

工業污染防治

Industrial Pollution Prevention and Control

本期專題：2050淨零之軌跡與行動路徑





中華民國七十一年一月創刊

中華民國一一二年十一月出刊

編輯審：江康鈺、吳義林、李公哲、林文印、林凱隆、胡憲倫、凌永健、

查委員：馬鴻文、康世芳、張添晉、陳士賢、劉鎮宗、歐陽嶠暉、鄭福田、顧洋(依姓名筆畫順序)

執行編輯：陳見財、莊茂森、莊倫綱、詹奇君、陳靖瑜

發行所：經濟部產業發展署

出版所：經濟部產業發展署

台北市信義路三段41-3號

TEL：(02)2754-1255

FAX：(02)2704-3753

網址 <https://www.ida.gov.tw/>

財團法人台灣產業服務基金會

台北市大安區106四維路198巷39弄14號1F

TEL：(02)2784-4188

FAX：(02)2784-4186

網址 <https://www.ftis.org.tw>

行政院新聞局出版事業登記證

局版臺誌第三一四七號

中華郵政北字〇五二七號

執照登記雜誌交寄

設計印刷：致琦企業股份有限公司

～ 本刊文章版權所有，非經同意不得轉載 ～

～ 本刊文稿屬個人學術發表，不代表經濟部產業發展署立場～

工業污染防治

Industrial Pollution Prevention and Control

本期專題：2050淨零之軌跡與行動路徑



159 工業污染防治

本期專題：2050 淨零之軌跡與行動路徑

淨零轉型關鍵戰略淨零綠生活推動與實踐

..... 簡慧貞、魏文宜、李奇樺、邱俊雄、邱慈娟、劉峯秀 1

製造業低碳化升級與儲能應用效益分析

..... 黃建中、鄭光利、鍾明軒、余家興、曾義翔 19

減污及減碳共利策略研析－以鍋爐管制為例

..... 莊晴、李侑蓁、許長嵐 35

水泥業淨零轉型精進策略

..... 蔣本基、李志賢、張章堂、陳耀德、簡又新 65

淨零轉型與產業推動資源循環

..... 賴瑩瑩、陳俊融、王耀晟、黃暄婷 89

廢棄物類

無機聚合技術製備環保多孔防火材料之研發

..... 林凱隆、羅康維、林雅雯、鄭大偉 115

以產業共生推動循環經濟發展

..... 廖逸凡、張哲銘、花建佑 129



廢（污）水處理類

零液體排放之技術應用與發展

..... 李岳陽、范振軒、許國恩、侯嘉洪 147

臺灣污水處理廠塑膠微粒之調查分析

..... 顏佑庭、游勝傑、王雅玢、謝炎恭 159

空氣污染與噪音類

大型柴油車汰舊換新之空污減量推動成效

..... 湯雅芳、謝明機、胡承瑄、許仲豪、呂澄洋、張根穆、蔡孟裕 187



本期簡介

「工業污染防治」刊物（以下簡稱本刊物）自民國 71 年發刊至今，已出版 158 期，共刊載 1,847 篇技術論文，為目前環工界歷史最悠久之技術刊物，提供國內產、官、學、研環保人員之專業發表平台。

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

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

本期專題以「2050 淨零之軌跡與行動路徑」為主題，共邀本集 5 編專稿，分別為「淨零轉型關鍵戰略淨零綠生活推動與實踐」、「製造業低碳化升級與儲能應用效益分析」、「減污及減碳共利策略研析」、「水泥業淨零轉型精進策略」、「淨零轉型與產業推動資源循環」；另收錄 5 篇廢棄物、廢（污）水處理、空氣污染與噪音範疇之文稿，分別撰述「無機聚合技術製備環保多孔防火材料之研發」、「以產業共生推動循環經濟發展」、「零液體排放之技術應用與發展」、「臺灣污水處理廠塑膠微粒之調查分析」、「大型柴油車汰舊換新之空污減量推動成效」，作者慨賜宏文，提供寶貴經驗，特此致謝。

2050 淨零之軌跡與行動路徑專題

淨零轉型關鍵戰略淨零綠生活推動與實踐

簡慧貞*、魏文宜**、李奇樺***、邱俊雄****、
邱慈娟*****、劉峯秀*****

摘 要

蔡英文總統於 2021 年 4 月 22 日（世界地球日）宣示 2050 淨零轉型為我國重要政策目標。後續國家發展委員會於 2022 年 3 月 30 日公布我國「2050 淨零排放路徑」，透過推動「能源轉型」、「產業轉型」、「生活轉型」及「社會轉型」4 大轉型策略與 12 項關鍵戰略計畫，逐步實現 2050 淨零排放之永續社會。其中，關鍵戰略之一的「淨零綠生活」，結合各級政府單位制訂 31 項推動措施與 63 項具體行動，鼓勵民眾從食、衣、住、行、育、樂等日常生活面向選擇較低碳生活方式，促使民眾落實減碳行為並養成習慣，共同達到淨零排放目標。

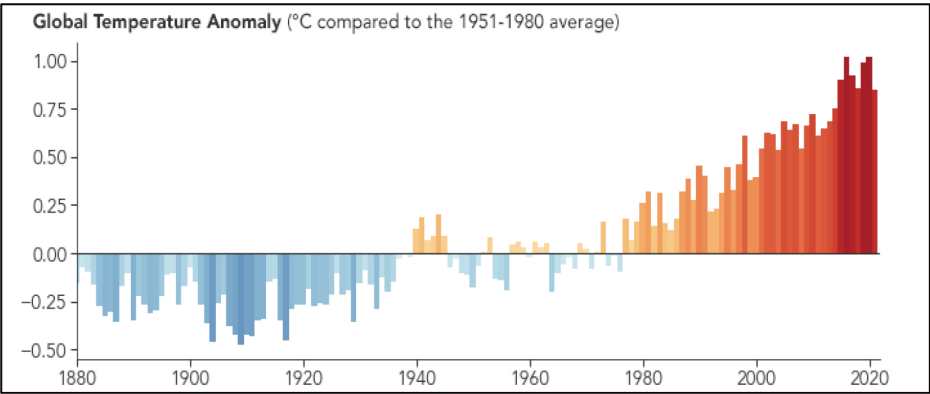
本文說明何謂「淨零綠生活」，詳細列出所有推動的措施與行動內容。同時，為促使民眾行為改變並養成習慣，環境部參照國際作法建立適用於我國的淨零綠生活行動指引，以及鼓勵民眾達成環保的生活行為，希望以此來提高民眾落實減碳行為動機與能力，使民眾行為產生改變，達成生活轉型目標。

【關鍵字】生活轉型、淨零綠生活、行動指引、環保集點

*	環境部管考處	處長
**	環境部管考處	副處長
***	環境部管考處	簡任技正
****	環境部管考處	科長
*****	環境部管考處	技正
*****	環境部管考處	技正

一、前言

全球二氧化碳（CO₂）及其他溫室氣體（如甲烷、氟氯碳化物等）自工業化以來排放量增長，衍生溫室效應使得全球平均氣溫上升。根據美國國家航空暨太空總署（National Aeronautics and Space Administration，簡稱 NASA）的觀察統計，2021 年全球平均溫度已經比工業化前上升超過 1℃，詳如圖 1。



資料來源：<https://earthobservatory.nasa.gov/world-of-change/global-temperatures>

圖 1 全球歷年平均溫度

為了因應全球氣溫上昇導致全球性的氣候變遷危機，自 1992 年聯合國氣候變化框架公約（United Nations Framework Convention on Climate Change，簡稱 UNFCCC）簽訂以來，各國通過締約方大會（Conference of the Parties，簡稱 COP）進行定期的會議，以協商和確定應對氣候變化的全球行動。隨著科學界對氣候變化的深入研究和示警，以及公眾對於氣候變化日益關注，在 2015 年第二十一屆聯合國氣候高峰會議（COP 21）中，通過「巴黎協定」（Paris Agreement），要求所有的簽署國提交自主貢獻（Nationally Determined Contributions，簡稱 NDCs），即自願的減排承諾和行動計劃，以確保全球平均溫度上升控制在 2℃ 以內。2018 年聯合國氣候變遷專門委員會（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC）的報告中指出，全球升溫幅度必須控制在工業化前平均水準的 1.5℃ 內，且 2050 年左右全球比須達

成淨零排放（Net-zero emission），才能避免溫室效應對全球自然環境造成不可挽回的傷害，促使世界各國積極設定淨零排放目標與制訂相關減碳政策。

1.1 國際淨零目標

2019 年英國立法承諾於 2050 年以綠能完全取代化石燃料，將溫室氣體排放減量至 1990 年水準，成為全球第一個設定淨零排放目標的主要經濟體，之後歐盟也於同年承諾「碳中和大陸」目標。英國與歐盟的積極態度，帶動了全球主要國家或經濟體提出淨零承諾之風潮，美國於 2021 年公布「2050 淨零排放之路：美國長期策略」（The Long-Term Strategy of the United States: Pathways to Net-Zero Greenhouse Gas Emissions by 2050），承諾 2030 年甲烷減排 30%，並將目標訂於 2050 年達到淨零排放。中國大陸為全球最大碳排放國，宣示將 2060 年達到淨零排放的目標。根據牛津大學開發出來的淨零追蹤器的資料顯示，目前全球已經有 150 個國家、147 地區、252 個城市提出淨零排放承諾，已涵蓋全球 88% 溫室氣體排放、92% GDP 與 89% 人口（Net Zero Tracker, 2023）。

我國為全球主要的生產基地，溫室氣體的排放量為 2.66 億噸，占全球總排放量 0.53%，排名全球第 35 名（WRI, 2023）。當世界上多數的國家在制定 2050 年淨零轉型目標，我國也積極部署接軌國際，除規劃 2030 年國家自定貢獻（NDCs）減碳目標為 $24\pm1\%$ 外，於 2021 年 4 月 22 日（世界地球日），由總統蔡英文宣示 2050 淨零轉型為我國重要政策目標，緊接著在同年的 8 月 30 日，時任行政院院長蘇貞昌指示將「溫室氣體減量及管理法」（簡稱溫管法）修法納入「2050 淨零排放」目標。國家發展委員會於 2022 年 3 月 30 日公布我國「2050 淨零排放路徑及策略總說明」，透過推動「能源轉型」、「產業轉型」、「生活轉型」及「社會轉型」4 大轉型策略，並延伸 12 項關鍵戰略，就能源、產業、生活轉型政策預期增長的重要領域制定行動計畫，逐步實現 2050 淨零排放之永續社會，詳如圖 2 與圖 3。

4 淨零轉型關鍵戰略淨零綠生活推動與實踐



圖 2 我國 2050 淨零轉型策略

註：原彩圖請至產業綠色技術資訊網站下載 <https://proj.ftis.org.tw/eta/>



資料來源：國發會（2022）

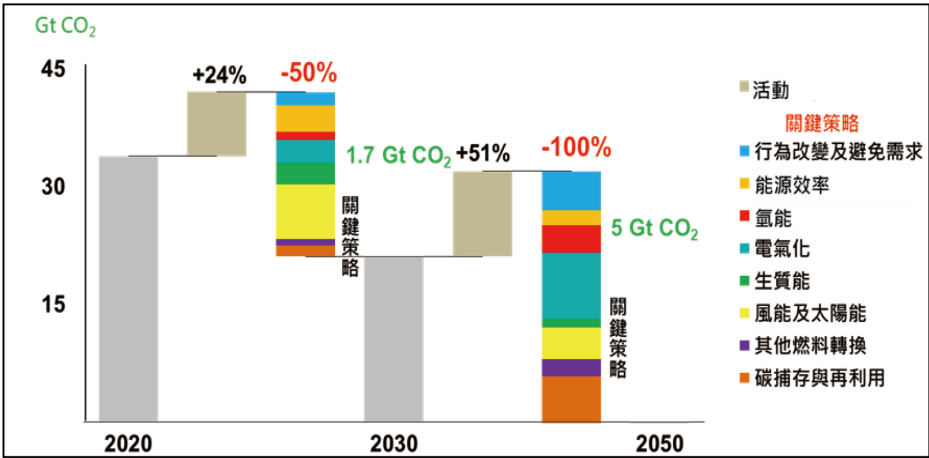
圖 3 我國 2050 淨零轉型 12 項關鍵戰略計畫

1.2 達成淨零排放手段

所謂的淨零排放，指的是「各個碳排活動需藉由其他移除大氣中等量溫室氣體的計畫，達到碳排放平衡」。提倡 OKR（Objectives and Key Results, 目標與關鍵結果）管理方法的知名創投家 - 約翰・杜爾（John Doerr）與白宮前副技術長 - 萊恩・

潘查薩拉姆 (Ryan Panchadsaram) 在「OKR 實現淨零排放的行動計畫」一書中，設計了一套以 OKR 來解決全球氣候危機的減碳實用方案，指引大眾如何在 2050 年前達成淨零排放；他們認為要達成淨零排放，首先需要做到 6 件事，分別是交通電氣化 (Electrify Transportation)、電網脫碳化 (Decarbonize the Grid)、解決糧食問題 (Fix Food)、保護自然 (Protect Nature)、淨化工業 (Clean Up Industry) 及移除空氣中的碳 (Remove Carbon)。除此之外，還必須結合 4 個行動來加速達成目標，分別是攻克政治與政策場域 (Win Politics and Policy)、轉化社會運動為行動 (Turn Movements into Action)、創新 (Innovate) 與投資 (Invest) (John Doerr, Ryan Panchadsaram, 2022)。

另外，國際能源總署於 2020 年所提出全球淨零排放藍圖中指出，若要在未來 30 年間快速減少二氧化碳排放量，全球能源系統脫碳的關鍵策略提高能源效率、行為改變、電氣化、再生能源、氫氣和氫基燃料、生質能源與 CCUS 技術。其中行為改變對於全球淨零排放具有相當大的影響。透過減少過度用能或能源浪費、改變交通運輸方式、提升材料利用效率等行為改變，累計至 2030 年前行為改變減碳量達約占總減碳量 8%，2030 年後當商業化減碳技術普及後，行為改變對於淨零排放的重要性會大幅度提升，至 2050 年行為改變減碳量占總減碳量 16% (如圖 4)。



資料來源：IEA (2020)

圖 4 達成 2050 淨零排放情境不同關鍵策略貢獻的減碳量

二、國際綠生活推動現況

行為改變擁有巨大的減碳潛力，已成為國際組織和各國政府高度關注的議題。藉由積極制定並實施相關措施與政策，旨在引導民眾納入減碳思維，逐步轉變生活方式，並在整體層面實現減碳目標。透過提供經濟激勵、宣傳教育、科技創新和綠色產業發展等多元方法，致力於協助個人和社會大眾適應永續生活的理念。以下說明聯合國、美國、日本與我國相關落實綠生活政策建議與措施。

2.1 聯合國懶人救世指南（The LAZY's guide to SAVING the WORLD）

聯合國以「能源與交通」、「食物」以及「全民呼籲（Speak up）」作為 ActNow 運動之核心，並推出懶人救世指南，倡議透過改變消費模式、使用自行車等主動交通工具和購買當地食品，來引導和鼓勵民眾在工作和家庭中更加永續地生活，促進個人淨零行動並達到 SDGs 目標。聯合國作法分為 4 種等級（如圖 5）：

- 階段一，當個沙發巨星：可以在沙發上就做到隨手關閉電源、使用電子帳單、分享節能減碳資訊及以氣候信用（Climate credits）抵碳等。
- 階段二，成為家庭英雄：在家裡就可以做到節水節電吃素、妥善保存避免浪費、堆肥及回收減廢等。
- 階段三，躍升社區好人：可以在社區鄰里間執行在地化、綠色交通、響應使用二手物品及再利用等。
- 階段四，變成優良員工：可以在工作中推動食物分享、節能減廢、綠色通勤及綠色採購等。



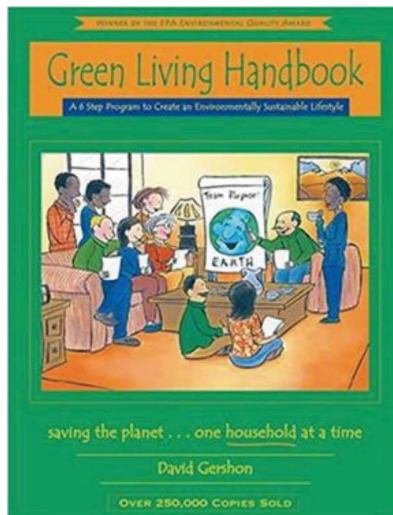
資料來源：聯合國，<https://www.un.org/sustainabledevelopment/takeaction/>

圖 5 聯合國懶人救世指南

2.2 美國綠色生活手冊 (Green Living Handbook)

美國環保署提倡綠生活 (Greener Living)，從交通、消費及綠色校園等生活面向進行推廣，引導民眾從行為選擇上減少對環境的衝擊。其中美國綠色生活手冊是有關可持續生活方式的指南，提供實用的建議、技巧和解決方案，讓民眾能夠在日常生活中做出綠色和環保的選擇，協助個人和社區實踐環保和可持續的生活方式，以減少對環境的影響，具體包含 6 大減碳主題（如圖 6）：

- 垃圾傾倒（廢棄物）：提及妥善分類回收以及使用可重複利用的物品等行動藉此減少固體廢棄物。
- 水資源：提及檢查並維修漏水設備以及安裝省水產品等行動藉此減少水資源浪費。
- 能源：提及更換節能電器以及隔熱防寒等行動藉此達到減少能源浪費的目標。
- 交通：提及搭乘大眾運輸、使用低碳運具以及共乘等行動藉此減少交通碳排放及污染。
- 購物：提及購買二手物品、友善環境產品等行動藉此改變消費者購物行為及製造商的生產模式。
- 共同落實永續生活：號召左鄰右舍以及親朋好友一起落實綠色行動。



資料來源：<https://www.amazon.com/Green-Living-Handbook-Environmentally-Sustainable/dp/0963032747>

圖 6 美國綠色生活手冊

2.3 日本零碳行動 30

日本以 2050 淨零排放為目標，針對 14 個行業領域提出「2050 碳中和綠色成長戰略」。其中，環境省則針對民眾推動「零碳行動 30」，而引導改變民眾的生活方式，將衣、食、住、行、購等日常生活中的減碳行動定義為「零碳行動」，包含 8 項實際行動（如圖 7）：

- 電能等能源的節約和轉換：改用再生能源、節水節電、使用節能家電等。
- 住宅：安裝太陽能板、零耗能建築、購買二氧化碳含量低的產品與服務等。
- 交通：選擇排放二氧化碳量較少的交通工具。
- 飲食：不要浪費食物、選用當令食材、堆肥等。
- 服裝與時尚：延長衣物使用時間、選擇環保衣物。
- 減少浪費：不使用拋棄式物品、自己修繕、使用二手物品、垃圾分類等。
- 購物 / 投資：零碳品與服務、個人 ESG（環境、社會和公司治理）投資。
- 環保活動：植樹、撿垃圾等活動。



資料來源：日本環境省，<https://ondankataisaku.env.go.jp/coolchoice/zc-action30/>

圖 7 日本零碳行動

三、我國淨零綠生活推動現狀與未來

3.1 我國淨零綠生活行動指引，引導民眾行為

為了落實淨零綠生活關鍵戰略行動計畫，我國政府參考國際作法，並在各部會通力合作下，研擬適用於我國的「淨零綠生活行動指引」，提供民眾簡單易懂的作法，讓民眾可以在日常生活中實踐淨零綠生活及減碳理念（如圖 8）。

該項指引從民眾日常生活食、衣、住、行、育、樂、購各個生活層面來推動，包括：零浪費低碳飲食、友善環境綠時尚、居住品質提升、低碳運輸網絡、使用取代擁有及全民對話。以零浪費低碳飲食（食），惜食減少浪費為例，引導民眾透過「eFOOD 食物分享地圖」，讓有食物剩餘或需求的民眾均能透過地圖，快速查找距離最近的據點捐食或領食，減少食品因過有效期而導致浪費。



資料來源：環境部整理（2023）

圖 8 我國淨零綠生活行動指引內容

相關資訊均可在環境部的「全民綠生活平台」查閱及下載（如圖 9），網站內容相當豐富多元，除可以了解政府目前推行的綠生活行動措施，也能從網站獲取節能環

保的相關訊息與資訊，並也可以透過個人綠行動評量表來檢視自身已經做到多少淨零減碳的行為。



資料來源：<https://greenlife.epa.gov.tw/about#intro>

圖 9 淨零綠生活行動指引網頁

為推動「綠色消費循環」的理念，落實前述指引行動，環境部推行「環保集點制度」，引導民眾選購綠色產品，鼓勵落實環保行為，將這些行動化為「環保綠點」獲得實質回饋，實現「環保行動有價化」，透過環保集點制度，開啟「綠色生活，環保選購」的習慣，讓「綠色消費」成為生活的一部分，共同努力減少資源浪費、減緩環境衝擊。同時也能間接鼓勵企業投入環保產品開發，帶動生產源頭降低碳排放，進而減緩溫室效應。

3.2 何謂淨零綠生活

所謂的「全民綠生活」是以提升綠色生活理念，環境部從食、衣、住、行、育、樂、購各個生活層面中，養成民眾落實環保的生活方式，尤其是食與行，更是可以立即處理凸顯成效，除了能大幅降低住商、運輸部門排放，更是國際盤查最大減碳空間，並能促使產業供給端改變，降低產業碳排放。而「淨零綠生活」則是與 7 個部會合作

推動一個可持續發展的生活方式，通過減少垃圾、節約能源和水資源等改變人們的消費和生活習慣的方式，減少對環境的影響，達到低碳、環保、節能的目標，並最終實現人與自然環境的和諧共處。具體來說，淨零綠生活的內容包括：

- (1) 淨零垃圾：避免使用過多不必要的包裝物、塑膠袋等一次性產品，推崇回收再利用、堆肥等綠色垃圾處理方式，最終實現垃圾減量和零廢棄。
- (2) 綠色消費：優先選擇環保、健康、可再生的產品，減少對環境和生態系統的負面影響。
- (3) 節約能源：提倡節約能源的行為和方式，例如合理使用電器、減少照明等，實現能源效益最大化和減少能源消耗。
- (4) 節約水資源：重視水資源的節約和合理使用，例如洗衣機等家電的節水設計、減少浪費等。

為展現臺灣愛惜地球的「綠實力」，政府部署地球永續發展的下一個十年，自 2020 年起推動「全民綠生活」，建立民眾友善環境的生活態度，以「綠色飲食」、「綠色旅遊」、「綠色消費」、「綠色居家」、「綠色辦公」等 5 大面向，提升國人「綠色生活」理念及養成綠色生活行為，並聚焦「用在地」、「惜資源」及「護環境」導入，迄今在各個面向的推動皆已具備相當的成效，民眾對於綠色環保生活的意識已逐漸成形，詳如圖 10。

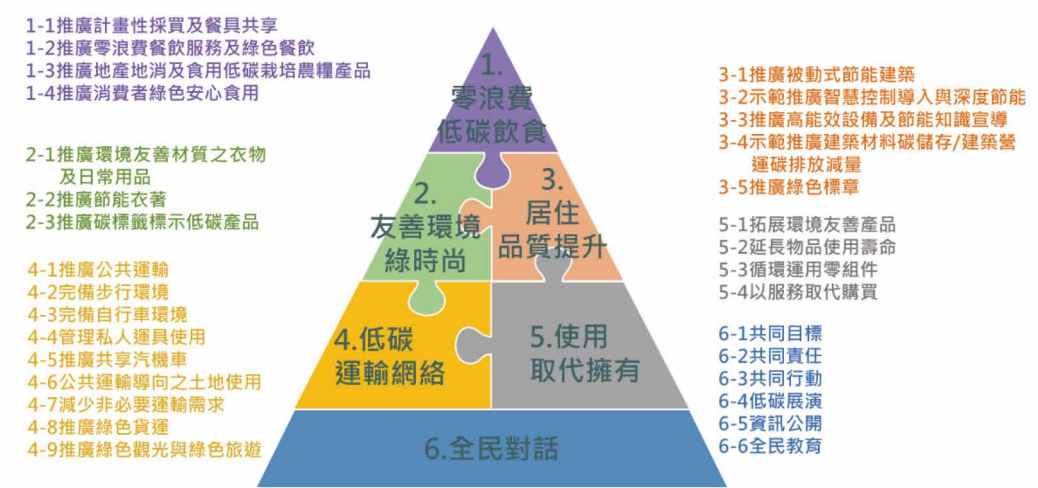


資料來源：環境部整理（2023）

圖 10 我國全民綠生活政策成果

3.3 規劃淨零綠生活關鍵戰略行動計畫指引領未來施政方向

為了透過行為改變，達成 2050 淨零排放目標，政府以全民綠生活政策成果為基礎，於 112 年完成「淨零綠生活關鍵戰略行動計畫」規劃與核定，透過跨部會整合機制，啟動綠生活多元對話與行為習慣養成，以科技創意激發綠生活商業模式，並用生活轉型帶動產業轉型。民眾生活轉型，不外乎從日常生活食、衣、住、行、育、樂、購面向著手，透過推動「淨零綠生活」進行全民對話及消費者覺醒，促使各界激發創意，建構低碳商業模式及形塑生活態度，由 6 大面向開展可推動措施，歸納 31 項具體措施，如圖 11 及表 1 所示。



資料來源：環境部整理（2023）

圖 11 我國淨零綠生活推動策略及措施

表 1 淨零綠生活關鍵戰略行動計畫內容

面向	推動措施	具體行動
食 - 零浪費低碳飲食	1-1 推廣計畫性採買及餐具共享	計畫性採買 餐具共享
	1-2 推廣零浪費餐飲服務及綠色餐飲	推廣惜食理念 扎根廚師及未來廚師的惜食觀念 推廣生態學校「永續食物」環境路徑 推廣綠色餐飲
	1-3 推廣地產地消及食用低碳栽培農糧產品	推動有機及友善環境耕作，並推廣消費者食用 推動食農教育，建立零浪費低碳飲食素養 推動畜牧糞尿資源化
	1-4 推廣消費者綠色安心食用	建立消費者辨識及業者自主管理具食安風險疑慮化學物質知能
衣 - 友善環境綠時尚	2-1 推廣環境友善材質之衣物及日常用品	二手衣物捐贈、改造、維護及新創商業模式，鼓勵閒置衣物高值商業模式，提升再利用價值
	2-2 推廣節能衣著	推廣生產節能衣物及功能服飾
	2-3 推廣碳標籤標示低碳產品	依產品碳足跡分級標示碳標籤，宣導民眾選購低碳產品
住 - 居住品質提升	3-1 推廣被動式節能建築	推動綠建築宣導
	3-2 示範推廣智慧控制導入與深度節能	推動綠建築宣導
	3-3 推廣高能效設備及節能知識宣導	推廣高能效設備及節能知識宣導
	3-4 示範推廣建築材料碳儲存 / 建築營運碳排放減量	建築材料碳儲存（已列入「節能」關鍵戰略行動計畫）
	3-5 推廣綠色標章	推廣綠色辦公 推廣環保標章旅館 推廣使用環保標章、環境友善產品及節能、省水、綠建材標章產品
行 / 樂 - 低碳運輸網絡	4-1 推廣公共運輸	健全公共運輸服務 多元推廣公共運輸
	4-2 完備步行環境	修訂人行道相關設計規範，擴大步行空間 補助優化步行環境

14 淨零轉型關鍵戰略淨零綠生活推動與實踐

面向	推動措施	具體行動
	4-3 完備自行車環境	打造無障礙自行車轉乘服務環境 補助縣市建置示範性自行車路網 改善自行車通學行車環境 優化自行車旅遊環境
	4-4 管理私人運具使用	強化車輛停車供需管理與合理費率 推動低碳交通區鼓勵低碳車輛使用 宣導鼓勵科學園區與工業區廠商減少私人運具 強化高排碳車輛驗車規範與執行強度 汽柴油價格回歸市場機制
	4-5 推廣共享汽機車	鼓勵縣市政府推廣共享汽機車服務 鼓勵縣市政府推動共享汽機車業者 與其它綠運輸之票證整合及轉乘優惠方案
	4-6 公共運輸導向之土地使用 (TOD)	滾動檢討車站與周邊地區整合開發 相關法規制度 地方政府於公共運輸場站周邊都市 計畫制定公共運輸導向之土地使用 相關配套規定
	4-7 減少非必要運輸需求	推廣遠距生活 檢討擴大綠運輸誘因機制
	4-8 推廣綠色貨運 4-9 推廣綠色觀光與綠色旅遊	推動貨運業者營運管理減碳 推廣「台灣好行」 推廣綠色旅遊 優化綠色旅遊服務
購 - 使用取代擁有	5-1 拓展環境友善產品	推動使用環境友善原料、清潔生產 使用較安全居家或工業化學品
	5-2 延長物品使用壽命	審慎評估用品需求，盡量延長使用、回收舊物、購買再生材料用品 強化巨大家具收運、處理及再利用 強化廢床墊回收
	5-3 循環運用零組件	永續物質流管理 負責任的電器處置方法 推動使用二次料
	5-4 以服務取代購買	獎 / 鼓勵產品共享經濟服務

面向	推動措施	具體行動
育 - 全民對話	6-1 共同目標 6-2 共同責任 6-3 共同行動	訂定綠生活指引引導民眾行為改變 辦理國家企業環保獎等獎項鼓勵各界參與 向產業、民眾、青年、公民團體等所有利害關係人溝通 結合地方產業創生，投資綠生活、遊樂場所產業鏈 建構綠色生活模式及家居碳足跡計算器
	6-4 低碳展演	推廣藝文展演活動使用低碳材料及資料電子化 推廣會展活動使用低碳材料及資料電子化
	6-5 資訊公開	揭露推動成果及效益相關資訊 推動商業智能與物聯網整合行為分析，推動企業、個人及家庭減碳 推動淨零綠生活氣候服務
	6-6 全民教育	全民教育教材的建構及推廣

資料來源：環境部整理（2023）

3.4 企業公私協力帶動淨零生活轉型

全民生活轉型，光靠政府不夠，需要更多驅動力。由於民間團體長期深耕於地方，並與民眾有密切之連結，如為有效向民眾宣導綠生活之政策與理念，辦理活動使民眾有感於綠生活，與民間團體合作是有效途徑之一。例如環境部已與慈濟及佛光山簽訂合作備忘錄，推廣綠生活觀念宣導與教育推廣。在慈濟方面，除社會救助事業外，其已推行環保行動多年，再如慈濟的資源回收已推行數十年，亦時常向民眾宣導蔬食與簡約生活。而在佛光山方面，佛陀紀念館建館設置多項綠能設施，且館內的餐廳均不使用一次性餐具，並申請環境教育認證場域，透過對學童的環境教育將環保理念向下扎根。將這些民間團體的特色進一步結合政府資源，在辦理展覽、講座、會議以及活動時，響應綠生活，不使用一次性餐具和容器，盡量使用電子檔文件而非紙本文件，提供參與人員低碳交通方式或是共乘。並可合作舉辦結合綠生活理念的環境教育課程或活動，包括教育訓練、研習、講座及志工培訓時加入綠生活理念，深植綠生活新知

16 淨零轉型關鍵戰略淨零綠生活推動與實踐

識，於其網站、刊物與出版品刊登綠生活資訊，協助推廣綠生活，並可鼓勵加入奉茶點，提供民眾飲水等方式，共同協力推動淨零綠生活。各部會主責業務範圍亦有其他民間團體可以共同結合推動，應可擴大更多元民間團體參與。

此外，企業驅動力亦相當重要，除企業本身實踐永續發展之企業責任外，本行動計畫各項推動上，考量從政府到民眾間的生活轉型，需連結民眾日常生活結合度較深的企業，如量販店、便利商店、超級市場、藥妝店等通路連鎖業者，予以優先連結，從產品服務的生命週期供應鏈，透過中介者及社區團體串連，建立示範點、團結經濟或社區微型經濟共享機制，擴大提升民眾認知度及資訊完整性，進而參與、體驗及改變行為與習慣。

相對於石化業、能源產業，金融業在碳排放與環境污染等的影響較小，然而依據世界經濟論壇（The World Economic Forum, WEF）全球風險報告，氣候變遷的風險位於榜首，氣候變遷對金融業所造成的風險遂成為重要議題。

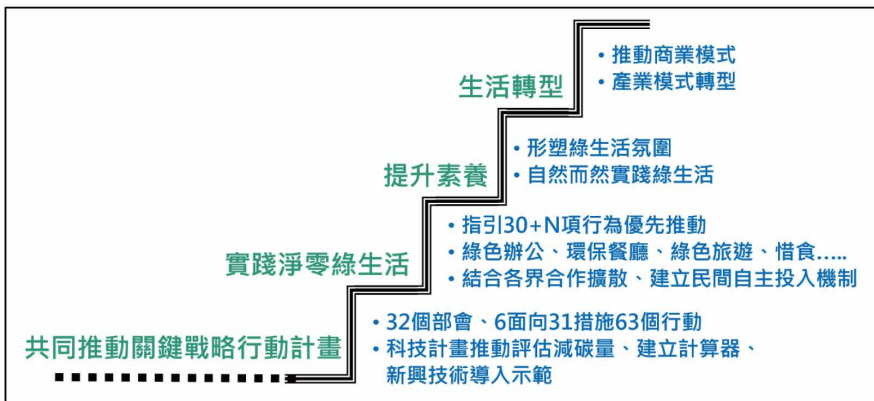
為支持「2050 淨零排放路徑」政策，金融監督管理委員會（簡稱「金管會」）推出「綠色金融行動方案 3.0」，聚焦於氣候變遷議題，推動金融業瞭解自身及投融資對象的溫室氣體排放情形，以「協力合作深化永續發展及達成淨零目標」、「揭露碳排放資訊，從投融資推動正體產業減碳」、「整合資料及數據以強化氣候韌性與因應風險之能力」為三大核心策略，並透過「佈局、資金、資料、培力、生態系」五大推動面向，依據不同的面向所推動的重點措施：

- 佈局：金融機構碳盤查及氣候風險管理
- 資金：推展我國永續經濟活動認定參考指引
- 資料：ESG 及氣候相關資訊整合
- 培力：金融機構永續、金融專業訓練
- 生態系：建立合作機制，推動永續發展

在此基礎上，驅動金融市場邁向淨零轉型，期望達到「整合金融資源，支持淨零轉型」之願景，而政策推動的重點方向，即是強化金融業氣候風險管理能力。

四、未來願景

淨零排放已是國際趨勢，在我們實踐淨零綠生活的未來願景中攜手共創，這些都需要政府與民間合作砥礪前行，由政府各部會共同推動淨零轉型關鍵戰略行動計畫，藉由科技計畫推動評估減碳量、建立計算器、新興技術導入示範，透過指引優先推動環保行為，結合各界合作擴散並建立民間自主投入機制來實踐淨零綠生活，帶領民眾自然而然的形塑綠生活氛圍，從全民生活教育對話，培養綠生活認知；從改善生活基礎設施，友善綠生活環境；從建構生活商業模式，帶動綠生活產業；從拓展綠色產品服務，鼓勵綠生活消費；從引導民眾行為改變，提升綠生活素養；再進而推動商業模式與產業轉型，達到生活轉型淨零綠生活目的（如圖 12）。



資料來源：環境部整理（2023）

圖 11 共同實踐淨零綠生活

參考文獻

NASA Earth Observatory, Global Temperatures, <https://earthobservatory.nasa.gov/world-of-change/global-temperatures>

World Meteorological Organization (2022), 2021 one of the seven warmest years on record, WMO consolidated data shows, <https://public.wmo.int/en/media/press-release/2021-one-of-seven-warmest-years-record-wmo-consolidated-data-shows>

Net Zero Tracker, 2023. Net Zero Stocktake 2022.

世界資源研究所 (World Resources Institute, WRI), 全球溫室氣體排放量 (含 LULUCF) 統計, <http://cait2.wri.org>

IEA, 2020. World Energy Outlook 2020. IEA, Paris.

創新未來學校, 專家帶路! 一次看懂 2021 國際淨零政策與看點, https://www.bplan.com.tw/post/net_zero_emissions_0222

John Doerr, Ryan Panchadsaram (2022), OKR 實現淨零排放的行動計畫, <https://bookzone.cwgv.com.tw/books/BCB770>

國際能源總署「2050 淨零: 全球能源部門路徑圖」(Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector, IEA 2021/05) <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>

聯合國, <https://www.un.org/sustainabledevelopment/takeaction/>

Green Living Handbook, <https://www.amazon.com/Green-Living-Handbook-Environmentally-Sustainable/dp/0963032747>

日本環境省, <https://ondankataisaku.env.go.jp/coolchoice/zc-action30/>

全民綠生活資訊平台, <https://greenlife.epa.gov.tw/>

2050 淨零之軌跡與行動路徑專題

製造業低碳化升級與儲能應用效益分析

黃建中 *、鄭光利 **、鍾明軒 ***、余家興 ***、曾義翔 ****

摘 要

面對國際減碳浪潮，台灣作為出口導向經濟體、在全球供應鏈中擔任重要角色，也必須積極跟進，接軌國際市場。本文以製造業為例，從低碳化升級的手法導入，簡要說明組織型溫室氣體盤查和產品碳足跡評估的應用，並分析製造業溫室氣體減量可由製程改善、能源轉換和循環經濟 3 大面向著手；在能源應用部分，則討論製造業導入儲能應用的效益分析，除了可以提升綠電供需的匹配程度，並能提供廠區電力備援，若為用電大戶則可滿足用電大戶的義務設置量，並可參與「義務儲能需量反應措施」，並穩定電網夜尖峰用電，強化電網韌性。本文並介紹汰役電池轉用儲能系統導入製造業案例，發現具有電池循環再利用之環境效益，及抑低尖峰用電的效益，若搭配綠電使用，將更能展現整體減碳效益。

【關鍵字】低碳化升級、碳管理、儲能系統

*	工業技術研究院綠能與環境研究所電池儲能研究室	專案經理
**	長榮大學綠能與環境資源學系	助理教授
***	長榮大學綠能與環境資源學系	學士
****	明創能源股份有限公司	協理

一、2050 淨零排放與國家政策

「全球暖化的時代已經結束。全球沸騰的時代 (era of global boiling) 已經來臨。」2023 年 7 月將成為史上最熱的 1 個月，聯合國秘書長古特瑞斯 (Antonio Guterres) 在 7 月底對世人發出警訊 (環境資訊中心，2023)。

近來極端氣候已實際發生在你我週遭，世界氣象組織 (WMO) 和歐洲哥白尼氣候變化服務中心 (C3S) 正式確認，2023 年 7 月為全球平均氣溫有紀錄以來最熱月份。世界各地會因炎熱乾旱導致野火蔓延，也會因為瞬間暴雨成災，對於人類活動及經濟發展的影響也越來越大。

為了減緩全球暖化帶來的影響，包含歐盟、美國、英國、日本及韓國，全球已經有超過 130 個國家或地區聯盟宣示 2050 淨零排放的目標，同時多家國際品牌大廠也宣示在 2030 年要達一定比例減排，更要在 2050 年全面使用再生能源、達到碳中和目標 (經濟部，2023)。

面對國際減碳浪潮，作為出口導向經濟體、在全球供應鏈中擔任要角的臺灣，也必須積極跟進，接軌國際市場。因此，我國在 2021 年 4 月宣示 2050 淨零轉型目標，並在 2022 年 3 月發布「臺灣 2050 淨零排放路徑及策略總說明」，另在 2022 年 12 月公布 12 項關鍵戰略的行動計畫，展現和世界共同邁向淨零的決心。同時，我國也在 2023 年 2 月公布將「溫室氣體減量及管理法」修正為「氣候變遷因應法」，除了將 2050 淨零排放目標入法、強化氣候變遷調適措施，更導入碳費機制，為臺灣邁向淨零之路奠定法制基礎 (經濟部，2023)。

我國 2050 淨零排放路徑將會以「能源轉型」、「產業轉型」、「生活轉型」、「社會轉型」等 4 大轉型，及「科技研發」、「氣候法制」2 大治理基礎，輔以「十二項關鍵戰略」(如圖 1)，就能源、產業、生活轉型政策預期增長的重要領域制定行動計畫，落實淨零轉型目標。

本文以製造業為例，說明低碳化升級，可先導入碳管理手法盤點現況，並由製程改善、能源轉換和循環經濟 3 大面向具體實現減碳，包括著手使用高能源效率設備、

建立智慧能源管理系統、轉換低碳燃料、設置再生能源、採用二級原料、建立產業共生系統，其中在設置再生能源部分，可以搭配儲能系統使用，因此後續也討論製造業導入儲能應用的效益分析，以作為國內製造業的參考。



圖 1 臺灣 2050 淨零轉型之 12 項關鍵戰略（國發會，2022）

二、製造業碳管理導入

在全球面臨 2050 淨零排放的迫切需求下，製造業前十大碳排企業排碳量，占全台 38%（遠見，2022），製造業成為減碳重點產業之一。在淨零排放下所言之「碳」管理，關注對象不僅二氧化碳，實則涵蓋所有的溫室氣體，如甲烷（ CH_4 ）、氧化亞氮（ N_2O ）、氫氟碳化物（HFCs）、全氟碳化物（PFCs）、六氟化硫（ SF_6 ）和三氟化氮（ NF_3 ）等。本文將製造業的碳管理分為溫室氣體評估和溫室氣體減量兩部分。

2.1 溫室氣體評估

2.1.1 組織型溫室氣體盤查

組織型溫室氣體盤查（或簡稱碳盤查），是以組織實體地理位置為邊界，盤查邊界內所有的溫室氣體排放量。ISO 14064-1（2018）已針對組織型溫室氣體盤查，

建立相關要求。碳盤查主要分為 3 個步驟，分別為邊界設定、排放源鑑別和排放量計算。實務上依評估者需求，可製作溫室氣體盤查報告，以及申請驗證（高雄市政府，2023）。

邊界設定為定義組織實體的地理邊界，以確保需盤查的溫室氣體排放源。ISO 14064-1 將組織的溫室氣體排放源分為 3 個範疇，範疇之下再分為 6 個類別，詳如

表 1 所示。在確定組織邊界和排放源後，蒐集邊界內所有排放源的活動數據，依下式（1）計算，即可得組織整體的溫室氣體排放量。式（1）中活動數據為前述步驟排放源之相關能源或物料使用量，例如燃煤鍋爐的燃煤用量（kg）、製程切割使用之乙炔量（kg），以及運具運輸使用之汽油量（L）。排放係數為單位活動量的溫室氣體排放量（CO_{2e}），代表該溫室氣體對氣候變遷的影響，以全球暖化潛勢（global warming potential, GWP）表示。

表 1 組織型溫室氣體排放源

範疇	類別	類型	排放源
範疇一：直接排放	類別 1：直接排放	1.1 固定式燃燒	發電設備、加熱設備和瓦斯爐
		1.2 移動式燃燒	交通運輸設備、移動式柴油引擎機具
		1.3 工業製程	二氧化碳焊接、乙炔切割、滲碳表面處理
		1.4 人為系統逸散	冷凍、冷藏或空調設備的冷媒、運具冷凍、冷藏或空調設備的冷媒、滅火器、化糞池
範疇二：能源間接排放	類別 2：輸入能源	2.1 外購電力	電力使用設備
		2.2 外購蒸汽	蒸汽或熱使用設備

範疇	類別	類型	排放源
範疇三：其它間接排放	類別 3：運輸產生	3.1 上游運輸	主要原物料運輸、輔助材料運輸
		3.2 下游運輸	下游產品運輸、廢棄物運輸
		3.3 員工通勤	接駁車、私人運具、大眾運輸運具
		3.4 客戶與訪客運輸	私人運具、大眾運輸運具
		3.5 商務旅行	私人運具、大眾運輸運具
	類別 4：組織使用的產品	4.1 購買商品	外購電力上游排放 外購燃料（如汽油、柴油或天然氣等）的上游排放 自來水的上游排放 主要原料的上游排放 輔助原料的上游排放
		4.2 資本物品	資本財的上游排放，例如電腦
		4.3 廢棄物處置	委外廢棄物處置（包括焚化、再利用或其它處理）產生的碳排放
		4.4 上游租賃資產使用	使用租賃產品產生的碳排放量，例如自動販賣機冷媒、租賃車冷媒
	類別 5：使用組織相關產品	5.1 產品使用的排放	因使用組織產品導致的碳排放（如用電、燃料等） 組織提供半成品，委外加工之碳排放
		5.2 下游租賃資產	組織空間租賃之碳排放源
		5.3 產品廢棄	組織產品使用週期結束後，廢棄處置相關碳排放
		5.4 金融投資	組織提供資金專案融資或投資衍生的碳排放
	類別 6：其它相關	其它類別無法報告者	其它類別無法報告

資料來源：ISO 14064-1（2018）

組織溫室氣體排放量 = $\sum$ 活動數據 $\times$ 排放係數..... (1)

2.1.2 產品碳足跡評估

溫室氣體評估的第二種方式為針對產品的碳足跡評估 (ISO 14067, 2018) 。產品碳足跡 (carbon footprint of a product, CFP) 為產品 (products) 在整體生命週期過程中，所產生的溫室氣體排放量總和。在碳足跡評估或生命週期評估 (life cycle assessment, LCA) 所述之產品，皆包含有形的貨品 (goods) 和無形的服務 (services) 。完整的生命週期指產品的一生，泛稱搖籃到墳墓，包含原料開採、生產製造、配送銷售、使用階段和廢棄處理階段。

然而依實際情況，產品的生命週期通常有三種形式，分別為搖籃到大門、搖籃到墳墓，以及搖籃到搖籃。貨品和服務的生命週期範疇如圖 2 所示。碳足跡評估範疇不僅只有二氧化碳 (CO₂)，實為包含所有溫室氣體。產品生命週期中，所有溫室氣體排放量的總和以二氧化碳當量 (CO_{2e}) 表示，即為產品碳足跡。



