專業．效率．主動．創新

經濟部

綠色技術與工程實務研討會

110年 論文集

綠色技術與工程實務研討會

110年 論文集

經濟部工業局 編印

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 978-986-533-214-3
9 789865 332143
GPN：1011001991
定 價：500元

經濟部工業局 編印

序

二十一世紀以來，在全球經濟不斷的發展下，必須要面對資源逐漸耗竭、氣候異常及環境污染所帶來的危機，如何兼顧經濟發展及環境維護，是我們刻正必須要思考及執行的重點。國際間自 1987 年提出永續發展的倡議，持續提出不同階段之發展目標，近年來各國在資源使用上逐漸形成以循環經濟取代傳統線性經濟，用以維持經濟成長，並兼顧環境的永續。本局為工業發展之重要推手，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，亦與國際趨勢接軌，以循環經濟的思維，提升資源使用效率，以達到資源使用效率最大化，邁向循環經濟的時代、推動永續發展之未來。

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，彙整諸多寶貴經驗，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「110 年綠色技術與工程實務研討會」，以「空氣品質與減碳技術類」、「資源減耗與再利用技術類」、「產業節水與水資源再生處理類」、「循環經濟與環境規劃管理類」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 27 篇論文，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綠色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 110 年 11 月

目　錄

論文簡報發表議程1—空氣品質與減碳技術類

1-1 化學性回收-熱裂解細分類再利用終結廢塑膠系統

林伯勳----------1-1

1-2污水處理廠碳排放調查評估方法與案例分析

蘇怡瑄、吳鳴峯、黃欣栩 ---------- 1-11

1-3 旋轉窯燃燒空氣系統優化案例分析

古家宇、吳克敏、徐洪陞、陳育群、陳昱志 ---------- 1-23

1-4 泵浦系統節能診斷客製優化設計生產技術

吳漢明、陳建龍 ---------- 1-35

1-5 低溫高效能選擇性還原脫硝觸媒之合成改質與應用特性研究

林奇鋒、林怡珍、陳志成 ---------- 1-51

1-6 卑南溪揚塵好發區影響範圍與濃度模擬及揚塵抑制之研究

楊承翰、張嘉智、蔡忠憲、張章堂 ---------- 1-65

論文簡報發表議程2—資源減耗與再利用技術類

2-1 陰極射線管廢面板玻璃添加廢觸媒生產綠色材料用於室內空間濕度之性能優化
林雅雯、林凱隆、李韋皞、張文軒 ----------2-1

2-2 以田口法探討硫酸對鋰電池正極浸漬之研究
王健至、湯逸勤、申永輝 ---------- 2-15

2-3 廢泡棉醇解再生技術之應用評估
陳思潔、簡文鎮、陳松柏 ---------- 2-27

2-4 新型高發泡壽命造渣劑於電爐節能效益評估
林啟明、何長慶、于愷文、張育恩、趙俊揚、吳威德---------- 2-39

2-5 利用迴流污泥改善廢水硬度並達成污泥減量
陳啟華、林礽龍 ---------- 2-63

2-6 電弧爐煉鋼還原碴資源化再利用
蔡文博、謝紹恆 ---------- 2-73

2-7 以無機聚合材料固化放射性陽離子交換樹脂之研究
謝宇杰、李韋皞、鄭大偉、黃君平 ---------- 2-83

論文簡報發表議程3—產業節水與水資源再生技術類

3-1 紡織廢水回收再利用之技術及其應用
林明旺、劉柏緯 ----------3-1

3-2 利用紫色非硫菌來改善廢水氨氮處理之效能
葉又菁、林礽龍 ----------3-9

3-3 半導體廠回收節水再進化-改善實例
盧彭潭、黃冠哲、黃俊評、林志南、柯柏睿 ---------- 3-17

3-4 產業園區水資源整合案例及實務探討
陳建璋、魏名軍、徐秀鳳、蔡人傑、葉秀鈴、張嘉顯 ---------- 3-37

3-5 LCD 玻璃奈米孔洞材料於電鍍產業水資源循環之應用案例
劉倩、李志怡、魏文宜、顏旭明、杜子邦、呂健瑋、洪煥毅 ---------- 3-47

3-6 單頭封裝 MBR 有機廢水回收技術
蔡宛芯、彭柏頤、黃任榆、吳俊湧 ---------- 3-59

3-7 工業區污水處理廠藉由沉降試驗和微生物相觀察評估「廢水處理促進劑(生物助劑)」之系統功能提升功效
張泉源、莊如雅、廖學球、吳相進、張哲毓* ---------- 3-69

論文簡報發表議程4—循環經濟與環境規劃管理類

4-1 能源轉型政策下之電業擱淺資產初探
劉育真、李育明 ----------4-1

4-2 臺灣帷幕牆工程導入循環經濟策略之研究
錢秋萍、邵文政 ---------- 4-17

4-3 染整廠能源供應模式更替環境評估之個案研究
施孟芬、林俊德 ---------- 4-35

4-4 化工產業廢水以 SBR 和 BioNET 組合程序之實廠處理
陳致君、王鈞逸、連文萍、張子芸、梁德明 ---------- 4-49

4-5 電力業價值鏈循環創新之推動策略
陳詩易、郭泰均、王郁惠、吳政宏、溫桓正 ---------- 4-61

4-6 高科技產業用水計畫書管理與精進作為
黃育德、蔡欣庭、黃欣栩、沈怡彤 ---------- 4-77

4-7 廢鋁加工廢水再生循環利用
蔡振章---------- 4-89

化學性回收-熱裂解細分類再利用終結廢塑膠系統

林伯勳*

摘　要

現今世界因便利、快速、便宜大量使用石化塑膠製品，同時包含一次性使用塑膠包裝、容器、瓶罐等。人類在使用這些製品後，即把這些工具認定為垃圾丟棄。也因沒有妥善分類處理，讓這塑膠垃圾量每年達到三億噸之多。這些廢、微塑膠垃圾也相繼的污染土壤、河流、海洋，後續也產生溫室氣體影響氣候變遷(掩埋或焚化)。其實，在這商業社會中原本就有既定的“國際通用資源回收編碼”1。且在大多的商品或包裝上都有標示，台灣的公民也多有簡單分類的習慣。卻因為後續無法妥善處理，導致半間不界的現象。垃圾做好分類就不再是垃圾。廢塑膠可以依循著回收編碼從上游製造商和中下游零售商做好溯源管理(大數據系統)，依照不同材質、重量、複合比例，在消費者購買時收集使用消費數據，再透過教育如何妥善做好拆解式分類 2，提倡民眾做到自己消費自己處理的概念，提高回收率。妥善分類後的塑膠(編碼 1-7)、金屬(鋁、鐵、銅)、玻璃、木頭、紙、廚餘等即變成原料。針對廢塑膠，透過拆解式細分類，分類後的編碼 2、4、5、6、7、ABS、PA，接著以化學性回收-熱裂解來處理已經排除金屬、玻璃、紙、液體、木頭和其他有機物質(容許率為總量 3%以下)。現今化學性回收-熱裂解技術已相當成熟，且無空水污染。相較於其他傳統再利用方式，可快速直接處理含有“3%以下”的貼紙、油、水等無法完全去除雜質之廢塑膠垃圾。透過裂解轉換後的產品:混合油含石腦油(輕油),可透過石化產業又可再次裂解成塑膠再生料 3。這些碳中合之舉同時可以回饋至上游做了細分類的公民。塑膠再生料同時跳脫了機械性回收六次上限之限制。循環經濟模式不但沒有被打破，且更有效的終結廢塑膠分解週期，提升了回收再利用率同時減少新產石化塑膠量。另外其他的化學性回收方式也陸續成熟，能與時俱進的妥善處理廢棄物: 一個全人類文明所面臨的難題。

【關鍵詞】國際通用資源回收碼、細分類、全分類、拆解式分類、大數據系統、熱裂解、碳中合、再生塑膠料、循環經濟、終結廢塑膠

---

*海神全球股份有限公司　總經理

一、前 言

海神全球(股)公司專精於除氧熱處理方式催化裂解廢塑膠。以化學性回收-熱裂解為主軸立足台灣發展回收和油品事業體。子公司設備廠海神重工研究開發多種熱處理方式將廢塑膠逆向轉換成油品，同時申請設備相關專利。諸多熱處理模式可產出液態高熱質油品、固態高含碳量碳黑、固態高等級石臘、氣態混合天然氣體等不同具價值產品。同時委外應用材料、化工、學校顧問提供建議、改善、行銷等建議。

熱裂解處理將我們分類過之廢塑膠轉換成輕質混合油等級之超低硫燃料油及熱裂解油，此輕油品可透過石化廠再次裂解成石腦油(Naphtha)產出再生原生塑膠粒和其他石化原料。此舉即進入循環經濟模式，歐美國家已相當成熟並已有數件成功商業案例。由於此油品等級和純度高階，經分餾後之燃料油同時適合發電機組，船舶，重機具等使用。熱裂解油當成再生塑膠的原料之方式跟傳統焚化爐或物理性回收處理相較，已證實能大幅減碳。公司已開始著手相關認證，希望與世界接軌進入碳中合市場。

公司著重於未來發展，除了持續研發增添更高效能處理量之相關設備(分類、分選、破粉碎、熱裂解)，也投入進行其他熱處理-無氧高效能低溫氣化爐之開發研究與製造，來消化處理轉換率較低、不易裂解或物性不適合裂解之其他類別廢塑膠。透過多元化且較低處理費方式來減少日積月累的世紀之垃圾-塑膠。另外，熱裂解和氣化爐所產生之油品及溫度/蒸氣/熱質也相當適合產綠電。

公司希望透過目前大園廠為開端，後續開設分廠，處理與服務不同區域之廢塑膠和油品客戶。分廠也會因國家以及區域而異，著重於不同末端產品(油品、碳黑、石蠟、氣體、溫度、蒸氣、綠電等)。台灣本地發展以收廢塑膠處理費及銷售油品、碳黑、石蠟、氣化發電儲能為一條龍業務重點，多方面收入來源來奠定商業經濟規模運轉可能。

由於此事業同時跨足雙領域: 回收業及油品能源業，商業模式皆屬火車頭產業，公司也續申請取得相關合法合歸證執照。熱裂解方面積極與國立台灣科技大學-化工系合作，提升熱裂解油產量及品質，才得供給石化廠所需之量體並產出足夠的再生塑膠來滿足循環經濟之趨勢。公司團隊皆屬年輕新世代，對於環境保護，愛護地球和提升生活及靈性層面等議題相當熱衷。一致希望以永續事業發展為出發點持續創造價值，進步和升級。為地球和人類做些微不足道但有絕對意義的貢獻!

二、 熱裂解處理方式及現況

1.熱裂解化學性回收應用與問題

在廢塑膠透熱裂解回收前，廢塑膠需打破以往的認知，不應該把廢塑膠當成垃圾，而是要以多種原料來看待。必須將垃圾做妥善分類才能確實變成原料加以利用。並突破以往對於廢塑膠分類知識及認知觀念。須排除金屬、玻璃、紙、液體、木頭和其他有機物質(容許率為總量 3%以下)。此"3%以下"亦可包含貼紙、油、汙漬、水、灰塵等無法完全去除雜質之廢塑膠垃圾。圖 1 妥善分類後透過簡單前置作業即可進入我們的 450 度低溫熱裂解程序。低溫除氧熱傳導溶解塑膠催化裂解技術可產生三種主要產品表 1 可燃甲烷氣體、混合輕質油、高碳含量碳黑。相較於中溫 800-900 度氣化處理以及高溫 1200 度以上的焚化處理，圖 2 我司無法高效裂解需要較高溫度的 1 號 PET 寶特瓶含蠟塑膠材質、3 號 PVC 含氯塑膠、鋁箔包塑膠和其他含金屬及玻璃等有機物質。但此化學性回收足以含蓋眾多泛用型廢塑膠包含 2 號 HDPE、4 號 LDPE、5 號 PP、6 號 PS、ABS 和 PA，且可以混合處理。表 2 產出之上述產品質量即高出相同性質產品。

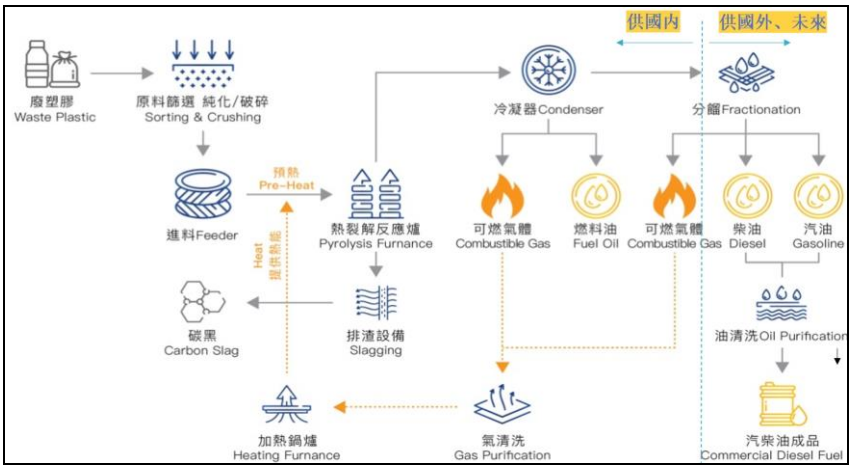


圖 1 海神全球化學性回收-熱裂解流程圖

表 1 廢塑膠熱裂解產物比較表

廢塑膠分類	油(wt%)	氣(wt%)	殘留固體物(wt%)	備註
PET	23.1~38.89	52.13~76.9	0~8.98	
HDPE	68.5~91.2	4.1~31.5	0~9.7	
PVC	12.3~12.79	0.34~87.7	0~12.3	鹽酸(HCl)=58.2wt%
LDPE	51.0~95.0	5.0~24.2	0~7.5	蠟(Wax)=24.8wt%
PP	48.8~92.3	4.1~49.6	0.12~13.3	
PS	89.5~97.0	2.50~9.9	0~4.0	
PE	88~96	7.0	0~10	
ABS	72~84	5~20	4~11	

圖 2 海神全球泛用型廢塑膠回收表

2.產品應用

低溫化學性熱裂解產出之圖 3 產品應用分為三類。第一類為甲烷可燃氣體，我司系統回收取得熱質再利用加熱介質。第二類輕質混合油個分為超低硫燃料油及熱裂解油: 燃料油供鍋爐及內外燃機使用;熱裂解油則販售提供給石化廠再次分餾成石腦油和聚乙烯及丙烯再生塑膠。第三類高碳含量碳黑則提供給煉鋼廠碳化鋼程序使用。

第二類產品-超低硫燃料油　第二類產品-熱裂解油　第三類產品-高碳含量碳黑

圖 3 海神全球產品

3.計畫目標

針對全球氣候變遷及海洋廢塑膠垃圾問題，公司相當注重熱裂解油的品質與產出量。圖 4 此產品相較於開採原油製成塑膠能減少 2.3 噸碳排。同時熱裂解相較於焚化爐處理，每處理 1 公噸廢塑膠可減少 0.5 噸碳排。此 0.5 噸碳權也能進入碳中合市場做交易。上述提到之再生塑膠可透過 Mass Balance 添加入新塑膠來降低新塑膠使用進入循環經濟體並無限循環。

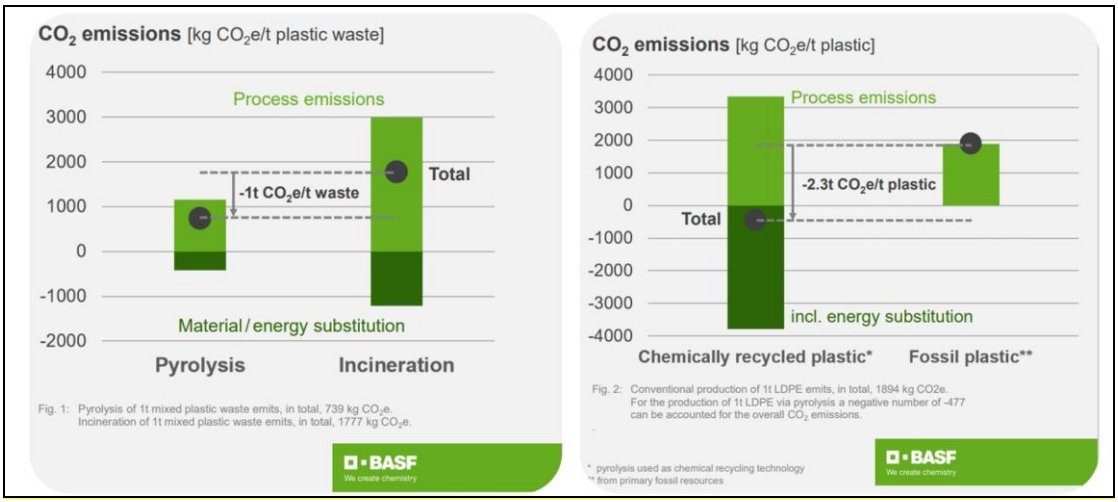


圖 4 巴斯夫 Life Cycle Assessment LCA 認證

圖 5 目前大園廠產能每月處理量約 80 公噸，平均轉換率為 60%，能產出 48,000 公升輕質混合油或熱裂解油。目標處理量及產量希望在透過計畫研究實行後將提升達 5 倍每月，相當於 400 噸廢塑膠處理量和 240,000 公升油品產量，相對的每個月也可減碳 200 噸。

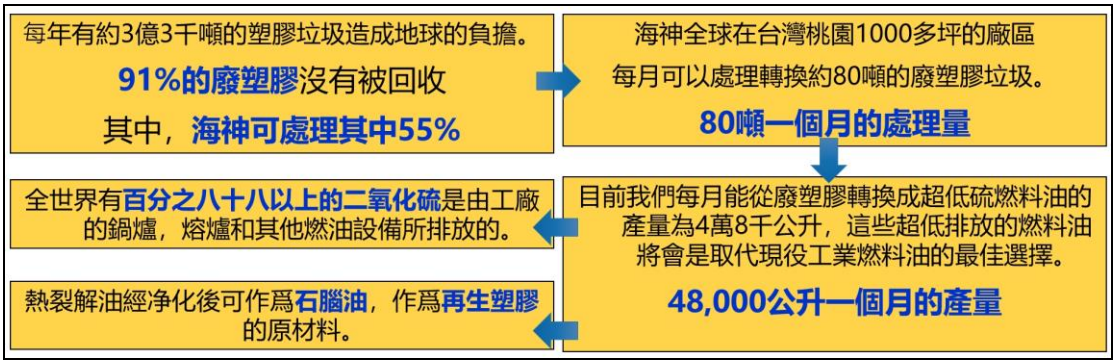


圖 5 目前海神全球處理量及產能

上述兩點達成即可大舉提升廢塑膠再利用率進入循環經濟體系。與現今 9%相比長遠目標希望再利用率能達 70% ;同時減少製造新塑膠與處理廢塑膠垃圾所產生之碳排放達 50%。此舉將有效助於減緩地球氣候變遷以及海洋廢塑膠和微塑膠之問題。

三、 數據化分類管理系統建置及執行現況

基於全球垃圾量持續攀升,針對廢塑膠垃圾回收處理再利用率僅占總量9%。我們公司具有化學性回收處理能力，立志要以海洋廢塑膠垃圾做為出發點，熱裂解回收廢塑膠垃圾。進而達成公司兩大訴求: 1. 提高廢塑膠再利用率 2.降低廢塑膠垃圾量。進而減少焚化爐處理量和相關空汙排放，以及垃圾掩埋甚至流入海洋的可能性。

進一步研究,我們發現垃圾回收再利用率無法提升是因為沒有正確分類及控管。意思是當塑膠製品銷售出去後立即變成垃圾身分並無法再度追蹤及控管。為達到確實追蹤我司提出一套創新作法以便追蹤溯源及為廢塑膠實名制。依照表 2 美國工業協會所製訂的七大類回收標誌進一步將產品的塑膠使用量做紀錄。以政府已推動多年的(表 8)資源回收制度 – 推動資源回收四合一計畫。並且透過教育來讓民眾更加認識塑膠種類，搭配正確快速分類法以及智慧資源回收點等措施來改變塑膠之宿(塑)命。提高再利用率也同時減少石油塑膠開採及製造，且能減碳進入循環經濟和碳中合市場。本公司自去年底開始積極推動“垃圾全分類數據化資源循環”計畫。

表 2 美國工業協會所製訂的七大類回收標誌

七大誌標	1 PET	2 HDPE	3 PVC	4 LDPE	5 PP	6 PS	7 OTHER
塑膠材質	聚乙烯對苯二甲酸酯	高密度聚乙烯	聚氯乙烯	低密度聚乙烯	聚丙烯	聚苯乙烯(若有發泡即保麗龍)	其他類
常見用品	保特瓶	清潔劑瓶 鮮奶瓶	沙拉油瓶 收縮膜 標籤	塑膠袋 夾鏈袋 塑膠杯	免洗餐具 飲料瓶 杯蓋	養樂多瓶 泡麵碗 豆漿杯 免洗湯匙	複合材質及其他塑膠類 如牙膏、壓克力、耐龍
回收再生用品	假髮 蛋盒 包裝盒 填充棉 不織布	工具箱 水管 垃圾袋	人造皮革 電線覆皮 水管	塑膠棧板 帽沿	花盆架 OA 傢俱 運動器材 腳踏墊 汽車保險桿	玩具 筆筒 相機及錄影帶外殼 建築合成材料	鋁箔 繩子 安全帽

圖 6 行政院環保署推動資源回收四合一計畫

此計劃包含製造、運輸、零售、使用者、消費者、清運業、回收業等。爲了更加有效的管理分類回收體系，必須每個角色都完善的管理與記錄使用的可回收物料。清楚透明化記錄可讓體系管理的有效的數據化，並建立回饋體系。消費者可依回收量取得點數回饋或金錢（與零售業合作或匯入悠游卡內）。透過每一個環節客制化的追蹤與報告，台灣可作爲第一個有完整系統管理實行回收大數據記錄的國家。

實際做法透過圖 7 商品或包裝上標示的 UPC 條碼，造冊植入數據及紀錄塑膠種類、淨重量、產地、出產商和是否有含金屬、玻璃、其他有機物等完整資訊。透過完整(表 10) POS 系統數據資訊以便追蹤溯源以及為廢塑膠實名制。 進而統計製造商以及消費者塑膠製造量與使用量。

圖 7 美國統一編碼協會-全球性 GS1 國際條碼

圖 8 POS 系統範例

範例:小花購買一罐沐浴乳，POS 掃條碼時除了顯示正常商品資訊外，資訊數據加入沐浴乳淨重、總重、使用塑膠總類、回收標號、是否含金屬/玻璃其他物質等資訊。此商品條碼資訊顯示: 塑膠容器 150 公克採用 100% HDPE 材質，壓頭瓶蓋 40 公克含 40% PP、40%HDPE 以及 20%金屬彈簧。再透過小花的會員號碼、悠遊卡或是載具等會員制系統記錄小花當期的塑膠(購買)使用量。當小花使用完商品後將其包裝/容器拆解(將彈簧分開)、清洗、分類、收集的廢塑膠送至回收地點時，系統以回收實際重量來從消費塑膠種量扣除，取得小花實際回收重量。再以此重量來計算實際回收或減碳回饋給小花。回收的廢棄物則由最終處理廠-海神全球-收取原本去焚化爐的處理費用來妥善處理再利用此廢棄物(或是適合其種類之最終處理廠)。

同時透過圖 9 教育民眾海神全球針對泛用型廢塑膠正確分類法(需清洗、拆解、剔除金屬玻璃等物質)，搭配政府資源回收機制以及圖 10 智慧資源回收站點，來提高廢塑膠再利用率及減低廢塑膠垃圾量。資源收集點採重量統計回收量，即能得到回收確實回收入據進而產生實質貢獻及回饋計算值。也讓人類每個人都有機會可以為地球環境盡上一份責任。透過大數據及系統化分析，除了從個人出發以外此計劃更可幫助各企業使用更能有效回收的塑膠製品同時達到淨零的目標，因爲不只是可回收原料，所有碳排放與減量額度都會融入其中，讓碳交易市場可有效成型。

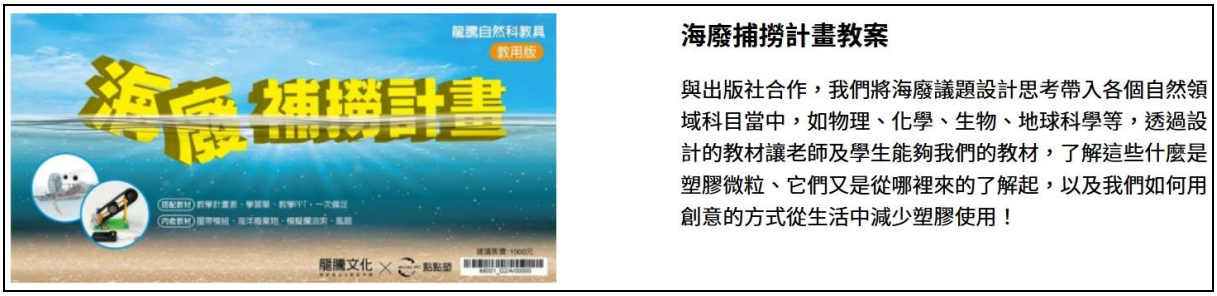


圖 9 透過教育來教導正確分類方式

圖 10　消費者適用智慧型回收站點

以塑膠類為此計劃的第一步，同時適合應用於 B2B 或是其他垃圾種類如廚餘、金屬、 玻璃、紙容器、紙、木材、鋁箔包裝等。有朝一日如能將所有垃圾都實名制並管理，肯定能大幅提升再利用率以及廢棄物垃圾量。

四、結　論

建立一套對於製造、分類、回收具有實務性之有效系統即能改善簡化複雜且模糊之現況回收程序。實用且有追蹤能力之系統，進而提升整個回收系統的透明度，由原本就統一收垃圾的台灣政府來將溯源做妥善管理。回收處理費(相同於焚化爐)及減碳權利相關費用由政府(人民)買單。基礎概念為使用者需付費，付出者得獎勵。類似的模式在台灣已相當成熟並在統一發票-兌獎或資源回收-價格等機制裏可參考。由於一條龍管理追蹤，最終各類資源可被分配至各大種類處理廠或是最終無法處理則走原本的焚化處理。此模式即可精準達成兩大訴求: 1.提高廢塑膠再利用率 2.降低廢塑膠垃圾量。

五、 參考文獻

1.楊仁泊、劉耀仁，「臺灣熱裂解處理廢塑膠再利用製油技術介紹」，工業污染防治 141 期，經濟部工業局，106 年 11 月。

2.https://www.basf.com/global/en/who-we-are/sustainability/we-drive-sustainable-solutions/circular-economy/mass-balance-approach/chemcycling/lca-for-chemcycling.html 巴斯夫官網。

3.行政院環保護署，生活廢棄物質管理資訊系統，垃圾分三類，110 年 1 月。

4.財團法人中華民國商品條碼策進會，載體擷取，EAN/UPC。

5.國立屏東大學會計學系，會計資訊系統課程講義，統一超商(7-11)的供應鏈系統，104 年 4 月。

6.龍騰文化事業股份有限公司，普高自然，海廢捕撈計畫。

7.皓揚環境科技有限公司，iTrash 智慧無人收集機。

污水處理廠碳排放調查評估方法與案例分析

蘇怡瑄*、吳鳴峯*、黃欣栩**

摘　要

溫室氣體所造成的全球氣候變遷之問題，已成為眾所關注之議題，聯合國政府間氣候變化專門委員會(Intergovernmental Panel on Climate Change, 簡稱 IPCC)建立之國家溫室氣體清冊指南，將國家溫室氣體排放源分為能源、工業過程與產品用途、農/林業及其他土地利用、廢棄物及其他等五項。我國行政院環保署 2020 年國家溫室氣體排放清冊報告資料指出，我國廢棄物部門 2018 年排放約 2,752 千公噸 CO_2e，其中廢(污)水處理約占部門排放 66%，為主要貢獻源。

為推動廢(污)水處理廠之節能減碳，有必要掌握廢(污)水處理廠之溫室氣體排放機制與排放量等基礎資料，本研究依循 ISO14064-1 要求，建立污水處理廠組織型碳盤查調查評估方法，包括盤查邊界設定、排放源鑑別、活動數據蒐集、排放係數選用、水體逸散係數建立與碳排放量計算，並以 6 座營運中污水處理廠為對象，分析溫室氣體排放概況，鑑定主要碳排放源及其機制，結果顯示污水處理廠溫室氣體排放以間接排放(外購電力)為主，約占總量 7~9 成，直接排放量約 9 成來自水體逸散。相關資訊可作為污水處理廠調整操作營運以及推動節能減碳之參考。

【關鍵詞】污水處理廠、組織型碳盤查、碳排放係數、水體逸散係數

*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、研究背景與目的

聯合國政府間氣候變遷專門委員會(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)應聯合國氣候變化綱要公約(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)之邀請，早於 2006 年建立國家溫室氣體清冊指南(以下簡稱 2006 IPCC 指南)，將國家溫室氣體源分為能源、工業過程與產品用途、農/林業與其他土地利用、廢棄物、其他等五項，其中廢棄物部門包含固體廢棄物掩埋處理、固體廢棄物生物處理、固體廢棄物焚化、廢(污)水處理及其他廢棄物管理活動所產生之排放。此後，隨著全球經濟發展，氣候變遷造成的影響愈發劇烈，面對全球氣候變遷危機，2016 年 4 月 22 日，上百個國家共同簽署「巴黎協定」，約定努力將地球氣溫升幅控制在不超過前工業時代(1750 年)的 2°C，並力求將升溫控制在 1.5°C 內。若欲達此目標，IPCC 建議 2030 年全球的溫室氣體排放量必須減半，且必須在 2050 年或更早實現淨零排放。

有關溫室氣體減量議題，總統蔡英文於 2021 年 4 月 22 日世界地球日表示，臺灣政府已開始評估及規劃臺灣在 2050 年達到淨零碳排目標的可能路徑。我國環保署參考 2006 IPCC 指南每年編制國家溫室氣體排放清冊，其中廢(污)水處理範疇定義以「水處理過程中，有機物及總氮等經細菌厭氧分解而產生之甲烷與氧化亞氮」及「由人類排泄物釋出之氧化亞氮」進行統計。我國環保署 2020 年國家溫室氣體排放清冊報告資料顯示，廢棄物部門 2018 年排放 2,752 千公噸二氧化碳當量，占全國溫室氣體排放量(不計土地利用變化及林業移除量)之 0.9%，其中又以廢(污)水處理及固體廢棄物掩埋處理為主(各占部門排放 66%、26%)，換算得我國廢污水處理溫室氣體排放量推算結果僅占全國溫室氣排放量(不計土地利用變化及林業移除量)之 0.6%，但仍屬廢棄物部門的主要貢獻源，故針對廢污水處理廠水體溫室氣體逸散係數及排放量進行調查。

本研究參考「ISO 14064-1 組織層級溫室氣體排放與移除之量化及報告附指引之規範」建立公共污水處理廠碳排放調查評估方法，其 2006 年版將溫室氣體排放主要來源分為 3 個範疇，2018 年版則細分為 6 個類別，詳細分類及新舊版本對照見表 1。其中，ISO 14064-1：2018 要求第 a 類直接溫室氣體排放與移除一定要量化，其他五類則必須界定哪些要納入報告邊界，依預期用途建立重大性間接溫室氣體排放與移除辨別準則；此外，各類別之人為生物二氧化碳排放量與移除量、非人為生物成因溫室氣體排放和二氧化

碳移除量應分開量化與報告，若另有對外輸出能源，則應另外揭露，不在組織溫室氣體排放總量中扣除。

表 1　ISO 14064-1 新舊版本之排放來源分類比對

排放類型	ISO 14064-1：2006	ISO 14064-1：2018
直接排放	範疇 1：直接排放	(a)直接溫室氣體排放量與移除量
間接排放	範疇 2：能源間接排放	(b)進口能源的間接溫室氣體排放
	範疇 3：其他間接排放	(c)運輸中的間接溫室氣體排放 (d)組織使用產品的間接溫室氣體排放 (e)與使用組織產品有關的間接溫室氣體排放 (f)其他來源的間接溫室氣體排放

二、研究方法

組織型溫室氣體盤查必須先界定盤查邊界，再鑑別溫室氣體排放源與擬定盤查基準年，然後針對溫室氣體排放源蒐集活動數據並選用適當的溫室氣體排放係數進行碳排放量計算，最後建立盤查清冊、評估不確定性、製作溫室氣體報告。

(一)界定盤查邊界與鑑別溫室氣體排放源

本研究針對營運中公共污水處理廠盤查邊界界定與溫室氣體排放源鑑別繪製示意圖(圖 1)，參考 ISO 14064-1 之定義，排放源分為：

1. 直接排放源：

(1)固定式或移動式設備排放源：發電機、公務車等燃料燃燒所貢獻的 CO_2、CH_4 及 N_2O 等排放。

(2)水體逸散排放源：污水處理程序及污泥處理程序產生的 CO_2、CH_4 及 N_2O 等排放，惟生物作用及生質燃料燃燒產生的 CO_2 屬於生物碳(biogenic carbon)，依 ISO14064-1 規定，應分開量化和報告，不納入碳排放的計算與平衡。然而，本研究為探討污水及污泥處理流程的 CO_2 產生量及占比，仍同步列入調查。

(3)其他逸散排放源：冷氣機、飲水機、CO_2 滅火器等冷媒或 CO_2 逸散所貢獻的 CO_2、HFCs、SF_6 等排放。

2. 間接排放源：

(1)進口能源的間接溫室氣體排放：主要為各項設備使用外購能源所產生的排放，如：曝氣鼓風機馬達、迴流馬達、排泥馬達及污泥脫水機動力等機械設備的電能消耗。

(2)其他間接溫室氣體排放(未繪於圖 1 中):運輸中的間接溫室氣體排放、組織使用產品的間接溫室氣體排放、與使用組織產品有關的間接溫室氣體排放、其他來源的間接溫室氣體排放。

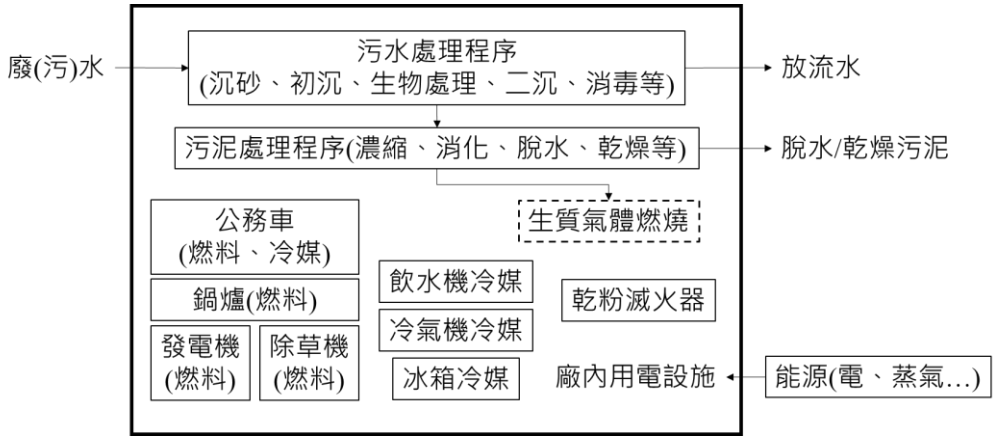


圖 1 營運中公共污水處理廠溫室氣體排放源與盤查邊界

(二)蒐集活動數據與選用排放係數

本研究依排放源鑑別結果,蒐集公共污水處理廠盤查邊界內的碳排放活動數據,而碳排放量即為各排放源活動數據乘以相應之排放係數後之總和。排放係數的部分,設備直接排放源、間接排放源多屬燃料及能源使用所產生,排放係數較不受環境影響,可參考 IPCC 提供之參考值或各國相關部門公告之數值,故本研究排放係數依照環保署「溫室氣體排放量盤查登錄審查作業指引」內容,選用環保署公告之「溫室氣體排放係數管理表」國家排放係數值,若國家排放係數中無相關係數者,則使用國際排放係數;惟水體逸散直接排放源之排放係數可能受不同污水處理程序或效能而有所差異,故本研究依環保署「溫室氣體排放量盤查登錄審查作業指引」內容,優先選用自廠發展係數。公共污水處理廠常見之碳排放源及相應排放係數彙整如表 2。

表 2 公共污水處理廠常見碳排放源及相應排放係數

活動設施	排放源	類別	活動數據單位	數據來源	溫室氣體排放係數	係數單位
污水及污泥處理單元	水體逸散	a	kg COD 移除量	污水廠水質資料	無,待量測	kg CO_2/kg COD 移除[註1]
	水體逸散	a	kg COD 移除量	污水廠水質資料		kg CH_4/kg COD 移除
	水體逸散	a	kg TN 移除量	污水廠水質資料		kg N_2O/kg TN 移除
	水體逸散	a	kg VSS 移除	污水廠水質資料		kg CH_4/kg VSS 移除
冷氣	冷媒 (R-410a)	a	公斤	財產清單或填充數量表	62.640*	kg CO_2e/kg
	冷媒 (R-407a)	a	公斤	財產清單或填充數量表	63.210*	kg CO_2e/kg

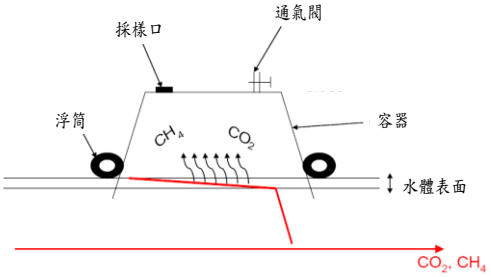
活動設施	排放源	類別	活動數據單位	數據來源	溫室氣體排放係數	係數單位
	冷媒 (R22)	a	公斤	財產清單或填充數量表	-[&]	-
飲水機	冷媒 (R-134a)	a	公斤	財產清單或填充數量表	4.290*	kg CO_2e/kg
冰箱	冷媒 (R-134a)	a	公斤	財產清單或填充數量表	4.290*	kg CO_2e/kg
	冷媒 (R-600a)	a	公斤	財產清單或填充數量表	-[%]	-
公務車	冷媒 (R-134a)	a	公斤	財產清單或填充數量表	4.290*	kg CO_2e/kg
	汽油 (移動源)	a	公升	加油卡資料或發票	2.361	kg CO_2e/L
	柴油 (移動源)	a	公升	加油卡資料或發票	2.650	kg CO_2e/L
緊急發電機	柴油 (固定源)	a	公升	加油卡資料或發票	2.615	kg CO_2e/L
除草機	柴油 (固定源)	a	公升	加油卡資料或發票	2.615	kg CO_2e/L
	柴油 (移動源)	a	公升	加油卡資料或發票	2.650	kg CO_2e/L
滅火器	已使用之乾粉滅火器	a	kg $NaHCO_3$	使用量統計表	0.262	kg CO_2/kg $NaHCO_3$
用電設施	外購電力	b	度	電費單	0.509[#]	kg CO_2e/度

註 1：屬於生物碳，不納入總排碳量計算；惟為研究二氧化碳的氣體占比，仍同部列入調查
「*」: 已使用環保署溫室氣體排放係數管理表 6.0.4 版的冷凍/冷藏及冷氣機之冷媒逸散排放因子及防治設備回收率進行換算
「&」: 組織型碳盤查中，R22、R12 不需量化
「%」: IPCC 及環保署尚未公告 R600 之 GWP 值，無法計算其溫室氣體排放係數
「#」: 參考經濟部能源局每年公告更新之年度電力排碳係數，此為 108 年度電力排放係數

資料來源：環保署溫室氣體排放係數管理表 6.0.4 版

(三)水體溫室氣體逸散(排放)係數量測

有關水體溫室氣體逸散係數，本研究採用聯合國教科文組織(UNESCO)及國際水力發電協會(IHA)「水庫溫室氣體量測指引」內建議之密閉式浮箱法(如圖 2(a))採樣，搭配離線實驗室分析，量測一定時間穿過水與氣界面的溫室氣體濃度差異，據以計算氣液介面溫室氣體通量，此方法又稱為非穩定、非流通式浮箱法(non-steady state, no-through flow chamber)，量測污水處理廠處理單元之溫室氣體類型包括二氧化碳(CO_2)、甲烷(CH_4)及氧化亞氮(N_2O)。



(a) 示意圖

(b) 實體照片

圖 2 密閉式浮箱採樣器

本研究使用之浮箱採樣設備實體以聚丙烯材質製成(如圖 2(b))，底部開口，上方為密閉狀態留有開關閥門，採樣口與聚乙烯管相連接。量測時，以浮箱罩住待測場址之水體水面，部分浮箱外殼需浸入水面，保持箱內空氣與外界沒有任何交換的情況，水面上方空氣的氣體會隨著時間而明顯變化，並於設定時間間隔採集氣體樣品，時間間隔原則為 30 分鐘(可能依實際量測點位狀況調整)，第 0 分鐘量測濃度代表背景濃度，第 30 分鐘量測濃度代表空間浮箱內增加後的濃度，兩者相減即為累積濃度，進而換算氣體排放通量；氣體採集後，樣品送入離地之實驗室，並以氣相層析儀(Gas Chromatography, GC)進行分析，量測氣體項目包含 CO_2、CH_4 及 N_2O 等溫室氣體，取得樣品濃度後進行污水處理單元及污泥處理單元的排放係數計算。

(四)污水處理廠碳排放量計算

本研究之碳排放量計算以排放係數法進行，計算公式為：碳排放量=活動數據×排放係數，即以蒐集之各種碳排放活動數據乘上對應的排放係數，得到碳排放量。因溫室氣體對氣候衝擊程度的不同，因此需要利用以 CO_2 為基準的全球暖化潛勢(Global warming potential, GWP)，將不同溫室氣體排放量轉換成公噸二氧化碳當量(公噸 CO_2e)，例如根據 2006 IPCC 指南，CH_4 的 GWP 值為 25，N_2O 的 GWP 值為 298，其他含氟化合物的 GWP 值則多半更高。

另外，依環保署溫室氣體排放量盤查登錄作業指引內容，若直接或間接溫室氣體排放量或移除量之貢獻低於 0.5%，可採用簡易量化方式，使用者得以直接引用該排放源首年或最近一年的排放量，但不應自排放量清冊中刪除，且須注意其簡易量化之排放量加總不得高於實質性門檻總排放量之 5%。

三、案例分析

本研究調查國內 6 座公共污水處理廠碳排放量，以下分別針對直接溫室氣體排放與間接溫室氣體排放進行彙整比對與討論。

(一)溫室氣體直接排放

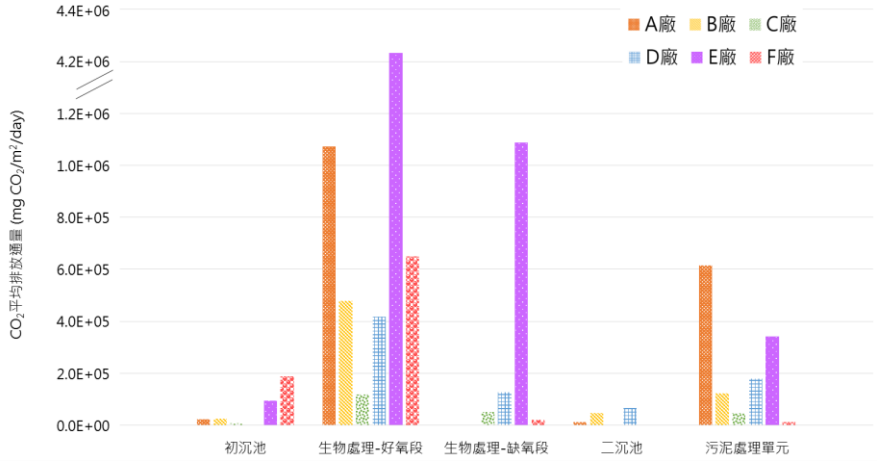
公共污水處理廠溫室氣體直接排放源包含處理單元直接逸散、冷媒使用直接逸散、汽柴油等燃料使用直接排放等三大部分，其中因處理單元水體溫室氣體逸散係數尚未建立，本研究針對國內 6 座不同規模及處理方式之公共污水處理廠進行調查，各廠水體溫室氣體逸散係數及各廠基本資料彙整如表 3。水體溫室氣體逸散係數部分，二氧化碳逸散係數介於 2.086~0.049 kg CO_2/kg COD_{rev}，與處理程序、規模及 COD 移除率等無明顯關聯；甲烷逸散係數介於 6.27×10^{-4}~1.28×10^{-2} kg CH_4/kg COD_{rev}，中小型廠的甲烷逸散係數變動較大，大型廠大約落於 10 的 $^{-2}$~$^{-3}$ 次方；氧化亞氮逸散係數，除 A 廠為 3.75×10^{-3} kg N_2O/kg TN_{rev}，其他廠則為 1.01×10^{-4}~4.04×10^{-4} kg N_2O/kg TN_{rev}。

表 3 執行碳排放調查之 6 座公共污水處理廠基本資料及水體溫室氣體逸散係數

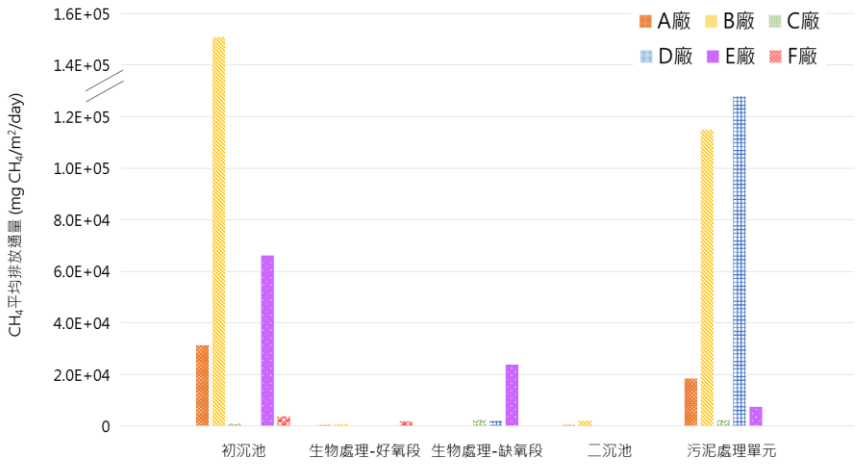
廠名 / 項目	A 廠	B 廠	C 廠	D 廠	E 廠	F 廠
採樣日期	106.09.07	107.02.07	107.08.02	108.11.20	109.06.16	110.01.26
處理規模	大型	大型	小型	小型	中型	大型
設計處理水量 (CMD)	42,000	30,000	3,750	4,600	10,500	109,600
採樣當日處理水量 (CMD)	28,200	46,027	2,481	2,091	7,772	86,027
生物處理程序	標準活性污泥	標準活性污泥	TNCU	氧化渠	A2O	AO
COD 移除率(%)	93.4	90.3	97.2	94.7	85.4	87.0
水體 CO_2 排放係數 (kg CO_2/kg COD_{rev})	0.239	0.049	0.068	1.148	2.086	0.227
水體 CH_4 排放係數 (kg CH_4/kg COD_{rev})	3.84×10^{-3}	1.28×10^{-2}	6.27×10^{-4}	1.02×10^{-2}	2.17×10^{-2}	1.30×10^{-3}
TN 移除率(%)	71.5	50.6	86.5	76.8	83.3	65.2

廠名 / 項目	A 廠	B 廠	C 廠	D 廠	E 廠	F 廠
水體 N_2O 排放係數 ($kg\ N_2O/kg\ TN_{rev}$)	3.75×10^{-3}	1.76×10^{-4}	4.04×10^{-4}	-	2.98×10^{-4}	1.01×10^{-4}

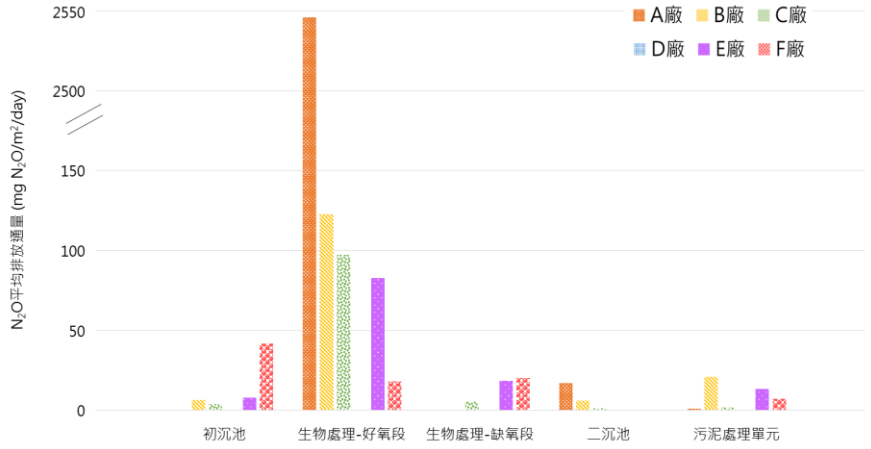
分析污水處理廠採樣當日各單元水體溫室氣體逸散通量調查結果(圖3)，污水及污泥處理單源二氧化碳逸散屬生物成因，不納入總碳排放量計算，但本研究仍進行比對分析。二氧化碳主要排放單元為生物處理的好氧階段，此階段為污水處理廠降解污染物之主要程序，微生物在有氧環境下大量分解有機物而產生二氧化碳，屬於生物碳，不納入排碳量計算，而在已調查之 6 座污水處理廠中，E 廠各單元的二氧化碳逸散通量皆偏高，但 COD 移除率卻是各廠最低，且生物處理缺氧段主要係降解水中含氮物質，二氧化碳逸散量應較少，顯示 E 廠操作係數應進行調整；甲烷主要排放單元為初沉池與污泥處理單元，污泥處理單元甲烷主要來自厭氧環境下有機物的去除，而初沉池之甲烷排放，則推測可能產生原因為底部有污泥沉積形成部分厭氧區所導致，而 B 廠初沉池甲烷產生量在已調查之 5 座污水處理廠中最高（D 廠無初沉池），係因 B 廠廢棄污泥量較少，且收受水肥導致進流 SS 及有機碳源濃度較高，應增加每日排泥量以減少初沉池甲烷直接逸散量；氧化亞氮主要產生自污水處理廠生物脫氮過程反應不完全，調查結果顯示各廠氧化亞氮排放主要單元為生物處理單元好氧段，其中又以 A 廠的排放通量最高，推測與 A 廠採間歇性曝氣有關，活性污泥池 DO 濃度平均控制於 1~1.5 mg/L，池體中可能存在兼氧細菌，導致硝化或脫硝過程之氧化亞氮中間產物生成，而氧化亞氮整體通量遠低於甲烷及二氧化碳，推測係因各廠進流總氮皆約為 COD 的 1/5 倍，且總氮移除率約落在 50~80%。



(a) 二氧化碳排放通量



(b) 甲烷排放通量



(c) 氧化亞氮排放通量

圖 3 執行碳排放調查之 6 座公共污水處理廠水體溫室氣體逸散通量

註：A 廠及 B 廠無生物處理缺氧段；D 廠無初沉池，生物處理程序為氧化渠，好氧段為輪曝機後，缺氧段為氧化渠進流端；E 廠及 F 廠無檢測二沉池溫室氣體排放量

本研究以調查當日各廠溫室氣體排放通量及污染物去除量換算水體溫室氣體逸散係數後，再以盤查基準年的污染物總移除量乘以水體溫室氣體逸散係數得到各廠在盤查基準年的水體溫室氣體逸散量，並將各廠其他直接排放納入統計，彙整如表 4。結果顯示，除採 TNCU 操作之 C 廠以外，各廠直接溫室氣體排放主要來自於水體逸散，約占總排放量 90%以上，其次為燃料使用之排放。

表 4 執行碳排放調查之 6 座公共污水處理廠盤查基準年溫室氣體直接排放量

廠名 / 項目	A 廠	B 廠	C 廠	D 廠	E 廠	F 廠
處理規模	大型	大型	小型	小型	中型	大型
水體逸散	680.477	656.907	0.129	31.493	315.097	154.843
其他逸散	3.057	0.457	0.730	0.717	0.308	3.759
燃料使用-固定源	3.041	5.246	1.242	0.618	0.077	17.969
燃料使用-移動源	13.724	5.576	6.018	2.457	3.010	7.700
類別(a)合計	700.299	668.186	8.119	35.285	318.492	184.271

單位：ton CO_2e/year

(二)溫室氣體間接排放

本計畫彙整各廠盤查基準年用電量及處理水量進行比對(表 5)，結果顯示大型廠處理每噸水平均用電量最低，約 0.32~0.34 度/噸，中小型廠處理每噸水用電量較高，但 C 廠採 TNCU 處理程序，每噸水用量高達 0.87 度/噸，遠高於 D 廠及 E 廠的 0.46~0.49 度/噸。

表 5 執行碳排放調查之 6 座公共污水處理廠盤查基準年溫室氣體間接排放量

廠名 / 項目	A 廠	B 廠	C 廠	D 廠	E 廠	F 廠
處理規模	大型	大型	小型	小型	中型	大型
盤查基準年	105	106	106	107	108	109
盤查基準年處理水量(噸/年)	9,938,514	10,494,340	1,001,878	897,337	2,483,109	27,776,218
盤查基準年用電量(度/年)	3,174,500	3,555,780	869,400	435,920	1,139,520	9,320,072
處理每噸水用電量(度/噸)	0.32	0.34	0.87	0.49	0.46	0.34
基準年間接溫室氣體排放量(ton CO_2e/year)	1,682.49	1,877.45	460.78	232.35	580.02	4,743.92

(三)溫室氣體排放總量

將污水處理廠溫室氣體間接排放量與直接逸散量整合分析(表 6)，各廠溫室氣體排放主要皆來自組織型碳盤查類別 b 之能源間接排放，占排放總量約 65~95%，平均約 80%；而類別 a 排放量主要來自包含水體逸散及冷媒逸散的逸散排放，其中又以水體逸散為主，多來自於含碳污染物去除所產生之溫室氣體(甲烷)二氧化碳當量。

表 6 執行碳排放調查之 6 座公共污水處理廠盤查基準年溫室氣體排放量

廠名 / 項目	A 廠	B 廠	C 廠	D 廠	E 廠	F 廠
類別 a	700.299	668.186	8.119	35.284	318.492	184.272
類別 b	1,682.485	1,877.452	460.782	232.345	580.016	4,743.917
排放總量	2,382.784	2,545.638	468.901	267.629	898.508	4,928.189

四、結論

未來污水處理廠進行組織型碳盤查時，碳排放量主要還是來自類別 b-能源間接排放，污水處理廠統計盤查年度總用電量後，乘以經濟部能源局每年公布之電力排碳係數，即可求得溫室氣體間接排放量；類別 a-直接排放占比較小，其中又以水體逸散排放為主，廠站統計盤查年度之 COD 及 TN 移除量，乘以相應之甲烷排放係數及氧化亞氮排放係數，即可估算溫室氣體直接排放量。目前污水處理廠水體甲烷逸散係數介於 6.27×10^{-4}~1.28×10^{-2} kg CH_4/kg COD_{rev}，氧化亞氮逸散係數，除 A 廠為 3.75×10^{-3} kg N_2O/kg TN_{rev}，其他廠為 1.01×10^{-4}~4.04×10^{-4} kg N_2O/kg TN_{rev}。

五、參考文獻

1.IPCC 2006, 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan.

2.行政院環保署，國家溫室氣體登錄平台，環保署溫室氣體排放係數管理表 6.0.4 版，https://ghgregistry.epa.gov.tw/Examine/Examine_First1.aspx

3.經濟部能源局，108 年度電力排碳 https://www.moeaboe.gov.tw/ECW/populace/news/Board.aspx?kind=3&menu_id=57&news_id=17638

旋轉窯燃燒空氣系統優化案例分析

古家宇**、吳克敏***、徐洪陞**、陳育群*、陳昱志****

摘　要

一般垃圾要達完全燃燒需考慮三個要素-溫度(Temperature)、時間(Time)及擾流(Turbulent)，而在旋轉窯型式的焚化爐中，所謂擾流就是向旋轉窯內送入燃燒空氣，使空氣與廢棄物充分的混合，一般擾流強度越大，空氣與垃圾的混合程度越好，可提升燃燒反應與效率。

國內某旋轉窯焚化爐(以下簡稱本廠)原燃燒空氣是透過風機抽取垃圾貯坑的空氣，再從前牆上的風口與環狀四周進入旋窯，風量平均分散在爐體四週，且大部分風經由環狀四周進入，其平均風速僅有 5.6 m/s，其所能造成之風壓很低，使得燃燒空氣和垃圾無法充分混合，所以在旋窯中形成的擾流度低，必須持續仰賴燃燒機持續提供熱源，才能符合設計的燃燒品質。

為有效提升燃燒空氣之風壓，增加空氣擾流度，本改善案將燃燒空氣從原先一股風供應改變為三股風供應，第一股風為前牆環狀四周空氣，第二股風為前牆上 10 個小風口，空氣則改為經熱交換器熱能回收後之熱風提供；第三股風為在燃燒機下方處增設一股強力的助燃空氣(簡稱噴射風)，風壓約 500~600 mmH_2O，此改善主要是提高空氣溫度，以加速乾燥，並改善風壓不足的問題及增加空氣擾流度。

改善後之旋轉窯燃燒空氣系統，因燃燒空氣溫度提高，可加速垃圾乾燥，外加風量不對稱分配，形成前牆左側風量大於右側，使得爐內風沿爐壁呈順時針螺旋狀運動，並與旋轉窯轉向相同，可充分將垃圾燃燒釋放出的熱能和未燃垃圾混合、攪拌，增加廢氣擾流度與停留時間，同時在垃圾主燃燒區，新增一股噴射風，增加燃燒空氣的貫穿力，進而改善空氣與垃圾的混合程度，加速垃圾的燃燒反應，使垃圾燃燒更完全，可改善底渣灼燒減量，並穩定廢氣排放品質，同時亦可減少燃燒機使用的頻率與輔助燃料使用量，達到節能減碳的效益。

【關鍵詞】旋轉窯焚化爐、燃燒品質、燃燒控制、燃燒條件、燃燒空氣系統優化

---

*信鼎技術服務股份有限公司　總經理特助
**信鼎技術服務股份有限公司　工程師
***信鼎技術服務股份有限公司　廠長
****信鼎技術服務股份有限公司　操作組長

一、 緣由與目的

本廠採用旋轉窯類型，設計處理量 60 公噸，本廠基本資料摘要如表 1 所示。

表 1 本廠基本資料

項次	項目		相關資訊
1	焚化爐類型		旋轉窯焚化爐+二次燃燒室
2	焚化爐容量		60 公噸/天
3	旋轉窯尺寸規格		長度：9 m；內徑：2.2 m
4	煙道廢氣處理設施	氮氧化物	噴入尿素(40%)
		酸性氣體及重金屬	消石灰+活性碳+袋濾器

改善前，本廠處理每噸垃圾用油量相較於一般機械爐床而言比例高出許多，主因為燃燒空氣配置與燃燒空氣溫度的差異，使得垃圾無法維持良好自燃的狀態，在這樣的疑問驅使下，本公司透過根因分析(Root Cause)的方法學，試圖找出問題的所在，同時提出改善的措施，期望能夠維持在一定水準燃燒品質的情況下，進一步減少用油比例，達成節能減碳的目標。

二、 文獻回顧

焚化廢棄物可達成垃圾減量化、無害化及穩定化的目標，而燃燒品質及效率可藉由 3T 控制來確保，所謂 3T 即溫度(Temperature)、時間(Time)及擾流(Turbulent)，一般而言焚化爐操作爐溫越高，且廢棄物及廢氣於爐內停留時間長與擾流度大時，燃燒效率較佳。以下將就 3T 進一步說明：

2.1 溫度(Temperature)

為將廢棄物及廢氣燃燒完全，法規規定焚化爐操作溫度不得低於 850℃，爐溫亦不能過高，否則產生溫度過高的廢氣，將導致後端廢氣處理單元負荷上升及處理成本增加，並可能使焚化爐爐體及鍋爐受損，然而焚化爐爐溫穩定可提升焚化品質及燃燒效率，燃燒效率可以式 2-1 表示。

$$\text{Combustion Efficiency}(\%) = \frac{[CO_2]}{[CO]+[CO_2]} \times 100\% \qquad \text{(式 2-1)}$$

Girovich 將旋轉窯操作溫度控制於 870 至 1200℃之間，廢氣停留約 2.5 秒，分析其廢氣組成，發現其揮發性有機性氣體去除效率皆達 99%，重金屬及氮氧化物皆有良好去除效果，且廢氣組成結果顯示一氧化碳濃度僅 68 ppm，其燃燒效率亦達 99.88%。

依據上述燃燒效率公式，採用本廠既往的煙道採樣報告數值計算，其燃燒效率約為 99.96%。

2.2 時間(Time)

廢棄物於爐內停留時間過短時，可能使廢棄物燃燒不完全，增加後續處理費用。廢棄物停留時間受許多因素影響，如廢棄物種類(固體、液體)、顆粒大小，及爐內徑、爐長、傾斜度及爐體轉速，通常爐長愈長，且爐內徑、傾斜度及爐體轉速愈小，則廢棄物停留時間長，反之停留時間短。

廢棄物於旋轉窯中停留時間，如式 2-2 所示，其中 C 為常數，其與廢棄物與爐壁摩擦力有關，亦即隨廢棄物幾何形狀及大小，和耐火磚性質而變異。

$$R_s = \frac{\beta}{2\pi}\frac{L}{NDS} = C\frac{L}{NDS} \qquad \text{(式 2-2)}$$

其中 Rs：固體停留時間(sec)

N：旋轉窯轉速(rpm)

D：旋轉窯爐徑(m)

S：爐體斜率(斜高/爐長)

ß：廢棄物於旋轉窯內最高時之弧度

一般而言，廢棄物於旋轉窯內滯留時間設計約為 0.5 至 2 小時。若以本廠實際運轉參數代入(式 2-2)，可得到理論固體停留時間約為 3.6 小時，但我們實際將一塊耐火磚投入旋轉窯內測試本廠廢棄物的滯留時間，觀察發現其滯留時間約為 3.3 小時左右，與理論公式差異不大。

2.3 擾流(Turbulent)

爐內擾流度越大可促使氧氣與廢棄物及廢氣充分接觸燃燒，如有足夠擾流度及迴流區，可使廢氣停留時間增加，故可提升廢氣燃燒效率與穩定廢氣品質，擾流可因許多因素而變，如過剩空氣量、一次及二次風比例...等。

吳氏模擬焚化爐內流場及擾流分析，結果發現增加二次風風量可形成較好的擾流度，於燃燒室內可形成回流區，增加廢氣停留時間，且增加過剩空氣量可提高燃燒效率。

葉氏模擬旋轉窯燃燒木材時之流場，使用不同過量空氣比進行試驗，發現當增加過剩空氣時，其爐內溫度顯著下降，且因二次燃燒室體積固定，輸入空氣量增加時，會使氣體停留時間縮短，但卻可增加爐體內擾流程度。

林氏研究不同過量空氣及預熱一次風對旋轉窯操作之影響，發現過量空氣增加，可以提升旋轉窯內擾流度，且不影響燃燒效率，但燃燒室出口溫度會下降。而將一次風溫度提升後，其對流場擾流度及燃燒室出口溫度無顯著

影響，但可增加旋轉窯爐內溫度。提高預熱溫度發現燃燒效率有提升之情形，並提升出口廢氣品質。

Salvador 等人嘗試增加燃燒室裡之擾流程度，燃燒室中置入 12 或 24 隻擾流管，並研究擾流管設置處與燃燒機之距離，對於 VOC、CO 及 NOx 之影響。由結果發現設置 12 支擾流管實驗組別，其 CO 濃度由 1,990 ppm 到 780 ppm，將擾流改為 24 支，增加其燃燒室裡之擾流度，結果可使 CO 濃度下降至 600 ppm，但對於 NOx 排放濃度則無明顯變化。

Sharifah 等人使用 XCN 公司發展之空氣注入旋轉窯系統制技術，此技術可使含水率高之垃圾於低過量空氣下燃燒，且二次燃燒室溫度達 800℃時，垃圾可自燃且無需使用燃燒機。根據其結果，垃圾燃燒釋放熱能，但熱能自然輻射散失且下次進料垃圾乾燥吸收，故爐溫會有燃燒上升後下降之重複性結果。垃圾成分變化大，故其廢氣分析結果中並無明顯趨勢變化，但程式模擬旋轉窯內流況結果，可發現任一時刻其擾流度很高，燃燒空氣與都市廢棄物有好的接觸，故有好的燃燒效率。

AVR 公司操作之旋轉窯，前牆進料口左右分別是污泥燃燒機及主燃燒機，而 Yang 等人以三種不同模式模擬其操作下，爐內流況與溫度分布。發現無論是何種模式下，其爐內流況都呈現高度不對襯，並以逆時鐘方向於旋窯內旋轉，而溫度則有分層現象，推論是因前牆燃燒機注射燃燒空氣量不同及其他因素所導致，故有好的擾流效果，但研究報告並未分析其燃燒效率及廢氣組成。

三、 旋轉窯燃燒空氣系統優化案例說明

探討本廠熱能利用狀況，發現本廠燃燒空氣並未利用廠內既有熱能來提高溫度，以加速垃圾乾燥，因此必須持續使用燃燒機來提供垃圾乾燥所需熱源。為妥善利用廠內既有的熱能，且在不影響原規劃設計的前提下，本改善將引用部分熱源作為燃燒空氣預熱的構想。

為提升燃燒空氣的溫度，本廠直接從熱交換器熱風出口管線，將熱風導引至前牆的小風口，因此本工程須增加一台熱風的送風機，以便將熱風抽引到旋轉窯內，本股熱風溫度約 250℃左右。

為提高擾流度，將燃燒空氣重新配置，並分成三部分(圖 1)，說明如下：

原燃燒空氣鼓風機所供應的風則是從前牆環狀四周進入旋窯爐內，其空氣通道面積約 0.216 m^2，平均風速為 1.93~3.22 m/sec。

將圖 1 右上方四個小風口盲封，其空氣通道面積將從原先 14 個風口約 0.087 m^2，減少到僅有 0.062 m^2，平均風速為 13.44~17.92 m/sec。

利用廠內閒置的燃燒機鼓風機，將其出口管線連接原污泥進料管進入旋窯爐內，此股風為具有噴射功能的燃燒空氣。其空氣通道全開面積約 0.017 m^2，但平常操作僅約開啟 1/5~1/4，因此實際面積僅有 0.0029 m^2，平均風速為 76.62~95.78 m/sec。

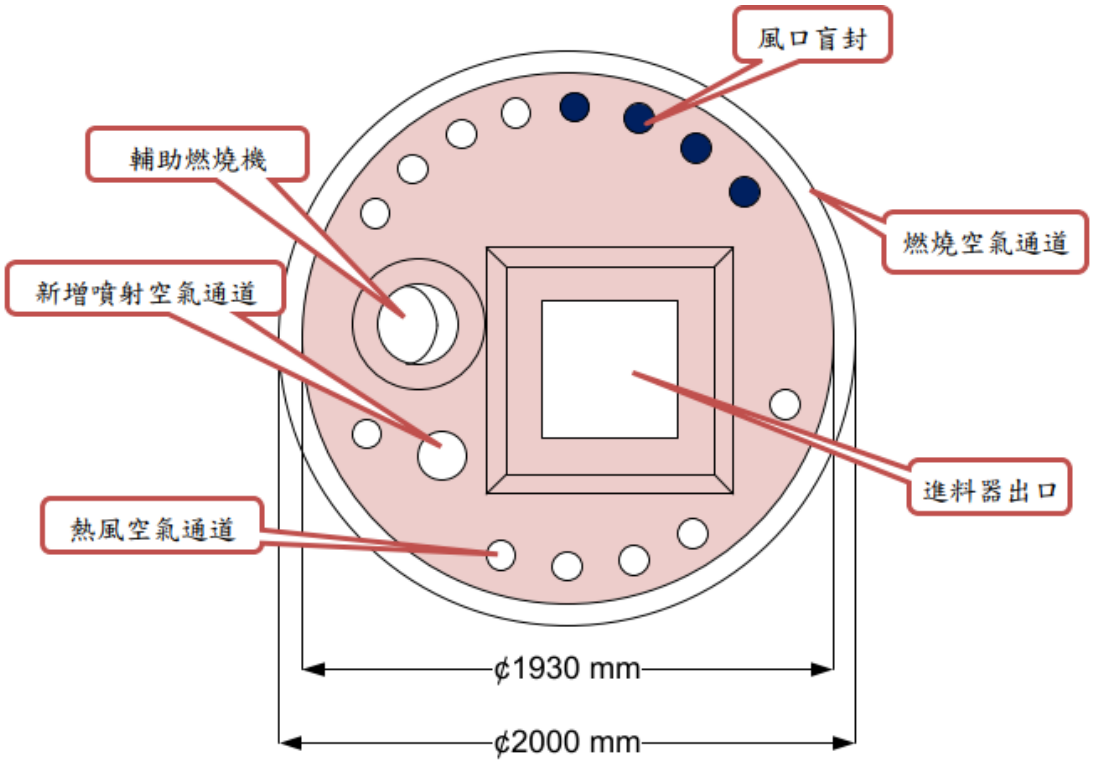


圖 1　前牆燃燒空氣配置示意圖

四、　案例效益分析

透過燃燒空氣的預熱與配置改變，比較改善前後差異，其中有關每日用油量部分彙整如圖 2，從趨勢圖可明顯發現，改善後的確對於用油量有很好的改善，符合預期的目標。在廢氣排放部分與底渣灼燒部分，則無明顯之差異性。

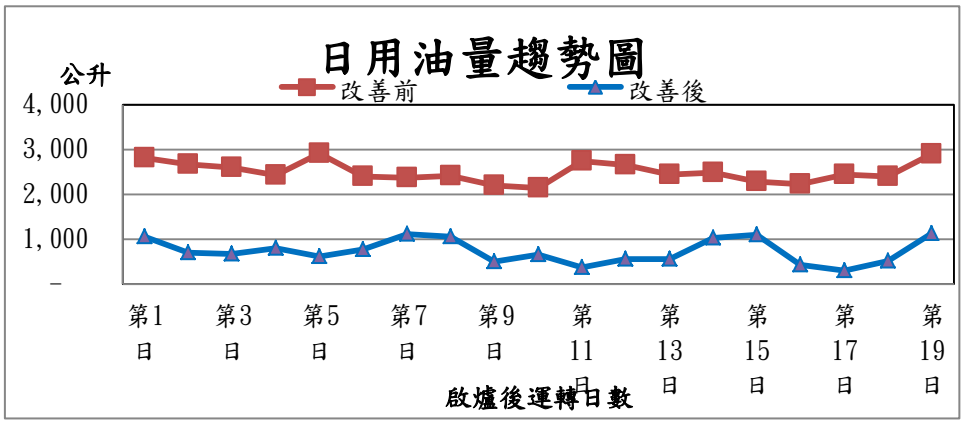


圖 2　改善前後連續運轉之日用油量趨勢圖

為進一步有系統分析本廠改善對於廢氣品質的影響，特地設計規劃三組實驗，以近似的操作條件，盡量排除外在干擾因素，重新建立各階段的燃燒環境，以利能更精準比較分析，其實驗規劃內容如下：

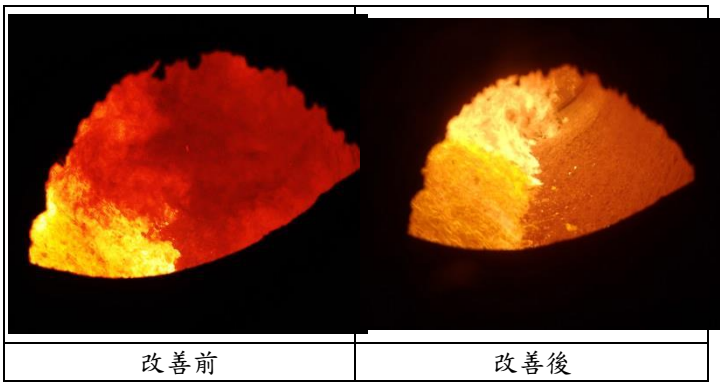
本實驗以固定總燃燒空氣量(5,500~6,500 Nm^3/hr)、垃圾與污泥投料配比(20∶1)左右、旋轉窯轉速維持 0.1 RPM 與二次燃燒室爐溫維持在 900~1,000℃左右的操作條件下，其燃燒空氣配置差異說明如下：

1. 改善前：燃燒空氣直接抽取垃圾貯坑空氣，燃燒空氣量設定為 5,500~6,500 Nm^3/hr，燃燒空氣未預熱的燃燒狀況。
2. 改善後：燃燒空氣(1,500~2,000 Nm^3/hr)、熱風(3,000~4,000 Nm^3/hr)與新增噴射風 (1,000 Nm3/hr)各自由獨立風機直接送入旋轉窯內的燃燒狀況。

上述燃燒空氣配置操作條件，分別連續運轉四小時，觀察與紀錄爐內燃燒火焰的位置、廢氣排放品質、用油量、灼燒減量等結果，探討分析如下：

1. 爐內燃燒火焰位置探討

改善後，因熱風溫度約 250 度左右，且熱風出口剛好在進料器的下方，能與進料的垃圾直接接觸，因此乾燥效果佳，加上新增噴射風能夠有效貫穿垃圾，提供垃圾層內足夠的燃燒空氣，使得燃燒更加劇烈，空氣擾流(Turbulent)強度增加，且因主要風量配置都在左邊，形成前牆左側風量大於右側，且風口前方有大量垃圾阻擋，所以左側空間壓力會大於右側壓力，自然使廢氣沿爐壁呈現順時針漩渦現象，能將火焰與廢氣轉向進料器端，加速垃圾乾燥與燃燒，在此情況下，即使停止燃燒機，垃圾自燃的情形仍可維持良好，火焰線可長時間維持在旋窯長度前 1/3 的位置(詳圖 3)，此結果也正好與文獻回顧中 Aishah S.A.K Sharifah 的研究成果類似。



改善前	改善後

圖 3　改善前後垃圾燃燒火焰線位置圖

2. 燃燒機使用頻率探討

燃燒機使用目的為維持爐溫大於 850 度與確保垃圾燃燒品質，因此本操作條件設定二次燃燒室出口溫度維持在 900~1,000℃的情況下(圖 4)，投入性質相似的垃圾與垃圾量(1.5~1.6 噸/小時)，探討改善對於燃油用量的影響，從圖 4 之燃油使用量趨勢圖中，可獲知改善後之燃油使用量明顯比改善前降低許多，其中改善前燃油使用最高約 90~110 公升，改善後用量則降到僅有 60~70 公升，另外改善後未使用燃燒機的機率也相對提高，證明提升燃燒空氣溫度與增加燃燒空氣擾流度，能夠增加垃圾自燃的效率，進而可減少使用燃燒機提供熱源的機率。

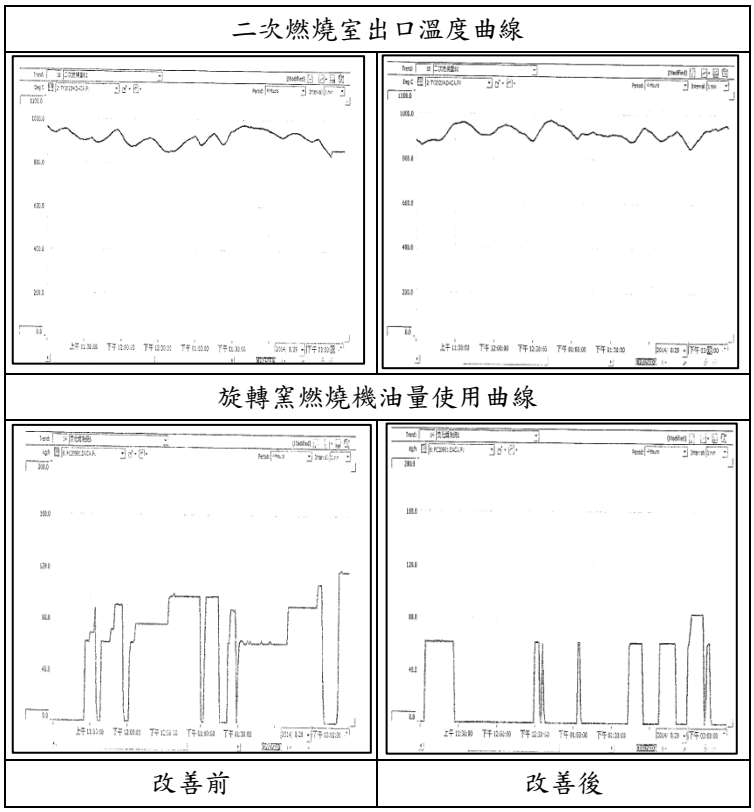
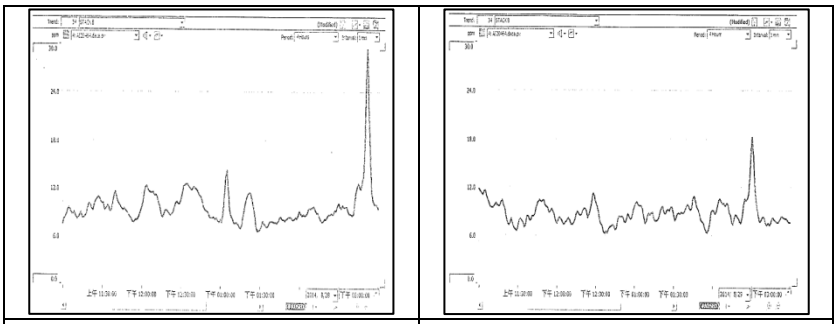


圖 4　爐溫與燃油使用量趨勢圖

3. 一氧化碳排放濃度的探討

一氧化碳是不完全燃燒的產物，因此其排放濃度高低，可代表其當下燃燒情況的好壞。為確保本改善並不會因為減少用油量，而對於燃燒品質會有很大的影響，在實驗過程中，透過煙囪所裝設之連續監測設施(CEMS)，紀錄各階段即時的一氧化碳排放濃度(詳圖 5)，並計算含氧校正(11%)後之小時平均數值彙整如表 2 所示。不論從即時曲線圖或是小時平均值差異均不大，但改善後似乎在一氧化碳的平均排放濃度略顯較低。



改善前	改善後

圖 5　改善前後煙囪一氧化碳即時排放原始濃度曲線圖

表 2　改善前後煙囪一氧化碳小時平均排放濃度彙整表(爐溫固定)

項次	改善前(ppm)	改善後(ppm)
第 1 小時	18.68	17.90
第 2 小時	21.88	14.54
第 3 小時	16.12	16.69
第 4 小時	23.17	17.92
平均值	19.96	16.76

註：法規排放標準值為 100 ppm。

從上述爐溫維持 900℃，並減少用油量的前提下，改善似乎對於一氧化碳的排放濃度影響差異性不大，為提供穩定燃燒的環境，減少因垃圾性質改變的干擾，將測試在固定用油量的情況下，其爐溫與一氧化碳的排放濃度差異，但當一次燃燒室出口爐溫若超過 1,050℃將會減少用油或停止燃燒機，若溫度低於 870℃則會加大油量。從圖 6 之趨勢圖可發現，在固定用油量的情況下，改善後的 4 小時平均爐溫 1,013℃大於改善前的 4 小時平均爐溫 927℃，其表示改善能使垃圾產生較劇烈的燃燒反應，相對釋放較多的熱能。

另從圖 6 之一氧化碳排放趨勢圖或是表 3 一氧化碳小時平均值(校正後)，

則可獲知改善後還是優於改善前，其顯示在一個相對穩定的燃燒條件下，改善後能夠提升燃燒的效率，降低一氧化碳的排放濃度。

此外，當操作條件開始改變後 3 小時，每 1 小時採底渣樣品 1 次，共計採樣 3 次，從表 4 各階段底渣的灼燒減量分析結果數據來探討，同樣可發現改善後之樣品平均灼燒減量 3.6% 小於改善前之樣品平均灼燒減量 5.7%。

綜合以上兩種條件之測試結果顯示，改善後可提供垃圾良好的燃燒反應環境，並能妥善利用垃圾自體燃燒所產生的熱能，讓下批次進料的垃圾達到自燃溫度，而不需外來火源，且能維持良好燃燒品質，可說是兼顧能源使用效率與燃燒效率。

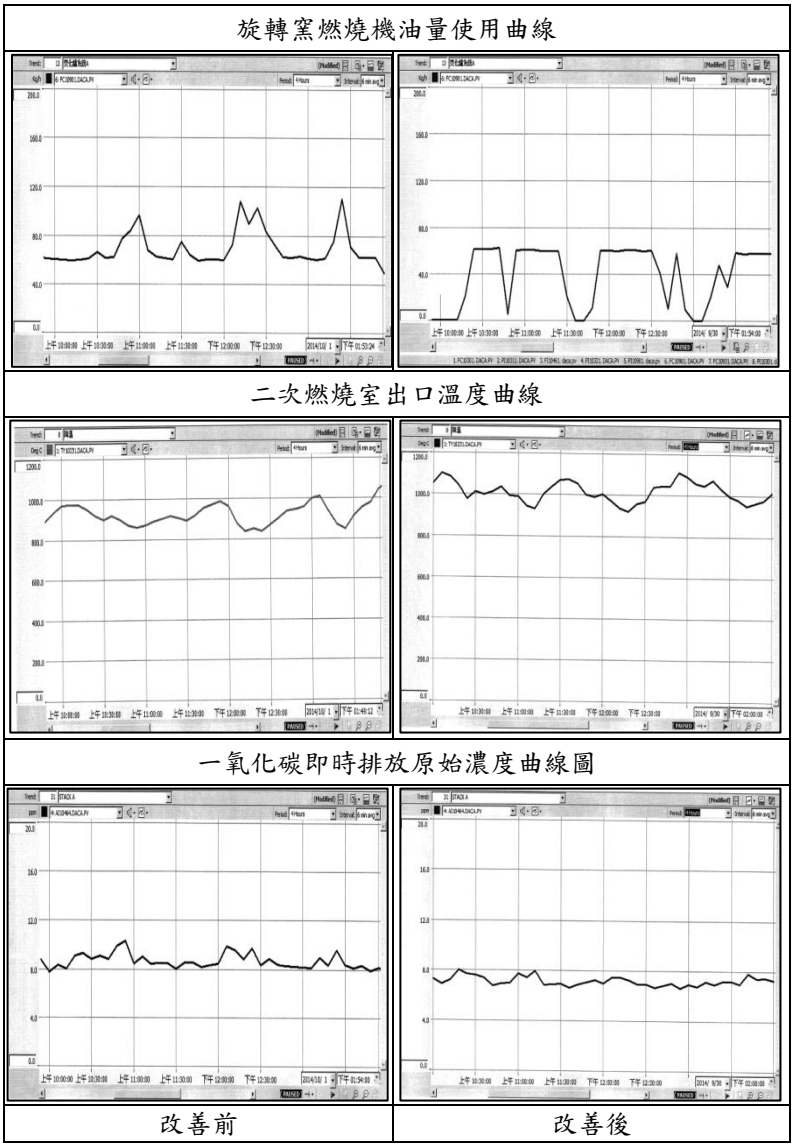


圖 6　爐溫與一氧化碳排放原始濃度趨勢圖

表 3　各階段煙囪一氧化碳小時平均排放濃度彙整表(固定用油量)

項次	改善前(ppm)	改善後(ppm)
第 1 小時	27.57	17.58
第 2 小時	24.05	16.98
第 3 小時	26.25	16.76
第 4 小時	23.27	18.32
平均值	25.29	17.41

註：法規排放標準值為 100 ppm。

表 4　各階段底渣灼燒減量分析結果彙整表(近似固定用油量)

項次	改善前(%)	改善後(%)
第 1 個樣品	5.0	3.7
第 2 個樣品	6.6	3.6
第 3 個樣品	5.6	3.4
平均值	5.7	3.6

註：本實驗日期為 2014 年 9 月並依照環保署環境檢驗所公告之焚化灰渣之灼燒減量檢測方法(R216.02C)進行分析，法規排放標準值為 7 %。

五、　結論

一般所謂最佳的燃燒控制，通常是指能夠使用較少的輔助燃料，又能降低污染排放的情況，然而燃燒是一連串複雜的化學反應，因此要有效穩定控制燃燒的品質，本來就是一件相當困難的事情，因為影響燃燒效率的因素很多，諸如燃燒空氣的壓力、溫度，或是燃料熱值、溫度等，假若主燃料(垃圾)的性質又是多變且無法預知的情況下，則更增添其控制的困難度。

因此垃圾焚化操作是需要靠經驗的累積，從垃圾攪拌與配比、燃燒空氣的分配、輔助燃燒機啟停時機及旋轉窯轉速等，都需要經過調適，並因應垃圾性質的改變做即時操作參數調整，始能確保較佳的燃燒品質，而這些參數的調整主要都是在確保能夠保持在良好的燃燒條件，而其不外乎就是溫度(Temperature)、時間(Time)及擾流(Turbulent)的改變。另從文獻或是本廠實際改善經驗都顯示，只要能夠有效提升燃燒空氣溫度及擾流度，並且設法使氣流在旋轉窯內產生漩渦現象，利用垃圾燃燒過程所釋放的熱能，便足夠使得下批次進料的垃圾能夠自體燃燒，除非進料的性質突然變異很大或是進料有發生中斷或不足的情況發生時，此時才會需要使用輔助燃燒機來提供熱源，可有效減少燃燒機使用頻率與次數，進而達到降低輔助燃料使用量的目標；同時只要能夠維持穩定的爐溫，確保良好的燃燒條件，一氧化碳的排放濃度也可相對維持在一個可接受的範圍區間，因此當爐溫下降趨勢變快，則須立即啟動燃燒機；相對地，當爐溫上升加快時，則應停止燃燒機，並維持穩定的進料品質與數量。

六、 參考文獻

1. Girovich, M. J., 1989. Performance of high-temperature slagging rotary kiln incinerator. JAPCA 39.6: 884-888.
2. 李志萍，國立台灣大學生物產業機電工程學研究所，博士論文，旋轉窯焚化爐操作特性及應用於處理事業廢棄物之研究，2004。
3. 吳中興，國立台灣大學生物產業機電工程學系，玉米穗軸燃燒爐紊流分析，中國農業工程學報，第 34 卷，61 至 75 頁，1988。
4. 吳中興，李志萍，國立台灣大學生物產業機電工程學系，使用旋轉窯焚化爐焚化稻殼之數值模擬分析，農業機械學刊第一期第 13 卷，2004。
5. 葉永富，國立台灣大學機械工程學系，碩士論文，旋轉窯焚化爐特性之分析，1998。
6. 林玉川，國立中山大學環境工程所，碩士論文，旋轉窯焚化爐三維紊流火焰結構及操作性能之研究，1999。
7. Salvador, S., Kara, Y., Crussol, J-M., 2005. Improving VOC recuperative incinerators performances by increasing turbulence levels inside the combustion chamber—experimental results. Applied Thermal Engineering. Volume 25, pp 1871-1881.
8. Sharifah, A. S., Abidin, H. Z., Sulaiman, M. R., Khoo, K. H., Ali, H., 2008. Combustion characteristics of Malaysian municipal solid waste and predictions of air flow in a rotary kiln incinerator. Journal of Material Cycles and Waste Management. Volume 10, Issue 2, pp 116-123.
9. Yang, Y., Rakhorst, J., Reuter, M. A., Voncken, J. H. L., 1999. Analysis of gas flow and mixing in a rotary kiln waste incinerator. Second International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries, 6-8.
10. Du, J. C., Huang, Q. X., Yan, J. H.,2012. Method for determining effective flame emissivity in a rotary kiln incinerator burning solid waste. Journal of Zhejiang University SCIENCE A 13.12, 969-978.
11. Lemieux, P. M., & Pershing, D. W., 1989. Design and construction of a rotary kiln simulator for use in studying the incineration of hazardous waste. Review of scientific instruments, 60(8), 2768-2776.
12. Woodruff, P. H., and Larson, G. P., 1968.Combustion Profile of a Grate-Rotary Kiln Incinerator. Proc. 1968 Nat. Incin. Conf., ASME.

泵浦系統節能診斷客製優化設計生產技術

吳漢明*、陳建龍**

摘　要

二氧化碳造成的溫室效應，包括極端氣候的頻率，暴風雨強度增強、冰山溶化、海平面上升，所帶來的災害，已逐漸發威，若不加以管制，地球生態將受到嚴重的損害。故 CO_2 減產的執行已迫在眉睫。

目前地球上 CO_2 的三大主要產生源於電力、交通及工廠，台灣的發電以火力發電為主，約占總發電量之 82%左右，因此減少用電對減少 CO_2 是最直接的幫助。

在台灣，馬達用電占全國總用電量的 46%，泵浦的用電占馬達用電的 22%，依能源局公布電力消費概況，2020 年增至 2710 億度，創下歷史新高，光是泵浦的耗電量就高達 274.3 億度，是耗電可觀的設備之一，為能效改善實施的首要標的項目。

目前在市場上運轉的泵浦，絕大多數不符合歐盟 MEI≥0.4 的要求；在空調系統上，冷卻泵及冰水泵的能效和須≤0.1kW/RT，普遍的冷卻泵及冰水泵能效和也未達上述標準，造成空調系統總能效低落，因此須發展泵浦線上診斷的技術，來改善泵浦的耗能問題，目前的台灣市場，存在著數以百萬台的老舊泵浦等待改善。

【關鍵詞】泵浦系統節能減碳、MEI、泵浦線上診斷技術、耗能

---

*殷聖工程有限公司　總經理

**殷聖工程有限公司　協理

一、前 言

二氧化碳造成的溫室效應，包括極端氣候的頻率，暴風雨強度增強、冰山溶化、海平面上升，所帶來的災害，已逐漸發威，若不加以管制，地球生態將受到嚴重的損害。故 CO_2 減產的執行已迫在眉睫。

目前地球上 CO_2 的三大主要產生源於電力、交通及工廠，台灣的發電以火力發電為主，約占總發電量之 82%左右，因此減少用電對減少 CO_2 是最直接的幫助。

在台灣，馬達用電占全國總用電量的 46%，泵浦的用電占馬達用電的 22%，依能源局公布電力消費概況，2020 年增至 2710 億度，創下歷史新高，光是泵浦的耗電量就高達 274.3 億度，是耗電可觀的設備之一，為能效改善實施的首要標的項目。

二、泵浦系統節能診斷技術

1.管路阻抗曲線

影響泵浦系統效率最大的因素是管路流動損失是否精準計算，而無取用過大安全系數之嫌，而造成阻抗曲線高估。

實際應用上，泵浦的操作點是決定於管路阻抗，泵浦性能曲線與等效阻抗曲線的交叉點才是操作點，目前泵浦的實際操作點往往落在大流量區域的低效率區居多，因為實際的管路阻抗曲線沒那麼高。

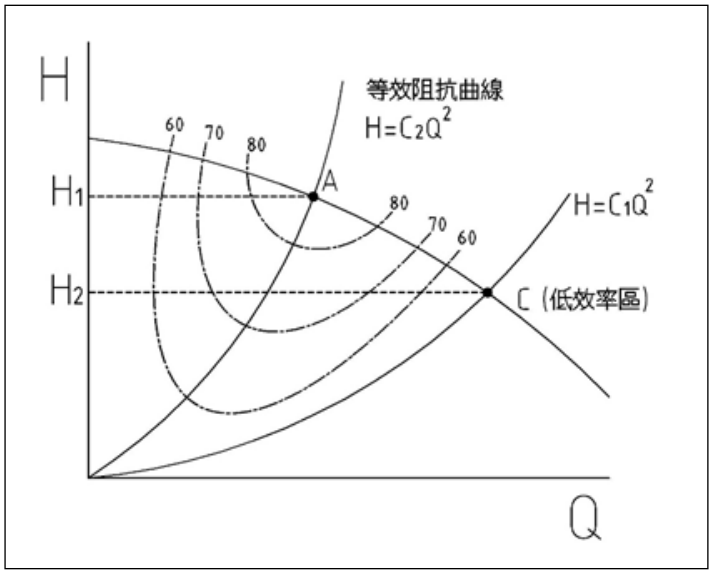


圖 1　管路阻抗曲線

2.迴轉動力泵動力說明

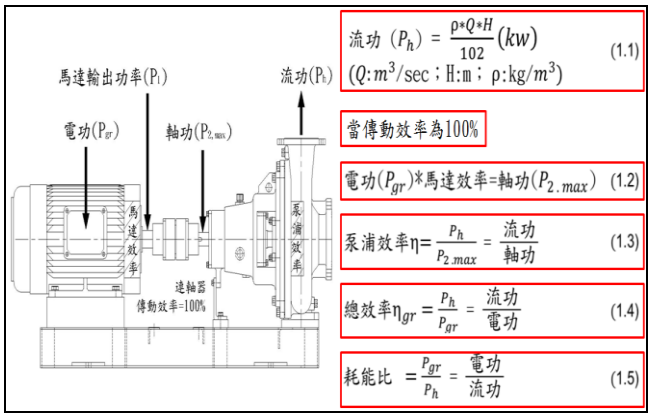


圖 2　迴轉動力泵動力說明

3.流功－耗電功曲線與耗能比

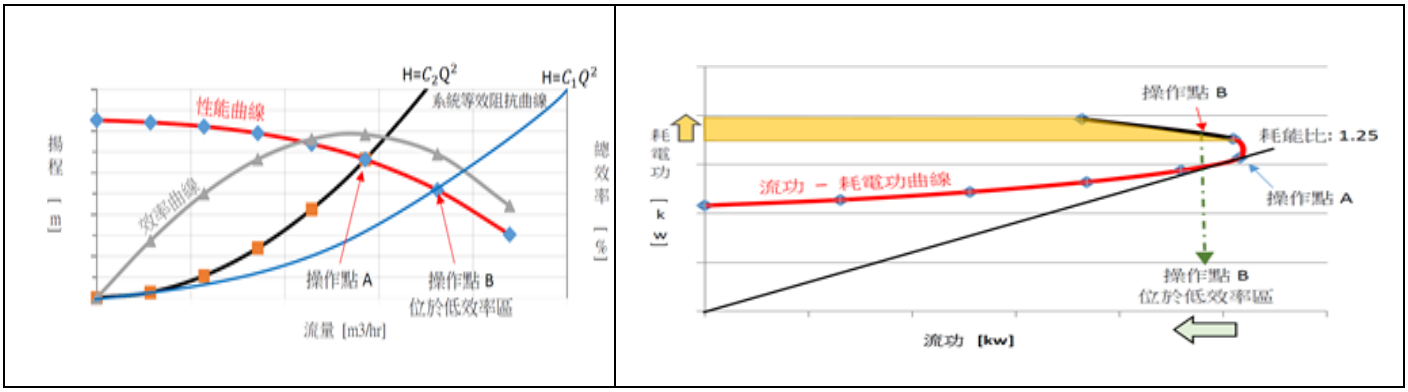


圖 3　流功－耗電功曲線與耗能比

泵浦的流功在經過最高點後正逐漸減少；但馬達耗電功持續增加，此時馬達過載成重要議題，也就是泵浦的操作點不應落在這些低效率區。

4.泵浦線上量測儀器

圖 4　般聖公司泵浦線上量測儀器

5.量測方法

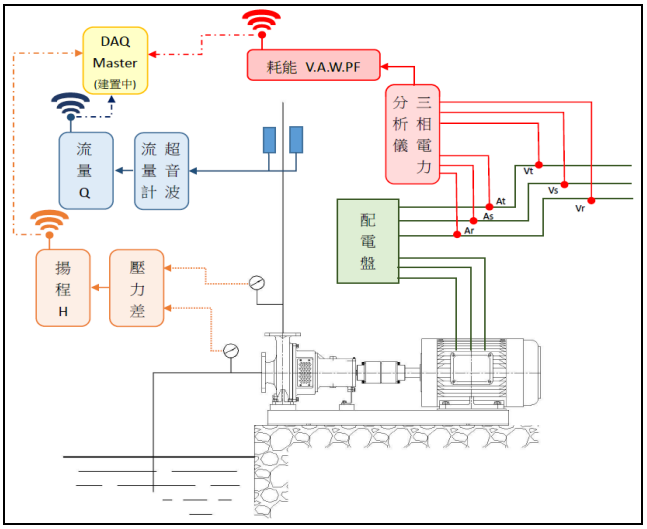


圖 5　量測方法

三、冷凍空調水側系統節能案例與評估

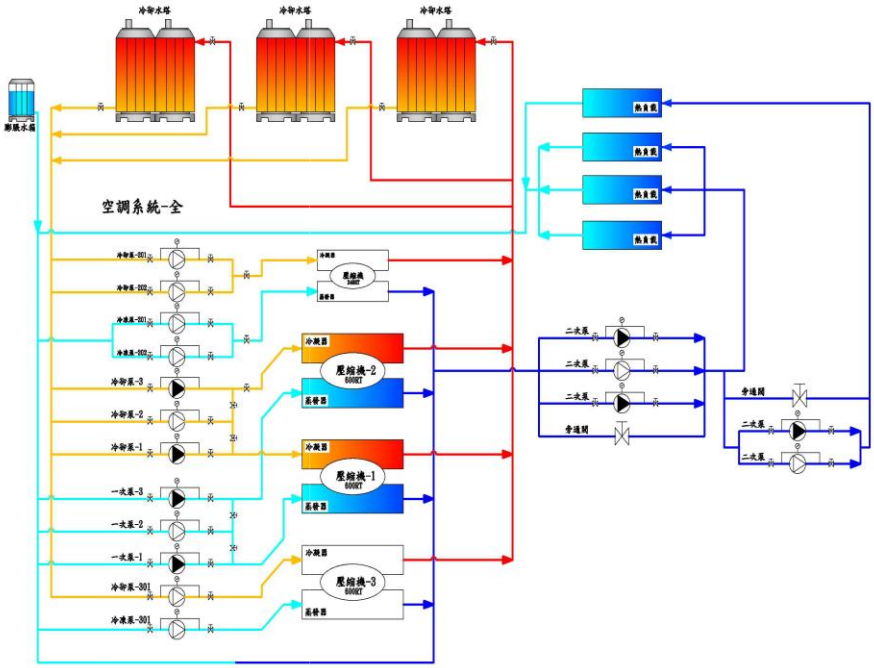
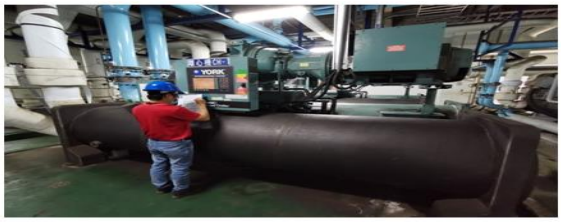


圖 6　冷凍空調水側系統圖



冰水主機

冰水泵

冷卻泵

冷卻水塔

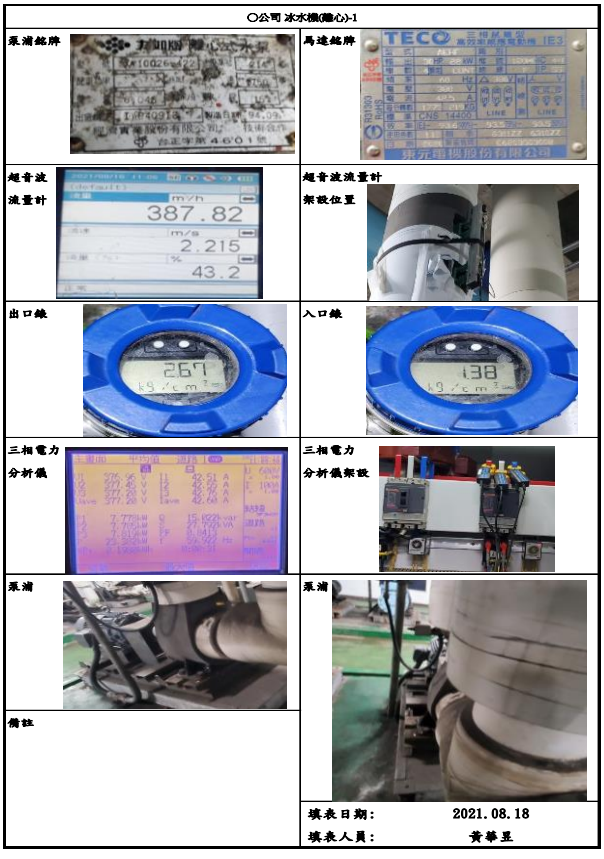


圖 7　量測現況照片

○公司 冰水機(離心)-1
空調系統場勘量測紀錄表

冰水機數據	冰水機資料			
	壓縮機型式	離心機-1	壓縮機並聯數(台)	2
	額定冷凍容量(RT)	600	運轉負載(%)	76%
	運轉耗電量(kW)	280.43	運轉容量(RT)	456
	蒸發氣冷媒溫度(℃)	---	冷凝器冷媒溫度(℃)	---
	蒸發器入口水溫(℃)	11.2	冷凝器入口水溫(℃)	31.8
	蒸發器出口水溫(℃)	8.2	冷凝器出口水溫(℃)	35.9
	蒸發器出入口溫差(℃)	3	冷凝器出入口溫差(℃)	4.1
	冰水泵數據(一次泵)			
	膨脹水箱位高(m)	15		
	額定揚程(m)	14.2	額定流量(Lpm)	6463.7
	額定馬力(hp)	29.3	額定轉速(rpm)	1750
	馬達效率(%)	93.5	運轉耗電量(kW)	23.382
	泵入口壓力(bar)	1.38	泵出口壓力(bar)	2.67
	入口壓力錶離地板高(m)	---	出口壓力錶離地板高(m)	---
	冰水泵數據(二次泵)			
	額定揚程(m)	9.98	額定流量(Lpm)	4478.3
	額定馬力(hp)	22.57	額定轉速(rpm)	1750
	馬達效率(%)	91.5	運轉耗電量(kW)	18.41
	泵入口壓力(bar)	1.42	泵出口壓力(bar)	2.32
	入口壓力錶離地板高(m)	---	出口壓力錶離地板高(m)	---
冷卻水泵數據	泵入口與冷卻塔盤水盤液面位差(m)			
	額定揚程(m)	30.3	額定流量(Lpm)	5036.3
	額定馬力(hp)	52.1	額定轉速(rpm)	1750
	馬達效率(%)	92.5	運轉耗電量(kW)	42.06
	泵入口壓力(bar)	0.39	泵出口壓力(bar)	3.35
	入口壓力錶離地板高(m)	---	出口壓力錶離地板高(m)	---
冷卻水塔風機數據	泵入口與冷卻塔盤水盤液面位差(m)			
	濕水盤與盤水盤位差(m)	2.6	濕球溫度(℃)	---
	額定馬力(hp)	15 * 6	馬達效率(%)	88.5
	運轉耗電功電量(kW)	14.376 / 2 = 7.2		
備註			填表日期	2021.08.18
			填表人員	陳建龍

○公司 冰水機(離心)-2
空調系統場勘量測紀錄表

冰水機數據	冰水機資料			
	壓縮機型式	離心機	壓縮機並聯數(台)	2
	額定冷凍容量(RT)	600	運轉負載(%)	71%
	運轉耗電量(kW)	267.18	運轉容量(RT)	426
	蒸發氣冷媒溫度(℃)	---	冷凝器冷媒溫度(℃)	---
	蒸發器入口水溫(℃)	11.8	冷凝器入口水溫(℃)	32
	蒸發器出口水溫(℃)	9	冷凝器出口水溫(℃)	35.8
	蒸發器出入口溫差(℃)	2.8	冷凝器出入口溫差(℃)	3.8
	冰水泵數據(一次泵)			
	膨脹水箱位高(m)	15		
	額定揚程(m)	11.3	額定流量(Lpm)	6238.2
	額定馬力(hp)	33.85	額定轉速(rpm)	1750
	馬達效率(%)	91.5	運轉耗電量(kW)	27.6
	泵入口壓力(bar)	1.34	泵出口壓力(bar)	2.35
	入口壓力錶離地板高(m)	---	出口壓力錶離地板高(m)	---
	冰水泵數據(二次泵)			
	額定揚程(m)	10.24	額定流量(Lpm)	5050.8
	額定馬力(hp)	22.9	額定轉速(rpm)	1750
	馬達效率(%)	91.5	運轉耗電量(kW)	18.69
	泵入口壓力(bar)	1.42	泵出口壓力(bar)	2.32
	入口壓力錶離地板高(m)	---	出口壓力錶離地板高(m)	---
冷卻水泵數據	泵入口與冷卻塔盤水盤液面位差(m)			
	額定揚程(m)	28.3	額定流量(Lpm)	5016.5
	額定馬力(hp)	51.1	額定轉速(rpm)	1750
	馬達效率(%)	93	運轉耗電量(kW)	40.95
	泵入口壓力(bar)	0.4	泵出口壓力(bar)	3.31
	入口壓力錶離地板高(m)	---	出口壓力錶離地板高(m)	---
冷卻水塔風機數據	泵入口與冷卻塔盤水盤液面位差(m)			
	濕水盤與盤水盤位差(m)	2.6	濕球溫度(℃)	---
	額定馬力(hp)	15 * 6	馬達效率(%)	88.5
	運轉耗電功電量(kW)	14.376 / 2 = 7.2		
備註			填表日期	2021.08.18
			填表人員	陳建龍

圖 8　診斷工作量測紀錄表

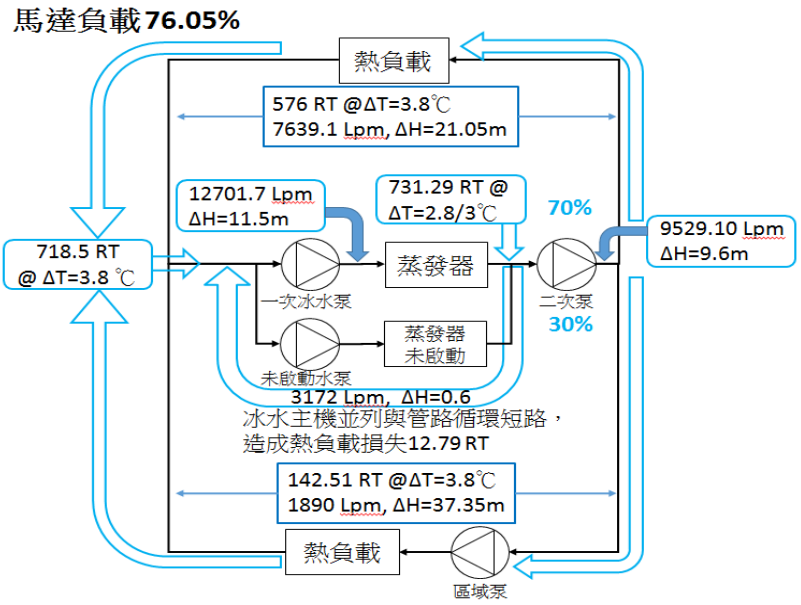


圖 9　量測等效系統圖

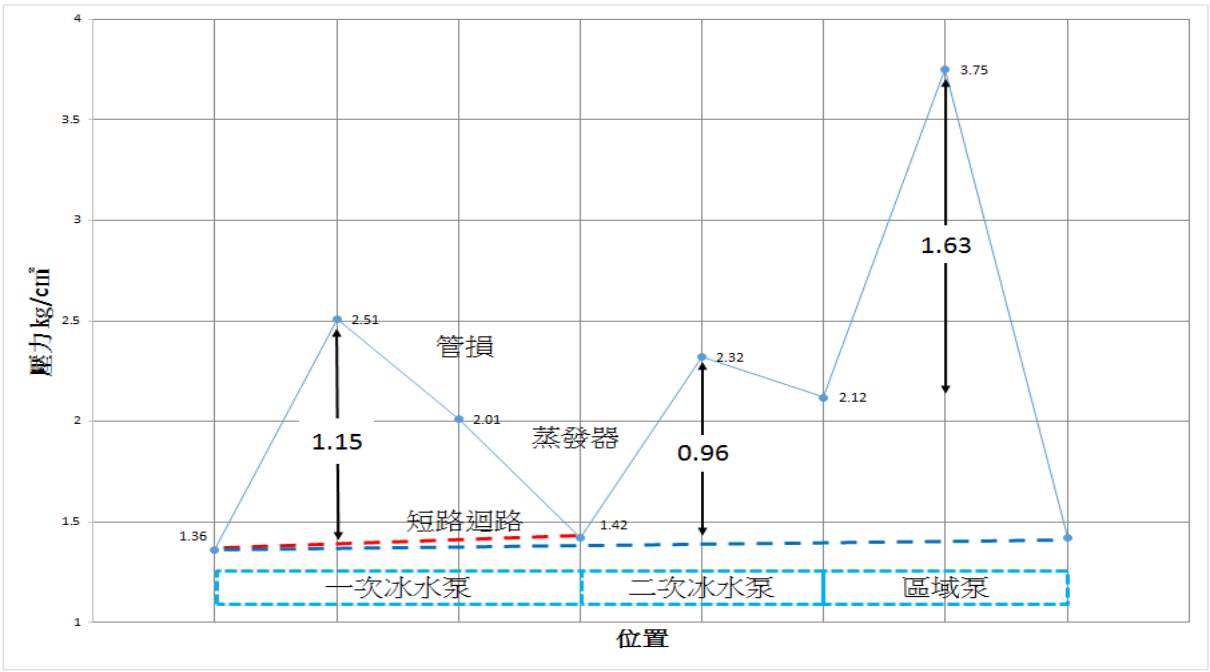


圖 10　量測壓力圖

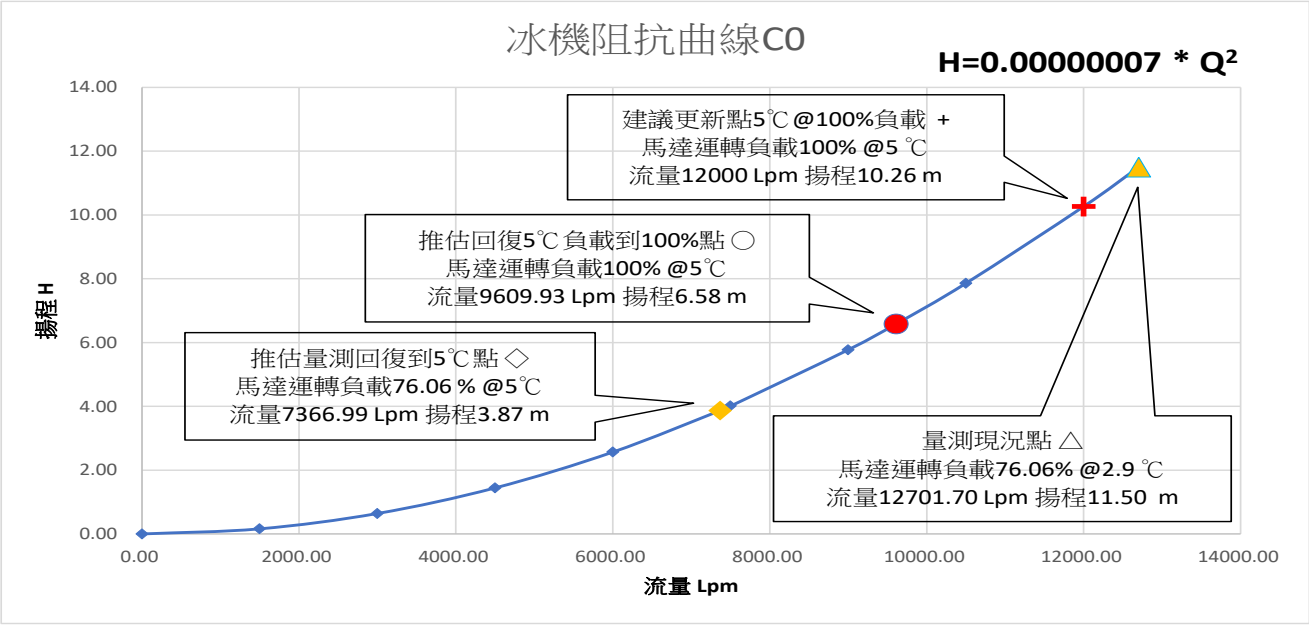


圖 11　系統阻抗圖-冰水機

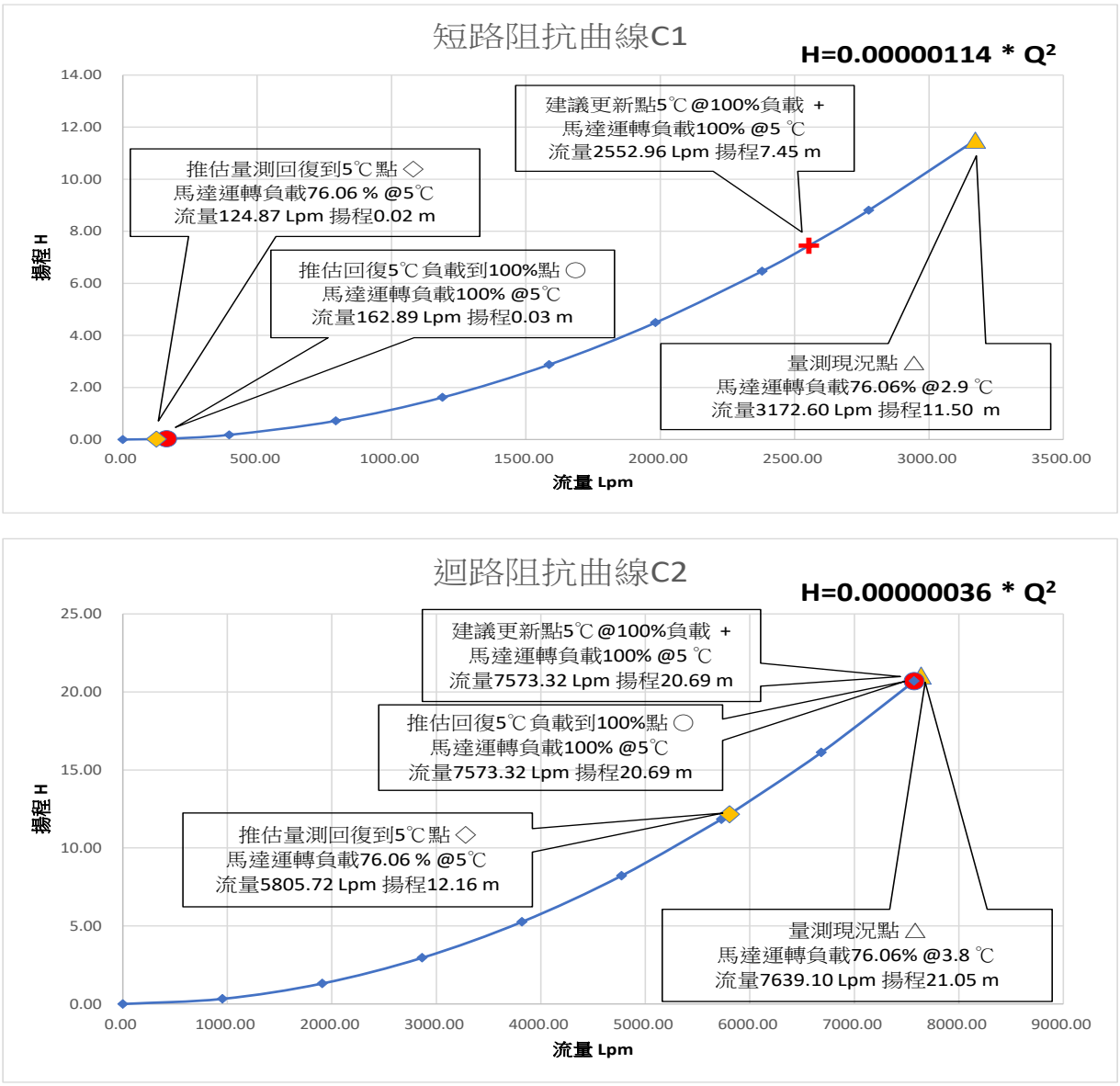
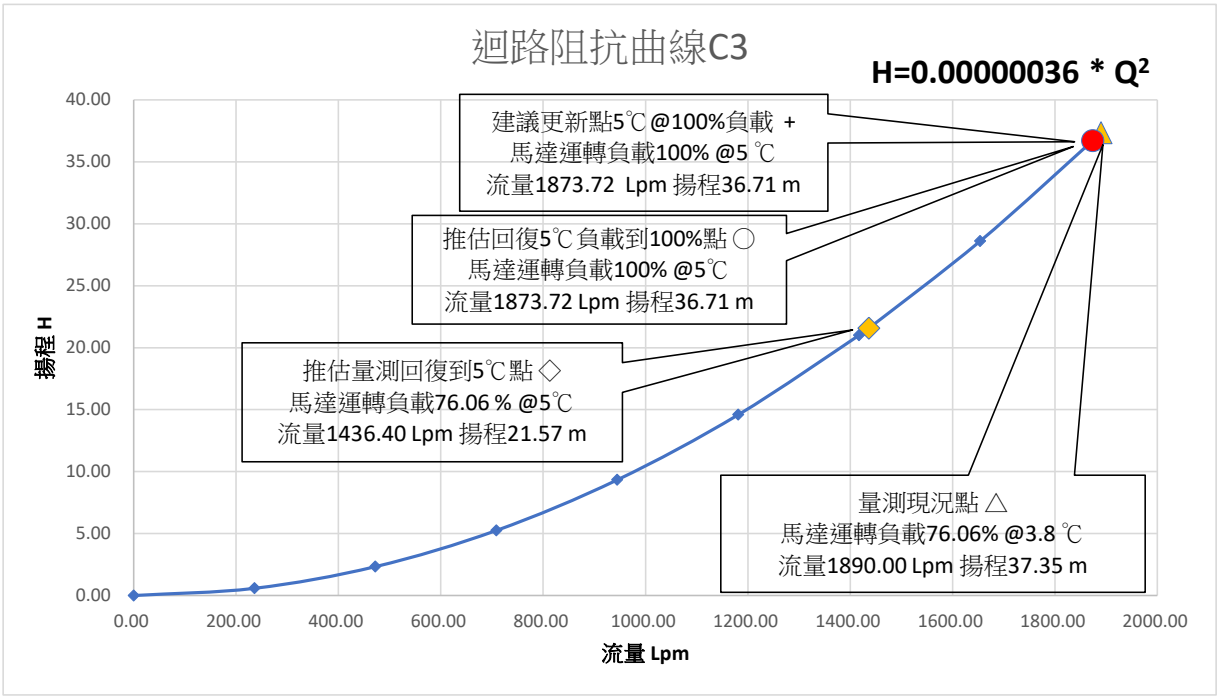


