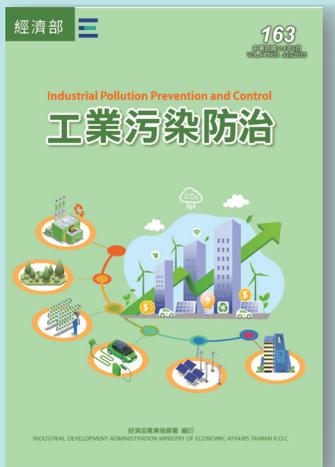


Industrial Pollution Prevention and Control

工業污染防治





中華民國七十一年一月創刊

中華民國一一四年七月出刊

編輯審查委員：

江康鈺、吳庭年、吳義林、李公哲、林文印、林凱隆、胡憲倫、
凌永健、馬鴻文、康世芳、張添晉、陳士賢、歐陽嶠暉、鄭福田
、顧 洋(依姓名筆畫順序)

執行編輯：陳見財、鐘嘉祺、莊倫綱、陳靖瑜

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

網址 <https://www.ida.gov.tw/>

財團法人台灣產業服務基金會

台北市大安區106四維路198巷39弄14號1F

TEL：(02)2784-4188

FAX：(02)2784-4186

網址 <https://www.ftis.org.tw>

行政院新聞局出版事業登記證

局版臺誌第三一四七號

中華郵政北字〇五二七號

執照登記雜誌交寄

設計印刷：致琦企業股份有限公司

～ 本刊文章版權所有，非經同意不得轉載 ～

～ 本刊文稿屬個人學術發表，不代表經濟部產業發展署立場～

Industrial Pollution Prevention and Control

工業污染防治



163 工業污染防治

空氣污染與噪音類

- 活性碳纖維吸脫附系統與觸媒焚化系統之空氣污染防制設備實廠應用
..... 鄭信暉、徐文瑞、張寶額 1
- 節能與抑制二次污染導向之空污防制技術：沸石轉輪結合觸媒焚化系統
之實廠分析
..... 鄭信暉、徐文瑞 21
- 結合地面移動測繪技術溯源 - 以火燄離子化偵測法為例
..... 黃志威、李冠頡、林楷傑、盧彥廷、李其霈、郭子豪 37

資源循環與再利用類

- 提升垃圾焚化廠運轉效益 - 突破瓶頸減少歲修次數
..... 葉平堯、王志豪、洪建皓 57
- 多元化無機資源物製備低碳排產品之技術研發
..... 羅勻謙、李梯群、卓大鈞、李韋皞、吳亞竹 67

環境管理規劃類

- 醫療用複合材質點滴袋之循環經濟可行性探討
..... 簡淑美、周卓群 91
- 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 111

本期簡介

「工業污染防治」刊物（以下簡稱本刊物）自民國 71 年發刊至今，已出版 162 期，共刊載 1,880 篇技術論文，為目前環工界歷史最悠久之技術刊物，提供國內產、官、學、研環保人員之專業發表平台。

近年來，國內社會大眾、環保團體及輿情均相當重視各項環保議題，且中央及地方環保主管機關亦積極制修定環保法規。產業界為因應此趨勢與符合法規要求，需多元落實各類工業污染防治（制）技術，據以改善製程及提升管末處理設施效能。為響應環保，本刊物以電子化方式，置於產業發展署永續發展組委辦之「產業綠色資訊網」，供各界瀏覽下載。

114 年度之文稿範疇包含空污防制及案例、減碳議題、節水及廢水回收再利用、再生水系統化（如都市生活污水再利用，以供產業用水）、廢水及重金屬處理技術、資源循環及減碳行動、土壤與地下水整治及調查技術、綠色永續韌性整治、毒性化學物質管理、再生能源發展與應用、永續發展策略、生命週期評估等。

本期共收錄 7 篇，分別撰述「活性碳纖維吸脫附系統與觸媒焚化系統之空氣污染防治設備實廠應用」、「節能與抑制二次污染導向之空污防制技術：沸石轉輪結合觸媒焚化系統之實廠分析」、「結合地面移動測繪技術溯源 - 以火燄離子化偵測法為例」、「提升垃圾焚化廠運轉效益 - 突破瓶頸減少歲修次數」、「多元化無機資源物製備低碳排產品之技術研發」、「醫療用複合材質點滴袋之循環經濟可行性探討」、「紡織業智能化生產、循環經濟和淨零排放管理系統」，作者慨賜宏文，提供寶貴經驗，特此致謝。

空氣污染與噪音類

活性炭纖維吸脫附系統與觸媒焚化系統之 空氣污染防制設備實廠應用

鄭信暉*、徐文瑞**、張寶額***

摘 要

半導體及其相關產業的蓬勃發展導致揮發性有機物之使用量大幅上升，對於防制設備的去除效率要求越趨於嚴格，尤其以活性炭固定床的操作效率無法長時間符合法規要求及效率下降太快等問題，目前尚無設置成本、操作成本較低之防制設備。本案以活性炭纖維吸脫附及低溫觸媒氧化做為防制處理設備，並於國內某電子業製造公司進行測試，除了達到長期穩定的去除效率外，也期待能降低設置、操作成本。氣流中揮發性有機物成份包括甲苯、異丙醇及甲醇，經由連續監測排氣之相關數據，評估系統對揮發性有機物 (VOCs) 的去除效率，經量測結果顯示，防制設備對甲苯的平均控制效率達 90.6%，對異丙醇的控制效率則達 98.2%，整體對 TVOC 平均控制效率為 90.2%。此外，觸媒氧化反應使部分異丙醇轉化為丙酮也是值得探討的問題。

【關鍵字】活性炭纖維、吸附、觸媒氧化爐、VOCs 去除

* 麒翰科技工程有限公司

** 麒翰科技工程有限公司

*** 工業技術研究院綠能所

設計副理

總經理

博士

一、緣由及目的

由於半導體與其相關產業的蓬勃發展，衍生出大量對人體有害的揮發性有機物 (Volatile Organic Compounds, VOCs)，許多國內外文獻指出 VOCs 對環境和人體造成影響，當空氣中的揮發性有機化合物濃度過高時，容易導致急性中毒。受影響者可能會出現頭痛、噁心、嘔吐和四肢無力等症狀，嚴重者甚至可能引發抽搐、昏迷和記憶力減退；當揮發性有機物釋放到環境空氣裡，易造成霧霾天氣、破壞臭氧層，造成溫室效應。此外，VOCs 亦為光化學臭氧生成的前驅物。當 VOCs 與氮氧化物 (NO_x) 在陽光照射下發生光化學反應，導致地表臭氧濃度上升，引發光化學煙霧，因此，如何有效去除這些揮發性有機物乃是重要的環保議題。

本文評估範疇以 VOCs 整體去除效率為主，應用案例為電子製造廠（以下簡稱為本案）為了削減控制其陶瓷基板生產製造過程產生的揮發性有機物的排放，在既有的活性碳吸脫附設備後端增設 1 套活性碳纖維及低溫觸媒氧化爐設備，以更大幅度地控制削減其製程 VOCs 的排放量，降低其製程排放之空氣污染物對環境空氣品質的影響，善盡企業對社會環境永續的企業責任。

二、VOCs 量測方法

本案採用傅立葉轉換紅外光譜儀 (FTIR) 作為 VOCs 之主要連續監測儀器，可同時進行定性與定量分析，FTIR 之定性原理，主要依據化合物的某一特定官能基或鍵結在振動或轉動時，對於特定頻率的紅外光有其獨特 (unique) 的吸收，此特性僅與化合物之結構或鍵結位置有關，而不受其它因素影響，故可經由理論推算或與實測光譜資料庫比對，找出確切的化合物種類。理論上，除了單原子及同核雙原子分子之外（如 N_2 、 O_2 ），幾乎所有化合物均具有獨特的紅外光吸收，而且即使是光學同分異構物或同位素，在紅外光光譜的吸收上亦各自表現出不同特性，由此可知紅外光儀對於有機或無機；固體、液體或氣體；自由基；甚至材料中之微量不純物分析，皆有相當的應

用空間。紅外光儀的定性依據主要靠數據點比對，由於各化合物出現在光譜上的波數位置十分固定，故可根據吸收波段決定可能存在於光譜中的所有化合物種類 (Dutta, 2017)。

在比對未知物光譜與標準光譜時，必須堅守的原則為：若未知物光譜的吸收峰數目少於標準光譜，而其它吸收峰皆相當吻合，則只能認定該未知物與標準光譜上的標示化合物結構相近，但並非同一化合物。反之，若未知物的吸收峰多於標準光譜，而其它吸收峰則相當吻合，則該未知物極可能為標準光譜上所標示的化合物，多餘的吸收峰可能來自其它干擾物或雜訊。圖 1 為數種 VOCs 的標準圖譜。

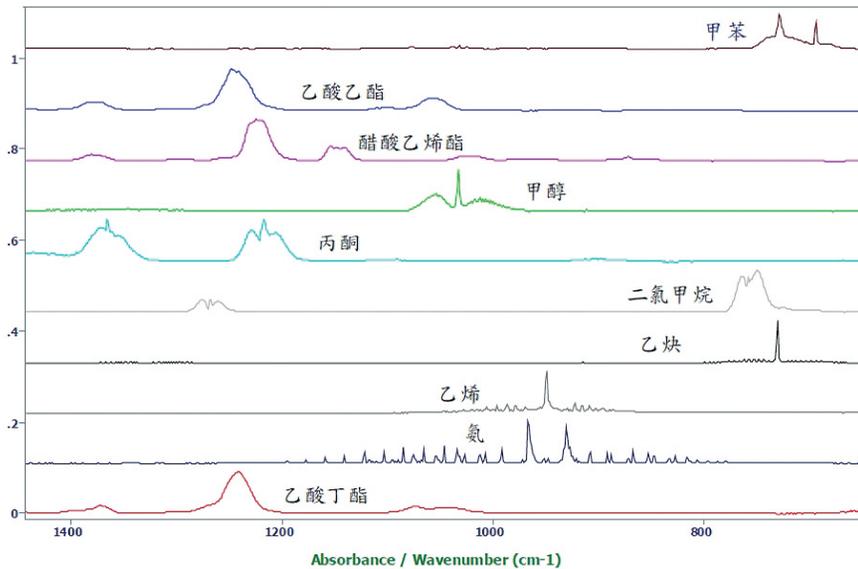


圖 1 數種 VOCs 的標準圖譜

經定性分析找出樣品光譜中所含之分析物種類之後，可續將樣品吸收光譜與已知濃度之參考光譜相互比較，再經由數學運算程序，求出分析物濃度，此過程稱為定量分析 (Dutta, 2017)。

三、防制設備設計與成效

3.1 活性碳纖維的製程

活性碳纖維的製備流程包括穩定化、碳化和活化等步驟，如圖 2 所示，前驅物材料如聚丙烯腈纖維 (PAN)、瀝青、嫻縈纖維 (Rayon)、酚醛樹脂纖維 (Phenolic) 先經過穩定化製程將高分子鏈狀結構進行重排和環化，形成穩定的芳香族環狀結構。碳化製程中，穩定化後的材料會被加熱至 900°C 以上的高溫，以去除其他雜質並獲得高純度的碳。高溫熱解過程中，原子的振動能增加，並且分子中原子之間的鍵結會被破壞。在活性碳纖維形成期間，這步驟可以破壞碳和氮原子之間的鍵結以及構成聚合物的碳氧原子之間的鍵結，使碳原子形成無定形碳 (Morgan, 2005)。活化是將碳化後的緻密碳材料轉變為多孔結構，以增加其比表面積。

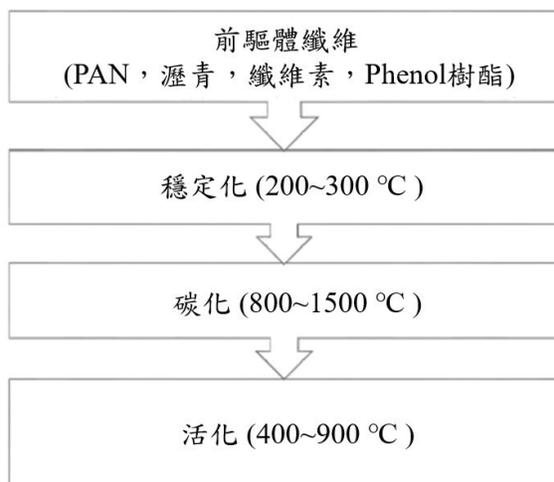


圖 2 活性碳纖維的製備方法 (Patrick, 2000)

3.2 活性碳纖維之優點

活性碳纖維與傳統活性碳均具備寬大的開放式孔洞結構，活性碳纖維主要呈微孔結構，這些微小的孔洞具有強大的吸附能力，能夠快速有效地將分子吸附進孔洞內。

相反，傳統活性碳主要以大孔洞為特徵，這些大孔洞內含有許多微孔。分子需要通過擴散作用從大孔洞傳送到中孔洞中，才能被有效地吸附。因此，與活性碳纖維相比，傳統活性碳的吸附效率及容量相對較低，顆粒狀活性碳 (Granules) 與纖維狀及粉末狀活性碳 (Fibers and Powders) 孔隙結構圖如圖 3 所示。

活性碳纖維的孔洞直徑平均約為 $5\sim 20\text{ \AA}$ ，遠小於傳統活性碳的孔洞直徑，因此活性碳纖維具有毛細凝結的吸附機制，使其吸附速率高於傳統活性碳。與傳統活性碳比較，活性碳纖維具有下列特性：

1. 纖維的直徑較細，使其與被吸附物質的接觸面積增大，提高了吸附的機會與更均勻的接觸。
2. 具較大的比表面積，且細小孔徑分佈均勻，吸附和脫附的速度快，活性碳纖維與顆粒狀活性碳吸脫附特性如圖 4 所示。
3. 強度相對較高，抗粉化能力良好，這在使用過程中能避免二次污染的發生。
4. 擁有適當的纖維強度，可以根據不同需求製造不同形狀的材料，適用範圍廣泛。
5. 所需設備體積較小，能源效益顯著，因而具備經濟性。
6. 密度小、壓損小，再生容易，使用壽命長。
7. 對酸鹼具有良好的耐受性，適用領域廣泛。

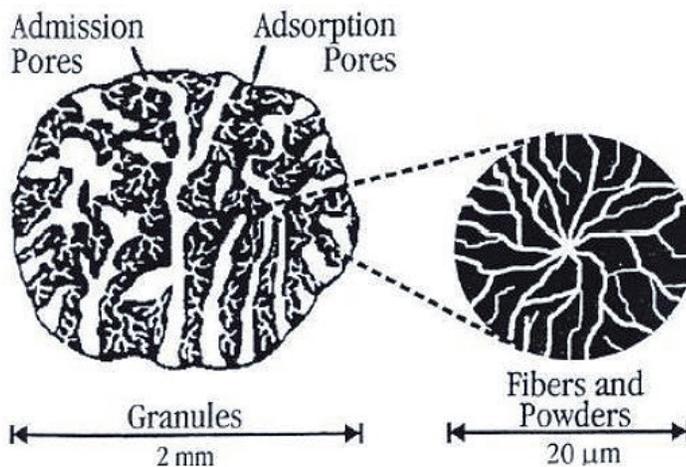


圖 3 活性碳纖維內部結構示意圖 (Suzuki, 1994)

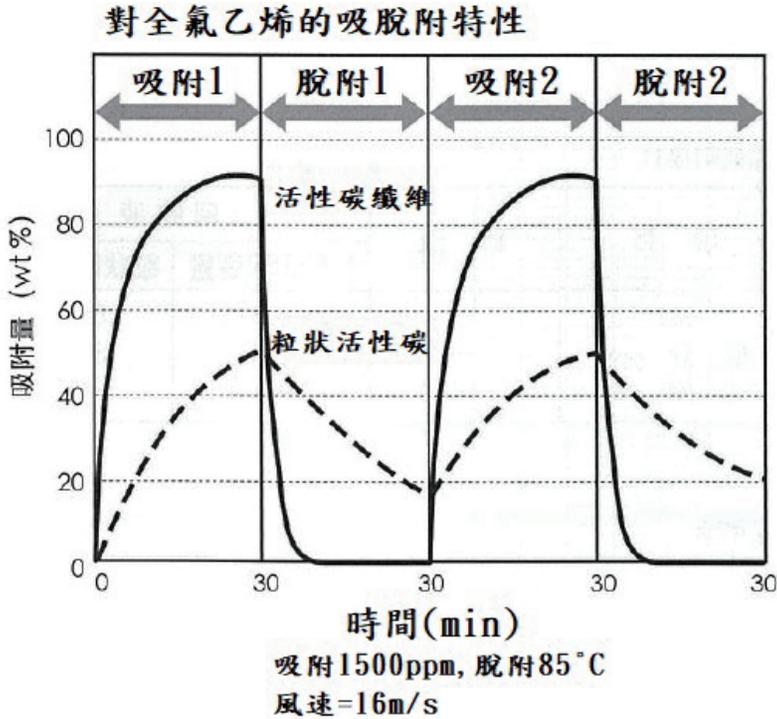


圖 4 活性碳纖維內部吸脫附特性

3.3 活性碳纖維吸脫附系統

活性碳纖維吸脫附系統外觀如圖 5 所示，是以活性碳纖維所製成之纖維布如圖 6 所示，進行吸附，主要將系統分為 2 個操作區間：吸附區及脫附區，系統依逆時針進行轉動，當廢氣通過吸附區時會被活性碳纖維所吸附，當系統持續轉動至脫附區時，以高溫及小風量的氣流導入脫附區進行脫附，使有機廢氣從活性碳纖維中被脫出，並達到提升濃度的目的，一般脫附溫度介於 110°C ~140°C 之間，脫附完成後系統繼續轉動，使脫附完成後的區域進行冷卻後再次進行吸附。

活性碳纖維吸脫附的優點：

1. 因具備幾乎是百分之百微孔的特性，所以吸附效果佳。
2. 濃縮倍率介於 5~25 倍，脫附後氧化處理的風量小、濃度高，可節省能源。
3. 吸附與脫附速度快，且脫附溫度低。
4. 因容易吸附與脫附，可維持吸附材乾淨孔洞與高去除率。

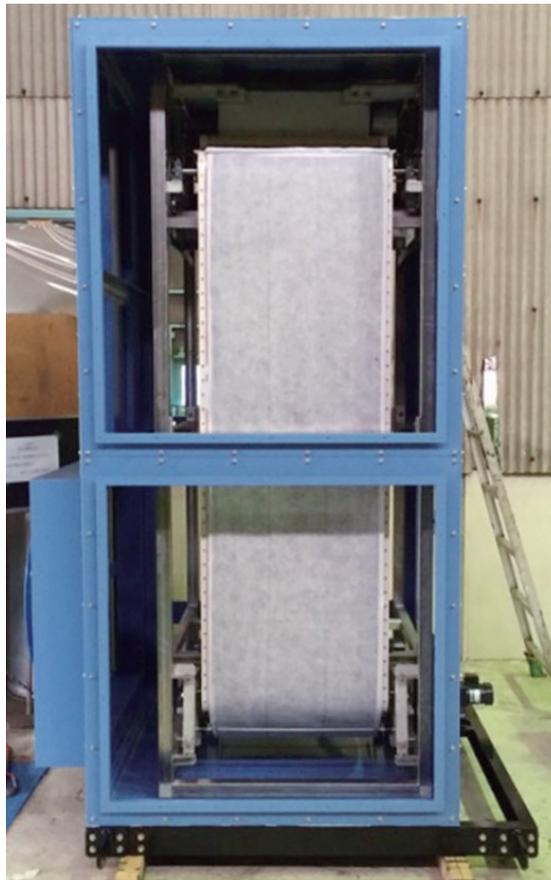


圖 5 活性碳纖維吸脫附系統外觀圖（東洋紡株式會社）



圖 6 活性碳纖維布外觀（東洋紡株式會社）

3.4 觸媒氧化系統

觸媒氧化爐是利用觸媒降低化合物燃燒分解所需要的活化能來促進氧化反應，操作溫度較 $600^{\circ}\text{C}\sim 800^{\circ}\text{C}$ 的焚化爐低，一般介於 $300^{\circ}\text{C}\sim 500^{\circ}\text{C}$ 之間，可以用較低溫將 VOCs 轉換為二氧化碳 (CO_2) 與水蒸氣 (H_2O)。圖 7 為觸媒熱氧化法 (Catalytic Thermal Oxidization, CTO) 的流程示意圖，一般而言焚化爐皆會搭配熱交換器來達到節能的需求，經熱交換器使廢氣先被預熱到趨近於觸媒分解溫度；若溫度不足，可以設置電加熱器，使溫度可穩定達到觸媒分解溫度；而經焚化後的乾淨氣體也經過熱交換器，為廢氣預熱提供熱源，並達到冷卻後排出。

此外使用觸媒氧化爐，需考慮到觸媒毒化以及燒結的問題。觸媒毒化是指觸媒因受污染而使觸媒效能降低或失去活性的情形，進而導致觸媒反應不穩定，降低反應效率；在一般情況下，常見會導致觸媒毒化的有機化合物包括含氯化合物、含硫化合物和重金屬成分。因此，在計劃和設計觸媒反應系統時，必須特別謹慎地考慮進料氣體

的成分，以避免觸媒毒化的發生。觸媒燒結是指觸媒在高溫下導致觸媒活性降低或是完全失效的情形，所以在系統設計上針對使用的觸媒及廢氣條件需特別留意，在實際工業應用中，操作溫度的選擇對於觸媒反應系統的效率有重要影響，較高的操作溫度會使有機物在氧化廢氣中的轉化率提高。然而，當溫度持續操作在超過 700°C 時，會造成觸媒燒結，同時增加能源消耗，進而提高操作成本 (Chu and Windawi, 1996)

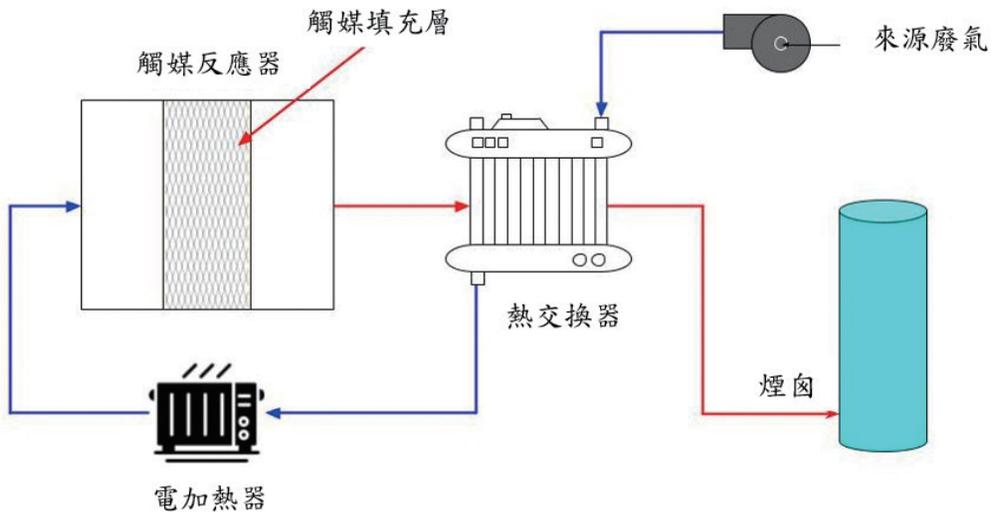


圖 7 觸媒熱氧化法流程圖

3.5 廢氣處理流程

本案設備廢氣處理流程有 4 個步驟，如圖 8 所示：

1. 排氣風車抽取含揮發性有機物之氣體由後送入活性碳纖維吸附系統進行吸附，被吸附後的乾淨空氣排往煙囪。
2. 脫附氣體來源為脫附風車抽取被吸附後排往煙囪的乾淨空氣並做為熱交換器之冷側來源，氣體經熱交換系統及加熱器提高溫度至所需之脫附溫度後，進入活性碳纖維系統進行脫附。

10 活性碳纖維吸脫附系統與觸媒焚化系統之空氣污染防治設備實廠應用

3. 脫附後低風量含揮發性有機物之氣體由氧化風車抽取後送入另一熱交換器做為冷側來源，經熱交換器進行預熱後之氣體進入觸媒氧化系統進行氧化。
4. 氧化處理後之乾淨空氣則經熱交換器，提供給脫附氣體預熱及脫附所需之熱源後排出煙囪。

FTIR 採樣點為吸附入口及煙囪出口所標示之兩個位置。

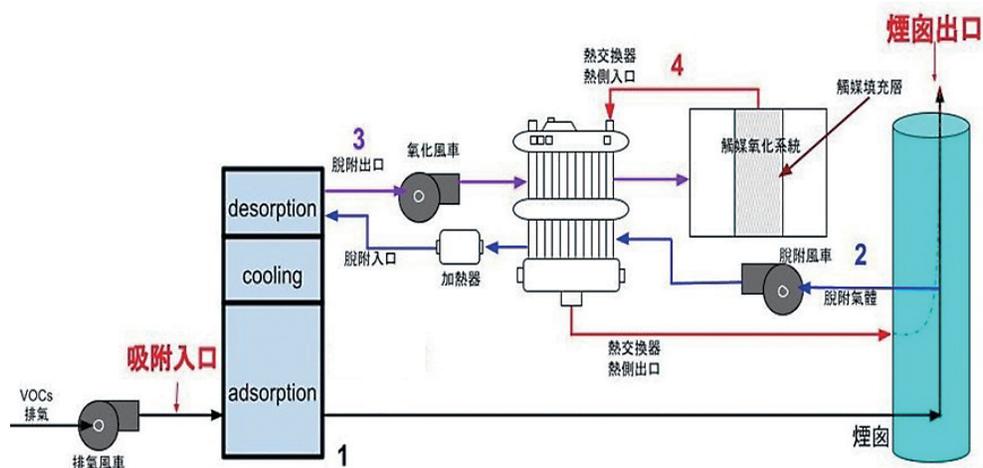


圖 8 廢氣處理流程圖

3.6 VOCs 處理成效

本案使用化學品包括：甲醇（擦拭用）、異丙醇和甲苯；製程操作時間為 24 小時 / 日、300 日 / 年。廢氣收集後，先經降溫設備降低廢氣溫度、導入既有活性碳吸脫附設備移除大部分的 VOCs 後，再導入本次評估的空氣污染防治設備，以 2 部抽氣式 FTIR 針對空氣污染防治設備（活性碳纖維吸脫附與低溫觸媒氧化爐）入口和防制設備後端的排放管道進行 24 小時以上的同步、連續量測，據以評估防制設備對製程產生的 VOCs 廢氣的去除效率。防制設備入口的量測時間自 2024/4/24 09:30 起，至 4/25 15:14 為止，共計量測 33.5 小時，以每 4~5 分鐘擷取 1 筆光譜，共計收集 372 筆紅外光量測圖譜供後續定性定量分析；防制設備出口的量測時間與光譜擷取頻率同入口的條件，共計收集 356 筆紅外光量測圖譜供後續定性定量分析。

3.6.1 防制設備入口量測結果

量測結果顯示，除了二氧化碳之外，防制設備前端共量測到異丙醇 (Isopropanol, IPA)、甲苯 (Toluene)、甲醇 (Methanol)；圖 9 為防制設備入口廢氣中空氣污染物的紅外光圖譜比對分析結果。

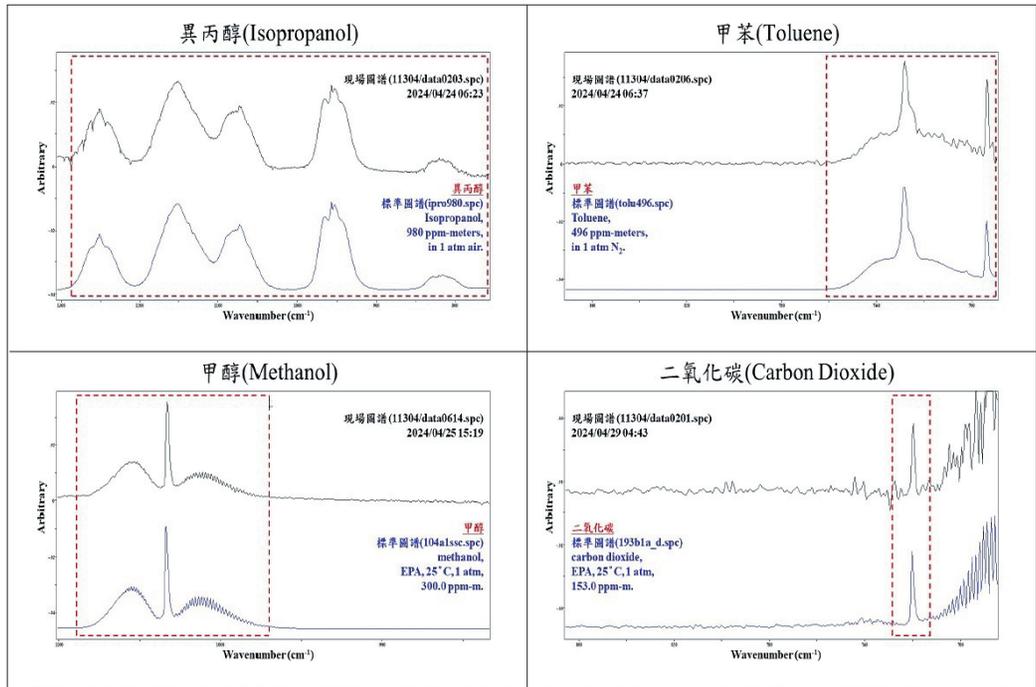


圖 9 入口廢氣中空氣污染成份的紅外光圖譜比對

防制設備入口中廢氣成分的定性定量分析結果如表 1 所示：除了二氧化碳之外，入口中主要空氣污染物濃度以甲苯濃度最高，最大濃度為 422.66 ppm，平均濃度 71.235 ppm，在 33.5 小時量測時間、372 筆量測數據中，入口隨時都有甲苯的濃度測值。異丙醇的最大濃度為 158.70 ppm，平均濃度為 46.356 ppm，整個 33.5 小時、372 筆量測數據中隨時都有異丙醇的測值。甲醇最大濃度為 40.81 ppm，平均濃度為 1.953 ppm，整個量測期間，入口只有 46 筆甲醇的測值。