圖 2 產品生命週期範疇

碳足跡為生命週期評估中的一項衝擊類別，評估產品在生命週期中對氣候變遷的衝擊。衝擊結果以全球暖化潛勢表示。各物質的 GWP 於政府間氣候變化專門委員會（The Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC）評估報告（assessment report, AR）中不定期更新。碳足跡評估步驟為依循 ISO/CNS 14040 中 LCA 的架構，分別為目標與範疇界定、盤查分析、衝擊評估和闡釋（鄭光利, 2012）。

1. 目標與範疇界定

碳足跡評估於目標與範疇界定中，必須先確立評估動機、評估產品、評估結果預期的使用方式以及預期溝通的對象。接續界定評估產品的生命週期、功能單位或宣告

單位，產品足跡的時間和地理範疇。此外，必須設定在碳足跡評估過程中的數據品質要求和分配原則，以確保評估結果的準確性和可比較性。

2. 盤查分析

盤查分析於 ISO 14067 的正式用語為生命週期盤查分析（life cycle inventory analysis, LCI），此階段必須依前項界定之生命週期系統範疇，盤查所有投入至系統，或系統產出的活動數據。在實際的評估過程中，首先會依產品的生命週期繪製流程圖，接續建立盤查表單、蒐集數據和整理數據，為下階段衝擊評估使用。

3. 衝擊評估

衝擊評估在生命週期評估中，需考量不同的衝擊類別與類別指標，因此過去有衝擊評估的優化研究（黃建中，2005），在 ISO 14067 的正式用語為生命週期衝擊評估（life cycle impact assessment, LCIA）。產品碳足跡僅針對產品生命週期系統範疇內溫室氣體的所有投入和產出活動量化，評估氣候變遷造成的衝擊。此量化方式如下式（2）所示，活動數據為產品在生命週期中投入和產出的活動量，通常以重量或能量單位記錄。例如投入的原物料量（kg）、水資源量（kg）和電力使用量（kWh）。排放係數為單位活動量的溫室氣體排放量（CO_{2e}），代表該溫室氣體對氣候變遷的影響，以 GWP 表示。將各別活動數據與相應的排放係數相乘後加總，即為產品的碳足跡（CO_{2e}）。

碳足跡=∑ 活動數據 x 排放係數……………（2）

4. 闡釋

在闡釋階段將綜合衝擊評估的結果，從生命週期或活動數據角度判視碳足跡熱點，作為產品低碳化的機會。碳足跡闡釋也必須呼應初始評估動機，並以預期的使用方式與預期的對象溝通。

組織型碳盤查與產品碳足跡同為溫室氣體評估方法，但兩者方法學互相獨立，執行上無先後次序，或彼此相依之關係，企業可單獨執行或擇一執行。若企業同時執行有組織型碳盤查與產品碳足跡，在盤查階段有相同項目之數據可互相引用，但方法學不可互相移植使用。以兩者方法學範疇界定說明，組織型碳盤查著重於鑑別組織地理

邊界相關的直接和間接溫室氣體排放源，強調排放源管理。產品碳足跡則是關注在產品的生命週期過程中，所有物質和能資源投入和產出所衍生的溫室氣體排放。產品碳足跡著重於生命週期管理，強調無煙囪（排放）也有污染的概念。組織型碳盤查與產品碳足跡在管理目標有顯著差異，企業決策者可依管理目的選擇適當之評估方法作為瞭解組織碳資訊之依據。

2.2 溫室氣體減量

製造業溫室氣體減量可由製程改善、能源轉換和循環經濟 3 大面向著手（表 2）。經濟部於 2023 年 4 月規劃了 3 年的疫後特別預算，提供溫室氣體評估和減碳技術等輔導與補助。輔導補助類型包括：諮詢診斷、技術發展 / 輔導、盤查輔導、設備購置 / 汰換、系統設備改善、系統管理、能源轉換、應用示範、商業模式轉型、人才培育、貸款優惠和綠能購買（經濟部，2023）。

表 2 製造業溫室氣體減量規劃

	低碳化	零碳化
製程改善	使用高能源效率設備 建立智慧能源管理系統	採用含氟氣體替代技術 採用高爐噴氫
能源轉換	轉換低碳燃料 設置再生能源	使用零碳能源
循環經濟	採用二級原料 建立產業共生系統	提高二級原料使用占比 碳捕捉、再利用及封存

資料來源：經濟部（2023）。

三、製造業導入儲能系統之效益

3.1 淨零排放與儲能技術

在我國「2050 淨零排放路徑」報告的「永續能源領域」也提到「儲能技術」，指出「用電需求的尖離峰差異，有賴儲能技術加以調節，將需求離峰時間多餘電力儲存，以供尖峰時間使用，強化電力調度彈性；或將再生能源所轉換電力先儲存起來，降低

再生能源發電之間歇性對於電力系統的影響，協助提升電力供應穩定度；此外，儲能系統具快速充放電能力，協助電網快速反應電力系統短暫的頻率變動，以強化供電穩定性與可靠度。

因應使用型態，儲能設備可區分為定置型及移動型 2 大類。定置型儲能主要應用於一般商業及工廠，如大型發電廠及企業用備援電力；短期需克服空間配置及饋線需求，長期以培養併網級儲能系統產業為主。至於移動型儲能，為帶動我國電動車產業發展之關鍵，需開發高能量、快充放電動車電芯，同時兼顧安全性及降低生產成本，如鋰固態等。」（國發會，2022）

3.2 用電大戶條款中的儲能應用

而臺灣用電尖離峰差異大，工業用電超過 50%，要達成綠能減碳目標，需要工商業高用電戶共同協助參與，鼓勵再生能源發展，善盡社會責任。

因此經濟部公告「一定契約容量以上之電力用戶應設置再生能源發電設備管理辦法」，又稱用電大戶條款，並於 110 年 1 月 1 日生效。初期以契約容量 5,000 kW 以上者（占全國用電量 49%）為優先推動對象，用電大戶義務履行方式如表 3 所示。

表 3 用電大戶義務履行方式

項目	計算公式
設置再生能源發電設備	義務裝置容量 = 義務契約容量 * 10%
購買再生能源電力及憑證	年購買額度 = 義務裝置容量 * 選購再生能源類別之每 瓩年售電量
設置儲能設備	設置容量 = 義務裝置容量 * 最小供電時數 2 小時
繳納代金	年繳交金額 = 義務裝置容量 * 2,500 度 / 瓩 * 4 元 / 度

本條款同時設有「提前履行優惠」，用戶應於 5 年內完成義務履行；提前完成者，可扣減義務裝置容量（3 年內扣減 20%、4 年內扣減 10%）。

到目前為止，依照申報情形分析，義務戶是以「設置再生能源發電設備」（64%）及「購買再生能源電力及憑證」（30%）為主，設置儲能系統僅有 6%（經濟部能源局，2023），如圖 3 所示。主要原因是兩者均可作為 RE 100 宣告，再生能源發電設備設

置成本較低，為多數產業優先選擇；其次為購買再生能源電力及憑證則較無空間限制；而儲能設置成本較高，在原先規範中無法參與台電各種需量反應或電力交易方案，因此採用此履行方式的義務戶較少。

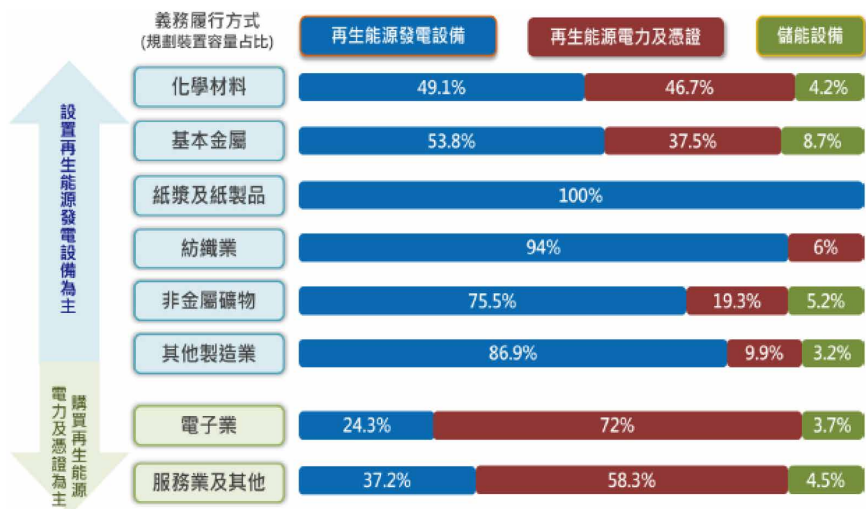


圖 3 用電大戶義務戶辦理情形（經濟部能源局，2023）

目前用電大戶申報裝置儲能設備的總量已經達到 41.6MW（台電月刊，2023），2023 年下半年開始會陸續安裝完成。為鼓勵儲能資源有效運用，台電也將同步試辦「義務儲能需量反應措施」，推動用電大戶所設置的儲能設備，參與台電系統調度，妥善運用用電大戶所設置之儲能設備，穩定我國電力系統。

目前方案是設定用電大戶儲能系統在星期一至星期五（離峰日除外）下午 6 時至 8 時放電 2 小時，每日以 1 次為限，且不得於執行放電時段安排儲能設備進行充電。再依據放電度數給予用戶電費扣減，用戶有「義務時數型」和「累進回饋型」2 種方式可以選用。

用戶應於執行放電月份開始前申請本措施，於約定之執行放電期間內，經中央主管機關同意設置儲能設備不得再選用其他種類之需量反應負載管理措施或電力交易平台之輔助服務商品。

30 製造業低碳化升級與儲能應用效益分析

依照義務儲能申報目標 41.6MW 估算，總儲電量可達約 8.32 萬度，相當可供 16 萬個家庭用戶 1 小時的用電，同時兼具抑低夜尖峰負載的效益。

3.3 製造業導入儲能的效益

因此對於製造業導入儲能來說，有以下的效益：

1. 滿足用電大戶的義務設置量，義務儲能設置可參與「義務儲能需量反應措施」，提升 IRR（內部報酬率），並穩定電網夜尖峰用電。
2. 可進行契約容量優化，以及時間容量移轉進行電價套利，同時針對廠區內充電樁與電動車充電行為進行尖峰調控。
3. 提高再生能源利用率，可儲存綠電餘電，提升綠電供需的匹配程度。
4. 提供廠區電力備援，鋰電池儲能系統可與緊急發電機搭配，作為短時間與長時間的電力備援系統。
5. 若非用電大戶義務設置量，可參與台電一般需量反應方案。

四、製造業導入汰役電池轉用儲能系統應用案例

4.1 我國運具電動化推動與汰役電池產生

我國在 2021 年 4 月宣示 2050 淨零轉型目標，並在 2022 年 3 月發布「臺灣 2050 淨零排放路徑及策略總說明」（國發會，2022），考量我國產業發展特性及社會環境，國內在運具電動化推動路徑，以公共運輸先行策略及政府帶頭示範，優先推動 2030 年市區公車及公務車電動化，如圖 4 所示。

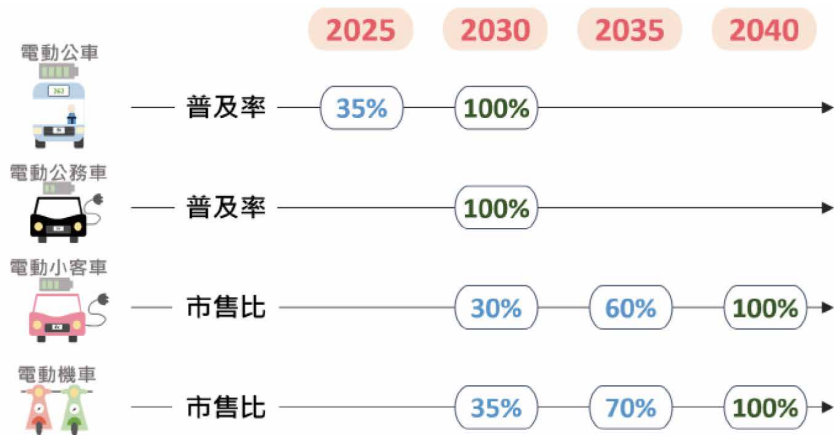


圖 4 我國運具電動化推動里程碑 (國發會，2022)

然而根據 Nissan Leaf 電動車的實測數據 (Myall,2018)，車用動力電池一般使用約 5~6 年，電池健康狀態 (State of Health, SOH) 就會衰退到 80% 以下，也就是動力電池在多次循環使用後，電池的最大容量只剩新品時的 80%，一般認為此時的電池狀態不再適合應用於動力載具上，必須從載具上卸除汰換，此時汰換下來動力電池可以稱為「汰役電池」。此時汰役電池可經過篩選和檢測，視其性能優劣進行利用於其他用途，一般電池健康狀態 (SOH) 在 50~80% 階段，可應用於不斷電設備、儲能系統或其他低速動力載具，汰役動力電池降階做為儲能使用可以延長電池使用生命週期，減低電池廢棄之環境衝擊，且可有效降低儲能系統成本，更容易導入工廠應用，不僅可以進行循環經濟的具體展現，更能為製造業導入儲能應用提供另一個選項，如圖 5 所示。



圖 5 汰役電池儲能系統可導入製造業應用

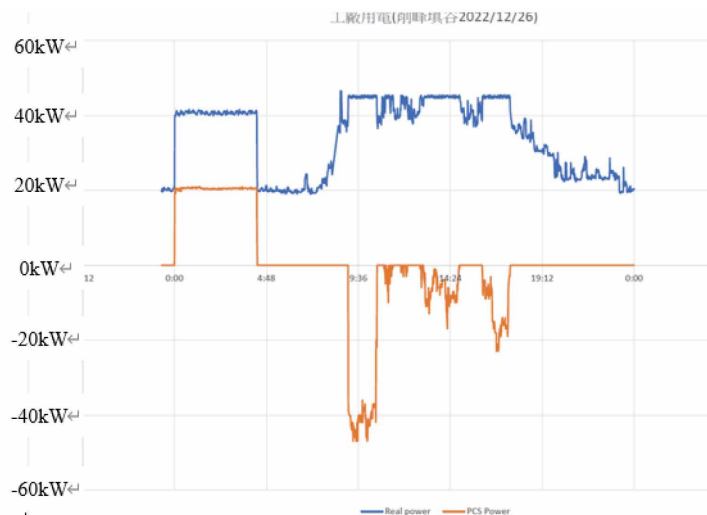


圖 7 廠區用電透過儲能系統有效抑低尖峰用電

一般電價差異是尖峰離峰價差，金額較少。最好結合契約容量的降低，可以達到更好的效益。廠區契約容量目前費用 236.2 元 /kw/ 月，假設契約容量減少為 50kW，每月可節費 11,810 元，具有一定的經濟效益。後續若要展現減碳效益，則需再搭配綠電購買使用，將工廠用電時間移轉與綠能發電時間相匹配，減碳效益將更為明確。

五、結論

為因應全球氣候變遷，國際上對於減碳的需求持續加大力道，因此各國以 2050 年達到淨零排放為共同目標，並且建立多種非關稅的貿易障礙，如歐盟的「歐盟碳邊境調整機制（Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM）」以及「美國清潔競爭法案（Clean Competition Act, CCA）」，歐盟於 2023 年 10 月起開始要求受管制產品進行申報，美國則是預期最快在 2024 年上路實施。

因應此情況，國內製造業需進行低碳化升級，透過碳管理了解本身的減碳熱點，並導入綠電使用，若再搭配儲能使用，則能提升綠電供需的匹配程度，並能提供廠區電力備援，若為用電大戶則可滿足用電大戶的義務設置量，並可參與「義務儲能需求反應措施」，並穩定電網夜尖峰用電，若非用電大戶義務設置量，可參與台電一般需

量反應方案，對業者而言可謂一舉數得，同時可強化我國電網韌性。

國內目前已有電動巴士業者，利用車上汰役之動力電池重組成儲能系統，並導入廠區應用，發現具有電池循環再利用之環境效益，及抑低尖峰用電的效益，若搭配綠電使用，將工廠用電時間移轉與綠能發電時間相匹配，將更能展現整體減碳效益。

參考文獻

遠見 ESG (20220509)，製造業碳排占四成，環團籲企業減碳莫跳票，<https://esg.gvm.com.tw/article/4653>

環境資訊中心 (20230827)，你見過極端氣候的長相嗎？六張 NASA 衛星影像見證「沸騰時代」，<https://e-info.org.tw/node/237298>。

經濟部 (2023)，企業淨零行動手冊。

國發會 (2022)，臺灣 2050 淨零排放路徑及策略總說明。

高雄市政府 (2023)，製造業碳管理作業手冊彙編。

ISO 14064-1 (2018) Greenhouse gases — Part 1: Specification with guidance at the organization level for quantification and reporting of greenhouse gas emissions and removals

ISO 14040 (2006) Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework

鄭光利 (2012)，回收物質再利用之碳足跡評估方法及不確定性分析研究 - 以台灣鋼鐵業廢鋼為例，碩士論文，國立成功大學。

黃建中 (2005)，生命週期衝擊評估之客觀權重方法，博士論文，國立台灣大學。

ISO 14067 (2018) Greenhouse gases — Carbon footprint of products — Requirements and guidelines for quantification

經濟部 (2021)，一定契約容量以上之電力用戶應設置再生能源發電設備管理辦法。

經濟部能源局 (2023)，用電大戶條款檢討意見徵詢會議簡報 (20230715)。

台電月刊 (2023)，727 期，2023 年 7 月號 p12。

Myall, D.; Ivanov, D.; Larason, W.; Nixon, M.; Moller (2018), H. Accelerated Reported Battery Capacity Loss in 30 kWh Variants of the Nissan Leaf. Preprints, 2018030122 (doi: 10.20944/preprints201803.0122.v1) .

2050 淨零之軌跡與行動路徑專題

減污及減碳共利策略研析 — 以鍋爐管制為例

莊晴*、李侑蓁**、許長嵐***

摘 要

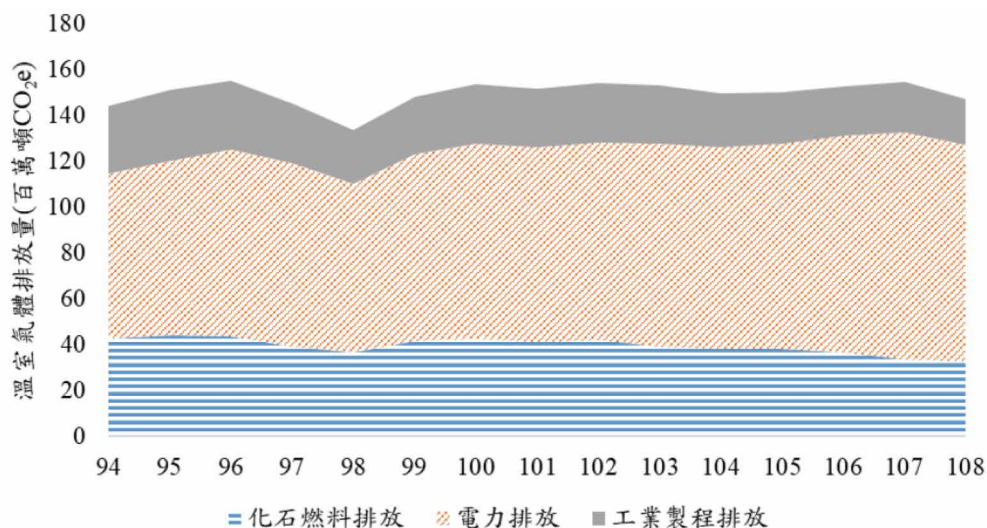
鍋爐廣泛應用於工商業製程，其為空氣污染物與溫室效應氣體排放的主要排放源之一，為使空氣污染與溫室效應氣體同時減量，國際間已採行排放濃度管制與能源效率協同管制策略。本研究收集國際間管制策略做法，並評析做為我國達成空氣污染防治方案減量目標與邁向淨零路徑的可行策略。本研究研析建議，臺灣可參考日本現行低污染、高效率之鍋爐標章認證制度做法，以自主認證機制鼓勵鍋爐技術升級同時降低產業衝擊，進而帶動轉型，惟執行上需以輔以行政管制、經濟誘因策略作為政策推動的驅動力，於此邁向淨零、減污協同管制之目標。

【關鍵字】鍋爐排放標準、鍋爐能源效率

*	環科工程顧問股份有限公司	工程師
**	環科工程顧問股份有限公司	副理
***	環科工程顧問股份有限公司	資深協理

一、前言

經濟部於 2022 年 9 月公告第二期製造部門溫室氣體排放管制行動方案指出，製造部門為主要溫室氣體（greenhouse gas, GHG）排放源（如圖 1 所示）。溫室氣體排放大多來自於能源使用過程（如：化石燃料、電力等），其中鍋爐為重要的能源使用設備而受關注，因此臺灣 2050 淨零排放路徑及策略總說明中，在能源轉換策略上，短期以天然氣及生質燃料為主，並將使用對象擴大至一般鍋爐以及汽電鍋爐，長期則朝使用綠電及無碳能源應用；在製程改善策略上，則推動加速產業設備汰舊換新、節能與數位化等策略，提升製程的能源使用效率減少空污與溫室氣體的排放（國家發展委員會，2022），於此邁向淨零轉型的過程中亦能協同降低污染排放之效益。



資料來源：行政院經濟部（2022），第二期製造部門溫室氣體排放管制行動方案（核定本）。

圖 1 我國溫室氣體排放各部門占比情況

鍋爐亦為空氣污染物排放的重要來源，以往管制策略應用上以降低燃料含硫份的源頭管制策略為主，而為深化鍋爐空氣污染物排放減量，自 2015 年起，行政院環境部收集並評估鍋爐排放情形作為管制排放之基準，經調查結果鍋爐所排放的硫氧化物（sulfur oxides, SO_x）排放量占全國排放量 14%、氮氧化物（nitrogen oxides, NO_x）

排放量占全體排放量 12%，在技術、經濟與行政可行之情形下，環境部於 2018 年發布了鍋爐空氣污染排放標準，不分規模及不分燃料別訂定各行業適用之鍋爐空氣污染排放標準，規範總懸浮微粒（total suspended particle, TSP）、SO_x 以及 NO_x 排放濃度，並協同產業發展署（前工業局）推動鍋爐汰換補助，環境部亦於 2020 年修訂固定污染源最佳可行技術控制規範，針對新設、大型鍋爐加嚴其排放標準，故現行鍋爐管制之排放標準規範彙整如表 1 所示。

表 1 鍋爐空氣污染物排放標準

規範	鍋爐蒸氣量	空氣污染物排放管道標準		
		硫氧化物	氮氧化物	粒狀污染物
鍋爐空氣污染排放標準規範	不分	50 ppm	100 ppm	30 mg/Nm ³
固定污染源最佳可行技術控制規範	>80 噸 /hr(或輸入熱值 >6,150 萬千卡 /hr)	25 ppm 或 96% 的削減率	30 ppm 或 90% 的削減率	10 mg/Nm ³
	13~80 噸 /hr(或輸入熱值 1,000~6,150 萬千卡 /hr)	50 ppm 或 60% 的削減率	100 ppm 或 60% 的削減率	25 mg/Nm ³

資料來源：行政院環保署（2020a），固定污染源最佳可行控制技術；行政院環保署（2020b），鍋爐空氣污染排放標準。

鍋爐空氣污物排放減量為空氣品質改善的重點策略，由環境部與經濟部共同輔導鍋爐業者從源頭燃料、燃燒技術、污染防制三面向改善或汰換；從 2017 年迄今，商業鍋爐與工業鍋爐合計改善 7,102 座鍋爐，改善率迄今已達 97%，目前仍有部分鍋爐因施工問題，採個案方式申請展延完成改善，而從政策推動至今，使用氣體燃料之燃氣鍋爐由 24% 增為 59%（增長約 2 倍）、使用液體燃料的重油鍋爐由 64% 減為 19%（減少約 7 成）（經濟部工業局，2023；環境部，2023a）。

根據空污費申報統計，圖 2 為 2015 年到 2022 年 SO_x 以及 NO_x 的歷年排放，以 2015 年作為基準迄今 SO_x 與 NO_x 的排放量皆呈現下降的趨勢，SO_x 排放量與 NO_x

排放量各減少約 7 千公噸，其相當於臺中電廠一年的空污排放量，若換算鍋爐改善減少的二氧化碳量（Carbon dioxide, CO₂），相當於減少 2,717 座大安森林公園的碳吸附量（行政院環保署，2022）。



資料來源：行政院環保署（2022），固定污染源空污費暨排放量申報整合管理系統。

圖 2 2015 年到 2022 年歷年鍋爐 SOx 與 NOx 排放量

而為進一步深化空氣品質改善且同時邁向 2050 淨零排放目標，依據空氣污染防治法授權，環境部推動第二期空氣污染防制方案（2024 年至 2027 年）（草案），在鍋爐的改善策略中，除針對提出個案申請展延符合之鍋爐管理追蹤外，亦規劃針對三級防制區新設鍋爐 NOx 採用最佳可行控制技術要求（行政院環保署，2023a），空氣污染防制方案所建構的策略，以管末排放減量為基礎外，亦強調技術應升級，提高能源使用效率，藉此減少空氣污染排放與能源消耗，以達到空氣污染和溫室氣體協同減量的效益。

而在鍋爐的效能管理部分，經濟部能源局於 2001 年依據能源管理法第 14 條發布鍋爐能源效率標準（2003 年 7 月 1 日開始實施）如表 2，規範使用燃油或燃氣為燃料之鍋爐，例如水管式燃油鍋爐、水管式燃氣鍋爐、煙管式燃油鍋爐及煙管式燃氣鍋爐，並以容量（公噸 / 小時）規範其能源效率標準（%），並於 2012 年公告指定能源用戶使用蒸汽鍋爐應遵行之節約能源規定，其規範鍋爐於穩定運轉的狀況下，應該符合的空氣比以及排氣溫度，以確保鍋爐的運轉效率達一定的規範，相關規定如表 3、表 4 所示。

表 2 鍋爐能源效率標準

種類	容量 (公噸 / 小時)	能源效率標準	備註
水管式燃油鍋爐	30 以上	92.5%	標準適用範圍及計算方式： 1. 本效率標準適用於以燃油或燃氣為燃料之蒸汽鍋爐，不適用於貫流式鍋爐。 2. 效率標準依國家標準 (CNS2141) 之熱損失法計算，並依燃料低熱值計算涵蓋廢熱回收裝置之鍋爐全載時之能源效率。
	10 以上未達 30	91%	
	5 以上未達 10	89.5%	
	未達 5	88.5%	
水管式燃氣鍋爐	30 以上	93.5%	
	10 以上未達 30	92.5%	
	5 以上未達 10	91.5%	
	未達 5	90.5%	
煙管式燃油鍋爐	30 以上	90%	
	10 以上未達 30	89%	
	5 以上未達 10	88%	
	未達 5	87%	
煙管式燃氣鍋爐	30 以上	92%	
	10 以上未達 30	91%	
	5 以上未達 10	90%	
	未達 5	89%	

資料來源：經濟部能源局（2001），鍋爐效率標準。

表 3 鍋爐於穩定運轉狀態下之空氣比上限值

燃料種類 容量 (公噸 / 小時)	燃煤		燃油	燃氣
	固定床	流動床		
30 以上	1.45	1.45	1.25	1.2
10 以上未達 30	1.45	1.45	1.3	1.3
5 以上未達 10	-	-	1.3	1.3
未達 5	-	-	1.3	1.3

註 1：空氣比 = 21 / (21- 排氣含氧量百分比)，並以四捨五入取至小數點二位。
註 2：鍋爐同時使用多種燃料時，應符合單位時間發熱量最多燃料之空氣比規定。
資料來源：經濟部能源局（2012），指定能源用戶使用蒸汽鍋爐應遵行之節約能源規定。

表 4 鍋爐於穩定運轉狀態下之排氣溫度 (°C)

燃料種類 容量 (公噸 / 小時)	燃煤		燃油	燃氣
	固定床	流動床		
30 以上	200	200	200	170
10 以上未達 30	250	200	200	170
5 以上未達 10	-	-	220	200
未達 5	-	-	250	220

註：鍋爐同時使用多種燃料時，應符合單位時間發熱量最多燃料之排氣溫度規定。
資料來源：經濟部能源局（2012），指定能原用戶使用蒸氣鍋爐應遵行之節約能源規定。

承前所述，環境部針對鍋爐持續降低污染排放量故從排放濃度進行管制，鍋爐的能源效率則由經濟部能源署（前能源局）進行規範，兩者規範分別管理，並未整合且同時考量空氣污染與溫室氣體協同管制之需求，因此本研究收集國際間，針對鍋爐同時考量能源效率與空氣污染管制之相關策略做法，並評析作為國內政策之可行性，提供我國鍋爐管制的施政建議。

二、國際間鍋爐空氣污染與溫室氣體減量協同策略

臺灣產業界常見的鍋爐品牌包括日本、美國、歐洲以及國內自有鍋爐品牌，故本研究彙整日本、歐盟與美國的管制方式，摘要如下說明：

2.1 日本

日本鍋爐空氣污染物排放標準（日本環境省，2023a）及能源效率管制方式，說明如下。

2.1.1 空氣污染物排放標準

1. 硫氧化物（SOx）排放標準

日本的 SOx 排放標準使用 K 值計算管制標準，經公式 1 換算而得（日本環境省，2023b）。

$$Q=K\times10^{-3}\times He^2$$
 公式 1

Q 代表 SOx 的排放量標準（在零度、1 大氣壓情況下換算每小時單位 m³）；K 由地方政府公告，此常數會根據地區而有不同，K 值越小代表排放管制越嚴格，當前各地區 K 值範圍落於 1.17 到 17.5 中；He 代表修正後的排放管道出口高度，其高度是由實際煙囪高度加上煙氣上升高度而得（日本環境省，2023b）。

2. 氮氧化物（NOx）和粒狀污染物排放標準

NOx 和粒狀污染物的排放管制標準，係根據不同鍋爐的燃料種類區分，規範其排放之標準，而日本全國的排放標準彙整如表 5（日本環境省，2023c），各地方政府可再依管制需求擬訂加嚴之排放標準。

表 5 鍋爐粒狀污染物和 NOx 的排放標準

設施種類	鍋爐規模 ²	標準值			
		含氧量 (%)	粒狀污染物 (g/m ³ N) ³		NOx (ppm)
			一般區域	特定區域	
燃氣鍋爐	4 萬 m ³ N 以上	5	0.05	0.03	60-100
	未滿 4 萬 m ³ N	5	0.1	0.05	130-150
重油或混和液體 燃燒鍋爐	20 萬 m ³ N 以上	4	0.05	0.04	130-150
	4-20 萬 m ³ N	4	0.15	0.05	150
	1-4 萬 m ³ N	4	0.25	0.15	150
	未滿 1 萬 m ³ N	4	0.3	0.15	180
黑液燃燒鍋爐 ¹	20 萬 m ³ N 以上	-	0.15	0.1	-
	4-20 萬 m ³ N	-	0.25	0.15	-
	未滿 4 萬 m ³ N	-	0.3	0.15	-
燃煤鍋爐	20 萬 m ³ N 以上	6	0.1	0.05	200-250
	4-20 萬 m ³ N	6	0.2	0.1	250-320
	未滿 4 萬 m ³ N	6	0.3	0.15	250-350

註¹: 黑液為從木屑提取之生質燃油（指造紙過程所產生之木質素廢液）。

註²: 鍋爐規模的單位為每小時濕基排氣量。

註³: 特定區域為工廠及商業群集，被認定為單獨應用現存法規將不易達到空氣品質標準之地區。

資料來源：日本環境省（2023c），ばいじんと NOx の排出基準値一覧。<https://www.env.go.jp/air/osen/law/t-kise-6.html>；本研究彙整。

2.1.2 能源效率標準

日本由經濟產業省訂定企業經營者合理利用工廠能源標準規範（經濟產業省，2021），其規範燃燒設備以及鍋爐的效率，管制內容包括燃料供給量、氣體溫度、排放氣體中的氧氣含量等規定。

對於鍋爐的空氣和燃料的質量比（又稱空氣比）規範如下表 6 所示。空氣比是定期檢查後穩定工作狀況下的負荷燃燒值，主要是測量鍋爐排氣出口的量測，若有同時燃燒多種燃料的鍋爐，負荷率所指的是混燒燃料的燃燒率。然而此標準不包含燃燒木屑、木皮、污泥等工業廢棄物燃燒或混合燃燒的鍋爐，或是廢氣處理設備等。對於鍋爐排氣溫度規範標準如表 7 所示，排氣溫度標準是以定檢時鍋爐入口的氣體溫度 20℃ 為基準，於鍋爐排氣處檢測到的溫度，鍋爐負荷率需達 100% 於出口處進行量測之情況。

表 6 鍋爐空氣比標準

類別		負荷率 (%)	空氣比標準				
			固體燃料		液體 燃料	氣體 燃料	高爐煤氣 / 其 他副產氣體
			固定床	流動床			
發電業者使用 ¹		75-100	-	-	1.05-1.2	1.05-1.1	1.2
一般鍋爐	蒸氣蒸發量 30 噸以上	1.3-1.45	1.2-1.45	1.1-1.25	1.1-1.2	1.2-1.3	1.2-1.3
	蒸氣蒸發量 10-30 噸	1.3-1.45	1.2-1.45	1.15-1.3	1.15-1.3	-	-
	蒸氣蒸發量 5-10 噸	-	-	1.2-1.3	1.2-1.3	-	-
	蒸氣蒸發量 5 噸以下	-	-	1.2-1.3	1.2-1.3	-	-
小型貫流鍋爐		100	-	-	1.3-1.45	1.25-1.4	-

註¹：發電使用之鍋爐指電力公司用於發電的設備鍋爐。

資料來源：經濟產業省（2021），工場等におけるエネルギーの使用の合理化に関する事業者の判断の基準。

表 7 鍋爐排氣溫度 (單位℃)

類別		空氣比標準				
		固體燃料		液體 燃料	氣體 燃料	高爐煤氣 / 其 他副產氣體
		固定床	流動床			
發電業者使用 ¹		-	-	145	110	200
一般 鍋爐	蒸氣蒸發量 30 噸以上	200	200	200	170	200
	蒸氣蒸發量 10-30 噸	250	200	200	170	-
	蒸氣蒸發量 5-10 噸	-	-	220	200	-
	蒸氣蒸發量 5 噸以下	-	-	250	220	-
小型貫流鍋爐		-	-	250	220	-

註¹：發電使用之鍋爐指電力公司用於發電的設備鍋爐。

資料來源：經濟產業省（2021），工場等におけるエネルギーの使用の合理化に関する事業者の判断の基準。

2.1.3 低 NOx・低 CO₂ 認證標章管理方式

為鼓勵產業技術發展、提高行政效能，1989 年日本東京都擬定優於東京都氮氧化物加嚴標準可取得低 NOx 排放的設備認證規範，該規範中也將低 CO₂（高能源效率）納入認證（東京都環境局，2023）。此規範將加熱設施分為 3 種類型，如表 8 所示，包括瓦斯熱泵空調（gas heat pump, GHP）、發電設施（combined heat and power, CHP）與其他鍋爐，相關說明如下。

表 8 加熱設施類型分類

設備類型	規模要求
瓦斯熱泵空調 (GHP)	定額耗氣量小於每小時 8 m ³
以燃氣發動機為原動機的電力機組 (CHP)	定額耗氣量小於每小時 8 m ³ ，發電量 5 kW 以上
蒸氣鍋爐、熱水加熱器、冷熱加熱水器、熱水鍋爐、預停式熱水器	傳熱面積小於 10 m ² ，熱能輸出大於 35 kW

資料來源：東京都環境局（2023），低 NOx・低 CO₂ 小規模燃燒機器認定制度の概要。
https://www.kankyo.metro.tokyo.lg.jp/air/air_pollution/torikumi/nox_co2/nox_co2.html；本研究彙整。

1. 認證規範類型與標準

該規範中，認證之規範類型 NOx 濃度標準（如表 9 所示）及能源效率標準（如表 10 所示），不同的鍋爐類別、不同的燃料使用會有不同的認證規範，以達到認證標準的程度，並分為 4 種不同的等級認證，分述如下：

- (1) AA 級：NOx 排放達到「超低 NOx」標準，能源效率須達到「超高效率」標準，如圖 3 左上圖所示。
- (2) A 級：NOx 排放達到「低 NOx」標準，能源效率達到「高效率」標準（如圖 3 右上圖所示）。
- (3) HH 級：NOx 排放達到「超低 NOx」標準的氫燃料蒸氣鍋爐或熱水鍋爐（如圖 3 左下圖所示）。
- (4) H 級：NOx 排放達到「低 NOx」標準的氫燃料蒸氣鍋爐或熱水鍋爐。（HH 級除外）（如圖 3 右下圖所示）。

表 9 NOx 認證標準

燃燒設備類型		氣體燃料		液體燃料	
		超低 NOx	低 NOx	超低 NOx	低 NOx
蒸氣鍋爐		40 ppm 以下	50 ppm 以下	60 ppm 以下	70 ppm 以下
熱水鍋爐		40 ppm 以下	50 ppm 以下	60 ppm 以下	70 ppm 以下
熱水加熱器		40 ppm 以下	50 ppm 以下	60 ppm 以下	70 ppm 以下
冷熱水加熱器		40 ppm 以下	50 ppm 以下	60 ppm 以下	70 ppm 以下
熱水器		50 ppm 以下	60 ppm 以下	-	-
瓦斯熱泵 空調	熱輸出 45 kW 以上	80 ppm 以下	90 ppm 以下	-	-
	熱輸出未達 45 kW	80 ppm 以下	100 ppm 以下	-	-
汽電共生機組		-	150 ppm 以下	-	-

資料來源：東京都環境局（2023），低 NOx・低 CO₂ 小規模燃燒機器認定制度について，認定基準 https://www.kankyo.metro.tokyo.lg.jp/air/air_pollution/torikumi/nox_co2/recognition_standard.html；本研究彙整。

表 10 能源效率認證標準

燃燒設備種類		效率	
		超高效率	高效率
蒸氣鍋爐 (鍋爐效率)	導熱面積 5m ² 以上	97 % 以上 (氣體燃料) 96 % 以上 (液體燃料)	90 % 以上
	導熱面積未滿 5m ²	95 % 以上	90 % 以上 (氣體燃料) 89 % 以上 (液體燃料)
熱水鍋爐 (熱效率)		93 % 以上	88 % 以上
熱水器		95 % 以上	90 % 以上
熱水加熱器		95 % 以上	88 % 以上
冷熱水加熱器 (性能係數) ¹	熱輸出 352 kW 以上	1.4 以上	1.2 以上
	熱輸出未滿 352 kW	1.3 以上	1.1 以上
瓦斯熱泵空調 (週期性能係數)	熱輸出大於 56 kW	1.88 以上	1.70 以上
	熱輸出 45-56 kW	1.80 以上	1.59 以上
	熱輸出 35.5-45 kW	1.64 以上	1.46 以上
	熱輸出 28-35.5 kW	1.38 以上	1.27 以上
	熱輸出小於 28 kW	1.23 以上	1.12 以上
汽電共生機組		-	85% 以上

註：¹ 性能係數為系統提供的能量 (Q) / 系統需要外界提供的能量 (W)
資料來源：東京都環境局 (2023)，低 NO_x・低 CO₂ 小規模燃燒機器認定制度について，認定基準。https://www.kankyo.metro.tokyo.lg.jp/air/air_pollution/torikumi/nox_co2/recognition_standard.html；本研究彙整。



資料來源：日本環境省 (2023)。低 NO_x 型燃燒機器普及促進のための様々な取組。
<https://www.env.go.jp/air/osen/shokibo/05.html>。

圖 3 東京都低 NO_x・低 CO₂ 小規模燃燒機器認證標準

2. 認證申請流程

根據東京都低 NO_x、低 CO₂ 設備認定綱要之規範（東京都環境局，2023a），鍋爐製造業者可於每年召開低 NO_x・低 CO₂ 設備批准委員會前向東京都環境局提出設備認證的申請，申請案件則由東京都政府所設立的低 NO_x・低 CO₂ 小規模燃燒機器認定委員會（以下簡稱認定委員會）進行審查。申請設備認證之詳細流程如圖 4 所示。



資料來源：本研究繪製。

圖 4 東京都低 NO_x・低 CO₂ 小規模燃燒機器認定流程

鍋爐業者進行申請時，申請書中主要會包含 3 個部分，第一部分為設備基礎資料，需涵蓋申請者（鍋爐業者）的基礎資料，例如申請者的姓名住址、申請設備的種類與型號、申請設備使用的燃料種類、機械結構與結構圖紙等資料。第二部分為 NO_x 排放減量資料，申請者須提供所申請標章的設備 NO_x 的減量方式，同時也須提供此設備依照此減量方式進行檢測之結果。第三部分為能源效率提升資料，申請者須提供所申請標章的設備能源效率提升的方式，同時也須提供此設備依照此能源效率提升方式進行檢測後，能源效率的檢測結果，經審查核准通過之鍋爐，業者可於商品、型錄上標示其設備標章類型，如圖 5 所示，同時地方政府也需要以公開的方式公告通過認證的設備（如圖 6 所示）。



資料來源：MIURA（ミウラ）（2023），製品・ソリューション | 熱・水・環境のベストパートナー <https://www.miuraz.co.jp/product/boiler/steam/gas/sq01.html#sq-as>。本研究翻譯。

圖 5 日本鍋爐型錄



資料來源：東京都環境局（2023b），低 NOx・低 CO₂ 小規模燃燒機器の一覧，https://www.kankyo.metro.tokyo.lg.jp/air/air_pollution/torikumi/nox_co2/equipment_list.html；本研究翻譯。

圖 6 東京都環境局公告通過認證之鍋爐名單

3. 行政面誘因

鍋爐高效能低污染標章政策的推動，需以完整的誘因措施作為產業的驅動力，最直接者為稅率上的優惠措施，如產業使用通過認證的鍋爐者，可抵免一部分的營業稅，藉此鼓勵大眾及業者購買有經過認證的設備，以 2009 年東京都為了鼓勵中小企業自願進行節能為例，產業採用通過認證之設備，可適用節稅標準，根據日本訂定的中小企業節能促進稅制度（東京都主稅局，2009），產業選用符合規範的設備可申請減免法人企業稅（資本金在 1 億日圓以下的法人）或是個人企業稅；此外日本石油相關產業組成的石油聯盟也針對使用該聯盟認證的高效率低 NO_x 設備進行補助。

除了稅務上的經濟誘因外，獲得鍋爐低 NO_x 高效能認證標章的鍋爐，也可以因節能減碳效益申請相對應的補助，欲申請相關補助之業者，需要提交全球暖化對策報告書（東京都，2023），該報告書是係以掌握企業對於能源使用以及溫室氣體排放為目的，規範企業需要提供必要的資訊（能源消耗、排放量、使用之節能措施等）供政府管理，而政府也能透過報告書檢核通過認證的設備應用於企業的情況。

另在 2010 年 3 月 31 日到 2026 年 3 月 30 日間，法人企業購置並使用認證過的設備，法人企業購置成本的 1/2（最高達 2,000 萬日圓）免徵稅；而在 2010 年 1 月 1 日到 2025 年 12 月 31 日間，個體企業戶購置並使用認證過的設備，其設備取得成本的 1/2（最高達 2,000 萬日圓）免徵稅（東京都主稅局，2023）。

企業採購認證過的設備，可以取得補助外，在稅賦上也享有優惠措施，在此優勢下，未取得標章認證之鍋爐，較無市場競爭優勢，因此日本企業所生產的加熱設施，其氮氧化物排放濃度、能源效率多已優於法令之規定。

2.2 美國

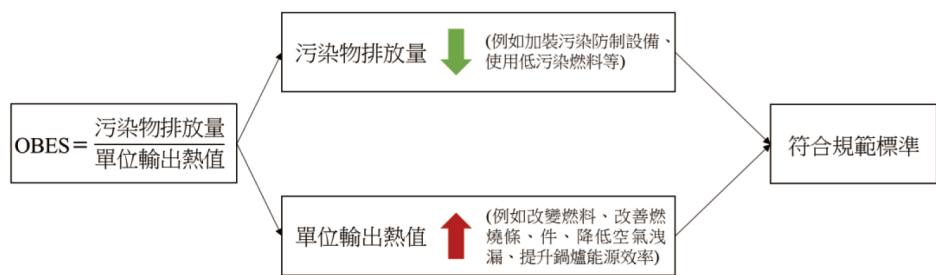
1970 年美國根據清淨空氣法（Clean Air Act, CAA）之授權，訂定了工業鍋爐的排放標準（EPA, 2023），其依照不同鍋爐的種類規定了濃度排放標準或單位輸入熱值排放標準（Input-based emission standards, IBES），此標準是以每單位輸入熱值（或燃料）污染物排放的質量（單位為 lb MMBtu⁻¹）當作規範，計算方式如公式 2 所示：

$$IBES = \frac{E_T}{F} \quad \text{公式 2}$$

公式 2 中，代表污染源的總排放量（以污染物的質量表示）；而 F 代表輸入的燃料所產生的熱值，美國以每英磅（lb，1 lb 相當於 0.45 kg）產生的百萬英熱（Million British Thermal Units, MMBtu）作為熱值能量的單位。當時污染物排放管制中，以排放量作為管制的主體，再加上考量到因規範下的空氣污染源類別、燃料類別多元（例如汽油引擎、燃煤鍋爐、柴油發電機等）需要相同的比較標準，考量到各燃燒源即使使用不同的燃料（例如氣體燃料、液體燃料或固體燃料等），皆有輸入熱值，故美國之鍋爐標準係以輸入熱值之排放量作為排放標準。

1990 年代美國為了改善燃燒源排放造成的空氣污染問題（包括酸雨、能見度降低、氣候變遷等），美國環保署（Environmental Protection Agency, EPA）研擬加嚴排放標準，然而 EPA 發現加嚴排放污染標準後，業者要符合排放標準所需要投入的成本越來越高，但減量效益卻不如預期，故 EPA 採用更具有彈性且具成本效益（cost efficient）考量的單位輸出熱值排放標準（output-based emission standards, OBES）進行管制，相較於以往管制作法，這樣的管制方式係以源頭、製程為基礎，並非僅針對管末進行限制，管制的作法，包括燃料使用效率、製程效率等進行規範，而非僅限制管末濃度標準，同時也希望可以在污染減量的同時達到工業技術提升的目的。

