

工業污染防治

Industrial Pollution Prevention and Control





中華民國七十一年一月創刊

中華民國一一三年九月出刊

編輯審：江康鈺、吳義林、李公哲、林文印、林凱隆、胡憲倫、凌永健、
查委員：馬鴻文、康世芳、張添晉、陳士賢、劉鎮宗、歐陽嶠暉、鄭福田
、顧洋(依姓名筆畫順序)

執行編輯：陳見財、莊茂森、鐘嘉祺、莊倫綱、詹奇君、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～

工業污染防治

Industrial Pollution Prevention and Control



161 工業污染防治

空氣污染與噪音類

以人工智慧 (AI) 優化粉煤燃燒並改善 NO_x 及未燃炭

..... 吳宗德、郭子豪、張耀斌、黃溢銓 1

廢（污）水處理類

食品產業廢水以 UASB 和 BioNET 組合程序之實廠處理

..... 陳致君、楊凱翔 25

染整前處理廢水回收過濾再利用模廠案例分享

..... 吳孟育、林彥儕 43

廢棄物類

核能電廠除役之循環經濟可行性探討

..... 簡淑美 61

資源再生產業在淨零碳排趨勢下的機會與挑戰

..... 蔡維馨、羅勻謙、黃晴澤、黃群真 83

環境管理規劃類

漿紙產業無機副產物低碳排資源化之研究

..... 蔡志達、李昂軒 107

水泥業 2050 年淨零排放路徑圖計算方法學研析

..... 陳志賢、曾昱中、邱子杰、陳志宗 127

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 160 期，共刊載 1,864 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。

113 年度之文稿範疇包含空污防制及案例、節水廢水回收再利用、廢水及重金屬處理技術、碳中和、資源循環及減碳行動、土壤與地下水整治、毒性化學物質管理、永續發展策略、生命週期評估、減碳管理議題、再生能源發展與應用及淨零碳排。

本期共收錄 7 篇，分別撰述「以人工智慧 (AI) 優化粉煤燃燒並改善 NO_x 及未燃炭」、「食品產業廢水以 UASB 和 BioNET 組合程序之實廠處理」、「染整前處理廢水回收過濾再利用模廠案例分享」、「核能電廠除役之循環經濟可行性探討」、「資源再生產業在淨零碳排趨勢下的機會與挑戰」、「漿紙產業無機副產物低碳排資源化之研究」、「水泥業 2050 年淨零排放路徑圖計算方法學研析」，作者慨賜宏文，提供寶貴經驗，特此致謝。

空氣污染與噪音類

以人工智慧 (AI) 優化粉煤燃燒
並改善 NO_x 及未燃炭

吳宗德*、郭子豪**、張耀斌***、黃溢銓****

摘 要

為因應空污減排、煤炭多元化及負載之變化，粉煤鍋爐面臨運轉偏離原始設計條件，導致鍋爐燃燒效率降低而增加煤炭用量、氮氧化物濃度增加使選擇性觸媒還原脫硝之噴氨量增加、飛灰未燃炭或燒失量增加影響循環經濟去化、鍋爐結渣破管衍生工安、可用率等問題。可透過人工智慧 (AI) 分析及調整操作參數優化燃燒過程來改善。優化目標係使爐膛溫度均勻分佈，則透過爐膛二維煙溫分佈線上測量系統來確認。本研究以前牆式粉煤汽電共生鍋爐 (500 公噸 / 小時) 及低 NO_x 燃燒器為對象，於固定煤炭成分情況下，調整操作參數如磨煤機運轉、燃燒器風箱壓力、風門等以調整粉煤粒徑及空燃比設定。燃燒優化結果顯示未燃炭由 4.9% 降至 0.86%，熱效率提升 1.93%，CO 濃度由 6.83 ppm 降至 6.3 ppm。值得注意的是，爐膛中心的溫度由調整前 913.7 °C 升高至 935.3 °C，但 SCR 入口 NO_x 濃度僅由 184.3 ppm 上升至 187.8 ppm，對 NO_x 幾無影響，推測 NO_x 主要由 Fuel NO_x 主導 (約占總 NO_x 的 75%)，透過降低一次風量可抑制 Fuel NO_x 的生成。本研究證實透過監測和控制燃料和空氣流量分佈可以優化燃燒過程，在不影響 NO_x 下，降低未燃炭及提高熱效率。建議企業因煤源多樣化等需求導入高燃料比 (固定炭) 燃料，而有 LOI 增加之潛勢，可透過本研究成果協助將 LOI 降低至 6% 以下，促進飛灰於循環經濟利用的管道。

2 以人工智慧 (AI) 優化粉煤燃燒並改善 NO_x 及未燃炭

【關鍵字】粉煤燃燒、燃燒優化、人工智慧、氮氧化物、未燃炭

- | | |
|------------------|-----------|
| * 環興科技股份有限公司 | 工程師 |
| ** 環興科技股份有限公司 | 計畫主任 |
| *** 台灣塑膠工業股份有限公司 | 仁武廠協理 |
| **** 台塑企業總管理處 | 安衛環中心副總經理 |

一、前言

為因應美國 1990 年的《清潔空氣法修正案》，許多粉煤鍋爐改用低氮氧化物燃燒器 (Low NO_x Burner) 來降低 NO_x 排放 (ECHNOLO, 1996)，並改善飛灰未燃炭或燒失量 (Loss on Ignition, LOI) 增加之副作用 (EPRI, 2001, Dong, 2010)。我國電力設施空氣污染物排放標準 (2014) 中燃煤汽電共生 NO_x 標準 70 ppm 高於業者的環評承諾及機組設計值。然而，近年業界推動超低排放 NO_x 濃度低於 30 ppm (台化公司, 2018) 因而必須提高 LNB 及選擇性觸媒還原脫硝 (SCR) 之 De-NO_x 效率，使粉煤鍋爐運轉偏離原始設計條件，難以兼顧燃燒效率、空污 (NO_x) 排放、飛灰 LOI 及工安 (結渣破管)，而有燃燒優化之需求。本研究透過文獻回顧與國內實廠測試，探討並驗證燃燒優化做法及效果。

二、文獻回顧

2.1 燃燒重要參數

燃煤電力設施承受提高效率、降低污染 (NO_x)、降低飛灰 LOI、降低結渣破管等多項壓力，同時滿足多項目標需要在爐膛內保持微妙平衡。圖 1 顯示燃燒關鍵參數與過剩空氣 (以空燃比表示) 之關係 (Widmer and Marquez, 2012, Lockwood, 2015)，燃燒最佳區 (optimum zone) 被定義最低可能的 O₂ 供應下，不完全燃燒指標 CO、LOI 最低，為此需要向爐膛提供足夠的過剩空氣以實現煤的完全燃燒。然而，於此區域運轉會增加與爐膛內還原條件相關的管道磨耗 (tube wastage) 的風險。因此，鍋爐通常在舒適區 (comfort zone) 內運行，有略多的過剩空氣 (及 O₂) 以兼顧完全燃燒和材料壽命，然可能會以降低效率及增加 NO_x 排放為代價。因為空氣量增加會導致風機功耗增加且煙氣排放熱損增加而降低效率，而 O₂ 對 NO_x 生成一般具正向關係。此外，手動過程無法在長時間內始終保持在這個範圍內。實現這個目標的唯一方法是通過自動化來優化鍋爐燃燒條件。(POWER, 2019)

4 以人工智慧 (AI) 優化粉煤燃燒並改善 NO_x 及未燃炭

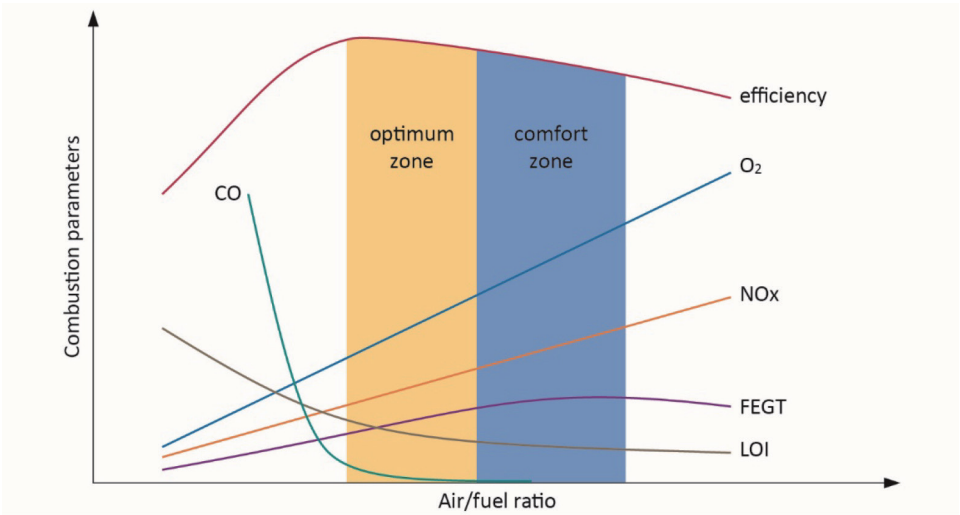


圖 1 關鍵燃燒參數與空燃比之關係 (Widmer and Marquez, 2012)

2.2 LNB 及潛在問題

傳統的燃煤燃燒器操作時多有 15 至 20% 的過剩空氣 (相比於理論化學計量空氣)，LNB 燃燒系統旨在降低主燃燒區氧氣，通常包含 LNB 進行分段燃燒，並結合火上空氣口 (Over Fire Air, OFA)，如圖 2，其原理如下：

LNB：操作原理涉及減少引入主燃燒區的空氣量，從而創造出富燃料、還原環境，並降低溫度，以抑制 NO_x 的生成。所需的用於完全燃燒的剩餘空氣則在主燃燒區之後作為二次 (、三次) 添加。在這裡，溫度足夠低，也可抑制 NO_x 生成。

OFA：在使用 LNB 的情況下，如果 NO_x 排放超出所需水平，可能需要更深層次的分段燃燒，可通過鍋爐較高位置、LNB 上方的獨立口進一步引入所需的剩餘燃燒空氣，同樣在較低溫度下，從而抑制額外 NO_x 的產生。

LNB 的潛在問題：在主燃燒區內減少空氣的 LNB 操作可能會導致經濟損失，因為 LOI 的含量增加，燃燒區的結垢增加，並加速腐蝕。LNB 促進的延遲燃燒可能會導致較高的爐膛出口煙氣溫度 (Furnace Exit Gas Temperature, FEGT)。為了抵消這些傾向，可以通過增加粉煤細度和燃燒優化等方式來降低 LOI。

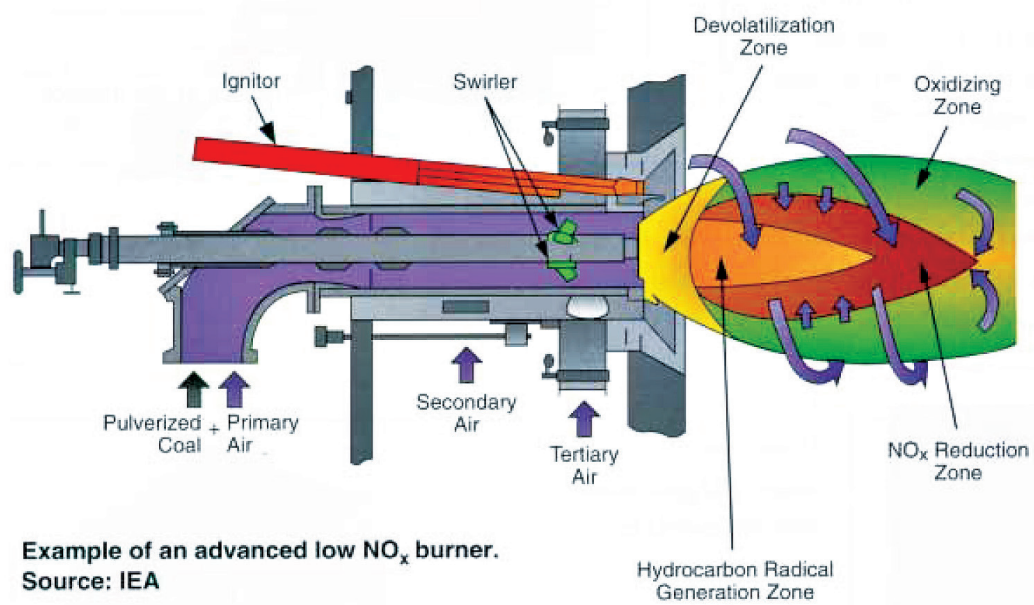


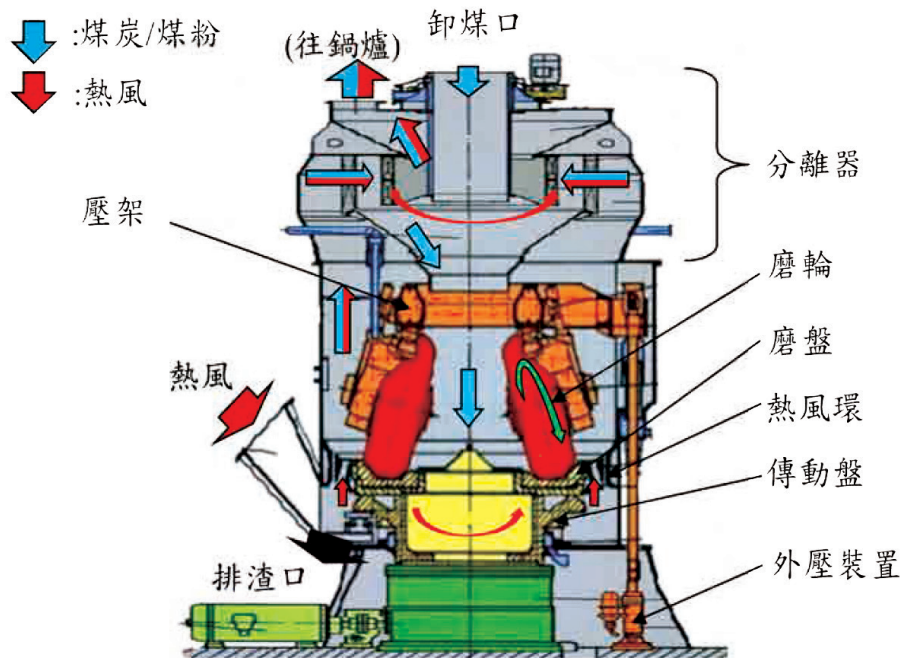
圖 2 低氮氧化物燃燒器 (LNB)(ECHNOLO, 1996)

2.3 增加粉煤細度

多數燃煤電廠改善經驗中顯示，至少有 75-80% 的機會取決於粉煤粒徑大小。因此，燃燒的優化應從改善粉煤細度和磨煤機性能開始 (Wiatros-Motyka, 2016)。鍋爐燃燒對煤粉細度具一定要求，依鍋爐設計條件設置有磨煤機將煤炭研磨成符合規格的燃料粉煤。磨煤機及其功能如圖 3，根據特定的哈氏可磨性指數 (Hardgrove Grindability Index, HGI)、原始煤料尺寸、含水量和所需的粒度水平設計，因此，煤粉碎機的性能會隨著燃料的變化而變化。其中，粒度和硬度對煤粉碎機的性能影響更大。因此調整煤粉碎機，以確保提供所需粒度的燃料，非常重要。

然而，因為設備使用年限較久使研磨煤粉過篩值 (200 MESH) 無法達到設計值 85% 以上 (台化公司, 2022)，且因煤炭多元化使煤磨機處理量低於設計值，則需透過維護保養提升性能來改善，當成燃燒優化的起點。

6 以人工智慧 (AI) 優化粉煤燃燒並改善 NO_x 及未燃炭



研磨：以內部機構磨輪與磨盤間的壓碎、輾碎、研磨等功能將煤炭研磨成煤粉。

乾燥：藉由通入熱風，將研磨完成的煤粉吹送至鍋爐，同時乾燥、去除水份並提高輸送順暢，避免阻塞。

篩選煤粉細度：藉由內部分離器篩選煤粉達要求細度，並將未達要求細度的煤粉篩除及循環再研磨。

排渣：煤中異物（如鐵塊、石塊、木塊等）排除。

圖 3 重立式磨煤機及其功能 (台化公司, 2022)

2.4 燃燒優化

煤電廠控制系統不斷演進，以滿足對高效靈活發電和低排放日益增長的需求。為了優化燃燒過程，需要使用更多在線（連續自動）監測技術，並用更先進的演算法以處理多變量系統，以替換現行標準控制環。國際能源署 (International Energy Agency, IEA) 乾淨煤炭中心 (Clean Coal Center, CCC) 於 CCC/251 報告 (Lockwood, 2015) 中

彙整先進演算法及監測技術。另於 CCC/263 報告 (Wiatros-Motyka, 2016) 中說明粉煤及生質能燃燒優化的作法。簡言之，燃燒優化中使用的監測器分為空燃比參數及燃燒效果驗證 2 項。在空燃比參數包括煤粉細度、煤粉流率、空氣流率；燃燒效果驗證包括煙道氣 O_2 、 CO 、FEGT 和飛灰 LOI 等。

國內早期因應煤源變更有燃燒優化的成功經驗 (陳等, 2005, 李, 2005, Wan et al., 2008)。台電公司面臨粉煤細度線上監測及設備維護均不易長久維持，取樣到實驗室做粉煤細度分析雖可供事後比對探討，無法長期提供作為動態及時運轉調整的數據來源，且為了降低購煤成本，購買煤炭的來源多元化，無法固定單一煤種。其次為了降低空污排放 (PM 、 SO_x 、 NO_x 3 項需合併綜合考量)、灰量、及控制熱值範圍等種種因素，會進行不同煤種的混煤燃燒。因此若實際運轉狀況偏離原先的條件，會使優化設定的效果打了折扣。

除了因應上開因素外，又為了提高燃燒效率，降低爐膛結渣等原因持續引進燃燒優化技術 (楊, 2010, 賴及林, 2012, 楊, 2015, 楊, 2016, 楊, 2017)，希望能結合台電公司目前已有之模擬系統進行優化。然而，國內空燃比參數監測設備使用並不普遍，業者表示有下列原因：1. 早期煤炭穩定於歲修後調整即可，2. 成本太高，3. 容易阻塞難維護等。在燃燒效果驗證設備使用也不普遍，包含下列因素：1. 僅有一維之 CO 跟 O_2 監測不敷使用，2. 雖有 FEGT 但無二維溫度場不敷使用，3. 成本太高，4. 過去管制相對寬鬆需要不高。

2.5 AI 引進步驟

AI 具有監控並提供電廠的管理參數數據之潛力，隨著淨零炭排政策持續發展，AI 可以在平衡需求和發電方面發揮作用，達到節省能源之目的。(Renshaw, 2023)

本研究將主成分分析 (Principal Component Analysis, PCA) 和線性迴歸模型結合用於燃燒優化的目標，包含以下步驟：數據收集，預處理，PCA，線性迴歸模型建立，模型訓練和評估，燃燒過程優化，最後希望可以結合 AI 自動控制，如圖 4。最終目標是通過持續監測和模型預測來實現燃燒過程的自動優化，從而提高燃燒效率。

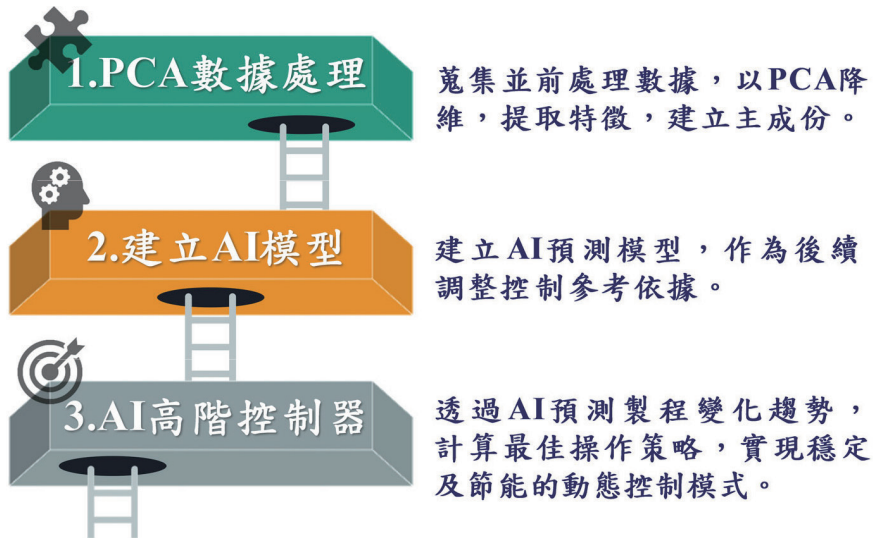


圖 4 AI引進步驟

2.5.1 PCA 數據處理

PCA 是一種用於資料降維和特徵提取的統計方法。它的主要目標是減少資料集的維度，同時保留盡可能多的訊息。PCA 透過線性變換將原始特徵空間轉換為新的特徵空間，其中新的特徵稱為主成分。這些主成分是原始特徵的線性組合，它們按照解釋資料變異數的大小排列，以確保前幾個主成分包含了資料中的大部分變異性。

以下為本研究執行 PCA 之主要步驟：

1. 標準化數據：首先計算各參數之標準差，並且刪除數據偏離大於 3 個標準差之離群值，再將各參數標準化，以確保每個特徵的均值為 0，變異數為 1。這有助於消除不同特徵之間的尺度差異。
2. 計算共變異數矩陣：PCA 基於特徵之間的共變異數來識別主成分。共變異數矩陣度量不同特徵之間的相關性。
3. 計算特徵值和特徵向量：透過對共變異數矩陣進行特徵值分解，可以得到一組特徵值和相應的特徵向量。特徵向量代表主成分的方向，而特徵值表示資料中沿著這些方向的變化量。

4. 選擇主成分：特徵值表示主成分的重要性。本研究選擇前 3 個特徵值最大的特徵向量作為主成分。這些主成分能夠解釋資料中大部分的變異性。
5. 投影資料：最後，將資料投影到所選的主成分上，獲得新的特徵向量。

PCA 的應用包括資料降維、視覺化、去噪、特徵選擇、模式識別等。透過降低資料維度，PCA 可以幫助減少計算複雜度、去除雜訊、提高模型的訓練效率，並有助於更好地理解資料中的模式和結構。

2.5.2 建立 AI 模型

本研究採用多變項線性迴歸（Multivariable Linear Regression）建立 AI 模型，多變項線性迴歸是一種統計學和機器學習中常用的模型，用於探索和建模變數之間的關係。這個模型特別適用於預測一個或多個連續型目標變數（也稱為響應變數）如房價、銷售數量等，

其核心思想基於線性關係的假設，試圖找到一個線性函數，以最好地描述自變數（或特徵）和響應變數之間的關係。這個線性函數通常表示為：

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_p X_p + \epsilon$$

其中，Y 是響應變數， $X_1, X_2, \dots, X_p$ 是自變數， $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p$ 是模型的係數，它們代表了自變數對響應變數的影響， ϵ 是誤差項。多變項線性迴歸的目標是找到最佳的係數 β 值，以使模型的預測與實際觀測值之間的誤差（即誤差項 ϵ ）最小。這通常是通過最小化均方誤差（MMSE）實現。

2.5.3 AI 高階控制器

透過 AI 預測製程變化趨勢，計算最佳操作策略，實現穩定且節能的自動化控制模式，達到節約能源和確保操作穩定的目標。不僅提高燃燒效率，同時降低人工操作需求，減少操作失誤風險。

三、研究方法

3.1 最佳化操作方法

量測是深入瞭解問題的首要步驟，它為我們提供可靠且準確的數據，這些數據在控制策略的制定和實施中起著關鍵作用。透過持續的量測和監控，有助於控制空燃比等操作參數，並不斷精進控制策略以達到優化之目的。但以往之調控方式，除了仰賴老師傅之目測火焰溫度及均勻度外，還有試誤時間成本的問題，若可透過監測數據調整瞭解燃燒狀況，並且透過人工智慧預測燃燒效率，即可大幅降低工廠燃燒優化之學習曲線。

本研究提出最佳化操作方法（如圖 5），於鍋爐系統加裝各式感測器後，透過空燃比或預測模型等，進階控制策略，再根據各項指標優化鍋爐燃燒系統。

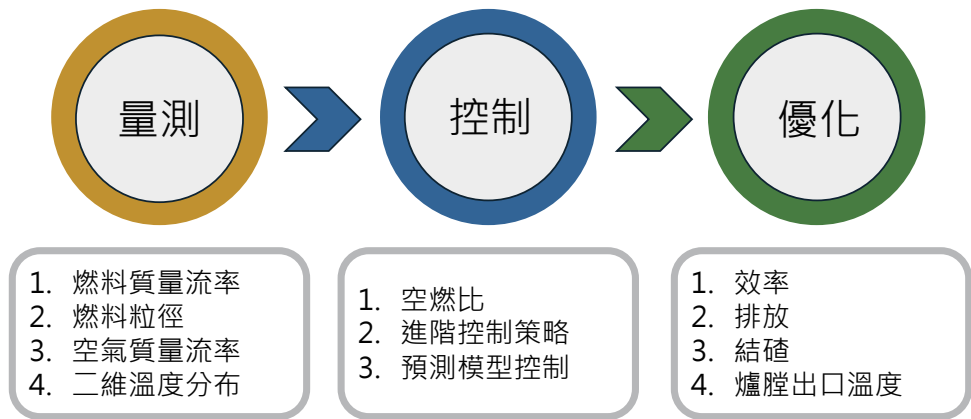


圖 5 最佳化操作方法

3.2 二維溫度分布映射技術

傳統 FEGT 單點監測無法得知平均溫度及其在鍋爐橫截面上的空間分佈。高級熱測技術，如本研究使用的 EUtech 公司 (EUtech, 2015) 的 EUflame 系統，提供了一種準確高效的 FEGT 監測方式：通過結合安裝在鍋爐周圍的多個紅外線 (IR) 熱測儀的信

號，可以重建 FEGT 的二維場，如圖 6。IR 熱測儀利用燃燒煙道氣中 CO₂ 的高濃度，其強烈的紅外輻射可以通過 Stefan-Boltzmann 定律與溫度相關聯，提供整個爐膛橫截面的完整溫度概況 (Lockwood, 2015)。

Blondeau 等 (Blondeau et al., 2020) 以 EUflame 展示了對 1 台 1,500 MW 鍋爐進行的測量活動的結果，該活動使用了 1 套包含 9 個紅外線熱測儀的系統。通過對燃燒空氣分配的在線調整，使 FEGT 峰值教調整前降低了約 100 °C，並且讓火焰重新居中。

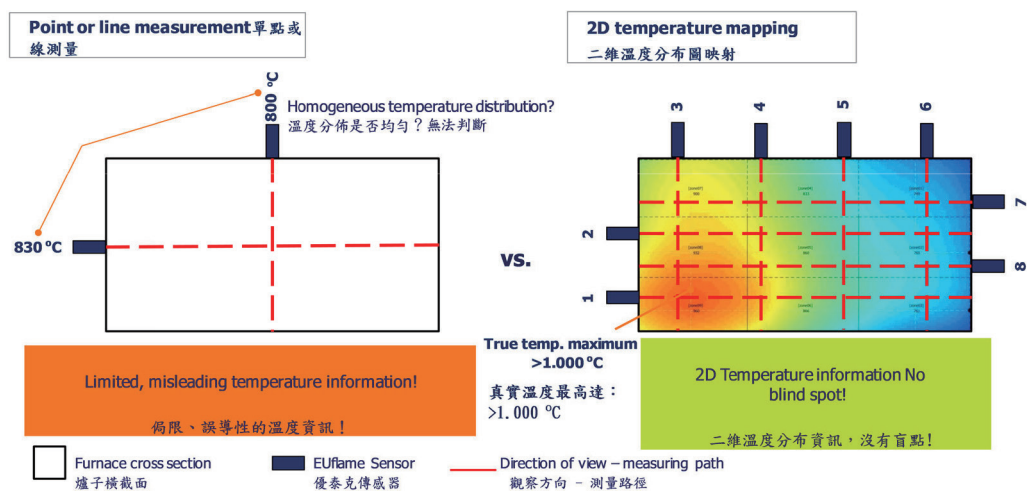


圖 6 二維溫度分布映射技術

3.3 研究對象

本鍋爐系統中 4 台磨煤機及 8 支各燃燒器之示意圖如圖 7 所示，說明如下：

3.3.1 磨煤機 (Mills)

磨煤機的主要功能是將煤炭磨碎並將其輸送到鍋爐的燃燒器，案例廠的鍋爐前側有 4 台磨煤機，為鍋爐提供煤粉。每台磨機都有 2 根粉煤管，將煤輸送到鍋爐前牆一層的燃燒器。

3.3.2 燃燒器 (Burners)

鍋爐配置之燃燒器位於前牆上，共有 8 支燃燒器，其主要優勢在於均勻的熱能分佈，有助於鍋爐的高效運行。每支燃燒器負責混合煤粉和空氣，然後在其內進行燃燒，形成鍋爐的主要燃燒區域。共同的風箱為 8 支各燃燒器提供所需的空氣，確保每支燃燒器都能獲得相同的風量和壓力，實現均勻燃燒。

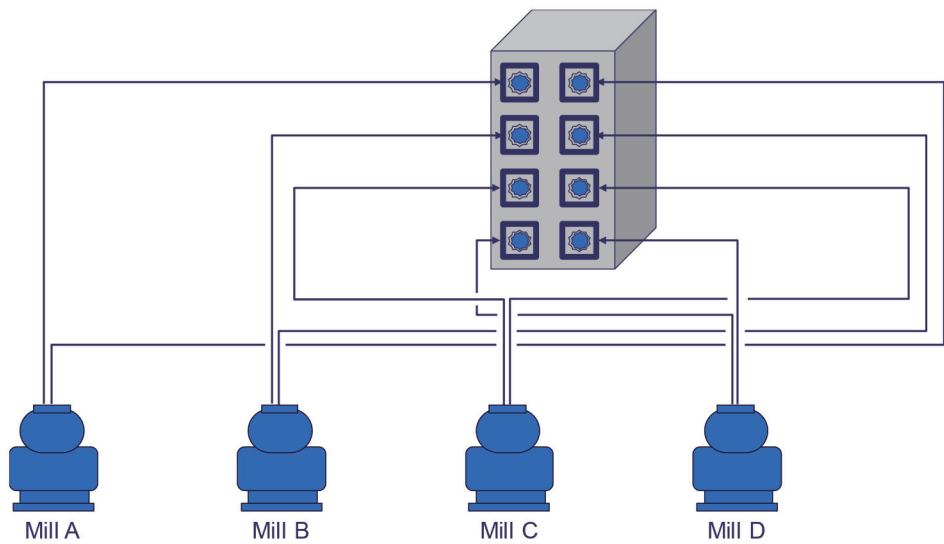


圖 7 磨煤機 & 燃燒器示意圖

3.3.3 風道和風量控制

鍋爐配有 1 台 FD 風車、1 台 ID 風車和 4 台 PA 風車。前者為風箱提供助燃空氣。在磨煤機中，熱空氣與冷風混合。每個磨煤機還配有密封空氣。

測量每台磨機的每個一次風體積流量。測量燃燒空氣流量（即二次、三次和 OFA 空氣）的總量。

OFA 從主風箱供應，並僅通過專用氣箱從爐鼻下方的後牆送入爐子。測量 OFA 體積流量，並可根據 NO_x 排放水準（即空氣分級）使用自動閥進行控制。

3.3.4 感測器佈置

燃燒分析的一部分是爐膛出口煙氣溫度（FEGT）及其在鍋爐水平橫截面上的分佈。因此，使用帶有八個感測器的 EUflame 2D 系統（如圖 8 左）來測量鍋爐內部水平橫截面（如圖 8 右）的溫度並計算溫度分佈。

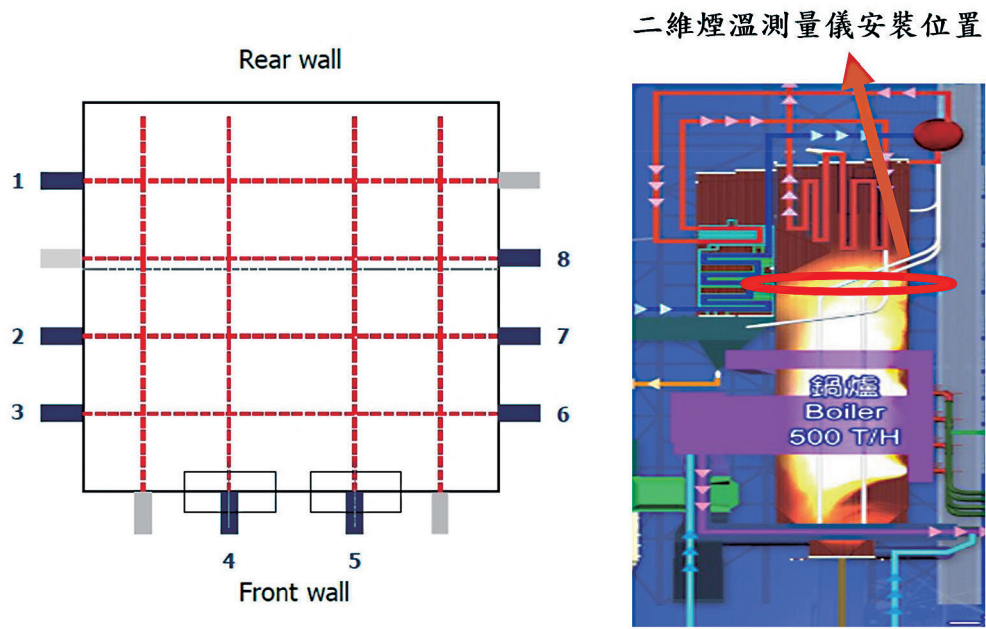


圖 8 溫度感測器佈置配置圖（左：EUflame 2D 系統；右：鍋爐）

四、結果與討論

4.1 PCA 主成分分析

本研究參數共計有 47 項，包含 8 支感測器的溫度、各磨煤機的一次風量、二次風量、各磨煤機的燃料流量、轉速等，數量之多，挑選其中 30 個可控參數，利用 PCA 進行數據降維。執行結果如圖 9。

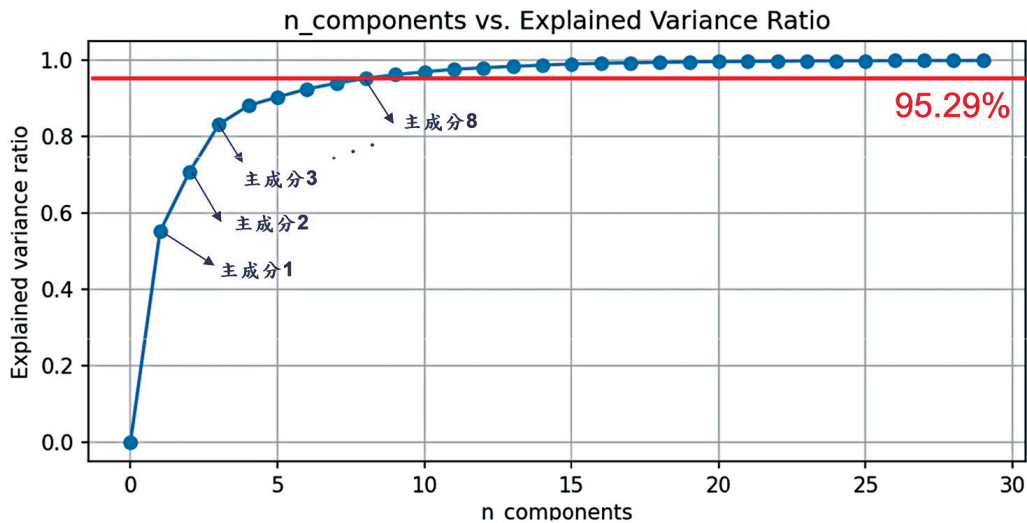


圖 9 主成解釋數據變化之總體變異數累積圖

透過主成分分析建立 29 組主成份，選取累積總體變異數 >95% 之前 8 項主成份 (PC1~PC8)，可以解釋資料變化的 95.29%，顯示這 8 項主成份成功地保留了大部分數據中的訊息。本研究將各主成分關鍵參數列出，排除相關係數小於 0.2 之參數，整理如表 1，從 PC1~ PC8 中挑選權重最高、涵蓋度最高之 22 項參數執行多變項線性迴歸模型之建置，上述參數包含：1. 鍋爐負載、2. 總燃料流量測量、3.A-mill 磨煤機燃料流量、4.B-mill 磨煤機燃料流量、5.C-mill 磨煤機燃料流量、6.D-mill 磨煤機燃料流量、7.A-mill 粉煤分離器轉速、8.B-mill 粉煤分離器轉速、9.C-mill 粉煤分離器轉速、10.D-mill 粉煤分離器轉速、11. 油料供料管中的壓力、12.A 磨煤機入口一次風壓、13.B 磨煤機入口一次風壓、14.C 磨煤機入口一次風壓、15. 一次風總量、16. 二次風流量總計、17. 火上風量、18.FDF 出口壓力、19.IDF 入口壓力、20.A-FurnacePressure、21.B-FurnacePressure、22. 總風量。

表 1 主成分中各參數之特徵權重

主成份貢獻度													
PC-1：55.1%		PC-2：15.6%		PC-3：12.6%		PC-4：4.8%		PC-5：2.3%		PC-6：2.1%		PC-7：1.5%	
參數	權重係數	參數	權重係數	參數	權重係數	參數	權重係數	參數	權重係數	參數	權重係數	參數	權重係數
總風量	0.24	D-mill 粉煤分離器轉速	0.37	C-mill 一次風量	0.47	A-Furnace Pressure	0.71	氣水消耗量(L/H)	0.50	A-Furnace Pressure	0.44	B-Furnace Pressure	0.55
一次風總量	0.24	B-mill 粉煤分離器轉速	0.33	B-mill 一次風量	0.46	B-Furnace Pressure	0.69	D-mill 一次風量	0.32	B-Furnace Pressure	0.36	A-Furnace Pressure	0.48
B-mill 氣源管路壓力	0.24	C-mill 粉煤分離器轉速	0.32	A-mill 一次風量	0.45			鍋爐負載	0.31	D-mill 一次風量	0.26	氣水消耗量	0.37
C-mill 氣源管路壓力	0.23	油料供料管中的壓力	0.30	D-mill 一次風量	0.36			火上風量	0.31	A-mill 一次風量	0.26		
D-mill 磨煤機燃料流量	0.22	A-mill 粉煤分離器轉速	0.30	油料供料管中的壓力	0.27			A-mill 一次風量	0.29				
C-mill 磨煤機燃料流量	0.22	總燃料流量測量	0.27	D-mill 氣源管路壓力	0.21			A-Furnace Pressure	0.25				
A-mill 氣源管路壓力	0.22	火上風量	0.23					A-mill 氣源管路壓力	0.21				
二次風流量總計	0.22												
A-mill 磨煤機燃料流量	0.22												
B-mill 磨煤機燃料流量	0.22												
D-mill 氣源管路壓力	0.21												
IDF 入口壓力	0.21												
鍋爐負載	0.21												
FDF 出口壓力	0.21												
A-Furnace Pressure	0.21												
B-Furnace Pressure	0.20												

4.2 多變項線性迴歸模型

本研究之目標變數擬使用燃燒相關之變數，如：CO、未燃炭。因未燃炭數據量較少，故使用尾氣 CO 濃度作為目標變數，自變數則使用過 PCA 篩選出來之上述 22 項參數，將目標變數及自變數進行標準化，並將數據依 7：3 隨機拆分為訓練集和測試集，接著使用訓練集（總數據的 70%），訓練多變項線性迴歸模型，再使用訓練好的多變項線性迴歸模型進行訓練集和測試集的預測。為了確保模型之正確且有效性，本研究應用均方誤差（MSE）、均方根誤差（RMSE）、平均絕對誤差（MAE）合格標準對於模型性能進行評估，預測結果如表 2，以權重最高（55.1%）之 PC1 中取相關性最高之總風量及一次風量為例，主要參數之預測結果（總風量及一次風量為例）如圖 10~11。

圖 10~11 為多變項線性迴歸模型的預測結果，以 CO 濃度為目標變數，總風量及一次風總量為自變數。圖中的紅色點表示實際觀測值，綠色點表示模型預測值。可以看出，預測值與觀測值大致可被直線繪製的區域涵蓋，表示模型能夠準確地捕捉到自變數和目標變數之間的線性關係。

表 2 迴歸模型之訓練結果

模型評估指標	訓練集	測試集	合格標準
模型準確度	80.74%	79.99%	-
均方誤差 (MSE)	0.19	0.21	0.30
均方根誤差 (RMSE)	0.44	0.45	0.55
平均絕對誤差 (MAE)	0.33	0.33	0.50

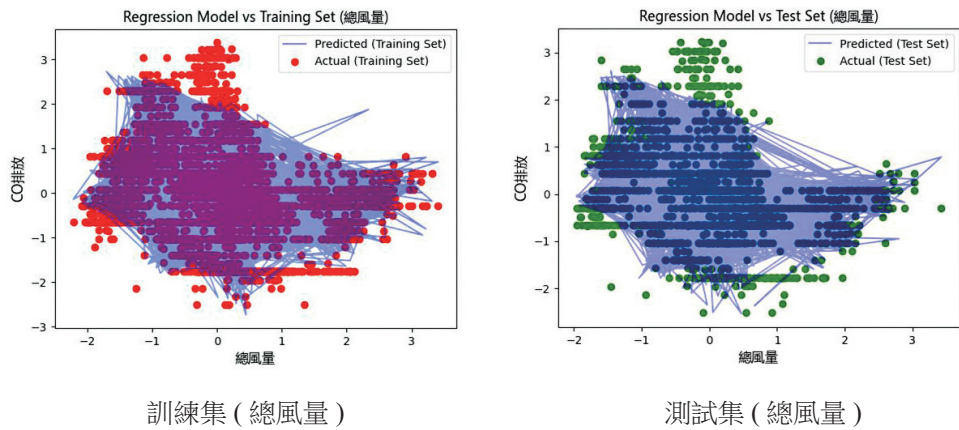


圖 10 迴歸模型之訓練結果 (CO 濃度 vs 總風量)

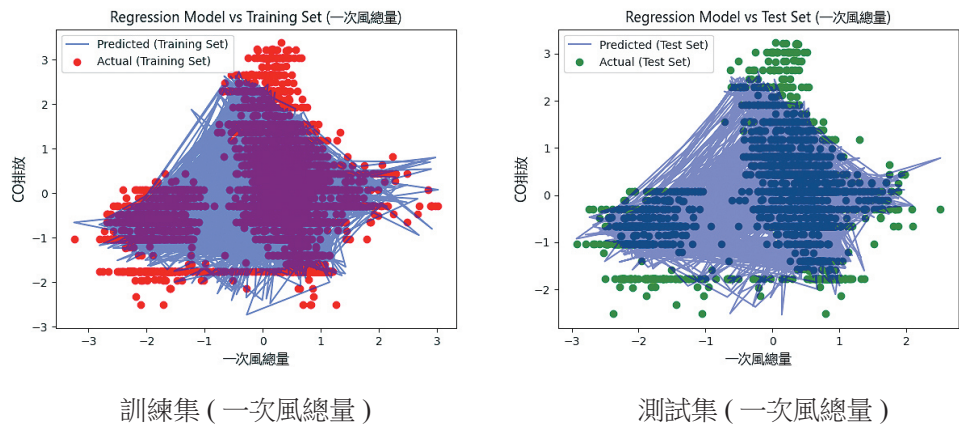


圖 11 迴歸模型之訓練結果 (CO 濃度 vs 一次風總量)