表 1 防制設備入口量測結果

化合物	最大濃度 (ppm)	平均濃度 (ppm)	出現頻率 (%)
甲苯	422.66	71.235	100.00
異丙醇	158.70	46.356	100.00
甲醇	40.81	1.953	12.37

防制設備入口連續量測結果如圖 10 所示，異丙醇的使用時間自開始量測時逐漸增加，在 4/25 06:01 達到最大濃度 158.70 ppm，06:00 以後入口的異丙醇濃度急遽下降；甲苯的使用時間則和異丙醇的使用時間銜接，但不同步；入口中的甲苯濃度在 4/25 06:11 起快速地上升，在 06:44 達到最大濃度 422.66 ppm 後，入口的甲苯濃度逐漸下降。至於甲醇的逐時濃度變化，只有在結束量測前的 4/25 12:00 開始，才可以在入口量測到甲醇，濃度逐漸上升到結束量測時。入口量測到的 3 種有機溶劑成分，逐時的濃度變化趨勢說明甲苯和異丙醇均為製程的溶劑，據現場操作紀錄推估，異丙醇主要用於製程清洗與溶劑處理，該時段可能對應特定製程階段（如球磨或真空脫氣），而甲苯可能於後續製程切換或換線作業時大量使用，濃度高峰的時間差亦顯示兩者用途之差異，而甲醇則為清潔擦拭溶劑，在製程作業告一個段落時才使用。

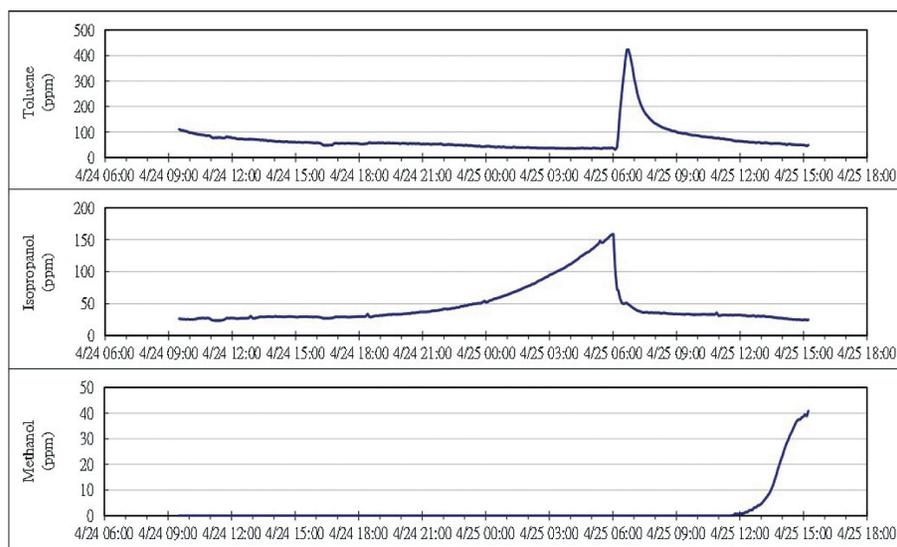


圖 10 入口廢氣中主成分的濃度時間變化趨勢

3.6.2 防制設備出口量測結果

防制設備出口的量測時間和入口的量測時間同步進行，量測結果顯示，製程廢氣經活性碳纖維吸脫附與低溫觸媒氧化爐處理後，在排放管道中，除了二氧化碳和一氧化碳之外，共量測到甲苯、異丙醇、丙酮、甲醇和乙醇等污染物；甲苯、異丙醇和甲醇出現在前端入口廢氣中，丙酮和乙醇僅出現防制設備後端；圖 11 為出口排放管道中主要成分的紅外光量測圖譜比對結果。

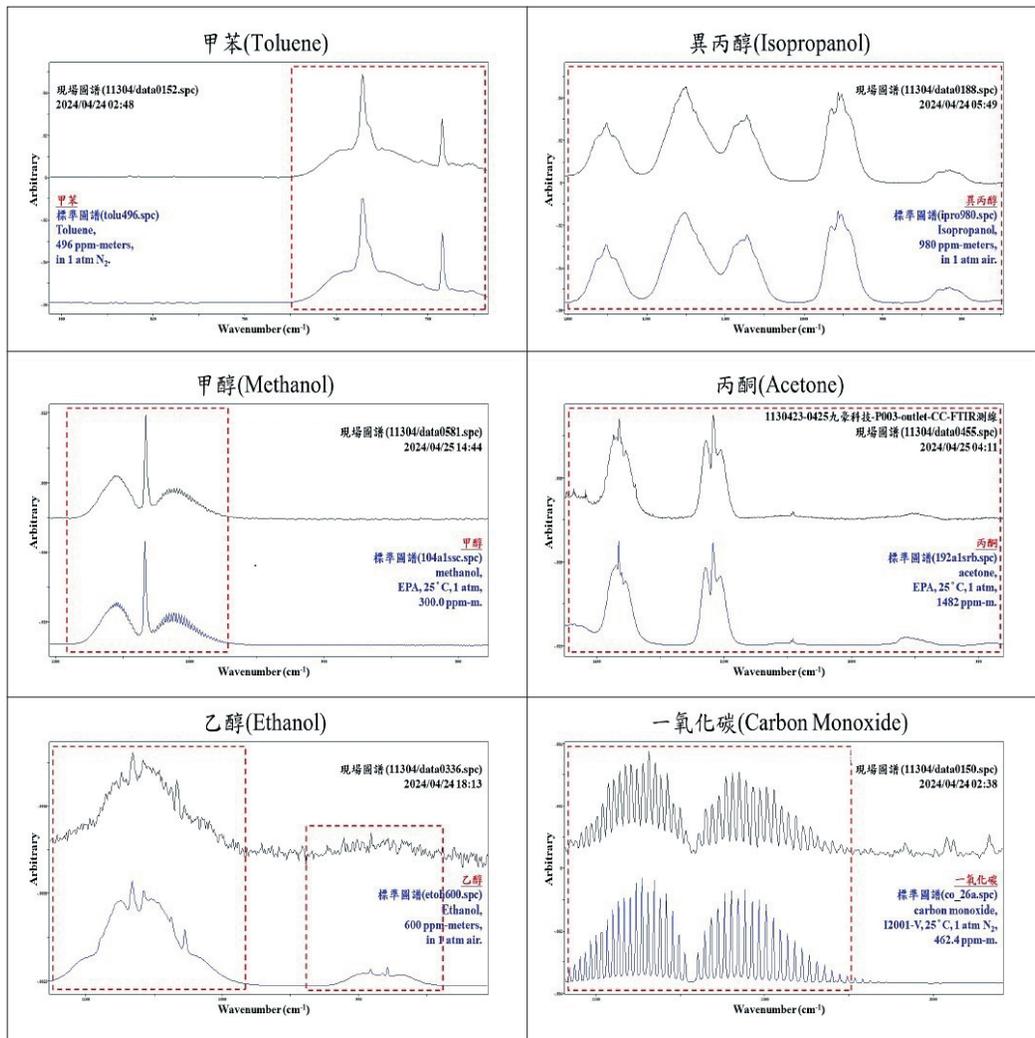


圖 11 排放管道中主要成分的紅外光量測圖譜比對結果

14 活性碳纖維吸脫附系統與觸媒焚化系統之空氣污染防治設備實廠應用

管道的定性定量分析結果如表 2 所示，管道中污染物的濃度以甲苯最高，最大濃度為 147.71 ppm，但平均濃度僅 6.700 ppm，量測期間管道中隨時都有甲苯。丙酮的最大濃度為 30.18 ppm，平均濃度為 3.638 ppm，整個量測期間所收集的 356 筆量測數據中，共有 310 筆數據中出現丙酮的測值。甲醇最大濃度為 25.89 ppm，平均濃度僅 1.331 ppm，整個量測期間甲醇的出現頻率為 17.13%，相當於 5.74 小時或 61 筆量測數據有甲醇的測值。異丙醇為陶瓷基板製造程序的主要溶劑之一，管道中的異丙醇最大濃度為 10.51 ppm，平均濃度為 0.821 ppm，量測期間 356 量測數據中共出現 114 筆異丙醇的測值。乙醇最大濃度僅 0.66 ppm，平均濃度更低至 0.004 ppm，量測期間管道中只有 7 筆乙醇的濃度。進一步分析排放管道中各主要成分的量測濃度，製程作業和擦拭清潔作業的溶劑成分甲苯、異丙醇和甲醇經既有活性碳吸脫附設備移除掉大部分後，再經過新增設的活性碳纖維吸脫附與低溫觸媒氧化爐做進一步的處理後，在防制設備出口仍有製程溶劑成分和反應的副產物 – 丙酮和乙醇。

表 2 防制設備出口量測結果

化合物	最大濃度 (ppm)	平均濃度 (ppm)	出現頻率 (%)
甲苯	147.71	6.700	100.00
丙酮	30.18	3.638	87.08
甲醇	25.89	1.331	17.13
異丙醇	10.51	0.821	32.02
乙醇	0.66	0.004	1.97

比對逐時濃度的變化趨勢顯示，異丙醇和丙酮的逐時濃度呈現明顯的一致性；但甲苯、甲醇和乙醇的逐時濃度變化趨勢，和異丙醇、丙酮並沒有同步的起伏變化。丙酮僅出現在防制設備後端的排放管道中，最大濃度達 30.18 ppm；文獻資料顯示異丙醇氧化（去氫化，dehydrogenation）而成為丙酮，進一步比對防制設備入口的異丙醇濃度和防制設備出口的丙酮逐時濃度變化趨勢顯示，入口的異丙醇部分經過觸媒氧化爐去氫化之後轉化為丙酮，部分氧化成為二氧化碳、一氧化碳和水，入口異丙醇平均

濃度為 46.356 ppm 與出口丙酮平均濃度為 3.638 ppm 推估，約有 7.8% 的異丙醇可能轉化為丙酮，圖 12 為排放管道中 5 種 VOCs 成分的逐時濃度變化趨勢圖。

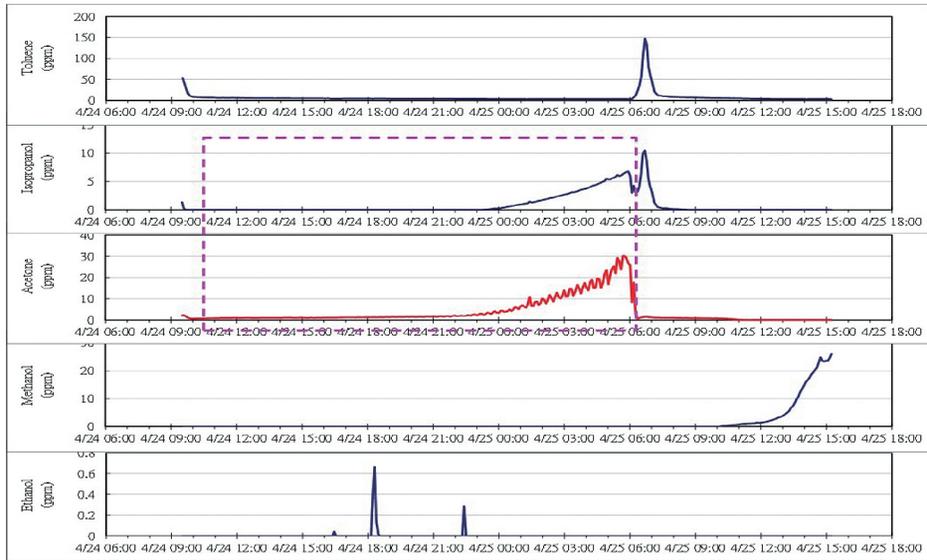


圖 12 排放管道中 VOCs 逐時濃度變化趨勢

3.7 防制設備控制效率分析

空氣污染物防制設備對於製程作業產生的 VOCs 廢氣的控制效率計算如下公式說明：

$$\text{平均控制效率} = \{ \text{平均排放量 (質量流率) inlet} - \text{平均排放量 (質量流率) outlet} \} / \{ \text{平均排放量 (質量流率) inlet} \} \times 100\%$$

本案以 2 部抽氣式傅立葉紅外光譜儀同步設置在活性碳纖維吸脫附前和觸媒焚化爐後的排放管道，分別執行 33.5 小時的連續量測，防制設備對於 VOCs 的控制效率評估方式即以前後端量測數據的平均值，和防制設備前後端的廢氣風量計算及控制效率。活性碳纖維吸脫附設備的脫附氣體來自廢氣經過活性碳纖維濾布吸附後的部份乾淨氣體，經熱交換器加熱後作為吸附設備的脫附氣體，最後再導入低溫觸媒氧化爐做

16 活性碳纖維吸脫附系統與觸媒焚化系統之空氣污染防治設備實廠應用

更進一步焚化處理，觸媒氧化爐處理後的氣體再合併到活性碳纖維濾布後的氣體一併由排放管道排入大氣中。防制設備前後端的廢氣風量一樣均為 92.65 NCMM；依據連續量測的平均濃度和廢氣風量計算前後的個別 VOCs 排放量，以評估活性碳纖維吸脫附與低溫觸媒氧化爐對個別 VOCs 和 TVOC 的去除效率。調查量測結果顯示，製程主要的有機溶劑成分 - 甲苯和異丙醇的平均控制效率分別為 90.6% 和 98.2%；至於清潔擦拭用途的甲醇，整個量測期間的平均控制效率僅 31.9%；但在量測期間，防制設備入口和出口的甲醇出現頻率分別為 12.37% 和 17.13%，因此甲醇的平均控制效率僅供參考。甲苯和異丙醇經防制設備處理後，在防制設備出口多了一定濃度的丙酮及微量的乙醇。依據防制設備入口和出口的 VOCs 排放量加總以評估整體的控制效率，顯示防制設備對於 TVOC 的平均控制效率為 90.2%。表 3 為活性碳纖維吸脫附與低溫觸媒氧化爐對製程 VOCs 氣體的平均控制效率調查評估結果；圖 13 及圖 14 為防制設備前後端甲苯及異丙醇逐時濃度變化趨勢。

表 3 控制效率分析結果

化合物	分子量 (g/mole)	平均濃度 (ppm)		平均排放率 (kg/hr)		平均效率 (%)
		入口	出口	入口	出口	
甲苯 Toluene	92.14	71.235	6.700	1.624	0.153	90.6
異丙醇 Isopropanol	60.09	46.356	0.821	0.689	0.012	98.2
甲醇 Methanol	32.04	1.953	1.331	0.016	0.011	31.9
丙酮 Acetone	58.08	ND	3.638	ND	0.052	-
乙醇 Ethanol	46.07	ND	0.004	ND	<0.001	-
TVOC (Σ VOC _i)				2.329	0.228	90.2

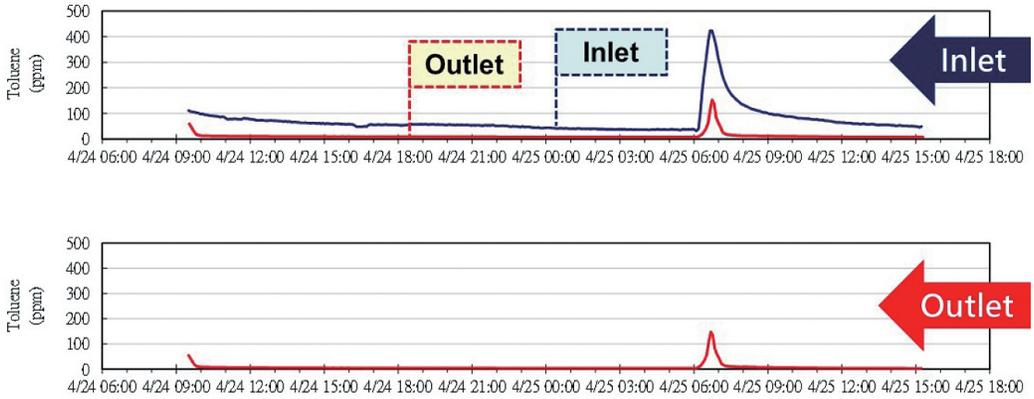


圖 13 防制設備前後端甲苯逐時濃度變化趨勢

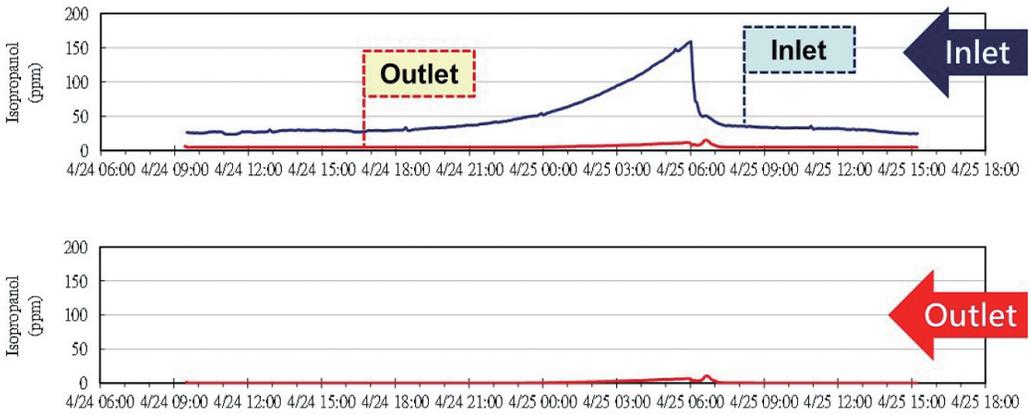


圖 14 防制設備前後端異丙醇逐時濃度變化趨勢

四、結果與討論

本案以活性碳纖維吸脫附系統搭配低溫電熱觸媒氧化爐做為防制設備對 VOCs 的處理前後端進行同步量測，量測結果分析彙整說明如下。

4.1 結論

- 一、除了二氧化碳之外，活性碳纖維吸脫附系統前端共量測到甲苯、異丙醇和甲醇；防制設備後端除了二氧化碳和一氧化碳之外，共量測到甲苯、異丙醇、甲醇、丙酮和微量的乙醇。
- 二、防制設備前後端同步量測評估的結果顯示，活性碳纖維吸脫附低溫觸媒焚化爐可以有效地控制製程使用的甲苯和異丙醇；甲苯的平均去除效率為 90.6%；異丙醇的平均去除效率為 98.2%；TVOC 的平均去除效率為 90.2%。

4.2 建議

- 一、量測評估結果顯示，整體的 VOCs 控制效率可達 90.2%。低溫觸媒焚化爐可以有效地去除甲苯和異丙醇；但部分異丙醇在低溫觸媒焚化爐經去氫化反應而轉化為丙酮；建議進一步評估廢氣在觸媒床的停留時間和觸媒氧化爐的燃燒溫度，以降低丙酮生成。
- 二、系統設置即時 VOCs 監測設備與電動比例控制閥，當偵測到防制設備入口之 VOCs 濃度超過預設上限時，自動啟動控制閥導入外氣進行稀釋，以降低進氣濃度，避免高濃度污染物直接進入觸媒氧化爐，造成觸媒中毒、效率下降或系統異常之風險。
- 三、在最高濃度下甲苯之去除效率為 65%，說明防制設備在高濃度條件下去除效率略有下降。此情況可能與吸附材接近飽和狀態有關，建議後續研究可建立「入口濃度 - 去除效率」關係曲線，並優化操作策略（如調整氣體稀釋量）以因應濃度波動。

參考文獻

Chu, W., & Windawi, H. (1996), "Control VOCs via catalytic oxidation. " *Chemical Engineering Progress*, 92(3).

Dutta, A. (2017), "Fourier transform infrared" spectroscopy. *Spectroscopic methods for nanomaterials characterization*, 73-93.

Morgan, P. (2005), *Carbon fibers and their composites*. CRC press.

Patrick, J. W. *Sciences of Carbon Materials*: H. Marsh, F. Rodriguez-Reinoso (Eds.); Universidad de Alicante, Alicante 674,2000.

Suzuki, M. (1994), "Activated carbon fiber: Fundamentals and applications. " *Carbon*, 32(4), 577-586.

東洋紡株式會社，<https://www.toyobo.co.jp/>。

20 活性碳纖維吸脫附系統與觸媒焚化系統之空氣污染防制設備實廠應用

空氣污染與噪音類

節能與抑制二次污染導向之空污防制技術： 沸石轉輪結合觸媒焚化系統之實廠分析

鄭信暉*、徐文瑞**

摘 要

隨著環保法規日益嚴格與產業永續發展需求增加，針對揮發性有機物 (VOCs) 排放之有效治理，已成為製造業不可忽視的重要課題。本案於國內某光電產業電池製造廠建置以沸石轉輪吸脫附系統結合低溫電熱觸媒氧化爐做為防制設備進行實場應用測試，目標在於有效削減製程排放之異丙醇 (IPA)。經由連續同步監測防制設備進、出口之 VOCs 濃度，量測結果顯示，防制設備整體去除效率達 97.9%，測試證實本系統能有效穩定控制 VOCs 排放，且無二次污染產生，NO_x 濃度未達偵測極限。系統設計除滿足環境部空氣污染物排放標準，亦展現高效、節能與安全等優點，提供半導體與電子產業 VOCs 治理具實用性與兼具經濟效益的解決方案。

【關鍵字】沸石轉輪、吸附、觸媒氧化爐、VOCs 去除

* 麒翰科技工程有限公司
** 麒翰科技工程有限公司

設計副理
總經理

一、緣由及目的

空氣污染已成為影響全民健康的重要環境議題，其中揮發性有機物 (Volatile Organic Compounds, VOCs) 為主要關注污染物之一。若未妥善控制，會對人體造成頭痛、噁心、記憶力衰退等危害。面對法規要求與企業社會責任，業者多採用污染防制設備因應。常見技術包括吸附法、冷凝法、焚化及催化法等；其中，吸附法因具操作彈性及適用範圍廣泛，在國內最為普遍，並常與其他技術整合使用，以提升整體處理效率及降低能源消耗。有效控管 VOCs 排放不僅有助於改善空氣品質，也保障勞工作業環境安全，是企業不可忽視的重要課題。

本文應用案例為光電產業中某電池製造廠（以下簡稱為本案），為有效削減其電池製程中所產生之 VOCs 排放，規劃新設 1 套以沸石轉輪結合低溫觸媒氧化爐之空氣污染防制設備。透過沸石轉輪對低濃度、大風量之 VOCs 廢氣進行濃縮，轉化為高濃度、小風量的氣流，再進入低溫觸媒氧化爐進行催化分解與無害化處理，整體系統具備高效率與低能耗之優勢。本案所採用之空氣污染防制策略，不僅能有效控制製程廢氣對環境空氣品質的影響，同時亦符合國內環保法規，展現企業對於環境永續與職場安全的高度重視，實踐企業應盡之社會責任。

二、VOCs 量測方法

本案之分析採用連續監測方式，利用氣相層析儀搭配火燄離子偵測器 (Gas Chromatography- Flame Ionization Detector, GC-FID) 分析進出口之 VOCs 濃度，相關設備如圖 1 所示。



圖 1 GC-FID 儀器外觀圖 (拓堡科技)

2.1 氣相層析儀

氣相層析的原理是基於不同成分在固定相（靜相，Stationary Phase）和流動相（移動相，Mobile Phase）中，根據各化合物的分配係數的差異而實現分離的效果。靜相通常是 1 種填充物，如多孔矽膠或聚合物，塗覆在毛細管或柱狀管中。移動相是氣相層析儀中移動的氣體，通常為氮氣、氬氣或氫氣。樣品透過氣體流注入，各成分以不同的速度通過含有液體的支撐物。由於不同成份具有不同的蒸氣壓，因此它們與液體的相互作用力也不同，在柱內分離所需的時間也不同，進而分離（張仁智，2016）。

2.2 火焰離子偵測器

火焰離子偵測的原理主要是利用 H_2 及 O_2 燃燒生成火焰，待測樣品在火焰中生成離子和電子，形成離子流，由於物質被游離後形成導電的離子，使得接收器中的電流信號增強，而電流信號與有機物之碳數成正比關係，因此火焰離子偵測適用於含 CH -基之有機物之偵測（張仁智，2016）。

三、防制設備設計與成效

3.1 沸石 (Zeolite) 簡介

沸石是一種由二氧化矽 (SiO_2) 與氧化鋁 (Al_2O_3) 組成，並與鹼金屬、鹼土金屬或稀土金屬等陽離子結合形成的矽鋁酸鹽類結晶物 (吳榮宗, 1989)，其結晶結構可忍受高溫。其結構為三維晶體，由矽或鋁原子與氧原子形成的 TO_4 四面體 ($\text{T}=\text{Si}$ or Al) 堆疊排列而成，擁有均勻孔徑與高度規則的孔道系統，能提供孔道內金屬離子或水分子的自由移動 (Walton et al., 2006)。在環境工程方面，沸石常作為分子篩使用，可依其孔徑選擇性吸附氣體中的特定污染物，例如 VOCs，並廣泛應用於廢氣處理、氣體乾燥、空氣淨化與污水處理等領域。本案使用沸石為日本東洋紡製造，其特點為使用高分子纖維與矽鋁混合物所製成，能提供較高的單位吸附容量，且熱容量較低，脫附效率高，脫附溫度約 $140\sim 180^\circ\text{C}$ 。

沸石具備以下特性：

1. 高吸附性：多孔性結構可吸附不同大小與性質的分子。
2. 離子交換性：陽離子（如鈉、鈣、鉀、鎂等）可在結構內自由交換，適用於水質處理與離子濃度調整。
3. 催化性能：適合作為觸媒或觸媒載體，廣泛應用於石化、環保等領域。

3.2 影響沸石吸附效能之因素

沸石作為常見的吸附材料，其吸附效能受到本身物理化學特性如比表面積、孔洞大小、孔隙分布、陽離子種類等 (Lee et al., 1996) 與外在操作環境條件的共同影響。

1. 比表面積與多孔性結構：沸石的比表面積愈大，提供的活性吸附位置也愈多，能有效提升吸附效率，其顆粒大小與孔洞結構直接影響比表面積與吸附潛能。

2. 孔洞大小與分布

依據國際純化學暨應用化學聯合會 (International Union of Pure and Applied Chemistry, IUPAC) 之定義，沸石孔徑可分為：

- (1) 微孔洞 (Micropores) : $D < 2 \text{ nm}$
- (2) 中孔洞 (Mesopores) : $2 \text{ nm} < D < 50 \text{ nm}$
- (3) 巨孔洞 (Macropores) : $D > 50 \text{ nm}$

沸石屬於微孔性材料，其孔徑大小對吸附效果具有關鍵影響。氣體透過質傳與擴散作用進入孔隙中並被有效吸附。對於分子體積較小的 VOCs 而言，沸石可提供高度選擇性的通道結構，因此具有優異的吸附效率。

3. 溫度及濕度

吸附過程屬於放熱反應，因此操作溫度對吸附效能有明顯影響。適當的溫度有助於氣體分子進入吸附劑孔隙中，提升擴散速率；但若溫度過高，將抑制吸附反應的進行，使吸附能力下降，導致整體效能停滯。因此，在設計與操作吸附系統時，控制適宜的溫度範圍是確保吸附效能的關鍵。

3.3 沸石轉輪吸脫附系統

沸石轉輪吸脫附系統外觀如圖 2 所示，主要材料為矽鋁及高分子纖維，利用高溫燒結而成之蜂巢狀沸石塊如圖 3 所示，沸石轉輪為一種連續運轉的吸附系統，其運作方式如圖 4 所示，是透過轉輪以每小時約 2~10 轉的速度旋轉，將 VOCs 廢氣進行二階段處理。第一階段為吸附區，污染氣體通過沸石轉輪時，VOCs 被吸附於多孔結構上；隨著轉輪旋轉至第二階段的脫附區，透過後端焚化系統的熱源預熱（約 180°C 以下），使已吸附的有機物脫附，此時脫附氣體的污染物濃度約為原始廢氣的 5~40 倍；之後轉回吸附區再次進行吸附，達成高效率削減 VOCs 的目的。本案所採用之沸石轉