圖 12　系統阻抗圖-冰水短路、冰水迴路 1



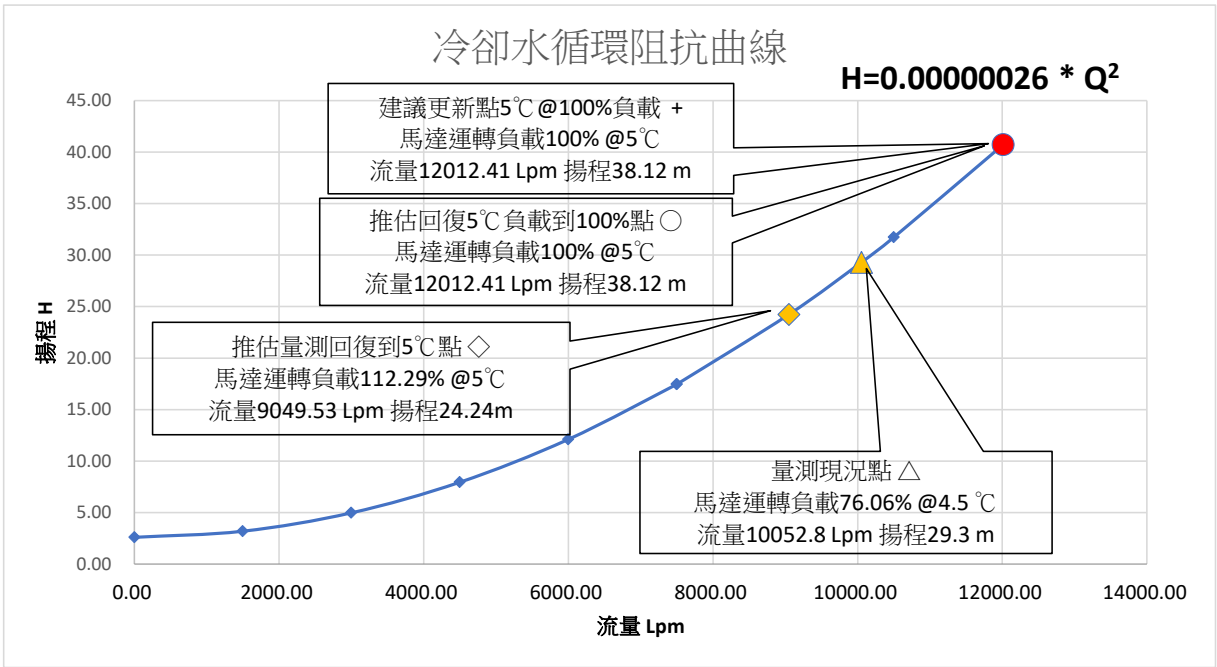


圖 13　系統阻抗圖-冰水迴路 2、冷卻水迴路

狀態	設備	壓縮機 馬達負載	冰水機	一次泵	二次泵	三次泵	冷卻泵	冷卻塔	總耗電	系統 熱負載RT
量測現況	量測溫差Δt℃		2.90		—		4.50			
			—		3.8	—				
			—			3.8				
	熱負載 kW		2569.85		—		3200.47			2569.85
			—		2025.23	—				2526.29
			—			501.06				
	熱負載 RT		730.90		—		910.26			730.90
			—		576.00	—				718.51
			—			142.51				
				H1	H2	H3				
	揚程m		11.50		9.55	16.30	29.300			
	一次迴路 揚程		—	21.05		—				
	二次迴路 揚程		—	37.35						
	流量 Lpm		Q0	12701.70	9529.10	1890.00	10052.800			
	冰機短路 Lpm		Q1	3172.60	—					
	一次迴路Lpm		Q2	7639.10	7639.10	—				
	二次迴路Lpm		Q3	1890.00	1890.00	1890.00				
	流功 kW		23.882		14.879	5.037	48.158			
	短路流功		(H1)*Q1	5.965	—					
	一次迴路流功	76.06%	(H1+H2)*Q2	14.363	11.928	—	—	流功總加=	26.291	
	二次迴路流功		(H1+H2+H3)*Q3	3.554	2.951	5.037	—	流功總加=	11.542	
	位差m,C0		0				2.6			
				泵1 揚程/Lpm^2	泵2 揚程/Lpm^2	泵3 揚程/Lpm^2				
	冰機組抗曲線C0		0.00000007		0.00000011	0.00000456				
	短路阻抗係數C1		0.00000114		—					
	一次迴路管路阻抗係數C2		0.00000036			—	0.00000026			
	二次迴路管路阻抗係數C3		0.00001046							
	耗電 kW		547.61	50.980	37.100	10.290	83.010	14.380	743.37	
	短路耗電		—	12.734	—		—		12.734	
	一次迴路 耗電		—	30.661	29.742	—	—		60.402	
	二次迴路 耗電		—	7.586	7.358	10.290	—		25.234	
	系統能效 kW/RT		0.749	0.070	0.051	0.014	0.114	0.020	1.017	
	短路系統能效 kW/RT		—	0.017	—		—		0.017	
	一次系統能效 kW/RT		—	0.042	0.041	—	—		0.083	
	二次系統能效 kW/RT		—	0.010	0.010	0.014			0.035	
	搬運效率EUIqra (kW/kW)		—	107.60	—		66.457	222.564		
			—	77.03		—	—			
			—	43.41			—			
	耗電比		—	2.135	2.493	2.043	1.724	冷卻塔 Gpm/hp		
	馬達額定容量(kW)	100.0%	720.00	—						
	額定容量百分比	60.91%	—							
Ashrae90.1(系統熱負載)		≦0.0582								
Ashrae90.1(冷媒熱負載)		≦0.0465								

狀態	設備	壓縮機 馬達負載	冰水機	一次泵	二次泵	三次泵	冷卻泵	冷卻塔	總耗電	系統 熱負載RT
推估量測回復到5℃	量測溫差Δt℃		2.90		—		4.50			
			—		3.8	—				
			—			3.8				
	溫差Δt℃		5.00				5.00			
	熱負載 kW		2569.85		—		3200.47			2569.85
			—		2025.23	—				2526.29
			—			501.06				
	熱負載 RT		730.90		—		910.26			730.90
			—		576.00	—				718.51
			—			142.51				
			H0	H1	H2	H3				
	揚程m		3.8686	0.0178	8.2721	9.4149	24.237			
	一次迴路 揚程		—	12.16		—				
	二次迴路 揚程		—	21.57						
	流量 Lpm @5℃		Q0	7366.99	7242.12	1436.40	9049.531			
	冰機短路 Lpm @5℃		Q1	124.87	—					
	一次迴路Lpm @5℃		Q2	5805.72	5805.72	—				
	二次迴路Lpm @5℃		Q3	1436.40	1436.40	1436.40				
	泵分流 流功kW		—	0.021	9.795	2.211	—			
	系統流功 kW	76.06%	4.681		9.795	2.211	32.013			
	短路流功		(H1)*Q1	0.079	—		—			
	一次迴路流功		(H0+H2)*Q2	3.672	7.852	—	—	流功總加=	11.524	
	二次迴路流功		(H0+H2+H3)*Q3	0.909	1.943	2.211	—	流功總加=	5.062	
	位差m,C0		0				2.6			
	短路阻抗係數C1		0.00000114		—					
	一次迴路管路阻抗係數C2		0.00000036			—	0.00000026			
	二次迴路管路阻抗係數C3		0.00001046							
	耗電 kW		547.61	9.947	16.286	4.517	60.555	14.380	653.29	
	短路耗電		—	0.169	—		—		0.169	
	一次迴路 耗電		—	7.839	13.056	—	—		20.895	
	二次迴路 耗電		—	1.939	3.230	4.517	—		9.687	
	系統能效 kW/RT		0.749	0.014	0.022	0.006	0.083	0.020	0.894	
	短路系統能效 kW/RT		—	0.0002	—		—		0.0002	
	一次系統能效 kW/RT		—	0.011	0.018	—	—		0.029	
	二次系統能效 kW/RT		—	0.003	0.004	0.006	—		0.013	
	搬運效率EUIqra (kW/kW)		—	548.97	—		99.973	222.564		
			—	175.73		—	—			
			—	98.98			—			
	耗電比		—	463.546	1.663	2.043	1.724	冷卻塔 Gpm/hp		
	馬達額定容量(kW)	100.0%	720.00					124.034		
	額定容量百分比	60.91%								
Ashrae90.1(系統熱負載)		≦0.0582								
Ashrae90.1(冷媒熱負載)		≦0.0465								

狀態	設備	壓縮機 馬達負載	冰水機	一次泵	二次泵	三次泵	冷卻泵	冷卻塔	總耗電	系統 熱負載RT
推估回復到5℃@100%負載	溫差△t℃		5.00				5.00			
	熱負載 kW 76.06%		2569.85		—		3200.47			2569.85
			—		2025.23	—				2526.29
			—			501.06				
	熱負載 kW @100%		3378.85		—		4227.91			3378.85
			—		2662.78	—				3321.58
			—			658.80				
	熱負載 RT		960.99		—		1202.48			960.99
			—		757.33	—				944.70
			—			187.37				
	流量 Lpm @5℃		Q0	7366.99	7242.12	1436.40	9049.531			
	冰機短路 Lpm @5℃		Q1	124.87	—					
	一次迴路Lpm @5℃		Q2	5805.72	5805.72	—				
	二次迴路Lpm @5℃		Q3	1436.40	1436.40	1436.40				
			H0	H1	H2	H3	—			
	揚程m		6.5829	0.0303	14.0758	16.0205	—			
	一次迴路 揚程		—	20.69		—	38.124			
	二次迴路 揚程		—	36.71						
	流量 Lpm @5℃ 100%		Q0	9609.93	9447.04	1873.72	12012.409			
	冰機短路 Lpm @5℃		Q1	162.89	—					
	一次迴路Lpm @5℃ 100%		Q2	7573.32	7573.32	—				
	二次迴路Lpm @5℃ 100%	100.00%	Q3	1873.72	1873.72	1873.72				
	泵分流 流功kW		—	10.343	21.741	4.908	—			
	流功 kW		10.391		21.741	4.908	74.876			
	短路流功		(H1)*Q1	0.001	—		—			
	一次迴路流功		(H0+H2)*Q2	8.151	17.429	—	—	流功總加=	25.580	
	二次迴路流功		(H0+H2+H3)*Q3	2.017	4.312	4.908	—	流功總加=	11.237	
	位差m,C0		0				2.6			
	短路阻抗係數C1		0.00000114		—		0.00000026			
	一次迴路管路阻抗係數C2		0.00000036			—				
	二次迴路管路阻抗係數C3		0.00001046							
	耗電 kW		720.00	22.079	36.150	10.026	129.063	19.088	936.41	
	短路耗電		—	0.002	—		—		0.002	
	一次迴路 耗電		—	17.698	28.980	—	—		46.678	
	二次迴路 耗電		—	4.379	7.170	10.026	—		21.575	
	系統能效 kW/RT		0.749	0.023	0.038	0.010	0.134	0.020	0.974	
	短路系統能效 kW/RT		—	0.0000	—		—		0.0000	
	一次系統能效 kW/RT		—	0.018	0.030	—	—		0.049	
	二次系統能效 kW/RT		—	0.005	0.007	0.010	—		0.022	
	搬運效率EUIqra (kW/kW)		—	325.18	—		56.465	221.495		
			—	104.09		—	—			
			—	58.63			—			
	耗電比		—	2.135	1.663	2.043	1.724	冷卻塔 Gpm/hp		
	馬達額定容量(kW)	100.0%	720.00					124.034		
	額定容量百分比	80.08%								
Ashrae90.1(系統熱負載)		≦0.0582								
Ashrae90.1(冷媒熱負載)		≦0.0465								

狀態	設備	壓縮機 馬達負載	冰水機	一次泵	二次泵	三次泵	冷卻泵	冷卻塔	總耗電	系統 熱負載RT
建議更新5℃@100%負載	量測溫差Δt℃		5.00				5.00			
	熱負載 kW		4219.20		—		5041.70			4219.20
			—		2662.78	—				3321.58
			—			658.80				
	熱負載 RT		1200.00		—		1433.93			1200.00
			—		757.33	—				944.70
			—			187.37				
			H0	H1	H2	H3	—			
	泵 $H=C_1Q^2$ 揚程		10.264	7.447	2.978	16.020	—			
	一次迴路 揚程		—	20.69		—	38.124			
	二次迴路 揚程		—	36.71						
	流量 Lpm		Q0	12000.00	9447.04	1873.72	12012.409			
	冰機短路 Lpm		Q1	2552.96	—					
	一次迴路Lpm		Q2	7573.32	7573.32	—				
	二次迴路Lpm		Q3	1873.72	1873.72	1873.72				
	泵分流 流功kW			20.139	4.600	4.908	—			
	流功 kW		34.749		21.741	4.908	74.876			
	短路流功		(H1)*Q1	3.108	—		—			
	一次迴路流功	100.00%	(H0+H2)*Q2	3.687	3.687	—	—	流功總加=	7.375	
	二次迴路流功		(H0+H2+H3)*Q3	3.145	0.912	4.908	—	流功總加=	8.965	
	位差m,C0		0				2.6			
	短路阻抗係數C1		0.00000114		—		0.00000026			
	一次迴路管路阻抗係數C2		0.00000036			—				
	二次迴路管路阻抗係數C3		0.00001046							
	耗電 kW		720.00	15.240	22.380	7.340	102.500	19.088	886.55	
	短路耗電		—	4.765	—		—		4.765	
	一次迴路 耗電		—	5.653	17.941	—	—		23.595	
	二次迴路 耗電		—	4.821	4.439	7.340	—		16.600	
	系統能效 kW/RT		0.600	0.013	0.019	0.006	0.085	0.016	0.739	
	短路系統能效 kW/RT		—	0.0065	—		—		0.0065	
	一次系統能效 kW/RT		—	0.008	0.025	—	—		0.032	
	二次系統能效 kW/RT		—	0.007	0.006	0.010			0.023	
	搬運效率EUIqra (kW/kW)		—	121.42	—		67.334	264.128		
			—	361.06		—	—			
			—	73.49			—			
	耗電比			0.757	4.865	1.496	1.369	冷卻塔 Gpm/hp		
	馬達額定容量(kW)	100.0%	720.00	—				124.034		
	額定容量百分比	100.00%	—							
Ashrae90.1(系統熱負載)		≦0.0582								
Ashrae90.1(冷媒熱負載)		≦0.0465								

圖 14　水側系統能效計算表

節能診斷改善建議	汰換冰水主機、一次冰水泵、二次冰水泵、三次冰水泵、冷卻水泵加裝變頻器及 MCU 中控系統

現況說明	改善方案	預期效益
1. 冷凍空調水側系統，設有YORK離心冰水機600RT x2台並聯、一次冰水泵22kW x2台並聯、二次冰水泵30 kW x2台並聯、區域泵 22 kW x1台、冷卻水泵55kW x2台並聯、並設有2,000 kWx6座方型冷卻水塔供冰水主機使用。 2. 冰水主機600RT x2台並聯全年開啟8,760小時。 3. 二台並聯冰水離心主機，離心機-1，馬達負載76%，運轉耗電量為280.43kW、蒸發器出入口溫差3℃、冷凝器出入口溫差4.1℃，離心機-2，馬達負載71%，運轉耗電量為267.18kW、蒸發器出入口溫差2.8℃、冷凝器出入口溫差3.8℃，出水溫度和回水溫度差3.8℃。 4. 平均電價2.5元/kWh 計算。 5. 冰水主機600RT x 2已購置，冰水主機能效0.6 kW/RT列入 IPLV 能效評估。	1. 量測該冰水機系統後，馬達負載76.06%，額定容量百分比=60.91%@3.8℃，結算熱負載能效= 0.749kW/RT，附屬設備一次冰水泵、二次冰水泵、三次冰水泵、冷卻泵、冷卻水塔 =0.070+0.051+0.014+0.114 +0.020=0.268 kW/RT。系統熱負載能效 =0.749+0.268=1.017 kW/RT。 2. 回推馬達負載76.06%@5℃，額定容量百分比= 60.91%@5℃，冰水機熱負載能效= 0.749kW/RT，附屬設備一次冰水泵、二次冰水泵、三次冰水泵、冷卻泵、冷卻水塔 =0.014+0.022+0.006+0.083 +0.020=0.145 kW/RT。系統熱負載能效 =0.749+0.145=0.894 kW/RT。 3. 回推馬達負載100%@5℃，額定容量百分比= 80.08%@5℃，冰水機熱負載能效= 0.749kW/RT，附屬設備一次冰水泵、二次冰水泵、三次冰水泵、冷卻泵、冷卻水塔 =0.023+0.038+0.010+0.134 +0.020=0.205 kW/RT。系統熱負載能效 =0.749+0.205=0.974 kW/RT。 4. 更換冰水主機、一次冰水泵、二次冰水泵、三次冰水泵、冷卻泵加裝變頻器及 MCU 中控系統，並依 IPLV 計算評估 依 IPLV 計算如下： (1) 馬達負載100%系統能效0.739 kW/RT，	1. 更換冰水主機、一次冰水泵、二次冰水泵、三次冰水泵、冷卻泵加裝變頻器及 MCU 中控系統。系統熱負載能效由0.974kW/RT(馬達負載100%@5℃）採 IPLV 計算，降為0.707kW/RT。 (1) 節省用電 =(0.974-0.707)*1200RT *8,760小時 =2,806,704kWh/年。 (2) 可降低需量 =2,806,704/8,760=320.4 kW。 (3) 節省電費 =(0.974-0.707)*1200R T*8,760小時*2.5元 =7,016,760元/年(701.6萬元)。 2. 投資費用：488萬元。 3. 回收年限：0.69年。 4. 相當減少溫室氣體排放量 =0.509*(0.974-0.707)*1200R T*8,760小時=1,428.6 ton-CO_2e/年(以108年度電力排放係數0.509kgCO_2e/kWh 計算)。

	馬達負載75%系統能效0.730 kW/RT， 馬達負載50%系統能效0.695 kW/RT， 馬達負載25%系統能效0.657 kW/RT。	

IPLV計算表

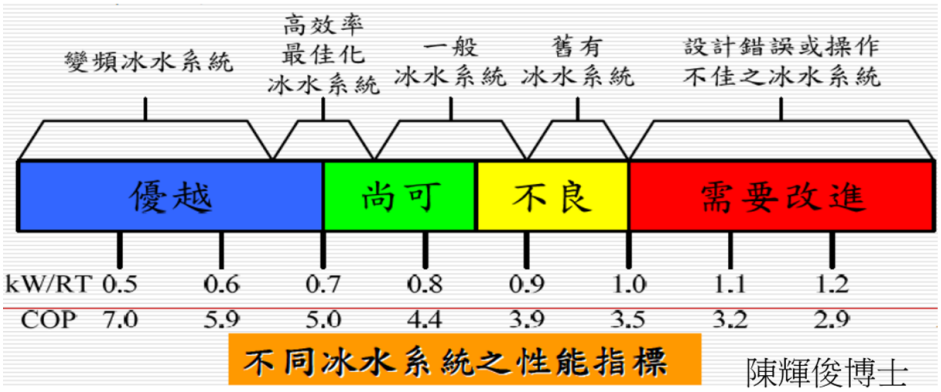
負載%	100%	75%	50%	25%	IPLV
時間係數	2.3%	41.5%	46.1%	10.1%	—
系統能校 kW/RT	0.739	0.730	0.695	0.657	0.707

(2) IPLV 系統能效為0.707kW/RT。

改善項目汰換冰水主機、一次冰水泵、二次冰水泵、三次冰水泵、冷卻水泵加裝變頻器及 MCU 中控系統，節能效益減少耗電 2,806,704 (kWh/年)，可降低需量 320.4(kW)，節省電費 701.6(萬元/年)，投資費用 488(萬元)，回收年限 0.6 年，溫室氣體減量 1,428.6（ton-CO_2e/年）。

四、空調系統性能指標

分析系統的節能潛力時，應針對系統效率做整體的調查與檢測，了解系統耗能的分佈狀況外，進而探討系統中可以進行節能之處，並針對各系統與項目提出適合的節能措施。



五、結　論

1. 等效阻抗曲線是簡單有效觀念，等效阻抗曲線是代表管路在某一時間點特性。
2. 等效阻抗曲線是未來泵浦選用的基礎，原始設計只是計算值，並不精確，現場量測值才是現況值。

3.流功－耗電功曲線才能正確表現泵浦在更新後的節能效果，耗能比的物理意義比總效率更能直截表現出省電的潛力。

4.此案例在迴路 1 部份負載 76.02%時，二次泵出水和回水溫差 3.8℃，依管路系統阻抗 H=0.0000036*Q2，回推至冰機全載 100℃@ΔT=5℃時，可分別得到一次泵及二次泵的規格。迴路 2 區域泵依其管路系統阻抗 H=0.0000104*Q2，可得到區域泵規格。同樣冷卻泵亦然，依管路系統阻抗 H=2.6+0.00000026*Q2，得到冷卻泵規格。

5.再依其冰機全載 100%@ΔT=5℃下之附屬設備(冰水泵、區域泵、冷卻泵)導入歐盟 C40 最低能效標準之泵浦搭配 IE3 馬達置入系統。

6.此計算法主要是將冰水主機及附屬設備經過量測後，將其各耗能指標計算出，並把 Ashrae90.1 的標準上限值列出作對比並尋找改善對策。

7.參考陳輝俊博士所製作的性能指標顯示該系統落於不良區間，急需改善，採用 IPLV(integrated part load value)計算，系統熱負載能效由 0.974kW/RT(馬達負載 100%@5℃)降為 0.707kW/RT。

六、參考文獻

1.泵浦與能源效率 - 台灣 ESCO 會訊 (第 16 期) – 黃建民 博士(國立勤益科大冷凍空調與能源系)

2.泵浦系統整合及能效診斷 (2018.06.07) – 簡煥然 講師(工研院機械與機電系統研究所 顧問)

3.泵浦現場量測設備說明與案例 (2016.04.14) – 沈宗福 講師(作者: 工研院機械與機電系統研究所 沈宗福、簡煥然、吳江龍、盧江溪)

4.空調系統節能技術(2014.06.18) – 陳輝俊 博士(中華民國能源技術服務商業同業公會創會理事長)

註. IPLV 計算公式建議標示出處：法源：CNS 12575_B4072_7.5 節

七、附件

1.量測儀器校正報告

(1)三相電力分析儀、廠牌 HIOKI、型號 3169-20/21、校正日期 110.04.12

(2)時間差超音波流量計、廠牌 Fuji、型號 FSCS10A4-00Y、校正日期 110.04.09

(3) Fuji 壓力傳送器壓力錶、廠牌 Fuji、型號 FCX-AIII 數位式(FKGT03VS)、校正日期

110.04.27

(4)溫度計、廠牌 DT、型號 DTG-K、校正日期 110.04.27

CLC科技檢校中心
CLC Technology Calibration & Testing Center
校正報告
Calibration Report

照倒有限公司
CHAO-LI CO., LTD.
高雄市仁武區京吉七路 55 號
No.55, Jingji 7th Rd., Renwu Dist., Kaohsiung City
TEL:(07)375-7188 FAX:(07)375-3975
Service No.： CLA1100407-R
Page ： 1 of 2
Report No.： CLE0903-110

申請單位 Applicant	殷聖工程有限公司
廠商地址 Address	屏東市大洲里經建路6號
儀器名稱 Equipment	電力分析儀
製造廠商 Manufacturer	HIOKI
校正程序 Procedure used	CL-SCP-E01~E05,E13
型號/規格 Model/Specification	3169-20
校正日期 Calibration Date	2021.04.12 ～ 2021.04.12
儀器序號 Serial No.	120900987
校正環境 Environment Condition	(21 to 25) ℃ (40 to 60) %R.H.
校正地點 Calibration Address	□送校 □遊校地點：

校正時使用之標準器 (CLC Standards Employed)

儀器名稱 Equipment	製造廠商 Manufacturer	型號 / 序號 Model / Serial No.
Digital Multimeter	Agilent	3458A ／ MY45045712
Digital Multimeter	Agilent	3458A ／ MY45045712
CALIBRATOR	FLUKE	5500A／9375028

追溯機構 Traceability	報告號碼 Report No.	標準器校正日期 / 有效日期 Calibration Date / Due Date
NML(TAF N0688)	E200113A	2020.04.27／2022.04.26
NML	E180331A	2018.06.22／2021.06.21
CLC(TAF 0458)	CLC0483-109	2020.05.22／2021.05.21

照倒有限公司特此證明本受校儀器已與上列標準儀器比較校正，並校正用之標準器可追溯至中華民國國家度量衡標準實驗室或其他國家之國家度量衡標準。本校正系統之運作均符合 ISO/IEC 17025：2017 之要求。
CHAO-LI CO., LTD. Hereby certifies that equipment noted herein has been compared with the above listed standards. The standards used to perform this calibration are traceable to NML/ROC or NIST/USA and other countries. The calibration system are in compliance with ISO/IEC 17025：2017.
本校正報告僅供客戶正確使用儀器之校正用途參考。本校正報告若有複製無效。
The calibration report is valid only in the form calibrated. Reproduced calibration report in partial is not effective.

報告簽署者：連綿
(Report Signatory)

弓銓企業股份有限公司
流量實驗室

試驗報告

Testing Laboratory
1265

報告日期： 110 年 4 月 9 日
報告編號：EMS110-LAB-T-091

試驗件名稱：超音波流量計
廠牌型號：Fuji/FSCS10A4-00Y
試驗件序號：N9J0114T
委託單位：殷聖工程有限公司
地　　址：屏東市經建路 6 號
電　　話：08-7523006

弓銓企業股份有限公司 流量實驗室 測試專用

吳文陽
報告簽署人

上項試驗物品經本實驗室試驗，結果如內文。
本報告含附頁共 5 頁，分離使用無效。

QR-LAB019/E1.4

第 1 頁，共 5 頁

量測科技股份有限公司
Measurement Technology Co., Ltd.
CALIBRATION REPORT
儀器校正報告書

NO. K10-04-122-01
Issue Date 發佈日期 2021/4/27
Page 1 of 2

Applicant 申請者	殷聖工程有限公司				
Address 地址	屏東縣屏東市經建路６號				
Manufacturer 製造廠商	Fuji	Model No. 型號	FKGT03V5-1RCYY-GY	Serial No. 序號	AJM2652F
Description 儀器名稱	壓力錶/真空計(壓力傳送器)			Received Date 收件日期	2021/4/12
Procedure used 校正程序	詳見內頁說明	Calibration Date 校正日期	2021/4/27		
Condition of calibration 校正時之環境條件		Temp 溫度	22 ℃ ~ 24 ℃	R.H. 相對濕度	47 % ~ 58 %

Standards Employed 校正時使用之標準器

Equipment 儀器名稱	Manufacturer 製造廠商	Model 型號	Serial Number 序號
PRESSURE CALIBRATOR	DHI	PPC2+_D-A0500/A0050	190
PRESSURE CALIBRATOR	DHI	PPC3	1079

Traceability 追溯機構	Report No. 報告號碼	Calibration Date 校正日期	Due Date 有效日期
NML(TAF N0882)	P200181A	2020/12/15	2021/12/14
NML(TAF N0882)	P200143A.P200145A.20A04A049	2020/10/28	2021/10/27

MTC in hereby certifies that the equipment noted herein has been compared with the above listed standards. The standards used to perform this calibration are traceable to the National Measurement Laboratory (NML) of ROC or National Time and Frequency Standard Laboratory(NTFSL) of ROC. The MTC laboratories are in compliance with ISO/IEC 17025.
量測科技股份有限公司特此證明本受校儀器已與上列標準實驗比較校正，上述之標準器均可追溯至中華民國國家度量衡標準實驗室或國家時間與頻率標準實驗室。本公司所屬實驗室之運作與管理均符合 ISO/IEC 17025 之要求。

北區服務部 報告專用章

Approved Signatory 報告簽署人

Lab. Head 實驗室主管

108.10.08 版　MT-LM-P00-16

量測科技股份有限公司
Measurement Technology Co., Ltd.
CALIBRATION REPORT
儀器校正報告書

NO. K10-04-257-03
Issue Date 發佈日期 2021/4/27
Page 1 of 2

Applicant 申請者	殷聖工程有限公司				
Address 地址	屏東縣屏東市經建路６號				
Manufacturer 製造廠商	ATLANTIS	Model No. 型號	-----	Serial No. 序號	K100425703
Description 儀器名稱	白金電阻溫度計			Received Date 收件日期	2021/4/19
Procedure used 校正程序	詳見內頁說明	Calibration Date 校正日期	2021/4/27		
Condition of calibration 校正時之環境條件		Temp 溫度	21 ℃ ~ 23 ℃	R.H. 相對濕度	56 % ~ 59 %

Standards Employed 校正時使用之標準器

Equipment 儀器名稱	Manufacturer 製造廠商	Model 型號	Serial Number 序號
PLATINUM RESISTANCE THERMOMETER	HART	5628-20-S	2035
PRT THERMOMETER STD. MODULE	FLUKE	1560/2560	B27466/B27360

Traceability 追溯機構	Report No. 報告號碼	Calibration Date 校正日期	Due Date 有效日期
TRANSCAT	15-FF8Q5-40-1	2019/12/27	2021/12/26
MTC(TAF 1733)	K07-04-074-02,03	2018/9/3	2021/9/2

MTC in hereby certifies that the equipment noted herein has been compared with the above listed standards. The standards used to perform this calibration are traceable to the National Measurement Laboratory (NML) of ROC or National Time and Frequency Standard Laboratory(NTFSL) of ROC. The MTC laboratories are in compliance with ISO/IEC 17025.
量測科技股份有限公司特此證明本受校儀器已與上列標準實驗比較校正，上述之標準器均可追溯至中華民國國家度量衡標準實驗室或國家時間與頻率標準實驗室。本公司所屬實驗室之運作與管理均符合 ISO/IEC 17025 之要求。

南區服務部 報告專用章

Approved Signatory 報告簽署人

Lab. Head 實驗室主管

108.10.08 版　MT-LM-P00-16

低溫高效能選擇性還原脫硝觸媒之合成改質與應用特性研究

林奇鋒*、林怡珍**、陳志成***

摘　要

有鑑於國人對於生活環境與空氣品質的要求提高，以及各項污染控制技術的不斷提升，我國固定污染源空氣污染物排放標準將逐步加嚴修訂，其中尤以氮氧化物最具有大幅減量空間與降低排放標準之需求，因此氮氧化物之控制技術更顯重要。選擇性觸媒還原系統(SCR)為效果最好且最具可行之氮氧化物控制技術，但實際應用上仍面臨 SCR 觸媒低溫反應效果不佳與容易毒化失活等問題，極需開發低溫高效能與耐用性高之 SCR 觸媒。

本研究目的為利用自製沸石載體合成低溫高效能 SCR 觸媒，探討不同觸媒製備條件之影響，以及 SCR 觸媒之改質效果與特性分析，並於不同模擬廢氣組成條件下進行 SCR 觸媒之低溫反應效果與耐毒性測試。實驗結果發現，自製沸石載體搭載 30%活性金屬錳所合成 SCR 觸媒之低溫反應效果最佳，再以鈰金屬進行改質後，可於低溫反應條件(150°C)下達到 95%脫硝效率。進一步以不同模擬廢氣組成進行此 Mn-Ce/zeolite 觸媒之低溫反應效果與耐毒性測試，發現此 SCR 觸媒於反應進氣中含有 O_2、SO_2、H_2O 條件下亦能維持良好低溫脫硝效果(>95%)，且長時間耐久性測試結果亦相當良好。由觸媒特性分析結果發現，活性金屬 Mn 主要以 MnO_2 與 Mn_3O_4 兩種氧化物形態存在，改質金屬 Ce 主要以 CeO_2 氧化物形態存在，改質金屬可提升觸媒表面 Lewis 酸性位點與活性氧，使其達到良好低溫脫硝效果與抗毒性。綜合實驗結果與觸媒特性分析可知，此自行製備合成之低溫脫硝觸媒優於一般市售 V-W/TiO_2 觸媒，具有更加良好之低溫催化反應效果，對於燃燒廢氣中 O_2、SO_2、H_2O 等氣體之耐受性佳，具有實際應用發展潛力，可協助解決實廠應用 SCR 控制系統所面臨之問題與困難。

【關鍵詞】氮氧化物、低溫脫硝、選擇性觸媒還原系統、合成改質、抗毒性

---

*逢甲大學環境工程與科學系　碩士

**逢甲大學環境工程與科學系　專任助理

***逢甲大學環境工程與科學系　教授

一、前言

由於近年空氣污染議題受到許多關注，固定污染源空氣污染物排放標準將加嚴修訂，其中尤以氮氧化物(NOx)之排放減量幅度最大也最迫切。由於傳統空污控制設備已無法滿足即將實施之最新 NOx 排放標準，增設選擇性觸媒還原系統(Selective catalytic reduction, SCR)應為目前效果最好且最具可行之控制技術，在特定反應溫度條件下(約 300-400°C)具有 80%以上的催化還原脫硝效果。目前一般市售 SCR 觸媒主要以釩鎢鈦成分為主，具有高催化反應活性之優點，然而釩鎢鈦觸媒實廠應用上亦有反應溫度限制與毒化失活問題，以及釩金屬本身具有毒性，於更換廢棄觸媒可能有二次污染之虞。

近年來許多研究以沸石(ZSM-5、SAPO-34、SSZ-13 等)作為載體進行 SCR 觸媒之製備，並以不同過渡金屬(Mn、Cu、Fe、Ce、Co 等)作為活性金屬，研究發現過渡金屬沸石觸媒相較於釩鎢鈦觸媒展現出較寬廣之反應溫度範圍，但過渡金屬沸石觸媒仍有 H_2O 及 SO_2 耐受性不佳的問題，在反應溫度較低的情況下，當煙道氣體存在 H_2O 及 SO_2 時，H_2O 將造成沸石觸媒脫鋁而破壞沸石結構，SO_2 則對觸媒造成毒化，皆可導致 SCR 觸媒之催化活性降低。許多研究以鈰作為改質金屬，添加鈰金屬可抑制觸媒表面硫酸化而形成硫酸錳、$(NH_4)_2SO_4$ 和 NH_4HSO_4，亦可增加活性金屬之活性酸位點，防止 Lewis 酸位點毒化，提高觸媒於 SCR 反應系統中對於毒化因子之耐受性[5][6]。因此過渡金屬沸石觸媒之製備、改質、耐毒性測試有助於開發低溫高效能 SCR 觸媒，更符合實際應用需求。

二、研究目的與架構

本研究目的為開發反應溫度低(<200°C)且脫硝效率高之 SCR 觸媒，將實驗室過去研究所合成沸石進一步應用製成觸媒載體，探討不同製備條件與改質方法之效果，期能改善傳統釩鎢鈦觸媒之應用問題，降低 SCR 觸媒最佳反應溫度與增加觸媒耐毒性，有效提升燃燒廢氣之 NOx 控制效果，符合實廠應用需求。本研究之主要目的與內容如下：

1. 探討不同製備條件(活性金屬、金屬含量、載體種類)之影響，建立低溫 SCR 觸媒之最佳製備條件。
2. 探討 SCR 觸媒之最佳改質方法與條件。
3. 探討低溫 SCR 觸媒之催化還原脫硝效率及最佳操作條件。
4. 模擬實廠廢氣，探討 SCR 觸媒於不同進氣組成條件下之脫硝效能與耐受

性及耐久性。

本研究主要流程與架構可分為低溫 SCR 觸媒之最佳製備與改質條件探討、低溫 SCR 觸媒之低溫脫硝效能與耐受性測試，針對影響 SCR 觸媒催化反應效果之主要製備條件，應用田口式直交表法以不同活性金屬、金屬擔持量以及不同載體作為控制因子進行實驗試程設計，探討不同活性金屬與擔持量以及不同載體對於 SCR 觸媒活性之影響；其次，參考文獻中之改質金屬資料及實驗室過去研究成果，以鈰金屬進行觸媒改質，探討不同鈰金屬含量對於 SCR 觸媒改質效果之影響；最後，將改質後之 SCR 觸媒於不同進氣條件中進行 SCR 反應活性測試，包括不同濃度 O_2、SO_2、H_2O、NH_3/NO 劑量比、不同空間速度、以及長時間反應之觸媒耐久性測試，探討自製合成改質 SCR 觸媒於不同進氣條件之脫硝反應效果，以及分析反應前後之觸媒特性變化情形，可作為未來實廠應用之參考。

三、研究方法及設備

1. SCR 觸媒製備與改質

本研究利用實驗室過去所自行合成之高性能沸石(回收廢太陽能板並以鹼熔水熱技術所合成)為原料進行造粒作為觸媒載體，使用硝酸銨以離子交換法對沸石載體進行改質以提高沸石之酸性位點(Zeolite-S)，將不同載體(TiO_2、Zeolite-C，Zeolite-S)以初濕含浸法方式進行 SCR 觸媒製備，以不同活性金屬(Mn、Cu、V)與擔持量(10 wt%、20 wt%、30 wt%)作為 SCR 觸媒製備條件，並以金屬鈰作為改質金屬，不同改質金屬(Ce)擔持量與活性金屬含量之莫耳數比為 0.05、0.2。首先配製所需活性金屬濃度與改質金屬濃度之金屬溶液，將適量沸石投入其中並置於恆溫震盪水浴，以操作條件(80°C、轉速 60 rpm)進行含浸 4 小時，再將觸媒取出置於烘箱以 105°C 烘乾 24 小時，最後再以 400°C 進行煅燒 4 小時，即完成自製改質 SCR 觸媒之製備，SCR 觸媒製備過程如圖 1 所示。

圖 1　SCR 觸媒製備過程

2. SCR 觸媒之脫硝催化活性測試

將上述所製備不同活性金屬與載體組合之各種 SCR 觸媒，分別置入實驗室規模之觸媒反應系統進行脫硝催化活性測試，如圖 2 與圖 3 所示，觸媒反應器可透過程序控溫系統將反應溫度控制於設計溫度。進流氣體主要由 NO(1,000ppm)、NH_3(1200ppm)、N_2、O_2(6%、9%、12%)、SO_2(200ppm)、H_2O(10%)所組成，NO、NH_3、N_2、O_2、SO_2 來自氣體鋼瓶，所有氣體透過質量流量控制器控制其流量以配製所需之氣體濃度，H_2O 則利用水氣產生裝置及水氣偵測器，調整控制不同水氣含量通入反應氣體中進行脫硝反應測試，後續藉由 FES/TEM、XRD、TPD-NH_3 等儀器設備分析 SCR 觸媒之表面特性與物化成分特性，探討含氧量、SO_2 與 H_2O 對於 SCR 觸媒脫硝效能與特性之影響。

圖 2　觸媒填充示意圖

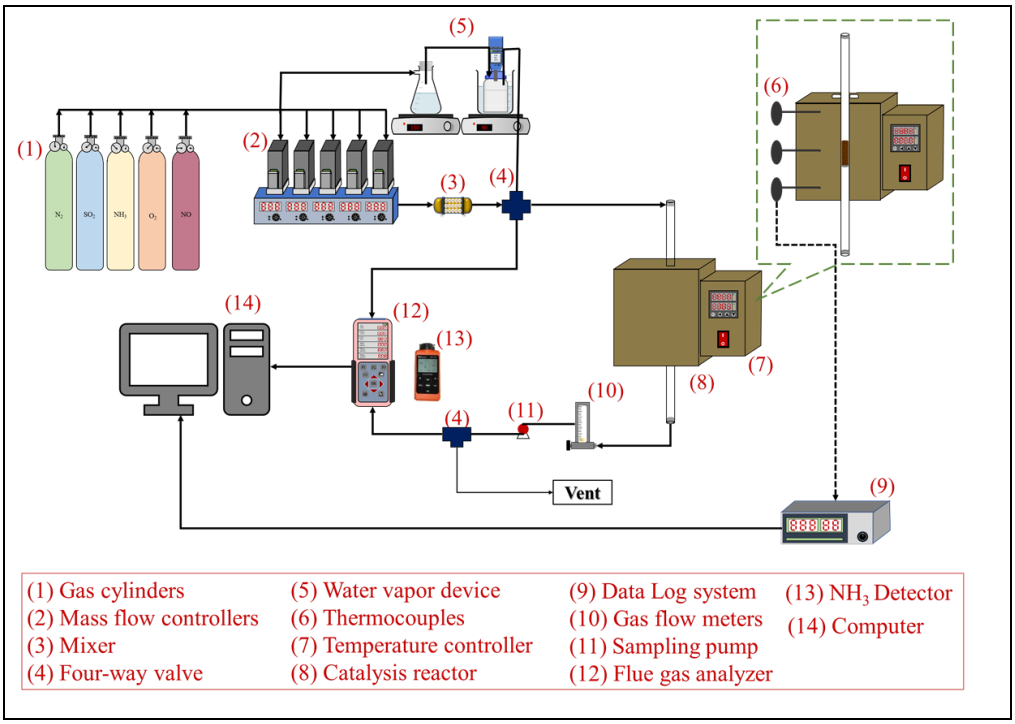


圖 3　SCR 觸媒催化活性測試設備示意圖

四、結果與討論

(一)不同活性金屬與載體之 SCR 觸媒脫硝效能比較

為了探討本實驗室自行合成沸石製備 SCR 觸媒之最佳條件，本階段將，以不同載體(TiO_2、Zeolite-C、Zeolite-C)、活性金屬(Mn、Cu、V)及其含量(10 wt%、20 wt%、30 wt%)所製備 SCR 觸媒進行脫硝反應活性測試，其製備條件與脫硝效果如表 1 所示。結果發現以 TiO_2 作為載體時，活性金屬 Mn、Cu、V 皆能在 200˚C~300˚C 達到 95%之脫硝效果，但若以自行合成沸石 Zeolite-S 作為載體時，錳金屬在低溫(150˚C)表現出最佳催化活性，脫硝效果可達 86%。銅金屬在低溫(150˚C)下之脫硝效果較差，但高溫(250~300˚C)下之脫硝效果可達 80%。當以商用沸石(Zeolite-C)作為 SCR 觸媒載體時，其實驗結果與 Zeolite-S 相似，錳金屬在低溫(150˚C~250˚C)下之脫硝效果均能達到 80%以上，而銅金屬在中高溫下(200˚C~300˚C)具有良好脫硝活性，其脫硝效果均能達到 90%以上。使用商用沸石或自製合成沸石當作載體時，釩金屬幾乎不具有脫硝活性，V/Zeolite-S 觸媒於低溫或中高溫下之催化效率皆不理想，主要原因為釩觸媒之脫硝活性受到釩金屬氧化還原態不同而有巨大差異，影響釩金屬氧化還原態之因素包含觸媒載體之酸鹼特性以及釩金屬製備溶液之濃度與酸鹼度，因此當以沸石作為載體時，可先進行脫鋁反應使沸石表面產生 OH 基團，並在酸性環境下使釩金屬與 OH 基團結合以獲得具有較高脫硝活性之 SCR 觸媒。

表 1　不同觸媒載體、活性金屬與含量之沸石觸媒脫硝效能比較

載體	活性金屬	活性金屬含量 (wt%)	NOx 去除率(%)			
			150°C	200°C	250°C	300°C
TiO_2	Cu	10	92.1	96.9	96.9	96.4
	Mn	20	56.9	95.4	97.9	94.9
	V	30	82.6	96.8	97.4	97.9
Zeolite-C	Mn	10	85.5	84.2	80.5	39.8
	V	20	0	0	7.1	15.0
	Cu	30	63.7	94.7	97.9	94.2
Zeolite-S	V	10	1.1	5.4	5.4	14.2
	Cu	20	16.8	30.1	75.3	80.0
	Mn	30	86.2	95.7	96.7	78.3

(二)鈰金屬改質 SCR 觸媒之效果

SCR 觸媒於實廠運用上常面臨許多不利脫硝反應之因素，例如反應溫

度降低、SO_2等酸性氣體造成觸媒毒化、以及鹼金屬佔據觸媒表面酸性位點等，因此許多學者嘗試應用不同金屬對 SCR 觸媒進行改質，利用改質金屬幫助活性金屬於氧化還原反應後，氧化為反應前之離子價數形態，改質金屬本身活性也可以提高氧化還原之反應速率，增加低溫條件下脫硝之催化反應效率，更可利用改質金屬可與毒性物質產生反應之特性，避免活性金屬毒化，提高觸媒抗毒化能力，以因應實廠煙道廢氣較為嚴苛之反應環境與條件[9][10][11]。

本研究根據上述各試程低溫催化之實驗結果，選擇活性金屬 Mn(20 wt%、30 wt%)、Cu(30 wt%)搭配載體 Zeolite-S 之 SCR 觸媒進行改質試驗，以鈰作為改質金屬，並以不同改質金屬與活性金屬之莫耳數比(Ce：Mn 莫耳數比=0.05、0.2)決定改質金屬含量，改質後之 SCR 觸媒催化活性測試結果如表 2 所示，可發現 20%Mn/Zeolite-S 與 30%Mn/Zeolite-S 觸媒經過鈰金屬改質後，在反應溫度 150°C~250°C 時表現出良好之脫硝效果，30%$MnCe_{0.05}$/Zeolite-S 觸媒之脫硝效果甚至能達到 95%以上，主要歸因於氧化錳與氧化鈰之間的協同作用，使觸媒表面具有更多活性氧，表面活性氧可以幫助吸附 NO(g)並氧化形成-O-N-O(a)，在 L-H 機制下，吸附 NH_4^+(a)與-O-N-O(a)反應形成 NH_4NO_2(a)，最終還原成 N_2、H_2O 達到脫硝效果[12][13]。

表 2　不同鈰金屬含量改質 SCR 觸媒之脫硝效果

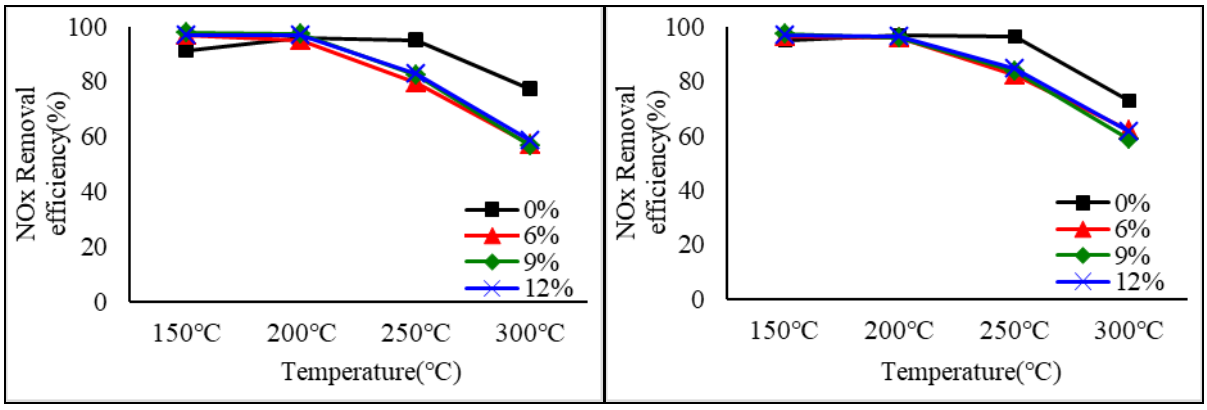
活性金屬	鈰金屬含量 (Ce/Mn mole ratio)	NOx 去除效率(%)			
		150°C	200°C	250°C	300°C
20%Mn	0.05	86.5	95.7	96.8	76.7
	0.2	91.4	95.7	95.1	77.3
30%Mn	0.05	95.1	96.7	96.2	72.8
	0.2	96	96.8	96.8	78.3
30%Cu	0.05	5.6	30.9	90.6	94.5
	0.2	44.3	82.9	95.2	96.3

(三)不同進氣組成之 SCR 觸媒催化還原效果

由於實廠煙道廢氣組成複雜，常含有 PM、SOx、O_2、H_2O、鹼金屬等物質導致 SCR 觸媒脫硝效果降低，甚至觸媒毒化失活，因此本階段模擬不同煙道廢氣組成條件下，將改質後脫硝效果最佳之兩組 SCR 觸媒(20 %$MnCe_{0.2}$/Zeolite-S、30 %$MnCe_{0.05}$/Zeolite-S)進行不同進氣組成之催化活性與耐受性測試，分為以下三部分進行實驗測試：(1)改質 SCR 觸媒在不同 O_2

濃度下之 deNOx 效果；(2)改質觸媒在 O_2、SO_2 同時存在條件下之 deNOx 效果；(3)改質觸媒在 O_2、SO_2、H_2O 同時存在條件下之 deNOx 效果。

為模擬燃煤電廠或焚化廠等實廠煙道氣體中之廢氣 O_2 濃度，將前述 SCR 觸媒活性測試之實驗模擬進氣(NO=1,000 ppm、NH_3=1,200 ppm、GHSV=5,000h^{-1})加入不同濃度氧氣(6%、9%、12%)，探討改質後 SCR 觸媒於不同 O_2 濃度條件下之 deNOx 效果。本研究改質後效果最佳之兩組 SCR 觸媒於不同 O_2 濃度下之活性測試結果如圖 4 所示，結果顯示在 O_2 濃度過高或較高反應溫度的情況下，可能造成 NH_3 氧化形成 NO 而導致脫硝效果降低，但適當 O_2 濃度可幫助 NO 脫硝反應以標準 SCR 反應機制(standard SCR reaction mechanism)方式進行，有利於提升脫硝效率，當 O_2 濃度過低時，脫硝反應則以慢 SCR 反應機制為主(slow SCR reaction mechanism)，反應速率較低。在有氧氣存在情況下，低溫反應條件(150 °C、200 °C)之兩組改質 SCR 觸媒脫硝效果皆比無氧氣存在時更佳，但是在反應溫度較高(250°C、300°C)情況下，脫硝效果反而下降。文獻指出，O_2 可以幫助 NO 氧化為 NO_2，再轉化形成 NO_2^-亞硝酸鹽形態，當 NH_3 吸附於觸媒表面形成 NH_4^+OH 時，可再與 NO_2^-亞硝酸鹽反應生成 NH_4NO_2，而 NH_4NO_2 可與 NO 反應產生 N_2 及 H_2O 達到脫硝效果。



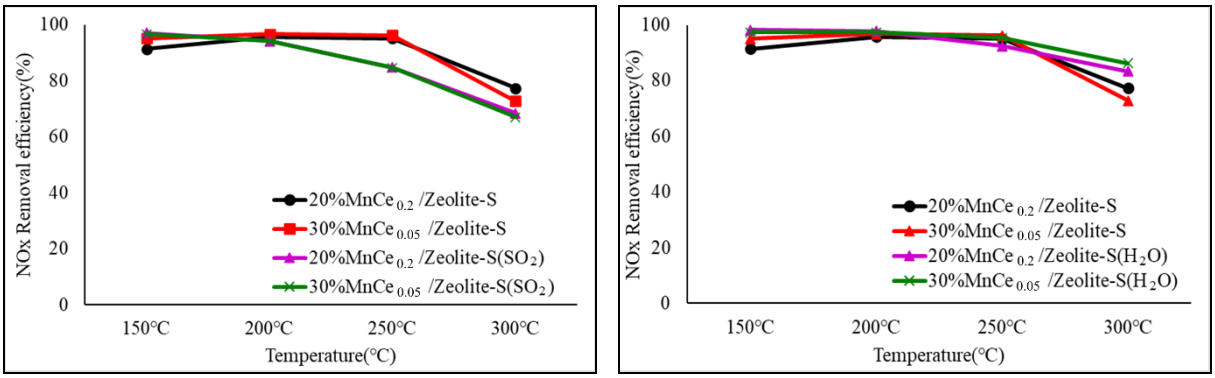
(a) (b)

圖 4 低溫高效能 SCR 觸於不同 O_2 濃度下之 deNOx 效果
(a) 20%MnCe0.2/Zeolite-S, (b)30 %MnCe0.05/Zeolite-S

許多工廠之熱處理或鍋爐、燃燒製程煙道廢氣中，常含有許多 SO_2 等酸性氣體，經過脫硫設備處理後仍存在少量 SO_2(大約 20~30ppm)。由於 SO_2 易與 NH_3、O_2 反應形成硫酸銨鹽，該硫酸鹽類易沉積於觸媒表面並造成堵塞，且在低溫下以化學作用吸附於觸媒之 SO_2 並無法有效脫附，最終造成

觸媒硫酸化並失去活性，故本研究將改質後 SCR 觸媒於前述實驗條件中(NO=1,000 ppm、NH_3=1200 ppm、GHSV=5,000 h^{-1}、O_2=12%)再加入較高濃度之 SO_2 氣體(200ppm)，進行 SCR 觸媒對於 SO_2 之耐受性測試，在不同反應溫度下之 SCR 觸媒催化效果如圖 5(b)所示，可發現此 SCR 觸媒在低溫反應條件下脫硝效果並未受到 SO_2 酸性氣體之影響而顯著降低，表示此低溫高效能 SCR 觸媒具有良好之抗酸性與抗毒化性。

由於許多實廠燃燒製程煙道氣體中常含有大量水氣，水氣亦是造成觸媒失活之主要因素，若酸性氣體 SO_2 同時存在時，觸媒失活毒化情形常更加顯著嚴重，因此本研究將前述實驗條件進氣中(NO=1,000ppm、NH_3=1,200ppm、GHSV=5,000h^{-1}、O_2=12%、SO_2=200ppm)再加入 10%H_2O(g)，以模擬實廠之煙道廢氣組成與條件，觀察水氣含量對改質 SCR 觸媒催化效率之影響。實驗結果如圖 5(a)所示，可觀察發現添加水氣至模擬進氣條件中，改質 SCR 觸媒於低溫(150°C、200°C)反應條件下之脫硝效果亦無明顯變化，水氣對於改質 SCR 觸媒催化效果並無顯著降低之影響，而在高溫(250°C、300°C)反應條件下，進氣中含有水氣之 SCR 觸媒脫硝效果反而較好，其原因可能為吸附於 SCR 觸媒之水氣在高溫反應條件下(250°C、300°C)發生去羥基化形成質子 H^+，促進 SCR 觸媒產生更多 Brønsted 酸性位點，使得 SCR 觸媒表面更容易吸附 NH_3(g)形成質子化 NH_4^+(a)，而 NH_4^+(a)與吸附於觸媒表面之-O-N-O(a)反應形成 NH_4NO_2(a)，最終還原為 N_2 與 H_2O 達到脫硝效果[18]。



(a) (b)

圖 5 低溫高效能 SCR 觸媒(20%$Ce_{0.2}$/Zeolite-S, 30%$MnCe_{0.05}$/Zeolite-S)於(a)12%O_2與 200ppmSO_2, (b)12%O_2、200ppmSO_2、10%H_2O 條件下之脫硝效果

目前實廠 SCR 觸媒之一般使用壽命大約為 2-3 年，觸媒之耐毒性與使

用壽命越佳，可降低 SCR 反應系統之操作成本，因此 SCR 觸媒之耐久性也是實廠選擇與操作 SCR 反應系統之關鍵因素，本研究將 20%$Ce_{0.2}$/Zeolite-S 與 30%$MnCe_{0.05}$/Zeolite-S 觸媒於反應溫度 150°C 以及進氣組成為 NO=1,000 ppm、NH_3=1,000 ppm、O_2=12%、SO_2=200 ppm、H_2O=10 %條件下進行 8 小時之耐久性測試，並探討不同空間速度(GHSV=5,000 h^{-1}、GHSV=1,0000h^{-1})對於觸媒脫硝效果之影響，其結果如圖 6 所示，在 8 小時耐久性測試下，20%$Ce_{0.2}$/Zeolite-S 與 30%$MnCe_{0.05}$/Zeolite-S 之脫硝效果並無下降趨勢，顯示自製改質觸媒 20%$Ce_{0.2}$/Zeolite-S 與 30%$MnCe_{0.05}$/Zeolite-S 皆具備良好耐受性與耐久性；而不同空間速度(GHSV=5,000 h^{-1}、10,000 h^{-1})對於觸媒之脫硝效果亦無顯著影響。

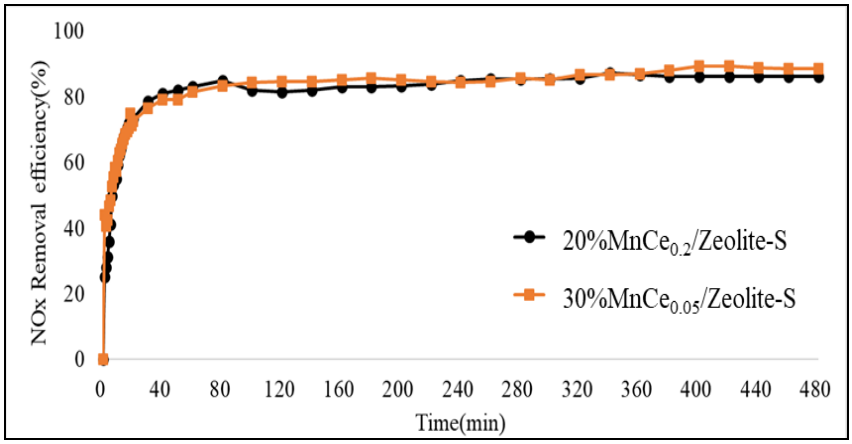


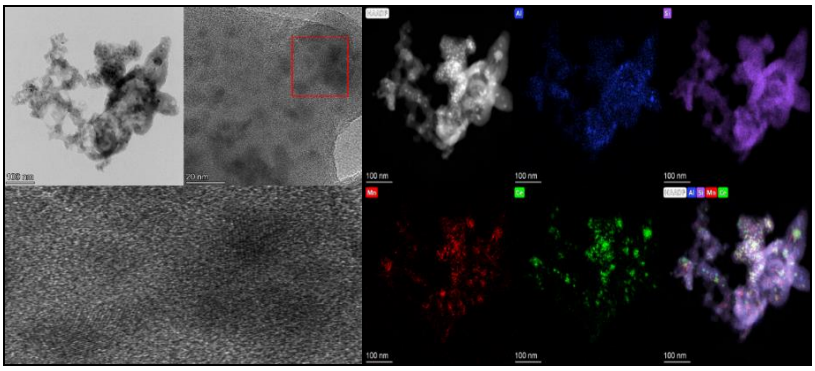
圖 6　低溫高效能 SCR 觸媒(20%$Ce_{0.2}$/Zeolite-S, 30%$MnCe_{0.05}$/Zeolite-S)之長時間耐久性測試結果

(三)低溫高效能 SCR 觸媒特性分析

為瞭解低溫高效能 SCR 觸媒經 deNOx 反應後，觸媒特性是否產生變化，並進一步掌握其催化特性，故將經過不同進氣條件實驗後之觸媒進行各項觸媒特性分析，包含場發射掃描/穿透式電子顯微鏡(FE-TEM/EDS)、高解析 X 光繞射分析儀(XRD)、NH_3-TPD，分析結果分別說明討論如下。

利用 FES/TEM 對自製改質 SCR 觸媒(30%$MnCe_{0.05}$/Zeolite-S)進行觸媒表面與結構特性分析，其結果如圖 7(a)所示，於紅色框線內可明顯地觀察到具有規則排列之結構，其為氧化錳與氧化鈰之晶體結構。應用高角度暗場像(STEM-HAADF)與 X 光能量散射光譜儀(EDS)之元素組成映像(Mapping)進行分析，結果如圖 7(b)所示。於 STEM-HAADF 分析結果中，當元素原子序

越大所呈現之影像亮度越高，SCR 觸媒上主要元素之原子序分別為 Si(14)、Al(13)、Mn(25)、Ce(58)，HAADF 圖中可以看出觸媒活性金屬與改質金屬於觸媒載體上之分布位置，並搭配 EDS Mapping 結果，可以發現活性金屬 Mn 與改質金屬 Ce 均勻散佈於觸媒上，有利益於 SCR 觸媒達到良好 deNOx 效果。



(a) (b)

圖 7　低溫高效能 SCR 觸媒(30%MnCe0.05/Zeolite-S)之 FES/TEM、STEM-HAADF 與 EDS Mapping 分析結果
(a)FES/TEM, (b)STEM-HAADF、EDS Mapping

低溫高效能 SCR 觸媒(30%$MnCe_{0.05}$/Zeolite-S)之 XRD 分析鑑定結果如圖 8 所示，於不同進氣組成反應後，SCR 觸媒之沸石結構(ZSM-23)並未受到 SO_2 與 H_2O 破壞，仍維持良好之沸石晶體結構。30%$MnCe_{0.05}$/Zeolite-S 觸媒之特徵峰主要以 MnO_2 與 Mn_3O_4 兩種氧化物形態存在，而改質金屬 Ce 之晶相特徵峰顯示主要以四價鈰 Ce^{4+}之 CeO_2 氧化物形態存在，高價數活性金屬及改質金屬具備高含量活性氧，有利於 SCR 觸媒之脫硝反應，Ce 於觸媒表面可吸附 SO_2 生成 $Ce(SO_4)_2$ 與 $Ce_2(SO_4)_3$，可減少活性金屬 Mn 與 SO_2 形成無氧化還原活性之 $MnSO_4$。

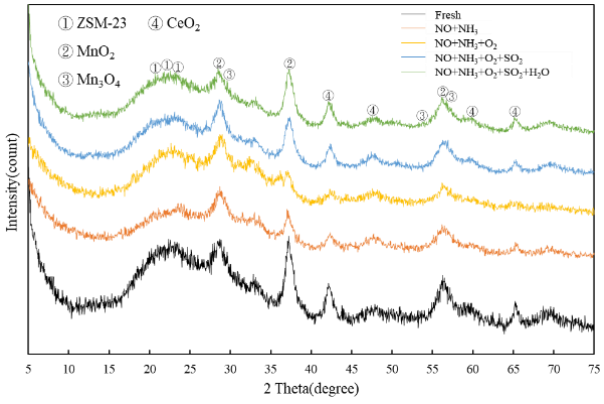


圖 8　低溫高效能 SCR 觸媒(30%$MnCe_{0.05}$/Zeolite-S)於不同進氣組成反應後之 XRD 繞射圖譜與物種鑑定結果

應用熱程式脫附分析儀及還原分析儀(TPD-NH_3)分析觸媒之活性酸基，Zeolite-S 觸媒載體、含浸活性金屬與改質金屬製備成觸媒、以及經過催化實驗過後 SCR 觸媒之 TPD-NH_3 分析結果如圖 9 所示，Zeolite-S 載體擔持活性金屬 30%Mn 製備成 30%Mn/Zeolite-S 觸媒之 NH_3 脫附主要發生在 380-550℃之間，可說明活性金屬 Mn 為 Zeolite-S 提供大量的 Lewis 酸性位點，利用鈰金屬改質觸媒 30%Mn/Zeolite-S 後，30%$MnCe_{0.05}$/Zeolite-S 改質觸媒之整體酸性位點數有所上升，有利於 SCR 觸媒吸附 NH_3(g)與 NO，並透過活性金屬與改質金屬之活性氧將觸媒表面吸附氨 NH_3(a)與 NO(a)氧化形成吸附配位氨基 NH_2(a)與 NO_2(a)，表面吸附配位氨基 NH_2(a)再與氣態 NO(g)反應形成 NH_2NO(a)，而 NO_2(a)與 Brønsted 酸性位點上之 NH_4^+反應形成 NH_4NO_2(a)，最終兩者皆可分解成 N_2 與 H_2O 達到脫硝效果。當 30%$MnCe_{0.05}$/Zeolite-S 觸媒於脫硝反應過後，其 Brønsted 酸性位點與 Lewis 酸性位點含量有下降趨勢，當進氣條件中加入 SO_2 時，反應後 SCR 觸媒表面之酸性位點含量下降較多，當進氣條件中加入 H_2O 時，由於 H_2O 發生去羥基化反應，使 30%$MnCe_{0.05}$/Zeolite-S 酸性位點含量提高。

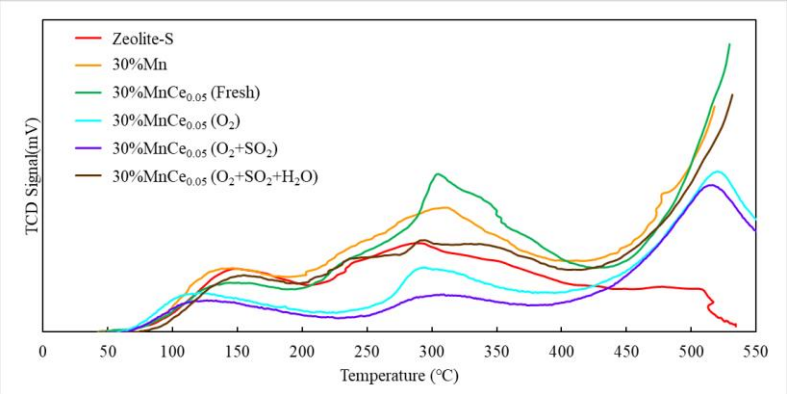


圖 9　30%$MnCe_{0.05}$/Zeolite-S 觸媒於製備、改質與脫硝反應前後之 TPD-NH_3 分析曲線

五、結論

本研究目的為開發反應溫度低(<200°C)且脫硝效率高之 SCR 觸媒，探討 SCR 觸媒成分與製備條件，以及鈰金屬改質效果，期能降低 SCR 觸媒最

佳反應溫度與增加觸媒耐毒性，有效提升 SCR 觸媒對於低溫燃燒廢氣之 NOx 控制效果，符合實廠應用需求，經由實驗結果得出以下結論：

1. 本研究成功開發低溫高效能 SCR 觸媒，其最佳製備條件為 30 wt%Mn 作為活性金屬、顆粒合成沸石經硝酸銨改質為載體，搭配鈰金屬進行改質後所合成之 30%$MnCe_{0.05}$/Zeolite-S 觸媒，在低溫反應條件下(150°C)之脫硝效率可達 95%。
2. 自製改質 SCR 觸媒 30%$MnCe_{0.05}$/Zeolite-S 之分析鑑定結果顯示，活性金屬 Mn 主要以 MnO_2 與 Mn_3O_4 兩種氧化物形態存在，改質金屬 Ce 主要以 CeO_2 氧化物形態存在，活性金屬與改質金屬可為觸媒帶來大量 Lewis 酸性位點與活性氧，使自製改質 SCR 觸媒達到良好之低溫脫硝效果。
3. 將 30%$MnCe_{0.05}$/Zeolite-S 觸媒以不同進氣組成條件進行脫硝實驗，發現廢氣中適量 O_2 濃度有助於提高 SCR 觸媒之脫硝效果，廢氣 O_2 濃度提高至 12%時，SCR 觸媒之低溫脫硝效率亦能維持良好，但高溫(250~300°C)反應下之脫硝效果則降低至 60%。
4. 30%$MnCe_{0.05}$/Zeolite-S 觸媒對於廢氣中 SO_2 與 H_2O 之抗毒性相當良好，低溫脫硝效能皆維持 95%以上，且長時間耐久測試之脫硝效率並無衰退趨勢，耐毒性與耐用性相當良好。

六、參考文獻

1. Chen, C., Cao, Y., Liu, S., Chen, J., & Jia, W. (2018). Review on the latest developments in modified vanadium-titanium-based SCR catalysts. Chinese Journal of Catalysis, 39(8), 1347-1365.
2. Yao, X., Ma, K., Zou, W., He, S., An, J., Yang, F., & Dong, L. (2017). Influence of preparation methods on the physicochemical properties and catalytic performance of MnOx-CeO_2 catalysts for NH3-SCR at low temperature. Chinese Journal of Catalysis, 38(1), 146-159.
3. Guan, B., Jiang, H., Peng, X., Wei, Y., Liu, Z., Chen, T., Lin, H., Huang, Z., & Huang, Z. (2021). Promotional effect and mechanism of the modification of Ce on the enhanced NH_3-SCR efficiency and the low temperature hydrothermal stability over Cu/SAPO-34 catalysts. Applied Catalysis A: General, 617, 118110.
4. Zhang, N., Li, L., Guo, Y., He, J., Wu, R., Song, L., Zhang, G., Zhao, J., Wang, D., & He, H. (2020). A MnO_2-based catalyst with H_2O resistance for

NH_3-SCR: Study of catalytic activity and reactants-H_2O competitive adsorption. Applied Catalysis B: Environmental, 270, 118860.

5. Liu, Q., Fu, Z., Ma, L., Niu, H., Liu, C., Li, J., & Zhang, Z. (2017). MnOx-CeO_2 supported on Cu-SSZ-13: A novel SCR catalyst in a wide temperature range. Applied Catalysis A: General, 547, 146-154.
6. Wu, Z., Jin, R., Wang, H., & Liu, Y. (2009). Effect of ceria doping on SO_2 resistance of Mn/TiO_2 for selective catalytic reduction of NO with NH_3 at low temperature. Catalysis Communications, 10(6), 935-939.
7. 劉姵吟，(2020)，廢太陽能板玻璃回收再利用合成沸石及量產測試之研究，逢甲大學環境工程研究所，碩士論文。
8. Smirniotis, P. G., Peña, D. A., & Uphade, B. S. (2001). Low-temperature selective catalytic reduction (SCR) of NO with NH3 by using Mn, Cr, and Cu oxides supported on Hombikat TiO_2. Angewandte Chemie International Edition, 40(13), 2479-2482.
9. Shen, M., Li, C., Wang, J., Xu, L., Wang, W., & Wang, J. (2015). New insight into the promotion effect of Cu doped V_2O_5/WO_3–TiO_2 for low temperature NH_3-SCR performance. Rsc Advances, 5(44), 35155-35165.
10. Shi, Y., Wang, X., Xia, Y., Sun, C., Zhao, C., Li, S., & Li, W. (2017). Promotional effect of CeO_2 on the propene poisoning resistance of HBEA zeolite catalyst for NH_3-SCR of NOx. Molecular Catalysis, 433, 265-273.
11. Han, S., Cheng, J., Ye, Q., Cheng, S., Kang, T., & Dai, H. (2019). Ce doping to Cu-SAPO-18: Enhanced catalytic performance for the NH_3-SCR of NO in simulated diesel exhaust. Microporous and Mesoporous Materials, 276, 133-146.
12. Machida, M., Uto, M., Kurogi, D., & Kijima, T. (2000). MnOx−CeO_2 Binary Oxides for Catalytic NOx Sorption at Low Temperatures. Sorptive Removal of NOx. Chemistry of Materials, 12(10), 3158-3164.
13. Qi, G., & Li, W. (2015). NO oxidation to NO_2 over manganese-cerium mixed oxides. Catalysis Today, 258, 205-213.
14. Pu, Y., Xie, X., Jiang, W., Yang, L., Jiang, X., & Yao, L. (2020). Low-temperature selective catalytic reduction of NOx with NH_3 over zeolite catalysts: A review. Chinese Chemical Letters, 2549-2555.
15. Mohan, S., Dinesha, P., & Kumar, S. (2020). NOx reduction behaviour in

copper zeolite catalysts for ammonia SCR systems: A review. Chemical Engineering Journal, 384, 123253.

16. Yu, T., Xu, M., Huang, Y., Wang, J., Wang, J., Lv, L., Qi, G., Li, W., & Shen, M. (2017). Insight of platinum poisoning Cu/SAPO-34 during NH_3-SCR and its promotion on catalysts regeneration after hydrothermal treatment. Applied Catalysis B: Environmental, 204, 525-536.
17. France, L. J., Yang, Q., Li, W., Chen, Z., Guang, J., Guo, D., Wang, L., & Li, X. (2017). Ceria modified FeMnOx—Enhanced performance and sulphur resistance for low-temperature SCR of NOx. Applied Catalysis B: Environmental, 206, 203-215.
18. Ma, Y., Wu, X., Liu, L., Cao, L., Ran, R., Si, Z., Gao. F., & Weng, D. (2020). Critical roles of $Cu(OH)_2$ in low-temperature moisture-induced degradation of Cu-SAPO-34 SCR catalyst: Correlating reversible and irreversible deactivation. Applied Catalysis B: Environmental, 278, 119306.
19. Qiao, T., Liu, Z., Liu, C., Meng, W., Sun, H., & Lu, Y. (2021). MnOx location on MnOx-ZSM-5 to influence the catalytic activity for selective catalytic reduction of NOx by NH_3. Applied Catalysis A: General, 617, 118128.
20. Yan, R., Lin, S., Li, Y., Liu, W., Mi, Y., Tang, C., Wang, L., Wu, P., & Peng, H. (2020). Novel shielding and synergy effects of Mn-Ce oxides confined in mesoporous zeolite for low temperature selective catalytic reduction of NOx with enhanced SO_2/H_2O tolerance. Journal of Hazardous Materials, 396, 122592.
21. Zhang, Y. C., Ullah, S., Zhang, R., Pan, L., Zhang, X., & Zou, J. J. (2020). Manipulating electronic delocalization of Mn_3O_4 by manganese defects for oxygen reduction reaction. Applied Catalysis B: Environmental, 277, 119247.

卑南溪揚塵好發區影響範圍與濃度模擬及揚塵抑制之研究

楊承翰*、張嘉智**、蔡忠憲***、張章堂****

摘　要

近年來，人們開始注意到懸浮微粒污染與健康問題之間的關係，而臺灣已飽受河川揚塵的危害多年，河川揚塵是由於大面積裸露河床受到強風吹拂，而導致河床表面小於 75 微米粒徑之顆粒揚塵，侵襲河川鄰近區域，揚塵主要是由總懸浮微粒(Total Suspended Particulate, TSP)及懸浮微粒(Particulate Matter, PM_{10})組成，而由於 PM_{10} 粒徑小於 10 微米以下，能深入人體肺部深處。長期處在高濃度 PM_{10} 環境中，對呼吸系統的危害最大，引發急性與慢性呼吸道症狀。因此針對河川所產生的 PM_{10} 需要採取有效防治措施。因此本研究因應揚塵預警系統開發，進而建置河川本土參數，另因各河川之揚塵特性有所不同，故本研究以臺灣河川揚塵較為嚴重位於東部的卑南溪為例，並以卑南溪揚塵進行分析與探討。本研究兼顧聯合國永續發展目標(SDGs)之「目標 3-確保健康及促進各年齡層的福祉」與「目標 13-採取緊急措施以因應氣候變遷及其影響」，將揚塵特性於空氣品質模式結合，發展出適合用於河川揚塵模式模擬預測系統，並藉此推估河川揚塵濃度分佈，期能做為相關單位及時啟動揚塵抑制時機之參考。

【關鍵詞】河川揚塵、排放係數、工業污染源複合模式

---

*國立宜蘭大學 環境工程學系 學生

**臺東縣環境保護局 空氣噪音防制科科長

***富聯工程顧問股份有限公司 計畫經理

****國立宜蘭大學 環境工程學系 終身特聘教授

一、前 言

(一)研究背景

在 20 世紀 70 年代，人們開始注意到懸浮微粒污染與健康問題之間的關係，而在美國，每年因空氣污染而死於肺癌的案例人數約為 223,000 人[1]，而臺灣已飽受河川揚塵的危害多年，河川揚塵是由於大面積裸露河床受到強風吹拂，而導致河床表面小於 75 微米粒徑之顆粒揚貢，侵襲河川鄰近區域，揚塵主要是由總懸浮微粒(Total Suspended Particulate, TSP)及懸浮微粒(Particulate Matter, PM_{10})組成，而由於 PM_{10} 粒徑小於 10 微米以下，能深入人體肺部深處。

(二)研究目的及流程

本研究為探討卑南溪河川揚塵所造成 PM_{10} 濃度與氣象因子之相關性，因此篩選出 2020/7 年至 2021/6 年卑南溪河川揚塵事件日，並以空氣品質測站數據進行增量濃度多元非線性迴歸分析後，利用影響揚塵濃度之因子如河床含泥量、含水量、相對濕度及風速等進行多元非線性迴歸分析，建置濁水溪及卑南溪揚塵排放量推估公式，並利用 Industrial Source Complex Short-Term Dispersion Model (ISCST)，進行卑南溪揚塵模擬，探討模擬結果與監測值之誤差及相關性，因此本研究主要之目的彙整以下：

1. 探討卑南溪揚塵濃度與河床含泥量、含水量、裸露河床面積、相對濕度、溫度因子間之相關性。
2. 建立卑南溪揚塵排放係數公式，以利推估排放量。
3. 探討 2020/7 年至 2021/6 年河川裸露河床之變化。
4. 建置揚塵擴散模型，模擬卑南溪河川揚塵濃度擴散分布。

二、研究方法

(一)衛星影像判識及成效分析

1.圖資建檔管理

本研究針對卑南溪流域（新武橋至出海口），逐月透過商業衛星購置卑南溪全流域衛星影像空照圖預計共 12 幅(2020/7-2021/6)，所購置之 PlanetScope 衛星影像空間解析度(ground sample distance，GSD)需優於(含) 3 公尺，幾何精度（CE90）需優於（含）10 公尺，雲覆率至少應低於 10%，且經影像正射糾正處理，成果符合臺灣通用電子地圖之道路圖資標準並可與其套疊。影像解析例如卑南溪出海口，並依照時間（豐枯水期、好發時間）、河段及用途（裸露地面積分析、水覆蓋成果調查）等，系統性地編列建檔，作為卑南溪河道與河床灘地變化基底圖或水覆蓋實兵演練成果展示之用途。

2.裸露面積掌握

透過卑南溪全流域影像依不同河段進行劃分，以影像辨識技術掌控地表現況。此技術採用 eCognition 影像分類軟體根據衛星影像所反應之多光譜及紋理獨特性，首先採用影像分割（Image Segmentation）技術將影像區塊化成「影像物件」，執行訓練樣區選取與紋理（Texture）特徵的計算，透過機器學習分類法（Machine Learning）將地表分為裸露地、含水灘地、其它及植被四大類，配合機器學習影像分類技術，讓電腦執行「學習」，從資料集中自動分析獲得規律，並利用規律對未知資料進行預測的演算，俾利精準掌握卑南溪情況，在遙測影像分類的應用上，可從已知類別樣本資料（Training Data）的特徵值套用至分類模型之中進行回歸計算，對未知類別的部分進行影像辨識，得到地表現況分佈的成果，最終將分類成果之波段 pixels 值積分轉化為面積，可確實掌握河道與河床灘地之變化情形。

3.卑南溪流域裸露地潛勢區域掌握

本研究進行建置衛星圖資影像資料庫，並繪製出該流域汛期與乾季之河川變遷特性，再加上利用更多時期之衛星影像，進行河道潛勢裸露區域推估，進而掌握揚塵好發時期與區域，透過厚實的影像資料庫，劃分卑南溪流域裸露地潛勢區域，以俾利掌握轄內卑南溪裸露地資訊。

流域概述		
	流域面積	1,603.21 Km^2
	行政區域	台東市、卑南鄉、延平鄉、鹿野鄉、關山鎮、海端鄉、池上鄉等 7 市鄉鎮
	發源地	大崙溪，中央山脈卑南主峰(E.L 3,295m)
	主流坡降	1/165
	河川特色	坡降陡、河床寬、豐枯水期流量變化大

流域範圍	
	卑南溪自新武橋至出海口長度約 52Km
	北鄰秀姑巒溪流域，東界海岸山脈分水嶺，南接太平、利嘉兩溪，西至中央山脈與高屏溪流域分踞東西向
	整體地形西以中央山脈為界，東以海岸山脈為界，分別由東西兩向中央降低

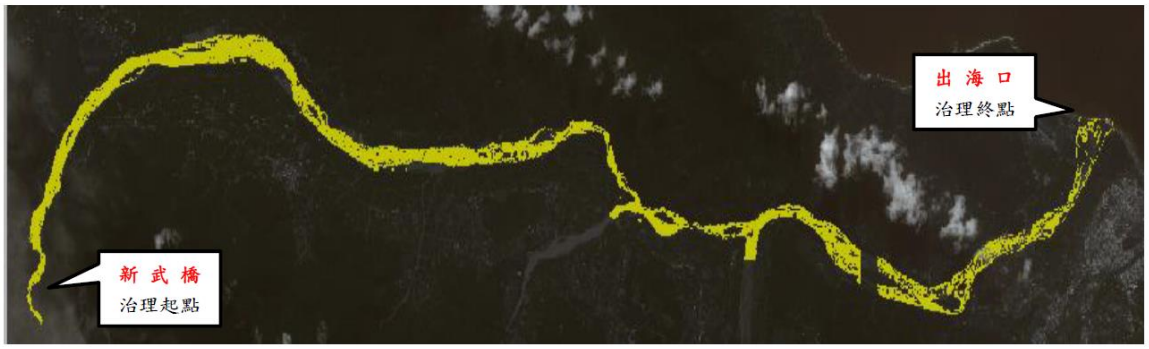


圖 1 卑南溪河灘裸露分布圖

(二) 揚塵潛勢區域及範圍調查

1.資料建檔管理

本研究將依照當月裸露地巡查所有監測之懸浮微粒濃度並進行紀錄，並針對紀錄中或當月空品測站出現 PM_{10} 濃度最高值的該日，其數值將代表當月繪製成圖。

2.懸浮微粒濃度分布圖之分析結果

為了解卑南溪河道裸露地揚塵影響臺東市區的時間與範圍，本計畫將利用 WRF 氣象模式結合 AERMOD 高斯擴散模式，於計畫期程內，針對每月揚塵影響臺東市區最顯著之日期（依據觀測與現地勘查資料而定）進行揚塵擴散模擬，作為日後揚塵事件的應變與防制規劃之依據。

(三)揚塵模擬-高斯（類高斯）擴散模式-ISCST3

ISCST3（Industrial Source Complex Short-Term Dispersion Model）是美國環保署公告的替代模式（Alternative Model）之一，適用於一階線性或惰性空氣污染物之模擬。ISC 以穩定之高斯煙流為基礎（Steady–State Gussian Plume Model），假設連續排放之污染源，在大氣中經過擴散、稀釋、沉降等作用，到達穩定的狀態。穩定狀態時，煙流（Plume）內部污染物濃度的分佈狀況以中間主軸方向濃度最高，而在垂直於風向之水平面及垂直面二邊，則以高斯分佈（Gaussian distribution）之原則進行擴散，亦即常態分佈（normal distribution），符合亂流的隨機性。

ISCST3 廣泛的被使用，模式之主要特徵為下列幾點：

1. 可模擬都市型或鄉村型的空氣品質。
2. 適合模擬忉坦地形。
3. 模擬的有效範圍於 50 公里。
4. 至多可以輸入 300 個污染源。
5. 至多可以輸入 1,200 個受體點。
6. 可模擬每小時的忉均濃度至全年的忉均年度。

自煙囪口排放出來的空氣污染物會受到不同型式的物理與化學作用影響，包括氣體動力學的下沖(downwash)，此一作用主要是因為附近的建築物而引貣，也可能是來自放獨立的通風口、複合的通風口、儲存的料堆、開放的深坑、輸送帶、以及其他因素等。ISCST3 排放源型式可以分類為四大型態，包括點源、體源、面源、以及開放的深坑排放源(openpit)等。

ISCST 3 模式使用小時的氣象資料，並依據氣象資料去計算煙流上升高度、傳輸、擴散與沉降等機制，ISCST3 模式可依據每個污染源和接受點的組合以及輸入逐時氣象資料，計算濃度及沉降數值，並由使用者設定之日期期間計算其忉均值，且 ISCST3 模式可針對沉降數值進行計算，包含乾沉降通量、濕沉降通量與總沉降通量，數值方法、座標系統及網格配置設定。

三、結果與討論

(一)NDVI

本研究為瞭解衛星影像解析中植被為主因子對分類指數之影響，卑南溪各年度 NDVI 分類區間如表 1 所示，利用 NDVI 分類後，2020/07/12 當天衛星影像之 NDVI 最大值為 0.51，最小值為-0.369；2020/08/09 當天衛星影像之 NDVI 最大值為 0.50，最小值為-0.369；2020/09/17 當天衛星影像之 NDVI 最大值為 0.77，最小值為-0.19；2020/10/13 當天衛星影像之 NDVI 最大值為 0.50，最小值為-0.48；2020/11/28 當天衛星影像之 NDVI 最大值為 1.0，最小值為-0.41；2020/12/11 當天衛星影像之 NDVI 最大值為 1.0，最小值為-0.49；2021/01/13 當天衛星影像之 NDVI 最大值為 1.0，最小值為-0.42；2021/02/07 當天衛星影像之 NDVI 最大值為 0.91，最小值為-0.36；2021/03/17 當天衛星影像之 NDVI 最大值為 0.72，最小值為-0.36；2021/04/18 當天衛星影像之 NDVI 最大值為 0.58，最小值為-0.15；2021/05/03 當天衛星影像之 NDVI 最大值為 0.8，最小值為-0.47。

表 1 卑南溪 NDVI 指標分類數值範圍

Date (日期)	2020/07/12	2020/08/09	2020/09/17	2020/10/13	2020/11/28	2020/12/11
Water (水體)	-0.37 ~ -0.07	-0.37 ~ -0.05	-0.19 ~ -0.05	-0.48 ~ -0.08	-0.41 ~ 0.08	-0.49 ~ -0.09
Puddle (水灘地)	-0.07 ~ -0.05	-0.05 ~ 0.10	-0.05 ~ 0.35	-0.08 ~ 0.15	-0.08 ~0.18	-0.09 ~ 0.13
Bare Ground (裸露地)	-0.05 ~ 0.10	0.10 ~ 0.50	0.35 ~ 0.75	0.15 ~ 0.47	0.18 ~ 0.90	0.13 ~ 0.70
Vegetation (植被)	0.10 ~ 0.51	0.50 ~ 0.51	0.75 ~ 0.77	0.47 ~ 0.50	0.90 ~ 1.00	0.70 ~ 1.00
Date (日期)	2021/01/13	2021/02/07	2021/03/17	2021/04/18	2021/05/03	-
Water (水體)	-0.42 ~ -0.01	-0.36 ~ -0.05	-0.36 ~ -0.07	-0.15 ~ 0.06	-0.47 ~-0.05	-
Puddle (水灘地)	-0.01 ~ 0.15	-0.05 ~ 0.15	-0.07 ~ 0.18	0.06 ~ 0.95	-0.05 ~ 0.16	-
Bare Ground (裸露地)	0.15 ~ 0.80	0.15 ~ 0.90	0.18 ~ 0.70	0.23 ~ 0.40	0.16 ~ 0.77	-
Vegetation (植被)	0.80 ~ 1.00	0.90 ~ 0.91	0.70 ~ 0.72	0.40 ~ 0.58	0.77 ~ 0.80	-

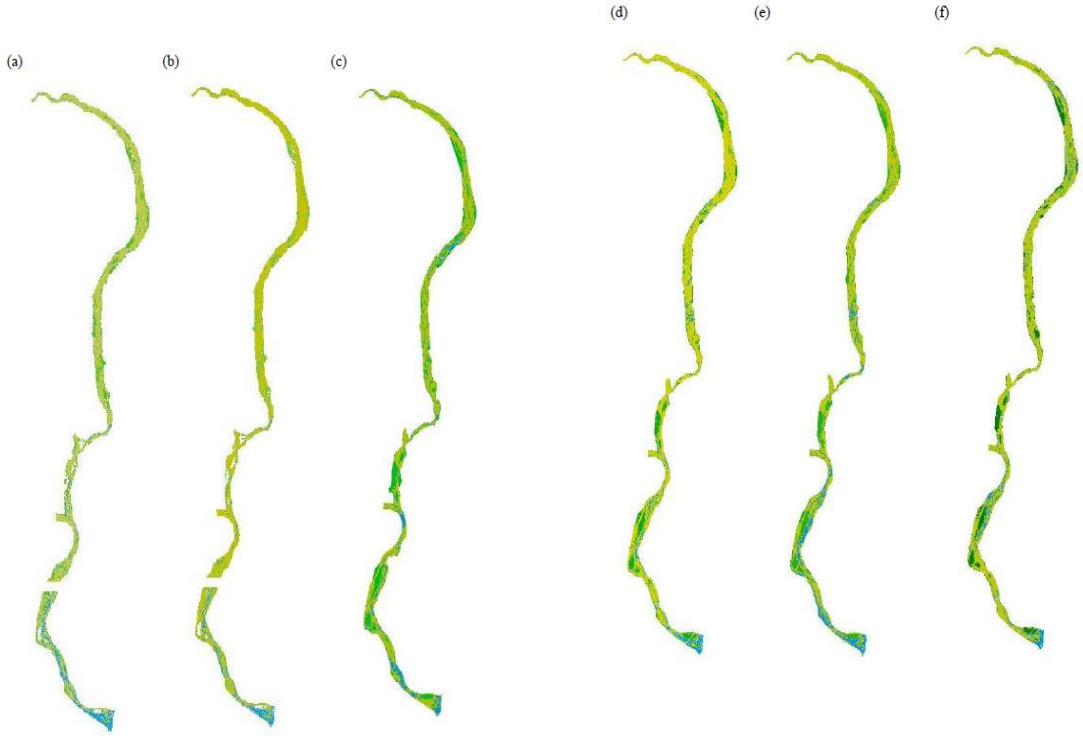


圖 2 卑南溪之衛星影像 NDVI 分類成果(II)
(a) 2020/07/12 (b) 2020/09/17 (c) 2020/11/28
(d) 2021/01/13 (e) 2021/03/17 (f) 2021/05/03

本研究利用 NDVI 進行卑南溪土地型態分類，從圖 3 可以明顯看出卑南溪各年度裸露地、水體及植被的變化，得知卑南溪各年度之裸露地面積皆大於水體及植被，面積約 18 ~ 23 km^2，再由圖 4 可發現，逐年之各分類無明顯變化。

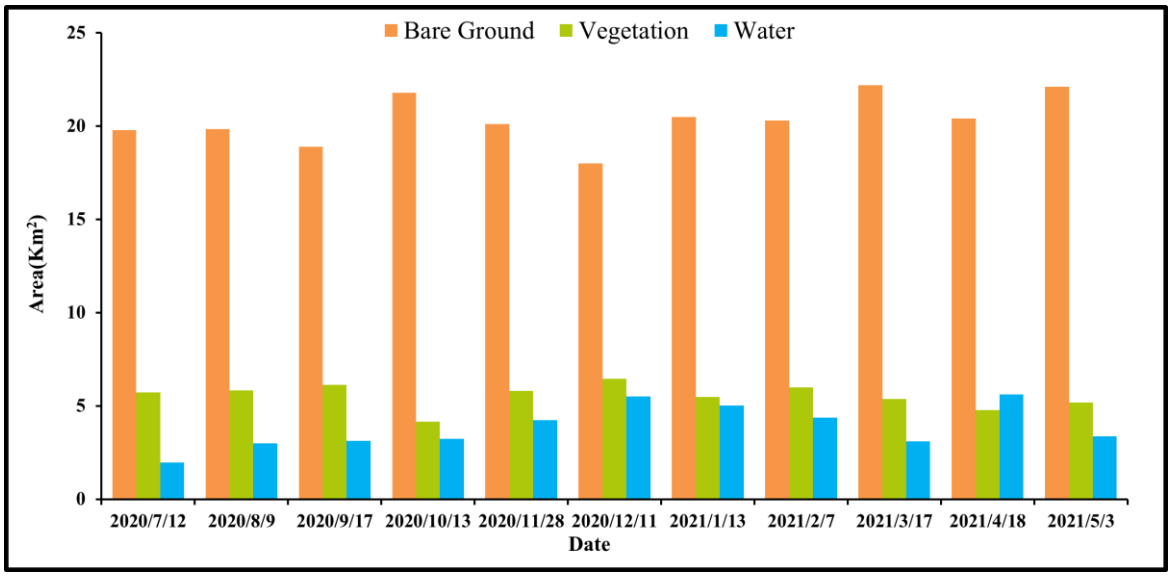


圖 3 各年 NDVI 法之卑南溪面積分類結果之變化

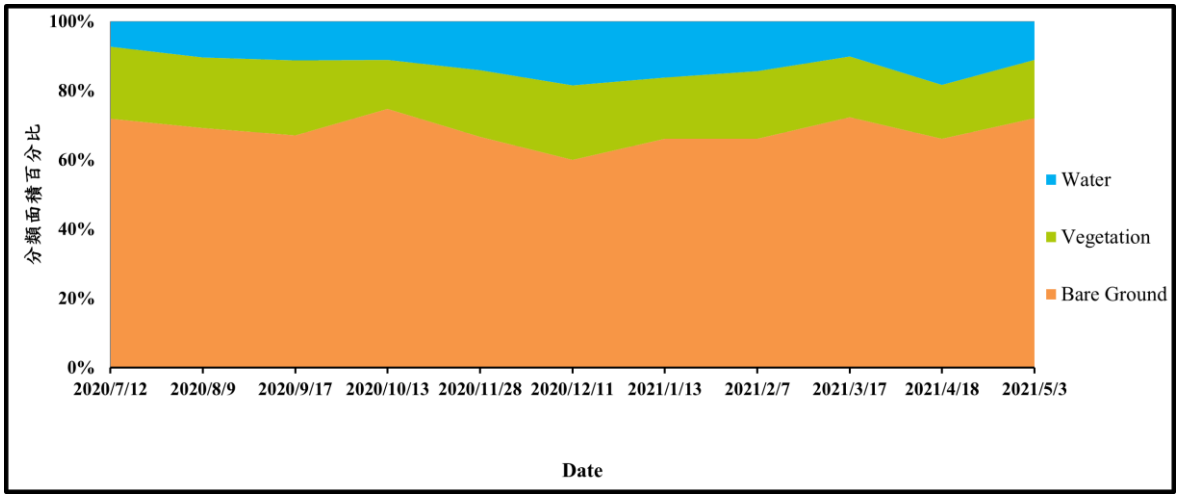


圖 4 各日 NDVI 之卑南溪百分比分類結果之變化

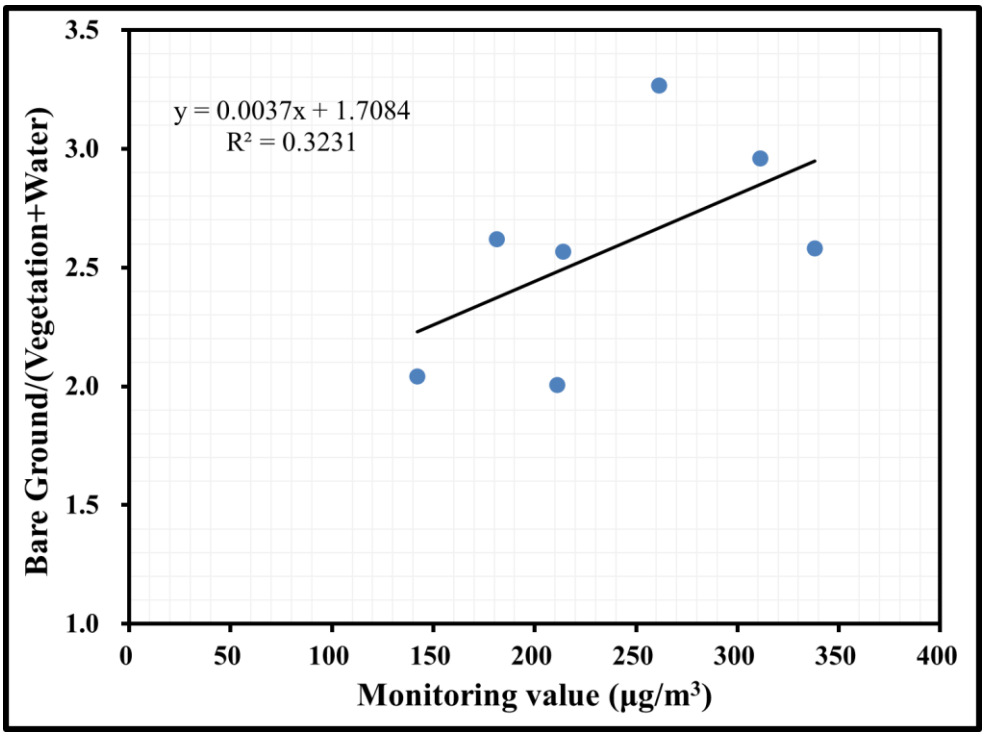


圖 5 卑南溪 NDVI 分類之裸露地面積與 PM_{10} 濃度相關性

為瞭解 NDVI 對於卑南溪之裸露地面積與 PM_{10} 日平均濃度之相關性，利用 NDVI 分類之裸露地面積與 PM_{10} 濃度進行線性迴歸，如圖 5 所示，得知 R^2 值為 0.3231，具較高的相關性，因此後續進行 ISCST 模擬將以 NDVI 分類結果進行網格化後，再帶入模式，並進行排放量計算。

本研究從卑南溪河川揚塵事件日中挑選數日較顯著之資料(2020/7/12、2020/9/17、2020/11/28、2020/1/13、2021/3/17 及 2021/5/3)之關山測站及台東測站監測數據(相對濕度及風速)，並加入卑南溪本土參數(含泥量及含水量)，進行多元非線性迴歸，得出式(1-1)：

$$EF = 0.016 \times k \times (RH/79)^{-1.33} \times (U/3.0)^{3.05} \times (M/1.5)^{-0.19} \times (S/4.1)^{0.19} \quad (1\text{-}1)$$

式中，EF 為排放係數($g/m^2 \cdot s$)；k 為粒徑相關係數；RH 為相對濕度(%)；U 為風速(m/s)；M 為含水量(%)；S 為含泥量(%)，並將排放量與推估量進行線性迴歸，發現 R^2 為 0.3231。

(二)河川揚塵事件日模式模擬分析

1.2020 年 7 月 12 日

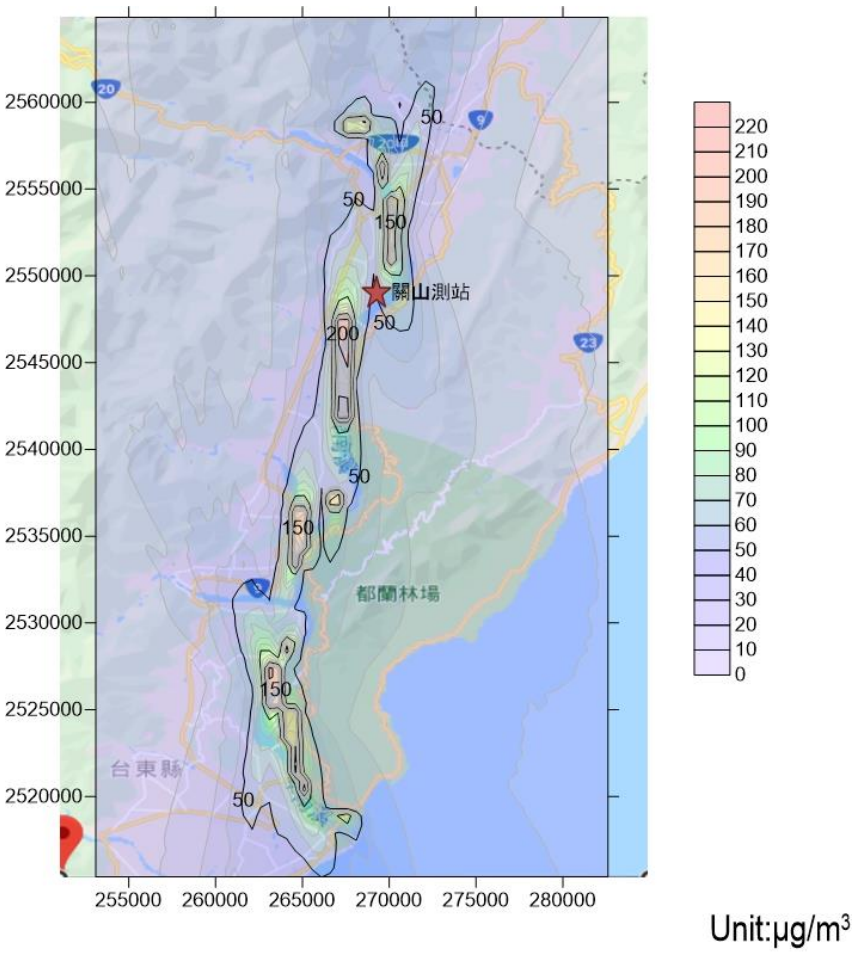


圖 6 2020 年 7 月 12 日 12 時增量模擬影響推估範圍

(1)卑南溪河川揚塵懸浮微粒(PM_{10})空氣品質模擬(109 年 07 月 12 日 12 時):

由當日之模擬濃度分布圖如圖 6 所示，可看出風向皆是往南岸吹拂，污染源產生兩個波形往南擴散，關山測站正好於污染源覆蓋面積較大的下方，因此受到較高濃度之 PM_{10} 污染，且臺東測站位於關山測站下方亦受到揚塵影響，當日揚塵影響範圍(PM_{10} 達 115 μg/m^3 以上)約 7 公里。

2.2020 年 9 月 17 日

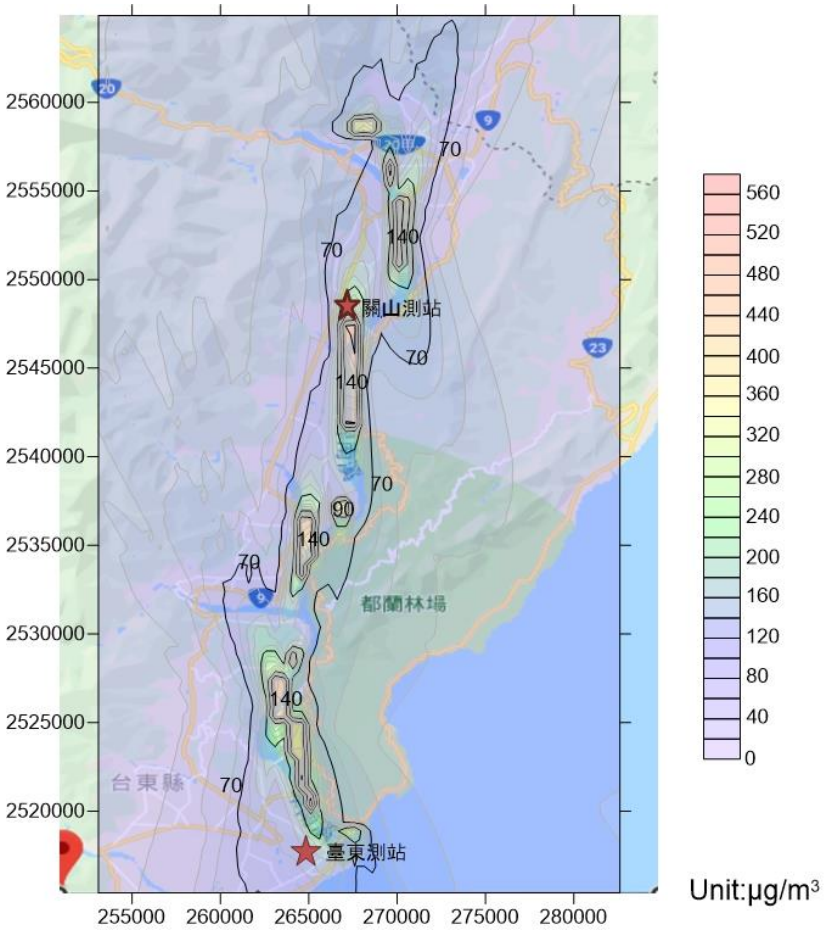


圖 7 2020 年 9 月 17 日 12 時增量模擬影響推估範圍

(1)卑南溪河川揚塵懸浮微粒(PM_{10})空氣品質模擬(109 年 09 月 17 日 12 時):

由當日之模擬濃度分布圖如圖 7 所示，可看出風向皆是往東岸吹拂，污染源產生兩個波形往東擴散，關山測站正好於污染源覆蓋面積較大的下方，因此受到較高濃度之 PM_{10} 污染，且臺東測站在較不受到揚塵影響，當日 PM_{10} 皆小於 140 $\mu g/m^3$。

3.2020 年 11 月 28 日

圖 8 2020 年 11 月 28 日 12 時增量模擬影響推估範圍

(1)卑南溪河川揚塵懸浮微粒(PM_{10})空氣品質模擬(109 年 11 月 28 日 12 時):

由當日之模擬濃度分布圖如圖 8 所示，可看出風向皆是往南岸吹拂，污染源產生兩個波形往南擴散，關山測站正好於污染源覆蓋面積較大的下方，因此受到較高濃度之 PM_{10} 污染，且臺東測站與關山測站皆受到揚塵影響，當日揚塵影響範圍(PM_{10} 達 100 μg/m^3 以上)約 8 公里。

4.2021 年 1 月 13 日

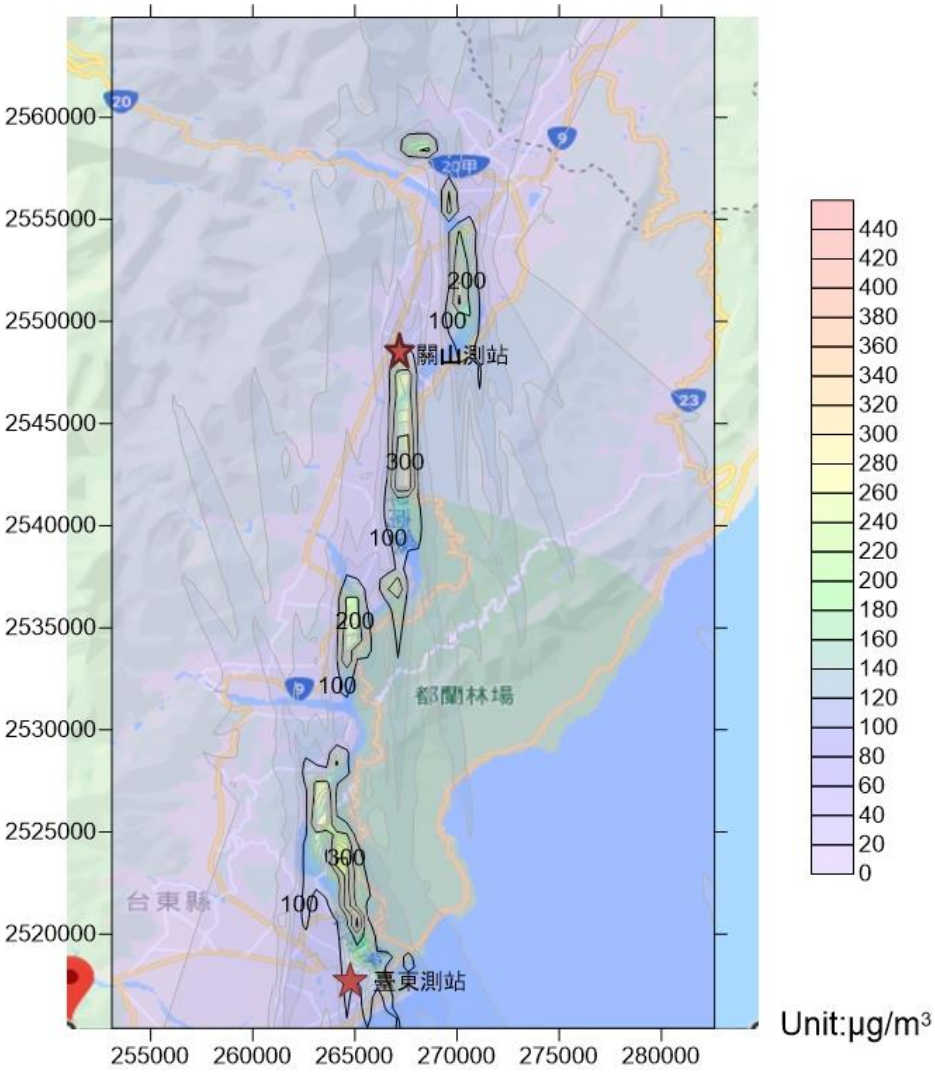


圖 9 2021 年 1 月 13 日 12 時增量模擬影響推估範圍

(1)卑南溪河川揚塵懸浮微粒(PM_{10})空氣品質模擬(110 年 01 月 13 日 12 時):

由當日之模擬濃度分布圖如圖 9 所示，可看出風向皆是往南岸吹拂，污染源產生兩個波形往南擴散，關山測站正好於污染源覆蓋面積較大的下方，因此受到較高濃度之 PM_{10} 污染，且臺東測站與關山測站皆受到揚塵影響，當日揚塵影響範圍(PM_{10} 達 100 μg/m^3 以上)約 7 公里。

5.2021 年 3 月 17 日

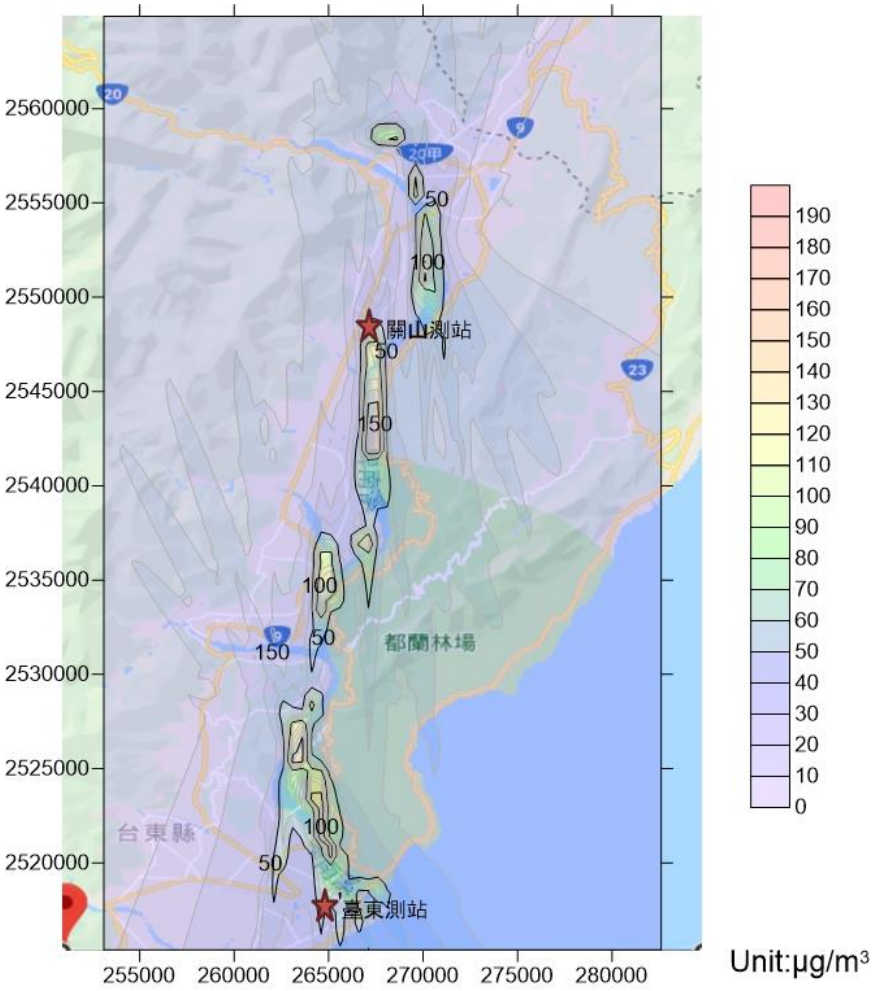


圖 10 2021 年 3 月 17 日 12 時增量模擬影響推估範圍

(1)卑南溪河川揚塵懸浮微粒(PM_{10})空氣品質模擬(110 年 03 月 17 日 12 時):

由當日之模擬濃度分布圖如圖 10 所示，可看出風向皆是往西岸吹拂，污染源產生兩個波形往西擴散，關山測站正好於污染源覆蓋面積較大的下方，因此受到較高濃度之 PM_{10} 污染，且臺東測站與關山測站皆受到揚塵影響，當日揚塵影響範圍(PM_{10} 達 125μg/m^3 以上)約 8 公里。

6. 2021 年 5 月 3 日

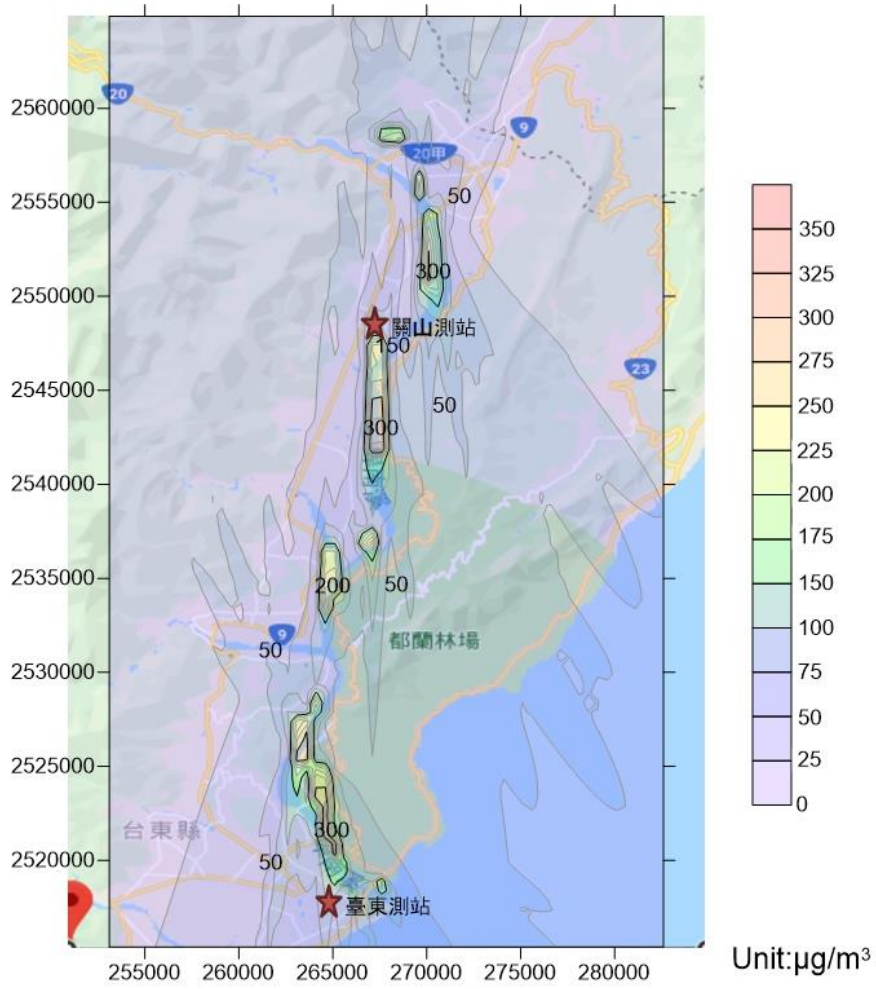


圖 11 2021 年 5 月 3 日 12 時增量模擬影響推估範圍

(1)卑南溪河川揚塵懸浮微粒(PM_{10})空氣品質模擬(110 年 05 月 3 日 12 時)：

由當日之模擬濃度分布圖如圖 11 所示，可看出風向皆是往東岸吹拂，污染源產生兩個波形往東擴散，關山測站正好於污染源覆蓋面積較大的下方，因此受到較高濃度之 PM_{10} 污染，且臺東測站位於關山測站下方亦受到揚塵影響，當日揚塵影響範圍(PM_{10} 達 125 μg/m^3 以上)約 9 公里。

