



經濟部

Ministry of Economic Affairs

# 綠色技術與 工程實務研討會

## 113年論文集



經濟部產業發展署 編印



# 序

永續發展是當前全球共識，亦為我國政府推動永續企業的重要目標，產業在綠色發展的過程中，除了持續推動環境保護、淨零減碳、水資源再利用等措施外，更要提高資源使用效率，減少廢棄物產生，邁向循環經濟。經濟部產業發展署(以下簡稱本署)深知產業發展對國家經濟成長的重要性，也為提升國民生活水準的關鍵指標。然而，隨著經濟成長，民眾對環境品質的要求也日益提高。因此，產業在發展的同時，也要兼顧環境保護，才能永續發展。本署除積極協助產業發展外，也透過各項輔導、宣導與推廣作為，協助產業推動污染防治技術等措施，因應國際環保趨勢，提升產業競爭力，達到企業永續發展目標。

為提供產、官、學、研各界之經驗與環保技術交流平台，本署自 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「113 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 31 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提供寶貴的知識與技術傳承。並促進產業永續發展。在此，我們要感謝所有投稿作者，將寶貴的實務經驗與心得與大家分享，為業界的永續發展做出貢獻。

最後，感謝論文審查委員、本署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。

經濟部產業發展署 謹誌  
中華民國 113 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 清灰技術應用於焚化廠熱交換器清灰之實廠應用	
許豐億、葉平堯、洪建皓、黃騰輝-----	1-1
1-2 探討企業如何達到淨零排放目標-以光電業W公司為例	
蔡旻娟-----	1-9
1-3 應用轉爐石再生鈣於流體化床反應槽中捕集二氧化碳之均質結晶技術	
陳文榆、盧明俊-----	1-23
1-4 回收飛灰中鈣離子捕捉煙道氣二氧化碳之減碳排技術	
呂博揚、盧明俊-----	1-31
1-5 染料製造業推動減碳降空污實例	
邱灯松、洪文承-----	1-39
1-6 超諧波對光電廠的影響與因應對策	
李春龍、謝鴻文-----	1-53
1-7 製程及冰機系統泵浦最佳化技術與 AI 智能大數據	
吳漢明、陳建龍-----	1-63
1-8 導入 AI 技術強化石化廠監控實現即時洩漏偵測與防範	
林楷傑、黃志威、郭子豪、吳宜展、黃溢銓-----	1-75

## 論文簡報發表 議程2 — 資源減耗與再利用技術類

### 2-1 半導體封裝電鍍污泥資源再利用技術開發

王智滢、蔡旻杰、彭柏頤、黃任榆 -----2-1

### 2-2 焚化鍋爐灰水洗製作人工砂及紅磚再利用循環技術

陳萬原、李宗哲、宋建財 ----- 2-11

### 2-3 利用不同結晶劑以流體化床均質結晶技術回收電鍍廢水之銅離子

羅宇斌、盧明俊 ----- 2-21

### 2-4 半導體廢水廠系統減碳案例分享

黃冠哲、柯柏睿、詹周智、黃俊評 ----- 2-31

### 2-5 表面處理製程之鎳金屬電解回收系統技術

趙寶祥、柯臣儒、蔡定霖、黃瑞堂、林怡明、莊雅婷 ----- 2-49

### 2-6 固體再生燃料混燒灰渣再利用分類及固化製程發展

王昱凱、劉錦霖、吳明富、詹尚文、黃偉慶 ----- 2-59

### 2-7 水泥窯協同處理廢風機葉片實務探討

陳志賢、詹忠榮、沈克鵬、劉丞偉、林庭安、黃讌惠 ----- 2-73

## 論文簡報發表 議程3 — 產業節水與水資源再生技術類

### 3-1 末端回收系統中水廠處理技術

王智滢、蔡旻杰、彭柏頤、黃任榆 ----- 3-1

### 3-2 可循環再生的低碳觸媒技術(COAC)應用於難降解有機廢水的處理

陳國源、簡偉倫、黃鈺雯、黃筱嵐、周珊珊、黃志彬 ----- 3-9

### 3-3 放流水 COD 組成特性分析-以桃園某工業區污水處理廠為例

楊珮慈、楊祐任、曾冠穎、莊順興 ----- 3-17

### 3-4 應用非熱電漿技術處理醫療廢水中新興污染物之研究

林威澄、柯致宇、官文惠 ----- 3-31

### 3-5 水資源效率評估指標研析與實務應用探討

魏名軍、曹書涵、楊深惠、林杰熙 ----- 3-43

### 3-6 以色列(ROTEC)FR-RO 系統應用於染整廢水回收再利用實績

吳孟育、林彥儕 ----- 3-59

### 3-7 膜氧傳輸生物膜反應器(MABR)於廢污水中氨氮去除之應用研析

吳亭蔚、林欣潔、侯嘉洪 ----- 3-77

### 3-8 應用超微細氣泡技術改造 SBR 曝氣系統之研究

陳建宏、詹原銘、鍾良信、鍾昇儒 ----- 3-87

## 論文簡報發表 議程4 — 循環經濟與環境規劃管理類

- 4-1 基於數據驅動特徵工程之長短期記憶體循環神經網路於能源署數據時間序列預測的應用  
黃朝健 ----- 4-1
- 4-2 營建業實踐搖籃到搖籃的循環思維  
陳思潔、曾志國、藍隆寬 ----- 4-9
- 4-3 自願性官民協議下產業節能合作-以荷蘭長期能效協議為例  
鄭雅文、曾台輔、連奕婷、范鑫榆 ----- 4-19
- 4-4 紡織業智能化生產、循環經濟和淨零排放管理系統  
林明旺、劉柏緯 ----- 4-33
- 4-5 醫療用複合材質點滴軟袋之循環經濟可行性探討  
周卓群、簡淑美 ----- 4-51
- 4-6 低碳排綠色自動指派系統開發與實務應用之研究  
徐肇聰 ----- 4-65
- 4-7 新世代廢轉能的生質能中心  
古家宇、邱品嘉、鄭健龍、徐洪陞 ----- 4-81
- 4-8 各國全氟及多氟烷基物質(PFAS)政策之比較  
李宜亭、駱尚廉 ----- 4-89

# 清灰技術應用於焚化廠熱交換器清灰之實廠應用

許豐億\*、葉平堯\*、洪建皓\*\*、黃騰輝\*\*\*

## 摘 要

大型都市垃圾焚化廠肩負處理生活廢棄物的重責大任，亦透過鍋爐回收焚化過程產生之熱能進行發電，因此穩定且長時間的運轉是管理焚化廠的重要課題。廢棄物焚化處理過程中，除了高溫煙氣外亦會產生煙氣灰粒，皆透過誘引式抽風機抽送至廢氣處理系統，並於過程中進行熱交換與污染物處理，最後透過煙囪將乾淨之煙氣排放於大氣。惟煙氣灰粒容易於流經鍋爐系統(熱交換器)的煙道時，堆積於鍋爐管上，甚至形成附著於鍋爐管表面的燒結物，日久即會導致煙氣流動受阻，鍋爐熱交換效率下降及鍋爐運轉困難，而須停爐清灰。

積灰不僅影響焚化爐處理廢棄物之效率及發電量，停爐清灰及重新起爐的過程，亦需要使用大量的柴油進行升溫及持溫，這些都是能資源的浪費以及產生不必要的碳排。崑鼎公司於2018年導入固定式震波清灰技術，於大型都市垃圾焚化廠(以下簡稱本案)鍋爐中容易發生積灰阻塞的位置設置固定式震波清灰設備，透過固定頻率的震波減緩積灰的生成，有效減少停爐清灰的次數，提升能源循環效益。

【關鍵詞】都市垃圾焚化廠、煙氣灰粒、燒結物、震波清灰

---

\*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 副廠長

\*\*\*信鼎技術服務股份有限公司 廠長

## 一、緣由與目的

本案係為大型都市垃圾焚化廠鍋爐(熱交換器)清灰技術之應用，焚化廠收受之廢棄物主要為一般廢棄物及一般事業廢棄物，廢棄物由垃圾吊車夾取送入爐內，以爐內高達 850°C 以上溫度使廢棄物完全燃燒，焚化過程產生高溫及煙氣灰粒，利用誘引式抽風機將廢氣抽引流經鍋爐的第一、二、三及四通煙道，其高溫廢氣和鍋爐管內的水產生熱交換作用，回收熱能提供蒸汽發電和廠內其他須加熱之流程使用，廢氣降溫後經由污染防制設施處理，由固定污染源空氣污染物連續自動監測設施 (CEMS) 24 小時監控，確保排放氣體完全符合法規標準，最後經煙囪將乾淨之尾氣排放於大氣，本案基本資料摘要如表 1、鍋爐燃燒系統如圖 1 所示。

廢氣流動過程，煙氣溫度逐漸降低，煙氣灰粒逐漸形成灰層，且高溫使煙灰粒子相互結合，積聚在鍋爐管上形成較厚的沉積層，此情形更易見於鍋爐二通與三通煙道之轉折處形成厚厚的燒結物，因此煙氣流動受阻，又因本案四通煙道過熱器管路間隙狹窄更易積聚灰粒，煙氣流堵塞導致煙道差壓值增加，每年為解決這些積灰本案 2 座鍋爐共需停爐清灰 8 次，不僅降低焚化爐能源效率，也衍生人力負荷的問題，停爐清灰及重新起爐的過程，亦需浪費大量的柴油，故本案導入相關清灰技術，有效減少停爐清灰的次數，提升能源循環效益。

表 1 本案焚化廠基本資料

項目	說明
焚化爐爐型	全連續機械式爐床
焚化處理容量	600 公噸/日
焚化爐爐數	2 座
操作溫度	850°C 以上
廢棄物種類	一般廢棄物及一般事業廢棄物

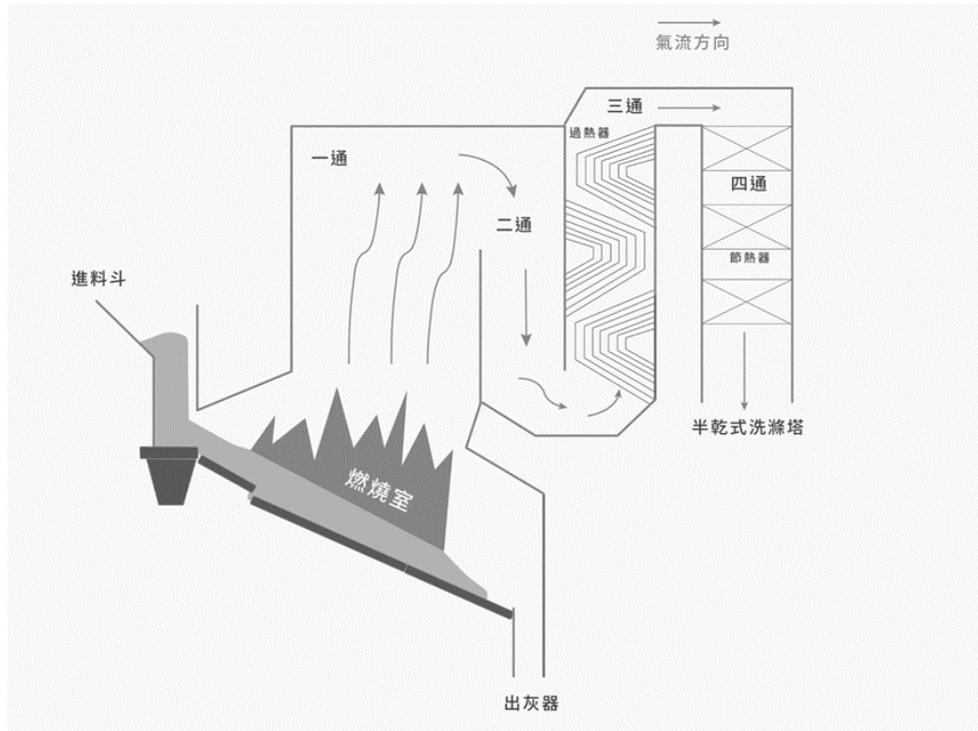


圖 1 焚化廠鍋爐燃燒系統示意圖

## 二、焚化廠熱交換器清灰建置及執行現況

### 1. 焚化廠熱交換器清灰建置狀況

焚化廠清除鍋爐積灰技術大致可分為「過熱蒸汽吹灰」、「敲擊清灰」及「震波清灰」等，前兩項作業僅能減慢積灰速度，後續仍需以人工進行清灰，若鍋爐內管排間距過小時，積灰速度加速，而停爐清灰次數亦需增加，又因焚化爐受限廢棄物處理量能壓力而無足夠時間清灰，導致清理成效不佳，造成熱交換效能變差，亦使廢氣誘引式抽風機的操作困難運轉負荷變大，本案廢棄物與煤、瓦斯和其他標準燃料相比，成分多樣且變化較大，性質差異較大，崑鼎於焚化廠實務營運中，持續導入多種清灰技術，經過評估比較後，歸結出「震波清灰技術」具有良好的適用性，再分析「移動式」與「固定式」震波清灰兩種型式的優缺點，初期採用可自由選定清灰位置的移動震波清灰技術進行實廠測試驗證，以期改善過熱器積灰狀況，取代停爐人工清灰作業，各項清灰技術及優缺點如表 2 所示。

表 2 各項清灰清技術及優缺點

項目	技術說明	優缺點
過熱蒸汽吹灰	透過馬達驅動使蒸汽噴嘴伸入煙道中，將管排表面的積灰吹除	此作業方式僅能減慢積灰速度，仍需定期停爐，由人員進入四通煙道過熱器區域移除積灰，不僅增添勞動力也存有安全疑慮
敲擊清灰	適用於水平煙道，擊錘將能量傳遞到管束上，使積灰震落	
CO <sub>2</sub> 震波清灰	將特製槍管伸入爐內，並將液態 CO <sub>2</sub> 灌入槍管內的一次性化學加熱器，爆破時啟動該加熱器，瞬間使 CO <sub>2</sub> 汽化並產生高壓 CO <sub>2</sub> 氣體，爆破後伴隨壓力脈衝以清除積灰	可加強局部的清灰效果，但執行過程中需開人孔，存在人員安全疑慮及外部冷空氣進入的風險，並需確認排灰量狀況，以避免排灰架橋造成鍋爐停止運轉
移動式震波清灰	將特製容器固定於點火槍管前端，伸入爐內清潔部位，引爆燃氣產生震波	
固定式震波清灰	利用高壓瓶裝燃氣與氧氣進行空氣混合，使氣體產生壓力脈衝以震落積灰	
固定式震波清灰+燃氣增壓系統	為往復式氣動增壓器，透過機械原理自動啟動與停止，當儲氣瓶中的壓縮空氣尚未達到目標壓力便開始驅動，直到目標壓力足夠即停止作動	清灰效果顯著且可將較難清潔隱蔽處積灰一併震除
		以埋設天然氣管線，則氣體可以採管道輸送方式取得，亦可免除使用瓶裝燃氣所帶來更換瓶的困擾

## 2. 焚化廠熱交換器清灰執行現況及成效

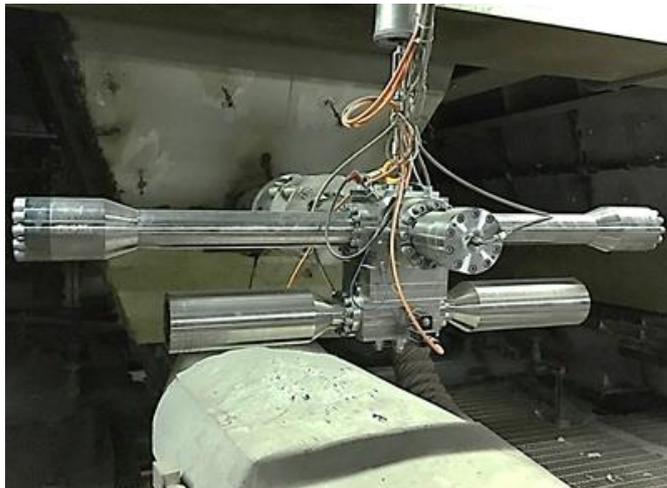
本案固定式震波清灰+燃氣增壓系統裝置係利用甲烷、氧氣、氮氣、壓縮空氣，蓄壓混和引爆產生約 350bar 之震波；爆燃清灰裝置包含裝置本體 (Shock Pulse Generator, SPG)、控制系統 (Control System)、爆燃氣體供應系統 (Gas Supply) 及壓縮空氣供應系統 (Air Compressor Unit)，為維持本案穩定運轉及減少停爐次數，於每爐裝設爆燃清灰裝置，作為輔助的吹灰工具，於第三通煙道過熱器下方煙道高程約 21m 位置，採單邊裝設，規劃每小時擊發一次，惟安裝位置需視爐管積灰狀況適度的調整，以達到系統之最佳操作效果，經比較震波清灰與蒸汽吹灰差異，每年可減少 4 次停爐清灰，約可增加發電量 1,400 千度(減碳 691 公噸 CO<sub>2</sub>e)及減少約 660 公噸吹灰用水量，蒸汽吹灰及震波清灰效益分析如表 3 所示。

經由本案可得功能效益包括：(1)提高清灰效果，解決第三通煙道過熱器積灰問題、提升熱交換率降低鍋爐出口廢氣溫度；(2)降低積灰密實程度，減少歲修清灰時間提升運轉率；(3)減少誘引抽風機負荷，降低用電量；(4)

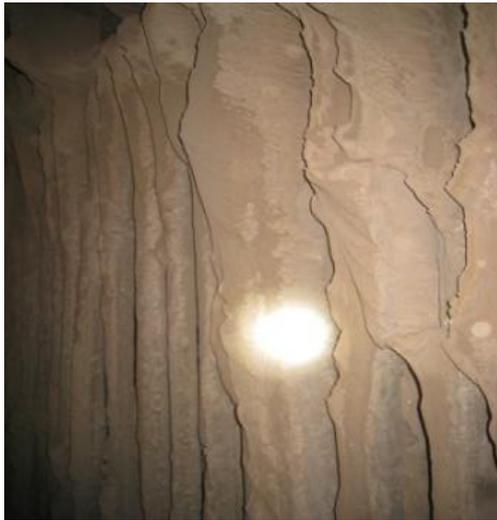
節省吹灰蒸汽用量，提高發電量。

**表 3 蒸汽吹灰及震波清灰技術效益分析**

項目	蒸汽吹灰	震波清灰
停爐清灰	1. 每年兩次歲修中間需停爐 2 次進行清灰，2 爐共計 8 次/年 2. 停爐減少發電量約 2,800 千度/年(碳排放量約 1,383 公噸 CO <sub>2</sub> e)	1. 每年兩次歲修中間需停爐 1 次進行清灰，2 爐共計 4 次/年 2. 期間減少發電量約 1,400 千度/年(碳排放量約 692 公噸 CO <sub>2</sub> e)
用水量	單日吹灰蒸汽用水量約 9 公噸/2 爐	單日吹灰蒸汽用水量約 4 公噸/2 爐
用油量	起停爐所需燃油約 56 公秉 / 年	起停爐所需燃油約 28 公秉/年



**圖 2 固定式震波清灰裝置**



執行前



執行後

圖 3 震波清灰執行前後之比較

### 三、結論與建議

#### 1. 結論

本案採用「固定式震波清灰」加「燃氣增壓系統」，爆燃清灰裝置一般用於鍋爐第二通與第三通煙道(本案設於第三通煙道)，藉由爆燃瞬間產生巨大聲能和大量高溫高速氣體以衝擊波的形式振盪、撞擊和沖刷，使其表面積灰飛濺，隨煙氣帶走，對飛灰結塊物有較強的破壞能力，同時其單一設備涵蓋範圍較廣，適合用於廢氣溫度較高，容易積灰之區域，與傳統蒸汽吹灰並行加強清灰效果，或可取代傳統之蒸汽吹灰方式，透過排定週期性的震波頻率，以減緩積灰程度，亦免除排灰架橋之情況及減少停爐清灰次數，若以埋設天然氣管線，則氣體可以採管道輸送的方式取得，可免除使用瓶裝燃氣所帶來更換瓶的困擾，本案經實際運行有效降低積灰問題，提升熱交換率，達到節能減碳之效益。

#### 2. 建議

崑鼎公司 2018 年於本案導入固定式震波清灰技術，透過固定頻率的震波減緩積灰的生成，有效減少停爐清灰的次數，本技術施工期間必須配合鍋爐停爐期間即可進行爆燃清灰裝置安裝，預計施工時間約一週，惟執行爐內安裝前必須先完成氣體鋼瓶存放單元的設置、氣體管線配置、控制儀表與控制盤的設置等，這些輔助單元則必須先行規劃施工，以便於鍋爐停爐前進行爆燃清灰裝置的爐外測試，待相關參數調整測試無誤，方能安

裝於爐內，以確保鍋爐起爐後，使該裝置能正常運作。

#### 四、參考文獻

1. 曹師維，「導入清灰技術 提升資源循環效能」，崑鼎電子報 No.025，崑鼎綠能環保，2024。
2. 龔玲玉，全方位減碳 提升能源使用效率震波清灰增設天然氣增壓系統，崑鼎電子報 No.020，崑鼎綠能環保，2022。
3. 紀茂樹，「導入震波清灰技術提升焚化廠鍋爐效率及運轉率」，崑鼎電子報 No.006，崑鼎綠能環保，2019。



# 探討企業如何達到淨零排放目標- 以光電業 W 公司為例

蔡旻娟\*

## 摘 要

在當今氣候變遷的狀態下，為了「我們共同的未來」，滿足當代的需要，而沒有犧牲下一代滿足他們的需要。台灣已宣布 2050 年達到淨零排放，在金管會推動下，上市櫃公司永續發展及溫室氣體排放，已成為政府及各界關注議題。

本研究透過質性分析，訪談顧問專家學者及企業代表，探討企業如何面對淨零排放挑戰；如何訂定目標；採取多種策略，包括自然碳匯，透過內部碳定價減少碳排，以有限額度的碳權交易達到碳中和。

本研究彙整了訪談對象，製作企業商業模式圖，展開規劃永續環境專案和活動，價值主張以企業達到淨零排放為核心，在面對多元多變環境時，增加自主權或借力使力。淨零是挑戰，也是機會，如企業視淨零為競爭優勢來源，那對各種減碳行為、策略實施，則將會視為一種投資。企業如何守住本業，發展創新，找出可長久的商業模式，才是企業永續經營之道。

【關鍵詞】淨零排放、碳中和、溫室氣體、減碳策略、商業模式

---

\*國立中興大學科技管理研究所 碩士生

## 一、緒論

### (一) 研究背景與動機

《世界環境與發展委員會,WCED》於 1987 年發表之「我們共同的未來」報告中，對於「永續發展」定義為：「永續發展是滿足當代的需要，而沒有犧牲下一代滿足他們的需要的一種發展」。近年來，二氧化碳排放量增加，影響全球氣候變化，CO<sub>2</sub> 是一種溫室氣體，釋放到大氣中的二氧化碳越多，補獲的熱量就越多，導致更嚴重及頻繁的天氣事件，例如熱浪、乾旱、洪水。

隨著全球暖化的每一次加劇，區域平均氣溫也會發生變化，氣候和極端事件變得更加普遍和明顯，同時對環境產生負面影響，包括海洋酸化，破壞海洋生態系統、森林砍伐、生物多樣性喪失、健康影響等。為此，氣候議題引發國際高度重視，各國陸續提出「2050 淨零排放」的宣示與行動。為呼應全球淨零趨勢，2021 年 4 月 22 日世界地球日，蔡總統宣示，2050 淨零轉型是全世界的目標，也是台灣的目標。企業的永續發展及溫室氣體排放，已成為政府及各界關注議題。

### (二) 研究目的

1. 本研究探討 2050 年企業實現淨零排放目標下，如何有效執行溫室氣體盤查行動，以瞭解企業排放狀況並制定相應的控制策略。
2. 透過收集各種減碳策略，本研究將透過顧問專家學者及企業代表的訪談，提供具體建議，以協助企業更有效地實現永續發展目標。
3. 本研究提供規畫淨零排放目標訂定參考框架，促進產業之間的知識分享，及未來可能面臨挑戰，藉此幫助企業在展開淨零排放策略時，找到適應未來方向。

## 二、研究方法

### (一) 研究架構

本研究以一家光電企業的實際溫室氣體盤查結果為個案研究基礎，透過質性訪談的方式，深入探討專家學者及企業代表在面臨外部減碳挑戰、目標制定、實際經驗、見解以及相關問題方面的經驗。這不僅確保了研究內容的深度和廣度，也為外界提供了有價值的參考，以促進更廣泛的討論與理解。

碳盤查分為組織型 ISO 14064-1 溫室氣體盤查，及 ISO 14067 產品碳足跡。前者為計算組織碳排放量，依金管會公布「上市櫃公司永續發展路徑圖」，規劃 2027 年全體上市櫃公司完成溫室氣體盤查、2029 年完成溫室氣體盤查之查證。未受規範之企業，則可採自願性碳盤查。後者為計算產品生命週期

各階段排放量，計算及查證方式，以一項或一系列產品為計算方式，因此通常選擇生命週期比較長的、或此項產品可以涵蓋大部份產品方式來做計算。計算時，排放係數選用原則，可參考圖 2-4，取得產品上下游供應鏈數據，計算方式較組織型複雜，目前尚未法規要求，由企業採自願性或客戶要求進行計算。

完成溫室氣體盤查後，確定基準年，設立目標，規劃減碳路徑，以實施相應的措施。由於不同企業在不同產業中存在著獨特的特點，包括碳排放量和著重執行減碳關鍵活動都可能有所差異。本研究的焦點將放在光電業上市櫃公司，並搜集各種減碳挑戰項目，透過專家和企業代表的訪談意見，協助企業制定適應未來發展的策略及方向。

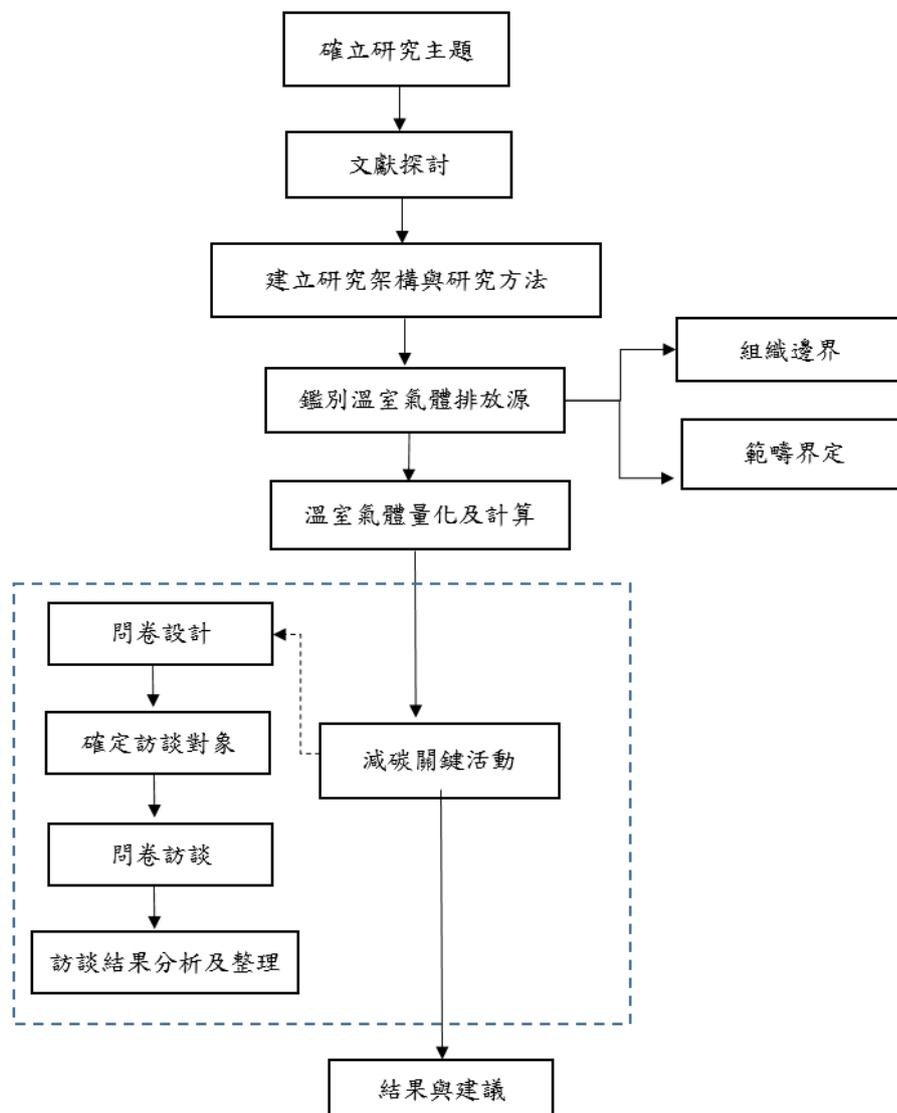


圖 1 研究方法流程圖

### 三、訪談對象

本研究透過深度訪談專業學者以及企業代表，以精心挑選的訪談對象涵蓋多個專業範疇，包括標準機構、企業顧問公司、輔導顧問、再生能源研究者和學術教授。企業代表包含石化企業以及來自不同光電領域的三家公司。透過此多元的訪談對象，旨在獲取富有價值的經驗與見解。透過與不同規模的光電企業互動，追求全面理解，以經驗豐富的利害相關者觀點，深入探討相關議題。

McCracken(1988)指出如欲透過專家深度訪談蒐集資訊 10 人以內是最佳的訪談人數。因此，本研究選擇 5 位專家學者及 5 位企業代表，進行深度訪談。訪談過程，受限距離及方便性，部份採取遠端連線方式。如無距離或時間問題，則採取面對面訪談方式。

#### (一)訪談結果分析及整理

**問題 A.企業可以先取得哪項查/驗證，有助於展開減碳計畫，您的建議如何？**

- 溫室氣體盤查、產品碳足跡、能源管理系統是減碳計畫的三個重要步驟，可以參考 ISO 14064-1、ISO 14067、ISO 50001 的標準。企業在執行這些 ISO 標準時，可以根據公司的策略或利害關係者的要求來決定執行順序。也可以參考專家和企業代表建議，先執行 ISO 14064-1 組織型溫室氣體盤查，可以幫助企業了解自己的碳排放量和來源，並制定減碳目標和措施。ISO 14067 產品碳足跡，可以瞭解產品在整個生命週期中的碳排放，身為供應鏈一環，有利回應客戶或市場要求。
- ISO 50001 能源管理系統，可以幫助企業有效能管源管理，有效節能，提高效率。這些項目都做到後，減量到一定程度，最後才進行碳中和。同時，企業也要關注市場法規消息，歐盟碳境調整機制(CBAM)、PAS-2060、GHG protocol 等，以因應市場變化。也須將減碳相關知識佈達給公司同仁，提升環境改善及減碳意識。

**問題 B.建議企業如何展開碳盤查？**

- 碳盤查是減碳計畫的重要基礎，委託有專業的輔導和經驗的輔導顧問，可幫助企業建立碳盤查的系統和流程，同時企業也應視資源情況和規模大小而定。請專職或主導人員外部受訓練，有助於和顧問合作，也有利後續專案執行。企業第二年盤查可選擇自行執行，可以增加內部能力和掌控，並持續維持溫室氣體盤查查證有效性。

- 企業對於是否要設置永續委員會和永續長、碳盤查的執行頻率和持續性、碳盤查的範圍和深度有不同的看法，應根據企業的策略和利害關係人的要求來決定。

#### **問題 C. 您建議企業如何訂定減碳目標？**

- 企業訂定減碳目標應採用絕對減量的方式，而不是相對減量，因為相對減量會隨著業績的增長而增加碳排放量，而絕對減量則是要減到比基準年的碳排放量。或是選擇合適的指標，如每單位產品的減碳量，並考慮產量和銷售額的變化，避免因為沒有訂單而減少排碳量，或因為增加訂單而增加排碳量，影響目標的公平性和可行性。
- 如目標設定是以範疇一、範疇二和範疇三的減碳目標，其中範疇三的目標可以訂得比較緩和，因為涉及供應鏈的管理。也可以分為內部管理和外部宣稱，內部管理可以用強度目標，因為與成本相關，外部宣稱可以用絕對減量目標，因為符合氣候變遷減緩的目的。
- 企業應檢視是否為能源大用戶，遵守法規要求，中小企業可參考大用戶標準。另外也建議以單位產品的減碳量作為相對目標，但要避免與產量波動連結，必須是實質的減量。

#### **問題 D. 在「工業」方面，依您的看法，企業減碳關鍵活動有哪些？**

- 工業領域的減碳活動有多種方式和方法，並且需要考慮不同的利害關係人和目標，因此沒有一個固定的標準或模式，而是需要根據企業的實際情況和需求來制定和執行。可能從製程空調和空壓著手，也可能從汰換老舊設備或包材減量著手，以不影響製程運作、產能為優先。
- 工業領域的減碳活動不僅是為了應對氣候變遷的挑戰，也是為了提升企業的競爭力和價值，因此需要有長遠的規劃和策略，並且持續改善和創新，以達到減碳和增效的雙贏。例如再生材料、循環材料、循序漸近導入低碳製程、智慧製造等。
- 工業領域的減碳活動需要有跨部門和跨界的合作和溝通，包括產品設計、製程管理、供應鏈管理、能源管理等，並且需要有相關的數據和指標來監測和評估，以確保減碳活動的有效性和可持續性。聘用永續人才、碳管理、電工領域、綠色材料等永續領域專才，以因應企業未來發展趨勢。

**問題 E.在「電力」方面，依您的看法，企業減碳關鍵活動有哪些？**

- 對企業而言，建置太陽能光電、導入能源管理、更換 LED 燈泡是較容易執行選項。能源管理是全面性的，可以協助企業盤點並找出節能點，對浪費電力地方執行改善對策。安裝智慧電錶、智慧電網，可有效監控能源設備、統計分析各個用電設備或區域的耗電量，達到有效減少電力，降低碳排放效果。如要設置儲能設備，必須留意消防法規規範，或工廠所在地管理局規定，不能放室內。

**問題 F.在「運輸」方面，依您的看法，企業減碳關鍵活動有哪些？**

- 使用低碳或無碳的運輸工具，如電動車和氫能車；減少運輸的需求和距離，如鼓勵員工使用大眾運輸或共乘；搭乘經濟艙，不要搭商務艙。使用當地生產的原物料，減少長途運輸的碳排放；批次集中生產管理，減少出貨次數。
- 員工運輸的減碳活動受到多種因素的影響，如環境、地理、習慣、成本等，不同的企業和員工可能有不同的選擇和偏好；公司設置充電樁也面臨困難，一方面充電樁普及度還尚不足，如公司所在地為承租使用，需經同意才能安裝，另外充電時間也可能受限。電動車和氫能車的發展和應用仍有爭議和挑戰，如技術、成本、效能、安全等，不同的專家和企業代表可能有不同的看法和態度，仍需持續關注氫能車未來發展。

**問題 G.除了上述減碳關鍵活動，工業、電力、運輸外，您覺得企業還可以透過哪些可行方式來達到碳中和目標**

- 企業達到碳中和目標的可行方式有多種，其中碳捕捉與封存、森林碳匯、內部碳定價和碳權交易等方式較為常見，但需要更多的技術發展和資金投入，各有其優缺點和挑戰。
- 森林碳匯可以增加碳吸收，但需要有足夠的土地資源和種植合適的樹種類，並遵守相關的法規和方法學，建議與專業人士合作，以確保碳匯的品質和可追溯性。但目前森林碳匯取得資源尚不普遍，一般企業較難短時間內得到效果。
- 內部碳定價可以提高企業的減碳動機和效率。不同的產業和規模的企業對於減碳方式的選擇和看法可能有所不同，需要根據自身的碳排放狀況和目標，制定合適的減碳策略和行動計畫。

## 問題 H. 為實現淨零排放目標，您認為未來企業存在哪些挑戰？

- 溫室氣體盤查、產品碳足跡、能源管理系統是減碳計畫的三個重要步驟，可以參考 ISO 14064-1、ISO 14067、ISO 50001 的標準。企業在執行這些 ISO 標準時，可以根據公司的策略或利害關係者的要求來決定執行順序。企業展開減碳計畫，進行溫室氣體盤查，以了解自身的碳排放狀況和來源，並制定減碳目標和措施，這是重要且必須執行的，可以委託專業的顧問公司來協助。
- 企業減碳的關鍵活動涵蓋了工業、電力、運輸等領域，需要根據不同的利害關係人和目標來制定和執行，並且需要有長遠的規劃和策略，以及跨部門和跨界的合作和溝通。例如，工業領域可以從製程空調和空壓、汰換老舊設備或包材減量、再生材料、循環材料、循序漸近導入低碳製程、智慧製造等方面著手；電力領域可以建置太陽能光電、導入能源管理、更換 LED 燈泡等方面著手；運輸領域可以使用低碳或無碳的運輸工具、減少運輸的需求和距離、使用當地生產的原物料、批次集中生產管理、爭取設置充電樁等方面著手。
- 企業達到碳中和目標的可行方式有多種，其中碳捕捉與封存、森林碳匯、內部碳定價和碳權交易等方式較為常見，但需要更多的技術發展和資金投入，各有其優缺點和挑戰。企業應根據自身的碳排放狀況和目標，制定合適的減碳策略和行動計畫，並選擇適當的減碳方式。
- 企業實現淨零排放目標的主要挑戰包括國際競爭力下降、需滿足客戶碳中和要求、技術及人才不足、減碳技術需持續強化。法規、成本、技術、人才等方面，影響企業的競爭力、獲利、形象等，企業必須有清楚的目標和策略，並積極投入減碳行動、培養人才、建置減碳系統。專家和企業在實現淨零排放目標時的不同需求和困難，專家需要提供更多的指導和協助，企業需要提高更多的意識和能力，雙方需要加強溝通和合作，才能共同推動減碳的進程。

## 四、研究結果

### (一) 減碳關鍵活動

在當今氣候變遷的狀態下，為了我們共同的未來，滿足當代的需要，而沒有犧牲下一代滿足他們的需要，企業扮演著重要角色，必須採取行動減少溫室氣體排放。首先，應先盤點自身企業的溫室氣體排放量(ISO 14064-1)，

了解碳排放狀況和來源。這將是制定減碳目標和措施的基礎。其次可選擇計算產品碳足跡(ISO 14067)，了解產品從原料採購、生產、運輸、使用、廢棄的整個產品生命週中的碳排放量。同時，能源管理系統(ISO 50001)建立也是不容忽視的(財團法人台灣綠色生產力基金會, 2018)，監控能源消耗狀況，針對常見設備節措施點檢(經濟部能源署，生產性質能源查核申報)，幫助企業有效地管理和節省能源，從而降低溫室氣體排放，並提高能源效率，減



少碳排放。

圖 2 減碳關鍵指標

### 【達到碳中和的策略】

完成以上減碳關鍵項目，減到不能再減時，企業可採取多種策略達到碳中和目標，包括碳捕捉與封存、自然碳匯(包括森林碳匯、海洋碳匯、土壤碳匯)、內部碳定價和碳權交易等。這些方法需要技術創新和資金投入，企業應根據自身情況選擇合適的減碳方式。

土壤就是自然碳匯之一。土壤裡存在有機質，可以幫助固碳外，也可以幫助土壤提供養分，增進生物多樣性，也是聯合國永續發展目標(SDGs)第13項氣候行動。不同氣候、不同區域的土壤結構，也會影響量測結果。BSI 蒲樹盛總經理提到，土壤每年吸收的二氧化碳占人類總排放量約48%，主要是土壤含有很多微生物與養分，但目前尚未有方法學，計算出到底一公頃的

地可以吸多少碳，像是不同的土壤、地質、地區與溫度都會產生不同的吸碳能力，背後需要有農業的專業。正因為目前國家尚未建立關於樹木、土壤的碳排資料庫，學校的角色就變得非常重要，需透過學校老師來做研究，「如果現在沒有一個方法學，未來要國家淨零靠它（土壤碳匯）來增匯，到底怎麼增，就沒有科學根據，」蒲總經理點出建立自然碳匯方法學的關鍵。（陳映璇, 2024）

為了實現森林碳匯，企業可以與森林學專家或相關廠商建立合作關係。森林碳匯的好處不僅限於減少碳排放，它還能顯著提升環境品質以及增強企業形象。目前台灣森林碳匯的方法學為農業部所訂定的「造林與植林碳匯專案活動」，適用於 2000 年 1 月 1 日以後開始造林的專案活動，植林面積應大於 0.5 公頃，平地造林土壤擾動面積不能超過 40%，山坡地造林不能超過 33%，還需考量枯木、火災、病蟲害等問題（環境部, AR-AMS0001 造林與植林碳匯專案活動, 2019）。如要參與碳權，個人無法申請，必須是事業單位或政府，才符合申請資格。

值得注意的是，不同樹種對碳的吸收能力有顯著差異（李孟儒, 2022），林木從根、莖、枝及葉均有固定碳素之功能，經數十年、數百年生長後，樹幹越粗大。根據行政院農業委員會辦理國有林產物處分作業要點，第六條第一項，除了樹種為杉木、柳杉、琉球松、臺灣二葉松、相思樹、樟楠類及槲櫟類者以外之一般樹種之材積式(如下公式)（農業部, 2013），胸高直徑、樹高為測量值，0.79 為固定數，而形數指的是「立木材積形態常數」，可以透過查閱「臺灣林產處分調查用立木材積表」（簡稱立木材積表）得知（姚鶴年, 1987），若想要測量的樹種類形並沒有列在立木材積表上，則形數以 0.45 計算（何郁庭, 2021）。

林木與竹林成長速度差異大，葉片大小面積光合作用程度不同，也會影響其碳吸收效率，碳吸存就是把時間因子算進去，指植物每年吸收的碳的量。碳吸收後需再評估碳儲存能力，每年可以吸收多少的量儲存，指植物固定碳的總量，固碳在不同時期也有顯著差異，毛竹有較高的固碳能力，優於杉木，毛竹是一種優良的固碳樹種。此外，因為不同地區適合種植的樹種各異，所以在規劃森林碳匯時，必須考慮到適當的方法學和碳吸收計算方式。

## (二)淨零排放目標規劃和設定

科學基礎減量目標 (SBT) 是由碳揭露專案 (CDP)、聯合國全球盟約 (United Nations Global Compact)、世界資源研究所 (World Resources Institute, WRI) 及世界自然 WWF 等領導機構共同創立之「科學基礎減量目標

倡儀」(Science-Based Targets initiative,SBTi)平台，主張的是以科學為基礎的淨零排放行動。

設定短期目標，基本 SBTi 科學目標，必須至少覆蓋全公司 95%的範疇 1 及 2 排放，而對於範疇 3 排放量，佔總排放量(範疇 1、2、3 排放量) 40% 的公司，還必須包含至少 67%的範疇 3 排放在短期目標中。

依國家發展委員會與環境部共同訂定「臺灣 2050 淨零排放路徑及策略總說明」，短期(~2030)達成低碳，長期(~2050)朝零碳發展，及參考 2050 淨零路徑規劃之階段里程碑，淨零轉型推動策略，能源大用戶年均節電 1%。電動汽車年銷售量占汽油車銷售量之比例於 2030 年與 2035 年，分別達 30% 與 60%，於 2040 年新售均為電動車。電動機車年銷售量占機車年銷售之比例於 2030 年與 2035 年，分別達 35%與 70%，2040 年新售均為電動機車。

如參考同業目標目標，還需考量公司規模大小、產業屬性，上述同業目標設定，皆有百分之百使用再生能達成時間，但是參加 RE100 的條件，必須是年用電度數超過一億度的公司，才能參加 RE100。因此，是否需加入 RE100，承諾於 2050 年前有階段性地達成 100%再生能源之目標，應由企業根據現況自行評估，或設定階段性達成任務。

2030 年台灣減碳目標由相較於基期 2005 年減少 20%，上修至 24±1%，。短中長期減碳路徑，分階段設定。以 W 光電為例，如依國家目標，並設定 2022 年為基準年，每年須減少 3%。針對溫室氣體盤查結果，依類別分別設定目標，如表 4-1。可透過整體目標，規劃各個區域永續指標項目，例如辦公區電力使用再生能源、塑膠或包材循環使用等方法，將指標與目標結合，綜合評估公司減碳行為可行性，以具體可執行方式，逐步展開進行規劃，如表 4-2、圖 4-2。如果公司有多廠區，也可以以特定廠區，分別設定目標值。

參考國家發展委員會與環境部共同訂定「臺灣 2050 淨零排放路徑及策略總說明」，2050 淨零路徑規劃之階段里程碑，以運輸、工業、電力三項分類，分別將項目具體、量化，分配至短期、中期、長期目標呈現。

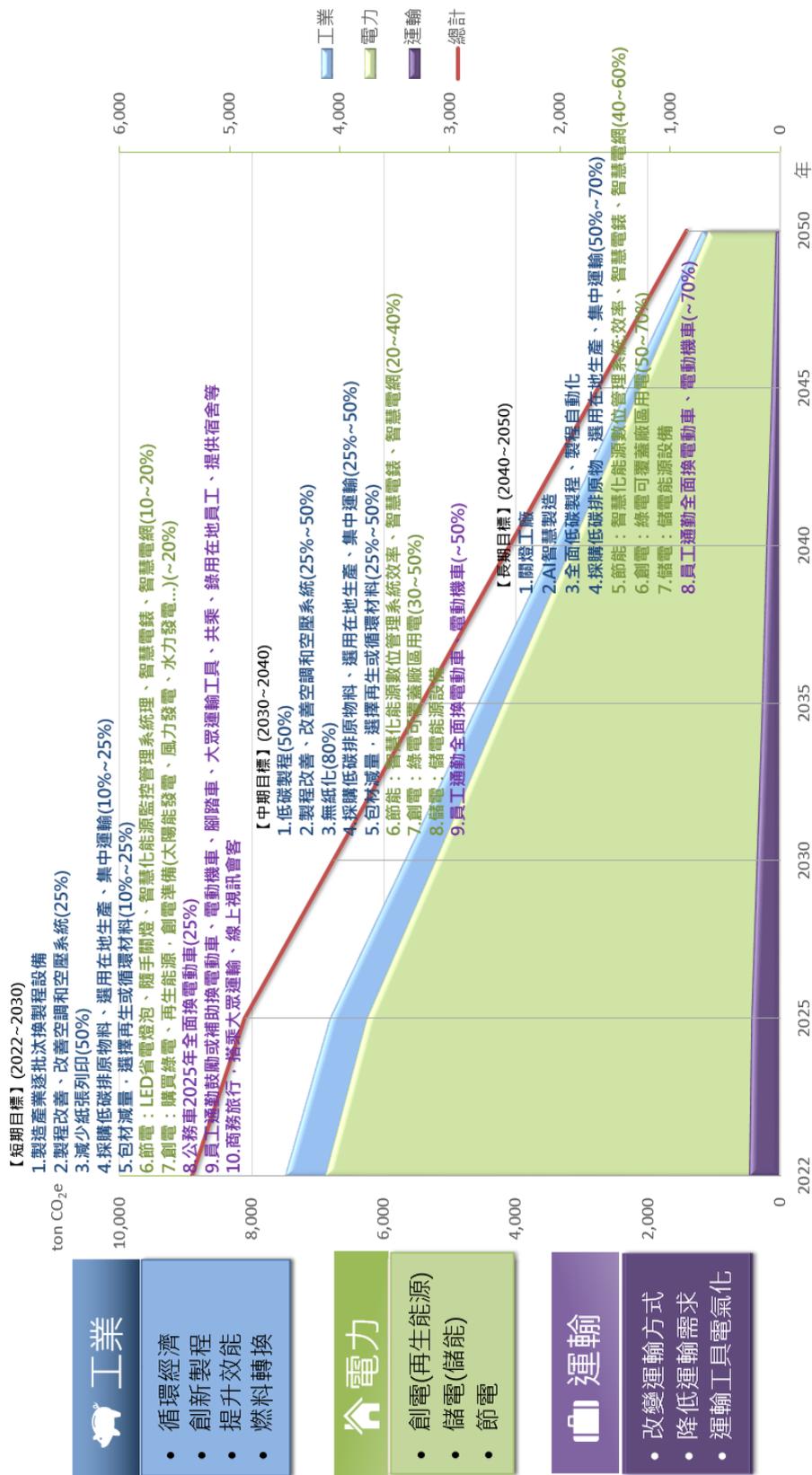


圖 3 W 光電減碳路徑階段里程碑

本研究參考 Ecocanvas 循環商業模式框架，來擴展有關永續商業模式的研究。商業模式不僅是一種工具，是企業在執行專案和活動時，對價值主張策略規劃的核心。它與創新的息息相關，尤其在追求永續發展的各個層面，本研究象整訪談建議，將探討企業如何達到(追求)淨零排放的宏偉目標，並將此目標融入商業模式的每一個環節。

<p><b>關鍵合作夥伴</b> </p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 員工</li> <li>● 供應商</li> <li>● 第三方認證單位</li> <li>● 輔導顧問公司</li> <li>● 海外工廠</li> <li>● 客戶</li> <li>● 政府機關</li> <li>● 設備廠商</li> <li>● 綠能建置者</li> <li>● 競爭者</li> <li>● NGO</li> </ul>	<p><b>關鍵活動</b> </p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 培訓永續人才</li> <li>● 組建溫室氣體盤查</li> <li>● 委託外部專業顧問輔導諮詢 (ISO14064-1、ISO14067、ISO50001)</li> <li>● 建置企業永續藍圖</li> <li>● 訂定減碳目標及減碳路徑</li> <li>● 設定減碳活動及關鍵指標</li> <li>● 碳吸收、自然碳匯(產學合作)</li> </ul> <p><b>關鍵資源</b> </p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 企業減碳/破管理力</li> <li>● 係數來源 (環保署公告、simapro 軟體等)</li> <li>● 溫室氣體統計能力(大數據)</li> <li>● 推動供應鏈減碳</li> <li>● 政府資源(企業以大帶小)</li> <li>● 投資再生能源</li> </ul>	<p><b>價值主張</b> </p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 2050 年企業實現淨零排放</li> </ul>	<p><b>顧客關係</b> </p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 增加長期合作夥伴機會</li> <li>● 維持舊有客戶及開發新客戶</li> </ul> <p><b>通路</b> </p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 上市櫃公開說明書</li> <li>● 企業網站</li> <li>● 永續報告書</li> </ul>	<p><b>目標客戶</b> </p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 上市櫃公司</li> <li>● 想進行碳盤查又不知如何開始的企業</li> <li>● 想進行減碳活動的企業</li> <li>● 想參考多元減碳方案的企業</li> <li>● 想知道企業有多少排碳量</li> <li>● 沒經費找顧問輔導的企業</li> <li>● 政府尚未要求，但想自主盤查的企業</li> <li>● 希望先瞭解減碳活動的企業</li> </ul>
<p><b>成本結構</b> </p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 委外顧問輔導費用</li> <li>● 第三方認證費用</li> <li>● 綠能設備建置與維護</li> <li>● 汰換老舊設備</li> </ul>	<p><b>收益流</b> </p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 減少碳關稅或不需購買碳權</li> <li>● 賣出多餘碳權增加收入</li> <li>● 增加客源(揭露碳排數據，若低於競爭者，將可提升客戶下單意願，維持長久合作關係)</li> </ul>			

圖 4 企業實現淨零排放商業模式圖

## 五、結論與建議

本研究針對企業面臨氣候危機，及政府宣布在 2050 年達到淨零排放後，勢必將為了淨零轉型，面臨許多經營風險與機會。企業實現淨零排放的關鍵，在於清晰的目標、內部跨部門和外部利害相關者的合作、產品技術創新與強化、再生能源取得、專家協助、多元人才培育、自然解方等面向。透過 ISO 14064-1 溫室氣體盤查了解企業排放情形與熱點，是減碳前建置基礎，同時以便掌握未來減碳潛力；ISO 14067 產品碳足跡，從原物料取得、生產、使用、生命終結、回收再利用、最終處置，整個生命週期評估，揭露產品碳排放量，選擇碳排較少的產品。同時，推動供應鏈的碳足跡盤查，促使供應商採用更環保的製造方式；建置 ISO 50001 能源管理系統，改善及提高能源績效，包括監督量測、排放熱點掌控等步驟，從中制定有效的減碳策略。策略方面，採用再生能源，提升能源效益，並優化生產流程以減少排放。目標的選用，應由公司依本身企業設定範疇一、範疇二和範疇三的減碳目標，其中範疇三的目標可以訂得比較緩和，最佳的企業減碳目標是確立具體且適合可執行指標，並可依達成績效逐步調整，完整團隊伙伴，各司其職，內部培訓專責人員、外部吸引多方人才，共同發展學習新知。

完成以上減碳關鍵項目，減到不能再減時，企業可採取多種策略達到碳中和目標，碳中和目標的可行方式有多種，包括碳捕捉與封存、自然碳匯(包括森林碳匯、海洋碳匯、土壤碳匯)、內部碳定價和碳權交易等。碳捕捉與封存，需要技術創新和資金投入。自然碳匯需透過各專業的方法學，目前學術單位皆有學者研究這些領域，企業可以透過與學術合作，共同發展，取得專業路徑。內部碳定價，則是將外部成本內部化，將碳的成本有感呈現於企業中。國內碳費雖尚未明定，但可確定的是碳權配額，也就是排碳的權利，將會逐年降低。因此，企業應根據自身情況選擇合適方式，達到碳中和目標。

本篇論文研究限制，訪談對象非代表全面性光電產業，同時非企業直接從事減碳行為之相關工作者，因此無法概括光電業皆為此種面向。不同產業的企業，其減碳目標及策略皆不相同，找出適合企業發展目標，客製化自身企業指標，不急於短期內達到淨零，也不用過度緊張焦慮，急於購買碳權抵換，而是抱著長期作戰準備，和利害相關人不斷磨合。淨零是挑戰，也是機會，如企業視淨零為競爭優勢來源，那對各種減碳行為、策略實施，則將會視為一種投資。比爾蓋茲：不創新，避不開氣候災難（“It will need to be the most amazing thing humankind has ever done.”），企業要如何守住本業，發

展創新，找出可長久的商業模式，才是企業永續經營之道。

## 六、參考文獻

1. 何郁庭，你一年的碳排放量，要用幾棵樹來抵？單木材積及固碳量計算. CASE 報科學，2021, December 23。
2. 李孟儒，【綠樹專欄】原來樹之間也有減碳能力分班！. DOMI 綠然能源，2022, September 14。
3. 國家發展委員會，臺灣 2050 淨零排放路徑及策略總說明. 國家發展委員會，2022, March 30。
4. 陳映璇，土壤、森林都是「自然碳匯」！這是什麼？為何是碳權交易的明日之星？數位時代. 2024, March 7。
5. 環境部，我國國家溫室氣體排放清冊報告，2023。
6. 國家溫室氣體排放清冊報告，2023, August。
7. 環境部氣候變遷署，溫室氣體排放量盤查作業指引. 事業溫室氣體排放量資訊平台，2024, March 7。
8. 環境部，AR-TMS0001 造林與植林碳匯專案活動，環境部，2019, April 24。
9. 農業部，行政院農業委員會辦理國有林林產物處分作業要點. 農業部 主管法規查詢系統，2013, July 4。
10. 經濟部發展署，IPAS 低碳化精修班公版教材，產業節能減碳資訊網，2024, April 2。
11. 經濟部產業發展署，產業淨零路徑分享，產業節能減碳網，2021。
12. 經濟部能源署，生產性質能源查核申報，工業節能服務網。

# 應用轉爐石再生鈣於流體化床反應槽中

## 捕集二氧化碳之均質結晶技術

陳文榆\*、盧明俊\*\*

### 摘要

當今世界面臨著全球暖化以及二氧化碳排放過高的問題，嚴重影響氣候、物種和糧食等，對於地球的未來也是緊緊相連，因此對於如何減少二氧化碳的排放並有效運用現有的資源是我們現在必須去解決的。轉爐石為台灣煉鋼製成中的副產物，其中有 50% 粒徑 < 5 mm 的細粉，在實際應用上是有困難的，本研究就是將這些細小轉爐石作為再生鈣並透過萃取其中的鈣離子，結合化學吸收法吸收二氧化碳後所產生的碳酸根，以及流體化床均質結晶技術來產生純度高、含水率低的碳酸鈣顆粒，使製程產生的衍生廢棄物達到資源化、循環利用的目的。研究中將進行轉爐石的鈣離子萃取以及在不同 pH 值的條件下對流體化床結晶反應的影響，探討碳酸根的去除效率、產物顆粒粒徑的分布、純度及結晶過程。結果顯示，根據碳酸根進流濃度為 0.096M、槽體 pH 值 7.0~10.0、進流  $[Ca^{2+}]/[CO_3^{2-}] = 1.0$ 、截面積負荷  $36.7 \text{ kg Ca}^{2+}/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ 、 $55.0 \text{ kg CO}_3^{2-}/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$  為操作條件時，pH8~9 獲得 99% 以上的碳酸根去除率及結晶率，而在粒徑分析結果顯示在 pH9 下擁有最多粒徑大於 1mm 之佔比。並且透過 SEM 可以得知初期先形成的晶核會隨著流體化的反應槽相互聚合形成更大更緊密的均質顆粒，晶體的外表也會逐漸從有菱有角變成圓潤光滑，而在結構方面則依 XRD 顯示出 pH7~9 皆以方解石碳酸鈣為主。整個研究以資源再利用為主軸，以再生鈣轉爐石當作鈣源和結晶槽出流水的重複利用，並結合吸收二氧化碳產出應用廣泛的碳酸鈣顆粒，藉此達到循環利用及提升減碳效率。

【關鍵詞】流體化床均質結晶技術、轉爐石、碳捕集、碳酸鈣、再生鈣

\*國立中興大學環境工程學系 研究生

\*\*國立中興大學環境工程學系 特聘教授

## 一、前言

當今世界上所面臨的許多問題中，全球暖化以及二氧化碳排放過高無疑是最引人注目的議題，不僅影響了氣候、物種及糧食等問題，對地球的未來也是息息相關，因此對於如何減少二氧化碳的排放並有效運用現有的資源是我們現在必須去解決的。目前在台灣煉鋼作業製程中的副產物轉爐石是可替代成天然砂石粒料，但其中 50% 粒徑 < 5 mm 的細小粉粒，在實際應用上是有困難的(郭于寧, 2019)。而本研究就是將這些細小轉爐石作為再生鈣並透過萃取其中的鈣離子，結合化學吸收法吸收二氧化碳後所產生的碳酸根，以及流體化床均質結晶技術來產生純度高、含水率低的碳酸鈣顆粒 (盧明俊等人, 2019)，使製程產生的衍生廢棄物達到資源化、循環利用的目的。

## 二、研究方法

本研究以轉爐石為鈣源，先透過萃取將氯化銨萃取液與轉爐石反應出鈣離子後配製出相似濃度的含鈣溶液，再將其導入流體化床反應槽中，另一方面則是利用直接合成的方式模擬出吸收塔經化學吸收法後產生的碳酸根溶液進行反應，在結晶槽形成的碳酸鈣以顆粒結晶形式排出，而同時生成的氯化銨溶液可分別回流至吸收塔中當作 CO<sub>2</sub> 的吸收液和返回初始萃取槽中作為轉爐石的萃取液。

此研究在相同濃度不同 pH 的條件下進行流體化床均質結晶實驗，結晶槽產物為出流水以及結晶顆粒。出流水是分別利用 0.45mm 注射型過濾器過濾以及直接取樣的方式採樣，接著使用原子火焰吸收光譜儀 (AA) 分析水中鈣離子濃度以計算去除率及結晶率。其中去除率為分析水中離子型態之碳酸根離子濃度去除效率，亦為過濾過的水樣(方程式 1)，結晶率則是有包括懸浮顆粒之碳酸根離子總濃度之去除效率，也就為未過濾的水樣(方程式 2)。而結晶顆粒的部分則是以 X 光繞射儀 (XRD) 鑑定產物成分及晶體結構，和熱場發射掃描式電子顯微鏡 (SEM) 了解其顆粒形成的過程，並以篩網進行粒徑分佈的分析。

$$(\text{CO}_3^{2-})_R, \% = \left[ \frac{(\text{CO}_3^{2-})_{in} - (\text{CO}_3^{2-})_d}{(\text{CO}_3^{2-})_{in}} \right] \times 100 \quad (1)$$

$$(\text{CO}_3^{2-})_G, \% = \left[ \frac{(\text{CO}_3^{2-})_{in} - (\text{CO}_3^{2-})_f}{(\text{CO}_3^{2-})_{in}} \right] \times 100 \quad (2)$$

### 三、結果與討論

本研究先利用不同濃度的萃取液找出在轉爐石中最適結晶反應的鈣離子濃度，再直接配置出吸收塔所形成之碳酸銨溶液進行流體化床均質結晶實驗，並以碳酸根進流濃度為 0.096M、槽體 pH 值 7.0~10.0、進流  $[\text{Ca}^{2+}]/[\text{CO}_3^{2-}] = 1.0$ 、截面積負荷 36.7 kg  $\text{Ca}^{2+}/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ 、55.0 kg  $\text{CO}_3^{2-}/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$  為操作條件，探討在不同 pH 條件下對碳酸根的去除效率、產物顆粒的粒徑分析、顆粒結晶形成過程以及產物組成晶體結構的影響及比較。

#### (一) 萃取轉爐石中的鈣離子

利用氯化銨溶液作為鈣離子萃取液，在固液比為 1/5 的條件下以不同萃取液濃度進行鈣離子的萃取，以找出最適流體化床均質結晶實驗的濃度，而根據文獻，萃取出來的鈣離子濃度會與萃取液的濃度呈正相關(郭子寧, 2019)。表 1 顯示萃取液在不同濃度下所測得的鈣離子濃度，當氯化銨有 0.1M 時，會有 3,498mg/L 的鈣離子被萃取出來，而 0.2M 則有 6,057.33mg/L，其符合文獻結果，而為了良好的操作結晶反應，因此以 0.1M 所得的鈣離子濃度為最適操作條件。

表 1 不同萃取液濃度所測得的鈣離子濃度

萃取液	濃度	固液比	$[\text{Ca}^{2+}]$ (mg/L)
$\text{NH}_4\text{Cl}_2$	0.1M	1/5	3,498.0
$\text{NH}_4\text{Cl}_2$	0.2M	1/5	6,057.3

#### (二) 不同 pH 對去除率、結晶率及粒徑分布之影響

在流體化床實驗中 pH 為重要的操作因素，根據文獻，pH 的高低會影響產物顆粒的組成成分、碳酸根的去除以其結晶的產率(Chou et al., 2024)，當 pH 低於 10.3 時碳酸根會逐漸變成碳酸氫根，使其與鈣離子難以發生沉澱反應 (Decllet et al., 2016)；但當 pH 逐漸提高，水中氫氧根的增加，鈣離子反而可能會與氫氧根結合形成氫氧化鈣而難以沉澱形成更多污泥(Mark et

al., 2020)。圖 1 為在不同 pH 值對去除率及結晶率的影響，可以觀察到在 pH8~9 時，去除率及結晶率都有達 99% 以上，而 pH10 的去除率雖有 99.97%，但結晶率卻下降至 85.33%。由此可知在 pH8~9 有最佳的操作條件。

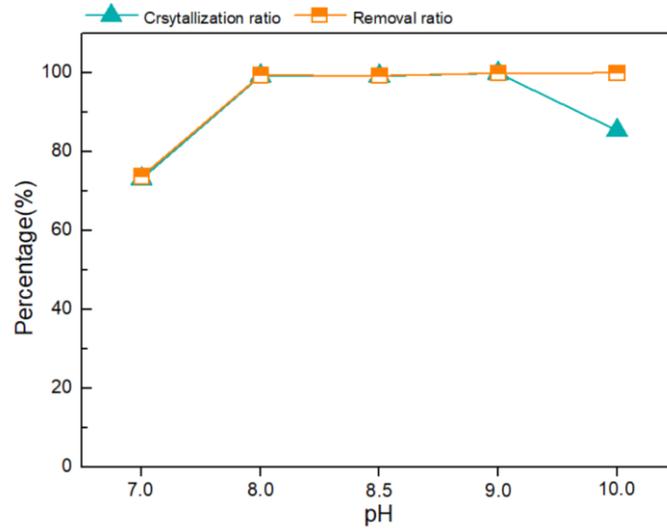


圖 1 pH 對去除率及結晶率的影響

圖 2 為不同 pH 值條件下的粒徑分布情形，當 pH 值降低其粒徑大的顆粒占比就越低，可觀察到在 pH9 的條件下顆粒粒徑小於 0.104mm 的有 56.95%、粒徑 0.104~0.38mm 的有 12.97%、粒徑 0.38~0.7mm 的有 6.9%、粒徑 0.7~1mm 的有 11.98%，而粒徑大於 1mm 的大顆粒則是有 11.1%。而在 pH7 條件下雖然也能得到粒徑 0.104mm 以上的顆粒，但在結合考慮較高的去除效率以及結晶率後，依然選擇 pH9 為最適操作條件。

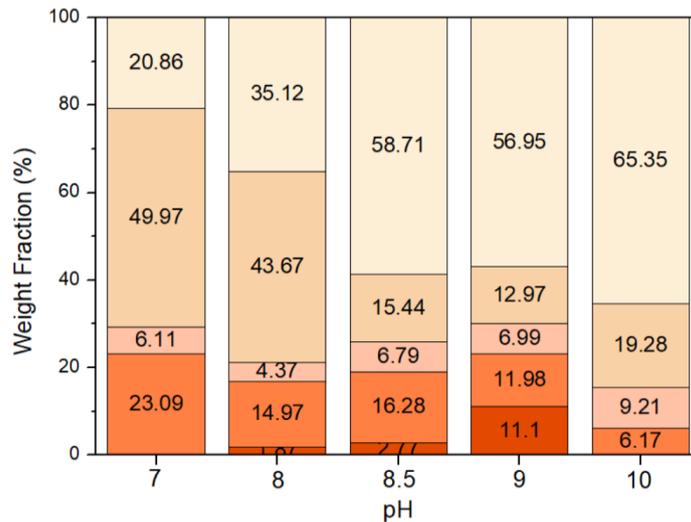


圖 2 pH 對顆粒粒徑分布的影響

### (三) 顆粒產物分析

在合適 pH 值及操作條件下，細小的晶核會先形成於結晶管內，並在流體化床反應槽中不停翻滾碰撞互相聚合生長，經過實驗條件所訂定的天數後，其最後會形成緊密又光滑的顆粒。圖 3 為顆粒產物形成的示意圖及 SEM 圖，可觀察到起初是從有菱有角的細小晶核開始生成的，並根據文獻結果，初步推測其為菱形方解石(Rhombohedral calcite) 的碳酸鈣顆粒(Arshe Said et al., 2013)，藉由結晶管的流體化不斷與彼此集結成團，表面也隨之變圓潤。

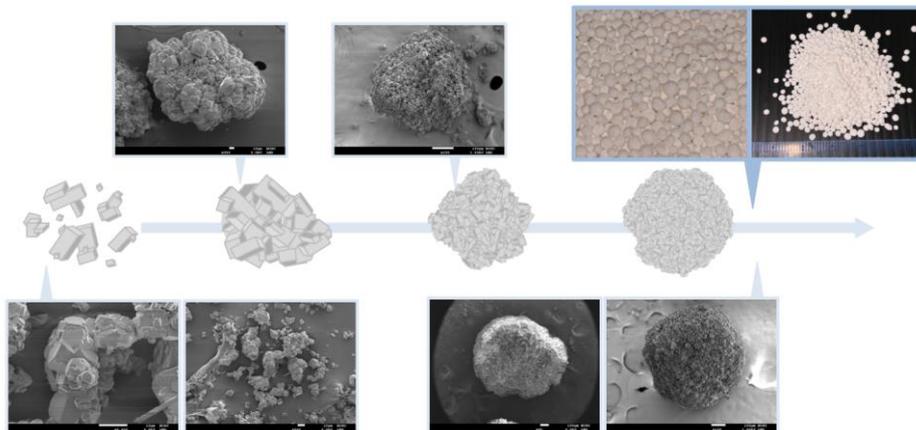


圖 3 顆粒結晶產物生長示意圖及 SEM

而為了證實實驗所得的產物成分及晶體結構因此進行了 XRD 分析，如圖 4 所示，結果顯示 pH 在 7~10 的範圍條件下，以氯化鈣及碳酸銨相互反應後的產物波峰結有  $29.3^\circ$  (104) 的碳酸鈣方解石特徵波峰，而其餘波峰也都與之相符，以此推斷其組成成分以方解石形式的碳酸鈣為主。

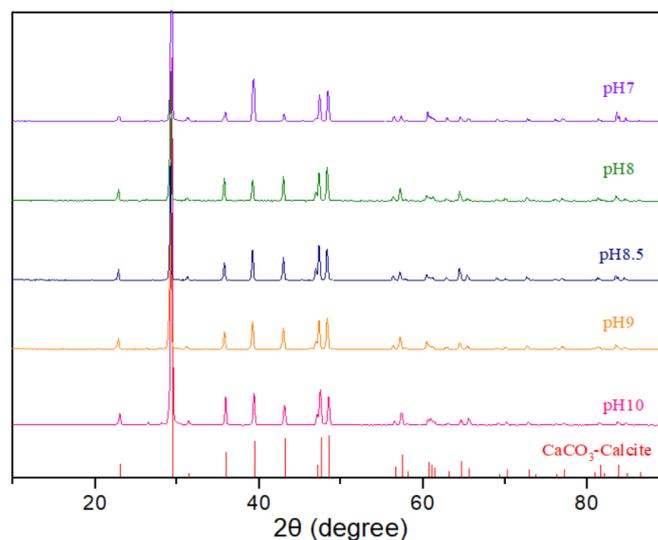


圖 4 結晶產物 XRD 分析

## 四、結論

在本研究中先萃取出再生鈣轉爐石的鈣離子，再以配製方法合成出相似濃度的含鈣溶液以及二氧化碳捕集後產生之碳酸銨溶液，透過以碳酸根進流濃度為 0.096M、槽體 pH 值 7.0~10.0、進流  $[Ca^{2+}]/[CO_3^{2-}] = 1.0$ 、截面積負荷  $36.7 \text{ kg } Ca^{2+}/m^2 \cdot \text{hr}$ 、 $55.0 \text{ kg } CO_3^{2-}/m^2 \cdot \text{hr}$  為操作條件，結合流體化床均質結晶技術來探討在不同 pH 條件下，以再生鈣當作鈣源的碳酸根去除率及結晶效果。根據實驗研究證明，以 0.1M 的氯化銨為萃取液時，會有 3,498mg/L 的鈣離子被萃取出來，並以此濃度來進行後續的結晶反應。在流體化床結晶反應中以 pH8~9 為最佳條件，其去除率及結晶率都可達 99% 以上，且在顆粒粒徑方面 pH9 也能夠產出 11.1% 的大顆粒，方便後續循環之利用。而顆粒組成成分在 pH7~10 的範圍內皆以方解石型態的碳酸鈣為主。整個研究以資源再利用為主軸，以再生鈣轉爐石當作鈣源和結晶槽出流水的重複利用，並且生產出的結晶顆粒為應用廣泛的碳酸鈣顆粒，在之後的研究中會嘗試更多不同濃度及莫爾比來因應在實際狀況中會遇到的各種情況，將整個實驗發揮出最大的潛力。

## 五、參考文獻

1. 郭于寧、張名惠、張書懷、徐恆文、萬皓鵬 (2019 年 11 月)。以轉爐石間接碳酸化程序進行二氧化碳再利用。工業技術研究院 綠能與環境研究所。
2. 盧明俊、黃耀輝、吳玄東，利用流體化床均質技術捕集二氧化碳，中華民國發明專利第 I660770 號，(2019)。
3. Chou, Y.-C., Ha, T.-H., Lu, M.-C. Optimum operation condition of fluidized-bed homogeneous crystallization technology for the recovery of carbon dioxide captured in flue gas. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(3), 112943, (2024).
4. Declat, A., Reyes, E., & Suárez, O. M. Calcium carbonate precipitation: a review of the carbonate crystallization process and applications in bioinspired composites. *Reviews on Advanced Materials Science*, 44(1), (2016).
5. de Luna, M. D. G., Sioson, A. S., Choi, A. E. S., Abarca, R. R. M., Huang,

- Y. H., & Lu, M. C. Operating pH influences homogeneous calcium carbonate granulation in the frame of CO<sub>2</sub> capture. *Journal of Cleaner Production*, 272, 122325, (2020).
6. Said, A., Mattila, H.-P., Järvinen, M., Zevenhoven, R. Production of precipitated calcium carbonate (PCC) from steelmaking slag for fixation of CO<sub>2</sub>. *Applied Energy*, 112, 765-771, (2013).



# 回收飛灰中鈣離子捕捉煙道氣二氧化碳之減碳排技術

呂博揚\*、盧明俊\*\*

## 摘 要

全球暖化與氣候變遷的議題，已經是全球公民所認同的全球危機，而造成這一切的主因就是溫室氣體，其中溫室氣體的占比又以二氧化碳為主，二氧化碳造成冰川融化及海平面上升，也使大量動植物與民眾的居住環境遭到破壞，為了解決二氧化碳排放的問題，也成為緩解全球暖化的首要課題，聯合國指出，未來任何產業都需要往淨零碳排的方向前進，這也就表示全球迫切需要碳捕集、利用和碳封存等相關技術，而碳捕集的成本更是發展技術的關鍵要素。

本研究結合二氧化碳化學吸收法及流體化床均質結晶技術，利用吸收槽將二氧化碳捕集，經過鹼液吸收轉變為碳酸根，並將垃圾焚化廠焚燒後的產物飛灰進行水洗，得到含有高濃度的鈣離子溶液，並導入至流體化床反應槽與碳酸根反應形成高純度、含水率低的碳酸鈣結晶顆粒。減少碳排的同時，也可以將回收後的碳酸鈣結晶顆粒，運用到塑膠、造紙、建材等工業原料，進行更高產值的應用。研究結果顯示；使用 4N HCl L/S 3:1 進行水洗可得到 26,040 mg/L 的鈣離子，利用若用模擬鈣廢水進行流體化床均質結晶試驗，去除及結晶產率皆達到 96% 以上。而在產物純度方面，不論是飛灰水洗溶液進行瓶杯試驗，或是以模擬含鈣廢水導入結晶槽，反應產物均為碳酸鈣-方解石。本研究亦利用實廠飛灰洗滌所獲的含鈣廢水，飛灰水洗後的溶液含有大量氯鹽等干擾物不可忽視，因此將干擾物納入實驗變因進行分析，能得到均質結晶技術實際運用的最佳條件，期望能透過本技術解決二氧化碳排放的問題，同時也達成廢棄物再利用及提升實廠碳捕集的經濟效益。

【關鍵詞】二氧化碳捕集、流體化床反應槽、均質結晶技術、飛灰、碳酸鈣

\*國立中興大學環境工程學系 研究生

\*\*國立中興大學環境工程學系 特聘教授

## 一、前言

近年來科技與世界人口快速成長，導致化石燃料的消耗快速增加，也間接造成二氧化碳排放的增長，導致全球暖化越來越嚴重(Elsaid et al.,2020)，人口成長的同時也產生了大量固體廢棄物(MSW) (Wang et al.,2020)，目前處理 MSW 的主要方法為焚燒及掩埋，而 MSW 可透過生活垃圾焚化(MSWI)進行發電，但在焚燒的過程中會產生大量二氧化碳，焚燒後的 MSW 則會產生固體焚化廢棄物飛灰(MSWI-FA)，雖然經過 MSWI 處理後的 MSW 體積可大幅減少約 85-90%( Fruergaard et al.,2011)，但其最大的缺點是焚燒過程會排放大量二氧化碳，焚燒產物則具有有毒的重金屬物質，目前二氧化碳能透過化學吸收法及均質結晶技術捕集(盧明俊等人, 2019)，而 MSWI-FA 則能透過水洗，也就是利用大量水溶液將可溶性氯鹽及可溶性金屬去除，而水洗後的溶液含有極高濃度的鈣離子(Lv et al.,2022)，如果搭配二氧化碳捕集技術與均質結晶技術回收這些鈣離子，不只減緩全球暖化的危機，更能將這些廢棄物進行更高產值的再利用。

本研究將模擬及實廠焚化廠飛灰水洗後的廢水將所產生的高濃度鈣離子廢水結合傳統二氧化碳化學吸收法及流體化床均質結晶技術，將煙道中的二氧化碳吸收並轉為碳酸根溶液，並導入流體化床均質結晶反應槽中，與鈣離子反應產生高純度的碳酸鈣結晶顆粒，可回收應用於塑膠、造紙、建材等用途，達成回收鈣的同時也能進行減碳，此外還能將產生的碳酸鈣均質顆粒結晶進行工業製程再利用。

## 二、研究方法

本研究目前為了配合實廠化考量以不同飛灰、飛灰水洗方式、鈣離子進流濃度、作為操作變因，研究以何種操作條件下最適合在流體化床均質結晶試驗中回收飛灰在水洗過程中所產生的高濃度鈣離子廢水，並將產出結晶顆粒篩分進行粒徑分析，利用熱場發射掃描式電子顯微鏡 (SEM) 觀察顆粒結晶情形，再以 X 光繞射儀 (XRD) 分析產物中成分。此外分別以利用經 0.45 mm 注射型過濾器過濾及直接取樣出流水，以原子火焰吸收光譜儀 (AA) 分析出流水鈣離子濃度計算去除率及結晶率。其中去除率為分析離子型態之碳酸根離子濃度去除效率(方程式 1)，結晶率則為未經過濾所分析之離子型態及總懸浮固體形式之碳酸根離子濃度去除效率(方程式 2)。

$$(\text{CO}_3^{2-})_R, \% = \left[ \frac{(\text{CO}_3^{2-})_{in} - (\text{CO}_3^{2-})_d}{(\text{CO}_3^{2-})_{in}} \right] \times 100 \quad (1)$$

$$(\text{CO}_3^{2-})_G, \% = \left[ \frac{(\text{CO}_3^{2-})_{in} - (\text{CO}_3^{2-})_t}{(\text{CO}_3^{2-})_{in}} \right] \times 100 \quad (2)$$

### 三、結果與討論

本研究以實廠飛灰作為鈣離子來源並使用 0.1-4N 的鹽酸及 DI 水進行水洗試驗，且使用不同水洗比例，分析水洗後溶液的鈣離子濃度，探討不同水洗條件下對鈣離子濃度的影響。

#### 3.1 水洗溶劑濃度、液固比例所產生之鈣離子濃度比較

根據文獻利用 0.1 N 鹽酸溶液在 L/S(液/固)比 3:1 的條件下水洗飛灰，所得到的鈣離子濃度高達 37,420 mg/L (Chen et al., 2024)。本研究為了應證水洗溶液濃度與 L/S 比是否對的鈣離子水洗出的濃度有影響故進行了以上試驗，找出水洗飛灰的最佳操作條件。

從圖 1 及圖 2 可觀察最佳的操作條件為使用 4 N HCl L/S 3:1 水洗飛灰的鈣離子濃度最高，可洗出約 26,040 mg/L 的鈣離子，使用 4 N HCl 所水洗出的鈣離子是 DI 的 3.5 倍，且 L/S 3:1 是 40:1 的 4.43-5.58 倍，根據文獻結果(Jang et al., 2022)，可初步推估因為 4 N HCl 的 pH 較低，更能將飛灰中的鈣離子溶出，但從 R2 值可發現 L/S 的影響比萃取液濃度更高，推測是因為當濃度提升到 2 N 時幾乎將飛灰中大部分的鈣離子洗出故鈣離子濃度沒有顯著提升，而 L/S 比 3:1 鈣離子濃度高於 40:1 則是因為在實驗中水洗反應中添加更多的飛灰固體，導致鈣離子溶出的量也會增加。

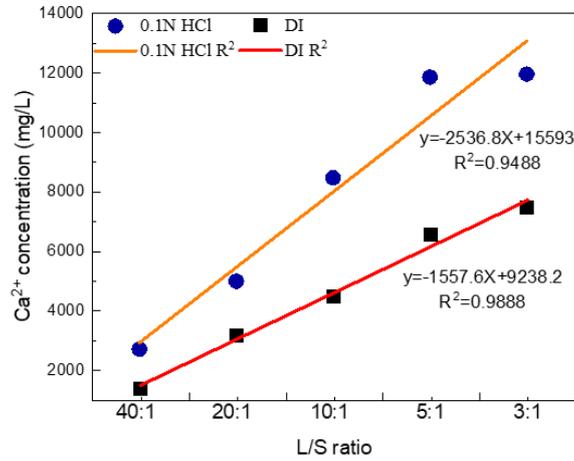


圖 1 不同水洗液與 L/S 比萃取鈣離子濃度比較

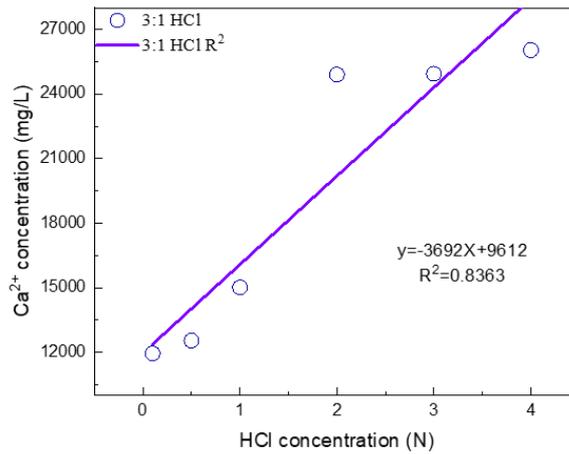


圖 2 使用不同鹽酸濃度萃取鈣離子濃度比較

接著本研究參考文獻(Chou et al., 2024)以鈣離子結晶槽，最適槽體 pH 9，以進流 $[Ca^{2+}]/[CO_3^{2-}] = 1.0$ 進行依據，改變碳酸根進流濃度 0.072-0.120 M，截面積負荷 27.5-45.9 kg  $Ca^{2+}/m^2 \cdot hr$ 、55.0 kg  $CO_3^{2-}/m^2 \cdot hr$  為操作條件，利用合成鈣離子廢水與碳酸根反應，分析出流鈣離子濃度與產物成分，探討不同反應條件下二氧化碳去除效率及產物純度之影響。

### 3.2 鈣離子去除及結晶效率

圖 3 可觀察在不同鈣離子進流濃度下對碳酸根去除效率的影響，在 pH 9 時鈣的去除及回收率並不會相差太大，結晶率及去除率均可達到 96% 以上，而在 0.096 M 結晶率略大於 0.120 M，這與文獻(Liu et al., 2022)結果相符，由於過飽和度過高造成結晶率下降。而在本次結果中可得知最佳去除及結晶率的操作條件為 0.096 M-0.120 M。

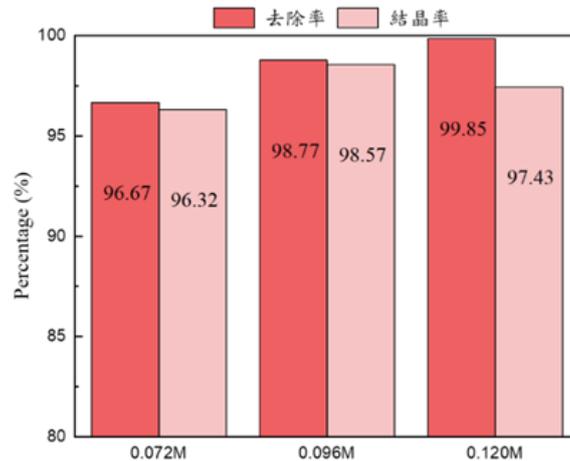


圖 3 pH 9 不同鈣離子進流濃度鈣離子去除率比較

### 3.3 結晶產物分析與成核比較

為了確認飛灰水洗溶液進行瓶杯試驗的產物與合成鈣廢水的結晶產物成分是否相似，進行了 XRD 分析，從圖 4 所示，結果顯示出不論是使用實廠飛灰水洗溶液進行瓶杯試驗的產物，或是合成鈣廢水在結晶槽的產物，皆與碳酸鈣方解石的波峰相符，可初步推測利用實廠飛灰水洗溶液進行均質結晶反應所得出的產物有可能會是碳酸鈣方解石。這也對後續回收利用有更多的用處。

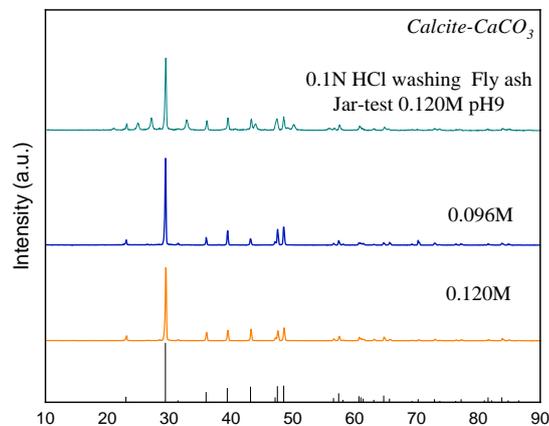


圖 4 產物 XRD 分析

從圖 5 所示利用流體化床均質結晶技術，所生長出的碳酸鈣顆粒比利用瓶杯試驗所生長出的顆粒更加光滑圓潤，推測可能是因為碳酸鈣顆粒在結晶槽中經過長時間的流動，使碳酸鈣結晶在生長過程中，表面被水流磨得越來越光滑，漸漸形成圓球形狀的結晶顆粒。

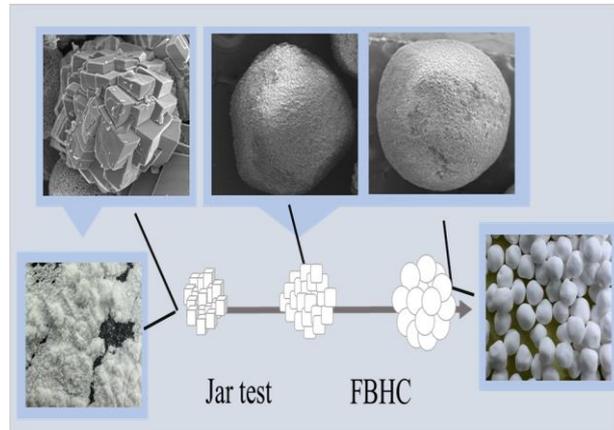


圖 5 碳酸鈣顆粒生長圖

#### 四、結論

本研究使用不同溶劑水洗滌實廠飛灰，結合模擬二氧化碳捕集後產生之碳酸鉀溶液，以流體化床均質結晶技術進行結晶顆粒化於 pH 9，以進流  $[Ca^{2+}] / [CO_3^{2-}] = 1.0$  進行依據，改變碳酸根進流濃度 0.072-0.120 M，的操作條件下進行比較。經研究證明使用 4 N HCl L/S 3:1 進行水洗可得到 26,040 mg/L 的鈣離子，利用合成鈣廢水進行流體化床均質結晶試驗，去除及結晶產率皆達到 96% 以上，晶主要成分均是碳酸鈣。本研究亦利用實廠飛灰洗滌所獲的含鈣廢水，飛灰水洗後的溶液含有大量氯鹽等干擾物不可忽視，因此將干擾物納入實驗變因進行分析，能得到均質結晶技術實際運用的最佳條件，期望能透過本技術解決二氧化碳排放的問題，同時也達成廢棄物再利用及提升實廠碳捕集的經濟效益。

## 五、參考文獻

1. Elsaid, K., Kamil, M., Sayed, E. T., Abdelkareem, M. A., Wilberforce, T., & Olabi, A. (2020). Environmental impact of desalination technologies: A review. *Science of the total environment*, 748, 141528.
2. Wang, Z., Lv, J., Gu, F., Yang, J., & Guo, J. (2020). Environmental and economic performance of an integrated municipal solid waste treatment: A Chinese case study. *Science of the Total Environment*, 709, 136096.
3. Fruergaard, T., & Astrup, T. (2011). Optimal utilization of waste-to-energy in an LCA perspective. *Waste Management*, 31(3), 572-582.
4. 盧明俊、黃耀輝、吳玄東，利用流體化床均質結晶技術捕集二氧化碳，中華民國發明專利第 I660770 號，(2019)。
5. Lv, Z., Pan, X., Geng, X., & Yu, H. (2022). Synergistic removal of calcium and iron impurities from calcium-rich and high-alumina fly ash by acid leaching control. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(2), 107268.
6. Jang, K., Choi, W. Y., Lee, D., Park, J., & Yoo, Y. (2022). Purification of landfill gas by extracted calcium ions from municipal solid waste incineration fly ash. *Science of The Total Environment*, 807, 150729
7. Chou, Y. C., Ha, T. H., & Lu, M. C. (2024). Optimum operation condition of fluidized-bed homogeneous crystallization technology for the recovery of carbon dioxide captured in flue gas. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(3), 112943.
8. Liu, P. C., Vilando, A. C., & Lu, M. C. (2022). Treatment of synthetic zinc and nickel wastewater and identification of its crystallization products by fluidized bed homogeneous crystallization technology. *Process Safety and Environmental Protection*, 164, 154-163.



# 染料製造業推動減碳降空污實例

邱灯松\*、洪文承\*\*

## 摘要

染料製造業空氣污染物主要排放源為鍋爐煙道排氣。環境部於 109 年 7 月 1 日公布鍋爐空氣污染物排放標準，自 111 年 7 月 1 日起不分鍋爐規格及燃料種類 TSP 排放標準為 30mg/Nm<sup>3</sup>、SO<sub>x</sub> 為 50ppm、NO<sub>x</sub> 為 100ppm，國內各鍋爐使用業者積極投入改善燃料種類(如天然氣、生質油)或加裝防制設備，以符合污染物排放標準；另配合政府推動 2050 淨零碳排策略，採取減碳減污協同措施，實現產業減少排碳之決心。

本公司為降低工業鍋爐空氣污染物排放濃度，經評估多種鍋爐燃料替代方案後，將燃料由原來的特種低硫燃料油改為植物油(棕櫚油)、排氣經多層水柱+活性碳洗滌塔處理、在燃燒火焰區注入飽和水蒸氣以阻擋氮跟氧的結合降低 NO<sub>x</sub> 濃度；實測結果顯示，排氣 TSP ≤ 12 mg/Nm<sup>3</sup>、NO<sub>x</sub> ≤ 25ppm、SO<sub>x</sub> ≤ 1ppm，排氣遠低於法規標準。鍋爐使用植物油(棕櫚油)當燃料，其燃燒排碳量不納入碳排放量計算，在將鍋爐排氣 CO<sub>2</sub> 收集作為養殖水生植物的碳源後，達到實質負碳。相關改善技術已獲得國內多項發明與新型專利。進一步研究發現，基改黃豆沙拉油原油經檢測熱值為 9,428 Kcal/kg，高出煤炭的 5,600 Kcal/kg，其熱值高、空污低、零碳排、排氣可養殖水生植物，已逐漸受到各界之關注。

本文另說明低殘液染料染料，提供國內眾多染整業者使用，由製程減少 2 次水洗水量、減少 48 分鐘染程時間、廢水量少易處理的特性，協助產業達到節能減碳的效益。

【關鍵詞】鍋爐、減污減碳、多層多層水柱+活性碳洗滌塔、水蒸氣注入、氮氧化物、基改黃豆沙拉油

---

\*泰鋒染化工業股份有限公司 董事長

\*\*泰鋒染化工業股份有限公司 顧問

## 一、前言

泰鋒染化公司創立於民國 66 年，成立至今已超過 47 年，是台灣本土染料業界的先驅之一，現在台灣已是全球機能性紡織品的基地，泰鋒公司也一直深耕著這塊土地，並放眼國際市場，著重於開發環保酸性染料，並建立泰鋒綠色檢測中心，對原物料及產品的品質做把關。隨著現今世界環保意識抬頭，國際社會對節能減碳議題的高度關注，公司特別重視環境永續課題，近年來公司積極投入開發空污防制新技術與減碳措施，進而達到淨零碳排放，盡到企業的社會責任，協助產業永續發展。

染料製造業空氣污染物主要排放源為鍋爐煙道排氣。環境部於 109 年 7 月 1 日公布鍋爐空氣污染物排放標準，自 111 年 7 月 1 日起不分鍋爐規格及燃料種類，TSP 排放標準為 30mg/Nm<sup>3</sup>、SO<sub>x</sub> 為 50ppm、NO<sub>x</sub> 為 100ppm，國內各鍋爐使用業者積極投入改善燃料種類(如天然氣、生質油)或加裝空污防制設備，以符合污染物排放標準。

由於工業鍋爐用戶多採用污染性較高之燃料，為減少鍋爐排氣對於空氣品質影響，鼓勵公私場所改造或汰換燃料、燃油鍋爐，改用低污染性氣體燃料(如天然氣)或改以能源整合中心供應蒸汽，經濟部產業發展署辦理產業輔導工作，協助並補助業者改善或汰換工業鍋爐，並委由專業技術團隊依據各廠狀況提供技術輔導與諮詢。

自 20 世紀中期以來，大氣層中溫室氣體的濃度及地球表面溫度不斷上升，溫室氣體主要來自化石能源的燃燒過程，例如燃燒煤、石油和天然氣來生產電力、驅動運輸工具和運行工業設備的過程。另外，砍伐樹木會減少植物進行光合作用及吸收二氧化碳，間接增加大氣層中二氧化碳的濃度。

鑑於氣候變遷對環境、人類生存和國家安全的威脅越來越大，全球已有 150 多國提出「2050 淨零排放」的宣示與規劃。我國於 111 年 3 月及 12 月分別公布「台灣 2050 淨零排放路徑及策略總說明」及「12 項關鍵戰略行動計劃」，112 年 2 月 15 日公布「氣候變遷因應法」，納入 2050 年零排放目標，徵收碳費專款專用，納入碳足跡及產品標示管理機制。賴總統在主持國家氣候變遷對策委員會中提到，台灣的能源政策必須靈活，因傳統火力發電的煤炭與天然氣受到諸多限制(前者產生之空污、後者則有儲量及安全性之虞，以及隨之而來的碳排放)，必須積極尋求新興能源技術的應用。

本公司經與輔導團隊討論，考量天然氣管線敷設成本、供應穩定性、設施安全及推行減碳排放等諸因素，乃配合政府推動減碳策略，採取減碳減污協同措施，以實現產業願環保、減碳排之決心。

## 二、鍋爐減碳減污協同措施與效益

### 1.改善措施

本公司染料製造過程中，設置 1 座 6 噸臥式煙管鍋爐(如圖 1)，原以特種低硫燃料油為鍋爐燃料，每月使用 15 公秉(年使用量 180 公秉)，排放空氣污染物 NO<sub>x</sub> 平均約為 170 ppm，雖然符合 109 年前的空氣污染物排放標準，然無法符合 109 年公告後之排放標準，必須改善。政府希望業者改用天然氣，但天然氣成本高且須注意易爆的公安問題，故本公司積極尋求降低污染物排放與低碳排的作法。

為解決鍋爐煙氣空氣污染問題，並達到減碳目的，近年來進行下列改善措施：(1)鍋爐空污改善：改用植物油作為鍋爐燃料、提昇煙氣濕式洗滌塔效率、鍋爐燃燒過程注入飽和水蒸氣以降低 NO<sub>x</sub>；(2)鍋爐零碳排：應用鍋爐煙氣養殖水生植物達到實質減碳、控制鍋爐煙氣 O<sub>2</sub> 含量降低 CO<sub>2</sub> 排放量；(3)開發低殘液染料，協助紡織染整業節能減碳。具體改善方式及效益分別說明如下：

#### (1) 鍋爐空污改善

##### A.以植物油替代低硫燃料油，降低空污濃度與減少碳排

為尋求鍋爐適用之燃料，本公司試燒坊間多種可能有效降低空污的燃料，但效益大多不彰(排放空污濃度比較如表 1)；僅植物油(棕櫚油)燃燒後之 NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>、PM<sub>2.5</sub> 降低許多且穩定，NO<sub>x</sub> 能維持在 70ppm 以下；因其含硫成分相當低(僅約 0.001%)，排氣中 SO<sub>x</sub> 降至 1ppm 以下(排放標準為 50ppm)，同時設備較不易產生腐蝕。

經確認測試結果後，自 110 年 10 月起改採用棕櫚油為鍋爐燃料油迄今。由於鍋爐排氣濃度低，變更空污操作許可後，各項污染物年許可排放量均低於 2 公噸/年(粒狀污染物：0.079 公噸/年、硫氧化物：0.026 公噸/年、氮氧化物：0.686 公噸/年)，依「公私場所應定期檢測及申報之固定污染源」公告事項三略以「...每一排放管道其粒狀污染物、硫氧化物或氮氧化物之個別年許可排放量未達每年二公噸者，該空氣污染物項目免實施定期檢測及申報」，減少空污定期檢測及申報的環保行政工作。

在減碳方面，因燃燒植物油鍋爐煙氣之 CO<sub>2</sub> 排放量可不納入碳排放量計算。以 1kg 植物油熱值 9,428Kcal/Kg 比較(詳表 2)，特種低硫燃料油產生 9,428 大卡之碳排量為 2.95Kg-CO<sub>2e</sub>，經計算，使用植物油可減少碳排放量為 538.3 公噸 CO<sub>2e</sub>/年。

表 1 不同燃料油試燒排放空污濃度比較

項目	O <sub>2</sub> (%)	CO <sub>2</sub> (%)	NO <sub>x</sub> (ppm)	SO <sub>x</sub> (ppm)
特種低硫燃料油*	9.0	9.1	158/198	137/171
甲種低硫油	3.1	13.6	171/143	118/99
某公司生質油	5.8	11.5	91/92	0
棕櫚油**	9.7	8.5	49/65	0

\*：本公司原使用之燃料油

\*\*：本公司目前使用之燃料油

資料來源：本公司自行測試檢測

表 2 各種燃料的熱值及碳排放係數

燃料種類	特種 低硫 燃料 油	天然 氣 (NG)	液化 石油 氣 (LPG)	柴油	煤炭	木質 顆粒	生質 燃油	植物 油
熱值 (Kcal/Kg)	11,000	11,300	12,000	10,000	5,600	4,300	10,634	9,428
碳排係數 (Kg-CO <sub>2</sub> /Kg)	3.44	2.81	3.18	3.11	2.25	0.63	1.18	0
產生 9,428 大卡需用燃 料(Kg)	0.857	0.834	0.786	0.943	1.684	2.193	0.887	1
產生 9,428 大卡碳排量 (Kg-CO <sub>2</sub> )	2.95	2.34	2.5	2.93	3.79	1.38	1.05	0

資料來源：環境部，碳足跡排放係數，本公司彙整計算。

B.提昇煙氣濕式洗滌塔效率：將廢氣洗滌塔改為多層水柱濕式洗滌及粒狀活性炭廢水處理

本公司原設置 1 座廢氣洗滌塔，經改為多層水柱濕式洗滌+粒狀活性炭吸附設備(如圖 2)，提昇粒狀物去除效率及煙氣洗滌水重金屬處理；結果顯示，粒狀物 TSP 可降至  $12\text{mg}/\text{Nm}^3$ (排放標準為  $30\text{mg}/\text{Nm}^3$ )。



C.鍋爐燃燒過程導入飽和水蒸氣以降低  $\text{NO}_x$

在確認植物油(棕櫚油)能降低燃燒排氣污染物後，接著更進一步研發如何再降低  $\text{NO}_x$  的方法。經多次測試發現，在燃燒過程中，在火焰區通入飽和水蒸氣後，以阻擋氮跟氧的結合，可有效降低  $\text{NO}_x$  濃度至 25ppm 以下(排放標準為 100ppm)。

(2) 鍋爐零碳排

A.應用鍋爐煙氣養殖水生植物：達到實質負碳效益

目前固碳技術仍存在高成本、能源需求大及地質風險等問題。為了實質減碳，將鍋爐燃燒植物油所排放之  $\text{CO}_2$ ，將其導入 2 池水生植物養殖池中，包括布袋蓮(*Pontederia crassipes*)、浮萍(*Lemna minor*) 或大藻(*Pistia stratiotes*)，經由這些水生植物的光合作用吸收後，將其轉化為葡萄糖，而釋放出  $\text{O}_2$  到空氣中；如此不僅能降低  $\text{CO}_2$  排放，甚至具有負碳排的效益。此外，無毒養殖之布袋蓮等水生植物，可作為豬飼料使用或供其它用途。圖 3 為利用鍋爐排氣  $\text{CO}_2$  養殖水生植物之現況。公司附近有多座池塘，在不影響水利安全考量下，未來可擴大養殖面積。



圖 3 鍋爐含 CO<sub>2</sub> 排氣導入 2 池水生植物養殖池

#### B. 控制鍋爐煙氣 O<sub>2</sub> 含量降低 CO<sub>2</sub> 之排放量

鍋爐燃燒通常需要使用過量空氣(約 20~30%)以確保燃料的完全燃燒。然而，過量空氣如未加入燃燒過程中，未燃燒碳、懸浮微粒與一氧化碳會造成額外的煙氣和爐膛傳熱表面的積垢，進而造成火焰不穩定性、降低鍋爐效率和工安疑慮。

本法藉由調節液態燃料通入鍋爐內的流量，並監測鍋爐燃燒產生的煙氣中二氧化碳的濃度，建立燃料使用量、氧氣及二氧化碳之濃度關係；在確保足夠壓力的水蒸氣下，達到降低燃料使用量與二氧化碳產生量，並兼顧良好的鍋爐燃燒效率。亦即，藉由調整煙道 O<sub>2</sub> 含量以降低 CO<sub>2</sub> 之排放量。

研發過程，利用法國 kimo 煙道儀器直接偵測法，建立燃料用量、氧氣與二氧化碳排放量之關係圖，如圖 4。由圖中鍋爐煙氣 O<sub>2</sub> 含量與 CO<sub>2</sub> 之排放濃度(%)對照，可知 O<sub>2</sub> 含量由基準 6%(燃料用量 159L/hr)調高至 10%(燃料用量 109L/hr)，則 CO<sub>2</sub> 之排放量由 11.4%降至 8.3%；而燃料減量為 108 公秉/年(減量 31%)。經由調整鍋爐煙器 O<sub>2</sub> 含量，計算可得知，每年可排減 CO<sub>2</sub> 共 278.3 公噸、節省燃料成本約 254.4 萬元/年(以每公秉 23,558 元計算)。

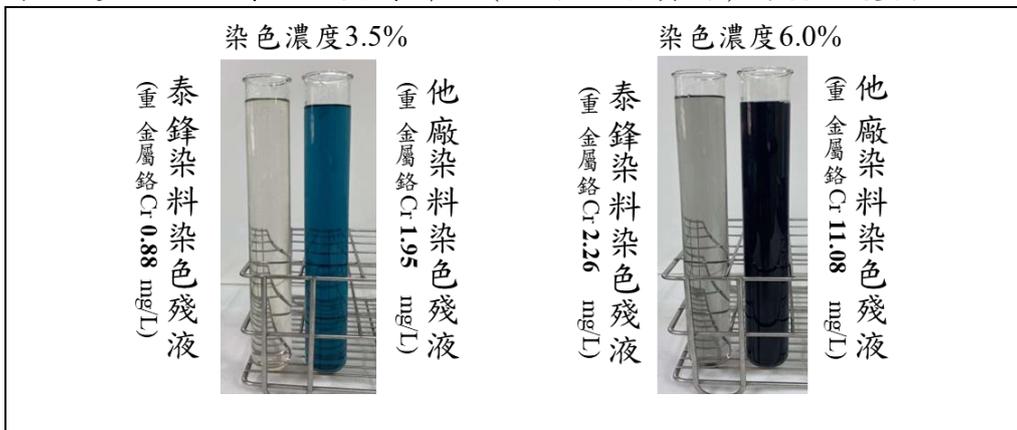
<table border="1"> <thead> <tr> <th>氧氣濃度(%)</th> <th>二氧化碳濃度(%)</th> <th>液態燃料用量(公升/小時)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>3</td><td>13.6</td><td>207</td></tr> <tr><td>3.5</td><td>13.2</td><td>198</td></tr> <tr><td>4</td><td>12.9</td><td>190</td></tr> <tr><td>4.5</td><td>12.5</td><td>182</td></tr> <tr><td>5</td><td>12.2</td><td>174</td></tr> <tr><td>5.5</td><td>11.8</td><td>166</td></tr> <tr><td>6</td><td>11.4</td><td>159</td></tr> <tr><td>6.5</td><td>11</td><td>152</td></tr> <tr><td>7</td><td>10.6</td><td>145</td></tr> <tr><td>7.5</td><td>10.3</td><td>138</td></tr> <tr><td>8</td><td>9.8</td><td>130</td></tr> <tr><td>8.5</td><td>9.4</td><td>123</td></tr> <tr><td>9</td><td>9.1</td><td>116</td></tr> <tr><td>9.5</td><td>8.5</td><td>112</td></tr> <tr><td>10</td><td>8.3</td><td>109</td></tr> <tr><td>10.5</td><td>8</td><td>105</td></tr> <tr><td>11</td><td>7.5</td><td>102</td></tr> <tr><td>11.5</td><td>7.2</td><td>98</td></tr> <tr><td>12</td><td>6.8</td><td>95</td></tr> <tr><td>12.5</td><td>6.4</td><td>92</td></tr> </tbody> </table>			氧氣濃度(%)	二氧化碳濃度(%)	液態燃料用量(公升/小時)	3	13.6	207	3.5	13.2	198	4	12.9	190	4.5	12.5	182	5	12.2	174	5.5	11.8	166	6	11.4	159	6.5	11	152	7	10.6	145	7.5	10.3	138	8	9.8	130	8.5	9.4	123	9	9.1	116	9.5	8.5	112	10	8.3	109	10.5	8	105	11	7.5	102	11.5	7.2	98	12	6.8	95	12.5	6.4	92			
氧氣濃度(%)	二氧化碳濃度(%)	液態燃料用量(公升/小時)																																																																		
3	13.6	207																																																																		
3.5	13.2	198																																																																		
4	12.9	190																																																																		
4.5	12.5	182																																																																		
5	12.2	174																																																																		
5.5	11.8	166																																																																		
6	11.4	159																																																																		
6.5	11	152																																																																		
7	10.6	145																																																																		
7.5	10.3	138																																																																		
8	9.8	130																																																																		
8.5	9.4	123																																																																		
9	9.1	116																																																																		
9.5	8.5	112																																																																		
10	8.3	109																																																																		
10.5	8	105																																																																		
11	7.5	102																																																																		
11.5	7.2	98																																																																		
12	6.8	95																																																																		
12.5	6.4	92																																																																		
<p align="center"><b>鍋爐燃料用量、煙氣 O<sub>2</sub> 與 CO<sub>2</sub> 之濃度(%)對照</b></p>			<p align="center"><b>降低二氧化碳排放的鍋爐燃燒方法發明專利</b></p>																																																																	

**圖 4 建立鍋爐燃料用量、氧氣與二氧化碳濃度之關係**

**(3) 開發低殘液染料：協助紡織染整業節能減碳**

政府刻正積極推動淨零碳排工作，公司有感於產業需由多面向同時推動減碳作為；因此，開發節能減碳之產品，研發對薄織物深色具有良好的染深性及高含量彈性紗織物高牢度、殘液少、濕牢度佳之低殘液染料，以減少染布的殘液、降低清洗水使用量與廢水污染濃度，達到節能減碳的效益。

低殘液染料可降低廢水中重金屬鉻之濃度，如圖 5；在不同染色濃度下，重金屬鉻濃度可大幅降低；而水洗量，則可減少 2 次水洗之用水量，並縮短 48 分鐘之染程時間，如圖 6 之比較圖。低殘液染料對於適用之紡織品，具有節能(能源及水資源)減碳之優異效能。



**圖 5 低殘液染料可降低清洗廢水中重金屬鉻濃度**

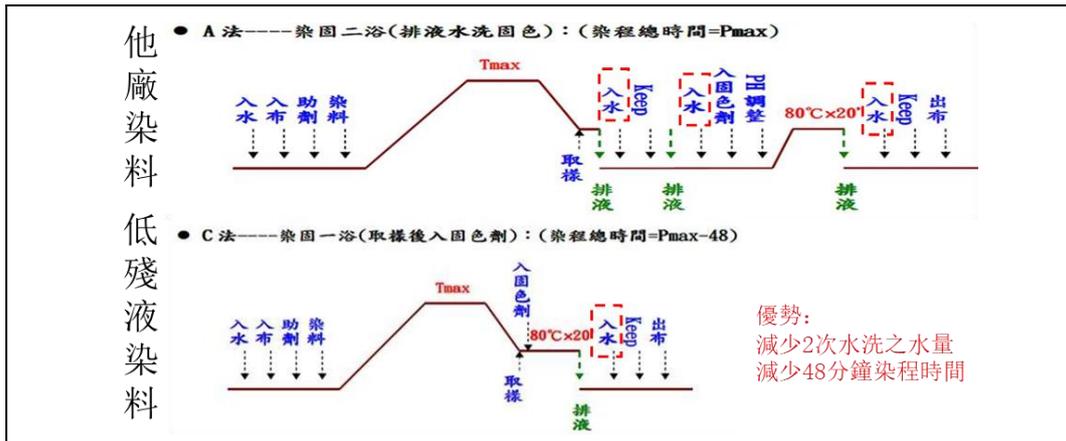


圖 6 低殘液染料可降低染後水洗次數及染程時間

## 2.改善成效

綜整鍋爐各項減污與減碳協同改善效益如表 3 所示。各項改善措施，在有限的改善成本下(改善成本及檢測儀器計約 60 萬元，不含研發成本)不但解決空污問題，並且達到減碳之效益；相關改善技術已獲得多項發明及新型專利。

為了提供各界參考應用，相關改善成果已於絲綢印染同業公會、2023 年宏遠興業自辦展及紡織價值鏈研討會、台南國際綠色產業展、第 29 屆 TITAS 2025 台北紡織展、網路媒體、工商時報、東森電、年代、民視等電視台，於研討會、論壇、展覽及媒體多元化提供各界參考應用，推廣活動摘錄如圖 7。目前已有多家國內紡織染整業者，參考相關技術，積極規劃空污及減碳協同措施、使用低殘液染料，共同努力邁向淨零碳排之綠色永續產業。

表 3 泰鋒染化公司鍋爐空污與減碳協同改善效益

項目	改善前 排氣濃度	改善後 排氣濃度	排放 標準	說明
氮氧化物 (ppm)	158~198	25	100	將鍋爐產生之飽和水蒸氣注入火焰區，不須額外設備。
硫氧化物 (ppm)	137~171	<1	50	植物油含硫量極低，排氣不須處理即可符合排放標準。
粒狀污染物 (mg/Nm <sup>3</sup> )	24	12	30	將傳統洗滌塔改為多層水柱+活性碳濕式洗滌塔，提高粒狀物去除率。
排碳量	816.6	0	1.低硫燃料油改為棕櫚油	

項目	改善前 排氣濃度	改善後 排氣濃度	排放 標準	說明
(公噸 CO <sub>2</sub> e/年)				<ul style="list-style-type: none"> <li>• 碳排放係數：2.990813kg -CO<sub>2</sub>/公升 =2,990.813kg-CO<sub>2</sub>/公秉 2,990.813kg-CO<sub>2</sub> x 15 公秉/月 x12 月/年 =538.3 公噸 CO<sub>2</sub>e/年</li> <li>2.控制鍋爐煙氣 O<sub>2</sub> 含量減碳：278.3 公噸 CO<sub>2</sub>e/年</li> <li>• 節省燃料量 108 公秉/年 (159-109)L/hr x 8hr/日 x 22.5 日/月 x12 月/年=108 公秉</li> <li>• 減碳量 278.3 公噸/年 CO<sub>2</sub> 濃度(11.4-8.3)%=3.1%=31,000 ppm 1ppm CO<sub>2</sub>= 44/22.4 = 1.964 mg/m<sup>3</sup> 排氣量:35.27 m<sup>3</sup>/min 減碳量: 31,000 x1.964 x35.27 x 60min/hr x 8hr/ 日 x 22.5 日/月 x12 月/年=278.3 公噸 CO<sub>2</sub>e/年</li> </ul>

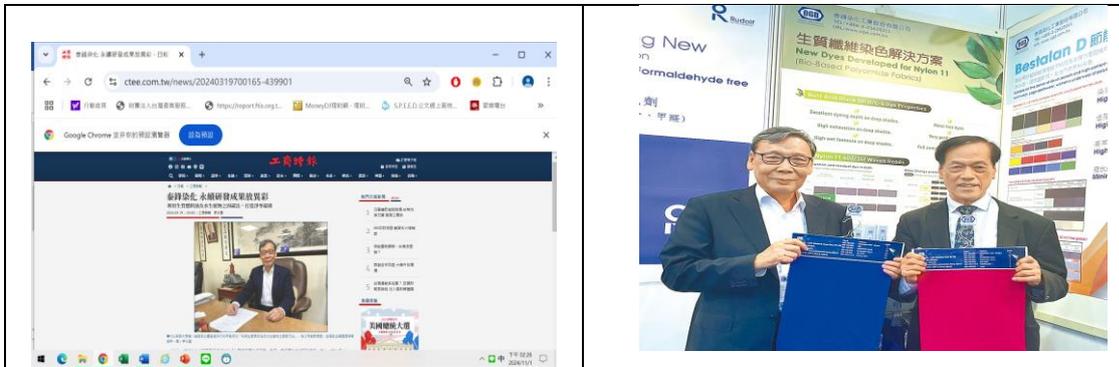


圖 7 工商時報報導與參加台北紡織展宣導活動

### 三、減碳減污協同措施討論

本公司改用植物油(棕櫚油)作為鍋爐燃料油，並進行排氣改善以降低空氣污染物之排放，包括 TSP、SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub> 之濃度均符合並優於環保法規標準，經運作約 4 年已有顯著的成效；同時將各界關注的減碳議題，納入公司經營之首要課題。僅將上述各改善技術重點摘錄說明於下。