輪，相關特性如表 1 所示，其沸石含量約為 75%~85%，相較於傳統沸石系統具備較高之濃縮倍率。此外，多數商用沸石轉輪脫附氣流溫度需達 200°C ~230°C，本案系統設計可於 180°C 以下完成有效脫附，顯示其於節能與操作效能上具優勢（廖文山，2019）。

沸石轉輪的優點（舒穎婕，2018）包括：

1. 高選擇性與化學穩定性：沸石具備不燃性、高活性與選擇性吸附能力，適用於多種常見的 VOCs，且不易受到如水氣或其他共存氣體的干擾，有效提升處理效率與穩定性。
2. 耐腐蝕性佳：沸石材料具化學惰性，不會腐蝕反應器本體及輸送管線，延長系統設備壽命並降低維護成本。
3. 可重複再生使用：吸附後的沸石可經由熱脫附再生，重複使用，具良好耐久性與經濟性。
4. 脫附效率高：透過加熱氣體（通常為 140°C ~180°C）可快速將 VOCs 脫附，降低殘留風險。
5. 高風量低濃度氣體的處理：適合處理大風量、低濃度的 VOCs 廢氣，能有效進行空氣淨化與氣體濃縮。
6. 大幅提高濃縮效率：透過連續旋轉吸附與脫附的設計，可將 VOCs 濃縮至 5~40 倍以上，產生小風量、高濃度的脫附氣體，有助於後段處理（如催化氧化爐或 RTO）進行有效分解，同時大幅節省能源與降低運轉成本。



圖 2 沸石轉輪吸脫附系統外觀圖

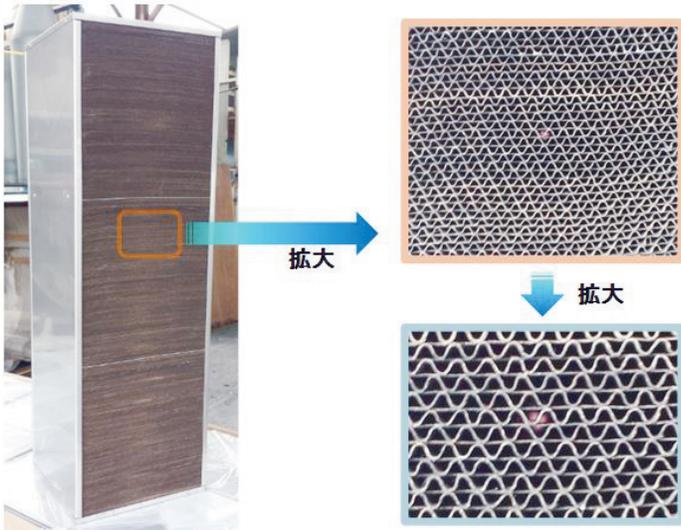


圖 3 沸石外觀 (東洋紡株式會社)

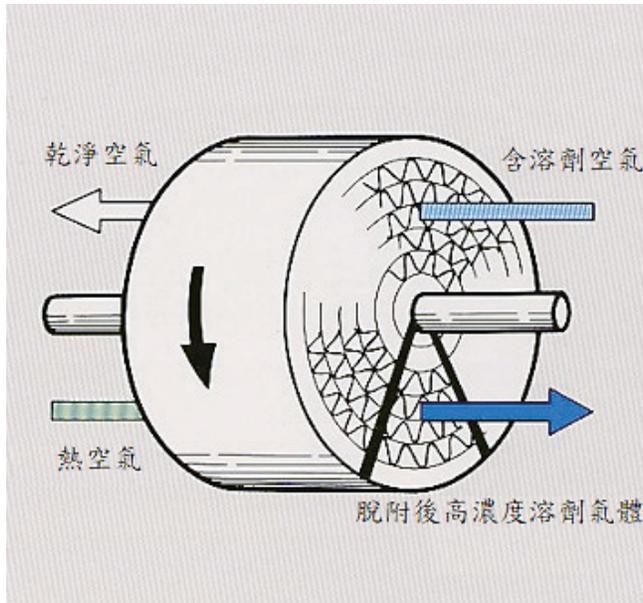


圖 4 沸石轉輪吸脫附原理流程圖

表 1 沸石相關特性

項目	數據 / 描述
材質	矽鋁及高分子纖維
沸石含量	>70%
比表面積 (m ² /g)	400~1,000
脫附溫度 (°C)	<180
濃縮倍率	5~40
耐熱溫度 (°C)	800~1,000
可燃性	不燃

3.4 觸媒氧化系統

觸媒氧化爐是利用觸媒降低化合物燃燒分解所需要的活化能來促進氧化反應，相較於操作溫度高達 600°C ~800°C 之傳統焚化爐，觸媒氧化爐操作溫度範圍一般介於 250°C ~400°C，可有效降低能耗，並於較低溫下將 VOCs 轉化為無害之二氧化碳 (CO₂)

與水蒸氣 (H_2O)，達到空氣污染控制之目的。圖 5 為觸媒熱氧化法 (Catalytic Thermal Oxidization, CTO) 的流程示意圖，系統設計上，焚化設備常搭配熱交換器以提升能源使用效率。廢氣在進入觸媒床層前，會先經由熱交換器預熱，使其溫度接近觸媒反應所需之分解溫度；若預熱後溫度仍不足，則可輔以電或天然氣加熱器進一步升溫，以確保觸媒反應區維持穩定操作條件。氧化後之淨化氣體則再經由熱交換器，釋出熱能以預熱後續進氣，並於冷卻後排放至大氣中，系統外觀圖如圖 6 所示 (呂權訓，2020)。

在觸媒氧化爐之應用中，須特別留意觸媒毒化與觸媒燒結等可能影響系統效能之問題。觸媒毒化係指觸媒受到氣流中特定污染物質影響，導致其催化活性降低甚至喪失，進而使反應效率下滑與系統穩定性下降。常見具毒化潛勢之物質包括含氮化合物、含硫化合物以及重金屬等，故於系統規劃與設計階段，應審慎評估進料氣體成分，以預防毒化情形發生。另一方面，觸媒燒結係因長時間處於高溫操作環境，使觸媒表面活性物質產生結構重組，導致活性顯著下降甚至完全失效。操作溫度對於觸媒反應效率具重要影響，雖較高溫度有助於提升有機物之氧化效率，惟當溫度長時間超過 $700^{\circ}C$ ，將增加觸媒燒結風險與能源消耗，進而提高整體操作成本。因此，於實際應用中應綜合考量觸媒特性、廢氣成分與反應條件，確保系統穩定性與處理效率，達成最佳操作效能。(Chu and Windawi, 1996)。

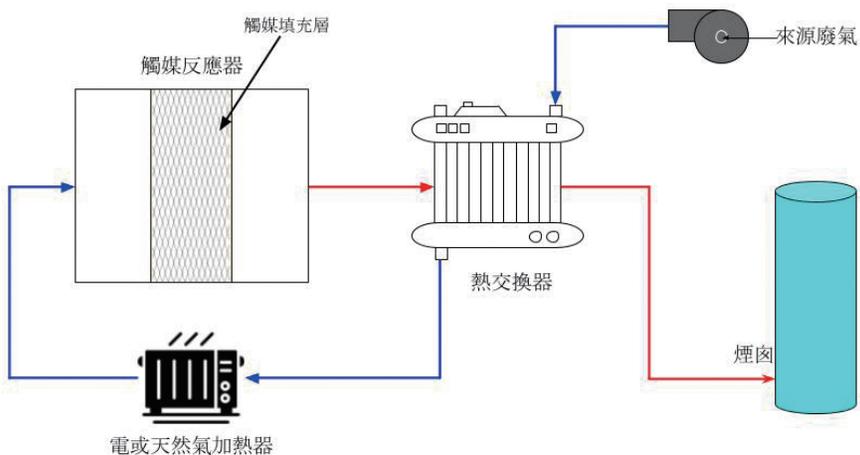


圖 5 觸媒熱氧化法流程圖



圖 6 觸媒熱氧化系統外觀圖

3.5 VOCs 處理成效

本案製程使用化學品為異丙醇，操作時間為 8 小時 / 日、300 日 / 年，製程產生之廢氣於 50°C 自排氣出口排出，經由降溫設備進行預冷卻處理後，導入本次新設之空氣污染防制設備進行處理，防制設備前後端的廢氣風量可能一樣均為 481 NCMM，各項操作條件如表 2 所示。為評估空氣污染防制設備對製程產生 VOCs 廢氣之去除效率，採用氣相層析火焰離子偵測器 (GC-FID) 進行連續監測。監測位置包含防制設備前端（沸石轉輪入口）與後端（煙囪出口）之排放管道，進、出口同步進行量測。監測作業自 2024 年 12 月 19 日 10 時 40 分起，至同日 11 時 39 分止，總計持續 1 小時。資料擷取頻率為每分鐘 1 次，合計收集 60 筆監測數據，作為設備去除效率評估之依據。

本案依據「排放管道中總碳氫化合物及非甲烷總碳氫化合物含量自動檢測方法－線上火焰離子化偵測法 (NIEA A723.75B)」，其方法偵測極限 (Method Detection Limit, MDL) 約為 1 ppm as CH₄；針對一氧化碳之監測，採用「排放管道中一氧化碳自動檢驗法－非分散性紅外光法 (NIEA A704.06C)」，其方法偵測極限約為 1 ppm。

空氣污染物防制設備對於製程作業產生的 VOC 廢氣的控制效率計算如下公式說明：

$$\text{平均控制效率} = \{ \text{平均排放量 (質量流率) inlet} - \text{平均排放量 (質量流率) outlet} \} / \{ \text{平均排放量 (質量流率) inlet} \} \times 100\%$$

表 2 系統操作條件

操作條件	規格 / 數據
進氣風量 (NCMM)	481
進氣溫度 (°C)	45.1
VOCs 進氣濃度 ppm as CH ₄	96
沸石脫附溫度 (°C)	140
濃縮倍率	20~30
氧化爐溫度 (°C)	300
面速度 (Nm/s)	0.5~1
氧化爐停留時間 (s)	0.2~0.4

3.5.1 防制設備入出口量測結果

根據連續監測資料分析，VOCs 入口濃度最低值為 83 ppm as CH₄，最高值為 101 ppm as CH₄，大部分時間入口濃度介於 90 ~100 ppm as CH₄，平均值為 96 ppm as CH₄，煙囪出口濃度平均值為 2 ppm as CH₄，防制設備系統平均去除效率為 97.9%，測試結果如圖 7 所示。根據環境部公告空氣污染管制及排放標準，防制設備處理效率應大於 90% 或揮發性有機物排放標準應小於 14 ppm as CH₄，表示本案新設之防制設備對排氣之異丙醇污染物有良好的吸附及氧化效果並符合空氣污染物排放標準。

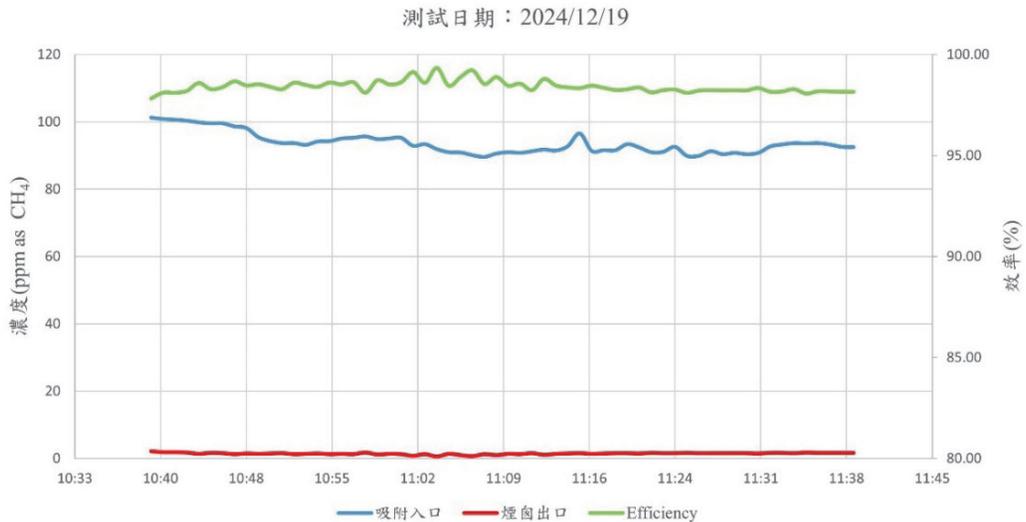


圖 7 沸石轉輪吸脫附系統結合觸媒氧化爐系統監測濃度及處理效率

3.6 觸媒氧化系統與其他熱處理技術之比較分析

為有效控制揮發性有機物及其他空氣污染物之排放，產業界普遍採用多種熱處理技術進行廢氣淨化處理，常見技術包括低溫觸媒氧化系統、蓄熱氧化系統及直燃氧化系統，各類系統在運行特性、污染物去除效率、及適用條件方面皆有所差異，針對上述 3 種熱處理技術進行比較分析，如表 3 所示；並進一步以相同進流條件與操作時間為基準，進行運轉成本之比較分析，運轉成本僅涵蓋電力 / 燃料消耗、以凸顯系統在節能方面之相對優勢，故不含觸媒更換等長期維護成本，其實際費用應視操作條件與觸媒壽命另行估算，相關結果如表 4 所示，此外於各煙囪出口進行氮氧化物 (NO_x) 濃度監測，結果顯示觸媒氧化系統排放濃度低於方法偵測極限，顯示其副產物生成極低；相對地，蓄熱氧化系統及直燃氧化系統皆檢測出約 54 ppm 之 NO_x 排放濃度；根據文獻資料指出，空氣燃燒條件當燃燒溫度達 1,000 °K 時，理論上約產生 37 ppm 之 NO_x，此結果亦與實測數據趨勢相符 (De Nevers, 2010)。

表 3 熱處理技術之比較分析 (張銘恩, 2019; 王志發, 2022)

項目	觸媒氧化系統	蓄熱氧化系統	直燃氧化系統
操作溫度	250~400°C	750~850°C	750~850°C
可處理風量	中小風量較適用	可處理大風量廢氣	中小風量較適用
處理效率	90~98% (依觸媒與設計條件而定)	95% 以上	95% 以上
啟動加熱 / 冷卻時間	快	慢	慢
對污染物耐受性	觸媒易受鉛、硫、鹵素、矽等而毒化	較佳	較佳
副產物	NO _x 、CO 生成量非常少	高溫下可能產生 NO _x	高溫下可能產生 NO _x
設備初期成本	較低	高	高
加熱方式	電熱或天然氣	天然氣	天然氣
適用場合	每天須開機時非常適用，起爐時間短	中大風量、連續操作場域	低廢氣流量、高濃度(熱值)之廢氣

表 4 熱處理技術之成本分析

項目	觸媒氧化系統	蓄熱氧化系統	直燃氧化系統
脫附風量 (NCMM)	22	22	22
進氧化爐 / 燃燒室溫度 (°C)	219	700	630
氧化爐設定溫度 (°C)	300	800	800
氧化爐運轉成本	467,591 元 / 年	605,738 元 / 年	1,071,403 元 / 年

四、結論與建議

4.1 結論

- 一、防制設備前後端同步量測評估的結果顯示，沸石轉輪吸脫附搭配觸媒氧化爐系統可以有效控制製程產生的異丙醇廢氣；異丙醇的平均去除效率為 97.9%，整體處理效率符合環境部之空氣污染物排放標準要求。
- 二、為確認系統運轉對其他空氣污染指標物之影響，亦針對煙囪出口進行 NO_x 與 CO 濃度檢測。經分析結果顯示，NO_x 濃度未達方法偵測極限 (Method Detection Limit, MDL)、CO 濃度僅 1 ppm，顯示本系統操作條件良好，未產生二次污染，亦兼顧空氣品質保護與環境永續之要求。
- 三、觸媒氧化系統設計操作溫度低於傳統熱處理系統，搭配熱交換器可有效回收餘熱降低能源損耗，整體年運轉成本約為 467,591 元，低於蓄熱氧化與直燃系統，有助於企業節能降耗並提升經濟效益

4.2 建議

- 一、定期檢視沸石轉輪的吸附與脫附效能及觸媒氧化爐內部溫度分布，必要時調整廢氣在觸媒床的停留時間與溫度控制，進一步優化處理效果與降低潛在副產物（丙酮）的風險。
- 二、由於目前廢氣成分以異丙醇為主，若未來製程變更導致氣體中含有氯、硫、重金屬等成分時，建議重新評估觸媒材質與防毒設計，以避免觸媒中毒影響處理效率。

參考文獻

吳榮宗，工業觸媒概論，國興出版社，新竹市，1989 年 8 月增訂版。

東洋紡株式會社，<https://www.toyobo.co.jp/>。

拓堡科技，<https://www.topsensors.com.tw/>。

張仁智，「揮發性有機物 (VOCs) 空汙防治設備之蓄熱式燃燒爐 (RTO) 效能提升研究 - 以光電廠為例」，碩士論文，國立屏東科技大學，2016。

舒穎婕，「以沸石轉輪焚化系統處理變壓器塗裝作業 VOCs 效率探討」，碩士論文，國立中央大學，2018。

廖文山，「不同材質沸石轉輪之 VOCs 濃縮燃燒系統之參數最佳化」，碩士論文，國立臺北科技大學，2019。

呂權訓，「以緩衝模組提升兩塔型 RTO 處理效率之可行性探討」，碩士論文，國立中央大學，2020。

張銘恩，「兩種蓄熱式焚化爐應用於半導體製程廢氣處理之效能比較」，碩士論文，國立中央大學，2019。

王志發，「半導體業沸石轉輪運轉與節能分析」，碩士論文，中原大學環境工程學系，2022。

Chu, W., & Windawi, H. (1996). Control VOCs via catalytic oxidation. *Chemical engineering progress*, 92(3).

De Nevers, N. (2010). *Air pollution control engineering*. Waveland press.

Lee, H.-K., Shim, M.-J., Lee, J.-S., & Kim, S.-W. (1996). Characteristics of CO gas adsorption on modified natural zeolite. *Materials Chemistry and Physics*, 44(1), 79-84.

Walton, K. S., Abney, M. B., & Douglas LeVan, M. (2006). CO₂ adsorption in Y and X zeolites modified by alkali metal cation exchange. *Microporous and Mesoporous Materials*, 91(1-3), 78-84.

空氣污染與噪音類

結合地面移動測繪技術溯源 - 以火燄離子化偵測法為例

黃志威*、李冠頡*、林楷傑*、盧彥廷*、李其需*、郭子豪**

摘 要

移動測繪 (Mobile Measurements) 技術依據美國環保署制定的檢測方法 OTM-33 (Other Test Method 33) 與其子方法 OTM-33A (Direct Assessment)，結合高解析儀器與全球定位系統 (Global Positioning System, GPS)，可用於污染物溯源與排放量化。OTM-33 提供濃度測繪、污染源特徵分析及排放量估算的完整框架，而 OTM-33A 則專注於快速部署，特別適用於近場小型地面源的定位與評估。此技術可記錄污染物濃度、地理位置及相關數據，進而生成空間分布圖，已成功應用於都會區、石化工業區，以及油氣開採逸散的監控。本研究盤點石化工業區移動測繪技術應用，並選擇火燄離子化偵測器 (Flame Ionization Detector, FID) 探討污染溯源的可行性。研究首先透過廠區外固定站識別污染熱點，結合氣象數據與排放特徵鎖定潛在污染源。接著，利用手持式 FID 於廠區內移動測繪，進一步限縮污染熱區，並輔以超聲波顯像儀 (Acoustic Imaging Cameras, AIC) 精準定位洩漏源。最終，透過 FID 進行定點監測，以評估修復後的洩漏改善成效。本研究展示移動測繪技術在國內石化工業區的應用情境，提出擴大應用時需考量的關鍵因素。此技術可補足固定站監測的空間覆蓋不足，為環境監測與污染治理提供有效的技術選擇。

38 結合地面移動測繪技術溯源 - 以火焰離子化偵測法為例

【關鍵字】移動測繪、污染溯源、火焰離子偵測器、超聲波顯像儀

* 環興科技股份有限公司
** 環興科技股份有限公司

工程師
技術經理

一、前言

隨著都市化與工業化的快速發展，空氣污染問題日益嚴峻，特別是在城市與工業區，複雜的污染源分布為環境監測與管制帶來重大挑戰。傳統的固定監測站（如一般站、光化站以及特工站），雖然能提供穩定且長期的污染數據，但其空間覆蓋範圍有限，對於快速定位污染熱點與即時追蹤排放源有其不足之處，迫切需要更靈活且高效的輔助監測技術來補足空白。

參考美國環保署針對移動測繪訂定之檢測方法草案 OTM-33 及其子方法 OTM-33A，以高解析度分析儀器結合全球定位系統，為污染溯源與排放量化提供了新解決方案。OTM-33 作為一種方法框架，涵蓋 3 種主要操作模式：(1) 濃度測繪 (Concentration Mapping, CM)、(2) 污染源特徵分析 (Source Characterization, SC) 及 (3) 排放量估算 (Emissions Quantification, EQ)，能有效整合多種數據，進行多層次的污染源評估。其子方法 OTM-33A 則專注於快速部署，針對近場小型地面排放源的即時定位與排放量估算，進一步提高技術的靈活性與適用性。

本研究採用 OTM-33 框架下的移動測繪技術，透過搭載火燄離子化偵測器 (FID) 的移動平台於目標區域的道路上，結合氣象數據與高精度儀器，記錄污染物濃度、位置及相關條件，生成細緻的污染物空間分布圖。該技術適用於快速辨識未知污染源、分析其特徵以及量化排放強度，並能快速覆蓋大範圍區域，對於環境污染防制與熱點監測具有重要意義。然而，該技術在國內的實際應用仍較為有限，亟需更多實例研究來驗證其效能與適用性。

本研究於石化工業區應用移動測繪技術，探索其在台灣高密度城市與工業環境中的應用潛力。透過實地操作與技術優化，期望進一步補足傳統監測方法的不足，為空氣污染管制與政策制定提供科學依據，並促進相關技術在國內的應用。

二、文獻回顧

移動測繪技術在空氣污染監測中具有重要應用，特別是在都市空氣污染監測、煉油與石化工業區，以及油氣開採等場域中。在大城市和都市區域，移動測繪技術能提供高解析度的空氣品質數據，用於識別污染熱點，並評估交通和工業活動對空氣品質的影響。以 Apte et al. (2017) 的研究為例，他們利用移動測繪技術，將高時間解析度污染測量平台安裝在 Google 街景車輛上，對美國加州奧克蘭市的街道進行多次採樣，生成高達 30 公尺空間解析度的年平均日間 NO、NO₂ 和黑碳濃度分布圖。結果顯示，污染物濃度在局部區域具有顯著的空間變化，同一城市的主要道路或是工業區污染物濃度可能比郊區高出 5~8 倍，污染物分布不平均。相較於傳統固定監測站數公里的空間解析度，此方法以 30 公尺空間解析度準確識別污染熱點並有效填補空氣品質監測的數據缺口，對公共健康和環境政策具有重要意義。

在煉油與石化工業區，移動測繪技術同樣發揮關鍵作用。例如，Knighton et al. (2012) 使用配備質子轉移反應質譜儀 (NO⁺ 試劑離子) 的 Aerodyne 移動實驗室，對美國休士頓運河區的固特異 - 德州石化設施周邊進行了實地測量，檢測到 1, 3- 丁二烯 (30 ppbv) 和苯乙烯 (15 ppbv) 的顯著濃度熱區。研究結合風向及德州環保署 (TECQ) 的固定站監測數據，並使用高斯點源煙流模型估算排放速率，結果與官方排放清冊吻合，證明了移動測繪技術在石化工業區污染溯源與量化排放量的可行性。此外，Thoma et al. (2023) 探討了環氧乙烷 (EO) 在工業設施內的排放特徵及次世代排放測量技術 (Next Generation Emission Measurement, NGEM) 的應用。他們利用光腔衰盪光譜儀 (CRDS) 進行移動測繪與固定多點監測，發現設施內的四個主要 EO 排放區域，涵蓋偶發性排放 (如鐵路車廂切換和反應器清洗) 及持續性排放 (如轉移泵和廢水排放口)。偶發排放濃度高達 500 ppbv 顯示設施內存在短暫的高污染排放事件，移動數據超過檢測下限 (MDL, 約 1.2 ppbv) 則顯示污染排放持續發生。此研究不僅揭示 EO 排放的多樣性，亦顯示高解析度移動測繪技術在補足數據缺口與推進 NGEM 方法開發上的應用潛力。

在油氣開採區域，移動測繪技術在甲烷等溫室氣體的排放監測中展現高度應用價值。例如，Brantley et al. (2014) 利用 OTM-33A 移動測繪方法，對德州、科羅拉多州和懷俄明州 3 大油氣盆地的 210 個生產場地進行短期甲烷排放量化研究。結果顯示，甲烷排放速率 (g/s) 在 3 大盆地中呈對數常態分布，與天然氣產量正相關，但產量變異僅能解釋 10% 的排放變異，顯示設備設計與維護對排放具有重要影響；本研究提供關於油氣生產場地甲烷排放的重要數據，為未來減排策略與設備優化提供參考依據。此外，Rella et al. (2015) 使用移動通量平面 (MFP) 系統，對德州 Barnett 頁岩區近 200 個井場的甲烷排放進行測量與分析。在受測井場中，115 個場址顯示非零排放，且排放分布呈高度偏態；進一步分析顯示，50% 的總排放來自於 6.6% 的最高排放井場，而 22% 的最高排放井場則貢獻 80% 的總排放，顯示排放源的集中性特徵。透過 MFP 系統，可迅速識別高排放井場，並提供高解析度排放數據，具有高效率、低成本且大範圍部署的優勢。綜上所述，移動測繪技術能有效捕捉污染數據，為空氣品質管理提供科學依據，在都市環境、石化工業區與油氣開採場域均展現廣泛應用潛力（如表 1）。

表 1 移動測繪應用場景

應用場景	說明	目的	污染物
1. 都市空氣污染監測	大城市和都市區域，特別是需要高解析度空氣品質數據的地區	識別污染熱點、評估交通和工業活動對空氣質量的影響	VOCs、NO _x 、O ₃ 、PM _{2.5} 和 PM ₁₀
2. 煉油與石化工業區	大規模工業設施周邊，如煉油廠、化工廠等	評估邊界範圍內的污染排放分布，特別是工廠排放的影響	VOCs (如苯、甲苯、乙烯)、硫化物 (如 H ₂ S)、氨氣 (NH ₃)
3. 油氣開採區	天然氣田、油氣井和相關的管道輸送設施	量化甲烷洩漏與溫室氣體排放，支持甲烷減排行動	甲烷、非甲烷揮發性有機化合物 (NMVOC)

三、研究方法

本研究盤點煉油與石化工業區移動測繪溯源技術，綜合考量應用場景、監測物種、靈敏度及時間解析度等因素。經比較後，選定火燄離子化偵測法 (FID) 作為示範技術，並規劃溯源流程為 4 個步驟：(1) 廠外環境濃度監測、(2) 廠內污染熱區標定、(3) 污染源直接量測、(4) 洩漏即時修復。執行流程如表 2。

表 2 溯源流程

步驟	工具	說明
1. 廠外環境濃度監測	固定站	由廠外固定站監測環境濃度，掌握長期趨勢以鎖定嫌疑廠區
2. 廠內熱區標定	移動測繪	以移動平台搭載檢測儀器，於廠內行經大範圍區域，快速篩查出污染熱區
3. 污染源直接量測	巡檢工具	根據污染源特性，選定合適的儀器標定洩漏源
4. 洩漏即時修復	FID	以 FID 監控修復過程的濃度變化，確認改善情形

3.1 環境濃度監測設備

固定監測站設備的選用須考量監測物種、靈敏度、時間解析度、空間覆蓋範圍及適用場景等因素。不同設備比較如表 3，摘要說明如下：

表 3 固定站設備比較

特性	GC-FID (光化站)	OP-FTIR	Online TD-GC-MS	PTR-TOF-MS
監測物種 範圍	VOCs、 部分 HAPs	VOCs、 無機氣體	VOCs (尤其是 HAPs)	VOCs、 無機氣體
靈敏度	高	中等	高	極高
時間 解析度	1 小時	2~5 分鐘	1 小時	數十秒
空間覆蓋 範圍	定點	數百公尺	定點	定點或移動測繪
適用場景	定點源監測與溯源	開放區域監測	定點源監測與溯源	高時空分辨監測 與動態分析
限制	無法依需求更改位置，共析物干擾	受環境條件 影響大	須定期維護， 非即時	設備昂貴， 同重物干擾

1. GC-FID：主要監測光化前驅物 (VOCs)，具高精度計量能力，但僅涵蓋部分芳香烴類的空氣污染物及異味污染物，較難全面應對污染監測需求。
2. OP-FTIR：適用大範圍快速篩查，但易受環境條件干擾，監測穩定性較低。
3. Online TD-GC-MS：具備高精度定量能力，適用於源解析，但時間解析度較長（約 1 小時）。
4. PTR-TOF-MS：具高靈敏度與即時監測能力適用於移動測繪，但設備昂貴。

