



經濟部
Ministry of Economic Affairs



綠色技術與工程實務研討會

112年
論文集



經濟部產發署
編印



經濟部產發署

IDA, Ministry of Economic Affairs

台北市信義路三段41-3號

電話：(02)2754-1255

傳真：(02)2704-3753

網址：www.moeaidb.gov.tw

經濟部產發署廣告



GPN：
定價：500元

綠色技術與
工程實務研討會

112年論文集



經濟部產發署 編印

目 錄

論文簡報發表 議程1 — 空氣品質與減碳技術類

1-1 碳封存試驗計畫場址評估

沈建豪、田志明、黃乙倫、王志文、葉庭瑜 ----- 1-1

1-2 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 ----- 1-17

1-3 快削鋼與中碳鋼於 CNC 加工之能資源耗用差異與減碳效益分析

孫書煌、吳致呈、江宏偉 ----- 1-37

1-4 冷凍空調系統冷凝器效率改善專利型技術

蔣偉義、蔡國棟、蔣明軒、蔣河晏 ----- 1-53

1-5 新建工廠整廠節能及清潔生產評估系統建置規劃

謝豐裕、王玫芸、陳建匡 ----- 1-69

論文簡報發表 議程2 — 資源減耗與再利用技術類

2-1 產業用水效率提升推動成效

黃俊富、陳建璋、陳晴璇、林子皓、魏名軍、徐秀鳳、林庭瑋 ----- 2-1

2-2 中水回收再利用於織布與染整製程

吳孟育、林彥儕、辜德旺 ----- 2-15

2-3 植生復育植體再利用研究

蕭因秀、林舜隆、林駿、陳泰元、郭駿凱 ----- 2-27

2-4 廢棄岩棉回收再利用並應用於輕質建築材料之研究

陳婷雅、張琨閔 ----- 2-39

2-5 廢聚碳酸酯升級為具高熱穩定性和高耐酸性的聚（碳酸酯亞胺）之 vitrimers 及碳纖維複材

陳怡君、蘇迪、林慶炫 ----- 2-51

2-6 漿紙產業無機副產物淨零碳排資源化之研究

蔡志達、李昂軒 ----- 2-67

論文簡報發表 議程3 — 產業節水與水資源再生技術類

3-1 冷卻水塔回收水測試計畫-以矽品精密中科廠為例

蔡旻杰、蘇鈺荃、彭柏頤、黃任榆、吳俊湧 -----3-1

3-2 催化氧化活性碳結合臭氧處理乙氧基胺廢水應用

何心平、簡偉倫、陳國源、周珊珊、黃志彬 -----3-9

3-3 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、洪仁陽、梁德明 ----- 3-19

3-4 推廣去氮除磷技術應用於建築物污水處理設施之評析

蔡欣庭、張嘉真、朱敬平 ----- 3-37

3-5 染整前處理廢水回收過濾再利用案例

吳孟育、林彥儕、顏義軒 ----- 3-49

論文簡報發表 議程4 — 循環經濟與環境規劃管理類

4-1 日本企業共同節能機制研析

鄭雅文、曾台輔、范鑫榆 ----- 4-1

4-2 核能電廠除役循環經濟之探討

簡淑美----- 4-13

4-3 紡織業永續發展、循環經濟和淨零排放的前景與趨勢

林明旺、劉柏緯 ----- 4-25

4-4 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 ----- 4-37

4-5 應用節能增氧曝氣筒於工業廢水系統提升氨氮轉換率及降低能耗之研究

鍾良信、林伯勳、王奕鈞、余邵霽、鍾昇儒 ----- 4-59

碳封存試驗計畫場址評估

沈建豪*、田志明**、黃乙倫*、王志文*、葉庭瑜*

摘 要

二氧化碳捕捉及封存技術(Carbon Capture and Storage, CCS)是邁向 2050 淨零碳排的重要減碳方法之一，全世界首個碳封存場址是 1996 年啟動的北海 Sleipner 計畫，其主要是封存天然氣生產過程中所伴產的二氧化碳，而全球第一個跨境運輸並提供碳封存服務的商業計畫-挪威北極光計畫將於 2024 年正式上線，預期每年提供 1.5 百萬噸的離岸二氧化碳封存服務。根據國際能源總署(International Energy Agency, IEA) 2021 年公布的能源使用之二氧化碳排放量統計資料顯示，我國二氧化碳排放總量為 2.6 億噸。根據 2023 年 IEA 能源科技展望推估未來 CCS 技術可減少 10%的碳排，預計台灣未來每年有超過 2 千萬噸的二氧化碳需要利用該技術進行二氧化碳封存以達減排目標。

深部鹽水層為碳封存主要封存地質構造，而且分布面積廣極具封存潛能，根據二氧化碳封存適合的溫壓條件來看，台灣中北部盆地具備良好的地質條件及封存潛能。本研究透過盤點二氧化碳排放源(潛在的碳封存客戶)及具封存潛能之深部鹽水層進行封存評估，鎖定背斜構造之鹽水層，透過數值模擬來研究目標封存系統之注入能力、斷層洩漏風險以及地層穩定性分析，以建立碳封存場址評估技術。另外，本研究亦比較不同碳運輸方式之特性，以及本案例之環境影響評估成果，最後利用碳封存技術成熟度(CO₂ Storage Readiness Levels, SRLs)框架方法來針對潛在二氧化碳封存場址實施技術成熟度評估，做為未來建置封存場址之技術發展的重要參考。

【關鍵詞】碳封存、鹽水層、地質封存、場址評估、技術成熟度

*台灣中油探採研究所鑽井採油組 研究員

**台灣中油探採研究所鑽井採油組 研究員兼組長

一、前言

因應氣候變遷對於大自然環境及人類生存調適影響，2050 淨零碳排(Net Zero by 2050)已成為世界各國宣示及行動發展目標，我國政府於 2022 年分別公布「臺灣 2050 淨零排放路徑及策略總說明」及「12 項關鍵戰略行動計畫」，立法院並於 2023 年三讀通過《溫室氣體減量及管理法》修正草案，經總統公布施行，名稱修正為《氣候變遷因應法》，納入 2050 年淨零排放目標、提升氣候治理層級、徵收碳費專款專用、增訂氣候變遷調適專章、納入碳足跡及產品標示管理機制等。

減碳/淨零技術對於 2050 淨零碳排氣候目標為重要的發展方向，除大規模發展太陽能光電及風能等再生能源外，包含燃料轉換(Other fuel shifts)、行為調適(Behaviour)、氫能(Hydrogen)、電氣化技術(Electrification)、生質能(Bioenergy)、提升能源使用效率(Efficiency)，以及碳捕捉、再利用和封存(Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS)等亦為達成淨零目標的重要技術(圖 1)(IEA, 2020; 2023)。

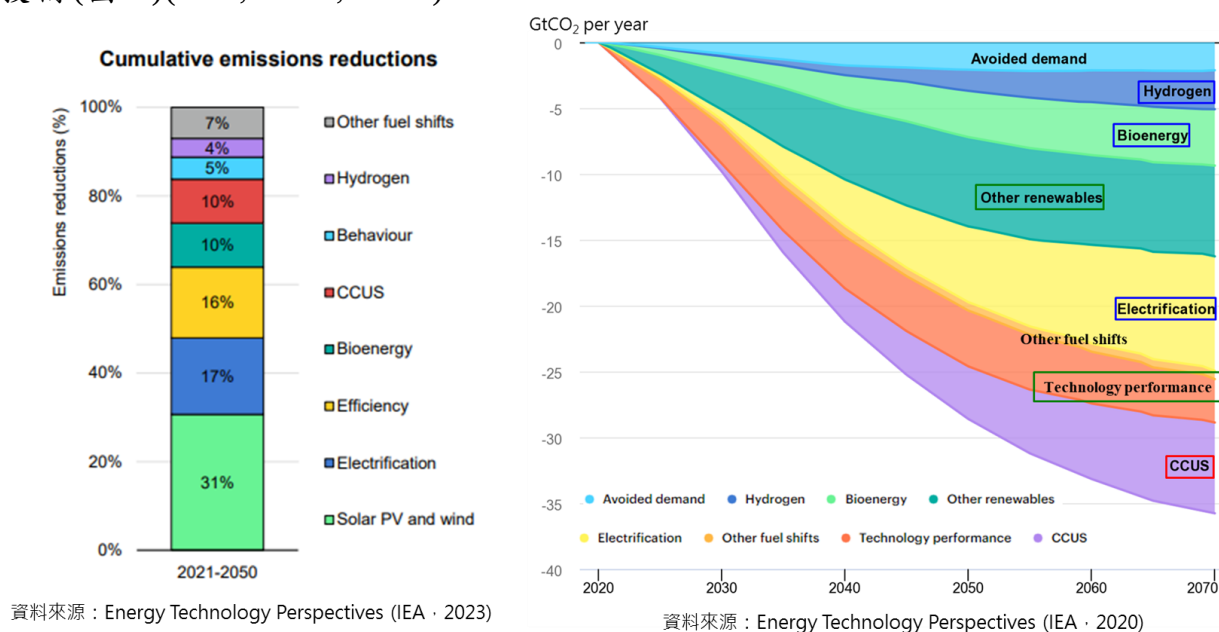


圖 1 減碳技術潛能推估(IEA，2020；2023)

台灣 2050 淨零排放路徑及策略(國發會，2022)中更納入 CCUS/CCS 技術，預期可提供台灣 20~27%的去碳電力，依據國際能源總署 IEA 之 2021 年公布的能源使用二氧化碳排放量統計資料顯示，我國之二氧化碳排放總量為 2.6 億噸，根據 2023 年的 IEA 能源科技展望所推估未來 CCS 技術可減少 10%的碳排，預計台灣未來每年有超過 2 千萬噸的二氧化碳，需要利用該技

術進行封存以達減排目標。

1. 二氧化碳捕捉及封存(CCS)

二氧化碳捕捉及封存(CCS)或碳捕捉、再利用和封存(CCUS)為國人較陌生的技術，其過程(圖 2)是指二氧化碳從排放源(例如電廠、煉油廠、水泥、煉鋼廠等)透過捕捉及分離技術來純化二氧化碳，經過壓縮運輸至再利用工廠(可轉化成化學品及建築材料等)或是二氧化碳封存場址注入至涸竭油氣層或是深部鹽水層中，將二氧化碳束縛在地層達到永久且安全的地質封存。全世界首個碳封存場址早在 1996 年啟動，北海 Sleipner 計畫，其主要是封存天然氣生產過程中所伴產的二氧化碳，世界各國正如火如荼發展技術及建置碳封存場址，根據 Global CCS Institute 的調查，截至 2022 年已有 196 個商業案場進行中，其中 30 個案場營運中，碳捕捉預期量將近每年 2.5 億噸二氧化碳，而全球第一個跨境運輸並提供碳封存服務的商業計畫-挪威北極光(Northern Light)計畫將於 2024 年正式上線，預期每年提供 1.5 百萬噸的離岸二氧化碳封存服務。

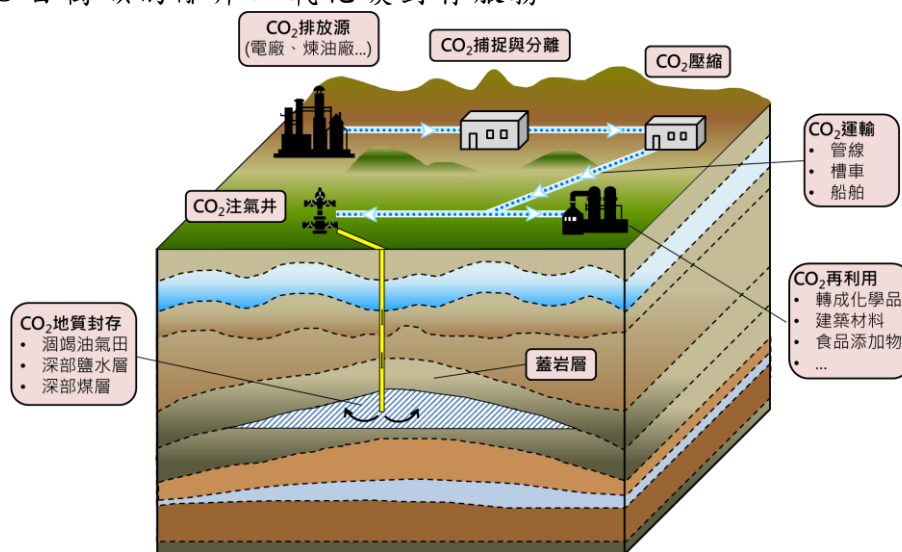


圖 2 碳捕捉及封存示意圖(台灣中油探採研究所繪製)

2. 二氧化碳地質封存機制

二氧化碳注入深部含水層後分布受 4 種封存機制控制，包括構造封存、殘餘封存、溶解封存、礦化封存(圖 3)，其中構造封存為防止二氧化碳逃逸至地表，而其餘封存機制則是隨時間增加和強化地質封存效率及安全性。

構造封存為灌注鹽水層的二氧化碳，以超臨界狀態存在於鹽水層的孔隙中，初期因受浮力影響，會上升聚集在灌注層的構造高區，被蓋岩層阻隔充滿於構造高區後，往側向流動延伸於鹽水層中。殘餘封存則是二氧化

碳受濕潤效應及毛細效應的影響，造成注入二氧化碳因移動性降低而被困在地層微孔隙空間之中。一般岩石，單一孔隙容積內，地層水(鹽水)可被二氧化碳取代之最大體積約 30~50%。溶解封存則是鹽水層中的超臨界二氧化碳與鹽水接觸後，二氧化碳溶解到地層水。二氧化碳溶解於鹽水中後，解離成碳酸根離子(CO_3^{2-})及碳酸氫根(HCO_3^{2-})離子，溶解封存作用下會增加地層鹽水密度，使其逐漸往下沉降形成對流，增進二氧化碳溶解作用及封存安全性。最後礦化封存因二氧化碳溶解於鹽水中後，解離成碳酸根離子(CO_3^{2-})及碳酸氫根(HCO_3^{2-})離子，並與地層中的礦物反應，形成碳酸鹽類礦物或次生礦物，以礦物形式封存在地層中。

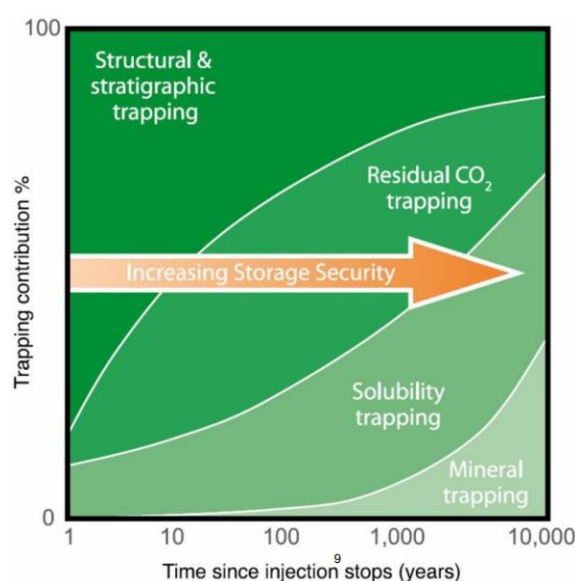


圖 3 封存機制時序示意圖(IPCC,2005)

3.碳封存場址評估技術與指標

碳封存場址已有成熟的評估技術及指標，目前世界各國已有許多的年注儲百萬噸等級的封存場址(例如挪威 Sleipner、澳洲 Gorgon 以及加拿大 Quest)營運或是建置中，透過這些場址營運對於碳封存技術已有相對的技術驗證及可信度，CCS 國際標準也發布(二氧化碳捕捉可參照 ISO-27919-1，二氧化碳管線運輸可參照 ISO-27913，地質封存則是 ISO-27914 可作為參考依據，此外英國地質調查局(British Geological Survey)於 2021 年提出了碳封存技術成熟度(Storage Readiness Levels, SRLS)框架(Akhurst et al.,2021)，可針對潛在二氧化碳封存地點實施全面性技術評估、許可依據和計畫實施進度，以及二氧化碳封存操作尚待完成的工作為何，這些標準及評估框架對於不管是計畫執行單位或是主管事業機

關，或是相關利益關係團體，隨著計畫成熟度發展下，有助於在相同的技術平台得到充分討論及監督。

碳封存技術成熟度 (SRLs) 框架分為 SRL-1~SRL-9，其中，SRL-1~SRL-4 屬於碳封存場址資料蒐集及評估階段，藉由既有文獻資料及相關報告進行初步的場址評估，此時往往透過簡單的體積法獲得理論的二氧化碳封存量，SRL-5 則是藉由探勘井(或稱地質探井)來獲得確切的封存系統之地層特性及參數資料，SRL-6 則是透過實際獲得地質資料及工程規劃來進行 CCS 可行性評估，此時可獲得具初步可信度之封存量估算，稱條件封存量。SRL-7 則是提交封存或測試許可，SRL-8 則藉由注入測試結果，提出二氧化碳注入及封存營運規劃以獲得封存許可，進行封存場址建造及試營運，最後 SRL-9 則是進行運轉及持續的注儲監測。

二、台灣二氧化碳封存潛能及主要排放源調查

適合二氧化碳地質封存的地質構造包括涸竭油氣層、深部煤層以及深部鹽水層等，其中深部鹽水層分布廣泛，藉由上部不透水層(例如：頁岩)的隔絕效果，以及儲集層(例如：砂岩)之側向良好延展空間，相較其他封存構造具有較大封存量，由國科會的能源國家型科技計畫之「淨煤、捕碳與儲碳主軸專案計畫」於 2014 年發行台灣二氧化碳地質封存潛能地圖集顯示，台灣西部有合適深部鹽水層地質條件及儲集層厚度，近岸 50 公里範圍之封存潛能初估可達 459 億噸(圖 4) (NEPI, 2014)。然而，台灣主要二氧化碳排放源多為能源使用，其中，發電及工業部門使用化石燃料發電，及產生工業用熱為造成二氧化碳排放量之主因。2020 年台灣二氧化碳排放量總計 2.6 億噸，主要碳排放源(>100 萬噸/年)分佈於台灣西部及東北部沿海，如台電大潭與台中火力發電廠、中鋼高爐及台塑麥寮石化廠等，發電產業及重工業(如水泥、鋼鐵、石化產業等)為台灣主要排放大戶，其二氧化碳排放量約達 1.9 億噸，占台灣總碳排之 73%(圖 4)。

本研究針對具封存潛能之深部鹽水層進行封存評估，鎖定以背斜構造之鹽水層，透過二氧化碳注入能力、二氧化碳團塊由斷層洩漏之風險及封存地層穩定性評估，進行二氧化碳封存模擬評估以建立碳封存場址評估技術，並探討碳運輸及環境衝擊評估，最後利用碳封存技術成熟度(SRLs)框架方法針對潛在二氧化碳封存場址實施全面性技術評估，做為未來建置封存場址之技術發展之重要參考。

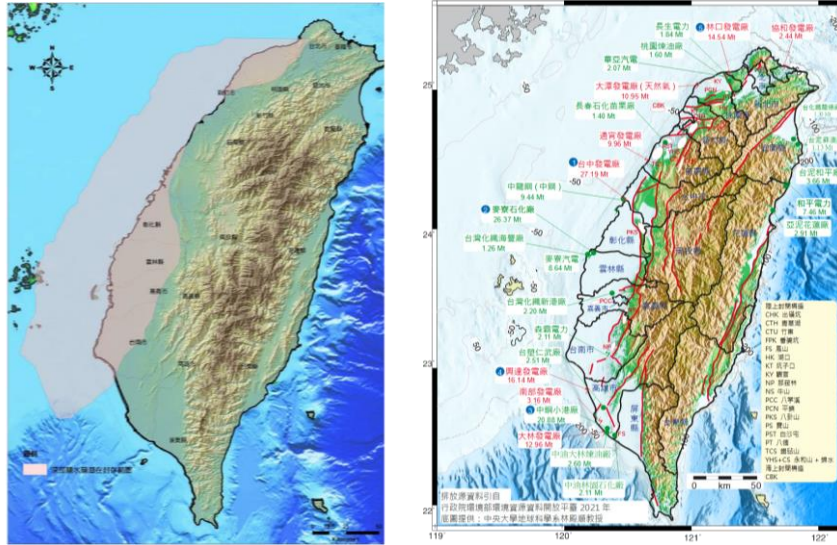


圖 4 台灣西部深部鹽水層封存潛能及主要碳排放源

(圖片來源：NEPI(2014)，中央大學地球科學系林殿順教授提供底圖，台灣中油探採研究所更新；碳排放數據資料來源：行政院環保署)

三、碳封存場址評估

碳封存場址評估時，關注的議題有封存量(Capacity)、注入能力(Injectivity)及封阻性(Containment)，封存量代表目標地層是否有足夠的孔隙體積封存注入之二氧化碳，注入能力則是是否能滿足規劃之年注入率或是透過其他工程手段(例如定向井或是水平井)來達到大規模注入之目標，封阻性則是探討封存系統之地層穩定性以及斷層等潛在洩漏路徑對注儲操作之影響，故先認識二氧化碳地質封存之機制，接著透過數值模擬來研究目標封存系統之注入能力、斷層洩漏風險以及地層穩定性評估。

由 IPCC(2005)的研究可知(圖 3)，在二氧化碳封存初期，二氧化碳主要是以構造封存機制封存於鹽水地層，隨著時間增加，構造封存機制所佔百分比會逐漸減小，而殘餘氣與溶解氣封存機制所佔百分比會逐漸增加，當時間更長(約幾千年後)礦化封存機制所佔百分比才有明顯的增加。雖然礦化封存機制安全性最高，但是因為地球化學反應相當複雜，所以其計算結果不確定性也最高。目前是以三個重要前期機制(包含構造封存機制、殘餘氣封存機制、溶解氣封存機制)進行評估。

1. 封存場址數值模型

本研究以 T 構造為例，T 礦區數值建模主要針對儲集層魚藤坪砂岩進行模式建立，目標鹽水層分布模型長約 13.7 公里、寬約 7.8 公里，厚度隨

構造變化而不同。數值模型採用之單位網格長寬高為 100 公尺×100 公尺×5 公尺，總網格數 42.8 萬，如圖 5 所示。

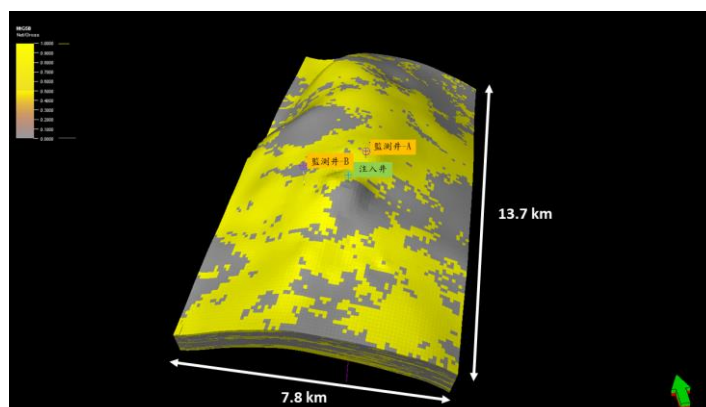


圖 5 魚藤坪砂岩地層數值模型

符合儲集條件之地質系統須包括蓋層與儲集層組合，蓋層須為滲透率低之緻密岩體(如頁岩)，而儲集層須為疏鬆之多孔隙岩體(如砂岩)，據此可使超臨界態二氧化碳儲存於多孔隙之儲集層，並因上方蓋層為低滲透率之緻密岩體受到阻隔，而不至傳遞於上方地下水層與人類生活圈範圍內。承上，地層構造符合二氧化碳地質封存安全之蓋層及儲集層配對條件，現階段規劃錦水-魚藤坪砂岩作為封存系統，其中錦水頁岩作為蓋層、魚藤坪砂岩作為儲集層，岩層與井位之相對位置如圖 6 及圖 7 所示。

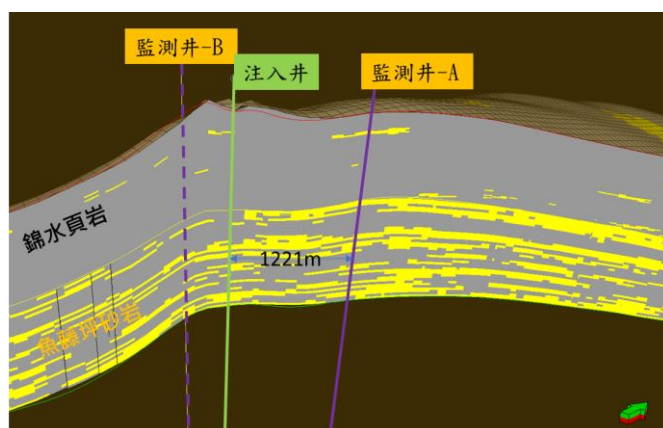


圖 6 注入井與監測井-A 岩性剖面及井位相對位置圖

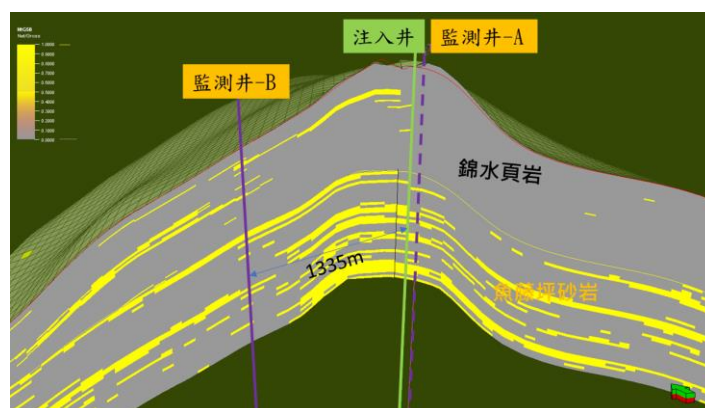


圖 7 注入井與監測井-B 岩性剖面及井位相對位置圖

數值模型設定方面，孔隙率及滲透率之關係式參考青草湖礦區桂竹林層進行之設定(圖 8(a))，假設垂直與水平滲透率比為 1:5，並參考文獻資料(Hsieh et. al, 2013)進行岩石流體相對滲透率設計(圖 8(b))，結果顯示如圖 8(c)頁岩約占 63.0%、砂岩約占 37.0%；孔隙率分布介於 7.0%至 23.0%區間，平均值為 9.6%；滲透率分布介於 5.5 至 590.3 毫達西(md)，平均值為 17.0 毫達西(md)。另目標鹽水層鹽度及組成則依據取得相對深度之地層水樣分析資料，如表 1 所示。

完成上述地層及流體參數設計後，輸入地層初始壓力及溫度條件，鹽水層壓力資料依正常靜水壓力梯度 0.45 psi/ft，估算 1,350 公尺處初始地層壓力為 1,993.2 psia；溫度則依正常溫度梯度 25 °C/km 估算 1,350 公尺處之初始地層溫度為 58.75°C。二氧化碳於標準狀態(25°C、14.7 psi)下以氣態方式存在，為提升二氧化碳封存之安全性及注儲潛能，場址選擇須讓地層溫度壓力條件大於臨界點(31°C、1,073.3 psia)，一般封存場址深度於 800 公尺以上即可使二氧化碳轉為超臨界態，當二氧化碳處於超臨界態時，其物理性質介於氣、液兩相之間，同時具有液體之高密度以及氣體之高流動性。本模型之初始地層壓力為 1,993.2 psia 及初始地層溫度為 58.75°C，二氧化碳在此溫度壓力條件下屬於超臨界態，亦即數值模型所注入之二氧化碳於儲集層為超臨界態。

本研究利用魚藤坪砂岩數值模型，針對注入井於目標地層(魚藤坪砂岩)之穿孔區間厚度約 60 m，設定之二氧化碳注入目標量為 100,000 噸/年，注入 3 年，於注入二氧化碳前須對注儲條件設定限制，由於注儲二氧化碳時將造成井底壓力上升，為避免地層因注入產生之壓力而破裂，必須針對注儲條件設定限制，而本模式以初始壓力之 1.5 倍(2,989.8 psia)，作為最大井底壓力，亦即若超臨界二氧化碳注入後使得井底壓力達到初始地層壓力之 1.5 倍限制條件後，將會改為定壓條件注入。

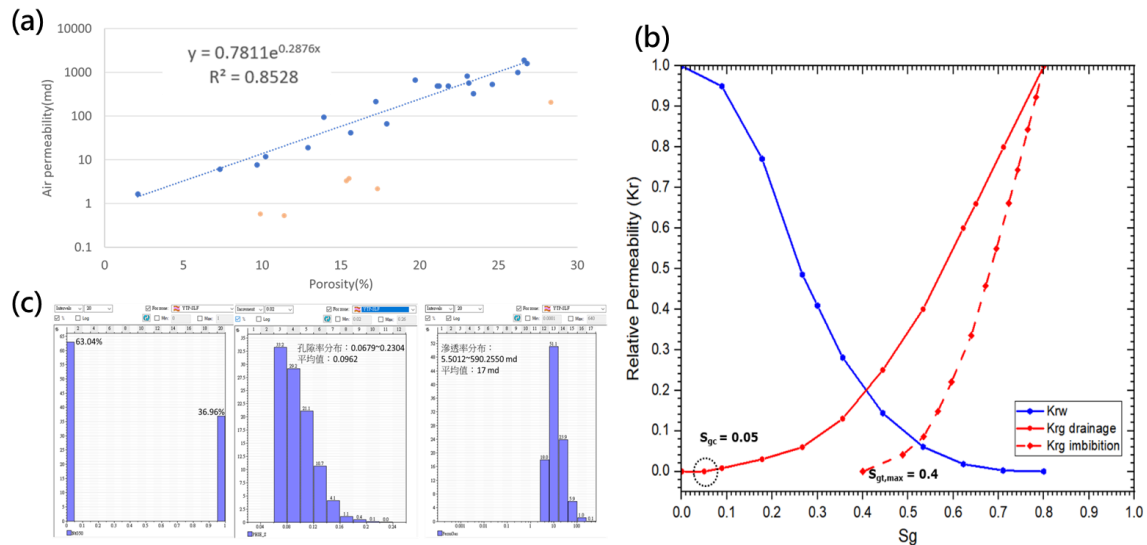


圖 8 數值模型參數，(a)孔隙率與滲透率關係，(b)數值模型岩性與孔滲比例，(c)岩石流體相對滲透率曲線

表 1 地層水樣分析資料

Sampling Date	50.07.19	50.07.25	50.09.19	50.12.24	50.12.29	50.12.29
Sampling Depth (m. MD)	1,225~1,230	1,339~1,360	2,330~2,334	2,650	2,328~2,333	2,559~2,564
Species(mg/L)						
Na ⁺	8,795.9	9,147.1	6,233.7	146	6,322.3	11,907.6
Ca ²⁺	208	286.4	63.4	30.4	33.2	4.8
Mg ²⁺	121.7	102	18.4	1.9	8.8	1.9
Fe ³⁺	13.4	51.1	6.3	2.2	12.1	6.5
Cl ⁻	14,157	13,167	9,001	140	7,610	15,338
HCO ₃ ⁻	1,120	3,050	1,370	134.2	3,843	5,145
SO ₄ ⁻	Nil	86.4	Nil	96.1	58.7	80.4
CO ₃ ²⁻	Nil	Nil	Nil	Nil	Nil	Nil
Density(g/cc@60°F)	1.0104	1.0102	1.0011	1.0003	1.001	1.0037
pH	7.4	8.1	7.6	6.9	7.8	7.6

2. 注入模擬評估

(1) 二氧化碳團塊由斷層洩漏之風險

本研究數值模型範圍內計有 R1、R2R、N1W、N2、N4W、N4E_A、N6 及 N7 等 7 條斷層皆無出露至地表，其中 R1、N4W、N4E、N6 及 N7 等 5 條斷層切穿十六份頁岩頂部至儲集層魚藤坪砂岩內，而 R1 斷層則有切穿魚藤坪砂岩及錦水頁岩頂部，注入井距 R1 斷層約 6.5 公里遠，故需確認二氧化碳在注入目標規模下，可能由 R1 斷層洩漏之風險，相關斷層分布及交會情形如圖 9 所示。

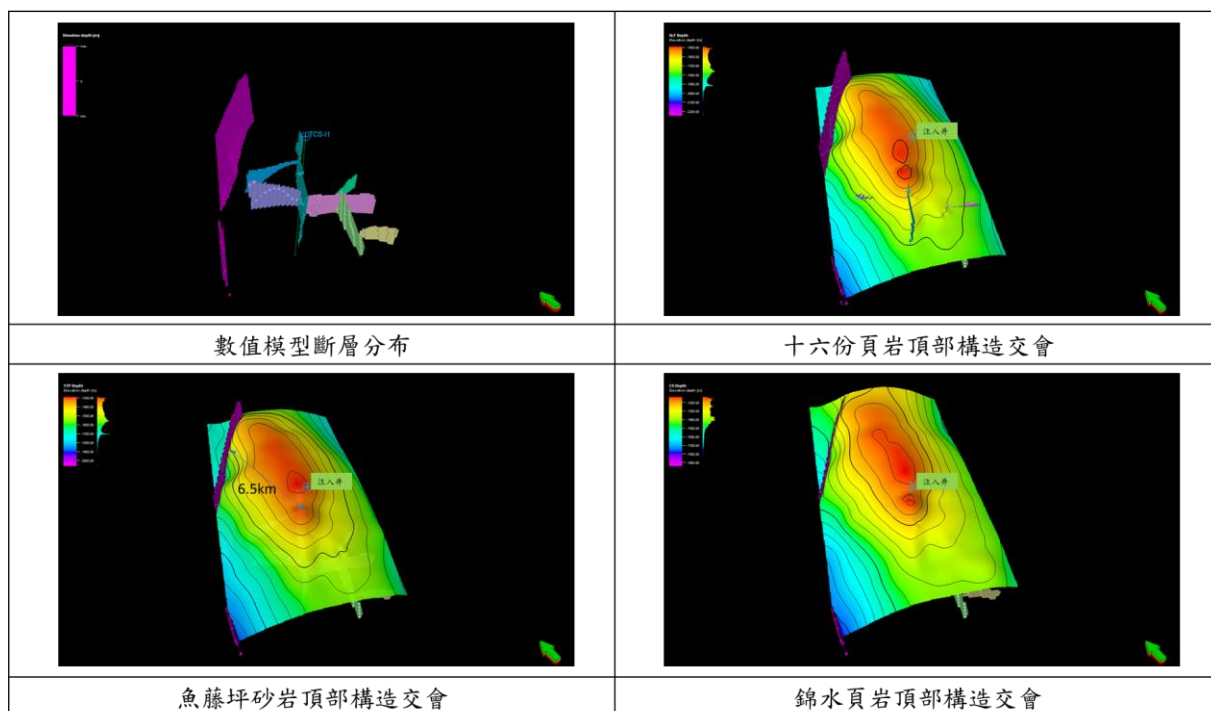


圖 9 數值模型與斷層分布交會情形

分析注入開始 50 年於注入井-監測井間(剖面)之移棲行為，可知二氧化碳主要注入至魚藤坪砂岩之中下部砂岩段，距離蓋岩層之錦水頁岩間仍有層間頁岩作為阻隔(圖 10)，而注入之二氧化碳主要聚集於背斜構造高區(圖 11)，因此二氧化碳由斷層洩漏之風險極低。

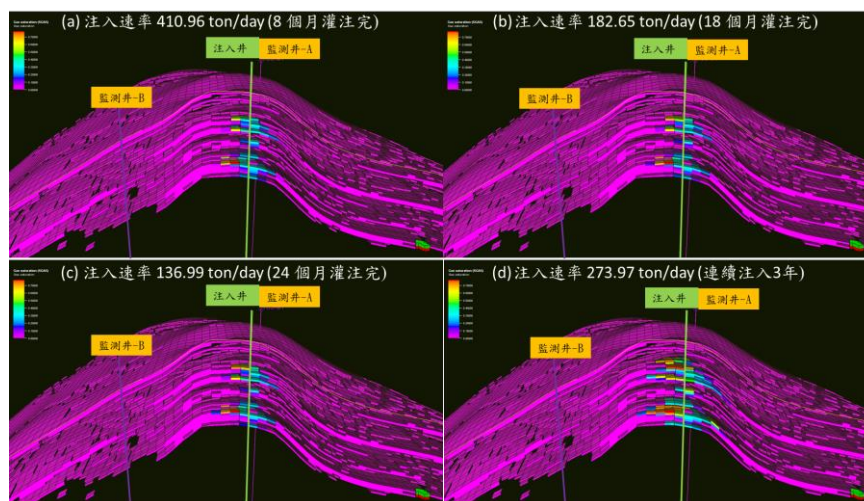


圖 10 注入開始 50 年之移棲行為(注入井與監測井-B 剖面為例)

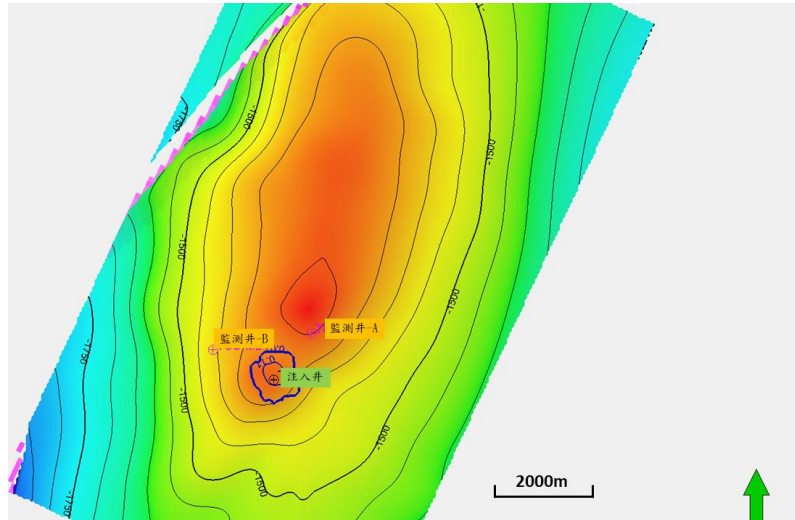


圖 11 注入開始 50 年之二氧化碳團塊與 R1 斷層距離

(2) 注入作業影響地層穩定性之風險

評估不同注入速率對岩層穩定性風險提升之結果(圖 12)，可知當一年注入量為 100,000 噸目標時，以注入率 136.9 ton/day(24 個月注完)時之井底最大壓力達 2,449.9 psia，相較於井底初始壓力 1,992.7 psia 增加約 22.9%；以注入率 182.7 ton/day (18 個月注完)時之井底最大壓力達 2,551.1 psia，相較於井底初始壓力增加約 28%；若提升至 411.0 ton/day (8 個月注完)時，井底最大壓力達 2,976.9 psia，此時相較於井底初始壓力增加約 49.4%，屬於較極端之情境，若依照目標注入規劃，以注入率 274.0 ton/day 時之井底最大壓力達 2,738.3 psia，相較於井底初始壓力增加約 37.4%。此外，於目標 30 萬噸之注入情境下僅有壓力延時增加，壓力並無堆疊增長之情形(圖 13)。

基於不同規模注入經驗及案例文獻(Zhou et al., 2008; Jin et al., 2010)，一般蓋層/儲集層條件下的注入壓力上限於約控制為初始壓力之 120~150 %。依據苦小牧實證試驗評價報告，安全注入壓力主要考量預定注入深度、管道損失，以及蓋層強度等因子，確切管理值將依據注入井鑽完後之岩層試驗資料作最後訂定。此外，考量岩體強度可依據岩體破壞模式，分析注入行為對地層穩定性影響程度，目前階段可根據汪蘭君(2010)於該地區之大地應力研究結果，計算魚藤坪砂岩於 1,350 公尺深度現地應力($\sigma_1=5,859$ psia、 $\sigma_3=3,604.5$ psia)，另根據蒐集魚藤坪砂岩或桂竹林層之岩體參數(黃伊伶，2012；台灣電力公司，2023)，進一步評估注入作業，對注入團塊影響範圍區域之岩層應力狀態改變，以了解岩體材料之安全性，孔隙壓力增量(Δu)分別以目標注入率之最大壓力增

量 745.6 psia(注入率 274.0 ton/day)進行評估,及最大注入壓力增量 984.2 psia(最快注入速率 411.0 ton/day)保守評估。由評估結果可知,於最大注入壓力增幅後之應力狀態改變,不管是彰濱井下岩心(台灣電力公司, 2014)或是野外露頭(黃伊伶, 2012)之岩體材料,皆距離碰觸破壞包絡線之臨界狀態相當遠(其安全係數分別為 2.1 與 2.6),綜上所述本注入規模初步評估對地層的穩定性影響不大,如圖 14 所示。

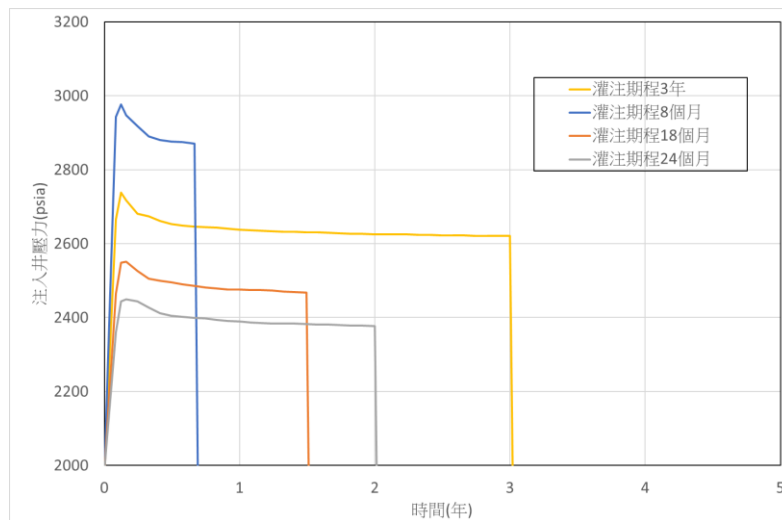


圖 12 不同注入速率(期程)下注入井壓力之依時變化

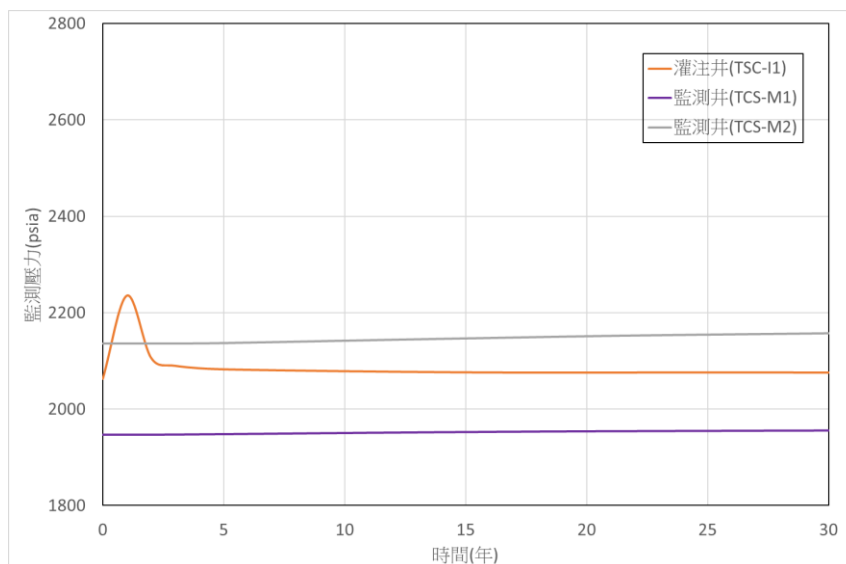


圖 13 目標注入情境下注入壓力之變化

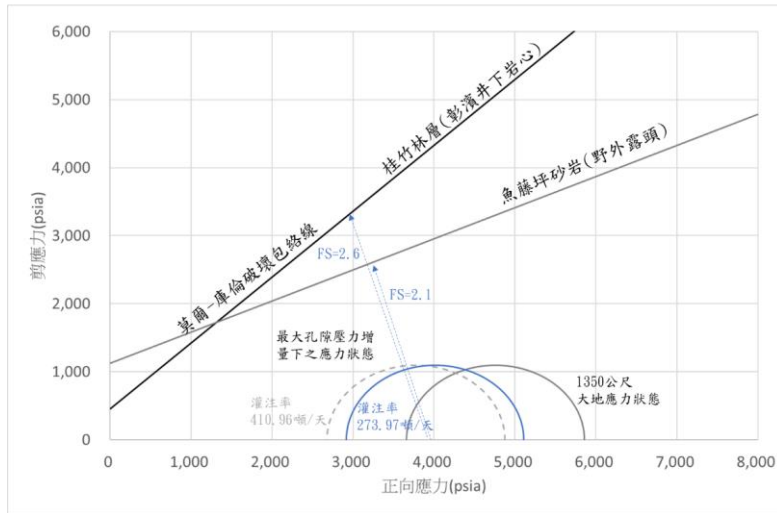


圖 14 岩體因注入作業之應力狀態變化

四、碳運輸與衝擊影響評估

二氧化碳比許多其他物質運輸要安全得多，因為它不會像石油和天然氣與空氣形成易燃或易爆混合物。二氧化碳釋放到環境空氣中時，不會直接對人類或野生動物產生毒性，除非在極不可能發生的情況下釋放(例如：釋放速度非常快且數量極大)才會有災難性。常見的安全措施(例如：管線壓力下降時的自動關閉功能)會使得災難性洩漏的可能性極小。二氧化碳管線和其他運輸方式均按照國際標準安全且嚴格管理。例如：在美國二氧化碳管線安全由聯邦管線和危險材料安全管理局(Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration, PHMSA)監管，二氧化碳管線安全數據由 PHMSA 公開報告。目前，美國約有 50 條二氧化碳管線營運中，總長超過 8,000 公里，年輸送量約 7,000 萬噸，並在陸上和海底二氧化碳管線開發和經營方面擁有豐富的經驗。

碳運輸是建構 CCS 價值鏈(Value Chain)(從排碳源至封存場)中不可或缺的一環。常見的碳運輸方式有：管線、槽車和船舶，而運輸方式選擇會考慮：碳排放源與封存場址距離、運送量大小、二氧化碳濃度(雜質含量)、相態(氣態、液態或超臨界態)、環境生態以及其他利害關係人關注議題等。其中，超臨界態由於具有與氣體相近的低黏度和高擴散性，以及與液體相近的密度和溶解性，較不易受到外界溫度影響，於實際運輸中具有優勢，但壓縮至超臨界態所需的成本較高。因此，在進行二氧化碳運輸時，依其成本考量及運輸方式，多將二氧化碳壓縮為超臨界態或液態進行運送，氣態則較少(表 2)。

表 2 二氧化碳運輸方式比較

運輸方式		CO ₂ 相態	運輸距離	運輸載量	優點	缺點
管線		氣態/超臨界態 (Gas/Supercritical)	中/長	大	① 輸送量大，碳源穩定下據具運輸和操作優勢 ② 營運成本(OPEX)低	① 初期資本支出高 ② 不易建於人口稠密或沿海生態區
槽車		液態(Liquid) 溫度：-20℃ 壓力：20 bar	短 (<100公里)	小	① 運送途徑較不受限 ② 資本支出(CAPEX)低	① 輸送量低 ② 受限於天候及交通 ③ 輸送產生碳排放高
船舶		液態(Liquid) 溫度：-30℃ 壓力：20 bar	中/長	中/大	① 適合中/長途運輸 ② 長途較管線有經濟效益 ③ 技術成熟(與LPG相似)適合初期先行	① 需要碼頭建置冷凍儲槽及裝卸設備 ② 船艙溫、壓控管條件高

資料來源：Technology Readiness And Costs Of CCS (GCCSI, 2021)；
Carbon dioxide transport via pipelines: A systematic review (Lu et al.,2020)

槽車運輸通常適用於短距離也是本試驗計畫預計採用運輸方式，具有交通運輸路徑彈性，通常為液態輸入，但受限槽體大小，單次運輸量能有限。管線運輸時，可以氣態、液態或超臨界態輸送。氣態輸送的密度低和壓降高，需要更大尺寸管線來輸送等量的二氧化碳。在液態或超臨界狀態下，二氧化碳的密度明顯高於氣態；可以較小尺寸的管線輸送大量的二氧化碳。管線輸送超臨界狀態二氧化碳的典型操作壓力窗口約 100~150 bar。船舶運輸時，則常為運輸工業和食品用途二氧化碳(如 1,000-2,000 m³)。大容量船舶(例如挪威北極光(Northern Light)CCS 項目)(如 7,500~ 50,000 m³)，降低單位運輸成本。二氧化碳通常在中、低壓力下以液態運輸(表 2)。目前液化二氧化碳船舶在中溫中壓(~-30 °C，20 bar)下進行運輸，而低溫低壓(~-50°C，5.8~12 bar)運輸是實現低成本大尺度液化二氧化碳船舶運輸的關鍵。

碳封存場址作業時，涉及鑽井作業施工期間及後續二氧化碳注入之營運作業，除先前透過數值模擬評估地下地質影響外，環境影響項目亦應針對空氣品質、溫室氣體、地面水質、地下水質、噪音振動、土石方等進行環境衝擊評估及提出對應的保護對策(表 3)，以降低對環境的衝擊。除此之外，碳封存場址之監測技術(圖 15)也至關重要，大氣環境進行環境背景二氧化碳監測，地表環境則有地表變形監測與水質監測，以及注入井區域二氧化碳通量監測技術，地下環境則包含微震監測、地層溫度及壓力變化監測、二氧化碳移棲監測，以及井下二氧化碳監測，透過地質、地球物理、地球化學以及工程科學之多專業學科背景之監測技術，以達安全封存之目標。

表 3 環境衝擊評估及保護對策(T 礦區環境影響對照表)

環境主要影響項目及對策	影響分析		影響評估	保護對策	
	施工期間	營運期間		施工期間	營運期間
空氣品質	鑽井機具	通行車輛	符合空氣品質標準，影響甚微。	施工圍籬、工區灑水、車斗加蓋防塵布等。	注入期間，設置二氧化碳氣體偵測器，偵測異常啟動緊急應變流程。
溫室氣體	移動燃燒源(機具運輸)為主要	移動燃燒源(機具運輸)及能源排放源(電力)為主要	施工階段佔整體31%，營運階段佔69%排放。	ISO 50001 能源管理、泵驅動馬達變頻設計、二氧化碳冷能發電方式降低二氧化碳排放。	
地面水質	工地、鑽井泥漿及生活污水	生活污水	經處理後可回收使用或清運。	工地廢水導入沉澱池，鑽井泥漿則導入電凝系統。	生活污水透過既有設施處理後清運。
地下水質	環保署 監測結果顯示鄰近測站除氨氮及鐵有未符合標準之情形外 其餘測項均符合標準。			採用套管背填水泥阻隔地下水受鑽井汙染。	設置地下水監測井長期監測水質影響。
噪音振動	最近敏感度距離<2公里，但經距離衰減後，所受影響可忽略。			施工機具採用低噪音、低震動之機型。施工車輛應符合營建工程噪音管制標準。	
土石方	土石廢棄物	不適用	無法採即挖即填	設置暫存區及逕流截並導入臨時性沉砂循環池污染地面水體，定期清運。	不適用

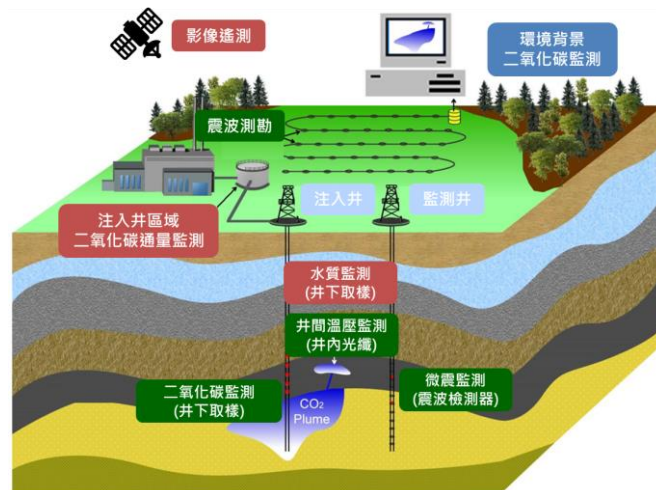


圖 15 碳封存場址監測概念(台灣中油探採研究所繪製)

五、結 論

本研究透過盤點台灣二氧化碳排放源(潛在的碳封存客戶)及具封存潛能之深部鹽水層進行封存評估，鎖定以背斜構造之鹽水層為例，接著透過數值模擬來研究目標封存系統之注入能力、斷層洩漏風險以及地層穩定性評估，以實現碳封存場址評估技術建立。比較不同碳運輸方式之特性，以及本案例之環境影響評估成果，最後利用碳封存技術成熟度(SRLs)框架方法來針對潛在二氧化碳封存場址實施全面性技術評估，本研究案例為二氧化碳示範

注入計畫，對應碳封存技術成熟度(SRLs)框架屬於 SRL-5~SRL-6，已完成碳封場場址之封存系統地質特性評估及注儲模擬評估，相關的大氣/地表/地下環境監測也逐一建置，正待進入注儲測試階段。

六、參考文獻

1. 110 年度我國燃料燃燒二氧化碳排放統計與分析，經濟部能源局，110 年 9 月。
2. 台灣二氧化碳地質封存地圖集，第一期程能源國家型淨煤主軸計畫 (NEPI)，國科會(原科技部)，103 年 3 月。
3. 台灣 2050 淨零排放路徑及策略總說明，國發會，111 年 3 月。
4. 台中發電廠第九、十號機發電計畫環境影響說明書第六次變更內容對照表 (設置二氧化碳封存試驗場址)，台灣電力公司，112 年 4 月。
5. 黃伊伶，超臨界二氧化碳對魚藤坪砂岩礦化封存機制的影響，國立成功大學碩士論文，101 年 7 月。
6. 能源統計手冊，經濟部能源局，112 年。
7. 鐵砧山地區天然氣注、產氣井開發計畫環境影響說明書第四次變更內容對照表，台灣中油股份有限公司，112 年 7 月。
8. Akhurst, M. et al., 2021, Storage Readiness Levels: Communicating the Maturity of Site Technical Understanding, Permitting and Planning Needed for Storage Operations using CO₂, IJGGC, Vol. 110, 2021.
9. GCCSI, 2021, Technology Readiness and Costs of CCS.
10. Global CCS Institute, 2023, 2022 Status Report.
11. IEA, 2020, Energy Technology Perspectives 2020.
12. IEA, 2023, Energy Technology Perspectives 2023.
13. IPCC, 2005, Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, Cambridge University Press, New York, N.Y.
14. Jin, M., Mackay, E., Pickup, G., 2010. Static and Dynamic Estimates of CO₂ Storage Capacity in Tow Saline Formation in the UK, SPE EUROPEC/EAGE Annual Conference and Exhibition, 14-17 June 2010.
15. Lu et al., 2020, Carbon Dioxide Transport via Pipelines: A Systematic Review.
16. Zhou, Q., et al. 2008, A Method for Quick Assessment of CO₂ Storage Capacity in Closed and Semi-closed Saline Formations. IJGGC, Vol. 4.

以人工智慧(AI)優化粉煤燃燒並改善 NO_x 及未燃碳

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(偏流及局部溫度過熱等)，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(SCR)之噴氨量增加、飛灰未燃碳或燒失量(Loss on Ignition, LOI)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碳由 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℃ 升高至 935.3℃，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(約佔總 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，降低未燃碳及提高熱效率。未來若導入高燃料比(固定炭)燃料，可降低 LOI 至 6%，促進飛灰於循環經濟利用的管道。

【關鍵詞】粉煤燃燒、燃燒優化、人工智慧、氮氧化物、未燃碳

*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)，並改善飛灰未燃碳或燒失量(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 70ppm 已考量並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 30ppm (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

(一)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)

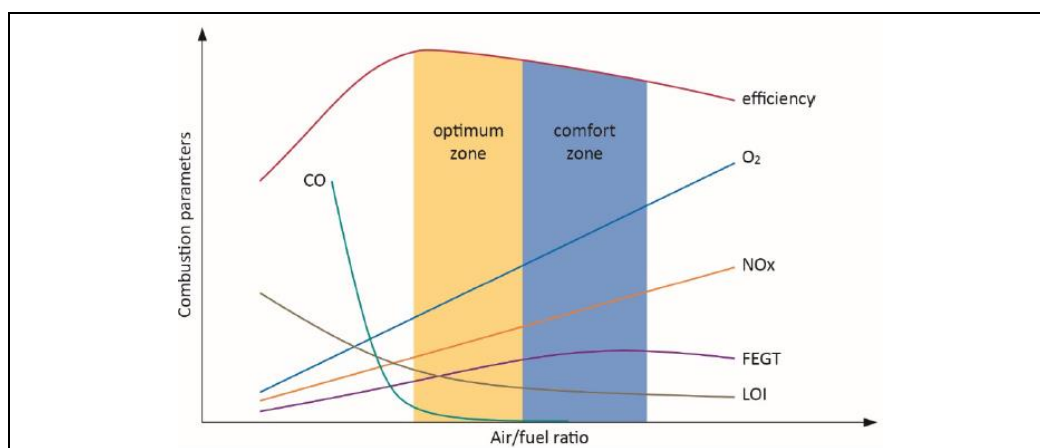


圖 1 關鍵燃燒參數與空燃比之關係(Widmer and Marquez, 2012)

(二)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。

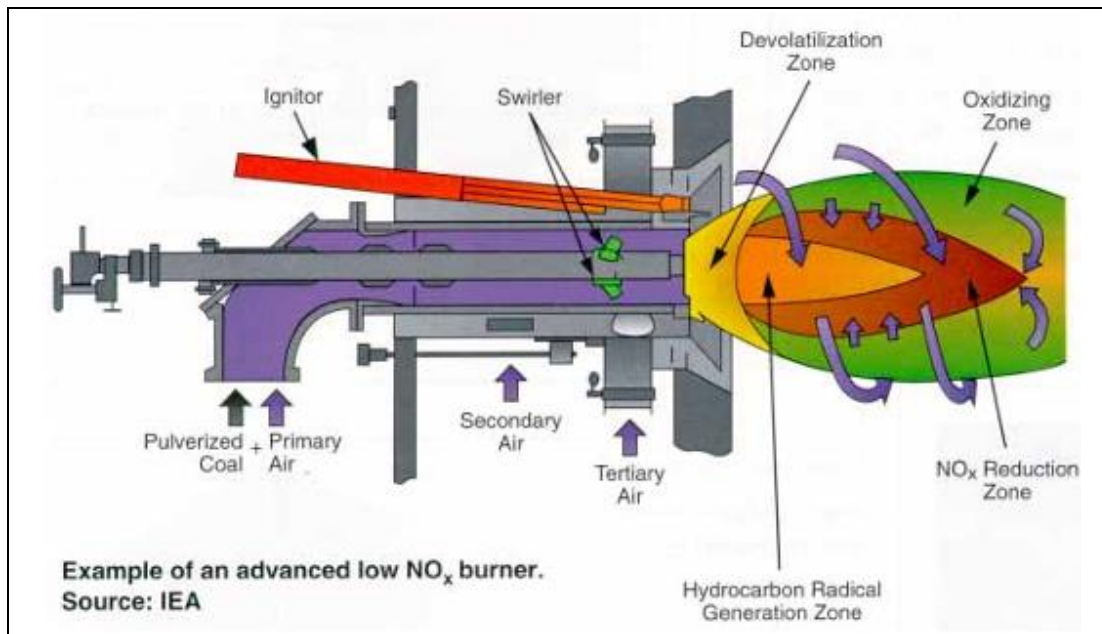


圖 2 低氮氧化物燃燒器(LNB)(ECHNOLO, 1996)

(三)增加粉煤細度

多數燃煤電廠改善經驗中顯示，至少有75%-80%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等使研磨煤粉過篩值(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。

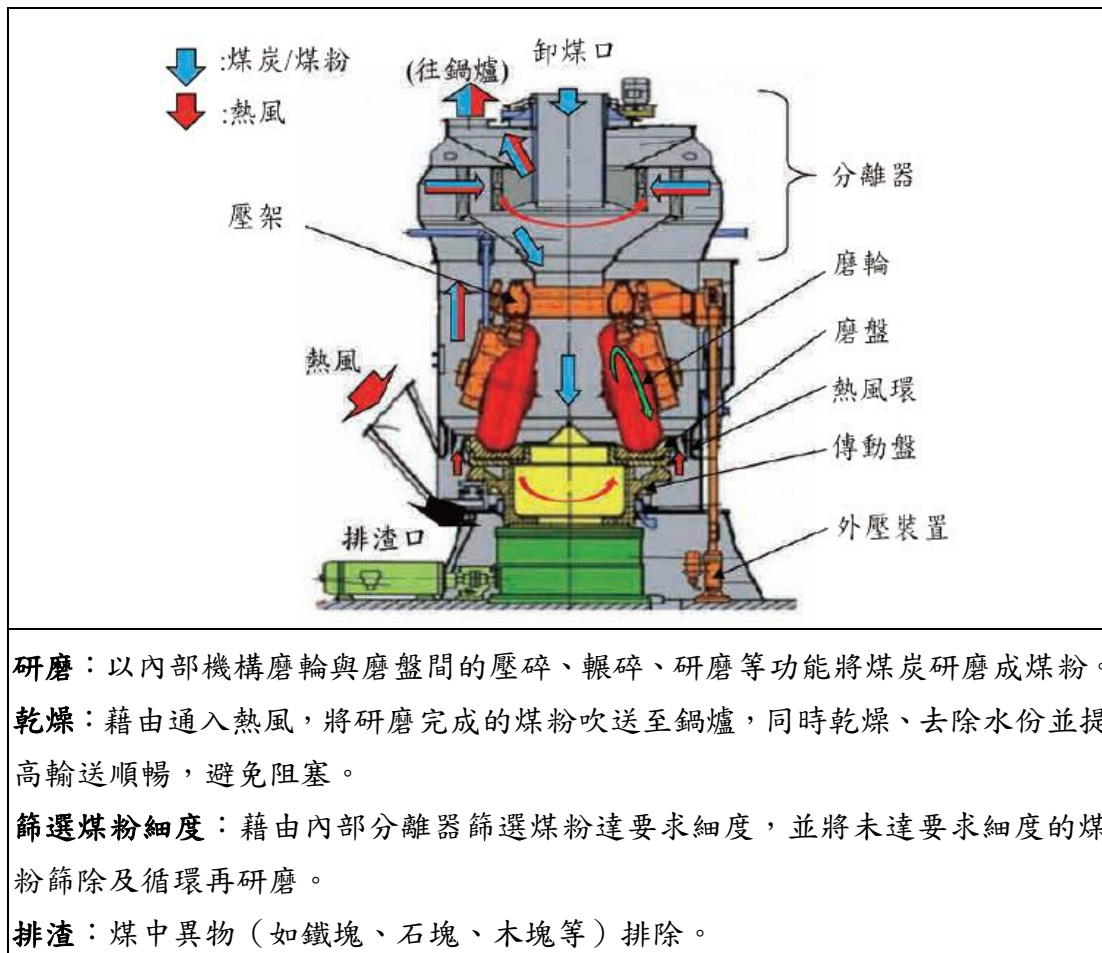


圖 3 重力式磨煤機及其功能(台化公司, 2022)

(四)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兩項。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

碳的來源多元化，無法固定單一煤種。其次為了降低空污排放(PM、SO_x、NO_x三項需合併綜合考量)、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.早期煤碳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1維之CO跟O₂監測不敷使用，2.雖有FEGT但無2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。

(五)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，隨著淨零碳排政策持續發展，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

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.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，X1、X2...Xp是自變數， β_0 、 β_1 、 β_2 ... β_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（MSE）實現。

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

(一)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。



圖 5 最佳化操作方法

(二)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。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展示了對一台1500 MWth鍋爐進行的測量活動的結果，該活動使用了一套包含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峰值較調整前降低了約100°C，並且讓火焰重新居中。

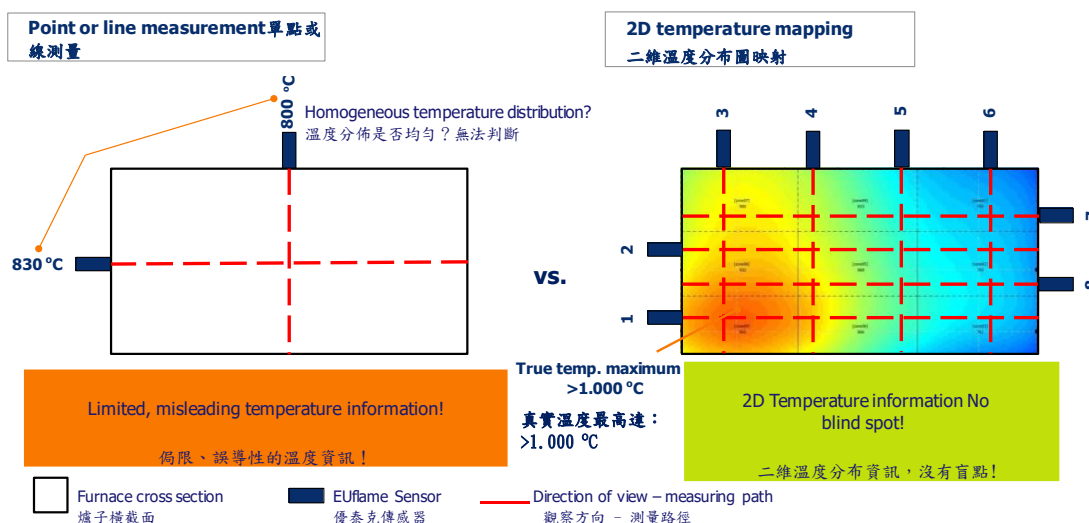


圖 6 二維溫度分布映射技術

(三)研究對象

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。

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 支個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。

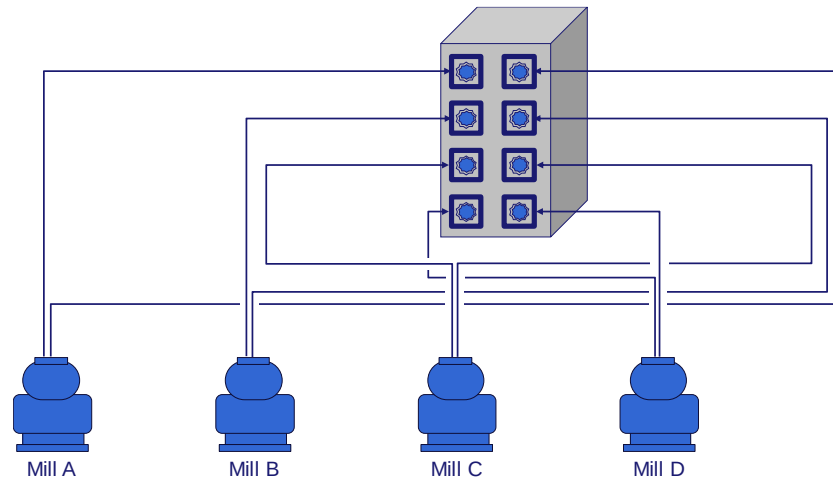


圖 7 磨煤機&燃燒器示意圖

2. 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. 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 系統來測量鍋爐內部的溫度並計算溫度分佈。

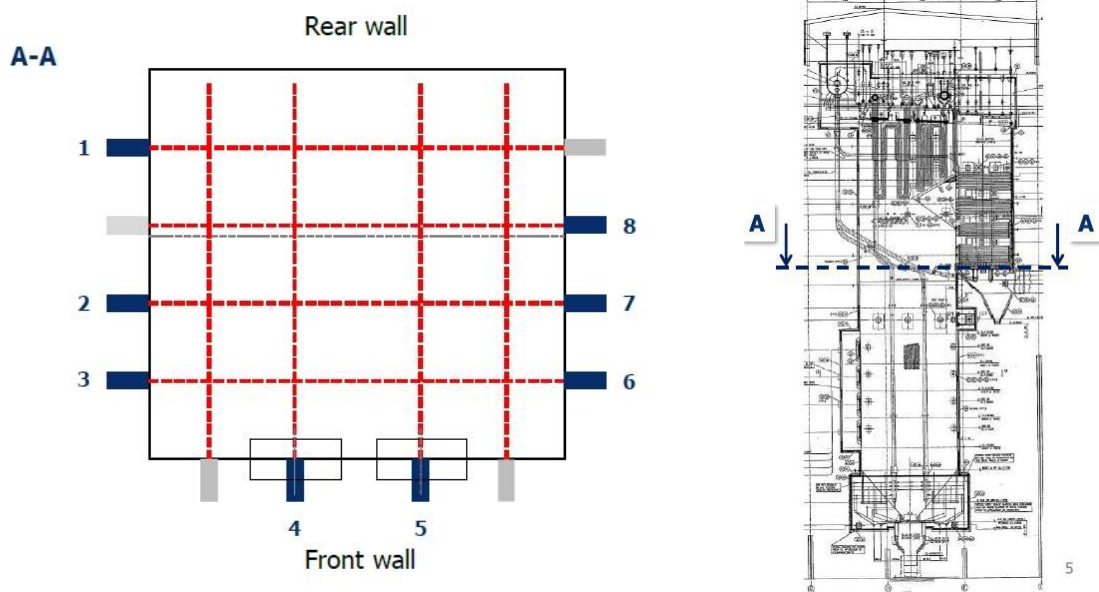


圖 8 溫度感測器佈置配置圖

四、結果與討論

(一)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。

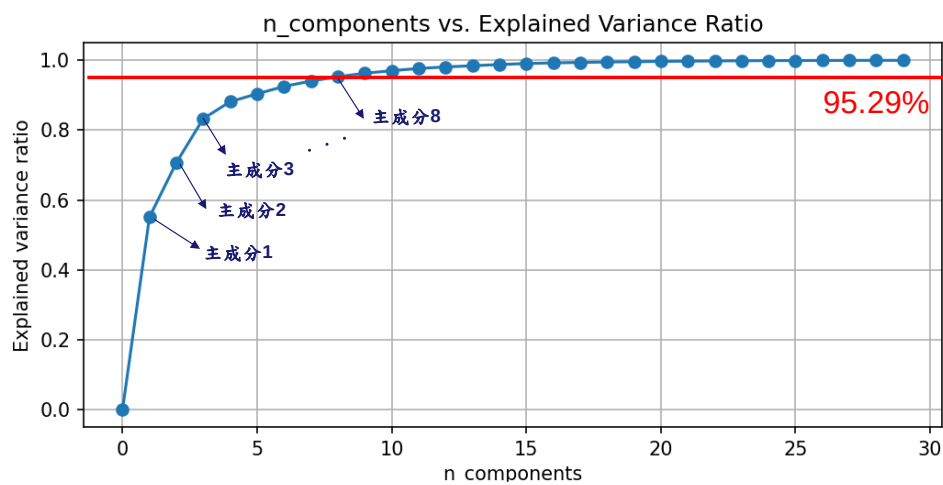


圖 9 主成分解釋數據變化之總體變異數累積圖

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。

(二)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、未燃碳。因未燃碳數據量較少，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 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%		PC-8：1.2%	
參數	相關係數	參數	相關係數	參數	相關係數	參數	相關係數	參數	相關係數	參數	相關係數	參數	相關係數	參數	相關係數
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	氨水消耗量(L/H)	0.50	A-Furnace Pressure	0.44	B-Furnace Pressure	0.55	油料供料管中的壓力	0.82
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	氨水消耗量	0.23
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	氨水消耗量	0.37	B-mill一次風量	0.21
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														

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

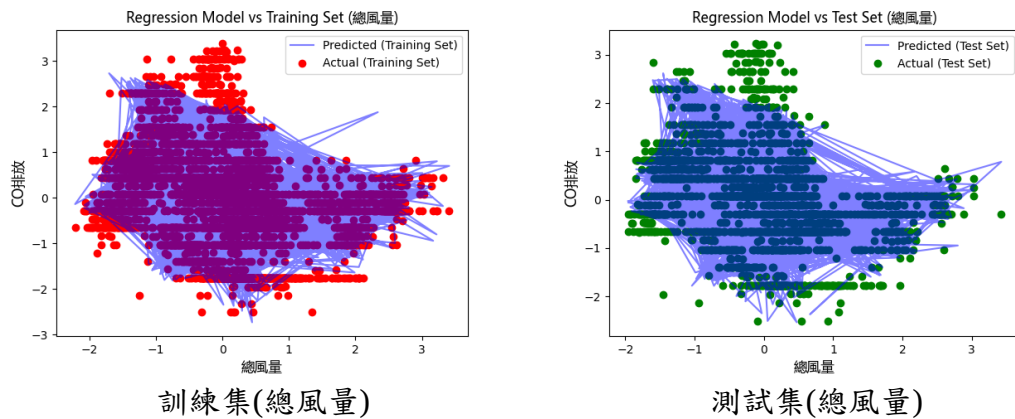


圖10 迴歸模型之訓練結果(CO濃度 vs 總風量)

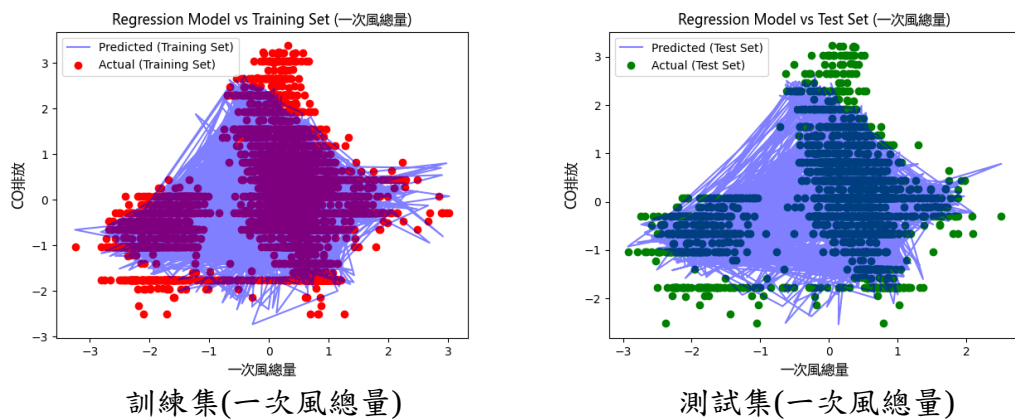


圖11 迴歸模型之訓練結果(CO濃度 vs 一次風總量)

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與未燃碳之關係式，將CO換算為未燃碳，驗證未燃碳之改善效益。

(三)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。

1. 調整前：爐膛火焰中心往鍋爐後牆靠近，火焰容易噴濺在後牆上，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。

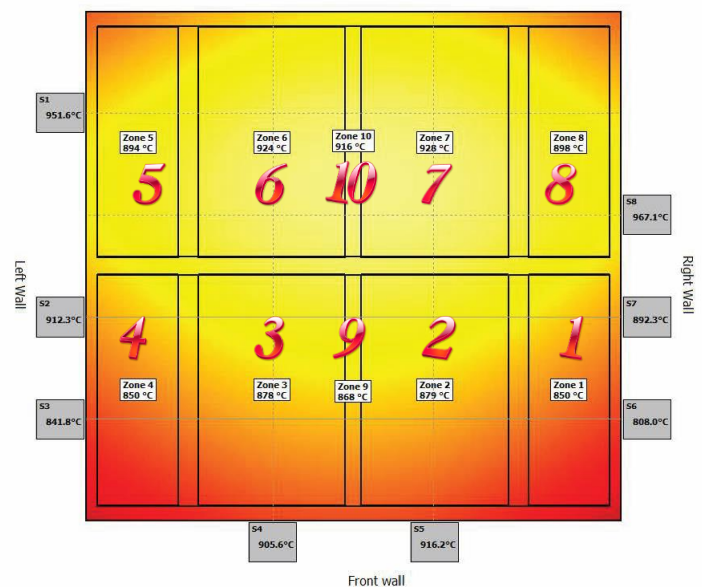


圖12 調整前爐膛溫度分布圖

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。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。

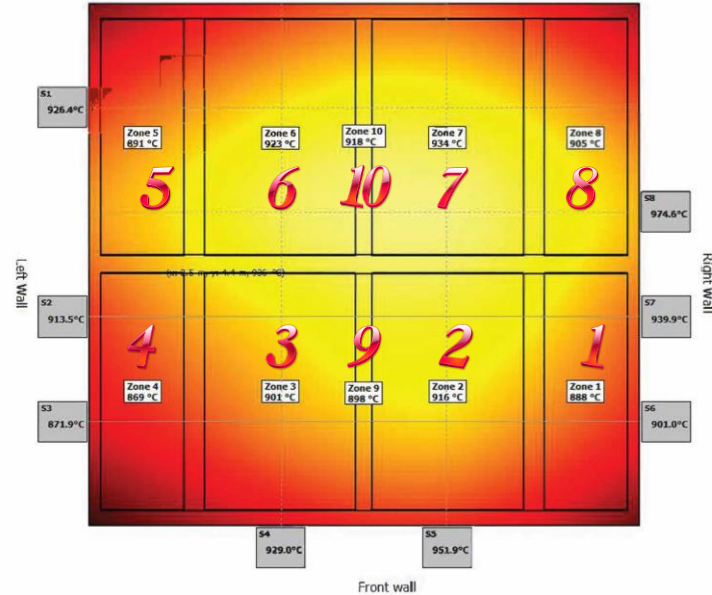


圖 13 調整後爐膛溫度分布圖

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

(四)燃燒優化結果

燃燒優化結果，未燃碳由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℃提高至調整後935.3℃，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，約佔總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（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。

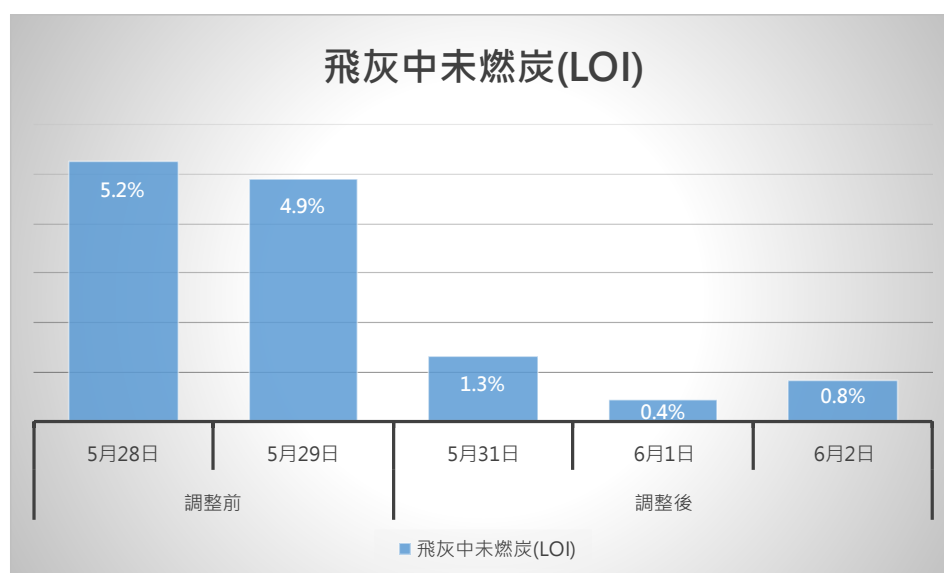


圖14 調整後LOI改善情形

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碳由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℃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，約佔總 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，降低未燃碳及提高熱效率。未來若導入高燃料比(固定炭)燃料，可降低 LOI 至 6%，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。