## 1. 多層水柱濕式洗滌+廢液粒狀活性炭吸附協同處理

多層水柱濕式洗滌塔設計係以傳統洗滌塔為基礎，於塔內設置多層洗滌與填充過濾層裝置，使其功能具有操作彈性，能依排氣濃度進行設置(本公司設備為 2 層)。填充過濾層裝置厚度介於 40~50cm，由尺寸介於 70~80mm、比表面積介於  $70\sim 80\text{m}^2/\text{m}^3$  的拉西環堆疊而成。多層水柱濕式洗滌塔洗滌淨化效率高，操作維護容易，可減少廢水排放問題。設備圖示及新型專利如圖 8 所示。

眾所皆知，廢氣濕式洗滌塔洗滌廢水須以適當方法(常用者為化學處理法)處理至符合放流水標準後方能排放至承受水體。本公司為了實質減碳，將鍋爐燃燒植物油所排放之  $\text{CO}_2$ ，將其導入水生植物養殖，考慮這些水生植物可作為畜牧用飼料，因此排氣中不能含有重金屬。

為此，進一步研發廢氣及廢液協同處理設備，在多層水柱濕式洗滌塔中設置可更換式由不織布包覆之粒狀活性炭吸附層(表面積  $\geq 100.531\text{mm}^2$ )，將洗滌後水中的懸浮微粒及重金屬微粒同時去除，處理水則可回收做為洗滌水及養殖水生植物使用，達到降污、去毒兼具節能減碳之功能。根據實測結果，鍋爐排氣經多層水柱濕式洗滌+廢氣及廢液協同處理後，其洗滌水中重金屬值多為 ND 或遠低於化工業放流水標準(參考圖 10)。

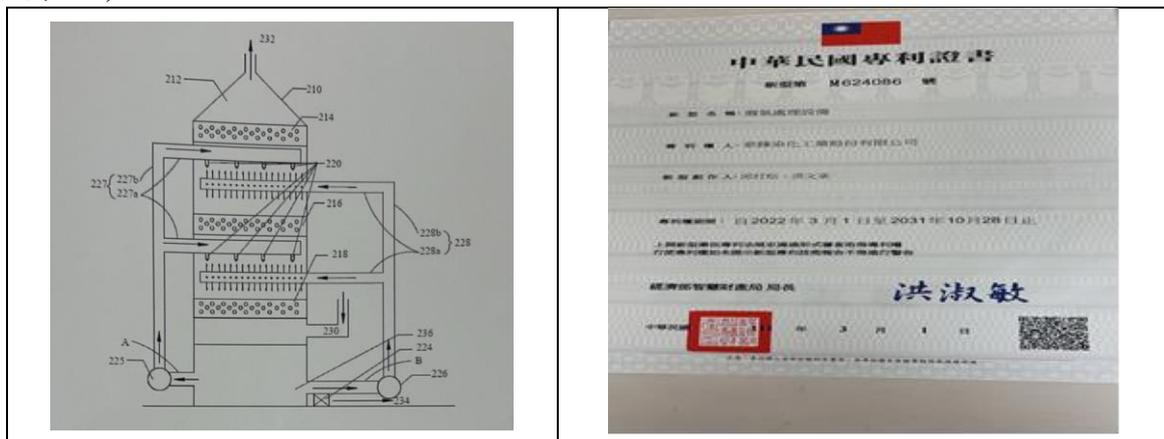


圖 8 多層水柱濕式洗滌示意圖與新型專利

## 2. 降低鍋爐排氣污染物的燃燒方法(鍋爐注入飽和水蒸氣降低 $\text{NO}_x$ )

本法係藉由調整鍋爐燃料燃燒以降低廢氣排放的方法。技術之應用係鍋爐在常壓下燃燒，爐內壓力維持在  $3\sim 5\text{kg}/\text{cm}^2$ ，加入適量的飽和水蒸氣，水蒸氣可以阻擋氮跟氧的結合，以降低氮氧化物的生成。鍋爐注入飽和水蒸氣控制  $\text{NO}_x$  濃度措施如圖 9 所示。

此技術適用於既存鍋爐使用，不須額外建置新的設備，也無須對既有鍋爐進行改造，可避免鍋爐系統改造所遭遇如天然氣管線或儲槽設置及可能洩漏等公安問題；甚至於可因應國際間熱議的限制使用含甲烷成分之天然氣可能造成燃料之短缺問題。

依操作經驗，使用棕櫚油燃料使用量為 100~120 公升/小時、注入蒸氣量為 30~40 公斤/小時，經由現場儀器即時檢測，控制排氣之 CO 濃度以調整飽和水蒸氣注入量，達到最佳操作條件時之實測空氣污染物 SO<sub>x</sub> 為 0ppm、NO<sub>x</sub> 為 30ppm。

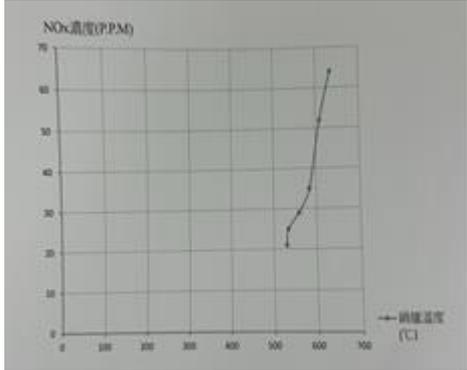
	
<p>控制注入火焰區之飽和水蒸氣量</p>	<p>使用 kimo 儀器即時檢測 (以 CO 濃度為參考控制參數)</p>
	
<p>建立溫度與 NO<sub>x</sub> 濃度關係圖</p>	<p>降低鍋爐排氣污染物的燃燒方法 法新型專利</p>

圖 9 鍋爐注入水蒸氣控制 NO<sub>x</sub> 濃度措施

### 3.更多植物油替代低硫燃料油之潛力研發

為了尋求更多元的植物油燃料來源，並因應棕櫚油貨源可能匱乏之窘境，更進一步進行基改大豆沙拉油原油、基改玉米油及菜籽油之試燒。

為避免影響公司正常營運，測試時以上述 3 項植物油進行少量試燒，

以法國 kimo 煙道儀器檢測鍋爐爐膛內未注入與注入水飽和水蒸氣之排氣 NOx 濃度比較，及鍋爐排氣經多層柱濕式洗滌塔+粒狀活性碳吸附洗滌後之排水重金屬水質檢測；另檢測這些植物油的熱值。測試及檢測結果如圖 10。

結果以基改大豆沙拉油原油為例進行說明。基改大豆沙拉油原油熱值為 9,428 Kcal/kg，高出煤炭的 5,600 Kcal/kg，通入飽和水蒸氣後之 NOx 為 29ppm；燃燒基改大豆沙拉油原油、基改玉米油及菜籽油之排氣洗滌水檢測，其重金屬項目均為 ND 或遠低於化工業放流水標準。顯示這些植物油是對環境友好的燃料油。

																																																									
<p>測試用基改大豆沙拉油原油</p>	<p>測試時監測鍋爐溫度</p>																																																								
 <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">烟气分析 重质燃油</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>O<sub>2</sub> %</td> <td>10.0</td> <td>ΔT °C</td> <td>139.5</td> </tr> <tr> <td>CO ppm</td> <td>0</td> <td>ηs %</td> <td>90.1</td> </tr> <tr> <td>CO<sub>2</sub> %</td> <td>8.3</td> <td>NO ppm</td> <td>39</td> </tr> <tr> <td>Ta °C</td> <td>30.9</td> <td>NOx ppm</td> <td>40</td> </tr> <tr> <td>Tf °C</td> <td>170.4</td> <td>SO<sub>2</sub> ppm</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>λ</td> <td>1.92</td> <td>NOx(O<sub>2</sub>) ppm</td> <td>55</td> </tr> </tbody> </table>	烟气分析 重质燃油				O <sub>2</sub> %	10.0	ΔT °C	139.5	CO ppm	0	ηs %	90.1	CO <sub>2</sub> %	8.3	NO ppm	39	Ta °C	30.9	NOx ppm	40	Tf °C	170.4	SO <sub>2</sub> ppm	0	λ	1.92	NOx(O <sub>2</sub> ) ppm	55	 <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">烟气分析 重质燃油</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>O<sub>2</sub> %</td> <td>9.2</td> <td>ΔT °C</td> <td>142.5</td> </tr> <tr> <td>CO ppm</td> <td>0</td> <td>ηs %</td> <td>90.6</td> </tr> <tr> <td>CO<sub>2</sub> %</td> <td>8.9</td> <td>NO ppm</td> <td>22</td> </tr> <tr> <td>Ta °C</td> <td>29.7</td> <td>NOx ppm</td> <td>23</td> </tr> <tr> <td>Tf °C</td> <td>172.2</td> <td>SO<sub>2</sub> ppm</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>λ</td> <td>1.78</td> <td>NOx(O<sub>2</sub>) ppm</td> <td>29</td> </tr> </tbody> </table>	烟气分析 重质燃油				O <sub>2</sub> %	9.2	ΔT °C	142.5	CO ppm	0	ηs %	90.6	CO <sub>2</sub> %	8.9	NO ppm	22	Ta °C	29.7	NOx ppm	23	Tf °C	172.2	SO <sub>2</sub> ppm	0	λ	1.78	NOx(O <sub>2</sub> ) ppm	29
烟气分析 重质燃油																																																									
O <sub>2</sub> %	10.0	ΔT °C	139.5																																																						
CO ppm	0	ηs %	90.1																																																						
CO <sub>2</sub> %	8.3	NO ppm	39																																																						
Ta °C	30.9	NOx ppm	40																																																						
Tf °C	170.4	SO <sub>2</sub> ppm	0																																																						
λ	1.92	NOx(O <sub>2</sub> ) ppm	55																																																						
烟气分析 重质燃油																																																									
O <sub>2</sub> %	9.2	ΔT °C	142.5																																																						
CO ppm	0	ηs %	90.6																																																						
CO <sub>2</sub> %	8.9	NO ppm	22																																																						
Ta °C	29.7	NOx ppm	23																																																						
Tf °C	172.2	SO <sub>2</sub> ppm	0																																																						
λ	1.78	NOx(O <sub>2</sub> ) ppm	29																																																						
<p>未注入飽和水蒸氣試燒 NOx 為 55ppm</p>	<p>注入飽和水蒸氣試燒 NOx 為 29ppm</p>																																																								



圖 10 基改植物油(大豆沙拉油原油)試燒與檢測結果

或許有人會質疑，若以植物油為燃料，會不會造成與食物搶資源的問題。從資料顯示，2022 年進口黃豆約 275 萬公噸左右，9 成都供榨油與飼料用，食品用量僅占 1 成，而非基改僅占 3.53%；世界黃豆年產量約為 3.9 億公噸，基改比例在 9 成以上，來源應無短缺問題。

另據文獻指出，基改黃豆會引起人類過敏，通常人不會用來當作食物(黃豆分級：特級為有機黃豆、一級為實用黃豆、二級為飼料豆、選豆)。植物油熱值高，燃燒產生之空污微量，再加上優化之減污措施，不失為「安全」、「天然」、「環保」、「再利用」的綠能之一，可供政府相關單位及企業界參考深思及選用。

至於基因改造的黃豆沙拉油是否會成為燃料油的選項？宜由植物油燃料來源多樣化進一步省思：

- (1) 植物油確實能有效降低人類工業化對空氣污染的影響。
- (2) 由本公司鍋爐燃燒用油研究發現，棕櫚油、玉米油、菜籽油及大豆沙拉油都是可應用於鍋爐燃燒的植物油，其高熱值、低空污、零碳排、可養水生植物成為飼料(負碳排)，應具有推廣價值。
- (3) 是否還有其他適合且可大量化之燃料化植物油，期待政府及企業界進一步研究。

#### 四、結論與建議

近年來台灣空氣品質在各界努力下已有大幅改善。依據環境部統計，近 8 年空氣品質監測結果，各污染物濃度均呈現下降趨勢，空氣品質不良(AQI >100) 天數比率由 15.09% 下降到 6.35%；細懸浮微粒(PM<sub>2.5</sub>)年平均濃度從 105 年的 20 微克/立方公尺降至 112 年 12 月的 13.8 微克/立方公尺，整體改善幅度達 3 成以上。

製造業為固定污染源之一，負有空污減量之責任。在經過改用植物油作為鍋爐燃料、提昇煙氣濕式洗滌塔效率、調整鍋爐操作方模及鍋爐煙氣作為養殖水生植物，本公司已可達到降污減碳之效益；未來除將持續努力外，將擴大宣導相關之改善技術，協助更多中小企業應用有限的改善成本下，也能為空污減量及淨零碳排盡一份心力。

國家經濟發展需要有更多的潔淨能源為基礎。經由本公司針對基改植物油之初步研究，若能以基改植物油作為燃料發電，兼具安全、天然、環保、再利用、活化荒廢農地複耕種植利用之優點，且其零碳排，可讓政府達到2050淨零排放目標；另一方面也可協助企業界降低繳納碳費之壓力，提昇其國際競爭力。

## 五、參考文獻

1. 產業低污染技術資訊網，[https://proj.ftis.org.tw/apc/Subject3/Detail?Name=3\\_2](https://proj.ftis.org.tw/apc/Subject3/Detail?Name=3_2)
2. 環境部，碳足跡排放係數，  
[https://data.moenv.gov.tw/dataset/detail/CFP\\_P\\_02](https://data.moenv.gov.tw/dataset/detail/CFP_P_02)
3. 公布 112 年空氣品質監測結果統計 空氣污染防制成果與未來展望，環境部監測資訊司，112 年 12 月 26 日，  
<https://enews.moenv.gov.tw/Page/3B3C62C78849F32F/9cec08b6-f4bf-441b-a8b1-6013f8a4602b>
4. 中華食物網，<https://www.foodchina.com.tw/DB/AD/chart/chart-importsb.html>

# 超諧波對光電廠的影響與因應對策

李春龍\*、謝鴻文\*\*

## 摘 要

在綠色能源、智慧電網快速進入我們的生活領域後，其主要的副產品「超諧波，SupraHarmonics, 2 - 150 kHz, 簡稱 SH」也快速進入我們的發電設備與微電網中，並有逐漸汙染電網之勢。

由於日益增長的電力需求，超諧波在低壓(LV)和中壓(MV)電網中激增，數量與強度因不同地域與再生能源密度，而可能呈現級數成長，其干擾程度輕者造成風光電廠發電無法達標、電容器爆裂、及電動車(EV)充電中斷，重者造成變壓器故障、區域供電電驛跳脫。

工作團隊應用既有的太陽能光電廠進行實地檢測，了解一般光電廠中可能存在的超諧波含量與變化，並設計適用於光電廠的超諧波吸收模組，有效控制光電廠的電力汙染狀況，於此同時，光電廠的發電效益也有顯著增加，投資效益大幅提升。

工作團隊也應用智慧電網中的先進模型，預測我國未來新能源中超諧波的發展趨勢及衝擊潛勢分析，可供能源決策者及再生能源投資者的參考依據。

【關鍵詞】超諧波、太陽能電廠、充電樁、電力品質

---

\*晉丞能源科技股份有限公司 總經理

\*\*陽光極限有限公司 總經理

## 一、前言

諧波是上個世紀末的重要電力課題，隨著再生能源 (Renewable energy)、智慧電網 (Smart grid)、分散式能源 (Distributed energy resources, DER) 概念的興起與實踐，目前的諧波課題已經轉移到「超諧波」，並有與日俱增之勢。有關超諧波對新能源電力的汙染調查，已從 2021 年開始，IEEE, IEC, IEA (國際能源署)、DOE (美國能源部) 皆已經有調查成果與論文出版。

在現有的重要電力規範中，IEEE 519-2022 規範到 50 階諧波，而 IEC 61800-3 規範 150-1M kHz 的頻段，可以看到在 2-150 kHz 的頻段被稱為「失落的頻段」，但超諧波在電力系統中會產生嚴重的干擾的現象，以及在此頻率範圍內的電壓和電流波形失真。

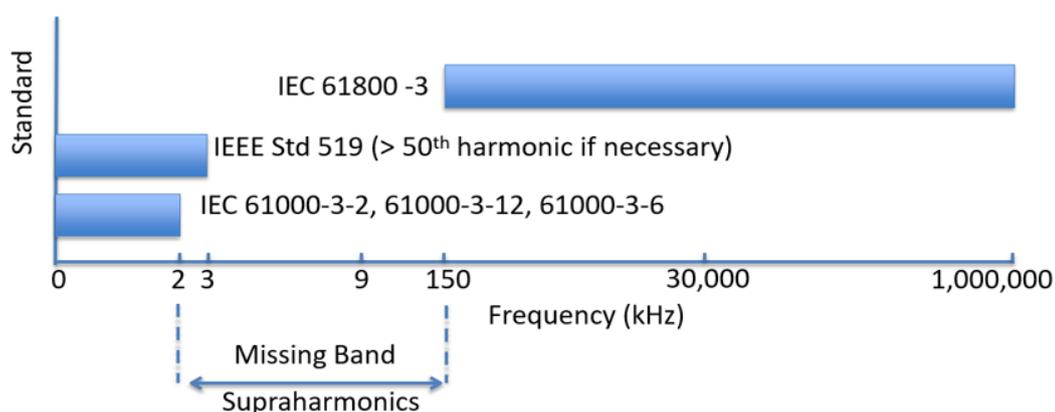


圖 1 諧波標準及超諧波頻譜位置 (MIRUS Inc)

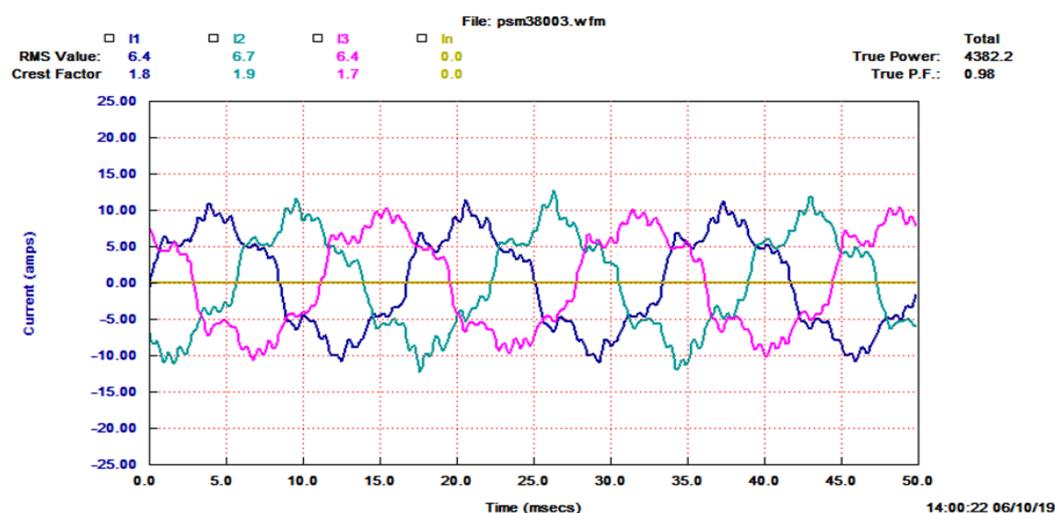


圖 2 光電廠的電流波形失真

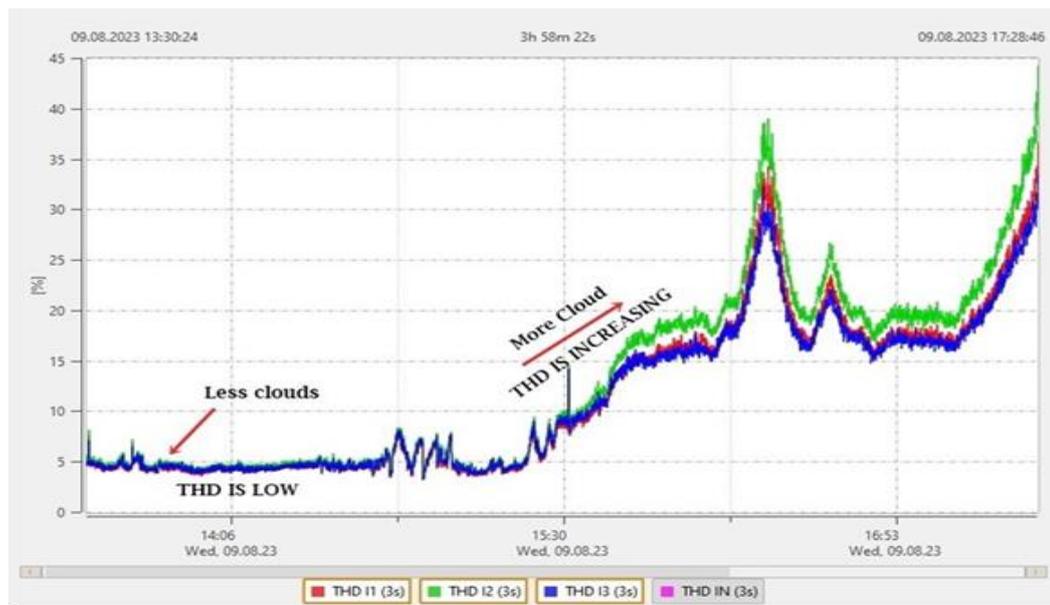


圖 3 光電廠的諧波變化(隨雲層)

諧波/超諧波對電力系統主要的損傷是電纜/電線以及電容器。用於平衡電源中斷的電容器如果未針對這些高頻發射而設計保護機制，可能會出現過流、發熱、保護跳閘或直接擊穿的情況。

其他的電力作用如設備產生可聞高低頻噪音、燈光閃爍或照度下降、低壓設備因剩餘電流而裝置跳脫、中壓及地下電纜終端故障、變壓器故障、缺相保護繼電器故障、接地系統故障等。

SupraHarmonics 的一些問題包括時間變化、測量難度(需要先進的電能品質分析儀)、輻射以及高阻抗弱電力系統對這些高頻的敏感度。此頻率範圍超出了諧波標準的要求，因此沒有明確定義，強制執行也有困難。

在現代電網中，各個子系統會應用碳化矽(SiC)二極體、金屬氧化物半導體場效電晶體(MOSFET)以及絕緣柵雙極電晶體(IGBT)等電力電子開關元件，俾便能夠以更高的頻率進行開關、高電流密度等功能，包括高頻逆變器、轉換器、電動車充電樁、太陽能逆變器、儲能雙向控制器和主動諧波濾波器等，以便達成高效率運轉，這些諧波產生源為電力工程師帶來了新的挑戰。

更加不同以往的是，過去諧波是單向(主要發生在工廠 ie 受電方)，現在及可預見的未來，諧波會形成雙向，也就是電網裡有諧波(風光發電、儲能及天然氣)，消費點也有諧波(如充電樁、變頻家電、LED 燈具等)，可預見的是，諧波的控制與管理將會傾向「源頭管理」「及時吸收」，才能降低電力污染的問題。

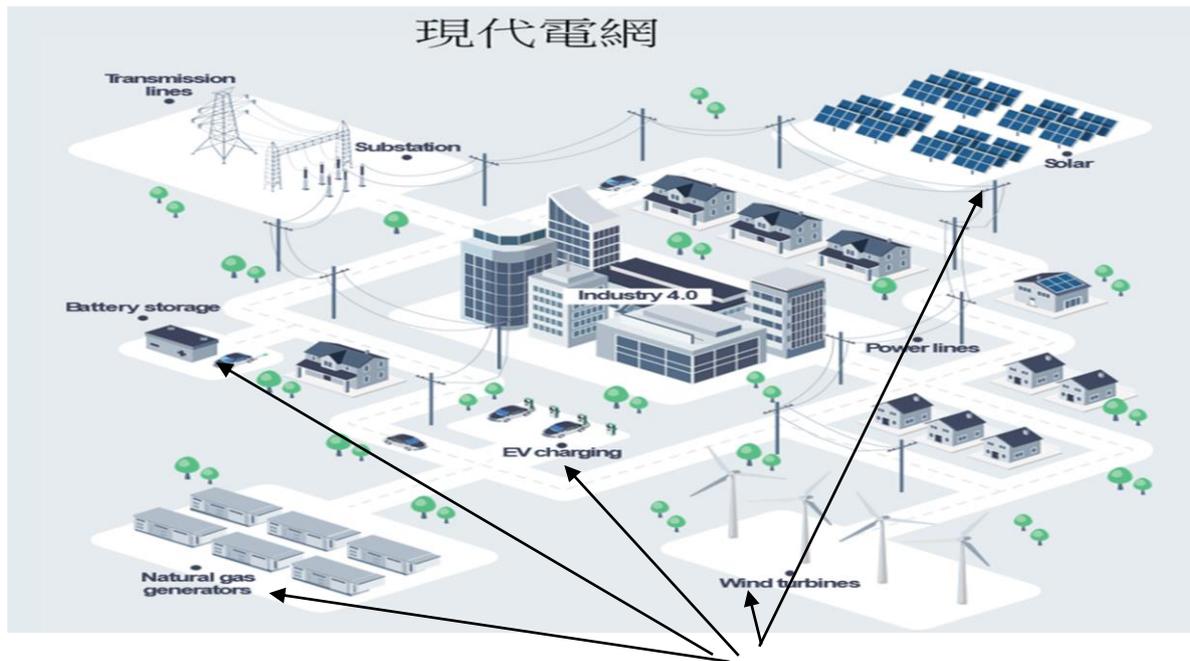


圖 4 現代電網與「超諧波產生源」

表 1 現代電網中諧波源及產生頻段

諧波源	主要產生頻段	汙染潛力
工業用變頻器	9-150k Hz	持平
車用充電樁	15-200k Hz	越來越高
太陽能/風能逆變器	4-300k Hz	越來越高
電力線通訊(PLC)	9-95k Hz	持平
LED, HVAC 系統	2-150k Hz	持平
直流整流子	2-10k Hz	持平
天然氣變頻	10-100k Hz	越來越高
儲能站	15-200k Hz	越來越高

## 二、現有治理方案

### 1. 充電樁的超諧波

雖然市面上的充電樁接通過某些安全規範，但意外事件仍時有耳聞，光是 2024 年第三季，兩個充電樁密度較高地區——韓國及中國大陸，媒體報導充電樁意外事故就高達 24 件，多數與電力品質相關。這兩國電機工程師不約而同的表示，由於電力品質不佳，電動車充電過程出現非常容易出現中斷。這是因為發現電動遭受高諧波失真時，車輛會斷開連接。此外，影響充電電動車對超諧波失真的影響以及與背景失真的相互作用，針對各個站點進行了測量及改善研究。結果表明，高次諧波發射普遍增加，應是由於電動車數量的不斷增加，這是可以預期的。

在這項工作中，對三種不同規模的電動車充電基礎設施的長期超諧波發射進行了時域和頻域分析。在監控點，已發現某些負載配置，車輛在與充電點斷開連接時，諧波呈現高失真狀態。若在此系統內增加主動濾波器，總諧波量(THD)雖然減少至 IEEE 519 的範疇內(28.24%降至 6.23%)，但較細微及較高階的諧波卻有顯著增加，如圖 5 所示。

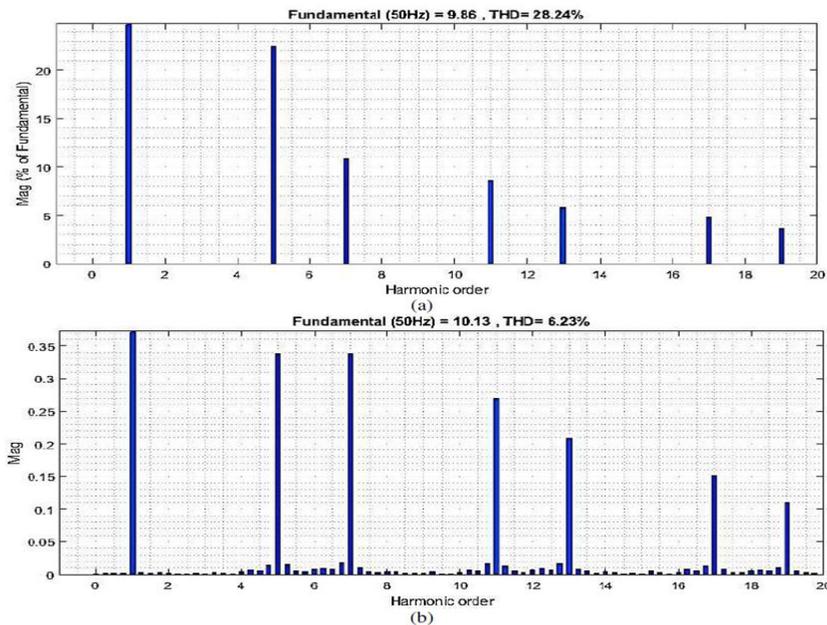


圖 5 充電樁使用主動濾波器前後的諧波總量

## 2.光電廠的超諧波

研究指出，主動濾波器與太陽能逆變器配合使用時，會導致太陽能逆變器電源供電故障。這是因為主動濾波器會在電源電壓上產生高頻共振漣波。這些更高次的諧波會因逆變器和主動濾波器相互作用引起的諧振而導致過熱。

太陽能發電廠在併網後，會對電網產生何種程度的不利影響，電力品質一直是最重要的課題。電力品質無法達標，在光電廠而言會造成逆變器及監控系統的故障，直接影響發電效率。下圖是國營光電廠在 1000 次異常事故的分項數量分析。

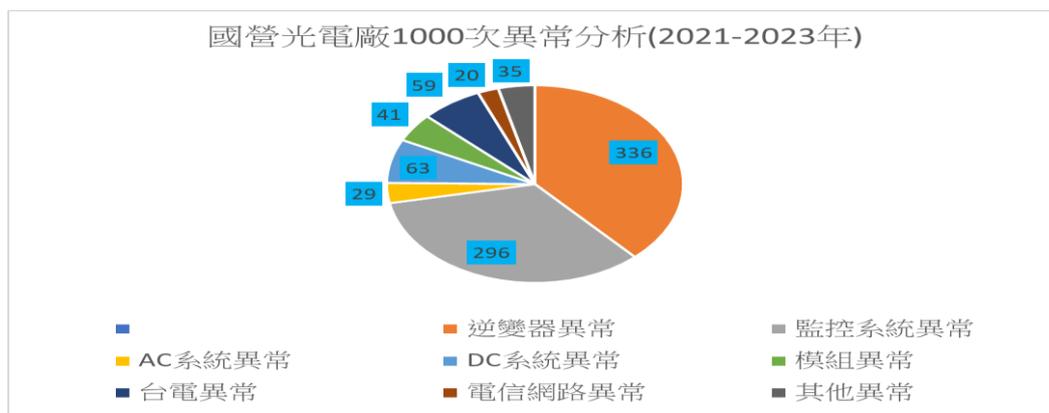


圖 6 國營光電廠 1000 次異常分析(2023 年能源展研討會)

依據 IEEE 在 2017 年所做結論，套用在具有良好維護運轉及品質保證計畫的光電廠中，可以觀察到與電力品質相關的「逆變器異常(336 次)」「監控模組異常(296 次)」「AC 系統異常(29 次)」佔到整體異常的 75.2%，這些因為電力品質引起的異常，早已超過設計之初所預期的故障頻率；而異常後常需要中斷供電以進行維修，也降低了供電時間與供電品質。

## 三、本次實驗設計與成效

工作團隊已有多多年整治諧波的經驗，下表整理目前可能整治諧波的各種設備，以及適用場合與範圍。因為多篇工作論文已經載明主動濾波器在對抗高次諧波的效能不彰，故採用「超寬頻譜吸收器」工作團隊以超晶體及多重濾波製作諧波吸收器，觀察光電廠的發電狀況，並記錄過程。

表 2 各種濾波設備及適用範圍

	與系統關係	功能	適用範圍
被動濾波器	串聯	固定階數諧波(15th 以內)	工廠及固定階數配電盤
主動濾波器	串聯	強弱不定諧波(50th 以內)	工廠及變頻器
吸收濾波器	並聯	吸收 50th 以上諧波	新能源

截至 2024 年第三季，各國研究尚停留在「如何偵測」「損害程度」兩方面，工作團隊以超晶體及多重濾波製作諧波吸收器，觀察光電廠的發電狀況。這種高階諧波的本質是使原來在正常工作狀態下的感性，容性電路中的磁力線或電子運動方向產生偏轉。「超寬頻譜吸收器」裝置的工作原理就是把所有這些因高階諧波而產生偏轉的磁力線和電子運動方向的角度逐步扭轉到設計上的正確方向。

原理基本設計公式如：

$$Dv=N \cdot \sum \int d\Phi / dt$$

此處  $\Phi$  是已經偏離的角度， $t$  是工作時間， $N$  是磁性體的參數， $Dv$  就是電路中的總電壓畸變率。影響公式裏時間變化的因素很多，概括起來即電路中負載產生的超諧波污染越嚴重，所需要的時間越長。

本次所採用的超寬頻譜吸收器的重要諸元：

額定電壓：400V

防護等級：IP44

最大峰值電壓：700V

抗突波電流：對於 300V 的脈衝電壓，脈衝電流不超過 1000A

吸收性能：0.5KHZ~30MHZ

吸收效率：>15dB

本吸收器(0.5-30000k Hz)較美國先進產品(3-1000k Hz)的吸收範圍更大更廣，應可以符合未來新能源設備中的超諧波(2-150k Hz)的吸收工作。以固定頻率連結上本吸收器時，在各單一頻段都可以觀察到超過 15dB 的吸收率，如下兩圖所示。

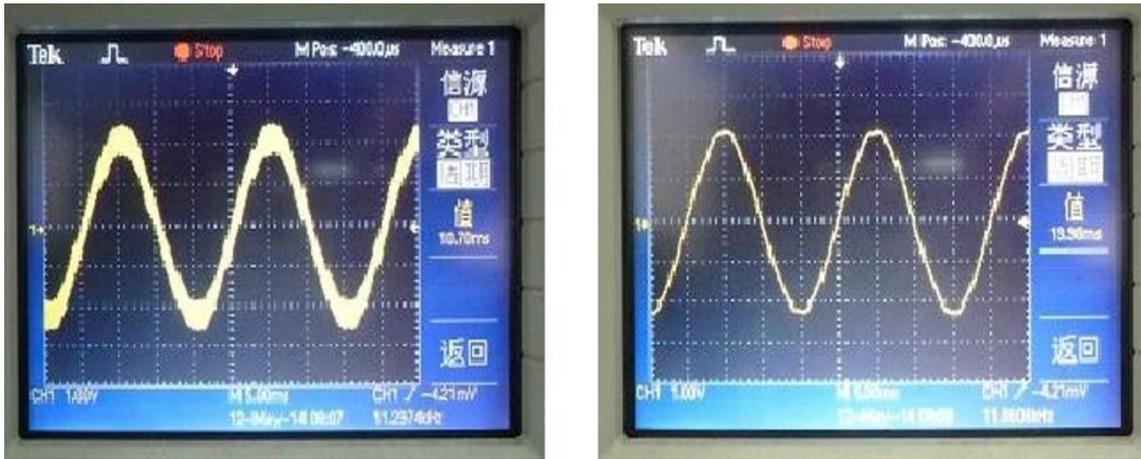


圖 7 500k Hz 在吸收前(左)後(右)的頻譜表現

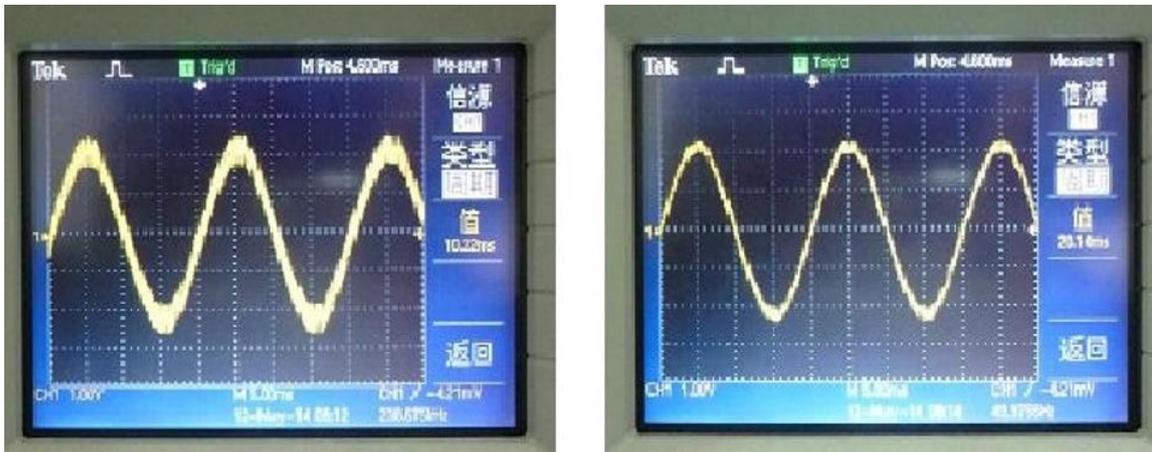


圖 8 15M Hz 在吸收前(左)後(右)的頻譜表現

工作團隊於 2024.6.8 在選取的兩座實驗電廠安裝三相超寬頻譜吸收器及三相五線並聯共振吸收型諧波設備。

根據 A 光電廠發電逐日數據(由 AUO 友達雲端監控管理)，選取日照條件相似的 2023 年 5-8 月、2024 年 5 月(未安裝改善設備前)以及 2024 年 7-9 月(安裝改善設備後)，經過數據篩選後，選取 2024.5 為基準月，並在 2024 年 7-9 月選取日照條件相似為比較月，進行發電量比對，結果如下表。

表 3 安裝改善設備前後發電對照表(A 廠)

項目/日期	2024.7	2024.8	2024.9
預估發電量	34739.760 度	32622.320 度	27270.280 度
實際發電量	41605.074 度	39365.255 度	30445.081 度
增加幅度	19.76%	20.67%	12.39%

B 光電廠發電逐日數據(由 THINGNARIO 慧景科技雲端監控管理)，我們選取日照條件相似的 2023 年 8 月(未安裝改善設備前)以及 2024 年 8 月(安裝改善設備後)，經過數據篩選後，進行發電量比對，結果如下表：

表 4 安裝改善設備前後發電對照表(B 廠)

	日照	發電	發電比	增幅
2023.8	134.68kWh/m <sup>2</sup>	12,883.6kWh	95.66083	----
2024.8	97.2kWh/m <sup>2</sup>	10,288.8kWh	105.8519	10.65%

#### 四、結論

「超諧波治理」將是未來電力系統的重要課題，在消極方面，可以保護電力系統甚至電網，降低傳輸損耗，延長使用壽命，增加電網韌性；在積極方面，可以增加風光電廠的發電量，讓不易取得的案場發揮其最大經濟與環保效益，落實 ESG 的精神。

我國地狹人稠，新能源所產生的副作用亦數倍於其他國家，實有必要強化法規與強化諧波管理，才能稱得上是「潔淨能源」。

#### 五、參考文獻

1. Supraharmonics in Power Grid: Identification, Standards, and Measurement Techniques, ieeexplore.ieee.org, SAAD T. Y., 2021
2. Characterization of Supraharmonic Emission from Three Different Electric Vehicle Charging Infrastructures in Time and Frequency Domain, Tim Streubel, Energies 2022, 15, 394
3. Power quality improvement in a grid integrated solar PV system, 2017 IEEE International Conference on Intelligent Techniques in Control,

Optimization and Signal Processing (INCOS), March 23-25 2017

4. Impact of electric vehicle charging station on power quality, M. S. Arjun, International Journal of Applied Power Engineering, March 2024
5. A Comprehensive Review on Supraharmonics—The Next Big Power Quality Concern, Supraja Rajkumar, Smart Grids and Sustainable Energy (2024)
6. The Problem of Inverter Welding Loads and Reliable Solutions, John Smith, LinkedIn, May 17, 2024
7. 併網下多項電力電子設備之諧波與超諧波管理應用課程, 工研院, 2023.3.14
8. 太陽能發電廠效率提升方案, 曾維民, 經濟部產業溫室氣體減量技術研討會, 2015年11月
9. Diagnosis of supraharmonics-related problems based on the effects on electrical equipment, Angela ´ Espín-Delgado, Electric Power Systems Research 2021

# 製程及冰機系統泵浦最佳化技術與 AI 智能大數據

吳漢明\*、陳建龍\*\*

## 摘 要

全球氣候變遷和能源危機是當今世界面臨的重大挑戰，它們對我們的社會、經濟和環境產生了廣泛而深遠的影響。隨著科學家們不斷發現氣候變化對全球氣候系統和生態平衡的影響，以及對我們的資源和能源供應的依賴性，人們對減少碳排放的迫切需求越來越強烈，2050 淨零碳排 ESG 永續發展迫在眉睫。

泵浦在現代社會中扮演著極其重要的角色，其廣泛應用於工業、建築、能源等領域，對維持生產運作、提高效率和確保基本生活需求的滿足至關重要。泵浦行業的重要性在於它為各種行業和基礎設施提供了必要的流體控制和輸送解決方案，使得現代社會得以運作。

目前在市場上運轉的泵浦，絕大多數不符合歐盟  $MEI \geq 0.4$  的要求；在空調系統上，冷卻泵及冰水泵的能效和須  $\leq 0.1 \text{ kW/RT}$ ，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。搭配冷凍空調系統以依 ASHRAE 90.1 空調水側系統之節能指標生產，符合冷凍空調所需流量/低流速/低揚程之最佳化高效率泵浦。冰水主機能效需  $\leq 0.56 \text{ kW/RT}$ 、冰水泵能效需  $\leq 0.05 \text{ kW/RT}$ 、冷卻水泵能效需  $\leq 0.05 \text{ kW/RT}$ 、冷卻水塔能效需  $\leq 0.03 \text{ kW/RT}$ ，使系統熱負載總效低於  $0.75 \text{ kW/RT}$  標準。將系統結合智能視覺化大數據 AI 分析，顯示泵效率、流量、揚程、耗電功、碳排放量。

目前地球上  $\text{CO}_2$  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  $\text{CO}_2$  是最直接的幫助。

【關鍵詞】泵浦系統節能減碳、冷凍空調系統、AI 智能大數據

\*殷聖節能泵浦股份有限公司 總經理 吳漢明

\*\*殷聖節能泵浦股份有限公司 協理 陳建龍

## 一、前言

全球氣候變遷和能源危機是當今世界面臨的重大挑戰，它們對我們的社會、經濟和環境產生了廣泛而深遠的影響。隨著科學家們不斷發現氣候變化對全球氣候系統和生態平衡的影響，以及對我們的資源和能源供應的依賴性，人們對減少碳排放的迫切需求越來越強烈，2050 淨零碳排 ESG 永續發展迫在眉睫。

目前地球上 CO<sub>2</sub> 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<sub>2</sub> 是最直接的幫助。

泵浦在現代社會中扮演著極其重要的角色，其廣泛應用於工業、建築、能源等領域，對維持生產運作、提高效率和確保基本生活需求的滿足至關重要。泵浦行業的重要性在於它為各種行業和基礎設施提供了必要的流體控制和輸送解決方案，使得現代社會得以運作。

目前在市場上運轉的泵浦，絕大多數不符合歐盟 MEI $\geq$ 0.4 的要求；在空調系統上，冷卻泵及冰水泵的能效和須 $\leq$ 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。冷凍空調系統以依 ASHRAE 90.1 空調水側系統之節能指標生產，使系統熱負載總效低於 0.75kW/RT 標準，將系統結合智能視覺化大數據 AI 分析，顯示泵效率、流量、揚程、耗電功、碳排放量，如此方可提供企業深度低碳高值化泵浦。

## 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。

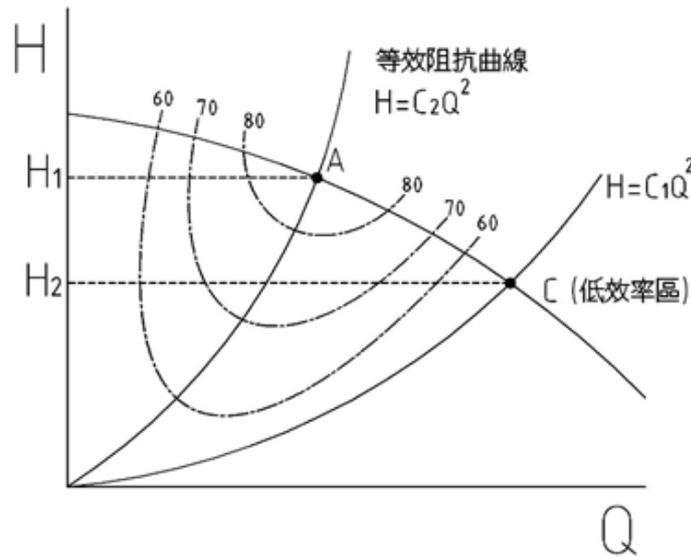


圖 1 管路阻抗曲線

2. 迴轉動力泵動力說明

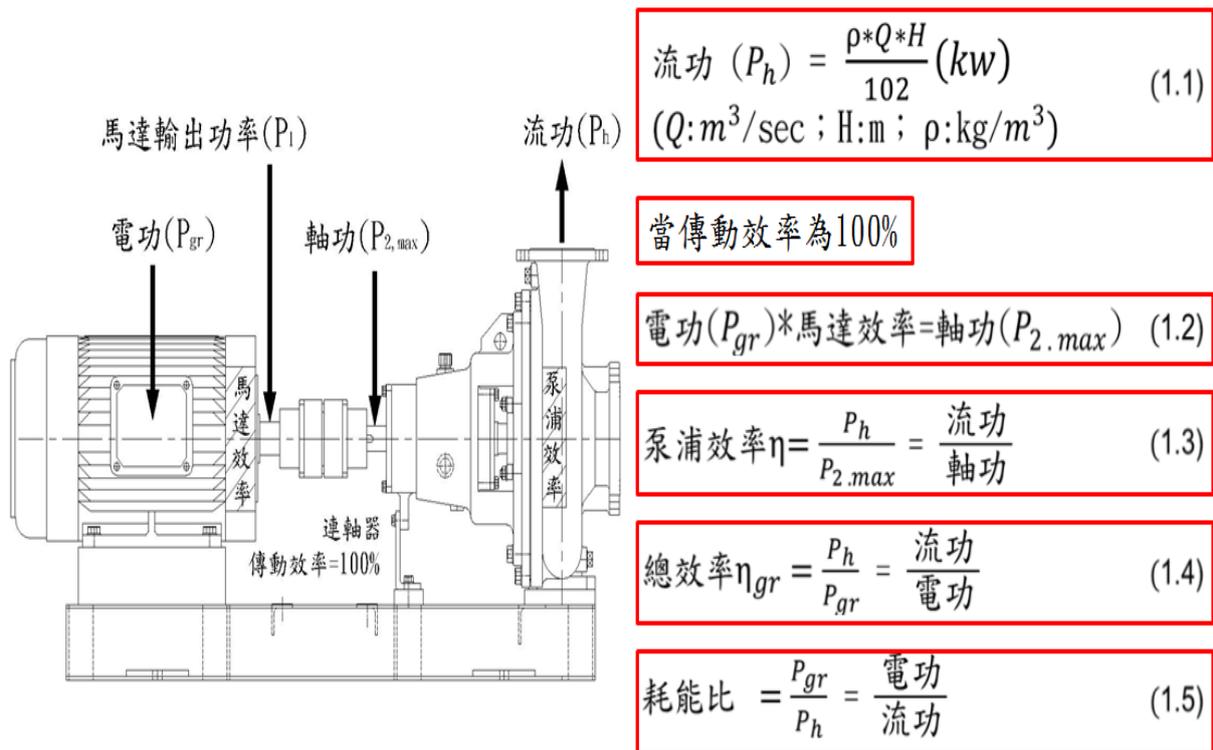


圖 2 迴轉動力泵動力說明

3. 流功 - 耗電功曲線與耗能比

耗電比是更直接的指標，在相同輸出下愈高耗電比代表更多耗電，大

型清水泵最低可以 $<1.2$  以下，通常 $>2.0$  的泵浦多數很耗電。

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。

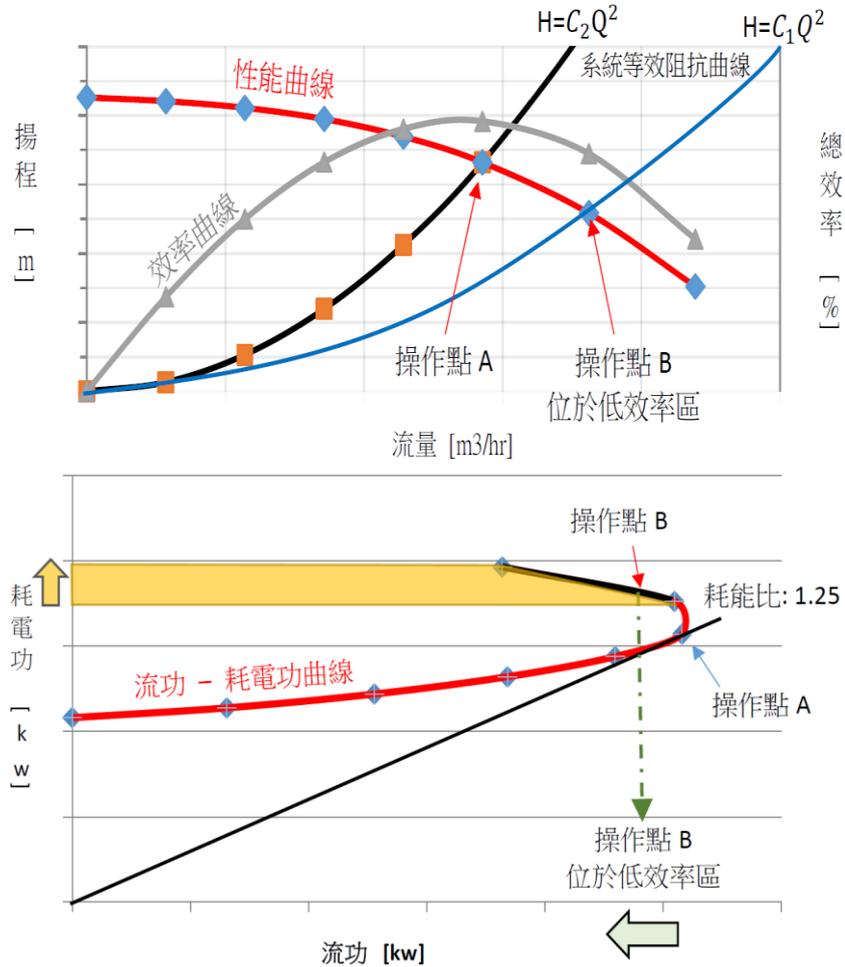
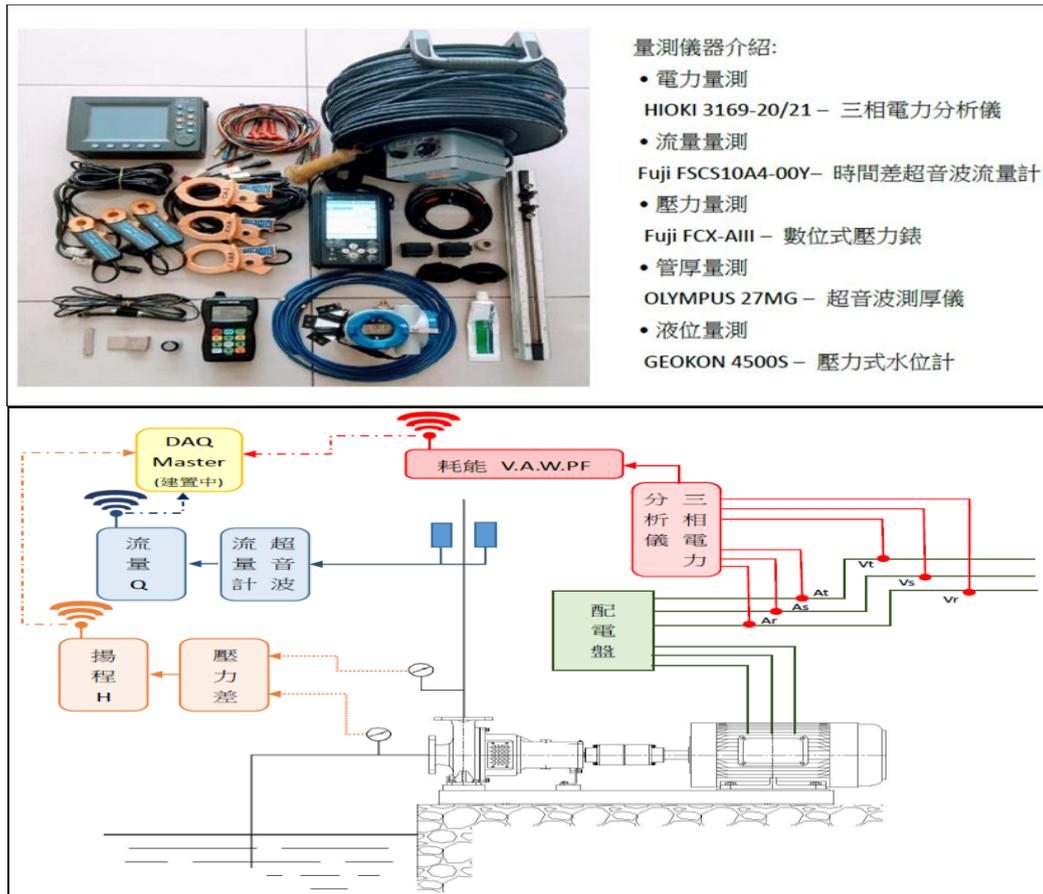


圖 3 流功 - 耗電功曲線與耗能比

#### 4. 泵浦線上量測儀器及量測方法

量測儀器包含三相電力分析儀、時間差超音波流量計、數位式壓力錶、溫度計，量測儀器每年送 TAF 校正，為了確保儀器測量的準確性和可靠性，這對於精密測量和品質控制尤為重要。



### 三、冰機系統泵浦最佳化技術與 AI 智能大數據

以某醫院廠勘舉例，第一步：瞭解該場域水側系統架構，冰水機台數及實際運轉情況，泵浦台數及實際運轉情況，水塔台數及實際運轉情況，數據收集後，場勘現況分析，依管路阻抗回推 5°C 100% 負載，提供建議更新。第二步：ASHRAE 90.1 的標準系統能效，計算原系統(定水量)IPLV 估算表，系統更新(水量變動)IPLV 估算表，將 IPLV 加入時間係數比較表，提供更完整節能診斷改善建議表。第三步：添加數值可視化監控系統，可使得空調水側系統中的泵浦流量控制得宜，即是使用的離峰期，也可以自動調整流量至當下負載最適合的用量，可將耗電量再降低。

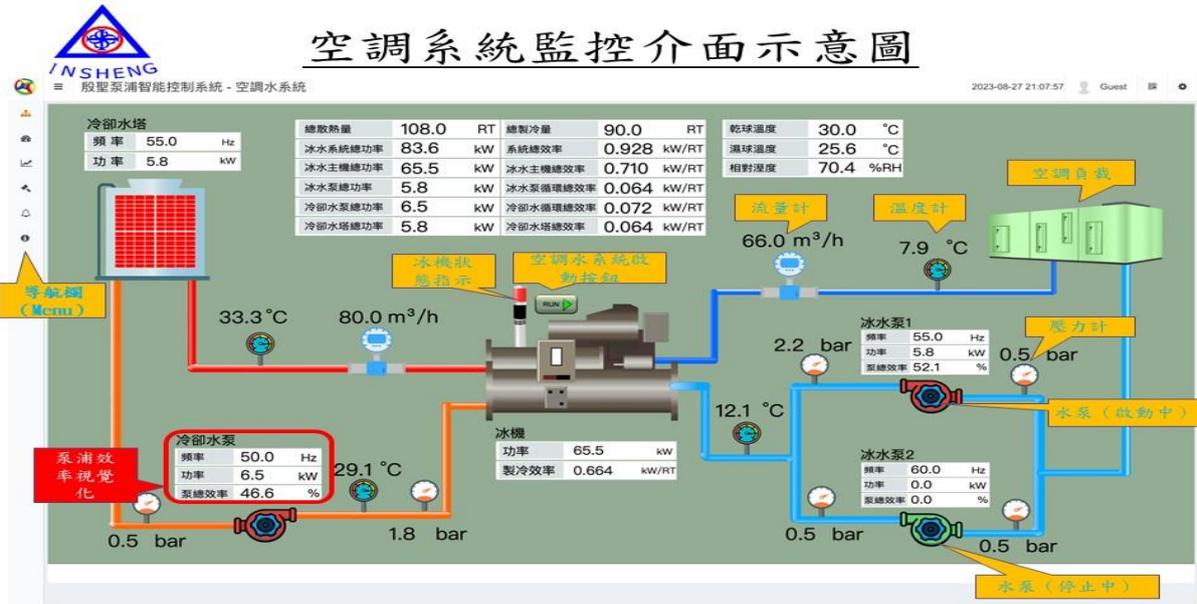


圖 5 空調系統監控介面示意圖

系統示意圖-00醫院

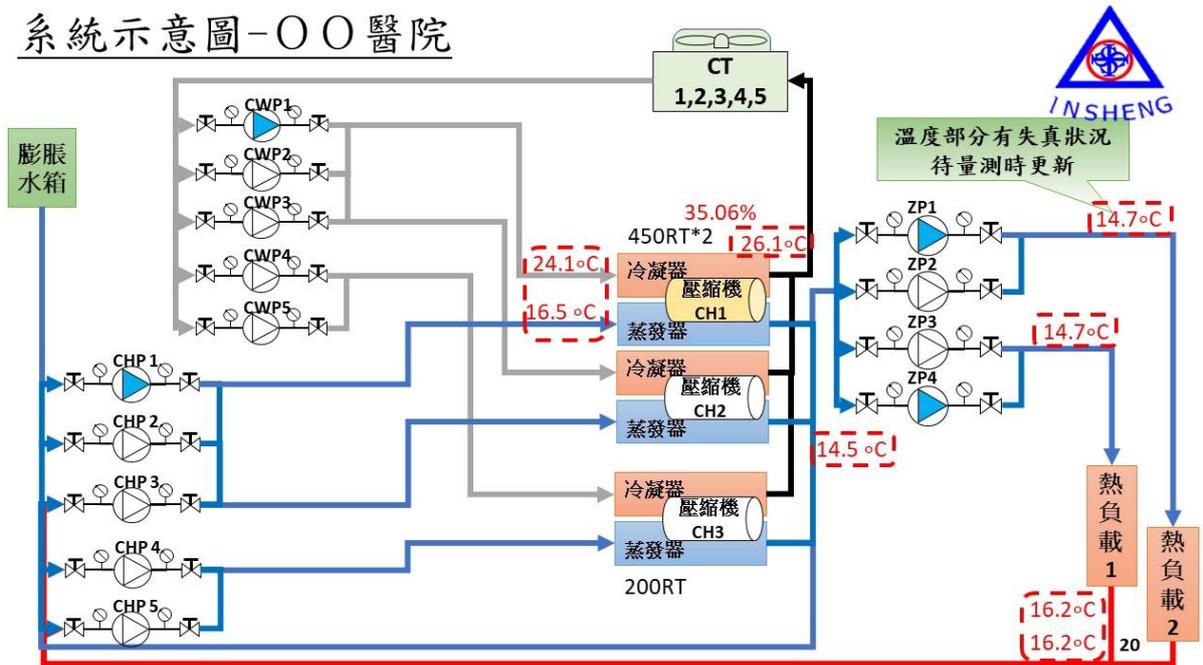


圖 6 水側系統示意圖



圖 7 量測現況照片

**廠勘現況**  
 冰機一能效值 **0.606** 仍在能源署正常能效內  
 醫院評估 場勘現況

	冰機一	冰水泵01	區域泵01	區域泵02	區域泵總和	冷卻水泵01	冷卻水塔	總耗電
額定 kW	249	定頻水量固定但水量遠不足 450RT冰機所需水量			冰機顯示溫差與酒精式溫度計 有誤差故以酒精式溫度計為主			
額定 RT	450							
額定 kW/RT	0.553							
耗電 kW	87.3	20.9	22.17	14.82	36.99	39.82	10.64	195.66
流率 kg/min	3634.00	3634.00	2904.06	1941.28	4845.33	4542.33	—	—
揚程 m	14.1	14.1	24.9	26.3	—	29	位差C <sub>0</sub>	3
流功 kW	—	8.378	11.823	8.348	—	21.537	—	—
耗電比	—	2.495	1.875	1.775	—	1.849	—	—
蒸發器入水溫 °C	16.5	—	14.7	14.7	—	24.1	<—	冷凝器入水溫 °C
蒸發器出水溫 °C	14.5	—	16.2	16.2	—	26.1	<—	冷凝器出水溫 °C
量測溫差 °C	2.0	—	1.5	1.5	—	2.0	<—	量測溫差 °C
額定溫差 °C	5	—	5	5	—	5.0	<—	額定溫差 °C
熱負載 kW	506.82	—	303.76	203.06	506.82	633.95	—	—
熱負載 RT	144.15	—	86.39	57.75	144.15	180.30	—	—
管路阻抗係數C <sub>1</sub>	0.00000107	0.00000107	0.00000295	0.00000698	—	0.00000126	—	—
系統能效 kW/RT	0.606	0.145	0.154	0.103	0.257	0.276	0.074	1.357
ASHRAE 90.1標準	—	0.050	—	—	0.050	0.050	0.030	0.750
馬達負載	35.06%	水量耗電比LPM/kW 426.91						
RT額定容量百分比	32.03%	系統能效高於ASHRAE標準 規範0.75kW/RT						

圖 8 場勘現況分析表



## 新增變頻系統控制水量—依管路阻抗回推5°C 100%負載

醫院冰機評估 依管路阻抗回推5°C 100%負載									
	冰機一	冰水泵01	區域泵01	區域泵02	區域泵總和	冷卻水泵01	冷卻水塔	總耗電	
額定 kW	249								
額定 RT	450								
額定 kW/RT	0.553								
耗電 kW	249	31.03	13.88	9.28	23.17	57.70	12.14	373.03	
流率 kg/min	4145.53	4145.53	2484.63	1660.90	4145.53	5181.92			
揚程 m	18.35	18.35	18.23	19.25	—	36.84	位差C <sub>0</sub>	3	
流功 kW	—	12.437	7.404	5.228	—	31.210			
耗電比	—	2.495	1.875	1.775	—	1.849			
蒸發器入水溫 °C	16.5	—	14.7	14.7	—	24.1	← 冷凝器入水溫 °C		
蒸發器出水溫 °C	14.5	—	16.2	16.2	—	26.1	← 冷凝器出水溫 °C		
量測溫差 °C	2.0	—	1.5	1.5	—	2.0	← 量測溫差 °C		
額定溫差 °C	5.0	—	5.0	5.0	—	5.0	← 額定溫差 °C		
熱負載 kW	1445.41	—	866.31	579.10	1445.41	1752.11			
熱負載 RT	411.09	—	246.39	164.70	411.09	498.33			
管路阻抗係數C <sub>1</sub>	0.00000107	0.00000107	0.00000295	0.00000698	—	0.00000126			
系統能效 kW/RT	0.606	0.075	0.034	0.023	0.056	0.140	0.030	0.907	
ASHRAE 90.1標準	—	0.050	—	—	0.050	0.050	0.030	0.750	
馬達負載	100.00%	冰機為離心式冰機				水量耗電比LPM/kW		426.91	
RT額定容量百分比	91.35%	雖然年代久遠少但效損不大							

圖 9 依管路阻抗回推 5°C 100%負載



## 建議更新

醫院冰機評估建議更新- 水泵									
	冰機一	冰水泵01	區域泵01	區域泵02	區域泵總和	冷卻水泵01	冷卻水塔	總耗電	
額定 kW	249								
額定 RT	450								
額定 kW/RT	0.553								
耗電 kW	249	16.18	9.63	7.69	17.32	20.54	12.33	315.37	
流率 kg/min	4145.53	4145.53	2484.63	1660.90	4145.53	5181.92			
揚程 m	18.35	18.35	18.23	19.25	—	19.00	位差C <sub>0</sub>	3	
流功 kW	—	12.437	7.404	5.228	—	16.098			
耗電比	—	1.301	1.301	1.472	—	1.276			
蒸發器入水溫 °C	12.0	—	7	7	—	30.0	← 冷凝器入水溫 °C		
蒸發器出水溫 °C	7.0	—	12.0	12.0	—	35.0	← 冷凝器出水溫 °C		
量測溫差 °C	5.0	—	5.0	5.0	—	5.0	← 量測溫差 °C		
額定溫差 °C	5.0	—	5.0	5.0	—	5.0	← 額定溫差 °C		
熱負載 kW	1445.41	—	866.31	579.10	1445.41	1714.95			
熱負載 RT	411.09	—	246.39	164.70	411.09	487.76			
管路阻抗係數C <sub>1</sub>	0.00000107	0.00000107	0.00000295	0.00000698	—	0.00000126			
系統能效 kW/RT	0.606	0.039	0.023	0.019	0.042	0.050	0.030	0.767	
ASHRAE 90.1標準	—	0.050	—	—	0.050	0.050	0.030	0.750	
馬達負載	100.00%					水量耗電比LPM/kW		420.17	
RT額定容量百分比	91.35%								

圖 10 更新汰換高效率泵浦後評估表



**IPLV 舊系統**

**原系統IPLV估算 (水量不隨冰機負載主動變化)**

負載	溫差℃	項目	冰機一	冰水泵01	溫差℃	區域泵01	區域泵02	區域泵總量	溫差℃	冷卻水泵01	冷卻水路	總耗電	
100%	5.70	耗電 kW	249	20.90	4.3	22.17	14.87	36.99	5.5	39.82	10.64	362.83	
		熱負載 RT	411.09	—		246.39	164.70	411.09		494.24	—	系統總能效	—
		能效kW/RT	<b>0.606</b>	<b>0.051</b>		<b>0.054</b>	<b>0.036</b>	<b>0.090</b>		<b>0.097</b>	<b>0.026</b>	<b>0.869</b>	—
		流量kg/min	3634.00	3634.00		2904.06	1941.28	4845.33		4542.33	—	—	—
		揚程 m	—	14.1		24.9	26.3	—		29.0	—	—	—
		流功 kW	—	8.378		11.823	8.348	—		21.537	—	—	—
		耗電比	—	2.495		1.875	1.775	—		1.849	426.91	—	—
75%	4.3	耗電 kW	186.8	20.9	3.2	22.2	14.8	37.0	4.1	39.8	10.6	299.24	
		熱負載 RT	308.32	—		184.79	123.53	308.32		372.76	—	系統總能效	—
		能效kW/RT	<b>0.606</b>	<b>0.068</b>		<b>0.072</b>	<b>0.048</b>	<b>0.120</b>		<b>0.129</b>	<b>0.035</b>	<b>0.957</b>	—
		流量kg/min	3634.00	3634.00		2904.06	1941.28	4845.33		4542.33	—	—	—
		揚程 m	—	14.1		24.9	26.3	—		29.0	—	—	—
		流功 kW	—	8.4		11.8	8.3	—		21.5	—	—	—
		耗電比	—	2.495		1.875	1.775	—		1.849	426.91	—	—
50%	2.9	耗電 kW	124.5	20.9	2.1	22.2	14.8	37.0	2.8	39.8	10.6	235.65	
		熱負載 RT	205.55	—		123.20	82.35	205.55		252.28	—	系統總能效	—
		能效kW/RT	<b>0.606</b>	<b>0.102</b>		<b>0.108</b>	<b>0.072</b>	<b>0.180</b>		<b>0.194</b>	<b>0.052</b>	<b>1.133</b>	—
		流量kg/min	3634.00	3634.00		2904.06	1941.28	4845.33		4542.33	—	—	—
		揚程 m	—	14.1		24.9	26.3	—		29.0	—	—	—
		流功 kW	—	8.4		11.8	8.3	—		21.5	—	—	—
		耗電比	—	2.495		1.875	1.775	—		1.849	426.91	—	—
25%	1.4	耗電 kW	62.3	20.9	1.1	22.2	14.8	37.0	1.5	39.8	10.6	172.06	
		熱負載 RT	102.77	—		61.60	41.18	102.77		121.80	—	系統總能效	—
		能效kW/RT	<b>0.606</b>	<b>0.203</b>		<b>0.216</b>	<b>0.144</b>	<b>0.360</b>		<b>0.387</b>	<b>0.104</b>	<b>1.660</b>	—
		流量kg/min	3634.00	3634.00		2904.06	1941.28	4845.33		4542.33	—	—	—
		揚程 m	—	14.1		24.9	26.3	—		29.0	—	—	—
		流功 kW	—	8.4		11.8	8.3	—		21.5	—	—	—
		耗電比	—	2.495		1.875	1.775	—		1.849	426.91	—	—

IPLV全文為"Integrated Part Load Value" 中文譯為積體部份負載值，即單一主機選取固定(25%, 50%, 75%, 100%) 四種運轉狀態每kw耗電量所提供冷凍噸數，再分別乘以加權值平均計算出能源效率(COP)。

5

圖 11 原系統(定水量)IPLV 估算表



**IPLV 新系統**

**系統更新 IPLV估算 (水量隨冰機負載主動變化)**

負載	溫差℃	項目	冰機一	冰水泵01	區域泵01	區域泵02	區域泵總量	冷卻水泵01	冷卻水路	總耗電	
100%	5	耗電 kW	249.00	16.177	9.63	7.69	17.32	20.54	12.33	315.37	
		熱負載 RT	411.09	—	—	—	—	—	—	—	系統總能效
		能效kW/RT	<b>0.606</b>	<b>0.039</b>	<b>0.023</b>	<b>0.019</b>	<b>0.042</b>	<b>0.050</b>	<b>0.030</b>	<b>0.767</b>	—
		流量kg/min	4145.53	4145.53	2484.63	1660.90	4145.53	5181.92	—	—	—
		揚程 m	—	18.35	18.23	19.25	—	19.00	—	—	—
		流功 kW	—	12.437	7.404	5.228	—	16.098	—	—	—
		耗電比	—	1.301	1.301	1.472	—	1.276	426.91	—	—
75%	4.5	耗電 kW	186.8	9.4	5.6	4.5	10.0	12.7	9.25	228.10	
		熱負載 RT	308.32	—	—	—	—	—	—	—	系統總能效
		能效kW/RT	<b>0.606</b>	<b>0.030</b>	<b>0.018</b>	<b>0.014</b>	<b>0.033</b>	<b>0.041</b>	<b>0.030</b>	<b>0.740</b>	—
		流量kg/min	3454.6	3454.61	2070.52	1384.09	3454.61	4318.26	—	—	—
		揚程 m	—	12.74	12.66	13.37	—	14.11	—	—	—
		流功 kW	—	7.197	4.285	3.025	—	9.963	—	—	—
		耗電比	—	1.301	1.301	1.472	—	1.276	426.91	—	—
50%	4	耗電 kW	124.5	3.9	2.4	1.9	4.2	6.2	6.17	145.10	
		熱負載 RT	205.55	—	—	—	—	—	—	—	系統總能效
		能效kW/RT	<b>0.606</b>	<b>0.019</b>	<b>0.011</b>	<b>0.009</b>	<b>0.021</b>	<b>0.030</b>	<b>0.030</b>	<b>0.706</b>	—
		流量kg/min	2591.0	2590.96	1552.89	1038.06	2590.96	3238.70	—	—	—
		揚程 m	—	7.17	7.12	7.52	—	9.25	—	—	—
		流功 kW	—	3.036	1.808	1.276	—	4.898	—	—	—
		耗電比	—	1.301	1.301	1.472	—	1.276	426.91	—	—
25%	3.5	耗電 kW	62.3	0.7	0.4	0.4	0.8	1.9	3.08	68.81	
		熱負載 RT	102.77	—	—	—	—	—	—	—	系統總能效
		能效kW/RT	<b>0.606</b>	<b>0.007</b>	<b>0.004</b>	<b>0.003</b>	<b>0.008</b>	<b>0.019</b>	<b>0.030</b>	<b>0.669</b>	—
		流量kg/min	1480.5	1480.55	887.37	593.18	1480.55	1850.68	—	—	—
		揚程 m	—	2.34	2.32	2.46	—	5.04	—	—	—
		流功 kW	—	0.567	0.337	0.238	—	1.525	—	—	—
		耗電比	—	1.301	1.301	1.472	—	1.276	426.91	—	—

IPLV全文為"Integrated Part Load Value" 中文譯為積體部份負載值，即單一主機選取固定(25%, 50%, 75%, 100%) 四種運轉狀態每kw耗電量所提供冷凍噸數，再分別乘以加權值平均計算出能源效率(COP)。

6

圖 12 系統更新(水量變動)IPLV 估算表



## IPLV-加入時間係數比較

### 舊系統

原系統IPLV估算表					
負載%	100%	75%	50%	25%	IPLV
時間係數	2.3%	41.5%	46.1%	10.1%	—
系統能效 kW/RT	0.869	0.957	1.133	1.660	1.107

### 新系統

系統更新 IPLV估算表					
負載%	100%	75%	50%	25%	IPLV
時間係數	2.3%	0.42	46.1%	10.1%	—
系統能效 kW/RT	0.767	0.740	0.706	0.669	0.718

IPLV全文為"Integrated Part Load Value" 中文譯為積體部份負載值，即單一主機選取固定(25%, 50%, 75%, 100%) 四種運轉狀態每kw耗電量所提供冷凍噸數，再分別乘以加權值平均計算出能源效率(COP)。

圖 13 IPLV 加入時間係數比較表

表 1 節能診斷改善建議表

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
<p>1. 離心式冰水主機一般能效約在 0.55~0.6 kW/RT 上下，依量測多年經驗，一般正常使用 10 年至 20 年的狀況下，能效衰退的幅度不多，大約還可維持在 0.6~0.67kW/RT 上下，不建議更換冰水主機。</p> <p>2. 在一般冰水主機水側系統上，泵浦的選型錯誤，造成泵浦提供的水量不足/過大，導致冰水主機的製冷量受限或系統總能效低落。</p> <p>3. 早期在系統建構上，只在區域泵加裝變頻器調整使用量，實際狀況冰水泵及冷卻水泵都必須加上變頻器，才能達到讓能效“美國採暖、製冷與空調工程師學會”ASHRAE 90.1 的標準系統能效 0.75kW/RT。</p>	<p>1. 依照泵浦性能及管路壓損，計算出該場域的管路阻抗係數，在依照該場域的管路阻抗係數及冰水主機水側需求水量客製出相對應流量、揚程之泵浦。</p> <p>2. 收集完該系統中的各項數據後，可以推出當下的系統能效，加上時間係數，可以得出原系統 IPLV，經評估後將系統中不良的附屬設備更新，可得到改善後之 IPLV，兩者相比較便可得節能率、節能電量、節省費用及節省碳排放量。</p> <p>3. 當下系統負載 35%，系統能效估算為 1.357kW/RT，有節能空間。水泵耗電比過高，</p>	<p>1. 節省用電 = <math>(1.107-0.718) \times 450RT \times 8,760</math> 小時 = 1,534,958 kWh/年。</p> <p>2. 節能率 = <math>(1.107-0.718) \div 1.107 = 35.1\%</math>。</p> <p>3. 降低需量 = <math>1,534,958 \div 8,760 = 175.22</math> kW/h。</p> <p>4. 節省電費 = <math>1,534,958 \times 3.32 = 5,096,061</math> 元/年(510 萬元)。</p> <p>5. 投資費用 = 20,348,149 萬元(2034.8 萬元)。</p> <p>6. 回收年限 = <math>2,034.8</math> 萬 <math>\div</math> 510 萬 = 4 年回收。</p> <p>7. 相當減少溫室氣體排放量 = <math>1,534,958 \times 0.494 \div 1,000 = 759.8</math> ton-CO<sub>2</sub>e/年 (以 112 年度電力排放係數 0.494 kgCO<sub>2</sub>e/kWh 計算)。</p>

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
	<p>導致冰水主機水側的附屬設備能效高於 ASHRAE 90.1 標準規範 0.05kW/RT。</p> <p>4. 更換為高效率泵浦及 IE3 馬達，使得泵浦的耗電比降低泵浦，讓平時運作中的耗電量降低。</p> <p>5. 添加數值可視化監控系統，可使得空調水側系統中的泵浦流量控制得宜，即是使用的離峰期，也可以自動調整流量至當下負載最適合的用量，可將耗電量再降低。</p>	

#### 四、結論

目前在市場上運轉的泵浦，絕大多數不符合歐盟  $MEI \geq 0.4$  的要求；在空調系統上，冷卻泵及冰水泵的能效和須  $\leq 0.1 \text{ kW/RT}$ ，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。搭配冷凍空調系統以依 ASHRAE 90.1 空調水側系統之節能指標生產，符合冷凍空調所需流量/低流速/低揚程之最佳化高效率泵浦。冰水主機能效需  $\leq 0.56 \text{ kW/RT}$ 、冰水泵能效需  $\leq 0.05 \text{ kW/RT}$ 、冷卻水泵能效需  $\leq 0.05 \text{ kW/RT}$ 、冷卻水塔能效需  $\leq 0.03 \text{ kW/RT}$ ，使系統熱負載總效低於  $0.75 \text{ kW/RT}$  標準。將系統結合智能視覺化大數據 AI 分析，顯示泵效率、流量、揚程、耗電功、碳排放量

#### 五、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)
5. IPLV 計算公式建議標示出處：法源：CNS 12575\_B4072\_7.5 節

# 導入 AI 技術強化石化廠監控實現即時洩漏偵測與防範

林楷傑\*、黃志威\*、郭子豪\*\*、吳宜展\*\*\*、黃溢銓\*\*\*\*

## 摘要

石化廠依據「職業安全衛生法」、「毒性及關注化學物質管理法」等設置製程氣體偵測器警報系統，包括毒性氣體偵測器及可燃性氣體偵測器兩大項。由於這些偵測器通常設置在較低位置，且主要偵測濃度較高(ppm 或 LEL 等級)或較遠距離分布，因此對於高處或遠距離洩漏處理，仍有改善空間。

為進一步減少洩漏可能帶來的安全、衛生與環境風險，業者近年來導入優於法規之 VOCs 智慧監控技術，包括強化固定偵測器(如快速質譜、煙道 CEMS 等)、廠內巡檢裝置(如光學氣體成像儀、超聲波顯像儀等)、及周界監測系統(如 FTIR 等)等多重防護措施。本文彙整了各項智慧監控技術的原理，問卷調查國內業者導入技術種類、比例及適用性。

此外，國內已有業者接軌智慧科技應用而持續導入人工智慧(AI)系統，如洩漏及銹蝕 AI 辨識系統、AI 智能化溯源系統。前者結合影像及 AI 輔助洩漏辨識，後者可迅速判別廠區內排放異常，進而達成「3~5 分鐘找出異常廠處，30 分鐘內抵廠查核」之目標。甚至與環境部合作，由廠外光化站測值比對廠內監控系統，於 113 年上半年 6 個廠外異常案例中，有 5 例洩漏於廠內被即時發現，偵測率達 83%。然而，就部分高架洩漏較難偵測問題，系統仍需持續優化。

本研究有助於業者導入智慧監控技術，實現即時洩漏偵測，從而有效改善安全、衛生與環境問題。

【關鍵詞】石化廠、揮發性有機污染物、氣體偵測器、溯源

---

\*環興科技股份有限公司 工程師

\*\*環興科技股份有限公司 計畫主任

\*\*\*台塑企業總管理處 處長

\*\*\*\*台塑企業總管理處 資深副總經理

## 一、前言

石化廠現況有人員(人力資源短缺，傳承技術困難)、設備(設備老化因應，設備問題預防)、成本(法今日趨嚴格，營運成本提升)等問題，可接軌智慧科技應用來解決，透過運用物聯網、AI、大數據分析等先進技術，提升設備、工廠和作業環境的安全性與效率。

石化廠在傳統安全管理的架構上，設置製程氣體偵測器警報系統，包括毒性氣體偵測器及可燃性氣體偵測器兩大項，當濃度達警報設定值，確認污染源及異常處理，以便即早發現洩漏問題並處理。導入智慧安全管理則可提升安全管理效率及減少現場人員負荷，達到減少有害物質洩漏、從業人員暴露、降低工安風險等效益，如圖 1。



圖 1 石化廠現況問題及接軌智慧科技應用之效益

## 二、文獻回顧

依據毒性化學物質管理及勞工安全相關法規，業者須設置工安偵測器(氣體偵測器)，連續自動監測及警報。毒性氣體偵測器之警報設定值不得大於八小時日時量平均容許濃度(PEL-TWA, permissible exposure limit-time weighted average)10倍。可燃性氣體以30%LEL管制，相關規定摘要如下：

1. 依據「勞工作業場所容許暴露標準 (107.3.14)」，規定八小時日時量平均容許濃度(PEL-TWA)，例如苯為 1 ppmv。
2. 依據「毒性及關注化學物質應變器材與偵測警報設備管理辦法(109.1.13)」第 5 條第一項規定：「製造、使用、貯存毒性或具危害性關注化學物質有下列情形者，運作人應於運作場所適當地點設置偵測及警報設備」，第二項規定：「前項偵測及警報設備，指利用儀器連續偵測，記錄環境中毒性或具危害性關注化學物質濃度、時間，當濃度超過設定值時，可發出警報訊號之設備。」。第 7 條規定：「毒性或具危害性關注化學物質運作場所偵測器採樣位置周圍濃度達警報設定值時，應能於一分鐘內自動發出警報燈示及聲響。」第 9 條規定：「偵測及警報設備之警報設定值，應依各運作場所適當地點之環境條件設定，其設定值不得大於勞工作業場所容許暴露標準之十倍；無勞工作業場所容許暴露標準者，設定值在攝氏二十五度一大氣壓條件下，不得大於 250 mg/m<sup>3</sup>。」
3. 依據「職業安全衛生設施規則(111.8.12)」第 177 條規定：「蒸氣或氣體之濃度達爆炸下限值之百分之三十以上時，應即刻使勞工退避至安全場所，並停止使用煙火及其他為點火源之虞之機具，並應加強通風。」
4. 依據「高壓氣體勞工安全規則(111.9.14)」第 60 條規定：「可燃性氣體或毒性氣體之製造設備中，有氣體漏洩致積滯之虞之場所，應設可探測該漏洩氣體，且自動發出警報之氣體漏洩檢知警報設備。」

除了廠內工安偵測器以外，另有周界監測及社區監測，如圖 2。若能加以整合，對於提早發現污染來源有所助益。



資料來源：U.S.EPA，Next Generation Emission Measurement (NGEM) Research for Fugitive Air Pollution

圖 2 社區監測、周界監測、廠內監測示意圖

### 三、研究方法

(一)問卷調查：對象涵蓋石油煉製，石化上中下游約20家。包括中油、台塑、長春、奇美、台聚、李長榮等集團。調查內容包括傳統監控系統，及導入AI之作法。

(二)傳統監控系統：調查法規及優於法規可及早偵測洩漏之偵測器，架設於廠內、巡檢、周界、廠外社區監測之不同功能者。針對設備適用性進行比較：

1. 互補性：即時性、準確性
2. 濃度區間：ppb、ppm、LEL
3. 高度：地面、高架
4. 距離：現址式、遠距離

(三)導入AI系統之作法：接軌智慧科技應用以更有效率查找洩漏方法，包括：

1. 管線洩漏及銹蝕 AI 辨識系統
2. AI 智能化溯源系統

(四)各式監控設備導入比例及預期目標

### 四、結果與討論

彙整業者採用之監控系統如圖 3，包含傳統監控系統持續優化(廠內、巡檢、周界、廠外監測等)以及導入 AI 系統(管線洩漏及鏽蝕 AI 辨識系統、AI 智能化溯源系統種)，整理於第四、五、六章，導入比例及結論整理於第七、八章，說明如下：



圖 3 整體架構

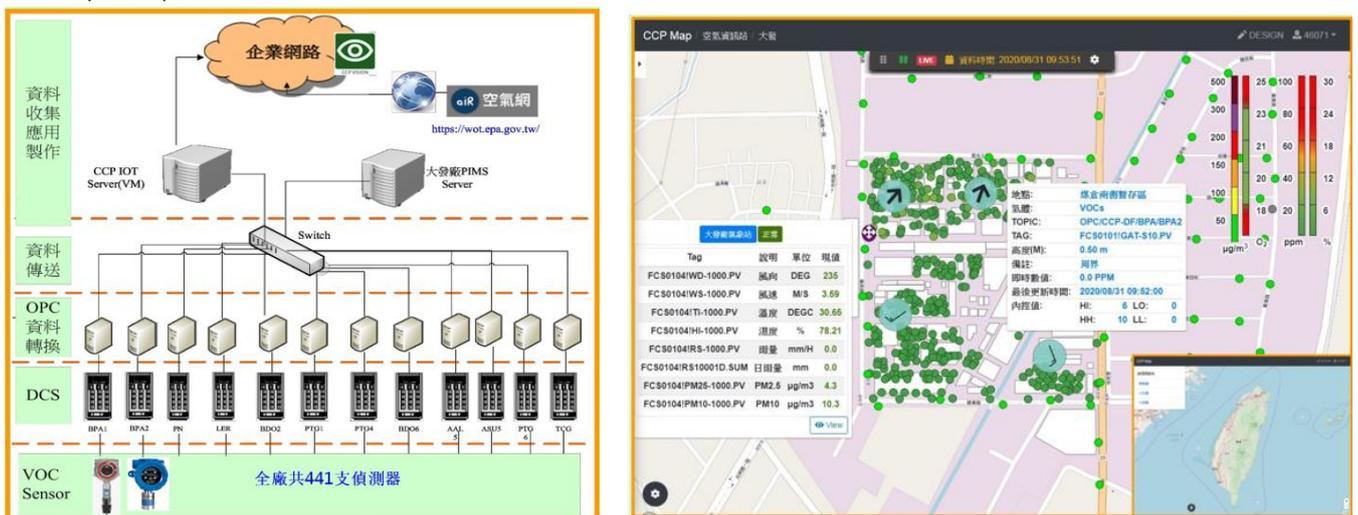
## (一)廠內監測-1.氣體偵測器

1. 應用目標：掌握製程各項元件污染洩漏情形。
2. 說明：

通過感測器探測氣體濃度的變化，當氣體濃度超過設定之安全閾值，偵測器發出警報，提醒相關人員採取應變措施，保障人身安全以及避免火災、爆炸等意外。常見的氣體偵測器包括可燃氣體偵測器和有毒氣體偵測器，前者通用於檢測甲、乙或丙烷等可燃氣體，後者則針對一氧化碳、硫化氫、氨氣等有毒氣體作個別感測。

圖 4 為案例廠毒性氣體與可燃性氣體偵測器警報系統，當異常警報發生，分散式控制系統(Distributed Control System, DCS)現場警報監測畫面顯示異常位置，且現場警報區域警示燈亮起。此時，人員必須立即攜帶手持式偵測器，於現場巡查確認後回報。除了廠區外，總公司設計廠區地圖平台，提供便利的視覺化呈現以及細緻的地圖區塊整合，並將現場偵測器數據與事件整合於此平台。平台除各式偵測器數據讀值外，並將廠內風向/風速、廠外空品感測器(PM<sub>2.5</sub>、VOCs 等)數據加以整合。

隨著科技進步，各種偵測技術如觸媒燃燒式、半導體式、光離子式、紅外線式、電化學式和比色法色帶式相繼出現，為快速、準確的氣體濃度檢測提供了多樣選擇。整理不同型式偵測器之特性比較表如表 3，無機類待測氣體與選用偵測器對照表如表 2，有機類待測氣體與選用偵測器對照表如表 3。



資料來源：長春人造樹脂廠，國家職業安全衛生獎，<https://www.osha.gov.tw/>

圖 4 案例廠毒性氣體與可燃性氣體偵測器警報系統

表 1 不同型式偵測器之特性比較表

偵測原理	可偵測氣體	優點	缺點	較佳偵測範圍
觸媒燃燒式	可燃性氣體 如丙烷等碳氫化合物	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 輸出值與氣體濃度之線性關係良好</li> <li>2. 受環境溫度、濕度影響小</li> <li>3. 再現性優</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 觸媒之活性易劣化(中毒)</li> <li>2. 不具選擇性；感測器表面易受污染</li> <li>3. 氧氣低於 10% 以下不適用</li> </ol>	500 ppm~ 100%LEL
半導體式	毒性及可燃性氣體，如乙醇	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 對低濃度氣體之靈敏度高</li> <li>2. 穩定性佳</li> <li>3. 對毒性氣體耐久性較觸媒燃燒式優</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 輸出值與氣體濃度之線性不佳</li> <li>2. 不適用於高濃度氣體偵測</li> <li>3. 易受溫度、濕度影響</li> <li>4. 無選擇性，干擾度高</li> <li>5. 有Sleeping 睡著效應</li> </ol>	0~1000 ppm 部份半導體感測元件，可測至 50%LEL
光離子式 PID	具不飽合之芳香族有機物（如苯、甲苯等）	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 成本低，易操作。</li> <li>2. 不受空氣中主要成份 O<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub> 等氣體分子干擾</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 感測器易受水氣溼度之影響</li> <li>2. 感測器表面易受污</li> </ol>	0~2000 ppm
紅外線式 IR	異原子結構之氣體分子化合物（不適用 O <sub>2</sub> 、N <sub>2</sub> 、H <sub>2</sub> 雙原子分子）	良好的精準度；可設計於即時偵測	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 若濕度太高，水氣容易破壞測試腔(攜帶式)</li> <li>2. 溫度易影響偵測值(攜帶式)</li> </ol>	0~100 Vol%
電化學式	一般可溶於水且可解離成離子狀態之化合物，如 NH <sub>3</sub> 、SO <sub>2</sub> 、NO、HCl、H <sub>2</sub> S 等	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 構造簡單容易操作</li> <li>2. 低濃度輸出為直線形</li> <li>3. 對氣體的選擇性佳</li> <li>4. 價格便宜</li> <li>5. 高靈敏度</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 需補充電解液(拋棄式除外)</li> <li>2. 必需更換隔膜(拋棄式除外)</li> <li>3. 易受干擾</li> </ol>	0~2000 ppm
比色法色帶式	毒性氣體如 AsH <sub>3</sub> 、B <sub>2</sub> H <sub>6</sub> 、Cl <sub>2</sub> 、C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH、N <sub>2</sub> H <sub>4</sub> 、SO <sub>2</sub> 、COCl <sub>2</sub> 等	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 具低濃度偵測</li> <li>2. 具適當之選擇性</li> <li>3. 操作方便</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 濕度影響色帶之顯色，造成校正困難</li> <li>2. 須常更換色帶</li> </ol>	0~100 ppm

表 2 無機類待測氣體與選用偵測器對照表

待測氣體	化學式	偵測器型式								
		觸媒燃燒式	半導體式	熱傳導式	光離子式	紅外線式	電化學式	比色法式	紫外光式	
無機類	氫	H <sub>2</sub>	V	V	V			V		
	氧	O <sub>2</sub>						V		
	氫	Ar			V					
	臭氧	O <sub>3</sub>					V	V	V	
	氟	F <sub>2</sub>						V		
	氯	Cl <sub>2</sub>		V					V	
	碘	I <sub>2</sub>				V			V	
	二氧化碳	CO <sub>2</sub>			V		V	V		V
	一氧化碳	CO	V	V	V		V	V		V
	二氧化氮	NO <sub>2</sub>				V	V	V	V	V
	一氧化氮	NO				V	V	V		V
	氨	NH <sub>3</sub>		V	V	V	V	V	V	V
	二氧化硫	SO <sub>2</sub>	⊙	⊙			V	V	V	V
	二硫化碳	CS <sub>2</sub>	V	V		V	V			V
	硫化氫	H <sub>2</sub> S	⊙	⊙		V	V	V		
	氯化氫	HCl	⊙				V	V	V	
	氫氰酸	HCN					V	V	V	V
	硫酸	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	⊙					V	V	
	磷酸	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	⊙					V		
	硝酸	HNO <sub>3</sub>	⊙					V	V	
砷化氫	AsH <sub>3</sub>	V	V							
光氣	COCl <sub>2</sub>						V	V		

光離子式偵測氣體的電離電位需 ≤ 偵測器所提供的電離電位。  
 V表可以此偵測器進行偵測。  
 ⊙表此類化合物可能會破壞感測元件。

表 3 有機類待測氣體與選用偵測器對照表

待測氣體	化學式	偵測器型式									
		觸媒燃燒式	半導體式	熱傳導式	光離子式	火焰離子式	紅外線式	電化學式	比色法式	紫外光式	
有機類	烷類	$C_nH_{2n+2}$	V	V	V		V	V			V
	烯類	$C_nH_{2n}$	V	V	V	V	V	V			V
	炔類	$C_nH_{2n-2}$	V	V	V	V	V	V			V
	芳香類	具苯環結構者	V	V	V	V	V	V			V
	醛酮類	醛：RCHO	V	V	V	V	V	V			V
	醚類	ROR	V	V	V	V	V	V			
	醇類	ROH	V	V	V	V	V	V			V
	腈類	RCN	V	V	V	V	V	V			V
	胺類	RNH <sub>2</sub>		V	V	V	V	V		V	V
	環氧烷類	環狀結構中有一碳被氧取代者	V	V	V	V	V	V			V
	鹵化烷類	烷類結構中有一氫被鹵素族取代者	⊙	V	V	V	V	V			V
	鹵化烯類	烯類結構中有一氫被鹵素族取代者	⊙	V	V	V	V	V			V
	鹵化炔類	炔類結構中有一氫被鹵素族取代者	⊙	V	V	V	V	V			V
氟氣烷	烷類結構中有一氫被氟或氯取代者		V	V	V	V	V			V	

光離子式偵測氣體的電離電位需 $\leq$ 偵測器所提供的電離電位。  
 V 表可以此偵測器進行偵測。  
 ⊙表此類化合物可能會破壞感測元件。

(一)廠內監測-2.污染源連續自動監測系統(CEMS)

1. 應用目標：針對大型污染源連續監控排放情形。

2. 說明：

符合法規規定：發電鍋爐等設備之廢氣排放管道設置 CEMS，長期連續監測排放管道之不透光率、二氧化硫與氮氧化物等污染物之排放濃度，作為評估污染防制設備功效及研擬改善方案之參考。

業者自主管理：目前收集到 3 種應用，包括：

(1) HCl：監控氯化物石化加熱爐爐管破裂

(2) NH<sub>3</sub>：監控脫硝設備注氮量最佳化

(3) THC：監控 VOCs 防制設備效能

(一)廠內監測-3.快速質譜儀

1. 應用目標：針對特定有毒、有害氣體於敏感點佈置監測。

2. 說明：

某廠使用質譜儀偵測空氣中 1,2 二氯乙烷、氯乙烯含量，每台最多可做 60 點之分析，佈點皆位於製程區內，可以針對廠區可能因意外產生之 VOCs 之氣態洩漏地點，如高架管線，施以 24 小時連續監測；此設備可以提供瞬時偵測，靈敏度高可於微量洩漏時測得，有助降低工安事件；亦可將分析所得到的廠內環境危害性氣體濃度數據，記錄於控制室電腦之中並加以運用，如建立某佈點濃度歷史資料以利訂立警報設定值，發出燈光閃爍與音響警報；或針對發生警報之異常訊號，進行改善。

圖 5 為質譜儀監測系統之架構圖。當取樣泵抽氣，各室外取樣點之取樣氣體經過過濾後，抽入監測站內，隨時都以浮子流量計監測流動情形，再通過快速多點取樣系統選擇後，瞬時得到取樣空氣，藉由極性分子半透膜作篩選而進入質量分析室。

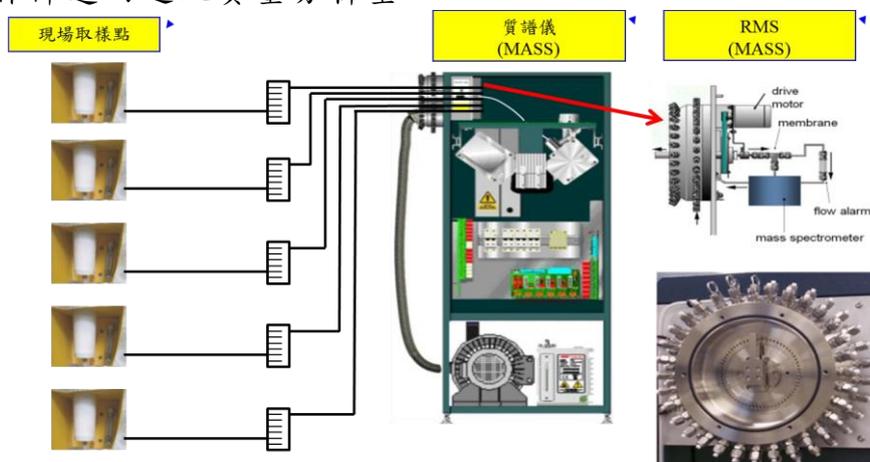


圖 5 快速質譜儀多點取樣系統

(一)廠內監測-各式廠內監測器適用性比較

固定式儀器在工業和環境監測中扮演著關鍵角色，特別適用於長期穩定監控需求。隨著環保意識提升和法規加強，對VOCs及有害氣體的監測需求不斷增加。固定式儀器相比直讀式儀器，具備連續監測、即時數據傳輸、遠端監控和自動警報功能，廣泛應用於石化、化工和製造業等高風險領域。這些技術提高了監測效率，減少人力巡檢需求，使固定式儀器在環境保護和工業安全中發揮了愈加重要的作用。

廠內監測器適用性比較如表4，氣體偵測器符合相關法規規定，可及時於測得污染物濃度並1分鐘內發出警報。然而具有干擾問題(汽油車廢氣、油漆/噴漆)。快速質譜儀具有準確度高、干擾少，對於人員不易巡檢處特別適合設置之優點，但有建置成本相對高昂缺點，一般用於毒性僅用於毒性氣體。污染源連續自動監測系統(CEMS)中，業者於管道增設HCl偵測器，以監控氯化物石化加熱爐爐管破裂，增設NH<sub>3</sub>偵測器可監控脫硝設備注氮量最佳化，增設THC偵測器可監控VOC防制設備效能。

表 4 廠內監測器適用性比較

設備/原理	優點	缺點
氣體偵測器	固定式氣體偵測器可及時於測得污染物濃度並1分鐘內發出警報	仍有干擾問題(汽油車廢氣、油漆/噴漆)
污染源連續自動監測系統(CEMS)	HCl：監控氯化物石化加熱爐爐管破裂 NH <sub>3</sub> ：監控脫硝設備注氮量最佳化 THC：監控VOC防制設備效能	設置及操作成本較高
快速質譜儀	準確度高、干擾少，對於人員不易巡檢處特別適合設置	氣體偵測器建置成本相對高昂。由於針對多點逐時檢測，分析週期高出法定之時間，不能取代工安偵測器。

## (二)巡檢-氣體偵測器警報(Alarm)處理流程圖

以案例廠為例，氣體偵測器濃度達第一段警報設定值時(Hi Alarm)，通知中控室值班人員以巡檢工具至現場查看及異常處理；當濃度達到第二段時(Hi Hi Alarm)則通知安全衛生單位監控進行處置，以及早發現洩漏問題並加以處理。如圖6。

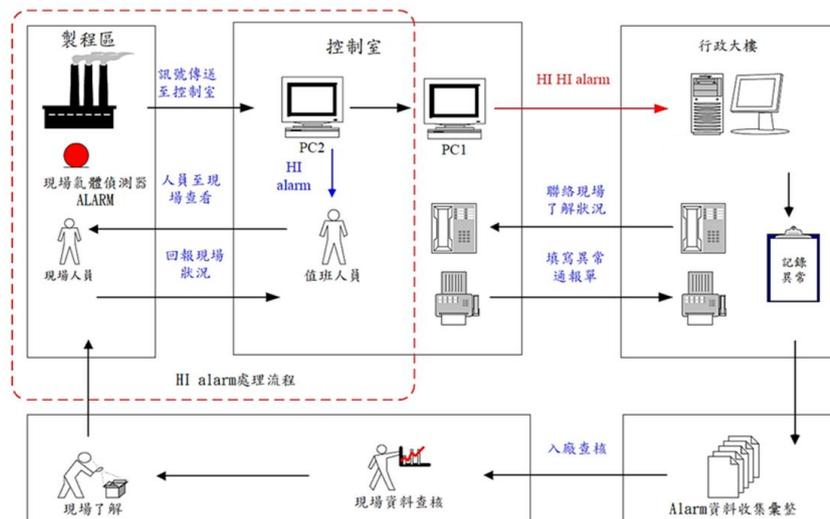


圖 6 氣體偵測器警報(Alarm)處理流程圖

## (二)巡檢-各式廠內巡檢工具適用性比較

手持式儀器具有即時、便攜和操作簡便特性，常用於人員巡檢查找洩漏源。這些儀器能基於不同原理檢測氣體濃度，並在短時間內提供準確數據。然而，它們在靈敏度、應用場景和使用限制上存在差異。了解各儀器的優缺點，有助於根據具體需求選擇合適的檢測技術。廠內巡檢工具適用性如表5，FID及PID為現址式監測且分別適用高、低濃度。OGI及AIC則可遠距離監測，但適用較高濃度或需為壓力設備。各項巡檢工具簡易說明如下：

表 5 廠內巡檢工具適用性比較表

偵測原理	優點	缺點	較佳偵測範圍
手持式 FID	測值準確，通用於各 VOC 濃度異常偵測	檢測速度較慢，一天檢測量約 400 點	1~20,000 ppm
PID 檢漏儀	輕便，可測得 ppb 等級洩漏，若有測值代表周遭可能有設備元件洩漏。	選擇性氣體偵測非通用型，因此目前無法取代 FID 設備元件檢測。	-
光學氣體 成像儀 (OGI)	檢測距離遠，可於數米外測得洩漏	開機時間長(約 10 分鐘)、靈敏度較差、易受熱源干擾(如蒸氣管線、太陽照射後的管線)、顯示判定吃力	與物種有關約 5,000 ppm 以上
超聲波顯 像儀(AIC)	檢測範圍廣、距離遠，可於數米外測得洩漏	管線必須要有壓力較容易測得，且容易被儀器空氣洩漏干擾	~100 kHz

## (二)巡檢-1.手持式火焰離子偵測(FID)

1. 應用目標：提供業者巡檢人員移動式查找洩漏來源。
2. 說明：

手持式 FID 是一種便攜的氣體偵測設備，其工作原理基於火焰離子化技術，內部裝有氫氣和空氣的混合燃燒器，當氣體樣品通過火焰時，碳氫化合物在高溫下被離子化，生成帶電的離子。這些離子在電極間形成電流，電流強度與碳氫化合物的濃度成正比，以此定量分析氣體樣品中的總碳氫化合物(THC)濃度，如圖 7。由於適用性廣、便攜性、高靈敏度、快速響應和操作簡便，使其應用廣泛。在煉油及石化業，FID 可用於檢測管道排放、元件和儲槽洩漏等 THC 濃度檢測及修護(Leak Detection and Repair, LDAR)等。

## (二)巡檢-2.手持式光離子偵測(PID)

1. 應用目標：提供業者巡檢人員移動式查找洩漏來源。
2. 說明：

手持式 PID 是一種利用紫外線光源將氣體分子電離成離子的儀器，專門用來檢測部分特定 VOCs 和部分無機氣體，如圖 8。當氣體樣品進入 PID 時，會受到紫外線照射，光子能量足以將某些氣體分子中的電子擊出，形成帶正電的離子和自由電子。這些離子在電場的作用下移動，產生電流，偵測器通過測量這個電流並將其放大，轉換為氣體濃度讀數。PID 對於像苯、甲苯、二甲苯等 VOCs，及部分無機氣體如氨氣、硫化氫有很高的靈敏度，並能夠快速響應，適合檢測低濃度的污染物，廣泛應用於工業安全、環境監測和石油化工等領域。

然而，PID 的應用也有其局限性。對於難以電離的氣體如甲烷和飽和烴檢測效果較差；對水汽較敏感，濕度較高時可能會影響測量的準確性。



圖 7 火焰離子偵測器



圖 8 光離子偵測檢漏儀

## (二)巡檢-3.紅外線氣體顯像測漏儀(OGI)

1. 應用目標：提供業者巡檢人員移動式查找洩漏來源。
2. 說明：

紅外線(Infrared, 簡稱 IR)氣體顯像測漏儀利用 IR 成像技術來檢測和定位氣體洩漏。其工作原理基於個別氣體對特定波長具有特徵吸收光譜，通過發射 IR 並檢測其反射或穿透後的強度變化來識別氣體。當 IR 通過氣團時，某些波長的 IR 會被吸收，儀器內的 IR 探測器可以檢測到這些變化並生成影像，顯示出洩漏的氣團及其濃度分布，如圖 9。儀器適用於多種 VOCs 和部分無機氣體，包括甲烷、乙烯、丙烯、苯、甲苯、二甲苯、氨氣、硫化氫和氟利昂等。在應用方面，紅外線氣體顯像測漏儀具有非接觸、遠距離和實時成像的優勢，可以快速掃描大範圍區域，特別適合用於高架設備和管道的洩漏檢測。

## (二)巡檢-4.超聲波顯像儀(AIC)

1. 應用目標：提供業者巡檢人員移動式查找洩漏來源。
2. 說明：

超聲波(Ultrasonics)顯像儀係利用超聲波成像技術來檢測和定位聲源的儀器。其工作原理基於麥克風陣列和聲學成像技術。配備了多個高靈敏度麥克風，以特定的幾何方式排列。聲源(如 VOCs 洩漏)之聲波在空氣中傳播並被麥克風陣列接收，透過到達麥克風的時間差來計算聲源位置。數據經處理後轉換成視覺圖像，顯示出聲源的位置和強度，如圖 10。與傳統的氣體檢測方法相比，超聲波顯像儀具有非接觸、快速、精確和可視化的優點。依照 ASTM E1002-11(2018) Standard Practice for Leaks Using Ultrasonics，噪音探測是以檢測洩漏孔徑為 4 mm，洩漏流量為 0.1 kg/sec，介質壓力小於 10 bar 氣體洩漏點為基準。實際上，超聲波顯像儀還會受到現場噪音的干擾，為其使用限制。



圖 9 紅外線氣體顯像測漏儀



圖 10 超聲波顯像儀

### (三)周界監測-1.開徑式傅立葉轉換紅外光光譜(Open-path FTIR，簡稱OP-FTIR)

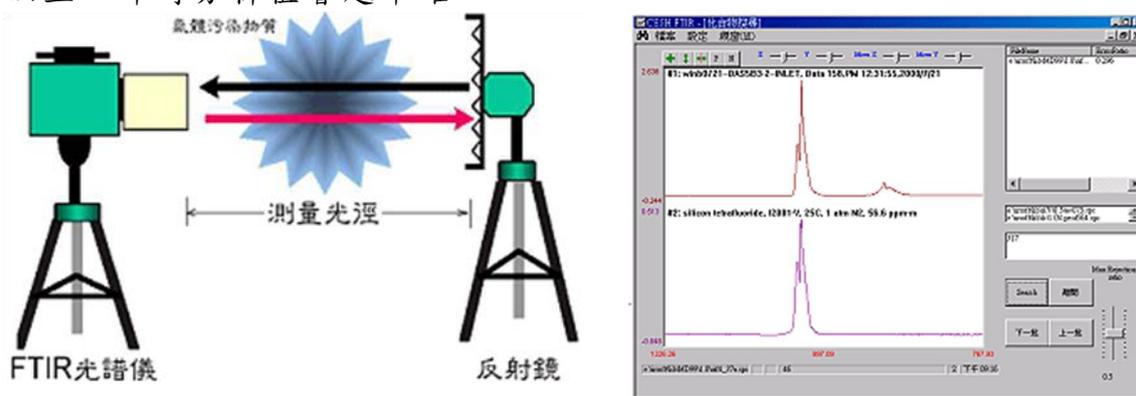
1. 應用目標：掌握廠內污染是否洩漏逸散至廠區周界。
2. 說明：

OP-FTIR 技術通過測量物質對不同波長中紅外光的吸收強度來識別和定量其組成。OP-FTIR 光譜儀包含一個紅外光源、干涉儀、樣品室和偵測器，如圖 11。IR 光源發出的光經干涉儀分光後通過樣品，樣品中的化學鍵會選擇性地吸收特定波長的 IR 形成特徵吸收譜圖。這些吸收譜圖經傅立葉變換轉換成光譜數據，從中可以識別和量化樣品中的化合物。

在工廠應用上，OP-FTIR 可架設於廠區周界以監控對廠外的影響，或架在製程中監控異常排放。OP-FTIR 為避免地面移動源排放干擾，通常架在建築物上大約 10 公尺高度，使其在高架排放監控具有優勢，例如管道排放、高架元件或管線洩漏、儲槽上方的呼吸閥及通氣口逸散。然而，OP-FTIR 應用也有限制，例如其易受水氣、粉塵干擾使其特別不適用於雨天或沙塵暴時段。

此外，OP-FTIR 的便攜式設計使其適合應用於緊急應變事件。工作人員可以快速部署 OP-FTIR 設備，實時監測洩漏現場的 VOCs 濃度，及時掌握現場情況並制定相應的應對策略。相比其他檢測方法，FTIR 技術具有多物種同時監測、部分物種高靈敏度和非破壞性測試的優點。

OP-FTIR 自動判圖及連續監測軟體技術，係將吸收圖譜與資料庫標準圖譜進行比對波峰等特徵，以定性定量，如圖 12。然而，在低濃度時因為圖譜特徵不明顯而易有誤判現象，依使用經驗，物種濃度高於 100 ppb 以上，即時分析值會越準確。



資料來源：碩傑企業股份有限公司，<http://www.mastek.com.tw>

圖 11 OP-FTIR 氣體分析監測儀 圖 12 FTIR 自動判圖及連續監測系統 軟體

### (三)周界監測-2.空品感測器

1. 應用目標：掌握廠內污染是否洩漏逸散至廠區周界，廠外監測污染保障周遭居民健康。

2. 說明：

空品感測器是一種低成本微型感測器技術，可即時監測提供空氣污染物的濃度變化訊息與趨勢，偵測物種包含 PM<sub>2.5</sub> 及 VOC 等。其中，VOC 採用半導體感測技術，如圖 13。當氣體通過半導體感測元件時，會與感測器表面的化學材料發生氧化或還原反應，從而改變其電阻，如圖 13。VOC 的濃度越高，電阻變化越大。雖然這種技術可以快速反應環境中的氣體濃度變化，但它的缺點是無法區分具體的氣體種類，並且可能受非有機氣體(如無機酸、鹼氣體)的干擾。此外，長時間測值易飄移、也會受到環境因素如溫度和濕度的影響，對部分物種靈敏度不足，需輔以更多元的感測技術來提升準確性。

### (三)周界監測-3.現址式GC

1. 應用目標：掌握廠內污染是否洩漏逸散至廠區周界，廠外監測污染保障周遭居民健康。

2. 說明：

現址式氣相層析儀(Field-GC)的工作原理基於傳統的氣相層析技術，利用樣本中的 VOCs 在固定相和流動相之間的不同滯留時間來分離化學成分。現場監測設備將空氣樣本收集後，透過氣相層析柱分離出不同的 VOCs，並由檢測器分析其濃度。這一技術能夠實現精確的污染物識別和定量，適用於檢測環境中濃度極低的 HAPs，如甲苯、乙酸乙酯等，具有實驗室級別的檢測靈敏度(小於 0.1 ppb)。

Field-GC 的系統整合氣相層析儀和自動化數據處理軟體，能夠持續在線監測，並實時傳輸結果，即使在無人值守的情況下，系統也能準確記錄 VOCs 的濃度變化，如圖 14。低功耗設計(約 100W)使得 Field-GC 能夠在不同的環境中靈活部署，適合於工業區、社區等空間有限的地區。

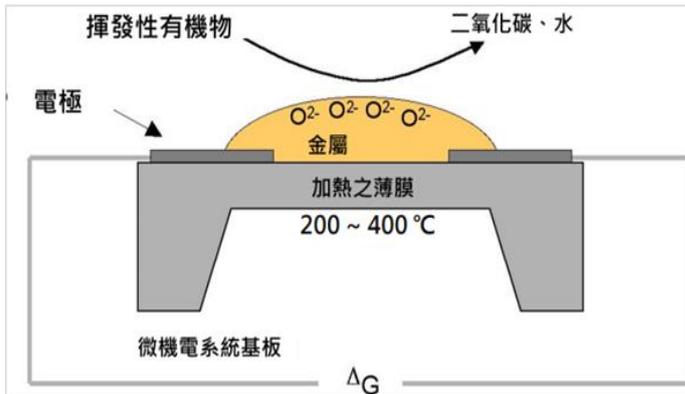


圖 13 VOCs 半導體感測技術



圖 14 現址式 GC

(三) 周界監測-偵測系統比較

周界偵測系統的比較顯示，各設備在應對工廠環境監測上各具特點。其中OP-FTIR具有即時多物種高靈敏度的優勢，適合高架排放監控，但受限於天候干擾；空品感測器成本低廉，能在穩定環境中迅速反應，但缺乏精確辨識氣體種類的能力；現址式GC可偵測個別物種且偵測低濃度(ppb)，可於工廠周界或鄰近社區監測，但成本較高，無法密集部署於整條周界線。周界監測系統適用性比較如表6。

表 6 周界 VOC 監測系統適用性比較表

偵測原理	優點	缺點	較佳偵測範圍
OP-FTIR	即時，多物種。可監測周界線。	受天候干擾，不適用雨天或沙塵暴時段。偵測靈敏度較低。	數百 ppb~ppm
空品感測器	即時，因低成本故可密集部署以涵蓋整條周界線，用於趨勢觀測，可搭配如高值觸發採樣罐等補足。	測值易飄移致準確度不足，無法辨別污染個別物種。	ppb
現址式 GC	可偵測個別物種且偵測低濃度(ppb)，可於工廠周界或鄰近社區監測。	約 1 小時測定、中成本，無法密集部署，故不易涵蓋周界線。	ppb