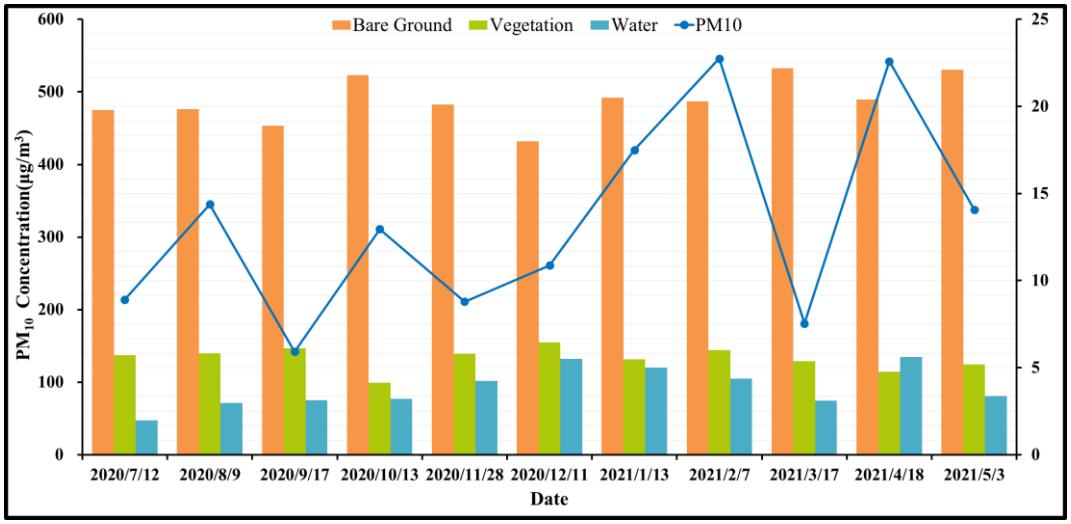


圖 12 卑南溪面積分類結果與 PM_{10} 濃度之比較

為瞭解 NDVI 對於卑南溪之分類面積與 PM_{10} 日平均濃度之相關性，本研究將其分類結果進行比較，如圖 12 所示，得知裸露地面積與 PM_{10} 濃度皆具相關性，得知 2021/2/27 與 2021/4/18 之裸露地面積明顯較大，河川揚塵濃度亦是最高(高達 546 $\mu g/m^3$ 與 542 $\mu g/m^3$)，但 2021/3/17 之裸露地面積較高，PM_{10} 濃度卻降低，推測原因該月衛星影像之河川中段有少量的雲遮蔽，NDVI 將其分類為裸露地，屬於誤判現象，因此裸露地之分類面積較大，且此圖亦可得知卑南溪之裸露地面積無明顯變化。

四、結　論

本研究經由 NDVI 分析得知卑南溪之裸露地面積無明顯變化，裸露地面積與 PM_{10} 濃度皆具相關性，並利用 NDVI 分類之裸露地面積與 PM_{10} 濃度進行線性迴歸，得知 R^2 值為 0.3231，經分析卑南溪裸露地分布與高濃度揚塵範圍影響後，得知關山站下方之河段屬於揚塵侵襲嚴重之區域，需要於該地區實施如綠覆蓋可多加佈設水線、鋪設截砂石籬及鋪設防塵網或種植保育林及堤後造林或防風林，以利有效防治揚塵。

五、參考文獻

1. 國際癌症研究機構(IARC)，2010年
2. 模式模擬中心，2017 年
3. 魏境枋，「河川揚塵排放資料庫與土地利用型態關係建置及預測系統開發研究」，國立宜蘭大學碩士論文，國立宜蘭大學，2020 年 7 月。

陰極射線管廢面板玻璃添加廢觸媒生產綠色材料用於室內空間濕度之性能優化

林雅雯*、林凱隆**、李韋皞***、張文軒***

摘　要

本研究係使用製坯燒結技術，利用廢觸媒以不同比例(0-40 %)取代陰極射線管 (Cathode ray tube, CRT)廢面板玻璃，以成形壓力為 5 MPa 及燒結溫度為 600-750℃以燒製多孔調濕建材，並藉由巨微觀檢測綠色材料是否達 CNS 3298 陶質壁磚之抗彎試驗規範，輔以 X Ray Diffractometer (XRD)、Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) 及 Scanning Electron Microscope (SEM)等精密儀器探討綠色材料之晶相物種、鍵結方式及微觀結構等變化。結果顯示，廢觸媒隨取代量的增加能有效提高綠色材料之平衡含水率和吸放濕量。FTIR 分析顯示，波數在 900-1,200 cm-1 主要為層狀矽酸鹽的矽四面體層鍵結的矽氧烷表面 (Si-O-Si)非對稱性伸展振動結前後之表面官能基以 Si-O-Si 形式存在。本研究綠色材料之氮氣等溫吸脫附曲線所產生遲滯環屬於 H3 類型。CRT 廢面板玻璃添加廢觸媒為 40%之綠色材料於相對濕度為 95%時，其平衡含水率有上升之趨勢。綜合分析結果顯示，當燒結溫度為 710℃時，含 80%之 CRT 廢面板玻璃添加 20%廢觸媒綠色材料，可符合 CNS 3298 陶質壁磚之抗彎試驗規範。綜合上述，未來可 100%再利用廢觸媒及 CRT 廢面板玻璃製備綠色材料符合環保署零廢棄、零掩埋及資源化之目標。

【關鍵詞】陰極射線管廢玻璃；廢觸媒；燒結；調濕建材；綠色材料

---

*國立台北科技大學 博士生

**國立宜蘭大學 特聘教授

****國立台北科技大學 助理教授

****國立宜蘭大學環境工程學系 碩士

一、前 言

台灣地區屬季風型海島性氣候，在夏天高溫多濕，颱風經常來襲，而地理位置上處於地震頻繁之太平洋斷層帶，因此在住宅安全考慮上採磚造或鋼筋混凝土建築物為主體。近年由於空氣、噪音等污染日益嚴重，而磚造、鋼筋混凝土建築物內部溫濕度又相當高，尤以夏季為甚，致使居住品質更形惡化，高溫高濕易所引起悶熱感，且易造成室內黴菌急速繁殖，形成一種不衛生的空間環境進而影響居住者之身心健康。相對於溫度的感覺，人類對濕度的感覺是較不敏感的，但濕度對健康之影響卻較大，在高濕的環境會造成活動的遲鈍，而太乾燥則會引起鼻黏膜的疼痛，尤其是空氣中之菌類孢子的生存會受室內濕度的影響。對人類而言，舒適的相對濕度範圍是 55%- 65%之間，因此，如何將室內相對濕度控制在此舒適範圍，不僅對人體健康有益處，亦可減緩建築物內之材料老化與劣化。當謀改善之對策時，一般住宅內部居住環境可利用冷暖氣機、除濕機等機械設備進行調節，但機械馬達的運轉不但會造成熱氣之排出，更會使得外部環境惡化。空氣中的濕度直接影響民眾的身心健康，對濕熱地區的民眾居住環境而言，濕度調節更為重要。為有效的節約能源消耗，在建築結構上乃大量使用調濕材料於牆壁、天花板等部位。良好的調濕材料不僅可以改善室內相對濕度，從而有利於生活和有益於人體健康，同時正確地進行建築調濕材料，能有效的減少除濕機械設備的能源消耗。因而，對無須藉由人工能源或機械設備，而依靠自身的吸、放濕性能，感應所調空間濕度之變化，自動調節空氣相對濕度之調濕材料之研發即顯得相當重要。

循環型社會之建構成為當今重要之時代課題，尤其在廢棄物處理回收利用方面，亦以達到「零排放」及「資源化」為最終之目標。台灣地區每年產生大量之無機廢棄物，如 CRT 廢面板玻璃和廢觸媒，均有待妥善之處理與資源化。而在另一方面，台灣地區每年亦消耗大量營建資材，此等資材原料與產品需求之供需不均與極度失衡，加上大量無機廢棄物有待妥善處理，使無機棄物處理與營建資材供給間，亟待建立一物質流之循環與平衡。近幾年廢棄物材料資源化已成為世界各國主要發展的方向，而將廢棄物轉換成有用之物質，以減少對環境生態之衝擊，達到自然資源保育之目的，並提昇工業經營之效率。在現今環保意識日愈提昇及全球資源日益匱乏之趨勢下，廢棄物資源化再利用之推廣，應可營造工業良好潔淨之形象，並使環境保護與經濟發展得以相輔相成。故本研究係將 CRT 顯示器產業之廢面板玻璃添加廢觸媒廢棄物燒製綠色材料之特性，綠色材料之來源包括 CRT 廢面板玻璃和

廢觸媒等。主要利用 CRT 廢面板玻璃添加廢觸媒於製坯燒結技術經燒結緻密化程序，使資源再生材料具有極大之微孔及吸附、調濕、催化或轉化等特性，進而應用於營建材料，使其具有能調節濕度、隔音、隔熱及轉化污染物之自淨作用。CRT 廢面板玻璃廢棄物燒製綠色材料之開發，主要包含材料組成之調配、材料之奈米微孔化、燒結緻密化及催化或轉化等關鍵技術。本研究開發之廢棄物製備為綠色材料具有環境與經濟效益，以推廣 100%全資源化再利用技術，期望達成零廢棄、零掩埋、資材化之環境永續發展目標，研發產品可應用於綠色產業鏈，亦符合永續發展之環保策略。CRT 廢面板玻璃合成綠色材料，符合生態營建材料之再製性及環境友善特性，具 100%回收再利用之潛力。

二、實驗材料與方法

本計畫係以 CRT 廢面板玻璃經前處理後，以廢觸媒粉體依不同比例(0-40%)混合取代部分 CRT 廢面板玻璃的成分製作樣品，並且在製程控制上改變半乾式加壓成形法，以成形壓力(5 kgf/cm^2)及燒結溫度(600-750 ℃)，以最適化燒製條件燒製綠色材料並進行物化特性分析，以判定其作為綠色材料之適性，並建立功能性綠色材料之優化性能測試。對於調濕優化性功能研究，主要針對製程條件，微觀結構以及孔洞性質。微結構性質包括孔洞內比表面積、孔容積、孔徑大小分佈，以及表面反應性質本研究之試驗項目包括抗彎試驗、FTIR、BET、AA 及 X 光繞射分析，以及調濕性能等項目分析。調濕優化性能則是根據日本工業規範 JIS A 1275 之建築材料平衡含水率測定方法，在環境溫度於 23℃下，在不同環境濕度(10%、33%、55%、75%、85%及 95%)條件下測定燒結體之重量變化來繪製出平衡含水率曲線，藉此探討不同環境相對濕度下之平衡含水率。

三、結果與討論

1.原材料之基本性質分析

本研究所使用之 CRT 廢面板玻璃及廢觸媒之物理性質如表 1 所示。由表中得知，根據環檢所公告 NIEA R208.03C 標準方法，以固液比 1：10 與蒸餾水攪拌後，測得 CRT 廢面板玻璃之 pH 為 10.80，而廢觸媒之 pH 為 7.76。另外， CRT 廢面板玻璃和廢觸媒之比重分別為 1.58 和 1.41。

表 1　材料之基本特性

Sample	pH	Specific gravity	Moisture (%)	Density (g/cm^3)	Loss on Ignition (%)
CRT Waste Panel Glass	10.80	1.58	0.11	1.04	-
Waste Catalyst	7.76	1.41	1.30	2.00	0.50

原料之之化學組成分析其結果如表 2 所示。CRT 廢面板玻璃主要成分為 SiO_2 及 Na_2O，而 K_2O 所占百分比為 7.40%，Na_2O 及 K_2O 常扮演著助熔劑的角色，如比較鹼金屬族與鹼土金屬族之助熔效果。而廢觸媒主要成分為 SiO_2 (43.40%)及 Al_2O_3 (51.50%)，可見廢觸媒之化學成分以 Al_2O_3 為主，而 Al_2O_3 為一種高熔點且耐熱性的物質，在燒結過程中可增加物質的黏滯性。

表 2　材料之化學組成

Sample	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	Na_2O	SO_3	K_2O
CRT Waste Panel Glass	63.20	1.52	0.21	0.85	8.60	0.20	7.40
Waste Catalyst	43.40	51.50	0.80	0.53	-	0.32	0.13

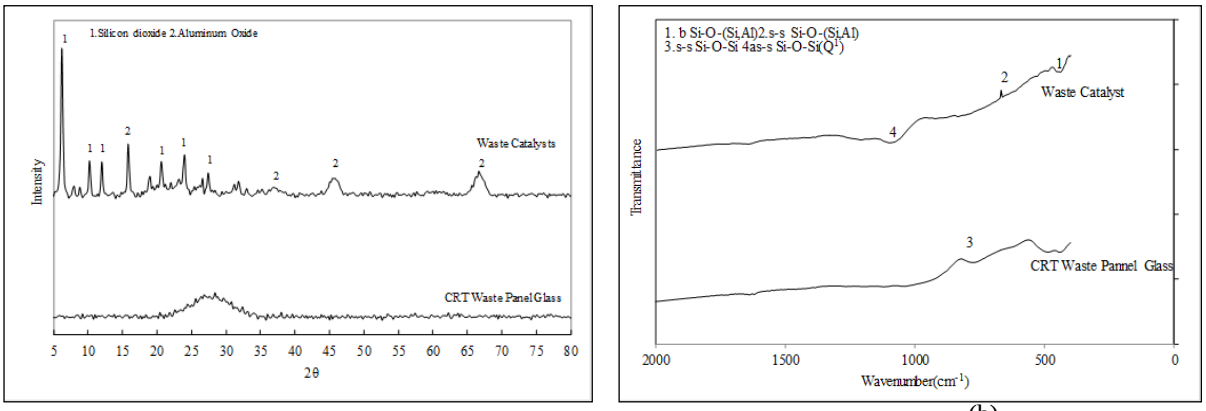
重金屬總量分析結果如表 3 所示，CRT 廢面板玻璃之重金屬總量 Pb 和 Zn 含量分別為 240 mg/kg 和 150 mg/kg，並含有 Cr 為 88.33 mg/kg，其來源應為面板玻璃進行組裝中所需要的材料；廢觸媒之重金屬總量中之 Ni 及 Zn 含量分別為 953.33 mg/kg 和 68.33 mg/kg。TCLP 重金屬溶出結果顯示，廢棄物中主要以 Pb、Zn 及 Ni 為主。CRT 廢面板玻璃之 Pb 溶出量為 3.73 mg/L，Zn 溶出量為 1 mg/L；廢觸媒之 Ni 溶出量為 2.06 mg/L，而 Zn 溶出量為 0.12 mg/L。由上述可知，CRT 廢面板玻璃及廢觸媒之溶出值均符合法規值，具資源化再利用之潛力。

表 3 材料之重金屬總量及溶出試驗結果

Sample	Pb	Cr**	Cu*	Zn	Cd***	Ni***
Total Metal (mg/kg)						
CRT Waste Panel Glass	240.00	88.33	20.00	150.00	N.D.	40.00
Waste Catalyst	N.D.	N.D.	23.33	68.33	N.D.	953.33
TCLP (mg/L)						
CRT Waste Panel Glass	3.73	N.D.	N.D.	1.00	N.D.	N.D.
Waste Catalyst	N.D.	N.D.	N.D.	0.12	N.D.	2.06
Regulatory Limits	5.00	5.00	15.00	—	1.00	—
*Cu 之偵測極限<0.020 mg/Kg ;**Cr 之偵測極限<0.016 mg/Kg ***Cd 之偵測極限<0.014 mg/Kg ;***Ni 之偵測極限<0.014 mg/Kg						

2. 原材料之微觀特性分析

本研究使用 X-ray 繞射儀分析 CRT 廢面板玻璃及廢觸媒之晶相物種，並比對各材料之晶相物種，分析結果如圖 1(a)所示。結果顯示原料晶相物種皆為方英石 (Cristobalite)，廢觸媒分別於 2θ 為 6°、10°、12°、20°、24°及 27°之處顯示 SiO_2 之繞射峰；而 2θ 為 16°、37°、46°及 67°之處顯示 Al_2O_3 之繞射峰。圖 1(b)為不同原料之 FTIR 光譜分析結果。結果顯示，CRT 廢面板玻璃之 FTIR 光譜分析，波數於 1036、1040 及 1026 cm^{-1} 出現層狀矽酸鹽矽四面體層鍵結之矽氧烷表面 (Si-O-Si)非對稱性伸縮(Asymmetric Stretching)和波數於 614、618、611 cm^{-1} 出現一寬對稱伸縮振動，其鋁矽酸鹽中之 Si-O-(Si, Al)鍵結形成。另外，廢觸媒之 FTIR 光譜分析，在波數於 1068 cm^{-1} 有 Si-O 伸縮振動 (Stretching Vibration)[1]。以掃描式電子顯微鏡 (SEM)觀察綠色材料微結構之變化。



(a) (b)

圖 1 材料之微觀特性分析。(a) XRD 分析；(b) FTIR 光譜

3. 綠色材料之機械特性分析

(1)體積收縮率、孔隙率、吸水率及體密度分析

圖 2(a)為綠色材料之體積收縮率變化。由圖可知，當燒結溫度為 620℃時，廢觸媒添加量為 10-40%之燒結體，其體積收縮率分別為 2.41%、2.35%、2.36%和 2.1%；當燒結溫度為 710℃時，廢觸媒添加量為 10-40%之燒結體，其體積收縮率分別為 26.1%、18.95%、10.89%和 7.63%。由此可知，隨著燒結溫度上升至 710℃時，燒結體內部矽酸鹽類產生黏滯流現象，形成緻密化現象，導致體積收縮率下降。另外，當廢觸媒添加量越高，則燒結體之體積收縮率就越小，主要為廢觸媒 Al_2O_3 含量高，在燒結過程中需更高的燒結溫度來處理，故燒結體之體積收縮率明顯下降；當燒結溫度為 620℃時，添加廢觸媒之燒結體，其體積收縮率 (2.41-2.1%)無明顯變化，係由於燒結溫度過低時，CRT 廢面板玻璃無法達到熔流點溫度，致

使 SiO_2 溶液流動性低，無法形成緻密之燒結體，故體積收縮率有下降之趨勢。

圖 2(b)為綠色材料之孔隙率變化。從圖中可知，當燒結溫度為 620℃時，廢觸媒添加量為 10-40%之燒結體，其孔隙率分別為 42.37%、45.24%、49.48%和 52.67%；當燒結溫度為 710℃時，CRT 廢面板玻璃添加廢觸媒為 10%-40%之燒結體，其孔隙率分別為 20.88%、33.15%、40.68%和 46.69%。當燒結溫度增加時，燒結體表面及內部形成頸部成長，造成孔隙率下降，係由於廢觸媒主要成分為 Al_2O_3，且熔點溫度較高，於燒結過程中降低燒結驅動力，難以形成緻密化現象，具有大量之孔洞存在，故孔隙率有上升之現象。

圖 2(c)為綠色材料之吸水率變化。由圖中可知，當燒結溫度為 620℃時，廢觸媒添加量為 10-40%之燒結體，其吸水率分別為 21.54%、23.47%、26.57%及 29%；當燒結溫度為 710℃時，廢觸媒添加量為 10-40%之燒結體，其吸水率分別為 8.98%、15.77%、20.93%及 25.47%。由此可知，當燒結溫度上升時，使顆粒內晶粒開始成長形成孔隙通道，並藉由燒結驅動力使晶粒間孔洞結構縮小，形成緻密化之燒結體，故吸水率隨燒結溫度上升而有下降之現象。

圖 2(d)為綠色材料之體密度。從圖中可知，當燒結溫度為 620℃時，廢觸媒添加量為 10-40%之燒結體，其體密度分別為 1.54 g/cm^3、1.47 g/cm^3、1.36 g/cm^3和 1.28 g/cm^3；當燒結溫度為 710℃時，廢觸媒添加量為 10%-40%之燒結體，其體密度為 2.11 g/cm^3、1.77 g/cm^3、1.54 g/cm^3和 1.37 g/cm^3。由上述可知，當燒結溫度上升時，其體密度有上升之趨勢，係因溫度上升時，蒸氣壓、溶解度及黏度呈指數函數上升之趨勢，因此，升溫能促進燒結，達到緻密化現象；另外，廢觸媒主要成分為 SiO_2 與 Al_2O_3 所組成，由於 Al_2O_3 熔點溫度較高，則廢觸媒添加量為 30-40%時，造成燒結作用不完全，無法達緻密化之燒結體，故體密度有下降之趨勢。

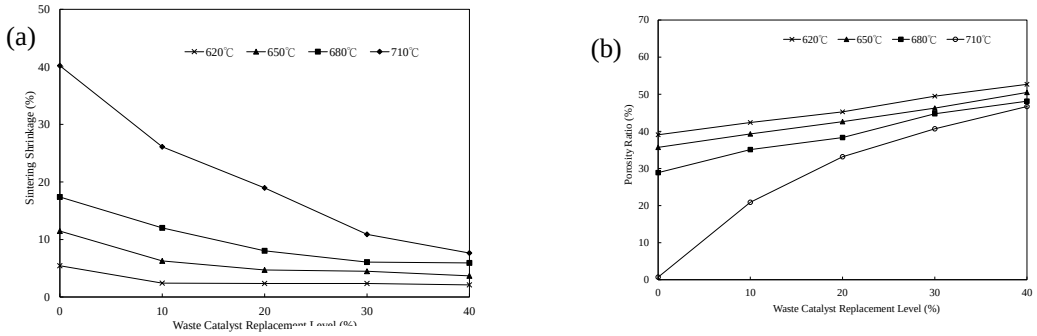


圖 2 綠色材料之機械強度分析。
(a) 體積收縮率；(b) 孔隙率

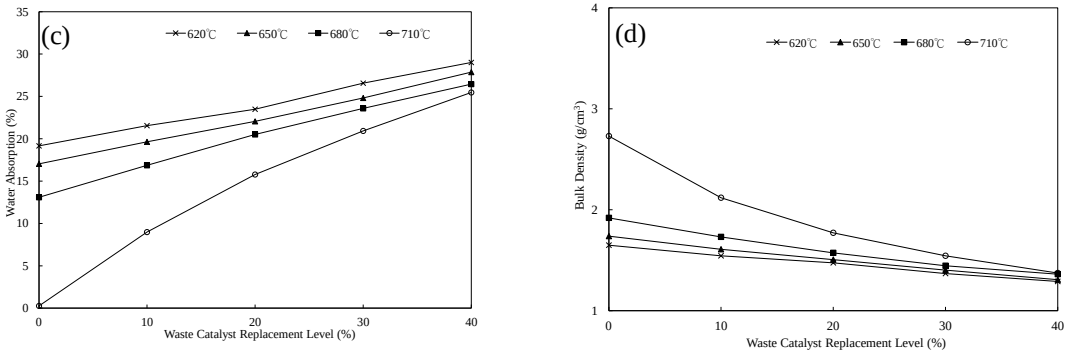


圖 2　綠色材料之機械強度分析
(c) 吸水率；(d) 體密度

(2) 抗彎強度分析

圖 3 為綠色材料之抗彎強度變化。由圖中可知，當燒結溫度為 620℃時，純 CRT 廢面板玻璃燒結體之抗彎強度為 4.55 kgf/cm^2；隨燒結溫度增加至 710℃時，燒結體之抗彎強度提升至 498.99 kgf/cm^2，由於燒結後期時，CRT 廢面板玻璃內矽酸鹽類形成黏滯流現象來填補其孔隙，其結構趨於緻密化，故抗彎強度明顯提升。圖中可知，當燒結溫度為 620℃時，廢觸媒添加量為 10-40%之燒結體，其抗彎強度分別為 2.19 kgf/cm^2、1.8 kgf/cm^2、1.25 kgf/cm^2、0.63 kgf/cm^2；當燒結溫度 710℃時，廢觸媒添加量為 10%-30%之燒結體，其抗彎強度分別為 174.69 kgf/cm^2、95.11 kgf/cm^2、38.03 kgf/cm^2，當燒結溫度為 710℃時，其內部孔隙通道進行封閉，形成緻密化之燒結體；另外，廢觸媒本身含有水分，根據 Itinoche 等人(2006)指出材料中含有水分使抗彎強度下降[6]，故廢觸媒添加量為 40%之燒結體，其抗彎強度明顯下降至 7.97 kgf/cm^2。由上述可知，當燒結溫度為 620℃時，燒結體之抗彎強度甚低，表示內部孔隙較多，造成機械特性較差。隨燒結溫度上升至 710℃時，燒結體具有高抗彎強度，係因燒結體內部經由黏滯流機制，形成緻密化燒結體；另外，添加廢觸媒造成抗彎強度明顯降低。

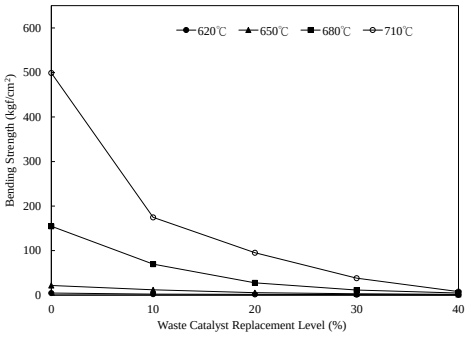
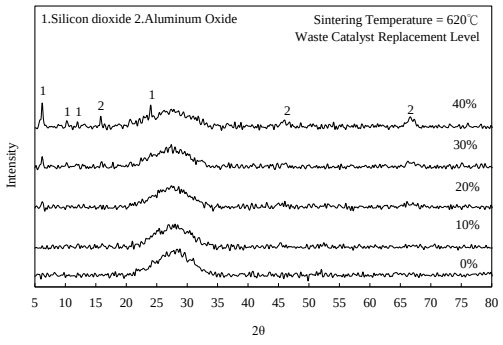


圖 3　綠色材料之抗彎強度分析

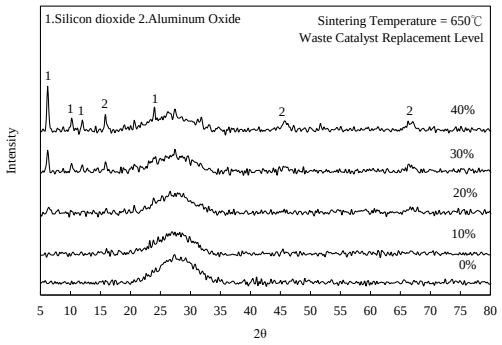
4. 綠色材料之微觀特性分析

(1) X-ray 晶相繞射分析

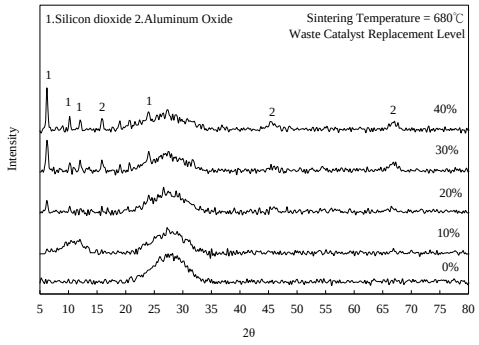
圖 4 為綠色材料晶相種類之變化情形。圖中所示，當燒結溫度為 620-710℃時，經由 XRD 分析結果顯示，CRT 廢面板玻璃為低結晶相，並根據 Fernandes et al 等人 (2013)指出結晶相形成和結晶程度與燒結溫度有相互關係，為燒結體與結構變化之重要因素；另外，該燒結作用顯示無結晶相或石英相，表示燒結體為低結晶化。由圖中顯示，當燒結溫度為 620-710℃時，CRT 廢面板玻璃廢觸媒添加量為 10-20%之燒結體，分別於 2θ 為 16°、37°、46°及 67°顯示 Al_2O_3 之繞射峰；另外，當燒結溫度為 620-710℃時，CRT 廢面板玻璃添加廢觸媒為 30-40%之燒結體分別於 2θ 為 6°、10°、12°、20°、24°及 27°顯示 SiO_2 之繞射峰。



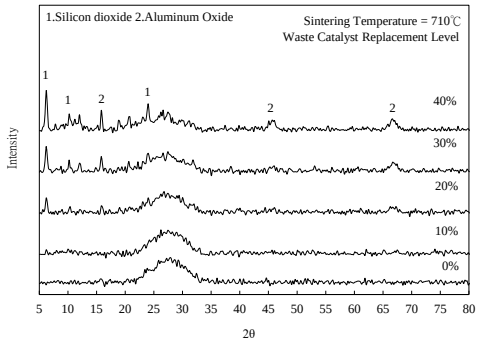
(a) 620℃



(b) 650℃



(c) 680℃



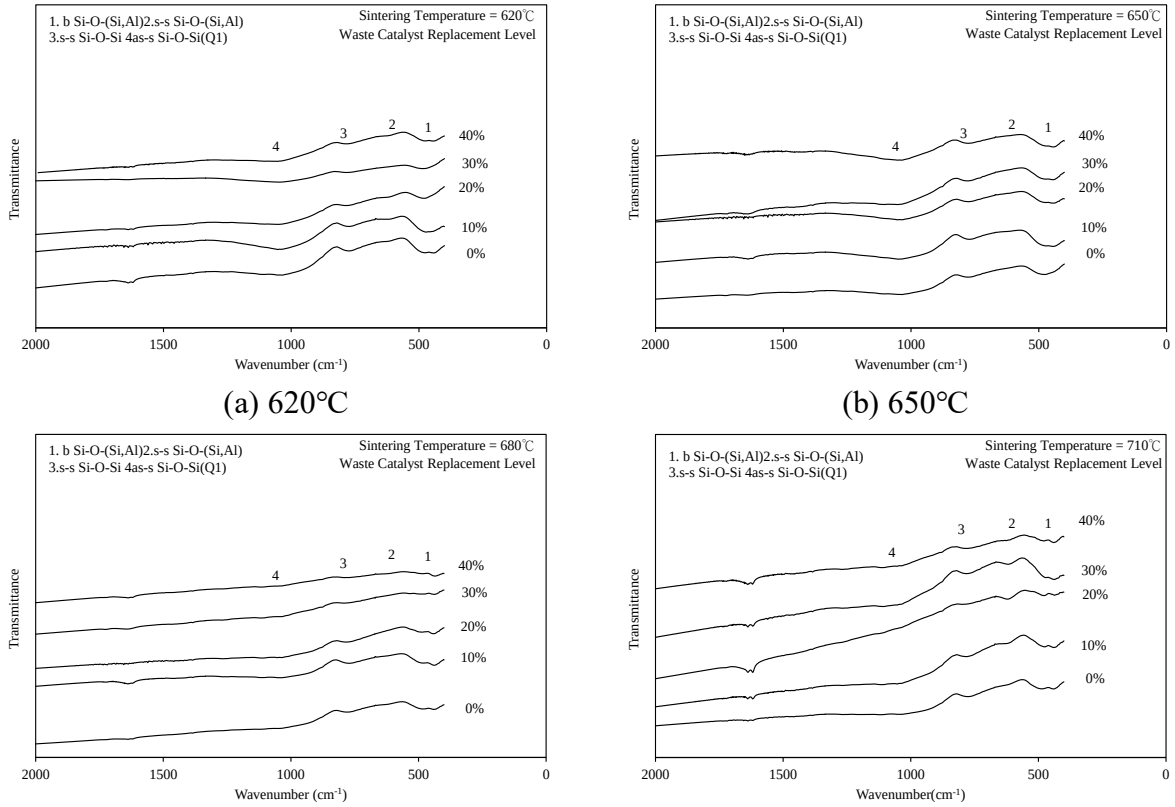
(d) 710℃

圖 4 綠色材料之 XRD 圖譜

(2) FTIR 鍵結分析

圖 5 為綠色材料之 FTIR 光譜。由圖中可知，當燒結溫度為 620-710℃時，廢觸媒添加量為 10%-40%之燒結體波數於 1040-1068 cm^{-1} 位置為 Si-O 伸縮振動隨之增加；而波數於 764 cm^{-1} 出現 Si-O-Si 之對稱伸縮 (Symmetric Stretching)，故內部以 Si-O-Si 之對稱伸縮 (Symmetric

Stretching)為主。分析燒結體之 FTIR 鍵結位置，可觀察出下列結果：1.顯示各燒結體之 FTIR 鍵結位置相似，未因添加材及燒結溫度增加而有所改變。2.在波數於 610-660 cm^{-1} 範圍內所顯示之波峰，係因矽鋁酸鹽中之 Si-O-(Si, Al)官能基。3.在波數於 750-810 cm^{-1} 範圍內之波峰為 Si-O-Si 官能基對稱伸縮振動 (Symmetric Stretching)運動。4.在波數於 480-1100 cm^{-1} 範圍內主要為層狀矽酸鹽矽四面體層鍵結之矽氧烷表面(Si-O-Si)非對稱性伸展 (Asymmetric Stretching)所造成，此波峰於各圖譜中較為明顯，顯示燒結體經燒結前後之表面官能基以 Si-O-Si 形式存在。5.在鍵結中，Si-O-Si、Si-O-(Si, Al)官能基以證明燒結體內主要成分為 SiO_2 及 Al_2O_3。



(a) 620℃　(b) 650℃

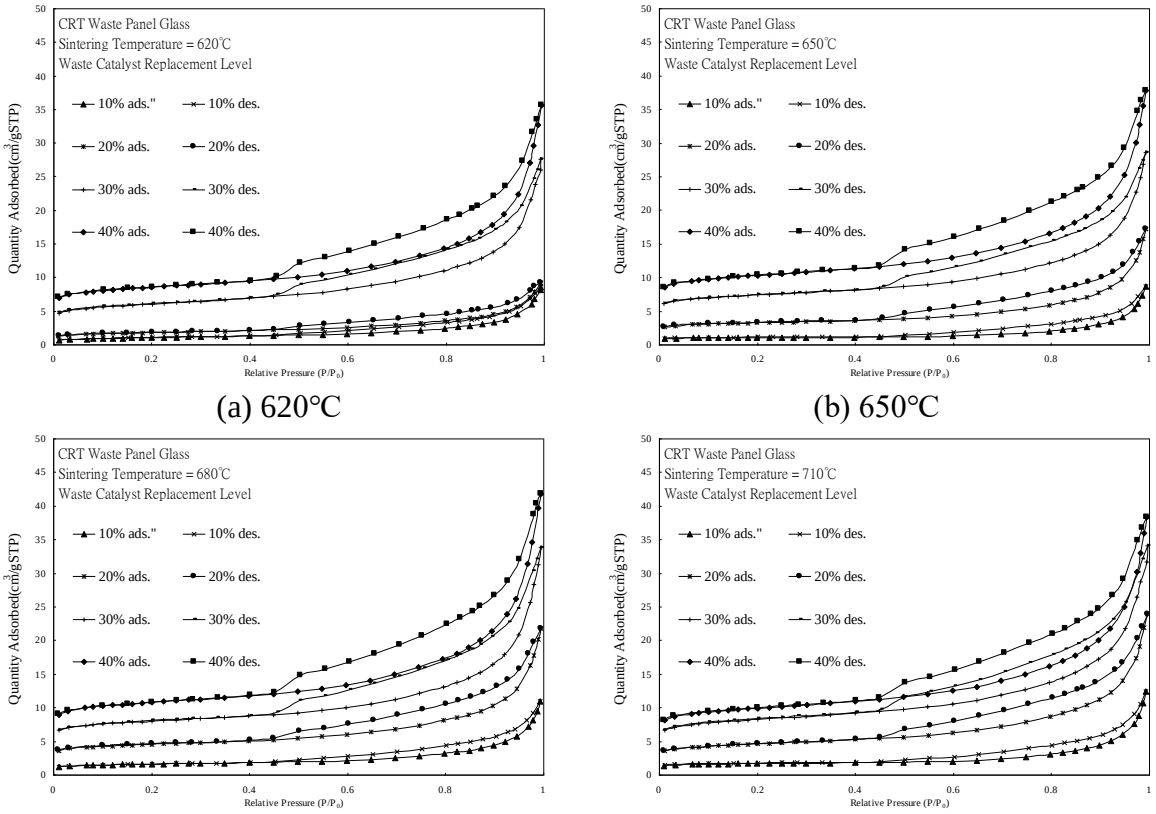
(c) 680℃　(d) 710℃

圖 5　綠色材料之 FTIR 光譜

(3) 孔洞特性分析

圖 6 為綠色材料之氮氣吸脫附曲線。由圖中顯示，當燒結溫度為 620℃時，廢觸媒添加量為 10-40%之燒結體，氮氣等溫吸脫附曲線於相對壓力為 0.8 時，其吸附量分別為 2.4 cm^3/g STP、3.5 cm^3/g STP、11 cm^3/g STP 及 14.3 cm^3/g STP；當燒結溫度 710℃時，廢觸媒添加量為 10-40%時，其吸附量分別為 3 cm^3/g STP、8.66 cm^3/g STP、13.7 cm^3/g STP 及 16.2 cm^3/g STP。由上述可知，吸附量隨燒結溫度增加而有下降之現象，係因 SiO_2 形成玻璃化物質以黏滯流填補孔洞，故吸附量低。另外，由於廢觸媒主要

成分為 SiO_2 與 Al_2O_3，並根據 Maeda 及 Ishida (2009)文獻指出 Al_2O_3 屬於中孔之結構，且中孔吸附能較大造成吸附含量增加，故吸附量隨廢觸媒添加量增加而有增加之現象。另外，根據 IUPAC 的報告中顯示，本研究燒結體之氮氣等溫吸脫附曲線產生的遲滯環線像是屬於 H3 類型，H3 類型在中高 P/P_0 時，沒有任何吸附的限制，且具有較寬的遲滯環，此種遲滯現象通常出現在以平板排列造成的狹縫形狀的孔隙結構(Slit-like Shaped)。



(a) 620℃　(b) 650℃

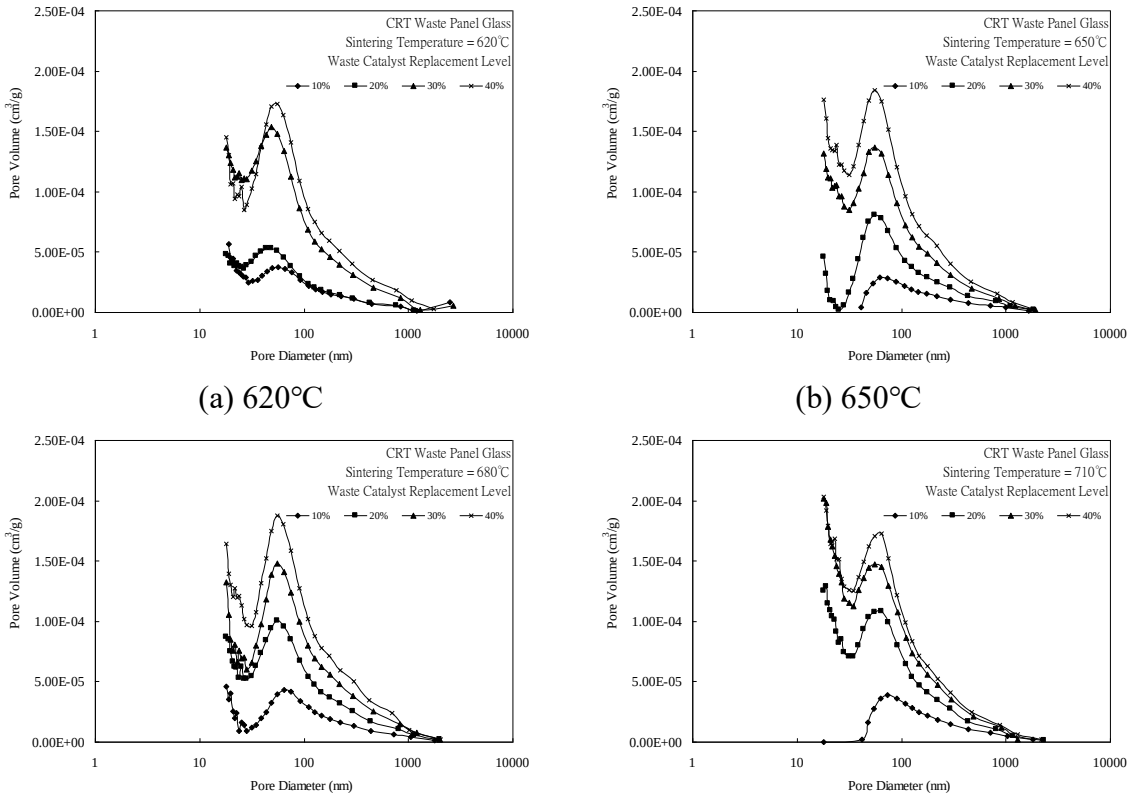
(c) 680℃　(d) 710℃

圖 6　綠色材料之氮氣等溫吸脫附曲線

圖 7 為綠色材料之孔徑大小與孔容積分佈曲線。當燒結溫度為 620℃時，廢觸媒添加量為 10%-40%之燒結體，其孔容積隨廢觸媒添加量之增加而明顯上升，係因廢觸媒為多孔之結構，故孔容積隨廢觸媒添加量增加而明顯上升；當燒結溫度為 710℃時，廢觸媒添加量為 10%-40%之燒結體，其孔容積有收縮之趨勢，係因矽酸鹽類經黏滯流機制形成玻璃化物質填補孔隙，故孔容積有明顯縮小之趨勢。綜合上述可知，燒結體在吸脫附過程中，在不同相對壓力下的吸附量與孔徑大小的不同以及孔容積，產生的結果與氮氣等溫吸脫附曲線結果相符合。

表 4 為綠色材料之孔洞特性。由表中顯示，當燒結溫度為 680℃時，

廢觸媒添加量為 40%之燒結體，其比表面積和孔容積分別為 34.49 m^2/g 和 0.0552 cm^3/g；當燒結溫度為 710℃時，添加廢觸媒為 40%之燒結體，其燒結體之比表面積和孔容積分別下降為 31.94 m^2/g 和 0.0512 cm^3/g。由上述得知，燒結溫度達 710℃時，CRT 廢面板玻璃之 SiO_2 和 Na_2O 成份於燒結過程中，熔融形成矽酸鹽玻璃化物質並填滿其內部孔隙結構，使比表面積和孔容積下降，來降低吸附性能。另外，當燒結溫度為 710℃時，廢觸媒添加量為 10-40%之燒結體，其比表面積分別為 5.4 m^2/g、15.22 m^2/g、6.72 m^2/g 和 2 31.94 m^2/g，孔容積分別為 0.0179 cm^3/g、0.0426 cm^3/g、0.0343 cm^3/g 和 0.0512 cm^3/g。由上述可知，廢觸媒之比表面積和孔容積較高，故隨廢觸媒添加量增加，其比表面積和孔容積有增加之現象。



(a) 620℃　　(b) 650℃

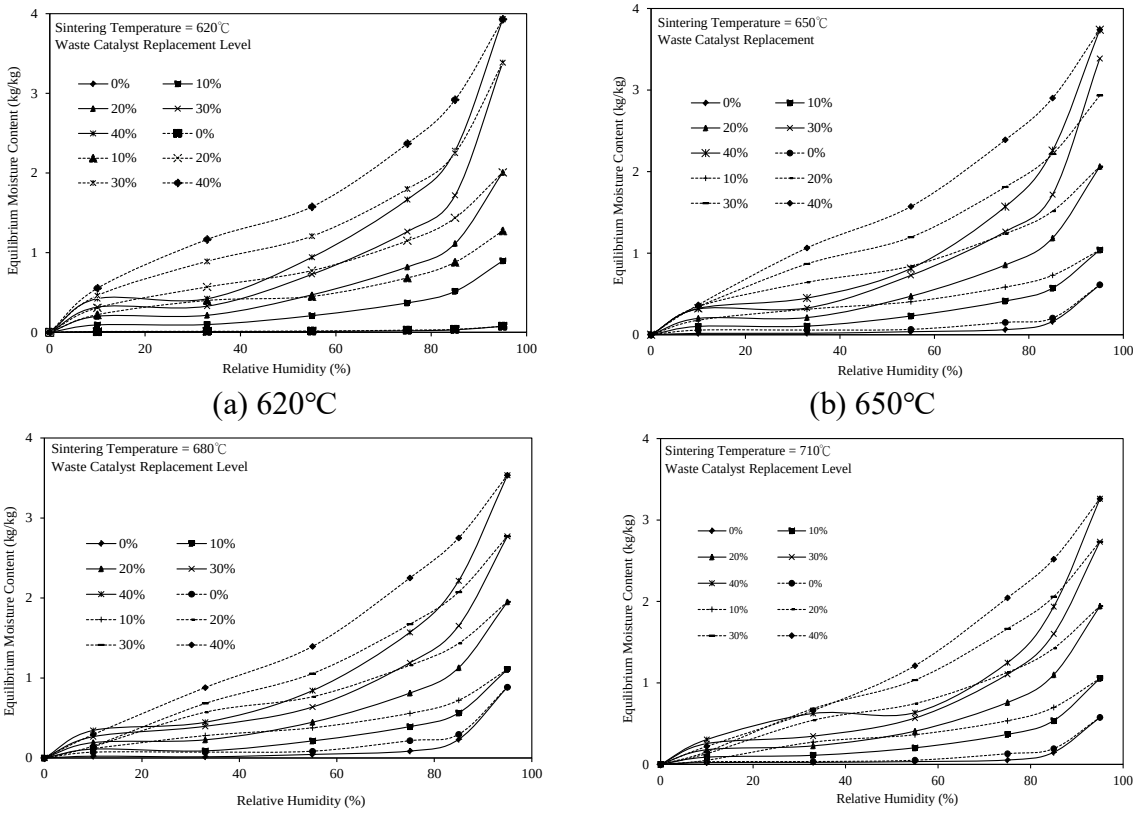
(c) 680℃　　(d) 710℃

圖 7　綠色材料之孔徑大小與孔容積分佈曲線

4. 綠色材料之調濕性能分析

本研究根據日本工業規範 JIS A 1275 之建築材料平衡含水率測定方法，在環境溫度於 23℃下，在不同環境濕度(10%、33%、55%、75%、85%及 95%)條件下測定燒結體之重量變化來繪製出平衡含水率曲線。圖 8 為綠色材料之平衡含水率曲線圖。由圖中得知，當燒結溫度為 680℃時，純

CRT 廢面板玻璃燒結體於相對濕度 95%下，其最大平衡含水率為 0.88 kg/kg；當燒結溫度上升至 710℃時，純 CRT 廢面板玻璃燒結體於相對濕度為 95%下，其最大平衡含水率為 0.57 kg/kg，根據 Maeda 及 Ishida 等人(2009)指出水蒸汽吸附和脫附量隨燒結溫度增大而降低[9]。另外，當燒結溫度為 620℃時，廢觸媒添加量為 10-40%之燒結體，於相對濕度為 95%下，其平衡含水率為 0.89-3.92 kg/kg；當燒結溫度上升至 710℃時，廢觸媒添加量為 10-40%之燒結體，於相對濕度為 95%下，其平衡含水率分別為 1.05 kg/kg、1.94 kg/kg、2.73 kg/kg 和 3.26 kg/kg。由上述可知，因 CRT 廢面板玻璃主要成分為 SiO_2 和 Ba，而 SiO_2 於燒結過程中，轉變成矽酸鹽類化合物，形成玻璃相並填補孔隙通道且金屬 Ba 經熔融形成液態金屬，降低燒結溫度，使燒結體趨於緻密化，其平衡含水率有下降之現象。另外，廢觸媒添加量為 10-40%之燒結體，於相對濕度為 95%下，其平衡含水率有上升之趨勢，係因廢觸媒主要成分為 SiO_2 (43.40%)和 Al_2O_3 (51.50%)，而 Al_2O_3 屬於高熔點且耐熱性氧化物質，因此，Al_2O_3 於燒結過程不易被熔融而形成孔洞結構，故添加廢觸媒燒結體能保持良好之水蒸氣吸附特性。



(a) 620℃　(b) 650℃

(c) 680℃　(d) 710℃

圖 8　綠色材料之 24 小時平衡含水率曲線

四、結　論

本研究利用 CRT 廢面板玻璃做為基底材料，添加不同取代量之廢觸媒，並改變不同燒結溫度等操作條件，燒製綠色材料，並建立綠色材料之巨微觀分析。本研究之結果如下：

1. CRT 廢面板玻璃主要成分為 SiO_2 及 Na_2O，而廢觸媒主要成分為 SiO_2 及 Al_2O_3。CRT 廢面板玻璃及廢觸媒皆符合重金屬溶出量標準，故具資源化之潛力。
2. 當燒結溫度為 680℃至 710℃時，CRT 廢面板玻璃燒結體皆形成液相燒結，並於燒結過程中金屬熔化形成液相燒結其填滿顆粒間之孔隙，形成緻密化之燒結體，故燒結體有較高之抗彎強度。
3. FTIR 分析結果顯示，波數於 1000-1100cm^{-1} 範圍內主要為層狀矽酸鹽的矽四面體層鍵結的矽氧烷表面 (Si-O-Si)非對稱性伸縮，波數於 600-620cm^{-1} 出現一寬對稱伸縮振動，其可能鋁矽酸鹽中之 Si-O-(Si, Al)鍵結形成，顯示出燒結體前後之表面官能以 Si-O-Si 和 Si-O-(Si, Al)存在，故燒結體主要成分為 SiO_2 及 Al_2O_3。
4. 當燒結溫度為 710℃，廢觸媒添加量為 10-40%時，其吸附量分別為 3 cm^3/g STP、8.66 cm^3/g STP、13.7 cm^3/g STP 及 16.2 cm^3/g STP，顯示吸附量隨燒結溫度增加而有下降之現象，係因 SiO_2 形成玻璃化物質以黏滯流填補孔洞。
5. 當燒結溫度為 620℃時，廢觸媒添加量為 10-40%之燒結體，於相對濕度為 95%下，其平衡含水率為 0.89-3.92 kg/kg，於相對濕度為 95%下，其平衡含水率有上升之趨勢，係因廢觸媒主要成分為 SiO_2 (43.40%)和 Al_2O_3 (51.50%)，而 Al_2O_3 屬於高熔點且耐熱性氧化物質，因此，Al_2O_3 於燒結過程不易被熔融而形成孔洞結構，故添加廢觸媒燒結體能保持良好之水蒸氣吸附特性。
6. CRT 廢面板玻璃合成綠色材料，符合生態營建材料之再製性及環境友善特性，具 100%回收再利用之潛力。

五、參考文獻

1. Barbosa V.F., MacKenzie K.J., Thaumaturgo C., (2000). Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysialate polymers, International Journal of Inorganic

Materials, 2, 309-317.
2.Meng B., Ren S., Li Z., Nie S., Zhang X., Song, W., Guo, Q., Shen, B. (2021). A facile organic-free synthesis of high silica zeolite Y with small crystal in the presence of Co^{2+}, Microporous Mesoporous Mater, 111248.
3.Pant D., Pooja S., (2013). Chemical modification of waste glass from cathode ray tubes (CRTs) as low cost adsorbent, Journal of Environmental Chemical Engineering, 1, 226-232.
4.蔡宗勳，「都市垃圾焚化飛灰燒結之研究」，碩士論文，中興大學環境工程研究所，2005。
5.Rajesh S., Jantunen H., Letz M., Pichler-Willhelm S., (2011). Low Temperature Sintering and Dielectric Properties of Alumina-Filled Glass Composites for LTCC Applications. International Journal of Applied Ceramic Technology.
6.Soltani N., Pech-Canul M.I., Bahrami A., (2013). Effect of 10 Ce-TZP/Al_2O_3 nanocomposite particle amount and sintering temperature on the microstructure and mechanical properties of Al/(10Ce-TZP/Al2O3) nanocomposites, Materials & Design, 50, 85-91.
7. Itinoche K.M., Özcan M., Bottino M.A., (2003). Oyafuso, D., Effect of mechanical cycling on the flexural strength of densely sintered ceramics, Dental Materials, 22, 1029-103.
8.Fernandes H.R., Andreola F., Barbieri L., Lancellotti I., Pascual M.J., Ferreira J.M., (2013). The use of egg shells to produce Cathode Ray Tube (CRT) glass foams. Ceramics international, 39, 9071-9078.
9.Álvarez-Ayuso E., Querol X., Plana F., Alastuey A., Moreno N., Izquierdo M., Barra M., (2008). Environmental, physical and structural characterisation of geopolymer matrixes synthesised from coal (co-) combustion fly ashes, Journal of hazardous materials, 154, 175-183.
10.Maeda H., Ishida E.H., (2009). Water vapor adsorption and desorption of mesoporous materials derived from metakaolinite by hydrothermal treatment. Ceramics International, 35, 987-990.
11. de Almeida Silva M., Romagnoli É.S., de Carvalho Pereira R., Tarley C.R.T., Segatelli, M.G., (2020). Structure and porosity of silicon oxycarbide/carbon black composites, Mater. Chem. Phys, 254, 123503.

以田口法探討硫酸對鋰電池正極浸漬之研究

王健至*、湯逸勤**、申永輝***

摘　要

隨著時代演進及電動車發展，未來廢棄鋰離子電池數量，將年年攀升；廢棄鋰電池中約含有有價金屬 5~20％鈷、5~10％鎳及 5~7％鋰，若不妥散處理，將對環境造成不可挽救的危害，因此回收廢棄鋰離子電池，將成為一重要課題；本研究以田口法，探討控制因子溫度、固液比、時間、酸濃度及雙氧水添加量，對廢棄鋰電池正極浸漬率的影響權重；經由田口法初步獲得最佳化製程參數為固液比 10 g L^{-1}、雙氧水添加量 1.5 vol%、酸濃度 2 mol L^{-1}、溫度 60℃、時間 45 min；由於各因子間可能存在交互作用，因此將進行最佳化製程參數的確認實驗，依浸漬率影響權重先後排序進行確認實驗(固液比>雙氧水添加量>酸濃度>溫度>時間)，最終獲得最佳浸漬參數為固液比 25 g L^{-1}、雙氧水添加量 1.5 vol%、酸濃度 2 mol L^{-1}、溫度 60℃、時間 15 min，Li、Co、Ni、Mn 浸漬率分別為 96.41%、82.53%、89.25%、99.99%；由最佳化浸漬結果得知溫度及時間參數影響浸漬效率不大，因此可利用酸液配置時所放出的熱，進行不加熱浸漬實驗，最終 Li、Co、Ni、Mn 浸漬率分別為 93.23%、81.44%、84.00%、99.99%，與最佳化製程參數相比浸漬率僅下降 5%，此方法也成功將有價金屬浸漬溶出。

【關鍵詞】廢棄鋰電池、田口法、循環利用、硫酸浸漬、濕法冶金

---

*國立成功大學資源工程學系 博士研究生

**國立成功大學資源工程學系 博士研究生

***國立成功大學資源工程學系 教授

一、前言

鋰離子電池主要由金屬、有機化學物質和塑料組成，約含有 5~20％鈷、5~10％鎳、5~7％鋰、15％有機化學物質和 7％塑料，其組成因製造商而異；由於鋰離子電池(a)高電池電壓(b)高能量密度(c)自放電率低(d)運作溫度範圍較廣等優點，常作為行動電話、筆記型電腦、電子設備電源等應用，最近，隨著混合動力和電動汽車（HEV 和 EV）的發展，鋰電池生產量也隨之增加，因此未來廢棄鋰電池回收，將成為一重要課題。

根據美國地質調查局報告，2019 年金屬鋰、鈷、鎳及錳全球產量約為 86,000、144,000、2,610,000、19,600,000 公噸；2019 年用於生產電動車的鋰電池，約使用金屬鋰、鈷、鎳及錳約 17,000、19,000、65,000、22,000 公噸；預計到 2030 年將有 2.45 億輛電動汽車，所需金屬鋰、鈷、鎳及錳將上升至 185,000、180,000、925,000、177,000 噸/年； 2020 年，僅中國就將產生約 500,000 噸廢舊鋰離子電池，其回收率小於 5%，且預計到 2030 年，全球每年將有 200 萬噸廢棄鋰電池，因此若能從廢棄鋰電池中回收有價金屬鋰、鈷、鎳及錳，不僅能解決廢棄物問題，還能實現循環經濟之理想。

下列為使用硫酸進行鋰電池浸漬之研究；Chen 等人，使用 2mol/L 硫酸、10vol%雙氧水、液固比 30ml/g、溫度 70℃、時間 90min，成功從鋰鎳錳鈷氧化物（NMC）中，浸漬出金屬 Li：99.76%、Co：98.46%、Ni：98.56%及 Mn：98.62%；Yang 等人，使用 3mol/L 硫酸、3vol%雙氧水、固液比 20g/L、溫度 80℃、時間 60min，成功從鋰鎳錳鈷氧化物（NMC）中，浸漬出金屬 Li：97.8%、Co：96.5%、Ni：98.1%及 Mn：97.0%；He 等人使用 1mol/L 硫酸、1vol%雙氧水、固液比 40g/L、溫度 40℃、時間 60min，成功從鋰鎳錳鈷氧化物（NMC）中，浸漬出金屬 Li、Co、Ni、 Mn 約 99.7%；上述研究成果都採用一次一因子實驗法，無法得知各參數對浸漬率影響程度，因子效應是相對於特定的參照實驗條件下的計算值，且雖鋰電池材料有所不同，但浸漬溫度最大差異達 30℃，其他因子也有所差異；本研究採用田口法，以相對全因子實驗較少的實驗次數，來獲得有用的統計資訊，首先確認參數對浸漬率影響權重，並將影響權重由大至小排列，尋找浸漬最佳化製成參數，此方法能有效兼顧實驗成本及精確度。

二、研究方法

1.材料

本研究所使用材料，為廢棄鋰離子電池正極材料，表 1 列出正極材料粉末經王水消化後，以原子吸收光譜儀進行分析，所得金屬成分及含量，其中 Li、Co、Ni、Mn 為本研究主要浸漬之目標金屬。

表 1　廢棄鋰離子電池正極材料中金屬含量

Element	Al	Mn	Fe	Co	Ni	Li
wt%	0.1	18.1	0.1	31.3	30.0	18.0

2.田口方法

藉由文獻探討，整理出可能影響浸漬率(品質特性)之重要因子(控制因子)，包含：溫度、固液比、時間、酸濃度、雙氧水添加量，一共五個控制因子，選取田口 $L_{16}(4^5)$直交表進行實驗規劃，此直交表可以允許五個控制因子分別有四個水準變化，表 2 列出本實驗所選擇之控制因子及其水準，表 3 為本實驗選用之直交表。

表 2　選擇之控制因子及水準

Factors	Temperature	S/L ratio	Time	Acid	H_2O_2
Unit	℃	g L^{-1}	min	mol L^{-1}	vol%
Level 1	60	10	15	0.5	0
Level 2	70	20	30	1.0	0.5
Level 3	80	30	45	1.5	1.0
Level 4	90	40	60	2.0	1.5

表 3　$L_{16}(4^5)$直交表

Exp.	1	2	3	4	5
1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	2	2
3	1	3	3	3	3
4	1	4	4	4	4
5	2	1	2	3	4
6	2	2	1	4	3
7	2	3	4	1	2
8	2	4	3	2	1
9	3	1	3	4	2
10	3	2	4	3	1
11	3	3	1	2	4
12	3	4	2	1	3
13	4	1	4	2	3
14	4	2	3	1	4
15	4	3	2	4	1
16	4	4	1	3	2

3.因子效應分析

由 $L_{16}(4^5)$直交表進行十六次直交表實驗後，利用原子吸收光譜儀確認金屬濃度，並計算有價金屬 Li、Co、Ni、Mn 浸漬率及因子效應，亦即每個控制因子的變動，對浸漬率的影響，最終利用因子反應圖及因子反應表，判斷控制因子對於浸漬率影響權重。

4.製程最佳化

因子效應分析後，為確認分析結果為最佳製程，亦即控制因子之交互作用小且可忽略，因此將進行確認實驗，此階段將視控制因子對於浸漬率影響權重，由大至小製作實驗，以確認最佳製程參數。

三、結果與討論

1.硫酸浸漬

首先，進行硫酸正交實驗，以確認控制因子，溫度、固液比、時間、酸濃度及雙氧水添加量，對廢棄鋰離子電池正極浸漬影響權重。有價金屬 Li、Co、Ni、Mn 之浸漬率，如表 4 所示，由實驗結果可知五項控制因子共同影響浸漬率。

表 4　各因子於不同水準下有價金屬 Li、Co、Ni、Mn 之浸漬率

No.	Temperature	S/L ratio	Time	Acid	H_2O_2	Li	Co	Ni	Mn
Unit	℃	g L^{-1}	min	mol L^{-1}	vol%	%	%	%	%
1	60	10	15	0.5	0	76.54	33.89	40.74	40.37
2	60	20	30	1.0	0.5	79.29	61.78	54.50	75.66
3	60	30	45	1.5	1.0	85.75	69.44	75.77	86.19
4	60	40	60	2.0	1.5	89.31	74.16	77.24	90.35
5	70	10	30	1.5	1.5	93.22	83.50	96.35	94.71
6	70	20	15	2.0	1.0	80.12	81.45	68.66	96.56
7	70	30	60	0.5	0.5	70.74	50.49	43.98	53.85
8	70	40	45	1.0	0	68.95	34.06	30.75	29.59
9	80	10	45	2.0	0.5	90.39	76.42	92.24	76.72
10	80	20	60	1.5	0	56.45	35.30	49.65	29.51
11	80	30	15	1.0	1.5	59.60	61.45	45.46	72.08
12	80	40	30	0.5	1.0	61.91	51.61	42.07	57.89
13	90	10	60	1.0	1.0	89.51	78.04	91.99	76.54
14	90	20	45	0.5	1.5	58.60	82.32	41.29	90.21
15	90	30	30	2.0	0	65.44	38.42	57.49	27.43
16	90	40	15	1.5	0.5	66.22	43.48	61.79	44.71

2.因子效應分析

因子反應表如表 5 所示，因子反應圖如圖 1 所示，由結果可知影響 Li 浸漬率大小的因子順序為固液比>溫度>酸濃度>雙氧水添加量>時間，影響 Co 浸漬率大小的因子順序為雙氧水添加量>固液比>酸濃度>時間>溫度，影響 Ni 浸漬率大小的因子順序為酸濃度>固液比>雙氧水添加量>時間>溫度，影響 Mn 浸漬率大小的因子順序為雙氧水添加量>固液比>溫度>酸濃度>時間。最終認為影響浸漬率大小因子順序為固液比>雙氧水添加量>酸濃度>溫度>時間，初步選擇固液比 10 g L^{-1}、雙氧水添加量 1.5 vol%、酸濃度 2 mol L^{-1}、溫度 60℃、時間 45 min，為最佳化製程參數。

表 5　各金屬因子反應表

	effect factor	A	B	C	D	E
		temperature	time	acid	H_2O_2	S/L
Li	K1	82.72%	70.62%	66.95%	66.85%	87.41%
	K2	78.26%	74.97%	74.34%	76.66%	68.62%
	K3	67.09%	75.92%	75.41%	79.32%	70.38%
	K4	69.94%	76.50%	81.32%	75.18%	71.60%
	extreme deviation	15.64%	5.88%	14.37%	12.48%	18.80%
	priority order	S/L>temperature>acid>H_2O_2>time				

	effect factor	A	B	C	D	E
		temperature	time	acid	H_2O_2	S/L
Co	K1	59.82%	55.07%	54.58%	35.42%	67.96%
	K2	62.37%	58.83%	58.83%	58.05%	65.21%
	K3	56.20%	65.56%	57.93%	70.13%	54.95%
	K4	60.56%	59.50%	67.61%	75.36%	50.83%
	extreme deviation	6.18%	10.49%	13.03%	39.94%	17.13%
	priority order	H_2O_2>S/L>acid>time>temperature				

	effect factor	A	B	C	D	E
		temperature	time	acid	H_2O_2	S/L
Ni	K1	62.06%	54.16%	42.02%	44.66%	80.33%
	K2	59.94%	62.60%	55.67%	63.13%	53.53%
	K3	57.35%	60.01%	70.89%	69.62%	55.67%
	K4	63.14%	65.72%	73.91%	65.08%	52.96%
	extreme deviation	5.79%	11.55%	31.89%	24.97%	27.37%
	priority order	acid>S/L>H_2O_2>time>temperatre				

	effect factor	A	B	C	D	E
		temperature	time	acid	H_2O_2	S/L
Mn	K1	73.14%	63.43%	60.58%	31.73%	72.09%
	K2	68.68%	63.93%	63.47%	62.74%	72.99%
	K3	59.05%	70.68%	63.78%	79.30%	59.89%
	K4	59.73%	62.56%	72.77%	86.84%	55.63%
	extreme deviation	14.09%	8.11%	12.18%	55.11%	17.35%
	priority order	H_2O_2>S/L>temperature>acid>time				

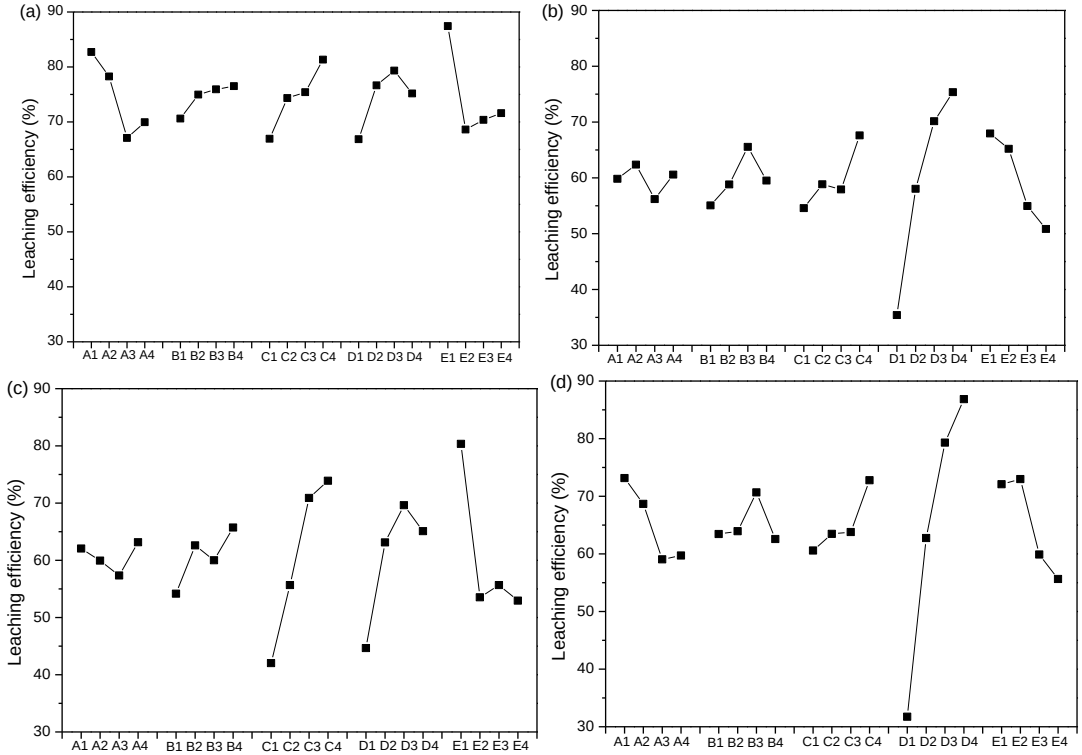


圖 1　金屬 (a) Li (b) Co (c) Ni (d) Mn 因子水準對浸漬率趨勢圖

3.確認最佳化製程參數

(1)固液比對浸漬率影響

由圖 1(a)可知，固液比對浸漬率的影響，在雙氧水添加量 1.5 vol%、酸濃度 2 mol L^{-1}、溫度 60℃、時間 45 min 情況下，考量經濟效益及浸漬效果，選擇固液比 25 g L^{-1} 為最佳參數，其中 Li、Co、Ni、Mn 浸漬率分別為 99.86%、89.27%、84.99%、99.99%。

(2)雙氧水添加量對浸漬率影響

由圖 1(b)可知，雙氧水添加量對浸漬率的影響，在固液比 25 g L^{-1}、酸濃度 2 mol L^{-1}、溫度 60℃、時間 45 min 情況下，四種金屬浸漬率隨著雙氧水添加量增加而增加，當雙氧水添加量 1.5 vol%時，浸漬率最高，後續再添加雙氧水浸漬率不再提高，因此選擇雙氧水添加量 1.5 vol%為最佳參數，其中 Li、Co、Ni、Mn 浸漬率分別為 91.91%、87.88%、82.51%、99.99%。

(3)酸濃度對浸漬率影響

由圖 1(c)可知，酸濃度對浸漬率的影響，在固液比 25 g L^{-1}、雙氧水添加量 1.5 vol%、溫度 60℃、時間 45 min 情況下，四種金屬浸漬率隨著酸濃度增加而增加，當酸濃度 2 mol L^{-1} 時，浸漬率最高，後續增加酸濃度浸漬率不再提高，因此選擇酸濃度 2 mol L^{-1} 為最佳參數，其中 Li、Co、Ni、Mn 浸漬率分別為 95.22%、

86.50%、82.66%、99.99%。

(4)溫度對浸漬率影響

由圖 1(d)可知，溫度對浸漬率的影響，在固液比 25 g L^{-1}、雙氧水添加量 1.5 vol%、酸濃度 2 mol L^{-1}、時間 45 min 情況下，四種金屬浸漬率隨溫度變化並不大，於溫度 60℃時，浸漬率最高，與 40℃相比浸漬率大約上升 4%，因此選擇溫度 60℃為最佳參數，其中 Li、Co、Ni、Mn 浸漬率分別為 95.09%、85.16%、91.31%、99.99%。

(5).時間對浸漬率影響

由圖 1(e)可知，時間對浸漬率的影響，在固液比 25 g L^{-1}、雙氧水添加量 1.5 vol%、酸濃度 2 mol L^{-1}、溫度 60℃情況下，四種金屬浸漬率隨時間增加而增加，當浸漬時間 12 min 時，Li、Co、Ni、Mn 浸漬率分別為 88.47%、75.43%、83.23%、99.97%，當浸漬時間 15 min 時，Li、Co、Ni、Mn 浸漬率分別為 96.41%、82.53%、89.25%、99.99%，浸漬率最高，再次提高浸漬時間並不影響浸漬率，因此選擇時間 15 min 為最佳參數。

(6).最佳化製程參數

最終選擇固液比 25 g L^{-1}、雙氧水添加量 1.5 vol%、酸濃度 2 mol L^{-1}、溫度 60℃及時間 15 min 為最佳化製程參數，Li、Co、Ni、Mn 浸漬率分別為 96.41%、82.53%、89.25%、99.99%。

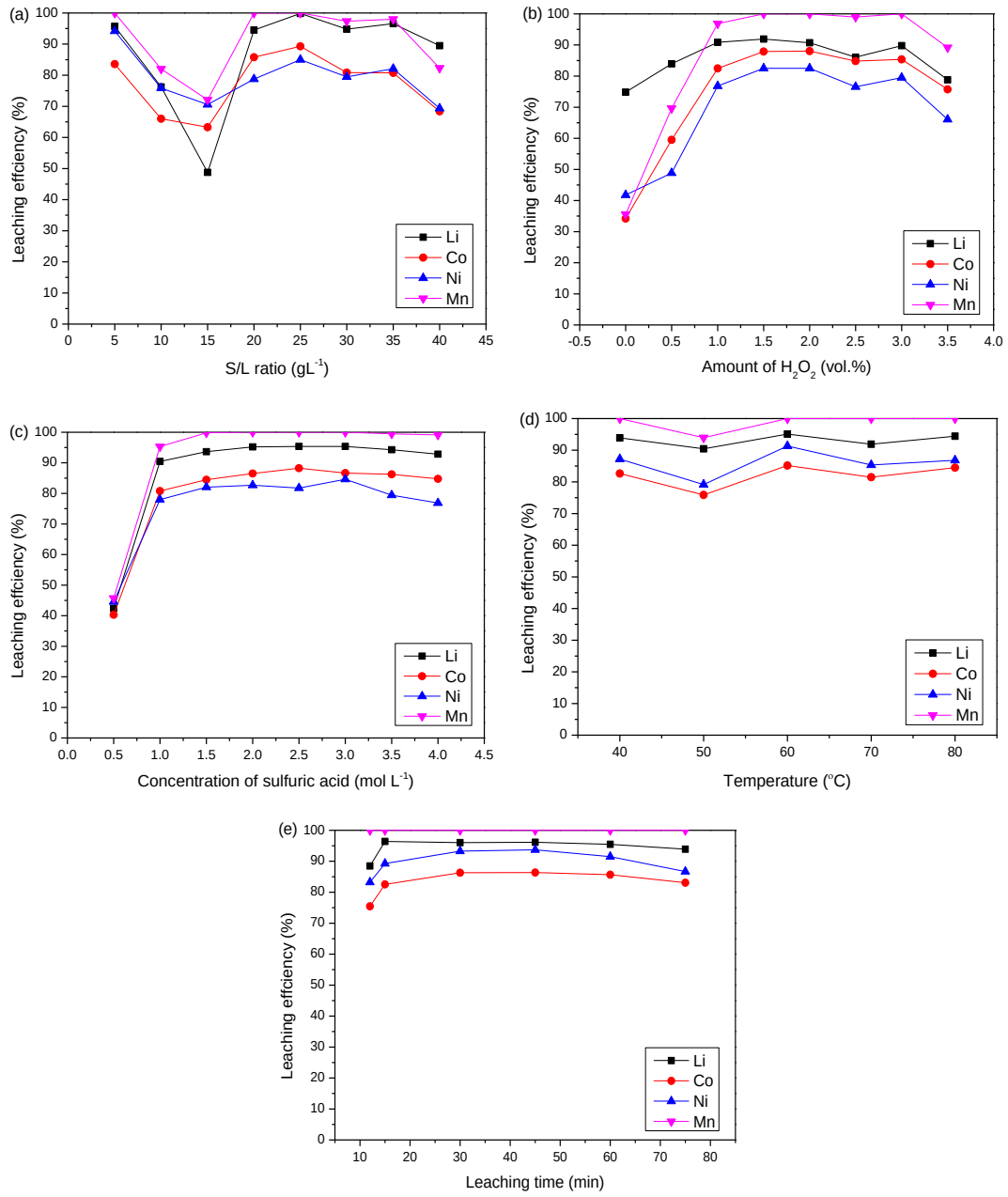


圖 1　在最佳化製成參數下確認

(a)固液比 (b)雙氧水添加量(c)硫酸濃度(d)溫度 (e)時間 對浸漬率影響

4.節能浸漬最佳製程

在上述實驗結果可知，溫度 40℃時浸漬率約比 60℃下降 4%，40℃也能有效浸漬有價金屬，因此可利用酸液配置時所放出的熱，浸漬有價金屬 Li、Co、Ni、Mn，本實驗利用 96%硫酸(18 mol L^{-1})，配製成 2 mol L^{-1} 硫酸，配置後溫度隨時間變化如表 6，在室溫 30℃情況下，最初酸液溫度達 51℃，隨時間拉長，溫度慢慢下降，60min 後溫度下降至 32℃。最終利用表 6 溫度、時間、固液比

25 g L^{-1}、雙氧水添加量 1.5 vol%及酸濃度 2 mol L^{-1} 進行硫酸無加熱浸漬，結果如圖 2 所示，浸漬 60 分鐘後，Li、Co、Ni、Mn 浸漬率分別為 93.23%、81.44%、84.00%、99.99%，與最佳化製程參數相比浸漬率約下降 5%，因此此方法也能成功將有價金屬浸漬溶出。

表 6　室溫 30℃下，酸液隨時間拉長，溫度變化

time (min)	0	15	30	45	60
temperature (℃)	51	40	35	34	32

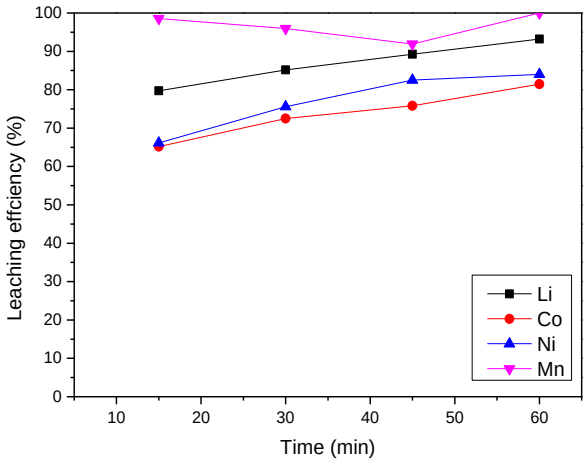


圖 2 無加熱條件下硫酸浸漬成果

四、結論

本文以田口方法探討硫酸對廢棄鋰電池正極浸漬率影響，同時考量溫度、固液比、時間、酸濃度及雙氧水添加量等五個因子，對於廢棄鋰離子電池正極浸漬影響，導入 $L_{16}(4^5)$直交表進行實驗規劃。由直交表實驗結果可知，影響浸漬率權重因子順序為固液比>雙氧水添加量>酸濃度>溫度>時間，初步選擇固液比 10 g L^{-1}、雙氧水添加量 1.5 vol%、酸濃度 2 mol L^{-1}、溫度 60℃、時間 45 min，為最佳化製程參數。最後進行最佳化製程參數確認，結果顯示，在固液比 25 g L^{-1}、雙氧水添加量 1.5 vol%、酸濃度 2 mol L^{-1}、溫度 60℃、時間 15 min 時，Li、Co、Ni、Mn 浸漬率分別為 96.41%、82.53%、89.25%、99.99%，能有效從廢棄鋰電池正極中溶出金屬。本研究發現溫度及時間對於浸漬率影響較小，因此利用配置酸液的所放出的熱進行浸漬，結果顯示 Li、Co、Ni、Mn 浸漬率分別為 93.23%、81.44%、84.00%、99.99%，此方法也能成功將有價金屬浸漬溶出。

誌謝

本研究感謝國立成功大學選礦實驗室申永輝教授的指導，以及本團隊研究人員的配合，方能於研究上獲得良好的研究成果。

五、參考文獻

1. Shin, S.M., et al., Development of a metal recovery process from Li-ion battery wastes. Hydrometallurgy, 2005. 79(3): p. 172-181.
2. Nishi, Y., Lithium ion secondary batteries; past 10 years and the future. Journal of Power Sources, 2001. 100(1): p. 101-106.
3. Ferreira, D.A., et al., Hydrometallurgical separation of aluminium, cobalt, copper and lithium from spent Li-ion batteries. Journal of Power Sources, 2009. 187(1): p. 238-246.
4. U.S.GeologicalSurvey, Mineral Commodity Summaries 2017. 2017.
5. U.SGeologicalSurvey, Mineral Commodity Summaries 2018. 2018.
6. U.S.GeologicalSurvey, Mineral Commodity Summaries 2019. 2019.
7. U.S.GeologicalSurvey, Mineral Commodity Summaries 2020. 2020.
8. U.S.GeologicalSurvey, Mineral Commodity Summaries 2021. 2021.
9. Jung, J.C.-Y., P.-C. Sui, and J. Zhang, A review of recycling spent lithium-ion battery cathode materials using hydrometallurgical treatments. Journal of Energy Storage, 2021. 35: p. 102217.
10. Chen, W.-S. and H.-J. Ho, Recovery of Valuable Metals from Lithium-Ion Batteries NMC Cathode Waste Materials by Hydrometallurgical Methods. Metals, 2018. 8(5).
11. Yang, X., et al., A Combined Method of Leaching and Co-Precipitation for Recycling Spent Lini0.6Co0.2Mn0.2O2 Cathode Materials: Process Optimization and Performance Aspects. JOM, 2020. 72(11): p. 3843-3852.
12. He, L.-P., et al., Leaching process for recovering valuable metals from the LiNi1/3Co1/3Mn1/3O2 cathode of lithium-ion batteries. Waste Management, 2017. 64: p. 171-181.
13. Li, G., et al., Leaching of limonitic laterite ore by acidic thiosulfate solution. Minerals Engineering, 2011. 24(8): p. 859-863.
14. Fan, E., et al., Leaching Mechanisms of Recycling Valuable Metals from Spent

Lithium-Ion Batteries by a Malonic Acid-Based Leaching System. ACS Applied Energy Materials, 2020. 3(9): p. 8532-8542.

廢泡棉醇解再生技術之應用評估

陳思潔*、簡文鎮**、陳松柏***

摘　要

目前國內14家廢電子電器物品處理廠每年回收處理超過40萬台廢電冰箱，拆解電冰箱後所產生之聚氨酯隔熱泡棉因體積大、熱值高、不易分解，現採焚化處理為主，去化管道受限。

醇解回收為目前國際間深受重視的聚氨酯化學回收方法，透過將廢棄聚氨酯在適當的催化劑及反應條件下降解成為低分子量產物，所得產物與多元醇結構及性質相似，可與原生多元醇摻混後再用於產製聚氨酯相關產品。本研究以二元醇作為廢電冰箱聚氨酯隔熱泡棉之醇解劑，並利用 150 L 不鏽鋼反應槽進行小規模放量測試評估，以掌握溫度、壓力、攪拌、過濾等工業化生產反應條件與相關控制因子。所得醇解產物並進行聚氨酯發泡配方調製及再生發泡材料性質評估，以及利用既有市售產品生產線試製 1 款再生發泡產品，以期建立最佳化製程條件與系統放大設計之參考數據，並實際探討醇解回收再生多元醇再製產品之市場應用性和經濟效益。本研究已初步建立本土化廢電冰箱 PUR 高值化循環利用技術之製程方法與參數，包含廢 PUR 粉體表面改質方法、粉體添加量、醇解回收流程、適用之醇解劑、觸媒以及最佳反應條件等，並進行再生發泡材料製作與性能測試，探討廢 PUR 循環再製材料或原料之特性與適用性，以作為未來發展高值化再生應用產品之參考。

【關鍵詞】廢聚氨酯、醇解、化學回收、循環經濟

---

*綠電再生股份有限公司　總經理特助

**明志科技大學化學工程系　教授

***明志科技大學化學工程系　研究員

一、前　言

廢電冰箱拆解處理後衍生之隔熱泡棉係屬硬質聚氨酯泡棉(rigid polyurethane, 以下簡稱 PUR)，係由異氰酸酯(di- or tri poly-isocyanate)及多元醇(polyols)經發泡固化反應生成。經反應後的聚氨酯分子結合成網狀結構之聚合體，具有極穩定的物理化學特性、長期不易腐化，若無法妥善處置，將對自然環境造成很大的負擔。目前針對廢棄聚氨酯普遍採用的處理技術除了能源回收及透過物理回收再製產品外，國際間對於醇解回收技術研究最多、技術成熟，並已有商業化運轉實績。透過將廢棄聚氨酯在適當的催化劑及反應條件下而使其高分子結構降解成低分子量產物，所得產物與多元醇結構及性質相似，可與原生多元醇摻混後再製成聚氨酯產品。根據本公司 109 年度初步研究結果，以二元醇(EG、DEG)作為廢 PUR 之醇解劑，加熱反應後產生之醇解產物可部分取代原料多元醇，並能成功與異氰酸酯反應再進行發泡，且發泡性質與完全採用原生多元醇原料相近，顯示廢 PUR 醇解回收具技術可行性，未來若能實際應用，將可確保資源在循環經濟的系統裡價值最大化，並能夠循環再生、不斷地被利用。

為進一步探討實驗室的研究成果是否能夠與生產線之量產順利銜接，本研究將延續前期醇解回收技術之測試結果，推動再生多元醇小規模試量產技術測試、醇解產物配方開發及再生發泡材商品化驗證等工作，以期建立最佳化製程條件與系統放大設計之參考數據，確認高值循環利用量產技術之可行性。本研究將根據 109 年度於實驗室所開發之醇解回收流程與參數，包含投入原料比例(廢 PUR、醇解劑、觸媒)及製程反應參數等，以不鏽鋼反應槽進行規模放大試量產製程條件評估。所得到的醇解產物則以市場可接受之產品規格為目標，交由多元醇原料廠商進行配方調製，再提供聚氨酯產品製造廠商進行線上生產。透過試量測試探究廢 PUR 醇解再生產品製程技術與應用管道，將可有效掌握商業化運轉參數之參考依據，加速促進廢 PUR 資源化技術的成熟發展，落實循環經濟推動。

二、聚氨酯特性與醇解回收原理

1.聚氨酯特性與應用市場

聚氨酯(Polyurethane，一般統稱縮寫為 PU)，全稱為聚氨基甲酸酯，是 1937 年由 Otto Bayer 等人在 I. G. Farbe 實驗室開發研究出來的高分子有機聚合物，由多異氰酸酯(di- or tri poly-isocyanate)和多元醇聚合物

(polyols)等經過加成聚合反應生成，主要的基團是氨基甲酸酯鍵(—NH—COO—)的重複結構單元[1]，其次是醚、酯、脲等。聚氨酯原料中的多元醇(俗稱白料)負責構成柔性鏈段，異氰酸酯(俗稱黑料)和小分子擴鏈劑等則構成剛性鏈段，透過改變多元醇和異氰酸酯的比例以及調整原料規格，可產出不同物性的發泡製品和非發泡製品。聚氨酯在全球的用量為各類塑膠中的第 5 名，除了主要由異氰酸酯與多元醇反應而成，還包含鏈增長劑(或架橋劑)、觸媒、活性劑、發泡劑、及其他功能性添加劑等原料；聚氨酯的密度、強度、硬度、耐熱、阻燃等特性會隨原料配方的不同而改變，透過在製程中藉由改變原料的成分或比例，即可獲得具有不同孔隙度的硬質或軟質的發泡體。軟質的發泡體多運用於家具、寢具及各類座墊，因其吸音和隔熱效果良好，亦適於吸音隔熱材、鍍鋅鐵板屋頂裡襯及房間隔間。半硬質發泡體常用於車輛內裝材料，例如汽車的臂靠、遮陽板及方向盤墊等，現已結合發泡樹脂液形成表皮，將內部蕊泡狀化，成為 PU 整體皮發泡體。硬質發泡體廣泛運用在低溫隔熱材，特別是冷藏或冷凍庫之隔熱；冷藏庫的隔熱壁就是將原液注入內箱與外箱的空間而發泡，讓內外箱一體化。

2.醇解回收技術原理

醇解法以醇類化合物為分解劑，加熱後聚氨酯廢料將被分解為聚醚或聚酯多元醇。目前作法大多利用乙二醇降解聚氨酯，主要發生兩種鍵斷裂，即 C—N 鍵斷裂和 C—O 鍵斷裂，生成多元醇或多元醇和端胺基 2 端羥基聚合物。反應分解歷程主要有以下兩類：氨基甲酸酯基團的酯交換反應以及脲鍵基團的分解[2]。醇解法的反應條件較為溫和，也可得到品質較佳的多元醇，直接再循環利用於聚氨酯發泡製程，是目前化學回收的主流方法，技術也比較成熟，可實現工業化生產。

國際間已被研究的醇解方法很多，其中又多以小分子的烷基二元醇為主要的醇解劑，在一定比例的醇解劑及助醇解劑如醇胺、叔胺、有機金屬化合物的作用下，反應溫度控制在 150~250℃進行醇解反應 1~5 個小時，即可得再生多元醇及芳香族胺的混合物[3]。反應分解歷程主要有以下兩類：氨基甲酸酯基團的酯交換反應(如圖 1a)以及脲鍵基團的分解(如圖 1b)。

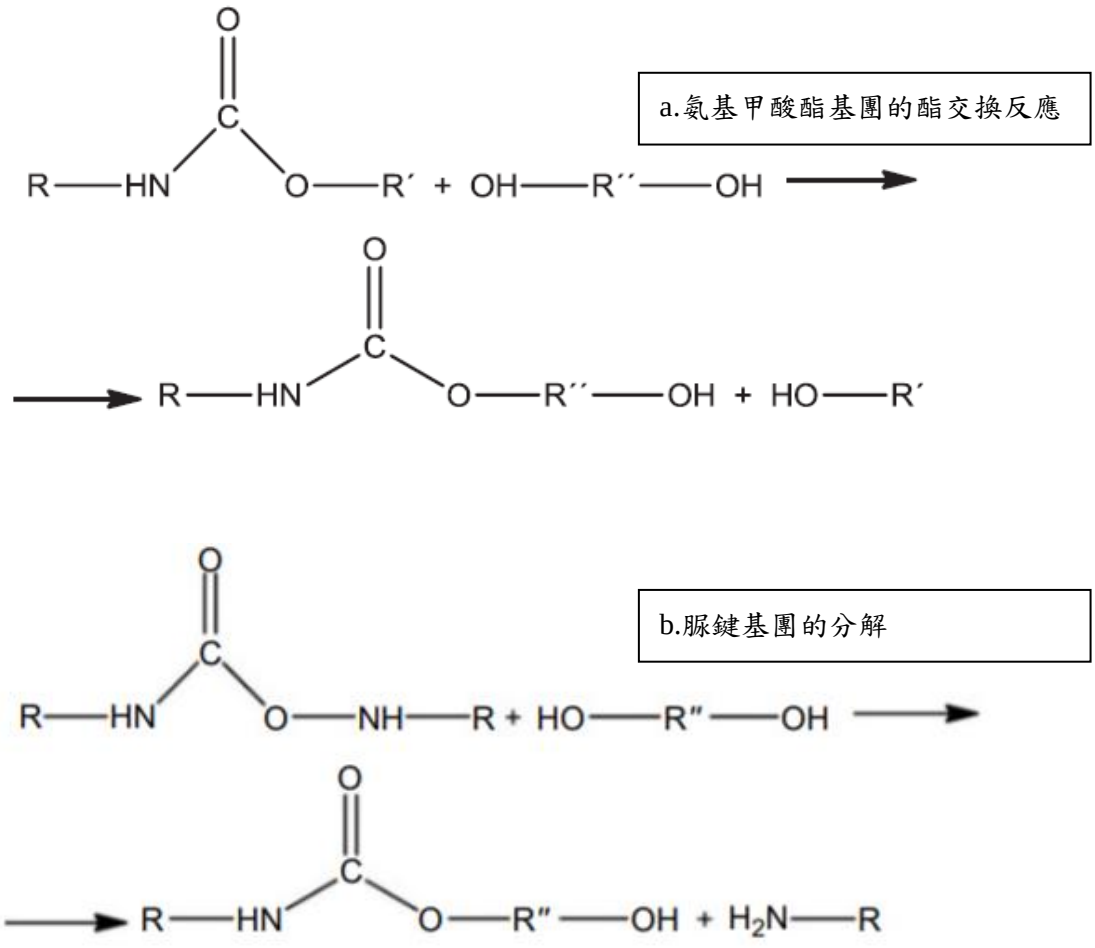


圖1　醇解反應機制(參考例)

本公司已於 109 年度掌握廢 PUR 循環再製技術之主要製程參數，並確認醇解回收技術之可行性。根據 109 年度實驗結果，考量發泡特性及產物再生多元醇之 OH 價，最適進料組成為廢 PUR:醇解劑=1.1~1.3:1、醇解反應的最適溫度及時間為 250℃及 2 小時；以添加 20%再生多元醇進行發泡試驗與泡體性質檢測，結果發現再生泡體的隔熱效果及抗壓強度皆較完全使用新鮮原料表現更佳，證實廢 PUR 可透過醇解反應還原成發泡原料。

三、研究方法

由於，實驗室階段所獲得的最佳反應條件不一定能完全符合放大規模測試的操作要求，因此，本研究針對其中主要的影響因素進行研究測試，以便掌握醇解反應在試量產設備中的變化規律，得到更適用於實際生產設備的反

應條件，並在測試過程中對製程進行調整修正，進而確保廢 PUR 高值循環利用量產技術之可行性。本研究利用小規模試量產設備放大生產模擬產線製程以找出製程放大的影響變數，研究方法為：透過 150L 不鏽鋼反應槽進行廢 PUR 醇解回收小規模試量產測試工作，探討生產規模放大之製程條件與相關控制因子，並經由配方調製與產品線上製作等過程，產製 1 款廢 PUR 再生產品，多元醇原料取代率應達 20%以上，以實際評估醇解回收再生多元醇再製產品之市場應用性與未來商業化運作之可行性。

四、測試樣品製備

本研究測試樣品為本公司拆解電冰箱後回收之廢 PUR。廢電冰箱進入處理廠後，首先於人工拆解站抽取冷媒、回收壓縮機及潤滑油，再取出內部件等以及剪斷電線/銅管，緊接著將整台廢電冰箱的本體投入破碎系統，破碎後之混合物經過磁選、電選、風選後，分離出鐵、銅、鋁、塑膠等再生物料，以及以 PUR 為主的「廢 PUR 混合物」擠壓塊。再進一步將廢 PUR 混合物透過微粉、精緻分選等程序，獲得純化後之廢 PUR(粉)，即為本研究回收再製泡棉之測試樣品。測試樣品製備情形如表 1 所示。

表1　測試樣品製備情形

處理流程	執行方法	圖例
整機破碎	利用破碎機將廢電冰箱外殼進行破碎，破碎成直徑大小約 38 mm 之片狀/塊狀混合物。	
磁/電/風選	破碎後之混合物(含金屬、塑膠、PUR)首先利用磁力選別機將鐵類篩出，其餘混合物質(非鐵類)再進入渦電流分選機篩出銅類，以及風選機將 PUR 及塑膠混合物分離。	

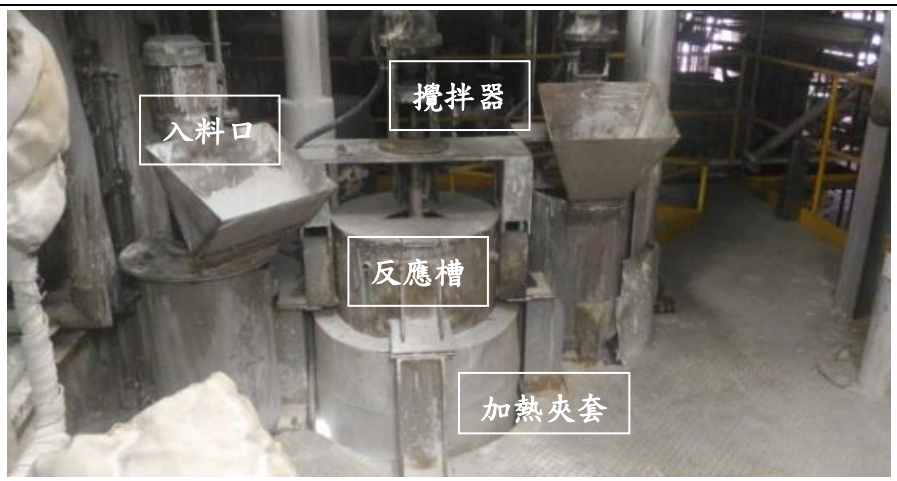
處理流程	執行方法	圖例
擠壓	破碎成塊狀的廢 PUR 及塑膠混合物經過磁/電分選後，利用塑膠比重選別機依比重分出塑膠及 PUR，分離出來的 PUR 再經過擠壓壓縮成為片/塊狀 PUR 減容。	
微粉	擠壓後的廢 PUR 以渦輪粉碎機利用高轉速及特殊刀具分段破碎，其中具有延展性的塑膠則維持較大的尺寸，便於在下個步驟進行分離。	
精緻分選	微粉後之 PUR 以空氣分級機與旋風集塵器、袋式集塵器、引風機組成之分離系統進行精緻分選，以避免造成後續小規模放量測試過濾)生產不順的問題。	

五、醇解回收小規模放量測試

1.測試系統

本年度之研究重點是以放大規模試量產為主軸，所採用的設備為紡織業者廠商 150L 實驗反應系統(如圖 2)。惟考量反應放大時無法和實驗室採用完全相同的操作，因此首先需要就試量產設備規格及試驗條件與廠商進行討論。所得之結論為，試量產設備之耐壓強度必須低於 5 kg/cm^2，再者基於廠商過往 PET 醇解之放量生產經驗，評估若使用短直鏈型之 DEG 為醇解劑，有可能在醇解過程中與醇解產物產生結晶現象，致醇解產物與醇解劑產生相分離現象不利於醇解效率及產物品質。為了在試量產測試之前能夠克服設備限制與可能產生的問題，本研究遂選擇沸點介於 EG 及 DEG 之間的 2-甲基-1,3-丙二醇(MPO)作為醇解劑，利用其分子立體空間之結構來防止其與醇解產物產生結晶，並同時降低醇解反應溫度及反應壓力，以

符合試量產設備之限制與要求。



150L 反應系統

濾袋機

PP 濾袋

圖 2　醇解回收小規模放量測試系統

2.反應步驟

首先加入 15 kg 的二甲基 1,3 丙二醇(mPDO)，接著添加觸媒醋酸鋅 15 g，最後秤重 15 kg 的廢 PUR 粉末，慢慢從上方入料口倒入。待所有原料投入後，關閉入料閥及開啟迴流管控制閥，開始以夾套式加熱器中的熱媒油進行升溫。升溫模式為第一階段採階段性緩慢升溫至 190℃、190℃持溫 2 小時，第二階段快速由 190℃升溫至 210℃，210℃並持溫 2 小時；靜候反應時間到，待槽內反應溶液溫度下降至約 100℃後，再使用過濾裝置搭配濾袋將醇解產物進行過濾，獲得醇解產物。反應溫度曲線如圖 3 所示。

圖 3　醇解反應溫度曲線

3.測試結果

透過階段升溫的方式降低 PUR 粉的醇解反應速率，讓殘存的發泡劑緩慢被釋出，並通過冷凝管釋出到不銹鋼反應器的外部，可有效避免反應物突然起泡的問題，使反應溫度順利達到預期的 210℃並進行醇解反應 2 小時。反應完成後所得醇解產物之黏度值約為 2,750 cp、OH 價約 780，分子量經 GPC 分析估計約可分為三個主要之區間，分別為 2,350、1,033、650 g/mole，顯示聚氨酯已解聚成為不同分子量的小單元分子。放大實驗測試結果如表 2，每批產物之性質無明顯不同，顯示此製程之穩定性與產品性質之再現性，未來將可以上述的生產條件作為量產的參考依據。

表 2　3L 放大實驗之實驗結果

溶劑	PUR：溶劑	第一階段溫度(˚C)	第二階段溫度(˚C)	黏度 (cp)	OH 價	反應壓力
MPO	1:1	190	210	2,682	804	NA
	1:1	190	210	2,750	780	NA
	1:1	190	210	2,727	752	NA

備註：OH(羥值 KOHmg/g)=(淨滴定值)×f×56.1/樣品重量×0.5；(f=標準 KOH 溶液的濃度標定修正值)

4.發泡試驗

本研究以國內硬質聚氨酯使用量較大的低密度泡棉、隔熱品質要求相較於電冰箱隔熱泡棉較為寬鬆的 PU 複合鋼板/庫板作為標的應用產品。目前市場上主要有低密度和高密度兩種配方，低密度為市場大宗；其中，庫板由外烤漆鋼板、內夾 ABS 塑膠相連接，內填充 PU 發泡保溫材(密度~40 kg/cm^3)，使內外鋼板不直接接觸(降低熱傳導)；屋頂板則內層為鋁鋅烤漆

鋼板、中層為 PU 發泡保溫材(密度~20 kg/cm^3)、外層為鋁鋅烤漆鋼板。

測試配方 A (密度~20 kg/m^3)，以直接取代的方式進行發泡試驗。因原產品需求密度低，發泡過程中要求一定程度破泡以求尺寸穩定性，添加再生多元醇後反應過快，發泡品質明顯不佳。本研究進一步以配方 B 進行發泡試驗及發泡性質測試。配方 B 以 100%新料，以及添加 10%、20%、30%再生多元醇進行調製，並依黑白料之 IP 比將密度調整一致。白料的原始料黏度為 255 cps，添加比例為 10、20、30%的黏度分別為 275、340 及 381 cps，顯示隨著較高黏度的再生多元醇添加量提高，白料的黏度也隨之提高。觀察泡體紙杯自由發泡外觀(如圖 4)，當加入再生多元醇比例為 10~20%時，泡體外觀與未添加者接近；但當添加比例達 30%時，泡體外型明顯歪斜；另觀察泡體切片可發現，除添加比例達 30%泡體有較大孔洞外，其餘泡孔均較為均勻。

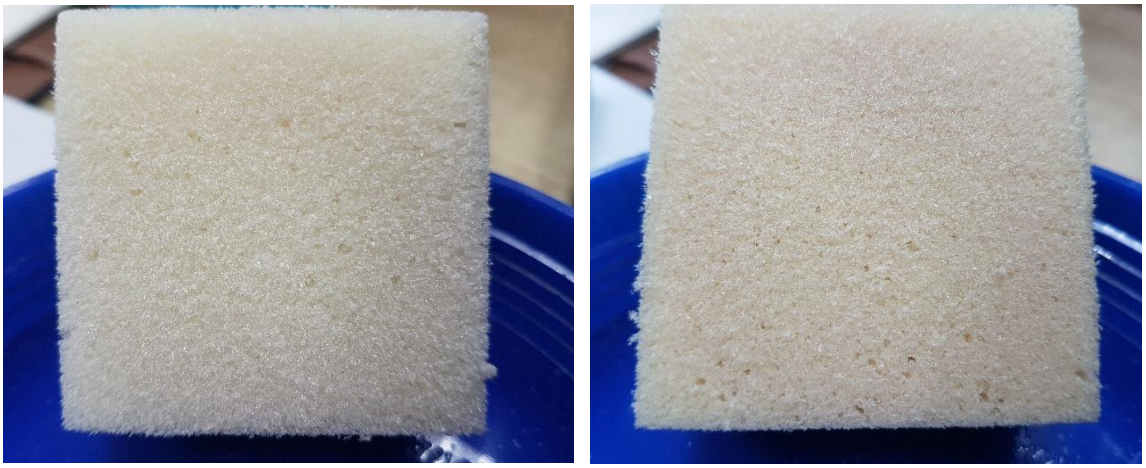
圖 4　再生發泡試驗自由發泡(配方 B)

簡易發泡實驗漿料性質、發泡參數及泡體性質之分析結果如表 3 所示。由表 3 可知，當再生多元醇添加量增加時，並未影響乳化時間及發泡時間。在泡體壓縮強度方面，原始泡體為 2.0 kgf/cm^2，當取代量為 10%時，壓縮強度提高到 2.3 kgf/cm^2，當取代量為 20%時，壓縮強度為 2.2 kgf/cm^2；唯取代量達 30%時，壓縮強度急遽下降為 1.2 kgf/cm^2。在密度方面，簡易發泡試驗的泡體密度隨著取代量的提高而略微提高，顯示取代量最大值為 20%較佳。

表 3　再生發泡性質測試(自由發泡)

測試項目 \ 取代量%		0	10	20	30
白料比例	配方 B	100	90	80	70
	再生多元醇	0	10	20	30
攪拌時間, 秒		10	10	10	10
乳化時間, 秒		20	20	20	20
發泡時間, 秒		2'20"	2'20"	2'20"	2'20"
實際密度(削皮), g/cm^3		0.0320	0.0325	0.0338	0.0344
縮泡情況		發泡階段無分岔	發泡階段會有小分岔	發泡階段會有明顯分岔	分岔嚴重
抗壓強度, kgf/cm^2		2.0	2.3	2.2	1.2

進一步針對再生多元醇取代量 20%進行強制發泡試驗，泡體切片外觀如圖 5、泡體性質檢測如表 4 所示。觀察原始泡體與再生發泡泡體的外觀及切片外觀，兩者泡孔結構皆均勻。在密度方面，原始泡體強制發泡的泡體密度為 0.036 g/cm^3，而再生發泡泡體密度略提高至 0.0376 g/cm^3。在泡體壓縮強度方面，原始泡體為 2.24 kgf/cm^2，而再生發泡泡體提高到 2.48 kgf/cm^2，顯示取代量以 20%較佳，趨勢並與自由發泡一致。在泡體吸水量方面，原始泡體為 2.33 g/100 cm^2，而 20%取代量的為 2.22 g/100 cm^2，顯示取代量以 20%較佳。在泡體熱傳導係數方面，原始泡體為 0.0254 W/mK，而 20%取代量的為 0.0268 W/mK，略高於原始泡體。圖 6 為利用再生多元醇取代量 20%的配方試製的 PU 複合隔熱鋼板。



0%　　20%

圖 5　原始泡體與再生多元醇取代量 20%強制發泡的泡體切片外觀

表 4　再生多元醇取代 20%與原始料的強制發泡泡體性質比較表

項次	驗證項目	測試標準/方法	原始料	取代量 20%
1	密度 g/cm^3	CNS 7774	0.0360	0.0376
2	壓縮強度 (Compressive strength), kgf/cm^2	CNS 7774 (10%壓縮應力)	2.24	2.48
3	吸水量, $g/100cm^2$	CNS 7774	2.33	2.22
4	熱傳導係數, W/mK	Hot Disk	0.0254	0.0268

圖 6　再生多元醇取代 20%再製複合隔熱鋼板

六、結　論

本研究以小規模設備完成製程可行性驗證，包含化學理論、操作程序、最佳化反應條件等，將提供未來設計建置較大規模設施之主要依據。小規模試量產測試需要和實驗室採取不同的處理技巧；相較於實驗室反應控制容易，當反應被放大時，因空間的增大導致物料的熱量傳輸空間增大，溫度與攪拌的控制更顯重要。本研究利用 150L 反應槽進行小規模試量產測試，以進料組成為廢 PUR:MPO=1:1，製程升溫採階段性緩慢升溫至 210℃，可獲得 OH 值約 780 的再生多元醇。根據放大實驗測試結果，每批醇解反應產物之性質相近，顯示此製程之穩定性與產品性質具再現性，未來將可以本研究的生產條件作為量產的參考依據。進一步以再生多元醇取代 20%新料多元

醇進行配方調製與強制發泡試驗，結果發現再生發泡體之隔熱效果雖然略為衰退，但抗壓強度較完全使用新料更佳可達 110%。在循環經濟概念當道的今日，透過醇解技術將廢 PUR 轉化為有價值的再生發泡原料，將可達到社會、經濟及環境平衡發展的永續目標。

誌　謝

感謝行政院環境保護署資源回收管理基金管理會創新及研究發展計畫對本研究之經費補助。

七、參考文獻

1. Nuno V. Gama et al., "*Polyurethane Foams: Past, Present, and Future"*, Materials 2018, 11, 1841.
2. Simón et al., "*Recycling of PU from lab to industry, a journey towards the sustainability"*, Waste Management 76 (2018) 147-171.
3. Mir Mohammad Alavi Nikje et al., "*Polyurethane Waste Reduction and Recycling: From Bench to Pilot Scales"*, Designed Monomers and Polymers 14 (2011) 395–421.
4. Chao-Hsiung Wu, Ching-Yuan Chang, Jiunn-Kuen Li, *Glycolysis of rigid polyurethane from waste refrigerators*, Polymer Degradation and Stability 75 (2002) 413–421.
5. Diego Simon Herrero, *Glycolysis Process for Polyurethane Waste Recycling*, Universidad De Castilla-La Mancha, Thesis Doctoral, 2017.