本研究設定了合格標準，以判斷模型是否達到預期的水準。表 2 顯示了訓練集和測試集的模型評估指標，可以看出，本研究建立的模型在訓練集和測試集上都滿足了合格標準，且訓練集和測試集的指標相差不大，表示模型沒有過度擬合或欠擬合的問題，訓練後的多變項線性迴歸模型對於訓練集有 80.74% 的準確度、用以預測測試集也有 79.99% 準確度，顯示本研究建立的多變項線性迴歸模型在訓練集和測試集上均具有良好的精準度。

需注意的是本試驗是使用固定煤，假設 HGI 相同，所需通過 200mesh 的 85% 通過率之磨煤機轉速相同，未來若 HGI 改變時，需重新建構學習曲線。

建模完成後，可以透過操作數據以預測 CO 濃度，藉以作為燃燒優劣之指標，再於固定煤炭情況下，調整操作參數如磨煤機運轉、燃燒器風箱壓力、風門等以調整粉煤粒徑及空燃比設定，達到燃燒優化之目的，最後利用 CO 與未燃炭之關係式，將 CO 換算為未燃炭，驗證未燃炭之改善效益。

4.3 燃燒調整過程

本研究於 112 年 5 月 29 日至 6 月 2 日於案例廠進行燃燒調整，該鍋爐容量為 500 噸 / 小時，研究期間並非滿載操作，負載約介於 230 噸 / 小時 ~ 320 噸 / 小時，故原設計之磨煤量餘裕仍多，本研究在固定煤炭種類為印尼煤之情況下，調整操作參數。

4.3.1 調整前

爐膛火焰中心往鍋爐後牆靠近，火焰中心位置偏向於區域 10，容易噴濺在後牆上，火焰可能過長致爐壁上有結渣情形，造成水牆管熱交換不均勻情形，如圖 12。

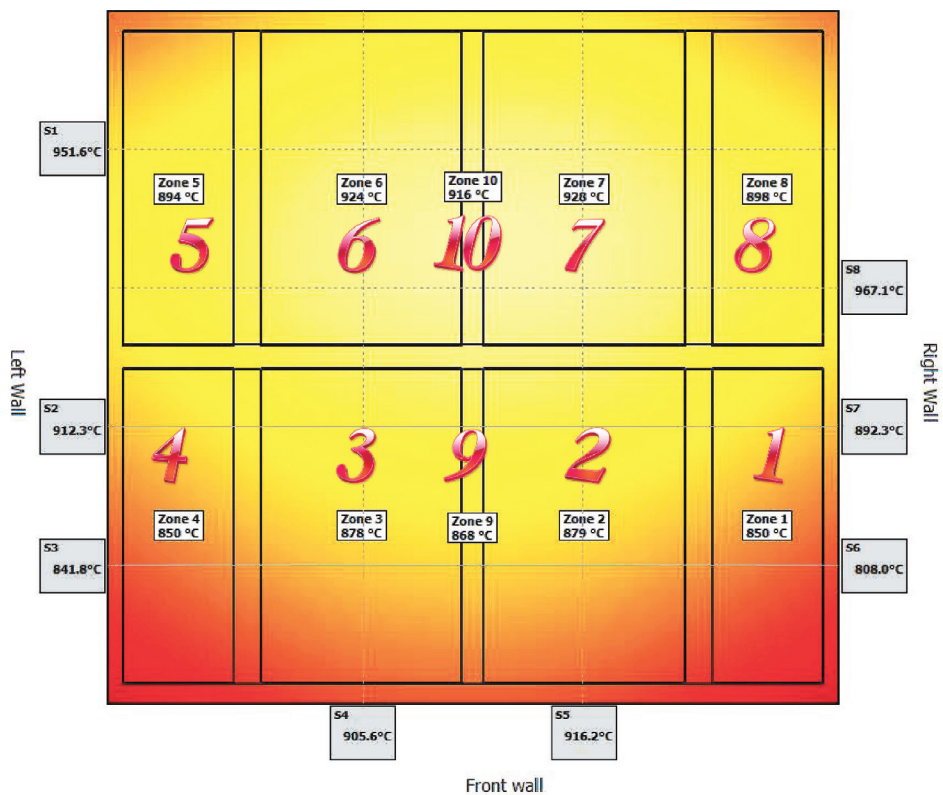


圖 12 調整前爐膛溫度分布圖

4.3.2 調整後

調整燃燒器二次風門及磨煤機參數後，火焰中心往爐膛中心接近，現場觀察後爐水牆管上明顯無火焰噴濺情形，如圖 13。優化後，火焰中心位置回到區域 9 及區域 10 中間，火焰中心雖有稍微偏右，現場觀察火焰燃燒情形佳及火焰無噴濺至後爐水牆管。優化後，各磨煤機 (A ~ D mill) 轉速皆提高，增速介於 52.4~98.0 rpm，如表 3。爐膛溫度除了 zone2 ~ zone4 的 FEGT 有降低以外，其餘區域溫度皆上升，如表 4。

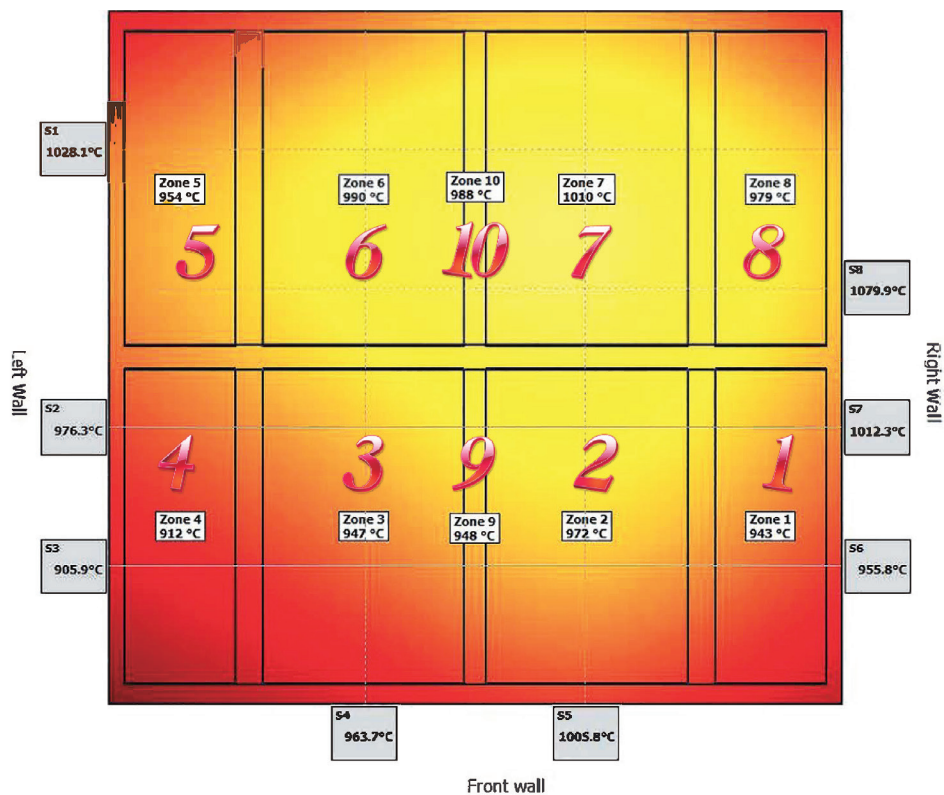


圖 13 調整後爐膛溫度分布圖

表 3 各磨煤機轉速調整前後差異

區域	調整前 (rpm)	調整後 (rpm)	增速 (rpm)
A mill 磨煤機轉速	609.0	661.4	52.4
B mill 磨煤機轉速	568.9	666.9	98.0
C mill 磨煤機轉速	564.1	660.7	96.6
D mill 磨煤機轉速	561.2	658.7	97.5

表 4 爐膛各區域 (zone1~10) 調整前後溫度差異

區域	調整前 (°C)	調整後 (°C)	升溫 / 降溫 (°C)
zone1 溫度	885.0	892.7	7.7
zone2 溫度	914.7	892.7	-22.0
zone3 溫度	913.2	911.4	-1.8
zone4 溫度	883.6	880.5	-3.1
zone5 溫度	892.7	910.7	18.0
zone6 溫度	923.0	942.5	19.5
zone7 溫度	925.8	949.9	24.2
zone8 溫度	895.6	919.7	24.1
zone9 溫度	903.5	905.9	2.4
zone10 溫度	913.7	935.3	21.5

4.4 燃燒優化結果

燃燒優化結果，未燃炭由 4.9% 降至 0.86%（如圖 14），熱效率提升 1.93%，CO 濃度由 6.83 ppm 降至 6.3 ppm。值得探討的是，爐膛中心 (Zone10) 的演算溫度由調整前 913.7 °C 提高至調整後 935.3 °C，但 SCR 入口 NO_x 濃度未有顯著增加，由 184.3 ppm 升至 187.8 ppm，推測在燃煤鍋爐中，NO_x 主要由 Fuel NO_x（燃料氮氧化物）主導，約占總 NO_x 的 75%（ECHNOLO, 1996）。Fuel NO_x 的生成機制涉及到燃燒過程中，燃料中的揮發分（VM）中的氮原子與氧氣的反應，這種反應通常發生在爐鼻附近的一次空氣（PA）燃燒區。因為調整後的煤粉更細，導致 PA 的比例降低（氧氣減少），進而降低 Fuel NO_x 的生成。

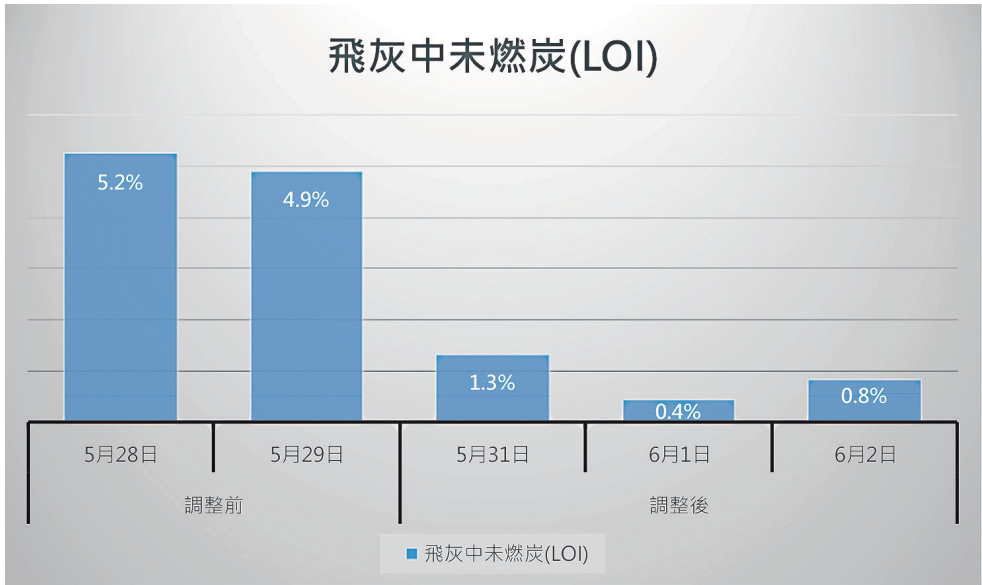


圖 14 調整後 LOI 改善情形

五、結論與建議

本研究以前牆式粉煤汽電共生鍋爐 (500 公噸 / 小時) 及低 NO_x 燃燒器為對象，透過 PCA 篩選關鍵可控參數後，透過多變項線性迴歸模型建模，以預測 CO 濃度，藉以作為燃燒優劣之指標，再於固定煤炭情況下，調整操作參數如磨煤機運轉、燃燒器風箱壓力、風門等以調整粉煤粒徑及空燃比設定。結果顯示，燃燒優化結果顯示未燃炭由 4.9% 降至 0.86%，熱效率提升 1.93%，CO 濃度由 6.83 ppm 降至 6.3 ppm。值得注意的是，爐膛中心 (Zone10) 的溫度由調整前 913.7 °C 升高至 935.3 °C，但 SCR 入口 NO_x 濃度僅由 184.3 ppm 上升至 187.8 ppm，推測燃煤鍋爐中 NO_x 主要由 Fuel NO_x 主導，約占總 NO_x 的 75%。Fuel NO_x 的生成機制涉及到燃燒過程中，燃料中的揮發分中的氮原子與氧氣的反應，這種反應通常發生在爐鼻附近的 PA 燃燒區。調整後的更細煤粉導致 PA 比例降低，進而降低 Fuel NO_x 生成。

本研究已完成 AI 引進步驟之前兩步驟 (PCA 數據處理及建立 AI 模型)，證實透過監測和控制燃料和空氣流量分佈可以優化燃燒過程，在不影響 NO_x 下，降低未燃炭及提高熱效率。建議企業因煤源多樣化等需求導入高燃料比 (固定炭) 燃料，而有

LOI 增加之潛勢，可透過本研究成果協助將 LOI 降低至 6% 以下，促進飛灰於循環經濟利用的管道，但要實現第三步驟 -AI 高階控制器達到穩定且自動化的動態控制模式仍需要持續提供模型數據以優化準確度，並導入高階控制器的技術。未來仍需持續突破技術以達成我們的最終願景。

參考文獻

- ECHNOLO, T.(1996), Reducing Emissions of Nitrogen Oxides via Low-NO_x Burner Technologies.
- EPRI (2001), Coal Ash Carbon Removal Technologies. Palo Alto, CA, USA, Electric Power Research Institute (2001)
- Dong N (2010), Reducing carbon in ash. CCC/167, London, UK, IEA Clean Coal Centre (2010)
- 台化公司工務部龍德公用廠 (2018)，視覺污染及清潔排放改善報告，台塑企業 2018 年 9 月號
- Widmer N, Marquez A (2012), Zonal combustion optimization for coal-fired boilers. Presentation at: McIlvaine hot topic hour webinar, 27 Sep 2012, pp 28 (2012)
- Lockwood, T.(2015), Advanced sensors and smart controls for coal-fired power plant controls for coal-fired power plant-CCC/251, IEA Clean Coal Centre, ISBN 978-929029-573-0
- 台化公司新港公用廠 (2022)，新港公用廠 SK3 磨煤機更新改善，台塑企業 2022 年 3 月號
- Wiatros-Motytk, M.(2016), Optimising fuel flow in pulverised coal and biomass-fired boilers-CCC/263, IEA Clean Coal Centre, ISBN 978-92-9029-586-0
- POWER. (2019, September 3). Combustion Optimization to Improve Heat Rate and

- Lower NO_x. News & Technology for the Global Energy Industry. Retrieved from <https://www.powermag.com/author/aiwadmin/>.
- EUtech (2015) EUtech Scientific Engineering Power generation solutions. Aachen, Germany, EUtech Scientific Engineering. 46 pp (2015)
- J. Blondeau, J. Van den Auweele, S. Alimuddin, F. Binder, F. Turoni(2020), Online adjustment of Furnace Exit Gas Temperature field using advanced infrared pyrometry: Case study of a 1500 MWth utility boiler,Case Studies in Thermal Engineering,Volume 21,2020,100649,ISSN 2214-157X,
- 楊泰然 (2010)，燃煤鍋爐節能減碳之粉煤平衡技術，台灣電力公司。
- 賴如椿、林春景 (2012)，參加美國 2011 Power-Gen 全球電力展覽研討會及參訪 Escalante 發電廠，台灣電力公司。
- 楊泰然 (2015)，燃煤鍋爐效能優化 (模擬測試評估) 技術，台灣電力公司。
- 楊泰然 (2016)，燃煤鍋爐煤質優化評估技術，台灣電力公司。
- 楊泰然 (2017)，燃煤鍋爐燃燒診斷技術及氣送煤流實驗設計，台灣電力公司。
- Renshaw, J. (2023, October 18). AI Revolution Could Drive Clean Energy Future. News & Technology for the Global Energy Industry. Retrieved from <https://www.powermag.com/author/jeremy-reshaw/>.
- 陳志廉、林全聖、簡有益、朱允中、鍾文宗、徐錦榮、余啟瑞、陳錦隆、邱鴻源、陳景林，楊泰然 (2005)，降低林一機飛灰中未燃炭之對策及方法研究，台電工程月刊。
- 李天財 (2005)，燃煤鍋爐因應煤質改變之燃燒經驗介紹，燃燒季刊。
- Hou-Peng Wan, Chyh-Sen Yang, B.R. Adams, S.L. (2008) Chen,Controlling LOI from coal reburning in a coal-fired boiler,Fuel,Volume 87, Issue 3.

24 以人工智慧 (AI) 優化粉煤燃燒並改善 NO_x 及未燃炭

廢(污)水處理類

食品產業廢水以 UASB 和 BioNET 組合程序之實廠處理

陳致君*、楊凱翔**

摘 要

案例廠為一食品製造公司，由於生產產品之清洗水中，含大量高濃度有機廢水與有機氮以及高濃度懸浮固體物，需要大面積的廢水處理場，然如何在有限可應用的空間上，創造高效率的處理功能。工研院材料與化工研究所，規劃 BioNET，乃以『多孔性生物擔體』為核心之新型生物處理技術，主要以操作簡單、提供廣大表面積作為微生物附著、增值之介質，可累積大量特定族群微生物，接續在可承載高體積負荷、佔地面積小、免供氧且低能源消耗之上流式厭氧生物 UASB 二級生物處理方法的組合程序，前處理有細篩機與浮除單元。實廠廢水量為 180 CMD，pH 從 4.0~11，CODt 濃度為 1,130~3,520 mg/L，有機氮為 50 mg/L，SS 濃度為 230~1,820 mg/L，為將產生污泥可直接作為堆肥再利用，故浮除單元僅添加凝集劑，又 UASB 厭氧生物處理所產出的顆粒污泥，可做為他廠的植種污泥，縮短厭氧生物系統啟動時間與污泥廢棄處理費用，此處理程序組合實為循環經濟最佳典範。UASB、BioNET 池體為 161 m³、170 m³，UASB 體積負荷為 4 kg COD/m³day，BioNET 水力停留時間為 22 小時，在 3 個月左右的實場試車結果，UASB 出流水 CODt 濃度大都降解至 200 mg/L 以下，去除率為 88.8~98.4%，BioNET 出流水 CODt 濃度小於 50 mg/L 以下，實廠氨氮沒有檢出，SS 出流水濃度小於 10 mg/L 以下，去除率高達 97% 以上。案例廠放流水須符合自行

26 食品產業廢水以 UASB 和 BioNET 組合程序之實廠處理

排放管制標準 CODt 為 100 mg/L，SS 為 30 mg/L，由 UASB 厭氧生物接續 BioNET 喜氣生物處理單元，達到再次降解 COD 濃度又同時具攔截大量 SS 的功效。

【關鍵字】有機廢水、UASB、BioNET、體積負荷、水力停留時間

* 工業技術研究院材料與化工研究所

研究員

** 明志科技大學化學工程系

專題生

一、前言

工研院材料與化工研究所(簡稱材化所)所開發的 UASB(上流式厭氧生物)二級生物處理技術,對高濃度或低濃度產業有機廢水,以上流進水方式,可達到良好進水分配,有效將固、液、氣三項分離的設計且在無須供氧之生物處理(工研院,2002),另一 BioNET(生物網膜)廢水高級處理技術乃針對產業廢水含有氨氮或 COD 物質,將 BioNET 浮動床植入適當 PU 擔體與經馴養之生物污泥,並藉由輸入氧氣使擔體上微生物增殖以進行生物分解作用(陳致君等,2022)。在 BioNET 活性生物處理系統中,可藉由多孔性擔體的特性累積大量的微生物菌群繼續將 UASB 生物系統所殘餘的 COD 進行再分解以及將所流出的 SS 攔截住。食品產業製造為生產各種研磨豆漿類與養生系列飲品。生產產品時所產生之廢水乃以批次性排放,廢水濃度與瞬間水量及 pH 值變動極大,廢水的主要污染來源為生產時產生的高 COD、高 SS 之蒸煮鍋與管線之清洗廢水。規劃設計的廢水處理場處理流程為細節、

調勻池、pH 調整池、膠凝池、浮除槽與 UASB、BioNET 及生物沉澱池組合程序,須達到現行法規之自行放流水排放標準 $COD \leq 100 \text{ mg/L}$, SS 濃度 $\leq 30 \text{ mg/L}$ 。故,規劃膠凝系統後進入浮除單元,將大量懸浮性豆渣去除後進入上流式厭氧生物處理池,為主要降解高 COD 濃度而且具高體積負荷,減少佔地面積,另 BioNET 生物處理單元接續在後,可再次降解 UASB 厭氧生物處理後所殘餘 COD 濃度、同時又具有攔截懸浮固體物與浮渣功能(陳致君等,2020)。從評估結果得知浮除單元去除大量的 SS, UASB 厭氧生物處理單元擔任降解廢水中大部分的 COD,污泥生長量少且呈顆粒狀,可提供給需要的廠商作為廢水處理場快速啟動之植種污泥來源,縮短啟動期的時間。BioNET 生物處理單元由於具有累積大量特定族群選擇性優勢菌種的功能,可將放流水 COD 濃度維持在 100 mg/L 以下,SS 濃度在 30 mg/L 以下,於此規劃大大減少現場操作人員的困擾,同時也降低了廢棄污泥的處理費用,可謂循環經濟的最佳典範案例。故,以上述組合程序處理高有機物、高 SS 廢水,達到了自行排放之放流水標準又同時具經濟效益及操作簡單之生物處理技術。

二、廢水水質

為達到最佳及最經濟的設計規劃，因此實驗前廢水水質調查工作尤其重要，由水質結果進行實驗室廢水處理程序評估，設計最適實驗與操作參數，經實驗室獲得的結果，作為廢水處理場處理程序規劃設計。

案例廠廢水來自食品製程生產時原料與蒸煮鍋的清洗及週期性鹼洗水，初級以細節後流入調勻池，廢水水質調查水源以採集調勻水池的廢水，每星期 1~2 次採批次取樣方式，運送至工研院實驗室進行評估。於經過 1 個多月水質調查結果如圖 1，原廢水 pH 值為 4.0~11，圖 2 為 CODt 濃度為約 1,000~3,700 mg/L；CODs 濃度為約 600~3,200 mg/L。

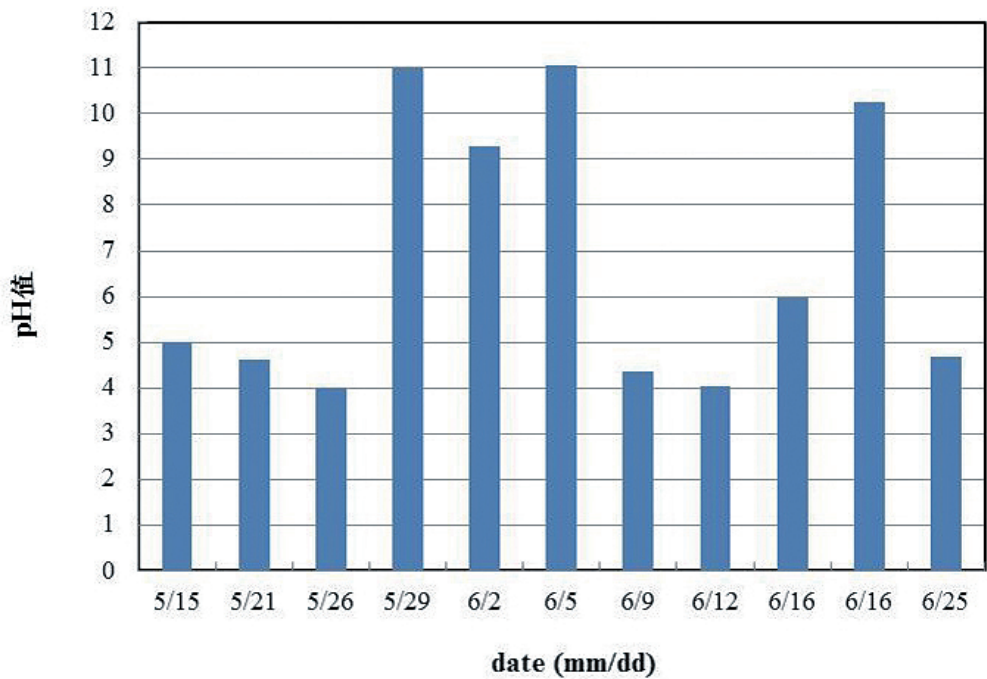


圖 1 原廢水 pH 值

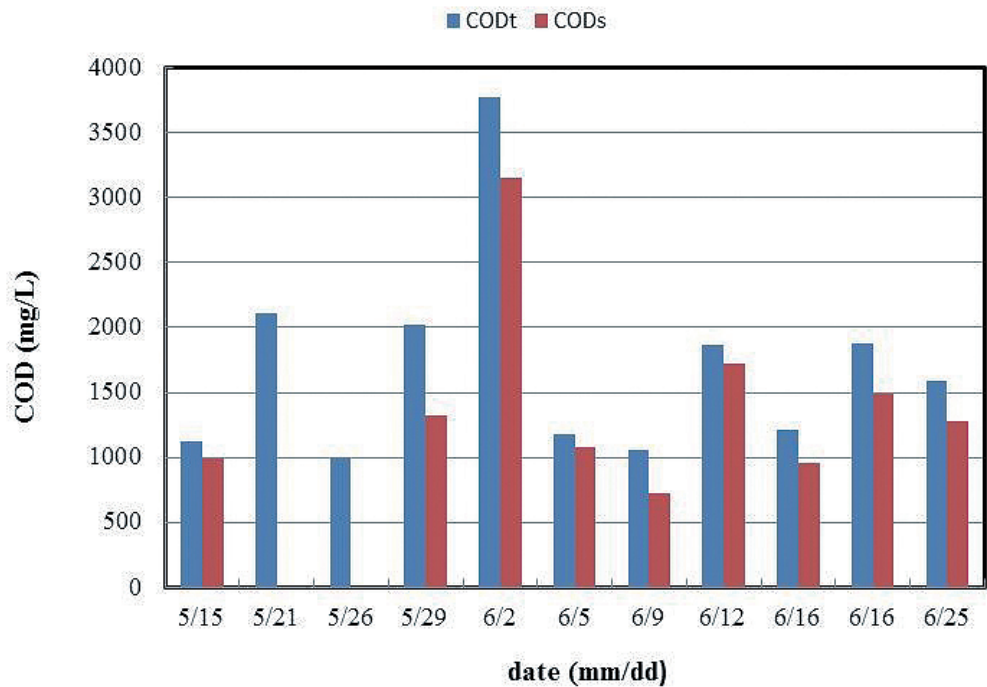


圖 2 原廢水 COD 濃度

三、廢水處理場單元流程規劃

食品產業製程為批式生產，廢水乃瞬間性排放產出，廢水濃度與水量變化極大，且會攜出大量的固體物及懸浮性固體，因此案例廠評估首要目的為先將固體物與懸浮性固體去除，有效降低 COD 濃度，可降低後段生物處理單元 COD 的體積負荷，達到符合放流水自行排放標準，故須在流程規劃上，進入調勻池前以細篩機進行固體物移除，懸浮性顆粒則採用加壓浮除方法將其帶出，上層液進入高體積負荷、占地面積小與高 COD 去除率以及操作簡單的厭氧生物處理單元，BioNET 生物處理單元接續在後，具有累積大量特定族群選擇性的優勢菌種，可將厭氧生物單元所殘餘的 COD 再由喜氣微生物再次降解、又同時具有攔截懸浮性固體物與浮渣的功能，最終至生物沉澱池，做為操作上安全把關之評估處理技術組合，提昇廢水處理場之整體處理效率與穩定性。

上述適用性及水質分析所得評估結果與因應廠商廢水水質的特性，程序單元規劃設計，邁入升級廢水處理場以操作簡單化、經濟效益與提高現場操作人員的信心與成就感，處理流程單元包括細篩機、調勻池、pH 調整池、加壓浮除及 UASB 厭氧生物、BioNET 喜氣生物與生物沉澱池等。

四、實驗室處理程序評估結果與討論

案例廠為含高 COD、SS 及有機氮之廢水，首先於實驗室進行可行性評估實驗，高懸浮性固體採用混凝沉澱方法進行去除，再進入 UASB 厭氧生物處理單元，此技術擔任降解大部分 COD 濃度，其出流水再接續 BioNET 喜氣生物處理單元，BioNET 喜氣生物處理技術主要功能具有可攔截大量懸浮性固體物 (SS)，同時又可將 UASB 厭氧生物處理單元所殘餘之 COD 濃度再次進行降解，圖 3 所示為食品廢水於實驗室評估之處理單元程序。案例廠配合實驗室研究所需的水量，以批式取樣方式將水樣寄送至工研院，廢水來源以採集抽水井廢水做為實驗室評估水源，實驗室評估為連續式 24 小時進流方式操作，期間進行 3 個多月。

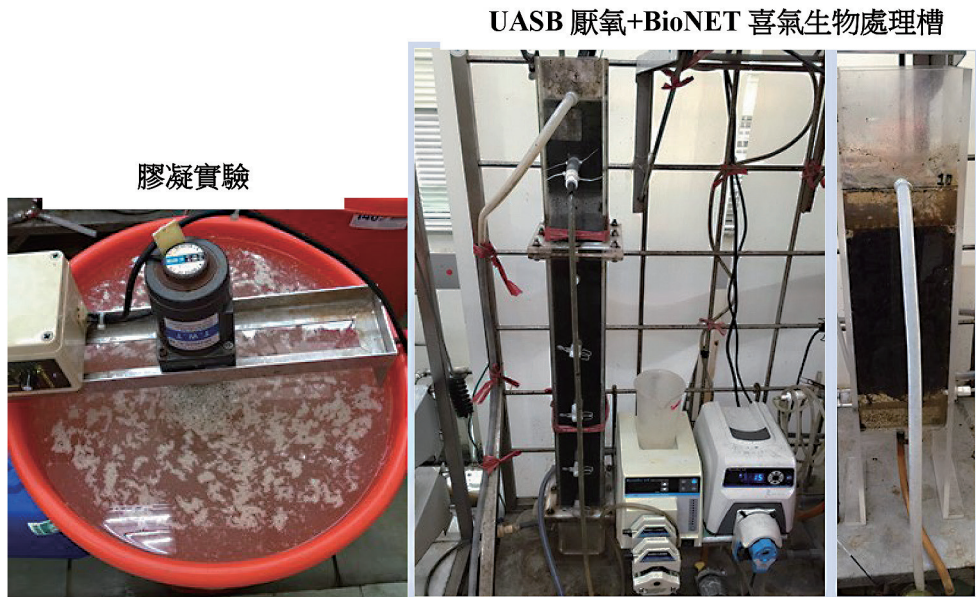


圖 3 實驗室處理程序單元

加壓浮除單元 (DAF) 在實驗室評估時，採用化學混凝方法代替，規劃設計 5 個瓶杯實驗條件，獲取最佳加藥量，每個瓶杯廢水水量為 1 公升，添加不同 PAC 混凝劑添加量，採 0、5、10、20、30 mg/L，每瓶杯固定添加 2 mg/L 凝集劑，實驗結果如圖 4 得知，COD 濃度從 1,176 mg/L 降低為 1,005~526 mg/L，去除率為 14.5~55.3%，另，為了符合堆肥需求規範，於後續化混評估實驗則不再添加 PAC，僅添加 2 mg/L 助凝劑，即可快速沉降懸浮性固體物進而去除之，上清液進入 UASB 厭氧生物系統處理，評估實驗之操作參數，槽中的 pH 值維持在中性範圍 6.7 至 7.8 之間，進流水 COD 濃度為約 610~3,780 mg/L，出流水 COD 濃度於系統穩定其後為約 72~243 mg/L，啟動期經過 55 天水質分析結果得知，UASB 系統處理已呈現穩定狀態，出流水 COD 濃度降解至 400 mg/L 以下，因此逐步提高處理槽內 COD 體積負荷，然因進流水 COD 濃度隨著製程生產的產品不同而有所變化，故體積負荷在 1.5~6.36 kg COD/m³day 之間變動，去除率為 75~94.3%，如圖 5、圖 6 所示。

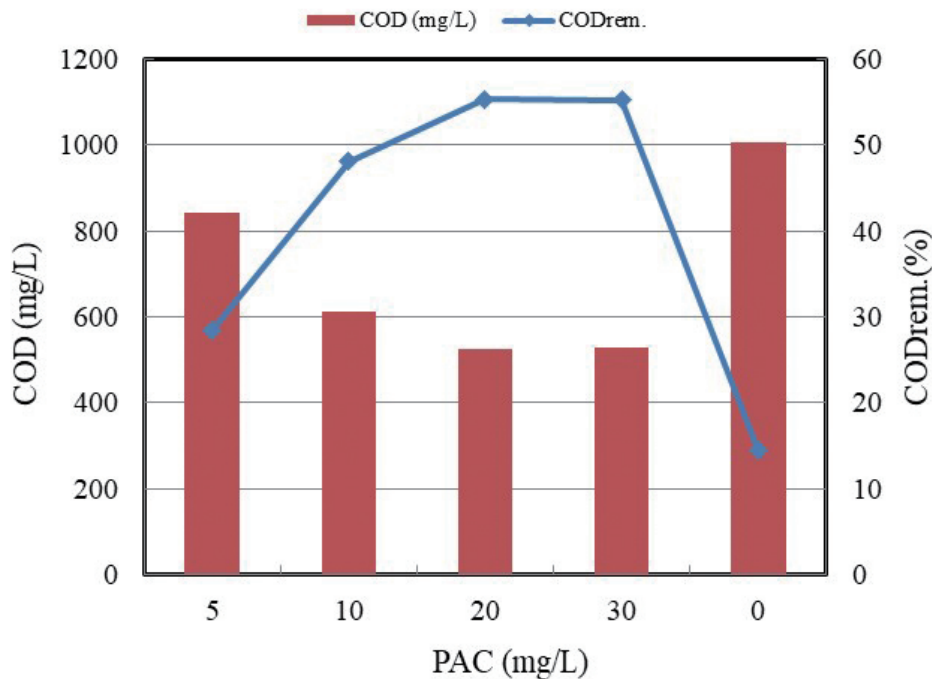


圖 4 化學混凝實驗結果

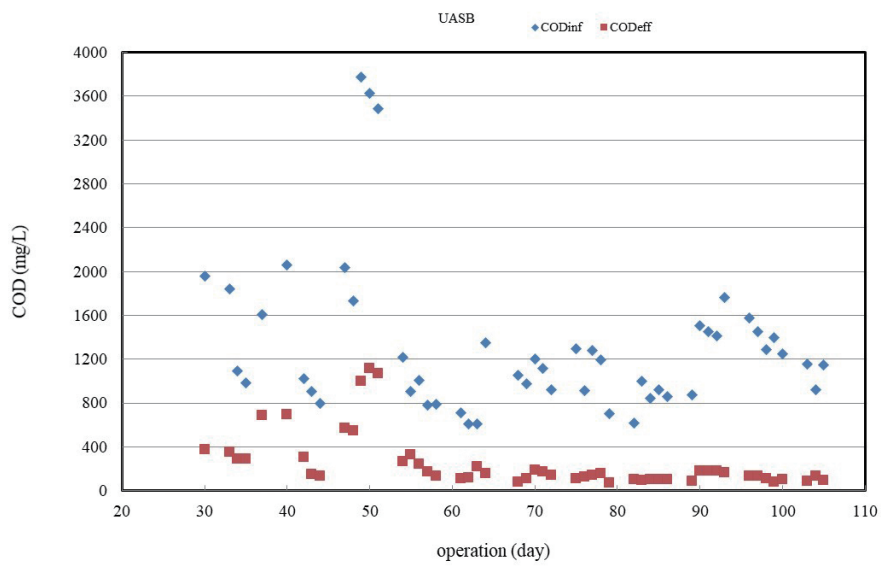


圖 5 實驗室 UASB 進出流水評估結果

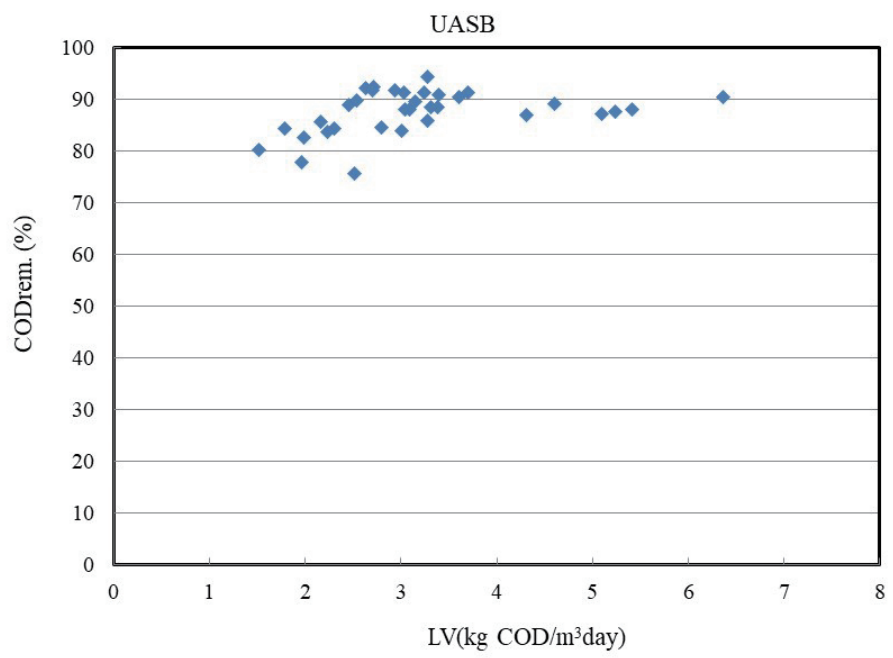


圖 6 實驗室 UASB 體積負荷與 COD 去除率

BioNET 喜氣生物處理單元，規劃 3 階段不同水力停留時間，探討水力停留時間於 9.6、6.7 與 10.2 小時之處理結果，由圖 7、圖 8 瞭解，UASB 出流水再經 BioNET 喜氣生物處理，出流水 COD 濃度降低至 9~50 mg/L，且大部分 COD 濃度均於 40 mg/L 以下，去除率為 70~97% 之間，SS 出流水濃度為 25 mg/L 以下，大都小於 15 mg/L，如圖 9 顯示。另由圖 10 與 11 得知，食品清洗廢水氨氮濃度從 0.01~16.19 mg/L，經 UASB 厭氧生物處理之出流水，氨氮濃度增加為 0.2~32.95 mg/L，接續 BioNET 喜氣生物單元處理，氨氮濃度降低至 3.05 mg/L 以下。食品清洗廢水中硝酸鹽氮濃度幾乎都在 1.0 mg/L 以下，僅 1 次硝酸鹽氮濃度為 3.67 mg/L。從 UASB 厭氧生物處理結果明確得知有機氮水解轉化成氨氮，氨氮在厭氧系統中無法進行硝化反應，硝酸鹽氮濃度並無明顯增加，故得知硝化反應是由 BioNET 喜氣生物處理系統進行，進流硝酸鹽氮濃度為 0.07~1.07 mg/L，於系統硝化反應後出流水硝酸鹽氮濃度增加為 5.22~34.20 mg/L 同時氨氮濃度降低為 0.02~3.05 mg/L，去除率為 25~99 %，如圖 12。