(四) 廠外監測器

1. 應用目標：廠外監測污染排放，保障周遭居民健康。
2. 說明：

光化站：我國參考美國 1990 年國會通過的空氣清淨法增修條文(Clean Air Act Amendments)，美國環保署要求各州或地方在臭氧問題嚴重地區必須開始建立光化學評估監測站(Photochemical Assessment Monitoring Stations; PAMS，以下簡稱光化站)，全面監測臭氧、臭氧前驅物及部分含氧揮發性有機物，以瞭解高臭氧發生的原因。目前我國光化站監測 54 項 VOCs 物種，11 站固定站及 4 部移動車合計共 15 站。

特工站：為掌握特殊性工業區排放空氣污染物對空氣品質造成的影響，保障民眾健康，環境部依空氣污染防治法第15條規定，特殊性工業區開發者，應於區界內之四周規劃設置緩衝地帶及適當地區設置空氣品質監測設施。目前全國共有 7 座特工區，其中3座(離島、臨海、林園)設有光化站各10站，合計28站(2站共站)。

大社工業區監測網-FTIR：參照臨海、林園特殊性工業區監測方式辦理，高雄市於110年1月份完成建置大社工業區監測網，並整合環保局、環保署及經濟部工業區之空品監測數據於「大社工業區空品監測網」，楠梓區五常里測線自103年12月起為每日監測，於110年4月份新增工業區東側(大社區三奶里)OP-FTIR測線，工業區南側測站由111年提前於110年9月底完成架設，開始監測。

## 五、管線洩漏及銹蝕 AI 辨識系統

### (一)即時煙霧辨識系統

環保單位開發數位攝影系統與智慧辨識監控系統，偵測影像中的突發煙霧排放，找出異常排放地點並結合告警系統即時提出警示，並透過模型訓練提升煙霧辨識的精準度。煙霧偵測原理可分為以下三種：

1. 物體動態判定基準：煙霧具有動態且有連續性變化的特性，不為靜態物體，因此可計算影像的動作之移動向量判定。
2. 顏色判定基準：單一色彩可能是煙霧，彩色則不可能，由色度與飽和度套用在煙霧偵測上，判定是否為單色物體。
3. 紋理判定基準：平滑面可能是煙霧，非平滑面則不可能，將影像的灰階值量化，計算統計特徵，判定是否為連續平滑物體。

辨識演算法區分黑煙與白煙，對黑煙的敏感度高易產生誤判，原因主要為振動誤判、雲層反射誤判以及熱氣誤判。針對振動誤判開發振動剔除演算法，以畫面中感興趣區(ROI)影像特徵為標的，若是標的出現振動，將警示視為無效判定。透過黑煙影像辨識技術，智慧監控影像並即時判斷畫面是否有異常影像，若是產生連續性異常訊息，於智慧監控平台顯示並透過Line群組推播服務提供主動預警。異常影像調閱功能及告警流程如圖15及16。



圖 15 異常影像調閱功能

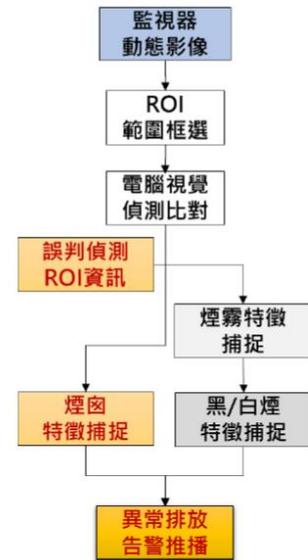


圖 16 異常告警流程

## (二)管線洩漏及銹蝕AI辨識系統

業者架設管線洩漏及銹蝕AI辨識系統，其原理主要結合人工智慧與影像辨識技術，用以即時監測並識別工業管線的洩漏與銹蝕情況。透過安裝於管線周邊的固定式或360度旋轉攝影機，持續進行24小時的影像監控，捕捉高風險管線區域及難以接近的高處管線，並將影像傳送至雲端平台。AI模型對這些影像進行自動化處理，檢測出管線上的異常，例如銹蝕或洩漏，從而實現早期異常預警。

AI模型開發歷程如圖17，包括(1)資料收集、(2)資料處理、(3)AI模型訓練、(4)AI模型驗證及(5)正式上線等五個步驟。該系統的核心技術為AI影像辨識模型，採用例如Cascade R-CNN等物件偵測演算法，經由大量實際的銹蝕與洩漏照片訓練而來，並對影像中的異常特徵進行標註。模型在輸入影像後，會經過多次篩選過程，將可能性較高的異常物件分離出來。每個物件經由卷積神經網路(CNN)處理後，最終回推其在原始影像中的位置，從而準確辨識洩漏點或銹蝕區域。

系統還利用資料擴增技術，通過灰階處理、圖像旋轉、翻轉等方式增強模型的訓練效果，提升其泛化能力和準確性，更有效地應對不同光線、角度及距離下的異常情況，最終達到95%以上的辨識率，減少人為因素對管線檢測結果的影響，提高巡檢的效率和安全性，如圖18。

該系統優點為全天候監測重要製程區域以及高塔、高處等不易巡檢區域，節省人力。缺點為設置成本高，機器學習門檻案例數需求高。

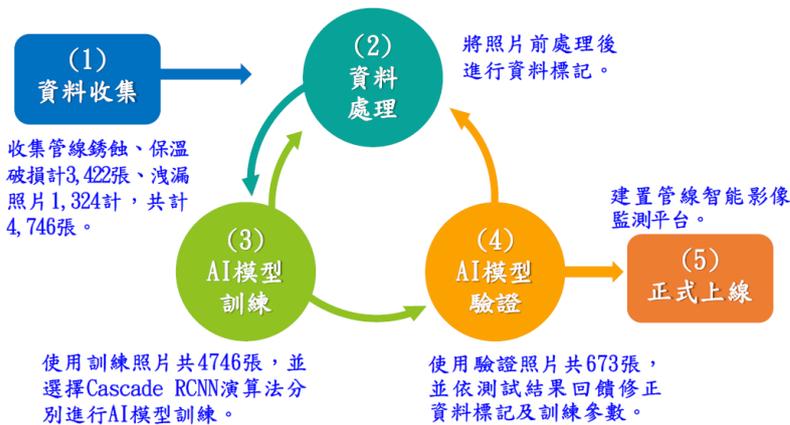


圖 17 AI 模型開發歷程



圖 18 模型持續優化

## 六、AI 智能化溯源系統

### (一)系統架構

考量空污排放影響到廠外的情形往往來得急去得快，為能落實確保空氣品質管理，除嚴密空氣品質監測網絡，即時察覺空品異常變化外，建置智能化空污異常溯源系統，透過電腦比對各廠原物料及產品，再查找廠處即時監測資料(氣體洩漏偵測、燃燒塔等)及環保履歷(環保通報單等)，並輔以氣象風向驗證溯源結果(溯源系統運作流程如圖19)，以縮短查找異常排放源時間，目標在3~5分鐘找出異常廠處，30分鐘內抵廠查核，俾第一時間消除污染異常，避免持續擴大造成工安環保事件，影響廠外民眾、傷害企業形象，同時深入檢討改善各項作業標準流程，由排放源頭進行削減排放及管末有效防制處理，確保異常不再發生。

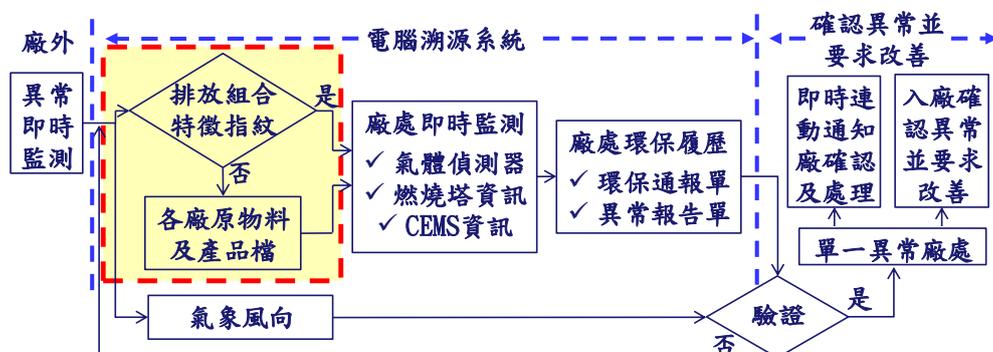


圖 19 AI 溯源流程圖

不斷藉由查核結果及追查經驗回饋溯源系統，透過電腦學習功能完備溯源系統，逐步提升溯源成功率，如圖 20。

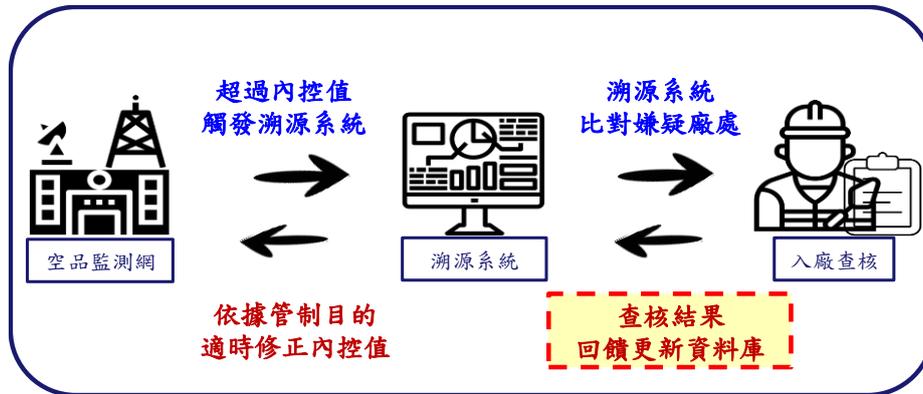


圖 20 系統資料更新

## (二) 案例分析

AI 智能化溯源系統透過綜合分析各種數據，如廠區即時監測、氣象條件、產品及原物料檔案，迅速定位污染事件的可能來源，並提供稽查依據。溯源流程依序為系統觸發、各廠原物料及產品檔、廠處即時監測、廠處環保履歷、氣象風向以及研判嫌疑廠處，以下說明案例：

### 1. 系統觸發

廠外光化站 11/6 22 時測得異戊二烯，測值為 34.92 ppb，超過內控預警值(7.87 ppb)，如圖 21，溯源系統立即自動觸發，判斷嫌疑廠處。

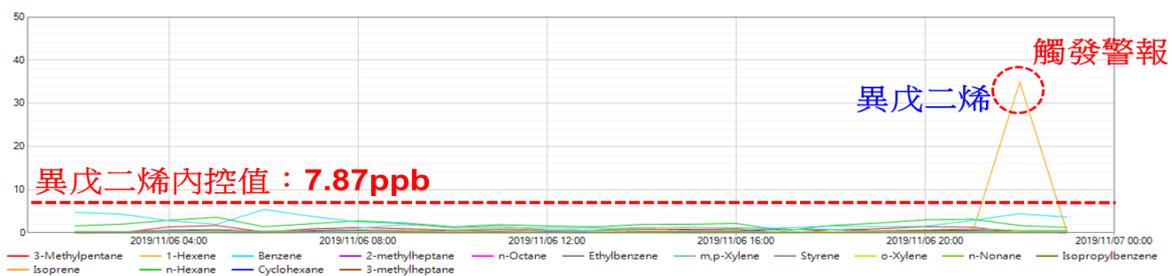


圖 21 監測時序圖

### 2. 各廠原物料及產品檔

系統以異戊二烯尋找原物料與產品資料檔，結果顯示廠區具有異戊二烯之廠處為 A 公司 XX 廠與 B 公司 OO 廠。

### 3. 廠處即時監測

系統檢視 A 公司 XX 廠及 B 公司 OO 廠之即時監測資訊，其中僅有 B 公司 OO 廠於異常時段(22 時)，廠內發生多筆氣體洩漏偵測警報，如圖 22。

警報時間	製程區	偵測器編號	物質代碼	物質名稱	偵測濃度值	單位
2019-11-06 21:58:57.0	7211	HCT-00F	T006	丁二烯	100	ppm
2019-11-06 21:58:40.0	7211	HCT-61D	G075	碳氫化合物	18.074	%
2019-11-06 21:58:03.0	7211	HCT-00F	T006	丁二烯	100	ppm
2019-11-06 21:57:19.0	7211	HCT-00F	T006	丁二烯	0	ppm
2019-11-06 21:55:49.0	7211	HCT-00F	T006	丁二烯	100	ppm
2019-11-06 21:55:15.0	7211	HCT-61A	G075	碳氫化合物	17.693	%
2019-11-06 21:54:37.0	7211	HCT-00F	T006	丁二烯	100	ppm
2019-11-06 21:53:44.0	7211	HCT-61A	G075	碳氫化合物	70.352	%
2019-11-06 21:52:45.0	7211	HCT-00F	T006	丁二烯	100	ppm

圖 22 即時監測

#### 4. 廠處環保履歷

系統於廠處環保履歷中擷取到 B 公司 OO 廠預先通報進行儲槽頂水作業(可能排放 VOCs)，如圖 23，系統判斷可能與本次超過內控值之物種具高度關聯性。

通報編號	發生時間	污染地點	事故異常事項	事故物質	製程名稱	製程編號	因應措施	原因說明
fe10807681	20191105 1727	丁二烯儲 槽區	頂水排放	PY.VOCs			已用N2先行吹管並用水洗管乾淨，並用異味中和劑噴灑，降低異味，若尚有異味逸散，即立即停止作業。	0107設備拆清

圖 23 廠處通報

#### 5. 氣象風向

本案風速 6.56 m/s，系統依據當下風速及風向夾角判定可能影響範圍為 12~60°，夾角為 48°，其中 B 公司 OO 廠恰落於風向夾角內，如圖 24，驗證溯源系統研判之結果。

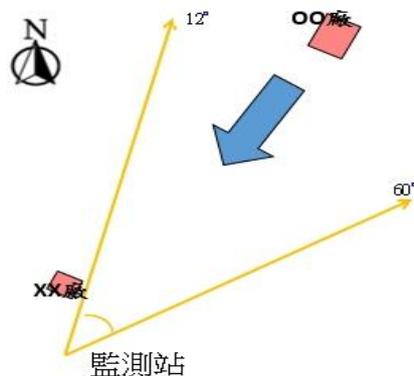


圖 24 污染源、測站、氣象風向相對位置圖

## 6. 研判嫌疑廠處

溯源系統根據上述相關資料，研判本次異常來源為 B 公司 OO 廠，攜帶原物料及產品檔資料、氣體洩漏偵測資料、環保通報單與風向與廠處相對位置圖等四項佐證資料入廠稽核，確認係 B 公司 OO 廠儲槽頂水作業未遵守油水不落地規定。

## 七、各式監控設備導入比例及預期目標

### (一)各式監控設備導入比例

本研究對20家石化業者進行問卷調查，請其填報廠內採用的監測設備種類，分析導入比例如表7。

廠內偵測器中，氣體偵測器為法規列管項目占比達100%，快速質譜儀只針對少數HAPs物種，占比約15%。巡檢設備中，手持式FID、PID及OGI使用普遍其占比可達75%以上，AIC也有40%占比。周界監測中，FTIR占比約55%，現址式GC則約5%。社區監測中，已有55%業者連線特工站數據，以協助廠內洩漏查找。AI部分，管線洩漏及銹蝕AI辨識系統約30%導入，配合AI智能化溯源系統則僅用於某企業。其他另有震動、煙霧、紅外線測溫儀等設備占比約65%以上。

表 7 各式監控設備導入比例分析

分類	設備種類	業者數量	占比
廠內	氣體偵測器	20	100%
	污染源 CEMS	13	65%
	快速質譜儀	3	15%
巡檢	手持式 FID	17	85%
	手持式 PID	16	80%
	光學氣體成像儀(OGI)	15	75%
	超聲波顯像儀(AIC)	8	40%
周界	OP-FTIR	11	55%
	現址式 GC	1	5%
社區	連線特工站等	11	55%
AI	管線洩漏及銹蝕 AI 辨識系統	6	30%
	配合 AI 智能化溯源系統	僅用於某企業	
其他	震動偵測	14	70%
	煙霧偵測器	13	65%
	紅外線測溫儀	13	65%

## (二)預期目標

整理業者之導入智慧監控系統之預期標如表8。A企業採用工安偵測器優化，人工判讀作法，以達到建立防護監測網，縮短判斷影響範圍時間及提升判定防護處理隔離方式之時效。B企業已導入AI智能化溯源系統，目標為3~5分鐘找出異常廠處，30分鐘內抵廠查核。

主管機關於社區監測，當光化站/特工站超過閾值者(與距離、HAPs標準值有關)，目標為100%溯源。B企業與主管機關合作，113年上半年6件異常監測案例有5件即時發現(佔83%)，已向目標邁進。

表 8 導入智慧監控系統之預期目標

公司	導入系統	目標
A 企業	工安偵測器優化，人工判讀	建立防護監測網，縮短判斷影響範圍時間及提升判定防護處理隔離方式之時效。
B 企業	AI 智能化溯源系統	3~5 分鐘找出異常廠處，30 分鐘內抵廠查核。
主管機關	光化站/特工站熱區管理系統	搭配業者廠內系統，超過閾值者(與距離、HAPs 標準值有關)能夠 100%溯源。
B 企業與主管機關合作		113 年上半年 6 件異常監測案例有 5 件即時發現(佔 83%)。

## (三)B企業與主管機關合作-實際成果

環境部部署光化站監控網絡，部分移動站部署於鄰近石化園區，且額外增加標準氣體而有VCM測試數據。環境部與B企業合作，以光化站廠外監測，比對B企業廠內監控系統，來確認污染來源。

以113年1~6月某行動站為例，共有6筆異常監測案例(VCM> 2ppbv，標準值20ppbv)。其中4個案例為隨機工業排放(Stochastic Industrial Sources, SIS)，佔比為67%。而業者即時發現的案例有5件，佔比為87%。未即時發現的案例，其特徵為隨機工業排放、低濃度洩漏、高架元件，且過去未發生過。隨後依照監測指紋特徵限縮查找範圍後，始得發現。

本案例經驗顯示，多層次且完整的污染監測網有利於污染追查和即時掌握異常排放情況，而隨機工業源(SIS)的逸散排放變異大且檢測困難，更需要業者強化廠內監控系統。本案例顯示，現行工安偵測器多設於地面以保護廠內勞工，廠內人員洩漏巡檢也多針對地面洩漏源，對於高架元件或設備之洩漏監控存在不足之狀況，可通過在高處設置快速質譜儀的偵測點等措施，或結合AI辨識系統來進行監測，提升工安和環保管理的效能。

## 八、結論與建議

- (一)本研究透過問卷調查，掌握石化業者採用的多層次監測技術，包括製程區氣體洩漏偵測、員工手持式巡檢設備、廠區及廠外監測設施，從而建立起完整的防護網，有效提升監測的廣度與深度，可供國內各業者參採。
- (二)目前針對高架管線洩漏難以檢測的問題，可以藉由在高處設置取樣管線連接快速質譜儀等設施，結合AI辨識系統來進行監測，從而即時發現並解決問題。
- (三)藉由AI技術的導入、以大量案例供AI系統調教與學習下，以讓後續異常監測值發生時，AI系統能更迅速、精確的掌握洩漏來源，加速通知業者妥處，可顯著提升追蹤與查核的效率。
- (四)AI需要有大量資料來源輸入給機器學習與研判，其中目前各業者最缺的就是基礎資料的建置與跨單位的整合，例如維修資料的通報、不同監測網之間的橫向整合。透過系統整合，可達事半功倍。
- (五)有關本研究各層次監測技術之投入成本及效益分析，建議未來可針對各石化業者之製程特性、歷史洩漏情形及廠區空間分布深入探討，以讓業者設置時有更多的評估依據。

## 九、參考文獻

1. Thoma, E.; George, I.; Duvall, R.; Wu, T.; Whitaker, D.; Oliver, K.; Mukerjee, S.; Brantley, H.; Spann, J.; Bell, T.; et al. Rubbertown Next Generation Emissions Measurement Demonstration Project. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2019, *16*, 2041. <https://doi.org/10.3390/ijerph16112041>
2. U.S.EPA, Next Generation Emission Measurement (NGEM) Research for Fugitive Air Pollution
3. 環境部，空氣品質監測網，<https://airtw.moenv.gov.tw/>。
4. 環境部，特殊性工業區空氣品質監測管制資訊網，<https://aqmsopen.moenv.gov.tw/>。
5. 高雄市，大社工業區監測網，[https://aqmc.kcg.gov.tw/AirMonitor/Monitor\\_index](https://aqmc.kcg.gov.tw/AirMonitor/Monitor_index)。
6. GB / T 50493-2019 石油化工可燃气体和有毒气体检测报警设计标准。

7. 王信凱、吳宜展、吳宗進，六輕工業園區建構完整空氣品質監測網絡，工業污染防治第 146 期，2019。
8. 吳宜展，台塑企業麥寮園區空氣品質維護管理，國際氣膠研討會，2024
9. 朱國棟、游逸駿，質譜儀用於環境氣體偵測之可行性探討，勞工安全衛生簡訊，第 51 期，2002。
10. 楊政育、張世昌、黃建元、盧建榮，台塑公司空氣污染防治成果及減量經驗分享，工業空污減排及製程技術改善與管理成果發表會，2013。
11. 台塑企業，管線洩漏及銹蝕 AI 辨識系統，麥寮六輕園區台塑企業所屬工廠總體檢成果發表會，2021。
12. 台塑企業，全面監控守護好空氣-麥寮園區空氣品質管理作為，<https://www.fpg.com.tw/esg/tw/news/issue/143>。
13. 長春人造樹脂廠，國家職業安全衛生獎，<https://www.osha.gov.tw/>。
14. 李其霈、盧彥廷、郭子豪、曠永銓、戴忠良、謝仁碩，建構遠端監控系統即時管理石化業異常排放，中興工程季刊，第 163 期，2024 年 4 月。
15. 盧彥廷、李其霈、郭子豪、陳滄欽、戴忠良、謝仁碩，以光化站物種共析特性精進石化業有害空氣污染物逸散管理之研究，環境調查年報，2023。
16. 盧彥廷、李其霈、郭子豪、戴忠良、江勝偉，升級 NGEM 光化站監控 HAPs-以氯乙烯製程為例，環工研討會，2024。
17. 環境部環境管理署，北部地區固定污染源運用科技工具與 AI 智能化查核計畫，112 年 12 月。



# 半導體封裝電鍍污泥資源再利用技術開發

王智滢\*、蔡旻杰\*\*、彭柏頤\*\*\*、黃任榆\*\*\*\*

## 摘要

電鍍廢水(Plating Wastewater)為半導體封裝製程用於增強晶片導電性和抗氧化性的過程而產生，其中含有高濃度的重金屬離子(10~500 ppm)，除對環境造成影響，亦具備經濟價值。應用 pH 調整、管式膜(Ultra Filtration, UF)及逆滲透膜(Reverse osmosis, RO)等處理程序，來提高水資源的回收率和獲取低雜質且高純度的污泥，降低環境污染風險，從而實現資源的有效利用。

本資源再利用技術專注於開發電鍍污泥中的無機金屬，特別是濃度最高之銅(Copper, Cu)、錫(Tin, Sn)、鎳(Nickel, Ni)等金屬離子，將其製成具備超大比表面積、高孔隙率、寬敞內部空間及外部通道的金屬有機框架材料(Metal Organic Frameworks, MOFs)，並評估對溫室氣體中二氧化碳(Carbon Dioxide, CO<sub>2</sub>)的捕捉效益，進一步提高資源再利用的效率，同時減少對環境的影響。結果顯示，利用熱重分析儀(Thermogravimetric analysis, TGA)進行 CO<sub>2</sub> 吸附測試，製備電鍍污泥複合材料 ES-MOFs 對 CO<sub>2</sub> 吸附量為 2.3%(重量百分比，相當於 ES-MOFs 對 CO<sub>2</sub> 吸附量為 23 mg/g)，經五次循環吸/脫附測試，此材料具有可重複性吸/脫附能力，且有優異的 CO<sub>2</sub> 吸附效能，是一有高度應用潛力的負碳材料。此外，本技術每年可減少有害事業廢棄物 50 噸/年、減少碳排放量 1.5 噸/年及增加再利用材料 5 噸/年，不僅促進技術創新思維，實現廢棄物減量與資源回收再利用，落實環境友善達到永續發展之循環經濟。

【關鍵詞】電鍍污泥、金屬有機框架、碳捕捉、資源再利用

---

\*矽品精密工業股份有限公司 資深工程師

\*\*矽品精密工業股份有限公司 技術副理

\*\*\*矽品精密工業股份有限公司 技術經理

\*\*\*\*矽品精密工業股份有限公司 副處長

## 一、前言

半導體封裝製程中的廢水問題一直是製造業中的一大挑戰，主要因含多種成分、濃度及物化特性皆為不同，如：矽廢水、硼廢水、有機廢水及電鍍廢水等。其中電鍍廢水(Plating Wastewater)為增加晶片導電性和抗氧化性的過程所產生之廢水含有高濃度的重金屬離子，如銅(Copper, Cu)、錫(Tin, Sn)、鎳(Nickel, Ni)等，濃度通常在 10~500 ppm 之間。這些重金屬離子不僅對環境造成污染，還可能對生態系統和人體健康產生嚴重影響。然而，這些重金屬離子同時也具有一定的經濟價值，如果能夠有效處理、回收或再利用，將有助於減少環境污染，同時實現資源的有效利用。

## 二、電鍍污泥現況

### 1. 電鍍污泥產出流程

傳統上，半導體製造業通常使用化學混凝加沉澱的方法來處理電鍍廢水。在這個過程中，混凝劑被添加到廢水中，與其中的重金屬離子反應，形成沉澱物，並通過固液分離的過程，沉降淨化廢水與產出重金屬污泥。然而，這種方法存在一些問題，如添加的混凝劑中常含有鐵鹽、鋁鹽等雜質，這些雜質會與金屬離子形成雜質沉澱物，降低了重金屬的純度和回收率，從而影響了回收價值，圖 1 為化學混凝沉澱處理產出之電鍍污泥流程。

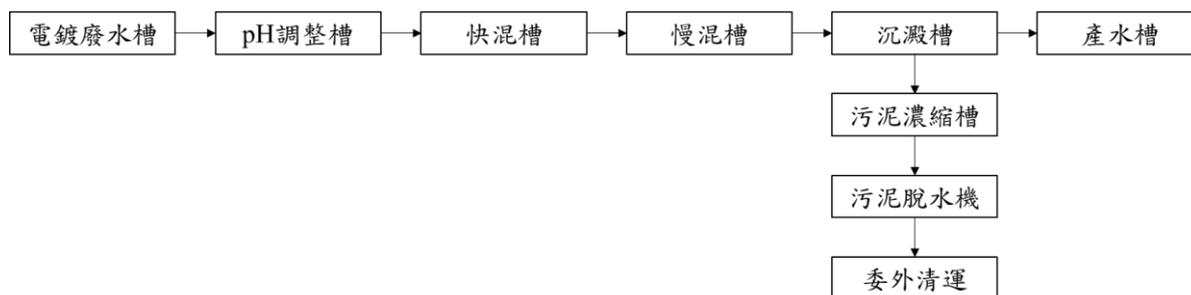


圖 1 電鍍污泥產出流程

### 2. 電鍍污泥處理方法

依據害事業廢棄物認定標準規定：電鍍製程中所產生的廢水污泥皆屬有害業廢棄物，需委託合法廢棄物廠清除並支付污泥清理費用，後續以固化、電解及融熔等方法處理。固化處理係利用固化劑、添加劑與有害廢棄物混合，有害成分經物化反應穩定於晶格中或包覆於惰性物質中，從而降

低其流動性和可溶性；電解處理為利用置換、電解及結晶等程序，將電流通過污泥，使其中的重金屬離子還原為金屬形態，進而分離和回收；融熔處理則於高溫下熔化，重金屬成分轉化為金屬或合金形式，從而實現分離和回收。

### 三、半導體封裝電鍍污泥資源再利用技術

#### 1. 電鍍廢水回收系統

為解決化學混凝沉澱法產出之電鍍污泥雜質問題，本廠針對電鍍廢水採用回收系統進行廢水回收與污泥富集，其處理流程包含 pH 調整、超濾 (Ultrafiltration, UF) 和逆滲透 (Reverse Osmosis, RO) 等單元，除可提高水資源回收率，並取得高純度污泥提升再利用，從而實現了資源的有效利用，電鍍廢水回收系統流程圖如圖 2 所示。

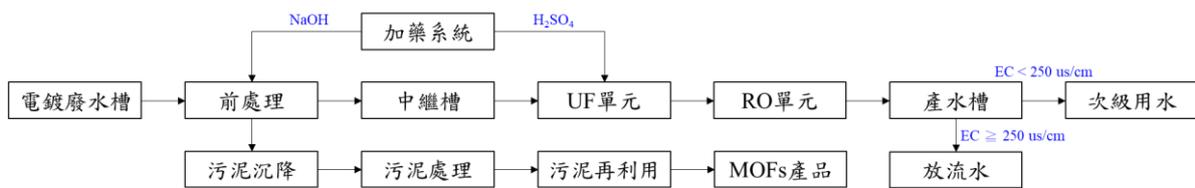


圖 2 電鍍廢水回收系統流程圖

#### 2. 電鍍污泥再利用技術

本廠著重電鍍污泥處理，通過對污泥富集使其濃縮純度提高，從而減少後續處理的成本與資源消耗。針對污泥中的無機金屬，特別是銅、錫、鎳金屬(銅、錫、鎳為濃度前三高之金屬元素)，將其製成金屬有機框架材料(Metal Organic Frameworks, MOFs)，並評估其對於溫室氣體二氧化碳(Carbon Dioxide, CO<sub>2</sub>)的捕捉效益，進一步提高資源再利用的效率，同時減少了對環境的影響，圖 3 顯示電鍍污泥再利用技術程序。

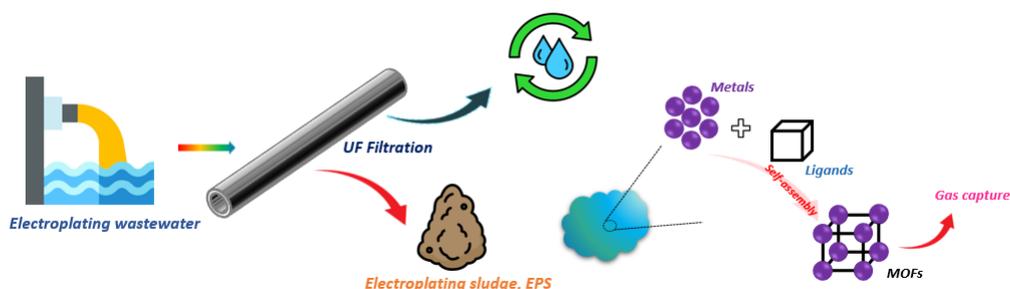


圖 3 電鍍污泥再利用技術程序圖

### 3. 污泥再利用技術開發

本技術於實廠應用前先進行開發測試，探討其再利用過程中可能遭遇之困難和問題，進一步修正污泥複合材料 ES-MOFs 產製條件與材料特性鑑定，並評估製備 ES-MOFs 應用於吸附 CO<sub>2</sub> 效能，圖 4 為污泥再利用技術開發流程。

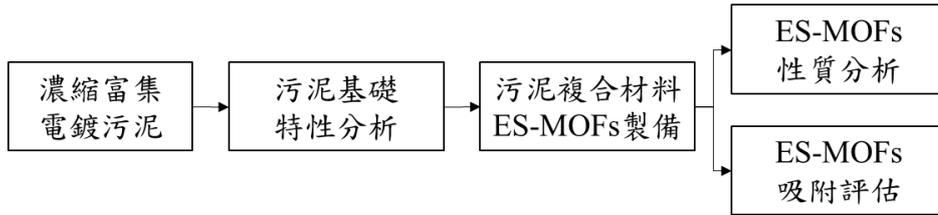


圖 4 電鍍污泥再利用技術程序圖

#### (1) 污泥基礎特性分析

首先將濃縮富集之電鍍污泥經煅燒處理去除水分與揮發性物後，利用掃描式電子顯微鏡(Scanning electron microscopy, SEM)觀察表面型態，由圖 5 之 SEM 圖可以觀察到經煅燒後污泥呈現顆粒狀。使用能量散射光譜儀(Energy Dispersive Spectrometer, EDS)進行定性或半定量成分分析，由圖 6 之 EDS 分析圖譜顯示主要的金屬成分為 Cu 和 Sn 分別佔總重的 38.8% 及 14.6%。透過 X 射線繞射儀(X-ray diffractometer, XRD)圖譜比對 CuO 與 SnO<sub>2</sub> 的 XRD 分析圖譜，可以觀察到污泥含有 CuO 和 SnO<sub>2</sub> 的成分(如圖 7 顯示)。最後，應用傅立葉轉換紅外光譜分析(Fourier-transform infrared spectroscopy, FTIR)分析表面官能基團的變化，由圖 8 之 FTIR 分析圖譜可知 1051 cm<sup>-1</sup> 區域附近的峰值顯示出與 Cu-O 鍵相關的不同類型的彎曲振動，而 1680 cm<sup>-1</sup> 區域附近的峰值驗證了 Cu-O 鍵的伸縮振動。

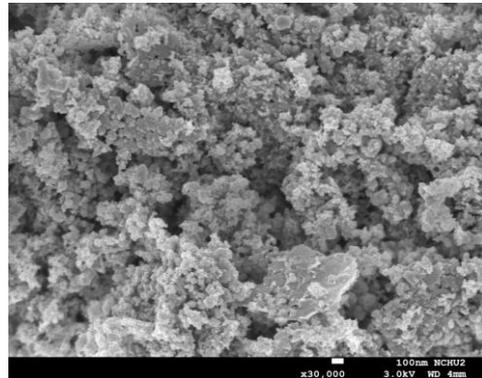
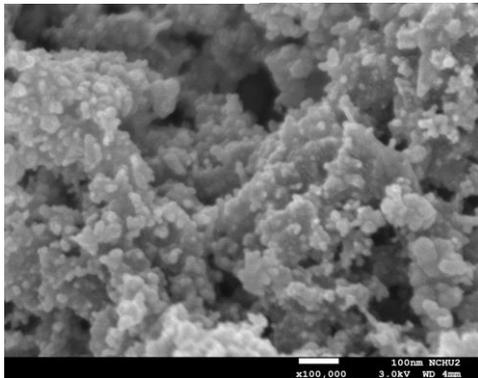


圖 5 電鍍污泥 SEM 分析圖

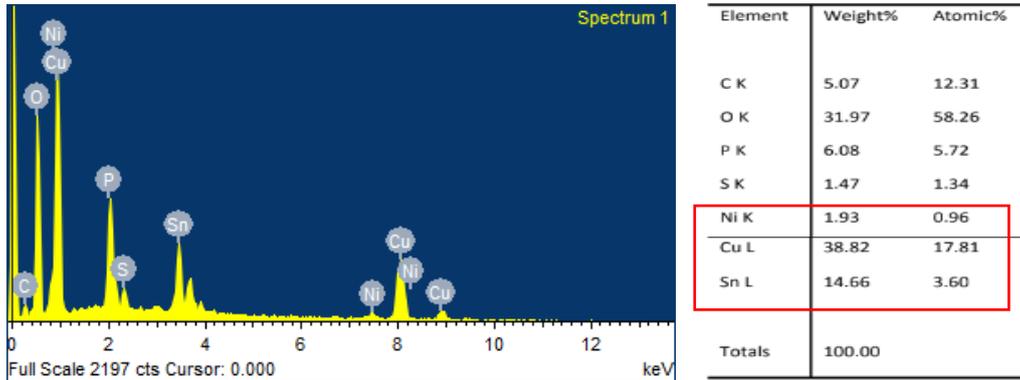


圖 6 電鍍污泥 EDS 分析圖

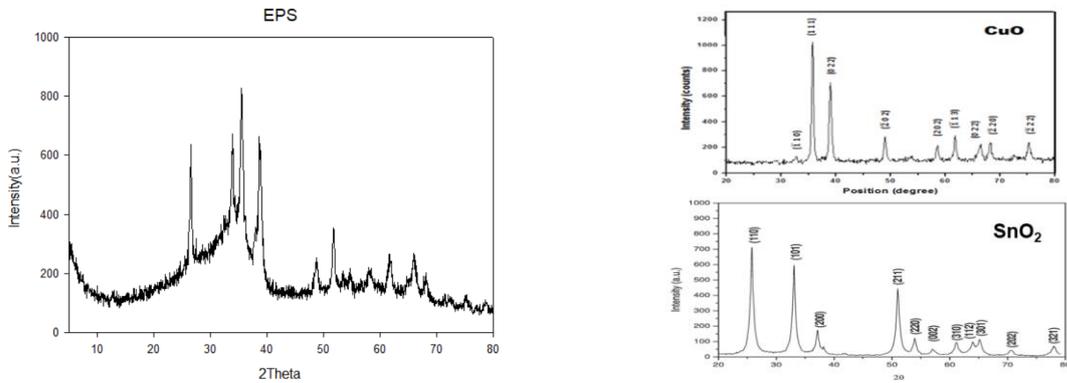


圖 7 電鍍污泥 XRD 分析圖

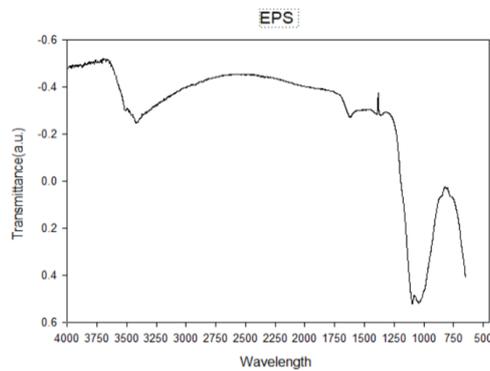


圖 8 電鍍污泥 FTIR 分析圖

(2) 污泥複合材料製備

表 1 污泥複合材料製備方法

MOFs	Metal cluster	Organic ligand	溶劑	反應	洗滌	乾燥
ES-MOFs	Electroplating Sludge(ES)	H <sub>2</sub> BDC	DI 水 Ethanol DMAC	140 °C 24 h	DI 水 Ethanol	80 °C 12 h

本技術先利用鹽酸(HCl)萃取電鍍污泥中重金屬離子作為中心金屬，與有機配位基對苯二甲酸(H<sub>2</sub>BDC)藉由溶劑熱反應合成電鍍污泥金屬有機框架(ES-MOFs)，製備所需材料如表 1、溶劑熱合成法製備 ES-MOFs 如圖 9。

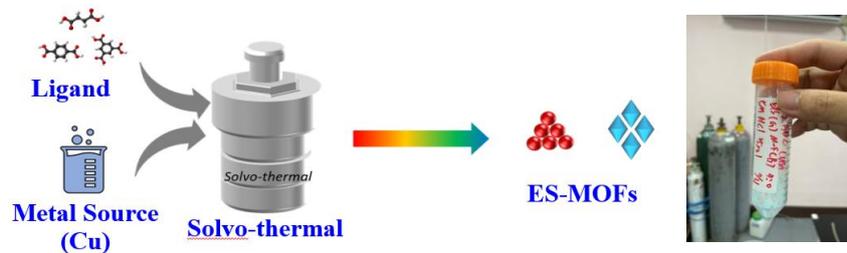


圖 9 溶劑熱合成製備 ES-MOFs 圖

### (3) 污泥複合材料 ES-MOFs 性質分析

由圖 10 透過 SEM 觀察 ES-MOFs 表面形態呈現片狀堆疊。另圖 11 之 EDS 分析圖譜結果顯示，產製 ES-MOFs 之後只剩下銅元素。而圖 12 之 XRD 分析圖譜可以觀察到 ES-MOFs 主要特徵峰出現在  $2\theta = 9.3^\circ$ 、 $12.0^\circ$ 、 $16.3^\circ$ 、 $17.5^\circ$ 、 $20.3^\circ$  和  $25.6^\circ$ ，這些峰值與 Cu-BDC 相似。最後，圖 13 之 FTIR 分析圖譜可知在  $1569$ 、 $1396\text{ cm}^{-1}$  處顯示出與配位羧酸的非對稱和對稱伸縮模式相關的高強度峰； $1025$ 、 $734\text{ cm}^{-1}$  處的弱窄帶分別歸因於芳香環的  $\delta(\text{C-H})$  和  $\gamma(\text{C-H})$  振動。因此，芳香環的存在表明有機配位基存在於材料中。 $1505$ 、 $775\text{ cm}^{-1}$  處的帶歸屬於苯環的振動。 $2926\text{ cm}^{-1}$  處的峰值歸因於 DMAC 的脂肪族(C-H)非對稱伸縮振動，而在  $3400\sim 3600\text{ cm}^{-1}$  範圍內的寬峰可能由於結晶水或羧基的酸性 OH 引起。透過 FTIR 和 XRD 分析可以得知 ES-MOFs 與 Cu-BDC 相似度極高。

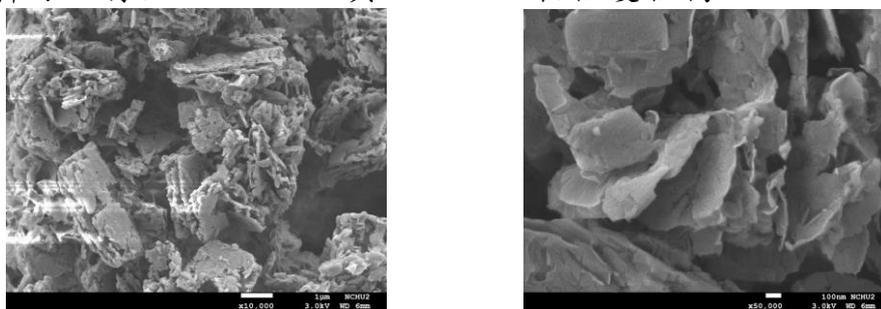


圖 10 電鍍污泥複合材料 ES-MOFs 之 SEM 分析圖

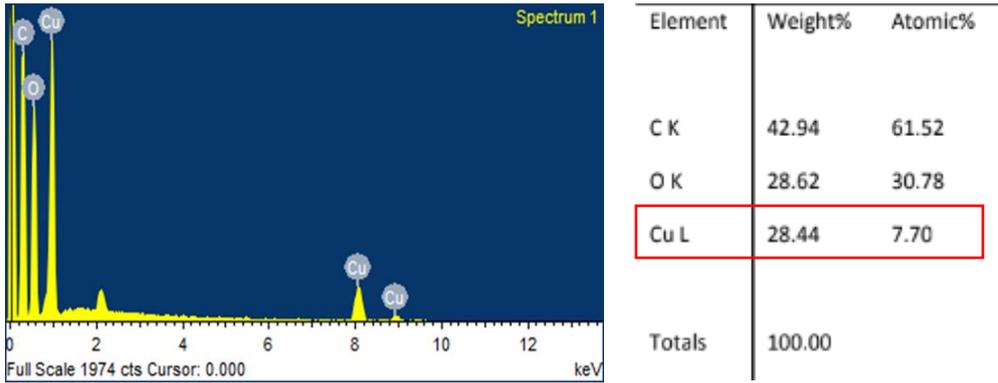


圖 11 電鍍污泥複合材料 ES-MOFs 之 EDS 分析圖

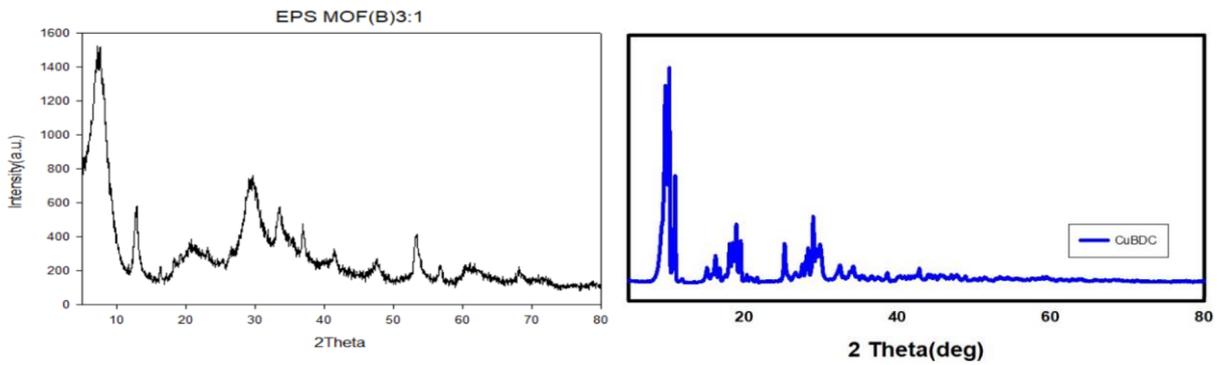


圖 12 電鍍污泥複合材料 ES-MOFs 與 Cu-BDC 之 XRD 分析圖

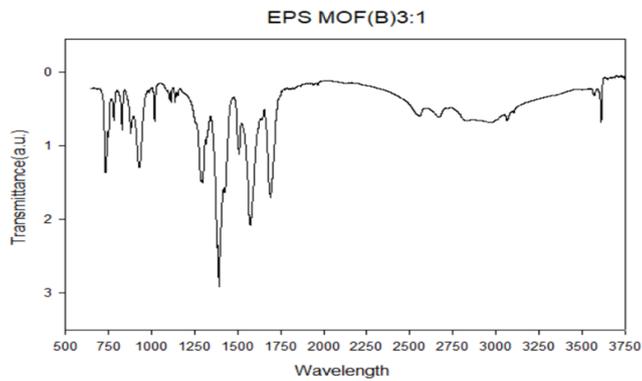


圖 13 電鍍污泥複合材料 ES-MOFs 之 FTIR 分析圖

#### (4) 污泥複合材料 ES-MOFs 吸附特性

圖 14 顯示利用熱重分析儀(Thermogravimetric Analyzer, TGA)對製備的 ES-MOFs 材料進行測試，該儀器可測量樣品在不同溫度下的重量變化，從而評估其不同溫度下的吸附性能和熱穩定性。

$$\frac{(W_{max}-W_0)}{W_0} \times 100 \text{ (wt \%)} \dots\dots\dots \text{equ(1)}$$

W<sub>max</sub> : t<sub>s</sub> 時間後材料達飽和吸附的吸附劑重量(mg)

W<sub>0</sub> : 初始吸附劑重量(mg)

Mole(gas) : CO<sub>2</sub> 之莫爾質量(44 g/mole)

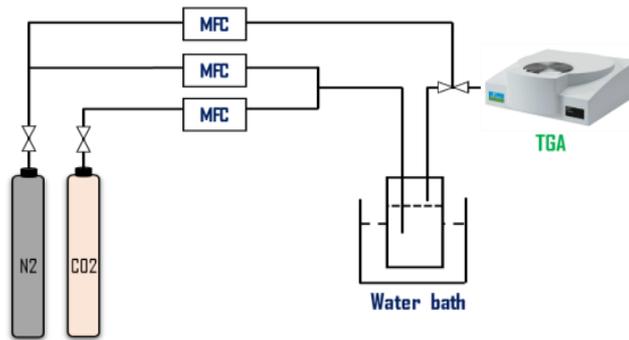


圖 14 CO<sub>2</sub> 吸附測試設備圖

本測試透過 TGA 進行 CO<sub>2</sub> 吸附測試，圖 15 為 ES-MOFs 於 30°C 下吸附曲線圖，經過 120 分鐘吸附量為 2.3%(重量百分比)，相當於 1 g 的 ES-MOFs 對 CO<sub>2</sub> 的吸附量為 23 mg。後續進行吸/脫附循環測試，通入 CO<sub>2</sub> 進行吸附 20 分鐘後，經由高溫 100°C 並通入氮氣脫附後，由圖 16 可知，ES-MOFs 經過五次吸/脫附循環後，對 CO<sub>2</sub> 吸附量仍維持 95% 以上吸附量，顯示製備之 ES-MOFs 可重複使用，是一具有可持續性且為可循環利用之吸附材料。

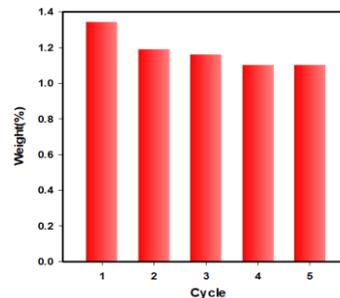
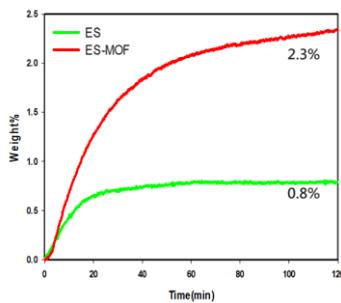


圖 15 ES-MOFs 對 CO<sub>2</sub> 吸附測試 圖 16 ES-MOFs 對 CO<sub>2</sub> 吸/脫附循環

## 四、結論

因應高科技產業提倡環境保護、永續經營的趨勢，發展廠內回收技術、資源利用、低碳排放及循環經濟為顯學，本技術著重於電鍍污泥資源再利用，應用污泥中重金屬成分與有機配位基 H<sub>2</sub>BDC 合成製備電鍍污泥複合材料 ES-MOFs，並利用 ES-MOFs 進行碳捕捉，其對 CO<sub>2</sub> 的吸附量為 23 mg/g，達到資源再利用目的。此技術每年可減少有害事業廢棄物 50 噸/年、減少碳排放量 1.5 噸/年及增加再利用材料 5 噸/年，不僅促進技術創新思維，實現廢棄物減量與資源回收再利用，落實環境友善達到永續發展之循環經濟。

## 五、參考文獻

1. Liu, Y., et al., Recovery of copper from electroplating sludge using integrated bipolar membrane electrodialysis and electrodeposition. *J Colloid Interface Sci*, 2023. 642: p. 29-40.
2. Fu, F. and Q. Wang, Removal of heavy metal ions from wastewaters: a review. *J Environ Manage*, 2011. 92(3): p. 407-18.
3. Sim, S.I. and Y.H. Teow, Integrated Membrane-adsorption system as a sustainable development approach for semiconductor-industry wastewater treatment. *Materials Today: Proceedings*, 2023.
4. Tsai, M.-H., et al., Influence of Al/Fe-based coagulant dosing sequences on floc formation and settling behavior in algae-laden water. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 2022. 8(1): p. 127-138.
5. 施勵行，「重金屬污泥資源化技術發展及潛力評估架構」，工業污染防治 91 期，經濟部工業局，93 年 7 月。
6. 蔡孟裕，「電鍍污泥分流處理合理化探討」，工業污染防治 108 期，經濟部工業局，97 年 10 月。
7. Hou, Z., et al., Facile conversion of nickel-containing electroplating sludge into nickel-based multilevel nano-material for high-performance pseudocapacitors. *Applied Surface Science*, 2021. 538.

8. Younas, M., et al., Recent progress and remaining challenges in post-combustion CO<sub>2</sub> capture using metal-organic frameworks (MOFs). *Progress in Energy and Combustion Science*, 2020. 80.

# 焚化鍋爐灰水洗製作人工砂及紅磚再利用循環技術

陳萬原\*、李宗哲\*\*、宋建財\*\*\*

## 摘 要

崑鼎綠能環保股份有限公司（ECOVE）在資源循環服務領域已有三十餘年的深耕，致力於提升資源回收及再利用的效能。本研究旨在配合政府焚化廠焚化飛灰源頭減量及再利用政策，探討水洗技術及其再利用技術在焚化飛灰處理中的應用。在焚化廠 ROT 案中(以下稱本案廠)，ECOVE 設置了一套先進的鍋爐灰水洗設備，採用重力滴濾水洗技術，並適時添加一定比例的螯合劑，相較採用多段攪拌及搭配脫水機的水洗方式，本技術不僅具備用水量低且維護成本亦較低。研究結果顯示，本技術在低固液比(1:2)操作條件下，便能有效地達成水洗灰氯鹽小於 1% 及重金屬的溶出符合廢棄物有害認定標準，進而提高水洗灰後端的再利用用途。此外，水洗灰進一步經過添加適量黏結劑及胚體增強劑後的再利用產品，可以用於製作人工砂及紅磚等建材產品，其中人工砂可使用於非與鋼筋接觸之混凝土材料或製品或 AC 等，有效地將廢棄物轉化為有價值的產品，同時減少了對天然資源的需求和環境負擔。

【關鍵詞】 飛灰水洗、飛灰再利用、人工砂、製磚

---

\*崑鼎綠能環保股份有限公司 助理總工程師

\*\*崑鼎綠能環保股份有限公司 主任工程師

\*\*\*崑鼎綠能環保股份有限公司 助理總工程師

## 一、前言

焚化爐飛灰主要包括廢熱回收鍋爐灰、半乾式洗滌塔灰及袋式集塵器灰。鍋爐灰指未添加外來物質的飛灰，其形成主要依賴重力和衝擊沉降，此類飛灰通常呈淺土黃色，粒徑較大，形態類似砂粒。反應飛灰則是經消石灰和聚合氯化鋁（PAC）噴注後，過濾捕集的小顆粒飛灰，顏色偏灰白，粒徑較小，且一般含有較高的重金屬、氯鹽與戴奧辛，呈粉狀。

當前台灣焚化廠對飛灰的處理主要採取穩定化後獨立分區掩埋的方式。然而，隨著掩埋場容量接近飽和，以及新設掩埋場面臨的土地取得困難，飛灰穩定化物的處理成本近年顯著上升。此外，長期重金屬溶出風險也使得此議題愈加重要。因此，如何有效減少飛灰產生及改善其處理方式，已成為國內焚化廠面臨的重要課題。

鍋爐灰水洗的主要目的是去除鍋爐灰中水溶性氯鹽及重金屬的含量，以降低其危害性，同時使其符合再生粒料、水泥業或煉鋼業的再利用標準。為在減少水資源使用的前提下達成良好的水洗效果，必須確保灰料與水的充分混合，以使水洗後的鍋爐灰中氯離子含量控制在 $\leq 1\%$ 。這要求在水洗處理的設計和執行中，充分考慮混合效率與水使用量的平衡。

## 二、鍋爐灰水洗系統建置及說明

隨著掩埋場飛灰穩定化物的收容量日益飽和，針對本案廠的鍋爐灰進行了深入調查。結果顯示，該鍋爐灰的危害性成分低，氯鹽含量約為 3%。通過水洗並添加螯合劑，我們能有效去除氯鹽，且該灰中的有害重金屬、戴奧辛及呋喃等成分均遠低於有害事業廢棄物管制標準。經過水洗的鍋爐灰可進行再利用，每天約可減少 6 公噸飛灰需進行固化掩埋處理，這不僅延長了現有飛灰穩定化物掩埋場的壽命，還逐步推進資源循環與零廢棄的目標。

### 1. 現行水洗技術說明

A/B 廠為國內第一代水洗流程，其原理是將飛灰與大量水混合攪拌，將飛灰中可溶解性鹽類溶解至水中，經由版框式脫水設備，將水洗灰含水率控制在 40% 左右，由於水洗灰中仍含有 40% 含鹽類廢水，理論上以稀釋倍數及殘存水分計算水洗灰中之溶解性氯鹽，依據各廠背景濃度設計，單次水洗以水灰比 10-15 倍操作，可達到水洗灰溶解性氯離子低於 1% 的標準。此設計須使用大量水來降低水洗灰中的氯含量。

C 廠是國內第二代水洗流程，其原理與第一代相似，但採用了兩階段式版框脫水設計，此設計能有效降低水洗灰在進入第二段水洗時的氯含量，同時也將水灰比降低到 3 以下，從而減少了廢水的產生。然而，該流程需要增加複雜的脫水攪拌機制及輸送設備，導致操作與維護成本上升。目前，C 廠的水洗灰已申請個案再利用，並送往高溫熱處理業作為製程中的鹼度添加劑，水洗灰的溶解性氯離子設計目標為低於 3% 的標準。此設計能有效降低水資源的使用，並減少污水處理的成本。

鑒於鍋爐灰產量少、透水性佳以及危害性低等因素，本案廠決定捨棄以往的多段攪拌與脫水處理程序，創新地採用滴濾法進行鍋爐灰水洗。這一方法能進一步將水灰比降低至 2 以下，並在同一桶槽中完成水洗與脫水功能，廢水產生量也顯著減少。產生的廢水可直接用於廠內反應灰的穩定化，無需額外的廢水處理設施。這一創新不僅省去了攪拌與脫水機的空間需求，還有效降低了設置及維護成本，操作過程也相對簡單，從而提升了整體效率與經濟性。有關 A/B/C 廠與本案廠的比較彙整如表 1 所示。

表 1 國內現行非灰水洗製程比較

	A 廠	B 廠	C 廠	本案廠
水洗方式	攪拌水洗 (CSTR)	攪拌水洗 (CSTR)	攪拌水洗 (CSTR)	滴濾法 (Leaching)
水洗次數	1 次	1 次	2 次	1 次
水洗液固比	10 倍	15 倍	3 倍	2 倍
水洗灰脫水	版框壓濾機	重力濃縮版框壓濾機	版框壓濾機	重力脫水 7 天熟化
水洗廢水	排放廠內廢水廠處理後排放公共污水下水道	排放廠內廢水廠處理後排放公共污水下水道	興建專用廢水廠處理後排放工業區污水下水道	回用廠內製程
水洗灰溶解性氯離子設計標準	<1.0%	<1.0%	<3.0%	<1.0%

## 2. 重力滴濾水洗技術研發

焚化飛灰水洗的主要目的是分離灰渣中的溶解性鹽類，如 NaCl、KCl 及 CaCl<sub>2</sub>。目前，國內焚化飛灰的水洗程序普遍採用攪拌水洗結合版框脫水法，這一過程類似於製備即溶咖啡的方式：將大量咖啡粉末（即飛灰）與水混合，溶解後形成咖啡液（即水洗水），再用濾紙過濾，留下的固體物為水洗灰，分離的液體則為水洗廢水。這一方法適用於溶質能大量溶解於水的情況。對於鈣系飛灰而言，其溶解率約為 30-40%，減量成效並不

顯著，且在後續需要進行水洗灰的濃縮脫水處理。在技術原理上，連續攪拌槽反應器（CSTR）的水洗技術更適合溶解度高的鈉系飛灰，能更有效地達到預期的水洗效果。這一點在設計與實施水洗流程時需要特別考慮。

本技術試驗對象為本案廠焚化鍋爐灰，有關灰全量分析資料詳表 2，鍋爐灰在焚化過程中隨著煙道氣體附著於粒狀物表面而形成。其特性表現為溶解度僅約 20%，低於混合飛灰，顆粒較大且透水性較佳，類似砂質條件。基於這一特性，本案採用類似濾掛式咖啡沖泡的原理，將溶劑（水）緩慢通過鍋爐灰，從而有效溶出溶解性氯離子。此原理無需大量機械攪拌，水洗過程採用塞流式，濃度梯度和時間之間存在關聯。我們可以通過控制溶劑的通過速度及時間來調整用水量和廢水中的鹽類濃縮濃度，這對於廢水的分流及回收有顯著幫助。這種創新方法能提升水洗效率，並降低整體處理成本。

本滴濾技術利用反應槽錐體設計，處理流程如圖 1 所示，使溶液與溶質接觸平均外，更利用鍋爐灰物理特性達成重力脫水含水率低於 40% 以下成果，大幅降低設備操作與維護成本及所需時間。

本案廠的鍋爐灰經由上述的水洗處理流程並添加螯合劑後，能有效去除鍋爐灰的氯鹽，且其有害重金屬、戴奧辛及呔喃等成分均遠低於有害事業廢棄物管制標準，有關水洗灰的有害事業廢棄物認定檢驗結果詳表 3。

表 2 本案廠鍋爐灰全量分析結果

單位: mg/kg

樣本	矽	總鈉	總鈣	總鉀	總鋅	總砷	總汞	總鉻	總鉛	總鎘	氯鹽(%)	硫酸鹽
1	133,000	17,800	186,000	14,300	6,400	59.2	<0.120	377	297	15.3	3.99	23,200
2	159,000	18,500	176,000	11,300	5,260	<30.0	<0.120	827	351	17.0	2.77	19,000
3	116,000	19,900	203,000	14,500	6,610	<30.0	<0.120	637	270	20.2	4.43	27,600

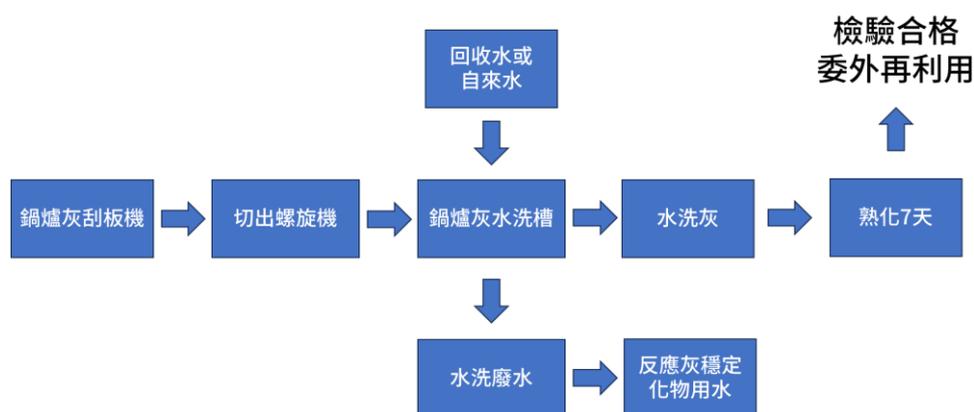


圖 1 本系統處理程序(注灰、滴濾、排灰、清洗)

表 3 本案廠鍋爐水洗灰有害事業廢棄物認定檢驗結果

樣本	總鉛 (mg/L)	總鎘 (mg/L)	總汞 (mg/L)	總鉻 (mg/L)	六價鉻 (mg/L)	總砷 (mg/L)	總銅 (mg/L)	總硒 (mg/L)	總鋇 (mg/L)	氯鹽 (%)	戴奧辛及呔喃 (ng I-TEQ/g d.w)
1	ND	ND	ND	1.930	1.46	ND	0.007	0.019	0.105	0.150	0.163
2	0.099	0.419	<0.0005	0.282	0.26	ND	0.180	<0.100	0.280	0.607	0.184
3	ND	ND	ND	0.732	0.71	0.037	ND	0.010	0.135	0.610	0.010
標準值	5	1	0.2	5	2.5	5	15	1	100	1	1

### 3. 水洗廢水

在比較攪拌水洗法與滴濾法時，在水灰比為 2 倍條件下，攪拌水洗法產出廢水氯鹽平衡濃度為 9,960mg/L，滴濾法產出廢水可濃縮至 78,600mg/L。結果顯示滴濾法在氯鹽的濃縮方面表現顯著，除節水效益外，若未來需進行廢水濃縮處理，建議採用分段收集濃排水的方式，並透過低濃度排水的回用進行水洗。目前，本案廠已使用滴濾法產生的水洗廢水，因廢水量較少，逐步回用於反應灰固化的添加用水，以實現廠內零排放的目標。

本案廠水洗廢水是回用於反應灰固化添加用水使用，為了解水洗廢水的性質，本案已針對廢水進行採樣分析，分析結果如表 4，除六價鉻外，其他項目基本上都可符合工業區的廢水進廠限值，且本案廠水洗廢水並無外排，因此並不無違反任何法令的問題；另針對水洗廢水回用於反應灰固化處理製程的影響，同時設計實驗與原固化處理製程使用回收水進行比對，其分析結果顯示，對於固化物的重金屬溶出濃度及戴奧辛濃度檢出影響不大。

表 4 水洗廢水採樣分析結果

樣本	鉛 (mg/L)	鎘 (mg/L)	總汞 (mg/L)	總鉻 (mg/L)	六價鉻 (mg/L)	砷 (mg/L)	銅 (mg/L)	鋇 (mg/L)	戴奧辛及呔喃 (pg I-TEQ/L)
1	0.27	ND	ND	0.59	0.59	0.0004	ND	0.032	0.291
進廠 限值	1.0	0.015	0.005	1.0	0.25	0.5	1.5		5

### 4. 操作維護成本效益分析

比較攪拌水洗和板框脫水法與滴濾法操作維護費用的差異，以本案廠為例，在硬體設備設置主要差異有攪拌機及脫水機，因此維護成本可節省更換攪拌機葉片及脫水機濾布的費用，另操作上則是廢水處理成本，本案廠廢水直接回用固化製程，其他廠則是排入下水道，除需額外廠內處理廢水外，還須繳納納管的費用。

以 C 廠(假設與本案廠相同容量)與本案廠進行操作維護費用比較說明，若考量操作期間之脫水機濾布與攪拌機的軸心葉片維修費用，以及污水處理費與納管費等相關費用，本案廠每年相對 C 廠的操作維護費用至少可節省約 100 萬元左右，且未計算電費差異。

### 三、鍋爐水洗灰再利用技術

飛灰水洗後之水洗灰再利用技術，目前於國內涵蓋水泥窯、添加藥劑造粒、電弧爐煉鋼、集塵灰高溫冶煉等方式。簡要說明如下：

#### 1. 水泥窯處理作為取代生料

飛灰再利用以水洗灰取代部分水泥生料較常見，將飛灰水洗前處理後取代 1% 水泥生料，利用旋轉窯以高溫 1400°C 煅燒，待冷卻後摻混熟石膏加以研磨，且產品主要成分組成亦無太大改變，而抗壓強度、凝結時間、毒性溶出試驗和水泥廠煙道廢氣分析結果皆符合規定。

#### 2. 集塵灰高溫冶煉作為鹼劑添加

採用鈣系廢氣除酸藥劑(如消石灰)產生之鈣系飛灰，可充分利用其含鈣成分，部分或全部取代既有高溫熱處理設施(如煉鋼業電弧爐、集塵灰高溫冶煉設施等)於製程操作期間所須添加之鈣系鹼劑(生石灰、消石灰)，同時高溫冶煉可將飛灰中戴奧辛物質破壞分解，將有助於飛灰得以較經濟方式進行再利用去化。

#### 3. 添加藥劑造粒作為級配料

將水洗前處理後飛灰經熔融、燒結、混練、壓製等處理後，製成特定大小顆粒之骨材產品，可應用於道路基底級配料、混凝土級配料、水泥磚、紅磚級配料等用途。

本案廠的水洗鍋爐灰再利用方式則是選用添加藥劑造粒後作為紅磚級配料或混凝土級配料，其製程簡要說明如下

#### 1. 製做紅磚

紅磚的主要原料為黏土，成分包括氧化鈣、氧化鉀、氧化鈉、氧化鐵、氧化鎂、氧化鋁和氧化矽。本案廠鍋爐所產生的水洗灰主要成分為氧化鈣、氧化矽、氧化鋁、氧化鐵和氧化鎂，具備直接替代黏土的潛力。此外，添加的坯體增強劑成分包括碳酸鈉、三氧化二硼、硫酸鈉及二氧化矽。經充分攪拌後，將 70% 的水洗灰與 30% 的坯體增強劑製成坯體灰，以作為紅磚部分生料的替代。

在紅磚窯爐內，以煤炭作為燃料，於 900°C 至 950°C 高溫燒製過程中， $B_2O_3$  與水洗灰中的  $CaO$  參與還原反應 ( $CaO + 3B_2O_3 + 7.5C \rightarrow CaB_6 + 5CO_2$ )，生成致密結構的  $CaB_6$  硼酸鹽。此反應有助於降低膨脹係數，改善紅磚在燒製過程中的高溫斷裂模量，提高抗氧化能力及降低吸水率，從而提升紅磚品質。紅磚製程如圖 2 所示，有關紅磚產品如圖 3 所示，其有害事業廢棄物認定檢驗結果詳列於表 4。檢驗結果顯示，不論是重金屬溶出濃度還是戴奧辛濃度均遠低於相關標準。

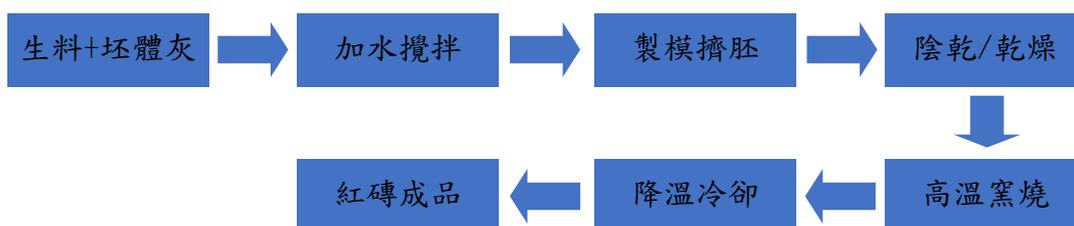


圖 2 紅磚製做流程圖



圖 3 紅磚再利用產品的照片

表 5 紅磚坯體灰再利用試驗成品檢驗數據表

樣本	總鉛 (mg/L)	總鎘 (mg/L)	總汞 (mg/L)	總鉻 (mg/L)	六價鉻 (mg/L)	總砷 (mg/L)	總銅 (mg/L)	總硒 (mg/L)	總銀 (mg/L)	氯鹽 (%)	戴奧辛及呔喃 (ng I-TEQ/g d.w)	燒失率 (%)
1	ND	ND	ND	ND	ND	0.014	ND	ND	ND	ND	0.0002	0.1
2	ND	ND	0.0069	ND	ND	0.043	ND	ND	ND	ND	0.0001	0.1
3	ND	ND	ND	ND	ND	0.026	ND	ND	ND	ND	0.000004	0.1
標準值	5	1	0.2	5	2.5	5	15	1	100	1	1	

## 2. 製做人工砂

水洗灰進廠後，進行氯離子檢測以作為後續投產水洗砂配比的參考。在投產過程中，包括水洗灰的破碎、秤重混料（含玻璃砂、水泥、水、黏著劑及胚體增強劑等）、攪拌、造粒、成型、過篩（及回料），最後在成品暫存區進行 7 日養護及檢測，待檢測結果符合規定後，進行人工砂成品

的銷售。人工砂的製程如圖 4 所示。有關人工砂的毒性特性溶出檢驗結果詳表 6，其結果顯示遠低於標準。

人工砂主要用於非結構性製品，若採用添加人工砂與天然砂混合的工程細粒料，可有效取代因基礎建設需求而不足的天然砂。若工程細粒料再利用產品中的氯含量 $\geq 0.024\%$ ，則可考慮作為部分 AC 細粒料的替代材料，人工砂與 AC 細料詳圖 5。

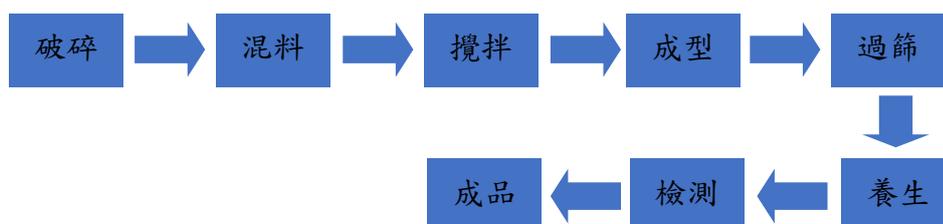


圖 4 人工砂製做流程圖

表 6 人工砂再利用試驗成品檢驗數據表

樣本	總鉛 (mg/L)	總鎘 (mg/L)	總汞 (mg/L)	總鉻 (mg/L)	總砷 (mg/L)	總銅 (mg/L)	總硒 (mg/L)	總銀 (mg/L)	氯鹽 (%)
1	ND	ND	ND	1.379	ND	ND	0.021	0.117	0.140
2	ND	ND	ND	1.292	ND	ND	0.020	0.118	0.139
3	ND	ND	ND	1.460	ND	ND	0.023	0.111	0.121
標準值	5	1	0.2	5	5	15	1	100	1

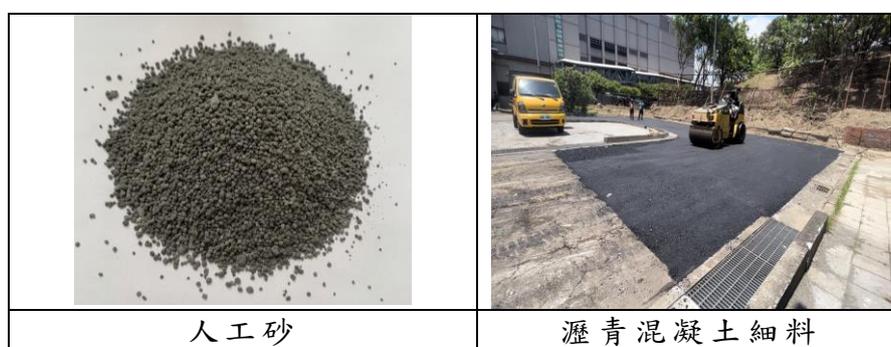


圖 5 人工砂與 AC 細料的照片

#### 四、結論

飛灰水洗技術能有效分離水溶性鹽類（如氯鹽、硫酸鹽等）及部分重金屬，以降低飛灰的毒性。為提高萃取效率，除了水洗，還可採用加酸、加螯合劑等衍生技術。一般而言，水洗液的固比通常介於 3 至 10 之間，具體取決於後續資源化再利用的需求。

焚化反應灰及鍋爐灰中富含鈣 (Ca) 和矽 (Si) 等元素，經過水洗處理後，氯化化合物的晶相基本消失，反應灰仍保留大量的氫氧化鈣，而鍋爐灰則主要保留二氧化矽。這些材料在作為輕質混凝土的替代原料方面顯示出良好的潛力。因此，水洗過程有效去除氯離子，有助於焚化飛灰在輕質混凝土製品中的再利用，並減輕氯離子對混凝土材料耐久性的影響。

## 五、參考文獻

1. 垃圾焚化飛灰特性、處理再利用，環境工程會刊，2014 年 2 月。
2. 水洗焚化飛灰再利用於輕質混凝土之研究，中華民國環境工程學會廢棄物處理技術研討會，2021 年 11 月。
3. 焚化廠整體策略規劃及營運督導計畫，行政院環境保護署，2022 年 12 月。
4. 臺中市建置焚化飛灰水洗廠可行性評估計畫，臺中市政府環境保護局，2022 年。



# 利用不同結晶劑以流體化床均質結晶技術

## 回收電鍍廢水之銅離子

羅宇斌\*、盧明俊\*\*

### 摘 要

隨著 AI 技術迅速發展，科技業相關供應鏈的蓬勃發展，尤其台灣半導體產業的持續躍也進帶動國內工業生產指數，隨著生產量的增加，需處理的廢水量也與日俱增；而隨著台灣環保意識的抬頭，如何資源化製程中產生的高濃度含重金屬廢水，便將成為高度敏感的環境永續議題。本研究便將針對酸性硫酸銅電鍍製程所產生的含銅廢液進行處理，目前環境部將事業污水處理設施之放流水銅限值，訂定為 1.5 mg/L，而在經過電鍍系統後之含銅廢水中的銅濃度，仍殘留約 10,000-15,000 mg/L，既有處理程序為電化學沉積法、化學沉降法、離子交換法等。

然而，前述處理程序仍有各自缺陷得面對，如使用電解法將銅製成銅片後移除，不僅需要耗費大量能源，且殘餘硫酸銅濃度仍有 150-500 mg/L，如化學沉降法所造成大量氫氧化銅污泥，也需消耗大量資源來處理水和處置污泥。故本研究以利用流體化床均質結晶技術(Fluidized-bed homogeneous crystallization, FBHC) 來克服上述缺點，分別以碳酸鈉和氫氧化鈉作為結晶劑，並透過調整酸鹼值、與沈澱物莫耳比 (Molar Ratio) 和金屬本身之截面積負荷 (Cross-surface Loading) 讓過飽和度維持在界穩區 (Metastable Zone)，迫使溶質析出於初成核之均質晶種表面，再藉由流體不斷地碰撞、嵌合，令目標物結晶逐漸顆粒化，除使製程廢水能符合環境部的放流水標準外，更形成低能耗、低含水率且高純度的可回收顆粒，進而實現含銅廢液資源化、廢棄物減量、減少能耗等綠色化學指標。

【關鍵詞】流體化床、均質結晶、碳酸銅回收、混凝作用、電鍍廢液

\*國立中興大學環境工程學系碩士班 研究生

\*\*國立中興大學環境工程學系 特聘教授

## 一、研究方法

本研究使用化學品皆為實驗級（純度>98%）之試劑。如圖一所示，該反應器為實驗室規模之流體化床均質結晶反應器，主要分為下部的結晶區段和上部的出流區段，出流區段的直徑擴張使上升流速下降，部分顆粒能有效沉降回結晶區段繼續生長。進流參數設計隨著實驗時間從 5 mL/min 上升至 15 mL/min，而迴流則配合進流上升從 10 mL/min 至最終的  $128 \pm 5$  mL/min，以確保結晶過程中的污泥能適當保存於反應器中成長。

為配合電解水樣實際情形，故將濃度設定為 6.29 mM，使流體化床單位截面積負荷量固定於  $1.15 \text{ kg/m}^2\text{h}$ ，再針對莫耳比進行後續討論。從過往以碳酸根做為銅結晶劑的實驗中可知，最佳反應條件的莫耳比落在 1 到 2 之間，故本實驗將從中尋求操作參數；而 pH 值將設立六個點 6/6.5/7/7.5/8/9 來觀察分析，在不同 pH 值下，碳酸根與銅離子之間結晶的變化關係，並以碳酸根沉降為基礎去比較氫氧根對銅離子的最佳處理條件，最後以實廠電鍍廢水進行最佳條件之驗證並探討其異同。

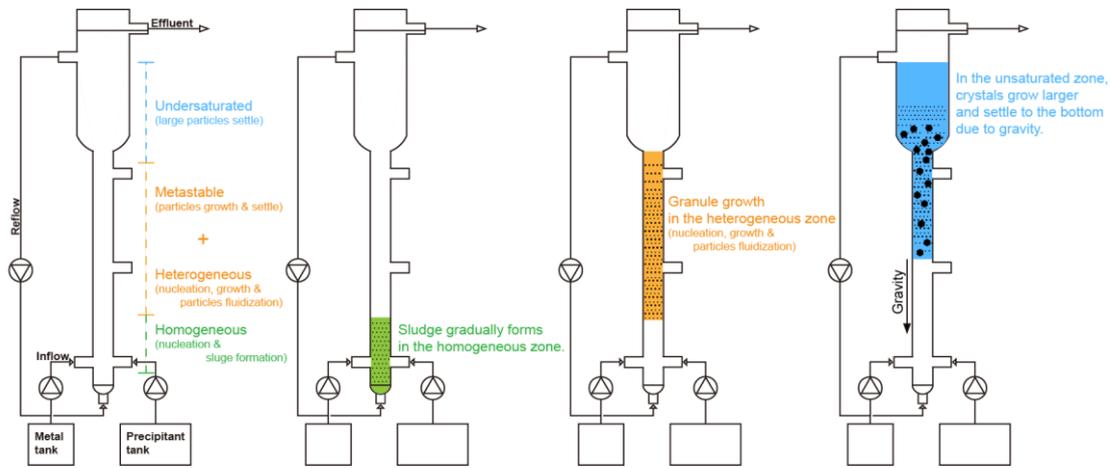


圖 1 流體化床均質結晶反應器示意圖及其功能性說明

其中，銅沉降效果有兩大指標，去除率（Total Removal, TR%）及結晶率（Crystallization Ratio, CR%）。使用原子吸收光譜儀（AAS）從水樣中量化銅濃度，並以計算公式從實驗結果中得出沉降劑對銅的去除率和結晶效率，詳細運算過程如下(1)(2)，（Jayson Sime Jeremias et al., 2024）：

$$TR\% = \frac{[Cu]_0 - [Cu]_d}{[Cu]_0} \times 100\% \quad (1)$$

$$CR\% = \frac{[Cu]_0 - [Cu]_r}{[Cu]_0} \times 100\% \quad (2)$$

[Cu]<sub>0</sub> 指的是原始溶液中的銅離子濃度，[Cu]<sub>d</sub> 為一特定時間下，以 0.45μm 濾紙過濾出流口前之上澄液，所得的溶解性銅離子濃度，[Cu]<sub>T</sub> 則是在一特定時間下，未過濾之出流口前上澄液，包括總懸浮固體物在內的總銅離子濃度。

結晶產物的型態與種類識別，係使用高解析 X 光繞射儀 (HR-XRD) 分析粉末狀樣品，並輔以 X 光光電子能譜儀 (XPS) 和能量散射光譜儀 (EDS) 取得材料表面的元素組成、含量、化學狀態等資訊，最後配合掃描式電子顯微鏡 (SEM) 完成外觀、晶型結構等圖像化的鑑定。

## 二、實驗結果與討論

本研究結果將分別針對流體化床反應器的酸鹼值變化，先針對碳酸根結晶銅離子的結晶效率和總去除率對生成結晶顆粒之影響，和連續偵測流體化床反應器，滾動式更動進迴流對結晶效率與總去除率的穩定性評估，後續再進行以氫氧化鈉為沉降劑的相關系列研究。

### (一) 模擬廢水-碳酸根系統

#### 1. 莫耳比對碳酸根結晶銅離子之影響

為了解在結晶劑的使用量上對銅離子之去除成效而進行本實驗。為配合後續規劃中電鍍廠的實際含銅廢水，故在實驗中所使用的銅來源皆為硫酸銅，並將其離子濃度固定為實廠操作出流水的近似濃度，400 mg/L。

在 Karnsinee Lertratwattana(2019)的試驗中，最適莫爾比(Molar Ratio, MR)為 1.5，意即  $[\text{CO}_3^{2-}]:[\text{Cu}^{2+}] = 1.5$ ，但其使用 0.5 作為區間，略大於其餘試驗，所以本實驗以 0.2 為區間從 1.0 做起，其結果如圖 2 所示。在 MR = 1.2 到 1.6 時結晶率與總去除率分別能達到 98% 與 96% 以上的效果，相距甚小，故考量到環保與成本問題，本試驗便以 1.2 倍的莫爾比，即  $[\text{CO}_3^{2-}]:[\text{Cu}^{2+}] = 1.2$ ，作為最佳莫爾比操作條件。

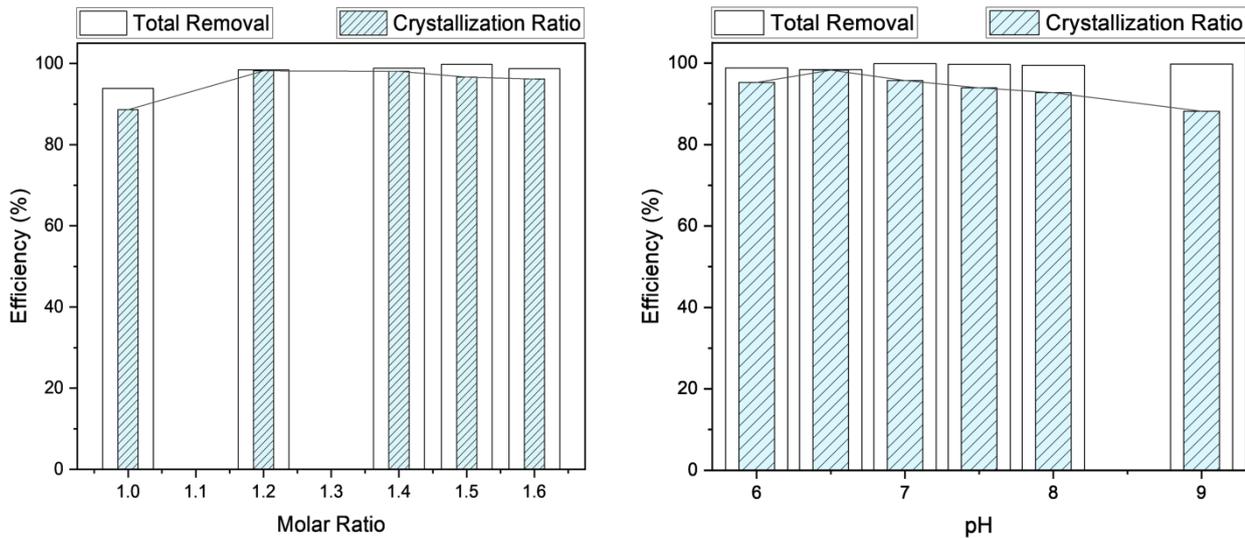


圖 2 不同莫耳比對結晶去除率之變化 圖 2 不同酸鹼值對結晶去除率之變化

## 2. 酸鹼值對碳酸根結晶銅離子之影響

因為結晶系統是建立在過飽和結晶理論之上，因此在流體化床結晶系統中，pH 值的影響是相當重要的，故此作為一操作變因。在操作方面，我們將順著水流方向，於末端出流口前檢測酸鹼值，並採取樣品進行殘留濃度檢測。

由圖 3 可以看出在不同 pH 值之間的差異性，空心柱為總去除率，中間藍色斜柱為結晶率。在總去除率 TR 的部分，因採用該系統已知的最佳莫爾比率 (Molar Ratio) 1.2 倍，因此各組間差距不大，皆能達成 98% 以上的總銅去除率；而從結晶率 CR 的角度就可以看到，在 pH6.5 時結晶率幾乎與去除率相同，意即原水樣中的銅，是經由結晶的方式留存於反應器中，成為晶體的一部分後再被移除，該批次反應器出流水殘存銅濃度僅 3.54 mg/L 總銅去除率達 98.43%，是為最佳酸鹼條件。

## 3. 顆粒組成分析結果

碳酸根系統會隨著不同 pH 值的變化，有不同的組合情形，而系統中銅的結晶產物亦將隨之影響。由上圖 3 可以發現，隨著酸鹼值上升結晶率明顯下降，從 pH 6.5 到 pH 9.0 時，結晶效率從 98.23% 下降至 88.15%，說明酸鹼值更動時，反應器中結晶的狀況亦有所更動。從實驗過程中，透過實驗管柱能發現，內部結晶顏色由孔雀石綠轉為天藍色，在反應器執行 7 日後將顆粒取出，並於攝氏 60 度的烘箱中乾燥後送樣。

### (1) HR-XRD

在圖 4，XRD 的結果中可以看到，pH 6.5 時的結晶顆粒為孔雀石(Malachite)，化學式為  $\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$ ，但在 pH 9.0 所形成的顆粒在烘乾後有氧化的情形，因此形成孔雀石與氧化銅  $\text{CuO}$  的混合顆粒。

### (2) SEM

在下方圖 5 中，我們藉由 SEM 觀察其外觀及尺寸，可以發現在 pH 6.5 時採集之顆粒粒徑遠大於 pH 9.0 的顆粒，大顆粒外部在流體化床中不停滾動、撞擊的過程中，已將外部打磨的相當光滑；而後使用高倍率，透過裂縫觀看到內部結構，顆粒由低 pH 的片狀及針狀變成方形晶格狀，可以得知在不同 pH 下進行的流體化床結晶顆粒與相關結晶特性會有一定的落差，例如結晶效率與不同粒徑所帶來的物理特性。

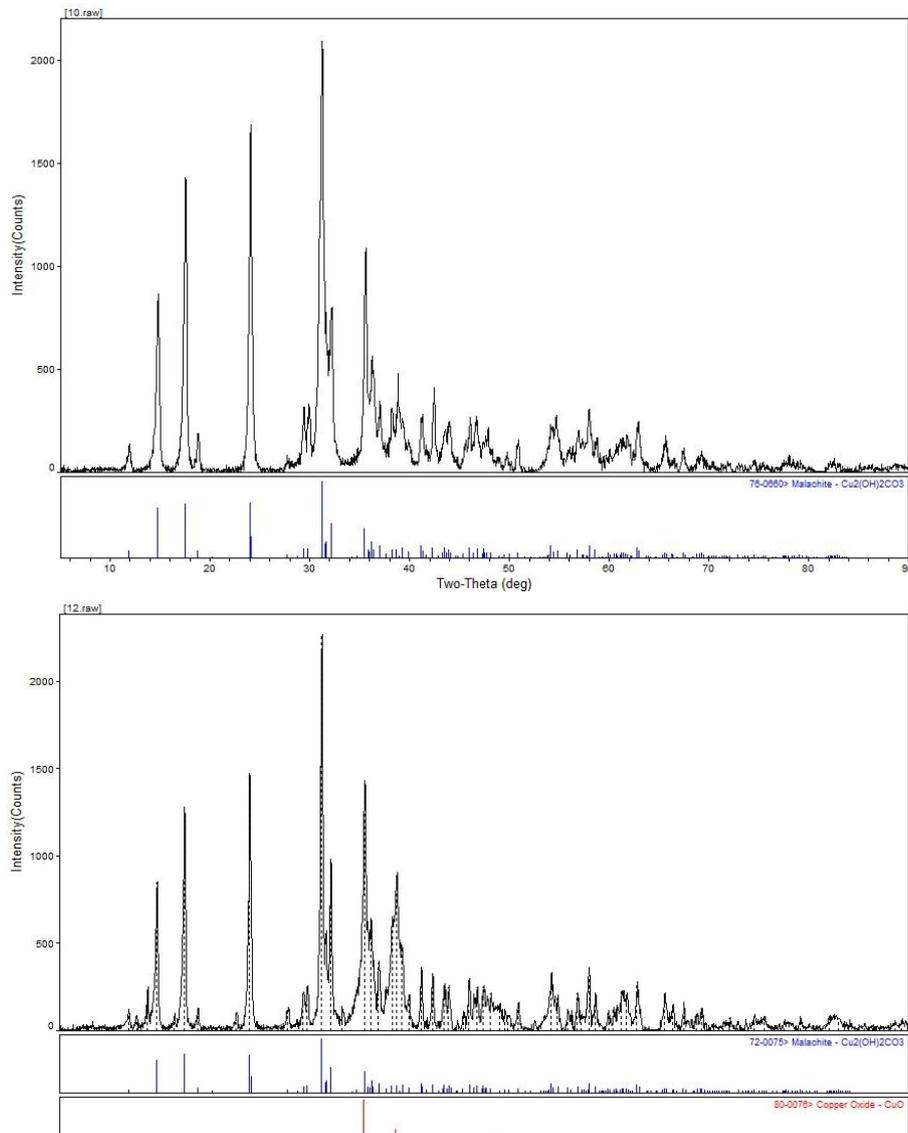


圖 3(上) pH 6.5± 0.3, [Cu<sup>2+</sup>] = 400 mg/L, MR = 1.2 ;  
(下) pH 9.0± 0.3, [Cu<sup>2+</sup>] = 400 mg/L, MR = 1.2

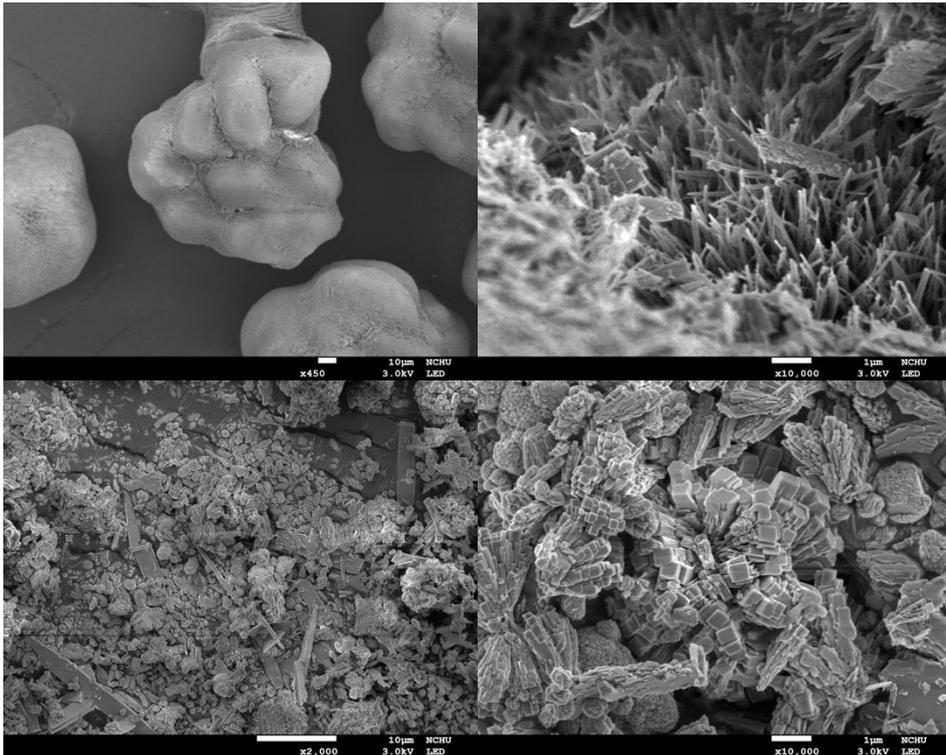


圖 4(左上) pH6.5-450 倍；(右上)pH6.5-10,000 倍；  
(左下)pH9.0-2,000 倍；(右下)pH9.0-10,000 倍

## (二)實廠廢水

### 1. 實廠廢水水質分析

在實廠含銅廢水中，廠商為達到良好電鍍效果，故添加整平劑來改善鍍層的平整性，故此會先利用前述所得的最佳操作條件進行對比，再進行後續討論。

從圖 6 中可以看到，與模擬廢水相比，含有整平劑的實廠水樣在總去除率（%TR）的差異不大，但在結晶效率（%CR）的部分有下滑的趨勢，且透過目視能發現該水樣較為濃稠，故可以推測整平劑對流體狀況造成一定程度的影響。

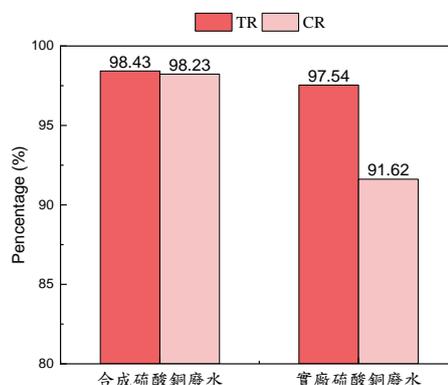


圖 6 合成與實廠廢水去除與結晶率之比較  
[Cu<sup>2+</sup>] = 400ppm, [CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>]/[Cu] = 1.2, pH = 6.5

## 2. 進流量對結晶去除率之影響

流體化床均質結晶反應器，是一種連續性操作水處理設備，啟動後原水便不斷輸入進行結晶，因此進流與迴流量也是其中一個重要的影響因子，故此執行此實驗。

從圖 7 可以看到我們將進流量分成 5、10、15 與每兩日調整一次的 5 到 15 mL/min。而其中可以看到最右側隨時間調整的流量變化不僅能令結晶效率維持在 90%，亦能提高後續處理的水量，故此我們將選用此進流模式來完成後續實驗。

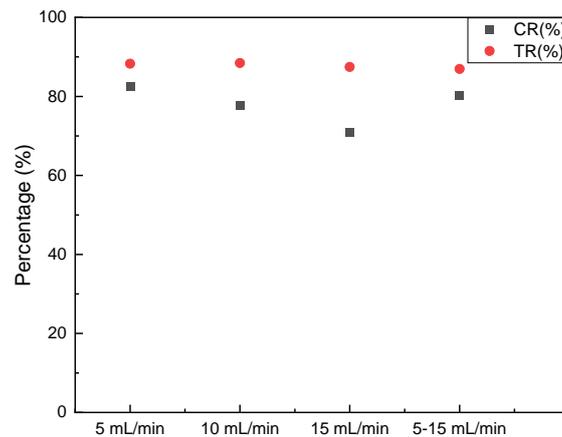


圖 7 不同進流量對去除與結晶率之比較

$$[\text{Cu}^{2+}] = 400\text{ppm}, [\text{CO}_3^{2-}]/[\text{Cu}] = 1.2, \text{pH} = 6.5$$

然而欲追求良好結晶效率，仍需提供完善的生長環境。需要一定時間以穩定反應器濃度以達平衡，我們稱之反應器啟動期。

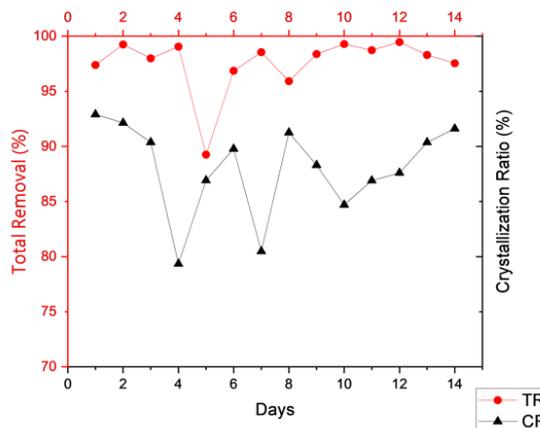


圖 5 實廠廢水連續操作去除與結晶率之比較

上方圖 8 便是以實廠廢水為例，將進流水量從最初的 5 ml/min 以每兩日為單位上升 5 ml/min 至 15 ml/min，並搭配迴流蠕動幫浦將結晶顆粒維持於結晶區段至圖閘口之間，並於七天後保持反應器上升流速在 25 ~ 30 m/h。可以發現隨著操作天數增加，去除與結晶率有逐步穩定的跡象，可知其啟動初期的操作條件對啟動期的長短有顯著的影響，故入流水質條件後，初期進迴流操作手法便顯得十分重要。為將實驗室設備銜接上實廠應用，後續將持續針對進迴流速率進一步規劃實驗設計。

### 3. 顆粒組成結果分析

我們一樣將實廠廢水的結晶顆粒取出後，置入攝氏 60 度的烘箱中乾燥送樣分析。

#### (1) HR-XRD 分析

從圖 9，XRD 的分析中我們可以發現其中所含的物質從鹼式碳酸銅轉變成鹼式硫酸銅，一水藍銅礬（Posnjakite）的形式，其原因推測是我們為提高實廠水樣的低 pH 值而添加大量的整平劑，導致含銅廢水槽中先有了大量氫氧根於其中，待後續混合進結晶劑拉高 pH 值時，Ksp 較低的鹼式硫酸銅便搶先形成於反應器中。

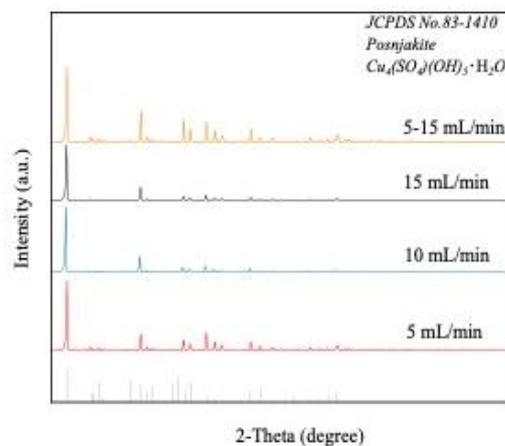


圖 6 不同進流量所造顆粒之 XRD 分析

#### (2) SEM 顯微攝影

在 SEM 中可以看到，圖 10 由實廠廢水所形成的結晶顆粒相較模擬廢水更不平滑，且結晶形狀也變成片狀鑲嵌的外觀，推測是整平劑影響結晶的生長模式。

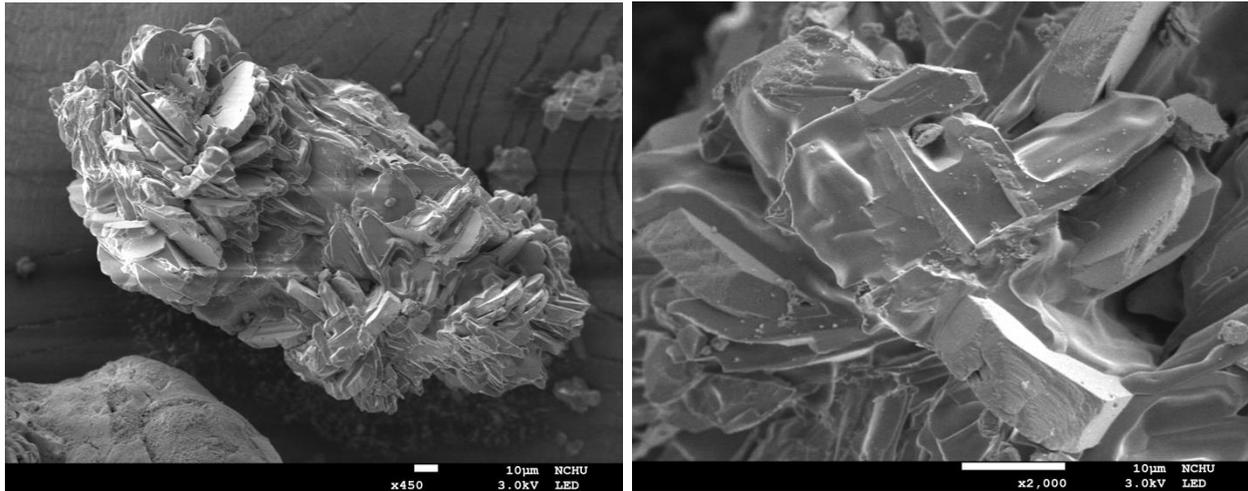


圖 7 實廠廢水結晶顆粒 SEM 圖(左) pH6.5 - 450 倍；(右) pH6.5 - 2,000 倍  
結論

本次研究藉由添加凝結晶藥劑碳酸鈉，以流體化床均質結晶技術回收含銅電鍍廢水中的銅離子，在經過實驗後找出最適操作條件，銅/碳酸根莫耳比 1.2，酸鹼值為 6.5，進迴流條件採以漸進式調整，從 5 ml/min 至 15 ml/min 的操作條件下，最佳總銅去除率 TR 可達 98.43%，結晶率 CR 可達 98.23%，意即大部分銅離子皆是經由結晶形式加以去除。並將相同操作手法來處理實廠水樣，亦能獲得 90% 以上的結晶與去除效率，能證明本處理技術對含銅電鍍廢水，是能有效降解污染並以更為節能的方式進行回收。

後續將接續利用氫氧化鈉作為結晶藥劑，和調整進流濃度改變單位截面積負荷量，進行下一步實驗規劃，尋找本技術於此應用的最適反應條件。可預期其低含水率、高純度之結晶顆粒特性，能為電鍍廠商帶來更加環保節能的綠色技術。

### 三、參考文獻

1. Lertratwattana, Karnsinee, et al. "Recovery of copper salts by fluidized-bed homogeneous granulation process: High selectivity on malachite crystallization." *Hydrometallurgy* 186 (2019).
2. Jayson Sime Jeremias, et al. "Copper recovery from treatment of simulated copper-iron wastewater using fluidized-bed homogeneous crystallization technology" *Journal of Cleaner Production* 436 (2024).