新型高發泡壽命造渣劑於電爐節能效益評估

林啟明*、何長慶**、于愷文***、張育恩****、趙俊揚****、吳威德****

摘　要

據國際能源署資料顯示，工業界的能源消費最多的產業為石化業(29%)，其次為鋼鐵業(21%)。產業界的二氧化碳(CO_2)直接排放量最多的是水泥業(26%)，其次為鋼鐵業(24%)，顯示鋼鐵業為能源耗量大且 CO_2 排放量高之產業。因應 2015 年巴黎協定內容提及，將在 2030 年達碳排減少 50%與 2050 年達零碳排之目標，鋼鐵產業正面臨能源轉型之迫在眉梢的極大壓力。高爐-轉爐之一貫製程中利用氫氣(H_2)作為燃料來降低 CO_2 排放，已是國際公認最具潛力的新能源冶煉技術，而在電爐製程中如何提升能源效率，藉此降低電力成本是目前首要任務，因此本研究開發出 1 種新型高發泡壽命造渣劑，並導入鋁渣與精煉渣等廢棄物當再生原料，利用 100 噸電爐進行節能效益評估。

由高溫黏度與高溫發泡壽命的量測結果證實，新型造渣劑(含 11.9~15.7%Al_2O_3)擁有較高的液態黏度，約為 36~59cP 與優越之發泡壽命，約為 6.4~7.6min，比傳統造渣劑(Al_2O_3=5%)高出 146~192%。此外由 FactSage 相圖模擬結果顯示，富 Al_2O_3 之新型造渣劑可在 1450~1650^oC 間，形成 100%穩定且高黏度的液態，且不受電爐製程中最難控制的 FeO 含量影響，可大幅增加電爐冶煉過程中造出優越發泡渣的時間，進而達到節能減碳的效果。由 100 噸電爐節能試驗結果顯示低 Al_2O_3 傳統造渣劑，所需的平均電力成本為 378kWh/ton。利用廢鋼中的 Al 氧化或添加鋁渣來當 Al_2O_3 來源，且利用熱精煉渣當 CaO 的來源，而形成富 Al_2O_3 之新型造渣劑，所需的平均電力成本為 319kWh/ton，證實約可達到 15.6%的節能效果，且同步達到進行鋁渣與精煉渣等廢棄物的再利用目標。

【關鍵詞】電爐製程、富 Al_2O_3 新型造渣劑、鋁渣與精煉渣、高溫黏度與發泡壽命特性、電力成本

---

*國立中興大學-金屬研發中心　副研究員
**嘉德技術開發股份有限公司　董事長
***威致鋼鐵工業股份有限公司　廠長
****國立中興大學-材料科學與工程學系　終身特聘教授

一、前　言

鋼鐵產業為能源耗量大且 CO_2 排放量高之產業，其中又以世界產量為重的高爐-轉爐製程，所需之能量(18.83 GJ/t_{HRC})與所排放出的 CO_2(1850 $kgCO_{2eq}/t_{HRC}$)含量為最高，而能量(4.29 GJ/t_{HRC})與 CO_2 排放量最低者為次產量的電爐製程，由此可知電爐製程將是未來國際鋼廠達到節能與減排，最倚重之煉鋼冶煉技術。為了因應 2015 年巴黎協定內容提及，將在 2030 年達碳排減少 50%與 2050 年達零碳排之目標，各國紛紛提出有效降低煉鋼冶煉 CO_2 排放量的創新冶煉技術理念，如歐洲的 ULCOS(超低二氧化碳煉鋼)計畫、日本的 COURSE50 計畫、美國的 AISI 計畫、瑞典的 HYBRIT 計畫、德國的 SALCOS 與 Carbon 2 Chem 計畫、韓國的 COOLSTAR 計畫等，舉例來說圖 1 為歐洲所規畫之超低二氧化碳煉鋼冶煉技術路線圖，由圖中可知利用綠電來電解水(H_2O)而產生氫氣(H_2)，再將 H_2 導入到還原爐進行鐵礦原料的還原反應，而生成無碳直接還原鐵(C-free DRI)，再透過電爐製程以綠電能源將無碳直接還原鐵進行高溫熔化冶煉，最後結合連鑄與壓延等製程，生產出熱壓鋼卷產品。

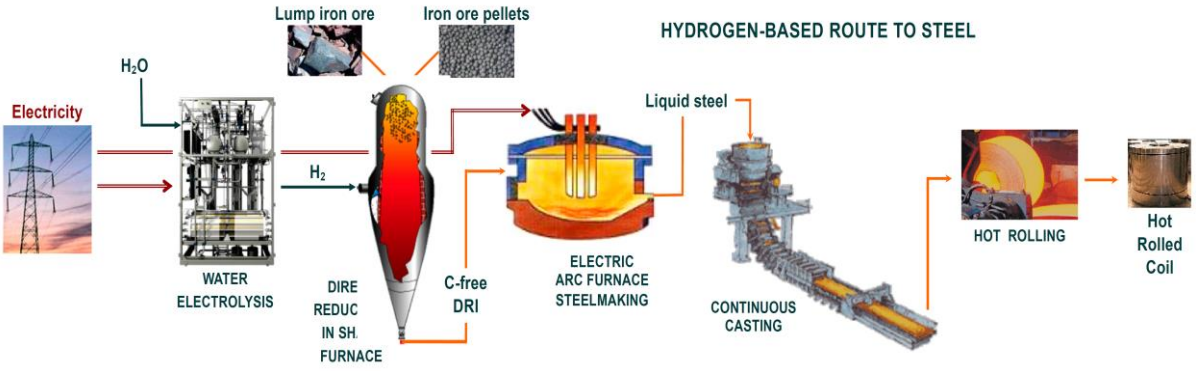


圖 1　歐洲的 ULCOS 之氫基煉鋼路線示意圖

電爐製程是以廢鐵當原料，並利用碳棒當電極通電產生電弧來對廢鋼原料進行加熱，如圖 2 所示，由圖中顯示電爐製程主要的能源用量都集中在電爐熔化與冶煉中，但由於電弧須有效將能量傳遞到廢鋼上才能使廢鋼快速熔化而達到節能效果，由圖 3 的電爐製程中發泡渣對電熱傳輸效率的影響關係圖證實，造出優越發泡渣可以使電熱傳輸效率達到 93%，因此如何在電爐冶煉過程中長時間製造出優越發泡渣，為電爐節能的首要任務，目前鋼廠都是採用大量吹氧與吹碳製程

來製造優越發泡渣，一方面可以透過化學反應產生大量 CO 氣體來製造發泡渣，另一方面可以增加化學能來降低電力的使用量。

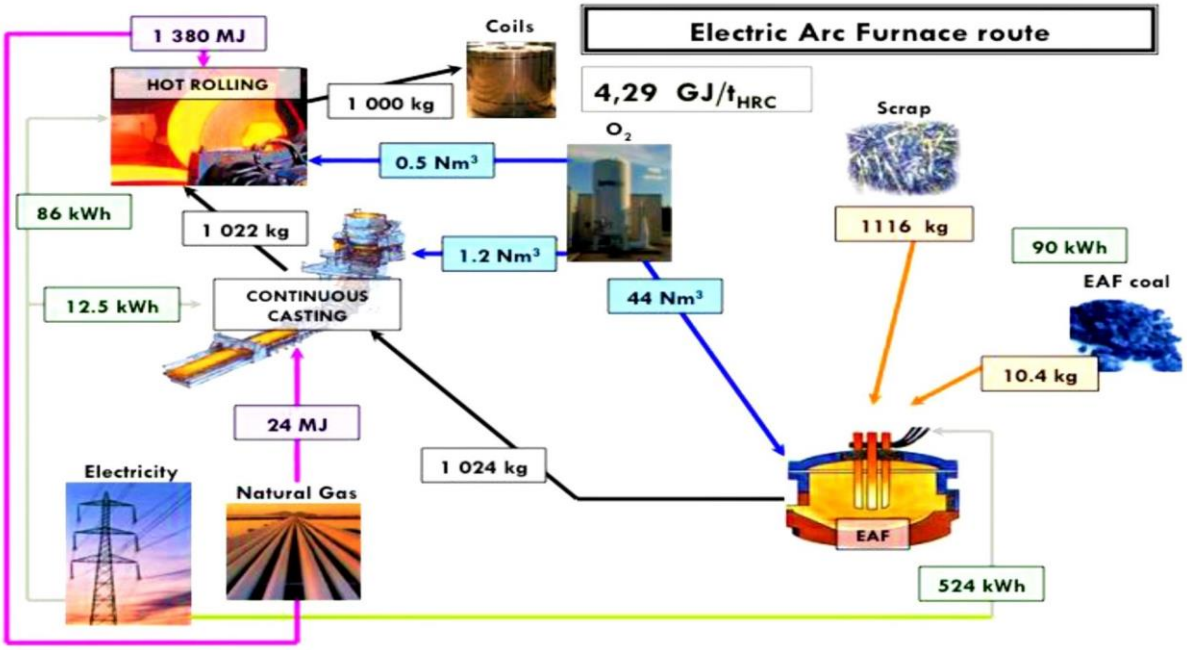


圖 2 電爐製程之物質流與能量流的示意圖

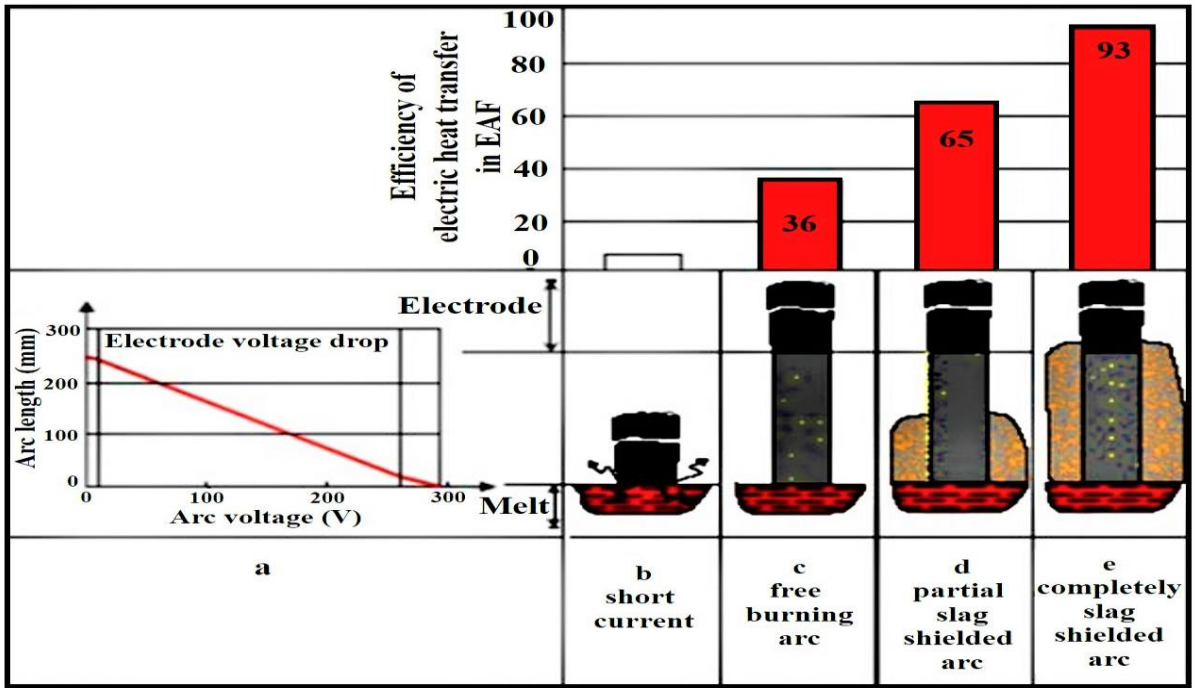


圖 3 電爐製程中發泡渣對電熱傳輸效率的影響

電爐製程中製造優越發泡渣來達到節能與減排之目標已是當前的重要課題。根據 Luz et al.的研究指出影響發泡渣最重要的因素為高溫黏度、作用溫度、造渣鹼度、高溫表面張力、固化相分率等，如圖

4 所示。Pretorius and Oltmann 的研究證實隨著固化相分率的增加則黏度與發泡指數會隨之增加，但是當固化相析出過量時，反而會造成黏度過大而促使發泡指數下降，但目前並無學者明確指出適合製造發泡渣的固化相分率。此外造渣劑成份特性亦是影響黏度與發泡特性之重要因素，Kim et al.的研究得知固定發泡渣成份下，黏度隨溫度的增加而顯著下降，起因於固化相分率下降所導致，此外當 FeO 含量低於 20%時，則黏度與發泡性隨 FeO 含量的增加而顯著下降；當 FeO 含量高於 20%時，則黏度與發泡性不再受 FeO 含量高低而影響。Seok et al.的研究指出提升鹼度(CaO/SiO_2)與降低 FeO 含量為相當有效提升高溫黏度的方法，當固定 FeO=20wt%時則鹼度從 1.5%提升至 3.76%，黏度將從約 125 cP 提升至 1,000cP，提升近 8 倍左右，相當顯著；若固定鹼度為 1.6%下則 FeO 從 20%下降至 10%，黏度將從約 300cP 提升至 800cP，提升近 2.7 倍左右，亦相當顯著，但效應比提升鹼度來得緩慢。Ilyushechkin and Hla 的研究顯示當溫度為 1800K、鹼度為 2.3、FeO 含量為 10wt%時，則 MgO 含量從 8%提升至 10%，黏度將從約 1,000cP 提升至 1250cP，提升近 25%左右，相較鹼度與 FeO 的效應來得較不顯著。

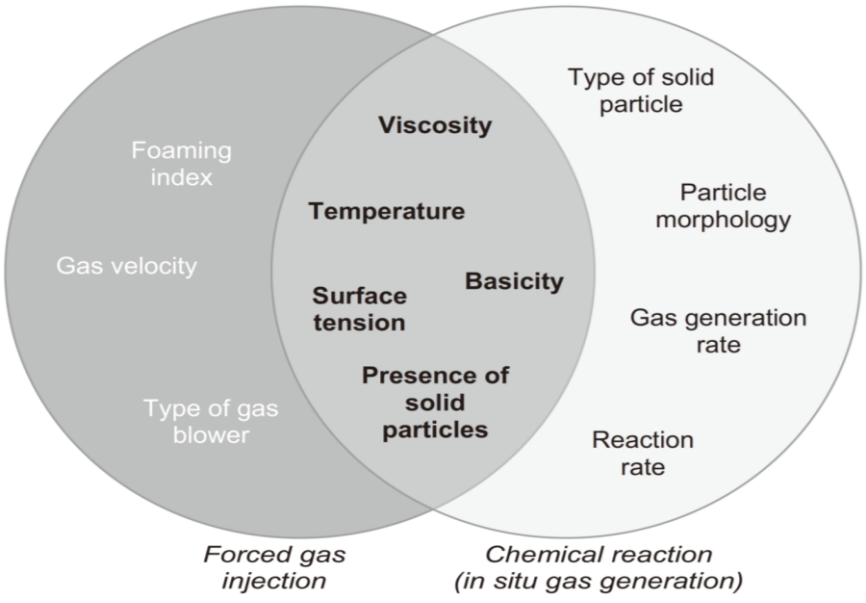


圖 4 影響發泡渣的重要因數說明圖

Shen et al.的研究證實 Al_2O_3 含量對提升造渣劑之液態黏度有顯著的效果，如圖 5 所示，由圖中證實利用固化相析出來控制造渣劑的黏度，受溫度的影響相當顯著，而落入液態後利用液態鍵結之黏度，

對溫度的敏感性較低，此外隨著 Al_2O_3 含量的增加則會顯著地提升液態渣的黏度，在 Al_2O_3=5%下且溫度高於 1,550°C 時，則液態黏度為 65cP；Al_2O_3 提升至 10%下且溫度高於 1,560°C 時，則液態黏度為 76cP；Al_2O_3 提升至 15%下且溫度高於 1,570°C 時，則液態黏度為 91cP；Al_2O_3 提升至 20%下且溫度高於 1,580°C 時，則液態黏度為 114cP，綜觀 Al_2O_3 含量對液態渣黏度的影響效應得知，Al_2O_3 含量從 5%增加至 20%，則液態黏度從 65Cp 增加至 114cP，增加幅度約 75.4%。此外 Shen et al.利用紅外線能譜(FTIR)更深入地探討不同氧化鋁(Al_2O_3)含量下，在液態時該熔渣的鍵結形貌證實，當 Al_2O_3 含量來到一定比例時，Al-O 鍵結會從簡單的四面體結構轉變為較為複雜之八面體結構，甚至當氧化鋁(Al_2O_3)含量≥15%後，開始產生更為複雜之 Al-O-Si 網狀鍵結形貌，藉此透過網狀結構提升熔渣在高溫 1550°C 下之黏度，更能利用此特性在投碳發泡過程中所產生之泡沫不易破裂，優化發泡操作手法。

綜觀上述文獻回顧證實，固化相分率為影響發泡渣之重要因素，起因於可以得到較高的黏度，但固化相分率很容易受到溫度與造渣劑成份的影響而導致黏度不足失去發泡效果，因此本研究將開發 1 種較不受溫度與造渣劑成份影響的新型高發泡壽命造渣劑，並導入鋁渣與精煉渣等廢棄物當再生原料，利用 100 噸電爐進行節能效益評估。

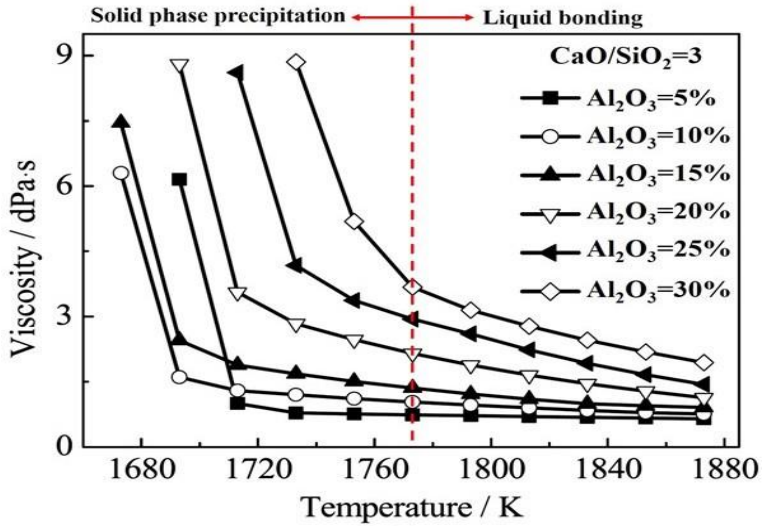
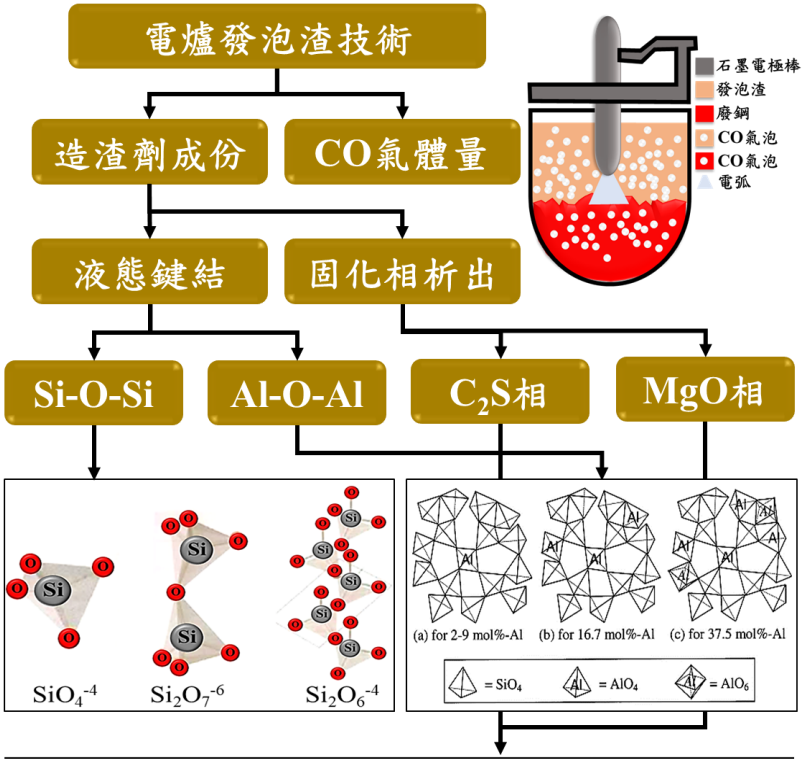


圖 5 Al_2O_3 含量對 $CaO-SiO_2-Al_2O_3-FeO-MgO$ 渣系之黏度的影響



模型類型	模型名稱	計算公式
愛因斯坦模型及其改進模型	Einstein	$\eta=\eta_0(1+2.5f)$
	Roscoe	$\eta=\eta_0(1-1.35f)^{-2.5}$
	Krieger	$\eta=\eta_0(1-f/f_p)^{-[\eta]f_p}$
	Toda	$\eta=\eta_0(1+0.5kf-f)/[(1-kf)^2(1-f)]\quad k=1+0.6f$
單胞模型	Happel	$\eta=\eta_0\{1+f(22f^{7/3}+55-42f^{2/3})/[10(1-f^{10/3})-25f(1-f^{1/3})]\}$ $\eta=\eta_0(1+2.5\lambda f)$
	Simha	$\lambda=4(1-y^2)/[4(1+y^{10})-25y^3(1+y^4)+42y^5]$ $y=(f/f_{max})^{1/3}/[2-(f/f_{min})^{1/3}]$
	Ruiz	$\eta=\eta_0\{1+10f(1-f^{7/3}/[4(1+f^{10/3})-25f(1+f^{4/3})+42f^{5/3}]\}$
	Zholkov	$\eta=\eta_0\{1+10f(1-f^{7/3})/[4(1+f^{7/3})-25f(1+f^{4/3})+42f^{5/3}]\}$
	Brule	$\eta=\eta_0[1+(3\pi/16)\cdot(1-\varepsilon)/\varepsilon],\varepsilon=1-(f/f_{max})^{1/3}$
半經驗模型	Thomas	$\eta=\eta_0[1+2.5f+10.05f^2+0.002\ 73\exp(16.6f)]$
	Batchelor	$\eta=\eta_0(1+2.5f+5.2f^2)$
	Mooney	$\eta=\eta_0 e^{2.5f/(1+1.35f)}$

圖 6 電爐發泡技術原理說明圖

二、台灣電爐鋼廠製造發泡渣的技術特性

圖 6 顯示為電爐發泡技術原理說明圖，由圖中可知電爐發泡技術主要取決於造渣劑成份與 CO 氣體量，而目前台灣電爐廠為了增加化學能，會在冶煉過程中同步噴碳(約 1,100 公斤/100 噸鋼)與吹氧(4,000Nm^3/100 噸鋼)，透過 C+1/2O_2→CO 的放熱反應(△H=-9.72kJ)，來提供熱能並同步大量產生 CO 氣體來使造渣劑進行發泡。但電爐製程技術未來將朝向低 CO 排放的目標，因此要造出優越發泡渣不能僅靠 CO 氣體量，而是要朝向造渣劑成份與 CO 氣體量相互搭配邁進。

由圖 6 亦顯示造渣劑成份改變主要透過液態鍵結與固化相析出等機制來影響發泡渣特性。固化相分率為顯著影響造渣劑黏度之重要因子，且目前眾多學者已導入固化相分率影響因子，提出黏度預估模型，如圖 6 所示，由圖中已證實固化相分率確實可以有效提升造渣劑黏度。在電爐造渣劑的成份上，以 10~30%FeO-1.5~3.0(CaO/SiO_2)-5~15%MgO-5~8%Al_2O_3 渣系為主，因此固化相析出的種類可分為 C_2S 相與 MgO 相，如圖 7 所示，且在文獻中已證實 C_2S 相與 MgO 相的析出，可以有效增加電爐渣的發泡壽命特性。由圖 7(a)的 FeO 對固化相特性的影響結果得知，FeO 含量對 C_2S 相析出量有顯著的影響，當 FeO 含量超過 25%時則會使 C_2S 相熔化而落入全液態區，造成黏度過低而使發泡性下降，且當 FeO 含量低於 15%時則 C_2S 相會大量析出，造成黏度過黏而使發泡性下降，由此可知利用 C_2S 相析出來控制發泡渣對電爐冶煉過程是相當困難的，起因於冶煉過程中 FeO 含量的變化是相當劇烈的。

目前台灣的電爐鋼廠皆使用過飽和 MgO 析出來製造發泡渣，由圖 7(a)的 MgO 對固化相特性的影響結果得知，當 MgO 添加量為 8%時就已達 MgO 飽和點，因此添加量繼續提升至 10%就可以達到 MgO 過飽和析出的效果，且析出量不受 FeO 含量增減而產生劇烈變化，因此利用過飽和 MgO 析出來控制發泡渣技術，廣泛被台灣電爐鋼廠所使用。但是過飽和 MgO 析出量受溫度與成份的影響相當顯著，由圖 7(b)的結果可以得知在 1,450^oC 下，且成份為 C/S=2.0、FeO=30%、MgO=6%、Al_2O_3=5%，則可若入 C_2S+MgO 的固化相析出區，但是隨著煉鋼冶煉溫度增加至 1,500^oC，則開始落入接近全液態區，若冶煉溫度繼續增加至 1,550^oC，則已落入全液態區，由此可知隨著煉鋼冶煉溫度的連續增加(1,500~1,620^oC)，若要持續控制 MgO 相析出，則要精準計算 MgO 原料的投入量與投入時間，這對電爐冶煉技術亦是一項考驗，且原料投入後需時間熔化，將降低有效發泡渣的時間。

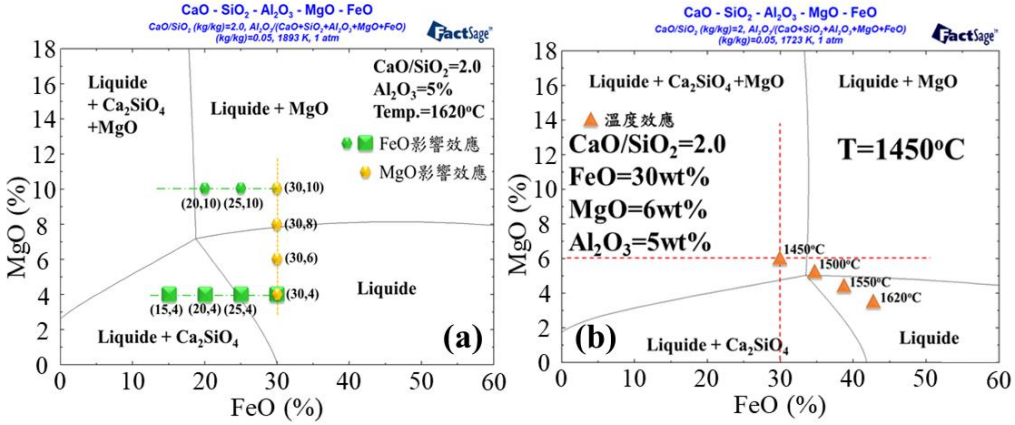


圖 7、不同參數對固化相特性的影響:(a)FeO 與 MgO;(b)溫度

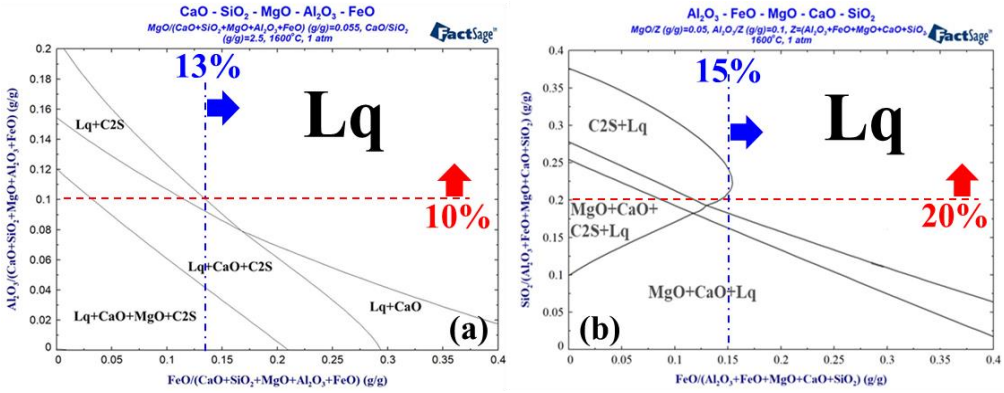


圖 8 不同成份對相區特性的影響:(a)Al_2O_3 與 FeO;(b)SiO_2 與 FeO

再由圖 6 亦顯示透過液態鍵結特性的調整亦可以提升電爐發泡渣特性，在 Yoshida et al.的研究已證實，在 SiO_2-Al_2O_3 系統中隨著 Al_2O_3 含量的增加則液態網狀鍵結的程度會更顯著，此外在 Shen et al.的研究亦已證實，在 CaO-MgO-SiO_2-Al_2O_3-FeO 渣系中，隨著 Al_2O_3 含量的增加則液態渣黏度會隨之顯著增加，起因於鍵結特性的改變，再結合圖 8(a)的 Al_2O_3 與 FeO 含量對造渣劑之高溫相區特性的影響結果得知，在 Al_2O_3 添加量超過 10%與 FeO 含量在 13~40%時，皆可以得到均勻的全液態相。此外圖 8(b)顯示在 SiO_2 添加量超過 20%與 FeO 含量在 15~40%時，亦皆可以得到均勻的全液態相。本研究期望透過液態渣改質來開發出 1 種較不受溫度與造渣劑成份影響的新型高發泡壽命造渣劑，將 SiO_2+Al_2O_3 總量控制在 25~35%下，探討 Al_2O_3 添加量對高溫黏度與發泡壽命的影響，並找出 1 種最具潛力可於 100 噸電爐試驗的配方，透過導入鋁渣與精煉渣等廢棄物當再生原料，而開發出 1 種較不受溫度與造渣劑成份影響的新型電弧高效率發泡技術。

三、新型高發泡壽命造渣劑之開發流程與試驗方法

1.造渣劑配方設計

本研究所設計之造渣劑配方經高溫預熔後之化學成份特性如表 1 所示，由表中可知組別 1 為對照組，是目前台灣電爐鋼廠透過大量產生 CO 氣體來使造渣劑進行發泡的成份特性；組別 2 是利用發泡機制為 C_2S 相析出的成份特性；組別 3 是利用發泡機制為 MgO 相析出的成份特性；組別 4~6 是利用發泡機制為液態鍵結改質的成份特性，其改質方法是將 SiO_2+Al_2O_3 總量控制在 25~35%下，改變 Al_2O_3 添加量分別為 8.6%、11.9%與 15.7%。將不同造渣劑配方進行相特性模擬、高溫黏度量測與發泡壽命評估，藉此找出 1 種最具潛力可於 100 噸電爐試驗的配方，透過導入鋁渣與精煉渣等廢棄物當再生原料，而開發出 1 種較不受溫度與造渣劑成份影響的新型電弧高效率發泡技術。

表 1 造渣劑配方經高溫預熔後之化學成份特性

Sample	Foaming mechanism	Chemical composition, wt%				
		CaO/SiO_2	FeO	MgO	Al_2O_3	MnO
1	No	2.9	22.1	4.5	5.1	6.2
2	C_2S	3.1	16.4	4.6	5.0	6.1
3	MgO	3.0	12.3	9.0	6.5	4.5
4	Lq. bonding	2.5	23.1	4.5	8.6	5.7
5	Lq. bonding	2.5	18.7	5.7	11.9	5.4
6	Lq. bonding	2.5	15.2	6.0	15.7	5.6

2.FactSage 相特性模擬

本研究會使用 FactSage 7.3 軟體內的數據資料庫 FactPS 與 FToxid 進行不同造渣劑配方的相圖計算。本研究會使用 Equilib 模組來計算不同造渣劑成份在不同溫度區間下的固化相種類與固/液相比例，此外亦會使用 Phase Diagram 模組來計算 CaO-MgO-SiO_2-Al_2O_3-FeO 渣系的相圖特性。透過 FactSage 相特性模擬結果來解析，不同造渣劑配方受溫度與成份變化的影響效應程度。

3.高溫黏度量測技術

本研究將利用自行建立之精準度高達 96%以上之高溫黏度量測分析儀進行不同造渣劑之黏度分析，其設備之特性說明如圖 9 所示。由圖 9(a)顯示將分析試樣放置在 Pure-Mo 坩堝內，並放置在 Ø70*430mm 之 Al_2O_3 腔體內，然後透過 10 支 $MoSi_2$ 進行加熱，其加熱程序為 2°C/min，溫度量測範圍為 1,450~1,585°C，所使用之轉子轉速為 20 RPM，樣本重量為 140 g。本研究所使用之坩堝與轉子材質皆為 Pure-Mo，其坩堝之尺寸為 Ø40*100mm，轉子之形狀為 Ø30mm 之圓錐狀。本研究結合文獻之數據利用小型週波爐進行低黏度之標準試樣調製，其成份為 54.6%CaO-45.4%SiO_2，作為本裝置之低黏度精準度測試(200~300cp)，其結果顯示精準度高達 96%以上，如圖 9(b)所示。本研究選用美國實驗室所開發之 717a 標準黏度試樣進行高黏度(12,000~20,000cp)之精準度校正，其結果顯示精準度高達 98%以上，如圖 9(c)所示。

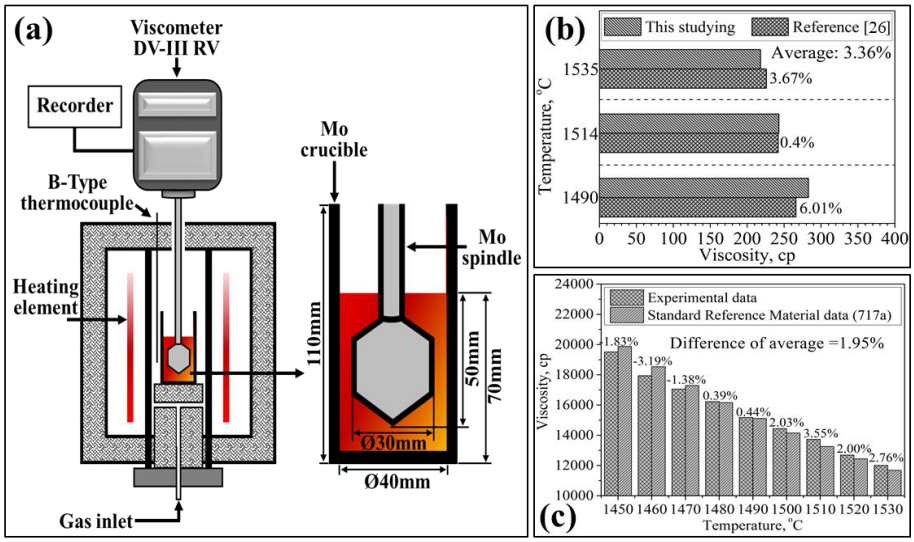


圖 9 高溫黏度設備之特性說明

(a)設備示意圖；(b)高黏度之精準度；(c)低黏度之精準度

4.高溫發泡壽命量測技術

本研究將利用自行建立之高溫發泡壽命量測儀進行不同造渣劑的發泡壽命評估。發泡壽命量測儀之設備示意圖如圖 10(a)所示，利用 B-type 的熱電偶來偵測溫度，偵測位置為試樣表面處，所使用之加熱來源為週波感應爐加熱石墨坩堝而傳導至 Pure-Mo 坩堝上。本儀

器之偵測原理如圖 10(b)所示，利用空氣(約 1.0V)與爐渣(約 3.0~5.0V)之不同電壓原理，偵測出不同時間下爐渣發泡前的高度，取 4 點高度平均求得精準之發泡前高度。本研究之評估方法是將約 35g 的造渣劑放入 Pure-Mo 坩堝內，然後加熱至 1550°C，之後量測發泡前的爐渣液面高度，如圖 10(b)所示，之後將碳粉添加至 Pure-Mo 坩堝內，並開始進行不同時間下之高度與電壓偵測，如圖 10(c)所示，偵測時間直至高度回復至原始高度後 1 分鐘後停止，最終建立出時間與高度變化關係圖，即可以得知發泡壽命特性。

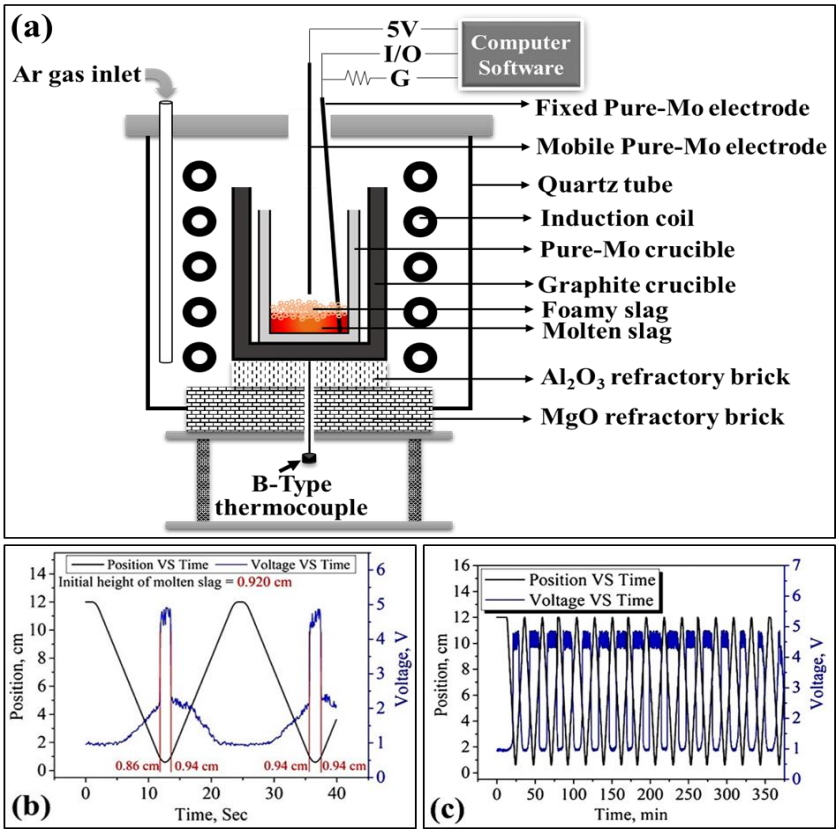
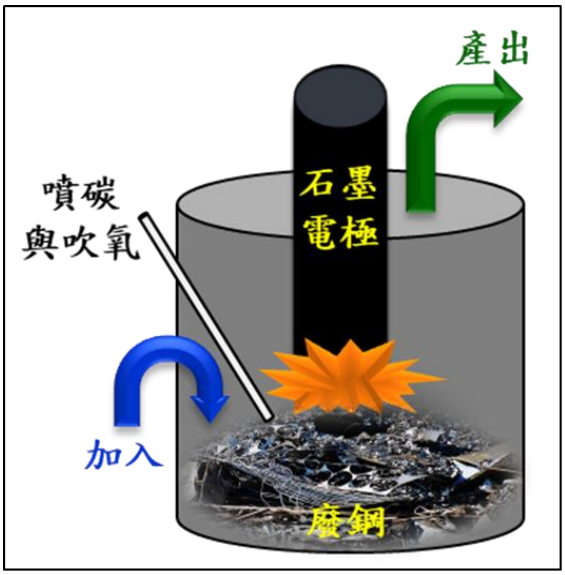


圖 10 高溫發泡壽命分析儀功能說明：
(a)設備示意圖；(b)偵測原理；(c)發泡壽命量測方法

5.現場 100 噸電爐發泡節能試驗方法

本研究將透過高溫黏度與高溫發泡壽命之量測結果，歸納出具備高發泡壽命造渣劑之 Al_2O_3 含量範圍，然後再進行台灣電爐鋼廠之 100 噸電爐發泡節能試驗，其試驗方法如圖 11 所示，由圖中顯示 100 噸廢鋼在加熱過程中約會產生 9 噸的氧化或汽化損失，而形成 91 噸的熱鋼液，由於本研究需要透過 Al_2O_3 來改質造渣劑，因此可選用高

鋁廢鋼來增加造渣劑中的 Al_2O_3 含量。此外在電爐冶煉時會投入約 3.6 噸 CaO 與 0.8 噸 MgO 來進行發泡渣製造，因此會產生約 11.8 噸的氧化碴與 1.8 噸的集塵灰等副產物，而本計畫會導入精煉渣與鋁渣等廢棄物，來減量 CaO 的投入並增加造渣劑中之 Al_2O_3 含量，最終透過電爐試驗後之 1.噴碳量(kg)、2.吹氧量(Nm^3)、3.出鋼溫度(^oC)、4.總送電量(kWh)等數據，計算出新型高發泡壽命造渣劑的節能效益。



產出	✓ 鋼液：91公噸 ✓ 集塵灰：1.8公噸 ✓ 氧化碴：11.8公噸
過程	✓ 廢鋼損失：9公噸 ✓ 耐火材侵蝕：0.2公噸
加入	✓ 廢鋼：100公噸 ✓ 造渣劑： CaO 3.6公噸 MgO 0.8公噸

製程特性	傳統發泡渣	新型發泡渣
1. 廢鋼種類	低鋁廢鋼	高鋁廢鋼
2. 造渣劑種類	CaO、MgO	CaO、MgO 精煉渣、鋁渣
3. 節能效益計算	記錄 1.噴碳量、2.吹氧量、3.出鋼溫度、4.總送電量	

圖 11 本研究於台灣 100 噸鋼廠之電爐發泡節能試驗方法

四、新型電爐高效發泡技術之性能試驗成果說明

1.不同造渣劑之高溫黏度量測結果

本研究已利用自行建立之高溫黏度量測設備，進行不同造渣劑之

黏度隨溫度變化的關係圖建立，如圖 12 所示，由圖中顯示台灣鋼廠利用大量 CO 氣體來製造發泡渣的造渣劑(EAF steel plant)，其在發泡溫度區間 1,500~1,620°C 時，擁有較低的黏度(25cP)。若是以 C_2S 相析出的組別，則在 1530~1580°C 間可以產生 30~900cP 的黏度特性，起因於少量固化相(2~9%)析出所導致。若是以 MgO 相析出的組別，則在 1,520~1,590°C 間可以產生 200~1,300cP 的黏度特性，起因於多量固化相(9~20%)析出所導致。由圖 12 的不同種類(C_2S 與 MgO)固化相析出對黏度的影響效應證實，固定造渣劑成份下黏度受溫度影響的程度相當劇烈，在低溫區(1,450~1,500°C)時，很容易因為固化相析出過量而導致黏度過大，反之在高溫區(1,550~1,620°C) 時，很容易落入全液態區而導致黏度過低，因此利用固化相析出來控制電爐冶煉過程中，長時間製造出發泡渣的狀態是一項相當艱難的課題。

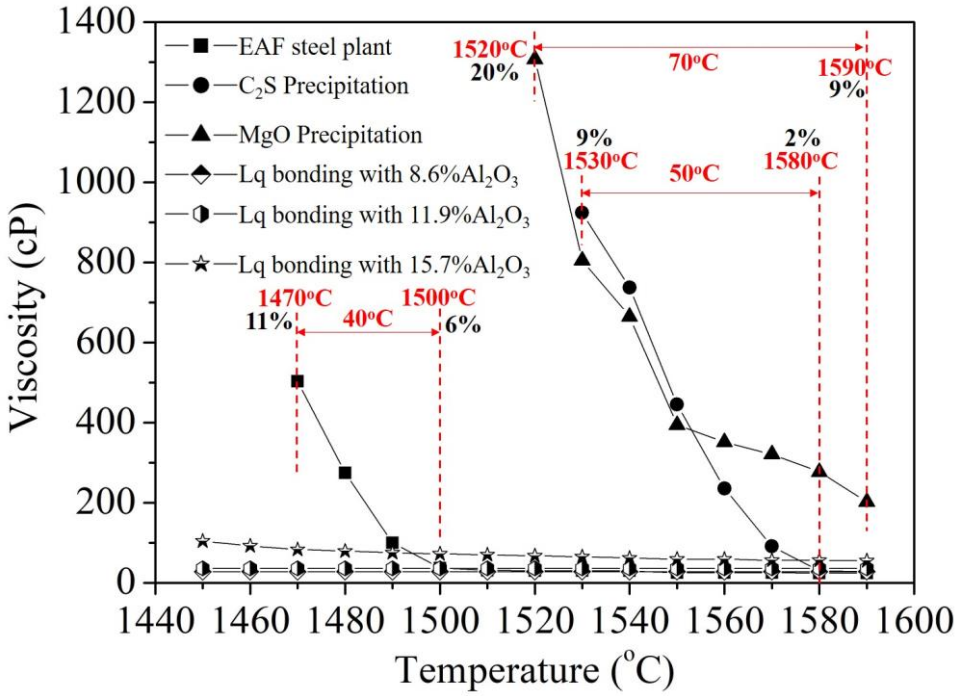


圖 12 不同造渣劑之黏度隨溫度變化的關係圖

圖 13 顯示為不同 Al_2O_3 含量對造渣劑之液態改質黏度的影響，由圖中可知紅色區域的黏度特性為未改質時液態的黏度(25~30cP)，將 Al_2O_3 從 5%提升至 8.6%，則 1,450~1,590°C 間的液態改質黏度約為 28cP，證實並無增加效果，當 Al_2O_3 繼續提升至 11.9%，則 1,450~1,590°C 間的液態改質黏度約為 36cP，證實已增加 31%的效

果，當 Al_2O_3 再繼續提升至 15.7%，則 1,450~1,590°C 間的液態改質黏度約為 55~104cP，證實已增加 100~278%的效果。因此由圖 13 的結果證實，若可以將造渣劑中的 Al_2O_3 控制在 11.9~15.7%，則可以有效增加液態黏度，且高 Al_2O_3 造渣劑之黏度特性較不受溫度的影響，並可在較廣的溫度區間(1,450~1,590°C)下擁有適當的黏度特性(36~104cP) 。

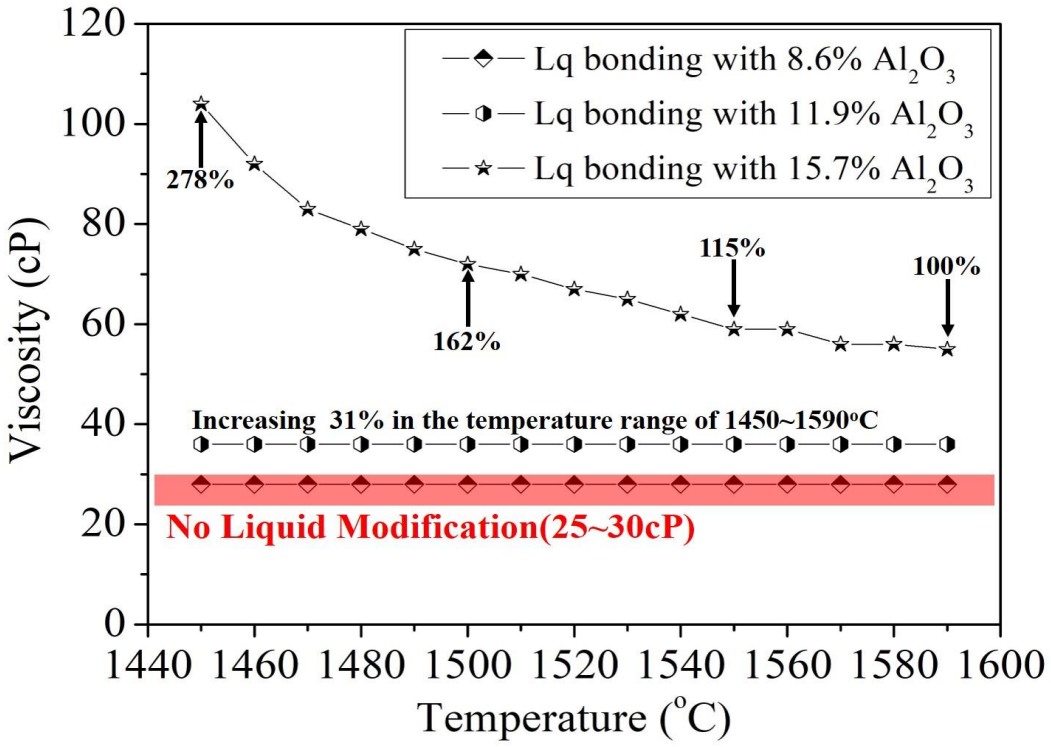


圖 13 不同 Al_2O_3 含量對造渣劑之液態黏度的影響

(二) 不同造渣劑之高溫發泡壽命量測結果

本研究已利用自行建立之高溫發泡壽命量測設備，進行不同造渣劑在溫度為 1,550°C 下之時間隨發泡高度的變化關係圖建立，如圖 14 所示，由圖中顯示當固定碳粉量投入高溫熔渣中時，碳會與環境中的氧產生快速反應而生成大量 CO 氣體並開始產生發泡現象，此時隨著時間增加則發泡高度隨之增加，之後待 CO 氣體生成量達到穩定後，則隨著時間增加發泡高度會呈現穩定狀態，之後待碳粉完全耗盡後就不再產生 CO 氣體，因此發泡高度會隨時間增加而下降，最終發泡高度會回到原始位置，此時就可以評估出不同造渣劑的發泡壽命特性。

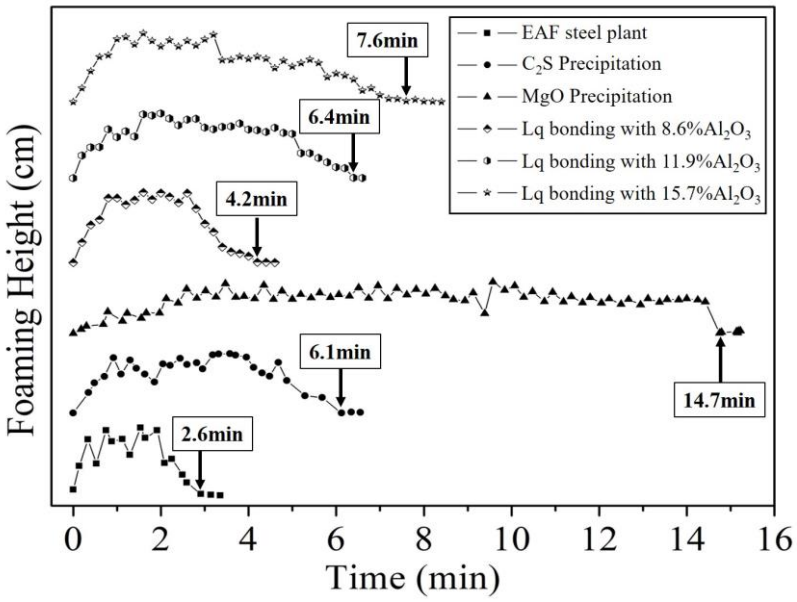


圖 14 固定溫度為 1550°C 下不同造渣劑之時間隨發泡高度的變化圖

圖 15 為不同造渣劑之發泡壽命與黏度的關係圖，由圖中證實台灣鋼廠利用大量 CO 氣體來製造發泡渣的造渣劑(EAF steel plant)，其發泡壽命僅達 2.6 分鐘，起因於黏度太低(25cP)所導致，證實若未來要透過降低噴碳與吹氧來達到 CO 減排的效果，則需要開發出黏度較高的造渣劑。若是以 C_2S 相析出的組別，則發泡壽命可達 6.1 分鐘，起因於在 1,550°C 下擁有約 445cP 的黏度，而在 MgO 相析出的組別上，其發泡壽命可達 14.7 分鐘，起因於在 1550°C 下擁有約 394cP 的黏度。由圖 15 的不同種類(C_2S 與 MgO)固化相析出對發泡壽命的影響結果證實，確實可以透過固化相析出來增加黏度特性進而提升發泡壽命，且 MgO 析出的效果優於 C_2S 相，故目前國內外鋼廠皆使用 MgO 析出來製造發泡渣。但是過飽和 MgO 析出量受溫度與成份的影響相當顯著，隨著煉鋼冶煉溫度的連續增加(1,500~1,620°C)，很難透過單一造渣劑成份，在不同溫度下皆擁有適當的 MgO 析出量，若要持續控制適當 MgO 析出量，則要精準計算 MgO 原料的投入量與投入時間，這對電爐冶煉技術是一項考驗，且原料投入後需時間熔化，將降低有效發泡渣的時間。

由圖 15 亦顯示透過 Al_2O_3 改質液態渣之造渣劑的發泡壽命，隨 Al_2O_3 含量增加而增加，從未改質的 5% Al_2O_3 之發泡壽命為 2.6 分鐘，增加至 11.9% Al_2O_3 之發泡壽命為 6.4 分鐘，增加幅度可達 146%，再增加至 15.7% Al_2O_3 之發泡壽命為 7.6 分鐘，增加幅度可達 192%，起

因於液態網狀鍵結程度增加而導致黏度提升所致。由此可知若將造渣劑中的 Al_2O_3 控制在 11.9~15.7%，則可以有效增加發泡壽命，並媲美 C_2S 相析出的發泡壽命，且結合液態黏度的結果，在高 Al_2O_3 造渣劑之黏度特性較不受溫度的影響，並可在較廣的溫度區間(1,450~1,590°C)下擁有適當的黏度特性(36~104cP)，為一項可在隨著煉鋼冶煉溫度的連續增加(1,450~1,620°C)下，穩定且長時間製造發泡渣的技術。

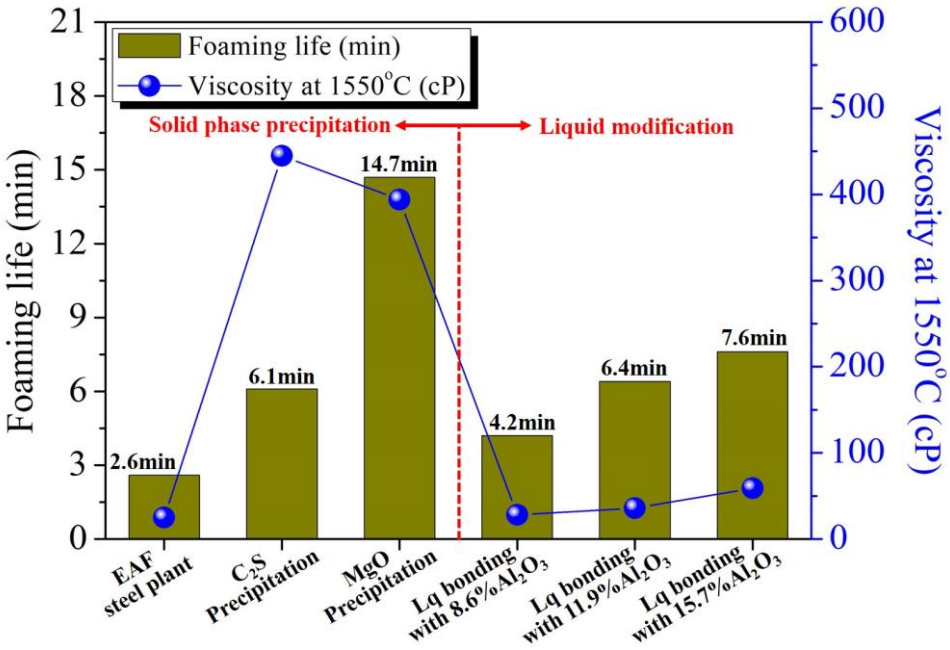


圖 15 不同造渣劑之發泡壽命與黏度的關係圖

電爐冶煉過程中造渣劑之脫磷能力亦是重要指標，Lin et al.的研究指出，隨著造渣劑中之 Al_2O_3 含量增加則脫磷能力會隨之下降，起因於 $FeAl_2O_4$ 相產生所致，當 Al_2O_3 含量為 12.4%時則脫磷能力為 82.7%；Al_2O_3 含量為 19.0%時則脫磷能力為 76.0%；Al_2O_3 含量為 22.1%時則脫磷能力為 63.8%；Al_2O_3 含量為 25.7%時則脫磷能力為 34.6%。結合本研究 Al_2O_3 含量需控制在 11.9~15.7%，才能有效增加造渣劑之發泡壽命，因此推估對脫磷能力的影響較不顯著。

3.不同造渣劑之 FactSage 模擬相區特性結果

本研究利用 FactSage 模擬軟體進行不同造渣劑之固化相分率隨溫度的變化關係圖建立，如圖 16 所示，由圖 16(a)可知鋼廠透過大量 CO 氣體發泡之造渣劑，在溫度為 1500°C 下固化相分率為 6.2%，在

發泡壽命評估溫度 1550°C 下固化相分率下降至僅剩 1.4%，因固化相分率不足而導致黏度太低(25cP)，造成發泡壽命僅有 2.6 分鐘。由圖 16(b)可知透過降低造渣劑中 FeO 含量至 16.4%，則可以讓溫度為 1,500°C 下固化相分率提升至 13.7%，並在發泡壽命評估溫度 1,550°C 下固化相分率含 3.5%，使造渣劑擁有適當黏度(445cP)而提升發泡壽命至 6.1 分鐘。由圖 16(c)可知透過提升造渣劑中 MgO 含量至 9.0%，則可以讓發泡壽命評估溫度 1550°C 下固化相分率含 15.4%，使造渣劑擁有適當黏度(394cP)而提升發泡壽命至 14.7 分鐘，並可以讓固化相持續維持到 1,600°C 還含有 6.3%，增加發泡渣的操作溫度區間。綜觀圖 16(a)~(c)的固化相分率隨溫度的變化關係圖顯示，若要將固化相分率控制在 10~15%時，則組別 1 的溫度區間為 1450~1480°C；組別 2 的溫度區間為 1490~1520°C；組別 3 的溫度區間為 1550~1590°C，證實不同造渣劑利用固化相析出而達到發泡渣的有效操作溫度約為 30~40°C，故透過控制固化相率來達到隨著煉鋼冶煉溫度的連續增加(1500~1620°C)皆擁有發泡渣，則必須在溫度增加約 30~40°C 下進行連續式改變造渣劑成份，因此冶煉過程中至少需轉換 3 種造渣劑成份。

圖 16(d)顯示為添加 8.6%Al_2O_3 之液態改質造渣劑的固化相分率隨溫度的變化關係圖，由圖中顯示溫度高於 1,450°C 下就幾乎無固化相存在，再由圖 17 的不同 Al_2O_3 造渣劑之液相區的 FeO 與溫度的關係圖證實，若造渣劑中添加 11.9~15.7%的 Al_2O_3，則在溫度為 1460°C~1600°C 且造渣劑中之 FeO 高於 18%下，可以獲得均勻的全液態區，再結合黏度與發泡壽命結果得知，此成份特性下可以擁有適當的黏度特性(36~104cP)與優越的發泡壽命(6.4~7.6min)，因此新型高 Al_2O_3 液態改質造渣劑(Al_2O_3=11.9~15.7%)為一項可在隨著煉鋼冶煉溫度的連續增加(1,450~1,620°C)下，穩定且長時間製造發泡渣的技術，且不會影響電爐冶煉的脫磷性能。

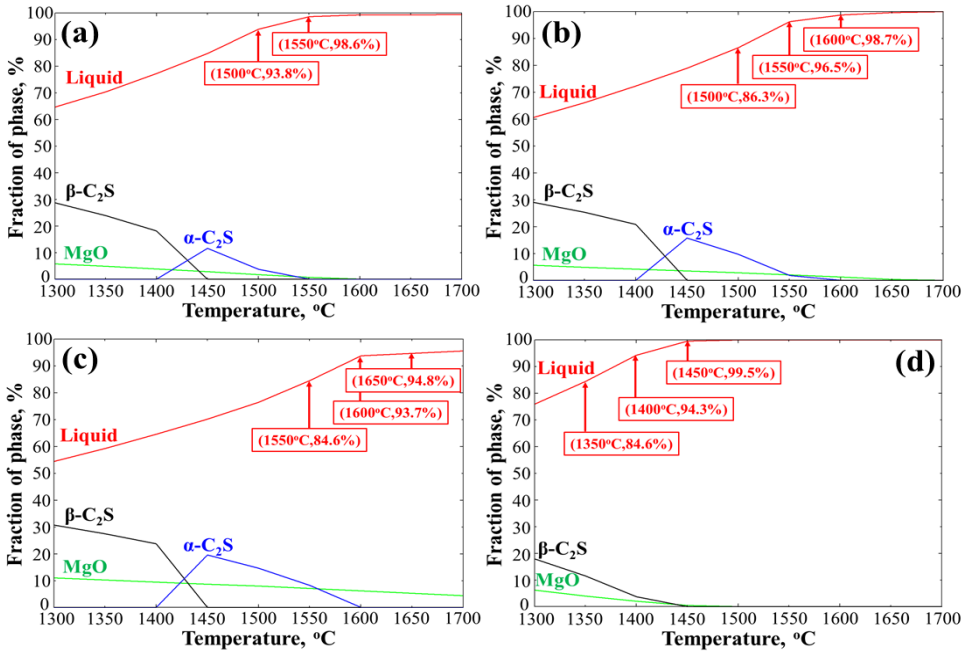


圖 16 不同造渣劑之溫度與固化相分率關係圖:(a)2.9C/S-5Al_2O_3(鋼廠發泡渣)；(b)3.1C/S-16.4FeO(C2S 析出)；(c)3.0C/S-9MgO(MgO 析出)；(d) 2.5C/S-8.6Al_2O_3(液態改質)

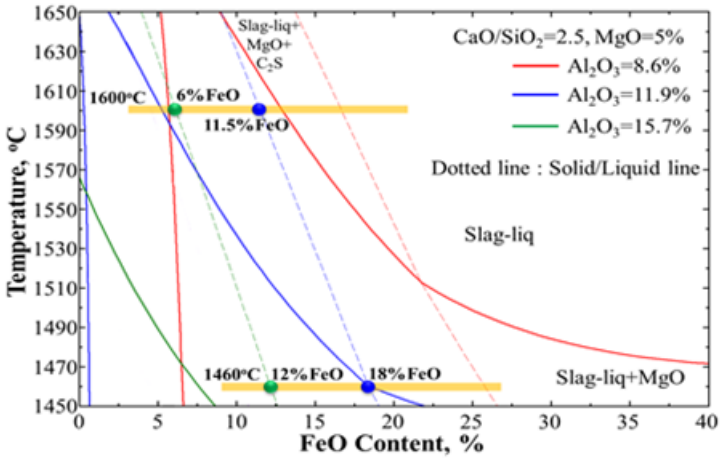


圖 17 不同 Al_2O_3 造渣劑之液相區的 FeO 與溫度的關係圖

4.現場 100 噸電爐發泡節能試驗結果

本研究已於台灣 3 家電爐鋼廠，進行新型高 Al_2O_3 液態改質造渣劑之 100 噸電爐節能試驗，其結果如表-2 與圖 18 所示，由表-2 顯示鋼廠 I 在未使用液態改質造渣劑(Al_2O_3=6.9%)時，其電力消耗為 383kWh/ton，比使用液態改質造渣劑(Al_2O_3=14.3%)之電力消耗為 317kWh/ton，高出 66 kWh/ton，證實液態改質造渣劑具有節能效果。此外在鋼廠 II 的試驗中亦證實若將造渣劑之成份控制在 Al_2O_3 為 11.9~15.7%(Al_2O_3=13.0%)，則電力消耗為 299kWh/ton，比傳統低

Al_2O_3 造渣劑(Al_2O_3=5.4%)之電力消耗為 385kWh/ton，降低 86 kWh/ton，證實液態改質造渣劑具有節能效果。此外在鋼廠 III 的試驗中亦證實若將造渣劑之成份控制在 Al_2O_3=14.6~17.7%，則平均電力消耗為 325kWh/ton，比傳統低 Al_2O_3 造渣劑(Al_2O_3=10.1%)之電力消耗為 365kWh/ton，降低 40 kWh/ton，證實液態改質造渣劑具有節能效果。此外由表-2 的鋼液之 P 含量顯示未使用液態改質造渣劑之平均 P 含量為 0.013wt%，而使用液態改質造渣劑之平均 P 含量為 0.017wt%，雖 P 含量有稍微增加，但皆符合鋼筋產品之要求為 P≦0.04 wt%。

表 2 台灣 100 噸電爐鋼廠驗證之節能數據

EAF	Chemical composition, wt%				P, wt%	電力 kWh/ton
	C/S	FeO+MnO	MgO	Al_2O_3		
I-1	3.0	28.8	9.7	6.9	-	383
I-2	2.5	23.0	5.9	14.3	-	317
II-1	2.3	36.8	5.9	5.4	0.013	385
II-2	2.3	39.3	5.6	13.0	0.017	299
III-1	2.6	41.7	6.4	10.1	0.013	365
III-2	1.8	35.5	5.8	17.7	0.026	311
III-3	2.1	30.2	8.1	14.6	0.010	327
III-4	2.2	19.2	5.4	17.4	0.018	336
III-5	1.9	34.0	6.2	14.7	0.011	324
I-2(Al_2O_3 來源為廢鋼)；II-2(Al_2O_3 來源為 650kg 鋁渣)；III-1~5(Al_2O_3 來源為廢鋼)；III-4,5(CaO 的來源為熱精煉渣)						

由圖 18 的結果得知 3 家鋼廠在未使用液態改質造渣劑時，其平均電力消耗為 378kWh/ton，利用廢鋼中金屬 Al 氧化而產生 Al_2O_3 來製造液態改質造渣劑(Al_2O_3=14.3~17.7%)之平均電力消耗為 318kWh/ton，利用添加鋁渣(每噸廢鋼添加 5.2kg 鋁渣)來製造液態改質造渣劑(Al_2O_3=13.0%)之電力消耗為 299kWh/ton，利用廢鋼中金屬 Al 氧化而產生 Al_2O_3 來製造液態改質造渣劑(Al_2O_3=14.7~17.4%)，並再利用熱精煉渣來取代 CaO 原料，則平均電力消耗為 330kWh/ton。將 3 種不同方法(100 噸電爐共試驗 6 爐次)而獲得新型高 Al_2O_3 液態改質造渣劑之電力成本進行平均證實，平均電力消耗為 319kWh/ton，與傳統未使用液態改質造渣劑之平均電力消耗為 378kWh/ton，相比較顯示電力消耗下降約 59kWh/ton，可達到約 15.6%的節能效果，換算 CO_{2eq} 排放量約可下降 30kgCO_{2eq}/ton。

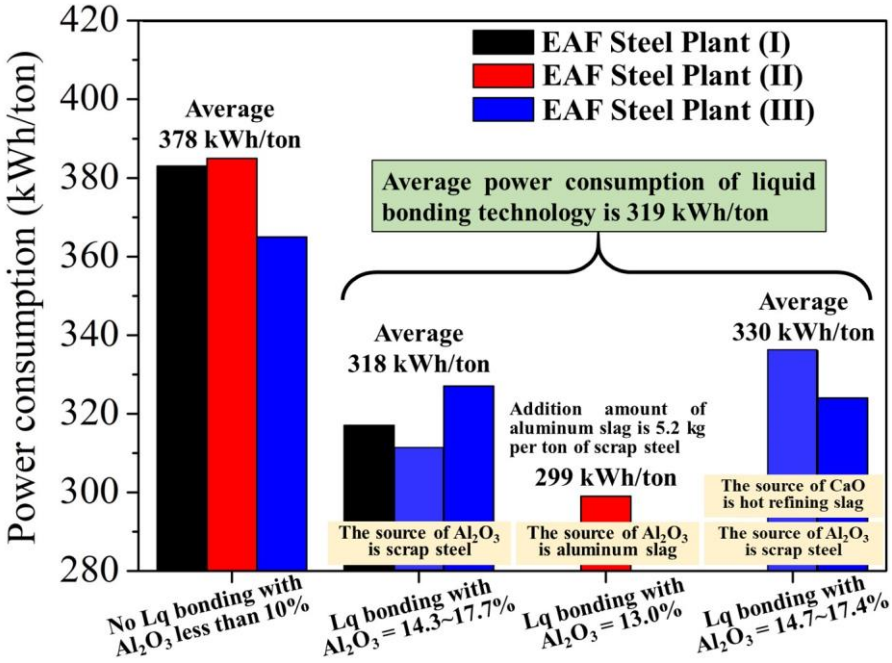


圖 18 新型高 Al_2O_3 液態改質造渣劑於 100 噸電爐鋼廠試驗之節能結果

五、結　論

本研究結合高溫黏度量測技術、高溫發泡壽命量測技術與 FactSage 模擬造渣劑之相特性技術等，系統化針對不同發泡機制之造渣劑配方進行特性評估，成功開發出新型高發泡壽命造渣劑配方，若造渣劑中添加 11.9~15.7%的 Al_2O_3，則在溫度為 1460°C~1600°C 且造渣劑中之 FeO 高於 18%下，可以獲得均勻的全液態區，再結合黏度與發泡壽命結果得知，此成份特性下可以擁有適當的黏度特性(36~104cP)與優越的發泡壽命(6.4~7.6min)，因此新型高 Al_2O_3 液態改質造渣劑(Al_2O_3=11.9~15.7%)為一項可在隨著煉鋼冶煉溫度的連續增加(1450~1620°C)下，穩定且長時間製造發泡渣的技術，且不會影響電爐冶煉的脫磷性能。此外由 100 噸電爐發泡節能試驗結果得知，利用 3 種不同方法(100 噸電爐共試驗 6 爐次)，分別為方法(1) 廢鋼中金屬 Al 氧化而產生 Al_2O_3、方法(2)添加鋁渣、方法(3)添加熱精煉渣來取代 CaO 原料等，來製造高 Al_2O_3 液態改質造渣劑，則平均電力消耗為 319kWh/ton，與傳統未使用液態改質造渣劑之平均電力消耗為 378kWh/ton，相比較顯示電力消耗下降約 59kWh/ton，可達到約 15.6%的節能效果，換算 CO_{2eq} 排放量約可下降 30kgCO_{2eq}/ton。

六、參考文獻

1. J. P. Birat, Society, Materials, and the Environment: The Case of Steel, Vol. 10, p. 331, 2020.
2. F. Patisson and O. Mirgaux, Hydrogen Ironmaking: How It Works, Metals, Vol. 10, p. 922, 2020.
3. J. J. Y, Progress and Future of Breakthrough Low-carbon Steelmaking Technology (ULCOS) of EU, International Journal of Mineral Processing and Extractive Metallurgy, Vol. 3, pp. 15-22, 2018.
4. M. Abdul Quader, S. Ahmed, R. A. R. Ghazilla, S. Ahmed, and M. Dahari, A comprehensive review on energy efficient CO_2 breakthrough technologies for sustainable green iron and steel manufacturing, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 50, pp. 594-614, 2015.
5. M. Abdul Quader, S. Ahmed, S. Z. Dawal, and Y. Nukman, Present needs, recent progress and future trends of energy-efficient Ultra-Low Carbon Dioxide (CO_2) Steelmaking (ULCOS) program, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 55, pp. 537-549, 2016.
6. S. Tonomura, N. Kikuchi, N. Ishiwata, S. Tomisaki, and Y. Tomita, Concept and Current State of CO_2 Ultimate Reduction in the Steelmaking Process (COURSE50) Aimed at Sustainability in the Japanese Steel Industry, Journal of Sustainable Metallurgy, Vol. 2, pp. 191-199, 2016.
7. V. Vogl, M. Ahman, and L. J. Nilsson, Assessment of hydrogen direct reduction for fossil-free steelmaking, Journal of Cleaner Production, Vol. 203, pp. 736-745, 2018.
8. A. Otto, M. Robinius, T. Grube, S. Schiebahn, A. Praktiknjo, and D. Stolten, Power-to-steel: reducing CO_2 through the integration of renewable energy and hydrogen into the German steel industry, Energies, Vol. 10, p. 451, 2017.
9. A. P. Luz, A. G. Tomba Martinez, F. Lopez, P. Bonadia, and V. C. Pandolfelli, Slag Foaming Practice in the Steelmaking Process, Ceramics International, Vol. 44, pp. 8727-8741, 2018.
10. E. Pretorius and H. Oltmann, Simulation of the EAF Refining Stage Fundamentals of the EAF Process, AISE Steel Technology, Vol. 80, No. 3, pp. 25-33, 2003.
11. H. S. Kim, D. J. Min, and J. H. Park, Foaming Behavior of $CaO\text{-}SiO_2\text{-}FeO\text{-}MgO_{satd}\text{-}X$ ($X=Al_2O_3$, MnO, P_2O_5, and CaF_2) Slags at High Temperatures, ISIJ International, Vol. 41, No. 4, pp. 317-324, 2001.
12. S. H. Seok, S. M. Jung, Y. Seok, and D. J. Min, Viscosity of Highly Basic Slags, ISIJ International, Vol. 47, No. 8, pp. 1090-1096, 2007.

13. A. Y. Ilyushechkin and S. S. Hla, Viscosity of High-Iron Slags from Australian Coals, Energy Fuels, Vol. 27, pp. 3736-3742, 2013.
14. X. Shen, M. Chen, N. Wang, and D. Wang, Viscosity Property and Melt Structure of CaO-MgO-SiO_2-Al_2O_3-FeO Slag System, ISIJ International, Vol. 59, No. 1, pp. 9-15, 2019.
15. L. Wu, M. Ek, M. Song, and D. Sichen, The Effect of Solid Particles on Liquid Viscosity, Steel Research, Vol. 82, No.4, pp. 388-498, 2011.
16. S. A. C. Stadler, J. J. Eksteen, and C. Aldrich, An Experimental Investigation of Foaming in Acidic, High Fe_xO Slags, Minerals Engineering, Vol. 20, No.12, pp. 1121-1128, 2007.
17. M. Takemoto, J. Lee, and T. Tanaka, A Model for Estimation of Viscosity of Molten Silicate Slag, ISIJ International, Vol. 45, No. 5, pp. 651-656, 2005.
18. G. H. Zhang, K. C. Chou, Q. G. Xu, and K. C. Mills, Modeling Viscosities of CaO-MgO-FeO-MnO-SiO_2 Molten Slags, Metallurgical and Materials Transaction B, Vol. 43, No. 1, pp. 64-72, 2012.
19. H. Yoshida, N. Matsushita, Y. Kato, and T. Hattori, Active sites in sol-gel prepared silica-alumina for photoinduced non-oxidative methane coupling, Physical Chemistry Chemical Physics, Vol. 4, No. 11, pp. 2459-2465, 2002.
20. W. T. Chang, C. M. Lin, Y. L. Su, C. C. Li, Y. E. Chang, J. M. Shen, and W. Wu, Effect of FeO Content on Foaming and Viscosity Properties in FeO-CaO-SiO_2-MgO-Al_2O_3 Slag System, Metals, Vol. 11, p. 289, 2021.
21. Y. E. Chang, C. M. Lin, J. M. Shen, W. T. Chang, and W. Wu*, Effect of MgO Content on the Viscosity, Foaming Life, and Bonding in Liquid for the CaO-SiO_2-MgO-5Al_2O_3-30FeO Slag System, Metals, Vol. 11, p. 249, 2021.
22.R. A. M. de Almeida, D. Vieira, W. V. Bielefeldt, and A. C. F. Vilela, MgO saturation analisys of CaO-SiO_2-FeO-MgO-Al_2O_3 slag system, Materials Research, Vol. 21, pp. 1-8, 2018.
23. M. A. Tayeb, A. N. Assis, S. Sridhar, and R. J. Fruehan, MgO Solubility in Steelmaking Slags, Metallurgical and Materials Transactions B, Vol. 46, pp. 1112-1114, 2015.
24. A. P. Luz, D. O. Vivaldini, F. López, P. O. R. C. Brant, and V. C. Pandolfelli, Recycling MgO-C refractories and dolomite fines as slag foaming conditioners: experimental and thermodynamic evaluations, Ceramics International, Vol. 39, pp. 8079-8085, 2013.
25. A. P. Luz, T. A. Á vila, P. Bonadia, and V. C. Pandolfelli, Slag foaming: fundamentals, experimental evaluation and application in the steelmaking industry, Refractories Worldforum, Vol. 3, No. 2, pp. 1-8, 2011.
26. K. Zheng, Z. Zhang, L. Liu, and X. Wang, Investigation of the Viscosity and

Structural Properties of $CaO-SiO_2-TiO_2$ Slags, Metallurgical and Materials Transactions B, 45B, pp. 1389-1397, 2014.

27. C. M. Lin*, C. W. Yu, W. Wu, C. C. Li, and K. L. Chang, Effect of $FeO-CaO-SiO_2-MgO-xAl_2O_3$ Slags with 12.0~26.0 wt.% Al_2O_3 Content on Dephosphorization of Molten Steel, Key Engineering Materials, Vol. 773, pp. 184-188, 2018.

利用迴流污泥改善廢水硬度並達成污泥減量

陳啟華*、林礽龍**

摘　要

化學混凝技術常為廢水處理場所應用，由於其極高的處理效率常為初級處理甚至是三級處理所使用，本研究在探討一染料製程廢水處理流程，因其以多階段之化學混凝單元進行操作，並以熟石灰為主要鹼度來源以致廢水硬度偏高，過高之硬度將造成後續臭氧處理單元反應器形成碳酸鈣結晶，造成臭氧處理單元運作與維護之困擾。為了解決此問題，本研究透過反應曲面之實驗計畫法，探討後段化學混凝之污泥迴流量、前段化學混凝劑之加藥量、前段化學混凝之 pH 等為反應變數，希望在達到既有處理效率之前提下，有效降低整體處理後水質之硬度，減輕維護成本。

實驗結果顯示，在達到既有處理效率條件下，後段化學混凝污泥迴流 10%至前段化學混凝，處理後水中硬度減少 35%，使得臭氧處理單元在清理碳酸鈣結晶之人力與時間等維護費用降為原本 1/3；且在該污泥迴流量條件下，可減少藥劑使用量 8%並減少污泥產出量約 13%，改善效益約 200 萬元/年。

【關鍵詞】污泥、迴流、碳酸鈣、化學混凝、臭氧處理

---

*臺灣永光化學工業股份有限公司第一廠　副理

**臺灣永光化學工業股份有限公司第一廠　副處長

一、前 言

化學混凝技術對廢水處理場而言，雖有極高處理效率，但其後續衍生的問題，如污泥大量產出及廢水硬度升高，導致設備故障及維護頻率增加等問題，均已造成處理場在環保處理費用的增加。為求在能達到既有處理效率前提下，又能節省環保處理費用，此為本研究主要目的。

本研究將利用反應曲面法找出廢水處理場最適化操作條件，其反應曲面法為一結合數學及統計之技術，將問題模式化並分析求出變數對系統反應值的影響。反應曲面法可以研究數個變數(或因子)組合所產生之反應值在何種變數組合條件下可獲得最適效果。反應曲面法可同時探討兩個或兩個以上而產生一最適化反應條件。近年來，此方法已被廣泛應用於多方面領域，相較於傳統一次實驗決定一個因子最適值，反應曲面法可提供實驗更大效益。

二、廢水處理場處理單元說明介紹

1.廢水處理場單元說明

此次研究對象為化工業染料製程廢水，其廢水處理場每日廢水最大產出量為 760CMD，且領有排放地面水體許可證，處理水質為放流水要求標準，簡述處理單元如下說明：

(1)化學混凝處理單元：混凝之主要功能係於廢水中加入混凝劑及助凝劑，使廢水中膠體粒子及細小懸浮物產生凝聚作用，凝聚產生之膠羽則藉由沈澱或浮除去除之。化學混凝處理包含快混池及慢混池，於快混池中係經由混凝劑之加入及快速攪拌，以破壞粒子的穩定性，慢混池則藉由緩慢的攪拌使粒子 相互碰撞而凝聚，形成可沈降之粗大膠羽。其廢水處理場染料製程廢水特性為色度高，COD 約 3,500mg/L 經收集調勻後，會先經過兩階段連續化學混凝處理，混凝劑使用原料為硫酸亞鐵及石灰。通常第一段 pH 控制範圍約在 8.5；第二段 pH 控制範圍約在 9.5。處理後的廢水，會再經過生物處理單元後，再進行最後一段化學混凝處理單元，此第三段 pH 控制範圍約在 10.8。

(2)生物處理單元：生物處理源自於自然的處理程序，藉由自然界水體中之微生物可有效分解有機物質之特性，以工程改良方式利用微生物的代謝作用來去除廢(污)水中溶解性與膠體有機物質，被去除之有機物質

轉換為生物體，藉由沉澱分離及排泥而去除。目前廢水處理場將生物單元分成生物一階及生物二階，主要是以好氧處理方式針對在化混過程中無法去除的溶解性有機物，交由微生物作進一步降解的處理。

(3) 臭氧處理單元：臭氧，為無色且不安定之氣體，其標準氧化還原電位僅次於氟，為強氧化劑一種，在酸性與中性水質環境下會發生高選擇性的直接氧化反應；若在鹼性水質環境下，則會產生更強氧化力及發生選擇性較低之自由基間接氧化反應。色度物質因具發色團或助色團而成色，臭氧氧化則可以破壞色度物質發色團或助色團的鍵結，所以具有脫色效果。尤其對於紡織色彩染料的超強脫色能力，其效果是更加明顯，臭氧可輕易破壞這些染料的發色與助色基團，以達到完整的脫色效果。目前廢水處理場使用每小時可產生 20kg 臭氧系統，作為主要處理單元設備

廢水處理場廢水經收集後，依序經過化學混凝處理、生物處理，以及臭氧處理，現場作業人員，確認水質符合放流水標準後，即將放流水排放。以上作業皆遵照水污染防治措施事項執行並達到規範之要求。

2.廢水處理場執行現況及問題

由於處理場使用大量的硫酸亞鐵及石灰，每月產出的污泥量約為 250 噸/月，再加上國內關於污泥的處理費用持續高漲；使得廢水處理成本大幅上升；又因廢水在處理過程中，因石灰的使用，使得廢水硬度居高不下，經檢測平均約 721mg/L；久而久之，造成臭氧處理單元管路及設備結垢，需耗費人力與時間清理碳酸鈣結晶，如表 1 所示。以上皆為需立即處理的難題。

表 1　臭氧處理單元保養項目及時間週期

保養項目	時間週期
臭氧反應釜清理	每月清理
高壓泵進流管路	每季清理
高壓泵出流管路	每季清理
臭氧注入器	每週清理
臭氧高壓泵	每月清理
排水隔膜閥	每週清理

3.污泥迴流改善廢水硬度及污泥減量

(1)污泥迴流原理說明

污泥迴流乃是迫使污泥結晶過程變成異質核化程序，投入較大污泥顆

粒，與化學沉降處理中剛形成的小顆粒共存，大顆粒繼續成長，小顆粒繼續溶解，最後使得溶液之平衡濃度減低。污泥經過顆粒成長及熟化過程，污泥粒徑較大且結構較緻密，以污泥顆粒為核子進行核化結晶，其速率加快，小顆粒變成大顆粒之轉化率提高，污泥密度及粒徑均增大，有利於污泥之沉降及脫水。

(2)迴流污泥配合臭氧 pH

該廢水處理場最後一段化學混凝單元，會將 pH 控制在 10.6~10.8，其主要原因在於，下一個臭氧處理單元，會將此高 pH 特性之廢水，經氧化處理後 pH 下降到 6.5~7.0 附近，讓水質達到符合放流水標準。是故其廢水所產生的污泥將具有高 pH 的特性且結合項次 1 的說明，其迴流污泥若是能回到前段化學混凝單元，作為鹼度來源，以期能減少石灰用量，如此一來，對於改善廢水硬度幫助污泥減量有不少助益。

(3)迴流污泥實驗設計

利用反應曲面設計兩因子 CCD 加上重覆一次之 DOE 實驗，其因子為硫酸亞鐵加藥量(0.5%，1.5%)、迴流污泥比(0%，10%)，其中石灰以調整至 pH=9.0 時記錄用量進行實驗。

三、實驗結果與討論

1. 依實驗設計法並經實驗測試所得到 20 組數據，且分別進行色度、COD、鈣離子濃度分析、污泥量量測，數據整理如圖 1

Pattern	硫酸亞鐵 %	迴流污泥量%	石灰用量(g)	色度	COD (mg/L)	Ca^{2+} (mg/L)	污泥量 (g)
−−	0.5	0	5.05	7,926	2022	1110	0.3721
−+	0.5	10	3.99	6,332	1997	1146	0.6271
+−	1.5	0	14.62	3,461	1979	1901	1.4043
++	1.5	10	13.71	3,385	1848	1908	1.6162
a0	0.5	5	5.08	6,854	1955	1103	0.5423
A0	1.5	5	13.74	3,140	1972	1869	1.2607
0a	1	0	10.43	4,861	2019	1546	1.0217
0A	1	10	10.05	3,831	1816	1518	1.1327
0	1	5	10.16	3,018	1684	1532	1.0248
0	1	5	9.70	4,611	1830	1504	1.0132
−−	0.5	0	5.33	7,634	2011	1157	0.4238
−+	0.5	10	4.01	5,641	1901	1146	0.8786
+−	1.5	0	13.77	3,268	2037	1873	1.4253

Pattern	硫酸亞鐵 %	迴流污泥量%	石灰用量(g)	色度	COD (mg/L)	Ca^{2+} (mg/L)	污泥量 (g)
++	1.5	10	12.63	3,177	1839	1866	1.5988
a0	0.5	5	5.26	6,837	1889	1201	0.8072
A0	1.5	5	10.86	3,155	1937	1679	1.7708
0a	1	0	7.46	4,759	2024	1437	0.9703
0A	1	10	8.33	3,937	1837	1493	1.0906
0	1	5	9.75	3,579	1893	1537	1.4214
0	1	5	9.53	3,370	1922	1523	1.4384

圖 1　迴流污泥實驗設計結果數據(續)

2.實驗模組迴歸及變異數分析

(1)污泥量迴歸分析:經統計軟體分析數據顯示，此污泥量分析 RSq 為 0.84(>0.7)，代表模型解釋能力良好，如圖 2。

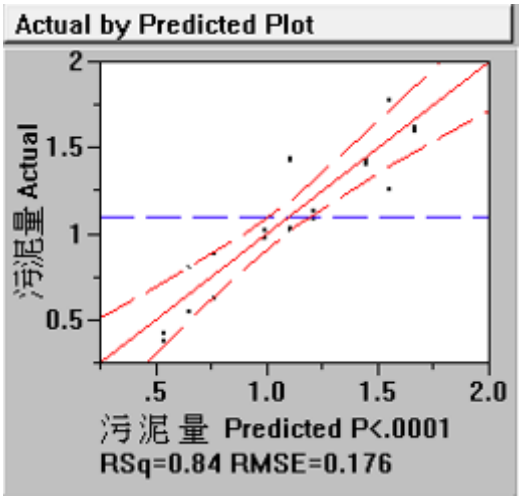


圖 2　污泥量迴歸分析

且經變異數分析判斷，其硫酸亞鐵加藥量及迴流污泥比，P 值皆小於 0.05 代表上述兩因子皆為影響污泥量的重要因子，如圖 3。

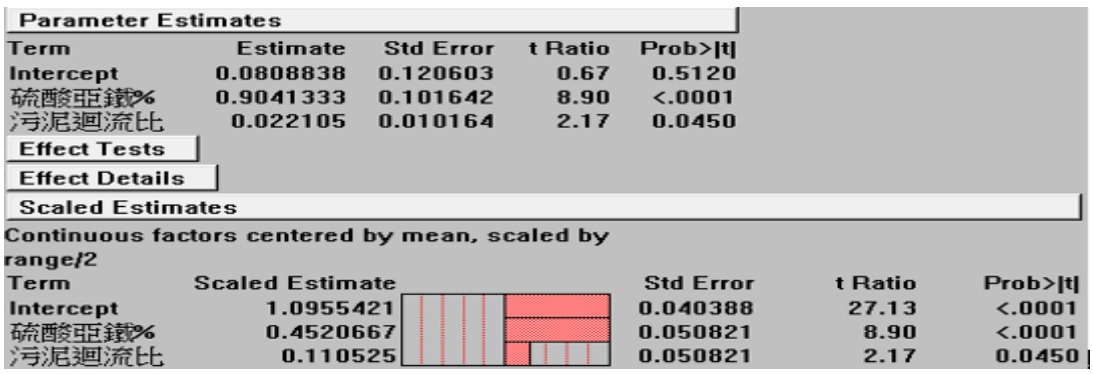


圖 3　污泥量變異數分析

(2)石灰用量迴歸分析:經統計軟體分析數據顯示，此石灰用量分析 RSq 為 0.92(>0.7)，代表模型解釋能力良好，如圖 4。

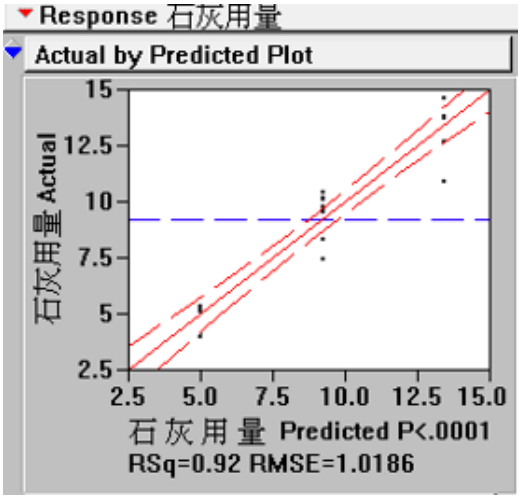


圖 4　石灰用量迴歸分析

且經變異數分析判斷，其硫酸亞鐵加藥量，P 值小於 0.05 代表上述因子為影響石灰用量的重要因子，如圖 5。

Parameter Estimates

Term	Estimate	Std Error	t Ratio	Prob>|t|
Intercept	0.7404967	0.630683	1.17	0.2556
硫酸亞鐵%	8.4329333	0.588115	14.34	<.0001

圖 5　石灰用量變異數分析

(3)色度迴歸分析:經統計軟體分析數據顯示，此色度分析 RSq 為 0.89(>0.7)，代表模型解釋能力良好，如圖 6。

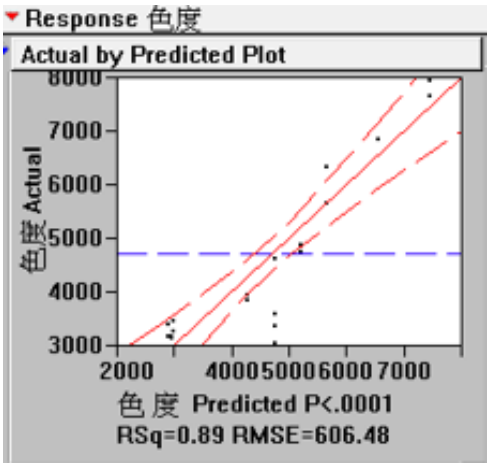


圖 6　色度迴歸分析

且經變異數分析判斷，其硫酸亞鐵加藥量及迴流污泥比，P 值皆小於 0.05 代表上述因子為影響色度的重要因子，如圖 7。

Scaled Estimates

Continuous factors centered by mean, scaled by range/2

Term	Scaled Estimate	Std Error	t Ratio	Prob>|t|
Intercept	4724.1053	139.1351	33.95	<.0001
硫酸亞鐵%	-1803.167	175.0745	-10.30	<.0001
污泥迴流比	-467.1667	175.0745	-2.67	0.0175
(硫酸亞鐵%-1)*(污泥迴流比-5)	427.5	214.4216	1.99	0.0647

圖 7　色度變異數分析

2. 迴流污泥實驗結果分析說明

根據統計軟體分析可得知污泥量主要受硫酸亞鐵添加量與部分污泥迴流比影響；而石灰用量主要受硫酸亞鐵添加量影響，根據 COD 與 ADMI 預測分析結果顯示，當污泥迴流達 10%時，硫酸亞鐵添加量可從 1%降為 0.7%如圖 8、圖 9 所示。以統計軟體預估數據可知當進行 10%迴流污泥時，同時減少硫酸亞鐵添加量，則水質狀況依舊保持穩定，且無增加水質負荷。

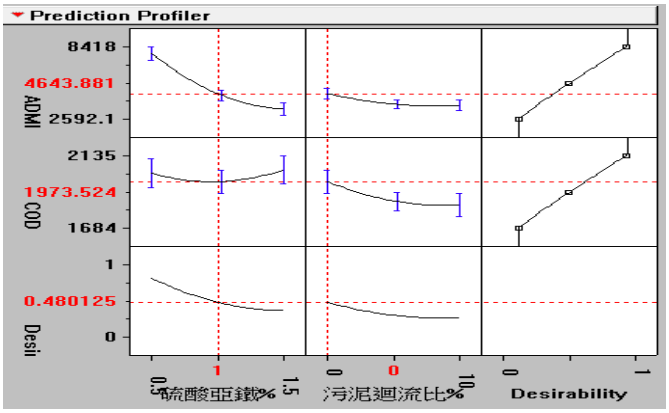


圖 8　迴流污泥比與硫酸亞鐵 10%:1%

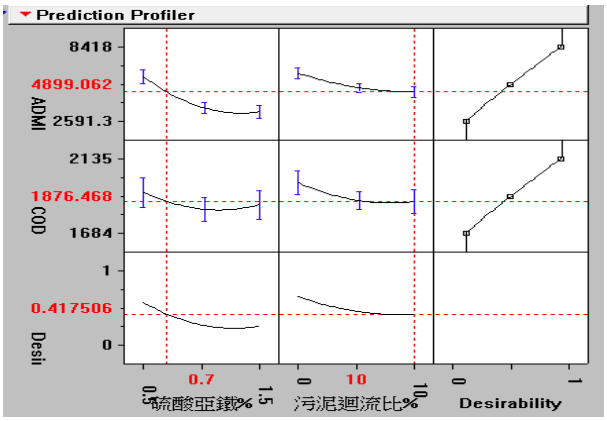


圖 9　迴流污泥比與硫酸亞鐵 10%:0.7%

3.實場應用實驗結果分析討論

觀察此研究發現,利用廢水處理場後段化學混凝污泥迴流至前段化混作為前段鹼劑來源,該後化混污泥特性為 pH 高可供前化混作為調整 pH 使用,也因有後化混迴流污泥提供鹼度,使得前化混藥劑量大幅下降,其中石灰用量減少,影響水中鈣離子濃度下降,大幅降低廢水硬度,使得過往管路卡垢情形已減緩,讓廢水處理廠在保養維護上,更能作彈性安排,而非緊急搶修,影響生產運作;且因藥劑用量下降的關係,使廢水處理廠污泥產量也明顯下降。後化混污泥迴流減緩了臭氧系統結晶卡垢的問題,也因污泥再回到前段多作一次處理流程,使污泥的沉降及脫水效果更佳,連帶降低污泥產出量。

四、結　論

依實驗結果進行廢水處理場測試顯示,在達到既有處理效率條件下,後段化學混凝污泥迴流 10%至前段化學混凝,處理後水中硬度原本 721mg/L 下降至 465mg/L 減少 35%,使得臭氧處理單元在清理碳酸鈣結晶之人力與時間等維護費用降為原本 1/3 如表 2 說明;且在該污泥迴流量條件下,可減少藥劑使用量 8%;並減少污泥產出量約 13%,如表 3 說明,以廢水處理場年均放流水量 180000 噸,藥劑減少使用量約 306 噸,估算成本費用下降 21.4 萬;另污泥減少產出 288 噸,估算節省污泥處理費用 200 萬,合併上述改善效益約 221.4 萬元/年。

表 2　臭氧處理單元保養項目及時間週期

保養項目	改善前時間週期	改善後時間週期
臭氧反應釜清理	每月清理	每季清理
高壓泵進流管路	每季清理	每半年清理
高壓泵出流管路	每季清理	每半年清理
臭氧注入器	每週清理	每月清理
臭氧高壓泵	每月清理	每季清理
排水隔膜閥	每週清理	每月清理

表 3　亞鐵與污泥量改善前後比較

評估項目	改善前	改善後
亞鐵 (kg)/ 放流水量 (噸)	21	19.3
污泥量(kg)/放流水量 (噸)	12	10.4

五、參考文獻

1.「利用反應曲面法探討金針花一氧化氮清除活性成分最適化乙醇萃取件」，劉虹每，102 年 7 月。

2.歐陽嶠暉，「廢水處理廠操作管理─活性污泥系統」，工業污染防治技術叢書─廢水好氧處理論著彙編(上)，經濟部工業局，89 年 3 月。

3.「生物處理程序常見問題」，中央大學永續環境科技研究中心產業環保技術服務團，104 年 8 月。

4. 劉新校、張陳郎、唐存宏「臭氧的應用技術-脫色」，台灣產業服務基金會。

5.「廢水污泥減容減量技術研析」，經濟部工業局，93 年 10 月。

電弧爐煉鋼還原碴資源化再利用

蔡文博*、謝紹恆**

摘　要

鋼鐵工業為產業發展之基礎，舉凡各種產品製造、營建工程、交通運輸及工商機具等，皆與鋼鐵工業息息相關，但伴隨著鋼鐵製造過程而產出的副產物-爐碴，如何妥善的處理與再利用，使其資源化，重新進入資源循環體系，進而降低環境衝擊並提升產業經營效能，實為一重要的課提。

電弧爐煉鋼還原碴為電弧爐煉鋼製程中所產生的副產物之一，因其含 f-CaO、f-MgO、C_3S、C_2S 等，這些組成一定條件下都具有不穩定性。冷卻後還原碴吸水，f-CaO 會消解為 $Ca(OH)_2$，體積將會膨脹 100-300 %，f-MgO 會消解為 $Mg(OH)_2$，體積膨脹約 77 %，因此含有 f-CaO、f-MgO 的常溫還原碴是處於不穩定狀態，未經安定化處理還原碴直接用於工程上時，就會產生工程瑕疵，只有在經適當處理後之還原碴，其 f-CaO、f-MgO 消解完成或含量很少時，體積才會穩定不膨脹，應用於工程上才不致發生工程品質不良的問題。

台鋼資源股份有限公司，應用高壓蒸汽熱壓處理進行還原碴安定化，安定化後產品在經過 CNS 15311「粒料受水合作用之潛在膨脹試驗法」或熱壓膨脹法之檢驗合格，將還原碴再利用於工程上。本文乃台鋼資源針對電弧爐煉鋼還原碴之安定化程序、安定化成效驗證與工程上再利用的成果討論，在體積穩定性無虞之前提下，將其視為一種營建材料，使用在合適的營建用途上，可有效發揮其的適用性與價值性，落實資源循環再利用，創造產業與社會雙贏之結果。

【關鍵詞】電弧爐煉鋼還原碴、高壓蒸氣安定化、還原碴再利用

---

*台鋼資源股份有限公司　總經理

**台鋼資源股份有限公司　化驗室主任

一、前 言

2016 年 3 月松菸文創大樓發生「青春痘牆面」爐碴（還原碴）屋事件，爐碴頓時成為台灣舉國關注的焦點，人人聞爐碴色變。事件中的主角爐碴以較精確的名稱來稱呼，應該稱為「電弧爐煉鋼還原碴」，在台灣的鋼鐵產業中，依生產工藝來分主要有一貫化煉鋼廠（如中鋼、中龍）與電弧爐煉鋼廠（如豐興、東和、協勝發、海光...等）兩種，以電弧爐煉鋼來說，因在不同程序產出，產生的副產物分為氧化碴與還原碴兩種，就國內現今電弧爐煉鋼廠每年約生產 1,000 萬公噸粗鋼，亦產出約計 120 萬公噸氧化碴及 46 萬公噸還原碴。會與水產生反應而導致體積膨脹之還原碴，則因爐碴屋事件的關係，剎時間面臨無處可去的窘境，台灣經濟命脈之一的鋼鐵產業面對著每天產出的還原碴亟待有效去化，鋼鐵產業苦思解決之道。因此，鋼鐵業集資成立爐碴再利用機構「台鋼資源股份有限公司」(以下稱台鋼資源)，依據「經濟部事業廢棄物再利用管理辦法」所規定之爐碴安定化方式建立生產線，採用高壓蒸汽熱壓處理進行還原碴安定化，安定化後產品則須經過 CNS 15311「粒料受水合作用之潛在膨脹試驗法」或熱壓膨脹法之檢驗，方能進行還原碴再利用，使用於管理辦法中許可的用途。

電弧爐煉鋼將廢鋼重新熔煉成各產業所需的鋼鐵原料，原本就是資源循環中重要的一環，但在從新熔煉的過程中會產生煉鋼副產品-爐碴。其中，還原碴在煉鋼製程中經超過 1,500℃冶煉，為一無機之粒料，其 TCLP 與戴奧辛檢測均可符合管理辦法規定，經過適當的處理與安定化，在體積穩定性無虞之前提下，將其視為一種營建材料，使用在合適的營建用途上，從新導入營建業材料循環中，可有效發揮其的適用性與價值性，不但可減少天然資源的開發與使用，對於循環經濟在營建業的推廣亦有所助益。但如何在確保營建品質安全無虞的前提下，達到資源循環再利用的目標，將還原碴妥善安定化，解決其體積穩定性之疑慮，使用在合適的營建用途上，實為一可行之方式。

二、電弧爐煉鋼還原碴

電弧爐煉鋼均為批次作業，冶煉過程依其化學反應分成三個階段，分別為熔解期、氧化期及還原期。將廢鐵及廢鋼經初步分類和稱重後加料，使廢鐵原料熔解成液態鋼水，為加速熔解，另通入高壓氧氣以加速氧化作用，此時廢鋼中含有之氧化物開始生成少量之氧化碴，再通入更多之氧氣，雜質則

氧化生成更大量的固態氧化碴及氣態氧化物(廢氣)，又因鋼液中含氧量過高，因此需加以還原作用，其作法是加入大量石灰石、碳粉等副料，使其與氧化物反應，產生還原浮碴並去氧脫硫，以清潔鋼液。此時可加入各種添加劑(如矽鐵、錳鐵、焦炭、生石灰等)以調整鋼液成份，煉鋼爐碴即是由此煉鋼過程所排出的熔碴，故又分為氧化碴及還原碴，圖 1 為煉鋼爐碴之產生流程圖。

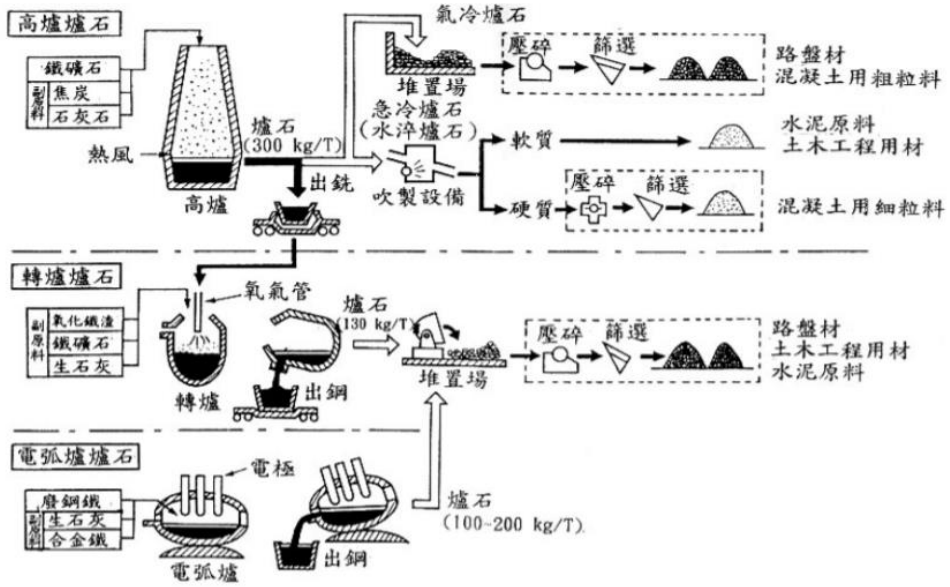


圖 1 煉鋼爐碴之產出流程

國內還原碴研究資料顯示，各煉鋼廠還原碴組成成份中[8,10,11]，氧化物中以 CaO 及 SiO_2 佔有之比例最多，分別佔有 35.3%~54.9%與 16.6%~34.8%，介於卜特蘭水泥第 I 型(分別為 62%及 22%)與高爐石粉(分別為 42%及 34%)的化學成份含量之間，如圖 2 所示。MgO 含量則高於卜特蘭水泥，主要因煉鋼廠於冷卻高溫還原廢碴時間過速，造成保溫材 MgO 包裹於爐碴顆粒中，無法經由常溫緩慢冷卻消解。若混合不同廠還原碴之各化學成份含量是介於參與混合煉鋼廠還原碴之間或相近，因此整體推估，煉鋼還原碴具有類似水泥及卜作嵐材料的膠結材料的效應。然而如果還原碴未經充分安定化，則還原碴中的游離氧化鎂／鈣(f-MgO/f-CaO)將是造成水泥、水泥砂漿及混凝土膨脹劣化的主要因素。

依據「經濟部事業廢棄物再利用管理辦法」2021 年 6 月 24 日公告修正「編號八、電弧爐煉鋼爐碴(石)」之再利用管理規定，其中還原碴之再利用用途為，水泥生料，經安定化處理後作為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、紐澤西護欄原料，或經高壓蒸汽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、水泥製品用粒料原料或

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。經安定化處理後之還原碴（石），應至少每月委託檢測機構依 CNS 15311 粒料受水合作用之潛在膨脹試驗法檢測一次，經檢測之七天膨脹量除再利用於紐澤西護欄原料用途者應未超過百分之 0.05 外，其他再利用用途未超過百分之 0.5 者，始得進行再利用。而再利用於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、水泥製品用粒料原料、混凝土（地）磚、空心磚、水泥瓦、水泥板、緣石、混凝土管、人孔、溝蓋之原料用途，且依前目契約書屬安定化處理執行單位者，須具備高壓蒸汽處理設備。其中，電弧電弧爐練鋼爐碴（石）經高壓蒸汽處理須維持爐內壓力至少在 20.1 kgf/cm^2 且持續 3 小時，其產出物應至少每月委託檢測機構依附件熱壓膨脹試驗法(20.1 kgf/cm^2 且持續 6 小時)檢測一次，經檢測之試體外觀無爆裂、局部爆孔、崩解及破裂情形者，始得進行再利用。

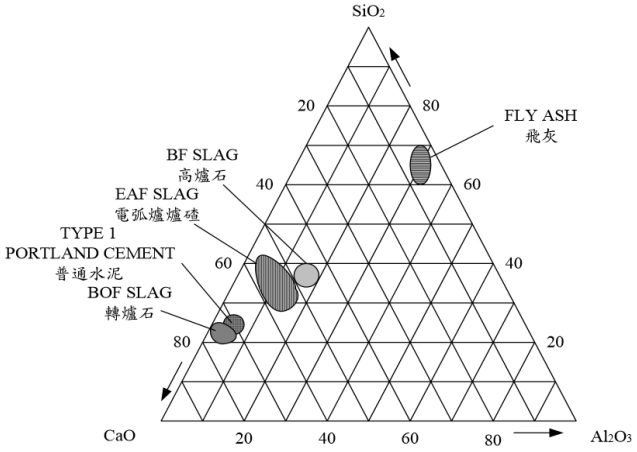


圖 2 煉鋼還原爐碴與卜作嵐材料之三相平衡關係圖

三、電弧爐還原碴之安定化

電弧爐還原碴再利用上之最大疑慮在於本身體積之高膨脹率，原因為還原碴含有大量未反應完之生石灰，這些未反應完之氧化鈣會以游離氧化鈣(Free-CaO)之形式存在，而游離氧化鈣之特點為活性大，易與水及二氧化碳反應消解成氫氧化鈣及碳酸鈣。在游離氧化鈣轉換成氫氧化鈣之過程中，爐碴之體積會膨脹，而當游離氧化鈣完全反應消解或是含量低時，電弧爐爐碴才會趨於穩定，以利後續再利用。台鋼資源還原碴安定化技術，其原理為在高溫高壓之狀態下使 f-CaO 及 f-MgO 與水產生反應（壓力 21kgf/cm^2，溫度 215℃之飽和蒸汽），使還原碴內所含的 f-CaO 或 f-MgO 反應消解，以達還原碴安定化之功效，其反應式如下：

$f\text{-}CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2$　　$f\text{-}MgO + H_2O \rightarrow Mg(OH)_2$

台鋼資源將還原碴安定化後，利用 ICP 進行成分分析，並依 CNS 15311 粒料受水合作用之潛在膨脹試驗法與再利用管理辦法附錄之熱壓膨脹試驗法進行安定化成果檢測，相關試驗結果如表 1 所示，表中鋼鐵廠之還原碴，經安定化後檢測其 7 天膨脹量，均可符合浸水膨脹率低於百分之 0.5 與熱壓膨脹試驗後試體外觀無爆裂、局部爆孔、崩解及破裂情形之規定，方進行再利用。

表 1　安定化後還原碴之浸水膨脹率試驗結果

樣品名稱	成分分析(單位：%):ICP						浸水膨脹率(%)	熱壓膨脹試驗
	Fe_2O_3	MgO	Al_2O_3	SiO_2	CaO	MnO_2		
210507#5-1	1.08	12.18	10.33	18.37	46.49	0.38	0.32	無爆裂崩解
210507#5-2	1.10	12.15	10.23	18.48	46.66	0.38	0.32	無爆裂崩解
210619#1-1	1.33	13.39	9.41	18.89	45.77	0.54	0.07	無爆裂崩解
210619#1-2	1.32	13.43	9.35	18.91	45.60	0.54	0.07	無爆裂崩解
210619#2-1	1.22	11.24	9.84	18.84	47.01	0.46	0.10	無爆裂崩解
210619#2-2	1.23	11.61	9.79	18.57	46.84	0.45	0.11	無爆裂崩解
210619#3-1	1.31	12.84	9.30	18.74	46.28	0.54	0.26	無爆裂崩解
210619#3-2	1.28	12.90	9.50	18.58	46.29	0.52	0.37	無爆裂崩解
210619#4-1	1.34	11.78	8.72	20.06	47.19	0.54	0.19	無爆裂崩解
210619#4-2	1.37	11.73	8.72	20.08	47.09	0.54	0.14	無爆裂崩解

四、安定化後電弧爐還原碴應用於控制性低強度材料(CLSM)

台鋼資源公司利用安定化還原碴(圖 2)與台灣鋼聯旋轉窯碴(圖 3)，替代天然粒料，應用於控制性低強度材料(CLSM)，以驗證台鋼資源生產的安定化還原碴與旋轉窯碴再利用於營建工程中之可行性。所有的 CLSM 配比均透過新拌及硬固性質試驗，分析其做為 CLSM 之可行性，並藉由熱壓膨脹試驗，驗證產品之體積穩定性，以有效資源化煉鋼還原碴與旋轉窯碴。

1.爐碴粒料基本性質

(1)電弧爐還原碴:蒸汽安定化處理還原碴，Group1 及 Group2 還原碴各項物理性質分析結果如表 2 所示。

(2)旋轉窯碴:本研究所使用之旋轉窯碴，乃台灣鋼聯資源化處理電弧爐集塵灰產生之副產物（可再利用廢棄物 R-1207)，旋轉窯碴（AK）細度模數(FM)為 4.84，仍然為接近河川細粒料之粒徑，並非屬於一般天然河川粗粒料的範圍。旋轉窯碴之主要化學組成為氧化鐵(63.3%)及氧化鈣，氧化鈣與二氧化矽的比值為 2.36。旋轉窯碴不含會崩解的成份，故屬穩定性佳的碴。

表 2 還原碴之基本性質分析

性質名稱	Group1	Group2
重量(kg)	30.6	34.0
比重	2.89	2.96
吸水率(%)	3.06	2.93
乾搗單位重(kg/m3)	1684	1771
孔隙率(%)	0.37	0.39
細度模數(FM)	2.64	2.28
浸水膨脹率（CNS 15311）	<0.2%	0.2%~0.4%

圖 2 還原碴

圖 3 旋轉窯碴

2.還原碴控制性低強度材料(CLSM)之應用

(1)還原碴 CLSM 在工程上之應用

本研究使用之細粒料為安定化後之還原碴，並將還原碴依進水膨脹率高低分為 Group1 及 Group2 兩組，其中 Group1 為浸水膨脹率<0.2%者；Group2 則為浸水膨脹率 0.2%~0.4%者，以驗證不同浸水膨脹率對還原碴再利用於 CLSM 時，對工程性能是否會有影響。CLSM 配比設計採用固定膠結料比率(水泥:燃煤飛灰比率 1:1) ，水膠比(W/B)設定為 1.08，水灰比(W/C)為 2.16，砂膠比(S/B)設定為 6:1，電弧爐還原碴取代河川細之比例為 0%、33%、66%、100%，添加 5%強塑劑以增加流動性，添加 6%、速凝劑以控制凝結時間。經計算後配比如表 3 所示。

新拌 CLSM 性質要求達到規定的坍流度、管流度及落沉時間，結果顯示如表 4 所示，基本上經由上述基本材料性質試驗數據可知，還原碴不同粒徑細度會直接影響新拌 CLSM 特性，細度模數(FM)愈小，比表面積愈大，對工作性愈不利，但這些工作性質基本上均可藉由添加摻料調整達成。初凝時間依據 ASTM C403「Time of setting by penetration resistance」之規定進行，基本上初凝時間，初凝愈短，則落沉時間愈短，這種結果都是工作性的一種表徵，而落沉試驗是更能表現出路面載重的承受能力。一般型規定落沉時間須在 24 小時內達成，早強型則需在 4 小時內達成，試驗結果顯示如表 4 所示，表中 CLSM 配比均可符合一般型 CLSM 之新拌性能需求。

硬固 CLSM 訴求早強晚弱的特性，依據台北市政府新工處的規定，齡期 1 天抗壓強度須高於 7 kgf/cm^2，齡期 28 天抗壓強度須在 90kgf/cm^2 以下。

本研究檢測4個齡期的CLSM抗壓強度，試驗結果如表5所示。還原碴CLSM的一天抗壓強度皆可以滿足大於7 kgf/cm^{2}的要求，至於28天抗壓強度，除C1F1S33A6SP5配比抗壓強度為90.35 kgf/cm^2，略高於90kgf/cm^{2}之要求外，其餘組別配比皆符合小於90 kgf/cm^{2}的規定。基本上就強度而言，還原碴CLSM可符合一般工程需求。

關於還原碴應用於工程上，其體積穩定性實為其工程性質外，外界更關注之焦點。本研究將硬固CLSM的試體先於室溫浸水養護3天後，即進行熱壓膨脹試驗，在高溫及高壓（飽和蒸汽壓）的作用下，加速其膨脹反應，以測試摻加不同程度安定化還原碴CLSM的體積變異程度，進而評估應用於回填後的工程之體積穩定性。試驗結果如表6示，各還原碴及旋轉窯爐碴CLSM皆沒有產生爆裂現象，顯示安定化還原碴(Group1及Group2)製成CLSM時，皆在高溫及高壓作用下，線膨脹量分別為0.04%及0.03%，不會產生爆裂現象，CLSM應用於工程回填時之體積穩定性，應可符合工程需求，將其應用於工程回填時使用的CLSM材料，是目前最佳再資源化的選項之一。

表 3 CLSM 配比表(kg/m^3)

編號	取代比例	強塑劑	速凝劑	水泥	飛灰	還原碴	水	細粒料
C1F1S0A6SP5	0%	5%	6%	136.2	136.2	0	294.7	1567.1
C1F1S33A6SP5	33%			139.1	139.1	528.0	300.9	1072
C1F10S66A6SP5	66%			142.1	142.1	1078.7	307.3	555.7
C1F1S100A6SP5	100%			145.3	145.3	1671.3	314.3	0
備註：代號及符號說明 C1-F1-S33-A6-SP5: C1:水泥與飛灰漿值濃度為 1:1; F1：水泥與飛灰漿值濃度為 1:1; S0：取代比例為 0%; A6：速凝劑為總膠結材料 6%的重量比; SP5：強塑劑為總膠結材料 5%的重量比 。								

表 4 電弧爐還原碴新拌 CLSM 性質

Group1 還原碴					
編號	工作性		單位重	凝結時間	
	管流度 (cm)	坍流度 (cm)	新拌單位重 (kg/m^3)	初凝時間 (hr)	落沉時間 (hr)
C1F1S0A6SP5	20	53	1940	9.1	-
C1F1S33A6SP5	27	70	1816	8.4	-
C1F1S66A6SP5	29	72	1749	8.1	-
C1F1S100A6SP5	21	54	1657	7.8	8.6
Group 2 還原碴					
C1F1S0A6SP5	20	53	1896	8.6	-
C1F1S33A6SP5	24	77	1763	6.5	8.3
C1F1S66A6SP5	23	75	1689	4.8	6.7
C1F1S100A6SP5	22	54	1573	4.1	5.9

表 5 電弧爐還原碴 CLSM 之抗壓強度

Group 1 還原碴(kgf/cm^2)				
編號	齡期 12 小時	齡期 1 天	齡期 14 天	齡期 28 天
C1F1S0A6SP5	3.16	7.14	61.16	80.49
C1F1S33A6SP5	3.67	7.67	78.96	84.17
C1F1S66A6SP5	4.89	8.91	67.66	82.61
C1F1S100A6SP5	4.26	4.95	53.18	69.79
Group 2 還原碴(kgf/cm^2)				
C1F1S0A6SP5	3.69	7.16	75.46	84.82.
C1F1S33A6SP5	3.51	7.50	88.84	90.35
C1F1S66A6SP5	5.54	10.82	80.83	85.37
C1F1S100A6SP5	4.89	5.50	71.41	80.03

表 6 電弧爐還原碴 CLSM 配比熱壓膨脹結果

	Group 1 還原碴	Group 2 還原碴
熱壓前		
熱壓後		
線膨脹	0.04%	0.03%

五、結　論

1.台鋼資源採用高壓蒸汽安定化處理電弧爐煉還原碴，結果顯示還原碴經高壓蒸汽處理後，還原碴之浸水膨脹率可低於百分之 0.5(CNS 15311)，高壓蒸汽安定化處理確實可達成體積穩定之成效。

2.安定化後還原碴產製之 CLSM，其工程性能可符合工程需求，透過熱壓膨脹試驗測試所有硬固 CLSM 試體，顯示皆無表面破裂現象，可以避免

應用於 CLSM 而造成路面隆起變形之現象，還原碴 CLSM 體積穩定性無虞。3.電弧爐煉鋼原本就是資源循環中重要的一環，但在重新熔煉的過程中會產生煉鋼副產品---爐碴。台鋼資源透過高溫高壓蒸汽安定化還原碴，在體積穩定性無虞之前提下，將還原碴使用在 CLSM 合適的營建用途上，可有效發揮其的適用性與價值性，不但可減少天然資源的開發與使用，對於循環經濟在營建業的推展亦有所助益。

六、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.「經濟部事業廢棄物再利用管理辦法」，行政院經濟部(2019)。

3.歐盟爐石協會(http://www.euroslag.com) (2018)。

4.美國國家爐石協會(http://www.nationalslag.org) (2018)。

5.「鋼鋼鐵渣基層材料與天然材料的比較」，日本爐石協會(http://www.slg.jp/e/index.htm)(2018)。

6.循環台灣基金會(https://www.circular-taiwan.org/)。

7.余騰耀、林平全、施延熙、黃兆龍、蔡敏行，電弧爐煉鋼還原碴資源化應用技術手冊，中興工程顧問股份有限公司，2001。

8.余騰耀，「電弧爐煉鋼業廢棄物減量及資源回收」，環保特刊，第 193-221 頁(1996)。

9.蘇茂豐、陳立，「電弧爐煉鋼爐碴之資源化現況及未來展望」，工業污染防治，第 93 期，27-51 頁, Jan. 2005。

10. 張同生、劉福田、王建偉,等.鋼渣安定性與活性激發的研究進展[J], 矽酸鹽通報, 2007, 26(5):980-984.

11. 桑山忠等，「電気炉還元スラグの水硬性とその利用」，廃棄物学会論文誌，Vol. 1, No. 1，1990。

12. 江奇成，電弧爐煉鋼還原渣與鑄件廢料摻用於混凝土再生材之模式研究，博士論文，國立台灣科技大學營建工程系，2005。

以無機聚合材料固化放射性陽離子交換樹脂之研究

謝宇杰[*]、李韋皞[**]、鄭大偉[***]、黃君平[****]

摘　要

廢離子交換樹脂係伴隨核能發電產生之廢棄物，屬於濕式低放射性廢棄物，其處理方式一直是國際性的難題。過去各國經常使用水泥材料將其固化，因為水泥材料成本低廉且操作亦相對簡單；然而其特性易於固化時與水泥進行離子交換反應，進而破壞水泥固化體之結構；且其屬於有機物，在固化過程中易產生輻射分解，將釋出氣體造成水泥固化體產生龜裂，故不適合使用水泥材料進行固化。

我國過去曾以水泥材料固化廢離子交換樹脂，亦因上述之問題而停止固化，改採脫水暫存廢樹脂，然而這非長久之計，目前仍有大量的廢離子交換樹脂需要處置，因此開發新型的固化材料是一項迫在眉睫的問題。

無機聚合材料(Geopolymer)是近年來迅速發展的新興材料，主要係使用富含矽鋁之工業副產品製備而成，具有優異之機械性質、耐久性及節能減碳等特點，亦有文獻指出其可以有效固化放射性廢棄物。故本研究期望以無機聚合材料固化廢離子交換樹脂，以探討無機聚合材料固化之可行性。

根據本研究結果顯示，無機聚合材料可有效固化廢離子交換樹脂，其濕基樹脂固化量可由傳統水泥固化的 12 wt. %大幅提升至 50 wt. %，且各項檢測結果亦符合低放射性廢棄物處理之規範，相較傳統水泥固化體，可大幅提升貯存之空間。因此，使用無機聚合技術進行廢離子交換樹脂固化，不僅能確保固化體的穩定性及安全性，更能延長掩埋場址的壽命，達到友善環境之目的。

【關鍵詞】低放射性廢棄物、離子交換樹脂、無機聚合材料、固化

---

[*]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　助理教授

[***]國立台北科技大學資源工程研究所　特聘教授

[****]核能研究所工程組　副研究員

一、前 言

隨著核能科技日益發展，如何處置產生之核廢料已被普羅大眾所重視，其中核電廠的廢離子交換樹脂之處理更是國際性之難題。離子交換樹脂屬於有機聚合物，被廣泛的使用於核能發電廠中，用以淨化放射性廢水[1]。使用後之離子交換樹脂屬於低放射性廢棄物，將直接廢棄，不再生使用。根據放射性廢棄物處理貯存及其設施安全管理規則第十五之一條，處理設施與核子反應器設施運轉所產生之低放射性廢棄物，未經安定化處理者，貯存不得超過五年。截至 2021 年 8 月，我國已累積貯存 20,016 桶未經安定化之廢樹脂。

廢離子交換樹脂之處理技術可分成減容處理及固化處理，兩種處理技術各有其優缺點。我國過去曾使用水泥固化法，將廢離子交換樹脂封存在水泥固化體中，但固化過程中，離子交換樹脂因水化反應而產生體積膨脹及收縮，導致水泥固化體破裂。因上述之緣故，我國自 1987 年 7 月以後，已停止使用水泥固化法，改採脫水暫存廢離子交換樹脂，但這並非長久之計，仍需研發新型固化材料以安定化廢離子交換樹脂。

無機聚合材料係一種結構類似於沸石之非晶質或半晶質材料，具有 SiO_4 及 AlO_4 四面體共用氧原子鍵結形成 Si-O-Al 之三維架狀結構。此材料主要係使用富有矽鋁離子之材料與鹼性溶液製備而成。透過鹼性溶液將材料之矽鋁離子析出，使其形成無機聚合前導膠體，經聚合、脫水及硬化後即形成無機聚合材料。

無機聚合材料具有許多優異性質，如高機械性質、高耐久性及操作簡單，並具有固化重金屬之特性，相當適合作為固化放射性離子交換樹脂之材料。國內外亦有不少使用無機聚合材料固化廢離子交換樹脂之先例。故本研究將以無機聚合材料固化陽離子交換樹脂，並提高樹脂濕基固化量至 50 wt. %。探討其可行性。

二、實驗材料與方法

1.實驗材料

(1)陽離子交換樹脂

本研究使用美國 Purolite 公司提供之核能級陽離子交換樹脂 (NRW100)，其基本性質如表 1 所示。

表 1 陽離子交換樹脂基本性質

型號	NRW100
聚合物結構	聚苯乙烯與二乙烯苯膠體
表面外觀	棕色凝膠球形粒狀
官能基(理論)	磺酸
離子型態	H+(99.9%)
交換容量	1.8 eq/L
含水率	51-55%
粒度範圍	425 – 1,200 μm
雜質-鐵(最大)	50 mg/L
雜質-鈉(最大)	40 mg/L
雜質-重金屬(最大)	40 mg/L
比重	1.2
溫度限制	120℃

(2)爐石粉

本研究使用中聯資源有限公司提供之爐石粉，產品名稱為 S4000 水淬高爐爐石粉。其粒徑分布如圖 1 所示，其中位徑(D50)為 12.0 μm。其化學成分如表 2 所示，主要為 CaO、SiO2 及 Al2O3，其中 CaO 含量最高，約為 46.0%。其晶相如圖 2 所示，顯示其主要為非晶質相。

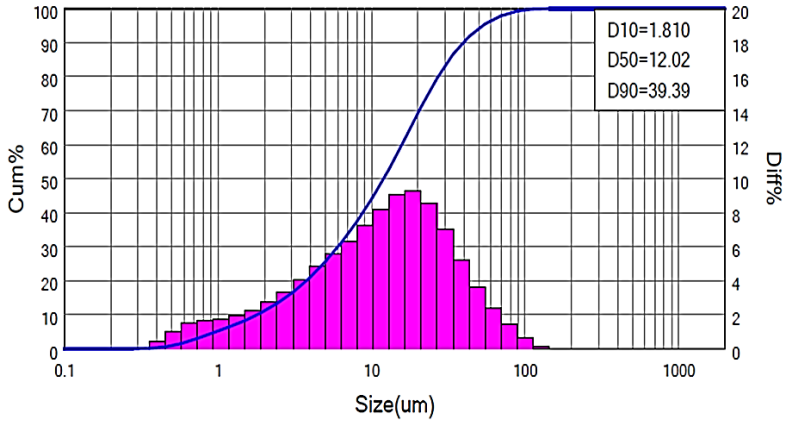


圖 1 爐石粉之粒徑分布

表 2 爐石粉之成分分析

化學成分	CaO	SiO_2	Al_2O_3	MgO	SO_2	Other	L.O.I.
wt. %	46.0	33.1	10.8	5.5	1.5	3.1	N.D.