2014 年 EPA 的汽電共生夥伴關係（combined Heat and Power Partnership, CHP partnership）發布了單位輸出熱值規範手冊（Output-Based Regulations: A Handbook for Air Regulators）（以下簡稱手冊），其訂定的 OBES 將排放量與生產的產能結合，使用每單位輸出熱值（MMBtu）或輸出電能（MWh）之排放量，排放量以重量單位（美國以英鎊（lb）為單位）作為管制標準，此管制架構下，若想要達到標準，可以選擇（1）減少污染物排放量，或是（2）提升單位輸出的熱值。和先前 IBES 的管制相較，OBES 增加了可以提升單位輸出熱值作為符合標準的改善方向，而為了提升單位輸出的熱值，業者會從提升鍋爐的能源使用效率、改變使用的燃料等方向進行改善，藉此達到增加能源使用效率的目的。OBES 的管制規範架構如圖 7 所示。



資料來源：本研究繪製。

圖 7 OBES 管制規範架構

該手冊說明採用 OBES 的優點有包括：提升設備的能源使用效率，達到節能減碳的協同減量效果、確保長期穩定的排放量減量、讓業者更清楚的比較不同設備和燃料的排放量表現、提供污染源更彈性的方式來符合規範，可降低業者成本（EPA, 2023）。

每單位輸出熱值管制包含了輸出熱值的燃燒源，其因為輸出能源用途不同，故再熱值的計量上以能源的用途將燃燒源區分為：產生電能（electrical energy）的設備、產生熱能（thermal energy）的設備、和產生機械能（mechanical energy）的設備，三種類型的設備，OBES 所使用的單位如表 11 所呈現，產生電能的設備，例如鍋爐（boilers）/ 蒸氣渦輪往復式引擎（steam turbines reciprocating engines）、燃燒渦輪（combustion turbine），使用 lb MWh⁻¹ 作為 OBES 的單位；產生熱能的設備，例如商業鍋爐（commercial boilers）與工業鍋爐（industrial boilers），使用 lb MMBtu_{輸出熱值}⁻¹ 作為 OBES 的單位；而產生機械力的設備，如往復式引擎（reciprocating engines），使用 g bhp-hr⁻¹ 作為 OBES 的單位。

表 11 單位輸出熱值之單位

設備	能源類別	使用單位
鍋爐 / 蒸氣渦輪往復式引擎 燃燒渦輪	生產電力	lb MWh ⁻¹
工業鍋爐 商業鍋爐	生產蒸氣或熱水	lb MMBtu _{輸出熱值} ⁻¹
往復式引擎	機械力	g bhp-hr ⁻¹

資料來源：EPA(2014), Output-based Regulations: A Handbook for Air Regulators.; 本研究彙整。

若管制單位想要建立 OBES，EPA 發布之手冊中載明提供了建立標準的步驟，過程需要經過三個階段，包括建立 OBES、決定能源輸出範圍、決定量測方法規範。

1. 建立 OBES

因為單位輸出熱值的資料蒐集不易，大多數較容易取得的資料為單位輸入熱值（燃料使用量換算或檢測）以及濃度排放量（煙道排放濃度等）。故在手冊中提供如何將單位輸入熱值（商業 / 工業鍋爐）或濃度（煙道氣（Flue gas））轉換為 OBES 的公式，以供主管機關可以直接利用公式將原本的管制標準（IBES 或濃度標準）轉換為 OBES。

(1) 工業 / 商業鍋爐 IBES 轉換為 OBES

商業 / 工業鍋爐主要所指的為生產水蒸氣或是熱水的鍋爐，此類的鍋爐已有 IBES 的規範，故可利用公式 3，將 IBES 標準轉換為 OBES 的標準：

$$OBES = \frac{IBES}{ENE_s} = \frac{\frac{E_T}{F}}{ENE_s} \quad \text{公式 3}$$

代表的為鍋爐的能源效率（energy efficiency, ENE），以百分比（%）作為單位。計算方式為將原本的 IBES 標準除以鍋爐的能源效率作為 OBES 標準。

(2) 煙道氣（Flue gas）濃度限值（ppmv）轉換為 OBES

部分的燃燒渦輪、鍋爐和引擎是以乾基設置體積濃度標準（ppm）限值。若要將這類的濃度標準轉換為 OBES 需要經過兩個步驟：

步驟 1：將濃度標準（ppm）轉換成 IBES，因濃度標準主要會考慮不同的燃料其排放的污染物成分會不同，轉換時會使用下面的公式 4 進行轉換。

$$lb/MMBtu_{heat\ input} = ppm \times k \times F \times \left(\frac{20.9}{20.9 - \%O_2} \right) \quad \text{公式 4}$$

公式 4 中，k 代表的是單位轉換的因素（例如從 ppm 轉換成 lb）；F 代表的是乾煙道氣體濃度轉換成燃料熱值的轉換係數，會根據不同的燃料有不同的值（EPA Method 19 的附件 A 中提供美國規範不同燃料的 F 轉換值（EPA, 2017））。舉例來說，

52 減污及減碳共利策略研析－以鍋爐管制為例

若原本排放標準是 25 ppmv (15% O₂)，經過換算之後，得到的 IBES 會等於 0.09 lb MMBtu_{輸入熱值}⁻¹。

步驟 2：將 IBES 轉換為 OBES，換成 IBES 後，以上述的公式 5 轉換成 OBES。

2. 決定能源輸出範圍

單位輸出能源的規範有兩種主要的類別，總能源輸出 (gross energy output) 以及淨能源輸出 (net energy output)。

(1) 總能源輸出

總能源輸出代表製程中所有能源的輸出。從產生電力的設備的能源輸出會以 (MWh) 作為計量單位，從工業鍋爐產生的能源輸出則會以 (MMBtu 輸出熱值) 作為單位。

(2) 淨能源輸出

淨能源輸出為總能源輸出扣除所有維持能源設備運轉的能源。其在計算上需要扣除的項目包含：用於輔助能源輸出的裝置（例如進料斗 (fuel handling)、前處理設備、幫浦、發動機以及風扇等）、用於污染防制設備的能源、用於維持熱的恢復設備（例如預熱器 (preheater)、省煤器 (economizer)）、建物使用（例如室內的照明、暖氣 / 冷氣等）。

使用淨能源輸出可檢視場內更完整的能源使用情況，因其將所有不同的設備消耗能源的情況進行盤點與扣除，故在管理上能提供業者更多資訊和管制面向。然而淨能源輸出的資料收集與總能源輸出相較下較困難，因為淨能源輸出無法直接從單一的設備裝置輸出進行計算，為了計算淨能源的輸出，會需要釐清各設備能源消耗、廠區內能源逸散的情況。若在比較複雜的製程中，淨能源輸出的計算困難度也會因設備的數量和類型增加而提高。

3. 決定量測方法規範

量測與計算的方法手冊中都已經有規定，業者主要需要決定的事該如何量測（例如量測計要設在哪裡、該如何取得排放資料等）。目前若已經有使用 IBES 的業者，多數都已經根據 IBES 的需求設置蒐集數據的量測計，業者可根據新的規範進行資料

的微調即可。對產生蒸氣的鍋爐而言，因為大型設備中量測鍋爐熱能的輸出為系統管理的主要數據，故多數的鍋爐應已有熱能輸出的數據（例如用產生的蒸汽流量、溫度變化等計算），可利用轉換公式將鍋爐輸出的熱值轉換成每單位輸出熱值排放量（使用 lb MMBtu⁻¹ 為單位）。

2012 年 EPA 發布了主要污染源：工業、商業和機構鍋爐和加熱媒有害空氣污染物國家排放標準（National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants for Major Sources: Industrial, Commercial, and Institutional Boilers and Process Heaters, Boiler MACT），用於規範工業、商業與機構設施的大型鍋爐和加熱媒（每年排放量超過 10 公噸者或有害污染物排放量超過 25 公噸者）。

Boiler MACT 原本就有規定排放標準（IBES 或濃度標準），在 2014 年提出了 OBES 的概念之後，Boiler MACT 也使用手冊中提供的方法，將原本設定的 IBES 或是濃度標準轉換為 OBES，提供所有鍋爐及排放污染物替代使用，業者可以從原本的標準（IBES 或濃度標準）和新建立的替代標準（換算後的 OBES）中，選擇其一遵守。

2.3 歐盟

2.3.1 歐盟空氣污染排放標準

歐盟於對於 2015 年訂定了鍋爐的空氣污染物排放標準（如表 12 所示），其標準的目的是藉由管末濃度排放標準管制減少產生的空氣污染排放量（European Parliament, 2015）。

表 12 歐盟鍋爐排放標準

規格 (蒸氣蒸發量)	SOx 排放標準	NOx 排放標準	TSP 排放標準
(既存) 輸入熱值 1~5 MW	200 mg/Nm ³ (固體生質) 1100 mg/Nm ³ (固體) 350 mg/Nm ³ (液體) 200 mg/Nm ³ (氣體)	650 mg/Nm ³ (固體生質 / 固體) 200 mg/Nm ³ (汽油) 650 mg/Nm ³ (液體) 250 mg/Nm ³ (氣體)	50 mg/Nm ³ (固體生質 / 固體) 50 mg/Nm ³ (液體)

規格 (蒸氣蒸發量)	SOx 排放標準	NOx 排放標準	TSP 排放標準
(既存)輸入熱值 >5 MW	200 mg/Nm ³ (固體生質) 400 mg/Nm ³ (固體) 350 mg/Nm ³ (液體) 35 mg/Nm ³ (氣體)	650 mg/Nm ³ (固體生質 / 固體) 200 mg/Nm ³ (汽油) 650 mg/Nm ³ (液體) 200 mg/Nm ³ (天然氣) 250 mg/Nm ³ (氣體)	30 mg/Nm ³ (固體生質 / 固體) 30 mg/Nm ³ (液體)

資料來源：European Parliament (2015) , Directive (EU) 2015/2193.

2.3.2 歐盟能源效率管制標準

歐盟在 EU NO.182/2011 針對工業排放 (industrial emissions) 的相關規範中，於能源使用的章節規定須採行最佳可行技術手冊 (best available techniques (BAT) reference document (BREF)) 中對於 ENE 的標準，且使用規定之方法進行資料蒐集和回報 (EU, 2011)。在 BREF 中有明確列出不同規模、設備以及不同燃料必須符合的污染物排放標準以及 ENE 門檻 (European IPPC Bureau, 2023)。為瞭解燃燒設備將燃料能源轉換成電力、熱水、蒸氣或是機械能的效率，必須利用能源效率當作指標來評估能源的轉換效率。能源效率計算須監測製程能源輸出與所有耗能，對於業者而言，同樣需增設或改善原有監測系統。但以管制層面來看，以提升能源效率為前提設定能效標準，是管末處理外另一種污染物減量之方法。初級能源產物大致上分為 2 種：電能以及熱能。在計算能源效率時，以單位時間內所投入燃料熱值為分母，淨電力輸出及淨熱能輸出之總和為分子，轉換效率的計算如下公式 5 (European Commission, 2009)：

$$Energy\ Efficiency = \frac{E_{E,\ output} + E_{TH,\ output}}{E_{f,\ input}}$$

公式 5

代表淨可用電力輸出；代表淨可用熱能輸出；代表燃料能量輸入。此處淨電、熱能係能源產生後，扣除能源生產相關設備使用所消耗能源。以淨能源輸出計算能源效率能提升對相關硬體設備能效要求並減少設備餘熱，增加能源效率並減少燃料使用，進而減少污染物排放。上述的計算方式會根據投入的能量和產生的能量（熱能和電力）而改變，同時也能透過相關的標準提升鍋爐的能量使用。

為了規範鍋爐的能源效率標準，歐盟於工業排放指令 (Industrial Emissions

Directive 2010/75/EU) 中的最佳可行技術對於大型燃燒源 (large combustion plants) 規範中，會依據燃燒的燃料、燃燒源規模等作為區分 ENE 標準的因素，用以規範 BAT 相關能源效率階級 (BAT-associated energy efficiency levels, BAT-AEELs) 標準，其中又分為淨發電率 (net electrical efficiency (%)) 和淨總燃料利用率 (net total fuel utilization)，會依據機組的功能 (發電或發熱) 而選用適當標準，能源效率標準彙整如表 13 (European Commission, 2017)。

表 13 歐盟大型燃燒源 ENE 標準

燃燒源類別		BAT 相關能源效率階級 ¹		
燃料設備類別	發電量	淨發電效率 (%)		淨總燃料利用率 (%)
		新設	既存	新設 / 既存 ²
煤 (Coal-fired)	≥ 1,000 MW _{th}	45-46	33.5-44	75-97
	<1,000 MW _{th}	36.5-41.5	32.5-41.5	75-97
褐煤 (Lignite-fired)	≥ 1,000 MW _{th}	42-44	33.5-42.5	75-97
	<1,000 MW _{th}	36.5-40	31.5-39.5	75-97
固體生質 (solid biomass) 和泥炭 (peat)	-	33.5-38	28-38	73-99
HFO 和燃氣燃油 (gas-oil) 鍋爐	-	>36.4	35.6-37.4	80-96
天然氣鍋爐	-	39-42.5	38-40	78-95
天然氣 CCGT	50-600 MW _{th}	53-58.5	46-54	-
	≥ 600 MW _{th}	57-60.5	50-60	-
天然氣 CHP CCGT ³	50-600 MW _{th}	53-58.5	46-54	65-95
	≥ 600 MW _{th}	57-60.5	50-60	65-95
多元燃料鋼鐵鍋爐	-	36-42.5	30-40	50-84
多元燃料鋼鐵 CCGT	-	>47	40-48	-
多元燃料鋼鐵 CHP CCGT	-	>47	40-48	60-82
液體燃料 (化學工業) 鍋爐	-	36.4	35.6-37.4	80-96
氣體燃料 (化學工業) 鍋爐	-	39-42.5	38-40	78-95

註：

1 這些規範不適用於操作小於每年 1,500 小時的設備。

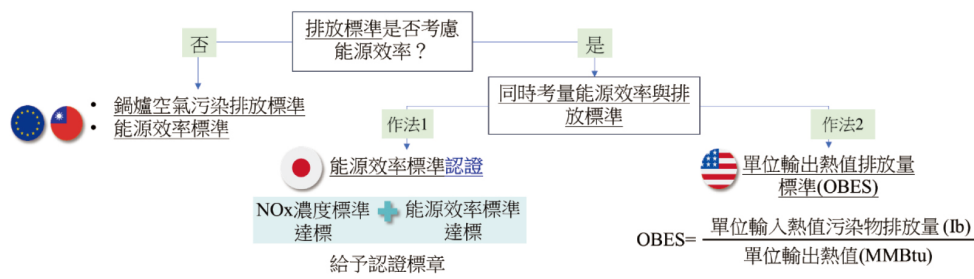
2 最低效率可能會受到所處環境和地形的影響，最多影響 4%；若發熱需求不足可能會無法達到標準。

3 CCGT：複循環燃氣渦輪 Combined cycle gas-turbine，由單循環燃氣再加上熱回收蒸汽發生器和蒸汽渦輪發動機所組成的，因此稱為複循環。

資料來源：European Commission, 2017. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Large Combustion Plants. Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control)；本研究彙整。

三、兼顧淨零轉型的鍋爐管制策略評析

鍋爐廣泛的應用於工商業的熱能或動力供給來源，其使用燃料過程所產生的空氣污染物為空氣品質改善的重點，管制策略上多以排放濃度的限制為其管制工具，而在2050 淨零轉型政策的驅動下，空氣污染管制必須考量溫室氣體減量的協同管理，因此鍋爐空氣污染物的排放管理必須同時考量能源效率，而國內的管理架構與歐盟相近，排放標準與能源效率分別管理，日本採用鼓勵型的標章認證方式，美國則將能源效率內含於排放標準的考量內，彙整如圖 8 所示。



資料來源：本研究繪製。

圖 8 國際間鍋爐排放標準與能源效率管理方式

綜合前述，日本與美國針對鍋爐的管制方式同時考量空氣污染排放減量以及能源效率管理，可作為我國邁向淨零過程中，產業轉型、技術升級的參考，故針對兩者不同管理做法，於國內政策推動之可行性進行評析。

3.1 行政可行性評析

日本採用標章方式鼓勵產業升級，美國則推動單位輸出熱值排放量管制標準，兩者不同做法於國內行政可行性評析說明如下。

1. 政策推動的即時性考量

採行單位輸出熱值排放量標準之管制方式，與國內現行管制方式差異較大，其將排放標準與能源標準整合為單一標準進行管制，藉此達到同時管控排放量與能源效率的目的，但因國內暫無常設監測與計算單位輸出熱值的規範，故若要參考美國現行標

準，建立國內本土化標準，需要政策推動的前置作業，包括數據的蒐集、資料庫的建立、標準流程的盤點與驗證的方法等，管制策略擬定上所需要的時間較長；而採標章管制方式，則與我國現行管制方法相近，日本針對優於法規之濃度與效率分別給於認證標章，國內僅需要設立結合兩種標準之認證標章與相關申請流程即可推動，管制策略擬定上所需的時間較短，較為立即可行。

2. 主管機關稽核的便利性

採行單位輸出熱值排放量標準之管制方式，主管機關為檢核是否符合管制標準，須針對排放結果、輸入熱值進行量測，管制執行面較不具便利性且其執行成本較高；而採用標章管制方式，主管機關針對設備進行驗證後給予標章，執行查核上較為容易且具有分級管理概念，主管機關可針對為取得標章之鍋爐再進行排放檢測作業。

3. 國內是否有相關執行經驗

結合能源效率與空氣污染排放管理的策略應用上，空氣污染防治法授權所訂定之電力設施空氣污染物排放標準，已針對汽電共生設備鍋爐訂有以總熱效率換算之空氣污染物排放標準，故國內已有能源效率結合排放標準管制方式，但目前僅針對大型電力設施所採行。

而在標章認證的策略作法上，在環境議題上國內已有相關的執行經驗，包括碳足跡標章、省水標章、綠建材標章、節能標章等皆屬之，而與空氣污染防治有關的標章者為，環境部推動之「施工機具清潔排放自主管理標章規範」，此標章旨為鼓勵施工機具自主管理，藉此獎勵使用排放低污染之施工機具者，業者可根據規範標章申請、審查及核發程序、標章級別及使用年限等規範，施工機具所有者可依相關申請程序辦理，經檢測黑煙光吸收係數測值小於 1.0m^{-1} 以下者，即核發該機具自主管理標章，其標章如圖 9 所示，策略概念、行政程序與日本推動鍋爐認證的方式相同。

而在施工機具清潔排放自主管理標章推動成果上，依據 2022 年統計結果，當年度核發標章的施工機具已有 1,679 部取得標章，而自推動標章後促使業者更加注重機具的空氣污染排放，且較願意採用新型、低污染機具，汰換掉年齡較大、污染排放較高的機具（行政院環保署，2023b）。



資料來源：行政院環保署（2023b），施工機具清潔排放自主管理標章規範。

圖 9 施工機具清潔排放自主管理標章

3.2 技術可行性分析

鍋爐燃燒所排放的空氣污染物以粒狀污染物、硫氧化物、氮氧化物為主，粒狀污染物、硫氧化物與燃料使用較為相關，多由源頭燃料或末端排放進行控制，而氮氧化物排放則與燃燒效率有關，良好的鍋爐設計及操作控制效率，可降低排放濃度外亦可提高能源效率，因此評估標章方式鼓勵產業升級或是採用單位輸出熱值排放量管制標準，均需評估氮氧化物是否有濃度再加嚴、能源效率再提高之的技術可行性。

1. 降低氮氧化物排放濃度之技術可達情形

環境部於 2018 年 9 月 19 日發布鍋爐空氣污染物排放標準，規範氮氧化物濃度標準為 100 ppm，使用鍋爐之業者多以燃料汰換、設備改善之方式降低排放濃度，彙整固定污染源管理資訊系統 2023 年之全國鍋爐氮氧化物定期檢測結果，現行 100 ppm 之濃度標準，氣體燃料之鍋爐 100 % 完全符合標準，有 95% 的液體燃料鍋爐符合；若將標準降至 80 ppm 則有 96 % 氣體燃料鍋爐與 87% 的液體燃料鍋爐可符合標準；若將標準降至 60 ppm 有 84 % 氣體燃料鍋爐與 60% 的液體燃料鍋爐可符合標準（環境部，2023b）。其結果顯示，在既有的鍋爐燃燒技術未提升之前提下，仍有技術可行的減量空間，因此推動優於法規排放濃度給予認證標章之策略，具有技術可行性。

2. 商業化可行技術現況

降低碳排放、減少燃料使用為鍋爐燃燒技術發展之趨勢，日本因推動鍋爐標章認證，購買取得具認證標章鍋爐之企業，即可獲得商業補助或是貸款誘因，因此鍋爐技術的發展已不再以滿足排放標準為考量，係以最高效能、最低污染排放為技術精進目

標，以日本品牌三浦鍋爐為例，蒸氣蒸發量 1,990 ~ 2,500 kg/h 取得日本標章認證之鍋爐，其氮氧化物可降低至 25 ppm，鍋爐的能源效率可達 98 % (MIURA (ミウラ), 2023)，顯見高效率、低污染排放之鍋爐已有商業量產之技術。

3.3 行政成本效益評估

鍋爐空氣污染物排放濃度的改善，為各縣市環保局施政的重點目標，而為確保鍋爐能符合排放標準，多委由環境檢驗測定機構進行排放管道檢測，以驗證企業所設置之鍋爐排放濃度，而常見之檢測項目為粒狀污染物、硫氧化物、氮氧化物，依區域、行業、排放高度等個案上的差異，排放管道檢測的所需的費用高 (行政院環保署, 2021)，因此稽查所需的行政成本不低，各縣市環保機關並無法將檢驗測定資源投注於鍋爐之排放檢測。

以行政成本之效益進行考量，當採行單位輸出熱值排放量標準之管制方式，仍需針對鍋爐之排放管道進行檢驗測定，且須再新增輸出熱值監測，故其行政成本可能會相較以往再增加；日本採用鍋爐出廠先行驗證，再給予認證標章，環保機關無須進行排放檢測，僅需針對未取得標章之鍋爐進行檢驗測定，兩者相較而言，採用鍋爐標章認證方式，較具有行政成本效益性。

3.4 政策外溢效果評析

針對採以單位輸出熱值排放量標準與標章認證方式，評析政策推動之外溢效果。

1. 產業的轉型與供應鏈的帶動

廠商專注於特定的綠色利基市場，因而導致於綠色專屬能力的發展，這項綠色專屬能力將成為永續環境競爭優勢的來源，而買方驅動的永續供應鏈管理，的確可以讓供應商在原物料與服務的成本、品質、交期、生產彈性等營運績效獲得進一步正向提升 (黃銘章, 2021)，而單位輸出熱值排放量標準的考量係將排放濃度管理與能源效率管理整合，屬被動的行政管制作為，並未具有驅動供應鏈管理之效益，而認證標章的方式則屬於主動式的誘因策略，因企業購置具認證標章的鍋爐才能取得補助、減免等優惠措施，且高效能鍋爐將減少燃料的使用量，亦具有成本效益優勢，產業將傾向

購買具認證之鍋爐，故未取得認證之鍋爐，將不具有市場競爭力，驅使鍋爐製造業者須將技術升級，提供更高效率、更低污染排放的鍋爐，使得產業技術得以升級而帶動整體供應鏈的轉型。

2. 產業衝擊的考量

為達成減量 2018 年環境部已發布鍋爐排放標準，產業多著手改善或汰換新鍋爐，而一般鍋爐設計的使用年限約為 20-30 年為主（陳國銘，2011），另依據財政部所公告固定資產耐用年數，鍋爐耐用年數則為 7 年（財政部，2017），而不論以設計的使用年限或是以財務為考量的耐用年數，鍋爐汰換完成後會有一段很長的使用時間才會再更新與汰換。若採行單位輸出熱值排放量之標準，則需再重新修訂標準，而修訂排放標準可能造成改善完成的鍋爐又需面臨使用壽命未屆則需再次換的衝擊，其所衍伸的產業衝擊可能較不利於政策推動；反之採用鍋爐標章認證方式對於整體產業的衝擊性也會較小，社會接受新的管制方式的意願也會較高，對施政滿意度具有效益。

3. 減污同時具有減碳的效益

單位輸出熱值排放量標準，因同時納入降低排放與提升效率作為管制標準概念，故產業可以符合標準的方式可提高效能或是降低排放，提供產業更多元的方式符合排放標準，但該標準的使用將有增加整體空氣污染排放量的風險，若要採取設立單位輸出熱值排放量標準之管制方式，需有相對應管控空氣污染排放量總量的配套。

而採用鍋爐標章認證方式，鍋爐必須符合排放濃度標準亦須同時符合能源效率，已有研究顯示提高鍋爐的能源使用效率，而減少空氣污染時，其所減少之能源使用亦有溫室氣體減量之效益（Bhander and Jozewicz, 2017; Fang etc., 2002），若以此方式管制，與使用單位輸出熱值排放量標準相較，其較無增加空氣污染排放的風險，但又可具有減碳之效益。

四、結論與後續研究建議

鍋爐廣泛的應用於工業製程，其為空氣污染物與溫室效應氣體排放的主要來源之一，而為使空氣污染與溫室效應氣體同時減量，國際間已採行排放濃度管制與能源效

率協同管制策略，本研究收集國際間管制策略做法，並評析做為我國達成空氣污染防治方案減量目標與邁向淨零路徑的可行策略，本研究之結論與後續研究建議說明如下：

4.1 結論

評析美國與日本同時考量空氣污染排放與能源效率管制方式差異，本研究建議可採行日本鍋爐標章認證之經驗，做為我國推動下一階段鍋爐改善之策略，綜合評析結論如下：

1. 於行政可行性評析方面，採用鍋爐標章認證方式，政策推動具有立即可執行性、主管機關查核之便利性且國內已有相關的執行經驗與實績。
2. 在技術可行性評析方面，燃油或燃氣鍋爐要優於排放標準一定程度給予標章認證者，以排放檢測結果進行評估，降低氮氧化物之排放濃度具有技術可行性，且低污染、高效率之技術已達商業化之技術可行性。
3. 行政成本效益評估方面，採用鍋爐標章認證方式，可減少後續稽核所需耗費的行政成本，較具有行政成本效益優勢。
4. 採用鍋爐標章認證方式，係以客戶需求為出發點，帶動鍋爐製造業者提高低污染、高效能之技術升級，進行使整體產業有轉型之契機。

鍋爐標章認證方式為企業主動符合，管制強度上並不如排放標準等行政管制措施具有其強制性，因此在推動上必須搭配具有足夠的誘因策略，當誘因不足以驅動時，政策推動上將不具其可行性，本研究建議可採行之誘因策略如下：

1. 依據固定污染源自行或委託檢測及申報管理辦法第 20 條規定，公私場所得檢具證明文件，經主管機關核准者，得免實施例行性定期檢測，因此鍋爐經檢測驗證可達低污染、高效能且取得標章認證者，可延長檢測頻率或降低定期檢測之次數，對業者有降低檢驗測定費用之誘因。
2. 依據行政院環境部審查開發行為空氣污染物排放量增量抵換處理原則，固定污染源採行具體防制措施之實際削減量，其所取得之排放量可作為環境影響評估開發使用，故標章策略可結合該原則，給予排放額度再售出，使業者具有改善誘因。
3. 依據環境部發布審查開發行為溫室氣體排放增量抵換處理原則，減量措施所得之排放

量可作為環境影響評估之增量使用，而高效率鍋爐可降低燃料使用，因此可結合該策略給予碳額度。

4. 結合優良企業表彰作法，將取得低污染、高效能標章之策略納入給予表彰之誘因考量。
5. 低污染、高效率之鍋爐的購置成本較高，政策推動可參考家電汰舊換新節能補助策略、節能電器退還減徵貨物稅等相關稅賦上的優惠措施，以提高產業汰舊換新之意願。

4.2 後續研究建議

本研究以國內外可取得之中、英文文獻、產業調查報告或企業已公開揭露之資訊進行評析，是否能代表實際狀況，仍有不無疑義之處，針對後續研究建議說明如下：

1. 針對鍋爐改善策略的選擇，可再進行法規政策影響評估（regulatory impact analysis, RIA）包括政策目標的設定、對策方案的研擬、影響預評估以評析最終執行方案的選定。
2. 管制策略選擇上，可再進行成本效益分析（cost benefit analysis, CBA），以尋求在決策上如何以最小的成本獲得最大的效益。

參考文獻

日本環境省（2023a），「大氣污染防治法の対象となるばい煙発生施設」。 <https://www.env.go.jp/air/osen/law/t-kise-0.html>。

日本環境省（2023b），「硫黄酸化物（SOx）規制」。 <https://www.env.go.jp/air/osen/law/t-kise-1.html>

行政院環保署（2021），固定污染源許可及定期檢測制度研析與應用管理計畫。

行政院環保署（2022），固定污染源空污費暨排放量申報整合管理系統。

行政院環保署（2023a），第二期空氣污染防治方案（113 年至 116 年）（草案），2023 年 3 月 21 日。

行政院環保署（2023b），施工機具污染改善推動計畫，2023 年 5 月。

東京都（2023），「中小企業者向け導入推奨機器とは」， https://www8.kankyo.metro.tokyo.lg.jp/eco_energy/

東京都主税局（2009），「環境に関する都税の軽減制度について」，<https://www.tax.metro.tokyo.lg.jp/kazei/info/kangen-tokyo.html>。

東京都主税局（2023），「環境に関する都税の軽減制度について〈HTT 関連〉○中小企業者向け省エネ促進税制（法人事業税・個人事業税の減免）」，<https://www.tax.metro.tokyo.lg.jp/kazei/info/kangen-tokyo.html>

東京都環境局（2023a），「低 NOx・低 CO₂ 小規模燃焼機器の認定に係る申請等」，https://www.kankyo.metro.tokyo.lg.jp/air/air_pollution/torikumi/nox_co2/application_guide.html

東京都環境局（2023b），「低 NOx・低 CO₂ 小規模燃焼機器認定制度について」，https://www.kankyo.metro.tokyo.lg.jp/air/air_pollution/torikumi/nox_co2/index.html。

財政部（2017），固定資産太用年數表。

陳國銘、吳宗峯、翁德富（2011），鍋爐之延壽評估。防蝕工程，第 25 卷第 1 期，35-46。

黃銘章、陳振燧、董蓁、梁燕燕、盧振華（2021），買方永續供應鏈管理與利益關係人壓力可以讓供應商獲得更好的環境與營運績效嗎？管理學報，第 38 卷第 4 期，497-532。

經濟產業省（2021），工場等におけるエネルギーの使用の合理化に関する事業者の判断の基準。

經濟部工業局（2023），工業鍋爐輔導管控表。

環境部（2023a），鍋爐月報統計。

環境部（2023b），固定污染源管理資訊系統，2023 年 8 月。

Bhander, B. and Jozewicz, W（2017），Analysis of emission reduction strategies for power boilers in the US pulp and paper industry. Energy Emission Control Technology, 5:27-37.

EPA（2017），Method 19 - Sulfur Dioxide Removal and Particulate, Sulfur Dioxide and

Nitrogen Oxides from Electric Utility Steam Generators.

EPA (2023), Progress Cleaning the Air and Improving People's Health. <https://www.epa.gov/clean-air-act-overview/progress-cleaning-air-and-improving-peoples-health>

EU (2011), Regulation (EU) No 182/2011, 2012/119/EU: Commission Implementing Decision of 10 February 2012 laying down rules concerning guidance on the collection of data and on the drawing up of BAT reference documents and on their quality assurance referred to in Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council on industrial emissions (notified under document C (2012) 613) Text with EEA relevance. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32012D0119>.

European Commission (2009), Reference Document on Best Available Techniques for Energy Efficiency.

European Commission (2017), Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Large Combustion Plants. Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control)

European IPPC Bureau (2023), BAT reference documents. <https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference>

European Parliament (2015), Directive (EU) 2015/2193.

Fang, J., Li, G. and Aunan, K (2002), A proposed industrial-boiler efficiency program in Shanxi: Potential CO₂-mitigation, health benefits and associated costs. Applied Energy, 71 (4) : 275-285.

MIURA (ミウラ) (2023), 製品・ソリューション | 熱・水・環境のベストパートナー <https://www.miuraz.co.jp/product/boiler/steam/gas/sq01.html#sq-as>。

2050 淨零之軌跡與行動路徑專題

水泥業淨零轉型精進策略

蔣本基 *、李志賢 **、張章堂 ***、陳耀德 ****、簡又新 *****

摘 要

為因應企業及社會各界需求，提升台灣企業永續之層次，本研究以國際永續表現傑出之水泥產業為對象，彙整國內外水泥產業因應淨零之氣候行動發展相關資訊，進行標竿對照，提供國內水泥業參考，並檢視國內水泥業現階段執行困難及提供精進建議，以持續推動國內水泥業達成淨零排放目標，邁向永續發展。

【關鍵字】淨零轉型、淨零碳排、風險評估、標竿產業

*	國立臺灣大學環境工程學研究所	名譽教授
**	崑山科技大學環境工程系	教授
***	國立宜蘭大學環境工程系	講座教授
****	國立台北大學商學院企業永續發展研究中心	諮詢顧問
*****	財團法人台灣永續能源研究基金會	董事長

一、前言

政府間氣候變化專門委員會（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC）預估全球暖化超過攝氏 1.5 度會導致某些區域更容易出現極端溫度，降水頻率、強度、降雨量的增加；某些地區旱災的頻率與強度增加。為預防上述情況發生，自第 21 屆氣候變化綱要公約會議（COP21）過後，各國建立淨零排放目標共識，讓地球的升溫被限制在攝氏 1.5 度以內。

我國長期致力於因應氣候變遷，減緩與調適雙轡進行，在回應國際間的 2050 淨零排放的倡議下，於 2022 年 3 月 30 日提出我國 2050 淨零轉型的 12 項關鍵戰略，前 5 項為能源轉型，包括風/光電、氫能、前瞻能源（地熱及海洋能等）、電力系統與儲能、節能；4 項技術轉型，包括碳捕捉利用及封存、運具電動或與無碳化、資源循環零廢棄、自然碳匯；社會轉型，包括淨零綠生活、綠色金融、公正轉型（國發會，2021）。

因此，為因應企業及社會各界需求，提升台灣企業永續之層次，本文以國際永續表現傑出之水泥產業為對象，彙整國內外水泥產業因應淨零之氣候行動發展相關資訊，進行標竿對照，並檢視國內水泥業現階段執行困難及提供精進建議，提供國內企業參考，以促進國內企業持續推動並達成淨零排放目標，邁向永續發展之道。

二、GCCA 2050 水泥與混凝土業淨零路徑

水泥行業是全球最大的二氧化碳放源之一，約占全球溫室氣體總排放量的 8%。全球水泥和混凝土協會（Global Cement and Concrete Association, GCCA）成員含近 40 個全球知名水泥企業，其中如中國建材、Holcim Group、HeidelbergCement（現已更名 Heidelberg Materials）、UltraTech Cement、台灣水泥、亞洲水泥等，皆是 2020 年產能占全球前 20 名的大廠，2020 年曾召集其會員企業與該行業領導者，一同承諾 2050 年生產碳中和混凝土和水泥，以符合全球氣候目標，加速實現二氧化碳減量，並發佈了水泥業 2050 年淨零路徑圖報告——《concrete future——The GCCA 2050 cement and concrete industry Roadmap for net zero concrete》（GCCA, 2021）。報告詳細闡述了水泥業將如何與建築環境利害關係人與政策制定者合作，使水泥和混凝土行業全面

脫碳，並為世界提供淨零水泥和混凝土。

GCCA（2021）發佈該行業永續框架指南，其中要求水泥業的 7 項商業行為準則，包含：職業健康與安全、法規遵循、公平競爭、反貪腐、社區議和、人權及環境。

上述環境議題在水泥業的生產製造過程與其價值鏈上的衝擊主要表現為：

- 能源消耗與碳排放：水泥生產是一個能源密集型過程，需要大量的化石燃料。高能耗的水泥生產過程將導致大量溫室氣體排放，並加劇氣候變遷。
- 空污與廢棄物產生：水泥生產除了導致二氧化碳和其他溫室氣體之排放，還會產生大量空氣污染物和廢棄物，包括粉塵、顆粒物和其他污染物。若無法執行妥當之末端處理，將對環境和人類健康產生負面衝擊。
- 用水：水泥生產需要大量耗水，用於生產製程和抑制揚塵。高用水量會給當地水資源帶來壓力，尤其在缺水地區。
- 循環經濟與土地利用：水泥生產原材料的開採會對生態系統和生物多樣性產生重大影響。與水泥生產相關的土地利用變化可能導致森林砍伐、水土流失和棲息地破壞。

更具里程的是 GCCA（2021）提出淨零路徑圖將淨零目標的達成分為第一期（1990-2020）、第二期（2020-2030）、及第三期（2030-2050）3 個階段，以 7 個主題之關鍵行動達成 2050 淨零目標，路徑圖與關鍵行動貢獻百分比如圖 1 所示：

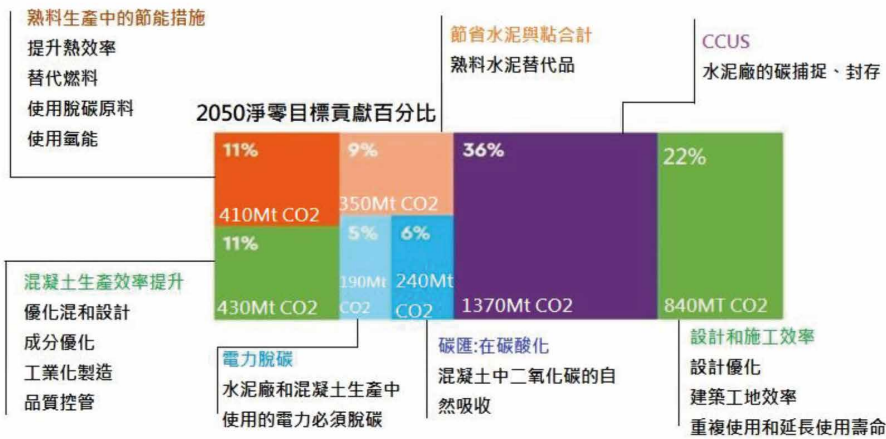


圖 1 各主題之關鍵行動達成 2050 淨零目標，路徑圖與關鍵行動貢獻百分比

GCCA 報告亦指出，2020 至 2030 年是淨零轉型的關鍵 10 年，GCCA 及其會員企業將通過以下行動和措施加速減少二氧化碳排放：

- 增加熟料替代——包括粉煤灰、煅燒粘土、粒狀高爐礦渣和碎石灰石。
- 減少化石燃料、增加替代燃料的使用
- 提高混凝土生產效率
- 提高混凝土項目設計和施工期間混凝土使用的效率，包括回收再利用
- 技術和創新投資
- CCUS（Carbon Capture, Utilization and Storage）技術和基礎設施開發

此外，GCCA 將透過合作，努力建立政策框架，以實現 2050 淨零與 2030 年二氧化碳減碳里程碑，即相較 2020 年，每立方公尺混凝土之排放強度降低 25%，每立方公尺水泥之排放強度降低 25%。

GCCA 最後指出，2050 淨零路徑報告的重點在於：正確的政策以及建築環境利害關係人和政府的支持是實現淨零路徑的重要因素；不同區域或國家的組織的減碳實際途徑不盡相同；會員企業應根據他們在價值鏈中的位置做出相應貢獻。與之相對應的是會員企業須承擔以下責任：

- 提出路徑圖中確定的實現淨零混凝土所需的政策
- 根據組織所處水泥和混凝土價值鏈中的位置，為淨零混凝土做出貢獻
- 根據組織在水泥和混凝土價值鏈中的地位以及迄今為止的脫碳進展，為一系列 2030 年里程碑和目標做出貢獻
- 定期報告進展

三、水泥業淨零碳排策略與技術

3.1 水泥業淨零減碳策略

水泥業淨零排放策略主要有 5 大面向，優化設計策略為使用新興科技與工程技術，如 3D 和 AI 技術，導入機器人和自動化，使整個系統產生優化；循環材料策略為廢棄

物資源再利用、研發與使用綠色的水泥，同時對環境友善，最重要的能達到減碳目的；能源轉換策略為提升能源效率、使用綠色能源如風力、太陽能等；製程精進主要為汰換老舊設備、製程優化等；減排技術策略為積極發展 CCUS，做到碳的捕集、封存、利用（SBTi（2021）、BORAL（2022）、Buzzi Unicim（2022）、CEMEX（2022）、Heiderberg（2022）、HOLCIM（2022）、Votorantim Cimentos（2022））；淨零策略 5 大策略詳述如下：。

（一）優化設計（BORAL, 2022；Buzzi Unicim, 2022；Heiderberg, 2022；HOLCIM, 2022）

1. 使用 3D 列印、用 AI、機器人、區塊鏈、IoT、3D 列印及量子計算
2. 優化水泥窯熱效率
3. 減少過度設計，提高施工的數位化程度，更好地匹配材料或材料特性（工程安全係數和物流優化）
4. 提高材料性能通過優化固體顆粒在新拌砂漿和混凝土中的粒徑分布，使用強度促進劑提高膠凝劑的早期抗壓強度，提高耐久性
5. 進鋼筋預應力或後張力的工程設計，以及鋼筋混凝土中部分空心 / 優化的結構件
6. 使設計和施工效率符合現行標準和規定。通過對混凝土樓板幾何結構和體系的選擇，混凝土柱間距的選擇和混凝土強度的優化等
7. 綜合優化混凝土強度、鋼筋含量和熟料含量

（二）循環材料（BORAL, 2022；HOLCIM, 2022；Votorantim Cimentos, 2022）

1. 逐年降低熟料水泥比
2. 開發綠色水泥商品 ECOPlanet、Susteno、Vertua®
3. 使用 SCMs 如飛灰、高爐爐渣集礦區覆土等、石灰石、煤灰、礦渣、火山灰、鍛燒黏土等：替代粘合劑的減排潛力，技術成熟度 / 水泥基替代的石灰石-熟化粘土-水泥的良好技術性能 / 用脫碳原料替代窯爐中的部分石灰石
4. 替代建築材料。砂漿和混凝土可以用不同的材料代替（少用混凝土）。
5. 一般材料（粉煤灰、GGBS（Ground granulated blast-furnace slag powder）、磨碎

的石灰石和其他材料都可以加入)

6. 增加循環性：通過改進施工方法和使用先進的建築技術來減少浪費
7. 為脫碳而回收（取決於運輸距離）
8. 從空間共享中強化使用

(三) 能源轉換 (BORAL, 2022 ; Buzzi Unicim, 2022 ; CEMEX, 2022 ; Heiderberg, 2022 ; HOLCIM, 2022 ; Votorantim Cimentos, 2022)

1. 加速使用高生物質的替代燃料
2. 採購清潔電力
3. 改進為最佳可行技術：基於窯爐的能源效率
4. 提高電氣效率，包括電壓和功率優化，以及使用改進的設備
5. 混凝土在建築中使用時可以提高能源效率和熱效率

(四) 製程精進 (Buzzi Unicim, 2022 ; Heiderberg, 2022 ; HOLCIM, 2022)

1. 使用綠色原料如鍛燒黏土
2. 添加副原料如水泥窯灰之加速碳化技術
3. 與低碳水泥製造技術廠商合作
4. 參加歐盟計畫 LEILAC (Low Emissions Intensity Lime and Cement) ，發展創新熟料，從製程中分離及捕捉 CO₂
5. 使用新穎熟料，如低溫熟料、低碳熟料
6. 提高熟料生產效率，以獲得耐用性和抗壓強度（減少熟料）
7. 在粘合劑利用方面優化混凝土生產（減少水泥）

(五) 減排負碳 (CEMEX, 2022 ; Heiderberg, 2022 ; HOLCIM, 2022)

1. 優先發展 CCUS 及其他新技術
2. 發展其他負碳技術
3. 二氧化碳吸收技術的發展：水泥粘合劑（碳酸氫鹽）吸收大氣中的二氧化碳

4. 替代能源的發展：

- (1) 二次燃料和生物質。水泥廠可以有益地利用低級生物質，如農業殘留物
- (2) 水泥窯的電氣化有可能消除直接的燃料燃燒排放，並且在電價足夠低的情況下，使直接捕獲 CCS 的成本與聯合 CCS 相當
- (3) 來自非初級材料的替代燃料
- (4) 通過對電力供應的間接排放達到電網脫碳

3.2 水泥業脫碳技術

3.2.1 水泥業脫碳技術原理（Bataille et al. 2018）

水泥業脫碳技術，其方法及原理說明如下：

（一）設計效率

1. 原子經濟
2. 觸媒作用
3. 能源效率的設計
4. 可再生原料的利用
5. 實施污染預防

（二）能源效率

1. 提升至最有效技術
2. 熱效率
3. 電效率

（三）燃料轉換

1. 可替代燃料
2. 廢棄物燃料
3. 生物燃料
4. 天然氣
5. 可再生能源
6. 氫氣

3.2.2 脫碳技術措施及績效

本研究蒐集近年來國外有關脫碳技術措施及績效，除對應 3.1 節的淨零排放 5 大策略，並系統性分類成 4 大面向：設計效率、能源與生產效率、材料與施工效率、排放效率等，如表 1 所示。