# 半導體廢水廠系統減碳案例分享

黃冠哲\*、柯柏睿\*\*、詹周智\*\*\*、黃俊評\*\*\*

## 摘要

近年來國際企業善盡企業社會責任，制定減碳目標，華邦秉持綠色製造原則，碳排放減量列為公司政策重要目標，從源頭階段透過製程優化及零碳排放氣體導入方式，並與下游廠商合作，以核心能力實現綠色影響力。廢水課秉持當責團隊精神，減少廢水處理過程產生之碳排，努力為環境以及公司盡一份心力。

廢水處理過程產生之碳排主要以化學品、用電與耗材構成，因半導體晶圓製程特性，廢水處理過程需使用大量化學品中和，去除水中有害物質。廢水處理碳排占比中，化學品使用造成之碳排佔比最高，約占廢水處理總碳排 8 成以上，其中氫氟廢水使用之氯化鈣貢獻最高，其次為氫氧化鈉和聚氯化鋁，分別為廢水處理用化學品碳排貢獻前三大項，故欲降低化學品碳排，需針對前三大化學品進行減碳改善。廢水處理碳排總貢獻次之為設備用電，約佔廢水處理總碳排 10%，其中依處理系統區分，貢獻最高為回收水系統、次之為氨氮廢水處理系統，兩系統碳排貢獻總合約佔用電碳排 8 成。其餘廢水處理碳排貢獻來自使用之耗材如 RO，活性碳，濾材，UF 膜...等。

經分析後，聚焦於改善降低氫氟酸廢水處理系統的氯化鈣加藥量，以及檢討氨氮處理系統熱力系統效率，提升回收系統泵浦能效。改善氫氟酸原水至反應系統混和不均問題，氯化鈣加藥模式改用大數據分析結合 AI 控制，改用新型改質 PAC 取代現有 PAC，進而減少化學品用量碳排。氨氮處理系統經檢討熱力系統效率維持，因涉及系統參數複雜暫不調整，既設回收系統轉動設備建置久遠，以提高馬達 IE 等級及更換節能型泵浦，減少回收耗電量，減少廢水處理耗電量減少碳排。整體改善後廢水處理碳排減少 10-20%。

【關鍵詞】大數據分析、AI、改質 PAC、IE 等級、節能型泵浦

---

\*華邦電子 300mm 廠務處廢水課副理

\*\*華邦電子 300mm 廠務處廢水課高級工程師

\*\*\*華邦電子 300mm 廠務處廢水課資深工程師

## 一、前言

隨著全球暖化影響氣候平衡，衍生降雨分布改變、糧食、水資源供應...等眾多的議題，諸多因素共同導致當代面臨的環境保育危機，環境問題並非單一國家能夠處理，必須全球一起面對，故各國間紛紛簽屬國際環境公約，制定環境保護規則。國際企業為善盡企業社會責任，制定減碳目標，華邦秉持綠色製造原則，將碳排放減量列入公司政策重要目標，從源頭階段透過製程優化及零碳排氣體導入方式，並與下游廠商合作，以核心能力實現綠色影響力。

華邦電子為落實碳管理制度，2021年起導入數化化工具輔助減碳政策推動。2022年起與微軟合作建置碳排資訊平台，精準計算 IC 生產過程中使用能源及碳排放量，以計算產品生命週期碳排，並逐年串聯推廣到製程以外其他單位，如採購端工程物料及化學品使用產品成分分類及建立內部碳會計系統，結合搖籃到墳墓的廢棄物清運碳足跡等，完善系統並將資訊平台成果推廣，與 13 家供應商及外包商進行減碳計畫，為達碳中和及降低環境衝擊目標持續努力。

減碳協同作業單位層面甚廣，需成立委員會，分不同的大方向，系統性思考盤查及各單位的協同努力，方可達到減碳政策。

## 二、華邦電子減碳作法概要

### (一)華邦電子台中廠碳盤查說明

欲邁向淨零，碳盤查是企業的減碳基本功。為管制溫室氣體排放，根據環保部《氣候變遷因應法》，碳盤查可分為三類：範疇一為直接排放，範疇二為電力排放，範疇三為間接排放。

以華邦電子台中廠某事業群單位碳排調查說明(該事業群排放量接近台中廠區整廠碳排，以下以事業群代稱)：範疇一(直接排放)包含製程氣體排放溫室氣體(CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O、CHF<sub>3</sub>、NF<sub>3</sub>、SF<sub>6</sub>、C<sub>4</sub>F<sub>6</sub>、C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>)，天然氣燃燒產生之二氧化碳(現址式洗滌塔，鍋爐，VOC 處理及廢水氨氮處理鍋爐)，以及廠內自備柴油發電機，VOC 廢氣燃燒產生之二氧化碳排放，範疇二的電力排放，如現場機台或廠務設施使用外界電力公司電力，電力在生產期間產生之碳排。範疇三(間接排放)之定義較廣，舉例如電力損失，燃料使用，廢水/自來水及廢棄物，製程氣體及化學品(N<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>、光阻液、研磨液、Ar、HF、HNO<sub>3</sub>、H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>、NH<sub>4</sub>OH、IPA、...)，以及廠務化學品(NaOH、H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、PAC、HCl、NaOCl、polymer、....)，以上皆屬間接排放範疇。

彙整統計事業群之碳排，2021 年碳排總量約 467,715 噸。進一步分析不同範疇占比，其中範疇一(直接排放)佔 8.3%，範疇二(電力排放)約佔 6 成(59.3%)，範疇三(間接排放)約佔 32.4%。

事業群於 2021 年訂定目標，預計 2030 年減少 5.69 萬噸(年減少 1.37%)，經歷一年的努力，自 2022 起提高減碳目標，預計每年減少 3%，預期 2026 年前累計減少碳排 6.17 萬噸。

## (二)華邦電子台中廠減碳具體做法

以工廠分區綜覽，兩大能源消耗用電單位:製程端與廠務端，用電佔比約為 55:45，兩者總合約佔全廠 97%。若從生產流程分析，可分為(1)產品研發設計(2)原物料供應(3)人員交通碳排(4)製程端生產製造及(5)廠務端供應支援(6)廢水/廢氣/廢棄物處理(7)其他系統，都有潛在改善碳排的機會點。

為順利推動減碳工作，以華邦電子台中廠為例，環安衛單位成立 ESG 推動小組，包含 ESG 推動經理 1 人。製程單位經理 1 人，追蹤範疇一及範疇三減碳工作，廠務單位 2 人追蹤範疇二減碳工作，轄下各單位負責推動窗口 1 人，每兩週由廠務起會，各單位窗口回報工作進度，包含節能量測方法，節能技術分享及工程進度。當節能改善工程或措施完工後，要求提供改善前後計算或監控圖表數據，完成節能報告。依照設備運轉情形及節能度數，分級審核核對資訊之完整及正確性。落後之進度亦定期在會議上持續追蹤，若有跨年節能案則分為不同年度認列。採購單位要求各單位開立工程案及化學品前，提供使用原物料的材質及碳排係數，要求廠商列出碳排計算資訊來源。資訊部門則建立人員運輸及廢棄物碳足跡登錄作業系統。會計部門則成立碳會計稽核單位，稽核各廠內年度碳排資訊供 ESG 及對外報告使用。

為達到永續減碳目標，除逐年推動減碳計畫，掌握現況亦為重要因素。華邦電子導入 ISO50001，建立各項耗電設備的基線，定期追蹤高度耗電設備，若異常偏離基線，採異常追蹤及矯正措施，避免異常設備系統影響年度節電成效。

大數據數位轉型等未來發展議題，在能源管理及減碳應用亦扮演相當重要角色。藉由內部碳盤查，碳足跡及內部碳會計制度及登錄作業系統建立，有助於精確掌握碳排資訊。大數據分析技術，隨著統計分析軟體及資訊收集系統建置及模型訓練，再結合 AI 伺服器應用逐漸導入廠務節能，目前業界及廠內成功案例有冰水主機 AI 智慧空調優化，有效降低空調系統能耗。另一發展應用於廢水氯化鈣加藥系統控制。

除以上措施，華邦電子積極投資再生能源使用以及認購再生能源。台中廠設置太陽能發電系統，容量達 500MW；認購水上太陽能發電 27MW 及陸域風電 3.6MW；參與植樹減碳計畫，如與中興大學合作進行為期 30 年植樹造林計畫；

認養國有林地護樹造林；參與國外藍碳濕地固碳計畫，捕捉大氣循環的碳。

全球減碳無法單打獨鬥完成，故華邦電子主動與外界合作，供應鏈永續經營管理，要求供應商及外包商設置減碳計畫，推動減碳目標；廠內產出之可回收廢棄物，如高濃度具回收價值的廢液，以廢硫酸為例，已在廠內設置廢硫酸回收系統，去除廢硫酸中雙氧水後供應廢水處理系統使用，採廠內回收再利用，若有多餘部分則採取委託廠商清運回收。其餘高濃度化學廢液，如廢磷酸、硫酸銨、氟化銨、氟化鈣污泥、廢 IPA 及 NNP 等可回收或高熱值有機溶劑，進入循環再利用經濟體系，間接減少化學品生產及處理產生之碳排。

### 三、台中廠廢水系統減碳說明

#### (一)廢水處理系統介紹與碳排揭露

台中廠廢水主要來自晶圓製程、設備 PM、冷卻水塔、中央洗滌塔、現址式洗滌塔、純水製程及生活污水。廢液分別由專管收集，依據不同水質特性，透過不同廢水處理機制進行處理以及回收再利用，大致流向如圖 1。廢水處理系統碳排主要來自化學品、耗材、廢棄物及用電，其中化學品碳排貢獻佔比最高，各系統碳排如表 1 所示。

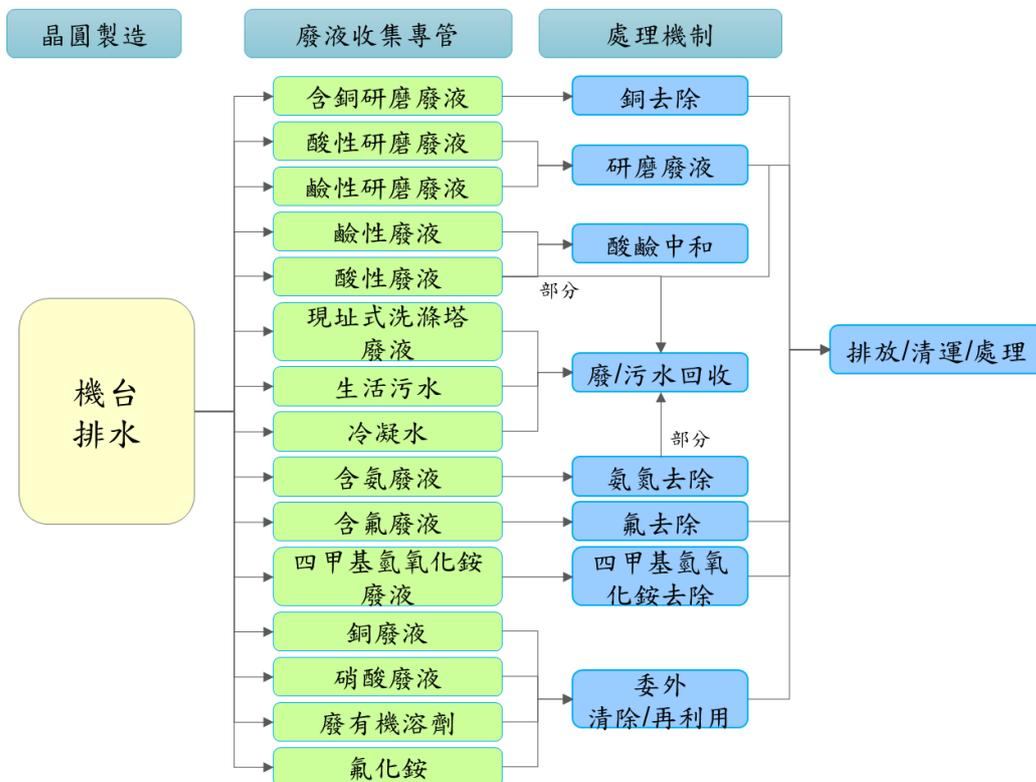


圖 1 廢水收集與處理系統簡介圖

表 1 廢水處理系統 2021 年碳排揭露

系統	用電碳排 (噸 CO <sub>2e</sub> )	化學品碳排 (噸 CO <sub>2e</sub> )	耗材 (噸 CO <sub>2e</sub> )	總碳排 (噸 CO <sub>2e</sub> )	佔比
氫氟酸廢水	101.6	17,277.6	0.3	17,379.5	58.1%
氨氮廢水	1,106.7	3,497.3	65.0	4,651.0	15.5%
研磨廢水	155.9	2,649.3	-	2,805.1	9.4%
回收水系統	1,160.1	1,448.0	65.8	2,673.8	8.9%
酸鹼中和	337.5	1,567.8	-	1,905.4	6.4%
四甲基氫氧化銨廢水	49.2	308.4	12.9	370.5	1.2%
含銅研磨廢水	12.4	70.0	-	82.4	0.3%
生活污水	52.0	-	1.5	53.5	0.2%
EKC-580 廢水	2.3	0.2	-	2.5	0.0%
合計	2,977.7	26,800.5	145.6	29,923.7	100.0%
佔比	10.0%	89.5%	0.5%	100.0%	-

廢水處理過程產生之碳排主要以化學品、用電與耗材構成，如圖 2 所示。因半導體晶圓製程特性，廢水處理過程需使用大量化學品中和、去除水中有害物質。故廢水處理碳排佔比中，化學品使用造成之碳排佔比最高，約占廢水處理總碳排 89%，其中又以處理氫氟酸廢水使用之氯化鈣貢獻最高，佔化學品碳排 46%，氫氧化鈉 26%、聚氯化鋁 25%、鹽酸 1.2%、硫酸 0.8%...等)，如圖 3 及表 2 所示。

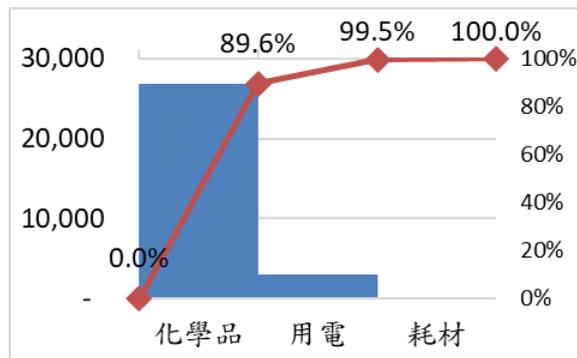


圖 2 廢水處理碳排佔比柏拉圖

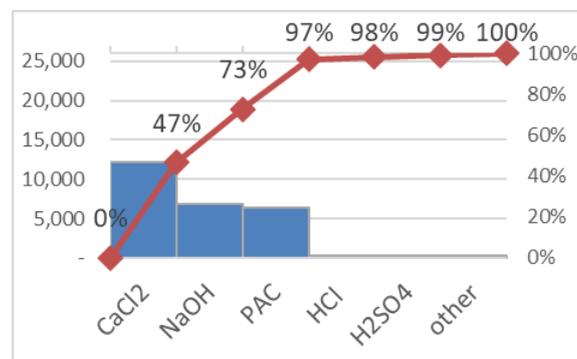


圖 3 廢水處理用化學品碳排柏拉圖

表 2 化學品碳排與用量

項次	碳排(%)	品項	用量(噸/年)
1	46.6	CaCl <sub>2</sub>	12,000
2	26.0	NaOH	4,100
3	24.5	PAC	1,700
4	1.2	HCl	180
5	0.8	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	300
6	0.8	Other	214
小計	26,800 噸 CO <sub>2</sub> e		18,494

其次為處理設備用電，如圖 4 及表 3 所示，約佔廢水處理總碳排 10%，依處理系統細分，用電最高為回收水系統 39%，次為氨氮廢水處理系統 37%，酸鹼中和系統 11%，研磨廢水處理系統 5%，氫氟酸廢水系統 4%。其餘碳排貢獻來自使用之耗材僅佔 0.5%。

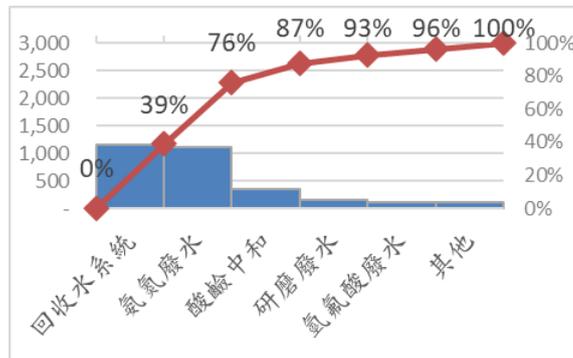


圖 4 廢水處理系統用電碳排佔比柏拉圖

表 3 廢水處理碳排與用量

項次	碳排(%)	系統	電量(度/年)
1	39.0	回收水系統	1,914,000
2	37.2	氨氮廢水	1,826,000
3	11.3	酸鹼中和	557,000
4	5.2	研磨廢水	257,000
5	3.4	氫氟酸廢水	168,000
6	3.9	其他	191,380
小計	2,978 噸 CO <sub>2</sub> e		4,913,380

## (二)碳排主要貢獻系統

廢水處理碳排分類最高為化學品，氯化鈣最高，次為液鹼和 PAC。氯化鈣用於氫氟酸廢水處理系統，液鹼各系統皆使用，PAC 用於氫氟酸廢水與研磨廢水處

理系統。因氫氟酸廢水系統於化學品碳排前三名皆有使用，故以氫氟酸廢水處理系統優先進行減量分析。廢水處理總碳排占比第二為用電，用電最多為回收水系統以及氨氮廢水處理系統，為說明進行減碳進行，三大用電廢水系統說明如下。

### 1. 氫氟酸廢水系統

製程氫氟酸廢水，晶圓製程採重力流方式排放，濃氫氟酸及稀氫氟酸廢水分別排放。兩者在原水槽內初步混合後，進處理系統 1 及處理系統 2。處理系統流程如下(圖 5):首先調整 pH 值並監測氟離子濃度，由測得氟離子濃度區間，決定第一段反應槽  $\text{CaCl}_2$  加藥量。 $\text{F}^-$  和  $\text{CaCl}_2$  之鈣離子( $\text{Ca}^{2+}$ )生成  $\text{CaF}_2(\text{s})$  和  $\text{HCl}$ ， $\text{CaF}_2(\text{s})$  流經低濃度反應槽，於 pH 6.0~6.5 環境與加入之 PAC(混凝劑)反應，生成  $\text{CaF}_2$  膠羽。當該槽  $\text{F}^-$  濃度超過 13ppm 系統會自動添加  $\text{CaCl}_2$ ，直到  $\text{F}^-$  濃度降至 13ppm 以下停止第二段加藥，現況平均氯化鈣加藥量  $15.14\text{kg}/\text{m}^3$  廢水。在混凝槽與所加入之 Polymer(助凝劑)反應，經混凝後生成更大的  $\text{CaF}_2$  膠羽，沉降槽將  $\text{CaF}_2$  污泥沉澱去除後，符合水質標準上澄液放流，污泥再進污泥濃縮槽，由脫水機脫水， $\text{CaF}_2$  污泥最終交由再利用廠商代為清除處理。

台中廠區無塵室之氫氟酸廢水收集管於不同時期需求建置，採重力排水進廢水收集槽，進水管路分別集中於收集槽頂不同區域。而後段銜接之兩個處理系統泵浦取水點分別位於收集槽底單側兩端，水平距離相差 15m(圖 6)。雖然處理系統配置與構造皆相同，原水取自同一槽，但兩處理系統進水濃度差異甚大，處理系統 1 平均濃度約為 680ppm，但處理系統 2 平均濃度約為 130ppm，兩者相差約 5 倍，兩處理系統濃度有明顯差異(圖 7)。且原水濃度變異係數甚大，單日最高可達 30%~50%。

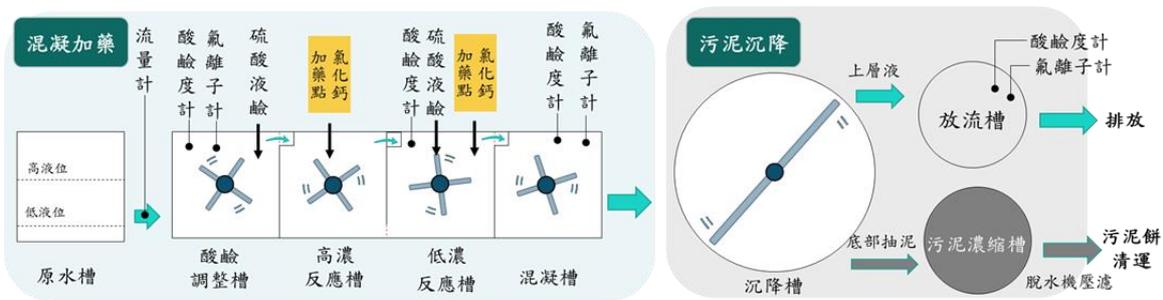


圖 5 氫氟酸廢水處理系統流程圖

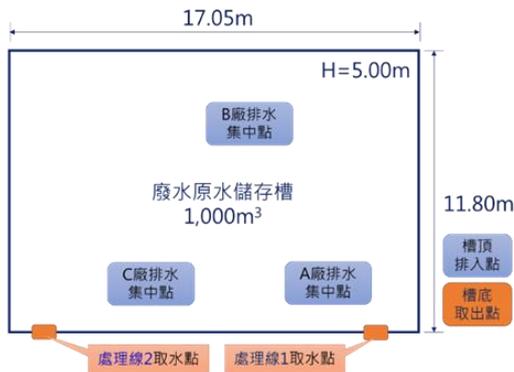


圖 6 氫氟酸廢水處理系取水點

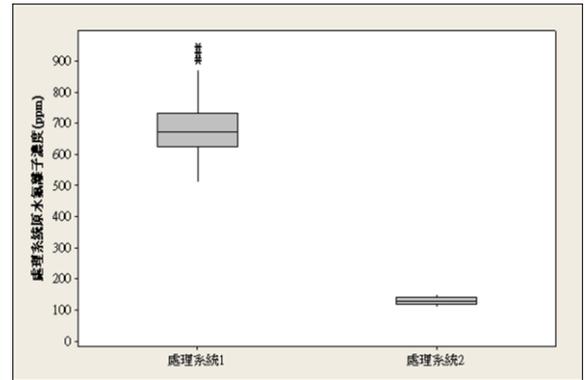


圖 7 氫氟酸廢水處理系統濃度盒鬚圖

## 2. 回收水系統

回收水系統分多個時期建置，主要分為四個系統別，依據來源水質設計相對應之處理，回收水來源主要為酸性廢水、冷凝水、純水製程排放水、現址式洗滌塔排放水、化學機械研磨廢液處理系統放流水，分段處理後依據產出水質差異，分別供應給現址式洗滌塔、中央洗滌塔、冷卻水塔、以及沖廁用水等，如圖 8 所示。

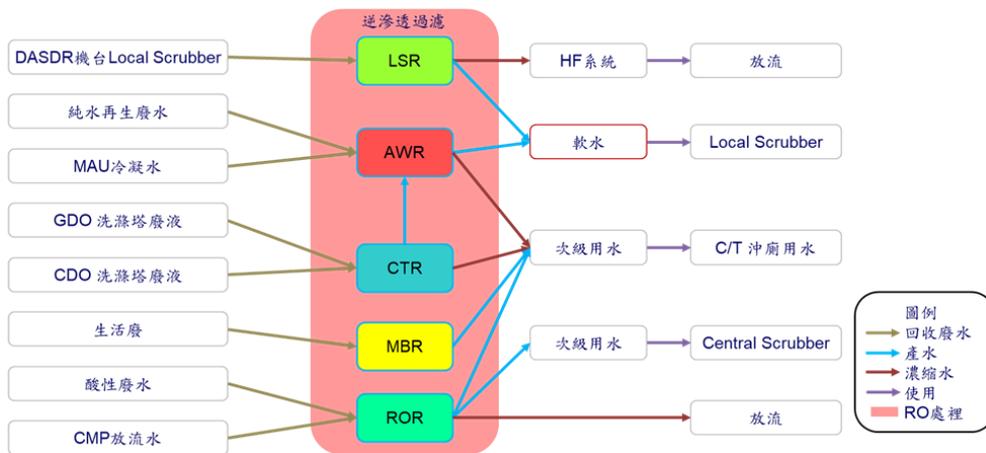


圖 8 回收系統來源及供應圖

## 3. 氮氣廢水處理系統

含氮廢水經過 25 $\mu$ m、5 $\mu$ m 過濾以及三段 RO 濃縮，調整 pH 後進行狀態轉換，由液態氮轉換為氣態氮，氣水分離後使用熱交換以及加熱器升溫，達到觸媒工作溫度，進行兩段觸媒反應，第一段反應將  $\text{NH}_3 + \text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_x$ ，第二段反應  $\text{NH}_3 + \text{NO}_x \rightarrow \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O}$ ，氮氣及水蒸氣經過熱交換降溫，洗滌塔淋洗後排放(如圖 9)。

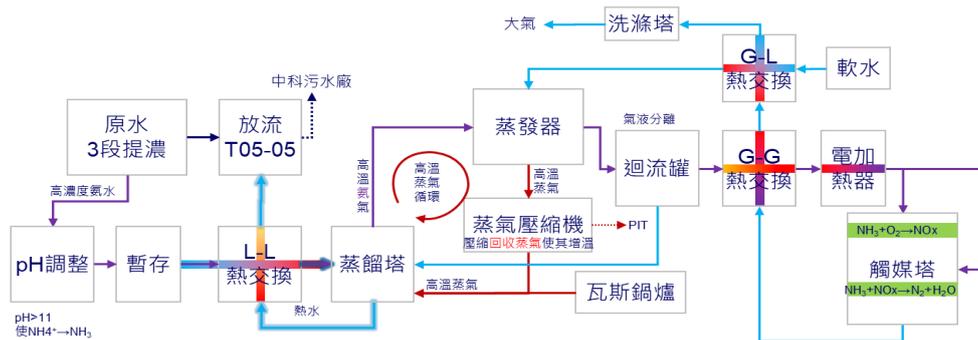


圖 9 氨氮廢水系統處理流程圖

### (三)現況分析及要因解析

以化學品，用電量，耗材三大面向，4W1H1B 分析廢水系統後，初步彙整如下表 4。再經過團隊探討，廢水突破問題點有二：氯化鈣用量多，回收系統及氨氮系統單位廢水處理用電高，針對兩大問題點，經過資料蒐集、整理、討論與腦力激盪後，以系統矩陣圖展開列出要因，由組員評分票選，依據可能要因對問題之重要性以及其可行性，進行可能要因展開，經三次展開彙整如表 5。後續對可能要因作真因驗證。

表 4 現況結論摘要表

主題	類別	層別因子	現況結論摘要
化學品	What	水質別	原水濃度變異係數單日最高達 30~50%(變異大)
	What	原料別	氟離子於低濃度環境與鈣離子結合效果不佳
	What	濃度別	兩處理系統平均濃度差異約 5 倍
	Where	位置別	各廠別分區排入，兩套處理系統取水點於原水槽兩端相距 15m
	Benchmark	鈣氟比	鈣氟比平均 3.67，文獻為 2.3，高於文獻平均
用電	What	設備別	氨氮廢水系統設有升溫用電設備
	When	時期別	回收系統自 2005 建廠開始陸續擴增(IE1~3)，氨氮系統 2015 建置(IE1~3)
	Howmany	數量別	回收系統配置電動機數量最多，共 100 個；氨氮系統單一設備功率高 150kW。
	Benchmark	耗電量	廢污水處理回收每噸用電 1.05 度，高於國內污水處理廠最高平均值約 14%

表 5 因對問題之重要性以及其可行性

問題點	一次展開	二次展開	三次展開	
氯化鈣 用量大	廢水氟離子濃度 變異大	排液濃度不均	排水濃度分流不完整 純水製程系統再生排水含氟濃度低	
		廢液無法均勻混合	原水槽無調勻裝置 高低濃度廢液管配置分布不均	
	處理系統 2 加藥量較大	氟離子濃度 (分布)差異	原水槽排水與處理系統取水點差異	脫水機濾液排入處理系統 2
			加藥調整手法差異	參數調整無明確規定
	過量加藥(平均鈣 氟比高於文獻)	反應過程含干擾物質	源頭混合使用無法分離	化學品品質不佳
單位廢 水處理 用電高	回收水系統 耗電量大	水泵能效不佳	馬達 IE 規格低	
			傳動效率不佳	
			泵浦效率差	
	大馬力泵浦配置數量 多	使用逆滲透過濾處理		
		回收水需多段串接處理		
	氨氮廢水系統 用電大	需額外加溫至 系統反應溫度	熱力系統熱交換效率不佳	
系統保溫效果不佳				

(四)真因驗證及可能對策：

受限於篇幅，僅列出驗證後真因及可能對策進行評分。檢討氨氮系統熱交換效率及保溫效果良好維持，若進一步優化單元參數，其影響甚為複雜，暫不列入探討。可能對策以效果、成本、時程三者評分，總分大於 80 分之對策進行評估。

表 6 真因驗證總結與可能對策評分表

項目	問題	真因	可能對策	效果	成本	時程	得分	對策
化學品	氯化鈣 使用量多	原水濃度不穩定，氯化鈣於 低氟濃度除氟效果不佳	增加擾流裝置	36	33	30	99	對策 1
			增加原水槽蓄水容量	35	15	12	62	
			尋找替代化學品	37	30	18	85	對策 3
	排水與取水點差異		排水管路修改	33	20	13	66	
			取水點管路修改	31	25	15	71	
			增加攪拌裝置	38	33	30	101	對策 1
	加藥參數調整無明確規定		改變加藥方式	36	28	24	88	對策 2
			訂定參數調整規則	18	37	24	79	
用電	回收水系統 用電量大	馬達規格 IE 等級低功率差	提升馬達 IE 等級	35	28	25	88	對策 4
			增設變頻器	33	21	22	76	
		泵浦非節能型	改變系統為重力流	20	15	22	57	
			更換節能型泵浦	22	27	32	81	對策 5

### (五)對策再擬定及評估

由真因驗證找到之問題，經討論並初步構思對策，預估改善效果、消耗成本以及時程是否可於活動期間內完成，進行評分票選可能最適對策，運用 PDCA 找尋最適對策並實施。其中對策 2 改變控藥方式作法值得分享，在此進一步說明。

傳統氯化鈣加藥控制，依設定之濃度區間採比例式或階梯式加藥。加藥參數來源為系統運轉初期，或不定期水質變化時，在不同條件下瓶杯試驗或採兩階段實驗設計，實驗得到之加藥參數及結果，依水量等比例放大至實廠加藥，由放流水質反饋及經驗調整再修正加藥參數，以符合放流水標準。

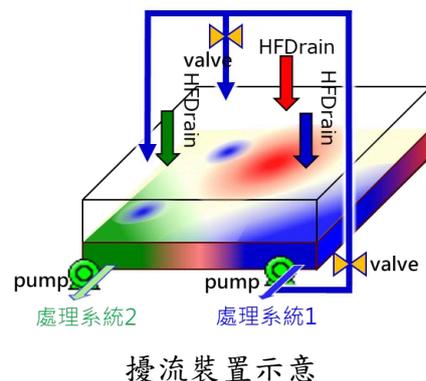
近年來，隨著大數據應用及 AI 輔助，可節省上述實驗時間，以大數據統計手法預測水質並優化加藥參數。其做法為：收集長期(一季以上)既有運轉相關數據資料，經資料預處理後，再經由統計分析軟體如 JMP 分析資料，使用特徵篩選演算法(如決策樹分析，隨機森林，XGBoost)共同篩選出重要因子，再以類神經建模。各種模型好壞可藉由未參與建模之測試集資料進行模擬，藉由模擬結果的 MAPE(平均絕對百分比誤差)及極端值模擬誤差表現，來評估不同參數模型之優劣，再現性及可接受性。經由上述步驟，可建立預測模型自動加藥系統，藉由定時更新並預測放流水質變化，由反應槽氟離子濃度及流量等資訊，提供系統加藥參數(pH，加藥量或閥開度)建議，作為 AI 自動控制或人員手動介入控制參考。

表 7 對策 1(增加擾流裝置) PDCA

對策 1：增加擾流裝置使兩處理系統氟離子濃度差異降低以及減低濃度變異				
>>Plan：				
方案	施行評估	成本評估	評分	選用
排水管路合併後再進收集槽	管路收集眾多機台排水，完全停水困難度高	-	42	否
配置攪拌機	槽頂布滿管路，且距離樓板大樑<1m	高(配置攪拌機難度高)	51	否
曝氣擾動	曝氣易造成泵浦損壞，且系統運轉時數長，槽內曝氣管路維護成本高	高(槽內曝氣管路維護成本高)	49	否
原水部分迴流	原水泵為變頻馬達，少全載運轉，使用該裕度進行迴流擾動	低(原水泵為變頻馬達，少全載運轉，迴流管迴流擾動)	81	是
配置內循環泵	配置於桶槽內有日後修繕等問題，配置於桶槽外-現場已無預留法蘭	高(系統水量大，無餘裕時間排空)	76	否

**>>Do :**

- 自原水泵補出口進行改造工程，以現有動力設備下游端進行改管，使濃度獲得重新分配以及增加槽內水體擾動，如**錯誤! 找不到參照來源。**
- 改善前，處理系統 1 及處理系統 2 原水濃度原差異大，處理系統 2 平均濃度低。
- 改善後，HF 系統兩套處理線氟離子濃度水質改善顯著。提高來源水濃度 F<sup>-</sup>，控制於線性加藥區，避免因濃度分布不均勻導致氯化鈣控藥不穩。



**>>Check :**

- 改善前兩處理系統原水濃度原差異大，處理系統 2 氟離子濃度時常低於 100ppm 以下漸進線加藥區，影響加藥效果。
- 改善後 HF 系統兩套處理線氟離子濃度水質改善顯著。
- 縮小兩處理系統原水濃度差距，以及降低濃度變異，氫氟酸處理系統 2 改善後，平均濃度由 130→320ppm，估算鈣氟比由 17.4→7.05，換算年節省 300 噸 CO<sub>2</sub>e。

**>>Action :**

- 修改系統圖面，並寫入系統操作手冊執行。

表 8 對策 2(改變控藥方式) PDCA

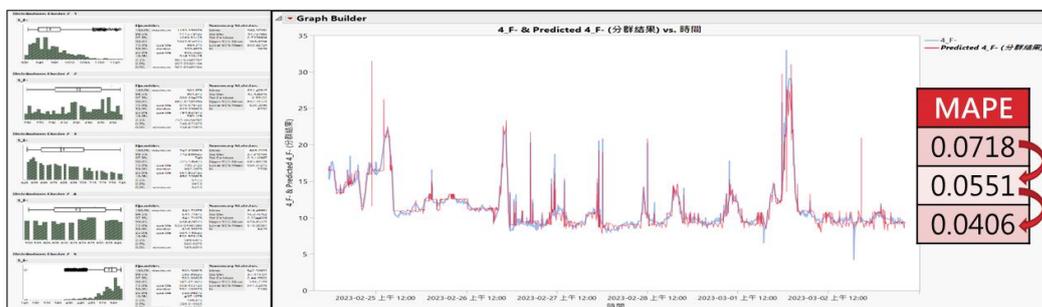
對策 2：改變控藥方式

**>>Plan :**

方案	施行評估	評分	選用
氯化鈣控制區間加藥	增加氯化鈣控藥區間，避免濃度差 50~100ppm 投放過量藥劑，但需 DOE 尋最佳解，如水質改變重新找尋。	65	否
AI 控藥	公司內推廣數據科學與 AI 學習課程，使用類神經網路分析，找尋最佳加藥參數，較 DOE 省時，模型之再訓練快速，符合本系統原水性值易變化之需求	86	是

**>>Do :**

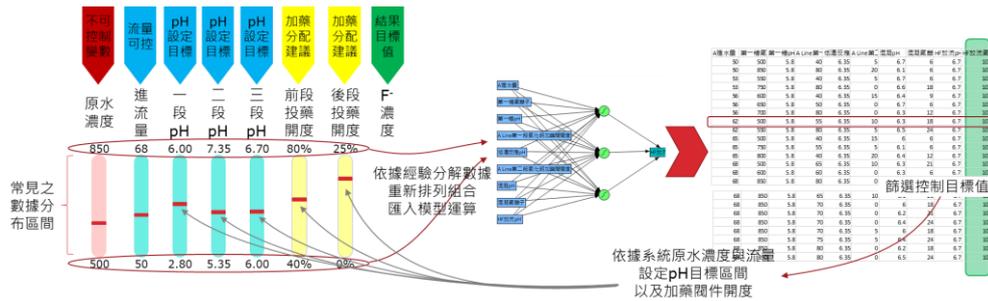
- 模型驗證，初始 MAPE=7.18%，判斷預測模型為高可靠度，多次模型優化，進行因子篩選、並對原水濃度進行資料分群，MAPE 由 7.18% 提升至 5.51% 最終為 4.06%，準確度提高 43%。



預測值與觀察值趨勢比較

**>>Check :**

- 初步執行：依據預測模型運算結果，篩選目標值，參考其對應設定參數，以該條件調整加藥參數，改善後單位廢水用藥量較穩定，預估用藥量 15.14→13.6kg/m<sup>3</sup>，相當於減少碳排 1,233 噸 CO<sub>2</sub>e/年。
- 進階執行：初步執行確認預測模型之可行性，向工程資料及系統單位提出需求，由不同專業單位協助建立預測模型自動加藥系統，開通廢水廠數據與公司數據資料庫訊息傳遞路線，且由中繼控制點管控讀取及應用數據之單位，保護資訊安全，達到自動化讀取及回饋系統加藥參數。



預測模型初步應用方式



預測模型進階應用方式

**>>Action :**

- 氫氟酸廢水處理系統氯化鈣投放原本以濃度區間加藥改為預測模型自動控制加藥。

表 9 對策 3(替代氯化鈣化學品) PDCA

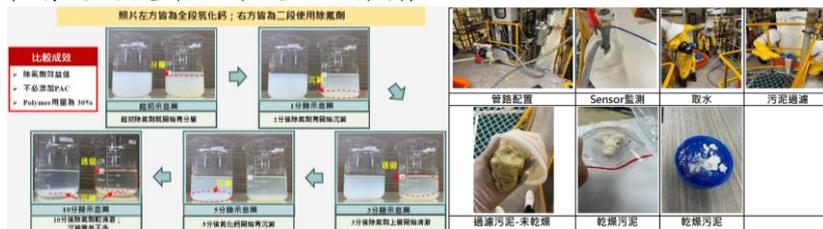
**對策 3：尋找替代氯化鈣去除氟離子之化學品**

**>>Plan :**

- 坊間有藥劑(改質 PAC)可於低濃度氟離子環境仍有優異的去除效果，彌補氟離子與鈣於低濃度去除不佳之特性，尋找並嘗試導入該藥劑。

**>>Do :**

- 與數間供應商洽談，邀請廠商提供數據與藥劑測試，瓶杯實驗挑選後現場測試。
- 確認測試污泥未含重金屬，提供樣品給處理商檢測，確認處理商接受污泥性質之改變。
- 上述步驟確認後，預估可使減少氯化鈣用量以及提高產水品質，向公司內部提出新化學品使用、向科學園區管理局提出水污染防治措施許可變更、並執行採購流程、建立化學品料號，待前述申請通過後即上線使用該藥劑。



改善PAC導入前測試過程

>>Check :

- 改善前後加藥方式與結果比較，使用預計氯化鈣用量可減少 40%，且產水導電度降低。
- 減少之氯化鈣換算為年減 3,500 噸 CO<sub>2e</sub>。

改善前後藥劑添加與反應結果比較

全段氯化鈣			先氯化鈣後除氯劑		
F	500	mg/L	F	500	mg/L
加藥量(ppm)	F- (mg/L)	導電度(ms/cm)	加藥量(ppm)	F- (mg/L)	導電度(ms/cm)
4000	52		4000	52	
4500	31		4500	31	
5500	20		除氯劑添加		
8500	10		1000	10	
10000	8	13.77	1250	8	9.97
Polymer添加 800 ppm			Polymer添加 400 ppm		

>>Action :

- 現場桶槽、管路、設備標示新藥劑、新藥劑建立廠內 SDS。
- 調整加藥參數、污泥沉澱系統運轉模式、脫水機運轉參數。

表 10 對策4(提供馬達 IE 等級) PDCA

對策 4：提高馬達 IE 等級，減少廢水處理耗電量

>>Plan :

- 2023 年公司進行第一期全廠馬達節能汰換，優先汰換大馬力、長時運轉之設備，如排氣系統風機、冰水系統供應泵等。
- 廢水系統馬達相對馬力數較低，汰換順序較後，優先挑選 ROI 高之設備申請更換。

>>Do :

- 依據馬達馬力、效率、運轉時數等估算更換後預計回收年限，回收快者優先提出更換申請。

設備編號	kW	極數	電壓 (V)	IE	原效率	新效率	時數/年	IE1運轉費用	IE4運轉費用	節省費用	設備費用 IE3-IE4	ROI(年)
BP-607A	7.5	4	480	1	88.5	91.7	2920	56,915	54,929	1,986	22,790	11.5
BP-608A	15	4	480	1	90.5	94.1	4380	166,972	160,584	6,388	45,180	7.1
A01-09	0.75	4	480	1	81	85.5	8760	18,656	17,674	982	6,410	6.5
BP-CT01A	3.7	4	480	1	86.5	89.5	4380	43,091	41,647	1,444	14,820	10.3
BP-CT01B	3.7	4	480	1	88.5	90	4380	42,117	41,415	702	13,800	19.7
BP-CT04A	7.46	4	480	1	88.5	94.1	4380	84,918	79,864	5,054	57,890	11.5
BP-CT04C	0.18	4	480	1	68.5	74	8760	5,294	4,901	394	4,960	12.6
BP-MAU01A	3	4	480	1	84.5	85.5	4300	35,112	34,702	411	6,850	16.7
BP-MAU01B	3.7	4	480	1	84.5	85.5	4300	43,305	42,799	506	6,850	13.5
P-601A	18.5	4	480	1	91	93.6	5840	273,068	265,483	7,585	51,380	6.8
P-601B	18.5	4	480	1	90.0	93.6	4000	189,111	181,838	7,274	51,380	7.1
A11-05	1.5	4	480	1	81.5	88.5	8760	37,082	34,149	2,933	9,090	3.1

>>Check :

- 以 A01-09 為例，更換前後運轉耗電量 0.476kW→0.423kW，約節省 11%
- 升級一台 0.75kw 馬達一年可減少碳排放 0.28 噸 CO<sub>2e</sub>



馬達更換前後耗電量測

>>Action :

- 後續將依據 ROI 篩選，提出更換需求，將廢水處理系統 IE 低且符合回收效益者逐年汰換。
- 已更換之動力設備須於廢水處理文件進行修改。

表 11 對策 5(更換節能型泵浦) PDCA

對策 5：更換節能型泵浦，減少廢水處理耗電量	
<b>&gt;&gt;Plan：</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>調查泵浦流量、運轉時數及水質等條件進行篩選。</li> <li>處理流量&gt;80CMH，年運轉時數&gt;5,300 小時。</li> </ul>	
<b>&gt;&gt;Do：</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>依據篩選條件，選出 7 台泵浦進行更換。</li> </ul>	
<b>&gt;&gt;Check：</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>實際運轉量測，估計年節電 55,200 度，換算為碳排約為 33 噸 CO<sub>2</sub>e。</li> </ul>	
<b>&gt;&gt;Action：</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>將改善結果列入 ESG 節能專案及能源局節電申報資料。</li> </ul>	

(六)效果確認

1. 化學品改善效果

改善前(2021~2022 年)單位氫氟酸廢水用藥量(氯化鈣用量/氫氟酸廢水量)平均為 15.14kg/m<sup>3</sup>，改善兩階段改善後平均值為 9.37 kg/m<sup>3</sup>，減少單位廢水氯化鈣用量 38.1%。第一階段：參考類神經網路模型結果進行加藥參數調整(手動→自動)。第二階段：導入改質 PAC(包含測試期間)以及迴流工程上線。

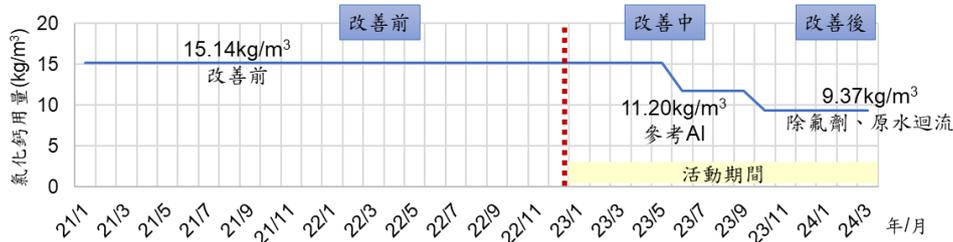


圖 10 改善前後氯化鈣實際平均使用量趨勢圖

氯化鈣碳排係數以 0.7075kg 計算(氯化鈣主要為 2 種製程，氫鹼法係數為 1kg，碳酸鈣或石灰石與鹽酸直接反應法為 0.42kg，因供應來源非固定，故以平均計算)，依改善前後月平均使用量差異，預估年節省 4.6Mkg 氯化鈣使用量，換算年碳排減量 3,280 噸 CO<sub>2</sub>e，佔 2021 年廢水系統總碳排 10.60%。

改質 PAC 導入前(2021/~2023/9)月平均使用 137,623kg，以改質 PAC 取代 PAC，改質 PAC 月平均(2023/12~2024/3)用量 68,436kg，PAC 與改質 PAC 碳排係數皆為 3.571，換算年碳排減量 2,720 噸 CO<sub>2</sub>e，佔 2021 年廢水系統總碳排 8.79%。

## 2. 節電改善效果



圖 11 ROR 系統單位廢水耗電量趨勢圖

ROR 系統改善前單位廢水用電量 0.824 度/m<sup>3</sup>，更換 6 組泵浦後為 0.729 度/m<sup>3</sup>，更換 2 組馬達為 0.704 度/m<sup>3</sup>，單位廢水處理用電量改善幅度達 14.5%，依據 2021 年 ROR 系統用電碳計算，年碳排減量約 90 噸 CO<sub>2e</sub>，唯回收系統仍考慮水質條件與逆滲透膜狀態，故後續仍須持續追蹤改善效果。

## 3. 廢水系統碳排係算

2021 年廢水處理總碳排約為 29,923 噸 CO<sub>2e</sub>，2021~2022 年氯化鈣使用量平均每月為 1,042 噸，2023 年 10 月至 2024 年 3 月，氯化鈣使用量月平均為 626 噸。ROR 系統改善前單位廢水用電量 0.824 度/m<sup>3</sup>，改善後 0.704 度/m<sup>3</sup>。本活動預期改善目標為減少廢水處理總碳排 5%，依化學品、用電量計算約 6,090 噸 CO<sub>2e</sub>，減少佔比 8.14% 碳排量。

表 12 廢水系統碳排減碳成效表

	改善前	目標值	改善後	達成率
廢水處理碳排減量 5%	29,923	28,427	23,924	407%

## (七) 效益評估

### (1) 有形效益

- A. 單位廢水氯化鈣使用量減少 38.1%，碳排年減 3,280 噸 CO<sub>2e</sub>。
- B. 改質取代 PAC，碳排年減 2,720 噸 CO<sub>2e</sub>。
- C. 回收水系統用電降低，碳排年減 90 噸 CO<sub>2e</sub>。
- D. 合計廢水處理碳排減少 20%。

### (2) 無形效益

- A. 透過數據科學實作學習，了解數據整理 SOP 重要性，且透過統計軟體分析，可減少實驗耗費之人力與時間，與統計資訊部門協助，使氫氟酸加藥自動化，減少人員操作造成之負擔以及風險。
- B. 節省藥量推算整年度共減少化學品充填 185 車次，降低值班人員工作負擔。

## 四、結論與建議

1. 因年度預算關係，尚有許多 IE1 馬達為更換，後續將依據回收年限陸續申請更換。
2. AI 應用於廢水控藥，需視水質變化反覆重新訓練模型，暫定每季執行再訓練，仍需觀察實際水變化而應變。
3. 持續努力開發低碳化學品來源。
4. 未來氮氫系統是否有單元設備或流程優化，以及熱回收值得與原廠進一步研究。

## 五、參考文獻

1. 華邦電子，2022 永續報告書，2023。
2. 華邦電子，2023 永續報告書，2024。
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. 李家岩、洪佑鑫，製造數據科學：邁向智慧製造與數位決策，前程文化事業股份有限公司，2022。



# 表面處理製程之鎳金屬電解回收系統技術

趙寶祥\*、柯臣儒\*、蔡定霖\*、黃瑞堂\*\*、林怡明\*\*、莊雅婷\*\*

## 摘要

表面處理產業對於廢液回收以及水資源循環應用極為重要，電鍍製程常見之光澤鎳製程產生高濃度硫酸鎳廢液，由於鍍液仍有回收價值，業界儘可能進行純化工作，或移至其他產線再次利用。硫酸鎳回收工作分為「生產線外批次回收」以及「生產線上回收」兩種，產線外回收仍有額外廢液產生，而產線上回收系統常有電極材質析出雜離子影響光澤鎳加工槽鍍浴壽命之問題。

「鎳金屬電解回收系統」技術協助表面產業大幅減少高濃度硫酸鎳廢液，光澤鎳鍍浴可再利用率幾乎達 100%，技術特點為 1. 「生產線上回收」技術，回收槽體管線連接於產線鍍槽；2. 具「智慧人機系統」以監控與調節光澤鎳槽及鎳回收系統的關鍵參數；3. 產出之回收鎳金屬純度達 99.95% 可回到製程再利用，原本產線需添加「硫酸」調整 pH 值，以及製程需抽出廢液再大量補水和化學品，但建置本技術系統回收鍍液中的鎳金屬後，其硫酸根再回流至鍍槽替代硫酸。

因此透過本技術可減少製程中鎳金屬、硫酸鎳以及水等使用，未來光澤鎳槽僅需正常補充化學品與製程過程中蒸發的水量，系統就可持續維持穩定運作，同步減少原材料鎳金屬採購並提升水資源利用率，協助製程減碳。

【關鍵詞】表面處理產業、高濃度硫酸鎳廢液、鎳金屬電解回收、智慧人機系統

---

\*展欣環保工程股份有限公司 總經理、研發長、工程師

\*\*財團法人金屬工業研究發展中心 副組長、工程師、管理師

# 一、前言

針對表面處理產業所產生的廢液中所含的貴金屬，不只有回收的價值，更能將廢水中的金屬離子降低，使得廢水處理成本也減少，若使用在某些製程上，更可以使原鍍液的使用壽命延長，進而減少廢水產出量。使用電解方式回收鎳金屬或其他貴金屬的方法屬於成熟可用的工業手法，各廠家所遇到的不同問題與採用相對應可行的解決方式，也關乎是否能實行的關鍵，參考公開可得的資料與應用現有的技術來執行此一方法，效果顯而立見，但仍有許多困難需要克服，例如改善電解效能與成本等的問題。茲就前後施行的過程與成果重點說明。

## 二、電解鎳設計基礎

### 1. 電極選擇

根據現有訊息，陽極板為避免被酸腐及剝離或離子汙染及導電性因素等，故選擇使用鈦板鍍鈦鈹材質，陰極板使用純鎳網或泡沫鎳，並在實驗室先做測試。以下是相關材質資料：

各種金屬之處理性質

Characteristic 材料 Material	密度 Specific Gravity	比重 Density (gm/cc)	熔點 Melting Point		沸點 Boiling Point (°C)	熱傳導 Thermal Conductivity (Cu = 1)	比熱 Specific Heat (Cal. Pwr/98 per °C)	導電率 Conductivity (99% Cu-100%)	電阻 Resistance Microhms /cm	
			(°F)	(°C)						
鋁, 鋁合金 Aluminum Alloy	2.7	2.7	1220	660	2480	0.52	0.22	59	2.8	
黃銅 Brass	8.6	8.6	1630	885	NA	0.28	0.09	28	6.6	
鋁青銅 (90Cu-9Al) Aluminum Bronze	7.69	7.7	1890	1032	NA	0.15	0.014	12.8	13.5	
銅青銅 (90Cu-10Sn) Phosphor Bronze	8.78	8.8	1550	845	NA	0.12	0.09	11	16	
銅 (去氧銅) Copper	8.89	8.9	1981	1081	2600	0.00	0.095	100	1.7	
鎳青銅 (70Cu-30Ni) Nickel Bronze	8.81	8.8	2140	1172	NA	0.07	0.09	4.6	37	
金 Gold	19.3	19.3	1945	102	2950	0.76	0.032	71	2.2	
鉛 Lead	1.34	11.3	621	328	1740	0.08	0.03	8	20.6	
鎂 Magnesium	1.74	1.7	1240	671	1100	0.4	0.246	37	5	
鎳鎘合金 Monel (67 Ni - 30Cu)	8.47	8.8	2400	1318	NA	0.07	0.127	3.6	48.2	
鎳 Nickel	8.8	8.8	2650	1452	3000	0.16	0.105	23	7.9	
鎳鎳合金 Nickel Silver Alloy	8.44	8.4	1706	930	NA	0.09	0.09	8.3	1.6	
銀 Silver	10.45	10.5	1762	963	2210	0.07	0.056	106	-	
低合金鋼 Low Alloy Steel	7.85	7.8	2600	1430	NA	0.12	0.118	14.5	12	
高碳鋼 High Carbon Steel	7.85	7.8	2500	1374	NA	0.17	0.118	9.5	18	
低碳鋼 Low Carbon Steel	7.84	7.8	2700	1483	NA	0.17	0.118	14.5	12	
錳鋼 Manganese Steel	7.81	7.8	2450	1342	NA	0.04	0.21	NA	72	
中碳鋼 Medium Carbon Steel	7.84	7.8	2600	1430	NA	0.17	0.118	15	15	
不銹鋼 Stainless Steel	(A)	7.9	7.9	2550	1395	NA	0.12	0.117	3	75
	(M)	7.7	7.7	2600	1430	NA	0.17	0.118	3	57
	(F)	7.7	7.7	2750	1507	NA	0.17	0.334	3	60
鉭 Tantalum	16.6	16.6	5162	2996	5430	0.13	0.052	13.9	12.5	
鈦 Ti	7.29	7.3	448	231	2270	0.15	0.125	13.5	11	
鈷 Tungsten	4.5	4.5	3270	1800	3200	0.04	0.113	1.1	42	
鎢 Tungsten	18.8	19.3	6170	3420	5600	0.42	0.034	31	5.6	
鋅 Zinc	7.13	7.1	788	419	907	0.27	0.093	30	5.9	

備註: (A) 奧氏體鋼 Austenitic Series  
(M) 馬氏體合金鋼 Martensitic Series  
(F) 鐵素體不銹鋼 Ferritic Stainless Steel Series

圖 1 各金屬之處理性質

## 2. 實驗設計原理

為取得初步數據，實驗設計根據簡易電解原理，設置適當陰陽極板，接上整流器，通電調整電壓電解鍍液。

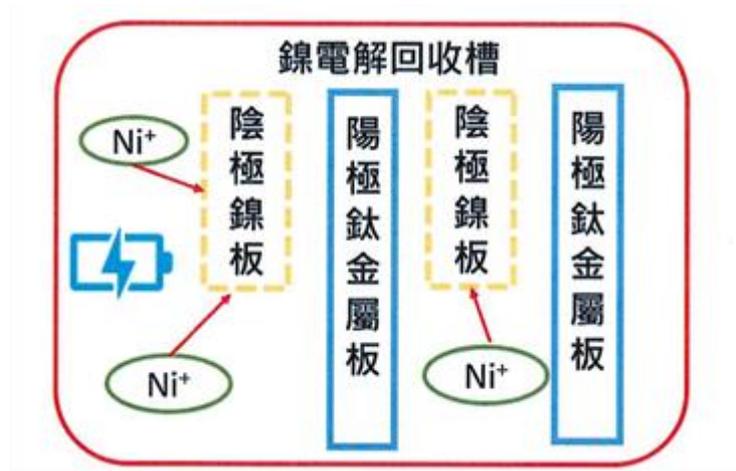


圖 2 鎳電解回收槽設計圖

## 3. 實驗裝置

鍍液取自廠商的光澤鎳鍍液，測試電壓設在 3V，陰極板使用泡沫鎳及網狀鎳(鎳網)作為比較，陰陽極板間距 2cm，電解前秤陰極板重量，電解固定時間後再秤陰極重量以計算電解速度和效率以及紀錄電流狀況。裝置如下照片：

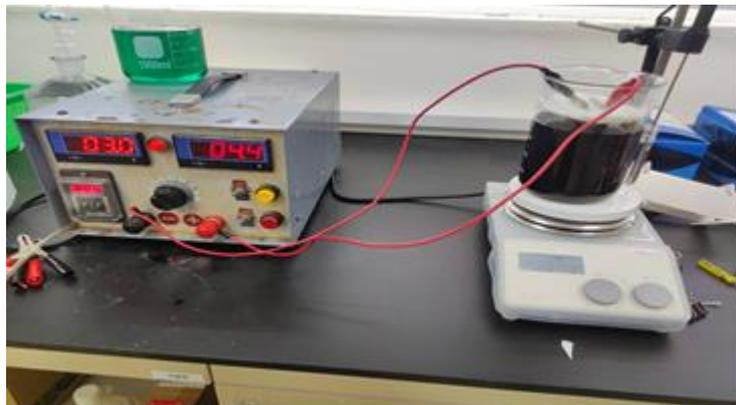


圖 3 實驗室裝置



圖 4 泡沫鎳原材料

#### 4. 實驗結果

電解一小時後將陰極板烘乾秤重，電解期間紀錄電流值如下圖，定電壓下電流會隨時間增長而增加，因為電解之金屬附著於陰極板越來越多使陰極板導電性越來越好，網狀鎳因單位重量高於泡沫鎳使其導電性較泡沫鎳高。

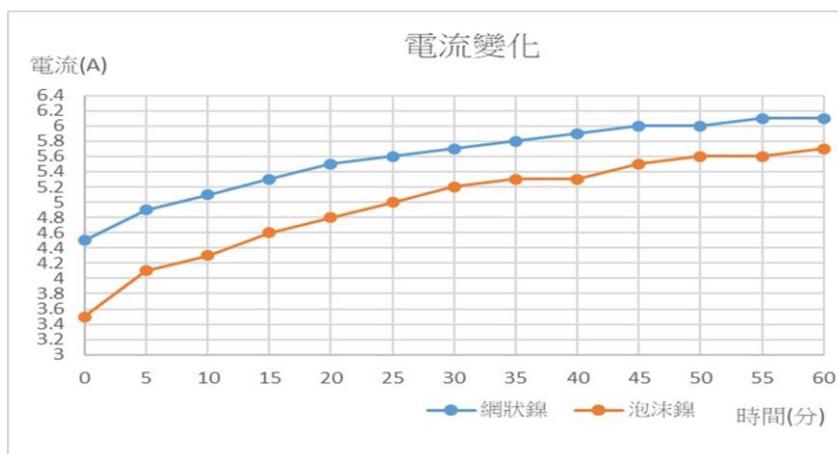


圖 5 電流變化趨勢圖

其他實驗數據如下表，網狀鎳的電解速度雖略高於泡沫鎳，但若加入重量因素後，泡沫鎳高於網狀鎳(效率重量比)。但兩者的電流電解效率均高於 90% 以上，網狀鎳為 93.99%，泡沫鎳為 94.48%，相較之下泡沫鎳更高一些。

表 1 電解效率比較表

No.	陰極	平均電流 (A)	陰極重量 (g)	陰極增加重量(g)	單位面積增加量(g/cm <sup>2</sup> )	電流電解效率	效率重量比
1	鎳網	5.62	2.63	5.78	0.23	93.99%	0.36
2	泡沫網	5.03	1.95	5.2	0.21	94.48%	0.48

註:效率(電解效率)計算說明

理論電解鎳電量=電解出來鎳重量(克)÷58.6×193000

實際電量=平均電流×電解時間(秒)

電流電解效率=理論電量÷實際電量×100%

### 三、設備介紹

設計時考慮客戶需求及安全需要，也為了現場使用上的方便，再參考其他相關設計，原型機設計如下圖：

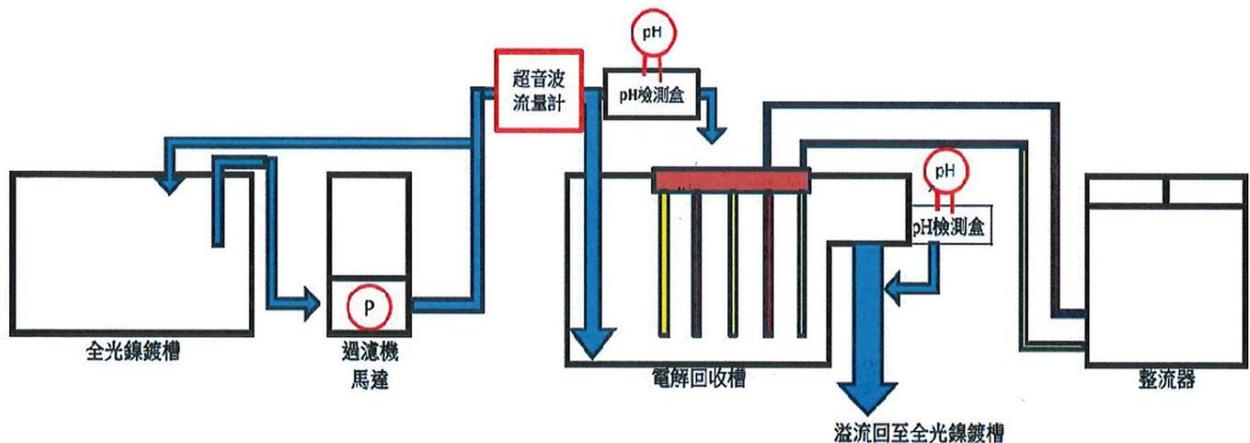


圖 6 原型機設計圖

由全光鎳鍍槽經由泵浦再經過濾器打入電解回收槽內，需控制流量，再由電解回收槽溢流回去全光鎳鍍槽，前後端監測 pH 值，電流經整流器降壓轉直流電再通入陰陽極板，須設定電壓或電流。

電解槽設計與實體如下圖：

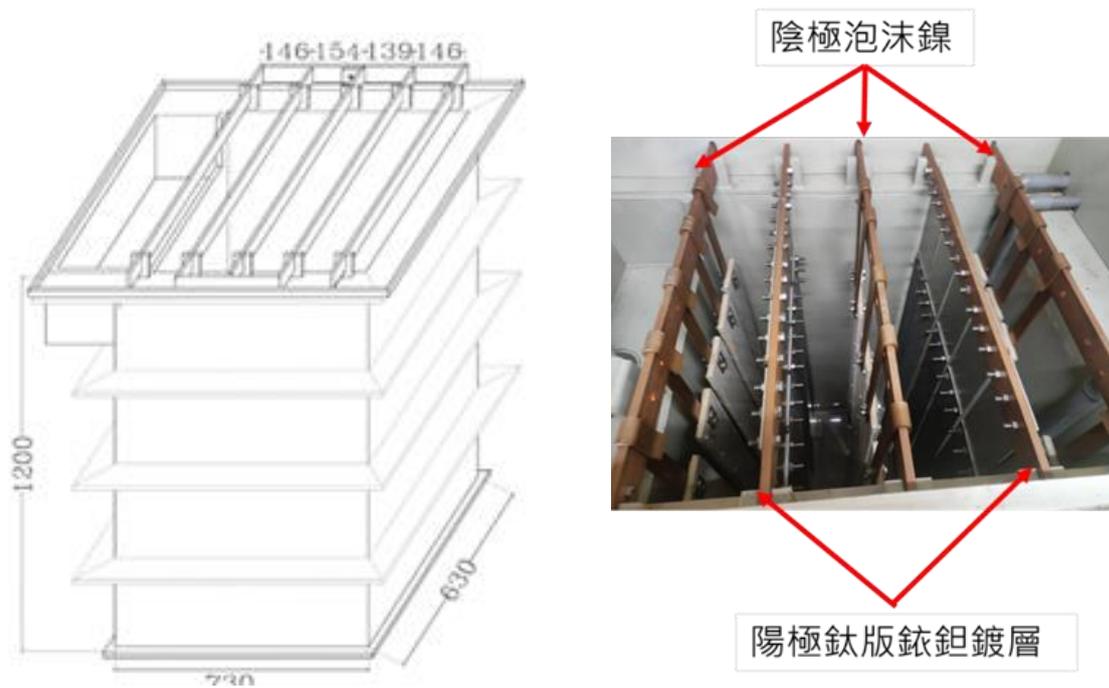


圖 7 電解回收槽體設計圖與實體建置照片

泡沫鎳(與實驗室為相同材質)陰極板面積寬度 10 公分,長度 90 公分每個陰極有兩面,槽體共計有 15 片陰極,合計總面積為 27,000 平方公分,陰陽極板間距為 15 公分,流量 3~7LPM。實體機台外觀如以下照片:



圖 8 電解槽體照片



圖 9 整流器與控制模組照片



圖 10 人機介面控制畫面



圖 11 人機介面系統即時訊息畫面

## 四、運作狀況

實際裝機測試完成後，開始試運作並調整參數以求最佳設定的狀態，並觀察機台及極板之狀況，也收集各項數據，下表為泡沫鎳陰極板電解前後之照片：

	
<p>(1)陰極板初始照片 說明:採用泡沫鎳由實驗室研究得出重量效率較佳，導電銅掛勾與 PP 板採鈦材質螺絲鎖固，陰極為雙面泡沫鎳中間採用 PP 板材質以固定泡沫鎳，並可維持在流動的回收鍍浴中的穩定性，PP 板材與泡沫鎳採使用塑膠束帶固定。</p>	<p>(2)陰極回收板鎳滿載照片 說明:系統運作後鎳陰極板上回收鎳金屬逐漸增加，由最初表面平滑狀態，轉為開始剝落為陰極板收集回收鎳的極限狀態。</p>

圖 12 泡沫鎳陰極版系統運作前後說明

鎳電解回收系統於客戶端運行調整各項參數並記錄所得之結果如下表：

表 2 電解速度比較表

No.	電壓(V)	電流(A)	時間(hr)	安培時	鎳增重(g)	電流效率	電解速度(g/hr)
1	5	300	16	4800	4750	90%	297
2	8	500	49	24500	24780	92%	506
3	8	500	30	15000	15700	96%	523
4	9	800	39	31200	27050	79%	694

所得數據顯示，原型機於 5V/300A 及 8V/500A 時電解效率均在 90% 甚至更高，當電壓電流提高至 9V/800A 時，雖然電解速度提升但電解效率卻大幅下降至 79%，應是電壓過高會讓陰極產出更多氫氣所致，另外電解時間越長也會因陰極附上更多的鎳金屬使導電效能更佳使電解效率更好，因持續循環電解的緣故，其前後之 pH 值差異很小 (<0.1)。另外因全光澤鎳鍍槽體量較大，鍍液濃度變化小於 5%，故不考慮濃度因素。

## 五、結論

以電解方式回收鎳或其他金屬離子是有效且可行的，但仍有許多問題需要克服，主要是設置成本的部分，陽極採用鈦板鍍鉍鈮的方式固然導電性及抗蝕性、抗剝離乃至極板壽命都非常優秀，但製作成本極高，占總設備成本 60% 以上。

其次是用電效率，要避免電能耗費在無效的熱能及電解出氫氣上面，這需要低電壓的狀態下進行。而為了電解速度電流值須維持高電流的狀況，這可能需要更大的極板面積、更小但具安全性的極板間距。

最後是現場空間與人力的問題，由於大部分業者廠區空間都非常有限，人力也是所有台廠共同的問題，所以盡量縮小設備體積與減少人力維護與操作成本是必要的。

當然可能還有許多其他可以再進一步改良的地方，這需要各種專業上的協助。

## 六、參考文獻

1. 化學鎳老化液電解回收鎳之研究，王文裕博士指導，林廷育撰寫，100 年 7 月。
2. 鈦基金屬氧化物電擊製備及電催化處理染料廢水，王文裕博士指導，呂信衡撰寫，103 年 7 月。
3. 吳成有，IrO<sub>2</sub>-TaO<sub>5</sub>/Ti 氧化物電極製備及於陰極蝕系統應用，98 年 3 月。
4. 財團法人金屬工業研究發展中心，鎳金屬電解回收系統建置輔導計畫結案報告，113 年 9 月。



# 固體再生燃料混燒灰渣再利用分類及固化製程發展

王昱凱\*、劉錦霖\*\*、吳明富\*\*\*、詹尚文\*\*\*\*、黃偉慶\*\*\*\*\*

## 摘要

全球氣候變遷議題日益嚴峻，溫室氣體排放和廢棄物處理成為各國共同面臨的挑戰，我國鼓勵業者把現有流體化床鍋爐改使用可燃廢棄物代替現有燃料，將橡膠、廢紙、纖維及廢木材等可燃性廢棄物加工成固體再生燃料(Solid Recovered Fuel, SRF)以實現廢棄物資源化。這一政策可有效降低化石燃料需求並因低碳排放而備受關注，然而部分鍋爐燃燒過程中使用石灰石作為脫硫劑，以及若干廢棄物中可能含有少量鋁金屬等原因，導致 SRF 衍生之混燒灰渣再利用於水泥製品時出現膨脹現象，這種情況導致混燒灰渣再利用途徑大幅受限，因而影響其去化。

本文旨在探討混燒灰渣的材料特性及再利用可行性，尤其針對具膨脹潛能的混燒灰渣使用水泥固化法探討其處理成效，研究結果指出漿料材製程會因混燒灰渣中含有可反應性鋁金屬及游離氧化鈣，導致出現強度發展問題和體積膨脹；塑性材製程可有效降低混燒灰渣帶來的膨脹現象並展現良好的抗壓強度；破碎材製程則顯示出物理性質良好且能根據破碎方式控制粒料的尺寸，作為工程填築材料展現良好潛力。本文並針對漿料材、塑性材及破碎材於營建工程方面的應用，提出具可行性的現地製程作業方式。

本文基於混燒灰渣的特性，包括可反應性鋁金屬含量、游離氧化鈣含量、強度活性指數等，進一步提出混燒灰渣再利用分類，包括漿料材製程、塑性材製程及破碎材製程的適用條件，為混燒灰渣的處理和再利用提供更多元應用之途徑。

【關鍵詞】固體再生燃料、混燒灰渣、漿料材製程、塑性材製程、破碎材製程、固化再利用分類

---

\*國立中央大學土木工程學系 碩士生

\*\*國立中央大學土木工程學系 碩士

\*\*\*國立中央大學土木工程學系 博士

\*\*\*\*環興科技股份有限公司能資源設施部 主任

\*\*\*\*\*國立中央大學土木工程學系 教授

## 一、前言

全球氣候變遷日益嚴重，減少溫室氣體排放、促進永續發展及達成淨零排放目標成為各國的共同挑戰。我國鼓勵企業將現有的流體化床鍋爐改以可燃廢棄物(橡膠、廢紙、纖維及廢木材等)製作成燃料，在這一背景下SRF(Solids Recovered Fuel)作為一種經過處理的固體再生燃料應運而生。SRF通過處理具熱質且符合環境品質要求的廢棄物，作為替代化石燃料的選擇，不僅能有效減少碳排放，還能推動資源的循環利用。由於其低生產成本、價格穩定以及資源再利用等優勢逐漸引起各界關注。然而，SRF與煤混燒後所產生的飛灰與底灰，其物理化學特性尚未明確，因而影響其再利用。如何妥善處理和管理這些灰渣，成為研究的重點。

使用燃燒後的混燒灰渣作為營建工程材料，不僅可減少進入掩埋場的壓力，還能節約自然資源，展現經濟和環保效益。本文探討SRF與煤混燒所產生灰渣的固化處理技術及其作為工程填築材料的可行性，並依其材料性能建議可行的現地製程，以利實務應用。同時，通過對混燒灰渣特性的掌握，提出一套有效的灰渣再利用分類建議，促進鍋爐混燒灰渣的資源化與再利用途徑。

## 二、試驗方法

本研究選取三家不同種類燃料所產生的混燒灰渣，參照CNS規範燃煤飛灰檢測方式及相關文獻內試驗方法，以分析不同原料所組成的混燒飛灰基本性質，接著針對混燒灰渣中的膨脹因子，包括可反應性金屬鋁、游離氧化鈣之含量進行檢測，然後採用水泥固化處理的方式，分別製成漿料材、塑性材、及破碎材等，評估混燒灰穩定化處理之成效，最後根據灰渣的基本性質，膨脹因子含量及穩定化處理等數據，提出混燒灰渣的再利用做為營建工程材料的分類方法建議。

### 1. 混燒灰渣成分及基本性質

本試驗所取樣的混燒灰渣其燃料成分如表1呈現，三廠燃料組成及比例皆不相同，A廠燃料組成中含有漿紙污泥成分，造紙過程中為增進紙張性能需添加碳酸鈣，而C廠藉由投入碳酸鈣進行爐內脫硫，以符合空氣污染防制法規，碳酸鈣在流體化床鍋爐中燃燒易還原成氧化鈣，因此A、C廠混燒灰有含游離氧化鈣之疑慮；B廠由於燃料使用煤炭量較多，

因此矽、鋁成份較高，也因輔助燃料中含食品與紡織污泥，使灰渣之燒失量偏高。流體化床鍋爐燃燒後產生之混燒灰渣又細分為飛灰、底灰，其外觀型態以 A 廠為例，如圖 1 所示。因目前國內對於混燒飛灰並無相關試驗檢測，因此參照 CNS3036 指定之相關物理、化學性質進行試驗，以了解混燒飛灰特性，利於後續再利用使用。

表 1 混燒灰渣燃料組成

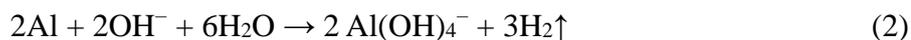
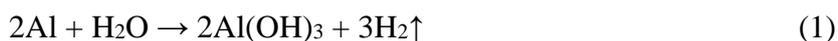
混燒灰種類	鍋爐種類	燃料組成及比例		
		煤(%)	固體再生燃料(%)	其他燃料(%)
A 廠	CFB 鍋爐	24	60.4(廠商未說明來源)	0.6 木屑、15 漿紙污泥
B 廠	CFB 鍋爐	71.8	13(廠商未說明來源)	0.6 食品加工污泥、2.3 紡織污泥、8.9 廢橡膠、3.4 廢金屬
C 廠	CFB 鍋爐	57	23(廢塑膠、廢舊衣)	20 廢橡膠



圖 1 A 廠混燒灰渣外觀

## 2. 膨脹潛勢檢測(可反應性鋁金屬含量檢測、游離氧化鈣含量檢測)

SRF 的組成中包含一些鋁製物品等成分，此類廢棄物產生之混燒飛灰部分因燃燒時間短及燃燒不完全導致鋁金屬呈活躍狀態，根據吳明富指出，若用於水泥系材料中，鋁金屬易與鹼性溶液反應而產生氫氣，以下列 2 條鋁金屬產氫之化學反應式(1)(2)可知 1 莫耳之鋁金屬約能產生 1.5 莫耳之氫氣。



目前國內對於固體再生燃料與燃煤混燒所產生的混燒灰渣，尚未針對其中的鋁金屬含量制定相關的標準檢驗方法。依據曾煜翔中提及的理想氣體方程式之單位莫耳氣體體積，推估鋁金屬於反應式(1)、(2)中的產氫

量。在 SATP 標準環境條件下(25°C、1 atm)，鋁金屬理論氫氣產量約為 1.36 L/g·Al。透過圖 2 所示的排水集氣法，收集不同鋁金屬添加量(0.01g 至 0.20g)與 1.0M 氫氧化鈉溶液反應後所產生的氫氣。基於鋁金屬添加量與產生的氫氣量進行回歸分析，並與理論值進行驗證，最終可透過此回歸分析公式推估混燒灰中可反應性鋁金屬的含量。

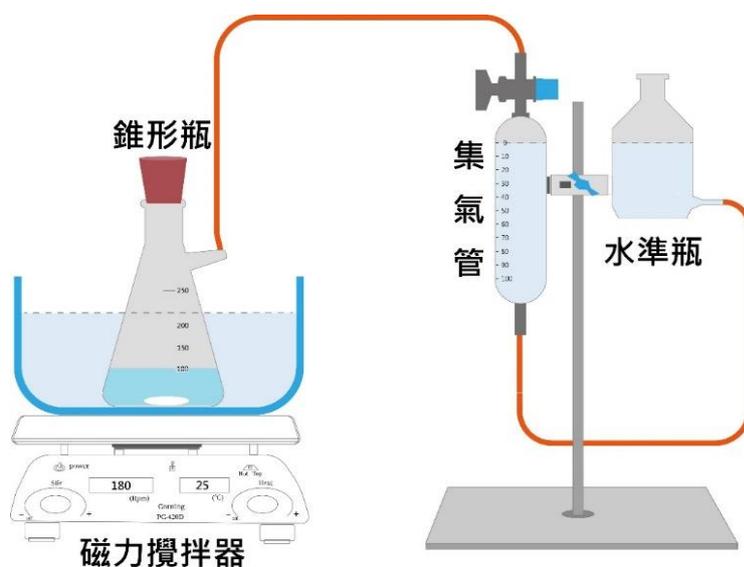


圖 2 可反應性鋁金屬定量分析檢測設備示意圖

為符合空氣汙染防制法規，部分鍋爐業者會投入大量石灰石進行脫硫，造成混燒飛灰含有過量的氧化鈣。根據下列氧化鈣的化學反應式(3)可知，若混燒飛灰或底灰中含有活性氧化鈣(f-CaO)，在與水接觸時會生成氫氧化鈣，並伴隨放熱、吸水反應，進而導致體積膨脹。為避免發生氧化鈣吸水造成試體膨脹及工作性下降等問題，需特別關注混燒灰中游離氧化鈣的含量。



本研究參考 EN451-1:2017 飛灰檢測游離氧化鈣含量法進行輔佐驗證，建立適用於混燒灰渣的游離氧化鈣含量檢測方法，如圖 3 所示。將混燒灰與乙醯乙酸乙酯及 2-丁醇混合，在煮沸的條件下進行萃取，選擇性將混燒灰中的游離氧化鈣分離出來。隨後，使用鹽酸對含有游離氧化鈣的濾液進行滴定，根據鹽酸的消耗量反推濾液中的 f-CaO 含量。

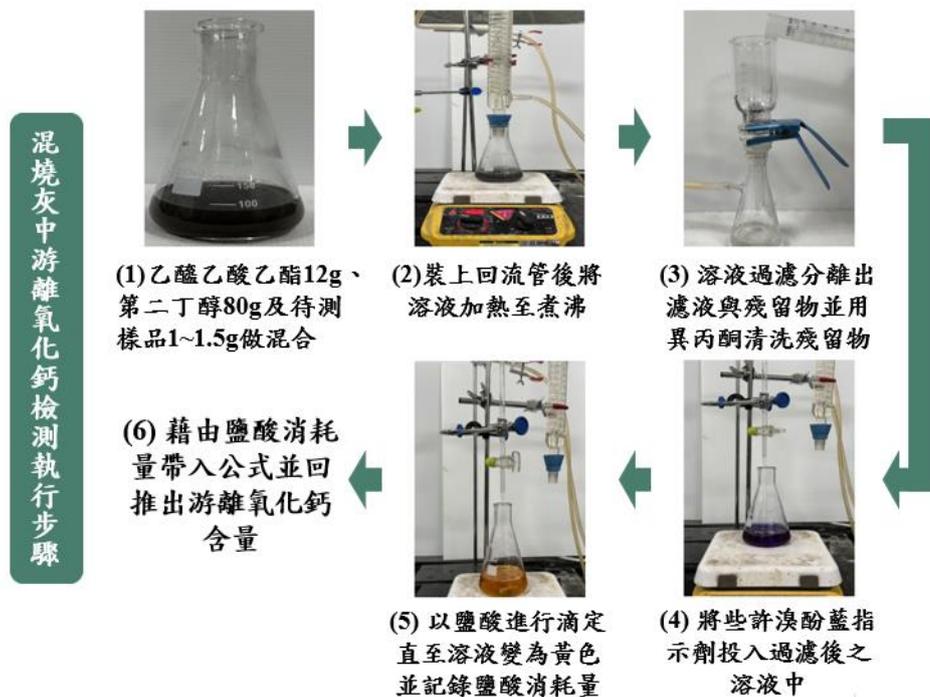


圖 3 游離氧化鈣含量檢測法流程圖

### 3. 水泥固化製程處理混燒灰渣(漿料材製程、塑性材製程、破碎材製程)

由於混燒灰渣中有含膨脹因子疑慮使部分混燒灰具有膨脹潛勢而影響工程應用。本研究參考日本石炭能源前沿機構(JCOAL, Japan Carbon Frontier Organization)之「港灣工事における石炭灰混合材料の有効利用ガイドライン」報告以及台電的煤灰海事工程應用手冊，其中關於燃煤飛灰後續如何再利用的方式，經由三種不同處理煤灰混合物之程序，包括漿料材製程、塑性材製程、破碎材製程，對混燒灰渣進行安定化處理，使其不發生膨脹後再進行再利用。

漿料材製程的設計需預先於實驗室進行試驗，其操作方式如圖 4 所示。將飛灰、底灰及適量的水進行混合形成灰渣混合物-漿料材，灰渣混合物會透過壓力泵送入攪拌車中，然後運送至現地，到達施工現場後，灰渣混合物通過壓送管路進行回填，這種方法能使混合物運送過程中所受影響最小化，且能夠確保漿料材的質量與性能。漿料材是由水泥、飛灰、底灰、水四種材料所組成的，以管流度控制混合物狀態，此製程所產出混合物具有極佳工作性，其現地製作方法及施工方式如圖 5 所示。

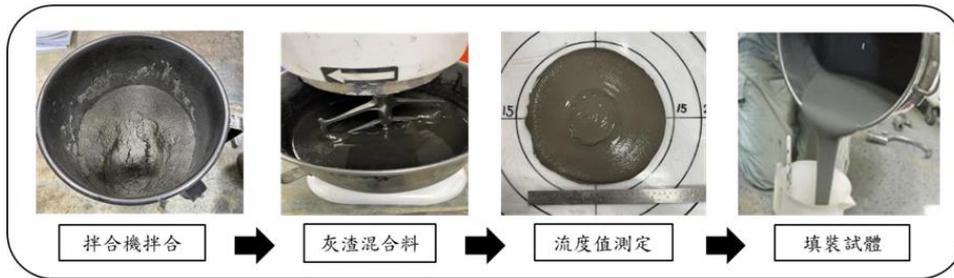


圖 4 實驗室內進行漿料材配製

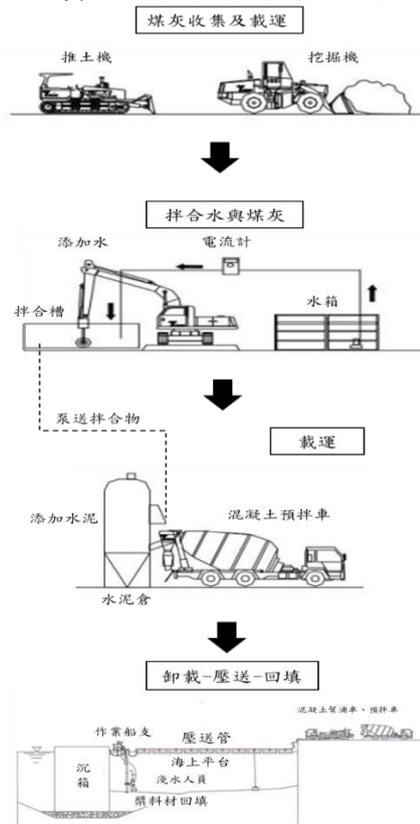


圖 5 灰渣混合物-漿料材現地製造及施工方式

塑性材製程中包含煤灰混合物製作(塑性材)、混合物載運、現地撒鋪攤平，以及現地施工壓實等多個階段如圖 6 所示。設計配比是基於實驗室的試驗結果，經由數據分析執行實驗驗證，且由於用水量的不同，灰渣混合料的狀態會成為類似飽和土壤狀，在壓實階段，現地是以壓路機來回滾壓以確保土壤緊實，而本研究為求符合現地之操作使用模擬現地壓實方式進行塑性材製作，塑性材之組成與漿料材相同，但由於使用的用水量少，使混合物外觀呈現像濕土壤狀態，其試驗過程如圖 7。



圖 6 灰渣混合料-塑性材現地製造及施工方式



圖 7 實驗室內進行塑性材製作

破碎材製程包括灰渣混合料的製備、現場輾壓滾實、現地破碎、運輸及工地滾壓填築等步驟，如圖 8 所示。該材料由塑性材經破碎程序產生，本研究使用之破碎材製程如圖 9 所示。其製程特點為可依照破碎力度去改變粒料尺寸並利用於路基與填築材料，本研究依據施工綱要規範第 02722 章中第三類型級配規定，將粒料破碎成規範所要求的粒徑大小，並依粒料筒壓強度、比重、吸水率、粒料受水合作用膨脹率及加州載重比等試驗，評估破碎材製程產品的材料成效。



(A) 拌合及輾壓滾實



(B) 養生靜置、破碎分選



(C) 車輛運送至工地



(D) 現地滾壓夯實、完成道路回填

圖 8 灰渣混合料-破碎材製造方法及施工方式



圖 9 實驗室內進行破碎材製程

為了比較各製程差異，漿料材設計配比將水泥用量固定為  $200 \text{ kg/m}^3$ ，且混燒飛灰與底灰使用量關係為 85%:15% 比例調整單位重，透過管流度控制調整用水量，其中管流度參考施工網要規範第 03377 章，使其具有流動性，便於現地回填時具充填能力。塑性材、破碎材設計配比由 CNS11777 土壤含水量與密度關係試驗法尋找最大乾密度與含水量，參考漿料材設計配比，調整單位重及含水量，直到獲得最大乾密度與對應含水量，即取得最佳配比。

### 三、試驗成果

#### 1. 混燒灰渣基本性質試驗及膨脹潛勢檢測結果

根據三種不同來源之混燒灰渣進行基本性質分析，發現各混燒灰性質差異甚大，化學成份分析結果如表 2，由於皆產自流體化床鍋爐，因使用石灰石脫硫導致灰渣的硫含量普遍偏高，流體化床鍋爐的燃燒時間及溫度相較於一般焚化爐低，導致混燒飛灰的燒失量較高。在飛灰中較高的燒失量表示未燃碳含量高，與水泥拌合可能會增加拌合水的用量，在後續試驗使用上可能會造成緩凝的現象。

表 2 混燒灰渣化學性質

項目	A 廠		B 廠		C 廠	
	飛灰	底灰	飛灰	底灰	飛灰	底灰
SiO <sub>2</sub> (%)	21.73	74.31	29.3	30.5	14.5	15.27
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	19.77	10.23	12.8	6.3	4.25	3.79
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	4.87	2.44	6.0	10.1	4.58	10.45
CaO(%)	31.86	8.92	20.3	24.0	53.4	53.05
MgO(%)	2.81	0.77	2.5	1.7	3.85	4.15
SO <sub>3</sub> (%)	7.24	0.16	11.4	24.0	10.9	6.85
Na <sub>2</sub> O(%)	0.75	0.56	2.0	1.3	1.53	0.51
K <sub>2</sub> O(%)	0.49	0.5	0.6	0.5	0.47	0.19
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	7.24	0.21	0.74	0.41	0.11	0.2
燒失量(%)	5.7	0.08	15.03	0.65	6.48	2.28
灼燒減量(%)	4.29	0.05	11.1	0.34	2.00	2.51

在物理性質方面如表 3 所示，混燒飛灰比重(2.74 至 2.93)明顯高於燃煤飛灰比重(2.1 至 2.4)。混燒飛灰的比重受到燃燒條件、燃料組成、化學成分、顆粒形態以及未燃碳含量等多重因素的影響，這些因素決定了飛灰的物理性質，進而影響其在不同再利用途徑中的適用性。三廠各齡期的強度活性指數均未達燃煤飛灰卜作嵐材料的標準。其中 A 廠的混燒飛灰強度活性指數極低(39.4%)，這與其較高氧化磷含量(7.24%)有關。磷酸鹽類會顯著延緩水泥凝結，進而降低水泥的硬固速率。由於 B 廠混燒飛灰的高燒失量，導致其需水量增加，使得其 28 天強度活性指數也偏低(55.9%)。

表 3 混燒灰渣物理性質

項目	A 廠		B 廠		C 廠	
	飛灰	底灰	飛灰	底灰	飛灰	底灰
比重	2.74	2.58	2.85	2.93	2.93	2.72
#325 篩餘量(%)	13	-	17	-	27	-
雷射粒徑分析	D10(μm)	2.01	-	1.66	-	0.69
	D50(μm)	12.23	-	8.35	-	2.62
	D90(μm)	50.45	-	52.03	-	64.57
細度模數(FM)	-	0.99	-	1.47	-	0.98
需水量，控制組百分率(%)	111.8	-	124.7	-	110.3	-
7 天強度活性指數，控制組百分率(%)	39.6	-	55.61	-	69.88	-
28 天強度活性指數，控制組百分率(%)	39.36	-	55.91	-	68.25	-

經由膨脹潛勢含量檢測所得結果呈現於表 4，檢測結果顯示可反應性鋁金屬(A 廠 1.76%、B 廠 1.28%、C 廠 0.02%)及游離氧化鈣(A 廠 1.07 %、B 廠 3.34%、C 廠 29.62%)皆存在於混燒飛灰內，而底灰中幾乎無驗出膨脹潛勢成分存在，推測原因是底灰在鍋爐中燃燒時間遠大於飛灰，可反應性鋁金屬與游離氧化鈣皆因高溫而反應完全，導致混燒底灰中已無膨脹因子成分。

表 4 膨脹潛勢含量檢測結果

來源	種類	鋁金屬含量(%)	游離氧化鈣含量(%)
A 廠	飛灰	1.76	0.75
	底灰	0	0
B 廠	飛灰	1.28	0.56
	底灰	0	0
C 廠	飛灰	0.02	3.58
	底灰	0	0.03

## 2. 水泥固化製程處理-漿料材製程結果

將三種不同來源之混燒飛灰以漿料材製程進行試驗，試樣於新拌至硬固歷程以 B 廠為例呈現於圖 10，試體拌合完成後三廠混燒灰皆會造成

膨脹，其中 C 廠 f-CaO 含量高達 29.62%，當試體裝填完成後開始大量放熱（約達 80°C），約 90 分鐘後試體發生氣爆，推斷為大量 f-CaO 放熱導致漿體快速硬固而使氫氣無法得到釋放所致，由於三廠混燒灰在漿料材製程方面皆表現出明顯的膨脹現象，因此本研究認為混燒灰中含有膨脹因子就不建議用於漿料材製程。



圖 10 B 廠漿料材製程體積變化歷程

### 3. 水泥固化製程處理-塑性材製程結果

以塑性材製程進行試驗之試體經 7、14、28 天養護後測量皆無體積膨脹如圖 11，說明塑性材製程對於混燒飛灰內的膨脹因子成份接受度高，但因 f-CaO 具放熱反應，需將拌合至夯實的時間縮短至 20 分鐘內，避免 f-CaO 對工作性造成影響。養護後之試體進行抗壓強度試驗結果如圖 12 所示。A、C 廠皆表現出良好的抗壓強度，而 B 廠因本身含較多未燃碳，因此拌合用水量較多，導致抗壓強度低。由此可見，塑性材製程對於混燒飛灰成分中含有膨脹因子者能發揮有效的穩定化效果。

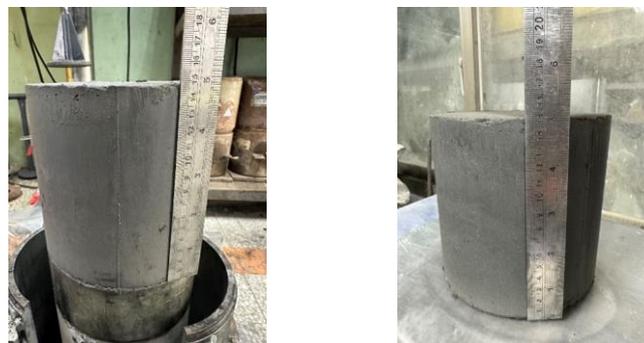


圖 11 塑性材-膨脹性測試

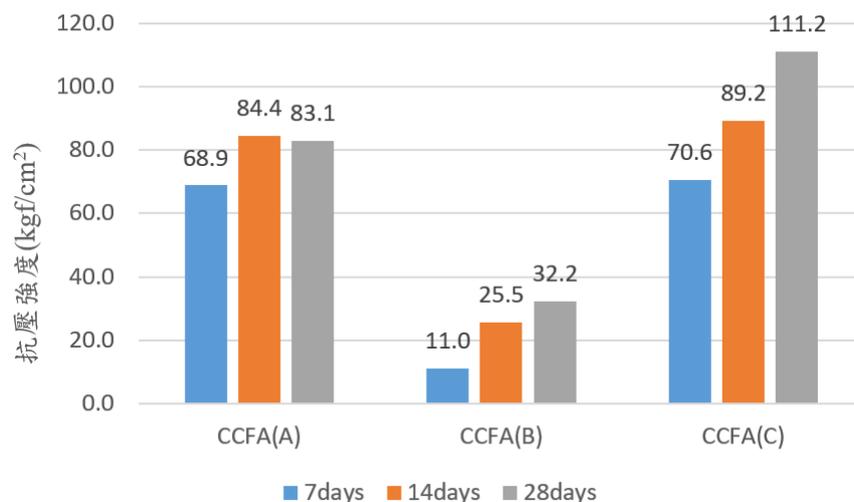


圖 12 塑性材齡期抗壓強度(kgf/cm<sup>2</sup>)

#### 4. 水泥固化製程處理-破碎材製程結果

塑性材經破碎程序後產出之破碎材，可視為一種再生粒料，對其密度、比重及吸水率等進行試驗，試驗結果如表 5 所示。三種破碎材飽和面乾(SSD)比重介於 1.65~1.84；而由於破碎材是水泥固化後的產物，故各廠破碎材的吸水率均偏高，介於 35.3~50.3%，作為再生粒料使用時，須留意其與天然粒料吸水率的差異。

表 5 破碎材基本性質

試驗組別	容積比重 SSD	容積比重 OD	吸水率(%)
A 廠	1.70	1.17	35.3
B 廠	1.65	1.16	36.4
C 廠	1.84	1.21	50.3

粗粒料筒壓強度試驗結果呈現於表 6，三廠破碎材的筒壓強度 介於 12.5~18.7 kgf/cm<sup>2</sup> 間。相較於台電燃煤底灰的筒壓強度 4~10 kgf/cm<sup>2</sup> 而言更高，作為道路填築粒料具有十足潛力。

表 6 破碎材筒壓強度試驗

試驗組別	承壓面積(cm <sup>2</sup> )	貫入壓力值(kgf)	筒壓強度(kgf/cm <sup>2</sup> )
CCFA(A)	103.9	1944	18.7
CCFA(B)		1235	11.9
CCFA(C)		1300	12.5

破碎材經夯實製成試體進行 CBR 驗所得結果如表 7 所示，A、B 廠破碎材 CBR 值分別為 152 % 及 175 %，相較於 C 廠 68 % 高出許多，推測因經夯實程序發生粒料破裂而使材料堆積更為緊密，僅有 C 廠粒料破裂程度較低；且在夯實完試體後浸水 4 天，過程中試體內未水化完全的水泥顆粒持續進行水化反應，使 A、B 廠破碎材持續發展強度，導致其 CBR 值增高。關於破碎材的檢驗標準參考施工綱要規範第 02722 章級配粒料基層中第三類型基層級配所規定 CBR 值須至少 20%，經測試後三種破碎材皆符合標準，後續透過粒料受水合作用之潛在膨脹試驗，測試經固化破碎的粒料是否具有膨脹性，結果三種混燒飛灰製成之破碎材膨脹率皆為 0%，驗證破碎材克服膨脹潛勢作為再生粒料、填築材料或基底層材料之潛力。

表 7 破碎材加州載重比試驗

CBR 試驗	A 廠	B 廠	C 廠
膨脹率(%)	0	0	0
95%乾單位重(kg/m <sup>3</sup> )	1204	990	1248
95%乾單位重 CBR(%)	152	175	68

#### 5. 混燒灰再利用分類

本研究結合混燒灰基本性質及膨脹潛勢檢測結果，根據劉錦霖中建議的不同特性混燒灰適合之產品製程，提出混燒灰渣再利用分類標準。將三種檢測項目影響層面分為體積穩定性(鋁金屬含量 0%)、工作性(f-CaO 含量 2%)及水泥相容性(強度活性指數 75%)。

從體積穩定性層面開始，若混燒灰檢測出鋁含量(>0%)即會引起膨脹的問題，此時建議使用塑性材製程或破碎材製程，藉此消彌膨脹帶來的體積穩定性問題；若混燒灰不含鋁金屬則進行下一分類檢測，當游離氧化鈣含量符合標準(如<2%)時，即可增加漿料材製程選項，且可接著討論強度活性指數項目，反之如果游離氧化鈣含量較高時(如>2%)會影響工作性，將回到上一個檢測項目所建議的再利用製程，當試驗結果強度活性指數高於 75%，可再增加作為水泥輔助膠結材的再利用方式。本文依據混燒灰渣特性建立之再利用分類程序如圖 13 所示。

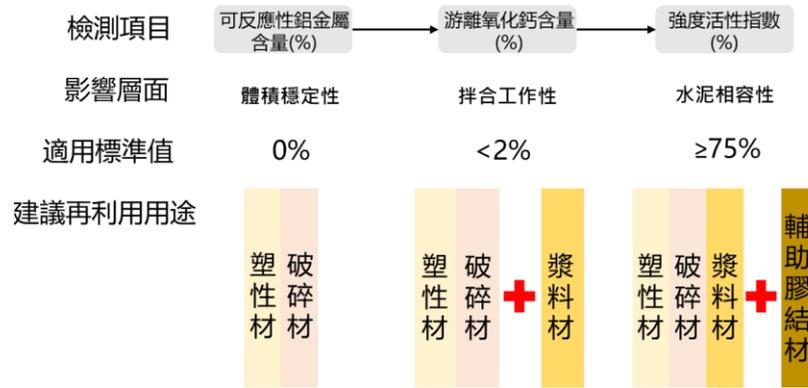


圖 13 混燒飛灰再利用建議分類法

#### 四、結論

具膨脹性混燒灰渣進行水泥固化處理，採用塑性材製程、破碎材製程可避免發生膨脹性反應，且經由相關試驗後三種破碎材皆符合施工綱要規範的標準，具備作為道路填築粒料使用之潛力。基於參考樣本有限，仍需收集更多樣本以提高分類標準的有效性，隨著檢測項目增加和標準的提高，混燒灰的再利用途徑也會隨之增加。

#### 五、參考文獻

1. CNS3036，混凝土用燃煤飛灰及未煨燒或煨燒天然卜作嵐材料，2021。
2. 吳明富，含鋁金屬混燒飛灰膨脹特性研究暨預處理穩定化方法評估，博士論文，國立中央大學，2023。
3. 曾煜翔，混燒飛灰中鋁金屬含量檢測方式建立暨濕式處理成之研究，國立中央大學碩士論文，2023。
4. European Committee for Standardization. Method of testing fly ash - Part 1: Determination of free calcium oxide content (EN 451-1). Brussels: CEN, 2017。
5. 一般財団法人石炭エネルギーセンター，石炭灰混合材料有効利用ガイドライン（統合改訂版），2018。
6. 台灣電力公司，煤灰海事工程應用手冊，2021。
7. 施工綱要規範，第 02722 章「級配粒料基層」，2018。
8. 劉錦霖，混燒飛灰經固化製程再利用於工程回填材料之試驗評估，國立中央大學碩士論文，2024。

# 水泥窯協同處理廢風機葉片實務探討

陳志賢\*、詹忠榮\*\*、沈克鵬\*\*\*、劉丞偉\*\*\*\*、林庭安\*\*\*\*\*、黃謙惠\*\*\*\*\*

## 摘要

為達成 2050 淨零排放，能源轉型刻不容緩，國內積極發展風力發電，以減少燃燒化石燃料發電所產生的碳排。當風力發電機損壞或屆齡除役後，包含鋼鐵、銅線、電子設備及傳動裝置等，都可以被回收再利用，但是葉片材質是以堅韌的玻璃纖維及樹脂等高強度複合材質(Fiberglass Reinforced Plastics，簡稱 FRP)所製成，最難被回收處理。以每 1MW 風力發電機組會產出 12~15 公噸廢風機葉片、國內每年新增 1.5GW 機組的目標估計，在風力發電機屆滿使用年限時，將衍生每年 2 萬公噸以上之廢風機葉片處理需求。

廢風機葉片現行處理方式包括掩埋及焚燒，分別面臨掩埋場土地資源不足及燃燒後產生纖維底渣與空污等疑慮，所以目前仍以暫置方式為主，等待更環保可行的處理技術。

本文探討水泥窯協同處理廢風機葉片技術與其相關處理技術，包括廢風機葉片材料分析、前處理技術、水泥窯操作、空污排放及對水泥品質影響，確認國內也適合採用水泥窯協同處理技術，同時對廢風機葉片進行熱能回收及材料回收，避免廢風機葉片處理不當衍生環境污染疑慮。

【關鍵詞】廢風機葉片、水泥窯、協同處理、循環經濟

---

\*亞洲水泥股份有限公司花蓮製造廠 首席副廠長

\*\*亞洲水泥股份有限公司花蓮製造廠 製造組股長

\*\*\*工業技術研究院綠能所環安政策推動組 組長

\*\*\*\*工業技術研究院綠能所環安政策推動組 資深研究員

\*\*\*\*\*工業技術研究院綠能所環安政策推動組 研究員

\*\*\*\*\*工業技術研究院綠能所環安政策推動組 副研究員

## 一、前言

近年來，劇烈且無常的氣候變遷給人們帶來嚴厲的警告，各國政府開始思考如何透過節能減碳，以減少化石能源對環境造成的危害，「再生能源」成為人們思考的解法之一，而「風能」於再生能源領域扮演一重要角色。

民國 89 年（西元 2000 年）台塑集團以四座 600 kW Vestas V47 風機在雲林麥寮設置了國內第一座商轉陸域示範風場，是我國陸域風電產業發展的起點；該風場裝置容量總計為 2.64MW，其產出電力係供給雲林六輕工業區使用。根據能源署再生能源裝機容量統計數據顯示，國內至 113 年 8 月之陸域與離岸風機裝置容量分別為 915MW 與 2,724MW，整體風能裝置容量已突破 3.6 GW。

因應能源需求與淨零碳排的趨勢，新安裝風機數量日漸攀升，相對而言面臨汰役的數量也很驚人，根據統計，截至 2050 年前全球會有 4,700 萬公噸的葉片廢棄物；而根據歐洲風能機構(WindEurope)整理數據顯示，未來五年內整個歐洲將拆除約 14,000 個風機葉片，將產生 40,000 至 60,000 公噸廢棄物，勢必面臨關鍵的葉片去化挑戰。國內早期發展之陸域風場亦逐漸面臨風機除役的挑戰，已有少數陸域風場申請汰役、更新；根據台電 112 年電業年報顯示，其位於澎湖的中屯風場已於 112 年 10 月 19 日因安全性因素，停止使用既有 8 座 Enercon E40 風電機組，進行舊有風機汰役與更新作業。以國內風能政策發展目標為據，並將陸域與離岸風機之汰役年份分別以平均 20 與 25 年生命週期設定，統計國內至 2050 年前面臨汰役年限之風場、關聯風電機組數量與對應汰役葉片重量；預期汰役或更新之葉片排出重量，短期至 2030 年止累計近 6,000 噸，中期至 2040 年止累計近 9,400 公噸，長期以每年(2026~2030 年)新增 1.5GW 機組的目標，每 1MW 風力發電機組會產出 12~15 公噸廢風機葉片估計，至 2050 年每年會有 2 萬公噸以上之廢風機葉片處理需求。

目前整體風機裝置的組成約 80-90 wt % 是可回收材料組成，包含鋼鐵、銅線或是電子零件以及塔架等，然而尚有 10-20wt% 的風機葉片難以回收處理，係因風機葉片主要由纖維複合材料組成，其材質約 60-70 wt % 為玻璃纖維，其餘 30-40 wt % 為樹脂材料；而內部芯材則由巴莎木、PET 或 PU 發泡材料所組成。國際上，現階段針對汰役葉片處置方法仍以掩埋、暫時堆置或焚化等為主，而德國已於 2009 年起禁止掩埋複合材料廢棄物，因此廢風機葉片亦屬於被禁止掩埋的廢棄物之一。然而因國內地狹人稠、腹地不足，不適合以掩埋或堆置等方式去化廢風機葉片，若改用焚化處理又會因燃燒溫度

不足，而使焚化爐體產生難以去化的熔融纖維底渣、有毒廢氣等問題，亦成為不可忽視的環境隱憂。

相較於焚化處理，同樣為高溫熱處理方法的水泥窯協同處理則可一次性大量去化廢葉片，該去化技術之成熟度較高，德國 Holcim Lägerdorf 水泥窯亦行之有年。在歐美地區使用水泥窯進行玻璃纖維複合材料廢棄物處理，可做為水泥替代原料進而達到減少礦物原料之使用量，在考量破碎、運輸、前處理以及處理量能成本，水泥窯是目前最符合經濟價值的玻璃纖維葉片處理方式。因此，本研究以探討國內採水泥窯協同處理廢風機葉片之技術可行性為目標，並評估其對於水泥窯操作及衍生水泥產品品質之影響。

## 二、廢風機葉片處理技術現況

廢風機葉片係由纖維與環氧樹脂組成之複合材料，其於固化階段會經過交聯反應，使結構之間產生不可逆之鍵結，此鍵結會提升風機葉片的機械強度及耐久性，惟當風機葉片抵達生命週期終點時，無法使用簡易的方式將廢風機葉片回收處置。現行國際多以掩埋、堆置等最終處置方式去化廢風機葉片；根據歐盟廢棄物框架指令 (EU's Waste Framework Directive, 2008/98/EC) 指出，掩埋應該是廢棄物處理等級或處置策略中的最後手段 (圖 1)，期望廢棄物可通過妥適的再利用手段達到資源循環的目的，包含 Reuse、Repurpose、Recycling 及 Recovery 等。而歐洲風能機構亦指出歐盟已針對廢風機葉片掩埋頒布禁令，若風電行業不做出改變，大量的風機葉片廢棄物將無法得到有效的終端處置。

廢風機葉片回收技術主要分為 3 大類：(1)機械回收、(2)熱裂解回收及(3)化學解聚回收等。機械回收係透過破碎及研磨等方式，將廢風機葉片粉碎成粉末，以填料的形式添加於塑膠或建築材料中；優點在於，其可透過簡單破碎或研磨等方式，即可達到回收再利用之目的，然而缺點在於若將廢風機葉片碎片或粉末做為填料，再利用經濟價值較低，去化管道受限，難以有效推展。熱裂解回收技術係透過將廢風機葉片置於無氧環境中，加熱至 400-750°C 後，廢風機葉片中的玻璃纖維經由高溫裂解後會分解成再生纖維，而樹脂材料則會形成蒸氣或燃料油；再生纖維可進行後續加工再利用，燃料油則可做為替代燃料提供能量予鍋爐或焚化爐等使用，再利用價值高於機械回收技術，但其缺點在於高溫裂解過程中，葉片中的纖維性質易因吸收過多熱能而受到損害或是表層樹脂殘留形成焦炭，另為避免受熱不均，風機葉片必須經過破碎，其所獲得之再生纖維長度較短，後續再利用範疇受限。

化學解聚回收則係經由溶劑配方調配，將廢風機葉片中的熱固性樹脂分子鍵斷鍵分解成低分子量寡聚物，並可將纖維從反應後溶液中取出，可保留原始纖維型態，使其特性不被破壞，亦可將具備熱值的樹脂寡聚物做為固體再生燃料進行後續再利用。以上三種回收技術各有優缺點，目前仍處於開發驗證階段，尚無法大批量去化廢風機葉片。

## Waste treatment hierarchy

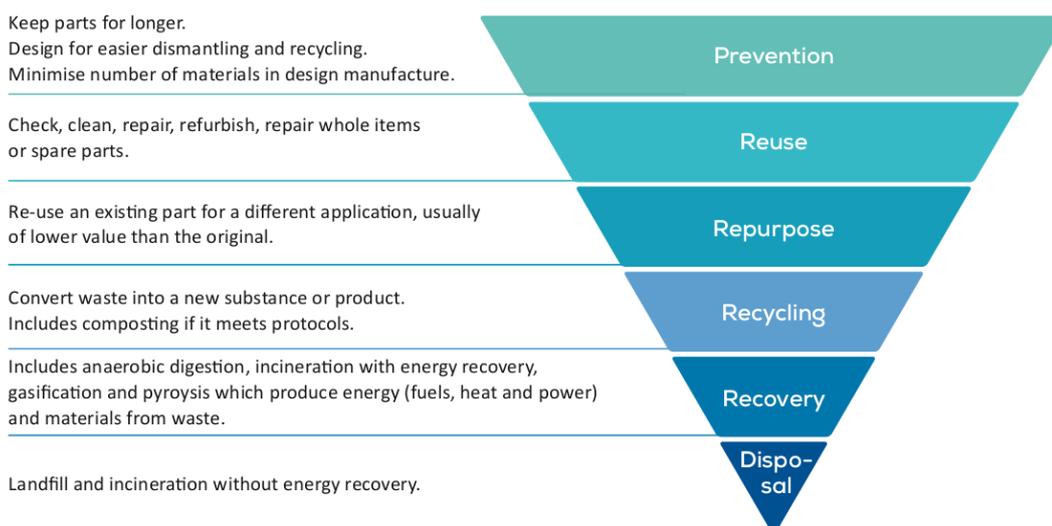


圖 1 廢棄物處置層級示意圖

因此，除上述廢風機葉片回收 Recycling 層級，國際上亦同步使用廢棄物回收處理層級中—Recovery 的概念，將廢棄物視為替代燃料，經由焚化或高溫燃燒獲得能量使用。而水泥窯協同處理則同時兼具 Recycling 及 Recovery 的層級，換言之，水泥窯協同處理可同時進行熱量及材料的回收利用。將廢風機葉片投入水泥窯中經過 1450°C 高溫煅燒後，樹脂材料會分解產生熱能可減少煤的使用；玻璃纖維複合材料中的矽、鋁、鐵及鈣會在高溫煅燒後化合形成水泥熟料，最終可以製成水泥產品。因此，可將廢風機葉片中的玻璃纖維視為替代原料的角色，達到減少使用水泥生料原料的目的；而樹脂材料亦可提供水泥旋窯運轉所需的熱能，進而降低天然煤炭的使用<sup>[11]</sup>。美國 Veolia 公司及德國 Geocycle 公司皆屬於利用水泥窯協同處理技術去化廢風機葉片的業內先行者，宣稱使用廢風機葉片取代水泥生料及燃料的使用<sup>[12]</sup>。水泥窯協同處理可以去化大量的廢風機葉片，並且可將其成分資源化再利用，因此係目前最具廢風機葉片去化潛力之回收技術。

### 三、水泥窯協同處理廢風機葉片國內首家實廠試驗

本研究為國內首次以水泥窯協同處理廢風機葉片的實廠試驗，由台灣電力公司再生能源處提供廢風機葉片，試驗內容包括葉片性質分析、前處理、水泥窯試燒，探討處理廢風機葉片對水泥窯操作、水泥品質及空污排放的影響。

#### (一)廢風機葉片來源

本次試驗的廢風機葉片來自台灣電力公司再生能源處的陸域風力發電機組，規格如下(表 1)，以 Vestas V80 為主，以及少部分 GE Vernova GE 1.5se。

表 1 本次實廠試驗的廢風機葉片規格

廠牌	生產國	型號	裝置容量 (MW)	葉片長度 (M)	轉子重量 (輪轂+3 葉葉片) (公噸)
Vestas	丹麥	V80	2	39	37
GE Vernova	美國	GE 1.5se	1.5	34	28

#### (二)廢風機葉片性質分析

廢風機葉片是複合材料，以水泥窯協同處理，不可燃部分可替代水泥原料；具有熱值的可燃部分可取代煤炭使用，兼具原料及燃料的性質。為評估處理風機葉片對水泥窯運行的影響，本研究針對風機葉片的燃料性質和不可燃的灰分化學組成進行分析(表 2)。風機葉片的可燃分約佔 34%，高位熱值約為 2,600 kcal/kg，大約是煤炭熱值的 40%；不可燃的灰分約佔 65%，主要成分是 SiO<sub>2</sub>、CaO 及 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>，為水泥生產需要的重要元素(Ca, Si, Al, Fe)，可替代水泥原料石灰石和黏土。氯化物的含量 0.03~2.07% 分布範圍大，平均高達 0.72%，需要控制摻加量以確保符合卜特蘭水泥國家標準 CNS 61 氯離子含量最大值 0.024 % 之規定，避免對水泥品質產生不良影響。

表 2 本次實廠試驗的廢風機葉片性質分析結果

樣品組別		#1	#2	#3	#4	#5	平均
高位熱值 (kcal/kg)	烘乾基	3,223	3,068	2,217	2,714	1,840	2,612
	接收基	3,178	3,028	2,244	2,687	1,822	2,592
三成分 (%)	水分	1.4	1.3	1.2	1.0	1.0	1.2
	灰分	58.8	74.6	63.7	64.0	63.8	65.0
	可燃分	39.8	24.1	35.1	35.1	35.2	33.8
氯含量(%)		2.07	0.03	0.32	0.65	0.55	0.72
灰分 化學組成 (%)	SiO <sub>2</sub>	55.0	57.7	58.5	59.4	58.9	57.9
	CaO	22.9	23.3	22.4	23.6	23.0	23.0
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.4	13.7	13.9	13.1	12.5	13.3
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.6	1.0	1.5	1.0	1.2	1.3
	MgO	2.5	1.8	1.8	3.5	3.9	2.7
	Na <sub>2</sub> O	0.45	0.42	0.38	0.97	0.00	0.44
	K <sub>2</sub> O	0.39	0.43	0.40	0.62	0.49	0.47

分析方法：

高位熱值：固體再生燃料熱值檢測方法－彈卡計法(NIEA M216.00C)

水分：一般廢棄物（垃圾）水分測定法（NIEA R213.21C）

灰分、可燃分：廢棄物中灰分、可燃分測定方法（NIEA R205.01C）

氯含量：固體再生燃料中硫、氯、氟及溴含量檢測方法(NIEA M217.00C)

灰分化學組成：XRF 玻璃熔融法

### (三)廢風機葉片前處理

本次試驗的廢風機葉片，每一葉的長度約 40 公尺，非常巨大，需要先經過前處理程序，破碎成小於 3 公分的碎片後，才能投入水泥窯。台電公司考量在貯放區現地執行破碎作業，會有粉塵逸散的空污問題，因此廢葉片在台電廠區先以水刀裁切至長度約 10 公尺(圖 2)，再吊掛至拖板車，清運到處理廠進行後續的前處理。

前處理的主要目的是將葉片縮小到適合水泥窯使用的尺寸，以及去除葉片上的不適燃物質。廢風機葉片除了 FRP 複合材料、泡棉等可燃物之外，還有葉片根部要和輪轂連接的金屬螺栓(圖 3)及防雷擊系統的接閃器與導線(圖 4)等不可燃物，這些不可燃物必須在前處理程序去除，以免造成後續處理廠的破碎設備及水泥廠的輸送設備損壞。

前處理程序包括以怪手油壓大鋼剪撕碎、人工撿拾不適燃物、粗破碎、磁選、細破碎(圖 5)，最後成為粒徑小於 3 公分的碎片(圖 6)。



圖 2 廢風機葉片以水刀進行裁切



圖 3 廢風機葉片根部上有許多金屬螺栓



圖 4 廢風機葉片前處理挑選出來的防雷擊系統之接閃器與導線

粗破碎 -----> 細破碎



圖 5 廢風機葉片前處理需經過粗破碎及細破碎程序



圖 6 廢風機葉片經前處理成為粒徑小於 3 公分的碎片

#### (四)水泥窯試燒

##### 1. 水泥窯試燒操作

亞泥花蓮製造廠有 3 座旋窯系統，本次試驗在二號及三號系統進行，設備的規格詳見表 3。目前亞泥花蓮廠已導入循環經濟，設置替代燃料進料系統(圖 7)，可以使用木屑、塑膠片及固體再生燃料(Solid recovered fuel, SRF)及廢塑膠等可燃物作為替代燃料，取代天然煤炭耗用。廢風機葉片前處理後的碎片，在替代燃料投料口投料(圖 8)，再以輸送設備運送到預熱機的上升風道(RISER)燃燒(圖 9)。

表 3 本次實廠試驗的水泥窯設備規格

系統別	預熱機	旋窯尺寸	冷卻機	熟料產能(公噸/日)
二號窯系統	四段式 Dyrrolon 預熱機	4.6m <sup>φ</sup> x 64m	推棍式 冷卻機	4,700
三號窯系統	四段式 Pyrorapid 預熱機	5.0m <sup>φ</sup> x 55m	爐排式 冷卻機	5,100



圖 7 水泥窯之預熱機、旋窯及替代燃料投料口外觀



圖 8 廢風機葉片碎料在投料口加料的外觀

風機葉片會在上升風道 800~920°C 的高溫環境和煤粉一起燃燒，提供熱能給生料預熱及脫酸，燃燼的灰分再和系統中，經過一段、二段及三段旋風筒熱交換後的熱生料混合，再經過四段旋風筒收集後，進入旋窯鍛燒，經過旋窯 1450°C 的高溫鍛燒後，熱生料、煤灰及風機葉片的灰分全部都會化合成為水泥熟料的矽酸鹽礦物，不會衍生剩餘灰渣需處理的二次污染問題。

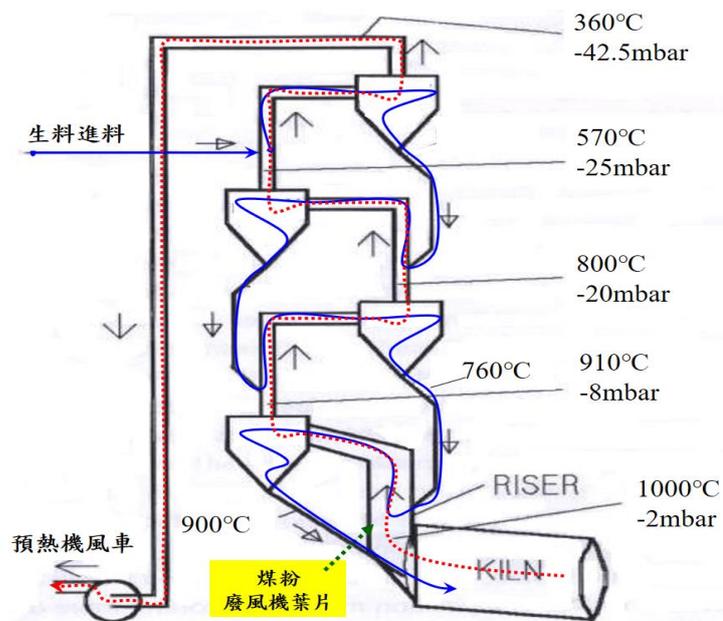


圖 9 廢風機葉片碎料在預熱機上升風道投料的位置及燃燒環境

比較廢風機葉片試驗期間的一般操作及試燒葉片期間的生料進料量及熟料產量(表 4)，並無明顯差異；二號窯試燒廢風機葉片期間，每小時節省 1 公噸煤粉，三號窯試燒廢風機葉片期間，每小時節省 0.4 公噸煤粉，因此處理廢風機葉片可以節省燃料耗用，去化每公噸廢風機葉片大約可以降低 0.2~0.4 公噸煤炭。

表 4 實廠試驗的水泥窯操作數據

操作條件	二號窯		三號窯	
	一般操作	試燒葉片	一般操作	試燒葉片
廢風機葉片投入量 (公噸/小時)	0	2.4	0	1.8
生料進料量 (公噸/小時)	247.7	247.5	294.5	295.0
煤粉使用量 (公噸/小時)	22.1	21.1	26.1	25.7
熟料產量 (公噸/小時)	159.2	159.0	169.2	169.5

## 2. 對水泥品質影響

廢風機葉片燃燒後仍有約 65% 不可燃物會成為替代原料，將貢獻成份至水泥熟料當中，估計二號窯試驗期間，廢風機葉片的灰份約占熟料的 0.98%；三號窯試驗期間，廢風機葉片的灰份約占熟料的 0.69%。實際分析水泥熟料化學組成及熟泥抗壓強度(表 5)，一般操作及試燒葉片期間並無明顯差異，可推知不可燃份亦已充分與水泥原料熱化學反應形成水泥熟料。

表 5 實廠試驗期間的水泥熟料化學組成及熟泥物理性質

操作條件		二號窯		三號窯		CNS 61 I 型規範
		一般操作	試燒葉片	一般操作	試燒葉片	
化學組成(%)	SiO <sub>2</sub>	21.2	21.3	22.1	22.0	
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.7	3.3	4.6	4.5	
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.6	3.5	3.1	3.0	
	CaO	65.5	65.1	65.2	65.1	
	MgO	3.0	3.1	2.8	2.9	≤6.0
	SO <sub>3</sub>	0.41	0.37	0.23	0.30	
	Na <sub>2</sub> O	0.24	0.27	0.22	0.23	
	K <sub>2</sub> O	0.37	0.39	0.43	0.43	
	鹼當量	0.48	0.53	0.50	0.51	≤0.60(任選)

操作條件		二號窯		三號窯		CNS 61 I 型規範
		一般操作	試燒葉片	一般操作	試燒葉片	
	CI	0.016	0.015	0.010	0.011	≤0.024(任選)
抗壓強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	3 天	219	209	219	203	≥122
	7 天	289	304	306	293	≥194
	28 天	413	411	423	411	≥286

### 3. 對空污排放影響

為了解廢風機葉片試燒對於空氣污染物排放的影響，本次試驗針對水泥窯排放管道的硫氧化物(參考方法:NIEA A413.75C)、氮氧化物(參考方法:NIEA A411.75C)及粒狀污染物(參考方法: NIEA A101.77C)進行檢測分析，結果如表 6。

由空污檢測結果得知，廢風機葉片試燒期間，硫氧化物和氮氧化物都有些微下降，粉塵排放不透光度則無明顯變化，顯示在旋窯 3T(高溫、長時間、高紊流)燒成條件下，試燒廢風機葉片對於空污排放並無明顯不利影響，且因試燒葉片期間會造成些微還原氣份，具有降低 NO<sub>x</sub> 排放濃度作用。

表 6 實廠試驗期間空污排放檢測結果

操作條件	二號窯		三號窯		水泥業空污 排放標準
	一般操作	試燒葉片	一般操作	試燒葉片	
廢風機葉片投入量 (公噸/小時)	0	2.4	0	1.8	-
硫氧化物含量(ppm)	<1	<1	30	22	100
氮氧化物含量(ppm)	260	249	324	269	350
粒狀物 (mg/Nm <sup>3</sup> )	9.0	9.0	2.0	1.5	50

## 四、結論與建議

水泥窯導入循環經濟，再利用各種廢棄物的基本前提是生產出來的水泥產品都必須維持相同的品質，不會因為使用廢棄物作為替代原料或替代燃料而受到影響。因此未來水泥廠在處理廢風機葉片時，仍需針對不同來源的風機葉片進行詳細分析後，再依據分析的結果研擬最佳的處理方式。

此次實廠試驗發現廢風機葉片在前處理過程，由於葉片複合材料非常的堅韌，因此設備的刀具及傳動設備損耗明顯，未來當有大量廢風機葉片需要處理時，前處理設備的選用可以評估採用更加耐用的設備。

風力發電是政府大力發展的綠色能源，社會大眾也關切未來大量風機除役後，衍生的廢棄物如何妥善處理，以避免造成後續的環境污染。本次實廠試驗的結果顯示，國內採用水泥窯協同處理廢風機葉片具有技術可行性。藉由水泥窯協同處理可以妥善的回收廢風機葉片作為水泥窯的原料及燃料，以未來每年產出 2 萬公噸廢風機葉片全部採用水泥窯協同處理估計，大約可以節省 8,000 公噸煤炭及 13,000 公噸天然礦石耗用，達到廢棄物妥善處理，及減少天然資源耗用的雙重效益。因此，建議政府未來能參考歐盟規定，限制廢風機葉片複合材料不得採用掩埋方式處理，以達到資源循環的目的。

## 五、致謝

本研究承蒙環境部資源循環署及台電公司再生能源處協助，特此致謝。

## 六、參考文獻

1. 再生能源裝機容量統計 113 年 8 月份月報，再生能源資訊網，經濟部能源局。
2. Accelerating wind turbine blade circularity – 2020, WindEurope, Cefic & EuCIA. May 2020.
3. 3.112 年電業年報，台灣電力公司，113 年 3 月。
4. 澎湖中屯風力發電站更新計畫環境影響說明書，台灣電力公司，113 年 1 月。
5. 臺灣 2050 淨零排放路徑及策略總說明，國家發展委員會、行政院環境保護署、經濟部、科技部、交通部、內政部、行政院農業委員會、金融監督管理委員會，111 年 3 月。
6. Jensen, J.P., Skelton, K., Wind turbine blade recycling: experiences, challenges and possibilities in a circular economy. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 97, 165~176, December 2018.
7. Michael Hinkel , Steffen Blume, Daniel Hinchliffe ,Dieter Mutz , Dirk Hengevoss, Guidelines on Pre- and Co-processing of Waste in Cement Production., GIZ-Holcim , January 2020.
8. How wind is going circular blade recycling, ETIPWind®, 2020.
9. How to build a circular economy for wind turbine blades through policy

and Partnerships, Wind Europe, November 2020.