3.2 移動測繪設備

移動測繪技術要求高時間解析度與抗震設計，主要設備比較如下：

1. PTR-MS 及 CRDS：高敏感度，可針對特定物種監測。
2. FID：針對總碳氫化合物 (THC) 量測，在國內廣泛用於設備元件檢測，具高度普及性。

依照應用場景（如都市空氣污染監測、煉油與石化工業區、油氣開採等）及污染物種選用適當設備，比較如表 4。

表 4 移動測繪設備比較

應用場景	污染物種	移動測繪設備	時間解析度	偵測極限
1. 都市空氣污染監測	NO, NO ₂ , PM _{2.5} , PM ₁₀ , 黑碳 (BC)	高靈敏度 NO _x 分析儀、光學粒徑計 (如 aethalometer)	1 秒 ~ 1 分鐘	NO ₂ 約 1 ppb, BC 約 0.01 μg/m ³
2. 煉油與石化工業區	VOCs (如苯、甲苯、1,3-丁二烯)、硫化物 (H ₂ S)、NO _x	PTR-MS、CRDS、FID (火焰離子檢測器)	1 秒 ~ 1 分鐘	VOCs 約 0.1 ppb, H ₂ S 約 0.3 ppb
3. 油氣開採	甲烷 (CH ₄)、乙烷 (C ₂ H ₆)、VOCs	CRDS、激光氣體分析儀 (TILDAS)	1 秒 ~ 10 秒	CH ₄ 約 0.1 ppb, C ₂ H ₆ 約 0.5 ppb

3.3 污染源直接量測設備

污染源標定主要透過攜帶式洩漏偵測設備（巡檢設備），包括：

1. 手持式 FID 及光離子偵測器 (PID)：近距離偵測（數公分內），檢測速度較慢但靈敏度高（PID 可達 ppb，FID 可達 ppm）。
2. 光學氣體成像儀 (OGI) 與超聲波顯像儀 (AIC)：可遠距離偵測（數十公尺），檢測速度快但靈敏度相對較低。

其中，OGI 的偵測下限與物種相關，約 5,000 ppm 以上。AIC 可偵測 20 kHz~100 kHz 的超音波範圍，高於人耳可聽頻率 (20 KHz)。設備比較如表 5。實務上，依靈敏度、應用場景與使用限制選擇適用設備，並可搭配不鏽鋼桶採樣與氣相層析 / 質譜儀進行更精確的定性 / 定量分析。

表 5 巡檢設備比較

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 VOCs 濃度異常偵測	檢測速度較慢，1 天檢測量約 400 點	1~20,000 ppm
PID 檢漏儀	輕便，偵測靈敏度高，製程區測值代表周遭可能有設備元件洩漏	相較於 FID 對物種具通用性，PID 具選擇性，而於設備元件檢測較受限	1 ppb~15,000 ppm
光學氣體成像儀 (OGI)	檢測距離遠，可於數公尺外測得洩漏	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）、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，可於數公尺外測得洩漏	受背景噪音干擾而須排除，不適用低壓系統洩漏，操作技術要求高故人員須培訓	20~100 kHz

四、結果與討論

4.1 案例分析

4.1.1 溯源案例考量

1. 廠外環境濃度監測：考量國內光化站及特工站監測網較完整，故挑選其測項為溯源物種。
2. 移動測繪設備：目前國內尚未導入具抗震性的 CRDS 或 PTR-MS，因此本研究先用 FID 進行移動測繪。然而，由於 FID 對物種不具選擇性，在石化園區道路進行測繪時，可能會受到多種石化原料的干擾，導致數據解釋困難。為確保 FID 測得的污染物為單一物種，且考量 FID 偵測靈敏度較高，廠外監測可能無濃度梯度，故案例選擇於乙炔罐裝廠廠區內執行。
 - (1) 巡檢工具：考量罐裝場高壓容器洩漏特性，選用 AIC 巡檢。
 - (2) 修復過程監控：選用 FID 於定點近距離監控。

執行流程 4 步驟的設備選定整理如表 6。

表 6 溯源案例選定設備比較

步驟	選定設備	時間解析度	選定原因
1. 廠外環境濃度監測	GC-FID	1 小時	國內光化站、特工站監測站網較完整
2. 廠內熱區標定	手持式 FID	1 秒	目前國內雖有 PTR-MS 及 CRDS，但尚未引入避震系統及應用於移動測繪 擇定物種單純之氣體灌裝廠，排除多項物種之化工製程
3. 污染源直接量測	超聲波顯像儀	1 秒	考量乙炔罐裝廠高壓洩漏特性而選用
4. 洩漏即時修復	手持式 FID	1 秒	國內常用於設備元件檢測，設備普及度高

4.1.2 廠外環境濃度監測

依據國內空氣品質指標 (AQI) 管理方式，設定乙炔濃度閾值，以紅 (300 ppbv 以上)、橘 (60~300 ppbv)、黃 (30~60 ppbv)、綠 (30 ppbv 以下) 圖像化展示 111 年乙炔濃度的時空變化 (如圖 1)。各光化站、特工站之乙炔日最大小時值熱點圖如圖 1，x 方向為 111 年 1 月 1 日至 111 年 12 月 31 日逐日，y 方向為測站別。分析結果顯示，光化站行動 06 站 (X)、林園特工站汕尾里站 (Y) 為污染熱區。由 X、Y 測站污染玫瑰圖 (如圖 2、圖 3) 顯示，其異常高值主要出現在北風時段，比對上風處工廠原料清單，發現 A、B 2 家乙炔灌裝廠為可能逸散源 (如圖 4)。

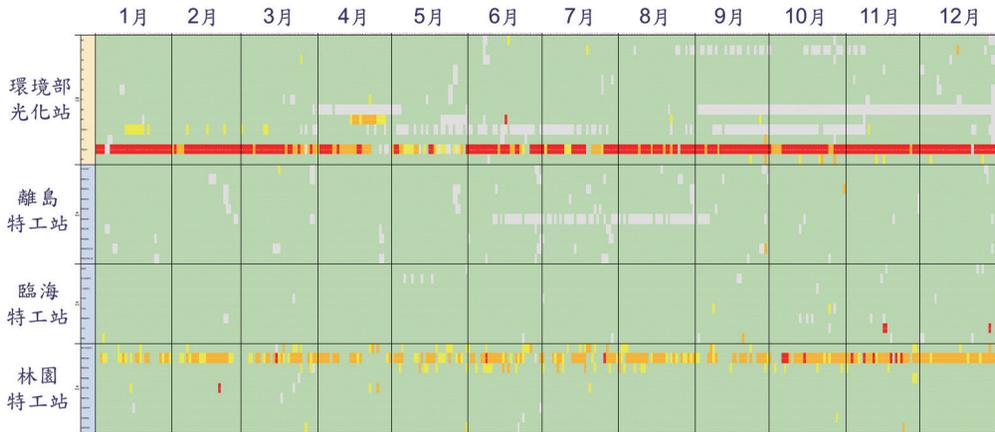


圖 1 111 年逐日乙炔濃度 (日最大小時值) 熱點圖

(註：原彩圖請至產業綠色資訊網站下載 <https://sdd.nat.gov.tw/eta/index.aspx>)

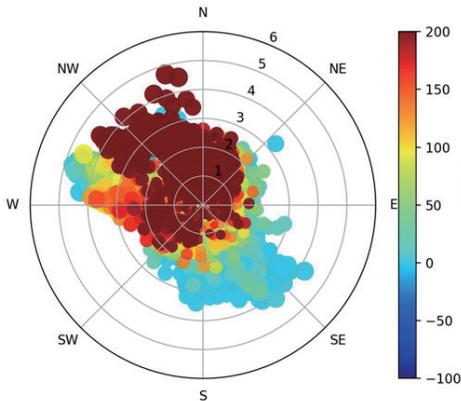


圖 2 光化站 (X) 乙炔污染玫瑰圖

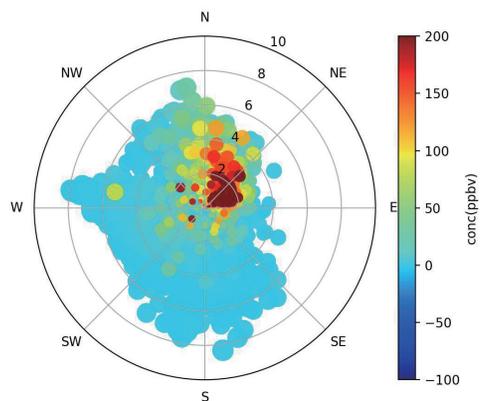


圖 3 林園特工站 (Y) 乙炔污染玫瑰圖



圖 4 A、B 工廠與固定站相對位置圖

4.1.3 移動測繪

依據固定站數據，針對 A、B 廠進行移動測繪（如圖 5、圖 6），軌跡線色塊對應的 VOCs 濃度為紅（300 ppmC 以上）、橘（60~300 ppmC）、黃（30~60 ppmC）、綠（30 ppmC 以下）。結果顯示，A、B 廠的熱區皆為灌裝區與實瓶區（出貨區），分別標註於圖中位置 1 和位置 2。因 A 廠較無濃度梯度，B 廠污染熱區較為顯著，因此進一步進行污染源標定。



圖 5 A 廠乙炔熱區標定圖

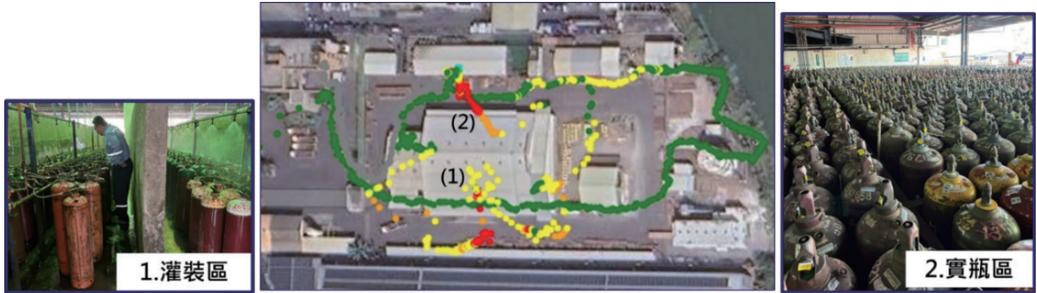


圖 6 B 廠乙炔熱區標定圖

4.1.4 污染源直接量測與修復

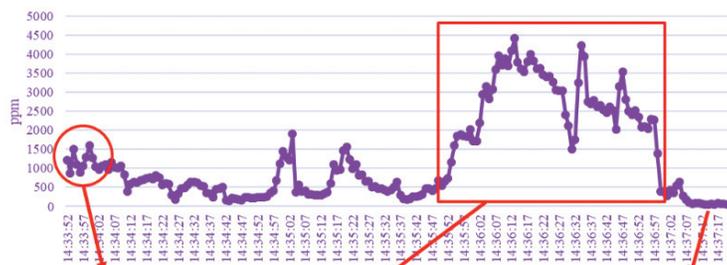
傳統工廠常以聲音來源或肥皂水泡泡測試洩漏點，然而該方法效率低且即時性不足；本研究考量高壓鋼瓶洩漏特性，改用 AIC 進行高壓氣體洩漏偵測，以迅速定位洩漏來源，如圖 7 所示。以 AIC 巡視 A 廠過程，發現實瓶區有偵測出高頻聲音來源，以手持式 FID 進行定點量測，結果顯示某一鋼瓶有閥件洩漏情形，測得濃度為 68 ppmC，如圖 8 所示。另巡視 B 廠過程中，由於 B 廠污染熱區較為顯著，以 AIC 迅速定位 B 廠洩漏源後，以手持式 FID 進行定點量測，結果顯示 VOCs 濃度高達 1,300 ppmC。修復期間因拆卸洩壓閥，濃度升至 4,500 ppmC，最終修復完成後濃度下降至 33 ppmC（如圖 9），證實減量效果。



圖 7 超聲波顯像儀快速定位壓力鋼瓶乙炔洩漏



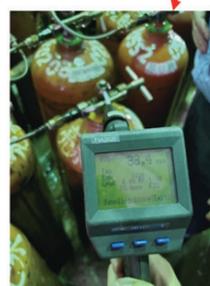
圖 8 A 廠實瓶區壓力鋼瓶乙炔洩漏



熱區巡檢發現污染源
(1,373 ppm)



更換洩漏鋼瓶墊片
(瞬間洩壓)



修復後VOCs降至
(33 ppm)

圖 9 FID 定點監控 B 廠乙炔灌裝鋼瓶之修復

4.2 本案例執行經驗檢討

本案例使用多重且具互補性技術達到污染溯源功能，包括固定站熱點調查、手持式 FID 於工廠移動測繪，及超聲波顯像儀標定污染源。依據本案例執行經驗，未來若要擴大應用，必須注意事項檢討如下：

1. 多物種干擾：本研究以物種單純之氣體灌裝廠為案例，然而大部分石化工廠之化學物種複雜，使得測量 TVOC 之 FID 測值受到干擾，無法準確定量。雖然 PTR-MS 及 CRDS 具有檢測特定物種的能力，但是其價格昂貴且操作、維護不易，若是退而求其次使用 FID，建議於高值路段搭配鋼桶採樣分析，掌握污染指紋，提升數據的完整性。
2. GPS 選用考量：本研究於甲、乙廠同步使用手機 GPS 與 FID 內建 GPS 進行移動測繪（見圖 10、圖 11）。結果顯示，FID 之 GPS 受限於僅能接收衛星訊號，受建築遮蔽影響較大，而手機 GPS 除衛星訊號外，還可輔助 Wi-Fi 及行動通訊定位，因此測繪路線相對精準。石化廠內特定區域工安要求嚴格，手持式 FID 配置的 GPS 記錄器具備防爆設計，然而 GPS 手機之防爆功能可能需要額外購置。
3. 適用於地面逸散源：本研究依據 OTM-33 及 OTM-33A 進行地面逸散源測繪，惟高架排放源（如高煙囪或高架管線洩漏）可能無法進入測繪範圍（如圖 12），因此針對高空排放源仍需採用不同技術，如於煙道下風處架設太陽能空品感測器於工廠頂樓，以掌握高空污染情形。
4. 風場影響：污染源與移動測繪設備之間可能受風向風速影響（如圖 13）。本研究進行近場監測，當日風速接近靜風，影響較小，未來應考量風場因素以提升測繪精度。
5. 作業安全：本研究測得廠內乙炔濃度最高約 1,300 ppmC，遠低於工安偵測器觸發閾值（30% 爆炸下限 (LEL)，乙炔 LEL 約為 2.5%），因此未觸發警報，確保測繪作業安全。

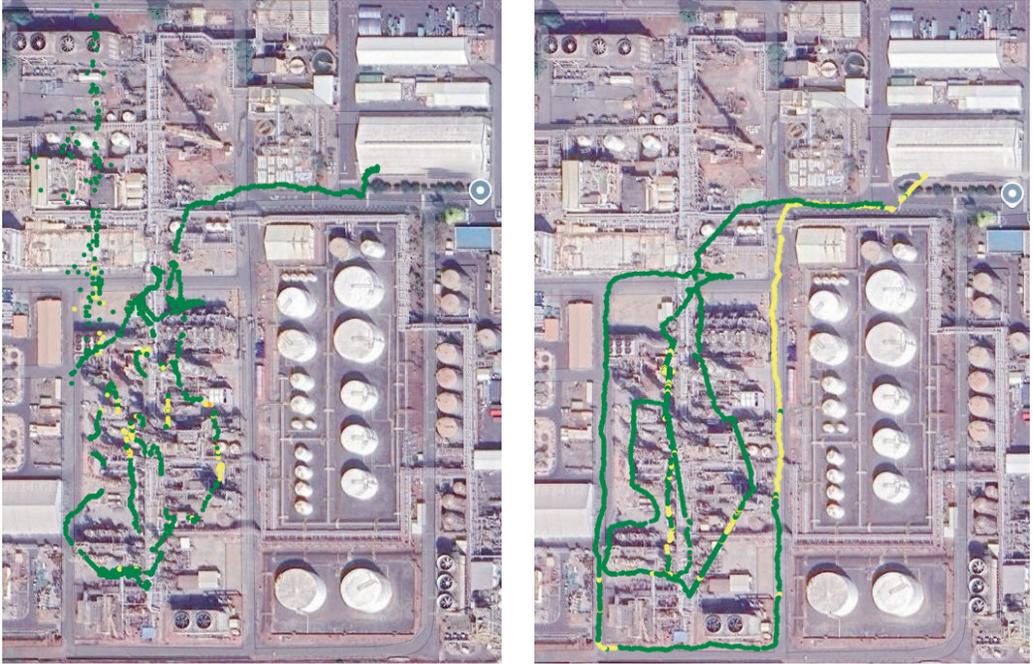
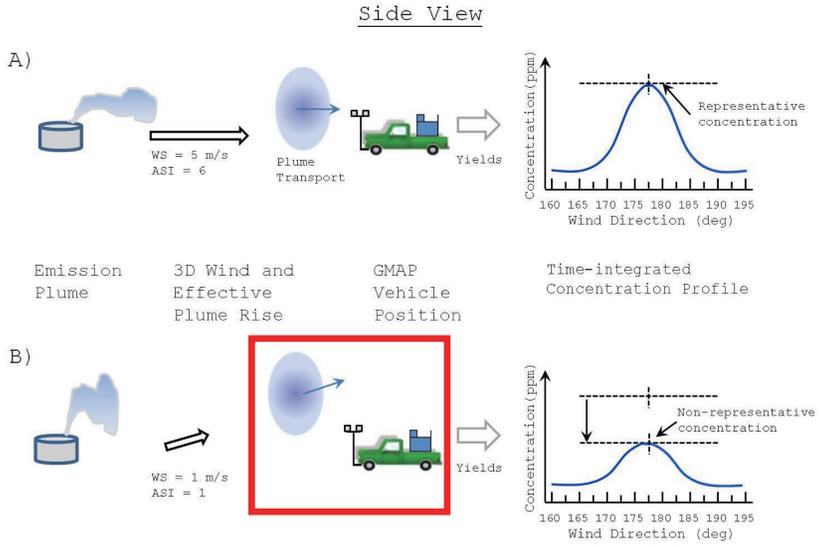


圖 10 甲廠 GPS 定位比較 (左圖僅衛星訊號, 右圖另含 Wifi 訊號)



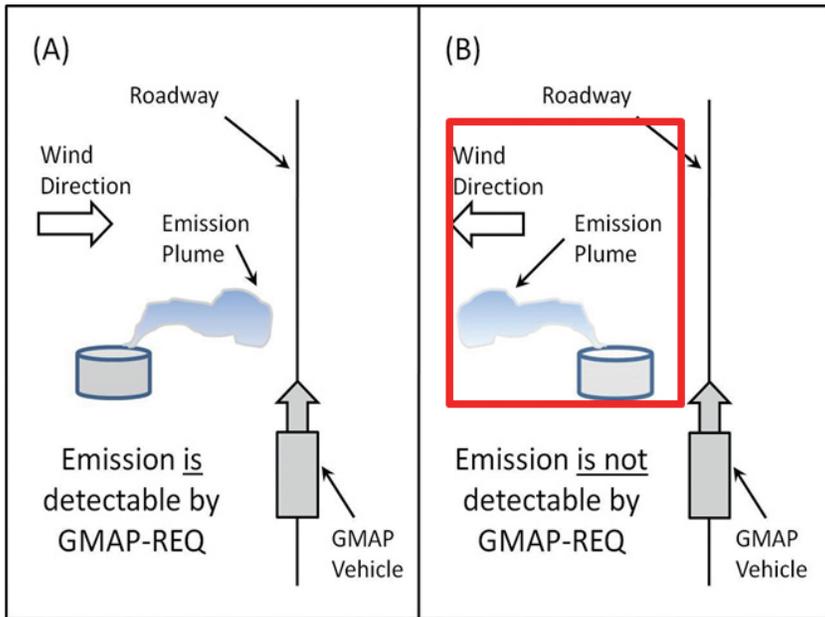
圖 11 乙廠 GPS 定位比較 (左圖僅衛星訊號, 右圖另含 Wifi 訊號)

52 結合地面移動測繪技術溯源 - 以火燭離子化偵測法為例



資料來源：OTM 33 及 OTM 33A

圖 12 排放高度影響



資料來源：OTM 33 及 OTM 33A

圖 13 風向干擾

五、結論與建議

本研究透過固定站監測與移動測繪技術，驗證了火焰離子化偵測法 (FID) 在氣體洩漏溯源中的應用成效。研究結果顯示，透過固定站長期數據可有效辨識污染熱區，再以移動測繪技術於廠區內進行高時空解析度的污染分布調查，能迅速鎖定高濃度區域並進一步定位洩漏源。FID 雖對物種選擇性有限，但於單一污染物主導的場域（如乙炔罐裝廠）具備高度實用性；搭配超聲波顯像儀 (AIC) 進行污染源直接量測，可精確掌握洩漏位置並即時監控修復成效，有效提升污染防治效率。

本研究的技術應用與成果重點如下：

1. 監測策略優化：固定站監測與移動測繪互補，兼顧長期趨勢與即時熱區鑑別，提升污染源調查的全面性。
2. 技術選擇與多元感測整合：依據場域特性選用 FID 作為核心監測設備，並結合 AIC 等多元感測技術，發揮儀器互補優勢，精確定位洩漏源並即時監控修復成效，顯著提升污染溯源效率與防治成效。
3. 應用推廣潛力：本研究模式可作為石化工業區及其他高風險場域污染防治之參考，具備推廣與標準化應用價值。

建議事項：

1. 推動移動測繪技術標準化與規範制定：建議主管機關及產業界共同推動移動測繪技術於工業區污染溯源之標準操作流程 (SOP) 與檢測規範，提升污染熱區鑑別與應變效率，補足現有固定監測站空間覆蓋之不足。
2. 整合多元感測技術，強化污染源監控與管理：鼓勵工業區及廠商導入 FID、AIC、OGI 等多元感測設備，建立分層監控與即時回饋機制，針對高風險區域定期巡檢與即時修復，提升污染源管理成效。
3. 建立污染熱區長期監測與預警制度：建議針對已鑑別之污染熱區，規劃長期監測與維護計畫，結合 AI 與大數據分析，發展即時預警系統，協助工廠及管理單位及早發現異常排放並迅速處理，降低環境與安全風險。

本研究成果可為工業區氣體洩漏溯源技術發展提供實證依據，並協助主管機關與產業界優化污染監測與管理策略，強化工業污染防治效能，促進環境永續與公共安全。

參考文獻

- Thoma, E., and Squier, B. (2014). OTM 33 Geospatial Measurement of Air Pollution, Remote Emissions Quantification (GMAP-REQ) and OTM33A Geospatial Measurement of Air Pollution-Remote Emissions Quantification-Direct Assessment (GMAP-REQ-DA), U.S. Department of Environmental Protection Office of Research, Cincinnati, OH.
- U.S.EPA, Next Generation Emission Measurement (NGEM) Research for Fugitive Air Pollution, <https://www.epa.gov/air-research/next-generation-emission-measurement-ngem-research-fugitive-air-pollution>
- <https://louisvilleky.gov/government/air-pollution-control-district/epa-air-toxics-monitoring-project-louisville>
- Apte, J. S., Messier, K. P., Gani, S., Brauer, M., Kirchstetter, T. W., Lunden, M. M., ... & Hamburg, S. P. (2017). High-resolution air pollution mapping with Google street view cars: exploiting big data. *Environmental science & technology*, 51(12), 6999-7008.
- Messier, K. P., Chambliss, S. E., Gani, S., Alvarez, R., Brauer, M., Choi, J. J., ... & Apte, J. S. (2018). Mapping air pollution with Google Street View cars: Efficient approaches with mobile monitoring and land use regression. *Environmental science & technology*, 52(21), 12563-12572.
- Knighton, W. B., Herndon, S. C., Wood, E. C., Fortner, E. C., Onasch, T. B., Wormhoudt, J., ... & Jones, M. (2012). Detecting fugitive emissions of 1, 3-butadiene and styrene from a petrochemical facility: An application of a mobile laboratory and a modified proton transfer reaction mass spectrometer. *Industrial & engineering chemistry research*, 51(39), 12706-12711.

Brantley, H. L., Thoma, E. D., Squier, W. C., Guven, B. B., & Lyon, D. (2014). Assessment of methane emissions from oil and gas production pads using mobile measurements. *Environmental science & technology*, 48(24), 14508-14515.

Rella, C. W., Tsai, T. R., Botkin, C. G., Crosson, E. R., & Steele, D. (2015). Measuring emissions from oil and natural gas well pads using the mobile flux plane technique. *Environmental science & technology*, 49(7), 4742-4748.