表 1 脫碳技術

策略	具體措施	具體績效	文獻參考
設計效率	減少過度設計，提高施工的數字化程度，更好地匹配材料或材料特性（工程安全係數和物流優化）	混凝土中的 PC 的二氧化碳排放量減少 < ~ 6%，產品中的混凝土排放量減少 < ~ 13%	Pamenter and Myers (2021)
	提高材料性能通過優化固體顆粒在新拌砂漿和混凝土中的粒徑分佈，使用強度促進劑提高膠凝劑的早期抗壓強度，提高耐久性	減少 < ~ 4% 的二氧化碳排放	Pamenter and Myers (2021)
	改進鋼筋預應力或後張力的工程設計，以及鋼筋混凝土中部分空心 / 優化的結構件	減少 < ~ 2% 的二氧化碳排放	Pamenter and Myers (2021)
	使設計和施工效率符合現行標準和規定。通過對混凝土樓板幾何結構和體系的選擇，混凝土柱間距的選擇和混凝土強度的優化等	在 2030 年和 2050 年分別減少 7% 和 22% 的二氧化碳排放量	GCCA (2021)
	綜合優化混凝土強度、鋼筋含量和熟料含量	減少 20% 的二氧化碳排放	Kourehpaz and Miller (2019) Karlsson et al. (2020)
能源和生產效率	改進為最佳可得技術：基於窯爐的能源效率	減少 ~ 2% 的二氧化碳排放	Pamenter and Myers (2021)
	提高電氣效率，包括電壓和功率優化，以及使用改進的設備	減少 ~ 1% 的二氧化碳排放	Pamenter and Myers (2021)
	混凝土在建築中使用時可以提高能源效率和熱效率	減少 ~ <20% 的操作加熱和 / 或 ~ <5% 的冷卻需求	Pamenter and Myers (2021)
	提高熟料生產效率，以獲得耐用性和抗壓強度（減少熟料）	熟料強度為 ~ 0.1 公斤 PC 熟料 / 公斤混凝土）	Pamenter and Myers (2021)
	在粘合劑利用方面優化混凝土生產（減少水泥）	在 2030 年和 2050 年分別減少 5% 和 14%	GCCA (2021)

策略	具體措施	具體績效	文獻參考
材料和 施工效率	材料替代：SCMs 替代粘合劑的減排潛力，技術成熟度	換 PC 熟料，減少 ~ 25% 的二氧化碳排放	Pamenter and Myers (2021) GCCA (2021) Habert et al. (2020)
	水泥基替代的石灰石 - 熟化粘土 - 水泥的良好技術性能	減少 15~30% 的二氧化碳排放	
	替代建築材料。砂漿和混凝土可以用不同的材料代替（少用混凝土）	減少 <4% 的二氧化碳排放	
	用脫碳原料替代窯爐中的部分石灰石	減少 2% 的二氧化碳排放	
	一般材料（粉煤灰、GGBS、磨碎的石灰石和其他材料都可以加入）	到 2030 年和 2050 年，熟料粘結劑係數分別從目前的 0.63 降低到 0.58 和 0.52；2030 年和 2050 年分別用 1% 和 5% 的水泥替代波特蘭熟料水泥	
	增加循環性 通過改進施工方法和使用先進的建築技術來減少浪費	減少 < ~ 1-2 %。二氧化碳排放	Pamenter and Myers (2021)
	為脫碳而回收（取決於運輸距離）	+1 至 -3% 的脫碳潛力	
	從空間共用中強化使用	到 2050 年減少 <3% 的二氧化碳排放	
排放效率	CCUS 和相關基礎設施的發展：CCUS 是淨零碳路線圖的基石，CCUS 技術在 2030 年以後將變得重要控源的排放、來自公司消費、採購系統和生產過程的間接排放	到 2050 年捕獲和利用 / 儲存 1.7 億噸二氧化碳	GCCA (2021)
	二氧化碳吸收技術的發展：水泥粘合劑（碳酸氫鹽）吸收大氣中的二氧化碳	減少水泥生產中 7-25% 的二氧化碳排放	Pamenter and Myers (2021) GCCA (2021) Habert et al. (2020)

策略	具體措施	具體績效	文獻參考
	替代能源的發展。 1. 二次燃料和生物質。水泥廠可以有益地利用低級生物質，如農業殘留物 2. 水泥窯的電氣化有可能消除直接的燃料燃燒排放，並且在電價足夠低的情況下，使直接捕獲 CCS 的成本與聯合 CCS 相當 3. 來自非初級材料的替代燃料 4. 通過對電力供應的間接排放達到電網脫碳	減少 11% 的二氧化碳排放 減少 23% 的二氧化碳排放 減少 5% 的二氧化碳排放 2030 年和 2050 年分別減少 54% 和 100% 的二氧化碳（與 2020 年相比）；減少 15% 的二氧化碳排放量	Pamenter and Myers (2021) GCCA (2021) IEA (2018)

四、脫碳供應鏈推動策略

強化供應鏈之脫碳行動可使面對客戶群的企業大幅提升排碳效益，遠高於企業僅針對自身之操作及能源部分減碳量，因此屬於供應鏈上游端企業需積極因應此趨勢。食物（農業）、建築（營建）、時尚、快速消費品、電子（電器）、汽車、專業服務、船運等 8 種行業之供應鏈排碳量貢獻了全球碳排放量的 50% 以上；主要供應鏈之脫碳僅會增加 1~4% 終端消費者負擔，因超過 40% 以上的減碳可採用現有及可負擔的技術和策略，例如循環經濟、系統效益提升以及綠能。（World Economic Forum, 2021）

4.1 脫碳供應鏈推動策略

供應鏈之脫碳有其困難度，包括資訊不透明、法規不完整、客戶群壓力不足。具體之推動策略如下（World Economic Forum, 2021）：

1. 建立脫碳供應鏈透明度

建立價值鏈排放基線與供應商交換數據，並設定減碳目標，公開報告進度；公司應藉供應鏈或企業淨零的專家小組，針對二氧化碳排放進行優化，以實現淨零目標。

- 建立一個全面的排放基本線，依實際需求進行計算供應鏈的排放
- 第一步，將其採購支出與全球排放因子數據庫相匹配

- 第二步，按地點對供應商進行細分，並根據供應商經營的區域進行具體估算
- 當供應鏈排放的透明度已經建置，公司應公開減碳目標或淨零目標

2. 優化淨零減碳能量

重新思考產品的永續性設計，並規劃永續性價值鏈 / 採購策略；公司應在其價值鏈設定規劃中考慮排碳問題，重新思考其 “生產或購買 ” 的決定，宜優先選擇當地市場的物流，以減少碳排放。

- 公司對舊產品應降低供應商運營中的碳足跡，並增加回收利用比例
- 公司應開發永續性設計產品使用更環保的材料，減少浪費，降低產品差異，提高回收，改善維修，並將製造技術轉換為低碳技術

3. 吸引供應商參與合作

整合碳排指標納入採購標準及追蹤績效，並與供應商合作，共同處理碳排議題；供應商為減少碳排做出財務承諾，公司可通過共同投資、承購協議或聯合去碳化倡議來分擔風險。

- 為供應商制定採購標準幫助解決上游排放問題。有 2 種主要方法：
 - A、強制實施標準：公司可定義一套優先標準，並要求其供應商在投標中使用之
 - B、要求供應商制定標準：公司允許供應商設定一套具體、可衡量、可實現和適當的減排目標
- 企業採購綠色電力推動可再生能源，公司可以簽署直接或虛擬的電力購買協議（PPA，vPPA）或直接投資於新的可再生能源項目的捆綁證書

4. 推廣生態系服務

參與企業部門倡議，提出最佳實務、認證、可追溯性、政策宣傳等作為，並擴大價值鏈參與者的規模，強化需求方的承諾；需求方承諾可鼓勵對去碳化技術的投資，促進建立合作計畫和對綠色工業化學原料及物流運輸解決方案的需求。

- 公司主管應積極整合相關部門，為氣候行動制定部門級目標，推動整個部門和相應的供應鏈的組成和發展，並緩解對競爭力的擔憂
- 標竿產業可進行跨業合作，提高價值鏈的去碳功能
- 合作成員可以共同投資於擴大碳捕獲和封存技術的中心計畫，促使計畫成為其行業中

去碳化的主要工具之一

- 為綠色解決方案共享信息，創造市場，並簽署承購協議，使綠色解決方案更具經濟效益

5. 激勵公司管理機制

引入低碳治理，調整內部激勵機制，賦予組織權力；公司應建立「淨零轉型」高階組織，將碳排納入採購標準和決策中 -- 將組織中的管理目標和激勵措施與碳排目標相一致。

- 籌組「跨職能採購委員會」，整合碳排與採購、物流、質量和其他職能工作
- 在採購方面，公司應該建立技術團隊，與供應商探討如何落實淨零轉型目標，進行教育培訓
- 內部管理應將內部目標、資金分配和激勵措施與淨零目標保持一致

4.2 營建產業脫碳供應鏈

就脫碳而言，因為二氧化碳本身是一個非常穩定的物質，它是經過高溫然後氧化的產物，因此二氧化碳若再減量和處理，基本上是違反熱力學的原理；就供應鏈而言，甲工廠的廢棄物能不能變成乙工廠的原料，從廢棄物資源回收的角度，減量回收再利用應該是可行的；再將此理念轉換至水泥產業供應鏈，在水泥的生產過程、混凝土使用在施工工地當生命周期結束時剩下廢土，廢土可思考成為再利用的建築材料，再跟二氧化碳結合的再利用，因此從供應鏈角度，水泥業應該與營建工程業結合。

對於脫碳的措施，須從幾個面向思考，如設計效率、能源效率、燃料轉換方面和CCUS。土木或建築工程師在設計的時候要考慮到安全的係數以外，而從節能減碳的角度來講，就是資源不要浪費，設計如何優化就顯得特別重要，其次就是在材料選擇方面，如水泥與鋼筋混凝土能夠變成預拌混凝土，或者是讓整個混凝土和鋼筋應力壓力結合在一起，達到讓整個營建系統優化。能源和生產效率的方面，可使用最佳可行的技術，提高電氣使用效率、添加黏合劑等。圖2為包含水泥業、鋼鐵業及營建業的脫碳供應鏈示意圖。

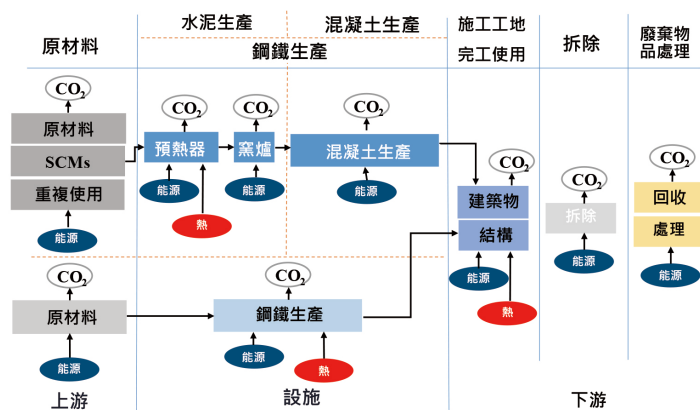


圖 2 營建產業脫碳供應鏈

財務相關脫碳供應鏈優化模式的組成架構如表 2 所示，模式涵蓋短中長期程；目標函數財務成本為主，碳排放減量與能源節約量為輔；限制條件式為 5 大減量策略；所需的參數主要有設計效率、熟料水泥比、碳排密集度及 CCUS 減碳技術等；風險管理包含轉型風險及實體風險的情境分析；一目標函數的多目標模式的解有優化解及折衷解；除應用在水泥業外，未來將擴展至其他產業。此模式可同時彈性選擇 1~3 目標，如碳排放減量最大化、能源節省最大化與財務成本最小化。在模式所需的參數已知下，配合減碳的 5 大策略，以及考慮到聯合國 IPCC 與國際能源總署 IEA 的氣候風險情境等限制條件下，所得的結果可供各產業決策者在未來淨零路徑規劃的參考。

表 2 財務相關脫碳供應鏈優化模式

模式架構					
期程	短期		中期		長期
目標	1. 碳排減量		2. 能源節約		3. 財務
限制條件	1. 設計	2. 循環材料	3. 能源轉換	4. 製程精進	5. 減排與負碳
參數	設計效率	熟料水泥比	燃料與電力	碳排密集度	CCUS 及其他
情境分析	轉型風險 (STEP/SDS/NZE)			實體風險 (RCP 2.6/RCP 4.5/RCP 8.5)	
模式解	單一優化解			折衷解	
應用	水泥業			其他	

4.3 營建工地減碳管理

前節介紹資訊工程技術應用於工地設備的多項技術，均取得了良好的效果（表 3）。施工現場的整體規劃也極為重要。勞動力的分配和具體車輛的規劃對當前的節能減碳目標也有很大的影響。

表 3 工地減能減碳管理方法

	應用資訊技術	效益	應用領域	來源
勞動力優化	◆數據處理 ◆遺傳演算法 ◆資料定義語言	根據現場施工過程、燃料隱性排放因數、勞動活動等因素創建二氧化碳排放模擬模型。使用相關演算法進行勞動力分配，減少二氧化碳排放。在加拿大蒙特利爾的實際現場測試中，整體二氧化碳排放量減少了 21.7 %	各類施工現場	Li et al., 2017
車輛調度	◆蟻群優化 ◆數據處理	蟻群優化技術用於優化施工車輛在不同點之間的路徑。實現最短路線，減少油耗和二氧化碳排放		Choi et al., 2018
建築機械系統優化	◆自組織映射 ◆數據處理 ◆粒子群優化 ◆多重權重變化模型	提出的工程設備優化系統在實際情況下可以減少隧道施工機械系統的碳排放約 20%	隧道施工現場	Song et al., 2022
施工過程優化	◆建築訊息模型 ◆蟻群優化	通過優化建築施工過程，這種方法可以顯著減少建築施工過程中的能源消耗和碳排放，同時還可以提高建築結構施工的效率	建築施工現場	Tabrizikahou et al., 2021

1. 溫室氣體排放的實時監測和可視化研究

本文提出了 1 種關於資訊物理系統（CPS）的監控系統。通過氣壓傳感器、定位模塊等設備監測工地各種設備的溫室氣體排放。由於絕大多數溫室氣體是由建築工地大型機械的電力和燃料消耗產生的，結合前一階段相關機械的數據採集，結合相應的溫室氣體排放因子，即可計算出溫室氣體排放總量，最後再將各類數據經過採集和計

算後，需要展示在用戶的電腦桌面或其他便攜設備上，並將其可視化，輔助施工現場節能減排工作（Liu et al., 2020）（圖 3）。

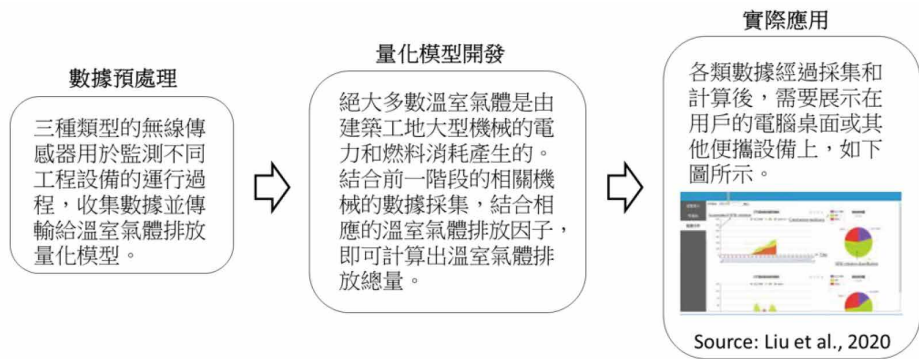


圖 3 溫室氣體排放的實時監測技術流程

2. 道路施工設備的最佳駕駛模式

道路施工設備是施工中不可或缺的設備，由於使用柴油等燃料，排放大量溫室氣體，污染環境。同時，該設備的油耗也很大，造成經濟上的浪費。因此，研究道路施工設備的最佳驅動方式，減少其排放次數，可以減少環境污染，降低能源消耗，有利於永續發展。

資訊技術的發展和應用，為道路施工設備最佳驅動方式的研究提供了便利。利用機器學習、數據挖掘、優化算法等技術，對大量運行數據進行分析處理，找出與排放相關的特徵和模式，進而優化設備的驅動方式，減少排放次數（圖 4）。

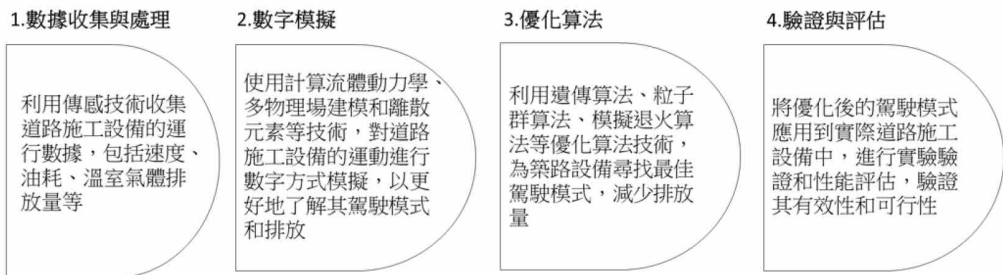


圖 4 道路施工設備的最佳駕駛模式技術流程 (Barati et al., 2017)

3. 節能減碳新興技術

隨著公眾環保意識的不斷增強，有關碳排放的法律法規也在不斷實施。在建築行業，對能源效率更高的工程機械的需求也越來越大，有關工程機械減碳技術，主要發展的 4 大設備，包括挖掘機、工程車、施工設備及鑽挖機，詳如表 4 所示。

表 4 工程機械減碳技術

應用的設備	應用資訊技術	效益	應用領域
挖掘機	◆ 計算機模擬建模 ◆ 數據處理 ◆ 加速的近端梯度算法	將建立的液壓挖掘機虛擬樣機模型與虛擬操作員仿真結果相結合，得到省油的挖掘機設計和人員操作模式 (Bender et al., 2017)	建築施工現場
	◆ 數據處理 ◆ 支持向量機 ◆ 反向傳播神經網絡 ◆ 邏輯回歸	通過採集挖掘壓力訊號，利用 3 種機器學習模型智能判斷其工作階段，從而幫助提高挖掘機效率和節能控制 (Shi et al., 2020)	
各種工程車	◆ 數據處理 ◆ 強化學習	基於強化學習的能源管理框架 (HCV)，並將其應用於現場的大型工程機械，以提高機械的燃油效率。實驗表明該框架可節省 5.9% 的燃料消耗 (Zhang et al., 2022)	各類施工現場
道路施工設備	◆ 數據處理 ◆ 普通最小二乘法 ◆ 多元線性回歸	通過優化駕駛方式，如減少急加速急剎車、適當控制行駛速度等，可以顯著降低施工設備的排放和油耗，提高燃油效率 (Barati et al., 2017)	道路施工現場
隧道鑽挖機	◆ 數據處理 ◆ 數據收集 ◆ 智能控制	通過對掘進機的技術採集和分析並優化多個系統，對系統進行智能控制，降低隧道鑽挖機的能耗，提高其能源利用效率 (Grishenko et al., 2014)	隧道施工現場

五、水泥業淨零轉型精進策略

建立適當年限的短（5 年內）、中（10 年內）、長期（20 年內）風險管理策略，除鑑別氣候風險流程外，宜有管理氣候風險流程並納入整體風險的管理制度，定期滾動式檢討，並適時調整；可參考 CEMEX 淨零路徑與目標（如圖 5）。

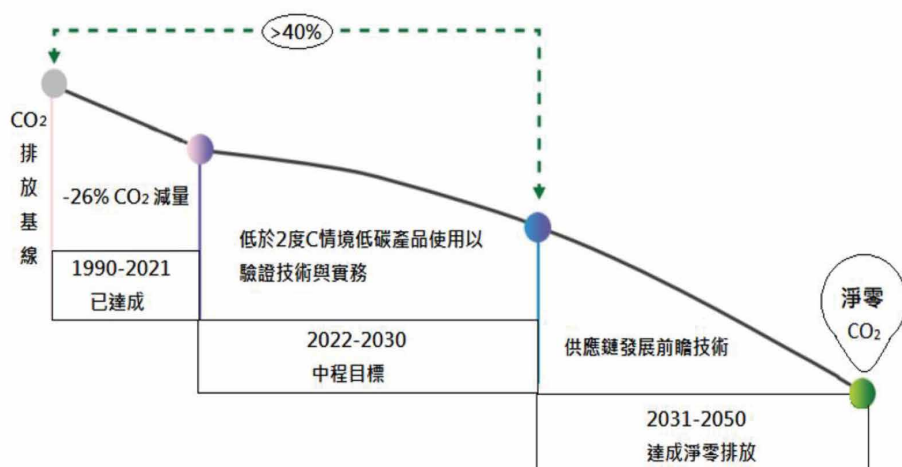


圖 5 CEMEX 淨零路徑與目標 (CEMEX, 2022)

轉型風險因子宜再加入剛通過的氣候變遷因應法相關措施，未來水泥產品相關法規、標準的修正；實體風險尤重水資源（水災、缺限水）失衡衝擊；加強 CCS（carbon capture and storage）技術研發，宜 CCUS、BECCS（Bio-energy with carbon capture and storage）雙轡進行（如表 6 所示）；宜設定多種情境的轉型風險（BAU、2°C、1.5°C）與實體風險（樂觀、穩定、悲觀）分析，著重量化對財務的影響，並輔以實際案例說明。如 4.2 節所述，此模式可同時選擇 1~3 個目標，在模式所需的參數已知下，如減碳的五大策略、IPCC 與 IEA 的氣候風險情境等限制條件下，所得的優化結果可供營建業或其他產業在未來淨零路徑規劃的參考。

表 6 建構財務相關脫碳優化模式

模式架構					
期程	短期	中期		長期	
目標	1. 碳排減量		2. 能源節約		3. 財務
限制條件	1. 設計	2. 循環材料	3. 能源轉換	4. 製程精進	5. 減排與負碳
參數	設計效率	熟料水泥比	燃料與電力	碳排密集度	CCUS 及其他
模式解	單一優化解			折衷解	
應用	水泥業			其他	

GCCA 全球水泥及混凝土協會淨零策略指引包括：設計與營建效率、混凝土生產效率、水泥與膠結材節約、熟料生產節約、CCUS、電力的脫碳、及 CO₂ 碳匯：再碳酸化等策略。研究過程中與國內水泥業召開多次諮商會議，其中，台灣水泥公司提出永續發展減碳 7 大策略包括：應用替代原物料、應用替代燃料、碳捕獲、碳匯造林、技術改善、餘熱發電、及再生能源鏈等；亞洲水泥公司提出淨零精進策略如下：

- 1. 循環經濟：替代能源
 - 利用含非碳酸鹽形成存在之氧化鈣物料作為替代原料
 - 解決廢棄物處理問題，亦可降低溫室氣體排放
- 2. 循環經濟：替代燃料
 - 使用含生質份或碳排因子較低且具高熱值之物料作為替代燃料
 - 減少傳統化石燃料造成之高碳排問題，也協助處理工業廢棄物
- 3. 碳捕捉再利用
 - 開發工業副產品再碳酸化技術，以工業副產品捕捉工廠排碳，製造人造粒料或 SCM
 - 將粒料或 SCM 供給下游混凝土廠，整合上下游產業鏈
- 4. 產品轉型：低碳水泥
 - 調整各水泥型別組成，降低碳排
 - 在產品創新及國家標準更新雙軌並進下，訂出產品結構轉型規劃，以具體實現產品減碳目標
 - 目前已量產：洋房牌慢砌水泥、卜特蘭石灰石水泥

5. 提高能源使用效率

- 改善生產製程，提高用電效率及熱效率。如：風車系統變頻控制改善、預熱機風道改善等
- 建立 ISO 50001 能源管理系統，透過系統性的能源管理，持續計畫性的推動節能措施

6. 廢熱發電系統

- 利用旋窯系統排氣之高溫廢熱，通過鍋爐產生高壓蒸氣驅動渦輪發電機發電，將熱能回收轉換產生電力

7. 再生能源系統

- 響應國家再生能源政策，規劃於 2023 年度建置太陽能發電系統，合計裝置容量 3.8MW 借鏡 GCCA、美國及歐盟，國際皆以水泥業結合混凝土業及營建業為一體達成淨零；效率才是企業追求的目標，政府應以排放強度規範企業碳排而非以總量，水泥是被動為滿足建設需求而生產之產業，企業與政府兩者目標才能一致。水泥業淨零轉型精進策略如下：

1. 建立氣候行動夥伴關係，建構綠色脫碳供應鏈

- 積極與利益相關客戶合作，制定節能標準和節約措施，按照相關國際標準（ISO14064-1、ISO50001 等）進行生產，推動綠色供應鏈的轉型升級
- 制定指導方向和計畫，針對原料供應商訂定減碳目標，為脫碳供應鏈建立材料標準、市場秩序和碳定價機制
- 建立透明的供應鏈排放和問責制度，關注市場平台監管和各行業碳排放數據的公開，在採購標準和決策中引入綠色供應鏈績效管理系統

2. 推廣數位轉化技術，優化系統決策功能

- 進行系統性的碳盤查，盤查直接、間接與價值鏈間的溫室氣體排放範疇，通過碳中和自動化管理和操作，提高生產過程的效率
- 利用物聯網（IoT）、網絡物理系統（CPS）和數字孿生等數位科技，評析減碳技術，提供最佳能源管理策略
- 推動綠色工廠的轉型及系統優化，提升能源和原料利用率技術，利用工程、環境、經濟和能源（4E）評估，優化系統決策功能

3. 發展節能儲能創能技術，增進能源使用效能

- 發展節能設備及廢氣回收 / 廢熱回用創技術；開發綠色材料，增加使用回收材料的比例，減少電力和熱能的消耗
- 提升綠能使用比例，減少原材料的碳足跡，降低電力碳排放係數；政府提供適當獎勵措施，鼓勵相關業者設置創能與儲能設施
- 精進生物質剩餘資源（廢棄物）循環再生、處理技術及管理措施，並建置生物質廢棄物能資源化之脫碳供應鏈

4. 強化永續生產與消費理念，實現低碳循環經濟

- 建立公司「低碳清潔生產」發展政策，強調永續生產和消費與循環經濟理念，俾使資源效率最大化和環境影響最小化
- 建立經濟循環商業模式 --RESOLVE（再生、分享、優化、循環、虛擬化、交換），實現低碳循環經濟
- 完善「生產者延伸責任准則」，建立生命週期、永續物料管理計畫；建立透明的供應鏈制度，實現永續生產與消費的願景

5. 建構自然碳匯評估系統

- 整合以自然為本思維，投入自然碳匯負碳技術驗證（包含 MRV）與示範，包括土壤碳匯（千分之四倡議）、生質能源碳捕獲技術及生物炭高值化等，提升自然碳匯效益
- 建立土壤碳匯監測方法學及自然（森林與農作物）碳匯推估模式，建構自然為本的永續碳匯系統
- 研發土壤固碳改良劑，建構綠色碳匯基礎設施，發展推廣生質能技術應用，提升自然碳匯量能。
- 建立生質廢棄物收集運輸、前處理加工、能源生產等淨零供應鏈，加強農業剩餘資源飼料化、肥料化、能源化及材料化等多元利用，並完善農工交流合作機制
- 整合綠色、低碳及環保等相關憑證，加速生質能再生能源憑證，健全綠色金融制度，獎勵生質能源產業措施，增加農業循環經濟及淨零之誘因

六、結語

6.1 結論

水泥業淨零轉型精進策略包含：建立氣候行動夥伴關係，建構綠色脫碳供應鏈；推廣數位轉化技術，優化系統決策功能；發展節能儲能創能技術，增進能源使用效能；強化永續生產與消費理念，實現低碳循環經濟；建立氣候金融與相關科技機制；及建構自然碳匯評估系統。此外，水泥業針對自身以及供應鏈上下游的碳排放情況，建立碳排基線，加深對產品碳足跡的瞭解，在自身減排的同時，督促供應商進行減排。

6.2 建議

建立適當年限的短（5 年內）、中（10 年內）、長期（20 年內）風險管理策略，除鑑別氣候風險流程外，宜有管理氣候風險流程並納入整體風險的管理制度，定期滾動式檢討，並適時調整；宜設定多種情境的轉型風險（BAU、2°C、1.5°C）與實體風險（樂觀、穩定、悲觀）分析，著重量化對財務的影響。

針對不同升溫路徑進行分析並制定公司相關應對政策，並依據當前政策、新興監管、技術、法律、聲譽及市場 6 個面向進行風險評估。針對不同地區的急性與非急性氣候危害進行情境分析並制定相關預防作法。

供應鏈潛力開發，達成供應鏈淨零，未來宜執行之工作包括導入循環經濟（減少使用初級原料）、製程效率提高（減少能資源使用）、使用再生能源（擴大再生電力來源）、運用再生熱能（擴大再生熱能來源）、採用創新製程（擴大製程創新）、自然為本的解決方案（永續林／農業）、使用綠色燃料（交通電動化、氫化）以及碳捕集（碳捕集與封存）。

致 謝

本論文得已順利完成，首先感謝台灣永續能源基金會簡又新董事長提供研究經費，其次再感謝研究期間出席座談會提供寶貴資訊及建議事項的專家學者包括：環境部資源循環署賴瑩瑩署長、臺灣科技大學顧洋講座教授、成功大學航空太空工程學系陳維新教授、中山大學環境工程研究所高志明教授、台灣混凝土學會何長慶理事長、水泥公會康福山總幹事、台灣水泥公司黃健強副總經理、邱鈺文協理、亞洲水泥公司花蓮廠張志鵬總廠長、陳志賢首席副廠長、及亞東預拌混凝土股份有限公司金崇仁總經理等在此一併致謝。

參考文獻

- 國發會，2050 淨零排放 12 項關鍵策略，https://www.ndc.gov.tw/Content_List.aspx?n=6BA5CC3D71A1BF6F，2021
- Bataille, C., Åhman, M., Neuhoﬀ, K., Nilsson, L.J., Fishedick, M., Lechtenböhmer, S., Solano-Rodriguez, B., Denis-Ryan, A., Stiebert, S., Waisman, H., Sartor, O., Rahbar, S. A review of technology and policy deep decarbonization pathway options for making energy-intensive industry production consistent with the Paris Agreement, *Journal of Clean Production* 187, 960-973, 2018.
- Buzzi Unicim, Holcim, Our Journey to Net Zero, 2022.
- Cemex, <https://www.cemex.com/sustainability/future-in-action/sustainable-products-and-solutions>, 2022.
- Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1 (11), 559-573. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0093-3>, 2020.Global Cement and Concrete Association, Climate and Energy, 2021.
- Global Cement and Concrete Association, The GCCA 2050 Cement and Concrete Industry Roadmap for Net Zero Concrete, <https://gccassociation.org/concretefuture/>

- wp-content/uploads/2021/10/GCCA-Concrete-Future-Roadmap-Document-AW.pdf, 2021.
- Göransson, L., Roadmap for decarbonization of the building and construction industry: A supply chain analysis including primary production of steel and cement. *Energies* 13, 4136. <https://doi.org/10.3390/en13164136>, 2020.
- Habert, G., Miller, S.A., John, V.M., Provis, J.L., A. Favier, A., Horvath, A. and Scrivener, K.,
- Holcim, <https://www.holcim.com/sites/holcim/files/2022-04/08042022-holcim-climate-report-2022.pdf>, 2022.
- Holcim, Holcim's Net Zero Journey, 2022.
- Heidelberg, <https://www.heidelbergmaterials.com/en/pr-24-05-2022>, 2022.
- IEA, Technology Roadmap: Low-Carbon Transition in the Cement Industry, 2018.
- IPCC, AR6 WG1 SPM-16, 2021.
- Karlsson, I., Rootzén, J., Toktarova, A., Odenberger, M., Johnsson, F. and Kourehpaz P, Miller SA, Eco-efficient design indices for reinforced concrete members. *Mater*
- SBTi, SBTi Corporate Net-Zero Standard, 2021.
- Struct 52:1–15. <https://doi.org/10.1617/s11527-019-1398-x>, 2019.
- Pamenter, S. and Myers, R.J., Decarbonizing the cementitious materials cycle: A whole-systems review of measures to decarbonize the cement supply chain in the UK and European contexts. *Journal of Industrial Ecology* 25, 359–376. <https://doi.org/10.1111/jiec.13105>, 2021.
- Votorantim Cimentos, <https://www.holcim.com/sites/holcim/files/2022-04/08042022-holcim-climate-report-2022.pdf>, 2022.
- World Economic Forum, Net-Zero Challenge: The supply chain opportunity, 2021.

2050 淨零之軌跡與行動路徑專題

淨零轉型與產業推動資源循環

賴瑩瑩*、陳俊融**、王耀晟***、黃暄婷****

摘 要

全球資源過度開採及溫室氣體排放對生態環境帶來重大衝擊，各國政府及國際組織積極倡議循環經濟及淨零排放，以實現資源永續利用、減少碳排放、及實現永續發展目標。

環境部資源循環署以「資源循環零廢棄」為願景，明確訂立永續生產與消費、提升資源使用效率、加值化處理廢棄物等 3 大主要目標。為實踐此願景，採用綠色設計源頭管理、能資源循環利用、廢棄物量能平衡與管理等 3 大循環策略，以及暢通循環網絡、創新技術與制度等 2 大驅動支柱，落實淨零轉型之目標。

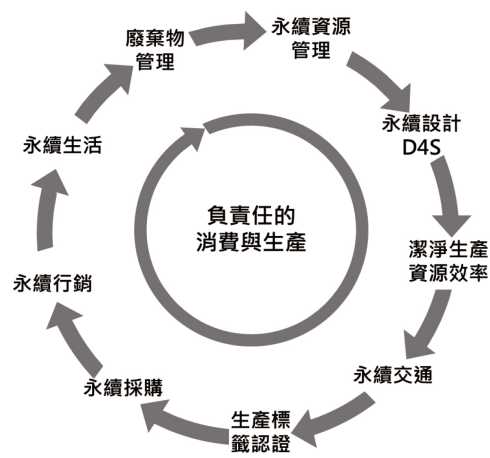
透過法規制度、自願性措施及經濟誘因，推動減少浪費與一次用產品減量，提高環保意識，促使業者及民眾共同響應；並將廢棄資源分為生物質資源、有機化學資源、金屬及化學品資源、無機資源等 4 大類，擬定策略提升資源使用效率，促使資源循環最大化、廢棄物處理最小化；而針對新興及難處理廢棄物，推動設置處理設施，以擴大去化量能平衡；同時，鏈結上、中、下游產業，逐步發展資源循環產業鏈，促進循環。透過翻轉廢棄物管理觀念，擴大資源範疇，加強回收及循環再生，以減少對自然資源的需求並降低環境負荷。

【關鍵字】資源循環、永續消費、資源回收、資源再利用、循環處理

*	環境部資源循環署	署長
**	環境部資源循環署	組長
***	環境部資源循環署	專門委員
****	環境部資源循環署	技士

一、前言

全球經濟發展仰賴於自然環境與資源的使用，同時對地球造成破壞性的影響，依據聯合國環境總署及世界銀行相關數據顯示，自西元（下同）1970 年至今，全球人口數成長為 2 倍、GDP 成長為 4 倍，而資源使用量已成長 3 倍以上，依此趨勢，至 2060 年全球資源使用量將提升為現今使用量的 1.5 倍（IRP, 2019），因全球資源開採量持續上升，導致全球資源循環度自 2018 年 9.1%、2020 年 8.6%，於 2023 年再降低至 7.2%（Circle Economy, 2023），產生巨大循環缺口（Circularity Gap），顯示全球的資源使用仍仰賴原生材料。因上個世紀的經濟與社會發展伴隨著環境退化，聯合國於 2015 年提出永續發展目標（Sustainable Development Goals, SDGs），從環境、社會及經濟 3 個面向提倡永續發展，其中第 12 項為「負責任的消費與生產（Responsible consumption and production）」（如圖 1），自然資源的消耗量遠超過地球所能提供的範圍，因此必需確保永續的消費與生產模式，以扭轉對地球造成的損害；例如推動新的商業模式，歐盟截至 2022 年已公告電腦、智慧型手機、家具……等 14 項綠色公共採購標準（Green Public Procurement, GPP），協助公部門採購規範可納入招標文件，以改善環境、減緩氣候變遷及提升能資源使用效率，並降低產品生命週期之環境成本，而臺灣亦推動電腦設備租賃及維運服務，以及影印機租賃，以公部門優先推動，建立產品服務化供應鏈後，再進一步鼓勵民間企業及團體，達到資源使用效益最大化，同時減少對環境之衝擊及能資源耗用之效益。另外在永續發展目標（SDGs）第 8 項「就業與經濟成長（Decent work and economic growth）」，主要意涵包括促進包容且永續的經濟成長，指標之一為提高消費和生產中的資源效率。



資料來源：UNEP (2010)

圖 1 SDG12 負責任的消費與生產

近期國際已將循環經濟視為重要國家產業發展策略，並依自身經濟與產業現況提出政策與方案，其中以歐盟發展趨勢及推動現況最具代表性，2020 年 3 月 11 日，歐盟通過新循環經濟行動計畫（A new Circular Economy Action Plan），運用經濟活動改變產品生產方式，以適應綠色的未來並增強綠色產業之競爭力，同時期望賦予消費者更多權利，使消費者購買產品時以環境永續為選購原則，確保替所有人提供邁向循環經濟之機會。而在 2022 年歐盟持續推動多項執行措施，包括永續性產品倡議及產品生態化設計規範（Ecodesign for Sustainable Products Regulation, ESPR），其草案包括產品性能與資訊揭露要件、產品數位護照、透明化要件、綠色公共採購及永續產品提供獎勵措施（EU, 2022），以 2050 年實現「碳中和」為最終目標，規劃針對產品壽命短、消費量大、具高回收價值或符合生態化設計之產品作為優先推動之標的，例如電池、消費性電子產品、紡織品、建材、包裝品及化學品等。

而在 2022 年第五屆聯合國環境大會（Fifth session of the United Nations Environment Assembly, UNEA-5），由 175 個國家領袖、環境及其他相關部門代表共同通過決議，將於 2024 年提出具有法律約束力的《全球塑膠公約》訂定進度與具體內容，以終結塑膠污染，從塑膠生命週期進行檢討，並訂定 4 大目標，包括大戰略目

標，包括：減少和替代塑膠製品、訂定塑膠產品設計目標、再利用塑膠轉型循環經濟及管理現有塑膠污染，預計於 2040 年，可減少 80% 以上塑膠廢棄物排入海洋、減少 55% 原生塑膠產量，同時減少 25% 的溫室氣體排放，並創造 70 萬個工作機會（UNEP, 2022）。

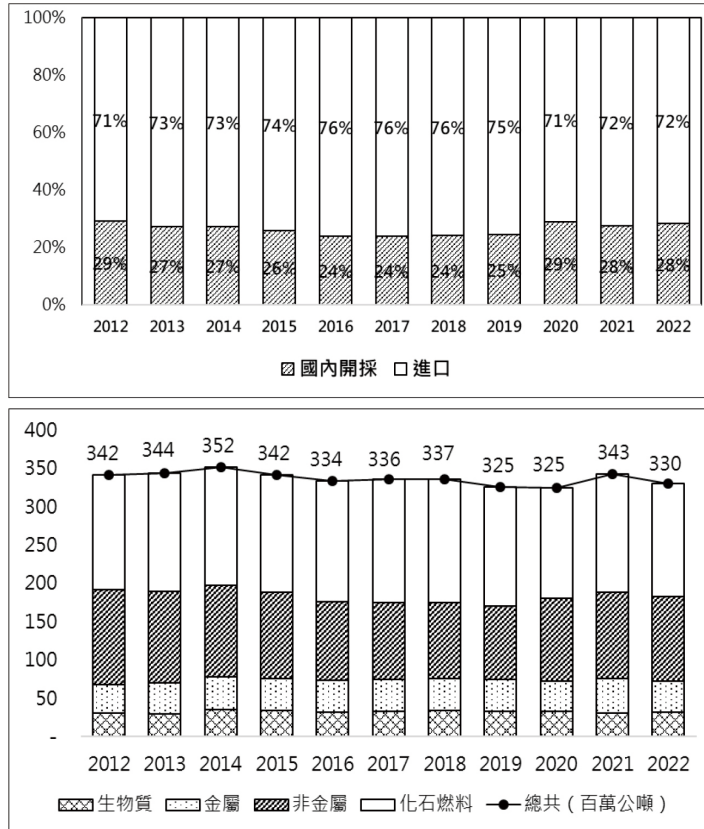


圖 2 西元 2012-2022 年國內物質來源比率 (上) 及年國內物質直接投入量 (下)

我國近年物質投入總量皆達 3 億公噸，7 成以上仰賴進口，扣除加工再出口部分，國內實際消費量皆高於 2 億公噸，平均每人每年消耗約 11 公噸物質，如圖 2 所示（國家層級物質流指標公開成果，2023）。

至於我國產出的總體廢棄物產生量則約 3 千萬公噸（事業廢棄物申報及管理資訊

系統 & 環境統計查詢網，2023），考量資源有限性及環境負荷，如何讓物料由「靜脈產業」回到「動脈產業」循環利用，讓廢棄資源重新回到產業生產製程使用，是環境部資源循環署與各產業須共同面對的課題。

因應國際淨零排放趨勢，減緩氣候變遷的衝擊，蔡總統於 2021 年世界地球日宣示我國 2050 年淨零排放目標，國發會於 2022 年 3 月公布 2050 淨零排放路徑，訂定能源轉型、產業轉型、生活轉型、社會轉型等 4 大策略，以及科技研發、氣候法制等兩大基礎，並輔以 12 項關鍵戰略整合跨部會資源，推動國家邁向淨零轉型，其中將「資源循環」納入淨零轉型 12 項關鍵戰略之一（國發會，2022）。另據英國艾倫麥克阿瑟基金會的報告指出，碳排放總量有 55% 來自能源，45% 與產品製造有關，產品製造過程 55% 之碳排放可透過碳捕捉等技術減少，45% 則需透過循環經濟政策實現，顯示資源循環於淨零轉型路徑上的重要性（Ellen MacArthur Foundation, 2019）。

二、邁向資源循環零廢棄

廢棄物管理自 1980 年代開始發展，隨自然資源匱乏議題逐漸被重視，國際間興起永續物料管理（Sustainable Materials Management, SMM），從廢棄物管理轉向以生命週期角度及永續發展之精神推動資源循環，建立循環型社會。歐盟於 2015 年起推出「循環經濟行動計畫」（Circular Economy Action Plan），目的為促進境內資源循環之策略；鄰近國家如日本，則於 2000 年公布「循環型社會形成推進基本法」，落實產品生命週期之資源循環；韓國亦於 2016 年制定「資源循環框架法」、2022 年制定「循環經濟社會轉型促進法」，目標為建構永續循環的經濟社會，減少廢棄物產生並促進廢棄物循環利用。國際專責資源循環及循環經濟議題之組織，如聯合國環境署（United Nations Environment Programme, UNEP），關注議題綠色經濟及資源效率；而在歐盟建立之歐洲環境署，為減少生產與消費系統所造成原生資源的浪費，轉向投入循環經濟，歐洲投資銀行（European Investment Bank, EIB）更，提供企業融資服務，並提供建議支持企業轉型。

在臺灣，行政院環境保護署自 2021 年 7 月起正式成立資源循環辦公室，專責辦

理整體資源循環政策規劃及管理，不同於過往廢棄物管理視角，以生物質資源、有機化學資源、金屬及化學品資源、無機資源四大物料角度（如圖 3），擬定創新資源循環政策。

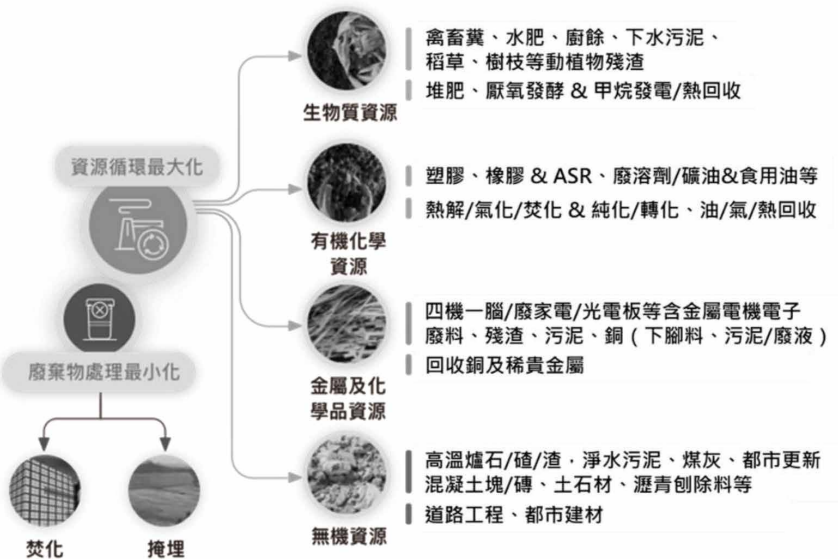


圖 3 資源循環四大物料

因應國際淨零排放趨勢、改善空氣品質、資源循環與化學物質管理等議題之重視，環境治理策略由污染管制轉變為預防管理，並整合事權，全面負起環境治理的責任，打造更堅韌的永續臺灣，立法院於本（2023）年 5 月 9 日三讀通過環境部及三級機關（構）相關組織法，總統於 5 月 24 日正式公布環境部組織法，環保署升格為環境部，為辦理廢棄物源頭減量、資源回收與循環利用及清除處理業務，特設資源循環署。

資源循環署以「資源循環零廢棄」為施政主軸，研提綠色設計源頭管理、能資源循環利用、廢棄物量能平衡及管理 etc. 3 大循環策略，以及暢通循環網絡、創新技術與制度等兩大驅動支柱，業務重點為研擬「資源循環促進法」，透過修法翻轉廢棄物管理觀念，以提升資源再利用並健全管理，並持續發展資源循環減碳技術，營造資源循環的有利環境，提高資源使用效率，並讓資源永續循環利用，落實淨零轉型之目標。