N.D. = < 0.1 wt. %

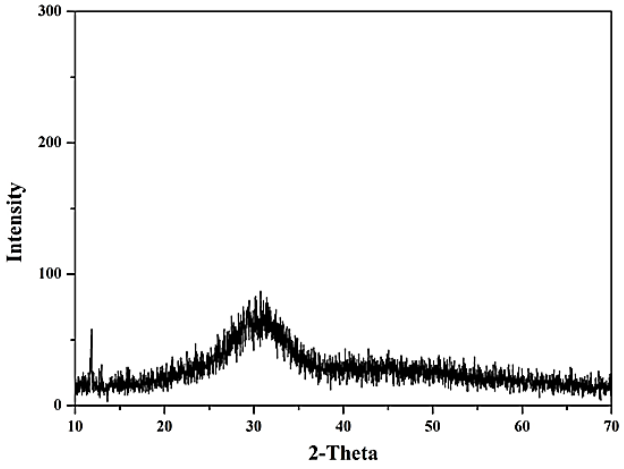


圖 2 爐石粉之晶相分析

(3)燃煤飛灰

本研究使用高雄興達火力發電廠提供之燃煤飛灰。以雷射粒徑測定儀檢測其粒徑分布，其粒徑分布如圖 3 所示，其中位徑(D50)為 18.9 μm。其化學成分如表 3 所示，主要為 SiO_2、Al_2O_3 及 Fe_2O_3，其中 SiO_2 含量最高，約為 63.0%。其晶相如圖 4 所示，顯示其主要為石英相及莫來石相。

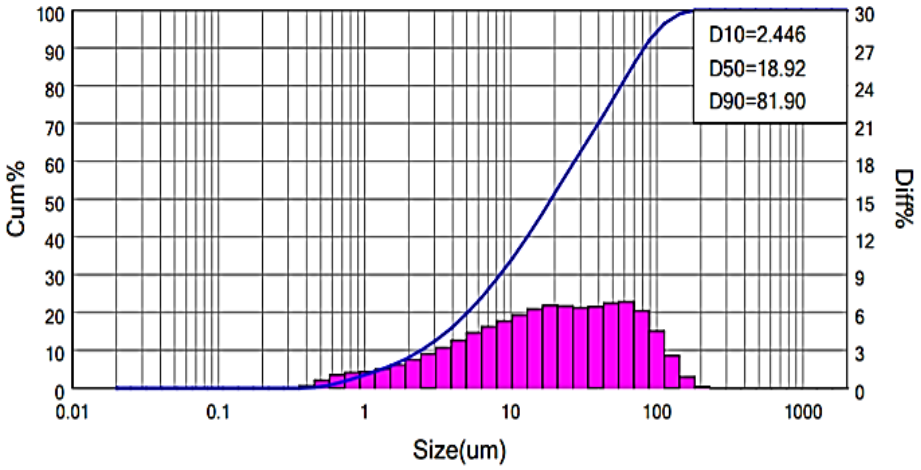


圖 3 燃煤飛灰之粒徑分布

表 3 燃煤飛灰之成分分析

化學成分	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	K_2O	TiO_2	Other	L.O.I.
wt. %	63.0	17.3	7.9	5.8	2.4	1.7	1.9	3.0

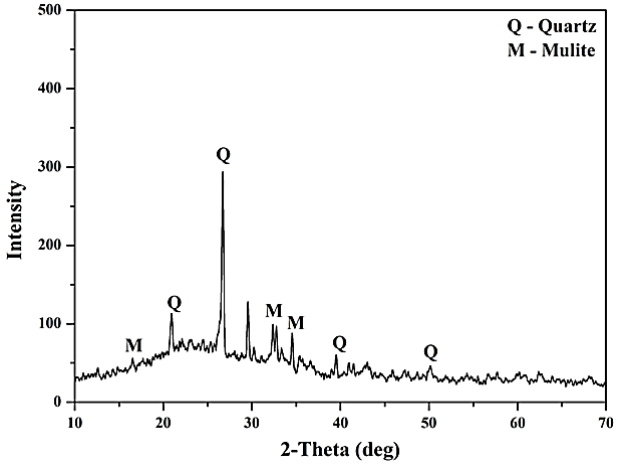


圖 4 燃煤飛灰之晶相分析

(4)聚丙烯纖維

本研究使用松江實業股份有限公司所販售之聚丙烯纖維，其基本性質如表 4 所示。此纖維經表面處理具親水性，擁有極佳之分散性及黏結性，可抑制固化體收縮並提高抗凍融性能[9]。

表 4 聚丙烯纖維基本性質[9]

纖維直徑(μm)	纖維長度(mm)	密度(g/cm3)	斷裂強度(MPa)	彈性模量(MPa)
15-45	19	0.91	> 450	> 4000

(4)模擬核種

本研究將氯化銫及氯化鍶配製成溶液，作為模擬核種添加至離子交換樹脂中，探討 Cs^{+}及 Sr^{2+}離子於固化體中之溶出情形。

2.實驗流程

實驗流程如圖 5 所示，本研究將探討鹼性溶液濃度、聚丙烯纖維添加量及添加模擬核種對固化體之影響。氫氧化鈉濃度分別為 12M、14M 及 16M，聚丙烯纖維額外添加量分別為 0 wt. %、0.1 wt. %、0.3 wt. %及 0.5 wt. %，核種濃度(Cs^{+}、Sr^{2+})分別為 997.3 及 999.8 mg/L。陽離子交換樹脂固化量為濕基 50 wt. %，爐石粉與燃煤飛灰之比例為 9：1，檢測項目包括自由水、機械強度、耐候性、耐水性及溶出試驗。

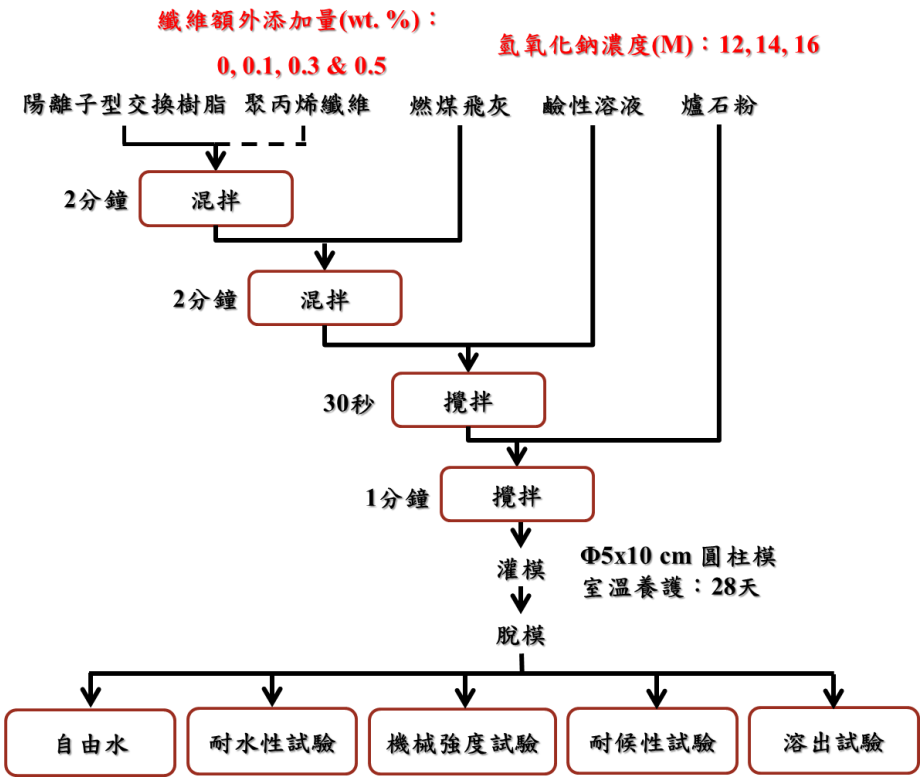


圖 5 實驗流程圖

3.測試項目

本研究依照低放射性廢棄物均勻固化體之法規與測試方法建立之標準，以評估固化體之品質，測試項目包含自由水、溶出率、機械強度、耐水性、耐候性，如表 5 所示。

表 5 低放射性廢棄物固化體測試項目、標準及方法

測試項目	測試方法	測試標準
自由水	FCMA-WFC-110	自由水含量小於固化體體積之 0.5%。 自由水 pH 值介於 4~11 之間。
溶出試驗	FCMA-WFC-310	固化體內各核種溶出指數大於 6。
機械強度	FCMA-WFC-410	固化體之抗壓強度大於每平方公分 15 公斤。
耐水性	FCMA-WFC-510	經耐水性試驗後，固化體之抗壓強度大於每平方公分 15 公斤。
耐候性	FCMA-WFC-610	經耐候性試驗後，固化體之抗壓強度大於每平方公分 15 公斤。

三、結果與討論

1.鹼性溶液氫氧化鈉濃度對固化體之影響

本實驗探討不同鹼性溶液氫氧化鈉濃度對無機聚合樹脂固化體之影響，氫氧化鈉濃度分別為 12M、14M 及 16M。陽離子交換樹脂固化量為濕基 50 wt. %，爐石粉與燃煤飛灰之比例為 9：1，檢測項目包括自由水、機械強度、耐候性及耐水性。

表 6 為不同氫氧化鈉濃度之固化體其各項試驗外觀。結果顯示不同氫氧化鈉濃度之固化體均未產生自由水現象，符合規範之標準。固化體經耐水性試驗後，其外觀未有剝落產生，均可保持其完整性。固化體經耐候性試驗後，其外觀均有嚴重剝落產生，無法保持其完整性，亦無法進行抗壓強度試驗。因為耐候循環至高溫高濕時，固化體內之樹脂將會吸水膨脹；耐候循環至零下環境時，樹脂內之水分亦會結冰膨脹，造成固化體膨脹剝落。

表 6 不同氫氧化鈉濃度之固化體其各項試驗外觀

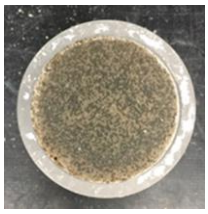
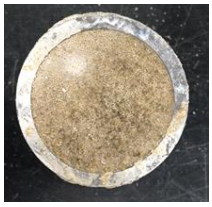
鹼性溶液 氫氧化鈉濃度(M)	12	14	16
自由水情形			
28 天 固化體外觀			
經耐水性試驗後 固化體外觀			
經耐候性試驗後 固化體外觀			

圖 6 為不同氫氧化鈉濃度之固化體其各項試驗抗壓強度圖。當使用之鹼液溶液氫氧化鈉濃度分別為 12M、14M 及 16M，於養護齡期 28 天時，其抗壓強度分別為 4.0 MPa、4.1 MPa 及 4.6 MPa。經耐水性試驗後，其抗壓強度分別下降至 2.8 MPa、3.5 MPa 及 3.6 MPa，均符合規範之標準 1.5 MPa。經耐候性試驗後，固化體均無法進行抗壓強度試驗，未符合規範之標準。

結果顯示，提高鹼性溶液氫氧化鈉濃度有助於增進固化體之抗壓強度，推測係因為氫氧化鈉濃度提高，有助於溶出粉體之矽鋁離子，進而增進無機聚合反應，提升固化體之抗壓強度。

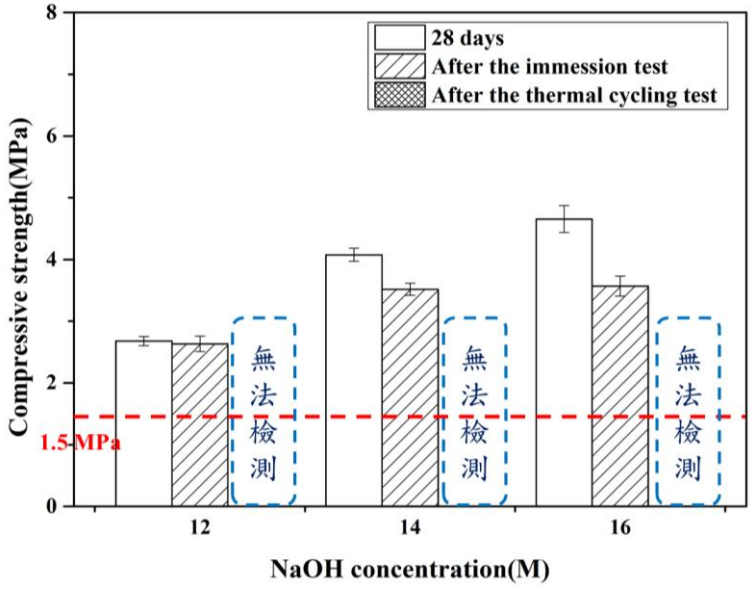


圖 6 不同氫氧化鈉濃度之固化體其各項試驗抗壓強度圖

2.聚丙烯纖維額外添加量對固化體之影響

本實驗探討不同聚丙烯纖維額外添加量對無機聚合樹脂固化體之影響，聚丙烯纖維額外添加量分別為 0 wt. %、0.1 wt. %、0.3 wt. %及 0.5 wt. %。陽離子交換樹脂固化量為濕基 50 wt. %，爐石粉與燃煤飛灰之比例為 9：1，鹼性溶液氫氧化鈉濃度為 12M，檢測項目包括自由水、機械強度、耐候性及耐水性。

表 7 為不同聚丙烯纖維額外添加量之固化體其各項試驗外觀。結果顯示不同聚丙烯纖維額外添加量之固化體均未產生自由水現象，符合規範之標準。固化體經耐水性試驗後，其外觀未有剝落產生，均可保持其完整性。固化體經耐候性試驗後，除未添加聚丙烯纖維之固化體外，其剝落問題均有明顯之改善，且隨纖維添加量越高，改善效果越佳，因為纖維具有橋接效應，可分散離子交換樹脂因膨脹而產生之應力，進而保持固化體之完整性。

表 7 不同聚丙烯纖維額外添加量之固化體其各項試驗外觀

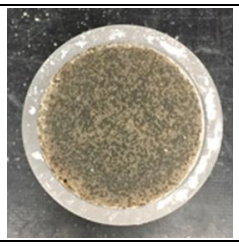
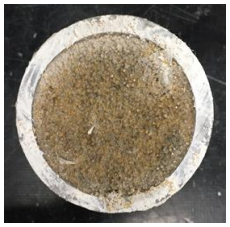
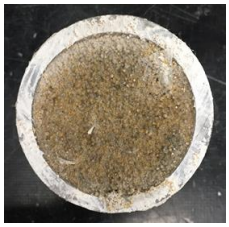
聚丙烯纖維 額外添加量(wt. %)	0.0	0.1	0.3	0.5
自由水情形				
28 天 固化體外觀				
經耐水性試驗後 固化體外觀				
經耐候性試驗後 固化體外觀				

圖 7 為不同聚丙烯纖維額外添加量之固化體其各項試驗抗壓強度圖。當固化體之聚丙烯纖維額外添加量分別為 0 wt. %、0.1 wt. %、0.3 wt. %及 0.5 wt. %，於養護齡期 28 天時，其抗壓強度分別為 4.0 MPa、4.6 MPa、4.5 MPa 及 4.3 MPa。經耐水性試驗後，其抗壓強度分別下降至 2.8 MPa、2.7 MPa、2.7 MPa 及 2.6 MPa，均符合規範之標準 1.5 MPa。經耐候性試驗後，其抗壓強度分別下降至 0 MPa、2.3 MPa、2.0 MPa 及 1.9 MPa，除未添加聚丙烯纖維之固化體外，均符合規範之標準 1.5MPa。

結果顯示，添加聚丙烯纖維可透過橋接效應，提高固化體之抗壓強度，並有效改善固化體經耐候性試驗後表面剝落之問題，且聚丙烯纖維額外添加量為 0.1 wt. %時具有最佳之抗壓強度。

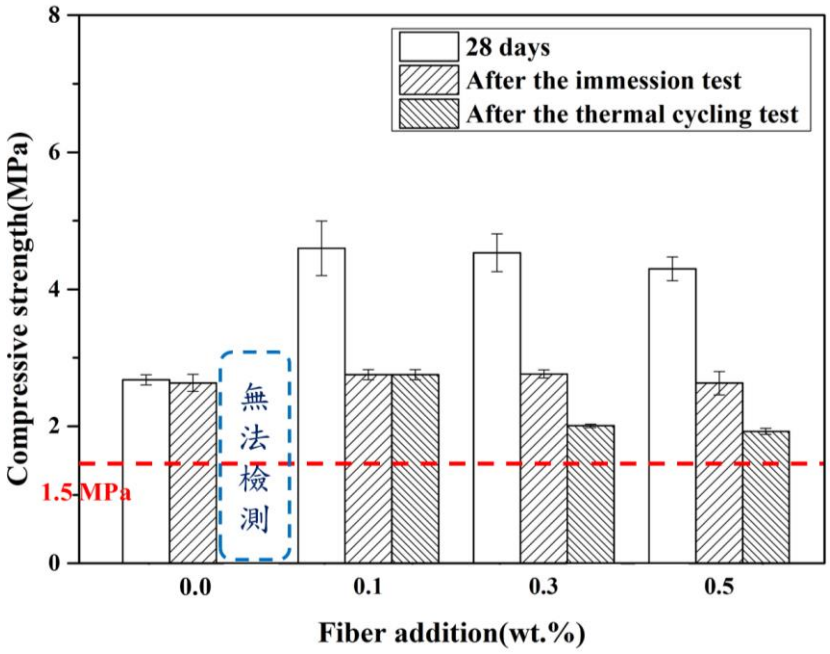


圖 7 不同聚丙烯纖維額外添加量之固化體其各項試驗抗壓強度圖

3.添加模擬核種對固化體之影響

本實驗為模擬核種溶出情形，將添加模擬核種，以探討其固化效果。離子交換樹脂內含有模擬核種，核種濃度(Cs^{+}、Sr^{2+})分別為 997.3 及 999.8 ppm。陽離子交換樹脂固化量為濕基 50 wt. %，爐石粉與燃煤飛灰之比例為 9：1，鹼性溶液氫氧化鈉濃度為 16M，聚丙烯纖維額外添加量為 0.5 wt. %，檢測項目包括自由水、機械強度、耐候性、耐水性及溶出試驗。

表 8 為添加模擬核種之固化體其各項試驗外觀。結果顯示固化體未產生自由水現象，符合規範之標準。固化體經耐水性試驗後，其外觀未有剝落產生，均可保持其完整性。固化體經耐候性試驗後，其表面仍會產生些許剝落，但仍可保持其完整性，符合規範標準。

表 8 添加模擬核種之固化體其各項試驗外觀

自由水情形	
28 天 固化體外觀	
經耐水性試驗後 固化體外觀	
經耐候性試驗後 固化體外觀	

圖 8 為添加模擬核種之固化體其各項試驗抗壓強度圖。添加模擬核種之固化體，於養護齡期 28 天時，其抗壓強度為 4.2 MPa。經耐水性試驗後，其抗壓強度下降至 2.8 MPa，符合規範之標準 1.5 MPa。經耐候性試驗後，其抗壓強度下降至 1.7 MPa，符合規範之標準 1.5 MPa。

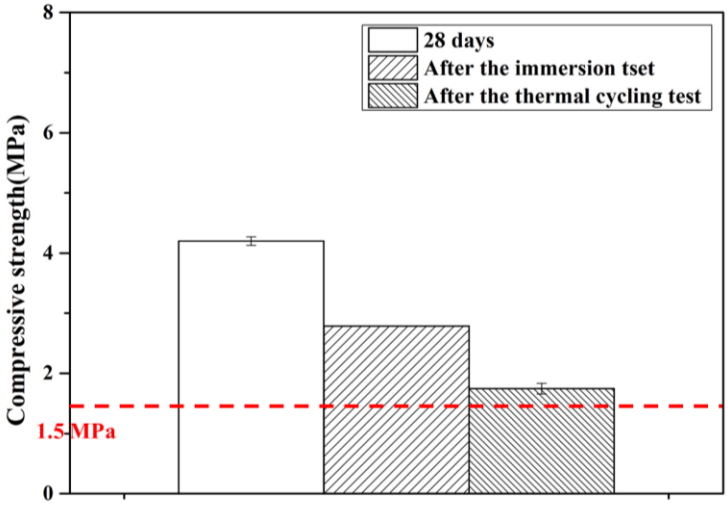


圖 8 添加模擬核種之固化體其各項試驗外觀抗壓強度圖

表 9 及表 10 分別為添加模擬核種之固化體其模擬核種之溶出指數。根據我國規範標準，固化體之溶出指數需大於 6，以避免放射性核種擴散至環境中。結果顯示固化體之溶出指數皆大於 6，符合規範標準，其中鍶離子之溶出率遠低於銫離子，因為銫離子溶解度較高，故溶出率較高[12]。

表 9 添加模擬核種之固化體其模擬核種鍶離子溶出指數

取樣時間	溶液濃度 (mg/L)	溶出總量 (μg)	有效擴散率 D (cm2/sec)	溶出指數 (LSr)	平均溶出指數(LSr)
第 2 小時	0.012	24.0	1.41E-11	10.9	
第 7 小時	0.012	24.0	1.85E-11	10.7	
第 1 天	0.013	26.0	6.50E-12	11.2	
第 2 天	0.013	26.0	8.02E-12	11.1	10.9
第 3 天	0.012	24.0	1.16E-11	10.9	
第 4 天	0.013	26.0	1.92E-11	10.7	
第 5 天	0.013	26.0	2.47E-11	10.6	

表 10 添加模擬核種之固化體其模擬核種銫離子溶出指數

取樣時間	溶液濃度 (mg/L)	溶出總量 (μg)	有效擴散率 D (cm2/sec)	溶出指數 (LCs)	平均溶出指數(LCs)
第 2 小時	0.560	1120.0	3.48E-08	7.5	
第 7 小時	0.480	960.0	3.36E-08	7.5	
第 1 天	0.380	760.0	6.31E-09	8.2	
第 2 天	0.710	1420.0	2.72E-08	7.6	7.4
第 3 天	0.990	1980.0	8.98E-08	7.0	
第 4 天	1.230	2460.0	1.95E-07	6.7	
第 5 天	0.690	1380.0	7.90E-08	7.1	

4.無機聚合樹脂固化體之核磁共振光譜分析

為探討提高鹼性溶液氫氧化鈉濃度對固化體結構之變化，本研究以 ^{29}Si 核種進行 NMR 光譜分析，比較鹼性溶液氫氧化鈉濃度 12M 及 16M 之差異性。圖 9 為不同鹼性溶液氫氧化鈉濃度之固化體 ^{29}Si NMR 分析圖譜。將此圖譜進行分峰定量，如圖 10 所示。最後將擬合曲線之各峰，計算其面積於整體所佔之百分比，即可得到 ^{29}Si 各鍵結型態之含量，如圖 11 所示。結果顯示，將鹼性溶液氫氧化鈉濃度從 12M 提升至 16M，對固化體之 ^{29}Si 鍵結型態並未有顯著之影響，兩者之主要鍵結皆係以 Q_4^4 為主，且整體反應應是以無機聚合反應為主。

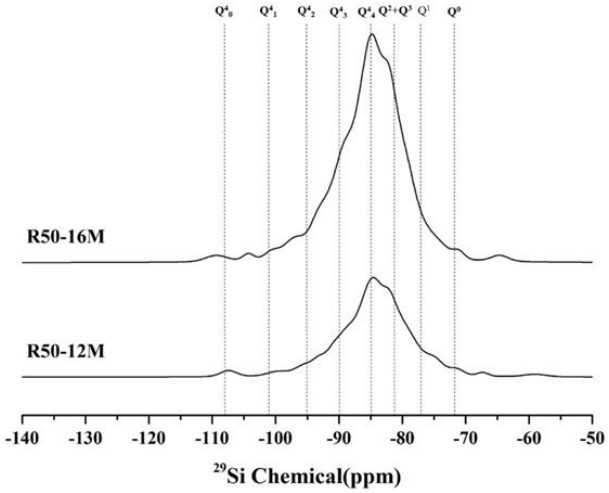


圖 9 不同鹼性溶液氫氧化鈉濃度之固化體 ^{29}Si NMR 分析圖譜

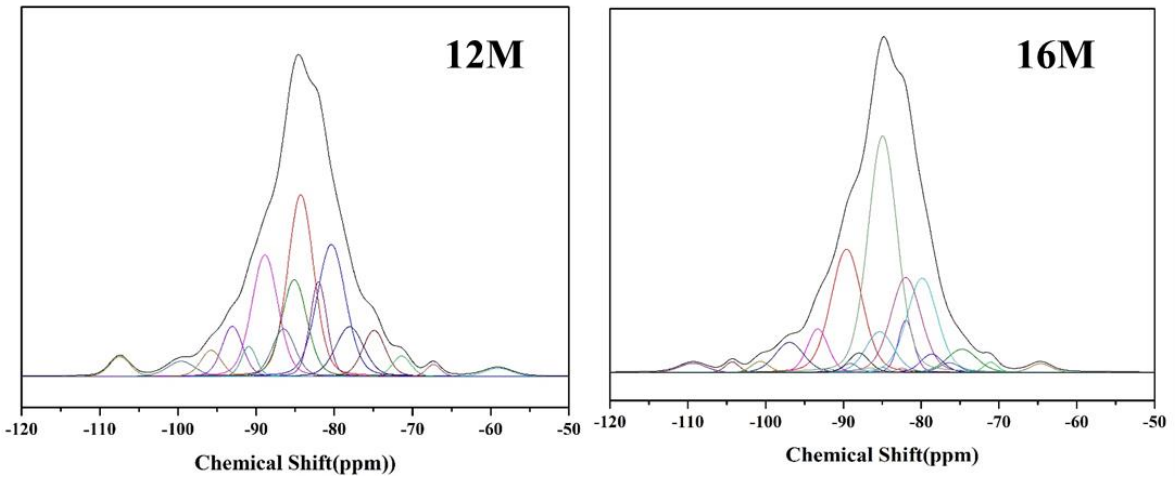


圖 10 不同鹼性溶液氫氧化鈉濃度之固化體 ^{29}Si NMR 擬合分析圖譜

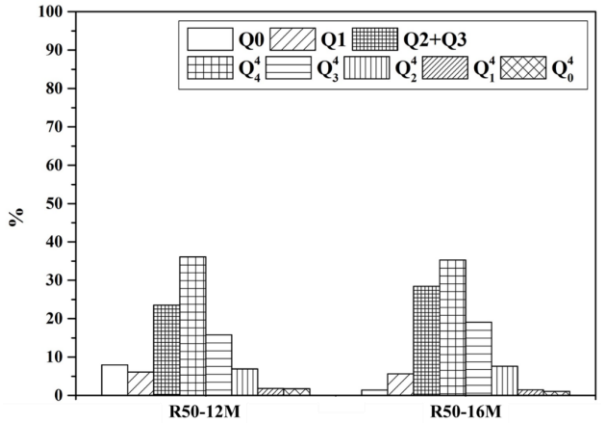


圖 11 不同鹼性溶液氫氧化鈉濃度之固化體 ^{29}Si 各鍵結型態之含量

5.增容比評估

為探討無機聚合材料固化陽離子交換樹脂之效益，本研究將計算其增容比，並與傳統水泥進行比較。增容比為一無因次指標，其定義為廢棄物固化處理前後體積之比值，係用以判斷固化效率並衡量成本之重要指標，其計算公式如公式(1)所示。無機聚合樹脂固化體及傳統水泥固化體之增容比如表 11 所示。結果顯示，無機聚合樹脂固化體之增容比最低為 1.66，代表每固化 $1m^3$ 之廢樹脂，將產生 1.66 m^3 方之樹脂固化體。而傳統水泥固化體之增容比約為 3.0，表示無機聚合固化體之減容效率約為水泥固化體之 2 倍，大幅提升貯存之空間。

$$\text{增容比} = \frac{\text{固化處理後之廢棄物體積}}{\text{固化處理前之廢棄物體積}} \qquad (1)$$

表 11 無機聚合樹脂固化體及傳統水泥固化體之增容比

	無機聚合樹脂固化體 (本研究)	傳統水泥固化體
濕基樹脂固化量(wt.%)	50.0	12.0
增容比	1.66	3.0

四、結論

研究顯示，無機聚合材料有效固化廢離子交換樹脂，濕基樹脂固化量可由傳統水泥固化的 12 wt. %大幅提升至無機聚合固化的 50 wt. %，其 28 天養護齡期之抗壓強度仍可達 4.2 MPa，且各項檢測結果亦符合低放射性廢棄物處理之規範，其增容比僅 1.66，相較傳統水泥固化體，可有效降低產生之廢棄物，大幅提升固化效率。

五、參考文獻

1. Rideaux J., “The role of ion-exchange resins in long-term spent fuel storage”, Westinghouse Savannah River Site; South Carolina, 1999.
2. 放射性物料管理局，https://www.aec.gov.tw/fcma/，2021。
3. 莊文壽，1993，「放射性廢樹脂之特性」，核研季刊，第一百二十九期，第 85-93 頁。
4. Lafond E., Cau dit Coumes C., Gauffinet S., Chartier D., Stefan L. and Le Bescop P., 2017, “Solidification of ion exchange resins saturated with Na+ ions: Comparison of matrices based on Portland and blast furnace slag cement”, Journal of Nuclear Materials, Vol. 438, pp. 121-131.
5. Davidovits J., 1999, “Chemistry of systems Termiology”, Proceeding of Geopolymer, 99 Second International Conference, France, pp. 9-37.Hajimohammadi A., Provis J. L. and Van Deventer J. S. J., 2008, “One-Part geopolymer mixes from geothermal silica and sodium aluminate”, Industrial and Engineering Chemistry Research, Vol. 47, pp. 9396-9405.
6. Lichvar P., Rozloznik M. and Sekely, S., 2013, “Behaviour of aluminosilicate inorganic matrix Sial® during and after solidification of radioactive sludge and radioactive spent resins and their mixtures”, International Atomic Energy Agency, Waste Technology Section, Vienna (Austria); [1 CD-ROM].
7. Lin W., Chen H. and Huang C., 2020, “Performance study of ion exchange resins solidification using metakaolin-based geopolymer binder”, Progress in Nuclear Energy, Vol. 129.
8. Purolite，https://www.purolite.com/product/nrw100，2021。
9. 江蘇蘇博特新材料股份有限公司，http://www.sobute.com/index.php/welcome.html，2021。
10. 放射性物料管理局，2011，低放射性廢棄物均勻固化體之法規精進與測試方法建立。
11. Ryu G. S., Lee Y. B., Koh K. T. and Chung Y. S., 2013, “The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators”, Construction and Building Materials, Vol. 47, pp. 409-418.
12. 王文文，謝華，王烈林，桑培倫，蘇偉，張霖濤，2018，「地質水泥固化體中 Sr(II)、Cs(I)、U(VI)的長期浸出行為研究」，原子能科學技術，第 52 卷，第 10 期，第 1740-1747 頁。

紡織廢水回收再利用之技術及其應用

林明旺*、劉柏緯**

摘　要

紡織及染整工業廢水經常是工業汙染水源的一個重點來源，伴隨所使用之化學原料、製程、產品種類及排放單元不同，亦有高複雜性之變化，並同時增加廢水處理及回收再利用的困難度；目前找尋適當的水處理單元設備，俱備穩定有效處理含各式汙染物質之綜合廢水，並維持回收水質之穩定，已成為重要之議題。

本研究針對紡織及染整之綜合廢水，進行廢水處理單元後放流水回收再利用之研究，目標係在於能夠保留經過廢水處理後的放流水再回用於製程上，研究分別有：1.廢水單元處理後放流水與地下水體(雨水)混合後經軟化處理即回用於染色製程、2.廢水單元處理後放流水之經 RO 逆滲透方式將水回用導入織布廠、鍋爐及染整廠全製程使用，取代現有工廠所使用之潔淨自來水源。

首先，其廢水處理方式為調勻、生物處理、沉澱、快混、慢混等功能。研究結果得知，利用該廢水處理方式及回收水設備，有效將水質控制於排放標準內，如：酸鹼值、生化需氧量、懸浮固體、硬度、色度及導電度等指標。此廢水處理之放流水體與地下水體混合，可應用於淺、中深色系之染色及染整製程中，確實與原水染色所呈現之色度相近；另外再將放流水導入 RO 逆滲透回收設備進行過濾，將有機物質及細菌等去除形成乾淨再生水源，進一步回用於織布廠、鍋爐及染整廠生產製造使用，有效提升廢水資源回收再利用，達到循環經濟之效益，亦大幅降低環境污染、水資源耗用及提升紡織產業節水效能。

【關鍵詞】紡織、染整、回收

---

*東豐纖維企業股份有限公司　廠長

**東豐纖維企業股份有限公司　課長

一、前 言

近年來，紡織產業發展朝向高質化、智慧化及環保意識抬頭，現今消費者對於機能環保紡織品的要求逐漸提升；如何有效提升機能性紡織品的功效，縮短生產製造流程以降低製作成本以及提升產品利潤，亦是目前大部分紡織業者在製作產品的研發重點之一。我國紡織產業皆以研發設計為主軸，垂直整合生產銷售至世界各地，陸續已逐漸擺脫過去代工生產的刻板印象。

賦予紡織品之機能性製作流程上，對紡織業廠商而言，亦是需要耗費相當人力及研發能量之重要考量。然而研發設計著重在產品多元化、綠色化，呈現出高質感、舒適性、環保綠色回收再應用的新形象。新素材的開發及產品功能擴展，對應染整工業需使用不同的藥劑、染料種類及有機化合物大量的應用在紡織工業。其製程原料中，需經過抽紗、假撚、織造、染整及後加工等程序後，所排放之淨水形成大量具有汙染物的廢水產生，使得紡織產業對於管末廢水的處理技術更加困難且不易達到廢水回收之重複再利用。

過去早期相關紡織、染整工廠因規模較小且為求便利、快速，大多將所產生的廢水在混合後行廢水處理工程，終端亦需投入大量的化學藥劑進行廢水化學處理至可達排放標準進行放流；未由製程的根本進行分類回收再重複使用或導入後端回收水系統設備，有效將水質再進一步處理後回用於生產製程上。

然現今需要能穩定有效處理各式汙染的綜合廢水且穩定維持回收水質，保留經過廢水處理後的放流水回用於製程上以達到回收再利用。全球提倡友善環境及循環經濟，對於紡織產業如何有效處理管末廢水及廢水回收技術，藉以達到降低耗水節省能資源、提高環境效益，已成為重要課題之一。

二、紡織廢水現況處理方法及回收再利用之循環技術

1. 紡織廢水現況處理方法

紡織業者面臨地球環境變遷，可使用的原物料逐漸減少，政府與環保相關業者提倡使用回收材料、能資源再利用，但又在市場競爭激烈、利潤下降及紡織工業所造成環境汙染議題，已被相當重視。以染整業排放廢水處理最為業者感到困擾，其排出水體所夾雜之色度很容易引起視覺上的醒目。染整主要會使用到有染料及化學藥劑，主要包含有酸、鹼、有機化合物及重金屬物質。染料化合物中具有高色度、高濃度、特殊毒性、部分結構複雜及不易劣化等特性，致使染整業一向被環保署列為重大污染源之一。

染整製程中是將胚布經過錫林、精練、染色、整理、印花等多項處理流程，以提高紡織品的附加價值，並也增加其特性用途於紡織中下游工業。現今，環保署訂定之紡織、染整工業之放流水排放標準亦是越來越嚴苛，表 1 所示為行政院環保署對於印染整理業所規定之法規，於 110 年 1 月 1 號更新真色色度由 550 下降至 400。然而近年來，常見染整廢水處理技術如表 2 所示，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。

表 1 行政院環保署對於印染整理業制定水質標準

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	400

表 2 常用廢水處理之物化處理技術

方法	原理	優缺點	適用範圍
物化處理技術			
混凝沉澱	投加高分子，使水體中的懸浮物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	技術設備簡單,易於實現,處理後的水質較好	適用於各類紡織染整廢水處理
活性污泥法	活性污泥中微生物生化作用，可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	指在好氧池前段設置缺氧池，缺氧池中反消化系中轉化氮氣	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	用生物填料作為微生物載體，生長有微生物的載體浸泡在水中，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

染整業者大致利用上述廢水之處理方式，可有效將廢水處理至可達放流水之標準，但對於有效將處理之後放流水進行回用至製程中仍是一大問題。

然目前常見廢水回收技術如管式膜過濾系統係利用調節池、反應池、迴圈濃縮池以及沉澱池進行廢水處理後，經過管式膜過濾系統再藉由逆滲透過濾系統將廢水多次處理並回收再利用，這樣的方法能夠提高廢水的過濾效能並提供回收再利用的水源，但由於紡織業廢水皆屬於較高度汙染的水源，利用管式膜、逆滲透過濾系統耗損相對較高，且回收利用成本相當高昂，一般染整廠無法達成，相對也可能造成使用機率較低的狀況。

三、紡織廢水回收再利用之循環技術相關要求及成效

1. 紡織廢水現況處理方法及回收再利用之循環技術

本研究主要以大型紡織染整廠包含有織布及染色、整理及前處理等部門，所產生的綜合廢水會包括有織布廢水及汙染較為嚴重的染整廢水，係主要將織布廢水以及染整廢水經過混合後，將其綜合廢水導入調勻池進行均勻混合，再將均勻混合後的廢水經冷卻水塔後流入活性污泥池進行生物處理分解，再將其分解後廢水導入終沉池進行沉澱後，輸入快混槽及慢混槽經化學處理後，利用浮除系統進行浮除，處理之水源流入中間槽經砂濾進行放流。圖 1 為廢水處理流程。

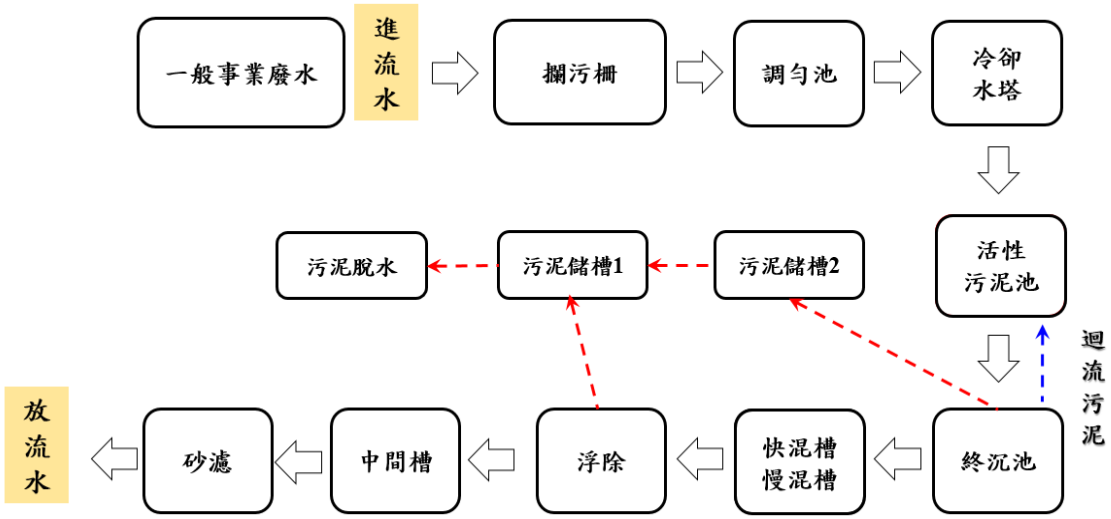


圖 1　廢水處理流程

其經廢水處理後之放流水再利用研究有：

(1)放流水與地下水混合後即應用於染色及染整製程。

(2)利用逆滲透方式將過濾有機物質及細菌後之乾淨水源，進入染整廠前處

理製程及鍋爐重新回用，另一部分則回用於織布廠進行使用。藉此，大幅提升織布及染整廢水統整回收再利用達到循環經濟且符合較低處理成本的做法。圖 2 為放流水之回用流程圖。

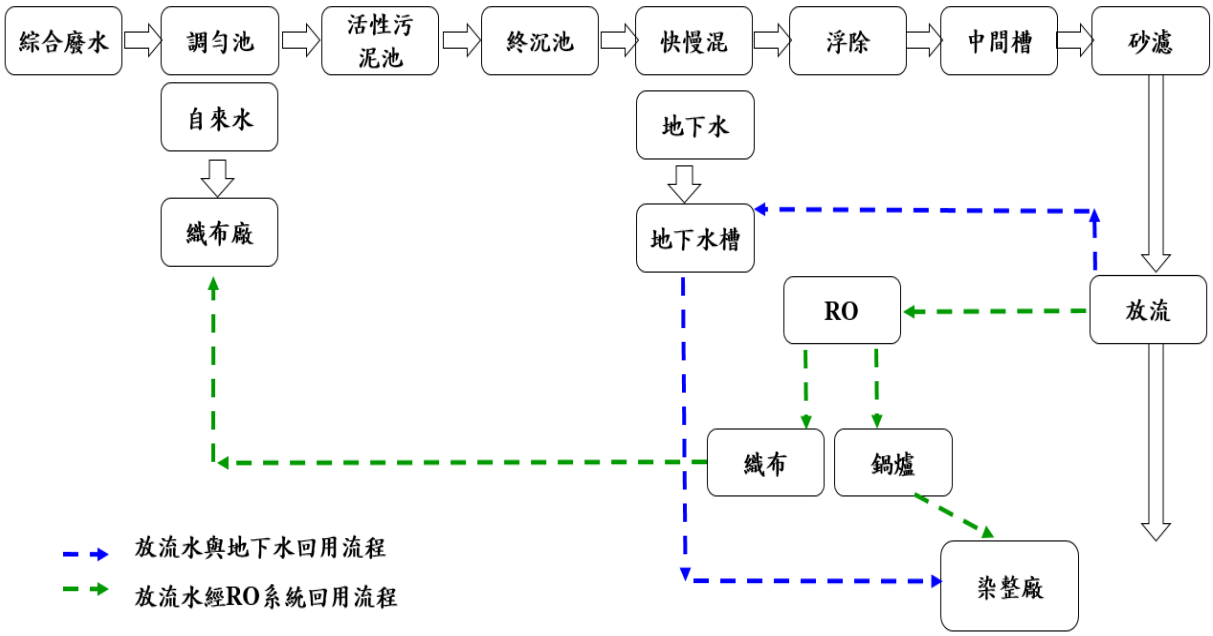


圖 2　放流水回用之流程

2. 紡織業廢水處理回收再利用之循環技術檢測

本研究係主要利用將染整廢水以及織布廢水混合後經過過濾、生物分解及化學分解後，有效將水質的酸鹼值、生化需氧量、懸浮固體、硬度、色度及導電度控制於排放標準內，此廢水處理之放流水體與地下水體混合，應用於淺、中深色系之染色及染整製程中，確實與原水染色所呈現之色度相近；如圖 3 及表 3 所示為標準水染色與放流水混合地下水之數據呈現。

(a)　(b)

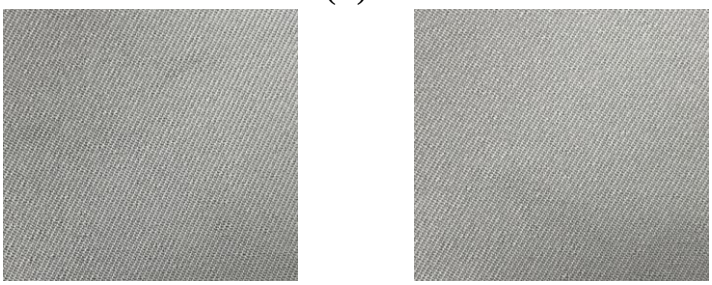


圖 3　(a)標準水染色(b)放流水與地下水混合染色布料

表 3　(a)標準水染色(b)放流水與地下水混用染色數據表

標準水染色	DL*	Da*	Db*	CIE DE	Status	color Comment
D65 10	0.16	0.01	0.10	0.19	Pass	more red more yellow
U3000 10	0.18	0.03	0.14	0.23	Pass	more red more yellow
F02 10	0.17	0.00	0.13	0.21	Pass	more red more yellow
放流水與地下水混合染色	DL*	Da*	Db*	CIE DE	Status	color Comment
D65 10	0.26	-0.10	0.30	0.41	Pass	more green more yellow
U3000 10	0.28	-0.05	0.35	0.45	Pass	more green more yellow
F02 10	0.27	-0.08	0.34	0.44	Pass	more green more yellow

另放流水導入 RO 逆滲透回收設備進行過濾如圖 4 為 RO 過濾設備及運轉狀態，圖 5 為 RO 過濾後水質與放流水，其過濾後水質檢測數據 COD < ND、SS < ND、硬度 < ND、導電度<100 及 Abs420nm < 0.001。進一步已將水質應用於織布廠、鍋爐及染整生產製程使用，有效提升廢水資源回收再利用的功能，達到循環經濟。織布及染整廠廢水資源再生之重複使用，大幅降低環境污染、水資源耗用及提升紡織產業節水效能。

圖 4　RO 過濾設備及運轉狀態

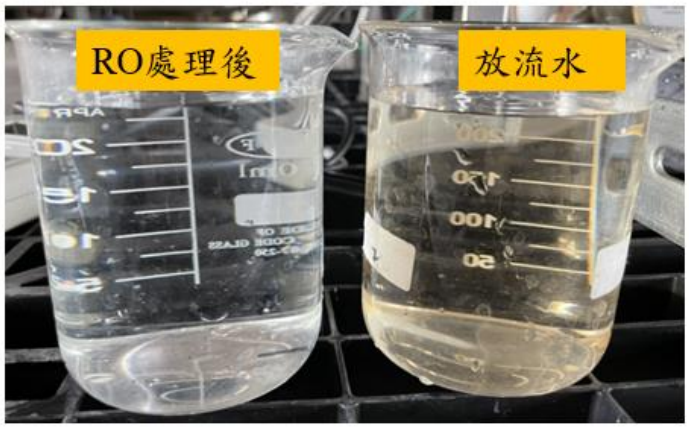


圖 5　RO 過濾後水質與放流水

綜合上述回收再利用，目前廠內總回收再利用率≥大於 50%，經本研究結果得知可廣泛應用在淺、中、深不敏感色系之染色及染整製程中與織布上，使染整廢水回收再利用以降低廢水排放率、降低自來水使用率及提升整體循環經濟效益。

四、結　論

本研究針對紡織及染整之綜合廢水，進行廢水處理後放流水回收再利用之研究。研究結果得知，利用該廢水處理方式及回收水設備，需有效將水質控制於排放標準內：酸鹼值、生化需氧量、懸浮固體、硬度、色度及導電度等指標。

此廢水處理之放流水體與地下水體混合，應用於淺、中深色系之染色及染整製程中，確實與原水染色所呈現之色度相近；另外再將放流水導入 RO 逆滲透回收設備進行過濾，將有機物質及細菌等去除形成乾淨再生水源，進一步回用於織布廠、鍋爐及染整廠生產製造使用，有效提升廢水資源回收再利用的功能，達到循環經濟。織布及染整廠廢水資源再生之重複使用，大幅降低環境污染、水資源耗用及提升紡織產業節水效能。

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.經濟部，產業節水與水再生技術手冊，紡織業。

3.行政院環境保 oaout.epa.gov.tw/law/LawContent.aspx?id=FL015489，2019。

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。

5.謝立生、黃建華譯，「環境工程化學」，科技圖書股份有限公司，1991。

利用紫色非硫菌來改善廢水氨氮處理之效能

葉又菁*、林礽龍**

摘　要

染料製程廢水的水質特性常不利於廢水處理場之生物處理單元應用，尤其早期的廢水處理單元設計並未考量氮磷等營養鹽處理需求，故在面對日益嚴格的排放水質要求下，如何改善既設廢水處理場之生物處理單元的氨氮處理效能，是一件值得研究的課題，本研究欲利用紫色非硫菌本身特殊之代謝模式及其對含氮物質的多效利用特性，來改善現行廢水生物處理單元之氨氮處理效能。

本實驗使用市售的紫色非硫菌，再利用自行開發之馴養量化流程，來取得足量菌液以投入現行的生物處理單元(無氧/好氧程序)，藉以改善其氨氮處理之效能，經實場三個月的連續投入試驗後發現生物處理單元的氨氮去除率約為 55~81%，另 COD 去除率約提高 4~7%。

【關鍵詞】廢水氨氮去除、生物處理系統、紫色非硫菌、染料製程廢水

---

*臺灣永光化學工業股份有限公司安衛處　工程師

**臺灣永光化學工業股份有限公司安衛處　副處長

一、前 言

環保署自 100~105 年已開始逐步對各產業廢水訂定其放流水標準，並將氨氮納入各產業放流水管制之水質項目，同時也加嚴排放標準，以預防過多之含氮化合物進入至自然水體中，造成藻類大量繁殖而引起河川湖泊水庫優氧化，以及生物多樣性危機、空氣污染、雨水酸化、地下水污染等環境問題，故氨氮管制現為廢水處理很重要的水質管制項目之一，而染料製造業廢水中的氨氮大多來自氨水等無機物或含氮有機質水解等原料，對於廢水中含氮物質之處理技術不外乎為物理、化學及生物等方式；一般而言，最佳處理模式以生物處理方式為主，乃因其具有不產生二次污染、成本較低等優點。

目前紫色非硫菌已有很多研究運用於廢水氨氮處理上，但其研究大多用於畜牧業或食品加工業等廢水處理，而在相關研究指出該菌於特定條件反應下可提升廢水中的碳、氮和磷之去除率。

二、紫色非硫菌介紹和研究目的

紫色非硫菌(purple non-sulfur bacteria，PNSB)，屬 Rhodospirillaceae(科)之不產氧光合細菌，因具有光合色素(如菌體細胞中的細菌葉綠素 a、b 及不同類型的類胡蘿蔔素)與光能量反應後，將使菌液大多呈現褐色、綠色、紅棕色、粉紅色與桃紅色，且菌液顏色會受到培養基成分、培養條件及有無氧氣存在而改變，而此菌在不同環境中可進行不同之代謝方式，例如：既能在厭氣、光照條件下由光合磷酸化取得能量，又能在有氧、黑暗條件下由氧化磷酸化取得能量，甚至還有部份種類能在厭氣、黑暗條件下，以發酵或脫氮的方式獲得能量。

目前紫色非硫菌於廢水處理上的應用研究：如畜牧業的養豬廢水之硫化物處理，光電業的有機廢水 COD 處理及啤酒廠廢水之 COD、NH^{4+}處理等類型應用研究，但針對化工業廢水之氨氮處理的應用研究卻相當少，故本研究將使用市售的紫色非硫菌(紅螺菌科)，並利用自行開發之馴養量化流程，來取得足量的培養菌液以投入現行的生物處理單元(無氧/好氧程序)，藉以觀察其氨氮處理之改善效能。

三、試驗方式與結果討論

據前人研究，廢水生物處理所使用的微生物需先以廢水馴化，以調適或加強該微生物的活性及適應力，故此次試驗將用公司第一廠廢水處理場之高鹽度廢水來作為紫色非硫菌的量化培養液原料，後續再將培養好的菌液以

JMP 統計軟體做 DOE (Design Of Experiment,實驗設計)分析，來探討紫色非硫菌處理廢水氨氮之相關因子關係,最後再分析廢水場投入紫色非硫菌之前後差異，故試驗分三部分執行：1.量化培養測試、2.投入實場前之 DOE 分析、3.實場投植之分析，來做後續相關結果探討。

1.量化培養測試：用本公司第一廠廢水場之高鹽度廢水為培養基底，並參考前人研究之紫色非硫細菌（紅螺菌）富集培養基配方，來調整合適之使用配方，再把市售之紫色非硫菌(紅螺菌科)以 1:3(菌:液)比例混勻進行量化培養測試，其培養結果如表 1 所示，若用傳統方式，只將菌液與富集培養基混勻後分裝至透明瓶再進行 5000~10000 LUX 的光照培養，會發現菌液轉紅的收成需費很長的等待期,但若用自行設計的量化馴養裝置(好氧/厭氧光照(5500LUX)循環)處理 2 天，再分裝於透明瓶進行相同照度的光照，則會發現菌液轉紅收成的等待期有明顯的縮短，而其收成時間的不一致，推測為所使用的廢水水質變異很大所致，其乃因公司生產模式皆為批次生產，且公司第一廠染料產品約計有 400 支以上，而每支產品所使用的原料不同，故所產生的製程廢液皆不相同，繼而導致廢水場廢水水質變化很大。

表 1　紫色非硫菌培養結果紀錄

培養方式	傳統方式(混勻分裝)	裝置處理 48hr 再分裝
收成期	15~26 天	3~13 天

2.投入實場前之 DOE 分析：為瞭解經馴化培養的紫色非硫菌對公司第一廠廢水場的廢水氨氮去除功用，故參考相關研究[6] [7]選定光照、溶氧、時間為有關影響因子作測試，再用 JMP 統計軟體規畫各因子 2 水準之 CCD (Central Composite Design，中央合成設計)實驗設計(如表 2)，並擇廢水場生物單元之前一股廢水設定植菌 40%於 500g 體積做反應測試，最後再將實驗結果用 JMP 統計軟體進行分析以了解各因子之影響(如圖 1)，其解析如下：

(1)R^2 adj 高達 0.92，顯示此實驗結果的迴歸模型之解釋力很好。

(2)溶氧、時間、時間平方及溶氧*時間皆為氨氮去除的前四大顯著因子，而從交互作用圖得知在高溶氧下，時間持續至 72hr 則氨氮濃度有持續下降之幅度趨勢，且因時間平方項也為顯著因子，故可合理解釋只要再給定一段相當長的時間範圍後，其氨氮濃度將也會有持續降幅達極限之趨勢。

(3)另外光照平方之 P 值雖沒很顯著(<5%)，但仍有一定的影響性，這顯示並不是光照強度越強則氨氮去除的效果就越好,而是需再找個合適之光照

範圍再驗證方能下定論(如圖 2)，而未來驗證的方式可參考圖 3 模型，在溶氧固定的條件下，來測試不同光照範圍在各時間下的氨氮去除反應結果之試驗。

表 2　最適化實驗執行條件

項次	照光	溶氧	時間(hr)
1	0	0	0
2	0	0	1
3	0	0	72
4	0	2.5	0
5	0	2.5	36
6	0	5	0
7	0	5	1
8	0	5	72
9	5000	0	0
10	5000	0	72
11	5000	2.5	0
12	5000	2.5	1
13	5000	2.5	36
14	5000	2.5	72
15	5000	5	0
16	5000	5	36
17	10000	0	0
18	10000	0	1
19	10000	0	72
20	10000	2.5	0
21	10000	2.5	36
22	10000	5	0
23	10000	5	1
24	10000	5	72

註：上述實驗條件，有額外再自行特增時間 1hr 及部分 0hr 作測試。

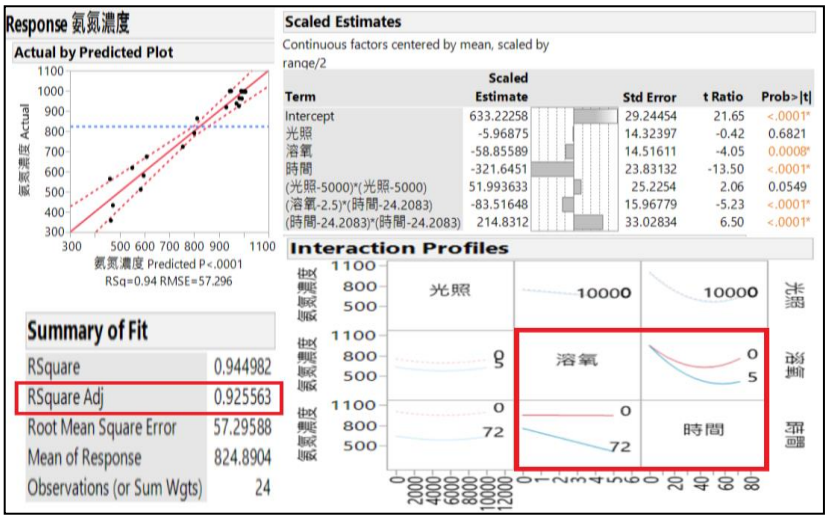


圖 1　JMP 軟體之顯著因子及效應分析-1

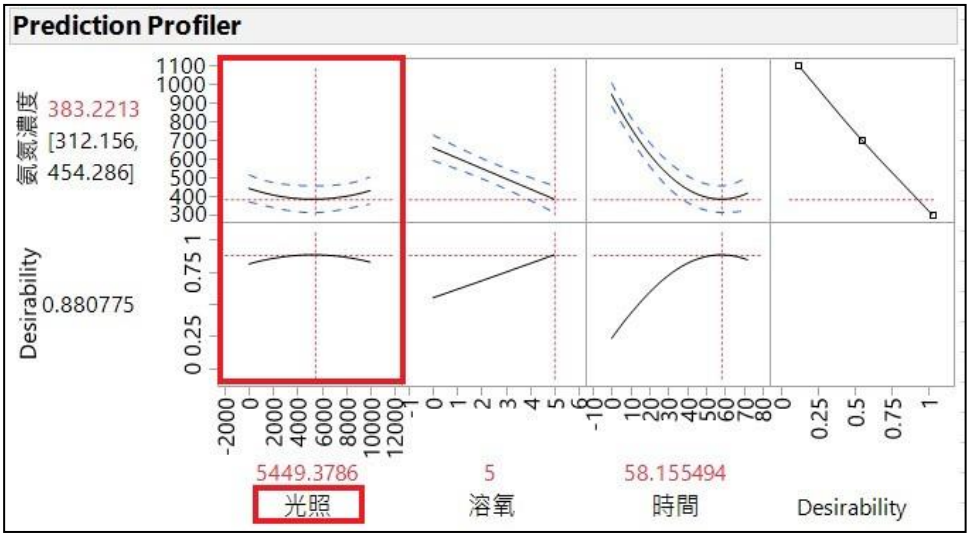


圖 2 JMP 軟體之顯著因子及效應分析-2

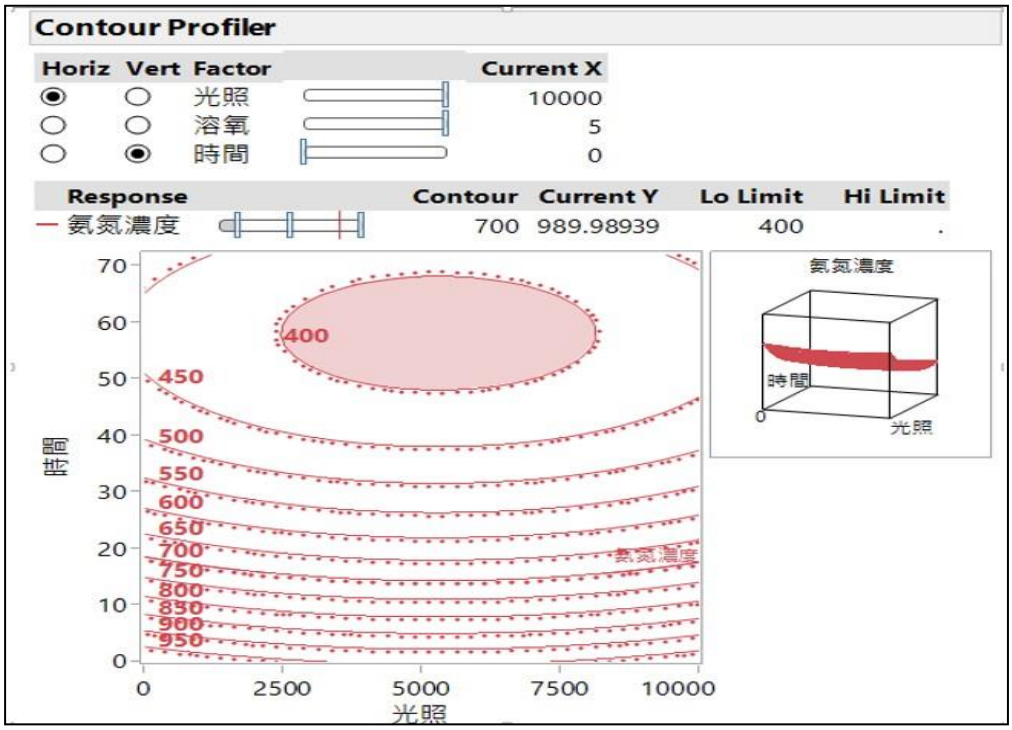


圖 3　JMP 軟體之顯著因子及效應分析-3

(4)實場投植之分析：本試驗設定於 2021 年 1-6 月期間做實場投植紫色非硫菌前後效益之觀察，為比對投植前後的氨氮去除功能，特將 1-3 月設定為不進行投植，再自 4 月起開始於廢水場生物單元進行每日投植紫色非硫菌(如圖 4)，在此期間則每日檢測氨氮值並紀錄，以分析投植前後的氨氮去除效益，如表 3 所示，經投植紫色非硫菌後確實有去除氨氮的功用，且氨氮去除率可達 55~81%，同時也些微提升生物單元 4~7%的 COD 去除率(如表 4)。

表 3　實場投入紫色非硫菌之前後氨氮紀錄

方式	進水	生物一階系統 (無氧/好氧流程)	生物二階系統 (好氧流程)	生物單元 氨氮去除率
未投植	33±7	39±8	44±9	-33~-35%
已投植	34±8	33±9	12±7	55~81%

註：上述數值為各期間之均值，其單位為 mg NH_3-N/L，採用「水中氨氮檢測方法—氨選擇性電極法(NIEA W446.53C)」方法檢測。

表 4　實場投入紫色非硫菌之前後 COD 紀錄

方式	進水	生物一階系統 (無氧/好氧流程)	生物二階系統 (好氧流程)	生物單元 COD 去除率
未投植	1111±191	841±149	554±76	48~52%
已投植	1417±281	990±170	622±76	52~59%

註：上述數值為各期間之均值，其單位為 mg/L，採用:UV-COD 光學方法檢測。

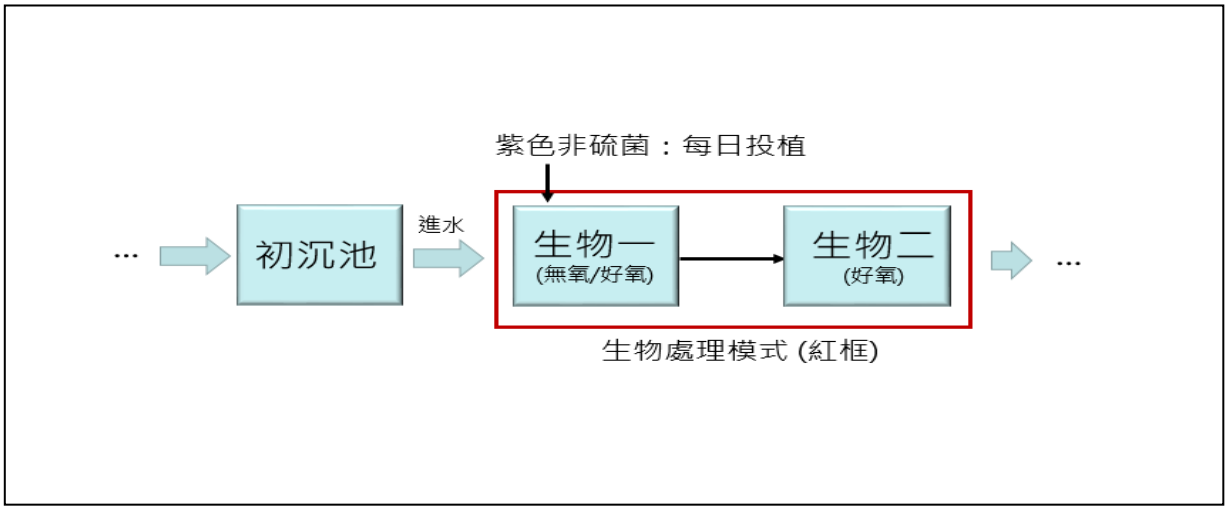


圖 4 廢水生物處理模式及紫色非硫菌投植示意圖

四、結　論

經 DOE 執行分析、實場投植測試，皆已驗證紫色非硫菌確有氨氮去除之功效，且也同時幫助現有生物系統的 COD 去除效益，但據上述 DOE 分析結果顯示光照並非是紫色非硫菌在處理氨氮上的一個很顯著因子，故建議後續可再擬定合適的光照範圍來進行驗證試驗。另用廢水場之高鹽度廢水來培養紫色非硫菌的方式是屬可行，但建議先用好氧與厭養光照(5500LUX)循環處理 48hr 後，再分裝至透明瓶進行 5000~10000 LUX 的光照培養，以縮短後續光照培養收成期。

五、參考文獻

1.林峰群，「嗜鹽性紫色非硫菌之多樣性分析與產生再生資源能力評估」，東吳大學微生物學系碩士論文，2012。

2.張志強，「光合菌在光合菌反應器產氫之研究」，國立中央大學化學工程研究所碩士論文，2000。

3.李季眉，「以固定化之紫色含硫光合作用細菌處理處理豬糞尿廢水之硫化氫－連續流式程」，中華民國環境工程學會第十六屆廢水處理技術研討會論文集（頁 157-168），1911。

4.有機廢水及汙泥處理系統，發明說明書公告本(證書號：TW1586609B)，2017。

5.Haifeng Lu, Meng Peng, Guangming Zhang, Baoming Li, Yuanyuan Li，「Brewery wastewater treatment and resource recovery through long term continuous-mode operation in pilot photosynthetic bacteriamembrane bioreactor」，Science of the Total Environment 646(頁 196-205)，2019。

6.Fan Meng, Anqi Yang, Guangming Zhang, Jianzhen Li, Xuemei Li, Xu Ma, Meng Peng，「Effects of dissolved oxygen on key enzyme activities during photosynthetic bacteria wastewater treatment」，Process Biochemistry，2018。

7.Ran Zhi, Anqi Yang, Guangming Zhanga, Yichun Zhu, Fan Meng, Xueyan Li，「Effects of light-dark cycles on photosynthetic bacteria wastewater treatment and valuable substances production」，Bioresource Technology 274 (頁 496–501) ，2019。

半導體廠回收節水再進化-改善實例

盧彭潭*、黃冠哲**、黃俊評***、林志南***、柯柏睿****

摘　要

近年來缺水事件頻繁發生，如110年上半年缺水情況嚴重，工業用水實施第四階段限水減供17%，水資源的有效利用是台灣產業發展之重要因素，如何有效節省用水達成水資源使用最佳化，成為企業追求永續發展的重要目標之一。面對未來可能更嚴峻之缺水窘境，希望經過水源調度及工程改善，在過程中進而改善現有狀況達到最大效益。目前半導體廠因應限水措施，常見開源如開發戰備水井、建築工地地下水及水車等。廢水回收又可分為：酸性廢水、化學機械研磨廢水（Chemical-Mechanical Planarization, CMP）、純水再生廢水、洗滌塔廢水 (Local Scrubber Reclaim, LSR)及氨氮廢水等。公司實施節水的基本原則需符合法規，其次是符合生產需求的水質及充足穩定的水量，再滿足上述前提之下，可往源頭減量、循環再利用、流程取代或重整的等方進行探討。

本案例因應未來缺水趨勢，將廠內純廢水回收系統進行平面展開再檢討，希望藉由重新檢討的過程中，找出可能回收再利用之空間。檢討的過程中面臨多項的艱難挑戰，例如：中科廠運轉至今已17年廠房基礎設計變動困難、廠務節水實施多年技術成本限制已遇瓶頸、放流水納管法規日漸趨嚴等。因應限水期間自來水減量供應，進行了中央洗滌塔排水減量、冷卻水塔濃縮排放及延長純水系統再生週期等，另一方面為達到廢水回收節水再進化之目標，由層別法對系統進行現況分析及問題分類，與系統設計資料與現況比較；經分析後發現在鹼性洗滌塔排水，氨氮處理系統及化學機械研磨系統放流水有進一步回收可行性，結合實務操作面及文獻知識，找出適合的改善工法；系統設計檢討方面，舊回收系統瓶頸檢討提升RO運轉量能。最後以循環式品質管理PDCA，針對品質工作按規劃、執行、查核與行動來進行，成功解決克服問題，節能/節費降低成本同時達成水資源回收再利用之目的。

【關鍵詞】廢水回收、層別法、要因特性圖、PDCA

---

*華邦電子 300mm 廠務處整合規劃部　經理
**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　工程師

一、前　言

水資源的有效利用是產業發展之重要因素，產業用水需求隨著工業持續發展不斷增加，有效節省水資源、工業用水的有效利用，為企業降低對水資源依賴及追求永續發展之重要指標。近年來氣候變遷因素，導致110年上半年缺水情況嚴重，工業用水甚至實施第四階段限水減供17%，面對未來可能更嚴峻之缺水窘境，希望經過水源調度及工程改善，改善現有狀況達到最大效益。

110年來，自來水節水率要求從原先7.5%(往年平均)，提升到110年第4階段節水17%。欲達此目標，檢討各類用水後發現，用水最大宗的製程用水在製程水質要求下，以及製程排水回收的純水回收系統已飽和，已無精進及回收空間，因此節水重任轉落在廠務系統操作調整及其他用水點用水最適化。廠務針對可能調整進行的系統，如中央洗滌塔排水減量、冷卻水塔濃縮排放及延長純水系統再生週期等實施節水措施，發現仍有用水缺口需填補以達到減量17%目標。在此限水減供且改善時間急迫的時空背景下，課內針對廢水處理及回收系統進行展開再檢討，找出可能回收再利用之空間。過程中面臨基礎設計變動困難、廠務節水實施多年、技術成本限制的艱難挑戰下，仍找到大宗回收水源進行回收節水確實不易。唯有使用系統性思考工具，檢討設計及掌握現況各系統水質水量，積極吸收新知，關注相關產業動向並與廠內既有系統做橫向思考比較，並思考因回收可能的放流水風險及衝擊，搭配相關的改善對策實施，才能在節水與放流水質兼顧達到雙贏。

二、華邦中科廠廢水處理及回收系統簡介

1.華邦廢水處理及回收系統介紹

華邦廢水來源分為兩類(圖 1)，第一類為無機廢水，自來水經過超純水處理後供應製程機台使用，機台產生的製程廢水依照其水質特性及放流水標準，分別進入相對應處理系統處理，分為六大系統：一般酸鹼廢水進該系統水質僅需 pH 調整後即可放流；氫氟酸廢水進入氫氟酸廢水處理系統處理去除氟離子；化學機械研磨(CMP)廢水進入化學機械研磨廢水處理系統去除 SS；銅處理系統處理含銅廢水；TMAH 系統則藉由樹脂塔離子交換去除 TMAH；氨氮

處理系統為含氨氮廢水 RO 濃縮後再經過氨選擇性氧化還原觸媒系統轉化為氮氣處理。廢水經六大處理系統後，放流水值應符合中科污水管理局納管標準。

第二類為有機廢液(水)，廠內工廠製程產生的有機廢液如廢 IPA 等，廠內僅設置收集系統，收集委外熱回收或蒸餾處理。另一類高濃度 COD 有機廢水如生活廢水，包含沖廁及廚餘廢水，此類廢水經過 MBR 處理後回收。

廢水廠內建置回收系統可分為 SW(Soft water)系統，為製造軟水供 FAB 現址式洗滌塔(Local Scrubber，L/S)使用，SW 系統來源水包含:回收空調冷凝水(MAU)，純水再生排放水(Regen Wtr)，現址式洗滌塔排水，不足時以自來水(CW)造水。此四股 SW 系統原水，經過的 SW 的次系統:LSR+AWR 或 CTR+AWR 進行過濾+(UF)+至少 2 段 RO 處理，完成回收。 ROR(RO Reclaim): 經過過濾+1 段 RO 處理回收一般酸性廢水，CMP 化混處理後放流水，C 廠一般酸性廢水，產水供應中央洗滌塔(Central Scrubber)用水，冷卻水塔(Cooling Tower，C/T)用水，以及沖廁等次級用水。回收系統流程如圖 2，圖 3，圖 4，圖 5 所示。

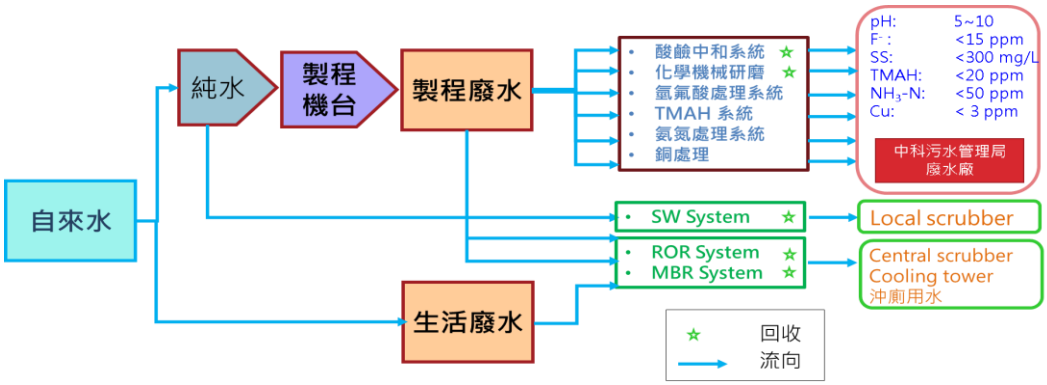


圖 1　廢水處理系統及回收系統流程圖

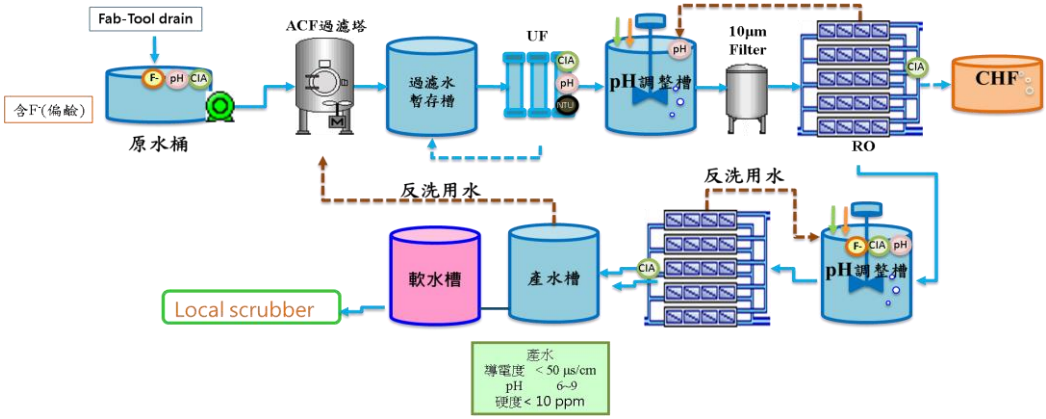


圖 2　SW 回收次系統(LSR)流程圖

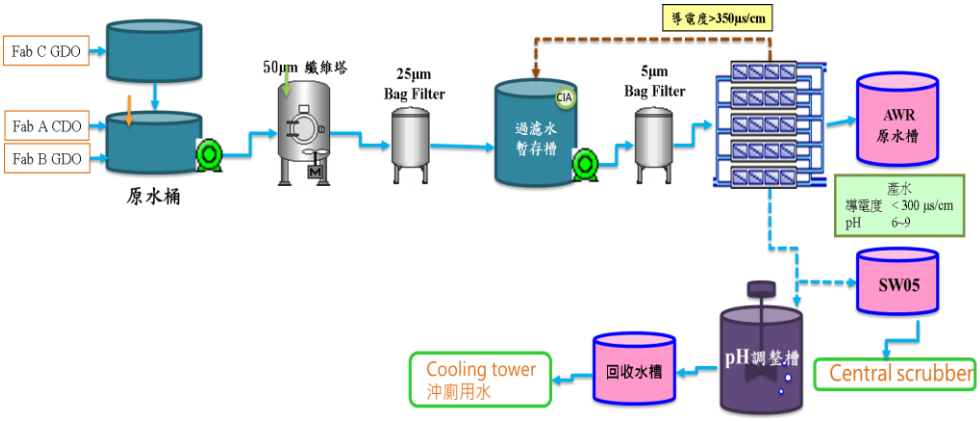


圖 3　SW 回收次系統(CTR)流程圖

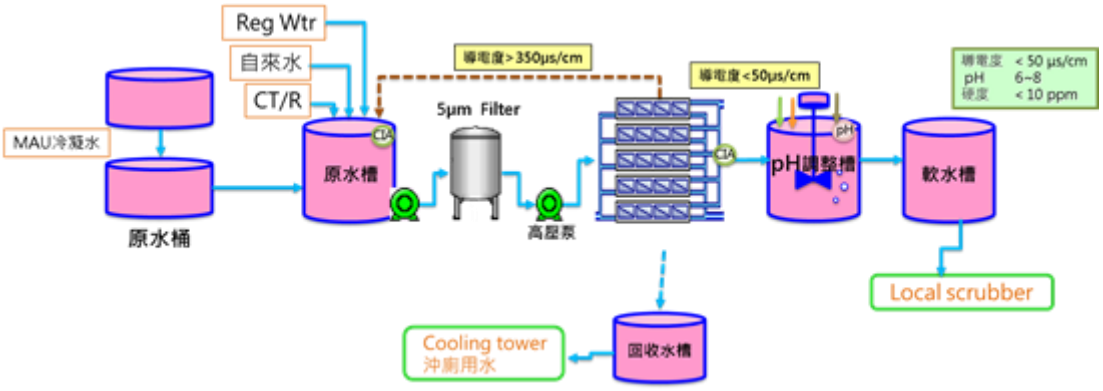


圖 4　SW 回收次系統(AWR)流程圖

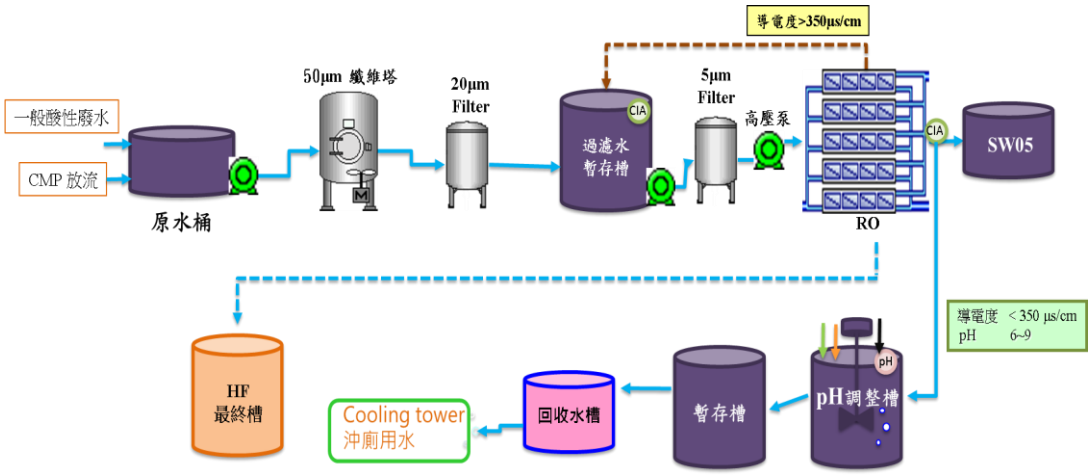


圖 5 ROR 回收系統流程圖

2.現況層別分析:

廢水回收系統多年操作，擔心人員因慣性思考上產生盲點，無法找出突破現況關鍵點，故此處借用 QIT 的分析流程進行現況分析，仔細的針對現況各層別進行調查整理，避免資訊收集不足，在後續釐清中有所遺漏無法突破現況。以 4W1H 調查詢問回收系統各種層別，後續再進行要因解析不明處釐清可能要因。舉例說明，在 4W1H 中人員別部分(Who)，不同人員操作回收系統，會不會影響廢水回收率？此人員層別可經由收集資訊後以變異數分析（Analysis of variance，簡稱 ANOVA），分析不同人員操作對於回收率之影響。經由統計軟體 Minitab 計算，p value =0.591> 0.05 ，判斷不同人員操作系統對回收率平均值無差異(表 2-1)。整理所有層別因子後如下表 2-2，再進一步調查後整理現況資訊如表 3， 表 4，表 5，此階段總體整理結果如表 6。現況分析總結發現有兩處現況未明點：1.回收系統中 RO 單元及 RO 清洗耗水非回收率限制因子，但 ROR 整體稼動率僅 71.4%，現況不明需進一步分析。2.與其他標竿企業比較：廠內氨氮系統及銅處理系統放流水未回收，差異值得進一步調查，現況未明。

表 1　人員別層別分析結論表

層別	層別因子	現況把握內容
who	操作別	調查不同人員操作對於回收率是否有影響?
資料蒐集	1. 以變異數分析（Analysis of variance，簡稱ANOVA）不同人員操作對於回收率之影響 2. p value > 0.05 無顯著差異 **One-way ANOVA: 回收率 versus 人員別** Source DF SS MS F P 人員別 2 0.000400 0.000200 0.55 0.591 Error 15 0.005505 0.000367 Total 17 0.005905 S = 0.01916 R-Sq = 6.78% R-Sq(adj) = 0.00% 不同人員A/B/C操作對於回收率影響其 P值>0.05(無顯著差異)	
結論	無關，不同人員操作對於回收率ANOVA分析無顯著差異	

表 2　現況層別分析表

4W+1H		現況層別分析表
類別	層別因子	
what	回收原水水質別	調查現有回收系統回收原水水質及限值
	系統稼動率別	調查現有回收運轉稼動率
	用水點需求水質別	調查各用水站點用水水質
	清洗別	調查現有回收系統清洗頻率
who	操作別	調查不同人員操作回收率是否有影響
where	回收系統單元限制別	回收系統單元各單元運轉量與原設計量比較
when	回收水用量季節別	收集一年資料，不同季節回收用水量調查
how	處理系統放流水質水量別	調查各系統放流水質及總放流限值

表 3 回收系統資訊表

系統別	次系統分類	前系統	原水來源	原水水質		運轉原水限值SPEC.	回收系統稼動率	每日RO清洗減少產水量	RO產水回收率/原設計回收率
				pH	CIA(us/cm)	CIA	(%)	(%)	(%)
SW	LSR	NA	C 廠DAS scrubber排水	6-7	2500-12000	10000 us/cm	92.7	0.5	99.8
	CTR	NA	A廠CDO/B廠GDO scrubber排水/C廠GDO scrubber排水	6-7	300~1000	1000 us/cm			99.5
	AWR	CTR	CTR產水/MAU冷凝水/純水再生排水	6-7	50~400	500 us/cm			96.8
ROR	NA	NA	AW 系統DACID原水	2-3	1000~2500	2500 us/cm	71.4	1.1	99.5
			CMP系統放流水	7-8	1000~1500				
			C廠AW系統DACID原水	2-3	1000~2500				

表 4 回收水使用點資訊表

使用點	供水水質	水質等級	水質要求	夏季用水量(CMD)	非夏季用水量(CMD)
Local Scrubber	CIA < 50 μs/cm pH 6~8 硬度 < 10 ppm	軟水	CIA NA pH 6~8 硬度 < 20ppm	1694	1687
Cooling tower	CIA< 350 μs/cm pH 6~9	自來水	CIA< 400 μs/cm pH 6~9	2871	2051
Central Scrubber	CIA< 350 μs/cm pH 6~9	自來水	CIA< 400 μs/cm pH 6~9	1051	941
沖廁用水	CIA< 350 μs/cm pH 6~9	自來水	CIA< 400 μs/cm pH 6~9 無影響人體健康物質	5.6	4.2

水源別	水量(CMD)	系統放流水質		回收比較	
		pH	CIA	T公司	W公司
酸性廢水	4,000	6-7	2500-12000us/cm	V	V
氫氟酸廢水	2,500	6-7	5000-8000us/cm	X	X
化學機械研磨	1,000	6-8	1000us/cm	V	V
銅廢水	20	6-9	1000us/cm	V	X
TMAH	70	3~10	<100us/cm	X	X
氨氮廢水	1,200	6~13	200~6000us/cm	V	X
生活污水	120	6~9	300~500us/cm	V	V

表 5 標竿層別比較表

圖 6 現況分析結論摘要表

4W+1H				現況分析結論
類別	層別因子	有關	無關	
what	回收原水水質限值		V	回收原水水質導電度限值SW系統:1000us/cm，ROR系統:3000us/cm
	系統稼動率別	V		SW系統稼動率92.7%，ROR稼動率71.4%偏低，現況未明。
	用水點水質需求別		V	軟水導電度<50us/cm，pH6~8，硬度<10mg/L， 其餘使用點導電度<350us/cm，pH6~9
	清洗別		V	SW系統清洗用水減少產水0.5%，ROR清洗用水減少產水1.1%。
who	操作別		V	不同人員操作對於回收率無關。
where	回收系統單元限制		V	各系統RO單元產水回收率>96.5%設計回收率，RO非非產水限制因子符合需求。
when	回收水用量季節別		V	各回收水使用站點，除C/T及Central Scrubber用水量季節別明顯差異，其餘不明顯。
how	處理系統放流水質水量別	V		與產業標竿比較，NH3-N及Cu系統未回收，現況未明。

三、處理改善流程介紹

1.異常原因分析:

前流程釐清現況後，針對不明現況需在要因分析及真因驗證流程中進行釐清真因後，在後續流程中以 PDCA 進行對策實施檢討。故此處進一步以特性要因圖(魚骨圖)分析，列出可能要因，為何 ROR 設備稼動率僅 71.4%?

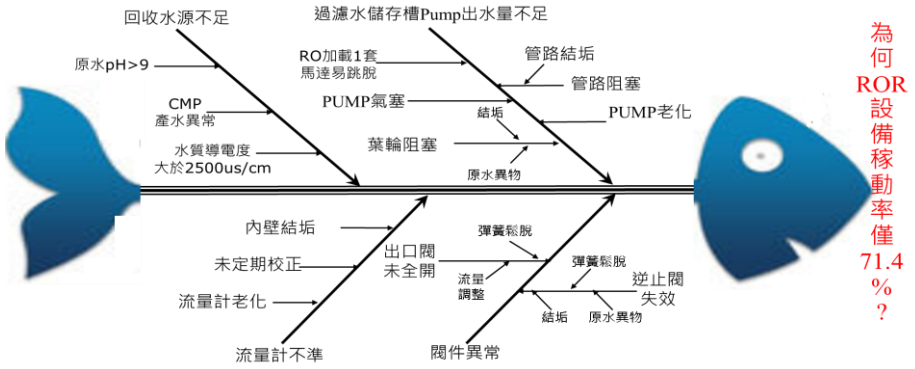


圖 7　為何 ROR 設備稼動率僅 71.4%特性要因圖

2.異常原因分析-氨氮系統：

同樣的，現況分析另一個現況分析未明處，組員腦力激盪及討論，以製程排放，排水，設備，人員四方面進行氨氮系統探討。

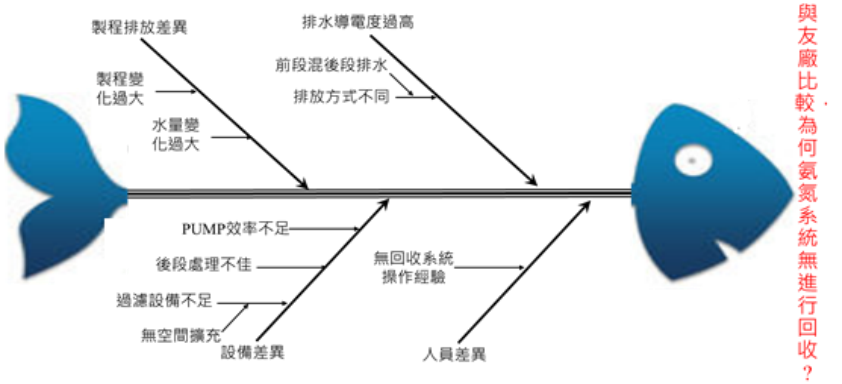


圖 8 與友廠相比，為何氨氮系統無法回收特性要因圖

3.原因分析-銅系統：

同樣的，針對銅系統，同樣進行腦力激盪及討論，以製程排放，排水，設備，人員等面向進行探討。

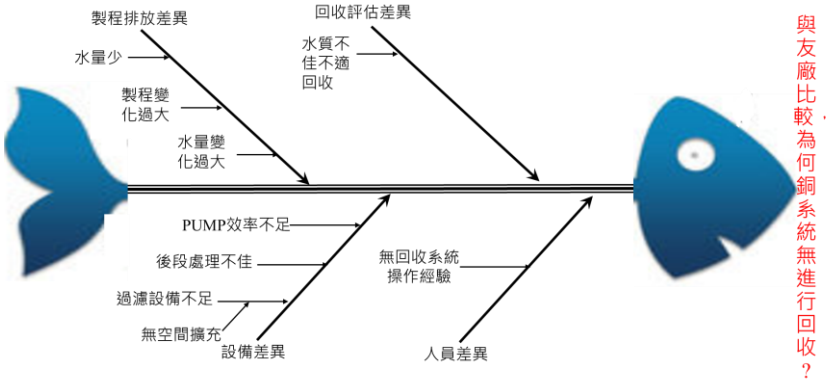


圖 9 與友廠相比，為何銅系統無法回收特性要因圖

經過特性要因圖分析，下一步驟則針對列出三個特性要因圖上每個可能要因，一一進行調查驗證。經驗證確認為真因者，採取相應的對策擬定，經過 PDCA 步驟評估後進行改善，以克服回收節水瓶頸。

4.真因驗證：

(1)為何 ROR 設備稼動率僅 71.4%?

經討論驗證後，只剩下一個要因待釐清查證，原管徑水力設計不佳不足多套 RO 運轉，所以 RO 再加載一套馬達容易跳脫，故無法提升稼動率 (如表 6 所示)

表 6 為何 ROR 設備稼動率僅 71.4%真因驗證摘要表

大要因	小要因	驗證方式及說明	難易度	影響性	可行性	第一階段驗證結論
回收水源不足	原水pH>9	歷史資料查詢	易	▿	○	正常
	CMP產水異常	歷史資料查詢	易	▲	○	正常
	原水導電度大於2500us/cm	歷史資料查詢	易	▲	○	正常
過濾水儲存槽pump水量不足	原先設計不佳，再加載RO容易跳脫	維持管實驗	易	▲	○	待釐清
	PUMP氣塞→水量不足	拆解檢查	易	▲	○	正常
	葉輪結垢→葉輪阻塞水量不足	拆解檢查	易	▲	○	正常
	原水異物→葉輪阻塞水量不足	拆解檢查	易	▲	○	正常
	管路結垢→管路阻塞水量不足	拆解檢查	易	▲	○	正常
	PUMP老化→效率下降水量不足	原廠量測	易	▲	○	正常
流量計不準	流量計內壁結垢	拆解檢查	易	▿	○	正常
	未定期校正	檢視校正報告	易	▿	○	正常
	流量計老化	拆解檢查	易	▿	○	正常
閥件異常	流量調整導致出口閥未全開	檢視後段纖維塔流量設定	易	▲	○	正常
	彈簧鬆脫導致出口閥未全開	拆解檢查	易	▿	○	正常
	彈簧鬆脫導致逆止閥失效	拆解檢查	易	▿	○	正常
	原水異物導致逆止閥失效	拆解檢查	易	▿	○	正常
	結垢導致逆止閥失效	拆解檢查	易	▿	○	正常

Y:容易，N:困難， ▲:強相關 ▿:弱相關 ○:可行 ●:不可行

為何 RO 再加載 1 套時馬達容易造成跳脫? RO 進水採 U 型管設計，當加載到 6 套時，彎管處流速過快，產生紊流及氣泡造成 PUMP 有異音，泵浦吸入端壓力不穩定容易造成跳脫，長期運轉亦造成水機串損壞，因為遭到限流，流量及壓力不足情形。故將 BRO-C/D 套改管進行實驗，經改管供應後管路流速降低，6 套 RO 運轉正常。故判斷原管徑水力設計不佳為真因。

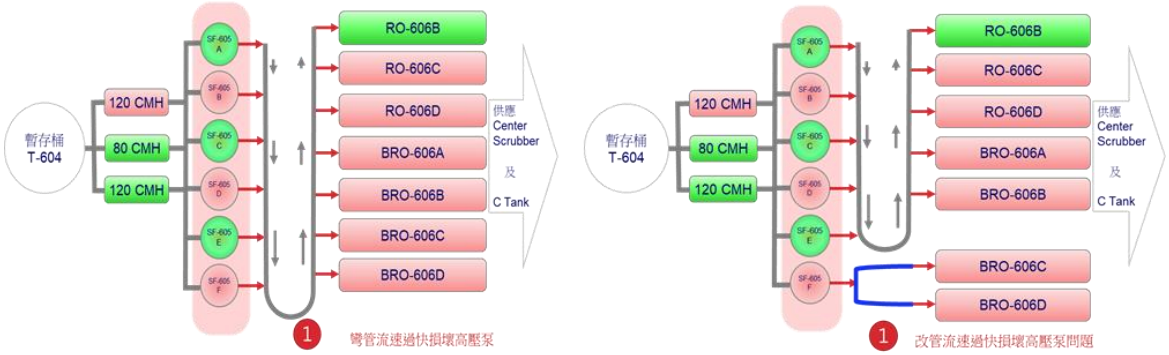


圖 10　管徑流路實驗說明

(2) 與友廠相比，為何氨氮系統無法回收?

與友廠相比，為何氨氮系統無法回收摘要表(表 10)，組員驗證與友廠及設計商討論後，與友廠系統比較，前段氨氮廢水都用 RO 濃縮，友廠 RO 產水有回收，本廠無。後段與友廠為不同設計，友廠 RO 濃縮水採 MD(脫氣模組)產製硫酸銨，本廠則將 RO 濃縮水的氨進行蒸餾塔蒸餾為氨氣，再經觸媒塔轉化氨氣轉化為氮氣。經分析後懷疑氨氮後段流程雜排水與前段與後段水質混合導電度過高導致無法回收，若前段 RO 產水導電度符合回收水質，有機會與友廠一樣進行回收。故進行採樣比對，取 RO 產水進行檢測，其導電度<300 us/cm 符合回收水質要求，但前後段混合後導電度過高>4000 us/cm (圖 11)，現有 RO 系統無法回收。真因已明。

表 7　與友廠相比，為何氨氮系統無法回收真因驗證摘要表

真因驗證摘要表						
大要因	小要因	驗證方式及說明	難易度	影響性	可行性	第一階段驗證結論
製程排放差異	製程變化過大	詢問友廠及系統設計商	難	▲	○	無差異
	水量變化大		難	▲	○	無差異
排水導電度過高	前段混後段排水	取樣	易	▲	○	待驗證
設備差異	PUMP效率不足	詢問系統設計商	易	▲	●	真因，但無法改善
	後段處理不佳	詢問系統設計商	易	▲	●	
	無空間擴充過濾設備	詢問系統設計商	易	▲	●	正常
人員差異	無回收系統操作經驗	直接調查	易	▲	○	有經驗，非真因
Y:容易，N:困難，　▲:強相關 ▿:弱相關 ○:可行 ●:不可行						

RO產水

混合後排水

圖 11　前段 RO 產水與前後段混合水取樣比較圖

(3) 與友廠相比，為何銅系統無法回收?

與友廠相比，為何銅系統無法回收摘要表(表 8)，與友廠及設計商討論，友廠化混後有設置 ACF 去除，藉由活性碳塔(ACF Tower)去除化混後殘餘銅。取銅系統放流水進行檢測，其銅離子介於 0~0.5ppm 符合放流水質標準，但不符合回收水要求，作進行回收需設製活性碳塔。評估擴充需求，其銅排放預估最大僅 40 CMD， ROI 達 80 年，不符現階段急迫節水需求。再來檢視擴充空間，現場亦無任何擴充空間。故綜合三個要因因素，故廠內銅系統無進行回收。

表 8　與友廠相比，為何銅系統無法回收真因驗證摘要表

大要因	小要因	驗證方式及說明	難易度	影響性	可行性	第一階段驗證結論
製程排放差異	製程變化過大	詢問友廠及系統設計商	難	▲	○	正常
	水量變化大		難	▲	○	正常
	水量小	設計商	難	▲	○	真因
回收評估差異	水質不佳	取樣	易	▲	○	真因
設備差異	PUMP效率不足	詢問系統設計商	易	▲	●	正常
	後段處理不佳	詢問系統設計商	易	▲	●	正常
	無空間擴充過濾設備	詢問系統設計商	易	▲	●	真因
人員差異	無回收系統操作經驗	直接調查	易	▲	○	正常

Y:容易，N:困難，　▲:強相關　▽:弱相關　○:可行　●:不可行

5.對策擬定與實施：

(1)原 RO 進水採 U 型管設計改善之對策評估及實施

以 PDCA 手法進行對策探討，在計劃階段(Plan)，常態只能開 5 套運轉挑戰開 6 套 RO 運轉為目標，在實施階段(Do)，經真因驗證分析，U 型管設計及流量不足為真因，將原管路 6 吋放大為 8 吋，並改為直管供應，評估可降低流速且可改善流量不足問題。故進行改管後實際測試。在確認階段(Check)進行短期確認，改管前系統進流量約 90CMH，改管後系統進流量約 118CMH ，有顯著提升。經改善後運轉 6 套 RO 系統穩定不跳脫，回收量由 1,500 提升至 1,800CMD。在行動階段(Action)，成效列入效果確認事項追蹤。此對策之 PDCA 說明如圖 12。

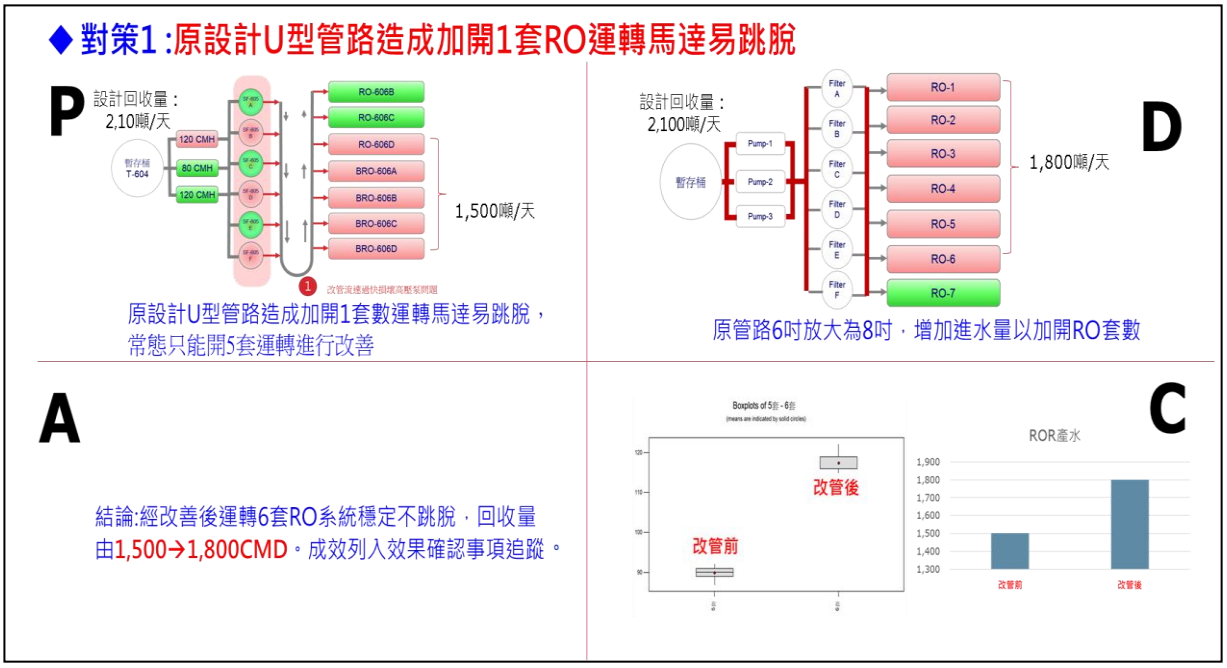


圖 12　RO 進水改善 PDCA 對策實施說明

(2) 氨氮系統 RO 產水回收之對策評估及實施:

氨氮 RO 產水若要進行直接回收供應使用，因回收水量大預估約 900-1000CMD，勢必大幅改變總放流水質特性，故擬事先探討若回收後總放流水質是否符合納管標準，若有疑慮則需加以釐清及尋找對策改善。在此引近常見的系統分析改善思考工具:以 5 Why 進行系統缺陷(Defect)分析(圖 13)，找出的 why 再分別進行屏障錯誤(Escape)分析及系統預防(Prevention)分析，由系統面上問題進一步推演找出因應對策(圖 14)(圖 15)。經由 5-why 步驟(限於篇幅，此處只列結論)得到 2 個對策改善方向(建置氟化銨收集清運系統及使用抗銅離子雙氧水分解酵素，收集 C 廠鹼性洗滌塔排水進氨氮系統處理)，以避免氨氮 RO 產水大量回收後，總放流氨氮濃度不符合納管標準。

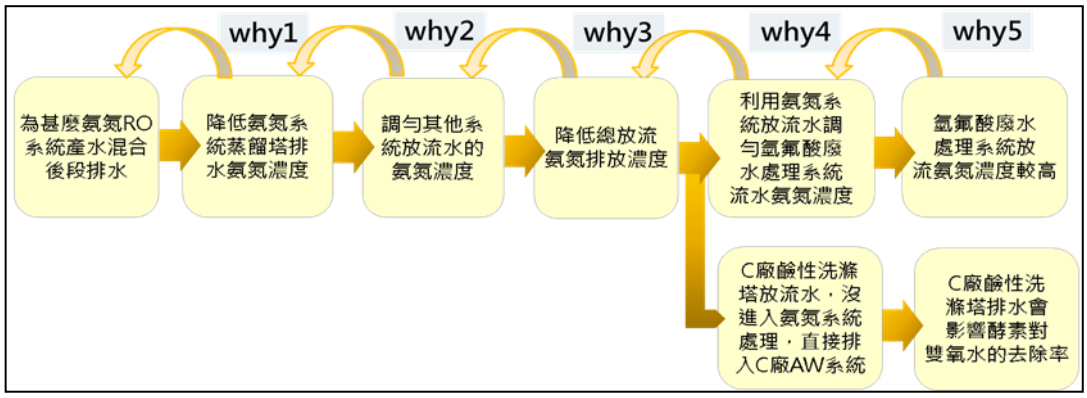


圖 13　5-why 分析為何氨氮 RO 產水混合後段排水(Defect)

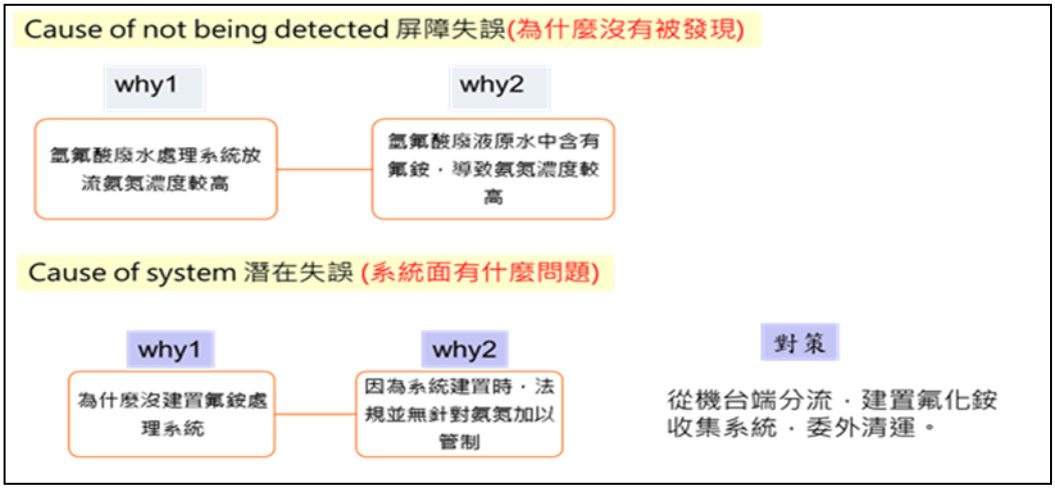


圖 14　5-why 氫氟酸廢水氨氮濃度較高系統改善對策 (Escape 及 Prevention)

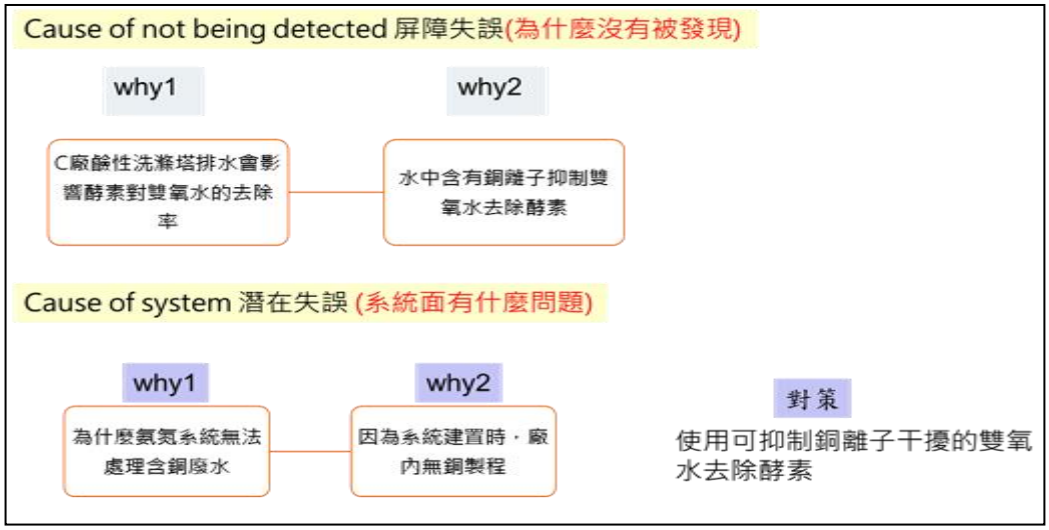


圖 15　5-why C 廠鹼性排水無法進氨氮收集系統改善對策 (Escape 及 Prevention)

針對 5-why 找出兩個潛在風險改善對策，在此亦依照 PDCA 手法進行對策探討及實施，針對現況中氫氟酸廢水氨氮濃度較高的現象，在計劃階段(Plan)，進行氫氟酸廢水氨氮調查評估改善，經調查氫氟酸廢水中氨氮貢獻來源為 WET 機台的氟化銨廢水。在實施階段(Do)，針對氟化銨廢液，從機台端酸槽進行分流收集，並設置氟化銨收集系統在確認階段(Check)，進行氫氟酸放流氨氮水質濃度檢測，以盒型圖比較改善前後差益，氫改善前後資料比較發現改管前氫氟酸放流氨氮平均濃度約 80mg/L，改管後氫氟酸放流氨氮平均濃度降至 45mg/L，有顯著改善。在行動階段(Action)，改善成效列入效果確認事項追蹤，同時氟化銨廢液分流後可進行廠外回收再利用，達到循環經濟，友善環境的附加目標。此對策之 PDCA 說明如圖 16。

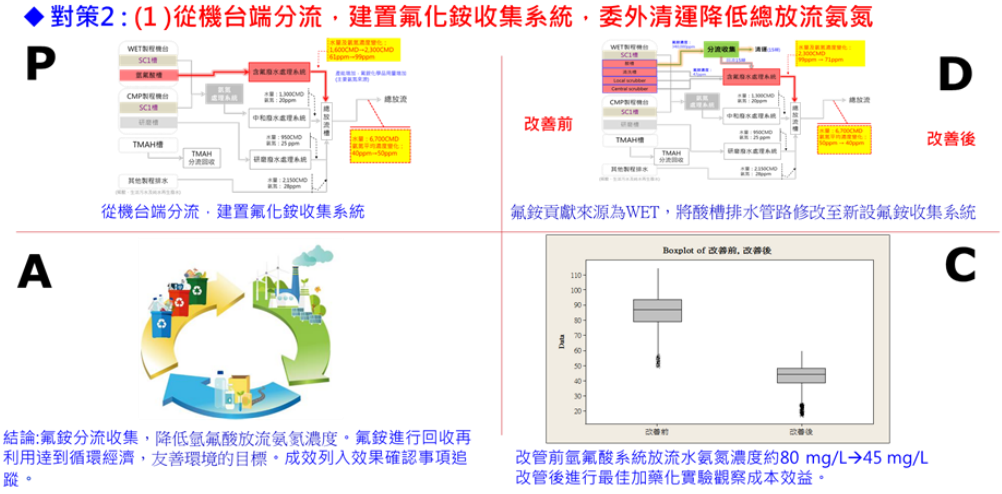
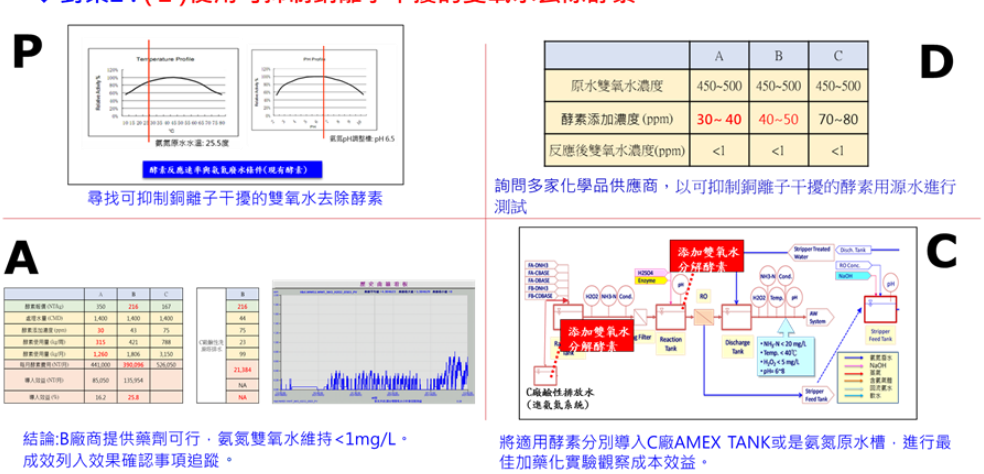


圖 16 氟化銨收集改善 PDCA 對策實施

而針對現況 C 廠鹼性洗滌塔排水，在計劃階段(Plan)，尋找能克服銅離子干擾的雙氧水分解酵素進行測試，並將 C 廠鹼性洗滌塔排水導入氨氮系統，經處理後增加可回收的氨氮 RO 產水。在實施階段(Do)，找到 3 家廠商雙氧水分解酵素，進行藥劑實驗。在確認階段(Check)，則針對進行廠商雙氧水分解酵素，添加在不同桶槽(原水收集及調勻槽)，進行最佳加藥化實驗觀察成本效益。此處觀察到某廠商酵素效益最佳，且處理後氨氮收集槽原水出口雙氧水濃度可穩定<1mg/L，在行動階段(Action)，引進最具經濟效益廠商酵素辦理入庫並導入 C 廠鹼性洗滌塔排水製氨氮系統，改善成效列入效果確認事項追蹤。



	A	B	C
原水雙氧水濃度	450~500	450~500	450~500
酵素添加濃度(ppm)	30~40	40~50	70~80
反應後雙氧水濃度(ppm)	<1	<1	<1

圖 17 C 廠鹼性洗滌塔排水收集改善 PDCA 對策實施

最後針對氨氮 RO 產水進行回收規劃，在計劃階段(Plan)，評估氨氮 RO 產水進行回收去向及氨氮其他排水去處。在實施階段(Do)，配置管路將蒸餾塔排水及 RO 產水分別收集，RO 產水進回收系統至 Central Scrubber 使用，蒸餾塔排水至一般酸鹼進行處理。在確認階段(Check)，氨氮 RO 產水供應中央洗滌塔使用，進行觀察是否會造成影響，經一段時間觀察中央洗滌塔使用氨氮 RO 產水後，操作無異常。在行動階段(Action)，持續觀察中央洗滌塔使用氨氮 RO 產水後，操作上換水頻率及加藥量均無異常。故此對策改善項目有效持續實施。最後，此 3 條改善對策互相搭配下可進行最終效果確認。

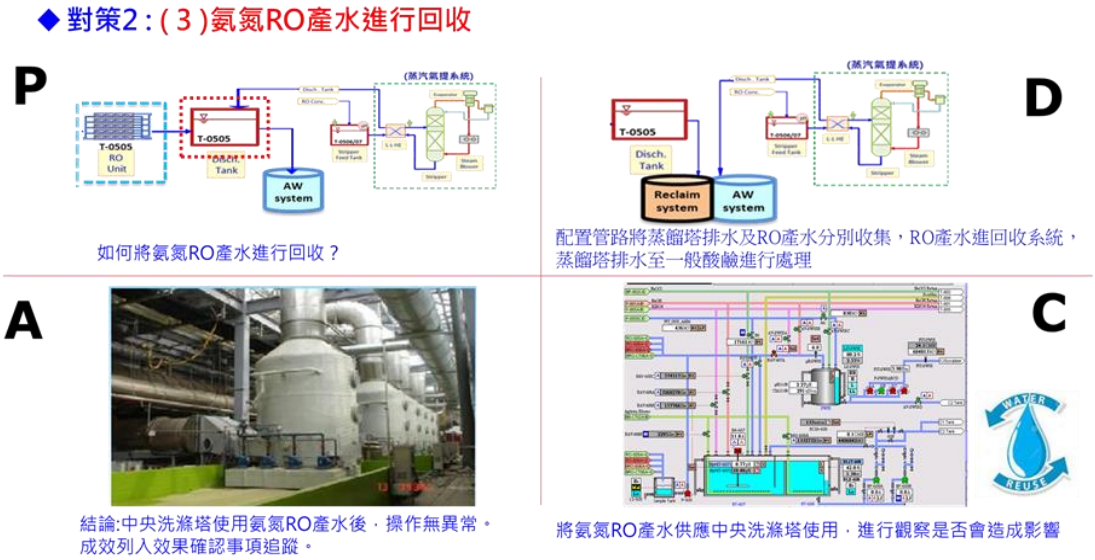


圖 18 氨氮 RO 產水回收 PDCA 對策實施

6.效果確認：

(1)次級用水自來水補水量與去年同期相比確認

經改善後自來水補水量大幅減少，平均每日補水量減少 889 噸。如圖 19 所示。

(2)納管排放水量與去年同期相比確認

經改善後納管平均每日排水量減少 385 噸。如圖 20 所示。

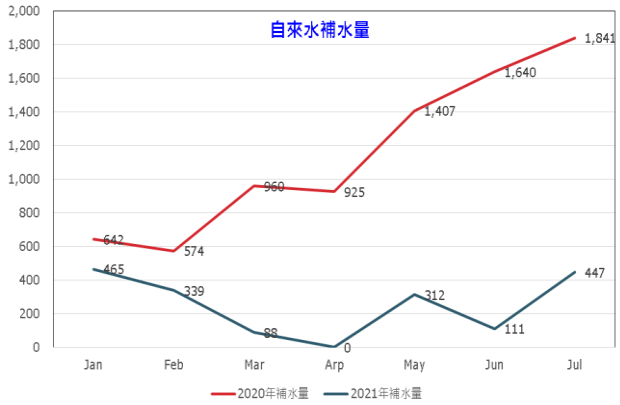


圖 19　次級用水自來水補水量趨勢比較圖

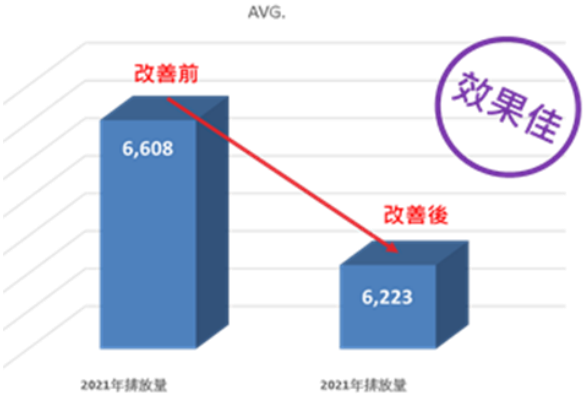


圖 20　每日納管排放水量比較圖

7.效益評估：

(1)有形效益:

1. 減少自來水用量 889 噸/天*365 天=324,485 噸/年。
2. 若以 109 年每日每日用水量計算，可節省 3,090 人一年用水量。
3. 減少自來水費用：889 噸/天*12.5 元/噸*365 天=約 405 萬
4. 減少放流水納管費用：385 噸/天*12.5 元/噸*365 天=約 176 萬
5. 從節水觀點年效益節省 581 萬元
6. 氟化銨收集委外回收後，總放流氨氮濃度從原本的 40mg/L 下降至 30mg/L，不

僅使放流水更趨穩定，亦大大降低氨氮的排放，為這友善環境進一份心力。

(2)無形效益:

1. 有效利用及節省水資源，提升團隊邏輯推理能力、團隊精神及問題解決能力。
2. 氟化銨經回收委外處理，將原本屬於廠內廢液，轉變成其他工業用資源，達到

循環經濟之目標。有如環工業界流傳的一句話：沒有所謂的垃圾，只有放錯地方的資源。

四、結論與建議

台灣年降雨量為各國均值之 2.6 倍，理應擁有豐沛水資源的地區卻因日益極端的氣候，缺水事件來的措手不及。需在最短時間內將有限資源發揮最大利用，故再次檢討廠內回收系統，找尋一個同時開源(可用回收水源)又節流(減少污水排放)的方案。

未來是否能增設單元回收銅處理系統廢水仍可持續探討。前述內容，期待能提供業界回收系統的改善及異常處理參考。台灣水資源有限，需要每個人共同來維護，讓我們一起努力留下乾淨的生活空間給後代子孫。

五、參考文獻

1.蔡騰龍，工業水處理，正文書局，2001。

2.駱尚廉，楊萬發，自來水工程，茂昌圖書有限公司，2000。

3.顏登通，高科技廠務，全華圖書股份有限公司，2006。

4.唐麗英，實驗設計法(DOE)講義，交大工業工程與管理學系/唐麗英 教授編寫，2008。

5.王春和，工業實驗設計講義，中正理工學院/王春和 教授編寫，2008。

6.彭定國、吳鴻錚、鄭大興，MINITAB 統計分析與應用，新文京開發出版(股)公司，2006。

7.蔡佩靜，5-Why 講義，華邦電子/蔡佩靜 編寫，2020。

產業園區水資源整合案例及實務探討

陳建璋*、魏名軍**、徐秀鳳***、蔡人傑****、葉秀鈴*****、張嘉顯******

摘　要

近年來世界各國對於循環經濟議題的高度重視，國內亦將循環經濟列為國家發展的重點政策方針，然循環經濟的核心價值即為兼顧資源循環、環境友善及經濟發展，因此不論能資源或水資源於循環經濟發展架構中，皆扮演不可或缺的一環。經濟部工業局長期輔導工廠提升產業用水效能，除辦理節水診斷輔導外，近年亦積極推動區域水資源整合工作，促成工業區內廠商的水資源循環再利用，其概念係由工業區內工廠或污水處理廠原本應納管或放流的排放水做為供水端，評估用水端之水質需求，透過一定程度處理或再生程序，提供鄰近工廠做為用水來源。