六、參考文獻

1. ECHNOLO, T.(1996), Reducing Emissions of Nitrogen Oxides via Low-NO_x Burner Technologies.
2. EPRI (2001), Coal Ash Carbon Removal Technologies. Palo Alto, CA, USA, Electric Power Research Institute (2001)
3. Dong N (2010), Reducing carbon in ash. CCC/167, London, UK, IEA Clean Coal Centre (2010)
4. 台化公司工務部龍德公用廠，視覺污染及清潔排放改善報告，台塑企業 2018 年 9 月號
5. 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)
6. 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
7. 台化公司新港公用廠，新港公用廠 SK3 磨煤機更新改善，台塑企業 2022 年 3 月號
8. Wiatros-Motyka, M.(2016), Optimising fuel flow in pulverised coal and biomass-fired boilers-CCC/263, IEA Clean Coal Centre, ISBN 978-92-9029-586-0

9. POWER. (2019, September 3). Combustion Optimization to Improve Heat Rate and Lower NOx. News & Technology for the Global Energy Industry. Retrieved from <https://www.powermag.com/author/aiwpadmin/>.
10. EUtech (2015) EUtech Scientific Engineering Power generation solutions. Aachen, Germany, EUtech Scientific Engineering. 46 pp (2015)
11. 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,
12. 楊泰然，燃煤鍋爐節能減碳之粉煤平衡技術，台灣電力公司，2010
13. 賴如椿、林春景，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，2012
14. 楊泰然，燃煤鍋爐效能優化(模擬測試評估)技術，台灣電力公司，2015
15. 楊泰然，燃煤鍋爐煤質優化評估技術，台灣電力公司，2016
16. 楊泰然，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，2017
17. 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/>.
18. 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，降低林一機飛灰中未燃碳之對策及方法研究，台電工程月刊，679，2005.03
19. 李天財，燃煤鍋爐因應煤質改變之燃燒經驗介紹，燃燒季刊，2005.2
20. Hou-Peng Wan, Chyh-Sen Yang, B.R. Adams, S.L. Chen,Controlling LOI from coal reburning in a coal-fired boiler,Fuel,Volume 87, Issue 3,2008

快削鋼與中碳鋼於 CNC 加工之能資源耗用差異 與減碳效益分析

孫書煌*、吳致呈**、江宏偉***

摘 要

快削鋼因優異切削性在加工上具有節電、省刀具與高產率等優點，常被應用於 CNC 加工。為量化快削鋼與傳統中碳鋼在 CNC 加工階段之能資源耗用差異，本研究建置能自動擷取各項加工參數之銑床工具機，包含 X/Y/Z 向移動軸、刀具主軸、主軸冷卻馬達、切削液馬達、捲削馬達、總電等 8 項電能耗用電壓電流參數。非電能耗用項目包含刀具耗損、切削液耗損，則依磨損狀況及減少重量量測。加工實驗使用三種快削鋼 1144、1215、S45CS1 及傳統中碳鋼 S45C，四類鋼之素材為 40 根直徑 25 mm 長 30 cm 直鋼棒，以 CNC 程式加工第 1~6 秒下刀，7~135 秒加工，136~142 秒退刀，成品為工業界廣泛應用於機器內部之元件艾克姆螺桿(Acme Screw)。

研究結果顯示，加工一根艾克姆螺桿，快削鋼 1144、1215、S45CS 總耗電分別為 7.97×10^{-2} 、 7.94×10^{-2} 、 7.77×10^{-2} kWh，基線 S45C 為 8.66×10^{-2} kWh，其中刀具主軸耗電最大佔 40.1%，捲削馬達耗電次之佔 17.6%，使用快削鋼節電 7.9~10.3%。快削鋼之刀具磨耗 4.79~8.12 g/根，基線鋼 31.1 g/根，差異顯著。切削油損失，快削鋼 16.2~16.5g/根，基線鋼 16.9 g/根，差異不大。本研究進一步分析鋼材製造、運輸、CNC 加工等搖籃至大門(Cradle to Gate)碳足跡，結果顯示以快削鋼 1144、1215、S45CS 生產一根艾克姆螺桿，碳足跡分別為 634.0、595.1、561.9 gCO₂ e/根，基線鋼 S45C 則為 685.9 gCO₂ e/根，快削鋼減碳效益 51.9~124.0 gCO₂ e/根。研究成果能作為 CNC 加工等自動化精密製造產業，評估能資源耗用及碳排參考。

【關鍵詞】快削鋼、CNC 加工、銑削加工、能資源損耗、減碳效益

*崑山科技大學機器人工程系 副教授

**中鋼公司綠能與系統整合研究發展處環保技術組 研究員

***達奈美克股份有限公司 總經理

一、前言

加工能耗是評價機械加工環境性能的重要指標之一，其中加工對環境的影響 99%是由於消耗電能引起的。國際標準化委員會因此起草了加工機的環境評估標準(ISO 14955) ^[1]，將節能減排的理念貫穿於加工機使用等主要耗能階段。因此本研究目標著眼於從後處理加工過程的能耗降低著手，選定數種不同的鋼材，探討其在切削時的耗能程度，試圖能夠讓鋼材在加工階段使用最少的能耗亦能產製工業所需之金屬成品，如此也是鋼鐵業在降低能耗的另一個努力的方向。

高機能鋼材能升級鋼鐵材料性質，應用上能增進產業鏈及用鋼產品生命週期減碳效益，中鋼公司已經建立高強度汽車鋼、高效馬達電磁鋼、高強度 H 型鋼、免調質鋼、耐蝕橋樑用鋼與高強度船舶用鋼的計算方法學，近期已完成快削鋼與冷打螺絲螺帽用鋼等高機能條線鋼材之減碳方法學建立，本研究則負責量化快削鋼於 CNC 加工減碳效益，以實測方式量化 3 種快削鋼與 1 種中碳鋼在 CNC 加工階段之能資源差異。

二、文獻分析

欲求得對鋼材進行切削時的能耗其實即等同於在切削此鋼材時工具機所提供的能耗，目前針對不同鋼材切削能耗量測與比較的參考文獻較少，反倒是有很多文獻提出各種量測工具機在進行切削時的能耗量測模型與分析。

1. ISO 有關工具機環境及能源效率的規範

在工具機的耗能方面，主要為許多馬達及輔助元件的能源消耗，尤其在加工時會耗去許多能源，例如在加工時主軸、工作平台的移動軸、及冷卻系統、排屑系統等，都會有能源的消耗，因此由建立工具機的耗能模式，檢查製造過程中各個組成部分的耗能，可算出潛在的節能效益，並可以評估及量測工具機的能源效率提升效益。

歐盟已於 2010 年 1 月進行工具機能源效率相關研究，由歐洲工具機協會 CECIMO 發起工具機自願同意草案，並已於 2009 年 11 月舉行諮詢會議。另外，Eceee(The European Council for an Energy Efficient Economy)於 2010 年 6 月第一次與相關工具機業者會議，說明由歐洲產品組織公布關於生態設計(Ecodesign)與能源相關產品(Energy-related Products, ErP)指令(Directive 2009/125/EC) ^[2,3]，對 ENTR Lot 5 工具機的研究。這個產品

組織的研究主要是這些工具機基於 European Commission Methodology for Ecodesign of Energy-using Products (MEEuP)設計的生命週期使用下，能確定找到和建議能源使用產品對環境性能的改善。經由這項研究的結果將被用來後續研究，包括進行政策選定的影響評估，以及諮詢論壇準備的文件。除歐盟研究外，國際上亦開始探討工具機的耗能模式，例如分析銑床工具機的耗能模式^[4]。

國際標準化組織在這方面特別訂定了 ISO 20140-1 ~ ISO 20140-5^[5-9]，為離散產品、零件製造行業指定了能源效率和其他環境影響因素評估的通用基礎和方法，使得特定行業的方法能夠應用於特定情況。接著又於 2012 年 9 月制定 ISO/DIS 14955-1: Machine tools - Environmental evaluation of machine tools - Part 1: Design methodology for energy-efficient machine tools，以及 14955-2 ~ 1499-4，合併成 ISO/DIS 14955^[1]，其中分為四大部分，主要內容乃針對工具機的環境進行評估。

ISO14955 主要針對數值控制(NC)工具機，此標準涉及工具機在使用階段的能源效率，且不考慮環境相關的因素，主要在工具機的設計及研發過程中導入能源效率觀念。

2. 切削工具機的耗能模式分析

工具機加工耗能過程包含：進料、鑽孔、粗加工、切削、磨、精加工等過程，文獻^[10]指出在 CNC 控制的切削過程，進給軸與主軸馬達約消耗總電量的 25% ~ 30%。在 A.Dietmair^[11]分析工具機之能源消耗模式中，在整個加工過程中有 20% 的電量是用在加工上。Shaohua Hu 等人^[12]則建立一套稱為稱為 OEEM(on-line energy monitoring)的線上工具機能耗監控系統。

3. 工具機切削能源消耗特性模式建立

工具機加工過程之能源效率模式可分為兩種方式探討，第一種為加工時之比能源消耗模式 (SEC, Specific Energy Consumption Model)，即是以總消耗能源除以切削總體積，此模式主要探討加工時程的能源消耗，而此種模式並沒有考慮附屬設備、切削速度與深度及進料過程所需能源，如 Diaz 等人^[13]、Draganescu 等人^[14]，以及 Li and Kara^[15]均各自提出不同的計算。

第二種能源效率模式為加工所需之直接能源 (direct energy requirements in machining)，如 Mori 等人^[16]、Diaz 等人^[17]及 He 等人^[18]，他們指出在加工過程中刀具與工件的接合與離開過程，這些過程的時間並

沒有投入到實際的材料切除，於是模式中之空切時間 (air cutting time) 可以減少高估能源需求的機會，最終還是需要量化整個過程之空切時間，以估計其在總能源需求的影響。Vincent 等人^[19]則以數學模式及邏輯分析工具機加工過程之直接電力需求。

三、研究方法與步驟

1. 研究方法

本研究之主要目的為：以 S45C 作為基線鋼種，併同 1144、1215、S45CS1 等三種快削鋼，探討四種不同鋼材從相同尺寸的素材，經過相同的程序加工成工業所需的一個完成品，並量測在加工過程中詳細區分的各個步驟及工具機上各個部件的能源消耗，再加以總和，得出各鋼材從素材到完成品之間的總花費能耗。並以 S45C 為基線鋼種，探討上述三種快削鋼相對於 S45C 之能耗差異，達成減碳及降低能耗的目標，作為日後發展快削鋼在切削性研究上的依據。切削實驗所使用的鋼材由中鋼公司提供，尺寸為 $25\phi * 300\text{ mm}$ 之鋼棒，每種鋼材 40 根。加工成品為如圖 1 所示之愛克姆螺桿。

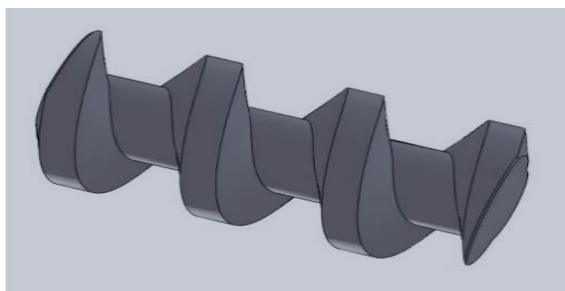


圖 1 加工成品圖 - 愛克姆螺桿

圖 2 所示為一個工件從素材到成品過程中的完整加工流程。探討這個加工流程可以歸納出，欲計算一個工件從素材到成品過程中總共消耗了多少能耗，可針對下列項目進行量測，包括：(a)機台刀具主軸旋轉馬達的電壓及電流值、(b)工作平台移動軸(X、Y、Z 軸)的電壓及電流值、(c)主軸冷卻馬達的電壓及電流值、(d)切削液馬達的電壓及電流值、(e)捲屑馬達的電壓及電流值、(f)刀具損耗、(g)切削液損耗。這些項目可以分為兩大類，一類是電能的損耗，包括上述項目的第(a) ~ (e)等五項，另一類為非電能的損耗，包括第(f)及(g)項。

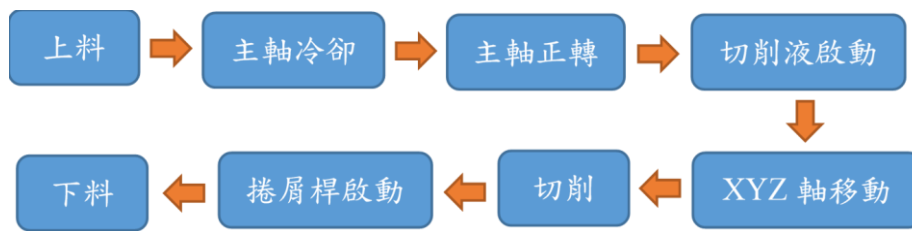


圖 2 工件從素材到成品的加工流程

2. 研究步驟

本研究之執行步驟詳細如下所述：

- (1) 由中鋼公司提供 1144、1215、S45CS1 及 S45C 等四種 $25\phi * 300$ mm 鋼棒，每種鋼材各 40 根。
- (2) 所取得之鋼材若有尺寸異於 $25\phi * 300$ mm，則先將素材車削至該尺寸。
- (3) 完成加工成品部件設計圖。
- (4) 製造組裝實驗用機台，並完成機台控制器與外部之連線，確認可於加工過程中即時且正確取得電流、電壓等加工資訊。
- (5) 撰寫加工程式 NC code。
- (6) 進行實際加工並記錄各項資料(包含重量、時間、電流等)，預計每種鋼種加工 30 ~ 40 件。
- (7) 分析各項資料，計算能耗值，製作圖表，探討結果。

3. 實驗設備與材料

計畫中欲量測的資料包括兩大類，其中第一類的電能損耗包括上述的第(a) ~ (e)等五項，必須在加工素材的時候即時量得 CNC 加工機上主軸馬達、進給軸馬達、主軸冷卻馬達、切削液供給馬達、切屑排削馬達等的耗用電流。而目前商業化工具機的控制器均極為封閉，或者是控制器製造商基於商業利益而不願意開放給使用者取得這些資料的權限，因此為取得加工階段的這些能耗資料，本研究乃自行製造組裝一台銑床加工機，配備國產台達電的控制器，並與台達電合作，由台達電開放取得控制器內部資料的權限，將加工機的控制器連線至一個外部的電力訊號輸出系統，在加工階段將所需資料擷取出來再進行分析。第二類的(f) ~ (g) 兩項是非電能的損耗，包括刀具損耗及切削液損耗，此兩項資料均從其損耗的重量來換算其能耗值。

根據以往的加工經驗，快削鋼由於擁有很好的切削性，使得切削時對刀具的損耗非常微小，正常情況使用下可能要加工上千件的素材才能明顯看得到它的損耗，因此在本研究中要探討切削加工對刀具損耗的因應辦法

是加大進給率執行重切削，使刀具承受較重的負載以加速其磨耗。另外在切削液損耗的量測是以稱重的方式進行，在完成多件素材的加工，直至切削液重量出現明顯減少後，再利用切削液損失的重量除以加工素材的數目，求得平均加工單一支素材的切削液重量損失。

本計劃加工設備 DMARK_CNC650 的控制器使用台達電 NC311 控制器，此控制器提供 API 可透過網路直接讀取加工中 X 軸、Y 軸、Z 軸和主軸等各馬達的功率百分比，這些資料在加工過程中會不斷地動態顯示，同時所有數據也在電腦硬碟中儲存為一個 .CSV 檔。

各種鋼材進行切削之次數依主軸開始產生顫振現象為一個循環，然後更換刀具，重新開始另一個循環，至於每種鋼材各進行多少循環則以取得的切削數據多寡而決定。其中 S45C 鋼材因材質較硬，不易切削，在加工第 6 支素材時主軸開始產生顫震，加工第 15 支素材時刀具即毀損，為取得更多數據，因此總共進行 3 個循環實驗，另外 1215 鋼材加工 2 個循環、其餘 1144 及 S45CS1 則都只加工 1 個循環，如下所示，合計四種鋼材總共加工素材 224 支，各鋼種加工數量不同之原因將於後述詳細說明。

- (1) S45C：每 15 支為 1 個循環，加工 3 個循環，共 45 支
- (2) S45CS1：加工 1 個循環，共 77 支
- (3) 1215：第 1 個循環加工 35 支，第 2 個循環加工 33 支，共 68 支
- (4) 1144：加工 1 個循環，共 34 支

而加工機 DMARK_CNC650 機器的各項硬體參數及切削實驗加工參數為：X、Y、Z 三軸的 100% 能耗值均為 1.5 KW，加工主軸的 100% 能耗值為 4.5 KW，切削液馬達、切屑排削馬達、主軸油冷馬達均為 750W。加工參數部分，主軸轉速為 2500 rpm、切削速度為 100 mm/min。

四、研究結果與討論

本研究在加工的同時藉由控制箱與筆電間的連線，以每秒擷取 1 筆資料的頻率將主軸馬達負載功率百分比、X Y Z 軸馬達負載功率百分比、切削液馬達電流值、切屑捲削馬達電流值、主軸冷卻馬達電流值、機台總電流值等共 8 項數值即時儲存於電腦內。每支素材之加工時間為 142 秒，故總共可獲得 142 筆資料。其中第 1 秒~第 6 秒為下刀行程，第 7 秒~第 135 秒進行加工，第 136 秒~第 142 秒為退刀行程，故每次加工資料均取其第 7 秒~第 135 秒的數值，共 129 筆，也代表每支素材的加工時間為 129 秒。

前面述及 S45C 鋼材共加工 3 個循環，45 支素材，因此會產生 45 個 Excel 檔案，若將檔案中主軸馬達電流值轉換為能耗值，再將加工每支素材的主軸馬達能耗值 vs 素材編號繪製曲線，可得如圖 3 所示之曲線圖。前面也述及 S45C 鋼材在加工到第 6 支素材時主軸開始產生顫震，由圖中確實可以看出在第 1 個和第 3 個循環中，在加工第 6 支素材後主軸能耗值即急遽升高，在第 2 個循環則在加工第 7 支素材後主軸能耗值急遽升高，此現象代表刀具已有損耗，切削力降低，為達到要求之切削量，CNC 須提供更大的功率給主軸馬達，就會導致主軸能耗值的急遽升高，因此判斷在第 7 支以後已屬不正常之加工，故本研究在計算 S45C 單支素材之加工能耗時乃採每一個循環中的第 1~6 支素材加工數據，共 18 組數據之平均值，作為加工一支 S45C 素材時 CNC 加工機各部位能耗值。

加工其他三種鋼材時也有類似的情況出現，但是因為各種鋼材的軟硬度不一樣，刀具開始出現顫振的時間點也不一樣，S45CS1 的材質比較軟，總共加工 77 支素材並繪製曲線，從曲線中發現在加工第 39 支素材後才出現主軸能耗值急遽升高的現象，因此 S45CS1 只加工 1 個循環，並採用第 1~39 支數據之平均值作為加工一支 S45CS1 素材時 CNC 加工機各部位能耗值。

加工 1215 時在完成第 1 個循環時發現在主軸能耗值曲線圖上沒有很明顯的轉折點，因此加做第 2 個循環實驗，兩次循環分別加工 35 支及 33 支素材並繪製曲線圖，在第 1 個循環的轉折點並不明顯，第 2 個循環的轉折點則較為明顯，在加工第 23 支素材後主軸能耗值急遽升高，因此計算 1215 時乃採第 2 個循環的第 1~23 支數據之平均值，作為加工一支 1215 素材時 CNC 加工機各部位能耗值。

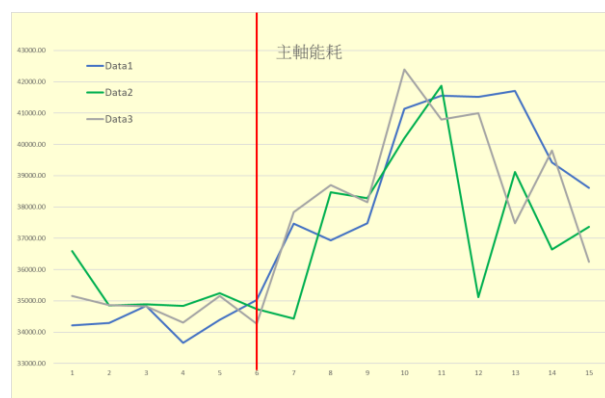


圖 3 加工 3 組 S45C 素材時主軸馬達能耗值曲線圖

1144 鋼材也只加工 1 個循環，共 34 支，在加工第 24 支素材後主軸能耗值急遽升高，故計算 1144 時乃採第 1 ~ 24 支數據之平均值作為加工一支 1144 素材時 CNC 加工機各部位能耗值。

由於加工單一支素材所損耗的切削液量太小，無法正確量測，因此切削液損耗的量測必須在經過若干支素材的加工後再進行損耗量測，然後再除以素材支數，以求取單一支素材加工的切削液損耗。在進行 S45C 切削實驗時，當切削第 15 支素材時開始產生火花，考慮產生火花後會因為高溫而造成切削液損耗量的量測數值失真，且因必須基於相同的實驗基礎，因此本研究在切削液損耗的量測上，四種鋼材均以加工 15 支素材為基準，在每一種鋼種均於加工 15 支後進行損耗量測，再求取單一平均值。

在每種鋼材加工完 15 支後進行一次切削液損耗的量測，此量測數據單位為 cc，再乘上切削液密度 0.975 g/cc 可得到切削液之損耗重量。

加工後的量測結果，加工一支 S45C、S45CS1、1215、1144 素材分別損失切削液 16.90 g、16.25 g、16.25 g、16.57 g

在加工刀具損耗量測部分，本研究所使用之刀具為威力 (WEENIX) 牌愛克姆螺牙粗銑成型刀，刀具外徑為 $\phi 25$ mm，厚度為 5mm，經過秤重量得一把刀具的重量為 186.9 g。

因為各種鋼材軟硬度不一，因此在加工時對刀具的損耗程度亦不相同，前面曾述及，在加工 S45C、S45CS1、1215、1144 時，分別在加工 6 支、39 支、23 支、24 支素材後主軸消耗電流明顯急遽上升，判斷這是因刀具已經產生磨耗所致，因此以此數據做為刀具損耗計算之依據（亦即加工一支 S45C 素材損耗 1/6 支刀具、加工一支 S45S1C 素材損耗 1/39 支刀具，以此類推），加工後的量測結果，加工一支 S45C、S45CS1、1215、1144 素材刀具磨耗重量分別為 31.15 g、4.792 g、8.126 g、7.788 g。

如前所述，S45C 共加工 3 個循環，每個循環取前 6 支鋼材進行量測，故將這 18 組數據取平均，可得出加工 1 支 S45C 鋼材時加工機各部位的能耗值，如表 1 的第 1 列資料所示，然後扣除總電項目以外，其餘 7 項中各取每一單項佔此 7 個項目總和的百分比則可得到各單項百分比值，如表 1 的第 2 列資料所示。另外在第 2 列資料最右一欄的數字 103.83 %代表由 CNC 加工機擷取的總電數據換算為能耗值後，其值約為各分項的量測數據總和換算為能耗值之後的 1.038 倍，代表 CNC 加工機的總能耗約比吾人所量得的各分項能耗總和稍微高出一點點，為 3.83 %，此高出的數值可推測為加工機中，除了吾人所量測的這些分項項目以外，另有一些能量由

機器本身以磨耗、熱能等方式而逸散掉。

表 1 單支 S45C 加工時 CNC 加工機各部位能耗值及百分比分配

項目	X	Y	Z	S	切削液	排屑	主軸油冷	總電
平均能耗值 (10 ⁻⁶ kWh)	5915.51	5109.03	7812.96	34784.72	6695.06	15290.34	7877.90	86680.00
單項佔全部 百分比	7.09%	6.12%	9.36%	41.67%	8.02%	18.31%	9.44%	103.83%

觀察表中數據可以看出各部位中以切削主軸耗能最高，佔全部能耗的 41.67%，其次則為切屑排削馬達，為 18.31%。

依照相同方式可求得其他三種鋼材，加工一支 S45CS1、1215、1144 鋼材時 CNC 各部位的能耗平均值如表 2 ~ 表 4 所示。在加工機各分項能耗的百分比比較上，四種鋼材都有相同的趨勢，都是以切削主軸耗能最高，其次則為切屑排削馬達。

表 2 單支 S45CS1 加工時 CNC 加工機各部位能耗值及百分比分配

項目	X	Y	Z	S	切削液	排屑	主軸油冷	總電
平均能耗值 (10 ⁻⁶ kWh)	4376.50	4604.27	8436.00	28988.14	6383.45	14176.68	7573.70	77739.60
單項佔全部 百分比	5.87%	6.18%	11.32%	38.89%	8.56%	19.02%	10.16%	104.29%

表 3 單支 1215 加工時 CNC 加工機各部位能耗值及百分比分配

項目	X	Y	Z	S	切削液	排屑	主軸油冷	總電
平均能耗值 (10 ⁻⁶ kWh)	5065.04	5254.53	9098.01	30129.89	6308.53	13808.72	7428.45	79410.70
單項佔全部 百分比	6.57%	6.82%	11.80%	39.08%	8.18%	17.91%	9.64%	103.01%

表 4 單支 1144 加工時 CNC 加工機各部位能耗值及百分比分配

項目	X	Y	Z	S	切削液	排屑	主軸油冷	總電
平均能耗值 (10 ⁻⁶ kWh)	5228.65	5410.94	9168.58	30814.58	6288.59	13746.69	7504.70	79777.25
單項佔全部 百分比	6.69%	6.92%	11.73%	39.42%	8.05%	17.59%	9.60%	102.07%

接下來進行四種不同鋼材的比較，將 S45C 三個加工循環平均後的第 1 ~ 6 筆資料、S45CS1 的第 1 ~ 39 筆資料、1215 第 2 個加工循環的第 1 ~ 23 筆資料資料、1144 的第 1 ~ 24 筆資料中的總電能耗值，以及其平均值繪製曲線，可得如圖 4 所示之曲線圖，其中分段曲線為每一支素材的實際值，直線為其平均值。由圖上的平均值可以得知，若以 S45C 當作比較標

準（設為 100 %），可以得出其他三種快削鋼相對於 S45C 的總電能耗百分比值，其中 S45CS1 為 S45C 的 89.69 %，1215 為 S45C 的 91.61 %，1144 為 S45C 的 92.04 %。

除了總電能耗值數據分析之外，由於在加工不同鋼材時，對鋼材的是否易於切削最敏感項目，當屬須克服材料移除時會產生負載的切削主軸能耗，因此吾人再依相同方式單獨只對切削主軸的能耗做比較，可得如圖 5 所示之曲線圖，一樣若以 S45C 當作比較標準（設為 100 %），可以得出其他三種快削鋼相對於 S45C 的切削主軸能耗百分比值，其中 S45CS1 為 S45C 的 83.34 %，1215 為 S45C 的 86.62 %，1144 為 S45C 的 88.59 %。

在非電流值的切削液及刀具能耗的分析部分，中鋼公司曾經透過其他計畫獲得切削刀具及切削液的損耗與碳排放值之間的轉換係數，如表 5 所示，此表可作為在計算切削刀具及切削液損耗的碳排放值時的轉換依據。

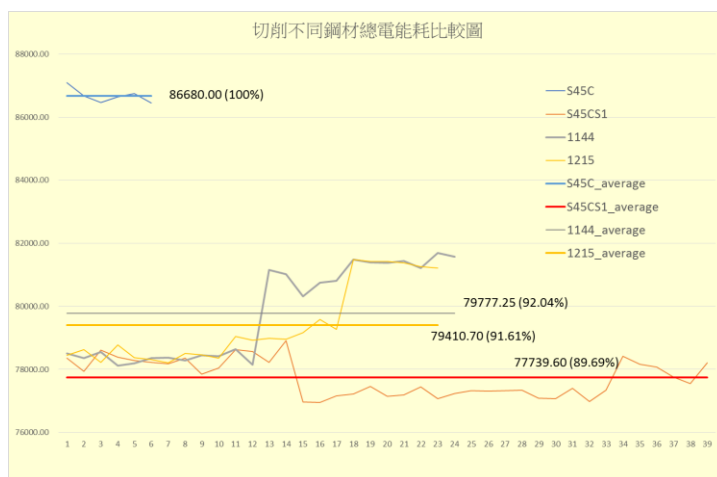


圖 4 切削不同鋼材時總電能耗比較圖

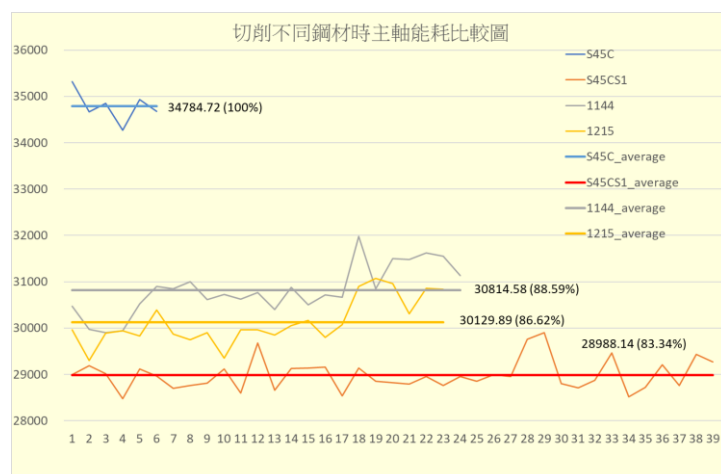


圖 5 切削不同鋼材時切削主軸能耗比較圖

表 5 切削刀具及切削液對碳排放的轉換係數

項目	係數	單位	係數來源	數據建置日期
切削刀具	4.52	kgCO ₂ /kg	工研院 DoItPro 18603	2011
切削液	1.02	kgCO ₂ /kg	環保署/工研院	2019
台灣自來水	2.99x10 ⁻⁴	kgCO ₂ /kg	環保署產品碳足跡資訊網	2017
稀釋切削液	6.40 x10 ⁻²	kgCO ₂ /kg	加權計算	切削液:自來水=1:15

由此表可得知切削液 1 g 的損耗等同於 6.40 x10⁻² g 的碳排放量，切削一支 S45C、S45CS1、1215、1144 鋼材分別會消耗 16.9 g、16.25 g、16.25 g、16.575 g 的切削液，因此可求得切削各鋼材時的切削液消耗碳排放量，若以 S45C 減去三種快削鋼的切削液消耗碳排值，可得出以 S45C 為基準，切削一支其他快削鋼素材比 S45C 的減碳效益。將上述數值除以一支持鋼材加工段的重量 0.1804 kg，即可求得三種快削鋼每公斤素材對 S45C 的單位鋼材減碳效益，再將減碳效益計算值各除以鋼材實際移除量 0.0737 kg，即可求得三種快削鋼每公斤素材對 S45C 的單位移除量減碳效益。所有數據整理如表 6 所示。

表 6 切削液損耗之碳排數據及減碳效益

鋼材	切削 1 支素材 切削液損失(g)	切削液消耗 碳排 (g CO ₂)	減碳效益 (g CO ₂)	單位鋼材減碳效益 (g CO ₂ /kg)	單位移除量減碳效益 (g CO ₂ /kg)
S45C	16.9	1.0816	--	--	--
S45CS1	16.25	1.04	4.16E-02	0.2305	0.5629
1215	16.25	1.04	4.16E-02	0.2305	0.5629
1144	16.575	1.0608	2.08E-02	0.1153	0.2815

另外由前一節所獲得的刀具損耗重量數據，由表 5 得知切削刀具 1 g 的損耗等同於 4.52 g 的碳排放量，切削一支 S45C、S45CS1、1215、1144 鋼材分別會消耗 31.15 g、4.792 g、8.126 g、7.788 g 的刀具，依據與切削液消耗碳排值相同的計算方式，可得到在加工各種鋼材時，切削刀具損耗之碳排數據及減碳效益，如表 7 所示。

表 7 切削刀具損耗之碳排數據及減碳效益

鋼材	切削 1 支素材 刀具損耗 (g)	刀具損耗 碳排 (g CO ₂)	減碳效益 (g CO ₂)	單位鋼材減碳效益 (g CO ₂ /kg)	單位移除量減碳效益 (g CO ₂ /kg)
S45C	31.15	140.798	--	--	--
S45CS1	4.792	21.661	119.137	660.404	1612.135
1215	8.126	36.73	104.068	576.871	1408.228
1144	7.788	35.2	105.59	585.355	1428.938

依據經濟部公布最新全國電力資源供需報告中，110 年度電力排碳係數為 0.509 公斤 CO₂ e/度，依據此數值和前述加工四種不同鋼材時總電的能耗值（圖 4），可計算出切削一支鋼材可獲得總電之碳排數據及減碳效益如表 8 所示。

其中電功率碳排是將總電 kWh 值乘以 0.509 之後換算單位為 g 而得，減碳效益（g CO₂）是以 S45C 的電功率碳排減去三種快削鋼的電功率碳排而得，單位鋼材減碳效益（g CO₂/kg）是以減碳效益（g CO₂）除以一支持鋼材加工段的重量 0.1804 kg 而得，單位移除量減碳效益（g CO₂/kg）是以減碳效益（g CO₂）除以鋼材實際移除量 0.0737 kg 而得。

表 8 總電的碳排數據及減碳效益

鋼材	總電 (kWh,度)	電功率碳排 (g CO ₂)	減碳效益 (g CO ₂)	單位鋼材減碳效益 (g CO ₂ /kg)	單位移除量減碳效益 (g CO ₂ /kg)
S45C	0.0867	44.120	--	--	--
S45CS1	0.0777	39.569	4.551	25.225	61.579
1215	0.0794	40.420	3.700	20.510	50.069
1144	0.0798	40.607	3.514	19.476	47.544

本研究之重點在於快削鋼對於 S45C 在切削行為上的減碳效益，因此若希望獲得四種鋼材單獨在切削方面能耗的差異比較，而非整個加工程序上的能耗差異比較，則可以將圖 5 加工四種不同鋼材時切削主軸的能耗值進行以上相同的計算，可獲得表 9 切削一支鋼材之切削主軸的碳排數據及單位鋼材減碳效益、單位移除量減碳效益。

表 9 切削主軸的碳排數據及減碳效益

鋼材	總電 (kWh,度)	電功率碳排 (g CO ₂)	減碳效益 (g CO ₂)	單位鋼材減碳效益 (g CO ₂ /kg)	單位移除量減碳效益 (g CO ₂ /kg)
S45C	0.03479	17.7054	--	--	--
S45CS1	0.02899	14.7550	2.9505	16.358	39.9250
1215	0.03013	15.3361	2.3693	13.138	32.0610
1144	0.03082	15.6846	2.0208	11.201	27.3451

為探究鋼材在整個加工過程中的能耗情況，本研究在加工過程中進行了屬於電能方面的七項能耗數值分析及非電能方面的二項能耗數值分析，接下來即進行這兩種電能與非電能能耗的總和比較。表 10 彙整了四種鋼材加工時各分項及總電的能耗數據，並增加計算各分項的合計值列於右邊第二欄，並將這些能耗數值轉換為碳排數值如表 11 所示。

以上述兩個表格內的數據進行單位鋼材減碳效益與單位移除量減碳

效益的計算可得表 12 及表 13，其中表 12 為各分項與非電能項目總和之減碳效益；表 13 為總電與非電能項目總和之減碳效益。

表 10 各分項與總電的能耗

能耗 (10 ⁻⁶ kWh)	X	Y	Z	S	切削液馬達	排削馬達	主軸油冷	分項合計	總電
S45C	5915.509	5109.028	7812.963	34784.722	6695.062	15290.340	7877.901	83485.53	86680.0
S45CS1	4376.496	4604.274	8436.004	28988.141	6383.447	14176.681	7573.704	74538.75	77739.6
1215	5065.036	5254.529	9098.007	30129.891	6308.527	13808.720	7428.454	77093.16	79410.7
1144	5228.646	5410.938	9168.576	30814.583	6288.588	13746.690	7504.699	78162.72	79777.2

表 11 各分項與總電的減碳效益

碳排 (g CO ₂)	分項合計	總電	切削液	刀具	分項與非電能項目之總和	總電與非電能項目之總和
S45C	42.494	44.120	1.082	140.798	184.374	186.000
S45CS1	37.940	39.569	1.040	21.661	60.641	62.270
1215	39.240	40.420	1.040	36.730	77.010	78.190
1144	39.785	40.607	1.061	35.200	76.046	76.868

表 12 各分項與非電能項目總和之減碳效益

鋼材	分項與非電能項目總和之碳排 (g CO ₂)	減碳效益 (g CO ₂)	較 S45C 減碳百分比	單位鋼材減碳效益 (g CO ₂ /kg)	單位移除量減碳效益 (g CO ₂ /kg)
S45C	184.374	--	--	--	--
S45CS1	60.641	123.733	67.1%	685.877	1674.329
1215	77.010	107.364	58.2%	595.144	1452.824
1144	76.046	108.328	58.8%	600.493	1465.877

表 13 總電與非電能項目總和之減碳效益

鋼材	總電與非電能項目總和之碳排 (g CO ₂)	減碳效益 (g CO ₂)	較 S45C 減碳百分比	單位鋼材減碳效益 (g CO ₂ /kg)	單位移除量減碳效益 (g CO ₂ /kg)
S45C	186.000	--	--	--	--
S45CS1	62.270	123.7297	66.5%	685.8647	1674.29
1215	78.190	107.8101	58.0%	597.6164	1458.863
1144	76.868	109.1325	58.7%	604.9446	1476.752

五、結 論

本研究以實測方式量化 3 種快削鋼與 1 種中碳鋼在 CNC 加工階段之能資源差異，彙整研究結果可以得到如下之總結：

1. 僅考慮總電能耗時，三種快削鋼相對於 S45C 在總電能耗上各可節省能耗百分比 S45CS1 為 10.31%、1215 為 8.39%、1144 為 7.96%。單位鋼材減碳效益（單位為 g CO₂/kg）S45CS1 為 25.23、1215 為 20.51、1144 為 19.48，單位移除量減碳效益 S45CS1 為 61.58、1215 為 50.07、1144 為 47.54。

- 2.僅考慮切削主軸電能耗用時，三種快削鋼相對於 S45C 在切削主軸能耗上各可節省能耗百分比 S45CS1 為 16.66%、1215 為 13.38%、1144 為 11.41%。單位鋼材減碳效益（單位為 g CO₂/kg）S45CS1 為 16.36、1215 為 13.14、1144 為 11.20，單位移除量減碳效益 S45CS1 為 39.92、1215 為 32.06、1144 為 27.34。
- 3.主軸等分項綜合能耗加上非電能碳排，三種快削鋼相對於 S45C 減碳 58.2% ~ 67.1%，單位鋼材減碳效益（單位為 g CO₂/kg）S45CS1 為 685.88、1215 為 595.14、1144 為 600.49，平均減碳 627 g CO₂/kg，單位移除量減碳效益 S45CS1 為 1674.33、1215 為 1,452.82、1144 為 1,465.88，平均減碳 1,531 g CO₂/kg。
- 4.總電加上非電能碳排，三種快削鋼相對於 S45C 減碳 58.0% ~ 66.5%，單位鋼材減碳效益（單位為 g CO₂/kg）S45CS1 為 685.86、1215 為 597.62、1144 為 604.94，平均減碳 629 g CO₂/kg，單位移除量減碳效益 S45CS1 為 1674.29、1215 為 1,458.86、1144 為 1,476.75，平均減碳 1,537 g CO₂/kg。

本研究進一步整合中鋼公司分析鋼材製造、運輸、CNC 加工等搖籃至大門(Cradle to Gate)碳足跡，結果顯示以快削鋼 1144、1215、S45CS 生產一根艾克姆螺桿，碳足跡分別為 634.0、595.1、561.9 gCO₂ e/根，基線鋼 S45C 則為 685.9 gCO₂ e/根，快削鋼減碳效益 51.9~124.0 gCO₂ e/根。研究成果能作為 CNC 加工等自動化精密製造產業，評估能資源耗用及碳排參考。

誌謝

本研究感謝台達電子工業股份有限公司在資料擷取技術上的協助。

六、參考文獻

- 1.ISO/DIS 14955-1:2012 Machine tools - Environmental evaluation of machine tools - Part 1: Design methodology for energy-efficient machine tools.ENTR Lot 5: Machine tools, <https://www.eceee.org/ecodesign/products/machine-tools/>
- 2.Eco Machine Tools, <http://www.ecomachinetools.eu/typo/home.html>
- 3.The energy efficient machine tool, Energy Efficiency & Technology <http://www.heidenhain.com/>
- 4.ISO 20140-1: Environmental and energy efficiency evaluation method for

- manufacturing systems. Part 1. Overview and general principles
- 5.ISO 20140-2: Guidelines for environmental evaluation procedures
 - 6.ISO 20140-3: Environmental evaluation index model
 - 7.ISO 20140-4: Environmental evaluation data model
 - 8.ISO 20140-5: Facility life cycle impact and indirect impact model
 - 9.Aspects of Energy Efficiency in Machine Tools, HEIDENHAIN.
 - 10.A. Dietmair, A. Verl, “Energy Consumption Forecasting and Optimisation for tool Machines”, http://www.mmscience.eu/archives/MM_Science_20090305.pdf
 - 11.Shaohua Hu, Fei Liu, Yan He, Tong Hu,” An on-line approach for energy efficiency monitoring of machine tools”, Journal of Cleaner Production, vol. 27 pp.133-140,2012.
 - 12.Diaz, N., Redelsheimer, E., Dornfeld, D. Energy consumption characterization and reduction strategies for milling machine tool use. In: Hesselbach, J., Herrmann, C. (Eds.), Globalized Solutions for Sustainability in Manufacturing. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 263-267, 2011.
 - 13.Draganescu, F., Gheorghe, M., Doicin, C.V., “Models of machine tool efficiency and specific consumed energy”. J. Mater. Process. Tech. vol.141 (1), pp. 9-15, 2003.
 - 14.Li, W., Kara, S., “An empirical model for predicting energy consumption of manufacturing processes: a case of turning process”, Proc. Inst. Mech. Eng. Part B, J. Eng. Manuf. vol.225 (B9), pp.1636-1646, 2011.
 - 15.Mori, M., Fujishima, M., Inamasu, Y., Oda, Y.,” A study on energy efficiency improvement for machine tools”, CIRP Ann. Manuf. Tech. vol.60 (1), 145-148, 2011.
 - 16.Diaz, N., Redelsheimer, E., Dornfeld, D., Energy consumption characterization and reduction strategies for milling machine tool use. In: 17.Hesselbach, J., Herrmann, C. (Eds.), Globalized Solutions for Sustainability in Manufacturing. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 263-267, 2011.
 - 18.He, Y., Liu, F., Wu, T., Zhong, F.P., Peng, B., “Analysis and estimation of energy consumption for numerical control machining”, Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf, Vol.226 (B2), 255-266, 2012.
 - 19.Vincent Aizebeoje Balogun and Paul Tarisai Mativenga,” Modelling of

direct energy requirements in mechanical machining processes”, Journal of Cleaner Production, vol. 41, pp. 179-186, 2013.

冷凍空調系統冷凝器效率改善專利型技術

蔣偉義*、蔡國棟**、蔣明軒***、蔣河晏****

摘 要

本發明係有關一種冷凝器及冷凝器增進效率方法，本發明冷凝器增進效率方法為：將來自壓縮機的高壓高溫過熱氣態冷媒導入冷凝器內部的液態冷媒區，高壓高溫過熱氣態冷媒與冷凝器內部液態冷媒會產生熱傳遞作用，使高壓高溫過熱氣態冷媒產生降溫冷凝現象，而冷凝器內部液態冷媒因吸熱產生升溫氣化現象，達成增進冷凝器效率功效。

相較傳統冷凝器中的冷媒冷凝過程是靜態凝結，本新技術有利用氣態冷媒攪拌液態冷媒的過程，增加熱交換器熱傳性能，普遍不被產學界的教授與先進接受，並斥之為無效。但經過發明人契而不捨的實驗精神，實際設計製造設備驗證，同一個冷凝器，改變配管方式，即可有效降低高壓(冷凝溫度)達到相同能量的散熱量。本技術經審查通過取得發明專利(發明第 I789604)。

有別於其他的熱交換器(冷凝器)的改善方法，本技術是直接而有效的，在不影響熱傳量的前提之下，平均可降低冷凝溫度 $3\sim 5^{\circ}\text{C}$ 以上，壓縮機的冷凝溫度每降低 1°C ，大約可節省 3% 的耗電量，顯而易見，本技術以全新專利的技術觀念，可以節電 9~15% 以上，如果使用率可普及冷凍空調業，增進冷凍空調設備效能，必定可以為全國節能減碳目標貢獻相當大的助益。

【關鍵詞】 冷凝器、冷凝器增進效率方法、冷凍空調設備效能

*雙興節能科技有限公司 機械暨冷凍空調技師(2005~2023)

**雙興節能科技有限公司 專案經理(2020/7~2023)

***雙興節能科技有限公司 工程師(2022/7~2023/5)

****雙興節能科技有限公司 助理工程師(2022/7~2023)

一、前言

冷凍空調系統的四大元件依序為壓縮機、冷凝器、膨脹閥、蒸發器，目前系統效率提升的主要方向有壓縮機的壓縮效率提升，或者是熱交換器(含冷凝器與蒸發器)熱交換效率提升，本文主要闡述的是熱交換器(冷凝器)熱交換效率改善提升，進而改善冷凍空調系統的性能係數(COP)。

傳統冷凝器的效率改善方法大約有，增加熱交換面積(例如有紋路的銅管)、更佳傳導性的金屬材質(例如德國銅管)...等等，但這些改善的效果很有限，因為環境污垢因素多(塵垢、油垢、水垢)，使用短時間熱交換器的表面就有積垢、塵土...等等不良條件，造成改善失效，而且使用者不容易經常保養冷凝器。

相較傳統冷凝器中的冷媒冷凝過程是靜態凝結，本新技術有利用氣態冷媒攪拌部分液態冷媒的過程，增加熱交換器熱傳性能，經過多台製程空調設備已經證實有效可行，而且迄今已經運轉 3~6 年以上，設備依然正常運轉，而且節能效果佳。

二、冷凍空調系統相關過程與公式說明

1.傳統冷凝器的冷凍循環公式說明：

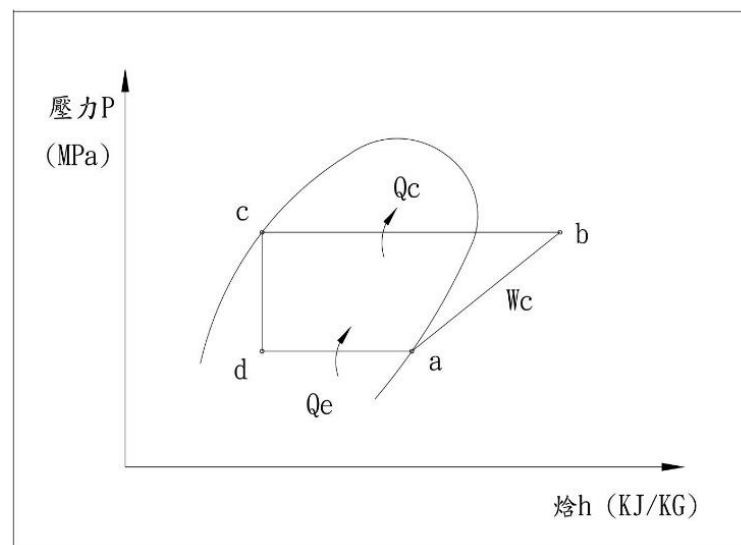


圖 1 冷媒壓焓圖

(1) 壓縮過程 a-b (壓縮機)

$$W_c = G \times (h_b - h_a)$$

(2) 冷凝過程 b-c (冷凝器)

$$Q_c = G \times (h_b - h_c)$$

(3) 節流過程 c-d (膨脹閥)

$$h_d = h_c$$

(4) 蒸發過程 d-a (蒸發器)

$$Q_e = G \times (h_a - h_d)$$

(5) 壓縮機的運轉能量平衡

$$Q_c = Q_e + W_c$$

其中：

W_c = 壓縮機的功率 KJ/S(KW)

G = 冷媒質量流率 KG/S

h = 冷媒焓值 KJ/KG

Q_c = 冷凝器單位時間的散熱量 KJ/S(KW)

Q_e = 蒸發器單位時間的吸熱量 KJ/S(KW)

2. 冷凝器的熱傳遞方程式

$$Q_c = UA(LMTD) \quad (\text{公式 2-1})$$

$$LMTD = (\Delta T_A - \Delta T_B) / \ln(\Delta T_A / \Delta T_B)$$

$$\Delta T_A = T_c - T_A$$

$$\Delta T_B = T_c - T_B$$

其中：

Q_c = 冷凝器單位時間的散熱量 KJ/S(KW)

U = 總熱傳遞係數 KW/M²·°C

A = 熱傳表面積 M²

$LMTD$ = 冷凝器的對數平均溫度差 °C

T_c = 冷媒在兩相區的冷凝溫度 °C

T_A = 冷卻流體在 A 處的溫度 °C

T_B =冷卻流體在 B 處的溫度 $^{\circ}\text{C}$

ΔT_A =兩流體在 A 處的溫度差 $^{\circ}\text{C}$

ΔT_B =兩流體在 B 處的溫度差 $^{\circ}\text{C}$

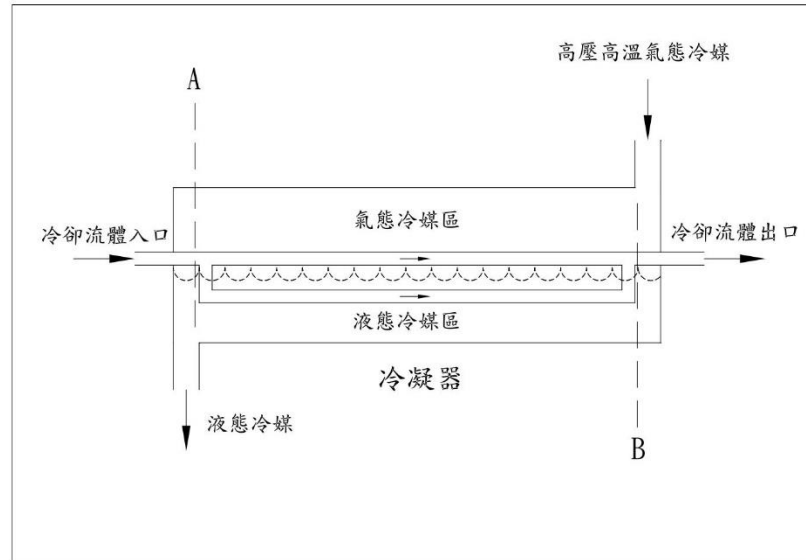


圖 2 傳統冷凝器熱交換器簡易示意圖

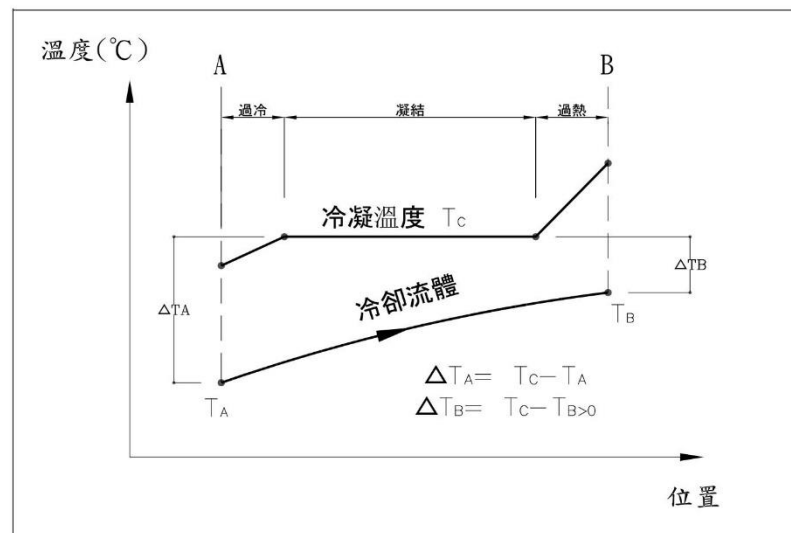


圖 3 熱交換器溫度位置圖

3. 高溫高壓冷媒傳遞給相對低溫的冷卻流體的熱傳量 Q_c (由冷媒高溫側計算)

$$Q_c = G \times (h_b - h_c)$$

其中：

G = 冷媒質量流率 KG/S

h = 冷媒焓值 KJ/KG

- 4.相對低溫的冷卻流體(水或空氣)由高溫高壓冷媒所得到熱傳量 Q_f (由冷卻流體低溫側計算)，

$$Q_f = G_f \times C_p \times (T_B - T_A)$$

其中：

Q_f =冷卻流體單位時間的熱交換熱量 KJ/S(KW)

G_f =冷卻流體的質量流率 KG/S

C_p =冷卻流體的比熱 KJ/(KG*°C)

T_A =冷卻流體在 A 處的溫度 °C

T_B =冷卻流體在 B 處的溫度 °C

- 5.假設不考慮任何微小的熱損，依能量不減的原則，理論上，二個流體熱交換，高溫流體(冷媒側)所減少的熱量等於低溫流體(冷卻流體側)所增加的熱量，

$$Q_c = Q_f \quad (\text{公式 2-2})$$

其中：

Q_c =冷凝器單位時間的散熱量 KJ/S(KW)

Q_f =冷卻流體單位時間的熱交換熱量 KJ/S(KW)

- 6.冷凝器的趨近溫度(T_{app})定義為冷卻流體出口位置的溫度(T_B)與冷媒冷凝溫度(T_c)的溫度差，如圖 3 所示， $\triangle T_B$ 即是趨近溫度(T_{app})，趨近溫度越小，代表熱交換器(冷凝器)性能越好，目前，業界的傳統做法是加大熱交換面積降低趨近溫度，但加大熱交換面積會增加設備製造成本，然而，無論多大的熱交換面積趨近溫度都是大於零。

- 7.趨近溫度(T_{app})是冷凝器很重要的一個參數，判斷熱交換性能的依據，同一台冷凝器用一段時間後，產生污垢，會影響熱傳性能變差，此時會造成高壓(冷凝壓力/冷凝溫度)升高，達到所需的高壓側熱傳量，但到一定程度(高壓上限保護)時，就必須清潔保養冷凝器，使其恢復冷凝器的熱傳性能。

- 8.採用更佳傳導性的金屬材質(例如德國銅管)也可以降低冷凝器的趨近溫度(T_{app})，進而得到改善熱交換器性能的結果，但是運轉一段時間所累積的塵垢、油垢、水垢很快讓性能下降，一般使用者不容易經常保養冷凝器，使得改善效果不彰。

- 9.一般市面型錄氣冷式冷凝器的性能表示方式有採用另一個數據為入口溫度差(ITD, Initial Temperature Difference)，亦即是附圖 2-3 中的 ΔT_A ，一般

氣冷式冰水主機的冷凝器選機條件，如圖 4，氣冷式冷凝器選機表所示， $\Delta T_A = 10^\circ\text{C}$ ($45^\circ\text{C} - 35^\circ\text{C}$)， $\Delta T_B = 3.9^\circ\text{C}$ ($45^\circ\text{C} - 41.1^\circ\text{C}$)

氣冷式冷凝器選機表(傳統方式，氣態管由上方進入)

PROGRAM NEWVPCD-EVAPORATOR/CONDENSER CALCULATION

KING MACHINERY CO., LTD.(2011-02-01)

REVISED DATE:2020-02-03(MODIFY HIEVP/HICD OF HITACHI FOR RNT/DI

JOB=TTA3-20[CONDENSER]

2020-3-31

COIL=CONDENSER 410A

COIL DATA:

NO. OF COIL= 2

COPPER TUBE [COPPER-FIN] FIN,THICKNESS(mm) .13

TUBE=[3/8-TUBE][SMOOTH] .41 MM.

TUBE DIA.(mm)= 9.520001 PITCH(mm),XH,XL= 25 21.65

ROW,FPI,TUBE/ROW.LENGTH(M)= 4 12 44 2

FACE AREA/COIL(SQM).FA= 2.2

THERMAL CALCULATION DATA:

EVAPORATING/CONDENSING TEMP.(TO COMPRESSOR) TE,TC= 3 45

PSIGL.PSIGH= 111.3242 381.3521

SUPERHEATING/SUBCOOLING,SH,SB= 14 8.3

EVAPORATOR INLET QUALITY,XIN= .4173714

HEAT TRANSFER AREA(SQM)/COIL.AO,AI= 165.1447 9.620838

FIN EFFICIENCY,EFF= .8976526

NUMBER OF CIRCUIT/COIL,NC= 22

REFRIGERANT MASS VELOCITY,G(KG/S-SQM)= 145.0581

TUBE-SIDE HEAT TRANSFER COEFF.:

HI(W/SQM-C)= 2520.193 [TEST DATA OF HITACHI]

TUBE-SIDE PRESSURE DROP(PSI),DPSI= 1.048072

FACE VELOCITY,FPM,M/S= 496.9697 2.525253

AIR-SIDE HEAT TRANSFER COEFF. HO(W/SQM-C)= 69.23857 [WANG(2000)]

AIR-SIDE FOULING,FF(SQM-C/W) 0

THERMAL RESISTANCE(C/W):

FIN-SIDE(AIR) RO=0.000097 61.587 %

FIN-FOULING RF=0.000000 0.000 %

CONTACT RC=0.000019 12.093 %

TUBE WALL RT=0.000000 0.066 %

INSIDE(REFRIGERANT) RI=0.000041 26.254 %

TOTAL AIR FLOW,CMH= 40000

AIR-SIDE PRESSURE DROP(PA)= 57.63616 MMWG= 5.879351

DISCHARGE TEMPERATURE,TDD(C)= 86.07021

HEAT RATE IN DESUPERHEATING,QSH(KW)= 20.19263

DESUPERHEATING AREA,ASH(SQM)= 42.23032

CONDENSATION REGION: HEAT RATE,QCD(KW)= 55.25971

AREA,ACD(SQM)= 202.9081

INLET/OUTLET AIR TEMPERATURE: TACD1,TACD2= 35 41.14456

TOTAL HEAT REJECTION CAPACITY (KW)= 83.97569 KCAL/HR= 72219.09

KCAL/HR/SQM(FACE AREA)= 16413.43

OVERALL EFFECTIVENESS,ECD= .6060586

KG/COIL= 141.3975 TOTAL WEIGHT= 282.795

Tc=45 C

TA=35C
TB=41.1C

圖 4 氣冷式冷凝器選機表

三、專利型冷凝器技術說明

- 1.本創作為一全新的設計，變更配管位置，改良傳統冷凝器的熱交換效率。高壓高溫冷媒氣體由下方或下側方(冷媒液、氣兩相共存區的液態部份)進入冷凝器，高壓高溫過熱氣態冷媒與飽和液態冷媒會產生熱傳遞作用，高溫過熱氣態冷媒會產生降溫冷凝現象，而飽和液態冷媒會因吸熱產生升溫氣化現象，由於高溫氣態有浮力作用，會往上飄，並不易短循環直接進入冷媒的底部出口，改善後簡單示意圖如下：

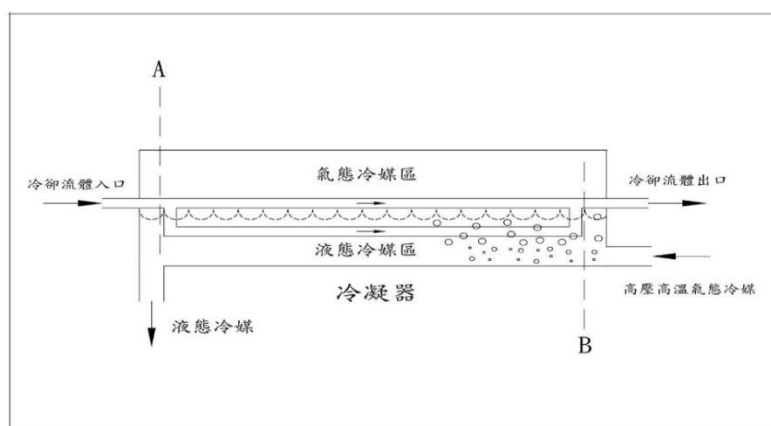


圖 5 新型冷凝器熱交換器簡易示意圖

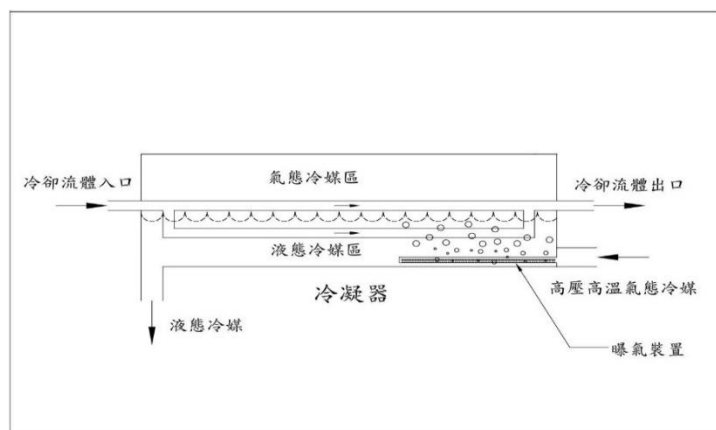


圖 6 新型冷凝器熱交換器簡易示意圖(增加曝氣)

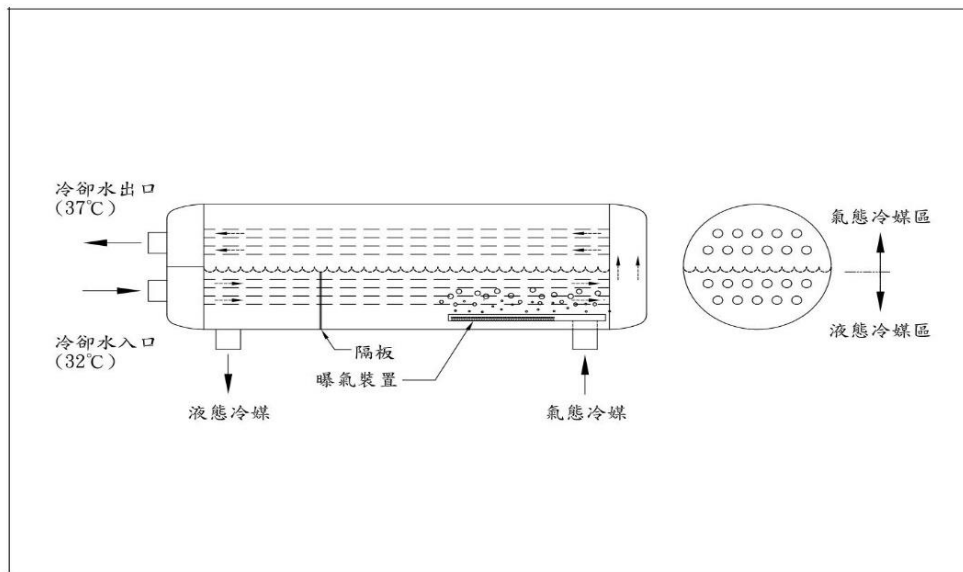


圖 7 新型水冷冷凝器熱交換器簡易示意圖

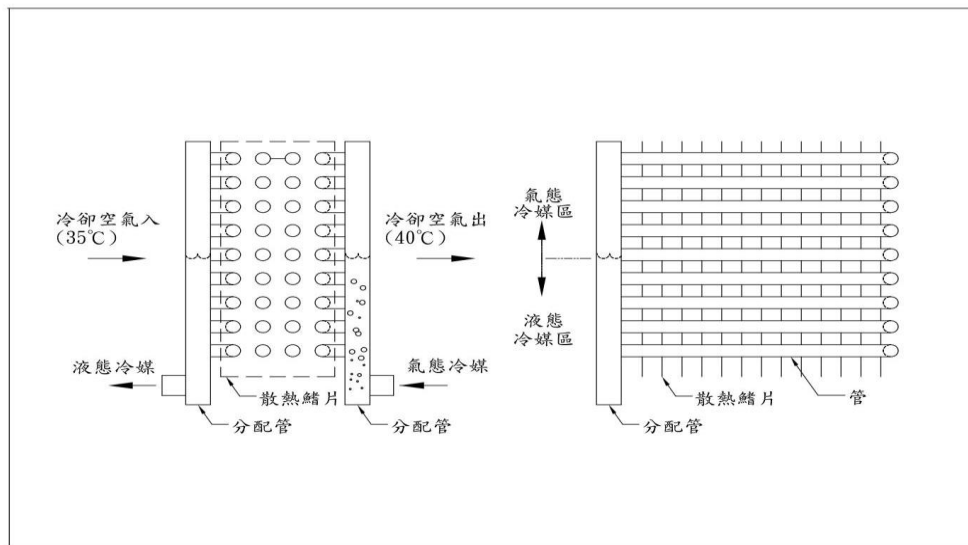


圖 8 新型氣冷冷凝器熱交換器簡易示意圖

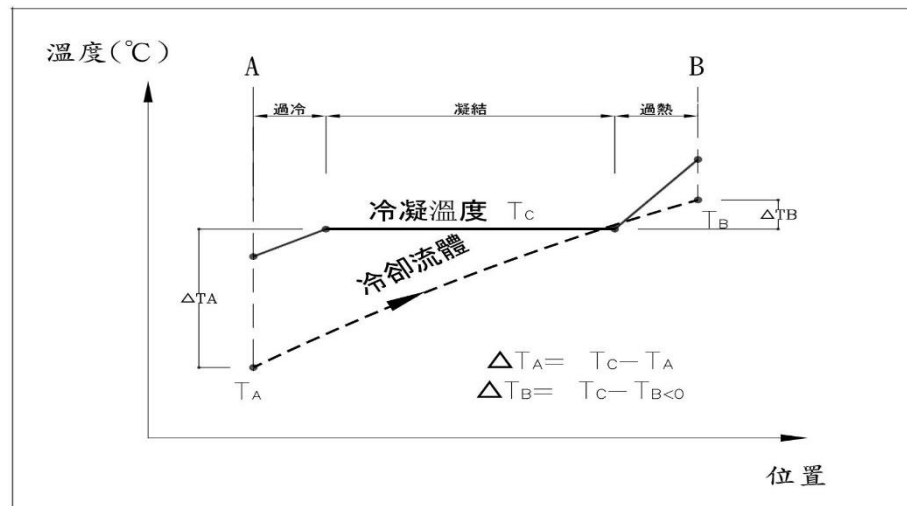


圖 9 新型改善後熱交換器溫度位置圖

2.與傳統冷凝器的靜態冷凝方式比較，本創作的可得到的差異或優點大約有下列四點：

- (1) 過熱區的高溫氣態冷媒(此區的對流係數與凝結係數較差與相對低溫液態冷媒混合，過熱氣態冷媒迅速凝結可以成為兩相區的氣態冷媒(對流係數與凝結係數較佳)。
- (2) 氣態冷媒在液態冷媒中，會形成氣泡，因浮力往上飄，產生攪拌效果形成較佳的熱傳導性能，因為氣態冷媒的密度很大，設計正確的冷媒流速之下，氣態冷媒並不會從底部的出口流出。
- (3) 目前推理假設(因為此暫態過程無人研究相關資料)，液態冷媒(約 37~45°C)區中，因為高溫氣態冷媒(約 70~90°C)的攪拌暫態過程，要達到兩相區的壓力(P)溫度(T)的穩態平衡需要時間，在平衡之前，有些熱量已經傳的到冷卻流體。不像傳統冷凝器的液態區，要提高液態冷媒的溫度形成熱傳，唯一的方法只能靠壓力提高。
- (4) 在較低的冷凝溫度(冷凝壓力)之下(Wc 變小)，可得到冷凝器的熱傳量 Qc 相同，蒸發器熱傳量 $Q_e = Q_c - W_c$ 也增大，系統性能係數 COP 增加。

- 3.經由多台設備實際運轉驗證，冷凝器的趨近溫度(Tapp)的值變小甚至為負值，已經無法採用傳統冷凝器的熱傳遞方程式(公式 2-1)計算，因為函數 $\Delta T_B = T_c - T_B$ 為負值，函數 $\ln(X)$ 的 X 值不能為負數，代表此專利冷凝器的熱傳模型與傳統的冷凝器的熱傳模型不同，所以傳統的舊公式不適用。
- 4.因為本改善技術是由結果，亦即冷凝器的趨近溫度(Tapp)變小，所推論的效率改善，其中所解釋的原理部分有部分是假設可能現象，因為冷媒的兩相區是屬於靜態(穩態)平衡的凝結現象，當過熱區域的高溫氣態冷媒混入

液態冷媒現象，是屬於動態攪拌(暫態)，狀態是否會依然一樣，並無相關的研究資料可查出。

- 5.如圖 10 所示，就氣態冷媒攪拌液態冷媒所增加液態冷媒蒸發量(G2)與凝結量(G2)，二者的能量變化一正一負，應是相抵消。但是，實際上，冷凝器的高溫分布情況會不同，而且高溫氣態冷媒在分布的路徑上會接觸到更多冷媒金屬管路，將熱量傳到冷卻流體。



溫溼度曲線圖-1090929(熱泵出風8曲線).xlsx

圖 10 新型改善後熱交換器數據紀錄圖

- 6.實際運轉成功案例之一，某食品工廠的熱泵乾燥機，出風溫度高於冷凝溫度，證明附圖 3-5 所示，冷凝器趨進溫度為負值。記錄曲線如附圖 3-6 新型改善後熱交換器數據紀錄圖。設備重點說明如下：

- (1)採用新型氣冷式冷凝器熱交換器(如附圖 3-4)作為加熱盤管，

$$\text{冷凝器的趨近溫度}(T_{app}) = \Delta T_B = T_c - T_B = 48.1 - 51.5 = -3.4^\circ\text{C}$$

其中：

T_c = 冷媒在兩相區的冷凝溫度 $^\circ\text{C}$

T_B = 冷卻流體在 B 處的溫度 $^\circ\text{C}$

ΔT_B = 兩流體在 B 處的溫度差 $^\circ\text{C}$

(2)由以上驗證，本技術改善的結果是優於傳統的技术。

7.實際運轉成功案例之一，20RT 氣冷式冰水主機之冷凝器性能，出風溫度趨近於冷凝溫度。

(1)新型冷凝器配管方式如圖 11 新型冷凝器配管方式所示(同一個冷凝器，將傳統方式的配管由上方進入，選機表如附圖 2-4，改為下方配管，性能改善)。



附圖 11 新型冷凝器配管方式(氣態管配管由下方進入)

(2)新技術的冷凝器現場數據，

I. 如圖 12，冷凝器的高低壓值(在外氣 35.3℃ 條件)。蒸發溫度=4.0℃，冷凝溫度=42.5℃。



圖 12 冷凝器的高低壓值(在外氣 35.3℃ 條件)

- II. 如圖 13 冷凝器的出風溫度($=42.1^{\circ}\text{C}$)。趨近溫度 $=43-42.1=0.9^{\circ}\text{C}$ ，傳統配管趨近溫度原本是 3.9°C (如附圖 2-4，氣冷式冷凝器選機表所示)。經改成新型配管的方式，外氣 35.3°C ，冷凝溫度 42.5°C ，離風溫度 42.1°C ，趨近溫度是 0.4°C ($42.5-42.1$)，驗證本技術可以降低趨近溫度的理論，同一組冷凝器，配管由上方進入，改成由下方進入，冷凝器趨近溫度由 3.9°C 降為 0.4°C 。



圖 13 冷凝器的出風溫度($=42.1^{\circ}\text{C}$)

- III. 上述的差異是在相同熱傳量之下，冷凝溫度下降 3.5°C ($=3.9-0.4^{\circ}\text{C}$)，對壓縮機的功率而言，大約減少 10.5% ($=3.5^{\circ}\text{C} * 3\%/^{\circ}\text{C}$)

四、新舊技術的差異比較

1. 增加熱交換器熱傳導性能的三大因素：

- (1) 溫度差(Temperature Difference): 熱交換流體的溫度差越大，熱傳導效率越好。 $(\Delta T \text{ 越大})$
- (2) 擾動(Turbulence): 流體擾動越大，熱傳導效率越好(U 值越大)
- (3) 時間(Time): 熱傳需要時間，熱交換時間越長，熱傳導效率越好。

2. 本創作新技術與傳統舊技術相比較之下，上述三點完全符合要點：

- (1) 溫度差(Temperature Difference): 高溫高壓的氣態冷媒不會集中在小區域，藉由底部液態區往上漂浮變化，會將高溫分布在比較大區域，也就是提高冷凝器的一次側區域的溫度，形成好的熱傳導效率。 $(\Delta$

T 越大)

- (2) 擾動(Turbulence):相較於傳統的冷媒是靜態凝結(無擾動)，如圖 14 所示，傳統的冷媒質量流量($G1$)只有等於壓縮機的冷媒質量流量。本創作新技術的氣態冷媒由液態冷媒進入，藉由氣態浮力往上飄，形成流體擾動，熱傳導效率越好(U 值越大)。如圖 15 所示，再合理推論，經由氣液相的擾動，有部分的液態冷媒($G2$)被蒸發再冷凝。

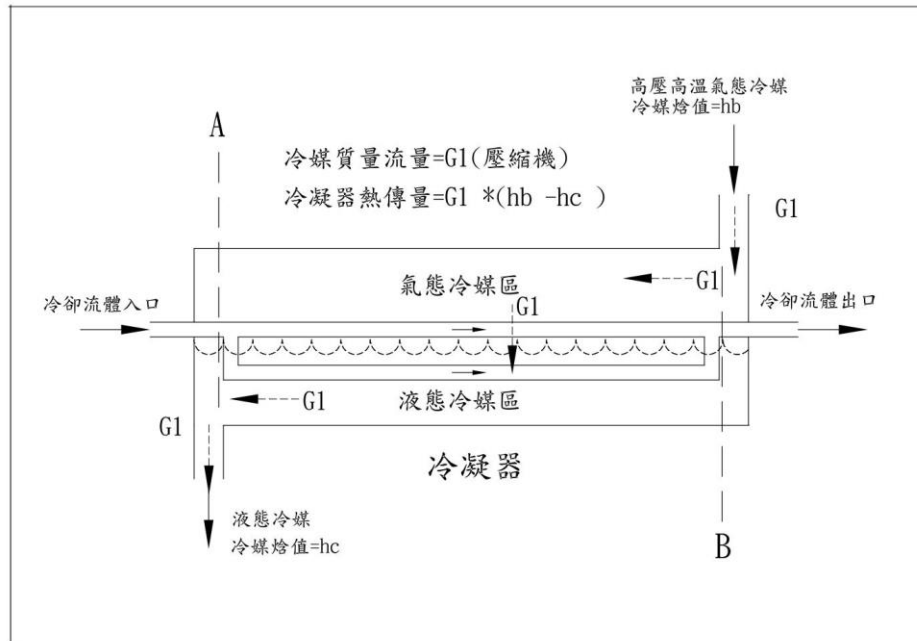


圖 14 傳統冷凝器冷媒凝結示意圖

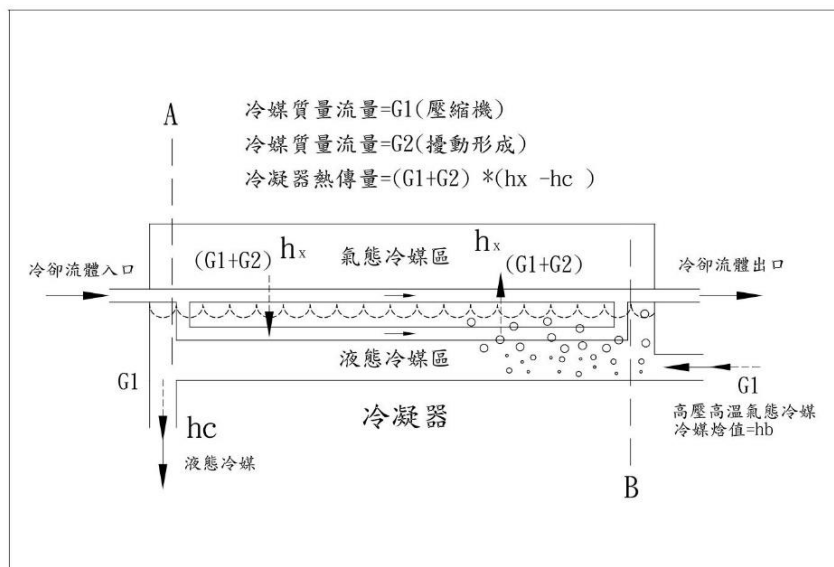


圖 15 新型冷凝器冷媒擾動凝結示意圖

(3) 時間(Time) :相較於傳統的冷媒的路徑是由上(入口)往下(出口)，如圖 16 所示，本創作新技術的氣態冷媒由液態冷媒進入，冷媒的路徑是由下(入口)往上漂浮到頂部，再往下凝結(出口)，如圖 17 所示，冷媒在冷凝器內停留的路徑(時間)比較長，熱交換時間越長，熱傳導效率越好。

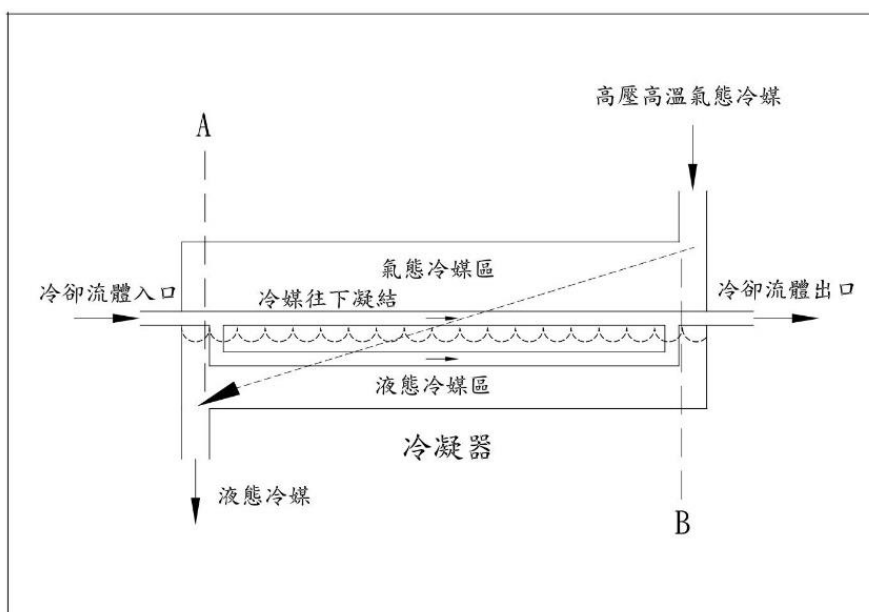


圖 16 傳統冷凝器冷媒凝結路徑示意圖

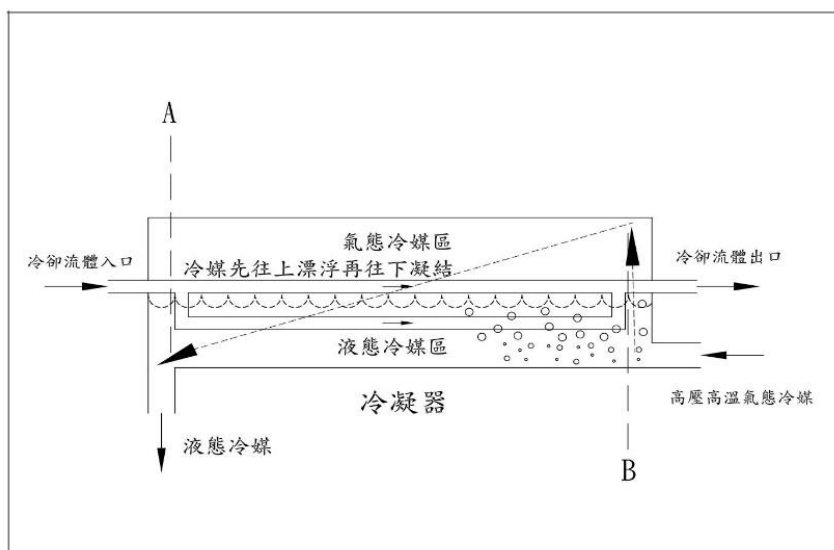


圖 17 新型冷凝器冷媒擾動凝結路徑示意圖

為方便了解新舊技術的差異，整理主要不同點比較如下表。

系統 內容 比較項目	新技術	傳統技術
主要工作原理	利用高壓高溫冷媒氣體的浮力，自冷凝器下部(冷媒液態區)進入，因為浮力作用，氣態冷媒會往上浮，產生冷媒區域流體的攪拌作用，增加熱傳導性能。	傳統的冷媒入口大都自冷凝器上部(冷媒氣態區)進入，冷媒靜態凝結降溫，靜態相變化(氣相變化為液相)，無任何攪拌功能。
冷媒的入口與出口	本案的冷媒入口與出口皆在冷凝器的下方(冷媒液態區)	傳統的冷媒入口大都自冷凝器上部(冷媒氣態區)進入，冷凝器的內部區域也沒有冷媒液態區與冷媒氣態區的差異
冷凝器的溫度分佈	過熱區的高壓高溫氣態冷媒的溫度可較平均分佈在冷凝器較大區域位置，提高熱交換性能。	過熱區的高壓高溫氣態冷媒的溫度受限在冷凝器極小區域位置，限制熱交換性能。
冷凝器的趨近溫度	趨近溫度接近 0 值，甚至為負值。	趨近溫度永遠大於 0 值，不可能為負值。

五、結 論

1. 本技術強調的趨近溫度變小，是因為在相同熱傳量之下，冷凝溫度(冷凝壓力)下降所得到實驗結果，此結果的優點是壓縮機的做功變小。另外，趨近溫度經由上述公式 2-2，所驗證，熱交換器的二次側熱傳量增加，代表一次側熱傳量也是增加。本創作全新的設計確實有效改善冷凝器的熱交換效率，同時也增加冷凍空調系統的性能係數(COP)，但礙於業界學者皆是研究傳統的方式，全新觀念普遍仍無法被認同與接受。
2. 因為是新設計，作者也曾懷疑是否可行。例如，冷凍油的循環是否會有問題?但經實際工程設備運轉 3~6 年以上，設備依然正常運轉，代表並無問題。
3. 此議題的應用相當廣泛，目前僅應用在多台氣冷式熱交換器，在理論上所有的冷凍空調冷凝器系統皆可改善，包含水冷式冰水主機、冷凍系統...等等，但因作者公司規模小，人力財力有限，改善的成果相當有限。在此呼籲，政府研究單位、冷凍空調業者、學術單位、想節能的使用者及先進們...