資源循環 3 大推動策略及 2 大驅動支柱如下（如圖 4）：

- 1. 循環策略 1– 綠色設計源頭管理：在產品生命週期各階段導入綠色設計，包括產品使用單一材質、循環設計及添加再生料，以減少原生物料使用，推動循環採購，延長產品使用壽命，並建立產品數位護照制度，促進產品資訊揭露。
- 2. 循環策略 2– 能資源循環利用：提升資源回收效能，結合經濟誘因，並建立分級分類管理架構，推動生物質資源、有機化學資源、金屬及化學品資源及無機資源等四大物料材料化、燃料化及肥料化，並建置資源循環管理平台作為輔助，促使資源循環最大化、廢棄物處理最小化。
- 3. 循環策略 3– 廢棄物量能平衡及管理：針對市場上規模不足、需特殊技術處理之廢棄物、需特別關注或新興廢棄物，推動設置資源化設施及處理設施，以擴大去化量能平衡，同時強化事業廢棄物再利用管理。
- 4. 驅動支柱 1– 暢通循環網絡：於民生方面持續推動資源回收四合一計畫；於產業方面鏈結上、中、下游產業，從事業內循環、事業間循環，逐步發展形成資源循環產業鏈，建立區域型循環網絡或虛擬產業園區。
- 5. 驅動支柱 2– 創新技術與制度：翻轉廢棄物管理觀念，研訂資源循環促進法，並發展資源循環減碳技術，推動高值化應用創造價值、輔導管理資源循環機構投入淨零轉型，透過資源循環分析資料庫，監測指標追蹤進展。

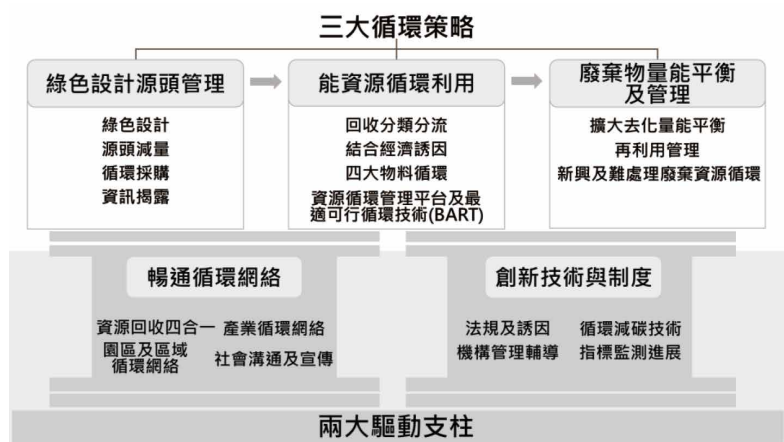


圖 4 資源循環施政主軸 – 三大策略及兩大支柱

2.1 資源回收四合一計畫

自民國 86 年起推動「社區民眾」透過家戶垃圾分類，將各類自家戶產出之小型資源垃圾，結合「地方政府（清潔隊）」、「回收處理業」及「回收基金」之力量予以回收再利用（如圖 5）。透過此四者合一建立完整回收網路，確保回收體系之完整循環。

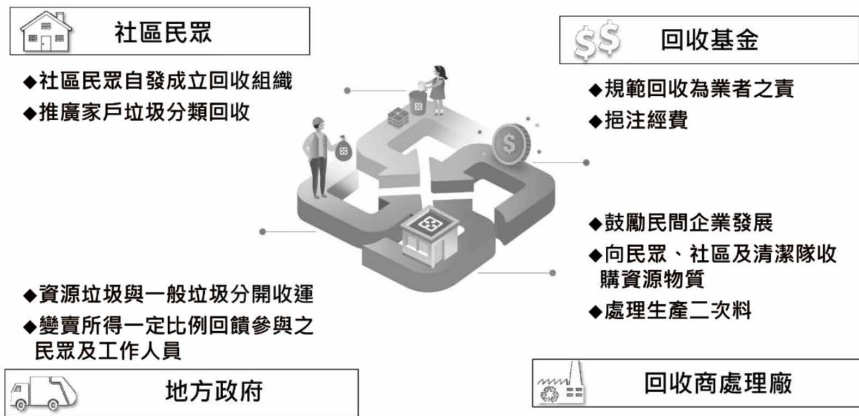


圖 5 資源回收四合一計畫

2.2 淨零轉型關鍵戰略第 8 項「資源循環零廢棄」

環境部資源循環署訂定 2050 淨零轉型「資源循環零廢棄」關鍵戰略行動計畫，參考聯合國永續發展目標第 12 項「負責任的消費與生產」、歐盟「新循環經濟行動計畫」以及相關國際發展趨勢，以永續消費與生產、提升資源使用效率、加值化處理廢棄物為三大策略目標，歸納出 4 項推動策略、37 項推動措施及 72 項行動，優先推動塑膠、紡織品、無機材料及粒料、生物質、廢棄物能源化及生質能、化學品、電器與電子產品、儲能及電動車用電池、太陽能光電板及風力葉片，以及產品數位護照等 10 項關鍵項目，以共同實現國家淨零排放之願景（如圖 6）。



圖 6 淨零轉型關鍵戰略第 8 項「資源循環零廢棄」推動架構

2.3 資源循環減碳技術計畫

淨零轉型的落實必需有創新技術支持，環境部資源循環署自 112 年起爭取科技計畫經費投入資源循環創新技術之研究及技術發展，以「管理平台建置」、「再利用產品再生技術提升」、「循環過程導入科技應用」與「效益評估」為 4 大主軸（如圖 7），開發各項資源循環利用技術，發展資訊管理平台，整合物質流向與量能，即時掌握資源循環基礎資訊；借鏡國際針對廢棄物推動循環之作法以及應用自動化、智慧化升級等，優化回收製程能力、開發新興循環利用技術；並建立資源使用效率、環境效益與減碳效益等評估工具。

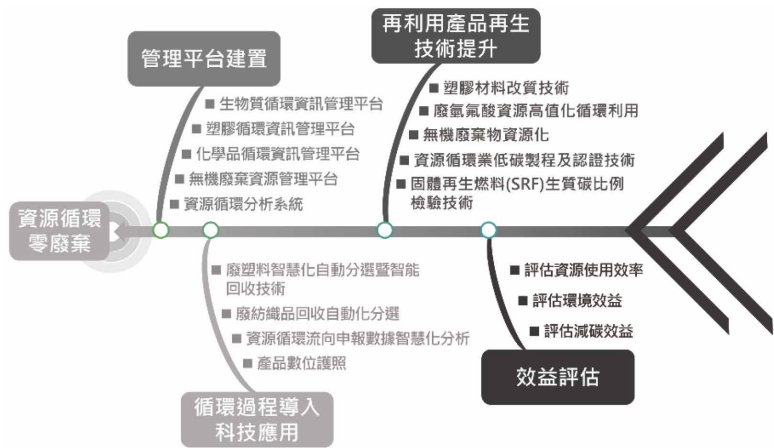


圖 7 資源循環科技發展藍圖

2.4 廢棄物管理及資源化行動方案

針對市場上規模不足、需特殊技術處理之廢棄物、需特別關注或新興廢棄物，環境部資源循環署偕同相關部會推動設置資源化設施及處理設施（如圖 8）。於設施面依可燃、無機、有機及化學品廢棄物等類別，提出增加設置與輔導處理設施，預計於 113 年可全數達量能平衡管理面；於管理面強化再利用機構管理、全程流向追蹤及申報、輔導分類場所轉型、推動設施設置、建構石綿廢棄物處理體系等策略，強化管理制度。

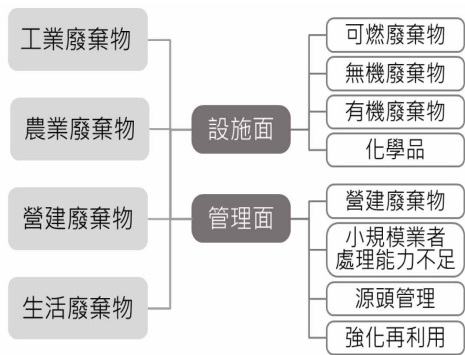


圖 8 廢棄物管理及資源化行動方案

三、如何促進產業資源循環淨零轉型

臺灣產業以出口為導向，且身為全球供應鏈的重要成員，除自主投入環境保護之行列，產業之發展深受國際趨勢影響，配合全球永續發展目標、各國家或供應鏈淨零排放（Net Zero）與碳中和（Carbon Neutral）的宣示，以及全球資源過度消耗等議題，勢必採取資源循環相關措施推動轉型，以提高產業競爭力永續發展。

而為解決國內資源高度仰賴進口，且快速消耗資源產出龐大廢棄物量體，環境部資源循環署從物質的生命週期角度切入，全面盤點物質流向及問題擬定資源循環之策略，從過去以末端管理方式，轉向重視源頭產業針對產品的設計以及原物料的使用，促進產品的循環性及永續性，並強調消費者的角色的重要性，透過資訊揭露賦權消費者，提倡選購綠色設計之產品，改變消費行為，從消費面影響產品製造及服務，促進生產者永續生產。未來規劃將產品綠色設計入法，包括規範產品使用再生料，採用可全回收、易維修與再製造之設計，以及提升耐用性延長使用壽命，增進環境永續性及資源使用效率。

3.1 綠色設計源頭管理

環境部資源循環署由消費者角度切入，檢視盤點消費品浪費及大量一次用產品廢棄淘汰問題，推動源頭減量，結合法令強制性規範、產業自願性措施以及經濟誘因方式，促使業者及民眾共同響應政策，提升環境保護意識，減少資源消耗同時降低垃圾量，達減輕環境負荷之效果。為降低政策推動對於產業發展及民眾生活習慣的影響，禁用或限制製造、輸入、販賣、使用相關措施，皆採取分階段推動，並逐步擴大管制對象及項目，分期訂定目標，給予一定緩衝時間因應，包括初期以自願性辦理、建立示範案例、提供經濟誘因，或透過輔導、相關指引及標準之訂定，引導產業轉型。

隨著經濟發展國人消費能力提升，我國每人每日垃圾清運量快速增長，行政院環境保護署為減少垃圾量，自 80 年代後期推動資源回收，而經調查發現於 90 年代一般廢棄物中，廢塑膠相較歐美先進國家高出約 1 倍數量，顯示國內塑膠類製品使用氾濫進而產生大量廢棄物，故自西元 2002 年起推動塑膠類產品禁限用，包括不得免費提

供購物用塑膠袋，以及不得提供塑膠類免洗餐具，推動方式如下：

1. 法令強制性規範：為正式啟動源頭減量，行政院環境保護署於西元 2001 年起，修正「廢棄物清理法」第 21 條規定：「物品或其包裝、容器有嚴重污染環境之虞者，中央主管機關得予以公告禁用或限制製造、輸入、販賣、使用。」同時配合修正「資源回收再利用回收法」第 6 條規定：「為達成資源永續利用，在可行之技術及經濟為基礎下，對於物質之使用，應優先考量減少產生廢棄物……」，完備法源依據，管制特定項目及對象，分階段實施禁限用措施。
2. 自願性措施：行政院環境保護署透過宣導、活動及訂定減量指引，結合產業力量，響應推動產品及包裝容器減量，於西元 2007 年起推動政府機關及學校紙杯減量，並逐步推動餐飲業者、觀光旅館、連鎖便利商店、百貨量販業美食街減少使用免洗餐具、鼓勵民眾自備環保餐具；另為減少包裝廢棄物，與品牌事業簽訂自願性減量協議，使包裝輕量化。近期因應網路購物興起，環境部資源循環署與網購平台業者、包材及物流業者共同組織「網購包裝減量聯盟」，跨業合作。
3. 經濟誘因方式：為提高產業及民眾配合政策推動之意願，結合連鎖飲料店、連鎖便利商店及連鎖速食店針對飲料杯品項，實施回收獎勵金及自備環保杯之優惠措施，藉以引導民眾改變消費行為，養成「自備、重複、少用」的生活習慣，減少過度浪費並減少垃圾產生。

依聯合國《全球塑膠公約》推動期程，將於西元 2024 年底前擬定具法律約束力的中止塑膠污染公約，而我國已自西元 2002 年起推動塑膠減量措施，並持續檢視我國產業發展變化及國際趨勢，滾動檢討源頭減量策略，例如外送服務興起，媒合外送平臺、可重複清洗餐具租賃業者及餐飲業者，以循環容器提供餐飲外送服務。另廣泛使用之聚氯乙烯（Polyvinylchloride，下簡稱 PVC）製造、使用至廢棄各階段皆有致癌風險，並隨安定劑的添加，可能產生重金屬污染，對於人體及環境產生負面影響，因此訂定「限制含聚氯乙烯之平板包材、公告應回收容器及非平板類免洗餐具不得製造、輸入及販賣」，並自西元 2023 年 7 月起生效。

除源頭減量相關措施，為促進產品循環性及永續性，減少對於環境的衝擊，環境部資源循環署將推動產業於產品生命週期各階段導入綠色設計，研擬 7 大原則包括：

1. 使用單一材質、減少材質種類及避免使用複合材質；2. 使用一定比率或數量之再生料；3. 易拆解或模組化工具一定可維修性；4. 強化耐用性延長使用壽命；5. 限制或禁止使用有害環境物質；6. 廢棄後可全回收及循環利用之設計；7. 對於原料之使用及製造過程，應減少廢棄物產生之必要措施。

目前環境部資源循環署積極推動產業自願性使用塑膠再生料，西元 2022 年訂定「非填充食品之塑膠再生商品推動作業要點」，鼓勵事業於非填充食品之塑膠再生商品使用塑膠再生料，並建立審查機制同時公布通過審查之塑膠再商品，引導事業落實社會責任及企業永續之目標，活絡國內塑膠再生料市場，促進產業循環利用轉型，並訂定於西元 2025 年再生料使用比率達 25%、2030 年再生料使用比率達 30%；目前已通過審查之塑膠再生商品共計 2 家公司之 9 項清潔用品包裝，包含聚乙烯對苯二甲酸酯（Polyethylene terephthalate, PET）及聚乙烯（Polyethylene, PE）材質。另針對電子產品、紡織品以相關指引之擬訂、搭配環保標章或回收清除處理優惠費率等方式，引導產業投入資源循環。

另外，環境部資源循環署亦規劃結合綠色設計、租賃服務及修繕服務，推動創新商業模式；現階段透過訂定共同供應契約，協助公部門財產以租代購，落實循環採購，並訂定採購目標，期望擴大需求進而建立產品服務化供應鏈，鼓勵民間企業及團體循環共同推動。為促進消費習慣改變，賦權於消費者，於 2023 年起參考歐盟管理制度與規劃，環境部資源循環署著手推動產品數位履歷制度（Digital Product Passport, DPP），促使參與產品生命週期之產業揭露產品環境資訊，例如產品碳足跡、再生料添加比率等，並規劃揭露產品維修度指數，建立制度增進維修風氣，以達延長產品使用壽命之目的。

3.2 能資源循環利用

80 年代後期為減少隨經濟成長逐年增長的垃圾量，行政院環境保護署推動資源回收，於西元 1988 年正式將廢棄物回收處理入法，並自 1997 年起推動資源回收之工作，結合地方清潔隊、社區民眾及回收處理業者，共同推動「資源回收四合一計畫」，並納入「延伸生產者責任（extended producer responsibility, EPR）」的精神及做法，依

「廢棄物清理法」第 15 條規定，公告 13 大類、33 項，共計 68 種應回收廢棄物，由產品生產、輸入及販賣業者負責廢棄物的回收處理責任，為提升回收成效，開始實施垃圾強制分類，使資源回收量大幅成長，廢棄物管理從管末處理概念，逐漸轉變為垃圾零廢棄、全回收，環境部資源循環署持續提升回收效能，包括檢討回收項目、增加資源回收量能，以及全面優化資收體系，藉由公權力主導，來達成垃圾減量、資源永續利用之目標，並帶動資源回收處理產業之發展，使積極投入廢容器及物品之回收利用。

行政院環境保護署於西元 2021 年 7 月正式成立「資源循環辦公室」，專責推動資源循環，強化可再利用資源的管理，精進資源的循環利用，期達成資源循環零廢棄的願景。因應國際趨勢，以及國內自然資源的不足，70% 以上資源仰賴進口，為提升我國產業原料的自主性，減少關鍵戰略物質之進口需求，並節約自然資源使用、減少廢棄物產生及促進物質回收再利用，環境部資源循環署以「對於物質之使用，應優先考量減少產生廢棄物，失去原效用後應依序考量再使用，其次物質再生利用，能源回收及妥善處理」為原則（如圖 9），針對物質全生命週期進行管理，完整盤點分析廢棄資源、發展能資源化技術及建立媒合管道，透過法令強化可再利用資源的管理，促進資源循環利用，並新增再利用產品的品質標準、認證制度及掌握其用途及流向，整合推動量能，使再利用產品適材適所。



圖 9 廢棄物管理優先順序

為促進產業資源循環再利用，提升再生關鍵材料價值，建構高值循環體系，環境部資源循環署訂定「精進補貼推動實施計畫」，推動電子產品、廢輪胎、廢機動車輛及廢玻璃容器之補貼，以經濟誘因鼓勵產業投入，提升再利用效益，並促成產學合作。

為有效盤點廢棄資源流向及關鍵議題，研擬正確的資源循環推動策略，環境部資源循環署將廢棄資源分為生物質資源、有機化學資源、金屬及化學品資源，以及無機資源等四大物料，以盤點健全基線資料、分類分流應用、訂定標準規範及指引、建立流向追蹤及查驗制度及循環示範推廣為五大循環利用策略架構，提升資源使用效率，使資源循環最大化、廢棄處理最小化，現行四大物料資源循環方式說明如下：

1. 生物質資源：針對各類生物剩餘資材、廢棄物進行流向盤點（如圖 10），結合各部會分工提升廢料價值，以高值化、飼料化、肥料化及能源化分級推動，並精進能源化處理技術、強化效能，發展生物炭及沼渣沼液多元應用途徑。

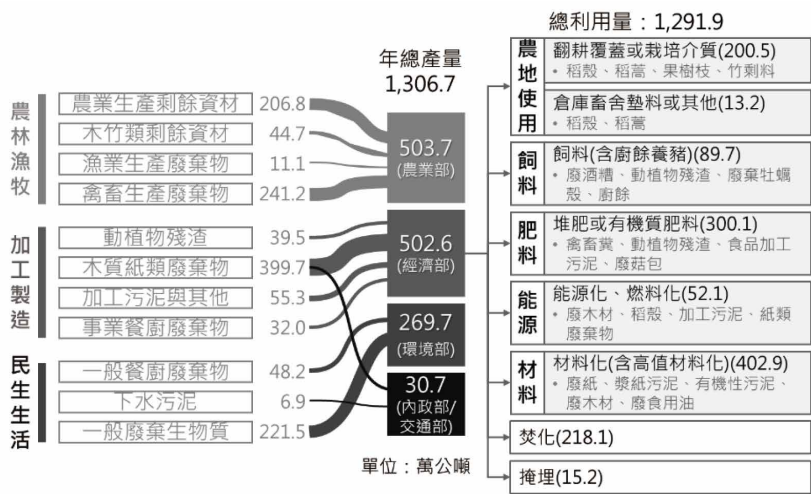


圖 10 分類分流應用盤點 – 以生物質資源為例

2. 有機化學資源：落實塑膠分類及回收，提升塑膠再生料品質，推動驗證制度及溯源機制，跨部會並結合業者協作推動塑膠再生料應用，驅動塑膠循環再生，創造再生料市場；推動紡織品多元化回收處理體系及材料回收分選，強化回收分類，開發循

環技術並推動驗證制度。

3. 金屬及化學品資源：投入創新技術發展，提升化學品廢液高值化循環應用、建立金屬表面處理業低廢循環處理技術；結合製造與輸入業者以多元逆向回收機制，暢通電器與電子產品回收處理管道，提升再利用技術與再生材料應用；強化儲能及電動車用電池循環材料使用，促進鋰電池創新技術發展；建立太陽光電板及風力葉片回收機制，推動產業協作、媒合，強化循環材料高值化利用。
4. 無機資源：引導無機資源替代天然原料，適材適所分流應用於建築與公共工程、再生建材及水泥製品、港區填築工程，及作為水泥業之替代原（燃）料，並研發新興技術、推動材料銀行，以提升粒料品質。

環境部資源循環署短期重要工作包括推動半導體業資源循環，與經濟部、國科會及地方政府合作，建立化學品租賃示範案例，媒合輔導產業推動化學品租賃（如圖 11）；推動太陽光電模組及風機葉片回收清除處理體系，研析高值化再利用技術，並擴展多元處理管道；而因應歐盟電池法案以及推估電池將於西元 2030 年達報廢高峰期，投入開發廢電池高值低碳技術，並推動責任業者自主循環回收計畫。

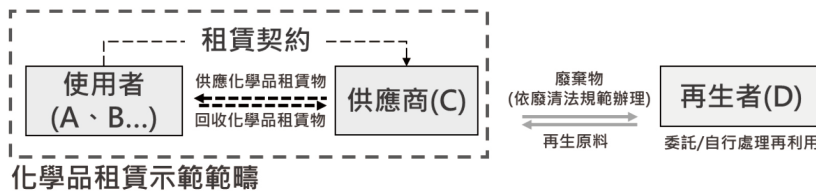


圖 11 化學品租賃模式

另外環境部資源循環署持續推動廢棄物能源化，引導產業使用以非有害適燃性固體廢棄物再利用製造之固體再生燃料（Solid recovered fuel, SRF）作為燃料使用（管理架構如圖 12），減少廢棄物產出及減少化石燃料的開採使用，同時創造減碳效益，為提升固體再生燃料品質，環境部資源循環署訂定「固體再生燃料製造技術指引與品質規範」，結合地方政府共同輔導、媒合業者。而固體再生燃料使用者產出之灰渣，則再循環利用於水泥生料、控制性低強度回填材料（Controlled Low Strength Material, CLSM）、海事工程用粒料及水泥製品，降低廢棄物處理需求，減輕環境負荷。

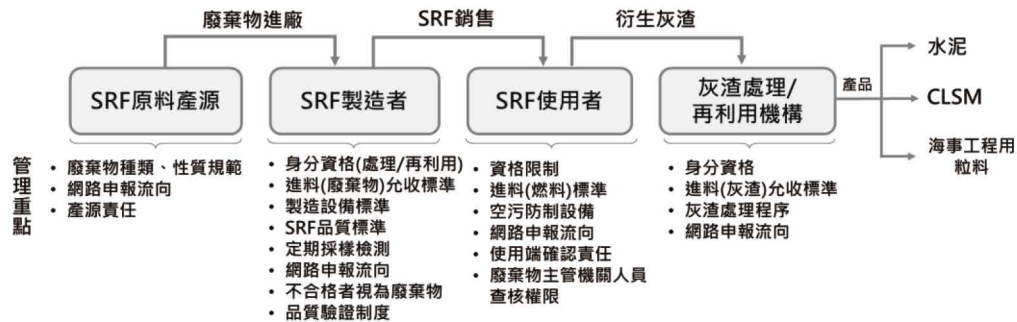


圖 12 SRF 管理架構

為建立掌握四大物料基線資料及流向、追蹤資源循環推動成效，並整合相關資訊，環境部資源循環署規劃建置資源循環管理平台（如圖 13），除協助進行管理，同時揭露產業所需資訊，期望進一步達產業媒合之效益。

3.3 廢棄物量能平衡及管理

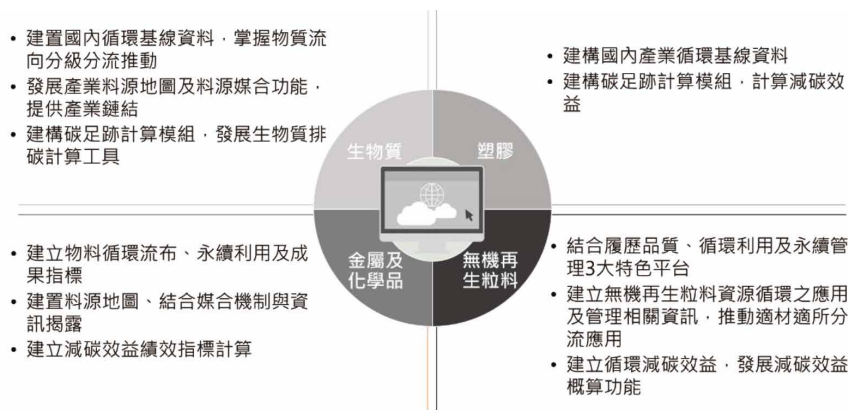


圖 13 資源循環管理平台

因事業廢棄物面臨處理設施不足、處理量能短缺的問題，環境部資源循環署訂定「廢棄物管理及資源化行動方案」，與各中央目的事業主管機關合作，盤點廢棄物數量及流向，將廢棄物分為可燃廢棄物、無機廢棄物、有機廢棄物及化學品廢棄物，訂

定處理量能平衡之策略與期程，說明如下：

1. 可燃廢棄物：由於過去應設置事業廢棄物焚化處理設施未完全設置，為解決可燃事業廢棄物處理設施量能不足及累積暫存的問題，推動廢棄物處理設施之補充設置與輔導，並強化產業源頭減量及依廢棄物性質分類分流清理。
2. 無機廢棄物：在事業廢棄物由產源事業負責處理原則下，因處理設施或去化量能尚有不足，由政府協助推動再生粒料適材適所分流應用。除現有陸域工程應用，為能大量使用集中管理，並進行中長期規劃，環境部資源循環署與相關部會共同推動再生粒料使用於港區填築工程。
3. 有機廢棄物：為改善畜牧糞尿排放影響周遭環境，從畜舍加強源頭減量，推動能資源化利用；另為強化雞糞堆肥處理方式，環境部資源循環署推動增加生物處理機設備及集中處理場設置，完善處理設施。
4. 化學品廢棄物：目前去化量能尚足，預期未來產生量將持續成長，透過提升純化技術及回收量能，促使化學品廢棄物資源循環利用。將於新設工業區或科學園區之相關環評文件中，要求承諾環保用地須設置資源化設施，及其於營運前期得收受區外廢棄物以符經濟規模，並原則應於園區開發前期完成設置。

現行由環境部資源循環署等 10 個部會各自管理所轄再利用機構，包括訂定廢棄物允收標準、規範再利用製程設施、產品品質標準、用途及地點等，分年執行機構查核輔導作業，全程追蹤流向，確保妥善清理，未來研擬將透過「資源循環促進法」由環保機關統一管理，並以財務工具補貼再利用產品使用，提升再利用產品市場競爭力，推動再利用產品妥善使用（再利用流向管理方式如圖 14）。

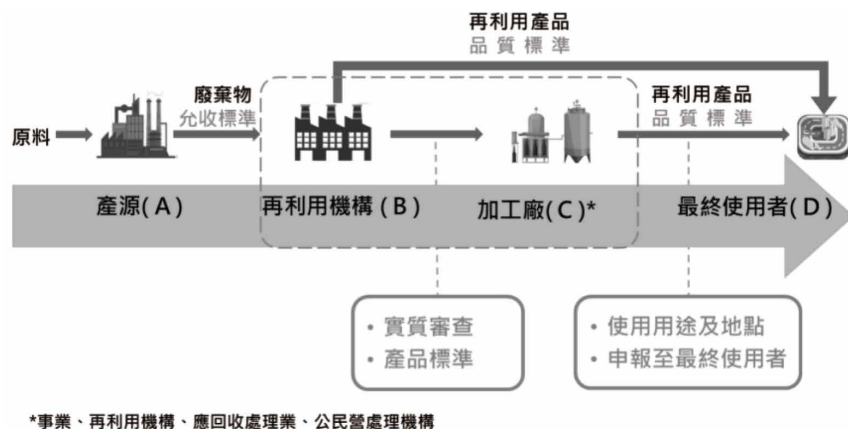


圖 14 再利用流向管理圖

針對處理不易、去化困難、不具經濟規模之廢棄物，環境部資源循環署亦規劃推動設置處理設施，或以建構建構廢棄物處理體系方式，協助產業及民眾處理廢棄物，推動策略如下：

1. 推動設施設置（如圖 15）：盤點現有廢棄物處理設施，如水泥窯、工業鍋爐等，轉型為資源循環中心，增加去化管道促進循環；另針對市場上規模不足、需特殊技術處理之廢棄物、需特別關注或新興廢棄物，由環境部資源循環署協調地方利用環保用地或工業區閒置用地，以促進民間參與公共建設方式，設置資源化設施及處理設施，目前為將民眾及產業排出之木質廢棄物轉為資材循環再利用，減輕焚化爐及掩埋場處理負荷，與環境部資源循環署與地方政府合作，規劃設置北、中、南三區生質燃料製造廠，可供鍋爐、電廠或水泥窯使用。

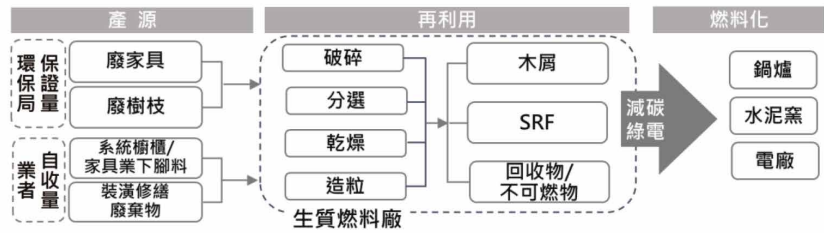


圖 15 生質燃料廠促參案規劃

2. 建構石綿廢棄物處理體系（如圖 16）：石綿主要用於建材，拆除過程若有破損易具飛散性，導致吸入危害風險，各部會已針對石綿原料及產品進行管制，行政院環境保護署則於 2022 年 4 月公告「限制含石綿產品輸入」；而早年建築物石綿瓦屋頂已達使用年限，將陸續拆除排出，環境部資源循環署已建立調查技術掌握建物現況，並規範清除處理及補助方式，引導民眾及業者妥善處置含石綿建材廢棄物，避免發生危害。

3.4 暢通循環網絡

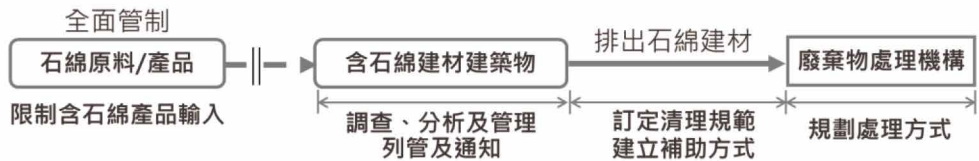


圖 16 石綿廢棄建材清除處理流程規劃

於民生面，行政院環境保護署為使資源回收體系之完整循環，自西元 1997 年推動「資源回收計畫」，結合「社區民眾」、「地方政府清潔隊」、「回收商」及「回收基金」，鼓勵全民參與資源回收工作，並以回收基金作為誘因，共同推動資源回收。

於產業面，環境部資源循環署致力於推動資源循環產業鏈，結合上、中、下游產業進一步發展，建立區域型產業循環中心，甚至跨區域成立虛擬園區，偕同各部會協助創造與鏈結資源循環供給與需求方，暢通循環路徑。環境部資源循環署為拓展事業廢棄物多元處理流向，訂定 10 種場內外循環模式供產業選擇，而行政院環境保護署於西元 2022 年函頒「資源循環網絡廢棄物清理計畫審查作業要點」，簡化行政程序，鼓勵業者跨區域、跨產業，考量廢棄物整體生命週期，串聯上、中、下游事業共同整合原物料供應、產品使用與廢棄物處理及再利用，以產源事業大帶小，或多個小規模產源事業串聯其產業鏈提出申請，延伸自主管理責任，促並進淨零轉型（資源循環網絡模式如圖 17）。

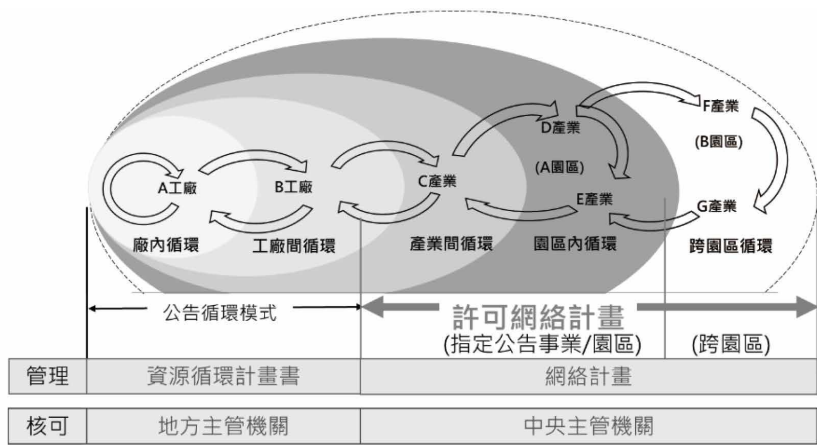


圖 17 資源循環網絡模式

為提升產業及民眾對於資源循環的認知，環境部資源循環署亦加強與社會公眾的溝通，例如結合產官學研辦理民間企業競賽、推廣海洋廢棄物循環產品標章及網購包裝減量標章等標章制度，另外運用媒體及社群軟體進行政策宣傳。而環境部資源循環署扶植中小企業，定期辦理資源循環績優企業遴選，透過遴選建立模範，帶動製造業及服務業等循環鏈結，並鼓勵引導其他業者提升技術或推廣使用再生料；另外透過展覽方式，例如配合循環經濟週活動，辦理超越圈圈展覽，提升民眾認知與實踐，邀請不同產業共同參與，蒐集多元媒材之應用，並增加青年創業及就業機會。

為擴大我國資源循環範疇，環境部資源循環署持續投入國際交流合作，例如臺美「國際電子廢棄物管理網絡」專案（International E-Waste Management Network, IEMN），擴展國際夥伴關係，邀請多國及我國企業參加年會、工作坊及網路研討會等交流活動，分享實踐循環經濟的經驗及技術交流，營造淨零永續的電子產品循環模式；於西元 2022 年舉辦第 1 屆臺德經貿政策對話會議，我國與德國針對產品數位護照制度之推動進行討論並取得共識；環境部資源循環署於西元 2023 年與經濟部合辦「歐盟創新週」，擴大與深化臺歐盟合作的契機，其中透過國際循環經濟研討會，邀請歐盟成長署、英國、義大利、德國等專家進行經驗分享，做為我國政府及產業推動循環經濟之參考。

3.5 創新技術與制度

為營造推動資源循環有利發展之環境，且因應組改及國際趨勢，環境部資源循環署將「廢棄物清理法」及「資源回收再利用法」二法精神納入，透過翻轉廢棄物管理觀念，擴大資源範疇（如圖 18），啟動新法立法程序，立法重點包括：(1) 翻轉觀念促進循環；(2) 消費性產品源頭管理；(3) 創造有利產業推動循環之環境；(4) 維護環境正義。

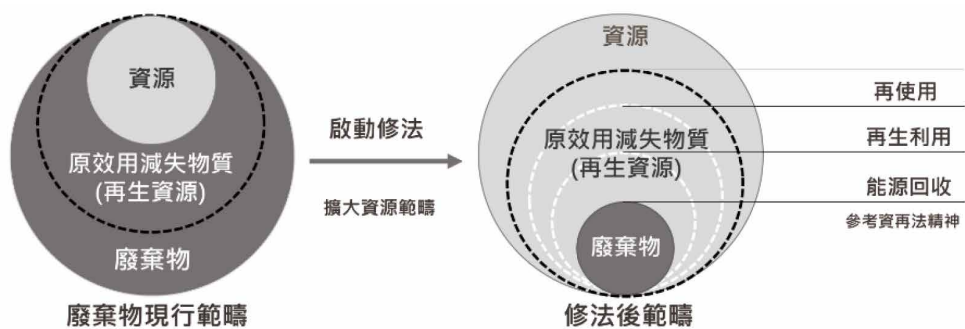


圖 18 翻轉廢棄物觀念促進資源循環

24 淨零轉型與產業推動資源循環

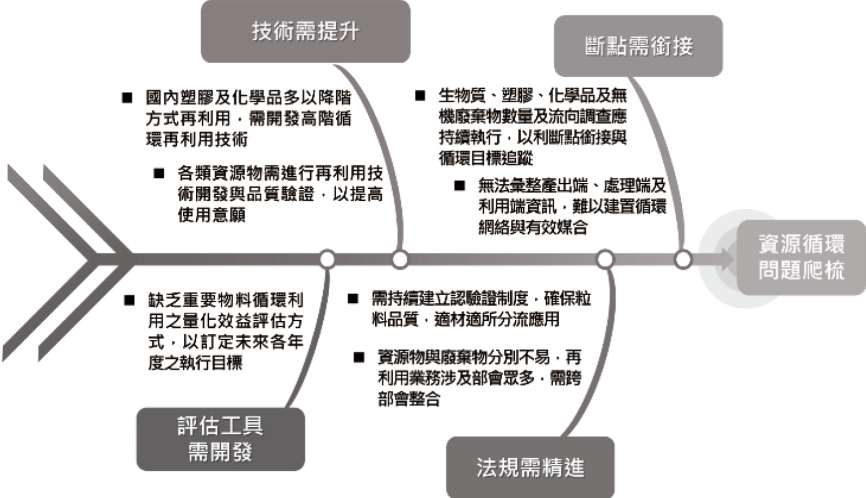


圖 19 現況問題爬梳

因應淨零排放趨勢，規劃我國淨零排放路徑並啟動相關工作，環境部資源循環署盤點現況問題（如圖 19），訂定「資源循環減碳技術計畫」，以永續消費及生產精神規劃資源循環減碳、高值化技術發展及驗證技術開發等，建構永續資源循環網絡體系，達成淨零減碳效益，並為鼓勵創造資源回收處理高價值，提升資源回收處理新技術、加強循環驅動力及再利用品質與產值。

為協助產業因應淨零排放趨勢，環境部資源循環署針對清除處理機構及回收處理業等資源循環產業進行管理輔導（如圖 20），包括盤查產業現況、建立輔導示範計畫、輔導產業導入自動化、智慧化及低碳化（Automation, Intelligence, and Low Carbonization, AIC），並評估減碳效益並辦理示範觀摩，培育強化業者淨零排放及永續發展新知，建構產業低碳永續轉型能力。

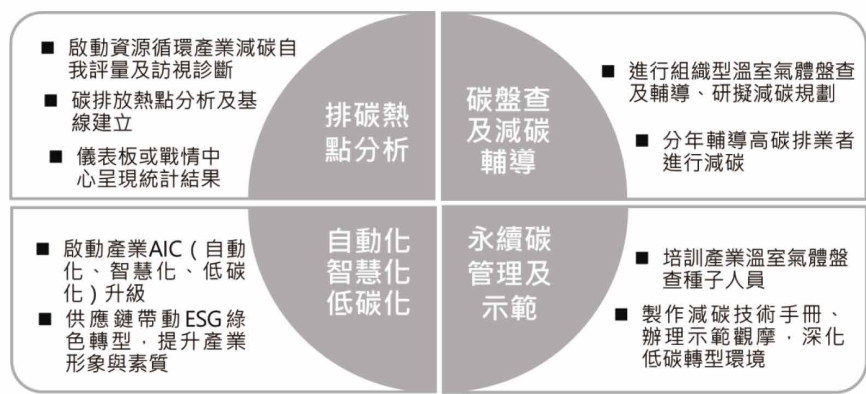


圖 20 資源循環機構管理輔導

為追蹤我國資源流佈情形，以資源循環現況與成效，環境部資源循環署透過資源循環分析資料庫，分析計算資源循環相關指標，且透過網站儀表板的呈現，了解資源生產力及國內物質消費等二大總體政策績效指標數值，監測追蹤政策執行成果（監測指標如圖 21）；另環境部資源循環署為協助產業計算投入資源循環的減碳效益，自今（西元 2023）年起，規劃於網站建置減碳效益試算功能，可初步計算執行資源循環工作所產生之減碳效益。

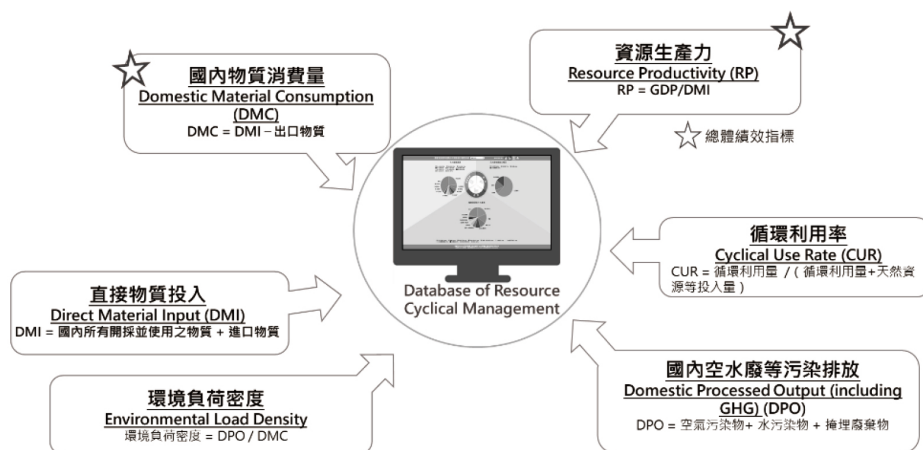


圖 21 指標管理監測進展

四、產業資源循環未來展望

因我國能資源短缺且多仰賴進口、人口密度高、土地資源有限等，使產業面臨先天不利條件，且因廢棄物處理設施興建困難以及國際發展趨勢等壓力，產業需正視資源循環堆推動之必要性，於環境部資源循環署成立前，行政院環境保護署從廢棄物管理角度，積極轉向推動資源循環，並偕地方政府及產業共同研擬解方，例如輔導設置資源循環設施、媒合動靜脈產業需求及供給，促進廢棄資源循環流動。而因應國際趨勢及氣候變遷的壓力，配合我國淨零排放路徑提出「資源循環零廢棄」淨零轉型關鍵戰略，以聯合國永續發展目標 SDG12 為核心，促使消費者永續消費，並由消費引導產業永續且負責任的生產，推動綠色設計及循環商業模式，建立資源永續利用之社會。

環境部資源循環署的成立，正式宣示我國廢棄物管理觀念的翻轉，除強調廢棄物為產業可循環再利用之資源，透過完善法規制度及研發創新技術，進一步推動我國產業成為全球資源循環之典範，朝資源循環零廢棄願景邁進；另逐步建立創新循環商業模式，推廣循環採購，將工程、產品或服務之生命週期中可能產生之負面環境影響及廢棄物減到最小，並提前因應國際針對產品資訊揭露的措施，規劃我國產品數位護照制度建立並與業者合作試行，未來協助產業適應國際發展。

在推動產業淨零轉型過程中，環境部資源循環署依循公正轉型核心重點「社會包容」及「重新分配」，並且依產業現況採分階段推動方式，逐步擴大標的並訂定分期目標，給予產業一定緩衝時間，減少政策實施對產業造成的負面影響，規劃因應方式包括：輔導產業轉型、訂定補貼費率、媒合相關產業形成鏈結、加強資訊公開、建立再生料與再生產品品質規範及驗證制度，並且建立示範計畫等，未來亦將持續視政策推動進行利害關係人及影響範疇之辨識，同時擬訂公正轉型相關措施，以降低衝擊，期望與產業共同實現永續發展。

參考文獻

- 國發會 (2022)，臺灣 2050 淨零排放路徑及策略總說明，https://www.ndc.gov.tw/Content_List.aspx?n=DEE68AAD8B38BD76
- 國家層級物質流指標公開成果 (2023)，https://smmdb.moenv.gov.tw/SMM/WebPage/MF_index.aspx
- 環境統計查詢網 (2023)，<https://statis91.epa.gov.tw/epanet/>
- 事業廢棄物申報及管理資訊系統 (2023)，<https://waste.epa.gov.tw/RWD/Statistics/?page=Year3>
- IRP. (2019), Global Resources Outlook 2019: Natural Resources for the Future We Want, p1-162.
- Circle Economy. (2023), The Circularity Gap Report 2023, p1-64, Rep.
- UNEP (2010), ABC of SCP Clarifying Concepts on Sustainable Consumption and Production.
- UNEP. (2022), Historic day in the campaign to beat plastic pollution: Nations commit to develop a legally binding agreement, <https://www.unep.org/news-and-stories/press-release/historic-day-campaign-beat-plastic-pollution-nations-commit-develop>
- Ellen MacArthur Foundation. (2019), Completing the picture: How the circular economy tackles climate change, p1-62.
- EU. (2022), Ecodesign for Sustainable Products Regulation, https://commission.europa.eu/energy-climate-change-environment/standards-tools-and-labels/products-labelling-rules-and-requirements/sustainable-products/ecodesign-sustainable-products-regulation_en

廢棄物類

無機聚合技術製備環保多孔防火材料之研發

林凱隆*、羅康維**、林雅雯**、鄭大偉****

摘 要

本研究利用碳化矽污泥 (SiC sludge, SCS) 和廢玻璃纖維 (Waste glass fiber, WGF)，以雙氧水發泡製備環保多孔防火材料，並分析 SCS 和 WGF 對熱機械和微觀性能的影響。結果顯示，SCS 取代率為 10%、WGF 添加量為 0.5% 和 2.0% 的樣品，1 天的抗壓強度分別為 0.32 MPa 和 0.46 MPa。當碳化矽污泥取代量為 10%，隨著廢玻璃纖維添加量由 0.5% 增加至 2.0% 時，其應力位移曲線由 0.28 mm 增加至 0.79 mm，顯示荷重從無機聚合物轉移至纖維中，使其應力位移曲線有所延伸。當 SCS 取代率為 10%、WGF 添加量從 0.5% 增加到 2.0% 時，樣品其應力 - 應變曲線從 0.28 mm 增加到 0.79 mm。當 WGF 添加量為 0.5% 和 2.0% 時，樣品的背板溫度分別為 238℃ 和 262℃，顯示添加適量的 WGF 能有效降低環保多孔防火材料的背板溫度。此外，本研究利用 H_2O_2 與碳化矽污泥能產製具良好韌性（位移曲線 0.7 mm）及良好防火性能（ $281^\circ C < \text{背板溫度} < 311^\circ C$ ）之環保多孔防火材料。本研究分析發現碳化矽污泥與 H_2O_2 含量對環保多孔防火材料之力學特性及微觀性質具顯著影響，且利用廢玻璃纖維能增強環保多孔防火材料之效能。