近年水資源循環再利用工作的積極推展及努力促成，工廠與工廠間水循環再利用在台塑、長春、台聚等多個集團推動下，已蔚為風氣。工業區污水廠放流水循環再利用案例，107 年經濟部工業局輔導雲林科技工業區內海德魯材料公司，申請工業區污水處理廠之放流水循環再利用，於 109 年 10 月順利完成並通水使用，成為全台首例工業區污水廠與工廠水資源循環再利用之實際案例，預計每年可節省自來水量約 1.8 萬立方公尺，此案不僅促進水資源循環及節省用水成本外，更成為善盡企業社會責任及區域水資源整合的優良典範，期許企業效尤，朝循環經濟方向發展。

【關鍵詞】水資源整合、放流水再利用、水媒合、循環經濟

---

*財團法人環境與發展基金會　副研究員

**財團法人環境與發展基金會　研究員

***財團法人環境與發展基金會　經理

****財團法人環境與發展基金會　資深經理

*****經濟部工業局雲林科技工業區服務中心　組長

******海德魯材料股份有限公司　經理

一、前 言

世界經濟論壇於 2021 年 1 月公佈「2021 年全球風險報告」，其中「水危機」已連續五年名列前五大實質性風險(如圖 1)，面對全球氣候變遷造成的各項嚴峻挑戰，水資源問題已成為企業永續經營必須面對的重要課題之一。經濟部工業局(以下簡稱工業局)自民國 92 年起即積極推動產業節水輔導計畫，計畫中一大特點為區域水資源整合之媒合推動，區域水資源整合係將工業區內工廠或污水處理廠原本要納管或排放的水資源，經處理或回收提供鄰近工廠使用，顯示工業局除推動製造業廠內節水外，更從節水、回收及再創水的角度，使得生產所需的水源除了自來水以外，更加導入創新思維的「綠水」。

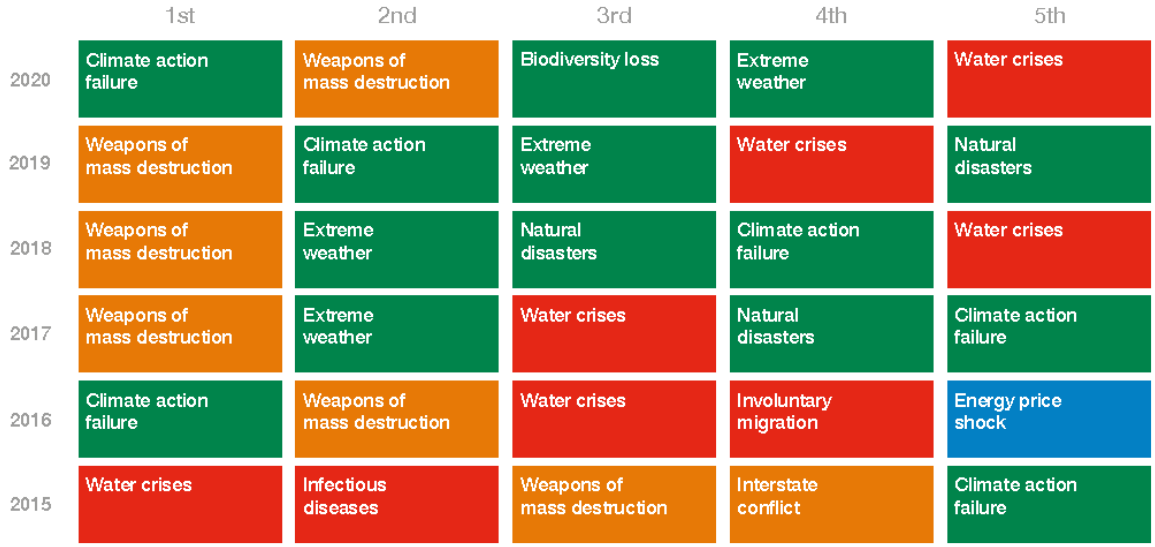


圖 1　全球面臨前五大的實質性風險

近年來在水資源整合再利用的積極推動下已成功媒合幾個案例，其中雲林科技工業區(以下簡稱雲科工)海德魯材料股份有限公司(以下簡稱海德魯公司)申請使用雲科工大北勢區污水廠放流水循環再利用一案已於 109 年 10 月通水啟用，此案為全台首例區內廠商取用污水廠放流水作為水源，希望藉此案能拋磚引玉，提倡環保與促進循環經濟，樹立企業社會責任最佳典範。

二、區域水資源整合之推動說明

再生水資源發展條例公告實施後(104.12.31)，強制新設廠或擴廠後總用水量>3,000 CMD 廠商須使用一定比例再生水，趨使廠商須尋覓再生水源，故規劃整合該區域內廠商之水資源，將特定產業聚落、水質特性相近者及需水品質要求，評估作為需水廠商之再利用，即可達成區域水資源整合再利用之目標。水資源整合推動的型態包括兩種類型(如圖 2 所示)：

1.Type 1：A 廠放流水提供 B 廠使用，有效減少 A 廠排水量及 B 廠之取水量。

2.Type 2：工業區相似性質之廢污水分類分流收集，並集中處理及回收，提供鄰近廠商使用；或聯合污水廠放流水再處理，送至各工廠回收再利用。

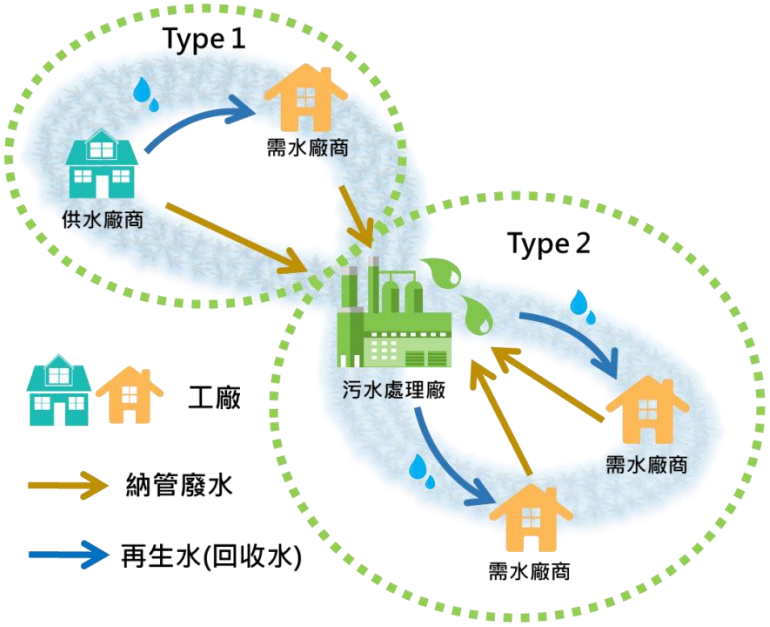


圖 2 區域水資源整合型態示意圖

本案屬於模式二，雲科工廠商廢水經納管匯流至污水處理廠處理，雲科工大北勢區污水廠將廢水處理至放流水標準後，部分放流水提供海德魯公司回收再利用。

三、區域水資源整合方式

1.供水端-雲林科技工業區大北勢區污水處理廠

雲林科技工業區位於雲林縣斗六市，該工業區內大北勢區與竹圍子區各有一個污水處理廠，目前大北勢區污水處理廠為自行操作，處理流程如圖 3 所示，廠商納管進流污水經攔污柵、沉砂池、初沉池、調和池、曝氣池、二沉池、混凝池、三沉池、過濾池、消毒池處理至符合放流水標準後排放至自然水體虎尾溪。並參照環保署公開之重大點源放流水自動連續監測資料統計 110 年 1 月至 9 月放流水水質如表 1 所示，每日排放平均水量介於 7,344 至 8,971 m^3，懸浮固體物濃度(SS)介於 4.2 至 6.6 mg/L，化學需氧量(COD)介於 15.5 至 25.1 mg/L，導電度介於 2,276 至 3,035 μS/cm，除導電度較高之外，COD 及 SS 含量皆低，顯示其放流水水質良好。

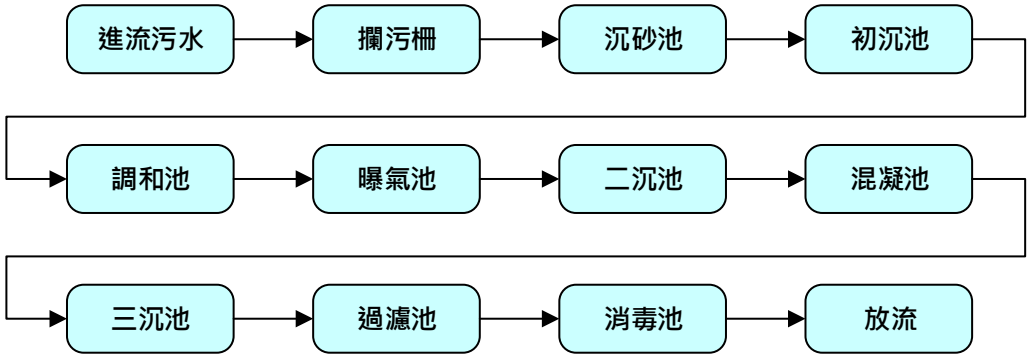


圖 3 雲科工大北勢區污水廠廢水處理流程

表 1 雲科工大北勢區污水廠放流水水質(110 年 1 月~9 月)[4]

	水量 (m^3/日)	懸浮固體物 (SS) (mg/L)	化學需氧量 (COD) (mg/L)	導電度 (μS/cm)
最大值	8,971	6.6	25.1	3,035
最小值	7,344	4.2	15.5	2,276
平均值	8,361	5.4	18.7	2,637

2.需水端-海德魯材料股份有限公司

海德魯公司為一專業之鋁鎔鑄廠，於 2012 年 10 月受讓挪威海德魯鋁業於雲林設立，廠區位於雲林科技工業區，使用最先進的鎔鍊技術及管理方式製作高品質的合金產品。

為配合雲林科技工業區服務中心綠色水資源管理，及因應氣候變遷所造成的旱災危機企業擬定節水政策，亦積極尋求替代自來水之穩定替代水源。海德魯公司主要水源為自來水，平均用水量約 50 CMD，主要為製程冷卻用水(佔總取水量 96%)，用於鑄造鋁棒製程冷卻使用，檢測分析廠內冷卻池換水及排放水質及污水廠放流水水質(如表 2)，顯示雲科工污水廠放流水水質的 COD、Mg^{2+}、Ca^{2+}、Mn^{2+}、Fe^{2+}及 SO_4^{2-}濃度皆優於冷卻用水的水質，且導電度對製程影響不高，經評估符合放流水標準且導電度< 3,000 μS/cm 放流水可作為其製程冷卻用水補充替代使用。

表 2　雲科工大北勢區污水廠放流水及海德魯材料公司製程直接冷卻用水水質

水質項目	雲科工污水廠放流水水質	冷卻池換水後水質	冷卻池排放水質
pH	7.2	8.4	7.9
COD(mg/L)	14.6	17.1	11.2
Mg^{2+}(mg/L)	15.3	33.3	34.5
Ca^{2+}(mg/L)	53.4	135	138
Mn^{2+}(mg/L)	0.059	1.16	1.15
Fe^{2+}(mg/L)	0.310	0.566	0.468
Cl^-(mg/L)	410	36.5	36.0
SO_4^{2-}(mg/L)	354	542	558
導電度(μS/cm)	1,988	1,020	1,085

*本計畫於 107 年 6 月 21 日檢測[3]

3.合作模式

經雙方現勘及協調，因污水廠放流水係以壓力管輸送至虎尾溪處排放，為增加海德魯公司水資源再利用之經濟誘因，故以共用污水廠廠內回收水馬達(海德魯公司依使用水量支付電費及設備攤提)，於放流水槽上方回收管改接三通管接回收管，沿污水廠內圍牆附掛，兩廠間綠道以開挖鋪設回收管，並於海德魯公司內設置 20 噸回收水槽貯存，管線總長約 406 公尺。污水廠放流水即時線上監控水質項目，水質異常時由污水廠即時通知海德魯公司停止取用及使用，避免異常之放流水流入海德魯廠內製程用水，放流水標準非線上監測項目，污水廠每月固定進行水質檢驗，由放流槽取樣分析，檢測結果供乙方取用放流水參考。於 109 年 4

月完成施工，管線規劃及實際現場照片如圖 4、圖 5 所示。

圖 4 區域水資源整合管線規劃[2]

施工現勘

放流水再利用管線(接水點)

放流水再利用管線(附掛圍牆)

回收水槽(海德魯公司)

圖 5 區域水資源整合實際照片

本案之推動為全台第一案，由工業區污水廠提供放流水(屬系統再生水)供區內廠商製程再利用，且涉及公部門-經濟部工業局管轄之大北勢區污水處理廠及私部門-海德魯公司，申請使用放流水需配合相關提送規定才可合法使用。申請流程如圖 6，供需雙方經多次會議協商達成放流水再利用規劃共識後，執行水污染防治措施計畫變更、放流水使用計畫書申請、公共設施土地租用申請及管線施工申請，各項申請許可後簽訂用水契約，合法取用污水廠放流水。因供需水雙方在申請流程皆無經驗，須向各主管機關請教及溝通，申請許可之溝通協調過程極為費時，自開始至實際通水約歷經 2 年，經濟部工業局已依本案之推動經驗，將申請流程及申請書件範例製作實務手冊，後續推動類似案例時可參考本案經驗，縮短案件申請時程，有利於未來的區域水資源整合推動與實施。

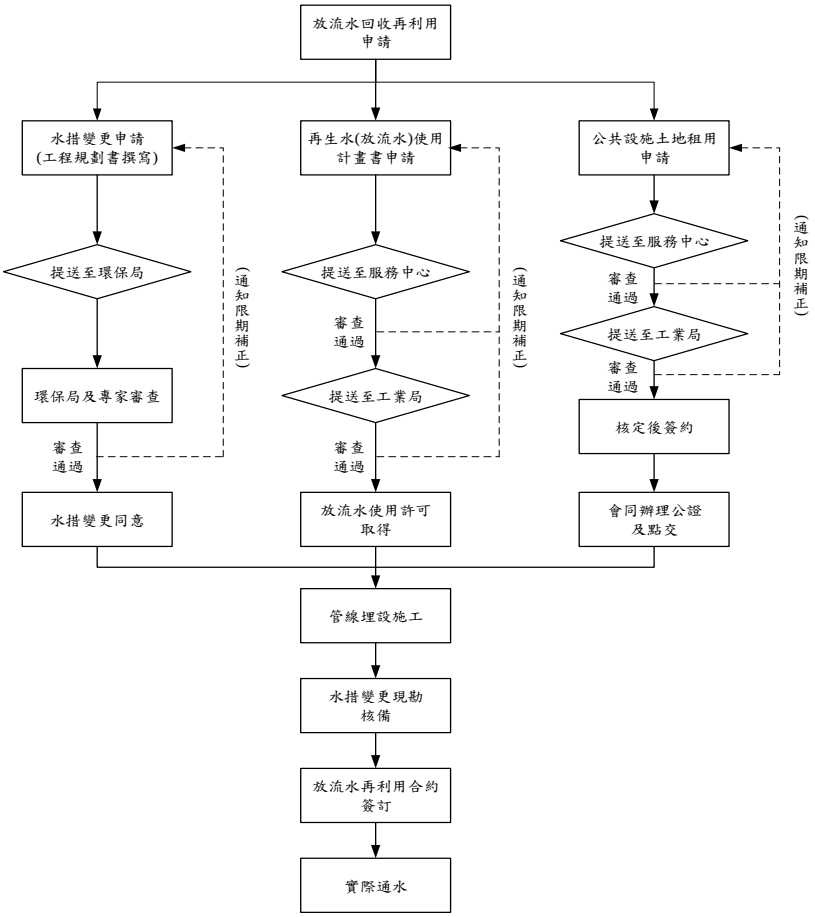


圖 6　區域水資源整合-放流水回收再利用申請流程圖

五、區域水資源整合推動效益

區域水資源整合的優點包含 1.無償取用污水廠放流水、2.降低自來水使用成本、3.保險用水概念，抗旱期間穩定之水源、4.耗水費的減徵、5.提升企業社會責任之環境永續形象

1.無償取用污水廠放流水

中央於 104 年 12 月 30 日頒布「再生水資源發展條例」，其第 5 條規定為促進系統再生水發展，縣(市)主管機關於一定期間無償提供所轄公共下水道系統之污水或放流水供申請者使用；但得收取為提供該水源所增加之建設、營運或其他必要費用。目前再生水使用發展條例公告起十年，至 114 年 12 月 30 日止，將無償取用放流水。故現行向污水廠申請取用放流水若無涉及污水廠增加建設、營運或其他必要費用可免費取用污水廠放流水。

2.降低自來水使用成本

海德魯公司向污水廠申請使用 50 CMD 的放流水，依照開工日數 360 天推估，一年約可降低 1.8 萬噸自來水取用水量，自來水價以 12.5 元/噸推估，一年約可產生 22.5 萬的經濟效益。

3.保險用水概念，抗旱期間穩定之水源

109 年下半年至 110 年 7 月台灣西部地區歷經 56 年來最嚴重乾旱，各地區進入不同程度的減壓供水、限水等情況。面對水源匱乏的問題，廠商須透過尋找替代水源方式以降低缺水對產業的衝擊，污水廠的放流水為廠商替代水源之一。抗旱期間，自來水的限水將無影響污水廠的放流水利用情形，針對已簽約使用污水廠放流水的廠商還可優先取用放流水，多元用水的概念可降低廠商對於取用水的風險成本。

且依水利署”使用再生水用戶於抗旱期間減量供水原則”會議規定，產業使用工業區污水廠放流水量係屬系統再生水，於旱災減量供水時，可折減其減供水水量，增加產業使用再生水誘因，除於旱災期間再生水提供穩定替代水源外，針對產業綠燈前半年使用系統再生水水量計算折減率，計算其可折減之減供水量，保障產業於旱災期間營運用水需求。

4.耗水費的減徵

水利署刻正研擬耗水費的開徵，並強調耗水費開徵精神是盼

廠商能節約用水，以及政府能對水資源進行有效管理，因此，相關細則會擬定減徵條件，如自行設置節水設備的廠商，便能申請抵減，最高可抵免六成耗水費。廠商申請使用污水廠放流水亦屬於系統再生水，亦屬於耗水費減徵之條件，可降低所需繳納耗水費。

5.提升企業社會責任之環境永續形象

企業社會責任是企業要「取之社會、用之社會」，不光只是替賺錢而已，還要對社會、環境的永續發展有所貢獻。節水節能、揭露綠足跡、淨灘、減碳減廢等環保措施，只是環保「基本功」，現在的環境永續做法，已經提升到如何將「綠色」納入營運中。使用污水廠放流水做為製程用水便是將「綠色」的概念納入其中，可大幅提升整體企業形象。

民國 109 年 10 月於雲科工大北勢區污水廠盛大舉行通水典禮(如圖 7 所示)，活動邀請經濟部工業局、經濟部工業局雲林科技工業區服務中心及廠協會代表見證，本案開創全國工業區污水處理廠放流水提供區內廠商使用之首例，透過水資源互惠利用，善盡友善環境之社會責任及義務。

圖 7　通水典禮活動照片

六、結　論

經濟部工業局長期致力提升工業區廠商用水效率，為了協助產業即早因應氣候變遷所帶來之風險，從輔導面、管理面、宣導面等面向著手，引領產業節水風氣以提升廠內用水效率。作為全台首例工業區污水廠放流水再利用案例，海德魯公司申請使用雲科工大北勢區污水廠放流水 50 CMD 已於 109 年實際通水，盼能藉此案拋磚引玉，讓更多工業區廠商回收利用污水廠的放流水，不僅促進水資源循環，更成為善盡企業社會責任及區域水資源整合的典範。

七、參考文獻

1.The Global Risks Report 2021, World Economic Forum, 2021。

2.產業用水效能提升計畫期末執行成果報告，經濟部工業局，109 年。

3.產業用水效能提升計畫期末執行成果報告，經濟部工業局，107 年。

4.經濟部工業局雲林科技工業區服務中心(大北勢區)專用污水下水道系統水污染防治措施計畫，行政院環境保護署水污法相關資訊公開平台

5.產業用水效能提升計畫期末執行成果報告(附冊報告)- 產業聚落水資源整合推動實務手冊，經濟部工業局，110 年。

LCD玻璃奈米孔洞材料於電鍍產業水資源循環之應用案例

劉倩[*]、李志怡[**]、魏文宜[***]、顏旭明[****]、杜子邦[*****]、呂健瑋[******]、洪煥毅[*******]

摘　要

我國是液晶顯示器(LCD)的主要生產國之一，每年可生產數億片 LCD 面板，卻也產出約 1 萬公噸的廢 LCD 玻璃，目前礙於無合適處理方法，僅能以掩埋方式去化，對於地狹人稠的台灣實為一沉重的環境負擔。此外，我國亦為全球水五金的生產重鎮，其中扮演關鍵角色的電鍍產業，每年會產生數百萬公噸的含重金屬廢水，以目前主流的化學混凝沉降法處理，不僅需要加入大量化學藥劑，更會產生大量重金屬污泥形成二次污染，因此亟需符合經濟效益兼具環境永續的處理方式。為解決上述兩項課題，行政院環境保護署(環保署)與工業技術研究院(工研院)共同投入研發，以專利奈米孔洞化技術在 LCD 玻璃上製造出無數個奈米大小且具有吸附重金屬能力的孔洞，將其轉化為「玻璃奈米孔洞吸附材料」(吸附材料)，並應用於電鍍製程水的吸附處理。當含重金屬的電鍍製程水流經吸附材料時，吸附材料可將重金屬保留在奈米孔洞內，使流出的水回復到自來水品質並導回電鍍製程中循環利用，其中每公斤吸附材料可吸附 100 公克的重金屬，且當吸附材料吸附飽和後，可藉由脫附程序將重金屬與吸附材料分離，不僅重金屬可回收，吸附材料亦可重複使用。實廠驗證方面，以吸附材料為核心，搭配活性碳和砂濾床組成一套噸級模組式吸附系統，安裝於彰濱工業區表面處理專區的電鍍廠內，進行氰化銅、焦磷酸銅、硫酸鎳及鉻酸等電鍍製程水之吸附處理及水資源循環回用測試。驗證結果顯示，各類電鍍製程水經過噸級模組式吸附系統處理後，皆可將數十~數百 ppm 的重金屬含量去除至小於 1 ppm(相當於自來水水質)，並可直接回用於電鍍製程，不須排入汙水處理廠，達到水資源循環利用的目的。整體而言，此技術不僅可將 LCD 玻璃轉化為高效能重金屬吸附材料進行高值再利用，更可協助電鍍產業建立更好的水資源循環方式，共同創造多方面的經濟循環新價值，達成資源永續使用的目的。

【關鍵詞】LCD 玻璃、電鍍製程水、重金屬吸附、水資源循環

*行政院環境保護署資源回收管理基金管理會 助理環境技術師
**行政院環境保護署資源回收管理基金管理會 組長
***行政院環境保護署資源回收管理基金管理會 副執秘
****行政院環境保護署水質保護處 處長
*****財團法人工業技術研究院材料與化工研究所 技術經理
******財團法人工業技術研究院材料與化工研究所 經理
*******財團法人工業技術研究院材料與化工研究所 組長

一、液晶面板不良品及報廢品處理現況

液晶面板具輕薄與高亮度、低耗電量、高解析度、無輻射污染等優點，應用非常廣泛，依面板大小分為大尺寸面板如液晶電視、桌上型電腦、筆記型電腦、監視器、平板電腦；中小尺寸面板如行動裝置電話、車用顯示器等；根據電子時報(DIGITIMES Research)於 2021 年公布的統計資料[1]，臺灣於 2016 年~2020 年間每年產出的大尺寸液晶面板達到 2.3 億片以上，如所圖 1 所示。近年來顯示器產業蓬勃發展使得產品替換的速度日益變快，造成產品廢棄物數量快速增加；此外，在生產過程中，不良品廢棄物也因產量擴充而逐漸增加，若無法針對廢棄面板進行有效的處理，將造成嚴重的環保問題。

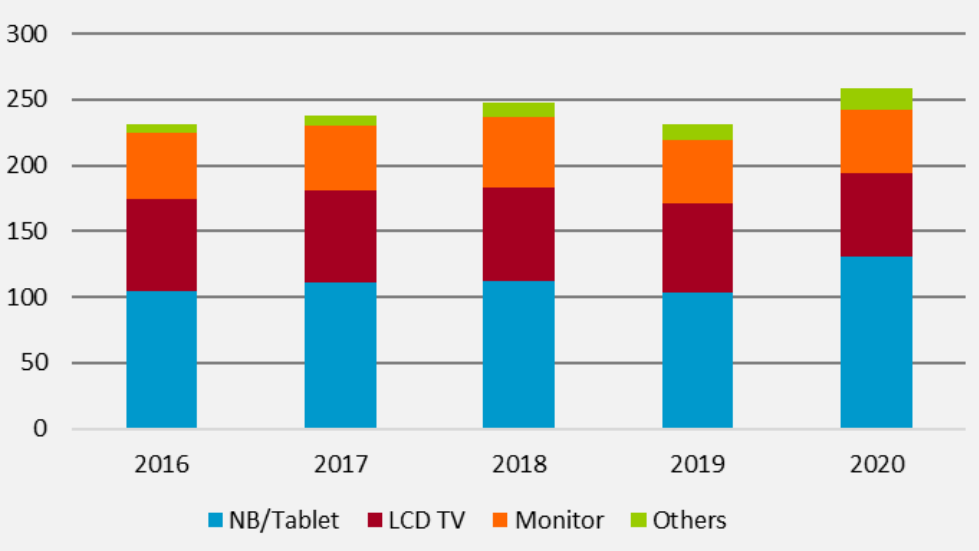


圖 1　2016-2020 年間台灣大尺寸 LCD 面板出貨量(單位：百萬片)

廢棄的液晶顯示器經過拆解、分類後，塑膠機殼、背光模組、電路板及其他金屬導線等物料均有適合的回收、再利用管道。目前歐洲國家對廢棄液晶顯示器處理技術的開發重點在於去除背光源中汞的汙染、提升每日處理量及降低運作成本，許多自動化廢液晶顯示器處理系統陸續被開發出來[2-5]。這些處理系統的運作方式大都是在密閉環境下將整部液晶顯示器進行破碎，期間利用抽氣系統將汞蒸氣抽出收集，剩餘物料再進行分選。如此雖然可以提升每日處理量，避免人工拆解時背光源不慎破損而造成的汞蒸氣外洩，但是液晶面板中最具回收價值且對環境具危害風險的液晶[6]則無法進行回收。行政院環境保護署(環保署)與工業技術研究院(工研院)共同投入研發，建立液晶回收技術及設備，將不良品面板或面板報廢品，經破碎、萃取、

分離等程序後，將回收液晶再利用，避免液晶洩漏至環境中。不含液晶之面板玻璃，佔液晶面板重量的九成以上，仍需持續的開發再利用的技術，以進一步降低面板產業對環境的負擔。

普通玻璃的主要原料為矽砂，可回收且不具有毒性，在分類收集且經過再熔融製程後可再製成玻璃產品，為一種可完全再生及再利用的物料，國內對於此類玻璃的再利用技術頗為成熟。但 LCD 玻璃為不含鹼金屬的硼矽鋁玻璃，其鹼金屬含量低，造成在熔融製程的溫度需高達 1,500℃，且未經材料分離處理的面板玻璃內尚含有機、無機等各式各樣的材料，儘管可經再熔融製程燒結成玻璃，但玻璃表面會產生各種金屬光澤，不僅原面板玻璃製造商不願意使用，一般玻璃再利用廠亦表示這樣的材料無法再用於玻璃製品，所以大部分面板玻璃皆以掩埋方式處理，僅有少部份作為磚、瓦或混凝土等低附加價值磚製品的替代料使用，且再利用價格並不高。開發 LCD 玻璃高值應用途徑，為一項刻不容緩的任務。

二、重金屬廢水處理技術

隨著經濟發展與高科技產業的蓬勃發展，各種工業製程產出大量工業廢水，例如：廣泛被應用於各種生產工具機、電子裝置與家電產品的印刷電路板，為了整合不同功能之半導體積體電路，其製造過程中會使用大量的蝕刻與清洗等濕式製程，因而產生大量重金屬廢水；電鍍廠為了在產品上電鍍各飾金屬，其製程中亦會產生大量含鉛、銅、鉻、鎘、鎳、鋅之重金屬廢水；廢鉛蓄電池處理廠在處理廢鉛蓄電池的過程中會產生高濃度含鉛廢水等。一旦這些工業活動所產生的重金屬廢水未經妥善處理即排放，將嚴重汙染河川、溪流、灌溉渠、出海口等水資源，且經由取水灌溉、滲入將造成農地土壤與地下水之汙染，而種植於受重金屬汙染之農地的作物、水果、蔬菜、稻米等將會吸收土壤與地下水中的重金屬，使得農作物中含有過量重金屬，這些具生物累積性且不易被分解的重金屬將會經由食物鏈直接危害人體健康，因此重金屬廢水處理技術，是現代工業持續發展不可或缺的重要技術。目前重金屬廢水處理技術中除了化學混凝沉澱法外，常見有離子交換法、吸附法與薄膜法，各種重金屬去除技術之均有其優缺點如表 1：

表 1 各重金屬處理技術之比較

處理技術	原理	材料/設備	優缺點
化學沉澱法	溶解度積>K_{sp}	OH^-、CO_3^{2-}	1. 去除高濃度重金屬 2. 由於 K_{sp} 限制會殘留一定量重金屬 3. 產生大量汙泥 4. 設備建置昂貴且佔地面積大 5. 處理成本低
離子交換法	利用離子價數只對重金屬具有選擇性	陽(陰)離子交換樹脂、螯合型離子交換樹脂	1. 僅適用於低濃度重金屬去除 2. 易受廢水中基質干擾影響交換能力 3. 樹脂成本高 4. 技術簡單 5. 可選擇性去除重金屬
吸附法 (活性碳、沸石)	利用凡德瓦爾利、錯合或靜電電荷吸引力去除重金屬	活性碳、合成沸石、天然沸石、奈米碳管	1. 能去除多種重金屬 2. 去除能力受限於所選擇之吸附基材 3. 需控制 pH~5，才具高吸附能力 4. 成本較低於離子交換樹脂
薄膜法	利用分子篩、半透膜去除重金屬	RO、電透析	1. 僅適用微量重金屬去除 2. 處理製程耗能 3. 設備昂貴、薄膜成本高 4. 技術層面高 5. 薄膜再生使用率低

化學混凝沉澱法利用重金屬離子於鹼性環境下(pH 9~11)，形成碳酸鹽與氫氧化物沉澱，且添加混凝劑降低總固體懸浮微粒達到良好固液分離。化學混凝沉澱法之缺點在於需要大量化學試劑反應、沉降性差、沉澱時金屬易蓄積團聚，以及產生大量重金屬汙泥造成環境負荷影響。

離子交換法利用具可螯合型特性之樹脂，以鈉離子有效將廢水中重金屬離子交換吸附於樹脂表面。優點為可再生使用，缺點為成本較高，且由於離子交換樹脂於高濃度下使用容易飽和，更換頻率高，故較少被使用於高濃度工業重金屬廢水，大部分應用於後端較低濃度重金屬廢水之處理，但仍容易受溶液中有機物質干擾影響其交換能力。

薄膜法利用微孔中空纖維膜做為支撐體，加入不溶於水的有機溶液組合成支撐性液態薄膜系統，再利用二級胺在酸性環境中進行六價鉻去除，可將廢水中 1,000 ppm 六價鉻去除至小於 0.5 ppm。

吸附法藉由吸附劑本身之高比表面積及多孔性特質，使重金屬離子與吸

附劑進行物理吸附，可透過凡德瓦爾力鍵結吸附或透過吸附劑化學結構進行靜電吸引。重金屬離子於水相-固相吸附劑吸附擴散之行為，溶液中重金屬離子先由擴散通過固體吸附物劑邊界層，再擴散至吸附劑表面上，最後會進入孔洞內，因此吸附劑表面積與孔洞數量越多，其吸附能力越強。

近年來以吸附法處理廢水重金屬離子廣泛被研究，相關研究證實吸附法對廢水中重金屬離子具有高吸附效率、高吸附能力、能脫附再生使用，且無二次汙泥產生問題。但吸附法目前尚未普遍應用，主因為(1)活性碳與沸石吸附劑不耐酸，不易脫附再生使用，使得成本較高；(2)活性碳與沸石吸附劑本身吸附廢水重金屬能力差，必須經過表面結構改質，才可提升吸附效能。而製備此高吸附量之表面結構改質活性碳與沸石之製程複雜，操作成本高且不易量化。利用 LCD 玻璃作為原料，經由奈米孔洞化改質技術，使材料具有多孔性、高比表面積、離子交換與電荷吸附等功能，應用於廢水中重金屬離子吸附，將可有效解決廢棄面板玻璃掩埋與重金屬環境汙染之問題。

三、LCD 玻璃改質奈米孔洞吸附材料

由於 LCD 玻璃的硬度、熔點比普通玻璃高出許多，且微量的有機、無機物質會使玻璃產生各種金屬光澤，所以無法回收重複使用；我們的研究中發現，面板玻璃透過合成玻璃的方式製作，組成幾乎不會改變，且因具有 B_2O_3-SiO_2 為主的成份，成為玻璃奈米孔洞材料的合適原料；行政院環境保護署(環保署)與工業技術研究院(工研院)共同投入研發，以專利技術(中華民國專利號 I577443-用於移除廢水中有害物質之無機材料及製造方法以及廢水處理方法)將面板玻璃轉化為可吸附重金屬離子的吸附材料，改質後 LCD 玻璃奈米孔洞吸附材料如圖 2。建立面板玻璃奈米孔洞吸附材料量產設備，其操作單元包括原料固相混合、持溫奈米孔洞化改質、淬冷、分篩等程序，其中奈米孔洞化改質為關鍵步驟，經放大生產設計，奈米孔洞化改質生產設備目前單日產量可達 200 Kg。LCD 玻璃原料及改質後之奈米孔洞材料 SEM 照片如圖 3，孔洞化改質後，產生無數奈米級的孔洞，利用 BET 設備進行材料孔洞特性分析如表 2，面板玻璃原比表面積僅 0.61 m^2/g，孔洞化改質後，可達 150 m^2/g 以上，孔洞體積達 0.52 cm^3/g 以上。

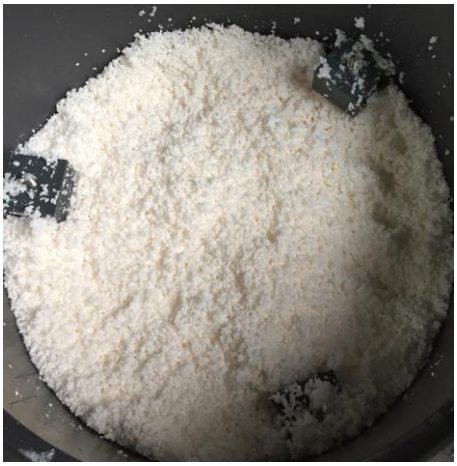
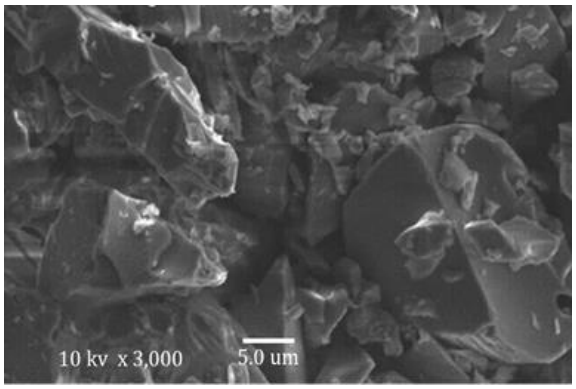


圖 2 LCD 玻璃改質成玻璃奈米孔洞吸附材料(左)萃取後廢 LCD 玻璃；(右)LCD 玻璃奈米孔洞吸附材料



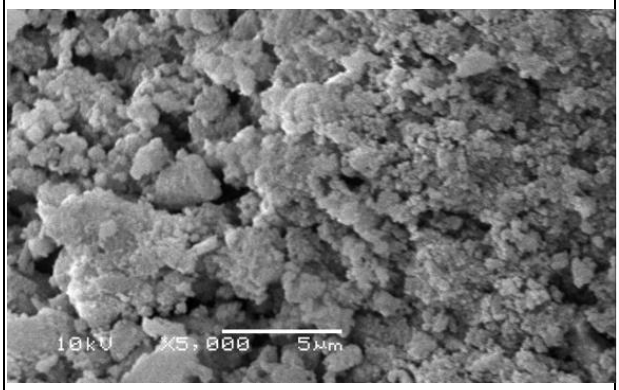


圖 3 SEM 照片(左)LCD 玻璃原料；(右)LCD 玻璃改質奈米孔洞材料

表 2 LCD 玻璃原料及改質後之奈米孔洞材料 BET 分析

樣品	比表面積 (m^2/g)	孔洞體積 (cm^3/g)	孔徑大小 (nm)
LCD 玻璃原料	0.61	-	-
LCD 玻璃改質奈米孔洞材料	174.6	0.52	9.9

四、電鍍產業水資源循環之應用案例

電鍍是金屬製程中關鍵且重要的一環，它不僅提供金屬製品防護力，更可美化其外觀提升產品的品質與價值。電鍍製程因應產品需求會產生多種重金屬廢水，例如含銅廢水、含鉻廢水、含鎳廢水、含鋅廢水等。而設置於彰濱工業區的電鍍業者可依規定將製程中的電鍍廢水排入工業區內污水處理廠。污水處理廠主要以廢水的前處理方法將廢水區分為氰系、鉻系及酸鹼系等三大類，而非依照金屬種類分類，且氰系及鉻系廢水完成前處理後，會再匯入酸鹼系廢水中，故廢水中混合多種重金屬難以分離再利用，僅能以化學混凝沉澱法進行處理。以化學混凝沉澱法處理重金屬廢水，不僅需要添加大量混凝劑導致處理成本偏高，更會產生難以處理的重金屬污泥。因此，若能在電鍍業的源頭排放端將僅含單一金屬的重金屬廢水先進行金屬吸附，不僅吸附後的金屬可脫附再利用，再者除去重金屬後的水可重新導入製程再次使用，如圖 4 所示。

利用 LCD 玻璃改質而成的 LCD 玻璃奈米孔洞吸附材料對銅、鉻、鋅、鎳等重金屬離子具備良好的吸附能力，每公斤吸附材料可吸附 100 公克以上的重金屬，吸附後則呈現不同顏色樣貌如圖 5。吸附後的材料可脫附再生重複使用，非常適合應用於電鍍製程後單一重金屬廢水的吸附處理，故與彰濱工業區內的電鍍業者合作，於該工廠內設置噸級重金屬廢水吸附處理系統，將其直接連結至電鍍製程產線的製程水出口並搭配 LCD 玻璃奈米孔洞吸附材料進行單一重金屬廢水吸附處理的實廠驗證。

圖 4 LCD 玻璃奈米孔洞材料應用於電鍍製程水循環

圖 5 LCD 玻璃奈米孔洞材料(左 1)及吸附不同重金屬後的樣貌(左 2 開始依序為吸附銅、鎳、鉻金屬)

為了快速的安裝與應用吸附材料，建立模組化吸附管柱，將吸附管柱(四組，每組填充 100 公斤吸附材料)搭配活性碳管柱和砂濾床管柱組成一套噸級模組式吸附系統，以重金屬含量約 20 ppm 的電鍍製程水估算，此系統的每分鐘入水流量可達 30 公升，且處理量可達 2,000 公噸以上。吸附模組整體外觀如圖 6 所示。

圖 6 LCD 玻璃奈米孔洞材料吸附處理系統

實廠驗證部分，將吸附系統安裝於彰濱工業區表面處理專區的電鍍廠內，分別將焦磷酸銅、硫酸鎳、氰化銅及鉻酸等電鍍製程水，經過分流後導入各吸附系統進行應用測試。以硫酸鎳製程清洗水為例，安裝方式如圖 7，該電鍍業者廠內的含鎳廢水 pH 值約 7 至 8，廢水中鎳的濃度約 20~60 mg/L，隨著每日電鍍廠的製程與鍍件量而異，而吸附後的鎳離子濃度則可維持在 1 mg/L 以下，符合現場再生水回用的標準。根據長期測試的結果來看，大約運作三個月才需要更換一座吸附管柱，經過吸附處理後的水質導電度約在 0.6 ms/cm 如表 3，故合作廠商將水回用於鍍件的前處理及最終端產品清洗製程，目前運作累計再生回用水達 1600 公噸。彰濱工業區電鍍專區每日產出 2,500 至 3,000 公噸重金屬廢水，目前以化學混凝法處理，每年產生約 1,000 公噸的重金屬污泥。以實廠驗證結果估算，本項技術若應用於彰濱工業區電鍍製程水回收，每年可減少 300 公噸的重金屬污泥，並將 30 萬公噸製程用水循環使用。

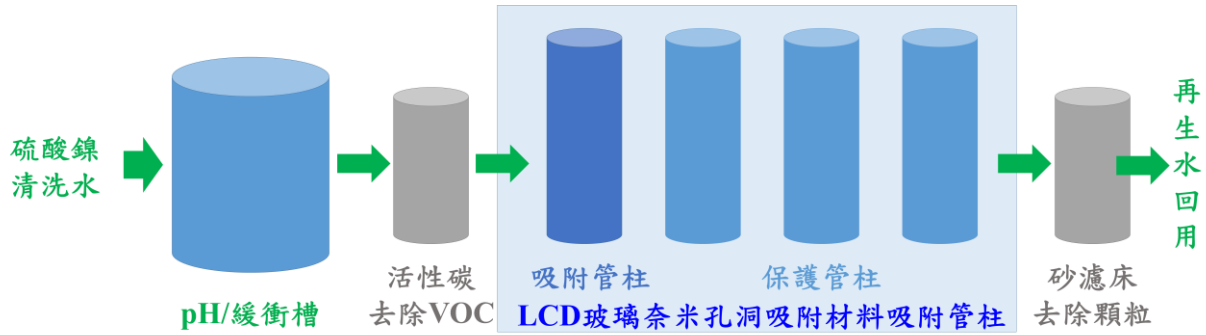


圖 7 電鍍廠以 LCD 玻璃奈米孔洞材料吸附系統處理硫酸鎳製程清洗水

表 3 電鍍廠硫酸鎳製程清洗水以 LCD 玻璃奈米孔洞材料吸附系統處理前後之水質分析

項目	硫酸鎳清洗水	再生回用水
Ni	40-60ppm	<1ppm
SO_4^{2-}	40-60ppm	40-60ppm
Na	40 ppm	110 ppm
COD	10 ppm	4 ppm
pH	6-8	8-10
電導度	0.62 mS/cm	0.60 mS/cm

五、結　論

臺灣每年產生近 8,000 公噸的廢棄液晶面板，這些廢棄物如果透過掩埋，將可能造成環境危害。行政院環境保護署（環保署）與工業技術研究院（工研院）共同投入研發，剖析液晶面板結構，將廢棄的液晶面板中的液晶取出、純化後再製成液晶面板產品，這項液晶回收的技術也技轉給國內的面板廠及國外的廢棄物處理廠使用。而剩下的 LCD 玻璃，國內現有的技術，至多只能經由破碎後添加至水泥、磚瓦等建材，經濟效益並不高。透過特殊的改質技術，在 LCD 玻璃上創造無數個奈米大小，又能吸附重金屬的孔洞，將棘手的液晶面板玻璃，轉變為玻璃奈米孔洞吸附材料，用於處理電鍍製程中產生的重金屬廢水。這整套技術不僅將廢液晶面板中的高值材料循環使用，還能進一步處理重金屬廢水問題，減少重金屬污泥的二次污染並讓水資源能夠重複循環使用。特別是近年來極端氣候在全球不斷發生，今年臺灣才遭遇 56 年來最嚴重的乾旱，水資源的循環使用在此時此刻顯得更加重要。期望這套技術能廣泛應用於面板、電鍍及廢棄物處理等產業，建立更好的資源循環利用模式，共同創造循環經濟的新價值。

五、參考文獻

1. DIGITIMES Research(2021/05/03)，全球產業數據，https://www.digitimes.com.tw/tech/rpt。
2. Electrical Waste Recycling Group 公司網站，http://www.electricalwaste.com。
3. BluBox 公司網站，http://www.blubox.ch。
4. MRT System International AB 公司網站，http://www.mrtsystem.com。
5. ALR Innovations 公司網站，http://www.alr.ie。
6. Huijun Su, Shaobo Shi, Ming Zhu, Doug Crump, Robert J. Letcher, John P. Giesy, and Guanyong Su, (2019) Persistent, bioaccumulative, and toxic properties of liquid crystal monomers and their detection in indoor residential dust, Proc Natl Acad Sci U S A. Dec 9,116(52):p 26450-26458

單頭封裝 MBR 有機廢水回收技術

蔡宛芯*、彭柏頤**、黃任榆***、吳俊湧****

摘　要

半導體封裝製程經常使用有機化學品進行處理，並透過大量超純水沖洗確保晶片清潔，過程中所排放之廢水稱為有機廢水(Organic wastewater)，原水 COD 約 140~320 mg/L，公司過往採用活性污泥法處理後進行放流，現今需規劃一套系統將廢水回收再利用，廠區因用地限制，採用生物薄膜系統(Membrane bioreactor, MBR)，與既有廢水設備相比減少約 50%用地面積。

本篇 MBR 系統膜件為中空纖維膜絲(Hollow fiber)，採橫流式過濾(Cross-flow filtration)，水流由封閉端往開口端流至產水通道，當薄膜在無污染的狀態下，水流通過膜面因摩擦壓力損失(Frictional pressure loss)與動能壓力損失(Kinetic pressure loss)影響產水的通量，在長時間的操作條件下膜面產生污堵，膜面阻力增加導致薄膜滲透通量降低，Koch 單頭封裝的海草式膜件，膜絲呈束狀固定在底部，膜束中央裝設曝氣頭可進行膜絲中間曝氣，藉由氣泡由下往上形成的穩定錯流，可擦洗在膜面均勻堆積的污泥，進而減少表面不均勻的污染物堆積，上端未固定的膜絲設計也確保不被纖維物質纏繞，相較常見的簾式膜件，減少上下兩側曝氣的死角，使膜絲達到確實清洗，降低薄膜表面生成濃度邊界層(Concentration boundary layer)的機率。

模組測試結果，MLSS 約 2,000mg/L 時，產水 COD 去除率可高達 90%以上，濁度<0.1 NTU，觀察 MBR 跨膜壓差會依測試時間越久而升高，經維護性保養後可維持原始操作參數並達到預期產水通量，MBR 產水 SDI 小於 3，可搭配逆滲透系統處理，使有機廢水回收至製程或是次級用水再利用，減少企業取水量及廢水排放量，也降低極端天氣事件對於產業的衝擊。

【關鍵詞】有機廢水、生物薄膜系統、海草式膜件

---

*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 技術副理
***矽品精密工業股份有限公司 課經理
****矽品精密工業股份有限公司 部經理

一、前　言

半導體封裝提供積體電路(Integrated circuit, IC)保護、散熱及與系統之間訊號連結，製程依照產品特性和需求，規劃不同封裝材料及程序，其中各階段使用之化學品也不同，例如：雷射切割(Laser grooving)為避免碎片附著於晶圓表面，會在雷射加工前塗佈水溶性保護膜；晶圓凸塊製程(Bumping)提供晶片與基板(Substrate)之間的連結，需進行聚合物保護層塗佈(Polymer re-passivation)、接植凸塊(Direct bump)及重佈線路(Redistribution)而使用光阻劑與顯影劑；植球回焊(Ball placement)會使用錫膏(Solder paste)固定錫球(Solder ball)於基板上……等，產品製造過程中為保持晶片清潔，會透過大量超純水沖洗，各站別沖洗殘留化學品之廢水收集而成為有機廢水(Organic wastewater)。

因應水資源日漸匱乏，矽品公司針對製程廢水進行了一系列回收水系統開發研究，有機廢水過往採用活性污泥法處理後進行放流，為減少放流廢水量以及取水量，且考慮既有廠區場地規畫限制，採用生物薄膜系統(Membrane bioreactor, MBR)，可提高系統生物負荷並降低污泥排放，並減少沉澱槽設置空間，與既有廢水設備擴充相比減少約 50%用地面積。

二、　文獻回顧

1.生物薄膜系統

生物處理方法在 1930 年代已成熟運用在工業及民生廢水處理上，於 1960 年代，Smith *et al.*, (1969)提出活性污泥法結合超過濾膜(Ultrafiltration, UF)過濾的概念[1]，而到了 1980 年代，Yamamoto *et al.*, (1988)使用中空纖維膜絲(Hollow fiber)於 MBR 的設計[2]，MBR 結合生物處理與膜分離技術，透過生物處理進行脫氮與硝化反應並去除水中有機碳，再透過膜分離去除水中固體物，現今許多企業皆有規畫在廢水廠中，因使用薄膜過濾可讓系統之水力停留時間(Hydraulic retention time, HRT)與污泥停留時間(Sludge residence time, SRT)可更有彈性的操作，膜面可攔截大分子的有機物質，使其回流至生物處理單元處理，傳統活性污泥法 COD 去除率約 80%，MBR 之 COD 去除率可達 90%以上，MBR 產水相較於活性污泥系統產水也顯得較為優良且穩定，其產水再搭逆滲透(Reverse osmosis, RO)，使水質達到製程可再利用的標準。

MBR 利用膜面攔截污泥可減少沉澱槽作用時間，MBR 相較活性污泥法好氧槽內之 MLSS 也較高，MLSS 中微生物之胞外聚合物(Extracellular polymeric substance, EPS)與溶解性微生物產物(Soluble microbial product, SMP)造成生物積垢，當固定通量的操作情形下，EPS 或 SMP 黏附於薄膜孔隙或表面導致滲透性下降，使薄膜之跨膜壓差(Transmembrane pressure, TMP)隨著操作時間上升[3]，若無有效減少污泥堆積機率及去除結垢，薄膜壽命將快速減少，一般會控制結垢物的生成速度(例如：控制掃流速度或曝氣強度)或是進行維護性保養(例如：定期加藥及化學增強清洗(Cleaning in place, CIP))來保持產水水量。

2.海草式膜件

當薄膜在無污染的狀態下，流體通過膜面因摩擦壓力損失(Frictional pressure loss)與動能壓力損失(Kinetic pressure loss)影響產水的通量[4]，而在長時間的操作條件下膜面產生污堵，膜面阻力增加導致薄膜滲透通量降低，本文生物薄膜系統採用科氏工業集團(Koch Industries, Inc.)單頭封裝海草式膜件，膜絲呈束狀固定於底部的纖維固定裝置，上端未固定的膜絲設計也確保不被纖維物質纏繞，膜件為中空纖維膜絲採橫流式過濾(Cross-flow filtration)，水流由封閉端往開口端流至產水通道，裝置中央裝設曝氣頭可進行膜絲中間曝氣，為確保氣泡流動方向穩定，於氣流垂直方向設置擋板，檔板型式可分為束裝式(Bundle enclosure)及間隔式(Intermittent cage)，使氣泡由下往上循環成穩定錯流，擦洗在膜面均勻堆積的污泥，進而減少表面不均勻的污染物堆積，使其從污泥通道排出，相較常見的簾式膜件，減少上下兩側曝氣的死角，使膜絲達到確實清洗，降低薄膜表面生成濃度邊界層(Concentration boundary layer)的機率。

曝氣型式可分為間歇式曝氣(Intermittent aeration gasification device)及脈衝式曝氣(Pulse aeration gasification device)，於曝氣裝置內上下連接兩條曝氣管路，並在裝置內設置凹槽引導氣流流動，當進行間歇式曝氣時，上端曝氣管會進氣使停留在曝氣管路中的水排出，並產生小氣泡擦洗膜面，降低污泥附著於膜面的速率；而進行脈衝式曝氣時，上下兩端的曝氣管會同時進氣，使裝置產生大氣泡充分擦洗膜面。

根據美國專利論文 US10,702,831[5]提出，在相同的情形下，比較不同檔板及曝氣型式之膜面結垢的速率，當採用束裝式擋板與脈衝式曝氣的情形下，膜面產生結垢的速率最低，次之為間隔式擋板與間歇式曝氣之情形，由此可知束裝式擋板有利脈衝式曝氣的操作，此可使氣泡不會由間隔流失，另外，在去除膜面污垢方面，輪流使用間歇式與脈衝式曝氣形成弛豫循環

(Relaxation cycle)並搭配逆洗可有效達到除垢效果。

三、 實驗步驟

1.水質檢測

本次檢測水質位置分別為：有機廢水原水、MBR 產水以及 RO 產水，在進行模組測試之前需確認有機廢水原水水質以便釐清現場狀況，並訂定 MBR 產水 SDI_{15} 需小於 3 才可進 RO 膜組進行處理，避免 RO 快速阻塞，RO 產水依照矽品公司規範回收水水質指標作為模組產水目標(見表 1)，使產水可回到製程前端之純水系統使用。

表 1 矽品公司回收水質目標

Item	Quality standard (reuse water)	Unit
pH	6.5~8.5	-
Turbidity	<1	NTU
Total organic carbon	<3	mg/L
Chemical oxygen demand	<10	mg/L
Ammonia nitrogen	<0.1	mg/L
Nitrate nitrogen	10	mg/L
Total hardness	<400	mg/L
Conductivity	≦5	μS/cm

2.測試模組

本次測試模組單元分別為原水槽、厭氧槽、好氧槽、MBR、MBR 產水槽、RO 模組以及 RO 產水槽(見圖 1)，原水槽盛接廠區既有有機收集槽水樣，並於此單元加入硫酸或氫氧化鈉維持原水 pH 於 6.5~8.5 之間；厭氧槽停留時間為 2 小時，污泥回流比為 0.33；好氧槽停留時間為 8 小時，溶氧維持在 2~3 ppm；MBR 採用 Koch 提供之 PURON® Hollow Fiber Demo Rows 模組進行測試(見圖 2)，採間歇式曝氣，廢水流動方向與薄膜表面平行，運用剪力使污泥餅不易形成，濾液通過膜表面至產水通道再收集至 MBR 產水桶，產水流量為 0.5 L/min；RO 型號為 DOW-BW 系列產品，MBR 產水經 RO 過濾後，水質預計可達到矽品公司回收水水質標準。

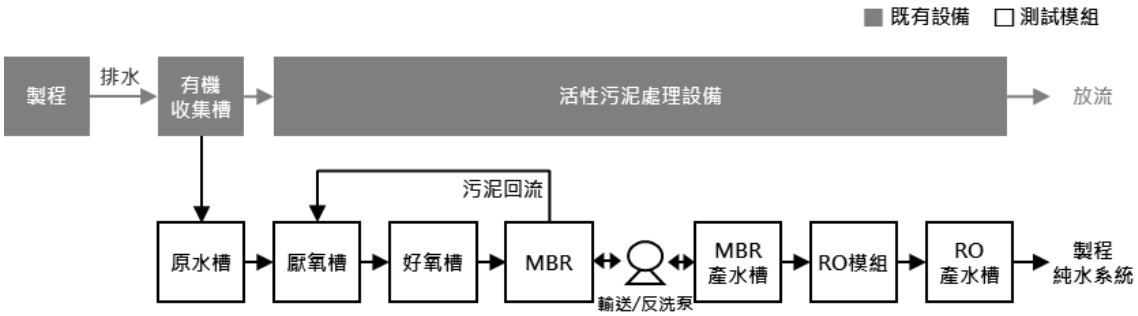


圖 1 測試模組流程

圖 2 PURON® Hollow Fiber Demo Rows 模組

四、 結果與討論

1.有機廢水原水水質

本次水質檢測結果(表 2)，由檢測得知，濁度、總有機碳、化學需氧量、氨氮以及導電度皆未符合回收水標準，預計濁度於 MBR 過濾時可去除，SDI_{15} 進而也可下降；總有機碳、化學需氧量及氨氮可透過生物處理系統進行處理；導電度通過 RO 時可有 90%以上的去除率。

表 2 廢水原水水質檢測結果

Item	Quality standard (reuse water)	Org. wastewater sample	Unit
pH	6.5~8.5	7.5	-
Turbidity	<1	**20.5**	NTU
Total organic carbon	<3	**53.4**	mg/L
Chemical oxygen demand	<10	**200**	mg/L
Ammonia nitrogen	<0.1	**1.6**	mg/L
Nitrate nitrogen	10	0.5	mg/L
Total hardness	<400	46.6	mg/L
Conductivity	≦5	**310**	μS/cm

2.MBR 模組

MBR 模組主要測試項目為 MBR 產水水質與 TMP 變化趨勢，本次測試水質每週至少檢測一筆，TMP 為每日檢測。

有機廢水水樣每日水質都有些許幅度，測試期間 COD 間於 140~320 mg/L(見圖 3)，MLSS 由 342 mg/L 上升至 2,088 mg/L (見圖 4)，在第 1 週測試時，好氧槽模組投入廠內既有污泥訓養此時利用顯微鏡觀測可發現微生物較少，種類多為鐘形蟲與線蟲等，COD 去除率平均約 34%；第 2 週去除率開始爬升，COD 去除率平均約 46%；第 3 和 4 週 COD 去除率開始下降，但 MLSS 持續上升，於第 5 週開始進行定期排泥，約兩週一次，COD 去除率開始穩定上升，在第 8 週 COD 去除率皆維持在 90%以上。

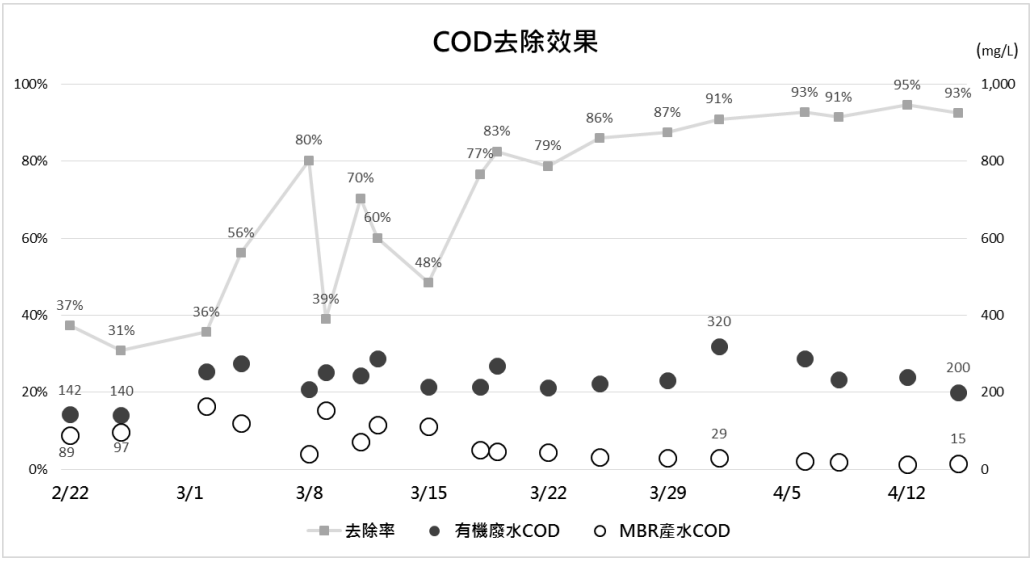


圖 3 COD 去除效果

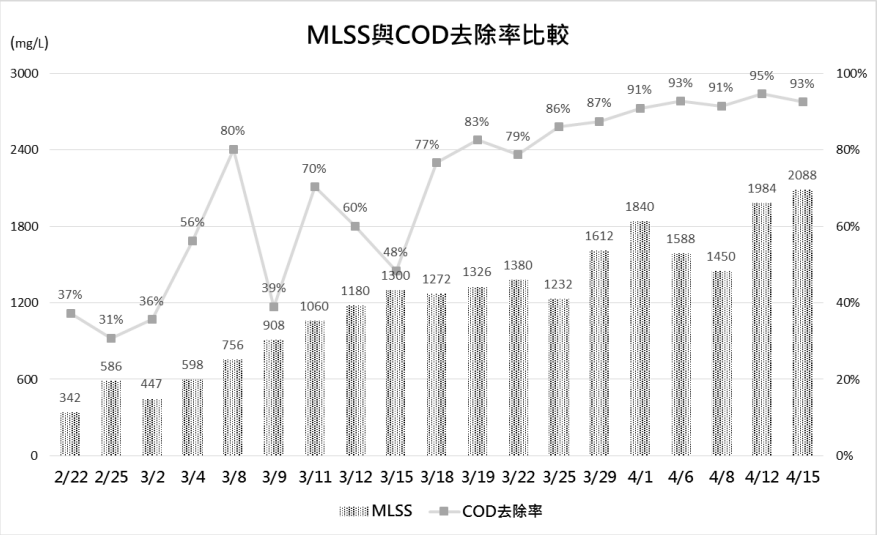


圖 4 MLSS 與 COD 去除率比較

TMP 變化部分請見圖 5，初始產水 TMP 為-0.03 kg/cm^2，於第 3 週為-0.24 kg/cm^2，產水 TMP 有日漸增加趨勢，到了第 5 週開始，產水 TMP 為-0.31 kg/cm^2，搭配維護性物理清洗，可使產水 TMP 回復至-0.16 kg/cm^2，因模組設計限制，本次模組無脈衝式曝氣，減少了弛豫循環去除污垢的能力，且測試之 MBR 模組高度約 53 公分，MBR 槽高度為 70 公分，一般建議槽體高度須高於模組 30 公分，使氣洗循環不會被破壞，為減少設計限制所帶來的誤差，遂每週進行物理沖洗之維護性保養，而在第 6 週，產水 TMP 為-0.34kg/cm^2 時，經 CIP 藥洗後產水 TMP 可回復至-0.15 kg/cm^2。由測試結果推論，Koch 測試模組採用間隔式擋板與間歇式曝氣，可有效減少污泥阻塞形成不可逆污染之機率，進行 CIP 藥洗時可輕易剝落孔隙及表面污泥。

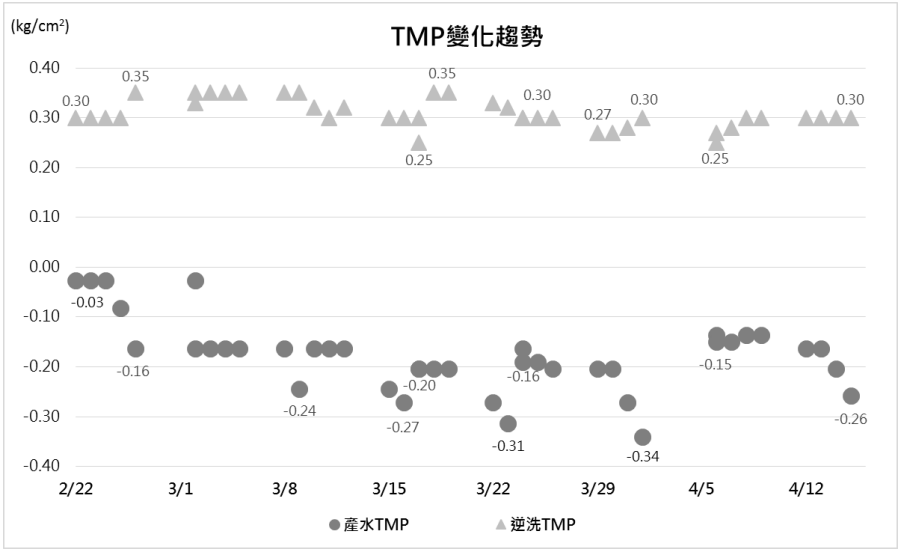


圖 5　TMP 變化趨勢

有機廢水經過 MBR 處理後，濁度下降至 0.1 NTU，COD 下降至 15 mg/L，導電度下降至 193 μS/cm，生物處理中氨氮會因亞硝化桿菌將氨氮轉化成亞硝酸鹽氮，而亞硝酸鹽氮由硝化桿菌反應生成硝酸鹽氮，所以 MBR 產水之氨氮下降至 0.5 mg/L，而硝酸鹽氮上升至 13.6 mg/L(表 3)，而 MBR 產水之 SDI_{15} 檢測後得出為 2.7，符合進 RO 系統之標準。

表 3 MBR 產水水質檢測結果

Item	Quality standard (reuse water)	MBR permeate	Unit
pH	6.5~8.5	7.0	-
Turbidity	<1	0.1	NTU
Total organic carbon	<3	**6.5**	mg/L
Chemical oxygen demand	<10	**15**	mg/L
Ammonia nitrogen	<0.1	**0.5**	mg/L
Nitrate nitrogen	10	**13.6**	mg/L
Total hardness	<400	46	mg/L
Conductivity	≦5	**193**	μS/cm

3.RO 模組

MBR 產水透過 RO 處理後，產水水質皆符合回收水產水標準，各項目去除率皆為 90%以上(表 4)。

表 4 RO 產水水質檢測結果

Item	Quality standard (reuse water)	RO permeate	Unit
pH	6.5~8.5	6.9	-
Turbidity	<1	ND	NTU
Total organic carbon	<3	0.34	mg/L
Chemical oxygen demand	<10	5.6	mg/L
Ammonia nitrogen	<0.1	0.03	mg/L
Nitrate nitrogen	10	0.1	mg/L
Total hardness	<400	5	mg/L
Conductivity	≦5	3	μS/cm

五、 結 論

透過 MBR 取代既有活性污泥處理系統，除了可減少用地之外，操作上也可更精準地控制，產水水質也較為優良且穩定，本次測試結果：當好氧槽 MLSS 約 2,000mg/L 時，MBR 模組之 COD 與濁度去除率皆為 90%以上，導電度去除率約 37%，MBR 產水之 SDI_{15} 符合 RO 進水標準，而產水經 RO 處理後，水質皆符合矽品公司之回收水產水標準，確認有機廢水經處理後，可回收至製程前端之純水系統進行使用。

本次採用 Koch 單頭封裝的海草式膜件，減少了曝氣死角，膜件有效地藉由間隔式擋板與間歇式曝氣形成穩定錯流，擦洗在膜面均勻堆積的污泥，達到確實清洗之效果，於實廠設計時如搭配脈衝式曝氣，且設計合適之槽體高度，可使污泥阻塞速度更加趨緩，且維護性保養頻率也可下降。

綜合以上測試結果，將海草式膜件納入有機回收系統規劃設計，使矽品公司擁有一股穩定的供水來源，降低極端天氣事件對於產業的衝擊，也可減少企業取水量及廢水排放量，消減半導體產業對於環境之衝擊，落實企業水資源管理之目標。

六、 參考資料

1. Smith, C. W., Di Gregorio, D., and Talcott, R. M. (1969). The use of ultrafiltration membrane for activated sludge separation. *Proceedings of the 24th Annual Purdue Industrial Waste Conference*, Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA. 1300–1310.

2. Yamamoto, K., Hiasa, M., Mahmood, T., & Matsuo, T. (1988). Direct solid-liquid separation using hollow fiber membrane in an activated sludge aeration tank. *In Water Pollution Research and Control Brighton* (pp. 43-54). Pergamon.

3. 范姜仁茂、莊連春、曾迪華、廖述良、游勝傑、梁德明，「薄膜生物反應器(MBR)於廢水處理之技術評析」，工業污染防治 109 期，經濟部工業局，2009 年 6 月。

4. Liang S., Zhang H., Zhao Y., Song L. (2016). Performance Modeling and Analysis of a Hollow Fiber Membrane System. *Journal of Membrane Science & Technology* 6: 144.

5. Johnson T. L., Colby D. M., Singh M., "Membrane module system with bundle enclosures and pulsed aeration and method of operation," U.S. Patent 10,702,831, Jul 7, 2020.

工業區污水處理廠藉由沉降試驗和微生物相觀察評估「廢水處理促進劑（生物助劑）」之系統功能提升功效

張泉源*、莊如雅**、廖學球***、吳相進****、張哲毓*****

摘　要

工業區內工廠異常水質排放常影響工業區污水廠生物處理系統功能，造成系統處理功能下降，為能迅速恢復系統功能，本文說明使用「廢水處理促進劑 」對污水廠生物處理系統功能提升功效評估結果與應用。評估試驗過程，自 110 年 4 月 12 日起每日定時、定點於每座曝氣池投放 5 公斤助劑，並於曝氣池出口端採取混合液進行試驗污泥沉降(SV30)及微生物相觀察拍照建檔。評估試驗第一天採取水樣建立基本資料，以作為後續逐日觀察比對基準。加藥一天後，2 座曝氣池之 SV30 污泥沉降體積已有改善，微生物相正常，以指標性纖毛蟲類微生物為主。本案例評估加藥前後 2 個月的操作檢驗數據繪製生物處理系統「系統傾向曲線圖」（5 天移動平均值曲線圖）評估系統功能。110 年 3 月份處系統操作、控制穩定正常，COD 去除率穩定維持在 80%以上；4 月份因為區內工廠排 放異常廢水，進流 COD 由月初平均 300mg/L 升高至 400mg/L；放流水平均 COD 則由 60mg/L 升高至最高點 80mg/L。經加藥後 2 週後，放流水平均 COD 則穩定維持在 60mg/L 以下，平均去除率由 4 月初最低的 71%，迅速回復到 80%以上；顯示「廢水處理促進劑」確實對處理系統功能提升有助益。本案驗證生物處理功能問題可以利用「廢水處理促進劑」快速解決，當污水處理廠遭遇系統功能異常時，「廢水處理促進劑」可以做為經濟、有效的異常處置方案之一，其可於短期內迅速加藥、觀察，進而調整操作模式，可以讓生物處理系統快速恢復處理功能。

【關鍵詞】生物處理系統、廢水處理促進劑、系統傾向曲線圖、異常處置

---

*經濟部工業局南崗工業區污水處理廠　環保組長

**經濟部工業局南崗工業區污水處理廠　化驗員

***經濟部工業局南崗工業區污水處理廠　技術員

****唐豐科技有限公司 總經理

***** 台中市政府文山水資源中心　副廠長

一、緣　起

近期由於區內工廠異常水質排放影響本廠生物處理系統功能逐漸下降，為確實評估「生物助劑」對本廠生物處理系統功能提升功效，掌握最佳加藥時機，特別要求藥劑供貨廠商派員配合進行全程試驗觀察並協助彙整記錄及編寫報告。

二、測試期程、方法

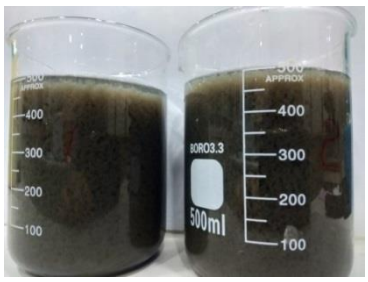
1.期程：自本（110）年4月12日起至4月23日止。

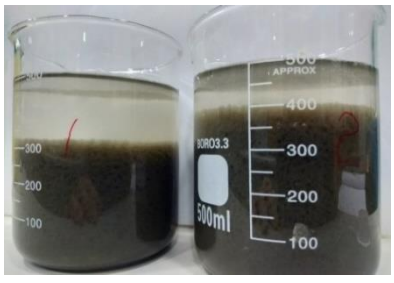
2.添加藥劑：因應本廠進行系統功能提升試驗之生物助劑由工廠配合提供。

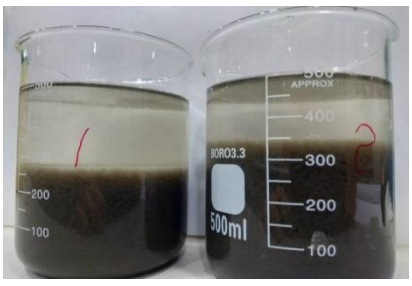
3.執行方法：自4月12日起每天定時（下午5點），定點於曝氣池進口端每池投放5公斤助劑，並於每池出口端採取曝氣池混合液進行試驗及觀察並記錄。

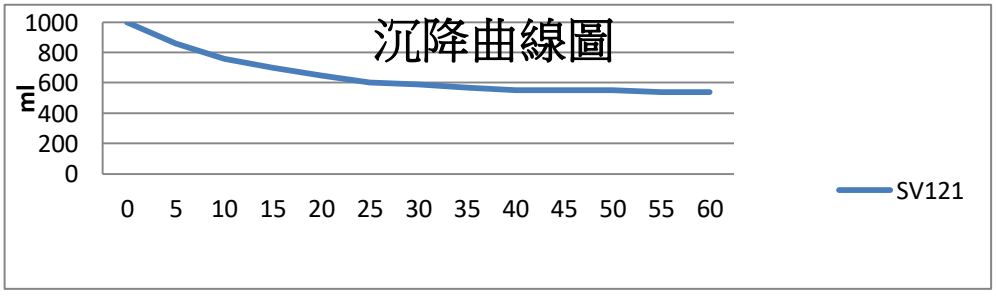
三、工作紀要

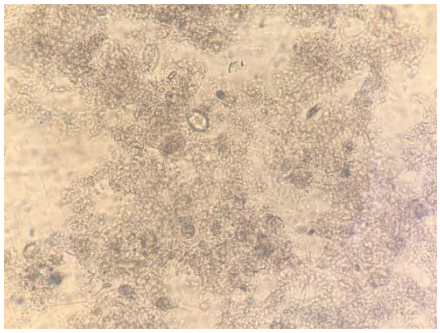
沉降試驗每5分鐘觀察沉降情形紀錄沉降體積，並拍照建檔。第一階段觀察分析如圖 1-5 所示

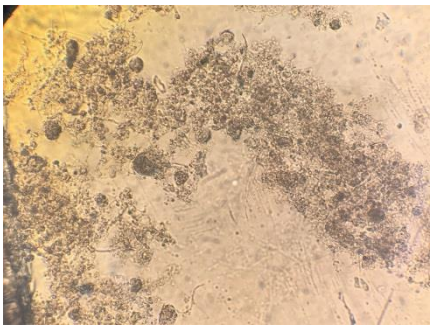


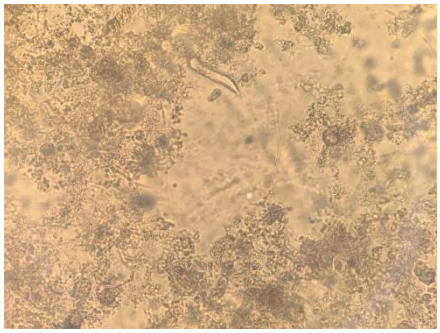


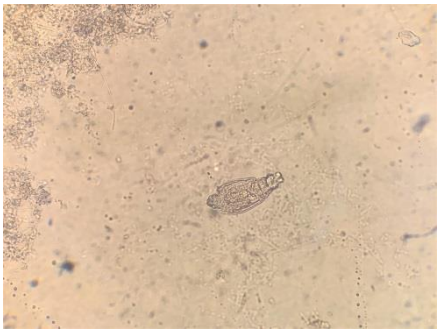






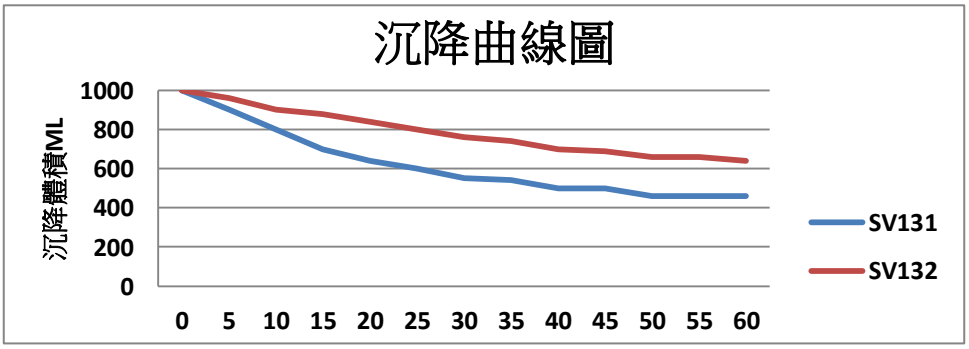


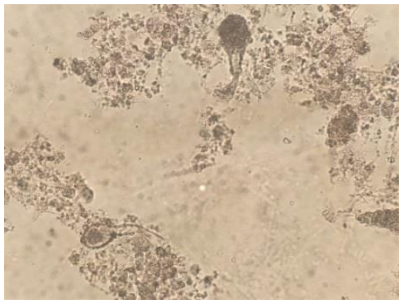


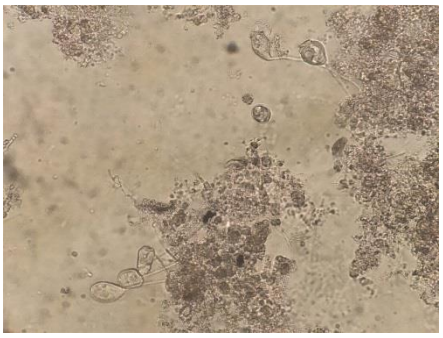


下毛目纖毛蟲類和低負荷指標微生物占相對優勢，顯示曝氣池污泥濃度偏高。(第二曝氣池以 250ml 量筒做沉降試驗和後續 500ml 燒杯不同，沉降曲線有誤差，不列入紀錄)

圖 1　4/12 加藥前，採取水樣建立基本資料

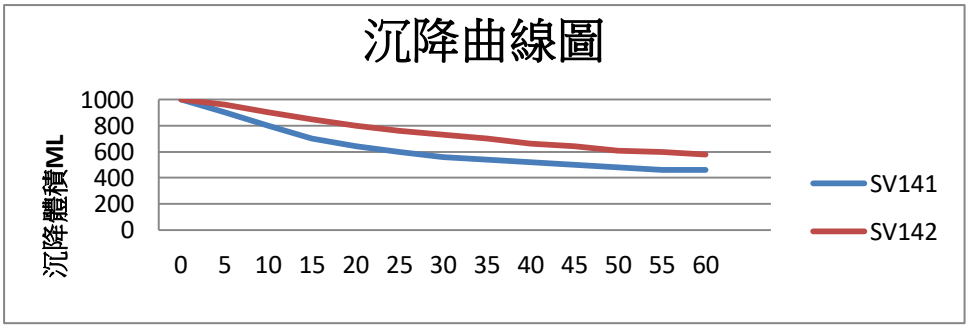


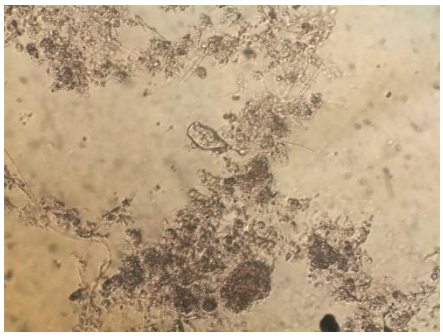


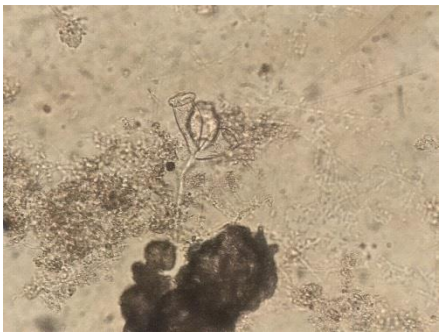


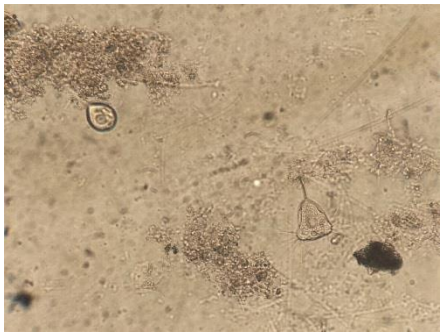
良好指標性原生動數量明顯增加，下毛目仍然占相對優勢

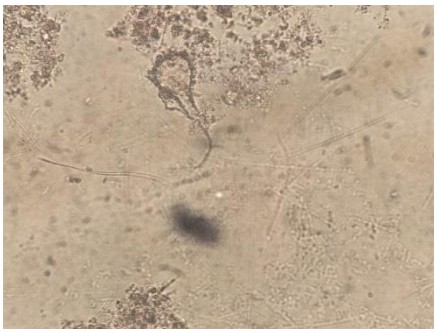
圖 2　4/ 13 加藥第 1 天，沉降性略有增加





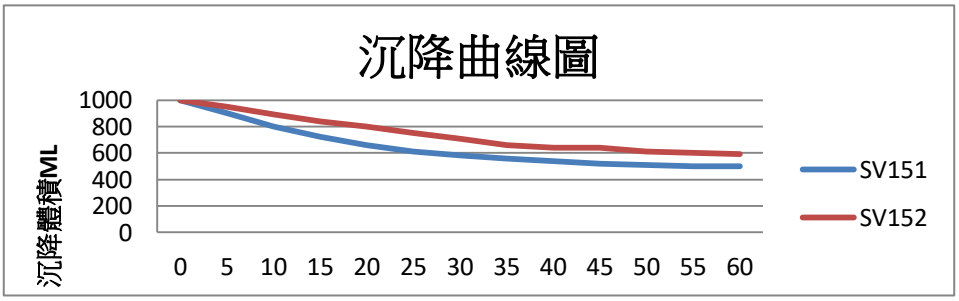


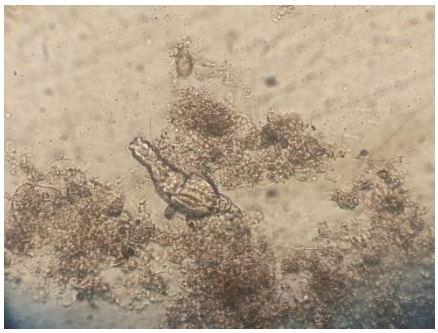


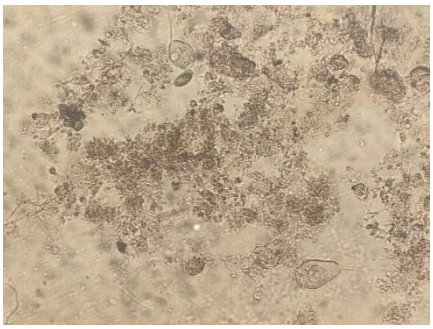


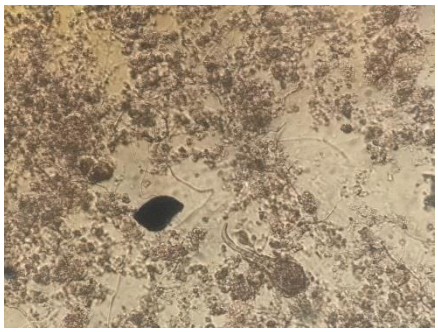
污泥沉降性和微生物相相對穩定並無太大差異

圖 3　4/14 日加藥後水質變化









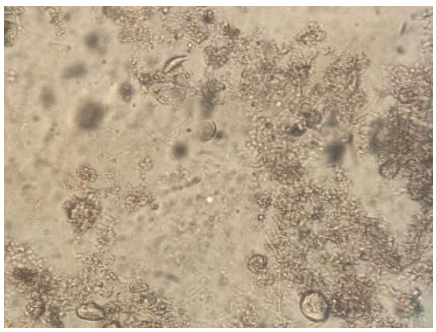
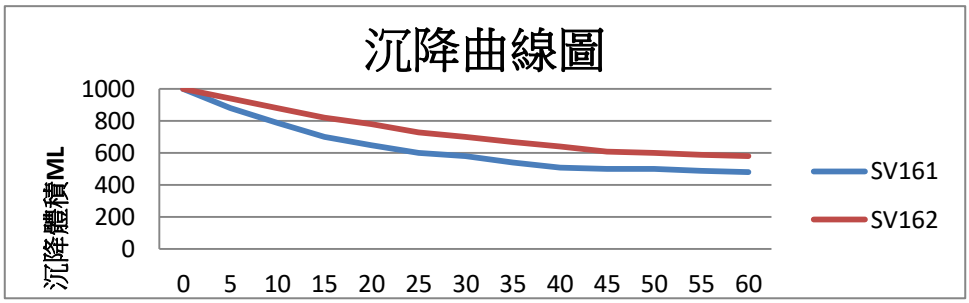
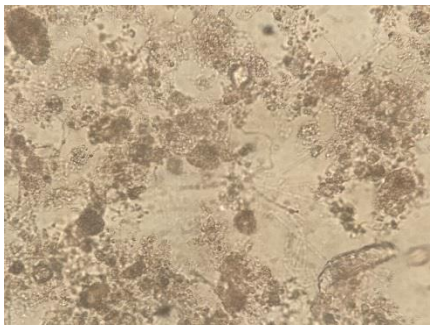
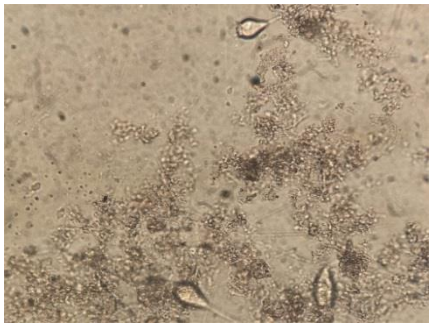
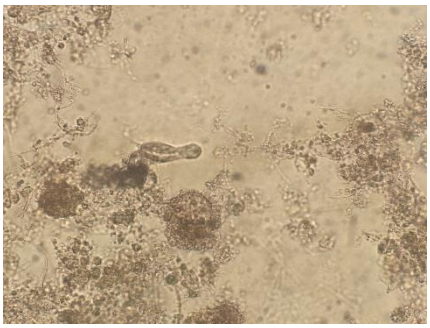


圖 4　4/15 日加藥後水質變化





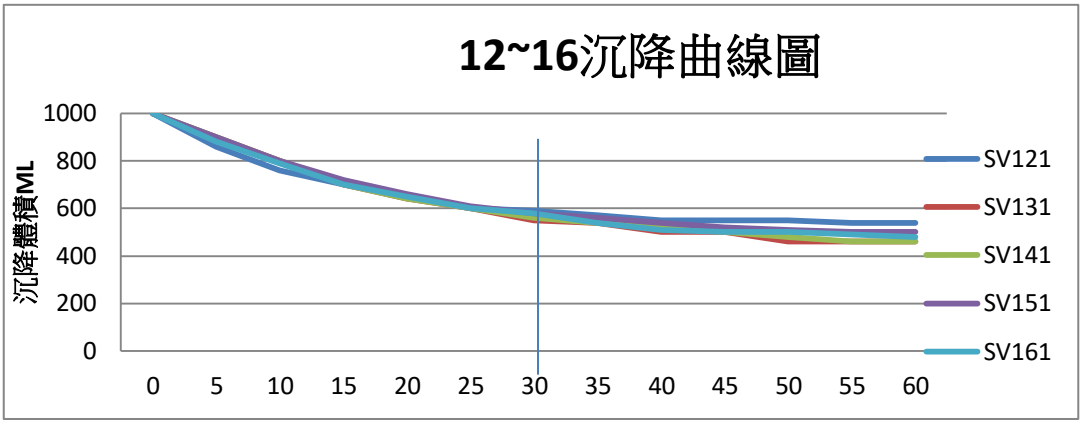




低負荷指標微生物轉輪蟲、鮰輪蟲占相對優勢

圖 5　4/16 日加藥後水質變化

彙整第一階段沉降曲線如圖 6，發現加藥一天後 2 池 30 分鐘沉降體積已有改善，第一池因為污泥濃度較低自第一天大幅降低之後逐漸上升，第二池因污泥濃度較高的關係，自加藥第一天起逐日降低，顯示污泥沉降性確有提升。繼續進行第二階段投藥觀察，如圖 6 至圖 11 所示。



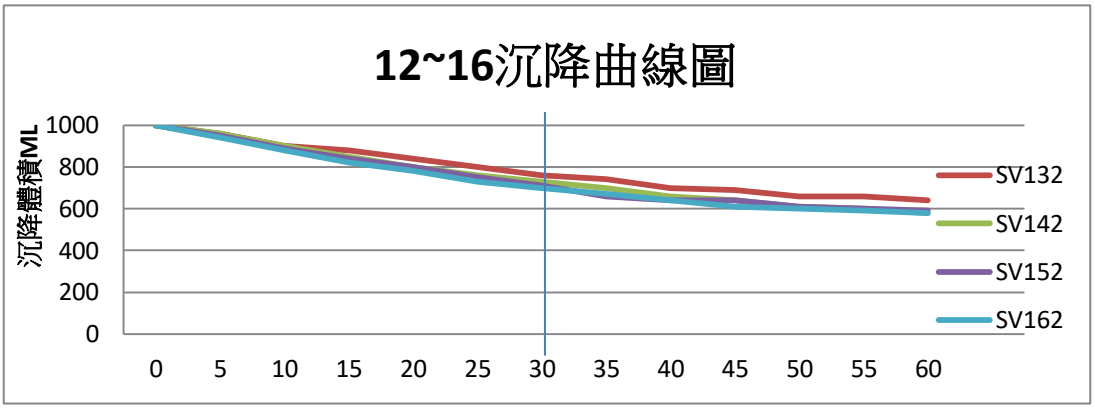
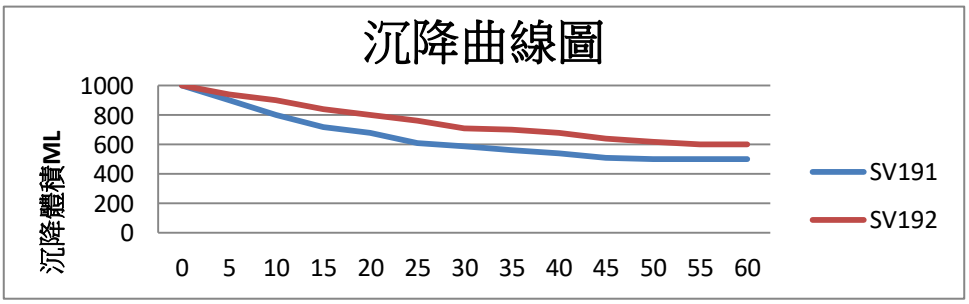


圖 6　第一階段沉降曲線圖



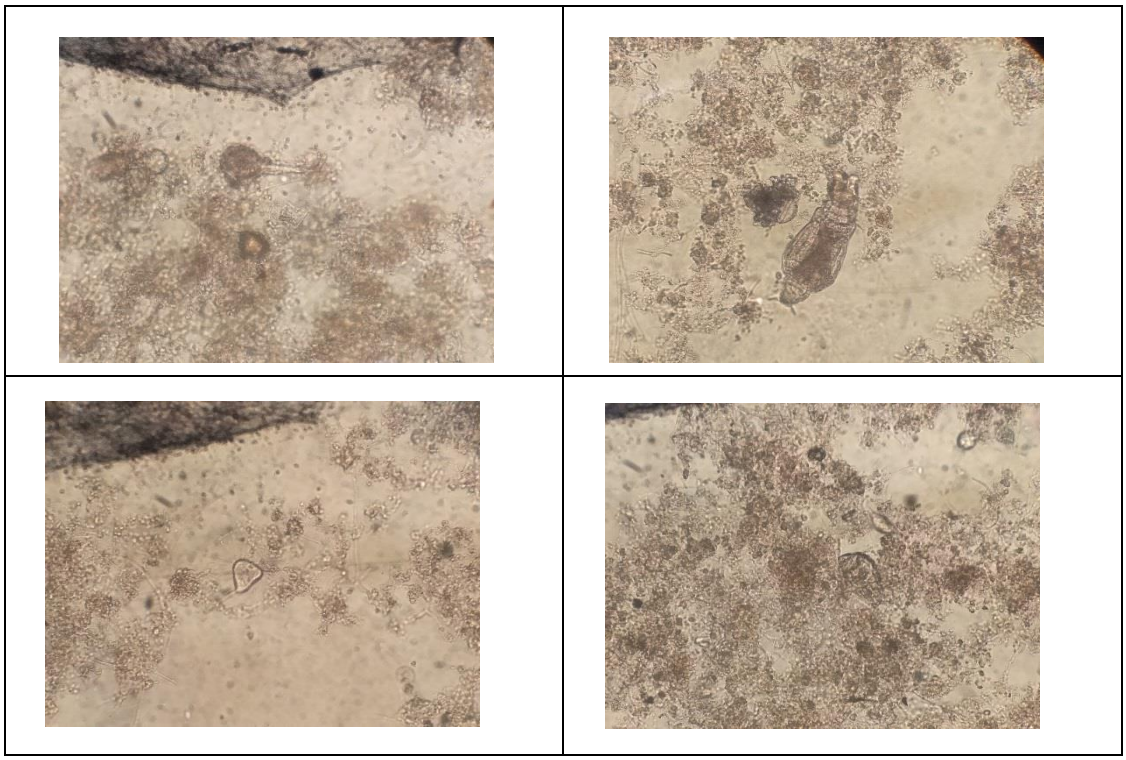
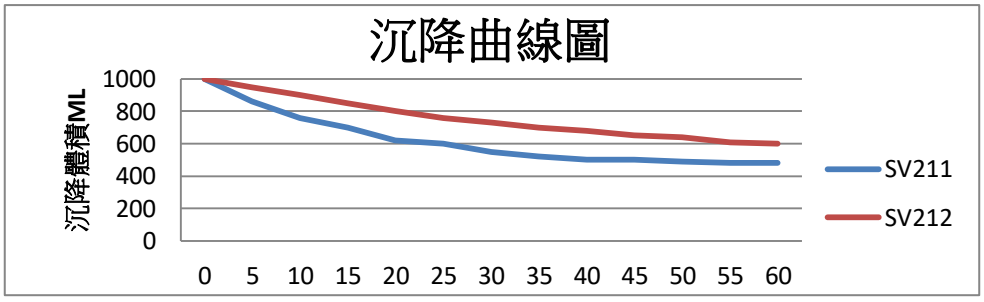
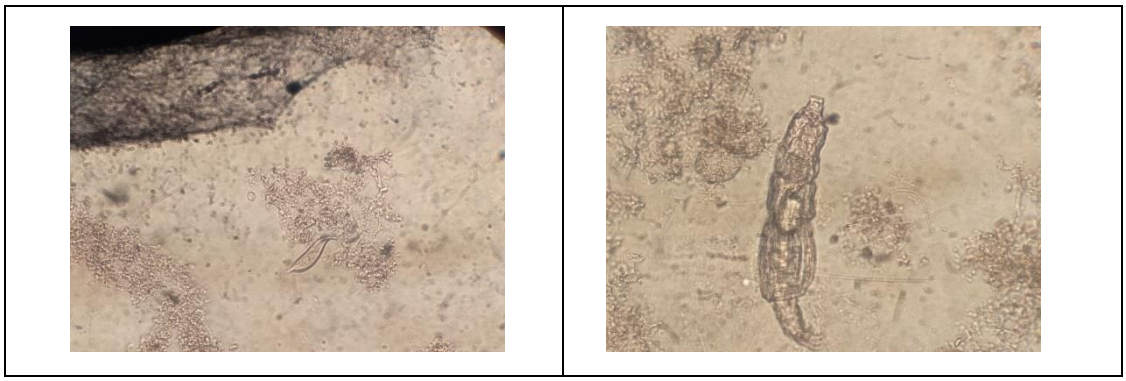
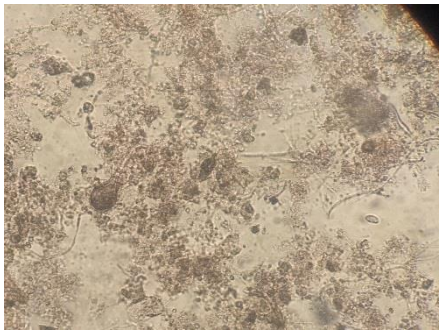
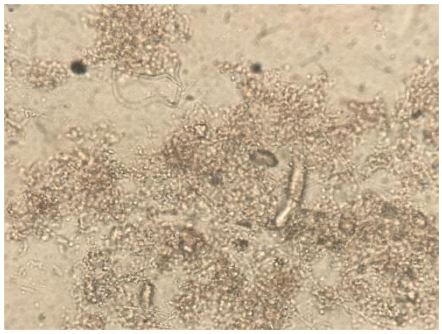


圖 7　4/19 日加藥後水質變化



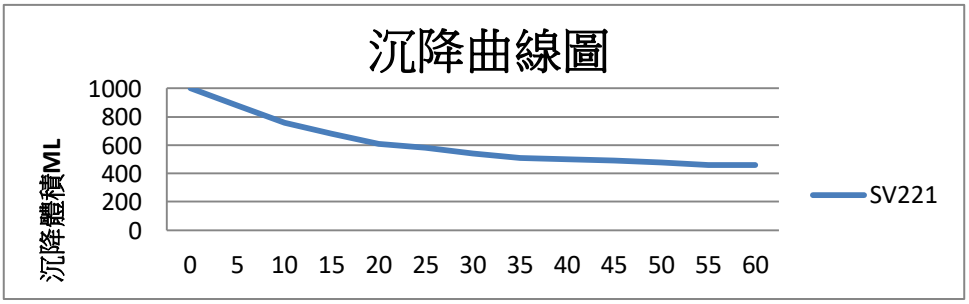


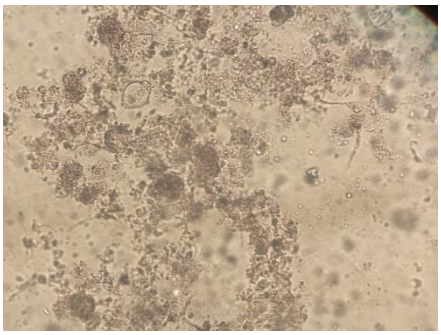


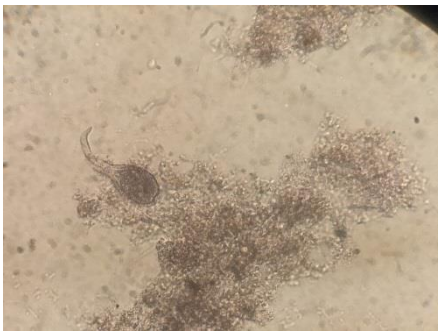


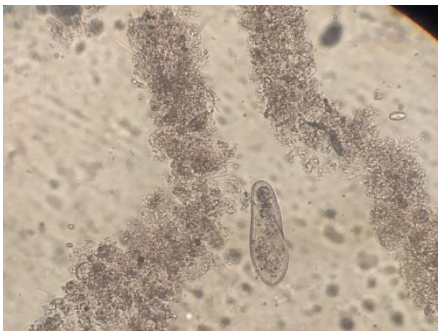
微生物相仍然維持少量多樣性，低負荷指標占相對優勢

圖 8　4/21 日加藥後水質變化(4/20 未進行採樣)



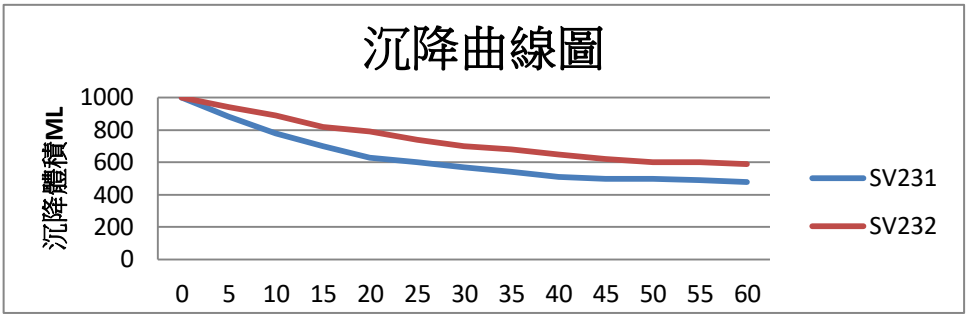


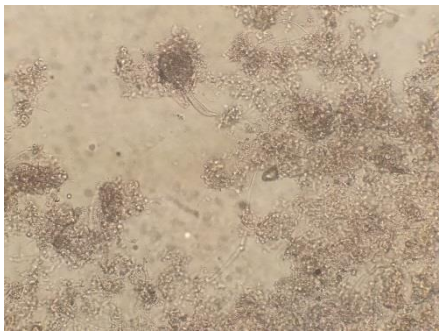


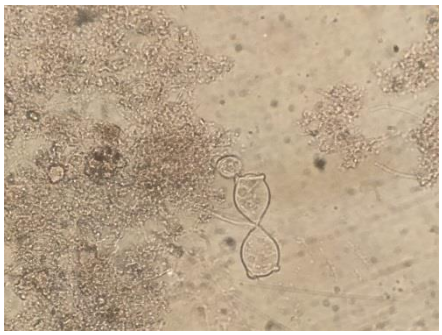
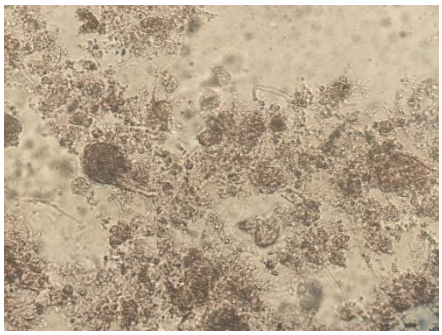


污泥沉降性和微生物相維持穩定

圖 9　4/22 日加藥後水質變化(採樣時因第二池曝氣停機，未能取得代表性水樣無試驗紀錄)



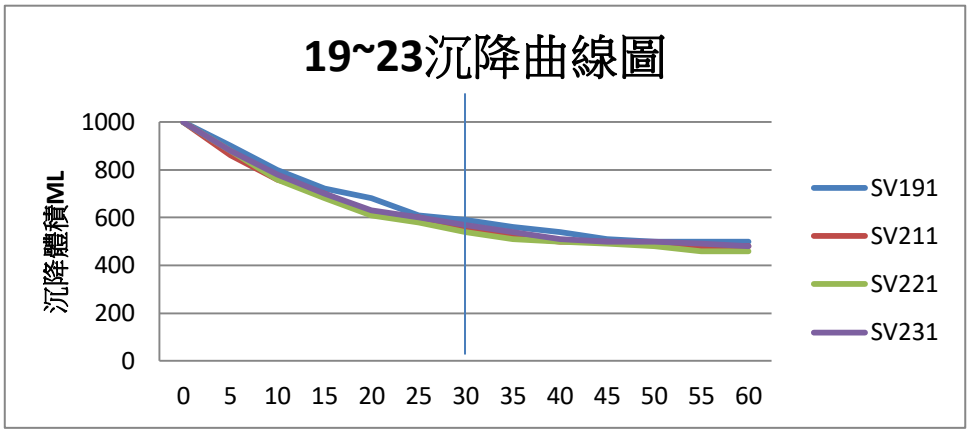


污泥沉降性和微生物相維持穩定

圖 10　4/23 日加藥後水質變化

本研究於 4 月 23 日將藥劑使用完畢，本次試驗加藥工作結束。彙整 4/19~4/23 沉降曲線第一池 30 分鐘沉降體積持續降低，如圖 10 所示。第二池 19、21 日沉降曲線幾乎重疊，23 日沉降體積略有下降。



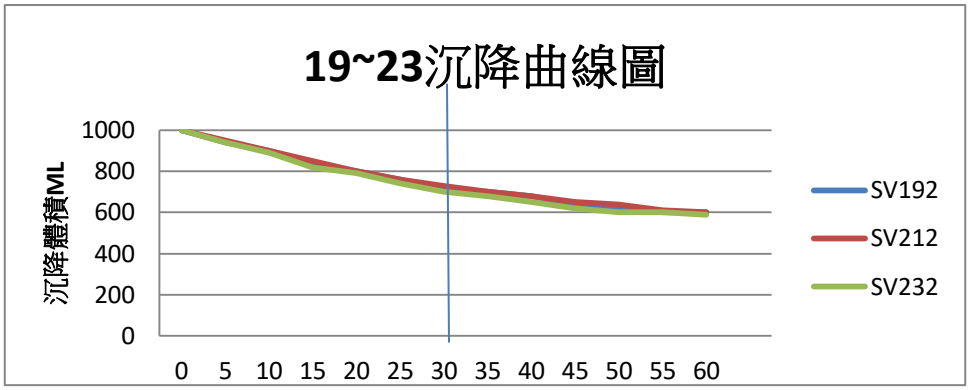
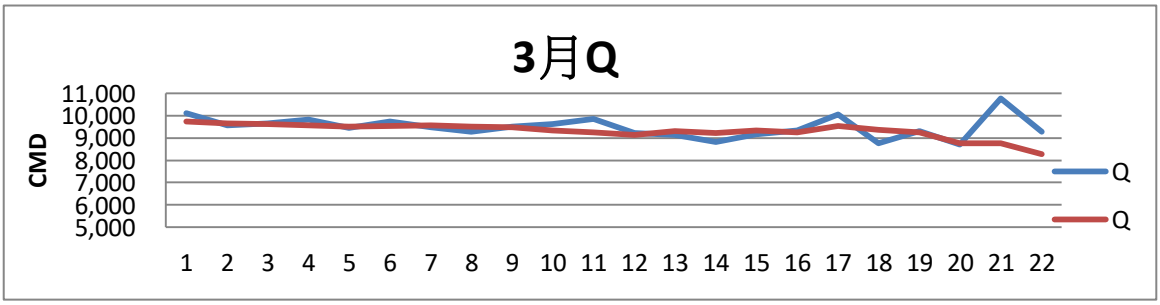


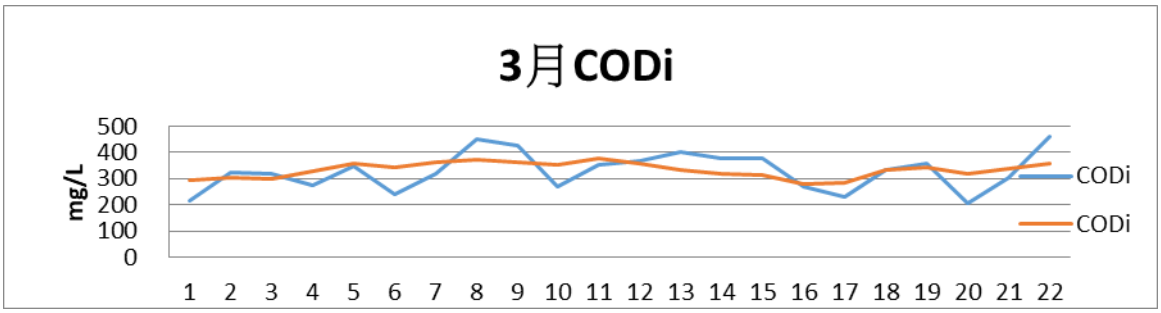
圖 11　第二階段沉降曲線圖

四、成效檢討

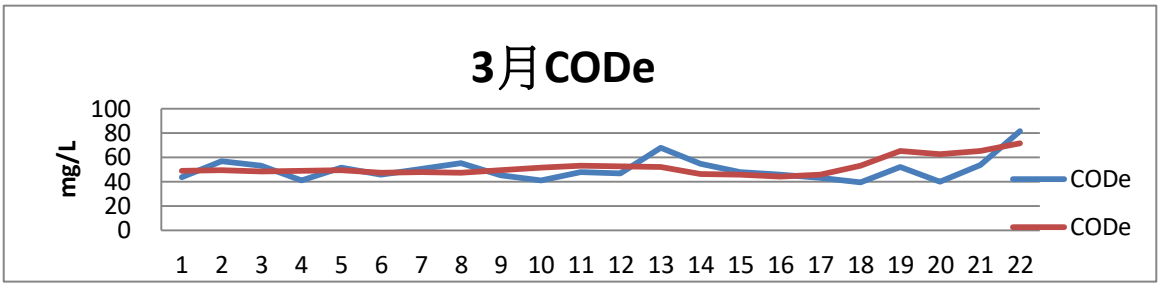
為能精確評估助劑投放效果，彙整 3 月份操作檢驗數據繪製生物處理系統「系統傾向曲線圖」(5 天移動平均值曲線圖)分析如下：



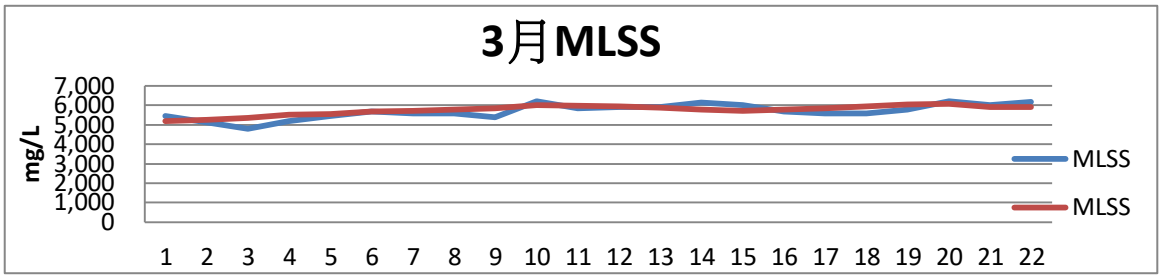
平均日處理廢水量 9,300CMD



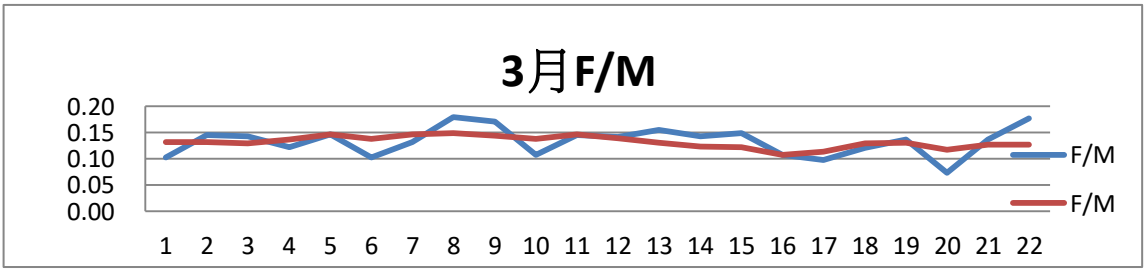
平均進流廢水 COD 濃度為 333mg/L



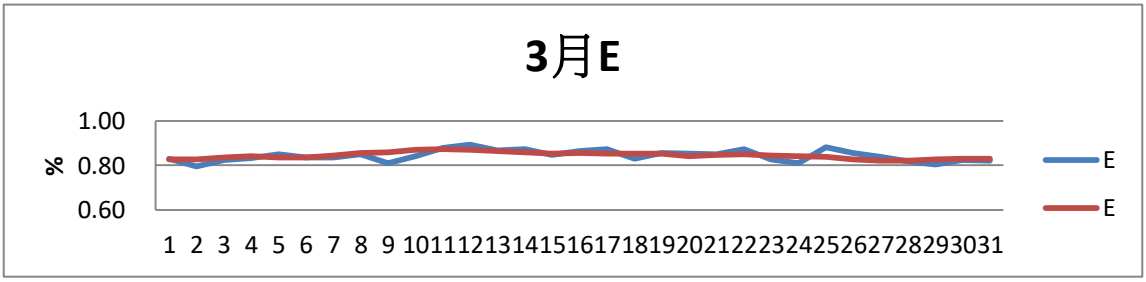
平均放流水 COD 濃度為 52mg/L



平均曝氣池 MLSS 濃度為 5,760mg/L



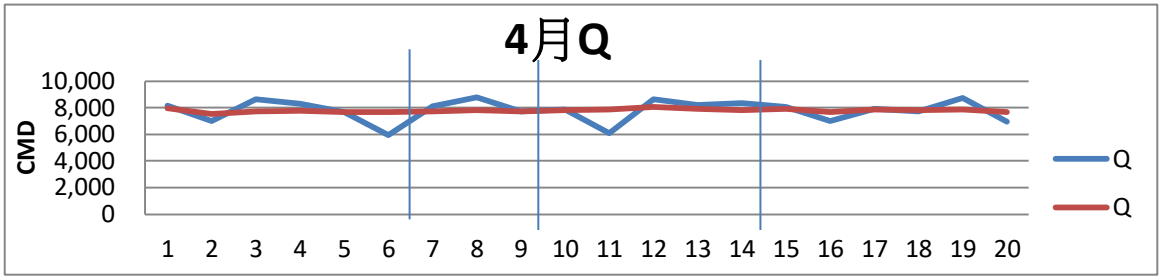
平均食微比為 0.13kg/kg MLSS · Day



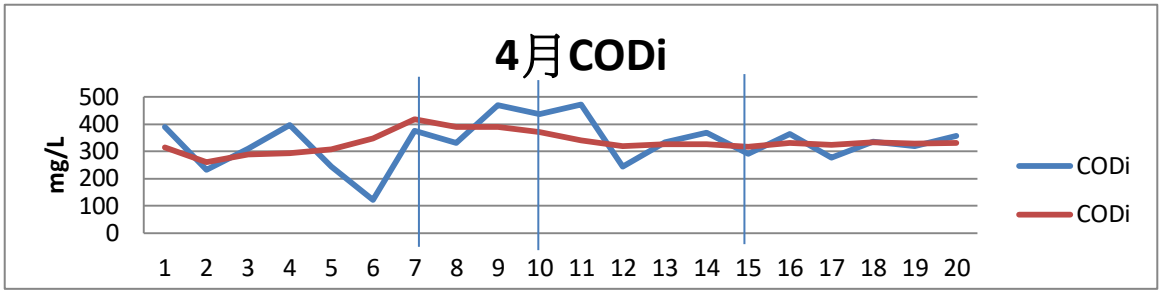
平均 COD 去除率為 84%

曝氣池放流水 COD 濃度介於 40~50mg/L，處理系統穩定維持在 80%以上的去除率，系統操作控制穩定正常。

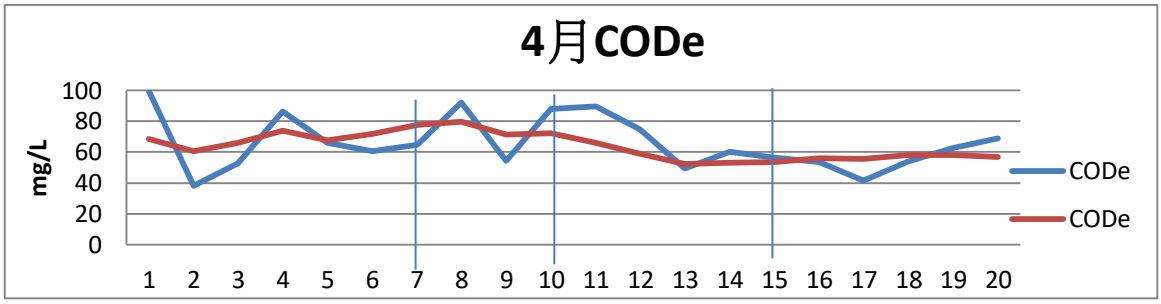
彙整 4 月份操作檢驗數據繪製生物處理系統「傾向曲線圖」(5 天移動平均值曲線圖）分析如下：



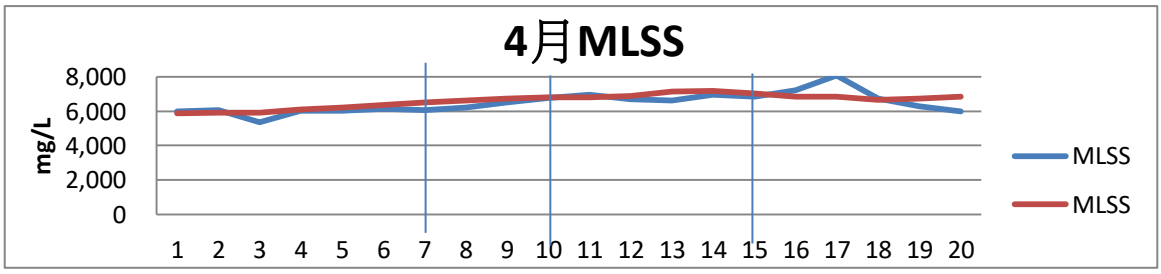
平均處理廢水量為 7,790CMD



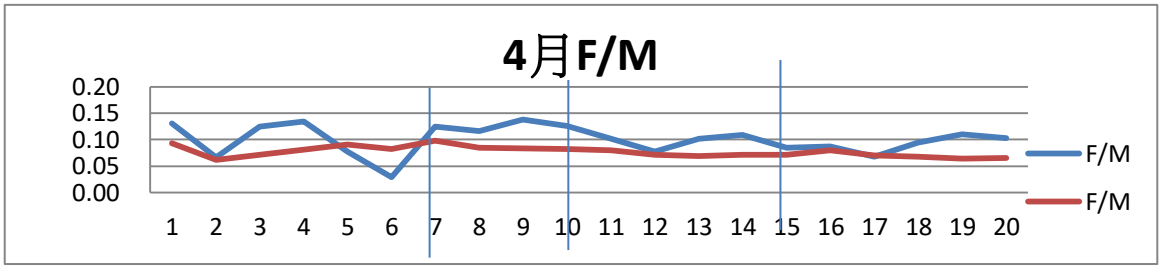
平均進流廢水 COD 濃度為 330mg/L，月初平均為 300mg/L 逐漸升高，於試驗開始階段升高到 400mg/L。



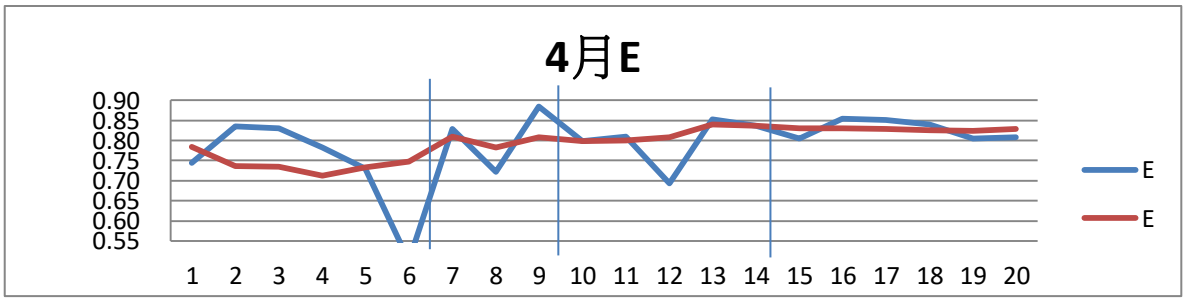
平均放流水 COD 濃度為 64mg/L，月初由 60mg/L 逐漸升高，於試驗開始階段升高到最高點 80mg/L。加藥之後明顯下降，第二週之後平均放流水 COD 濃度穩定維持在 60mg/L 以下。



逐漸上升，加藥期間持續上升，直到加藥結束才略為下降然後穩定維持 6,830mg/L。



平均食微比 0.08，月初為 0.1，隨著 MLSS 濃度的升高逐漸降低。



平均去除率由月初的 80%，下降到最低 70%，加藥之後回復到 80%以上。

五、廢水處理促進劑（生物助劑）微生物組成鑑定

利用 16S rDNA 序列對照方法，分析了 3 種生物助劑中的真細菌含量。研究結果顯示在活性污泥系統中去除碳/氮的主要功能性微生物屬於變形桿菌(紫色細菌)的 γ 分支，以及格蘭氏陽性細菌（4 個菌落）的 Rummeliibacillus stabekisii，諸如 Klebsiella pneumoniae, Pantoea agglomerans, P.anamatis, P.vagans 及 Pectobacterium cypripedii 等菌種均在前述生物助劑中被鑑別出來。

將 3 種生物助劑中的微生物（TF1-CMB,TF4-MB,TF5-POB）用高壓滅菌的液態培養基培養 4 天，每天分別利用顯微鏡觀察和量測攝氧率（OUR，mg O2 /L/min），來監測微生物的增長情形和活動性。再使用組織和細胞基因組 DNA 純化試劑盒萃取 4 天培養的微生物的基因組 DNA。

實驗結果顯示在液態培養基中培養 2-4 天後，微生物有顯著的增長（經由顯微鏡觀察）和極佳活性（量測攝氧率，如圖 11）本研究提供了這 3 種生物助劑中進一步的微生物成分訊息，以支持以往應用在廢水異常處置成功案例的真實理由，並且有助於將來選擇合適的生物助劑，以順利解決廢水生物處理系統的各種問題。

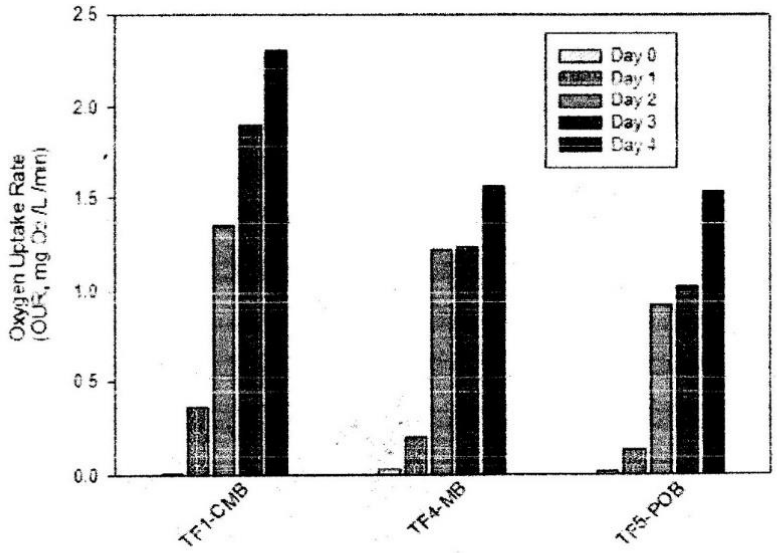


Figure 1. Activity of the microbes from the bio-aids increased as incubation time was increased during the 4-day cultivation period.