等，若對本議題有興趣者，可連絡洽談相關技術合作交流，或共同開發更節能的冷凍空調設備，裨利益社會大眾，迎向人類 2050 淨零排放的美好未來。

六、參考文獻

- 1.中華民國專利證書，發明第 I789604 號，發明名稱:冷凝器及冷凝器增進效率方法，專利權人:蔣偉義，發明人:蔣偉義。
- 2.冷凍與空調，第二版，Wibert F. Stoecker/Jerold W. Jones 著，蘇金佳譯 麥格羅希爾印行。

新建工廠整廠節能及清潔生產評估系統建置規劃

謝豐裕*、王玫芸**、陳建匡***

摘 要

新建工廠是導入新式節能設備最恰當之時機，因建築本體及產線仍在設計階段，可按照未來需求規劃設備規格。然而產能預估失準以及系統設置過高安全係數，導致實際運作時過度能耗或是設備不敷使用之情形屢見不鮮。有鑑於此，大醫生技在前期依照綠建築指引透過分區規劃、變頻設備等手法，降低超量設計風險；後期導入能源管理系統(Energy Management System, EMS)驗證運作狀況並適時調整對應參數，以期達到整廠節能的效益。

大醫生技設有多項 ESG 規範及指標，包含限用物質清單、環境暨節能減碳管理辦法、能資源管理目標等，將其結合綠建築標章及清潔生產評估系統，於建廠之初，即納入設備節能減碳考量，統籌整廠規劃。

整廠節能規劃係按照綠建築評估手冊^[1,2]及清潔生產評估系統^[3]各項指標，針對重大能源使用設備：空調系統、空壓系統及生產設備規劃能源管理系統，建置完成後可透過該系統持續監控各設備能源使用狀況，確保各設備處於良好運轉負載。空壓系統選用加熱式乾燥機配合廢熱回收設計，加上水潤滑式壓縮機及無耗氣自動卻水器，提升空壓系統之能源效率。空調系統透過區分使用場域及運作時間，計算合理空調負載，藉此選用最適用之高效能冰水主機，輔以變頻冰水泵浦，將空調系統負載盡量調整貼近需求。

除廠房設備節能規劃，亦參考清潔生產評估系統各項指標項目，導入 ISO14064-1:2018^[4] 組織層級溫室氣體盤查，量化溫室氣體排放量，做為未來溫室氣體減量之依據；包裝改善計畫，達成廢棄物及溫室氣體排放減量、物質節約、降低能源使用之目標；發行永續報告書，建置與揭露永續資訊。

透過本案規劃經驗發現，建廠及產線規劃前期就將整廠節能及清潔生產評估系統納入設計有助於減少能源消耗及改善成本，產線正式營運後也能更快適應減碳規範，並呼應企業永續發展願景。

【關鍵詞】空調節能、能源管理系統(EMS)、清潔生產評估系統、ESG

*大醫生技股份有限公司 總經理

**大醫生技股份有限公司 品研副理

***大醫生技股份有限公司 永續經營管理師

一、前言

大醫生技現以取得綠建築標章金級認證及通過清潔生產評估系統為目標。新建工廠是導入新式節能設備最恰當之時機，然而產線未正式生產、需量不明確，易導致超量設計、不敷使用等情形發生，大醫生技透過分區規劃、模擬計算等方式，規劃空調、空壓等高耗能設施，並參考綠建築評估手冊及清潔生產評估系統之指標，規劃廠房節能、減廢設計。

二、建置規劃描述

1. 空壓節能設計

本廠空壓系統主要透過加熱式乾燥機、內部廢熱再生乾燥分子篩、水潤滑式壓縮機、無耗氣式自動卻水器等設備選用，降低能源使用量，各項空壓節能設計分述如下：

(1) 無熱式乾燥機及加熱式乾燥機比較

我司空壓系統選用加熱式乾燥機，在相同設計壓力下，加熱式乾燥機平均耗氣量低，耗電量相對下降，以 100HP 壓縮機為例，約較無熱式乾燥機減少 77% 能耗，無熱式乾燥機與加熱式乾燥機比較請見表 1。

表 1 無熱式乾燥機與加熱式乾燥機比較

形式	無熱式乾燥機	加熱式乾燥機
設計風量	≤ 840 CMH	≤ 840 CMH
設計壓力	7kg/cm ²	7kg/cm ²
出口露點	-40°C	-40°C
使用電壓	440V/三相/60Hz	440V/三相/60Hz
脫附再生型式	利用壓縮空氣吹乾	利用電熱吹乾
再生時加熱溫度	NA	200°C
再生時加熱氣源	NA	環境空氣
平均耗氣率	20%	2%
平均加熱耗電功率	NA(用電量小不計算)	2.1KW
專利內部廢熱利用	NA	Yes
(1)乾燥劑分子篩耗電	NA(用電量小不計算)	18,396KW
(2)耗氣換算耗電*	146,402KW	14,640KW
(1)+(2)合計	146,402KW	33,036KW
節能率換算	相比無熱式乾燥機，年減 113,366KW，節能比例 77%	

*以 100HP 壓縮機為例，氣體成本:0.09945KW/m³(以 1HP 產氣 7.5 CMH 計算)

*資料來源：復盛股份有限公司產品型錄^[5]

(2) 使用專利內部廢熱利用鼓風外加熱吸附式乾燥機

專利內部廢熱利用之加熱吸附式乾燥機其再生乾燥分子篩時，加熱與冷卻方向皆遵循熱氣上升之原理，同為下進上出(圖 1)，利用電熱的 200°C 熱空氣，一層一層由下往上進行水分脫附，並在乾燥桶身約 3/4 位高度裝設溫度計，加熱至 3/4 桶身即停，接著冷卻流程由下往上進行，會把下方的廢熱往上推，將乾燥桶上方的分子篩乾燥再生，提前結束加熱時間節省加熱耗能。若無利用廢熱，一般加熱型乾燥機會加熱整桶，我司選用此型號比一般同規格加熱型乾燥機節能 20% 左右。



資料來源：復盛股份有限公司產品型錄^[5]

圖 1 加熱吸附式乾燥機再生乾燥流程

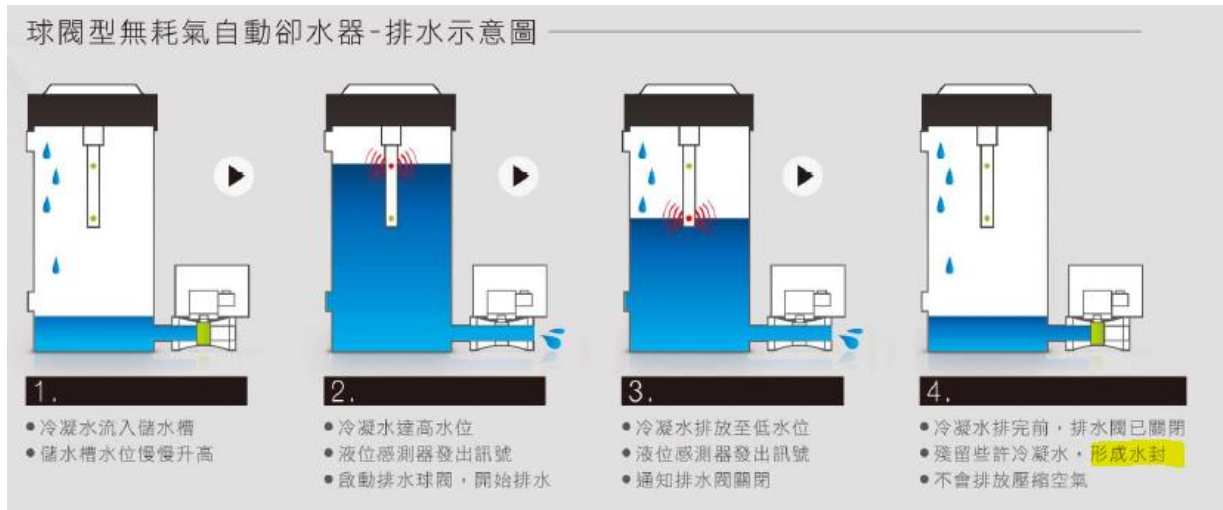
(3) 使用無油變頻式水潤滑型壓縮機

因我司隸屬生技廠，壓縮空氣品質要求無油，適用水潤滑及乾式壓縮機，我司使用水潤滑型壓縮機，選用純水潤滑而非常見的油潤滑。水潤滑有更佳的密封、冷卻功效，當潤滑水注入壓縮室，形成水膜密封轉子間隙，防止壓縮空氣回漏。經過水冷卻，壓縮溫度降至 40°C，相較乾式壓縮機因壓縮而增溫，水潤滑系統能冷卻壓縮空氣產生的熱能，使系統更接近理想的等溫壓縮，每單位風力之風量比一般乾式壓縮機提高 15%。

變頻專用控制器可依負載調整馬力，減少傳統空壓機的空重車運轉，傳統空壓機因供壓不穩，設定輸出壓力常比使用壓力多 1bar，造成能源浪費。變頻控制器可即時反應風量需求，使壓力穩定保持在使用壓力的 $\pm 0.1\text{bar}$ 。除了提供穩定的排氣壓力，啟動電流也比定頻空壓機平緩，延長壓縮機使用壽命。復盛專利變頻控制器可用於追蹤設備運轉狀態，可減少能耗達 35%。

(4) 使用無耗氣式自動卻水器，減少氣體流失以降低設備能耗

無耗氣式自動卻水器透過液位感測計感測冷凝水水位，達高水位時感測器發出訊號開始排水，達低水位時停止排水，使冷凝水保留一定水位高度，達到水封效果，減少壓縮空氣洩漏(圖 2)。



資料來源：復盛股份有限公司產品型錄^[5]

圖 2 球閥型無耗氣自動卻水器示意圖

2. 空調負載適當設計

(1) 空調系統節能潛力

中央空調系統設計之初是假定條件，如人員機具數量、運作型態、使用特性，乃至氣候因素等加以考量，為滿足上述這些條件，常選擇對應尖峰負荷的設備，另外再考量尚未確定的因素，像是日後耗能設備擴增、運作型態改變或未來劇烈的氣候變遷，冷凍噸數的設計通常會加入安全係數，造成設備容量大於負荷估算值。圖 3 可見我國全年度系統全載運轉時數並不多^[6]。因此本案節能重點便放在 A.評估合理的空調負載、B.設置相對應的高效率主機、C.綠建築標章建議之節能技術，以達到節能目的。

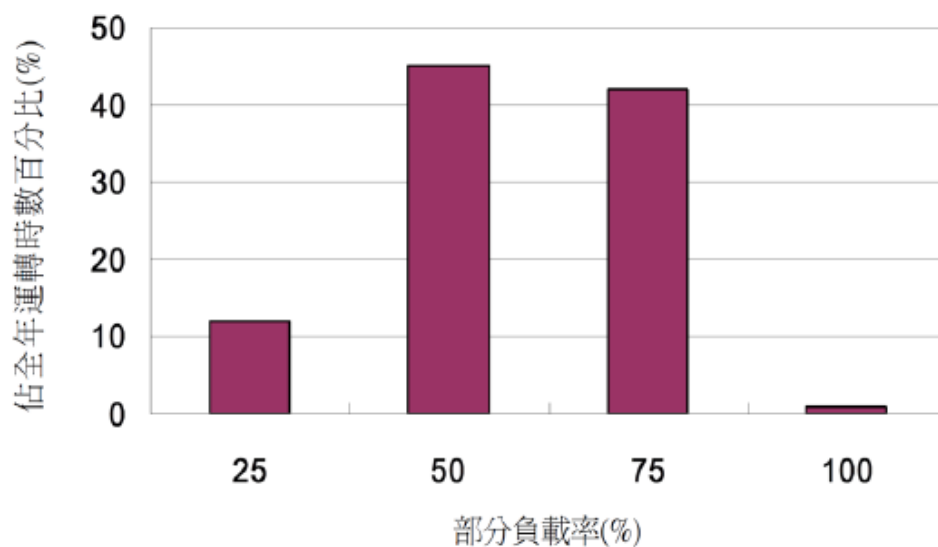


圖 3 冰水主機全年部分負載運轉時數統計

(2) 評估合理空調負載

我司委託彥輝冷凍空調技師事務所評估我司案場之空調溫溼度需求、空調使用時間、空間大小、換氣所需外氣量計算得到負載如圖 4，總負載需求約 196.5RT，相比僅以房室面積計算最大需求 384RT，約減少 48.8%之過量設計。

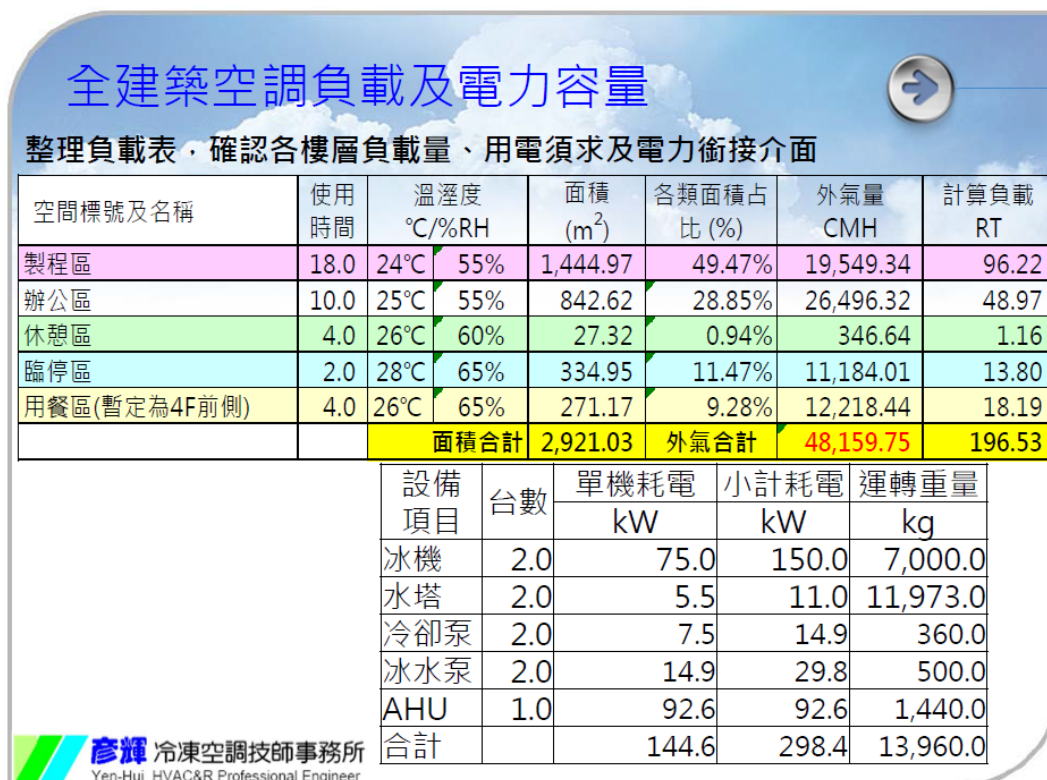


圖 4 全建築空調負載計算結果

(3) 設置相對應的高效率主機^[7]

冰水主機應採用效率高於經濟部能源局在 108 年公告的「蒸氣壓縮室冰水機組容許耗用能源基準與能源效率分級標示事項方法及檢查方式」冰水主機效率標準(表 2)之主機^[8]。表 2 中可見製冷能力小於 528KW 之 1 級製冷能效水冷容積式冰水機組性能係數(COP)為 5.15，目前我司選用之水冷容積式冰水機組 COP 為 5.70，高於現行 1 級製冷能效之規範。

表 2 冰水機組製冷能源效率分級基準表

冰水機組類型		標示額定制冷能力	製冷能源效率分級基準		
			性能係數(COP)		
			3級	2級	1級
水冷式	容積式	< 528kW	4.45	4.80	5.15
		≥ 528kW <1758kW	4.90	5.30	5.70
		≥ 1758kW	5.50	5.90	6.35
	離心式	<528kW	5.00	5.40	5.80
		≥ 528kW <1055kW	5.55	5.95	6.40
		≥ 1055kW	6.10	6.60	7.10
氣冷式		全機種	2.79	3.00	3.20
註： 1.冰水機組性能係數(COP)依CNS 12575（96年版）「蒸氣壓縮式冰水機組」於全載標準試驗條件，及各積垢容許值皆為零值下，實測所得之額定制冷能力除以額定制冷消耗電功率，採四捨五入計算至小數點後第二位，須符合附表一規定。 2.實測所得之額定制冷能力及性能係數應大於產品標示值95%以上。 3.經中央主管機關審核具有CNS 12575中所述熱回收功能之冰水機組，不適用本表分級基準。					

(4) 綠建築標章建議之節能技術方案

本案根據綠建築標章建議之節能技術採取方案如表 3，包含空氣側變風量系統、一次變頻冰水系統、CO₂ 濃度控制外氣系統、冷卻散熱系統、BEMS 及驗證測試報告等。

表 3 本案採取之綠建築標章建議節能技術方案

空調節能技術	效率	採取方案 ^[9]
空氣側變風量系統	α1	(1) 辦公室等無限制壓差的區域使用 PAH+FCU+VRF，利用外氣空調箱初步處理熱空氣，引入新鮮外氣，再經過風機管排組送到各區域，並搭配變風量系統匹配空調負荷的變動，達到舒適節能的效果。 (2) 正壓及恆溫恆濕之製程區使用 設計 AHU+CAV+風門控制，維持壓力溫度的同時，利用風門適當控制回風量和外氣量，經由濾網及盤管，出風到負載端，達到

空調節能技術	效率	採取方案 ^[9]
		氣體交換及留住空調的效果。
冰水 VWV 系統	$\alpha 2$	一次變頻冰水系統，冷卻水泵加裝變頻器，配合系統變頻控制自動化之運轉策略，使冰水主機運轉於 50%~100%，減少冰水主機與水泵運轉耗能。
CO ₂ 濃度控制外氣系統	$\alpha 4$	偵測人員密度較高的區域，當 CO ₂ 濃度超過極限值會開啟風門引入新鮮外氣。
冷卻散熱系統	$\alpha 7$	濕球溫度及水溫變頻控制，監控大氣濕球溫度，水塔之變頻風扇會隨大氣環境而更改風速，控制水溫達到最適散熱效果。
BEMS	$\alpha 8$	B 級 BEMS，具備 1.具監視、警報、運轉控制(至少應包含冰水主機台數控制)、計測(所有空調熱源設備每台電力)、2.設備啟停時程管理、3.空調系統運轉資料之紀錄及存檔等功能、4. 空調所有設備用電量、能源使用、運轉效率、設備維護紀錄等大部分之設備運轉狀況監視功能、5.計算製冷量及耗電機制功能、6.資料處理功能，將各設備之用電情形及運轉狀態，以報表（月報、季報、年報等）及各類圖形之方式作比較分析功能、冰水機房之 KW/RT 或 VRF 製冷耗電值。
TAB	$\alpha 9$	1.TAB 報告應含空氣側風量調整平衡，水側流量調整平衡。 2.空調設備運轉量測資料：冰水主機、水泵、空調箱、冷卻水塔及 VRF 系統等主要設備。水泵、空調箱風機要有性能曲線並做運轉點標示。
CX	$\alpha 10$	1. $\alpha 1 \sim 7$ 節能技術性能確認報告：各項節能技術控制設定值確認，確認節能控制是否可依要求自動控制節能，查看設定值變更時，自動控制可否配合操作。 2. $\alpha 8$ 節能技術性能確認報告：各項節能技術控制設定值確認，確認節能控制是否可依要求自動控制節能，查看監控系統有無規定功能報表圖控資料。 3.空調系統 VRF 運轉性能確認報告：測試系統是否可正常運轉，並提交測試報告書。 4.冰機效率證明或 IPLV 測試報告。 5.水泵要有 5%數量之 TAF 實驗室或第三方測試報告(依據 CNS659 系列)，但該個案廠商全部符合 ISO 9906 第 1 及 2 級並檢附證明者，不用另外做第三方測試報告。 6.空調箱要有 5%數量之測試報告，只要風量測試報告，測試方式由製造廠自行規定，但要有用電功率、風量、機外靜壓量測位置圖及數據報告。 7.分離式(含 VRF)驗證登錄證書或認證的節能標章。 8.FCU 及其他空調設備不用出廠測試報告。

3. 清潔生產評估系統

除空調、空壓系統外，外殼節能、照明節能皆依據綠建築評估手冊選用 Low-R(Low Radiation)玻璃及高效能 LED 照明，藉由手冊之指引，將能源使用降低至本廠之最低理論負載。創能也是本廠減少外部能源使用之策略之一，本廠預計規劃於頂樓設置太陽能發電設施，預計可供應現規劃設施 12.6%之能源使用。

軟體、管理系統參考清潔生產評估系統，各項指標分述如下：

- (1) 能資源節約：清潔生產評估系統之指標項目 1，能源消耗量已於前文說明，此處不贅述；我司參考分項「1-9 溫室氣體排放量」導入「ISO14064-1:2018 組織層級溫室氣體盤查」查證作業，並制定「溫室氣體盤查作業管理辦法」，計畫新設廠房正式營運後增加盤查邊界，變更基準年，做為後續減碳規劃之依據。
- (2) 綠色製程：清潔生產評估系統之指標項目 2，藉由分析產品性質及生產流程，規劃高效率生產動線，以減少不同生產站點間運送所需之能源及包裝使用。
- (3) 環境友善設計：清潔生產評估系統之指標項目 4，我司已展開包材改善計畫，選用 FSC 認證紙材、低揮發性植物油墨、減少包材工序及用量等措施降低包裝產生之廢棄物、有害物質及碳排放。目前受限於供應商配合能力，部分設計仍無法上線，新設廠房完工後將持續以環保低碳為目標改良設計。
- (4) 綠色管理：清潔生產評估系統之指標項目 5，我司制定限用物質清單，規範產品中添加之物質，保障消費者與現場作業人員身體健康；我司自願性溫室氣體制度包含採購綠電並響應綠色和平組織發起之 RE10×10^[10]倡議，承諾 2025 年前達成 60%再生能源使用。廠房規劃也納入能源管理系統(Energy Management System, EMS)，即時監測廠房能源使用，若有異常狀態，可立即修正，以減少能源耗用；我司已於民國 112 年透過利害關係人問卷及發行永續報告書與利害關係人溝通、透過供應商行為準則及供應商永續自評問卷瞭解並管理供應商在環境、社會、公司治理方面之表現。
- (5) 社會責任：清潔生產評估系統之指標項目 6，我司已於民國 112 年參考全球報告倡議組織(Global Reporting Initiative, GRI)之通用準則 2021(Universal Standard 2021) ^[11] 編制發行永續報告書(請見：<https://www.greencome.com.tw/esg-report>)，建置與揭露永續資訊，與利害關係人溝通我司之社會影響力，以符合永續發展目標。

本案於規劃階段參考清潔生產評估系統之各項指標分述如表 4。

表 4 清潔生產評估系統指標及應對措施

指標項目	分項	應對措施
1 能資源節約	1-3 能源消耗量	1.空壓系統採用加熱式乾燥配合廢熱回收、水潤滑型壓縮機及無耗氣式自動卻水器，減少能源消耗及壓縮空氣逸散 2.空調系統計算合理負載、選用高效率主機並配合變風量、變流量設計，避免超量設計、提升能源效率。
	1-9 溫室氣體排放量	導入「ISO14064-1:2018 組織層級溫室氣體盤查」查證作業，並制定「溫室氣體盤查作業管理辦法」
2 綠色製程	2-1 廠房流程管理有效性	分析產品性質及生產流程，規劃高效率生產動線
4 環境友善設計	4-1 採用物質節約設計	包材改善計畫，選用 FSC 認證紙材、低揮發性植物油墨、減少包材工序及用量
5 綠色管理	5-1 危害物質管制措施	制定限用物質清單，規範產品中添加之物質
	5-3 自願性溫室氣體制度導入	1.採購綠電並響應綠色和平組織發起之 RE10×10 倡議，承諾 2025 年前達成 60% 再生能源使用 2.規劃能源管理系統，即時監測廠房能源使用
	5-4 與利害關係人溝通	透過利害關係人問卷及發行永續報告書與利害關係人溝通
	5-5 綠色供應鏈管理	透過供應商行為準則及供應商永續自評問卷瞭解並管理供應商
6 社會責任	6-2 永續資訊之建置與揭露	發行永續報告書，建置與揭露永續資訊

三、預期成效

我司透過需量分析瞭解廠房負載，並規劃合理使用量，藉以避免超量設計，達成適用、不浪費之目標。各系統預期節能率如表 4。太陽能設備預計每年可發電 124,641 度，相當於現規劃設施 12.6%之能源使用。

表 4 各系統預期節能成效

項目	能源節約率(%)	備註
空壓系統		
加熱式乾燥機	77	與無熱式乾燥機相比
無油變頻空氣壓縮機	35	與標準定頻空壓機相比
空調系統		
合理空調負載	48	現規劃與他牌廠商初步規劃之冷凍噸差異

除可直接量化之能源指標外，我司透過清潔生產評估指標設定能資源節約、綠色製程、環境友善設計、綠色管理及社會責任等面向之應對措施，使我司在面對用電大戶條款、碳費徵收、客戶要求等挑戰時可快速反應。

我司為保健食品品牌商，品牌形象及客戶溝通是我司經營重點，透過節能減碳、環境保護及清潔生產目標，可提升我司永續發展績效，進而提升整體業績表現。

四、結 論

我司新建廠房計畫分析空壓及空調系統之合理需量、配合高效能設備及變頻器，減少空壓及空調設備能源需求。並參考綠建築評估手冊及清潔生產評估系統之指引，提升照明設備之能源效率、透過建築外殼隔熱達到節能效果。提前規劃綠色生產、綠色供應鏈、社會責任等目標，以達成永續發展願景。

透過本案規劃經驗得知，建廠及產線規劃前期就將整廠節能及清潔生產評估系統納入設計有助於減少能源消耗及改善成本，產線正式營運後也能更快適應減碳規範，並呼應企業永續發展願景。

五、參考文獻

- 1.王榮進，綠建築評估手冊-基本型，財團法人台灣建築中心，108年9月。
- 2.王榮進，綠建築評估手冊-廠房類，財團法人台灣建築中心，108年9月。
- 3.綠色工廠標章制度一般行業清潔生產評估系統評估指引，經濟部工業局，108年。
- 4.溫室氣體排放量盤查作業指引，行政院環保署，111年5月。
- 5.空壓機組設備型錄，復盛股份有限公司。
- 6.空調系統空氣測節能應用技術指引，經濟部能源局，106年12月。
- 7.吳有烈，「空調空氣側節能應用技術簡介」，服務業節能服務網線上節能課程，107年03月。
- 8.趙宏耀、吳旭聖，「冰水機能源效率標示新規定」，台灣ESCO會訊59期，台灣能源技術服務產業發展協會，109年03月。
- 9.王榮進，綠建築評估手冊-基本型 附錄-空調系統性能查核報告書2019年版(更新版)，財團法人台灣建築中心，108年9月。
- 10.RE10×10 企業綠電倡議計畫，財團法人綠色和平基金會，請見：
<https://cloud.greentw.greenpeace.org/campaign-climate-re10x10>
11. Global Reporting Initiative Universal Standard 2021, Global Reporting Initiative, 2021.

產業用水效率提升推動成效

黃俊富****、陳建璋****、陳晴璇****、林子皓***、魏名軍**、徐秀鳳***、林庭瑋*

摘 要

近年來全球高溫、強降雨等極端氣候，造成各地乾燥、森林大火及洪水等天然災害頻傳，氣候變遷的影響更為劇烈及頻繁，面對降雨時間及空間的異常變化，致使汛期與早期的應變更無法預期，也使得水資源管理更加嚴峻。

經濟部產業發展署辦理產業節水輔導、技術分享與交流等活動，強化產業節水及提升用水效能的觀念，以化工業、電子業的用水效能提升最為顯著；於民國 108 年更配合經濟部水利署政策加強產業園區用水計畫提送與申報管理措施，包括鋼鐵、化材及電子等產業，不僅加強廢水分流處理後回收再利用，更逐年強化替代水源-再生水之使用。全國首例鋼鐵業者使用首座鳳山水資中心之再生水，已將該廠之自來水占比降至 50%，同時吸引化工業、石化業及電子業者投入使用再生水行列，不僅降低對天然水資源之依賴，提高廠內用水穩定度，面對 110 年百年大旱及 112 年接續而來的枯旱，讓產業得以維持一定產能，強化企業營運韌性，也提升因應氣候變遷缺水危機的能力。

經濟部產業發展署將持續提供各類節水輔導資源，建立產業節水改善與技術交流的平台，並推動 ISO 水資源效率管理系統示範輔導，加強廠內用水管理及用水人才培育，俾利產業接軌國際水資源效率趨勢，及協助產業降低耗水費徵收的衝擊，也提升產業因應極端氣候的韌性，在政府與企業共同努力下，打造更具效率的用水環境。

【關鍵詞】產業節水輔導、用水回收率、水資源效率管理系統

*經濟部產業發展署 技正

**財團法人環境與發展基金會 經理

***財團法人環境與發展基金會 研究員

****財團法人環境與發展基金會 副研究員

一、前 言

近年極端氣候加劇，全球暖化造成熱浪、野火、乾旱和洪水頻繁發生，全球海運動脈-巴拿馬運河及歐洲貿易命脈-萊茵河因乾旱造成水位乾涸而中斷航運；澳洲、美國、加拿大、西班牙及葡萄牙等國家因高溫及乾旱，引起嚴重森林大火，顯現氣候變遷嚴重影響各國經濟發展與人民生活品質，面對降雨時間及空間的異常變化，致使汛期與早期的應變更無法預期，也使得水資源管理更加嚴峻。

臺灣於 2021 年發生百年乾旱，不僅停止稻作供灌、更採取供二停二的限水措施才渡過缺水危機。於 2022 年因颱風帶來豐沛雨水，惟南部地區降雨不如預期，2023 年台南及高雄地區仍面臨缺水而採取停止供灌及產業限水等措施，依中研院氣候變遷專家預估，登陸臺灣的颱風可能持續降低，未來乾旱的情況將越來越常見。在此旱災頻繁之際，產業永續發展更應珍惜水資源，減少碳排放量，並建立因應缺水危機之韌性才是長久之計。

我國依據聯合國永續發展目標^[1]建構臺灣永續發展目標^[2]，包括 6-淨水與衛生(SDG 6)中「06.04.02-推動節約用水工作，提升產業園區內廠商用水回收率」及 8-合適的工作及經濟成長(SDG 8)中「08.10.01-藉由節水循環、回收科技等措施，提升工業、農業用水效率」，兩項具體指標宣告推動節約用水及提升用水效率。我國行政院於 107 年及 111 年核定「產業穩定供水策略行動方案^[3]」及「國家氣候變遷調適行動方案(112 年-116 年)」^[4]，以提高工業用水循環利用率，確保國內產業用水可穩定供應為目標之一。



圖 1 聯合國 17 項永續發展目標^[1]

二、產業用水效能提升之推動說明

依循臺灣永續發展目標與「產業穩定供水策略行動方案」等國家政策，為積極推動產業大用水戶增加用水循環量，經濟部產業發展署持續辦理「產業用水效能提升計畫^[5]」，提供產業節水診斷輔導或 ISO 水資源管理系統之示範輔導，並視個案潛力規劃雨水貯留、模組試驗、區域水資源整合等實質措施，以及辦理用水管理人員教育訓練與輔導說明會等活動會議，持續跟進新穎技術、相關法規或國際節水推動資訊，計畫架構如圖 2。

透過現地輔導、廣宣擴散等各項工作推動，增進產業投資及加強用水管理意願，加強申報管理制度以有效掌握產業用水情形，並於產業穩定生產前提下，達成節水、省水及提升產業用水效率的目標。

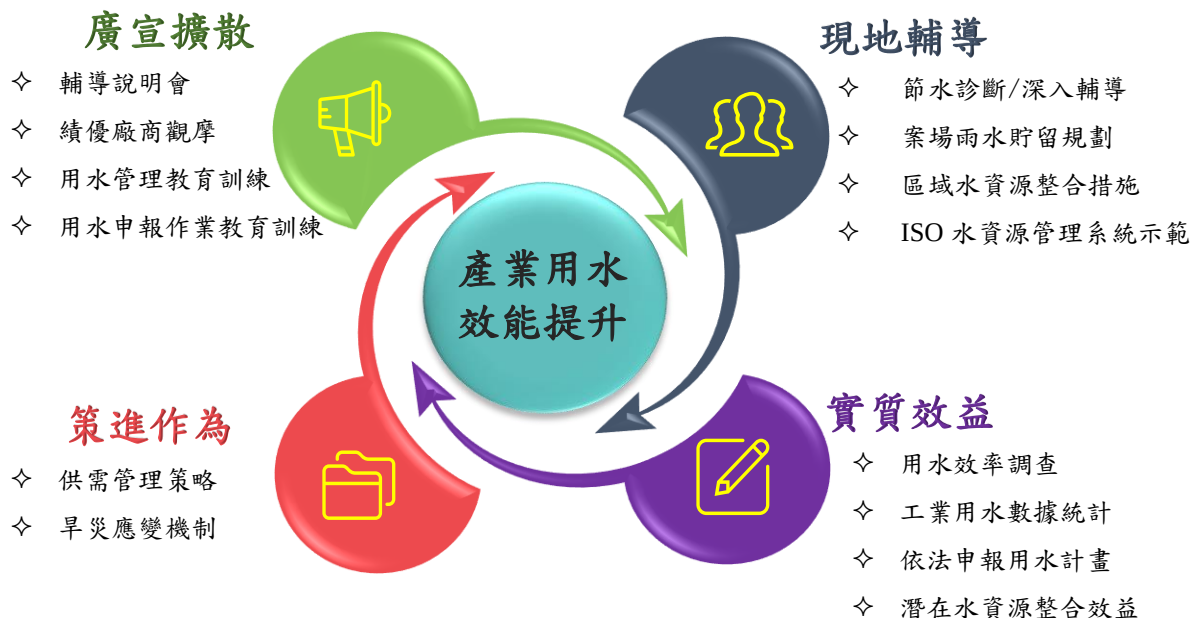


圖 2 產業用水效能提升計畫架構^[5]

三、推動效益與案例

水資源短缺和各項政策推動的影響下，永續的水處理技術布局和水資源循環再利用的思維將越來越受到重視，經濟部產業發展署於產業用水效率提升的推動成效分述如下：

1. 輔導推動與廣宣擴散

輔導對象以經濟部轄管 62 處產業園區大用水廠商(用水量>1,000 CMM 廠商)為主，產業型態則以化工、民生等傳統產業居多，新興產業如電子、晶圓等產業則較少，產業類型概略分成(1)化工業、(2)民生用品業、(3)電子業、(4)食品與醫療品業、(5)各類製品製造業及(6)非製造業者等 6 種。園區各產業的總用水量約 81 萬噸/日(含自來水+自行取水+再生水)，各產業的用水比例如圖 3 所示，以化工業的用水比例最高達 45%，其次為各類製品製造業約 24%、電子業約 15%，上述三個產業合計用水量占整體用水量的八成。

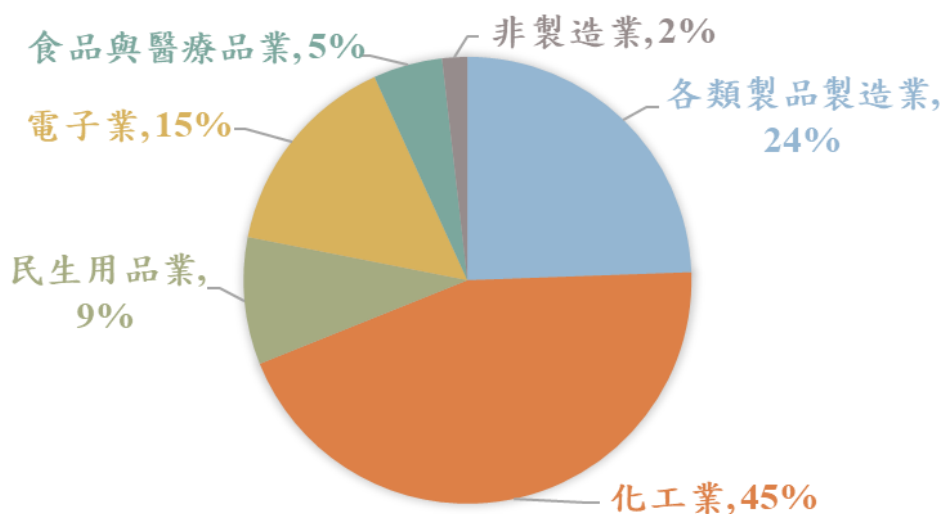


圖 3 62 處產業園區各產業大用水廠商用水比例^[5]

各產業的用水標的結構如圖 4 所示，主要以冷卻用水、製程用水為主，約佔各產業用水 80% 比例以上，鍋爐、洗滌塔、生活、其他等用水標的則較少，其中化工業及各類製品製造業的冷卻用水跟製程用水差距不大，約各佔 30%~40% 不等，為節約用水之主要標的；而民生用品業、電子業、食品與醫療品業則以製程用水為大宗，達 60%~70%，明顯高於冷卻用水；節約用水輔導通常針對不同產業類型及其用水特性，提供合適的節水建議與方案，故鍋爐、冷卻水塔、生活及其他用水的用水比例雖然不高，但往往因僅須改管或設置成本較低等原因，是產業較有意願及容易落實的節水或水回收措施的用水標的。

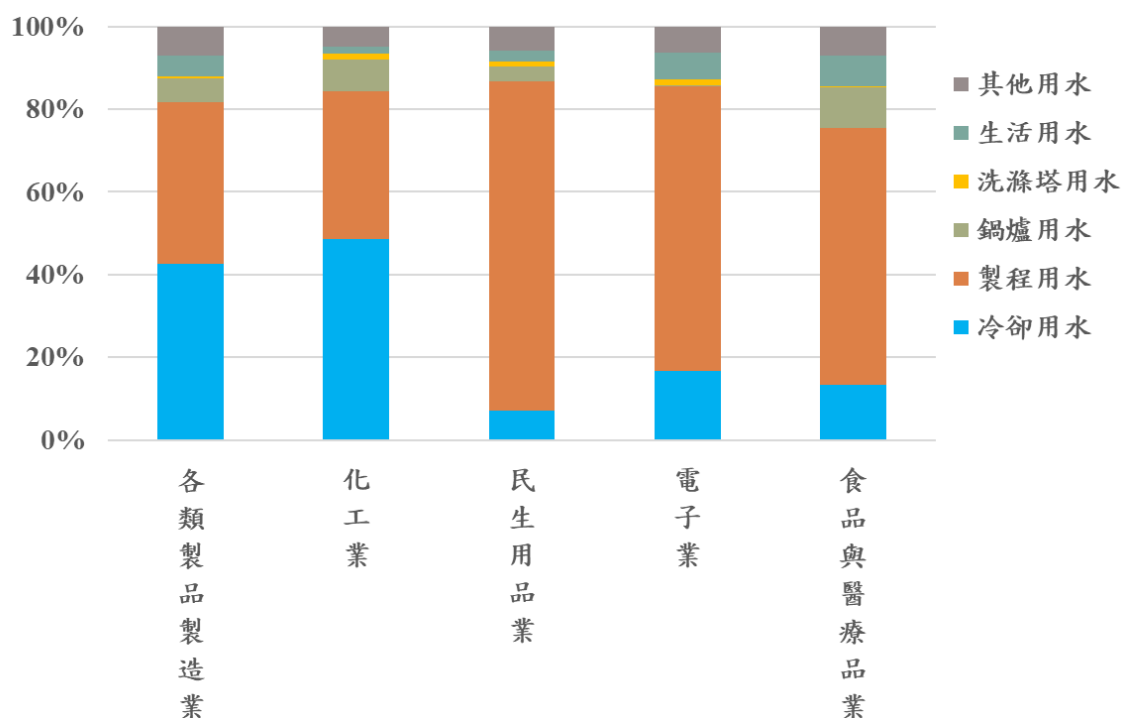


圖 4 各產業用水標的結構^[5]

追蹤歷年輔導的執行成效，各產業的節水量如圖 5，節水量達 1,500 萬噸/年，以化工業節水貢獻最高，達 1,000 萬噸/年，其次為電子業達 200 萬噸/年以上，餘四項產業節水量介於 13~120 萬噸/年不等。

化工業及各類製品製造業等傳統產業，從早年建設發展至今，多數已營運數十載，其中化工業佔整體 45% 用水比例，屬重點輔導產業，故其節水量及成效亦較為顯著；然而傳統產業也面臨廠內設備老舊、不易變動等窘境，有限的廠房空間也已竭盡開發，難以調整製程或增加回收處理設備，致使各類製品製造業、民生用品業等產業之節水效益較不突出。

除此之外，因食品與醫療品業多以天然水源為其原料或產品的成分之一，例如醃製、醬料、飲品、美妝品、保養液等，屬必要之用水情形，且國內法規亦管制食品與醫療品業不得使用回收或再生水，避免國民存有安全疑慮，故相關產業不易執行節水措施。

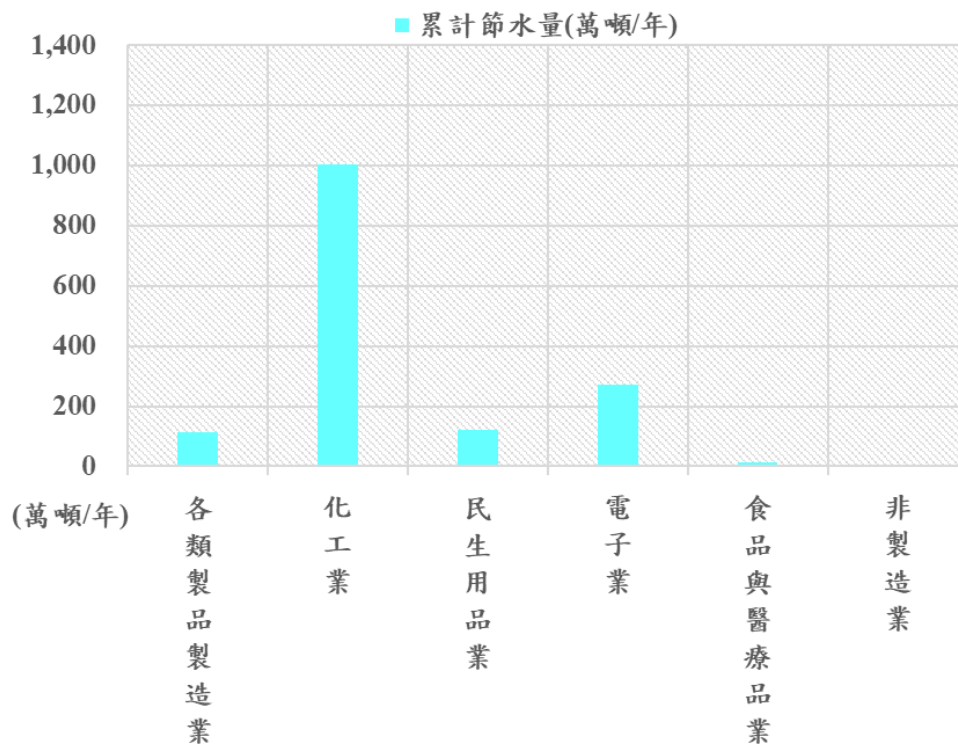


圖 5 各產業近年累計輔導節水量^[5]

彙整產業各用水標的常見的節水方案如表 1 所示，包括規劃源頭減量、製程水循環提升、公共設備用水改善、汰舊換新、廠區雨水貯留及製程低濃度清洗水、排放水回收再利用等可行性方案(如圖 6)。

表 1 各用水標的常見的節水方案彙整^[5]

用水標的	節水方案
冷卻水塔用水	1. 冷卻水塔風扇採用多段式變頻裝置，減少蒸發水量。 2. 調整冷卻水塔內噴頭角度，減少飛濺損失。 3. 增設防飛濺措施，減少飛濺損失。 4. 提高濃縮倍數，增加冷卻循環量。 5. 使用回收水(如：RO 濃排水、樹脂後段再生水)，減少原水取水。 6. 循環水或排放水透過設備處理後再利用(如：UF、RO、砂濾等)。
製程用水	1. 製程間接冷卻水、清洗用水等，循環再利用及依水質逐級利用。 2. 產品原材料替換為無需用水之材料。 3. 等待下一批製程期間，停止清洗槽進水。 4. 以導電度控制回收低濃度製程清洗水、排放水，經處理再利用。 5. 儀器分析水回收。 6. 汰換老舊耗水設備(如：水浴比高換低)，節省製程用水。 7. 排放水透過處理設備處理(如：RO、混床、EDI 等)，回收再利用。

用水標的	節水方案
洗滌塔用水	使用回收水(如：RO 濃排水、空調冷凝水)，作為補充水源使用。
生活用水	1. 廠內用水管理、水錶控管用量、宣導節約用水。 2. 裝設省水設備(感應式水龍頭、二段式沖廁)。 3. 使用回收水(如：RO 濃排水)，作為沖廁使用。
其他用水	1. 軟水系統再生時機，以導電度控制，回收後到清洗水。 2. 使用回收水(如：RO 濃排水)，作為補充水源使用。 3. 空調冷凝水回收。 4. 雨水回收。



(RO 回收設備)



(濃排水改管供冷卻水補水)



(EDI 回收設備)

圖 6 常見節水措施或設備相關照片^[5]

藉現地訪廠輔導的工作執行，能有效提供受輔導對象可行節水方案，同時掌握各產業用水情形與節水技術需求，計畫依行政院主計總處公告中華民國行業標準分類，108 年出版 18 項產業之用水最適化及節水技術指引手冊，提供各產業參考利用，並製作績優節水案例宣導海報，公開展覽及宣導擴散(如圖 7)。

同時辦理各項教育訓練、說明會或技術交流活動等，邀請國內主管機關、新穎技術的設備業者、節水績優的產業先進等，提供國內相關法規佈達、國際間用水管理趨勢的介紹、及節水經驗做法的分享，帶動各領域產業前往節水績優廠商進行觀摩交流互動，協助提高產業投資意願與信心，促進廠商落實節水工作，近年廣宣與交流活動如圖 8。



(a)節水技術指引手冊

(b)宣導海報

圖 7 編撰節水技術指引手冊及廣宣海報^[5]



(節水績優觀摩交流)

(教育訓練)

圖 8 計畫辦理相關活動與廣宣成果^[5]

2.水資源整合與替代水源推廣

另一項執行重點為區域水資源整合之媒合推動，係以園區內工廠或污水處理廠即將納管排放的廢污水，經適當處理後回收提供鄰近廠商使用，除了琢磨精進廠內節水的技術領域，更藉由整合區域水源的創新思維，改善產業固有使用天然水源的生產模式，進一步推廣帶動替代水源-再生水的使用，及提升企業面臨極端環境的調適韌性。

(1)水資源整合推動成效

水資源整合推動的型態包括兩種類型(如圖 9 所示)，Type 1 為供水廠商之放流水提供需水廠商再使用，有效減少供水廠商排水量及需水廠商的取水量，而 Type 2 係以園區相似性質之廢污水分流收集，或以聯合污水廠集中處理後，其放流水提供鄰近廠商回收再使用。

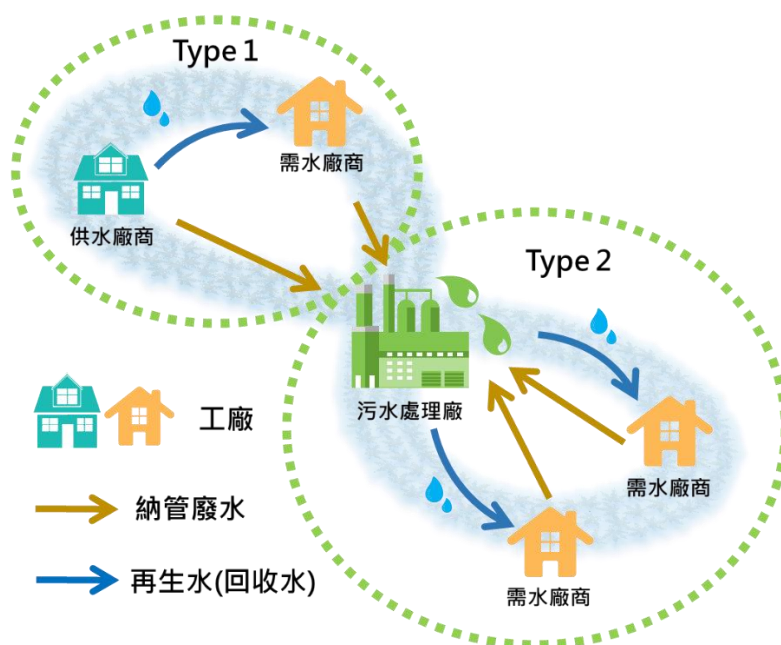
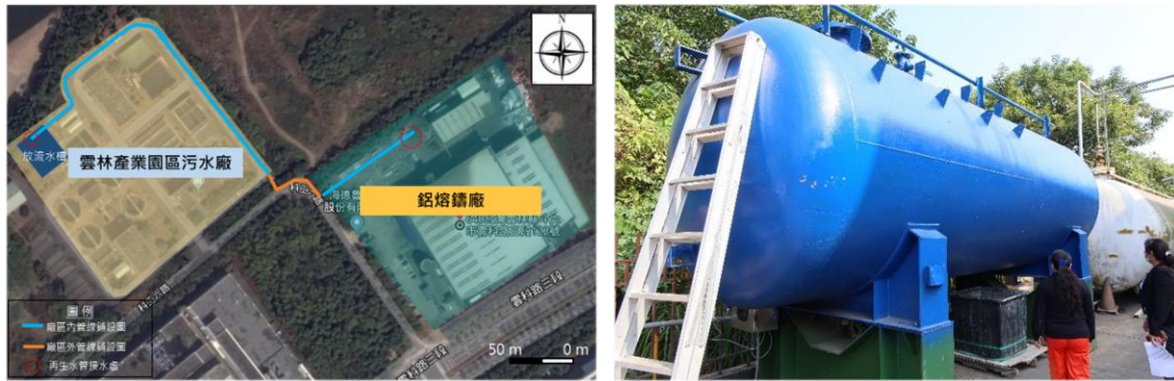


圖 9 區域水資源整合型態示意^[5]

近年來積極推動區域水資源整合及案例，如雲林產業園區污水廠提供放流水予鄰近鋁熔鑄廠作為製程冷卻用水補充，及官田產業園區污水廠提供放流水予塑膠容器再生處理廠作為製程清洗用水，前述案例累計每年降低 12.7 萬噸自來水取用量，相關推動成果如圖 10，透過水資源互惠利用，善盡友善環境之社會責任及義務。



(雲林產業園區案例)



(官田產業園區案例)

圖 10 區域水資源整合推動案例^[5]

(2)替代水源-再生水使用的推動

依據「再生水資源發展條例(111年5月18日修正公告)」，興辦或變更開發行為達一定規模需使用一定比例再生水，再生水泛指廢(污)水或放流水，經處理後可再利用之水，又可分為系統再生水、非系統再生水兩者，主要差異在取水源是否來自下水道系統，前者(系統再生水)即取自下水道系統、而後者(非系統再生水)取自未排入下水道系統之。

盤點產業園區內再生水使用情形，以民生系統再生水類型為高雄地區的鳳山水資源中心與臨海水資源中心，分別於107年8月、110年12月陸續通水供應，使用端為高雄臨海產業園區內的鋼鐵與化工業者；工業系統再生水類型包含前述雲林產業園區、官田產業園區之案例，以及各廠商間執行之回收再利用措施，產業園區使用再生水量已超過6,400萬噸/年，等同一座南化水庫蓄水量，面對110年百年大旱及112年接續而來的枯旱，讓產業得以維持一定產能，強化企業營運韌性，也提升業界因應氣候變遷缺水危機的能力。

3.產業園區用水改善成效

參考經濟部水利署發布「用水計畫書件內容及格式^[6]」所定義之用水回收率，分別為 R1 回收率(重複利用率)、R2 回收率(不含冷卻水塔內循環量)共兩種，計算式如下所列，主要差別在於 R2 不列入冷卻水塔內循環量，因內循環量值普遍偏高，故排除內循環量的 R2 較能呈現用水改善情形，故以 R2 回收率探討產業園區用水改善的成效。

R1 回收率(重複利用率)

$$= \frac{(\text{總循環水量} + \text{總回用水量} + \text{雨水取水量} + \text{冷凝水取水量})}{\text{總用水量}} \times 100\%$$

R2 回收率(不含冷卻水塔內循環量)

$$= \frac{(\text{總循環水量} + \text{總回用水量} + \text{雨水取水量} + \text{冷凝水取水量} - \text{冷卻水塔內循環量})}{(\text{總用水量} - \text{冷卻水塔內循環量})} \times 100\%$$

總用水量 = 總取水量 + 總循環水量 + 總回用水量

統計 62 處產業園區各產業之歷年 R2 回收率趨勢如圖 11 所示，其中各類製品製造業的 R2 回收率最高，惟因其 R2 回收率已達 85% 以上，可再提升幅度有限；以食品與醫療品業的 R2 回收率最低，主要仍受限其產業特性，較不易執行回收措施，然藉由其他可行的節水手段，該產業整體趨勢仍呈現逐年增長，顯現改善效益。

就提升節水成效部分，以電子業提升最多，R2 回收率自 20% 以下逐步改善提升至 50% 以上；其次為化工業，R2 回收率自 30% 提升至 50% 以上，此兩種產業的 R2 回收率提升，亦呼應前述章節，屬輔導推動節水最具成效之產業類型。

民生用品業的 R2 回收率呈遞減趨勢，尤以 108 年到 109 年出現明顯銳減，評估係受全球疫情、國際貿易停擺、物料短缺、訂單銳減、人力縮編等影響產業用水量及回收水量所致。

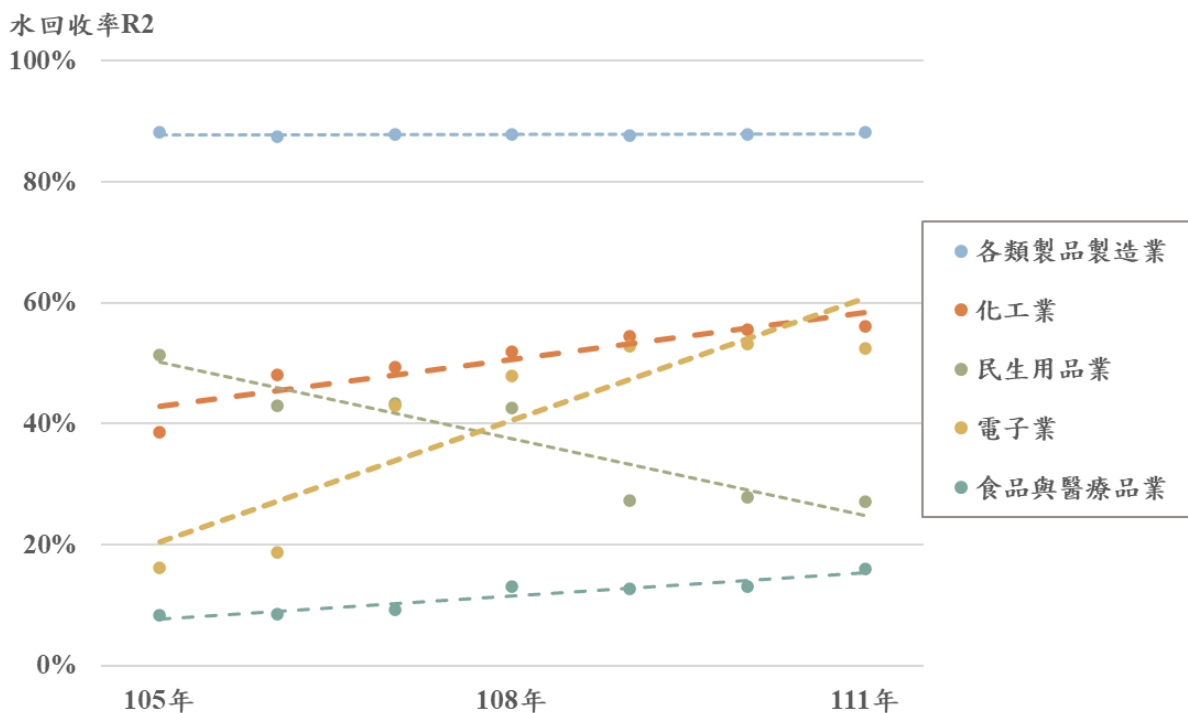


圖 11 62 處產業園區各產業歷年 R2 回收率趨勢^[5]

分析不同用水級距廠商之 R2 回收率提升情形如圖 12 所示，以用水量>1,000 CMD 廠商的 R2 回收率>75%最高，其次為 300~1,000 CMD 級距廠商，R2 回收率最低的則為 33~100 CMD 級距廠商，顯示產業用水量越大越有節水空間，用水回收率也越高。

就提升節水成效部分，以用水量 300~1,000 CMD 級距的廠商提升最多，R2 回收率自 30%逐步改善提升近 60%，其次為 33~100 CMD 級距廠商，R2 回收率自低於 20%提升至約 30%。

整體而言，各產業經過輔導推動多有顯著改善用水效率，以電子業、化工業及用水量 300~1,000 CMD 級距的廠商最具成效，未來將持續推動提升產業水資源循環利用率的輔導及宣導擴散工作。

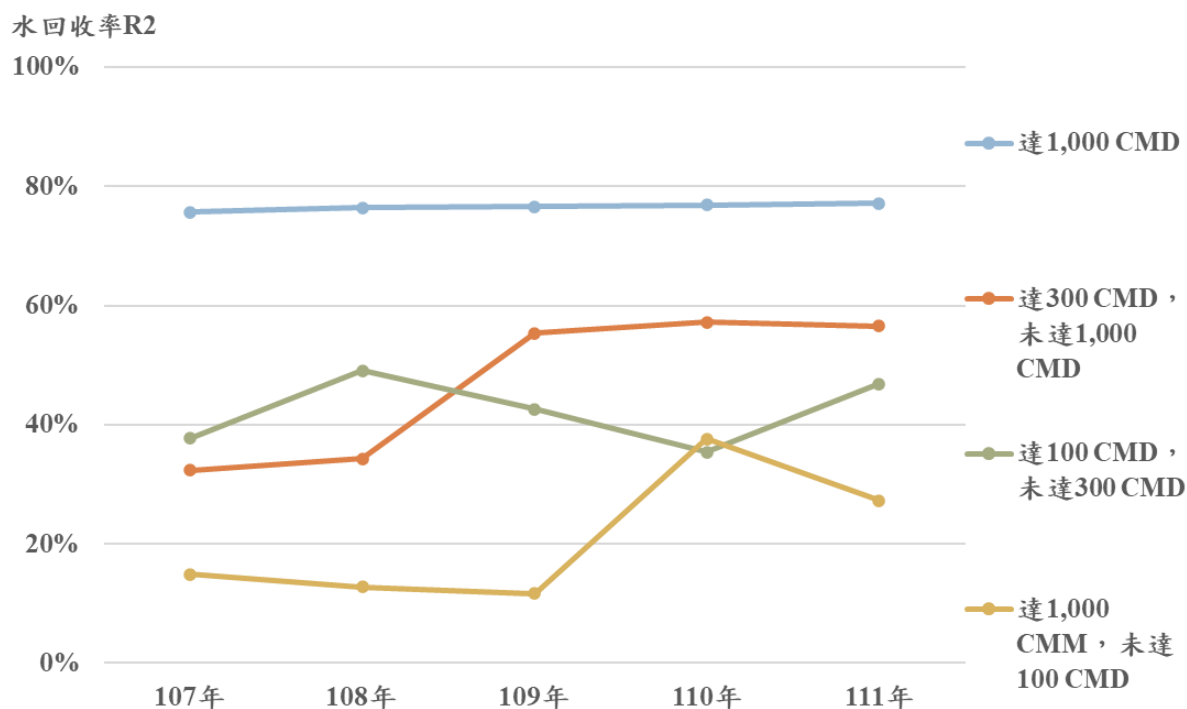


圖 12 62 處產業園區各用水級距廠商歷年 R2 回收率趨勢^[5]

四、結 論

經濟部產業發展署長期推動提升產業用水效率，62 處產業園區大用水廠商均有顯著的用水效率提升成效，並協助產業降低耗水費徵收之衝擊。未來，為協助產業即早因應氣候變遷所帶來之風險，將從輔導面、管理面、宣導面等面向著手，持續引領產業營造水資源循環利用風氣及提升產業因應極端氣候調適能力的韌性。

五、參考文獻

1. United Nations official website on SDGs, 2015 年。
2. 臺灣永續發展目標，行政院國家永續發展委員會，2019 年 7 月。
3. 產業穩定供水策略行動方案，經濟部，2018 年 5 月。
4. 國家氣候變遷調適行動方案(112 年-116 年)，環境部，2022 年 11 月
5. 產業用水效能提升計畫，經濟部產業發展署，2016~2022 年。
6. 用水計畫書件內容及格式，經濟部水利署，2017 年發布、2023 年修訂。

中水回收再利用於織布與染整製程

吳孟育*、林彥儕**、辜德旺***

摘 要

紡織染整業是需要大量水資源的產業，由於氣候變遷近年來國內的梅雨季或颱風季減少，導致乾季時間更長、造成缺水風險高，另國際品牌要求其供應鏈須符合生產水布比及水回收率規範，更凸顯水資源再利用重要議題。

本廠的製程用水來源為軟化後的地下水，根據廠內近半年的水平衡資料顯示製程(織布與染色)用水為約為 4,500 噸/日，佔了整體總用水量的 70%以上，實為大宗。若能將處理後的放流水回到製程再利用，則能提高回收率並減少水資源的耗用，更符合 ESG 精神。

本廠製程廢水經好氧生物及後化學混凝後已去除大部分 COD 和色度，排放量約為 5,300 噸/日，目前已有一部份放流水經過砂濾處理後成為回收中水，做為廠內的沖廁及空汙防治設備等用水。但回收中水雖經過處理仍有兩大挑戰，其一為水中色度較深，數值約 250~300；其二為導電度值高，約 4,000~5,000 μ S/cm，水中的色度及導電度值太高均會影響產品良率。

本研究使用臭氧脫色及電透析脫鹽、逆滲透過濾進行比較，來降低水中的色度及導電度，處理完色度降為 30 以下，導電度則降約為 1,500 μ S/cm，後續選擇不同處理流程將中水導入現場進行生產，以不同混合比例後進行織布與染色實驗室測試，測試結果織布成品良率不受影響；染色部分僅深色布種成品良率不受影響，淺色布種則有良率不佳的狀況。

【關鍵詞】節水、水資源再利用、臭氧脫色、逆滲透、電透析脫鹽

*宏遠興業股份有限公司 課長

**宏遠興業股份有限公司 研究員

***強氧興業股份有限公司 董事長

一、前言

有鑑於全世界環境保護與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並降低污染排放。為此，需以最佳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。

紡織染整業是需要大量水資源的產業，近年來因氣候變遷，梅雨季或颱風季減少，導致乾季時間更長而造成缺水風險，因此紡織染整業的水資源再利用更顯其重要性。以今年2023年統計全廠每月平均使用水量為15萬噸，以染整製程使用占比70%為第一大宗用水，其次為織布製程使用25%。因此，若能有效將製程廢水處理回收再利用，將可提升用水效率，節省水的消耗及製程藥品的使用量，最終減輕後續廢水處理的負擔，達到水資源永續再利用的目標。

本廠製程廢水經好氧生物系統及化學混凝處理後，部份放流水經砂濾塔過濾成為回收中水，但因染整製程產品多元，使用的染料及染助劑複雜，加上軟化處理流程的離子交換樹脂產生排液等因素，導電度約為3,500 μ S/cm以上的狀況，若直接導入製程測試會導致良率不佳，因此本研究評估臭氧脫色及電透析脫鹽、逆滲透過濾去除色度及導電度，提升染色及織布的良率，經處理後的水樣對聚酯和尼龍纖維布料進行染色及織布測試，以符合製程的最適水質。並針對水回收處理流程運用於製程的相關優劣進行評估。

二、廠內製程及廢水處理流程

依照紡織產品種類差異，其染整製造流程分別為：

- 1.短纖：原紗 → 鬆筒、整經 → 染色 → 烘乾 → 漿紗 → 穿綜 → 織造 → 退漿 → 整理 → 烘乾定型 → 成品布
- 2.長纖：原絲 → 假撚 → 撚紗 → 整經 → 漿紗 → 織造 → 退漿 → 減量 → 染色 → 烘乾定型 → 成品布

製程排放之廢水及其它項廢水，經本廠廢水處理，流程如圖 1 所示，好氧生物及後化學混凝後去除大部分 COD 和色度，處理後部份回收作為廠內

的沖廁、防治設備洗滌...等用水，本文研究中測試用水將採用電透析脫鹽、逆滲透、臭氧脫色進行評估。

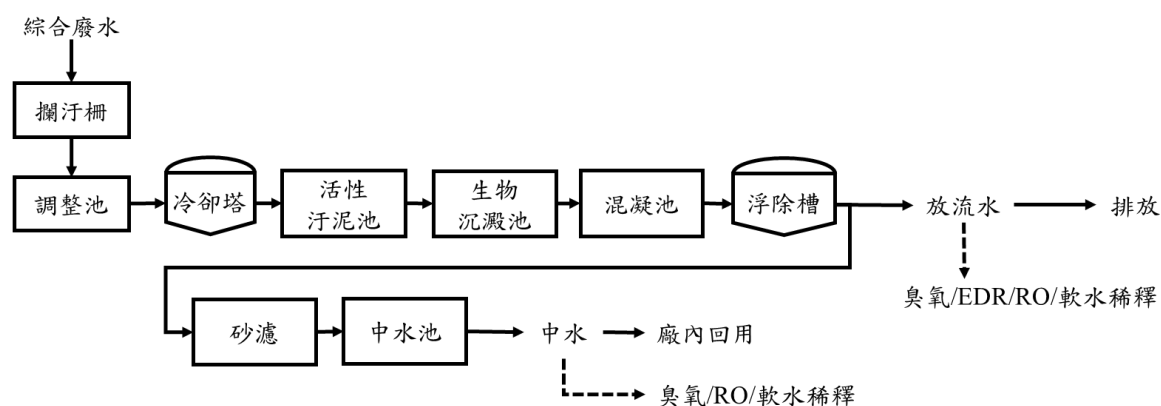


圖 1 本廠廢水處理流程/實驗取水位置示意圖

三、技術簡介

(一) 電透析脫鹽

電透析 (Electrodialysis; ED) 技術是利用電場驅動的薄膜分離技術，可用來做為脫鹽、濃縮與純化等不同用途。如圖 2 所示，電透析系統是讓水流經交替排列之陰、陽離子交換膜間，在直流電場作用下驅動離子通過滲透選擇性離子交換膜，如此離子可被去除或濃縮在另一水道。在脫鹽過程，為了減少薄膜阻塞與藥洗頻率，電透析系統可設計成可倒極式，即稱為倒極式電透析 (Electrodialysis Reversal; EDR)。將電透析裝置定時切換兩端電極極性和內部淡濃室，如此反覆操作，能自動清洗離子交換膜表面上的結垢，可增加電透析系統的操作穩定性及壽命。一般 ED 膜較 RO 膜有較好的物理性及抗化性 (含抗 SiO_2)，EDR 更對雜質、膠質及細菌的容忍度較 RO 為高[1]。

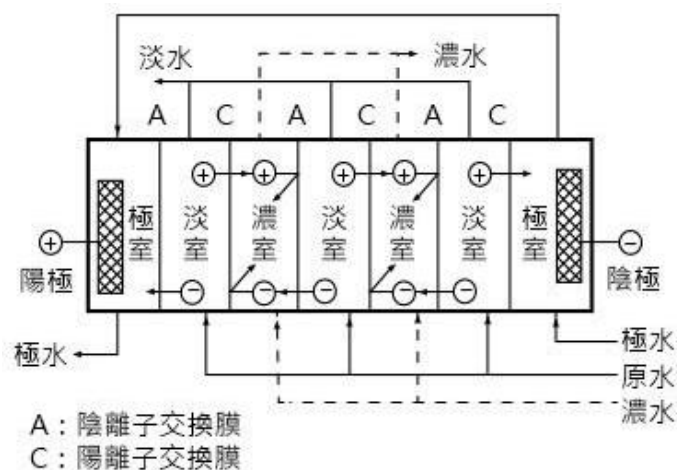


圖 2 電透析脫鹽示意圖

(二) 逆滲透

如圖 3 所示，逆滲透是利用半通透膜區隔開張力不同之溶液的技術，一般而言低張力溶液(總溶解固體量低)會往高張力溶液(總溶解固體量高)滲透過去，若在高張力溶液端施加壓力，使滲透方向往低張力溶液處流，則稱為逆滲透[2]。

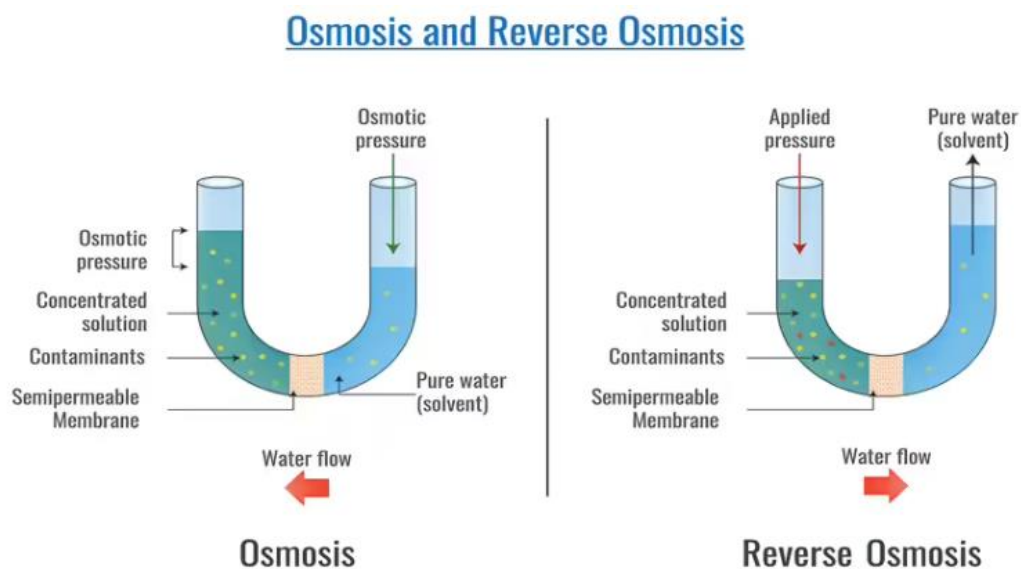


圖 3 逆滲透原理示意圖

(三) 臭氧脫色

臭氧為無色且不安定之氣體，其標準氧化還原電位僅次於氟，為強氧化劑一種，在酸性與中性水質環境下會發生高選擇性的直接氧化反

應；若在鹼性水質環境下，則會產生更強氧化力及發生選擇性較低之自由基間接氧化反應。色度物質因其發色團或助色團而成色，臭氧氧化則可以破壞色度物質發色團或助色團的鍵結，所以具有脫色效果。尤其對於紡織色彩染料的超強脫色能力，其效果是更加明顯，臭氧可輕易破壞這些染料的發色與助色基團，以達到完整的脫色效果[3]。

四、實驗方法與結果

(一)染色測試染色實驗

搭配不同的水源及處理方法做測試，測試的水源有軟水、放流水、中水，水質條件如表 1 所示。測試之染料顏色及對應布料如表 2。水樣的處理方法有：軟水稀釋、電透析脫鹽、逆滲透、臭氧脫色，經處理或稀釋後測量水質，結果如表 3 所示。布料經染色後，以驗色儀 Datacolor 800 檢驗色差 CMC DE(Difference Equation)及同色異譜指數(MI；Metamerism Index)，檢驗標準及報告範例如圖 4，後續測試結果將簡化成代號表示。

判讀方式以驗色結果的CMC DE值和MI值為主。 CMC DE值和MI值只要有任一方不通過則該塊布不通過。		value	判定	代號								
		≤ 0.2	通過	○								
		0.2~0.3	及格邊緣	△								
		>0.3	不通過	×								
Batch Name	Ill/Obs	DL*	Da*	Dh*	CIE DE	DL*SL	DC*cSC	DH*SH	CMC DE	Status	MI	綜合判定
EDR(淡水+軟水)脫色1	D65 10 Deg	-0.84	0.04	0.03	0.85	-0.36	-0.05	0.33	0.37	Pass	0.04	
EDR(淡水+軟水)脫色1	F02 10 Deg	-0.84	0.01	0.04	0.84	-0.36	-0.04	0.01	0.36	Pass	0.04	
EDR(淡水+軟水)脫色1	A 10 Deg	-0.84	0.04	0.07	0.84	-0.36	-0.09	0.1	0.37	Pass	0.03	
脫色放流水	D65 10 Deg	-0.12	0.09	0.15	0.21	-0.05	-0.20	0.05	0.21	Pass	0.04	
脫色放流水	F02 10 Deg	-0.10	0.05	0.15	0.19	-0.04	-0.18	0.01	0.19	Pass	0.04	
脫色放流水	A 10 Deg	-0.09	0.11	0.19	0.23	-0.04	-0.24	0.14	0.25	Pass	0.05	
脫色(中水1/4)	D65 10 Deg	-1.16	0.07	-0.03	1.17	-0.50	0.00	0.10	0.51	Pass	0.04	
脫色(中水1/4)	F02 10 Deg	-1.16	0.04	-0.04	1.16	-0.50	0.03	0.06	0.50	Pass	0.04	
脫色(中水1/4)	A 10 Deg	-1.16	0.05	0.00	1.16	-0.50	-0.02	0.06	0.50	Pass	0.04	
脫色(中水1/2)	D65 10 Deg	-0.12	-0.04	0.15	0.20	-0.05	-0.15	0.12	0.20	Pass	0.04	
脫色(中水1/2)	F02 10 Deg	-0.11	-0.03	0.12	0.17	-0.05	-0.12	0.03	0.16	Pass	0.04	
脫色(中水1/2)	A 10 Deg	-0.11	-0.01	0.16	0.19	-0.05	-0.16	0.09	0.19	Pass	0.03	

圖 4 檢驗標準及檢驗報告判讀範例

表 1 各項水源之水質

水源		軟水	放流水	中水
水質				
pH		7.07	6.57	6.91
導電度	μS/cm	1030	3830	3090
硬度	ppm	5	350	280
Fe(II)	ppm	0.03	0.08	0.13