林楷傑、黃志威、郭子豪、吳宜展、黃溢銓 (2024)，導入 AI 技術強化石化廠監控實現即時洩漏偵測與防範，綠色技術與工程實務研討會，1-88。

資源循環與再利用類

提升垃圾焚化廠運轉效益 - 突破瓶頸減少歲修次數

葉平堯*、王志豪**、洪建皓***

摘 要

營運中的焚化廠往往因所處理的垃圾成分複雜，且長時間於高溫、高負載的條件下操作，當連續運轉接近半年時，易發生煙道積灰阻塞、耐火材料脫落、爐內燒結物增生、機械設備磨耗等問題，導致運轉效能下降，須透過較長時間的計畫性檢修 - 歲修，進行設備的全面維修及保養，以恢復正常處理效能，故焚化廠一般需規劃每年 2 次歲修。然而，受近年垃圾熱值不斷升高、焚化廠逐漸老舊等因素影響，焚化廠的處理量能逐年下降，且需要較運轉初期更長的時間才可完成歲修作業；又因各掩埋場逐漸飽和，一年 2 次歲修期間的垃圾調度也成為各縣市政府的棘手難題。

信鼎技術服務股份有限公司憑藉長期操作維護各類型焚化廠的經驗，持續導入新的技術工法，評估於轄下焚化廠將每年 2 次歲修縮減為每年 1 次歲修的可行性，透過導入高合金披覆爐管以降低鍋爐第一煙道高風險區域破管機率、調整爐床檢修工法以避免爐條運轉中脫落、提升移動式震波清灰頻率以減少煙道積灰阻塞等工法改善，成功於 111 年度將苗栗縣垃圾焚化廠從過往的一年 2 次歲修，縮減為一年 1 次歲修，於 111 年 3 月至 112 年 3 月期間，亦無再因前述瓶頸而導致非計畫性停爐，111 年度在垃圾進廠量、垃圾處理量、鍋爐運轉率及焚化熱能負載率等關鍵績效指標，皆創下近 5 年新高，透過技術導入及維護工法調整，成功提升運轉效益，深化綠色低碳營運。

【關鍵字】歲修、高合金披覆爐管、移動式震波清灰、提升運轉效益

* 信鼎技術服務股份有限公司	工程師
** 信鼎技術服務股份有限公司	廠長
*** 信鼎技術服務股份有限公司	工程師

一、前言

台灣地區的廢棄物處理政策早期以掩埋為主，然而伴隨人口增長、產業發展及環保意識抬頭，民國 75 年時行政院已將焚化列為垃圾中長程處理方案，並由前行政院環保署於民國 79、85 年分別訂定「台灣地區垃圾資源回收廠（焚化廠）興建計畫」、「鼓勵民營機構興建、營運垃圾焚化廠推動方案」，推動焚化廠的興建及鼓勵民間機構參與投資及營運。相較於掩埋處理有占地面積大、容易因沼氣而引發自燃等問題，焚化處理可有效減少垃圾體積，將垃圾轉化為可再利用的底渣及安定的飛灰穩定化物，而焚化過程產生的熱能則可轉換為電力轉售予台電公司，因為具有前述優點，焚化處理遂成為台灣目前主要的垃圾處理方式。

垃圾焚化流程係將垃圾車清運進廠之廢棄物，集中傾卸至焚化廠之貯坑，經由抓斗攪拌後投入焚化爐內，於燃燒室內經由 850~1,050°C 的高溫燃燒，廢棄物燃燒後則產生底渣與飛灰等副產物，經分別收集、處理後再轉送至再利用機關進行再利用及掩埋場進行掩埋，燃燒過程中所產生的廢氣則透過水牆式鍋爐進行熱交換，再經由半乾式洗煙塔去除廢氣中的 HCl、SO_x 等污染物質，並透過袋式集塵器收集反應灰後，經由煙囪排放至大氣。水牆式鍋爐中的鍋爐水則透過廢氣加熱轉換為蒸汽，用於焚化廢汽、水系統的預熱以及推動汽輪發電機產生電能，剩餘的蒸汽則透過冷凝器回收至鍋爐系統中循環再利用。焚化廠全廠製程可參考圖 1 之示意圖。

鍋爐設備長期於高溫高壓條件下連續操作、加上廢棄物成分複雜，焚化廠製程前段的爐床、鍋爐水管牆等設備，容易受到熱腐蝕及廢氣沖蝕而變形、減薄，而製程後段的蒸發管、過熱器管亦容易因為長時間操作，積灰過多阻塞，使誘引式風機加重負載，難以維持燃燒室內正常燃燒狀況所需的負壓條件，造成處理量下降。受限於設備因長時間運轉而導致的效能衰退，焚化廠的機組約莫在連續運轉半年時就會發生處理量、發電量下降等問題，甚至可能發生鍋爐破管或機械故障等事故，需透過計畫性停爐檢修，進行維護保養如設備清潔、耗材零件更換，維持正常處理效能。此例行的計畫性停爐維修作業，即所謂的“歲修”。

國內焚化廠多採行一年 2 次歲修之維護保養模式，惟因各縣市焚化廠皆已近屆齡延役整改期，又受廢棄物熱值升高之影響，處理效能已不若營運初期，甚至有逐年緩降之趨勢，各縣市之掩埋場亦漸趨飽和，因此歲修期間的垃圾調度往往成為讓地方主管機關困擾之難題，若能將焚化廠例行之歲修減少為一年 1 次，應可適度減緩所屬縣市之垃圾處理壓力。

信鼎技術服務股份有限公司（以下簡稱信鼎公司）為專業之垃圾焚化廠操作營運廠商，具有多年的焚化廠歲修工作經驗，擅長依不同焚化廠的特性安排適當的工法，為了導入一年 1 次歲修之維護保養模式，積極評估轄下焚化廠執行之可行性，綜合檢視各焚化廠的鍋爐形式、歲修關鍵工作項目、可採行之改善工法等條件後，選定苗栗縣垃圾焚化廠（以下簡稱苗栗廠）為試行焚化廠，於 111 年度達成一年 1 次歲修，有效提升苗栗廠運轉效益，減少碳排，優化實踐循環經濟。

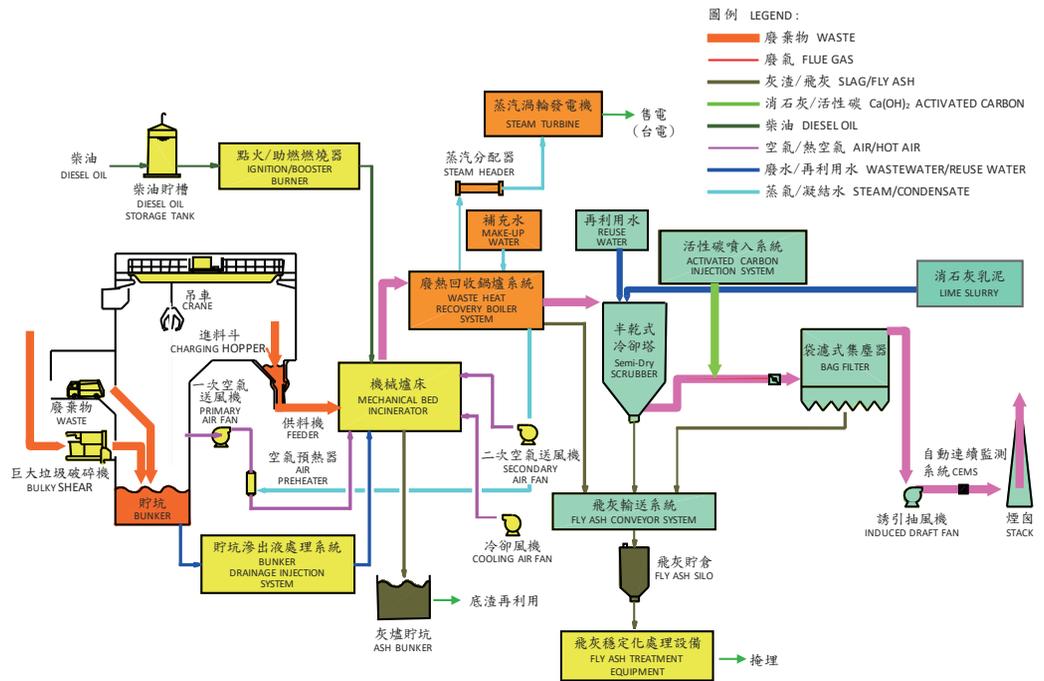
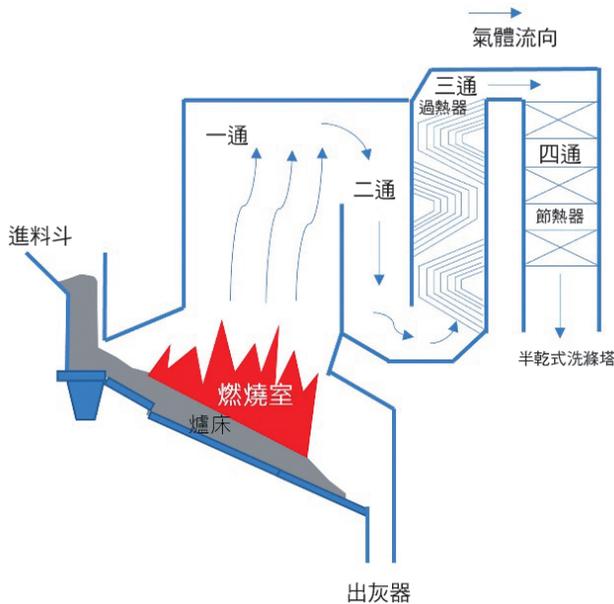


圖 1 垃圾焚化廠製程說明

二、工法改善

欲將一年 2 次之歲修縮減為 1 次，信鼎公司以既有掌握的各焚化廠的設備形式、歲修工作計畫，篩選出需要改變保養或施工方法之設備，並選定適用的新設備或工法，克服運轉半年需停爐檢修之瓶頸。以苗栗廠為例，需克服瓶頸之設備主要為爐床、第一煙道（一通）水管牆以及第三煙道（三通）過熱器管，前述 3 項設備於運轉時所遭遇之瓶頸可見圖 2 說明。透過工法改善，成功使苗栗廠於 111 年開始執行一年 1 次之歲修模式，以下為關鍵工法簡介：



- * 爐床：由固定件與移動件組成，負責垃圾的移動及翻攪，因作動頻繁且直接與垃圾接觸，容易發生脫落或是變形，常態需於歲修時進行保養。
- * 一通：位於燃燒室正上方的第一條廢氣通道，直接受到高溫及氣流影響，為爐管破管的高風險區域。管厚減薄率高，需於歲修時密集量測檢查。
- * 三通：鍋爐過熱器管的所在位置，因為過熱器管密集分布與溫度較高的特性，導致鍋爐灰容易於過熱段堆積甚至於形形成燒結物附著，運轉經過一段時間後容易阻塞，影響鍋爐內的負壓條件，進而導致鍋爐降載。

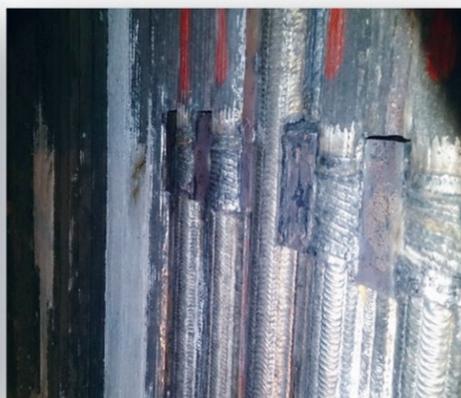
圖 2 1 次歲修需克服工作瓶頸之關鍵設備

2.1 第一煙道高風險區域採用高合金披覆爐管

由於燃燒室及第一煙道的爐管最先承受高溫燃燒廢棄物產生的熔融態飛灰、 SO_x 及 HCl 等氣體以及高溫氣體沖蝕，成為鍋爐破管的高風險區域，歲修時需要架設施工架對此區域的耐火材料與爐管進行密集檢查，且因碳鋼管容易減薄，亦需要較頻繁的重新灌注耐火材料及更換爐管。透過在碳鋼管材上預先披覆具有耐腐蝕、耐氧化及耐磨特性的鎳基超合金材料 - 英高鎳 (Inconel) 合金，可有效提升第一煙道爐管對高溫環境的耐受度，歲修時即可免除此區域的搭建檢查及爐管更換。高合金披覆爐管與一般碳鋼爐管對照如圖 3 所示。



未披覆英高鎳合金之碳鋼管



堆焊披覆英高鎳合金之碳鋼管

圖 3 一般碳鋼管與堆焊處理後之碳鋼管對照

2.2 增加移動式震波清灰頻率

廢氣進入半乾式洗煙塔與袋式集塵器等污染防制設施前，會經過鍋爐中數組的過熱器管排，並與管排中的鍋爐水進行熱交換，降低廢氣溫度並產生推動汽輪機所需的過熱蒸汽。由於需在有限的空間內完成熱交換，過熱器管排以密集排列的方式設置於煙道中，加上焚化廠處理的廢棄物性質複雜，導致鍋爐運轉一段時間後容易於此處發

生積灰阻塞，使得熱交換效能下降，過往於半年 1 次的歲修時需要進行清灰、管壁厚測等保養作業，導致作業時間拉長。移動式震波清灰技術係在鍋爐正常運轉期間，將前端裝有特殊氣體之燃料袋，以專用設備伸入過熱器管排間，藉由鍋爐內的高溫點燃氣體，產生小規模的爆炸將過熱器管排間的積灰震落，讓爐管可恢復原先的熱交換效能，而積灰清理後亦可讓燃燒室維持良好的負壓，使焚化廠可以保持正常的處理效能，待一年 1 次的歲修時再行清潔。執行移動式震波清灰前後過熱器管排對照如圖 4 所示。

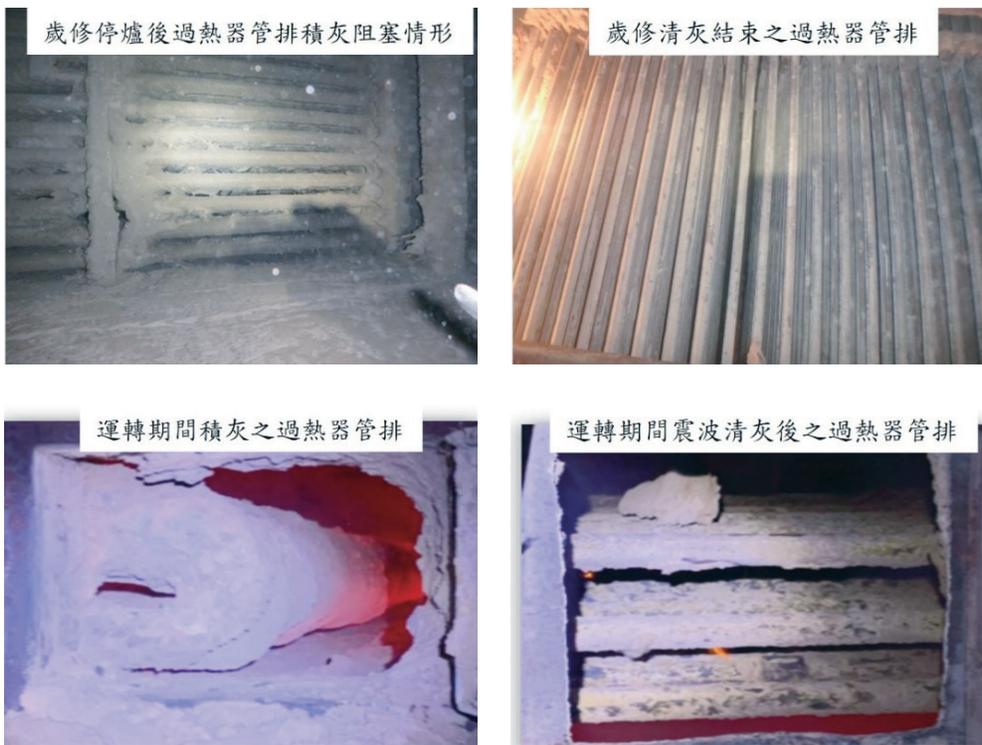


圖 4 積灰過熱器管組與清灰後過熱器管組對照

2.3 爐床易損壞區域加強焊接

爐床是焚化廠處理垃圾的關鍵單元，主要功能係讓垃圾可以在有限的空間內進行乾燥、燃燒，而燃燒後剩餘的底渣則掉落至出灰器，集中於底渣貯坑收集。為使垃圾

以一定的速率移動，爐床設計為一個具有 30 度角，由可動部分、不可動部分之構件組成的大型機械設備，由於長時間在高溫環境中作動，歲修時會視磨損情形作執行爐條的局部更新，但並非採爐條 1 次全面更新的作法，故新舊爐條間的公差以及卡樺的強度將會產生落差，若需連續運轉近 1 年，可能於運轉期間中發生故障而導致停爐。為避免前述風險，透過檢視苗栗廠過往的歲修紀錄，規劃出爐床高風險損壞區域，於歲修期間將該區域的爐條更新，並加強側邊固定卡樺之穩定度，減少因爐床故障造成需停爐的狀況發生。

三、一年 1 次歲修效益說明

藉由前述 3 項工法改善，苗栗廠已於民國 111 年開始，成功達成一年 1 次歲修之目標（111 年 3 月歲修後，可維持足夠良好之運轉效能持續至 112 年 3 月歲修），因減少歲修次數，焚化爐起爐前進行水壓測試確認爐管焊接良好所需之純水，以及起爐停爐期間用於持溫及降溫之柴油等原物料皆可減少使用；另外受惠於運轉天數增加，處理量、發電量及減碳量皆有顯著提升，一年 2 次歲修與 1 次歲修之效益差異比較如表 1 所示：

表 1 一年 2 次歲修與一年 1 次歲修之效益差異比較

效益指標	2 次歲修	1 次歲修	效益
歲修工作日數（天）	22	16	減少工作天數
爐管壓力測試用水（公噸）	240	120	減少純水使用量 120 噸 / 年
起 / 停爐助燃柴油（公秉）	48	24	減少柴油使用量 24 公秉 / 年
廢棄物處理量（公噸）	169,700	172,668	增加處理量 2,969 公噸 / 年
年發電量 (MWh)	80,344	81,749	增加發電量 1,405 公噸 / 年
減少用柴油減碳效益 （公斤 / 年）	-	64,320	減少碳排放量約 64 公噸 / 年
增加發電量減碳效益 （公斤 / 年）	-	695,689	減少碳排放量約 695 公噸 / 年

四、結語

以苗栗廠一年 1 次歲修模式的成功經驗，信鼎公司將持續精進技術整合應用，搭配內部歲修施工關鍵作業要點及管理作為，積極於其他焚化廠導入此一次歲修模式，亦持續審慎評估其他新技術應用於縮短歲修工期之可行性，降低環境衝擊並最大化焚化廠的運轉效能，達到珍惜每一分資源的目標，深化綠色低碳營運。

參考文獻

謝錦松、黃正義 (1988)，固體廢棄物處理，淑馨出版社。

魏豐義 (1992)，焚化爐較低溫部之腐蝕與耐蝕鋼材的發展，防蝕工程，6 卷 4 期，P 37-55。

施瑞卿、紀茂樹、蘇敬智、楊建邦 (2018)，焚化爐鍋爐管材被覆技術探討與應用，化工，65(4)，P 46-50。

曹師維 (2024)，導入清灰技術提升資源循環效能，崑鼎電子報 No.025，<https://www.ecove.com/e-newsletter/?l=CH&no=025&cat=key-technology&article=01>。

資源循環與再利用類

多元化無機資源物製備低碳排產品之 技術研發

羅勻謙*、李梯群**、卓大鈞**、李韋皞***、吳亞竹****

摘 要

隨著氣候變遷議題日益嚴峻，如何有效減緩溫室氣體排放成為產業與學術界的重要課題，傳統土木與建材業普遍仰賴高碳排原料與製程，亟需發展具永續性與環保效益的新興材料技術。本文聚焦於無機聚合技術 (Geopolymer Technology)，彙整無機聚合產品國內外應用情形及國內未來發展方向，並實際以國內製造業產生之無機資源物如還原渣、混燒飛灰等，以無機聚合技術製備具機械性能與環保效益兼具之低碳排產品（非構造物用混凝土、控制性低強度回填材料及高壓地磚等），其開發經驗供國內產業參考。

【關鍵字】無機聚合技術、無機資源物、低碳產品

* 財團法人台灣綠色生產力基金會

** 財團法人台灣綠色生產力基金會

*** 國立臺北科技大學資源工程研究所

**** 環境部資源循環署

副理

工程師

助理教授

特約助理環境技術師

一、前言

面對全球氣候變遷與淨零排放的挑戰，低碳轉型已成為我國政策與產業發展的重要方向。我國事業廢棄物以無機資源物為大宗，每年約有 1,500~1,700 萬公噸產生，如能將其中的物理化學成分加以利用，將其轉換為再利用材料，不僅能解決廢棄物處理問題，同時也能發揮資源的最大價值。

而妥善利用無機資源物之關鍵，在於掌握其原料特性及選用適合技術，國內無機資源物以灰渣、爐渣、污泥類為主，其中電弧爐煉鋼爐還原渣（石）（簡稱還原渣）及混燒灰渣因具有不穩定成分，容易造成膨脹性問題，如未妥善處理，將影響產品品質及後端使用意願。現行解決膨脹性問題的方法主要為高壓蒸氣安定化技術，即於高溫高壓條件下蒸壓至少 3 小時，但此技術耗能較高；另一方面，無機資源物資源化現況又以預拌混凝土、控制性低強度回填材料（Controlled Low Strength Material，簡稱 CLSM）及再生粒料等土木、建材類用途為主，但大多需添加水泥等高碳排膠結材料，進一步提高產品碳排放量。

為解決前述問題，本會 112 年度執行環境部資源循環署「無機資源循環材料技術研發與管理計畫」，以未經安定化處理之還原渣、混燒灰渣（飛灰）及砂石碎解洗選場泥餅（簡稱泥餅）等無機資源物為素材，實際運用低能耗之無機聚合技術產製非構造物用混凝土、CLSM 及高壓地磚等產品，所產製之產品其品質可符合國家標準及施工綱要規範，同時具有減碳及成本效益，展現應用無機聚合技術生產多元產品的可行性。

本文首先概述無機資源物資源化現況及面臨問題，介紹無機聚合技術原理、特性及國內外發展現況，分享以無機聚合技術開發低碳排產品之成果。最後，提出未來推動規劃及配套措施建議，期望為無機資源物拓展多元化應用管道，及降低資源化過程碳排放量之目標。

二、無機資源物資源化現況及面臨問題

2.1 無機資源物資源化現況

1. 產出現況

經分析環境部資源循環署之事業廢棄物統計年報(2023)相關數據，112年無機資源物產生量達1,502.1萬公噸，主要以灰渣、爐碴、營建廢棄物及污泥類為主，如圖1，其中灰渣占比最高，總產出量達620萬公噸，爐碴類次之，其後為營建廢棄物及污泥類。如再將灰渣類依申報種類細分為R類及D類代碼，R類灰渣以燃煤飛灰產出量435萬公噸最高，燃煤底灰次之；其餘D類灰渣以非有害廢集塵灰或其混合物、一般性飛灰或底渣混合物產出量較大，2項合計年產出量約63萬公噸。

爐碴類以G類代碼水淬高爐石產出量最大，年產出量逾250萬公噸，其後分別為R類氧化碴(100萬公噸)、還原碴(24.4萬公噸)；D類代碼以金屬冶煉爐渣(含原煉鋼出渣)為最多，年產出量約11萬公噸。至於營建廢棄物部分，其年產出量達160萬公噸，以R類代碼之營建混合物產出最大；污泥類則是以D類代碼之無機性污泥年產出量最大，達100萬公噸。

除上述4類外，無機資源物之其他類，則包括常見之廢玻璃陶瓷磚瓦、瀝青混凝土挖(刨)除料、土木或建築廢棄物混合物等產生量較小之種類。綜上，無機資源物多為製程末端產物，且量體龐大，如可將其妥善利用，則可減低環境負荷。

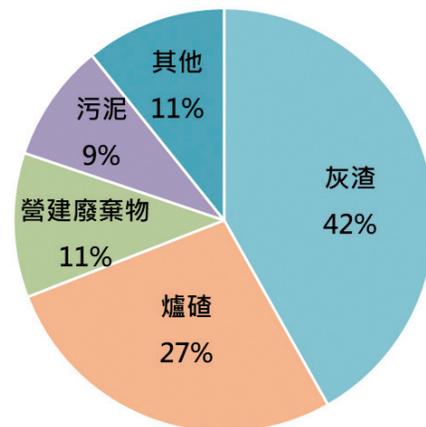


圖 1 無機資源物主要類別產出量占比

2. 資源化現況

現行無機資源物資源化，主要透過物理（破碎、篩分）程序或化學程序產生最終產品，部分會再經過窯爐進行煨燒或燒結。主要資源化用途如下所列：

- (1) 再生粒料：如電弧爐煉鋼爐渣、灰渣、廢鑄砂、廢玻璃、廢磚等，用於管溝回填用粒料、道路工程基底層級配等。
- (2) 水泥或混凝土摻料：如煤灰、還原渣作為水泥生料；煤灰及水淬高爐石研磨後之爐石粉，其具有膠結性，經常用於混凝土攪和物產製預拌混凝土。
- (3) 填地材料：如燃煤底灰回填灰塘、廢磚用於回填凹地等用途。
- (4) 水泥製品：如高壓混泥土地磚、空心磚、水泥板、水泥瓦、路緣石等。
- (5) 紅磚：如淨水污泥、無機性污泥，經窯燒產製紅磚。

除水泥、紅磚外，大部分最終產品生產過程皆使用水泥作為膠結材料，少數會添加爐石粉。由於水泥原料及生產過程耗能高，導致這些產品碳排放量偏高。因此，開發低碳環保膠結材料成為近年來的重點關注議題。

2.2 無機資源物資源化面臨問題

本研究關注之無機資源物包括還原渣、混燒灰渣及砂石碎解洗選場泥餅，其外觀如圖 2 所示，3 種無機資源物目前所面臨之問題，分別說明如下：



圖 2 本研究關注之無機資源物外觀

1. 還原渣：含游離氧化鈣 (f-CaO) 及氧化鎂 (MgO) 等成分，遇水易有膨脹性，故現行再利用前，通常須經高壓蒸氣安定化程序。該技術已趨成熟，但資源化過程耗能高，且產品的應用管道仍有限。因此，有必要開發低碳安定化技術，並拓展更多應用場域。目前全國還原渣貯存量約 32.8 萬公噸。
2. 混燒灰渣：因應政府推動廢棄物燃料化政策，目前有許多種廢棄物可再利用為燃料或產製固體再生燃料，或直接作為輔助燃料，並於燃燒後產生混燒灰渣。混燒灰渣中常含有易膨脹物質，可能影響再利用產品的穩定性。為此，環境部已於 114 年 1 月發布「共通性事業廢棄物作為固體再生燃料原料再利用管理辦法」，加強法規管制，有助於提升混燒灰渣再利用的穩定性。目前全國混燒灰渣貯存量約 8.8 萬公噸。
3. 砂石碎解洗選場泥餅：我國砂石原料含泥量約為 15%，經洗選後產生大量餘泥，脫水後形成泥餅。這些泥餅粒徑極細，年產量龐大，但可供應的去化用途有限，因此亟需開發新的應用方向。

綜合以上，開發無機資源物的新應用技術，並導入低碳安定化處理，是目前推動還原渣、混燒灰渣及砂石場泥餅資源化的重點。本研究透過「無機聚合技術」進行開發，嘗試為無機資源物資源化注入新的技術能量。

三、無機聚合技術簡介

3.1 無機聚合技術

無機聚合技術是透過鹼性配方液，將礦物或廢棄物表面的矽與鋁離子溶出，接著經過聚合反應、脫水與硬化等步驟，生成具有非晶質或半晶質結構的三維鋁矽酸鹽材料。以無機聚合技術製備之材料統稱為無機聚合材料，這類無機聚合材料具備優異的隔熱性、高初期強度及低熱傳導率等特性，且製程中無需高溫燒製，展現出良好的節能減碳潛力。

無機聚合材料的原料來源相當多樣，參考經濟部礦物局 2016 年研究報告指出，只要含有豐富矽與鋁元素且能在鹼性溶液中良好溶解的礦物或廢棄物皆可作為材料。根據功能，此類添加物可分為 3 大類：(1) 鹼性活化液；(2) 惰性添加物；(3) 活性添加物。

鹼性活化液通常以矽酸鈉溶液為主，主要目的是提供可作為膠結材料的矽元素；惰性添加物則是指富含可溶性矽和鋁的礦物或廢棄物粉體；至於活性添加物，則多選用如變高嶺土、燃煤飛灰、水淬高爐爐渣、廢玻璃等具有化學反應活性的物質，藉此提升硬化與結構強度。除上述 3 類組成外，製備過程中還需添加適量的鹼性溶液，以促進粉體中矽與鋁元素的釋出並形成膠凝結構。過去研究中，常見的鹼性來源為氫氧化鈉 (NaOH) 或氫氧化鉀 (KOH)。

3.2 無機聚合物材料之優點

無機聚合技術具備製程簡便的優勢，不需高溫燒結，且聚合過程中不產生二氧化碳，符合低碳技術特性。此類材料同時展現出優異的機械強度、耐久性、耐腐蝕性、耐高溫性能、良好的黏結能力，以及對重金屬離子的固化 / 穩定化能力，應用領域相當廣泛，被視為一種極具發展潛力的工程材料，其各項優點整理如表 1 所示。

表 1 無機聚合物材料優點說明

優點	說明
機械性質	具有高早強特性，在短時間內可達到優異的機械強度，且可根據不同的配比設計與養護條件進行調整與優化。(Davidovits, 1990)
耐久性	長期於一般室外環境條件下可保存完整性。(Davidovits, 1988)
耐腐蝕性	經酸性溶液浸泡後，外觀無明顯變化，具有良好耐化學腐蝕性。(Bakharev, 2002)
耐火性	具有優良的防火絕熱性質，可耐 1,200°C 高溫，應用於結構材上可加強結構物之防火性質，使結構物更具安全性。(邱俊萍, 2002)
黏結性質	在脫水硬化前，其漿體具有黏結之特性，可應用於不同界面之修補，亦可作為混凝土裂縫之修補材料。
固化重金屬	可將重金屬離子封鎖於無機聚合結構中，避免重金屬溶出污染。(Phair, 2005)
節能減碳	生產 1 噸無機聚合水泥，其 CO ₂ 排放量僅有傳統水泥之 20 %。(Davidovits, 2002)

資料來源：經濟部礦務局，低碳排放之無機聚合綠色水泥及混凝土製備研究報告，2016

3.3 影響無機聚合物之因子

影響無機聚合作用的關鍵因素，主要可歸納為以下幾項：原料的種類與其物理化學特性、所使用的鹼性活化劑種類與濃度、製備過程中的攪拌時間，以及養護時的溫度與持續時間；這些因子會共同影響無機聚合材料的反應效率、微觀結構形成以及最終性能表現，各項影響因子彙整如表 2 所示。

表 2 無機聚合物之影響因子說明

影響因子	說明
原料種類與特性	不同種類與性質的原料會影響整體配比設計、操作參數及反應條件。尤其在顆粒尺寸方面，原料粒徑越小，則比表面積與反應活性越高，能加速矽與鋁的溶出，進而提升無機聚合程度，這將有助於提高材料的抗壓強度與延展性。
鹼活化條件	鹼性活化劑在無機聚合反應中扮演關鍵角色，主要功能為促進矽、鋁元素的溶出及寡聚物的生成。其濃度高低與所選用的鹼金屬陽離子類型（如 Na^+ 或 K^+ ），都會直接影響鋁矽酸鹽的溶解程度與反應速率，是關鍵的控制因子之一。
攪拌時間	攪拌時間的長短對材料不同齡期的抗壓強度有顯著影響。研究顯示，延長攪拌時間有助於早期與中期強度的提升，惟對長齡期的強度增益則較不顯著。
養護溫度與時間	養護溫度為影響無機聚合物凝結與硬化的重要因素。適當提高養護溫度能促進反應並提高抗壓強度，但若溫度過高，反而可能抑制反應進行或導致結構缺陷，進而降低強度。

資料來源：行政院原子能委員會，無機聚合物萃製及成形技術研究，2015

3.4 無機聚合技術抑制膨脹性鋼渣之機制

一般而言，膨脹性鋼渣發生體積膨脹的主要原因，來自其內部含有游離氧化鈣 (f-CaO)。當 f-CaO 與水接觸時，會生成氫氧化鈣 ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)，進而導致體積膨脹的現象。因此，本研究提出之構想為，將含 f-CaO 之還原渣細粉引入無機聚合物體系中，藉由其中所含之游離矽成分，促使 f-CaO 與其反應，進而轉化為穩定的鈣系化合物，達到膨脹性鋼渣安定化的目的。鹼性活化劑中所使用的穩定化藥劑主要包括 X 與 Y 兩種，其對應的反應式如下： $(\text{X},\text{Y}) + \text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow 2\text{Ca}(\text{X},\text{Y}) + \text{H}_2\text{O}$