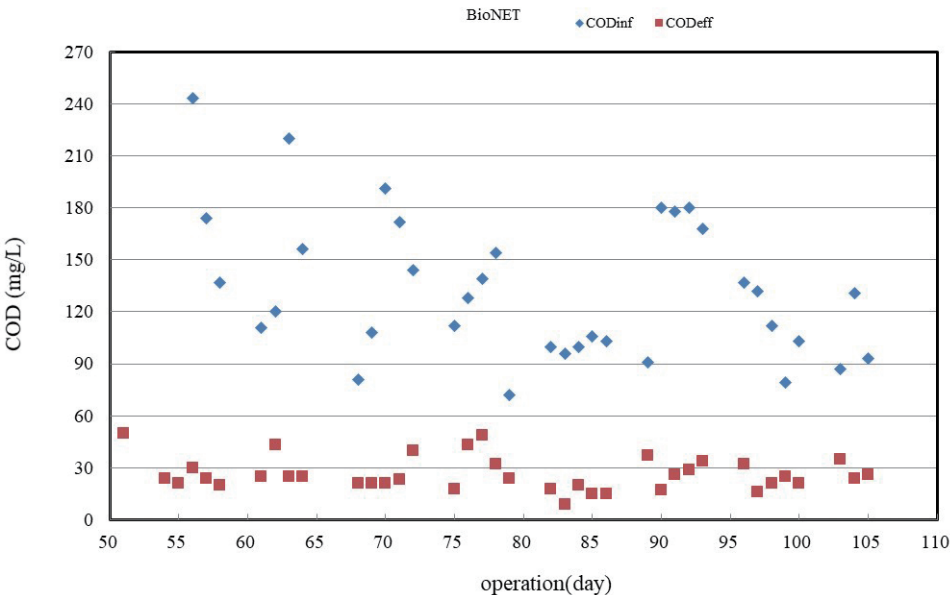


圖 7 實驗室 BioNET 進出流水處理結果

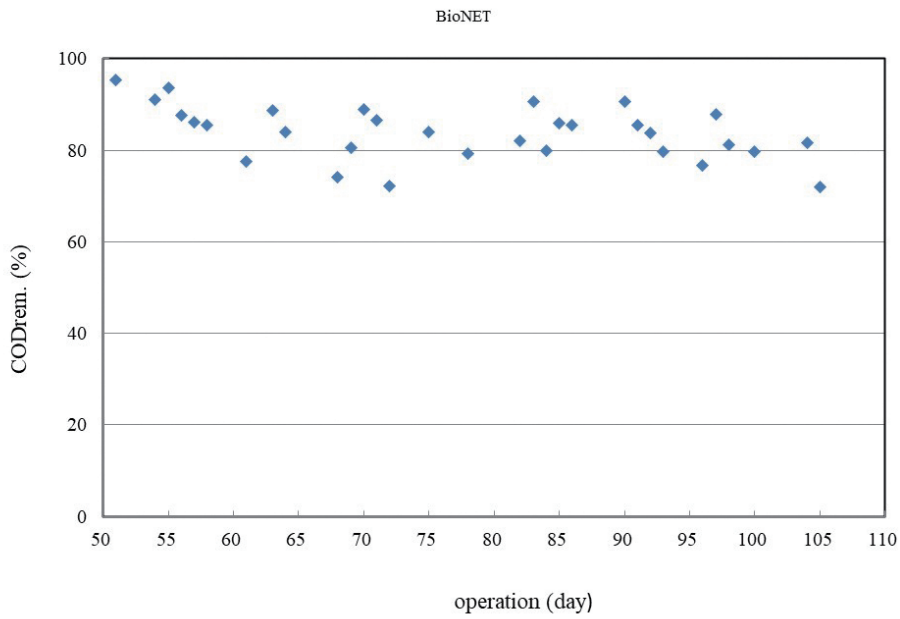


圖 8 實驗室 BioNET-COD 去除率

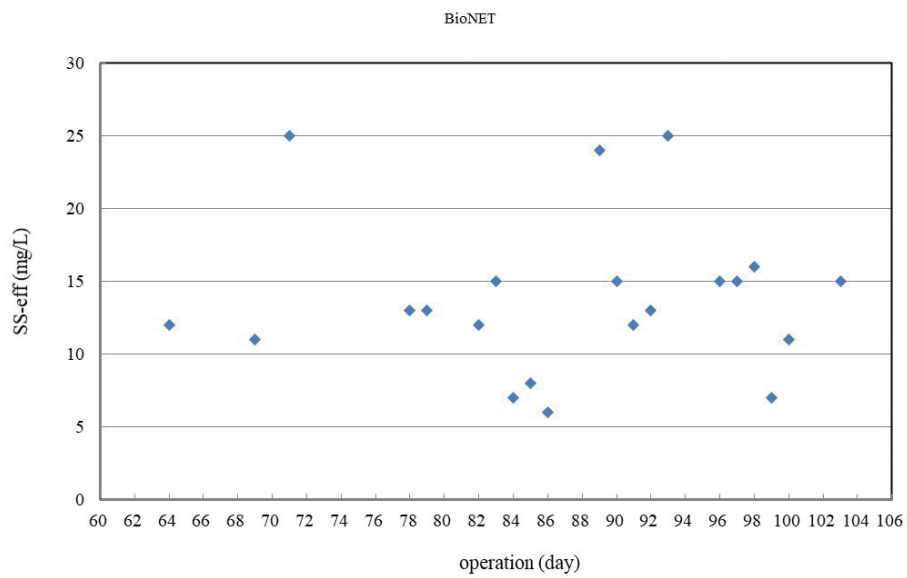


圖 9 實驗室 BioNET 出流水 SS 評估結果

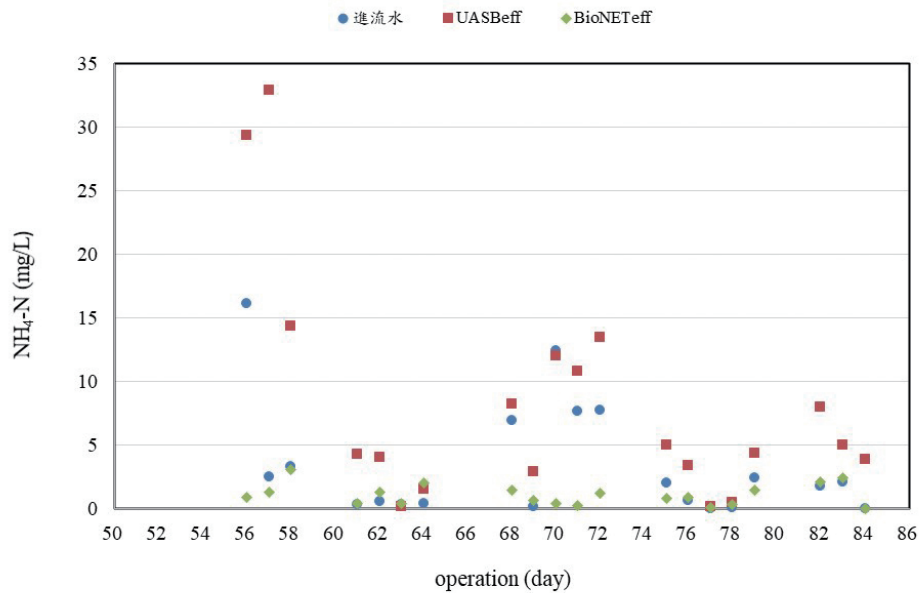


圖 10 實驗室氨氮處理結果

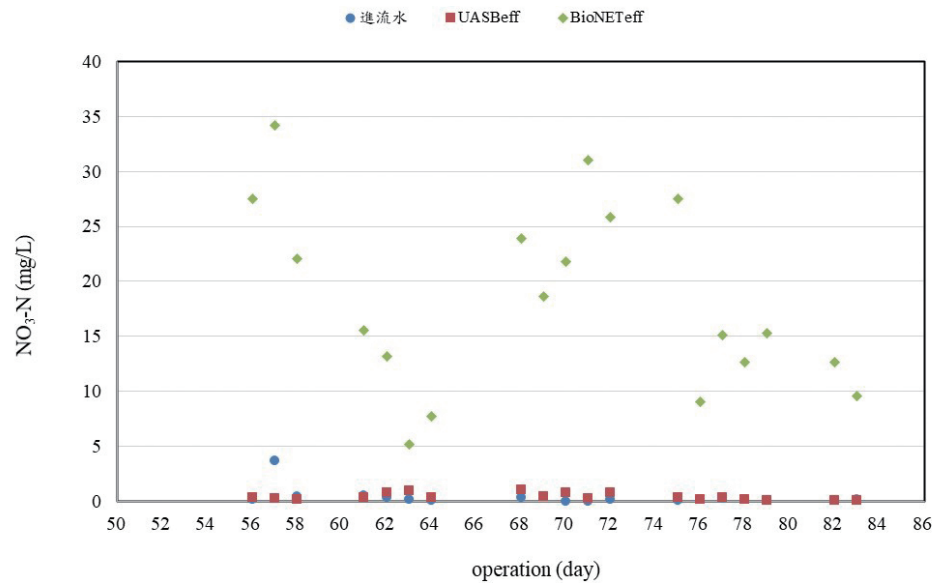


圖 11 實驗室硝酸鹽氮處理結果

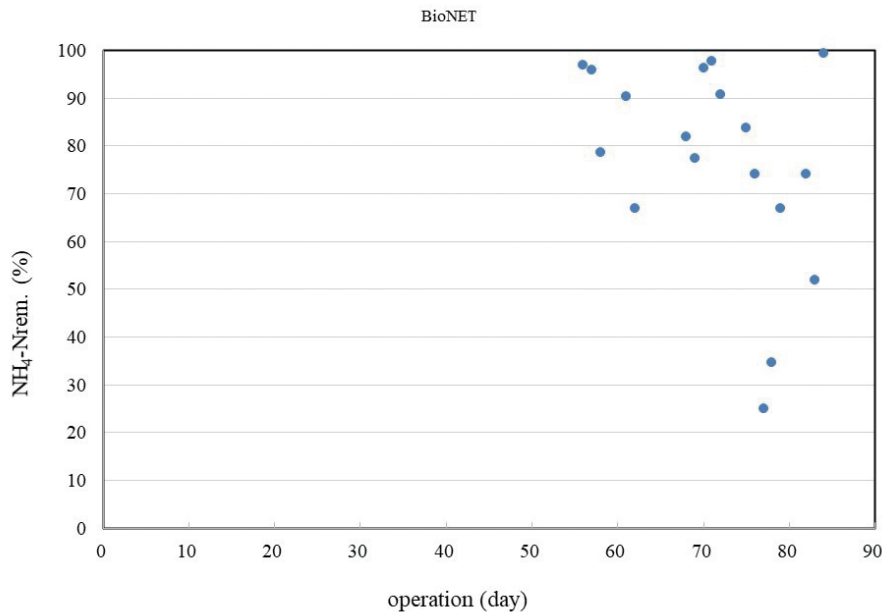


圖 12 BioNET 氨氮去除率

五、廢水場設計理念與流程

1. 廢水處理場設計

規劃處理流程：由細節機除去大顆粒固體物，讓進入調勻池批式產出之有機物廢水達到完全混合調勻功能，進行 pH 調整，所含懸浮性固體採用添加 polymer 以加壓浮除法進行去除，接續應用 UASB 厭氧生物技術降解大部分 COD，所殘餘 COD 則由 BioNET 喜氣生物技術接力進行降解達到符合法規規定放流水自行排放的標準。

設計理念：

- 以生物處理為主，降低對環境衝擊。
- 調勻池將批式產出的有機廢水達到完全混合功能，穩定廢水水質提供給處理系統。

- pH 調整池可機動性調整食品廢水因鹼液清洗而造成廢水 pH 值偏鹼及食品廢水容易酸化的困擾，讓生物處理系統處於穩定最適 pH 值下操作，避免因異常造成對生物處理系統的衝擊。
- 前處理以細篩機及加壓浮除單元，目的為去除大顆粒固體物與懸浮性固體降低對生物系統的負荷及減少占地面積。
- UASB-BioNET 生物處理單元組合程序，可有效降解有機物生物分解效率與經濟效益。
- 生物沉澱池，主要預防現場操作異常，進而造成廢水進入生物處理系統的負荷突增，保障放流水符合自行排放標準。

2. 廢水處理場處理流程與主要單元槽體設計及操作參數

案例廠廢水處理場規劃之處理流程如圖 13，先經細篩機再流入調勻池、pH 調整池、膠凝池、DAF、UASB、BioNET、生物沉澱池、污泥貯池、污泥脫水、放流水池。

主要單元槽體設計規劃為：調勻池 174 m³，水力停留時間為 19 小時，快混池與膠泥池池體體積為 2.4 m³，水力停留時間為 19 分鐘，DAF 槽體面積 10 m²，UASB 池體體積為 161 m³ 池體體積負荷為 4 kg.COD/m³.day，BioNET 池體體積為 170 m³，水力停留時間為 22 小時，沉澱池面積規劃為 11.6 m²。

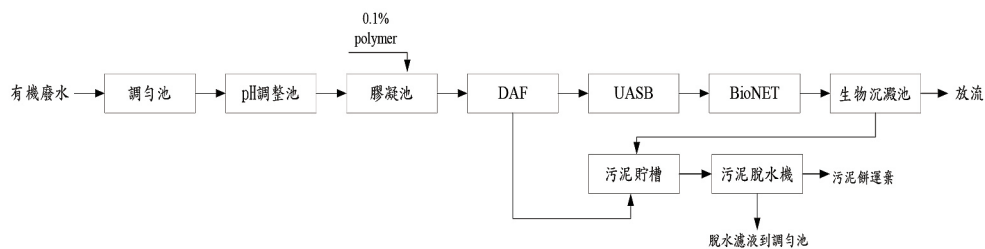


圖 13 廢水場處理流程

六、實場試車結果與討論

食品產業廢水為高 COD、SS 且含有機氮之廢水，實驗室評估所規劃之處理流程中以採用工研院開發的上流式厭氧生物處理 (upflow anaerobic sludge bed，UASB) 技術，主要將廢水之高濃度 COD 利用最小占地面積達到承載高體積負荷且污泥產率小於 0.1 kg SS/kg COD 與生物網膜 (Biological New Environmental Technology，BioNET) 三級喜氣生物處理技術接續二級生物處理所殘留之 COD 進行再次降解且同時具有攔截大量懸浮性固體的組合程序。前處理以細節機篩除固體物再應用加壓浮除法將懸浮性固體去除，實驗室評估結果所獲得的參數，作為實廠廢水處理場各單元工程建置基本設計參數的依據。實廠廢水場之試車結果由圖 14 得知，進流水 COD 濃度最大值為 3,520 mg/L，平均值為 2,400 mg/L 經由細節與 DAF 單元處理，把固體物與懸浮性固體物先去除，COD 濃度降低至最高為 2,900 mg/L，平均 COD 濃度為 1,880 mg/L，於圖 15 瞭解，DAF 進流水 SS 濃度為 233~1,820 mg/L，浮除後出流水 SS 濃度為 62~448 mg/L。

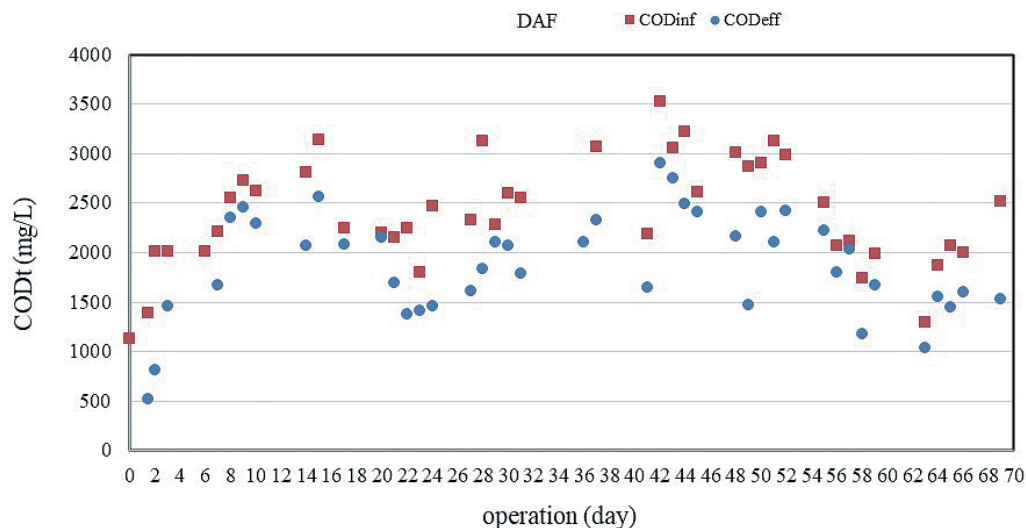


圖 14 實廠 DAF 處理結果

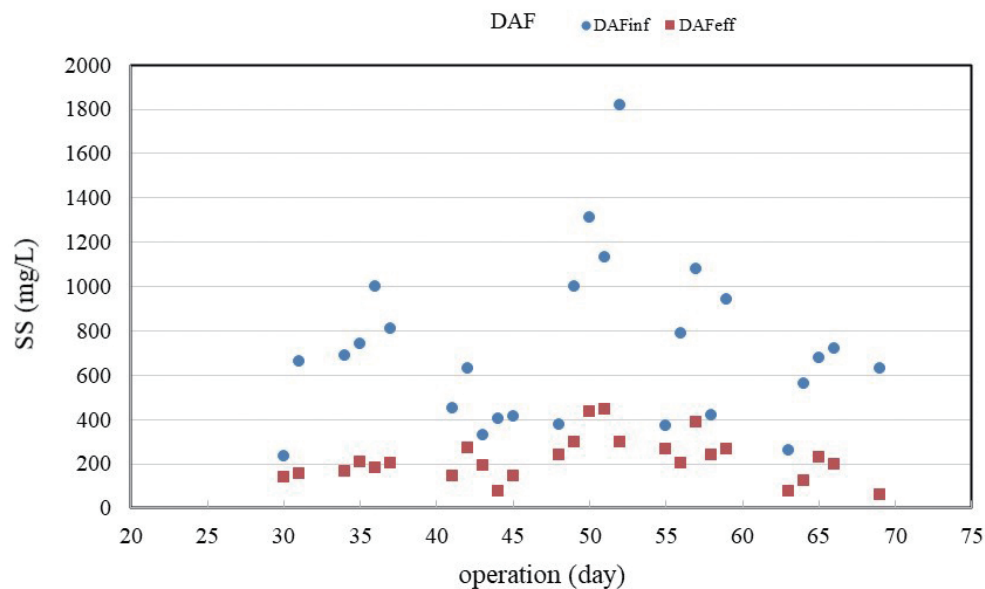


圖 15 實廠 DAF 進出流水 SS 處理結果

二級生物處理以 UASB 厭氧生物處理技術來進行承載高 COD 體積負荷，尤對食品之高濃度有機物廢水降解效率優，從圖 16 結果顯示，UASB 出流水的 COD 濃度降低至 26~198 mg/L，其進流水為 DAF(加壓浮除)的出流水，因隨著進流水濃度變化，COD 去除率為 88.8~98.4%，另相同地，BioNET 喜氣生物處理之進流水為 UASB 厭氧生生物處理單元的出流水，於圖 17 得知，BioNET 喜氣生物處理出流水 COD 濃度降解至 1.0~53 mg/L，遠低於自行排放濃度 100 mg/L，去除率最高達 95.5%。放流水 SS 濃度為 1~9 mg/L，如圖 18 所示，仍遠低於自行排放標準濃度 30 mg/L，另，放流水氨氮濃度則沒有檢出。

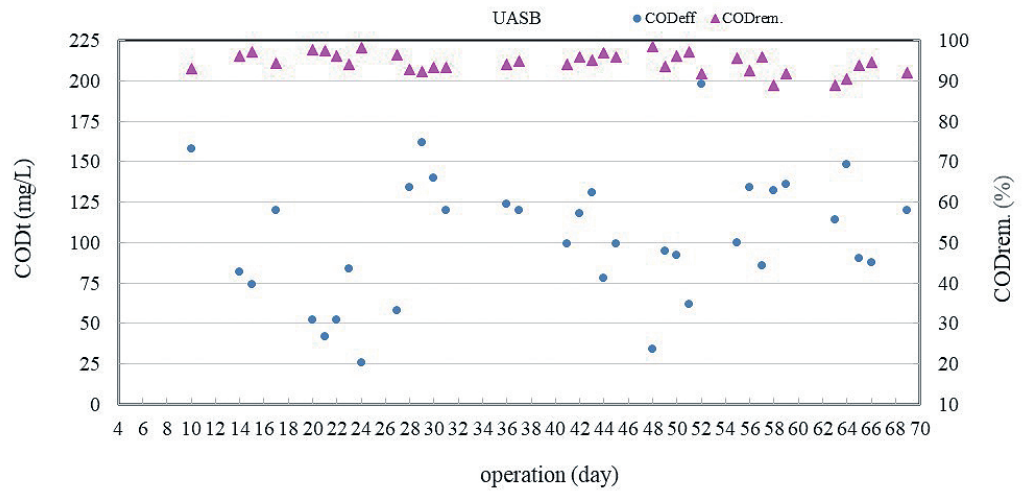


圖 16 實廠 UASB 出流水與 COD 去除率

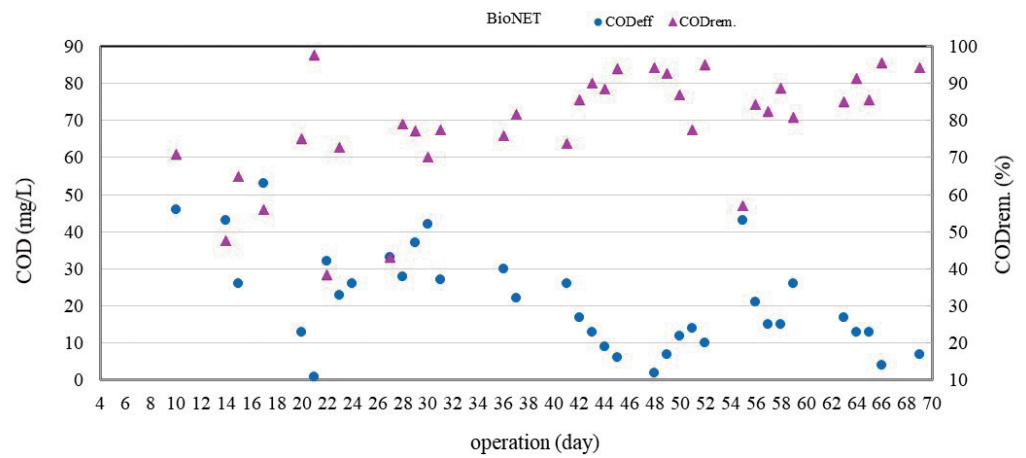


圖 17 實廠 BioNET 處理結果

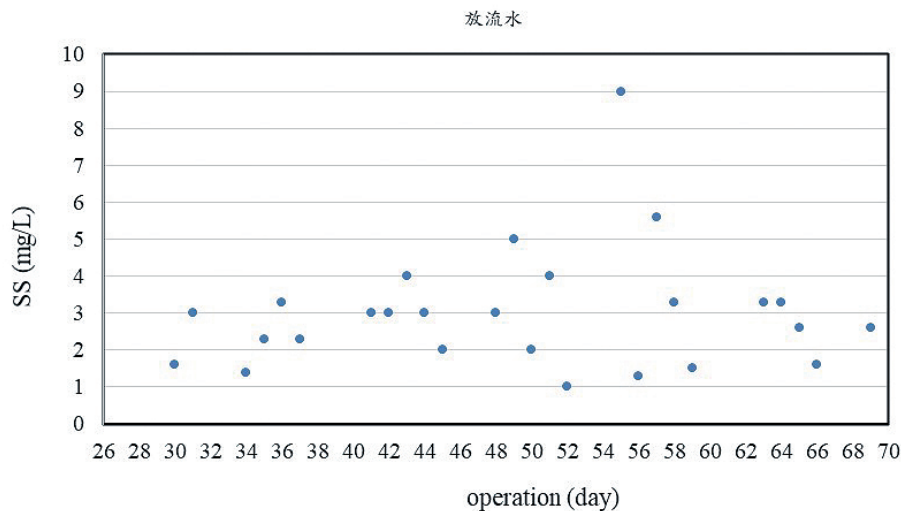


圖 18 實廠放流水 SS 濃度

七、結論

綜觀上述實驗室評估果再經實廠試車結果驗證，工研院規劃設計之廢水場 - 處理流程單元，完全解決了食品產業廢水高濃度 COD、SS 及高有機氮廢水，UASB 厭氧生物處理系統降解大部分有機物，出流水 COD 濃度為 26~198 mg/L，去除率在進流水水質穩定操作的情況下可高達 98.4% 以上，其所殘餘之 COD 濃度接續由 BioNET 喜氣生物處理單元進行再次降解 COD，出流水 COD 濃度在 1.0~53 mg/L 去除率最高達 97% 且可攔截大量的 SS，進流水 SS 濃度從 230~1,820 mg/L，放流水 SS 濃度降低至 10 mg/L 以下，遠低於放流水排放標準 30 mg/L，去除率高達 98% 以上，放流水 COD 濃度亦遠低於自行排放標準的 100 mg/L 以下，去除率可高達 99% 以上。

浮除單元僅添加凝集劑所產生的污泥可直接作為堆肥再利用，UASB 厭氧生物處理所產出的顆粒污泥，可做為他廠的植種污泥，縮短厭氧生物系統啟動時間與污泥廢棄處理費用，此處理程序組合實為循環經濟最佳典範。另廢水處理場處理流程規劃之最終目標，主要考量亦以現場工作人員於執行上必須操作簡單，同時具有高效率處理功能及減少佔地使用，達到最大經濟效益利用為主要目的。

參考文獻

工業技術研究院 (2002)，上流式厭氣污泥床處理系統設計及應用手冊。

陳致君、洪仁陽、姜榮煌、洪政偉、陳威全、廖啟鐘、鄒文源 (2015)，氨氮與正磷酸鹽廢水以 BioNET® 和化學混凝組合程序之實場處理，環保技術與工程實務研討會，p 67-82。

陳致君、洪仁陽、蔡松均、梁德明、黃志彬 (2020)，以 UF/EDR 回收 PCB 產業廢水：BioNET 前處理評估，環境工程學會廢水處理研討會。

陳致君、王鈞逸 (2022)，化工產業廢水以 SBR 和 BioNET 組合程序之實廠處理，工業污染防治，第 155 期，p 59-72。

廢(污)水處理類

染整前處理廢水回收過濾再利用 模廠案例分享

吳孟育*、林彥儕**

摘 要

紡織品是民生不可或缺的必需品，卻也是高耗能及耗水資源的產業，現今服飾講求多功能紡織，製程改變導致耗水量日趨增加；加上氣候變遷近年來國內的梅雨與颱風季減少，導致乾季時間更長、造成缺水風險，故水資源再利用是產業重要議題。若能將染整流程中整理段廢水現地處理後直接回收使用，除可節省水的消耗外，亦能節省製程藥品的使用量還能減輕後續廢水處理的負荷，為本專案探討之重點。

織物在染色前需先前處理加工，分別為退漿、水洗、解捻、精練、漂白等過程，為了防止經紗斷裂，會在織造前對經紗進行上漿處理，以提高經紗的斷裂強度和耐磨損性。胚布上漿料的存在若無法完整去除則不利後續的流程，因此退漿過程是織物前處理的基礎，該過程可以去除織物上大部分的漿料和部分天然雜質，以利後續的加工。解捻段是將強捻的布鬆開，紗線中油脂去除洗淨達到布種收縮效果，會使用到不少水量進行此工段。

本文探討 2 股廢水主要以退漿及解捻製程為優先，使用氧化劑在鹼性環境下進行退漿及解捻，藥劑有螯合分散劑、乳化精練劑、過硫酸鈉和液鹼 (45%)，該股水質特性 pH 7.0~12.0，溫度約 80~90 °C，現況該水源經過熱交換器回收熱能後直接排放，

排放水量約 100~130 CMD，由於漿料及雜質造成水中濁度高，約 300~900 NTU，其中較為棘手是高溫、高 pH 條件下對許多膜過濾材料是一大挑戰。

本文以現地模廠及規劃日後實廠建置案例進行說明，採用有機高分子管式膜採內壓式過濾對該股水源進行回收再利用，該濾材優勢為切向流型式不易堵塞、可處理高固含量、高濃度之廢液。經過處理後濁度降至 3 NTU，去除率高達 97%，每日可以省下近 100 CMD 的解撚退漿整理流程用水量。

【關鍵字】節水(Water conservation)、廢水回收模廠測試(Wastewater recycle pilot test)、有機高分子管式膜(Organic Polymer Tubular Membrane)、內壓式過濾(Inside-out)、退漿(Desizing)、現地處理(On-site treatment)

* 宏遠興業股份有限公司	副理
** 宏遠興業股份有限公司	股長

一、前言

有鑑於全世界資源永續意識日見抬頭，為推動水資源之有效利用，降低環境負荷。因此，必須提升原料使用效率，降低生產失敗成本，並可減少污染排放。從產品開發之可行性技術達成污染減量、節能減碳、促進水資源與廢棄物循環再利用、維護環境等，而以重新思考 (Rethink)、重新設計產品或流程 (Redesign)、減量 (Reduce)、重複使用 (Reuse)、修復 (Repair)、再生 (Recycle)、生態復原 (Recovery) 等，進一步達成經濟面、社會面與環境面均衡發展。

紡織染整業是極耗水資源的產業，為 6 大耗水產業之一。現今服飾講求多功能紡織導致耗水量日趨增大；加上全球暖化近年來國內的梅雨季或颱風季減少，導致乾季時間更長、造成缺水風險，因此紡織染整業的水資源再利用為重要的議題。以 2023 年為例，統計全廠每月平均使用水量為 15 萬噸，其中染整製程用水 10 萬噸，占比全廠將近 70% 的用水量，因此，若能有效將染整廢水處理回收再利用，將可提升用水效率，節省水的消耗及能節省製程藥品的使用量並減輕後續廢水處理的負擔，達到水資源永續再利用目標。

另外，近年來，紡織產品所需機能性逐漸增加，染料與染助劑所訴求功能性日新月異，且染整各製程單元及原料纖維種類不同，所使用的加工方法、添加藥劑及用水量亦不相同，根據染整製程特性將用水分為三大部分 (經濟部, 2018)：

1. 製程用水，其中分為，前處理 (退漿、水洗、解撚、精練 .. 等) 和染色兩大項；
2. 設備冷卻水和鍋爐蒸汽冷凝水；
3. 公共區及環境清潔用水。

退漿是前處理中的重點，在織布過程中，為了防止經紗斷裂，會在織布前對經紗進行上漿處理，以提高經紗的斷裂強度和耐磨損性，但原布上漿料的存在反而不利後續的加工 (誠興貿易有限公司, n.d.)。退漿不僅可以去除織物上大部分的漿料外，同時將紡織纖維上的雜質去除，以利後續的加工。常用的退漿的方法有酶、鹼、酸和氧化劑退漿等。

本文研究的退漿機是使用氧化劑在鹼性環境下進行退漿，使用的藥劑有螯合分散劑、乳化精練劑、過硫酸鈉和液鹼 (45%)。針對退漿及水洗製程用水單元，個別進行廢水處理，達到退漿製程之用水標準，回收於退漿製程重複使用，解撚製程亦同。藉由該兩股廢水回收再重複使用，可減少新鮮水的使用量，提高回收率外，還能節省廢水處理費並減少製程藥劑用量，達到節省能源與降低生產成本之目標。

二、處理廢水調查與回收方法

(一) 現況調查

以 2023 年統計染整製程用水量平均 3,500 CMD，占比全廠將近 70% 的用水量，目前廠內的退漿製程流程主要分為垂掛式無張力退漿機 Boil-Off (BO) 與鬆弛收縮解撚 Relax (RE)，其中 BO 排水量較多，排放量為 200~250 CMD，RE 則排出 100~120 CMD 廢水。

1. 垂掛式無張力退漿機 Boil-Off (BO)：是由多座水槽組成的設備，水槽分別為預濕槽、退漿主槽、水洗槽兩座及冷卻槽，主槽是 BO 的工段核心，透過化學藥品與高溫高鹼環境下除去織物的漿料與雜質，其中主槽及水洗槽 A 廢水排放經過熱交換器回收熱能後直接排放至廢水廠處理，水洗槽 B 與冷卻槽溢流水則會分別回到上一槽回收再使用，其設備流程如圖 1 所示：

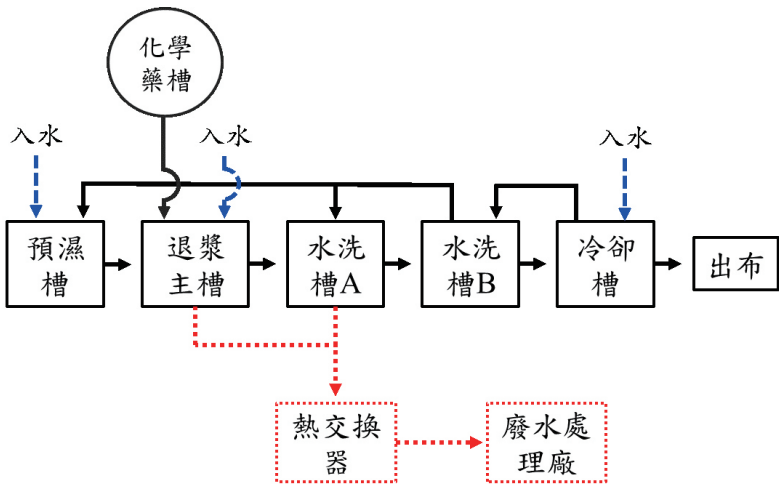


圖 1 垂掛式無張力退漿機 BO 退漿流程圖

2. 鬆弛收縮解撚 Relax (RE)：布種視情況要達到收縮效果時，才會進入此製程，相較於 BO 需要五座水槽進行工段，RE 是由 1 台染缸進行該工段，用水與廢水量較少，RE 工段需入二次軟水，第一次的軟水經過加藥等工段後，會將缸內的廢水排放經過熱交換器回收熱能後直接排放至廢水廠，第二次入水經行工段後這股水不會進行排放，會將剩餘的水留給第一次入水延續使用，其操作流程如圖 2 所示：

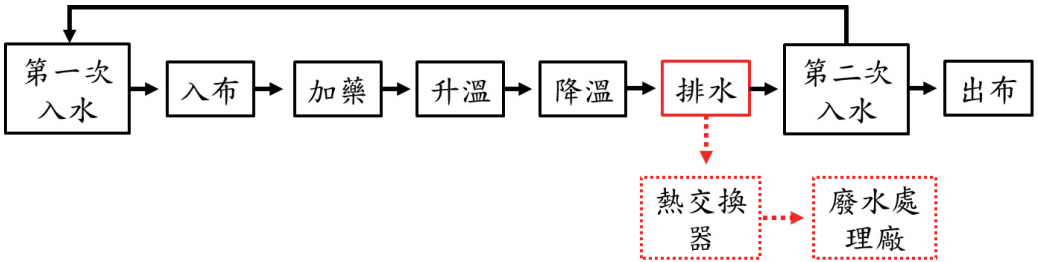


圖 2 鬆弛收縮解撚 RE 退漿流程圖

(二) 廢水特性

該 2 股廢水主要含有織物上的污物、油脂及不同比例混合漿料 (壓克力、PVA 及澱粉漿料)，特性為高溫、高 pH、高濁度。依照退漿方式及處理布種不同而產生不同特性的廢水，其差異參閱表 1。

表 1 退漿水質特性差異表

退漿方式	處理布種	水溫 (°C)	pH	濁度 (NTU)	懸浮固體物 (mg/L)	導電度 (µs/cm)	化學需氧量 (mg/L)
BO	不限	80~90	11~12	600~900	200~400	14,000~16,000	9,000~12,000
RE	Nylon	55~65	7~9	50~200	50~100	1,000~2,000	300~1,000
	Poly	65~75	10~12	200~400	100~200	4,000~8,000	1,000~3,000

(三) 處理技術

依水質特性大致可分為：物理處理法(分離)、化學處理法(加藥混凝)及生物處理法(活性污泥或厭氧處理)。其中物理與化學處理法所需處理時間較短，且可用於處理高 COD 之廢水；但化學處理法因添加化學藥品改變廢水中的化學性質，重複回到製程使用恐有污染產品之疑慮，因此本文研究以物理處理法為主。物理方法主要以分離方式回收廢水中不溶解的懸浮狀物質，在處理過程中並不會改變其化學性質，且操作方式簡單。常用的方法分別為：重力/離心分離法、膜過濾法、蒸發法及結晶法。

膜過濾技術 (Membrane filtration) 為廣泛使用的分離與純化技術之一，主要是透過半透膜 (Semi permeable membrane) 將不同物質、粒子或分子選擇性的通過達到過濾效果。過濾方式主要分為直流式過濾 (Direct Flow Filtration, DFF)(如圖 3 所示) 及切向流過濾 (Tangential Flow Filtration, TFF) (如圖 4 所示)。

直流式過濾是傳統的過濾方法，液體流向垂直於膜的表面，靠著正壓(如：擠壓)或負壓(如：真空)提供動力過濾大分子物質，但此方式會讓膜表面迅速生成高濃度的凝膠層 (Gel layer)，造成過濾樣品會殘留在膜表面且效率會急劇下降。(欣梗科技股份有限公司, n.d.)

切向流過濾液體流向平行於膜表面，藉由壓差原理推動溶質或小分子物質以垂直流向通過濾膜，當液體以一定速度連續流過膜表面時，除了過濾外也對膜表面進行了沖洗，使膜表面不易形成凝膠層，從而保持穩定的過濾速度。切向流過濾該系統的優點為 (1) 節省能源；(2) 清洗方便；(3) 提高產量效率與品質管理。(欣梗科技股份有限公司, n.d.)

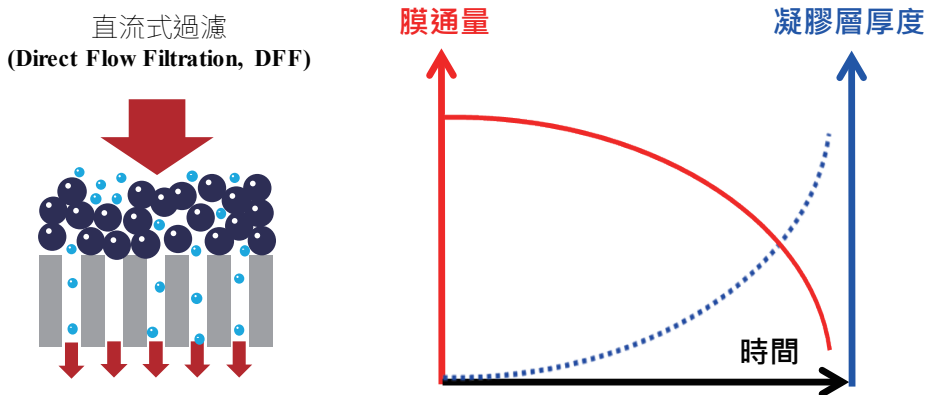


圖 3 直流式過濾 (Direct Flow Filtration, DFF) 工作示意圖

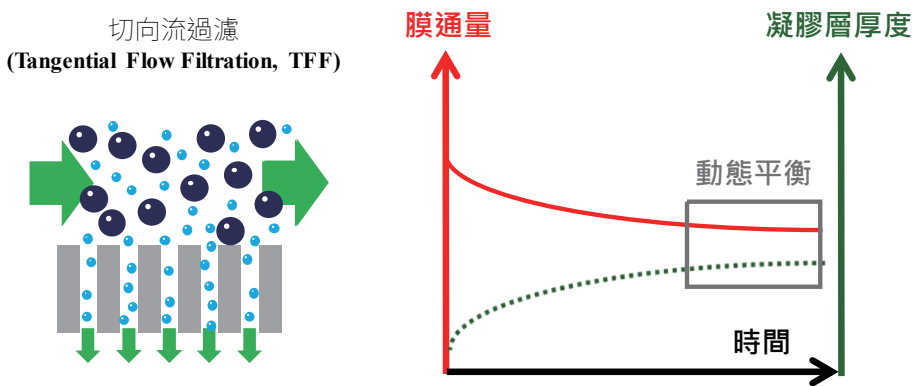


圖 4 切向流過濾 (Tangential Flow Filtration, TFF) 工作示意圖

市面上常見的 TFF 過濾膜依型式可分為：平板式 (Flat plate)，又稱為卡匣式 (Cassette)；卷式 (Spiral wound) 及中空纖維膜 (Hollow fiber)；但這些膜型式的入水條件不適合高溫、高 pH 及高油脂的退漿廢水 (洛科儀器股份有限公司, n.d.)。

有機管式膜是近幾年來創新的 TFF 過濾膜型式，與其它膜型式比較參閱表 2，有機管式膜特點在於流道較寬，對於進料之液體無嚴格要求，可處理高固含量、高濃度之液體，耐壓性高，不會像中空纖維有斷根之現象，後續維護及清洗過程簡單，有化學及物理清洗，皆可線上操作，節省人力 (大成過濾材料有限公司, 2020)。

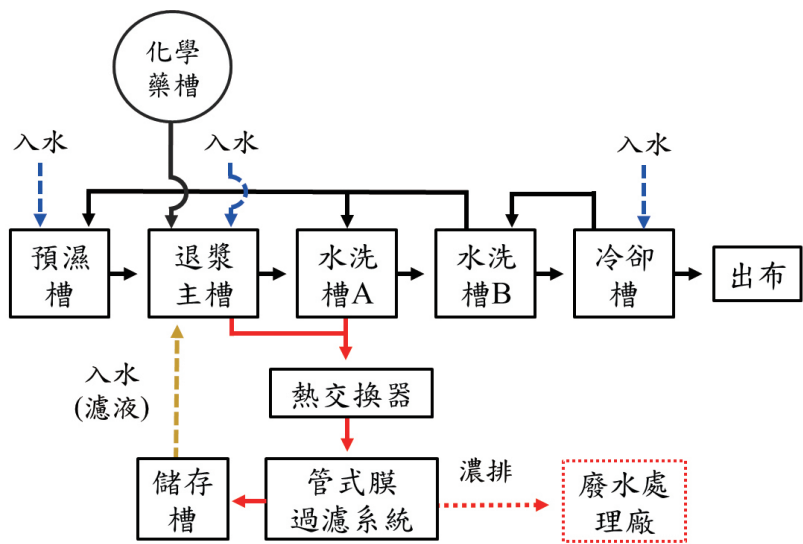


圖 5 BO 廢水連接管式膜系統流程圖

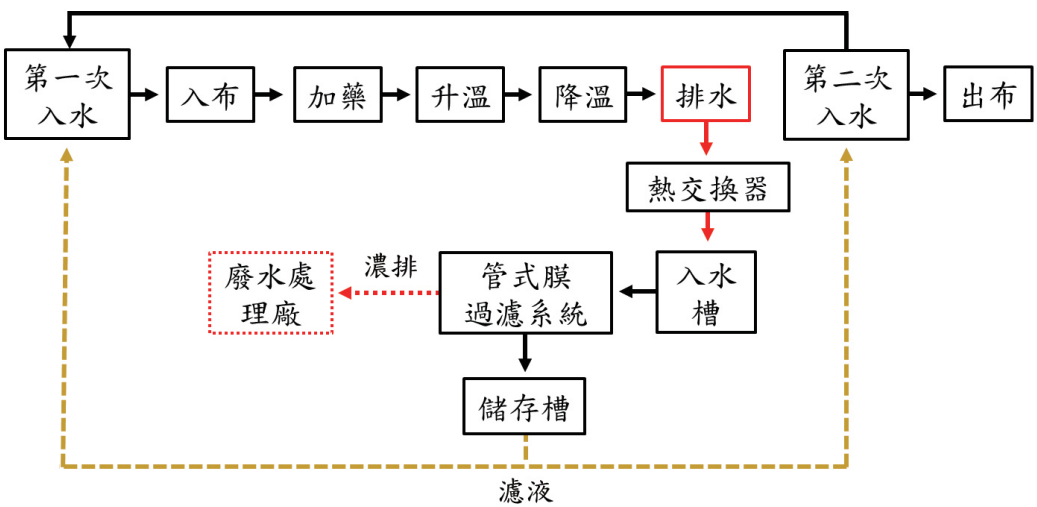


圖 6 RE 廢水連接管式膜系統流程圖

本專案所採用之有機管式膜過濾系統為錯流式過濾，進流水部分流過膜濾，設計膜殼內含有機管式膜（圖 7 為示意圖），其為內壓式過濾 (inside-out) 處理水由膜絲內腔進入，經過膜絲過濾後，濾液在膜絲外收集。管式膜數量由膜殼尺寸而定，廠商依照 RE 與 BO 廢水排放量設計測試機規格及膜管選擇，RE 測試機規格如圖 8 所示，BO 測試機規格如圖 9 所示，連續測試 3 個月，每日紀錄水溫、膜通量、pH、導電度、懸浮固體及濁度。

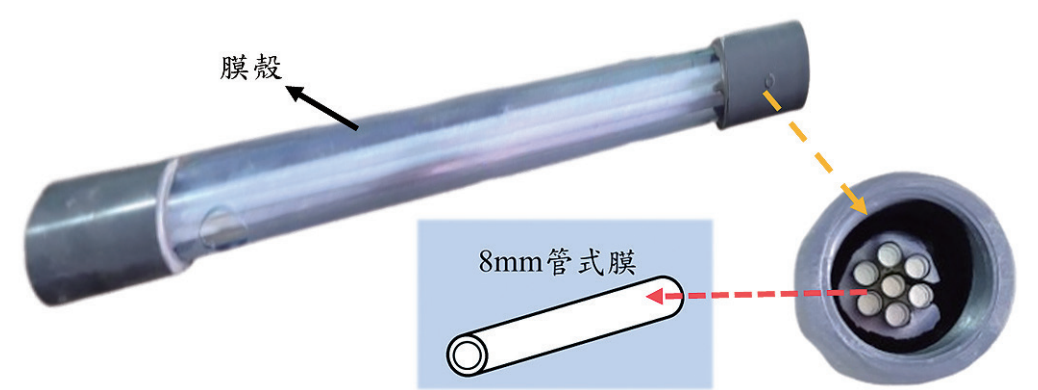


圖 7 膜殼及管式膜示意圖

控制系統，
避免設備空轉和溢出

入水槽

膜殼
(內含管式膜)

入水槽

測試機規格表 (RE)	
名稱	有機管式超濾膜 pilot 設備
設備大小	45cm × 60cm × 150cm
電力需求	220V，單相10A
膜規格	1.5吋，0.5米長
膜材質	PES/PET
膜孔徑	10萬截留分子量
操作壓力	2 kg/cm ²
產水量	1.4L/min (一天約2噸)
回收率	95%