表 2 染料顏色及對應布料

聚酯纖維布料										尼龍纖維布料					
暗紅	黑	深藍	米白	灰	藍	紅	淺黃	淺褐	灰	紅褐	黑	墨綠	黃	淺褐	灰
															

表 3 處理或稀釋後之水質

水樣		中水:軟水 3:1	中水:軟水 1:1	中水:軟水 1:3
水質				
pH		7.37	7.43	7.47
導電度 $\mu\text{S}/\text{cm}$		2,410	2,010	1,610
硬度 ppm		190	130	70
水樣		脫色放流水	脫色中水:軟水 1:1	脫色中水:軟水 1:3
水質				
pH		7.46	7.69	7.63
導電度 $\mu\text{S}/\text{cm}$		3,550	2,030	1,580
硬度 ppm		310	130	70
水樣		EDR淡水	EDR淡水:軟水 1:3	脫色EDR淡水:軟水 1:3
水質				
pH		5.91	7.20	7.72
導電度 $\mu\text{S}/\text{cm}$		830	910	890
硬度 ppm		10	6	6
水樣		RO放流水	RO放流水:軟水 1:3	RO放流水:軟水 1:5
水質				
pH		7.14	7.38	7.48
導電度 $\mu\text{S}/\text{cm}$		150	820	900
硬度 ppm		4	6	6

1. 聚酯纖維布料-深色系料染測試

以放流水和中水進行深色系染色試驗，驗色結果如表 4。以放流水染色，只有黑色無法通過標準，紅、藍色均能通過標準；以中水染色，紅、黑、藍三種深色系都能通過驗色標準。

表 4 聚酯纖維布料-深色系驗色結果

水樣 染色	放流水	中水
紅(2.50%)	O	O
黑(3.00%)	X	O
藍(3.50%)	O	O
O：通過 / Δ ：及格邊緣 / X：不通過		

2. 聚酯纖維布料-淺色系料染測試

驗色結果如表 5。以稀釋中水染無染料對照組、灰色、米白色等較敏感的顏色，無論中水的稀釋倍數為何都無法通過驗色標準，染藍色和紅色則通過標準；以脫色放流水染米白色可通過標準，染灰、藍、紅的驗色結果在及格邊緣，只有無染料的對照組無法通過驗色；脫色中水 1:軟水 1 僅染灰色無法通過標準；脫色中水 1:軟水 3 染無染料對照組、米白、藍無法通過標準；EDR 放流水僅染紅色可通過驗色標準；EDR 放流水 1:軟水 3 染灰、藍色驗色結果在及格邊緣，其餘皆不通過標準；脫色 EDR 放流水 1:軟水 3 的染色藍、紅色通過驗色標準，無染料對照組、米白、灰則在及格邊緣。

表 5 聚酯纖維布料-淺色系驗色結果

水樣 染色	中水:軟水 3:1	中水:軟水 1:1	中水:軟水 1:3	脫色 放流水	脫色 中水:軟水 1:1	脫色 中水:軟水 1:3	EDR 放流水	EDR 放流水:軟水 1:3	脫色EDR 放流水:軟水 1:3
無染料	X	X	X	X	O	X	X	X	△
米白(0.04%)	X	X	X	O	O	X	X	X	△
灰(0.30%)	X	X	X	△	X	O	X	△	△
藍(0.46%)	O	△	O	△	O	X	X	△	O
紅(4.12%)	O	O	O	△	△	△	O	X	O
O: 通過 / △: 及格邊緣 / X: 不通過									

3. 聚酯纖維布料染色結果總結

中水可以直接做為聚酯纖維布料染深色系的用水，中水脫色後染淺色系的良率比未脫色前佳，但良率仍然在及格邊緣，因此不適合導入現場使用。另外表 5 中可以觀察到，脫色中水 1:軟水 3 的水質，用於染色的良率不如脫色中水 1:軟水 1，脫鹽後的水質，也造成良率的下降，這樣的狀況驗證了鹽類有促染效果[4]，它可以讓皮革或布料染完後光澤、鮮豔度以及飽和度有明顯差別，因此造成良率不佳可能是鹽濃度下降所造成。

4. 尼龍纖維布料-淺色系料染測試

脫色中水 1:軟水 1、RO 放流水作為染色用水，兩者在染前測量其 pH 值做比較，其 pH 值及驗色結果如表 6 所示。RO 放流水在染前 pH 明顯低於脫色中水 1:軟水 1；兩者染淺色系皆無法通過驗色標準。

表 6 尼龍纖維布料-淺色系料染測試驗色結果

水樣 染色	脫色中水:軟水 1:1		RO放流水	
	染前pH	驗色結果	染前pH	驗色結果
黃(0.69%)	5.83	X	4.71	X
淺褐色(0.14%)	6.68	X	6.07	X
灰(0.13%)	7.16	X	5.39	X
O：通過 / Δ：及格邊緣 / X：不通過				

5.尼龍纖維布料-深色系料染測試

以軟水稀釋 RO 放流水來染尼龍纖維布料的深色系，測試結果如表 7，RO 放流水 1:軟水 3 的三種顏色都沒辦法通過驗色；RO 放流水 1:軟水 5 稀釋的水樣染紅褐色、黑色，檢驗結果在及格邊緣，墨綠則無法達到標準。

表 7 尼龍纖維布料-深色系料染測試驗色結果

水樣 染色	RO放流水:軟水 1:3	RO放流水:軟水 1:5
紅褐色(1.44%)	X	Δ
黑(2.88%)	X	Δ
墨綠(1.70%)	X	X
O：通過 / Δ：及格邊緣 / X：不通過		

6.尼龍纖維布料染色結果總結

測試結果顯示只有 RO 放流水 1:軟水 5 有較佳的驗色通過率，但仍在及格邊緣，其它水樣染色皆無法通過驗色標準，除此之外可以觀察到兩個現象：

- 比較表 6 兩種水樣可以發現，RO 處理後的水樣，pH 緩衝能力有降低的狀況，pH 緩衝能力降低，再加入酸性染料後，pH 值將會低於適當範圍，並引起濃染化[5]的現象，進而影響到染色之良率。
- 脫鹽造成良率下降的狀況，同樣出現在尼龍纖維布染色結果上，經 RO 處理後的水樣，其導電度及硬度都會下降，兩項數值均低於軟水，因此以軟水稀釋反而有良率改善的現象。

(四) 織布測試

中水經臭氧脫色處理後，以軟水稀釋並添加次氯酸鈉，終濃度為 0.3 ppm，再測量其水質，水質如表 8 所示，將脫色後的水樣用於聚酯纖維的織布製程，測試結果如表 9，原液和脫色中水 1:軟水 1、脫色中水 1:軟水 3、脫色中水 1:軟水 5 對織布成品良率沒有影響，不會造成布胚的黃化。

布胚的黃化現象會對後續染色製程的良率產生重大影響。這種黃化主要源於酚醛黃變(phenolic yellowing)[6]的作用，其中主要的物質是 DTNP(2,6-di-tetr.butyl-4-nitrophenol)。DTNP 的生成是由抗氧化劑 BHT(butyl hydroxyl toluene)和空氣中的氮氧化物(NO_x)之間的化學反應引起的。DTNP 在酸性環境下是無色的，但當暴露於鹼性物質時，立即轉變為黃色。黃化是一個隨時間累積的過程，因此需要長時間的觀察和研究，表 9 展示了布胚一年後的狀況。實驗結果顯示，pH、導電度、硬度、鐵離子濃度、COD 對織布良率沒有影響，僅需脫色處理就能使用，因此可考慮在織布製程中引入脫色中水，減少軟水用量並提高用水效率。

表 8 中水處理後之水質

水質 \ 水樣	脫色中水	脫色中水:軟水 1:1	脫色中水:軟水 1:3	脫色中水:軟水 1:5
pH	7.33	7.45	7.47	7.58
導電度 $\mu\text{S}/\text{cm}$	3,150	2,180	1,630	1,500
硬度 ppm	240	120	70	50
Fe(II) ppm	0.06	0.05	0.05	0.05
COD mg/L	24	13	4	0

表 9 織布測試結果

	軟水 (目前製程使用)	脫色中水	脫色中水:軟水 1:1	脫色中水:軟水 1:3	脫色中水:軟水 1:5
織布 成品呈色					
評估	-	無明顯黃化變色	無明顯黃化變色	無明顯黃化變色	無明顯黃化變色

五、結 語

(一) 染色結果彙整

各項水樣的染色適用性統整如表 10。中水適用於染聚酯纖維布料的深色系，淺色系則對水質的要求較高，只有脫色 EDR 放流水 1:軟水 3 適用於淺色染色製程，其 pH 值、色度、導電度、硬度等水質條件可作為後續水質改良之參考。尼龍纖維布料的染色測試中，經 RO 處理的水樣照理說是最乾淨的，但缺少適當的導電度、硬度，導致染色良率不佳，若考慮添加藥劑調整水質，經 RO 處理的放流水是泛用性最高的水樣，能導入多項染色製程使用。

表 10 水樣染色適用性統整

聚酯纖維布料		
水樣	深色	淺色
放流水	×	
中水	○	
中水3:軟水1		×
中水1:軟水1		×
中水1:軟水3		×
脫色放流水		×
脫色中水1:軟水1		×
脫色中水1:軟水3		×
EDR放流水		×
EDR放流水1:軟水3		×
脫色EDR放流水1:軟水3		○
尼龍纖維布料		
水樣	深色	淺色
脫色中水1:軟水1	×	
RO放流水	◎	
RO放流水1:軟水3		◎
RO放流水1:軟水5		◎
○:適用 ×:不適用 ◎:有改善空間		

(二) 脫色中水導入織布製程之效益分析

臭氧處理法不需要向水中投加其它化學藥劑，僅需使用臭氧，臭氧能有效地去除水中的發色物質，而且在常溫下，臭氧再經過數分鐘即可還原成氧氣，因此不會有任何殘留和二次污染問題。

若臭氧設備設計最大處理量為 600 噸/日(18,000 噸/月)，操作成本

(動力成本+液氧成本)約 8 元/噸，將軟水替換成脫色中水後，其效益分析如表 11 所示，每年可節省約 840,000 元，這顯示了臭氧處理法不僅具有環保優勢，還在經濟效益方面帶來了顯著的優勢。

表 11 中水臭氧脫色效益分析

軟水成本	12 元/噸
臭氧操作成本	8 元/噸
每日節省經費	$600T \times (12-8) = 2,400$ 元/日
每年節省經費(350 天)	840,000 元/年

六、參考文獻

1. 廖啟鐘，胡伯瑜，洪仁陽，梁德明，「電透析技術在脫鹽及濃縮/純化之研發與應用」，工業材料雜誌 350 期，民國 105 年。
2. Metcalf; Eddy. Wastewater Engineering. New York: McGraw-Hill Book Company. 1972.
3. 劉新校，張陳郎，唐存宏，「臭氧的應用技術-脫色」。
4. 房寬峻，王建慶，「染料應用手冊」，第 2 版，第二章，第二節。
5. 染化雜誌社，「染整研發作業的根本要訣」，P139-140，民國 93 年。
6. 強盛染整股份有限公司，「紡織百科-織物的貯存黃變原因與防止方法」。

植生復育植體再利用研究

蕭因秀*、林舜隆*、林駿*、陳泰元*、郭駿凱*

摘 要

植生復育為使用植物來萃取、隔絕或降解環境中污染物，或使污染物危害性降低的一項技術，運用上具有減碳、低耗能、低破壞性與低成本等優點，是兼顧環境與永續性的整治方法。以植生復育做污染整治所需時間較長，若所種植的植物沒有經濟效益或再利用用途，則不僅衍生廢棄物處理問題，也將產生更多碳足跡，不利於環境友善。將植生復育之植體開發為可再利用產品，使植生復育在土壤污染整治之外，還可創造經濟效益。

培地茅因根系具有提煉精油的特性又稱香根草或岩蘭草，為高耐受性植物，其耐鹽、耐旱、耐寒、耐風、耐淹水逆境等特性，使之能於污染土壤環境下存活，因此近年來有許多使用培地茅應用於各種污染之植生復育研究，如：重金屬、化學品、放射性物質、藥品、紡織工業廢水、有機物(柴油、酚、戴奧辛)與混合污染土壤(碳氫化合物與重金屬)等。本研究選擇培地茅進行柴油污染土壤之植生復育試驗，為了解培地茅植體中污染物分布與累積情形，將採收之根與葉進行萃取後以氣相層析儀分析，結果發現與種植在無污染土之培地茅相較，油品污染物的存在對葉子並無明顯變化，但其根系植體的圖譜則有所不同，其組成皆與新鮮或風化之柴油圖譜不相似，推測污染物的存在誘使與土壤直接接觸之根系，產生能有助於不利環境下生長之物質，土壤中 TPHd 之降解非經由植物萃取，並未累積於植體之中。進一步將油污染土採收之培地茅根系萃取精油，與市售精油做氣相層析儀分析，結果發現圖譜相似，皆含有 β -岩蘭烯、岩蘭醇、客烯醇與香根草酸等岩蘭精油之重要活性成分。研究結果顯示柴油污染土壤之植生復育植體具有再利用性。

【關鍵詞】植生復育、油污染土壤、培地茅、精油

*台灣中油股份有限公司探採研究所 研究員

一、前言

油品已為現今生活不可或缺的資源，但若於運輸、提煉、儲存等過程中發生洩漏事件，意外地進入到環境中，將造成總石油碳氫化合物(Total Petroleum Hydrocarbons, TPH)暴露的風險。國內自 2000 年實施「土壤及地下水污染整治法」以來，社會日益重視土壤及地下水的污染問題，近年來環保署積極推動綠色永續型整治(Green and Sustainable Remediation, GSR)觀點，即在場址整治工作的任一階段，採行兼顧環境、社會與經濟效益三面向的技術、工法、策略或管理方式，達到土地與地下水永續利用的最終目標。

植生復育的定義為使用植物來萃取、隔絕或降解環境中污染物，或使污染物危害性降低的技術，其運用在污染場址的整治上，具有減碳、低耗能、低破壞性與低成本等優點，是兼顧環境與永續性的整治法，且過程兼具自然、美觀，一般民眾接受意願高，更增加實際應用的可行性。培地茅又稱香根草、奇蹟草、岩蘭草，為多年生巨大叢生的禾本科草本植物，台灣從 1998 年開始引種進行本土適應性研究，目前台灣的培地茅為台大選 101 號，乃經馴化選育的栽培型，大部份並不開花，即使開花產生種子，種子不稔無散播之慮，且其根系垂直向下生長，側生根系極少，因此不會與農作物競爭肥料與水分種子，叢生型無地上走莖或地下匍匐莖，只能分株繁殖，不會蔓延擴散成雜草，可以安全應用；在環境適應性方面，培地茅為高耐受性植物^[1]，其耐極端的酸鹼(pH 3~9.5)、耐鹽(EC 47.5)、耐旱、耐寒(-15~55℃)、耐風、耐淹水逆境等特性，使之能於污染土壤環境下存活，因此近年來有許多使用培地茅應用於各種污染之生物整治研究，如：重金屬^[2](鐵、鋁、鋅、鉻、錳、鎳等)、化學品(氰化物^[3]、TNT^[4])、放射性物質(90 銨、137 銫^[5])、藥品(Neproxen^[6])、紡織工業廢水^[7]、有機物^[8]與混合污染土壤^[9](碳氫化合物與重金屬)等。植生復育技術的應用具有地域性，本研究選用培地茅做為植生復育法的植體，應用於柴油污染土壤的整治中。

植生復育所需時間較長，若所種植的植體沒有經濟效益，或不具再利用之用途，則不僅衍生廢棄物處理問題，也難以達成永續之目標。本研究選用之培地茅，其植體之根系具有可提煉為岩蘭草精油的特性，且因根系乾重精油含量只在 0.15~0.29 %^[10]，故市售價格偏高，屬於高值化應用；將植體開發為可再利用產品，使植生復育可創造循環經濟效益。

二、精油萃取方法及試驗設置

2.1 精油萃取方法說明

植物精油^[11] (Essential Oil)，又稱植物精質或植物揮發油，是芳香植物中含有濃厚氣味的物質；植物所分泌的精油具有其生存意義的功效，如吸引昆蟲授粉、防蟲、抗菌等，是保護植物得以生存的重要成分，但並非所有植物均含有精油。精油存在於植物不同之部位，如玫瑰、茉莉、橙花、洋甘菊等存在於花朵中，尤加利、茶樹、薰衣草、苦橙葉、絲柏、杜松等存在於葉子中，培地茅(岩蘭草)、薑等存在於根系中，肉桂、黃樺等存在於樹皮中，檸檬、萊姆、葡萄柚、佛手柑、苦橙等存在於果皮中，藏茴香、芫荽等存在於種子中，乳香、沒藥、安息香等存在於樹脂中。植物在生長過程之中，藉由光合作用，進行生化反應如：葉綠素+水分+二氧化碳+太陽光→葡萄糖→酵素分解→異戊二烯(Isoprene, IPP)，再由異戊二烯衍生出萜烯(如單萜烯、倍半萜烯、雙萜烯等)，幾乎所有的精油成分都由此衍生而來。常見的精油萃取方式^[12,13]，分述如下：

- (1)蒸餾法(Distillation)：最常見的精油萃取方式，適合用於可耐熱氣不會被破壞的植物，為將植物置於沸水中或透過蒸氣加熱，使水蒸氣通過植物後，再經過導管冷凝成液體，透過比重的差異可將萃出的成分分離成油層與水層，油層即是精油，水層即是純露(或稱花水)。
- (2)壓榨法(Expression)：常用於甜橙、葡萄柚、橘子、檸檬、萊姆等不耐熱之柑橘類植物精油製作，以壓榨果皮或果肉方式，再將精油與果汁(水層)做分離。壓榨過程完全不用加熱，其萃取精油香味及化學組成完全來自果皮本身，包含臘等非揮發性物質，故相較於蒸餾精油有可兩年以上的保存期限，冷壓法所製精油具有較短(約 6~9 個月)的保存期。
- (3)溶劑萃取法(Solvent Extraction)：用於不耐熱之花卉材料，以較低沸點的丙酮、己烷、石油醚、甲醇或乙醇等不同溶劑進行萃取，經第一道溶劑萃取、蒸發、濃縮後，所得濃縮物稱之為香料浸膏或是凝香體，再經第二道溶劑萃取(酒精)後，蒸發後可得到精油。溶劑萃取法是一個相對耗時的過程，然而可能溶劑殘留物保留在最終產品中之疑慮。
- (4)超臨界萃取法 (Supercritical Fluid Extraction, SFE)：二氧化碳因其適度的臨界條件而成為最常用的超臨界流體，可以作為一種非常惰性和安全的介質從原料中提取芳香分子，有溫度低、無溶劑殘留等優點，並具有較高的回收率，由於成分較為豐富，質地也較為濃稠許多，氣味與一般蒸餾

萃取則有所不同。

本計畫所使用培地茅，具有可萃取精油之價值，市售培地茅單方精油多以蒸餾法萃取，為其為深棕色的黏稠狀液體，土味濃烈還帶有糖蜜般的後味，具有鎮靜和溫暖的效用。一般認為精油主要成分為倍半萜醇(異岩蘭草醇、異戊烯醇)，然其隨產地、植體生長情況與採收季節等因素而異，如表 1 所示：

表 1 培地茅精油(Vetiver)主要成分[14]

化合物(英文名)	化合物(中文名) γ	分子式
α -Amorphene	α -紫穗槐烯	C ₁₅ H ₂₄
Eremophilene	佛術烯	C ₁₅ H ₂₄
β -Cadiene	β -杜松烯	C ₁₅ H ₂₄
β -Vatirenene	β -朱樂	C ₁₅ H ₂₂
β -Eudesmol	β -桉葉醇	C ₁₅ H ₂₆ O
4 α -Methyl-3, 4, 4a, 5, 6, 7, 8, 9-octahydro-2H-benzocycloheptene-2-one		C ₁₂ H ₁₈ O
Humulane-1, 6-dien-3-ol	胡木烷-1, 6-二烯-3-醇	C ₁₅ H ₂₆ O
α -Guaiene	α -愈創木烯	C ₁₅ H ₂₄
(+)-Longifolene	長葉烯	C ₁₅ H ₂₄
Khusinol	客素醇	C ₁₅ H ₂₄ O
Acorenon	菖蒲螺烯酮	C ₁₅ H ₂₄ O
Longipinocarvone	長葉松香芹酮	C ₁₅ H ₂₂ O
α -Lsodiacienol	α -異杜松醇	C ₁₅ H ₂₄ O
β -Selinene	β -桉葉烯	C ₁₅ H ₂₄
Vetiselinenol	岩蘭醇	C ₁₅ H ₂₄ O
Khusimol	客烯醇	C ₁₅ H ₂₄ O
Isovalencenol	異朱樂倍半萜醇	C ₁₅ H ₂₄ O
Zizanoic acid	岩蘭酸	C ₁₅ H ₂₂ O ₂
β -Vetivone	β -岩蘭酮	C ₁₅ H ₂₂ O
Nootkatone	香柏酮	C ₁₅ H ₂₂ O
α -Vetivone	α -岩蘭酮	C ₁₅ H ₂₂ O
Sesquiterpene ketone	倍半萜烯酮	C ₁₅ H ₂₂ O

2.2 試驗設置

本研究將培地茅分別種植於無污染土，以及柴油污染土壤中，以進行植生復育試驗，污染土壤來源為中部某污染整治場址，土壤之 THPd 成份分析，為土壤樣品以丙酮/正己烷(1：5，v/v)萃取、濃縮與定量後，以 GC/FID(The 8890 Gas Chromatograph System，Agilent Tech.)分析之，期初污染濃度為 1792.12 mg/kg。土堆以紐澤西護欄將圍出周界，底鋪帆布與約 10~15 公分厚碎石以收集廢水；紐澤西護欄高 84 公分，試驗區土堆高度約 60 公分。試驗土壤每間隔 1 x 1.25 公尺種植 20 盆 3 吋盆苗栽，設自動灑水系統，設定於每日早晚各灑水一次，單叢澆灌量約 12 公升，設置完成之試驗場址如圖 1 所示。



圖 1 植生復育試驗設置完成初期植體狀況

試驗三個月後，植體生長狀況如圖二所示，採收將洗淨風乾後之葉與根，以丙酮/正己烷(1：5，v/v)萃取、濃縮與定量後，以氣相層析儀以氣相層析質譜儀 GC/MS(5977B MSD、7890B Gas Chromatograph System，Agilent Tech.)分析之。培地茅根並以蒸餾法及超臨界萃取法獲取其精油，蒸餾法單次萃取約 1.5 公斤，蒸餾 16 小時；二氧化碳超臨界萃取於 70°C、2,700 psi 下萃取 16 小時，萃取液經冷凝後收集之，依溶液密度分層，下層為水溶液之純露，上層為精油。



圖 2 植生復育試驗三個月後植體狀況

三、結果與討論

3.1 植體污染物分布分析

為能安全應用培地茅植體，首先需要了解種植於油品污染土中之培地茅，植體之污染物分布與累積情形。將種植於無污染土壤與試驗土壤之培地茅植體，分別採收葉子與根進行萃取、濃縮與定量後以 GC/MS 分析。葉子分析結果如圖 3 所示。

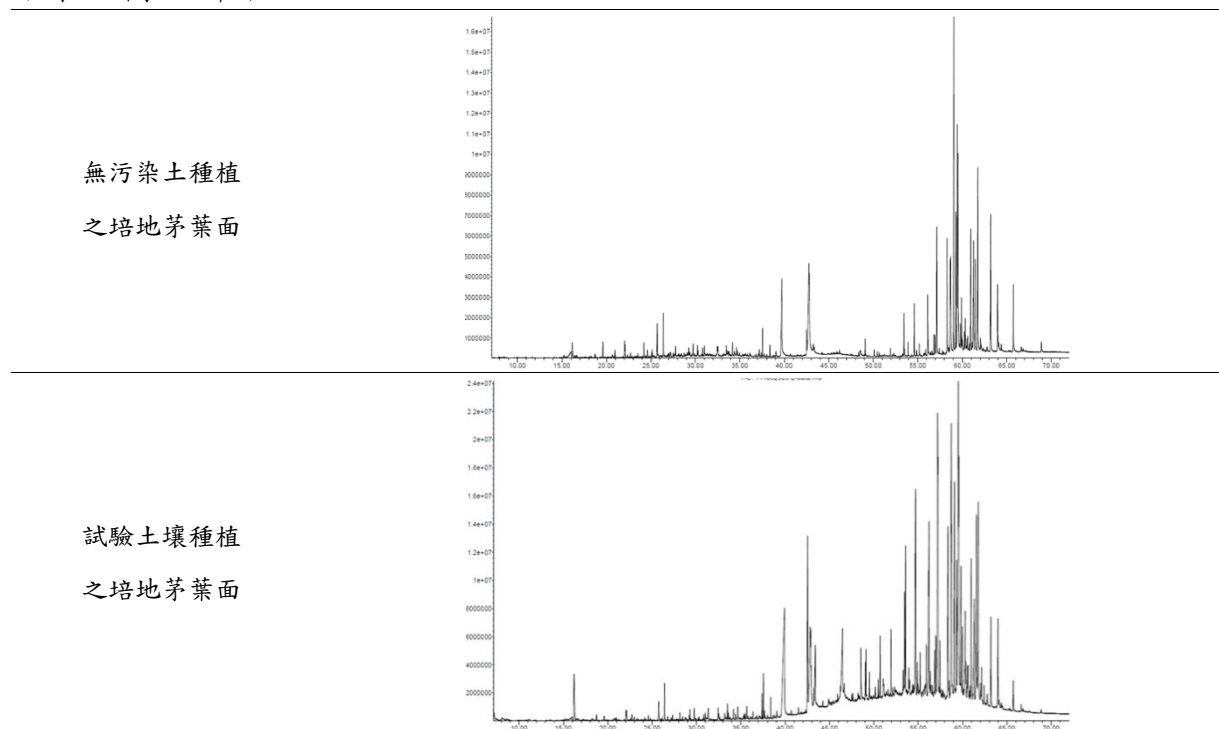


圖 3 種植於不同土壤之培地茅葉面以 GC/MS 分析之 TIC 圖譜

結果顯示，種植於污染土與無污染土之培地茅葉之 TIC 圖譜相似，且根據氣相層析質譜 NIST 2017 比對結果，無污染土壤所種植之培地茅葉子主要

包含棕櫚酸(n-Hexadecanoic acid, Retention time=39.7 min)、亞麻油酸(9,12-Octadecadienoic acid, Retention time=42.73 min)、維他命 E(Vitamin E, Retention time=57.15)、穀固醇(γ -Sitosterol, Retention time=59.4 min)與 2-甲基四十三烷(Tetratriacontane, 2-methyl-, Retention time=61.75 min)等，常見於一般植體，顯示污染物對培地茅葉無明顯影響。

根系分析結果如圖 4 所示。

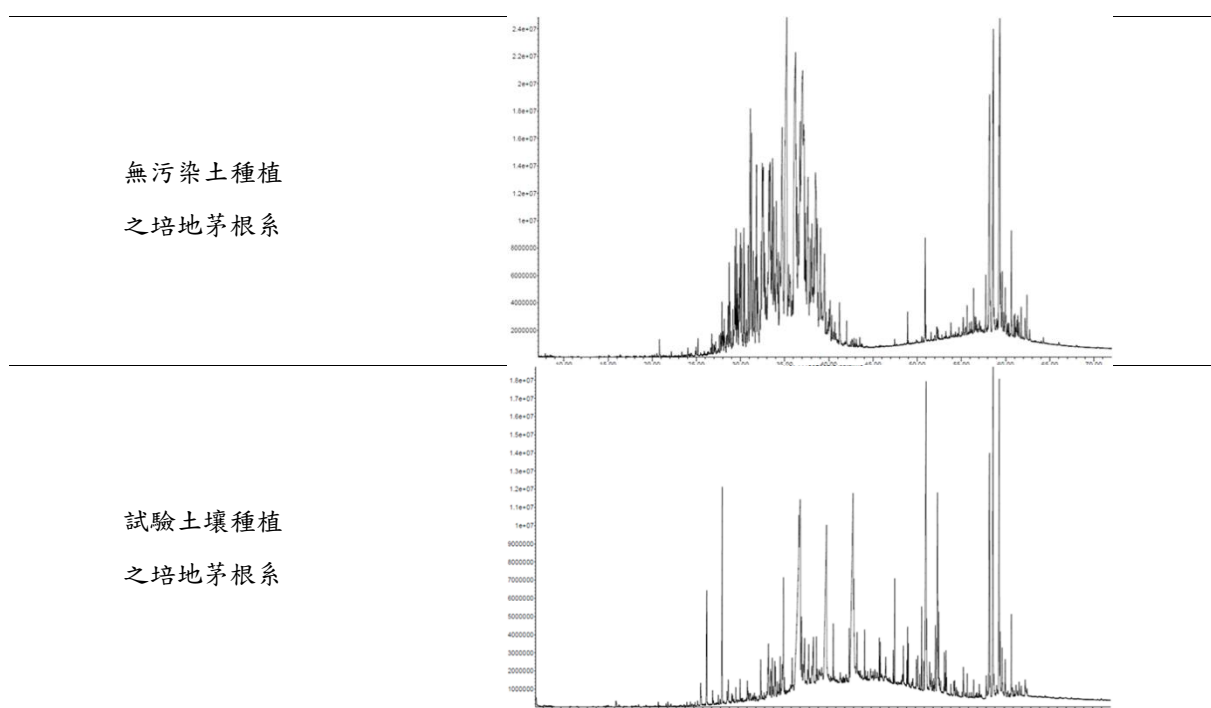


圖 4 種植於不同土壤之培地茅根系以 GC/MS 分析之 TIC 圖譜

培地茅根之分析圖譜則顯示，種植於污染土壤之植體與無污染土壤有所不同；污染土所種植之培地茅，其根系以 NIST 2017 比對包含香根草酸((3S,3aR,6R,8aS)-7,7-Dimethyl-8-methyleneoctahydro-1H-3a,6-methanoazulene-3-carboxylic acid, Retention time=36.95 min)、棕櫚酸、異亞油酸(9(E),11(E)-Conjugated linoleic acid, Retention time=43 min)、豆固醇(Stigmasterol, 常見的植物固醇, Retention time=46.5 min)與 Licarin A (一種二氫苯並呋喃新木脂素，抗病毒、抗真菌, Retention time=51.2 min)等，而無污染土所種植之培地茅，其根系以 NIST 2017 比對包含岩蘭烯(β -Vetivenene, Retention time=31.1 min)、岩蘭醇(Vetiselinol, Retention time=34.8 min)、異株欒倍半萜(Isovalencenol, Retention time=35.22 min)、

客烯醇(Khusimol, Retention time=36.05 min)與香根草酸等，推測污染物的存在誘使與土壤直接接觸之根系，產生能有助於不利環境下生長之物質。

為進一步檢視其成份，試驗土壤及其種植之培地茅根系以 GC/MS 分析之 m/z 85 圖譜如圖 5 所示，觀察分析結果可知污染土壤種植之培地茅根系，皆與新鮮或風化之柴油圖譜不甚相似，推測土壤中 TPHd 之降解，並非經由植物萃取，或萃取後發生轉換，而無累積於植體之中。

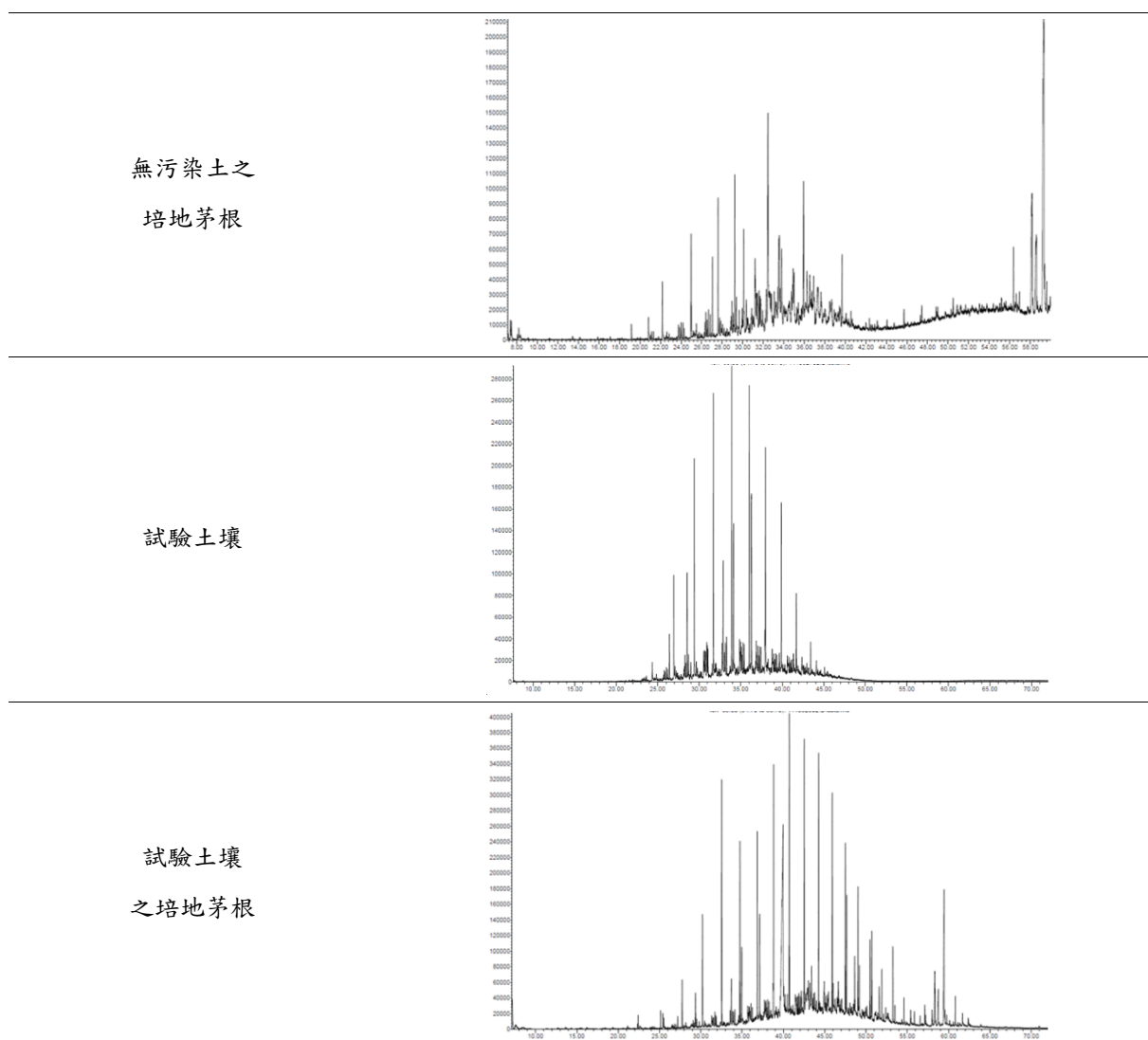


圖 5 不同土壤及其種植之培地茅根系以 GC/MS 分析之 m/z 85 圖譜

3.2 植體再利用

將培地茅根系洗淨、粉碎後，以蒸餾萃取法製備岩蘭精油：以 20 公升萃取器裝取 1.4 公斤之培地茅，以 8 公升水蒸餾 16 小時，以萃取培地茅精

油。實驗結果如圖 6 所示，因精油層稀薄，僅肉眼可見水面油花，與深褐色油滴卡在容器壁上，但不足以收集、取出做分析之用；因培地茅根系精油含量低，應為實驗室萃取之容器與根系量體不足，無法取得足量精油。而蒸餾法雖無法取得足量油性成分，其水溶液稱之為純露。純露與精油皆為植物經蒸餾而得之產物，蒸餾後浮於水面者(依精油比重而定)為精油，凝結而成的液體即為純露，兩者成分大不相同，純露為親水性，常含有無法分離之微量的精油(一般含 0.01~0.04 %)與大量的植物水溶性成分，如有機酸與單萜烯醇等。



圖 6 蒸餾萃取之培地茅精油分佈於水面與壁面情況

為有效取得培地茅精油，將培地茅根系以 70℃、2,700 psi 之二氧化碳做超臨界萃取，萃取槽體 10 公升，萃取 16 小時，每次進樣約 1.6~2.3 公斤，萃取結果如表 2 所示，萃取率提升至 0.75~1.64 %。

表 2 超臨界萃取培地茅精油結果

樣品重(g)	1750	1950	1650	2300	1700	1900	1800	2284.4	1600
精油量(g)	18.3	24.4	12.4	26.2	27.5	28.1	22.5	37.5	25
萃取率	1.05%	1.25%	0.75%	1.14%	1.62%	1.48%	1.25%	1.64%	1.56%

將超臨界萃取取得之培地茅精油，與市售以蒸餾法萃取之岩蘭精油做 GC/MS 分析，分析結果如圖 7 所示。植體之種植條件、採收季節與前處理方式等因素，皆會影響萃取之精油成分與比例，由於此二者培地茅精油未在相同控制變因下產出，因此無法經分析結果定義不同萃取方式之優劣，然可以界定在此 GC/MS 分析條件下，培地茅精油的圖譜有其相似性；以 NIST 2017 資料庫對比，兩者皆含有 β -岩蘭烯、岩蘭醇、香烯醇與香根草酸等，由分析結果顯示，種植於油污染土壤之培地茅植體所產製之岩蘭精油，具有岩蘭精油之重要活性成分。

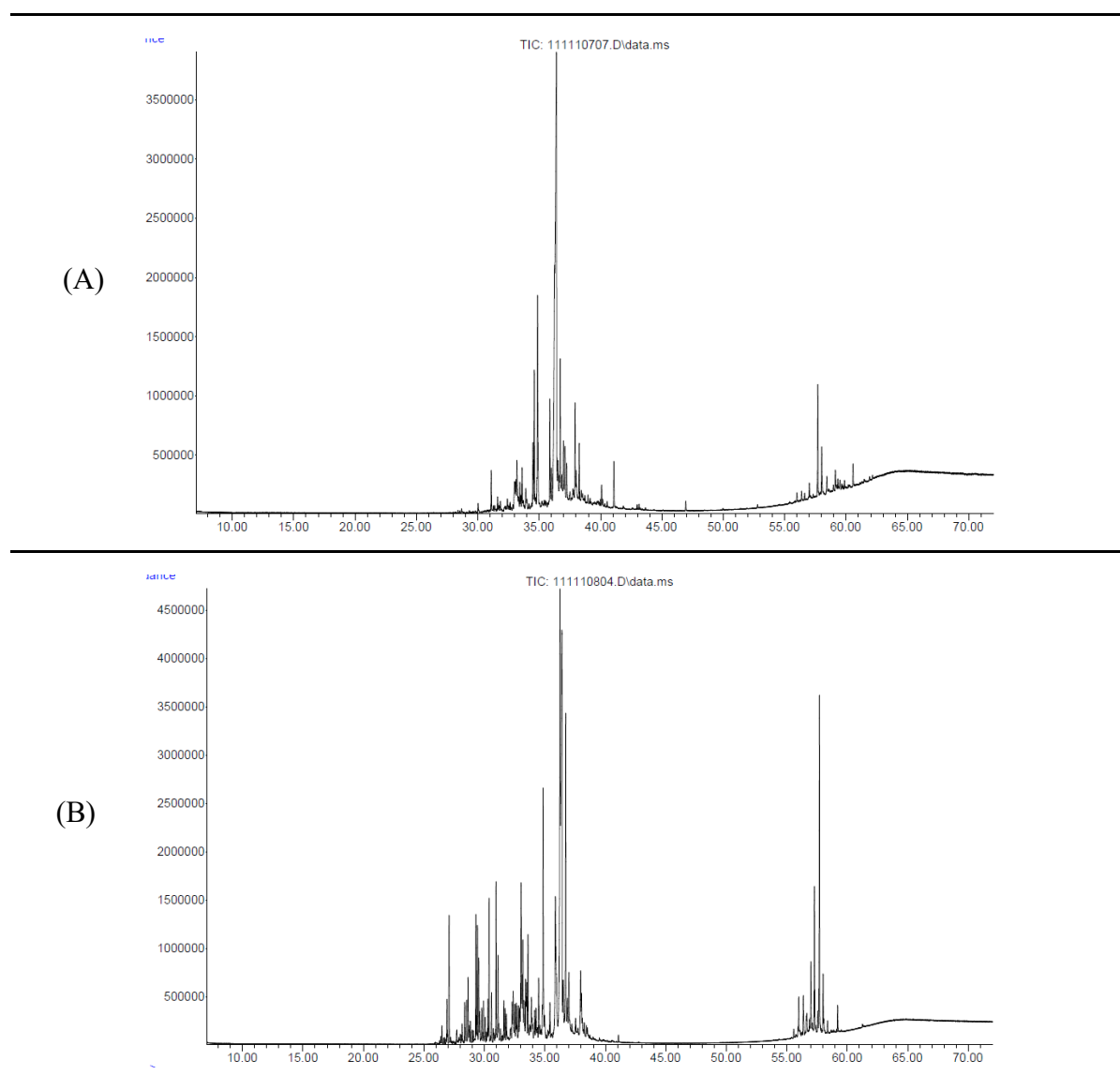


圖 7 (A)超臨界萃取、(B)市售蒸餾萃取之培地茅精油分析結果

四、結 論

柴油污染土壤中種植之培地茅，其葉面與種植於無污染土者相較，顯示油品污染物的存在對葉子無明顯變化，而根系植體的圖譜則有所不同，然其組成皆與新鮮或風化之柴油圖譜不相似，顯示油品污染物並未累積於植體之中。進一步將油污染土採收之培地茅根系萃取精油，與市售精油做氣相層析儀分析，結果發現圖譜相似，皆含有岩蘭精油之重要活性成分。研究結果顯示柴油污染土壤之培地茅植體可產製岩蘭精油，具有再利用性。

五、參考文獻

- 1.吳昭慧、連大進，「綠色草籬－培地茅」，臺南區農業專訊 42 期，2002 年 12 月，pp.7-11。Doi:10.29557/YYWYLL.200212.0002
- 2.R. Banerjee, P. Goswami, K. Pathak, A. Mukherjee, Vetiver grass: An environment clean-up tool for heavy metal contaminated iron ore mine-soil, Ecological Engineering, 90 (2016), 25-34.Doi:10.1016/j.ecoleng.2016.01.027
- 3.K. Saeb, R. Khadami, S. Khoramnejadian, E. Abdollahi, Use of vetiver (*Vetiveria zizanioides*) in remediation of cyanide soil contamination, Journal of Biology and Today's World, 4 (2015), 150-155. Doi:10.15412/J.JBTW.01040702
- 4.K. C. Makris, K. M. Shakya, R. Datta, D. Sarkar, D. Pachanoor, Chemically catalyzed uptake of 2,4,6-trinitrotoluene by *Vetiveria zizanioides*, Environmental Pollution, 148 (2007), 101-106. Doi: 10.1016/j.envpol.2006.10.047
- 5.S. Singh, S. Eapen, V. Thorat, C. P. Kaushik, K. Raj, S. F. D'Souza, Phytoremediation of ¹³⁷cesium and ⁹⁰strontium from solutions and low-level nuclear waste by *Vetiveria zizanioides*, Ecotoxicology and Environmental Safety, 69 (2008), 306-311. Doi: 10.1016/j.ecoenv.2006.12.004.
- 6.N. Marsidi, C.K. Nye, S.R.S. Abdullah, H.A. Hasan, M.I.E. Halmi, Phytoremediation of naproxen in waste water using vetiver *zizanioides*, Journal of Engineering Science and Technology, 11 (2016), 1086-1097.
- 7.M. Jayapal, H. Jagadeesan, V. Krishnasamy, G. Shanmugam, V. Muniyappan,

- D. Chidambaram, S. Krishnamurthy, Demonstration of a plant-microbe integrated system for treatment of real-time textile industry wastewater, *Environmental Pollution*, 302 (2022). Doi:10.1016/j.envpol.2022.119009
- 8.Z. Kiamarsi, M. Kafi, M. Soleimani, A. Nezami, S. Lutts, Conjunction of *Vetiveria zizanioides* L. and oil-degrading bacteria as a promising technique for remediation of crude oil-contaminated soils, *Journal of Cleaner Production*, 253 (2020). Doi:10.1016/j.jclepro.2019.119719
- 9.L. T. Danh, P. Truong, R. Mammucari, T. Tran, N. Foster, Vetiver grass, *Vetiveria zizanioides*: a choice plant for phytoremediation of heavy metals and organic wastes, *International Journal of Phytoremediation*, 11 (2009). Doi: 10.1080/15226510902787302。
- 10.K.K. Aggarwal, A. Singh, A.P. Kahol, M. Singh, Parameters of vetiver oil distillation, *Journal of Herbs, Spices & Medicinal Plants*, 6 (1998).
- 11.歐秋明，芳香精油應用，樂齡大學，109年3月。
- 12.P. Tongnuanchan, S. Benjakul, Essential Oils: Extraction, Bioactivities, and Their Uses for Food Preservation, *Food Science*, 79 (2014). Doi:10.1111/1750-3841.12492
- 13.郭恒怡，正是時候開始中醫芳療【上集】・86種植物精油百科，時報出版，2023年3月。
- 14.王賽丹、陳齊亮、孫認認、李濤、任保增，響應面優化超聲波輔助萃取香根油工藝及其成分研究，*Food Research & Development*，39 (2018)，53-59。

廢棄岩棉回收再利用並應用於輕質建築材料之研究

陳婷雅*、張琨閔**

摘 要

一直以來輕質建材是建築材料中持續發展重要的一環，而將廢棄物資源化再導入建築材料中也是環境、科學關注的議題。本研究為廢棄岩棉資源化做為再生建材，廢岩棉資源化過程考量效率與成本，在破碎機方面採用剪切式機台加速處理效率，另一方面為了增加廢岩棉資源化的利用量，在產品生產製程中材料採用半濕式預拌方式處理，經原料級配與添加劑用量測試後，廢岩棉添加量可達到 10%以上，檢驗結果顯示本研究開發之輕質建材符合綠混凝土 G 類強度，材料養生 21 天抗壓強度即達 280.6 kgf/cm^2 ，另外經第三方檢驗材料之氯離子含量、TCLP、有機物含量與石棉纖維含量等檢測皆符合綠建材法規。

最終將材料進行地面施作測試，材料輸送過程順利、後期強度發展良好。另由建商協助測試高樓層輸送可輸送樓層達 10 樓以上，顯示本案開發之輕質建材能有效降低建築施工成本以及有助於工地之空間管理。

【關鍵詞】廢棄岩棉、輕質建築材料、耐壓強度、再生綠建材

*新聯興企業股份有限公司 研發工程師

**新聯興企業股份有限公司 副總經理

一、前言

在現今的社會，建築樓層高度日益增加，使用傳統水泥砂漿作為建材，由於水泥砂漿重量較重，除了須克服在高樓層搬運困難的問題之外，材料堆放空間需求量大，增加許多施工困難度與成本。為了解決上述情況，採用輕質建築材料為可行之方法，除了能夠減少在運輸上所產生的額外成本，也可降低材料堆放的空間需求。

岩棉^[1]是以玄武岩為主要原料，透過高溫熔融製成的人造無機纖維，岩棉具有低密度與高孔隙率，使岩棉成為隔熱與耐火材料^[2]。國內目前並無岩棉生產工廠，仰賴國外生產並進口，根據海關進出口統計，2018 年岩棉進口量約 4 萬公噸^[3]。

根據綠建材循環經濟產業鏈結推廣計畫中預估廢棄岩棉年產出量約為 1500 公噸^[3]，營建事業廢棄物再利用中並無廢岩棉項目，而且岩棉體積龐大且無法燃燒，因此傳統掩埋與焚燒處理並不適用^[3]。

查閱許多應用於輕質建築材料的相關文獻，發現大多是使用廢棄物作為輕質建築材料的填充材料^[4]，而廢棄物再利用同樣是近年環保意識抬頭下的重要課題。有關岩棉再利用研究^[5]指出，收集某石化公司之廢棄岩棉並將其粉碎成為岩棉粉，當岩棉大量再利用時將材料打成粉末是非常困難的，而且處理成本極高，商業價值低。而在高分子混凝土固粉碎岩棉廢棄物之研究^[6]中認為岩棉粉最佳添加比例為取代砂含量 3%，其再利用比例太低。另外在綠建材循環經濟產業鏈結推廣計畫中^[3]提到添加岩棉 5~10%之高壓混凝土磚強度只有 30.5~61.1kgf/cm²，從目前收集到的資料與研究中無法達到建築產業所需強度之需求與去除大量化之目的。

因此本研究希望擷取過往資訊與經驗並改善岩棉再利用之現況，將廢棄岩棉透過簡易的破碎方式進行前處理，再導入輕質材料中測試出符合建築材料所需之強度，最後透過第三方檢測與實地灌漿施作，驗證本篇研究之材料與工法提升了商業應用價值，進而達到廢棄岩棉再利用之目的。

二、實驗步驟

(一)實驗設計

本研究將廢棄岩棉經粉碎前處理後，再以不同比例混合輕質細粉、微粉結合劑與水泥作為輕質建築材料，材料灌入模具中分別養生 7 天、14 天、21 天和 28 天後進行材料強度測試，及進行材料 XRD 及相關分析，實驗設計程序如圖 1。

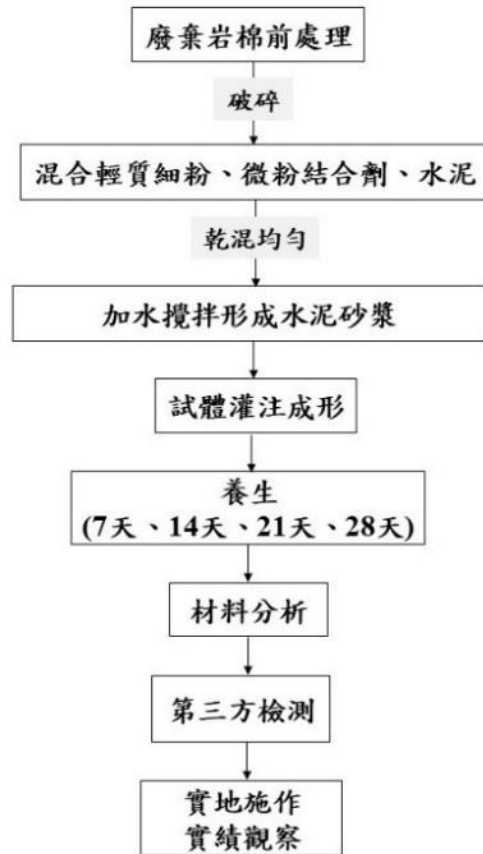


圖 1 實驗流程

(二)廢棄岩棉前處理

本公司將塊狀岩棉(如圖 2)送到破碎廠進行破碎，將岩棉倒入剪切式破碎機(圖 3-1)，破碎過程約 20 分鐘，破碎後的岩棉有大有小如圖 3-2。



圖 2 岩棉粉碎前狀態



3-1



3-2

圖 3 破碎岩棉設備和岩棉破碎後外觀
(3-1:剪切式破碎機外觀、3-2:岩棉破碎樣貌)

(三)材料配置

取破碎後的岩棉、輕質細粉、微粉結合劑與水泥，先混合均勻後，再加入適當水進行濕拌，透過調整加水量以符合不同施工條件。

(四)物性分析

分別灌製成不同尺寸之試體，本篇研究測試為長方體試體，尺寸為 $4 \times 4 \times 16$ cm。委託第三方檢測使用圓柱體試體尺寸為直徑 12cm $\times$ 高 24 cm，並分別在室溫下養生 7 天、14 天、21 天和 28 天後測量試體的強度並記錄，實驗室檢測耐壓設備廠牌為 HungTa，型號為 HT-8391PC。

(五)材料 XRD 分析

實驗室檢測 XRD，設備廠牌為 RIGAKU，型號為 MiniFlex，測試方式為取混合的乾式材料利用瑪瑙研鉢研磨，並將材料填充於 XRD 載台上，啟動機台並將載台放入分析腔體中開始掃描，掃描角度範圍為 $10^\circ \sim 90^\circ$ ，掃描速率為 5 deg/min。

(六)與市售產品比較/實地施作

為了確定本研究之材料在市場具有競爭力，本研究材料與市售產品規格進行比較，第三方檢測項目除了體密度、耐壓強度等物性之外，還針對法規中所強調的石棉含量、有機物含量、氯離子含量與熱傳導率進行比較。

三、結果與討論

(一)材料調整與物性分析

初期研究如表 1 配方，將粗骨材、細骨材，輕質細粉、岩棉與水泥

混合後加水攪拌，實驗過程中發現材料皆產生骨料分離現象如圖 4，顯示目前配方的材料粒度分配不均，使細粉容易隨著水流出造成骨料分離，材料性狀不適合實際施工，因此重新擬配方。



圖 4 材料骨料分離現象

為了避免骨料分離現象，將配方改成降低粗骨材 3-1mm 添加量、增加輕質微粉用量如表 2。材料加水攪拌已無骨料分離現象。

各組試驗經過養生 3 天後進行材料測試，其中體密度仍為 1.5g/cm^3 以上，抗壓強度最高為 91.71kgf/cm^2 ，這樣的材料仍需改善輕量化，以及其強度仍偏低的缺陷。另外材料灌注後各組出現相當程度的泌水狀態，尤其是岩棉添加量達 15% 時泌水狀態最嚴重，因此推測泌水導致水分無法保持在材料中，導致材料強度無法提升。

依據表 2 的測試結果，再次進行配方調整為表 3，表 3 中嘗試添加微粉結合劑來減少泌水現象，並改以大量輕細微粉做為主要的填充材料，材料加水混合攪拌後狀態如圖 5，從圖中可以發現，材料已無先前泌水與骨料分離之現象。

表 3 各組配方經過 7、14、21、28 天養生後進行物性測試，其中 NO7 組試體於第 7 天測試之體密度約 1.35g/cm^3 、抗壓強度已大於 124.62kgf/cm^2 。顯示將粗骨材改成顆粒較小的輕質細粉以及微粉結合劑，讓粉類原料能滲入岩棉纖維中減少泌水現象，進而達到強度提升且維持材料輕量化的效果。

表 1 初期試驗參數表-添加岩棉 5-10%

實驗組別	NO1	NO2
粗骨材 3-1mm(%)	b	b
粗骨材 1-0mm(%)	c	c
岩棉(%)	5%	10%
輕質細粉(%)	d-5%	d-10%
水泥(%)	a	a

表 2 第二次材料試驗配方與物性資料表

實驗組別	NO3	NO4	NO5
粗骨材 3-1mm %	b	b-5	b-10
細骨材 0-1mm %	c	c	c
廢棄岩棉%	5	10	15
輕質細粉%	d	d	d
水泥%	a	a	a
材料施工性			
加水量%	32.7	42	45
養生 3 天後物性測試			
體密度(g/cm ³)	1.66	1.53	1.5
耐壓強度(kgf/cm ²)	91.71	66.24	62.16

表 3 第三次材料試驗配方與物性資料表

實驗組別	NO6	NO7	NO8	NO9
粗骨材 3-1mm %	0	0	0	5
細骨材 0-1mm %	0	0	0	0
廢棄岩棉%	5	10	15	10
輕質細粉%	b+c+d-2	b+c+d-7	b+c+d-12	b+c+d-12
水泥%	a	a	a	a
微粉添加劑%	2	2	2	2
材料施工性				
加水量%	40	40	40	40
養生 7 天後物性測試				
體密度(g/cm ³)	1.42	1.35	1.3	1.28
耐壓強度(kgf/cm ²)	126.87	124.62	79.69	63.28
養生 14 天後物性測試				
耐壓強度(kgf/cm ²)	145.717	136.55	89.06	76.53
養生 21 天後物性測試				
耐壓強度(kgf/cm ²)	148.37	137.36	91.51	95.48
養生 28 天後物性測試				
耐壓強度(kgf/cm ²)	148.88	137.77	90.89	96.60



圖 5 輕質建築材料加水混合後狀態。(以表 3 NO7 配方為例)

將配方 NO7 進行圓柱體試體灌製並送第三方驗證，在室溫下以不同養生時間進行耐壓強度測試，從表 4 數據結果顯示，隨著養生時間增加，試體的耐壓強度也隨之提升，並在養生 21 天之後趨於平緩，第三方材料耐壓強度的驗證與綠混凝土 G 類強度規範比較如圖 6，從圖中可以發現，本研究所開發的材料在養生 21 天後，即可達到綠混凝土 G 類強度規範要求。

表 4 圓柱體試體在不同養生時間的耐壓強度表

養生時間(day)	耐壓強度(kgf/cm ²)	耐壓強度(PSI)
7	143.78	2045.0
14	197.83	2813.7
21	280.60	3991.1
28	279.40	3970.4

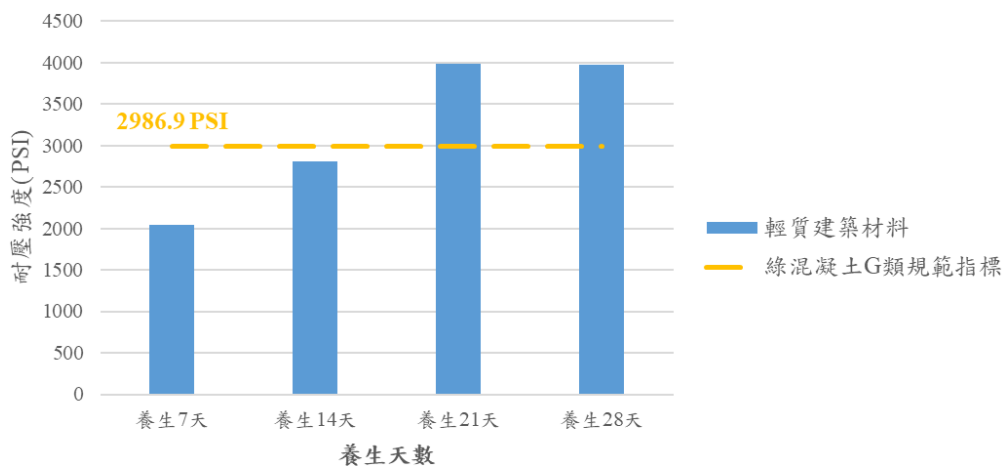


圖 6 圓柱體試體養生時間與耐壓強度關係圖

(一)材料 XRD 分析

材料 XRD 分析如圖 7，材料晶相由碳酸鈣與二氧化矽所組成，說明本研究所發開的材料僅有常見的混凝土原料晶相，並無其他晶相產生。

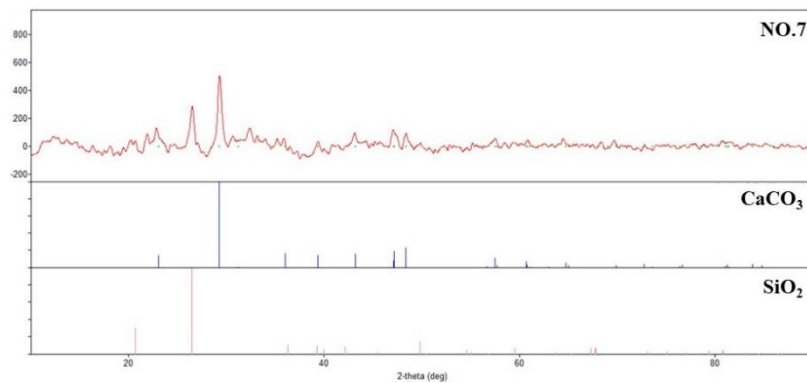


圖 7 材料 XRD 分析

(二)與市售產品比較/實地施作

為了確定本研究之材料在市場具有競爭力，本公司委託第三方檢驗單位除了對基礎物性如體密度和耐壓強度進行測試之外，還進行綠建築法規中的石棉量、有機物含量、氯離子含量、與熱傳導率測試，結果顯示如表 5。與市售產品規格相比，本研究所開發之輕質建築材料體密度與市售品差異不大，本研究之材料抗壓強度明顯高於市售品。兩者皆未檢出石棉與有機物質。根據綠建材標章評估基準中提及限制物質相關規定，其中水泥相關製品總氯離子含量基準需小於 0.1%，雖然市售品和本研究之輕質建築材料的氯離子含量皆符合綠建材標章之規定，但本研究開發之材料氯離子含量卻低於市售品氯離子含量約 5 倍。另外本研究材料之熱傳導率為 $0.099 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，根據建築物強化外殼部位熱性能節約能源設計技術規範^[7]之材料分類，本研究材料接近岩棉吸音板，且熱傳導率遠低於市售品，代表本研究之材料有助於建築體隔熱、保溫與節能。本次研究材料也進行重金屬殘留檢測，結果顯示，重金屬殘留檢測符合綠建材標準規範(圖 8)。

表 5 本研究開發之材料與市售品比較表

檢驗項目	市售品	本研究開發之材料
體密度 kg/cm^3 (CNS 329-3 2010)	1200-1500	1300
耐壓強度 PSI (CNS 1232 2002)	1885	3988.5
石棉量 (CNS 15546)	Negative	Negative
有機物 (CNS 1164 2015)	接近比色板 1 號色	接近比色板 1 號色
氯離子含量 % (CNS 14703 2002)	0.0056	0.0011
熱傳導率 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ (CNS 7333 2014)	0.2849	0.099

檢測項目	檢測結果 (單位)	檢測方法	綠建材標準 值
萃出液中總砷	ND<0.032 (mg/L)	NIEA R201.15C/NIEA R306.13C/NIEA M104.02C	≤ 0.3 (mg/L)
萃出液中總鎘	ND<0.011 (mg/L)	NIEA R201.15C/NIEA R306.13C/NIEA M104.02C	≤ 0.3 (mg/L)
萃出液中總銅	ND<0.015 (mg/L)	NIEA R201.15C/NIEA R306.13C/NIEA M104.02C	≤ 0.15 (mg/L)
萃出液中總鉛	ND<0.016 (mg/L)	NIEA R201.15C/NIEA R306.13C/NIEA M104.02C	≤ 0.3 (mg/L)
萃出液中總銀	ND<0.016 (mg/L)	NIEA R201.15C/NIEA R306.13C/NIEA M104.02C	≤ 0.05 (mg/L)
萃出液中六價鉻	0.15 (mg/L)	NIEA R201.15C/NIEA R309.12C	≤ 1.5 (mg/L)
萃出液中總汞	ND<0.0004 (mg/L)	NIEA R201.15C/NIEA R314.12C	≤ 0.005 (mg/L)
以下空白			

圖 8 重金屬殘留檢測

本次開發之產品，也配合某建設公司進行實地鋪設和高樓輸送施工試驗，如圖 9，當本研究開發之輕質材料施作於平地時，如一般水泥砂漿容易施工，而且使用工具將其刮平時，材料具流動性，因此可輕易地將輕質材料鋪平。因為材料實施輕量化，在進行 10~12 樓高樓管線輸送時，並不會發生堵管及壓力過高等狀況(圖 10)，運輸後的材料仍維持均勻混合之狀態，施工過程順利無異常。



圖 9 本篇研究開發之輕質材料於實地施作情形



圖 10 本篇研究開發之材料使用管線輸送之情形

四、結 論

本研究以廢棄岩棉資源化作為再生建材，透過本研究得到以下效益：

1. 廢棄岩棉可以粗破碎方式來執行材料製作，減少處理時間與成本。
2. 本研究廢棄岩棉資源化再利用可達 10%，且製作出來的輕質建材其強度達到 3991.1PSI，已達到綠混凝土 G 類規範(大於 2986.9 PSI)。
3. 透過第 3 方檢測來驗證本研究材料其氯離子含量與熱傳導率皆遠低於市售品，同時也未檢出石棉與有機物，說明本研究開發之材料在諸多項目符合綠建材法規。並與先前研究相比，採用粗破碎方式並將岩棉導入輕質建材高達 10%，顯示本研究開發之材料於關鍵物性指標數據皆有優勢，表示本研究材料可商業化程度高且富有市場優勢。
4. 經實地測試材料灌注以及高樓層材料輸送，本研究材料於管件輸送時順利不堵管、無骨料分離現象，輸送高度達 10 樓以上，這會讓工地作業時達到快速施工、輕勞化、提高空間利用率。

五、參考文獻

1. 李紅霞，耐火材料手冊，北京冶金工業出版社，2007 年
2. Yap, Z. S., Khalid, N. H. A., Haron, Z., Mohamed, A., Tahir, M. M., Hasyim, S., & Saggaff, A. (2021). Waste mineral wool and its opportunities—a review. *Materials*, 14(19), 5777.
3. 陳文卿(2021)，綠建材循環經濟產業鏈結推廣計畫，財團法人環境與發展基金會
4. Kumar, R., Srivastava, A., & Lakhani, R. (2021). Industrial wastes-cum-strength enhancing additives incorporated lightweight aggregate concrete (LWAC) for energy efficient building: A comprehensive review. *Sustainability*, 14(1), 331.
5. 朱延清 (2008)。岩棉粉應用於水泥基複合材料之研究。[碩士論文。國立臺灣海洋大學]臺灣博碩士論文知識加值系統。 <https://hdl.handle.net/11296/rejv4n>
6. 李培誠 (2008)。高分子混凝土固化粉碎岩棉廢棄物之研究。[碩士論文。逢甲大學]臺灣博碩士論文知識加值系統。 <https://hdl.handle.net/11296/bustfz>。
7. 行政院公報，第 018 卷，第 216 期，20121109，內政篇，建築物強化外殼部位熱性能節約能源設計技術規範。

廢聚碳酸酯升級為具高熱穩定性和高耐酸性的聚(碳酸酯亞胺)之 vitrimers 及碳纖維複材

陳怡君*、蘇迪**、林慶炫***

摘 要

聚碳酸酯(PC)因其耐熱性、韌性和高光學透明性而在全球市場穩定成長。為實現永續發展，應回收廢棄的聚碳酸酯(WPC)將其再利用。本研究以 100% 原子效率將 WPC 升級為 WPC 衍生醛基化合物(WPC-CHO)，並與兩種芳香族二胺製備聚(碳酸酯亞胺) vitrimers (PCIs)。一般的聚亞胺可以在溫和的酸性條件下降解，且聚亞胺很少表現出良好的熱性質及拉伸性能。本研究製備的 PCIs 樹脂顯示出優異的熱穩定性和拉伸強度，其玻璃轉移溫度高達 175、192°C。PCIs 更是表現前所未見的耐酸水解性，PCIs 即使浸泡在 5 M H₂SO₄ 之 THF/H₂O 溶液中 6 個月，仍保持完整的樹脂，PCIs 顯示出優異的耐酸水解性，增加樹脂在酸性環境下的應用。此外將 PCIs 粉碎後，可在溫度 240°C 壓力 10MPa 下熱壓重新塑形成樹脂薄膜，證明 PCI 的 vitrimer 特性。且 PCIs 可在無催化劑的溫和條件下透過胺解和胺基轉移作用達到降解。基於前述樹脂具可降解性，本研究更是將 PCIs 與碳纖維製備碳纖維複合材(CFRP)，當複材走向使用終端時，可成功將樹脂降解，同時回收未受損的碳纖維。這項研究從廢棄聚碳酸酯發展至聚(碳酸酯亞胺)之 vitrimer 及碳纖維複材，有助於環境的永續發展及迎接減碳世代的來臨。

【關鍵詞】

聚碳酸酯回收升級、100%原子效率、聚(碳酸酯亞胺) vitrimers、高耐酸性、胺解、碳纖維複合材料、可再加工性、轉氨基作用、可回收熱固樹脂、希夫鹼

*國立台灣大學 高分子科學與工程學系 博士生

**國立中興大學 化學工程學系 博士後研究員

***國立中興大學 化學工程學系 特聘教授

一、前言

2021 年聚碳酸酯(PC)工程塑膠的需求量超過 4100 噸，預計 2022-2027 年預測期內收入複合年增長率(CAGR)將達到 2%。PC 應用非常廣泛，如汽車、建築、電子產業中。近年 PC 需求量漸增，換言之，廢棄 PC 將造成環境衝擊。一般廢棄 PC 透過物理及化學回收法進行，但兩者仍會造成環境衝擊，因此尋求 100%原子效率回收方法，最為符合綠色化學趨勢。本技術不僅著眼於聚碳酸酯回收議題，同時關注全球減碳新世代的來臨，隨著減碳「D-Day」運動的啟動，減碳已不是環保議題，而是經濟議題。近年碳纖維複合材料產生的環保議題，對於退役的碳纖維複材，全世界目前多數仍選擇以最便宜的掩埋、焚燒方式進行處理，進而帶來新的環境衝擊，如何將熱固樹脂與碳纖維分離，有效的處理樹脂及回收高單價碳纖維，是目前須正視並解決的棘手課題，因此勢必要發展可降解熱固性樹脂

為實現熱固性樹脂的可回收性，近年許多學者透過在交聯結構中引入可逆的動態共價鍵結，使其在受外部刺激下(如加熱、照光、觸媒、溶劑等)發生斷鍵或鍵交換反應，以製備具有可回收、自修復及再加工性能的熱固性材料，並稱此類高分子為「Vitrimers」。可逆的動態共價鍵結中的亞胺鍵(也稱希夫鹼)的 vitrimer，於溫和酸性條件(0.1-1.0 M HCl)下可水解，使材料具備可降解性，同時也賦予材料熱再加工性^[1, 2]。但亞胺鍵的水解不穩定性，則成為亞胺熱固性材料的缺點。為提升聚亞胺的耐水解性，Dong 學者等人^[3]提出導入 hydrazone 鍵結可以提升聚亞胺樹脂的耐水解性。而 Hakkarainen 學者等人^[4]則發表含亞胺鍵結的聚甲基丙烯酸酯表現出耐酸性，並且聚甲基丙烯酸酯在 1 M HCl 溶液中不會降解。主因為高含量的芳香族基團和光固化雙鍵的交聯有助於水解穩定性。另外，Averous 學者等人^[5]，發表生物基的聚亞胺 vitrimer，提出使用較疏水性的胺基化合物，可提升聚亞胺的疏水性，以提供材料的耐水解穩定性。

目前常見含有亞胺鍵之熱固性樹脂中，當使用脂肪胺基形成之聚亞胺則表現出較低 T_g (<100°C)^[3, 5-13]，而芳香胺基形成之聚亞胺表現出中高等 T_g (>100°C)和拉伸強度^[14-16]。如 Feng 學者^[15]和 Zhu 學者等人^[16]製備得亞胺鍵之熱固性樹脂，分別顯示出高 T_g (204°C)/高拉伸強度(122 MPa)， T_g 為 172°C /拉伸強度(81MPa)。因此，為提升聚亞胺熱固性樹脂的熱及機械性能，勢必要選擇具芳香族官能基之化合物，以提升亞胺鍵之熱固性樹脂熱及機械性能。

二、碳酸酯之醛基衍生物

(一)模型反應(Model reaction)合成碳酸酯之醛基衍生物(DPC-CHO)

將碳酸二苯酯(DPC)與香草醛基環氧(VNEP)進行置入反應(insertion reaction)，合成 DPC-CHO，如圖 1(b)所示。DPC-CHO 經 $^1\text{H-NMR}$ 進行結構鑑定，如圖 2(b)所示，VNEP 經置入反應後生成之 $-\text{CH}_2-$ 訊號於 4.2 ppm 生成、 $-\text{CH}$ 訊號位於 5.2 ppm，醛基訊號可在 9.8 ppm 附近生成，DPC-CHO 之積分值、化學位移值與其結構一致，證實合成成功。

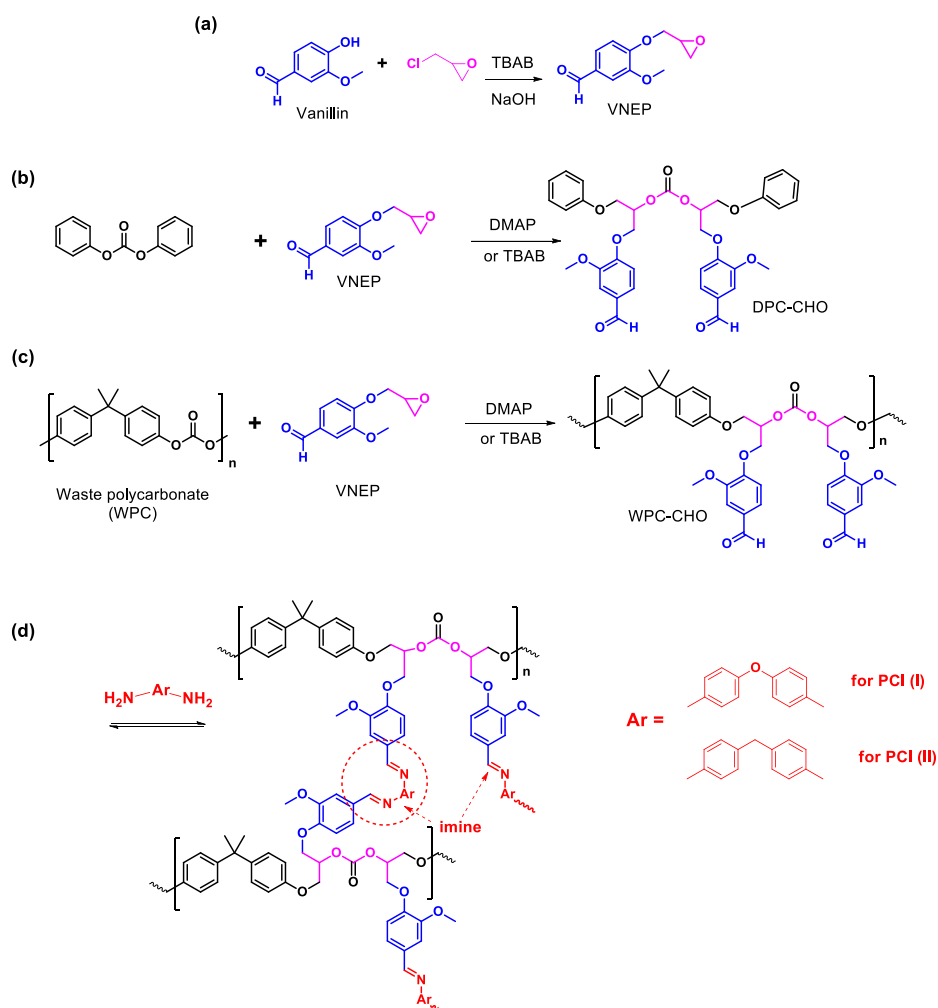


圖 1 (a) VNEP 之合成 (b) DPC-CHO 之合成 (c) WPC-CHO 之合成 (d) 製備聚(碳酸酯亞胺)之 vitrimers

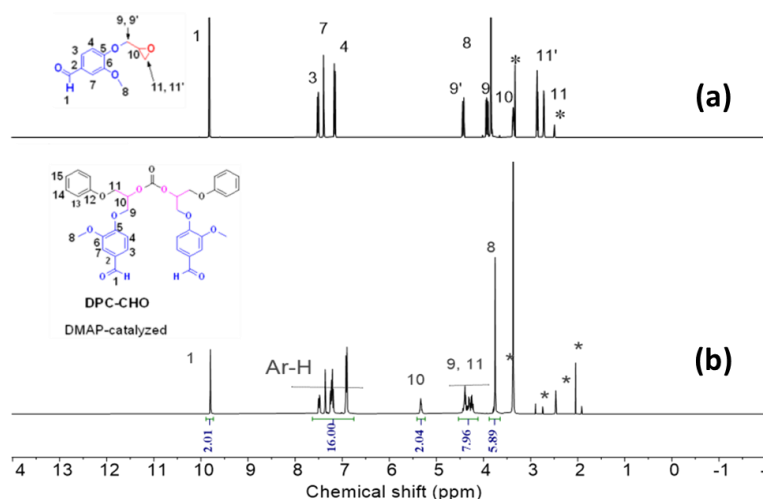


圖 2 DPC-CHO 之 ^1H -NMR 光譜圖

(二)廢棄聚碳酸酯合成碳酸酯之醛基衍生物(WPC-CHO)

藉由 DPC-CHO 證實 VNEP 可與碳酸酯進行置入反應，進一步將廢棄聚碳酸酯與 VNEP 合成 WPC-CHO，如圖 1(c)所示。WPC-CHO 經 ^1H -NMR 進行結構鑑定，如圖 3(c)所示，於 9.8 ppm 附近可觀察到醛基(H1)訊號，VNEP 經置入反應後生成之-CH(H10)及-CH₂(H9, H11)訊號，可分別在 5.3 及 4.3 ppm 附近觀察到相對應之新生成吸收峰。另外，-CH₃(H18)及其餘苯環(H3, H4, H7, H14, H15)皆在相對應位置生成，所有重要吸收峰之積分值、化學位移值與其結構一致。

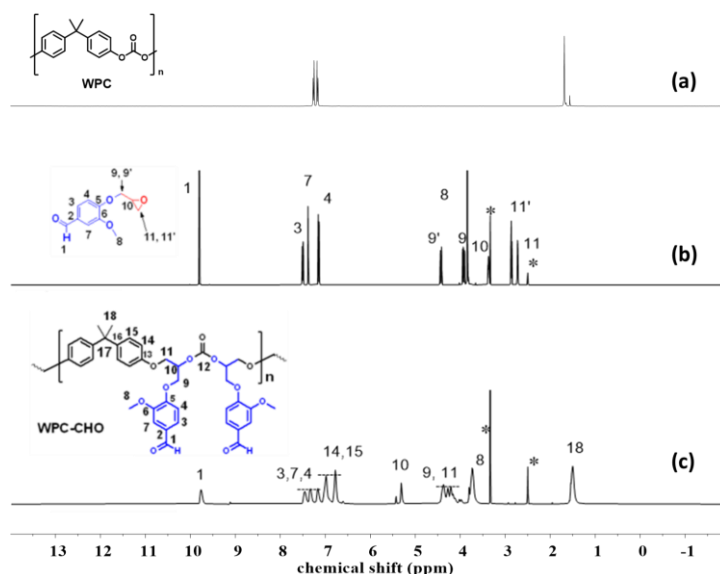


圖 3 WPC-CHO 之 ^1H -NMR 光譜圖

三、聚(碳酸酯亞胺) vitrimers (PCIs)之製備及物性分析

(一)製備聚(碳酸酯亞胺)之 vitrimers (PCIs)

將前述合成之 WPC-CHO 與市售二胺單體(ODA 及 DDM)製備聚(碳酸酯亞胺)之 vitrimers (PCIs)，如圖 1(d)。因此先透過變溫(25°C 至 210°C)FTIR 觀察 WPC-CHO 側鏈上的醛基與二胺之間形成亞胺鍵結，如圖 4 所示。WPC-CHO 在 1681 cm^{-1} 之醛基訊號，隨著溫度的升高而逐漸減少。同時，隨著溫度的升高，位於 1621 cm^{-1} 處的亞胺鍵之吸收峰強度逐漸增強，且該反應在 210°C 時達到最大轉化率。