10. Sustainable decommissioning: wind turbine blade recycling, Report from phase 1 of the energy transition alliance blade recycling project, 2020.
11. 鄭為珊、丁俊元、陳建緯，循環經濟：循環經濟的發展與應用—水泥篇，科技大觀園，107年3月。
12. GE Renewable Energy Announces US Blade Recycling Contract with Veolia, December 2020.

# 末端回收系統中水廠處理技術

王智滢\*、蔡旻杰\*\*、彭柏頤\*\*\*、黃任榆\*\*\*\*

## 摘 要

中水(Reclaimed water)又稱為再生水，係指廢(污)水經廢(污)水系統處理後，原將放流的水進一步經過生物降解(Biodegradable)與膜過濾(Membrane filtration)技術，回收再利用。由於全世界淡水資源匱乏，中水因具備質穩定、不受水文天候限制等優勢，各國紛紛開發中水利用並逐步成為關注的焦點。末端回收系統應用生物粉末活性炭(Bio-Powdered Activated Carbon, BPAC)、薄膜生物反應器(Membrane Bio-Reactor, MBR)及逆滲透膜(Reverse osmosis, RO)等處理程序，以去除水中有機污染物、無機污染物和淨化水質達自來水標準以上，增加水資源利用率與減少廢(污)水排放量。

本水資源再生技術主要著重於有效去除放流水之雜質並純化，利用BPAC單元吸附降解污染物質，並透過MBR單元去除有機污染物與固液分離，最終應用RO過濾淨化水質，回收百分之五十原本需要排放的放流水，可作為工業與次級用水使用；剩餘百分之五十經處理後的放流水，水質標準也較未處理的排放水質佳，兼顧有效保水與生態維護。此技術不僅可提升水回收利用率，亦可減少放流水排放量，以降低環境衝擊達到永續發展並創造循環經濟之效益。

【關鍵詞】中水、水資源、末端回收

---

\*矽品精密工業股份有限公司 資深工程師

\*\*矽品精密工業股份有限公司 技術副理

\*\*\*矽品精密工業股份有限公司 技術經理

\*\*\*\*矽品精密工業股份有限公司 副處長

## 一、前言

臺灣年平均降雨量達 2,500 mm，總降雨量雖豐沛，但受限於地理環境因素，水量不易儲存，僅約百分之二十的年雨量被利用。加上近年因極端氣候造成降雨量分佈不均，豐水年與枯水年差距逐漸加大，枯水年出現頻率縮短，對水資源應用與管理造成極大的影響。半導體封裝製程中需耗用大量清洗水，穩定的水源供給才能持續生產，因此產業界紛紛實施水回收政策及投入回收水技術發展，以降低供水短缺風險。目前製程廢水經處理至符合放流水標準後直接排放，因放流水具備質穩量定、不受水文天候限制等優勢，若能將放流水進一步處理形成中水(即再生水)回收再利用，除可緩和缺水問題的衝擊，同時創造循環經濟之效益。

## 二、半導體封裝製程排水處理現況

### 1. 半導體封裝製程排水來源

半導體封裝製程過程中產出多種且成分、濃度及量體皆不同之廢水，如下圖 1 封裝製程與產出廢水類別圖所示。以本廠為例，將封裝製程廢水依特性分成切割廢水、無機廢水、高污染清洗水及高有機污染濃排廢水等十三類廢水，其中七類廢水其水量大(占總廢水量 70%)、水質單純，採分股分流、獨立收集回收處理；其餘六類廢水因水量小、水質複雜，則採末端中水、最終排水回收處理，本廠廢水特性分類圖如圖 2 所示。

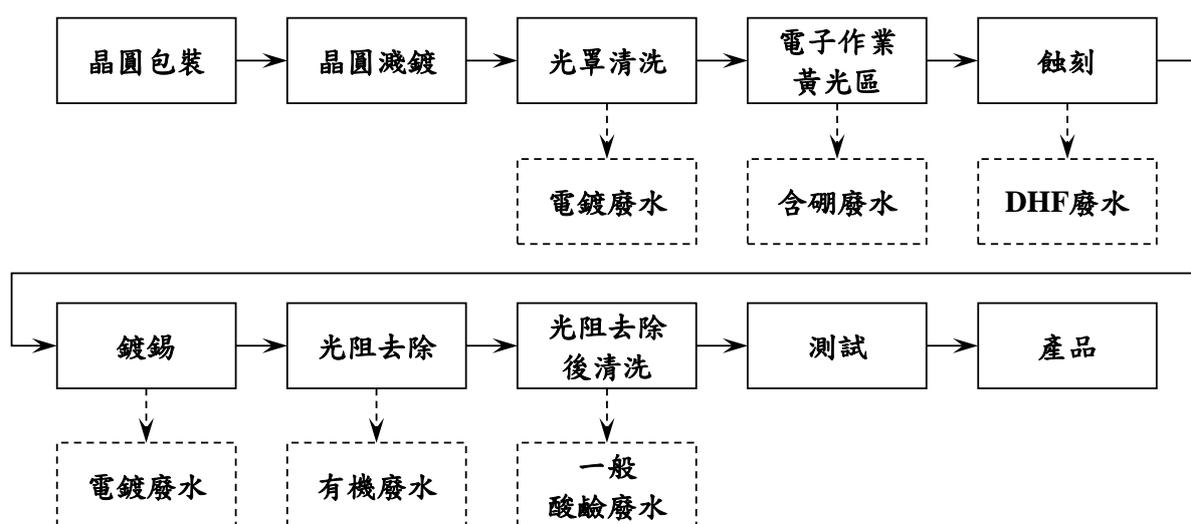


圖 1 封裝製程與產出廢水類別圖

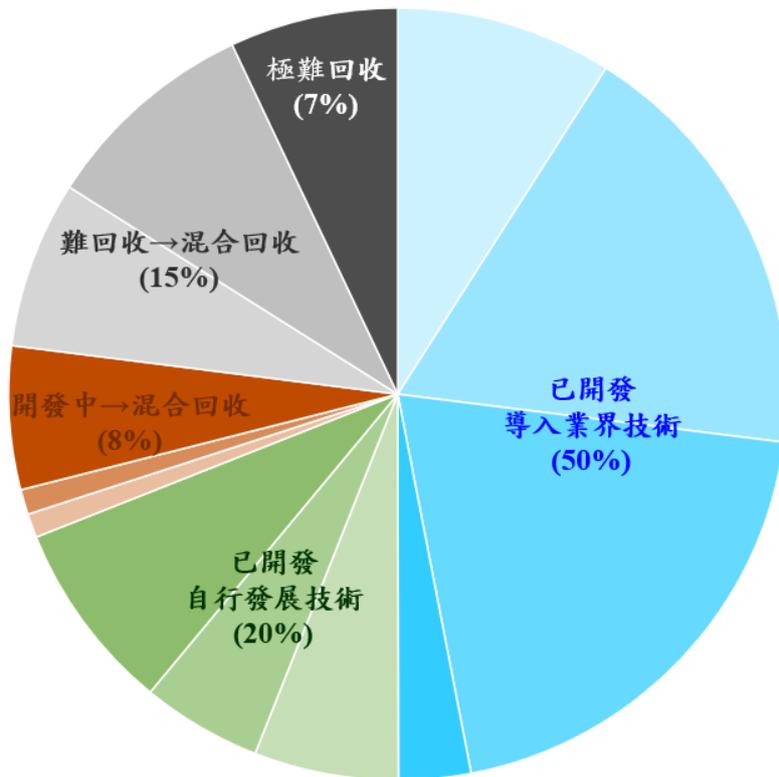


圖 2 廠區廢水特性分類圖

## 2. 半導體封裝製程排水處理方法

廠區水資源策略初期主要以處理概念為主，廢水依水質特性採單股分流收集，並經各股廢水系統處理至放流水標準後排放。後續因應水資源相關法規、國際企業發展趨勢以 ESG 為永續發展目標等要求，發展回收水技術，包含單股與末端回收兩大類別，圖 3 顯示廠區單股與末端回收系統流程圖。其中單股分流回收系統分成七種系統，包含切割廢水、植球廢水、研磨廢水、銅屑廢水、有機廢水、電鍍廢水及冷卻水塔排水等回收系統，如下圖 4 單股回收系統處理單元圖所示。

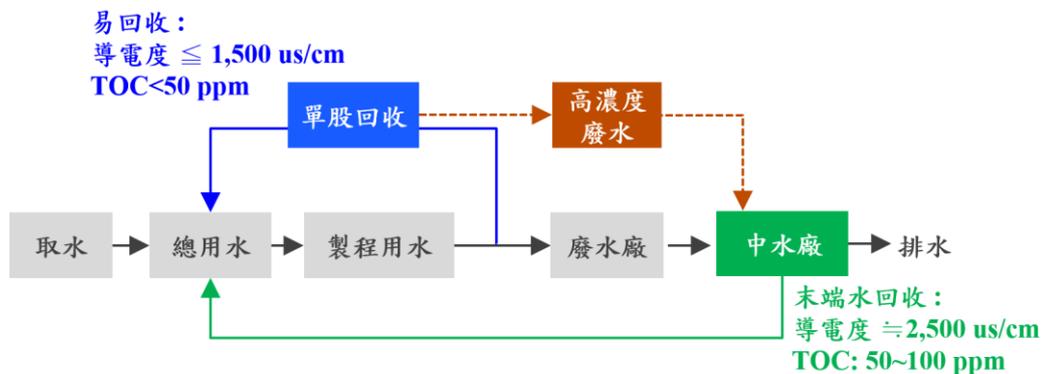


圖 3 廠區單股與末端回收系統流程圖

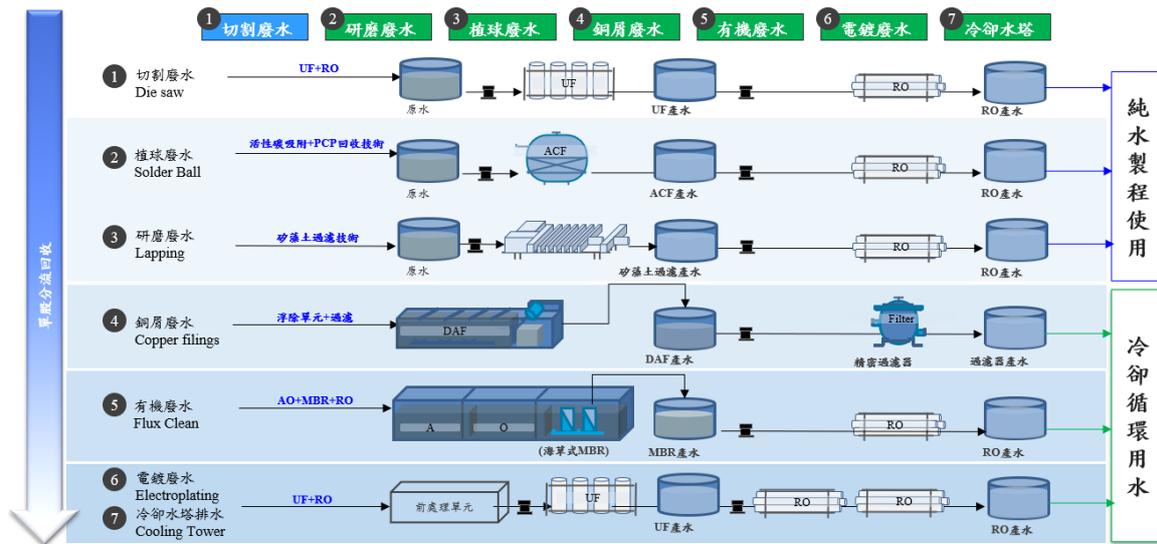


圖 4 單股回收系統處理單元圖

### 三、末端回收系統中水廠處理技術

#### 1. 末端回收系統處理流程介紹

為增加廠區回收水量與提升用水回收率，本廠針對經廢水與回收系統處理後預計排放之放流水，導入中水廠進行末端回收，其處理流程包含生物粉末活性炭(Bio-Powdered Activated Carbon, BPAC)、薄膜生物反應器(Membrane Bio-Reactor, MBR)及逆滲透膜(Reverse osmosis, RO)等處理程序，去除水中有機污染物、無機污染物及淨化水質，回收至少 50%原將直接排放之中水，增加水資源利用率與減少廢(污)水排放量，末端回收系統處理流程圖如圖 5 所示。

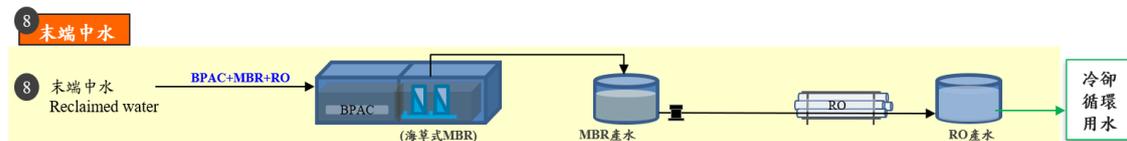


圖 5 末端回收系統處理流程圖

#### (1) 生物粉末活性炭(BPAC)

BPAC 係一種新型的廢污水處理方法，結合活性炭吸附、生物降解及活性炭和微生物再生利用等反應機制，有效去除廢水中污染物質。以下是 BPAC 反應機制：活性炭吸附過程為通過物理與化學吸附去除廢水中的有機污染(如 BOD、COD)和無機污染(如重金屬)；生物降解係

將廢水中的污染物質轉變成無害物質(如  $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}_2$ )；另活性碳和微生物再生利用則是於 BPAC 表面生長，進一步降解難以去除的有機污染(如 TMAH)，其反應機制如圖 6 所示。

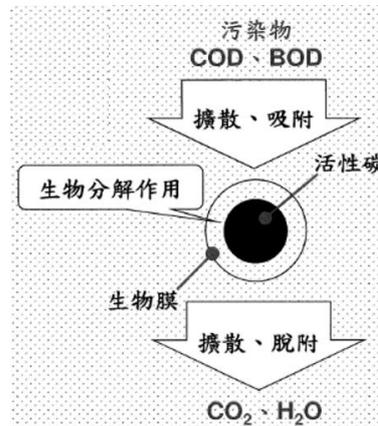


圖 6 生物粉末活性碳反應機制圖

## (2) 薄膜生物反應器(MBR)

MBR 為結合生物處理與膜分離技術的廢污水處理方法，具有高效去除有機污染的特點，原理包含固液分離、生物膜生物分解及污泥濃縮作用等。通過微過濾膜或超過濾膜(MF、UF)，將水和固體分開，保留活性污泥和其他懸浮物，藉由微生物將廢水中的有機物分解轉化為  $\text{CO}_2$ 、水等無害物質，同時濃縮污泥於較高的污泥濃度下運轉，減少污泥處理成本，可取代傳統的沉澱槽和作為後段 RO 預處理單元，具備處理水質佳、穩定性高、佔地小及污泥量少等優勢<sup>[5]</sup>，圖 7 顯示中水廠使用之 MBR 型式圖。

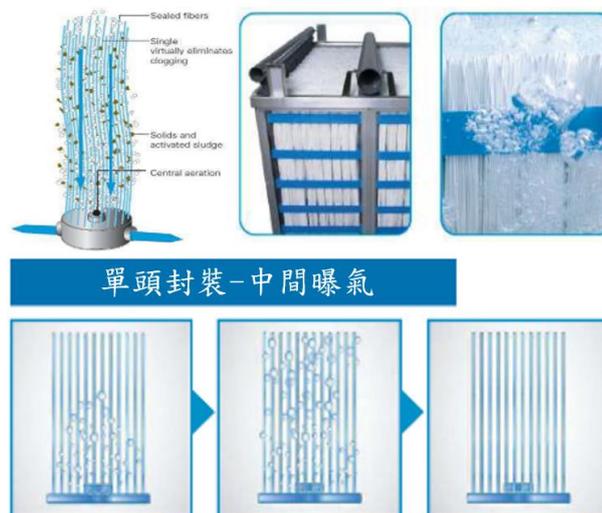


圖 7 中水廠使用之 MBR 型式圖(海草式)

### (3) 逆滲透膜(RO)

RO 是一種膜過濾技術，可去除水中污染物質達 90% 以上，主要利用半透膜將水中的微生物、溶解固體、無機鹽類及其他污染物分離過濾。其原理為透過施加壓力使水分子通過半透膜，大部分溶解固體與污染物則被阻擋於膜的另一側，目前已廣泛應用於生活污水、工業廢水、再生水及海水淡化等處理系統，中水廠使用之 RO 型式如圖 8 所示。



圖 8 中水廠使用之 RO 型式圖(螺旋纏繞式)

## 2. 中水廠運行探討

表 1 中水廠水量與水質資料表

系統名稱	項目	單位	進水	RO 產水	ROR 濃排	排水
中水廠 末端中水 回收系統	水量	CMD	≤2,000	> 1,000	<1,000 (or 50%)	-
	COD	ppm	<150	<10	<150	<150
	SS	ppm	<100	<1	-	<80
	SiO <sub>2</sub>	ppm	< 50	<1	-	-
	TOC	ppm	<100	<2	-	-
	NH <sub>3</sub> -N	ppm	<20	<5	<20	<20
	pH	-	5~10	6~9	6~9	6~9
	導電度	μs/cm	<1,500	< 100	-	-
	濁度	NTU	<50	<1	<50	<50
	總硬度	ppm	<100	<10	-	-

目前廠區中水廠之末端回收系統(以下簡稱中水廠回收系統)處理流程如圖 9 所示，包含調勻槽、pH 調整槽、BPAC、MBR、RO、RO 產水槽及 ROR 濃排槽等單元，設計處理水量為 2,000 CMD，進水、RO 產水、ROR 濃排及排水之水質如表 1 所示。RO 產水槽裝設水質分析儀，透過分析 pH、導電度、總有機碳(Total organic carbon, TOC)及總硬度等 on-line 選別控制，可作為純水製程和冷卻水循環使用之補水，以利降低自來水取用量。

中水廠回收系統回收率依據放流水水量與水質作為計算基礎，由於廠區大部分廢水經單股回收系統處理後回用(占總廢水量 70%)，剩餘水量小且水質複雜、不易回收處理之廢水(占總廢水量 30%)，則經廢水系統處理

後排放至中水廠進行末端回收。另因考量廠區總回收率、系統穩定性及運轉成本等多方面考量，中水廠回收系統之回收率以 50% 作為基礎，污染排放量可減少 50%，且整廠水回收利用率可提升 11% 達 92%。

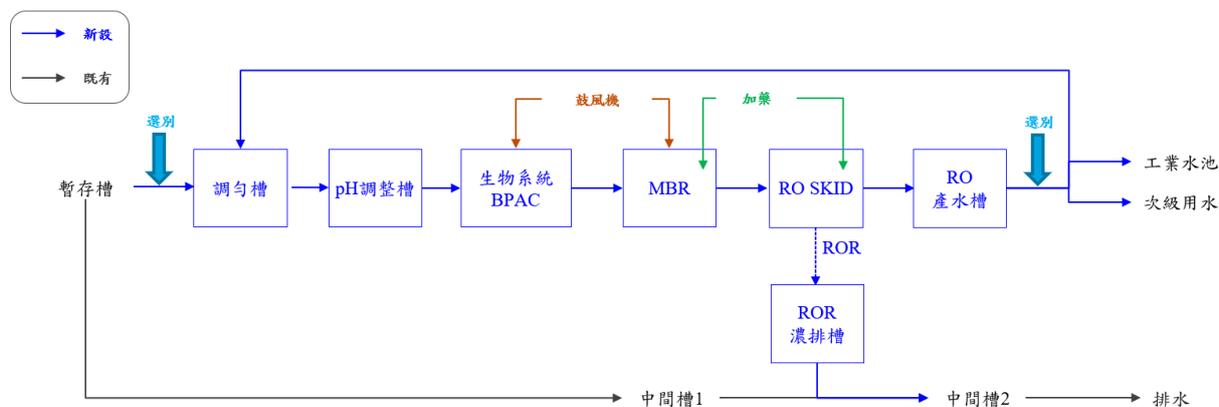


圖 9 中水廠之回收系統處理流程圖

#### 四、結論

由於全世界淡水資源匱乏，中水因具備質穩量定、不受水文天候限制等優勢，各國紛紛開發中水利用並逐步成為關注的焦點。本處理技術著重於放流水回收再利用，每年可增加回收水量 365,000 噸/年、減少污染排放量 365,000 噸/年及減少碳排放量 56 噸/年(以 113 年度自來水每度水排放 CO<sub>2</sub> 當量 0.155 公斤 CO<sub>2</sub>/度計算)，除提升水回收利用率，亦減少放流水排放量，以降低環境衝擊達到永續發展並創造循環經濟之效益。

#### 五、參考文獻

1. 戴元良，「工業區綜合廢水處理再生水回收技術」，工業污染防治 146 期，經濟部工業局，108 年 9 月。
2. 林國盛，「半導體封裝製程用水管理及回收系統探討」，工業污染防治 127 期，經濟部工業局，103 年 4 月。
3. 毛振泰，「推動污水處理廠放流水回收及污泥再利用，以符潮流」，國家發展委員會新聞稿，國家發展委員會，104 年 2 月。
4. 彭柏頤，「半導體封裝電鍍廢水回收技術與重金屬污泥再利用」，綠色技術與工程實務研討會 111 年論文集，經濟部工業局，111 年 11 月。

5. 范姜仁茂，「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，98 年 6 月。

# 可循環再生的低碳觸媒技術(COAC)

## 應用於難降解有機廢水的處理

陳國源\*、簡偉倫\*\*、黃鈺雯\*\*、黃筱嵐\*\*、周珊珊\*\*\*、黃志彬\*\*\*\*

### 摘要

隨著台灣經濟的發展，用水需求不斷增加，因此在降低碳排放的前提下，「優化廢水處理與回收」變得日益重要。石化、化工、印染、製藥等產業常見具有難降解特性或生物毒性的工業廢水，大部分工廠未將難降解廢水進行分流處理，因此通常需要在生物處理後進行高級處理，但此種流程操作下會導致整體操作成本偏高。本團隊針對中高濃度難降解 COD 廢水的技術瓶頸，開發了一種無污泥且可循環再生的觸媒廢水處理技術-催化氧化型活性碳 (catalytic oxidative activated carbon, COAC)。

COAC 以活性碳為基底，利用薄膜化製備技術在其表面披覆鈦金屬及其他重金屬。透過活性碳本身的吸附力將有機物吸附至孔洞，再由孔洞內所披覆的貴金屬進行催化氧化。由於有機氮廢水難以生物降解，加上生化處理會產生氨氮和硝酸鹽氮，需要兼顧硝化與脫硝反應來符合放流標準，本研究共測試了數種不同主成分有機氮廢水，發現觸媒催化氧化技術的處理難易度與其結構相關，由低至高分別為二甲基乙醯胺(DMAC)、乙氧基胺、丙烯腈、N-甲基吡咯烷酮 (NMP)、螢光增白劑。利用 COAC 觸媒/臭氧處理後，預估 90% 以上的有機氮能直接轉換成氮氣，氨氮與硝酸鹽的轉換率小於 10%，且處理過程中幾乎不產生污泥。此技術已成功應用至處理科技廠的乙氧基胺廢水，建立處理水量 80 CMD 的應用實績，驗證此觸媒催化氧化技術相較於傳統高級氧化法，具有無污泥產生、低操作成本、低加藥量及高氮氣選擇率等特點。

【關鍵字】鈦、催化臭氧化、可再生型活性碳、難降解有機廢水

\*國立陽明交通大學環境工程研究所 博士生

\*\*國立陽明交通大學環境科技及智慧系統研究中心 工程師

\*\*\*國立陽明交通大學環境科技及智慧系統研究中心 執行長

\*\*\*\*國立陽明交通大學環境工程研究所 終身講座教授

## 一、前言

隨著台灣經濟發展，用水需求增加，因此在降低碳排放的前提下，「優化廢水處理與回收」日益重要。水資源與水污染管理有兩大趨勢：一是廢水回收與再生成為主要發展方向，二是台灣及新興市場對放流水排放標準，如化學需氧量(COD)、氨氮和總氮，進行更嚴格的規定。因此，廢水分流收集處理為重要之配套措施，其中重要原則如下：

1. 將低濃度廢水搭配高級處理技術進行回收規劃。
2. 針對難降解之廢水以高級處理或其他技術作前處理。
3. 將特殊物料廢水納入資源化考量。

石化、化工、印染、製藥等產業常見具有難降解特性或生物毒性的工業廢水，大部分工廠未將難降解廢水分流處理，因此常需在生物處理後再進行高級處理，如此操作成本較高。若能在處理前進行分流，先對難降解和生物毒性廢水進行前處理，則可降低整體操作成本，並減少對生物處理單元的影響，以確保符合排放標準。

現有高級氧化技術以 Fenton 氧化法( $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{2+}$ )為主，但因需要在酸性下反應，其氧化劑和酸鹼的加藥成本高，且污泥產量大。同時，針對某些難降解的廢水，在實廠應用中仍面臨處理效率低、操作成本高及污泥量多的瓶頸。因此，針對中高濃度難降解 COD 廢水，有必要開發處理效率高、操作成本低且產生污泥少的低碳處理技術。

## 二、觸媒氧化技術

本團隊基於中高濃度難降解 COD 廢水的技術瓶頸，開發了無污泥且可循環再生之觸媒廢水處理技術 - 催化氧化型活性碳(catalytic oxidative activated carbon, COAC)。COAC 以活性碳(AC)為基底，觸媒粒徑大小為直徑 0.422~0.853 mm (20~40 mesh)，比重 0.5 (圖 1(a))。利用薄膜化的製備技術於表面披覆數種貴金屬如鈦、B 及 C 兩種不公開金屬，核心鈦成分因 Ru(III)~Ru(VII)的氧化電位高達 3.65 V (Povar et al., 2016) (高於氫氧自由基之氧化電位 2.8 V)，因此 COAC 較常見的 AOPs 高級氧化程序具更強的氧化還原能力；另外因使用奈米薄層技術使貴金屬占比僅 0.01%，故價格也頗具競爭力。透過強吸附力將有機物吸附至孔洞，再由孔洞內所披覆的貴金屬進行催化氧化，COAC 催化氧化機制反應如圖 1(b)所示，具有無污泥產生、高

處理效率及可重複活化使用等高性價比優勢。

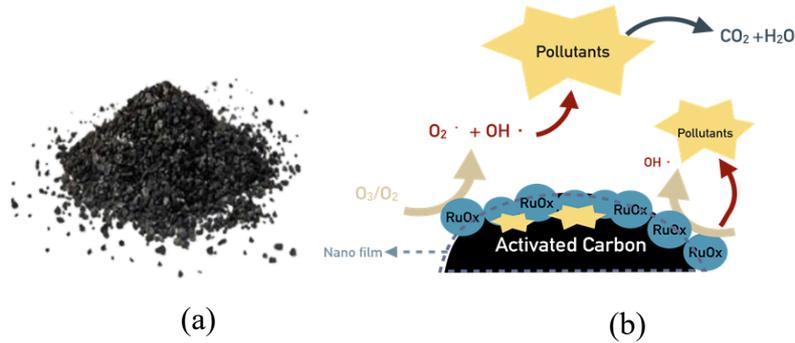


圖 1 (a)COAC 及(b)催化氧化機制示意圖

目前經測試各種不同工業廢水的 COD 降解實驗，已證實可循環再生的 COAC 低碳觸媒技術具有以下 3 點優勢，說明如下(圖 2)：

1. 無污泥：COAC 觸媒+臭氧高級氧化技術無污泥產生，依據本團隊過去的研究，採用化學方法的廢水處理系統通常加藥的原物料取得階段約佔至少 40%的碳排，產生污泥的廢棄物處理階段也約佔至少 40%的碳排，故本技術具有低碳特色。
2. 低操作成本及低加藥量：相比既有傳統 AOPs 處理方法(如 Fenton 氧化法)，僅須適量促進劑(如臭氧或次氯酸鈉)，可大幅降低雙氧水與亞鐵等藥劑添加，使操作成本省約一半以上。
3. 氨氮轉化率高：少氨氮與硝酸鹽氮累積，多可直接轉化為氮氣。

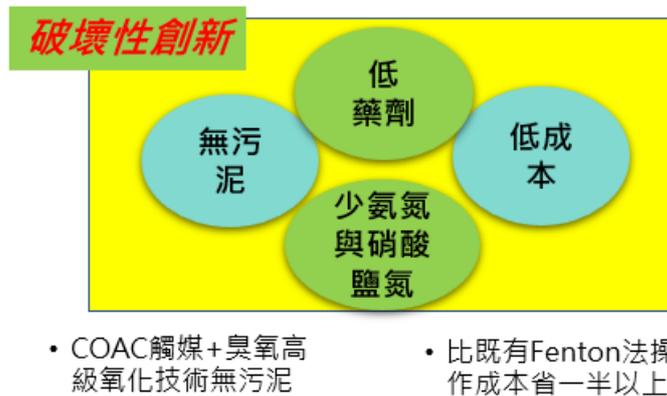


圖 2 COAC 技術創新優勢

COAC 同時兼具吸附及氧化特性，針對處理上難度較高的中高濃度難降解有機廢水(COD 500 ~5000 mg/L)，須有較好的質傳，因此在實廠操作上適合採用流動床(圖 3)來進行連續吸附及氧化。為維持觸媒活性及避免觸媒毒化，我們會採用小活化(MA, Maintenance Activation)和大活化(RA, Recovery Activation)，小活化為觸媒日常保養，其目的係將觸媒孔洞積碳清除，係以

常溫臭氧曝氣 4 小時進行；觸媒大活化則為重新披覆貴金屬氧化物使其長晶至觸媒上，均可直接在反應槽內進行。

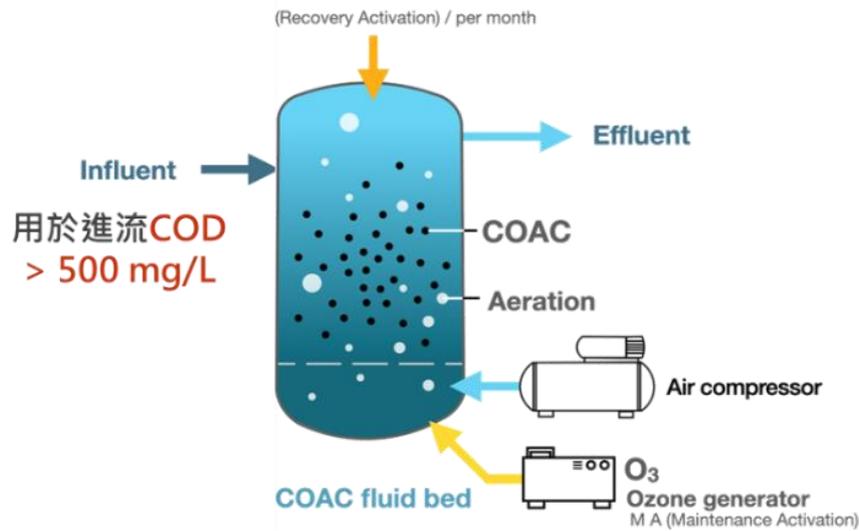


圖 3 觸媒流動床系統示意圖

COAC 技術除了可應用於難降解有機廢水處理外，亦可應用於氨氮廢水處理。由於環境部 100 年起推動氨氮放流濃度管制，大部分產業均已陸續被規範。高濃度氨氮廢水(> 5,000 mg/L)以氣提回收生成氨水法具資源化效益，低濃度氨氮廢水(< 500 mg/L)則可使用生物處理，介於前述濃度區間之中濃度氨氮廢水，多以硫酸氣提吸收生成硫酸銨的方式處理，但會衍生副產物處理問題。本團隊利用 COAC 技術，可於氣提後以 COAC 固定床法，使其完全轉化為氮氣，無二次污染，且觸媒可重複循環使用(蔡等人，2022)。此技術在環境部計畫下發展至小型模廠操作階段，也已獲得中華民國專利(發明第 I799122 號，觸媒及其應用)。

### 三、觸媒氧化對於不同污染物氧化能力及應用案例

難降解有機廢水的處理一直是廢水處理上的難題，如石化、化工、焦化、製藥和印染等行業的廢水含有生物毒性、有機氮或高鹽度等問題。由於有機氮廢水難以生物降解，加上生化處理會產生氨氮和硝酸鹽氮，需要兼顧硝化與脫硝反應來符合放流標準，因此成為重中之重。現行的放流水標準中，明確制定石化、化工業處理難度較高的高含氮製程與非高含氮製程有不同的標準，而這些高含氮製程廢水中有不少為有機氮廢水，並常伴隨不易於生物處理的物質。於石化以及化工業之難降解廢水，其有機氮成分含量高，如丙烯腈(acrylonitrile, 屬於有機氮化合物)、二甲基甲醯胺(dimethylformamide, DMF)、

二甲基乙醯胺 (dimethylacetamide, DMAC)、甲基吡咯烷酮 (N-Methylpyrrolidone, NMP) 等，在印染業則所產生的廢水則含有偶氮染料，而製藥業之廢水成分則更為複雜，可能具環狀結構有機物及高鹽度等廢水特性。

一般而言，這些難降解之廢水難以單獨使用生物處理，常需搭配高級氧化技術來進行預處理或後處理。針對難生物降解有機氮廢水 (COD 濃度 500-5000 mg/L)，本團隊測試數種不同主成分有機氮廢水，發現依照觸媒催化氧化技術處理難易度由低至高分別為 DMAC、乙氧基胺、丙烯腈、N-甲基吡咯烷酮 (NMP)、螢光增白劑 (圖 4)。以下列舉幾種廢水使用本技術的研究成果與應用案例。

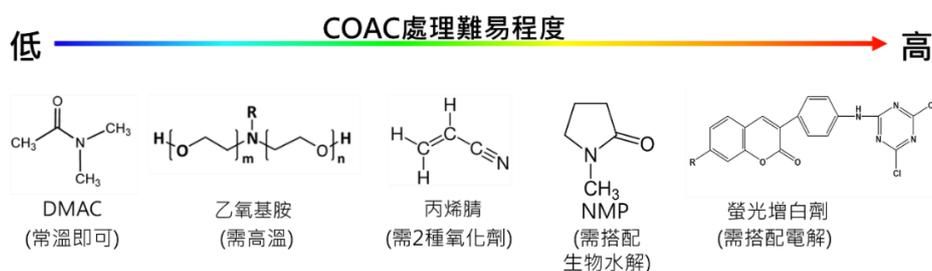


圖 4 觸媒催化氧化技術處理不同有機氮廢水的難易度(由低至高)

### 1. DMAC 合成廢水

DMAC 常用於半導體業與化工石化業等產業，且已被證實對人體具有神經及生殖毒性，目前既有處理技術無法有效降解大量且高濃度之 DMAC 製程廢水，其產物最終多轉為氨氮及硝酸鹽氮。本團隊以觸媒催化氧化技術 (COAC+O<sub>3</sub>) 進行 DMAC 催化氧化降解研究，圖 5 為觸媒氧化技術與傳統 Fenton 法或臭氧法對 DMAC 廢水處理結果之比較 (賴等人, 2023)，結果顯示觸媒催化氧化技術有較高的溶解性有機碳 (DOC) 去除率 (98%) 及總氮 (TN) 去除率 (93%)，且產生之含氮中間產物 (氨氮和硝酸鹽氮) 極少，反觀 Fenton 法的 DOC 去除率只有 29%，且會產生大量的氨氮和硝酸鹽氮，此表示觸媒催化氧化技術應用於有機氮廢水具有相當的潛力。

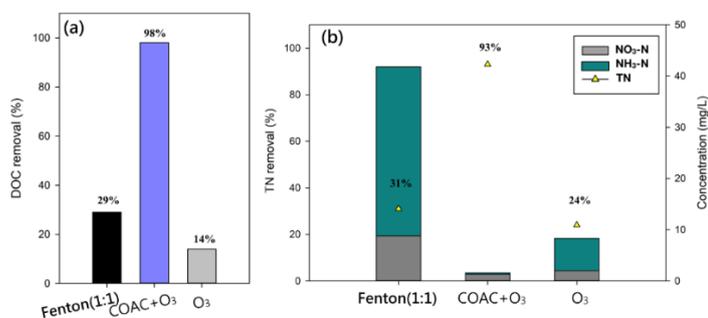


圖 5 COAC+O<sub>3</sub> 與傳統氧化方法對 DMAC 廢水處理效率之比較

(反應條件： $[\text{DOC}]_0 = 1,249 \text{ mg/L}$ 、 $[\text{TN}]_0 = 249 \text{ mg/L}$ 、

反應時間=120 min、COAC 添加量=10 g/250 mL 水樣、溫度=23°C)

## 2. 乙氧基胺廢水

乙氧基胺(Amine ethoxylate)為一種含氮污染物，常用於 PCB、電子零件焊錫清潔劑。本團隊在去年以觸媒催化氧化技術處理有機廢水已有初步實驗成果。以新竹某科技廠清潔劑廢水其主要成分為乙氧基胺，將 COAC 分別添加 10 g、20 g 及 40 g 至 300 mL 水樣進行多次重覆實驗，觀察平均 COD 去除率(CODr, avg)和每批次觸媒活性衰減率(以 CODr 為指標；CODr, decay)的變化。其實驗結果如圖所示(何，2023)，COAC 添加量為 40 g/300 mL 時有最佳的 CODr, avg 和最低的 CODr, decay。由於 COAC 比重約為 0.57，40 g/300 mL 相當於 COAC 填充比例 20%，並以此參數作為後續實驗基準。

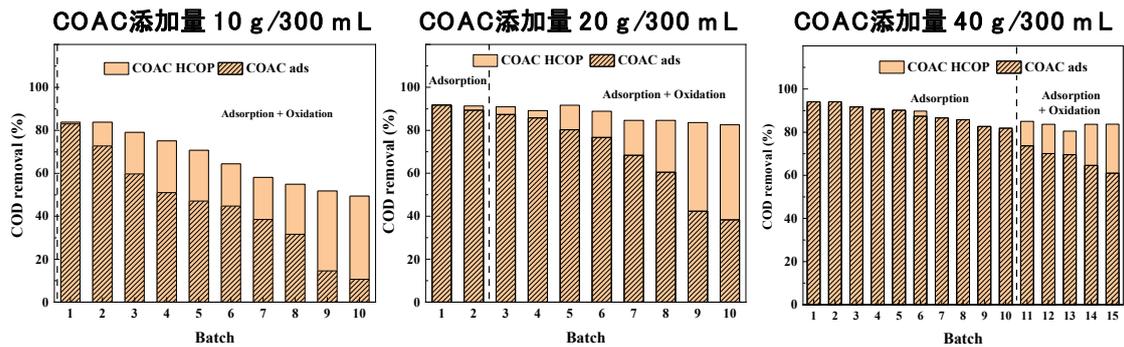


圖 6 不同 COAC 添加量對乙氧基胺廢水催化氧化處理之影響

乙氧基胺雖然可使用生物處理法降解污染物，然而以此法所需處理時間長且占地大。圖 7 為某科技廠針對此股廢水進行各項處理方案的評估結果，由於另一項競爭技術(臭氧/FeOOH)僅能使 COD 降至 1800 mg/L，無法達標且污泥產生量高，同時會產生氨氮和硝酸鹽氮須後續處理的問題。反之，本團隊的 COAC/臭氧技術可使 COD 降至 < 300 mg/L，且不會產生氨氮和硝酸鹽氮，操作成本也較低。該科技廠經多方比較確認 COAC/臭氧法為最佳方案，具有低空間且高效率之優勢，因此採用此技術並建置處理量 80m<sup>3</sup>/day 規模的實廠。

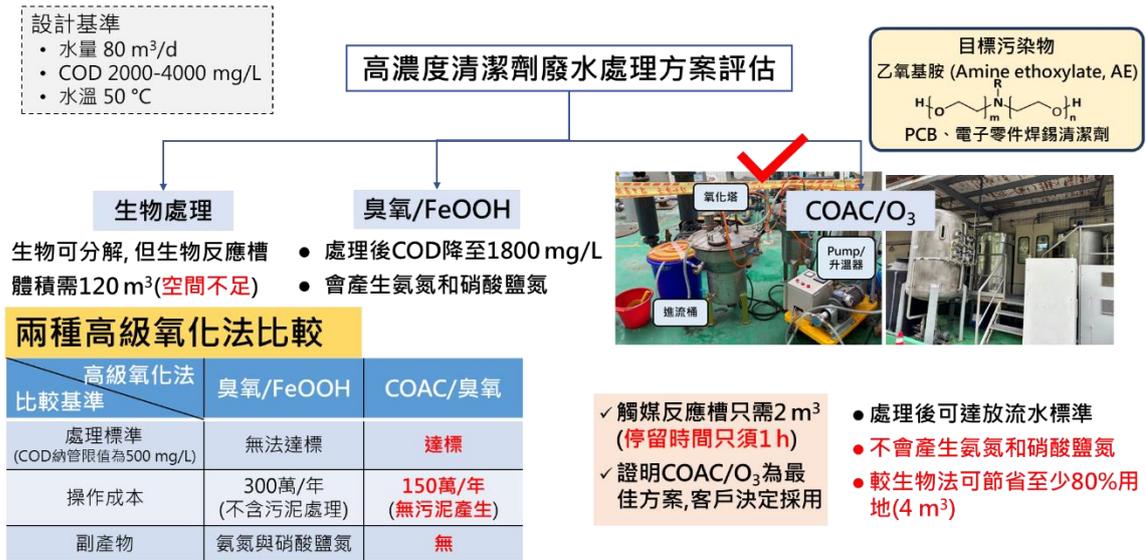


圖 7 科技廠乙氧基胺廢水處理方案評估結果

### 3. 丙烯腈廢水

丙烯腈 (Acrylonitrile, AN) 為合成纖維與 ABS 工程塑膠等化工產品的原料，因其危害性高且具生物難降解特性，故須評估合適的化學氧化法來處理。測試的丙烯腈廢水 (COD 濃度約 1000 mg/L)，若單純利用好氧生物處理容易造成生物毒性，使得生物處理不易操作且易產生大量的氨氮、硝酸鹽氮與生物污泥。

若將 COAC 觸媒作為前處理單元，可有效降低丙烯腈對於生物系統毒性，進而降低生物系統負擔及減少污泥量。經過 COAC 觸媒/臭氧處理後預估 90% 以上的有機氮能直接轉換成氮氣，氨氮與硝酸鹽的轉換率小於 10%，所需的曝氣動力亦小於生物處理系統 (圖 8)，整體系統操作穩定，氨氮與硝酸鹽不易超標之餘，曝氣量、污泥量與加藥劑量皆可大幅降低。

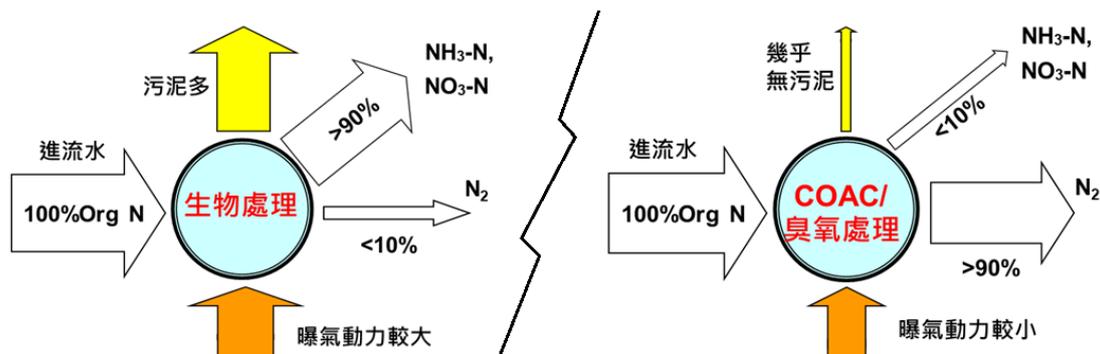


圖 8 水中有機氮經一般生物處理與 COAC 觸媒/臭氧處理之含氮物質轉換

## 四、結論與建議

隨著產業發展，水資源和低碳議題逐年受重視，台灣不管是在用水量大的半導體產業或是傳統產業，其難降解有機廢水處理和水再生技術都必須要有新思維。催化氧化型活性碳(catalytic oxidation activated carbon, COAC)為可循環再生的多功能觸媒，利用觸媒核心鈦成分的強氧化還原能力，輔助添加少量臭氧進行催化氧化，相較於傳統高級氧化法具低碳、低污泥及低成本等優勢。因此透過 COAC 催化氧化技術，進行難降解有機廢水處理，可有效解決傳統處理方法，用地面積大及碳排放量高等議題。

## 五、參考文獻

1. Povar, I., & Spinu, O. (2016). Ruthenium redox equilibria- 3. Pourbaix diagrams for the systems Ru-H<sub>2</sub>O and Ru-Cl--H<sub>2</sub>O. *Journal of Electrochemical Science & Engineering*, 6(1), 145–153.
2. 蔡明瀚、簡偉倫、陳國源、周珊珊、黃思蕓、趙淑如、黃志彬、張莉珣、顏旭明 (2022)，含氮廢污水綠色處理系統建立，*工業污染防治*第 155 期。
3. 賴怡芬、莊湘盈、蔡明瀚、周珊珊、黃志彬 (2023)，可循環式催化氧化型活性碳降解水溶液中二甲基乙醯胺之研究，*工業污染防治*第 158 期。
4. 何心平、簡偉倫、陳國源、周珊珊、黃志彬 (2023)，催化氧化活性碳結合臭氧處理乙氧基胺廢水應用，112 年綠色技術與工程實務研討會。

# 放流水 COD 組成特性分析-

## 以桃園某工業區污水處理廠為例

楊珮慈\*、楊祐任\*\*、曾冠穎\*\*\*、莊順興\*\*\*\*

### 摘 要

隨著工業科技的轉變，許多工業區污水廠內部分廠商逐漸轉型為高科技產業，使得排放廢水量激增，且對於特殊有機化學品的使用量也日益增加，當中含有一些生物難分解之化合物，且污染物濃度不易掌握，影響廢水生物處理程序之效率，稍有不慎即有超出放流水標準之虞。為了降低超標之風險，本研究對桃園某工業區污水處理廠之放流水進行分析，瞭解其放流水的 COD 組成，以利後續擬定有效之污染控制策略。

本研究針對經生物處理後的工業區廢水進行 COD 細分類分析，將 COD 分為快速可生物分解 COD(Readily Biodegradable COD, RBCOD)、緩慢可生物降解 COD (Slowly/Particulate Biodegradable COD, SBCOD)、溶解性不可生物分解 COD (Non-Biodegradable Soluble COD, NBSCOD)和顆粒性不可生物降解 COD (Non-Biodegradable Particulate COD, NBPCOD)。分析結果顯示，經生物處理後的工業區廢水中 NBSCOD 為主要成份，約佔總 COD 的 69.6% 至 77.5%。

由於工業區污水處理廠之進流水質與水量隨著不同行業納管工廠製程變動較難穩定，易造成污水廠生物處理系統異常，嚴重影響放流水質。因此，建議廠區應對進流水水質進行適度的長期分析，作為調整適當操作參數之依據。除此之外，亦可針對放流水中不可生物分解的 COD，操作適當之化學氧化處理單元，藉以緩解放流水水質超標之風險。

【關鍵詞】有機污染物、難生物分解性有機物、化學需氧量、放流水標準、工業廢水

---

\*國立中央大學環境工程研究所 碩士

\*\*國立中央大學環境工程研究所 博士生

\*\*\*國立中央大學環境工程研究所 碩士生

\*\*\*\*國立中央大學環境工程研究所 教授

## 一、前言

隨著工業科技的蓬勃發展，許多工業區內部分廠商逐漸轉型為高科技產業，使得排放廢水量激增，且對於特殊有機化學品的使用量也日益增加，當中含有一些生物難分解之化合物，影響廢水生物處理程序之效率，稍有不慎即有超出放流水標準之虞。為了降低超標之風險，針對該污水廠之放流水成分組成特性進行調查。

水污染防治法之放流水標準，對「其他工業區專用污水下水道系統放流水水質」之生化需氧量（BOD）和化學需氧量（COD）進行嚴格管制，其管制標準如表 1 所示（環境部，2022）。

表 1 其他工業區專用污水下水道系統放流水水質項目及限值

項目		限值	
中華民國九十八年七月三十一日前完成建造、建造中或已完成工程招標，且許可核准排放水量未達每日一 0、000 立方公尺者	生化需氧量	最大值	三 0
		七日平均值	二五
	化學需氧量	最大值	一 0 0
		七日平均值	八 0
	懸浮固體	最大值	三 0
		七日平均值	二五
中華民國九十八年七月三十一日前尚未完成工程招標者；及九十八年七月三十一日前完成建造、建造中或已完成工程招標，且許可核准排放水量為每日一 0、000 立方公尺以上者	生化需氧量	最大值	三 0
		七日平均值	二 0
	化學需氧量	最大值	八 0
		七日平均值	六五
	懸浮固體	最大值	二五
		七日平均值	二 0

桃園某工業區污水處理廠為了因應廠內的廠商轉型與法規要求，於設廠至今歷經了多次擴建，目前廢水處理狀況良好。但隨著廠區內的產業對於有機化學品的使用，使得廢水中的有機污染物濃度不易掌握，導致處理後的放流水 COD 濃度存在超標之風險。因此，本研究針對工業區污水處理廠之放流水進行分析，瞭解其放流水的 COD 組成特性，以利後續擬定有效之污染控制策略。

## 二、文獻回顧

### 1. COD 細分類

為了更有效的瞭解廢水中有機污染物的組成與特性，依據廢水中有機物的溶解狀態，總 COD (Total COD, TCOD) 被分為顆粒性 COD (Particulate COD, PCOD) 與溶解性 COD (Soluble COD, SCOD)。APHA (1998) 所出版的檢驗水和廢水的標準方法，所定義的分類方法為：TCOD 是原水樣所測得的 COD；SCOD 是經  $0.45\ \mu\text{m}$  濾紙過濾之水樣所測得的 COD。以上分類定義，如圖 1 所示。

而根據廢水中有機物的生物解性，可將 TCOD 分為快速可生物降解 COD (Readily Biodegradable COD, RBCOD)、緩慢可生物降解 COD (Slowly/Particulate Biodegradable COD, SBCOD) 和不可生物降解 COD (Non-Biodegradable, NBCOD)，其中 NBCOD 又可分為溶解性不可生物降解 COD (Non-Biodegradable Soluble COD, NBSCOD) 及顆粒性不可生物降解 COD (Non-Biodegradable Particulate COD, NBPCOD) (Brouwer et al. 1994)。以上分類定義，如圖 2 所示。

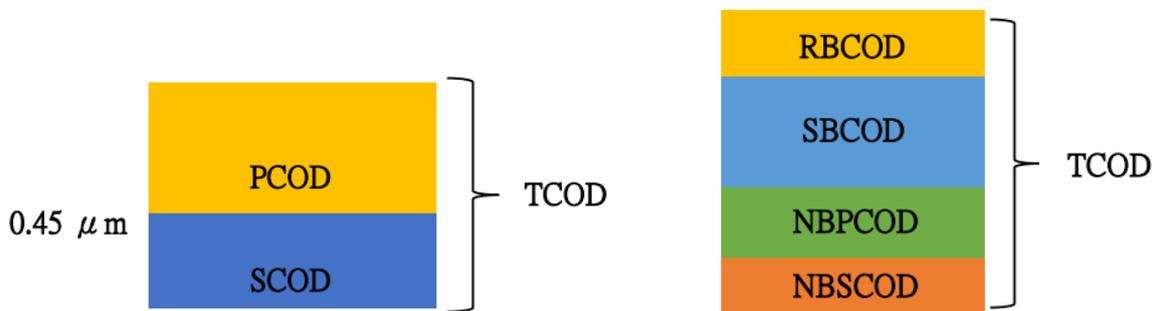


圖 1 廢水中 COD 的溶解性分類      圖 2 廢水中 COD 的生物分解性分類

COD 分類為可以更好地瞭解複雜廢水的成分、可處理性、來源和可能影響環境的一種方式 (Orhon et al., 2007)。

#### (1) RBCOD：

主要為溶解性有機物，可直接被微生物利用獲取能量，如揮發性脂肪酸。

#### (2) SBCOD：

由顆粒有機物組成，先通過生物吸附於微生物表面，再由胞外酵素將顆粒性有機物水解為溶解性有機物，方可進入微生物體內進行利用獲取能量。

(3)NBSCOD：

通常會存在於工業廢水中，且因其不可被生物降解的特性，無法被微生物代謝，仍會存在於經污水處理廠處理後之放流水，如芳香族化合物、SMPs。

(4)NBPCOD：

可以通過傳統污水處理廠中的沉澱去除或是薄膜膜組進行過濾去除。

有效的生物處理通常需要使用快速可生物降解和緩慢可生物降解的有機物來提供足夠的電子供體。大多數緩慢可生物降解的有機物是顆粒狀的，需要細胞外水解才能產生小分子(<10<sup>3</sup> amu)，這些小分子可以被輸送到微生物細胞中進行代謝(Morgenroth et al., 2002; White, 1995)。早期 Balmat (1957)指出，大顆粒的有機物較膠體有機物的水解速率慢四倍。目前的廢水處理數學模型沒有考慮到不同顆粒大小的不同水解速率 (Henze et al., 2006)。因此，這些數學模型中的水解速率將取決於特定的粒子特性。

2. 各類 COD 之定義與關聯性

廢水生物處理數值模型中，將 COD 分類分為 S<sub>s</sub>(溶解性可生物降解的 COD，對應 RBCOD)、X<sub>s</sub>(顆粒性可生物降解的 COD，對應 SBCOD)、S<sub>i</sub>(溶解性不可生物降解的 COD，對應 NBSCOD)、X<sub>i</sub>(顆粒性不可生物降解的 COD，對應 NBPCOD)。如圖 3 所示。TCOD 則為此四部分之總和，如式 1。

$$TCOD = S_s + X_s + S_i + X_i \quad \text{式 1}$$

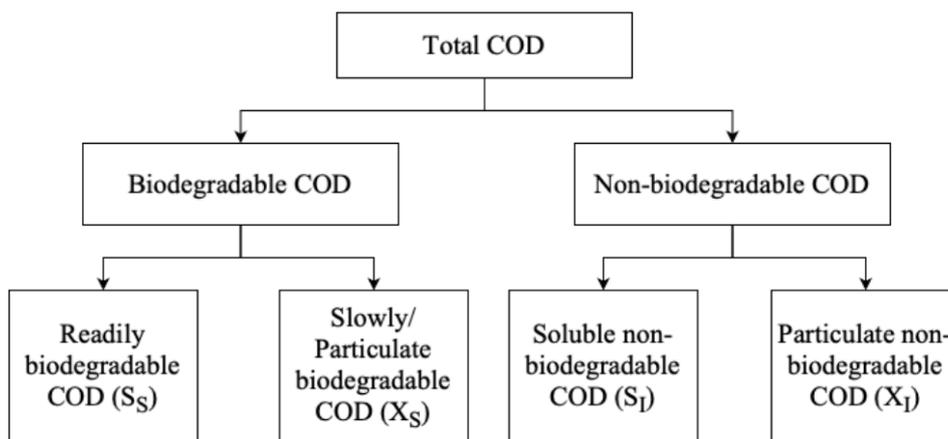


圖 3 廢水生物處理數值模型 COD 組成分類

### 三、研究材料與方法

#### (一)COD 細分類分析方法

COD 細分類必須透過 BCOD(Biodegradable COD)，OUR(Oxygen utilization rate)等分析，搭配生物處理理論運算而得，總分析流程如圖 4 所示，關鍵分析要項說明如下。

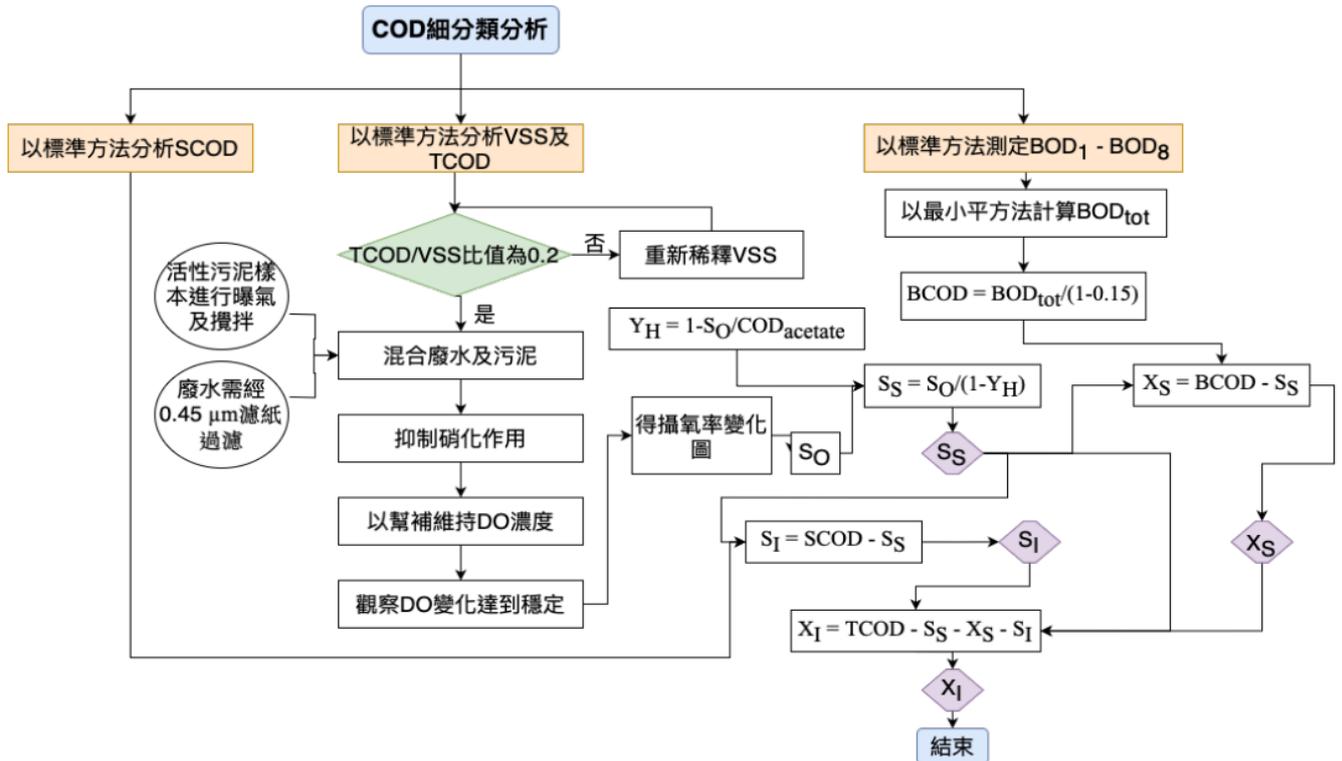


圖 4 COD 細分類分析流程圖

#### 1. BCOD 分析方法

BOD 分析方法採用美國公共衛生協會、水環境聯合會發表的水中生化需氧量檢測方法 (APHA 5210B) 進行測定。本實驗採用最終 BOD ( $BOD_{tot}$ ) 測量方法，對水樣的第 1、2、4、6、8 天重複測量 BOD。為了確定 BOD 消耗隨時間的變化，通常使用一階最小二乘法，並透過 BOD 曲線來表示，如式 2 (Metcalf et al., 2003)。

$$BOD_{tot} = \frac{1}{1 - e^{-k_{BOD}t}} \quad \text{式 2}$$

BOD 測量中的微生物量會在生長和衰減之間存在相互作用，長時間的 BOD 測量會導致部分 BCOD 轉為惰性，導致 BCOD 濃度升高。因此，

在估算 BCOD 時必須使用  $f_{BOD}$  (如式 3) 因子修正。一般  $f_{BOD}$  的值為 0.15 (0.1~0.2)(Borzooei et al., 2021; Roeleveld & Van Loosdrecht, 2002)。

$$BCOD = \frac{1}{1 - f_{BOD}} BOD_{tot} \quad \text{式 3}$$

## 2. OUR 分析方法

透過測量 OUR 來評估過濾廢水的 RBCOD，OUR 根據攝氧率和總需氧量評估生物量。攝氧率越大，廢水中有機物越易生物分解。

圖 5(a) 提供了 OUR 測量的示意圖，實驗過程包括對污泥混合物進行曝氣，然後將如表 2 所配製之 4 L 混合液添加到 5 L 反應器中。隨後，如 Liu et al. (2018) 所述，加入 10 mg/L 的烯丙基硫脲(ATU)來抑制硝化作用。以 150 rpm 的速度攪拌反應器，以確保樣本混合並維持在  $25 \pm 1^\circ\text{C}$  的溫度。使用 DO 感測器每分鐘連續監測溶氧量濃度，反應器中的氧含量控制在 2 至 6 mg/L 之間。當氧濃度達到 6 mg/L 時自動關閉曝氣，當氧濃度降至 2 mg/L 時重新開始曝氣。曝氣停止後進行 OUR 的測量，透過量化溶氧減少的速率來確定流程如圖 4(b)。以式 4 計算 OUR：

$$OUR = \frac{\Delta DO}{\Delta t} \quad \text{式 4}$$

再以式 5 將得到之 OUR 變化計算出  $S_s$

$$S_s = \frac{\Delta OUR \times V}{1 - Y_H} \quad \text{式 5}$$

$V$  表示反應器的體積，以 L 表示。 $Q$  表示進料的流速，以 L/hr 為單位測量。 $Y_H$  是異營代謝產生的微生物量。

**表 2 OUR 實驗參數**

COD (mg/L)	VSS (mg/L)	Initial loading (kg COD/kg VSS)
150	750	0.2

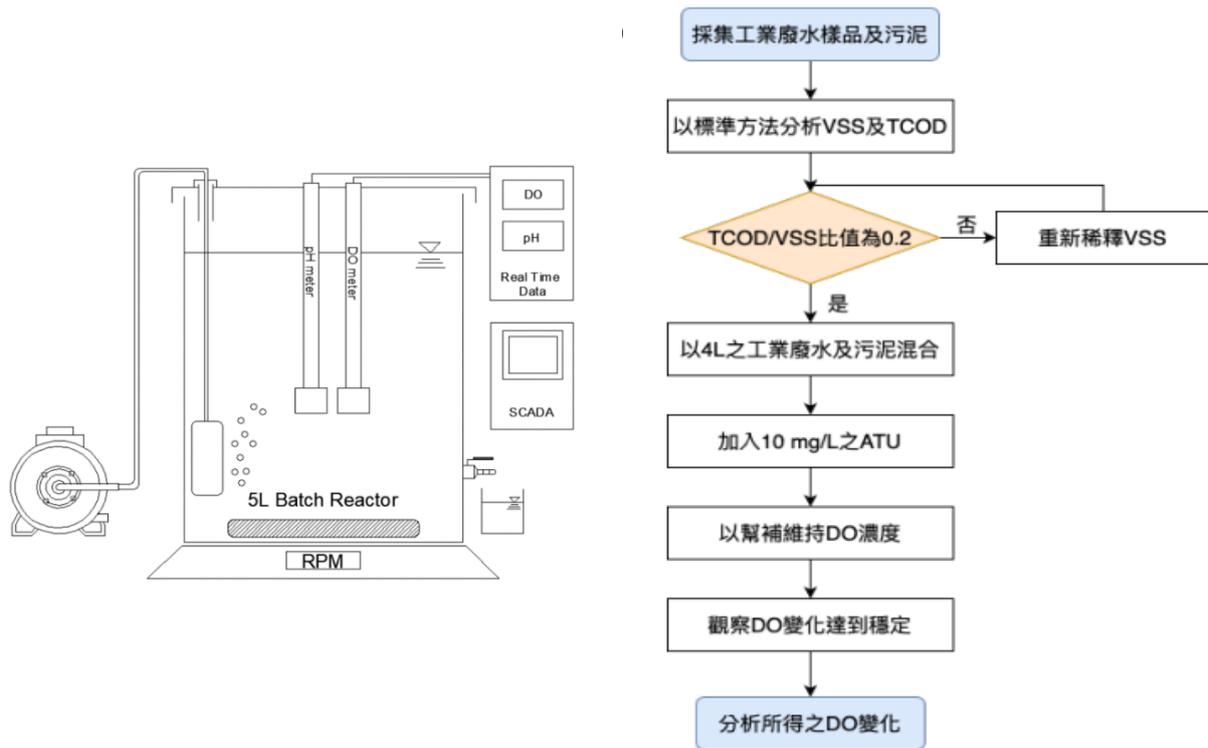


圖 5 OUR 測試裝置及流程

### 3. COD 細分類之計算

最後將得到之 BCOD 及  $S_s$  帶入表 3 之公式，即可得到 COD 之分類。

表 3 COD 分類之計算公式

COD 分類	計算方法
$S_s$	$\frac{\Delta OUR \times V}{(1 - Y_H)} = S_s$
$S_I$	$SCOD - S_s = S_I$
$X_s$	$BCOD - S_s = X_s$
$X_I$	$TCOD - S_s - S_I - X_s = X_I$

#### (二) 分析方法

本次實驗之檢測方式皆為按照環檢所公布之分析與保存方法並且在檢測過程中，以過濾 0.45  $\mu\text{m}$  濾紙區分為溶解性及非溶解性，進行分析與探討。

(1) 水中化學需氧量檢測方法—密閉式重鉻酸鉀迴流法(NIEA W517.53B)

(2) 水中總溶解固體及懸浮固體檢測方法-103~105°C 乾燥(NIEA W210.58A)

- (3)水中生化需氧量檢測方法(NIEAW 510.54B)  
 (4)水中氨氮檢測方法-靛酚比色法(NIEA W448.51B)  
 (5)水中硝酸鹽氮檢測方法-分光光度計法(NIEA W419.5)

#### 四、結果與討論

##### (一)經生物處理後之廢水水質

本實驗分析經生物處理後工業廢水的水質特徵如表 4 所示，經生物處理後的工業廢水的總 COD 平均濃度為 151.8 mg/L，其中 SCOD 均佔比 50% 以上，除改善生物系統外，可以 COD 細分類來了解主要為何種類型之 COD 導致濃度可能超出放流水標準。

此外，工業廢水經過生物處理後， $\text{NH}_4^+\text{-N}$  濃度範圍為 6.3-15.1 mg/L， $\text{NO}_3^-\text{-N}$  的濃度範圍為 1.7-45.3 mg/L，此分析結果顯示工業廢水中存在高濃度的無機氮，排放到水體仍存在高潛在風險。

表 4 工業廢水經生物處理後之水質特性

	Sample A	Sample B	Sample C	Sample D	Sample E	Sample F	Sample G
TCOD (mg/L)	118.8 ± 31.1	95.6 ± 11.9	237.1 ± 15.3	171.7 ± 1.1	120.6 ± 2.0	147.9 ± 10.8	171.2 ± 5.1
SCOD (mg/L)	96.5 ± 1.7	68.2 ± 0.91	148.9 ± 0.7	121.9 ± 2.1	76.9 ± 3.2	85.3 ± 1.4	98.6 ± 0.0
$\text{NH}_4^+\text{-N}$ (mg/L)	13.1 ± 1.1	9.3 ± 0.1	10.3 ± 0.3	2.2 ± 0.1	15.1 ± 0.3	6.3 ± 0.1	6.5 ± 0.2
$\text{NO}_3^-\text{-N}$ (mg/L)	1.7 ± 0.2	45.3 ± 0.1	14.7 ± 0.3	30.3 ± 0.3	45.1 ± 0.3	30.3 ± 0.3	3.5 ± 0.2

註：皆為三重複

##### (二)生物處理後之廢水 COD 特性

###### 1. RBCOD(SS)

由 COD 和 OUR 的相關性測量，再使用式 5 估算異營增殖係數( $Y_H$ )。表 5 顯示了對工業廢水樣本進行的呼吸測量實驗所獲得的  $Y_H$  值。

表 5 工業廢水的異營增殖係數

Industrial WWT	
$Y_H$ (g cell COD/g COD)	0.69±0.02

本研究中，污泥對醋酸鹽的增殖係數( $Y_H$ )為 0.69 g cell COD/g COD。Borzooei et al. (2021)提出  $Y_H$  的變化與基質有關，特別是醋酸鹽的增殖係數範圍為  $0.74 \pm 0.03$  g cell COD/g COD。本研究使用醋酸鈉溶液和活性污泥的混合物進行的 OUR 之測量。 $Y_H$  可依式 6 計算

$$Y_H = 1 - \frac{S_0}{COD_{acetate}} \quad \text{式 6}$$

$S_0$ ：醋酸鹽利用過程消耗的氧量

$COD_{acetate}$ ：作為 COD 樣本的醋酸鈉質量

圖 6 為使用醋酸鈉溶液和活性污泥的混合物所進行 OUR 之測量， $S_0 = 23.25$  mg/L 和  $COD_{acetate} = 75$  mg/L。

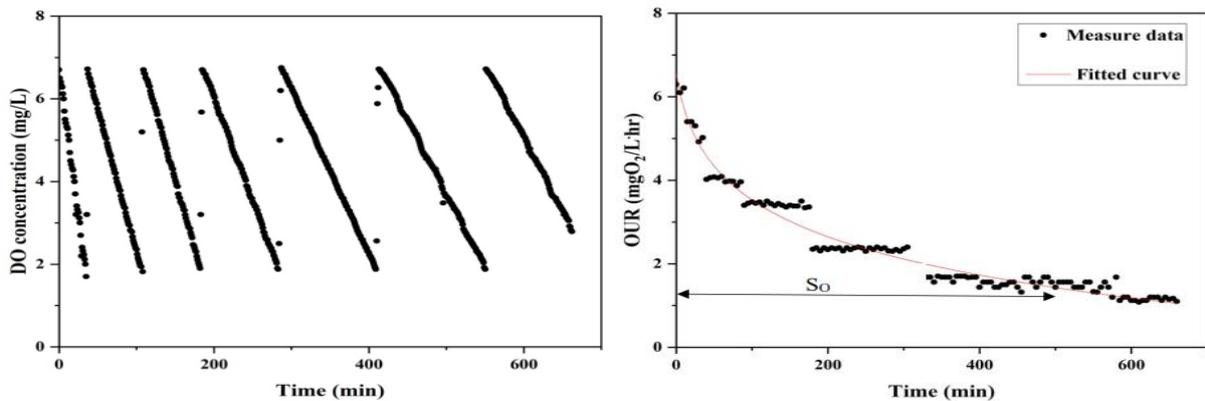


圖 6 活性污泥隨時間的溶氧消耗量以及對應的醋酸鈉 OUR 曲線

緩慢分解的有機物的存在對廢水處理系統的攝氧率有顯著影響 (Drewnowski et al., 2014; How et al., 2020)。Choi and Daehwan (2001)表示顆粒性 COD 會導致整體 OUR 增加，因此為了減少分析過程中顆粒 COD 成分的影響，分析前樣品須經過  $0.45 \mu\text{m}$  濾紙過濾。OUR 圖上觀察到的區域對應於易生物分解的有機物分解過程中所消耗的氧氣，這表示一旦易生物分解的有機物被充分利用，攝氧率就會達到穩定狀態。然後，可以使用以公式 7 估算易生物分解的有機品質：

$$S_S = \frac{S_0}{(1-Y_H)} \times \frac{(V_{sludge} + V_{ww})}{V_{ww}} \quad \text{式 7}$$

$S_0 = 0.36$  mg/L and  $Y_H = 0.69$  g COD/g COD,  $V_{ww} = 2$  L,  $V_{sludge} = 2$  L

$$\text{At } 25^\circ\text{C}, S_S = \frac{0.36}{1-0.69} \times \frac{4}{2} = 2.3 \text{ mg/L}$$

## 2. SBCOD(XS)

在本研究中，使用 BOD 測量法來估算  $BOD_{tot}$ 。在第 1、2、4、6 和 8 天重複測量水樣的 BOD。採用一階最小平方法估算隨時間變化的 BOD 消耗量，並以 BOD-t 曲線表示。圖 7 為工業廢水 BOD-t 曲線。這些曲線提供了 BOD 消耗相對於時間的初步估計。

由圖 7 可以看出工業廢水之 BOD 衰減符合一級反應速率動力學(Sibil et al., 2014)。工業廢水的平均一級 BOD 分解率為 0.19，但最高有 0.34 及最低為 0.14，這是由於工業廢水含有更多樣化的有機和無機污染物(Alrousan & Murshed, 2019)，且工業廢水成分複雜、污染物負荷較高，因此一級 BOD 分解率較不穩定。工業廢水在 BOD 分解方面表現出一級反應速率動力學，但由於不同的廢水成分和處理要求，速率常數和處理過程也有所不同。

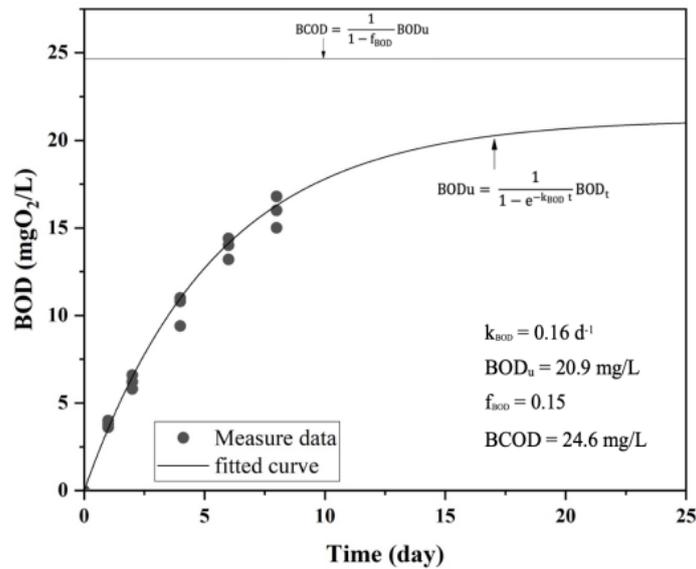


圖 7 工業廢水中可生物降解 COD 之 BOD-t 曲線

依表 6 中顯示工業廢水的 BCOD 值，難以生物分解的化學物質的存在可能會影響工業廢水的生物降解性。這些化學物質對生物處理系統造成影響，可能需要增加物理或化學的處理程序。此外，工業廢水可能含有抑制微生物活性或對環境產生毒性影響的物質 (Xu & Zheng, 2021)。因此，工業廢水的生物分解性取決於特定產業、生產流程以及化學物質或抑制物質的存在。

接著由所得之 BCOD 以式 8 計算即可得  $X_s$

$$BCOD - S_s = X_s$$

式 8

表 6 工業廢水的 BOD<sub>tot</sub> 和 k<sub>BOD</sub> 值

	Sample A	Sample B	Sample C	Sample D	Sample E	Sample F	Sample G
BOD <sub>tot</sub> (mg/L)	20.9	24.3	130.8	45.0	38.0	55.3	60.8
k <sub>BOD</sub> (d <sup>-1</sup> )	0.16	0.16	0.34	0.18	0.14	0.18	0.16
BCOD	24.6	28.6	153.9	52.9	44.8	65.0	71.6

### 3. NBSCOD(S<sub>I</sub>)及 NBPCOD(X<sub>I</sub>)

透過標準分析方法所得之 SCOD 及 TCOD，由表 3 之公式可計算得到 S<sub>I</sub> 及 X<sub>I</sub>。

#### (三)廢水 COD 特性分析

圖 8 及圖 9 為七組工業區污水處理廠生物處理程序後之水質分析，除 sample C 因生物處理系統效能不佳導致主要之 COD 來源為 X<sub>S</sub> 及 S<sub>S</sub>，不可生物分解的 COD 佔比僅為 24.2% 外，其餘樣本不可生物分解的 COD 含量範圍為 69.6% 至 77.5%，為廢水中主要 COD 來源，此與 Henze et al., (1987) 的研究結果類似。由此 COD 組成分析結果可得知此工業廢水出流水之 COD 超過法規標準值主要來源為 S<sub>I</sub>，因此後續可選擇使用化學氧化法進行 S<sub>I</sub> 之去除。

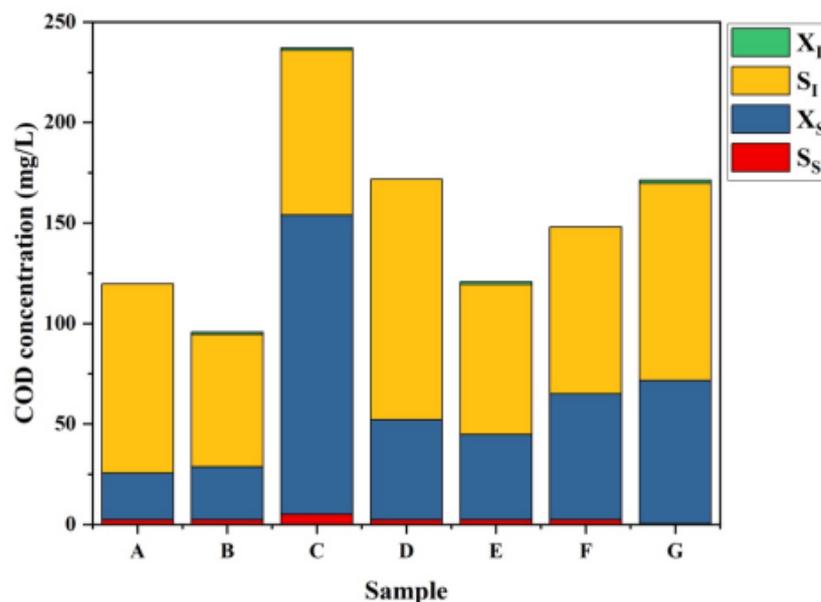


圖 8 經生物處理後之工業廢水的 COD 組成分類

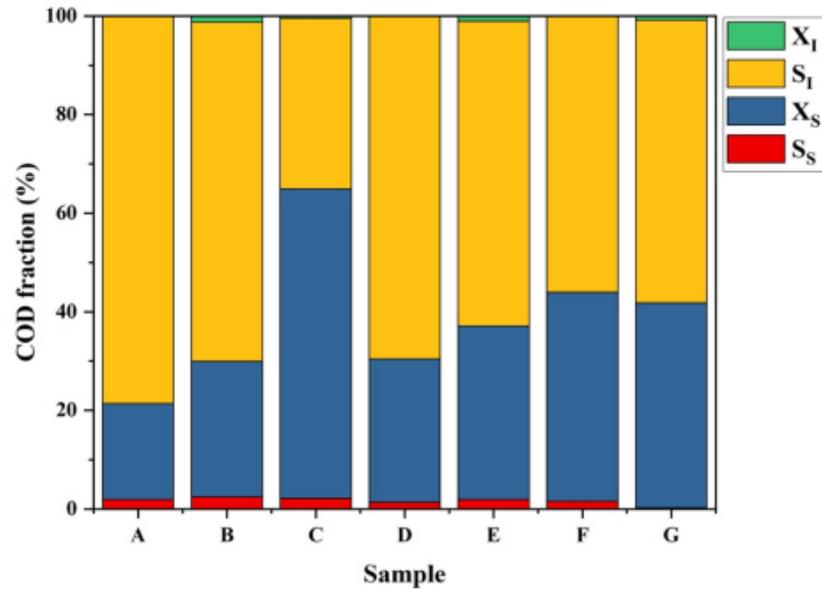


圖 9 經生物處理後之工業廢水的 COD 百分比組成分類

## 五、結論

本案例生物處理後的工業廢水總 COD 平均濃度為 151.8 mg/L，其中 SCOD 均佔比 50% 以上，除改善生物系統外，可以 COD 細分類來了解主要為何種類型之 COD 導致濃度存在超標風險。研究結果顯示，NBSCOD 約佔總 COD 的 69.6% 至 77.5%，為廢水中主要 COD 來源，由此 COD 組成分析結果可得知此工業廢水出流水之 COD 超過法規標準值主要來源為 S<sub>1</sub>，因此可選擇使用化學氧化法進行 S<sub>1</sub> 之去除。

## 六、參考文獻

1. Alrousan, D., & Murshed, M. (2019). Determination of BOD kinetic parameters of domestic and industrial wastewater using different mathematical methods. AIP Conference Proceedings
2. APHA (1998). Standard methods for the examination of water and wastewater (20th Edition). American Public Health Association.
3. Balmat, J. (1957). Biochemical oxidation of various particulate fractions of sewage. Sewage and industrial wastes, 29(7), 757-761.

4. Borzooei, S., Simonetti, M., Scibilia, G., & Zanetti, M. C. (2021). Critical evaluation of respirometric and physicochemical methods for characterization of municipal wastewater during wet-weather events. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(3), 105238.
5. Brouwer, H., Klapwijk, A., & Keesman, K. (1994). MODELLING AND CONTROL OF ACTIVATED SLUDGE PLANTS ON THE BASIS OF RESPIROMETRY. *Water Science and Technology*, 30(4), 265.
6. Choi, E., & Daehwan, R. (2001). Nur and our relationship in bnr processes with sewage at different temperatures and its design application. *Water Research*, 35(7), 1748-1756.
7. Drewnowski, J. (2014). The impact of slowly biodegradable organic compounds on the oxygen uptake rate in activated sludge systems. *Water Sci Technol*, 69(6), 1136-1144.
8. Henze, M., Gujer, W., Mino, T., & Van Loosedrecht, M. (2006). *Activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3*. IWA publishing.
9. How, S. W., Sin, J. H., Wong, S. Y. Y., Lim, P. B., Mohd Aris, A., Ngoh, G. C., Shoji, T., Curtis, T. P., & Chua, A. S. M. (2020). Characterization of slowly-biodegradable organic compounds and hydrolysis kinetics in tropical wastewater for biological nitrogen removal. *Water Science and Technology*, 81(1), 71-80.
10. Liu, B., Terashima, M., Quan, N. T., Ha, N. T., Van Chieu, L., Goel, R., & Yasui, H. (2018). Determination of optimal dose of allylthiourea (ATU) for the batch respirometric test of activated sludge. *Water Sci Technol*, 77(11-12), 2876-2885.
11. Morgenroth, E., Kommedal, R., & Harremoës, P. (2002). Processes and modeling of hydrolysis of particulate organic matter in aerobic wastewater treatment—a review. *Water Science and Technology*, 45(6), 25-40.
12. Orhon, D., Insel, G., & Karahan, O. (2007). Respirometric assessment of biodegradation characteristics of the scientific pitfalls of wastewaters. *Water Sci Technol*, 55(10), 1-9.
13. Roeleveld, P., & Van Loosedrecht, M. (2002). Experience with guidelines for wastewater characterisation in The Netherlands. *Water Science and Technology*, 45(6), 77-87.
14. Sibil, R., Berkun, M., & Bekiroglu, S. (2014). The comparison of different

mathematical methods to determine the BOD parameters, a new developed method and impacts of these parameters variations on the design of WWTPs. *Applied Mathematical Modelling*, 38(2), 641-658.

15. White, W. F. (1995). *A man called White: The autobiography of Walter White*. University of Georgia Press.
16. Xu, S., & Zheng, Q. (2021). Analysis the Influencing Factors of Toxic Substances Toxicity Threshold on Biological Wastewater Treatment. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*
17. 環境部(2022), 放流水標準。

# 應用非熱電漿技術處理醫療廢水中新興污染物之研究

林威澄\*、柯致宇\*、官文惠\*\*

## 摘要

隨著醫療抗生素的使用，廢水中新興污染物（如藥物殘留、內分泌干擾物和藥物中間體）濃度逐漸增加，傳統污水處理程序在去除這些難降解抗生素效果有限，廢水中的藥物污染變得日益嚴重，對水體和生態系統造成潛在威脅。非熱電漿技術為一種新興的高級氧化水處理技術，生成活性物種（如氫氧自由基、臭氧等）之作用機制，能夠有效降解水中難降解污染物。本團隊開發建置一套非熱電漿系統結合微細氣泡裝置促進氧化反應效率，相對一般氣泡會迅速上升至水面並破裂，而微細氣泡於水中上升速度緩慢，於水體中存在時間較長，且微細氣泡特性於上升過程中體積不斷收縮並溶解於水中，可使水中氣體含量達過飽和條件時仍維持高質傳效率，此外微細氣泡破裂瞬間亦可在水中釋放出大量氫氧自由基，提升了活性物質的溶解速率與濃度，增強對新興污染物的去除效果。本研究係以國內北區某醫學中心廢水為試驗對象，檢測出原廢水中抗生素乙醯胺酚（Acetaminophen, ACT）濃度達數百 $\mu\text{g/L}$ 。實驗結果顯示，不論是否經預沈澱，透過非熱電漿處理均可在30分鐘內將抗生素藥物去除達93%以上。為測試多種藥物且高濃度情境之處理效能，本研究另於實廠廢水中添加安莫西林（Amoxicillin, AMO）與雙氯芬酸（Diclofenac, DIC）兩種常見抗生素藥物，30分鐘內亦可達71%以上之去除率，且處理體積在大規模醫療廢水處理中的實踐效果已可達0.5CMD。

【關鍵詞】非熱電漿、新興污染物、醫療廢水、活性物種、微米氣泡

---

\*明志科技大學環境與安全衛生工程系 研究助理

\*\*明志科技大學環境與安全衛生工程系 教授

## 一、前言

電漿 (Plasma) 是一種正電與負電數目相同的穩定電中性氣體，是除了一般熟知的固、液、氣三態外的第四態物質，另有等離子體之名稱。非熱電漿 (Non-thermal plasma) 係利用電子撞擊原子或分子，激發出多樣化具反應性的高活性物種，整體電漿溫度接近室溫，故適合運用於水處理，降解水中污染物之模式則近似高級氧化處理 (Advanced oxidation processes, AOP)。高級氧化程序能夠生成羥基自由基 ( $\cdot\text{OH}$ )，通過自由基-自由基相互作用、奪氫或直接電子轉移等方式進行，可有效降解水中的有機污染物和有害物質，包括不易分解的短鏈分子化合物。非熱電漿技術之優勢在於可藉由操作參數之調控，如雞尾酒般產出不同種類與比例的自由基、激發態分子或碎片、陰陽離子、以及電子，且具不須外加化學藥劑與佔地空間小之優勢，儘管非熱電漿技術近年快速發展，且較熱電漿 (thermal plasma) 處理技術節能、設置成本低，但應用於水處理領域仍有許多待突破之處。

新興污染物一般定義為新認定或之前未確認、法規未規範，但對人體健康與生態環境具風險的污染物，這類物質目前尚未有完整調查、評估或監測資料顯示對人體造成影響，國際上也普遍尚未列管，但由於這些污染物可能對生態及水體環境具有潛在威脅，進一步的研究和監測對於管理新興污染物影響至關重要。新興污染物在環境檢體中濃度通常較低，但近年全球均在河川、海洋甚至我們的飲用中，逐漸檢測出這些污染物的蹤跡。新興污染物包括藥物與個人衛生保健用品 (Pharmaceuticals and personal care products; PPCPs)、內分泌干擾物 (Endocrine disrupting chemicals; EDCs)、持久性有機污染物 (Persistent of organic pollutants; POPs)、微塑料 (Microplastic)、無機污染物 (Inorganic pollutant)、奈米材料 (Nanomaterials) 和消毒副產品 (Disinfection byproducts)，其中 PPCPs 為預防與治療疾病處方藥，或個人護理產品，包括一般抗生素、激素、鎮痛劑、消炎藥等，當口服安莫西林藥物時，約 60% 會在 6-8 小時內從尿液中排出，這些產品經服用後，隨著人體代謝排出，進入污水下水道系統，釋放到環境中對水資源、水生生物和生態系統產生不良影響，儘管藥物濃度在環境水體很低，但長期暴露，仍可能造成生物突變，不僅增加細菌抗藥性，亦有可能使其演變成超級細菌；同時，與污水程序消毒用之氯反應，有可能形成具毒性消毒副產物。此外，傳統污水廠通常不是為處理藥物而設計的，因此無法去除不可生物降解之藥物污染，研究顯示廢污水及環境水體中已存在 PPCPs，檢測濃度範圍為奈克/公升 (ng/L) 至微克/公升 ( $\mu\text{g/L}$ )，民國 109 年由環保署委託之事業廢水特性

調查及管制策略研析計畫中更是整理出台灣水體環境中 PPCPs 的存在情況如下表 1，其中乙醯胺酚於新店溪流域調查濃度最高，為 0.00294~3.227 $\mu\text{g/L}$ ，儘管 PPCPs 的濃度很低，但 PPCPs 殘留可能會對健康產生嚴重危害與未知的長期影響。

表 1 台灣水體檢測之藥物及其濃度

藥物名稱	醫院或下水道系統放流水檢出濃度	環境水體檢出濃度
異丁苯丙酸 (布洛芬)	醫院 N.D.-0.454 $\mu\text{g/L}$	新店溪流域 N.D.-0.2097 $\mu\text{g/L}$ 新店溪流域 0.0251-0.0625 $\mu\text{g/L}$ 大漢溪流域 <0.0025-0.185 $\mu\text{g/L}$
乙醯胺酚 (普拿疼)	醫院 N.D.-0.027 $\mu\text{g/L}$	新店溪流域 0.00294-3.227 $\mu\text{g/L}$
苯酮苯丙酸 (凱妥布洛芬)	醫院 0.003-0.010 $\mu\text{g/L}$ 公共污水下水道 0.002-0.004 $\mu\text{g/L}$	新店溪流域 N.D. 大漢溪流域 <0.0025-0.185 $\mu\text{g/L}$
萘普生 (拿百疼)	-	新店溪流域 N.D.-0.0834 $\mu\text{g/L}$
四環黴素	醫院 0.0105 $\mu\text{g/L}$	中部流域 N.D.-0.0178 $\mu\text{g/L}$ 南部流域 N.D.-0.019 $\mu\text{g/L}$
羥四環黴素 (土黴素)	醫院 0.0032 $\mu\text{g/L}$	中部流域 N.D.-0.142 $\mu\text{g/L}$ 南部流域 N.D.-0.336 $\mu\text{g/L}$
氯四環黴素 (金黴素)	醫院 N.D.	中部流域 N.D.-0.0792 $\mu\text{g/L}$ 南部流域 N.D.-0.0728 $\mu\text{g/L}$

水處理程序中，常有需要將氣體導入水中之情境，如活性污泥法曝氣、消毒與高級氧化導入臭氧等。一般的曝氣方式因為氣泡太大，於水體中產生後會迅速上升至水面並破裂消失，致使氣體大都逸散至大氣，而無法停留於水中，水中氣體濃度無法提升。氣泡是指介質中由界面所封包之氣體，若能將氣泡尺寸縮小至微米甚至奈米等級，則因微細氣泡本身無浮力之特性，水中停留時間增長。超微細氣泡於水中上升速度緩慢，從氣泡生成至破裂通常可達幾十秒或幾分鐘，且於氣泡上升過程中體積將不斷收縮並於水中溶解消失，氣泡體積愈小上升速度愈慢，當氣泡直徑縮小時，表面張力對氣泡內部氣體之壓縮作用將大幅提升，使氣泡體積於上升過程中不斷內縮，氣泡內部

壓力隨體積縮小而上升，進而使更多氣體穿透氣泡界面而溶入水中，最終壓力到達極限而破裂，藉由此特性使水中氣體含量即便達到過飽和條件，仍可維持高質傳效率。超微細氣泡破裂瞬間可產生約 5,000 K 高溫及 1,800 atm 大氣壓力，在水中釋放出大量 $\cdot\text{OH}$ ，進而與吸附於氣泡表面之有機物質發生機械剪切、熱解斷鍵、自由基氧化及超臨界水氧化之物化反應，達到分解及去除水中污染物之目的。

本研究開發非熱電漿結合不同孔隙尺寸之微細氣泡管系統，測試整體程序對醫療廢水中新興污染物抗生素藥物之處理效能。透過模組運行參數的優化，探討系統長期操作與對不同水質條件的適應性。

## 二、材料與方法

本研究先設計製作非熱電結合微細氣泡管，透過調整系統配置與操作參數，以觀察活性物質之生成情形；並以實廠醫療廢水進行試驗，探討其中數種抗生素藥物之去除效能，處理規模為 0.5CMD。

### (一)電漿水處理模組

本研究團隊設計開發一種電漿水處理反應模組（如圖 1），並將其運用於實廠醫療廢水中藥物之降解處理。反應模組主要由四個部分構成，包括電源供應單元、氣體輸入單元、電漿生成區及氣液混合單元。電源供應單元提供高頻電壓，採用脈衝直流電源，頻率設定為 15kHz，固定開啟時間 8 $\mu\text{s}$  的情況下，激發模組內的氣體（如氧氣或空氣）從而形成穩定電漿。模組結構採用介電阻擋放電（Dielectric barrier discharges, DBD）以創造均勻且大面積的電漿生成區域，可操作電壓最大為 30kV，可以需求調整。在反應模組中，氣體輸入單元將載流氣體輸送至電漿生成區域，載流氣體主要由氫氣與空氣（或氧氣）的混合組成，模組一端設置介電層包覆的碳棒作為高壓電極輸入端，另一端亦以碳棒作為接地電極端，碳棒與碳棒中間形成的放電電場即為電漿生成區域，於電漿反應區域過程中氣體分子經過離子化反應，產生高能電子、自由基及臭氧等具備強氧化能力之活性物質，能有效分解水中的有機污染物。

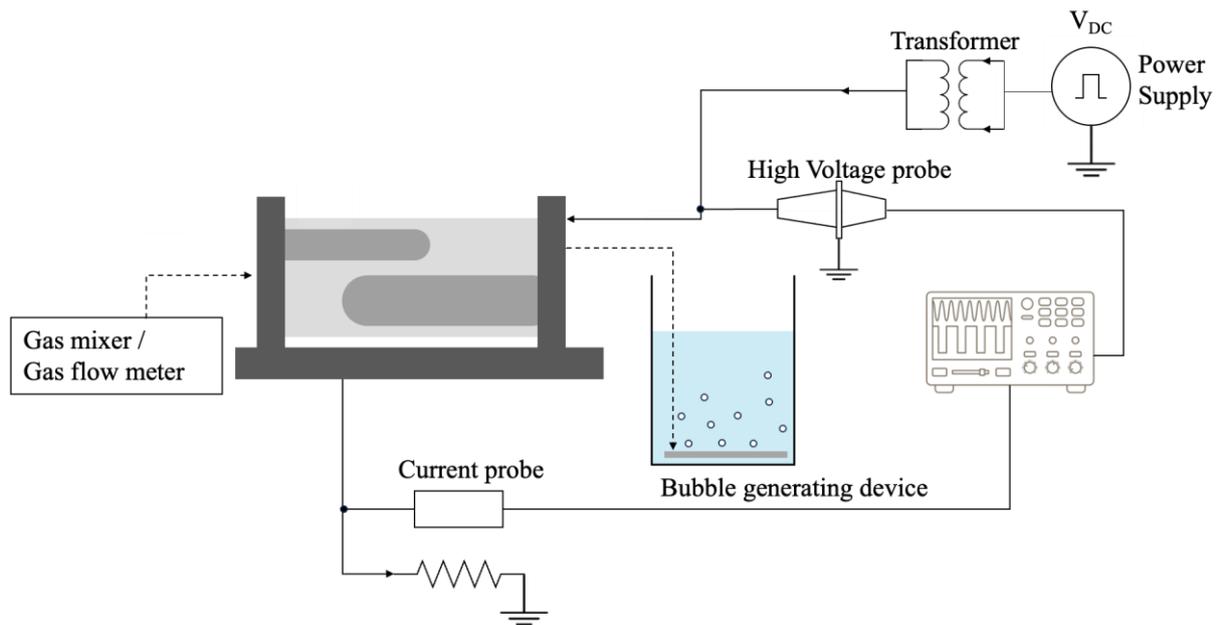


圖 1 非熱電漿電漿微細氣泡水處理模組系統配置圖

## (二) 氣泡微細化裝置與特性量測

為促進電漿產生之活性物質與廢水充分接觸，模組結合微米氣泡裝置，探討氣泡尺寸對處理效能之影響。因此本研究利用不同尺寸的填充材料，填充出不同孔隙率的微細氣泡管，測試氣泡尺寸對水中污染物的處理效能差異，以優化非熱電漿微細氣泡模組效能。由於氣泡表面之電雙層是由表面帶負電層及其電性吸引帶正電之  $H_3O^+$  離子所組成，氣泡體積愈小則表面處產生界達電位愈高，對水中帶電粒子之吸附性愈高，當微氣泡在水中收縮時，帶電離子於超微細氣泡界面上快速濃縮，界達電位理論上可能會上升。本研究運用水中溶氧（背景試驗組）或臭氧濃度（非熱電漿試驗組）之溶解速率與飽和濃度比較氣泡尺寸對水中活性物質傳送，以至於污染物處理效能之影響。

## (三) 藥物之 HPLC-MS/MS 分析

本研究中利用 HPLC-MS/MS (Shimadzu, LCMS-8030) 分析廢水中乙醯胺酚、安莫西林與雙氯芬酸之濃度，層析分離選用 C18 分析管柱 (ACQUITY BEH, C18, 100x2.1mm, 1.7 $\mu$ m)。流動相用乙腈（溶劑 A）和去離子水（溶劑 B）的梯度混合洗脫分離樣品。在進行 HPLC-MS/MS 分析之前，通過 0.22 $\mu$ m 注射過濾器過濾樣品，樣品分析時間為每支 7 分鐘，梯度程序如下：0-0.7 分鐘，64.4 % B 相；0.7-1.3 分鐘，1% B 相；1.3-4.0 分鐘，維持平衡 1% B 相；4.0-4.3 分鐘，70% B 相；然後在 70% B 相下重新平衡至 7 分鐘。

流速為 0.3 mL/min。進樣量設置為 10 $\mu$ L。使用氬氣輔助霧化，霧化氣流速 2.6 L/min，DL 溫度 250  $^{\circ}$ C，乾燥氣體流量 12.5 L/min。電離源選擇 ESI 源在 MRM 模式反應下分段監控，透過監測 m/z 366.20  $\rightarrow$  349.10 (AMO)、m/z 151.70  $\rightarrow$  110.10 (ACT) 及 m/z 294.00  $\rightarrow$  214.00 (DIC) 測定目標污染物濃度。

### 三、結果與討論

#### (一) 孔隙尺寸背景試驗

為促進電漿生成之活性物種在水中的溶解效率，本研究採用多種基材（如陶瓷、石墨烯和不鏽鋼），透過燒結法開發不同孔徑的微米氣泡管，並將氣泡管應用於本實驗的非熱電漿水處理模組中。本研究先以氧氣測試孔徑尺寸對水中溶氧濃度之影響，選取了 1 $\mu$ m、6.5 $\mu$ m 和 8.7 $\mu$ m 三種孔徑作為代表，試驗控制組則使用普通曝氣石。測試結果顯示微米氣泡管所產生的微米氣泡在水中溶氧速率與飽和濃度顯著高於一般氣泡石曝氣，且孔徑愈小溶氧提升速率愈快（圖 2）。

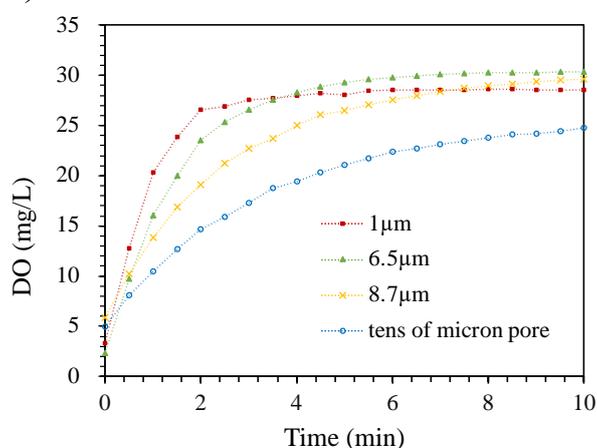
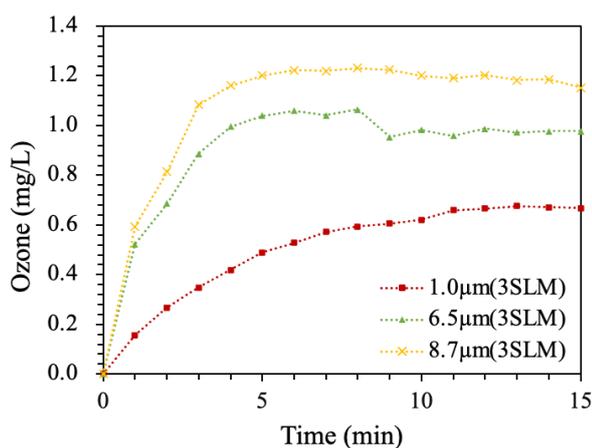


圖 2 微米氣泡管溶氧實驗

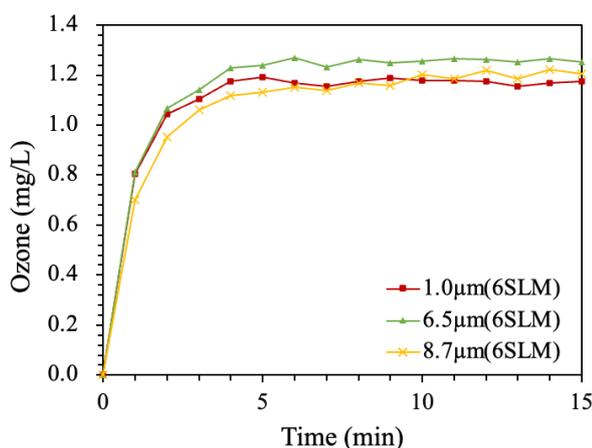
#### (二) 電漿產生活性物種之溶解效能

可生成電漿的氣體包括 He、Ar、O<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>、空氣或混合氣，在常壓電漿反應器中，Ar 和 O<sub>2</sub> 是相當有效的氣體。空氣電漿除了產生臭氧和水解離物質外，還會產生一些稱為活性氮物質 (RNS) 的氮氧化物化合物，例如一氧化氮、亞硝酸和過氧亞硝酸，當這些物質擴散到水中時，可能增加處理水的毒性並降低 pH 值。非熱電漿結合微細氣泡因氬氧氣體混合比例產生臭氧量較高，故先以 Ar/O<sub>2</sub> 混合為載流氣體比較氣泡管孔徑大小 1 $\mu$ m、6.5 $\mu$ m 和 8.7 $\mu$ m 三種代表性的孔徑對水中臭氧濃度的定量，測試兩種氣體流量分

別為 6SLM 及 3SLM。實驗結果以水中臭氧濃度進行討論。根據實驗結果顯示，氣泡管孔徑的大小（ $1\mu\text{m}$ 、 $6.5\mu\text{m}$  和  $8.7\mu\text{m}$ ）顯著影響活性物質的溶解速率，在高氣體流量下，水中的臭氧濃度較快達到飽和。實際測得的臭氧濃度在 5 分鐘內，氣體流量為 3SLM 下約為  $0.4\text{-}1.2\text{mg/L}$ ，而在 6SLM 的流量下，水中臭氧濃度約為  $1.1\text{-}1.2\text{mg/L}$ 。為驗證氣體流量與氣泡尺寸對非熱電漿模組水處理的影響，我們分析了相同氣泡尺寸下不同氣體流量，以及不同氣泡尺寸下相同流量的情況。如圖 3 所示，當氣泡管在高流量下時，產生的氣壓較大，氣體透過壓力擴散的方式溶解於水中，導致小孔隙尺寸氣泡管的臭氧溶解速率高於大孔隙尺寸氣泡管（ $8.7\mu\text{m}$ ）；然而在低流量下，氣體以滲透擴散的方式溶解於水中，故較大孔隙氣泡管（ $8.7\mu\text{m}$ ）的溶解速率高於小尺寸氣泡管（ $1.0\mu\text{m}$ ），故後續模組研究將以高流量進行。其中  $1\mu\text{m}$  氣泡管的材質與燒結方式異於另外兩種尺寸管柱，致使表面疏水性不同，故對高流量下之飽合臭氧濃度稍有影響。



(a)



(b)

圖 3 非熱電漿結合不同孔隙尺寸微細氣泡管對水中臭氧濃度之影響。

(a) 電漿氣體流量 3slm (b) 電漿氣體流量 6slm

### (三)實廠醫療廢水中抗生素之處理

本研究目標為驗證非熱電漿對實際醫院廢污水的藥物去除效能，故選擇國內北區某醫學中心等級的大型綜合醫院廢水為測試對象。醫院設有四個中心、十個門診部和一個專科，日均門診量超過 6,500 人次，急診量近 400 人次，病床數達 1,415 床，員工人數為 1,800 人，每日原廢水進流量約為 876 CMD。廢水處理主要依賴生物處理（接觸曝氣/氧化）和加氯消毒，並輔以紫外線消毒。在本實驗中採集原廢水調勻池的水樣進行試驗。廢水基本特性分析如表 2 所示。醫療廢水性質依醫院當下病患使用之藥物不同而有變化，除了基本水質監控外，選用三種常見之藥物 AMO、ACT、DIC 作為標的新興污染物，代表樣品濃度如表 2 所示。

表 2 實廠醫院廢水水質參數

分析項目	單位	採樣位置/單元名稱
		T02-02 (原廢水調勻池)
pH	-	7.58
基本水質	導電度	μS/cm
	化學需氧量	mg/L
	總有機碳	mg/L
	AMO	μg/L
PPCPs	ACT	μg/L
	DIC	μg/L

為評估電漿水處理技術對水質改善的有效性，本研究考慮到廢污水中抗生素的濃度背景較低，因此選擇廢污水中常見抗生素的標準品添加作為識別對象，實驗分別添加 AMO 及 DIC 濃度約 500μg/L，並在相同氣體流量 6SLM 下使用兩種載流氣體參數，分別為氬氧混合 (Ar : O<sub>2</sub> = 5:1) 和氬空氣混合 (Ar : Air = 3:3)，並比較結合氣泡管對抗生素去除，實驗設計以微米氣泡管與一般氣泡孔徑相比，結果如圖 4 所示。實驗結果顯示，電漿水處理在去除水中污染物方面兩者均具有一定的效果，15 分鐘後，去除率均可達 50% 以上。在比較氣泡孔徑對污染物去除的影響時，使用氬氧混合氣體的情況下，微米氣泡管對三種藥物的去除效果均優於一般曝氣；在使用氬空氣混合氣體的情況下，使用微米氣泡管亦可以提升污染物的去除率，且隨時間延長使用

氣泡尺寸較小之氣泡管可提升污染物之去除率，證明氣泡越小，氣泡封包水中停留時間越長，提升氣體溶解度及氣體於水中之質傳效率。

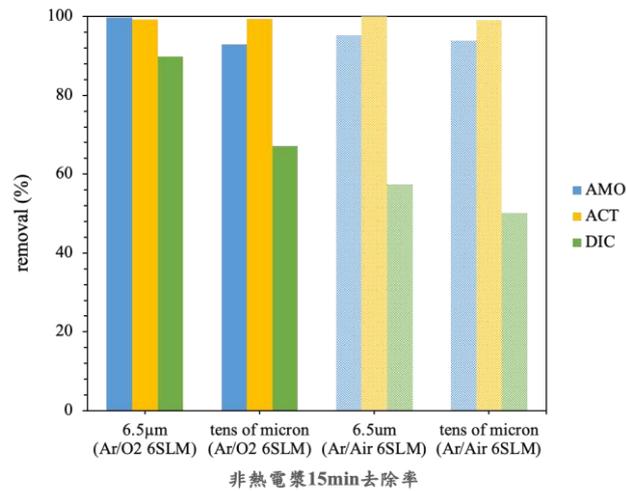
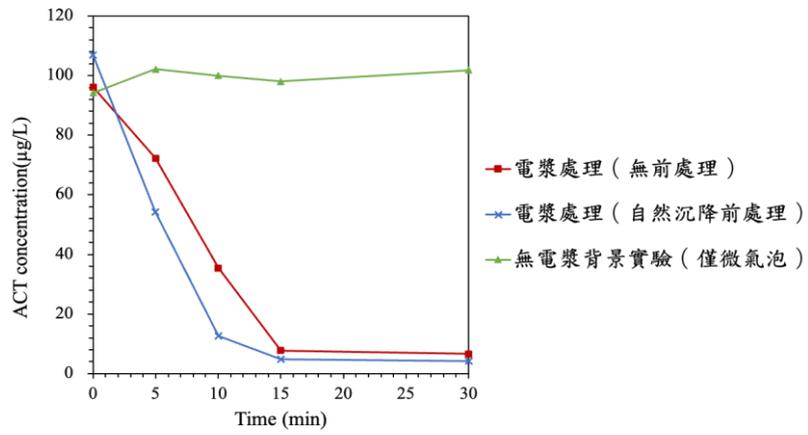


圖 4 不同氣泡尺寸與電漿氣組成對實廠廢水中抗生素去除率之影響

#### (四)前處理之影響與 0.5CMD 連續試驗

電漿作為一種新興的水處理技術，特別在去除難降解有機物方面具有強烈優勢，為能有效將電漿應用開發於實際廢水處理上，隨著廢水處理量的需求，本研究目標計劃在實驗室規模的放大階段達每日水體處理量 0.5 CMD，並結合氣泡管的多微氣孔設計，以最大限度地生成微米氣泡，有效溶解於水中，實現最佳利用效率。本研究使用非熱電漿整合微米氣泡技術模組系統，對實廠醫療廢水中的抗生素進行處理，實驗首先在未啟動電漿僅有微細氣泡的狀態下進行背景實驗，以評估非熱電漿模組系統去除抗生素污染物的基準，另對實廠廢水進行自然沉降前處理，取得上清液，並與未經前處理的原廢水進行比較，探討廢水中懸浮固體對非熱電漿系統的影響，污染物濃度變化與不同前處理對水質影響之外觀變化如圖 5 所示。結果顯示在進行背景實驗時，醫院廢水中的乙醯氨基酚 (ACT) 未有去除效果；相反經非熱電漿模組系統處理後，抗生素污染物濃度隨時間下降，在 30 分鐘的實驗操作中，原廢水及自然沉降前處理後的廢水中，乙醯氨基酚的去除率均可達 90% 以上，顯示含有活性物種的氣泡封包為抗生素廢水降解的主要因素，此外抗生素廢水是否進行前處理對非熱電漿模組系統的影響不顯著，自然沉降後的廢水在實驗初期的去除效率略高於原廢水，但當處理時間延長至 15 分鐘後，兩者的去除率均可達 90%，且連續操作亦能維持穩定的處理效能。

(a)



(b)

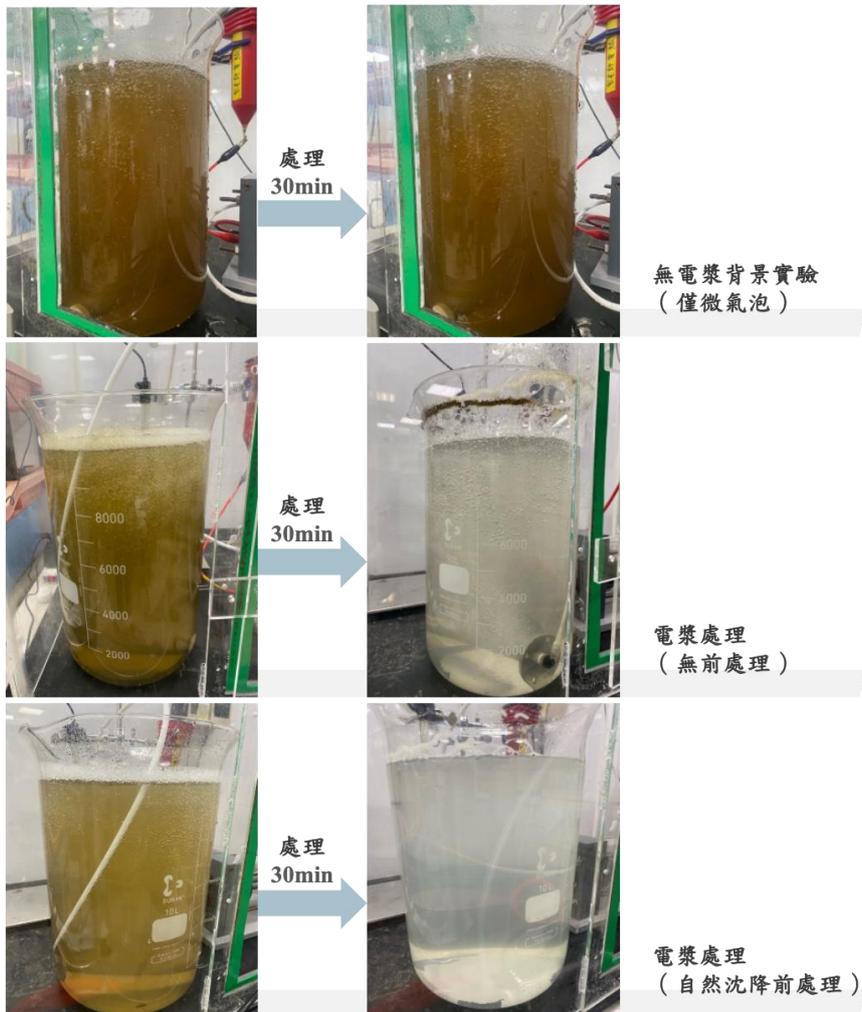


圖 5 不同前處理程序對實廠廢水中抗生素之處理效能，處理規模為 0.5CMD (a) 水中 ACT 濃度隨時間變化；(b) 處理前後之水樣外觀照片

## 四、結論

本研究研發之非熱電漿結合微細氣泡可有效降解醫療廢水中之新興污染物抗生素。氣泡管孔隙尺寸愈小，則可使電漿產生之活性物種溶解速率與飽和濃度愈高。三種抗生素 DIC、ACT 與 AMO 也是採用小孔細氣泡管之去除效率高於一般曝氣石；其中 ACT 與 AMO 之去除率均可達 95% 以上，DIC 則約為 50~90%，使用微米氣泡管之效率高於一般氣泡石約 25%。廢水是否進行沉澱前處理對非熱電漿水處理之整體效能的影響不顯著，自然沉降後的廢水在實驗初期的去除效率略高於原廢水，但當處理時間延長至 15 分鐘後，兩者的去除率均可達 90%。

## 五、參考文獻

1. Wang, J. and S. Wang, Reactive species in advanced oxidation processes: Formation, identification and reaction mechanism. *Chemical Engineering Journal*, 2020. 401: p. 126158.
2. Nam, S.-N., et al., Catalytic non-thermal plasma treatment of endocrine disrupting compounds, pharmaceuticals, and personal care products in aqueous solution: A review. *Chemosphere*, 2022. 290: p. 133395.
3. Lei, M., et al., Overview of emerging contaminants and associated human health effects. *BioMed research international*, 2015. 2015(1): p. 404796.
4. Sivaranjane, R. and P.S. Kumar, A review on remedial measures for effective separation of emerging contaminants from wastewater. *Environmental Technology & Innovation*, 2021. 23: p. 101741.
5. Aryee, A.A., R. Han, and L. Qu, Occurrence, detection and removal of amoxicillin in wastewater: A review. *Journal of Cleaner Production*, 2022. 368: p. 133140.
6. Mackulak, T., et al., Hospital wastewater—source of specific micropollutants, antibiotic-resistant microorganisms, viruses, and their elimination. *Antibiotics*, 2021. 10(9): p. 1070.
7. Mercado-Cabrera, A., et al., Thin film water non-thermal plasma reactor for acetaminophen analgesic oxidation. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2024: p. 1-12.