【關鍵字】碳化矽污泥、廢玻璃纖維、應力-應變曲線、環保多孔防火材料、微觀特性

*	國立宜蘭大學環境工程學系	教授
**	國立台北科技大學資源工程研究所	博士生
***	國立台北科技大學資源工程研究所	教授

一、前言

台灣地區近年來產業逐漸轉往光電產業發展，其中包括發光二極體（Light-emitting diode, LED）光電產業、半導體產業及矽晶圓產業、太陽能產業等快速發展，製程中所產生之廢棄物如碳化矽污泥等，伴隨產業發展而快速增加，卻缺乏適當之處理及再利用方式。此外，隨 LED 藍寶石基板大量生產下，其相對產生的污染物總量伴隨著增加，所產生之廢棄物其處理處置等相關問題亦相當棘手，而如何將其回收再利用及讓此資材能夠永續發展，將是未來發展之主要目標。其中，LED 藍寶石基板製造業所生產之藍寶石基板係由矽晶棒經線鋸切片而成，在切割的過程中會產生大量的碳化矽（Silicon carbide, SiC）污泥，根據環保署統計每年約有 6,916 公噸碳化矽污泥產生。目前碳化矽污泥大都以掩埋處置為主，不僅增加藍寶石基板製造業的成本，同時對環境造成負荷。因碳化矽污泥含氧化鋁（ Al_2O_3 ）及 SiC，為天然高嶺土之主要成分，若能回收再利用，不僅能降低生產成本，同時亦可減少對環境的污染。符合環境部零廢棄、零掩埋資源化之目標。

此外，由於台灣地區因電子資訊業的產業蓬勃發展，以國內台玻集團之玻璃纖維廠總產量為每年 320,000 噸，包括電子級玻璃纖維絲（Yarn）162,000 噸，強化塑膠級玻璃纖維製品 50,000 噸。資料顯示，目前國內的南亞及台玻玻璃纖維布（Cloth）的產能與產量已凌居世界之冠亞軍（地區性單家工廠而言），台灣廢棄的玻璃纖維每年推估超過 30 萬公尺（以織布損耗 6% 計）[白方正，2013]，根據環保署統計之資料指出，2022 年事業廢棄物申報量總計約 2,075 公噸。目前再利用方式主要以控制性低強度回填材料（Controlled-Low-Strength-Materials）為主。

無機聚合物是具有三維網狀結構的新型環保型無定形或半結晶矽鋁酸鹽無機聚合物，由於無機聚合物這類膠凝材料具有傳統水泥所不具備的優良性能，比如：早強、體積穩定性佳、耐化學腐蝕、界面結合能力強、抗滲性好、耐高溫性好、耐水熱作用及耐久性佳等特點 [GÖRHAN et al., 2022]。其獨特的性能以及在建築材料、高強材料、固核固廢材料、密封材料和耐高溫材料等方面具應用之潛力，也日益受到重視 [Lan and Wang, 2020]。此外，在製備過程中與卜特蘭水泥相比，無機聚合物具有很大的優勢。製備無機聚合物不需要高溫煅燒或燒結，無機聚合反應在常溫下即可完成，且在生產過程中幾乎沒有 NO_x 、 SO_x 和 CO 的產生， CO_2 的排放量亦低。而目前甚少

有學者以碳化矽污泥和廢玻璃纖維作為無機聚合物之原料，故本研究以碳化矽污泥和廢玻璃纖維製備無機聚合物並藉由無機聚合物良好的防火特性達到作為環保防火材料的再利用潛力。此外，本研究提出廢玻璃纖維優化製備多孔環保防火材料。使用最佳鹼性溶液條件，並添加碳化矽污泥、變高嶺土、 H_2O_2 發泡劑及廢玻璃纖維等材料，作為合成多孔環保防火材料之原料。將分析物理特性如抗壓強度、抗彎強度及熱傳導係數與防火性能，藉以建立多孔環保防火材料之品質特性。

二、無機聚合物之特性與應用

2.1 無機聚合物之特性

無機聚合物（Geopolymer）主要是用於描述鋁矽酸鹽無機聚合物，而通常無機聚合物可以藉由卜作嵐材料或富含鋁矽酸鹽的材料與強鹼性溶液混合產生，而生成之無機聚合物以 SiO_4 、 AlO_4 之四面體組成架狀結構，其結構相似於沸石。沸石主要為結晶相，但無機聚合物主要是由不定形所組成。無機聚合物擁有極好的機械特性、低收縮、耐火和抵抗酸能力，這些特性使無機聚合物擁有與卜特蘭水泥建築材料競爭之能力，其耐久性也符合混凝土之耐久性。惟製造卜特蘭水泥在燒製過程中至少需要 $1,400^\circ\text{C}$ 的高溫燒製而成，而無機聚合物的製備在低於 100°C 的環境中即可合成，不需花費太多的能量合成；傳統上製造 1 公斤卜特蘭水泥需要消耗 1.6 公斤的石灰石，即產生 0.53 公斤之 CO_2 ；而無機聚合物所排放 CO_2 約比傳統卜特蘭水泥少約 55% [Carreño-Gallardo et al., 2018]，僅產生 0.29 公斤之 CO_2 ，故無機聚合物為對環境友善的建築材料，如表 1 所示。

表 1 無機聚合物和水泥熟料生產過程中的總 CO_2 排放量

單位	無機聚合物	水泥熟料
kJ/g	0.306	1.059
kWh/kg	0.085	0.294
kg CO_2 (Energy)	0.056	0.192
kg CO_2 (Decarbonation)	0.237	0.342
Total kg CO_2 emitted	0.293	0.534

資料來源：本研究自行整理，2023。

根據 Glukhovsky 所建立 Glukhovsky 模型 (Glukhovsky Model)，當材料主要是由矽酸鹽及鋁酸鹽所組成時，會發生破壞－凝結－濃縮－結晶化 (Destruction-Coagulation-Condensation-Crystallization) 所連結而成的反應；其第一步為共價鍵之 Si-O-Si 和 Al-O-Si 鍵結崩解，而此反應會發生在於鹼性溶液中之 pH 提高時，此官能機物轉變為膠體相 (Colloid Phase)，之後當破壞的產物出現時會開始堆積 (Accumulation)，而其之間會相互作用而形成凝固結構 (Coagulated Structure)，導致第三階段的濃縮結構和結晶 [Li et al., 2010]。

2.2 無機聚合物之應用

無機聚合物因原料來源相當廣泛，例如天然礦物 (高嶺土、變高嶺土) 與工業固體廢棄物 (煤灰、爐石等) 富含矽鋁酸鹽材料者皆可做為無機聚合物之原料，且因於最初合成無機聚合物系統中所含的成分不同，而產生不同的結構之無機聚合物。根據最初原料中所含的 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比例不同，而應用於不同領域。在 Si : Al=1 : 1 時，可應用於磚、陶瓷與防火材料等方面；在 Si : Al=2 : 1 可做為綠色水泥混凝土 (與卜特蘭水泥比較 CO_2 排放較低) 與固定有害與輻射廢棄物；Si : Al=3 : 1 時，可發展防火玻璃纖維複合材料與耐熱複合材料 (200~1,000°C)；而當 Si : Al > 3 : 1 又可應用不同的領域。

無機聚合材料與目前大量用於營建材料的卜特蘭水泥比較具有環保性、安全與舒適性和經濟性等。在環保性方面，在整個製程中所產生的 CO_2 遠低於卜特蘭水泥，其排放的 CO_2 小於 0.5 kg CO_2 /kg；在安全與舒適性方面，因無機聚合材料具有多孔隙結構，故可做為防火材料，且無機聚合物具有防火效能 (可承受 1,000°C 左右的高溫)，於 80°C 之高溫下其抗壓強度為 77.7 MPa；於 600°C 之高溫下其抗壓強度為 83.9 MPa；於 800°C 之高溫下其抗壓強度為 30.5 MPa；暴露於 1,000°C 下其抗壓強度為 28.5 MPa [Saxena et al., 2017]；在經濟方面，因可將富含鋁矽酸鹽廢棄物做為原料使用，故可降低其成本。

無機聚合物在應用於修補材料上係屬較新穎的技術，藉由外層鋪上含有纖維的複合材料來修補建築物結構，而修補的建築結構有石材建築、混凝土與磚等，或將纖維

複合材料應用於建築物之地基上。美國與日本已經開始將此技術應用於建築物與橋梁上，來增加建築物抗震的能力（Geopolymer Institute）。利用無機聚合物修補石材建築，主要原理是利用無機聚合反應（Geopolymerisation），藉由化學轉換的方式將粉末於短時間內轉換成固體。一般而言，通常先將黏土進行預處理（脫羥基），而此時黏土內所含的鋁酸鹽其配位基會從六配位轉變為四配位，之後再添加富含鈉或鉀與矽酸於系統中，其混合物結構會由二維結構轉變為三維結構，所合成的物質類似於卜特蘭水泥的膠結性材料，此材料可用於修補花崗岩、玄武岩、石灰岩和其他種類的岩石。

三、防火材料之特性及應用

3.1 防火材料之特性

防火材料（Fireproof Materials）是指用以阻止熱流傳遞及減少熱能損失的所有材料總稱，不僅可防火亦可有保冷之效能，其具有體積密度小、孔隙率及熱傳導係數低之特性。一般防火材料按使用溫度使用可分為 4 種類型：（1）低溫防火材料：使用溫度低於 900℃。主要產品有矽藻土磚、膨脹珍珠岩、輕質粘土磚及矽酸鋁纖維等。（2）中溫防火材料：使用溫度於 900~1,200℃，主要產品有矽藻土磚、泡沫石棉、膨脹蛭石、礦渣棉、玻璃棉及泡沫玻璃等。（3）高溫防火材料：使用溫度大於 1,200℃，主要產品有輕質高鋁磚、輕質剛玉磚、輕質鎂磚及高純矽酸鋁纖維等。（4）常溫防火材料：使用溫度於常溫及常溫以下，主要產品有輕質混凝土、石膏製品、泡沫塑料及其他有機防火材料等。常用的防火材料按其成分可區分為有機、無機及其他類。

3.2 防火材料之應用

防火材料指具有火災預防及火災防護功能之材料，其防火性能可分為 3 類；防焰性、耐燃性，以及耐火性。防火材料即是防焰材料、耐燃材料，以及耐火材料的總稱。當火災發生時，防火建築與裝修（飾）材料即使觸碰到火源或熱源，也不會立即燃燒，可以延緩火勢的蔓延，並保護其它易燃材料不會受火源影響而燃燒。圖 1 為防火材料之應用示意圖。

關於建築與裝修（飾）材料的使用與其防火能力的規範，於建築設計規則施工編有詳細的規定與說明。防火建築材料主要用於分間牆，使用不燃之無機材料做為防火層，例如珍珠岩、氯化鎂、氧化鎂、石膏或水泥等無機礦材所形成之多層結構，或使用纖維或不織布等軟性基材，摻混 50~80 wt.% 無機不燃材料，並添加難燃劑與發泡劑，形成質地堅硬的防火板材。而裝修（飾）材料則多用於天花板、門板與塗料等裝潢材，除了使用無機不燃材料外，此類材料多半使用有機高分子主體，添加大量的發泡劑、碳化劑、難燃劑及黏著劑，在燃燒時能夠促進複材發泡膨脹與碳化，以做為主要的防火機制，有效隔絕火焰與熱量傳遞，但此種碳化層結構極為蓬鬆且具有大量孔洞，在持續加熱或遭受外力的情況下，有可能會產生龜裂，甚至出現剝落與分解的現象，而無法有效地持續保護內部的材料。

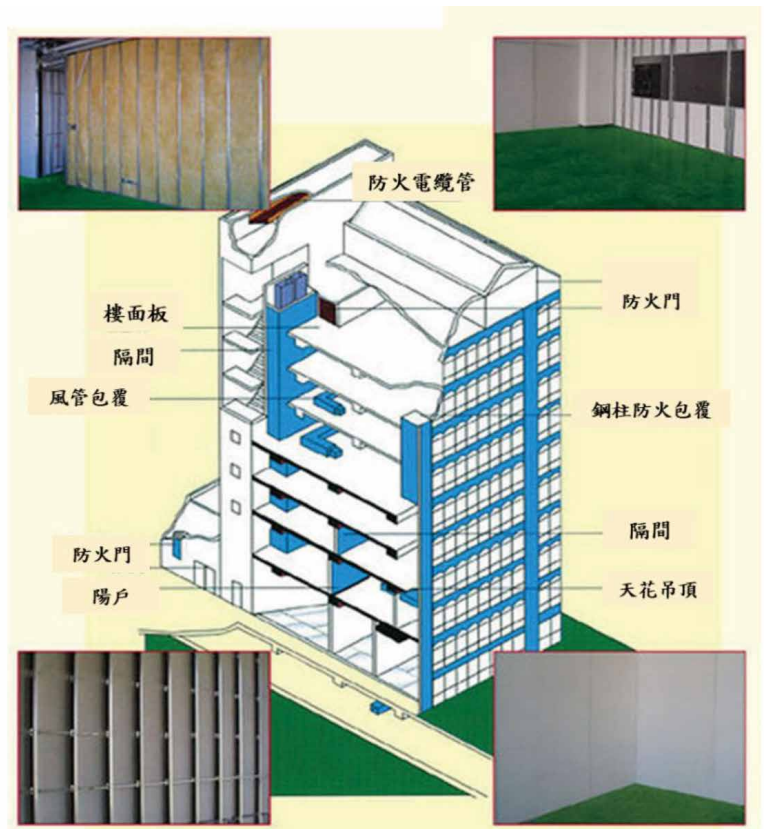


圖 1 防火材料之應用示意圖（資料來源：江榮裕建築師事務所，2008）

四、實驗材料與方法

本研究使用變高嶺土 (Metakaolin, MK) 為高嶺土經由 650°C 煅燒 3 小時而成。藍寶石基板之 SCS 污泥取自於北部某面板廠，將其細度控制在 $300\sim 400\text{ m}^2/\text{kg}$ ，作為初始材料以製備碳化矽污泥基無機聚合物。廢玻璃纖維來自塑膠公司生產玻璃纖維布的副產物，較長的廢玻璃纖維在作為混合前被切割成長度為 5 mm 的纖維。其中，SCS 污泥中主要成分為 SiO_2 (75.40%) 及 SiC (23.00%)，其他成分包含 Al_2O_3 (0.8%)、 Fe_2O_3 (0.58%) 及 CaO (0.09%)。而變高嶺土之主要成分為 SiO_2 (59.60%) 及 Al_2O_3 (38.00%)，其他成分包含 Fe_2O_3 (1.30%)、 CaO (0.25%) 及 K_2O (0.32%)。另外，變高嶺土之主要成分為 SiO_2 (59.60%) 及 Al_2O_3 (38.00%)，而廢玻璃纖維之主要成分為 SiO_2 (59.90%)、 CaO (23.40%) 及 Al_2O_3 (14.70%)。

本研究流程主要係將碳化矽污泥取代部分變高嶺土製成無機聚合物，無機聚合物漿體中矽鈉莫耳比為 1.6、液固比為 0.75、 SiC 污泥 (SCS) 取代量為 0%~20%，而發泡輕質無機聚合物中發泡劑 (H_2O_2) 的重量比 0%~2.0% 及添加 0.5%~2.0 wt.% 廢玻璃纖維作為優化製備多孔發泡無機聚合物。製備環保多孔防火材料之流程圖如圖 2 所示。並探討無機聚合物於養護齡期 1~56 天之抗壓強度發展，並將試驗完之試體終止反應以進行孔隙率、抗壓強度、抗彎強度、應力位移及防火絕熱分析。

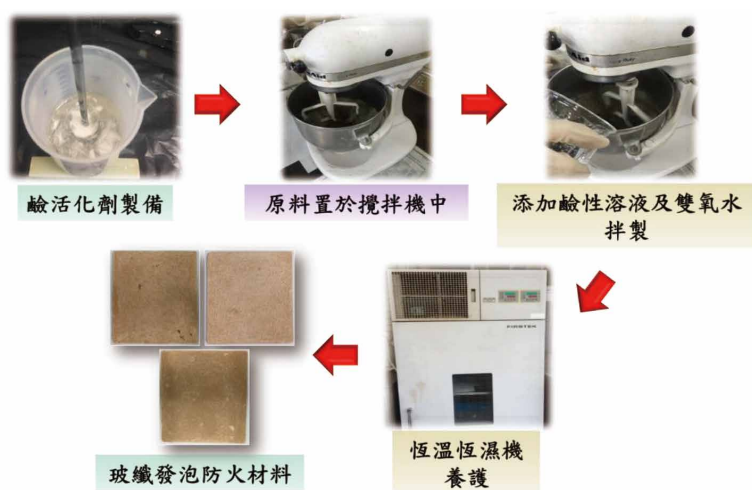


圖 2 製備環保多孔防火材料之流程圖

五、結果與討論

5.1 環保多孔防火材料之孔隙率分析

當養護齡期為 1 天、碳化矽污泥取代量為 0% 時，隨著廢玻璃纖維添加量至 0.5%、1.0%、1.5% 與 2.0% 後，環保多孔防火材料其孔隙率分別為 39.18%、38.31%、38.22% 及 37.42%；當養護齡期為 28 天時、廢玻璃纖維添加量為 0.5%、1.0%、1.5% 與 2.0% 時，環保多孔防火材料其孔隙率分別下降為 36.90%、36.57%、36.01% 及 33.40%。此外，當廢玻璃纖維添加量為 2.0%、碳化矽污泥取代量為 10% 及 20% 時，其孔隙率分別為 28.13% 及 39.67%。結果顯示，廢玻璃纖維之添加量為影響環保多孔防火材料孔隙率之重要參數。Novais 等人利用風力發電葉片所產生的玻璃纖維廢棄物用來作為無機聚合物之增強劑，其結果顯示隨著纖維含量（0-3 wt.%）的增加，表現出較高的抗壓強度，係因纖維與無機聚合物基體良好結合 [Novais et al., 2017]。故當廢玻璃纖維添加量越多時其反應加劇，因此其環保多孔防火材料其孔隙率會隨著廢玻璃纖維的增加而有逐漸下降之現象。

5.2 環保多孔防火材料之機械強度分析

圖 3 為不同碳化矽污泥取代量於不同廢玻璃纖維添加量下環保多孔防火材料其機械強度分析。由圖中可知，於養護齡期為 1 天時，未添加廢玻璃纖維之環保多孔防火材料其抗壓強度為 0.27 MPa，隨著廢玻璃纖維添加至 0.5%、1.0%、1.5% 與 2.0% 後，環保多孔防火材料其抗壓強度分別為 0.62 MPa、0.67 MPa、0.71 MPa 及 0.77 MPa；可見環保多孔防火材料其抗壓強度會隨著廢玻璃纖維的添加而有增加之趨勢。當碳化矽污泥取代量為 10%、廢玻璃纖維添加量為 0.5% 和 2.0% 時其抗壓強度分別為 0.32 MPa 與 0.46 MPa；當養護齡期為 56 天時，其抗壓強度分別為 0.82 MPa 與 1.25 MPa。另外，當廢玻璃纖維添加量為 1.5% 和 2.0% 時，抗彎強度分別為 0.95 MPa 與 1.30 MPa。結果顯示，添加廢玻璃纖維之環保多孔防火材料相比能有效提升強度，且透過添加韌性材料能改善抗彎特性。此外，當碳化矽污泥取代量為 20% 時，廢玻璃纖維添加量為 0.5%、1.0%、1.5% 與 2.0% 時，環保多孔防火材料其抗彎強度分別增加

為 1.10 MPa、1.25 MPa、1.55 MPa 及 1.65 MPa，顯示荷重從無機聚合物轉移至纖維中增加其抗彎強度發展。與未添加廢玻璃纖維之環保多孔防火材料相比，相當於分別提升 4.8%、19.0%、47.6%、57.1%。

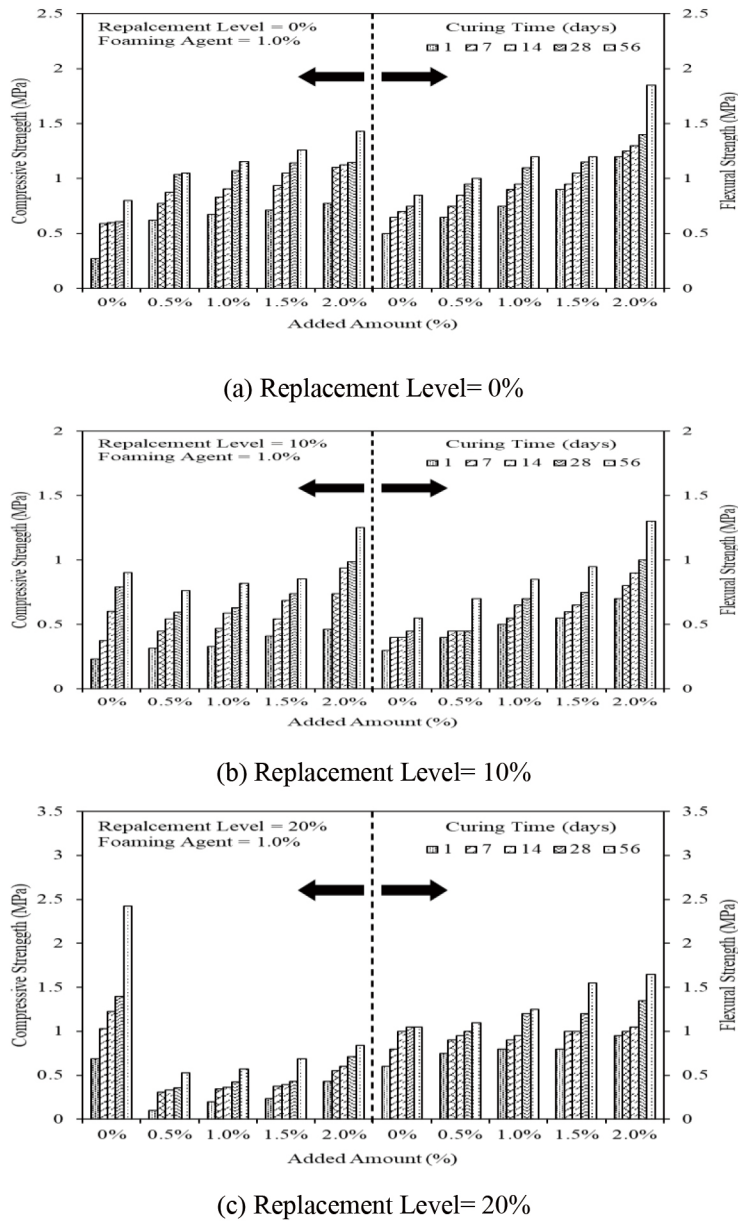
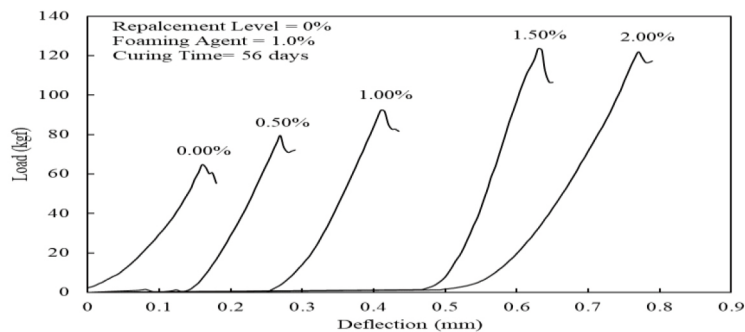
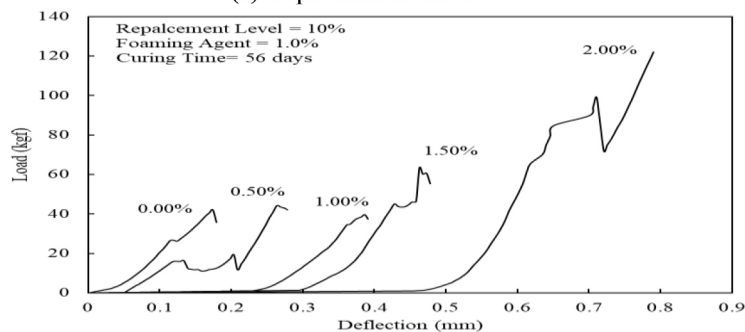


圖 3 不同廢玻璃纖維添加量之環保多孔防火材料強度圖 [Lo et al., 2021]

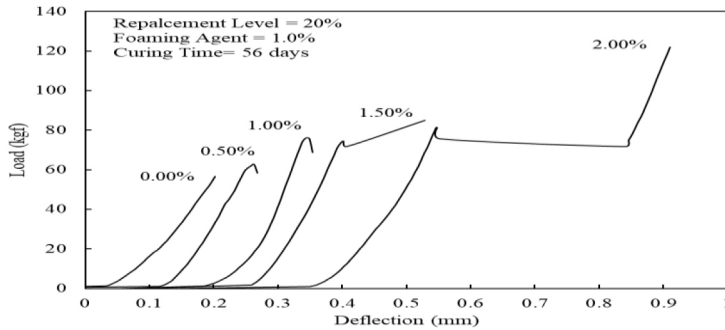
圖 4 為不同碳化矽污泥取代量於不同廢玻璃纖維添加量下環保多孔防火材料其晚期應力位移曲線圖。由圖中得知，當碳化矽污泥取代量為 0%、廢玻璃纖維添加量為 2.0% 時，顯示應力達到最高值後逐漸緩慢下降。同時，觀察到應力位移曲線較為延伸。當碳化矽污泥取代量為 10%，隨著廢玻璃纖維添加量由 0.5% 增加至 2.0% 時，其應力位移曲線由 0.28 mm 增加至 0.79 mm，顯示荷重從無機聚合物轉移至纖維中，使其應力位移曲線有所延伸，本研究結果與 Al-mashhadani 等人研究結果一致 [Al-mashhadani et al., 2018]。另外，當碳化矽污泥取代量為 20% 時，其應力位移曲線由 0.27 mm 增加至 0.91 mm。根據 Novais 等人（2017）研究顯示，添加 0~3 wt.% 玻璃纖維廢棄物作為無機聚合物之增強劑，隨著纖維含量增加，其無機聚合物強度增強並增加開裂後延展性，使更高的應力能量被吸收，防止試體的完全破壞 [Novais et al., 2017]。因此，顯示增加廢玻璃纖維含量其應力位移曲線有所延伸。



(a) Replacement Level= 0%



(b) Replacement Level= 10%



(c) Replacement Level= 20%

圖 4 不同廢玻璃纖維添加量之環保多孔防火材料應力位移曲線圖 [Lo et al., 2021]

5.3 環保多孔防火材料之防火絕熱性質

表 1 為不同廢玻璃纖維添加量之環保多孔防火材料其背板溫度變化分析。由表中可知，當養護齡期為 1 天、碳化矽污泥取代量為 0% 時，隨著廢玻璃纖維添加量至 0.5%、1.0%、1.5% 與 2.0% 後，其背板溫度分別降低為 238℃、227℃、260℃ 及 262℃，顯示添加廢玻璃纖維能有效降低其背板溫度。當養護齡期為 56 天、廢玻璃纖維添加量為 0.5%、1.0%、1.5% 與 2.0% 時，環保多孔防火材料其背板溫度分別為 219℃、251℃、259℃ 及 283℃，顯示隨著養護齡期越大其背板溫度明顯降低。此外，由表 1 中得知，當養護齡期為 28 天、廢玻璃纖維添加量為 2.0%、碳化矽污泥取代量為 10% 及 20% 時，其背板溫度分別下降為 268℃ 及 304℃，顯示廢玻璃纖維添加量的增加，其背板溫度有明顯下降之現象，其可能原因為系統中同時受到 SiC 顆粒及廢玻璃纖維存在的影響，促使漿體黏度增加，而產生更多的毛孔 [Bergamonti et al., 2018]，提升其絕熱性能。故隨著廢玻璃纖維添加量增加其背板溫度下降，且優於碳化矽污泥取代量為 0% 之環保多孔防火材料。另外，Shiu 等人（2014）也使用類似的發泡過程，進行廢玻璃製備發泡無機聚合物其結果顯示，當廢玻璃取代量為 10%、泡劑添加量為 1.5% 及 2.0% 其背板溫度分別為 362℃ 及 367℃ [Shiu et al., 2014]，其背板溫度皆高於本研究結果。故本研究所製備之環保多孔防火材料具有作為防火材料之潛力。

表 1 不同廢玻璃纖維添加量之環保多孔防火材料其絕熱試驗結果 [Lo et al., 2021]

SCS (wt. %)	WGF Addition (%)	Reverse-Side Temperature (°C)		
		1 day	28 days	56 days
0	0.0	322	252	306
	0.5	238	216	219
	1.0	227	218	251
	1.5	260	244	259
	2.0	262	253	283
10	0.0	340	301	298
	0.5	225	255	243
	1.0	218	255	202
	1.5	244	259	253
	2.0	254	268	265
20	0.0	367	333	255
	0.5	261	281	244
	1.0	241	261	241
	1.5	284	284	245
	2.0	303	304	300

六、結論與建議

本研究探討不同碳化矽污泥取代量與廢玻璃纖維添加量，以雙氧水發泡劑製備環保多孔防火材料，並分析環保多孔防火材料物理特性、機械強度、防火性能及微觀結構的影響。彙整開發環保多孔防火材料之產業應用優勢如下：本研究經驗活化合成法應用於環保多孔防火材料之製備方法，透過添加玻纖能夠改善其無機聚合物脆性破裂模式與增加應力位移曲線，並藉由碳化矽取代所製備環保多孔防火材料，已掌握有效提升高韌性（位移曲線 0.7 mm）及降低其背板溫度之特點。本研究開發新式再利用途徑及提供相關市場需求（市價 200~300 元 /m²），本研究成本為 100 元 /m² 提高產品性價比，與此同時解決大量碳化矽污泥（3,000~4,000 元 / 公噸）及玻璃纖維（20,000~25,500 元 / 公噸）等處理成本問題，進而提升防火材料於相關產業競爭能力。而後續建議可選擇不同之纖維添加至碳化矽污泥基多孔環保防火材料中，探討不同纖維對於碳化矽污泥基多孔環保防火材料其性能優化。

參考文獻

- Al-mashhadani M.M., Canpolat O., Aygörmez Y., Uysal M., Erdem S. (2018), Mechanical and microstructural characterization of fiber reinforced fly ash based geopolymer composites, *Construction and Building Materials*, 167: p505–513.
- Bergamonti L., Taurino, R., Cattani L., Ferretti, D., Bondioli, F. (2018). Lightweight hybrid organic-inorganic geopolymers obtained using polyurethane waste. *Construction and Building Materials*, 185: p285-292.
- Carreño-Gallardo C., Tejeda-Ochoa A., Perez-Ordóñez O.I., Ledezma-Sillas J.E., Lardizabal-Gutierrez D., Prieto-Gomez C., Valenzuela-Grado J.A., Hernandez F.C.R., Herrera-Ramirez J.M. (2018) In the CO₂ emission remediation by means of alternative geopolymers as substitutes for cements, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6: p4878–4884.
- GÖRHAN G., KÜRKLÜ, G. (2023). Investigation of the effect of metakaolin substitution on physicomechanical properties of fly ash-based geopolymer mortars. *Materials Today: Proceedings*, 81: p35-42.
- Lan X., and Wang Z. (2020). Efficient high-temperature electromagnetic wave absorption enabled by structuring binary porous SiC with multiple interfaces. *Carbon*, 170: p517-526.
- Lo K.W., Lin K.L., Cheng, T.W., Lin Y.W. (2021). Elucidating the effects of silicon carbide sludge and waste glass fiber on the characteristics of porous eco-fireproof materials. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 40(6), e13682.
- Novais R.M., Carvalheiras J., Seabra M.P., Pullar R.C., Labrincha J.A., 2017, Effective mechanical reinforcement of inorganic polymers using glass fibre waste, *Journal of Cleaner Production*, 166: p. 343–349.
- Saxena S.K., Kumar M., Singha N.B., (2017). Fire Resistant Properties of Alumino

Silicate Geopolymer cement Mortars, *Materials Today: Proceedings*, 4: p5605–5612.

Shiu, H.S., Lin, K.L., Chao, S.J., Hwang, CL., Cheng, T. W. (2014). Effects of foam agent on characteristics of thin-film transistor liquid crystal display waste glass-metakaolin-based cellular geopolymer. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 33(2): p538-550.

江榮裕建築師事務所，健康的綠建材—矽酸鈣板，2008，<https://roychiang.pixnet.net/blog/post/29597034>.

白方正 (2013)，聚乳酸生質材料合膠之韌性與導熱性研究，逢甲大學化學工程學系碩士論文，台中。

Li C., Sun H., Li L. (2010), A review: The comparison between alkali-activated slag (Si+Ca) and metakaolin (Si+Al) cements, *Cement and Concrete Research*, 40: p. 1341–1349.

廢棄物類

以產業共生推動循環經濟發展

廖逸凡*、張哲銘**、花建佑***

摘 要

經濟部產業發展署 2018 年起依據行政院「循環經濟推動方案」，加強建置促進產業共生之相關輔導機制與措施，除了輔導既有產業園區轉型循環園區外，亦同時推動循環技術研發及循環供應鏈媒合。本文從環境建構、技術研發、市場鏈結等不同面向，說明如何將產業共生及循環經濟落實至產業及產業園區中。

環境建構以推動循環示範輔導園區作為既有產業園區循環轉型之示範案例，首先透過循環園區評估指標了解各產業園區的產業共生現況與循環潛力，篩選相對具推動潛力的園區率先示範輔導。接著採用虛（線上）實（線下）整合輔導方式，結合產業園區服務中心與廠商合作組織，搭配環境部相關申報系統資訊分析結果，有系統的辦理能資源鏈結輔導工作，並以大園、和平、官田 3 座產業園區為例，針對 3 種不同類型循環示範輔導園區推動型式做個案介紹。技術研發則以促進創新循環技術研發為標的，從盤點現有廢棄物循環產業鏈發掘具潛力的項目，進一步媒合產學合作技術開發並以政府補助計畫提供研發經費協助，並以鋰電池正極材料回收再利用為例作個案介紹。市場鏈結則透過循環供應鏈媒合機制，針對品牌需求深度調研，提供可靠的循環物料供應商清單、政府與產業脈動資訊等，實質協助品牌商與臺灣廠商建立互信互助之循環供應鏈，並以全循環為例做個案介紹。

【關鍵字】循環經濟、產業共生、能資源整合、循環園區評估指標、循環供應鏈		
*	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
***	環興科技股份有限公司	技術經理

一、前言

循環經濟 (Circular Economy) 最早由英國環境經濟學者 Kerry Turner 與 David Pearce 提出，其核心概念為「只有放錯地方的資源，沒有真正的廢棄物」，講求整個生產與消費的經濟體系重新設計，透過使用可再生之材料及能源，藉由重新設計產品結構、製造、銷售、回收、分解、保存、再生等流程，避免降級回收，使得能資源能夠更有效率地被循環使用 (黃育徵，2017)。循環經濟同時能對溫室氣體減量有所貢獻，根據艾倫麥克阿瑟基金會 (Ellen MacArthur Foundation, EMF) 研究，能源策略可減少總碳排約 55%，剩下的 45% 減碳缺口，則要倚重於循環經濟策略 (EMF, 2021)。我國 111 年公布之「臺灣 2050 淨零排放路徑及策略總說明」中，針對製造業所規劃之淨零排放路徑規劃亦將循環經濟納入 (國家發展委員會，2022)。

循環經濟涵蓋 3 個重要原則，分別為「產品服務化 (生產 / 消費文化改變)」、「高價值循環 (資源效益 / 零廢棄)」與「系統合作 (產業共生 / 跨域合作)」 (循環臺灣基金會，2019)。其中，產業共生是指企業運用另個企業未充分利用的資源繼續創造價值，透過能源、資源、水資源等之交換，促進一個企業之副產品做為另一企業之原料使用，更可進一步跨大至專業知識、人才、公有設施之共享等非物質的交換。

經濟部產業發展署 (下稱產發署) 自 2008 年起針對部分產業園區推動的能資源整合，即為我國推動產業共生的雛形。行政院於 2018 年 12 月核定通過「循環經濟推動方案」，以「循環產業化」及「產業循環化」作為主軸，藉此落實循環經濟所需研發、技術、土地、人才及資金等能量，提升能資源整合效率，促進產業循環共生及轉型，持續強化國際競爭力。產發署之後依據「循環經濟推動方案」，加強建置促進產業共生之相關輔導機制與措施，除了將原本點對點的能資源再利用媒合，擴大到以產業園區為單位的既有產業園區轉型循環園區外，為提升區內廠商循環技術能力及擴大再生產品市場鏈結，亦同時推動循環技術研發及循環供應鏈媒合，從環境建構、技術研發、市場鏈結等不同面向，將產業共生及循環經濟落實至產業及產業園區中。

本文從環境建構、技術研發、市場鏈結等不同面向，說明產發署之推動機制，以及執行之實務案例，以清楚呈現如何將產業共生及循環經濟落實至產業及產業園區中。

二、環境建構—推動循環示範輔導園區

當產業間的共生發展成為一個國家長期推動的政策時，通常具體落實在一國境內的「生態工業園區」(Ecology industrial park, EIP)，最著名案例即位於丹麥的卡倫堡園區，該園區自 1960 年代末由廠商自發性開始發展產業共生系統，由最初的蒸汽與水的鏈結開始，逐漸演化為現今超過 30 種不同能資源鏈結的網絡。

我國產業園區 / 工業區多為既設工業區，過去在招商時並未特別考量產業間循環潛力，因此推動園區產業共生的方式，是在既有的園區基礎上，加入環境保護、廠商資源共享等因子進行改造，使既有產業園區 / 工業區可逐步轉型為循環園區。

由於我國產業園區 / 工業區與國外產業園區的屬性或產業結構不盡相同，為了了解各產業園區的產業共生現況與循環潛力，輔導產業園區內的廠商能落實循環經濟並與國際接軌，因此參考國外案例，建置一套用於衡量園區落實循環經濟的指標系統，並透過指標篩選相對具有產業共生推動潛力的園區率先示範輔導。

2.1 循環園區評估指標

國際上已有許多組織針對循環生態工業區作出明確定義，例如聯合國工業發展組織 (United Nations Industrial Development Organization, UNIDO) 指出，一特定工業區域，透過社會、經濟及環境品質的整合，將永續概念與措施園區選址、整體管理規劃、設施除役等面向，即為循環生態工業區 (UNIDO, 2017)。另聯邦環境保護署 (Federal Office for the Environment, FOEN) 於 2014 年則透過多項指標，針對歐洲、美洲、亞洲等共計 168 座工業區進行評估，當時所引用之指標分別為「廢棄物管理」、「能源效率」、「水資源管理」、「物質流 / 化學流」、「可再生能源」、「文化、社會、健康及安全」、「移動性、交通」、「土地利用」、「生物多樣性」、「空氣污染控制」、「環境管理系統」、「噪音控制」等 12 項。

由於我國產業園區與國外產業園區的屬性或產業結構不盡相同，為了輔導產業園區內的廠商能落實循環經濟並與國際接軌，於 2020 年參考國際間生態化工業區評估標準 (張嘉真等，2019；張嘉真等，2021)，兼容參考我國產業園區發展特性，訂定

我國循環園區評估指標。我國循環園區評估指標之訂定，依環境、經濟、社會面向擬訂 12 項指標。其中環境面指標可再細分為水資源、資源、能源及綜合類，著重能源、資源及水資源再利用（循環）量（率）、污染排放控制、工業區內循環利用，並納入國際認證相關指標等；經濟層面重視經濟與資源之關聯度，包括土地利用、資源循環產業（廢棄物資源化）發展情形等；而社會面則強調工業區與社會之關聯度，包括區內事業發布企業社會責任政策及作法、資訊公開揭露度等列入評估指標中，以促進工業區生態化轉型，並強化社會連結。惟考量我國產業園區受客觀環境影響，且進駐產業類別使園區產業結構各異，導致部分指標有特定適用產業類型及其適用限制，故依據指標適用對象及其限制條件，將 12 項指標區分為共通性指標與個別指標（表 1）。

表 1 我國循環園區評估指標內容與定義

指標 面向	指標 類別	指標項目	指標定義	單位	共通性
環境 指標	水資源	用水重複利用率	工業區及區內事業於生產或營運過程中，各項標的用水重複利用水量占總用水量之比例，數值越高，表示水資源越有效利用	%	V
		事業廢水納管率	工業區內個別事業產生廢（污）水後，排入污水下水道系統，由污水處理廠集中處理後排放至地面水體之比例，數值越高，表示水環境遭受的污染風險越低	%	
	資源	資源循環生產力	工業區內事業以廢棄物為原料進行再利用，產出再生產品之單位產品產值，數值越高，表示資源再利用之效益越高，資源循環朝高值化發展	元 / 公噸	
		廢棄物再利用率	工業區及區內事業於營運過程中，產生事業廢棄物（含有害廢棄物）之交換再利用量占總產生量之比例，數值越高，表示資源越有效利用	%	V
	能源	空氣污染改善及蒸汽鏈結比例	工業區內鍋爐使用氣體燃料及柴油等低污染性燃料之比例，以及將產製蒸汽與其他事業相互鏈結之比例，數值越高，表示工業鍋爐產生空氣污染量越低且能源越有效利用	%	
		再生能源利用	工業區及區內事業之再生能源裝置容量，不含汽電共生，數值越高，表示節能減碳成效以及能源自主性越高	瓩	V

指標 面向	指標 類別	指標項目	指標定義	單位	共通性
	綜合	循環經濟標準指引	工業區內事業取得循環經濟標準認證的家次，數值越高，表示越多企業選擇以循環經濟模式取代線性經濟，達成能資源有效循環利用	家次	V
		能源、資源或水資源之產業合作網絡	工業區內能源、資源或水資源循環利用合作網絡，可促進能源使用效率、資源循環使用、節省水資源，增加產業共生的機會	家數	
經濟指標		資源循環產值	工業區內事業每年從事以各類可資源化廢棄物為原料，將其再利用為再生產品者，其產值越高，表示循環經濟發展度越高	萬元 / 年	
		土地利用率	工業區已完成租售及開發之產業用地之於工業區產業用地之比率，數值越高，表示閒置土地越少，土地活化利用指數越高	%	V
社會指標		企業社會責任資訊揭露程度	區內事業之企業社會責任揭露家數占區內廠商數之比率，數值越高，表示願負起社會責任之企業越多	%	
		工業區資訊揭露及利害關係人共生合作	工業區服務中心、廠商協進會及民眾的多方交流，透過網站公告、發布新聞稿等方式公開必要資訊，以及舉辦社區參與、環境教育等活動，促成工業區事業、員工、鄰近社區居民及學校等重要利害關係人之溝通交流，數值越高，表示資訊越透明化，溝通管道更暢通	次 / 年	V

2.2 循環示範輔導園區推動機制

參考指標評估結果，產發署於 2021 至 2022 年間擇定大園、和平、頭份、竹南、銅鑼、彰濱、官田、永安等 8 座具輔導、轉型潛力或推動亮點之產業園區，作為循環示範輔導園區，參考各園區於循環園區指標各項指標之表現，研擬適當之改善目標、措施與行動方案，推動能資源循環利用及循環經濟能力建構相關工作。

循環示範輔導園區的推動，採用虛（線上）實（線下）整合輔導方式（圖 1）。「實」為建立循環園區推動組織，以產發署編定的產業園區為例，多數園區皆設有獨立的服務中心與廠商合作組織（如廠協會、廠聯會等），因此，園區循環利用組織的成員除了既有專案計畫的執行團隊之外，另外還有在地的服務中心及廠協會，協助在地溝通及快速發掘具有推動潛力的案件，藉此厚實輔導能量與提升輔導全面性。「虛」則是

透過分析與比對環境部相關申報系統，有系統的盤點園區內具有類似輔導需求的潛在廠商，後續執行團隊在服務中心及廠協會的陪同之下，赴現場辦理輔導工作。針對具有能資源再利用潛力的項目，輔導團隊利用線上資料庫系統，依據處理 / 再利用機構允收標準、再利用方式、運輸距離等面向綜合考量，提供適合的處理 / 再利用機構媒合選項，並視再利用資源供需雙方意願，召開媒合會議加速能資源鏈結。

長期運作下來，產發署、計畫執行單位（含專家學者）、服務中心、廠協會共同形成一個推動園區循環的組織，透過定期舉辦的小組工作會議，不斷盤點案源與研擬輔導策略，進而提升輔導深度與廣度。

2.3 循環示範輔導園區推動案例

循環示範輔導園區雖皆屬由既設工業區進行改善方式，但因每個工業區基礎設施、產業結構、以及周邊環境差異，在推動循環轉型過程中仍須因地制宜調整推動項目及作法。本文針對 3 種不同類型循環示範輔導園區推動型式做個案介紹，包含大園產業園區以能源整合擴大至能資源區內循環模式、和平產業園區由核心企業帶動整體園區循環發展模式、以及官田產業園區由行政單位引領開發園區循環潛力模式。

1. 經濟部大園產業園區—能源整合擴大至能資源區內循環

經濟部大園產業園區（簡稱大園產業園區）屬於涵括多種產業類別之綜合型工業區，區內主要產業包括紡織染整、化學材料、電子、機械製造、造紙、食品等等，雖有多家大型企業設廠，但並沒有產值或土地占比特別高的主導型企業，或是具大量副產物可供周邊工廠循環利用或可提供能資源予週邊廠商的核心企業。

大園產業園區邁向能資源整合與產業共生的起點，來自於園區內食品、造紙、化學、電鍍及染整業廠商對蒸汽有共同的需求。因此，配合政府政策推廣工業區能資源整合並提昇能源使用效率，自 94 年起引進大園汽電共生（股）公司（簡稱大園汽電）作為供汽中心，統一提供園區內需汽廠商所需蒸汽，紓解工業區內供電供汽壓力、並改善環境污染。目前大園汽電在大園產業園區內建置總長度超過 10 公里的蒸汽輸送管線，提供服務的廠商超過 60 家。

近年大園產業園區進一步的產業共生合作，奠基於園區內廠商在蒸汽整合的良好基礎和信賴，將園區內具能資源互補性產業進一步整合，引導適燃性廢棄物（如紡織污泥、食品污泥、紡織廢料、廢塑膠、廢溶劑等）成為汽電共生廠輔助燃料，產生的蒸汽及電力又再回供園區內廠商，形成園區內資源與能源的封閉循環（圖 1）。