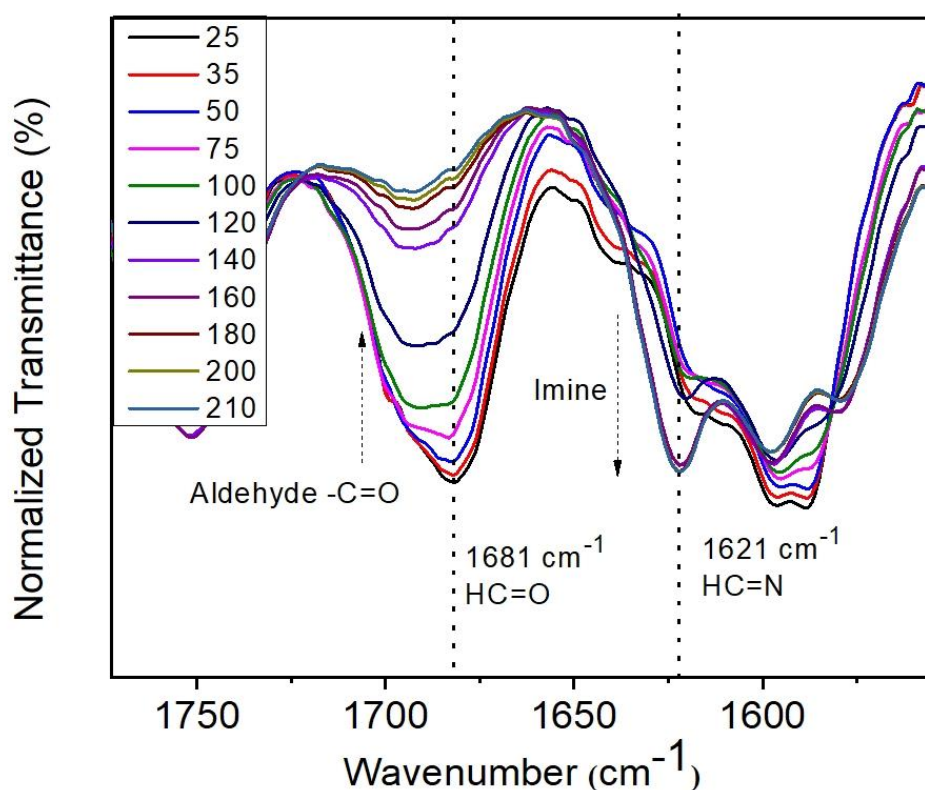


圖 4 WPC-CHO 和 DDM (以莫爾比 1:1)在不同溫度(25 °C 至 210 °C)下進行 FTIR 光譜分析

(二)聚(碳酸酯亞胺)之 vitrimers 熱及機械性質之分析

將 WPC-CHO 與二胺製備 PCIs，其中 WPC-CHO 與 ODA 固化者，稱為 PCI(I)；與 DDM 固化者，稱為 PCI(II)，如圖 1 所示。進一步將固化物 PCIs 透過熱重分析(TGA)、熱機械分析儀(TMA)、微示差掃描熱卡分析儀(DSC)、動態機械分析(DMA)及拉伸試驗，研究 PCIs 的熱及機械性能，相關數據如表 1 所示。

由 TGA 進行材料的熱穩定性分析，PCIs 在溫度 300°C 溫度下仍非常穩定，且當 PCIs 之重量損失 5 wt% ($T_{d5\%}$) 時的溫度為 376-378 °C。另外，PCI (I) 和 PCI (II) 的焦炭殘餘率分別為 37%和 39%。該材料具有高熱穩定性和焦炭殘餘率，主因為聚合物具高交聯密度和高芳香族含量。

藉由 DSC、DMA、TMA 探討材料之玻璃轉移溫度，由 DSC 所測得 WPC-CHO 的 T_g 值約 86°C，主因為它是熱塑性材料，而 PCI (I)和 PCI (II)的 T_g 分別為 175 和 192°C，顯示優異的玻璃轉移溫度，主因為 PCIs 是熱固性材料。另外，藉由 DMA 分析，PCI (I)和 PCI (II)的 T_g 分別為 200 和 213°C，且其 $\tan \delta$ 的峰為單一波峰，皆表明 PCIs 為熱固性樹脂。最後 PCIs 的 TMA 分析也可得 T_g ，以上得到 PCIs 之玻璃轉移溫度皆具有相同趨勢，其 PCI (I)顯示出比 PCI (II)稍低的 T_g ，主因是 PCI(I)固化之二胺，具有較為靈活之醚基鍵結，因醚基在空間上分子較容易轉動，故顯示較低的 T_g 。

另外，藉由拉伸測試分析 PCIs 之機械性能，PCI(I)的拉伸強度為 79.4 MPa，拉伸應變為 3.8%，機械性質略優於 PCI(II) (75.8 MPa，3.1%)，主因為醚基分子較容易轉動所致。其中 PCIs 因高交聯密度和芳香族含量，而表現出高拉伸性能。

表 1 PCIs 之熱及機械性質

Sample	$T_{d5\%}$ (°C) ^a	$T_{d10\%}$ (°C)	CY (%) _b	T_g (°C)			CTE (ppm/°C) _e	Stress (MPa)	Strain (%)
				DSC	TMA _c	DMA _d			
WPC	430	440	9.8	150	-	-	-	50	7.8
WPC-CHO	361	375	16	86	-	-	-	-	-
PCI (I)	378	392	37	175	168	200	76.3	79.4	3.8
PCI (II)	376	392	39	192	173	213	76.0	75.8	3.1
R- PCI (I)	360	388	37	142	148	187	48.3	76.8	3.8
R- PCI (II)	372	390	39	152	153	200	58.3	74.5	3.0

^a TGA 以 20 °C /min 的加熱速率進行測量

^b 800 °C 時的殘餘重量百分比

^c TMA 以 5 °C /min 的加熱速率進行測量

^d DMA 以 5 °C /min 的加熱速率進行測量

^e 在 50 °C 至 100 °C 之間的熱膨脹係數

(三)聚(碳酸酯亞胺)之 vitrimers 可塑性分析

亞胺鍵可在高溫下進行熱重排(亞胺鍵複分解)，賦予材料具可重性和自修復。因此將 PCIs 進行粉碎，並在 240°C、10 MPa 下熱壓 2 小時，可得到再加工薄膜(R-PCIs)，如圖 5 所示。並將 R-PCIs 進行 TGA、TMA、DSC 和 DMA 分析，如表 1 所示。經由 TGA 進行熱穩定性分析，結果顯示 R-PCIs 的熱穩定性幾乎沒有明顯下降。由 DMA 熱分析圖顯示，重新塑形薄膜的 T_g 僅下降了 6.5%。而 R-PCIs 的拉伸測試表現中，其拉伸強度和斷裂伸長率略低於 PCIs。前述 R-PCIs 其 T_g 和拉伸測試數據的下降，主因是動態共價亞胺鍵的交換不完全所致，此現象在文獻中普遍可見。以上分析可得，R-PCIs 仍具有一定的熱及機械性能。

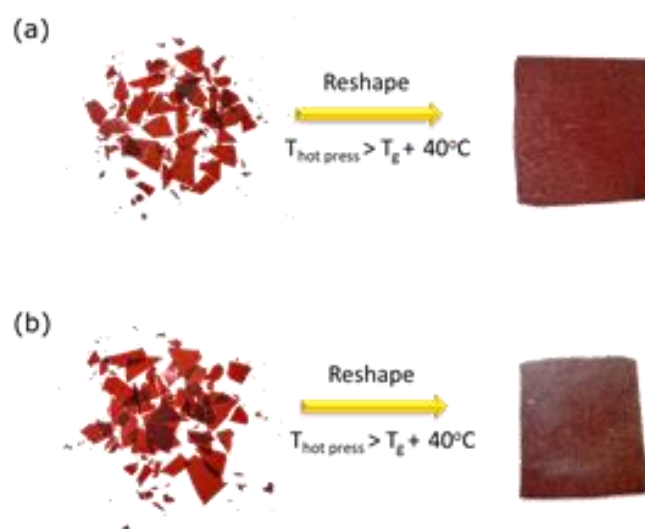


圖 5 PCIs 重新塑形測試。(a) PCI (I) 和 (b) PCI (II)。

四、聚(碳酸酯亞胺) vitrimers (PCIs)之降解分析

亞胺鍵除賦予材料可再加工性，更可透過酸性條件下進行亞胺鍵逆反應，使材料達到降解性。本研究提供兩種方式，將 PCIs 進行降解。

(一) 聚(碳酸酯亞胺) vitrimers (PCIs) 之酸解

將 PCIs 於 50°C 下使用不同酸濃度下 PCIs 進行降解，如圖 6 所示。PCI (I) 在 5 M 濃度的 H_2SO_4 溶液中放置 6 個月幾乎沒有膨潤或降解，顯示 PCI(I) 具優異的耐水解穩定性，PCI (II) 也觀察到相似的結果。另外將 PCIs 在 1M HCl 和 1M 醋酸 THF/ H_2O (8/2, v/v) 溶液中的酸水解情況，並持續兩週，同樣無觀察到降解，推測高交聯網絡阻礙了亞胺鍵的斷裂。這優異的耐水解穩定性在聚亞胺中非常少見，將增加 PCIs 在酸性環境中的應用。

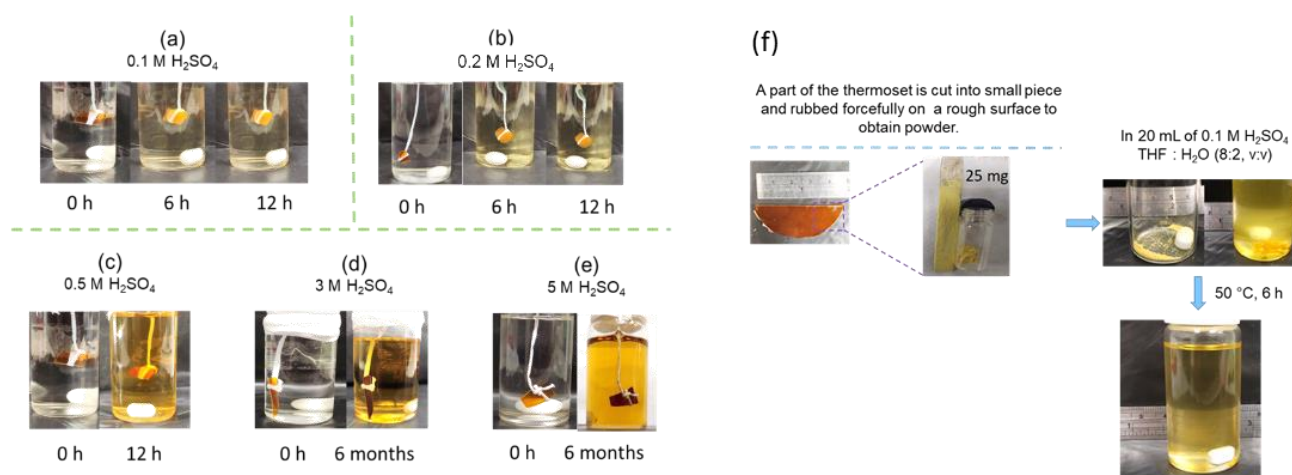


圖 6 PCI (I) 酸解試驗，於 50°C 不同濃度的 H_2SO_4 之 THF/ H_2O (v/v, 8/2) 溶液中 (a) 0.1 M、(b) 0.2 M、(c) 0.5 M、(d) 3 M 和 (e) 5 M。備註：6 個月後顏色變深是由於高濃度 H_2SO_4 溶劑的光氧化所致。(f) PCI (I) 粉末的酸水解測試。

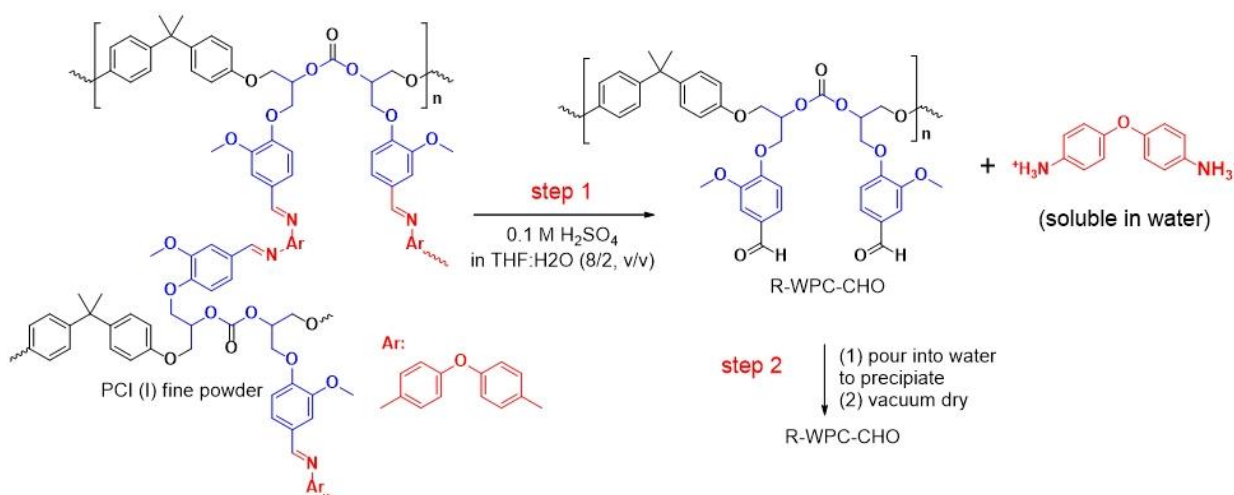


圖 7 PCI(I) 酸水解結構分析

PCI(I)結構中之亞胺鍵經由酸水解進行逆反應，還原為 WPC-CHO 及 ODA，使固化物 PCIs 達到降解效果，如圖 7 所示。為了加速 PCIs 中亞胺鍵的酸解速率，將 PCI(I)薄膜粉碎並研磨成粉，將所得的 PCI(I)粉末以 0.1 M H_2SO_4 的 THF/ H_2O (8/2, v/v) 溶液進行酸解。儘管 PCIs 的薄膜狀態樣品具有耐水解穩定性，但粉末可在 50°C 下約 6 小時達到完全降解，如圖 6(f)。進一步對降解物進行分析，藉由減壓濃縮機將溶劑移除，並將殘餘固體溶解於 DMAc 中，以 MeOH/ H_2O 析出得到沉澱物，然後過濾並真空乾燥，得到回收的 R-WPC-CHO；另外濾液以 NaOH 處理(至 pH=8)以得到沉澱物，並過濾真空乾燥後得到回收的 ODA(簡稱 R-ODA)。將前述所回收的 R-WPC-CHO 和 R-ODA 進行 ^1H -NMR 分析，結果顯示回收產物的訊號與原始 WPC-CHO 和 4,4-ODA 的訊號一致，如圖 8 所示。綜合前述，表明 PCIs 具有一定的耐酸性，且同時可藉由酸解成功回收原料的 WPC-CHO 及 ODA。

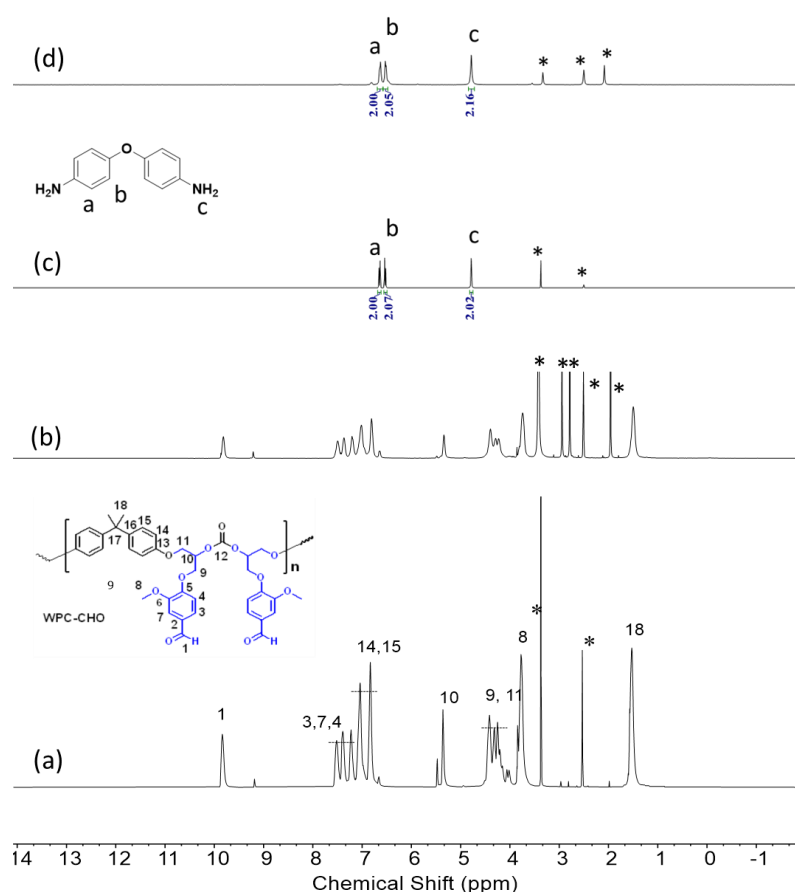


圖 8 PCI(I)酸水解產物 ^1H -NMR。(a) WPC-CHO，(b) R-WPC-CHO，(c) commercial ODA，(d) R-ODA

(二)、聚(碳酸酯亞胺) vitrimers 之降解(胺解及胺基轉移作用，並酸解)

前述將 PCIs 可直接酸解，礙於須研磨成粉方可進行。故本研究提供另一降解方法。由於 PCIs 結構中具有碳酸酯與亞胺鍵，如圖 9 所示，第一步將 PCIs 利用正己胺進行碳酸酯之胺解，及亞胺鍵之胺基轉移反應(transimination)，可將固化物降解為 dihexylurea、dihexylimine 及 ODA，第二步透過加入 0.1M 的 H_2SO_4 將溶液進行酸化，可將 ODA 獨立分離出來，其，同時 dihexylimine 之亞胺鍵因酸化而進行逆反應，形成 dialdehyde。第三步將剩下溶液倒入己烷，可得析出物即為 dialdehyde，而 dihexylurea 則溶於己烷。前述 PCIs 之所有降解產物可獨立分離，並進行 ^1H -NMR 分析，如圖 10 所示，其產物之積分值皆與理論相符，證明結構正確。

綜觀所述，本研究製備之 PCIs 與過往文獻相比具有高耐酸性，增加 PCIs 於酸性環境下的應用，同時提供兩種降解方法可將固化物完全降解，不僅使降解途徑更加多元，更是促進廢棄 PC 回收再利用之永續發展。

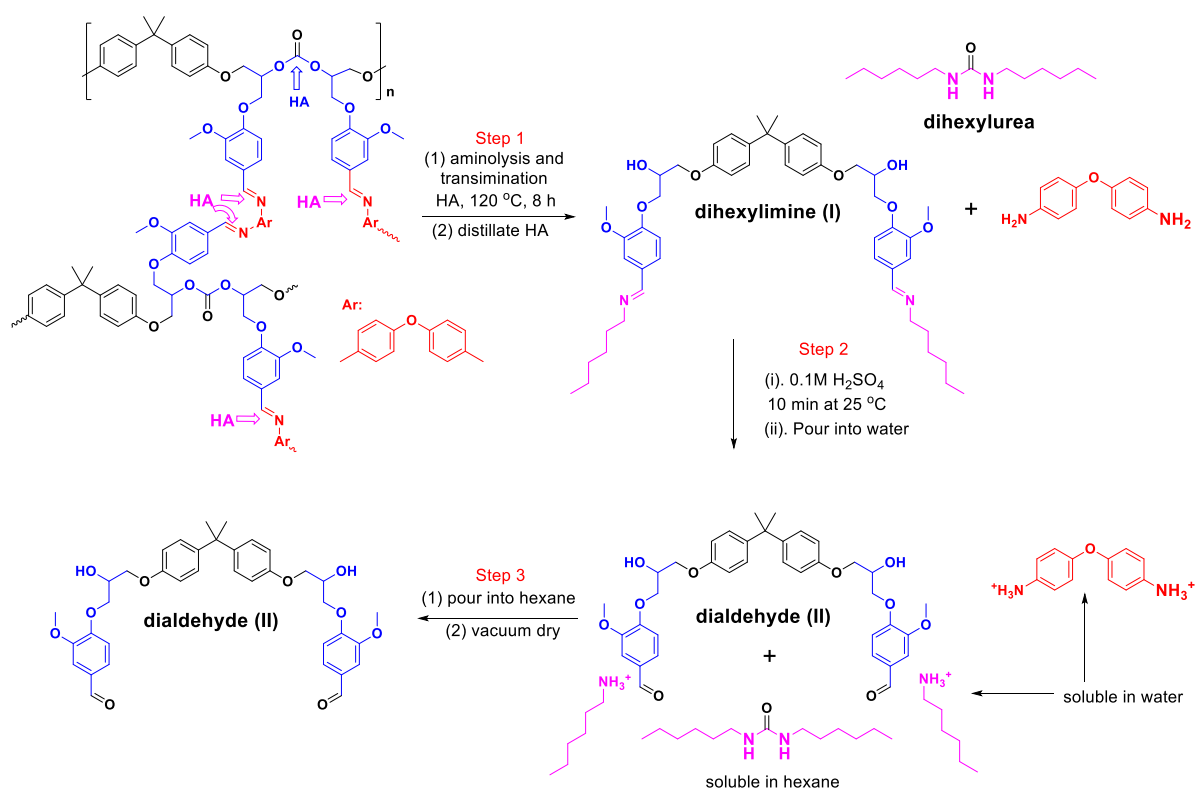


圖 9 PCI(I)之胺解及胺基轉移作用，並酸水解結構式

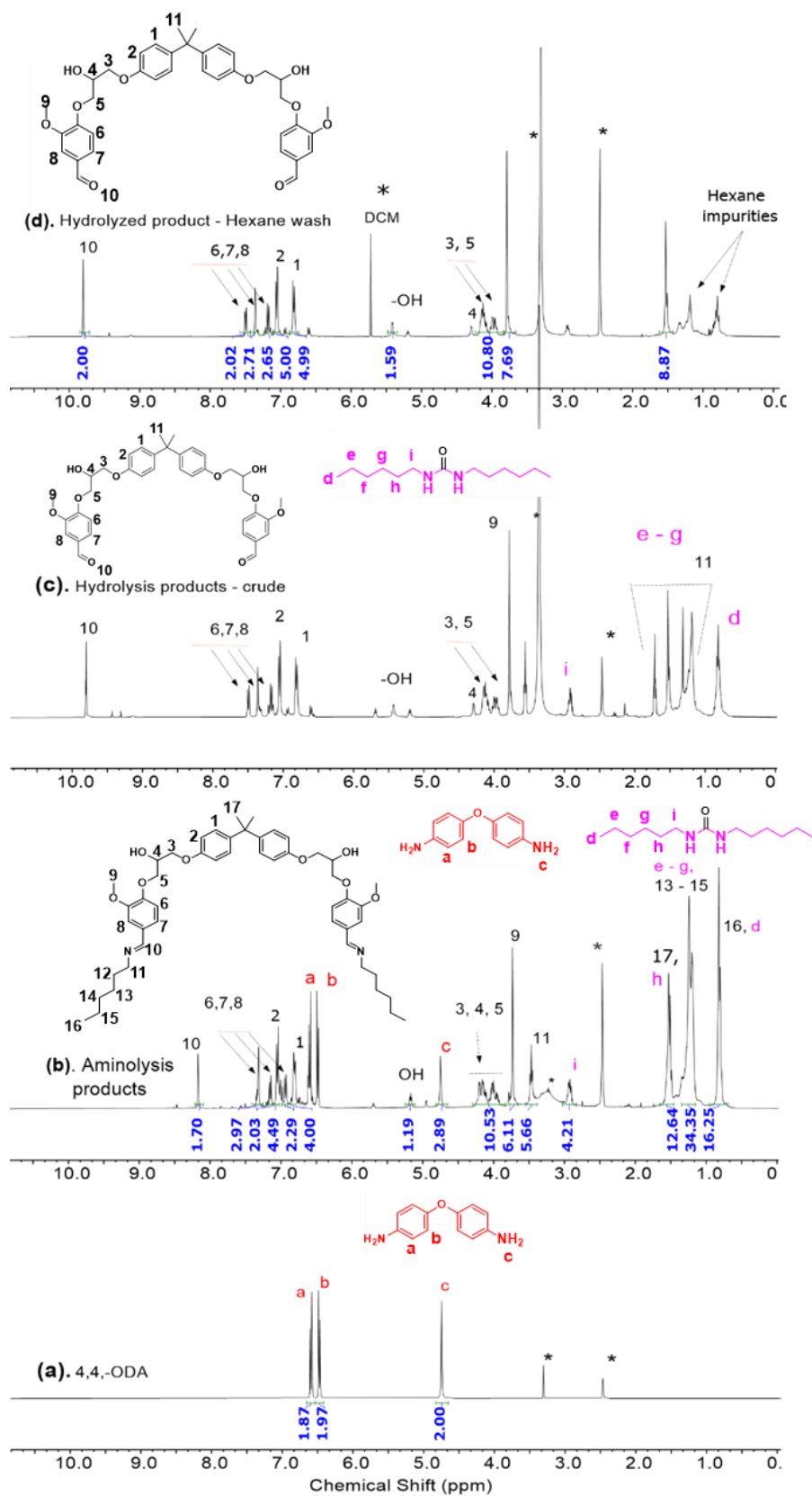


圖 10 PCI(I)之降解物 ^1H -NMR 光譜圖

五、聚(碳酸酯亞胺) vitrimers 之碳纖維複合材料的製備及

降解分析

由於 PCIs 具備可降解性，因此進一步與碳纖維製備碳纖維複合材料，分別命名為 PCI(I)/CF 及 PCI(II)/CF，如圖 11(g)及(h)。將複材進行拉伸測試，當應力達到拉伸機器之極限時，複材仍不會斷裂，證明 PCIs 複材具有優異的機械強度，如圖 12(a)。進一步將 PCIs 複材以正己胺胺解及胺基轉移作用進行降解，使 PCIs 固化物完全降解，得以回收碳纖維。將回收之碳纖維透過電子顯微鏡觀察表面型態，及量測能量散射 X 射線進行元素分析，並與新鮮碳纖維進行比較，如圖 11(a)-(f)。由分析結果可得回收之碳纖維的表面型態及元素分析，不因化學降解而有損傷，且將回收之碳纖維進行拉伸測試，其機械性能與新鮮碳纖維相當，如圖 12(b)。綜合以上可得，由 PCIs 製備碳纖維複材之機械性能優異，且 PCIs 固化物經機化學降解後，回收之碳纖維之物性表現可與新鮮碳纖維比擬，其回收碳纖維可用於再次製備複材用，進而達到減碳效益。

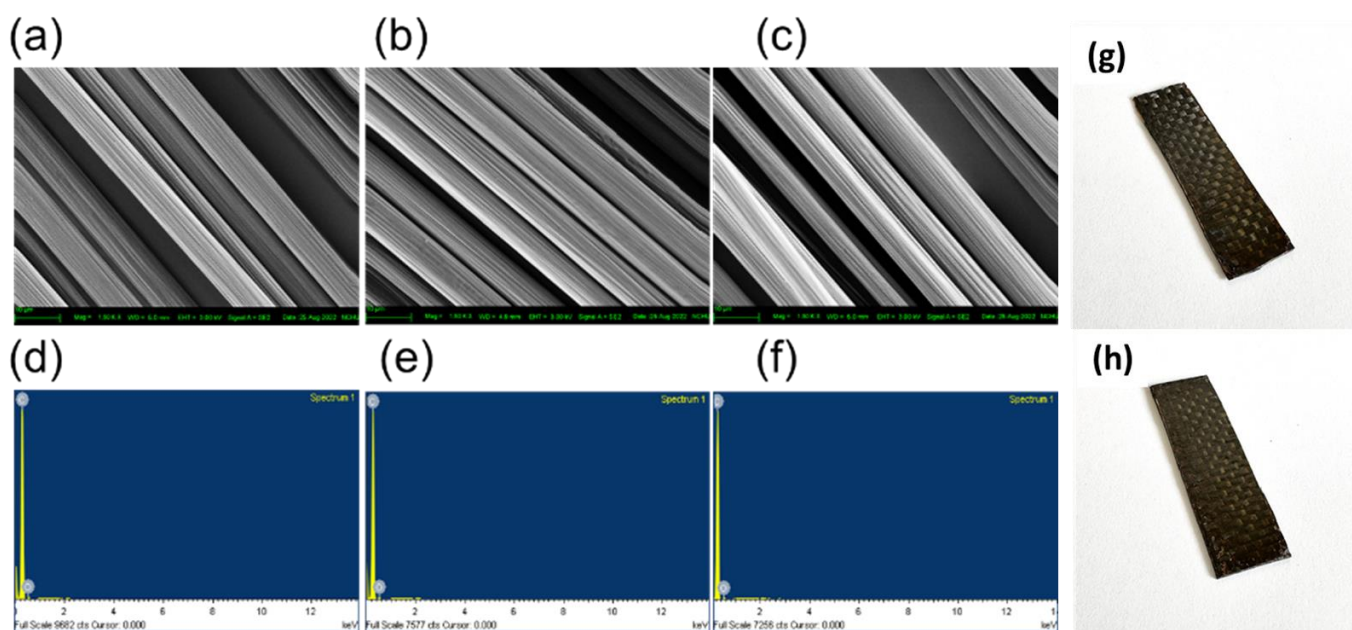


圖 11 新鮮及回收碳纖維之表面及元素分析。(a)和(d)為新鮮碳纖維，(b)和(e)為 PCI (I)/CF 之回收碳纖維，(c)和(f)為 PCI (II)/CF 之回收碳纖維

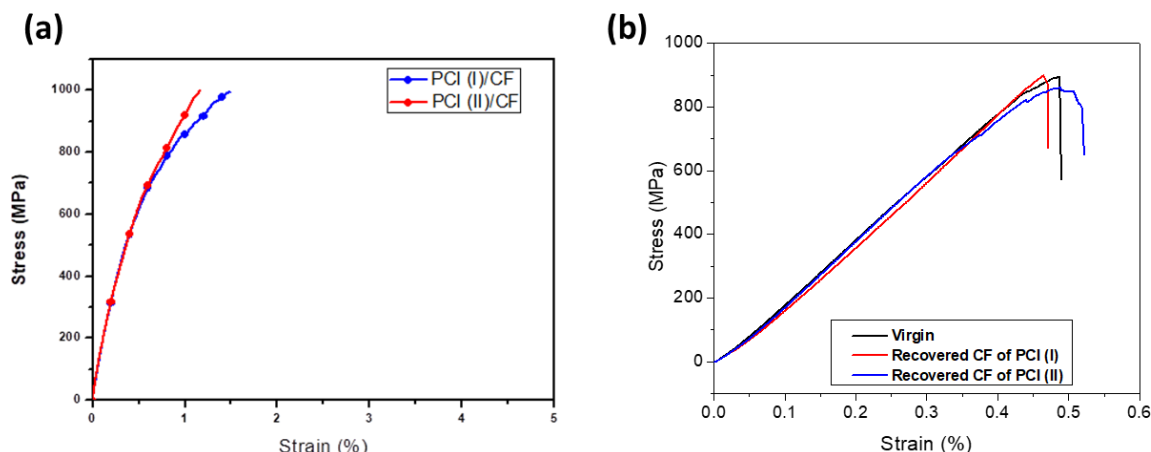


圖 12 (a)PCIs/CF 之拉伸測試，(b)新鮮及回收碳纖維之拉力測試

六、結 論

本研究成功將廢棄聚碳酸酯升級為碳酸酯之醛基衍生物(WPC-CHO)和聚(碳酸酯亞胺) vitrimers (PCIs)，與其他聚亞胺相比，PCIs 表現出優異的熱和機械性能，以及前所未有的耐酸水解性。亞胺鍵賦予 PCIs 具有自修復性能，可透過高溫熱壓方式，將粉碎之熱固材料重新塑形，PCIs 表現出 vitrimers 的特性。此外，亞胺鍵可使 PCIs 具備可降解性，本研究更是提供多元降解方式，回收熱固性樹脂。更是利用樹脂之可降解性，製備碳纖維複合材料，且表現優異的機械性能。最後更可成功回收碳纖維，其物性幾乎與新鮮碳纖維無差異。這項研究將廢棄聚碳酸酯以 100% 原子效率升級為高耐酸水解之可降解聚(碳酸酯亞胺) vitrimers，及碳纖維複合材料。成功將廢棄物回收再利用，達到永續發展之外，同時藉由回收碳纖維達到減碳效益。

七、參考文獻

- 1.M.E. Belowich, J.F. Stoddart, Dynamic imine chemistry, Chemical Society Reviews 41(6) (2012) 2003-2024.
- 2.A. Liguori, M. Hakkarainen, Designed from Biobased Materials for Recycling: Imine-Based Covalent Adaptable Networks, Macromolecular rapid communications 43(13) (2022) 2100816.
- 3.G. Li, X. Zhang, J. Huang, T. Li, S. Yang, Y. Wang, J. Jiang, B. Xia, M.

- Chen, W. Dong, Hydrazone bond enhance the mechanical properties, heating resistance, and water resistance of imine-based thermosets, *Chemical Engineering Journal* 435 (2022) 134766.
4. Y. Xu, K. Odelius, M. Hakkarainen, Photocurable, thermally reprocessable, and chemically recyclable vanillin-based imine thermosets, *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* 8(46) (2020) 17272-17279.
 5. S. Dhers, G. Vantomme, L. Avérous, A fully bio-based polyimine vitrimer derived from fructose, *Green Chemistry* 21(7) (2019) 1596-1601.
 6. Z. Zhou, X. Su, J. Liu, R. Liu, Synthesis of vanillin-based polyimine vitrimers with excellent reprocessability, fast chemical degradability, and adhesion, *ACS Applied Polymer Materials* 2(12) (2020) 5716-5725.
 7. H. Geng, Y. Wang, Q. Yu, S. Gu, Y. Zhou, W. Xu, X. Zhang, D. Ye, Vanillin-based polyschiff vitrimers: reprocessability and chemical recyclability, *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* 6(11) (2018) 15463-15470.
 8. H. Zheng, Q. Liu, X. Lei, Y. Chen, B. Zhang, Q. Zhang, A conjugation polyimine vitrimer: Fabrication and performance, *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry* 56(22) (2018) 2531-2538.
 9. P. Wu, X. Wang, R. Shi, H. Cheng, F. Zhao, A self-healing and recyclable poly (urea-imine) thermoset synthesized from CO₂, *Green Chemistry* 24(4) (2022) 1561-1569.
 10. P. Taynton, K. Yu, R.K. Shoemaker, Y. Jin, H.J. Qi, W. Zhang, Heat-or water-driven malleability in a highly recyclable covalent network polymer, *Advanced materials* 26(23) (2014) 3938-3942.
 11. Z. Guo, B. Liu, L. Zhou, L. Wang, K. Majeed, B. Zhang, F. Zhou, Q. Zhang, Preparation of environmentally friendly bio-based vitrimers from vanillin derivatives by introducing two types of dynamic covalent CN and S–S bonds, *Polymer* 197 (2020) 122483.
 12. K. Saito, F. Eisenreich, T. Türel, Ž. Tomović, Closed-Loop Recycling of Poly (Imine-Carbonate) Derived from Plastic Waste and Bio-based Resources, *Angewandte Chemie International Edition* 61(43) (2022) e202211806.
 13. X. Yang, Y. Ke, Q. Chen, L. Shen, J. Xue, R.L. Quirino, Z. Yan, Y. Luo, C. Zhang, Efficient transformation of renewable vanillin into reprocessable, acid-degradable and flame retardant polyimide vitrimers, *Journal of Cleaner*

Production 333 (2022) 130043.

- 14.X. Zhang, Y. Eichen, Z. Miao, S. Zhang, Q. Cai, W. Liu, J. Zhao, Z. Wu, Novel Phosphazene-Based flame retardant polyimine vitrimers with Monomer-Recovery and high performances, *Chemical Engineering Journal* 440 (2022) 135806.
- 15.X. Xu, S. Ma, J. Wu, J. Yang, B. Wang, S. Wang, Q. Li, J. Feng, S. You, J. Zhu, High-performance, command-degradable, antibacterial Schiff base epoxy thermosets: synthesis and properties, *Journal of Materials Chemistry A* 7(25) (2019) 15420-15431.
16. S. Wang, S. Ma, Q. Li, X. Xu, B. Wang, W. Yuan, S. Zhou, S. You, J. Zhu, Facile in situ preparation of high-performance epoxy vitrimer from renewable resources and its application in nondestructive recyclable carbon fiber composite, *Green chemistry* 21(6) (2019) 1484-1497.

漿紙產業無機副產物淨零碳排資源化之研究

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、底渣，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（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，並獲得 2023 金點設計標章的肯定。故透過冷壓技術資源化漿紙產業無機副產物，作為淨零碳排綠建材應屬可行，如此不僅可增加漿紙產業無機副產物的經濟價值，並達成漿紙產業無機副產物零污染、零掩埋之目標，亦朝「零廢棄全回收資源循環社會」與「2050 淨零排放之永續社會」的願景邁進。

【關鍵詞】

漿紙產業無機副產物、淨零碳排、冷壓資源化、無機聚合、非水硬性水泥

*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^[1]。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—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^[2]。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/m³）^[3]與符合 CNS 382 性能要求的普通磚（水泥用量 200 kg/m³）^[4]，如圖 1 所示），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 2），並獲得 2023 金點設計標章的肯定。

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 CO₂ 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」^[5-6]。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）^[7-9]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^[10]，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，資源化漿紙產業無機副產物，作為淨零碳排綠建材應屬可行，如此不僅可增加漿紙產業無機副產物的經濟價值，並達成漿紙產業無機副產物零污染、零掩埋之目標，亦朝「零廢棄全回收資源循環社會」與「2050淨零排放之永續社會」的願景邁進。



(a) 再生粗粒料



(b) 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 華紙公司花蓮廠圍牆試砌與鋪面試鋪照片

一、實驗方法

(一)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 3），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 4-(a)）分析結果顯示，綠液主要成分為 Na_2CO_3 與 CaCO_3 。

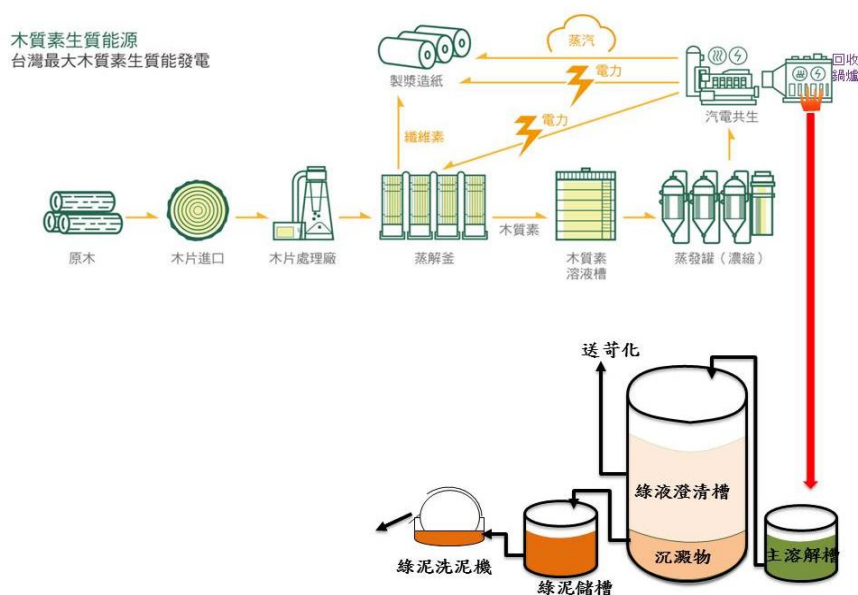


圖 3 綠液與綠泥產出製程

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	59532	46042	ND	ND	2310	Se	ND	ND	ND	ND	ND
Al	11505	2173	45041	25236	140	Rb	22	ND	22	46	ND
Si	14239	8965	28049	46441	530	Sr	1406	891	286	275	ND
P	2002	2909	1512	1571	1570	Y	ND	ND	ND	21	ND
S	13042	4218	2942	5555	400	Zr	ND	ND	355	122	ND
Cl	906	ND	5037	5545	40	Nb	ND	ND	8	10	ND
Ca	264742	348440	297551	176980	61760	Mo	ND	ND	ND	ND	ND
Ti	ND	ND	ND	5252	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	4035	ND	ND	ND	160	Sb	ND	ND	ND	ND	ND
Fe	9534	9700	30153	36979	1130	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)

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 5 所示。綠泥比重約為 2.44，由組成成分 XRF（見表 1）與 XRD（見圖 4-(b)）分析結果顯示，綠泥主要成分為 CaCO_3 。

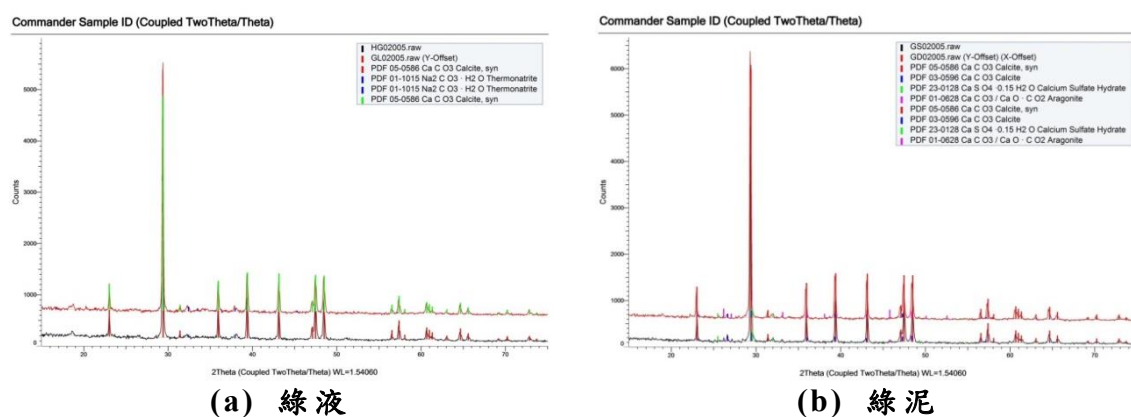


圖 4 綠液與綠泥 XRD 分析結果

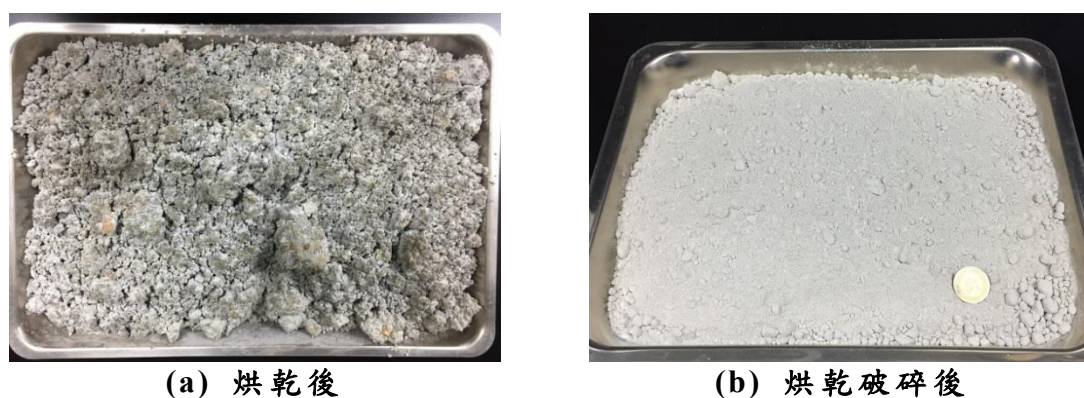


圖 5 綠泥照片

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 6 所示。其比重約為 2.31，由組成成分 XRF (見表 1) 與 XRD (見圖 7-(a)) 分析結果顯示，飛灰主要成分為 CaO 、 SiO_2 ，及 CaCO_3 。

4. 底渣：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 8)，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 7-(b)) 分析結果顯示，底渣組成成分則較為複雜，主要成分為 SiO_2 。

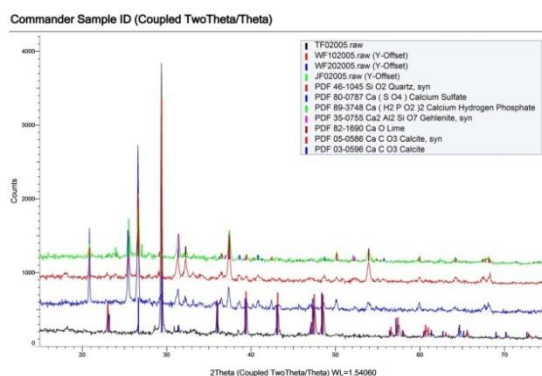


(a) 烘乾前

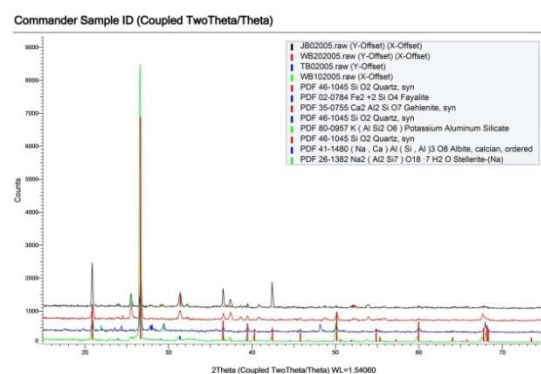


(b) 烘乾後

圖 6 華紙公司台東廠飛灰照片



(a) 飛灰



(b) 底渣

圖 7 華紙公司台東廠飛灰與底渣 XRD 分析結果



(a) 烘乾前



(b) 烘乾後

圖 8 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 9），其組成成分 XRF 分析結果，如表 1 所示。



圖 9 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。

(二) 冷壓資源化製磚技術

1. 實驗室：冷壓資源化技術^[11]乃基於材料基本原理（愈緻密其強度等相關性質愈佳）^[12]與複合材料^[13]的觀念，導入水泥化學及卜作嵐材料間互制特性^[5-6]，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 CO₂ 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 10），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 10 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。

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淨零碳排綠建材，則是直接於華紙公司花蓮廠所設置的試驗模廠（見圖 11）進行。



Step 1：填料



Step 2：安裝加壓模



Step 3：加壓成型



Step 4：退模

圖 10 冷壓資源化技術於實驗室製磚程序





圖 11 華紙公司花蓮廠試驗模廠照片

三、結果與討論

(一) 配比設計

本研究採用緻密配比邏輯^[10]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^[14]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 1 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^[4]，於骨材系統中，選擇綠泥填塞飛灰的比例（ α ）=0.50；綠泥與飛灰混合料填塞底碴的比例（ β ）=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 2 所示。

表 1 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

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

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

表 2 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	飛灰	綠泥最適含水率調整	底碴
------	--------	----	-----------	----

	(kg/m ³)	(kg/m ³)	綠泥 含水率 (%)	綠泥 (kg/m ³)	綠泥 含水量 (kg/m ³)	(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 %)		
綠泥最適含水率調整								
配比編號	爐壁灰 (kg/m ³)	飛灰 (kg/m ³)	綠泥 含水率 (%)	綠泥 (kg/m ³)	綠泥 含水量 (kg/m ³)	底碴 (kg/m ³)	綠液 (kg/m ³)	SP (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[4]，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，選擇三種不同綠泥與飛灰混合料填塞底碴的比例 () =0.50、0.65，及 0.75，如公式(2)所示，其配比見表 2。表 2 中顯示本研究採用漿紙產業無機副產物所開發的 GP 與 NC 系淨零碳排綠建材，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[15]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），故應屬淨零碳排綠建材。如此不僅可達成漿紙產業無機副產物零污染、零掩埋之目標，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。

(二) 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[11]：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[16]，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，且綠泥係具含水

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[4]，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 2）；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 12 所示。

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[4]，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 2。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 13 所示。

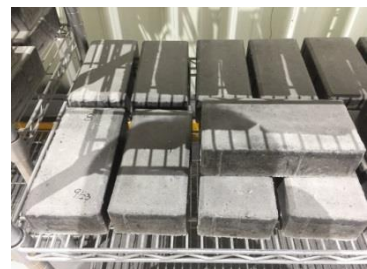
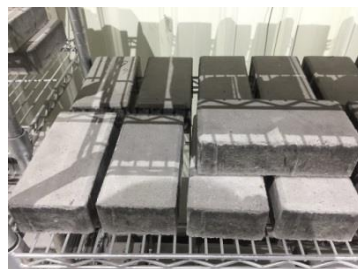


(a) 甫製作完成時



(b) 靜置 24 小時後

圖 12 GP 系漿紙產業無機副產物冷壓型普通磚試壓結果



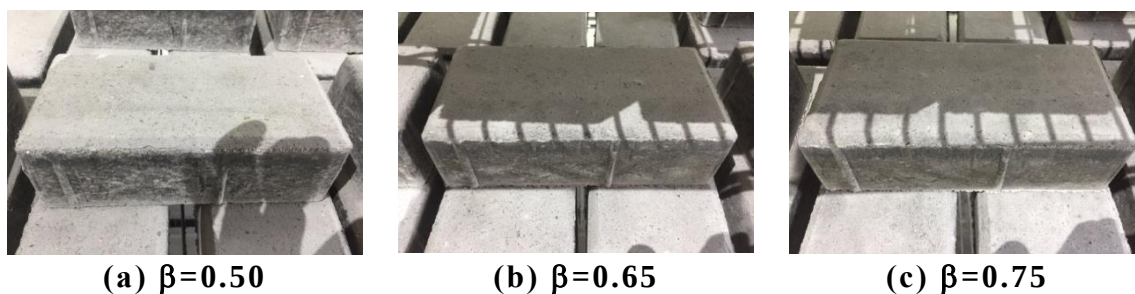


圖 13 NC 系漿紙產業無機副產物冷壓型普通磚試壓結果

(三) 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 14 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[17]，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 14），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[5-6, 10]，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淨零碳排綠建材，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情事發生。

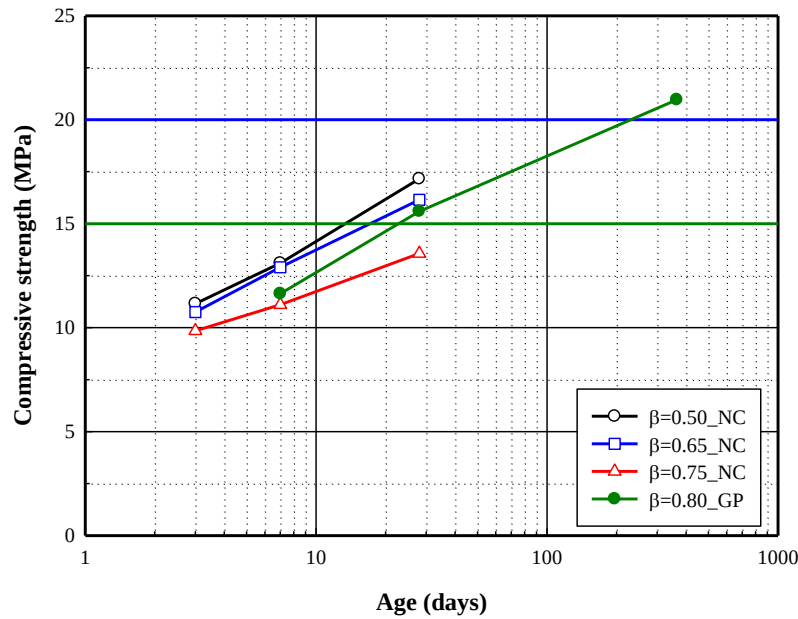


圖 14 GP 系與 NC 系冷壓型普通磚抗壓強度成長關係圖

(四) 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 15 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[5-6, 10]所致。其中 $\beta=0.50$ 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 $\beta=0.75$ 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。

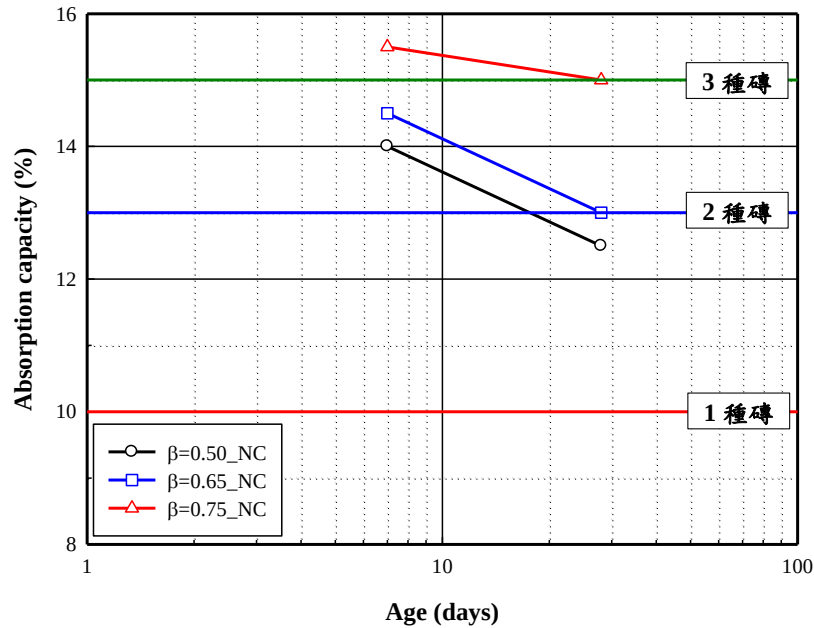


圖 15 NC 系漿紙產業無機副產物冷壓型普通磚吸水率變化關係圖

四、結 論

1. 本研究採用漿紙產業無機副產物所開發的 GP 與 NC 系淨零碳排綠建材，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， $\beta=0.50$ 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， $\beta=0.50$ 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 $\beta=0.75$ 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，故可視為低碳綠建材，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 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），另非水硬性水泥可視為一種「碳捕捉技術」，因此可視為淨零碳排綠建材，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，不僅可達成漿紙產業無機副產物零污染、零掩埋之目標，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。

五、參考文獻

1. 淨零排放路徑及策略總說明，國家發展委員會、行政院環境保護署、經濟部、科技部、交通部、內政部、行政院農業委員會、金融監督管理委員會，111 年 3 月。
2. 中華紙漿股份有限公司 2019 永續報告書，中華紙漿股份有限公司，109 年 6 月。
3. 蔡志達、李昂軒、施承瑋、戴佳雄、羅嚮盛、張祖恩，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，第 237-250 頁，花蓮，109 年 10 月。
4. 蔡志達、李昂軒、施承瑋、戴佳雄、羅嚮盛、張祖恩，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，第 251-264 頁，花蓮，109 年 10 月。
5. Mindess, S. and J. F. Young (1981): Concrete, Englewood Cliffs, NJ.
6. Mehta, P. K. (1986): Concrete-structure, properties and materials, Englewood Cliffs, NJ.
7. Xu H. and Van Deventer J. S. J. (2000): The geopolymerisation of aluminosilicate minerals, International Journal Minerals Process, 59, pp. 247-266.
8. Schmücker M. and Mackenzie K. J. D. (2005): Microstructure of sodium polysialatesiloxo geopolymer, Ceramics International, 31, pp. 433-437.
9. 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, pp. 9396-9405.
10. 黃兆龍，混凝土性質與行為，詹氏書局，2002 年。
 11. Tsai, C. T. (2012): Sintering of Ceramics - New Emerging Techniques: Chapter 5 Cold-Bonding Technique – A New Approach to Recycle Innocuous Construction Residual Soil, Sludge, and Sediment as Coarse Aggregates, InTech, Rijeka, Croatia.
 12. Dowling, N. E. (1993): Mechanical behavior of materials: engineering methods for deformation, fracture, and fatigue, Englewood Cliffs, NJ.
 13. Gibson, R. F. (1994): Principles of composite material mechanics, Detroit, Michigan.
 14. 蔡志達，無機聚合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，第 50-56 頁，109 年。
 15. 何明錦，綠建材解說與評估手冊 2015 年更新版，內政部建築研究所，台北，104 年。
 16. Holitz, R. D. and W. D. Kovacs (1986): *An introduction to geotechnical engineering*, New York.
 17. 李韋皞(鄭大偉指導)，微結構發展對於無機聚合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，台北，106 年。

冷卻水塔回收水測試計畫-以矽品精密中科廠為例

蔡旻杰*、蘇鈺荃**、彭柏頤***、黃任榆****、吳俊湧*****

摘 要

高科技產業由於對產品的精確性及穩定性要求較高，因此於製程設備對於環境要求條件相對也較為嚴苛，如環境溫、濕度等，現今無塵室主要以空調系統控制環境條件為主流，其中冰水主機及冷卻水塔做為供應機台及空調系統冷卻水的主要來源可謂核心設備。而因應工廠全天候運轉冷卻水塔在運轉過程時因冷卻水與空氣進行熱交換致使空氣中的微細粉塵混入水中，而運作過程中冷卻水因蒸發、溢散、噴濺等自然及非自然因素導致水中微細粉塵濃度提高，使矽、鈣、鎂等的礦物質濃縮，如未妥善處置，則可能內壁結垢導致冷卻水的管路流速降低或阻塞使熱交換效率低下；更有甚者可能管路破裂後影響冷媒主機運轉導致空調系統停擺，因此需定時加藥改善水質或直接更換用水。但因冷卻水系統用水量，因應水資源匱乏的現今，精進廠內水回收再利用為如今產業之趨勢。

本回收技術主要著重於有效去除冷卻水中鈣、鎂等水質硬度金屬離子，應用管式膜及逆滲透膜(Reverse Osmosis)連續處理及回收冷卻水，增加廠內水回收率及再利用率。主要方式調整 pH 值，使冷卻水中金屬離子析出形成懸浮顆粒，再經管式膜過濾後，排出濃縮水及過濾產水；過濾產水再經由逆滲透膜處理後，可回收至次級用水或再次使用於冷卻水中。此技術可提升水廠內回收率，達成永續發展之效益。

【關鍵詞】冷卻水塔、水回收、超濾膜、RO 逆滲透

*矽品精密工業股份有限公司 技術副理

**矽品精密工業股份有限公司 資深工程師

***矽品精密工業股份有限公司 技術經理

****矽品精密工業股份有限公司 技術部經理

*****矽品精密工業股份有限公司 副處長

一、前言

環境保護、社會責任、公司治理作為企業 ESG 目標，為符合國際企業永續發展之趨勢，目前國內相關綠色技術發展迅速，以改善污染防治效率及因應國際環保情勢，本公司推行回收水技術於廠務系統中，主要目的為降低用水量及減少汙水排放量，本次探討對象為冷卻水塔用水，與傳統冷卻水塔排放廢水以調整 pH 值後放流排放不同，本公司測試將冷卻水塔排放廢水先以 UF 進行濾除顆粒及懸浮物質，再以 RO 進行水質處理，處理水質可符合廠內次級用水品質。

二、冷卻水塔排水處理現況

1. 影響冷卻水塔水質

冷卻水在工業和商業領域中有著至關重要的作用，對於製冷和維持設備的溫度。然而，冷卻水的水質可能會受到多種物質的影響，這可能導致系統問題和設備故障。下述為主要影響冷卻水水質的物質。固體顆粒：冷卻水中的固體顆粒，如泥沙、鏽跡、塵土和顆粒物，是常見的水質問題來源。固體顆粒物質可能進入冷卻系統，引發淤積、設備故障^[1]。微生物：微生物包括細菌、藻類和真菌，它們可能在水下繁殖，形成生物膜並引發生物腐敗、腐蝕和設備故障^[2]。腐蝕物質：冷卻水中的金屬離子、氧氣和酸鹼物質可能引發金屬設備的腐蝕^[3]。硬水：硬水富含鈣和鎂離子，容易形成石灰垢，可能導致設備堵塞和效率下降^[4]。溶解物質：冷卻水中的氣體溶解物質，如氧氣和浮球，以及溶解的部分和有機物質，都可能影響水的化學性質，導致水的腐蝕增加或結垢堵塞性增加^[5]。化學添加劑：添加到冷卻水的化學物質中，如腐蝕劑、生物殺菌劑等，對用水的品質產生重要影響。這些添加劑用於維持水質和系統運作的穩定性，但仍可能對後續處理程序造成影響。環境條件：外部環境因素，如溫度、濕度等，也可能影響冷卻水的水質，如高溫和高濕度條件有利於微生物生長，氣體可能進入冷卻系統並影響質量。

2. 冷卻水塔水質相關研究

冷卻水塔補充用水來源可為自來水、回收水等，為確保及維持用水相關的品質使冷卻水塔有效運作並減少故障發生機率，目前針對其相關研究

囊括：導電度的管理，維護冷卻水塔水質適當的導電度水平，以確保冷卻水的效能。研究通常評估導電度增加的原因，例如礦物質濃度、溶解固體等，並提供方法來控制導電度^[6]；水質分析，定期確認冷卻水水質狀態，以監測各種參數，如 pH 值、懸浮固體、細菌和礦物質含量等，有助於早期檢測潛在的水質問題^[7]；防止結垢，由於礦物質在設備及管道表面結晶後沉積將影響冷卻效能，相關研究如何預防或處理結晶沉積^[8]；防止腐蝕發生，冷卻水因水質變化可能對設備或管路產生腐蝕作用，相關研究探討如何使用添加劑或材料來保護系統免受水質腐蝕的影響^[9]；設備節能措施，研究重點關注如何提高冷卻系統的能效，以減少能源消耗，例如改進風扇效能、優化水流等^[10]；水質監測技術，實時監控冷卻水的水質，其中涉及新型水質監測技術，如自動校正的導電度量測裝置，以確保即時反應水質問題^[11]。關於冷卻水塔水質研究有助於確保冷卻水塔的可靠運作，減少設備故障，並提高能源效益。它們是工業和製造業中的關鍵領域，以確保生產過程的平穩運行。

3.冷卻水塔水質處理相關技術

為了確保冷卻系統的高效運行，冷卻水塔對於水質品質控制要求至關重要，下述探討冷卻水塔水質處理相關技術。過濾技術是冷卻水處理的關鍵步驟，可以有效冷卻水中的固體顆粒，如泥沙、鏽跡和有機物質，過濾系統或器械種類包括機械過濾器、砂過濾器等設備及技術，具體選擇取決於品質和處理要求^[12]。化學處理是控制冷卻水水質的另一個重要方面，添加如腐蝕氧化劑、生物殺菌劑和螯合劑有助於防止腐蝕、微生物生長和結垢堵塞等問題。不同的化學物質類型和濃度將根據水質和工業需求而訂定使用藥劑的種類及濃度^[13]。生物防治目的是為了減少微生物的生長而採取的措施，從而減少微生物引起的污染和腐蝕，透過生物殺菌劑的投放或生物過濾器的使用來實現目的^[14]。螯合劑的使用可以防止金屬離子生成沉澱以減少腐蝕的風險，藉由螯合劑與金屬離子結合，可降低對設備的損害^[15]。排放控制是必要的管理方式，以便清除冷卻水中的固體和化學廢水，以確保環保法規，排放後的廢水需要經過適當的處理，以確保可以再次使用或安全地排放到環境中^[16]。此外監控和控制冷卻水系統是關鍵，藉由即時監控冷卻水的水質和操作條件，並自動調整化學品的投放量。這有利於確保冷卻系統的穩定運行，同時節省成本和資源^[17]。最後，定期的清潔和維護對於冷卻水塔的有效關鍵。這包括清潔呼叫、運作水池和冷卻塔結構，以達到水垢的累積和維持，確保其系統運作不中斷^[18]。水塔水質處理

是一個複雜的冷卻過程，需要綜合考慮不同的技術和措施，以滿足特定工業製程的要求。透過綜合運用上述技術，可以確保冷卻水系統的高效運行，延長設備的使用壽命並減少環境影響。

三、矽品精密中科廠冷卻水塔回收水技術

1.冷卻水塔回收水系統概述

本廠冷卻水塔改善前處理方式如圖 1，冷卻水塔內部循環水達需更換時，於冷卻系統排放至一般廢水收集槽，調整 pH 後確認水質達排放標準，再予以排放；因為廢水排放對於水資源的利用實屬浪費，故本公司以回收用水為目標，先將冷卻水塔排放水調整 pH 值以利後續水質處理，經由自清過濾器去除大顆粒懸浮物質後再以 UF 單元進行錯流式超過濾流程，降低阻塞之問題並可有效過濾廢水中之鹽類及懸浮雜質等，後續以 RO 單元過濾去除水中離子，降低電導度，RO 產水可作為次級之補水水源。流程設計規劃如圖 2。

2.冷卻水塔回收水系統模廠試運轉結果

本回收水系統於實廠應用前先進行模廠運行，探討其運作過程中可能遭遇之困難及問題，進一步修正實廠設置中各部分單元及系統之參數設定，另外監測各階段中水質變化，驗證系統之有效性。

(1) UF 單元操作變化

UF 單元操作分別觀察前後端進水流量及 UF 壓差之變化，如圖 3 所示，進水流量由圖中可知介於 3.2 ~ 3.5CMH，變化頻度及幅度皆為穩定；而壓差變化穩定於 0.8kg/cm²，由結果可知，確認冷卻排放水經由前端過濾器後已去除大量顆粒懸浮物質，UF 攔截小粒徑懸浮物過程中，無發生堵塞等情形，證明處理程序已驗證穩定及可行。

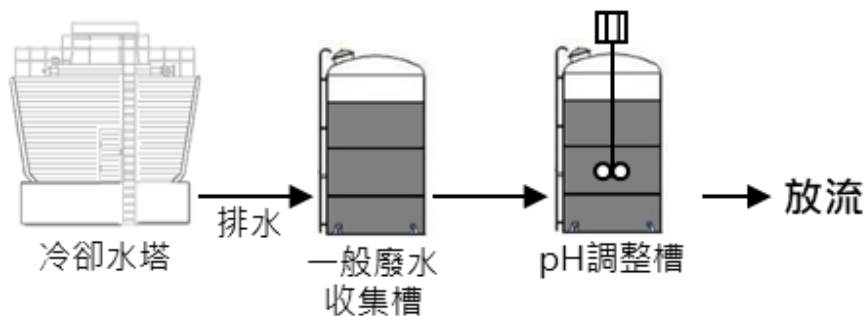


圖 1 冷卻水改善前處理流程圖

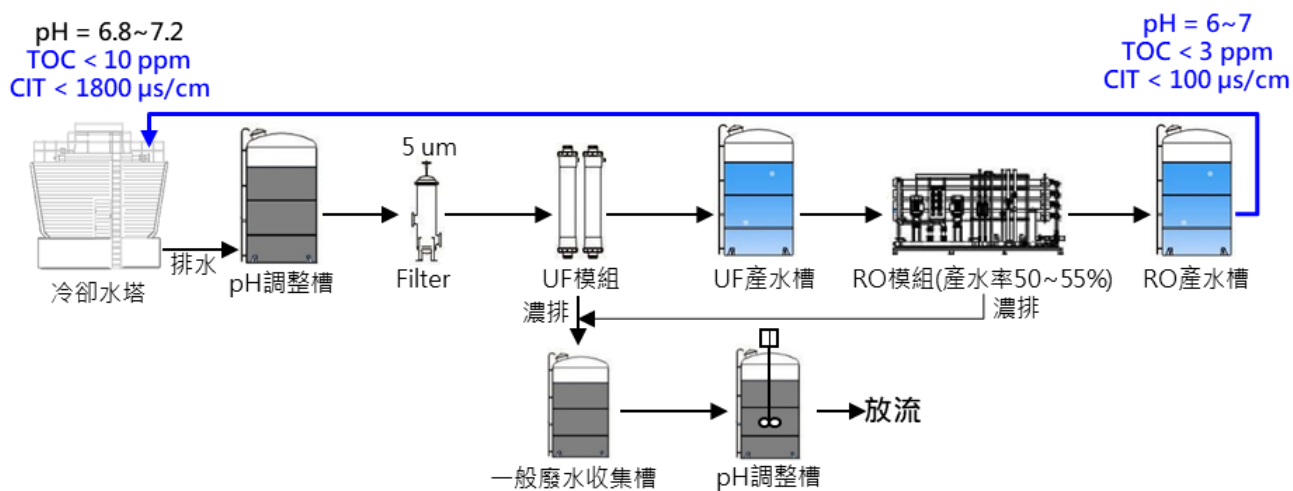


圖 2 冷卻水回收處理流程圖

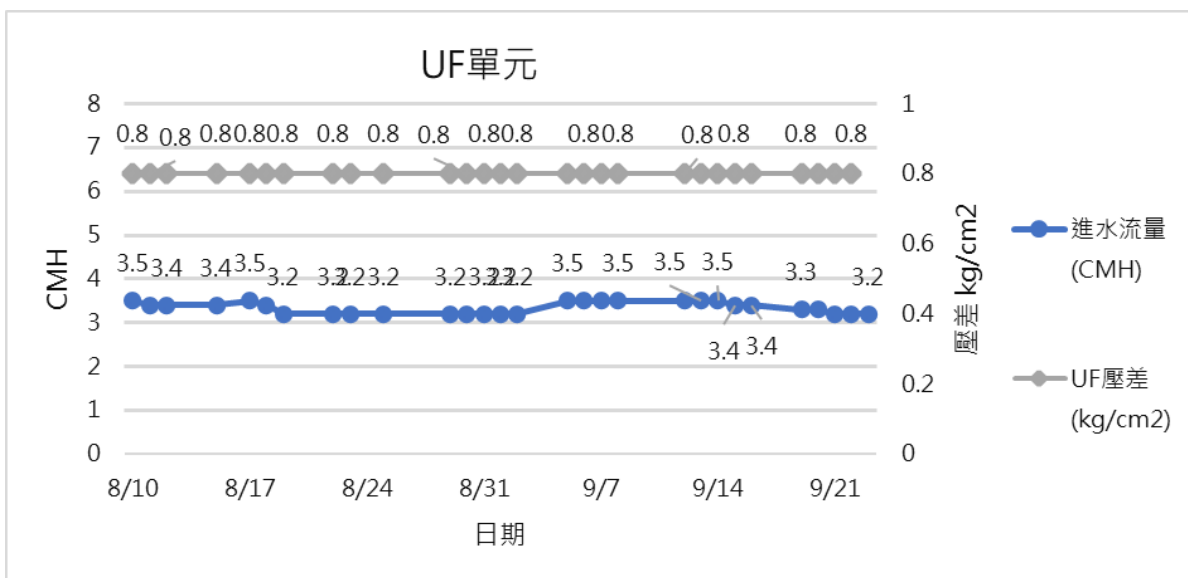


圖 3 UF 單元進水流量及壓差變化

(2) RO 單元操作變化

RO 單元操作著重觀察產水量、進水量及入口壓差之變化，如圖 4 所示，入口壓差變化介於 10.2 ~ 11 kg/cm²；產水量介於 3.5 ~ 5 CMH 之間；進水量介於 8 ~ 9.5 CMH 之間，由結果可知，RO 產水狀況穩定，產水率為 52 ~ 53 %，證明處理程序已驗證穩定及可行。

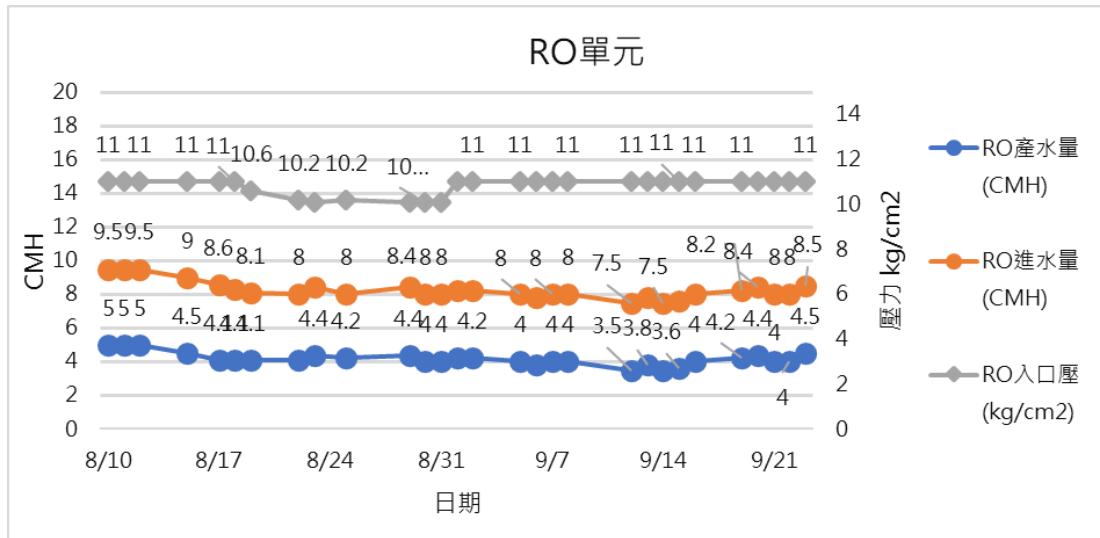


圖 4 RO 單元進、產水流量及壓差變化

(3) 測試設備水質變化

由於處理冷卻水目標為去除其中具有導電度之物質，如鹽類或陰陽離子等，水質變化觀測 UF 入口、RO 產水端的導電度變化及 RO 產水總有機碳(TOC)，數據作圖整理如圖 5，可知導電度去除率約為 94 ~ 99%，已去除絕大部分的導電物質，而低 TOC 的結果也可確認避免生物膜產生於 RO 系統中，整理進水及產水端水質檢測結果如表 1。

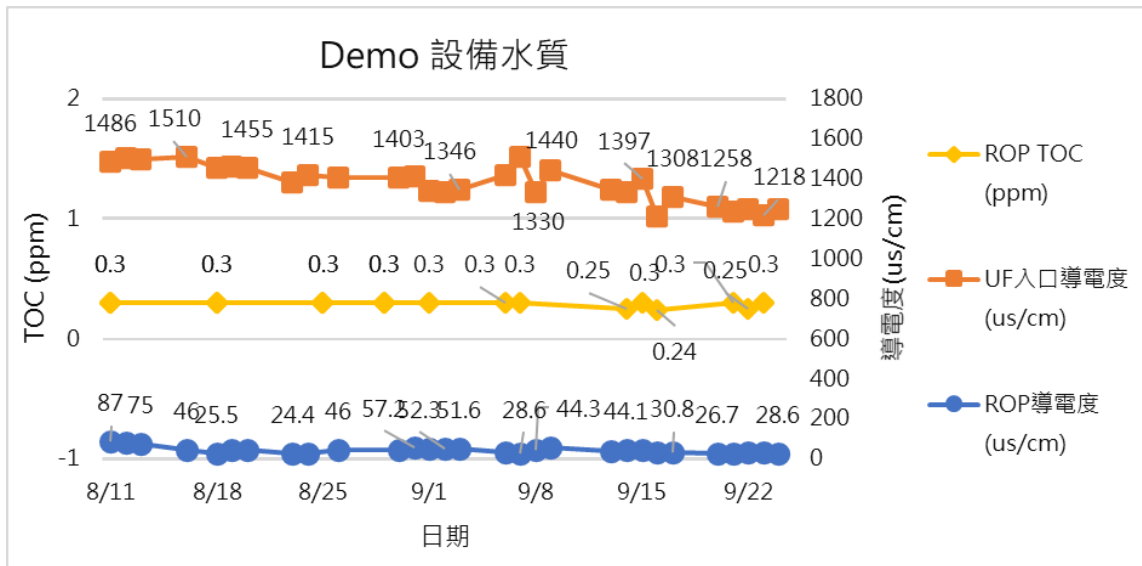


圖 5 測試設備水質變化

表 1 各階段水質檢測結果

測 項	進水端	RO 出水端	去 除 率	水 質 要 求
pH	6.8~7.2	6.8~7.2		6~8
導 電 度 ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1,200~1,500	30~50	> 90%	<100
TOC (ppm)	7~10	0.3	>90%	<3

四、結 論

因應目前高科技產業提倡環境保護、永續經營的趨勢，目前發展相關廠內回收技術及循環經濟為顯學，本回收技術著重於有效分離冷卻水排水中的導電物質，如鹽類等，再應用管式膜及逆滲透膜(Reverse osmosis)連續進水處理，回收原本需要排放的廢水，此技術可提升水回收率，預計提升全公司水回收率 0.4%以上，達到永續發展並創造循環經濟之效益。

五、參考文獻

1. Melidis, P., & Aivazidis, A., Cooling water treatment practices and challenges: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 31, 100880, (2019).
2. Patil, S. S., et al., Review of cooling water system and cooling water treatment. *Materials Today: Proceedings*, 18, 4446-4451, (2019).
3. Liu, Y., et al., A review of cooling water treatment for recirculating cooling systems in power plants and industrial processes. *Chemosphere*, 279, 130634, (2021)..
4. Zin, S. M., et al., A review on cooling water treatment technologies in Malaysian palm oil mills. *Journal of Water Process Engineering*, 40, 101786, (2021).
5. Madireddi, M., & Reddy, K. K., A review on cooling water treatment and purification methods. *International Journal of Advanced Research in*

- Science, Engineering and Technology, 2(6), 251-255, (2015).
6. Chen et al., Water Quality Control Technology for Cooling Towers, 2015.
 7. Collier, Cooling Water Treatment Principles and Practice, 1998.
 8. Liu et al., Scale and Deposit Control in Cooling Water Systems., 2009.
 9. Golab et al., Corrosion Control in Cooling Water Systems., 2011.
 10. Nehorai et al., Energy Efficiency in Cooling Towers., 2017.
 11. Jung et al., Development of an Automatic Water Quality Monitoring System for Cooling Towers., 2020.
 12. Nussinovitch, A., Handbook of Water and Energy Management in Food Processing. Wiley., 2018.
 13. Pal, P., Mukherjee, S., & Mukherjee, S., An overview of cooling water treatment methods. International Journal of ChemTech Research, 7(1), 277-283., 2015.
 14. Coll, L. T., & Olsson, G., Best practices for cooling water management. Chemical Engineering Progress, 103(5), 43-50., 2007.
 15. Kumar, R., Moeed, A., & Jaffery, S. H., Cooling tower water treatment: principles and practice. Journal of Advances in Chemistry, 9(8), 1991-1999., 2015.
 16. Mahdi, A. H., Water treatment plant design for cooling systems in petroleum industries. International Journal of Engineering Research & Technology, 2(2), 1025-1031., 2013.
 17. Rosario, M. M., & Machado, C. P., Water treatment in cooling tower systems: challenges and trends. Environmental Science and Pollution Research, 21(13), 8064-8075., 2014.
 18. Hawkins, R. S., Cooling tower maintenance and water treatment. The Chemical Engineer, 44-47., (2019).