8. 財團法人中興工程顧問社，事業廢水特性調查及管制策略研析計畫。2020(行政院環境保護署)。
9. Silori, R., et al., Global groundwater vulnerability for Pharmaceutical and Personal care products (PPCPs): The scenario of second decade of 21st century. *Journal of Environmental Management*, 2022. 320: p. 115703.
10. Kovalakova, P., et al., Occurrence and toxicity of antibiotics in the aquatic environment: A review. *Chemosphere*, 2020. 251: p. 126351.
11. John, A., et al., Microbubbles and their application to ozonation in water treatment: A critical review exploring their benefit and future application. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2022. 52(9): p. 1561-1603.
12. Wang, W., et al., Hydroxyl radical generation and contaminant removal from water by the collapse of microbubbles under different hydrochemical conditions. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2018. 229: p. 1-11.

# 水資源效率評估指標研析與實務應用探討

魏名軍\*、曹書涵\*\*、楊深惠\*\*\*、林杰熙\*\*\*\*

## 摘要

全球企業實踐 ESG 永續發展不再是一個口號，ESG 成為企業市場走勢和掌握永續經營的必要措施。受到國際組織和具社會責任感的大型企業和金融機構的積極推動，ESG 投資的影響力不斷擴大，逐漸成為全球投資者及資產管理機構主流的投資理念，然企業取得 ESG 相關資金，落實責任投資及設定目標達成與否，作為金融機構判斷提供資金的依據，更能避免企業藉由 ESG 推動進行「漂綠」行為，此類可持續發展績效目標(SPT, Sustainability Performance Target)的設計依據及訂定內容，儼然成為一項關鍵課題

近年來在水資源時間及空間分配不均的台灣地區，枯旱及洪害發生頻率不斷提高，使得水資源議題受到企業及政府單位等各界高度重視。有別於能源效率提升或溫室氣體減量，水資源使用效率的評估方式與指標，因應政府法規規範或使用需求，進而發展出不同的指標及評估方法，常見指標包含用水回收率、節水率、單位產品用水量、單位產值用水量及用水密集度等。而在政府機關相關規範要求中，包含環境部、經濟部及國科會(科管局)，亦因應轄管業務需求，訂有用水回收率相關要求及評估計算方式，但因應管理要求或施政導向，各部會之用水回收率計算基準及內容也不盡相同。

合適之水資源效率管理指標，可充分展現企業推動水資源管理績效，亦可成為金融機構提供 ESG 等綠色資金時重要判別工具，企業並可依此指標擬定水資源永續目標之參考依據，本文將就過去水資源管理相關指標進行分析，並就各項指標特點及合適性分別討論，並評估其在實務應用時的可行性。

【關鍵詞】用水回收率、可持續發展績效目標、水資源效率、ESG

---

\*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 副研究員

\*\*\*經濟部水利署保育事業組 副工程司

\*\*\*\*經濟部水利署保育事業組 科長

## 一、前言

在全球正高度關注淨零碳排放議題時，台灣碳費相關政策配套子法公布，等同正式宣布我國邁入碳定價時代。然 2024 年 3 月時石門水庫蓄水量僅剩 31.6%，南臺灣的曾文水庫也僅有 48.6%，再度上演水情拉警報的情境，水資源無疑是經濟的命脈，而缺水的經濟代價，據 CDP(碳揭露計畫)的統計資料顯示，2020 年就因缺水導致損失竟高達 3,010 億美元，超過新台幣 9 兆元。台灣近年來發生旱象頻率增加，缺水導致啟動限水措施時，產業透過水車載水費用高達 1,000 元/公噸，以科技指標企業台積電公司單一工廠上萬噸用水量計算，一天光水車載運費用可能高達千萬元，再度說明了缺水導致的鉅額損失。

而高用水量是否即表示企業用水浪費或未有效節約用水，水資源使用效率如何評估等議題，也由於各個產業特性不同，經常出現企業各自表述的狀況，往往不容易透過這些指標了解企業水資源使用效率的優劣，以及衡量企業是否善盡水資源管理永續責任。而在全球 ESG 蓬勃發展的時代，資金不斷湧入擴大 ESG 相關投資標的，不僅是企業評估自身水資源效率需要一項合適指標，提供資金的金融業者更需要一項指標，能有效衡量企業水資源管理投入的績效，並且監督其提供的綠色資金為水資源永續付諸行動。

## 二、水資源效率指標及評估方式

因應台灣地理環境及經濟發展，包含科技產業及傳統產業接續發展，水資源對產業而言是生產不可或缺的一環，尤其部分產業對水資源具有一定的依賴程度，以 2023 年統計資料來看，半導體製造中晶圓製造業代表-台積電公司，每日需取用自來水量約 25 萬噸；而面板製造業中的代表-群創光電公司，每日取用自來水量約 4.4 萬噸；化工及化學原材料製造業代表-台塑企業集團下各廠區，合計每日取用水量(包含自來水、地表水及地下水)約 9.8 萬噸，僅是此三家企業合計每日需取用水量約 39.2 萬噸，約等於台水公司第八處(宜蘭縣)的系統供水能力(約 36.6 萬噸/日)，顯示出水資源對於企業而言是不可或缺的重要生產原料及資源。

### (一)每滴水重複使用次數

然近年來全球永續議題熱潮之下，我國政府也持續增加推動節水力道，企業對於水資源管理議題關注程度不斷提高，許多大企業更對於節水推動及相關成果績效，更是如同田徑賽場上一般地爭奪排名及話題性，過去最為人熟知的即為台積電公司曾發布的「一滴水使用 3.5 次」這樣的績效展現方式，顯示台積電公司其對於水資源管理及重複使用的重視及實際成果，甚至群創光電公司及台塑企業也曾對外發布類似的數據，說明企業對於水資源管理方針及節水重視程度，透過三家企業過去所發布的 CSR 報告書中揭露資料彙整如表 1，台積電公司、群創光電公司及台塑企業麥寮園區相關用水量及回收水量及每滴水重複使用次數資料，可發現下列幾點情形：

1. 每滴水使用次數的計算方式及水量類型並無明確定義，各家企業對外所發布每滴水重複使用次數，多依據內部統計的數據類型與計算方式，可供參考但不易直接比較。
2. 台積電對外宣稱每滴水重複使用 3.5 次，並於 CSR 報告書中揭露計算方式與數據，計算方式：每滴水重複使用次數=(自來水用量+回收水量)/自來水用量
3. 群創光電於 CSR 報告書中有揭露台灣廠區平均每滴水使用 4 次、台南 Fab5 廠 7 次，但未說明計算方式與數據。
4. 六輕每滴水使用次數，如按照台積電算法及台塑企業 CSR 報告書中的數據計算，每滴水使用 7.3 次無誤。

由前述資料結果得知，「每滴水重複使用次數」這項數據雖然對於節水推動力道的展現相當直觀，但由於節水措施中不僅是回收再利用的部分，亦有其他節水措施採取的方式，例如水在同一用水單元或系統內循環使用，這類再循環或再利用方式，不易透過此項數據指標完整展現節水績效，顯然以「每滴水重複使用次數」作為水資源效率評估指標依據並不是最佳選擇。

表 1 我國企業每滴水重複使用次數分析

行業別	廠商名稱	用水量 (百萬噸/年)	回收水量 (百萬噸/年)	每滴水重複使用 次數(次) <sup>4</sup>	備註
晶圓 製造	台積電 <sup>1</sup>	41.4	103.40	3.5	每滴水重複使用次數 $= \frac{\text{自來水用水量} + \text{回收水量}}{\text{自來水用水量}}$
面板 製造業	群創光電 <sup>2</sup>	22.96	—	4.0	CSR 報告書中未明確說明計算方式，並未有相對應數據可供計算
化工及 化學 原材料	台塑 麥寮六輕 <sup>3</sup>	91.54	573.08	7.3	參考台積電計算方式

資料來源：1.台積電 106 年度企業社會責任報告書(台灣廠區)

2.群創 105 年企業社會責任報告書台灣廠區平均 4 次，台南 Fab5 廠 7 次

3.台塑企業 106 年企業社會責任報告書，麥寮園區 7.3 次。

4.每滴水重複使用次數 = 
$$\frac{\text{自來水用量} + \text{回收水量}}{\text{自來水用量}}$$

## (二)每單位產品(產值)用水量

近年來國際間為推動永續發展及營造 ESG 環境，自 1997 年全球永續性報告指標(Global Reporting Initiative, GRI)成立後，並於 2000 年發布 G1 Guideline 提供全球企業重大揭露建議之首部永續報告架構，對應到金管會於 2018 年發布之新版公司治理藍圖，要求企業依循 GRI 製作 CSR 報告書時，並應考量利害關係人關注議題進行揭露。金管會因應國際趨勢相關要求再進化，於 2020 年發布「公司治理 3.0-永續發展藍圖」正式啟動，考量國際投資人及產業鏈將關注焦點放在 ESG 相關議題，用以提醒企業重視 ESG 議題，並進一步提供公開之 ESG 資訊，以 GRI 為基礎並納入參考國際相關準則如 TCFD、SASB 等準則，強化永續報告書揭露資訊，並自 113 年起要求所有上市櫃公司應編製並申報永續報告書，且應至台灣證券交易所之企業公開資訊觀測站申報系統(SII)(詳圖 1)進行 ESG 相關資訊申報及揭露，其中水資源資訊揭露所採用指標包括「用水量」、「用水密集度」、「水資源管理及減量目標」等，用水密集度所使用計算方式為用水量/產品產量、用水量/服務或用水量/百萬元營業額，此項指標即為企業界常使用的指標單位產品(服務)用水量或單位產值用水量。

**TAIWAN STOCK EXCHANGE**

## SII 申報畫面-環境議題(6)

壹、企業 ESG 資訊揭露-環境議題

### 三、水資源管理

**是否取得驗證** (若取得不僅一項驗證機構或標準，請選擇“其他”並列出所有機構名稱或驗證標準)

是；驗證機構： (下拉選單(單選)；選擇其他需自行輸入驗證機構，不得空白)  
 否；驗證標準： (下拉選單(單選)；選擇其他需自行輸入驗證標準，不得空白)

兩者需選擇一個填寫

**(一) 用水量**

整數9位、小數4位  公噸；資料範圍： (文字(text, 可換行, 不可空白))  
 無資料，原因： (下拉選單(單選)；選擇其他需填寫原因，不得空白)

兩者需選擇一個填寫

**(二) 用水密集度** (如：以每單位產品、服務或營業額計算)

整數9位、小數4位  用水量/ (下拉選單(單選)；選擇其他需自行輸入單位，不得空白)  
 無資料，原因： (下拉選單(單選)；選擇其他需自行輸入驗證標準，不得空白)

**(三) 水資源管理或減量目標**

(文字(text, 可換行, 不可空白))

圖 1 台灣證券交易所企業公開資訊觀測站申報系統(SII)申報畫面 (水資源管理)

單位產品(服務)或單位產值用水量確實可以反映一部份企業內部資源管理或節約的績效，但運用上仍有一些限制，表 2 為國內企業經常使用評估水資源效率的幾項指標，包含用水回收率、單位產品(產能)用水量及單位產值用水量等三項指標。

首先，以單位產品用水量指標進行探討，其概念與能源效率評估常用之單位產品用電量概念相近，主要探討從生產過程概估消耗的用水量，但影響用水量的因子更複雜，例如用水量可能因蒸發逸散多寡受影響，而非真正被使用。另外電能沒有品質之分，用水水質則是一項關鍵影響因子，且電力進入設備使用後就消耗殆盡，水被使用後則有排放及回收再利用等後續議題。故使用單位產品用水量作為指標時，通常較適合生產單一產品或製程單一(例如水泥、鋼鐵等)，因產品製程變化程度低，以單位產品用水量作為指標時，可反映節水措施實施前後但為產品用水量的下降趨勢，亦可利用此項指標作為內部水資源管理的指標項目，能反映節水措施及水資源管理的有效性。

當產品種類超過 2 項甚至 2 項以上，或產品世代更新頻率高時，更難以分辨個別產品於製造過程中直接或間接使用水量，甚至絕大多數製造所需用水供應系統皆為共用儲槽、管線系統或設備(例如自來水槽、自來水管、純水系統等)，且當製程或原料頻繁改變，甚至用水方式也可能產生變化(例如清洗次數不同)，幾乎無法分別計算使用水量，採單位產品用水量指標時，

因生產條件皆產生變化，用水基準線也不同，無法與過去資料進行比較指標數值差異，進一步作為評估水資源效率之主要依據。另因單位產品用水量指標之取得，僅需統計產品產量以及組織邊界內的總取水量，經兩者計算即可得到數據結果，節水措施的實施與否不易直接反應在單位產品用水量指標，因在產量相當的條件下，單位產品用水量的變化不易直接展現實際投入節水績效，例如公司裁員導致取水量下降，漏水導致取水量增加等，也不易以單位產品用水量為指標，連結及要求個別用水單元或區域設定節水目標。

### (三)用水回收率

而另一項常見水資源效率評估指標為「用水回收率」，用水回收率的概念主要為探討水在組織邊界內被重複利用水量的比例，並且將用水分類為取水量、循環水量及回收再利用水量等類型，相對於單位產品用水量指標，受到產品生產情形以及產值變化影響較小，因為計算項目中都與水量直接相關，並無與產品相關直接數據涵蓋在內，若要維持一定回收率水準，不論取水量變高或降低，皆須維持一定比例之循環水量及回收再利用水量，因此用水回收率指標不因產能產量變化受到明顯波動，取水量越大(水用得越多)，若要維持相同回收率數值，循環水量或回收再利用水量也需要增加。但用水回收率指標仍然有一些使用上的限制，例如因計算時計入內部循環用水量，通常循環水量會大於取用水量數倍甚至數十倍，例如冷卻水塔、製程或洗滌塔運作時，都有循環用水量的活動數據產生，尤其以冷卻水塔內循環水量貢獻最高，因此廠內有冷卻水塔內循環水量時，可能使用水回收率偏高達到80%甚至90%以上。可能使得其他節水措施(循環水量或回收再利用水量)的貢獻被稀釋，從另一角度來說，組織邊界內只要有此股冷卻水塔內循環水量時，企業不需要額外節水措施提高循環水量或回收再利用水量，就可以達到高用水回收率。另，因循環水量往往因認定不易，若沒有流量計及外部查驗機制，可能出現水量認定或用水回收率計算上的爭議。

綜合上述幾項常見或常用水資源效率評估指標特性、運用優勢以及使用限制，可得到下列幾點結果：

1. 國內目前並無定義水資源效率，亦無相關法規規範水資源效率。
2. 用水量、節水量、回用水量皆可與產量(值)進行計算，但產量(值)變化，不能直接展現「水」使用效率的提升或降低。
3. 即使在用水量未增加/減少的形況下，單位產量(值)用水量指標，可能因直接接受產量(值)變化而增減。
4. 製造業各行業特性不同，甚至同行業同產品，製程流程亦可能有所不同，

導致用水特性也存在些許差異。

5. 不同行業的產品類型千變萬化，產量(值)差異更大，故若以單位產量(值)用水量做為用水效率指標，無法真實反映投入水資源改善績效。

經比較幾項水資源效率評估指標，考量指標不易受產品生產差異、產值變化以及可落實內部用水管理等因素，用水回收率應是相對而言適用性較佳且能有效管理的指標，也有利於內部規劃節水推動工作，但用水回收率仍存在水量認定上的問題。

表 2 我國常見水資源效率評估指標

評估指標	指標特性及運用優勢	指標限制
用水回收率	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 水資源在組織邊界內被重複使用的水量比例。</li> <li>2. 指標受產量(產值)影響變化小，可真實反映節水投入改善績效。</li> <li>3. 不單以節水量為節水成效依據，過去曾投入節水改善績效可納入計算。</li> <li>4. 為統計節水績效並計算用水回收率，需裝設各用水單元各項用水計量設備，強化落實內部用水管理。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 回收率公式中計入用水單元或系統設備內部循環水量，且以冷卻水塔內循環水量最高，將使回收率數值產生偏高情形。</li> <li>2. 組織邊界內之循環水量占比偏高時，導致回收率數值無法完整呈現實際節水績效。</li> <li>3. 回收水量或循環水量之評估計算，需搭配適當查驗機制，減少認定上爭議。</li> </ol>
單位產品(產能)用水量	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 適用生產單一產品者且製程變化幅度小的用水戶。</li> <li>2. 計算容易，僅需產品產量及總取水量即可算出。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 產品種類多且產品(製程)世代替換周期頻繁者不適用。</li> <li>2. 對於產品產量不易查驗，且認定上易有爭議。</li> <li>3. 僅需總取水量即可進行計算，故無需取得細部用水資料，即無法對於各用水單元進行有效管理。</li> </ol>
單位產值用水量	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 適用生產單一產品者且製程變化幅度小的用水戶。</li> <li>2. 計算容易，僅需以產值及總取水量即可算出。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 產品種類多且產品(製程)世代替換周期頻繁者不適用。</li> <li>2. 產值可能受景氣及訂單影響(價格波動)，導致可能無法反映產品製造階段的真實用水效率。</li> <li>3. 同行業間甚至同產品之原料、製程及產品皆可能有差異，成本也有所不同，故影響產品產值之因子複雜多元，故不易做為比較指標。</li> </ol>

評估指標	指標特性及運用優勢	指標限制
		4. 僅需總取水量即可進行計算，故無需取得細部用水資料，即無法對於各用水單元進行有效管理。

### 三、用水回收率指標推動及實務應用

由前一節內容所得結果，用水回收率相對適合做為企業水資源效率評估指標，但進一步蒐集國內部會機關法規或政策等相關資料，包含經濟部、環境部及國科會等所屬機關(詳表 3)已使用用水回收率，對於用水回收率定義及計算公式，也因為使用目的及需求有所不同，下面就目前國內常見幾種不同用水回收率進行研析。另，目前經濟部水利署所推動耗水費政策中，以用水回收率作為優惠費率認定指標，並訂有第三方查驗制度，強化用水回收率公信力以及增加後續指標多元化的應用。

#### (一)用水回收率

表 3 資料顯示，經濟部轄下所屬單位，用水回收率計算方式皆依循經濟部水利署所公布用水計畫審核管理辦法之規範，包含經濟部水利署、產發署及產業園區管理局；而國科會所轄科學園區，則依循用水計畫審核管理辦法精神，另於國家科學及技術委員會科學園區水電輔導管制辦法訂定其用水回收率計算方式；環境部則於工業區開發環境影響評估審議規範第二十六條中提到「工業區全區用水總回收率（含廠內用水回收、中水道系統回收及污水處理廠廢水回收等）應至少達百分之七十」。

經濟部與國科會所使用用水回收率計算公式中，有關計算原則及水量認定方式大致相似，惟科學園區所採計算公式中，分母項可扣除蒸發水量及產品生產過程中消耗水量(包含移轉成為產品)，而環境部回收率並無明確定義計算方式以及相關水量定義，且可能因環評審查過程中審查委員要求意見、開發單位開發需求及進駐產業特性等，導致計算方式有所差異，因此無一致計算公式。綜上所述，可發現國內用水回收率計算及評估方式主要問題大致可分為下列兩類：

#### 1. 用水回收率評估方式缺乏一致性

- 經濟部、環境部及科管局等單位所採用水回收率公式，因應需求導致計算方式有所不同。
- 因應環評承諾要求，用水回收率計算方式隨環評承諾及委員審查意見要求，評估標準無一致性。

- 未有用水回收率查驗相關工具，回收率評估結果可信度有待商榷。

## 2. 目前水資源管理無強制性規範

- 未強制企業設置關鍵水錶，水量多為推估值存在一定誤差。
- 企業多未建立完善之用水管理制度，針對內部用水進行定期劑量及管理。(例如建立用水管理小組、水資源管理專責人員)
- 未強制要求企業申報評估用水回收率所需的相關水量紀錄資料。

經前述彙整資料得知用水回收率計算方式，依各機關使用需求有所差異，且國科會(科管局)所訂定相關規範，也是以經濟部水利署所訂定用水計畫精神所訂定，又環境部針對用水回收率未有明確定義，相較於經濟部水利署以既有用水回收率標準架構，另訂定「用水回收率查驗作業指引」，並設有查驗機制，顯示水利署所訂之用水回收率規範架構，更適合作為主要評估指標，可協助企業扣合永續 ESG 揭露需求，強調水資源管理持續性及有效性。

目前耗水費優惠費率認定之用水回收率，基於下列幾項考量，以水利署公式 R2(不含冷卻水塔內循環水量)為認定標準依據。

- **計量方式直接**：直接採計用水量相關數據(取水量、循環及回用水量)，搭配計量設備及查驗機制，更能有效展現企業節水績效。
- **受產品(產值)變化影響小**：若要維持一定水準之用水回收率數值，須維持回用水量及循環水量之佔比，原則上不受產能(量)、產品種類或產值的影響，可真實反映用水效率。
- **正面驅動企業投入節水改善**：增加回用及循環水量才能提升用水回收率，促使企業實質投入節水進行水再利用，或鼓勵使用冷凝水、雨水等替代水源，減緩供水壓力
- **維持用水效率**：回收率需保持運作相關節水措施才可維持，不因節水達到瓶頸而無法持續節水改善。

### (二)用水回收率查驗制度

因應用水回收率計算過程中，涉及水量數據蒐集認定方式及有效性等問題，須有一套機制進行規範及要求，並交由第三方單位進行查證。

經濟部水利署為辦理耗水費第三條有關費率認定依據，已於 112 年 1 月 7 日發布「用水回收率查驗作業指引」，指引中共分為六章，涵蓋用水回收率相關用語定義、用水回收率查證作業、用水平衡圖繪製原則、查證機構及資格要求、回收率查證要求以及其他要求事項，表 4 為查驗作業指引架構及內容摘錄，顯示指引中已訂有用水回收率查驗相關流程、數據品質要求、查驗機構資格、查證員資格等規範，且為確保用水回收率數值可靠性，要求特

定水量類型需有一定比例初級數據，搭配數據抽樣原則，透過依照此查驗作業程序，所得用水回收率數值已具有一定可信度。

目前水利署已有公告查驗機構名單(共 21 家)，可依據查驗作業指引執行用水回收率查驗，所出具查證聲明書可作為企業申請耗水費優惠費率之依據，未來此用水回收率查驗機制，應可發展更多應用領域，例如可結合企業編制永續報告書，以此查驗機制作為揭露水資源管理時之第三方驗證標準。

表 3 國內相關單位所使用用水回收率計算公式

使用單位	用水回收率計算公式	差異說明
<p>經濟部所屬單位<sup>1</sup> 水利署 產發署 園管局</p>	<p>● R1：回收率(重複利用率)=<math display="block">\frac{\text{總循環水量} + \text{總回用水量} + \text{雨水} + \text{冷凝水}}{\text{總用水量}} \times 100\%</math></p> <p>● R2：回收率(不含冷卻水塔內循環水量)=<math display="block">\frac{\text{總循環水量} + \text{總回用水量} - \text{冷卻水塔內循環水量} + \text{雨水} + \text{冷凝水}}{\text{總用水量} - \text{冷卻水塔內循環水量}} \times 100\%</math></p>	<p>1.總用水量=總取水量+總循環水量+總回用水量。 2.總循環水量須包含冷卻水塔內循環水量。 3.再生水使用量，不列入公式分子項。</p>
<p>國科會所屬單位<sup>2</sup> 科管局</p>	<p>● 全廠回收率：<math display="block">\frac{\text{總循環水量} + \text{總回用水量} + \text{雨水} + \text{冷凝水}}{\text{自來水取水量} + \text{雨水} + \text{冷凝水} + \text{總循環水量} + \text{總回用水量} - \text{總蒸發} / \text{消耗水量}} \times 100\%</math></p> <p>備註：目前科學園區使用為用水回收率計算公式，為第九版(經常稱 R9 版)用水回收率計算公式</p>	<p>1.冷卻水塔排放水回收再利用，需建置回收設備，才可計入公式分子項。 2.冷卻水塔循環用水量，需控制排放水導電度在 1,500 μS/cm 以上，才可計入公式分子項。 3.廢氣洗滌塔循環水量，需建置回收設備，才可計入計算公式分子項。 4.分母項可扣除冷卻水塔蒸發水量、洗滌塔蒸發水量、純水系統消耗逸散水量及產品消耗用水(移轉成為產品內一部份的水量)。</p>
<p>環境部<sup>3</sup></p>	<p>工業區全區用水回收率= 包含廠內用水回收、中水道系統回收及污水處理廠廢水回收等。</p>	<p>無明確定義回收率計算公式，依照各環評書件審查通過內容公式為主，因此各案件之水回收率計算方式各有不同</p>

備註：1. 用水計畫審核管理辦法-用水計畫書件內容及格式附件四「用水平衡圖繪製說明」。

2. 國家科學及技術委員會-國家科學及技術委員會科學園區水電輔導管制辦法第三條。

3. 環境部-工業區開發環境影響評估審議規範第二十六條。





## 四、用水回收率指標實務應用

為引導企業推動永續發展及營造 ESG 環境，企業除了積極透過於商品/服務開發加入綠色思維，對環境產生綠色影響力用以減緩或適應氣候變化、產業 ESG 投入績效成為投資人評估企業體質好壞的一項重要指標，尤其與利益相關者建立綠色文化的認同，得以在經營道路上創造更多永續價值。

絕大多數企業對於能源及排碳議題已有一定熟悉程度，金融機構也有乘坐相關永續連結貸款(SLL)，且融資規模仍在成長中。但觀察水資源永續相關放貸案件則寥寥可數，其原因除了節水投入所創造效益回收年限長以外，另一個主因應是金融機構對於水資源永續目標之指標參考依據及資訊不足，且檢視國際永續績效連結授信原則 (Sustainability Linked Loans Principles) 中，於 2021 年版本雖有提供常見 KPI 設定範疇及範例(詳表 5)，於水資源使用範疇之範例，也僅只提到節約使用水資源，須有一項績效指標作為 SPTs 評估使用，然目前水利署所使用的用水回收率指標搭配查驗制度，應可作為未來推動水資源相關金融商品或企業訂定水資源節約之永續 KPI 使用。

經檢視 2024 年企業於 ESG 數位平台申報 2023 年成果資料，發現已有 2 家企業(榮成紙業及旺宏電子公司)運用水利署用水回收率相關指標及查驗方法，作為水資源管理之-確信標準依據，顯然該項指標也已初步獲得企業認可，將使未來推動該指標之應用更加具有說服力，相關揭露頁面詳圖 2 及圖 3 所示。

1909 - 榮成		2023年				
議題	指標	數據	資料邊界	確信機構	確信標準	確信範圍
水資源管理	用水量(公噸(t))	57,928,880.0000	母公司	其他(財團法人成大研究發展基金會)	其他(用水回收率)	
	用水密集度	3.7500				
	密集度單位	公噸/產品				
	水資源管理或減量目標	二林廠因應社會環保意識抬頭及彰化地區水源匱乏，長期致力於改善廠區用水，主要以"白水系統密閉"及"放流水回用"作為改善方向，同時將生產過程分為製漿及製紙兩區塊做改善。 製漿：散漿用水除使用白水回用外，同時進行放流水回用，每日回用水量約1百萬公升(1,000m3)製紙：化藥二次稀釋水由清水改為白水進行使用，每日回用水量約1百萬公升(1,000m3)，全面檢視機台清水使用狀況，水質需求不高之部位，全面改為清白水回用，經同仁努力，噸紙用水由2018年4.42噸/噸紙，逐年遞減至2023年3.75噸/噸紙，白水回用次數達26次，達業界標竿，顯見榮成長期在水資源利用及管理有著顯著成效。				

圖 2 榮成紙業公司 ESG 數位平台水資源管理申報資料(摘錄)

議題	指標	2023年				
		數據	資料邊界	確信機構	確信標準	確信範圍
水資源管理	用水量(公噸(t))	2,684,080.0000	旺宏總部、晶圓二廠、晶圓五廠、測試廠	其他(晶圓二廠：成創永續股份有限公司、晶圓五廠：財團法人中興工程顧問社)	其他(經濟部發布之用水回收率查驗作業指引，用水計畫審核管理辦法及耗水費徵收辦法政策之規範)	
	用水密集度	97.1648				
	密集度單位	公噸/百萬元營業額				
	總取水量(千立方公尺)	2,684.0000				
	總耗水量(千立方公尺)	723.0000				
	水資源管理或減量目標	2024年目標： (1)8吋晶圓廠製程用水回收率≥82% (2)12吋晶圓廠製程用水回收率≥85% (3)單位晶圓用水量≤0.210(立方米/12吋晶圓當量-光罩數)				

圖 3 旺宏電子公司 ESG 數位平台水資源管理申報資料(摘錄)

表 5 永續連結目標 KPI 範疇與範例

範疇項目	範例
能源效率	授信戶購置或承租建築物與(或)機器設備其能源效率評級的改善。
溫室效應排放	授信戶所製造或銷售商品，或商品生產製造的循環過程中產生溫室氣體排放的減少。
廢棄物處理	製造或商品生產製造的整個循環過程產生的液態及固態廢棄物處理的減少。
再生能源	增加使用或製造再生能源。
水資源消耗	節約使用水資源。
永續來源	增加使用經認證的永續原物
循環經濟	增加回收循環使用率，或增加使用循環原物料或供應商，生產工廠達到零廢棄物處理。
永續農業及食物	永續農產品的生產或來源履歷的改進、使用合格標籤或具認證的農產品。
生態多樣性	生態多樣性的保護與保育的改進，及對生態多樣性的貢獻。
全球ESG的評估	授信戶的 ESG 評等的改進，及(或)取得公認的 ESG 認證。

## 五、結論

永續議題已經提倡多年，我國也積極推動諸多 ESG 相關政策，但多數仍與國家淨零碳排政策脫不了關係，企業如何節能減碳以及目標都相當明確，但水資源效評估指標因受重視程度不及碳議題，討論較少也未能有公認標準，連帶影響綠色資金多數傾向節能減碳需求部位。綜觀過去的每滴水重複使用次數，一直到每單位產品用水量等指標，能展現企業自身用水效率，當需要在企業間進行比較時，仍應回歸「水」在企業組織內被重複使用的占比，並可透過核算組織內部之整體用水回收率，更能展現企業對於水資源管理的重視程度，故用水回收率指標應更適合作為水資源效率評估指標。

搭配第三方查驗機制，使得水資源管理之揭露內容及指標結果及資訊，將使企業所宣告「用水回收率」數值具有公信力及指標性，也能使金融機構於提供綠色資金時參考引用用水回收率指標，作為融資階段性目標及利率優惠條件，將引導資金對於水資源永續推動產生實質影響力，也可避免企業發生漂綠行為，才得以為水資源發展及永續行動效益規模持續擴散。

## 六、參考文獻

1. 台灣自來水股份有限公司(2024)，「台灣自來水事業統計年報」。
2. 台灣積體電路股份有限公司(2024)，112年「永續報告書」。
3. 台灣積體電路股份有限公司(2017)，106年「企業社會責任報告書」。
4. 台灣塑膠工業股份有限公司(2024)，112年「永續報告書」。
5. 台灣塑膠工業股份有限公司(2016)，105年「企業社會責任報告書」。
6. 群創光電股份有限公司(2024)，112年「永續報告書」。
7. 群創光電股份有限公司(2016)，105年「企業社會責任報告書」。
8. 臺灣證券交易所公司治理部(2023)-企業 ESG 資訊揭露申報說明簡報。
9. 經濟部水利署(2023)，「112年產業效率用水提升輔導計畫」，用水回收率查驗人員教育訓練簡報資料。
10. 經濟部水利署(2023)，「用水回收率查驗作業指引」。
11. 臺灣證券交易所-ESG數位平台，2023年企業申報資料。
12. 財團法人金融聯合徵信中心(2023)，「國際永續績效連結授信原則摘譯說明」。

# 以色列(ROTEC)FR-RO 系統應用於

## 染整廢水回收再利用實績

吳孟育\*、林彥儕\*\*

### 摘要

近年來氣候變遷導致國內雨季減少，面臨缺水危機的考驗，紡織業在製程上用水需求量大，大多以地下水為主要的供給水源，被視為國內六大高耗水產業之一，為了提升用水效率，如何有效處理水資源達循環再利用是產業要面對的重要議題。

本文以實廠案例進行說明，2024 年統計全廠平均新鮮水使用量為 5,200 CMD，放流量為 5,000CMD，廠內主要的廢水來源為加工紗、織布、染整、鍋爐、民生廢水，目前紡織工業以染整廢水最為複雜，主要包含染料中的有機化合物、酸、鹼及重金屬物質，具有高色度、高有機濃度、特殊毒性、複雜結構及不易劣化等特性，已被環保署列為八大污染源之一。

從源頭管理、廢水處理及回收再利用部分進行規劃，源頭管理利用 7R 的做法，透過管控染料助劑和化學品使用，提升確保原料的安全和使用效能，以降低水資源污染；廢水處理則依照廠區的生產特性做分類處理(專管回收)，從源頭進行分流和系統性的處理；回收再利用除了製程冷卻水回收使用外，解撚廢水透過 UF 有機管式膜進行過濾回收再利用，系統回收率 95%，每日不僅可省下近 120 CMD 的水量，還能省下化學品的使用量。此外，處理後的染整放流水則導入 RO 回收系統，引進台灣第一套運用以色列的 ROTEC FR-RO 反向滲透迴流技術 RO，可防止薄膜結垢，減少廢鹽水量而提高回收水量，該系統 RO 回收率高達 90% 以上，最後將水導回製程再利用，可減少 2,200 CMD 新鮮水使用量。

【關鍵字】節水(Water conservation)、源頭管理 (Source management)、水資源再利用(Reclaimed water)、反向滲透迴流技術 RO(Flow Reversal Reverse Osmosis)

---

\*宏遠興業股份有限公司 副理

\*\*宏遠興業股份有限公司 股長

## 一、前言

近年來氣候變遷導致國內雨季減少，面臨缺水危機的考驗，全世界意識到環境保護與資源永續的重要性，紛紛推動水資源有效再利用之具體行動，降低環境負荷。紡織業在製程上用水需求量大，大多以地下水為主要的供給水源，被視為國內六大高耗水產業之一。

紡織染整業是需要大量水資源的產業，而現今服飾講求多功能紡織導致耗水量日趨增大，因此紡織染整業的水資源再利用是重要的議題。以今年 2024 年統計全廠平均新鮮水使用量為 5,200 CMD，放流量為 5,000CMD，廠內主要的廢水來源為加工紗、織布、染整、鍋爐、民生廢水，目前紡織工業以染整廢水最為複雜，主要包含染料中的有機化合物、酸、鹼及重金屬物質，具有高色度、高有機濃度、特殊毒性、複雜結構及不易劣化等特性，被環境部列為八大污染源之一。因此，若能有效將染整廢水處理回收再利用，將可提升用水效率，節省水的消耗，達到水資源永續再利用目標。

本文研究從源頭管理、廢水處理及回收再利用部分進行規劃，源頭管理利用 7R 的做法，透過管控染料助劑和化學品使用，提升確保原料的安全和使用效能，以降低水資源污染；廢水處理則依照廠區的生產特性做分類處理(專管回收)，從源頭進行分流和系統性的處理；回收再利用除了製程冷卻水回收使用外，解摻廢水透過超過濾(Ultra Filtration, UF)有機管式膜進行過濾回收再利用。此外，處理後的染整放流水則導入逆滲透(Reverse Osmosis, RO)回收系統，引進台灣第一套運用以色列的 ROTEC 反向滲透迴流技術(Flow Reversal Reverse Osmosis, FR-RO)，可防止薄膜結垢，減少廢鹽水量而提高回收水量，該系統 RO 回收率高達 90% 以上，最後將水導回製程再利用，可減少新鮮水使用量。

## 二、廢水調查與回收方法

### (一)現況調查

以今年 2024 年統計全廠平均新鮮水使用量為 5,200 CMD，放流量為 5,000 CMD，廠內主要的廢水來源為加工紗、織布、染整、鍋爐、民生廢水，本廠最主要的廢水處理流程如圖 1 所示：

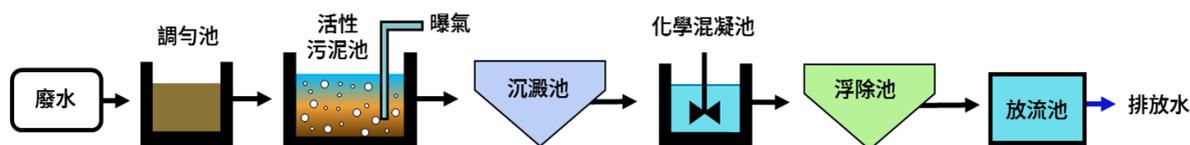


圖 1 廢水處理流程

(二)放流水特性

廢水經過如圖 1 方式進行處理後，其放流水之水質數據參閱表 1。

	pH	導電度 (us/cm)	總硬度 (ppm)	總溶解固體 (ppm)	懸浮固體 (ppm)	濁度 (NTU)
放流水	7.5	5,650	328	4,320	5	28.3

	Cl <sup>-</sup> (ppm)	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> (ppm)	SiO <sub>2</sub> (ppm)	總鐵離子 (ppm)	Mn (ppm)	Al (ppm)	Ca (ppm)	Mg (ppm)
放流水	797	1,644	32	0.06	014	1.3	87.7	31.8

表 1 放流水之水質數據表

(三)水資源管理策略

用水單元依照用途或被處理情形主要區分為三大類，分別為民生用水、工業用水及其他用水，其中工業用水又區分為冷卻用水、鍋爐用水、製程用水及雜項用水。各個用水單元有不同的水質要求，本廠依照廠區的生產特性做分類處理(專管回收)，從源頭進行分流和系統性的處理，再將再生水分配至各個用水單元，如次級、製程與鍋爐用水等，因此可避免將高品質再生水供給至水質要求低之項目形成浪費，下列為本廠水資源管理執行之策略：

1. 冷卻水回收

染色機和定型機是染整常見的設備之一，染色與定型製程需要透過蒸汽來加熱，後續冷卻工段需要冷水給外缸降溫，透過熱交換原理冷卻水水溫提高成為熱水，此股回收水可供應給其他需要熱水的製程使用，達到節水與節能雙重效益，回收流程如圖 2 所示，平均每月可回收 5,000 公噸冷卻水。

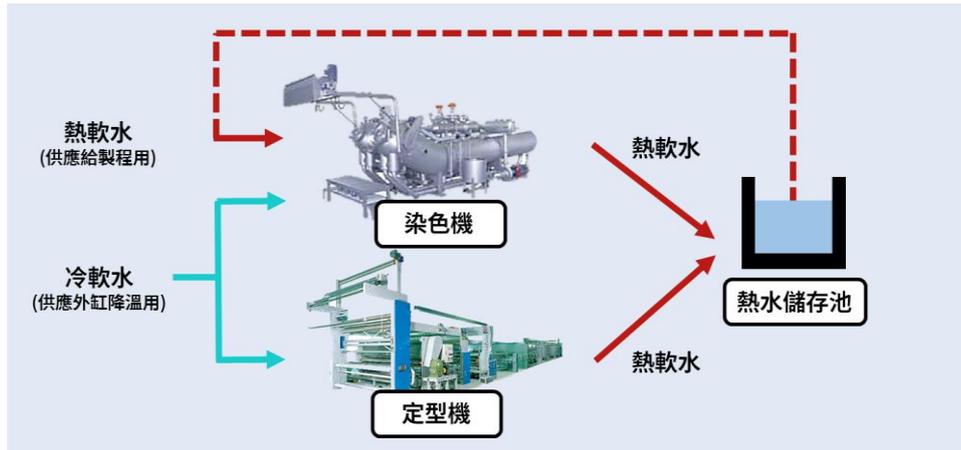


圖 2 冷卻水回收流程

## 2. 鍋爐蒸汽冷凝水回收

增設冷凝水回收桶，在蒸汽系統下設置 21 座回收桶，回收冷凝水餘熱，並可回收水資源，減少新鮮水與燃料之用量，平均每月可回收 4,000 公噸冷凝水。

## 3. 織布廢水再生

本廠有兩座織布廠房，織布製程相較於其它製程所產生之廢水特性較為單純，因此設置兩座專門收集織布廢水的處理廠，分別採用生物活性污泥法與化學混凝法處理，最終再以砂濾塔過濾後回收再利用，平均每月織布回收水為 36,000 公噸，回收率為 85% 以上。

## 4. 加工紗 AIKI 廢水再生

加工紗所產生的廢水含油漿臘及纖維成分，導致水體懸浮固體物 (Suspended Solid, SS) 較高，採用化學混凝法處理，最終再以砂濾塔過濾後回收再利用，平均每月可回收水量為 2,900 公噸，設備回收率為 85%。

## 5. 解撚廢水再生

解撚製程目的是洗去織物上的油脂及漿料，此廢水特性為高溫、高 pH、高濁度及高油脂；UF 有機管式膜是近幾年來創新的 TFF (Tangential Flow Filtration) 切向流過濾過濾膜型式，特點在於流道較寬，對於進料之液體無嚴格要求，可處理高固含量、高濃度之液體，圖 3 為 UF 有機管式膜構造圖；平均每月可回收水量為 2,800 公噸，系統回收率高達 95%，除此之外可減少化學品的使用量，降低對環境的污染風險，系統設備如圖 4 所示。

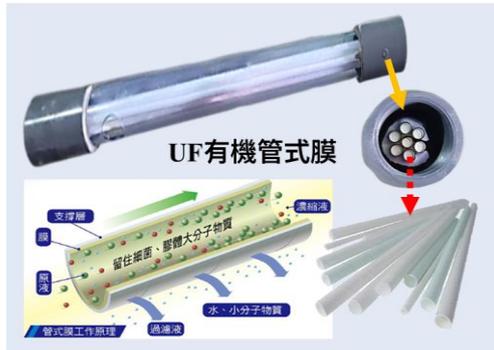


圖 3 UF 有機管式膜構造



圖 4 UF 有機管式膜系統設備

## 6. 中水回收

部分處理後的染整放流水(中水)，導入廠內廁所用的沖洗水、污泥脫水機濾布沖洗水、部分製程用水以及鍋爐的空污防制設備(例如水洗塔)，以減少廠區新鮮水的使用量，平均每月可回收中水總量為 44,000 公噸。

## 7. RO 回收系統

處理後的染整放流水導入 RO 回收系統，引進台灣第一套運用以色列的 ROTEC FR-RO 反向滲透迴流技術，該系統可防止薄膜結垢，減少廢鹽水量而提高回收水量，回收率高達 90% 以上，最後將水導回製程再利用，減少新鮮水使用量。

### (四) 藍氏飽和指標(Langelier Saturation Index, LSI)

LSI 定義為測得之 pH 值與預測之 pH<sub>s</sub> 值的差值，於 1936 年由 Langelier 所提出，是目前最廣泛應用於管材的腐蝕指標，此指標是以 CaCO<sub>3</sub>(碳酸鈣)飽和度作為是否會產生結垢或腐蝕的判斷依據。LSI 值所代表之意義為(1)LSI 值 > 0 時，表示 CaCO<sub>3</sub> 呈現過飽和狀態，會有結垢現象，水管內壁易形成保護膜以避免腐蝕發生；(2)若 LSI 值 < 0，則表示 CaCO<sub>3</sub>(s) 處於未飽和的狀態，會有 CaCO<sub>3</sub>(s) 溶出，有腐蝕傾向；(3)若 LSI 值 = 0，則代表 CaCO<sub>3</sub>(s) 為飽和的狀態，水質穩定，管內將不會腐蝕也不會有沉澱結垢。

## (五)ROTEC FR-RO 反向滲透迴流技術

### 1. RO 逆滲透原理與過濾方式

滲透是指以半透膜隔開兩種不同濃度的溶液，其中溶質不能透過半透膜，則濃度較低的一方水分子會通過半透膜到達濃度較高的另一方，直到兩側的濃度相等為止。相反的，如果高濃度溶液一方施加比滲透壓更大的壓力，就可以使水由高濃度流向低濃度，而這個現象就稱為逆滲透，其原理如圖 5 所示。

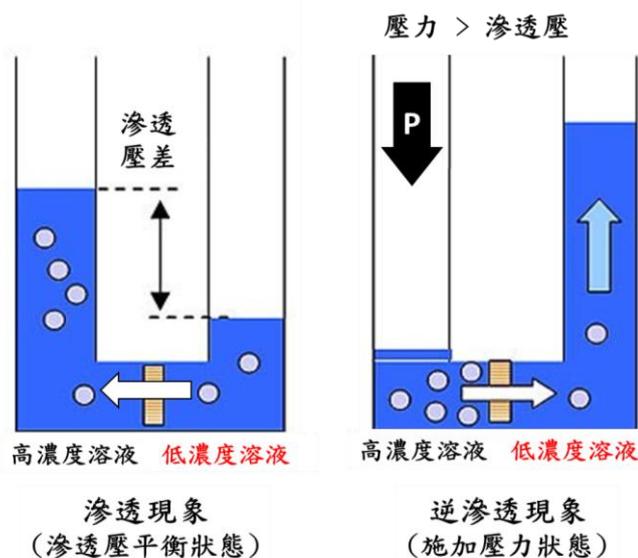


圖 5 滲透與逆滲透原理

### 2. 傳統的 RO 系統的侷限性

一般傳統 RO 系統回收率通常限制在 30-50% 的範圍內，系統回收率與薄膜壽命通常會受到水質的總溶解固體量 (Total Dissolved Solids, TDS) 影響，且超過鹽溶解度/飽和度指數的運行時間會導致礦物結垢產生 (圖 6)，並引發以下狀況：

- (1) 沖洗次數減少，能源成本增加
- (2) 增加 CIP 的頻率，增加停機時間及藥品的使用量
- (3) 影響系統回收率
- (4) 增加操作成本及降低系統的收益性

然而薄膜阻塞是不可避免的問題，一但阻塞會導致膜通量降低、操作成本增加及降低薄膜使用壽命等問題，其系統結垢變化如圖 7 所示。



圖 6 礦物結垢堵塞的 RO 膜情況

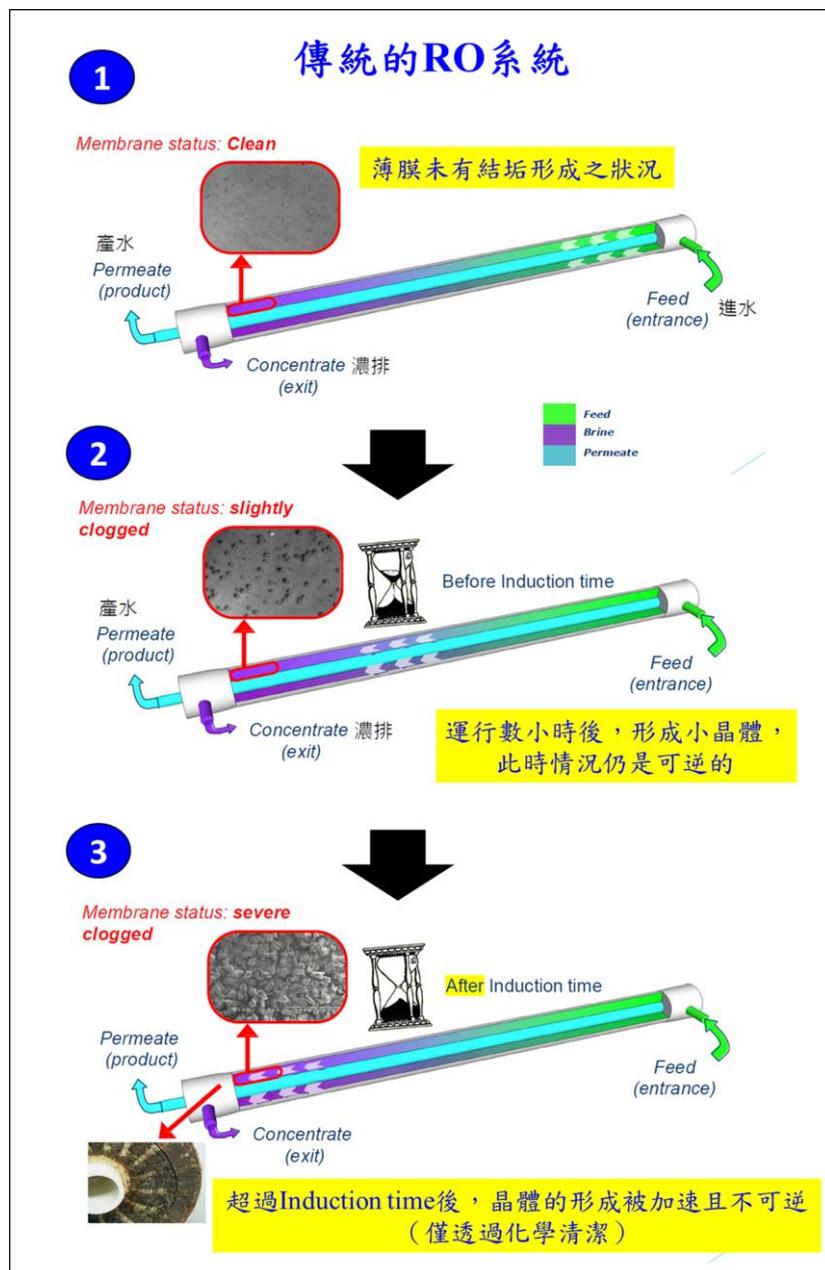


圖 7 傳統 RO 系統結垢變化

### 3. 逆流逆滲透(FR-RO)系統

為了解決傳統 RO 系統結垢問題與提高回收率，本公司與以色列企業 ROTEC 合作進行此專案。該專案提出了許多設計與挑戰，除了實現高回收率的 RO 逆滲透系統，同時解決高含量 TDS、結垢離子與化學需氧量 (COD) 等問題。考慮到這些挑戰，ROTEC 提供一種採用 FR-RO 技術的新型 RO 逆滲透系統，與傳統 RO 系統相比可以產出更多回收水，RO 系統回收率高達 90%。

FR-RO 是透過系統控制，定期感應 RO 膜鹽/結垢狀況，改變進流方向和區塊旋轉，減少 RO 膜鹽/結垢負荷的不平衡情況。因此，與傳統 RO 系統單獨使用阻垢劑相比，FR-RO 可以減少 CIP 的頻率，更可以實現高回收率的目標。其系統結垢變化如圖 8 所示。

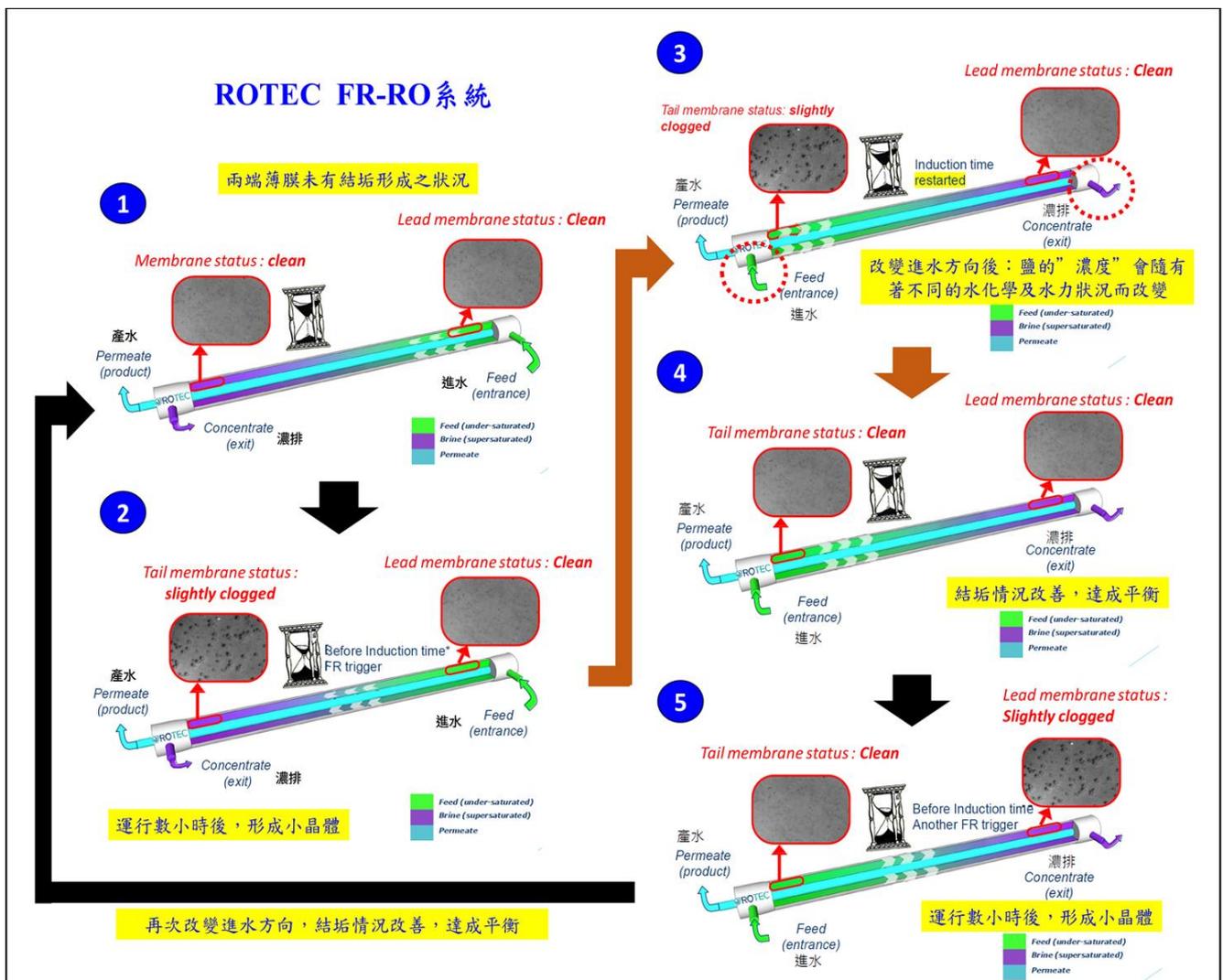


圖 8 FR-RO 系統結垢變化

### 三、FR-RO 系統工程規劃

FR-RO 系統工程規劃前端分別設置多層過濾系統(MMF)、超過濾系統(UF)、RO 預濾器、化學性反洗(CEB)及線上藥洗裝置(CIP)，以實現高效的清潔和維護，系統流程如圖 9 所示。

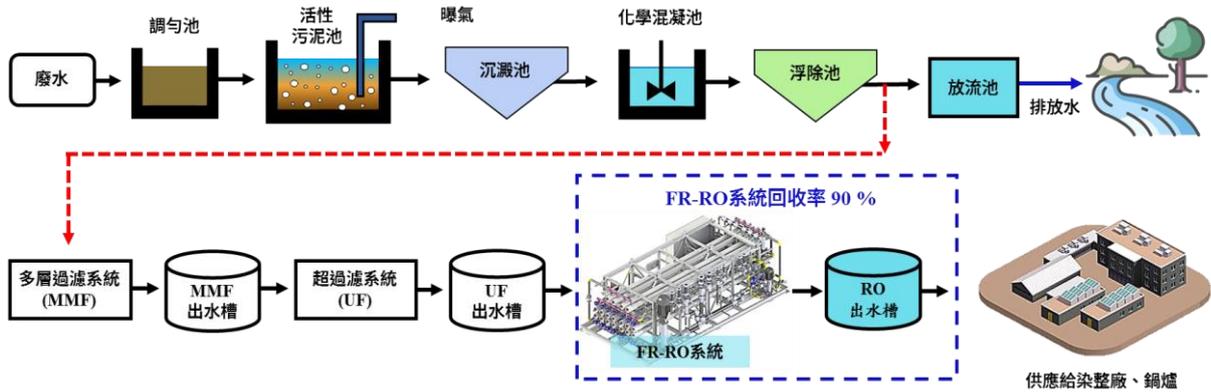


圖 9 FR-RO 系統規劃流程

#### 1. 多層過濾(MMF)系統

以混合濾材為主要之設計基礎，混合濾材可依用水及廢水處理上不同之需要更改濾床濾料粒徑、濾層厚度、及濾料材質之配置以滿足過濾系統中濾程及放流水標準之間的平衡。目的為回收水中的大型的菌落及一些懸浮固體 SS，進而增加 UF 的過濾時間。

多層過濾採 0.45mm 濾徑石英砂為主要過濾層，其他較大粒徑石英砂及卵石作為支撐層，構造與規格如圖 10 所示，最大處理水量：89 m<sup>3</sup>/h，設計壓力：5Kg/cm<sup>2</sup>。

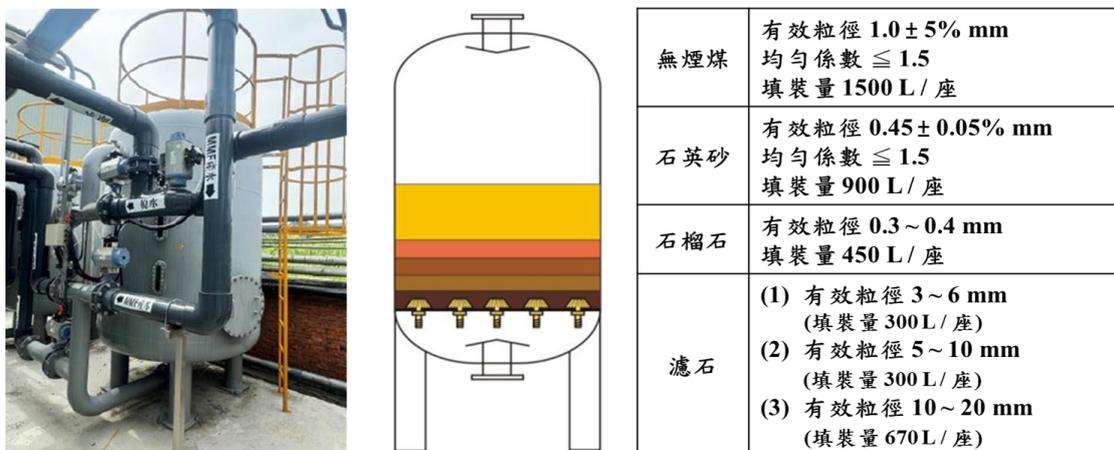


圖 10 MMF 構造與規格

## 2. 超過濾(UF)系統

UF 膜的材質為聚偏二氟乙烯(polyvinylidene difluoride, PVDF)，平均孔徑為  $0.02 \mu\text{m}$ 。本廠 UF 系統共有 44 支 UF 膜。初期設定為產水時間 30 分鐘，流量為 80 CMH，UF 每操作中 30 分鐘進行水力清洗(HC)程序；每 15 個週期會進行一次化學性反洗(CEB)，若 UF 膜壓差升高，且經由 CEB 都無法恢復時，此時可藉由 CIP 來進行離線藥洗。UF 設備如圖 11 所示。



圖 11 UF 系統構造

## 3. RO 預濾器

進入 FR-RO 系統之前有一套預濾器保護 FR-RO 設備，其平均孔徑為  $5 \mu\text{m}$ ，共有 4 支，流量為 30 CMH，設備如圖 12 所示。預濾器主要過濾 UF 膜沒有過濾掉的物質，此外，入水端有監測導電度、pH 與 ORP 數值，一旦超過監測數值會立即停機來達到保護 RO 膜的作用。

Tag	Description
1	進流口
2	沖洗進流口
3	亞硫酸氫鈉注入點
4	抑菌劑注入點
5	筒式過濾器
6	採樣面板
7	筒式過濾器壓力計採樣面板
8	1 <sup>st</sup> stage + 3 <sup>rd</sup> stage CIP入口
9	抑垢劑注入點
10	與RO SKID連接管

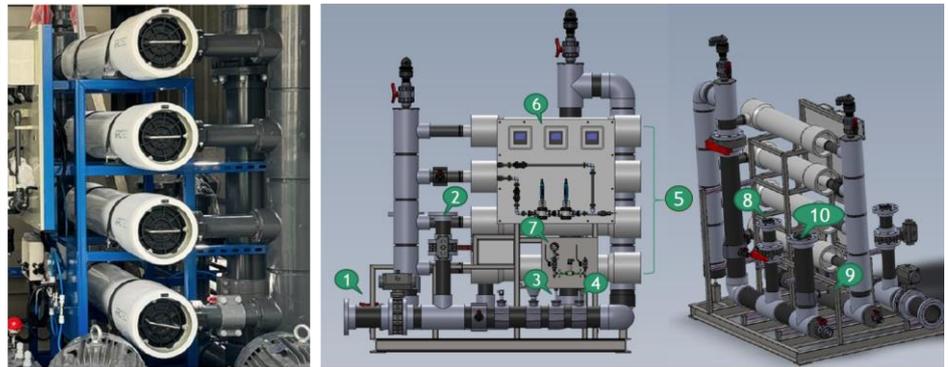


圖 12 預濾器系統構造

## 4. FR-RO 系統

UF 產水先經過 UF 儲水桶後，再由三套加壓設備送進 FR-RO 系統中，其規格如圖 12 所示。FR-RO 系統所使用的 RO 膜材質為複合聚醯胺(Composite Polyamide)，FR-RO 系統設備與加壓設備如圖 13、14 所示，本系統分為 3 層共有 19 組膜管，1 組膜管可以放入 8 支膜，共有 152 支 RO 膜，膜管構造如圖 15；最大產水量為 92 CMH。

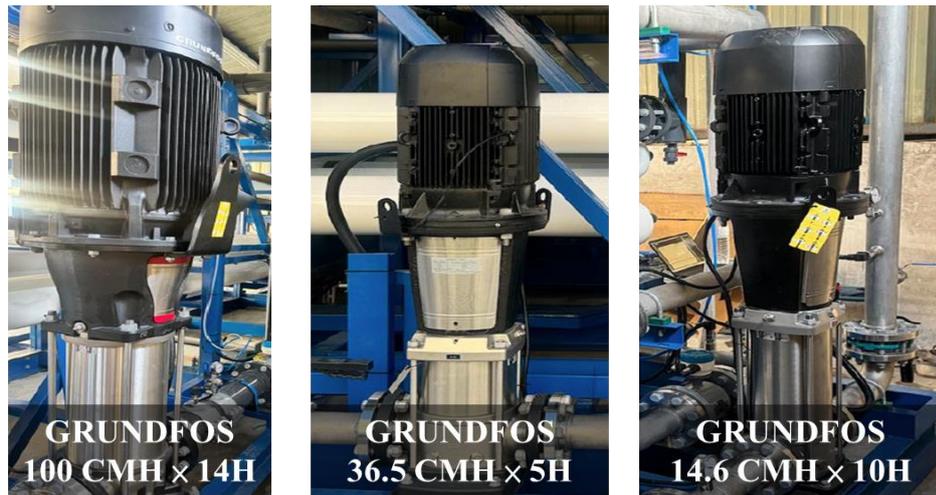


圖 13 加壓設備

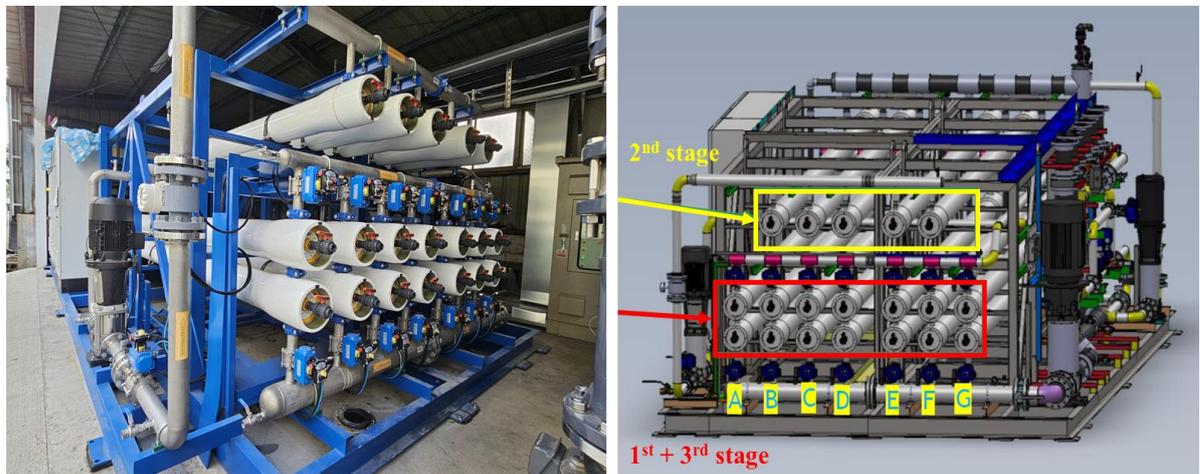


圖 14 FR-RO 系統預濾器系統構造

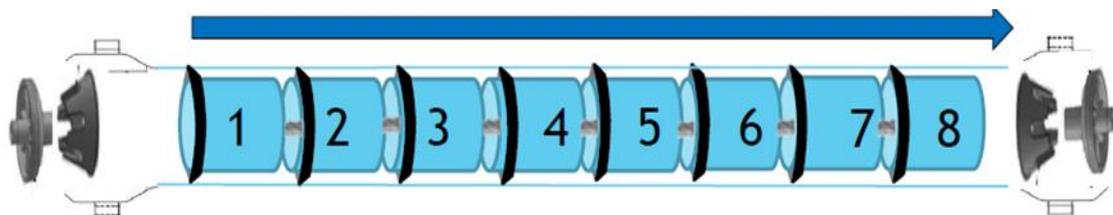


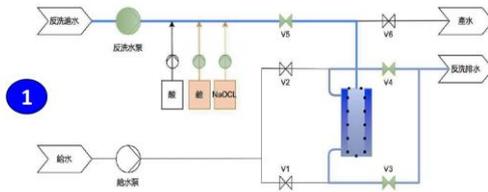
圖 15 膜管構造圖

5. 化學性反洗(CEB)

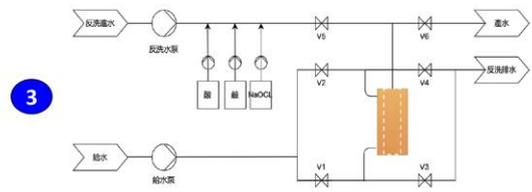
UF 系統在過濾程序時，污物會被隔離在膜的表面，雖然水力清洗(HC)程序可去除大部份固態顆粒，但吸附性顆粒，則必須利用化學藥劑來去除。清洗時機依照 HC 執行次數達到設定值時，即進入 CEB，清洗程序流程圖 16 所示，依據目的分成兩種程序：

CEB1A：鹼 (NaOH) + 次氯酸鈉 (NaOCl) → 有機物阻塞(含生物阻塞)  
 CEB1B：酸 (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) → 無機物阻塞

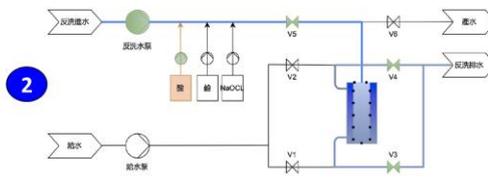
化學加強反洗程序-注藥(鹼洗)



化學加強反洗程序-浸泡



化學加強反洗程序-注藥(酸洗)



化學加強反洗程序-漂洗

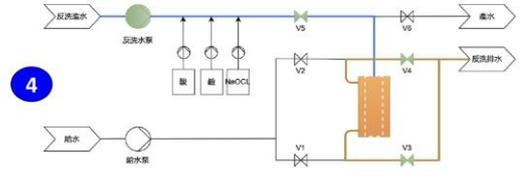


圖 16 CEB 清洗程序流程圖

## 6. 在線清洗 (CIP)

當系統運作一定時間會進行 CIP 作業，根據以下 4 點情況判定 CIP 需求：

- (1)標準化產水流量減少 10%
- (2)標準化產水電導度增加 10% (如果進行膜清潔后仍未解決，則一個或多個膜可能會損壞並需要更換)
- (3)RO 壓差增加了 15%
- (4)進水壓力增加 15%

CIP 藥品的選擇應評估膜表面污垢的性質，所使用的化學品和程序應根據污垢的性質以及膜 OEM 手冊和技術服務公告(TSB)來決定，本系統所使用之化學品有亞硫酸氫鈉(SMBS)、抑垢劑與抑菌劑；SMBS 加藥分為兩種模式(a)定量加藥、(b)依 ORP 數據添加，目前設定>220 mV 即啟動添加；抑垢劑與抑菌劑則需定量添加，避免膜結垢/長菌。

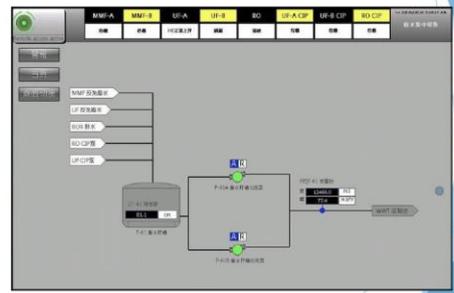
## 7. 人機介面 (Human Machine Interface, HMI)

HMI 提供清晰和簡潔的資訊介面，讓人員能與控制系統進行高效率互動，此外，透過數據監控和即時警報使人員能夠快速做出決策，有助於減少操作錯誤等風險。圖 17 為本系統 HMI 介面，操作員可透過 HMI 操作啟動與關閉設備、設定參數等，以視覺化訊息讓人員方便操作。

人機介面 - 系統頁面



人機介面 - UF系統頁面 (廢水槽)



人機介面 - RO系統流量趨勢圖



人機介面 - 系統警報頁面

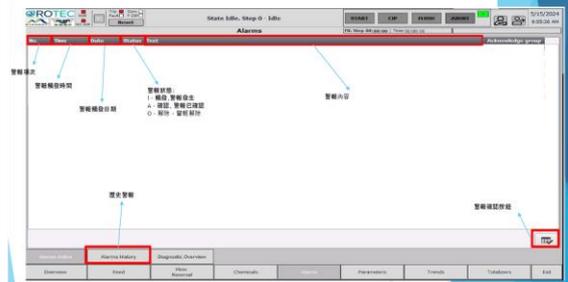


圖 17 HMI 介面

## 四、效益分析

### (一)水質結果比較

染整廢水主要經過活性污泥處理後的放流水仍然有高鹽度、高色度等問題存在，造成水回收再利用有一定的侷限，經過 FR-RO 過濾後前後如圖 18 所示，可以明顯看出濾後的水樣清澈透明，各項水質數據分析差異如表 2。

表 2 各項水質之數據表

檢測項目	單位	RO	軟水/井水	放流水(中水)
pH值		5.7	7.6	7.5
濁度	NTU	2.0	2.4	28.3
導電度	μS/cm	64.5	1000	5650
懸浮固體	mg/L	<2.5	<2.5	5
總固體量	mg/L	18.0	666	
總溶解固體物	mg/L	16.5	620	4320
總硬度	mg/L	ND(<2.39)	ND(<2.39)	328
化學需氧量	mg/L	ND(<4.73)	10.6	56
亞硝酸鹽氮	mg/L	0.01	ND(<0.0020)	
硝酸鹽氮	mg/L	<QDL (0.05)	0.76	0.7
硫酸鹽	mg/L	ND(<2.95)	48.5	1644



圖 18 水樣過濾前後變化

(二)產水量

FR-RO 最大設計產水量為每日 2,200 噸，目前測試從 MMF 至 RO 整體產水量數據與回收率趨勢如圖 19、20 所示，初期因調整操作條件與各項設備不穩定情況。

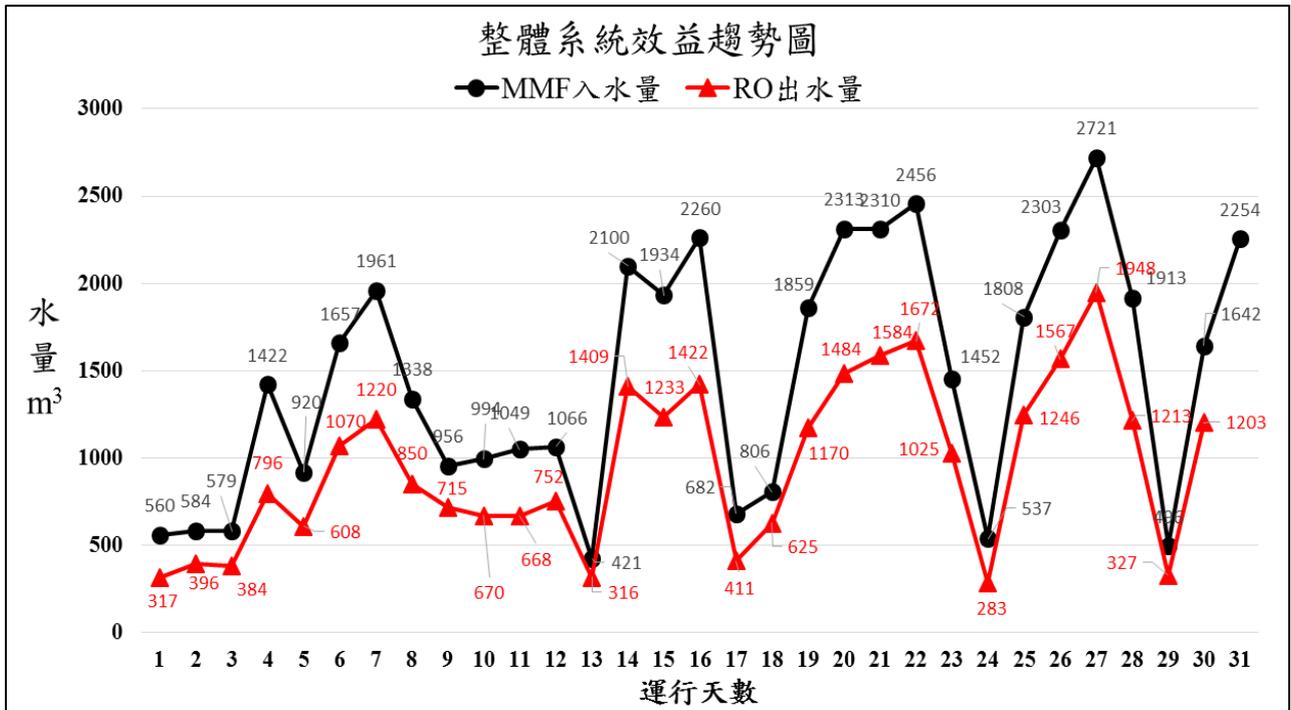


圖 19 整體產水量趨勢圖

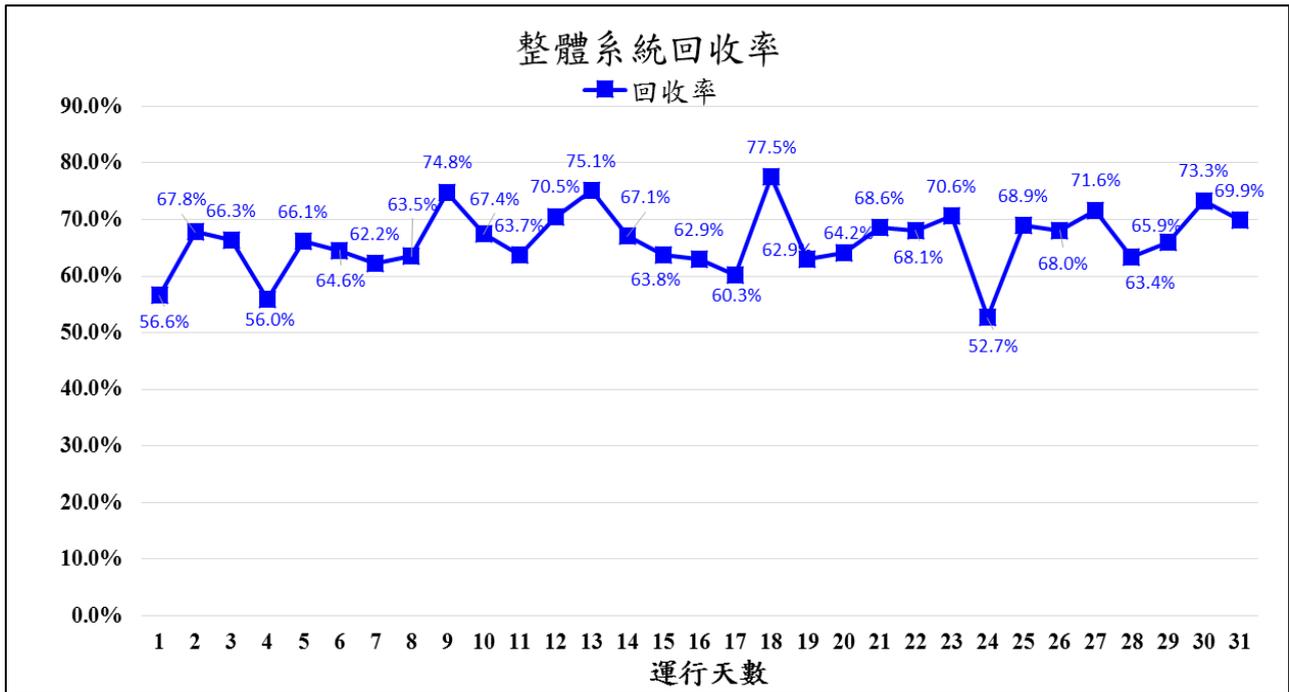


圖 20 整體回收率趨勢圖

從 UF 入水到 RO 出水區間測試回收率從 85% 逐步提高至 88%，觀察濃縮倍率提高水質是否會產生變化，水質數據分析如表 3，從數據表示隨著濃縮倍率提高導電度與矽酸鹽對薄膜仍是一大挑戰。

表 3 回收率調高至 85% 與 88% 之水質數據表

RO 回收率 85% 時，水質狀況				RO 回收率 88% 時，水質狀況			
試樣種類	入水	濃縮水	RO	試樣種類	入水	濃縮水	RO
pH	7.0	7.49	6.73	pH	6.74	7.3	6.14
導電度 (µs/cm)	3,750	17,990	43	導電度 (µs/cm)	4,120	27,800	29
鹼度 (ppm)	65.1	325	13.7	鹼度 (ppm)	53.6	425	7.5
鈣硬度 (ppm)	199	1,212		鈣硬度 (ppm)	164	1,480	
硫酸鹽 (ppm)	973	6,855		硫酸鹽 (ppm)	1,060	8,770	
矽酸鹽 (ppm)	30.4	177	0.51	矽酸鹽 (ppm)	20.3	132	0.082
總磷酸鹽 (ppm)	1.39	8.52		總磷酸鹽 (ppm)	1.26	9.53	

### (三)效益與成本分析

#### 1. 產水效益與操作成本比較

FR-RO 與傳統 RO 系統預估初期操作成本及產水效益分析如表 4，後續會依照操作情況調整藥劑與耗材用成本金額。由於傳統 RO 系統薄膜結垢狀況較頻繁，導致操作成本增加、產水率下降，反觀 FR-RO 各項操作成本大幅度節省了 25 %。

表 4 FR-RO 與傳統 RO 系統預估初期操作成本及產水效益比較表

項目	傳統RO	FR-RO
	※視水質情況數值會浮動調整	
處理水量 (CMD)	4,200	3,000
UF產水量 (CMD)	3,600	2,500
RO產水量 (CMD)	2,200	2,200
RO回收率 (%)	60	90
整體回收率 (%)	50	75
藥劑成本 (元)	8	7
用電成本 (元)	8	6
耗材成本 (元)	10	8
合計操作成本 (元)	26	21

#### 2. 回收成本估算：

軟水成本為每日 12 元/噸，耗水費與水汙費每日 3.65 元/噸；每日 RO 產水以最高回收量 2,200 噸計算，每日可節省 34,430 元，每年(350 天)節省 12,050,500 元。

#### 3. 增設 FR-RO 回收系統後提升效益如下表：

根據台積電提供的每滴水使用次數計算方法 = (新鮮水+回收水) / 新鮮水可得出 2024 年一滴水平均使用 1.5 次，增加 RO 回收水每天 2,200 噸後，一滴水使用次數提高至平均 2.4 次，趨勢圖如 22 所示。

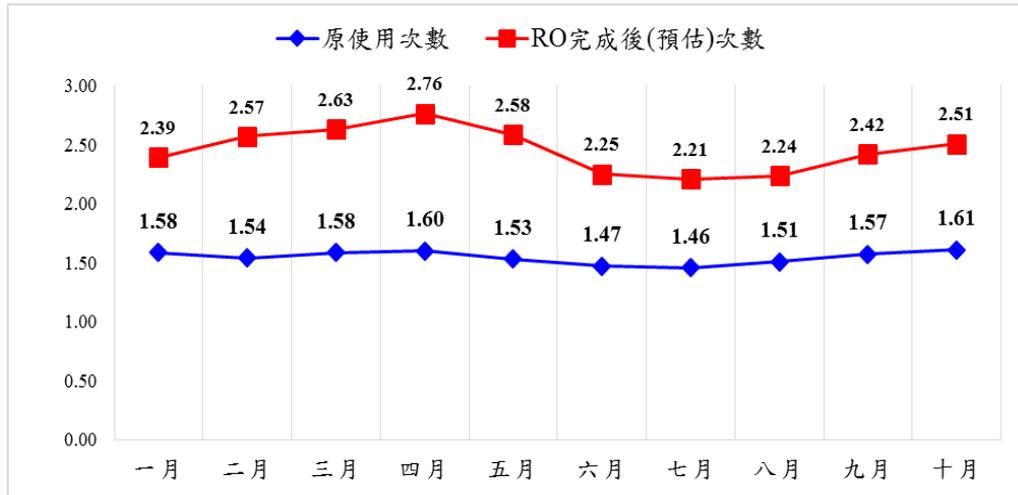


圖 21 2024 年一滴水使用次數趨勢圖

#### (四)遇到問題與解決方式

##### 1. 系統優化

- (1)RO、UF、MMF 反洗廢水流量不穩定，主要原因抽取廢水的泵浦設計為並聯兩台，平時水量小開啟一台，當廢水量變大則兩台泵浦啟動，導致廢水量忽大忽小，讓後端廢水處理操作不易；目前已在反洗廢水儲存槽調整液位，保持抽取廢水流量穩定。
- (2)MMF 因場地問題沒有設計備用設備，若遇到歲修或反洗則會影響流量導致 FR-RO 停機，目前對應方式是遇到上述情況會將部分放流水跳過 MMF 直接供應給 UF 系統，確保流量穩定。

##### 2. 操作條件調整

- (1)RO 預過濾器容易造成堵塞，平均操作 3 週需要更換，造成耗材成本提高，目前預定送樣分析判別堵塞物成分。
- (2)RO 入水 OPR 太高，因為 UF 反洗過程可能把氧化劑等物質帶出，導致 ORP 值偏高，目前對應方式在預濾器監測 ORP 數值，超過監測數值 CIP 會添加還原劑-亞硫酸氫鈉來改善。

## 五、結論

染整廢水成分複雜，不易處理及回收再利用，但廢水再生仍是未來新水源來源之一。當未來國際永續議題、國內法規及利害關係人等要求下，廠區用水壓力將更加嚴峻，而廢水再生的最大優勢為來源穩定，透過處理後的染整放流水則導入 RO 回收系統，引進台灣第一套運用以色列的 ROTEC FR-RO 反向滲透迴流技術 RO，可防止薄膜結垢，減少廢鹽水量而提高回收水量，該系統 RO 回收率高達 90%以上，為台灣紡織界的創舉；最後將再生水導回製程再利用，可減少新鮮水使用量，掌握水資源，創造永續經濟雙贏。

## 六、參考資料

1. 中央社 CNA (2016)，耗水費將開徵 6 大工業用水大戶首當其衝。
2. 林明旺、劉柏緯 (2020)，紡織業廢水回收再利用及其處理方法，工業污染防治，第 148 期，第 37 頁。
3. 洪世政、吳振榮 (2020)，中華民國自來水協會 109 年度研究計畫，澎湖馬公地區海淡廠藍氏飽和指數(LSI)影響配水水質之研究，第 38 頁。
4. 張伯鴻，2004，海水淡化廠出水最佳防蝕方式研究，成功大學環境工程學系碩士論文。
5. 胡毓輝 (n.d.)，淺談 RO 逆滲透原理與設計。
6. Lasers Technology Co., Ltd. (n.d.)，什麼是逆滲透膜？
7. Mingheng li., Alex Waite., Sunny Wang. (2024, May 9), Piloting Experience of ROTEC's Flow Reversal RO (FRRO) for 90 % Recovery in Brackish Water Desalination. Sciencedirect.
8. Aqua-win RO (n.d.)，膜逆滲透工作原理。
9. All Way Environmental Co., Ltd. (2024)，UF 系統簡介及操作說明。
10. Guo W., Ngo H. and Li J. (2012), A mini - review on membrane fouling, BioresourceTechnology, 122: p27 - 34.
11. 台灣積體電路製造公司 (n.d.)，一滴水在台積公司運用 3.5 次的旅程。

# 膜氧傳輸生物膜反應器(MABR)於廢污水中

## 氮氮去除之應用研析

吳亭蔚\*、林欣潔\*\*、侯嘉洪\*\*\*

### 摘要

隨著台灣產業與人口的快速增長，來自事業與家戶中的含氮氮污(廢)水大量進入污(廢)水處理廠中，若未妥善處理將造成承受水體水質惡化，對生態及人體健康造成危害。環境部已於民國 108 年開始逐年加嚴各產業放流水中含氮污染物限值，且為因應臺灣 2050 淨零排放路徑及策略，高效且節能之除氮技術已成為污(廢)水處理領域之發展重點之一，朝永續發展之目標。

膜氧傳輸生物膜反應器 (Membrane-Aerated Biofilm Reactor, MABR) 作為新穎的生物膜技術，其利用透氣膜作為生物載體並進行氧氣供給，氧氣由透氣膜向外擴散進入生物膜中，不僅具高氧氣傳輸效率，且該氧氣擴散模式有利於生物膜內形成多層功能性微生物分層，提高對有機物及氮氮等污染物之去除率，減少碳源、鹼度等藥劑添加。由過去文獻指出，相較於傳統懸浮式污泥系統，MABR 在除氮過程中不僅可降低曝氣能耗及節省藥劑成本，亦可減少廢棄污泥之產量，已作為國際上新穎之污(廢)水廠生物處理單元之升級改造方案之一。

為評估 MABR 技術於台灣本土實廠污水之除氮效能，並了解其關鍵操作參數，本研究於國內民生污水處理廠中設立一座模廠規模的混合式 MABR 系統。以該廠之初沉池出流之低碳氮比污水作為試驗標的，透過各項效能指標發現 MABR 在無碳源添加且無硝化液迴流之操作條件下，相比於相同尺度之傳統除氮程序(Modified Ludzack-Ettinger, MLE)，MABR 可實現更佳的除氮效能，驗證其於台灣本土污水除氮之應用潛力，顯示 MABR 之應用將有利於國內污(廢)水處理朝向低能耗、低碳排之方向發展。

【關鍵詞】生物除氮、生物膜技術、膜氧傳輸生物膜反應器

---

\*國立臺灣大學環境工程學研究所 博士生

\*\*國立臺灣大學環境工程學研究所 博士候選人

\*\*\*國立臺灣大學環境工程學研究所 教授

## 一、前言

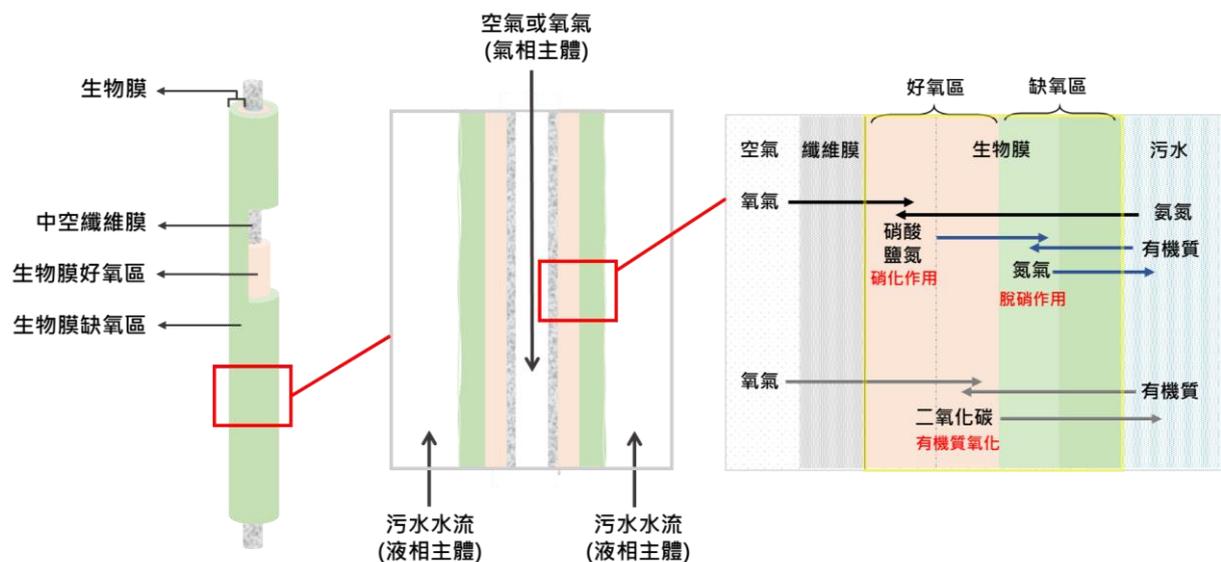
隨著工業化與都市化的發展，水資源需求與污(廢)水處理技術的提升已成為國際各國關注的重要議題。含氮物質為污(廢)水中的主要污染物之一，近年台灣產業與人口快速增長，每日有大量的氮氮隨事業及家戶污(廢)水排放進入污(廢)水處理廠中，若未妥善處理則可能造成承受水體水質惡化，對生態及人體健康造成危害。有鑒於此，環境部於民國 108 年修正放流水標準，並逐年加嚴各產業放流水中氮氮的限值，以避免水資源受到過量氮氮之污染，其中針對公共污水下水道系統放流水之氮氮限值更是於民國 113 年進一步加嚴至 6 mg/L。為符合當前加嚴之水質法規標準，並同時因應臺灣 2050 淨零排放路徑及策略目標，高效且節能之除氮技術已成為污(廢)水處理領域之發展重點之一，目標帶領污(廢)水處理技術轉型朝向永續發展前進。

表 1 公共污水下水道系統放流水氮氮限值

適用範圍		限值			
氮氮	排放於自來水水質水量保護區內者	流量大於 250 CMD	10 mg/L		
			6 mg/L (民國 113 年 1 月 1 日施行)		
		流量 250 CMD 以下	10 mg/L		
	排放於自來水水質水量保護區外者	流量大於 250 CMD	許可核准收受處理事業廢水、截流水或水肥之設計最大量達總廢(污)水最大量百分之二十以上者	民國 106 年 12 月 25 日前完成建造、建造中或已完成工程招標者	75 mg/L (民國 113 年 1 月 1 日施行)
					30 mg/L (民國 113 年 1 月 1 日施行)
				民國 106 年 12 月 25 日前尚未完成工程招標者	20 mg/L
			許可核准收受處理事業廢水、截流水或水肥之設計最大量未達總廢(污)水最大量百分之二十者；或未收受處理事業廢水、截流水或水肥者	民國 106 年 12 月 25 日前完成建造、建造中或已完成工程招標者	10 mg/L (民國 113 年 1 月 1 日施行)
				民國 106 年 12 月 25 日前尚未完成工程招標者	6 mg/L
未收受處理事業廢水、截流水或水肥者	民國 106 年 12 月 25 日前尚未完成工程招標者	6 mg/L (民國 113 年 1 月 1 日施行)			

膜氧傳輸生物膜反應器(Membrane-Aerated Biofilm Reactor, MABR)作為一種新穎的生物膜技術，可利用透氣膜作為生物載體進行無泡供氧，達成高效的氧氣傳輸並減少曝氣能耗；同時可於透氣膜表面形成內層好氧、外層缺氧的異相傳輸生物膜，有利於減緩微生物之間的競爭作用，並促進多種微生物同時生長於生物膜中(例如:好氧硝化菌與缺氧脫硝菌)，達成對污染物的高效去除，MABR應用於硝化脫硝程序進行除氮之機制如圖 1 所示。MABR 於污(廢)水除氮之應用已進入商業化階段，在國際上已有相關模廠與實廠案例，並被作為新穎之污(廢)水廠生物處理單元之升級改造方案之一。

為評估 MABR 技術於台灣本土實廠污水之除氮效能，並了解其關鍵操作參數，本研究於國內民生污水處理廠中設立一座模廠規模的混合式 MABR 系統。以實廠民生污水進行試驗，同時彙整各項除氮效能以及能耗相關指標，探討污水除氮之現況並進行應用評估，促進國內污(廢)水處理相關技術之創新與發展。



資料來源：110 年度污水處理生物膜反應器脫氮性能與水再生效能提升評估計畫

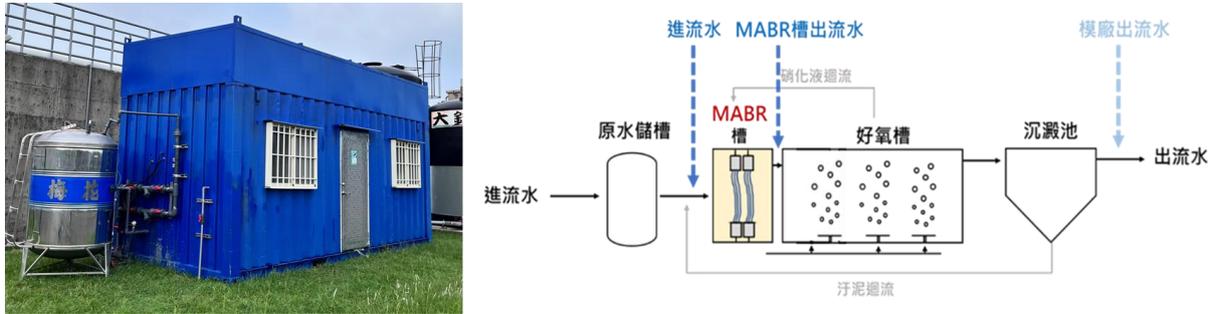
圖 1 MABR 應用於硝化脫硝之除氮機制

## 二、實驗方法

### (一)混合式膜氧傳輸生物膜反應器模廠設置

本研究之模廠試驗使用 MABR(A)-O 做為測試系統，如圖 2 所示。模廠內之單元包含原水儲槽、MABR 槽、好氧槽與沉澱池，此系統目的在於模擬 MABR 加裝於常見之污(廢)水廠生物除氮程序 MLE(Modified

Ludzak-Ettinger) 中的缺氧段，形成貼附性生物膜與懸浮污泥同時存在之混合式 MABR 單元。本模廠所選用之 MABR 模組為威立雅水處理技術與方案股份有限公司之 ZeeLung\* Module 模組，其透氣膜材質為聚偏氟乙烯 (polyvinylidene fluoride, PVDF) 等複合材質。

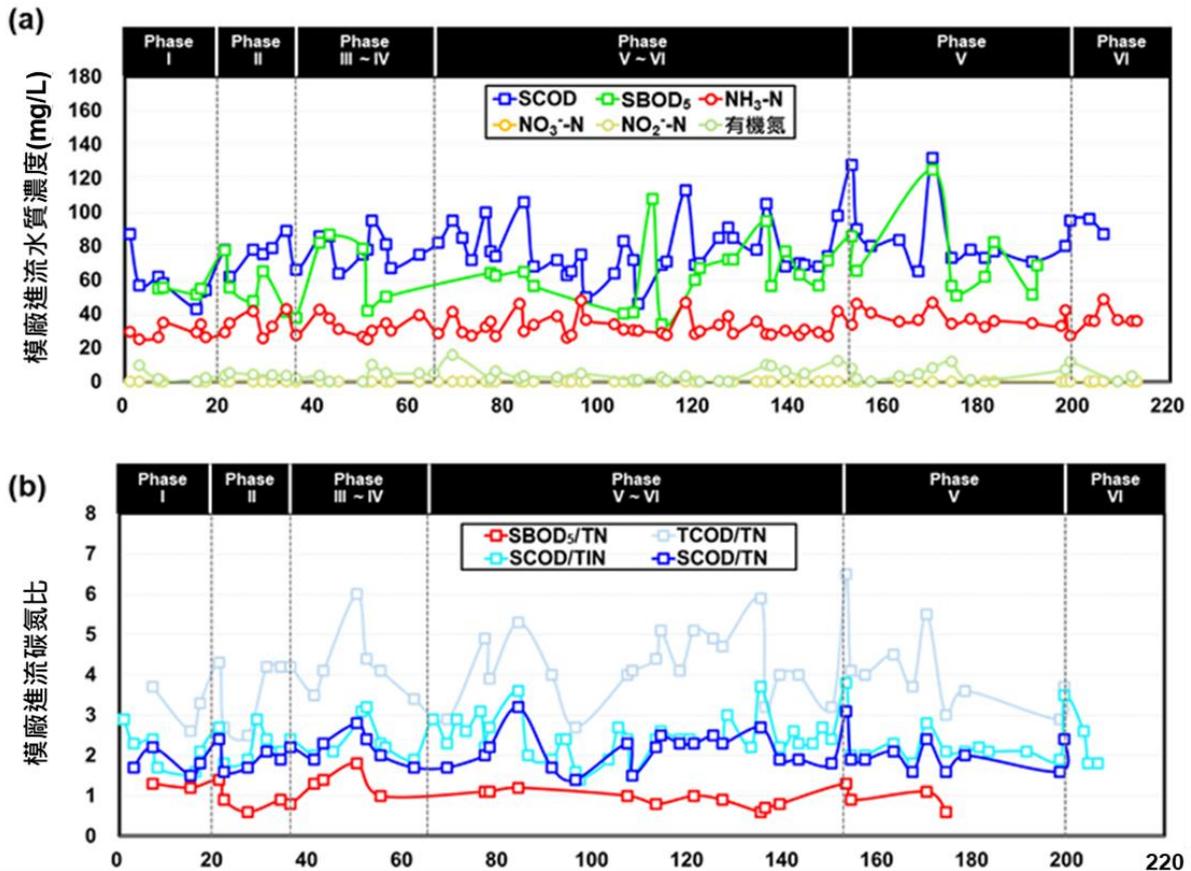


資料來源：110 年度污水處理生物膜反應器脫氮性能與水再生效能提升評估計畫

圖 2 混合式膜氧傳輸生物膜反應器模廠實體圖與單元示意圖

## (二) MABR 單元操作參數設置與除氮性能評估

本研究使用民生污水廠之生物池進流水作為處理標的，平均 TBOD<sub>5</sub>/TN 約為 1.8，屬於低碳氮比污水，進流水質之長期監測狀況如圖 3 所示。為了解 MABR 技術應用於低碳氮比污水之關鍵操作參數，進行不同操作參數之測試，包含：水力停留時間 (Hydraulic Retention Time, HRT)、供氣壓力及水溫等。為探討 MABR 單元之除氮性能，本研究針對進流、MABR 單元出流水進行水質分析，觀察含氮物質濃度變化，計算 MABR 單元之體積削減率 ( $\text{g}/\text{m}^3/\text{d}$ ) 與比膜面積削減率 ( $\text{g}/\text{m}^2/\text{d}$ ) 作為評估其除氮效能之依據。水質分析項目包含 pH、溫度、化學需氧量、氨氮、硝酸鹽氮、亞硝酸鹽氮、總無機氮。能耗相關指標分別計算氧氣傳輸速率 (Oxygen Transfer Rate, OTR)、氧氣傳輸效率 (Oxygen Transfer Efficiency, OTE) 與曝氣效率 (Aeration Efficiency, AE)，以評析 MABR 技術之能源使用效率。



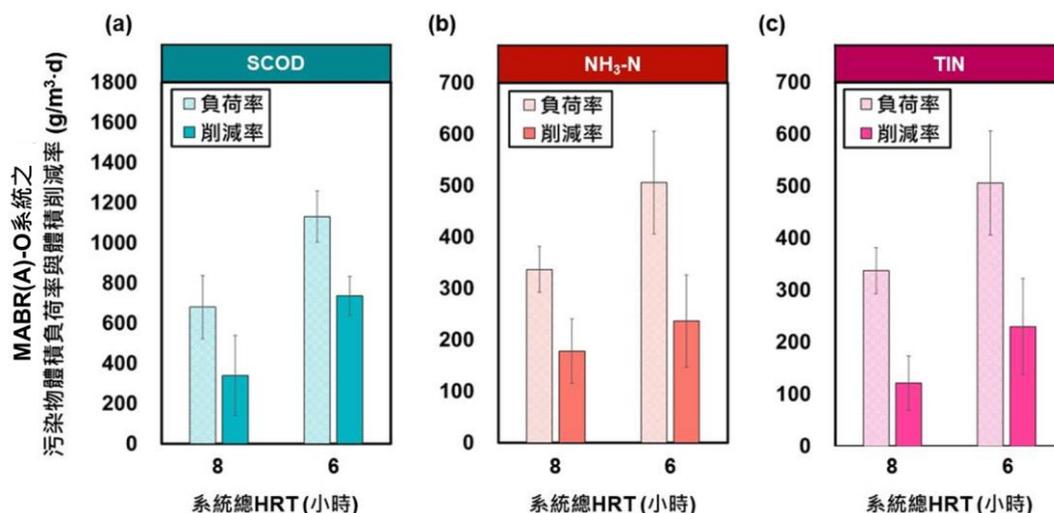
資料來源：110 年度污水處理生物膜反應器脫氮性能與水再生效能提升評估計畫

圖 3 模廠進流水中(a)污染物濃度(b)碳氮比之長期監測

### 三、實驗結果

#### (一)MABR(A)-O 系統操作參數試驗

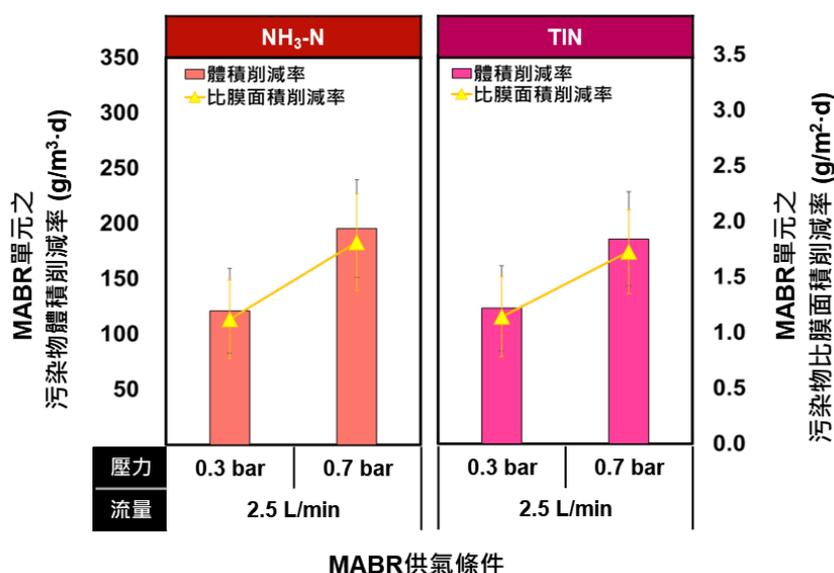
MABR(A)-O 系統以所在廠址之好氧槽污泥作為系統植種來源，且在試驗過程中未添加任何碳源，於 MABR(A)-O 系統操作過程亦未進行硝化液迴流。測試 HRT 對 MABR(A)-O 系統之影響，將 MABR(A)-O 系統之 HRT 從 8 小時(MABR 槽 2 小時，好氧槽 6 小時)調降至 6 小時(MABR 槽 1.5 小時，好氧槽 4.5 小時)，MABR(A)-O 之體積負荷率與體積削減率如圖 4 所示。由結果可發現當 MABR(A)-O 系統之 HRT 下降時，MABR(A)-O 系統對於 SCOD、NH<sub>3</sub>-N 及 TIN 之削減率皆有上升的趨勢，其平均值分別為 737.0 g/m<sup>3</sup>/d、237.0 g/m<sup>3</sup>/d 與 230.1 g/m<sup>3</sup>/d。推測是因較低的 HRT 提高系統中污染物的負荷，促進微生物對污染物進行降解，顯示在相對低的 HRT 下操作將有利於 MABR(A)-O 系統對於污染物之去除。



資料來源：110 年度污水處理生物膜反應器脫氮性能與水再生效能提升評估計畫

圖 4 MABR(A)-O 系統於不同 HRT 下之  
(a)SCOD；(b)NH<sub>3</sub>-N；(c)TIN 去除性能變化

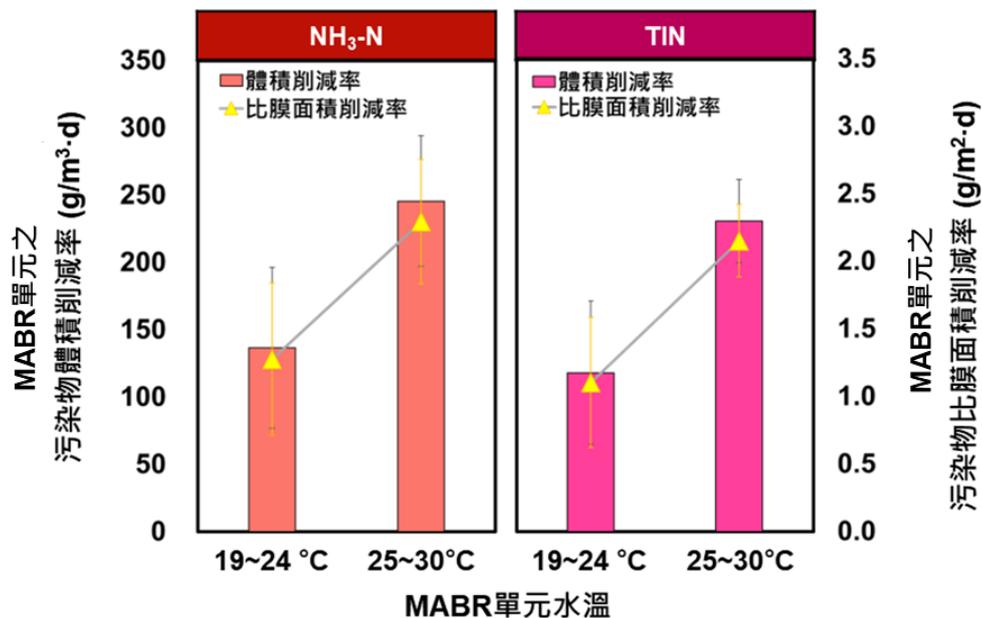
將 MABR 供氣流量維持於 2.5 L/min，進行 MABR 膜內供氣壓力測試，將 MABR 操作於 0.3 bar 與 0.7 bar 進行比較，結果如圖 5 所示。在供氣流量不變之條件下，調升 MABR 膜內壓力明顯有助於 MABR 單元對 NH<sub>3</sub>-N 與 TIN 之削減率提升，推測原因為較大的膜內壓力有助於驅動氧氣的擴散，更多的氧氣傳輸可促進硝化作用，達成 NH<sub>3</sub>-N 削減的提升，良好的硝化產出更多硝酸鹽亦有利於 TIN 的去除。



資料來源：110 年度污水處理生物膜反應器脫氮性能與水再生效能提升評估計畫

圖 5 MABR 單元於不同供氣壓力下之除氮效能變化

由於模廠試驗期間逢冬季低溫，因此團隊亦分析 MABR 單元水溫對於 MABR 單元除氮效能之影響。將 MABR 單元水溫以 25°C 為分界，整理 MABR 單元之體積削減率與 MABR 比膜面積削減率如圖 6 所示。由結果可發現當溫度下降時，MABR 單元對於 NH<sub>3</sub>-N、TIN 之處理效能皆明顯下降，削減效率分別下降了約 14% 與 15%。其中低溫情況下 MABR 單元對 NH<sub>3</sub>-N、TIN 之平均體積削減率分別為 136.8 g/m<sup>3</sup>/d 與 117.6 g/m<sup>3</sup>/d；平均比膜面積削減率分別為 1.3 g/m<sup>2</sup>/d 與 1.1 g/m<sup>2</sup>/d。由本模廠試驗結果可知溫度對於 MABR 系統具有一定的影響，主要是因硝化菌普遍適合生長於 25~30 °C 之水溫條件，較低水溫會影響其活性以及生長速率，故造成系統除氮效能下降。



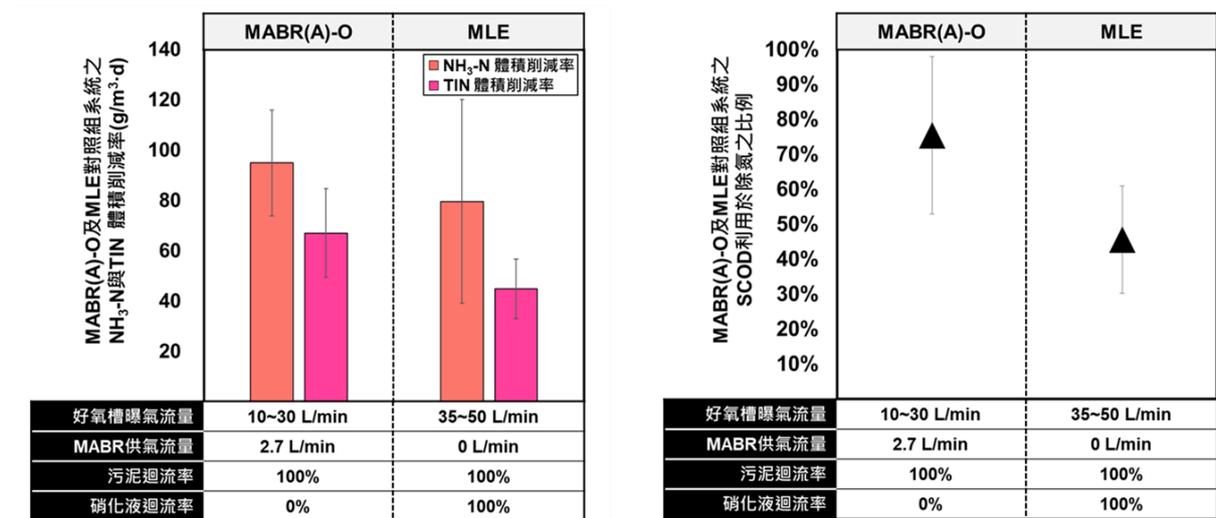
資料來源：110 年度污水處理生物膜反應器脫氮性能與水再生效能提升評估計畫

圖 6 MABR 單元於不同水溫下之除氮效能變化

## (二)MABR(A)-O 系統與 MLE 系統之比較

為比較 MABR(A)-O 系統與現行 MLE 除氮技術之除氮性能差異，在完成 MABR(A)-O 系統之各項試程後，另執行 MLE 系統對照組實驗，用以比較當缺氧槽內「有」與「無」加入 MABR 模組之兩狀況下之系統除氮效能，並探討 MABR 對既有除氮系統性能提升之成效。MABR(A)-O 相對於對照組 MLE 系統之操作參數與系統效能比較結果如圖 7 所示，其對系統處理效能之比較彙整於表 2。比較 MABR(A)-O 系統與對照組 MLE 系統之效能，MABR(A)-O 系統之 NH<sub>3</sub>-N 及 TIN 去除效能皆高於 MLE 系統，其中

MABR(A)-O 系統之 TIN 體積削減率約為 MLE 系統的 1.7 倍。此外，在 MABR(A)-O 系統中之 SCOD 利用於除氮之比例約為 MLE 系統的 1.7 倍，顯示出 MABR 可減少好氧異營菌與異營脫硝菌對有機質的競爭，將有利於異營脫硝菌利用碳源進行脫硝，故相比於 MLE 系統可達成更高效的 TIN 去除，由此可再次驗證膜氧傳輸生物膜反應器技術可實現於低碳氮比污水除氮效能之提升。



資料來源：110 年度污水處理生物膜反應器脫氮性能與水再生效能提升評估計畫

圖 7 MABR(A)-O 系統與同尺度 MLE 系統之除氮效能比較

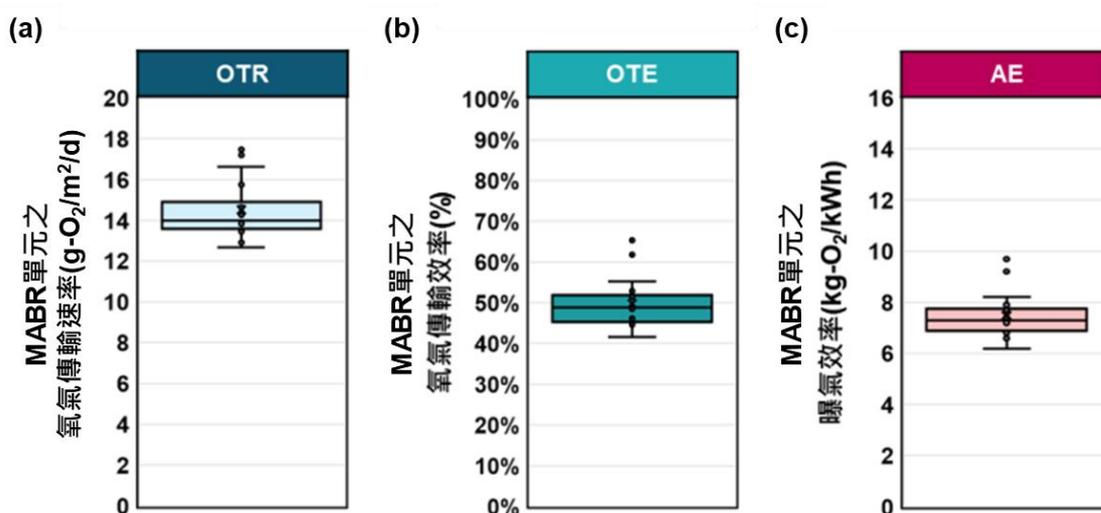
表 2 MABR(A)-O 系統與同尺度 MLE 系統之除氮效能彙整

效能指標	系統平均效能	
	MABR(A)-O 系統	MLE 系統
NH <sub>3</sub> -N 體積削減率 (g/m <sup>3</sup> /d)	94.9 ± 21.1	79.6 ± 27.6
TIN 體積削減率 (g/m <sup>3</sup> /d)	67.0 ± 17.6	44.8 ± 11.8
SCOD 利用於除氮之比例 (%)	75.4% ± 22.6	45.6 ± 15.4

資料來源：110 年度污水處理生物膜反應器脫氮性能與水再生效能提升評估計畫

### (三)MABR 單元之節能效益

藉由監測 MABR 模組之進出氣氧氣濃度與流量以計算 MABR 之氧氣傳輸效率，並進一步計算其氧氣傳輸速率與曝氣效率，結果如圖 8 所示。在本次模廠試驗之操作條件下，MABR 之氧氣傳輸速率平均為  $14.5 \text{ g-O}_2/\text{m}^2/\text{d}$ ，氧氣傳輸效率平均為 49.9%，曝氣效率平均為  $7.4 \text{ kg-O}_2/\text{kWh}$ 。該曝氣效率數值高於一般傳統細氣泡散氣盤之標準曝氣效率 (SAE)  $1.8\sim 3.31 \text{ kg-O}_2/\text{kWh}^{[1]}$ ，由此可驗證 MABR 較傳統散氣設備具更優之能源利用效率，MABR 應用於污(廢)水廠除氮將可達到節能之效益。



資料來源：110 年度污水處理生物膜反應器脫氮性能與水再生效能提升評估計畫

圖 8 MABR 單元之(a)氧氣傳輸速率(b)氧氣傳輸效率(c)曝氣效率

## 四、結論

本研究透過 MABR(A)-O 模廠試驗系統，評估 MABR 技術於低碳氮比污水除氮之可行性，並同時與傳統 MLE 除氮程序進行差異分析。其結果顯示，將 MABR 應用於低碳氮比污水除氮時，可有效去除污水中的化學需氧量、氨氮與總無機氮，其平均體積削減率分別可達到  $254.1 \text{ g/m}^3/\text{d}$ ， $94.9 \text{ g/m}^3/\text{d}$  及  $67.0 \text{ g/m}^3/\text{d}$ ，其中總無機氮之去除效能約為同尺度 MLE 之 1.7 倍。同時 MABR(A)-O 系統於操作上可省去硝化液迴流並大幅減低曝氣能耗，MABR 單元之曝氣效率高達  $7.4 \text{ kg-O}_2/\text{kWh}$ ，證實 MABR 之能源利用效率高於傳統散氣設備。因此，膜氧傳輸生物膜反應器技術具有相當之應用發展潛力，未來可更進一步以不同污(廢)水進行實廠驗證，了解其詳細的除氮機制與節能效益，實現對於傳統污(廢)水除氮程序之升級，促進國內污(廢)水處理相關技術的發展。

## 五、參考文獻

1. 國土管理署，污水處理廠設計及解說，2021。
2. 國土管理署，污水處理生物膜反應器脫氮性能與水再生效能提升評估計畫，2021。
3. 林欣潔，葉庭谷，鄭惠君，曾淑娟，侯嘉洪。新世代生物除氮技術-膜氧傳輸生物膜反應器。下水道·水再生期刊，第一卷第二期，2022。
4. Syron, E., Semmens, M. J., & Casey, E. (2015). Performance analysis of a pilot-scale membrane aerated biofilm reactor for the treatment of landfill leachate. *Chemical Engineering Journal*, 273, 120-129.
5. Peeters, J., Adams, N., Long, Z., Côté, P., & Kunetz, T. (2017). Demonstration of innovative MABR low-energy nutrient removal technology at Chicago MWRD. *Water Practice & Technology*, 12(4), 927-936.
6. Uri-Carreño, N., Nielsen, P. H., Gernaey, K. V., & Flores-Alsina, X. (2021). Long-term operation assessment of a full-scale membrane-aerated biofilm reactor under Nordic conditions. *Science of The Total Environment*, 779, 146366.
7. Silveira, I. T., Cadee, K., & Bagg, W. (2022). Startup and initial operation of an MLE-MABR treating municipal wastewater. *Water Science and Technology*, 85(4), 1155-1166.