圖 1 大園產業園區能資源區內循環示意圖

除了大園汽電為中心的園區內蒸汽及廢棄物循環外，大園工業區內的正隆大園廠利用自身造紙廠的特性，積極推動廠內能資源循環（漿紙污泥製成固體再生燃料（Solid Recoverd Fuel, SRF）作為自廠鍋爐燃料）與綠能設施（沼氣綠電系統），打造廠內能資源循環；此外，大園工業區許多再利用機構協助處理全國事業廢棄物，如收受全國含銅污泥進行再利用的永源化工等，為跨園區資源循環的經典案例。整體而言，大園產業園區同時展現出跨園區循環、園區內循環、廠內循環等大、中、小 3 種產業共生模式。

2. 經濟部和平產業園區—核心企業帶動整體園區循環發展

和平產業園區為附設專用港區，將採礦、生產、運輸之作業點緊密結合之水泥產業園區，園區內核心企業為台泥集團（主要為台泥和平廠、和平電廠、和平港公司）。

和平產業園區能資源整合與產業共生的推進，與台泥集團息息相關。園區內產業

共生的發展，首先將台泥和平廠、和平港以及和平電廠，從原料開採、製程、能源到產品運輸，採跨產業資源循環規劃，水泥原料石灰石提供和平電廠環保脫硫減少空氣污染物排放，電廠產生的煤灰與脫硫石膏 100% 運至水泥廠當作水泥原料，目前已達成 99% 以上園區廢棄物的循環再利用。未來台泥新設汽化爐運轉後，和平產業園區內剩餘廢棄物將由汽化爐處理，無廢棄物離開園區，成為零廢棄的循環園區。

而水泥業使用的水泥旋窯，具備高溫、滯留時間長等優勢，適合處理廢棄物以作為替代燃料使用，焚化後的殘餘物又成為安定性強的水泥熟料，同時將廢棄物轉化為原料或能源。因此近年台泥和平廠更逐步擴大循環共生範疇，成為事業廢棄資源循環中心，協助鋼鐵、半導體製造、半導體封裝、化學纖維、造紙等產業，處理難以自行去化之事業廢棄物，作為水泥替代原料及燃料。

和平產業園區產業共生另一特點，是與週邊社區生活緊密結合，透過提供經費與資源改善週邊社區生活條件與就業環境，將循環園區進一步擴大至循環城市（圖 2）。

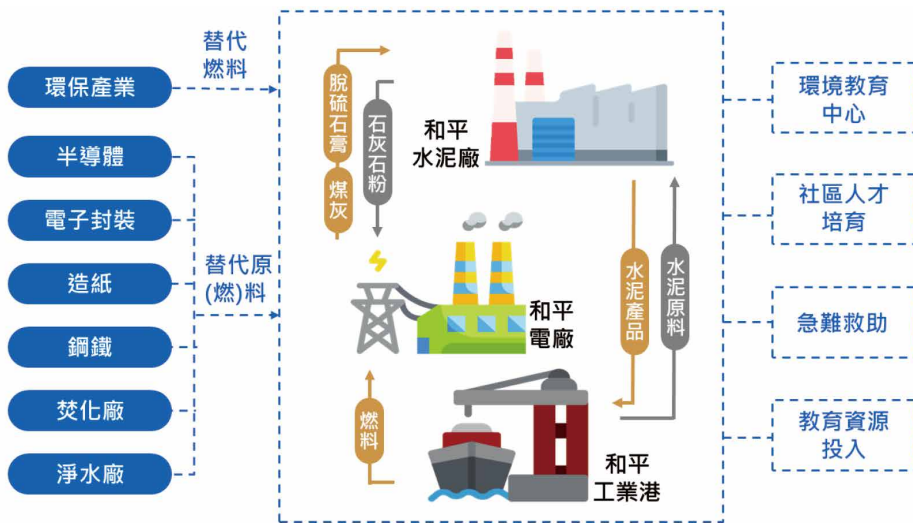


圖 2 和平產業園區產業共生網絡示意圖

3. 經濟部官田產業園區一行政單位引領開發園區循環潛力

經濟部官田產業園區（官田產業園區）屬於傳統綜合型產業園區，區內主要產業包括食品、紡織、化學製品製造、塑膠製品製造、金屬製品製造業等傳統產業，園區

內廠商以中小企業為主，較少大型企業集團進駐。

官田產業園區基於園區內以中小企業占多數的產業組成特性，在推動園區產業共生過程中，不易由廠商主導能資源整合項目的開展，因此特別側重園區行政管理單位（產業園區服務中心）協助發掘循環潛力及穿針引線，與產業園區廠商協進會合作將有潛力的廠商整合創造能資源鏈結。

官田產業園區原已有以官田汽電為供汽中心的蒸氣整合系統，供應區內 7 家廠商蒸汽需求。近 3 年藉由與產業園區服務中心及產業園區廠商協進會合作推動，另建立了將工業區污水處理廠放流水作為廠商製程用水的再利用鏈結，以及媒合區內廢塑膠產源端與鄰近園區之再利用機構合作製成 SRF，未來將推動 SRF 回供官田汽電作為再生燃料使用，建立園區內資源與能源的封閉循環（圖 3）。

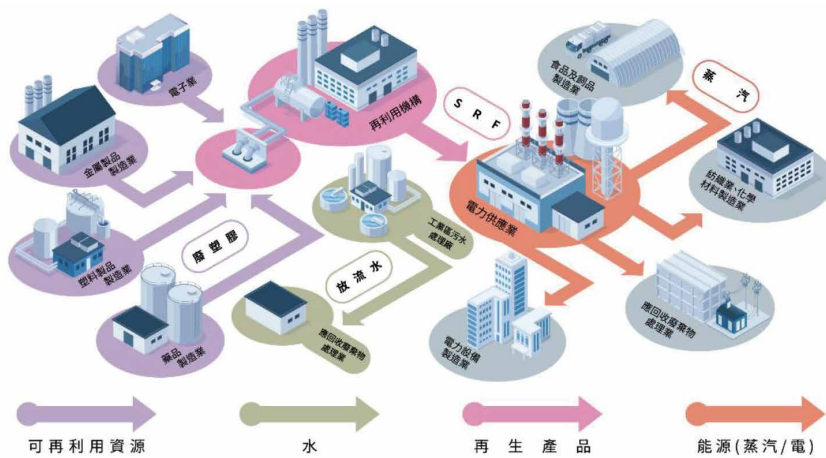


圖 3 官田產業園區產業共生規劃示意圖

三、技術研發—提升能資源循環技術能量

臺灣在缺乏天然資源的壓力下，產業以循環經濟為基礎的發展策略有其必要性。促進產業落實能資源循環利用，若在技術可行的前提下，透過產業間互相媒合即可促成；但若遇到技術尚未成熟的資源項目，則必須結合學研單位開發相應的循環技術，才能將廢棄物高值、高效的再利用。

3.1 促進創新循環技術研發機制

相較於先進國家再利用產業，國內再利用廠商多屬中小型企業，無論人力及資金等規模相對較小，技術開發前期所需投入的資源對企業而言是不小的負擔。因此，在開發新技術的育成階段，需要政府單位提供資金協助等配套措施襄助創建超越目前產業技術水平的循環利用產業鏈。

為了鼓勵企業自主提升產業競爭力，並弭平資源循環技術缺口，促進創新循環技術研發的機制，乃透過盤點現有廢棄物循環產業鏈，發掘具市場需求及技術研發潛力的資源循環項目，媒合企業與學界合作技術開發，並促成廠商透過經濟部轄下相關局處單位設立之多元補助計畫，申請相關補助減輕財政壓力。

3.2 推動案例：鋰電池正極材料回收再利用

在全球節能減碳趨勢推動下，電動運輸工具成為主流發展方向，帶動鋰電池市場蓬勃發展，一方面市場對鋰電池的原物料需求大幅增加，另一方面則須建立廢棄鋰電池的回收再利用系統，減緩廢棄鋰電池對環境造成的衝擊。

綜觀國內鋰電池產業從上中下游包含原料供給、製程模組至應用產業都具有一定的能量，但缺乏將回收鋰電池材料再生技術開發技術，僅以物理拆解、破碎等方式，回收塑膠外殼等資源物，含有價金屬的正負極混合粉體大部分輸出國外，正、負極材料之自主供應比重低於 30%，導致國內鋰電池循環產生斷鏈的情況。

目前國內已開始整合電池產業之循環供應鏈體系，以充分運用國內現有鋰電池回收原料，並進行有價金屬回收智能檢測技術與材料再生技術開發，惟尚未建構完整的鋰電池正極材料相關產業鏈，故上游關鍵材料（正極材料）之自主掌握程度將成為國內廠商發展二次鋰電池最迫切之需求。

因此產發署輔導國內動力鋰電池正極材料回收業者投入研發活動，促成建構廢動力鋰電池（磷酸鋰鐵電池、三元鋰電池）拆解粉碎前處理及材料提純回收（正極材料前驅體原物料）之循環供應鏈。在與國立臺北科技大學、朝陽科技大學合作之下，逐

步進行小型實驗室技術開發、小模廠測試等前期研究，接著在產發署產創平台研發補助支持下，展開更具規模的技術研發工作。未來將輔導再利用業者與上游車廠及下游鋰電池原料製造廠對接，透過相關認驗證之後，將可逐步形成鋰電池封閉式循環供應鏈（圖 4）。

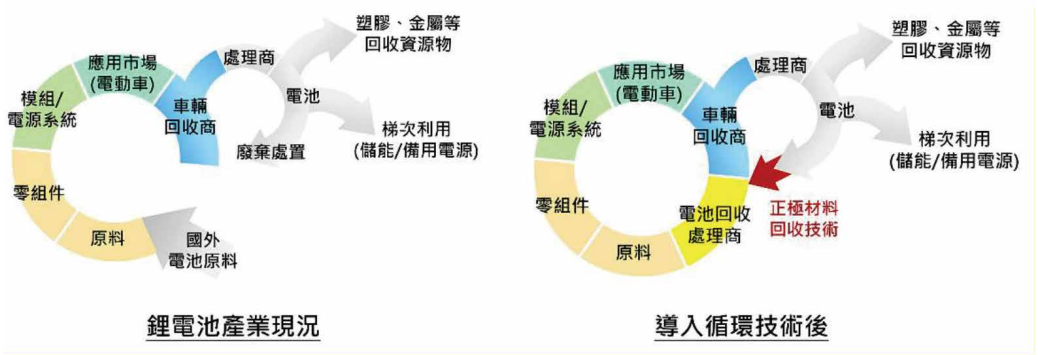


圖 4 鋰電池封閉式循環供應鏈

四、市場鏈結—建構循環供應鏈對接機制

循環供應鏈（Circular Supply Chain）係指產品及資源可在整個經濟體系內，不斷地循環使用。相對於線性供應鏈的運作模式，循環供應鏈更強調產業上中下游的溝通與合作，促進更充足的資訊分享與更透明的規則制定環境，以提供市場更優質的產品與服務。建構健全的全球循環供應鏈網絡，有賴各國政府、品牌商、供應商、消費者及非營利組織共同協力完成。

臺灣長久以來為國際品牌製造與供應基地，當品牌大廠紛紛轉變為循環採購模式之際，對供應鏈形成強大壓力；然而，臺灣廠商向以敏捷與彈性聞名，憑藉著長期累積的製造與研發實力，全球供應鏈綠化潮流對臺灣廠商而言，是威脅也是機會。

4.1 循環供應鏈媒合機制

臺灣已建置成熟的循環回收體系與運作管理制度，可將製造業產生之事業廢棄物轉化為再生塑膠、再生金屬、再生燃料、再生溶劑等超過 230 種的再生產品，作為各

行各業的替代原料或燃料，進而滿足國際品牌大廠之採購需求。然而再生物料採購流程的複雜度相當高，且涉及回收法規、技術與認證等議題，與品牌商合作需長時間互動建立互信關係，我國資源循環產業大多屬中小企業，缺少與品牌商建立互動的管道。

因此，產發署建構「循環供應鏈媒合機制」（圖 5），透過品牌採購的深度調研，提供可靠的循環物料供應商清單、政府與產業脈動資訊等，得以在掌握品牌商在台開發計畫及採購需求，實質協助品牌商相關負責人之業務推進，並與臺灣廠商建立互信互助之循環供應鏈（經濟部工業局、歐洲在台商務協會，2021）。

1. 第 0 階段：破冰

有鑑於新產品開發與物料採購多屬品牌商之機密資訊，建立高度互信是取得相關訊息的重要關鍵。產發署計畫執行團隊介紹國內供應鏈量能與對接機制和流程，除透過外國在台商會協助引介國際品牌之對口單位，另由計畫執行團隊主動出擊接觸品牌商，或是品牌商主動向產發署提出需求

2. 第 1 階段：調查品牌需求

從需求端，確認產品與物料需求，以增進對接精準度。計畫執行團隊針對品牌商循環採購需求進行訪調，對象包括採購或產品設計負責人，雙方針對品項訂立合作排序，並視品牌商需求簽署保密協議等。

3. 第 2 階段：搜尋供應商夥伴

從供應端，確認供應商之量能與意願，以強化對接品質。計畫執行團隊自循環物料追蹤資料庫，篩選潛在對接供應商，並確認其生產量能、再生物料品質等相關資訊，確認其交流意願；最後，提供潛在合作供應商清單予品牌商。

4. 第 3 階段：供需雙方對接

從供需雙方角度，營造友善、信任、高效的交流環境，以增進對接成功率。由品牌商選擇對接對象，並由計畫執行團隊協助辦理交流會議，形式包括：「一對一」、「一對多」、「多對多」等線上或實體交流會議。

5. 第 4 階段：持續推進合作

計畫執行團隊於第 3 階段後將擔任中立第三方角色，除促成雙方洽簽合作意向書，並提供雙方回收相關法規諮詢、綠色升級輔導，及協助申請政府補助資源等；最後，進行後續的商機追蹤。



圖片來源：邁向韌性之路：台歐循環供應鏈主題報告，2021。

圖 5 循環供應鏈媒合機制

4.2 推動案例：循環紡織—布到布全循環

歐盟以「歐洲綠色政綱」為基礎於 2020 年修訂循環經濟行動計畫（Circular Economy Action Plan, CEAP）中，將紡織業定為重點關注部門及優先管理對象，此措施促使紡織業大廠，包含 IKEA、ZARA、H&M 等，提出相關環保訴求。其中，IKEA（宜家家居）為了盡快達到碳中和、零廢棄物與循環經濟，預計於 2030 完全轉型為循環商業模式並達成零廢棄物，因此建立循環供應鏈及尋找合適的供應商成為優先推動事項，並透過歐洲在台商會的引薦，進行建構循環供應鏈合作。

臺灣廠商為全球紡織供應鏈的創新研發推手，在 PET 全循環表現尤其出色，積極布局物理及化學回收技術，並導入 ICT 智慧分選程序，解決廢衣回收問題。因此，透過「循環供應鏈媒合機制」，將 IKEA 零售端廢棄窗簾布，串接多個臺灣廠商，將廢棄窗簾布再生成新布。

IKEA 布到布全循環專案參與企業包含國際品牌商 IKEA，以及臺灣紡織業代表性廠商遠東新世紀及鎰呈行。布到布再利用步驟包含將廢棄窗簾收集分類、熔融、造粒、紡紗、織布、染整、成為再生布料。當中 IKEA 角色為將零售店即期品進行蒐集及分類，以及將再生布料重新循環為新品，實現「IKEA to IKEA」封閉式循環模式；遠東新世紀提供布到布回收技術 TOPGREEN® rTEX，以廢棄聚酯紡織品經過粉碎、熔融造粒、抽絲及假撚加工製成回收纖維；而鎰呈行則在專案中擔任整合角色，與供應鏈夥伴協作克服再生材料於後端織布、上色等製造技術問題，以廢布回收再製產出新品。

本專案推動歷時 2 年，經過 30 次以上會議溝通，方達成 IKEA 循環紡織合作。依據「循環供應鏈媒合機制」將本專案各階段面臨之推動障礙與因應策略彙整於表 2，以供未來推動參考。

表 2 IKEA 布到布專案各階段推動障礙與因應策略

階段說明	Stage 0 破冰	Stage 1 調查品牌需求	Stage 2 搜尋供應商夥伴	Stage 3 供需雙方對接	Stage 4 持續推進合作
面臨的障礙	涉及 IKEA 多個部門，需各自水平溝通，並獲總部同意才可執行。	針對目標項目廢棄窗簾產品，政府無明確規範銷售端產生的不良品之再利用辦法。	針對欲再利用資源，部分回收技術未臻成熟。	預計產製的再利用最終產品，須符合 IKEA 企業識別需求(最終產品符合 IKEA 產品重新設計理念，以及顧客接受程度)。	—
因應策略	IKEA 有明確的循環目標、且落實至各專案負責人的年度工作目標，透過與循環目標結合取得全體支持。	由計畫團隊諮詢環境部，掌握國內相關法令規範，確認符合再利用規範。	1. 透過循環物料追蹤資料庫，挑選符合品牌商期待之再利用技術。 2. 篩選潛在對接供應商，確認供應商具備量能及意願。	1. 供應鏈與 IKEA 行銷部門多次溝通最佳產品設計。 2. IKEA 行銷部門協助規劃作為門市會員滿額禮。	持續協助 IKEA 推進其他廢棄物循環專案。

五、未來展望

落實產業共生核心為「共同合作」，包括產、官、學、研之間從環境建構、技術研發、市場鏈結等不同面向的各種合作，而產發署從中扮演牽引的角色，已初步建立各面向推動機制，使產業間循環的能量不斷擴散。

經由 8 座循環示範輔導園區的推動，現已建立透過循環園區評估指標發掘產業園區具循環精進潛力項目，再利用虛實整合輔導方式輔導改善的既有產業園區循環轉型推動機制，促成多種不同型態的共生模式與案例。由於我國產業園區眾多且產業組成型態與面臨之永續發展議題各不相同，後續將透過研修精進循環園區評估指標，將既有產業園區依據特色分群，擬定重點推動策略，以將循環園區的推動機制擴大到所有產業園區，協助其他產業園區的廠商形成共生的合作模式，展現各自循環特色並解決產業園區面臨問題。

技術研發是推進產業共生與循環經濟發展的核心能力。從現有廢棄物循環產業鏈發掘具市場需求及技術研發潛力的資源循環項目，媒合產學合作技術開發，並透過申請政府補助計畫取得經費支持，為促進創新循環技術研發的推動機制。我國能資源循環產業發展蓬勃，未來應持續關注國際趨勢，找到具發展性的循環技術缺口建構國內循環供應鏈，並強化提升循環技術與市場對接應用，將可進一步提升整體能資源循環產業競爭力與產業共生的發展。

有了環境與技術作為基礎，仍須有市場的使用與支持，循環經濟與產業共生的系統才能永續運作。經由循環供應鏈媒合機制，將品牌商採購需求與國內再生料供應商串聯，協助國內業者打入國際供應鏈市場，並在市場的趨動力之下，促使業者往循環經濟方向靠攏。未來在既有循環供應鏈媒合機制下，除了回收量能擴大與技術研發累積外，加強進行產品國際認證，將是深化與國際市場的連結的推動方向。

面對天然資源枯竭與氣候變遷危機，循環經濟創造出資源能夠再生或持續循環利用的經濟系統，為達成淨零排放不可或缺的一環。臺灣的製造業在全球占有重要角色，而製造業落實循環經濟必須以產業共生為核心。感謝產發署委辦「促進能資源整合與產業共生計畫」推動相關工作，協助產業園區逐步整合區域內 / 外產業餘裕之能源與

資源，搭配創新技術與商業模式，以最少的能資源使用創造最大的經濟效益，降低環境衝擊與負荷，以達成產業永續發展的轉型。

參考文獻

國家發展委員會（2022），臺灣 2050 淨零排放路徑及策略總說明，p19-22。

張嘉真、黃欣栩（2019），生態化工業區循環經濟評估指標初探，中興工程，第 143 期，p47-55。

張嘉真、黃欣栩、施顏祥、陳良棟、朱敬平（2021），國際間能資源整合趨勢，永續產業發展期刊，第 90 期，p3-13。

黃育徵（2017），循環經濟，天下雜誌股份有限公司，p34-49。

循環臺灣基金會（2019），邁向循環臺灣－循環經濟實踐案例，循環臺灣基金會，p21。

經濟部（2018），循環經濟推動方案，第 19-22 頁。

經濟部工業局（2019），全國循環專區試點示範推動計畫，108 年度期末報告。

經濟部工業局（2021），促進能資源整合與產業共生計畫，110 年度期末報告。

經濟部工業局（2022），促進能資源整合與產業共生計畫，111 年度期末報告。

經濟部工業局、歐洲在台商務協會（2021），邁向韌性之路：台歐循環供應鏈主題報告，經濟部工業局。

Ellen MacArthur Foundation, EMF（2021），Completing the Picture: How the Circular Economy Tackles Climate Change reveals the need for a fundamental shift in the global approach to cutting emissions.

European Commission（2020），A new Circular Economy Action Plan- For a cleaner and more competitive Europe.

Federal Office for the Environment, FOEN（2014），International survey on eco-innovation parks Learning from experiences on the spatial dimension of eco-innovation.

UNIDO（2017），Implementation handbook for eco-industrial park, p12-13.

廢(污)水處理類

零液體排放之技術應用與發展

李岳陽*、范振軒**、許國恩***、侯嘉洪****

摘 要

在臺灣水資源短缺的情況下，零液體排放（Zero Liquid Discharge, ZLD）技術可達到水資源的最大利用，減少具污染風險的廢水體積。目前常見零液體排放技術以逆滲透設備由廢水中提取淨水，剩餘濃縮水引入加熱濃縮設備蒸發回收淨水，最後於結晶器中結晶。在不排放廢水的同時，零液體排放技術產出的淨水可全數再利用，固體結晶則可回收有價成份或委外處理。

現今，結合薄膜及電化學之水處理方式，可降低零液體排放技術之建置及運轉成本。如薄膜電容去離子技術，以低操作電壓、高產水率達到低能耗的淨水與濃縮效果；而薄膜蒸餾技術，則利用膜兩側溫度差，使廢水中的水分以水蒸氣的形式與其他污染物分離。隨著技術發展，零液體排放更具普及於業界的潛力，進一步提升水資源的利用效率。

【關鍵字】零液體排放（ZLD）、水回收、廢水濃縮技術、資源再生

*	國立臺灣大學環境工程學研究所	碩士生
**	水科技與低碳永續創新研發中心	博士兼副執行長
***	財團法人中興工程顧問社	高級研究員
****	國立臺灣大學環境工程學研究所	教授
*****	水科技與低碳永續創新研發中心	執行長

一、前言

臺灣為降雨量豐沛的海洋島嶼，然而，近年來的極端氣候致使豐枯水期之雨量差異增加，淡水資源的供給量受地區及季節而有極大不同。於此同時，水庫淤積、產業升級等多重因素，使缺水問題更加嚴重，因此推動節水及水回收再利用刻不容緩。

目前臺灣之廢污水回收產業中，針對工業廢水的回收，以分離技術將低污染之廠內用水（如洗滌塔、冷卻水等）或高價值廢水（如含金、銀等有價金屬廢水等）再處理後回收至製程重複使用。民生污水則在經過都市污水處理廠處理後，部份放流水經砂濾後，可作為環境景觀用水或其他生活次級用水等回收水使用，另有再經逆滲透法等薄膜處理技術之再生水，可供工業製程使用。

為更進一步減少水資源的消耗，零液體排放（Zero Liquid Discharge, ZLD）技術使用多道濃縮及分離程序，目標將水全數回收再利用，不再排放液態廢水，以減少廢水排放時對環境的衝擊，同時最大化水資源的利用效率。

現今較為成熟之零液體排放技術主要使用逆滲透設備先行濃縮廢水，再透過加熱濃縮設備將廢水加熱至沸點，以蒸發方式取出純水。隨著純水的提取，廢水中的物質濃度亦會逐漸升高。在其接近物質飽和濃度時，採用結晶設備產生固體結晶。其中，加熱濃縮設備所需能源龐大，建設及運行成本花費甚鉅，難以吸引業者採用，造成零液體排放技術於業界的普及率低。

隨著電化學及薄膜技術的進步，現已發展出多種低能耗方式濃縮廢水。藉由整合各濃縮技術之優點與適用濃度範圍，可取代以加熱蒸發方式濃縮廢水的程序。降低能源的使用及減少操作成本，增加業者投資零液體排放系統的誘因。

本文列舉零液體排放技術之優勢，介紹常見的零液體排放技術，並針對具有零液體排放特性之新興技術進一步討論。並探討各技術間之應用潛力及目前面臨的挑戰。

二、零液體排放之優勢

零液體排放技術擁有幾項優勢，如圖 1 所示，在臺灣水資源供給依季節變化存在風險，尤其近年氣候變遷造成梅雨、颱風降水減少，使得旱季更加延長，對於水資源的供給穩定更是一大隱患。在此情形下，建立零液體排放系統，使用廠內回用的再生水作為生產用水，可降低對於自來水或抽取地下水的依賴，並提升生產的穩定性及可靠度不受水資源供給情形影響。

零液體排放策略在節約用水的同時也完全避免廢水的排放，於工業區中之工廠，可減低廢水進入工業區污水處理廠所需之納管費用；非於工業區之工廠，除可減少水污費用外，也避免廢水排放時造成的污染影響周圍環境。若廢水中含有有價值之成份，也可利用濃縮技術加以收集回收，於達成零液體排放的同時也能促進循環經濟，減少資源之浪費。

國內之放流水標準近年來多次加嚴，對產業帶來巨大的壓力和挑戰，但這也是推動產業轉型的契機。為了達到新的排放標準，許多企業開始投資引入符合新規範的廢水處理設備。若能藉著產業升級之機會，建立零液體排放系統，即可一次性解決廢水排放問題。同時，隨著世界環保意識的抬頭，國外已有許多企業開始採用零液體排放之管理策略，來減少廢污水對當地環境的衝擊，提升企業環境保護及永續發展的形象。

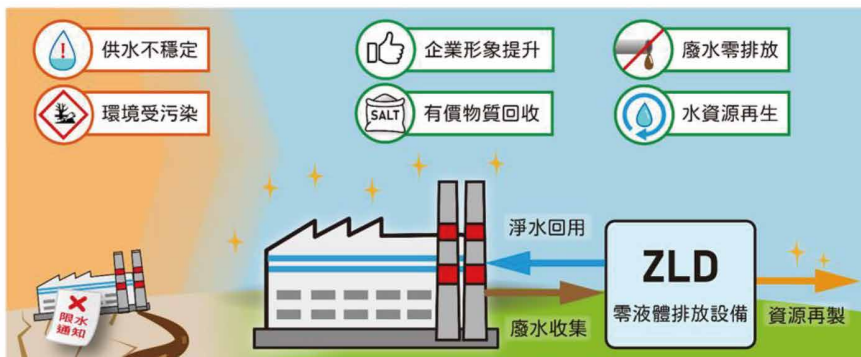


圖 1 零液體排放技術之優勢

三、傳統零液體排放處理方式

零液體排放技術先以濃縮單元提高水中各類成份，如鹽類離子、有機物、揮發性氣體等之濃度，再以分離技術分離。目前常用的濃縮方式有逆滲透濃縮及加熱濃縮，分離方式則使用結晶器分離晶體及溶液。數種目前使用的技術如下所示：

3.1 逆滲透 (Reverse Osmosis, RO)

逆滲透設備以泵浦提供高壓，強迫進流水中的水分由高濃度側穿透半透膜至低濃度側，達到濃縮之效果。隨著濃縮液之濃度增加，施加的壓力也必須增加，才可以驅使水分滲透過薄膜，因此薄膜最高能耐受的壓力為本方法中最重要的操作指標。在逆滲透系統中，因流體頻繁接觸薄膜表面，經常受到水中之鈣、鎂等離子沉積影響造成堵塞，導致濃縮效率降低，故進流水仍需進行軟化前處理或依靠在線清洗藥劑及抑垢劑以避免堵塞。受限於耐受壓力，逆滲透方法最高僅能使總溶解固體量達到至 75 g/L 左右 (Tong et al., 2016)，後續仍需更進一步濃縮，但因相較於加熱濃縮程序具有較低能耗之優勢約 3.7~8 kWh/m³ 出流水 (Al-Karaghoul et al., 2013)，因此作為熱處理之預濃縮步驟，可以降低運轉成本。

3.2 機械蒸氣再壓縮 (Mechanical Vapor Recompression, MVR)

機械蒸氣再壓縮設備為一高效率之加熱濃縮裝置。此裝置使用高溫高壓蒸氣透過薄管式或平板式熱交換器加熱進流水，使進流水汽化產生水蒸氣，此蒸氣經氣液分離後再經過壓縮機加壓產生高溫，作為前述加熱之熱源。收集濃縮後之殘餘液並泵送回至設備之進流水入口重新加熱使之內循環，可不斷提取廢水中之水分，水回收率可達到 90% 至 98%，並達到高度濃縮（約為 250 g/L）之效果，產出之淡水也相當於純水等級。因進行濃縮步驟涉及到相變化，所需之能耗較 RO 系統高，約為 28~39 kWh/m³ 出流水 (McGinnis et al., 2013)，但與其他同類型濃縮系統（如多級閃蒸、多效蒸發等）相比，MVR 系統具有能耗優勢，為零液體排放處理系統中常採用之濃縮設備。

3.3 結晶器 (Crystallizer)

結晶器可將固體及液體分離，為達成零液體排放過程中不可或缺的設備，結晶器將接近飽和濃度之進流廢水不斷在結晶器內循環，同時藉由加熱蒸發或降溫減低溶解度等方式，使溶液達到過飽和狀態，再於液體內添加晶種使結晶形成並於結晶器下方排出。單位能耗約為 52 至 66 kWh/m³ 出流水 (Tong et al., 2016)。因結晶器主要以高鹽、高溫之廢水作為進流溶液，且結晶形成時易造成堵塞，除了需要採用高單價之鈦金屬或不銹鋼作為熱交換器之材料，且經常需要維護。因此，於結晶設備之前處理過程必須儘可能的減少廢水體積與濃縮，降低設計結晶設備的處理量，以減少結晶器之設置及運轉成本。

四、新興濃縮技術

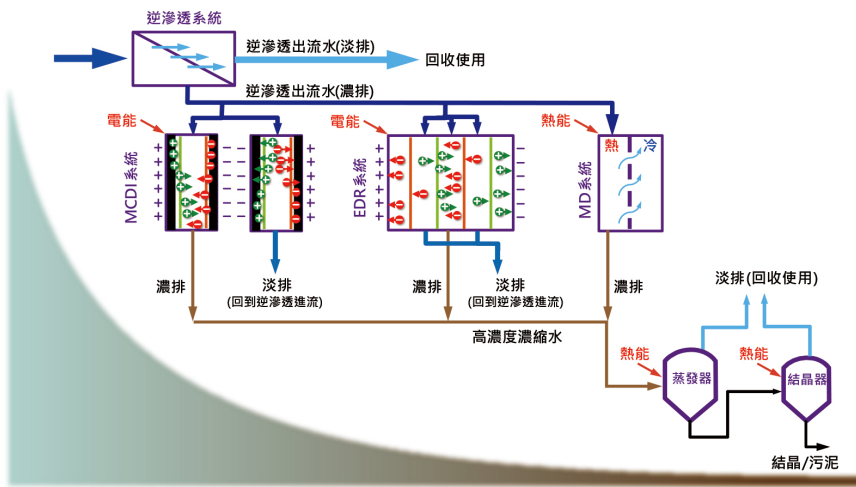


圖 2 結合新興濃縮技術之零液體排放系統

在現有零排放技術所需的能源中，供給廢水濃縮的驅動力所消耗的部份占相當大比例，運用的熱源也普遍需由燃料或電能轉換，操作所需之能源成本高昂。目前有數種新興濃縮技術具有低能耗、低成本特性，或可運用工廠內之低溫廢熱作為熱源。同時，因其可在較低的操作壓力、溫度下運行之特點，有助於減低設備相關零部件的購

置成本及耗損。

新興濃縮技術可取代傳統加熱濃縮設備，或縮小加熱濃縮設備所需的設計處理量。如圖 2 所示，數種新興濃縮之技術列舉如下：

4.1 薄膜電容去離子技術（Membrane Capacitive Deionization, MCDI）

薄膜電容去離子技術為一低能耗濃縮技術。此技術使用高比表面積之多孔性碳材作為電極（如碳氣凝膠、活性碳、奈米碳管等），再於兩側正負電極表面分別披覆陰離子交換膜與陽離子交換膜，2 個交換膜之間有一流道供水流通過，如圖 3 所示。脫鹽時於極板兩側施加直流電壓，促使水中離子受電場吸引，通過離子交換膜後被吸附於碳電極，產出淡水。離子交換膜可提升濃縮效果同時增加電流使用效率。脫鹽一段時間後，電極會達到吸附平衡，此時反轉電極極性，即可將所儲存之離子釋出，使出流濃度比原進流水高，產出濃縮水。藉由連續之吸、脫附過程，可將水中之離子富集，提升濃度並降低廢水體積。

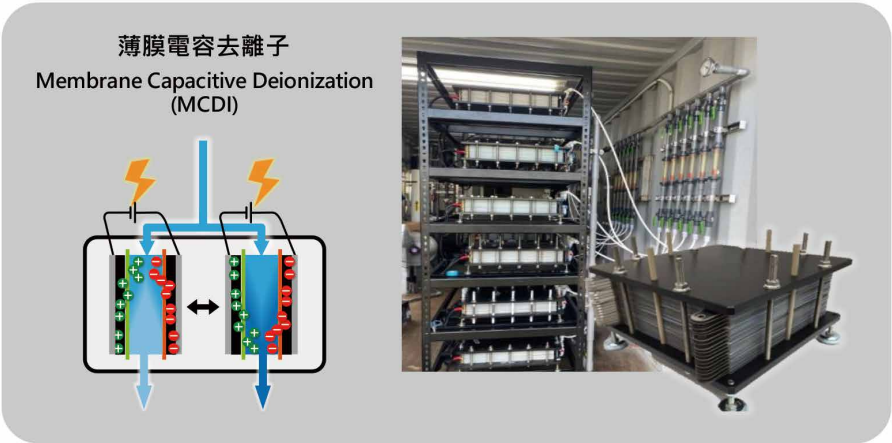


圖 3 薄膜電容去離子技術

因薄膜電容去離子技術施加的電壓位於 1.2 V~2.0 V 之間，具有高電流使用效率、高吸附容量、高產水率、再生程序無需化學添加等特性（Chen et al., 2022），在半鹽

水、低鹽度溶液的淡化程序中，操作所需之能源成本低於 RO 系統，約為 $0.1\sim 3 \text{ kWh/m}^3$ 。在低初始鹽度之廢水中設置 MCDI 裝置，可以減少 RO 設備之負荷，減低能源消耗。

4.2 倒極式電透析 (Electrodialysis Reversal, EDR)

倒極式電透析以電場驅動水中帶電離子之提濃，為一低能耗之濃縮技術。在電透析模組中，兩側電極板中間交錯放置陽離子交換膜及陰離子交換膜，進流水則於各膜間之流道流動，如圖 4 所示。施以直流電壓於兩電極板間，可使得進流水中之離子受電極板吸引，依照其電性通過離子交換膜，則可將出流水分為濃、淡兩股水流，達到濃縮分離水中帶電離子之效果。倒極式電透析系統會在運作期間定時反轉極板電性，使得離子流動方向改變，以減少膜表面之堵塞、避免結垢問題產生。

倒極式電透析技術能將濃水之鹽度提升至 100 g/L (Oren et al., 2010)，因其不涉及溫度變化及相變化，電能消耗僅 MVR 的 $1/3$ ，約 $7\sim 15 \text{ kWh/m}^3$ 出流水 (Korngold et al., 2009, Loganathan et al., 2015)，可作為替代 MVR 之濃縮設備，適用於含有大量鹽類離子的廢水。

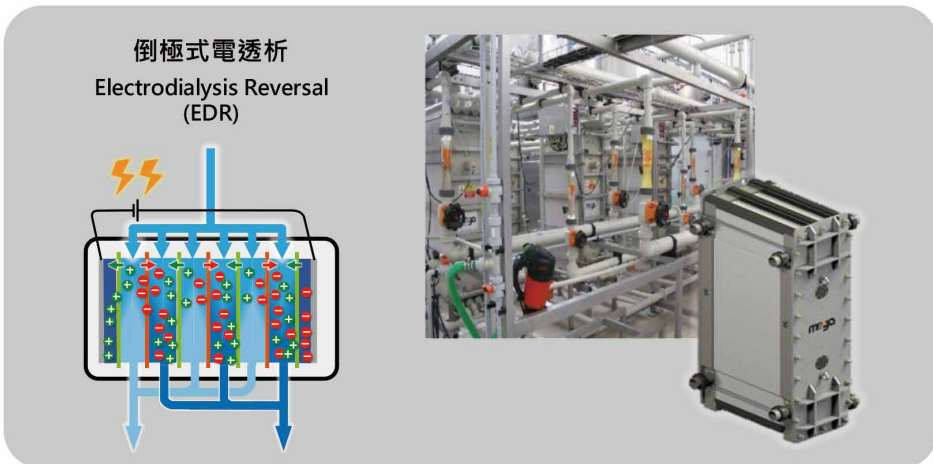


圖 4 倒極式電透析技術 (Novasep, 2023)

4.3 薄膜蒸餾 (Membrane Distillation, MD)

薄膜蒸餾設備為一新興的薄膜濃縮技術。進流水流經薄膜蒸餾設備中多孔性疏水薄膜之高溫原水側，而低溫淨水側則通以冷水或抽取真空、空氣掃流等方式，使得薄膜兩側產生蒸氣壓差，如圖 5 所示。此時進流水中因溫差所產生之水蒸氣會穿透薄膜，並於低溫淨水側達到冷凝與淡水回收。而高溫原水側之廢水則被濃縮，產出高濃度之出流水。由於廢水之流動方向與薄膜平行，因此具有低結垢潛勢的特點。

薄膜蒸餾法可產出最高 200 g/L 濃水 (Tong et al., 2016)，但不適用於具有揮發性物質或界面活性劑的廢水。此方法之能耗雖與前述之蒸氣再壓縮濃縮器相近，約為 22~67 kWh/m³ 出流水 (Meindersma et al., 2006)，但因操作溫度不需達到液體之沸點，因此即使是工廠產生的廢熱、使用過之蒸氣都可作為薄膜蒸餾的熱能來源，因此適合產生廢熱且具水處理需求之產業採用。

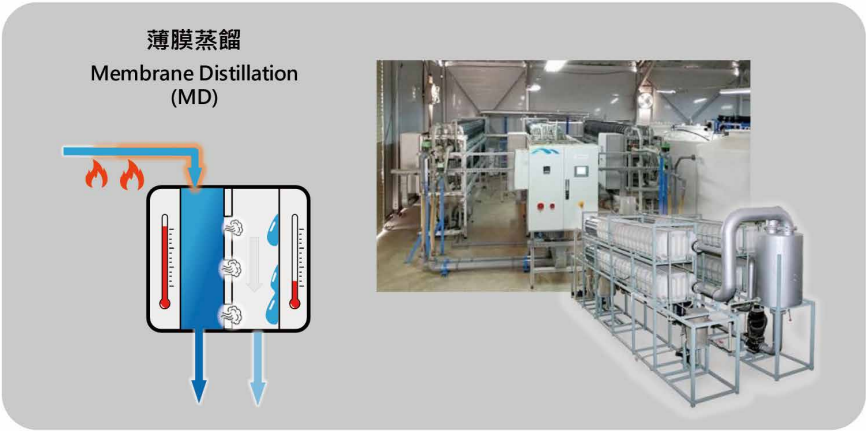


圖 5 薄膜蒸餾技術 (Memsys, 2023)

五、有價資源之循環再生

零液體排放系統將目標廢水不斷地濃縮，直到所有水分都被回用，僅剩餘固體結晶為止。在此過程中，水中各成份濃度皆被提升，有助於提升回收有價金屬時的效率。

例如化學沉澱法在低濃度時，需添加大量藥劑並產生多餘低純度污泥；而濃縮後之廢水進行化學沉澱，產生出的污泥純度及價值則可獲得提升。

因此，在零液體排放流程中增設適當之回收裝置，如選擇性離子交換樹脂或化學沉澱（Bello et al., 2021），可以回收廢水中的有價金屬，如鎳、銅等，從而在實現零液體排放的同時創造更大的效益。另外，在結晶設備產出的鈉鹽、鉀鹽、鈣鹽等結晶，也具有循環再利用的價值，實現資源最大化的利用，減低對有價金屬等稀有資源的需求，降低對環境的負擔。

六、零液體排放之挑戰與展望

各項濃縮技術之進步使零液體排放所需的能源成本降低。如圖 6 及表 1 所示，可依照廢水之水質情形、鹽類濃度及能源供給條件，進而整合多項濃縮技術的最適宜操作範圍，以最少的能源達到最佳之濃縮效果。

然而，達到零液體排放所需之能耗仍相當可觀，為了避免因採用零排放技術而增加的能源消耗導致溫室氣體排放量上升，結合再生能源操作並減少對傳統能源的依賴，可避免造成環境的負面影響。此外，利用離峰用電或供電充裕的時段操作，也是降低能源成本及對電網負荷的方法。

臺灣目前已有數家採用零液體排放技術之業者，如桃園市友達光電龍潭廠於 2016 年開始採用零液體排放技術，現已藉由 RO、EDR 及熱蒸發等技術達成每日 18,000 噸廢水全數回收（友達光電，2023）。而彰化縣及臺南市的 2 座新設工業區則承諾未來達成零液體排放（朱敬平等，2017），可見政府對於零液體排放之重視，以及業者於零排放領域所投入之成果。

未來各項濃縮技術將繼續隨著技術之發展與推廣應用而降低達成零液體排放所需的成本。同時，世界對於水資源之重視也勢將日益提升，因此零液體排放將會成為全球趨勢。

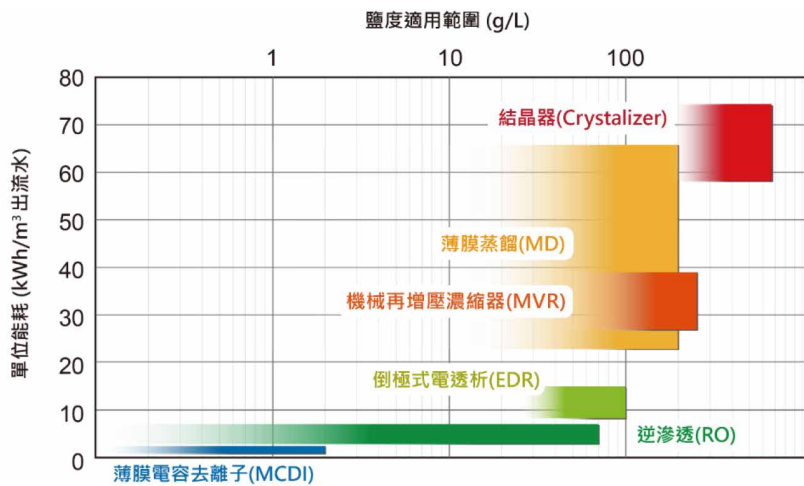


圖 6 各濃縮技術能耗及鹽度適用範圍

表 1 各項濃縮技術之比較

技術	原理	能耗 (kWh/m ³ 淡水產出)	優點	缺點
MCDI	電場驅動力 電吸附	0.1~3	• 操作電壓低，能耗低，高產水率 • 掃流式流道較不易污堵 • 模組化設計	• 只能處理帶電物質 • 可達到的最高濃度較低
RO	滲透壓差	3.7~8	• 技術成熟 • 模組化設計	• 膜孔易結垢或堵塞使產量降低 • 僅能濃縮至 75 g/L
EDR	電場驅動力	7~15	• 可濃縮至 100 g/L • 極板電性定時交換可減少膜表面結垢 • 模組化設計	• 只能處理帶電物質 • 高壓電流會產生不必要副產物。
MD	蒸氣壓差	22~67	• 可濃縮至 200 g/L • 產水可達純水等級 • 可運用廢熱作為熱能 • 模組化設計可擴充	• 低產水速率 • 無法阻擋揮發性污染物
MVR	加熱蒸發	28~39	• 可濃縮至 250 g/L • 技術成熟 • 產水可達純水等級	• 造價及操作成本高 • 非模組化設計不易擴充

(資料來源：Cheng et al, 2022、Al-Karaghoulı et al., 2013、Loganathan et al., 2015、Meindersma et al., 2006、McGinnis et al., 2013)

七、結語

零液體排放系統具有完全避免廢水排放、可最大限度減少了淡水資源的使用量、提升企業形象、符合國際趨勢等優點。隨著設置及營運成本逐漸降低，政府與學界、產業界應藉此機會共同努力，輔導業者共同發展新的零液體排放技術，實現零液體排放的目標，維持水體健康，緩解目前臺灣淡水資源不足的困境，同時促進循環經濟，建立永續發展的可能性。

參考文獻

朱敬平 (2017)，廢水零排放產業現行推動概況，永續發展期刊，第 79 期，p 34-44。

友達光電 (2023)，水資源管理，<https://csr.auo.com/tw/environment/cycle/water>。

Al-Karaghoul A., and Kazmerski L. L. (2013), Energy consumption and water production cost of conventional and renewable-energy-powered desalination processes, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24, p 343-356.

Bello A. S., Zouari N., Da'ana D. A., Hahladakis J. N., and Al-Ghouti, M. A. (2021), An overview of brine management: Emerging desalination technologies, life cycle assessment, and metal recovery methodologies, *Journal of Environmental Management*, 288, 112358.

Chen T. H., Yeh K. H., Lin C. F., Lee M., and Hou C. H. (2022), Technological and economic perspectives of membrane capacitive deionization (MCDI) systems in high-tech industries: From tap water purification to wastewater reclamation for water sustainability, *Resources, Conservation and Recycling*, 177, 106012.