催化氧化活性碳結合臭氧處理乙氧基胺廢水應用

何心平*、簡偉倫**、陳國源***、周珊珊****、黃志彬*****

摘 要

在過去工業有機廢水因佔地限制，無法使用生物處理系統而採用高級氧化程序進行處理，然而高級氧化程序如芬頓法具有高加藥成本、高污泥量等缺點。而異相催化氧化程序為一種新穎的處理程序，本研究之目的為探討一種負載鈦複合金屬氧化物之催化氧化型活性碳 (catalytic oxidative activated carbon, COAC) 之新興材料搭配臭氧，降解處理乙氧基胺(amine ethoxylate, AE)溶液，其測試條件如 pH (5-11)、溫度(25-80°C)、批次反應時間(30-60 min)和臭氧質量流率(2-2.8 g/hr)等處理 AE 溶液 (初始 COD 約 2500 mg/L)，並進一步進行 10 至 15 批次氧化實驗對 COAC 活性影響之探討，發現較高 pH (pH 9 以上)或較高溫度(80°C)時，COAC 進行催化氧化之整體效果越好。

經由上述研究得到最適化之操作參數(分別為 pH 11、批次反應時間 60 min、溫度 80°C、臭氧進流質量流率 2.8 g/hr)實驗得到最高的 COD 去除率為 89%，而 COAC 佔總反應體積比約為 19% (v/v)。最後綜合實驗室實驗得到之較佳的實驗條件，於實廠進行 50 L Pilot 試驗，進行催化氧化處理 AE 廢水(不同批次初始 COD 約 1800-3600 mg/L)，最終在實廠建置處理規模為 80CMD 的廢水處理系統，經試車後仍可維持良好的 COD 去除率，表示 COAC 搭配臭氧應用於處理實廠廢水亦具有相當的操作穩定性和處理效能。

【關鍵詞】催化氧化、鈦觸媒、有機廢水、活性碳、觸媒活性

*國立陽明交通大學 環境工程研究所 碩士

**國立陽明交通大學 環境科技及智慧系統研究中心 工程師

***國立陽明交通大學 環境工程研究所 博士生

***國立陽明交通大學 環境科技及智慧系統研究中心 執行長

****國立陽明交通大學 環境工程研究所 終身講座教授

一、前言

過去研究發現金屬氧化物在水中搭配臭氧進行催化氧化程序，透過一系列反應，可分解臭氧形成一系列的活性氧類物質(reactive oxygen species, ROS)包括氫氧自由基，達到降解難分解有機物之效果，且具有無污泥產生、佔地面積小、無藥劑殘留等優點^[1]。

催化氧化除了透過自由基鏈反應，文獻中亦指出其他不涉及自由基反應降解有機物之途徑。例如：貴金屬或過渡金屬可與水中有機物形成金屬有機配位化合物，進行化學性吸附，在表面與 ROS 反應後，降解形成 CO₂ 或其他中間產物後脫附。另外鈦金屬具廣泛之氧化態變化範圍，尤其在高氧化電位之水中可提升鈦金屬至較高氧化態，最高可至正八價，利用高氧化態金屬氧化物氧化降解吸附於金屬表面之有機物^[2]。

在催化臭氧化相關文獻提到，其應用範圍仍侷限於中低有機物濃度之範疇。當處理高濃度有機廢水時，經常碰到有機物負荷過高導致觸媒毒化，導致降解效率過低等問題。故本研究使用負載複合金屬的活性碳，又稱催化氧化型活性碳-COAC (catalytic oxidative activated carbon)，搭配臭氧去除水中乙氧基胺(amine ethoxylat, AE)為清洗電子元件上多餘焊劑之非離子界面活性劑廢水。故本研究探討以 COAC 搭配臭氧處理 AE 溶液之礦化可行性，並進行操作因子探討，使該技術可以在實場應用於長期處理有機物廢水。研究目的包括以下重點：

- 1.研究操作因子對觸媒活性之影響並尋找最適催化氧化操作條件。
- 2.研究 COAC 長期使用之穩定性

二、研究方法

2.1 催化氧化型活性碳(catalytic oxidative activated carbon, COAC)^[3]

係以椰殼活性碳為基底(圖 1)覆蓋有效成分(Ru-A-B 金屬氧化物)，顆粒大小約 20-40 Mesh，其中 Ru 披覆量僅 0.01%，Ru(III)-Ru(VII)的氧化電位



圖 1 COAC 外觀

2.2 研究架構

在實驗室的研究分為 COAC 物化特性分析及操作因子對 COAC 活性影響兩部分，其中操作因子包括 pH、溫度、臭氧流量、反應時間及觸媒量等。然後依照實驗室最佳操作條件到現場進行模廠驗證，以了解 COAC 的操作穩定性。最後協助工程公司進行工程基本設計，並參與完成實廠建置與試車。

三、材料與方法

3.1 實驗裝置

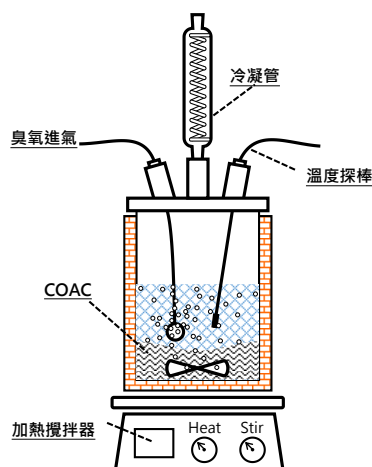


圖 2 實驗裝置

3.2 觸媒重複測試的評估指標

初始 AE 溶液 COD 約為 2500 mg/L，將 5 批次 COAC 催化氧化之 COD 去除率($COD_{r, avg}$)和每批次 COD 活性衰減率($COD_{r, decay}$)分別作為 COAC 催化氧化能力和維持 COAC 活性衰減的指標，並簡稱為 $COD_{r, avg}$ 和 $COD_{r, decay}$ 兩個名詞(計算方式如下)。

計算公式：

$COD_{r, avg} = 5 \text{ 批次平均 } COD \text{ 去除率}$

$$COD_{r, decay} = \frac{\text{線性擬合斜率} \times 100\%}{\text{批次數}}$$

四、結果與討論^[4]

4.1 COAC 特性分析

針對 COAC 的特性利用比表面積分析儀 BET 進行比表面積與孔洞特性分析，結果如表 1，比表面積與孔洞體積有較原始顆粒活性碳載體略為減少。另以感應耦合電漿分析儀 ICP 進行 COAC 負載金屬組成的分析，結果如表 2，主要活性 Ru 成分僅占 0.0062%，B 與 C 則為另兩種不公開元素。

表 1 比表面積與孔洞特性

分析項目	COAC	AC
BET Surface area (m ² /g)	961	1103
Pore volume (cm ³ /g)	0.46	0.54
Pore size (Å)	19.07	19.49

表 2 COAC 負載金屬組成(ICP)

元素	COAC (w/w)
Ru	0.0062%
B	0.0897%
C	0.0562%

4.2 操作因子對 COAC 活性影響

1.COAC 添加量

COAC 添加量分別在 300 mL 水樣添加 10 g、20 g 及 40 g 三種條件下進行五批次重覆實驗，觀察 $COD_{r, avg}$ 和 $COD_{r, decay}$ 變化量。數據顯示(如圖 3)於 20%觸媒(觸媒比重約 0.57)添加量有較佳的 $COD_{r, avg}$ 及最低 $COD_{r, decay}$ 。後續參數實驗因為需要縮短實驗時間，均以 10 g COAC/300 mL 進

行，但 pilot 測試以 20% COAC 填充量作為實驗基準。

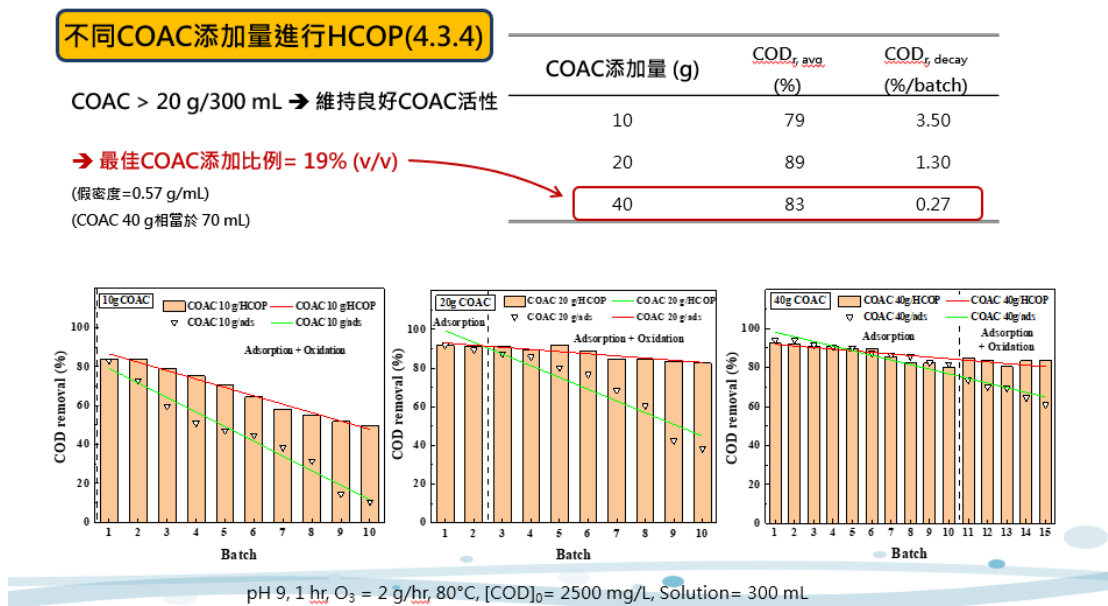
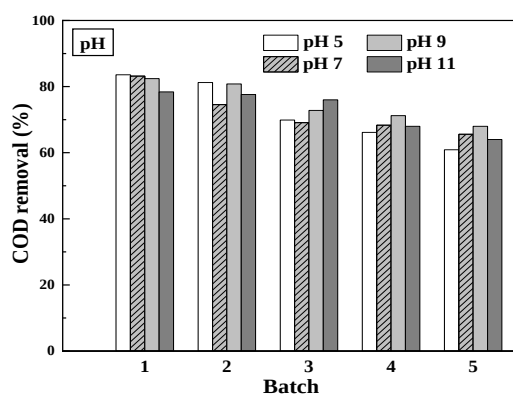


圖 3 不同 COAC 添加量進行 5 批次催化氧化之 COD 去除率變化

2.反應 pH

在不同反應 pH 下進行 5 批次重覆實驗觀察 COD_{r, avg} 和 COD_{r, decay} 變化。結果如圖 4，發現 COD_{r, avg} 於 pH 5-11 約 70~75%，觸媒活性(COD_{r, decay})則於鹼性為佳，並隨 pH 下降而衰減。本階段結果可推測降解水中 AE 之催化氧化機制為在 pH 9 下分解形成氫氧自由基提升鈦氧化物價態至 RuO₄²⁻和 RuO₄⁻，進而降解吸附於 COAC 表面之 AE。



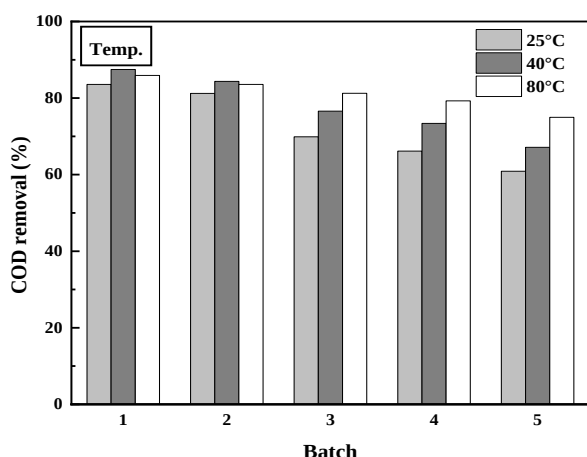
pH	COD _{r, avg}	COD _{r, decay}
5	72%	6.00%
7	72%	5.20%
9	75%	2.60%
11	73%	1.30%

25°C, 10 g COAC/300 mL, 60 min

圖 4 不同反應 pH 下進行 5 批次催化氧化之 COD 去除率變化

3.反應溫度

在不同反應溫度下進行 5 批次重覆實驗觀察 $COD_{r, avg}$ 和 $COD_{r, decay}$ 變化，結果如圖 5，反應溫度=80°C 有最佳的 $COD_{r, avg}$ 和 $COD_{r, decay}$ ，其次依序為 40°C 與 25°C。反應溫度對維持 COAC 活性與污染物降解能力成正相關，且影響顯著。



反應溫度 (°C)	$COD_{r, avg}$	$COD_{r, decay}$
25	72%	6.00%
40	78%	4.10%
80	81%	3.80%

圖 5 不同反應溫度下進行 5 批次催化氧化之 COD 去除率變化

(pH 5、臭氧質量流率=2.8 g/hr、10 g COAC /300 mL、批次反應時間=60 min)

4.各操作參數綜合影響

臭氧質量流率為 2.0 g/h 與 2.8 g/h 下進行 5 批次重覆實驗觀察 $COD_{r, avg}$ 和 $COD_{r, decay}$ 變化。結果如圖 6， $COD_{r, avg}$ 隨臭氧量上升而增加， $COD_{r, decay}$ 則呈遞減，表示臭氧分解產生的氫氧自由基供 COAC 貴金屬氧化物之鈦元素提升氧化態價數以對目標污染物降解去除。反應時間測試係以 30 與 60 分鐘情形下，進行五次批次重覆實驗觀察 $COD_{r, avg}$ 和 $COD_{r, decay}$ 變化。數據顯示(如圖 6)隨時間增加 $COD_{r, avg}$ 亦上升， $COD_{r, decay}$ 則無明顯差異。綜合比較上述各操作參數的 $COD_{r, avg}$ 和 $COD_{r, decay}$ 變化，尤其須優先考慮設法減緩觸媒毒化，可以發現各操作參數的重要性為：pH > 反應溫度 > 臭氧量 > 反應時間。

各操作參數對COAC處理技術的影響-乙氧基胺廢水

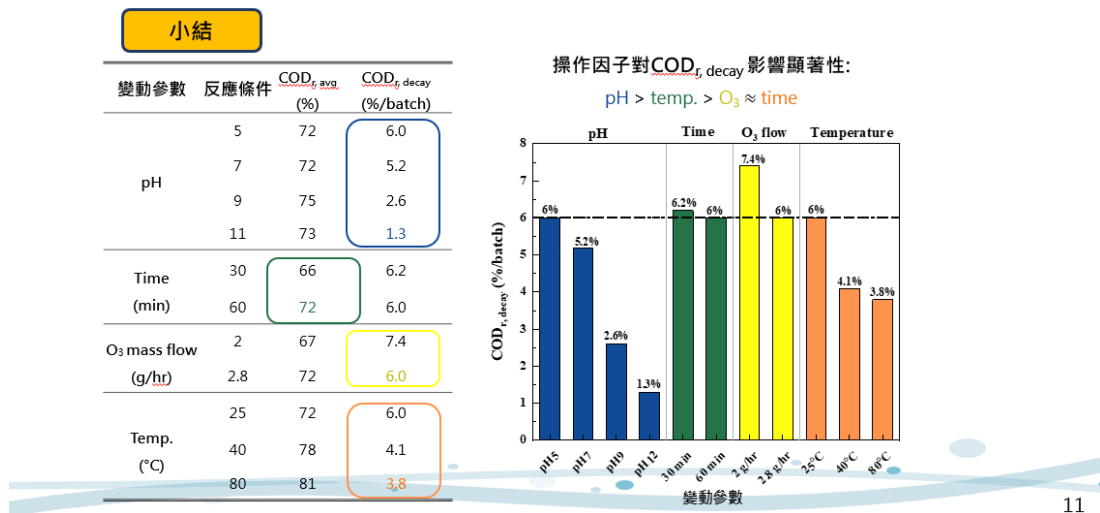


圖 6 各操作參數對 COAC 處理技術的綜合比較

5.pilot 測試

pilot 測試於台灣新竹某電子廠進行，該廠清潔劑廢水主要成分為 AE，測試時以竹科污水處理廠納管標準 COD 500 mg/L 作為指標。現場實驗模組如圖 7，反應槽體積為 50 L，COAC 填充量為 20%，反應 pH 8.6~9.2，臭氧供應量為 20 g/hr，於 80°C 下批次反應 2 小時。實驗結果如表 3，前三批次測試初始 COD = 1824 mg/L 下進行 Pilot 試驗，經三批次反應後 COD 殘餘濃度 < 100 mg/L，維持良好活性，後提高初始 COD 至 3,570 mg/L，反應至第九批次時發現 COAC 殘餘濃度為 258 mg/L，即表示 COAC 應用於 AE 廢水處理佔地小、效能穩定，且處理後不會衍生氨氮和硝酸鹽氮等副產物。



圖 7 實廠個案 COAC 催化氧化先導試驗模組

表 3 個案先導試驗不同 COAC 催化氧化批次反應後 COD 濃度

Batch	1	2	3	4	5	6	7	8
Initial COD (mg/L)	1824	1824	1824	3570	3570	3570	3570	3570
[COD] _{1h} (mg/L)	74	88	96	108	120	135	156	180
[COD] _{2h} (mg/L)	65	65	70	88	96	104	116	148
Batch	9	10	11	12				
Initial COD (mg/L)	3570	2106	2106	3366				
[COD] _{1h} (mg/L)	258	223	194	208				
[COD] _{2h} (mg/L)	232	209	183	201				

6. 實廠案例

經先導試驗後，COAC 成功放大於實廠應用，處理設計水量為 80 m³/d (至今約操作半年)，COD 約 3,000~6,000 mg/L，水溫約 50℃。實廠新設廢水處理流程依序為暫存槽 1 + pH 調整槽 + COAC 反應槽 1 (HRT 1 h) + COAC 反應槽 2 (HRT 1 h) + 玻璃砂過濾 + 暫存槽 2，後端出水 COD 濃度即能符合科學園區納管限值 < 500 mg/L。其中 COAC 反應槽 1 係使用 O₃/COAC 對有機物進行降解，COAC 反應槽 2 則以次氯酸鈉搭配觸媒進一步移除殘餘 COD，後進入既有廢水化混系統，並符合 COD 排放標準。

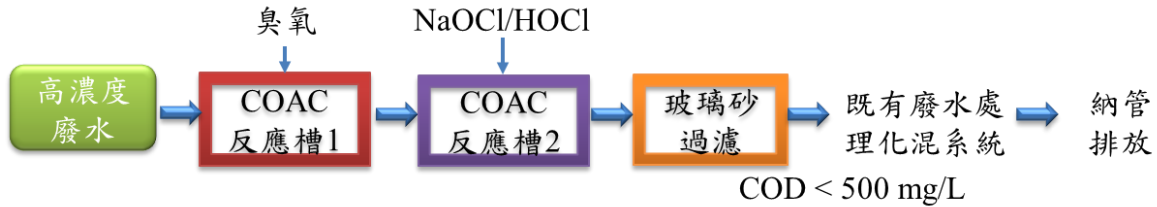


圖 8 實廠廢水 COAC 催化氧化處理流程與照片

五、參考文獻

- 1.Kasprzyk-Hordern, B., Ziółek, M. & Nawrocki, J. (2003) "Catalytic ozonation and methods of enhancing molecular ozone reactions in water treatment." *Applied Catalysis B: Environmental* 46(4): 639-669.
- 2.Povar, I. & Spinu, O. (2016) "Ruthenium redox equilibria 3. Pourbaix diagrams for the systems Ru-H₂O and Ru-Cl--H₂O." *Journal of Electrochemical Science and Engineering* 6(1): 145-153.
- 3.蔡明瀚、簡偉倫、陳國源、周珊珊、黃思蓁、趙淑如、黃志彬、張莉珣、顏旭明(2022)，含氮廢污水綠色處理系統建立，含氮廢污水綠色處理系統建立，工業污染防治，第 155 期
- 4.何心平，應用催化氧化型活性碳結合臭氧處理乙氧基胺水溶液(2021)，國立陽明交通大學環境工程研究所碩士論文。

致 謝

本文承環境部水質保護司 111 及 112 年度「含氮廢污水綠色處理系統示範驗證計畫」支持，特此致謝。

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**洪仁陽***梁德明***

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，COD_t 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 槽體為 161 m³、170 m³，UASB 體積負荷為 4 kgCOD/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 COD_t 濃度大都降解至 200 mg/L 以下，去除率為 88.8~98.4%，BioNET 出流水 COD_t 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排放管制標準 COD_t 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。

【關鍵詞】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

***工業技術研究院材料與化工研究所 正研究員

一、前言

工研院材料與化工研究所(簡稱材化所)所開發的 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，另一 BioNET (生物網膜)廢水高級處理技術乃針對產業廢水含有氮或 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。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。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，初級以細篩後流入調勻池，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。於經過一個多月水質調查結果如圖 1，原廢水 pH 值為 4.0~11，圖 2 為 COD_t 濃度為約 1,000~3,700 mg/L；COD_s 濃度為約 600~3,200 mg/L。

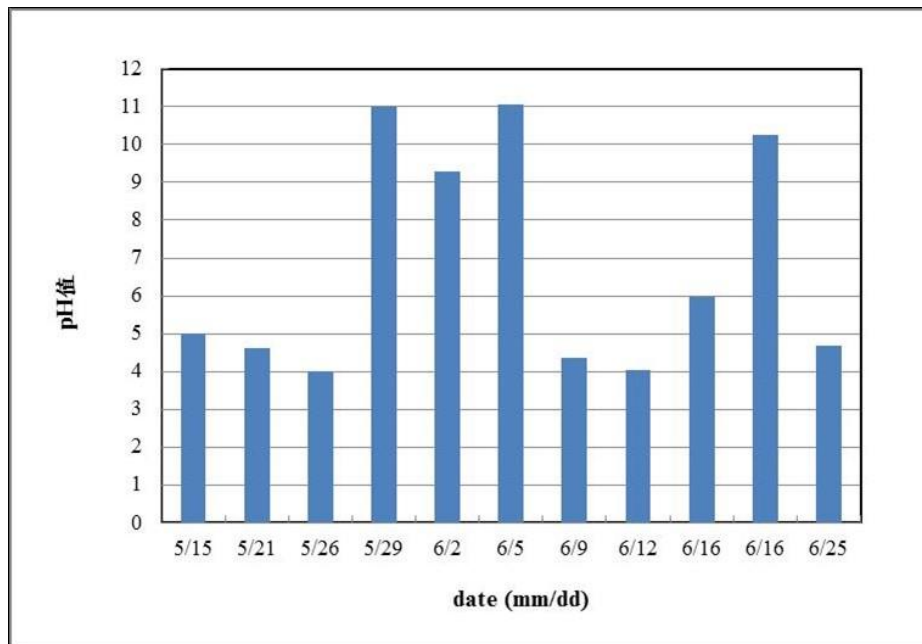


圖 1 原廢水 pH 值

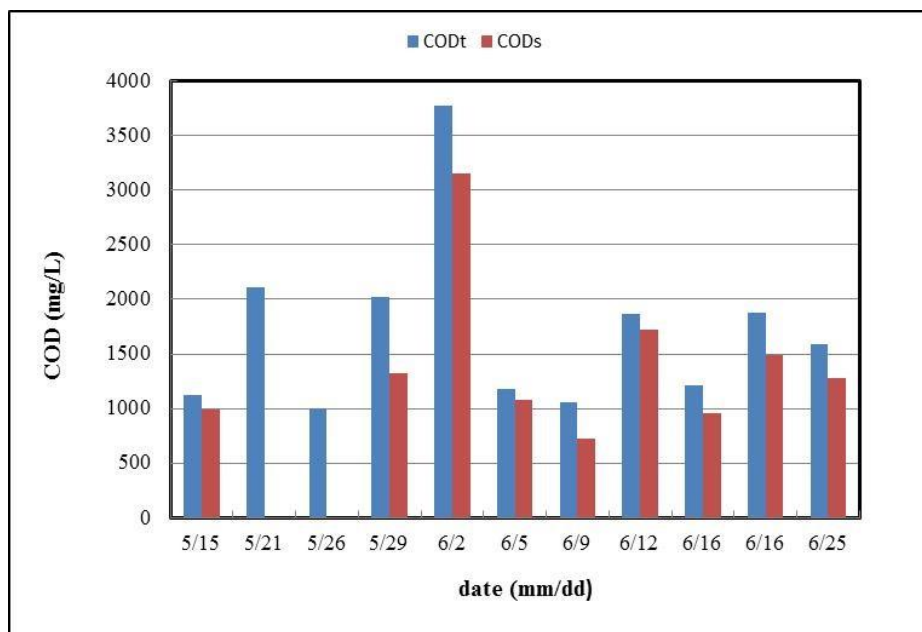


圖 2 原廢水 COD 濃度變化

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物，因此案例廠評估首要目的為先將固體物與懸浮性固體物去除，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、佔地面積小與高 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。

1. 細篩機

細篩機作為前處理單元，主要功能為將進入調勻池之製程廢水，從抽水井泵浦輸送至細篩機，進行篩除製程廢水中所攜帶大量豆類固體物。

2. 調勻池

由於案例場之製程廢水為批式且瞬間大量排出的方式，因此必需將瞬間大量產出的製程廢水水質達到均勻混合，由此調勻池的設計在廢水處理場上是非常關鍵重要的。

3. 加壓浮除(dissolved air flotation system, DAF)

浮除法為固液分離技術的一種，適於分離比重與水接近之懸浮性固體物，如油脂、纖維、活性污泥等。此技術的關鍵即在水中通入或產生大量微細氣泡，使其附著在懸浮顆粒上，造成密度小於水的狀態，利用浮力作用，使懸浮顆粒浮至水面，達到固液分離的目的。

4. 上流式厭氧污泥床(upflow anaerobic sludge bed, UASB)

新型上流式厭氧污泥床(UASB)廢水處理技術，除了硬體技術有穩固的基礎外，在軟體操作控制技術方面，包含處理程序評估、污泥植種、啟動試車、操作策略擬訂等，亦獲致重大突破與進展，對整體工程技術應用，有相當助益。新型 UASB 技術主要由四個部分構成(1)進流水分佈裝置(2)污泥床(3)污泥毯(4)氣固液分離裝置，污泥床式沉澱在處理池底部的一層濃厚污泥顆粒，而污泥毯則為污泥床上方與厭氧反應所產生的氣體混合之懸浮污泥部份，進入處理池內的廢水在污泥床和污泥毯區被厭氧分解，產生的氣體隨其上浮懸浮污泥在氣固液分離區被導引，氣體收集並排出，而懸浮污泥則於水流較穩定的區域沉澱並回到處理池中，處理水則排出池外。

5. 生物網膜活性污泥(BioNET)

生物網膜活性污泥(biological new environmental technology)技術為工研院開發之專利技術，結合 PU 擔體與微生物的組合，具有優勢分解功效之廢水高級處理技術，其適用於工業廢水中難分解物質，有助於特殊選擇性優勢菌群生長之處理技術，於多孔性擔體中可附著大量微生物進而形成硝化菌微生物菌群，進行去除廢水中之 COD 與氨氮，此處為將 UASB 厭氧生物處理單元所殘餘 COD 進行再次降解，並同時俱有可攔截大量 SS 的功能，而且多孔性擔體毋需更換，僅須少量補充，操作簡單且費用低，亦無二次污染問題。

6. 生物沉澱池

將 BioNET 喜氣生物池中老化的污泥，採用每天定時排入沉澱池的方式，減少生物池中累積過量的老化污泥，另可防範系統徒增負荷，降低出流水在異常處理時無法達標問題的發生。

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，高懸浮性固體物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。

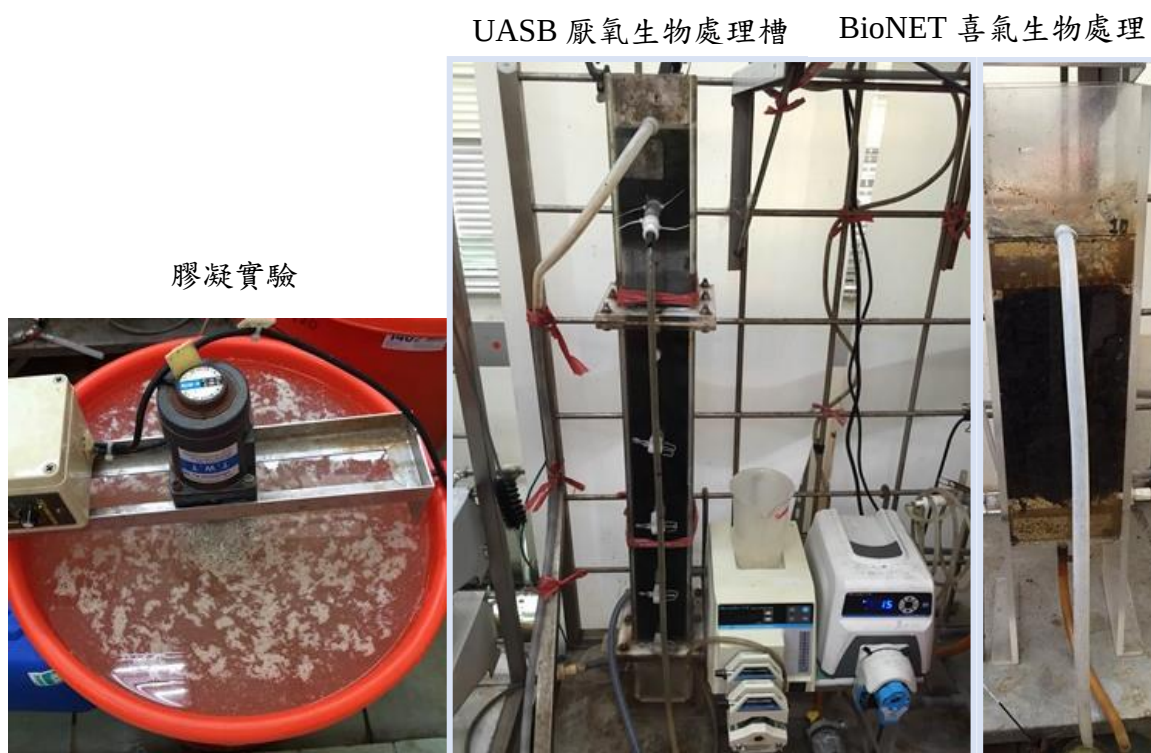


圖 3 實驗室處理程序單元

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 mg/L~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_t 濃度為約 610~3,780 mg/L，出流水 COD 濃度為約 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 kgCOD/m³day 之間變動，去除率為 75~94.3%，如圖 5、圖 6 所示。

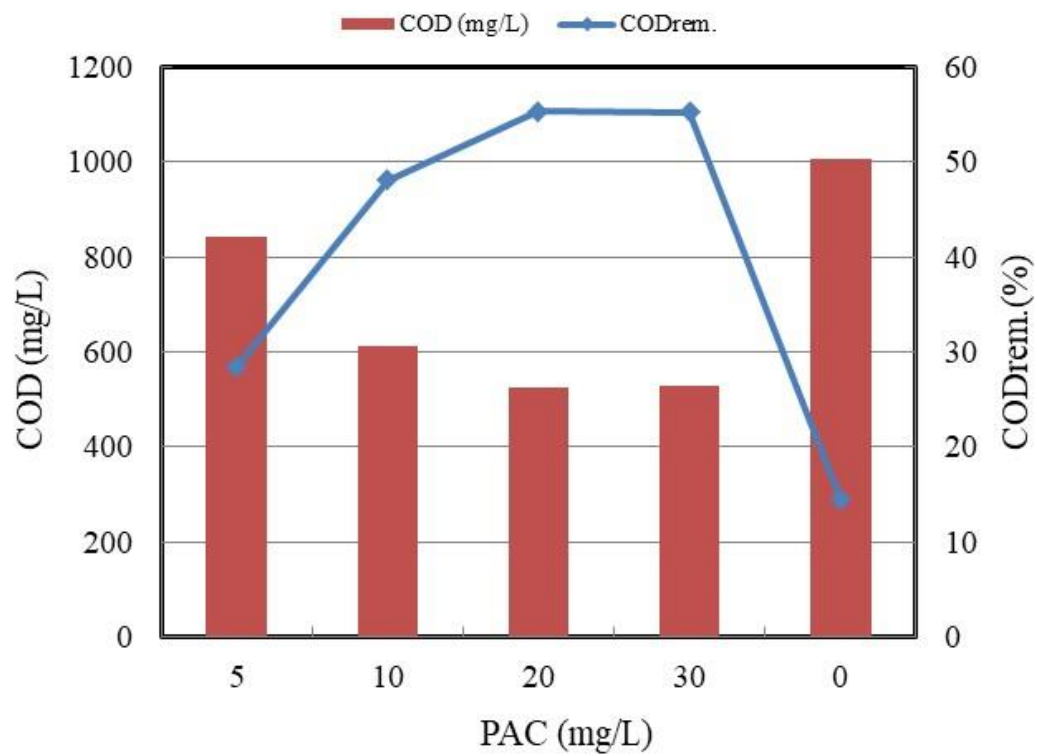


圖 4 化學混凝實驗結果

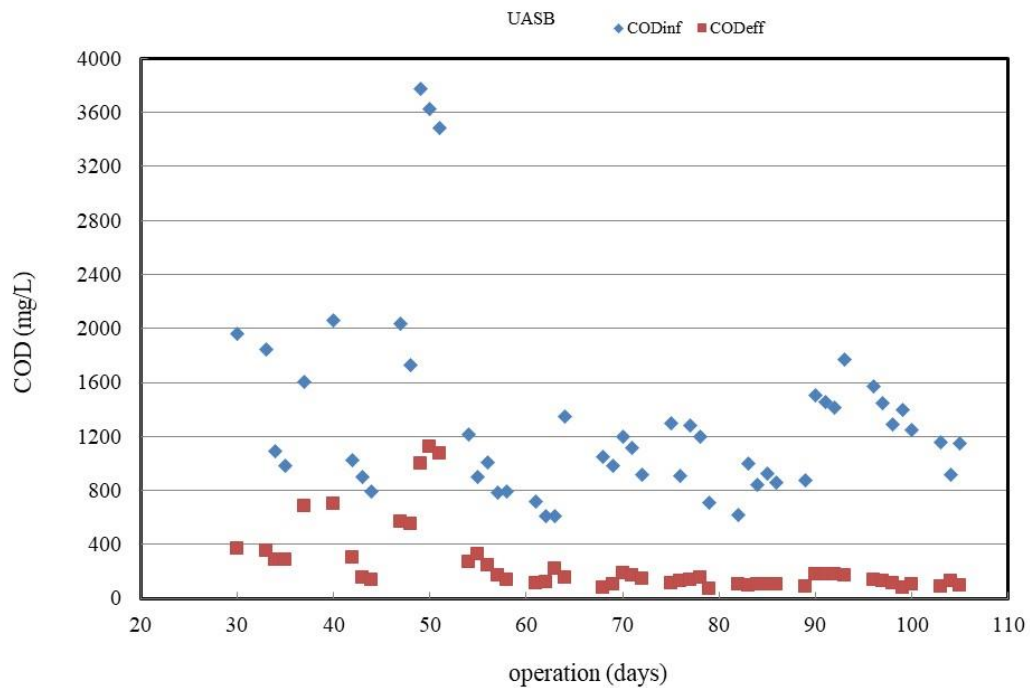


圖 5 實驗室 UASB 進出流水評估結果

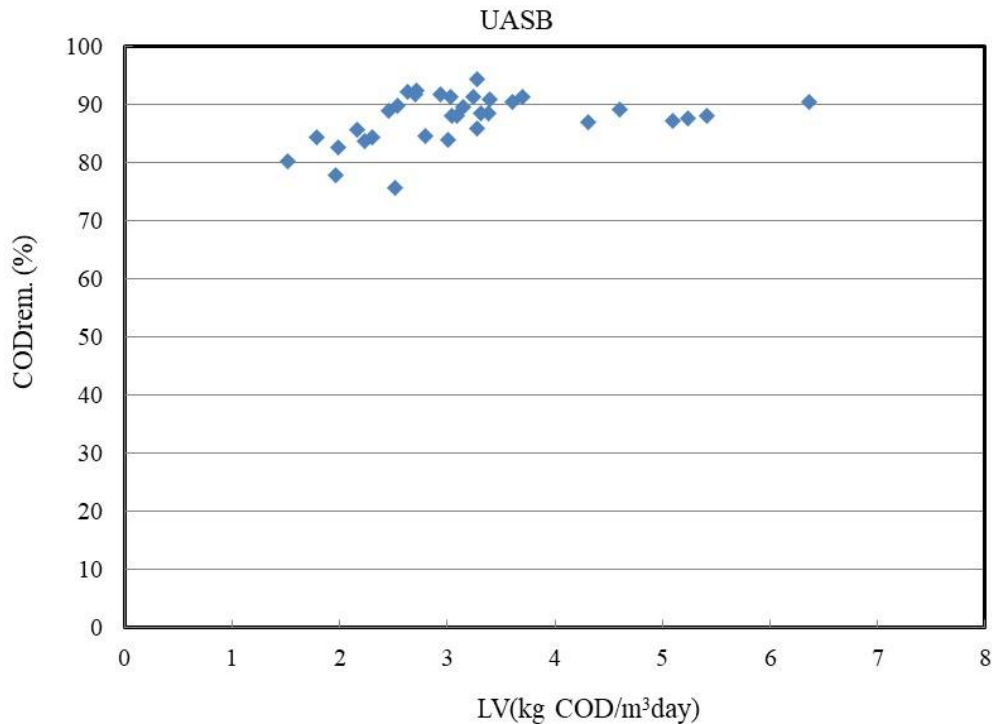


圖 6 實驗室 UASB 體積負荷與 COD 去除率

BioNET 喜氣生物處理單元，規劃三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 9~49 mg/L，且大部分 COD 濃度均於 40 mg/L 以下，去除率為 70%至 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，僅壹次硝酸鹽氮濃度為 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。

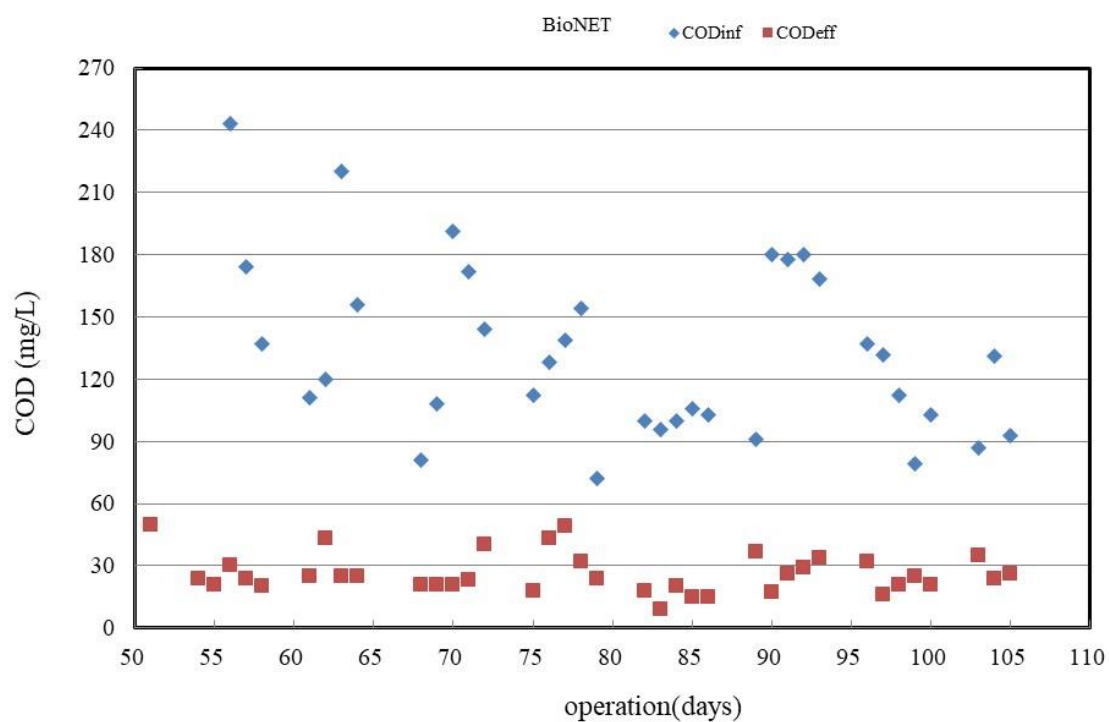


圖 7 實驗室 BioNET 進出流水處理結果

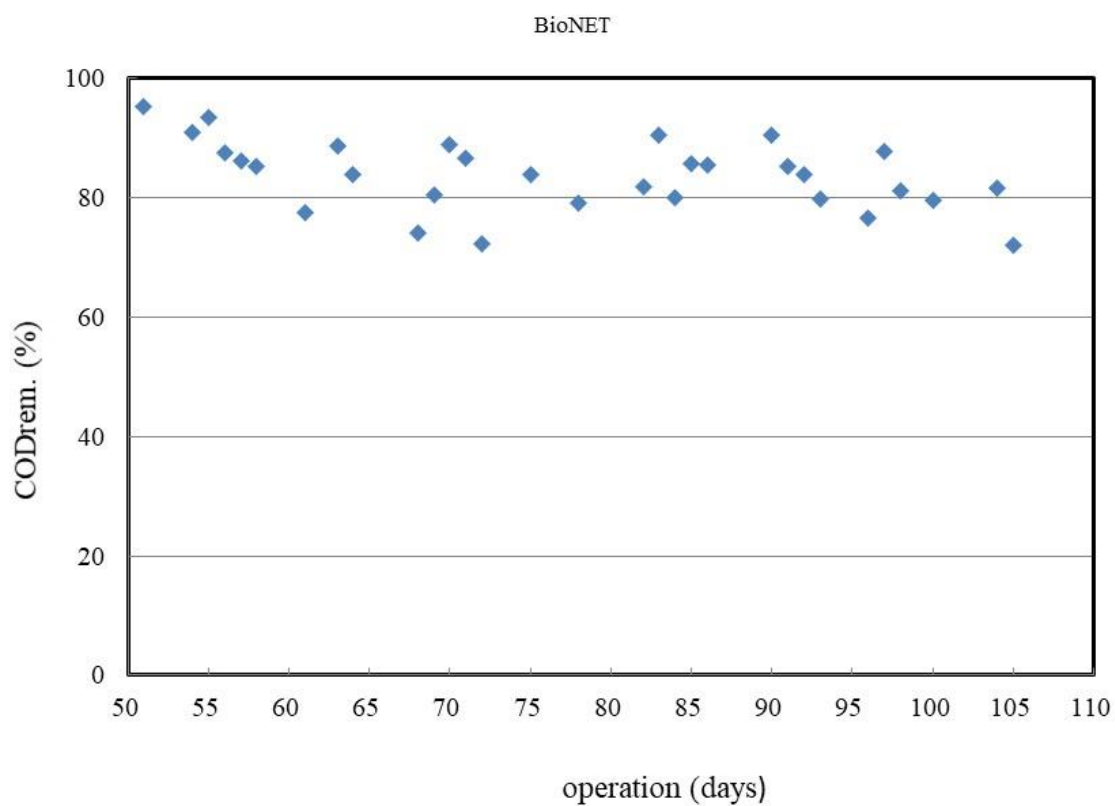


圖 8 實驗室 BioNET-COD 去除率

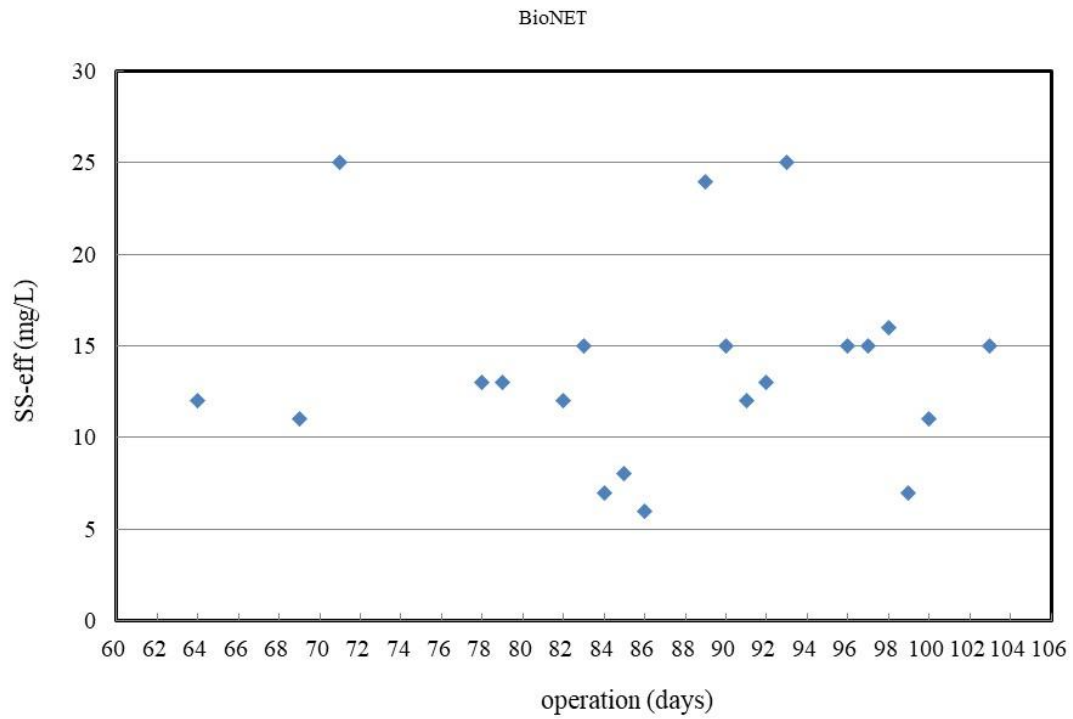


圖 9 實驗室 BioNET 出流水 SS 評估結果

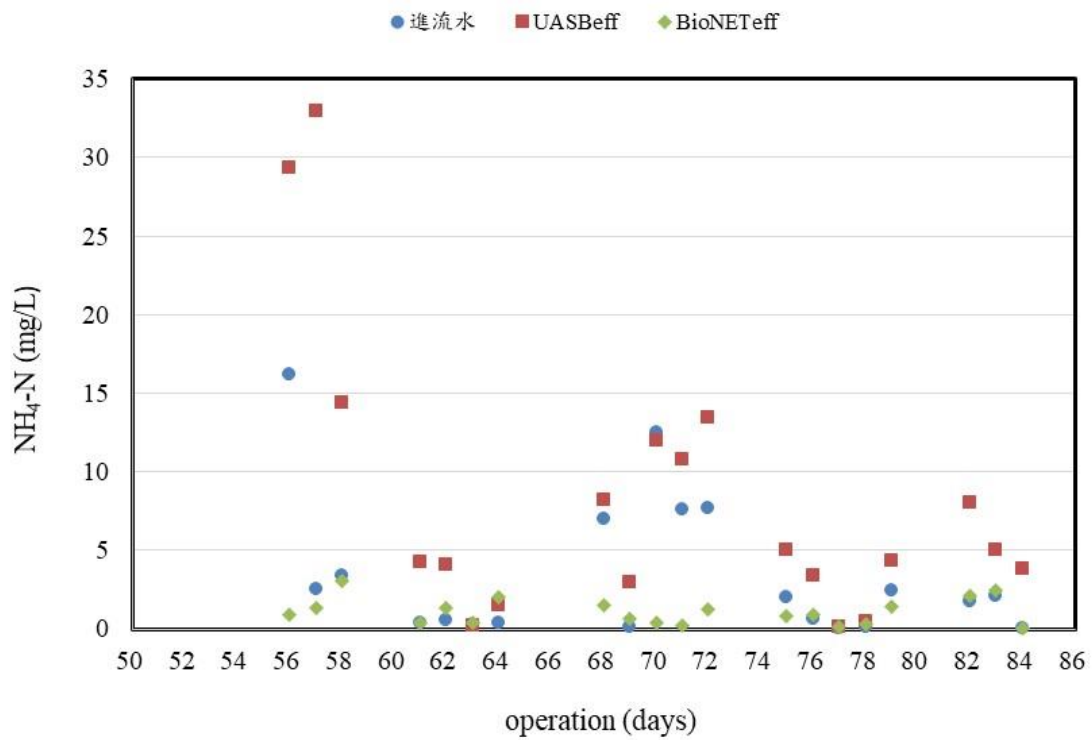


圖 10 實驗室氨氮處理結果

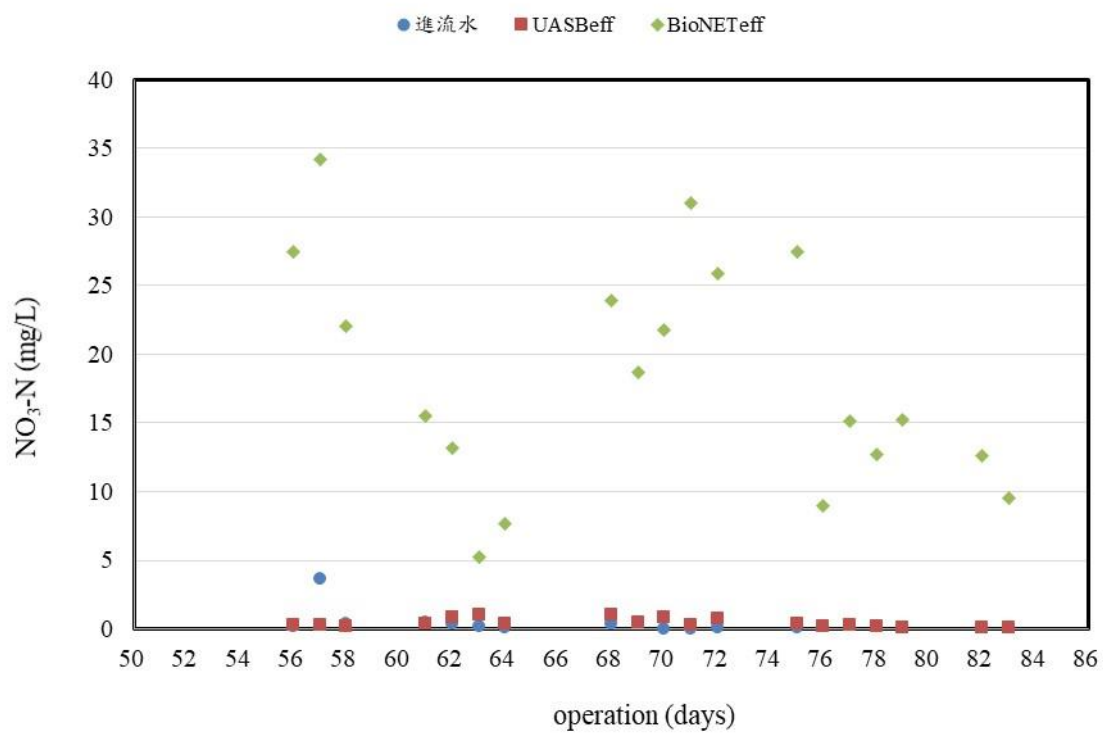


圖 11 實驗室硝酸鹽氮處理結果

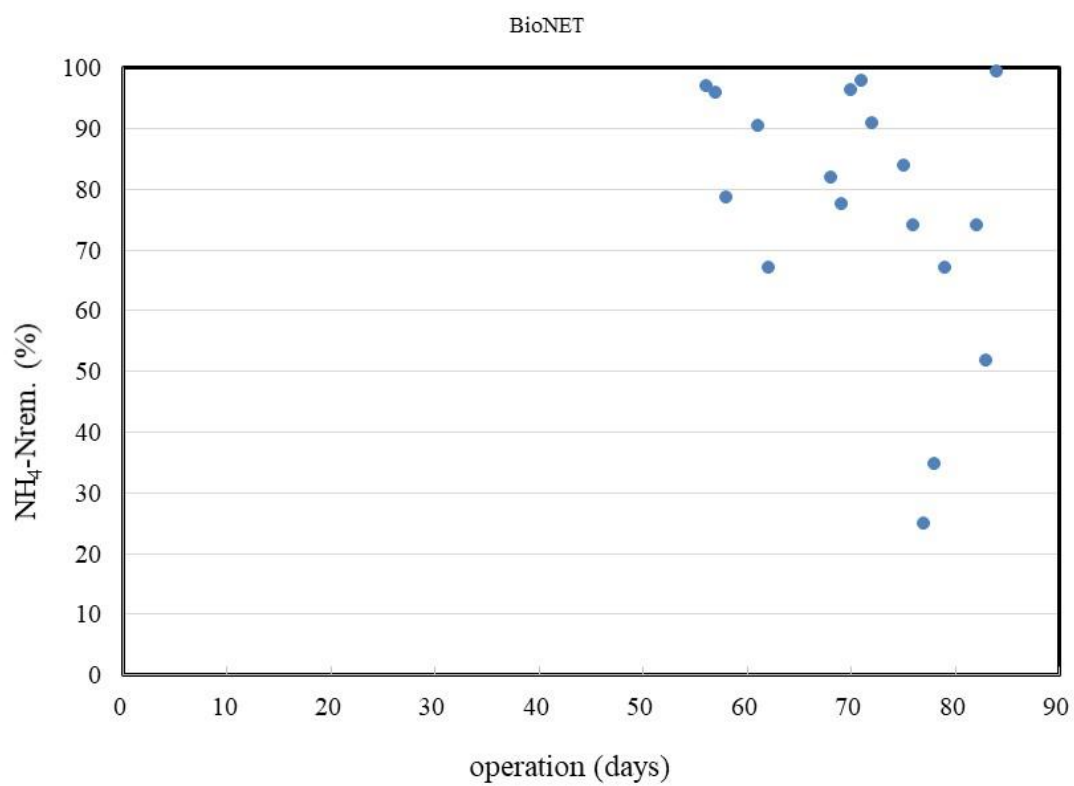


圖 12 BioNET 氨氮去除率

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:由細篩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，所含懸浮性固體物採用添加 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物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

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。

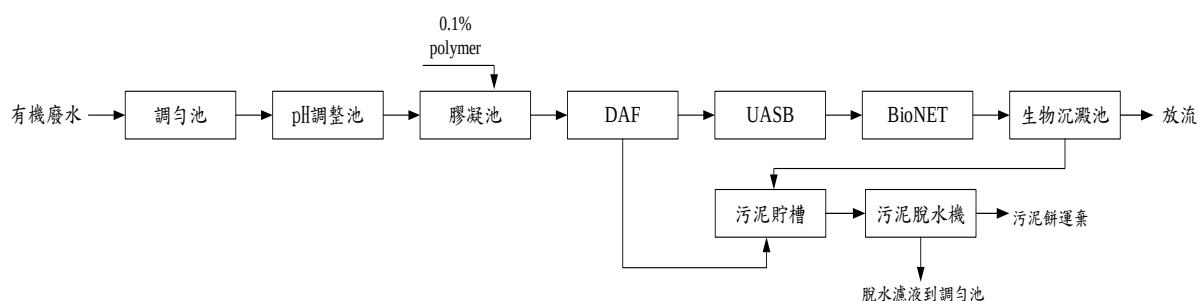


圖 13 廢水場處理流程

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 利用最小佔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物的組合程序。前處理以細篩機篩除固體物再應用加壓浮除法將懸浮性固體物去除，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 3520 mg/L，平均值為 2400 mg/L 經由細篩與 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 2900 mg/L，平均 COD 濃度為 1880 mg/L，於圖 15 瞭解，DAF 進流水 SS 濃度為 233~1820 mg/L，浮除後出流水 SS 濃度為 62~448 mg/L。

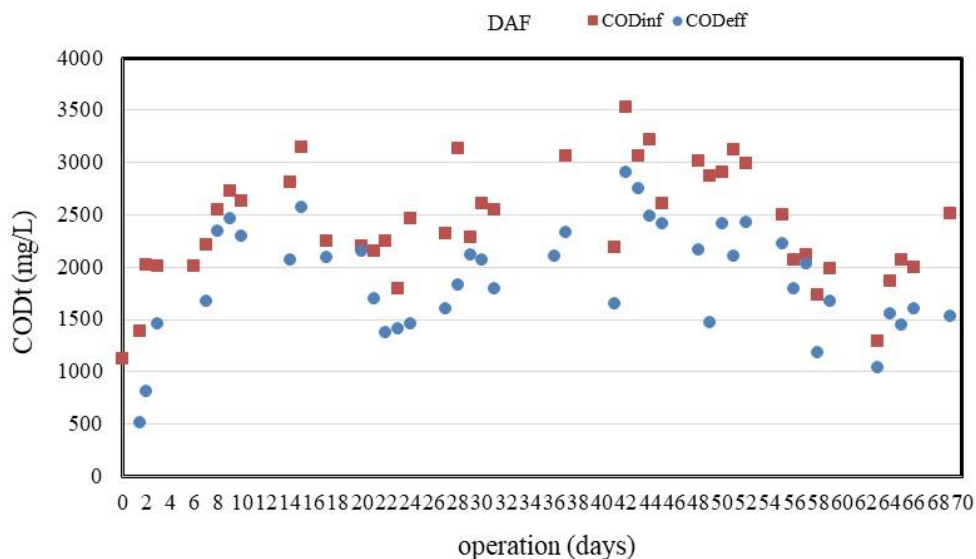


圖 14 實廠 DAF 處理結果

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 1~6 mg/L 去除率為 97.6~99.9%如圖 18 所示，依然遠低於自行排放標準濃度 30 mg/L，放流水氨氮濃度則沒有檢出。

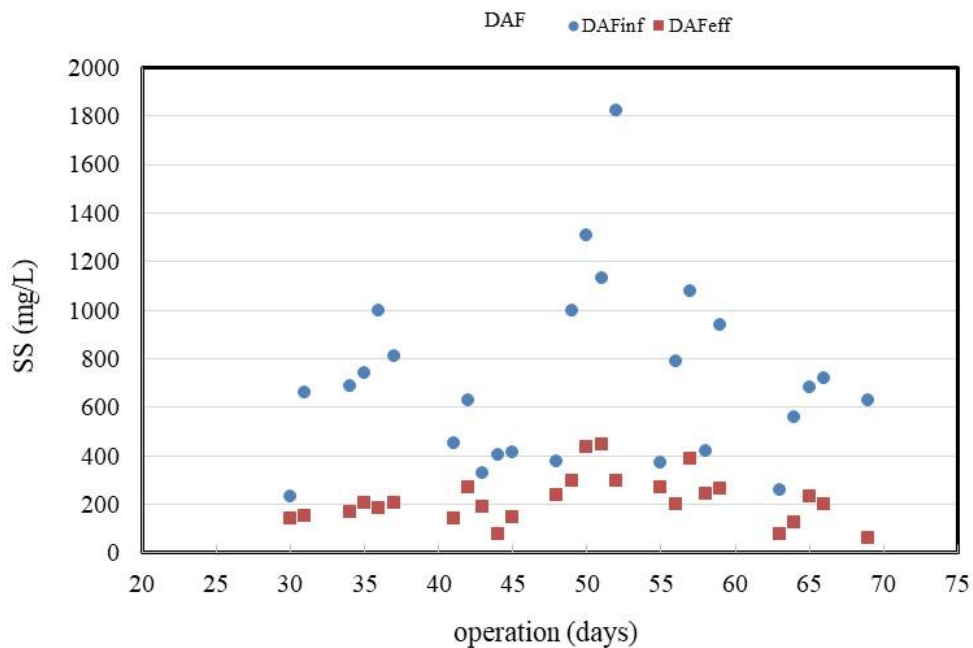


圖 15 實廠 DAF 進出流水 SS 處理結果

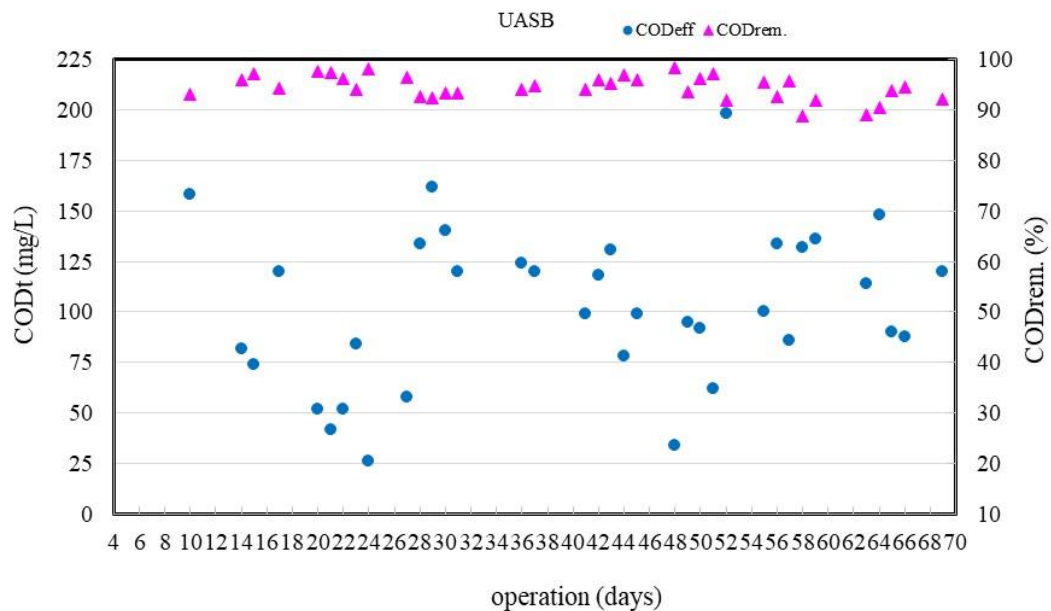


圖 16 實廠 UASB 出流水與 COD 去除率

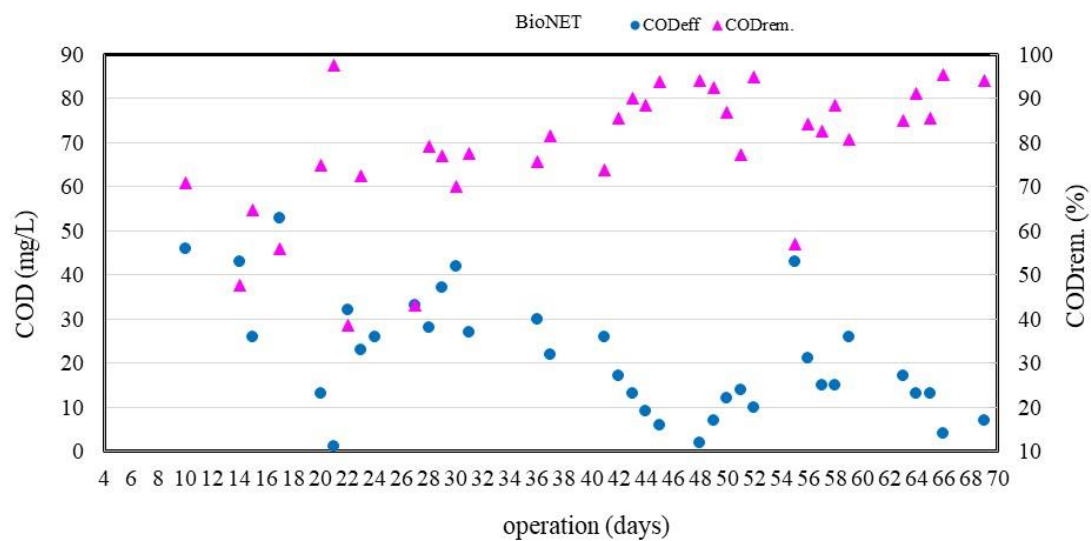


圖 17 實廠 BioNET 處理結果

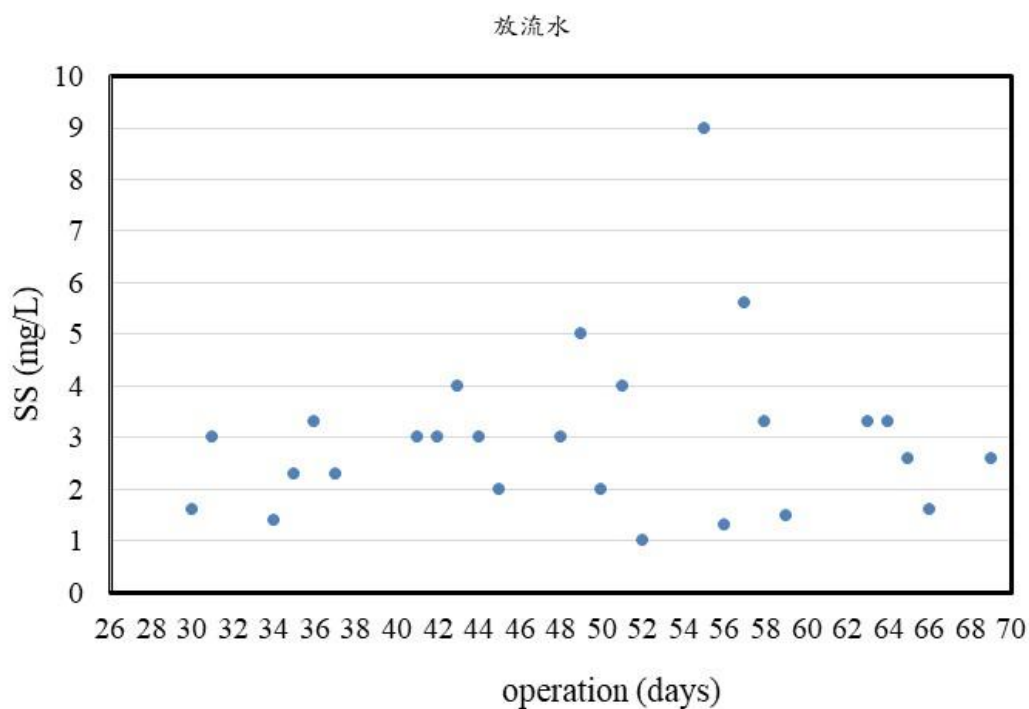


圖 18 實廠放流水 SS 濃度

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 230~1820 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，主要考量的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。

八、參考文獻

- 1.莊順興、鄒文源等(1999)，埤塘水質調查暨整治現地研究，經濟部委託研究計畫報告。
- 2.陳慶華等(1998)，工業技術研究院，化學工業研究所，高性能整合性廢水處理技術開發，經濟部委託研究計畫報告。
- 3.陳致君、洪仁陽、姜榮煌、洪政偉、陳威全、廖啟鐘、鄒文源(2015)，氮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。
- 4.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。
- 5.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。
- 6.Dolfing J. (1987) Granulation in UASB reactors. Wat. Sci. Tech. VOL. 18, No, 12, pp.15 – 25. (1986)
- 7.Harada H, Endo G, Tohya Y, Momonoik, (1988, a), High rate performance and its related characteristics of granulated sludges in UASB reactors treating various Wastewaters. Proceedings of the Fifth International Symposium on anaerobic digestion Bologna, Italy 22 – 26 May.
- 8.Harada H., Endo G., Tohya Y. and Momonoik. (1988, b). High rate Performance and

its related characteristics of granulated sludges in UASB reactors treating various wastewaters. Bologna, Italy, 22~26 May.

9. Wenjing Chen , Yiming Lu , Quan Jin , Miao Zhang , Jun Wu., (2020) "A novel feedforward control strategy for simultaneous nitrification and denitrification (SND) in aerobic granular sludge sequential batch reactor (AGS-SBR) " , *Environ Manage*, 260(12) : 110103
10. Xinping Yang, Shimei Wang, Lixiang Zho., (2012) "Effect of carbon source, C/N ratio, nitrate and dissolved oxygen concentration on nitrite and ammonium production from denitrification process by *Pseudomonas stutzeri* D6" , *Bioresour Technol* , 104 : p 65–72.
11. Ying-Chih Chiua, Li-Ling Leeb,1, Cheng-Nan Changb, Allen C. Chao., (2007) " Control of carbon and ammonium ratio for simultaneous nitrification and denitrification in a sequencing batch bioreactor" , *Internation Biodeterioration & Biodegradation*, 59(1) : p 1–7.