圖 8 RE 測試機

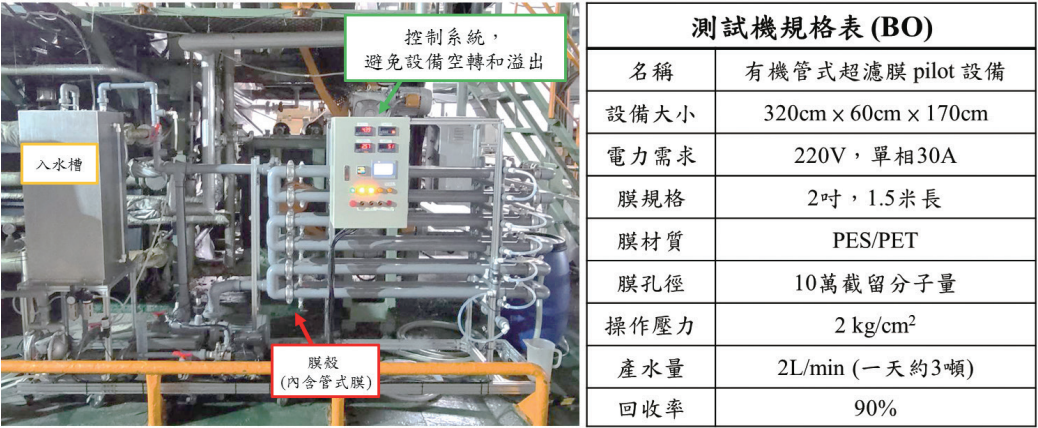


圖 9 BO 測試機

四、測試結果

本文測試結果以 RE 廢水模廠測試為主要討論方向，已完成建置實廠回收系統；BO 退漿廢水因污染濃度較高，目前仍以模廠連續測試中。在此感謝大成過濾材料公司提供設備測試。

(一) 濁度分析結果

該股廢水含有漿料及分解物等污染物，造成水體濁度高，水樣過濾前後如圖 10 所示，可以明顯看出濾後的水樣清澈透明；退漿廢水依照布種及退漿藥劑不同，濁度範圍在 70~500 NTU，經過 3 個月的測試，濁度變化趨勢如圖 11。整體去除率高達 98%。

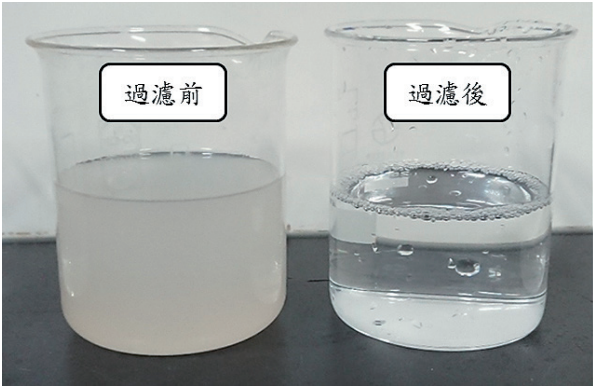


圖 10 水樣過濾前後變化

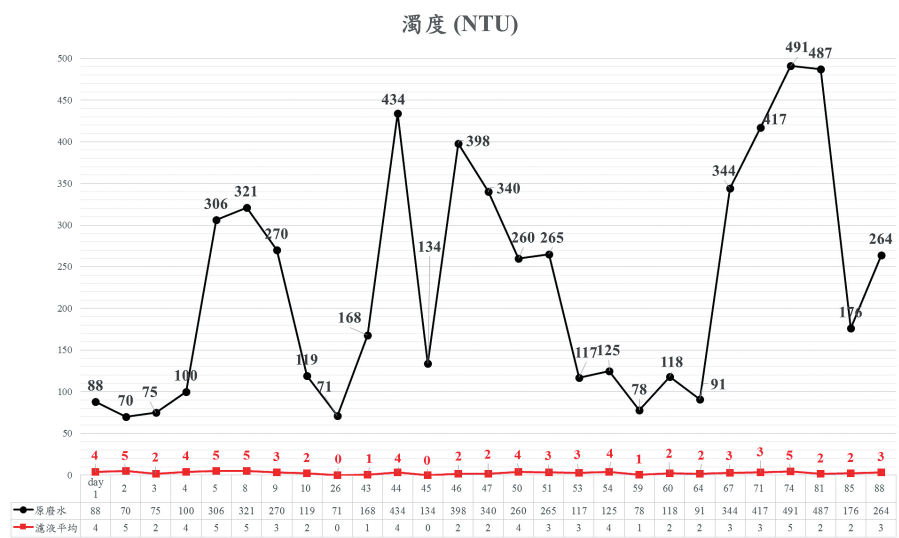


圖 11 濁度變化趨勢

(二) 懸浮固體物 (Suspended solids, SS) 分析結果

織物在進行退漿時會將纖維上的雜質藉由藥劑分離出來，並根據布種不同，所排放的廢水 SS 含量也不同，約在 7 ~ 45 mg/L，過濾前後的水樣 SS 變化趨勢如圖 12。而有部分濾液 SS 數值偏高，原因為入水槽內濃水濃度太高沒有定期排放所導致，整體去除率平均在 87%，進行排放後即恢復正常。

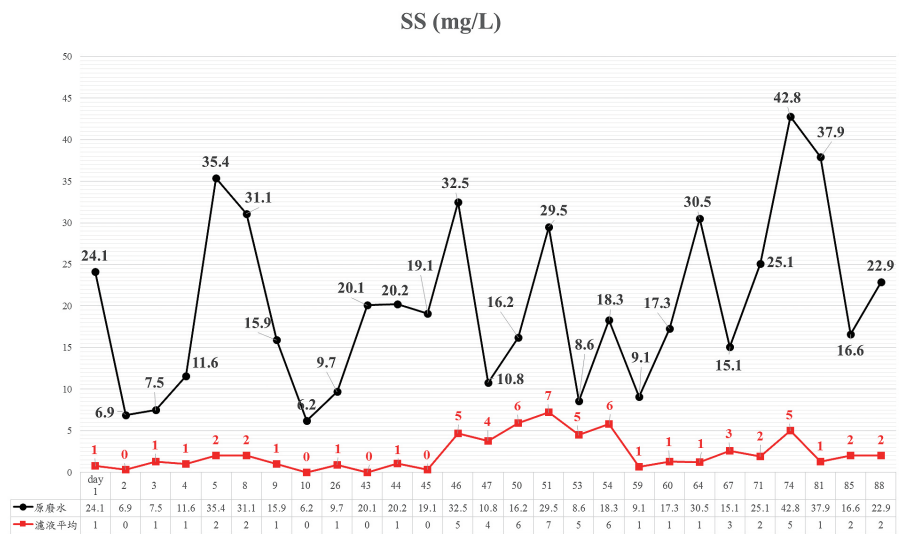


圖 12 SS 變化趨勢

(三) pH 分析結果

退漿會添加液鹼做為溶解聚合物的方法，而 Poly 廢水 pH 7~9；Nylon 廢水 pH 10~12，過濾前後的水樣 pH 值變化趨勢如圖 13。結果表示原廢水及濾液 pH 值相近，過濾對 pH 值影響並不大，推測是液鹼殘留，濾液若回收到製程可節省液鹼使用量。

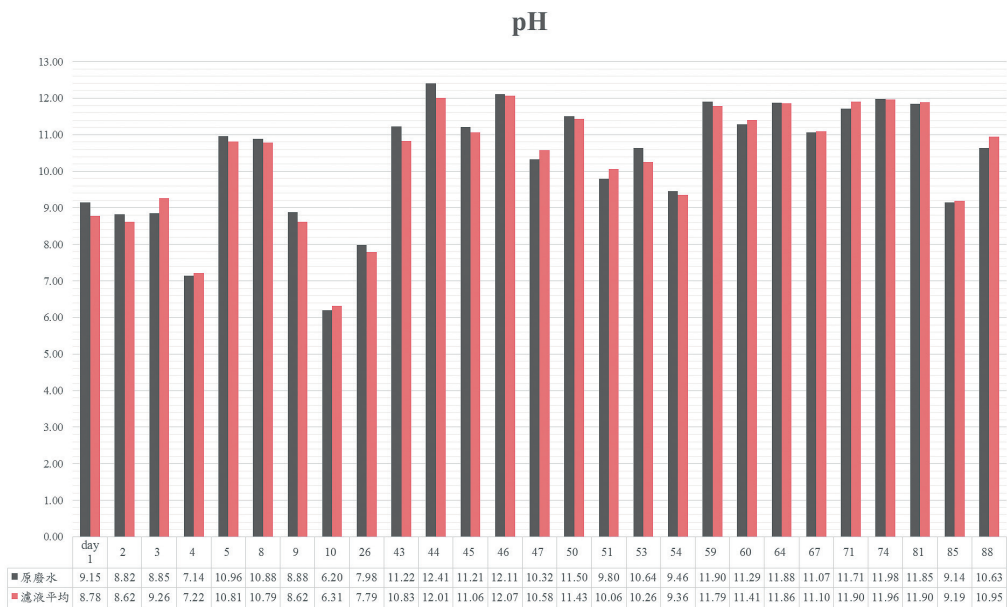


圖 13 pH 值變化趨勢

(四) 導電度分析結果

根據胚布的布種、在織布段所上的漿料組成、退漿配方要求和工廠設備，選用合適的退漿流程。退漿後，要及時用熱水洗淨，因為漿料的分解產物等雜質會重新凝結在織物上，嚴重妨礙後續加工過程。必須再經水洗去除水解產物而達到退漿目的。

退漿除了溶解織物上的聚合物外，同時對織物有一定的漂白效果，為了增加織物的溶解會添加退漿劑（過硫酸鈉）、螯合分散劑及乳化精練劑加強效果，且藥劑的添加皆為貢獻水體中的導電度值。經膜濾前後的水體導電度值變化趨勢如圖 14。結果表示原廢水及濾液導電度值相近，過濾對導電度值影響並不大，推測是藥劑殘留，濾液若回收到製程可節省藥劑使用量。

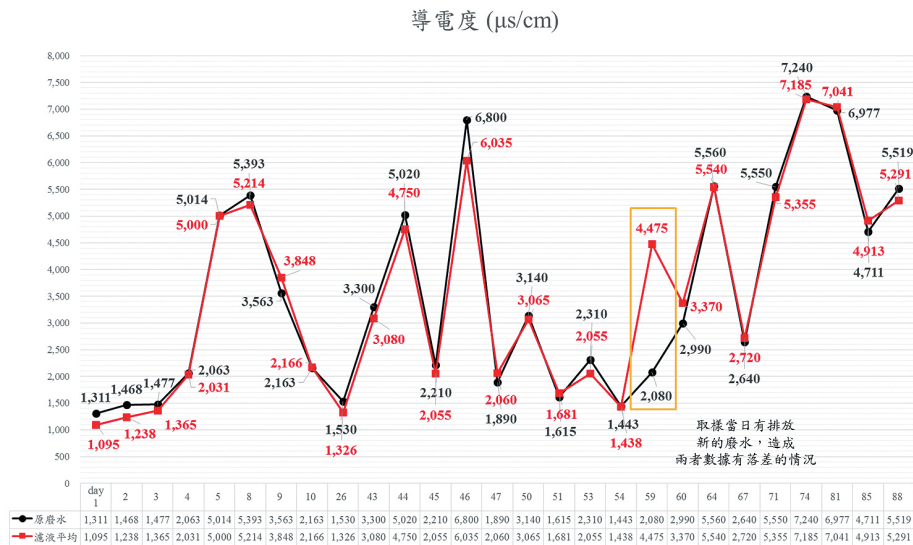


圖 14 導電度值變化趨勢

(五) 膜通量

膜通量是指每小時在每平方公尺的過濾面積所產出多少公升的水量 (L/m²·hr) 。管式膜的通量範圍 30~100 L/m²·hr，測試機結果趨勢如圖 15 所示，平均通量約為 60 L/m²·hr，隨時間運轉下產生濃水或積垢會導致通量的衰減，則必須進行膜管清洗，建議使用鹼性熱水除垢，可恢復至通量 60 L/m²·hr 以上。

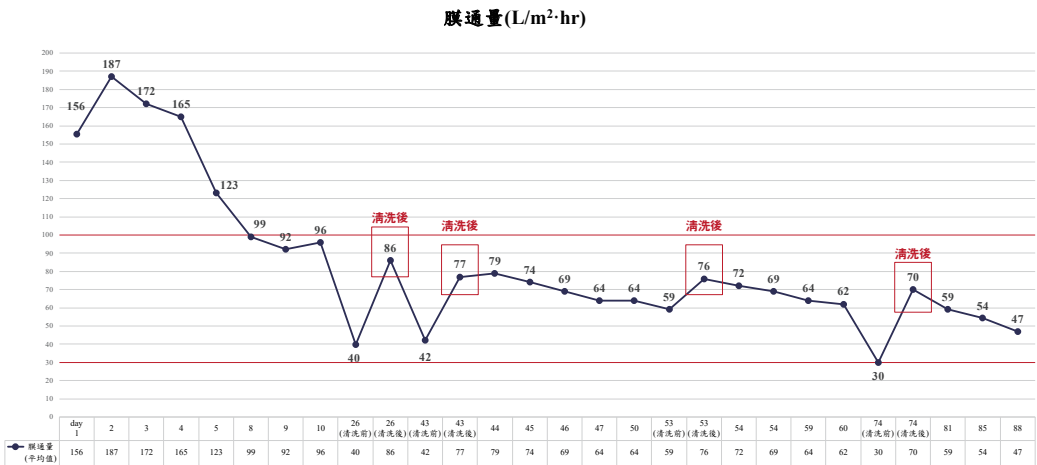


圖 15 膜通量變化趨勢

(六) 成本分析

1. 操作成本估算

以廠內 2023 年數據為例，RE 退漿廢水 120 CMD 之水量為基準，預估操作成本為 10.8 元 / 噸；管式膜的保固為 2.5 年，因此膜的攤提費用為 6.0 元 / 噸；可得出每噸水的操作成本為 $10.8 + 6.0 = 16.8$ 元 / 噸。

2. 回收成本估算

廠內的廢水處理成本為 19.6 元 / 噸，製程所使用之軟水成本為 12.0 元 / 噸，因此可得出每噸水的回收成本為 $19.6 + 12.0 - 16.8 = 14.8$ 元 / 噸。

3. 碳排放量估算

根據經濟部能源局於 2023 年 6 月公布 2022 年電力排碳係數為 0.495，也就是每發一度電的碳排放量為 0.495 公斤 (經濟部能源局, 2023)；廠內以 2023 年數據為例，製造軟水所用電量每日平均為 7,800 度，因此可得出碳排放量為 $7,800 \times 0.495 = 3,861 \text{ kg CO}_2\text{e} / \text{日}$ 。

根據台灣自來水公司提供的每度用水排放 CO_2 約當量計算方式 = 用電量產生 CO_2 量 (kg) $\div$ 水量 (度) (台灣自來水公司, 2023)；廠內以 2023 年數據為例，井水每日平均用量為 4,500 噸，因此可得出每生產 1 噸軟水排放 $0.858 \text{ kg CO}_2\text{e}$ 。

若將 RE 解撚 (100~120 CMD) 與 BO 退漿 (200~250 CMD) 廢水回收於製程使用，以有機管式膜過濾回收率 90 % 計算，每日可回收共 270~333 噸濾液，相當於每日減少排放 231~285 $\text{kg CO}_2\text{e}$ ，若每年以 350 天計算，可減少將近 81 噸~100 噸 CO_2e 排放量。

五、結論

本文以探討 BO 及 RE 退漿廢水為主，分析水質特性後評估回收可行性及選擇合適通量管式膜規格及封裝耐受性測試，大成過濾材料公司提供相關設備，進行小型模廠回收再利用評估，以利後續實廠建置參考，初步獲得以下之結論：

(一) 改善前後比較

處理前後濾液及退漿用水水質特性比較如表 3，從濁度與 SS 方面相比，兩者數值與製程退漿用水相近，驗證該股濾液回用於製程是可行的，因設備為 UF 過濾所以 pH 與導電度部分較無效果，推測為液鹼與退漿藥劑殘留所貢獻，濾液若回收到製程可節省藥劑使用量。

表 3 水質特性比較表

項目	濁度 (NTU)	SS (mg/L)	pH	導電度 (μ s/cm)
退漿廢水	50~900	50~400	8.5~12.0	2,000~7,000
濾液	≤ 3	≤ 3	8.5~12.0	2,000~7,000
退漿用水(軟水)	≤ 2	≤ 2	6.8~7.5	1,000~2,000

(二) 回收率改善前後比較

目前本廠染整製程用水量平均為 3,500 CMD，回收再利用於製程的水量約為 150 CMD 回收率為 4.3%，若日後加入 RE 與 BO 濾液產水共 333 CMD 回收到製程使用，回收率從 4.3 % 提高至 13.8%。從成本角度看，廠內的廢水處理成本(19.6 元 / 噸) 且軟水製造成本(12.0 元 / 噸)，若 RE 與 BO 濾液回收再使用，每日可省下近 1 萬元費用。以減碳排放效益，每年可減少 81 噸~100 噸 CO₂e 排放量。

參考文獻

經濟部 (2018)，紡織業低碳製程技術彙編，產業特性與發展趨勢，p 13

誠興貿易有限公司 (n.d.)，紡織上漿，<https://reurl.cc/vvvm0k>

欣梗科技股份有限公司 (n.d.)，何謂膜濾系統，<https://reurl.cc/KlIX2e>

洛科儀器股份有限公司 (n.d.)，切向流過濾濾膜形式，<https://reurl.cc/2jj839>

大成過濾材料有限公司 (2020)，有機高分子管式膜介紹，<https://reurl.cc/xvv14b>

經濟部能源局 (2023)，111 年度電力排碳係數，<https://reurl.cc/GppXYv>

台灣自來水公司 (2023)，每度用水排放二氧化碳 (CO₂) 約當量計算，<https://reurl.cc/RecOG6>

廢棄物類

核能電廠除役之循環經濟可行性探討

簡淑美 *

摘 要

歐盟執委會 (European Commission, EC) 已於 2022 年 7 月公布，將核能和天然氣能源活動列入歐盟分類法涵蓋的經濟活動清單，這意謂著在因應氣候變遷的相關議題，核能發電具有調適與減緩的效應，就其效應除營運階段對於環境衝擊能媲美再生能源之外，對於氣候變遷有減緩的幫助；許多關於核能電廠的研究中，重點都是聚焦在使用階段，對於核能電廠除役的研究甚少進行評估，主要是因為除役過程需要數十年的時間，且一旦核能電廠停止營運後已無任何經濟價值，因此除役對環境、經濟和社會的衝擊影響至今仍不明確。

EC 旗下之聯合研究中心 (Joint Research Center, JRC)，2021 年發布之《核能發電技術評估報告》，除環境保護之永續性指標外，更是提倡循環經濟轉型，使其在經濟發展的同時也將環境永續概念導入經濟活動之投資，本研究參考該評估報告循環經濟的觀點，並以核一廠為例計算核能電廠除役後建材、設備等潛在回收率，由定量結果來探討核能電廠除役對於循環經濟之影響，其類別項目包含鋼筋混凝土、金屬廢棄物 (含組件及設備)、混凝土廢棄物 (含活化及受污染) 和其他廢棄物 (保溫材)，研究結果指出除役後廢棄物總潛在回收率為 57.9%，仍有 42.1% 的廢棄物需貯存於低放射性廢棄物貯存庫，依促進永續投資框架規則之朝向循環經濟轉型，本研究認為核能一廠除役階段可更精進除污技術的研究以利提升除污效果，使其達到外釋標準以利回收再

利用，加速朝核能發電技術循環經濟轉型的目標邁進；此外，研究結果亦能做為《核能發電技術評估報告》除役階段的補充說明，評估核能發電列入永續性經濟活動之適宜性。

【關鍵字】核能電廠、除役、循環經濟、核能廢棄物

* 泰興工程顧問股份有限公司 核能工程部

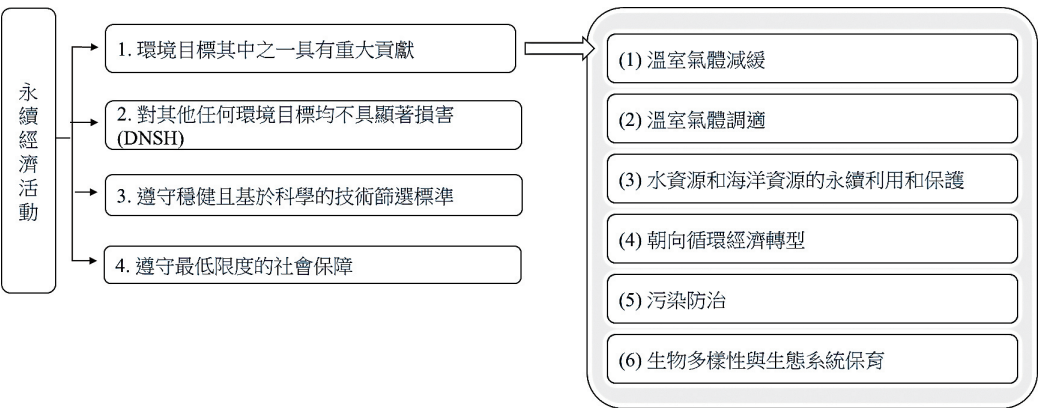
資深工程師

一、前言

歐盟執委會 (European Commission, EC) 將核能和天然氣能源活動列入歐盟分類法的經濟活動清單，顯示了歐盟對於多元化能源來源和應對氣候變遷的策略。核能在減少碳排放方面具有顯著的優勢，相較於燃煤和天然氣等能源，核能在發電過程中減少大量的溫室氣體排放，對於降低溫室氣體排放和應對氣候變遷具有積極的影響。

2019 年 6 月歐盟技術專家小組 (Technical Expert Group, TEG) 針對永續金融 (Sustainable Finance)，提出歐盟永續性經濟活動的通用分類系統 (EU-Wide Common Classification System for Sustainable Economic Activities)，為公司、投資者和決策者，提供適當的綠色投資定義，建立永續性投資的清單，幫助歐盟擴大永續性投資和推動歐盟綠色協議，旨為希望能調動大量民間投資加快綠色轉型，緩解市場分裂並將投資轉移到最需要的發電技術。

除溫室氣體減緩與調適作為重要指標，還包括五項環境目標，分別為水資源和海洋資源的永續利用和保護、朝向循環經濟轉型、污染防治、保護和恢復生物多樣性和生態系統，綜合考量發電技術的相關廢棄物及排放，是否會對環境造成長期顯著性傷害。



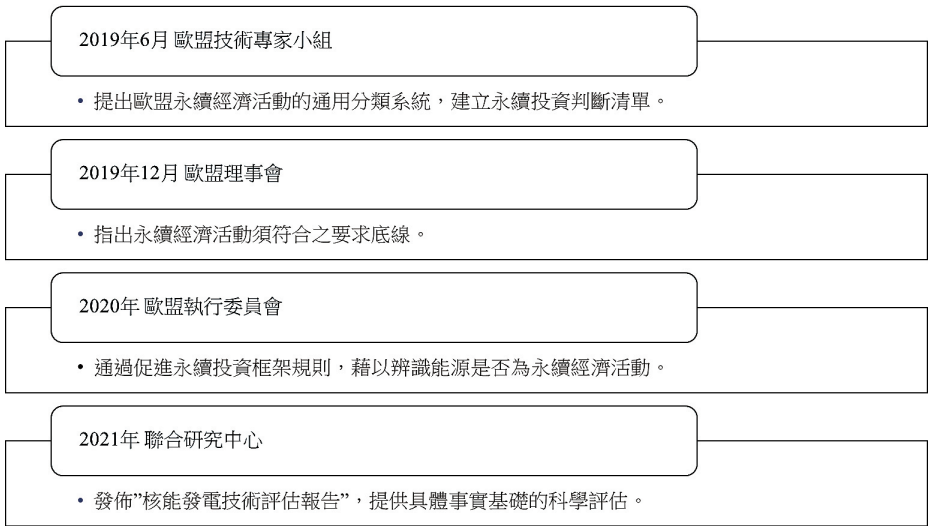
資料來源：本研究繪製

圖 1 歐盟永續性經濟活動的通用分類系統及環境目標

歐盟理事會 (The Council of the EU, EU) 在 2019 年 12 月歐洲議會指出，永續性經濟活動投資必須符合的四個要求，包括六項環境目標其中之一具有重大貢獻 (Substantial Contribution)、對其他任何環境目標均不具顯著損害 (Do No Significant Harm, DNSH)、遵守穩健且基於科學的技術篩選標準 (Technical Screening Criteria)、遵守最低限度的社會保障 (Minimum Social Safeguards)，並在 2020 年 4 月 15 日通過建立『促進永續投資框架規則』 (Establishment of a Framework to Facilitate Sustainable Investment)。此規則可提供歐盟內所有企業和投資者一套『永續經濟活動分類』 (Taxonomy for Sustainable Economy Activities)，以識別哪些能源是被認為具有環境永續性的投資 (如圖 1)。

為釐清核能發電是否屬於符合 DNSH 準則之技術，EC 旗下之聯合研究中心 (Joint Research Center, JRC) 於 2021 年發布 Technical Assessment of Nuclear Energy with Respect to the ‘Do No Significant Harm’ Criteria of Regulation(EU)2020/852(Taxonomy Regulation)，以下簡稱《核能發電技術評估報告》，提供具事實基礎的科學評估，供 EC 相關決策者參考。

根據《核能發電技術評估報告》，已明確表示核能在營運階段，溫室氣體排放量接近於零，可以媲美再生能源發電，因此核能發電在減緩氣候變遷是具有貢獻的能源之一，永續經濟活動之發展歷程摘述於圖 2；然而，專案小組提出之報告僅聚焦在營運階段，對於任何發電技術在環境之實質影響及衝擊，應全面性考量包含燃料製造、建廠和除役後廢棄物之處置及管理等各階段，較為客觀。



資料來源：本研究繪製

圖 2 永續經濟活動之發展

本研究以核一廠為例，從除役計畫及環評報告書進行資料收集，盤查分析核電廠除役之相關資料，其評估範疇與系統邊界至整廠除役完畢，並參考《核能發電技術評估報告》朝向循環經濟之觀點，計算核能電廠除役後建材、設備等潛在回收率，本研究結果能做為核一廠除役期間廢棄物處理及除污技術選擇之參考依據，加速朝核能發電技術循環經濟轉型的目標邁進；此外，亦能做為該報告除役階段的補充說明，評估核能發電列入永續性經濟活動之適宜性。

二、文獻回顧

(一) 核能電廠除役

1. 國際核能電廠除役概況說明

(1) 美國：

截至 2024 年，在美國已有 32 座核能電廠永久停止運轉，其中 14 座已完成除役、13 座已完成屏蔽隔離狀態或安全貯存、5 座目前進行除役中，其餘的電廠則處於廠址對外開放準備或安全貯存準備階段。根據美國的除役相關

法規，僅要求經營者需在 60 年內完成核能電廠除役，可依據各廠的需求選擇適宜的除役策略。

依據美國核能管理委員會 (United States Nuclear Regulatory Commission, USNRC) 出版之 NUREG-0586 “Final Generic Environmental Impact Statement on Decommissioning of Nuclear Facilities”，核能電廠的除役方法有三種選擇模式，可分為『立即拆除 (DECON)』、『安全貯存 (SAFSTOR)』及『長期封存 (ENTOMB)』等 3 種。其中又以立即拆除方式 (需要 5~10 年) 或安全貯存方式 (需要 30~50 年) 為主流選擇。

從經濟角度來看，立即拆除方式通常更具成本效益。然而，由於部分核能電廠考量到用過核燃料和放射性廢棄物的貯存地點和處置場尚未完備，因此選擇了安全貯存方式。美國的核電廠經營者也可以選擇結合前兩種策略，即對核子設施的某些部分進行延後拆除，先採取安全貯存，而其他部分則立即拆除，目前台灣核能電廠也是以兩種策略作為核能電廠除役之方式。

(2) 德國：

截至 2024 年，德國已有 33 座核能電廠及原型反應器永久停止運轉，有 6 座正在進行拆除，其中 2 座已完成反應器拆除，並將廠址以『綠地 (Greenfield)』方式對外開放；另有 2 座處於安全貯存階段。

德國的除役策略是由經營者決定其執行策略，各州政府等管制單位則負責審查業者所提出的除役計畫內容，當業者提送的除役計畫符合審查標準時，即發給除役許可。

德國從危害風險角度決定進行核能電廠除役，但除役措施則是以經濟角度進行評估，並從中選擇立即拆除方式或安全貯存後拆除方式。目前 2 座處於安全貯存階段分別為林根 (Lingen) 核能電廠與 Thorium Hoch Temperature Reactor (THTR) 反應器，是採用安全貯存後拆除方式；而其餘的核能電廠則考量到社會經濟層面之影響，並為有效利用電廠專業人員的情況下，選擇了立即拆除方式。

(3) 日本

截至 2024 年日本已有 27 座核能電廠永久停止運轉，1 座已除役完成、24 座停止發電、1 座除役中。日本核能電廠的除役，基本原則就是拆解並移除反應器及其附屬設備與建物，並將土地恢復至未建廠的狀態。除役期間，輻射劑量較高的部分侷限在反應器區域；因此，必須事先進行約 10 年的安全貯存期，讓反應器區域的輻射衰減，藉此可讓執行除役作業的作業人員所接受到的輻射劑量，暴露於跟運轉期間之作業人員一樣的程度。

在安全貯存期間的先進行拆除方面，第 1 階段是進行附屬設備等的拆除，第 2 階段則是進行熱交換器等拆除，並確保第 3 階段反應器區域的解體廢棄物搬出路徑、放射性廢棄物貯存庫，以及作業量的均衡化。

2. 核能電廠除役過程主要階段

核能除役 (Decommissioning) 是指當核能設施（如反應爐）達到使用壽命、運轉執照到期無法繼續營運或政府政策決定停用時，對這些設施進行安全的關閉、拆除、除污、貯存和處理的過程。這是一個複雜且長期的工程，確保設施在除役期間核能安全風險和環境衝擊影響降至最低，核能電廠除役過程通常包括幾個主要階段，本研究彙整如表 1。

表 1 核能電廠除役過程主要階段

階段	工作說明
停止反應爐運作並確保安全	1. 反應爐關閉，中止核子分裂反應，待冷卻並減壓後，移除所有燃料棒。 2. 封閉反應爐的所有開口部份，如閥門、活栓等，確保無流體洩漏。
封存反應爐並進行除污及切割	1. 拆除連接於反應爐壓力槽的所有管線、機件，減少槽體的尺寸，再將其緊密包封。 2. 進行除污 (decontamination) 工作，根據評估結果重新規劃圍阻體廠房或通風系統等設施。
完全拆除並確保無放射性污染	1. 完全拆除具有高放射性的材料、機器配件等。 2. 未移除之建物或設備必須無放射性污染，使該區域可以無限制地再使用。

整個除役過程中，安全性是最重要的考慮因素。過程中需要遵守台灣和國際的法規和標準，確保從事除役工作之相關人員和周圍環境的安全。

(二) 核能電廠除役經濟循環

循環經濟致力於透過重新使用廢棄物和利用環境友善的資源，提高社會效益和減少自然資源使用，從而促進經濟永續發展，也是應對當前資源限制和環境問題的重要途徑，此思維建立在減少、再利用和回收材料三個概念的基礎上，以及使用創新技術來提高工業製程中的資源利用率。

從經濟角度來看，核能除役運用循環經濟的理念，回收及再利用除役產生廢棄物的某些部分（例如廢金屬或混凝土碎石）是非常值得推動的策略，在理想狀態下可節省處置能力和減少消耗環境資源。本研究彙整目前國際上對於除役循環經濟的方法和原則其說明如下：

1. 廢棄物最小量：根據美國能源部於 2021 年發佈由國家實驗室執行之專案研究報告，提出在核能設施拆除過程中，通過精確的除污技術，使除役期間產生之廢棄物達到外釋標準，將其生成量最少化，並從輻射防護的角度進行分析，確保其輻射劑量，對人類健康不良影響落在可忽略的水平。
2. 回收和再利用：回收是評估任何核能除役是否有確實減少廢棄物體積之真實指標。Lim et al., (2022) 研究指出韓國核能電廠除役過程中產生的廢棄物，包括金屬或混凝土等材料，應規劃採取最大化地回收和再利用，以日本而言已將流體鋼結構之材料運用於核能反應器建物，相較於鋼筋混凝土能減少對環境資源之利用和需求，除役後達到外釋標準的廢棄物，以韓國為例優先考慮再利用於其他工業領域。
3. 放射性廢棄物處理：Hrncir et al., (2019) 研究指出斯洛伐克 (Slovakia) 核能電廠除役期間中產生的放射性廢棄物，應進行詳細的安全評估以及成本 / 效益估算和可行性研究，以證明規劃之處理及貯存方案的安全性、實用性和成本效益，確保它們不對環境和人類健康造成威脅；同時，也應該研究放射性廢棄物的再處理和再利用技術。

4. 技術創新：中國近年來則是投入研究和開發，尋找更高效、更環保的除污技術、拆除工法和放射性廢棄物處理技術等，以確保除役過程盡可能地低污染和高效率。

(三) 核能發電技術評估報告之循環經濟

根據《核能發電技術評估報告》循環經濟在核能領域的定義主要關注使用的設備、機械、材料和建材的耐用性、可修復性、可升級性、可重複使用性和可回收性。這些特性是循環經濟的基本原則，旨在最大限度地延長設備、機械、材料和建材的使用壽命，減少浪費，提高資源的再利用率，具體來說：

1. 耐用性 (Durability)：設備、機械、材料和建材應該設計成具有較長的壽命，減少提早報廢和資源浪費的情況，並且能夠承受長期使用且不失效能。
2. 可修復性 (Repairability)：設備、機械、材料和建材出現故障或瑕疵應該易於修復，能迅速且符合成本地修復，而非報廢。
3. 可升級性 (Upgradeability)：設備、機械、材料和建材應該具有可升級的特性。這意味著在技術進步或使用需求改變的情況下，產品應該能夠方便地進行升級，而不是必須完全替換。
4. 可重複使用性 (Reusability)：設備、機械、材料和建材的選擇應使用再生材料，減少對有限資源的需求，或選擇符合綠色設計標準的建材，減少對環境的影響。
5. 可回收性 (Recyclability)：設備、機械、材料和建材應該易於回收。在核能電廠的壽命結束後，設備、機械、材料和建材應該能夠被有效地分離和回收，以供再次使用。

這些特性的結合可以幫助確保核能設施的建造、運轉和除役是符合循環經濟原則的，以實現更可持續的能源生產和使用。在《核能發電技術評估報告》循環經濟著重在將來核能電廠除役期間建材、鋼筋、混凝土或運轉期間時廢水等回收再利用之評估；以台灣核能電廠除役為例，若採用循環經濟之理念，在理想狀態下可節省處置能力和減少消耗環境資源；但是其中外釋標準則是一項非常具有挑戰性的任務。

(四) 台灣核能電廠金屬廢棄物減量與再利用之法規及經驗

國際原子能總署 (International Atomic Energy Agency, IAEA) 於 2004 年下半年公布 RS-G-1.7 報告，提出有關放射性固體廢棄物的解除管制 (Clearance) 建議限值。於同年行政院原子能委員會 (現稱為核能安全委員會) 放射性物料管理局參考 RS-G-1.7 報告，隨後同年也跟進公布“一定活度或比活度以下放射性廢棄物管理辦法”，作為放射性廢棄物外釋法源依據。該辦法中明確規定了兩種固體廢棄物的外釋方式：

- (1) 符合管理辦法中附表的放射性廢棄物的活度或比活度限值；
- (2) 依據輻射劑量評估，1 年內所造成個人之有效劑量不超過 0.01(mSv)，且集體劑量不超過 1 人 (Sv) 者。

符合上述規定者得提出外釋計畫，經主管機關核准後方可進行放射性廢棄物的解除管制外釋作業。

根據台電核能月刊 (2011) 刊登之金屬廢棄物解除管制外釋作業執行實務，其經濟效益分析討論外釋及不外釋作業之差異，依廢金屬來源外釋分為 4 個批次，外釋經濟效益則是由廢金屬標售費用及作業執行人力成本計算得知；反之，不外釋作業則採用最終處置之費用作為經濟效益計算。其研究指出，金屬廢棄物如不外釋，而是進行處理並送往最終處置之費用為新台幣 81,069,566 元。然而，若執行外釋作業之支出費用約為 80,139,889 元，相關計算彙整如表 2 所示。從此得知，外釋或最終處置兩者之間的實質差異不具有顯著差異 ($P<0.05$)，由於這是 2011 年的研究，經過數十年無論是技術普及化或是溫室氣體減緩及調適之急迫性而言，其潛在或是附加價值應會有所提升。

表 2 金屬廢棄物解除管制外釋作業經濟效益分析

批次	第一批	第二批	第三批	第四批
標售總價 (元)	196,000	616,668	271,855	108,800
合計 (元)	1,193,323			
清運重量 (公斤)	20,506	37,406	43,539	8,998
合計 (公斤)	110,449			

批次	第一批	第二批	第三批	第四批
人力估算 (新台幣元)	2,123,000			
規費 (元 / 公斤)	734 核研所收費標準之非燃性廢金屬處理貯存及最終處置規費			
計算說明	外釋作業： 標售總價(元)+規費(元/公斤)x清運重量(公斤)-人力成本(元) 1,193,323(元)+734(元/公斤) x 110,449(公斤) - 2,123,000(元) =80139889 (元) 不外釋採處理並送最終處置： 規費(元/公斤)*清運重量(公斤) 734(元/公斤)*110,449(公斤)=81,069,566 (元)			

資料來源：台電核能月刊(2011)；本研究彙整說明

三、研究方法

(一) 目標與範疇界定

本研究說明核一廠除役各階段之作業目標及工作時程，依據除役 4 個階段所對應之工作分解架構 (Work Breakdown Structure, WBS)，核一廠除役為期 25 年內各階段所需達成之工作目標，藉此規劃本研究之範疇及系統邊界界定 (如圖 3)，其主要目標及作業時程，說明如下：

1. 停機過渡階段：
- (1) 除役規劃：主要工作為除役所需之工程顧問、工程規劃及承包商招標。

(2) 廠房與場地：除役工作地點準備、核能相關設施停止作業、用過核燃料移出至冷卻池、廠址輻射特性量測、拆除前受污染設備及區域進行除污及反應器壓力槽與其內部組件拆解流程規劃準備。

(3) 放射性廢棄物管理 (第 1 期)：放射性廢棄物設施前置作業準備與建造規劃。
2. 除役拆廠階段：
- (1) 除役規劃：通用設備與材料之招標。

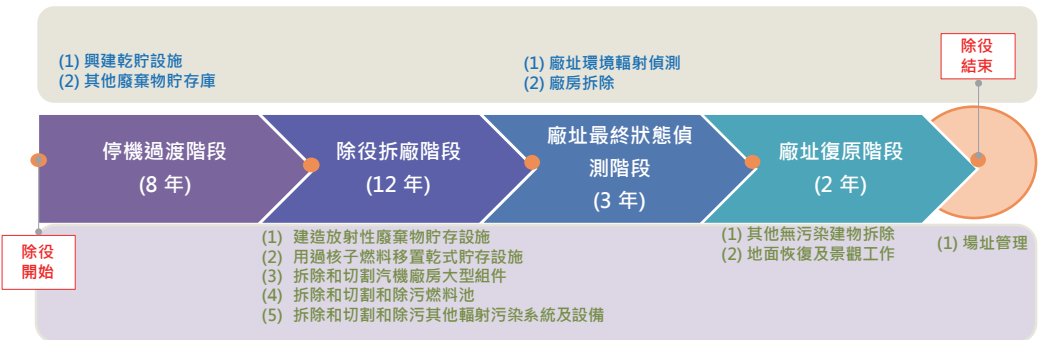
- (2) 廠房與場地：執行現場規劃及準備作業，包括既有廠房改建待外釋廢金屬之臨時倉庫及鋼筋混凝土塊分離場。
- (3) 放射性廢棄物管理 (第 2 期)：放射性廢棄物貯存庫建造與規劃運轉操作。
- (4) 用過核燃料移置室內乾式貯存庫：進行燃料池之清空，包含用過核燃料移至乾式貯存設施，燃料池及其他低放射性廢棄物包裝、運送，並存放於所需之互相與貯存庫。
- (5) 拆解與拆除：除役需求公用設施系統調整 (含電力和用水供應)、聯合結構廠房與汽機廠房內所需拆解及切割作業區域準備、聯合結構廠房內、汽機廠房內及其他輻射作業廠房內所有設備組件之拆除及混凝土結構物表面污染之刨除；其他非輻射作業廠房內設備拆解。

3. 廠址最終狀態偵測階段：

- (1) 建築物拆除：主要是拆除其他污染建物。
- (2) 廠址最終輻射偵測：執行最終輻射偵測以驗證除役後廠址是否符合除役目標。

4. 廠址復原階段：

- (1) 建築物拆除：將在第三階段內未拆除完之其他無污染建築物拆除完畢，其需拆除的建物有重機械廠房及其他須拆除的建築物等。
- (2) 土地復原：進行除役範圍內土地之覆土、整地等景觀工程。
- (3) 除役終止：除役範圍內土地復原之相關作業。



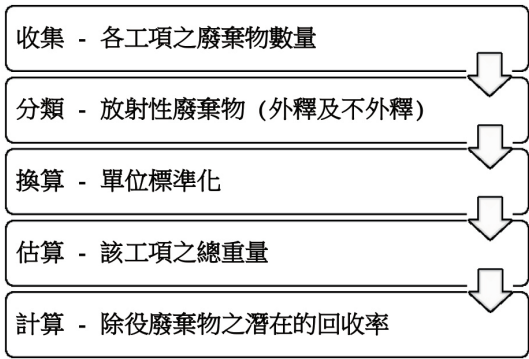
資料來源：本研究繪製

圖 3 核能電廠除役循環經濟探討範疇及系統邊界界定

(二) 盤查分析步驟

核一廠除役環評報告書已於 108 年通過，同時原能會也核發除役許可，因此本研究生命週期評估的範疇，是依照核一廠環評報告書及除役計畫工作分解工項，分別包括拆除和切割汽機廠房大型組件、燃料池、輻射污染系統及設備和其他建物等工程，盤點整個核能一廠在 25 年內待拆除的建物與設施及計算其潛在回收率，故並不受限於期程及環評之影響。

核能發電的健康和環境外部成本，已被廣泛地探討，並且在合理的不確定性的範圍內完全評估。但是就除役階段的健康和環境外部成本相關研究甚少，主要關鍵仍是因為無法決定除污後的外釋標準，在各種永續經濟活動的過程中，污染物排放常被認為是一種不可或缺的元素，因此要根絕污染（零輻射）不但在技術上相當困難，在經濟上也極不可及。



資料來源：本研究繪製

圖 4 除役廢棄物數據收集及整理

根據《核能發電技術評估報告》，經濟面的永續評估，是以循環經濟的思維來進行討論，廢棄物去向也是很重要的環境永續目標，應分別考量化學性廢棄物和放射性廢棄物兩種指標。對應臺灣相關法規要求即是區分為放射性廢棄物和事業廢棄物（含非放射性廢棄物）兩類，事業廢棄物將會依據環境保護署之「廢棄物清理法」將電廠產生之事業廢棄物，再細分為一般事業廢棄物及有害事業廢棄物；一般事業廢棄物可經主管機關認可之清理單位處理，而有害事業廢棄物則須依「有害事業廢棄物認定標