## 致謝

本研究由內政部國土管理署「110 年度污水處理生物膜反應器脫氮性能與水再生效能提升評估計畫」補助，並感謝國立臺灣大學環境工程學研究所的支持。

# 應用超微細氣泡技術改造 SBR 曝氣系統之研究

陳建宏\*、詹原銘\*\*、鍾良信\*\*\*、鍾昇儒\*\*\*\*

## 摘要

在當前全球推動循環經濟和綠色製造的背景下，提升工業水處理系統的能源效率和環境效益成為產業升級的重要課題。本研究針對化工廠的 SBR（批次活性污泥池）進行了曝氣設備的升級改造，從傳統散氣管更換為超微細氣泡節能增氧曝氣筒，以改善曝氣不均、氨氮濃度偏高等問題，同時實現節能降耗的目標。

批次活性污泥池曝氣設備經過更新後，許多操作指標都得到了改善。其中溶氧由 0.81mg/L ~ 1.1mg/L 提升至 2.0mg/L ~ 5.0mg/L，顯示超微細氣泡的節能增氧曝氣筒其溶氧效率在批次活性污泥池中表現相當顯著；氨氮濃度也由 19ppm 下降至 3ppm，顯示出系統因得到較好的溶氧效果，使得系統的硝化作用也得到大幅度的改善。

在節能方面，鼓風機的用電量由原先的每天 20KW~23KW 下降至 13KW~17KW 節能效果顯著，能源節約效益達 15.0%~26.1%。除能源節約外，系統背壓也從 62~65KPa 下降至 50~55KPa；同時出口風量也從 58~63 m<sup>3</sup>/min 提升至 70~79m<sup>3</sup>/min，出口溫度也從 89°C~92°C 下降至 82°C~86°C，於降低了設備機械負荷，增加了出口風量也同時延長了設備使用壽命。

因節能增氧曝氣筒因耐用且無耗材設計，並允諾商品可 100% 回收，符合 SDGs 的潔淨水源以及產銷責任，獲允登入於經濟部社會創新平台。

【關鍵詞】SBR、批次活性污泥池、生物池、低碳、減碳、節能、氨氮、TMAH、硝化作用、脫硝作用、污泥減量

\*三福化工股份有限公司 課長

\*\*三福化工股份有限公司 廢水處理專員

\*\*\*華照環保設備有限公司 總經理

\*\*\*\*華照環保設備有限公司 副理

## 一、前言

在現代廢水處理技術中，SBR（批次活性污泥）系統被廣泛應用於工業污水處理，特別是處理具有高氨氮濃度的廢水。然而，傳統的膜片式散氣設備在運轉過程中常會面臨曝氣效率降低、氣泡分佈不均以及進而因散氣設備孔洞阻塞影響氣體噴出，導致其他散氣盤承受較高的氣體壓力而破裂等問題，這些缺陷會降低系統的運轉效率，並增加運轉成本。

相較之下，新型的節能增氧曝氣筒在提升氣體溶解效果和降低壓力損失方面表現出色，不僅能夠有效降低鼓風機的能耗，還能顯著提高溶解氧(DO)濃度，進一步促進硝化反應的進行。節能增氧曝氣筒並具有多角度安裝的特點，可無視系統中污泥濃度的影響及系統間歇性曝氣等因素影響。

本次研究針對此技術在批次活性污泥系統中的應用進行探討，並展示其如何解決傳統散氣系統所面臨的挑戰，同時達到節能與提高處理效率的目的。

## 二、系統建置說明及執行現況

在此次研究中，業者在批次活性污泥系統進行了曝氣設備的升級，選擇以新型的節能增氧曝氣筒替代傳統膜片式散氣設備。這一改造的核心目標在於解決傳統曝氣設備常見的氣泡分佈不均、曝氣效率低下、長期運轉中曝氣孔洞阻塞以及鼓風機耗能、易故障等問題。

### (一) 系統建置概況

曝氣設備是批次活性污泥處理池中的關鍵因素，曝氣設備的效能直接影響污水處理過程中的氧氣溶解速率、效率以及污染物去除效率。傳統的膜片式細氣泡設備在曝氣過程中，由於曝氣孔洞較大，產生的氣泡直徑相對較大，這導致氣泡在水中上升速度較快，因而影響氧氣在水中的傳輸效率，且因膜片式結構設計問題，導致氣泡集中於中間部位，導致氣泡分佈不均，而未曝氣的部位又會產生污泥淤積、阻塞的影響。並隨著曝氣過程中污泥的逐漸堆積，這些設備的孔洞容易發生阻塞，最終影響曝氣效果。

相較於傳統技術，節能增氧曝氣筒的核心優勢在於其利用超微細氣泡技術，生成的氣泡直徑較小，並且氣泡在水中的停留時間較長，這不僅增加了氣液接觸的表面積，還大幅提高了氧氣傳輸效率。

此次進行批次活性污泥處理池的改善工作，先移除既有膜片式管狀的散氣管 400 組後，改以安裝 342 組節能增氧曝氣筒，其餘 58 組則以管帽塞住。



圖 1 原系統更新曝氣設備前的樣式，污泥覆蓋著膜片式散氣管

## (二) 設備安裝與運轉

在批次活性污泥處理池完成曝氣系統更新後，最先獲得的成效是該技術的應用使得曝氣系統的鼓風機供氣順暢，系統背壓顯著下降從原有的 62Kpa~65Kpa 下降至 50Kpa~55Kpa；系統出口溫度由 89°C至 92°C下降至 82°C至 86°C，進一步減輕了鼓風機的運轉負荷。



圖 2 為原系統更新後的樣式

### (三) 系統效益評估

由於在新系統背壓大幅下降的表現下，鼓風機的用電量從原來的每日 20KW~23KW 下降至 13KW~17KW，節省了約 25% 的用電，同時，氣體輸出量從原先的 58CMM~65CMM 提升至 70CMM~79CMM，顯示批次活性污泥處理系統，因曝氣設備的低壓損，使得鼓風機的運作效能得到的提升，這顯著的節能效果，對於廠區的長期運轉成本具有極大的積極意義。

同時，溶解氧(DO)的提升對於硝化反應的進行至關重要。溶解氧濃度由原來的 0.8mg/L~1.1mg/L 提升至 2.0mg/L~5.0mg/L，這為系統內硝化菌的繁殖和活性提供了理想條件，最終使得氨氮濃度從 19ppm 降至 3ppm，系統硝化作用提升了約 84.2%，硝化反應效能有明顯的提升。這對於批次活性污泥系統後續進行脫硝反應有著莫大的幫助。

### 三、廢水以 SBR 方式處理常見的缺失

SBR（批次活性污泥）系統雖然具有高效的處理能力，但在實際運轉中仍存在一些常見的缺失，主要集中於曝氣效率、能耗以及設備維護方面。係因傳統膜片式散氣設備因曝氣孔洞容易堵塞、曝氣不均等問題，再者因傳統膜片式的氣體溶解效率受到廢水的溫度、鹽類、黏滯性等主要原因的影像，使得其溶氧效率低，導致系統的處理能力下降，並且需要頻繁維護，或是以逐步提高曝氣供應的空氣量來因應。

傳統 SBR 系統常見的缺失：

#### （一）曝氣不均與氧氣分佈不足

傳統膜片式散氣設備的曝氣孔洞大且分佈不均，氣泡在水中的上升速度較快，導致曝氣效果局部化，部分區域溶解氧濃度偏低，影響硝化和脫硝過程。這一問題導致廢水處理效率下降，並且氨氮去除效果不佳。

#### （二）設備孔洞阻塞

由於 SBR 系統經常停氣再啟動，污泥容易沉降在散氣設備的孔洞上，這會導致孔洞阻塞，進而使氣泡無法順利生成，曝氣效果變差。隨著時間推移，散氣系統的運轉效率逐漸衰退，需要定期檢查和清理，增加了運轉成本。

#### （三）能耗高

傳統的散氣設備需要較高的鼓風機壓力來維持曝氣強度，這導致鼓風機長期高負荷運轉，能耗高，設備損耗快。對於大規模工業污水處理來說，這些問題會進一步推升運轉成本。

#### （四）曝氣時間過長影響脫硝作用效果

當系統中溶氧不足，將無法進行硝化反應，故僅能以增加風量、延長曝氣時間來因應，若佔據較多的時間進行曝氣，將會影響後續系統進行脫硝作用可用的時間。

### 四、節能增氧曝氣筒的優點與操作維護注意事項

而隨著技術的進步，節能增氧曝氣筒成為了解決這些問題的一個有效方案，該設備在建置成本、運轉效率、能耗控制及維護方面均展現出多項優勢。

## (一) 改用節能增氧曝氣筒的優點

### 1. 建置成本低

節能增氧曝氣筒的設計相對簡單，安裝靈活，無需進行大規模的基礎設施改造便可替換傳統曝氣設備。因此，建置成本較低，且安裝過程快速，對現有 SBR 系統的運轉影響較小。

### 2. 運轉成本低

該設備通過產生超微細氣泡來提高氧氣在水中的溶解效率。這使得鼓風機可以在較低壓力下運轉，同時提供足夠的氧氣供應，從而顯著降低了電能消耗。運轉數據顯示，節能增氧曝氣筒能將鼓風機的用電量降低約 20% 至 30%，這在長期運轉中可有效降低整體運轉成本。

### 3. 節能減碳效果顯著

由於氣泡直徑小且氧氣傳輸效率高，節能增氧曝氣筒大幅提高了溶解氧的傳輸效率，使得曝氣效率大幅提升。這減少了鼓風機的運轉負荷，不僅節省了能源，還減少了二氧化碳的排放。特別是在大規模廢水處理廠，這樣的技術能有效助力節能減碳目標。

### 4. 維護需求低

由於氣泡的均勻分佈和攪動效果，污泥較少沉積在曝氣設備上，避免了孔洞阻塞問題。這不僅提高了設備的長期穩定性，還大大減少了設備的維護頻率，從而降低了維護成本和人力需求。相比傳統設備頻繁的維護需求，節能增氧曝氣筒的自我清潔特性大大減少了停機時間。

### 5. 攪動效果與水質均勻性提升

節能增氧曝氣筒能夠在水中形成穩定的水流攪動，促進了污泥與氧氣的充分接觸，進而提高了有機物降解效率和硝化反應效果。該技術使整個處理池的溶解氧分佈更加均勻，從而顯著提升了水質穩定性和處理效率。

## (二) 維護與操作注意事項

在日常操作中，為確保節能增氧曝氣筒能夠發揮最佳效能，應對以下事項進行監控：

### 1. 溶氧濃度監控

透過在線監測設備，保持溶解氧濃度在最佳範圍內，從而促進硝化反應的進行。

### 2. 鼓風機運轉狀態的檢查

定期檢查鼓風機的運轉壓力和能耗，確保其在較低背壓下仍能穩定運轉，降低不必要的能源損耗。

### 3. 氨氮硝化作用能力

我們習知消化作用有二階段，如「活性污泥處理單元發生硝化反應之原因與對策」，第一個階段是氨氧化菌為將氨氮氧化成亞硝酸鹽，第二階段是亞硝酸氧化菌再將亞硝酸鹽氧化成硝酸鹽，而足夠的溶解氧則會是硝化作用是否完整的關鍵。

通過改用節能增氧曝氣筒，SBR 系統在曝氣效率、能耗控制和維護需求方面均得到了顯著提升。這不僅提高了整體系統的運轉穩定性，還在長期運轉中有效降低了總體成本，成為工業污水處理中高效節能的理想解決方案。

## 五、結論

此次應用節能增氧曝氣筒於 SBR 系統的升級，不僅顯著提升了曝氣效率、降低了系統能耗，還有效促進了氨氮的去除，展示了新型技術在工業廢水處理中的應用潛力。相比傳統的膜片式散氣設備，該技術的核心優勢在於提高溶解氧濃度，並減少系統壓損和運轉成本，從而實現了更高效的廢水處理效果。

此外，系統改善後的出水水質更為穩定且達到更高標準，特別是在氨氮和有機污染物去除方面，這使得水質回收再利用的可能性大大增加。由於更高效的氧氣傳輸和污染物去除，經過處理後的廢水可更容易滿足工業回收利用的水質要求，從而降低了水資源回收的處理成本，進一步推動了工廠的循環經濟發展。

總結來說，這項技術的應用不僅為工業廢水處理提供了一個可持續的解決方案，還有助於提升水資源的回收再利用效率，為實現更低碳和節能的工業運作奠定了技術基礎。

## 六、參考文獻

1. 工業廢水除氮處理方式探討及技術分享，經濟部工業局，87 年 10 月。
2. 曾明加，「活性污泥處理單元發生硝化反應之原因與對策」，財團法人台灣產業服務基金會。
3. 唐存宏，「工業廢水氨氮處理概述」，財團法人台灣產業服務基金會。
4. 鍾良信，「應用節能增氧曝氣筒於工業廢水系統提升氨氮轉換率及降低能耗之研究」，綠色技術與工程實務研討會。



# 基於數據驅動特徵工程之長短期記憶體循環神經網路於能源署數據時間序列預測的應用

黃朝健\*

## 摘要

本論文深入探討深度學習模型在能源預測中的應用，聚焦於單一時序 LSTM 與多步驟 LSTM 兩種架構，並強調其在處理工業用電與再生能源預測上的成效。透過調整優化器、學習率和批次量等三種收斂優化方法，本研究顯示適當的超參數調整可顯著提升預測精度，特別是在面對複雜數據集時。基於台灣能源署提供的詳細數據集，本文對工業用電消耗和再生能源使用情況進行全面分析，預測未來能源需求，並提出融合多步驟處理的優化方法，利用 LSTM 框架提高供需匹配精度。研究結果顯示，LSTM 相較於傳統機器學習算法，在長期運算中具有突出的穩定性與準確度，這源於其內部的記憶管理機制，特別是遺忘閘的應用，能篩選不相關特徵並保留關鍵資訊，提升模型性能。這些研究成果表明，LSTM 神經網路在能源管理與政策制定上具有廣泛的應用潛力，為售電業者和能源規劃提供了更加精確的工具，助力再生能源憑證的取得，並推動台灣在能源效率與永續發展方面的進展。

【關鍵詞】循環神經網路、長短型記憶體架構、多步驟 LSTM、能源憑證

---

\*勞動部雲嘉南分署講師

## 一、前言

台灣晶圓代工產業享有世界級聲譽，但隨著工業用電需求持續攀升，穩定供電與缺電風險成為重要挑戰。在全球聚焦永續發展的大環境下，如何平衡能源消耗與供應尤顯關鍵，特別是在預測工業用電需求與再生能源供應方面。本研究運用長短期記憶（LSTM）神經網絡模型來分析時間序列數據，期望提供精準的預測模型，協助保障能源供應的穩定性與可靠性。在《電業法》及台灣電力公司轉供辦法的框架下，台灣售電業者需每年設定購售電契約，對用戶與再生能源發電站的長短期用電與發電量進行評估。短期數據用於分析用電曲線與再生能源發電曲線的匹配度及媒合的可行性，長期數據則為購售電契約提供關鍵參數設定依據。為提高評估準確性，本研究提出一套結合梯度下降法與學習率調整的契約參數設定方法，並基於 LSTM 框架進行發電量和用電需求的預測。透過本研究，期望為售電業者提供高精度的工具，助其優化能源分配，並推動再生能源憑證取得策略的有效落實。

## 二、人工智慧導入數據集分析說明

現有研究多集中於利用傳統時間序列分析方法(如 ARIMA 模型和卡爾曼濾波)來捕捉電力需求中的季節性和周期性變化。ARIMA 模型基於數據趨勢進行短期和長期預測，能有效揭示用電變化的規律性；卡爾曼濾波則在動態條件下提供了平滑化和即時調整的能力。然而，這些方法在應對複雜市場條件和快速變化的供需環境時往往顯得不足。隨著工業用電需求的迅速增加，單純依靠這類時間序列分析很難精確反映最新變化趨勢，導致預測結果的準確性和即時性受到限制。

相較之下，人工智慧（AI）模型在電力需求預測中的應用愈發受到關注。AI 模型，尤其是基於深度學習的技術，具備自動學習數據中隱含模式的能力，能夠更靈活地適應各種市場條件和供需波動。與傳統的時間序列方法不同，AI 模型不僅能捕捉季節性和周期性變化，還可以根據即時數據進行動態調整，從而更好地應對突發事件或市場波動。在高度複雜的能源供需環境中，這種靈活性極為重要。AI 模型透過深度神經網絡同時處理大量輸入數據，包括歷史數據、即時市場信號和經濟指標，並將這些資訊綜合考量，進而產生更加精準的預測結果。

### 三、研究方法

本研究根據不同的預測需求與數據特性選擇最適合的 LSTM 模型或其變體，這些模型針對時間序列的不同特性有獨特的處理能力，影響其在再生能源電力預測中的效果與應用表現。

#### (一)數據集和模型說明

本研究的數據來自經濟部能源署，主要涵蓋兩個關鍵資料集：「全國各部門電力消費」與「工業用電各產業用電量」。這些數據記錄了台灣自民國 71 年（1982 年）以來的詳細用電情況，包括不同部門及產業的用電變化。在進行視覺化分析後，觀察到各部門與產業用電量的占比隨著台灣經濟發展與工業轉型產生了顯著變化。這些變化為未來的電力需求預測提供了寶貴的參考依據。除了整體趨勢的分析，本研究聚焦於「工業用電各產業用電量」資料集，將其作為訓練深度學習模型的基礎。該資料集涵蓋了不同行業的詳細用電數據，為模型的精細化預測提供了豐富的支持。本研究將對多種深度學習模型進行實驗與比較，選擇包括單一時序 LSTM、多步驟 LSTM、多時序 LSTM，以及結合卷積神經網絡（CNN）的 CNN-LSTM 模型。

表 1 模型分析表格

模型類型	特點	優勢
單一時序 LSTM	針對單一時間序列進行預測	能有效捕捉時間序列的短期趨勢與特徵
多步驟 LSTM	可同時預測多個未來步驟，處理較長期的需求變化	可應對多步驟的需求預測，適合捕捉長期趨勢
多時序 LSTM	可處理多條不同時間序列的預測	訓練與運算成本較高，需更複雜的數據處理
CNN-LSTM	結合 CNN 與 LSTM 處理時空特徵	訓練難度較高，且需較多數據支持

#### (二)資料分析與探勘

本研究利用經濟部能源署的能源統計數據，針對台灣各類發電形式的月度發電量進行分析，資料涵蓋自民國 71 年（1982 年）至 113 年（2024 年）的詳細記錄，分別顯示全國總發電量、發電業、台電公司、民營電廠、自用發電設備的發電量，並包含抽蓄水力、火力、核能及再生能源等不同發電類型。這些豐富的時間序列數據形成了再生能源發電量的目標序列，並提供了火力與核能發電等特徵序列，以支持深度學習模型的訓練和預測。

研究將根據具體的預測任務與數據特性選擇適合的 LSTM 模型架構，

使用單一時序 LSTM 或多步驟 LSTM 模型預測再生能源發電量，並藉由多變量 LSTM 結合其他發電數據增強預測精度。透過折線圖視覺化，可以直觀地觀察各種發電設施的逐年變化趨勢及全國再生能源發電量的增長走勢。此外，分析工業用電量的產業變遷顯示，自民國 94 年（2005 年）前化學材料製造業為最大用電產業，隨後隨著智慧型手機的普及，電腦通信及電子產品製造業的用電量急劇上升，成為主要用電消費者。

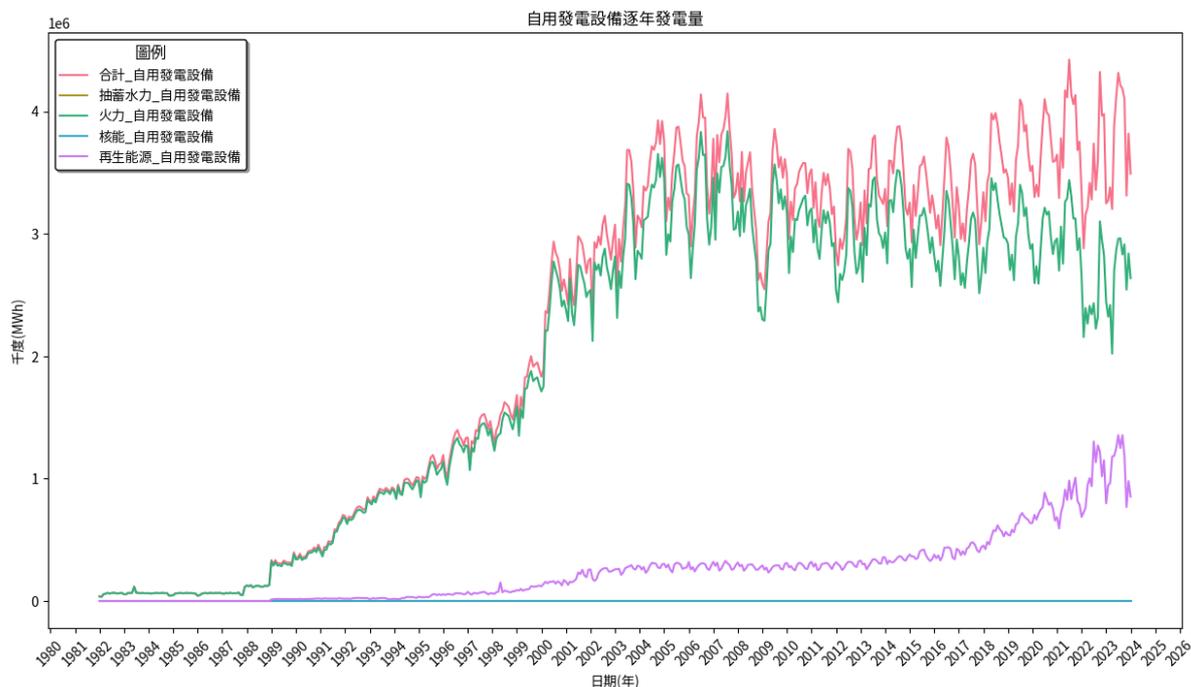


圖 1 能源署自用發電設備逐年發電量

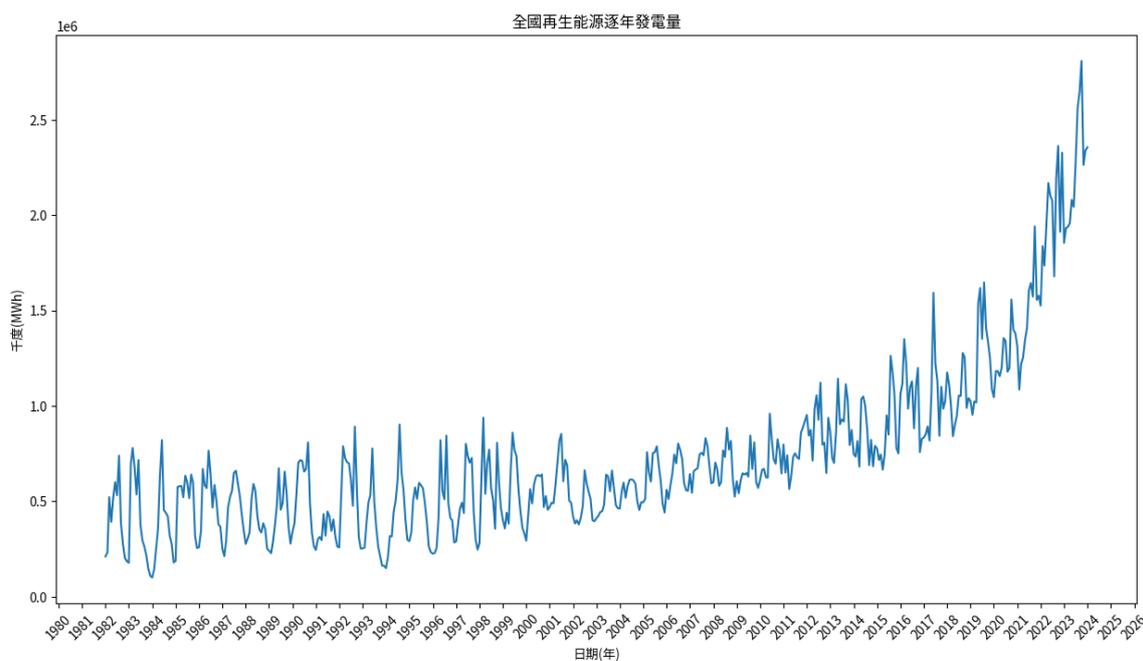


圖 2 能源署再生能源逐年發電量

綜上所述，本研究數據的豐富性和 LSTM 神經網路的應用有望為未來再生能源發電量的準確預測提供堅實支撐，有助於能源管理和政策規劃。

## 四、實驗結果

本研究使用多步驟的 LSTM 的架構進行分析和預測，主要進行能源署的工業用電和再生能源的資料集進行分析和預測，此處藍色的線條為預測結果，而橘色線為實際結果的繪製。而此處本研究針對不同步數進行預測和觀察。這些圖 3 呈現了基於 LSTM 模型的預測值與真實值之間的比較，展示了 LSTM 在時間序列預測任務中的應用效果。LSTM 模型因其獨特的記憶單元與遺忘閘設計，具備捕捉長期依賴性和學習數據內在模式的能力，能夠有效應對數據中的季節性與周期性波動。從圖 4 中可以看出，LSTM 模型在多數情況下能準確捕捉到數據的趨勢變化，尤其是在穩定變化的區域，預測值與真實值呈現高度一致，反映出 LSTM 對整體趨勢的良好適應性。

然而，在極端波峰和波谷區域，模型的預測值與真實值之間出現較大偏差，這表明 LSTM 在處理突發性或極端變化時的表現可能受到限制，這可能與模型參數調整或訓練數據特徵不完全匹配有關。值得注意的是，圖 4 中 LSTM 模型的預測效果優於圖 3，預測曲線更為貼近真實值，這可能是經過參數優化或加入了更多特徵數據所致，顯示了 LSTM 模型在深度學習訓練和優化後具備更高的精確性與穩定性。

總體而言，這些圖表說明了 LSTM 模型在捕捉時間序列數據長期依賴性和季節性波動方面的有效性，同時也揭示了 LSTM 在應對劇烈變動時的局限性，未來可以通過進一步的超參數調整或多模型融合來提升其預測性能。

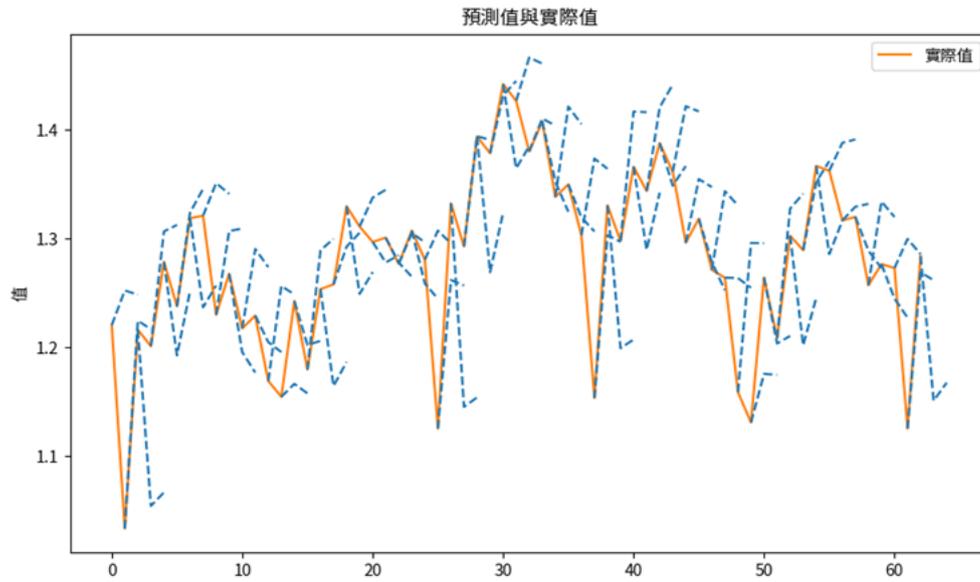


圖 3 工業用電的預測時間步數: 2

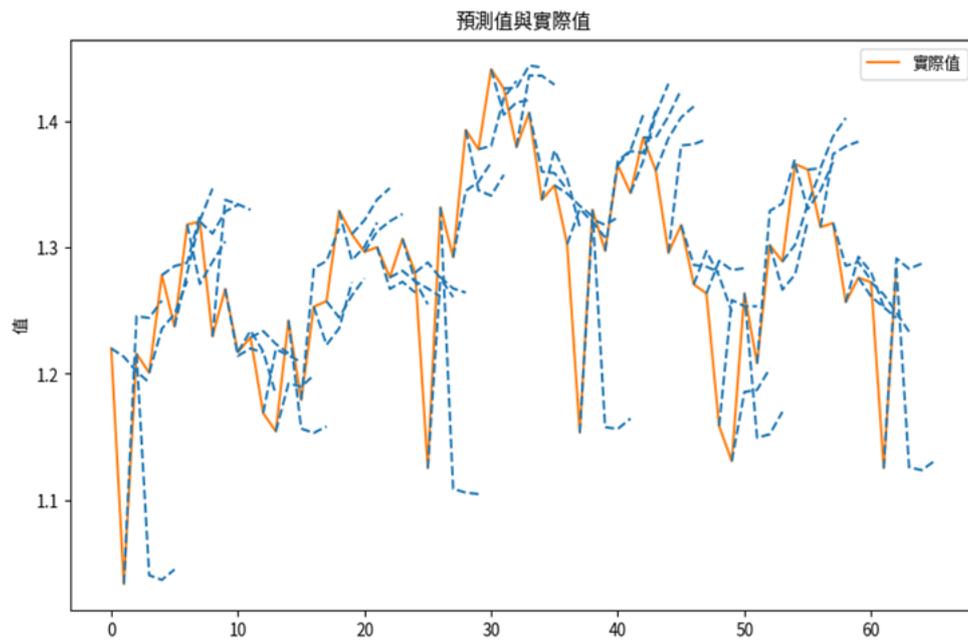


圖 4 工業用電的預測時間步數: 3

## 五、參考文獻

1. Zha, W., Liu, Y., Wan, Y., Luo, R., Li, D., Yang, S., and Xu, Y. (2022). "Forecasting Monthly Gas Field Production Based on the CNN-LSTM Model." *Energy*, 260, 124889. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124889>
2. Wu, C., Wu, F., Chen, Y., Wu, S., Yuan, Z., and Huang, Y. (2018). "Neural Metaphor Detecting with CNN-LSTM Model." In *Proceedings of the Workshop on Figurative Language Processing*. <https://doi.org/10.18653/v1/W18-0913>
3. Zhao, J., Mao, X., and Chen, L. (2019). "Speech Emotion Recognition Using Deep 1D & 2D CNN LSTM Networks." *Biomedical Signal Processing and Control*, 47, 312–323. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2018.08.035>
4. Xu, Z., Li, S., and Deng, W. (2015). "Learning Temporal Features Using LSTM-CNN Architecture for Face Anti-Spoofing." In *Proceedings of the Asian Conference on Pattern Recognition (ACPR)*, Kuala Lumpur, Malaysia, 141–145. <https://doi.org/10.1109/ACPR.2015.7486485>
5. Yu, Y., Si, X., Hu, C., and Zhang, J. (2019). "A Review of Recurrent Neural Networks: LSTM Cells and Network Architectures." *Neural Computation*, 31(7), 1235–1270. [https://doi.org/10.1162/neco\\_a\\_01199](https://doi.org/10.1162/neco_a_01199)
6. Staudemeyer, R. C., and Morris, E. R. (2019). "Understanding LSTM – A Tutorial Into Long Short-Term Memory Recurrent Neural Networks." *arXiv preprint*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1909.09586>
7. Sherstinsky, A. (2020). "Fundamentals of Recurrent Neural Network (RNN) and Long Short-Term Memory (LSTM)." *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 404, 132306. <https://doi.org/10.1016/j.physd.2019.132306>
8. Zhao, Z., Chen, W., Wu, X., Chen, P. C. Y., and Liu, J. (2017). "LSTM Network: A Deep Learning Approach for Short-Term Traffic Forecast." *IET Intelligent Transport Systems*, 11(2), 68-75. <https://doi.org/10.1049/iet-its.2016.0208>
9. Sundermeyer, M., Schluter, R., and Ney, H. (2012). "LSTM Neural Networks for Language Modeling." In *Proceedings of the 13th Annual Conference of the International Speech Communication Association (INTERSPEECH)*, Portland, OR, USA, 194–197.
10. Kim, T. Y., and Cho, S. B. (2019). "Predicting Residential Energy Consumption Using CNN-LSTM Neural Networks." *Energy*, 182, 72–81. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.05.230>



# 營建業實踐搖籃到搖籃的循環思維

陳思潔\*、曾志國\*\*、藍隆寬\*\*\*

## 摘要

營建業為全球消耗能資源最大的產業，據報告顯示，全球有 40~50% 的原物料被拿來蓋房子、廠辦及公共工程等，建築物的建造與使用每年更會消耗全球約 34% 的能源，並造成近 37% 的碳排放，同時產生全球約 1/3 的廢棄物。

隨著我國新建工程與老舊建築拆除改建工程持續成長，國內營建剩餘土石方年均產生量達 4,000 萬立方公尺，雖然營建剩餘土石方多屬安定且無害的資源，但以目前用量最多的營建材料鋼筋混凝土(RC)為例，其中鋼筋(材)因回收價值高，回收再利用幾乎達到 100%，反觀混凝土廢棄回收的技術卻遠遠落後於鋼材，僅不到 30% 可被復原和再利用，造成地球環境的負擔與生態的浩劫。因此，營建業是最需要推行循環經濟的產業，若能落實執行將可獲得顯著的成效。

根基營造多年來致力於推動永續發展，充分意識到營造業在政府循環經濟的拼圖中，扮演著不可或缺的角色。根基營造承攬板橋區府中段都市更新案，過程中將拆除階段的廢磚及混凝土塊回收再製成磊篩克混凝土並應用於假設工程，期以本案進行施工程序、材料特性、環境效益之研究分析，驗證用最少化廢棄物及最大化回收可用資源達成循環經濟的目標，實踐搖籃到搖籃的循環思維。

【關鍵詞】營建廢棄物、磊篩克混凝土、資源再利用、循環經濟

---

\*根基營造股份有限公司 環續部經理

\*\*根基營造股份有限公司 品環管理處副總經理

\*\*\*宥辰興業股份有限公司 藍隆寬董事長

## 一、前言

全球溫室氣體排放造成氣候變遷影響與極端氣候事件加劇，促使各國政府及企業積極尋求解方。有鑑於營建業為全球消耗能資源最大的產業，據報告顯示，全球有 40~50% 的原物料被拿來蓋房子、廠辦及公共工程等，建築物的建造與使用每年更會消耗全球約 34% 的能源，並造成近 37% 的碳排放，同時產生全球約 1/3 的廢棄物。根基營造充分意識到營建業在我國政府減碳的拼圖中，扮演著不可或缺的角色，採取行動已刻不容緩，而循環經濟更是對應氣候變遷、達淨零排放的關鍵。

## 二、營建工地溫室氣體盤查

### 1. 全面推動溫室氣體盤查

根基營造減碳的第一步即為進行組織型溫室氣體盤查，因為沒有基礎的排放數據，便難以制定具體可行的減碳目標與策略。根基營造以 2022 年為起點針對全國 20 處在建工地及公司總部進行全面性盤查，並涵蓋類別四上游供應鏈的產品與服務，以期確實掌握營建工程的排放熱點，進而探討如何有效推動減碳。經過一年的教育訓練、程序文件建置、數據蒐集、查證演練、排放量彙整與計算等工作，於 2023 年 6 月首度通過 SGS 台灣檢驗科技(股)公司 ISO 14064-1 溫室氣體查證。根基營造盤查範疇如表 1 所示。

表 1 營建工地溫室氣體盤查範疇

類別	排放源	活動數據憑證
一 直接排放	根基所屬發電機/機具/公務車用油、桶裝瓦斯/天然氣、氧氣乙炔、焊條、冷媒逸散、滅火器、化糞池逸散	加油單據、請購單、施工日誌/月報、設備名版等
二 能源間接	電力使用	台電電費單、電表抄表請款紀錄等
三 運輸	假設工程/機具/材料運輸、員工差旅及通勤	材料送貨單、請款計價紀錄、出差旅報告單、員工通勤問調查卷等
四 上游產品/ 服務	建材/機電/內裝、廢棄物處理(服務)、承攬廠商機具使用等	請款計價列控表、送貨單、機具簽單、營建廢棄物三聯單等

營造業的項目、工種繁雜，考量現場工程師不僅要做好自己的專業，還要跨界環工領域，學習彙整碳排放的活動數據及佐證資料。更困難的是，工程師不僅僅自己要會做碳盤查，還要教育供應商如何提供正確的資料，過程中要投入的人力、物力和心力，相當龐大。為有效將溫室氣體盤查落實在組織之日常活動中，根基營造多管齊下，讓減碳意識深入同仁日常工作：

- (1)高階主管支持：透過每月檢討會議，由高階主管親自督導溫室氣體盤查進度，並掌握
- (2)建置程序文件：完成建立盤查程序書、活動數據蒐集指引、盤查工具表、佐證資料參考範例等，供現場執行同仁參考運用，依步驟正確的執行盤查作業。
- (3)辦理教育訓練及內部查證演練：定期辦理盤查內部教育訓練，並透過實際查證演練以及工地互相稽查，提升數據品質。
- (4)現場查訪輔導：由盤查小組定期至工地確認各案場施工進度，盤點相關直接與間接排放源，以及討論佐證資料形式、蒐集來源及資料可靠性等。

## 2.溫室氣體盤查數據分析

根基營造以 2022 年為減碳元年，全面推動全國在建工程專案 ISO 14064-1 組織型溫室氣體盤查，針對營運控制權範圍內的總部大樓、各建築案之工務所及工地，盤查營運相關之直接溫室氣體排放源(類別 1)、能源間接溫室氣體排放源(類別 2)、及其他間接溫室氣體排放源(類別 3~4)，完整掌握營造業供應鏈碳排放熱點，以利擬定符合公司發展的減碳策略，積極朝淨零排放目標邁進。盤查結果彙整如表 2 所示。

**表 2 2022 及 2023 年溫室氣體排放量**

類別	2022 年		2023 年		兩年度 差異 (%)
	排放量 (tCO <sub>2</sub> e)	排放占比 (%)	排放量 (tCO <sub>2</sub> e)	排放占比 (%)	
一、直接排放	619	0.22	561	0.26	-9.37%
二、能源間接	2,704	0.95	2,829	1.32	4.62%
三、運輸	3,675	1.29	3,731	1.74	1.52%
四、上游產品 /服務	277,710	97.54	207,181	96.68	-25.40%
合計	284,708		214,302		-24.70%

營建業碳排放主要來自於建材生產、施工過程及建築物運營等三個階段，由表 2 可知，根基營造類別四排放量約占總排放量的 97%，其中又以建材的生產製造所貢獻之碳排放比重最高，2022 及 2023 年平均約占整體碳排放的 90.7%。如圖 1 分析所示，建材碳排放中又以主結構體材料包含鋼筋、混凝土、鋼構、預鑄梁柱等排放量合計高達 86.5%，與文獻資料分析主結構體工程碳排佔軀體工程總碳排之 75~85%的結果一致。因此，主結構體的蘊含碳(Embodied Carbon)是最主要之減碳熱點。

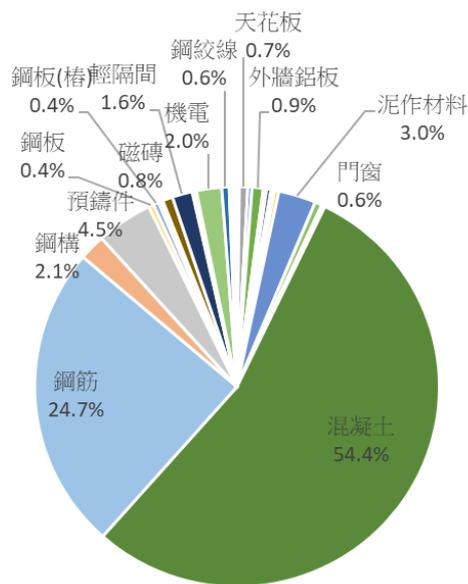


圖 1 各類建材碳排放占比分析

進一步探討根基營造兩年度溫室氣體排放量差異，每億元營收碳排放 2022 年為 2,004 公噸 CO<sub>2</sub>e、2023 年為 1,499 公噸 CO<sub>2</sub>e，2023 年總排放量較 2022 年減少 24.7%，分析主要原因為受到工程進度及工程類型所屬階段不同的影響，造成 2023 年度結構體鋼筋混凝土用量較少，進而減少溫室氣體排放，如圖 2 所示。

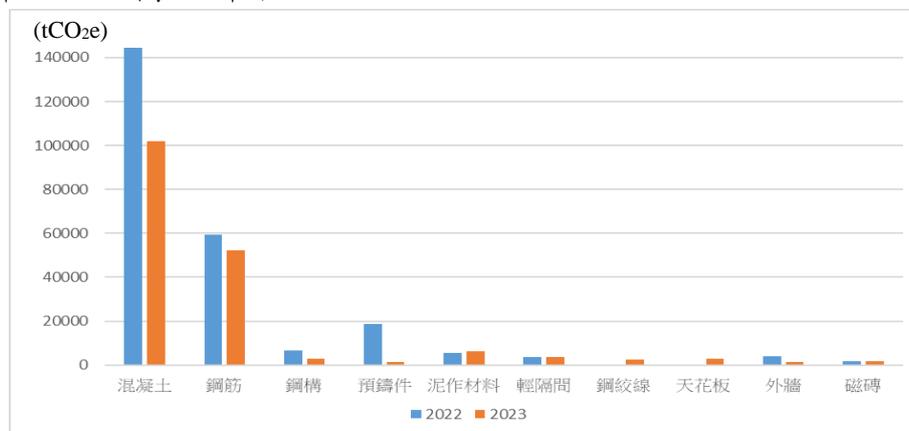


圖 2 各類建材碳排放量分析

### 3.減碳目標與策略

IEA 報告指出，全球建築營建部門的溫室氣體排放約占全球 37%，其中 28%是建築能源使用部分的溫室氣體排放(稱為營運碳 Operational Carbon)，另有 9%是鋼筋、水泥、玻璃等建材的製造運輸與施工的溫室氣體排放。由於，根基營造 90%以上的碳排放係來自營建工程所使用的建材，其中，又以主結構體的鋼筋、混凝土為大宗，因此，根基營造積極與供應鏈的廠商攜手合作，從工法、材料乃至於管理策略，2023 年亦持續推動包括採用低水泥配比混凝土、石灰石水泥混凝土、鋁模板取代傳統模板、預鑄工法等各項減碳措施，串聯產業鏈共同邁向永續淨零之路。

## 三、營建剩餘土石方的循環經濟契機

營建業被視為全球消耗能資源最大的產業，據報告顯示，全球有 40~50%的原物料被拿來蓋房子、廠辦及公共工程等，建築物的建造與使用每年更會消耗全球約 34%的能源，並造成近 37%的碳排放，同時產生全球約 1/3 的廢棄物。有鑑於循環經濟是應對氣候變遷、達成淨零排放及實現永續發展的關鍵方式，營建產業若提升資源循環度、減少原物料使用及廢棄物的產生，最終將難以達成淨零排放的目標。

隨著我國新建工程與老舊建築拆除改建工程持續成長，國內營建剩餘土石方 106~111 年年均產生量已高達 4,000 萬立方公尺。雖然營建剩餘土石方多屬安定且無害的資源，但以目前用量最多的營建材料鋼筋混凝土(RC)為例，其中鋼筋(材)因回收價值高，回收再利用幾乎達到 100%，反觀混凝土廢棄回收的技術卻遠遠落後於鋼材，僅不到 30%可被復原和再利用，以致過去營建廢棄物多以掩埋為主，對於地狹人稠、掩埋量體有限的臺灣而言，最終往往遇到去化問題，造成環境的負擔與生態的浩劫。

### 1.營建剩餘土石方再利用用途

根據內政部營建剩餘土石方處理方案，營建剩餘土石方包含營建工程施工所產生之剩餘泥(含營建泥漿)、土、砂、石、磚、瓦、混凝土塊。土方產出量目前仍以建築工程為大宗約占 70%，公共工程約 30%。另根據國內統計，拆除營建工程剩餘土石方的分類比例，磚瓦、混凝土塊、土石等所占比例將近 70%，其量體相當龐大。

目前，營建剩餘土石方的再利用方式以工程領域的需土回填直接利用及建材加工的間接利用為大宗，建材主要作為骨材、級配料、磚瓦原料、再生級配料等，應用在砂石、磚瓦、水泥、預拌混凝土等營建材料上。其

中，B5 類的磚、瓦及 B7 類的連續壁皂土較缺乏再利用技術，市場應用度低；而 B5 類混凝土塊雖可經過適當的篩析以取代 CLSM 粗、細粒料的使用，但 B5 類品質落差明顯，常會摻夾雜質，而再生粒料之利用，主要問題在於需要碎化、篩選、去塵及分離不需要之雜質等繁雜的處理工作。因此，若能在建築物拆除階段將混凝土塊、磚瓦與廢塑膠、裝潢材料、金屬、玻璃等廢棄物做更好的分類，將可大幅提升後端再利用的機會。

宥辰興業旗下的長惟工業主要營業項目為收受 B1~B7 類的營建工程剩餘土石方，包括磚塊、混凝土塊及砂石等。為了配合政府大力推廣循環經濟的理念，特成立興磊資源回收負責處理磚塊或混凝土塊，經過破碎、水洗、篩分等步驟，產製「磊篩克多孔粒料」，大幅提升可回收再利用資源的比例，再利用流程如圖 3 所示。磊篩克多孔粒料可再藉由不同的比例混合後，分別應用在路基回填、工程材料、園藝植栽、農業種植等領域。

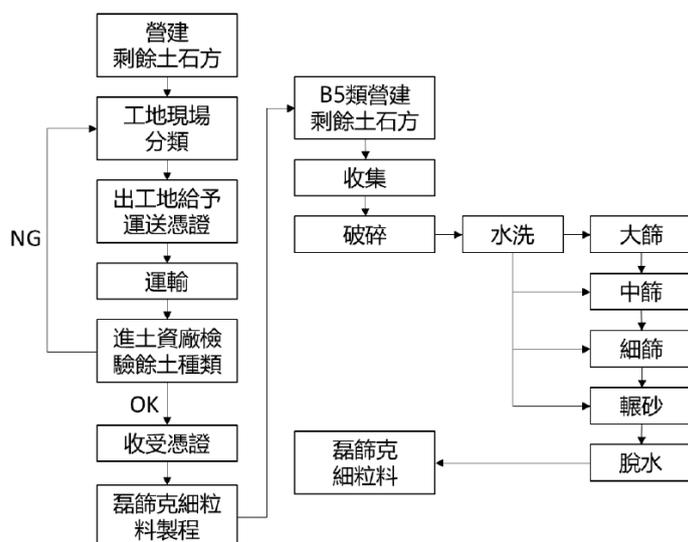


圖 3 B5 類土石方再生粒料產製流程

## 2. 都更案循環經濟的實踐

根基營造承攬板橋區府中段土地都更案之營建工程，範圍包含拆除市長官邸及數棟私有建築物，並透過都市更新興建兩棟新建築，以改善基地老舊建物、提供友善生活環境。為推動將營建剩餘土石方回用到基地建物再利用，拆除階段在工地現場即須將 B5 類的營建剩餘土石方(磚塊為主、混凝土塊及細砂為輔)先初步分類，與其他營建混合物分離。拆除流程及分類回收項目如圖 4 所示，拆除順序摘述如下：

- (1) 室內清除：以人工清除建物內各類廢棄物或遺留物(不含小型家具及裝潢)，包含所有垃圾及家電等東西，木材或大型家具則會先移至旁邊，以便下階段作業。

- (2)室裝及家具拆除：內部廢棄物清除後，以吊車將小型挖土機吊掛至屋頂，首先在每個樓層樓地板層挖出天井，專供拆除廢棄物投料使用。接著由上往下逐層使用小型挖土機破壞大型家具、木造裝潢及部分非結構牆，以利於挖土機在該樓層之運作。
- (3)主體結構拆除：待前述廢棄物及室裝拆除之廢棄物清除後，使用大型挖土機及大鋼牙進行機械破壞，並將鋼筋等有價物分選回收，其餘混凝土塊及磚塊則送入資源回收廠進行處理加工。

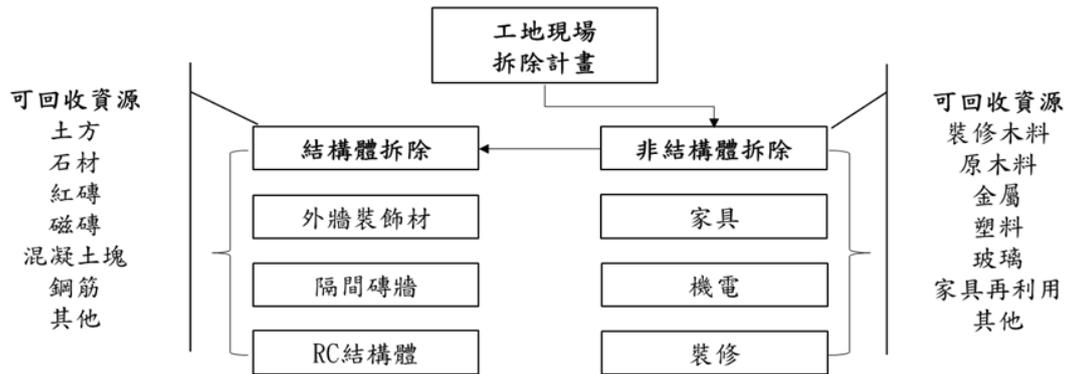


圖 4 舊有建築分離式拆除流程

B5 類之營建剩餘土石方送至興磊資源回收後，經過粗破碎、細破碎、水洗、篩分、研磨、脫水等步驟，最後依照 CNS 1240 混凝土粒料的規範研磨成各種粒料的級配尺寸分布的磊篩克細粒料，並將其添加在混凝土中，取代一般天然細粒料，成為「磊篩克細粒料混凝土」。根據相關力學與耐久性實驗結果顯示，磊篩克細粒料具有多孔隙與保水性佳的特性，相較於一般混凝土可減少收縮開裂的風險；在抗氯離子穿透表現方面，快速氯離子滲透試驗(RCPT)結果顯示氯離子穿透量低於 1,000 庫倫；在抗壓強度方面，磊篩克細粒料混凝土之抗壓強度在各齡期相對較低，但皆可符合混凝土設計強度，設計強度 350 kgf/cm<sup>2</sup> 磊篩克細粒料混凝土的 180 天抗壓強度可達 563 kgf/cm<sup>2</sup>、設計強度 280 kgf/cm<sup>2</sup> 磊篩克細粒料混凝土的 91 天抗壓強度可達 463 kgf/cm<sup>2</sup>，皆遠高於設計值。

板橋區府中段土地都更案共計申報回收 B5 類土石方 2,826 立方公尺，經處理後產製磊篩克細粒料混凝土共 5,338 立方公尺，後續將應用於本基地建案的連續壁導溝鋪面、PC 層、沉澱池及洗車台等處，讓營建材料能夠回到營建循環中持續再利用，達到封閉循環之目的。其中，開工典禮臨時鋪面已使用磊篩克細粒料混凝土完成澆置，後續正式採用階段將另進行相關力學性能試驗。

### 3.環境效益評估

磊篩克細粒料是將都更危老建築的土石方回收處理而成的再生磚砂，100%源自回收料，且使用後可以再次回收，因此在德商 C2C 認證的「材料循環再利用性」面向獲得金級、在「水資源管理」面向更是獲得最高等級白金級。

在環境績效方面，使用磊篩克細粒料取代天然砂石，不僅可減少廢棄物的產生，降低土資場負荷，亦可避免天然砂石開採對環境造成的負面影響，例如水土流失、水污染和海洋生態系統破壞。在溫室氣體減量方面，天然砂石開採之碳足跡包括開採過程機械設備操作、運輸、破碎、篩分、清洗等過程能源消耗產生之碳排放。根據內政部建築研究所建築產業碳足跡服務平台，每立方公尺砂石約產生 1.39 公斤 CO<sub>2</sub>e，因此推估使用 2,826 立方公尺磊篩克細料可減少溫室氣體排放約 3.92 公噸 CO<sub>2</sub>e。

## 四、結論

我國政府積極推動 2050 淨零轉型，提出「十二項關鍵戰略」並制定行動計畫，建築營造業不僅須從建築物的設計階段即導入低碳材料、綠色工法、節能設計等思維，針對無機再生粒料的循環再利用更是扮演者至關重要的角色。循環經濟更是隨著永續環保意識抬頭，成為政府和企業備受矚目的課題，也是淨零排放不可或缺的一塊拼圖。

根基營造響應國內外淨零排放與循環經濟趨勢，致力於落實節能減碳及廢棄物減量回收再利用，以板橋區府中段土地都更案作為示範場域，針對老舊建築拆除改建工程所產生之營建剩餘土石方，透過人工移除廢棄物及現場妥善的拆除、分類，並與國內資源回收廠商合作再製成混凝土，回用至基地建案使用，達到封閉循環的目的。過程中並記錄相關執行流程、施作情形、材料性能驗證結果等，進行彙整報告，以作為未來推廣應用至其他建案之參考依據。

## 五、參考文獻

1. 建築設計變因對中高層 RC 建築結構體建材用量與碳排放量之影響，國立成功大學建築學系，110 年 10 月。

2. 臺灣 2050 淨零轉型「資源循環零廢棄」關鍵戰略行動計畫，行政院環境保護署，112 年 4 月。
3. 營建院輔導興磊公司通過 C2C 國際認證—「搖籃到搖籃」營建材料 循環營建新趨勢，臺灣營建研究院營建知訊 463 期，110 年 8 月。
4. 新材料新工法 CETES 驗證—磊篩克細粒料應用於混凝土，臺灣營建研究院，臺灣營建研究院營建知訊 478 期，111 年 11 月。
5. 營建廢棄物管理及資源循環計畫，永旭豐環境科技有限公司，112 年 12 月。
6. 營建剩餘土石方後端去化與再利用用途之可能與檢討，內政部營建署，112 年 1 月。



# 自願性官民協議下產業節能合作- 以荷蘭長期能效協議為例

鄭雅文\*、曾台輔\*\*、連奕婷\*\*\*、范鑫榆\*\*\*\*

## 摘要

荷蘭自 1992 年起運用長期能效協議(Longterm Energy Efficiency Agreement, LTA)帶動產業改善能源效率及使用再生能源，屬於自願性節能協議，由產業協會代表企業與政府締約，所有企業皆可自由參與。LTA 涵蓋部門包含工業、食品飲料業、服務業與運輸業等。參與 LTA 的企業簽署約 10 年左右的能效協議，每四年提報一次節能計畫。若企業無法實現節能承諾，將面臨更嚴格的环境法規和無法取得營業所需環境許可證等風險。

在 1992 年至 2020 年間，荷蘭共執行三次 LTA 計畫，參與對象從用能大戶涵蓋中小用戶，官方認可的能源效率改善方式，亦從製程能效，逐步拓展至產品練能源效率與再生能源。最後一期 LTA 計畫中，締約企業受惠於再生能源快速發展，使得 2020 年整體能源消費較 2005 年改善 66.7%，年均能效改善率達 4.4%，為官方期望的兩倍。

本研究欲透過分析荷蘭長期節能協議運作機制，探討荷蘭政府與產業針對節能議題的協商內容、節能目標設定與節能成果計算方式，並以荷蘭 ICT 產業長期節能協議成果為例，介紹自願性官民協議下產業節能合作實務，以茲我國邁向產業淨零轉型相關政策研擬與企業節能合作規畫之參考。

【關鍵詞】自願性協議、能源效率、長期能效協議、產業節能合作

---

\*工研院產科國際所 副研究員

\*\*工研院產科國際所 研究員

\*\*\*台灣綠色生產力基金會 副理

\*\*\*\*台灣綠色生產力基金會 工程師

## 一、前言

儘管荷蘭具備大量高能源密集度與高碳排的工業，仍以積極的溫室氣體減量作為氣候與能源政策的核心。在 1992 年至 2020 年間採行自願性長期能效協議(Long-term Energy Efficiency Agreement, LTA)，由各行業產業協會代表企業與政府簽約，每份 LTA 締約企業用能涵蓋該行業用能約 70~80%，帶動產業改善能源效率及使用再生能源，分三期實施，最終成果顯示 2020 年締約企業整體能源消費較 2005 年改善 66.7%，年均能效改善達 4.4%，成效為官方預期兩倍。

2020 年以前，自願性長期能效協議(LTA)持續在荷蘭產業節能政策扮演重要角色，並且與新興產業節能法規形成互補。例如，1993 年時荷蘭將部分歐盟能效指令(Energy Efficiency Directive, EED)納入《環境保護法》，於 2008 年將企業節能義務納入《環境管理活動法令》，2014 年依歐盟能效指令納入大企業<sup>1</sup>能源查核義務，2019 年增設企業節能措施申報義務，以及 2023 年新設大企業節能研究義務，規範對象如表 1 所示。未參與 LTA 的大企業經常是第一波申報對象。

表 1 荷蘭企業法定節能義務一覽

項目	能源查核	節能措施申報義務	節能研究義務
起始年份	2014 年起	2019 年起	2023 年起
法源	EED	環境管理活動法令(依 EED)	環境規劃法
對象	年用電量	無	5 萬度以上
	年天然氣用量	無	25,000 M <sup>3</sup>
	其他規定	大企業(包含 ETS 企業)	中小企業、大企業
實施週期	每 4 年一次	每 4 年一次	每 4 年一次
節能義務	能源查核	實施投資回收期少於 5 年之節能措施	說明未來節能計畫
提報內容	<ul style="list-style-type: none"> <li>能源平衡表</li> <li>分析能源消費的主要因素</li> <li>量化企業節能潛力預測</li> <li>條列所有具備成本效益之節能措施</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>企業用能分析</li> <li>節能措施規劃</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>用能分析</li> <li>已採行節能措施</li> <li>未來節能計畫</li> </ul>
備註	參與 LTA 的企業獲得豁免	2023 年起涵蓋減碳措施，：架設再生能源、燃料轉換等。	包含非建築相關節能措施，如：製程、運輸等

資料來源：本研究整理自 ROV.nl

<sup>1</sup> 依據歐盟定義，大型企業為擁有超過 250 名員工或年總營業額超過 5,000 萬歐元且資產負債表超過 4,300 萬歐元的大型公司。

本研究鑑於荷蘭長期能效協議的成功，期盼透過探討荷蘭長期節能協議運作機制，研析討論荷蘭政府與產業針對節能議題的協商內容、節能目標設定與節能成果計算方式，並以荷蘭 ICT 產業長期節能協議成果為例，介紹自願性官民協議下產業節能合作實務，以茲我國邁向產業淨零轉型相關政策研擬與企業節能合作規畫之參考。

## 二、荷蘭長期能效協議簡析

### (一) 制度簡介

荷蘭自 1992 年起運用長期能效協議(Long-term Energy Efficiency Agreement, LTA)鼓勵產業改善能源效率及使用再生能源。參與 LTA 的企業簽署約 10 年左右的能效協議，每年提報年度節能成果外，每四年提報一次節能計畫(Energy Efficiency Plan)說明將採取哪些節能措施，以達成年節能目標。LTA 涵蓋部門分成工業、食品飲料業、服務業與運輸業等四類，由產業協會代表企業與政府締約<sup>2</sup>。所有企業皆可自由參與，包含大企業與中小企業<sup>3</sup>。

如同前面提到，參與 LTA 的大企業可豁免於能源查核。大多數 LTA 的企業更著眼於以下三大好處：

#### 1. 取得專門節能知識，提升企業競爭力：

對企業而言，節約能源支出不但能使自己比同業更具競爭力，也更有資本來提升或保持商譽。而參與 LTA，可接收來自所屬中央目的事業主管機關與產業協會提供的最新節能技術情報與實務，獲得最可靠及最相關的行業節能知識。

#### 2. 獲得額外財稅獎勵與科研補助：

荷蘭政府針對參與 LTA 且年用電超過 1,000 萬瓦的企業提供免除能源稅的優惠，各中央目的事業主管機關則於官民協定中承諾贊助行業相關節能技術開發，針對技術研究與發展，提供穩定的財務支持。以 ICT 產業為例，該產業協會便運用政府經費，探討可能對企業會員有利的新興節能技術與措施。

---

<sup>2</sup> 荷蘭長期能效協議分三期實施，分別稱為 LTA1、LTA2 與 LTA3。起初，長期能效協議(LTA1)於工業部門實施，故由荷蘭經濟事務部(Ministry of Economic Affairs)代表國家與民間簽約；其後，LTA2 之產業類別擴大至農業與服務業，故分別由荷蘭農業、自然與糧食品質部(Ministry of Agriculture, Nature and Food Quality)和荷蘭住宅、空間規劃與環境部(Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment)等主管機關加入，代表官方簽署長期節能協議。

<sup>3</sup> 依據荷蘭對中小企業定義主要引用歐盟 2003/361/EG，即僱用 50-250 人，且其年營業額在 5,000 萬歐元以下或其資產負債表為 4,300 萬歐元以下者為中型企業，僱用 10-50 人，且其年營業額或資產負債表均在 1,000 萬歐元以下者為小型企業，僱用 1-9 人，且其年營業額及資產負債表均在 200 萬歐元以上者為微型企業。

### 3. 運用自願節能避免法規趨嚴：

為提升企業參與 LTA 意願，荷蘭政府在官民協議中，承諾當企業自願參與 LTA 並實現節能承諾，便不會推出更嚴格的管制措施，也不會針對能源消費課徵更高的稅率。許多參與 LTA 的企業表示，這點的確是他們參與 LTA 最大的理由，並且促使產業協會與個別企業努力實現節能承諾。

綜合上述可知，荷蘭長期能效協議(LTA)是非常有效的官方與民間約定，企業透過自願節能承諾，取得所屬行業的專業節能知識、政府財稅獎勵與節能科研補助資源，而政府則承諾在企業達成節能目標的前提下，不增設管制法令與稅賦。雙方在合理的利益交換下，促成 LTA 制度的成功。

#### (二)利害關係人

長期能效協議為政府與產業之間的節能減碳約定，由各行業產業協會代表民間與政府簽約，才開放有意參與的企業提出申請，當企業所提報的能源效率計畫(EEP)獲得官方認可後，始成為 LTA 正式成員。有關 LTA 執行過程中利害關係人與職責整理如圖 1 所示，說明如下：

##### 1. 企業

欲申請 LTA 的企業，首先必須制定能源效率計畫(EEP)，執行並且每年提報成果。在第三期 LTA(LTA3)，每年節約 2%的目標不分行業別與公司規模，企業必須在 EEP 中說明執行辦法，通常有熟悉該行業節能措施的能源顧問公司協助企業擬定。

##### 2. 產業協會

荷蘭產業協會的組成，有時以同行業為單位，有時以特定產品為單位。產業協會的任務是告知並鼓勵成員參與 LTA、促進知識轉移、制定產業節能路徑圖，並作為企業代表與各方進行聯繫

##### 3. 中央目的事業主管機關

荷蘭有四個部會參與 LTA 制度，包含(1)荷蘭經濟事務暨氣候政策部<sup>4</sup>、(2)荷蘭農業、自然暨糧食品質部<sup>5</sup>、(3)荷蘭住宅、空間規劃與環境管理部<sup>6</sup>，以及(4)荷蘭財政部。上述部會代表國家鼓勵企業參與 LTA，負責測試企業提報的 EEP 內容實際，提供企業執行建議，並確保各行業專業節能資訊布達給全體締約企業，與荷蘭企業署 5 有密切合作。

---

<sup>4</sup> Ministry of Economic Affairs and Climate Policy

<sup>5</sup> Ministry of Agriculture, Nature, and Food Quality

<sup>6</sup> Ministry of Housing, Spatial Planning and Environmental Management

#### 4. 荷蘭企業署<sup>7</sup>

隸屬荷蘭經濟事務暨氣候政策部，主要業務為協助企業與產業協會投資、發展及擴大商務或投資計畫，設有一個部門支援監管 LTA 締約企業，並協助企業擬訂能源效率計畫(EEP)、傳遞專業節能知識，以及探討潛在新節能措施。

#### 5. 跨省協會

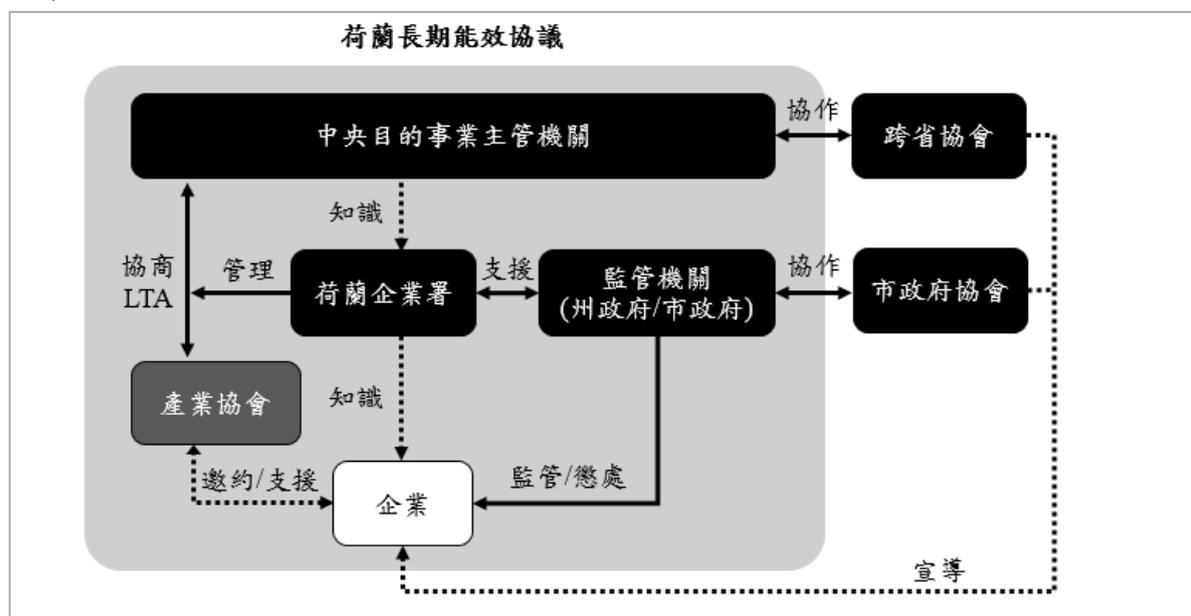
跨使協會成員為荷蘭各省代表，推派一人向政府表達省政府對 LTA 的觀點，參與 LTA 相關諮詢會議，並鼓勵管轄地區的企業參與 LTA。

#### 6. 市政府協會

市政府協會則由荷蘭市政府組成，目的為促進省級政策實務交流與創新，鼓勵企業加入 LTA 之餘，也被要求在發放企業許可證時優先考慮能源效率。

#### 7. 監管機構

LTA 監管機構為州政府或市政府，依法對企業進行監管。企業提交能源效率計畫(EEP)時會同時提交給所屬監管機構與荷蘭企業署，取得兩者認可後，正式成為 LTA 的一員。在第三期 LTA，當企業不便承諾每年 2% 能效改善，或者實際年能效改善無法達成 2%，必須向監管機構報告，由監管機構評估合理性，如：新技術投入運轉所需的時間。官方代表中，只有監管機構有權力處罰違反 LTA 規定的企業。



資料來源：Technopolis (2023)，本研究繪製(2024)

圖 1 荷蘭長期能效協議利害關係人

<sup>7</sup> 最初，荷蘭政府設立 SenterNovem，作為獨立第三方機構，協助管理全國 LTA 計畫。SenterNovem 有責任保護大企業戰略機密不外洩。SenterNovem 於 2010 年併入 Agentschap NL，而 Agentschap NL 於 2014 年成為荷蘭企業署(Rijksdienst voor Ondernemend Nederland，簡稱 RVO)的一部份。

### (三) 節能途徑與成效計算

在節能途徑方面，荷蘭長期能效協議(LTA)認可製程能源效率、供應鏈能源效率以及再生能源消費等三種節能方式。其中，製程能源效率是最早出現的能源效率措施，實施於第一期 LTA。產業鏈能源效率與再生能源消費則自 2001 年起實施，即第二期 LTA 起。有關這三種節能方式的定義與總體節能成效計算，分述如下：

#### 1. 製程能源效率

量化企業採行與製程相關節能措施所產生的節能效果，包含製程設備、設施與建築改造、能源管理與用能行為調整以及策略計畫(如：工廠餘熱應用)。當企業提報製程能源效率改善情況時，須同步說明能源節約量和影響生產活動的因子，如：產品生產量變化或氣候變化。製程能效改善率計算公式如下：

$$100\% * \frac{\text{製程能效節能量 (J)}}{\text{實際能源消費 (I)} + \text{製程能效節能量 (J)}}$$

#### 2. 產業鏈能源效率：

於企業本身以外產生的節能成效，即屬於產業鏈能效，例如與顧客、供應商與物流商進行節能合作，區分為生產鏈及消費鏈等兩部分。生產鏈方面，重視原物料採集、處理、運輸、廢氣與再利用等過程之能源消費；消費鏈方面，則重視產品運輸與使用相關之能源消費，包含產品本身運作效率以及使用壽命優化。由於產業鏈能效通常涉及多個利害關係人的協作，故規定無論參與企業家數多寡，每家企業皆可認列 50% 產業鏈節能成效。產業鏈能效改善率計算公式如下：

$$100\% * \frac{\text{產業鏈能效節能量 (J)}}{\text{實際能源消費 (I)} + \text{產業鏈能效節能量 (J)}}$$

#### 3. 再生能源消費：

使用再生能源無法節能，但有助於減少碳排放。荷蘭政府認可自產自用再生能源與對外採購再生能源，企業須提出相關佐證文件，如：再生能源電力採購單據。再生能源使用率計算公式：

$$100\% * \frac{\text{再生能源消費量 (J)}}{\text{實際能源消費 (I)}}$$

#### 4. 總能效改善率：

需使用同一年度的實際能源消費與各節能措施數據計算能效改善率，公式如下：

$$100\% * \frac{\text{製程能效節能量(J)} + \text{產業鏈能效節能量(J)} + \text{再生能源消費量(J)}}{\text{實際能源消費(J)}}$$

#### (四) 節能知識創造與擴散

取得所屬業別的節能知識，是荷蘭企業加入長期能效協議(LTA)的主要動機之一，主要管道為中央目的事業主管機關與產業協會。首先，中央目的事業主管機關負責發展適合該行業的製程能效措施、產業鏈能效措施與再生能源消費，也贊助 LTA 締約企業探索新節能技術。例如，荷蘭動物飼料產業<sup>8</sup>便透過 LTA 經費贊助，雇用能源顧問公司，針對冷卻系統節能機會辦理交流會議與實地量測，發現運用冷卻系統餘熱的可行性，找到幾乎適用於每家企業的節能措施。

其次，產業協會為協助參與 LTA 的中小企業落實節能措施，除了設立網頁進行節能宣導，也提供節能輔導、節能技術諮詢、供應鏈夥伴節能合作輔導、節能相關交流活動與頒獎典禮等，由產業協會自行規劃及提供給參與 LTA 的企業，LTA 企業則依規定須派員參與相關活動與討論。產業節能交流活動因業別而異，如：荷蘭 ICT 產業著重於企業交流與節能諮詢，而荷蘭塑膠與塑料行業則多以節能輔導與節能獎項促進大小企業互相觀摩與學習。

最後，荷蘭政府為促進同業節能資訊擴散、最佳實務共享及落實節能措施，委託 SenterNovem(現今為 RVO)管理節能資訊擴散與輔導資源，執行下列配套措施：

1. LTA 推廣資源：建立 LTA 官方網站及相關說明手冊。
2. 節能資訊交流平台與網絡：以耗能設備類型或產業別形成知識網絡，著重促進企業間資訊交換。
3. 節能措施資料庫：與產業專家與能源專家合作，籌備各業別節能措施清單。
4. 節能潛力掃描服務：協助企業辨識節能機會與可行措施。
5. 投資決策支援工具：提供推算投資報酬率與措施能效改善率軟體。
6. 中小企業能源中心：由政府補貼產業協會建立網站，提供所屬行業中小企業與其他會員改善能源效率及使用再生能源相關資訊。
7. 合格能源顧問名單：運用官網宣傳，協助企業尋找合格能源顧問，取得專業節能建議

從荷蘭長期能效協議(LTA)節能知識產生與擴散的方式可知，政府負責開發、贊助與傳遞行業別節能知識，產業協會負責會員節能輔導與節能交流活動，LTA 締約企業則有參與工作小組討論的規定，上述機制不但加速了產業節能知識的創造與擴散，也提升企業達成節能目標的可能性。

<sup>8</sup> 僅 10 家企業參與 LTA，且大多數為小企業。

### (五)執行成果

在 1992 年至 2020 年間，荷蘭共執行 3 次 LTA 計畫，如表 2 所示。第一期 LTA(LTA1)於 1992 年至 2001 年間實施，以年能源消費高於 0.5PJ 的企業為對象，要求其提升製程能效，目標使 2000 年全體工業能源密集度較 1989 年降低 20%。時至 2000 年，實際成果超乎預期，達 20.3%。

第二期 LTA(LTA2)則於 2001 年至 2012 年間實施，納入整體產品鏈的能源效率，並開始鼓勵架設再生能源發電裝置或採購綠電。2005 年時，荷蘭政府考量大多數能源密集企業將被納入歐盟碳交易系統(ETS)，開放年能源消費低於 0.5PJ 的企業與中小企業加入 LTA，產業別也同步擴大至服務業與農業。在節能減碳目標設定方面，LTA2 不具全體工業節能減碳目標，改由各行業自行定義。然而，荷蘭政府仍對企業節能減碳成果有所期許，以 1998 年作為基期，盼望參與 LTA 的企業達成每年 1.3%能效改善率。最終，參與 LTA2 的大企業與中小企業平均每年達成 2.1%能效改善率，約 9 成以上的節能成果來自製程能效改善。

最後一期 LTA(LTA3)實施於 2012 年至 2020 年，荷蘭政府與產業協會於 2008 年簽訂 LTA3，期初締約的企業家數約 1000 家，涵蓋 33 個行業。重要改革有兩項：(1) 荷蘭政府再度明訂總體能效改善目標：以 2005 年為基期，2020 年能效改善率達 30%；以及(2)各產業協會須制定所屬行業之長期能效改善路徑圖。參與 LTA3 的企業同意達成每年 2%能效改善率。雖然期間陸續有企業主動退出協議或因連續兩次未提報成果而遭除名，2020 年時有 859 間企業持續參與 LTA3。LTA3 締約企業實現年均能效改善承諾。在 LTA3 期間，荷蘭受惠於再生能源快速發展，締約企業透過採用再生能源降低溫室氣體排放，最終成果顯示，2020 年整體能源消費較 2005 年改善 66.7%，年均能效改善率達 4.4%。

表 2 荷蘭長期能效協議各期參與對象、目標與節能成效

期別	執行期間	部門別	企業類型	節能目標	節能成果
第一期 (LTA1)	1992~2001 年	工業	年能源消費高於 0.5PJ 者	2000 年全體工業能源 密集度較 1989 年降低 20%	全體工業改善 20.3%
第二期 (LTA2)	2001-2012 年	工業、食 品飲料 業、服務 業與運輸 業	2005 年起納入年能 源消費低於 0.5PJ 企 業與中小企業	各行業自訂； 政府期望年改善 1.3%	企業平均年改善 2.1%
第三期 (LTA3)	2012-2020 年		同上。	2020 年較 2005 年能效 改善 30%；每年能效 改善 2%	2020 年較 2005 年能效改 善 66.7%；企業平均年能 效改善 4.4%

資料來源：本研究整理

### 三、荷蘭 ICT 產業案例

#### (一) LTA 參與情況

荷蘭 ICT 產業於 2008 年至 2020 年參與長期能效協議(LTA)，涵蓋 LTA2 與 LTA3。荷蘭 ICT 產業協會承諾參與 ICT LTA 的企業能源消費至少占 ICT 產業能源消費至少 80%。最後一期 LTA(2016 年)之初，共有 34 家 ICT 產業參與荷蘭 ICT LTA，如圖 2 所示，包含電信公司、數據中心及大型 ICT 服務供應商，ICT LTA 所涵蓋的初級能源消費量在各行業中排名第四大。在 2020 年 LTA 落日時，參與 ICT LTA 的廠商數為 40 家，其中有 37 家具備節能義務。



資料來源：Netherlands ICT

圖 2 荷蘭 ICT 產業長期能效協議締約企業-2016 年

#### (二) 節能目標

在 LTA 初期，荷蘭 ICT 產業設定於 2020 年達成節能 20% 的目標，然而 2015 年節能成果超過預期，達 24%，故於 2016 年將 ICT 產業節能目標改為在 2005 年至 2020 年間達成能效改善 30%，年均能源效率改善 2%。

#### (三) 節能資訊擴散

荷蘭 ICT 產業協會(Netherlands ICT)在 LTA 中發揮協調各方的作用，協助知識累積與經驗擴散，包含：

1. ICT LTA 企業交流會：每年兩次
2. 能源議題諮詢服務，如：數據中心冷卻議題、餘熱應用等。

3. 串聯 ICT 產業協會內外資源，執行 ICT 用能趨勢調查及產業發展研究，如：數據中心冷卻相關研究、節能軟體知識庫以及荷蘭 ICT 產業協助其他行業節能減碳相關研究等，並在 LTA 相關工作小組與產業協會官網上公開成果資訊。

#### (四) 節能成果

在荷蘭 ICT 產業協會的領導下，荷蘭 ICT 產業的初級能源消費與越來越強勁的數據流量成長脫鉤，也開發創新 ICT 方案協助其他行業節約能源消費。參考荷蘭官方公開資料，及至 2020 年，荷蘭 ICT 產業的製程能源效率較 2005 年改善 39.3%，消費鏈能效改善 6.3%，生產鏈能效改善 1.6%。

另參考依據荷蘭 ICT 產業發布之 2020 年 LTA 執行成果報告書，荷蘭 ICT 產業原規劃達成每年節能 3,099.2 TJ 目標，至 2020 年時達成年節約 9,455.3 TJ 成果，超過節能目標 3 倍。在製程措施方面，荷蘭 ICT 產業重要措施為汰換舊系統(節能 319 TJ)、降低數據中心數量(改為雲端系統，節能 47 TJ)以及更換不斷電供應系統(UPS，節能 18 TJ)。在產品鏈節能方面，荷蘭 ICT 產業重視與客戶的合作，在各個鏈結點共節約 647 TJ 能源。此外，將數據資料存在雲端而非客戶端的伺服器，也創造了約 85 TJ 的節能量。在最後一期(2017-2020)年荷蘭 ICT LTA 中，2020 年預期節能量與實際節能成果整理如表 3 所示。

表 3 荷蘭 ICT 產業參與 LTA 成果-2017~2020 年

單位：TJ

分類	次分類	2020 年 預期節能量	2020 年 實際節能量
製程能源效率	製程措施	1,033.4	1,413.8
	設施與建築改造	1,032.3	1,077.9
	能管與用能行為	183.7	175.6
	策略計畫	39.5	82.1
	小計	2,288.9	2,749.5
產業鏈 能源效率	生產鏈措施	53.4	6.0
	消費鏈措施	398.6	867.5
	小計	452.1	873.5
再生能源消費	購買再生能源	357.9	5,831.5
	架設再生能源	0.3	0.8
	小計	358.2	5,832.3
	總計	3,099.2	9,455.3

資料來源：Netherlands ICT, 2020

## 四、對我國的啟示

荷蘭長期能效協議(LTA)是良好的官民協議典範，不但是政府與企業的雙贏，也促進新興節能技術開發與佈署，持續引領荷蘭產業落實節能減碳，IEA 數據便顯示自 2000 年以來，荷蘭工業最終能源消費穩定下降。在 LTA 於 2020 年落幕前，官民討論以氣候協議(Klimaatakkoord)接續 LTA 精神，設立新節能減碳目標，致力於使 2030 年溫室氣體排放量較 1990 年減少 49%。

我國在邁向淨零排放的路上，宜多加參考不同的政策工具選項與實務案例，使節能減碳不僅是政府的願景，也是企業願意主動追求的目標，以適當的制度設計促進政府與企業、企業與企業間節能合作。研析荷蘭長期協議執行架構與成果，值得我國參考的面向分述如下：

### 1. 企業自願節能承諾，實現企業與國家共榮

如同荷蘭企業體認的，節能本身有助於促進企業競爭力，自願參與長期能效協議的主要利益是避免政府緊縮法規與管制，而透過 LTA 取得所屬產業的節能知識，則屬企業永續經營之道。雖然我國產業協會組成方式與荷蘭不同，但值得參考荷蘭模式，以行業別或產品別為分類，使有意參與節能的企業用能占該分類用能 70-80%，共同制定積極的短中長期節能目標，據以作為和政府協商的基礎，共同探討合適的協作模式與節能成效認可方式。

### 2. 結合官方與民間資源，加速企業節能合作與知識擴散

在荷蘭長期能效協議(LTA)架構下，節能技術與知識的創造與擴散，有中央目的事業主管機關、產業協會與 LTA 締約企業的參與。產業協會扮演重要的角色，不但與政府協商並取得科研經費支援<sup>9</sup>，也負責促進同業節能學習、新興節能技術探索與測試，同時造福 LTA 締約企業與其他企業會員。上述活動是在政府與企業互有節能約定下促成，使得產業有動機也有資源擴大節能知識的探索與實踐，值得我國思考如何善用官方與民間能量與資源，共同開發各行業節能潛力。

### 3. 鏈結中小企業節能能量，擴大產業節能成效

雖然 LTA 不是專為中小企業設計的制度，但研究顯示約有 60% 締約企業屬於中小企業，且各行業中小企業比例不同，如：荷蘭 ICT 產業 LTA 僅 10% 企業為中小企業，而荷蘭動物飼料產業則高達 80%。LTA 架構下，使得較有時間和資源進行節能技術研究的大企業，在取得研究成果後，與同樣是 LTA 締約方的中小企業分享。而缺乏大公司的行業別，透過數家中小企業聯合參與 LTA，也有機會透過 LTA 經費支援，進行關鍵節能技術探索<sup>9</sup>。兩種途徑都提

---

<sup>9</sup> 荷蘭動物飼料產業透過與政府簽訂 LTA，取得資源雇用能源顧問公司，探索節能機會。

供中小企業取得所屬行業節能知識的管道，加速開拓整體產業節能潛力。

## 五、結語

荷蘭屬於能源和排放密集型的國家，高度依賴於化石燃料，能源消費主要由產業活動驅動，與我國十分相似。在 1992 年至 2020 年實施的長期能效協議(LTA)不但帶動荷蘭產業落實節約能源，也創造良好的官民互動與企業節能協作，使得企業不僅探討自身的節能潛力，也探討與顧客、供應商與物流商節能合作的可能，並在政府與產業協會的支持下，持續開拓各行業節能機會並加速擴散節能實務，同時提升企業與國家競爭力。

我國為實現淨零排放目標，積極規劃各樣政策措施之餘，值得參考荷蘭長期能效協議的作法，透過官民協議自願性且積極的節能目標，分配彼此的權利、義務與資源，加速企業間節能合作與節能技術開發，以期在滿足淨零排放目標的路上，不遺落中小企業，也幫助企業順應國際淨零碳新興法規，實現經濟產業淨零轉型與國家永續發展。

## 致謝

本研究承能源署能專經費之支持，特此致謝，不勝感激。

## 六、參考文獻

1. IEA (2020), The Netherlands 2020 Energy Policy Review, <https://www.iea.org/reports/the-netherlands-2020>
2. Technopolis Group (2023), European SMEs Energy Efficiency Policy
3. 荷蘭經濟部企業署(RVO)<https://www.rvo.nl/>
4. RVO (2015), Handreiking monitoring MEE-convenant. Source: <https://www.rvo.nl/sites/default/files/2015/01/Handreiking%20monitoring%20MEE%20versie%204.3%20-%20december%202015.pdf>
5. RVO (2020), MJA-Sectorrapport 2020 ICT, <https://www.nldigital.nl/wp-content/uploads/sites/3/2023/11/Sectorrapport-ICT-2020.pdf>
6. RVO (2020), MJA-Sectorrapport 2020 Rubber- en kunststofindustrie, [https://kunststof-magazine.nl/wp-content/uploads/2021/10/MJA-sectorrapport2020\\_RubberKunststof.pdf](https://kunststof-magazine.nl/wp-content/uploads/2021/10/MJA-sectorrapport2020_RubberKunststof.pdf)

7. Nicole van Beeck (2007) , Transferring the Dutch success of voluntary agreements with industry to other countries
8. ROV , Meerjarenaafspraken energie-efficiëntie (MJA3/MEE) ,  
<https://www.rvo.nl/onderwerpen/mja3mee>
9. NLdigital , Resultaten MJA3: digitale sector doet het goed ,  
<https://www.nldigital.nl/kennis-producten/resultaten-mja3-digitale-sector-doet-het-goed/>
10. Klimaatakkoord.nl , Wat is het doel van het Klimaatakkoord?  
<https://www.klimaatakkoord.nl>



# 紡織業智能化生產、循環經濟和淨零排放管理系統

林明旺\*、劉柏緯\*\*

## 摘 要

現代紡織業正積極結合人工智能化生產及管理系統，以提高生產效率並實現可持續發展目標，本研究主要通過雲端實時紡織智能生產資訊管理監控預警整合系統集成感測裝置、通訊系統、伺服器主機、中央資訊整合系統和終端設備，實現了紡織生產過程的監控、分析和預警功能，提高了生產效率和品質，並提供即時數據支持，使紡織業生產瑕疵異常通報及履歷檢索系統則建立了一個生產異常履歷檢索資料庫，即時通報和記錄異常情況並提供生產履歷檢索工具，確保所有過程和品質均處於控制之下，有助於追蹤生產異常，提升瑕疵排除效能；藉由紡織業視覺化製造設備管理系統實現地端自動化機械設備、資訊設備和伺服器主機的無縫整合，提高了原物料使用效率，並大幅減少廢料，同時通過雲端資料庫存儲和分析數據，提高了整體生產流程的管理效能和資訊整合效率。

在循環經濟方面，紡織業面臨的主要挑戰是廢水回收與再利用，為了降低環境污染，本文提出了多重廢水處理技術，如生物處理與化學混凝技術，有效提升廢水的再生利用率，此外，通過優化廢水回收系統，減少化學藥劑的使用，不僅降低成本，還促進環保效益；同時，紡織業也積極推動節能減碳，本公司積極導入可再生能源如太陽能的應用，並藉由碳足跡評估系統，實現生產過程中的碳排放監控，企業透過引入高效能設備，優化生產流程，有助於提高能源效率，並達到減碳目標，紡織業需結合智能化技術與環保策略，才能在提升生產力的同時，達成可持續發展目標並迎合全球綠色經濟趨勢。

【關鍵詞】智能化生產、雲端實時管理系統、淨零排放、廢水處理、碳足跡

---

\*東豐纖維企業股份有限公司 經理

\*\*東豐纖維企業股份有限公司 課長

## 一、前言

近年來，物聯網(Internet of Things, 簡稱 IoT)在產業界快速發展並大幅提升工業製造業的生產效率、良率以及降低人力及時間成本的浪費，物聯網是一種藉由裝置、機械、數位設備相互關聯的系統，現今的物聯網可結合大量的設備、感測器、軟體及其他互連設備進行傳輸及接收相關資料，且進一步將資料進行分析並加速制定策略，並利用人工智慧來進行進階分析及機器學習建立整體 AIoT 人工智慧物聯網，隨著資訊科技快速發展以及工業自動化的進步，政府也不斷提出企業資訊化改革以及工業 4.0 的解決方案，提升上下游整合效率、降低生產成本、減少廢料損耗，同時提升管理效能、達到自動化生產流程並同時進行瑕疵檢測分析在紡織業便形成了非常重要的研究方向。

另外，因應時代潮流現行機能性紡織品高度發展以及消費者對於衣著的需求，許多不同的化學溶劑、染劑及有機化合物大量的應用在紡織工業製程原料中，經過上游紡紗、中游織造及染整加工程序後，所輸入之淨水嚴然形成大量具有高度污染物之廢水產生。隨著不同原料、製程、產品及排放單元，所排放的廢水內容物亦包括大量的有機化合物、酸、鹼及重金屬物質，使得紡織產業對於廢水回收再利用處理技術程序繁複且不易達到。因此，如何將製程優化、採以更為潔淨的清潔生產技術，亦成為目前全球紡織工業極需解決的重要課題及發展目標。

再者，節能減碳也是紡織工業應積極面對改善的目標，首先在整體製造過程以及生產環境中必須判斷識別出相對高耗能、高碳排的設備及環節，並針對碳排熱區之製程單元以及設備進行重點量測及汰換，並導入綠能發電系統，制定減排目標以及相對應之執行計畫，搭配公司內部碳足跡盤查檢測，推動整體生產過程的低碳化轉型制度，也是目前大部分紡織工業需要積極努力面對的環境保護轉型計畫目標之一。

## 二、紡織業智能化生產、循環經濟和淨零排放管理系統執行現況

### 1. 智能化生產於紡織業之應用及可持續發展之永續目標

紡織業不斷努力將智慧製造和物聯網技術融入到工廠運營中；然而，物聯網融入紡織業時面臨一個重要問題，即跨平臺操作性差，缺乏通用標準(洪志銘，2017)；此外，物聯網設備種類繁多，存在著在現有硬體和軟體之間的差異，這使得開發變得相當困難；另，紡織業計畫進入智慧製造

領域，必須提高遠端監控技術，藉由智慧製造中的遠端監控技術可以說明工廠隨時瞭解設備狀態，快速追蹤生產進度，並能夠隨時調整生產計畫，同時降低設備停機或損壞的風險，顯著提高生產效率並延長設備壽命；此外，它還能夠為消費者提供更透明的生產資訊和相關流程。

目前，紡織業的產品製造已經與過去大不相同；過去，紡織工廠內部的生產記錄檢索困難，當客戶要求生產記錄時，無法及時滿足客戶需求，客戶只能購買所需的產品，無法瞭解產品的整個生產過程以及製造工廠的情況；然而，如今全球各大品牌對於生產記錄的追溯趨勢日益重要，經常要求能夠即時遠端檢索產品的生產記錄或相關缺陷報告。

在智慧製造過程中，生產異常跟蹤和生產記錄是品質控制和產品售後管理非常重要的組成部分；它們的功能主要包括監控生產操作、自動修正或改進生產操作、即時回應設備或系統異常並進行故障排除、減少生產線停機的機會和時間、提供實際操作與歷史記錄以及預期結果的比較分析，找出生產異常的原因，並能夠提供消費者或客戶端相關產品的生產記錄和內部人員缺陷分析的過程結果(黎瑀蓉，2018)；因此，如何提高上下游整合效率、即時瞭解生產異常以提高生產良品率、降低生產製造成本、迅速提供客戶產品的生產記錄，將同時提高管理排除故障的效率，實現即時異常通報和解決，以及提供產品整體生產記錄，為消費者提供更透明的產品資訊。

本公司通過全面導入智能化生產流程來優化紡織生產的各個環節，從原料管理到成品出貨，全過程實現自動化操作、實時監控與數據驅動的決策，首先，在物聯網（IoT）技術的應用上，我們在紡織生產設備上安裝了大量的感測器和IoT裝置，這些感測器能夠即時監測設備的運行狀況和生產材料的特性，IoT技術將這些感測器收集的數據透過無線網絡傳輸至中央控制系統，實現生產過程的實時監控，例如，當設備出現異常時，系統會自動發出警報，並記錄問題詳細數據，讓技術人員能迅速定位和解決問題，避免因設備故障導致生產中斷。

本公司組建了一個專業的資訊團隊，開發了雲端實時紡織智能生產資訊管理監控預警整合系統，以滿足紡織業智能化生產管理的關鍵需求，這個系統整合了多個重要元素，包括感測裝置、通訊系統、伺服器主機、中央資訊整合系統、雲端資料庫和終端設備，旨在實現生產過程的監控、數據分析和即時預警；感測裝置是系統的關鍵組件之一，安裝在紡織自動化設備上，例如生產設備、染整設備、回收設備和廢水處理設備，這些感測裝置監控各設備的即時狀態，並可隨時發出警報，以確保生產過程的正常

運作；通訊系統負責將感測裝置收集的數據傳送到伺服器主機，以進行處理和分析；伺服器主機是系統的核心，用於存儲和處理大量數據；中央資訊整合系統則分類和處理不同類型的數據，並將其存儲在雲端資料庫中；最後，終端設備為用戶提供界面，可接收和顯示即時監控數據，以及接收警報訊息。雲端實時紡織智能生產資訊管理監控預警整合系統的目標是實現紡織產業的智能化監控和管理，提高生產效率和品質，同時為管理者提供更好的數據支持。

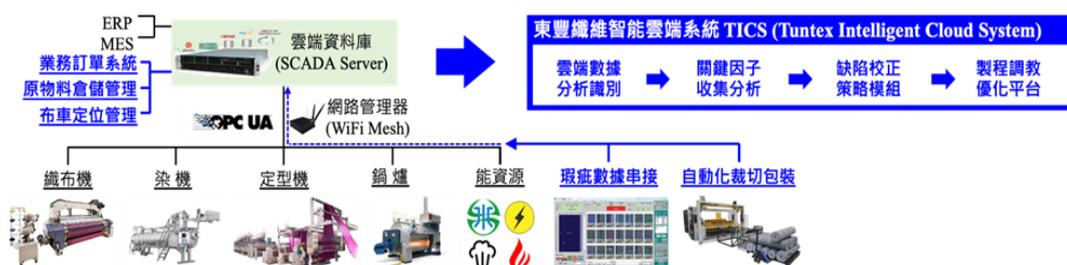


圖 1 智能生產資訊管理監控預警整合系統示意圖

接著以人工智慧 (AI) 輔助決策，我們引入了人工智慧技術來進行數據分析與預測，特別是在生產計劃和品質控制方面，AI 系統會根據歷史生產數據、訂單需求和當前的生產狀態，精確調整生產流程，不僅能夠預測可能出現的瑕疵，還能夠根據實時數據優化設備的運行參數，AI 系統可以根據不同布料的特性，動態調整染色過程中的溫度和時間，確保產品的品質穩定；本公司目前已導入自動化設備與智能機械，自動化設備是我們智能化生產流程的重要組成部分，包括自動包裝機、全自動搬運系統等，這些設備能夠根據生產計劃自動完成指定任務，從而降低人工操作帶來的錯誤和效率低下，此外，智能搬運機能夠在生產車間內自動搬運原料和成品，並且根據實時訂單需求調整運輸路線，有效提升物流效率。

結合人工智慧輔助決策系統以及雲端實時紡織智能生產資訊管理監控預警整合系統的目標是能實現紡織產業的智能化監控和管理，提高生產效率和品質，同時為管理者提供更好的數據支持。



圖 2 智能生產即時監控數據示意圖

再者，本公司導入實時數據監控與品質管理，我們的智能生產流程整合了實時數據監控系統，確保生產過程中的每一個細節都被精確記錄和管理，將每一批原材料的使用情況、生產環境的變化、設備運行的狀態都能在中央控制系統中被即時監測，當出現異常時，系統能自動觸發修正程序，進行快速調整，保證產品質量不受影響，例如，布料瑕疵檢測系統使用高速攝影機和 AI 影像分析技術，能夠在生產過程中即時檢測布料的瑕疵，並自動標記需要修復或替換的部分，減少人工檢驗時間，並提高質量控制的精準度。

因此，本公司所開發之紡織業生產瑕疵異常通報及履歷檢索系統，旨在記錄和通報生產過程中的各種異常情況，並提供生產履歷檢索的工具，以確保所有過程和品質都受到控制，包括紡織設備、資訊設備、伺服器主機和生產履歷檢索平台，紡織設備上安裝了生產狀態感測裝置，用於監控生產狀態信息，而資訊設備生成訂單和流程管理資訊；伺服器主機整合和存儲各種數據，包括異常數據和生產履歷；另外，生產履歷檢索平台允許客戶通過查詢不同信息來檢索生產履歷，以提高效率和瑕疵排除效能。

紡織業生產瑕疵異常通報及履歷檢索系統主要目標是幫助工廠追蹤生產異常狀態，通過數據收集、異常數據整合和通報，實現瑕疵異常通報和整合分析，同時，消費者可以通過生產履歷檢索平台了解產品的整體生產履歷，從而提高整體效率和瑕疵排除效能，為實現更全面的管理解決方案，我們開發了紡織業視覺化製造設備管理系統，結合紡織業生產瑕疵異常通報及履歷檢索系統，能夠有效實現地端自動化機械設備、資訊設備、伺服器主機和產線智能雲端系統的無縫整合，以提高原物料使用效率、降低廢料，並實時監控制造過程。主要目標是實現紡織業生產過程的高效管理和資訊整合，提高生產效率、減少廢料，並實時監控制造過程，有助於提高競爭力並降低成本。



圖 3 紡織業視覺化製造設備管理系統示意圖

另一個提升生產力的智能工具就是智能倉儲與供應鏈管理，本公司智能倉儲系統結合了自動化運輸機(AGV)和感測器來管理原材料與成品的儲存與調配，系統能夠根據生產需求自動進行原料的分配，確保生產線不會因缺料而停工，此外，我們的智能倉儲系統還能夠預測未來的原料需求，並自動生成採購計劃，保證供應鏈的順暢運行。



圖 4 紡織業自動化運輸系統示意圖

本公司為因應未來 AIoT 以及智能化趨勢，大幅更新採用數據驅動的生產流程優化，透過智能化生產流程不僅能夠即時掌握生產的各項數據，還能利用這些數據進行生產流程的優化，數據分析系統會定期生成報告，識別出生產中的瓶頸和潛在問題，並提供改善建議，例如，若某生產工序的效能低於預期，系統會自動分析過去的運行數據，找出問題的根源，並提出解決方案，進一步提高生產效率。

可持續發展與能源管理也是本公司極度重視的區塊，為配合全球環保議題、淨零排放之目標，智能化生產流程不僅提高了效率，還讓我們在環保和能源使用方面取得了顯著成效，本公司所研發之系統能夠監控生產過程中的能源消耗，並根據需求進行自動調整，從而最大限度地降低能源浪費，如在不影響生產的情況下，系統會自動調節設備的運行速度，減少不必要的電力消耗，同時，同時應用廢料管理系統，優化資源利用率，達成節能減排的目標。

本公司致力於將智慧製造和物聯網技術全面導入紡織生產流程，從而實現自動化操作、實時監控和數據驅動的決策優化，雖然在物聯網應用過程中仍存在跨平台操作性差和缺乏通用標準的挑戰，但我們通過在設備上安裝感測器，結合物聯網技術進行實時監控，及時發現並解決生產過程中的異常情況，同時，人工智慧技術被廣泛應用於數據分析和決策支援，有效提升了生產計劃的準確性和品質控制的精確度。

我們進一步通過自動化設備和智能機械，降低人工操作的錯誤，提升生產效率和產品品質，此外，實時數據監控系統和智能倉儲系統使我們能夠隨時掌握生產流程和原料狀況，確保生產的持續性並提高供應鏈管理的靈活性和效能；在可持續發展和能源管理方面，本公司依賴智能化生產技術來實現能源的有效利用，並優化資源管理，達到節能減排的目標，透過這一系列技術的應用，我們不僅提升了生產效率，還提高了對消費者和客戶的透明度，提供即時檢索生產記錄和品質報告，進一步增強了市場競爭力並符合全球環保趨勢。

智能化生產流程使本公司在全球紡織業中具備了更高的靈活性、效率和可持續性，同時提高了產品質量和客戶滿意度。

## 2. 可持續性紡織廢水回收再利用

紡織業產品持續轉變，發展方向日益朝向高質化、智慧化和環保意識的提高，消費者對於紡織品的要求正在逐漸升高，他們期望產品具有更多的功能性和環保特性，同時，紡織業者也在積極尋求方法，以提高機能性紡織品的效能，縮短生產製造流程，降低製作成本，並提高產品利潤，這已成為眾多紡織業者在產品研發過程中的關鍵焦點，然而，研發設計的重點已轉向產品的多元性和環保性，呈現出高品質、舒適和環保再生應用的新面貌；這需要開發新材料，擴展產品功能，並在紡織工業中使用不同類型的藥劑、染料和有機化合物；製程中產生的廢水，經過假撚、織造、染整和後加工等步驟後，排放出大量含有污染物的廢水，這使得紡織產業面臨處理末端廢水的技術挑戰，並且難以實現廢水的回收再利用。

過去，許多紡織和染整工廠處理廢水時主要將不同來源的廢水混合，然後使用大量化學藥劑進行化學處理，以符合排放標準，這種方法並未從根本上對製程中的廢水進行分類和回收再利用，也未將廢水納入後端回收水系統中，以進一步處理後重新用於生產製程；然而，如今，需求已轉向穩定且有效處理各種污染物的綜合廢水，同時保持回收水的質量穩定，以實現廢水的回收再利用，全球對環境友好和循環經濟的呼籲，使紡織產業如何有效處理末端廢水和廢水回收技術成為一個重要議題，這不僅有助於節約水資源和能源，還有助於提高環境效益(莊雅茹，2020)。

本公司針對紡織業污染相對嚴重的染整廢水，開發了一套高效的回收循環處理方法，該方法主要在降低化學用藥、減少環境污染，並提升循環經濟價值。



圖 5 原廢水與放流水比較(a)原廢水；(b)放流水

首先，排放之染整廢水經由匯流槽混合，流入一個 pH 中和池，在這個池中，廢水的 pH 值被調整至 7-8 之間，然後利用水位的高低差將廢水引流至調勻池，使廢水均勻化，此 pH 中和池的水位略高於調勻池，確保中和後的廢水能自然流入調勻池中，接著，經過中和和調勻的廢水通過抽水馬達導入冷卻水塔，進行冷卻處理，並將冷卻後的廢水引流至活性污泥池，進行曝氣和生物分解程序，經過冷卻和生物分解後的廢水，利用緩坡導流槽導入終沉池，在終沉池中，廢水會進一步處理，並經過快混槽和慢混槽後，進入浮除池。需要注意的是，該緩坡導流槽的傾斜角度不大於 25 度，以保證水流的穩定性；最後，經過砂濾器和軟化樹脂塔的處理後，淨化後的冷水將被導回染整程序進行回用。透過這一系列的處理步驟，我們的系統能夠大幅減少化學用藥的使用，同時降低整體回收及廢水處理的成本支出，減少環境污染，並提升循環經濟價值。

本公司所開發的回收循環處理方法的主要優勢包括：

- (1)減少化學用藥：藉由多重回收步驟和生物分解技術，減少廢水回收過程中對化學用藥的依賴，大幅降低對水質和環境的損害。
- (2)降低回收成本：透過中和調勻、冷卻分解、終沉浮除及過濾回用等步驟，回流的二次回收廢水提升了回收效能，有效降低了廢水回收及處理的成本。
- (3)減少環境污染：多道回收再利用程序有效提升了廢水的回收品質，減少了對環境的污染。
- (4)提升循環經濟價值：將回收淨化的廢水重新利用於染整製程中，不僅提高了資源的利用率，還顯著提升了循環經濟的價值。

本公司致力於推動紡織業的可持續發展，透過創新的染整廢水回收循環處理方法，有效降低環境影響，並促進資源的有效利用，為業界樹立良好的典範。

### 3.可再生能源的應用、能源效率改進、碳排放監測和碳足跡評估

紡織業是全球最大的製造業之一，但它也是一個能源密集型行業，對環境和氣候變化產生了巨大的影響，隨著對可持續發展的需求日益增加，紡織業正積極尋求在生產過程中應用可再生能源、改善能源效率、監測碳排放並評估碳足跡的方法。

首先，紡織業可以利用可再生能源來減少對傳統能源的依賴，太陽能是最常見的可再生能源，可以用於提供電力和熱能，太陽能光電板可以安裝在紡織廠的屋頂上，將太陽能轉換為電能，供給裝置的運轉，再生能源不僅可以減少對傳統能源的需求，還可以減少碳排放，從而降低紡織業對氣候變化的負面影響。

其次，紡織業可以透過改善能源效率來節約能源和降低碳排放，紡織生產過程中存在著許多能源浪費的問題，例如能源裝置的老化和執行不當，以及能源管理不佳等，為瞭解決這些問題，紡織業可以引入先進的節能技術和裝置，例如高效照明系統、節能機械等，以降低能源消耗；同時，紡織廠也可以透過改善生產過程中的能源利用效率，減少能源浪費，這樣不僅可以節省能源成本，還可以減少碳排放，提高生產效率。

最後，碳足跡評估可以幫助紡織業瞭解整個產品生命週期中的碳排放情況，透過碳足跡評估，紡織業可以確定哪些環節或產品具有高碳排放，然後採取相應的減排措施，碳足跡評估還可以幫助紡織業與消費者進行溝通，提供更具可持續性和低碳的產品，這不僅能夠滿足消費者對環境友好產品的需求，還能提高企業的競爭力。

紡織業在可再生能源的應用、能源效率改進、碳排放監測和碳足跡評估方面有很大的改進空間，透過應用可再生能源，改善能源效率，監測碳排放並評估碳足跡，紡織業可以實現更可持續的發展，減少對環境的影響，同時為企業帶來更多的競爭優勢(郭子平，2011)，隨著技術的不斷進步和意識的提高，紡織業將能夠在可持續發展的道路上取得更大的成就。

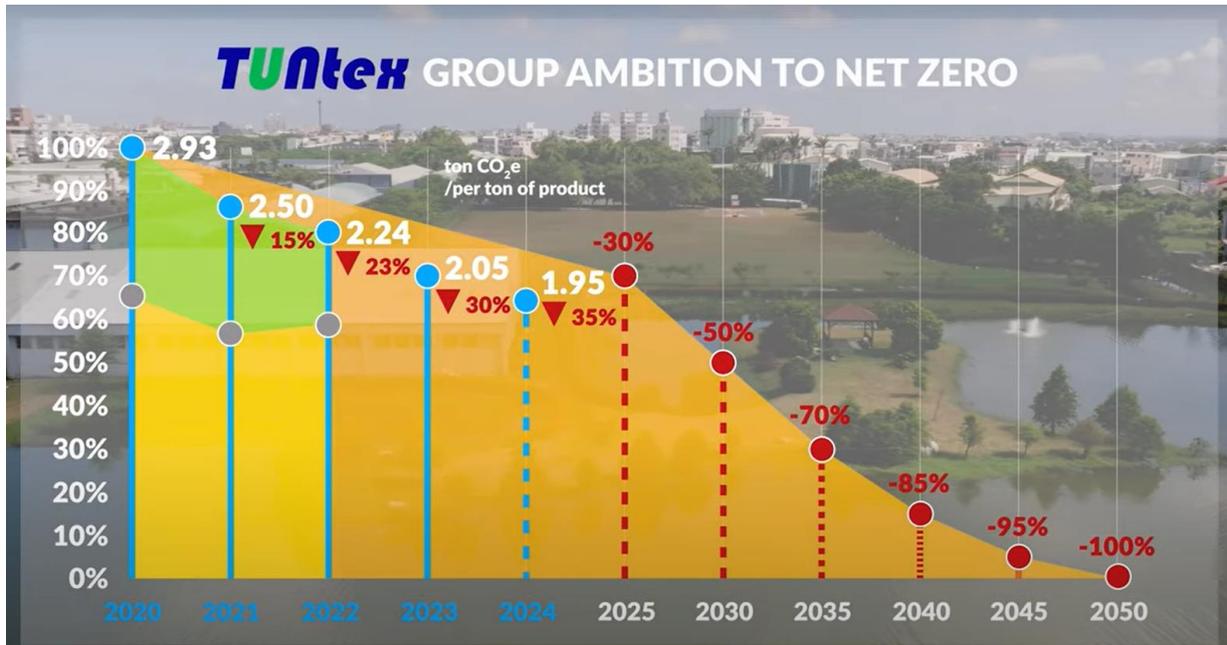


圖 6 東豐纖維企業股份有限公司淨零碳排目標圖

紡織業作為製造業的關鍵部分，正積極採取措施以實現可持續性發展，本公司積極在可再生能源應用、能源效率改進、碳排放監測和碳足跡評估等方面所採取的重要措施，以實現碳盤查、減排目標和低碳化轉型，茲敘述如下：