推廣去氮除磷技術應用於建築物污水處理設施之評析

蔡欣庭*、張嘉真*、朱敬平**

摘 要

我國部分河川氮氮及總磷達成率偏低，推估與生活污水污染相關，如何提升建築物污水處理設施之氮磷去除效果，實為要務；為推廣去氮除磷技術應用於建築物污水處理設施，本研究參考日本淨化槽公告處理方法，整合我國管理制度及去氮除磷技術應用於自來水水質水量保護區內建築物污水處理設施之限制，從各層面提出精進作為。於技術面建議採循環式硝化脫硝法及加藥除磷法，制度面得考量氮磷去除功能，由國土管理署修訂「建築物污水處理設施設計技術規範」，或由環境部增訂「預鑄式建築物污水處理設施審定登記範本」，進而帶動業者研發產品與申請審定登記；此外，為使去氮除磷設施設置後能持續正常維運，應搭配改善管理與驗證制度、加強人員教育訓練，或可採用遠端控制設備輔助等配套措施。

為落實建築物污水處理設施之操作維護及水質管理，本項研究提出中長程三階段管理執行方式：(一)現行展延審查優化，將展延審查內容擴增至評價已安裝設施之處理功能(如檢驗水質等)；(二)污水處理技術有效性自我宣告證明，與環境技術驗證結合，評價預鑄式建築物污水處理技術(包含去氮除磷處理技術)及其附屬設備、藥劑、機電之功能表現；(三)技術士定期檢點建築物污水處理設施，透過污水操作維護專業人員培訓及技能檢定，由合格技術士定期維護既設建築物污水處理設施之運作有效性。期以三階段管理逐步提升建築物污水處理設施管理細緻度，提升環境品質。

【關鍵詞】

建築物污水處理設施、污水去氮除磷技術、環境管理制度、自來水水質水量保護區

*財團法人中興工程顧問社環境工程研究中心 副研究員

**財團法人中興工程顧問社環境工程研究中心 副主任

一、前言

建築物污水處理設施自民國 80 年起納入水污染防治法管理，並針對自來水水質水量保護區訂有氨氮及正磷酸鹽之放流水標準。而建築物污水處理設施設計、配置、施工、使用與安全衛生管理等事項應符合內政部國土管理署「建築物污水處理設施設計技術規範」，依建造地點分為「現場構築式」及「預鑄式」兩種類型；其中預鑄式設施應經中央環保主管機關(環境部)會同中央主管建築機關(內政部)審核認可並審定登記後，始得上市。截至 112 年 10 月底，已審定登記之預鑄式建築物污水處理設施計有 39 個廠牌，289 個型號，惟經查各型號均未具備去除氮磷功能，不利於自來水水質水量保護區內建築物設置選用。

有鑑於此，本研究蒐集國內外有關去除氮磷污水處理設施之案例作法，從制度面、技術面及實務面等面向，探討去氮除磷應用於我國建築物污水處理設施之問題點、適用條件、應用限制等，並研析可行技術與替代方案，評估新增適用於氮、磷排放標準(氨氮 10 mg/L、正磷酸鹽(以三價磷酸根計算)4.0 mg/L)規定之設計，期能妥善處理自來水水質水量保護區內居民所排放之生活污水，俾利保護區內水污染防治工作之推動。

二、國內建築物污水處理設施管理現況

建築物污水之主要來源為廚房、浴室洗滌水等生活雜排水及廁所排水，其中生活雜排水在民國 80 年水污染防治法尚未修訂前，並無相關法令加以管制，隨著生活污水問題日漸嚴重，環境部於民國 80 年 5 月 6 日修訂水污染防治法，規定事業、污水下水道或建築物污水處理設施排放之廢(污)水應符合放流水標準，並於同年 11 月 29 日將建築物污水處理設施之排放標準納入放流水標準中。

又依據「建築技術規則」建築設計施工編第 49 條規定：「沖洗式廁所排水、生活雜排水除依下水道法令排洩至污水下水道系統或集中處理場者外，應設置污水處理設施」。表示新設建築物若其排水未能納入公共污水下水道處理系統或未符合下水道法施行細則第 4 條中須建設專用下水道者，皆須強制要求設置建築物污水處理設施。

此外，依據建築物污水處理設施設計技術規範 1.4 類型說明，建築物污水處理設施可分為現場構築者及預鑄式者，所謂現場構築者係指污水處理設

施為根據工程設計圖說，於建築物現場施工構築建造完成者；預鑄式係指污水處理設施為於製造工廠製造裝配完成，另於建築物之適當位置場所施工安裝者。而依據建築技術規則建築設備編第 40 條規定，污水處理設施為現場構築者，其技術規範由中央主管建築機關另定之；為預鑄式者，應經中央環境保護主管機關會同中央主管建築機關審核認可；水污染防治法第 25 條第 3 項亦規定，建築物污水處理設施屬預鑄式者，其製造、審定、登記及查驗管理辦法，由中央主管機關會同相關目的事業主管機關定之。據此，內政部國土管理署訂定建築物污水處理設施設計技術規範，規定現場構築者之設計、配置、施工、使用與安全衛生管理等事項；而環境部則訂定預鑄式建築物污水處理設施管理辦法，規定預鑄式污水處理設施之製造、審定、登記及查驗相關規定。

從上述之法規可得知，目前建築物污水處理設施之管制法令多屬「中央命令」層級(如圖 1 所示)，法令位階較低，且從建築物污水處理設施設計製造、施工安裝、操作維護之各階段過程主管法令，分散於環保、建築及下水道主管機關，除各條文可能有競合之虞，若設置或施工紀錄不明確且三方所得資訊並未連通，可能造成後續之維護管理問題，導致建築物污水處理設施之效能不彰。如原登記專用污水下水道或建築物污水處理設施處理污水之戶數，於接入公共污水下水道後，應於前兩者中註銷登記，惟此三類設施各由不同單位管理，加上建築物污水處理設施無公開列管資訊，且其設置運作無須取得許可證(文件)，因此建築物污水處理設施設置核可流程不須經過環保主管機關，導致環保主管機關難以掌握確切設置名單及戶數。

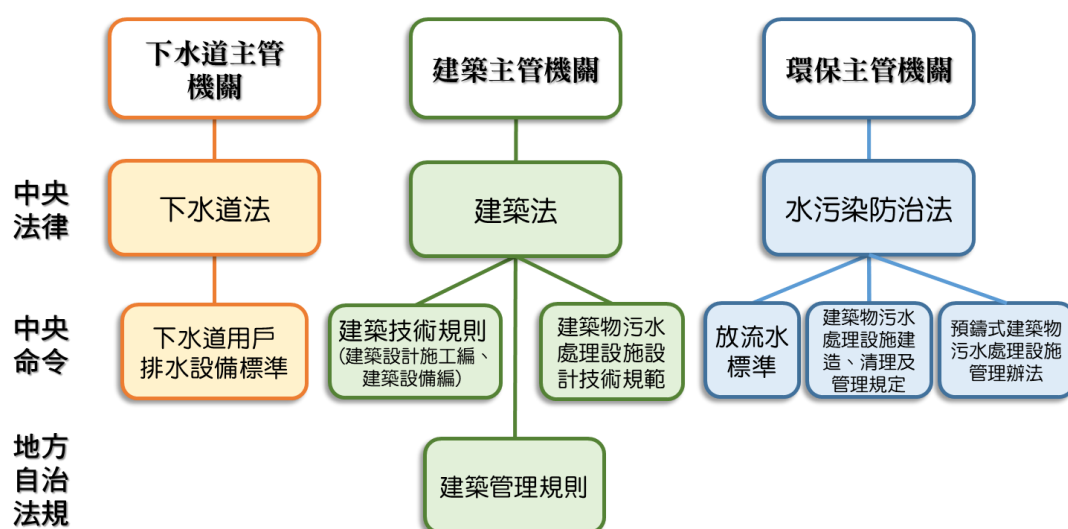


圖 1 現行建築物污水處理設施管理架構及法令

三、預鑄式建築物污水處理設施現況問題評析與對策方向

建築物污水處理設施包括現場構築型及預鑄型兩種，建築物得視需要選擇設置不同類型之污水處理設施。預鑄式建築物污水處理設施顧名思義係為在工廠預先組裝好，經由運輸送抵現場經簡易施工即可使用，且相關機械設計為自動化，無須人為操作，只須定期保養即能長期處理生活污水。現場構築式污水處理設施為根據工程設計圖說，於建築物現場施工構築建造完成，並須由環境工程技師簽證後，始得使用。預鑄式建築物污水處理設施採規格商品式銷售，易於安裝，且經環境部審定者不用再技師簽證，故相比於現場構築式污水處理設施具有更廣泛的使用率。

依據內政部國土管理署建築物污水處理設施設計技術規範，建築物污水處理設施的污水處理程序共有 8 種，分別為旋轉生物圓盤法、接觸曝氣法、延長曝氣法、批次活性污泥法、標準活性污泥法、滴濾池法、分離接觸曝氣法，以及厭氣濾床接觸曝氣法(各處理程序彙整詳表 1)。截至民國 112 年 10 月 31 日，市面上通過環境部審定登記之預鑄式建築物污水處理設施共有 289 個型號，處理水量範圍為 0.9~75 CMD，處理方法以厭氣濾床接觸曝氣法(199 個)為主，另尚有接觸曝氣法(89 個)、分離接觸曝氣法(1 個)；材質方面，以玻璃纖維(FRP)為大宗(196 個)，屬鋼筋混凝土(RC)材質者較少(93 個)。

儘管現行已有相關法令規範預鑄式建築物污水處理設施，也有相關的技術規範與審定登記範本，但制度與技術面仍有待精進之處，茲將目前預鑄式建築物污水處理設施應用現況與問題評析如後。

表 1 建築物污水處理設施設計技術規範之污水處理方式

項次	污水處理方式	處理規模 (CMD)	處理單元
1	旋轉生物圓盤法	10-50	初沉槽、攔污柵、沉砂池、流量調整槽、旋轉生物圓盤槽、沉澱槽、消毒槽、放流槽、污泥濃縮貯留槽、污泥濃縮槽、污泥貯留槽
		51-250	
		>250	
2	接觸曝氣法	10-50	初沉槽、攔污柵、沉砂池、流量調整槽、接觸曝氣槽、沉澱槽、消毒槽、放流槽、污泥濃縮貯留槽、污泥濃縮槽、污泥貯留槽
		51-250	
3	延長曝氣法	50-250	攔污柵、沉砂池、流量調整槽、曝

項次	污水處理方式	處理規模 (CMD)	處理單元
		>250	氣槽、沉澱槽、消毒槽、放流槽、 污泥濃縮貯留槽、污泥濃縮槽、污 泥貯留槽
4	批次活性污泥法	10-50	初沉槽、攔污柵、沉砂池、流量調 整槽、批次式活性污泥反應槽、消 毒槽、放流槽、污泥濃縮貯留槽、 污泥濃縮槽、污泥貯留槽
		51-250	
		>250	
5	標準活性污泥法	>1,000	攔污柵、沉砂池、流量調整槽、活 性污泥曝氣槽、沉澱槽、消毒槽、 放流槽、污泥濃縮槽、污泥貯留槽
6	滴濾池法	10-50	初沉槽、集水槽、攔污柵、沉砂池、 流量調整槽、滴濾塔、分水裝置、 沉澱槽、消毒槽、放流槽、污泥濃 縮貯留槽、污泥濃縮槽及污泥貯留 槽
		51-250	
7	分離接觸曝氣法	<10	初沉槽、接觸曝氣槽、沉澱槽、消 毒槽、放流槽
8	厭氣濾床接觸曝氣 法	<10	厭氣濾床槽、接觸曝氣槽、沉澱 槽、消毒槽、放流槽

(一)管理權責單位分散

目前建築物污水處理設施之管制法令多屬「中央命令」層級(詳圖 1)，法令位階較低，且從建築物污水處理設施設計製造、施工安裝、操作維護之各階段過程主管法令，分散於環保、建築及下水道主管機關，若設置或施工紀錄不明確且三方所得資訊並未連通，易導致各主管機關間資訊不流通，恐造成後續之管理問題。

我國建築物污水處理設施於環保主管機關而言，係以水污染防治法為主管法令，惟水污法本身屬管制法令，並無工程建設及使用管理等相關規定，為提升預鑄式建築物污水處理設施之處理效能及增加管理強度，可參酌我國下水道法或日本淨化槽法等「建設」相關法令，另定專法管理國內預鑄式建築物污水處理設施，有助於明確預鑄式建築物污水處理設施從設計施工、使用管理到監督輔導各階段應辦理事項，也可增訂罰則以嚇阻不法情事，並仿效下水道法或淨化槽法增加相關從業人員之資格條件，以維持建築物污水處理設施施工或管理品質，同時增加工作機會。此外訂定專法除提高預鑄式建築物污水處理設施處理效率，確保其正常營運外，亦可提升了現有建築物污水處理設施在水污法規體系裡的地位。

然而訂定新法勢必耗費大量人力物力與時間，同時其繁瑣可能使整個過程曠日廢時，難度頗高；也須考量避免與既定管理架構及法令產生疊床架屋、相互扞格之疑慮。再者現有制度已施行多年，涉及的建築所有(管理)人、業者與公務執行人員眾多，訂定專法影響層面廣，改變現況可能容易遭受阻力，推動實施不易。這些問題都可能造成修法的延宕以及目標難以達成。

另一可能是在現有法制下進行整合，例如在執行上增加不同主管機關橫向聯繫與溝通，建立跨部雲端管理系統平台；在法規部份針對不足處進行修法，例如可以在「建築物污水處理設施建造、清理及管理規定」中納入建築物污水處理設施操作管理人員相關規範等。如此可在影響層面較小的情況下，強化現有管理架構與法令。

此外，環境技術認證技術(Environmental Technology Verification, ETV)宗旨為透過第三方查證機制，建立供應端及使用端之信賴關係，幫助新興技術進軍市場，精進現有技術或開發創新科技，以克服面臨之環境議題。ETV流程是參考國際認可的 ISO 14034 獨立且可信賴的資訊，由認可之第三方單位來驗證評估新創的技術，此制度受益對象通常為目前尚無標準方法或程序可量化或認證其技術效能之新穎技術，惟此類技術卻可能解決目前面臨之環境問題。國內目前研擬之 ETV 試行計畫為參考歐美國家及日韓等國之相關資訊後，因應國情及文化所建立，其中包含六個執行單位，分別為權責機關、諮詢小組、技術工作小組、查證組織、測試組織及申請者，而作業流程則包含聯繫階段、申請階段、特定查證規範階段、測試階段、評估及查證階段以及發布階段等共六階段。

預鑄式建築物污水處理設施之審定登記管理與 ETV 制度作業相似度甚高，惟建築物污水處理設施設計技術規範中明訂處理方法之基本單元及設計規模等參數，可能造成技術廠商需於法規框架下設計污水處理設施，致使研發動力較為薄弱，另外 ETV 制度將查證作業授權於受認證之查證組織及測試組織執行，此作法可大幅減少政府部門之相關人力輸出，未來可持續研擬，評估預鑄式建築物污水處理設施結合 ETV 制度之可行性及作法。

(二)缺乏去氮除磷技術

建築物污水處理設施之放流水應符合放流水標準，排放於自來水水質水量保護區(下稱保護區)者另應符合氮、磷之管制限值(氨氮限值 10 mg/L；正磷酸鹽限值 4 mg/L。經查目前 289 式合格業者生產之型號，並無適用於保護區者；惟於協助環境部審查業者申請展延審定登記文件階段，查驗文件顯示該等設施仍有販售於保護區內之紀錄，該等污水經處理後其氮、磷恐有不

符保護區放流水標準之虞。另查「建築物污水處理設施設計技術規範」第三章，列有八項污水處理方式，其中七項均無脫氮除磷功能，僅「批次活性污泥反應槽」陳述脫氮除磷之原則性規定(3.6.8.1 具脫氮除磷功能批次活性污泥反應槽)，惟該等規定中槽體有效水深達 3.0 至 5.0 公尺，顯難適用於一般住宅於閘基內裝設處理設施之現況，該等尺寸亦不利於業者依該規範設計與製造預鑄式建築物污水處理設施；如前述，市售商用預鑄式設施因此並無適用保護區內之脫氮除磷類型，若建築所有人有此需求，僅能依前述規定建置「現場構築型建築污水處理設施」，另請專業技師簽證以確保功能，考量個別家戶能力資源有限，恐有違簡政便民之原則。

依照預鑄式建築物污水處理設施管理辦法第 5 條，預鑄式建築物污水處理設施依中央主管機關及中央主管建築機關公告之範本設計者，得合併辦理審定登記，並免進行第二階段功能測試審查。而現今不論是內政部國土管理署建築物污水處理設施設計技術規範，或是環境部預鑄式建築物污水處理設施審定登記範本的內容均無收錄去氮除磷技術，因此業者如想販售相關技術之預鑄式建築物污水處理設施，就須進行第二階段功能測試審查，惟業者須自行覓妥合適的測試場地及污水來源，且須投入較長時間及經費以符功能測試要求，以致因成本提高業者無意願研發新技術，也導致當今市面上均無去氮除磷功能的預鑄式建築物污水處理設施。若建築所有人有此需求，僅能依前述規定建置「現場構築型建築污水處理設施」，另請專業技師簽證以確保功能，考量個別家戶能力資源有限，恐有違簡政便民之原則，也成為自來水水質水量保護區水質維護的不利因素。

目前市面上通過審定登記的預鑄式建築物污水處理設施普遍選用厭氧濾床接觸曝氣法與接觸曝氣法作為污水處理程序，由於其槽體體積小、水力停留時間短的特點，僅有去除 BOD、SS 功能，且無硝化液迴流設計，故無硝化、脫硝功能。此外所有型號的預鑄式建築物污水處理設施皆缺乏生物除磷設計(如厭氧-好氧槽)與化學除磷設計(如加鋁混凝、電解鐵混凝等)，這會造成位於自來水水質水量保護區的建築無從選用具有去氮除磷功能的預鑄式建築物污水處理設施，氮氮與正磷酸鹽恐難符合放流水標準，並有污染源環境的疑慮。

建議中央主管機關能對現有的審定辦法予以精進，例如審定辦法放寬，將免進行第二階段功能測試審查的條件，從原本「依中央主管建築機關規定之建築物污水處理設施設計技術規範設計者」，擴充為國內外已成熟之去氮除磷技術，簡化審定流程，增加業者研發/引進去氮除磷設施的意願，或者

是將去氮除磷技術納入建築物污水處理設施設計技術規範以及預鑄式建築物污水處理設施審定登記範本，提供廠商作為設計參考依據，鼓勵預鑄式設施製造商進行去氮除磷產品研發與審定登記申請。

本研究參考日本國土交通省公告之去氮除磷功能篇章，並考量國內發展廢污水之去氮除磷技術雖已行之有年，但並非皆可運用於預鑄式建築物污水處理設施，建議應選擇操作簡易，且操作維護費較低之設施，例如以循環式硝化脫硝法進行去氮，以加藥除磷法進行除磷，說明如下。

1.具去氮功能之污水處理設施－循環式硝化脫硝法(MLE 法)

循環式硝化脫硝法(MLE 法)係將生物反應槽分為兩部分，以進流水 BOD 於前段缺氧槽為碳源進行脫硝反應，而於後段好氧槽進行硝化反應，此系統將脫硝槽置於硝化曝氣槽之前，而增加一內部循環量，將曝氣槽中已硝化的硝化液，循環迴流至前段的脫硝槽中進行脫硝作用。而在缺氧段之脫硝作用，其微生物所需的碳源，則由進流污水中可生物分解的有機碳提供，即所謂使用內部碳源，也可於初級沉澱池部分進流水或污泥繞流，以補充脫硝作用所需之碳源。

2.具除磷功能之污水處理設施－加藥除磷法

化學除磷係添加石灰或鋁鹽等藥劑，使三價正磷酸鹽形成不溶沉澱物而移除，惟化學沉降法操作上受水質 pH、加藥點位置與加藥量影響，且會產生污泥，若操作不當會造成操作維護成本增加，因此應妥善評估除磷劑添加位置，茲將其添加位置對除磷之效果說明如下。

- (1)將除磷劑添加於初沉池前，係藉由排除初沉池污泥而達到除磷效果，惟隨著除磷劑加藥量增加，會伴隨大量污泥產生，且因同時會去除水中有機物質，亦會影響後端生物脫硝反應。
- (2)將除磷劑添加於生物反應池中，配合生物處理同時進行除磷，可減少建造成本，且將除磷劑添加於此，除可減少除磷劑的加藥量，且能使磷酸鹽與除磷劑充分反應，提高除磷效率。
- (3)將除磷劑添加於終沉池後面，此添加法需再設置一混凝沉澱反應池，會增加建造成本，惟因於後端加藥，故不影響前端生物硝化脫硝反應。

3.兼具除磷功能之污水處理設施－加藥除磷法

兼具生物去氮及化學除磷功能之污水處理流程初步設計如圖 2 所示，其處理單元應包含初沉池、缺氧濾床槽、接觸曝氣槽、沉澱槽 1、中間水槽、快混/慢混槽、沉澱槽 2 及消毒槽等，其處理方法與建築物污水處理設施設計技術規範第 3.10 節之厭氣濾床接觸曝氣法相似，再配合去氮除磷需

求調整槽體用途、增設額外槽體或設備，說明兩者差異如下。

- (1)獨立設置初沉槽。
- (2)厭氣濾床槽改為缺氧濾床槽。
- (3)增設硝化液循環管線。
- (4)原消毒槽功能取消，後方增設加藥除磷單元，再增設消毒槽。
- (5)增設污泥貯留槽，儲存廢棄污泥。
- (6)如設施設置的位置受用地限制無法順利排放，可設置獨立放流槽，將放流水泵送至適合的放流位置。

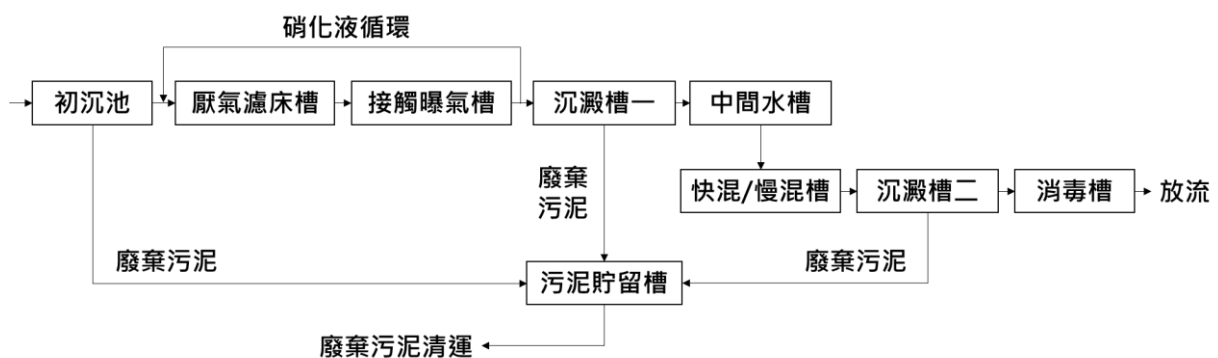


圖 2 兼具生物去氮及化學除磷功能之建築物污水設施流程圖

3.缺乏專業人士操作維護

依建築技術規則建築設計施工編第 49 條規定，沖洗式廁所排水、生活雜排水除依下水道法令規定排洩至污水下水道系統或集中處理場者外，應設置污水處理設施，並排至有出口之溝渠，換言之因建築物未接管，才會有設置預鑄式建築物污水處理設施的需求。惟現今我國公共污水下水道系統未達地區地理位置相對偏遠，故污水處理設施平日較難有專人維護管理。而我國現行跟生活污水處理有關的專業人員有廢污水專責人員、下水道技術士，以及下水道用戶排水設備承裝技工，惟預鑄式建築物污水處理設施的處理規模較小，未達廢污水專責人員設置規模，而下水道技術士與下水道用戶排水設備承裝技工的執業範圍又多以公共污水下水道系統及工業區專用污水下水道系統為主，故預鑄式建築物污水處理設施目前沒有規定需要專業人士操作維護。

雖然預鑄式建築物污水處理設施具有一體成形、平日可自動處理污水的優點，但是依然有定期專人維護管理的必要，如保養曝氣用的鼓風機，或是輸送液體與污泥的泵浦，若沒有定期保養如潤滑及較正軸心、檢查管

線是否有污垢堵塞等，就易因設備耗損並產生噪音、臭味等問題而被關閉，並失去了解決生活污水排放的本意。此外依照水污染防治法第 25 條第 1 項以及水污染防治法第 8 條規定，建築物污水處理設施產生之污泥，應由建築物污水處理設施之所有人、使用人或管理人妥善處理，不得任意放置或棄置，然而地理位置偏遠之建築物，很難委託清除機構清理，故當地的污泥處理就必須交由居民自行解決，或是將污泥存放更長的時間才清運，就容易導致放流水的 SS 上升，也容易造成系統微生物劣化，進而影響到放流水的水質。

參考日本淨化槽法，所有種類的淨化槽皆規定需要專業人士定期維護，確保設施能正常運作。我國也可效仿日本淨化槽法的精神，規範預鑄式建築物污水處理設施需要有專業人員定期維護，保障水體環境不被生活污水污染。

四、結 論

預鑄式建築物污水處理設施普遍使用於公共下水道未達地區之建築，我國已推行多年，現已有超過二百個型號流通於市面。然而預鑄式建築物污水處理設施存在管理權責單位分散、缺乏去氮除磷技術與缺乏專業人士操作維護等問題，成為危害水體環境的隱憂，故本文針對上述問題，提出了 5 大建議與未來展望：評估另訂預鑄式建築物污水處理設施專法之可行性、審定辦法精進、結合環境技術認證技術、仿照日本淨化槽法，規範專業人員定期維護，以及其他精進事項，冀望從制度面解決預鑄式建築物污水處理設施當前問題，讓預鑄式建築物污水處理設施確實發揮生活污水處理功能，達到保護水體環境的目的。

五、參考文獻

1. 建築技術規則建築設備編，行政院內政部，111 年 12 月。
2. 下水道用戶排水標準，行政院內政部，101 年 12 月。
3. 水污染防治法，行政院環境部，107 年 6 月。
4. 預鑄式建築物污水處理設施管理辦法，行政院環境部，98 年 9 月。
5. 建築物污水處理設施設計技術規範，內政部國土管理署，109 年 7 月。
6. 放流水標準，行政院環境部，108 年 4 月。

- 7.經審定登記認可之處理設施一覽表/預鑄式建築物污水處理設施認可登記一覽表，行政院環境部，112 年 10 月。
- 8.下水道法，行政院環境部，107 年 5 月。
- 9.淨化槽法，日本環境省，西元 2020 年。
- 10.淨化槽法實施細則，日本環境省，西元 2020 年。
- 11.屎尿淨化槽及び合併処理淨化槽の構造方法を定める件（化糞池暨合併式淨化槽構造方法規定），日本國土交通省，西元 2020 年。
- 12.流域別下水道整備総合計画調査指針と解説（各流域下水道整備総合計畫調查指針與解說），日本國土交通省水管理・國土保全局下水道部，西元 2015 年。
- 13.式新工程顧問有限公司，「國內去氮除磷合併式淨化槽應用案例與展望」，環保署前瞻計畫水環境改善與管理研討會，109 年 10 月。
- 14.生活污水污染削減及管理計畫，行政院環境部，100 年。
- 15.生活污水減量及處理設施管理計畫，行政院環境部，110 年。
- 16.生活污水處理設施管理制度評析計畫，行政院環境部，111 年。
- 17.污水處理廠設計及解說，內政部國土管理署，110 年 11 月。

染整前處理廢水回收過濾再利用案例

吳孟育*、林彥儕**、顏義軒***

摘 要

染整業為大量耗水資源的產業，而現今服飾講求多功能紡織導致耗水量日趨增大；加上氣候變遷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，故水資源再利用是重要的議題。若能將染整流程中整理段廢水現地處理後回收使用，除了可以節省水的消耗外，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。

在織造過程中，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。然而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。故染色前需要前處理加工，分別為退漿、水洗、解撚、精練、漂白。

本文探討再利用廢水主要以退漿及解撚製程為優先，使用氧化劑在鹼性環境下進行退漿及解撚，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℃，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 100~130CMD，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 條件下對許多過濾材料是一大挑戰。

本文以實廠案例進行說明，採用有機高分子管式膜對該股水源進行過濾回收再利用，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 100CMD 的退漿整理流程用水量。

【關鍵詞】節水、水資源再利用、有機高分子管式膜、退漿、現地處理

*宏遠興業股份有限公司 課長

**宏遠興業股份有限公司 研究員

***大成過濾材料有限公司

一、前言

有鑑於全世界環境保護與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並降低污染排放。需以最佳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。

紡織染整業是需要大量水資源的產業，而現今服飾講求多功能紡織導致耗水量日趨增大；加上氣候變遷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是重要的議題。以今年 2023 年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，染料與染助劑更新頻率也日新月異，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，根據染整廠製程特性主要用水分為三大部分^[1]：

1. 製程用水，其中分為兩大項，前處理(退漿、水洗、解捻、精練..等)和染色
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

其中退漿是前處理中的基礎，因為在織布過程中，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^[2]。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。藉由退漿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退漿藥劑用量，達到節省能源與降低生產成本之目標。

二、退漿廢水調查與回收方法

2-1 現況調查

以今年 2023 年統計染整製程用水用量平均 3,400 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 Boil-Off (BO) 與 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) Boil-Off (BO)：是由好幾座水槽組成的退漿設備，排放廢水經過熱交換器回收熱能後直接排放至廢水廠，其設備流程如圖 1 所示：

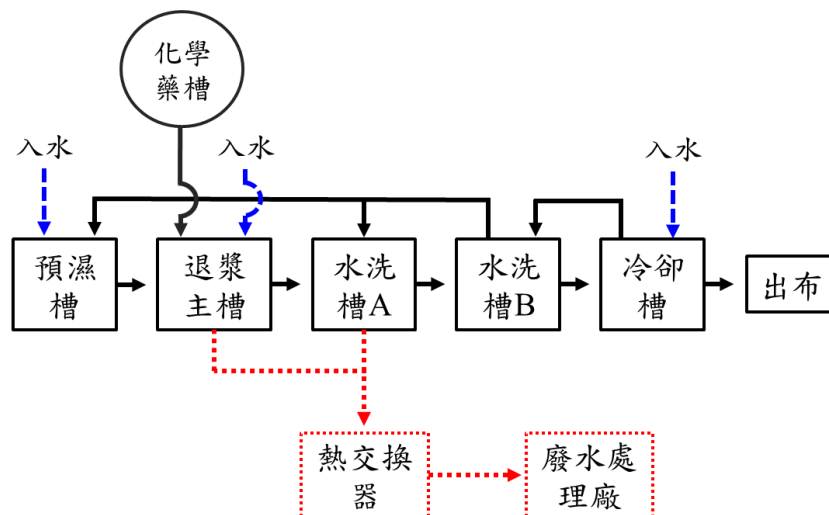


圖 1 BO 退漿流程圖

(2) Relax (RE)：針對布種視情況需二次退漿時才會進入該製程，於染缸內進行該工段，排放廢水經過熱交換器回收熱能後直接排放至廢水廠，其操作流程如圖 2 所示：

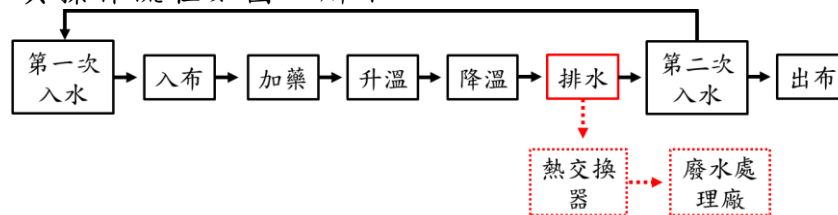


圖 2 RE 退漿流程圖

2-2 廢水特性

該股廢水主要含有織物上的污物、油脂及漿料，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

2-3 處理技術

一般處理方法大致可分為：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)。其中物理與化學處理法所需處理時間較短，且可用於處理含有高 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。過濾方式主要分為兩種，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。^[3]

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。^[3]

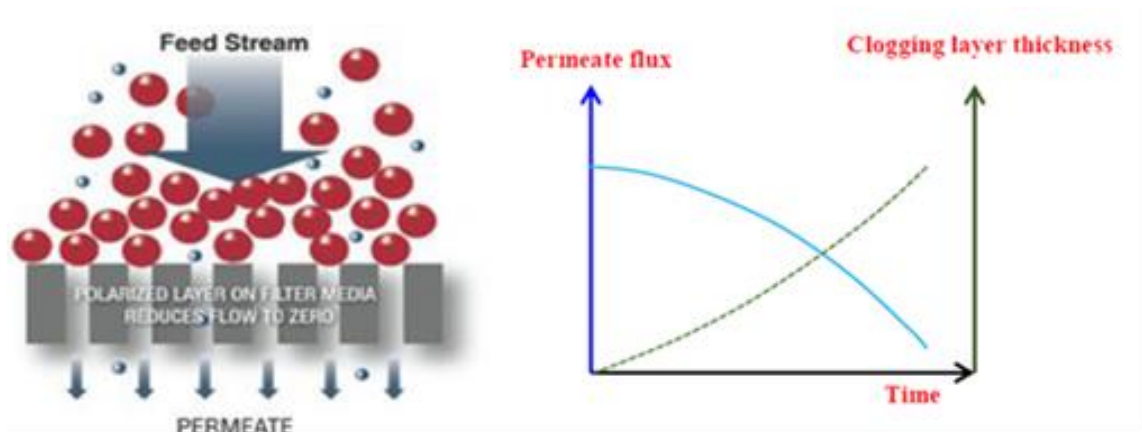


圖 3 直流式過濾 (Direct Flow Filtration, DFF)工作示意圖

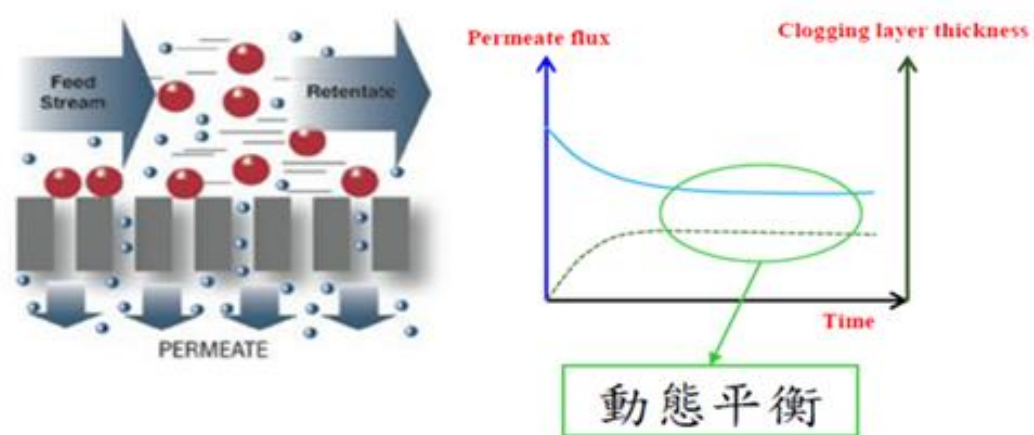
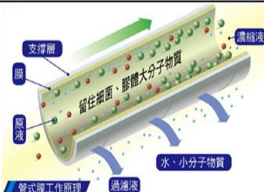
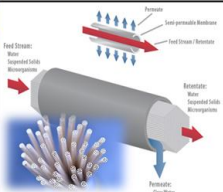
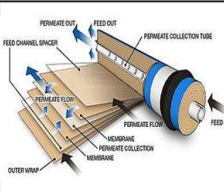
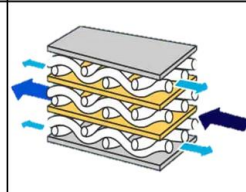


圖 4 切向流過濾(Tangential Flow Filtration, TFF)工作示意圖

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。^[4]

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。^[5]

表 2 膜型式比較分析表

膜型式	有機管式膜	中空纖維膜	卷式膜	平板式膜
膜通量 (L/m ² ·hr)	30 ~ 100	8 ~ 15	12 ~ 20	15 ~ 25
填充密度 (m ² /m ³)	< 300	30,000	100 ~ 300	100~400
最佳 使用領域	1. 製程上的分離過濾 2. 高濃度廢水濃縮 3. 固液分離 4. 含矽廢水濃縮 5. 含油廢水濃縮	1. 純水系統前處理 2. MBR廢水系統	1. 純水系統前處理	1. MBR廢水處理 2. 小型廢水處理
工作原理				
適用酸鹼值 範圍	2 ~ 12	2 ~ 10	2 ~ 10	2 ~ 10
溫度上限	< 90	< 45	< 50	< 80
含油上限 (mg/L)	< 10	< 2	< 5	< 5

三、水回收規劃及測試

針對退漿流程 BO (圖 1)與 RE (圖 2)，將原先廢液排至廢水廠階段中，專管回收將其集中收集，結合有機管式膜過濾系統進行過濾，並將濾後的出水導入製程重複使用，以達到水循環再利用的效果，BO 與 RE 更改後處理流程如圖 5 與圖 6 所示：

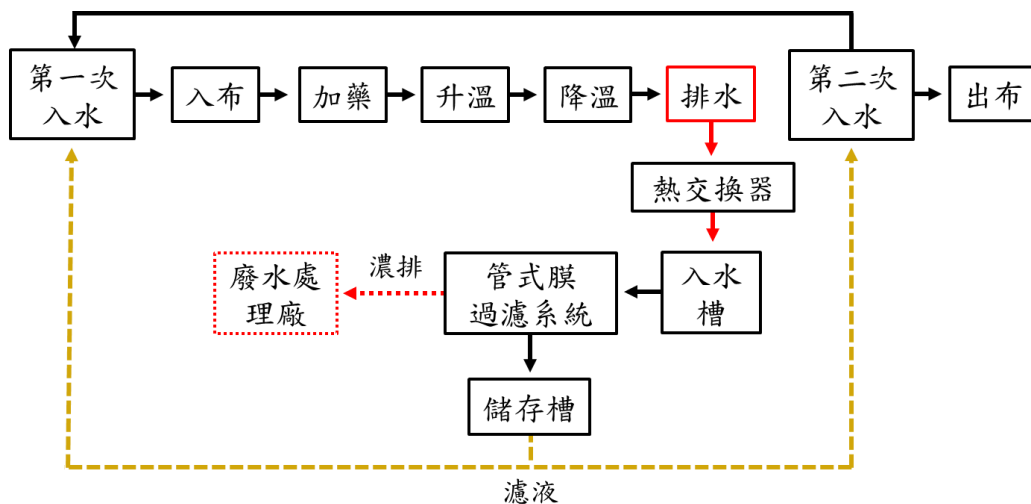


圖 5 BO 廢水連接管式膜系統流程圖

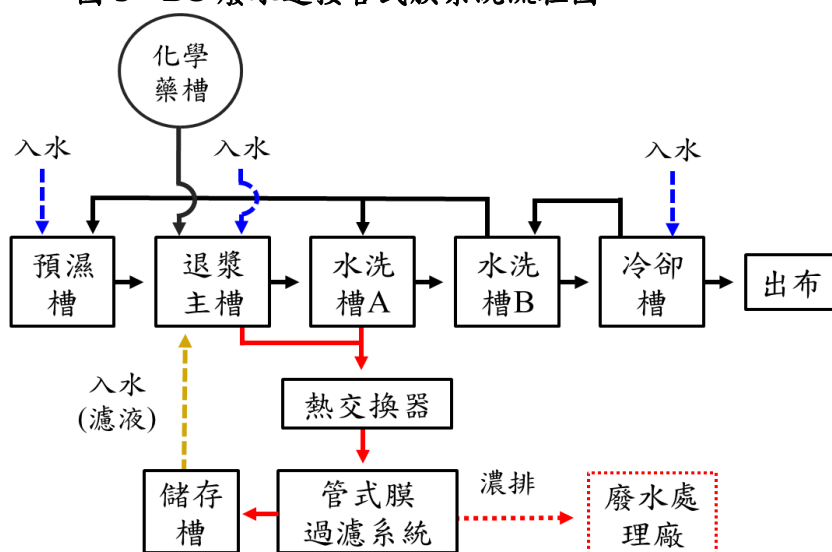


圖 6 RE 廢水連接管式膜系統流程圖

有機管式膜過濾系統，膜殼內含有機管式膜(圖 7 為示意圖)，管式膜數量由膜殼尺寸而定，測試機規格會依照 RE 與 BO 廢水排放量做設計，RE 測試機詳細規格如圖 8 所示，BO 測試機詳細規格如圖 9 所示，連續測試三個月，每日紀錄水溫、膜通量、pH、導電度、懸浮固體物及濁度。

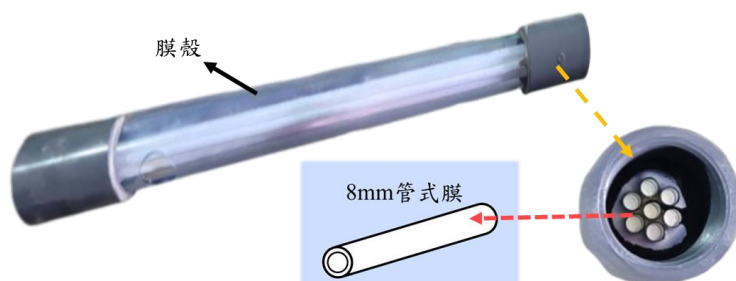


圖 7 膜殼及管式膜示意圖

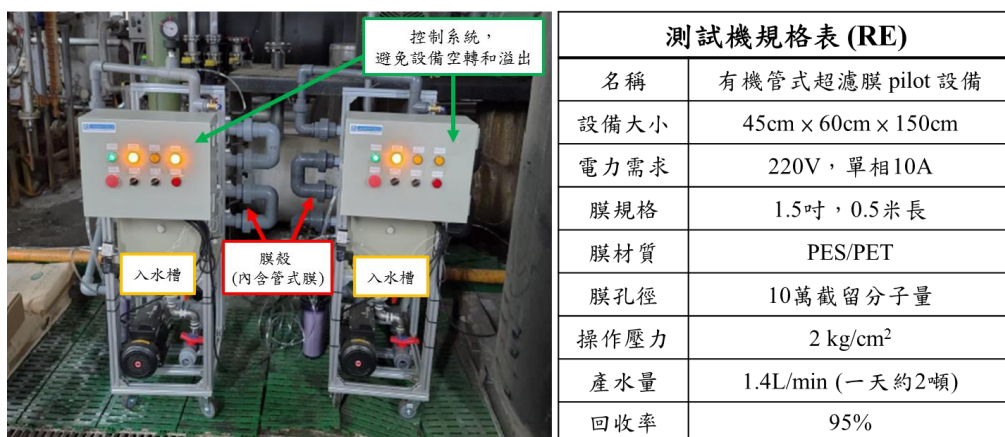


圖 8 RE 測試機

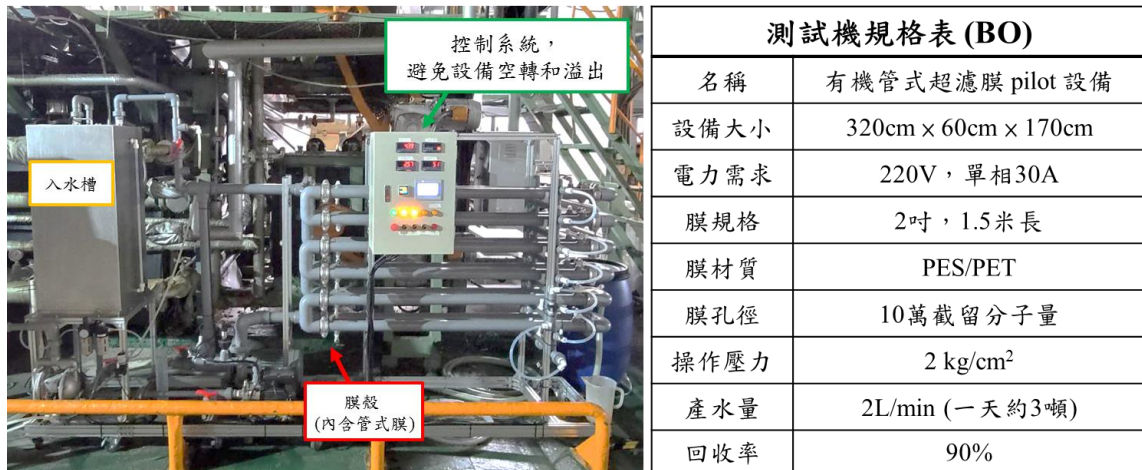


圖 9 BO 測試機

四、測試結果

本文測試結果以 RE 廢水模廠測試為討論方向，後續將建立實廠回收系統；BO 退漿廢水目前仍以模廠連續測試中。

4-1 濁度分析結果：

退漿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方式不同，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%。

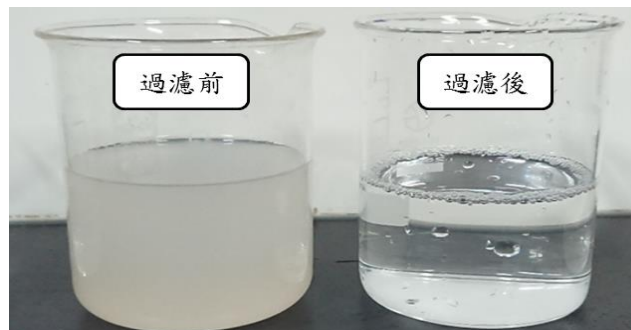


圖 10 水樣過濾前後變化

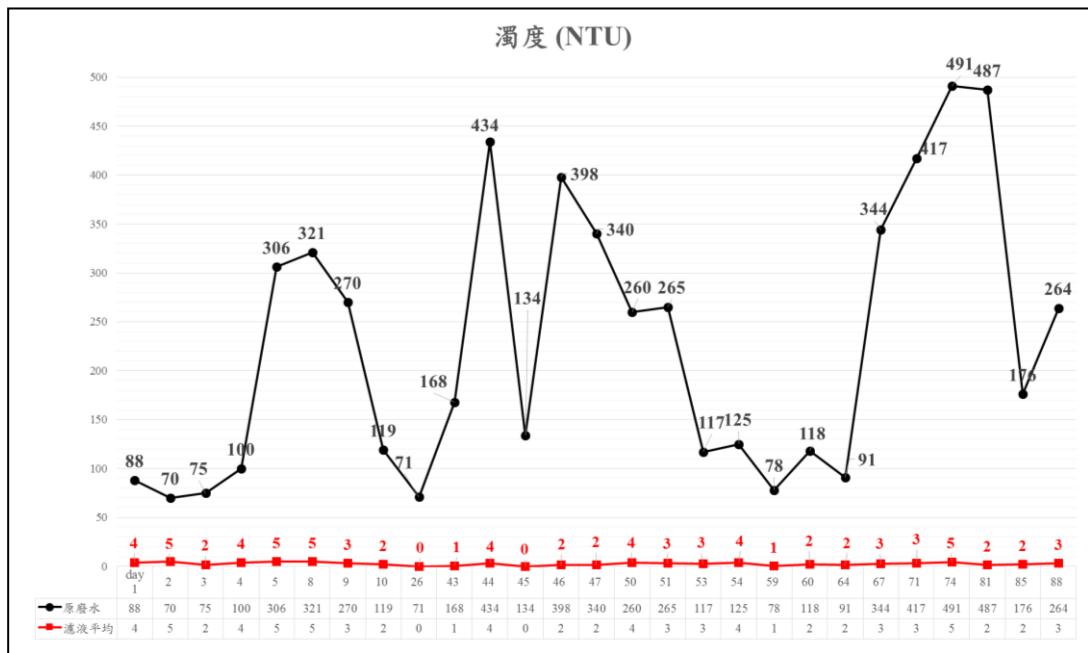


圖 11 濁度變化趨勢

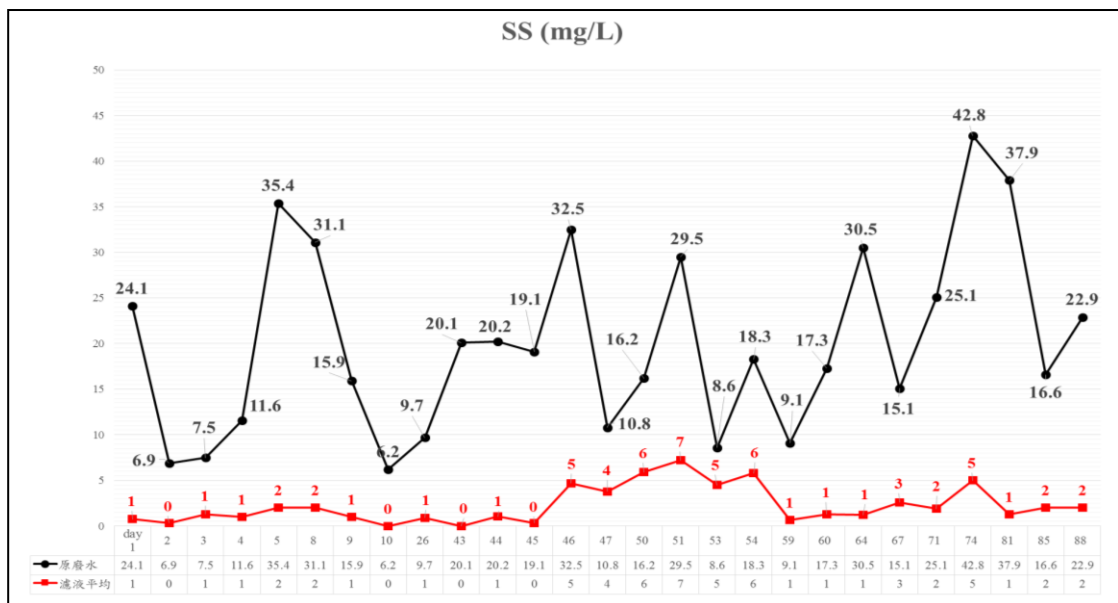


圖 12 SS 變化趨勢

4-2 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水洗出來，而根據布種不同，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 數值偏高是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%。

4-3 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。

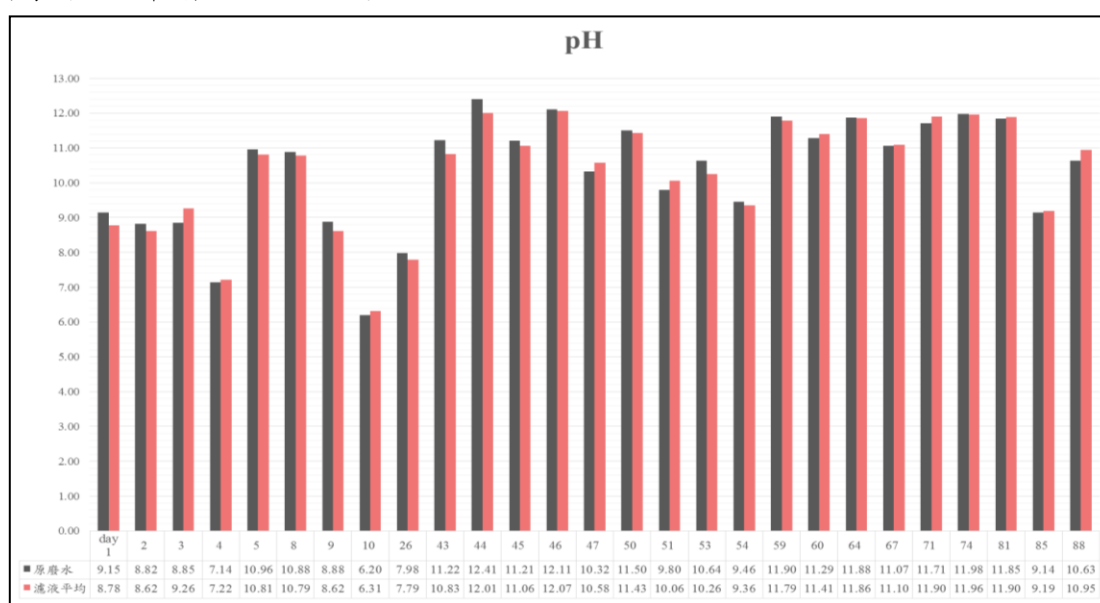


圖 13 pH 值變化趨勢

4-4 導電度分析結果：

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。過濾前後的水樣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。

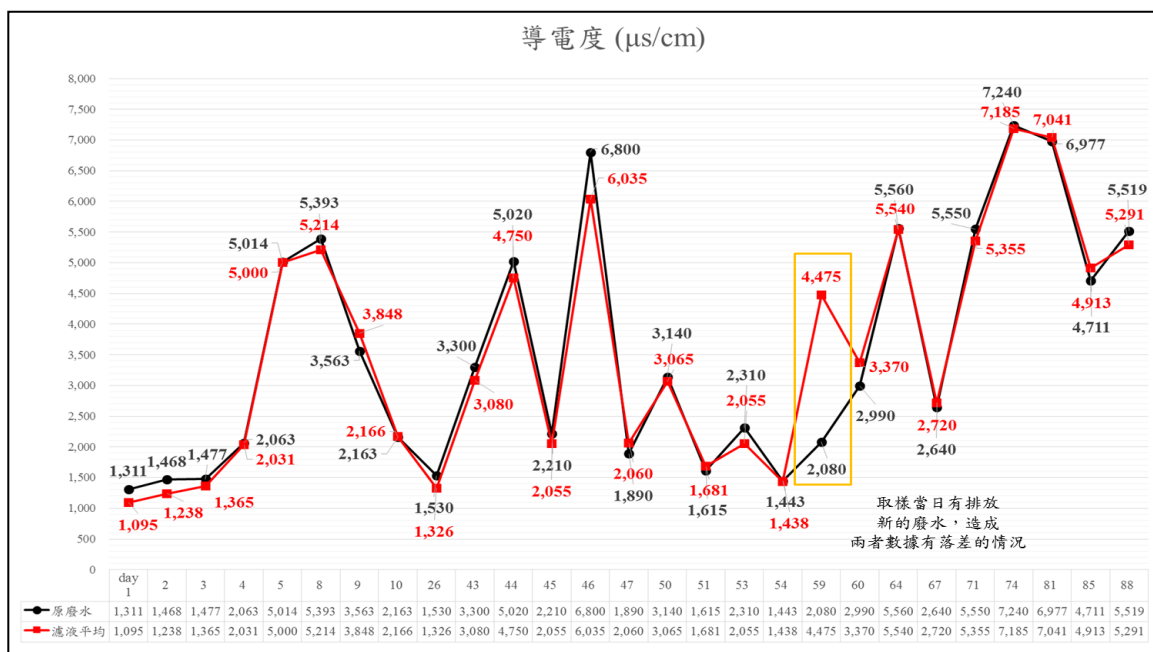


圖 14 導電度值變化趨勢

4-5、膜通量

膜通量是指每小時在每平方米的過濾面積所產出多少公升的水量 ($L/m^2 \cdot hr$)。管式膜的通量範圍 $30 \sim 100 L/m^2 \cdot hr$ ，測試機結果趨勢如圖 15 所示，平均通量約為 $60 L/m^2 \cdot hr$ ，隨時間運轉下產生濃水或積垢會導致通量的衰減，因此使用鹼性熱水除垢，即可恢復至通量 $60 L/m^2 \cdot hr$ 以上。

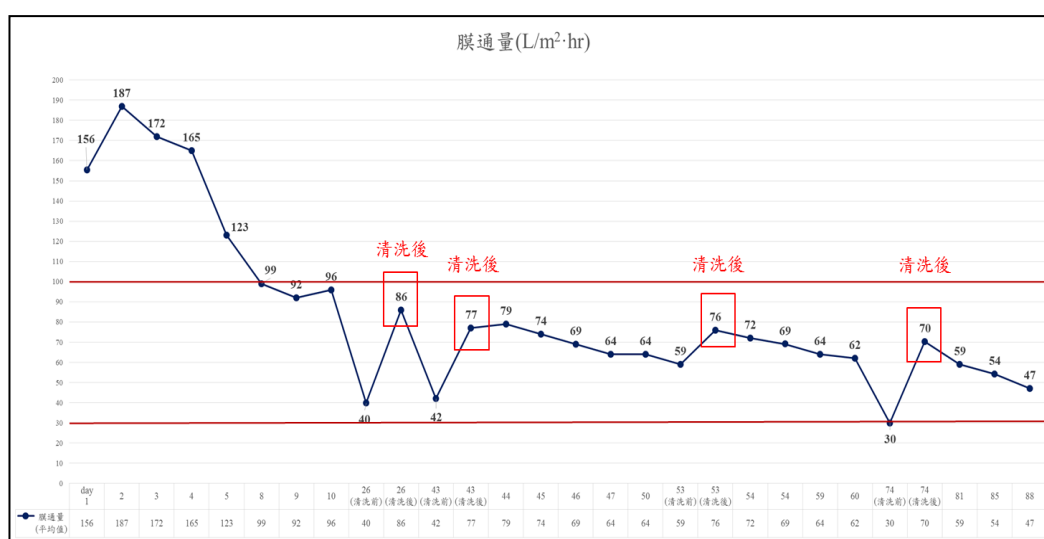


圖 15 膜通量變化趨勢

4-6 成本分析

1. 操作成本估算：

以廠內 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 19.0 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 $19.0 + 12.0 - 16.8 = 14.2$ 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^[6]；廠內以 2023 年數據為例，製造軟水所用電量每日平均為 5,000 度，因此可得出碳排放量為 $5,000 \times 0.495 = 2,475$ kg CO₂e / 日。

根據台灣自來水公司提供的每度用水排放 CO₂ 約當量計算方式 = 用電量產生 CO₂ 量(kg) ÷ 水量(度)^[7]；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 0.55 kg CO₂e。

因此若 RE (100~120 CMD)與 BO (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 149~184 kg CO₂e，若每年以 360 天計算，可減少將近 54 噸~67 噸 CO₂e 排放量。

五、結論

本文研究探討退漿廢水回收再利用，設置管式膜測試機進行回收再利用評估，對濾後水質加以分析，初步獲得如下之結論：

5-1 改善前後比較

處理成效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，驗證回用於製程用水是可行的，因設備為 UF 過濾所以 pH 與導電度部分較無效果，推測是液鹼與退漿藥劑殘留，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 ($\mu\text{s}/\text{cm}$)
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

5-2 回收率改善前後比較

目前本廠染整製程用水量平均為 3,400 CMD，而現階段有在回收再利用的水量平均為 150 CMD，製程回收率為 4.4%，若 RE 與 BO 濾液共 333 CMD 回收製程使用，回收率從 4.4 % 提高至 14.2%。從成本角度看，廠內的廢水處理成本(19.0 元/噸)、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。從減碳角度看，每年可減少 54 噸~67 噸 CO₂e 排放量。

六、參考資料

1. 經濟部. (2018). 紡織業低碳製程技術彙編.
2. 誠興貿易有限公司. (n.d.). 紡織上漿.
3. 欣梗科技股份有限公司. (n.d.). 何謂膜濾系統.
4. 洛科儀器股份有限公司. (n.d.). 切向流過濾.
5. 大成過濾材料有限公司. (2020). 有機高分子管式膜介紹.
6. 經濟部能源局. (2023). 111 年度電力排碳係數.
7. 台灣自來水公司. (2023). 每度用水排放二氧化碳(CO₂)約當量計算.

日本企業共同節能機制研析

鄭雅文*、曾台輔**、范鑫榆***

摘 要

日本定期申報制度自 1993 年起施行迄今，凡單一或全體營業場所年能源消費達 1,500 公秉(KL)以上之事業，須依法每年提出定期用能報告與中長期節能計畫，並以中長期年均能源密集度改善 1%為節能目標，行業別涵蓋工業與服務業。日本政府體察各行業與企業節能潛力之差異，自 2008 年起以共同節能制度鼓勵企業間合作，以分享能源資源、節能技術與節能實務經驗等方式，提升企業能源合理使用。受管制企業可共同合作，或者尋找中小企業作為節能夥伴，企業間節能合作成果由第三方機構驗證後，始得用於定期申報。

自 2013 年啟動之 J-Credit 制度，使參與共同節能制度的中小企業得以向定期申報企業販售節能投資產生的 J-Credit，不但創造雙方企業的雙贏，也激勵 ESCO 企業參與企業節能合作的媒合，活絡產業節能市場供需發展。國發會於 2022 年三月提出「2050 淨零排放路徑及策略總說明」，經濟部隨即規劃淨零 12 項關鍵戰略-「節能戰略」行動計畫，並就商業及工業部門提出對應節能措施，並鼓勵能源用戶攜手共同節電，達到能源效率極大化之戰略目標。日本政府以共同節能與 J-Credit 帶動企業節能合作的作法值得我國參考借鏡，用以構思我國企業節能合作政策制度架構與執行策略，開發並實現我國產業節能潛力。

【關鍵詞】共同節能、產業節能、J-Credit

*工研院產科國際所 副研究員

**工研院產科國際所 研究員

***台灣綠色生產力基金會 工程師

一、前言

日本在規劃能源政策時，考量關聯技術與產業的發展，以期掌握能源技術與關鍵產業鏈在國際能源應用與節能市場上維持領先的地位。日本自 1970 年代石油危機後，制定節能法並作為推行節能政策之依據，避免能源供給議題再度引發國內恐慌與社會經濟動盪。

2015 年時，日本以 2013 年能源需求為基礎，預測年均 1.7% 經濟成長下須節能 5,036 萬公秉(萬 KL)才能抑制最終能源消費增長，使 2030 年最終能源消費從 2013 年的 36,100 萬公秉降為 32,600 萬公秉。

在近年全球碳中和潮流之下，日本政府於 2021 年將 2050 年碳中和目標入法，因而調高 2030 年各部門能源節約目標，如表 1 所示。日本依最新社會經濟發展情況，推估 2030 年需節能 6,200 萬 KL，才能使最終能源消費降為 28,000 萬 KL。雖然在 2021 年公布的各部門節能目標中，運輸部門節能目標占總目標 37.1%，然工業與服務業部門加總的節能量占比達 43.5%，超越運輸部門約 400 萬 KL，顯示產業節能仍是日本碳中和目標不可或缺的一環，備受重視。

表 1 日本 2030 年中長期節能目標-部門別

單位：萬 KL

部門別/年度	2019 年 實際情況	2030 年度舊目標 (2015 年制訂)	2030 年新目標 (2021 年修訂)
工業部門	322	1,042	1,350
服務業部門	414	1,227	1,350
住宅部門	357	1,160	1,200
運輸部門	562	1,607	2,300
合計	1,655	5,036	6,200

資料來源：日本經產省資源能源廳，本研究整理^[1]

日本能源管理制之法源係節能法，施行上採中央與地方協作模式，由經濟產業省資源能源廳、地方經濟產業局，以及一般財團法人日本節能中心(Energy Conservation Center, Japan，簡稱 ECCJ)共同推動。

自 1979 年以來，日本節能法經歷多次修訂，管制業別逐步從製造業擴大至服務業，管制對象亦從工廠逐步擴及企業集團。有關形塑現今日本產業能源管理相關制度的重要修法年度與內容，茲整理如下：

1.1983 年：建立能源管理師國家考試制度

2.1993 年：啟動定期申報制度(與我國能源查核申報制度相當)

3.1998 年：要求定期申報者提出中長期節能計畫

4.2002 年：將高能源消費的服務業納入定期申報對象

5.2008 年：將企業與連鎖企業納入定期申報制度，並啟動行業標竿制度與事業者評價分級制度

日本定期申報制度起初適用對象為年能源消費達 1,500 公秉(KL)以上的工廠，後來逐步擴及服務業營業場所、連鎖企業與企業集團。受該制度規範之企業必須定期申報能源使用狀況，落實各項節能措施，並在未來 3 年至 5 年間，達成中長期年均能源密集度下降 1%之目標。

日本政府為鼓勵企業間合作善用能源資源、分享節能技術及節能實務經驗，於 2008 年修訂節能法，引進共同節能制度，認可兩間以上企業合作產生之能源節約量，並同步實施行業標竿制度與事業者評價分級制度^[2]。藉由行業標竿與分級制度，鼓勵企業積極節能及尋找節能合作夥伴。

隨著 2013 年 J-Credit 制度施行，共同節能制度成為吸引企業參與 J-Credit 制度的一項誘因。受定期申報制度規範的企業(後簡稱為受管制企業)以中小企業為共同節能夥伴時，可採購中小企業節能投資產生的 J-credit，作為自身節能成果。中小企業則受益於共同節能制度與 J-Credit 制度，自受管制企業取得節能相關知識、技術與資金^[3]。

有鑒於日本共同節能制度為企業節能合作建立良好的基礎，並將持續運作，本文首先就日本共同節能制度進行介紹，並分析日本政府結合共同節能制度與 J-credit 的申報案例，最後提出我國引進類似政策制度之思考方向，以期我國能透過促進企業節能合作，進一步擴大產業節能潛力。

二、日本企業共同節能制度簡析

(一)制度緣起

日本政府為監管高耗能企業用能情況，自 1993 年起，以節能法為依據，設置定期申報制度，以年能源消費達 1,500 KL 為基礎，要求高耗能企業申報能源使用量，並以中長期年均 1%能源密集度改善為目標。迄今，受日本受管制企業類型，從單一工廠或營業場所，擴大至連鎖企業與企業集團，涵蓋工業與服務業部門。

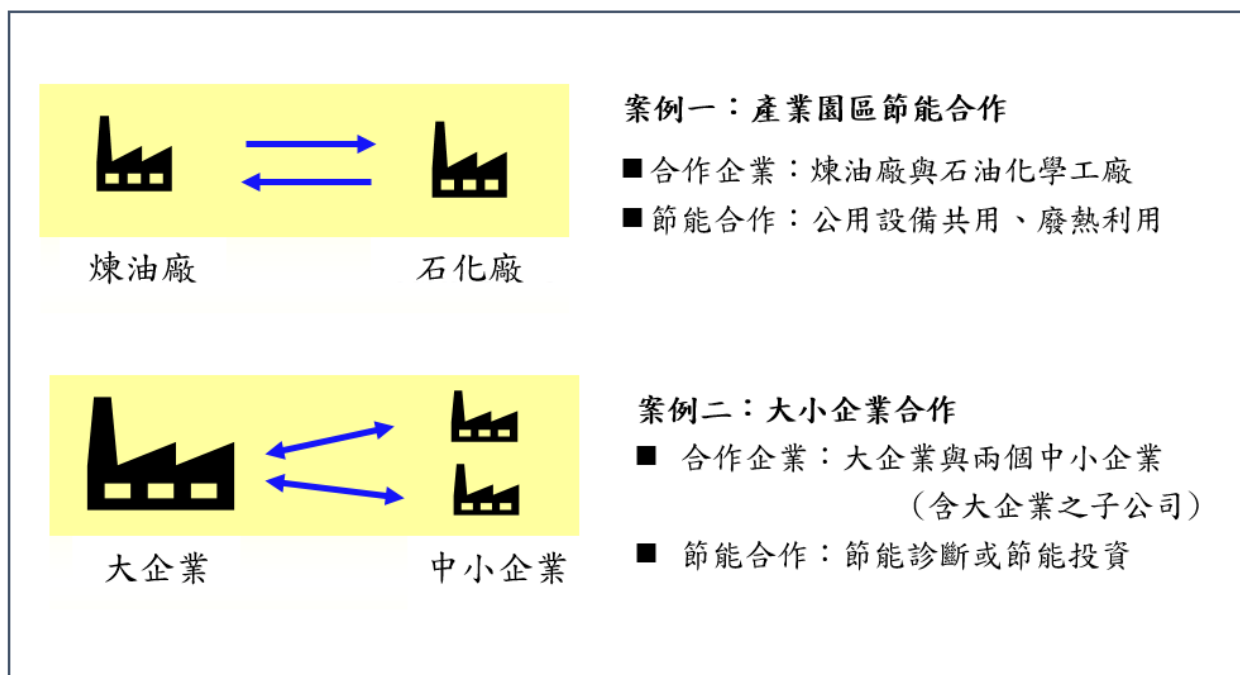
2008 年時，日本政府以定期申報制度為基礎，實施行業節能標竿制度與事業者分級評價制度，據以表揚節能表現優異的企業，並針對節能成果不佳的企業發送提醒信與政府節能輔導資訊，必要時派員執行現場調查或公告屢勸不改的企業名單。

由於受管制企業在善盡可行之節能措施後，仍有可能未能達成年均能源密集度改善 1% 的法定目標，無法提升事業者分級評價，故日本政府以共同節能制度，認可企業間合作產生的能源節約量。受管制企業能自由尋找節能合作對象，包含其他受管制的企業與中小企業。事實上，共同節能制度的實施亦歸功於節能量檢驗技術的發展，解決早年無法檢測企業節能合作成果的情況。

(二)運作方式

1.一般企業節能合作

共同節能制度鼓勵企業透過分享節能資源、技術、經驗，以及投資合作等方式，開拓日本產業節能潛力。如圖 1 所示，企業具體節能合作項目可包含共用公用設備、廢熱再利用、節能診斷與節能投資協助等節能措施，合作企業不限制公司規模，也無家數限制。當合作企業同屬受管制企業時，由雙方協商共同節能量的分配方式。



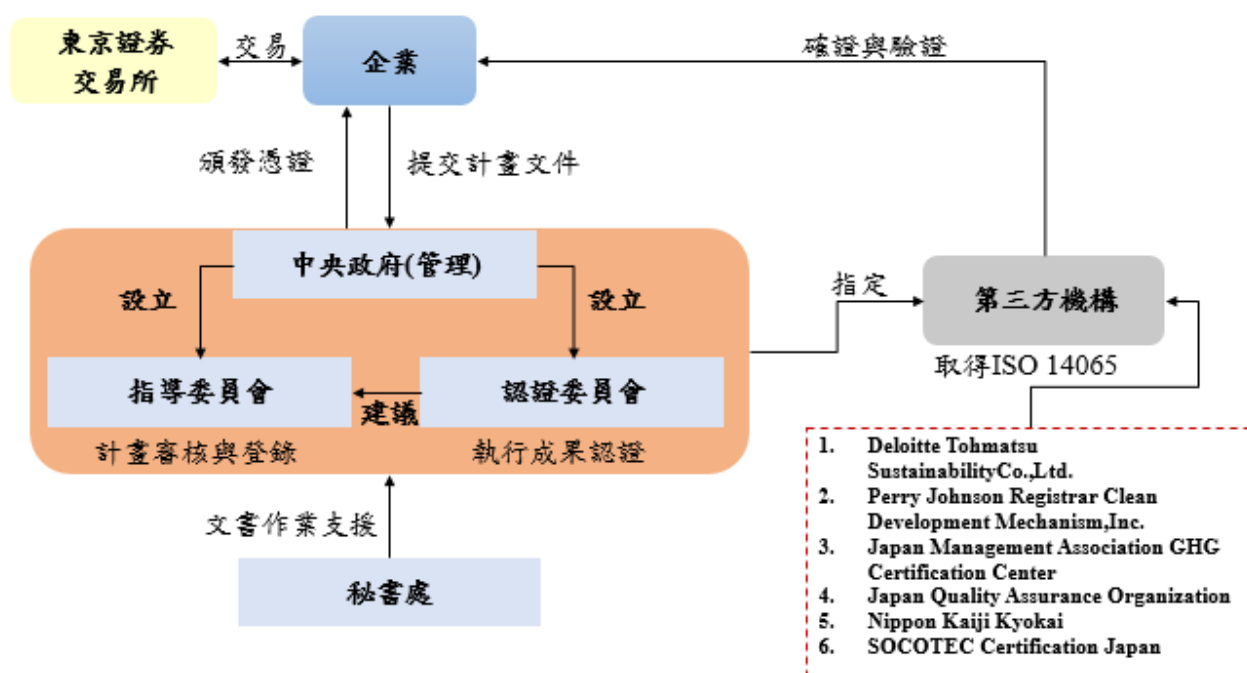
資料來源：日本經產省資源能源廳^[4]，本研究重繪

圖 1：日本共同節能制度施行示例

2. 結合 J-Credit 制度實施共同節能辦法

日本於 2013 年啟動的 J-credit 制度，係結合日本認證減排制度(Japan Verified Emissions Reduction，簡稱 J-VER)與國內碳排放抵銷制度(Domestic CDM)的碳憑證機制。由日本經濟產業省、日本環境省，以及日本農林水產省共同運作。J-credit 制度已自 2021 年 4 月起完全取代 J-VER 與國內碳排放抵銷制度。

圖 2 以企業為視角的 J-Credit 運作機制，參與者可分為企業、政府單位及第三方驗證機構。政府單位負責制定管理制度及核發憑證(J-Credit)。欲創造 J-Credit 的企業，需提出計畫書，經過官方認可並實施後，經由第三方機構驗證成果，始取得 J-Credit。一般而言，企業提交計畫至取得官方認可約需 3 至 6 個月的時間，並且需在執行計畫一年後方可開始申請 J-Credit 認證。



資料來源：本研究彙整

圖 2 日本 J-Credit 運作機制

J-Credit 所認可措施分為節能措施、再生能源與森林管理活動等。在節能措施方面，鼓勵企業購置高能源效率的鍋爐、照明、空調、熱泵、熱電聯產設備以及工具機、工業鍋爐、烘乾設備等。上述節能措施產生的 J-Credit 才能作為共同節能量^[5]列於定期報告中。

J-Credit 創造者主要為中小企業、農業、森林業和地方自治團體，個人也

可以參與 J-Credit 創造。而 J-Credit 採購者則包含大企業、中小企業與地方自治團體。值得注意的是，年能源消費高於 1,500 KL 的中小企業可同時為 J-Credit 的創造者與採購者。

在 J-Credit 制度下實施企業節能合作時，受管制企業需可透過採購中小企業被認可之節能措施產生的 J-Credit，將其認列於定期報告書。而販售節能 J-Credit 的中小企業利用 J-Credit 制度加速投資回收。據此，參與節能合作的企業達成互利雙贏局面。

3. 申報共同節能成果規定

在一般情況下，受管制企業採取共同節能措施時，必須在定期報告中說明採取的節能措施，並委託公正獨立的第三方驗證機構檢視可量化之節能量成果，方能以共同節能量的形式申報。即使如此，參與共同節能得受管制企業本身仍需盡力實施節能措施，若需透過共同節能才能達成年均能源密集度改善目標時，日本經產省資源能源廳將另行檢查並判定節能成果。

針對自 J-Credit 系統取得共同節能量的受管制企業，日本規定該 J-credit 不可續存。受管制企業在申報時，需在定期報告書中說明該 J-Credit 編號、措施類型、節能量及註銷日期。迄 2023 年 9 月，J-Credit、J-VER 與國內碳排放抵銷制度中，節能減量憑證累計 410 萬噸二氧化碳^[6]，約 60% 節能量辦理註銷。

(三) 綜合效益

日本政府以定期申報制度為基礎，讓高耗能企業更有意識的使用能源。節能政策制度也隨著產業用能數據的累積與能源查核方法的演進，從起初中長期能源密集度改善 1% 目標，發展出行業標竿制度、事業者評價制度與共同節能制度，不但為企業節能目標提供方向，也為企業間節能合作的法令制度奠定基礎。2013 年日本政府在 J-Credit 制度納入共同節能制度的做法，更是結合節能政策與氣候政策的典範，提供企業進行節能減碳合作的平台與投資誘因。即使部分日本企業仍因參與成本太高未能加入共同節能制度或 J-Credit 制度，但仍有許多企業參與。在這之中，節能相關檢驗與顧問服務業也扮演著重要橋樑，媒合市場供需並帶領中小企業進行節能投資，活絡日本節能設備的銷售與市場發展。

從企業節能需要的角度分析，日本行業標竿制度與事業者評價制度驅使高耗能產業尋求節能機會，產生企業間節能合作的誘因。而共同節能制度的設立，則解決日本中小企業在節能投資領域的困難，使得大企業得以向小企業提供知識、經驗、技術與資金，協助中小企業建立自主節能的能力。因此，日本政策制度使得高耗能企業與中小企業在節能領域有良好的合作架構並形成雙贏局面，有利於

實現日本產業部門節能目標。

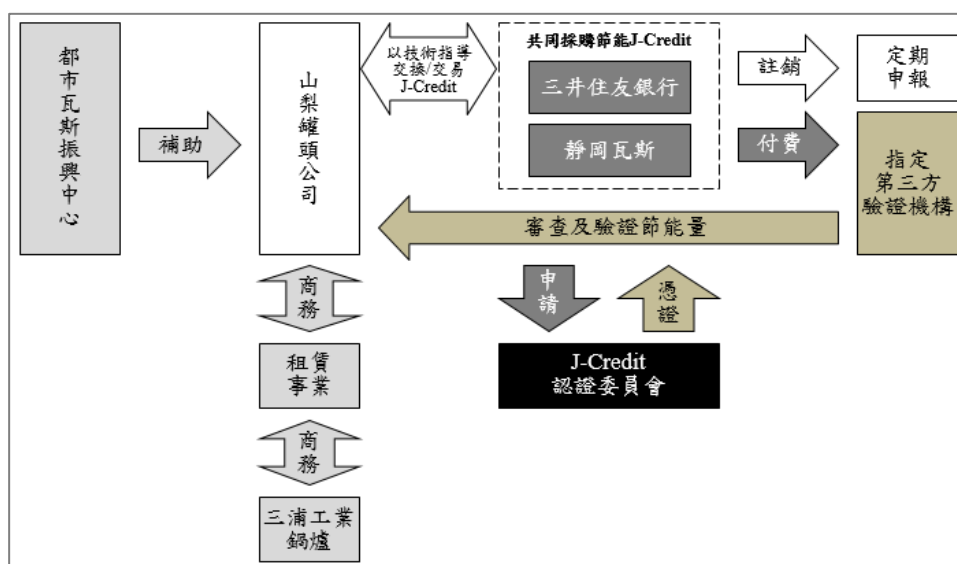
最後，從中小企業的角度看日本企業節能合作法令架構可發現，日本政府給予中小企業靈活應對的空間。對於年能源消費達 1,500 KL 的中小企業而言，雖須依據節能法遵循定期申報度規定，但亦提供中小企業自由參與共同節能制度與 J-Credit 制度的機會。這樣的制度設計使得日本中小企業得以客觀評估自身節能投資能力與需要，據以尋求政府輔導與補助資源、參與 J-Credit 制度的可行性與其他企業節能合作機會。

三、日本企業活用節能合作政策案例

(一)山梨罐頭、三井住友銀行(SMBC)和靜岡瓦斯公司共同節能案例

位於山梨縣的山梨罐頭公司，創立於 1933 年，資本額為 1,000 萬日圓，員工數約 116 名，營業內容包含罐頭食品、蒸煮料理包和杯裝食品製造和販售。節能合作企業為靜岡瓦斯公司與三井住友銀行

2009 年 6 月，山梨罐頭公司以租賃的方式，將兩座使用重油的鍋爐改為天然氣鍋爐，預期每年可減少 437 噸二氧化碳，所產生 J-Credit 由三井住友銀行(SMBC)和靜岡瓦斯公司取得。其中，靜岡瓦斯除了採購 J-Credit，也和山梨罐頭公司交換瓦斯供給與應用相關技術知識，企業合作項目包含：(1)調查能源消費與設備現況、(2)專案管理規畫與施工管理，以及(3)計畫書撰寫與申請作業，提升中小企業天然氣使用效率。山梨罐頭公司企業共同節能架構如圖 3 所示。



資料來源：J-Credit 事務局^[7]，本研究整理與重繪

圖 3 山梨縣山梨罐頭公司等共同節能架構

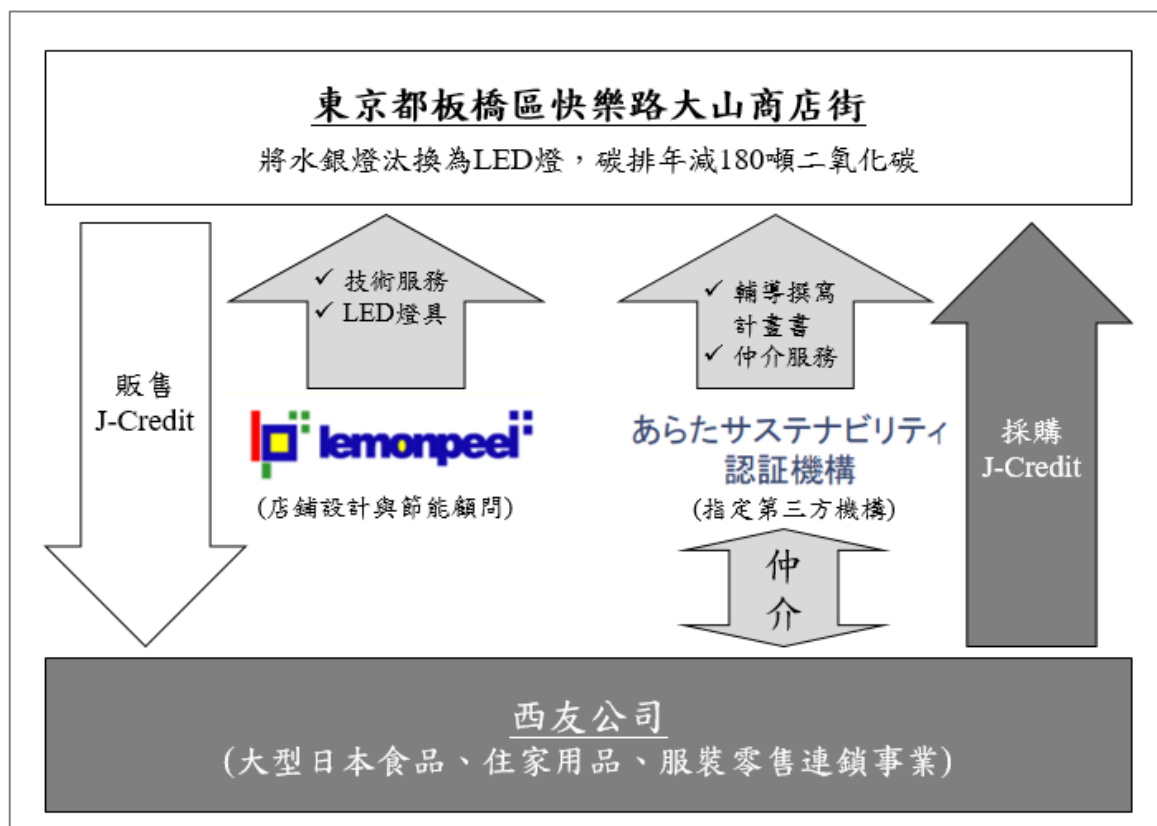
兩家大企業在取得 J-Credit 後，可再販售給其他企業、進行定期申報或抵消自身產品碳排放。未來，靜岡瓦斯有意以此向節能合作案為基礎，聯合其他在地中小企業，據以形成大型區域性節能合作。屆時，靜岡瓦斯將作為節能減碳計畫提案者和 J-Credit 收購人，向中小企業採購 J-Credit 認證，再轉售給其他企業。

(二)東京都板橋區地方商圈共同節能案例



圖 4 東京都板橋區快樂路大山商店街地圖

2009 年快樂路大山商店街以「與您一生相伴」為號召，檢視商店街對環境友善對策，與西友公司共同探討商店街與消費者相關環境友好策略，並運用東京都對商店街的補助和 J-Credit 制度籌措資金，委託新永續認證機構協助 J-Credit 制度申請與認證，由 Lemonpeels 公司將商店街的照明汰換為 LED 燈具。最後，商店街將取得的 J-Credit 販售予西友公司(SEIYU)。此共同節能合作案協助商店街能源消費從 56 萬 kWh 降至 9 萬 kWh，節省年電費約 900 萬日圓，年碳排放量從 200 噸二氧化碳降至 40 噸二氧化碳。整體節能合作方式如圖 5 所示。



資料來源：J-Credit 事務局^[8]，本研究整理與重繪

圖 5 東京都板橋區地方商圈共同節能架構

從東京都板橋區快樂路大山商店街的共同節能案例顯示，具備定期申報義務的企業，可以透過與節能服務公司合作，運用共同節能制度與 J-Credit 制度，透過採購自中小企業的節能 J-Credit，實現法定節能義務。這個案例亦顯明，由中小企業組成的商店街屬於地方自治團體的一種，在 J-Credit 制度中屬於 J-Credit 創造者。因此，受管制企業得以與中小企業自治團體實施共同節能，以更為迅速的方式取得大量節能量。

四、對我國的啟示

邁向淨零排放的道路上，最大化產業部門的能源效率是不可或缺的一環。我國經濟部已在2023年4月發布的淨零十二項關鍵戰略中，提出商業及工業部門節能措施，並鼓勵能源用戶攜手共同節電，據以達成產業能源效率極大化之戰略目標。企業節能合作案例是我國產業節能政策的新里程，值得各界共同探討適合我國產業的合作方式與架構。在這樣的時刻，在日本行之有年的共同節能制度與相關政策架構，值得可作為我國規劃企業節能合作制度之參考，分述如下：

1. 建立共同節能量認定辦法

日本政府要求企業委託公正的第三方檢驗可量化的共同節能量，包含化石燃料消費與電力消費，使得企業節能合作成果得以有客觀數據佐證。在企業節能合作的方法上，不限於機器設備更新，亦包含營運方法、技術移轉以及經驗傳承等知識交流。我國在推動企業節能合作的過程中，宜探討不同企業節能合作驗證方式，使得企業節能合作更為多元，能夠量化、追蹤，也較能夠具體反應在合作企業的整體能源消費改善，不只在於節電成效，亦能達到最終減碳目標。

2. 開放企業節能合作對象與業別

日本共同節能制度，開放受管制企業彼此合作，也開放受管制企業與未受管制的企業合作。現今我國與鼓勵能源用戶攜手節電，宜參考日本作法，鼓勵企業自由進行節能合作，並不限於自身供應鏈或關係企業，而能依據市場機制尋找最具經濟效益的合作夥伴。以日本為例，共同節能制度創造多元企業節能合作，使得合作企業不受地點、組織型態與行業別限制。例如，母公司能與子公司進行節能合作、受管制企業也能與中小企業自治團體合作、服務業能與製造業合作，以及不同業別的受管制企業共同與中小企業合作等，這樣彈性的制度設計對於整體產業部門的節能減碳成效大有助益。

3. 提供中小企業多元節能合作管道

日本共同節能制度有助於解決中小企業在節能知識、技術與資金的匱乏。隨後J-Credit制度的引進，更進一步使中小企業可自由選擇節能合作方式，為節能減碳提供更充足之誘因。J-Credit制度給予中小企業更彈性的空間，避免節能投資決策

受制於大企業，幫助中小企業從更廣泛的 J-Credit 採購者販售憑證，縮短節能投資回收期。

五、結 語

日本政府運用共同節能制度與 J-Credit 制度，為企業節能合作創造良好的法令架構。對於受管制企業而言，企業節能合作有助於在善盡自身節能潛力後，以外部取得的節能量，持續達成中長期能源密集度改善 1%之法定目標，也能夠改善事業者評價分級制度的級別。對於年能源消費低於 1,500 公秉(KL)之企業，透過節能合作解決在知識、技術與資金的取得困難，實質改善自身能源效率。整體制度設計有利於日本持續開拓產業節能潛力，推進合理能源使用及降低碳排放。

日本共同節能制度以可量化的節能量為基礎，包含化石燃料與電力消費的改善量，認可節能措施包含技術、知識與資金相關移轉，並開放企業進行多元合作，且不限業別與企業組織型態。J-Credit 制度的引進，使得企業更容易尋找節能合作夥伴，也讓中小企業能不需透過大企業帶領便能參與 J-Credit 交易，提升節能投資回收速度。上述特色值得我國在規劃企業節能合作制度時參考，據以建立多元企業節能合作管道，活絡節能相關產業發展，最大程度地實現我國產業節能潛力。

感謝詞

本研究承能源署能專經費之支持，特此致謝，不勝感激。

五、參考文獻

1. 經濟產業省資源エネルギー庁，2030 年度におけるエネルギー需給の見通し（関連資料），2021/3/10，
<https://www.meti.go.jp/press/2021/10/20211022005/20211022005-3.pdf>
2. 經濟產業省資源エネルギー庁，事業者クラス分け評価制度と産業トップランナー制度，
https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saving/enterprise/overview/institution/index.html
3. 經濟產業省資源エネルギー庁，改正省エネ法の概要，2010，

https://www.jfma.or.jp/news/METI_091022.pdf

4. 経済産業省，資料 5，<https://www.env.go.jp/council/06earth/y060-70/mat05-5.pdf>
5. J－クレジット制度事務局，温対法・省エネ法での活用，
<https://japancredit.go.jp/case/law/>
6. J－クレジット制度事務局，J－クレジット制度について（データ集），
2023 年 9 月，https://japancredit.go.jp/data/pdf/credit_002.pdf
7. J－クレジット制度事務局，国内クレジット認証事業例-山梨罐詰（株）に
おける削減プロジェクト，2009/6/10，
https://japancredit.go.jp/jcdm/link/data/seminar/tokyo_03.pdf
8. J－クレジット制度事務局，国内クレジット認証事業例-大手小売店と商店
街の国内クレジットを活用した コラボレーション事業，2009/12/9，
<https://japancredit.go.jp/jcdm/link/data/agriculture/G.pdf>

核能電廠除役循環經濟之探討

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。

【關鍵詞】建立促進永續投資框架規則、循環經濟、非生物消耗潛勢、核能電廠除役

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。

除以碳排放量作為重要指標，還包括五項歐盟環境目標，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。

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。

為能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^[1]，核能發電在減緩氣候變遷是具有貢獻的能源之一。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。

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

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 ^[2]	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，如閘門、活栓等，確保無流體洩漏。
封存反應爐並進行除污及切割 ^[3]	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 ^[4]	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^[5]。

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：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，將其生成量最小化，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^[6]。
- 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)研究指出除役過程中產生的廢棄物，包括金屬或混凝土等材料^[7]，應規劃採取最大化地回收和再利用^[8]，減少對環境資源之利用和需求，並且優先考慮再利用於其他工業領域^[9]。
- 3.放射性廢棄物處理：Hrncir et al., (2019) 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^[10]；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：投入研究和開發，尋找更高效、更環保的除污技術^[11]、拆除工法和放射性廢棄物處理技術^[12]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》^[1]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》^[1]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。

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，依據除役四個階段所對應之工作分解架構(Work Breakdown Structure, WBS)^[13]，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，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剷除；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。

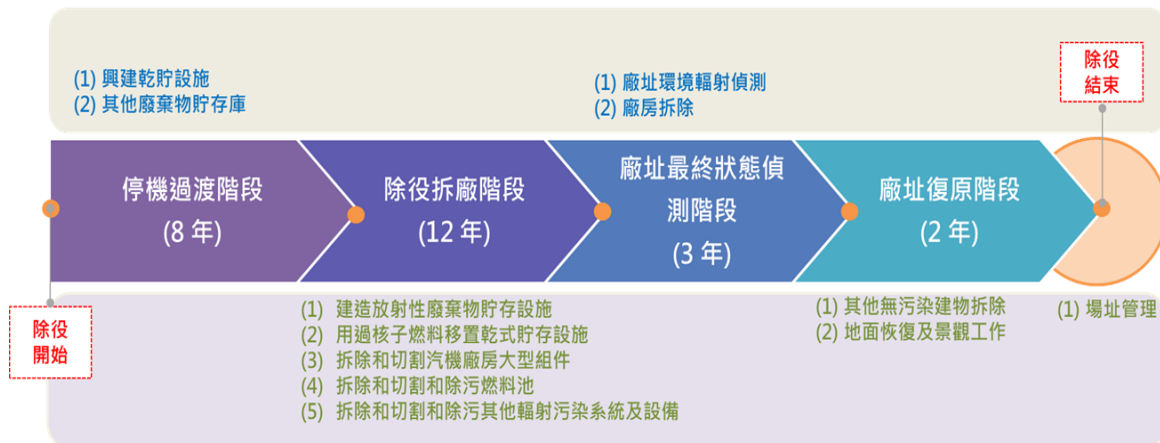


圖 1 核能電廠除役循環經濟探討範疇及系統邊界界定

(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要素，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。

根據《核能發電技術評估報告》^[1]，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，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；放射性廢棄物計算除役後廢棄物之潛在的回收率。

$$MR = \frac{\sum_j R_j}{M_p} \times 100 (\%)$$

MR: overall material recyclability (%)

R_j: amount of material j that can be recycled (MT)

M_p: total amount of materials contained in the power plant (MT)

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^[14]；反觀，德國 Lubmin 電廠(立即拆除)，

則是假設混凝土為 100%回收^[15]，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^[13]。

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^[13]。

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 2。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%。

表 2 核一廠除役潛在回收率估算

類別	放射性廢棄物之分類(MT)				合計 (MT)	可外釋 (MT)	潛在 回收率*
	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	
1.2.9 儀器管線	0	3	0	0	3	0	
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，資料來源，除役計畫第九章；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。

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。

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。

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行程序，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。

六、參考文獻

1. 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
2. Caldas Neto, A.B. and Silva, A.T., (2023). “Strategies for Decommissioning Small Nuclear Reactors in Brazil”. *Nuclear Engineering and Design*, 414, 112608.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Konno, T., (1999). “Construction materials for reactor buildings for decommissioning and recycling”. *Nuclear Engineering and Design*, 192(2-3), 365-380.