由於這些反應在膨脹性鋼渣安定化過程中可能有藥劑過量，因此部分未參與反應的藥劑會殘留於還原渣細粉內。當還原渣細粉進一步被用於產製無機聚合成品後，若因外力或其他因素產生裂縫，導致顆粒破碎並再次釋放出 f-CaO，殘留在材料中的藥劑便可於滲入的水分中溶解，再次與釋出的 f-CaO 反應，形成穩定產物，有效避免成品因膨脹而導致破裂。其反應過程示意如圖 3 所示（胡庭凱，2017；林冠宇，2019）。

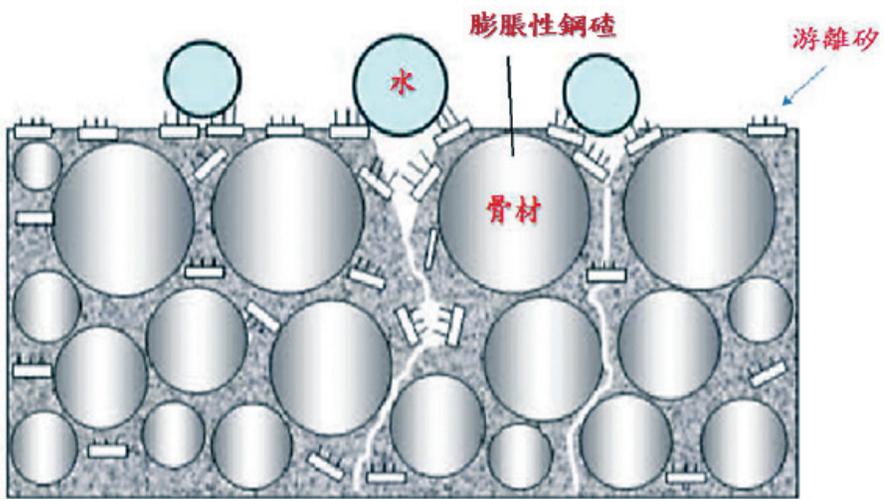


圖 3 無機聚合技術抑制膨脹性鋼渣之機制示意圖（胡庭凱，2017；林冠宇，2019）

3.5 無機聚合技術應用於多元無機資源物之研究

無機聚合技術具備良好的資源再利用潛力，可廣泛使用富含矽與鋁元素之各類廢棄物作為原料，常見之無機資源物包含：大理石石材切削廢料、太陽能面板廢玻璃、TFT-LCD 面板廢棄物、煉鋼集塵灰、燃煤飛灰、水庫底泥、廢棄保溫棉、營建廢棄物，以及煉鋼爐渣等。

近年來，國內外對無機聚合材料的研究熱度持續升高，其中以各類無機資源物為原料之應用也日益增加。分析近年文獻之研究標的，無機聚合材料在原料選用上展現

高度多元性，包括運用於含重金屬之污泥或是受輻射污染之物質，亦有良好的包容能力且無有害物質釋放，顯示出在重金屬固化與環境穩定性方面具備優異表現。表 3 彙整近年學術研究中，不同無機資源物應用無機聚合技術之成果。

表 3 學術研究各類無機資源物之無機聚合

年份	作者	原料	成果
2017	Belmokhtar	陶瓷工業污泥	28 天抗壓強度介於 34.7 MPa ~ 49.4 MPa。
2019	Ahn	含有大量元素 Ba 及硫酸鹽之核電廠污泥	污泥添加至 40%，抗壓強度在 30 MPa 左右，且無大量 Ba 及硫酸鹽測出。
2020	樊堂宇	有機成分之地下水污泥與爐石粉	28 天後其抗壓強度達 35.1 MPa。
2021	Kozai	受輻射物 Cs 污染之污泥與爐石粉	污泥添加量至 30% 時強度可達到 50 MPa，且無重金屬溶出。
2022	Bai	電爐渣、焚化飛灰、爐石粉及紅土	製作高壓地磚，最佳強度可達 29.46 MPa
2023	Zhao	含有重金屬之污水污泥、飛灰與爐石粉	強度可達 46 MPa，且材料經 TCLP 檢測均無重金屬溶出。
2023	Ramadan	玻璃拋光污泥、燃煤飛灰及爐石粉	添加 30% 玻璃拋光污泥於 28 天時可達到 30 MPa。

資料來源：環境部資源循環署，無機資源循環材料技術研發與管理計畫，2023

四、無機聚合技術國內外現況

4.1 國外應用現況

無機聚合技術的應用領域相當廣泛，目前已涵蓋混凝土與其相關產品、結構補強材料，以及防火複合材料等領域。無機聚合技術的商業化發展已於多國展開，包含澳洲、英國、德國、芬蘭及美國等地皆陸續有相關公司設立，表 4 彙整各國應用情形，說明如下：

1. 混凝土與相關產品

澳洲 Wagner 公司利用爐石粉、燃煤飛灰、鹼性活化劑與骨材，開發以無機聚合技術製成的綠色混凝土「Earth Friendly Concrete(EFC)」，相較於傳統混凝土，每立方公尺約可減少 75%~85% 二氧化碳排放，抗壓強度介於 10~65 MPa，可應用於牆體、柱子、管道、地基等工程。實際應用案例如機場鋪面、橋梁預鑄板、人工魚礁與住宅基礎等，目前正持續推廣至英國市場。

芬蘭 Betolar 公司採用高爐石、再生混凝土骨材與鹼性活化劑為原料，生產「Geoprime」產品，可廣泛應用於基礎建設所需之地磚、水管等混凝土產品，展現無機聚合技術於建材領域的實用性。

2. 防火材料

由於無機聚合物具低熱傳導性、高熱穩定性及不燃性，因此非常適合應用於防火與隔熱材料，如澳洲 Nu-Core® 公司開發出「Geopolymer Composite Panel」無機聚合複合板材，具備 A2 級防火性能，原先為航空產業設計，後續也推展至一般商業用途，能有效取代傳統不耐燃之鋁複合板。

德國 Skoberne 公司推出暖氣系統的無機聚合泡沫產品「SKOBIFIX 30」；INOMAT 公司開發無機聚合防火塗料「Ino-Flamm」，拓展了無機聚合材料於建築安全領域之應用。

3. 結構補強材料

美國 Milliken Infrastructure Solutions, LLC 公司，研發以無機聚合技術製成之結構補強材料「GeoSpray」，具有高早強與高終強度、優異的抗彎與黏結性能、極低孔隙率及良好的抗化學腐蝕性。主要應用於非開挖式的管道修復工程，包括下水道、供水及廢水管等基礎設施之結構加固。

表 4 國外無機聚合技術商業化彙整

國家	公司	產品名稱	產品說明
澳洲	Wagner	Earth Friendly Concrete	由工業副產品、廢料，如高爐礦渣和粉煤灰製成的無機聚合混凝土
澳洲	Nu-Core®	Nu-Core®A2FR	無機聚合複合防火板材板
美國	Milliken Infrastructure Solution, LLC	GeoSpray™、GeoSpray™AMS、GeoPlug™、GeoFuse™	結構補強材料；GeoSpray™ 使用 60% 之工業廢棄物
美國	Geopolymer Solutions	GEOPOLYMER CONCRETE	使用高爐渣、飛灰及天然礦物產製之混凝土
美國	Vortex Companies	GeoKrete®	用於遭受腐蝕和其他可能導致災難性故障問題的大直徑管道、涵洞、隧道和其他基礎設施
美國	Alchemy Geopolymer Solutions	Green Cement	前 NASA 實驗團隊，測試將 Green Cement 用於火箭火焰噴射溝槽
芬蘭	Betolar	Geoprime®	使用高爐渣、混凝土粒料及活化劑生產混凝土、混凝土管及混凝土磚
德國	Skoberne	SKOBIFIX 30	暖氣系統專用無機聚合泡沫
德國	INOMAT	Ino-Flamm	防火無機聚合塗料
挪威	Snøhetta	GEOPOLYMER CONCRETE	研發替代傳統水泥之無水泥材料

資料來源：(1) 行政院原子能委員會，無機聚合材料萃製及成形技術研究，2015

(2) GeopolymerSolutions, <https://www.geopolymertech.com/green-concrete/>

(3) Korniejenko, K., Łach, M., & Mikula, J.B. (2021). The Influence of Short Coir, Glass and Carbon Fibers on the Properties of Composites with Geopolymer Matrix. *Materials*, 14, 4599.

現行無機聚合技術最受關注之商業化應用為無機聚合物混凝土，根據 Almutairi 等人 (2021) 指出，早期無機聚合物混凝土可追溯至 1960 年代的烏克蘭，當時使用矽鋁酸鹽原料（如黏土、岩石與礦渣）搭配鹼金屬溶液，興建了 2 棟 9 層樓高的住宅建築。Xu 等人 (2008) 後續針對該建物於 2000 年進行材料取樣與性能測試，結果顯示即使長期處於惡劣環境，材料強度仍持續提升，且未觀察到明顯老化跡象，證實其良好的耐久性。

隨後，澳洲 Wagners 公司積極推動無機聚合物混凝土的發展，自 2010 年起陸續在澳洲各地進行相關工程應用。其中，2013 年於昆士蘭大學的全球變遷研究所建築中，採用預鑄梁柱方式導入無機聚合混凝土，為該技術在現代工程應用上的重要里程碑。接著於 2014 年，該公司在昆士蘭圖沃柏的 Wellcamp 國際機場鋪面工程中全面使用無機聚合混凝土，該項工程預估減少約 6,600 噸二氧化碳排放，展現其在減碳與永續建材應用上的潛力。近期於 2023 年，英國南倫敦的赫斯特變電站工程中，也採用無機聚合混凝土作為隧道傳動軸的基礎材料，灌入於深達 55 公尺的隧道底部，總用量約 736 m³，進一步擴展無機聚合技術於基礎建設領域的應用實績。前述實際應用案例彙整如表 5。

表 5 國外無機聚合混凝土應用案例彙整

國家	時間	地點	項目	說明
烏克蘭	1960's	基輔	建築	2 棟 9 層樓高之住宅大樓。
俄羅斯	1989	利佩茨克	建築	高 20 層之住宅大樓。
澳洲	2010	新南威爾斯	滑道鋪面	於新南威爾斯州的洛基角 (Rocky Point) 船隻滑道鋪面，以預鑄式無機聚合混凝土鋪設。
澳洲	2013	昆士蘭	預鑄梁柱	於昆士蘭大學之全球變遷研究所，以無機聚合技術製作 33 塊預鑄樑柱使用。
澳洲	2014	昆士蘭	機場跑道	於澳大利亞昆士蘭州圖沃柏 Wellcamp 飛機場，採用無機聚合物混凝土鋪設。
澳洲	2019	雪梨	道路	鋪設於雪梨道路，長 15 公尺之無機聚合物混凝土道路，後續持續追蹤 5 年。
美國	2016-2018	紐約及俄亥俄州	地下水道	以無機聚合材料用於地下水道補強。
英國	2023	南倫敦	隧道傳動軸基材	於英國南倫敦之赫斯特變電站，將無機聚合物混凝土灌至 55 公尺深之隧道底部，灌製隧道傳動軸基材，共 736 m ³ 。

資料來源：(1) Almutairi, A.L., Tayeh, B.A., Adesina, A., Isleem, H.F., & Zeyad, A.M. (2021). Potential applications of geopolymer concrete in construction: A review. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00733.

- (2) Wagners, <https://www.wagner.com.au/main/our-projects/>
 (3) VortexCompanies, <https://vortexcompanies.com/product/geokrete-structural-geopolymer/>
 (4) <https://www.nationalgrid.com/national-grid-completes-record-breaking-pour-cement-free-concrete-london-power-tunnels>

4.2 國內應用現況

目前國內已有多個研究團隊投入無機聚合技術之研發與應用，相關成果涵蓋實驗室產品開發與實場試作 2 大面向。在實場試作部分，主要原料以燃煤飛灰與高爐石粉為主，成功生產出無機聚合混凝土與各類水泥製品，展現良好的實務應用潛力。在實驗室開發方面，除常見之灰渣與污泥類原料外，亦有研究嘗試導入廢棄蚵殼、廢棄印刷電路板 (PCB) 以及港灣污泥等資源材料，用以製作各類水泥製品及工程用建材。其中所製成之高壓地磚與工程材料，其抗壓強度皆可達到 21 MPa，展現優異的力學性能。

此外，亦有研究團隊針對含有鉻與銅等重金屬污染之污泥，進行無機聚合固化處理的可行性評估。經由毒性特性溶出程序— TCLP 檢測，其重金屬溶出濃度皆符合環保法規，顯示無機聚合技術在環境安全性方面亦具有良好表現。

整體而言，國內無機聚合技術的應用已逐步從實驗室邁向實廠實作階段，其推動現況詳列於表 6，相關產品開發成果如圖 4 所示。

表 6 國內無機聚合技術應用現況彙整

規模	原料種類	應用方向	說明
實驗室開發	焚化飛灰	防火材料	溶出試驗—使用含有重金屬之焚化飛灰為原料，無機聚合技術固化後之材料經 TCLP 檢測均無重金屬溶出。 防火試驗—以 1,400°C 火焰燃燒固化體一側，另一側以溫度計量測溫升情形，火焰接觸 30 分鐘後，另一側僅升溫至 100°C。
	重金屬污泥	重金屬固化 / 穩定化	將含有鉻及銅重金屬污染之污泥，製作無機聚合材料固化體，經 TCLP 檢測，固化體重金屬溶出結果均未超標。

規模	原料種類	應用方向	說明
實驗室開發	港灣污泥	工程材料	將港灣污泥製成無機聚合固化體，50 % 污泥摻配比仍可達到一般工程材料抗壓強度要求 21 MPa，且經 TCLP 檢測，重金屬溶出均符合標準。
	廢蚵殼	高壓地磚	利用澎湖之廢蚵殼進行無機聚合高壓地磚製作，當固體原料摻配比達 50 % 時，抗壓強度可達 21 MPa，符合 C 級磚強度要求。（此應用獲得國際 Cradle to Cradle 認證）
	PCB 廢料	植草磚	利用 PCB 廢料為填充材，進行無機聚合植草磚製作。
實場應用	燃煤飛灰及爐石粉	無機聚合砂漿	鋪設於北科大設計系系館樓頂，無機聚合砂漿由協力廠商於預拌廠完成配製後，以預拌車運送經 30 分鐘車程後進行澆灌。
		無機聚合透水混凝土	於現場拌合鋪設無機聚合透水混凝土於北科大校園內。
		無機聚合混凝土	於宜蘭縣冬山鄉香和路 257 巷 13 弄社區進行實體圍牆灌製，實際灌製量達 7.6 噸，體積為 3 m ³ 。

資料來源：環境部資源循環署，無機資源循環材料技術研發與管理計畫，2023



高壓地磚（實驗室）



植草磚（實驗室）

圖 4 國內無機聚合應用產品開發現況



無機聚合砂漿 (北科大)



無機聚合透水混凝土 (北科大)



無機聚合混凝土 (宜蘭縣冬山鄉香和路)



植草磚鋪設 (宜蘭縣冬山鄉香和路)

圖 4 國內無機聚合應用產品開發現況

五、無機資源物以無機聚合技術開發低碳排產品

為促進無機資源物之資源循環，以及使用低碳技術，本研究以無機聚合技術開發低碳排產品。首先針對無機資源物原料成分特性分析著手，再進行無機聚合膠結材開發，備製各項低碳排產品，評估其品質與可行性，期望為未來技術落地應用奠定基礎。

5.1 原料基本性質

本研究主要使用之無機資源物包含泥餅、還原渣及混燒飛灰，另以爐石粉作為輔助反應材添加，以 XRF 檢測原料之成分組成，分析結果如表 7，檢測發現原料以鈣矽鋁氧化化合物為主。此外，泥餅經壓濾脫水後團結成塊，且含水率仍有 26.4%，於後續材料攪拌需添加分散劑以利分散；還原渣之游離氧化鈣 f-CaO 為 0.8%，可用於比對後續膨脹性抑制情形；混燒飛灰遇鹼易有發泡現象，使用前需進行適當的前處理（如添加鋁酸鈉加速氧化反應），以提升材料穩定性。

表 7 泥餅、還原渣、混燒飛灰及爐石粉之基本性質

原料	成分 (%)							粒徑 (D_{50}) (μm)
	氧化鈣 (CaO)	二氧化矽 (SiO ₂)	氧化鋁 (Al ₂ O ₃)	氧化鐵 (Fe ₂ O ₃)	f-CaO	其他	含水率	
泥餅	0.5	49.8	7.1	7.1	-	6.5	26.4	12.8
混燒飛灰	30.4	24.7	14.2	7.8	-	14.6	-	15.6
還原渣	52.6	16.0	5.2	6.3	0.8	13.5	-	511.0
爐石粉	40.2	34.7	14.1	0.2	-	10.8	-	12.0

5.2 無機聚合膠結材開發

無機聚合膠結材之開發試驗配比及強度結果如表 8，因泥餅主要以 SiO₂ 為主，故以其為主要原料搭配輔助反應材爐石粉使用。膠結材開發首先確立泥餅使用量及對無機聚合膠結材之強度影響；接者評估還原渣取代爐石粉使用之影響；最後再評估混燒飛灰取代部分還原渣添加之影響。

從圖 5 發現當泥餅添加量增加時，無機聚合膠結材之強度隨之減少，然而泥餅添加量達 70% 之系列，其強度於 28 天仍可達到 24.3 MPa，符合大部分膠結材應用於工程材料要求強度。另還原渣取代爐石粉之結果如圖 6，顯示對強度影響不大；最後將混燒飛灰經前處理，再將其破碎取代部分還原渣添加，依圖 7 結果顯示會使強度些微下降，但整體強度仍可符合工程材料要求強度。由此可知，還原渣具有反應性可做為膠結材之使用，而泥餅及前處理之混燒飛灰反應性較低，較適合作為細粒料使用。

表 8 無機聚合膠結材之開發試驗配比及強度結果表

實驗編號		泥餅 (%)	還原值 (%)	混燒飛灰 (%)	爐石粉 (%)	抗壓強度 (MPa)			
						3 天	7 天	14 天	28 天
泥餅取代部分爐石粉	N50	50	0	0	50	32.6	31.8	45.4	53.8
	N60	60	0	0	40	26.6	41.9	41.0	35.5
	N70	70	0	0	30	8.4	12.2	20.0	24.3
泥餅、還原值取代部分爐石粉	50-R	50	10	0	40	25.2	49.9	50.4	47.3
	60-R	60	10	0	30	24.4	29.9	34.6	28.0
泥餅、還原值及混燒飛灰取代部分爐石粉	50-RS	50	7	3	40	36.4	36.5	36.8	38.7
	60-RS	60	7	3	30	18.2	21.5	28.3	19.7

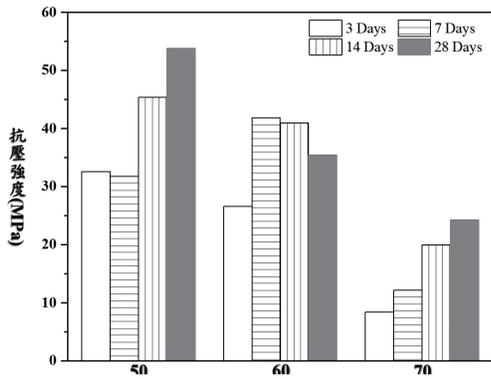


圖 5 泥餅添加量之影響

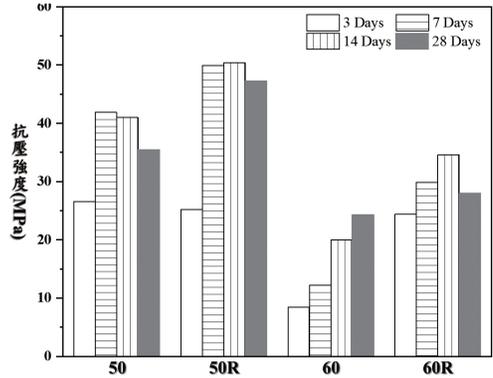


圖 6 還原值爐石粉之影響

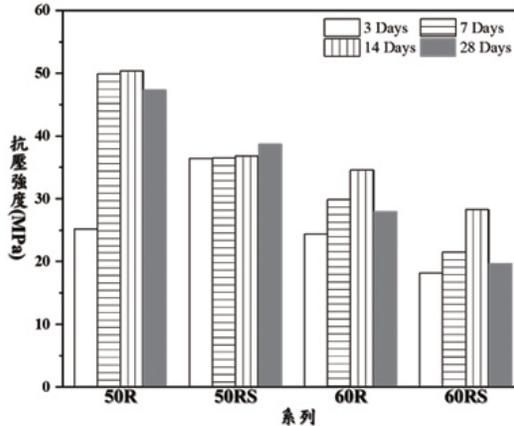


圖 7 添加混燒飛灰之影響

5.3 無機聚合技術開發之低碳排產品可行性

從 5.2 節得知各無機資源物對膠結材之影響後，設計各 5 組膠結材配比進行低碳排產品開發，開發之產品為高壓地磚、非構造物混凝土及控制性低強度混凝土 (CLSM)，開發結果說明如下：

高壓地磚開發部分，高壓地磚配比表及檢測結果如表 9 所示，高壓地磚之試驗依「CNS 13295 高壓混凝土地磚」進行檢測，檢視結果顯示 H1 組符合 A 級磚之強度要求，H2 及 H3 兩組符合 B 級磚之要求，另耐磨係數均符合規範要求。

表 9 無機聚合低碳排產品—高壓地磚之開發試驗配比及試驗結果

試驗組別 代號		膠結材料 (%)				鹼液 添加量 (%)	28 天 抗壓強度 (MPa)	耐磨係數 ($\text{cm}^3/50 \text{cm}^2$)
		泥餅	還原渣	混燒飛灰	爐石粉			
高 壓 地 磚	H1	50	17	3	30	10	37.4	< 0.1
	H2	60	17	1	25		29.1	< 0.1
	H3	60	17	3	20		27.3	< 0.1
	H4	70	7	3	20		16.2	< 0.1
	H5	70	5	0	25		20.1	< 0.1
高 壓 地 磚	A 級						> 32	< 15
	B 級						> 24	
	C 級						> 21	

非構造物混凝土及控制性低強度混凝土部分，其使用之固體材料比例均固定，僅透過鹼性添加量（液灰比）調整，產製非構造物混凝土及 CLSM，配比表及檢測結果如表 10 所示。表中熱壓膨脹試驗，是以高溫高壓之方式加速其膨脹發生，主要用於測定材料之穩定性。從結果發現，非構造物混凝土之 U1 及 U2 兩組配比可達到強度需求，且熱壓膨脹試驗後，材料無膨脹之情形，強度均有上升，表示以無機聚合技術能有效抑制膨脹，且無機聚合反應仍持續進行，使強度於熱壓試驗後上升。

CLSM 部分，亦有 C2 及 C4 兩組符合強度要求，其餘 3 組強度均高於需求強度，表示可再提高無機資源物之使用量，而熱壓試驗之穩定性與非構造物混凝土發展情形相同。

表 10 無機聚合低碳排產品—非構造物混凝土及控制性低強度混凝土
開發試驗配比及試驗結果表

試驗組別代號	膠結材料 (灰 1)(%)				砂 (2.5)	石 (2.4)	液灰比	28 天抗壓強度 (MPa)	熱壓膨脹試驗		
	泥餅	還原碴	混燒飛灰	爐石粉					試驗後強度 (MPa)	外觀	
非構造物混凝土	U1	50	17	3	30	旋轉窯爐碴再生細粒料	旋轉窯爐碴再生粗粒料	0.85	19.6	21.6	無爆裂、局部爆孔、崩解及破裂
	U2	60	17	1	25				16.0	18.6	
	U3	60	17	3	20				11.3	13.3	
	U4	70	7	3	20				10.4	13.5	
	U5	70	5	0	25				13.2	19.0	
相關要求								≥ 14			
控制性低強度混凝土	C1	50	17	3	30	旋轉窯爐碴再生細粒料	旋轉窯爐碴再生粗粒料	0.97	15.6	16.6	無爆裂、局部爆孔、崩解及破裂
	C2	60	17	1	25				9.0	10.6	
	C3	60	17	3	20				9.8	11.2	
	C4	70	7	3	20				8.5	9.6	
	C5	70	5	0	25				13.6	15.3	
相關要求								2~9			

5.4 無機聚合技術開發之產品減碳效益評估

無機聚合技術可應用多元化無機資源物，其產品在成本效益上和使用原生料配比之產品具有優勢，另由於其無添加水泥，和相同性能水泥製品相較，通常有較低碳排放量，本研究透過產品碳足跡計算，評估無機聚合產品之減碳效益。

產品碳足跡係計算產品全生命週期中直接與間接產生的溫室氣體排放量，包含「原物料取得」、「製造」、「配送銷售」、「使用」及「廢棄」等 5 大階段所產生的溫室氣體排放量總和。由於本研究主旨在於比較以不同原料、配比及技術產製符合同一品質標準之產品碳足跡，故僅考量由「搖籃」至「大門」階段，亦即原料

取得及製造階段之碳排放量，不計算後續配送銷售、使用及廢棄處理階段之碳排放量。

原料取得階段包含原料生產製造之碳排放量及原料到生產廠之運輸過程相關溫室氣體排放，由於本計畫並未限定特定之原料產源，故亦不計算原料運輸之碳排放量。另由於本研究所採用之無機聚合技術可使用現行主流技術之設備（如拌合設備），在製程能資源消耗差異有限的情形下，將假設製造階段之碳排放量為相同，故主要差異為使用不同原料之碳排放差異。

本研究減碳效益比較對象主要有 3：本研究開發之無機聚合產品、蒐集市場原物料配比之產品，以及環境部碳足跡資訊網同類型產品碳排放資訊。以本研究開發之產品為例，其產品碳排放量係以產品原物料配比（使用量），乘上各原料之碳排放係數，計算出單位產品之碳排放量；而市場原物料配比產品之碳排放量計算方式亦同；環境部碳足跡資訊網產品則是篩選計算範疇相同之同類型產品。

由單位產品碳排放量分析可知，無機聚合產品主要碳排放來源為鹼液，若能控制鹼液添加量，則較能顯現減碳優勢。依本研究開發之配比進行計算，無機聚合技術應用於非構造物用混凝土及高壓地磚，和碳足跡資訊網同類型產品碳排放量相較，分別有 10% 及 50% 減碳效益（如圖 8），產製 CLSM 則較無優勢，顯示無機聚合產品應朝高強度開發，較有減碳優勢。

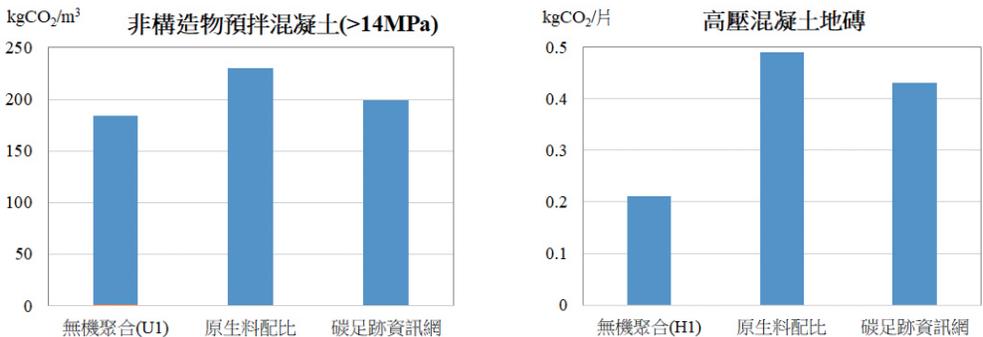


圖 8 無機聚合產品與同類型產品減碳效益示意圖

六、未來推動規劃及配套

在資源循環與節能減碳兩大主流趨勢驅動下，無機聚合技術因可應用於多元性物料、抑制鋼爐渣膨脹性，以及產品碳排放量較低等優勢，日益受到研究單位重視，也逐漸引起產業界關注。無機聚合材料其性能雖能符合市場相同功能產品之規格與標準，惟目前國內實場應用案例相對有限，產業對該技術認識不足，僅能透過文獻資料略窺一二，缺乏實證數據佐證其可行性。再者，現行國家標準或施工規範多要求一定比例的水泥添加，對無添加水泥之無機聚合產品推廣造成一定挑戰。

有鑑於此，無機聚合技術的推動策略，除需持續於實驗室階段測試各類無機資源物（如還原渣、混燒飛灰、重金屬污泥及現行採掩埋處理之事業廢棄物），從成分特性分析、配比設計、前處理技術等面向，提升材料穩定性與性能外，亦需同步開發多元產品，以擴展應用管道。而實場落地應用更為關鍵，不僅可驗證產品之耐久性，亦有助於建立市場信心。未來推廣方向可聚焦於非結構性混凝土應用與建材類產品開發兩大主軸。

混凝土的用量大、應用性廣，又可去化大量無機資源物，適合作為未來推動之項目。為穩健推動，下一階段可聚焦鹼液添加比例，在維持良好工作性並兼顧產品功能性，作為研發重點。至於應用場域，建議先行導入非結構性私人回填工程，如管溝回填、筏式基坑非承重之回填等，並同步進行耐久性監測，藉以觀察產品長期功能表現，逐步累積國內實廠應用數據。

在建材領域，無機聚合地磚因兼具減碳及經濟效益，隨著環保意識興起，民眾對低碳綠色建材接受度逐漸提升，顯示其應用可期。另配合我國法規建築技術規則對室內外綠建材使用比例提升，無機聚合技術開發產品，未來可朝綠建材標章認證發展，可提升建築產業使用意願，帶動無機資源物再利用產業的技術轉型與價值提升。

參考文獻

行政院原子能委員會 (2015)，無機聚合材料萃製及成形技術研究。

林冠宇 (2019)，安定化轉爐石膨脹性之研究，國立臺北科技大學資源工程研究所碩士論文。

邱俊萍 (2002)，利用高爐爐渣製成無機聚合材料之研究，國立臺北科技大學碩士論文。

胡庭凱 (2017)，轉爐石安定化可行性之研究，國立臺北科技大學資源工程研究所碩士論文。

經濟部礦務局 (2016)，低碳排放之無機聚合綠色水泥及混凝土製備研究報告。

樊堂宇 (2020)，下水污泥之有機物常溫去除暨合成無機聚合材料與評估，國立臺北科技大學碩士論文。

環境部，產品碳足跡資訊網，<https://cfp-calculate.tw/cfpc/WebPage/index.aspx>。

環境部資源循環署 (2023)，無機資源循環材料技術研發與管理計畫。

環境部資源循環署，各事業廢棄物代碼申報流向（112年1月~112年12月），事業廢棄物申報及管理資訊系統。

環境部資源循環署，資源再利用管理資訊系統，<https://rms.moenv.gov.tw/RMS/>。

Ahn, J., Kim, W. S., & Um, W. (2019). Development of metakaolin-based geopolymer for solidification of sulfate-rich HyBRID sludge waste. *Journal of Nuclear Materials*, 518, 247-255.