圖 11　微生物攝氧率

表 1　3 種生物助劑的微生物成分表

TF1-CMB

Kingdom 界	Phylum 門	Genus 屬
Bacteria 細菌界	*Actinobacteria* 放線菌門(0.24%)	*Actinomyces* 放射菌屬(0.04%)、*Corynebacterium* 棒狀桿菌屬(0.08%)
	Bacteroidetes 擬桿菌門(0.47%)	*Chryseobacterium* 擬桿菌屬(0.01%)、*Elizabethkingia* 伊麗莎白菌屬(0.10%)、*Flavobacterium* 黃菌屬(0.04%)、*Sphingbaterium* 鞘氨醇桿菌屬(0.25%)
	Cyanobacteria 藍綠菌門(4.56%)	---
	Firmicutes 後壁菌門(90.4%)	*Bacillus* 芽孢桿菌屬(4.22%)、*Paenibacillus* 類芽孢桿菌屬(0.03%)、*Enterococcus* 腸球菌屬(0.19%)、*Lactobacillus* 乳酸菌屬(0.19%)、*Clostridium* 梭菌屬(20.7%)、*Leuconostoc* 白色念珠菌屬(0.22%)

Kingdom 界	Phylum 門	Genus 屬
	Proteobacteria 變形菌門(1.42%)	*Brevundinomas* 短波單胞菌屬(0.01%)

TF4-MB

Kingdom 界	Phylum 門	Genus 屬
Bacteria 細菌界	*Bacteroidetes* 擬桿菌門(0.17%)	*Wautersiella*(0.17%)
	Chloroflexi 綠彎菌門(0.09%)	*Ornatilinea* 俊繩菌屬(0.09%)
	Cyanobacteria 藍綠菌門(0.04%)	*Aerosakkonema*(0.04%)
	Firmicutes 後壁菌門(98%)	*Bacillus* 芽孢桿菌屬(12.4%)、 *Clostridium* 梭菌屬(50.7%) *Enterococcus* 腸球菌屬(16.2%)、 *Lactobacillus* 乳桿菌屬(16.0%)、 *Leuconostoc* 白色念珠菌屬(12.5%)、 *Paenibacillus* 類芽孢桿菌屬(0.30%)
	Proteobacteria 變形菌門(1.68%)	*Kluyvera* 克呂沃爾菌屬(0.52%)、*Comamonas* 叢毛單胞菌屬(0.34%)

TF5-POB

Kingdom 界	Phylum 門	Genus 屬
Bacteria 細菌界	*Bacteroidetes* 擬桿菌門(0.07%)	*Chryseobacterium* 金黃桿菌屬(0.07%)、
	Cyanobacteria 藍綠菌門(1.02%)	*Cylindrospermum* 筒孢藻屬(1.02%)
	Firmicutes 後壁菌門(32.7%)	*Bacillus* 芽孢桿菌屬(11.9%)、 *Clostridium* 梭菌屬(0.2%) *Enterococcus* 腸球菌屬(12.8%)、 *Lactococcus* 乳球菌屬(0.04%)、 *Leuconostoc* 白色念珠菌屬(0.57%)
	Proteobacteria 變形菌門(66.3%)	*Cronobacter* 板崎腸桿菌屬(65.9%)

六、結論與建議

彙整相關紀錄、數據資料歸納以下結論：

1.由投藥當天和隨後的每天採樣觀察紀錄顯示曝氣池混合液 SV30 的沉降體積有明顯下降，對照微生物相觀察也有指標性原生動物的變化。

2.參照 3 月份傾向曲線圖系統處理概況如下：平均廢水處理量 9,300CMD、平均進流 COD 濃度 333mg/L、平均放流水 COD 為 52mg/L、平均曝氣池 MLSS 濃度 5,760mg/L、平均食微比 0.13、平均去除率 84%，曝氣池放流水 COD 45~50mg/L，處理系統穩定維持 80%以上的去除率，系統操作控制穩定正常。

3.參照 4 月份傾向曲線圖評估助劑提升系統處理功能功效：平均廢水處理量由 3 月的 9,440CMD 降為 7,790CMD，月初平均進流 COD 濃度為 300mg/L 逐漸升高，於試驗開始階段升高到 400mg/L，明顯受到廠商異常排放影響，月初平均放流水 COD60mg/L 受進流 CMD 影響逐漸升高，於試驗開始階段升高到最高點 80mg/L。加藥之後明顯下降，二週之後放流水平均 COD 穩定維持 60mg/L 以下。顯示助劑對處理系統功能提升確實有效。

4.曝氣池混合液 MLSS 濃度月初延續 3 月的 6,000mg/L 逐漸上升加藥期間持續上升，推測應是處理水量減少 1,510CMD（9,300CMD-7,790CMD），約每小時少了 63 噸的水量在系統中循環所致，如這個假設正確，則依據 3 月平均曝氣池 MLSS 濃度 5,760mg/L、處理量 9300CMD 換算 4 月 7,790CMD 處理量的平均曝氣池 MLSS 濃度 6,880mg/L（5,760mg/L x 9,300CMD/7,790CMD =6,876 mg/L），比照加藥結束穩定維持 6,830mg/L 的狀況，這個推測尚屬合理。如要深入探討則需要彙整每個處理單元的流量監測記錄回饋計算。

5.食微比（F/M）月初由 3 月的 0.13 降到 0.1 以下，去除率也隨著降到 75% 以下，第一階段加藥之後雖然食微比（F/M）因曝氣池 MLSS 濃度偏高， 直到加藥結束仍持維持 0.8 左右，但去除率由第一階段加藥之後的 80% 提升到 85%，加藥結束後仍然維持 83%。證實助劑確實在偏低食微比操作下，能夠維持系統 83%左右的良好功能。

6.綜合以上結論，建議二個最佳加藥時機：(1)曝氣池 MLSS 濃度逐日

偏高，連續 3 天高於 6,000mg/L 以上時，或(2)曝氣池放流水 COD 濃度逐日偏高，連續 3 天高於 80mg/L 以上時。

七、參考文獻

1.Prof. W. Wesley Eckenfelder, Jr 中興大學“廢水處理廠操作與管理研習會”1981 年。

2.李季眉、林坤讓、林正祥，經濟部工業局“廢水處理功能生物診斷技術”，1995 年。

3 Y-W Chen, P-L Lee, C-Y Huang, C-N Chang, H-W D. Kuo Department of Environmental Science and Engineering, Tung-Hai University, Taichung, Taiwan『 Gamma-Proteobacteria Identified in Commercial Bio-aids Used in Wastewater Treatment Industrial』2014 年。

4.吳相進，台灣產業服務基金會“活性污泥處理程序”，1988 年。

5.廢水處理單元設計及異常對策，經濟部工業局，87 年 10 月。

6.廢水處理廠操作管理，經濟部工業局，83 年 6 月。

7.經濟部工業局“廢水處理單元設計及操作撙準則之試驗建立”，1992 年。

能源轉型政策下之電業擱淺資產初探

劉育真*、李育明**

摘　要

為了減緩全球暖化的進程，世界各國必須合作減少對化石燃料的依賴性，因此將不可避免的影響石油和煤炭產業。對於多年以油、煤等化石燃料為發電基礎的電業，再加上電力建設的前置作業期長，使用年限也長，面對能源轉型的挑戰，經營上的風險似乎已儼然成形。台灣電力草創初期從地利之便以水力奠基，配合經濟起飛投入火力發電，面對能源危機引進核能發電，之後為提升能源使用彈性加入天然氣發電，有鑑於非核家園而轉型綠能，再為減緩全球暖化而致力於太陽光電、風能及其他再生能源。過去的電力供應成就今日繁榮的經濟發展；現在的能源規劃勢必影響未來整體供電能力，能源與環境的課題，成為電業經營的一大挑戰。

低碳甚至無碳時代的來臨，對於電業資產風險管理所可能面臨的挑戰，本研究希望透過電業擱淺資產的三種情境分析，建構未來可能發生的各種狀況，討論其中的不確定性與影響層面，並進而擬定應變建議方案，尋求避免或減少擱淺資產的發生，健全電業資產結構。再加上目前台灣的電業仍屬於國營公用事業，其營運的風險及可能尋求的機會，或許也能夠藉由資產消長的效果分析，作為政策反饋的參考，以期達到環境、經濟與社會的永續。

【關鍵詞】能源轉型、擱淺資產、風險管理、情境分析

---

*國立臺北大學自然資源與環境管理研究所　碩士在職專班研究生
台灣電力公司　研究員

**國立臺北大學自然資源與環境管理研究所　教授

一、緒論

(一)研究動機

面對全球暖化，氣候異常，2015 年的《巴黎協定》希望控制全球的升溫不超過 1.5℃，國際組織 IPCC，再加上日本福島核災的衝擊，低碳排甚至淨零碳排已成為台灣能源轉型的目標。能源轉型將產生不連續的變化，在不確定的領域中，從主導技術和能源規模，到治理、政治、體制與生活方式均將發生改變。電力產業為能源產業的一環，並對民生福祉及經濟發展至為關鍵，因此對於能源轉型的相關改變導致電力資產可能面臨的挑戰與遭遇的風險，有必要做進一步的探討。

資產是一種可以通過擁有或控制來獲得利潤或未來利益的經濟資源。電業資產存在的目的即在於讓電業能夠利用這些資產產生電力，並藉由銷售電力造福民生及促進經濟發展與地方建設，並因此回收成本與獲利。由於電廠的設立需要較長的前置期，火力機組也有較長的使用年限，電業資產從設立到成本回收的時間相對較長，如以傳統火力機組為例，汽力機組的壽命一般為 40 年，燃煤機組也有 30 年(而風力機組大約只有 20 年)，再加上建廠期間也較目前新興的再生能源要長，無論是成本的投資或是回收可能遭遇的風險自然更多，這些資產一旦投資下去卻無法在有限的壽命中回收，即產生了擱淺資產。因此，當因為外在環境的要求，需要在短時間內完成從高碳到低碳，甚至無碳的能源轉型，對於電業經營的挑戰也就不言可喻了。

(二)研究目的

1. 分析能源轉型對於電業資產的可能影響
2. 了解電業資產可能擱淺的風險因素
3. 探討不同情境下電業擱淺資產的變化及差異
4. 就如何降低電業資產擱淺風險提供可能的建議方案

二、文獻回顧

(一)擱淺資產的由來

根據熊彼特（Schumpeter）的“創造性破壞”一詞，我們瞭解在創造價值的過程中也會有被摧毀的價值，而也經由這樣的過程才能推動創新和經濟增長，從這個層面上來看擱淺資產似乎是無

可避免的。國際能源署認為：當資產“已經設置完成，但在經濟壽命終結前，已不再能夠為市場帶來經濟回報者”，即視為是擱淺資產。另根據國際上普遍被接受的定義，則是將擱淺資產定義為：是遭受意外損失的資產或過早的減記、貶值或轉換為負債。

近年來，由氣候變化和向低碳經濟轉型造成的擱淺資產問題在國際議程上顯著升級，並且對電業的利害關係人產生了一定的影響，例如金融機構對含碳標的物的投資風險、氣候與社會行為對電業的投資決策、監管機構對於公正過渡轉型的法規與財務行為、上下游廠商的碳排放承諾等，本研究認為，電業經營者及電業主管機關皆應提早重視此一現象，並預作防範。

(二)擱淺資產類別

根據研究，電業因為能源轉型而可能產生擱淺資產的類別有三種，分別是

1.自然資產(例如：煤、油、氣等化石燃料的礦區或儲存)

2.實體資產：基礎設施(例如機組、設備、變電所甚至輸電線路)

3.金融資產：可投資產生財務槓桿的金融商品(例如：貨幣、債券、期貨等)。

本研究認為，傳統電業的資產龐大，電力是民生安定及國土安全的重要推手，不同的資產類型勢必有不同的擱淺樣態，如能針對資產擱淺的成因或是結果進行了解，當有助於針對可能的變化研析解決方案。

(三)與環境相關的擱淺資產

雖然資產擱淺是任何市場經濟的自然特徵，但由於可能發生擱淺的規模，在與環境因素相關時更為重要。氣候變化導致的物理環境變化以及社會對這些變化的反應，可能會在短時間內使整個地區和全球行業陷入困境，從而對投資策略和負債產生直接和間接的影響。與環境相關的風險則包括物理的(例如：環境變化、資源格局)及社會的(例如)：政府法規、技術變革、社會規範和消費者行為變化、訴訟和法律解釋)。

(四)擱淺資產的風險來源

根據中國中央財經大學綠色金融國際研究院指出，導致電業資產擱淺的風險主要有技術風險、政策風險、市場風險、聲譽風

險和物理風險等五類[4]，說明如下：

(1)技術風險：主要由可再生能源生產成本降低造成。技術的提高降低了可再生能源的生產成本，使低碳資產更具融資優勢。

(2)政治風險：主要由立法框架的變化造成。當國家制定出更嚴格的溫室氣體排放量要求，將使相關產業的營運成本增加，也提升了營運限制。

(3)市場風險：主要是由原材料成本的增加和全球市場的不確定性所導致，必要時資產必須重新定價。

(4)聲譽風險：是消費者偏好的轉變和行業形象的受損所引起。該風險會導致商品和服務的需求下降，進而減少項目的固有資產價值。

(5)物理風險：由氣候變化造成。旋風、洪水等極端天氣或全球氣候模式改變（降水、供水等）等氣候變化帶來的問題導致了資產壽命的縮減，尤其是基礎設施資產。

本研究認為相關的風險也正是目前台灣電業所面臨的，值得針對不同的風險加以分析，以利提早因應。

三、研究方法與研究架構

由於本研究認為，能源轉型所產生的環境變化會對電業經營中的資產管理產生無可避免的風險，而情境分析能夠透過建構未來可能發生的各種狀況，討論其中的不確定性與影響層面，並進而擬定應變方案。因此希望透過對不同情境的設立，連結能源轉型的目的，思考未來電業所可能遇到與策略有關的各種情況，找出其中的關鍵影響因素、評估其可能性與對電業造成的衝擊，以及提出因應策略。

(一)研究方法：

由於不同的能源轉型方向與速度，對電業擱淺資產的產生與影響不同，因此對於可能的轉型力道，採用情境分析的方式，利用三種不同的情境，對台灣能源轉型與電業擱淺資產進行模擬探討。再依循可能因能源轉型而產生的電業資產類型為橫軸，不同類型的擱淺資產風險為縱軸，透過對不同情境的差異分析，找出重要性、關聯性及可預期性，並進而提供可能的因應建議。

(二)研究架構

首先界定能源轉型會影響電業資產的部分，根據不同的資產特性列出可能受到的衝擊大小；再依據能源轉型的不同情境，將不同類型的資產帶入，評估是否有擱淺的風險，及可能遭遇到的風險型態；最後依照不同的風險型態分析可能的因應措施。

(三)研究限制

本研究所討論的電業擱淺資產，係以台灣綜合電業之電力資產為研究對象。由於是以情境分析進行，相關情境內容與實際狀況或有出入，都將視為是轉型能源政策規劃中可能發生的狀況，並適度予以忽略，而僅聚焦於當資產出現可能擱淺的風險時，電業所能採取之事前預防措施及事後補救處理。

四、台灣電業擱淺資產情境分析

本研究引用 Candelaria Bergero 等人(2021)對台灣能源的研究內容，並採用其利用工業技術研究院(ITRI)開發的一種名為"台灣 2050 計算器"的開放來源的能源模型，界定的三種情境為架構。本研究另考慮台灣的發電現況與未來預期，略作修正及調整後，分成「政策方向」、「電力目標」及「資產特色」三項條件，設立情境背景後進行風險影響分析。

除了情境設定外，對於電業可能擱淺的不同類型資產範圍與內容，則說明如下：

1. 自然資產：

台灣缺乏自有化石燃料資源，因此不大可能出現所謂的"不可燃碳"的碳資產擱淺風險；但也由於國土大小及地理的限制，短時間不易大量開發再生能源。在有限制的天然條件下，煤、石油、天然氣等燃料多向國際採買也參與投資探勘及開採。核能則在既定的電廠壽命條件下變動不大。值得關注的是，再生能源的開發能夠做到甚麼程度？對於其他燃料的替代性能夠提高到多少？對於自然資產是否能承擔轉型風險等，是該項排碳資產是否會成為擱淺資產的關鍵因素。

2. 實體資產：

電業的實體資產龐大，包括電廠、機組、輸配電鐵塔、變電所及線路等。與能源轉型相關的資本資產，則是在考慮再生能源加入

發電行列後的資產價值差異，包括採用化石燃料的電廠、機組，以及配合再生能源發電所需的分散電源線及併網設備，是否會造成集中式輸電網線的被淘汰與被替代。

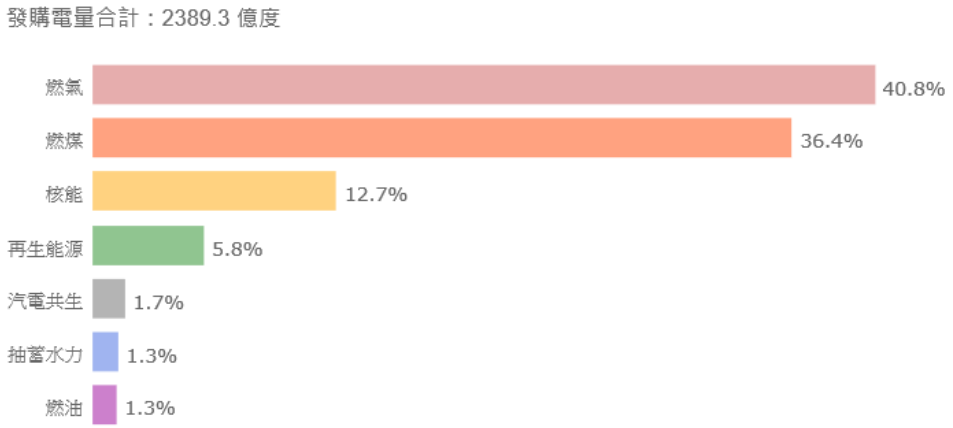
3. 金融資產：

根據企業會計準則定義之金融資產包括：現金、股票、短期票券、政府債券、受益憑證、公司債、衍生性金融商品等。由於氣候變化可能造成傳統化石能源相關資產的系統性貶損，當電業因發電所需，透過國際債券、期貨而購買含碳燃料，或投資採礦業、化石燃料礦區或探勘業等，甚或進行財務槓桿操作，當環境改變，債券、期貨等可能貶值，投資也可能血本無歸。另一方面，無法順應國際要求的標準進行減排，也將影響電業之信用評等，進而影響電業融資及信貸能力。

(一)情境一：基準情境(REF)

1. 政策方向：減煤、增氣、展綠、非核，無特別碳排放限制。
2. 電力目標：整體能源轉型路徑以逐步增加再生能源與燃氣發電，降低燃煤比例為發展方向，預期至 2050 年低度再生能源電網的發電結構配比為；化石燃料 82%，再生能源 15%，核能 3%。
3. 資產特色：發電仍然大比例維持在煤、天然氣等化石燃料，若以 2020 年(火力 82.2%，再生能源 5.8%，核能 12.7%，抽蓄 1.3%)對照，最明顯的應該是以再生能源來取代核能。

2020 年發購電量各能源別占比



資料來源：台灣電力公司官網

4. 不同風險對電業資產的影響：

資產 風險	自然	實體	金融
技術： 影響再生能源生產成本程度	此情境之下，再生能源技術並未被要求要迅速提升，因此技術所引起的成本競爭性不高，不至於對化石燃料產生太大的威脅，持有排碳自然資產不易產生擱淺。(一)	此情境之下，因再生能源技術的開發不急迫，實體資本資產的汰換率無須被迫提早，不至於產生擱淺。(一)	此情境之下，雖然再生能源技術持續開發，但尚未成熟。仍然需要利用長約(債券、期貨)或短約、現貨方式取得化石燃料，不至於產生擱淺。(一)
政治： 相關法令影響營運成本的程度	此情境之下，溫管法可能限制溫室氣排放總量加嚴，導致改變燃料選擇而提高發電成本，但不至於產生原購入的化石燃料擱淺。(一)	此情境之下，如溫管法之類的法規可能提高發電設備的減排要求，以至於限縮發電的燃料選擇，導致老舊機組須提前停機，成為擱淺資產。	此情境之下，如果化石資產持有企業能遵循 TCFD 的建議，對於含碳資產在財務報表上充分揭露，將可以降低電業投資具擱淺資產風險的衍生性金融商品，而不易產生擱淺。(一)
市場： 全球的不確定性影響原料成本及資產價值的程度	此情境之下，由於仍需一定程度的依賴化石燃料，因此即使國際不確定性因素提高，對於電業所持有的自然資產只有可能增加成本，而不至於造成擱淺。(一)	此情境之下，如採用的化石燃料成本引受到全球影響程度過高，將可能在可調配與替代的情況下，讓低效率的老舊機組成為擱淺資產。	此情境之下，當所持有的金融資產與全球化石燃料關聯性愈高，則當國際燃料資產受到影響的程度愈大，則愈可能產生擱淺資產。
聲譽：	此情境之下，若	此情境之下，	此情境之下，

資產 風險	自然	實體	金融
消費者偏好影響電業形象使需求下降的程度	是來自於對電力需求的減少，因消費者無法決定使用的電力來自何種燃料，電業也未長期持有大量自然資產，應不至於造成擱淺。(－)	消費者的偏好確實有可能影響機組的運轉，尤其是透過政治力介入，將使擱淺資產發生的風險增加，並可能因此面臨供需不平衡的狀態。	可能影響電業的信用評等及融資、信貸能力，進而使得金融資產取得變得困難，但不至於會造成金融資產擱淺。(－)
物理： 因氣候變化影響資產壽命的程度	此情境之下，對於缺乏擁有自然資產的電業而言，可能會發生不易取得自然吃產的風險，但不至於產生擱淺資產。(－)	此情境之下，當氣候異常導致電力設施或設備喪失功能，無法繼續運作，將會提早報廢產生損失或損害。	此情境之下，由於氣候變化對實體資產的威脅是全球的，如果持有相當比例的綠色債券，或許對於減緩氣候威脅有間接的幫助，並進而降低擱淺資產的發生。(－)

註：負號(－)代表發生擱淺資產的風險低

(二)情境二：以台灣所提的國家自主貢獻（NDC）為背景

1. 政策方向：碳排放受限制。2030 年溫室氣體排放量為 BAU 減量 50%，2050 年排放量比 2005 年低 50%，2100 年排碳量線性遞減至淨零，2090 年零排碳。
2. 電力目標：煤跟核能退場，天然氣減量，中度利用再生能源。預期至 2050 年中度再生能源電網的發電結構配比為；化石燃料 42%，再生能源 58%，核能 0%。
3. 資產特色：發電的能源占比再生能源已經超過化石燃料，核能則歸零。若以 2020 年(火力 82.2%，再生能源 5.8%，核能 12.7%，抽蓄 1.3%)對照，則化石燃料發電約只剩原占

比的一半，除了自然資產的採購會大幅減少外，電網也勢必從集中式走向分散式，電力設施與設備的韌性(質)與落點(量)均增加，也提高了資產維護的複雜度與挑戰性。

4. 不同風險對電業資產的影響：

資產風險	自然	實體	金融
技術： 影響再生能源生產成本程度	此情境之下，由於化石燃料的用量趨緩，向國際採購將趨於保守，如因再生能源生產成本大幅下降，市場煤與天然氣等可能供過於求而跌價，如持有自然資產將可能擱淺。	此情境之下，再生能源蓬勃發展需要大量實體資產投入，基礎建設將是再生能源是否順利超越化石燃料的關鍵。原集中式資產需與分散式資產同時使用，不易產生擱淺。(一)	此情境之下，金融資產需要做適度轉型，排碳類金融商品配合降低比例，並增加綠能產業持有比例，並發展綠色債券加入市場，不易產生擱淺。(一)
政治： 相關法令影響營運成本的程度	此情境之下，由於法令大幅調高再生能源佔比，原購得的含碳資產可於十程內消耗完畢，則不至於產生擱淺。(一)	此情境之下，再生能源的建設速度加快，溫室氣體排放控管加嚴，如果實體資產無法儘速提升效率與降低排放以符合法規，將面臨擱淺。	此情境之下，由於比重已由化石燃料傾斜至綠能，金融資產的比重逐步搭配再生能源相關債券、期貨甚至購買碳權，不至於產生擱淺。(一)
市場： 全球的不確定性影響原料成本及資產價值的程度	此情境之下，對於無持有大量化石燃料資產的企業，加上需求減少，不至於發生資產擱淺。(一)	此情境之下，若國際化石燃料不易購得，加上再生能源所需分散式基礎設施已大幅完成建置，集中式基礎設施	此情境之下，原持有相關含碳金融資產有可能因為全球性市場影響而成為擱淺。

資產風險	自然	實體	金融
		將容易面臨擱淺。	
聲譽： 消費者偏好影響電業形象使需求下降的程度	此情境之下，聲譽受消費者偏好的影響程度低，對於無持有化石燃料資產的企業，不至於發生資產擱淺。(－)	此情境之下，再生能源超越化石燃料，消費者縱使用電需求下降，但再生能源仍須一定程度連接集中式基礎設施，不至於產生擱淺資產。(－)	此情境之下，供電寡占，消費者對化石燃料電力需求減少，應仍須提高再生能源電力需求，對金融資產不至於產生擱淺。(－)
物理： 因氣候變化影響資產壽命的程度	此情境之下，對於無持有化石燃料資產的企業，不至於直接對自然資產造成擱淺。(－)	此情境之下，異常氣候對於資產的威脅性增加，無論分散式或集中式電力設施基礎建設均可能造成擱淺。影響層面上，集中式可能甚於分散式。	此情境之下，氣候異常影響上下游產業甚或全球實體資產，將間接影響持有的金融資產，使其成為擱淺的風險提高。

註：負號(－)代表發生擱淺資產的風險低

(三)情境三：界定升溫不超過 1.5 度（1.5 ℃）的背景

1. 政策方向：考量《巴黎協定》對溫升的要求，以不超過攝氏 1.5 度，在 2050 年達到淨零碳排，並延續到 2100 年。
2. 電力目標：除了煤與核能退場，天然氣減量外，低成本的再生能源技術被高度使用。預期至 2050 年高度再生能源電網的發電結構配比為；化石燃料 10%，再生能源 90%，核能 0%。
3. 資產特色：發電的能源占比以再生能源為主，化石燃料剩下一成，核能歸零。若以 2020 年(火力 82.2%，再生能源

5.8%，核能 12.7%，抽蓄 1.3%)對照，則火力機組大幅度退場，除了自然資產的採購不再容易受市場影響外，再生能源的遍地開花，也代表了再生能源技術有一定幅度的跳躍式成長，以及消費者的用電習慣應該有大幅度的變動，才能夠搭配再生能源的晝夜性與季節性。

4. 不同風險對電業資產的影響：

資產 風險	自然	實體	金融
技術： 影響再生能源生產成本程度	此情境之下，再生能源的高佔比，代表成本已大幅下降。對於無持有化石燃料資產者不至於發生資產擱淺。(一)	此情境之下，再生能源技術提高導致成本大幅下滑，化石燃料相關基礎建設與設施如無法及時轉型，勢必面臨擱淺。	此情境之下，非屬再生能源相關產業之金融資產將面臨擱淺。
政治： 相關法令影響營運成本的程度	此情境之下，對於無持有化石燃料資產的企業將不至於受法令影響而產生自然資產擱淺。(一)	此情境之下，由於再生能源發電幾乎涵蓋整體用電，相關實體資產將大幅擱淺。	此情境之下，持有的金融資產將多以再生能源為考量，並將大幅採用碳權以滿足法令要求，對於具彈性轉換的金融工具而言不至於產生擱淺。(一)
市場： 全球的不確定性影響原料成本及資產價值的程度	此情境之下，化石燃料需求占比極低，全球影響力低，不至於產生擱淺。(一)	此情境之下，再生能源佔比高、基礎設施汰換快、燃料不來自於市場，會受到國際市場影響的資產少，不至於產生擱淺。(一)	此情境之下，金融資產將受到與再生能源相關產業的影響而改變資產價值，是否擱淺則視持有的部位而定。
聲譽： 消費者偏好影	此情境之下，無持有化石燃料的自然資產，縱	此情境之下，因電網中再生	此情境之下，所持有的金融資產傾向

資產 風險	自然	實體	金融
響電業形象使需求下降的程度	使消費者因偏好而降低電力需求，將不至於造成資產擱淺。(－)	能源的高占比，顯示發電端配合需求端的彈性增加，惟為維持系統穩定與供需平衡，一旦需電量減少，實體資產將容易發生擱淺。	綠能相關金融商品，能夠在市場中進行買賣，將不至於受到需電量影響而成為擱淺。
物理： 因氣候變化影響資產壽命的程度	此情境之下，即使氣候影響化石燃料的開採及運用，然企業未持有相關自然資產，故無涉資產擱淺。(－)	此情境之下，再生能源基礎設施密集，一旦發生無再生能源可用的情況(例如天災、旱澇、無風、無陽光等)則將使資產擱淺的風險大幅提升。	此情境之下，氣候變化影響的資產壽命如果發生在持有的債券、碳權或其他衍生性金融商品項目中，則將可能因此產生擱淺。

註：負號(－)代表發生擱淺資產的風險低

資料來源：本研究分析整理

(四)小結

擱淺資產一旦發生，勢必會對於企業的營運與財務健全造成衝擊，而電業肩負著國家安全與經濟發展的重責大任，更不可不審慎以對。然而不同的情境下，對於不同的電業資產，會產生不同類別的影響，並進而造成不同程度的資產擱淺風險。大抵而言，當情境變動的幅度越小，能夠因應的時間越長，則自然會造成資產擱淺的風險就相對較低；如果因為自然的物理環境突然大幅變化，或是人為社會或政策的突然轉向，則將使得資產擱淺的風險相對提高。因此，如希望降低發生擱淺資產的風險，需要能夠減少環境的變動，或是拉長回應環境變動的時間，才能夠對電業的財務穩定發生較佳的作用。

五、結果與討論

本研究針對從 2020 年進展到 2050 年所可能面臨的電力使用狀況，配合溫室氣體排放減量的要求，模擬出三種不同的電力能源結構情境；並針對電業的三大資產項目：自然資產(燃料)、實體資產(設施)及金融資產(財務)，進行五種可能造成資產擱淺風險的因素分析，涉及層面包括技術、政治、市場、聲譽及物理。不同的情境，除了不同層面的思考，所需要因應風險的力道也不同，透過定性的描述，希望能幫助電業了解未來可能面臨的處境，也間接提供給政策制定者在制定政策的目標與行動綱領時，針對不同的風險因子，可以考慮及應該考量的相關可能影響，藉以減少或降低未來可能造成的損失或危害。

整體而言，由於台灣缺乏自有化石燃料，發電所需多仰賴進口，能源結構比例高達約 98%；相較之下，再生能源因受地理環境與經緯度影響，使得四面環海、日照充足、季節風力強勁等均成為發展綠能的優勢。上述三種情境在不同的能源轉型要求下，突顯出當因為化石燃料需求下降，再生能源佔比提高時，台灣電業自然資產(指煤、石油、天然氣等)發生擱淺的風險相對低，然而實體資產將受到不同風險層面的影響，將容易產生擱淺風險，至於金融資產係屬財務槓桿的一環，如果能夠配合國際能源情勢與國內供需變化，提早規劃轉型部位並機動調整持有類別的多元組合，則發生擱淺的風險也會相對較低。

六、結論與建議

(一)結論：

目前全球許多能源使用大國及能源業者都已經發現化石燃料對氣候變化所造成的影響，並且開始尋求轉型，台灣也在做同樣的努力。在能源轉型政策的引導下，低碳甚至無碳時代的來臨就在不遠的未來，電業的資產管理，也能夠配合不同的風險層面進行調整甚至提前布局，對於產業發展及民生安定，也必定能起防微杜漸、見微知著及防弊興利的作用。

電業能夠利用 30 年時程配合政策進行安全資產的準備，一方面對於已經存在的資產尋求不至於擱淺的解案；另一方面也要避免再增加可能會在未來擱淺的資產。畢竟在過去，我們總是擔心

化石燃料在無法尋求突破性能源使用技術提升之前就消耗殆盡，擔心化石燃料不夠用；今後我們則應該要擔心的是化石燃料用太多，造成對環境、對氣候的巨大影響，及對能源使用無法恢復與彌補的傷害。從產業鏈的觀點，從根本的發電端燃料進行調整，再視需要進行輸配電設備及線路的更新及強化，最後則還是需要回到需求端，讓民眾的能源使用觀念與習慣與電力供給型態產生共鳴，步調一致。

(二)建議：

為了能夠在不同的情境下，針對不同的資產特性進行有效的風險規避，本研究提供以下層面的建議：

1.在技術方面：為了能夠有效減緩目前資產所造成的溫室氣體排放，需要精進固碳技術，一方面提升目前火力機組的固碳能力，強化碳捕集、利用與封存(CCS 及 CCUS)的能力，短期內滿足法規要求及以低成本與再生能源發電競爭。另一方面引進氨、氫能，導入混燒技術；也同時開發負碳排技術，在再生能源尚未成熟到足以大幅降低成本之前，先一步顯著降低排碳係數，進行碳中和，避免成為擱淺資產。長期更可考慮利用再生能源多餘電力生產綠氫，提供成為工業原料。

2.在政治方面：能源管理法、再生能源發展條例、溫室氣體減量及管理法及能源政策等，如果能夠有效地在能源結構轉型階段，配合電業相關資產轉換與燃料替代所需時程，包括導入離岸風電、太陽光電、氫能，甚至地熱、波浪能、負碳排等，將可大幅降低擱淺資產產生的可能性。

3.在市場方面：國際市場對於化石燃料的生產與銷售，很大程度受到供給大國與使用大戶所左右，不僅價格與數量受到人為掌控，以目前的發展趨勢，也已經受到氣候異常的影響，不再是想開採多少就有多少，要使用多少就會有多少了。當這樣的風險增加，如果不能儘速轉型脫離化石燃料的侷限，以台灣而言，將使得實體資產的價值受到相當的挑戰。

4.在聲譽方面：雖然台灣的電業目前還是維持綜合電業的型態，由一家寡占，但未來再生能源從發電端加入，加上國際情勢已朝向對綠電憑證及碳權交易的需求，灰電需求勢必下降。縱使電業寡占，民眾購電選擇少，綜合電業的市占率流失可能不高，

然而在考慮綠電需求的成長，及為了維持電業的財務穩健，發展再生能源及相關交易機制，將有助於避免金融資產的擱淺。

5. 在物理方面：氣候變化對電業實體資產造成的威脅，除了發電設施外也同時影響輸電網絡的設備，要能夠降低擱淺風險，除了要強化電網脫碳，確保再生能源極大化併網之外，也可以透過數位化管理，進行智慧用電調度，提升電網資產的韌性；同時考慮再生能源間歇性特質對供電的影響，開發及提升儲能系統效率，並導入抽蓄變頻水力機組，甚至引進製氫技術以氫儲能，均能夠因為及早規劃，及時引進而降低實體資產擱淺的風險。

(三)後續研究：

能源轉型鼓勵產業在能源的開發與使用上，能夠為減緩氣候變遷而努力，讓能源的選擇從高碳走向低碳，甚至是無碳；但轉型無法一蹴可幾，需要有目標、有系統地按部就班，才能指日可待。若從風險管理的角度來看，即使同樣的情境，不同時期在不同的對象身上也將產生不同的風險影響。因為每個國家能源發展關切的重點不同，勢必會有不同的風險尺度，最後產生不同的風險結果。本研究只是初步地分析出不同情境的可能風險層面，如果有實務上的需要，也建議可以針對不同的風險因素及資產種類，給予不同的權重，並進而導引出可能的資產擱淺風險程度，並了解在不同情境之下可能產生的資產擱淺損失。除了可以比較不同的電業表現外，也可以回饋給政策規畫當局，了解電業在不同情境的不同權重下，可能會遭受的資產風暴，並進而防患於未然。

七、參考文獻

1. IRENA: “Stranded assets and renewables: how the energy transition affects the value of energy reserves, buildings and capital stock”, International Renewable Energy Agency(IRENA), Abu Dhabi, www.irena.org/remap, 2017
2. Caldecott, B., N. Howarth, and P. McSharry “Stranded Assets in Agriculture: Protecting Value from Environment-Related Risks.” Smith School of Enterprise and the Environment, University of Oxford, 2013.

3. William Thomson, “Silent Stranded Assets: The Real Assets That Will Blow a Hole In Your Portfolio”, MASSIFCAPITAL website, July 2, 2020
4. Rabi Nawaz, Mathias Lund Larsen, 能源金融—關於中國海外能源投資組合擱淺資產風險評估及降低相關風險的建議，中央財經大學綠色金融國際研究院，http://iigf.cufe.edu.cn/info/1012/1380.htm
5. C. Bergero, M. Binsted, C.-W. Chao et al, “An integrated assessment of a low coal low nuclear future energy system for Taiwan”, Energy and Climate Change, Energy and Climate Change 2 (2021) 100022
6. Ben Caldecott, “Introduction to special issue: stranded assets and the environment”, Journal of Sustainable Finance & Investment, 7:1, 1-13, 2017

八、參考資料

1. 中華民國（臺灣）「國家自定預期貢獻」(INDC)，行政院環境保護署，104 年 12 月。
2. 能源發展綱領，經濟部，106 年 4 月。

臺灣帷幕牆工程導入循環經濟策略之研究

錢秋萍*、邵文政**

摘　要

帷幕牆自誕生以來就一直面對能耗的問題，早期帷幕牆設計除了重視玻璃透光性能及大面積玻璃採光優越性外，還具有良好的耐候性能、輕量化、單元化等優點，作為外牆材料有其獨特優勢，近年辦公大樓及超高層建築大量興建，使用帷幕牆已經成為了現代高層建築所必須採用外牆模式的發展趨勢。全球性能源危機引起了全世界高度重視，建築界「可持續發展」新理念引出了生態建築概念，隨著全球性資源缺乏，強調以可持續性生產與消費模式，減少經濟活動對環境的壓力，臺灣帷幕牆工程導入循環經濟策略之研究應運而生。

本研究主要在設計階段就開始檢視帷幕牆材料完整生命週期，從安裝到工程完工，至使用年限到期、拆除後，尋找出材料可持續再利用的循環經濟效益，帷幕牆工程完工後，其建築生命週期即進入長達50-100年的使用期，以帷幕牆鋁擠型材料及連結件為研究範圍，將材料執行精細分項篩選，依工業循環、生物循環分類與其他工程廢棄物不會互相混合，建立帷幕牆工程循環評估系統，研究方法以模糊德爾菲法篩選評估系統所需考量評估因子，擬定「臺灣帷幕牆工程導入循環經濟策略」之研究評估指標，透過從事帷幕牆建築設計及現場工程師相關工作有經驗專業人士進行專家問卷調查評估項目之重要性。

臺灣帷幕牆工程導入循環經濟之研究目的在帷幕牆系統未來業主使用需求轉換時，能保有最大彈性，使建材能被再次組裝與利用，並保持建材的高價值，而非拆除後進入低價值的資源回收系統中，除了設計節能帷幕牆外，強化可再生與再使用循環建材比率，讓帷幕牆材料資源達到循環製造、最佳化使用、價值回復這三項目標，透過維修、再使用、翻新與再製造等方式讓帷幕牆工程使用壽命延長，創造更多的價值甚至提升回收後材料性能。

【關鍵詞】帷幕牆、循環經濟、再生綠建材

---

*國立臺北科技大學建築系建築與都市設計在職碩士班 研究生

**國立臺北科技大學建築系建築與都市設計研究所 副教授

一、 緒論

(一)研究動機

依據建築技術規則所示，帷幕牆是：「構架構造建築物的外牆，除承載本身重量及其所受的地震、風力外，不再承載或傳導其它載重之牆壁」。一般提起帷幕牆，大多數人會聯想到玻璃帷幕牆，其實帷幕牆純粹是一種構造的形式，與使用材料沒有直接關係，所以它的材料可以是石材、鋁板、複層板，也可以是玻璃等建材，而各種不同的組合也帶給建築師在設計上更充分的創意空間，早在 150 年前帷幕牆就已在建築工程中使用，由於當時受到材料和加工機具的局限，達不到絕對水密性、氣密性、物理性能（熱輻射、結露）以及隔音、防火等要求。自 50 年代以來，由於建築材料及加工技術的迅速發展，各種類型的建築材料研製成功，玻璃用橡膠圈、隔音、防火材料的發明，迅速解決了建築法規上對帷幕牆規範要求，帷幕牆逐漸成為現代外牆建築設計趨勢。

據國際能源總署（IEA）顯示，房地產及建築產業消耗了全球約40%的能源，排放了所有溫室氣體的 30%，消耗原材料的 40%，人類為開採有限資源破壞天然環境造成了氣候變遷、海洋污染等問題，帷幕牆循環經濟技術重點放在建築外牆的材料使用性能上。除了設計節能帷幕牆外，也讓材料資源達到循環製造、最佳化使用、價值回復這三個目標，透過維修、再使用、翻新與再製造等方式讓帷幕牆使用壽命延長，創造更多的價值，循環經濟是一個資源可恢復亦可再生的經濟和產業系統，要做到材料循環經濟，就必須系統性地檢視帷幕牆完整的生命週期，從設計、使用、維修到拆除回收的各個階段，分析帷幕牆框架材料、連結件、帷幕窗橡膠圈等各種零件材料的物質循環、資源再利用，減少地球資源的耗用，並減少廢棄物產生。

(二)研究目的

本研究以文獻、期刊蒐集國內外循環經濟有關之帷幕牆建築工程發展現況、相關建築廢棄物之回收法規政策及其回收技術，並透過社會面、環境面、經濟面等三大面向探討國內帷幕牆工程導入循環經濟之發展趨勢，以提出未來帷幕牆工程廢棄物回收再利用材料循環率之評析，綜合以上所述，本研究主要探討以下四項：

1、探討臺灣帷幕牆工程系統和未來趨勢

2、研擬臺灣帷幕牆工程導入循環經濟評估指標與項目

3、透過實例驗證，提供臺灣帷幕牆工程導入循環經濟制度

4、提出臺灣帷幕牆工程導入循環經濟策略指標之建議與效益

二、文獻探討

循環經濟是一個資源可回復、可再生的經濟和產業系統。採行「製造-使用-循環」模式，讓任何產品、能源、水源，從進入循環圈開始，就形成系統性的迴圈，經由重新設計讓資源能在產業系統內循環再生，使經濟於持續發展過程中可達降低資源消耗、廢棄物處置，藉由減量（Reduce）、再使用（Reuse）、回收再利用（Recycle）原則，減少資源耗用並妥善運用及管理資源，用更少的資源，更少的汙染，達到零浪費、零廢棄目標，創造更高的價值。循環經濟並非只限於回收環保議題，不論是設計、生產，或是製造過程都可用系統化方式，盡量做到零廢棄的目標，基於保持產品和材料使用以及再生自然系統的原則，把廢棄物轉換為再生資源，讓廢棄物可以重新被應用，也能被賦予新的功能和意義。

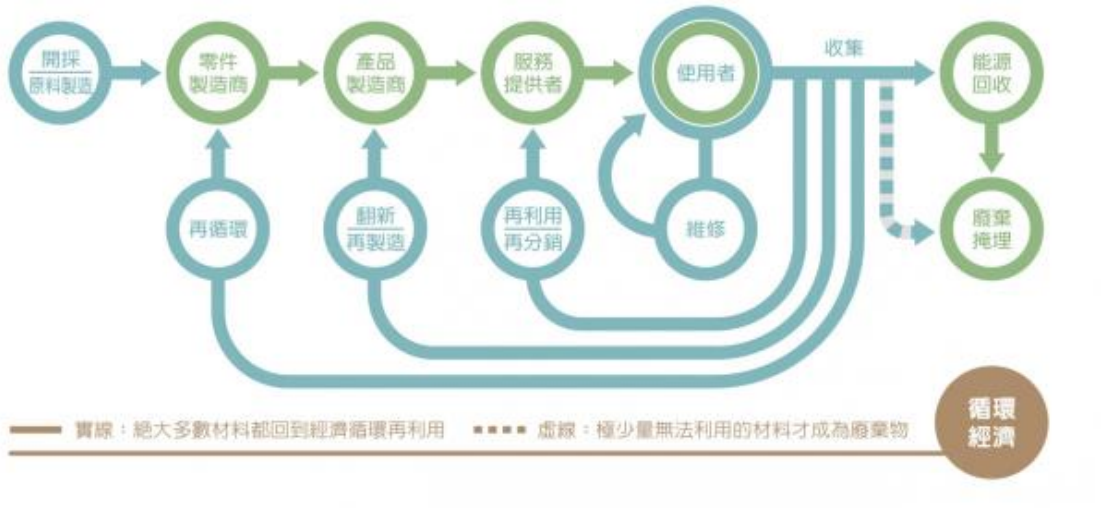


圖 1 循環經濟

（圖片資料來源：地球公民基金會 地球公民通訊第 28 期）

(一)循環經濟發展沿革

循環經濟概念的首次提出可追溯至 20 世紀 60 年代，1966 年美國經濟學家鮑爾丁(K.E.Boulding)發表的未來太空船地球經濟學(The Economics of the Coming Spaceship Earth)理論，「地球像是一艘封閉的太空船，在這裡面沒有無限的資源可供開採，也無法無止盡的被污染，人類必須學會即使在沒有能源的供給下，如何在這生態系統中進行物質的循環再利用。」意即人類需要探尋一個能夠將物質重複循環使用，避免廢棄物產生的生態系統，循環經濟的雛形出現後，接著，循環經濟的概念不斷出現，直到 2010 年英國艾倫·麥克阿瑟基金會（Ellen MacArthur Foundation）成立，提出循環經濟是一套效法大自然資源使用的循環生態系思維，在資源使用上做出更好的決策，確保資源可持續回復、循環再生，達成零浪費的設計(desing out waste)，創造更多更高價值。

(二)從線性經濟轉型到循環經濟

工業革命以前，人類文化以農業為核心，直到十八世紀工業革命，各行各業的生產者從自然環境開採原料、加工製成產品，消費者使用後丟棄，徹底改變了農業社會的循環型經濟，工業化生產下的線性經濟模式，產品在層層價值附加後，經過使用即走向價值下坡，從線性到循環，產品的生產到使用等不同生命週期階段，重新設計（Redesign）資源循環的經濟模式，這兩大循環，主要可分為工業循環及生物循環，艾倫·麥克阿瑟基金會(Ellen MacArthur Foundation，簡稱 EMF)與麥肯錫顧問公司所發表的循環經濟系統圖，生動地將工業及生物循環，像蝴蝶一般表現(圖 2)，左邊翅膀的生物循環，表達生質原料經過生化原料萃取、沼氣、堆肥等程序後，可安全回到自然界。右邊翅膀則是工業循環，其化合物、合金等科技和人造物質，透過再使用、再製造再回收等程序，以高價值的方式保留在人造系統中，不隨意散落到大自然裡。透過線性與循環經濟的情境可看出，在循環經濟裡，資源透過再使用、再製造、再回收等工業技術，或是生物循環裡的重複使用，堆肥、分散萃取、細菌發酵等方式，在系統內得以不停循環。這樣的迴圈循環有賴系統裡新增加的角色，把本來只能是廢棄物的資源，轉變為可再運用的狀態。

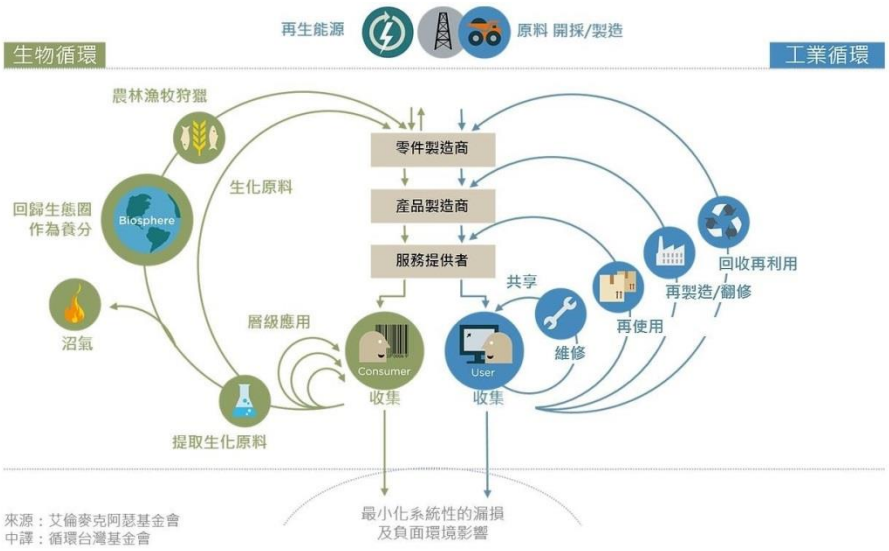


圖 2 循環經濟思維模式裡，生生不息的經濟體系可分為兩種循環-生物循環與工業循環

（圖片來源：艾倫・麥克阿瑟基金會 翻譯：資源循環台灣基金會）

(三)國內循環經濟相關法規

目前我國推動管理資源循環材料處置與再利用，主要依「廢棄物清理法」與「資源回收再利用法」為主。除此之外，環保署依總統105年5月20日就職政見：「對各種污染的控制，嚴格把關，更要讓臺灣走向循環經濟的時代，把廢棄物轉換為再生資源，對於能源的選擇，以永續的觀念去逐步調整」，因此環保署以循環經濟政策思維為主軸，於107年核定「107至109年資源回收再利用推動計畫」，由生產、消費、廢棄物管理及二次料市場等四大面向訂定12項推動策略93項推動措施，並建立相關推動平台及智庫。

(四)國外循環經濟相關法規

聯合國將循環經濟概念編入永續發展目標，並要求各會員國採取方案以達成聯合國政策目標，目前全球各主要國家皆已研擬相關之法令，以實際行動建立循環經濟體系，彙整全球各國歐盟、荷蘭、英國、日本、中國及法國等推動循環經濟相關法規及措施(如表 1)，並分析其循環經濟相關法令內容。

表 1 全球各主要國家推動循環經濟之相關法規及措施

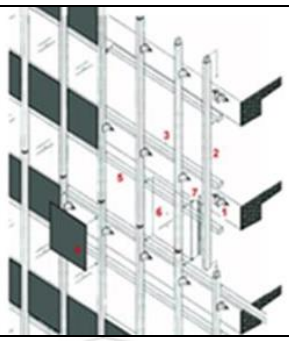
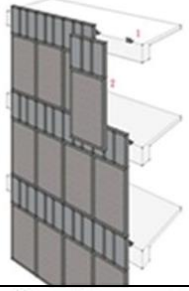
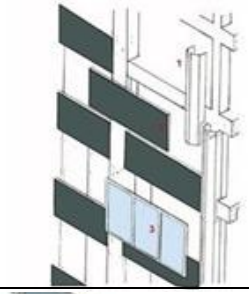
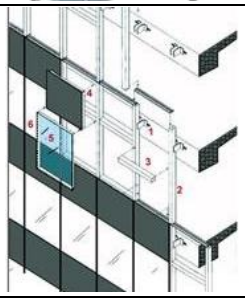
國家	政策法規	主責單位	主要目標	主要措施
歐盟	循環經濟行動計畫 循環經濟套案	歐盟執委會	2030 年一般家庭廢棄物回收率達 65%、包裝廢棄物回收 75% 2025 年禁止可回收物掩埋、2030 年消除掩埋場	修訂廢棄物法規 延長生產者責任 商業模式創新 會員國綠色公共採購 50%
荷蘭	循環經濟 2050	基礎建設暨環境部	2030 年減少 50%化石燃料和金屬等原物料之使用	法規改善 金融措施(如產品依再生原料課稅) 國際合作 各產業綠色協議
英國	資源革命： 創造未來計畫 (2015-2020 年)	環境、食物及鄉村事務部	2020 年一般家庭廢棄物回收率達 50%(歐盟要求)	政府出資提供誘因 各產業合作(技術指引、交流平台、宣導活動)
日本	循環型社會形成推進基本法、資源有效利用促進法	環境省 經產省	2020 年循環利用率達 17%，資源生產力達 46 萬日圓/噸	完備法規體系 提供經濟誘因 家電回收法落實城市礦山循環技術國際輸出
中國	循環經濟促進法、十三五規劃、循環發展引領行動	國務院 國家發展和改革委員會	2020 年主要資源產出率比 2015 年提高 15%再利用產業產值達 3 兆元 75%國家級園區 50%省級園區開展循環化改造	強化生產者責任 資金減免/提供補助 試點計畫 清潔生產
法國	綠色成長能源轉型法案	環境、能源暨海洋部	2020 年廢棄物減量 10%、廢棄物回收量增加 55%，2020 年回收 70%建築廢棄物材料等	公共採購獎勵 懲罰廠商對產品壽命減短之行為 延長生產者責任 電子廢棄物回收管理

資料來源：經濟部工業局簡報

(五)帷幕牆

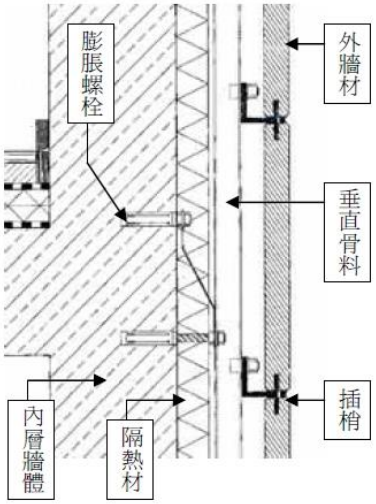
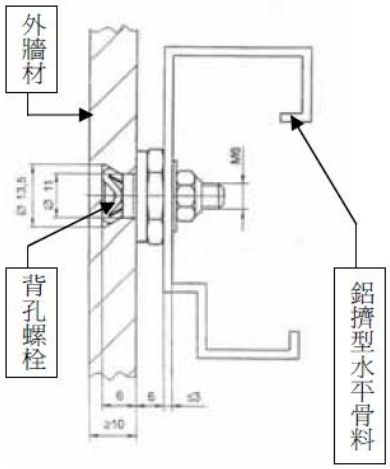
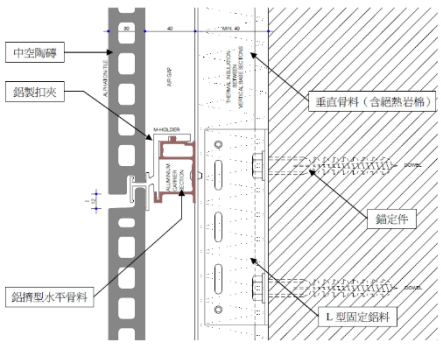
帷幕牆構件分為直橫料系統、格板系統、窗間梁帶橫式鋁包板系統、單元式系統、複合式系統。

表 2 帷幕牆系統類型

系統類型	圖　示	功　能
1. 直橫料系統 (Stick System)		1. 繫件、 2. 直料 、3. 橫料、 4. 窗間板、5. 橫料 、6. 視窗玻璃 ，7. 直料內壓條。直橫料系統所有材料零件由工廠加工後，運送到工地現場組裝，總成本較單元式帷幕牆便宜。
2. 格板系統 (Panel System)		1. 繫件 、2. 板片。 隔板系統在工廠沖壓或鑄造，運送到工地錨定吊裝而成，不需用鷹架
3. 窗間牆梁帶橫式鋁包板系統 (Column Cover And Spandrel System)		1. 柱包板單元 、2. 梁帶包板單元 、3. 可視窗單元。 窗間牆梁帶橫式鋁包板系統安裝程序簡單，大部分材料在工廠組裝好後，運送到工地安裝，此系統也是半單元的一種。
4. 單元式系統 (Unitized System)		1. 預埋件及繫件 、2. 單元。 單元式系統即各元件在工廠組成單元，運送到工地現場安裝，每個單元都有設計層間變位量及樓板活載重撓度，具有高氣密性能與水密性能，適合高層建築。
5. 複合式系統 (Unit And Mullion System)		1. 預埋件及繫件、2. 帷幕牆直料、3. 帷幕牆橫料、4. 梁帶外飾面板、5. 玻璃、6. 玻璃外牆。 複合式系統介於直橫料系統和單元化系統間的構法，安裝方式先訂

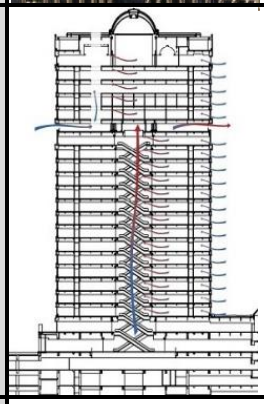
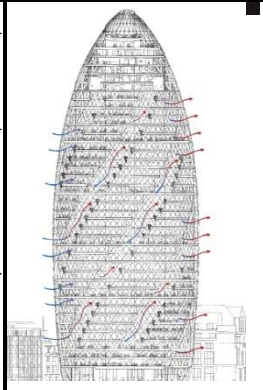
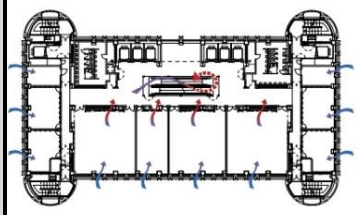
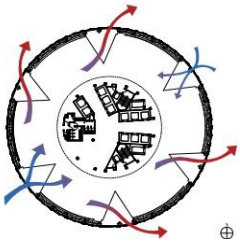
（資料來源：林志瑞，1991，本研究彙整）

表 3 外牆材料與固定件接合方式與種類

固定件接合方式	圖　示	工　法
1.石材外牆 插梢式		插梢式固定主要使用在乾式石材外牆施工上，適用於石材厚度在2.5~4cm間，結構牆面與石材距離約6~9cm，施工快速，價格比濕式石材高。
2.石材外牆 背孔螺栓式		背孔螺栓式材料有石材面板、植釘、鋁擠型背襯材、直橫料、填縫膠、繫件及預埋件等組成。石材面板在工廠裡面通過機械設備預加工背栓孔，石材運到施工現場後進行背栓安裝及繫件安裝，之後掛接到直橫料上一種石材帷幕牆。
3.陶板外牆 懸掛固定式		陶板安裝材料主要有橫料、直料（鍍鋅方鋼管或特製鋁合金）、繫件（鋁合金）、彈簧片及固定鐵件。懸掛固定式原理是利用表面陶板用螺栓將固定件鎖固在直料上來達到固定目的，此種安裝方式簡易快速。

（資料來源：顧宗沛，2004，本研究彙整）

表 4 國外雙層牆案例

	（一）明治大學自由塔，日本東京	（二）30聖瑪麗斧 英國倫敦
建築照片	完成年份：1998年 高　　度：119公尺 總 面 積：53,068㎡ 通風類型：混合模式 平均降水量：1529毫米 相對濕度：最熱72% 最冷50%	完成年份：2004年 高　　度：180公尺 總 面 積：64,470㎡ 通風類型：混合模式 平均降水量：611毫米 相對濕度：最熱66% 最冷81%
立剖面圖	 空氣通過窗戶開口進入建築物，再經過使用空間天花板上的回風管排入自動扶梯通風道的浮力效應將熱空氣通過建築物19-23層間中庭，由上部將熱空氣排出。	 辦公空間外側設有電動三角窗通風，雙層牆如立剖圖通過通風道，將排出的熱空氣穿過空腔排出，減少夏天太陽熱量吸收或冬天使熱通風道變暖。
平面圖	 新鮮空氣通過每個窗戶底部開口進入教室，並通過天花板上的回風管排到自動扶梯空間空隙，通過浮力效應充當垂直通風道，由通風道最上部排出空氣。	 圓形在空氣動力學彎曲形式極有利於自然通風策略，當風在建築物周圍流動時它會加速，從而增加了迎風面和背風面之間的風壓差，使迎風面和下風側可更有效引起交叉通風
通風策略	整體通風策略依賴風和浮力效應將空氣驅入，建築物周邊房間設有單層玻璃固定窗，通風口安裝固定窗單元內，單元內自動控制通風口可進入空氣，使用視聽設備進行演講過程中關閉百葉窗也可以吸入新鮮空氣，這些管道以自然通風和機械通風方式排出空氣，自動扶梯充當垂直通風道利用浮力效應從教室抽回回風並將其排出，此建築十八層將三個V形防風柵欄放置在離頂部不遠的位置，可保護風口不受風的影響，有助於引導新鮮空氣通過1-17層的外圍窗戶進入。	此建築配有建築物管理系統，該系統監視外部天氣情況並控制窗戶的運行。當外部溫度於5℃和28℃之間時，建築物自然通風保持室內溫度於20℃和24℃間，室內溫度升至24℃以上時，系統將打開窗戶同時啟動機械空調，如果室外溫度超過28℃，系統會關閉所有窗戶並為整個建築物進行全面空調。室外溫度低於12℃時，將通過主動提供暖氣來補充自然通風，室外溫度低於5℃，將進行機械加熱。室外相對濕度高於60%，風速高於10 m / s，也會觸發窗戶的關閉和人造系統的使用。

（資料來源：CTBUH ，2013，本研究彙整）

建築外牆單元的可拆卸式模式已於單元帷幕牆工法中被實現，帷幕牆透過模組化的分割、在工廠中生產組裝再運送至工地與建築主結構體搭接組裝。未來亦可透過拆卸方式，將帷幕牆一片一片的卸下尋求再使用。

由(圖 3)帷幕牆 3D 斷面示意圖可看出帷幕牆主要構件的鋁擠型(直)材料、玻璃、背板、鋁擠型蓋板壓條、鋁擠型(橫)材料、結構固定鐵件、連結件等材料，其中大約 80% 為可循環材料，而循環經濟主要動力來自於再生材料或可再使用材料的需求，當建築設計納入的需求比率越高，勢必帶動建築循環產業鏈的轉動與新技術開發，因此在設計階段提高帷幕牆材料在建造或維護更新時使用再生建材，始可觸動材料循環率。

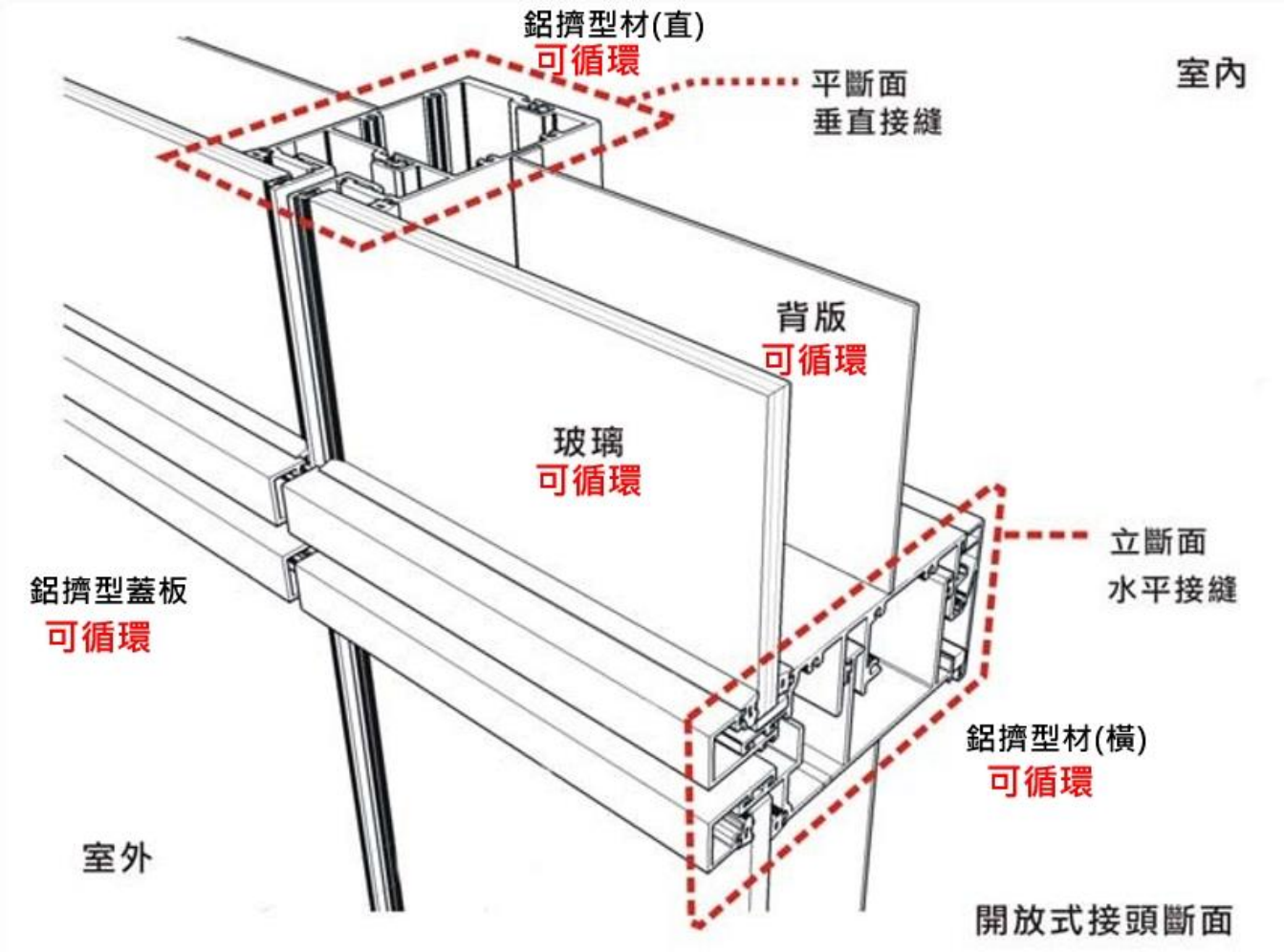


圖 3 帷幕牆可循環材料立體示意圖

三、研究方法與流程

本研究方法主要透過國內外文獻回顧，蒐集國內外循環經濟相關法規、建築產業在循環經濟上發展、國外建築實踐循環經濟之概況及帷幕牆產業發展現況、帷幕牆工程廢棄物回收處理流程、回收後再使用現況及循環率相關資料，經由整理與分析，瞭解帷幕牆導入循環經濟策略之研究及其應用方式彙整出評估項目，同時探討帷幕牆產業發展歷程，再透過模糊德爾菲法進行專家問卷，並將問卷分為產、官、學三面向作進一步的分析得到定量分析評估模式。

表 5　研究方法

研究方法	研究目的	研究內容
文獻分析法	國外循環經濟之定義與發展歷程	1.瞭解循環經濟之定義與發展沿革。 2.針對帷幕牆產業廢棄物回收再利用相關資料作為後續研究理論基礎。
	循環建築評估項目	3.探討循環經濟之相關法規及措施。 4.瞭解國內建築產業循環經濟之發展。
	帷幕牆導入循環經濟評估指標	5.探討現有再生綠建材評定項目及相關資料，作為後續擬定循環經濟基礎與依據。 6.探討現有帷幕牆材料回收再使用狀況。 7.探討帷幕牆回收處理流程。 8.研究運用創新商業發展模式應用於未來市場。
比較分析法	國內外相關循環經濟評估指標	9.彙整國外循環經濟指標於國內之適用性。 10.彙整國內相關再生材料與循環經濟材料之關聯性 11.瞭解國外現況發展、評估、應用等發展趨勢。
專家問卷法	循環經濟指標評估項目	12.透過從事帷幕牆建築設計師、現場工程師相關工作有經驗之專業人士進行專家問卷調查，確認本研究之層級架構、評估項目及影響因子。 13.本研究以「模糊德爾菲問卷」，得到評估系統所需考量之評估因子，擬定「臺灣帷幕牆導入循環經濟評估指標」。

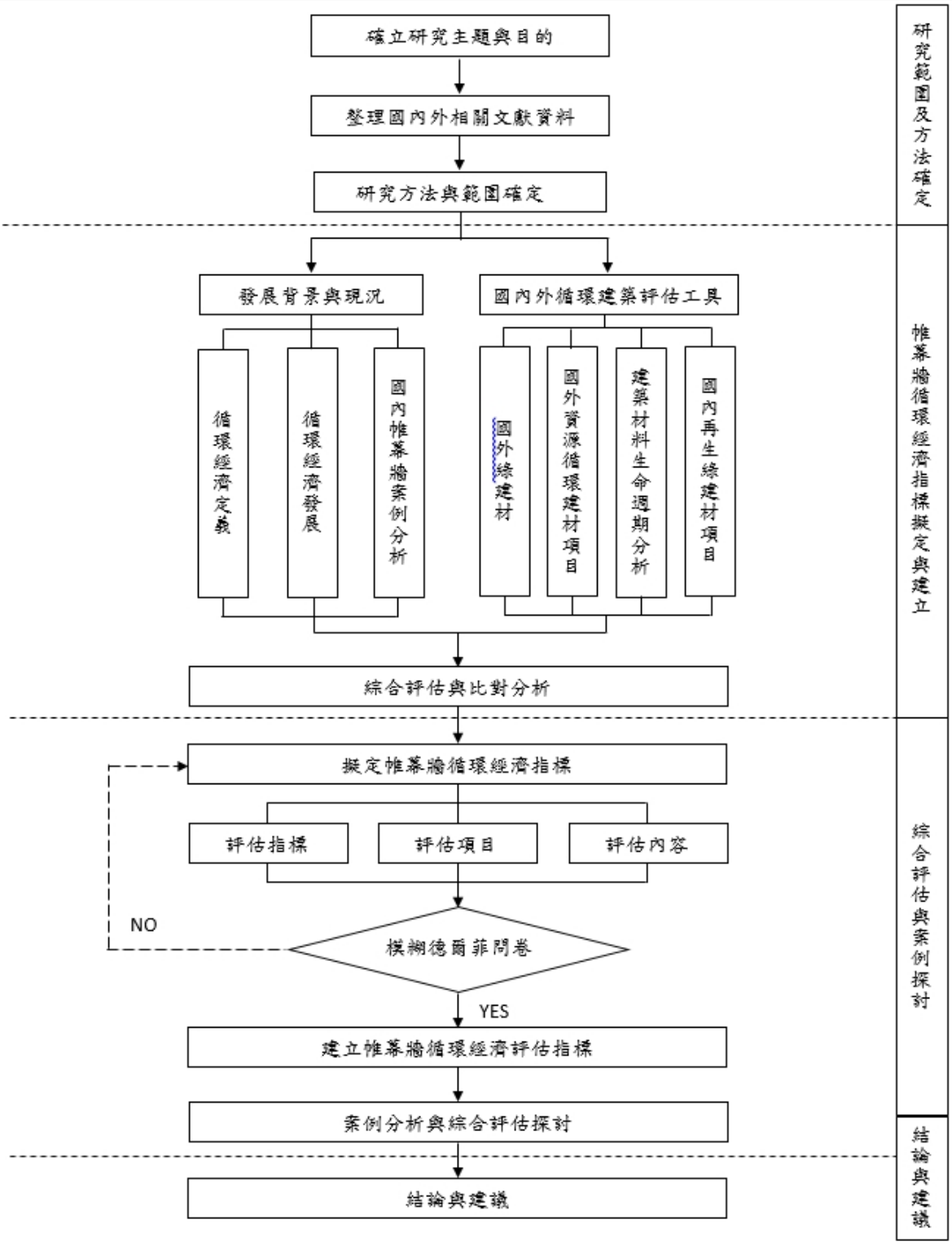

確立研究主題與目的
整理國內外相關文獻資料
研究方法與範圍確定
發展背景與現況
國內外循環建築評估工具
循環經濟定義
循環經濟發展
國內帷幕牆案例分析
國外綠建材
國外資源循環建材項目
建築材料生命週期分析
國內再生綠建材項目
綜合評估與比對分析
擬定帷幕牆循環經濟指標
評估指標
評估項目
評估內容
NO
模糊德爾菲問卷
YES
建立帷幕牆循環經濟評估指標
案例分析與綜合評估探討
結論與建議
研究範圍及方法確定
帷幕牆循環經濟指標擬定與建立
綜合評估與案例探討
結論與建議

圖 4 研究流程圖

四、研究結果

(一)擬定初步架構

綜合本研究整理初擬評估因子的內容是經由相關文獻資料分析歸納整理國內外帷幕牆建築設計，而擬出優先決策評估的指標架構(如圖 5 所示)，編擬模糊德爾菲專家問卷初稿，透過專家意見彙整與分析後，找出各層級準則重要程度，作為帷幕牆導入循環經濟策略研究。

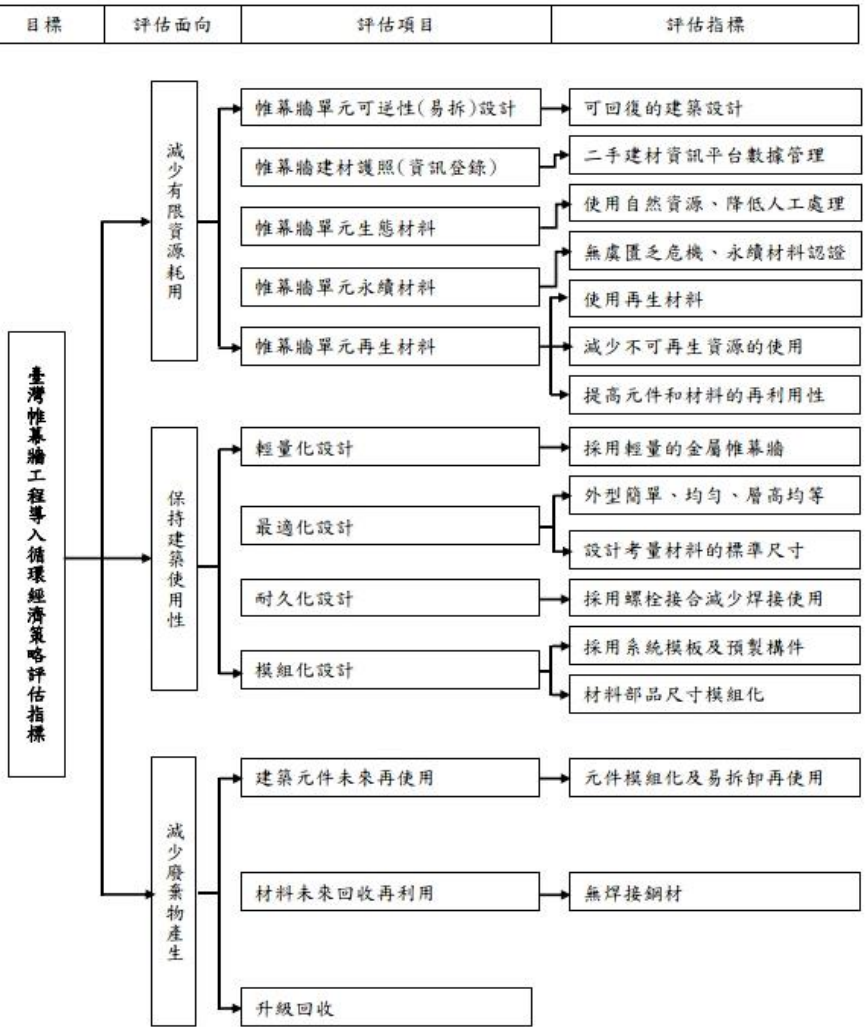


圖 5 臺灣帷幕牆工程導入循環經濟策略模糊德爾菲法評估指標架構

(二)模糊德爾菲法專家問卷調查分析

本階段以模糊德爾菲法（Fuzzy Delphi Method）進行專家問卷調查，依專家其專業素養主觀認定，評定方式採 0~10 個等級，評定分數愈高表示愈為重要，專家需於每項目中填寫重要程度範圍之最小值、

最佳值和最大值 3 個數字，且給予專家學者增列指標，以補足初期指標羅列之不足，針對修正後之評估內容，再次進行問卷調查，分析其評估內容之重要性，作為後續調合之基礎與依據。本階段共計發放 10 份問卷，調查方式採書面填答，共回收 10 份問卷，回收率為 100%。

專家問卷以模糊德爾菲法之檢定值與共識值作為指標篩選標準，一般而言檢定值以 0 為界定值，共識值若以 0~10 之範圍值而言，門檻值之設定多數採 6.00~7.00 唯一門檻之界定值(羅健文，、邱量忠，2015)，本研究採用 6.00 之門檻值進行篩選，經篩選後建造階段指標中「帷幕牆建材護照」與拆卸階段指標中「材料升級回收」兩項目，因檢定值為負值，表示其共識值無法收斂，故予以刪除，專家共識值中以模組化設計為最高 9.2 評分值，其他評估指標專家都給予 7 分以上的共識值，由模糊德爾菲問卷調查結果得知「臺灣帷幕牆工程導入循環經濟之策略」評估指標可行的方向。(如表 6)

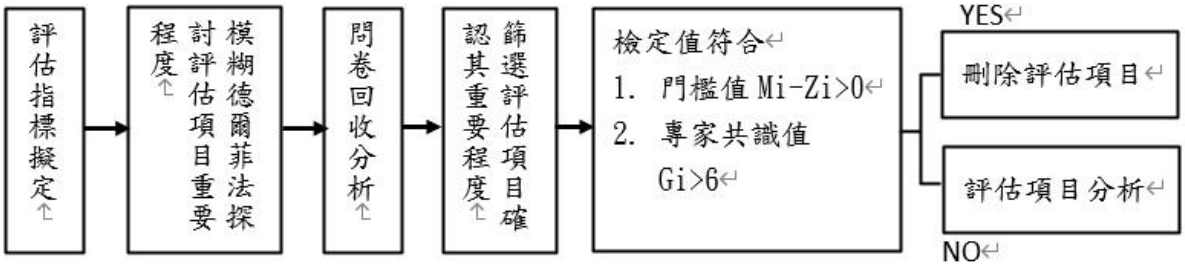


圖 6 模糊德爾菲問卷篩選流程圖

表 6　模糊德爾菲法三角模糊數無重疊計算專家共識值與評估指標檢定值

評估面相	評估項目	最保守值 C^i		最樂觀值 O^i		最佳值 a^i		幾何平均值		Mi	Zi	檢定值 Mi-Zi	專家共識值Gi
		min	max	min	max	min	max	C_M^i	O_M^i				
減少有限資源耗用	帷幕牆單元可逆性設計	4	8	7	10	7	10	6.0	9.1	3.1	1.0	+2.1	7.5
	帷幕牆建材護照	3	8	5	10	4	10	4.9	7.7	2.8	3.0	-0.2	6.4
	帷幕牆單元生態材料	5	10	8	10	6	10	6.4	8.8	2.4	2.0	+0.4	8.4
	帷幕牆單元永續材料	6	8	8	10	5	10	6.7	9.0	2.3	0.0	+2.3	8.0
	帷幕牆單元再生材料	6	8	8	10	6	10	7.1	9.4	2.3	0.0	+2.3	8.0
保持建築使用性	輕量化設計	3	8	6	10	6	10	5.5	8.3	2.8	2.0	+0.8	7.0
	最適化設計	3	8	6	10	6	10	5.8	8.6	2.8	2.0	+0.8	7.1
	耐久化設計	5	8	9	10	7	10	6.9	9.7	2.8	-1.0	+3.8	8.6
	模組化設計	5	10	9	10	7	10	7.3	9.7	2.4	1.0	+1.4	9.2
減少廢棄物產生	建築元件未來再使用	5	8	7	10	7	10	6.5	8.8	2.3	1.0	+1.3	7.5
	材料未來回收再利用	5	8	8	10	5	10	6.4	9.0	2.6	0.0	+2.6	8.0
	材料升級回收	5	10	7	10	5	10	6.5	8.8	2.3	3.0	-0.7	8.0

五、結論

(一)研究結論

「臺灣帷幕牆工程導入循環經濟策略之研究」是對國內帷幕牆產業發展的思維轉換、觀念轉移；循環經濟須經由消費文化、產業文化的變革得以達成。為讓資源持續循環、高度保存產品價值的系統，需要透過系統性的規劃，以創新的設計與商業模式為核心，在設計階段就開始檢視材料完整生命週期，從設計、安裝到工程完工至使用年限到期拆除後，尋找出材料可持續再利用的循環經濟效益，臺灣帷幕牆工程導入循環經濟策略主要考量帷幕牆在達生命週期終點時，其構造元件未來被再使用之必要性，因此在設計建造時需具有可逆性設計和耐久化的性能，使帷幕牆材料在循環回收階段具有最高價值，材料未來可回收再使用將是設計之重點，材料構件朝向可拆卸設計為主，取代以往焊接工法，建立模組化設計，材料零件經由模組化提高現場施作效率，並減少單元材料型式，增加材料循環率與品質，提升每一份資源的生產力，使用較少的原物料，創造更多的價值，另外也須政府配合以政策、法規、資金、平台、教育等面向多管齊下引導和鼓勵創新，如果企業端、消費者端和政府齊力同心，讓臺灣帷幕牆工程導入循環經濟策略走向未來產業發展方向。

2020 年是世界地球日的五十周年，新冠肺炎(COVID-19)疫情帶給人類許多恐慌與不確定性，當災難發生時，產業鏈原物料端面臨缺工、缺材料、環境因素而無法供應，製造端一旦面臨供應鏈中斷便得停工停產，造成工程延宕，大幅衝擊人們生活和經濟運作，而氣候變遷與所造成的極端氣候及天然災害是人類極大威脅，這些環境的負載，嚴重影響了我們的生存環境，綜上所述，經濟的發展不應該超過環境的承載力，只有盡量減少環境開發負荷和經濟發展中取得平衡，我們才有辦法和環境共生共榮。

(二)建議

帷幕牆為建築物之外衣，帷幕牆 80% 材料皆可回收再利用，臺灣帷幕牆工程導入循環經濟的發展重點在於商業模式轉型，且需要搭配政府法規要求，否則市場就無法創造出來相關的誘因，材料再生之推動需有獎勵誘因，否則以開發者角度而言，交付給客戶時仍希望是全新產品，此為行銷與消費心態。

六、參考文獻

1.黃育徵，循環經濟，台北市：天下雜誌股份有限公司，2017 年

2.黃育徵、陳惠琳，循環台灣，台北市：天下雜誌股份有限公司，2021 年

3.黃宗煌、丁執宇、朱宏毅、吳再益、李岱洲、李培群、李堅明、林妘襄、林萊悌、洪悅容、馬鴻文、張西龍、張俊飆、張家驥、張慶源、郭財吉、章詩函、陳文卿、陳必晟、陳良棟、陳潔儀、黃顯凱、曾明朗、楊明憲、楊晴雯、溫麗琪、鄒倫、廖宗聖、廖孟儀、談駿嵩、薛翔之、簡偵富，台灣循環經濟發展論，財團法人現代財經基金會，2020 年

4.呂良正，「營建循環經濟專刊」，財團法人臺灣營建研究院營建知訊，441 期，2019 年

5.陳文卿、陳靖原，綠建材循環經濟產業鏈結推廣計畫，內政部建築研究所業務委託計畫成果報告，2018 年

6.史文成,單元式金屬帷幕牆開放式接頭防水設計之研究,碩士論文，國立成功大學建築研究所，台南，2008 年

7.林志瑞，台灣地區鋁帷幕牆耐久性能之研究，碩士論文，國立成功大學建築研究所，台南，1991 年

8.賴姿羽，臺灣建築產業之循環經濟發展策略評估因子研究，碩士論文，國立台北科技大學建築與都市設計研究所，台北，2018 年

9.李崇德，建築廢棄物回收系統制度之研究，碩士論文，國立中央大學土木工程研究所，桃園，2002 年

10.CTBUH Technical Guide Natural Ventilation in High-Rise Office Buildings An output of the CTBUH Sustainability Working Group Antony Wood & Ruba Salib

11.Terri Meyer Boake, Associate Professor School of Architecture, University of Waterloo B.Arch. and M.Arch. Co-authors/Research Assistants:Understanding the Principles of the Double Façade System Terri Meyer Boake BES B.Arch M.Arch November 2003

12.Double-Skin Façade Modelling and Experimental Investigations of Thermal PerformanceKalyanova, O. (2008).

13. Double Skin Façades for Office Buildings Literature Review Harris Poirazis Division of Energy and Building Design Department

of Construction and Architecture Lund Institute of Technology Lund University, 2004 Report EBD-R--04/3

染整廠能源供應模式更替環境評估之個案研究

施孟芬*、林俊德**

摘　要

紡織業在台灣屬於工業部門八大能源密集產業之一，佔整體工業總能耗 3.9%。染整為紡織品加值之重要下游製程，但也高度耗用能源與水資源。本研究以尚益染整大園廠為目標分析案例，運用生命週期評估，以 IPCC 2013 GWP 100a、WDI (Berger et al., 2014)、CML-IA baseline 2000 三種衝擊評估方法，量化並分析該廠自 2017 年起逐漸淘汰以傳統化石燃料(煤及重油)作為定型機所需熱能之環境效益。該廠至 2020 年已全面使用大園工業區汽電共生廠配送之低壓與中壓蒸氣於所有染整製程(退漿、染色)上，以因應能源轉型及固定空氣污染排放源管制加嚴之趨勢，成為紡織業能源轉型及綠色清潔生產成功之案例。依四個年度(2017-2020)之盤查資料與產量，計算本廠能源供應模式改變過渡期相應之碳排放、水足跡以及對環境衝擊與資源耗損進行評估。結果顯示更替後的能供模式可讓全廠一年減少 19.2%的碳排及 33.2-100%的硫氧化物與 27.7-100%的氮氧化物，同時耗水量降低 20.9%，紡織污泥排放量也降低 67.4%。能源供應模式之變更亦減少該廠之 13.2%淡水生態毒性、19.0%海洋生態毒性、陸地生態毒性 17.0%、優養化 12.2%、臭氧層破壞 6.8%、人類毒性 14.4%、光化學煙霧 26.8%、酸沉降 33.9%、資源耗損 14.4%及全球暖化 19.2%十項特徵化環境衝擊。此外，水資源之耗用在今年缺水期亦為染整業面臨之緊急挑戰。本研究將個案改變能源供應之多重環境效益，具體量化減低碳排、空污、水資源各項友善環境指標，可提供使用鍋爐相關產業作為評估及規劃節能、減排與企業永續發展之參考，並可呈現出水資源與能源鏈結(Water-Energy Nexus)之關係。

【關鍵詞】染整廠、生命週期評估、碳排放、水足跡、水資源與能源鏈結

---

*逢甲大學環境工程與科學學系 環境永續奈米科技研究室 博士後研究員

**逢甲大學環境工程與科學學系 教授

一、前 言

自五〇年代開始，紡織工業已成為台灣僅次於食品工業的第二大工業；八〇年代上半期更是到達了高峰。隨著時代變遷，產業轉型，紡織工業在台灣逐漸朝向以資本、技術密集與特殊功能導向的化學纖維為主的貿易與生產型態。在持續為台灣取得可觀的經濟效益同時，也消耗了大量的能源並帶來生態環境上的影響。其中，產業鏈的中游階段，即染整過程因在處理程序中需消耗大量的能源，所帶來的影響極大而不容忽視。 其需要使用工業鍋爐燃燒大量燃料來產生蒸汽以提供製程所需， 除了需要大量的水量和高耗電量，各種化學藥劑是另一項重要的問題。因此，在進行環境影響評估時，需要考量更多細節，例如對於水生與陸地生態毒性的影響，或是對人類的毒性傷害等。

大量的能源消耗增加了紡織工業製造過程中的碳排放。在製程中，如何減少能源使用以及降低溫室氣體排放，已成為全球製造業在環境、經濟和社會等方面的主要與必要訴求。Huang 等人指出全球經濟衰退加劇了在節能、綠色能源，以及零污染技術的需求，透過例如廢棄物或廢熱、廢能回收與再利用技術，將成為減少溫室氣體排放、降低資源浪費的有效解決方案[3]。此外，全球工業水污染的 20%以上來自於紡織業，其製程所使用的化學藥劑超過 8000 種，使得紡織廢水成為造成環境退化與人類疾病的原因之一，特別是其中可能包含的已知致癌物質。水資源使用的水足跡評估包含兩大類，分別為水資源可用量(Water availability)和水質惡化(Water degradation)，其有助於了解人類活動或生產過程中消耗的水資源對環境的潛在影響。該評估結果可協助企業與決策者了解產業製程可能帶來的水源風險，提高水資源效率並了解其對環境的影響。

本研究分析個案為尚益染整加工大園廠，該公司自 2011 年接受經濟部中小企業節能減碳輔導計畫輔導以來，透過內部能源結構調整與監測，逐步建構企業節能減碳執行藍圖。在應對全球氣候變遷議題之下，跨國貿易企業相繼對高耗能、高排碳產業所帶來的迫切減碳需求，亦加速該企業能源轉型速度，於 2019 年完全淘汰使用廠內所有工業鍋爐，成為全台第一所全面改用蒸汽動力能源的紡織染整廠。本個案研究旨在評估染整廠於更換蒸汽供應來源之期程前後，於碳足跡、水足跡，與環境影響評估各方面的變化與表現。

所得結果可供產業背景相近者參考。

二、研究背景與評估執行方法與工具

1. 評估盤查範疇與邊界說明

本研究分析個案位於台灣北部，負責業務為紡織中游的染整階段，包括前處理、染色、定型、整理等多個單元。2017 年至 2020 年期間，透過廠內能源轉型規劃，將原本使用化石燃料的工業鍋爐逐年更替為蒸汽動力能源。紡織廠 2017 至 2020 年平均年產量為 4,368 公噸功能性布匹，主要原物料為尼龍和聚酯纖維兩種胚布。表 1 所示為四年間主要的投入與產出盤查清單，製程中所使用的化學品，例如退漿使用的助劑、精練劑，染整需要的染劑與助劑等，也包含在評估盤查清單中。紡織廠從 2017 年到 2018 年逐步淘汰了工業鍋爐使用的常規化石燃料，如煤與重油。同時，從 2018 年至 2020 年，使用蒸汽以低壓與中壓的形式分別於製程各階段，逐漸取代原本使用的化石燃料和鍋爐。此外，四年間淡水和電力的平均消耗量分別為 574,015 立方米和 8,203 千度。除產品外，產出包括硫氧化物(SO_x)和氮氧化物(NO_x)排放（僅 2017 和 2018 年）、廢水排放（平均 533,706 立方米）、紡織污泥（平均 37 公噸）、紡織廢料和一般廢棄物（平均 19 和 24 公噸），也列在表 1 的盤查清單中。

表 1 染整廠 2017-2020 年投入與產出之物資與能源盤查清單

	內容	年度 單位	2017	2018	2019	2020
投入	胚布（尼龍）	公噸	3008.9	2781.1	2928.3	2576.5
	胚布（聚酯纖維）	公噸	2269.9	2275.5	2300.8	1790.4
	液鹼	公噸	646.5	571.9	570.2	451.6
	精練劑	公噸	252.6	216.4	223.1	165.0
	染色助劑	公噸	413.3	328.9	362.3	234.3
	酸性染劑	公噸	61.4	55.3	64.3	53.4
	分散性染劑	公噸	46.3	45.1	50.7	36.8
	定型用助劑	公噸	97.8	78.2	100.8	91.3
	三米煤	公噸	3,948	2,276	-	-
	低硫重油	公秉	170	35	-	-
	低壓蒸汽	公噸	45,919	43,727	54,467	32,700
	中壓蒸汽	公噸	-	8,978	22,202	20,577
	用水量	立方米	628,787	617,439	552,139	497,694

	內容	年度 單位	2017	2018	2019	2020
	用電量	度	7,904,328	8,726,560	9,402,868	6,779,131
產出	完成產品	公噸	4,586.5	4,485.4	4,657.5	3,742.1
	硫氧化物(SO_x)排放	公斤	8,352.2	5,583.3	-	-
	氮氧化物(NO_x)排放	公斤	9,483.2	6,854.1	-	-
	廢水排放量	立方米	582,210	566,550	507,539	478,523
	紡織污泥(R0906)	公噸	76.4	22.8	24.9	24.4
	紡織廢料(D0899)	公噸	25.9	14.7	16.8	17.6
	一般廢棄物(D1801)	公噸	23.8	25.4	27.5	17.8

評估的邊界屬於“搖籃到大門”(cradle-to-gate)，包括原物料輸入、染整廠完整製程至完成品產出。除此之外，廢水排出的廠內前處理也做了計算，但不包括最終的廢棄物處理，也不包含成品完成後的運輸。本研究的評估範疇與系統邊界於圖 1 中表示。評估功能單位以該染整廠每年的年產量為基礎，功能單位(Functional unit)為“每生產 1 公斤完成品”為比較單元。

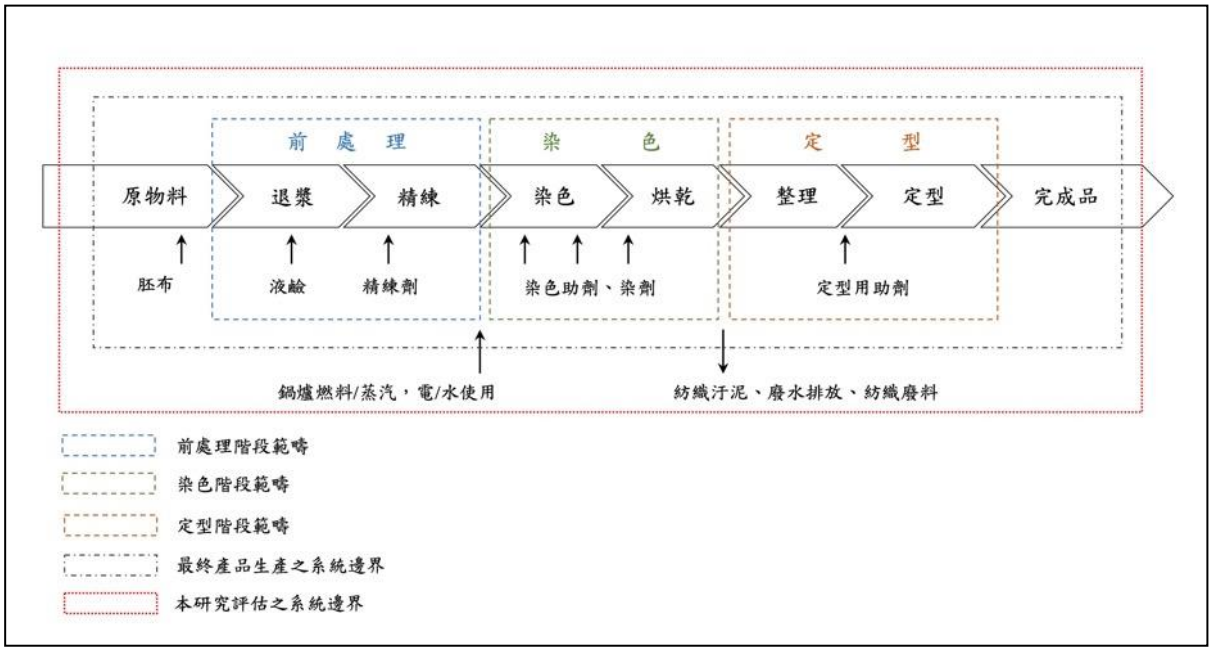


圖 1　本研究生命週期評估之範疇與邊界說明

2. 生命週期評估方法

考量紡織業對環境所帶來的潛在影響，本研究採用的衝擊評估

方法包括評估碳足跡(Carbon footprint)的 IPCC 2013 GWP 100a；水足跡(Water footprint)包含 Berger 等人提出的耗水量指數(WDI)；CML-IA 中的淡水與海洋生態毒性(FAETP/MAETP)與優養化(EP)則用於評估水質惡化情況。環境衝擊評估則採取 CML-IA baseline 方法，評估面向包估：資源耗損(ADP)、臭氧層破壞(ODP)、人類毒性(HTP)、水中生物毒性(FAETP)、海洋生態毒性(MAETP)、陸地生物毒性(TETP)、光化學煙霧(POCP)、酸沉降(AP)、優養化(EP)，也包括全球暖化(GWP)等十個與紡織染整業密切相關的特徵化項目。對於水資源與能源鏈結(Water-energy Nexus)則以 ReCiPe2016 Endpoint[9]方法加權評估後結果作為分析依據。所採用的 LCA 工具為本研究室已建置的工具 SimaPro Software v.8.4 與 Ecoinvent 數據庫 v.3。

三、評估結果與討論

1. 碳足跡評估

評估結果發現，採用新措施之後，研究個案在 2017 至 2020 年間，碳排與總燃料熱值消耗率逐年降低，而年度產能關鍵績效指標(KPI)達成率仍能平均維持 96%以上(表 2)。值得一提的是，2019 年為該廠第一年完全淘汰使用工業燃料鍋爐，燃料熱值消耗亦較前一年(2018)降低 8.5%，結果表明該年生產能力不僅沒有受到影響，甚至有所增加。雖然用電量(表 1)較前一年(2018)略增加約 7%，但由於完全淘汰使用化石燃料，2019 年的整體碳足跡比 2018 年減少了 10%，每生產 1 公斤產品約減少了 2.7 公斤二氧化碳當量(kg CO_2 eq)，按 2019 年產品總量計算，該年減少了碳足跡約 1.26 萬噸二氧化碳當量。

表 2 2017-2020 年紡織廠年度碳足跡排放率(基於 2017 年排放量)、產能達成率(基於年度 KPI 目標)、燃料使用率和供應方式對照比較表

年度	碳足跡減少率(%)	燃料熱值消耗減少率(%)	產能目標達成率(%)	燃料採用比例以及供應方式				
				工業燃料鍋爐	三米煤(5800 kcal/kg)	低硫重油(9200 kcal/kg)	低壓蒸汽(435 kcal/kg)	中壓蒸汽(27 kg/cm^2)
2017	100.0	100.0	97.6	有	40%	10%	50%	-

年度	碳足跡減少率(%)	燃料熱值消耗減少率(%)	產能目標達成率(%)	燃料採用比例以及供應方式				
				工業燃料鍋爐	三米煤(5800 kcal/kg)	低硫重油(9200 kcal/kg)	低壓蒸汽(435 kcal/kg)	中壓蒸汽(27 kg/cm^2)
2018	90.7	18.0	94.4	有	23%	2%	50%	25%
2019	80.8	25.0	101.4	無	-	-	50%	50%
2020	83.5	47.9	114.1	無	-	-	50%	50%

2. 水足跡評估

水足跡評估方面，耗水量指數與碳足跡評估結果呈現符合的趨勢：耗水足跡逐年下降；減少率約為 18%。從圖 2(a)中的年度耗水量、廢水排放量和耗水指數之間的關係可以看出逐年下降的趨勢。此外，與水質惡化足跡評估相關的化學藥劑消耗和紡織污泥排放在圖 3(b)中也顯示出類似的趨勢。2018 年以來所有化學藥劑用量和紡織污泥排放量均呈下降趨勢。其中，從表 1 可以看出，在 2017-2020 年之間，精練劑、染色助劑、酸性染劑、分散性染劑和定型用助劑在 2019 年出現用量高峰，平均增長約 12%。隨後，2020 年各項用量再次下降，但水質惡化相關指數，如 FAETP、MAETP、EP 在 2020 年反而呈現小幅上升。與 2019 年相比，染色階段的助染劑和分散性染劑分別在使用量減少的幅度最大，均減少 31%。預處理階段的精練劑次之，減少了 23%。然而與 2019 年相比，2020 年在定型階段的整理助劑用量雖然減少了 10%，但仍比 2018 年增加了 13%。對應水質惡化評估結果，推測 2020 年在製造過程中所使用得定型助劑可能是提高影響數值的主要因素之一。而就總體而言，水質惡化足跡在施行新措施之後，平均減少 15%。

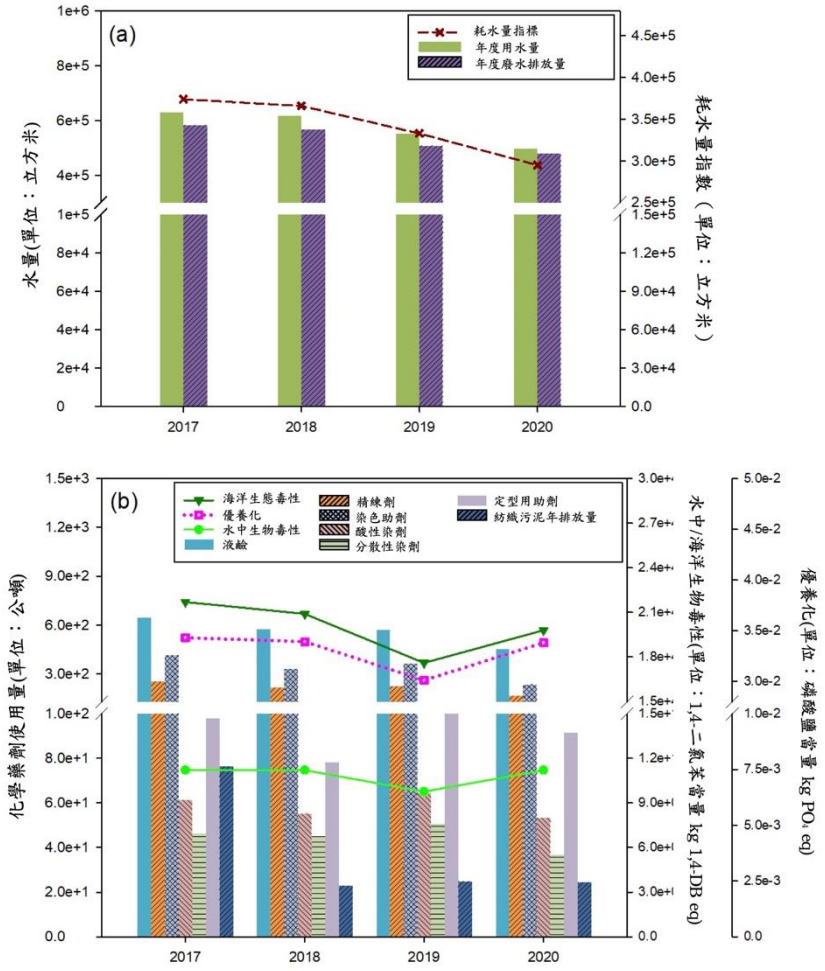


圖 2 不同的影響類別顯示了紡織廠從 2017 年到 2020 年每年的水資源可用量和水惡化情況。（WDI：耗水量指數。FAETP：水中生物毒性；MAETP：海洋生態毒性；EP：優養化）。

接下來，圖 3(a)至(c)個別顯示了三種與水質惡化有關的評估項目(即 FAETP、MAETP 與 EP)與產品製程中主要階段(預處理、染色與定型)的相互關係。圖 3 顯示各評估項目受到製程個階段影響的比例，呈現與圖 2(b)相似的趨勢。在前處理與染色階段的影響比例自 2017 年之後逐年下降，而 2019 至 2020 年在定型階段的影響比例則在 2018 年之後呈現上升現象。因此得知，施行新措施對於水量耗損或是水質惡化都能帶來改善，然而產品製程中所使用的化學物質所造成的水質惡化影響卻仍需注意。除了定型助劑之外，預處理階段所使用的化學藥劑一直是製程中對環境影響佔比最大的。

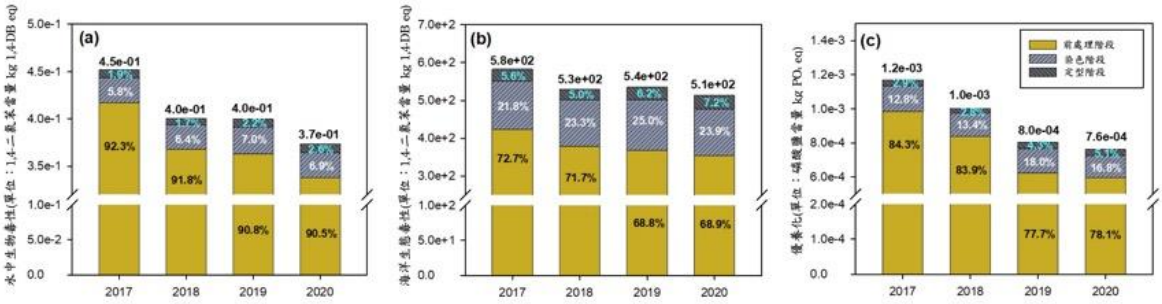


圖 3 產品製程中的主要階段對三種水質惡化評估項目的影響比例：(a)水中生物毒性(b)海洋生態毒性 (c)優養化。

3. 環境衝擊評估

圖 4 以盤查範疇對每個環境影響項目的百分佔比，顯示 2017 年至 2020 年染整廠對環境的影響。各項目由左至右，依次為 2017 至 2020 年的數值。本研究環境衝擊評估，包括從原物料的輸入至廠內前處理階段，與後續加工過程至最終產品之所有環節，其中也包含了廢水在排放前的處理，涵蓋以下部分：原物料、生產製造、燃料使用、用水量、用電量、廠內廢水處理、能源回收再利用等七個部分。經評估結果得知，原物料部分在化石資源耗損(ADP-fossil fuel)、全球暖化(GWP)、陸地生物毒性(TETP)、光化學煙霧(POCP)和酸沉降(AP)等項目影響佔比最高，而在資源耗損(ADP，非化石燃料)項目則僅次於生產製造部分的佔比。該結果與作為主要原物料的人造纖維(尼龍及聚酯纖維)胚布，不可避免地使用化石燃料原料有很大的關聯，評估結果確實顯現了後續加工過程帶來的聯動效應。生產製造部分對資源耗損(ADP)的影響最大，其次是陸地生物毒性(TETP)，再者是臭氧層破壞(ODP)，這與生產過程中使用的多種化學藥劑有關，例如前面提及的染整劑和各種助劑。ODP 評估可顯示物質對臭氧層可能帶來的破壞，而 GWP 則常使用於衡量化學物質對全球暖化的影響，因此同時觀察有助於評估化學物質對環境的影響。從整體評估結果看來，生產製造階段對於 GWP 的影響佔比極小，而是與水質惡化方面有較高的關聯性，此部分在後述廠內廢水處理的部分也可得見。燃料使用部分則在 AP、POCP、GWP 和 ADP-fossil fuel 類別中顯示出較為明顯的比例，並且從結果明確地顯示自 2018 年後，染整廠徹底汰換了化石燃料與工業鍋爐，使

得此部分對環境衝擊影響降至最低。這意味著新的蒸汽供應方式確實為減少環境損害帶來了良好的效果。廠內廢水處理是另一個在環境衝擊評估具有極大佔比的部分，特別是在人類毒性(HTP)、FAETP、MAETP、TETP 和 EP 中的佔比明顯高於廠內其他部分，並且大部分與水質惡化有密切關聯。值得注意的是，能源回收再利用部分從評估結果顯示出其在減少環境影響方面的優勢。應證染整廠利用汽電共生廠直接提供的回收蒸汽，替代鍋爐燃料並淘汰鍋爐使用，可有效減少對環境的破壞，特別是在 ADP-fossil fuel、GWP、POCP 和 AP 等項目，效果顯著。然而對於 HTP、FAETP、MAETP，與 EP 則無明顯影響。得知，此部分對於化石燃料相關項目確實有直接影響，而對廠內化學藥劑使用相關項目，則沒有直接效益。

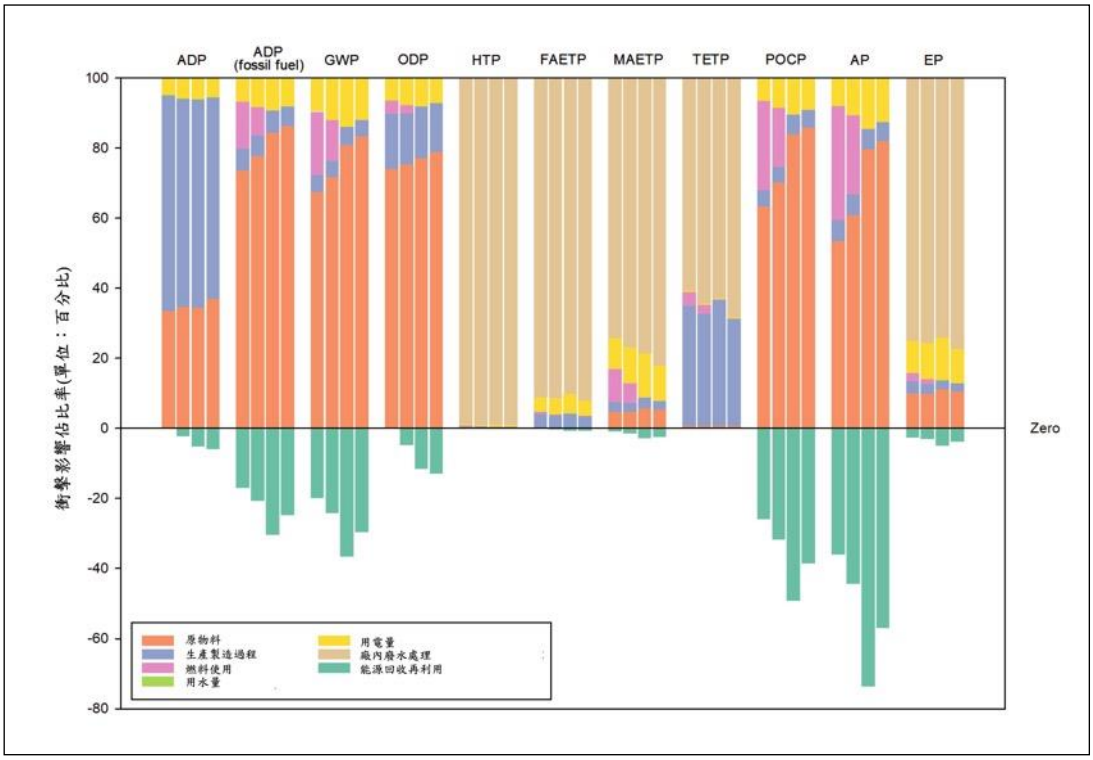
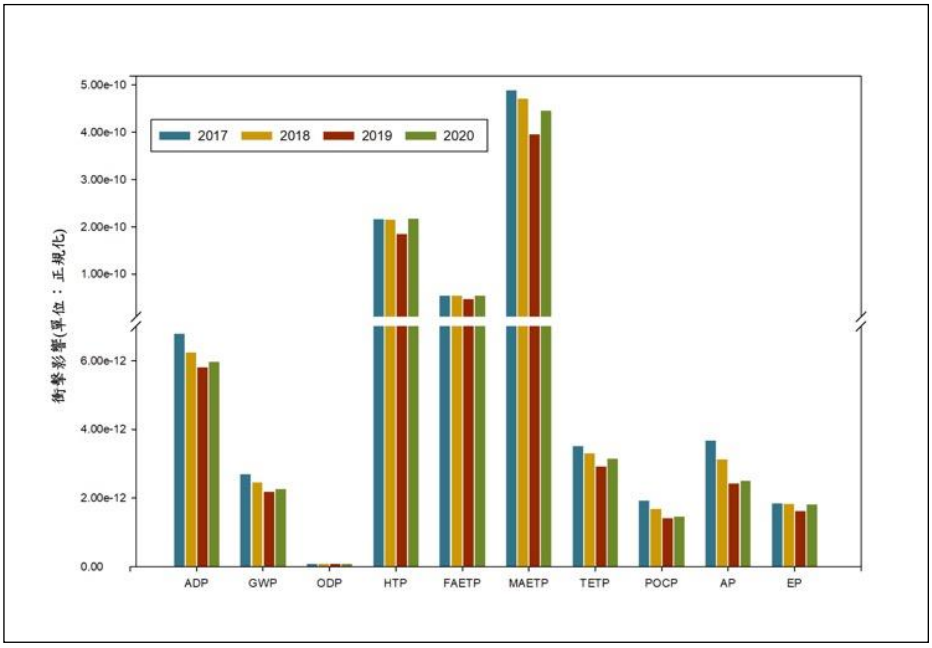


圖 4 染整廠各部分在各環境衝擊影響項目中的佔比評估（每個項目由左至右依序為 2017 至 2020 年）。

圖 5 顯示了正規化(normalized)後的評估結果，可見新措施執行後，環境衝擊項目的影響數值大致呈現逐年下降的情形，除了 2020 年在 HTP 項目上，相較 2017 年還增長了 0.23%之外。就整體生命週期評估來看，染整廠在 ADP、HTP、FAETP、MAETP 等項目帶來較明顯的衝擊影響。與圖 4 對應，ADP 的影響主要來自原材

料和生產製造部分。2017 年至 2020 年的評估結果確實驗證了改變鍋爐燃料與淘汰工業鍋爐使用對減少環境損害有所助益。但是，在 HTP、FAETP 和 MAETP 的影響仍有限，因來自於生產製造過程所使用的化學藥劑，以及後續也對廠內廢水處理部分產生了影響。四年評估當中，2019 年在所有項目中的數值皆為最低，而產量最高(圖 5，表 1)。除去可能因潛在的外部因素迫使生產項目與過程必須改變的 2020 年，2019 年的評估結果證明了使用汽電廠直接供應的回收蒸汽取代舊有的化石燃料使用與供應方式，所帶來有效減少環境影響與破壞的效益，尤其在降低 AP(34%)、POCP(27%)、GWP(19%)、MAETP(19%)、TETP(17%)等項目，更具效果。

圖 5　2017 年至 2020 年，每個環境衝擊影響項目的正規化 (normalized)評估結果。



本研究評估之結果顯示，相較於以傳統化石燃料使用，鍋爐燃料類型採用汽電共噌廠所提供之蒸汽，對於減少大部分的環境衝擊影響確實有所助益。它有效的協助製程中減少甚至無化石燃料燃燒後所產生的污染物，並且因提供回收蒸汽的汽電共生廠即位於同一工業區，直接輸入的回收能源發揮了很好的能源效率，協助該染整廠更順暢的淘汰鍋爐之使用。總體的效益包括逐步實現年度減碳目標，降低燃料成本，以及因能源效率提高而促進生產效能。圖 6 顯示了原物料消耗、年產量、固定污染源空氣污染物排放、碳排放和

年度燃料成本的關係趨勢，可見，隨著燃料種類和供應方式的逐年變化，燃料成本和碳排放指數也隨之下降。總體而言，本研究的評估結果，對於發展製造產業的綠色生產、區域能源網絡的未來建構規劃，具有啟發意義與可實踐性。

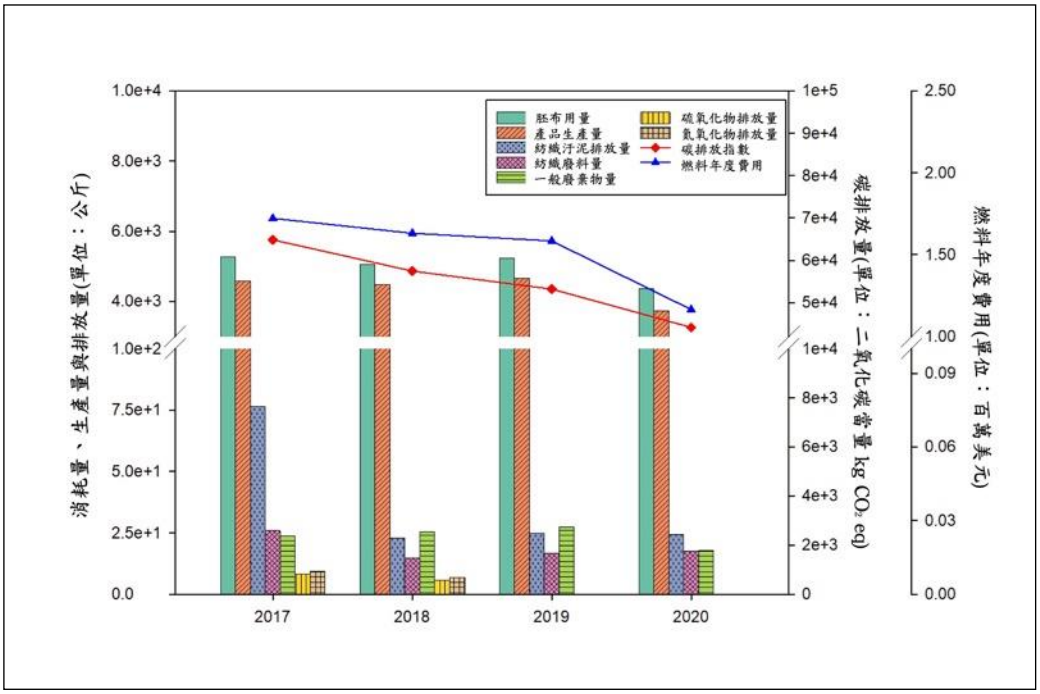


圖 6 原物料消耗量、產品年產量、固定污染源空氣污染物排放量、碳排放指數與年度燃料成本關係與趨勢圖。

4. 水資源與能源鏈結觀察

Robert White 於 1994 年提出工業生態學(Industrial Ecology, IE)[12]觀點，對工業活動中原物料與能源的流動，以及經濟、政策、社會資源等轉換現象，之於環境的影響提出相關探討。水-能關係屬於雙向鏈結關係，包含供水耗能至產能需水，自然資源開發所需之廢水處理技術與管理，甚至碳與水資源價格評估，皆屬此討論範圍。本研究所使用的 ReCiPe2016 Endpoint 方法，將特徵項目加權化之後，以相關質量單位顯示該項目的損害程度與關聯性。生態系統質量單位為物種與時間年(species x year,)的關係呈現，意味評估區域物種隨著時間推移的損失。資源缺稀化單位則以未來礦產與化石資源開採所產生的額外費用(additional cost)為準。研究個案在四年間水、電、燃料資源消耗與衝擊項目損害指標之相互關係，於圖 7 呈現評估結果。以 2017 年使用量與造成的衝擊指標數值為基準，

年度用水量呈現明顯逐年下降之趨勢；以生產製程所需燃料總熱值計算，隨著個案逐年減少化石燃料使用量以及最終淘汰鍋爐之步驟，此數值呈現與用水量接近的下降趨勢。值得注意的是，水資源使用損害指標在 2018 年以 10.6%與 2019 年以 10.1%，出現降幅曲線些微停滯情形，而資源缺稀指標曲線則呈現 2018 年以 1.9%微幅下降後於 2019 年上揚 0.2%的趨勢，此現象呼應了在 2018 年 9.4%與 2019 年 15.9%略為增長的年度用電量。此兩年之間，正逢研究個案在新舊措施交接階段，同時，2019 年產品生產總量為四年間最高。此現象呈現用電量與水資源運用及資源耗損相關損害指標的直接鏈結關係。若針對廠內各部分用電模式與量能，能做更詳盡的單位監管，則更能將資源有效的運用與分配，具體模擬不同情境的資源供需情況，評估整體系統的乘載力與回復力，有助優化提升在水-能鏈結的協同效益(synergistic benefits)。

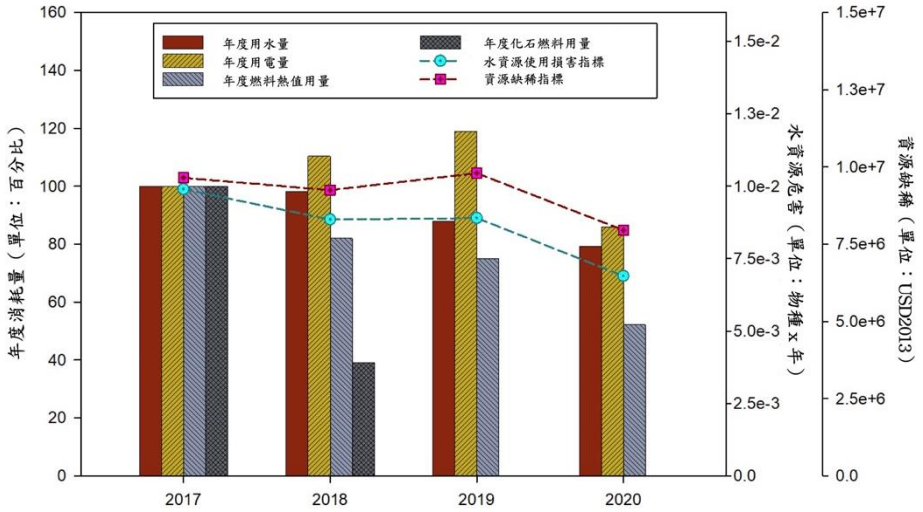


圖 7 水資源與能源鏈結關係圖。

四、結　論

本研究個案透過汽電共生廠回收之蒸汽以低壓與中壓蒸汽方式直接提供廠內製程使用，取代長期倚賴的化石燃料與工業用燃料鍋爐，經生命週期評估後發現，碳足跡、水足跡、環境衝擊影響等結果均有所改善：年度碳足跡可減少 19%的排放率，水資源耗損足跡和水質惡化足跡則可以分別完成 18%和 15%的損耗率。在染整廠

所有評估範疇中，原物料輸入的部分對環境的影響較大的原因來自於該人造織物原料與化石燃料的高度關聯性。此外，製程中所使用的化學物質則對水質惡化造成了很大的影響，其中預處理階段是其中中影響最大者。最後，在停止使用化石燃料，並採用直接輸入的蒸汽後，燃料部分不再為環境帶來衝擊影響。在評估能源回收再利用的結果發現，該措施對於減少環境損害、降低年度燃料成本，與空氣污染防治具有相當的優勢，並具有轉型綠色產業發展前景、符合經濟面考量且容易施行，適合現行使用燃料鍋爐於製程的產業作為參考。觀察該個案在水資源與能源鏈結，提供了用電量與相關損害指標的強關聯性之力證，有助於加強單位能源使用監測，以利未來朝向永續規劃及發展。

五、參考文獻

1. Yin, H. and Guo, H.,2015. Energy and exergy analyses of finishing process in cotton textile production. International Journal of Exergy, 18(3), 251–274.
2. Huang, R., Riddle, M., Graziano, D., Warren, J., Das, S., Nimbalkar, S., Cresko, J., Masanet, E., 2016. Energy and emissions saving potential of additive manufacturing: the case of lightweight aircraft components. Journal of Cleaner Production, 135(1), 1559–1570.
3. Zhang, N., Smith, R., Bulatov, I., Klemes, J. (2013). Sustaining high energy efficiency in existing processes with advanced process integration technology. Applied Energy, 101, 26–32.
4. International Organization for Standardization (ISO), 2014. 14046-Environmental Management-Water Footprint-Principles, Requirements and Guidelines. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
5. IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535

pp.