- (1) **製程碳足跡監測**：瞭解每個製程的碳足跡至關重要，包括紡紗、織造、染整和成衣製造等等，本公司積極評估和監測每個製程的碳排放情況，並根據評估結果制定相應的減排策略。

## Tuntex Quality Advance Capability

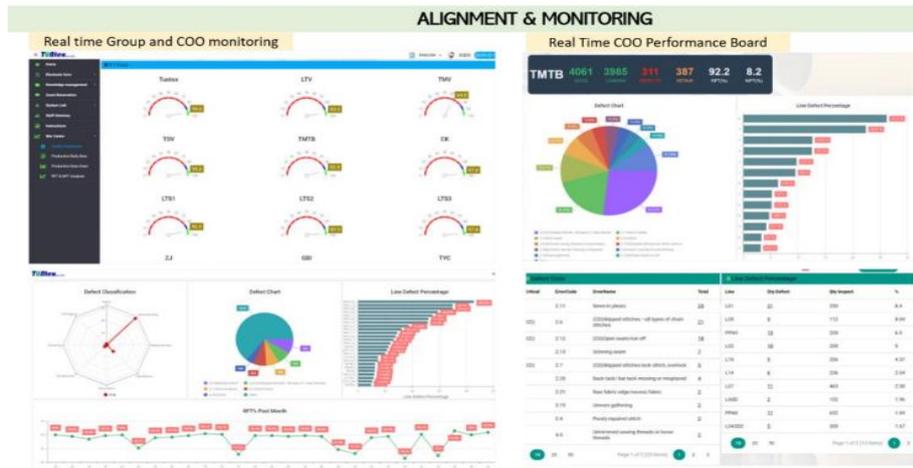


圖 7 紡織業製程碳足跡監測情況示意圖

- (2) 生產資訊串接和能源資源管理：實現製程生產資訊的串接，確保各個製程之間的協同作業，同時亦有效地管理和監控能源消耗，以降低能源浪費。



圖 8 東豐纖維企業股份有限公司路竹廠區碳排現況分析

- (3) 廢料再生燃料：極研究如何將廢料轉化為可再生能源，以降低對傳統能源的需求，同時實現資源的可持續再利用，這不僅有助於環境保護，還減少了廢料處理的成本。
- (4) 自動化和標準化：本公司利用自動化裝置和標準化製程參數來實現生產過程的穩定性和高效性，同時減少了資源浪費。
- (5) 碳盤查和供應鏈碳足跡評估：紡織業應建立完整的碳盤查系統，收集直接和間接的排放資訊，並瞭解供應鏈中的碳足跡，這有助於評估整個生產過程的碳排放，制定相應的減排策略。

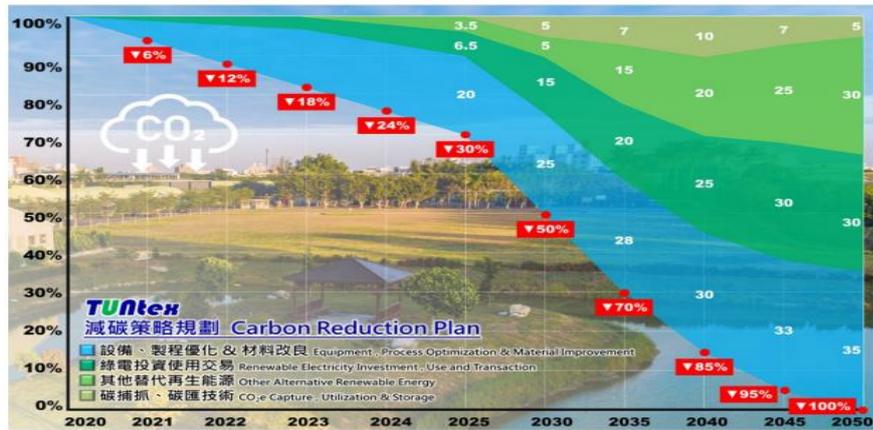


圖 9 本公司減碳策略規劃示意圖

(6) 太陽能發電系統的應用：本公司已經完成整廠太陽能光電板綠電的安裝，大幅減少對傳統化石能源的依賴，同時降低碳排放。



圖 10 本公司太陽能發電量計算示意圖

(7) 推動低碳化轉型：透過即時動態碳盤查和分析深入瞭解其碳足跡，制定減排目標，並推動生產過程的低碳化轉型。



圖 11 紡織業碳管理整合應用平台循環示意圖

### 三、紡織業智能化生產、循環經濟和淨零排放管理系統注意事項

#### 與常見缺失

隨著全球對可持續發展與環保的重視日益增加，紡織業作為資源消耗和環境污染的重點行業，亟需推動智能化生產、循環經濟和淨零排放的管理系統。這不僅能夠提升企業競爭力，還能有效減少對環境的影響，然而，在實施這些系統時，企業需要注意一些重要事項，並警惕常見的缺失，茲敘述如下：

#### 1. 紡織業智能化生產的注意事項與常見缺失

##### 注意事項

- (1) 技術整合與兼容性：目前智能化設備和現有系統之間的整合往往需要克服技術兼容性問題，舊型的紡織設備通常缺乏與現代通訊協定或自動化裝置的相容性，導致設備之間的資料交換困難；因此，引入中間軟體或協定轉換設備以實現新舊系統之間的溝通，此類工具能夠幫助數據在不同系統間流通，並實現設備間的同步運作。
- (2) 數據安全與隱私：智能化生產需要大量的數據收集和網絡連接，這使數據洩露和網絡攻擊的風險增大；因此建立健全的數據安全策略，如加密技術、防火牆、身份驗證機制，以及定期的安全評估，確保生產數據的機密性和完整性便成為智能化生產的重要關鍵之一。
- (3) 員工培訓與技能提升：智能化技術的應用需要員工擁有一定的技術能力，許多員工對新技術的適應可能存在困難；所以，企業應投入培訓資源，針對智能設備操作和數據分析的技能進行培訓，提高員工對新技術的接受度和操作效率。
- (4) 實時監控與預警系統：沒有即時監控的系統可能導致生產過程中的異常未能及時處理，從而增加損失和停機時間；本公司乃利用物聯網（IoT）技術建立實時監控系統，透過感測器和數據分析平台，實時檢測設備狀態和生產數據，及時發送預警，從而進行快速反應和故障排除。

##### 常見缺失

- (1) 缺乏整體規劃：很多企業在推動智能化生產時，往往只專注於個別技術的引入，而忽視了生產過程的整體規劃和流程優化，這會導致生產效率低下和資源浪費。

- (2) 數據利用不足：雖然許多企業已經建立了數據收集系統，但在數據分析與應用上卻缺乏有效的策略，未能充分挖掘數據的潛在價值。

## 2. 紡織業循環經濟的注意事項與常見缺失

### 注意事項

- (1) 原材料的可持續性：優先使用可再生資源和可回收材料，減少對有限資源的依賴，降低生產對環境的負面影響；可循序漸進的選擇生物基材料、回收塑料等作為原料，並注重供應鏈的可追溯性，確保原材料來源的環保性和合法性。
- (2) 產品設計的生態友好性：在產品設計時，從生命周期角度考慮生產、使用、回收等階段，以減少環境足跡；一般建議採用可拆解設計、模塊化結構等，讓產品在廢棄時能夠輕鬆拆解並進行再利用，避免材料的浪費。
- (3) 廢物管理與資源回收：建立有效的廢物管理體系，通過減少廢物的產生量和提高資源回收效率來延長資源的使用壽命；可設置分類回收機制和建設專業的回收中心，以確保材料能被有效地重新投入生產。
- (4) 消費者教育與參與：提升公眾對循環經濟的認識，並鼓勵消費者在購買和使用產品時選擇可持續選項；積極推廣環保標籤制度、舉辦宣傳活動，讓消費者了解如何正確回收和處理廢棄產品，從而參與到循環經濟的推動中。

### 常見缺失

- (1) 缺乏循環思維：許多紡織相關企業仍然使用線性生產模式，重視短期利益而忽略資源的長期管理，這導致資源被浪費且難以再利用。
- (2) 回收流程不完善：許多回收系統設計不科學，回收管道不夠暢通，導致大量可再利用的材料未能進入循環過程，降低了循環經濟的整體效果

## 3. 紡織業淨零排放的注意事項與常見缺失

### 注意事項

- (1) 能源管理與效率提升：紡織業可通過引入節能型設備，如高效能的假撚機、染色機、織布機等，來降低能源消耗，同時，制定具體的能耗減少計劃，設立能效目標，並定期評估和優化生產流程中的能源使用。這些措施能夠顯著減少能源浪費，提高整體生產效率。

- (2) 使用可再生能源：紡織廠可以採用太陽能板發電等可再生能源裝置，作為廠區內的一部分電力來源，這樣不僅可以減少對傳統化石燃料的依賴，還能有效降低二氧化碳排放，達到更高的環保標準。此外，企業可與當地可再生能源供應商合作，確保能源供應的穩定性。
- (3) 排放監測與報告：建立精確的排放監測系統，可以幫助企業即時追蹤各個生產階段的碳排放數據，並定期生成報告，這些數據不僅可以用來檢視現有的減排措施是否有效，也能提供依據來進一步調整策略，從而確保淨零排放的目標能夠逐步達成。
- (4) 與利益相關者的合作：企業應積極與供應鏈中的各方（包括原材料供應商、物流合作夥伴、客戶及政府機構）進行合作，共同推動可持續發展，這可能包括選用低碳原料、優化運輸方案、參與政府的節能減碳計劃等，從而促進整體供應鏈的綠色化。

#### 常見缺失

- (1) 缺乏長期規劃：許多紡織企業在推動淨零排放的過程中，常會忽視長期目標和具體路徑的制定，往往僅關注於短期的節能措施，如暫時性減少生產能耗等，導致這些措施難以產生持續的影響。缺乏明確的長期策略會影響企業在減排路線上的整體效果。
- (2) 監測數據不準確：排放監測系統的精確度對於有效管理碳排放至關重要，然而，部分紡織相關企業的監測設備較為落後，導致排放數據的準確性不足，數據不精確會導致減排措施無法針對實際排放情況進行調整，從而影響減排計劃的效果，為此，企業應投資於先進的監測技術，並定期校準設備，確保數據的可靠性。

## 四、結論

紡織業在推進智能化生產、循環經濟和淨零排放的過程中，面臨許多挑戰與機會。智能化生產可通過物聯網技術、數據分析和自動化設備，大幅提升生產效率和產品質量，然而，企業在技術整合時需克服舊設備兼容性問題，並加強員工的技術培訓，以確保新技術的有效運用；本公司在推動紡織業智能化生產、循環經濟和淨零排放管理方面，始終秉持著追求創新、提高生產效率及實現可持續發展的目標，我們充分利用物聯網（IoT）技術，將感測器、智能設備與自動化系統無縫整合，構建了雲端實時生產資訊管理系統。該系統不僅能即時監控生產狀態、提供預警功能，還能對生產過程中的

異常情況進行快速反應和修正，有效提升生產良率和設備使用壽命。這些技術措施使我們能夠精確地掌握生產中的每個環節，從而大幅度提高管理效能。

推動循環經濟方面，紡織企業需優先選擇可再生資源和生態友好的產品設計，並建立高效的廢物管理和回收系統，這些措施有助於減少資源浪費和降低環境影響，同時增強企業的市場競爭力，然而，許多企業在實施循環經濟時，往往缺乏長期規劃，導致回收流程效率不高；本公司致力於減少資源消耗、提高材料利用率，我們開發了紡織廢水回收再利用技術，通過多階段的過濾和生物處理，有效地控制廢水中的污染物，達到再利用的標準，減少對環境的影響，此外，我們在產品設計階段就考慮材料的再生和回收可能性，努力提升產品的生態友好性，確保資源在生產和消費後能得到循環再利用。這不僅降低了生產過程中的環境負擔，也讓我們在市場上更具競爭優勢。

實現淨零排放是紡織業可持續發展的重要目標，企業應積極採用可再生能源，如太陽能 and 風能，並建立精確的排放監測系統，以確保碳排放符合標準。與供應鏈各方的合作，也能有效推動整體碳足跡的減少，然而，缺乏準確的監測數據和明確的長期策略，是實現淨零排放過程中常見的問題；我們積極採用可再生能源，如太陽能光伏系統和風能發電裝置，以減少對傳統化石燃料的依賴，我們建立了精確的排放監測系統，定期進行碳排放數據的分析和報告，並根據這些數據制定有效的減排策略，我們也注重與供應鏈上的合作夥伴攜手合作，共同推動上下游產業的低碳轉型，確保整個生產鏈條的可持續發展。這些措施有助於我們在全球淨零排放目標的推動中，占據了有利的市場地位。

紡織業在智能化生產、循環經濟和淨零排放方面擁有巨大的潛力，但也需要克服技術、管理和數據準確性等方面的挑戰，通過制定清晰的長期規劃、加強技術應用和促進利益相關者的合作，紡織業可以實現更高效、可持續的發展目標，為全球環保趨勢做出積極貢獻；儘管我們在推動這些目標的過程中，仍面臨著技術整合、長期規劃和數據準確性等挑戰，但我們相信，只要堅持以創新技術和科學管理為基礎，積極響應市場和消費者對可持續發展的需求，我們將能夠持續提高生產效率、降低環境負擔，並在淨零排放和循環經濟領域樹立行業標杆，我們將繼續投入資源，致力於成為全球紡織業中綠色技術的領導者，為客戶和社會創造更多可持續的價值。

## 五、參考文獻

1. 洪志銘，循環經濟與綠色經濟促成經濟轉型，經濟前瞻，108年5月。
2. 黎瑀蓉，應用卷積神經網路於辨識製程異常樣式之研究-以紡織紗線製程為例，中華民國品質學會第54屆年會暨2018國際品質管理研討會，109年11月。
3. 莊雅茹，水處理回收技術-以紡織染整廢水處理為例，工業技術研究院，111年6月。
4. 郭子平，從碳足跡：溫室氣體排放量盤查建立綠色產品管理制度～以S公司產品型碳足跡為例，博碩士論文，112年4月。



# 醫療用複合材質點滴軟袋之循環經濟可行性探討

周卓群\*、簡淑美\*\*

## 摘要

依據 2023 年行政院環境部統計資料顯示，全國醫療事業廢棄物申報量約為約為 13 萬公噸，有害事業廢棄物約為 4.2 萬公噸；世界衛生組織(World Health Organization, WHO)調查研究，生物醫療廢棄物(或稱感染性廢棄物)約佔醫院有害事業廢棄物總量的 10~15%，根據此公開數據可以大膽推估平均全國每天約產生 0.42~0.63 萬噸之生物醫療廢棄物。

近年來，政府對於醫療或照護機構提倡循環經濟之理念，將部立醫院及公立醫院列入優先輔導對象，要求並鼓勵提高醫療廢棄物再利用率。根據環保部線上申報資料顯示，國內醫療廢棄物再利用率約 21%，換言之，大量醫療廢棄物送往焚化處理後再掩埋，而焚化有衍生戴奧辛及爐渣等二次污染之疑慮。目前國內醫療廢棄物回收再利用流程主要以有價標售方式進行，首先由合法處理廠商清運及分類，進而轉送至合法再利用機構進行清洗、破碎，製成塑膠粒，最終送至塑膠工廠熔融、塑化成次級塑膠產品，儘管這一系列的再利用過程能夠將部分醫療廢棄物轉化為可用資源，減少對環境資源的消耗，但整個回收再利用的過程卻存在著嚴峻的挑戰。

本團隊與北部兩所醫療院所合作，將使用過的點滴袋做為改造原料，回收後透過專利技術製成再生塑膠粒及廢針筒儲存盒，真正落實醫療用複合材質點滴軟袋之循環經濟理念，再生廢針筒儲存盒同時回到於原醫療單位使用，整個回收再利用流程均有第三方驗證確保其溯源性並已取得專利證書，本研究創新作法經成本效益評估可行，目前已完成產品碳足跡盤查，未來將進一步申請環保標章及規劃環境足跡盤查。

【關鍵詞】循環經濟、複合材質點滴軟袋、醫療事業廢棄物

\*廣鉉企業股份有限公司 經理

\*\*泰興工程顧問股份有限公司 資深工程師

## 一、前言

近年來，政府積極推廣循環經濟理念，將部立醫院及公立醫院列為優先輔導對象，並要求和鼓勵這些機構提高醫療廢棄物的再利用率。然而，對於使用占比最高的點滴軟袋，大多數仍委託合格清除公司進行焚化處理，點滴軟袋的回收再利用卻少有深入研究，更不用談將其再製回供醫療院所使用；這主要是因為這些軟袋的材料組成複雜，通常由不同類型的塑料和其他添加劑混合而成。

在回收再製過程中，熔點和物化特性的掌握技術上具有高度挑戰性，因此業界對於複合材質點滴軟袋的回收再製多持保守態度，這也導致台灣在醫療廢棄物回收再利用方面的成效相較於其他產業效果不彰。

塑料產品無處不在，並且在日常生活中往往是不可或缺的，但塑料的生產和處理可能會對環境造成損害。尤其是，丟棄的塑料如果不經過焚化銷毀處理，採用固化掩埋會在人類生活的環境中累積。據估計，如果不改善醫療廢棄物管理，到 2050 年，約有 12000 萬噸塑料廢棄物將累積在掩埋場或自然環境中(Geyer et al., 2017)。在歐洲塑料的生產和焚化每年約產生約 4 億噸二氧化碳(European Commission, 2018)，而複合材質的廢棄物會污染水質、土壤以及海洋，對海洋生態系統造成損害(Wagner et al., 2014)；Barnes et al., 2009)。

隨著 COVID-19 疫情帶來的醫療廢塑料急劇增加(Prata et al., 2020)，以再利用創新技術的提升和再製回供醫療院所使用的循環經濟模式需求變得愈加迫切(Patricio Silva et al., 2020)。醫療廢塑料的管理是一個公認的困難領域，擁有多種分離和回收方法，且對最佳策略沒有共識(Rigamonti et al., 2014)。此外，雖然廢物管理是一個全球性問題，但不同國家在可持續實踐的發展和採用方面進展不一，各城市和地區根據特定需求實施相應策略(ElSaid and Aghezzaf, 2018)。歐盟(EU)被視為在這方面的全球領導者，其通過廢物框架指令(Directive 2008/98/EC)引入的廢物層級導致了成員國的填埋場轉向和廢物管理的改善。2015 年的歐洲循環經濟計劃隨後重申了廢物層級，強調重用、回收和持續減少填埋(Marin et al., 2018)。廢物層級描述了各種廢物管理方法的相對環境危害，以促進實施對環境影響較小的策略。該層級包含五個級別，從預防作為最高優先事項位於金字塔的頂端，接下來依次是重用準備、回收和資源回收。處置則被置於金字塔的最低層，應該僅作為最後的選擇(DEFRA, 2011)。在循環經濟中，廢

物和污染被設計排除在系統之外，產品和材料則通過共享、重用、修理和回收保持使用時間盡可能長，自然系統則獲得恢復和再生的空間(European Parliament, 2016)。

因此，若以歐盟循環經濟原則為出發點，減少廢複合材質點滴軟袋焚化後可能對環境污染的影響，可從優化傳統處理步驟做為起手式；本團隊將使用過的廢棄點滴袋做為改造原料，回收後透過專利技術製成再生塑膠粒及廢針筒儲存盒，整個回收再利用流程均有第三方驗證確保其溯源性並已取得專利證書。本研究創新作法經成本效益評估可行，除申請產品碳足跡，並已將再製的廢針筒儲存盒提供給北部兩間醫療院所先行使用，真正落實循環經濟之初衷理念，進而達到醫療院所永續發展之目標。

## 二、文獻回顧

### (一)醫療事業廢棄物之定義

醫療廢棄物認定、分類主要依據「有害事業廢醫療廢棄物認定標準」，屬於此標準所定義的有害事業廢棄物，都須符合高要求的處理標準。醫療廢棄物之包裝、貯存、清除、中間處理及最終處置等實務運作，以「事業廢棄物貯存清除處理方式及設施標準」為主，細分類則整理如表 1。醫療單位生產之有害事業廢棄物處理依規定設有冷藏設施的箱型車載運，送到專業處理廠以熱處理法(焚化、熱解、熔融、熔煉)或採用化學處理(滅菌法或藥劑消毒)；一般事業廢物，則可併入垃圾焚化廠或以衛生掩埋處理。

表 1 醫療事業廢棄物之細目分類

分類	次分類	細目
一般事業廢棄物	員工生活垃圾	辦公室廢棄物、訪客或非傳染病患者之生活廢棄物等
	一般性醫療廢棄物	乾淨點滴瓶、非有害藥用玻璃瓶(藥水容器)、未沾血且未與針頭相連的輸液導管、不含有害藥劑的食鹽水或葡萄糖軟袋
	人體或動物用藥	非基因毒性廢棄物之廢藥品(含藥水、藥膏、藥錠)及殘留此類藥品之容器
	巨大垃圾	廢家俱、廢棄病床、輪椅、點滴架
	營建廢棄物	房屋修繕廢棄物
	再利用	廢紙、廢玻璃(瓶、屑、平板玻璃、滅菌處理後之廢玻璃)廢金屬(藥罐、機械器具及滅菌處理後之廢金

		屬)、廢塑膠(瓶、罐、杯)、廚餘(不含隔離病房產生者)、廢石膏模(屑、塊、粉)、經滅菌處理後之廢尖銳器具(注射針頭、與針頭相連之注射筒及輸液導管、針灸針、手術縫合針、手術刀、載玻片、蓋玻片或破裂之玻璃器皿)、廢攝影膠片(卷)(包括 X 光膠片及以 PET 為片基材質的廢攝影膠片)、廢顯／定影液、經滅菌處理後之廢牙冠、廢食用油、醫療用廢塑膠(點滴輸注液容器、輸液導管、廢藥水桶)
	其它	破損汰換之床單被服
有害事業廢棄物	生物醫療廢棄物	基因毒性廢棄物
		廢尖銳棄物
		感染性廢棄物
	溶出毒性事業廢棄物	廢顯定影液、含水銀(汞)之廢棄溫度計及血壓計、牙科銀粉(汞齊)
	毒性事業廢棄物	福馬林、環氧乙烷(含殘留環氧乙烷之氣體罐)、三氯乙烯、四氯乙烯
	反應性事業廢棄物	鈉、硝化甘油
	腐蝕性事業廢棄物	氫離子濃度指數(pH 值)大於等於 12.5(如氫氧化鈉溶液)或小於等於 2.0(硫酸、鹽酸)的廢液
	易燃性事業廢棄物	藥用酒精、有機溶劑、二甲苯、甲醇、丙酮、異丙醇、乙醚
混合五金廢料	含油脂之充膠廢電線電纜、廢通信器材、廢棄醫療儀器(屬電路版／含零件者)	

資料來源：本研究整理

## (二)可再利用醫療事業廢棄物

醫療機構所產生的「一般事業廢棄物」種類繁多，其中可再利用事業廢棄物當中的醫療用廢塑膠，相關之器材屬無感染疑慮，是可直接回收再利用的，無須經過滅菌程序；此項類別若能落實回收再利用，一者減少垃圾製造量，二者減少焚燒後釋放之空氣污染，三者資源再回收可循環利用，減少資源耗損。

依「醫療事業廢棄物再利用管理辦法」，所列醫療事業廢棄物種類及管理方式，進行再利用，其分類分為六大項目：

1. 廢石膏模(屑、塊、粉)：指事業產生之廢石膏模(屑、塊、粉)。
2. 廢尖銳器具：事業產生，並且經由滅菌處理後之廢尖銳器具。
3. 廢攝影膠片(卷)：事業產生之廢攝影膠片(卷)。
4. 廢顯／定影液：事業產生之廢顯／定影液。
5. 廢牙冠：事業產生，並且經由滅菌處理後之廢牙冠。
6. 醫療用廢塑膠：事業產生之醫療用廢塑膠，包含：點滴輸注液容器、輸液導管、廢針筒、廢藥水桶四項。

本研究範疇為第 6 項種類「醫療用廢塑膠」，以點滴輸注液容器(含點滴瓶)為主要回收再製之項目，如圖 1 所示。



圖 1 醫療用廢塑膠種類

### (三)醫療用複合材質點滴軟袋之循環經濟

落實醫療用複合材質點滴軟袋的循環經濟，需綜合檢視幾個領域的研究，包括複合材質的特性與管理處理方式、複合材質的回收再利用與應用挑戰、循環經濟理論及生命週期評估等面向，方能從更全面的視角，了解醫療用複合材質點滴軟袋之循環經濟的現狀、挑戰和潛在解決方案：

#### 1. 複合材質的特性與管理處理方式

##### (1) 複合材料的特性：

醫療用點滴袋主要由多層塑料材質，如聚氯乙稀 (Polyvinylchloride, PVC)、乙稀(Ethylene Vinyl Acetate, EVA)、聚丙烯 (Polypropylene, PP)等構成，目的是達到防滲透、耐化學腐蝕及保持無菌的要求。Bagherzadeh 和 Heidari(2016)研究指出多層複合材料在醫療產品外包裝，結構層次的選擇對防止氣體進入醫療產品包裝至關重要，有助於保持產品的無菌性和穩定性，這對於醫療用點滴袋等需要長期保存且保持無菌的產品非常重要；近年來也有研究針對複合塑料的組成、使用和最終處置，特別是化學添加劑如何影響材料的性能及回收 (Al-Akra, M. H., et al., 2018; Hahladakis, J. N., et al., 2020)。

## (2) 複合材料的特性的管理處理方式：

根據世界衛生組織(World Health Organization, WHO)的研究報告，醫療廢棄物的處理一直是全球環保領域的重要議題。醫療設施中使用過的點滴袋需要經過特別的處理和處置，以確保安全和避免污染。大多數文獻的研究重點集中於焚燒處理及其環境影響，因為焚燒是主要的處理方式之一，用於消滅受污染的材料，避免病原體擴散並降低公共衛生風險(WHO, 2018)。

## 2. 複合材質的回收再利用與應用挑戰

### (1) 複合材質回收再利用：

在複合材料回收的研究中，熱裂解和化學回收技術被視為有效解決方案。化學回收能將複合材料分解為原始單體便於再製新產品，解決多層材料分離困難(Meys et al., 2020)。Hopewell et al. (2009)強調熱裂解能將複合材料轉化為石油原料，既可用於再生塑料，也能進行能源回收，能處理高複雜的複合材料。Al-Salem et al. (2009)進一步提出，熱解和催化裂解能將複合材料轉化為其他原料，從而減少對原物料之需求，還能降低焚化及掩埋後造成的環境衝擊(Ragaert et al., 2017)。

### (2) 複合材質應用挑戰：

複合塑料在醫療產品中具備出色的功能性，主要是因為多層結構保持產品的無菌性和穩定性。Zhou 和 Xie (2018)研究指出聚合物複合材料在高溫應用中易變形或分解，一般均會添加高熔點填料，以提高複合材料的熱穩定性。Bagherzadeh 和 Heidari (2016)指出，複合材料多層結構中不同層次的熔點差異可能導致加工過程中的不一致性，特別是在醫療產品包裝中需要保持高耐熱性和穩定性。Chung (2017)則指出，在航空航天和醫療設備等應用中，不同材料層的熔點不一致可能導致結構失效，因此開發具有更高熔點且具一致性的複合材料至關重要。這些研究顯示，熔點問題是影響複合材料應用的重要因素，改進材料組成和結構設計是解決此問題的關鍵，這也意謂者複合材料在熔點的差異會導致融熔處理不易，因此熔點是再回收利用的關鍵因素之一。

### (3) 循環經濟理論的應用

Tudor et al. (2020) 將循環經濟原則導入醫療廢棄物管理，針對醫療器材的設計優化和可分解之材料選擇，旨在減少資源浪費並強調優化醫療器材的設計以及選擇可分解材料的重要性，以提高資源的再利用率。這一觀點與 Diaz-Elsayed et al. (2021) 的研究一致，後者指出開

發具生物相容性且可回收的醫療器材材料是推動醫療行業可持續發展的重要途徑。這不僅能提高材料的回收利用率，還能顯著減少醫療廢棄物的產生。

### 3. 永續性評估

近年來，已有許多研究使用生命週期評估(Life Cycle Assessment, LCA)來評估醫療用品對環境的衝擊。Beylot et al. (2022)研究計算醫療塑料廢棄物在不同化學處理方式其碳足跡總量，並發現回收系統的引入可顯著減少碳排放。該研究也進一步說明改進的回收方法不僅降低了碳排放，還能提高資源的再利用效率。此外，Rincón et al. (2021)分析了不同醫療耗材處置對環境的影響，透過 LCA 可識別出環境熱點，有助於預測和降低整體環境負荷，能提供永續性材料選購的決策方案。

## 三、方法

### (一)優化醫療用複合材質點滴軟袋廢棄物處理流程

傳統的醫療廢棄物塑膠回收流程中，回收商自醫院清運後，須將 PE、PVC、PP 等材質進行分類、破碎並作為次級材料出售，而複合材質的塑膠則多以焚化處理為主。本研究則改變傳統方式，針對回收的醫療用複合材質點滴軟袋，進行瓶蓋與點滴袋的分離處理，使用過的點滴袋經回收後製成再生塑粒，並通過專利技術加工成廢針筒儲存盒。此創新方法不僅實現了廢棄物的再利用，還有效減少了對非生物性資源的消耗，再生產品能回饋於醫療或護理機構使用，本研究設計之廢針筒儲存盒可重複使用，形成穩定的循環鏈，促進資源回收並減輕環境負擔，傳統廢塑料處理流程與本研究優化塑膠處理流程圖如圖 2 所示。

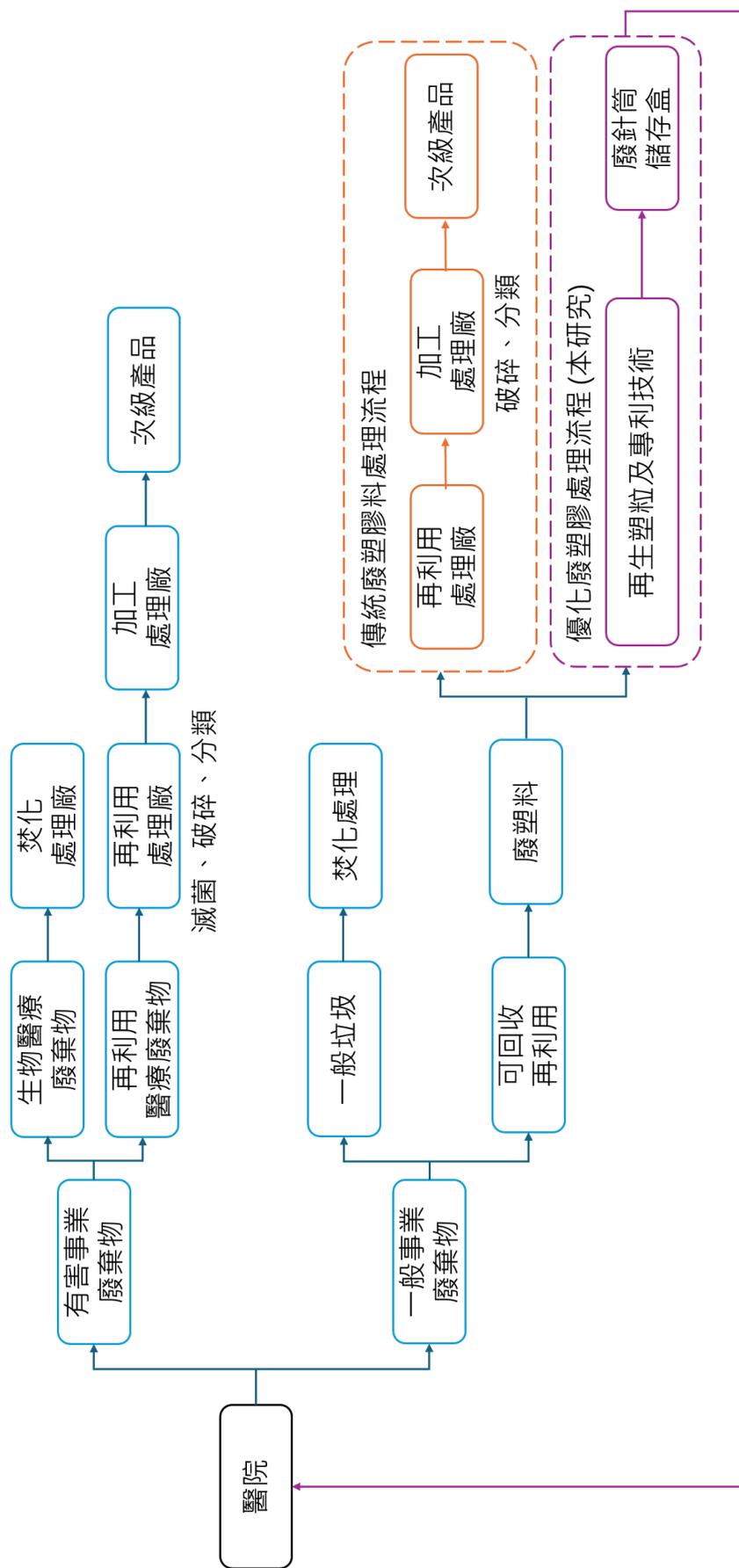


圖 2 醫療廢塑料處理流程

## (二)廢針筒儲存盒製造

廢針筒儲存盒的製造流程包括以下主要步驟，以確保符合 ISO 及相關法規標準：

### 1. 醫療用複合材質點滴軟袋處理

複合材質點滴軟袋回收，並將其分類處理並進行破碎、清洗、粉碎、浮除、脫水...等的程序(如圖 3 所示)，接著將處理好的塑膠半成品，透過製粒機在高溫高壓的條件下，讓塑膠呈半熔融狀態後擠出，並造成粒子狀，將塑膠粒加熱至適當溫度，使其熔融均勻，再進行後續注塑成型，熔融塑膠進入模具並冷卻固化，形成儲存盒的基本結構，模具需設計精確，確保貯存盒尺寸、厚度和內部支撐結構的穩定性。

### 2. 第三方驗證及碳足跡盤查

為能證實本研究研製之廢針筒儲存盒落實循環經濟之理念，整個回收再利用流程均有第三方驗證確保其溯源性。本團隊研製之廢針筒儲存盒通過 ISO14021 產品環保性驗證和 ISO23907-1 防止割傷-要求和測試方法，並已取得相關專利申請；同時也完成 ISO14067 碳足跡之盤查與評估，即將向第三方提出確信之申請。



資料來源：本研究繪製

圖 3 醫療用複合材質點滴軟袋處理

## 四、結果與討論

本團隊優化廢料處流程提出回收之醫療用複合材質點滴軟袋，經由專利技術製成二次塑膠原料，在注塑成形為廢針筒儲存盒，通過 ISO 14021 和 ISO 23907 認證，這意味著該儲存盒不僅在環保與安全性上達標，還能落實循環經濟方面做出貢獻。以下是本團隊針對醫療用複合材質點滴軟袋如何透過標準要求來實現循環經濟的具體說明。

### 1. 可回收材料之使用

依據 ISO 14021 的要求，醫療廢針筒儲存盒可以選用可回收和再生材料，如再生塑膠或其他環保材料，減少對新原材料的需求。本團隊與北部醫療院所合作，將使用過的廢點滴袋做為改造原料，回收後製成再生塑膠粒，透過專利技術製成廢針筒儲存盒，真正落實醫療用複合材質點滴軟袋之循環經濟理念，再生產品同時回饋於醫療或照護單位使用。

### 2. 非生物性資源消耗之減少

財團法人塑膠工業技術發展中心，針對本團隊研製之廢針筒儲存盒，分別於 2023/04/26 及 2023/06/19 依照塑膠再生料檢驗程序(PIB-QP-12)，並參照 ISO 14021 標準，執行包含生產管理、場內取樣等相關檢查作業已確認其追溯性與符合性，其再生料含量為 100%消費後再生聚丙烯(PP)/聚乙烯(PE)，此創新方法不僅實現了廢棄物的再利用，還有效減少了對非生物性資源的消耗，盡可能降低對環境資源之使用。

### 3. 防刺穿和防漏設計之安全考量

ISO 23907 的要求，儲存盒應具備防刺穿和防漏功能，以保護使用者和處理人員的安全，防止廢棄針筒意外刺穿或洩漏。本團隊研製之廢針頭儲存盒已通過 ISO 23907 之防刺穿、防漏要求，已能確保多次或長期使用的安全性，耐用性高的儲存盒能減少醫療廢棄物的總量，降低環境負擔，並提高資源利用效率，亦是循環經濟中的重要一環。

### 4. 產品碳足跡之盤查

本團隊所研製的集針盒已完成產品碳足跡盤查，範疇說明及盤查結果如表 2 所示。為進行比較，我們廣泛蒐集了相關產品的碳足跡數據，然而發現無論國際或本土研究在此方面的數據揭露仍然有限，使得進行比較頗具挑戰，甚為遺憾。希望藉由此次數據的公開，能為醫療用複合材質點滴袋的再利用提供更多的研究結果及應用基準。

表 2 廢針頭儲存盒產品碳足跡之盤查

產品之生命週期評估範疇				搖籃到大門(原料取得到製造階段)			
產品碳足跡生命週期溫室氣體排放量							
生命週期階段	原料	製造	配銷	使用	廢棄	總和	功能單位排放
搖籃到大門	1.587	0.265	N/A	N/A	N/A	1.85	1.85
單位	(Kg_CO <sub>2</sub> e)						

## 五、結論

本研究首創運用廢棄醫療用複合材質點滴軟袋作為創新環保材料，透過熔融與塑化技術製成次級塑膠產品 - 廢針頭儲存盒。該產品已經過 ISO 驗證、取得專利技術，並完成碳足跡盤查。本研究之集針盒已與北部兩家醫院合作使用，證實其具備循環再利用的潛力。即便產品最終無法再使用，仍可透過優化的循環鏈達到真正的永續利用，有效減輕環境負擔。

醫療廢棄物的清除和處理流程受嚴格法規約束，因此多數醫院將有價廢棄物進行標售處理。本研究由醫院、業界(處理加工廠)、產界(顧問單位)三方共同參與，採用優化的循環再利用流程，並經過 ISO 安全性測試的認證和碳足跡本土數據建立，搭建醫院與業界之間的橋樑，切實落實循環經濟與永續發展的目標。

## 六、參考文獻

1. Geyer, R., Jambeck, J.R. and Law, K.L., 2017. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*. 3 (7), e1700782.
2. European Commission, 2018. A European Strategy for Plastics in a Circular Economy.
3. Wagner, M., Scherer, C., Alvarez-Munoz, D., Brennholt, N., Bourrain, X., Buchinger, S., Fries, E., Grosbois, C., Klasmeier, J., Marti, T., Rodriguez-Mozaz, S., Urbatzka, R., Vethaak, A.D., Winther-Nielsen, M., and Reifferscheid, G., 2014. Microplastics in freshwater ecosystems: what we

- know and what we need to know. *Environmental Sciences Europe*. 26 (1), 12.
4. Barnes, D.K., Galgani, F., Thompson, R.C., Barlaz, M., 2009. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Philosophical Transactions: Biological Sciences*. 364 (1526), 1985e1998.
  5. Prata, J.C., Silva, A.L.P., Walker, T.R., Duarte, A.C., Rocha-Santos, T., 2020. COVID-19 pandemic repercussions on the use and management of plastics. *Environmental Science & Technology*. 54 (13), 7760e7765.
  6. Patrício Silva, A.L., Prata, J.C., Walker, T.R., Campos, D., Duarte, A.C., Soares, A.M.V.M., Barcelo, D., Rocha-Santos, T., 2020. Rethinking and optimising plastic waste management under COVID-19 pandemic: policy solutions based on redesign and reduction of single-use plastics and personal protective equipment. *Science of The Total Environment*. 742, 140565.
  7. Rigamonti, L., Grosso, M., Møller, J., Martinez Sanchez, V., Magnani, S., Christensen, T.H., 2014. Environmental evaluation of plastic waste management scenarios. *Resources, Conservation and Recycling*. 85, 42e53.
  8. ElSaid, S., Aghezzaf, E.-H., 2018. A progress indicator-based assessment guide for integrated municipal solid-waste management systems. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 20 (2), 850e863.
  9. Marin, G., Nicolli, F., Zoboli, R., 2018. Catching-up in waste management Evidence from the EU. *Journal of Environmental Planning and Management*. 61 (11), 1861e1882.
  10. DEFRA, 2011. *Guidance on Applying the Waste Hierarchy*. London. Affairs, D. f. E. F. a. R.. Available at: [https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/69403/pb13530-waste-hierarchy-guidance.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/69403/pb13530-waste-hierarchy-guidance.pdf).
  11. European Parliament, 2016. *Closing the Loop: New Circular Economy Package*.
  12. Bagherzadeh, R., & Heidari, M. (2016). Influence of multilayer structure on the gas permeability of food and medical packaging. *Packaging technology and science*, 29(3), 115-122.

13. Al-Akra, M. H., Al-Jamal, O., & Obaidat, M. S. (2018). Mechanical and antimicrobial properties of polypropylene/ethylene-vinyl acetate copolymer composites for medical applications. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, 106(8), 2737-2745.
14. Hahladakis, J. N., Velis, C. A., Weber, R., Iacovidou, E., & Purnell, P. (2020). An overview of chemical additives present in plastics: Migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling. *Journal of Hazardous Materials*, 383, 121-174.
15. Zhou, L., & Xie, X. (2018). High-temperature stability of polymer-based composite materials: Challenges and opportunities. *Polymer Composites*, 39(10), 3787-3801.
16. Chung, D. D. L. (2017). Polymer-matrix composites for high-temperature structural applications. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 113, 1-27.
17. World Health Organization. (2018). Safe management of wastes from health-care activities: A summary. World Health Organization.
18. Meys, R., Frick, F., Westhues, S., Sternberg, A., Klankermayer, J., & Bardow, A. (2020). Towards sustainable chemical recycling of waste plastics with liquid-phase catalytic hydrocracking. *Angewandte Chemie International Edition*, 59(37), 15402-15410.
19. Hopewell, J., Dvorak, R., & Kosior, E. (2009). Plastics recycling: Challenges and opportunities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 2115-2126.
20. Al-Salem, S. M., Lettieri, P., & Baeyens, J. (2009). Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review. *Waste Management*, 29(10), 2625-2643.
21. Ragaert, K., Delva, L., & Van Geem, K. (2017). Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste Management*, 69, 24-58.
22. Tudor, T., Văduva, S., Dinescu, A., & Dima, M. (2020). Implementing circular economy principles in healthcare waste management. *Waste Management*, 106, 222–234.
23. Diaz-Elsayed, N., Montalvo, M., & Macias, E. (2021). Biocompatible and recyclable materials for medical devices: A path towards sustainable healthcare. *Journal of Cleaner Production*, 315, 128166.

24. Kumar, A., Ghosh, A., & Purohit, H. (2022). Circular economy in healthcare: A comprehensive review. *Sustainable Production and Consumption*, 30, 143–157.
25. Beylot, A., Sulpice, P., & Lemaire, C. (2022). Carbon footprint of medical plastic waste: Assessing the impact of different treatment options. *Waste Management*, 142, 247–257.
26. Rincón, L., Torres, F., & Ibarra, D. (2021). Life cycle assessment of medical devices: Identifying environmental hotspots. *Environmental Science & Technology*, 55(11), 7473–7483.
27. Clemente, M., Manfredi, S., & Cattaneo, S. (2023). Integrating life cycle assessment into medical device design: Impacts on sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 331, 129876.

# 低碳排綠色自動指派系統開發與實務應用之研究

徐肇聰\*

## 摘 要

2050年淨零碳排(2050 Net Zero)是全球最為重視新的環境保護課題，其中減少能源耗用進而降低溫室氣體的排放，則是達成此目標之關鍵作法。而品牌商則是在有害物質管理要求之外，新增低碳生產的產品銷售壁壘。進而要求負責產品製造的廠商檢附報告佐證，通過海關審查順利入境銷售。而這樣產品有害物質報告(Product Hazardous Substance Report, PHSR)，在製造上現況上是以人工指派進行，存在作業能耗大造成高 CO<sub>2</sub> 排放問題。此指派過程在作業研究領域上是屬於困難且無法在多項次時間內解決的 NP-Hard 問題。研究以開發低碳排綠色自動指派系統，解決製造商面臨品牌商需求上的問題為目標。在求解上提出以啟發式演算法進行，先將影響指派的條件以層級分析法進行量化；接著以混合分治基因演算法進行求解。並以真實資料進行模擬驗證，提出的新指派方法較實際人工指派方法在減少總能耗與減少 CO<sub>2</sub> 排放上有更好表現。而在實務應用與成效分析上均優於人工指派，並同時展現負責任的消費與生產(SDG 12)與氣候行動(SDG 13)的永續發展目標的達成。

【關鍵詞】綠色產品有害物質報告、層級分析法、混合分治基因演算法、溫室氣體排放、永續發展目標

---

\*明泰科技股份有限公司 資深經理

## 一、前言

環境永續是近年來各國家發展的重要政策，尤其是基於人類健康之有害物質管制與永續能源保護的低能耗製造。制訂有害物質標準對進口產品進行把關，確保消費者購買到的產品中不含有會造成中毒、癌症等危害人類健康的物質存在。同時要求製造商在產品製造過程需有效降低能源的使用進而減少 CO<sub>2</sub> 排放，其方式是遵照碳排放標準(如 ISO14064-1)進行盤查與執行減碳。基於符合各國所重視進口產品需符合有害物質管制與能源節省目的，製造商在製造過程需遵守 RoHS、REACH 標準並採取相關的管制措施，製造出符合有害物質規範產品。同時掌握過程的能源耗用與 CO<sub>2</sub> 排放並採取相關的節能措施，達成低能源耗用產品製造目標。然而過去 PHSR 製作所需使用到綠色平台伺服器進行材質符合性資料處理、XRF 物質測試儀進行有害物質檢測、以及使用個人電腦製作報告存在大量電力耗用，人員並無關注並進行作業改善。在實務作業上每份報告平均要花 30 個工作天製作，故突顯出此問題的重要。而其重要性是在於無法及時且於低能耗完成 PHSR 報告時，可能影響到品牌商無法被允許產品入境銷售，直接影響製造商營運，同時製造商也無法呼應聯合國永續發展目標，進而影響商譽。

現況上在 OEM/ODM 製造商都面臨此一情況，而大多數製造商內部主管對於此需求，都是以個人經驗進行此工作分配，基本就是哪位工程師有空就直覺進行分配。但 PHSR 會因不同國家管制指令及標準的限制，而有不同的報告類型與低能源耗用報告要求，而存在製作上的困難度。有鑑於此，本研究試圖去探討 PHSR 與工程師指派組合最佳化，協助製造商以低能源耗用且有效率地完成品牌商的產品銷售需求。此指派問題在作業研究領域上是被定義為 NP-Hard 困難問題，因此規劃使用啟發式演算法進行求解，同時開發自動指派系統取代人工作業。過程包含第一階段以層級分析法來量化設備使用能耗影響條件(包含綠色平台伺服器、XRF 物質測試儀、個人電腦)與工程師能力(作業品質)；第二階段以基因演算法為基礎，並考量求解的收斂速度以及品質，加入分治法提高獲得最佳解的機會。依此混合分治基因演算法(Mix Divide and Conquer Genetic Algorithm, MDnCGA)解決最佳化指派問題，而且是在最小化作業能耗下完成此作業。在驗證演算法成效後，進一步開發低碳排綠色自動指派系統，並且確認執行結果與多指標成效。整體的研究背景如圖 1 所示，將針對步驟 1 與步驟 3 進行設備能耗研究，最後再將步驟 3 進行 e 化作業系統開發。

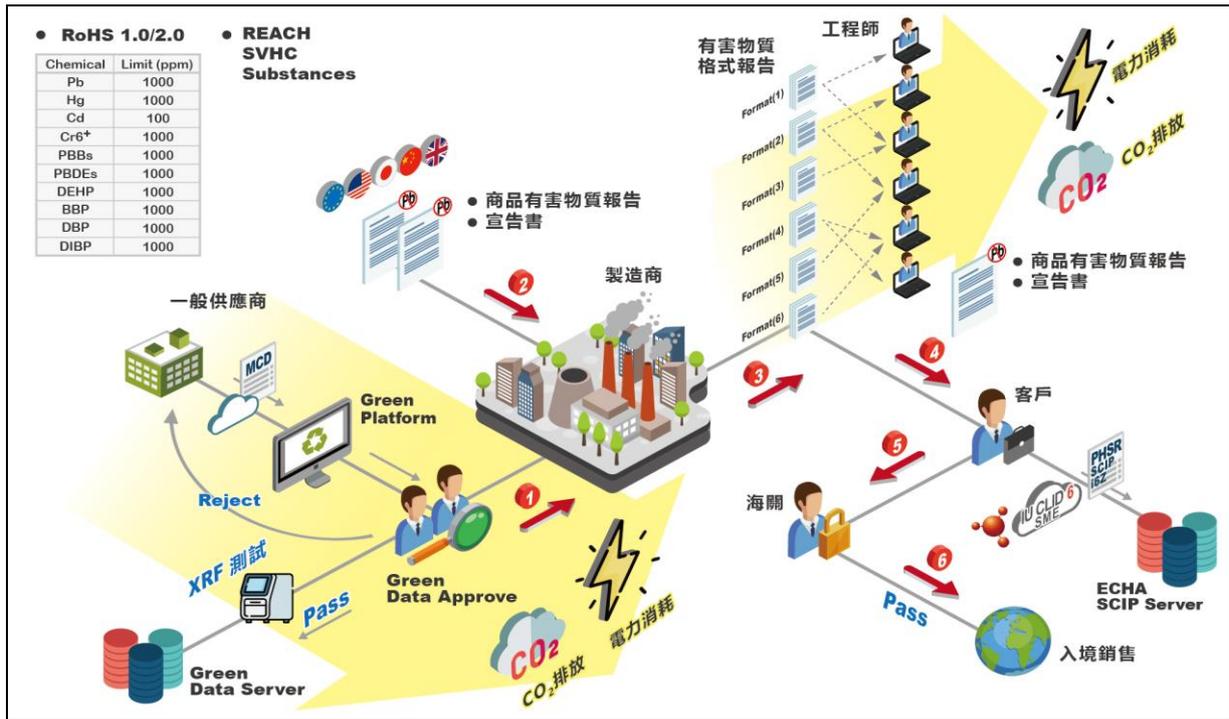


圖 1 綠色產品有害物質報告製作過程圖

## 二、自動指派系統開發

低碳排綠色自動指派系統將包括設計、開發、驗證的過程，在驗證演算法成效後才進行系統化，相關的步驟如下說明：

### 1. 指派條件評估

首先將綠色平台伺服器、XRF 物質測試儀、個人電腦、作業品質透過層級分析法予以量化，包含下列三個步驟：

- (1) 建立條件成對比較矩陣：將品牌商 PHSR 報告需求與工程師條件，建立起影響結果的條件評估矩陣。
- (2) 計算評估條件相對權重分數：於指派評估矩陣由負責主管依據層級分析法基本量表給予個別權重，最後計算相對權重分數的幾何平均值。
- (3) 獲得指派條件準則量化決策值：依相對權重的幾何平均值再進行計算，最後獲得 PHSR 需求與工程師指派條件準則量化決策值。

每份品牌商因應出貨需求的 PHSR 與每位負責製作的工程師，其權重與指派作業如圖 2 所示。

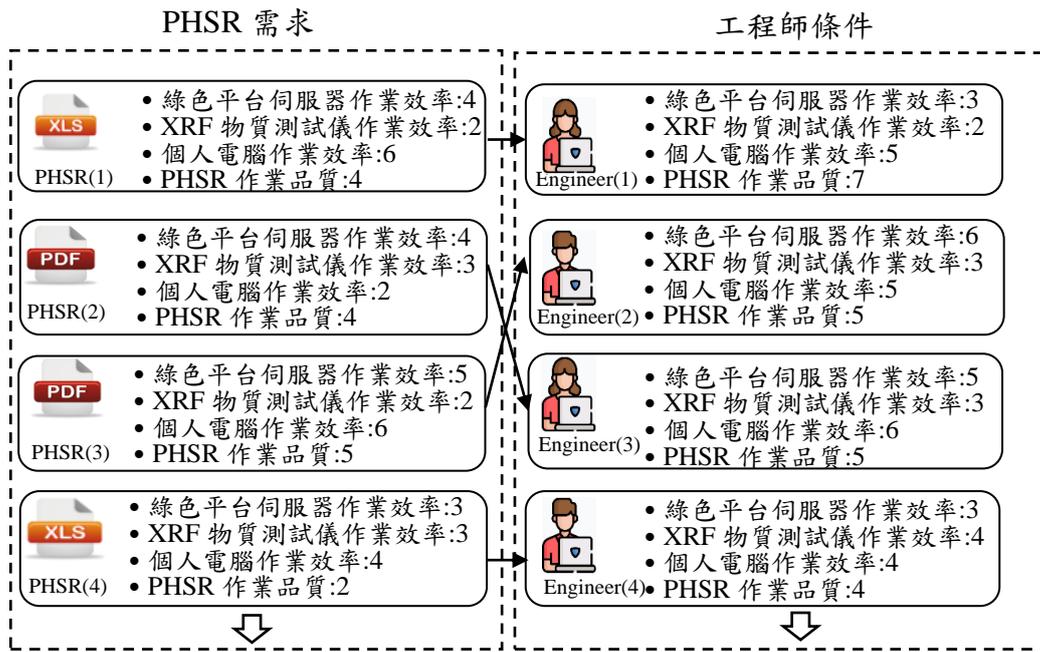


圖 2 指派作業圖

## 2. 演算法設計

將所獲得 PHSR 需求與工程師指派條件準則量化決策值，以下列數學式進行染色體適應度值計算。以最小化綠色平台伺服器  $S_{ij}^k$ 、XRF 物質測試儀  $R_{ij}^k$ 、個人電腦的總能耗  $C_{ij}^k$  乘以作業品質條件  $Q_{ij}^k$  造成能耗之影響常數值的總和為目標(公式 1)。所使用的每個設備總能耗計算，是以每件 PHSR 製作標準作業工時  $WH$ ，加上作業效率層級分析法的權重差值(包括綠色平台伺服器  $SE^k$  與  $SE_{ij}$  的差值、XRF 物質測試儀  $RE^k$  與  $RE_{ij}$  的差值、電腦作業  $CE^k$  與  $CE_{ij}$  的差值)，乘以轉換為標準作業工時之影響常數值  $EC$ ，再乘以該設備單位能耗  $EP$  計算獲得(公式 2~公式 4)。而作業品質差值，是以 PHSR 與工程師之作業品質層級分析法的權重最大差值( $PQ_{ij}$  與  $PQ^k$  的差值)，除以 2 倍的最大差值並加上常數 1 進行計算(公式 5)。最後對每件 PHSR 是否有一位工程師負責製作進行指派，有指派為  $X_{ij}^k = 1$  反之為  $X_{ij}^k = 0$ (公式 6)。

$$\text{Minimize } \sum_{i=1, \dots, N} \sum_{j=1, \dots, M_{ij}} \sum_{k=1, \dots, O} X_{ij}^k \cdot \left[ (S_{ij}^k + R_{ij}^k + C_{ij}^k) \times Q_{ij}^k \right] \quad (1)$$

Where

$$S_{ij}^k = \sum_{i=1, \dots, N} \sum_{j=1, \dots, M_{ij}} \sum_{k=1, \dots, O} \left\{ WH + [(SE^k - SE_{ij}) \times EC] \right\} \times EP \quad (2)$$

$$R_{ij}^k = \sum_{i=1, \dots, N} \sum_{j=1, \dots, M_{ij}} \sum_{k=1, \dots, O} \left\{ WH + [(RE^k - RE_{ij}) \times EC] \right\} \times EP \quad (3)$$

$$C_{ij}^k = \sum_{i=1, \dots, N} \sum_{j=1, \dots, M_{ij}} \sum_{k=1, \dots, O} \left\{ WH + [(CE^k - CE_{ij}) \times EC] \right\} \times EP \quad (4)$$

$$Q_{ij}^k = \sum_{i=1, \dots, N} \sum_{j=1, \dots, M_{ij}} \sum_{k=1, \dots, O} \left[ 1 + \left( \frac{PQ_{ij} - PQ^k}{16} \right) \right] \quad (5)$$

$$\sum_i \sum_j \sum_k X_{ij}^k = \{0, 1\}, \forall i \in N, j \in M_{ij}, K \in O \quad (6)$$

### 3. 系統開發與驗證

低碳排綠色自動指派系統是以 C++ 程式進行撰寫，並且以個人電腦進行求解。研究所提出的混合分治基因演算法 (MDnCGA)，為確認其開發的成效，分別與三種交配方式的基因演算法 (GA1、GA2、GA3) 以及菁英策略基因演算法 (ESGA) 進行演算結果的比較。從表 1 的模擬統計結果可以看出，在小規模的實際需求資料下驗證，MDnCGA 演算法較其他四種演算法更具成效，故採用為本研究之低碳排綠色自動指派系統的主要演算法。

表 1 演算結果比較表

Algorithm	Best Fitness	Average Fitness	Worst Fitness	Average Duration	StdDev
MDnCGA	101,524.8	101,619.5	101,634.3	621.5	1.87
GA1	105,393.1	105,476.2	105,842.2	269.4	102
GA2	105,093.5	105,298.7	105,468.2	267.2	123
GA3	101,892.5	102,139.8	102,498.8	653.1	75.8
ESGA	102,781.2	102,838.8	103,118.9	1,147.6	82.4

且由於是以減少總能耗與減少 CO<sub>2</sub> 排放為目標，進一步統計新的指派方法(MDnCGA 指派)與現有指派方法(人工指派)於小規模品牌商 PHSR 需求下，在綠色平台伺服器作業、XRF 物質測試儀作業、個人電腦作業的能耗結果。從表 2 的統計結果可以看出 MDnCGA 指派方法設備總能耗為 123,438.3 kWh 而人工指派為 148,917.2kWh，有著 25,478.9 kWh 的差值，表示在相同設備使用下採取新指派方式是能夠有效降低能耗的。

表 2 設備能耗估算統計表

指派方法	作業名稱	設備名稱	作業能耗 (kWh)	總能耗 (Total kWh)
MDnCGA 指派	綠色平台伺服器作業( $S_{ij}^k$ )	HPE ProLiant DL380 Gen10 伺服器	77,671.5	123,438.3
	XRF 物質測試儀作業( $R_{ij}^k$ )	Hitachi EA1000VX XRF Analyzer	41,088.6	
	個人電腦作業( $C_{ij}^k$ )	Aspire XC Personal Computer	4,678.2	
人工 指派	綠色平台伺服器作業( $S_{ij}^k$ )	HPE ProLiant DL380 Gen10 伺服器	87,164.2	148,917.2
	XRF 物質測試儀作業( $R_{ij}^k$ )	Hitachi EA1000VX XRF Analyzer	56,054.1	
	個人電腦作業( $C_{ij}^k$ )	Aspire XC Personal Computer	5,698.9	

同時將作業總能耗進行 CO<sub>2</sub> 排放計算(公式 7)，首先將所使用設備能耗加總，再乘以 112 年度台電公佈電力係數<sup>[9]</sup>，獲得總作業 CO<sub>2</sub> 排放量。從表 3 的計算結果可以看出 MDnCGA 指派方法 CO<sub>2</sub> 排放量為 60,978.5 KgCO<sub>2</sub>e 而人工指派為 73,565.1 KgCO<sub>2</sub>e 有著 12,586.6 KgCO<sub>2</sub>e 的差值，表示在相同設備使用下採取新指派方式是能夠有效降低 CO<sub>2</sub> 排放量的新方法。

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in M_{ij}} \sum_{k \in O} GH_g = \left[ (S_{ij}^k + R_{ij}^k + C_{ij}^k) \times EF_{KgCO_2e} \right] \quad (7)$$

表 3 CO<sub>2</sub> 排放量估算統計表

作業名稱	總能耗 (Total kWh)	年度電力係數 ( $EF_{KgCO_2e}$ )	總作業 CO <sub>2</sub> 排放量 (KgCO <sub>2</sub> e)
MDnCGA 指派	123,438.3	0.494	60,978.5
人工指派	148,917.2	0.494	73,565.1

### 三、實務應用

研究進一步以 MDnCGA 演算法所建立的 e 化低碳排綠色自動指派系統 (圖 3)，進行實務應用步驟說明並確認輸出的結果，以及從客戶角度分析導入系統的作業改善成效。

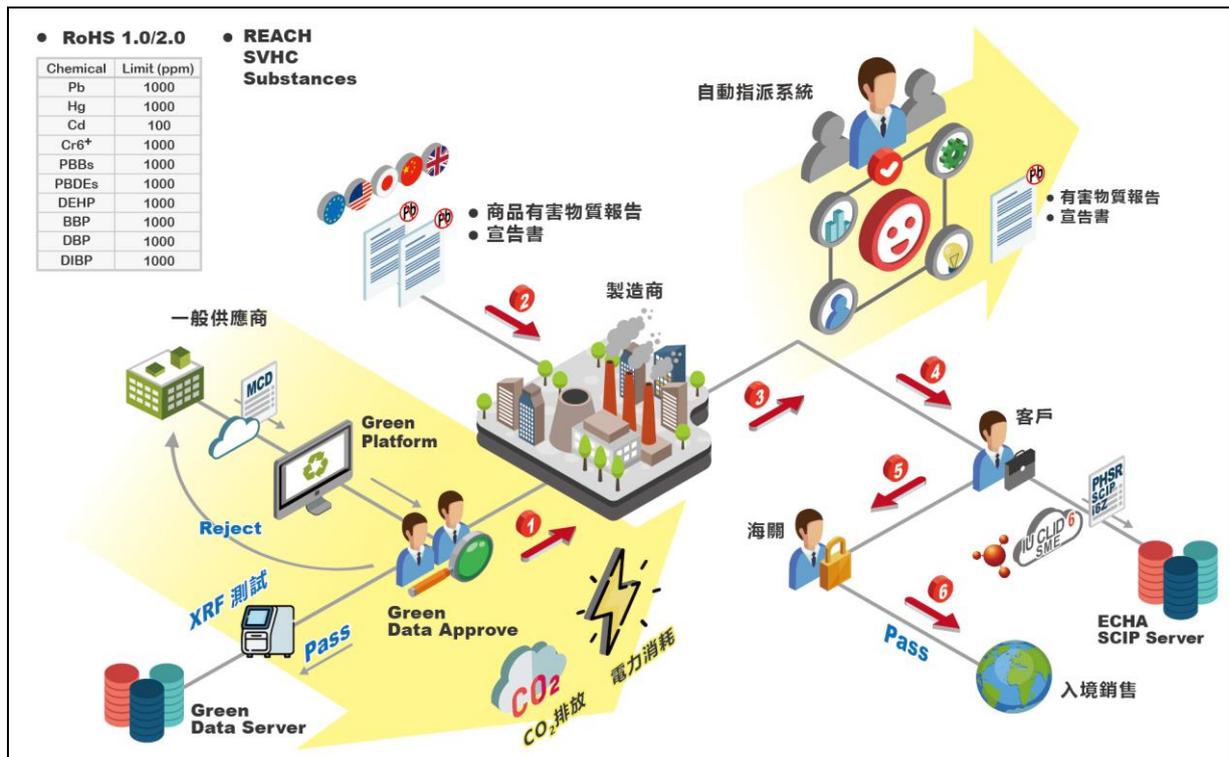


圖 3 低碳排綠色自動指派系統製作步驟圖

#### 1. 應用公司背景

應用公司為 ODM/OEM 網通產品的製造商，公司成立於 2003 年位於台灣新竹科學園區，總資本額共 NT\$ 54 億，全球員工人數合計約有 4,000 人，提供網路通訊產品的設計、製造、服務。公司在台灣、中國與越南合計有四個生產製造據點，負責 LAN/MAN 網路產品、Wireless/Broadband 無線寬頻網路產品、Digital Multimedia 數位多媒體產品，客戶群來自歐洲、美洲、日本、英國的品牌商公司。除了現有的產品線之外，也積極朝著更高傳輸速度進行升級，掌握新一波的網通相關產品的趨勢。

## 2.系統步驟說明

整體低碳排綠色自動指派系統，總共合計 5 個作業步驟如圖 3 所示。首先作業 1 是與品牌商負責窗口確認產品料號、報告種類、PHSR 件數、報告需求日期等需求資料；作業 2 是以層級分析法進行 PHSR 需求以及負責報告製作工程師條件的評估，由公司負責單位主管進行評估獲得量化的決策值，用來決定報告需求由哪位工程師負責製作的優先順序；作業 3 是以研究提出的 MDnCGA 演算法進行最佳化 PHSR 需求與工程師指派的搜尋求解，用以獲得最佳化指派的組合；作業 4 是演算法適用於可能的 PHSR 需求的規模(包括 1~2000 小規模、2001~4000 中規模、4001~6000 大規模)進行資料分析，會這樣進行系統開發是考量台灣製造商的屬性，都是少量多樣的訂單需求居多，且隨著需求的可能變化，故開發具彈性且適用性高的系統進行使用；作業 5 是完成報告需求由哪位工程師負責製作的指派結果輸出(表 4)，最後存入資料庫，提供實際作業上依循使用，讓產品經理能夠掌握報告預計完成日期，回覆給品牌商客戶並確認產品量產時程。

表 4 指派報告範例表

PHSR 報告類型	產品料號	負責人員	預計作業時數	預計完成日
產品有害物質標準報告	AYS360031.A1	工程師(2)	161 hrs	2024/12/30
FMD Report	BYS360031.A1	工程師(1)	173 hrs	2024/12/30
chemSHERPA Report	CYS360031.B2	工程師(3)	172 hrs	2024/11/30
JGPSSI	DYT570013.B1	工程師(5)	145 hrs	2024/11/26
ECF Report	EYS360034.A1	工程師(4)	160 hrs	2024/12/11
SCIP Report	FYT350012.A2	工程師(6)	115 hrs	2024/11/30

而低碳排綠色自動指派系統在公司內部作業管理上，是與產品生命週期管理 (Product Lifecycle Management, PLM) 系統進行整合，讓該作業是結合在產品開發的周期之內進行，成為一項標準化作業項目。整理自動指派程式作業流程，如圖 4 所示。

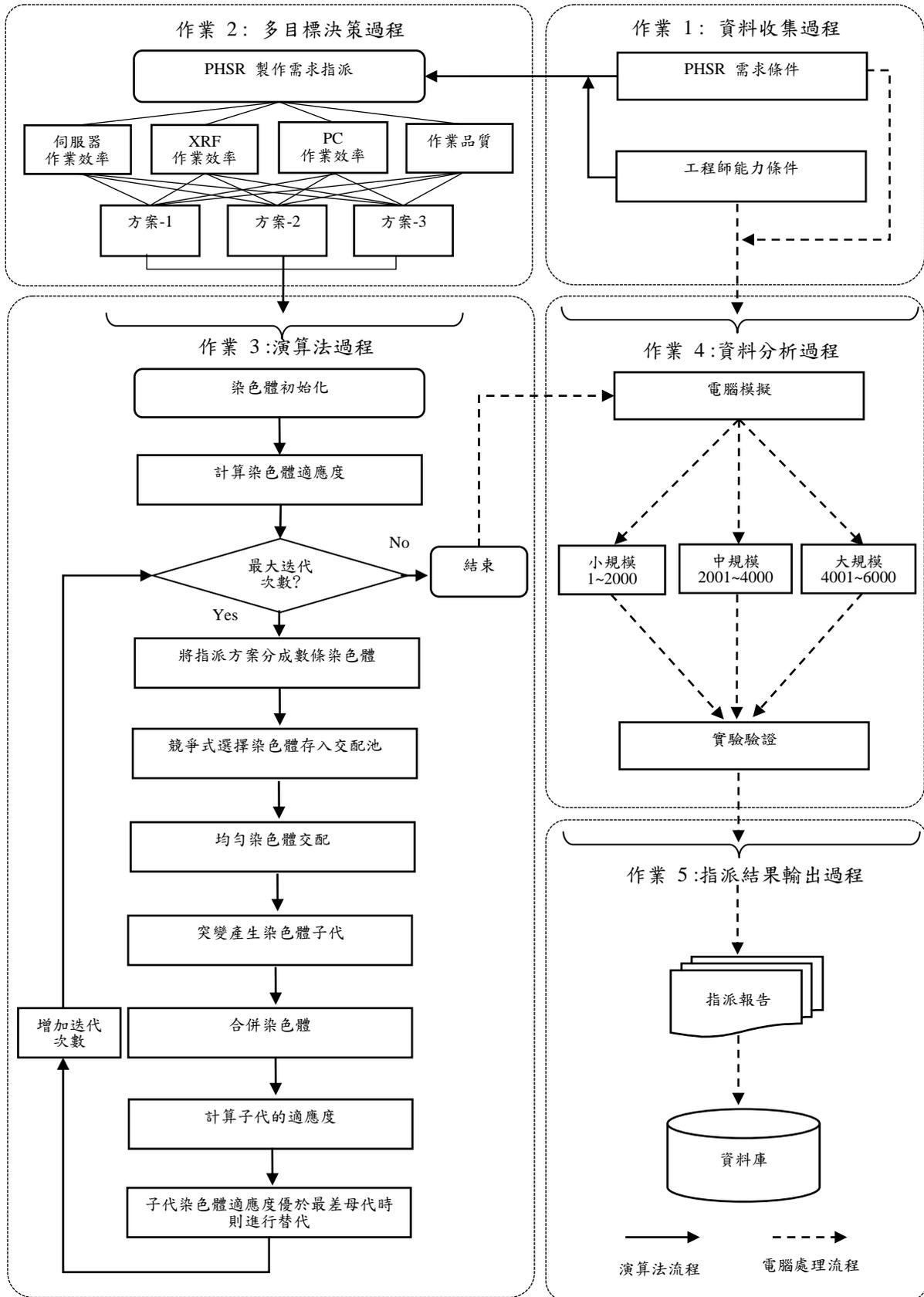


圖 4 自動指派程式作業流程圖

在低碳排綠色自動指派系統的資料庫，存有每一份 PHSR 的總指派結果(表 5)，有助於進行影響條件的決策值與綠色平台伺服器、XRF 物質測試儀、個人電腦的單位能耗以及指派的結果，有助於分析與決策。

表 5 總指派結果表

PHSR pcs	Server Efficiency	XRF Efficiency	PC Efficiency	Processing Quality	Engineer No.	$S_{ij}^k$	$R_{ij}^k$	$C_{ij}^k$	$Q_{ij}^k$	Matching Points
Format (1)	2	6	3	9	2	35.03	16.9	2.24	1.125	60.94125
Format (2)	6	2	8	1	1	37.29	21.45	2.1	0.5	30.42
Format (3)	2	6	6	1	1	41.81	18.85	2.24	0.5	31.45
Format (4)	6	2	3	4	3	35.03	23.4	2.03	0.75	45.345
Format (5)	5	5	3	9	2	31.64	17.55	2.24	1.125	57.85875
Format (6)	7	5	1	3	4	33.9	21.45	2.17	0.6875	39.545

而分析與決策的目的，是因為 PHSR 種類依照出貨的國家或是品牌商要求而有所不同(圖 5)，作業時間長短不同。再加上很多時候因應提前完成、工程師離職、急單需求、法規改版增加管制物質等影響，而需要在影響發生重新指派工作任務，故建置系統在實務上確實有幫助。能夠協助製造商有效解決現況上面臨的問題之外，對於品牌商展現製造工廠的系統化程度與彈性的應變能力，並降低因為人工指派作業不具效益的疏失，並且也能增進客戶信心與提高供應商評鑑分數。

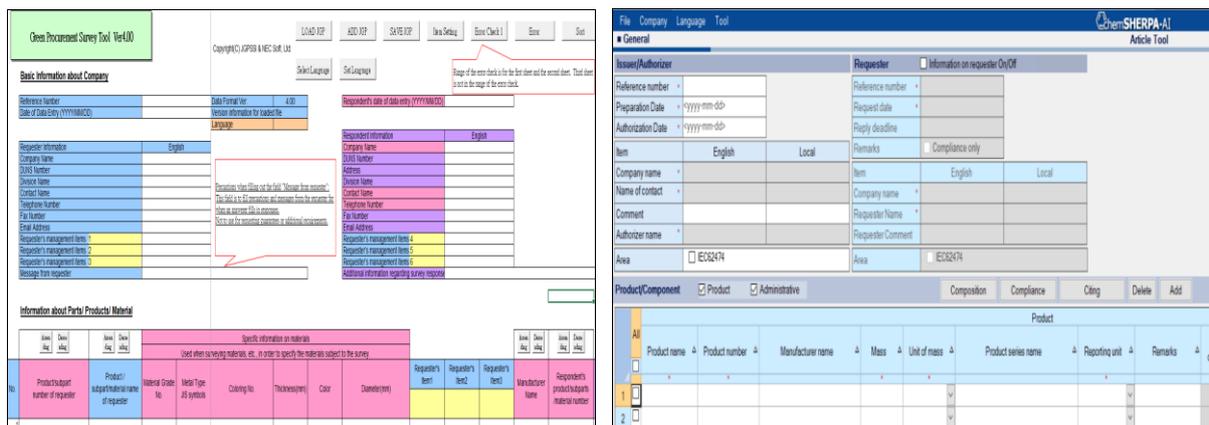


圖 5 PHSR 種類示意圖

## 四、成效分析

而從過往相關的探究可以發現，全球環境暖化原因有一主因是日趨嚴重的溫室效應。而在新的 2050 年淨零碳排(2050 Net Zero)環境保護課題之下，製造商則需要因應品牌商的要求公司或組織在溫室氣體(Greenhouse Gas, GHG)排放的量化與移除申報(圖 6)。依循國際標準化組織發佈 ISO 14064-1 標準進行盤查，並於內部展開減量措施。

Site ID (if applicable)	Site Name	Country or Region	Climate Province (if applicable)
Example ABC	Example Site ABC	China	Asia

圖 6 GHG 申報示意圖

故對於低碳排綠色自動指派系統的成效分析，首先可以呼應消費與生產 (SDG 12) 的聯合國永續發展目標，所使用的原物料所製造出來的產品，是符合 RoHS Directive 管制的有害物質，並且遵守歐洲化學品管理局公佈的關於化學品註冊、評估、許可和限制法案 (REACH Regulation)，對於產品中高關注物質 (SVHC) 進行申報，讓產品順利入境銷售。而另一個成效是呼應氣候行動 (SDG 13) 的永續發展目標，因為 2023 年 4 月 18 日歐洲議會立法通過碳邊境調整機制 (CBAM)，對於特定進口產品規劃開始徵收貿易關稅。臺灣也於 2023 年成立碳權交易所，創造企業減碳誘因，進一步促進低碳生產技術及創新產業發展。因為這些法規遵守與減碳的趨勢是品牌商對於產品銷售上是需要遵守新的壁壘。

同時分析導入低碳排綠色自動指派系統在客戶滿意的角度上，達成的結果與相關成效。收集指派分數、減碳成效，人員工作負荷管理、法規符合、報告達交率與客戶滿意的構面資料並參考相關研究進行績效指標衡量。提出以公式 8. 進行達成率  $ME_s$  計算 ( $AC$  為實際達成件數,  $SR$  為需求件數)，資料來源是收集來自客戶季度評分 (Quarterly Business Review, QBR) 或是每月的檢討會議資料，經個別計算後完成指標績效統計表 (表 6) 以及繪製出 MDnCGA 指派與人工指派的雷達圖 (圖 7)。

$$ME_s = \sum_{s=1, \dots, n} \left( \frac{|AC - SR|}{SR} \right) \times 100\% \quad (8)$$

表 6 指標績效統計表

指派方法	指派分數	減碳成效	人員工作負荷管理	法規符合	報告達交率	客戶滿意度
MDnCGA 指派	92%	56%	96%	100%	99%	95%
人工指派	52%	32%	31%	100%	70%	75%

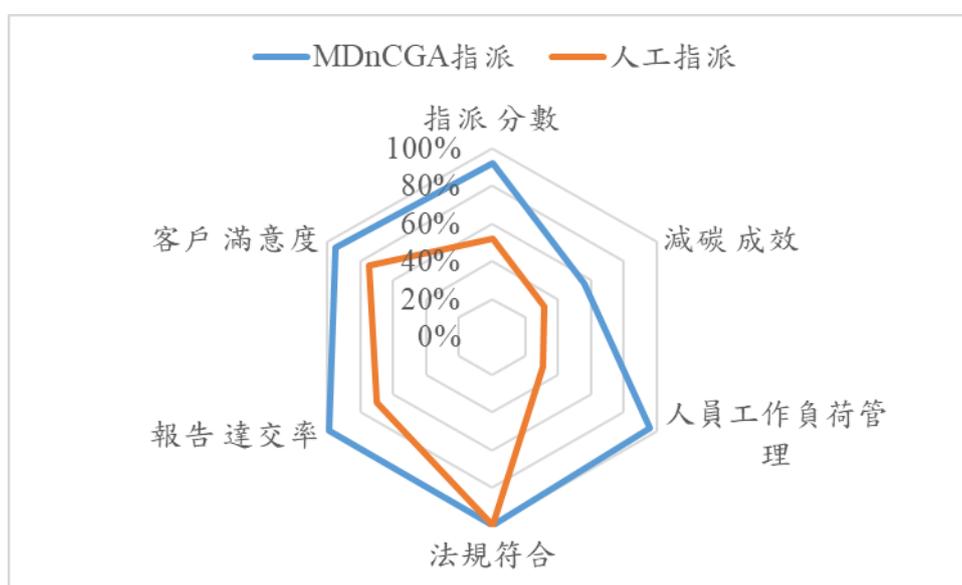


圖 7 指派方式成效比較雷達圖

顯示出 MDnCGA 指派在 6 個指標績效上都較原有人工指派有較佳表現，提升了客戶滿意度與作業上改善的成果。該工作在實務上需要長時間培訓與人員養成，進行人員工作負荷分析有其必要性，也可降低離職率。而在綠色法規符合是最基本的項目，因為強制法規都無法符合的話是不能進行產品銷售的，而在日常作業下能夠進行減碳行動，則是於企業內部建立員工環保意識的良好的第一步，會較一開始就投入大量金額購置節能設備來的佳。開發建立低碳排綠色自動指派系統，更是製造商落實於聯合國永續發展目標 SDG 12 與 SDG 13 的達成，也是對品牌客戶展現競爭力的表現。

## 五、結論

為達成品牌商在銷售上所需遵守有害物質管制與能源節省的目標，研究對過往忽略的 PHSR 需求與工程師指派之最佳化能源耗用進行研究。提出以層級分析法與混合分治基因演算法二階段方式進行求解，獲得指派最佳解決方案。並進行低碳排綠色自動指派系統的開發，在實際導入使用後，確實讓產品經理能夠掌握報告預計完成日期，並回覆給品牌商客戶確認產品量產與出貨時程。而開發具彈性且適用性高的系統，則可因應製造商少量多樣不同規模的產品量產需要進行採用。這是對於在 ODM/OEM 代工有競爭力的台灣企業來說，落實 SDG 12 與 SDG 13 的聯合國永續發展目標最實際的作為，更是展現企業永續能力進而增加獲得新訂單的機會。

## 六、參考文獻

1. Liu X., Gu S., Yang S., Deng J., Xu J. Heavy metals in soil-vegetable system around E-waste site and the health risk assessment. *Science of the Total Environment* 2021;779 :146438.
2. Zhang T., Ruan J., Zhang B., Lu S., Gao C., Huang L., Bai X., Xie L., Gui M., Qiu R-l. Heavy metals in human urine, foods and drinking water from an e-waste dismantling area: Identification of exposure sources and metal-induced health risk. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 2019 ; 169 : 707-713.
3. Teng S. Y., Touš M., Leong W. D., How B. S., Lam H. L., Máša V. Recent advances on industrial data-driven energy savings: Digital twins and infrastructures. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2021;135:110208.
4. Alarcón M., Martínez-García F. M., Hijes F. C. G. d. L. Energy and maintenance management systems in the context of industry 4.0. Implementation in a real case. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2021 ; 142 : 110841.
5. Grifa R. A., Pozzoli G. Electro-medical devices: Environmental regulation on hazardous substances. *Microchemical Journal* 2019;148:568-572.

6. Moreno J., Ven D-J. V. d., Sampedro J., Gambhir A., Woods J., Gonzalez-Eguino M. Assessing synergies and trade-offs of diverging Paris-compliant mitigation strategies with long-term SDG objectives. *Global Environmental Change* 2023;78:102624.
7. Toussil G. K., Naghibzadeh M. A divide and conquer approach to deadline constrained costoptimization workflow scheduling for the cloud. *Cluster Computing* 2020;24:1711-1733.
8. Saaty T. L. What is the Analytic Hierarchy Process?. *Mathematical Models for Decision Support* 1988 ; 48 : 109-121.
9. Electricity Carbon Emission Factor from Ministry of Economic Affairs, at: [https://www.moeaea.gov.tw/ecw/populace/content/ContentDesc.aspx?menu\\_id=26391](https://www.moeaea.gov.tw/ecw/populace/content/ContentDesc.aspx?menu_id=26391) accessed in October., 2024.
10. Li J., Dong W., Oenema O., Chen T., Hu C., Yuand H., Zhao L. Irrigation reduces the negative effect of global warming on winter wheat yield and greenhouse gas intensity. *Science of the Total Environment* 2019 ; 646 : 290-299.
11. Manabe S. Role of greenhouse gas in climate change\*\*. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography* 2019 ; 71 : 1620078.
12. Liu D., Guo X., Xiao B. What causes growth of global greenhouse gas emissions? Evidence from 40 countries. *Science of the Total Environment* 2019 ; 661 : 750-766.
13. P., Yeganeh B., Abbasi M., Alipourmohajer S. Energy assessment and greenhouse gas predictions in the automotive manufacturing industries in Iran. *Sustainable Production and Consumption* 2021 ; 26 : 316-330.
14. Chen X., Xu X., Lu Z., Zhang W., Yang J., Hou Y., Wang X., Zhou S., Li Y., Wu L., Zhang F. Carbon footprint of a typical pomelo production region in China based on farm survey data. *Journal of Cleaner Production* 2020 ; 277 : 124041.
15. Perdana S., Vielle M. Carbon border adjustment mechanism in the transition to net-zero emissions: collective implementation and distributional impacts. *Environmental Economics and Policy Studies* 2023 ; 25 : 299-329.
16. Taiwan Carbon Solution Exchange at: <https://www.tcx.com.tw/en/index.html> accessed in October., 2024.

17. Yang M., Ji Z., Zhang L., Zhang A., Xia Y. A hybrid comprehensive performance evaluation approach of cutter holder for tunnel boring machine. *Advanced Engineering Informatics* 2022 ; 52 : 101546.
18. Peng W., Li Y., Fang Y., Wu Y., Li Q. Radar Chart for Estimation Performance Evaluation. *IEEE Access* 2019 ; 7 : 113880–113888.
19. Yanlan Yong, Zahoor Ahmed, Shaohui Wang, Husam Rjoub, Yuriy Bilan. Minerals, natural resources, government instability, and growing ecological challenges: Can we achieve SDGs 12 and 13?. *Resources Policy* ; 277 : 124041.
20. Kristina Mensah<sup>1</sup>, Christine Wieck, Bettina Rudloff. Sustainable food consumption and Sustainable Development Goal 12: Conceptual challenges for monitoring and implementation. *Sustainable Development* ; 32 : 1109-1119.



# 新世代廢轉能的生質能中心

古家宇\*、邱品嘉\*\*、鄭健龍\*\*\*、徐洪陞\*\*\*\*

## 摘 要

回顧過去垃圾處理政策的演變，民國 73 年核定「都市垃圾處理方案」，然在當時未分類的垃圾主要仍以掩埋處理為主，因掩埋土地有限的情況，民國 80 年在環保署(現環境部)的帶領下，確立「垃圾處理方案」中以焚化為主、掩埋為輔的主軸，並核定「臺灣地區垃圾資源回收(焚化)廠興建工程計畫」，為解決廢棄物處理問題，全國共興建並營運 24 座可回收電能的大型焚化廠。近年在 Energy from Waste 理念趨勢下，新世代廢轉能的生質能中心油然而生。

本中心為全國首座取得再生能源發電設備認證的熱處理設施，透過廢棄物前處理系統、高燃燒效率與熱回收鍋爐系統、煙氣餘熱回收等系統，使發電效率提升至 27.5%(全國 112 年度平均 18.3%)；此外亦具有環境友善之高效率廢氣處理系統，故氮氧化物、硫氧化物以及氯化氫氣等污染物較全國平均皆有顯著效益，進而減少部分溫室氣體排放。本中心為落實循環經濟理念，有效解決廢棄物與資源的浪費，並希望將廢棄物導向減量(Reduce)、再使用(Reuse)、回收(Recycle)之循環理念。

【關鍵詞】生質能中心、發電效率、再生能源發電設備

---

\*信鼎技術服務股份有限公司 操作組長

\*\*信鼎技術服務股份有限公司 操作副組長

\*\*\*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 技術經理

## 一、前言

廢棄物的處理處置一直是世界各國重視之環境問題之一，若無妥善處理可能衍生環境污染及病蟲害的問題。綜觀本國廢棄物處理從早期掩埋為主，隨著環保意識抬頭轉變以焚化處理減廢為方向，現今循環經濟蓬勃發展，廢棄物已不再視為廢棄物，而是一種可用之再生資源，因此整合各方先進技術的生質能中心，是邁向資源循環零廢棄目標的途徑之一。

## 二、廢棄物處理政策演變與焚化廠現況

### 1. 廢棄物處理政策演變

台灣家戶垃圾早期未實施垃圾分類且妥善處理觀念尚未普及，因此行政院於民國 73 年頒定「都市垃圾處理方案」，係以掩埋處理未分類之垃圾，不僅讓珍貴的土地資源使用受限，且有排放溫室氣體加劇環境變遷之議題，然而在環保意識抬頭且掩埋場趨近飽和情境下，於民國 80 年環保署(現環境部)確立了「垃圾處理方案」中以焚化為主、掩埋為輔的主軸，並於同年核定「臺灣地區垃圾資源回收(焚化)廠興建工程計畫」。然為紓困建設財政經費不足問題，於 85 年 3 月核定「鼓勵公民營機構興建營運垃圾焚化廠推動方案」，以擴大興設垃圾焚化廠解決廢棄物處理問題。

### 2. 焚化廠現況

在政府領頭主導並積極尋求國外先進技術，進而推動地方政府興建垃圾焚化廠以解決垃圾處理問題，當時全國共興建 26 座可回收電能的大型焚化廠，其中包含尚未啟用的雲林廠及 112 年重新整改啟用的台東廠(如表 1)，總計設計處理量(扣除雲林廠)達 24,950 噸/日。

表 1 全國焚化廠基本資訊

廠別	營運方式	運轉日	設計處理量 (噸/日)	爐數(組)	設計熱值 (kcal/kg)	發電機組裝置 容量(MWH)
基隆市廠	公有民營	95/3/27	600	2	2,400	15.8
臺北市北投廠	公有公營	88/5/26	1,800	4	2,400	45
臺北市木柵廠	公有公營	84/3/28	1,500	4	1,600	13.5
臺北市內湖廠	公有公營	81/1/16	900	3	1,350	6
新北市新店廠	公有民營	83/11/5	900	2	1,553	14.6
新北市樹林廠	公有民營	84/7/4	1,350	3	1,553	22.3
新北市八里廠	公有民營	90/7/17	1,350	3	2,305	35.771

廠別	營運方式	運轉日	設計處理量 (噸/日)	爐數(組)	設計熱值 (kcal/kg)	發電機組裝置 容量(MWH)
桃園市廠	民有民營(BOO)	90/10/9	1,350	2	2,300	35.1
宜蘭縣利澤廠	公有民營	95/4/7	600	2	2,300	14.7
新竹市廠	公有民營	90/2/16	900	2	2,300	23.72
苗栗縣廠	民有民營(BOT)	97/2/29	500	2	2,300	11.8
臺中市文山廠	公有民營	84/12/12	900	3	1,500	13
臺中市后里廠	公有民營	89/8/14	900	2	2,300	22.6
臺中市烏日廠	公有民營	93/9/6	900	2	2,300	22.6
彰化縣溪州廠	公有民營	90/1/18	900	2	2,300	22.6
嘉義市廠	公有民營	87/11/18	300	2	1,350	2.326
嘉義縣鹿草廠	公有民營	90/12/1	900	2	2,500	25
臺南市城西廠	公有民營	88/8/17	900	2	1,600	14.3
臺南市永康廠	公有民營	97/3/1	900	2	2,400	22.5
高雄市中區廠	公有公營	88/9/1	900	3	1,900	25.5
高雄市南區廠	公有公營	89/1/20	1,800	4	2,500	49
高雄市仁武廠	公有民營	89/12/1	1,350	3	2,300	36.5
高雄市岡山廠	公有民營	90/4/3	1,350	3	2,500	38
屏東縣崁頂廠	公有民營	90/12/23	900	2	2,200	22.5
臺東縣廠	公有民營	112/1/31	300	2	2,300	8.9

資料來源：環境部環境管理署 焚化廠營運資訊管理系統

因政府推動相關源頭減量與回收政策，部分焚化廠原先規劃處理廢棄物之性質已截然不同，因此常有處理量不符設計處理量情形發生，可能原因為廢棄物性質變化、焚化廠老舊等狀況，統計 112 年度各廠營運資訊(如表 2)，可發現多數廠別之實際平均熱值已高於設計熱值，因此呈現熱負載大於處理量負載之狀況，間接顯示廢棄物性質已與過往規劃有差異。

(1)處理量負載=焚化處理量÷(設計處理量×運轉率)×100%

(2)熱負荷=焚化處理量×平均熱值÷(設計處理量×設計熱值×運轉率)×100%

表 2 全國焚化廠 112 年度營運資訊

廠別	垃圾進廠量	焚化處理量	實際平均熱值	運轉時數		運轉率	處理量負載	熱負荷
				操作時數	停爐時數			
單位	公噸	公噸	kcal/kg	小時	小時	%	%	%
基隆市廠	198,374.55	194,122.56	2,412.14	15,876.00	1,644.00	90.6%	97.8%	98.3%
臺北市北投廠	390,546.93	382,449.28	2,376.33	26,479.00	8,561.00	75.6%	77.0%	76.3%
臺北市木柵廠	263,283.84	263,859.10	2,392.57	29,742.00	5,298.00	84.9%	56.8%	84.9%
臺北市內湖廠	153,839.32	152,070.00	2,208.83	21,219.00	5,061.00	80.7%	57.3%	93.8%
新北市新店廠	218,126.34	221,376.20	2,220.17	16,750.00	770	95.6%	70.5%	100.8%
新北市樹林廠	321,020.62	317,816.70	2,288.15	24,613.00	1,667.00	93.7%	68.9%	101.5%
新北市八里廠	412,703.77	408,738.29	2,616.37	24,650.00	1,630.00	93.8%	88.4%	100.4%

廠別	垃圾進廠量	焚化處理量	實際平均熱值	運轉時數		運轉率	處理量負載	熱負荷
				操作時數	停爐時數			
桃園市廠	306,846.06	307,134.94	2,177.42	13,308.00	4,212.00	76.0%	82.1%	77.7%
宜蘭縣利澤廠	202,646.46	201,925.92	2,207.00	16,508.00	1,012.00	94.2%	97.9%	93.9%
新竹市廠	186,100.32	183,557.91	2,293.87	13,873.00	3,647.00	79.2%	70.6%	70.4%
苗栗縣廠	158,622.15	157,269.56	2,492.63	16,419.00	1,101.00	93.7%	92.0%	99.7%
臺中市文山廠	194,534.38	192,425.86	2,424.25	24,035.00	2,245.00	91.5%	64.0%	103.5%
臺中市后里廠	252,120.74	246,767.37	2,556.04	15,492.00	2,028.00	88.4%	85.0%	94.4%
臺中市烏日廠	285,336.69	288,481.84	2,440.99	16,145.00	1,375.00	92.2%	95.3%	101.1%
彰化縣溪州廠	296,200.16	292,236.61	2,275.21	15,754.00	1,766.00	89.9%	98.9%	97.9%
嘉義市廠	71,432.57	70,964.70	2,099.97	16,975.00	545	96.9%	66.9%	104.0%
嘉義縣鹿草廠	228,577.23	224,014.92	1,972.08	12,775.00	4,745.00	72.9%	93.5%	73.8%
臺南市城西廠	189,219.17	190,041.42	2,529.48	15,789.00	1,731.00	90.1%	64.2%	101.5%
臺南市永康廠	274,387.51	269,910.38	2,466.76	15,799.00	1,721.00	90.2%	91.1%	93.6%
高雄市中區廠	219,971.48	214,869.60	1,890.47	20,693.00	5,587.00	78.7%	83.1%	82.7%
高雄市南區廠	337,714.29	352,938.83	2,143.83	24,555.00	10,485.00	70.1%	76.7%	65.7%
高雄市仁武廠	338,897.26	342,540.75	2,460.01	21,445.00	4,835.00	81.6%	85.2%	91.1%
高雄市岡山廠	239,638.28	235,576.98	2,579.67	18,933.00	7,347.00	72.0%	66.4%	68.5%
屏東縣崁頂廠	192,349.91	187,143.56	1,754.67	11,617.00	5,903.00	66.3%	85.9%	68.5%
臺東縣廠	74,339.17	72,261.48	1,990.48	13,197.00	2,835.00	82.3%	80.2%	69.4%

資料來源：環境部環境管理署 焚化廠營運資訊管理系統及本文章彙整

然而近年循環經濟蓬勃發展，廢棄物相關處理及處置技術已逐漸朝向生質能源中心概念發展，其中包含飛灰與底渣再利用之研究，皆是將廢棄物視為可使用之資源為出發點，而焚化廠轉型同時亦須考慮高效率型發電機組以提高能源回收比例，實踐搖籃到搖籃的永續目標。

### 三、新世代廢轉能生質能中心

本中心設計理念環繞「循環經濟」、「生質廢棄物資源化」，將廢棄物導向減量、再使用、再循環之理念，結合國外先進技術減污減排並提高發電效率。本中心亦是全國首座經「再生能源發展條例」及「再生能源發電設備設置管理辦法」等相關規定審查，並順利取得再生能源發電設備認證的熱處理設施。

熱處理設施主要包含：採用廢棄物前處理技術、高燃燒效率及高鍋爐效率鍋爐、高效率廢氣處理系統、技術和全面性整合相關系統效能提升，大幅提高熱處理設施發電效率及充分回收廢棄物中的再生能源，以下介紹相關系統設備效能。

## 1. 提升熱值、減少污染效能的廢棄物前處理系統

本中心的熱處理設施採一前一後雙貯坑的設計，前貯坑用於接收和貯存進廠廢棄物，後貯坑則用於貯存經廢棄物前處理系統後的廢棄物，再由垃圾吊車抓取後貯坑的廢棄物進行投料焚化處理。



圖 1 雙貯坑設計之垃圾貯坑

廢棄物前處理系統採用兩線配置（2 線×30 噸/小時），廢棄物由雙軸式破碎機將廢棄物破碎至約 100 mm 大小尺寸，並經磁選機及渦電流分選機分選回收鐵及非鐵金屬，進一步排除金屬等不可燃物質，使廢棄物大小、成分均質化，從而達到提升熱值及穩定燃燒效率、減少污染、降低底渣產生量與減少底渣熱量損失等效益。

## 2. 高燃燒效率及高鍋爐效率的焚化及廢熱回收鍋爐系統

本中心的熱處理設施採用日本先進技術廠商的焚化與鍋爐系統，考量本中心收受廢棄物的特性，設計熱值提升為 3,000 kcal/kg，為因應此高設計熱值，主燃段爐床冷卻方式採用新式水冷式爐床，可避免局部高溫損壞爐條，提升運轉率。搭配自動燃燒控制程序，以低過量空氣達到更佳燃燒效果，減少廢氣量及熱量損失，而水冷式爐床冷卻回收的熱水則透過設置熱交換器，將一次風進行第一階段加熱，有效回收餘熱；爐床側牆則選用堆焊管之水冷壁，不僅增加熱回收效率，亦達到減少燒結物產生的目的。鍋爐過熱蒸汽溫度則由以往設計的 400℃ 提升至 430℃，增加蒸汽熱焓提高發電效率。



圖 2 水冷式爐床及水冷壁

### 3. 結合廢氣熱能回收的高效率廢氣處理系統

本中心的空污排放採歐盟標準設計，選用德國先進技術系統。考量除酸效率及衍生廢棄物等因素，採用低過量加藥之碳酸氫鈉乾式除酸處理製程。碳酸氫鈉經由磨粉機製成小粒徑後於煙氣反應塔與酸氣反應，為減少飛灰中未反應之碳酸氫鈉含量，增設反應灰循環再利用系統，有效降低廢氣中酸氣(HCl、SO<sub>x</sub>)濃度及衍生廢棄物產量，具減排減廢的效果。

本中心亦設置選擇性非觸媒還原法(SNCR)，搭配聲納測溫系統自動控制，選擇不同高層及位置注入還原劑(液態尿素)，使其可於最佳反應溫度區間進行脫硝，達到 NO<sub>x</sub> 最佳的去除效果，另外設置選擇性觸媒還原反應塔(SCR)，利用前述未反應完之餘氨進行還原反應，可同時去除戴奧辛及 NO<sub>x</sub>。

乾式廢氣處理系統的廢氣均維持高溫約 185°C，並採用低溫型 SCR，廢氣不需要再加熱。於煙道後段增設一外部節熱器，將袋式集塵器出口廢氣降溫至 150°C，利用回收的廢氣廢熱對飼水溫度加熱，進一步回收熱能。



圖 3 煙道後段外部節熱器

#### 4. 高效率汽輪發電機及氣冷式蒸汽冷凝器

本中心熱處理設施採用高效率汽輪發電機，出口蒸汽乾度大幅降低，回收更多蒸汽熱能。採用高效率氣冷式冷凝器，設計大氣溫度採 34℃，汽輪機出口壓力降低至 0.15kg/cm<sup>2</sup>A，均優於國內大多數焚化廠，可回收利用更多蒸汽熱能，汽機餘熱則用於一次與二次燃燒空氣預熱。



圖 4 高效率氣冷式冷凝器

## 四、結論

本中心以零廢棄、低污染、多元化處理與永續經營的循環型處理設施做為目標，朝向綜合處理廠，強調提供總體解決方案，以循環經濟理念設廠，宣告邁入新世代垃圾處理時代的來臨。期望透過落實循環經濟的理念，讓廢棄物不再是廢棄物，而是一種可利用的能源物質(Energy from Waste)，實現本中心理念，即經由「廢棄物循環、水循環、能源循環」三循環，讓本中心成為低碳永續的「綠色工程」。

## 五、參考文獻

1. 沈寧衛，「我國垃圾處理設施興建營運與轉型活化成效之探討」，立法院專題研究，106年8月。
2. 高思懷，「一般廢棄物清理政策與管理 廢棄物的現況與未來」，環境工程會刊，109年5月。
3. 焚化廠營運資訊管理系統，環境部環境管理署。

# 各國全氟及多氟烷基物質(PFAS)政策之比較

李宜亭\*、駱尚廉\*\*

## 摘要

全氟及多氟烷基物質 (Per/Polyfluoroalkyl substances, PFAS) 是一類具有化學穩定性的合成物質，具備防水、防油和低摩擦等特性，廣泛應用於各類表面塗料，如衣物、紙張護膜、食品包裝材料、炊具和消防泡沫等。其中，全氟辛烷磺酸 (Perfluorooctane sulfonic acid, PFOS) 與全氟辛酸 (Perfluorooctanoic acid, PFOA) 是生產量最大的兩種化合物。在製造鐵氟龍 (聚四氟乙烯) 材料時，PFOA 及 PFOS 常被用作助劑，但在最終產品中仍可能殘留。

2017 年，《環境學與技術快報》(Environmental Science & Technology Letters) 刊登的一項研究指出，全球動物實驗結果均證實 PFAS 會導致腫瘤生成，並顯著增加罹患肝癌、胰臟癌、腎臟癌、乳癌和睪丸癌的風險。2011 年 4 月，美國對 25,957 名年齡在 18 至 65 歲的女性進行血液樣本研究，這些女性曾於 2005 至 2006 年間飲用過被杜邦工廠污染的含 PFAS 的水。研究將受試者血液中的全氟辛酸濃度分為五組，結果顯示，濃度最高的前 20% 女性提早進入更年期的風險較最低者高出 40%，表明長期暴露於高濃度 PFAS 家庭用品中的婦女，進入更年期的風險增加。

全氟及多氟烷基物質已被廣泛應用於戶外服裝以增強其防水性。然而，鑑於這類物質對人類健康和環境的潛在影響，國際社會已開始公告針對特定化學物質的禁令。然而，PFAS 包含約 4,700 種不同的化學物質，許多製造商已利用尚未受到管制的化學物質取代被禁用的成分。從循環經濟的角度來看，消費品中的 PFAS 可能在生產和處置過程中導致露出。儘管目前循環利用的紡織品種類有限，但 PFAS 的使用會阻礙這一過程，因為它會導致人類通過新產品再次接觸到這類化合物。國際間正評估戶外服裝和運動服裝中 PFAS 的使用情況，未來應探討如何打造無毒的循環經濟制度。

近年來，全氟化合物成為多國立法的重點，歐美地區也相繼制定了 PFOA 限制要求，並將 PFOA 及其鹽類和相關化合物納入 REACH 附錄 17 中進行管制。鑑於國際間對全氟化合物使用的限制，這也關係到塑膠循環經濟的發展。因此，本文探討了國際間對全氟化合物的管制情形。

【關鍵詞】全氟及多氟烷基物質、化學物質管理、政策法規

---

\*國立臺灣大學環境工程學研究所 博士生

\*\*國立臺灣大學環境工程學研究所 特聘教授

## 一、前言

全氟/多氟烷基物質 (PFAS) 是一類穩定的合成化學物質，具有防水、防油和低摩擦特性，廣泛應用於衣物塗層、食品包裝、炊具和消防泡沫中，產量最大的是全氟辛烷磺酸 (PFOS) 與全氟辛酸 (PFOA)。PFAS 的生產和使用已被證實與腫瘤及多種癌症風險相關，長期暴露於高濃度 PFAS 的女性更易早更。PFAS 在戶外服裝的防水應用雖廣泛，但對健康及環境的影響使其逐步受限。各國相繼制定 PFAS 管制規範，限制其使用以支持循環經濟發展，並探索無毒循環的可能性。

## 二、各國全氟及多氟烷基物質(PFAS)政策之探討

### 1. 聯合國環境署

《斯德哥爾摩公約》(Stockholm Convention) 是一項環境保護的國際公約，旨在禁用或限制生產持久性有機污染物。1995 年，聯合國環境署倡導全球採取行動，應對這些在動植物體內積聚、長期留存在環境中且對人類有害的化學物質。

《斯德哥爾摩公約》將部分 PFAS 化學物質列入持久性有機污染物 (POPs) 的附件 A (消除) 和附件 B (限制) 清單 (詳見表 1)。研究顯示，暴露於 PFAS 的環境中可能對人類和動物健康構成風險。國際癌症研究署 (IARC) 已將全氟辛酸列為 2B 級 (Group 2B) 可能致癌物。儘管已成功找到一些 PFAS 的替代品，例如消防泡沫中可替代全氟辛酸 (PFOA) 和全氟己烷磺酸 (PFHxS) 及其相關化合物，但在發展中國家尚無法立即全面替換 PFAS，僅能針對部分應用逐步採用替代方案。

表 1 列為斯德哥爾摩公約之持久性有機污染物的 PFAS

化學物質	附件清單	持久性有機污染物毒性
全氟辛酸(PFOA)、其鹽類及其相關化合物	附件 A	全氟辛酸 (PFOA) 具有高度持久性、穩定性，並且易於在生物體內累積和通過食物鏈放大。北極等偏遠地區的空气、水、土壤、沉積物和生物群中的監測數據顯示，PFOA 能夠進行長距離傳輸。人類若暴露於 PFOA，可能面臨腎癌、睪丸癌、甲狀腺疾病、妊娠高血壓及高膽固醇等健康風險。此外，PFOA 對陸生和水生物種也會產生不良影響。
全氟辛烷磺酸 (PFOS)、其鹽類和全氟辛烷磺醯氟	附件 B	全氟辛烷磺酸 (PFOS) 具有高度持久性，並且易於在生物體內累積和經由食物鏈放大，能夠進行遠距離傳播。不同於大多數持久性有機污染物 (POPs)

化學物質	附件清單	持久性有機汙染物毒性
(PFOSF)		會在脂肪組織中積累，PFOS 則是與血液和肝臟中的蛋白質結合，對人類健康產生影響。
全氟己烷磺酸 (PFHxS)、其鹽類及其相關化合物	附件 A	氟辛烷磺酸 (PFOS) 具高度持久性，且容易在生物體內累積並經由食物鏈放大，能夠傳輸至遠距離環境。現有的實驗和流行病學研究證據顯示，全氟己烷磺酸、其鹽類及相關物質可能對人類健康和野生動植物產生不良影響。

## 2. 歐盟

2021 年 8 月 5 日，歐盟委員會在官方公報中發佈了 REACH 法規 ((EC)1907/2006) 附件 XVII 的修訂案——法規 (EU)2021/1297，新增對含有 9 至 14 個碳原子的全氟羧酸 (C9-C14 PFCA<sub>s</sub>)、其鹽類及相關物質的限制。此法規將於 2023 年 2 月 25 日正式生效，主要針對 C9-C14 PFCA<sub>s</sub> 及其鹽類和相關物質，但不限於以下列出的特定物質（詳見表 2）。

表 2 未受 REACH 法規限制之 PFCA<sub>s</sub>

全名	簡稱	CAS 編號
全氟癸酸(C10-PFCA)	PFDA (Perfluorodecanoic acid)	335-76-2
全氟十二烷酸(C12-PFCA)	PFDoDA (Perfluorododecanoic acid)	307-55-1
全氟壬酸(C9-PFCA)	PFNA (Perfluorononanoic acid)	375-95-1
全氟十四烷酸(C14-PFCA)	PFTDA (Heptacosafuorotetradecanoic Acid)	376-06-7
全氟十三烷酸(C14-PFCA)	PFTrDA (Perfluorotridecanoic acid)	72629-94-8
全氟十一烷酸(C14-PFCA)	PFUnDA (perfluoroundecanoic acid)	2058-94-8

## 3. 美國

美國於 2021 年提出的 PFAS 策略路線圖是目前國際間最具代表性的 PFAS 管理政策。根據美國環保署的規劃，參與並執行此策略的主要單位包括空氣與輻射辦公室、化學安全與污染預防辦公室、國土安全與緊急應變辦公室、研究與發展辦公室以及水資源辦公室（詳見表 3）。

美國的 PFAS 管理框架採用顯示框架，即在評估化學品時同時考慮其潛在的負面影響及背後機制。PFAS 策略路線圖的各項計畫目標即是依此框架制定，美國環保署各辦公室根據健康風險評估及毒性報告結果，推出相應法規。

表 3 美國 PFAS 策略路線圖的計畫目標

美國環保署轄下單位	PFAS 策略路線圖的計畫目標	相關法案
水辦公室	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 監測飲用水中的 PFAS 含量。</li> <li>• 發布 PFAS 的毒性評估報告與健康建議。</li> <li>• 通過排放限制指導(ELGs)和國家污染排放削減計畫(NPDES)來減少 PFAS 的排放量。</li> <li>• 改進 PFAS 在飲用水監測中的分析方法。</li> <li>• 制定 PFAS 的最終推薦環境水質標準。</li> </ul>	安全飲用水法、國家主要飲用水條例、淨水法
化學安全及污染預防辦公室	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 制訂國家 PFAS 的試驗策略。</li> <li>• 為新的 PFAS 制訂穩健的審查流程。</li> <li>• 根據毒性物質管理法(TSCA)審查現有的 PFAS。</li> <li>• 加強有毒物質排放清單(TRI)內的 PFAS 報告。</li> <li>• 根據毒性物質管理法(TSCA)第 8(a)(7)條命令完成新的 PFAS 報告。</li> </ul>	毒性物質控制法
美國國土及緊急應變辦公室	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 將某些全氟辛酸(PFOA)和全氟辛烷磺酸(PFOS)指定為環境應變補償和責任歸屬綜合法(CERCLA)有害物質。</li> <li>• 發布有關各種 PFAS 的環境應變補償和責任歸屬綜合法(CERCLA)規則制定的預先通知。</li> <li>• 發布關於破壞和處置 PFAS 的最新指南。</li> </ul>	環境應變補償和責任歸屬綜合法
空氣及輻射辦公室	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 建立解決 PFAS 空氣排放問題的技術基礎，以確定 PFAS 來源。</li> <li>• 預計開發和最終確定煙囪排放和環境空氣的監測方法。</li> <li>• 開發具有成本效益的緩解技術。</li> </ul>	空氣清潔法
研究與發展辦公室	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 開發測量環境中 PFAS 的方法。</li> <li>2. 進行 PFAS 對人類健康和環境的風險評估。評估和開發減少環境中 PFAS 的技術。</li> </ol>	—

### 三、結論

總結來說，歐洲、美國和中國對於 PFOS 和 PFOA 這兩類產品已採取嚴格的管制措施。然而，全球範圍內的 PFAS 限制政策仍侷限於少數範疇，且其生效時間有所延遲。

2021 年 7 月，美國緬因州成為全球首個禁止銷售含 PFAS 產品的地區，該禁令將於 2030 年生效，但對某些無法避免使用 PFAS 的產品(如醫療用品)仍有例外規定。歐盟則已針對部分 PFAS 類型及用途施加限制，並有環保人士與一些歐洲國家政府呼籲將 PFAS 視為整體高優先管理的物質，進行全面性管控。

未來應繼續蒐集製造商資訊，以了解產品中的替代品情況，並建立 PFAS 替代品資訊平台，以避免使用其他具有相同風險的有害替代品。同時，完善的稽查制度至關重要，需以持續且深入的方式進行，期望逐步發展出完整的監管系統，以為後代保留更清潔、永續發展的生存環境。

#### 四、參考文獻

1. Laurel A. (2017), “Fluorinated Compounds in U.S. Fast Food Packaging,” *Environ. Sci. Technol. Lett.* 2017, 4, 3, 105–111.
2. Sarah S. (2011) “Implications of Early Menopause in Women Exposed to Perfluorocarbons,” *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, Volume 96, Issue 6, 1 June 2011, Pages 1747–1753.
3. “All POPs listed in the Stockholm Convention,” UNEP.
4. “Text of the Convention,” UNEP.
5. “PFAS Strategic Roadmap: EPA's Commitments to Action 2021-2024.” USEPA.。
6. 「環保署新增公告列管大克蟎及修正全氟辛酸及其鹽類、多溴二苯醚等毒化物運作事項」，行政院環保署毒物及化學物質局網站。

## 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. 113 年/經濟部  
產業發展署, 財團法人台灣產業服務基金會著.  
-- 初版.-- 臺北市: 經濟部產業發展  
署, 財團法人台灣產業服務基金會, 民 113.11  
面; 公分  
ISBN 978-986-533-468-0 (平裝)  
1. 環境保護 2. 職業衛生 3. 文集  
445.907 113017860

### 113 年綠色技術與工程實務研討會論文集

出版日期: 中華民國 113 年 11 月

發行所: 經濟部產業發展署

出版所: 經濟部產業發展署

台北市信義路三段 41-3 號

TEL: (02)2754-1255 FAX: (02)2704-3753

<https://www.ida.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>

審查委員: 李公哲、李育明、馬小康、張祖恩、張添晉、楊萬發、歐陽嶠暉、  
鄭福田、顧洋(依姓氏筆劃排列)

編輯企劃: 陳見財、張冠凱、鐘嘉祺、莊倫綱、陳靖瑜

版次: 初版

GPN: 1011301674

ISBN: 978-986-533-468-0

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)

<https://www.govbooks.com.tw/>

五南文化廣場: 台中市軍福七路 600 號(04-2437-8010)

<https://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: 經典數位印刷有限公司

定價: 新台幣伍佰元整

著作權利管理資訊: 經濟部產業發展署保有所有權利。欲利用本書或部分內容者, 需徵求經濟部產業發展署同意或書面授權。

聯絡資訊: 圖書室(02)2754-1255 轉 3916



## 經濟部產業發展署

Industrial Development Administration  
Ministry of Economic Affairs

台北市信義路三段41-3號

電話：(02)2754-1255

傳真：(02)2704-3753

網址：[www.ida.gov.tw](http://www.ida.gov.tw)

經濟部產業發展署 廣告



GPN : 1011301674  
定價：500元

# 綠色技術與 工程實務 研討會

113年  
論文集



經濟部產業發展署  
編印