Almutairi, A.L., Tayeh, B.A., Adesina, A., Isleem, H.F., & Zeyad, A.M. (2021). Potential applications of geopolymer concrete in construction: A review. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00733.

Bai, Y., Guo, W., Wang, J., Xu, Z., Wang, S., Zhao, Q., & Zhou, J. (2022). Geopolymer bricks prepared by MSWI fly ash and other solid wastes: Moulding pressure and curing method optimisation. *Chemosphere*, 307, 135987.

- Bakharev T., Sanjayan J.G., Cheng Y.-B. (2002), "Sulfate attack on alkali-activated slag concrete." , *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, pp. 211-216.
- Belmokhtar, N., Ammari, M., Brigui, J., & Allal, L.B. (2017). Comparison of the microstructure and the compressive strength of two geopolymers derived from Metakaolin and an industrial sludge. *Construction and Building Materials*, 146, 621-629.
- Davidovits, J. (1988). *Geopolymer chemistry and properties*. Geopolymer 88, First European Conference on Soft Mineralogy, Compiègne, France, 1, 25-48.
- Davidovits J, Comrie D.C., Paterson J.H., Ritcey D.J., (1990), "Geopolymeric concretes for environmental protection." , *Concrete International*, Vol. 12, pp. 30-40.
- Davidovits, J. (2002). *Environmentally Driven Geopolymer Cement Applications*. GeopolymerSolutions, <https://www.geopolymertech.com/green-concrete/> .
- Korniejenko, K., ach, M., & Mikula, J.B. (2021). The Influence of Short Coir, Glass and Carbon Fibers on the Properties of Composites with Geopolymer Matrix. *Materials*, 14(16), 4599.
- Kozai, N., Sato, J., Osugi, T., Shimoyama, I.S., Sekine, Y., Sakamoto, F., & Ohnuki, T. (2021). Sewage sludge ash contaminated with radiocesium: Solidification with alkaline-reacted metakaolinite (geopolymer) and Portland cement. *Journal of hazardous materials*, 416, 125965 .
- National Grid, <https://www.nationalgrid.com/national-grid-completes-record-breaking-pour-cement-free-concrete-london-power-tunnels>
- Phair, J. W., Smith, J. D., Van Deventer, J. S. J., (2005), Characteristics of aluminosilicate hydrogels related to commercial Geopolymers, *Materials Letters*, Vol.57, pp. 4356-4367.

Ramadan, M., Habib, A. O., Hazem, M. M., Amin, M. S., & Mohsen, A. (2023). Synergetic effects of hydrothermal treatment on the behavior of toxic sludge-modified geopolymer: Immobilization of cerium and lead, textural characteristics, and mechanical efficiency. *Construction and Building Materials*, 367, 130249.

VortexCompanies, <https://vortexcompanies.com/product/geokrete-structural-geopolymer/>

Wagners, <https://www.wagner.com.au/main/our-projects/>

Xu, H., Provis, J. L., van Deventer, J. S., & Krivenko, P. V. (2008). Characterization of aged slag concretes. *ACI Materials Journal*, 105(2), 131.

Zhao, Q., Ma, C., Huang, B., & Lu, X. (2023). Development of alkali activated cementitious material from sewage sludge ash: Two-part and one-part geopolymer. *Journal of Cleaner Production*, 384, 135547.

環境管理規劃類

醫療用複合材質點滴袋之循環經濟 可行性探討

簡淑美*、周卓群**

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 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，生物醫療廢棄物（或稱感染性廢棄物）約占醫院有害事業廢棄物總量的 10~15%，據此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。根據環境部線上申報資料顯示，國內醫療廢棄物再利用率約 21%，意謂大量醫療廢棄物送往焚化與掩埋，可能衍生戴奧辛與爐渣等二次污染。現行國內醫療廢棄物回收再利用流程主要以有價標售為主，由合法處理廠商清運及分類，轉送至合法再利用機構進行清洗、破碎，製成塑料粒，最終送至塑膠工廠熔融、塑化成次級塑料產品，儘管這一系列過程能將部分醫療廢棄物轉化為可用資源，減少環境資源的消耗，但回收再利用的過程仍面臨著嚴峻的挑戰。

本團隊與北部 2 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粒及再生廢針筒儲存盒，並回用於原醫療單位，實踐複合材質點滴袋之循環經濟理念。全流程經第三方驗證，具可追溯性並取得專利證書。此創新模式經成本效益評估具可行性，並已完成產品碳足跡盤查。

【關鍵字】循環經濟、複合材質點滴袋、再生廢針筒儲存盒、醫療事業廢棄物

* 泰興工程顧問股份有限公司

資深工程師

** 廣鉉企業股份有限公司

經理

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袋，大多數仍委託合格清理公司進行焚化處理，點滴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 12,000 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)。

自 COVID-19 疫情爆發以來，醫療廢塑料的產生量急遽上升，進一步突顯現行廢棄物管理體系在應對突發公共衛生事件下的脆弱性。Prata et al. (2020) 研究指出，疫情期間一次性個人防護設備 (PPE) 與塑膠醫療耗材的廣泛使用，導致大量高風險塑料廢棄物之產出，對既有管理策略構成挑戰。在此背景下，Patrício Silva et al. (2020) 強調，發展具備可行性與安全性的醫療塑料再利用技術，並建構回供醫療體系之循環經濟模式，已成為實現資源永續與韌性醫療供應鏈之關鍵議題。儘管相關技術逐漸發展，醫療廢塑料之處理與回收仍屬高度挑戰性領域。Rigamonti et al. (2014) 透過生命週期評估 (Life Cycle Assessment, LCA) 比較多種醫療廢棄物處理方案，揭示目前並無一致公認之最適化策略，政策與技術選擇須根據特定國家與地區的制度、經濟與基礎設施條件進行調適與評估。此論點亦可從 ElSaid and Aghezzaf (2018) 之研究獲得佐證；該研究強調，廢棄物管理雖為全球性課題，惟各國在制度設計與永續實踐推動上

進展不一，致使回收率與資源利用效率呈現顯著落差，顯示在地化策略之重要性。在制度與政策層面，歐盟於 2008 年實施之《廢棄物框架指令》(Directive 2008/98/EC) 明定「廢棄物處理階層」原則，並於 2015 年「循環經濟行動計畫」中進一步強化該原則，促使成員國逐步由掩埋轉向重用與回收。Marin et al. (2018) 認為，歐盟相關政策的推動不僅提升資源效率，也對國際間循環經濟政策的制度化提供借鏡。

此外，醫療塑膠回收在技術實施層面亦面臨多重限制。Al-Akra et al. (2018) 指出，跨國醫療產品回收受限於不同法規間之不一致，影響回收流程與再利用的法定依據。而 Hahladakis et al. (2020) 則進一步指出，複合材料（如 PVC 點滴袋）中之添加劑、增塑劑與潛在污染物，對現行機械回收與材料再製構成重大技術障礙。綜合上述研究成果，可發現醫療複合塑料的再利用需同時兼顧污染控制、材料可回收性與法規一致性，為未來技術研發與政策制定提供關鍵方向。

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塑粒及再生廢針筒儲存盒，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，並已將再製的再生廢針筒儲存盒提供給北部 2 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

2.1 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」（環境部，2018），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」（環境部，2023）為主，細分類則整理如表 1。醫療單位生產生之有害事業廢棄物處理依規定設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	

分類	次分類	細目
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；有害事業廢醫療廢棄物認定標準（環境部，2018）；事業廢棄物貯存清除處理方式及設施標準（環境部，2023）。

2.2 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，可減少垃圾製造量、減少焚燒後釋放之空氣污染，及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」（環境部，2018），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 6 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 4 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

2.3 醫療用複合材質點滴袋之循環經濟

落實醫療用複合材質點滴袋的循環經濟，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、循環經濟理論及產品碳足跡等面向，方能從更全面的視角，了解醫療用複合材質點滴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，如聚氯乙烯 (Polyvinylchloride, PVC)、乙烯 (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 et al., 2018; Hahladakis 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具潛力的解決方案。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，這些原料可用於生產再生塑膠或作為能源來源，特別適用於處理結構複雜且難以機械回收的廢棄物 (Hopewell et al., 2009)。此外，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。

4. 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、研究方法

(一) 優化醫療用複合材質點滴袋廢棄物處理流程

傳統的醫療廢棄物塑膠回收流程中，回收廠商自醫院清運後，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。本研究改變傳統方式，針對回收的醫療用複合材質，進行點滴瓶與點滴袋本體分離處理，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再生廢針筒儲存盒。

本研究所提出的醫療用複合材質點滴袋廢棄物優化處理流程，具備多項顯著優勢。首先，透過點滴瓶與點滴袋本體的分離處理，避免不同材質混合，顯著提升再生塑粒的純度與物理性能，確保再生廢針筒儲存盒具備足夠的耐用性與安全性。在注塑製程方面，針對產品尺寸及成型缺陷的挑戰，升級射出機鎖模力並精準匹配螺桿容量，有效減少飛邊、短射及充填不足問題，確保再生廢針筒儲存盒的一致性和結構完整性。

此外，本研究利用優化的模具設計及冷卻控制，提高產品的尺寸穩定性，特別是在密封結構與卡榫設計上，確保再生廢針筒儲存盒組裝密合度與使用安全。整體處理流程結合多段分離、清洗、比重分選及高效造粒設備，不僅提升回收效率，還有效避免傳統焚化處理對環境的負面影響。

更重要的是，本研究開發的再生廢針筒儲存盒為耐用且可重複使用產品，促進醫療廢棄物管理的閉環循環，降低醫療機構長期成本與資源消耗，符合永續發展目標。此優化流程整合先進技術與製程管理，實現醫療複合材質廢棄物的高價值再利用。相關流程與傳統回收流程之比較，於圖 2 以流程圖呈現。

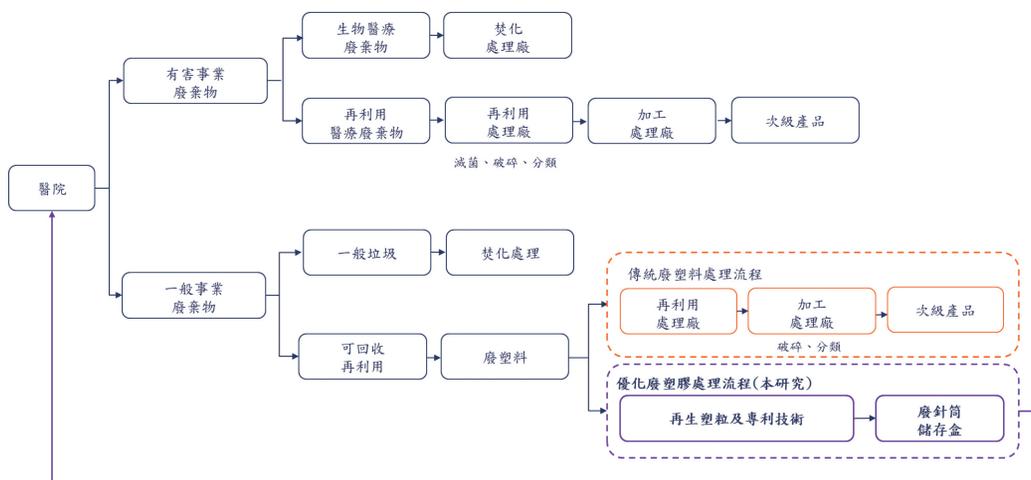


圖 2 醫療廢塑料處理流程

(二) 再生廢針筒儲存盒製造

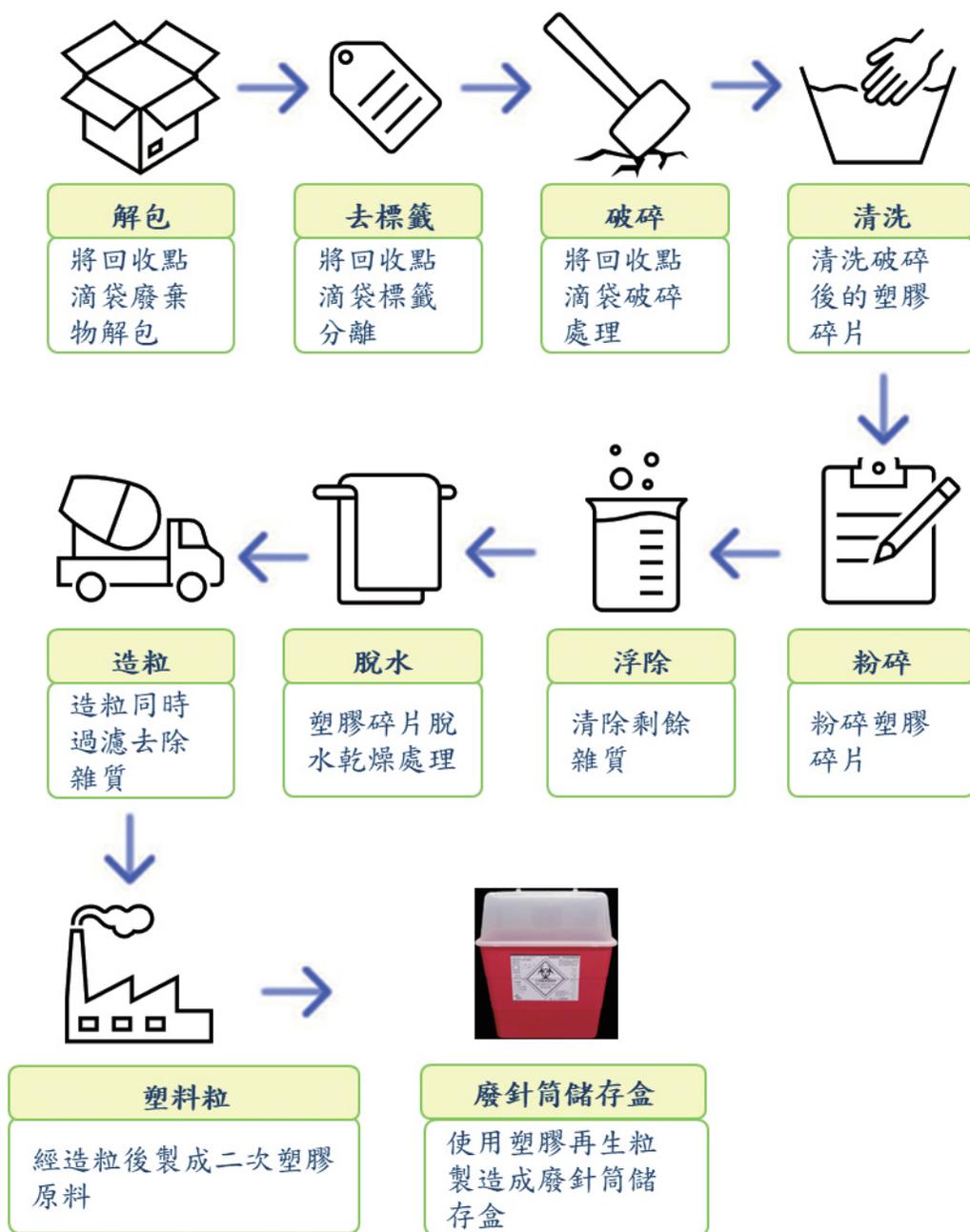
再生廢針筒儲存盒的製造流程包括以下主要步驟，以確保符合 ISO 及相關法規標準：

1. 醫療用複合材質點滴袋處理

複合材質點滴袋回收，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再生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。本團隊研製之再生廢針筒儲存盒採用依據產品環保性的方法檢驗和 ISO 23907-1 防止割傷 - 要求和測試方法等第三方驗證，並已取得相關專利申請；同時也完成 ISO 14067 產品碳足跡之盤查。



資料來源：本研究繪製

圖 3 醫療用複合材質點滴袋處理

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袋，經由專利技術製成二次塑料，在注塑成形為再生廢針筒儲存盒，依循 ISO 14021 之方法驗證和取得 ISO 23907-1 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，醫療再生廢針筒儲存盒可以選用可回收和再生材料，如再生塑料或其他環保材料，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，回收後製成再生塑粒，透過專利技術製成再生廢針筒儲存盒，真正落實醫療用複合材質點滴袋之循環經濟理念，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

本團隊研製之再生廢針筒儲存盒已於 2023 年 4 月 26 日及 6 月 19 日，由財團法人塑膠工業技術發展中心，依據塑膠再生料檢驗程序 (PIB-QP-12) 並參照 ISO 14021 標準，對生產管理流程及場內取樣進行檢驗。該檢驗證實本產品製程中使用的再生料為 100% 回收聚丙烯 (PP) 與聚乙烯 (PE)，確保再生料真實且完整地應用於再生廢針頭儲存盒製程中，具備完整追溯性與符合相關規範。此結果證明本創新技術能有效實現醫療廢棄物的資源化利用，並降低非生物性資源消耗及環境負荷。

實際再生廢針頭儲存盒製程應用方面，上蓋部分使用 20 公斤原料，其中包含 10 公斤再生料及 10 公斤新料，可製作 80 個上蓋，平均每一個上蓋再生料含量為 50%；桶身部分使用 20 公斤原料，其中 6 公斤為再生料，14 公斤為新料，平均每一個桶身再生料含量為 30%。上述數據可作為廢點滴袋改造再生料投入的量化基準，並為產品碳足跡盤查提供重要計算依據。

3. 防刺穿和防漏設計之安全考量

ISO 23907-1 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。本團隊研製之再生廢針頭儲存盒已通過 ISO 23907-1 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

產品之碳足跡盤查樣本數並無固定標準，係依產品特性、生命週期階段及資料可取得性綜合評估後決定。一般而言，碳足跡盤查以具「代表性」且「數據量足夠」為原則。本研究評估之再生廢針頭儲存盒為標準化、規格一致之 **Business to Business (B2B)** 產品，主要供應醫療機構等單位使用，其生產流程相對穩定、集中。因此本研究擷取單一生產批次之投入原料進行說明：

- (1) 上蓋部分使用總重 20 公斤原料，其中再生料與新料各 10 公斤，可生產 80 個上蓋；
- (2) 桶身部分亦使用 20 公斤原料，其中包含 6 公斤再生料與 14 公斤新料，可生產 50 個桶身。

在本研究之產品碳足跡盤查中，產品於製程階段使用再生料與新料混合製作，屬於典型之多來源原料系統，須進行環境負荷之合理分配。根據 ISO 14044 及 ISO 14067 規範，當單一系統產出多項產品或混合來源時，應採用適當之分配原則以確保碳足跡計算之準確性與一致性。本研究採用質量基礎分配法 (mass allocation)，以下列 2 種數據分配原則，進而量化本產品於整體生產系統中所占之原料與回收使用比例：

- (1) 分配原則一（依原料重量占比）：以再生廢針頭儲存盒於全廠生產體系中所使用的原物料重量比例進行分配，計算結果為 0.29%。
- (2) 分配原則二（依回收點滴袋數量）：以每件產品對應之回收點滴袋或瓶數量為依據，計算結果為 0.71%。各階段之分配原則如表 2 所示。

表 2 再生廢針頭儲存盒各階段之分配原則

階段	活動數據名稱	分配原則
原料	PP 再生塑膠粒 PP 新料 委外射出成型	分配原則 1 分配原則 2
原料	紙箱、棉手套、活性炭口罩、貼紙	分配原則 1 分配原則 2
製造	用電、用水	分配原則 1 分配原則 2
製造	堆高機、發電機	分配原則 1 分配原則 2
製造	化糞池	分配原則 1 分配原則 2
製造	廢棄物	無分配
運輸	事業廢棄物	分配原則 1 分配原則 2
運輸	原料運輸	無分配

上述原料投入量及分配原則，構成本研究產品碳足跡盤查的基礎，並作為功能單位設定與後續各階段溫室氣體排放量量化之依據。產品碳足跡範疇說明及盤查結果如表 3 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 3 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 ₂ e)						

五、結論

本研究首創運用廢棄醫療用複合材質點滴袋作為創新環保材料，透過熔融與塑化技術製成次級塑料產品－再生廢針頭儲存盒。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 2 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梁，切實落實循環經濟與永續發展的目標。

參考文獻

- Geyer, R., Jambeck, J.R. and Law, K.L., 2017. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*. 3 (7), e1700782.
- European Commission, 2018. A European Strategy for Plastics in a Circular Economy.
- 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.
- 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.

- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- European Parliament, 2016. *Closing the Loop: New Circular Economy Package*.
- 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.

- 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.
- 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.
- Zhou, L., & Xie, X. (2018). High-temperature stability of polymer-based composite materials: Challenges and opportunities. *Polymer Composites*, 39(10), 3787-3801.
- Chung, D. D. L. (2017). Polymer-matrix composites for high-temperature structural applications. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 113, 1-27.
- World Health Organization. (2018). Safe management of wastes from health-care activities: A summary. World Health Organization.
- 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.
- 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.
- 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.
- Ragaert, K., Delva, L., & Van Geem, K. (2017). Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste Management*, 69, 24-58.

Tudor, T., Văduva, S., Dinescu, A., & Dima, M. (2020). Implementing circular economy principles in healthcare waste management. *Waste Management*, 106, 222–234.

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.

Kumar, A., Ghosh, A., & Purohit, H. (2022). Circular economy in healthcare: A comprehensive review. *Sustainable Production and Consumption*, 30, 143–157.

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.

Rincón, L., Torres, F., & Ibarra, D. (2021). Life cycle assessment of medical devices: Identifying environmental hotspots. *Environmental Science & Technology*, 55(11), 7473–7483.

Clemente, M., Manfredi, S., & Cattaneo, S. (2023). Integrating life cycle assessment into medical device design: Impacts on sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 331, 129876.

環境部 (2023), 《事業廢棄物貯存清除處理方式及設施標準》, <https://law.moj.gov.tw>。

環境部 (2018), 《有害事業廢醫療廢棄物認定標準》, <https://law.moj.gov.tw>。

環境部 (2018), 《醫療事業廢棄物再利用管理辦法》, <https://law.moj.gov.tw>。

環境管理規劃類

紡織業智慧化生產、循環經濟和 淨零排放管理系統

林明旺*、劉柏緯**

摘 要

現代紡織業積極導入智慧化生產與管理系統，以提升效率並實現可持續發展，本研究建置「雲端即時紡織智慧化生產資訊管理監控預警整合系統」，整合感測裝置、通訊系統、伺服器與終端設備，實現生產過程的監控、分析與預警，有效提升生產效率與品質，系統內建「瑕疵異常通報及履歷檢索功能」，即時記錄與通報異常，建立異常資料庫，強化追蹤與排除效能。

此外，透過「視覺化製造設備管理系統」整合地端自動化設備與雲端資料庫，提升原料使用效率並降低廢料，進一步強化資訊整合與流程管理。

在循環經濟方面，本研究提出結合生物處理與化學混凝的多重廢水處理技術，提升廢水再生率並減少化學藥劑使用，兼顧成本與環保效益，同時導入太陽能等再生能源，搭配碳足跡評估系統與高效能設備，達成節能減碳目標，紡織產業唯有結合智慧技術與環保策略，方能提升生產力並迎合全球綠色經濟趨勢。

【關鍵字】智慧化生產、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亟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，推動整體生產過程的低碳化轉型制度，也是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、紡織業智慧化生產、循環經濟和淨零排放管理系統執行現況

2.1 智慧化生產於紡織業之應用及可持續發展之永續目標

2.1.1 智慧製造推動產線升級與營運優化

紡織業持續推動智慧製造與物聯網技術的整合，以提升工廠運營效率，然而，物聯網在應用上仍面臨挑戰，包括跨平台操作性不足與缺乏通用標準（洪志銘，2017），加上設備種類繁多，硬體與軟體整合困難，增加了系統開發的複雜度，為邁向智慧製造，紡織產業必須強化遠端監控技術，以即時掌握設備狀態、追蹤生產進度、調整生產計畫，進而降低停機風險、延長設備壽命並提升生產效率，此外，遠端監控也有助於提供消費者更透明的產品資訊。

過去，紡織工廠內的生產紀錄難以檢索，客戶無法即時取得所需資訊，亦無從了解產品的完整生產過程，隨著全球品牌對供應鏈透明化的重視，即時檢索生產紀錄與缺陷報告已成為標準要求，生產異常追蹤與生產記錄亦是品質控管與售後服務的重要環節，涵蓋生產監控、自動修正、異常回應與故障排除，並提供歷史數據分析，以找出異常原因與缺陷，提升生產品質並強化客戶服務（黎瑀蓉，2018）。

因此，提升上下游整合效率、即時掌握異常狀況、迅速提供生產紀錄，對於提高良品率、降低成本與加快排除故障的效率具有關鍵意義，也能提升消費者對產品的信任與滿意度。

某紡織公司全面導入智慧生產流程，從原料管理到出貨皆採自動化操作與數據驅動決策，藉由物聯網 (IoT) 技術，紡織設備上裝設感測器，能即時監測設備狀態與原料特性，並透過無線網路將數據傳輸至中央控制系統，一旦設備異常，系統將即時警報並記錄詳細資料，協助技術人員迅速排解問題，避免生產中斷。

某紡織公司亦成立資訊團隊，自主開發「雲端實時紡織智慧化生產資訊管理監控預警整合系統」，以因應智慧生產的關鍵需求，系統技術架構與資源配置說明如下：

1. 硬體設備需求

- (1) 感測器設備：溫度、濕度、振動、電流感測器
- (2) 通訊設備：工業級路由器、數據採集器
- (3) 伺服器主機：Dell PowerEdge R740，含儲存陣列
- (4) 終端顯示設備：工業平板電腦

2. 軟體系統開發

- (1) 資料庫管理系統：採用 MySQL Enterprise
- (2) 雲端平台租用：AWS 或 Azure 服務
- (3) 客製化軟體開發

導入效益評估：

1. 總投資成本：約 1,500 萬元（第一年）
2. 年度維運成本：約 100~300 萬元
3. 預期效益：生產效率提升 23%

此系統整合感測裝置、通訊系統、伺服器、中央資訊整合系統、雲端資料庫與終端設備，能即時監控設備運作、進行數據分析與異常預警，感測器部署於自動化生產、染整、回收與廢水處理設備，收集即時數據，通過通訊系統傳送至伺服器處理，資訊整合系統將不同數據分類後存入雲端，供終端設備即時顯示監控資訊與警報訊息。