準」、「事業廢棄物貯存清除處理方法及設施標準」和「經濟部事業廢棄物再利用管理辦法」辦理，本研究不將其列入除役循環經濟探討範疇及系統邊界；對於放射性廢棄物，評估中考慮了部分材料具有輻射污染須除污後才能再利用的事實，若無法達到外釋標準則是依據輻射劑量高低，分別貯存至低或高放射性廢棄物貯存場。除役放射性廢棄物數據收集及整理，包含五大步驟分別為收集、分類、換算、估算及計算（如圖 4）。參考《核能發電技術評估報告》朝向循環經濟之觀點，計算核能電廠除役後建材、設備等潛在回收率，計算公式如下列所示。

$$\text{整體建材或設備的回收率} = \frac{\text{可回收的建材或設備重量(公噸)的總和}}{\text{除役後建材或設備總量(公噸)}} \times 100 (\%)$$

四、結果與討論

本研究根據核一廠除役環評報告書及除役計畫等資料進行潛在回收率估算，做為核一廠除役循環經濟之討論。首先是鋼筋混凝土的潛在回收率，目前國際上針對核能電廠除役研究發表僅只有 Wallbridge et al. (2013) 和 Seier and Zimmermann (2014) 是根據核電廠實質除役階段進行之研究分析，就英國 Mangnox 電廠（安全封存），對於混凝土回收量為不確定之變數，在衝擊評估則是採用完全不回收之假設；反觀，德國 Lubmin 電廠（立即拆除），則是假設混凝土為 100% 回收，就核一廠除役環評報告書及除役計畫，對於鋼筋混凝土的量體均未有明確的數值，主要是因為不容易估算，但在環評報告書則是提及鋼筋混凝土將會回填至聯合結構廠房及汽機廠房，以不外運為原則，故本研究假設為 100% 回收。

金屬廢棄物分類為活化金屬、污染金屬及初判無污染之金屬，活化金屬主要來源為反應器壓力槽與其內部組件經中子活化所產生之金屬廢棄物，反應器壓力槽不可外釋及可外釋重量分為 878 MT 及 0 MT，反應器內部組件不可外釋及可外釋重量分為 345 MT 及 0 MT，活化金屬不可外釋及可外釋重量小計分為 1,233 MT 及 0 MT，其活度約佔除役金屬廢棄物的 95.6%，但重量僅佔 4.3%，由於活化程度較高，因此不會外釋回收再使用。

污染金屬則是受放射性污染之閥件、製程管線、管路連接件等相關設備，經除污後不可外釋及可外釋重量小計分為 8,842 MT 及 6,699 MT 可外釋；核一廠管制區內初步研判確認無污染者，例如電纜與電纜槽、電力組件、電櫃、搬運設備、加熱與衛生用水處理組件與管線、聯合結構廠房與汽機廠房之橋式吊車、鋼材等，總重量約有 11,524 MT，不列計在受污染之金屬內，均能回收再使用。

混凝土廢棄物又包含活化混凝土 (生物屏蔽) 及污染混凝土，就活化混凝土 (生物屏蔽) 不可外釋及可外釋重量分為 1,140 MT 及 0 MT，就污染混凝土不可外釋及可外釋重量分為 1,545 MT 及 0 MT，混凝土廢棄物不可外釋及可外釋重量小計分為 2,685 MT 及 0 MT。

其他廢棄物又包括乾性廢棄物 (減容後)、濕性廢棄物 (固化後) 和保溫材，就乾性廢棄物 (減容後) 不可外釋及可外釋重量分為 242 MT 及 0 MT，就濕性廢棄物 (固化後) 不可外釋及可外釋重量分為 362 MT 及 0 MT，就保溫材不可外釋及可外釋重量分為 30 MT 及 212 MT，其他廢棄物不可外釋及可外釋重量小計分為 634 MT 及 212 MT。

綜整上述內容，評估結果整理至表 3。以回收再利用及潛在回收率的比例討論，就鋼筋混凝土部分，其潛在回收率為 100%，就金屬廢棄物部分：由於主要來源為反應器，其潛在回收率為 0.0%；就污染金屬部分：汽機組、製程管線及通風元件部分廢棄物可外釋，故提升潛在回收率之比例 (43.1%)；就電纜與電纜槽等無污染之金屬則 100% 外釋回收；就活化混凝土部分：與金屬廢棄物一樣，主要為反應器周圍之生物屏蔽，其潛在回收率為 0.0%；就其他廢棄物部分：為固化及減容後之廢棄物，故潛在回收率一樣為 0.0%。

整體而言，金屬廢棄物 (包括活化金屬、污染金屬和初判無污染之金屬)、混凝土廢棄物和其他廢棄物潛在回收率僅只有為 57.9%，換言之將會有 42.1% 的廢棄物在短時間內活化程度無法達到外釋標準，需要貯存於低放射性廢棄物貯存庫，就永續分類標準之朝向循環經濟轉型，就本研究認為仍有需要進行更多除污技術的研究以利提升除污效果，加速讓核能發電技術循環經濟轉型的目標。

活化金屬主要是反應器壓力槽及其內部組件，若要進行除污達到外釋標準在技術上相當具有挑戰性，其費用勢必相當可觀；污染金屬主要是連結組件，雖受輻射污染，但相較於活化金屬輻射劑量較低，若採取適宜之除污技術，定能提高潛在回收率；其他廢棄物，相對於直接或是間接受中子輻射影響之機率更顯低，源頭的管制配合適當除污，潛在回收率亦能提高。

污染金屬除污技術選擇取決於多個因素，包括污染的性質、分佈情形、劑量高低等，就表面除污而言可以考量研磨消除法、加壓水柱或是研磨料噴射法；對於處理金屬內部深處則是須由化學溶液或是電化學方式；然，污染金屬除污技術選擇並非單一方法，關鍵策略是針對上述之因素進行分類，採用複合式技術以化學方法來處理深層污染，然後再使用機械方法來清潔表面，結合多種技術以確保可達到外釋標準以便回收再利用，且可避免產生大量的二次廢棄物的疑慮。

表 3 核一廠除役廢棄物潛在回收率估算

類別	不可外釋 (MT)					可外釋 (MT)	潛在回收率 *
	放射性廢棄物之分類 (MT)				合計 (MT)		
	超 C 類	C 類	B 類	A 類			
1. 金屬廢棄物							
1.1 活化金屬							
1.1.1 反應器壓力槽	0	0	0	878	878	0	0.0%
1.1.2 反應器內部組件	72	37	0	236	345	0	
小計	72	37	0	1,114	1,223	0	
1.2 污染金屬							
1.2.1 閥件	0	0	32	510	542	527	43.1%
1.2.2 熱交換器	0	53	78	3,395	3,526	70	
1.2.3 泵	0	0	1	475	476	294	
1.2.4 桶槽	0	0	163	344	507	668	
1.2.5 其他汽機廠房組件	0	0	0	34	34	39	
1.2.6 汽機組	0	0	0	0	0	2,564	
1.2.7 製程管線	0	55	346	1,858	2,259	1,012	
1.2.8 管路連接件	0	8	53	151	212	237	

類別	不可外釋 (MT)					可外釋 (MT)	潛在回收率 *
	放射性廢棄物之分類 (MT)				合計 (MT)		
	超 C 類	C 類	B 類	A 類			
1.2.9 儀器管線	0	3	0	0	3	0	(接續前頁)
1.2.10 雜項製程組件	0	1	123	97	221	339	
1.2.11 內襯鋼板與燃料格架	0	232	0	788	1,020	81	
1.2.12 通風元件	0	1	32	9	42	868	
小計	0	353	828	7,661	8,842	6,699	
1.3 初步研判無污染之金屬							
1.3.1 電纜與電纜槽	0	0	0	0	0	2,435	100.0%
1.3.2 電力組件	0	0	0	0	0	445	
1.3.3 電櫃	0	0	0	0	0	974	
1.3.4 搬運設備	0	0	0	0	0	102	
1.3.5 加熱與衛生用水組件	0	0	0	0	0	65	
1.3.6 加熱與衛生用水管線	0	0	0	0	0	45	
1.3.7 橋式吊車 (天車)	0	0	0	0	0	500	
1.3.8 鋼材 (含鋼構)	0	0	0	0	0	6,958	
小計	0	0	0	0	0	11,524	
2. 混凝土廢棄物							
2.1 活化混凝土 (生物屏蔽)	0	0	0	1,140	1,140	0	0.0%
2.2 污染混凝土	0	0	0	1,545	1,545	0	
小計	0	0	0	2,685	2,685	0	
3. 其他廢棄物							
3.1 乾性廢棄物 (減容後)	0	0	0	242	242	0	25.1%
3.2 濕性廢棄物 (固化後)	0	0	131	231	362	0	
3.3 保溫材	0	0	0	30	30	212	
小計	0	0	131	503	634	212	
合計	72	390	959	11,963	13,384	18,435	57.9%

註：* 本研究計算；

計算說明：{可外釋 / (不可外釋 + 可外釋) × 100%}

以活化金屬為例：{0 / (1,223 + 0) × 100%} = 0%

資料來源：除設計畫第九章；低放射性廢棄物分類之判別，依據「低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」所列之長短半化期核種參考濃度，以分率和方式計算，作為低放射性廢棄物 A、B、C 及超 C 類分類依據。

五、結論

目前核一廠已進入除役階段，接下來核二及核三廠將會陸續除役，由此可知，核能電廠除役將是臺灣未來重大工程之一，且核能電廠除了面對非核家園的減核政策，如期如質除役或甚至提前除役等迫在眉睫的重責大任；同時，用過核燃料的安全存放、放射性廢棄物最終處置和除役完成後廠址復原的使用，都是社會大眾重視之議題。

因此，本研究核能電廠除役之循環經濟，參考歐盟理事會提出『建立促進永續投資框架規則』，核能電廠除役經濟評估是導入循環經濟之思維，透過除役後產生廢棄物之潛在回收率進行定量分析，從結果得知除役後仍有 42.1% 是短時間無法外釋回收，需要貯存於低放射性廢棄物貯存庫，由於本研究數據是參考除役計畫和環評報告書，當時尚未決定除污方式和執程序，故以嚴謹思維一分為二，確定無涉及任何輻射污染之建材、管線、機械等，才進行回收；就永續分類標準之朝向循環經濟轉型，就本研究認為仍有需要進行更多除污技術的研究以利提升除污效果，加速讓核能除役朝循環經濟轉型的目標。

污染金屬除污技術選擇取決於多個因素，包括污染的性質、分佈情形、劑量高低等，就表面除污而言可以考量研磨消除法、加壓水柱或是研磨料噴射法；對於處理金屬內部深處則是須由化學溶液或是電化學方式；某些情況下，可以使用化學方法來處理深層污染，然後再使用機械方法來清潔表面，結合多種技術以確保可達到外釋標準以便回收再利用。其他廢棄物，避免一次性的耗材使用。若提升污染金屬及其他廢棄物之潛在回收率，必能加速朝核能發電技術循環經濟轉型的目標邁進。

參考文獻

- Joint Research Center(2021). “Technical assessment of nuclear energy with respect to the “do no significant harm” criteria of Regulation (EU) 2020/852 (Taxonomy Regulation)” . Available online: https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/business_economy_euro/banking_and_finance/documents.pdf
- Caldas Neto, A.B. and Silva, A.T.(2023). “Strategies for Decommissioning Small Nuclear Reactors in Brazil” . Nuclear Engineering and Design, 414, 112608.
- Hyun, D., Kim, I., Lee, J., Kim, G.H., Jeong, K.S., Choi, B.S., and Moon, J.(2017). “A methodology to simulate the cutting process for a nuclear dismantling simulation based on a digital manufacturing platform” . Annals of Nuclear Energy, 103, 369-383.
- Vico, A.M., Nogueras, M.C., Rodríguez, L., and Álvarez, A.(2021). “Clearance of building of a former uranium concentrates plant” . Annals of Nuclear Energy, 159, 108313.
- Liu, H., Khan I., Zakari, A. and Alharthi M.(2022). “Roles of trilemma in the world energy sector and transition towards sustainable energy: A study of economic growth and the environment” . Energy Policy, 170, 113238.
- Ramirez-Corredores, M.M., Diaz, L.A., Gaffney, A.M. and Zarzana, C.A.(2021). “Identification of opportunities for integrating chemical processes for carbon (dioxide) utilization to nuclear power plants” , 150, 111450.
- Lim, Y.J., Lee, B.S., Park S.O. and Lee, S.G.(2022). “A study on the clearance waste recycling scenario in the decommissioning of Korea’ s nuclear power plants” . Annals of Nuclear Energy, 178, 109366.
- Konno, T.(1999). “Construction materials for reactor buildings for decommissioning and recycling” . Nuclear Engineering and Design, 192(2-3), 365-380.

- Chang, I.G. and Cheong J.H.(2023). “A new proposal for controlled recycling of decommissioning concrete waste as part of engineered barriers of a radioactive waste repository and related comprehensive safety assessment” . Nuclear Engineering and Technology, 55(2), 530-545.
- Hrncir, T., Strazovec, R. and Zachar M.(2019). “Potential for recycling of slightly radioactive metals arising from decommissioning within nuclear sector in Slovakia” . Journal of Environmental Radioactivity, 196, 212-224.
- Xie, Y.P., Wang, J., Hu, Y.C., Sun, Q., Li, X.B, Wang, S. and Liu G.M.(2023). “Numerical simulation and experiments study on laser ablation decontamination for strontium and cesium from contaminated 316L stainless steels in spent nuclear fuel reprocessing” . Progress in Nuclear Energy, 161. 104760.
- Kurniawan, T.A., Othman, M.H.D., Singh, D., Avtar R., Hwang, G.H., Setiadi, T. and Lo, W.H. (2022). “Technological solutions for long-term storage of partially used nuclear waste: A critical review” . Annals of Nuclear Energy, 166, 108736.
- International Atomic Energy Agency(2004). “Application of the Concepts of Exclusion, Exemption and Clearance, IAEA Safety Standards Series No. RS-G-1.7” . Available online: <https://www.iaea.org/publications/7118/application-of-the-concepts-of-exclusion-exemption-and-clearance>
- 台灣電力股份有限公司 (2021)，核一廠除役計畫。取自於：<https://www.taipower.com.tw/tc/page.aspx?mid=1471>
- Wallbridge, S., Banford, A., and Adisa, A.(2013). “Life Cycle Environmental Impacts of Decommissioning Magnox Nuclear Power Plants in the UK” . The International Journal of Life Cycle Assessment, 18(5), 990-1008.
- Seier, M., and Zimmermann, T.(2014). “Environmental Impacts of Decommissioning Nuclear Power Plants: Methodical Challenges, Case Study, and Implications” . The

International Journal of Life Cycle Assessment, 19, 1919-1932.

World Nuclear Industry Status Report.(2020). 取自於：<https://www.worldnuclearreport.org/-World-Nuclear-Industry-Status-Report-2020-.html>

United States Nuclear Regulatory Commission.(2021). “Final Generic Environmental Impact Statement on Decommissioning of Nuclear Facilities (NUREG-0586)” . 取自於：<https://www.nrc.gov/docs/ML1805.pdf>

林志宏、徐仲彥 (2015)，核能電廠除役作業安全分析之審查技術研究，行政院原子能委員會放射性物料管理局委託研究計畫期末報告。取自於：<https://www.aec.gov.tw/share/file/information>

白寶實、許文勝、李宜娟、楊雋之 (2012)，核能電廠除役計畫審查技術之研究，行政院原子能委員會放射性物料管理局委託研究計畫研究報告。取自於：<https://www.aec.gov.tw/share/file/information/.pdf>

王正忠、張峰榮 (2011)，金屬廢棄物解除管制外釋作業執行實務，台電核能月刊。取自於：<http://archived.chns.org/s.php?page=4&id=34&id2=1804.html>

廢棄物類

資源再生產業在淨零碳排趨勢下的 機會與挑戰

蔡維馨*、羅勻謙**、黃晴澤***、黃群真****

摘 要

「資源循環零廢棄」為實踐淨零碳排的關鍵戰略之一，廢棄資源再利用，可避免增加天然原料開採之溫室氣體排放，減少碳排密集產品之使用，以及減輕廢棄物最終處置對環境所造成之沉重負荷，因此資源再生產業在淨零碳排趨勢下扮演重要角色。本文分享國內資源再生產業發展現況，介紹當前淨零碳排趨勢與國內相關政策發展，並評析資源再生產業在淨零浪潮下所面臨的機會與挑戰，以提供各界參考，期望促進各界採取行動，讓淨零成為資源再生產業競爭力提升的動力。

【關鍵字】工業廢棄物、資源再生產業、淨零碳排

* 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

*** 財團法人台灣綠色生產力基金會

**** 經濟部產業發展署

經理

副理

工程師

科長

一、前言

自工業化以來，人為活動造成之溫室氣體排放量遽增，使得全球平均氣溫因溫室效應而升高，進而造成氣候變遷，並且已對人類及生態環境造成衝擊，其嚴重程度引起各國關注並積極展開淨零碳排相關行動，致力於控制全球升溫幅度在 1.5°C 內，以避免造成不可挽回的傷害。

我國地狹人稠且天然資源有限，為提高資源使用效率，讓資源於產業鏈中循環運用，政府已積極扶植資源再生產業發展，鼓勵產業自主建構資源循環網絡，同時推動循環產業園區發展，迄今在各界共同努力下，工業廢棄物再利用率已超過 80%；於此同時，廢棄資源再生可扭轉線性經濟，並具有溫室氣體排放減量之效益，對於我國響應國際公約實踐淨零碳排目標至關重要。

推動「環境保護」與「經濟發展」雙頭並進為我國產業發展基本原則，在當前淨零碳排趨勢下，政府已將「資源循環零廢棄」列為關鍵戰略，然而我國資源再生產業多屬中小企業，在人力及資源有限條件下，如何發揮資源再生及低碳二次物料減碳優勢，為產業必須面臨之挑戰。

本文分享國內資源再生產業發展現況，介紹當前淨零碳排趨勢與國內相關政策發展，並評析資源再生產業在淨零浪潮下所面臨的機會與挑戰，以提供各界參考，期望促進各界採取行動，讓資源再生產業成為實踐淨零碳排目標的助力，並提升資源再生產業競爭力。

二、工業廢棄物產出及資源再生產業發展現況

依據環境部統計資料顯示，2022 年全國總事業廢棄物產生量為 2,117.8 萬公噸，其中工業廢棄物產生量約 1,835.4 萬公噸，占比高達 86.67%(環境部，2023)。為促進工業廢棄物再利用，經濟部工業局(現改制為經濟部產業發展署)自 2001 年起著手推動「資源再生產業」發展，透過法規制度建立、再利用機構輔導、技術提升輔導、廢棄物交換媒合及資源再生綠色產品認可制度推動等措施，扶持資源再生產業蓬勃發展，迄今資源再生產業由最初 305 家成長至 2,036 家，再利用率也提升至 81.6%(經濟

部產業發展署，2023)，有效轉化產業廢棄物為有價資源，延長資源使用週期及效率。資源再生產業作為循環經濟推動之重要橋樑，以下就其發展現況進行說明。

2.1 資源再生產業發展現況

凡從事以各類可資源化廢棄物為原料，將其再利用為再生產品者，依據「工業及礦業團體分業標準」行業別定義，皆屬廣義資源再生產業之範疇，而依循我國廢棄物管理相關法令之區分，各類從事工業廢棄物資源化之管道，包含：公告再利用、許可再利用、公民營廢棄物處理及共同處理採資源化方式等 4 類管道（如圖 1），皆屬資源再生產業。



圖 1 資源再生產業範疇

依據經濟部產業發展署統計資料顯示，2023 年從事工業廢棄物再利用之資源再生廠家共有 2,036 家，其中 98.2% 為資本額小於新臺幣 1 億元或員工人數少於 200 人之中小企業，大型企業僅占 1.8%，顯示資源再生產業規模較小，需要透過法令或政府扶持其發展。

資源再生產業長期配合政府資源循環零廢棄之政策，協助將廢棄物分類、篩選、加工或提純，將其轉化為再利用產品，並作為材料、燃料或作為其他用途使用。經過

長期推動，資源再生產業再利用國內廢棄物之成效，至 2023 年再利用率已達 81.6%、產值達 798 億元，不僅提升資源循環利用率，並減少最終處置之廢棄物，對國內之經濟及環境效益具有重要貢獻。

2.2 再生物料產銷情形

經統計 2023 年度資源再生產業以產業廢棄物或剩餘下腳料為原料之再利用產品產生量約 9,515.9 萬公噸、總銷售量約 9,454.4 萬公噸，其中以建材類為最大宗（約占 98%），詳細各類產品之生產量、銷售量及產品項目摘要如表 1。另針對產生量較大之「建材類」、「金屬類」、「無機化學品類」、「燃料類」產品，以及「其他類」所涵蓋之再利用產品資源化方式說明如下：

1. 建材類：以廢磚、爐碴等無機廢棄物為原料，透過篩分、破碎等物理程序，產製各類再生粒料，並進一步與水泥拌合產製預拌混凝土或其他水泥製品、與瀝青焦油拌合產製瀝青混凝土；抑或與水泥原料經適當配料、研磨、燒成產製水泥產品。此類產品主要供應國內各式道路工程、土木工程、建築工程及其他工程使用。
2. 金屬類：將金屬廢料、含金屬污泥、廢液等，透過物理、化學或是熱處理等技術，從中回收各類金屬，以提供金屬、化工等行業使用。
3. 無機化學品類：將產業使用化學品後產生之廢液，如廢硫酸、廢酸洗液、廢酸性蝕刻液、廢異丙醇等，以中和、置換、調配、過濾、熱處理等方式，再利用產製硫酸等酸類、硫酸銅、氧化鋅或電子級清洗劑等無機化學品，提供化工、電子業作為原料，或產製氯化鐵、硫酸亞鐵、聚氯化鋁等廢水處理藥劑，以供工廠廢水處理程序使用。
4. 燃料類：因應減煤及轉廢為能政策，將廢木材、廢塑膠混合物、廢纖維混合物等具熱值廢棄物，透過破碎、分選、造粒等程序產製再生燃料，常見為木屑、固體再生燃料 (SRF)，提供給國內具替代燃料需求之造紙、汽電共生、紡織等業者使用。
5. 其他類：將廢輪胎透過熱裂解技術產製碳黑，漿紙污泥經碳化後產製保溫材料，或是將廢油經調整、過濾產生再生潤滑基礎油等其他工業產品，提供國內輪胎、鋼鐵及其他工業使用。

表 1 2023 年資源再生產業產品之產銷情形統計

類別	產生量 (萬公噸)	銷售量 (萬公噸)	產品項目
建材	9,297.5	9,238.4	卜特蘭水泥、高爐水泥、爐石粉、預拌混凝土、控制性低強度回填材料、再生粒料、地磚、紅磚、纖維強化水泥板、紐澤西護欄、鑄砂、陶瓷土粉、耐火材料、石粉等
金屬	69.3	69.3	金、銀、銅、銻、鋅、錫、鉛、鐵、鋼等
無機化學品	58.2	57.6	氧化鋅、硫酸、硝酸、鹽酸、磷酸、硫酸銨、硫酸銅、氯化鐵、硫酸亞鐵、聚氯化鋁、電子級清洗劑等
燃料	38.5	39.1	固體再生燃料、其他燃料(如木屑)、燃料油等
肥料及飼料	16.2	15.9	有機質肥料、魚粉、飼料、飼料添加物
有機化學品	7.5	5.9	甲醇、乙醇、異丙醇、丙酮、丁酮、光阻剝離液等
塑橡膠	4.4	4.2	塑膠片、塑膠粒、再生橡膠、橡膠墊等
民生用品	0.1	0.1	紙張、不織布等
其他	24.2	23.9	碳黑、保溫材料、砂輪、潤滑基礎油等

資料來源：經濟部產業發展署 (2023)，資源再生產業推動及審查管理計畫。
備註：(1) 部分再利用產品依環保法規屬免申報項目，故未納入統計。
(2) 燃料類別產品銷售量大於產生量，表示當年度銷售產品包含前一年度庫存產品。

2.3 再利用減碳案例

1. 案例一：臺灣水泥股份有限公司 (臺灣水泥股份有限公司，永續報告書，2022)

水泥業為國家基礎工業，各項民生建設、公共建設及災後重建，皆需仰賴水泥之穩定供應。由於水泥旋窯製程具高溫 (1,300 °C 以上)、高滯留時間、高擾流的三高特性，能夠完全分解廢棄物中的有機質，並有效地將具熱值之廢棄物轉化為能源，提供熟料燒結所需熱能，進而減少煤炭的使用，而燃燒後之剩餘物質也可作為水泥熟料之部分組成，使得水泥業成為推動循環經濟的重要角色，但另一方面，水泥業於生產原料開採及運輸、製程燃料與電力等能源耗用，以及水泥旋窯高溫鍛燒生產熟料過程分解石灰石等階段會釋放二氧化碳，使其成為高碳排產業之一。

在面臨全球淨零碳排的目標壓力下，臺灣水泥股份有限公司承諾 2050 邁向淨零排放，且為達到此目標，已擬定減少碳排之七大策略，其中替代原料及替代燃料為最有效之減碳方式。目前該公司替代煤炭所用之燃料包括：廢木材、廢油、紡織廢料、固體再生燃料等，2022 年使用替代率達 6.3%；而以廢棄物取代水泥原料部分，2022 年以氟化鈣污泥、氧化鎂脫硫無機性污泥、煤灰、還原渣、廢壓模膠、廢陶瓷、廢耐火材及焚化再生粒料等取代原料比例達 22%，不僅可達減碳目的，亦協助去化其他產業廢棄物。有關臺灣水泥股份有限公司之循環經濟模式如圖 2(臺灣水泥股份有限公司，永續報告書，2023) 所示。

此外，臺灣水泥股份有限公司生產的卜特蘭 I 型水泥已取得環境部減碳標籤，同時正在開發低碳水泥，其相較卜特蘭 I 型水泥減碳達 15~30%；另針對使用低碳水泥所配製之低碳混凝土，相較一般混凝土亦有減碳 10~15% 之效益。

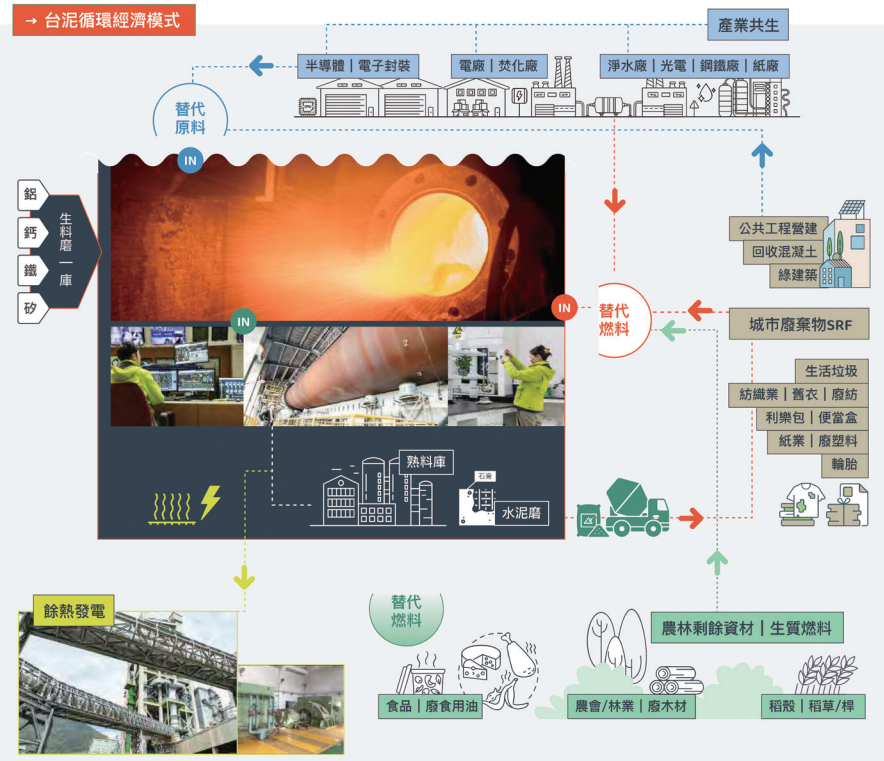


圖 2 臺灣水泥股份有限公司循環經濟模式示意

2. 案例二：永豐餘工業用紙股份有限公司

造紙業屬高耗水、高耗能產業之一，身為造紙業龍頭的永豐餘工業用紙股份有限公司一直在尋找有效的廢水處理及節能減碳措施。首先，在處理紙張回收而產生之高濃度有機質製程廢水方面，該公司於新屋廠設置國內規模最大之厭氧沼氣發電系統，透過運用不同菌種，將水體有機物分解、轉化成沼氣，再透過內燃機及發電機轉化為電能，並將餘熱回收後產生蒸汽，供給造紙製程使用。

該系統產生之甲烷純度超過 80%，總裝置容量約為 5,200KW，每年最大發電量約 4,200 萬度，相當可供應 1.2 萬戶住宅用電（天下雜誌，2023）；於此同時，永豐餘工業用紙股份有限公司藉由厭氧沼氣發電取代燃煤發電，每年可減少溫室氣體排放量約 4.1 萬公噸。（永豐餘工業用紙股份有限公司，2022）

此外，因永豐餘工業用紙股份有限公司 80% 以上碳排來源為製程或設施之直接排放，如何減少化石燃料使用即為減碳關鍵的一步。因此，該公司於新屋廠設置全台首座零燃煤汽電共生鍋爐，以固體再生燃料替代化石燃料，該鍋爐每小時能產生 70 公噸蒸汽或產生 9,500 度電力，一方面解決紙張回收製程衍生之高熱值廢棄物，同時每年可減少約 8.8 萬公噸化石燃料（燃煤）使用量。（永豐餘工業用紙股份有限公司，2022）



圖 3 永豐餘工業用紙股份有限公司新屋廠沼氣設備

3. 案例三：長春石油化學股份有限公司

電子產業中常用之特用化學品包含異丙醇、顯影劑及光阻剝離劑，經查科學園區電子零組件製造業於 2022 年之異丙醇廢液、顯影劑廢液、光阻稀釋劑廢液產生量分

別為 10.8 萬公噸、8.7 萬公噸及 0.4 萬公噸 (環境部資源循環署，2023)。近年半導體產業規模持續擴張，先進製程占比逐漸提升，特用化學品需求量必定逐年提高，同時衍生廢棄物產出量亦將同步增加。

隨著化學品純化技術發展，目前國內已有多家資源再生業者將異丙醇廢液、顯影劑廢液、光阻剝離液廢液等產製為符合工業級或電子級之再生異丙醇、顯影劑及稀釋劑，實現化學品循環利用並開拓綠色經濟，而長春集團即為積極投入業者之一。

該集團旗下之長春石油化學股份有限公司已取得經濟部核發之異丙醇廢液、四甲基氫氧化銨 (TMAH) 顯影劑廢液、光阻剝離液廢液之通案再利用許可資格，透過純化技術，將上述廢液產製為工業級產品或電子級化學品 (長春集團，2022)。此外，因應半導體領航業者對於異丙醇製程封閉循環使用之規劃，該公司已進駐中部科學園區零廢中心，未來將把半導體業者所產出之廢異丙醇純化為電子級異丙醇後，再送返半導體製程使用。

長春集團 2022 年收受約 3 萬公噸 TMAH 廢液、4 萬公噸異丙醇廢液及 2,000 公噸光阻稀釋劑廢液 (長春集團，2021；長春集團，2022)，其中再生異丙醇相較新品異丙醇可減少約 54% 碳排放量 (環境部資源循環署，2023)；若以 2022 年科學園區電子零組件業之異丙醇廢液產生量 10.8 萬公噸，以及電子級再生異丙醇回收率 15% 進行估算，減碳效益約可達 1.3 萬公噸二氧化碳當量。

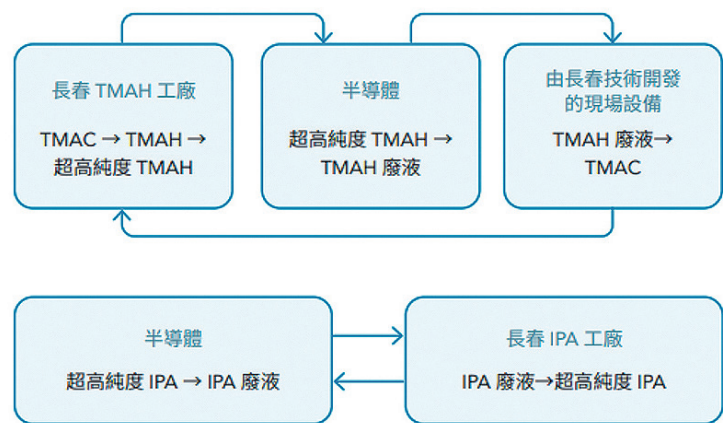


圖 4 長春集團之 TMAH 廢液及異丙醇廢液循環經濟模式示意

4. 案例四：環拓科技股份有限公司 (中小型資源再生產業推動淨零碳排輔導計畫，2022)

我國汽機車數量規模龐大，基於行車安全，輪胎成為定期需汰換之物品，進而衍生每年約產生 15 萬公噸之廢輪胎。由於廢輪胎不易清除、處理，且在自然環境下不易分解，因此，環境部已將其公告為強制應回收物品項目。

環拓科技股份有限公司具備成熟之熱裂解技術，可將廢輪胎轉化成環保碳黑及裂解油，其中環保碳黑可作為橡膠的補強劑使用，並應用於輪胎製造；另經估算，生產每公噸碳黑需使用 2 公噸原油，並產生 2.6 公噸二氧化碳當量，而生產每公噸環保碳黑僅產生 0.9 公噸二氧化碳當量，其相較傳統碳黑約可減少 65% 之碳排量。因此，在淨零碳排趨勢下，國內輪胎製造商已積極導入使用環保碳黑，其亦已成為輪胎產業構建低碳產業鏈不可或缺之重要材料。有關環拓科技股份有限公司之循環經濟模式如圖 5 所示。

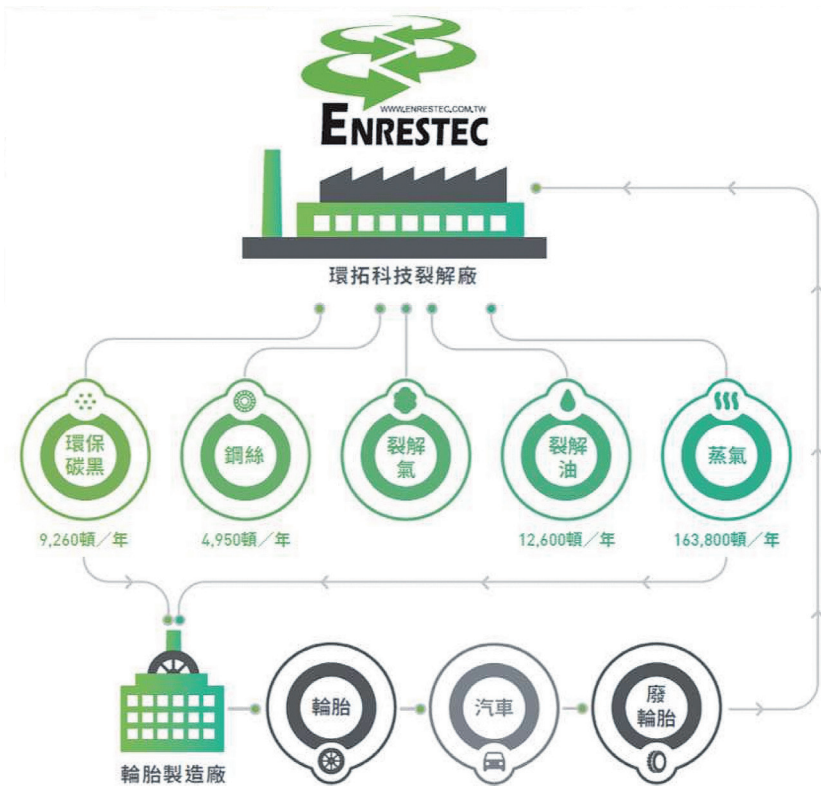


圖 5 環拓科技股份有限公司循環經濟模式示意

三、淨零碳排趨勢及國內政策發展

3.1 淨零碳排趨勢

政府間氣候變化專門委員會 (Intergovernmental Panel on Climate Change，以下簡稱 IPCC) 於 1990 年發表第一次氣候變遷評估報告，表示確信人類活動正在大幅增加大氣溫室氣體濃度，造成全球暖化。隨著地表氣溫上升，將導致氣候改變、加劇極端天氣現象、海平面上升、損害生態系統等重大負面影響，進而威脅人類生命財產及自然生態。

基於上述報告基礎，為因應溫升導致之全球性氣候變遷危機，聯合國於 1992 年通過「聯合國氣候變化綱要公約」(United Nations Framework Convention on Climate Change，以下簡稱 UNFCCC)，對人為溫室氣體排放提出防制協議，並定期召開締約方大會 (Conference of the Parties，簡稱 COP) 協商及確立應對氣候變化的全球行動。

由於各會員國普遍未認真執行減量，促使 1997 年 UNFCCC 第三次締約國大會通過具約束力之「京都議定書」(Kyoto Protocol，2005 年 2 月 16 日生效)，明確規範 38 個工業國家及歐洲聯盟已開發國家的減碳責任，目標在 2008 年至 2012 年間，將其溫室氣體排放量降至 1990 年平均排放水準再減 5.2%。

2014 年 UNFCCC 第 20 次締約國大會通過「利馬氣候行動呼籲」(Lima Call for Climate Action)，決議各國於 2015 年第 21 次締約國大會前提交「國家自定預期貢獻」(Intended Nationally Determined Contribution, INDC)，以作為接替「京都議定書」新協議的基礎。隨後 2015 年 12 月 UNFCCC 第 21 次締約國大會通過具約束力之「巴黎協定」(Paris Agreement，2016 年 11 月 4 日生效)，要求簽署國以每五年為一週期提交自主貢獻 (Nationally Determined Contributions，簡稱 NDCs)，即自願性的減排承諾和行動計劃，目標讓升溫幅度控制在與前工業時代相比最多 2°C 內；另與京都議定書不同的是，本協定將減排義務擴及至中國大陸與印度，以及要求已開發國家提供氣候變遷資金，協助開發中國家減少溫室氣體排放，並有能力應對氣候變遷帶來的後果。批准巴黎協定之簽署國碳排總量達全球碳排量 55% 以上，顯示各國遏阻全球暖化趨勢的決心。

儘管如此，2018 年 IPCC 報告指出，全球升溫幅度必須控制在工業化前平均水準的 1.5 °C 內，並於 2050 年達成淨零排放 (Net-zero emission)，才能避免溫室效應對全球自然環境造成不可挽回的傷害，促使 2021 年 UNFCCC 第 26 次締約國大會因應氣候緊急，通過「格拉斯哥氣候決議」(Glasgow Climate Pact)，各締約方同意加快行動，除重申巴黎協定目標外，並將致力控制升溫在 1.5 °C 內，並於 2050 年達到淨零排放，同時 2030 年二氧化碳排放量相對 2010 年應減少至少 45%，以減緩氣候變遷衝擊。2022 年 UNFCCC 第 27 次締約國大會，重申控制升溫 1.5 °C 的重要性，進一步督促落實，且締約國首次同意設立基金，賠償氣候脆弱國家因氣候變遷造成的損失及損害。

根據牛津大學開發出的淨零追蹤器網站 (Net Zero Tracker) 出具 2023 年報告書 (New Climate Institute, Oxford Net Zero, Energy & Climate Intelligence Unit and Data-Driven EnviroLab, 2023) 顯示，提出淨零排放相關承諾之國家、地區、城市及企業皆逐年增加，如圖 6；此外，截至 2023 年 4 月 2 日，全球已經有 149 個國家、159 地區、268 個城市及 1,088 家企業提出淨零排放相關承諾，涵蓋範圍達全球 88% 溫室氣體排放、92% GDP 與 89% 人口，另已將淨零目標納入法律規範者有歐盟及其他 17 個國家，淨零碳排發展趨勢可見一斑。以下針對國際大國及聯盟相關政策趨勢摘要如下，並彙整歐盟及其他國家淨零宣示及目標如表 2 所示：

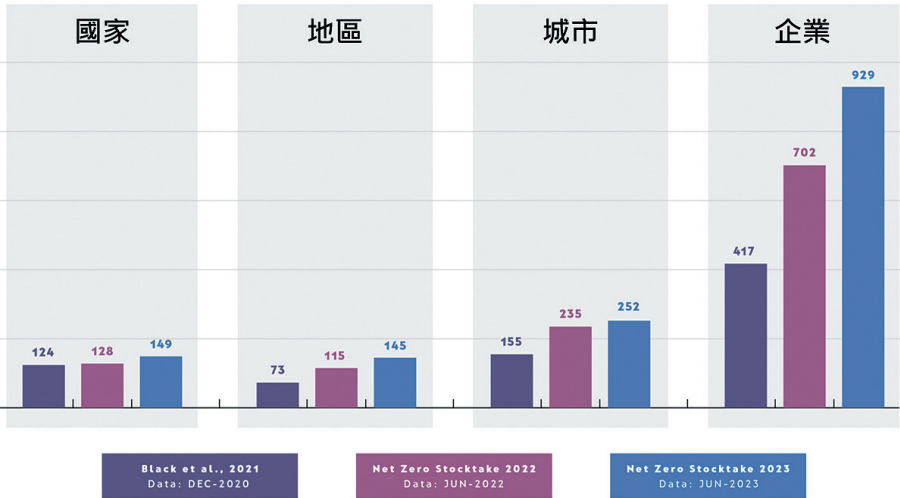


圖 6 淨零承諾目標數量變化趨勢

1. 歐盟

2019 年歐洲理事會批准 2050 年實現氣候中和目標及公布「綠色政綱」(又稱綠色新政)(European Green Deal)，其涵蓋「推動循環經濟」在內之八大構面，詳如圖 7 所示 (王彬墀、周麗芳、盧芬絹，2022)，並以此作為達成 2050 年氣候中和的藍圖。另歐盟於 2021 年通過「歐盟氣候法」(Regulation (EU) 2021/1119 establishing the framework for achieving climate neutrality，European Climate Law)，明定 2030 年與 1990 年相比減少至少 55% 的溫室氣體排放，並於 2050 年實現氣候中和，歐盟續而採取多項政策工具，包含碳邊境調整機制 (Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM)、能源稅指令 (Energy Taxation Directive, ETD)、再生能源指令 (Renewable Energy Directive, RED)、永續燃料政策等。

此外，歐盟執委會於 2023 年 2 月 1 日提出「綠色新政產業計畫」(Green Deal Industrial Plan)，加速淨零產業轉型，並積極與其他國家建立合作關係，共同開發淨零排放技術、推動供應鏈多樣化、加強供應鏈 (謝汎琪、古慧雯，2023)。此外，歐盟於 2023 年 3 月 16 日公布「淨零產業法案」(Net-Zero Industry Act)，目的為加強歐洲淨零技術的製造能力，並鎖定太陽能、陸地和離岸風能、電池和儲能、碳捕捉和封存、核能 .. 等 17 項關鍵科技進行投資，以提升歐盟淨零技術製造的韌性和競爭力，並防止對中國大陸等第三國的依賴。