9. 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.
10. Hrnčir, 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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>
14. 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.
15. 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.

紡織業永續發展、 循環經濟和淨零排放的前景與趨勢

林明旺*、劉柏緯**

摘 要

紡織業中，循環經濟和淨零排放策略成為推動可持續經營實踐的核心要素，本研究主要探討紡織業目前如何實施環保、循環經濟和淨零排放策略，以實現可持續發展。

首先，本公司(東豐纖維股份有限公司)藉由發展自動化與智慧製造並整合推動可持續發展之永續目標，通過製程智慧化、機械自動化與供應鏈合作夥伴協作，經供應端加工廠及運輸段共同整合視覺化管理系統、即時監控系統以及物料管理系統可以高效幫助企業提高生產效率、確保提供環境友好的原材料採購和產品製造；再者，本公司積極投資先進的廢水再生處理技術，並於 2023 年希冀達到 90%以上之廢水回收率，放流水 RO 再生系統供水目標 1,200 噸/日；另外，通過對廢料循環再生分析研究可以瞭解其組成和特性並找到適合的再利用和回收方式，已完成廢布、廢紗及汙泥再生之初步實驗；此外，製程碳盤查是評估紡織企業碳足跡的重要工具之一，通過對整個生產過程中的能源消耗和碳排放進行測量和分析，本公司可識別出高耗能和高排放的環節，並採取相應的節能和減排措施，本公司已完成廠內耗能機具設備、燈具能量盤查並預計於 2026 年完成 2,000kWp 以上之太陽能發電系統，同時經由製程即時動態碳盤查協助本公司瞭解其碳足跡，制定減排目標，並推動本公司生產過程的低碳化轉型。

【關鍵詞】循環經濟、淨零排放、永續發展

*東豐纖維股份有限公司 經理

**東豐纖維股份有限公司 課長

一、前言

近年來，物聯網簡稱(IoT)技術在工業界迅速崛起，大幅提升了製造業的生產效率、品質良率，同時降低了人力和時間成本的浪費；物聯網是一種將設備、機械和數位裝置相互連接的系統(Lee, I., & Lee, K., 2015)，結合了大量的感測器、軟體和其他互聯設備，使得資料的傳輸和接收變得更加高效，進一步，這些資料經過分析，並利用人工智慧進行進階分析和機器學習，建立了整體 AIoT（人工智慧物聯網）系統，旨在提高上下游整合效率、降低生產成本、減少廢料損耗，同時提升管理效能，實現自動化生產流程和瑕疵檢測分析，這些趨勢在紡織業便成為一個重要的研究方向。

在紡織業中，隨著功能性紡織品的高度發展以及消費者對於衣著的需求增加，製程中大量使用不同的化學溶劑、染劑和有機化合物，經過上游紡紗、中游織造和染整加工後，導致產生大量高度污染的廢水；這些廢水中含有各種有機化合物、酸、鹼和重金屬物質，使得廢水處理變得複雜且困難；因此，如何進行製程優化，採用更為環保的清潔生產技術，成為目前我國紡織工業亟需解決的重要課題和發展目標之一。

此外，節能減碳也是紡織工業必須積極應對的挑戰之一，在整體製造過程和生產環境中，必須識別高能耗和高排放的設備和環節，進行重點測量和改善；引入綠能發電系統、制定減排目標以及執行相應計畫，並結合內部碳足跡監控，推動整體生產過程向低碳化轉型，成為紡織工業在環保轉型中的重要任務之一。

目前紡織業正面臨著多重挑戰，包括提高生產效率、減少環境污染、節約能源和降低碳排放，本公司乃藉由整合物聯網技術、環保製程優化和節能減碳措施，有望實現更可持續的發展，同時為環保事業貢獻一己之力。

二、紡織業永續發展、循環經濟和淨零排放現況

2-1 物聯網及智慧製造於紡織業之應用及可持續發展之永續目標

紡織業不斷努力將智慧製造和物聯網技術融入到工廠運營中；然而，物聯網融入紡織業時面臨一個重要問題，即跨平臺操作性差，缺乏通用標準(洪志銘，2017)；此外，物聯網設備種類繁多，存在著在現有硬體和軟體之間的差異，這使得開發變得相當困難；此外，紡織業計畫進入智慧製造領域，必須提高遠端監控技術；智慧製造中的遠端監控技術可以說明工廠隨時瞭解

設備狀態，快速追蹤生產進度，並能夠隨時調整生產計畫，同時降低設備停機或損壞的風險，顯著提高生產效率並延長設備壽命；此外，它還能夠為消費者提供更透明的生產資訊和相關流程。

目前，紡織業的產品製造已經與過去大不相同；過去，紡織工廠內部的生產記錄檢索困難，當客戶要求生產記錄時，無法及時滿足客戶需求，客戶只能購買所需的產品，無法瞭解產品的整個生產過程以及製造工廠的情況；然而，如今全球各大品牌對於生產記錄的追溯趨勢日益重要，經常要求能夠即時遠端檢索產品的生產記錄或相關缺陷報告。

在智慧製造過程中，生產異常跟蹤和生產記錄是品質控制和產品售後管理非常重要的組成部分；它們的功能主要包括監控生產操作、自動修正或改進生產操作、即時回應設備或系統異常並進行故障排除、減少生產線停機的機會和時間、提供實際操作與歷史記錄以及預期結果的比較分析，找出生產異常的原因，並能夠提供消費者或客戶端相關產品的生產記錄和內部人員缺陷分析的過程結果(黎瑀蓉，2018)；因此，如何提高上下游整合效率、即時瞭解生產異常以提高生產良品率、降低生產製造成本、迅速提供客戶產品的生產記錄，將同時提高管理排除故障的效率，實現即時異常通報和解決，以及提供產品整體生產記錄，為消費者提供更透明的產品資訊。

2-2 可持續性紡織廢水回收再利用

紡織業產品持續轉變，發展方向日益朝向高質化、智慧化和環保意識的提高，消費者對於紡織品的要求正在逐漸升高，他們期望產品具有更多的功能性和環保特性，同時，紡織業者也在積極尋求方法，以提高機能性紡織品的效能，縮短生產製造流程，降低製作成本，並提高產品利潤，這已成為眾多紡織業者在產品研發過程中的關鍵焦點，然而，研發設計的重點已轉向產品的多元性和環保性，呈現出高品質、舒適和環保再生應用的新面貌；這需要開發新材料，擴展產品功能，並在紡織工業中使用不同類型的藥劑、染料和有機化合物；製程中產生的廢水，經過抽紗、假撚、織造、染整和後加工等步驟後，排放出大量含有污染物的廢水，這使得紡織產業面臨處理末端廢水的技術挑戰，並且難以實現廢水的回收再利用(陳見財，2014)。

過去，許多紡織和染整工廠處理廢水時主要將不同來源的廢水混合，然後使用大量化學藥劑進行化學處理，以符合排放標準，這種方法並未從根本上對製程中的廢水進行分類和回收再利用，也未將廢水納入後端回收水系統中，以進一步處理後重新用於生產製程；然而，如今，需求已轉向穩定且有效處理各種污染物的綜合廢水，同時保持回收水的質量穩定，以實現廢水的

回收再利用，全球對環境友好和循環經濟的呼籲，使紡織產業如何有效處理末端廢水和廢水回收技術成為一個重要議題，這不僅有助於節約水資源和能源，還有助於提高環境效益(周明輝，2004)。

2-3 可再生能源的應用、能源效率改進、碳排放監測和碳足跡評估

紡織業是全球最大的製造業之一，但它也是一個能源密集型行業，對環境和氣候變化產生了巨大的影響，隨著對可持續發展的需求日益增加，紡織業正積極尋求在生產過程中應用可再生能源、改善能源效率、監測碳排放並評估碳足跡的方法。

首先，紡織業可以利用可再生能源來減少對傳統能源的依賴，太陽能 and 風能是最常見的可再生能源，可以用於提供電力和熱能，太陽能光電板可以安裝在紡織廠的屋頂上，將太陽能轉換為電能，供給裝置的運轉；同樣地，風力發電可以在紡織廠周圍建立風力發電機組，利用風能發電，這些可再生能源不僅可以減少對傳統能源的需求，還可以減少碳排放，從而降低紡織業對氣候變化的負面影響。

其次，紡織業可以透過改善能源效率來節約能源和降低碳排放，紡織生產過程中存在著許多能源浪費的問題，例如能源裝置的老化和執行不當，以及能源管理不佳等，為瞭解決這些問題，紡織業可以引入先進的節能技術和裝置，例如高效照明系統、節能機械等，以降低能源消耗；同時，紡織廠也可以透過改善生產過程中的能源利用效率，減少能源浪費，這樣不僅可以節省能源成本，還可以減少碳排放，提高生產效率。

最後，碳足跡評估可以幫助紡織業瞭解整個產品生命週期中的碳排放情況，透過碳足跡評估，紡織業可以確定哪些環節或產品具有高碳排放，然後採取相應的減排措施，碳足跡評估還可以幫助紡織業與消費者進行溝通，提供更具有可持續性和低碳的產品，這不僅能夠滿足消費者對環境友好產品的需求，還能提高企業的競爭力。

總結來說，紡織業在可再生能源的應用、能源效率改進、碳排放監測和碳足跡評估方面有很大的改進空間，透過應用可再生能源，改善能源效率，監測碳排放並評估碳足跡，紡織業可以實現更可持續的發展，減少對環境的影響，同時為企業帶來更多的競爭優勢(郭子平，2011)，隨著技術的不斷進步和意識的提高，紡織業將能夠在可持續發展的道路上取得更大的成就。

三、紡織業永續發展、循環經濟和淨零排放之系統建置及執行

3-1 雲端實時紡織智能生產資訊管理監控預警整合系統

紡織業面臨的一個重要問題是跨平臺操作性的差異和缺乏通用標準，為應對這一挑戰，本公司組建了一個專業的資訊團隊，開發了雲端實時紡織智能生產資訊管理監控預警整合系統，以滿足紡織業智能化生產管理的關鍵需求，這個系統整合了多個重要元素，包括感測裝置、通訊系統、伺服器主機、中央資訊整合系統、雲端資料庫和終端設備，旨在實現生產過程的監控、數據分析和即時預警；感測裝置是系統的關鍵組件之一，安裝在紡織自動化設備上，例如生產設備、染整設備、回收設備和廢水處理設備，這些感測裝置監控各設備的即時狀態，並可隨時發出警報，以確保生產過程的正常運作；通訊系統負責將感測裝置收集的數據傳送到伺服器主機，以進行處理和分析；伺服器主機是系統的核心，用於存儲和處理大量數據；中央資訊整合系統則分類和處理不同類型的數據，並將其存儲在雲端資料庫中；最後，終端設備為用戶提供界面，可接收和顯示即時監控數據，以及接收警報訊息。雲端實時紡織智能生產資訊管理監控預警整合系統的目標是實現紡織產業的智能化監控和管理，提高生產效率和品質，同時為管理者提供更好的數據支持。

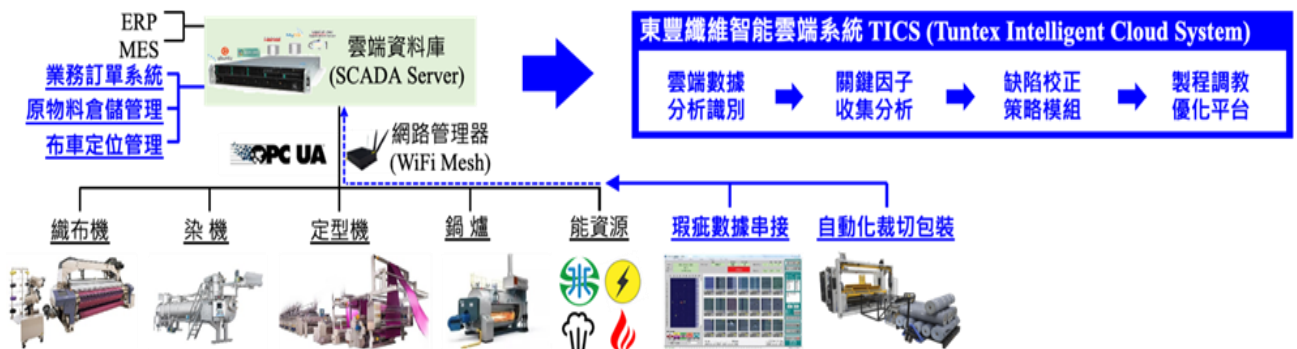


圖 1 智能生產資訊管理監控預警整合系統示意圖

雲端實時紡織智能生產資訊管理監控預警整合系統的目標是實現紡織產業的智能化監控和管理，提高生產效率和品質，同時為管理者提供更好的數據支持。

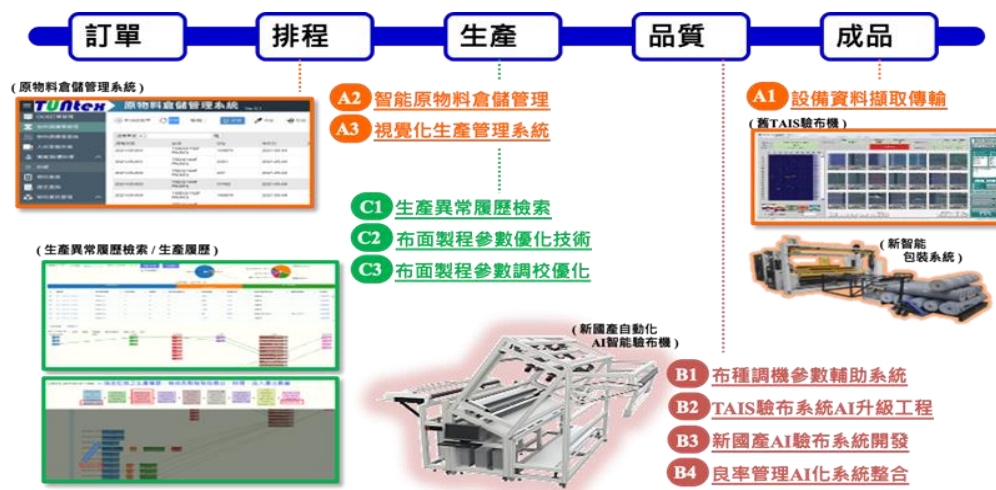


圖 2 智能生產即時監控數據示意圖

此外，本公司還開發了一個紡織業生產瑕疵異常通報及履歷檢索系統，旨在記錄和通報生產過程中的各種異常情況，並提供生產履歷檢索的工具，以確保所有過程和品質都受到控制。

這個系統包括紡織設備、資訊設備、伺服器主機和生產履歷檢索平台，紡織設備上安裝了生產狀態感測裝置，用於監控生產狀態信息，而資訊設備生成訂單和流程管理資訊；伺服器主機整合和存儲各種數據，包括異常數據和生產履歷；另外，生產履歷檢索平台允許客戶通過查詢不同信息來檢索生產履歷，以提高效率和瑕疵排除效能。

紡織業生產瑕疵異常通報及履歷檢索系統主要目標是幫助工廠追蹤生產異常狀態，通過數據收集、異常數據整合和通報，實現瑕疵異常通報和整合分析，同時，消費者可以通過生產履歷檢索平台了解產品的整體生產履歷，從而提高整體效率和瑕疵排除效能。

為實現更全面的管理解決方案，我們開發了紡織業視覺化製造設備管理系統，旨在實現地端自動化機械設備、資訊設備、伺服器主機和產線智能雲端系統的無縫整合，以提高原物料使用效率、降低廢料，並實時監控製造過程。主要目標是實現紡織業生產過程的高效管理和資訊整合，提高生產效率、減少廢料，並實時監控製造過程，有助於提高競爭力並降低成本。



圖 3 紡織業視覺化製造設備管理系統示意圖

3-2 紡織業的可持續發展：廢水回收再利用技術與應用

隨著原物料減少和環境意識的提高，越來越多的紡織業者正在尋找創新的解決方案，以實現永續發展的理想目標，其中一個主要的問題是染整業排放的廢水，為了應對這個問題，本研究提出了一種綜合的廢水處理和回收再利用技術，特別適用於大型紡織染整工廠，這種技術將不同來源的廢水混合在一起，經過均勻混合、生物處理、化學處理和過濾等步驟，最終實現水資源的回收再利用，這種方法降低了環境汙染，同時節省了寶貴的水資源，也提高了整體循環經濟效益；具體而言，這種技術的實施步驟如下：

1. 混合廢水：織布廢水和染整廢水來源不同，但都包含有害成分，首先，將這些廢水混合在一起，以實現更好的處理效果。
2. 生物處理：通過生物處理過程，利用微生物分解有機污染物，降低廢水中的污染物濃度，有助於使廢水達到更高的水質標準。
3. 化學處理：接著，使用化學處理方法進一步處理廢水，以去除殘留的污染物，確保廢水達到排放標準。
4. 過濾：最後，通過過濾步驟，從處理後的廢水中去除任何固體顆粒懸浮物，使其適合於再利用。

這種技術的關鍵優勢之一是可以將處理後的廢水應用於染整和織布製程，確保了與原水染色相似的效果，此外，部分廢水還進一步通過 RO 逆滲透回收系統處理，提高了廢水資源的回收再利用功能，降低了環境汙染，同時節省了水資源的使用。

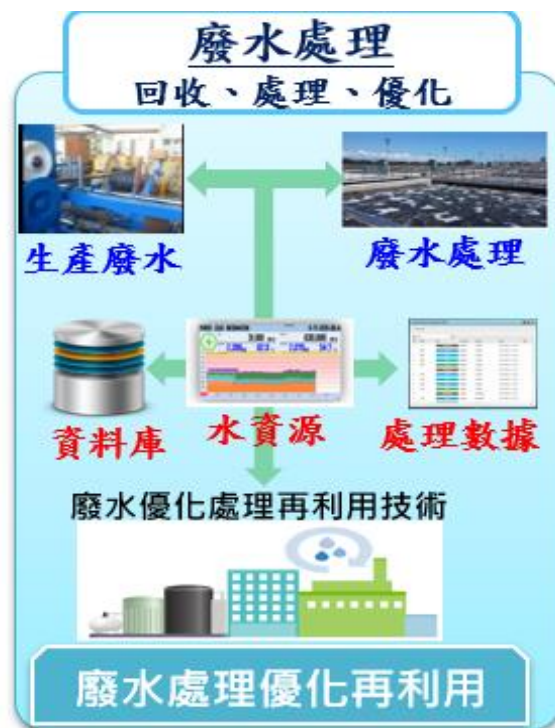


圖 4 紡織業廢水處理和回收再利用技術示意圖



圖 5 紡織業廢水處理和回收再利用成果示意圖

3-3 紡織業製程碳盤查、減排目標及低碳化轉型

紡織業作為製造業的關鍵部分，正積極採取措施以實現可持續性發展，本文將探討紡織業在可再生能源應用、能源效率改進、碳排放監測和碳足跡評估等方面所採取的重要措施，以實現碳盤查、減排目標和低碳化轉型。



圖 6 紡織業碳盤查極低碳化轉型示意圖

- 1.製程碳足跡監測：瞭解每個製程的碳足跡至關重要，包括紡紗、織造、染整和成衣製造等等，本公司積極評估和監測每個製程的碳排放情況，並根據評估結果制定相應的減排策略。

Tuntex Quality Advance Capability

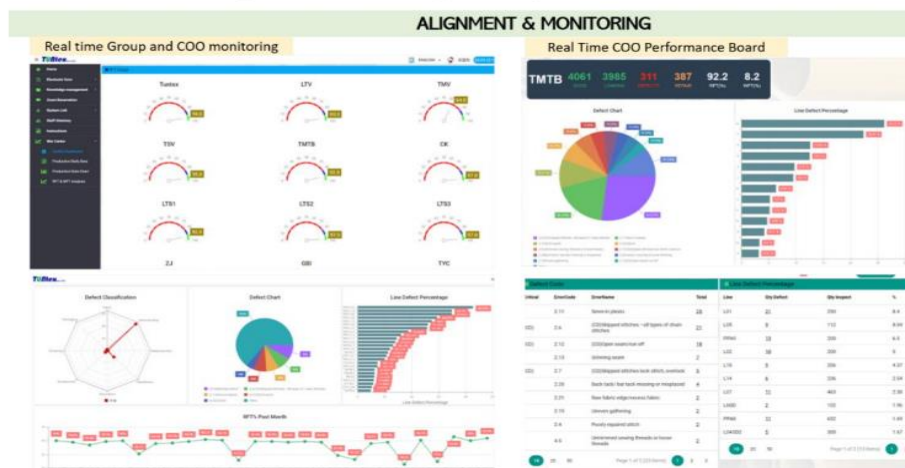


圖 7 紡織業製程碳足跡監測情況示意圖

- 2.生產資訊串接和能源資源管理：實現製程生產資訊的串接，確保各個製程之間的協同作業，同時亦有效地管理和監控能源消耗，以降低能源浪費。
- 3.廢料再生燃料：極研究如何將廢料轉化為可再生能源，以降低對傳統能源的需求，同時實現資源的可持續再利用，這不僅有助於環境保護，還減少了廢料處理的成本。

4.自動化和標準化：本公司利用自動化裝置和標準化製程參數來實現生產過程的穩定性和高效性，同時減少了資源浪費。

5. 碳盤查和供應鏈碳足跡評估：紡織業應建立完整的碳盤查系統，收集直接和間接的排放資訊，並瞭解供應鏈中的碳足跡，這有助於評估整個生產過程的碳排放，制定相應的減排策略。

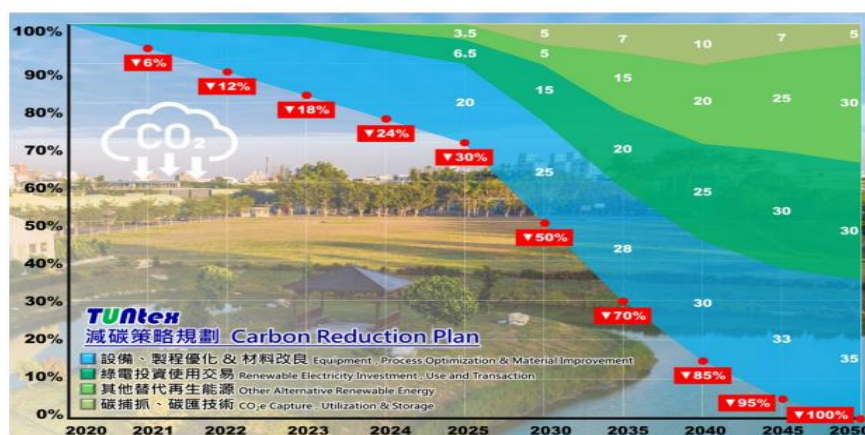


圖 8 本公司減碳策略規劃示意圖

6. 太陽能發電系統的應用：本公司已經完成整廠太陽能光電板綠電的安裝，大幅減少對傳統化石能源的依賴，同時降低碳排放。

7.推動低碳化轉型：透過即時動態碳盤查和分析深入瞭解其碳足跡，制定減排目標，並推動生產過程的低碳化轉型。



圖 9 紡織業碳管理整合應用平台循環示意圖

四、結 論

本公司堅定地追求永續發展，並積極採取多種創新解決方案，以應對當前的環境挑戰，我們認識到在紡織業中，實現可持續性是我們的責任，也是未來的趨勢，在這個過程中，我們已經取得了令人矚目的進展，並將繼續不懈努力，以確保我們的行業能夠實現更環保、更可持續的未來。首先，我們通過自動化、智慧製造和資訊科技的應用，提高了生產效率和品質，不僅降低了我們的環境負擔，還減少了資源浪費，本公司利用資訊整合系統不僅提供了更好的數據支持，還使我們能夠更靈活地應對市場需求和永續性的要求，這為我們帶來了更多機會和競爭優勢，確保我們在未來能夠持續繁榮。其次，我們深刻明白廢水處理和回收再利用技術在紡織業中的重要性，這些技術不僅有助於降低環境汙染，還提高了資源的有效利用，本公司積極投入了這方面的努力，以創建更環保和永續發展的未來，我們相信這將為整個行業帶來穩健的發展，同時為地球的環境保護做出了重要貢獻。最後，我們通過太陽能發電系統的應用、自動化製程監控、碳盤查和低碳化轉型等措施，積極實現永續發展之生產製程，這些舉措不僅有助於減少碳排放，還有助於減輕對環境和氣候變化的影響，本公司的目標是引領紡織業邁向更環保、更可持續的未來，並為社會和環境的整體健康作出積極貢獻。

五、參考文獻

1. Lee, I., & Lee, K. (2015), "The Internet of Things (IoT): Applications, investments, and challenges for enterprises," *Business Horizons*, Vol. 58, No. 4, pp. 431-440.
2. 洪志銘 (2017)。紡織業推動智慧製造案例分析。經濟前瞻, (169), 97-101.
3. 黎瑀蓉 (2018)。應用機器學習演算法於辨識製程異常樣式之研究-以紡織紗線製程為例。元智大學工業工程與管理學系，碩士論文。
4. 陳見財 (2014)。廢水處理常見問題與對策，財團法人台灣產業服務基金會。
5. 周明輝 (2004)。生物製劑在廢水處理上之應用-以石化業為例 國立屏東科技大學環境工程與科學系碩士班，碩士論文。
6. 郭子平 (2011)。從碳足跡：溫室氣體排放量盤查建立綠色產品管理制度～以 S 公司產品型碳足跡為例，碩士論文。

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為唯一解方。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%，因此水泥被視為急需減碳的產業，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，約佔整體排放的 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。目前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 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，其中方法學參考了 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。

【關鍵詞】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。其中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九成以上，並且約佔世界排碳 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。經由 IPCC 報告中所指的全球暖化幅度需控制至 1.5C^[1]，若超過 1.5C 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—石灰石在高溫鍛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於精進於減碳技術還要有也要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，使物料的複雜性不斷提升，但為了實現更高的效率和更環保的生產，各大水泥企業積極進行技術創新和製造工藝優化。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，其主要包含矽、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

透過採掘的石灰石、黏土..等原料經過成分的調配，以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(脫酸)排出二氧化碳，並形成具有活性之氧化鈣。經鍛燒脫酸之生料進入旋轉窯後，在高溫下，約有四分之一材料形成熔融態，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,C3S)、矽酸二鈣(dicalciumsilicate,C2S)、鋁酸三鈣(tricalciumaluminate,C3A)、鋁鐵酸四鈣(tetracalciumaluminoferrite,C4AF)。在國內，預熱機及旋轉窯使用燃料多為煤炭，在旋轉窯內將生料以約1450°C高溫下燒結成為熟料礦物，火焰溫度可高達1,600~1,800°C。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°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。將有助於增強水泥業對環境的影響，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，熟料生產為主要排放源，其中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鍛燒後脫酸形成CO₂排放，為不可避免之排放，約佔整體排放60%，另一為燃料排放為熟料生產的熱源提供，一般以煤炭、重油當作燃料，約佔整體排放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，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及製程熱效率改善，並開始研發新創減碳技術；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，水泥業透過以下兩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，間接減少製程排放，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，也能減少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....等，取代煤炭、重油作為燃料使用，降低燃料排放係數。

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 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/tclinker)^[2]。

3. 生產及推廣低碳水泥：

接續兩項熟料的減碳措施，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 13 個百分點的差距。其原因在於我國預拌混凝土業者習慣於使用卜特蘭水泥，鮮少使用熟料佔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墁砌水泥規範；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，增加了混合水泥總類，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，還需持續向下游廠進行環境教育及推廣活動，使低碳水泥逐漸取代卜特蘭水泥，使我國水泥中熟料的比率有大幅度的下降。

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。透過推動碳稅、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 (belitecalciumsulfoaluminate,BCSA)、活性富矽酸二鈣水泥 (reactivebelite-richPortlandcement,RBPC)、鍛燒高嶺土石灰石水泥 (limestonecalcinedclaycement,LC3)、鹼激發材料 (alkali-activatedmaterials) 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 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 碳捕捉利用及封存：

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獲技術主要包括：

- (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獲效率的富氧燃燒法 (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 CCUS 技術直到今日仍十分昂貴，目前每噸二氧化碳捕獲成本從 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，碳捕獲成本可望進一步降低，推估未來每噸二氧化碳捕獲成本可能降低到 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，負碳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 在混凝土實現二氧化碳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碳排放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完全淨零排放不可或缺的最重要途徑。2009 年 IEA/WBCSD 水泥減碳路徑圖導入了 CCUS 作為主要減少二氧化碳排放的手段，預估 2050 年約有 56% 的二氧化碳減排量需依賴 CCUS 達成，並估計這將需要 321 至 592 億美元的投資。2017 年 UNEP 針對可行性低碳水泥基材料的研究報告指出^[3]，自 2009 年 IEA/WBCSD 發布水泥減碳路徑圖至今^[4]，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，而不會讓混凝土減碳變得過於昂貴。但無論如何，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 年混凝土是否能達成碳中和的關鍵。

四、水泥業淨零排放路徑介紹：

以上為水泥業減碳技術說明，而為使水泥業能夠於 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 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^[5]

全球水泥及混凝土協會(The Global Cement and Concrete Association，簡稱 GCCA)是由全球水泥及混凝土製造商組成的組織，會員廠佔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》中，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、碳捕捉利用及封存(CCUS)、電力脫碳、自然再碳酸化，並明確了這些措施在 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，他們要求在 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輔助性膠結材料(supplementary cementitious material,SCM)取代部分高碳排熟料，使產品碳排持續降低。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)提高混凝土生產效率

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)在營建設計及施工過程中提高混凝土的使用效率，包括混凝土的再利用。

(5)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，以為進入 2030 年時作好準備。

(6)發展碳捕捉利用及封存技術和基礎設施

CCUS 技術目前則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。

(7)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的公共政策其中的核心作用，需要相關法規及標準的安裝，這需要水泥業者、政策制定者及政府的共同努力，推動低碳水泥生產政策、協助加強低碳混凝土的需求，打造淨零排放場所需的基礎設施。

2.水泥協會淨零排放路徑圖介紹^[2]

歐洲水泥協會(TheEuropeanCementAssociation,CEMBUREAU)在 2020 年發布的淨零排放路線圖，請參閱圖 1，說明了如何利用 5C，分別為熟料、水泥、混凝土、營造及(再)碳化(Clinker,Cement,Concrete,Construction, re-Carbonation,5C)達成淨零排放。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%，設定全球一致於 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、持續提高熱效率、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；水泥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了它的減碳貢獻，在 IPCC 第 6 次評估報告中(IPCC6thAssessmentReport,IPCCAR6)，被納入碳移除的計算中。根據瑞典 IVL 環境研究所數據顯示，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%。

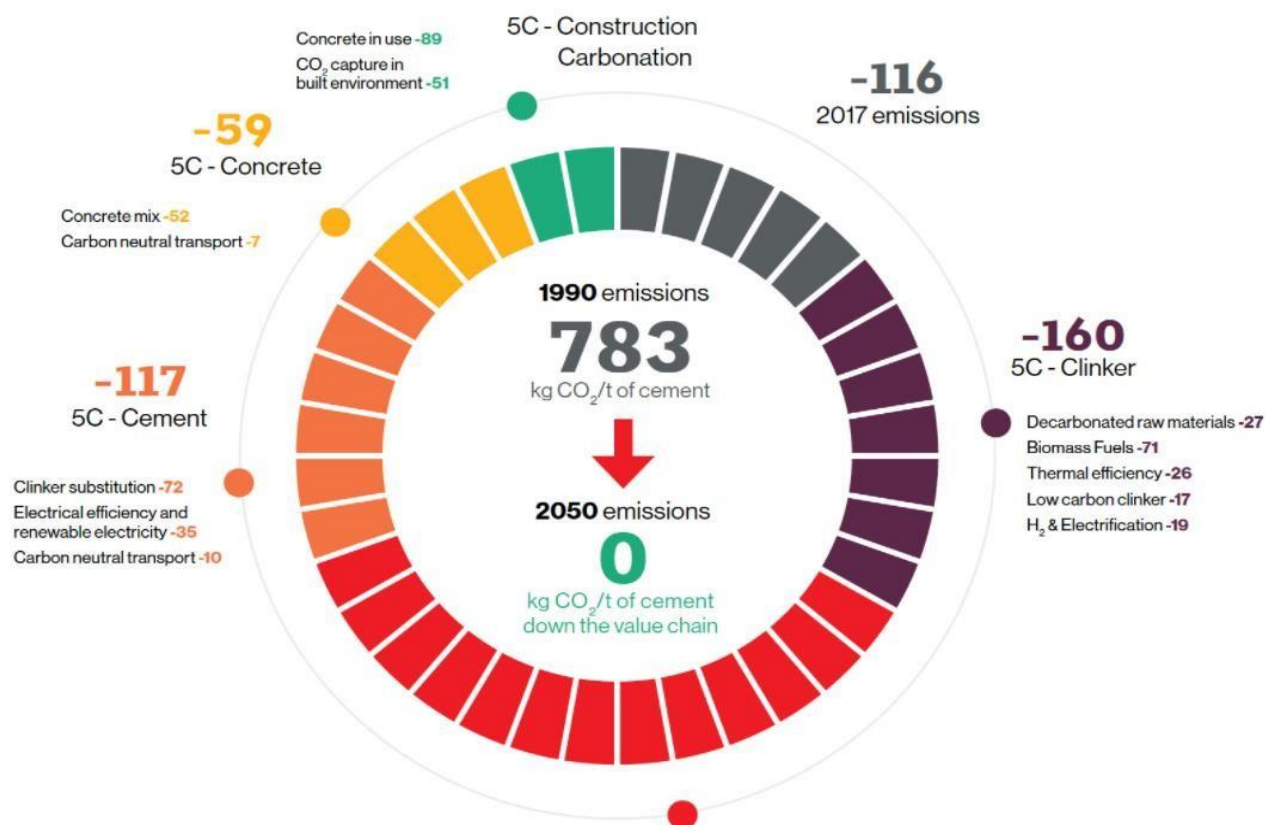


圖 1 歐洲水泥協會減碳路徑圖

五、國內水泥業碳排放計算

混凝土為人類使用量最大的建築材料，且混凝土排碳佔比最高的原料即為水泥，如何在水泥製造過程中大幅降低二氧化碳排放的重要性無須贅述。在透過了解各國國際組織淨零排放路徑圖後，筆者認為 GCCA 及歐洲水泥協會淨零路徑圖範疇包括了混凝土、水泥及營建業，涵蓋範圍過大，非單一公司可執行，為使各產業達到淨零，各產業必需有各自產業淨零路徑圖，才能清楚了解產業各製程的改善情形。歸屬於水泥廠製程邊界的主要減碳措施包括：降低單位熟料碳排放、開發使用新低碳膠結材料、降低水泥中熟料比例等措施，並需要相應之措施減碳目標，才可一步步達到淨零。

以下為一水泥公司碳排放計算範例，其程序和項目參考 GCCA 淨零排路徑圖計算及國內水泥業 SBTi 目標盤查經驗，圖 2 為水泥碳排放強度計算步驟，提供讀者參考。首先，第一步為碳排放邊界設定，因本章節計算目的在於了解並增加減碳措施成效，故筆者建議選擇具有營運控制權的設施做為邊界，以下以水泥生產工廠為邊界作為範例。第二步為收集水泥生產工廠之大型排放源相關資料，誠如前述，水泥生產工廠之碳排放來源主要為：熟料生產排放(包含製程排放以及燃料排放)及電力間接排放，蒐集相關數據以利後續計算水泥排放強度。第三步為計算熟料排放係數，此值可分為製程排放及燃料排放分別計算。第四步為計算水泥電力排放係數，可透過生產工廠用電量除以水泥產量計算得出。透過以上三個參數及水泥中熟料比例，計算後可得到各型別水泥排放強度。

詳細計算方法及公式如下：

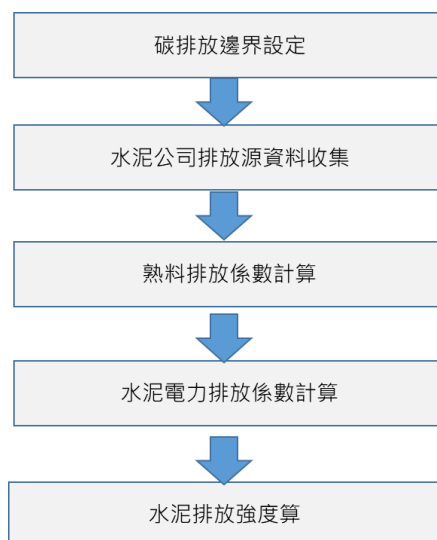


圖 2 水泥碳排放強度計算步驟

(一)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。

(二)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 ISO14064 劃分之類別 4~6 排放因評估複雜且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：

- (1) 熟料產量[ton]
- (2) 熟料 CaO、MgO 成分[%]
- (3) 年度熟料耗熱[MJ/(t-clinker)]
- (4) 替代原料種類
- (5) 替代原料用量[ton]
- (6) 替代原料 CaO、MgO 成分[%]
- (7) 傳統燃料種類(燃煤、重油..等)
- (8) 傳統燃料用量[ton]
- (9) 傳統燃料單位重量熱值[MJ/ton]
- (10) 傳統燃料碳排放係數[t-CO₂/MJ]
- (11) 替代燃料種類
- (12) 替代燃料用量[ton]
- (13) 替代燃料單位重量熱值[MJ/ton]
- (14) 替代燃料碳排放係數[t-CO₂/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：

- (1) 水泥生產總量[ton]
- (2) 各型別水泥產量[ton]
- (3) 熟料入磨用量[ton]
- (4) 各型別水泥中熟料比例[(t-clinker)/(t-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：

- (1)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
- (2)綠電用電量[kWh]
- (3)餘熱回收發電量[kWh]
- (4)外購電力度數[kWh]
- (5)外購電力排放係數[kg-CO₂/kWh]
- (6)各型別水泥研磨耗電量[kWh/t-cement]

(三)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(CaCO₃)及碳酸鎂(MgCO₃)受熱分解後提供，分解過程將伴隨產生二氧化碳(CO₂)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(CO₂)。以此概念，先透過熟料中的 CaO、MgO 成份回推出皆以碳酸鹽類(CaCO₃、MgCO₃)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。以上兩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)

$$\text{製程排放} \left[\frac{t - CO_2}{t - \text{clinker}} \right]$$

$$= \frac{\left\{ \left(\text{熟料產量} [\text{ton}] \times \text{熟料 CaO} [\%] \times \frac{CO_2 \text{ 分子量}}{CaO \text{ 分子量}} \right) + \left(\text{熟料產量} [\text{ton}] \times \text{熟料 MgO} [\%] \times \frac{CO_2 \text{ 分子量}}{MgO \text{ 分子量}} \right) \right\}}{\text{熟料產量} [\text{ton}]}$$

$$= \frac{\left\{ \left(\sum_{i=1}^n \left(\text{替代原料}_i \text{ 用量} [\text{ton}] \times \text{替代原料}_i \text{ CaO} [\%] \times \frac{CO_2 \text{ 分子量}}{CaO \text{ 分子量}} \right) \right) + \left(\sum_{i=1}^n \left(\text{替代原料}_i \text{ 用量} [\text{ton}] \times \text{替代原料}_i \text{ MgO} [\%] \times \frac{CO_2 \text{ 分子量}}{MgO \text{ 分子量}} \right) \right) \right\}}{\text{熟料產量} [\text{ton}]}$$

2.燃料排放

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

$$\text{燃料排放因子} \left[\frac{t - CO_2}{MJ} \right] = \sum_{i=1}^n (\text{燃料}_i \text{ 供熱比例} [\%] \times \text{燃料}_i \text{ 碳排放係數} \left[\frac{t - CO_2}{MJ} \right])$$

$$\text{燃料}_i \text{ 供熱比例 } [\%] = \frac{\text{燃料}_i \text{ 用量 } [\text{ton}] \times \text{燃料}_i \text{ 單位重量熱值 } \left[\frac{\text{MJ}}{\text{ton}} \right]}{\sum_{i=1}^n (\text{燃料}_i \text{ 用量 } [\text{ton}] \times \text{燃料}_i \text{ 單位重量熱值 } \left[\frac{\text{MJ}}{\text{ton}} \right])}$$

燃料_i 包含傳統燃料及替代燃料。

3. 熟料排放係數

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

(四) 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。

$$\text{水泥電力排放係數} \left[\frac{t - CO_2}{t - \text{Cement}} \right]$$

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

(五) 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：

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

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，我們可透過下列步驟規劃自身淨零排放路徑圖：

1. 設定目標值(單位水泥排放強度)：基準年定義及目標年水泥排放強度制定
2. 熟料排放係數制定
3. 各型水泥熟料比例假設
4. 電力排放係數制定
5. 各型水泥排放強度
6. CCUS 減碳量制定
7. 水泥型別產量比例調整

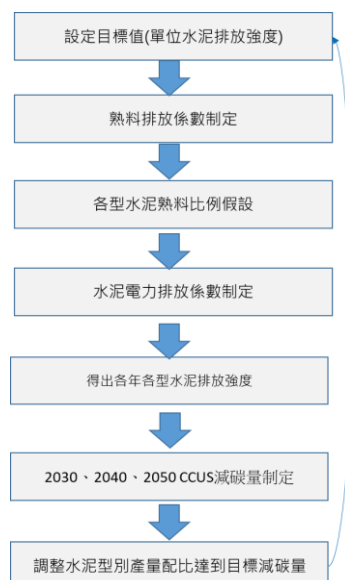


圖 3 淨零排放路徑評估方法步驟

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)

首先需要確定明確的年度目標，這將是我們前進道路的基石，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%。

這三者可視為水泥業碳排放的重要參考。一旦確定了年度指標，我們便可以著手製定具體的減碳計劃。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^[6]。熟料排放係數與各公司或工廠使用替代原料、替代燃料的狀況，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：物料成分將影響作為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。

(2)未來循環經濟設備投資：設備投資將大幅影響物料使用量，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，利用前一章節所列公式，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，為一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。

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

表 1 熟料排放係數目標

3.各型水泥熟料比例假設

各型水泥中熟料比例設定，應考慮：

(1)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：CNS61 卜特蘭水泥、CNS13512 壩砌水泥、CNS15286 水硬性混合水泥…等。

(2)自身公司或工廠生產低碳水泥的種類及條件：考量原料取得難易度(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。

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

水泥電力排放係數制定，可考量以下幾點作為評估依據：

(1)公司於製程節能之投資

(2)公司於再生能源之投資或策略

(3)能源署預估之年度電力排放係數

(4)生產低碳水泥的種類及條件：生產不同型別水泥可能需要改變產品細度，影響研磨耗電。

(5)CCUS 技術投資：國際上 CCUS 技術尚在起步階段，參酌各路徑圖分析，使用 CCUS 技術將會提高電力耗用量。

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：

$$\text{各型水泥排放強度} \left[\frac{t-CO_2}{t-Cement} \right] = \text{熟料排放係數} \left[\frac{t-CO_2}{t-clinker} \right] \times \text{各型水泥熟料比例}$$

$$\left[\frac{t-clinker}{t-Cement} \right] + \text{水泥電力排放係數} \left[\frac{t-CO_2}{t-Cement} \right]$$

實際範例參考表 3，為一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 3、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	磚砌水泥	混合水泥	卜特蘭水泥	磚砌水泥	石灰石水泥	新膠結材混合水泥	磚砌水泥	石灰石水泥	新膠結材混合水泥	磚砌水泥	石灰石水泥	新膠結材混合水泥
水泥中熟料比例	kg-clinker/kg-cement	0.91	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-CO2/ton-clinker	0.892	0.820			0.762			0.645			0.475		
- 單位熟料 製程 排放	ton-CO2/ton-clinker	0.55	0.507			0.472			0.402			-		
- 單位熟料 燃料 排放	ton-CO2/ton-clinker	0.34	0.314			0.290			0.243			-		
單位水泥電力排放	ton-CO2/ton-cement	0.054	0.054			0.054			0.054			0.000		
各型別單位水泥碳排放	ton-CO2/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(碳捕捉、封存及利用)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，不同技術對於碳捕獲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 減碳約佔 2019 總碳排 0.6%、2%，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。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。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範例：

- (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)墾砌水泥：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%，故墾砌水泥最高比率為 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以及表 4。

各型水泥排碳量：

各型水泥排碳量[t-CO₂]

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

整體水泥排放強度：

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

表 4 各製程年度減碳目標

項目	單位	2019	2025			2030			2040	2050		
水泥型別	--		卜特蘭水泥	礮礱水泥	混合水泥	卜特蘭水泥	礮礱水泥	石灰石水泥	新膠結材混合水泥	礮礱水泥	石灰石水泥	新膠結材混合水泥
水泥總年產量	ton-cement	3000000	3000000			3000000			3000000	3000000		
各型別水泥年產量	ton-cement	3000000	60000	150000	2790000	411000	2574000	15000	450000	1050000	1500000	2100000
水泥各型別生產佔比	--	100.00%	2.00%	5.0%	93.0%	13.7%	85.8%	0.5%	15.0%	35.0%	50.0%	70%
各型別水泥熟料產量	ton-clinker	2730000	45000	124500	2538900	308250	2136420	7500	337500	871500	750000	1050000
水泥中熟料比例	kg-clinker/kg-cement	0.91	0.750	0.830	0.910	0.750	0.830	0.500	0.750	0.830	0.500	0.500
水泥中平均熟料比例	kg-clinker/kg-cement	0.91	0.903			0.817			0.653	0.587		
單位熟料碳排放	ton-CO2/ton-clinker	0.892	0.820			0.762			0.645	0.475		
- 單位熟料製程排放	ton-CO2/ton-clinker	0.55	0.507			0.472			0.402	-		
- 單位熟料燃料排放	ton-CO2/ton-clinker	0.34	0.314			0.290			0.243	-		
單位水泥電力排放	ton-CO2/ton-cement	0.054	0.054			0.054			0.054	0		
水泥年度總碳排放	ton-CO2	2598714	2385076			2005376			1296428	0		
各型別水泥年度碳排放	ton-CO2	2598714	40181	110297	2234598	257199	1767634	6530	242093	619035	565235	160313
各型別單位水泥碳排放	ton-CO2/ton-cement	0.866	0.670	0.735	0.801	0.626	0.687	0.435	0.538	0.590	0.377	0.356
CCUS	ton-CO2	0.00	0			25987			129936	1006693		
單位水泥碳排放	ton-CO2/ton-cement	0.866	0.795			0.668			0.432	0.000		
減碳百分比(含CCU)	--	-	8%			22.8%			50%	100.0%		

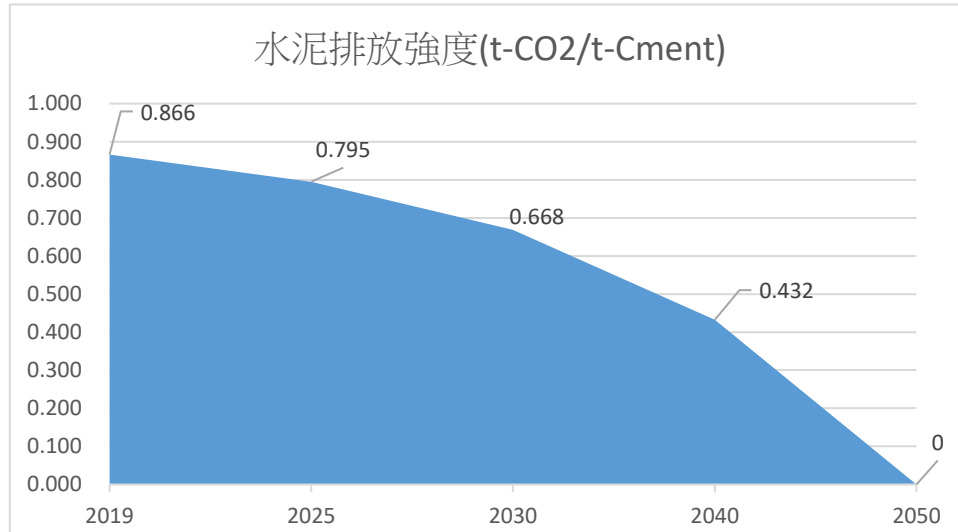


圖 3 淨零排放路徑圖(單位)

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，並可以此數據做出水泥廠之 2050 淨零排碳路徑圖。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。而如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，將需透過循環經濟降低熟料排放係數，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。

七、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。此外，本文還提到了客戶的習慣、法規限制、投入成本等因素對創新的發展產生的影響，這些因素也需要被考慮進去。在實現淨零排放的過程中，我們需要克服許多困難和挑戰。例如，水泥業是一個資本密集型產業，需要大量的投資和調整現有的生產製程，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。這份路徑圖的製定和實施，將使我們提供明確的方向，以完成淨零排放的目標。透過碳排放計算方法學持續追蹤各製程是否減碳目標。而在實現淨零目標的過程中，還需克服各種困難和挑戰，不斷地追求創新和改善減碳技術，持續達成年度指標，才能實現淨零排放的目標，而再未來減碳壓力越來越大的情況，為推行循環經濟及低碳水泥推廣還需政府、國內專家學者與水泥業共同努力透過政策及規範的修訂，製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做出貢獻。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。

八、參考文獻

1. key messages_GCCA members , GCCA , 111 年 9 月 。
2. Cementing the European Green Deal-Reaching Climate Neutrality along the Cement and Concrete Value Chain by 2050 , CEMBUREAU , 109 年 。
3. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO2 cement-based materials industry. , UNEP , 106 年 。
4. Cement Technology Roadmap 2009 , OECD/IEA and WBCSD , 98 年 。
5. Concrete Future-The GCCA 2050 Cement and Concrete Industry Roadmap for Net Zero Concrete , GCCA , 110 年 。
6. CEMBUREAU KEY FACTS&FIGURES , CEMBUREAU 2023 年
7. GNR 資料庫 (Getting the Numbers Right) , GCCA 。

應用節能增氧曝氣筒於工業廢水系統提升氨氮轉換率及降低能耗之研究

鍾良信*、林伯勳**、王奕鈞***、余邵霖****、鍾昇儒*****

摘 要

在政府持續推動鮭魚返鄉以及產業升級之下，將造就電力需求增加、土地需求增加、污水排放量也將隨之增加。再者，為減緩溫室效應的衝擊，污水排放管制標準的提升及碳稅課徵在即，產業須盡早實施節電、減少藥劑用量、廢水系統的優化、減少水處理設備空間及提高水資源的再利用性。

廢水廠的最大耗電設備為各式泵浦以及鼓風機，其中又以鼓風機搭配散氣盤(管)的耗電量占比最高，因此，若能改善因散氣盤的膜片造成過高的靜壓損，以及鼓風機凝結水不易排除的困擾，且同時提升廢水系統處理效能及減少能耗與碳排，對於廢水處理業界將有莫大的幫助。

節能增氧曝氣筒，是一個同時兼具攪拌、清淤、增氧、降氨氮、節能等五大功效的曝氣設備，目前在業界已有多處實績，其中應用於含有高濃度氨氮的新北市某污水處理廠，協助在氨氮的轉換率由 47.52% 提升至 75.87%，且即使於廢水量由 26,323 CMD 增加至 28,352 CMD 的環境下，仍讓鼓風機的月平均耗電量由 7,920 度下降至 7,365 度，減少 7% 的耗電量。

另一案例為應用於產業園區服務中心污水處理廠，在相同鼓風機運轉設定下，不但使溶氧提高、微生物生長正常外，更大幅的降低了鼓風機耗電量約每日 1,000 度(換算年度碳排量約為 0.48 座大安森林公園)。

由於業者的節能增氧曝氣筒因耐用且無耗材設計，並允諾商品可 100% 回收，符合 SDGs 的潔淨水源以及產銷責任，獲允登入於經濟部社會創新平台。

【關鍵詞】操作維護、環境管理系統、節能、減碳、生物池、氨氮

*華照環保設備有限公司 總經理

**國立中央大學環境工程研究所 副教授

***國立中央大學環境工程研究所 碩士生

****國立中央大學環境工程研究所 碩士生

*****華照環保設備有限公司 副理

一、前言

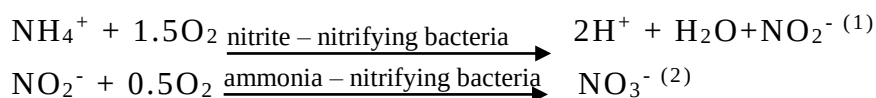
隨著產業的升級與成長，工業廢水水量不斷增加、水質不斷複雜化，若未能確實有效的處理，將對環境造成嚴重衝擊。

在污水排放管制標準的提升和碳稅實行的要求下，進一步推動了廢水處理行業朝著更環保和節能的方向發展。因此，我們不僅需要降低能耗，減少廢水處理過程中使用的藥劑，還需要提高水資源的再利用性，以實現符合未來發展的廢水處理技術。

在能耗方面，廢水廠中鼓風機是最大的耗電設備之一，特別是搭配膜片式散氣設備後，由於鼓風機產出的凝結水無法順利排出，導致了鼓風機的運作較不順暢，同時，因膜片式散氣設備的動作原理，系統將產生過高的靜壓損，加上鼓風機凝結水難以排除等問題，直接影響了散氣設備的效能，導致鼓風機的能源消耗約佔整個廢水處理系統的 40% 以上。

本研究自行研發生產的節能增氧曝氣筒，具有較低壓損、較高的氧傳能力及較佳的攪拌能力，可進行系統中沉積物的清理，進而再以曝氣筒的高氧傳能力，快速提升水中的溶氧。當水中溶氧提升後，可提升污染物去除效果，其中又對硝化作用有顯著提升。

習知技術可以得知硝化反應的機制有二個階段，如曾明加^[3]所述，第一個階段是氨氧化菌為將氨氮氧化成亞硝酸鹽如反應式(1)，而亞硝酸氧化菌再將亞硝酸鹽氧化成硝酸鹽，如反應式(2)；



由上列反應式顯示，硝化反應第一階段氧化氨產生亞硝酸鹽之過程，其理論需氧量為 3.43 kg；硝化反應第二階段氧化亞硝酸鹽生成硝酸鹽之過程，其理論需氧量為 1.14 kg。因此，氧化 1 kg 之氨氮理論上需氧量為 4.57 kg。由反應式中可以得知，氨氮轉換成硝態氮的過程中，氧氣的提供是相當重要的，足夠的溶氧可大幅提升硝化反應的進行，而溶氧(Dissolved oxygen, DO)是指已經溶解在水中的部分，而不是於水面上看到的氣泡，因為氣泡的表面積會決定空氣與水體接觸的機率，但是空氣是否會溶解於水中的關鍵條件是水溫、水中的鹽類、黏滯性以及氣壓等條件。

節能增氧曝氣筒有別於傳統膜片式的氧傳方式，膜片式散氣設備僅提供一片具有許多小孔洞的膜片與氣體管線銜接的裝置，氣泡是否可以穿透膜片擴散至水體中，完全是依賴鼓風機的動力。因此，鼓風機要將空氣順利排至水體中的靜壓損有二項，一是水槽的蓄水深度、另一是散氣設備膜片的壓力損失。節能增氧曝氣筒是一款沒有膜片式設計的曝氣裝置，獨家的內部導流設計，使氣流噴出曝氣筒後，呈現一股氣泡不斷破裂與重組的渦漩狀氣流，氣泡的破裂意味著空氣直接釋放至水體中，使得水中溶氧得以快速上升，相比傳統膜片式散氣盤，節能增氧曝氣筒的氧傳能力不但可大幅提升，鼓風機的動力耗損也少很多。

由於近年來除氮問題逐漸受到重視，也為了滿足人民不斷提高的環境品質要求，政府對放流水中氮氮的排放標準也越來越嚴格，而在業界常見用於廢水系統處理氮氮的方式，有物化法的折點加氯法、化學沉澱法、吹脫法和氣提法、離子交換法、液膜法、電透析法、RO分離法、高級氧化技術、循環冷卻系統脫氮、膜分離技術、氨水汽提回收法，以及生物法硝化及脫硝生物法、Anammox 技術、生化聯合技術等等^[2]。

本研究計畫採用節能增氧曝氣筒，以提升曝氣效率的方式，進行廢水系統提升氮氮轉換成硝態氮，以利後續系統(包含兼氧、厭氧)生物處理法脫硝進行的主要原因是，目前國內大多數的民生污水處理廠、水資源回收廠、畜牧業廢水處理廠以及私人企業的廢水處理廠，仍多數採用技術成熟高、低成本且高穩定性的生物硝化及脫硝法。因此，唯有讓氮氮在好氧階段盡可能的轉換成硝態氮，當廢水進入厭氧系統進行脫硝作用時的效用也會較為完整。

二、研究方法

由反應式(1)可以得知 O_2 的供應對於生物法硝化作用有著密切的關係。以下將從節能增氧曝氣筒的工作原理以及應用於污水處理廠設計參數二方向說明節能增氧曝氣筒提升硝化作用及降低能耗的機制。

(一)節能增氧曝氣筒的工作原理

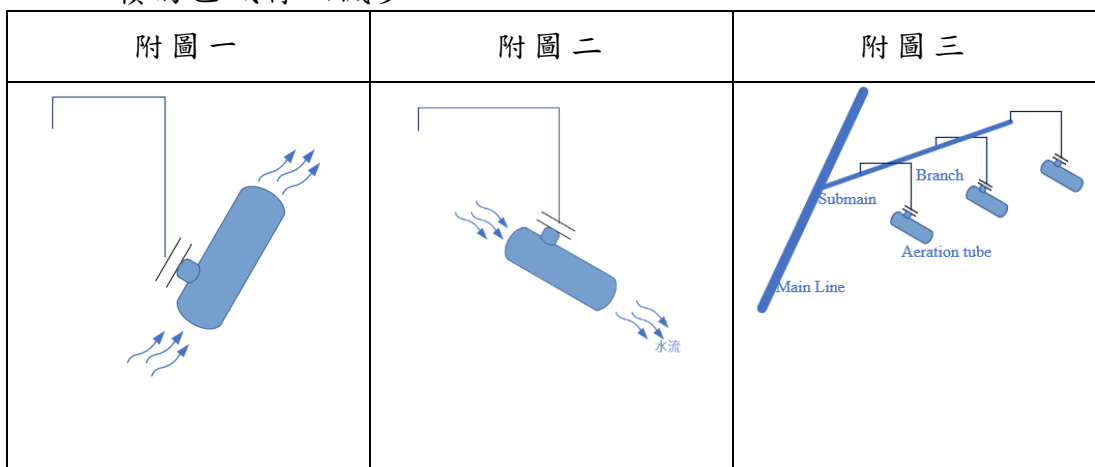
我們將透過節能增氧曝氣筒的五大功效描述中，說明曝氣筒的工作原理。

1. 攪拌：節能增氧曝氣筒的專利導流設計，使氣流自曝氣筒噴出後，產生渦漩狀，而渦漩氣流將再使氣流中的氣泡不斷的破裂與重組，再破裂再重組的反覆性過程，產生了更大的紊流，使廢水攪拌的更為均勻，

相較下優於單一機械化的攪拌效果。

2.排淤：節能增氧曝氣筒為目前市面上唯一可 360o 安裝的曝氣設備，其安裝方式以如下附圖一表示出口朝上、附圖二表示出口朝下、附圖三為實際安裝的簡圖，並簡述其排淤的方式有：

- i. 出口朝上安裝：當空氣自曝氣筒噴出後，順勢的將出口附近的水流向上推擠，以至於曝氣筒下方產生一股較低氣壓的區域，使得曝氣筒下方四周的水流連帶將污泥等沉積物主動的流向曝氣筒，並隨氣流噴出、擴散於槽體中
- ii. 出口朝下安裝：主要是利用氣流向下的衝擊的力道，由混和空氣的水泵向下衝擊沉積物，使其產生擾動後擴散於槽體中
- iii. 已經被擾動擴散於槽體中的污泥、沉積物，則隨著水流逐一排出流向下一單元。
- iv. 存水彎的配置：以往散氣設備的配置是安裝於空氣管線的二側或是上方，而管線下仍有支撐架，以至於散氣設備至槽底有 20 公分以上的污泥沉積區；而曝氣筒有著可 360 度角任一角度安裝的特性，可搭配著存水彎的配置，讓槽體內部易產生淤積的區域得以減少。



3.增氧：

(1)曝氣筒內部的導流設計，讓氣流呈現渦流狀進入曝氣筒腔體中，再經由二道氣流切割鰭片的碰撞與重組後，使得氣流噴出曝氣筒後，呈現一股氣泡不斷破裂與重組的渦漩狀氣流，氣泡的破裂意味著空氣直接釋放至水體中，不受水溫及鹽類的影響，主動的將空氣釋放於水體中，使得水中溶氧得以快速上升。

(2)搭配著攪拌現象，得以讓整個水池溶氧可以快速提升且平均分布，避免

了角落溶氧不足，以及多邊形槽體不易配置曝氣設備的問題。

4.硝化：

在生物處理法中有足夠的溶氧是很重要的。常見的文獻中提到溶氧要維持於 1.5mg/L 到 2.5mg/L，以確保硝化反應可以正常的進行；再者因散氣盤以下的沉積物，因溶氧不足以至於存在著兼氧菌、厭氧菌，或是硫化菌等影響好氧菌正常運作的干擾物。

5.節能：

(1)較高的標準傳氧速率(Standard Oxygen Transfer Rate, SOTR)與標準傳氧效率(Standard Oxygen Transfer Efficiency, SOTE)：如下表 1 為本團隊委託中台科技大學環工系，依據 EN-12255-15 (Wastewater treatment plants part15: Measurement of the oxygen transfer in clean water in aeration tanks of activated sludge plants, June 2004)進行。

表 1 節能增氧曝氣筒標準傳氧率(SOTR)及標準傳氧效率(SOTE)

水深(M)	1.5*	3.0	4.0	5.0	6.0	8.0	10.0
SOTR (kg/hr)	0.4053	0.6449	0.7819	0.9080	1.0260	1.2441	1.447
SOTE (%)	12.215	19.435	23.566	27.367	30.922	37.496	43.542

*：為測試水深 0.5 公尺與 2.5 公尺的平均值。

(2)較低的壓損：如下表 2 為節能增氧曝氣筒委託 SGS 進行壓損的檢測數據。

表 2 節能增氧曝氣筒壓損的檢測數據

空壓機壓力 P (kg/cm ²)	進氣口面積 A (m ²)	進氣口風速 V (m/s)	進氣口風量 Q (LPM)	曝氣筒壓差 (mmAq)
0.5	0.001999568	0.69	82.8	6.8
1.0		0.94	112.8	10.7
1.5		1.20	144.0	20.9
2.0		1.60	192.0	31.2
2.5		2.00	239.9	48.0

(3)由上述表 1、表 2 可以得知節能增氧曝氣筒有較高的 SOTE、較低的壓力損失以及非膜片式的設計，讓凝結水可以順利由空氣管線排出，綜合三項因素，可以得知節能增氧曝氣筒更較於傳統膜片式更為節能。

(二)應用於污水處理廠設計參數

1.風量計算：

$$U = U' + U'' + U''' ;$$

$$U' = a'Y + b'Z ; a' : (0.35 \sim 0.50) ; b' : (0.05 \sim 0.24) ;$$

$$U'' = 4.57 \times Q \times (\text{氮氮 in} - \text{氮氮 out}) ;$$

$$U''' = \text{槽體容積} \times \text{HRT} \times \text{操作 DO} ;$$

$$\text{Air} = U / \text{空氣中 O}_2 \text{ 濃度} / \text{SOTE} / \text{空氣比重} * \text{安全係數} * \text{鼓風機效率}。$$

上式中 U 表示系統需要的空氣量；U' 表示為有機物反應所需要的氧量；a' 表示去除 1kgCOD 所需氧量；b' 表示去除 MLSS kg-day 所需氧量；Y 表示去除 COD 總量；Z 表示曝氣槽內 MLSS 量；U'' 表示脫硝反應所需要的耗氧量；Q 表示廢水量；U''' 表示系統操作所需的溶氧量；HRT 表示水利停留時間；DO 表示溶氧。

2.需求數量計算：

算出需求風量後，再依據槽體深度選定搭配的曝氣筒型號，如下表 3。再以總風量 / 單一曝氣筒風量 = 曝氣筒需求數量

表 3 節能增氧曝氣筒產品型號對照表

Product Model	Inlet Port Diameter (mm)	Depth rating (M)	Air flow rate (LPM)			SS concentration (mg/L)
			Min	Typ.	Max.	
HZ5005	5.0 ± 0.5	< 2M	60	100	160	< 500
HZ5007	7.5 ± 0.5	2M ~ 4M	100	140	180	< 1,500
HZ5010	10.0 ± 0.5	4M ~ 6M	140	170	200	< 3,000
HZ5012	12.5 ± 0.5	5M ~ 8M	150	200	250	< 4,500
HZ5015	15.0 ± 0.5	8M ~ 20M	200	280	350	4,500 ~ 8,000
HZ5020	20.0 ± 0.5	> 20M	320	400	480	> 8,000

3.配置方式：

以槽體的面積 / 曝氣筒需求量 = 單一曝氣筒包含的面積；

將面積開根號，即可得相對應的長、寬尺寸。舉例說明：

(1)某污水處理廠，平均廢水量為 10,500CMD，有二座長 28.5 公尺、寬 11 公尺、蓄水深度 6 公尺的生物池。

(2)進入生物池時的 COD 為 300 g/m³、氮氮 50 g/ m³、系通操作 MLSS 為 2,500 g/m³，生物池出口水質要求 COD 為 30 g/m³、氮氮為 6 g/m³ 條件下，計算出所需的空氣量、曝氣筒數量以及曝氣筒配置方式。假設系統操作所需 DO 為 2.5 mg/L。

(3)U' = a'Y + b'Z；a'：(0.35~0.50)；b'：(0.05~0.24)；

A.因 COD 去除率要求為(300-30) / 300 = 90%；故建議 a' = 0.35 + (0.5-0.35) × 90% = 0.49；b' = 0.05 + (0.24-0.05) × 90% = 0.22

B.Y = 300 × 90% × 10,500 = 2,834.7 kg-COD

C.Z = 2,500 × (28.5 × 11 × 6 × 2) = 9,405.0 kg-COD

D.U' = 0.49 × 2,834.7+0.22 × 9,405.0 = 3,453.3 kg-O²/day

(4)U'' = 4.57 × Q × (氮氮 in - 氮氮 out)

U'' = 4.57 × 10,500 × (50 - 6) = 2,111.3 kg-O²/day

(5)U''' = 槽體容積 × HRT × 操作 DO

U'''=(28.5×11×6×2)×1440×(((28.5×11×6×2)/10,500)×1440)×2.5=26.3 kg-O²/day

(6)SOTR = 3,453.3 + 2,111.3 + 26.3 = 5,590.9 kg-O²/day

(7)查表得知曝氣筒在 6 公尺水深時的 SOTE 為 30.92%，已知空氣中氧氣

含量為 20.8%，假設鼓風機運轉效率為 95%、安全系數 110%(考量管線、閥件壓損等)，空氣密度 1.204 kg/m³。

A.所需空氣量： $5,590.9/20.8\%/30.92\%\times110\%/1.204=79,423\text{CMD}$

B.鼓風機風量： $79,423/1440/95\%=58.06\text{CMM}$

(8)蓄水深度 6 公尺，可選用曝氣筒口徑有 10 mm，單支曝氣筒計算風量為 0.18CMM。 $58.06 / 0.18 \div 323$ 支。(每一道生物池曝氣筒安裝數量為 161 支)

(9) $(28.5 \times 11 \times 2) / 323 \div 0.97\text{m}^2/\text{支}$ (曝氣筒安裝間距 0.99 公尺)

(10)上述案例於使用節能增氧曝氣筒後的效益有：

A.能耗改善

表 4 污水處理廠，將散氣盤變更為曝氣筒的鼓風機耗能差異

	曝氣設備說明	鼓風機運轉功率	管線備壓	鼓風機出口溫度
改善前	二道生物池，各至配置 480 個散氣盤	100.8KW	66.1Kpa	100.9℃
改善後	一道生物池維持 480 散氣盤；一道生物池變更為 240 個曝氣筒	94.2KW	61.7Kpa	96.5℃
說明	單一道曝氣筒理論數量 161 支，因沿用既有管線進行改善，故採用間隔方式配置了 240 個曝氣筒			

B.在不同風量下，散氣盤與曝氣筒的用電量差異

表 5 相同鼓風機在不同風量下，對應於使用散氣盤與曝氣筒的用電量差異紀錄

風量		改善前	改善後
65 CMM	運轉電流(A)	133.7	
	功率(KW)	88	
70 CMM	運轉電流(A)	140.5	129.3
	功率(KW)	92.5	85.1
75 CMM	運轉電流(A)		136.3
	功率(KW)		89.7

C. 氮氮的轉換率

表 6 相同水量操作條件下，不同曝氣設備的氮氮轉換差異

名稱 單位	原水	第一道生物池	第二道生物池
氮氮 mg / L	19.2	15.6	1.20
去除率(%)		18.75%	93.75%

註：第一道生物池維持維持 480 個散氣盤；第二道生物池改善為 240 個曝氣筒。

(11)由表 4、表 5 可以得知，節能增氧曝氣筒在該處理廠將氮氮的轉化率由 18.75%提升至 93.75%的表現下，仍減少了 8%的用電。

三、結果與討論

此節將再列舉二案例，說明氮氮轉換率提高以及節能案例。表 7 與表 8 為新北市某污水廠異動前後水量、氮氮及鼓風機用電量數據，該系統有三道生物池，每一道生物池又區分成三小池(合計九座生物池)，現場曝氣筒安裝於第一道第三池(簡稱為 1-3)，表示尚有八座生物池維持膜片式散氣盤。自 109/11 月至 111/10 月定義為異動前(表 7)；自 111/11 月至 111/10 月定義為異動後(表 8)，觀察僅變更 1-3 生物池後，氮氮與用電量的變化。

(一)新北市某污水廠

表 7 新北市某污水廠 109/11 月至 111/10 月(異動前)水量、氮氮及鼓風機用電量數據

異動前	109/11 月	109/12 月	110/01 月	110/02 月	110/03 月	110/04 月	110/05 月	110/06 月	110/07 月	110/08 月	110/09 月	110/10 月	平均
水量 (CMD)	24,239	26,457	26,650	25,151	25,608	24,623	25,305	27,863	27,195	28,725	26,229	27,830	26,323
氮氮 in (mg/L)	48.7	45.3	42.6	49.3	50.4	49.1	49.6	51.9	40.9	36.3	47.1	36.2	45.6
氮氮 out (mg/L)	31.8	30.8	27.9	33.1	29.6	25.6	33.1	30.9	15.6	12.1	9.9	6.9	23.9
鼓風機運轉電流(A)	238	242	250	242	245	250	240	238	220	220	220	220	235.4
鼓風機用電量 (KWH)	4,284	4,356	4,500	4,356	4,410	4,500	4,320	4,284	7,920	7,920	7,920	7,920	7,920

註:110/07 月起，啟動第二台鼓風機

**表 8 新北市某污水廠 110/11 月至 111/10 月(異動後)水量、氨氮及鼓風機用
電量數據**

異動後	110/11 月	110/12 月	111/01 月	111/02 月	111/03 月	111/04 月	111/05 月	111/06 月	111/07 月	111/08 月	111/09 月	111/10 月	平均
水量 (CMD)	26,452	26,092	27,925	32,920	29,431	26,791	30,773	30,279	27,117	26,540	29,239	26,672	28,352
氨氮 in (mg/L)	47.1	43.7	42.5	33.2	40.3	48.6	36.8	36.8	42.7	35.6	33.1	35.4	39.7
氨氮 out (mg/L)	11.8	12.3	15.1	9.3	9.7	12.7	6.1	6.0	8.9	9.0	6.1	7.8	9.6
鼓風機運轉電流(A)	200	195	195	200	205	210	205	210	210	210	210	205	204.6
鼓風機用電量 (KWH)	7,200	7,020	7,020	7,200	7,380	7,560	7,380	7,560	7,560	7,560	7,560	7,380	7,365.0

註:110/11 月起，第 1-3 生物池由散氣盤改用曝氣筒

該場域使用傳統膜片式散氣盤，觀察其運轉紀錄可以發現，異動前自 109/11 月至 110/10 月的氨氮轉換率約為 47.52%，鼓風機的平均運轉電流為 235.4A。

本團隊於 110/11 月完成 1-3 生物池的散氣設備由 104 個散氣盤變更為 88 個曝氣筒，觀察 110/11 月至 111/10 月的水量由 26,323CMD 增加至 28,352CMD 後(水量約增加 7.71%)，在氨氮轉換率由 47.52%提升至 75.87% 的同時(轉化率增加 31.35%)，用電量卻是下降了 6.81%；同時鼓風機的運轉電流也下降至 204.6A(鼓風機電流下降約 13.08%)。

(二)經濟部龜山產業園區服務中心污水處理廠

服務中心污水廠有二道生物池，每一道生物池又區分為 3 池；第一道改善時間為 112/01/31 日、第二道改善日期為 112/02/27 日。表 9 為改善前後基本資料、表 10 為改善前後加藥量差異分析。

表 9 改善前後基本資料

	改善前	改善後
散氣設備	散氣管	曝氣筒
設備數量	720 支	220 支
溶氧(mg/L)	0.5~0.7	1.5 ~ 2.2
鼓風機電流(A)	113 ~ 115	78 ~ 95 (鼓風機差異)
鼓風機節電%	--	17.39% ~ 30.97%
菌相	較少	正常

表 10 加藥量差異分析

年/月	水量(m ³)	PAC (kg)	陰性高分子(kg)
112/01	220,255	51,000	1,920
112/02	255,665	39,500	1,845
112/03	272,679	42,500	1,920
112/04	274,226	39,000	1,710
112/05	277,289	53,000	1,680
112/06	287,499	54,500	1,395

1. 112/01 月，PAC 用量 0.23155 kg/m³，陰性高分子用量 0.00871 kg/m³
2. 112/02 月至 112/06 月的 PAC 用量 0.16711 kg/m³，陰性高分子用量 0.00625 kg/m³
3. PAC 用量減少 27.83%、陰性高分子用量減少 28.27%

(三)成效

由上述二案例說明了，節能增氧曝氣筒用於民生污水的處理以及工業廢水的處理成效相當顯著，可提高好氧性生物系統的溶氧，進一步提高氨氮轉換率，使氨氮排放合乎放流標準，同時降低電量使用、藥劑的使用，達到節能減碳永續目標。

四、結 論

節能增氧曝氣筒除了具有加強攪拌、清除淤積、提升溶氧，進而提高氨氮的轉換率外，更因自身的專利結構設計，為沒有膜片式的設計，在相同風量 100 LPM 下的壓力損失，僅為散氣盤的 1/19(10.7mmAq:200mmAq)，使得鼓風機運作更加順暢、更加節能。本研究證實應用節能增氧曝氣筒於好氧活性污泥系統中能有效、快速地提升水中溶氧，並藉由氣流進入水體中的同時，產生一股具有攪拌效果的氣流，讓槽體中的溶氧可以均勻的擴散至每一角落，並且可以同時清除槽底中沉積物，減少厭氧/兼性菌的生長，提升氨氮轉換成硝酸鹽氮的效率。

五、參考文獻

- 1.黃文昌、姜榮煌、洪政偉，「廢(污)水處理廠節能規劃與改善 以工研院中興院區為例」，工業污染防治 122 期，經濟部工業局，101 年 6 月。
- 2.工業廢水除氮處理方式探討及技術分享，經濟部工業局，87 年 10 月。
- 3.曾明加，「活性污泥處理單元發生硝化反應之原因與對策」，財團法人台灣產業服務基金會。
- 4.唐存宏，「工業廢水氨氮處理概述」，財團法人台灣產業服務基金會。