6. Berger, M., van der Ent, R., Eisner, S., Bach, V., Finkbeiner, M. (2014). Water accounting and vulnerability evaluation (WAVE): considering atmospheric evaporation recycling and the risk of freshwater depletion in water footprinting. Environmental science & technology, 48(8), 4521-4528.
7. CML-Department of Industrial Ecology (2016). CML-IA Characterisation Factors, Institute of Environmental Sciences, Leiden University: Leiden, The Netherlands.
8. Guinée, J.B., Gorée, M., Heijungs, R., Huppes, G., Kleijn, R., de Koning, A., van Oers, L., Wegener Sleeswijk, A., Suh, S., Helias, A., de Haes, H.A.U., de Bruijn, H., van Duin, R., Huijbregts, M.A.J., Lindeijer, E., Roorda, A.A.H., van der Ven, B.L., Weidema, B.P., 2001. Life Cycle Assessment-An Operational Guide to the ISO Standards: Characterization and Normalization. Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment, Centre of Environmental Science, Leiden, The Netherlands.
9. Huijbregts, M.A.J., Steinmann, Z.J.N., Elshout, P.M.F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M.D.M., Hollander, A., Zijp, M., van Zelm, R., 2017. ReCiPe2016: a harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. The International Journal of Life Cycle Assessment, 22, 138–147.
10. PRè Sustainability Consultant, 2017. SimaPro v.8.4 software, PRè Consultant: Amersfoort, The Netherlands.
11. Weidema, B.P., Bauer, C., Hischier, R., Mutel, C., Nemecek, T., Reinhard, J., Vadenbo, C.O., Wernet, G., 2013. Overview and methodology. Data quality guideline for the ecoinvent database version 3. Ecoinvent Report 1(v3). St. Gallen, The ecoinvent Centre, Switzerland.
12. White, R., 1994. The Greening of Industrial Ecosystems. Allenby, B.R. and Richards, D.J., (Eds.). National Academy Press, Washington DC.

化工產業廢水以 SBR 和 BioNET 組合程序之實廠處理

陳致君*、王鈞逸**、連文萍***、張子芸****、梁德明*****

摘　要

案例廠為一化工製品製造公司，由於製程中使用大量化學有機藥劑且含高濃度有機氮，造成廢水成份複雜處理不易，在現有處理系統以調勻池與化學混凝沉澱做為初級處理、批式活性污泥(SBR)二級生物處理等程序，此程序處理後氨氮濃度最高約還有 160 mg/L 左右。工研院材料與化工研究所以生物網膜活性污泥(BioNET)處理方法接續在批式活性污泥(SBR)二級生物處理之後，擬定 SBR 系統硝化脫硝反應操作策略參數，實場廢水量為 150 CMD， TKN 進流濃度 24～215 mg/L 之間、COD 進流濃度 130～390 mg/L，不足的碳源則以場內的 IPA 廢液補充，應用此方式為循環經濟最佳的範例。SBR、BioNET 槽體為 300 m^3、100 m^3，SBR 硝化反應時間 18 小時；脫硝反應時間 4 小時。BioNET 水力停留時間為 16 小時，在約 3 個月評估結果平均 TKN 濃度從 100 mg/L 降低至 20 mg/L 以下，TKN 去除率為 80%以上;硝酸鹽氮出流水濃度小於 50 mg/L 以下。有機氮在處理過程中，必須先經水解產生氨氮，再進行硝化與脫硝反應，目前自行排放氨氮管制濃度標準為 20 mg/L，硝酸鹽氮濃度管制標準為 50 mg/L。故，在 SBR 生物處理系統後接 BioNET 喜氣生物處理系統，不但可做殘餘氨氮再硝化亦可同時具有攔截 SS 的功能。

【關鍵詞】化工產業廢水、SBR、BioNET、硝化、脫硝

---

*工業技術研究院材料與化工研究所　研究員

**工業技術研究院材料與化工研究所　副研究員

***工業技術研究院材料與化工研究所　助理研究員

****明志科技大學環境與安全衛生工程系　專題生

*****工業技術研究院材料與化工研究所　正研究員

一、前 言

工研院材料與化工研究所(簡稱材化所)所開發的 BioNET (生物網膜)廢水高級處理技術乃針對產業廢水含有氨氮物質，將 BioNET 浮動床植入適當 PU 擔體與經馴養之生物污泥，並藉由輸入氧氣使擔體上微生物增殖以進行生物分解作用。在 BioNET 活性生物處理系統中，可藉由多孔性擔體的特性累積大量的硝化菌群繼續將 SBR 生物系統所殘餘的氨氮進行再硝化以及將所流出的 SS 攔截住。化工產業製程為生產紡織染整助劑與塑膠用滑劑，於製程中使用大量化學藥劑，廢水成份複雜，而製程中所產生之廢水乃間歇性排放，廢水濃度與水量變化極大，廢水的主要污染來源為製程中產生的高 COD、高有機氮之反應槽清洗水。目前現有的廢水處理場處理流程為由:調勻池、pH 調整槽與混凝沉澱、中間水槽及批式活性污泥池所組合，主要為處理 COD。然現有法規之放流水排放標準，則新增加了氨氮以及硝酸鹽氮的濃度管制，於是將現有的批式活性污泥池由以降解 COD 濃度為目標，提升為不僅僅是降解 COD 濃度，又可同時進行水解、硝化脫硝處理之功能。從評估結果獲得 SBR 系統硝化脫硝最適的操作策略以及新增 BioNET 生物處理單元，讓有機氮於 SBR 系統中達到水解、硝化脫硝又可利用製程中廢棄之 IPA 廢液作為 COD 的碳源，於此同時大大減少了廢棄物處理費用，可謂循環經濟的最佳典範案例。故，以新增 BioNET 喜氣生物系統接續在 SBR 生物處理單元的組合程序處理高有機氮廢水,達到了現行放流水標準又同時具經濟效益之生物處理技術。

二、廢水水質

1.廢水水質調查

案例廠廢水來自化工產業含氮製程反應槽清洗廢水，初級以化學混凝沉澱後流入中間水池，廢水水質調查的廢水來源為採集中間水池，以每天 24 小時連續自動採樣，每 2 小時採取一個水樣，每天樣品數總共有 12 個連續 6 次 (天)，將其每天 12 個樣品數水質結果取其平均值，由表 1 與圖 1 得知，廢水中的 pH 值、COD、氨氮與電導度及硫酸鹽等濃度，pH 值為 7.36～7.58;CODt 濃度為 222～246 mg/L;氨氮濃度低於 20 mg/L 以下;電導度為 896～1104 μS/cm;硫酸鹽濃度為 354～525 mg/L。

表 1 六次採樣 24 小時平均結果

次數	pH	CODt (mg/L)	CODs (mg/L)	NH_4-N (mg/L)	EC (μ S/cm)	SO_4^{2-} (mg/L)
1	7.43	246	211	10	1074	525
2	7.39	222	201	10	1104	523
3	7.36	230	210	12	996	466
4	7.41	223	214	16	896	354
5	7.58	234	224	17	990	417
6	7.58	230	222	18	1029	416

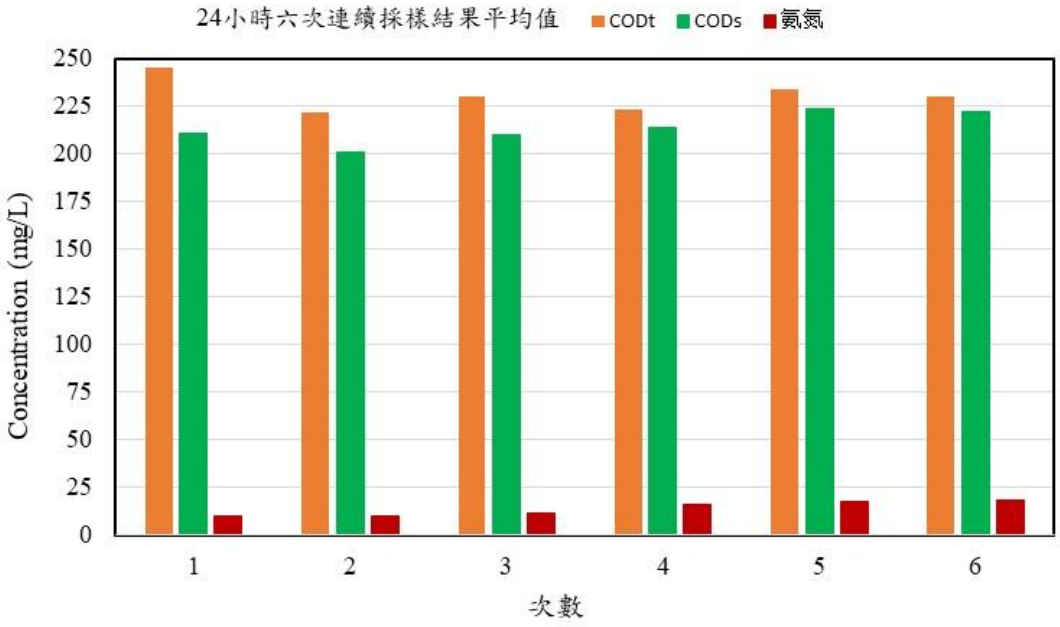


圖 1 六次 24 小時連續採樣水質結果

2. 實驗室連續式評估廢水水質

有機氮廢水以喜氣生物系統進行水解、硝化脫硝連續式之實驗室處理程序評估，採樣點以中間水池做為進流水的水源，案例廠依實驗室所需的水量，採批式的方式將採取的水樣寄送至工研院，實驗室評估以 24 小時連續式進行評估。批式所採廢水水質檢測結果如表 2 與圖 2 所顯示，pH 值在 7.0～7.7 之間;CODt 濃度為 130～390 mg/L;水中所含鹼度濃度為 72～268 mg/L，由 24 小時連續採樣的水質結果中，氨氮的濃度不高，故推測廢水中所呈現的形態應該是有機氮，因此再新增加總凱氏氮檢測項目，濃度為 24～215 mg/L。

表 2 實驗室連續式評估水質結果

日期	CODt	TKN	鹼度	pH
7/2	386	79	--	7.54
7/10	290	103	103	7.38
7/17	222	88	72	7.14
7/23	157	101	109	7.09
7/30	200	93	114	7.17
8/5	214	130	180	7.18
8/13	297	24	130	7.60
8/19	133	27	112	7.23
8/26	209	107	123	7.14
9/1	258	142	141	7.00
9/8	250	124	162	7.28
9/16	298	151	168	7.35
9/26	307	152	268	7.16
10/14	292	99	264	7.71
10/20	325	214	118	7.49
平均值	256	109	147	7.30

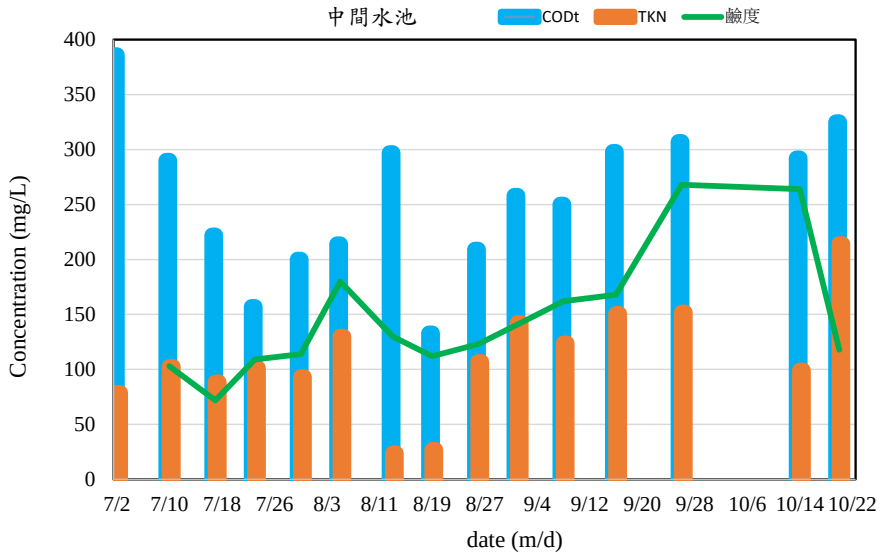


圖 2 實驗室連續式評估水質結果

三、現有廢水處理場性能提升規劃

由於化工產業製程所產生之廢水乃間歇性排放，廢水濃度與水量變化極大，現有的

批式活性污泥(SBR)系統操作程序只能將部份可生物分解的 COD 去除，但無法對廢水中的有機氮進行水解再行硝化脫硝反應能力，因此案例廠評估首要目的為有效降解有機氮，達到符合自行排放或可達到納管排放的標準，故須以擬定 SBR 生物處理系統硝化脫硝最佳操作策略方案與評估處理技術的組合，進而達到精進現有的批次活性污泥(SBR)系統處理的程序，以提昇廢水處理場之整體處理效率與穩定性。

上述適用性及水質分析所得評估結果與因應廠商要求將現有生物處理池體做性能的提昇，提升工程包括批式活性污泥處理系統的操作策略擬定、新增中間水池與生物網膜活性污泥系統(BioNET)等三部份。

1. 批式活性污泥(sequencing batch reactor)

為提升現有 SBR 生物處理池的功能與效率，必須先調整有機氮廢水進入生物池的濃度及修正現有操作條件，讓池內微生物持續微量增殖的狀態下，使其有效地將廢水中有機氮進行水解、硝化脫硝反應在可容許的濃度，同時與 SBR 生物系統的操作策略息息相關。當有機氮於生物活性污泥系統中可產生水解、硝化反應，另有可在同一生物系統中於無氧狀態下進行脫硝，達到於同一個系統中，有機氮水解、硝化脫硝的三重反應功能。

2. 生物網膜活性污泥(BioNET)

生物網膜活性污泥(biological new environmental technology)技術為工研院開發之專利技術，結合 PU 擔體與微生物的組合，具有優勢分解功效之廢水高級處理技術，其適用於工業廢水中難分解物質，有助於特殊選擇性優勢菌群生長之處理技術，於多孔性擔體中可附著大量微生物進而形成硝化菌微生物菌群，進行去除廢水中之氨氮與 COD，並同時俱有可攔截大量 SS 的功能，而且多孔性擔體毋需更換，僅須少量補充，操作簡單且費用低，亦無二次污染問題。

3. 中間水池Ⅱ

中間水池Ⅱ為批式活性污泥 (SBR)生物系統至連續式 BioNET 活性污泥處理系統，兩個系統的出流水與進流水之間連接緩衝貯槽。

四、實驗室處理程序評估結果與討論

含有機氮廢水的處理技術於實驗室評估時，採用案例廠現有的批式活性污泥法(Sequencing Batch Reactor，SBR)處理技術與生物網膜(Biological

New Environmental Technology，BioNET)喜氣生物處理技術的組合程序，SBR 生物處理系統裝置有監測設備一組，監測 SBR 生物反應池中進行硝化脫硝反應時，pH 值、DO 與 ORP 值的變化趨勢紀錄，從變化趨勢的結果中獲取硝化脫硝處理的最佳操作條件及操作策略，系統設備如圖 3 所示。

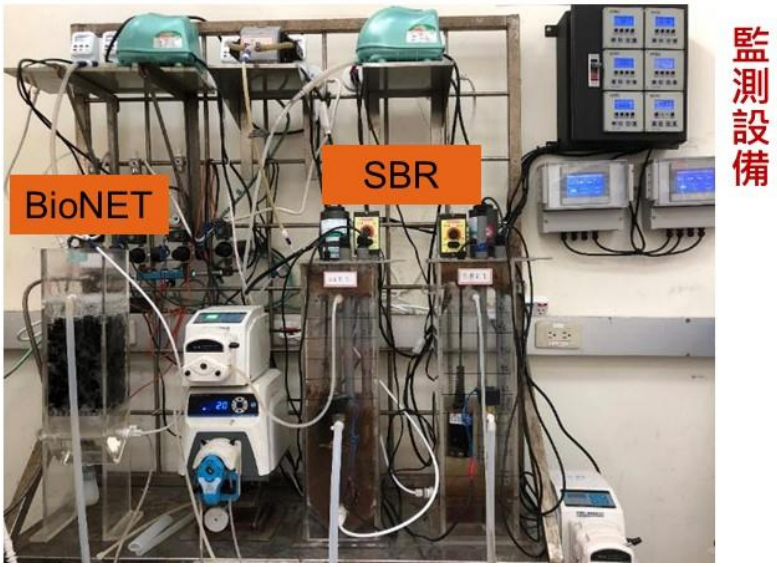


圖 3 實驗室硝化脫氮處理系統

案例廠化工產業製程之洗桶、洗槽水含高濃度有機氮，實驗室的評估裝置系統，應案例廠的委託要求以現有SBR生物處理技術進行有機氮硝化脫硝之實驗室評估，擬定最佳硝化脫硝之處理操作策略方案，在評估期間進行水質檢測，由於初期的水質調查結果，氨氮濃度不高所以在系統進行連續式評估實驗中，同時增加分析廢水中總凱氏氮(TKN)的濃度，結果由圖4與圖5得知，進流水TKN濃度為約30 mg/L至160 mg/L之間，經由SBR生物系統處理，以階段性逐步濃度提升的操作方式作為硝化脫硝處理之可行性評估，以其處理後的出流水再進入BioNET喜氣生物處理系統。SBR生物系統在操作穩定時，於35天開始到46天之間，出流水TKN與氨氮濃度大都在20 mg/L以下，去除率為約77～88%。但在第47天開始處理後出流水的TKN濃度為35～147 mg/L，隨著進流水濃度的提高而升高，去除率下降至51%以下，然BioNET喜氣生物系統從第52天時，因SBR生物系統有機氮負荷太高，無法有效降解而使濃度累積，造成出流水TKN濃度高於50 mg/L～71 mg/L之間，但從結果顯示TKN濃度還能再降解76 mg/L，氨氮濃度亦可再分解減少至60 mg/L以下，由此瞭解BioNET生物系統具有再次水解硝化的功能。於第51天將進流水TKN濃度降低至100 mg/L左右，生物系統出流水TKN濃度也有明顯的降低，故，接著

調整SBR系統實驗進流水的TKN濃度將其控制維持著在100 mg/L左右，由SBR串聯BioNET生物處理單元，出流水的TKN與氨氮濃度逐漸降低在20 mg/L以下。

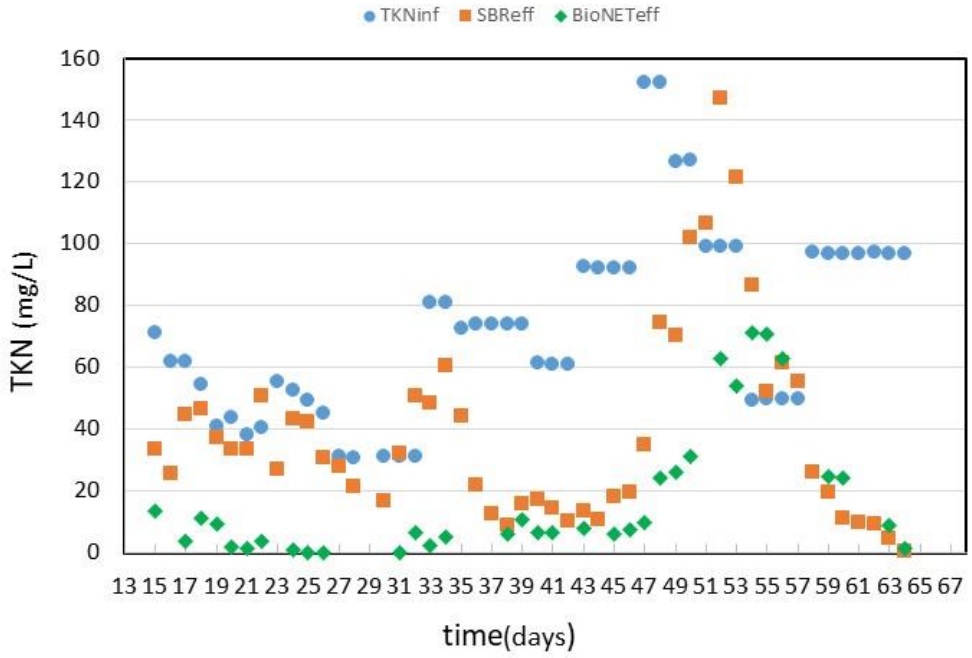


圖 4 進流水 TKN 經過生物系統處理結果

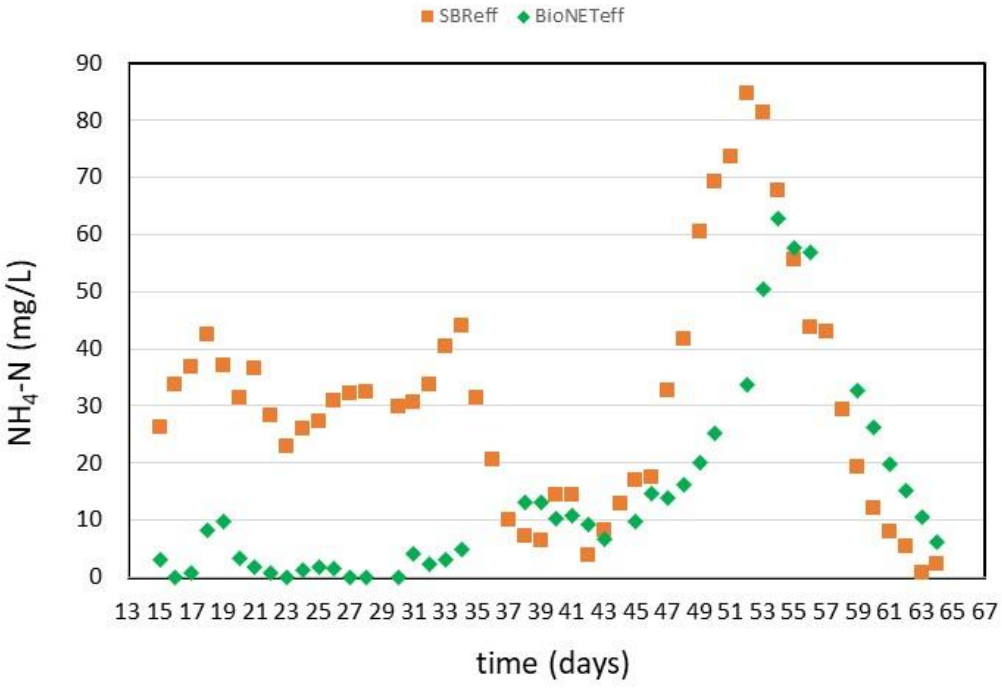


圖 5 進流水經過生物系統硝化之處理結果

SBR 生物系統進行水解、硝化脫硝反應完成後，雖然 TKN 與氨氮濃度高於 30 mg/L，但經由 BioNET 喜氣生物系統處理結果由圖 6 顯示，出流水的硝酸鹽氮濃度大都可以達到自行排放標準 50mg/L 以下，同時也符合新廠於桃科園區納管排放標準 50 mg/L 無須收費的標準，唯當進流水 TKN 濃度高於 120 mg/L 時，反應槽內的 TKN 與氨氮濃度無法有效分解而有累積的情況，造成後段經由 BioNET 喜氣生物系統再硝化後，在第 49 天到第 54 天之間的硝酸鹽氮濃度增加至最高 60 mg/L，雖不符合舊廠硝酸鹽氮自行排放標準 50 mg/L，但在新廠可符合納入桃科污水場的納排標準。然卻可從硝酸鹽氮濃度升高的結果明確知道，BioNET 喜氣生物處理技術可馴養及累積大量硝化菌群以及操作簡單的優勢、還無須進行污泥迴流，將 SBR 生物池中所殘餘的 TKN 與氨氮進行再水解、硝化反應，故出流水氨氮濃度又可再次被降解。

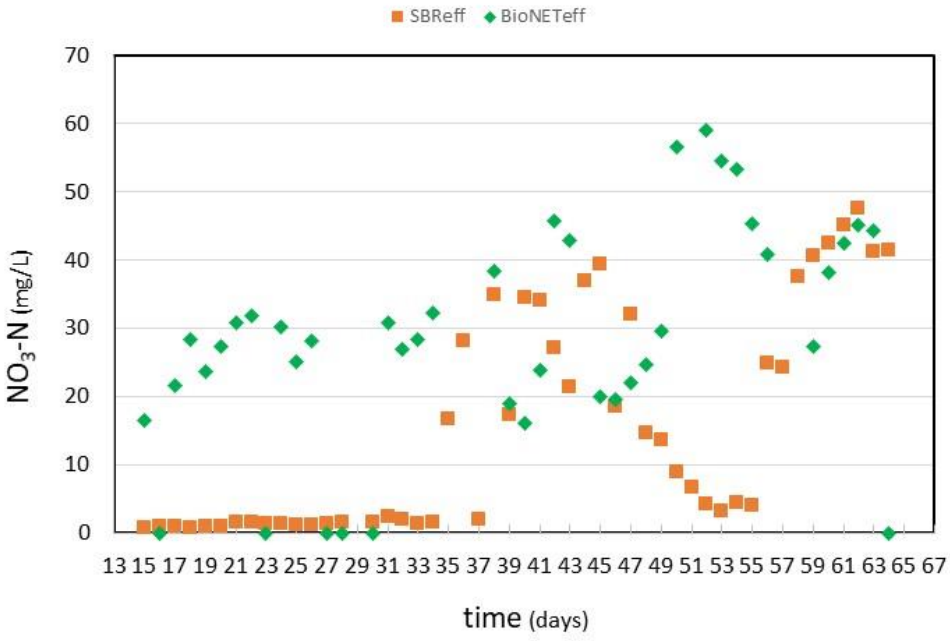


圖 6 生物系統脫硝處理結果

生物處理技術進行脫硝反應，反應中必須要有足夠的碳源才可以將硝酸鹽氮反應完成以氮氣排出，所以 SBR 生物系統的脫硝反應以 COD 碳源 4.3 比值進行生物脫硝反應，從圖 7 結果得知，進流水的 COD 濃度為 200 mg/L ～1200 mg/L 之間，SBR 生物系統操作策略以模擬實場現有的池體體積之下先應用廢水中的 COD，剩下不足的 COD 再添加 IPA 廢液當作碳源進行脫硝反應，滿足碳氮比值的需求降低後段 BioNET 生物系統的池體體積。SBR 生

物系統出流水的 COD 濃度都在 200 mg/L 以下，SS 出流水濃度在 20 mg/L ～150 mg/L 之間，再進入 BioNET 喜氣生物系統處理，出流水 SS 濃度都低於 6 mg/L 以下，大部分 SS 濃度都小於 2 mg/L 以下可由圖 8 的結果得知。

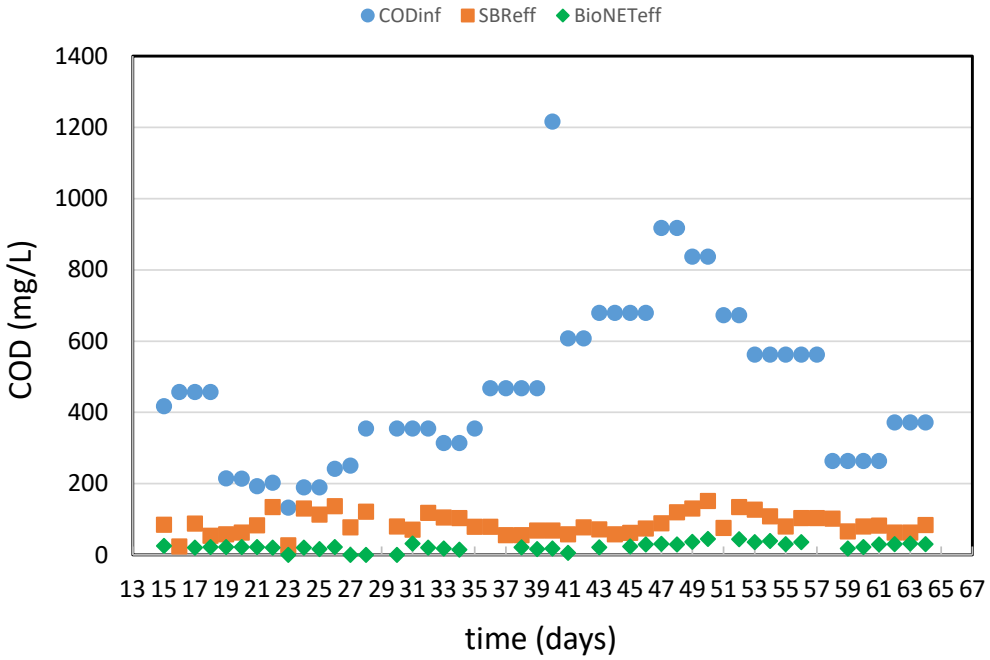


圖 7 生物系統脫硝與 COD 降解結果

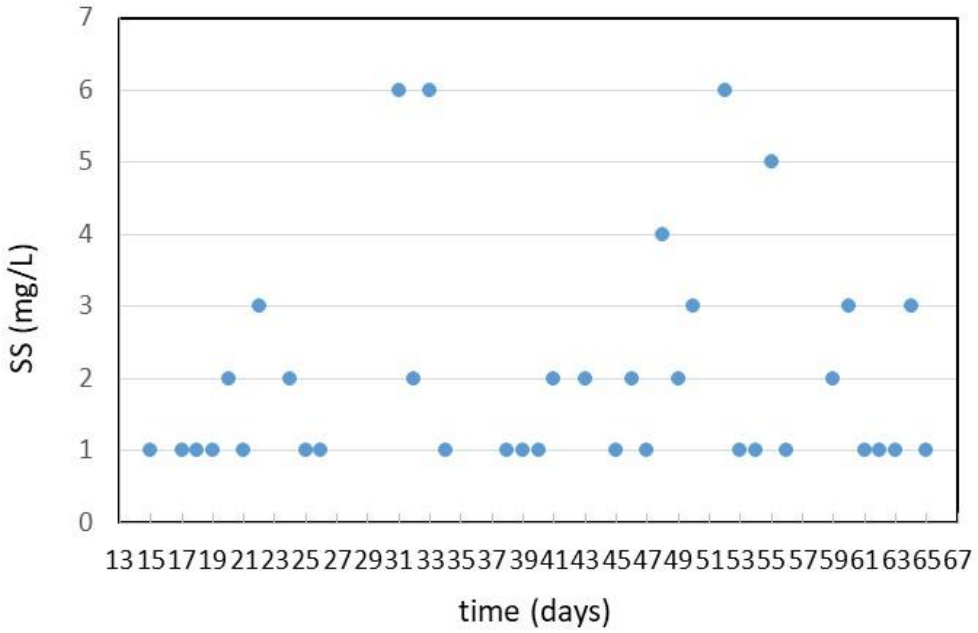


圖 8 BioNET 生物系統 SS 處理結果

五、廢水處理場設計與流程

1. 廢水處理場設計

以現有 SBR 生物池修正為適合處理有機氮之操作策略方案，新增網膜式活性污泥系統(BioNET)處理池，體積為 300 噸，廢水量 150CMD，水力停留時間 16 小時。

設計理念：

■以生物處理為主，降低環境衝擊。

■設置 SBR-BioNET 生物活性單元組合程序，提高有機氮生物分解效率。

■增設中間水池連接 SBR-BioNET 生物處理系統，提升 SBR 出流水水質穩定性。

2.廢水處理場流程

有機氮廢水現有處理與新增之流程如圖 9，黑線為現有處理流程：暫存池、調勻池、pH 調整、快混池、慢混池、化學沉澱池、中間池、批式活性污泥生物處理池、中間池Ⅱ、生物網膜處理池、排入承受水體。藍色線為新增系統。

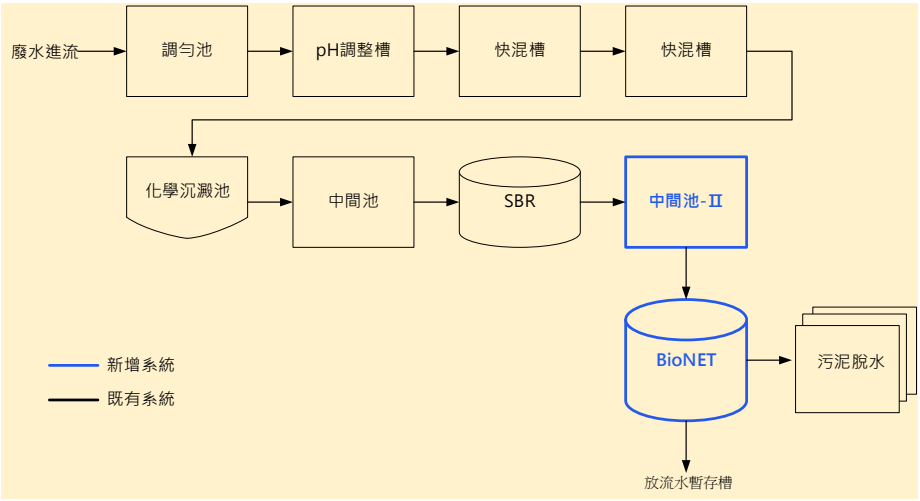


圖 9 現有與新增處理流程圖

六、結論

綜觀上述實驗評估結果，進流水 TKN 濃度需控制使其維持在 100 mg/L 左右，經由 SBR 與 BioNET 生物處理技術串聯組合程序，氨氮與硝酸鹽氮及 SS 的出流水濃度符合舊廠放流水自行排放標準 20 mg/L、50 mg/L 與 30 mg/L 以下，然於新建廠則為納入桃科污水下水道，出流水納排標準氨氮濃度為 30 mg/L、硝酸鹽氮為 50 mg/L 以上。雖然現有 SBR 生物系統負責擔任有機氮廢水之水解、硝化及脫硝處理技術，可以達到自行排放

的氨氮及硝酸鹽氮濃度，同時可降低污泥的產生量，因此也相對地大幅減少污泥處理費用，然又因 BioNET 生物處理技術，可負責攔截及把關出流水 SS 以及 SBR 出流水氨氮濃度高於 20 mg/L 以上異常問題發生的困擾。

七、參考文獻

1. Ying-Chih Chiua,_, Li-Ling Leeb,1, Cheng-Nan Changb, Allen C. Chao., 2007 Control of carbon and ammonium ratio for simultaneous nitrification and denitrification in a sequencing batch bioreactor. 59, 1–7.
2. Xinping Yang, Shimei Wang, Lixiang Zho., 2012 Effect of carbon source, C/N ratio, Ying nitrate and dissolved oxygen concentration on nitrite and ammonium production from denitrification process by Pseudomonas stutzeri D6. 104, 65–72.
3. Wenjing Chen , Yiming Lu , Quan Jin , Miao Zhang , Jun Wu., 2020 A novel feedforward control strategy for simultaneous nitrification and denitrification (SND) in aerobic granular sludge sequential batch reactor (AGS-SBR).
4. Jiantao Ji , Yongzhen Peng , Xiyao Li , Qiong Zhang , Xiping Liu., 2020 A novel partial nitrification–synchronous anammox and endogenous partial deniytification (PN-SAEPD) process for advanced nitrogen removal from municipal wastewater at ambient temperatures.
5. 歐陽橋暉，工業污染防治第 62 期，86 年 4 月。
6. 陳慶華等，工業技術研究院。化學工業研究所，高性能整合性廢水處理技術開發 FY87 年度計畫執行總報告，87 年 7 月。
7. 白子易、莊順興、許鎮龍、蘇昭郎、邱仁杰，以台灣活性污泥模式 (TWEA1) 模擬 A2O 程序於變動 SRT 之硝化菌族群動力。
8. 莊順興、鄒文源等，埤塘水質調查暨整治現地研究，工業技術研究院化學工業研究所，88 年 6 月。
9. 王少波、王淑瑩、彭永蓁、李勇智，常溫內源反硝化脫氮過程中pH和ORP變化規律，94年3月。
10. 陳致君、洪仁陽、姜榮煌、洪政偉、陳威全、廖啟鐘、鄒文源，氨氮與正磷酸鹽廢水以BioNET® 和化學混凝組合程序之實場處理，環保技術與工程實務研討會，104年11月。
11. 陳致君、洪仁陽、蔡松均、梁德明、黃志彬，以UF/EDR回收PCB產業廢水:BioNET前處理評估，廢水處理研討會，109年11月。

電力業價值鏈循環創新之推動策略

陳詩易*、郭泰均*、王郁惠**、吳政宏***、温桓正****

摘　要

台電公司面對能源轉型的國際趨勢與友善環境的要求，及落實政府 5+2 產業創新計畫之循環經濟政策，以三大方向「擬定循環經濟策略藍圖」、「落實電力業價值鏈循環經濟」、「擴大對外溝通推廣、展現理念及成果」為主軸，並藉由訂定循環經濟政策目標與行動方案，作為推廣落實循環經濟策略方向。台電公司推動循環經濟之作法為：

一、蒐研國外電力業循環經濟作法，擬定循環經濟策略藍圖與整合能源與資源面向，以生命週期規劃相關推動策略。

二、落實電力業價值鏈循環經濟，於發電、輸供電、配售電各環節納入循環經濟五大商業模式，同時致力於電力事業副產品及退役材料再利用。

三、透過與利害關係人溝通及擴大議合活動，在活動當中落實循環經濟概念，積極對外展現循環經濟的執行成果。

台電公司未來將以過去廢棄物料再生的方案推動成果為基礎，將煤灰等物料拓展更多利用方式，延伸至其他物料循環商業模式應用。且持續針對價值鏈投入與產出，進行潛勢物料盤點，發展商業模式可行性評估與試點。並促進跨部門溝通，逐步擴大方案規模與範疇，讓循環經濟更能落實在企業營運的各個環節。循序漸進以循環經濟策略藍圖為主軸、實踐短中長期目標，建構能源及資源的循環迴圈，落實永續電力。

【關鍵詞】循環經濟、永續發展、電力業

---

*台灣電力股份有限公司環境保護處　專員

**台灣電力股份有限公司環境保護處　組長

***台灣電力股份有限公司環境保護處　副處長

****台灣電力股份有限公司環境保護處　處長

一、前言

循環經濟（Circular Economy）是把能資源消耗的線形經濟模式，從優化能資源利用效率找出機會點，轉變為循環的迴圈，進而創造新的商業模式，建立能資源循環再生的產業共生體系，並促進邁向零廢棄社會。隨著人類發展模式對資源開採和環境污染造成的壓力愈加嚴重，循環經濟的概念逐漸受到更多的重視，並且成為多個國家的經濟發展新模式；台灣政府亦將「循環經濟」列為「5+2 重要產業發展策略」，以創造經濟與環保雙贏並與國際接軌。台電因應國內外經濟發展趨勢邁向循環經濟，以循環思維打造高效與永續的能資源利用，並落實循環經濟之理念，積極推動各項循環經濟議題，並藉由訂定循環經濟政策目標與行動方案，開創電力業發展循環經濟的機會，其中台電公司現階段推動循環經濟之機會與發展藍圖如圖 1 所示。

圖 1、台電推動循環經濟之機會與發展藍圖

一、 國際循環經濟推動作法之彙整

(一)創新的循環商業模式

廣義的循環經濟理念，從前端生產設計改變產品功能與材質，使之適合回收再利用，並發展創新的商業模式。透過租賃的方式減少對初級原料和能源依賴，以減少廢棄物、廢水、廢氣產量，最終再將廢棄材質進行循環利用。而循環經濟必須以「客戶」為中心的商業模式

建立循環鏈結的可能，有關循環經濟商業模式的雛型，國際管理諮詢埃森哲顧問公司(Accenture)於 2014 年將其歸納為五種循環商業模式，結合其他創新技術，透過以客戶為中心的商業建立循環優勢。而循環經濟驅動的關鍵要素是可持續性商業模式，可歸類為生產端、商業端驅動兩類，前者包含循環資源供應、資源再生、產品延壽，後者為共享平台、產品服務化，五種商業模式與電力業推動要素之說明如表 1 所示。

表 1、電力業五種循環經濟商業模式表

循環經濟的商業模式	商業模式主要特性說明	電力業循環經濟推動要素
循環供應及設計 (Circular Supplies & Design)	提供可再生、可生物分解、可重複使用、可回收之資源，以取代一次性耗用、稀少資源的利用、提升能資源使用效率	再生能源應用、低碳燃料、儲能設備建置、綠色採購、需量反應機制、使用生質材料及可回收之營建材料、模組化設計、高效率發電機組等
產品延壽(Product Life-Extension)	透過維修、再製造、升級和轉售等方式，延長建物、產品、和零組件的生命週期	電廠及電力基礎設施耐久設計、可維修升級性、提供客戶電力設備維修或升級服務、產品可再製造或翻新等
資源再生(Resource Recovery)	在產品生命週期結束之際，從退役材料和副產品回收有用之能資源，將廢棄物的價值回復進行再利用	餘熱回收使用、無機物料回收再造、發電廢棄物再利用、提供回收服務、廢棄物資源化技術等
產品服務化(Product As a Service)	企業透過租賃或是依照使用量計價的交易機制，將提供產品的使用權擁有權轉化為一種服務，並透過訂定契約改革過往買斷模式	預測性維修服務、電力產品服務化（如智慧電網）、高能源效率產品以成效給付、電力基礎設施及辦公設備產品以租代買等
共享平台(Sharing Platform)	透過共享模式的建置，提高產品的利用率；如二手市場或 P_2P 出借市場、協同消費	養藻固碳、電廠設施設備建材銀行、材料護照資訊庫、共享低碳電站、電廠除役共生園區應用等

(一)國際上電力業之循環經濟作法

(1)丹麥卡倫堡火力電廠

丹麥卡倫堡火力發電廠與周圍的煉油廠、石膏版工廠、製藥廠建立產業共生園區，各廠商間透過各自「廢棄物」的交換，創造能資源再利用的可能，其中運用循環經濟商業模式中,「資源再生」結合「共享平台」的模式，將廢棄物進行循環利用，達到節能減排的目的。

表 2 彙整該園區的循環經濟作為，並以能源流與物質流的方式進行區分，進一步了解能資源面相。燃煤火力發電廠將產生之廢熱、蒸汽提供給製藥廠以及養漁場使用，並將發電副產品石膏提供給石膏板工廠，產生的飛灰則做為道路鋪設材料，有效將廢棄物利用轉化為資源物，獲得經濟、環境與社會兼顧的正面效益。

表2、丹麥卡倫堡火力電廠產業共生園區彙整表

項目	方法	說明
能源流	發電廠提供廢熱給養魚廠	發電廠排放之廢熱提供養魚廠加溫使用，減少因寒害造成之魚損，使養魚場提升漁獲量。
	發電廠將蒸汽供給製藥業工廠跟石油製造業工廠	發電廠提供蒸汽作為煉油廠將導管及儲藏槽加熱以及製藥廠加壓之熱能。
物質流	水泥業從發電廠取得石膏材料與飛灰	發電廠燃煤產生的飛灰，以及廢氣經由脫硫設備過程產生之硫酸鈣(工業石膏)，可作為水泥產業之原料投入。
	石油製造業導引冷卻水到發電廠的鍋爐	石油製造業的廢水處理後部分經由下水道導引到海洋，部分經由管道提供給發電廠做為清潔或其他使用，提升水資源再利用並降低廢水排放。

(2)關西電力公司

關西電力成立兩間子公司分別負責處理發電副產品、工業廢棄物以及租賃業務、土地活化與運用、辦公設備租賃等業務（圖 2)。營業項目涵蓋無機物料回收再造、發電廢棄物再利用、提供回收服務、廢棄物資源化技術、電廠及電力基礎設施維修升級以及提供客戶電力設備維修或升級服務，多項營業項目橫跨「資源再生」、「產品延壽」及「產品服務化」等三種循環經濟模式。

圖 2、關西電力兩家子公司營業項目圖

依照上述方法蒐研國外電力業及能源業循環經濟相關作為之內容與效益，初步蒐研結果彙整如表 3。

表3、國外電力/能源業循環經濟作法實例彙整

國家	公司名稱	循環經濟商業模式				
		循環供應及設計	產品延壽	資源再生	產品服務化	共享平台
義大利	Enel			◎		◎
	Enel X	◎			◎	◎
西班牙	Iberdrola	◎				◎
	Endesa		◎			
法國	EDF			◎	◎	
日本	關西電力		◎	◎	◎	
芬蘭	Oulun Energia				◎	
丹麥	卡倫堡			◎		◎

二、 台電循環經濟之策略與成效

(一)擬定循環經濟策略藍圖

面對能源轉型的國際趨勢與友善環境的要求，為確保未來循環經濟發展方向可與國際趨勢接軌，台電透過系統性的轉化經營思維，在能源轉型的過程中納入循環創新，打造創新的循環電力事業。綜整能源與資源面向，並就生命週期整體規劃，貫穿發電、輸供電、配售電的價值鏈，逐步納入循環創新思維，研擬未來推動循環經濟之策略藍圖。

電力業的產品是「電」，而製造電力的兩大關鍵因素為投入的原料「能源」，以及維持電力基礎設施及設備的材料「資源」。由於能源與資源具有相互影響的特性，因此需要從設計規劃、資源採購、電力製造基礎建設到電力供售與服務，乃至於最後的廢棄處理及回收等階段，探討建構其循環再利用迴圈的可能性。

目前研擬之循環經濟策略框架分為四大部分，從最內圈核心由台電與其利害關係人出發，向外推展包含循環能源、循環資源至共享平台，建立推動循環經濟策略。循環能源包含「能源生產」、「能源輸配」、「能源使用」及「能源回收與再利用」階段；循環資源則包括「前期規劃及可行性評估」、「循環設計、採購與營建」、「資產設備使用與維運」及「資源回收及再利用」四階段。其中，台電循環經濟策略藍圖如下說明(圖 3)：

圖 3、台電循環經濟策略藍圖「能源」推動之策略

1.能源生產

目前台電公司於能源生產方面之推動方向，包括提高再生能源發電佔比、擴充再生能源裝置容量，另於109年度燃氣發電比例已高於燃煤。此外，將火力電廠導入超超臨界機組，持續降低燃煤、燃氣等面向之碳排放，並提升能源使用效率。

2.能源輸配

能源輸配是指於能源輸配電過程中，降低能源逸散與損耗，並持續提升輸配電效率。目前在歐洲地區，智慧電網及智慧電表建置的發展技術成熟，例如：意昂集團(E-ON)發展高密度的智慧電網收集來自離岸風場、風場與太陽能電場之電力，並分為四種電壓，提供給不同需求之用戶（跨國傳輸、企業用戶、工業用戶及一般用戶），另外義大利國家電力公司(Enel)之子公司 Enel X 則將用電戶的餘電銷售給其他用電需求量大的客戶，以提升輸配電效率。

3.能源使用

在能源使用方面，透過了解用電戶的需求以提供相關的服務，藉此提升用電效率與電力調度彈性。藉由發展再生能源的儲能系統、建置電力交易平台，媒合再生能源電網供給端與需求端，達到提升再生能源使用效率的目的。目前在歐洲國家的作法為：設置充電式電動車輛充電站並進一步發展汽車連電網（Vehicle to Grid, V2G）。

4.能源回收再利用

能源回收再利用為回收電廠過剩的能源，透過能源回收新技術促進其循環再利用。在國際上也有許多電力業實施能源回收再利用的實例，如法國電力公司（EDF）將餘熱轉化為電或蒸氣，用於城市供熱或是工業及農業用途；丹麥卡倫堡的燃煤發電廠與周圍的煉油廠、石膏板工廠及製藥廠等共生循環園區，供給養魚廠之廢熱或是製藥業工廠之蒸汽等等。目前台電公司已發展低溫熱能 ORC 餘熱回收以及海洋牧場等，後續亦規劃將液化天然氣氣化冷能進行產業共生利用之作為。

(二)「資源」推動之策略

1.前期規劃及可行性評估

將循環經濟的概念融入前期策略推動的規劃，於前期規劃即擬定循環經濟方針，以區別過往的線性經濟發展模式，強化循環經濟策略之推動。例如台糖沙崙綠能循環住宅即建立 BIM 材料資料庫，採用彈性設計，將模組化、可拆性及可替換性最大化，而在國際上，伊比德羅拉(Iberdrola)西班牙私營跨國電氣公司之電力業循環經濟標竿，即於專案規劃初期即思考將循環經濟模式導入結合的可能性，其中更與西班牙政府簽署循環經濟協議，以宣示循環經濟轉型之決心。

2.循環設計、採購與營建

設備、資產以及電力等基礎設施於設計、製造與營建階段，即思考未來如何有效的重新配置與回收，並使用具有循環經濟理念的工程、產品與服務。義大利國家電力公司(Enel)模組化設計與導入「預測型設計維運」於其電廠設備設施，預測其設備使用率以及效能，讓電廠設備於即將損壞時，能自主發出預警信號，避免因電廠設施損壞而造成供電問題，使該公司能及時反應而避免更大規模的資產損壞。

3.資產設備使用與維運

資產設備使用與維運即為將產品服務化應用於電力設備，以提升電廠及電網設備維修效益，例如 Enel X 發展太陽能發電系統提供給不同需求的用戶，並提供租後買回服務。未來可規劃適合採用租賃之電力設備或通用設備，以降低財產代管及盤點之人事成本。另通用設備也可藉由產品服務化攤提費用支出，減少不必要的支出。

4.資源回收及再利用

若已確認無法藉由維運或翻新達到同樣使用效率的產品以及設備，可藉由重新拆解與回收，並開發資源新用途延長產品的生命週期。例如 Enel 開展電廠除役計畫，將該廠址透過重新再設計建構成物流中心、遊樂園、環境教育場域等。而台電公司也發展發電副產品再利用（如脫硫石膏、煤灰），進行文化資產活化以實現資源回收及再利用的目標。

5.共享平台

綜合考量「能源」及「資源」循環，以及結合與利害關係人的共享及合作，形成循環經濟策略框架的最外圈「共享平台」，透過建立相關利害關係人皆可觸及的平台，提升產品或服務的使用頻率。例如發展冷能共享、電力大數據等。

(三)價值鏈盤點與融入循環創新思維

台電公司在發電、輸供電、配售電的價值鏈納入循環創新思維，透過盤點電力業價值鏈發展、輸供、配售的資源投入與產出，持續盤點各單位的原物料使用與循環經濟熱點。以逐步發展台電循環經濟五大商業模式(循環供應與設計、產品延壽、共享平台、資源再生及產品服務化)，相關成果彙整說明如圖 4 與表 3 所示：

1.發電

電力業價值鏈的最上游為發電階段，提供水、火力及再生能源發電之營運、開發、維修及管理，致力提供穩定且乾淨的能源。火力電廠持續提升能資源使用效率，汽力發電機組導入新技術，由「亞臨界」轉為「超超臨界機組」，逐年提升發電效率、減少能資源投入以及二氧化碳、氮氧化物和硫氧化物等污染物的排放量。同時，利用低溫沸點有機工作流體的熱機循環系統(organic Rankine cycle，ORC)，將餘熱透過 ORC 回收轉換為電力。除此之外，台電持續針對發電廢棄物透過跨單位研究無機物料循環再生，並朝向高值化邁進，例如將排煙脫硫過程中生成之脫硫石膏應用於水泥業及防火板材業、煤灰再利用與混凝土業、廢水處理廠之污泥再製污泥紅磚；將排放的廢氣養藻固碳，與電廠溫排水一同投入，進行魚苗養殖試驗；將廢棄物再製成文創產品，於台電文創網頁販售；台電興達火力發電廠透過「以租代買」模式租賃排煙脫硫(FGD)廢水處理服務，由廠商負責廢水處理，提高處理效率，並負責後續廢水處理系統維護，降低維護管理風險等。

2.輸供電

電力業價值鏈的中游為輸供電，主要為變電所及電網之規劃、設計、建造及營運。在能源的輸供面向，台電建置轉直供平台並與再生能源業者協作供電。資源面則是針對變電所及電網等輸供電的基礎設備中的相關營建材料再利用或營建物的活化利用。台電文創則將線路絕緣陶瓷礙子與回收木材、LED 燈相結合，製成礙子燈座，提高廢棄礙子的經濟價值。礙子為電力運輸網中用以絕緣與支持電線安全穩定的物體，常見於輸電線路鐵塔與電線桿上，為台電獨有的物料。廢礙子貯存於各地營業單位，並透過招標方式委外處理。台電活化閒置資產，延長建築物之生命週期，台電於新民配電變電所上方建置全國第一座綠能主題展示館—電幻 1 號所，透過「參與式觀展」形式，宣傳用電知識，同時提供空間舉辦綠能講座，提供民眾能源與環境生態教育。

3.配售電

電力業價值鏈的下游為配售電，主要為售購電、用戶服務、配電網規劃建置、運轉及維護。在資源面向，如同輸供電系統將絕緣陶瓷礙子與回收木材進行再利用；在能源面向，進行 AMI 佈建及智慧電錶安裝、提供需量反應措施，並預計於 2020 年底試行電力交易平台。配售電階段為電力業下游，主要為與使用者接觸的介面，資源再利用較不局限於電力業的特定材料，而是一般與民眾的溝通活動的展覽材料再利用。例如台電將展覽使用之組合棚架拆遷後，重組續展，達到資源再利用。

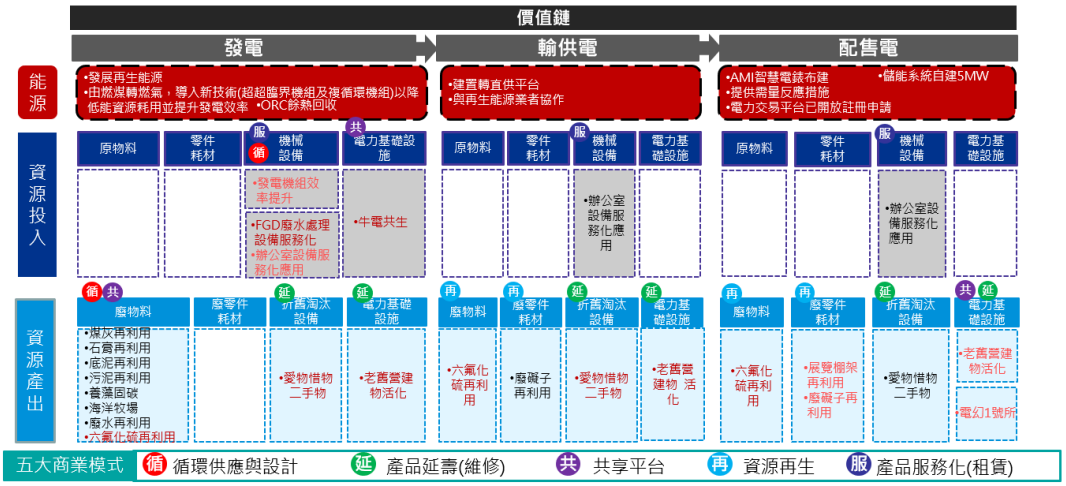


圖 4、電力價值鏈成果彙整圖

表3、電力價值鏈成果彙整說明表

商業模式	循環經濟作為	成果與效益
循環供應與設計	發電機組效率提升	降低資源投入，每度電用煤量減少0.068公斤、每度電二氧化碳排放量減少0.186公斤，同時每度電熱耗率減幅為20%。
	低溫熱能ORC餘熱回收	於塔山電廠完成先期評估試驗，並聯兩台ORC 裝置回收年限約4.3年，年發電量122.5萬度，每年電費效益為735.3萬元。
產品延壽	老舊營建物活化	杭州南路老屋、青田街老屋以及潮州街老屋修復再利用為茶道教室或複合式空間。
	愛物惜物二手物	利用「臺北惜物網」[10]將部分尚具功能報廢物品以「二手品」方式進行拍賣，109年網拍成交件數共3,991件。
產品服務化	辦公室設備服務化	透過以租代買模式租賃影印機、水塔除垢裝置、畫作以及盆栽。

商業模式	循環經濟作為	成果與效益
	FGD廢水處理設備服務化	興達電廠FGD廢水處理設備採用以租代買模式。
資源再生	廢水再利用	台電致力於廢污水回收再利用，109年廢水回收261萬噸。
	六氟化硫再利用	六氟化硫（SF6）純化再利用，109年回填率達93.61%，溫室氣體減量達1,080,738公噸。
	養藻固碳	利用廢煙氣養殖微藻，減少二氧化碳排放量，更將剩餘之藻類再製為保健食品、生技保養品與養殖餌料等，微藻每年每公頃可吸收的二氧化碳達229.5噸。
	廢礙子再利用	製作礙子燈座文創商品，進行販售。
	展覽棚架再利用	科普特展之組合棚架拆遷後，重組後續展。
	煤灰再利用	煤灰再利用為全煤灰回填工程材料、飛灰塑木複合材、底灰輕質磚、天目釉陶瓷品、煤灰杯墊、獎盃與非直接臨海之中隔堤方塊，109年度煤灰再利用率達89.7%。
	石膏再利用	石膏再利用為石膏纖維板、水泥製造及石膏板製造，109年石膏利用率達98.6%。
共享平台	牛電共生	大彎光電場與農委會畜產試驗所合作，由黃牛協助光電場進行除草。
共享平台	海洋牧場	利用排放的廢氣進行養藻固碳，與電廠溫排水一同投入，進行魚苗養殖試驗。
	電幻1號所	將變電所部分場域改造成綠能主題展示館—電幻1號所

台電長期致力於電力業副產品及退役材料再利用，更於碳盤查、水足跡、物質流、以及能源管理導入系統性管理架構，在整合推動循環經濟的面向上實已奠定相當之基礎，過去台電循環經濟較著墨於煤灰等發電副產品再利用，未來將延伸既有之產出，從下游端之副產品面向擴大到整體台電公司發電、輸供電及配售電價值鏈上下游，探討價值鏈上投入與產出可能產生的循環經濟商業模式，以推動循環經濟策略藍圖與相關目標方案之擬訂與執行，並同步擴大向外推廣。

(一)理念溝通及成果推廣

由於循環經濟概念是新興的商業模式，有別於過去從搖籃到墳墓的線性商業模式，對於循環經濟的概念尚在逐漸改變中，重新思考對於改變既有思考模式與消費模式非常重要，且循環經濟之推動需要各個單位的共同努力才可行，因此循環經濟藍圖之建構以及電力業價值鏈循環經濟策略之推動，皆需要內部跨部門長時間的理念溝通、以及外部專家學者觀點的意見達成，改變同仁對於既有模式的框架，透過

舉辦「循環經濟策略藍圖框架工作坊」、「公民咖啡館」等溝通平台，與相關單位溝通及凝聚循環經濟策略與意識；同時也舉辦「循環經濟策略框架及產品服務化應用」專家諮詢委員會，彙整所有專家之指正與建議，使得循環經濟轉型策略更趨完善。此外，為將循環經濟理念向外擴大議合並推廣，透過舉辦「環境月」特展 -「退役材料循環」設計展等展覽，於活動當中展現台電循環經濟的創新成果，期望循環經濟理念向外展現並推廣。

1.循環經濟策略藍圖框架工作坊

舉辦循環經濟策略藍圖工作坊的目的，主要為藉由台電相關部門之參與工作坊，彙整台電未來可能納入此框架之作為，並進一步針對目前的循環經濟策略進行落差分析、溝通討論後續的推動規劃，以建構循環經濟策略藍圖框架，完善循環經濟策略藍圖框架，以利後續與相關單位討論循環經濟擬定循環經濟的短中長期目標。

2.公民咖啡館

公民咖啡館突破傳統單向溝通的模式，以茶會的方式進行共同對談交流，並藉由邀請不同處室的中階主管腦力激盪，增加各單位對於循環經濟的議題的重視，也讓同仁思索未來於前期規畫階段導入循環經濟概念之可能，以擬定未來電力業循環經濟開展之具體行動方案以及循環經濟策略。

3.「循環經濟策略框架及產品服務化應用」專家諮詢委員會

此專家諮詢委員會邀請循環經濟、環境工程、環境管理等相關領域專家學者，針對台電公司擬定之循環經濟策略框架以及產品服務化應用推動方案深入討論，以彙整所有專家之指正與建議，並提供同仁創新的循環經濟思維，俾利後續循環經濟方針調整及修正方向，使得將來轉型策略更趨完善(如圖 5)。

圖 5、「循環經濟策略框架及產品服務化應用」專家諮詢委員會

4.「環境月」特展-「退役材料循環」設計展

此特展除了對外展現台電公司長期投入循環經濟的歷程、亮點及創新行動，也透過與 C-Hub 成大創意基地設計師合作，進行台電公司循環經濟潛勢物料盤點，基於廢棄物應用之成熟度、材料取得之難易度，以及設計單位對於材料處理之難易度進行考量，將五種廢棄物納入設計主題；並將團隊分為五組設計師與學生共同參與，結合不同的退役材料進行創作，最終產出五種退役材料的作品。

而此次的設計主題規定將退役材料創作再利用為「生活居家用品」，重現退役材料於日常生活中的利用價值，使大眾了解與重視台電倡議之「循環經濟生活」。目前經由設計師與學生團隊改造重生的商品包含，使用輕鋼橫擔製作的柵欄、木橫擔製作的傢俱櫃、電纜線製成茶几、電力保險絲座製成板凳，以及利用電表及礙子結合製成電錶藍芽音響燈(如圖 6)。

圖 6、「環境月」特展 -「退役材料循環」設計展

藉著展覽、專家諮詢會、創新設計活動等對外溝通及擴大議合活動，除了在活動當中落實循環經濟概念，促進台電各項物料的加值與再利用，更對外推廣及落實循環經濟觀念，提升議題聲量；邀請利害關係人多方互動對話，促進台電與社會之共融；並提供人才發揮舞台，激發循環經濟創新設計能量；讓台電成為循環經濟領域的實踐與倡議者。

三、 結論

台電公司研擬「循環經濟策略藍圖」，以「能源」與「資源」兩面向於生命週期不同階段，建構未來的推動策略作為，並發展與利害

關係人共享能資源的合作模式。另外，為落實資源永續達到零廢棄之目標，以五種永續商業模式盤點具有潛勢循環的物料及試點可行發展商業的模式，包括循環供應與設計、產品延壽、共享平台、資源再生以及產品服務化，在電力業發電、輸電及配電的價值鏈中，探討循環經濟創新的可能。最後透過內、外部專家諮詢會議、工作坊或成果展覽等方式，擴大利害關係人溝通以及展現台電循環經濟作為在環境、經濟與社會面之正面效益。

未來將以過去廢棄物料再生的方案推動成果為基礎，將煤灰等物料拓展更多利用方式，延伸至其他物料循環商業模式應用。依據電力業兩大特性:能源及資源，發展台電獨有的循環經濟模式。並將「循環營建」作為資源圈裡的其中一項核心議題，電力設施的開發、擴建、更新改建等工程，恰巧可以運應自有退役資材再利用，回到建築中，因此應從資源角度來思考，在相關基礎設施及發電設備的前期規劃、設計/採購施工、營運使用、乃至於除役時，都納入「循環營建」的概念，來落實循環經濟，未來將透過循環經濟專案，邀請相關領域專家研議，發展具體策略及行動方案。

另持續針對價值鏈投入與產出，進行潛勢物料盤點，發展商業模式可行性評估與試點。並促進跨部門溝通，逐步擴大方案規模與範疇，讓循環經濟更能落實在企業營運的各個環節。循序漸進以循環經濟策略藍圖為主軸、實踐短中長期目標，建構能源及資源的循環迴圈，落實永續電力。

圖 7、循環經濟策略藍圖

四、 參考資料

1. Paik, Yongsun, and David Y. Choi. "The shortcomings of a standardized global knowledge management system: The case study of Accenture." Academy of Management Perspectives 19.2 (2005): 81-84.
2. Jacobsen, Noel Brings. "Industrial symbiosis in Kalundborg, Denmark: a quantitative assessment of economic and environmental aspects." Journal of industrial ecology 10.1-2 (2006): 239-255.
3. Chatfield, Akemi Takeoka, and Christopher G. Reddick. "Smart city implementation through shared vision of social innovation for environmental sustainability: A case study of Kitakyushu, Japan." Social Science Computer Review 34.6 (2016): 757-773.
4. Persson, Sara, and Ludvig Carlman Bydén. "Wind and Solar Power in Distribution Grids–Risk Management with a Distribution System Operator Perspective." (2016).
5. Mio, Chiara, and Marco Fasan. "The case of Enel." Integrated Reporting. Springer, Cham, 2013. 225-236.
6. Kempton, Willett, and Jasna Tomić. "Vehicle-to-grid power fundamentals: Calculating capacity and net revenue." Journal of power sources 144.1 (2005): 268-279.
7. Steinweg, T., A. Ten Kate, and K. Racz. "Sustainability in the Power Sector. 2010 Update. Europe." (2010).
8. Da Costa, Driely Celestino. A circular economy perfomance evaluation of the electric sector: Case study on the Iberdrola Group. Diss. Universidad Politécnica de Madrid, 2019.
9. Tagliafierro, Nicola. "The Circular Economy at Enel X." Symphonya. Emerging Issues in Management 1 (2020): 101-116.
10. https://shwoo.gov.taipei/shwoo_admin/home/home00/login

高科技產業用水計畫書管理與精進作為

黃育德*、蔡欣庭**、黃欣栩***、沈怡彤****

摘　要

我國自 1980 年代起陸續開發新竹、中部及南部科學園區，作為我國高科技產業重要發展基地，帶動以半導體產業為主的高科技產業蓬勃發展。高科技產業屬用水密集產業，因應氣候變遷加劇水資源供需不穩定性，為對園區用水進行有效之供應與管制，科技部於民國 107 年 12 月發布「科技部科學園區水電輔導管制辦法」，規定園區用戶於興建、租賃廠房時應提送用水計畫書。

園區管理單位與廠商共同合作，從技術與管理雙方面著手，除由廠商自行實施節約用水方案外，管理單位亦透過推動用水管理相關作為，提高園區內水資源有效利用。本研究綜整園區管理單位之用水管理手段，包括(1)辦理用水查核作業，如比對用水資料、檢視近三年實際用水量及用水平衡圖檢視、確認廢污水處理及監測系統現況等；(2)精進用水平衡圖，參考廠商實際用水及水回收再利用情形，予以修正調整；(3)建立節水效能指標，如單位產品用水量、單位面積用水量；(4)提供節水輔導及追蹤查核等，協助廠商提升用水效率，減輕用水壓力。

【關鍵詞】科學園區、用水計畫書、用水平衡圖、節水效能指標

---

*財團法人中興工程顧問社 正研究員

**財團法人中興工程顧問社 副研究員

***財團法人中興工程顧問社 高級研究員

****財團法人中興工程顧問社 助理研究員

一、前　言

臺灣地形起伏大、集水區地勢陡峭不易涵養水分，及降雨豐枯分布不均等地區因素，加上近年來全球氣候異常，乾旱缺水、暴雨淹水發生頻率逐年上升，導致可開發利用之水資源十分有限，直接影響生態環境、資源利用及經濟發展。另一方面，我國自 1980 年代起設立之新竹科學園區、中部科學園區及南部科學園區承擔國內半導體、電腦及精密機械等高科技產業發展，為提供營運無虞之生產環境，園區管理單位除確保電力供應外，須解決園區用水迫切的問題。

為對園區用水進行有效管理，科技部於民國 107 年 12 月發布「科技部科學園區水電輔導管制辦法」，規定園區用戶於興建、租賃廠房時應提送用水計畫書，另經濟部水利署於民國 110 年 1 月修正發布「用水計畫書件內容及格式」，完備用水計畫書之撰寫規範。園區管理單位亦積極採取一系列節約用水因應對策，本研究以新竹科學工業園區內的高科技廠商為調查對象，綜整前揭作為包含(1)辦理用水查核作業；(2)精進用水平衡圖；(3)建立節水效能指標；(4)提供節水輔導及追蹤查核等，並提出未來精進方向，以符合我國產業用水管理之目標。

二、辦理用水查核作業

依據科技部科學園區水電輔導管制辦法第三條規定，園區用戶於興建、租賃廠房時，應提送用水計畫書，經科技部科學園區管理局(以下簡稱科管局)審核通過後，方能向供水單位提出未來供水之申請。為確保營運期間，廠商確實依核定計畫書內容執行相關措施，園區管理單位應辦理用水查核作業，以掌握園區事業實際用水狀況。

(一)優先查核對象

用水計畫書查核對象，以園區用戶實際用水量超過核定量、連續三年之年平均日實際用量未達核定用量八成、廠內用水回收率未符合園區相關規定、未按時申報用水平衡圖或其他特殊情形經園區管理單位指定之園區用戶為優先。

(二)查核作業程序

園區管理單位應正式行文向受查核廠商說明本作業方法，並請廠商依規定提出近三年用水紀錄表及相關節水佐證資料，以比對廠商用水計畫書內容之完整性及正確性，查核項目及查核重點

如表 1 所示。此外，透過現場訪談，確認實際用水狀況，提出改善建議或調整核定量，並視需要辦理查核總結會議，邀集園區公會水電小組幹部，針對廠商廠內利用現況與未來趨勢，提供必要之協助；完整查核作業流程如圖 1 所示。

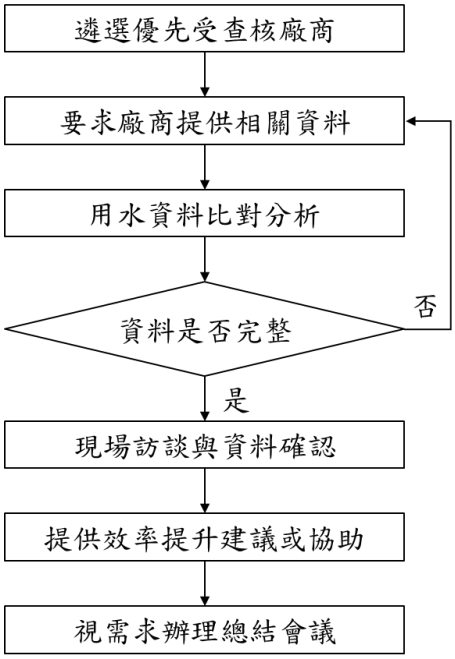


圖 1　園區事業用水查核作業程序

表 1　園區事業用水查核項目及重點

項次	查核項目	查核重點
1	廠內用水概況	確認廠商廠內用水行為，如因產能提升、產線增加、製程更換、設備更新等因素，使用水量產生變化
2	廠內近三年實際用水量	確認廠商近三年實際用水量，討論用水量增減原因
3	廠內近三年用水平衡圖	確認廠商近三年實際用水平衡圖及回用水收率狀況
4	節約用水計畫及廠內回收系統	確認廠內近年節約用水計畫，以及用水計畫書登載各項節水措施之達成度
5	乾旱缺水或預告停水緊急因應策略	確認廠內用水緊急因應策略
6	廠區用水儲存槽	確認廠內用水儲存槽狀況
7	污廢水處理與排放系統	確認廠內污廢水處理狀況
8	水資源監測系統	確認廠內各項水資源監測系統狀況
9	近一年提供用水申報相關紀錄及證明文件	確認廠商用水紀錄

(三)查核作業成果

依據 109 年度查核作業結果，共計 5 家廠商，各廠商近三年

之年度平均用水量皆未達用水計畫書核配用水量八成，透過現場訪談及資料比對後，了解廠商因受產業特性及全球景氣影響，短期內生產部門並無擴增產線或產品轉型計畫，或雖有擴產計畫但實際接獲訂單期程未能完全確定，故已請廠商核實評估未來產能利用狀況，酌修原用水計畫書申請用水量，並依科管局規定提送用水計畫書修正版。經由本次用水查核作業，該 5 家廠商原核配用水量共計 4,955 CMD，經檢討後核配用水量約可下修釋出 2,825 CMD。

三、精進用水平衡圖

用水平衡圖除可了解廠商於各類水源之使用情形外，亦可整合管理廠內各用水單元之用水情形，輔助廠商針對主要用水點進行妥適管理，以診斷主要節水關鍵；而對於區域水資源管理單位及園區管理單位而言，可透過區域內各廠商提送之用水平衡圖，對廠商之用水需求進行調配，以達水資源有效管理及分配之目的，故用水平衡圖為我國產業用水管理之重要工具。

現行用水平衡圖係採用一體適用原則，分為含製程用水版及無製程用水版，前者適用於生產型工廠，後者適用於僅為研發、實驗或其他無製程用水需求事業[1]。目前使用之含製程用水版用水平衡圖為 R8 版本(於民國 107 年 7 月 6 日發布)，如圖 2 及圖 3 所示，其重點流向標示包含原始取水流向(w1~w3)、製程用水流向(P1~P3)、排水回收再利用流向(c1~c8)、管末排水回收再利用流向(r1~r4)、外部水源流向(A1~A2)、外部二次利用廢水回收(R2)、蒸發與逸散(V1~V2)及排放(d1~d5)，以及三項用水標準，包含製程回收率(manufacturing process water recovery rate, RP)、全廠回收率(total factory water recovery rate, RT)及全廠排放率(discharge rate, DT)。其中，製程回收率及全廠回收率與園區環評承諾有關，廠商需於用水計畫書內規劃並落實各項措施，使相關回收率能符合環評承諾。

為減輕廠商負擔，提高用水平衡圖之適用性，依據不同環評承諾與相關規定，及歷年節水輔導經驗，建立精進版用水平衡圖，以供未來進駐園區廠商或提出用水計畫變更廠商參考；其修改項目分別說明如下： (一)用水平衡圖(含製程用水)修改項目

1. 含製程用水版應依園區基地分別製作。

2. 新增列印表頭，包含廠商名稱、用水地址、填寫月份。
3. 增加民生用水回收 r5。
4. 增加產品消耗用水。
5. 修正 c8 計算公式：

   C/T 濃縮倍數 6 倍以上，相當之節水當量

   $$c8= f2_0 - f2 = (V1 \times 6/(6-1)) - (V1 \times ((f2/d_{5-2})/(f2/d_{5-2})-1))$$

   $f2_0$=原補充水量；f2=提高濃縮倍數後補水量；

   V1=C/T 蒸發量；d_{5-2}=提高濃縮倍數後的 C/T 排放水量。
6. 修正 c6 計算公式，並增加是否設置 C/T 旁濾設備選項。
7. 修正 c6 及 c8 呈現位置。
8. 新增冷卻水塔飛濺水量欄位。
9. 修正英文代碼說明。
10. 新增用水回收率及排放率標準說明。
11. 特定區域新增冷卻用水回收率、生活用水回收率、降低生活用水量比率。

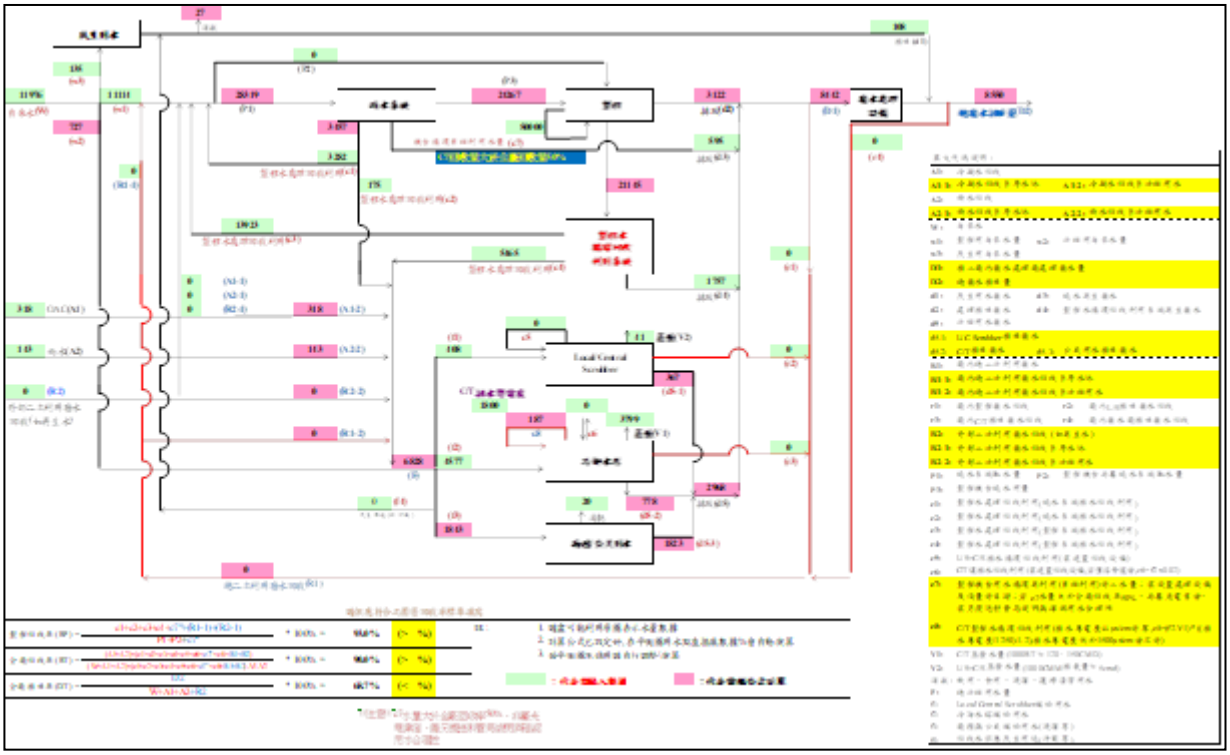
(二)用水平衡圖(無製程用水)修改項目

1. 修正流向及圖面顯示方式。
2. 新增民生用水回收及廢水排放回收。
3. 新增外部二次利用廢水回收 R2。
4. 新增總二次利用廢水回收 R1。
5. 冷卻水塔新增飛濺水量欄位。
6. 修正全廠回收率計算公式：

   $$\text{全廠回收率} = \frac{A1+A2+R1+R2}{W+A1+A2+R1+R2-V} *100\%$$

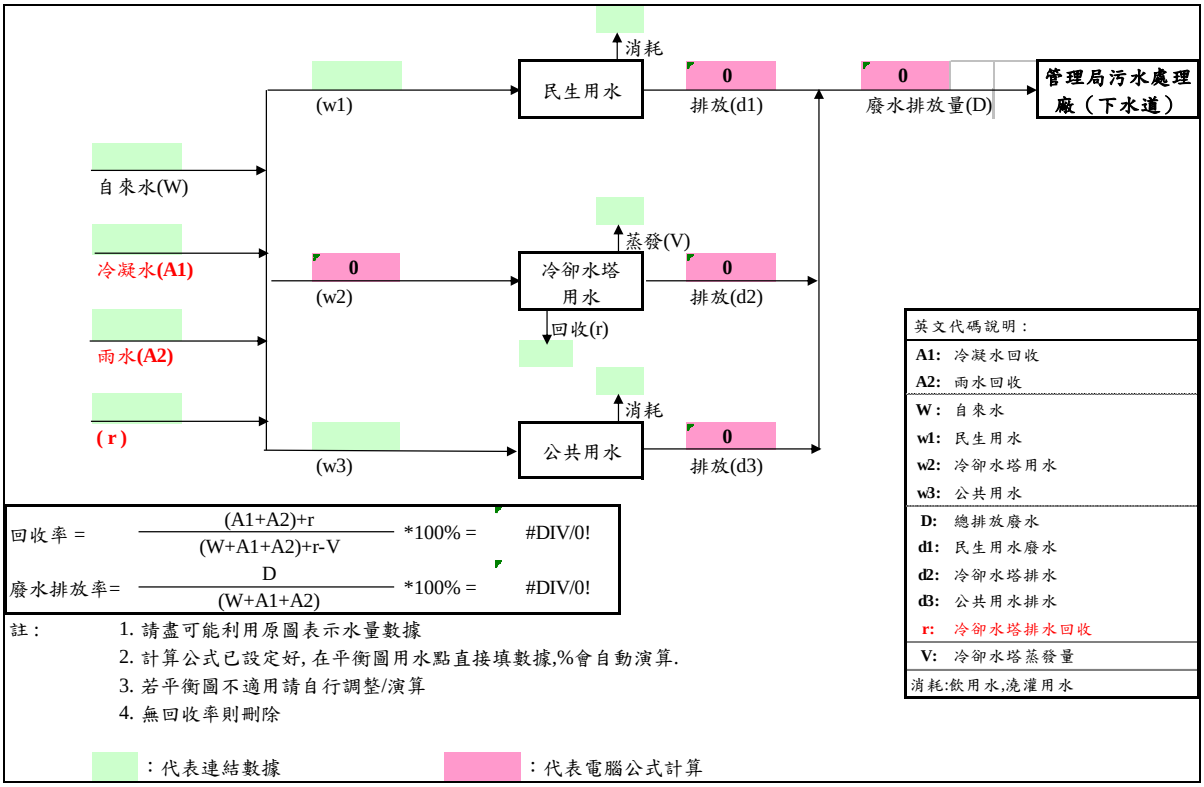
7. 修正廢水排放率計算公式：

   $$\text{廢水排放率} = \frac{D}{W+A1+A2+R2} *100\%$$



資料來源：科技部新竹科學園區管理局，民國 107 年 7 月 6 日發布

圖 2 用水平衡圖(含製程用水)R8 版



資料來源：科技部新竹科學園區管理局，民國 108 年 11 月 22 日發布

圖 3 用水平衡圖(無製程用水)

四、建立節水效能指標

為使園區廠商執行節水相關措施有遵循之標準，並方便衡量、評估廠商節水績效，園區管理單位以園區六大產業(包含積體電路、通訊、電腦及周邊、光電、精密機械、生物科技)為標的，進行單位產品用水量及單位面積用水量分析，以建立節水效能指標，茲說明如下：

(一)單位產品用水量(單位：CMD/產品單位)

單位產品用水量指標建立之目的，主要為探討企業實質產能狀態下，對於實質生產所需自來水之使用效率，在最大實質產值下使用較少的水源，代表企業生產時節水措施與廠內水資源回收利用率較佳。爰此，園區管理單位規劃調查與分析園區產業之主要產品類型、產量及單位產品耗水量，並依產業別、用水規模進行單位產品用水量級距及效能分析。

依據 109 年度回收有效問卷資料結果，產業主要以積體電路業(51.6%)和光電業(19.4%)為主，其單位產品用水量範圍如表 2 所示，平均日用水量大於 1,000 CMD 者共計 29 廠，屬積體電路業、光電業和其他(氣氮製造)，其中大於 5,000 CMD 者共計 5 廠，主要產品分別為 12 吋晶圓及 8 吋晶圓廠，顯示該產業的產能和用水量較為可觀。目前園區內廠商產品規格多元且產能隨景氣浮動，若未來可完善收集園區內事業單位產品用水量的數值加以分析，此項指標將可作為廠商產品用水需求量之參考，以及判斷廠商用水量申請是否合理之依據。

表 2　各產業別單位產品用水量調查結果

產業別	單位產品用水量(CMD/產品單位)	家數	總計百分比(%)
積體電路	0.02 – 499.0	48	51.6%
光電	0.01 – 5,949.4	18	19.4%
生物科技	0.02 – 4,233.5	10	10.8%
電腦及周邊	0.11 – 168.0	7	7.5%
精密機械	0.04 – 1,216.7	6	6.5%
其他	0.02 – 4.9	4	4.3%
總計	–	**93**	**100.0%**

(二)單位面積用水量(單位：CMD/m^2)

單位面積用水量為評估各類型開發案所需水量之重要評估

指標之一，經濟部水利署於民國 107 年 6 月修正發布之「用水計畫審核管理辦法」係以廠地面積作為不同行業別(主計處四位碼分類)的單位用水量參考值，惟該數值水量區間範圍較大，且考量與基地面積相比，樓地板面積更能反應出實際廠房用水涵蓋範圍，故以單位樓地板面積用水量作為節水效能指標。

依據 109 年度回收有效問卷資料結果，扣除未填列面積資訊廠商，有效資料總數為 91 家，其單位面積用水量範圍如表 3 所示，平均日用水量小於 1,000 CMD 者共計 63 廠，介於 1,001 – 3,000 CMD 者共計 17 廠，介於 3,000 – 6,000 CMD 者共計 8 廠，而大於 6,000 CMD 以上者共計 3 廠。總體而言，園區內廠商以積體電路業、光電業和其他(氣氮製造)之單位面積用水量較大，亦為主要用水大戶。

表 3　各產業別單位面積用水量調查結果

產業別	單位面積用水量(CMD/1000m^2)	家數	總計百分比(%)
積體電路	2.2 – 272.4	47	51.6%
光電	3.0 – 120.9	18	19.8%
生物科技	1.8 – 17.0	9	9.9%
電腦及周邊	1.1 – 10.4	7	7.7%
精密機械	1.9 – 32.5	6	6.6%
其他	58.0 – 361.7	4	4.4%
總計	–	**91**	**100.0%**

五、提供節水輔導及追蹤查核

工業用水依其用途及性質，可概分為製程用水、冷卻用水、鍋爐用水以及生活用水等，而園區內事業多以電子零組件製造業為主，在用水標的及水質規範上有其特殊性，可分為製程用水、生活用水、次級用水(含廢氣洗滌塔用水及冷卻水塔用水等)，以及公共用水(含澆灌用水、清洗用水等)，其中以製程用水為最大宗，其次為次級用水，至於生活用水以及公共用水量則視廠區員工數以及廠區占地面積而定。

為協助園區內事業，從技術面與管理面，導入節約用水技術，提升水資源使用效率，節水輔導主要內容包括用水基線資料調查、建置用水平衡資料、純水系統排水回收、製程排水回收、雨水及空調冷凝水貯留利用、冷卻水塔排水、廢氣洗滌塔廢水循環再利用，以及廢水

處理回收可行性評估，並提出製程用水減量評估與診斷，建議節水改善方案與評估經濟效益，以協助受節水輔導單位有效運用水資源，提升節水及回收再利用技術，並展現具體之節水與經濟效益。執行作業流程則如圖 4 所示，茲說明如下：

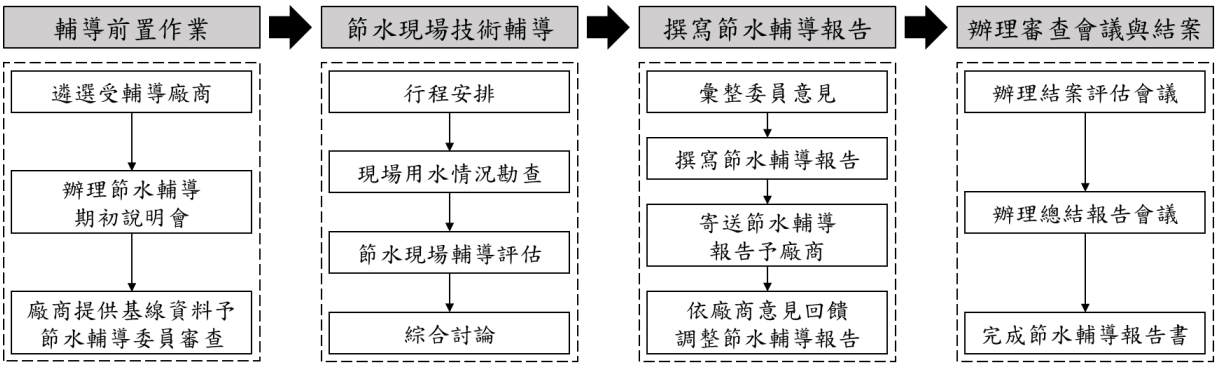


圖 4　節水輔導作業流程

(一)輔導前置作業

考量園區事業之用水量、可能節水空間、節水成效待改進或尚未進行節水者，以及是否為本計畫近三年輔導對象等因素，篩選出受輔導廠商清單，並辦理節水輔導期初說明會，邀集廠商統一說明年度節水輔導規劃以及需配合事項，請廠商提供廠內用水基線資料，供節水輔導委員審查。

(二)節水現場技術輔導

配合節水輔導工作，成立節水技術小組，成員包括園區管理單位、學者專家、園區同業公會水電氣供應委員會小組幹部等，主要工作內容為出席現場節水技術輔導及園區管理單位召開之各項工作會議，而節水現場技術輔導重點，包含確認廠內用水資料正確性、確認用水平衡圖流向正確性、協助廠內進行用水清查、提出廠內用水單元節水措施、提出具回收潛勢用水點之回收建議措施，以及評估改善措施之回收效益。

(三)撰寫節水輔導報告

現場訪查及廠商輔導作業完成後，就工廠基本資料、廠內用水現況、節水輔導重點及建議方案等資料，並彙整節水輔導委員意見，來撰寫節水輔導報告書。節水輔導報告書撰寫章節及重點如表 4 所示，茲說明如下：

1. 基本資料收集及分析：包括工廠用水現勘，工廠供水資料、

用水資料、回用資料、排水資料、相關水質資料及正確用水平衡圖之建立、修正。

2. 節水潛力分析：包括工廠用水資料清查、水平衡圖分析、已回用水量、可回用水量、原廠取水量、建議改善後取水量、原回收率、改善後製程回收潛力及全廠回收潛力。
3. 節水方案建議：包括廠內具有節水潛力之用水減量，製程回收、純水系統、空調系統及廢污水管末回收等具體可行節水方案評估。
4. 回收水量統計：包含工廠已回用水量、年度內可回收水量及未來可回收水量等各廠商過去年度及未來年度(原則為三年內)之節水達成/預估績效，並將作為年度節水績優廠商選拔之評分參考。
5. 經濟效益分析：建議方案之回收單位處理成本計算及回收年限評估。

表 4 節水輔導報告書撰寫章節及重點

項目	內容
一、工廠基本資料	(一)建廠日期 (二)主要產品 (三)員工人數
二、用水現況	(一)廠商取水、用水及排水現況 (二)主要耗水點、回收率及單位產品用水量 (三)用水平衡圖 (四)純水系統及廢水系統流程
三、現有節水措施	說明目前廠內既有的節水措施
四、節水改善評估及建議	(一)改善建議方案 (二)具節水潛力回收點成本效益分析 (三)改善後用水平衡圖 (四)結論與建議
五、附錄	(一)現場照片 (二)現場技術輔導、結評會議紀錄及辦理情形

(四)辦理審查會議與結案

完成各廠節水輔導報告書後，透過辦理結案評估會議及總結報告會議等討論，並與輔導廠商確認定案後，完成節水輔導結案成果報告書，作為受輔導廠商列入未來年度推動節水措施之參考。

(五)追蹤查核輔導成效

為掌握前一年度受輔導廠商實際節水情形，透過現場訪查方

式，對前一年度園區受輔導廠商進行現地查核，以追蹤輔導成效，勘查重點包括(1)廠內用水、排水、水回收、全廠回收率、製程回收率、排放率及用水平衡圖等相關用水資料、數據之合理性及正確性；(2)前一年度輔導改善建議事項之執行達成率追蹤查核；(3)其他節水空間診斷及改善方案建議，並提出查核報告。

六、結　論

我國科學園區內廠商多屬高耗水之高科技產業，為達成水資源有效利用及穩定供應，科技部於民國 107 年 12 月發布「科技部科學園區水電輔導管制辦法」，園區管理單位亦配合提出相關配套措施，包含(1)辦理用水查核作業，可掌握園區事業實際用水狀況，並規劃下修各廠商之核配用水量；(2)精進用水平衡圖，可提高產業適用性，供未來進駐園區廠商或提出用水計畫變更廠商參考；(3)建立節水效能指標，例如單位產品用水量、單位面積用水量，作為節水相關措施之遵循標準；(4)提供節水輔導及追蹤查核，確認輔導成效，並提升各廠商之節水及回收再利用技術。透過上述作為，園區管理單位可解決園區用水迫切的問題，並達成政府逐年降低工業用水量之量化目標。

七、參考資料

1. 李晨瑜、黃欣栩、黃育德、鍾裕仁(2018)我國現行用水平衡圖之分析與探討。中興工程，(140)，33-40。
2. 科技部(2018)科技部科學園區水電輔導管制辦法。
3. 新竹科學園區(2018)用水平衡圖(R8 版)。檢自 https://www.sipa.gov.tw/home.jsp?mserno=201604180001&serno=201001210016&menudata=ChineseMenu&contlink=ap/download_view.jsp&dataserno=201805170001。
4. 新竹科學園區(2019)用水平衡圖(無製程用水)。檢自 https://www.sipa.gov.tw/home.jsp?mserno=201604180001&serno=201001210016&menudata=ChineseMenu&contlink=ap/download_view.jsp&dataserno=201009030003。
5. 經濟部水利署(2021)用水計畫書件內容及格式。

廢鋁加工廢水再生循環利用

蔡振章*

摘　要

基於鋁合金特性，實務上，各種鋁合金加工業皆採用強鹼溶液進行鋁合金表面預處理，或是各項生產程序的後處理，例如，模具脫除作業。雖然鹼處理方法可以得到良好處理效果，但卻會產生大量之強鹼廢水溶液，其中含有極高濃度的鋁成分。現有該股廢水處理方式皆利用酸鹼中和方式，處理到放流水規範，予與排放。吾人針對該種操作模式進行成本分析後發現，以一噸廢水為例，新泡強鹼溶液之片鹼原料費用僅占總操作成本 32%，廢水委託代處理費(每噸 10,000 – 20,000 元)高達 58 - 74%，亦即鋁加工業為操作強鹼液時，額外負擔強鹼本身成本的 2 倍費用，支付廢水處理費用。該項分析數據凸顯，廢水處理費用之昂貴。以台灣鋁擠型產業為例，每年廢水量 8,000 噸以上，該產業每年花費代處理費用高達上億元。

針對該項高昂之強鹼廢水處理費用，吾人提出一項環保、經濟技術，將強鹼液回收循環使用，不但不會產生廢水，可以節省巨幅廢水代操費用，同時可以回收鹼液，節省新鮮片鹼用量達 50%以上，降低片鹼原料成本，一兼二顧，藉可提升工業安全與環保，又可以降低操作成本，具有顯著循環經濟效益。

【關鍵詞】鋁加工、強鹼廢液、廢水純化處理、回收循環利用

---

*國立高雄大學應用化學系　特聘教授

一、鋁擠型廠咬模程序

輕金屬包括鋁、鎂、鈦合金等，由於密度低，質地堅硬，其應用日益廣泛，被廣泛使用於建築裝潢、機械設備、電器用品等各式器材，甚至是航太產業。以鋁合金為例，其密度為 2.70 g/cm^3，非常適合於今日輕薄短小各項產品需求。鋁合金化學性值活潑，接觸到空氣中即會快速的自我氧化，在表面生成一層緻密氧化層，因而具有抗氧化、耐腐蝕性功能。同時，鋁有良好的導熱導電性，因而廣泛應用於各項民生、軍事用品，包含建築材料例如鋁製門窗；運輸交通器材例如汽車輪框；電器設備與電子產品例如機殼；與運動器材、食品包裝、機械五金等產業，產業結構完整且能影響整體經濟發展，創造出一個龐大的經濟體系。隨著環保材料、電子 3C 產品等需求，鋁合金需求正在快速成長，鋁合金產業正蓬勃發展。

鋁合金加工產業龐大，加工方式包括鑄鋁、鋁擠、陽極電鍍處理等，藉以製造各種鋁合金產品。基於鋁合金特性，各種鋁合金加工程序皆需要配合不同之預處理或後處理程序。在陽極電鍍處理過程中，針對鋁合金表面在空氣中所生成氧化層，加工前需要進行預處理程序，去除表面氧化物層，藉以進行後續之精密加工處理，提高鋁合金製品之抗腐蝕性能與相關性質。

台灣鋁擠型廠商約有 120 家，產值佔台灣整體鋁工業的 24%，約 199 億元[1]。鋁擠型操作包括多道操作程序，鋁合金先經約 420–520°C 高溫軟化，再經過高壓擠壓成型，鋁製產品從模具中擠壓脫模成品。其中擠壓模具為鋁擠型廠的一個核心模具，在連續式擠壓生產過程中，最後會有一段鋁材殘留在模具中。依據統計數據，模具殘鋁量為大約每操作 1 噸鋁坯會有 3 - 10 Kg 殘鋁量。模具殘鋁必須清除，稱為「咬模」程序，得以再生模具，模具得以重複使用。「咬模」程序作法係採用高鹼度的氫氧化鈉水溶液，進行「氧化還原反應」，如下列反應式，把模具中的殘鋁清除，使鋁渣溶解，模具藉此脫模，得以再生重複再使用。該等「咬模程序」涉及激烈之化學反應，反映放出大量熱量，導致溶鋁槽咬模過程中有著大量溫升，需要嚴謹的反應溫度控制，重視操作安全。

$$2Al + 6H_2O + 2NaOH \rightarrow 2Na[Al(OH)_4] + 3H_2$$

$$Na[Al(OH)_4] \rightarrow NaOH + Al(OH)_3$$

全球鋁擠型製品年產量可達 1,500 萬公噸，依據統計資料，每公噸鋁擠產量，約有 0.025 公噸廢鹼產出，因而廢鹼液年產出量高達 37.5 萬公噸。其中，台灣的鋁擠型工業年產量約為 30 – 100 萬公噸，而廢鹼液年產出量

則多達 8,000 公噸。該項「咬模程序」能夠有效脫除模具，但處理後會產生大量的「含鋁強鹼廢水」，其組成之鋁(Al)含量為 6 – 14 wt%，氫氧化鈉(NaOH)濃度為 15 – 29 wt%，如此高鋁含量強鹼廢水，必須進一步進行環保處理，才能排放。

二、鋁擠廢水處理現況

目前台灣的鋁擠型工業廠商對於廢鹼液的處理方法有兩種方式，一種方式係將廢鹼液收集至大型儲存槽，再交給外部環保處理公司委外處理，如圖 2 所示。

圖 1　金屬表面處理業之廢水處理流程

廢鹼液到達委外專業廢水處理工廠後，進行一般靜置沉澱處理，進而分離澄清上層液與下層氫氧化鋁固體，再將上層鹼液採用酸鹼中和－沉澱方法，在廢鹼溶液加入「酸性礦化劑」，例如，硫酸 H_2SO_4，將廢液液調至中性或偏酸環境(pH < 7)，廢液中之鋁離子形成硫酸鋁$(Al_2(SO_4)_3)$固體沉澱。若以硫酸鋁作為礦化劑，其反應式如下所示，接著進行液/固體分離，下層固體進行膠體分離；上層澄清液溢流到二級處理槽，再進一步處理至放流水標準，送至工業區廢水處理場進行最終處理。

$$2[Al(OH)_{3+x}]^{x-} + 2x\ Na^{+} + 3H_2SO_4 \rightarrow Al_2(SO_4)_3 + 2x\ Na(OH) + 6H_2O$$

此種委外代處理操作模式為集中處理，專業代工，其優點在於廢水處理工廠可達經濟規模，比較會有效率；缺點則是廢水長途運輸，有安全疑慮；代工處理不可靠，工廠停工風險較高；各工廠廢水品質不一，集中處理之廢水組成無法控制，增加廢水處理場操作難度，甚至於無法達到廢水處理場操作目標與效率。

另外一種為廠內先行酸鹼處理，鋁同時產生鋁汙泥。廢水則再送到各工業區之廢水處理廠處理成放流水標準，加以排放。汙泥則委託環保代處理業者清運處理。

$$[Al(OH)_{3+x}]^{x-} + x\ Na^{+} + xHCl \rightarrow Al(OH)_3 + x\ NaCl + xH_2O$$

酸性沉澱去鋁程序之核心技術在於選擇合適之沉澱劑與控制在適當的溶劑環境。沉澱溶液性質則視沉澱劑添加量而定，其 pH 值呈現微酸性質，溶液中鋁離子濃度與膠體呈現平衡，溶液中之平衡式如下式，「酸性礦化劑」添加量影響到廢鋁回收率、溶液 pH 值與溶液中之鋁離子含量。

$$Al^{3+} + 3\ OH^- \rightarrow Al(OH)_3 \qquad Ksp = 1.9 \times 10^{-33}$$

目前鋁擠型廠之含鋁廢鹼液之處理方法，皆採管末處理方法，台灣的鋁擠產業，每年會有超過 8000 公噸的廢鹼液產出。從鋁擠廠操作效益計算立場，廢鹼液處理需要付出高額代處理費用，鋁擠廢水之產值為負值。此方式相當不環保，需要有大量的中和劑及沉澱劑，且經過處理已失去原先的鹼度，僅能排放而無法重複使用。

三、循環再生廢水處理之經濟效益評估

吾人針對該種操作模式進行成本分析，採用 LCA (Life cycle analysis) 手法，包括鹼液配置、溶鋁操作、廢鹼處理、最終放流四個階段，如表 1 所示。以 LCA 分析方法，我們將目前之廢鹼處理法稱為片鹼一次性使用法，以一噸鹼液計算，該 NaOH 溶液鹼度為 28.0%計算，即需片鹼 280 公斤，以每公斤 25.0 元計算，每噸鹼液之鹼液成本為 7,000 元。但每噸廢鹼液之處理費用高達 1.5 萬元，計算結果可以得知，新泡強鹼溶液之片鹼原料費用僅占總操作成本 31.5%，廢水處理費高達 67.5%，亦即鋁加工業為操作強鹼液時，額外負擔強鹼本身成本的 2 倍費用，支付廢水處理費用。該項分析數據凸顯，廢水處理費用之昂貴。

依據綠色化學 12 原則[1]，解決前述各項問題之最高策略首推 3R 策略，亦即回收(Recycle)、重複使用(Reuse)與減量(Reduction)，廢水處理原則應該是「源頭減廢」、「分流處理」。文獻上有許多報導，絕大部分廢水處理技術，大都屬於物理處理法，包括汙泥固化、離子交換方法等。由於鋁含量偏高(6 – 14 wt%)，增加了回收處理的難度，這些物理處理法並無法有效處理回收含鋁鹼性廢水。

針對該項高昂之強鹼廢水處理費用，吾人提出一項環保、經濟技術，將強鹼液回收循環使用，不但不會產生廢水，可以節省巨幅廢水代操費用，同時可以回收鹼液，一兼二顧，藉可提升工業安全與環保，又可以降低操作成本。如表 1 所示，當片鹼回收率 50%，即可以節省新鮮片鹼用量 50%，加上副產品所創造價值，扣除廢鹼液純化反應之操作成本，總共節省成本可達 45%。

圖 2 評估 NaOH 回收率與模具脫膜總成本節省率之關係，可以明顯看出，提高 NaOH 回收率可以顯著的降低總成本。當 NaOH 回收率低於 40%，脫膜成本的節省比率變低，循環經濟效益隨之下降。鹼液純化循環再利用技術需要具有 NaOH 回收率達於 40%以上。以台灣鋁擠型產業為例，每年廢水量 8,000 噸以上，該產業廢水處理費用每年高達 1.2 億元。循環經濟可以大幅節省廢鹼處理成本。

表 1　LCA 手法溶鋁廢鹼成本分析

經常性檢查及維護	片鹼一次性使用方法		片鹼循環再生循環使用方法	
計算基礎： 1. NaOH 溶液鹼度 28.0% 2. 片鹼價格 NT$25.0/Kg			片鹼回收率 50%	
	金額 (NT$/噸)	費用比率	金額 (NT$/噸)	費用比率
(一)鹼液配置、(二)溶鋁操作 水費	11	0	0	–
新鮮片鹼費用	7,000	31.5%	3,500	25.9%
回收片鹼	0		-3,500(回收)	–
(三)廢鹼處理 廢水處理費用	15,000	67.5%	–	–
純化處理費用	–	–	10,000	74.1%
(四)最終放流 放流水排放	200	0.9%	0	–
副產品價值	–	–	-1,300(副產品)	–
總處理成本	22,211	100%	12,200	100%

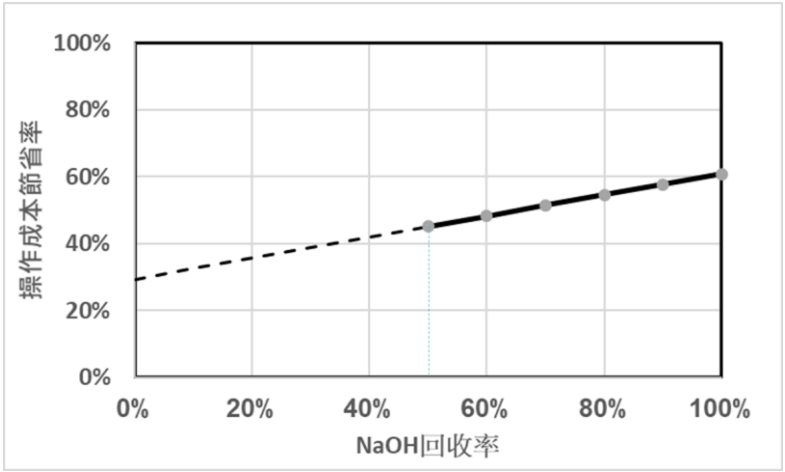


圖 2　NaOH 回收率與模具脫膜總成本節省率之關係

四、相關議題

循環經濟有多項執行方式，包括清運廠外、廠外再利用、場內資源回收等，有著不同之施行法規與主管單位。相關作業與相關法規常需要環保署與經濟部；中央與地方部門之間的與解讀，需要各項文件來回與大量溝通協調。

廢棄物定義以出廠狀態來判定，廠區內各種原物料、半成品、產品並未出廠，應該沒有涉及廢棄物的認定問題。廠區內進行循環經濟操作，進行各種生產、加工方式變更，所涉及之製程設備、生產方式、產品項目之變更，在廠內進行各項物質的轉換與調撥，皆應屬於生產管理部分，受到相關工安管理辦法等之相關規定。其中某些副產物與產品出廠時，即受產品項目、廢棄物管理辦法(水措)等之監管。該等相關法規釐清，影響到實務作業細則的施行，執行方式也會影響到循環經濟做法之效益計算與評估，也直接影響到創新技術的商業運轉。

五、結　論

鋁擠廠模具脫膜以強鹼處理，該項「咬模程序」能夠有效脫除模具，但處理後會產生大量的含鋁強鹼廢水，其組成之鋁(Al)含量為 6 – 14 wt%。目前業界採用酸鹼中和法處理該項高鋁含量強鹼廢水，以達環保排放標準，該種方法不具循環再利用。

從循環經濟模型得知，新泡強鹼溶液之片鹼原料費用僅占總操作成本 31.5%，廢水處理費高達 67.5%，亦即鋁加工業為操作強鹼液時，額外負擔強鹼本身成本的 2 倍費用，支付廢水處理費用。該項分析數據凸顯，廢水處理費用之昂貴。經濟評估結果顯示，NaOH 回收率達於 40%以上，即可收到循環經濟效果，可為台灣鋁擠型產業節省大量廢鹼處理成本。

六、參考文獻

1. P.T. Anastas and J.C.Warner, Green Chemistry: Theory and Practice, NY: Oxford University Press, 1998.
2. L.P. Wei, P. Y. Liu, K. C. Lin, J. M. Yi, C. W. Liou, G. C. Yang, H. Y. Hsu, T. C. Tsai , Chem. Eng. J. 281 (2015) 434–443.
3. N. Chubar, R. Gilmour, V. Gerda, M. Mičušík, M. Omastova, K. Heister, P. Mane, J. Fraissard, V. Zaitsev, Advances in Colloid and Interface Science 245 (2017) 62–80.

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. 110 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 110.11
面 ; 公分
ISBN 978-986-533-214-3
1.環境保護 2.職業衛生 3.文集

445.907 110019729

110 年綠色技術與工程實務研討會論文集

出版日期：中華民國 110 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、洪萱芳、陳見財、吳宜樺、陳志銘、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：1011001991
ISBN：978-986-533-214-3
其他類型版本說明：本書另有電子版本，同時刊載於 https://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：平誠印務有限公司
定 價：新台幣伍佰元整
著作權利管理資訊：經濟部工業局保有所有權利。欲利用本書或部分內容者，需徵求經濟部工業局同意或書面授權。
聯絡資訊：圖書室(02)2754-1255 轉 3916