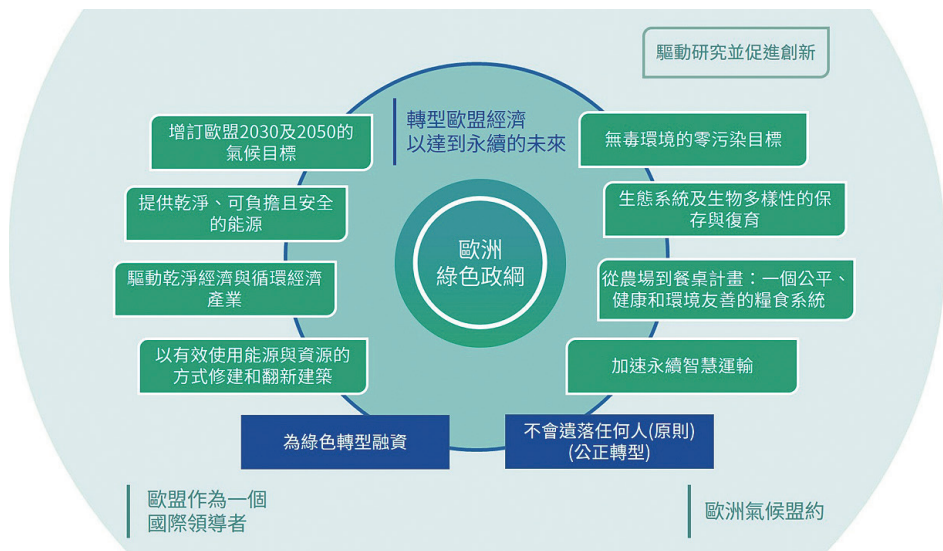


圖 7 歐洲綠色政綱架構

2. 美國

拜登總統就任首日宣布重返巴黎協議，並採取措施以應對氣候危機。2021 年 11 月公布「2050 邁向淨零排放之路：美國長期策略」(The Long-Term Strategy of the United States: Pathways to Net-Zero Greenhouse Gas Emissions by 2050)，著重能源、運輸、建築及工業製程四大部門減量，承諾 2050 年達到淨零排放。目前美國由地區自行制定相關規範，主要區域性倡議有「區域溫室氣體倡議 (RGGI)」及「運輸及氣候倡議計畫 (TCIP)」，前者共計 11 個州加入，主要規範電力業之排放，目標於 2030 年排放量相較 2020 年減少 30%。

此外，美國於 2022 年 6 月提出「清潔競爭法案 (Clean Competition Act)」，用以限制石油產品、鋼鐵、水泥、化肥等高碳排初級產品的製造與進口，以美國行業平均排放強度為基礎課徵碳稅，碳含量超過基準者，將對超出部分徵收 55 美元 / 公噸的碳稅，最快將於 2024 年實施。此外，由於資訊揭露為降低碳排放的重要基礎工具，美國加州亦於 2023 年 9 月通過「氣候企業資料課責法」(the Climate Corporate Data Accountability Act, Senate Bill No. 253, SB 253)，又稱為「最強氣候揭露法案」，要求在加州開展業務且年收入超過 10 億美元之企業，必須每年公開前一財務年度的範疇 1、範疇 2 及範疇 3 之溫室氣體排放量 (康昱涵，2023)，由於揭露範圍涵蓋範疇 3 之排放量，未來業者勢必向其供應鏈廠商提出排放數據之需求甚至要求，進而施以碳管理壓力。

3. 日本

2020 年 10 月宣示 2050 淨零排放目標，2021 年 10 月 22 日修正「地球溫暖化対策推進法」，提出 2050 碳中和與 2030 路徑。日本公布的淨零排放策略包括 5 項跨部門政策工具和針對 14 個部門的行動計畫，其中 2021 年 6 月 8 日針對 14 個行業領域提出「2050 碳中和綠色成長戰略」修訂版，將減碳挑戰轉變為驅動經濟轉型的契機，相關措施包含創設綠色創新基金提供企業融資補助、提供投資抵減與優惠稅率等以鼓勵企業生產與研發綠色商品、建立標準化規範讓該國企業研發生產的技術或產品可行銷全球 (鄧凱方，2021)。另針對資源循環產業部分，其綠色成長戰略相關推動策略包含提高生物質材料功能及擴大用途、開發回收技術及高性能材料、推動垃圾發電及熱能利用技術發展等 (日本經濟產業省，2023)。

此外，由於日本約 90% 溫室氣體排放量與化石能源使用有關，故於 2012 年 10 月起實施碳稅 (Carbon Dioxide Tax of Global Warming Countermeasure)，針對汽油、天然氣及煤炭等化石能源進行課稅，以作為溫室氣體減量手段。

4. 中國

中國為全球最大溫室氣體排放國，但在京都議定書中，因非屬規範需控制人為排放溫室氣體數量之表列國家，因此在 UNFCCC 下的國際氣候談判中，無義務提供氣候資金，亦不需要根據公約進行有約束力的減排行動。2014 年中國與美國發布中美氣候變化聯合聲明，將加強雙邊合作，攜手達成 2015 年適用於所有締約方之協議，並續於 2015 年 6 月 30 日提交 INDC，承諾 2030 年達到峰值碳排放量。同時，中國是最早批准巴黎協定的主要國家之一，並宣示將於 2060 年達到碳中和目標。

中國國務院 2016 年發佈「十三五節能減排綜合工作方案」及「十三五控制溫室氣體排放工作方案」，明確節能減排與溫室氣體排放控制目標、任務及各部門分工，且為加速經濟社會全面綠色轉型，續於 2021 年 12 月 28 日發佈「十四五節能減排綜合工作方案」，聚焦「重點產業（鋼鐵、有色金屬、建材、石化化工）綠色升級」、「園區節能環保提升」、「城鎮綠色節能改造」、「交通物流節能減排」、「農業農村節能減排」、「公共機構能源效率提升」、「重點區域污染物減量」、「煤炭清潔高效率利用」、「揮發性有機物綜合整治」、「環境基礎設施水準提升」等十大工作，分別明定重點任務，目標於 2025 年國內生產總值能源消耗相較 2020 年下降 13.5%，同時減少主要污染物排放總量。其中重點產業綠色升級部分，除推動產業清潔生產外，以鋼鐵業為例，亦鼓勵將一貫作業之長流程煉鋼轉型為短流程之電弧爐煉鋼（中華人民共和國國務院，2021）。

表 2 歐盟及其他國家淨零宣示及目標

國別	歐盟	美國	日本	中國
法案	2021 年通過氣候法	—	2021 年 10 月修正地球溫暖化對策推進法	—
宣示淨零時間	2019 年 (歐洲理事會批准)	2021 年 4 月 (拜登總統於第 26 屆世界領導人氣候峰會宣示)	2020 年 10 月	2020 年 9 月
NDC 目標 (2030 年)	較 1990 年減量 55%	較 2005 年減少 50-52%	較 2013 年減量 46%，並以 50% 為目標	較 2005 年降低 65% 以上
淨零目標	2050 年實現氣候中和	2050 年達成淨零排放	2050 年達成碳中和	2060 年達到碳中和

3.2 國內淨零碳排政策發展

氣候變遷的影響是全球性的，台灣雖非聯合國會員及 UNFCCC 締約國，但根據國際能源總署 2021 年數據，台灣人均年排碳 10.77 公噸，排名世界第 19 名，具有相當減碳責任，且因屬海島型國家及外貿國家，容易受到氣候變遷影響，且在氣候外交、供應鏈要求下，勢必要積極面對減碳議題，加入國際淨零排放行列。

基於此，我國依據公約精神，呼應氣候變遷全球行動，於 2015 年訂定公布「溫室氣體減量及管理法」，並納入國家溫室氣體長期減量目標及檢討調整機制，明定 2050 年溫室氣體排放量降為 2005 年溫室氣體排放量 50% 以下，且中央主管機關應擬訂國家因應氣候變遷行動綱領及溫室氣體減量推動方案，報請行政院核定後實施，中央目的事業主管機關則應訂定所屬部門溫室氣體排放管制行動方案，合力推動減碳行動。

此外，呼應巴黎協定，國家發展委員會於 2022 年 3 月 30 日公布「2050 淨零排放路徑及策略」，在「能源、產業、生活、社會」等四大轉型及「科技研發」、「氣候法制」兩大治理基礎上，輔以「十二項關鍵戰略」來整合跨部會資源，並於 2022 年 12 月 28 日制定發布「淨零轉型十二項關鍵戰略行動計畫」，如圖 8 所示 (國發會，2022)。其

中，關鍵戰略之一的「資源循環零廢棄」，由環境部資源循環署訂立永續生產與消費、提升資源使用效率、加值化處理廢棄物等 3 大主要目標，提出綠色設計源頭管理、能資源循環利用、廢棄物量能平衡與管理等 3 大循環策略，以及暢通循環網絡、創新技術與制度等 2 大驅動支柱，藉以落實淨零轉型之目標，前述資源循環零廢棄施政主軸如圖 9 所示（環境部，2023）。

同時，我國於 2015 年提出 INDC，設定 2030 年溫室氣體淨排放量為依現況發展趨勢推估情境減量 50%，相當於以 2005 年作為基準年排放量再減 20%，2022 年更新後的國家自定貢獻承諾，強化減量目標，到 2030 年與參考年相比，排放量減少 23% 至 25%，加強減量企圖心並努力實現 2050 年淨零排放目標（環境部氣候變遷署）。

另在「氣候法制」治理基礎上，為提升因應國際減碳作為及建構氣候變遷調適之能力，於 2023 年 2 月 15 日將原「溫室氣體減量及管理法」修正為「氣候變遷因應法」，明定 2050 年淨零碳排目標，使我國成為全球第 18 個將淨零排放目標入法的國家。環境部於氣候變遷因應法發布後，便參酌國際公約決議事項及國情變化，檢討擬定第二版國家因應氣候變遷行動綱領，並於 2023 年 11 月 3 日經行政院核定，其基本原則遵循巴黎協定促進減緩溫室氣體排放，推動綠色金融及碳定價機制，優先實施碳費徵收，逐步降低化石燃料及訂定再生能源發展目標外，且將致力提高資源與能源使用效率，促進資源循環使用，確保國家能源安全及資源永續利用。



圖 8 臺灣淨零轉型十二項關鍵戰略

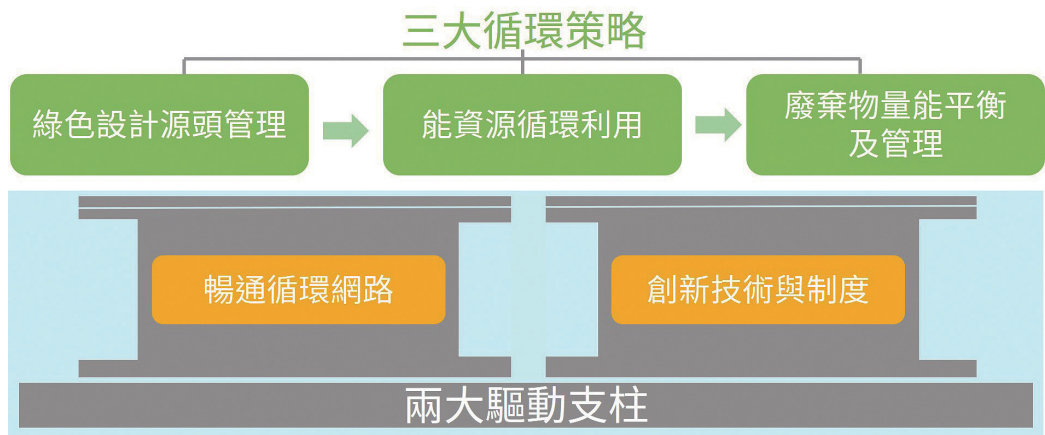


圖 9 資源循環零廢棄施政主軸

四、資源再生產業的機會與挑戰

全球產業在面臨氣候變遷的挑戰下，開始以循環經濟作為產業永續發展之重要路徑。在此趨勢下，資源再生產業可透過由廢棄資源轉化為二次物料，供應其他產業邁向低碳轉型或循環經濟所需要的資源，協助產業加速因應法規、採購準則、供應鏈要求或是自願性協議等。資源再生產業已是發展低碳路徑及循環經濟不可或缺的一環，評估其具備之潛在機會與面臨挑戰如下：

4.1 資源再生產業的機會

資源再生產業在淨零碳排趨勢下的機會，主要可從 3 個觀點說明：

1. 二次物料需求及使用量增加

循環經濟概念提出後，歐盟執行委員會於 2015 年「歐盟循環經濟行動計畫」、2019 年「綠色新政」、2020 年「新循環經濟行動計畫」等，皆將使用二次料作為重要的推動策略；爾後，又進一步於 2018 年之「循環經濟塑膠策略」或是 2023 年通過「新電池法」等，更積極、明確訂定使用回收料目標或禁用不可回收材料目標等，加速廢棄塑膠或電池材料之循環利用。除歐盟外，包括我國、美國等皆訂有使用再生料目標。以塑膠再生料為例，到 2030 年，全新塑膠製品中消費後回收塑膠 (Post-Consumer

Recycled material, PCR) 比例，在歐盟是 30%，美國加州規定寶特瓶須達 50%，我國非填充食品之塑膠再生商品之自願性使用塑膠再生料則是 30%；至於電池部分，歐盟新電池法規明定新電池使用再生材料的最低比例，至 2031 年至少應為鈷 16%、鉛 85%、鋰 6%、鎳 6%，且逐步提高。前述措施大幅提升二次料使用需求，帶動二次料市場商機。

除政府措施外，許多國際品牌大廠，如 Apple 為呼應永續發展，推動零碳、零廢棄物及零掩埋目標，自願性逐年擴大使用再生材料或再生能源，其中所使用再生材料包括我國業者所生產之金、錫、鎢等材料；另外像是紡織供應鏈，也受到品牌商 Nike、Addias、The North Face 等要求，使用再生纖維、再生皮革等製成運動衣、機能服、球鞋等戶外用品，顯示使用再生材料、再生產品不再是特殊案例，產業已將再生材料納為優先且必要採購及使用之材料，且比重持續攀升。

2. 再生產品有利減少供應鏈產品碳足跡

一般而言，產業於生產、製造、營建等過程皆會產生下腳料或廢棄物，此類下腳料或廢棄物因其仍具材料特性，可進一步被資源再生產業加工、再製為產業可使用之二次物料，且品質亦符合應達之標準。在此過程中，資源再生產業所產製之二次物料，相較原材料於原料取得階段減少開採、提煉過程之溫室氣體排放量，部份亦減少國外至國內長途運輸之溫室氣體排放量，使得產品碳足跡可大幅下降，而被視為低碳產品。

一般而言，在計算產品碳足跡時，需考量「原物料取得」、「製造」、「配送銷售」、「使用」及「廢棄」等五大產品全生命週期階段之溫室氣體排放。以金錠產品為例，一般需由國外礦場開採金礦及冶煉後，再運至我國用於印刷電路板或電子產品製造，而資源再生業者只需自國內含金廢料中回收金屬，故計算「再生金錠」的碳足跡時，原物料取得及其運輸之溫室氣體排量較低，使得再生金錠碳足跡低於原生金錠。

企業面臨低碳轉型時，勢必優先自製程之耗能設備、效率提升等進行改善，但隨著減碳目標日趨嚴峻，當重大的改善措施完成後，下一步減碳空間在哪？這時，便需綜合考量企業生產之各環節，而資源再生產業可供應低碳產品，減少供應鏈廠商於原物料取得階段之碳排放量，協助產業達成減碳。

3. 法規或供應鏈要求納入範疇三間接溫室氣體排放計算

企業在計算溫室氣體排放時，主要依循「ISO 14064-1 溫室氣體盤查標準」，其中一項較令產業頭痛的部分為範疇三間接溫室氣體排放量的量化，但其將是未來趨勢。範疇三間接溫室氣體排放量係指非企業內部產生，而是來自上、下游排放，如供應鏈原料、原料運輸、員工通勤、設備租賃、廢棄物處理，以及產品銷售使用、產品運輸、投資等，大多非企業直接控制的項目，如原料部分需取得上游供應鏈產品碳足跡，再與實際採購量計算範疇三之原料溫室氣體排放量。隨著越來越多資料顯示，範疇三的溫室氣體排放量佔企業整體排放量之大宗，顯示具減量重要性，並進一步影響供應鏈減碳行動。

目前法規尚未強制要求量化範疇三排放量，但全球領先企業如 Apple、台積電、華碩等，早已關注供應鏈減碳議題，積極佈局供應鏈碳管理措施，例如要求供應鏈廠商提出溫室氣體排放數據，建立材料碳排放資料庫，進一步訂定減碳目標及納入採購指標，建立低碳供應鏈。在法規面，2023 年美國加州提出 SB 253 法案，要求 2026 年企業須揭露範疇一、範疇二溫室氣體排放量，至 2027 年則須進一步揭露範疇三間接溫室氣體排放量，且範疇三至 2030 年須達有限保證等級；此法案對於未揭露溫室氣體排放量之企業訂有行政處分 (50 萬美元)，且受管制的企業包括 Google、Apple、Walmart 等跨國品牌，表示全球供應鏈業者皆將受到直接衝擊，範疇三間接溫室氣體揭露已是未來趨勢。

當企業將碳排納為採購評估指標時，表示低碳產品具有較大的利基，而前面所提到二次物料具備低碳特性，則是資源再生產業之機會。資源再生產業除專注於本業外，應配合供應鏈範疇三間接溫室氣體排放量揭露之需求，建立溫室氣體排放量數據，並運用政府提供之低碳診斷輔導，進行企業體質調整及加強碳管理能力。雖然資源再生產業非我國法規要求應申報碳盤查資料之業者，但應敞開心胸，即早建立碳排放基線資料及針對排放熱點減碳，才可乘著低碳浪潮轉型及打入關鍵供應鏈，將壓力化為企業永續發展之助力。

4.2 資源再生產業挑戰

艾倫·麥克亞瑟基金會 (Ellen MacArthur Foundation) 研究報告 (EMF, 2019) 指出，全球碳排總量 55% 來自能源，可透過再生能源及能效提升減低碳排；其餘 45% 排放來自產品製造有關；此外，來自產品製造有關之碳排，以食物、鋼鐵、水泥、塑膠、鋁等 5 大關鍵領域產品占大宗，其約 45% 減碳量必須仰賴循環經濟達成淨零排放最後一哩路，顯示資源再生產業對於淨零碳排具相當重要性。但我國在推動資源再生碳排減量及推廣低碳資源再生二次物料過程中，仍有面臨下列挑戰，必須予以重視及協助產業克服，俾利實踐國家淨零目標。

1. 再生技術有待升級

國內資源再生產業所採用之資源化技術，仍多為低階物理處理程序，產品價值多不高，且除控制性低強度回填材料 (CLSM) 等工程材料外，部分具潛在高價值之化學品再生二次料僅屬中間原料，尚需輸出精煉再製，始可供製造業作為原料使用，例如：廢鋰電池現採簡易拆解、破碎、篩分處理，其中有價黑粉（正負極混合粉體）仍輸出國外，尚無法於國內再生為碳酸鋰供電芯製造，故有必要扶持國內業者提升加工技術及深度。因此，針對重點發展產業之關鍵物料，建議加強建構技術研發中心，建立核心資源再生技術及推動產業研發聯盟，並由政府提供資源再生研究、設備相關投資抵減之獎勵措施，營造有利技術研發創新之環境，俾利關鍵資源留存國內運用，同時提高資源再生產業競爭力。

2. 基礎碳管理能力欠缺

我國資源再生產業高達 98.2% 為中小企業，人力及資源相較缺乏，難以掌握目前國家淨零政策及減碳趨勢，即便遭受供應鏈客戶要求，亦不易推動自主碳管理與進一步減碳措施；另一方面，屬中小型資源再生產業之溫室氣體排放量相較動脈產業低，且多非屬「氣候變遷因應法」列管對象，廠商對於碳管理及低碳轉型意識低、意願也不高，即便政府投入輔導資源，仍不易推動，造成資源再生產業普遍缺乏碳管理能力，且難以進一步投資導入減碳措施。有鑑於資源再生產業行業特性，廠商多僅關注資源再生相關法規動態及參與相關活動，故可將碳管理輔導資源結合資源再生法令宣導說明會進行推廣，以提升業者參與意願，進而接受輔導及建構基礎碳管理能力。

3. 減碳效益未被看見

艾倫·麥克亞瑟基金會 2022 年發表的專題文章提到，全球輪胎生產使用的碳黑，只有不到 1% 來自回收的報廢輪胎，然而與原生材料相比，在新輪胎生產中使用再生碳黑最多可減少 85% 的二氧化碳排放量，由此可知，使用資源再生產業生產之二次物料，可減少原生物料使用及其於製造過程或交通運輸之能耗，對於減碳具有貢獻。由我國推動資源再生產品應用實務上，可發現資源再生產業因欠缺碳管理能力，以至於鮮少量化產品碳足跡，從而缺乏資源再生產品減碳效益資訊。因此，推動資源再生二次物料減碳效益可視化，可為未來政府推動之重點，以利動脈產業於擇定原物料時可優先採購具減碳效益之資源再生二次物料。

4. 循環加工碳排需減量

丹麥玩具大廠樂高 (LEGO) 生產的積木，主要由丙烯腈丁二烯苯乙烯 (ABS) 塑膠製作，該公司曾承諾，2030 年將採用可持續性材料取代石油基塑膠材料，並於 2021 年啟動回收寶特瓶製造積木計畫，卻因製程能耗及碳足跡太高，不符其減碳目標，故而宣告失敗 (Jem Bartholomew, 2023)。由前述案例可知，資源再生產業以廢棄物為原料之製造加工程序未必減碳，故尋求低碳製程及導入製程減碳相當重要，必要時必須對基礎設施、技術或製程改善等研究及導入投入大量資金，此對於資本額較低的中小型資源再生產業而言，也將是一個障礙，必須由政府提供相關補助或綠色融資等經濟面誘因，協助企業推動及落實低碳轉型，甚至導入數位化或自動化，進而提供低碳資源再生二次物料，俾利後端供應鏈製造業降低生產產品碳足跡。

5. 法規阻礙製程升級

現行廢棄物清理法中，涉及事業廢棄物再利用運作，依各部會再利用管理辦法規定，非屬公告再利用種類及管理方式者，則需申請再利用許可。由於事業研發優化資源再生技術、製程時，於落地前必須經過模組試驗，惟受限既有法規，必須為已設置完成之製程設備始能提出相關再利用資格申請，並於申請核准後始能取得廢棄資源料源進行測試，不利產業升級轉型及開發低碳製程。當前環境部刻正研議訂定「資源循環促進法」(草案)，支持基於研究、技術發展、設備測試等目的，提供廢棄資源料源取得之簡化程序，俾利促進資源再生產業升級及轉型。

五、結語

全球產業在面臨氣候變遷的挑戰下，已開始由低碳技術發展及轉化為循環經濟型態，以邁向淨零碳排及永續發展目標。同時，資源再生產業也面臨前所未有蓬勃發展，產業對於二次物料需求與日俱增，各種循環經濟標準也讓資源再生產業有了明確的角色及定位。

因此，我國的資源再生產業，除奠基於過去推動廢棄物再利用的基礎上，更應利用資源再生產業所生產二次物料於原物料取得具有較低碳排之特性，及整體環境對揭露供應鏈範疇三碳排資訊之需求，搶先建立碳管理能力及推動低碳轉型，提供產業需求之低碳二次物料，共同促成供應鏈減碳目標。透過掌握低碳商機，導入智慧、高效及創新之技術及應用，帶動資源再生產業發展，並運用長期於廢棄物循環利用之經驗，整合動脈產業，塑造更為健全及創新之循環經濟系統，使企業、供應鏈、整體社會、環境得以永續發展。

參考文獻

天下雜誌 (2023)，「沼」到新出路，永豐餘轉廢為能打造低碳產業鏈。

中華人民共和國國務院 (2021)，國務院關於印發“十四五”節能減排綜合工作方案的
通知，https://www.gov.cn/zhengce/content/2022-01/24/content_5670202.htm。

王彬墀、周麗芳、盧芬絹 (2022)，2050 淨零排放新思維解析《歐洲綠色新政》，科學
月刊，487 期，<https://www.scimonth.com.tw/archives/5801>。

日本經濟產業省 (2023)，全球暖化對策 / 綠色成長策略 / 資源流通相關產業，https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/ggs/13_shigenjunkan.html。

永豐餘投資控股股份有限公司 (2022)，永豐餘永續報告書。

環境部 (2023)，111 年事業廢棄物申報量統計報告。

長春集團 (2021)，長春集團永續報告書。

長春集團 (2022)，長春集團永續報告書。

長春集團 (2023)，長春集團永續報告書。

康昱涵 (2023)，美國加州最強氣候揭露法案 SB-253 如何要求企業揭露碳資訊？，
<https://rsprc.ntu.edu.tw/zh-tw/m01-3/en-news/1825-sb-253.html>。

國立臺灣大學風險社會與政策研究中心 (2023)，美國加州最強氣候揭露法案 SB-253 如何要求企業揭露碳資訊？。

國發會 (2022)，淨零轉型之階段目標及行動簡報。

經濟部產業發展署 (2023)，資源再生產業推動及審查管理計畫，112 年度期末報告。

經濟部產業發展署 (2023)，中小型資源再生產業推動淨零碳排輔導計畫，112 年度期末報告。

資誠企業永續發展新訊 (2023)，淨零趨勢下 供應鏈溫室氣體範疇三的挑戰！

臺灣水泥股份有限公司 (2022)，台灣水泥永續報告書。

臺灣水泥股份有限公司 (2023)，台灣水泥永續報告書。

鄧凱方 (2021)，日本 2050 年實現碳中和的綠色成長策略，科技發展關鍵平台 / 科技議題，<https://outlook.stpi.narl.org.tw/index/topic?type=E>。

謝汎琪、古慧雯 (2023)，歐盟綠色新政產業計畫及相關法案，科技發展關鍵平台 / 焦點報導，<https://outlook.stpi.narl.org.tw/index/focus-news>。

環境部資源循環署 (2023)，金屬化學品循環資訊平台及減碳效益評估計畫成果報告。

環境部資源循環署 (2023)，推動塑膠再生商品，攜手共創綠色循環。

環境部氣候變遷署，中華民國 (臺灣) 更新版國家自定貢獻，<https://www.moe.gov.tw/cca/D2B61B18C99F9C47>。

環境部 (2023)，立法院第十屆第八會期社會福利及衛生環境委員會環境部業務報告簡報。

環拓科技股份有限公司網站，<https://www.enrestec.com.tw/>。

聯合國氣候綱要公約 (UNFCCC)，中華民國外交部參與國際組織網站，<https://subsite.mofa.gov.tw/igo/Default.aspx>。

Apple (2023), Environmental Progress Report Covering.

EMF (2019), Completing the Picture : How the Circular Economy Tackles Climate Change.

European Commission (2023), EU Batteries Regulation.

Jem Bartholomew (2023), Lego abandons effort to make bricks from recycled plastic bottles.

Net Zero Tracker (2023), <https://zerotracker.net/>.

The EU Green Deal – a roadmap to sustainable economies, <https://www.switchtogreen.eu/home/>.

New Climate Institute, Oxford Net Zero, Energy & Climate Intelligence Unit and Data-Driven EnviroLab (2023), NET ZERO STOCKTAKE 2023: Assessing the status and trends of net zero target setting.

環境管理規劃類

漿紙產業無機副產物低碳排資源化之研究

蔡志達*、李昂軒**

摘 要

農林業是自然界最早的碳循環生態建構者，而華紙公司係台灣唯一林漿紙—即從造林到造紙一貫作業的企業，其產出之無機副產物大致有綠泥、飛灰、底碴，及少量性質屬非水硬性水泥的爐壁灰，已成功透過冷壓資源化技術將其開發作為低水泥系建材（再生粗粒料與符合 CNS 382 性能要求的普通磚）。雖然目前水泥仍是全世界最普遍使用的建材，惟它卻兼具高耗能與高 CO₂ 排放的缺點，為逐步實現 2050 淨零排放之永續社會，須提前布局淨零轉型：本研究採用無機聚合（Geopolymer）技術資源化漿紙產業無機副產物達成短期（~ 2030）低碳目標；再利用性質屬非水硬性水泥的爐壁灰達成長期（~ 2050）朝零碳發展之願景。研究結果顯示低水泥系資源化產品 - 冷壓型普通磚中漿紙產業無機副產物再生資材可達 85 % 以上，而綠建材評定基準中普通磚僅要求：「回收材料乾重比率 40 % 以上」。採用無機聚合或非水硬性水泥技術所開發的冷壓型普通磚中漿紙產業無機副產物則可達 100 %。於齡期 28 天時，相關性能亦均可符合 CNS 382 普通磚之要求。其中低水泥系冷壓型資源化產品，更於華紙公司花蓮廠完成圍牆試砌與鋪面試鋪，不僅獲得 2023 金點設計標章的肯定，且安全挺過 2024 年 0403 花蓮強震。故採用無機聚合技術或屬非水硬性水泥的爐壁灰，來取代高耗能與高 CO₂ 排放的燒結技術或卜特蘭水泥，並透過冷壓技術資源化漿紙產業無機副產物作為綠建材，相較於原生產品，或許可被稱為低碳甚至零碳綠建材，如此不

僅可增加漿紙產業無機副產物的經濟價值，亦朝「2050 淨零排放之永續社會」的願景邁進。

【關鍵字】漿紙產業無機副產物、冷壓資源化、無機聚合、非水硬性水泥、綠建材

* 國立成功大學永續環境實驗所

副研究員

** 中華紙漿股份有限公司

專案經理

一、前言

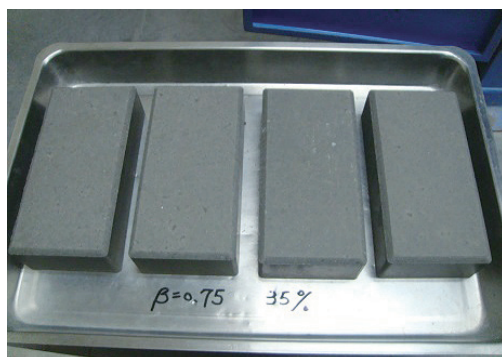
為減緩溫室效應所造成的氣候變遷，聯合國於 2015 年通過巴黎協定，戮力控制全球升溫不超過 1.5°C 。為達成此目標，世界各國近年來紛紛宣示淨零碳排（碳中和）行動並推動淨零排放立法，包含美國、日本、韓國、歐盟等皆以 2050 年達淨零碳排為目標。針對推動 2050 淨零轉型，我國亦提出「十二項關鍵戰略」，藉以落實淨零轉型之長期願景目標，逐步實現 2050 淨零排放之永續社會，以共同承擔全球目標（國家發展委員會等，2022）。十二項關鍵戰略中第八項 - 「資源循環零廢棄」提及：廢棄資源物質能資源化，強化資源永續循環利用，投入技術研發與制度革新，提升資源循環效率。從產品設計、資源再生、產業鏈結及技術創新四大面向，打造零廢棄的資源永續循環世代。

華紙公司係台灣唯一林漿紙一即從造林到造紙一貫作業的企業，其關注資源循環再利用的發展，致力於材料生命週期的循環運用，以一棵樹木創造的循環經濟：努力尋求各種方法將木頭中的纖維衍生出跨足許多產業的產品和應用，來減少對天然資源的需求。並以搖籃到搖籃的思維模式研發，為這些來自漿紙產業製程的副產物創造出嶄新的價值（中華紙漿股份有限公司，2020）。造紙原料的樹木是固定二氧化碳最佳捕手，紙張纖維透過回收再造可重複使用；製程中的副產物容易回收再利用，或資源化成為新產品，漿紙產業副產物主要分為二類：有機質經過回收再利用可做作為生質燃料與肥料；其產出之無機副產物大致有綠泥、飛灰、底渣（其產出比例約為 7:6:1），及少量性質屬非水硬性水泥的爐壁灰，目前業已成功透過冷壓資源化技術將其開發作為低水泥系建材，即再生粗粒料（水泥用量 100 kg/m^3 ）（蔡志達等，2020），與符合 CNS 382 性能要求的普通磚（水泥用量 200 kg/m^3 ）（蔡志達等，2020），如圖 1 所示，其中普通磚相關性能（見圖 2）並完成模廠試量產，低水泥系冷壓型資源化產品，更於華紙公司花蓮廠完成圍牆試砌與鋪面試鋪（見圖 3），不僅獲得 2023 金點設計標章的肯定，且安全挺過 2024 年 0403 花蓮強震。

雖然目前水泥仍是全世界最普遍使用的建材，惟它卻是高耗能且高 CO_2 排放的材料，而上述水泥係指屬水硬性水泥的卜特蘭水泥，回顧水泥發展史係以歐洲為主流，可區分為「非水硬性水泥」，「水硬性石灰」及「卜特蘭水泥系」(Mindess, 1981 and Mehta, 1986)。為逐步實現 2050 淨零排放之永續社會，須提前布局淨零轉型：本研究採用無機聚合 (Geopolymer) (Xu, 2000, Schmücker, 2005, and Hajimohammadi, 2008) 技術（簡稱無機聚合系，GP）資源化漿紙產業無機副產物達成短期（~ 2030）低碳目標；再利用性質屬非水硬性水泥的爐壁灰（簡稱無水泥系，NC）達成長期（~ 2050）朝零碳發展之願景。而非水硬性水泥即指不能在水中水化硬固的材料，屬於氣硬性粘結料，包括石膏及石灰二種。其中石灰漿在很早以前即被開始和黏土混合用於建築物中。石灰的原料係靠石灰岩燒結而得，石灰加水即會形成「氫氧化鈣」而硬固，暴露空氣中會吸取「二氧化碳」而形成「碳酸鈣」，復原為原始之形態 (黃兆龍, 2002)，故此反應亦可視為一種「碳捕捉技術」。故透過冷壓技術與無機聚合或非水硬性水泥，來取代高耗能與高 CO_2 排放的燒結技術或卜特蘭水泥，資源化漿紙產業無機副產物作為綠建材，相較於原生產品，或許可被稱為低碳甚至零碳綠建材，如此不僅可增加漿紙產業無機副產物的經濟價值，亦朝「2050 淨零排放之永續社會」的願景邁進。



(1) 再生粗粒料



(2) 普通磚

圖 1 低水泥系漿紙產業無機副產物冷壓型綠色建材

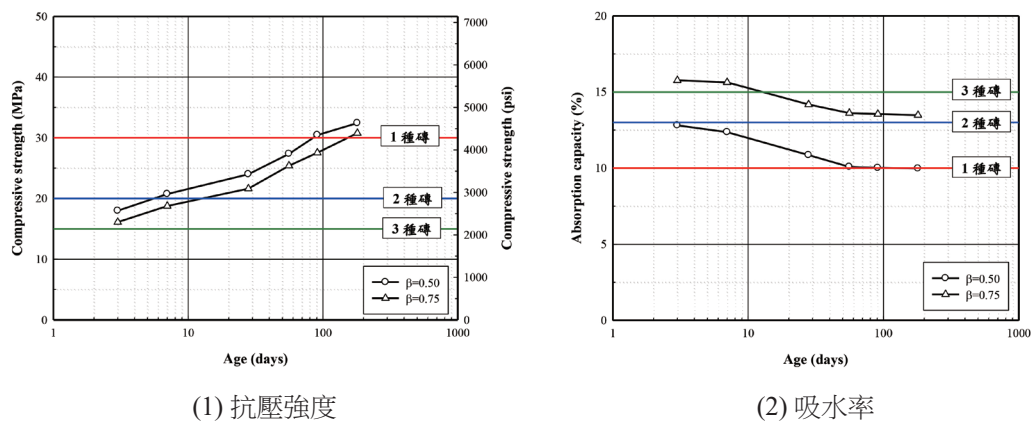


圖 2 低水泥系漿紙產業無機副產物冷壓型普通磚相關性能



圖 3 華紙公司花蓮廠圍牆試砌與鋪面試鋪照片

二、實驗方法

2.1 實驗材料

1. 綠液：係漿紙產業製漿程序中的白液（主要成份為氫氧化鈉與硫化鈉）添加於蒸解釜中蒸解木片，蒸煮後由木材溶出黑液，透過回收鍋爐燃燒發電後（見圖 4），剩餘熔融物的無機物，成份主要為碳酸鈉、硫化鈉，並含有少量的氫氧化鈉和硫酸鈉等。溶解在水

中可用石灰苛化，回收氫氧化鈉。因成分中有少量的氫氧化鐵，呈墨綠色，故稱為綠液。綠液的比重約為 1.05，含水率為 83.0 %，固含率為 17.0 %，由組成成分 XRF(見表 1) 與 XRD(見圖 5-(1)) 分析結果顯示，綠液主要成分為 Na_2CO_3 與 CaCO_3 。

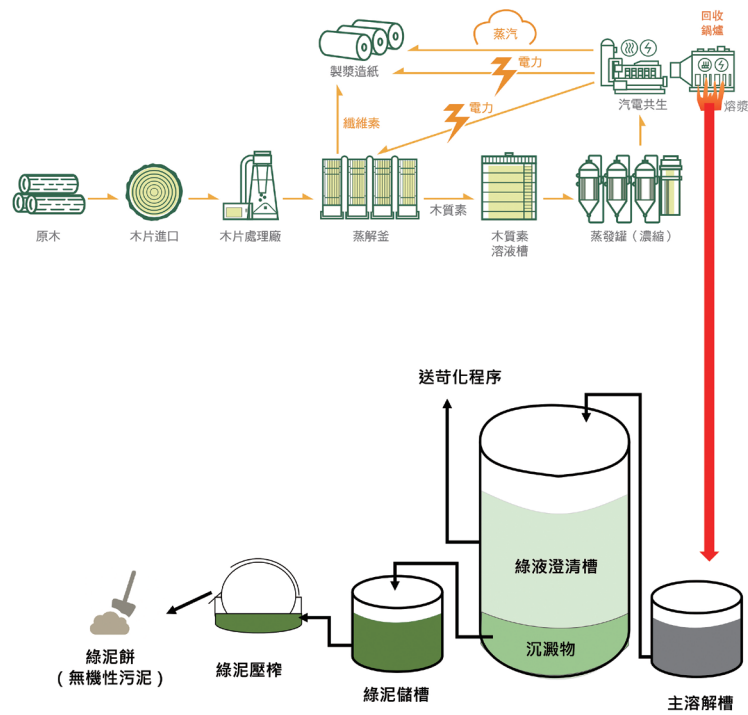


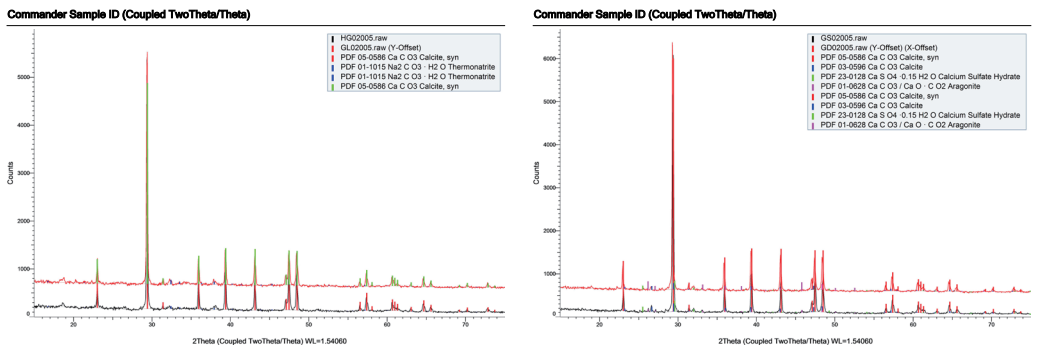
圖 4 綠液與綠泥產出製程

表 1 漿紙產業無機副產物 XRF 分析結果

元素	綠液	綠泥	飛灰	底碴	爐壁灰	元素	綠液	綠泥	飛灰	底碴	爐壁灰
Mg	59,532	46,042	ND	ND	2,310	Se	ND	ND	ND	ND	ND
Al	11,505	2,173	45,041	25,236	140	Rb	22	ND	22	46	ND
Si	14,239	8,965	28,049	46,441	530	Sr	1,406	891	286	275	ND
P	2,002	2,909	1,512	1,571	1,570	Y	ND	ND	ND	21	ND
S	13,042	4,218	2,942	5,555	400	Zr	ND	ND	355	122	ND

元素	綠液	綠泥	飛灰	底渣	爐壁灰	元素	綠液	綠泥	飛灰	底渣	爐壁灰
Cl	906	ND	5,037	5,545	40	Nb	ND	ND	8	10	ND
Ca	264,742	348,440	297,551	176,980	61,760	Mo	ND	ND	ND	ND	ND
Ti	ND	ND	ND	5,252	ND	Ag	ND	ND	ND	ND	ND
V	ND	ND	ND	ND	ND	Cd	ND	ND	ND	ND	ND
Cr	ND	ND	ND	ND	ND	Sn	352	ND	34	35	ND
Mn	4,035	ND	ND	ND	160	Sb	ND	ND	ND	ND	ND
Fe	9,534	9,700	30,153	36,979	1,130	Ba	ND	364	782	474	ND
Co	ND	ND	ND	558	ND	Ce	ND	392	ND	ND	ND
Ni	ND	ND	ND	ND	ND	W	28	ND	ND	ND	ND
Cu	ND	ND	309	190	ND	Hg	ND	ND	ND	ND	ND
Zn	338	118	647	325	ND	Pb	ND	ND	53	ND	ND
As	ND	ND	53	ND	ND						

註：元素濃度 (PPM)



(1) 綠液

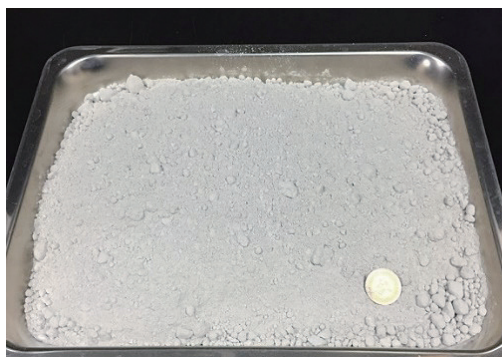
(2) 綠泥

圖 5 綠液與綠泥 XRD 分析結果

2. 綠泥：綠液回收至水消機與石灰進行苛性化反應後，而綠液中顆粒部分經洗滌、沉澱後的墨綠色底泥，再與石灰廢渣經壓濾脫水後（含水率約 50-55 %）所產出之漿紙產業無機副產物，簡稱為綠泥，如圖 6 所示。綠泥比重約為 2.44，由組成成分 XRF(見表 1) 與 XRD(見圖 5-(2)) 分析結果顯示，綠泥主要成分為 CaCO_3 。



(1) 烘乾後



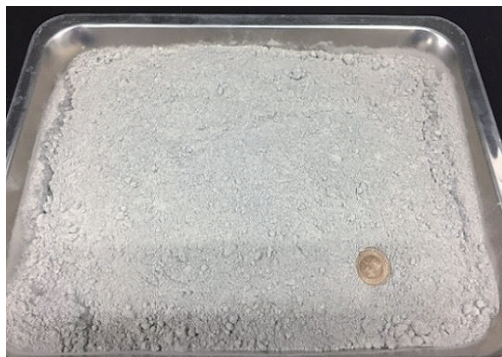
(2) 烘乾破碎後

圖 6 綠泥照片

3. 飛灰：採用華紙公司台東廠流體化床鍋爐所衍生之無機副產物。為配合減少燃燒生煤，由回收紙分離的紙渣廢料製成固態廢棄物衍生燃料 (RDF) 作為替代燃料，取代部分煤作為燃料混燒，因此所衍生之飛灰係屬混燒煤灰，如圖 7 所示。其比重約為 2.31，由組成成分 XRF(見表 1) 與 XRD(見圖 8-(1)) 分析結果顯示，飛灰主要成分為 CaO 、 SiO_2 ，及 CaCO_3 。