此系統的目標是實現紡織業的智慧化監控與數據導向管理，不僅提升生產效率與品質，也為管理決策提供強力支援。

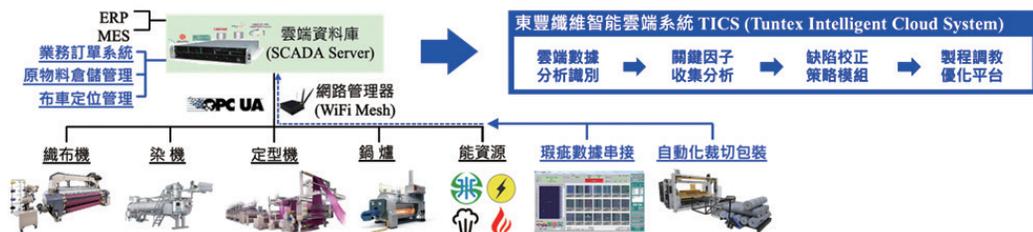


圖 1 智慧化生產資訊管理監控預警整合系統示意圖

2.1.2 人工智慧強化決策精準與品質控管

接著以人工智慧 (AI) 輔助決策，引入了人工智慧技術來進行數據分析與預測，特別是在生產計畫和品質控制方面，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；某紡織公司目前已導入自動化設備與智慧化機械，自動化設備是智慧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畫自動完成指定任務，從而降低人工操作帶來的錯誤和效率低下，此外，智慧化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與雲端實時紡織智慧化生產資訊管理監控預警整合系統，目標在於實現智慧化監控與管理，提升生產效率與品質，並為管理層提供即時數據支持。

在實際應用上，導入了實時數據監控與品質管理系統，整合每批原料的使用情況、生產環境變化與設備運行狀態，透過中央控制系統即時監測，當出現異常時，系統自動啟動修正程序，快速調整，以確保產品品質穩定，例如，採用高速攝影機結合 AI 影像辨識的布料瑕疵檢測系統，可即時偵測並標記布料缺陷，自動識別需修復或替換的區域，大幅減少人工檢驗時間，提升品管精度。

2.1.3 生產履歷與異常通報提升資訊透明與信任

為了強化異常管理與生產資訊透明度，開發「紡織業生產瑕疵異常通報及履歷檢索系統」，能全面記錄與通報生產異常，並提供詳盡的生產履歷查詢工具；此系統整合生產設備、資訊設備、伺服器主機與履歷檢索平台：

1. 生產設備裝設感測器，監控即時狀態；
2. 資訊設備負責生成訂單與流程管理資訊；
3. 伺服器主機彙整儲存異常與履歷數據；
4. 客戶可透過履歷平台查詢相關產品紀錄，提升查詢效率與異常排除能力。

系統的核心目標是協助工廠即時追蹤異常，透過數據收集與分析進行自動通報與整合，並讓消費者查閱完整產品生產履歷，增加資訊透明度與信賴感。

此外，進一步開發「紡織業視覺化製造設備管理系統」，與前述系統無縫整合，涵蓋地端自動化機械、資訊設備、伺服器與雲端平台，實現從生產到資訊的全面整合，該系統能提升原物料使用效率、降低廢料產出，並實現製造過程的全時監控，協助企業強化競爭力、降低營運成本，達到高效能與永續生產的雙重目標。

2.1.4 智慧倉儲與能源管理實現永續目標

另一個提升生產力的智慧化工具就是智慧化倉儲與供應鏈管理，智慧化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，智慧化倉儲系統還能夠預測未來的原料需求，並自動生成採購計畫，保證供應鏈的順暢運行。

因應 AIoT 與智慧化發展趨勢，全面導入數據驅動的智能化生產流程，透過即時掌握生產數據，進行流程優化與瓶頸分析，系統定期生成報告，針對效率偏低的工序自動提出改善建議，協助提升整體生產效能。

在可持續發展與能源管理方面，亦取得顯著成果，智慧系統可即時監控能源使用狀況，並依需求自動調整設備運行，避免能源浪費，例如，在不影響生產的情況下，自動調整機台速度以降低電力消耗；同時配合廢料管理系統，提升資源利用效率，實現節能減碳目標。

為實現智慧製造，廣泛應用物聯網與人工智慧技術，儘管仍面臨跨平台整合與標準化不足等挑戰，但透過感測器與 IoT 監控系統，已可即時偵測異常並迅速處理，AI 則負責分析數據與支援決策，提升生產計劃與品質控管的精準度。

此外，導入自動化設備與智慧化機械，減少人為錯誤、提升生產效率與品質；實時數據監控與智慧化倉儲系統，則強化對生產流程與原料存量的掌握，提升供應鏈管理的靈活性與即時性，結合智慧製造與環保策略，不僅有效提升生產效率與透明度，還可即時提供產品履歷與品質報告，增強市場競爭力，並符合全球環保與淨零排放趨勢。

藉此，大幅提升工作效率、良率以及環保之功效，茲敘述如下：

指標項目	年度成果示例
生產效率提升	+23% (導入智慧系統後首年度)
生產瑕疵率下降	從 3.2% 降至 0.9%
廢棄物減量	年減少固廢 10 噸，廢布回收率達 65% 以上
回收水量	回收水用於染整，年節省原水 8,000 噸 (第三方認證)
操作人力需求減少	自動化導入後減少現場人力 20% 以上
客訴件數減少	年降幅達 35%，大幅提升顧客滿意度

2.2 可持續性紡織廢水回收再利用

紡織產品正朝向高質化、智慧化與環保意識並重的方向發展，消費者對機能性與環保性的要求日益提高，為因應市場需求，紡織業者積極開發新材料與新製程，提升產品功能、縮短製造流程、降低成本並提升利潤，現今產品設計的重點已由單一機能轉向兼具多元性、舒適性與再生環保性，並廣泛應用新型藥劑、染料與有機化合物。

然而，紡織製程如假撚、織造、染整與後加工所產生的廢水，含有大量難以分解的化學污染物，對環境造成極大壓力，傳統處理方式多為將各類廢水混合後以大量化學藥劑處理，以達到排放標準，但未能實現源頭分類與後端回收再利用，使水資源無法有效循環使用。

目前，業界趨勢已轉向採用穩定且高效的綜合性廢水處理與回收技術，確保回收水質穩定，實現循環再利用，這不僅有助於節水與節能，也符合全球對環境友善與循環經濟的期待（莊雅茹，2020）。

在國際應用方面，歐盟紡織產業透過「清潔生產技術 (Clean Production Techniques)」與「工業共生 (Industrial Symbiosis)」推動廢水零排放與廢熱再利用；例如德國與荷蘭已有紡織廠實現超過 80% 的水回收率。

相較之下，台灣紡織業近年也加速推進綠色製程與智慧化水資源管理系統，部分紡織企業亦已建構廢水回收再利用系統，年回收水使用率 60% 以上，但中小型廠商則仍面臨設備投資與技術整合挑戰。

因此，台灣紡織業若能強化智慧水處理系統的應用、推動模組化與低成本的回收設備普及，並借鏡國際經驗，即可進一步提升循環經濟效益，達成產業轉型與永續發展雙重目標。

某紡織公司針對染整製程中污染較嚴重的廢水問題，自主研發高效的回收循環處理系統，著重於減少化學用藥、降低環境污染並提升循環經濟價值。

處理流程如下：染整廢水首先匯入 pH 中和池，將酸鹼值調整至 7~8，再藉由高低水位差自然引流至調勻池，確保水質均勻，經調勻後的廢水，透過抽水馬達送入冷卻水塔降溫，並流入活性污泥池進行曝氣與生物分解，隨後，廢水經緩坡（傾角不超過 25 度）引導至終沉池，進行進一步沉降處理，再依序通過快混槽、慢混槽與浮除池處理雜質，最後，透過砂濾器與軟化樹脂塔過濾淨化後，冷水再導回染整程序重複使用。

本系統的主要優勢包括：

1. 減少化學用藥：透過生物分解與物理程序，降低對化學藥劑的依賴，減輕水質與環境壓力。
2. 降低回收成本：多段式處理流程提升回收效率，節省整體廢水處理支出。
3. 減少環境污染：提升回收水質與可再利用比例，有效減少廢水排放量。
4. 提升循環經濟價值：淨化水重新投入染整流程，提高資源使用效率，落實循環再生理念。

某紡織公司亦先期投資廢水處理系統，技術規格與投資分析內容茲敘述如下：

1. 處理設備技術參數：

- (1) 廢水處理量：日處理 4,000 噸
- (2) 調勻池：混凝土結構
- (3) 活性污泥池：含曝氣系統
- (4) 沉澱槽：上下分層
- (5) 砂濾器與軟化設備

2. 處理效能與經濟效益：

- (1) 化學需氧量 COD 去除率：85% 以上
- (2) 懸浮固體 SS 去除率：90% 以上
- (3) 回收水水質：符合工業用水標準
- (4) 廢水回收率：70%
- (5) 年節省用水成本：400 萬元
- (6) 投資回收期：6.2 年

3. 操作維護成本包含：

- (1) 電力消耗
- (2) 化學藥劑

(3) 人工維護

(4) 設備維修

某紡織公司致力推動紡織業的永續轉型，透過創新技術實踐節能減排與資源循環的目標，為產業建立綠色製程的標竿。

2.3 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

紡織業作為全球重要且能源密集的製造業，對環境與氣候變化影響深遠，隨著可持續發展需求提升，紡織業積極推動可再生能源應用、能源效率提升、碳排放監測與碳足跡評估。

首先，紡織業廣泛利用太陽能等可再生能源，安裝光電板供應生產所需電力與熱能，有效降低對傳統能源的依賴與碳排放，減緩氣候變遷影響；其次，透過引入高效照明、節能機械等先進節能技術，以及優化能源管理流程，紡織廠能有效減少能源浪費，不僅節省成本，更降低碳排放，提升生產效率；最後，碳足跡評估幫助企業全面掌握產品生命週期中的碳排放熱點，並制定精準減排策略，提升企業與消費者間的溝通與信任，推動低碳綠色產品。

國際上，歐盟紡織業積極落實淨零排放管理，結合智慧能源管理系統與再生能源，推動「碳中和工廠」建設，且實施嚴格的碳排放報告制度與碳交易機制，美國則強調供應鏈碳足跡透明化與能源轉型，鼓勵企業採用可再生電力並提升能源效率。

相較之下，台灣紡織業正逐步引進智慧節能設備與碳排放監控系統，部分企業已建立碳足跡盤查及能源管理標準，惟整體淨零排放管理仍處於推廣與深化階段，未來可借鑑國際成熟經驗，加速技術普及與政策支持，推動產業轉型升級。

綜合而言，透過推動可再生能源、提升能源效率、完善碳排放監測及碳足跡管理，紡織業能有效降低環境負擔，實現可持續發展與淨零排放目標，並提升市場競爭力（郭子平，2011），隨技術進步與環保意識增強，紡織業在全球淨零轉型中將持續發揮關鍵作用。

各國在紡織業淨零排放管理技術亦有些許差異，本文亦整理主要地區在技術應用與管理策略上的差異與重點，茲敘述如下：

項目	歐盟	美國	中國	台灣
政策框架	強制碳排放報告、碳交易制度、綠色製造標準	自願碳披露、聯邦及地方政策支持、產業指導方針	政府主導綠色轉型計畫、碳排放交易試點、省級碳管理規範	逐步推動碳足跡盤查與能源管理標準，尚無強制碳交易制度
能源使用	大規模應用太陽能、風能等可再生能源，推動碳中和工廠	促進可再生電力採購與能源效率提升	依賴國內煤電轉型，鼓勵企業引入新能源與節能設備	部分企業導入太陽能與節能設備，整體應用比例仍待提升
碳排放監測技術	智慧感測器網絡、即時排放監控系統	物聯網技術與大數據分析，供應鏈碳足跡追蹤	工業級監控系統結合智慧化，數據集中管理	採用感測器監控與碳盤查軟體，數據管理能力逐步加強
節能減碳措施	製程優化、自動化控制、廢熱回收與利用	高效設備替換、智慧化製造與流程重組	推廣清潔生產技術，支持節能改造和產業升級	推動節能機械設備升級，倡導智慧化生產，仍處於推廣階段
循環經濟與廢水處理	工業共生、廢水零排放技術、資源循環再利用	廢水處理新技術與資源回收整合	廢水深度處理與回用示範項目增加	廢水處理技術引進與應用中，規模化回收尚待擴展
碳足跡評估與報告	法規要求企業公開碳足跡數據，納入企業環境報告	推動企業自願碳足跡披露，促進市場綠色競爭	碳足跡評估標準逐步完善，支持國家級碳盤查平台建設	部分企業開始碳足跡評估，市場需求增加，標準化尚未完全建立

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，某紡織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，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 2 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。
3. 廢料再生燃料：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，除有助於環境保護，還減少了廢料處理的成本。

4. 自動化和標準化：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，有助於評估整個生產過程的碳排放，制定相應的減排策略。
6. 太陽能發電系統的應用：已完成整廠太陽能板的建置安裝，大幅減少對傳統化石能源的依賴，同時降低碳排放。
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。

為達上述目的，某紡織公司亦大規模建構再生能源系統，建置與效益分析敘述如下：

1. 太陽能發電系統規格：

- (1) 裝置容量：1,100KWp 太陽能板系統
- (2) 年發電量：約 8 萬度電

2. 碳排放系統技術配置：

- (1) 碳盤查軟體：ISO 14064 認證軟體
- (2) 碳足跡標籤申請：產品碳足跡認證

3. 能源管理系統效益：

能源使用效率提升：15%

碳足跡管理流程與成本：

1. 製程碳足跡監測建置：

- (1) 監測點設置：生產線 15 個監測點
- (2) 數據收集系統：自動化數據收集，減少人工統計 90%

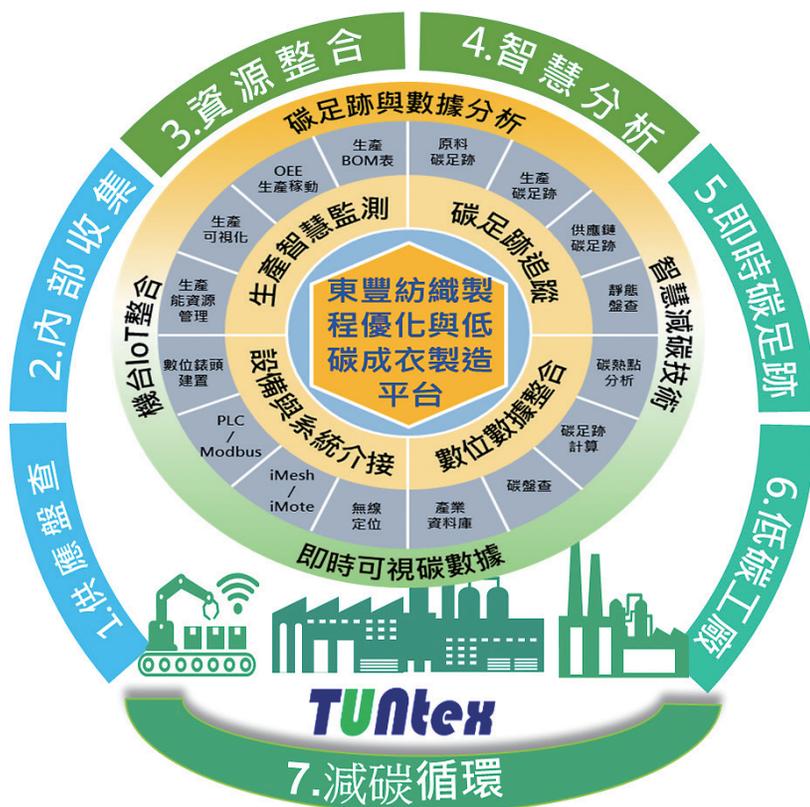


圖 3 紡織業碳管理整合應用平臺循環示意圖

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：

3.1 紡織業智慧化生產的注意事項與常見缺失

3.1.1 注意事項

1. 技術整合與兼容性：目前智慧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：智慧化生產需要大量的數據收集和網絡連接，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慧化生產的重要關鍵之一。
3. 員工培訓與技能提升：智慧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，針對智慧化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；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，可及時發送預警，從而進行快速反應和故障排除。

3.1.2 常見缺失

1. 缺乏整體規劃：很多企業在推動智慧化生產時，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。

3.2 紡織業循環經濟的注意事項與常見缺失

3.2.1 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，從生命週期角度考慮生產、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。

3.2.2 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。

3.3 紡織業淨零排放的注意事項與常見缺失

3.3.1 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。

3.3.2 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

紡織業在推動智慧化生產、循環經濟與淨零排放的進程中，面臨諸多挑戰與機會，智慧化生產透過物聯網技術、數據分析與自動化設備，可顯著提升生產效率與產品品質，但在導入過程中，企業需克服舊設備的兼容性問題，並加強員工技術培訓，確保新技術有效運用。

某紡織公司秉持創新與可持續發展的理念，導入物聯網 (IoT) 技術，將感測器、智慧化設備與自動化系統整合，建置雲端即時生產資訊管理系統，該系統具備即時監控、預警與異常修正功能，有效提升生產良率與設備壽命，並使管理效率大幅提升。

在推動循環經濟方面，紡織企業應優先選用可再生資源及生態友善的產品設計，並建立高效的廢棄物管理與回收機制。某紡織公司致力於提升資源利用率與降低消耗，自主開發多階段紡織廢水回收再利用技術，透過過濾與生物處理，有效控制污染並實現再利用，同時在設計階段即考量材料回收與再生的可行性，進一步提升產品的環境友好性，降低整體生產過程對環境的衝擊，增強市場競爭力。

在邁向淨零排放的進程中，企業應積極採用可再生能源（如太陽能與風能）並建立精確的碳排放監控系統，與供應鏈夥伴協作以降低整體碳足跡。某紡織公司已導入太陽能光伏系統與風能發電設施，降低對化石燃料的依賴，並建立碳排放監測系統，定期進行分析與報告，據以制定有效減排策略，並與上下游供應鏈合作，推動整體產業低碳轉型，強化永續供應鏈管理。

總體而言，紡織業在智慧生產、循環經濟與淨零排放方面具有高度潛力，惟仍須克服技術整合、管理機制與數據準確性等挑戰，唯有透過明確的長期規劃、創新技術應用與多方協作，方能實現高效且可持續的發展目標。

某紡織公司將持續投入綠色技術與創新解決方案，致力於降低環境負擔、提升生產效率，在循環經濟與淨零排放領域建立標竿，成為全球紡織業中具代表性的綠色技術領導者，為客戶與社會創造更高永續價值。

紡織業在推動智慧化生產、循環經濟與淨零排放的過程中，面臨諸多挑戰與轉型機會，智慧化生產可透過物聯網 (IoT)、數據分析與自動化設備，有效提升生產效率與產品品質，但企業需克服舊設備兼容性、系統整合與員工培訓等問題，才能順利導入。

某紡織公司導入雲端實時生產資訊管理系統，結合智慧化感測器、自動化設備與 AI 決策模型，能即時監控生產狀況，並針對異常情形快速發出預警與修正，導入後，生產良率提升約 15%、設備故障率下降約 30%、維修平均回應時間縮短至原本的 60%，顯著提升了生產穩定性與效能。

為導入該系統，企業需考量以下資源配置：

1. 經費需求：完整建置智慧生產與監控系統約需投資 3,000~5,000 萬元，依工廠規模與自動化程度而定；
2. 設備升級：約有 40~60% 老舊機台需加裝感測器或汰換以符合數據連接要求；
3. 人力培訓：需增聘或培訓 3~5 名資訊工程師／設備操作員，負責系統維護與數據分析。

在循環經濟方面，某紡織公司從產品設計階段即導入「可回收」、「低污染」材料思維，並開發多階段紡織廢水回收系統，該系統經過預處理、過濾、及生物反應處理後，可達到廢水回收率達 70%，每年可回收超過 20,000 噸水資源，不僅減少用水成本約 12%，也大幅降低對當地水資源的負擔。

目前，台灣約有 65% 的中小型紡織業者未建立完整回收體系，透過完善的廢棄物分類與回收機制，提升材料再利用率至 45% 以上，有效控制原物料成本與廢棄處理費用。

在邁向淨零排放的路上，某紡織公司簽訂 RE10x10 積極導入綠電太陽能光電系統與規劃評估儲能設備，目前已自產可再生能源佔總用電比約 22%。此外，建置精密碳排監測系統，並依據 ISO 14064 與 GHG Protocol 標準，定期盤查與報告排放數據，透過這些措施，年碳排放量已較導入前減少約 18% (約 1,500 公噸 CO₂e)。

根據評估，導入再生能源與碳管理系統的初期投資約需 1,000 萬元，但可於 5 年內回收成本，並可取得政府節能補助與綠色金融支持，進一步提升企業競爭力。

綜合來看，紡織業在智慧化生產、循環經濟與淨零轉型上擁有高度潛力，雖然導入過程中仍需克服技術整合、資源配置與數據準確性等挑戰，但只要制定明確的長期策略、分階段投入資本與人才，並強化與供應鏈夥伴的協作，即可實現以下綜合效益：

根據本研究實務經驗，建議紡織業者導入智慧化管理系統時應考慮以下要點：

1. 分階段投資策略：

- (1) 第一階段：智慧化生產系統
- (2) 第二階段：再生能源系統
- (3) 第三階段：廢水處理系統

2. 競爭優勢建立：

- (1) 生產效率提升 15~25%
- (2) 營運成本降低 10~18%
- (3) 碳排放減少 18%
- (4) 取得 ESG 認證優勢

參考文獻

- 洪志銘 (2017)，循環經濟與綠色經濟促成經濟轉型，經濟前瞻，108 年 5 月。
- 黎瑀蓉 (2018)，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。
- 莊雅茹 (2020)，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。
- 郭子平 (2011)，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。

徵稿

工業污染防治刊物



經濟部產業發展署
Industrial Development Administration, MOEA



財團法人台灣產業服務基金會
FOUNDATION OF TAIWAN INDUSTRY SERVICE

「工業污染防治」刊物自民國71年發刊至今，提供產業界各類工業污染防制之技術及管理工具，據以改善製程及提升管末處理設施效能，透過學術研究與實務技術發表，提供產、官、學、研技術交流之機會。本刊物竭誠歡迎**不限期徵稿**，惠請各界踴躍投稿。

本刊特點



1. 為國內歷史最悠久之環保期刊之一，至113年已發行162期，專業論著已逾1,880篇。
2. 列入國內重要專業期刊，專業技師投稿將取得60分之積分。
3. 納入國家圖書館期刊文獻資訊網，各期紙本刊物於國家圖書館永久保存。

徵稿範疇與方向



1. **空氣污染與噪音**：空污防制及案例、減碳議題
2. **水處理與資源再利用**：節水及廢水回收再利用、再生水系統化(如都市生活污水再利用，以供產業用水)、廢水及重金屬處理技術
3. **資源循環與再利用**：資源循環及減碳行動
4. **土壤處理與綠色永續化學**：土壤與地下水整治及調查技術、綠色永續韌性整治、毒性化學物質管理
5. **環境管理規劃**：再生能源發展與應用、永續發展策略、生命週期評估

投稿辦法



1. 投稿稿件，請以電子郵件寄至工業污染防治刊物編輯組
2. 檔案下載：徵稿啟事、撰寫格式及範例、著作權讓與同意書
3. 稿件請勿一稿多投，來稿將依收件情況及範疇分期審查刊載

聯絡窗口



陳靖瑜 助理工程師

專線電話：(02)7704-5156

E-mail：watch8630@ftis.org.tw



經濟部產業發展署 廣告

「工業污染防治」廣邀各界投稿

一、本刊特點

1. 為國內歷史最悠久之環保期刊之一，於71年1月創刊，至 113 年已發行162期，專業論著已逾 1,880篇。
2. 列入國內重要專業期刊，專業技師投稿將取得60分之積分。
3. 本刊物納入國家圖書館期刊文獻資訊網，各期紙本刊物於國家圖書館中永久保存。

二、徵稿內容

1. 本刊關有下列類型領域，凡有處理技術、工程規劃設計、操作維護、污染防治實例、清潔生產、污染預防、資源循環技術及法令規章等稿件均歡迎。
 - (1) 空氣污染與噪音
 - (2) 水處理與資源再利用
 - (3) 資源循環與再利用
 - (4) 土壤處理與綠色永續化學
 - (5) 環境管理規劃
2. 來稿限未在其他刊物發表過之文稿。稿件請勿一稿兩投，文稿篇幅盡量勿超過 25頁(含圖表)，請附中文摘要(300字以內)，並附關鍵字。一經採用酌酬稿費，其版權歸本刊所有，請檢附「著作權讓渡同意書」。
3. 來稿請附真實姓名、服務單位、地址及電話，以利聯絡並對讀者負責。
4. 本刊對來稿有刪改權，不採用恕不退稿，如需退稿或不願被刪改，請在來稿中註明。
5. 來稿請寄「工業污染防治編輯組」E-mail:watch8630@ftis.org.tw；或透過計畫網站線上投稿 <https://proj.ftis.org.tw/oss/index.html#/>
6. 詢問本刊相關事宜，請電(02)2784-4188轉5156「工業污染防治」編輯組。

三、刊物編寫格式(文稿格式範例請洽本刊編輯組)

1. 版面設定：文稿請以 A4 規格 21cm*29.7 cm 編排，本文版面規格則為上界 4.9cm、下界 4.9cm、左界 3.7cm、右界 3.7cm；內文段落則採固定行高 20 pt。
2. 字型設定：除標題(21號粗體字，置中)、作者(12 號，靠右)、摘要、章標題(16 號粗體字，置中) 及節標題(12號粗體字，靠左)採標楷體字型外，其餘內容請採用新細明體(內文為10號，左右對齊，首行首字須位移2字元；圖名及表名則採10.5號粗體字並置中)；英文及數字請用Time News Roman。
3. 章節編序：一、1、(1)、a 依序類推為原則，章節編寫系統範例如下：
一、→1.1→1.1.1→1.→(1)→a。

4. 圖表配置：文中之圖表請隨文插入，序號請依撰文順序依次編號，如表1、表2，圖1，圖2等；圖表則須清晰可供辨識，另圖表中之說明文字請採用中文。
5. 文稿篇幅：請依上述格式編排並盡量控制於25頁以內(含圖表)。
6. 外文引述：翻譯名詞應採易通易懂者，首次出現請附原文，如沉澱(sedimentation)；原文名詞為首字則不必大寫，如活性污泥法(activated sludge process)；一般通用之縮寫文字亦不必加點，如BOD、SS等(不必寫成S.S)。
7. 數據規範：文中數字請採用阿拉伯數字，年份則以西元紀年，可量化數字每超過3位數請以逗點區隔，如1,250；文中所用數據單位應為公制單位，如mg/L、m/d、kg/m³、d、m、min、°C等。數字及英制單位之間請空半形1格，如12mg/L，改為12 mg/L。
8. 行文要求：文句簡明，用字通俗即可，請儘可能避免如“的”、“之”混用情形。
9. 文獻格式：文獻引用請隨文以文獻作者、年份註解於括號內，如陳國城等(1991)、(Gzara, 1991)；參考文獻以中文在前，英文在後之原則序列，中文請依第一作者姓名筆劃順序排列，英文則依作者姓氏字母順序羅列。

期 刊：作者(出版年)。篇名。出處。卷期。頁數。

書 籍：作者(出版年)。篇名。出處。頁數。

機關出版品：編寫機構(出版年)。篇名。出版機構。頁數。

研討會論文：作者(出版年)。篇名。會議論文冊名稱。主辦單位。頁數。

報 告：作者(出版年)。報告名稱。○○○委託之專題研究報告(若是政府委託需填寫報告編號)。出版地點：出版商。

網 頁：作者(網頁日期)。資料名稱。網站站名網域網址。

【參考文獻 格式範例】

王義基(2014)，製造業產品碳足跡輔導歷程與成果，永續產業發展季刊，第66期，p3-9。

林靜宏翻譯(1999)，儀器分析，美亞書版股份有限公司。

林振誠(2012)，IBP 塑網，「丙烯市場展望」，<http://goo.gl/ypB800>。

楊正邦、劉志成(2004)，快濾地反沖洗廢水之處理技術及回收再利用，自來水會刊第23期，p81-86。

經濟部工業局(2011)，放流口線上光學COD/SS 監測開發計畫，100年度CITD專案計畫結案報告。

Gzara, L. and Dhahbi, M. (2001), Removal of chromate anions by micellar-enhanced ultrafiltration using cationic surfactants, *Desalination*, 137(1-3): p241-250.

著作財產權讓與同意書

著作名稱		
作者	姓名	
	通訊處	
作者	姓名	
	通訊處	
作者	姓名	
	通訊處	

※如不敷記載可自行增列

- 一、本著作全部作者保證除本次投稿外，相同內容未投稿至國內外其他刊物；如有類似一稿多投之情形同意無條件撤回本文，不得異議。
- 二、本著作全部作者同意將著作財產權自「工業污染防治刊物」(下稱本刊)接受刊登日起，讓與給經濟部產業發展署，但作者保留引用文章在自己著作之權利。如爾後有版權、著作權等法律糾紛，文責由作者自負。
- 三、財團法人台灣產業服務基金會因承辦經濟部產業發展署計畫，有重新製作並將本篇文章置於該會所屬網站及刊物等刊載供外界查詢之權利，但須註明本著作之作者。
- 四、本著作全部作者同意由_____代為領取稿酬，其分配與本刊無涉。

此 致

經濟部產業發展署

作者：_____ 簽章
年 月 日

_____ 簽章
年 月 日

_____ 簽章
年 月 日



本期刊下載

發行所：經濟部產業發展署

台北市106信義路三段41-3號

TEL:(02)2754-1255

FAX:(02)2704-3753

本期刊全文網址：sdd.nat.gov.tw/eta/index.aspx