(1) 烘乾後



(2) 烘乾後

圖 7 華紙公司台東廠飛灰照片

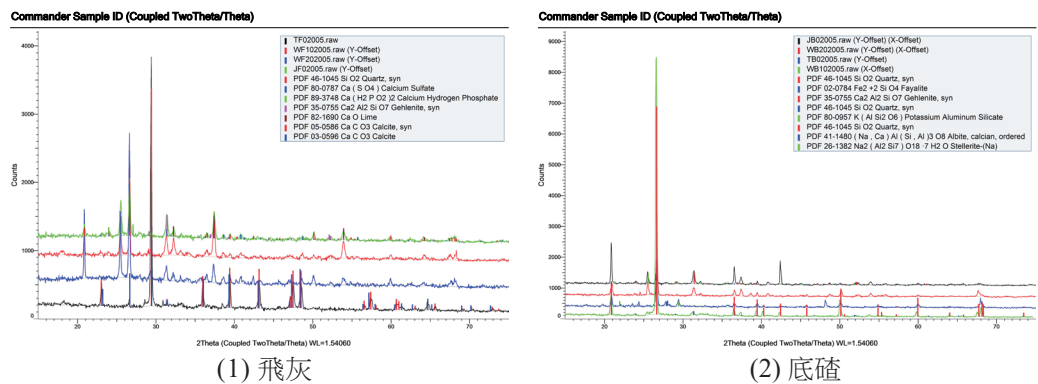


圖 8 華紙公司台東廠飛灰與底碴 XRD 分析結果

4. 底碴：同採華紙公司台東廠流體化床鍋爐所衍生之無機副產物 (見圖 9) ，其比重約為 2.62 ，吸水率為 7.28 % ，粒徑分佈符合 CNS 1240 之規定。由組成成分 XRF(見表 1) 與 XRD(見圖 8-(2)) 分析結果顯示，底碴組成成分則較為複雜，主要成分為 SiO_2 。



圖 9 華紙公司台東廠底碴照片

5. 爐壁灰：又稱為石灰窯泥渣，係漿紙產業製程中石灰回收再利用時，需經過石灰窯加熱烘乾，進窯時石灰泥漿易沾黏於窯壁上，於長時間加熱下， CaCO_3 被分解為 CaO 與 CO_2 ，而 CaO 則附著於窯壁上，因此簡稱為爐壁灰 (見圖 10) ，其組成成分 XRF 分析結果，如表 1 所示。



圖 10 華紙公司爐壁灰照片

6. 鹼性溶液 (鹼液)：購自由國立臺北科技大學鄭大偉特聘教授研究團隊所技術移轉之欣得實業股份有限公司， NaOH 濃度為 10M ； $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ 為 1.28 ； $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 為 50 ，其比重約為 1.35 。
7. 強塑劑 (SP)：本研究採用羧酸系列之高性能減水劑，係購自優積企業有限公司，其物化性質均符合相關 CNS 與 ASTM 規範要求。

2.2 冷壓資源化製磚技術

1. 實驗室：冷壓資源化技術 (Tsai, 2012) 乃基於材料基本原理 (愈緻密其強度等相關性質愈佳) (Dowling, 1993) 與複合材料 (Gibson, 1994) 的觀念，導入水泥化學及卜作嵐材料間互制特性 (Mindess, 1981 and Mehta, 1986)，並依據再生資材的材料特性，藉以改善其界面性質，所開發出兼具低耗能、低 CO_2 排放的資源化技術。於實驗室製磚方式係利用自行開發的冷壓型製磚模具 (見圖 11)，經簡單的填料、加壓成型、退模等程序，即可成功完成冷壓型砌塊、普通磚，或高壓地磚製作，如圖 11 所示。本研究採用無機聚合 (Geopolymer) 技術資源化漿紙產業無機副產物作為低碳綠建材係於實驗室進行。

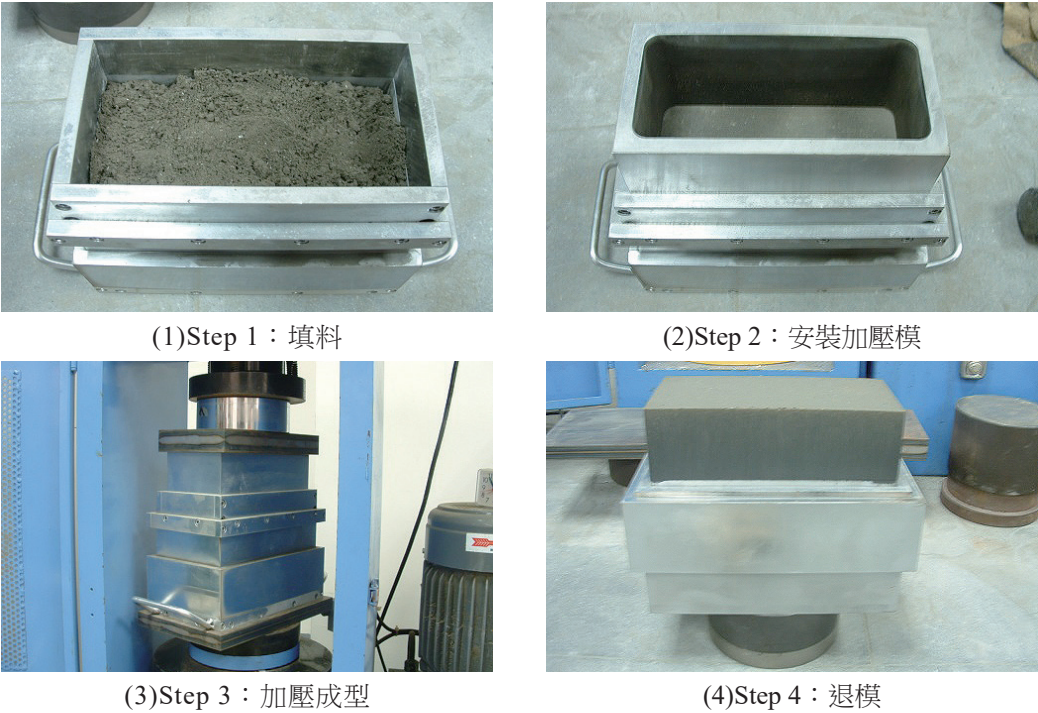


圖 11 冷壓資源化技術於實驗室製磚程序

2. 試驗模廠：另本研究採用爐壁灰取代卜特蘭水泥，綠液取代拌合水，開發漿紙產業無機副產物零碳綠建材，則是直接於華紙公司花蓮廠所設置的試驗模廠 (見圖 12) 進行。



圖 12 華紙公司花蓮廠冷壓型製磚試驗模廠照片

三、結果與討論

3.1 配比設計

本研究採用緻密配比邏輯 (黃兆龍, 2002) 設計漿紙產業無機副產物淨零碳排資源化產品的配比, 由於緻密配比邏輯係根據水泥系材料所發展, 因此無機聚合系 (GP) 的資源化低碳綠建材配比, 係根據組成材料再演繹後的緻密配比邏輯 (蔡志達, 2020) 所設計, 而漿紙產業無機副產物低水泥系、無機聚合系 (GP), 及無水泥系 (NC) 普通磚組成材料之差異如表 2 所示。為增加無機聚合系冷壓型普通磚配比中綠泥的使用率, 本研究參考低水泥系漿紙產業無機副產物冷壓型普通磚研究成果 (蔡志達等, 2020), 於骨材系統中, 選擇綠泥填塞飛灰的比例 (a) =0.50; 綠泥與飛灰混合料填塞底碴的比例 (b) =0.80, 如公式 (1) 與 (2) 所示。於漿體系統中選用參數為: 綠泥: 飛灰 =9: 1, 其配比如表 3 所示。

表 2 漿紙產業無機副產物冷壓型普通磚組成材料之差異

	骨材系統	漿體系統
低水泥系	綠泥、飛灰、底碴	水泥、綠泥、強塑劑、水、綠泥含水量
無機聚合系	綠泥、飛灰、底碴	鹼液、綠泥、飛灰、綠泥含水量
無水泥系	綠泥、飛灰、底碴	爐壁灰、綠泥、強塑劑、綠液、綠泥含水量

$\alpha = W_{\text{綠泥}} / (W_{\text{綠泥}} + W_{\text{飛灰}})$ 式 (1)

$\beta = (W_{\text{綠泥}} + W_{\text{飛灰}}) / [(W_{\text{綠泥}} + W_{\text{飛灰}}) + W_{\text{底碴}}]$ 式 (2)

表 3 GP 系與 NC 系漿紙產業無機副產物冷壓型普通磚配比

配比 編號	10M 鹼液 (kg/m ³)	飛灰 (kg/m ³)	綠泥最適含水率調整			底碴 (kg/m ³)
			綠泥 含水率 (%)	綠泥 (kg/m ³)	綠泥 含水量 (kg/m ³)	
$\beta=0.80_GP$	167.38	659.90 (42.96 %)	19.13	560.34 (36.47 %)	66.75	316.00 (20.57 %)

配比編號	爐壁灰 (kg/m ³)	飛灰 (kg/m ³)	綠泥最適含水率調整			底渣 (kg/m ³)	綠液 (kg/m ³)	SP (kg/m ³)
			綠泥 含水率 (%)	綠泥 (kg/m ³)	綠泥 含水量 (kg/m ³)			
$\beta=0.50_NC$	210.80 (11.78%)	495.06 (27.67%)	20.00	258.43 (14.44%)	64.61	825.10 (46.11%)	162.59	1.31
$\beta=0.65_NC$	210.80 (12.57%)	611.35 (36.44%)	20.00	306.62 (18.28%)	76.66	548.64 (32.71%)	187.53	0.81
$\beta=0.75_NC$	210.80 (13.10%)	682.61 (42.43%)	20.00	336.15 (20.90%)	84.04	379.23 (23.57%)	202.66	0.65

註：() 中係指各組成固體材料之重量百分率

無水泥系（NC）漿紙產業無機副產物冷壓型普通磚配比，則採用低水泥系漿紙產業無機副產物冷壓型普通磚配比（蔡志達等，2020），根據體積法，利用爐壁灰取代卜特蘭水泥，綠液取代拌合水，另為增加綠泥的使用率，選擇 3 種不同綠泥與飛灰混合料填塞底渣的比例（ β ）=0.50、0.65，及 0.75，如公式 (2) 所示，其配比見表 3。表 3 中顯示本研究採用漿紙產業無機副產物所開發的 GP 與 NC 系低碳排綠建材，其固體組成材料中綠泥、飛灰、底渣，及爐壁灰等再生資材均可達 100 %，而綠建材評定基準（何明錦等，2015）中對普通磚僅要求：「回收材料乾重比率 40 % 以上」。另由於 NC 系冷壓型普通磚中採用爐壁灰取代高耗能且高 CO₂ 排放的卜特蘭水泥，並使用綠液取代有碳足跡的拌合水（自來水），相較於原生產品，或許可被稱為零碳綠建材，如此不僅可增加漿紙產業無機副產物的經濟價值，並藉以落實淨零轉型之長期願景目標，朝向 2050 淨零排放之永續社會邁進。

3.2 漿紙產業無機副產物冷壓型普通磚製作

由於冷壓資源化技術其成型應力與組成材料含水率之相互關係，影響資源化產品性質甚鉅 (Tsai, 2012)：因為當加壓成型時，若組成材料含水率太低，則不易成型，即使採用較高的成型應力，於解壓過程，將因毛細孔隙吸水產生張力作用，使得資源化產品產生裂縫；反之當加壓成型時，若組成材料含水率過高，於加壓成型過程容易產生壓密排水現象 (Holitz, 1986)，所排出的水將形成弱面，進而影響資源化產品相關性

質。配合華紙公司試驗模廠的製磚設備，故本研究成型應力為 12.5 MPa，惟本研究採用漿紙產業無機副產物所開發的 GP 系冷壓型普通磚，於無機聚合物系統中，並未直接使用水，係使用鹼液與液灰比 (L/S) 來控制工作性，且綠泥係具水份的再生資材，根據低水泥系漿紙產業無機副產物冷壓型普通磚研究成果 (蔡志達等，2020)，骨材系統中綠泥含水率係採用 35.0 %，而漿體系統中綠泥含水率則為 0.0 %，經計算後整體綠泥的最適含水率為 19.13 % (見表 3)；液灰比 (L/S) 則選擇 0.60，進行 GP 系漿紙產業無機副產物冷壓型普通磚試拌與試壓，試壓結果顯示，本研究採用漿紙產業無機副產物與無機聚合技術，及經再演繹後的緻密配比邏輯所設計的配比，可成功壓製 GP 系漿紙產業無機副產物冷壓型普通磚，如圖 13 所示。

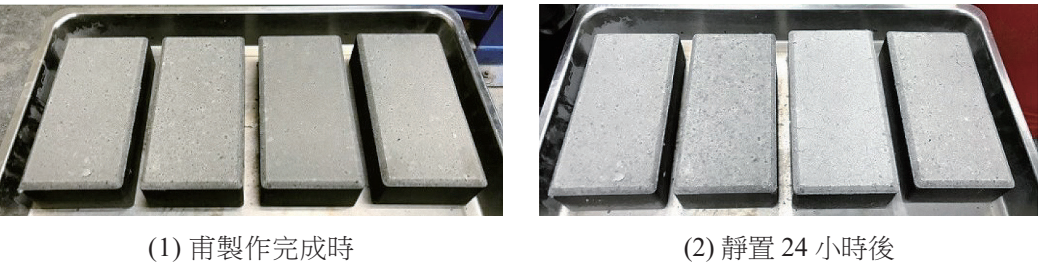


圖 13 GP 系漿紙產業無機副產物冷壓型普通磚試壓結果

而 NC 系漿紙產業無機副產物冷壓型普通磚，係直接於華紙公司花蓮廠所設置的試驗模廠進行壓製，由於低水泥系冷壓型普通磚已成功於試驗模廠製作生產 (蔡志達等，2020)，因此本研究團隊已累積相當豐富的模廠壓製經驗，並掌握相關生產參數。由於本研究係根據體積法，採用爐壁灰取代卜特蘭水泥，綠液取代拌合水，而爐壁灰比重較卜特蘭水泥小，故取代後整體比表面積變大；而綠液的含水率為 83.0 %，固含率為 17.0 %，故整體水量較拌合水低，因此先將綠泥最適含水率調高至 20.0 % 後 (原低水泥系為 15.0 %)，見表 3。再進行 NC 系漿紙產業無機副產物冷壓型普通磚壓製，結果顯示，NC 系所有配比均可於試驗模廠成功壓製，如圖 14 所示。

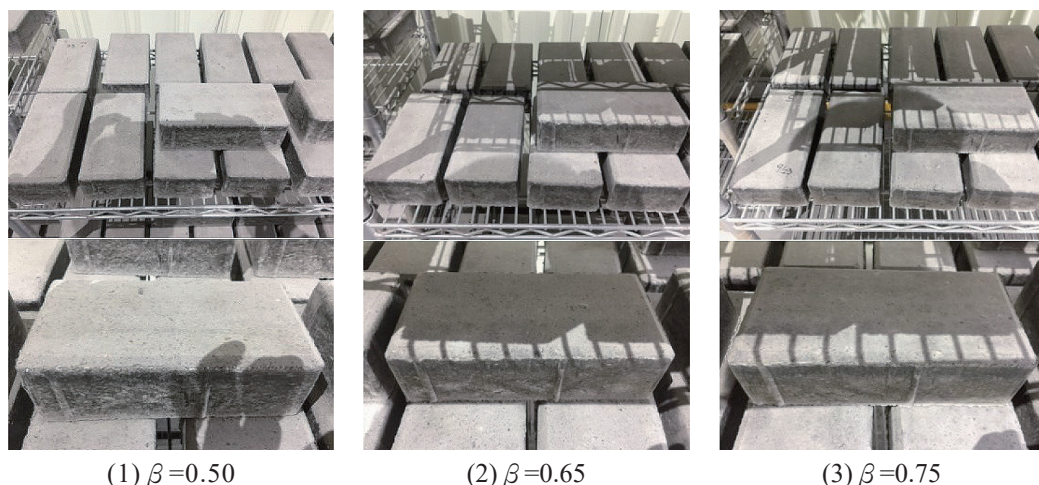


圖 14 NC 系漿紙產業無機副產物冷壓型普通磚試壓結果

3.3 漿紙產業無機副產物冷壓型普通磚抗壓強度

本研究依據 CNS 382 進行 GP 系與 NC 系漿紙產業無機副產物冷壓型普通磚抗壓強度試驗，試驗結果如圖 15 所示。圖中顯示 GP 系冷壓型普通磚抗壓強度隨著齡期持續成長，係由於隨著齡期成長，無機聚合反應持續進行，且由於配比中添加大量卜作嵐材料（飛灰），配合卜作嵐反應（李韋皞，2017），藉以填塞內部孔隙，使其更緻密化，並改善其介面性質，進而使得 GP 系冷壓型普通磚抗壓強度隨齡期的增長而持續成長。另圖中亦顯示於齡期 28 天時，無機聚合系冷壓型普通磚即可符合 CNS 382 中 3 種磚抗壓強度性能要求；於齡期 365 天（1 年），可滿足 CNS 382 中 2 種磚之抗壓強度要求。

NC 系漿紙產業無機副產物冷壓型普通磚抗壓強度亦隨著齡期持續成長，係由於隨著齡期成長（見圖 15），屬非水硬性水泥的爐壁灰碳酸化反應持續進行，配合卜作嵐反應（Mindess, 1981, Mehta, 1986, and 黃兆龍，2002），使內部孔隙更緻密化，並改善其介面性質，進而使得 NC 系冷壓型普通磚抗壓強度隨齡期的增長而持續成長。於齡期 28 天時， $\beta=0.50$ 與 0.65 的 NC 系冷壓型普通磚可符合 CNS 382 中 3 種磚抗壓強度性能要求。由於 GP 系與 NC 系漿紙產業無機副產物冷壓型普通磚抗壓強度均隨著齡期持續成長，由此亦可研判，本研究採用漿紙產業無機副產物與冷壓資源化技術所開發之低碳排綠建材，其內部應無因收縮或膨脹作用而產生微裂縫，進而影響其抗壓強度之狀況發生。

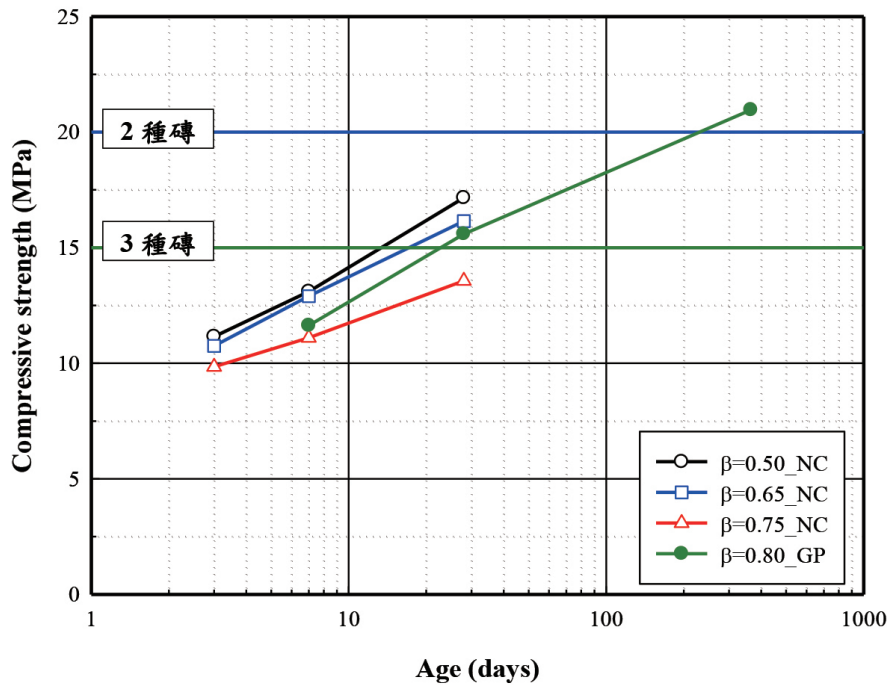


圖 15 GP 系與 NC 系冷壓型普通磚抗壓強度成長關係圖

3.4 漿紙產業無機副產物冷壓型普通磚吸水率

本研究依據 CNS 382，分別於齡期 7 與 28 天進行 NC 系漿紙產業無機副產物冷壓型普通磚吸水率試驗，試驗結果如圖 16 所示。圖中顯示 NC 系冷壓型普通磚的吸水率隨齡期增長而持續下降，係由於其中添加大量卜作嵐材料（飛灰），配合卜作嵐反應，可轉換屬非水硬性水泥的爐壁灰其碳酸化反應產物，形成較低密度之 C-S-H 膠體，藉以填塞內部孔隙，使其更緻密化，並改善其介面性質 (Mindess, 1981, Mehta, 1986, and 黃兆龍, 2002) 所致。其中 $b=0.50$ 與 0.65 的 NC 系冷壓型普通磚，於齡期 7 天時，吸水率即可符合 CNS 382 中 3 種磚，於齡期 28 天則可滿足 2 種磚的要求；而 $b=0.75$ 的 NC 系漿紙產業無機副產物冷壓型普通磚，於齡期 28 天時，吸水率亦可符合 3 種磚之性能要求。

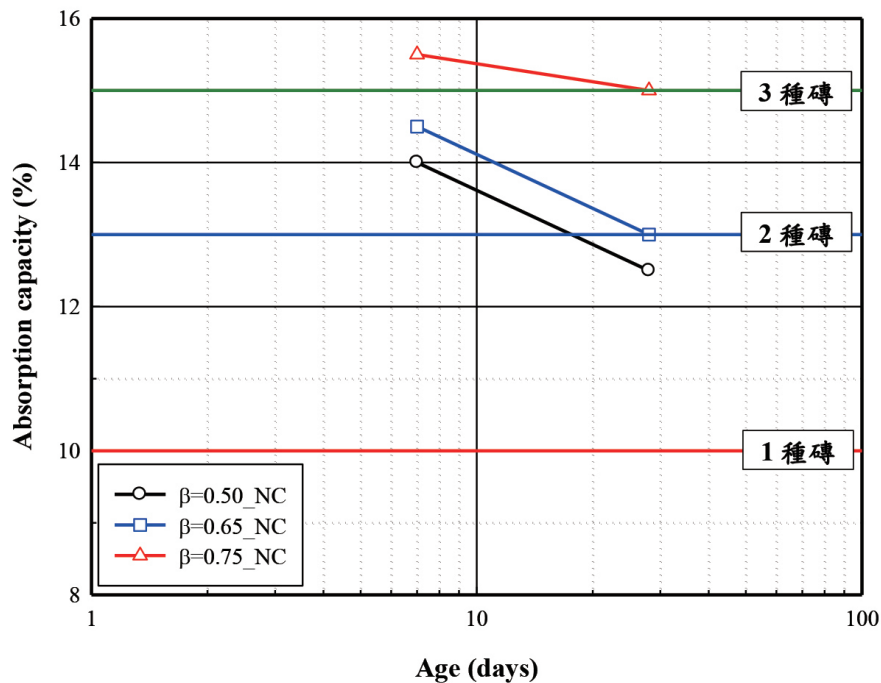


圖 16 NC 系漿紙產業無機副產物冷壓型普通磚吸水率變化關係圖

四、結論與建議

1. 本研究採用漿紙產業無機副產物所開發的 GP 與 NC 系低碳排綠建材，其固體組成材料中綠泥、飛灰、底碴，及爐壁灰等再生資材均可達 100 %，而綠建材評定基準中對普通磚僅要求：「回收材料乾重比率 40 % 以上」。故本研究可有效增加漿紙產業無機副產物再生資材之使用率。
2. GP 系漿紙產業無機副產物冷壓型普通磚抗壓強度試驗結果顯示，抗壓強度隨著齡期持續成長，於齡期 28 天時可符合 CNS 382 中 3 種磚抗壓強度性能要求；於齡期 365 天 (1 年) 則可滿足 2 種磚之抗壓強度要求。由此亦可研判漿紙產業無機副產物中的綠泥與飛灰，具備作為無機聚合材料原料的潛力，惟係屬活性或惰性添加物，應進一步研究探討，如此方能更適材適所地採用無機聚合技術資源化漿紙產業無機副產物。

3. NC 系漿紙產業無機副產物冷壓型普通磚性能測試結果顯示，於齡期 28 天時， $b=0.50$ 與 0.65 的普通磚可符合 CNS 382 中 3 種磚抗壓強度性能要求；吸水率方面，於齡期 7 天時， $b=0.50$ 與 0.65 的普通磚，即可符合 CNS 382 中 3 種磚性能要求，於齡期 28 天則可滿足 2 種磚；而 $b=0.75$ 的普通磚，於齡期 28 天時，亦可符合 3 種磚之性能要求。目前其相關性質僅量測至齡期 28 天，未來將持續觀測，以作為耐久性評估分析之參據。
4. 本研究所開發的 GP 系漿紙產業無機副產物冷壓型普通磚，因為使用的鹼液仍有一定之碳排放量，相較於使用高耗能與高 CO_2 排放的燒結技術或水泥所製成的產品，或許可視為低碳綠建材，達成短期 (~ 2030) 低碳目標；而 NC 系漿紙產業無機副產物冷壓型普通磚，係利用屬非水硬性水泥的爐壁灰取代高耗能且高 CO_2 排放的卜特蘭水泥，並使用綠液取代有碳足跡的拌合水 (自來水)，另非水硬性水泥可視為一種「碳捕捉技術」，相較於使用高耗能與高 CO_2 排放的燒結技術或水泥所製成的產品，或許可視為零碳綠建材，達成長期 (~ 2050) 朝零碳發展之願景。故本研究採用冷壓資源化技術與漿紙產業無機副產物所開發之 GP 系與 NC 系冷壓型普通磚，不僅可增加漿紙產業無機副產物的經濟價值，並藉以落實淨零轉型之長期願景目標，朝向 2050 淨零排放之永續社會邁進。

參考文獻

中華紙漿股份有限公司 (2020)，中華紙漿股份有限公司 2019 永續報告書。

何明錦等人 (2015)，綠建材解說與評估手冊 2015 年更新版，內政部建築研究所。

李韋皞 (2017)，微結構發展對於無機聚合物材料性質的影響研究，國立臺北科技大學工程學院工程科技博士論文。

國家發展委員會、行政院環境保護署、經濟部、科技部、交通部、內政部、行政院農業委員會、金融監督管理委員會 (2022)，淨零排放路徑及策略總說明。

黃兆龍 (2020)，混凝土性質與行為，詹氏書局。

蔡志達、李昂軒、施承瑋、戴佳雄、羅嚮盛、張祖恩 (2020)，利用冷壓技術開發紙廠無機副產物作為再生粗粒料之可行性研究，2020 資源與環境學術研討會論文集，大漢技術學院，p 237-250。

蔡志達、李昂軒、施承瑋、戴佳雄、羅嚮盛、張祖恩 (2020)，透過冷壓技術資源化紙廠無機副產物作為普通磚，2020 資源與環境學術研討會論文集，大漢技術學院，p 251-264。

蔡志達 (2020)，無機聚合物材料配比設計方法推演與應用，土木水利，第四十七卷，第二期，p 50-56。

Dowling, N. E. (1993), Mechanical behavior of materials: engineering methods for deformation, fracture, and fatigue, Englewood Cliffs.

Gibson, R. F. (1994), Principles of composite material mechanics, CRC Press.

Hajimohammadi A., Provis J. L., Van Deventer J. S. J. (2008), One-Part geopolymer mixes from geothermal silica and sodium aluminate, Industrial and Engineering Chemistry Research, 47, p 9396-9405.

Holitz, R. D. and W. D. Kovacs (1986), An introduction to geotechnical engineering, Prentice Hall.

Mindess, S. and J. F. Young (1981), Concrete, Englewood Cliffs.

Mehta, P. K. (1986), Concrete-structure, properties and materials, Englewood Cliffs.

Schmücker M. and Mackenzie K. J. D. (2005), Microstructure of sodium polysialatesiloxo geopolymer, Ceramics International, 31, p 433-437.

Tsai, C. T. (2012), Chapter 5 Cold-Bonding Technique – A new approach to recycle innocuous construction residual soil, sludge, and sediment as coarse aggregates, Sintering of Ceramics - New Emerging Techniques, InTech, p 95-120.

Xu H. and Van Deventer J. S. J. (2000), The geopolymerisation of alumin-silicate minerals, International Journal Minerals Process, 59, p 247-266.

環境管理規劃類

水泥業 2050 年淨零排放路徑圖 計算方法學研析

陳志賢*、曾昱中**、邱子杰***、陳志宗****

摘 要

因地球溫度不斷升高，為避免極端氣候持續惡化，減少二氧化碳的排放是唯一解方。為因應減碳的潮流，世界各產業紛紛提出 2050 年淨零排放路徑圖。根據統計，水泥業二氧化碳排放約占全球的 7~8%，因此水泥業被視為亟需減碳的產業，但同時因水泥的主要原料—石灰石，在煅燒成為水泥熟料的過程中，會分解並無法避免地釋放出二氧化碳，此製程排放為水泥業排放的主要來源，約占整體排放的 60%，造成水泥業成為減碳困難的產業。

由於水泥業為減碳困難產業，故必須在執行減碳措施同時，也要制定長期產業減碳目標，以利追蹤各項措施效益及彈性調整策略達到 2050 年淨零排放的目標。水泥產業常見的減碳措施為使用替代原燃料、生產低碳水泥、研發新膠結材料、發展 CCUS (Carbon Capture, Utilization and Storage) 新創技術。本文介紹水泥業如何以科學方式設定上述措施減碳目標及使用的方法學，其中方法學參考全球水泥和混凝土協會 (Global Cement and Concrete Association, GCCA) 淨零路徑圖的各減碳措施，考量國內水泥業實際情況，更有利於追蹤減碳目標。期待透過本文能使各界更能了解水泥業減碳的未來方向，並提供各產業參考，攜手邁向 2050 淨零排放。

【關鍵字】淨零排放路徑、水泥業、循環經濟、低碳水泥

* 亞洲水泥股份有限公司花蓮製造廠	首席副廠長
** 亞洲水泥股份有限公司花蓮製造廠	研究室副研究員
*** 亞洲水泥股份有限公司花蓮製造廠	研究室工務員
**** 亞洲水泥股份有限公司花蓮製造廠	研究室助理工程師

一、前言

水泥主要應用為混凝土材料組成的一部分，其中混凝土由於其具有可塑性、隔熱、耐火、強度及具經濟性，為世界上使用最多的建築材料。混凝土材料中水泥占的重量比例約為 10%，雖占比不大，但水泥材料之溫室氣體排放量卻達整體混凝土的 9 成以上，並且約占世界排碳 8%。由於全球氣溫不斷升高，造成氣候變遷、冰川融化……持續惡化，世界各國開始重視淨零排放議題。政府間氣候變化專門委員會 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 報告中指出，全球暖化幅度需控制至 1.5 °C (IPCC, 2018)，若超過 1.5 °C 將導致極端氣候事件（如乾旱、暴雨等）的頻率和強度增加；且隨著極地冰川和海冰的融化，以及海水因升溫而膨脹，海平面將上升，可能導致洪水淹沒、土地流失和社會緊急狀況。水泥業身為重大排碳產業，故為各國所關注的減碳重點產業。

而水泥之所以為重大排碳產業，其原因為製造水泥熟料之原料—石灰石在高溫煅燒時會發生脫酸反應，必然會產出二氧化碳，故被視為減碳難度較高的產業。故為達到淨零排放，水泥業除了持續精進於減碳技術，亦須制定長期產業減碳目標及措施，以利追蹤各項措施效益及彈性調整策略達到 2050 年淨零排放的目標。

二、水泥製程介紹

水泥的製造從原料的採掘到最終的水泥成品，每一步都需要經過精密的操作和嚴格的控制。隨著水泥製造流程導入循環經濟，物料的複雜性不斷提升，但為了實現更高效率及環保的生產，各大水泥企業積極進行技術創新和生產流程優化。水泥製造通常分為以下幾個階段：

1. 原料採掘

水泥製造的第一步為原料的採掘。水泥的主要成分來自石灰石、黏土，石灰石是含有高碳酸鈣的一種天然礦物，是水泥中重要的成分之一。石灰石容易在我國東部沉積岩的地質中被找到，並利用專業的採礦設備及爆破的技術，將石灰石開採出來，以備後續的加工和利用。同時黏土也是另一個重要的原料，主要包含矽、鋁等成分。黏

土通常也需要從相應的礦場取得。與石灰石一樣，這些黏土礦石在經過一系列的採掘、分選等過程之後，將成為水泥原料中的一部分。擁有優良的石灰石與黏土採集技術，可為後續的生產過程提供基礎。

2. 生料研磨

透過調配石灰石、黏土 .. 等原料，確保其成分均勻符合水泥生產要求。同時送入破碎機進行破碎形成生料，此步驟的成分調配為熟料燒成重要基礎。

3. 熟料生產

利用旋窯上升熱氣流快速將生料中石灰石（主要成分為碳酸鈣）加熱分解脫去二氧化碳（脫酸），形成具有活性之氧化鈣。經煅燒脫酸之生料進入旋轉窯後，在高溫下，約有 1/4 材料形成熔融態，此時氧化鈣與氧化矽、氧化鋁及氧化鐵等氧化物，結合「燒成」水泥熟料礦物，即矽酸三鈣 (Tricalciumsilicate, C_3S)、矽酸二鈣 (Dicalciumsilicate, C_2S)、鋁酸三鈣 (Tricalciumaluminate, C_3A)、鋁鐵酸四鈣 (Tetracalciumaluminoferrite, C_4AF)。在國內，供給預熱機及旋轉窯熱量之燃料多為煤炭，在旋轉窯內火焰溫度可高達 $1,600 \sim 1,800^\circ\text{C}$ ，將生料以約 $1,450^\circ\text{C}$ 之高溫下燒結成為熟料礦物。旋轉窯出口處為使熟料迅速冷卻形成高活性結晶相，會透過冷卻機將水泥熟料自旋轉窯落口的 $1,200^\circ\text{C}$ 高溫，冷卻至約 100°C 。

4. 水泥研磨

水泥研磨製程為將水泥熟料、調節水泥凝結時間的石膏（約 5%），另依不同水泥種類的國家標準規定，可添加不同比例之材料（如石灰石、飛灰、水淬高爐爐渣、矽質材料或卜作嵐材料等），於水泥磨中進行成品「研磨」，出磨後之成品即為水泥，輸送至水泥庫進行儲存及發貨。

水泥的製造為一資源密集的過程，需要大量的原材料和能源。隨著全球對永續發展和環保需求的增加，水泥產業正積極尋求方法減少碳排放並採用更低碳的製造方法，有助於降低水泥業對環境的衝擊，並為未來的永續發展鋪路。

三、水泥業減碳技術

在了解水泥生產的製程後，讓我們再以碳排放的角度切入生產製程，其中「熟料生產」為主要的碳排放來源，又可分為製程排放及燃料排放。製程排放為水泥原料石灰石經高溫煅燒後脫酸造成 CO_2 排放，為不可避免之排放，約占整體排放 60%；另一燃料排放為熟料生產的熱源提供，一般以煤碳、重油當作燃料，約占整體排放 35%；其餘 5% 為設備及辦公室使用的外購電力排放。

因應排放特性，可制定不同時期減碳策略。初期以最佳可行技術為主，如；循環經濟降低熟料排放係數、生產及推廣低碳水泥，降低水泥中熟料比例、製程熱效率改善，並開始研發 CCUS 新創技術；中期為開發新膠結材料應用於低碳水泥，大幅度取代水泥中熟料；後期透過以上既有技術及成熟之 CCUS 新創技術來達成淨零排放目標。以下介紹水泥業各項重要減碳措施：

1. 循環經濟

循環經濟對於水泥行業熟料生產排放而言，有相當大的貢獻。如前述所提，熟料生產排放主要分為製程排放及燃料排放，水泥業透以下 2 種循環經濟模式分別減少以上兩種排放：

(1) 替代原料

透過加入非碳酸鹽類之含鈣工業副產品或廢棄物取代天然石灰石，減少製程排放。而工業副產品或廢棄物通常為轉爐石、還原渣等，透過使用以上物料不僅能減少碳排，也能降低副產品或廢棄物去化問題。

(2) 替代燃料

透過使用生質及非生質之廢棄物通常為塑膠片、油泥、木屑、SRF(Solid recovered fuel) 等，取代煤炭、重油作為燃料使用，降低燃料排放。

2. 製程改善

傳統的節能措施，係著眼於直接減少熟料生產的耗熱量，進而降低高碳排燃料之使用，係為直接而有效的方法。投入製程改良、設備妥善維護，根據歐洲水泥協會 (The

European Cement Association, CEMBUREAU) 的預估，2050 年因製程熱效率改善，熟料耗熱可低至 3,150~3,250 (MJ/t-clinker) (CEMBUREAU, 2020)。

3. 生產及推廣低碳水泥

接續 2 項熟料的減碳措施，我們來談談水泥中熟料比例的使用策略。目前全球水泥中熟料的比率平均值約為 80%，此與我國大宗使用的卜特蘭水泥中熟料占比 93%，兩者約有 13% 的差距。其原因在於我國預拌混凝土業者習慣於使用卜特蘭水泥，鮮少使用熟料占比較低之水硬性混合水泥。依據 ASTM C150 標準，卜特蘭水泥中非熟料添加物已可達 10% (5% 石灰石及 5% 無機製程添加劑，如飛灰、高爐石、矽質原料等)，ASTM 標準中亦有石灰石水泥規範及墘砌水泥規範；EN 標準也針對不同工程特性用途的水泥，規定不同之熟料占比。為接軌國際趨勢，雖然我國已修訂 CNS 15286 水硬性混合水泥規範，增加了混合水泥種類，可降低水泥中熟料比例，但因公共工程施工綱要規範限制及混凝土廠使用習慣，仍較少廠商願意使用水硬性混合水泥。因應此狀況，除努力推行規範修訂，還需持續向下游廠商進行環境教育及推廣活動，讓低碳水泥逐漸取代卜特蘭水泥，使我國水泥中熟料比率得以大幅度下降。

4. 開發新膠結材料

因為矽酸鹽水泥的成功，全球水泥業對於投入新低碳膠結材料製造的腳步較為緩慢。客戶的習慣、法規限制、投入成本考量影響了創新的發展。因水泥業為資本密集產業，單套系統投入設備資金可達數十億元台幣，大幅調整現行生產製程，對於任何水泥廠都是需要思考的重大風險，再加上法規及客戶端的保守特性，新低碳膠結材料要發展到實際可應用之歷時仍過長，對於水泥業減碳發展將是重大阻礙，但仍存在巨大減碳潛力。透過推動碳費、減碳財務投資計畫、政府支持、大眾理解及議題討論，加速新低碳膠結材料的發展，是突破僵局的可能方向。近十年全球對於新低碳膠結材料之研究仍持續發展當中，可期待的技術方案如：富矽酸二鈣 - 硫鋁酸鹽水泥 (Belite calcium sulfoaluminate, BCSA)、活性富矽酸二鈣水泥 (Reactive belite-rich Portland cement, RBPC)、石灰石煅燒高嶺土水泥 (Limestone calcined clay cement, LC³)、鹼激發材料 (Alkali-activated materials) 等。開發新低碳膠結材料的目的是在於降低生產所需溫度以及降低熟料鈣含量以減少碳排、或以反應性輔助膠結材料

(Supplementary cementitious materials, SCMs) 搭配較少量的矽酸鹽熟料達到性能要求，進而降低單位膠結材料的二氧化碳排放。

5. CCUS 發展碳捕捉利用及封存技術

CCUS 描述了從二氧化碳排放源或大氣中捕獲二氧化碳，並將其再利用或儲存，使大氣中的二氧化碳濃度降低之過程。目前備受關注的碳捕捉技術主要包括：

- (1) 利用碳酸鈣與氧化鈣在不同溫度區間轉換藉此捕獲的鈣迴路法 (Calcium looping)
- (2) 提升燃燒過程中助燃氣體之氧氣濃度，增加後端二氧化碳捕捉效率的富氧燃燒法 (Oxyfuel)
- (3) 利用醇胺藥劑的化學吸收捕獲法 (Amines-based capture)
- (4) 使用選擇性薄膜兩側不同壓力差捕獲法 (Membrane carbon capture)
- (5) 使用天然礦物或廢棄混凝土吸附再碳酸化 (Mineral carbonation)

因水泥及混凝土產業與營建產業息息相關，亦有研究指出，使用高二氧化碳分壓進行破碎混凝土的再碳酸化實驗，依據不同粒徑、配比、水灰比等因素，吸收量可提高到熟料製程排放的 60~80%。捕獲後二氧化碳可進行利用或儲存，例如向油田注入二氧化碳提高採油量、做為養殖藻類碳源、製造生質燃料、飼料，或直接打入穩固地層中進行地質封存等。但直到今日 CCUS 技術仍所費不貲，目前每噸二氧化碳捕捉成本從 50~70 歐元不等。隨著技術和科學的進步，預期未來幾年隨著相關創新技術發展成熟，碳捕捉成本可望進一步降低，推估未來每噸二氧化碳捕捉成本可能降低到 40 歐元以下。雖然如此，對於碳密集度極高的水泥業而言，捕碳成本仍然相當高，CCUS 之技術成本相較於水泥生產現有成本結構仍有相當大之衝擊。大多數捕獲技術仍處於研究階段，目前難以預測各種不同的 CCUS 技術，在接下來的幾十年裡將如何發展。這很大程度上取決於政治邊界條件，例如：能源稅、關稅、碳稅、低成本再生能源的可用性、儲存運輸條件，以及捕獲後二氧化碳的應用狀況等。目前 CCUS 還需要更多技術及經濟的可行性調查。然而，不依靠 CCUS 在水泥業實現淨零排放是極度困難的，除非水泥燒成有重大突破，可完全不使用石灰石及傳統化石燃料作為水泥製

造之原燃料，故 CCUS 依舊是實現水泥及混凝土淨零排放不可或缺的最重要途徑。2017 年聯合國環境署 (United Nations Environment Programme, UNEP) 針對可行性低碳水泥基材料的研究報告指出 (UNEP, 2017)，自 2009 年 IEA/WBCSD 發布水泥減碳路徑圖至今 (IEA and WBCSD, 2009)，已經陸續開發出更多可行及相較 CCUS 便宜、基於熟料的解決方案，其成本遠低於 CCUS，並可在中短期內被應用而顯著影響全球二氧化碳排放，而不會讓水泥業減碳變得過於昂貴。CCUS 仍是解決方案重要的一塊拼圖，其技術進展及運作成本是 2050 年水泥業是否能達成淨零排放的關鍵。

四、水泥業淨零排放路徑介紹

為使水泥業能夠於 2050 年完成淨零排放的目標，世界上各組織及水泥公司紛紛提出淨零排放路徑分享給水泥同業參考。除了提供建議的減碳目標外，還提供了水泥業建議的減碳策略，為水泥業減碳提供明確的方向，以下為全球水泥和混凝土協會 (Global Cement and Concrete Association, GCCA) 及歐洲水泥協會淨零排放路徑圖介紹：

1. GCCA 淨零排放路徑圖介紹 (GCCA, 2021)

GCCA 是由全球水泥及混凝土製造商組成的組織，會員廠占全球水泥行業總產量的 80%。從 2020 年開始，他們提出了基於氣候氣溫的升幅控制在 1.5 °C 《水泥及混凝土淨零排放路線圖》以內，描述了水泥行業達到 2050 年淨零排放目標的措施，並提供了實用的執行建議。

GCCA 的淨零排放路線圖重點在於熟料生產效率、水泥和膠結材料生產效率、混凝土生產效率、設計與施工、發展碳捕捉利用及封存技術 (CCUS)、電力脫碳、自然再碳酸化，並估計了這些措施在 2050 年的貢獻。為了監控淨零排放的進展，GCCA 設定了 2030 年的里程碑目標。以 2020 年為基準，他們設定在 2030 年時，混凝土排放強度需減少 25%，水泥排放強度需減少 20%。

GCCA 建議水泥業在 2020~2030 年內實施以下措施：

(1) 減少化石燃料的使用，增加替代燃料的比例

水泥業利用循環經濟，透過使用低碳替代燃料或生質燃料取代傳統燃料煤炭，可在生產階段減少化石燃料的使用及相應排放。以實現水泥業的能源轉型。

(2) 增加熟料的替代原料使用，包括飛灰、煅燒黏土、水淬高爐爐渣粉和石灰石粉。

通過生產低碳水泥，持續增加使用 SCMs 取代部分高碳排熟料，降低單位水泥碳排放。因火力發電之式微及煉鋼行業的低碳轉型，飛灰及水淬高爐爐渣可預期將逐漸減少，但其仍將於這十年間持續發揮重要角色。而近年大量被討論的煅燒黏土、石灰石及回收混凝土細粉等新興輔助性膠結材料的導入，也將促使熟料比例（熟料因子）持續下降。

(3) 在營建設計及施工過程中提高混凝土的生產效率及使用效率，包括混凝土的再利用。

在混凝土及設計施工方面，透過優化建築設計及提高混凝土生產效率，並進一步加工及使用回收材料，可以從源頭減少水泥及混凝土的使用。

(4) 加大對科技及創新技術的投資

在這十年間，水泥行業急需相關製程的新技術發展，如電力燒窯、氫能燒窯、新類型熟料及膠結材料製程等，現在就應立即開始投資，替進入 2030 年時做好準備。

(5) 發展碳捕捉利用及封存技術和基礎設施

CCUS 技術目前仍處於百家爭鳴的情況，但就技術的角度而言是可行的，惟其成本仍過高，每捕捉一噸的二氧化碳可能需要花費至 80~90 歐元的費用，這在成本上足以讓多數水泥廠裹足不前。GCCA 提出應在政策上與制定者及利害相關者合作，才可能順利推動 CCUS 的技術發展，並部署未來規模化所需要之基礎設施。

(6) 建立政策架構，以實現淨零混凝土的生產

GCCA 也強調水泥產業及價值鏈中，公共政策、相關法規及標準可造成的核心作用。這需要水泥業者、政策制定者及政府的共同努力，一同推動有利低碳水泥及混凝土的生產政策及市場需求。

2. 歐洲水泥協會淨零排放路徑圖介紹 (CEMBUREAU, 2020)

CEMBUREAU 在 2020 年發布的淨零排放路線圖，請參閱圖 1，說明了以 1990 年單位水泥排放量為基礎，扣除至 2017 年排放強度的下降量後，再透過 5C 減碳技術達到淨零排放。5C 分別為熟料、水泥、混凝土、營造及 (再) 碳化 (Clinker, Cement, Concrete, Construction, re-Carbonation, 5C)。

目標在 2030 年前，依循《巴黎協定》2 °C 的情境，水泥生產二氧化碳排放量對比於 1990 年應減少 30%、下游混凝土產業鏈減少 40%，設定與全球一致之 2050 年達成淨零排放目標。在熟料減排部分，2017 年歐洲水泥旋轉窯替代燃料占所需燃料的 46%，其中 16% 為生質燃料，並計畫持續擴大生質燃料使用，2030 年及 2050 年目標將分別達 30%、50% 生質燃料使用率。同時使用替代原料取代石灰石、持續提高熟效率、發展新型態熟料、發展碳捕捉利用及封存技術，盡可能降低熟料排放。在水泥減排部分，則採行生產低熟料配比水泥、發展新型態低碳水泥材料及提升電力使用效率，降低水泥中熟料用量及間接排放。混凝土措施及營建設計階段之減碳措施，則以降低水泥使用及盡可能回收物料再利用之概念執行。最後自然發生的混凝土再碳酸化亦持續有減碳貢獻，在 IPCC 第 6 次評估報告中 (IPCC 6th Assessment Report, IPCC AR6)，被納入碳移除的計算中。根據瑞典環境研究所 (Swedish Environmental Research Institute, IVL) 數據顯示，在一般情況下，混凝土再碳酸化減碳量每年可達使用水泥之製程排放的 23%。相當於水泥製造排放總量的 8%。

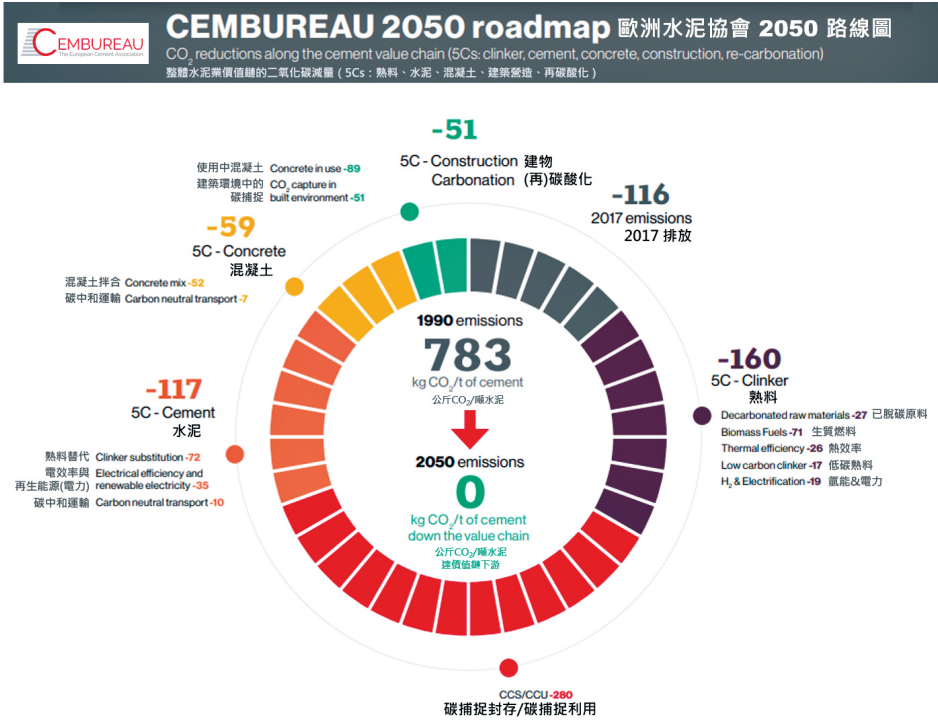


圖 1 歐洲水泥協會減碳路徑圖 (CEMBUREAU, 2020)

筆者認為我國水泥業可參考上述措施因地制宜發展國內水泥業短、中、長期減碳措施。初期以最佳可行技術為主，如：力行循環經濟降低熟料排放係數、生產低碳水泥降低水泥中熟料比例，降低直接排放、改善生產能耗降低間接排放，並持續關注及投入新創減碳技術之開發；中期持續放大上述減碳措施，開發新輔助性膠結材料應用於低碳水泥，以求更大幅度地降低單位水泥排放；後期則在減碳措施皆已成熟完備的情況下，全力導入碳捕捉利用及封存技術來達成淨零最後的一哩路。目前我國已與國際接軌，訂定國家標準 CNS 15286 水硬性混合水泥，可供國內業者依循，利用成本較熟料低的 SCMs 取代水泥熟料研發混合水泥。現已有國內廠商開發二元混合水泥，如：卜特蘭石灰石水泥、卜特蘭高爐爐渣水泥…等，未來可預期亦將有三元混合水泥，即水硬性混合水泥 (IT 型)，出現於市場上。混合水泥能在具備相同或更加的性質表現下，有較低的單位水泥碳排放。國外已有熟料比例僅占 50% 之三元混合水泥，如：石灰石煅燒黏土水泥 (Limestone calcined clay cement, LC³)，據國外研究顯示，該種水泥中

後期強度發展即與一般卜特蘭水泥相當，但單位水泥碳排放量可降低 40%。惟國內市場環境、下游業者使用習慣、法規、稅則等針對混合水泥之使用仍處於轉型過渡階段，尚需各界共同努力。

五、國內水泥業碳排放計算

混凝土是全球使用量最大的建材，而其中排放最多二氧化碳的原料便是水泥。如何在水泥製造過程中大幅降低碳排放的重要性不言而喻。筆者在研究各國國際組織的淨零排放路徑圖後發現，GCCA 及 CEMBUREAU 的路徑圖範圍涵蓋了混凝土、水泥及營建業，過於廣泛，難以由單一公司實行。為實現各產業的淨零目標，每個產業都需要有自己的淨零路徑圖，以清楚了解各製程的改善情況。在水泥廠的製程邊界內，主要的減碳措施包括：降低單位熟料的碳排放、開發新型低碳膠結材料、降低水泥中的熟料比例等。這些措施需要明確的減碳目標來逐步實現淨零。以下是 1 家水泥公司的碳排放計算範例，其程序和項目參考了 GCCA 淨零路徑圖及國內水泥業的 SBTi 目標盤查經驗。如圖 2 所示，首先，設定碳排放邊界，建議選擇具有營運控制權的設施，以水泥生產工廠為例。其次，收集生產工廠的大型排放源資料，主要包括熟料生產排放（製程排放和燃料排放）及電力間接排放。第三，計算熟料排放係數，分為製程排放及燃料排放。第四，計算水泥電力排放係數，通過用電量除以水泥產量得出。通過以上 3 個參數及水泥中熟料比例，可計算出各類水泥的排放強度。詳細計算方法及公式如下：

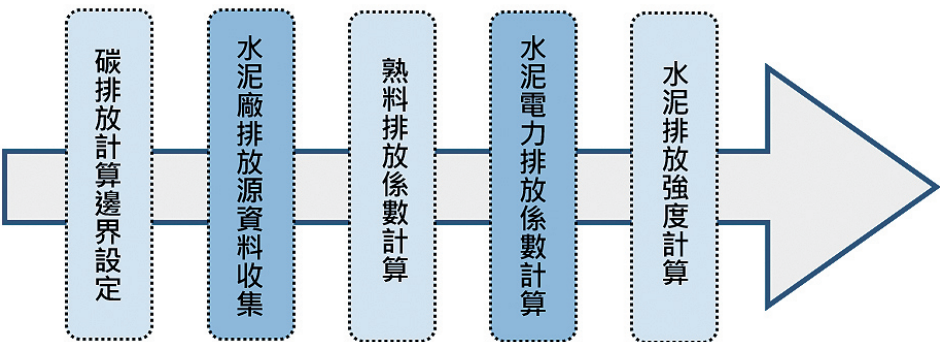


圖 2 水泥碳排放強度計算步驟

1. 碳排放計算邊界設定

在這個步驟中，設定須納入碳排放計算的邊界。本章節的主要目的是評估減碳措施的有效性，因此筆者建議以實際具有運營控制權的設施作為邊界。以下以水泥生產工廠為邊界作為範例，不考慮混凝土及營建業的減碳。

2. 水泥廠排放源資料收集

本文為使讀者能夠更清楚了解水泥業的排碳計算，故採重大排放源：熟料生產、水泥研磨、電力間接排放進行評估。石灰石、黏土副原料等原料採掘、使用，上下游產品運輸、使用等 ISO 14064 劃分之類別 4~6 排放因評估複雜且相較排放量較低在本文中暫且不納入範例，後續可依照各公司策略選擇評估。

(1) 熟料生產製程

需考慮熟料生產製程之「製程排放」、「燃料排放」，且水泥業可能使用大量循環經濟物料，故通常會需要熟料、替代原料、傳統燃料、替代燃料的相關數據以進行下一步計算。需蒐集資料包含：

- a. 熟料產量 [ton]
- b. 熟料 CaO、MgO 成分 [%]
- c. 年度熟料耗熱 [MJ/(t-clinker)]
- d. 替代原料種類
- e. 替代原料用量 [ton]
- f. 替代原料 CaO、MgO 成分 [%]
- g. 傳統燃料種類 (燃煤、重油 .. 等)
- h. 傳統燃料用量 [ton]
- i. 傳統燃料單位重量熱值 [MJ/ton]
- j. 傳統燃料碳排放係數 [$\text{t-CO}_2/\text{MJ}$]
- k. 替代燃料種類
- l. 替代燃料用量 [ton]
- m. 替代燃料單位重量熱值 [MJ/ton]
- n. 替代燃料碳排放係數 [$\text{t-CO}_2/\text{MJ}$]

(2) 水泥研磨製程

水泥研磨製程屬於水泥生產的最後端製程，此製程為透過熟料、石膏、石灰石及礦物摻料共同研磨成成品水泥。此步驟所需資訊，有利於追蹤低碳水泥生產所降低熟料用量情形。需收集資料包含：

- a. 水泥生產總量 [ton]
- b. 各型別水泥產量 [ton]
- c. 熟料入磨用量 [ton]
- d. 各型別水泥中熟料比例 $[(t\text{-clinker})/(t\text{-cement})]$

(3) 電力間接排放

水泥生產工廠電力能源耗用所造成之碳排放，可依照各工廠對於電力能源之規劃投資（如：綠電設備建置、購買綠電憑證等）、各型別水泥研磨條件等情況進行資料收集。建議蒐集資料包含：

- a. 工廠總用電量 [kWh]：旋窯、生料、預熱機、水泥磨、辦公室等系統耗電量
- b. 綠電用電量 [kWh]
- c. 餘熱回收發電量 [kWh]
- d. 外購電力度數 [kWh]
- e. 外購電力排放係數 $[\text{kg-CO}_2/\text{kWh}]$
- f. 各型別水泥研磨耗電量 $[\text{kWh}/t\text{-cement}]$

3. 熟料排放係數計算

熟料中氧化鈣 (CaO)、氧化鎂 (MgO) 主要由碳酸鈣 (CaCO_3) 及碳酸鎂 (MgCO_3) 受熱分解後提供，分解過程將伴隨產生二氧化碳 (CO_2) 排放，若使用非碳酸鹽類之含鈣物料作為替代原料，煅燒時則不會產生二氧化碳 (CO_2)。以此概念，先透過熟料中的 CaO 、 MgO 成份回推出皆以碳酸鹽類 (CaCO_3 、 MgCO_3) 作為原料所伴隨產生之二氧化碳排放，再扣除替代原料中 CaO 、 MgO 可取代的二氧化碳排放當量，計算可得製程排放。

而燃料排放可透過各燃料使用比例計算出各燃料供熱比例後，乘上相應之單位熱值排放係數，加總得到燃料排放因子 (tonCO₂/MJ)，再乘上年度熟料耗熱 (MJ/t-clinker)，得到燃料排放。以上 2 係數相加可得熟料排放係數。

(1) 製程排放 (替代原料若為碳酸鹽物料，則不適用以下算法)：

$$\begin{aligned} \text{製程排放} \left[\frac{t - CO_2}{t - clinker} \right] &= \\ &= \frac{\left\{ \left(\text{熟料產量} [ton] \times \text{熟料 CaO} [\%] \times \frac{CO_2 \text{分子重}}{CaO \text{分子重}} \right) + \right.}{\text{熟料產量} [ton]} \\ &\quad \left. \left(\text{熟料產量} [ton] \times \text{熟料 MgO} [\%] \times \frac{CO_2 \text{分子重}}{MgO \text{分子重}} \right) \right\}} \\ &= \frac{\left\{ \left(\sum_{i=1}^n \left(\text{替代原料}_i \text{用量} [ton] \times \text{替代原料}_i \text{CaO} [\%] \times \frac{CO_2 \text{分子重}}{CaO \text{分子重}} \right) \right) + \right.}{\text{熟料產量} [ton]} \\ &\quad \left. \left(\sum_{i=1}^n \left(\text{替代原料}_i \text{用量} [ton] \times \text{替代原料}_i \text{MgO} [\%] \times \frac{CO_2 \text{分子重}}{MgO \text{分子重}} \right) \right) \right\}} \end{aligned}$$

(2) 燃料排放：

$$\begin{aligned} \text{燃料排放} \left[\frac{t - CO_2}{t - clinker} \right] &= \text{年度熟料耗熱} \left[\frac{MJ}{t - clinker} \right] \times \text{燃料排放因子} \left[\frac{t - CO_2}{MJ} \right] \\ \text{燃料排放因子} \left[\frac{t - CO_2}{MJ} \right] &= \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\sum_{i=1}^n \left(\text{燃料}_i \text{供熱比例} [\%] \times \text{燃料}_i \text{碳排放係數} \left[\frac{t - CO_2}{MJ} \right] \right) \\ \text{燃料}_i \text{供熱比例} [\%] &= \frac{\text{燃料}_i \text{用量} [ton] \times \text{燃料}_i \text{單位重量熱值} \left[\frac{MJ}{ton} \right]}{\sum_{i=1}^n (\text{燃料}_i \text{用量} [ton] \times \text{燃料}_i \text{單位重量熱值} \left[\frac{MJ}{ton} \right])} \end{aligned}$$

燃料_i 包含傳統燃料及替代燃料。

(3) 熟料排放係數：

$$\text{熟料排放係數} \left[\frac{t - CO_2}{t - clinker} \right] = \text{製程排放} \left[\frac{t - CO_2}{t - clinker} \right] + \text{燃料排放} \left[\frac{t - CO_2}{t - clinker} \right]$$

4. 水泥電力排放係數計算

此處假設工廠總用電扣除餘熱發電及綠電來源後，皆向台灣電力公司購買電力，且各型水泥研磨單位水泥所需耗電量相同。

$$\begin{aligned} & \text{水泥電力排放係數} \left[\frac{t - CO_2}{t - Cement} \right] \\ &= \frac{(\text{水泥工廠總用電量 [kWh]} - \text{餘熱發電量 [kWh]} - \text{綠電 [kWh]}) \times \text{台電電力排放係數} \left[\frac{kg - CO_2}{kWh} \right] \times 0.001 \left[\frac{ton}{kg} \right]}{\text{水泥產量 [ton]}} \end{aligned}$$

5. 水泥排放強度計算

因考慮水泥業屬於產量隨經濟波動之產業，產量隨經濟起伏波動，若水泥排放強度持續降低，而產量提高，若以總碳排放角度無法看出水泥業對減碳的努力，而透過單位水泥排放將能明確了解水泥各製程減碳改善的成效。

以下為各型別水泥排放強度計算方法：

$$\begin{aligned} & \text{水泥排放強度} \left[\frac{t - CO_2}{t - Cement} \right] \\ &= \text{熟料排放係數} \left[\frac{t - CO_2}{t - clinker} \right] \\ &\quad \times \text{水泥中熟料比例} \left[\frac{t - clinker}{t - Cement} \right] \\ &\quad + \text{水泥電力排放係數} \left[\frac{t - CO_2}{t - Cement} \right] \end{aligned}$$

透過以上的計算可以明確分析出各製程排碳量，找出尚可減碳之製程，並採取相應的措施。根據製程排放公式可發現若持續增加替代原料、減少天然石灰石的使用，

將可大幅度減碳；而使用單位熱值碳排放較低之替代燃料作為供熱來源，則可降低燃料排放，兩者並行達到降低熟料排放係數之目的。由水泥排放強度公式可見，除了降低熟料排放係數，另須降低水泥中的熟料比例以及水泥生產過程中耗電量。降低水泥中熟料比例可透過生產低碳水泥來達成，而降低水泥電力能源排放則需由各公司針對能源轉型努力。針對水泥生產，降低各排放源的排放量須針對水泥生產及銷售做全面規劃佈局，提高產品和產業的可持續性，滿足對環保的社會需求。碳排放數據將替我們在制定減排策略及淨零路徑時提供重要的參考。

六、國內水泥業淨零路徑評估

在上一章中，我們透過分析水泥生產工廠的碳排放情況，釐清水泥生產過程所涉及的排放源。在此基礎上，我們可透過圖 3 步驟規劃自身淨零排放路徑：

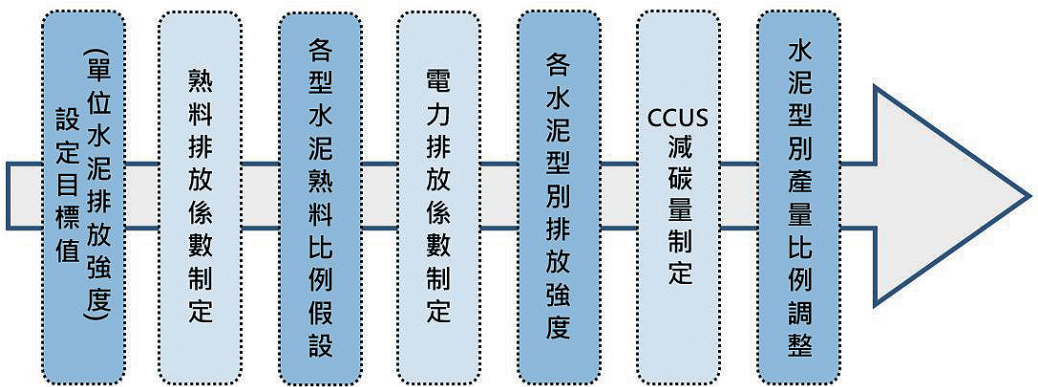


圖 3 淨零排放路徑評估方法步驟

淨零排放路徑評估方法步驟詳述：

1. 設定目標值（單位水泥排放強度）

首先需要初步設定年度目標，在路徑評估流程進行到最後時，若發現原先訂定目標遙不可及，可再檢討重新訂立具有挑戰性但可達成之目標值。

年度目標的訂定將在企業或工廠的減碳野心與實際可執行技術之間拉扯，數值十分難以決定。為此，筆者提供幾個方案作為訂定方法參考：

- (1) 參與科學基礎減量目標倡議 (SBTi)：透過申請參加此全球性倡議，與其工作小組合作、溝通，訂定科學基礎減碳目標。
- (2) 參考國家發展委員會 (國發會) 所提供的指標：依溫室氣體減量及管理法制定三期目標，皆以 2005 年作為基準年，第一期為 2020 年相較基準年減碳 2%，第二期為 2025 年相較基準年減碳 10%，第三期為 2030 年相較基準年減碳 20%。
- (3) 參考 GCCA 發布之水泥業減碳路徑圖；以 2020 年排碳為基準，2030 年相較基準年減碳 20%。

這 3 者可視為水泥業碳排放的重要參考。一旦確定了年度指標，便可以著手制定具體的減碳計劃。這將涉及降低熟料排放係數、促進低碳水泥生產及 CCUS 新創技術等減碳技術。參考以上資料，範例設定各年度目標：相較基準年，水泥生產工廠在 2025 年減碳目標值 8%、2030 年減碳目標值 20%、2040 年減碳目標值 50%、2050 年達到淨零排放。

2. 熟料排放係數制定

根據歐洲水泥協會統計，2020 年熟料排放係數為 0.825 噸 CO₂/ 噸熟料 (CEMBUREAU, 2023)。熟料排放係數依各公司或工廠使用替代原料、替代燃料的狀況而異，目前國內水泥業在循環經濟物料使用量方面相較國際水泥廠較低，這一定程度上影響了我們的熟料排放係數，致使國內熟料排放強度遠高於此數值。為了實現這一目標，需要政府、學者專家、水泥業共同研商循環經濟的策略，以提升循環經濟物料用量。在訂定熟料排放係數目標值時，應考慮自身工廠情況及發展策略，著眼點可包含：

- (1) 往年及未來預估的循環經濟物料種類：利用物料成分 (氧化鈣、氧化鎂) 來評估替代原料的減碳效益；若物料作為替代燃料，則應考量單位熱值的碳排放係數，以利減少燃料排放。
- (2) 未來循環經濟設備投資：因傳統之水泥生產設備未具有使用替代原燃料之設計，造成使用量無法提升。而透過編列設備投資將大幅提高物料使用量，可將改造後預估能提升之使用量列入評估，如：進料口設計、燃燒爐體改造等。

(3) 製程熱效率改善：熱效率改善可減少燃料的使用，同步減少傳統燃料以及替代燃料的使用量。

公司或生產工廠可透過考量以上幾點，利用第五章所列公式，估算自身製程排放以及燃料排放，訂出各年熟料排放係數目標。值得一提的是，在 GCCA 所提路徑圖中，所有可行措施皆執行的狀況下，2050 年熟料排放係數值為 0.475。筆者在此特別提出此值，旨在提醒公司或生產工廠訂定目標時，應注意兼顧挑戰性與可達成的合理性。

通過以上方式訂定目標，不僅可得到熟料排放係數目標，也能追蹤製程排放、燃料排放狀況，隨時做出調整。列舉範例於表 1，為 1 水泥廠通過以上方法設定之製程排放、燃料排放、熟料排放係數目標值。

表 1 熟料排放係數目標

項目	單位	2019	2020	2021	2022	2025	2030	2040	2050
製程排放係數	ton-CO ₂ /ton-clinker	0.548	0.540	0.537	0.526	0.507	0.472	0.402	-
燃料排放係數	ton-CO ₂ /ton-clinker	0.344	0.335	0.330	0.330	0.314	0.290	0.243	-
熟料排放係數	ton-CO ₂ /ton-clinker	0.892	0.874	0.867	0.856	0.820	0.762	0.645	0.475

3. 各型水泥熟料比例假設

(1) 在水泥生產過程中，不同類型的水泥產品熟料比例的設定是至關重要的。要設定各類水泥中的熟料比例，需要考慮以下幾個關鍵因素：

- 現行國家標準：國內市面上大宗水泥產品皆有相對應的國家標準，其中規範了熟料以及添加物的比例限制，如：CNS 61 卜特蘭水泥、CNS 13512 壩砌水泥、CNS 15286 水硬性混合水泥等。
- 自身公司或工廠生產低碳水泥的種類及條件：考量各廠原料取得難易度（如：用於水硬性混合水泥之原料石灰石、水淬高爐爐渣、卜作嵐材料）、水泥品管條件（如：研磨配比）等，進行各型水泥熟料比例評估。

接續前述範例，假設各型水泥熟料比例為：卜特蘭水泥 91%、水硬性混合水泥 (IL 型) 83%、壩砌水泥 75%、水硬性混合水泥 (IT 型) 50%。

4. 電力排放係數制定

在制定水泥的電力排放係數時，需要綜合考慮以下幾個關鍵因素：

- (1) 公司在製程節能方面的投資：企業在提高生產效率和減少能源消耗方面所做的投資，是影響電力排放係數的重要因素。
- (2) 公司在再生能源方面的投資或策略：企業在使用太陽能、風能等再生能源方面的投入和策略規劃，將直接影響其電力排放係數。
- (3) 能源署預估的年度電力排放係數：使用政府或能源機構提供的電力排放數據，可以作為制定公司電力排放係數的基礎。
- (4) 生產低碳水泥的種類及條件：不同類型的水泥生產可能需要調整產品的細度，這會影響研磨過程中的電力消耗。
- (5) CCUS 技術的投資：碳捕捉利用及封存技術在國際上仍處於初期階段。

根據各種路徑圖分析，應用 CCUS 技術將增加電力消耗。因此，公司在此技術上的投資也需納入電力排放係數的考量。由於水泥電力排放係數考慮因素較為複雜，對於能源間接排放影響有消有長，故範例假設 2025、2030、2040 年電力排放與基準年相同做計算，而 2050 年因全面轉型為綠色能源，無電力排放。

5. 各水泥型別排放強度

經前述步驟設定，可計算得出各目標年的各型水泥排放強度，公式參考前一章水泥排放強度計算：

$$\begin{aligned} \text{各型水泥排放強度} & \left[\frac{t - CO_2}{t - Cement} \right] \\ &= \text{熟料排放係數} \left[\frac{t - CO_2}{t - clinker} \right] \\ &\times \text{各型水泥熟料比例} \left[\frac{t - clinker}{t - Cement} \right] \\ &+ \text{水泥電力排放係數} \left[\frac{t - CO_2}{t - Cement} \right] \end{aligned}$$

實際範例參考表 2，為 1 水泥廠通過以上方法訂定之各年度各型別水泥排放強度目標。

表 2 各型水泥排放強度目標

項目	單位	2019	2025			2030			2040			2050		
水泥 型別	--	卜特蘭水泥	塊砌 水泥	卜特蘭 石灰石 水泥	卜特蘭 水泥	塊砌 水泥	卜特蘭 石灰石 水泥	三元混合 水泥	塊砌 水泥	卜特蘭 石灰石 水泥	三元混合 水泥	塊砌 水泥	卜特蘭 石灰石 水泥	三元混合 水泥
水泥中 熟料比例	kg-clinker/ kg-cement	0.910	0.750	0.830	0.910	0.750	0.830	0.500	0.750	0.830	0.500	0.750	0.830	0.500
單位熟料 碳排放	ton-CO ₂ / ton-clinker	0.892	0.820			0.762			0.645			0.475		
-單位熟料 製程排放	ton-CO ₂ / ton-clinker	0.548	0.507			0.472			0.402			-		
-單位熟料 燃料排放	ton-CO ₂ / ton-clinker	0.344	0.314			0.290			0.243			-		
單位水泥 電力排放	ton-CO ₂ / ton-cement	0.054	0.054			0.054			0.054			0		
各型別單位 水泥碳排放	ton-CO ₂ / ton-cement	0.866	0.670	0.735	0.801	0.626	0.687	0.435	0.538	0.590	0.377	0.356	0.394	0.238

6. CCUS 減碳量制定

CCUS 為水泥業為實現淨零的最後一哩路，目前全世界皆在積極開發相關技術中。CCUS 的減碳量應視各公司或生產工廠技術發展情況制定，不同技術對於碳捕捉有不同效率以及技術成熟度。根據 GCCA 評估，在 2050 年，整體碳排放之 30~40% 將透過 CCUS 技術捕捉。

範例假設 2030 及 2040 年 CCUS 減碳約占 2019 總碳排 1%、5%，並在 2050 年利用成熟的 CCUS 技術捕捉最佳生產條件下仍會發生之碳排放，達成淨零排放。

7. 水泥型別產量比例調整

在路徑評估流程的最後一步，設定各型別水泥的產量，搭配前些步驟所設定數值，計算出整體的水泥排放強度，並與第一步設定之目標相比較，檢視整體路徑是否為一可達成之規劃。

根據 GCCA 文獻，未來混凝土用於營建的量會增加，但混凝土中的水泥量將會降低，兩因素將會使水泥量難以估計。筆者認為我國已屬已開發國家，公共建設或民間建築數量增消已趨於穩定，因此國內水泥總產量或用量未來將持平或微幅降低，但國內水泥市場產品結構將發生變化。公司或生產工廠在規劃水泥產量時，可參酌考慮：

- (1) 公司於市場的產品規劃：散裝或袋裝產品種類及產銷量
- (2) 國內法規及市場接受度預期：施工規範、貨物稅、使用產品習慣、營建商對低碳建材需求…等

由於熟料為水泥主要排放源，隨淨零排放趨勢，低熟料比例的低碳水泥將會成為主流，最終目標為生產 50% 熟料之水硬性混合水泥，並具有與卜特蘭水泥相同之性能，為減碳效益及性能兼具之水泥產品。本文範例將水泥總產量設定與基準年相同，而生產不同型別水泥有不同的熟料比例，使每個目標年的熟料產量不同，以下為對各型別水泥產量比例設定作演示范例：

1. 2025 年：因目前公共工程施工綱要規範尚未完善，且目前混凝土廠普遍習慣使用卜特蘭水泥，低碳水泥處於推廣階段，故設定卜特蘭水泥約佔總產量 80~90%。
2. 2030 年：參酌 GCCA 路徑圖，預估 2030 年全球水泥中熟料比例將會達到 0.58。此時假設水硬性混合水泥 (IL 型) 已完全取代卜特蘭水泥，並開始生產 50% 熟料占比之水硬性混合水泥 (IT 型)。
3. 2040 年：水硬性混合水泥 (IT 型) 逐漸取代卜特蘭石灰石水泥成為主要水泥種類，估計其將佔總產量 50%。
4. 2050 年：水硬性混合水泥 (IT 型) 成為主流水泥產品，約佔產量 70%。
5. 壩砌水泥：參考 2022-2023 年台灣水泥年報，國內各水泥廠之袋裝水泥產量約佔總產量的 15%，故壩砌水泥最高比率為 15%。

在設定完各型別水泥產量比例後，計算整體的水泥排放強度，實際範例參考下列公式、表 3 及表 4。

各型水泥排碳量：

各型水泥排碳量 $[t - CO_2]$

= 各型水泥排放強度 $\left[\frac{t - CO_2}{t - cement} \right] \times \text{水泥總產量 [ton]}$
× 各型水泥產量比例 [%]

整體水泥排放強度：

水泥排放強度 $\left[\frac{t - CO_2}{t - cement} \right]$
= $\frac{\text{各型水泥排碳量總和 } [t - CO_2] - \text{CCUS 減碳量 } [t - CO_2]}{\text{水泥總產量 [ton]}}$

表 3 各製程年度減碳目標 (2019 年及 2025 年)

項目	單位	2019	2025		
水泥型別	—	卜特蘭水泥	燠砌水泥	卜特蘭石灰水泥	卜特蘭水泥
水泥總年產量	ton-cement	3000,000	3000,000		
各型別水泥年產量	ton-cement	3000,000	60,000	150,000	2790,000
水泥各型別生產佔比	percent	100.0	2.0	5.0	93.0
各型別水泥熟料產量	ton-clinker	2730,000	45,000	124,500	2538,900
水泥中熟料比例	kg-clinker/kg-cement	0.910	0.750	0.830	0.910
水泥中平均熟料比例	kg-clinker/kg-cement	0.910	0.903		
單位熟料碳排放	ton-CO ₂ /ton-clinker	0.892	0.820		
- 單位熟料 製程 排放	ton-CO ₂ /ton-clinker	0.550	0.507		
- 單位熟料 燃料 排放	ton-CO ₂ /ton-clinker	0.340	0.314		
單位水泥電力排放	ton-CO ₂ /ton-cement	0.054	0.054		
水泥年度總碳排放	ton-CO ₂	2598,714	2385,076		
各型別水泥年度碳排放	ton-CO ₂	2598,714	40,181	110,297	2234,598
各型別單位水泥碳排放	ton-CO ₂ /ton-cement	0.866	0.670	0.735	0.801
CCUS	ton-CO ₂	0	0		
單位水泥碳排放	ton-CO ₂ /ton-cement	0.866	0.795		
減碳百分比(含CCU)	percent	-	8.0		

表 4 各製程年度減碳目標 (2030 年、2040 年及 2050 年)

項目	單位	2030			2040			2050		
水泥型別	—	煆砌水泥	卜特蘭石灰石水泥	三元混合水泥	煆砌水泥	卜特蘭石灰石水泥	三元混合水泥	煆砌水泥	卜特蘭石灰石水泥	三元混合水泥
水泥總年產量	ton-cement	3000,000			3000,000			3000,000		
各型別水泥年產量	ton-cement	411,000	2574,000	15,000	450,000	1050,000	1500,000	450,000	450,000	2100,000
水泥各型別生產佔比	percent	13.7	85.8	0.5	15.0	35.0	50.0	15.0	15.0	70.0
各型別水泥熟料產量	ton-clinker	308,250	2136,420	7,500	337,500	871,500	750,000	337,500	373,500	1050,000
水泥中熟料比例	kg-clinker/kg-cement	0.750	0.830	0.500	0.750	0.830	0.500	0.750	0.830	0.500
水泥中平均熟料比例	kg-clinker/kg-cement	0.817			0.653			0.587		
單位熟料碳排放	ton-CO ₂ /ton-clinker	0.762			0.645			0.475		
- 單位熟料 製程 排放	ton-CO ₂ /ton-clinker	0.472			0.402			-		
- 單位熟料 燃料 排放	ton-CO ₂ /ton-clinker	0.290			0.243			-		
單位水泥電力排放	ton-CO ₂ /ton-cement	0.054			0.054			0		
水泥年度總碳排放	ton-CO ₂	2005,376			1296,428			0		
各型別水泥年度碳排放	ton-CO ₂	257,199	1767,634	6,530	242,093	619,035	565,235	160,313	177,413	498,750
各型別單位水泥碳排放	ton-CO ₂ /ton-cement	0.626	0.687	0.435	0.538	0.590	0.377	0.356	0.394	0.238
CCUS	ton-CO ₂	25,987			129,936			1006,693		
單位水泥碳排放	ton-CO ₂ /ton-cement	0.668			0.432			0		
減碳百分比(含CCU)	percent	22.8			50.0			100.0		

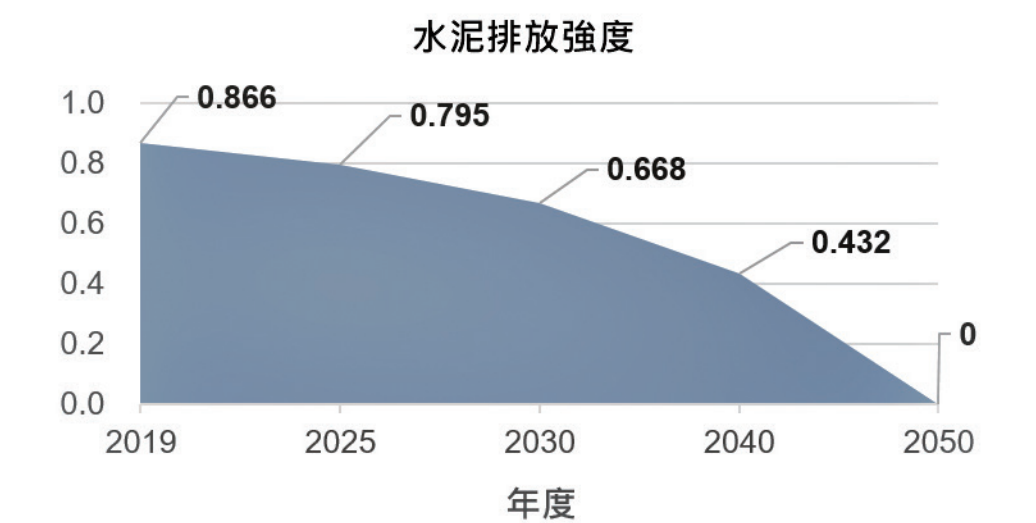


圖 4 2019 年至 2050 年淨零排放路徑圖

通過以上數據及假設，再透過各水泥種類之比例調整，使水泥碳排放強度接近設定減碳量，可取得各年度各製程減碳目標，並可以此數據做出該水泥廠之 2050 淨零排碳路徑圖如圖 4。以上步驟可清楚規劃水泥各製程所分配到的減碳目標，通過以上目標對水泥廠排碳進行管理、追蹤，一步步達成淨零排放目標。而若因外部環境因素

影響導致無法達成目標時，如：低碳水泥因規範及客戶習慣銷售量未達預期，則需透過強化各項減碳措施降低熟料排放係數，來達成目標值或對於減碳路徑圖作出調整，以達到 2050 淨零排放目標。

結語

本文介紹了水泥業減碳的重要性及相關措施，了解到水泥業是一個重要的產業，但同時也是一個高碳排放的產業。因此，減少水泥業的碳排放是非常必要的。本文提供了一些減碳措施，包括使用替代原燃料、生產低碳水泥、研發新膠結材料、發展 CCUS 新創技術等，這些措施可以幫助水泥業實現減碳目標。

為達到 2050 年淨零排放的目標，透過科學方法設定減碳目標及措施，可以提高產品和產業的可持續性，滿足對環保的社會需求，並更好地了解水泥業各製程的碳排放。本文提供了淨零排放路徑圖評估過程，清楚規劃水泥各製程所分配到的減碳目標，通過以上目標對水泥廠進行管理，一步步達成淨零排放目標。這份路徑圖的制定和實施，將提供我們明確的方向以完成淨零排放的目標，並透過碳排放計算方法學持續追蹤各製程是否達成減碳目標。此外，在未來減碳壓力越來越大的情況，水泥業需要克服各方困難和挑戰，例如：水泥業是一個資本密集型產業，調整現有的生產製程需要大量的投資，這對於任何水泥廠都是一個重大的風險。法規和客戶的保守特性也會對新低碳膠結材料及低碳水泥的發展產生影響。為推行循環經濟及低碳水泥，尚需政府、國內專家學者與水泥業共同努力透過政策及規範的修訂，創造利於水泥業推行減碳策略的環境，為環境保護和可持續發展作出貢獻。筆者透過以水泥業為範例拋磚引玉，提供各產業參考，將淨零路徑圖的概念應用到其他產業中，淨零排放不僅為水泥業的責任，還需透過各產業共同努力，才能實現世界淨零排放的目標。

參考文獻

- CEMBUREAU (2020), Cementing the European Green Deal-Reaching Climate Neutrality along the Cement and Concrete Value Chain by 2050, https://cembureau.eu/media/kuxd32gi/cembureau-2050-roadmap_final-version_web.pdf
- CEMBUREAU (2023), CEMBUREAU KEY FACTS&FIGURES, <https://cembureau.eu/media/lfqjyve5/key-facts-figures-2021.pdf>
- GCCA (2021), The GCCA 2050 Cement and Concrete Industry Roadmap for Net Zero Concrete, <https://gccassociation.org/concretefuture/wp-content/uploads/2021/10/GCCA-Concrete-Future-Roadmap-Document-AW.pdf>.
- IEA and WBCSD (2009), Cement Technology Roadmap 2009, <https://iea.blob.core.windows.net/assets/897b7ad9-200a-4314-b870-394dc8e6861a/CementTechnologyRoadmap-CarbonEmissionsReductionsupto2050.pdf>
- IPCC (2018), Summary for Policymakers of IPCC Special Report on Global Warming of 1.5°C approved by governments, <https://www.ipcc.ch/2018/10/08/summary-for-policymakers-of-ipcc-special-report-on-global-warming-of-1-5c-approved-by-governments/>.
- UNEP (2017), Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry, <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/25281>.

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160期，專業論著已逾1,864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
2. 廢(污)水處理：節水及廢水回收再利用、廢水及重金屬處理技術、碳中和
3. 廢棄物：資源循環及減碳行動
4. 土壤處理與毒化物：土壤與地下水整治、毒性化學物質管理
5. 環境管理規劃：永續發展策略、生命週期評估、減碳管理議題、再生能源發展與應用

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



陳靖瑜工程師

專線電話：(02)7704-5156

E-mail：watch8630@ftis.org.tw



「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160期，專業論著已逾 1,864 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) 廢(污)水處理
 - (3) 廢棄物
 - (4) 土壤處理與毒化物
 - (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:cjjhan@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5157「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、℃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：<https://proj.ftis.org.tw/eta/>