Cheng C. Y., Chen T. H., Chen K. Y., Ma J., Hou C. H. (2022), Redox-flow battery with four-channel architecture for continuous and efficient desalination over a wide salinity working range, *Desalination*, 534, 115783.

Korngold E., Aronov L., and Daltrophe N. (2009), *Electrodialysis of brine solutions*

- discharged from an RO plant, *Desalination*, 242(1-3), p 215-227.
- Loganathan K., Chelme-Ayala P., and El-Din M. G. (2015). Treatment of basal water using a hybrid electrodialysis reversal–reverse osmosis system combined with a low-temperature crystallizer for near-zero liquid discharge. *Desalination*, 363, p 92-98.
- McGinnis R. L., Hancock N. T., Nowosielski-Slepowron M. S., and McGurgan G. D. (2013), Pilot demonstration of the NH₃/CO₂ forward osmosis desalination process on high salinity brines, *Desalination*, 312, p 67-74.
- Meindersma G. W., Guijt C. M., and De Haan A. B. (2006), *Desalination and water recycling by air gap membrane distillation*, *Desalination*, 187(1-3), p 291-301.
- Novasep (2023), Industrial electrodialysis, <https://www.novasep.com/process-solutions/from-unit-operations-to-process-lines/industrial-electrodialysis-technology.html>
- Oren Y., Korngold E., Daltrophe N., Messalem R., Volkman Y., Aronov L., Weismann M., Bouriakov N., Glueckstern P., and Gilron J. (2010). Pilot studies on high recovery BWRO-EDR for near zero liquid discharge approach, *Desalination*, 261(3), p 321-330.
- Memsys Water Technonogies GmbH (2023), Products, <https://www.memsys.eu/products.html>
- Tong T., and Elimelech M. (2016) The global rise of zero liquid discharge for wastewater management: drivers, technologies, and future directions, *Environmental science & technology*, 50(13), p 6846-6855.

廢(污)水處理類

臺灣污水處理廠塑膠微粒之調查分析

顏佑庭*、游勝傑**、王雅玢***、謝炎恭****

摘 要

本研究於臺灣 6 間污水處理廠分析以了解塑膠微粒豐度及特性。根據分析結果及塑膠微粒多樣性指數與相關性分析以了解季節性影響及地區性差異。塑膠微粒豐度範圍為 17.6~136 個 / 公升 (n/L)，類型主要以碎片與纖維為主，白色為主要顏色，且白色塑膠微粒與纖維塑膠微粒具顯著相關，尺寸則以 500~5,000 μm 為主。塑膠微粒多樣性指數結果顯示，桃園北區水資源回收中心於夏季進流水有較複雜之特性組成，墾丁污水處理廠則於冬季進流水具較複雜之特性組成，龜山水資源回收中心因處理紡織業廢水使進流水塑膠微粒組成較為單一。相關性分析結果顯示，影響因子對塑膠微粒豐度影響程度由大至小為人均 GDP、人口、氣溫與降雨量；季節影響性分析，北部污水處理廠因冬季氣溫影響使冬季塑膠微粒豐度較高，其豐度差異分別為 109n/L、34.0n/L、1.3n/L 與 48.0n/L；南部墾丁污水處理廠因溫差變化不明顯且夏季用水量較高導致夏季塑膠微粒豐度較高，其豐度差異為 16.9n/L 與 13.4n/L。塑膠微粒豐度會隨污水處理廠日處理量增加而越高；於城市類型差異性分析中，污水處理廠所在區域 GDP 越高、人口越高，塑膠微粒污染風險越高，導致塑膠微粒豐度水平提升。於北部與南部污水處理廠之差異性分析顯示，臺灣北部與南部因氣候型態差異使塑膠微粒於不同季節呈現不同豐度水平。於旅遊區域差異性分析中，旅遊人口越高，塑膠微粒豐度將越高。

【關鍵字】塑膠微粒、污水處理廠、相關性分析、季節性影響、旅遊區域

*	中原大學環境工程學系	研究生
**	中原大學環境工程學系	教授
***	中原大學環境工程學系	教授
****	國家海洋研究院海洋生態及保育研究中心	助理研究員

一、前言

1.1 塑膠微粒

自工業時代發展以來，石油工業蓬勃發展，其中以石油為主要成分之塑膠被開發以來被各界廣泛應用。塑膠係由多種複合原料製成，因其具有低成本、耐用性和強度之特性被廣泛應用於各種產業，包括汽車工業、建築業、製造業、醫藥產業、航空業、包裝業及農業等。據統計，全球每年約製造與消費使用超過 3 億噸之塑膠，其中約有 10% 之塑膠廢棄物會經各種渠道最終進入海洋環境中，占有海洋廢棄物之 60~80 % (Kaposi et al., 2014)。

遭丟棄之塑膠製品因各種途徑遭破壞分解後，會變成非常細小的塑膠粒子，進而演變成對環境造成威脅的塑膠微粒。塑膠微粒 (MPs) 係粒徑小於 5 mm 之新興污染物，已在環境中被大量發現及檢測 (McCormick et al. 2014)，可分為初級塑膠微粒與次級塑膠微粒。

初級塑膠微粒係指其初始粒徑小於 5 mm 之塑膠微粒，如樹脂顆粒、研磨清潔劑之工業，以及被利用於家用以及洗沐用品或化妝品工業之塑膠柔珠；次級塑膠微粒則為物理作用與化學作用等使大型塑膠破碎形成塑膠碎片，抑或是風、浪等作用及紫外線熱輻射所降解而成之塑膠微粒，這些破碎行為可能會發生在製造與使用紡織品、油漆和輪胎等過程中被釋放至環境中，目前已在許多環境都可檢測出初級與次級塑膠微粒之存在，其被認為是造成環境污染和對生物產生危害之新興污染物。

此外，現今有超過 60 % 之紡織品使用聚酯纖維等塑膠產品製造而成，這些紡織品在洗滌過程中將會產生大量塑膠纖維，在每次洗滌過程中，每件衣物可能釋放出多達 1,900 條纖維，每克紡織品中釋放的纖維重量可達 0.1 mg，這相當於每次洗滌過程中約有 0.01 % 的洗滌材料損失，這些塑膠纖維將會經污水下水道進入污水處理廠。

迄今為止，過去大部分研究都集中於檢測海水、陸地環境及淡水中之塑膠微粒 (Hu et al. 2019)；作為塑膠微粒途徑之一的污水處理廠，係有其必要性調查與分析污水處理廠中之塑膠微粒，目前在國外污水處理廠被發現塑膠微粒已被分類為 5 種形

狀，分別為顆粒（小顆硬塊塑膠、球狀珠子、柔珠）、薄膜（非常薄之片狀塑膠）、發泡（海綿狀物質）、碎片（小型破碎塑膠）以及纖維（紡織品材質）。

1.2 塑膠微粒特性

塑膠微粒之物理特性包括其大小、密度、顏色、形狀，通常會使用顯微鏡目視研究分析，這些特性會對塑膠微粒在環境中之行為及對生物的危害程度產生重大影響（Chen et al. 2021）。

由於塑膠微粒之體積很小，其巨大之比表面積使其具有更多從環境中吸附重金屬物質、親水性和疏水性有機污染物之能力；其對於有機污染物之吸附行為已在世界上被確立，包括多環芳香烴（PAHs）、多氯聯苯（PCB）、二氯二苯三氯乙烷（DDTs）、六氯環己烷（HCHs）、有機磷酸酯（OPEs）、多溴二苯醚（PBDEs），雙酚類化合物等。其吸附行為會受到許多變因影響，如污染物之競爭以及水生生態環境之複雜性，其中鹽度、溫度、pH 值和離子強度等外部變因都可能會產生塑膠微粒吸附作用之影響。

此外，塑膠本身顆粒結晶度與粒徑等聚合物之特性也可能會影響塑膠微粒之吸附行為。除了吸附污染物外，塑膠之聚合物合成中還使用了數十種添加劑，如塑化劑、阻燃劑、抗氧化劑和色素等，這些用於製造塑膠的添加劑會隨著許多途徑轉移至塑膠表面上。以塑膠微粒作為載體進入環境之食物鏈轉移這些污染物，會對環境中之生物與人類產生健康危害風險（Liu et al., 2021）。

1.3 塑膠微粒健康危害風險

目前塑膠微粒在全球已經在許多海洋生物個體中被發現，有許多研究都顯示塑膠微粒對海洋生物之毒性影響，如海膽、貝類、螃蟹，以及魚類（Kaposi et al., 2014）等，均會對生物產生毒性影響。其主要之毒性機制為塑膠製品中之添加劑，以及因其巨大比表面積之吸附作用使塑膠微粒能夠吸附環境當中之重金屬、化合物以及有機污染物等（Liu et al, 2021）。

目前已有研究證實，塑膠微粒會造成從無脊椎動物到魚類之各種生物物種產生有害之影響；其對於生物之健康危害影響主要有物理損傷，小型無脊椎動物或浮游生物誤食塑膠微粒後，會造成體內器官堵塞以及損傷體內細胞組織，有研究顯示食入如聚乙烯（PE）、聚丙烯（PP）、聚苯乙烯（PS）、聚酰胺（PA）和聚氯乙烯（PVC）等聚合物造成斑馬魚與底棲動物腺蟲之腸道絨毛開裂以及腸細胞分裂，以及造成金頭鯛肝臟損傷（Capo et al., 2021）。

1.4 污水處理廠之塑膠微粒

縱使現今大部分污水處理廠之去除率都能達到良好效果，但若無法量化其每日進流之塑膠微粒，將無法了解有多少塑膠微粒會被排放至環境當中，這些數據將影響塑膠微粒對該地區所產生之健康危害風險程度，以及對於該地區之環境產生污染。

目前全球不同地區之污水處理廠進流水中之塑膠微粒豐度（Microplastic Abundances），從 0.28 n/L 到 31,400 n/L 不等；放流水的豐度則為 0.01 到 297 n/L，每天約有 5×10^5 至 1.39×10^{10} 個塑膠微粒由污水處理廠排入水生環境當中（Liu et al., 2021），造成此巨大差異可能與研究中採用不同之採樣方法、前處理程序、樣品分析方式不同有關。

Üstün 等人針對土耳其布爾薩之污水處理廠調查，於該污水處理廠之進流水、放流水及其污泥採樣，結果顯示其進流水豐度平均為 135.3 ± 28.0 n/L，放流水之平均豐度為 8.5 ± 4.7 n/L，平均塑膠微粒去除率為 93.7 %；經過計算，每天排放至水生環境當中之塑膠微粒數量為 5.25 億個塑膠微粒，其年排放量為 1.9×10^{11} 個塑膠微粒，從結果顯示，縱使污水處理廠對於塑膠微粒之去除率相當高，其每年排放至環境當中之數量還是非常可觀（Üstün et al., 2022）。

此外，根據其研究結果，進流水中之塑膠微粒主要會累積於污泥當中；其污泥濃縮樣品與污泥餅中塑膠微粒豐度分別為 17.9 ± 2.3 n/L 及 8.5 ± 4.7 n/L，這些塑膠微粒會因沉澱機制於沉沙池與二沉池累積於迴流污泥當中，該污水處理水廠每天污泥處理量為 81.5 噸 / 天，換算下每年將於污泥中累積 2.8×10^{11} 個 MPs，若無法妥善處理這些污

泥，將對環境造成二次污染。

根據 Liu 等人調查了全球 11 個國家共 38 間污水處理廠之塑膠微粒豐度與其特徵 (Liu et al., 2021)，發現塑膠微粒之豐度差異會與各種複雜因素如服務範圍人口、民生用水習慣以及廢水來源（民生用水、工業用水）有關；其研究統計，在民生用水污水處理廠中之塑膠微粒較低，範圍從 $0.28\sim 6.1\times 10^2$ n/L（平均值： 1.27×10^2 n/L），處理民生用水及工業用水之污水處理廠豐度則為 $1.6\sim 3.14\times 10^4$ n/L（平均值： 5.23×10^3 n/L）；以服務人口來說，進流水之塑膠微粒豐度與人口數成正比，因此服務範圍內人口數越高之污水處理廠其進流水之塑膠微粒會較人口數低之污水處理廠高。

1.5 季節對污水處理廠塑膠微粒之影響

塑膠微粒之豐度將會隨季節與時間變化而產生變化 (Ben-David et al., 2020, Uogintè et al., 2022)，目前針對污水處理廠之塑膠微粒豐度仍相當有限，迄今為止，大部分針對污水處理廠之塑膠微粒研究其採樣期程為數天或數月，僅有 2 篇研究以全年採樣了解其研究範圍之污水處理廠塑膠微粒季節變化 (Ben-David et al., 2020, Uogintè et al., 2022)。

冬季較高之塑膠微粒豐度，可能反映出較高之洗滌行為及較高之地表逕流貢獻 (Ben-David et al., 2020)，該研究於冬季研究情形，由於該研究位置於以色列，其冬季為雨季，因降雨量大導致陸地逕流流速增加了約 45%，使入滲至污水下水道之塑膠微粒豐度提升，也為許多中東國家典型情況，且城市中心附近之河流也反映此種情形。在降雨季節時，塑膠微粒豐度水平較高，如韓國 Nakdong 河域於 $260\sim 1,410$ n/m³（旱季）至 $210\sim 15,560$ n/m³（雨季），而在 Ben-David 等人之研究指出，纖維為全年塑膠微粒分析中最主要之類型，在所有季節皆占超過 80%，顯示民生用水在污水中佔據主導地位。

另一研究指出 (Uogintè et al., 2022)，其季節性影響結果與 Ben-David 等人之研究相異，由於其研究位置係於歐洲立陶宛，其氣候型態與以色列有其差異性，因此該研究指出在冬季由於氣溫最低至攝氏負 20 度，大量降雪使塑膠微粒被冰封於地表，

不容易進入污水處理廠，以至於春季時因融冰導致春季為該研究塑膠微粒豐度最高之季節，其也指出長時間之降雨將導致春季塑膠微粒豐度提升。

綜合以上兩篇有關於污水處理廠季節性影響之研究可以發現，不同地區將導致塑膠微粒豐度在不同季節有不同變化，且降雨季節皆為塑膠微粒豐度最高之季節，而臺灣因位處亞熱帶地區及熱帶地區，其北部與南部之氣候型態也有差異性，因此更有其必要性瞭解北部與南部塑膠微粒豐度於不同季節是否存在影響。

二、研究架構與方法

2.1 實驗設計與步驟

本研究之實驗方法係按照上述相關研究之實驗方法進行修改與設計，實驗流程如圖 1 所示，本實驗以實驗設計法先根據研究所需設定篩選條件以選擇污水處理廠，後續按照採樣規劃與污水處理廠聯繫，並於 6 間污水處理廠之進流水與放流水進行夏季與冬季採樣，採樣過程將於現場進行現場過濾後帶回實驗室做後續前處理與分析；前處理過程主要使用 30% H_2O_2 進行消化程序並使用飽和 NaCl 溶液進行密度分離，以離心取上清液完成前處理步驟，後續樣品分析步驟使用顯微鏡目視分析各污水處理廠之夏季與冬季進流水與放流水之塑膠微粒豐度，並進行尺寸、類型及顏色之特性分析，將塑膠微粒類型分為碎片、顆粒、纖維、發泡及薄膜，尺寸分為 50~125 μm 、125~250 μm 、250~500 μm 及 500~5,000 μm ；顏色分為黑色、白色、藍色、紅色、黃色、綠色、橘色及其它顏色，完成所有實驗後以相關性分析進行結果與討論。

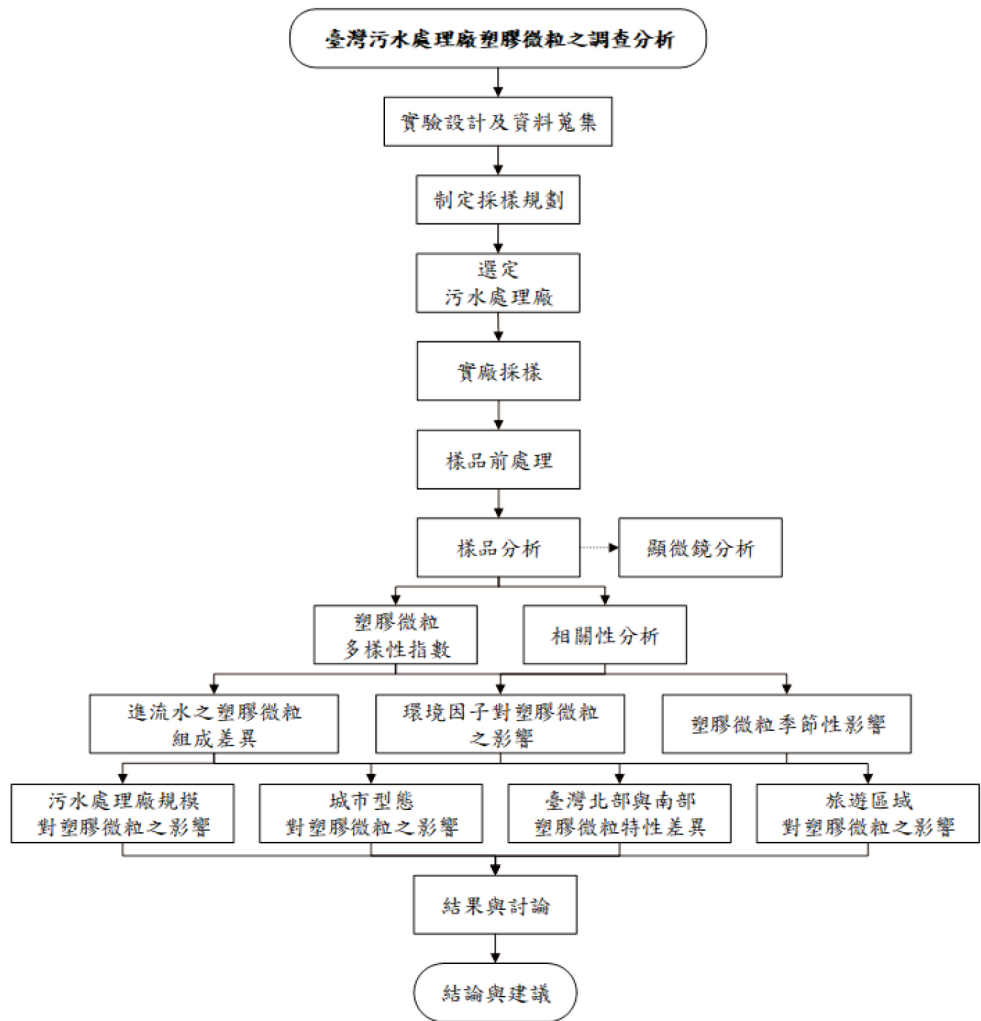


圖 1 研究架構圖

2.2 污水處理廠之選擇

本研究選定之北部大型污水處理廠為桃園北區水資源回收中心，中型污水處理廠為龜山水資源回收中心，以及位於旅遊區域之小型污水廠大溪水資源回收中心；南部大型污水處理廠則為鳳山水資源回收中心，中型污水處理廠為六塊厝污水處理廠，以及位於旅遊區域之小型墾丁污水處理廠。各廠主要服務範圍如表 1 所示。

表 1 污水處理廠處理量及其服務範圍

污水處理廠名稱	位置	平均日污水處理量 (CMD)	服務範圍
桃園北區水資源回收中心	桃園市蘆竹區	100,000	桃園南崁新市鎮計畫區、擴大桃園修訂計畫區
龜山水資源回收中心	桃園市龜山區	27,000	工三工業區、工四工業區與新市鎮之大崗里、公西里、文化里、大華里、大湖里、舊路里及樂善里村等地區
大溪水資源回收中心	桃園市大溪區	3,750	大溪區月眉里、田心里、一心里、興和里、福仁里等區域
鳳山水資源回收中心	高雄市鳳山區	109,600	鳳山區、部分鳥松區、部分大寮區及部分鳳山溪截流水
六塊厝水資源回收中心	屏東縣屏東市	50,000	屏東市
墾丁污水處理廠	屏東縣恆春鎮	2,000	墾丁大街兩側截流污水、大灣路用戶接管

2.3 採樣方法

本研究使用之採樣方法為抓樣法，係利用不銹鋼鐵桶於進流水及放流水採樣。於採樣過程中，利用不銹鋼鐵桶將採集到之水樣倒入不銹鋼濾網過濾器中過濾，其過濾器之尺寸根據先前相關研究設計其過濾尺寸，孔徑大小由大到小分別為 500 μm 、250 μm 、125 μm 以及 50 μm 。

本研究於採樣點位採樣完成分層過濾後，將不銹鋼過濾器攜至水廠實驗室進行現場過濾，利用去離子水 (DI water) 配合抽氣泵浦將各層濾網上之樣品分別轉移至孔徑大小為 25 μm 之不銹鋼濾膜；為使採集之樣品充分轉移至濾膜當中，過濾過程當中需以 DI water 充分清洗過濾器及抽氣泵浦，完成過濾後將樣品帶回實驗室放入烘箱以 60 $^{\circ}\text{C}$ 進行乾燥，以利進行後續前處理程序、顯微鏡目視分析，以及顯微紅外線光譜儀分析。

2.4 實驗步驟與分析

2.4.1 樣品前處理

收集之水樣根據先前相關研究之實驗方法設計以作為樣品前處理之方法。在室溫環境下加入 30% H_2O_2 將樣品從濾紙轉移到玻璃燒杯中，利用磁石攪拌器攪拌以消化樣品中之有機物，完成消化步驟後使用飽和氯化鈉（ NaCl , 1.48 g/mL）進行密度分離步驟，再使用 25 μm 不銹鋼金屬濾膜將上清液以過濾設備完成前處理；過濾後在烘箱中以 60°C 乾燥樣品，乾燥後以目視檢查及微傳立葉轉換紅外光譜儀檢測不銹鋼金屬濾膜上是否存在殘留物。

2.4.2 樣品分析

完成前處理後之樣品以正金相顯微鏡（ZoomKop HM-3200），以數位影像攝影系統（LeadView 6300AC），並應用 ImageView 螢幕式軟體進行目視分析，其放大倍數可達 100 倍。判定原則係參考 Norén's 對塑膠微粒之鑑別標準，（1）觀察到之塑膠微粒中無細胞或有機結構。（2）纖維應具有相同之粗細，末端不逐漸變細，且具有三維彎曲（不包括有機物）。（3）白色與透明之塑膠微粒需以更高之放大倍數進行檢查以排除生物源。（4）塑膠微粒之顏色必須清晰統一，並參考塑膠微粒識別指南。

在顯微鏡目視分析過程中，將以數據整理表格紀錄樣品中之塑膠微粒類型、尺寸及顏色，並使用 ImageView 螢幕式軟體之比例尺與截圖功能將具明顯特徵之塑膠微粒儲存至電腦中。

2.4.3 塑膠微粒多樣性指數

塑膠微粒多樣性指數之計算係基於辛普森多樣性指數（Simpson diversity index）（Fang et al., 2021），其是被用來評估樣品中塑膠微粒多樣性之指標，根據其樣品中塑膠微粒之不同特性之比例進行計算，其計算公式如下所示：

$$SDI = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2$$

其中，S 為塑膠微粒種類之數量，Pi 為類別 i 中塑膠微粒於樣品中之比例，如塑膠微粒形狀比例，將樣品中之 5 種形狀比例依公式計算後即獲得該樣品之塑膠微粒形狀多樣性指數，其 SDI 最小值為 0，最大值為 1，SDI 指數越大其代表樣品中之塑膠微粒多樣性就越大，反之，其 SDI 值越接近 0 則表示其塑膠微粒多樣性越低。本研究參考林育仲等人（2021）之研究，以塑膠微粒尺寸（SDIS）、顏色（SDIc）、形狀（SDISh）之多樣性指數綜合計算出塑膠微粒綜合多樣性指數（microplastic diversity integrated index, MPDII）以了解該污水處理廠其塑膠微粒特性之整體多樣性，其公式如下所示：

$$MPDII = (SDI_s \times SDI_c \times SDI_{sh})^{1/3}$$

MPDII 與 SDI 值相同，其範圍介於 0~1 之間，MPDII 指數越大其代表該污水處理廠樣品中之塑膠微粒綜合多樣性就越大；反之，其 MPDII 值越接近 0 則表示其塑膠微粒綜合多樣性越低。

2.4.4 相關性指數

相關性分析（Correlation Analysis）係利用相關係數（coefficient of correlation），來評估兩個變數 X 和 Y 之間相關程度的方法。相關係數反映了這 2 個變數之間的線性關係和相關性的方向。

通常情況下，相關係數越大表示 2 個變數之間的關係越強而呈顯著相關；而相關係數越小則表示其關係越弱成非顯著相關。本研究使用了皮爾森積差相關分析（Pearson Correlation）來探討塑膠微粒豐度與其他因素之間的線性相關性。透過計算相關係數，可了解這些因素之間的關聯程度，r 值係數相關強度如表 2 所示：

表 2 相關係數強度

r > 0.7	高度相關
0.7 > r > 0.4	中度相關
0.1< r < 0.4	低度相關
r <0.1	微 / 無相關

2.4.5 預防樣品污染

為確保實驗過程中使樣品之背景污染降至最低，實驗人員需全程穿著針織布實驗衣和丁腈橡膠手套，並保持實驗區域之清潔。為避免受到空氣中之塑膠微粒污染樣品，實驗過程中將關閉實驗室所有窗戶。在實驗過程中，為確認塑膠微粒之前處理是否造成樣品中塑膠微粒之損失，以及為增加整體數據之可靠性，有進行回收率實驗之必要性。

於實驗過程中，由於空氣顆粒可能會影響樣品，所以每組實驗樣品於採樣與後續前處理及目視分析過程中，需放置空白樣品以扣除因空氣顆粒沉降所產生塑膠微粒數據誤差，其實驗之空白樣品包括相同載體，如不銹鋼金屬過濾膜以及去離子水；實驗過程中所有溶液需使用 $0.47\ \mu\text{m}$ 之玻璃纖維膜進行過濾，而所有玻璃器皿、過濾設備以及相關實驗用具，皆以中性洗劑清洗後使用去離子水沖洗以減少樣品污染之情形。

三、結果與討論

3.1 污水處理廠塑膠微粒豐度

本研究於臺灣夏季 7 月與冬季 12 月，在臺灣北部與南部之 6 間污水處理廠進行採樣，各污水處理廠均發現塑膠微粒之存在，其結果如表 3 所示。其中，桃園北區水資源回收中心之進流水塑膠微粒豐度為 $79.6 \pm 54.4\ \text{n/L}$ ，放流水塑膠微粒豐度為 $5.28 \pm 3.28\ \text{n/L}$ ；龜山水資源回收中心之進流水塑膠微粒豐度為 $119 \pm 17.5\ \text{n/L}$ ，放流水塑膠微粒豐度為 $4.21 \pm 0.01\ \text{n/L}$ ；大溪水資源回收中心之進流水塑膠微粒豐度為 $46.2 \pm 0.63\ \text{n/L}$ ，放流水塑膠微粒豐度為 $2.01 \pm 0.46\ \text{n/L}$ ；鳳山水資源回收中心進流水塑膠微粒豐度為 $41.6 \pm 24.0\ \text{n/L}$ ，放流水塑膠微粒豐度為 $3.29 \pm 0.13\ \text{n/L}$ ；六塊厝水資源回收中心之進流水塑膠微粒豐度為 $69.5 \pm 8.45\ \text{n/L}$ ，放流水塑膠微粒豐度為 $3.25 \pm 1.54\ \text{n/L}$ ；墾丁污水處理廠之進流水塑膠微粒豐度為 $40.6 \pm 6.69\ \text{n/L}$ ，放流水塑膠微粒豐度為 $5.80 \pm 0.90\ \text{n/L}$ 。由上述實驗分析結果可知，表示塑膠微粒廣泛存在於處理民生用水之污水處理廠。

為了解臺灣污水處理廠目前塑膠微粒污染之豐度水平，本研究將研究結果與全球其他針對污水處理廠塑膠微粒之研究做比較。本研究中污水處理廠與其他國家污水處理廠之塑膠微粒豐度比較如表 4 所示，本研究選定之 6 間污水處理廠其塑膠微粒豐度與芬蘭之污水處理廠相似（61.0 n/L），低於土耳其（135.3±28.0 n/L）、中國（126±14.0 n/L），與英國（2102.16 n/L）之污水處理廠，而高於中國（32.5±28.0 n/L）、西班牙（3.78±0.48 n/L、12.4±2.70 n/L）；與日本（19.2 n/L）之污水處理廠，在與全球各地污水處理廠之塑膠微粒豐度進行比較後，可以發現臺灣污水處理廠之塑膠微粒豐度於全球污水處理廠屬於中等水平。

表 3 污水處理廠塑膠微粒豐度

污水處理廠名稱	MPs 豐度 (n/L)		
	進流水	放流水	去除率 (%)
桃園北區 水資源回收中心	79.6±54.4	5.28±3.28	92.84
龜山 水資源回收中心	119±17.5	4.21±0.01	96.38
大溪 水資源回收中心	46.2±0.63	2.01±0.46	95.66
鳳山 水資源回收中心	41.6±24.0	3.29±0.13	87.91
六塊厝 水資源回收中心	69.5±8.45	3.25±1.54	94.98
墾丁 污水處理廠	40.6±6.69	5.80±0.90	84.96

表 4 本研究與其他國家污水處理廠塑膠微粒豐度之比較

國家	污水處理廠 處理量 (CMD)	進流 MPs 豐度 (n/L)	放流 MPs 豐度 (n/L)	資料來源
土耳其	61,800	135.3±28.0	8.5±4.7	Üstün et al., (2022)
中國	10,000	32.5±1.0	5.0±0.4	Zhang et al., (2023)
西班牙	16,200	3.78±0.48	1.38±0.48	Bayo et al., (2021)

國家	污水處理廠 處理量 (CMD)	進流 MPs 豐度 (n/L)	放流 MPs 豐度 (n/L)	資料來源
西班牙	35,000	12.43±2.70(GGR)	1.23±0.15	Bayo et al., (2020)
芬蘭	30,180	61	0.8	Salmi et al., (2021)
日本	200,000	19.16	5.15	Nakao et al., (2021)
英國	190,000	2,102.16	129.13	Cunsolo et al., (2021)
中國	600,000	126.0±14.0	30.6±7.8	Jiang et al., (2020)
桃園北區 水資源回收中心	100,000	79.6±54.40	5.28±3.28	本研究
龜山 水資源回收中心	27,000	118.95±17.45	4.21±0.01	本研究
大溪 水資源回收中心	3,750	46.23±0.63	2.01±0.46	本研究
鳳山 水資源回收中心	109,600	41.60±24.00	3.29±0.13	本研究
六塊厝 水資源回收中心	50,000	69.45±8.45	3.25±1.54	本研究
墾丁 污水處理廠	2,000	40.61±6.69	5.80±0.90	本研究

3.2 塑膠微粒特性分析

在本研究以目視分析所發現之塑膠微粒類型主要為碎片與纖維，其占有塑膠微粒類型比例為 21.2%~58.7% 與 37.7%~82.0%，其與其它相關文獻之結果相符（Ben-David et al., 2021、Liu et al., 2021），而各區域之污水處理廠其塑膠微粒形狀比例存在相異變化，如圖 2 所示。

本研究各污水處理廠之塑膠微粒顏色比例如圖 3 所示。桃園北區水資源回收中心其夏季塑膠微粒以藍色（25.8%）為主，其次為黃色（15.1%）；冬季則以白色（49.4%）為主，其次為藍色（16.3%）；龜山水資源回收中心夏季與冬季之塑膠微粒皆以白色（78.2%、80.5%）為主，其次也皆為橘色（8.87%、7.40%）；大溪水資源回收中心其

夏季與冬季塑膠微粒皆以白色（37.9%、51.1%），其次夏季為黃色（29.5%），冬季則為橘色（17.8%）；鳳山水資源回收中心夏季與冬季之塑膠微粒皆以白色（46.6%、61.5%），其次夏季為黃色（13.6%），冬季則為橘色（13.0%）；六塊厝水資源回收中心夏季與冬季皆以白色（43.9%、44.0%）為主，其次夏季為黃色（17.3%），冬季則為橘色（28.1%）；墾丁污水處理廠其夏季與冬季皆以白色（35.0%、43.9%）為主，其次也皆為黃色（14.7%、14.0%）。

而 6 間污水處理廠之塑膠微粒尺寸分布，雖各污水處理廠之塑膠微粒尺寸分布皆不一致，但仍以 500~5,000 μm 為主要塑膠微粒尺寸，其分布範圍為 14.7%~46.9% 如圖 4 所示。

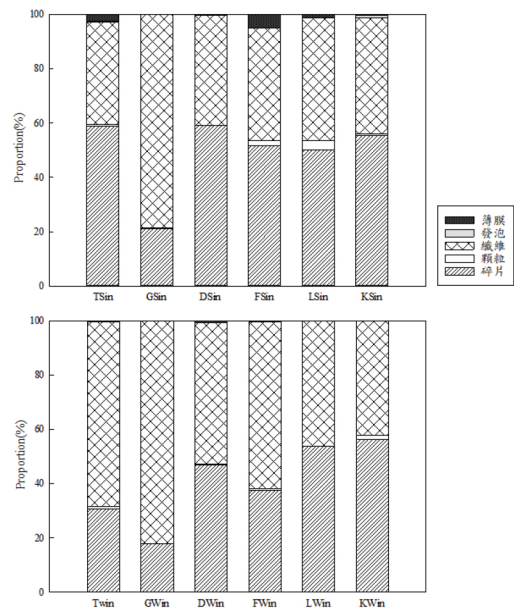


圖 2 塑膠微粒形狀百分比圖

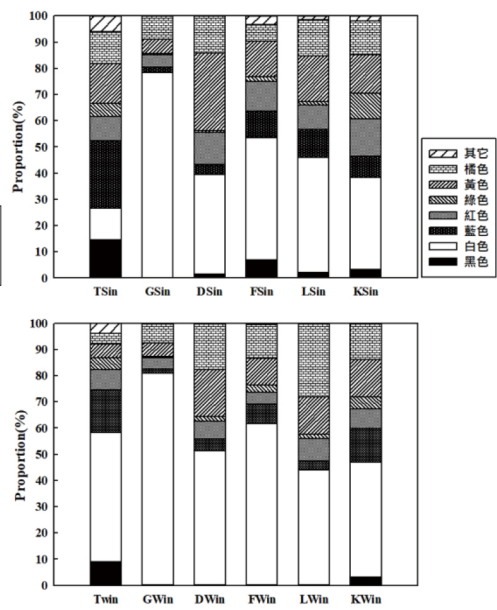


圖 3 塑膠微粒顏色百分比圖

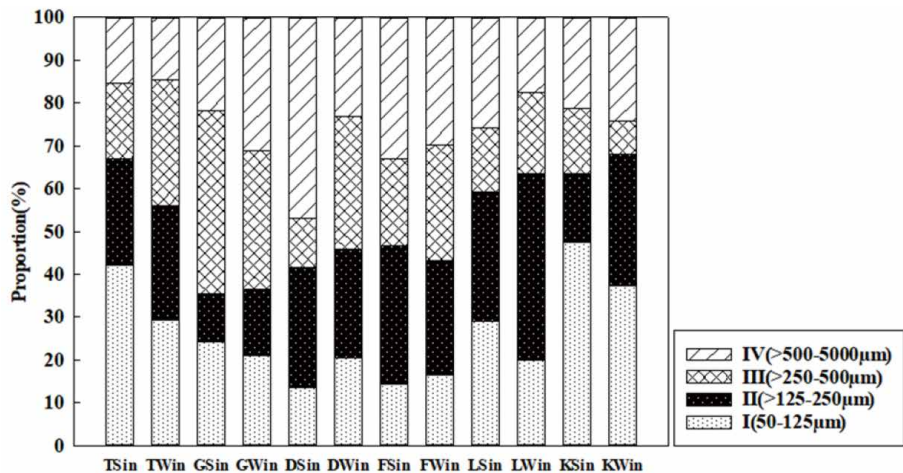


圖 4 污水處理廠塑膠微粒尺寸百分比

3.3 塑膠微粒多樣性指數

本研究以多樣性指數了解進流水中塑膠微粒組成之複雜程度，從多樣性指數計算結果如表 5 所示，龜山水資源回收中心因其系統收集範圍內之廢水來源特性，導致其 MPDII 值明顯低於其他污水處理廠（夏季 0.36 與冬季 0.32），表示該污水處理廠其所接收之污水來源較其他污水處理廠單一，而其他污水處理廠之計算結果顯示，因各污水處理廠因形狀、尺寸與顏色之多樣性指數有所差異，於夏季之 MPDII 值計算結果顯示，桃園北區水資源回收中心之 MPDII 值為最高（0.66），表示該污水處理廠進流水來源相對多元，但從 MPDII 值顯示，桃園北區水資源回收中心之 MPDII 值與鳳山水資源回收中心（0.64）、六塊厝水資源回收中心（0.63），以及墾丁污水處理廠（0.64）相似，表示此 4 家污水處理廠之塑膠微粒來源之複雜程度相似，而冬季之 MPDII 結果顯示，墾丁污水處理廠之 MPDII 值最高（0.61），但與大溪水資源回收中心（0.58）及六塊厝水資源回收中心（0.59）相似，表示於冬季，此 3 家污水處理廠塑膠微粒來源之複雜程度較為相似。在時空分布上，冬季之 MPDII 值均低於夏季之 MPDII 值，顯示此 6 家污水處理廠其夏季之塑膠微粒來源較為複雜與多元。

表 5 污水處理廠塑膠微粒豐度

污水處理廠名稱	污水處理廠之塑膠微粒多樣性指數							
	形狀多樣性 (SDIsh)		尺寸多樣性 (SDIs)		顏色多樣性 (SDIc)		MPDII	
	夏季	冬季	夏季	冬季	夏季	冬季	夏季	冬季
桃園北區 水資源回收中心	0.51	0.44	0.71	0.74	0.85	0.71	0.66	0.56
龜山 水資源回收中心	0.34	0.30	0.70	0.73	0.37	0.34	0.36	0.32
大溪 水資源回收中心	0.49	0.51	0.67	0.74	0.73	0.67	0.60	0.58
鳳山 水資源回收中心	0.56	0.48	0.72	0.74	0.73	0.59	0.64	0.53
六塊厝 水資源回收中心	0.54	0.50	0.74	0.70	0.74	0.70	0.63	0.59
墾丁 污水處理廠	0.51	0.51	0.68	0.70	0.80	0.74	0.64	0.61

3.4 塑膠微粒豐度影響因子分析

3.4.1 氣溫對塑膠微粒之影響

本研究根據選定之各污水處理廠其季節與塑膠微粒豐度進行相關性分析，相關性分析結果表示氣溫對塑膠微粒豐度呈現負中度相關（ $r=-0.51$, $p<0.05$ ）如圖 5 所示，結果表示當氣溫越低，塑膠微粒豐度將提高，此分析結果也與文獻相符，根據相關研究顯示，氣溫降低將導致民生活動中有更多纖維塑膠微粒因洗滌行為由污水下水道之途徑進入污水處理廠（Uoginté et al., 2022），因此調查該污水處理廠位處區域之季節氣溫，也可以提供未來針對塑膠微粒污染之防治參考。

經氣候特性條件分析可以發現，北部污水處理廠因其氣候條件導致冬季低溫明顯低於南部區域，使北部冬季民生用水洗滌厚重衣物頻率增加，使冬季塑膠微粒豐度高於夏季，在圖中溫度為攝氏 15 度之範圍皆為北部污水處理廠之冬季塑膠微粒豐度，而南部區域因位處熱帶區域，其氣候條件導致全年無明顯冬季，且冬季日夜溫差明顯，導致冬季白天氣溫仍可高於 20℃，甚至於夏季時因高溫將使當地民生用水更傾向於夏季有較高之衣物更換及洗滌頻率，導致其夏季塑膠微粒豐度高於冬季，從圖中也可看

到南部污水處理廠冬季溫度約攝氏 20 度，但其塑膠微粒豐度並無高於夏季。

因此氣溫對塑膠微粒豐度影響之結果可以解釋為，當其氣候特色屬於亞熱帶氣候，於溫度較低之季節時，將使塑膠微粒豐度與氣溫呈負相關；當氣候特色屬於熱帶氣候並且位於氣溫較高之季節時，塑膠微粒豐度將與氣溫呈現正相關之情形。

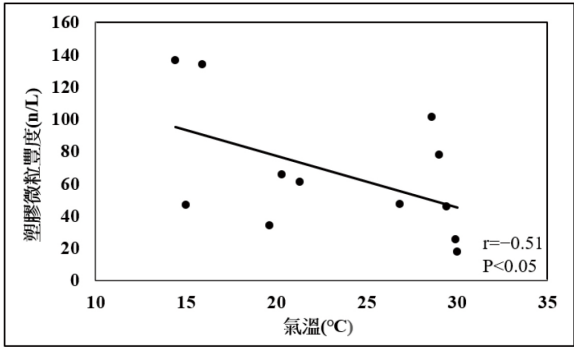


圖 5 溫度對塑膠微粒豐度之影響

3.4.2 降雨量對塑膠微粒之影響

本研究調查選定之污水處理廠所處地區之氣候型態，以及該地區於採樣當月之平均降雨量，以探討降雨量對污水處理廠中塑膠微粒之影響，塑膠微粒豐度在旱季和雨季將存在變化（Uogintè et al., 2022），其研究發現在雨季時因降雨導致環境中之塑膠微粒，會因雨水沖刷等因素而導致其由人孔進入污水下水道，使得雨季塑膠微粒豐度較旱季高；但於本研究之降雨量對塑膠微粒豐度相關性顯示，降雨量之多寡對於塑膠微粒豐度呈現低度相關（ $r=0.29$, $p<0.05$ ）如圖 6 所示，從分析結果顯示，污水處理廠之塑膠微粒豐度無因為降雨量之多寡而產生顯著之影響，本研究判斷因數據為該地區之月平均降雨量且各地區之塑膠微粒豐度水平並不一致，因此需進一步調查採樣當週該地區之降雨情形，或由未來相關研究針對同一地區進行更全面之研究，以量化降雨量影響塑膠微粒豐度之程度。

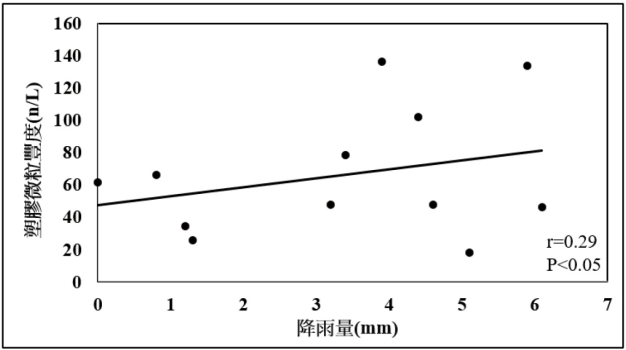


圖 6 降雨量對塑膠微粒豐度之影響

3.4.3 GDP 對塑膠微粒之影響

根據部分研究顯示，區域內之生產總值（GDP）對塑膠微粒豐度有顯著正相關之關係（Zhou et al., 2020），因 GDP 更高之城市區域表示該區域有更多企業以及工業，其中 GDP 所包含之產業為第一產業（如農業等）、第二產業（包括工業、製造業、紡織業與公共工程等）以及第三產業（包括金融業、教育相關產業以及服務業等），表示 GDP 越高之區域經濟發展程度更高以及更都市化，具有更多塑膠微粒來源，進而造成更多的塑膠微粒污染風險，且有文獻指出，第三產業之服務業相關產業為民生污水處理廠塑膠微粒主要來源（Zhang et al., 2021）。

本研究蒐集各區域之 GDP 數據與塑膠微粒豐度進行相關性分析，分析結果如圖 7 所示，顯示 GDP 對於塑膠微粒豐度具有高度相關（ $r=0.82$, $p<0.05$ ），其結果說明 GDP 愈高之區域對於污水處理廠之塑膠微粒豐度呈現正相關，表示 GDP 愈高之區域，其民生用水中將含有更高之塑膠微粒，此結果不僅可以提供後續塑膠微粒污染防治參考外，更能夠以 GDP 初步了解國內塑膠微粒豐度較高之區域，提供後續相關研究針對塑膠微粒污染潛勢高之地區進行更進一步之研究。

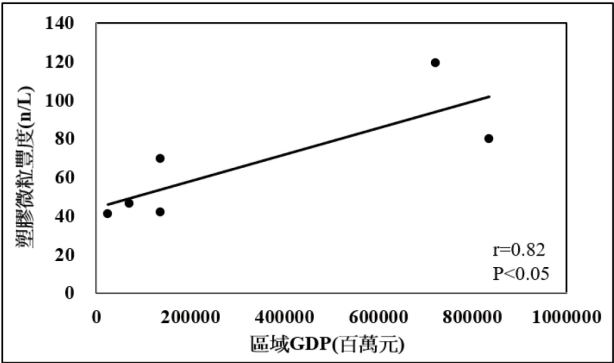


圖 7 區域 GDP 對塑膠微粒豐度之影響

3.4.4 人口對塑膠微粒之影響

根據相關文獻表示，塑膠微粒豐度會與許多複雜因素如民生用水習慣、污水來源、氣候等因素有關 (Liu et al., 2021)，其中，服務範圍人口對塑膠微粒豐度也會產生影響 (Zhang et al., 2021)，因此本研究調查污水處理廠系統服務範圍內之人口與分析結果之塑膠微粒豐度進行相關性分析，分析結果顯示於本研究所選定之污水處理廠其系統服務範圍人口對塑膠微粒豐度之相關性呈現低度相關 ($r=0.21$, $p<0.05$)，表示於本研究選定之污水處理廠中，人口數量對於塑膠微粒豐度並無明顯之相關性，其可能因污水系統收集範圍並不一致所導致。因此，本研究選取選定之污水處理廠除了系統收集範圍包含工業廢水之龜山水資源回收中心進行相關性分析，結果顯示人口對於塑膠微粒豐度如圖 8 所示呈現中度相關 ($r=0.68$, $p<0.05$)，表示若民生污水處理廠之進流水來源僅為民生用水與截流河水，其塑膠微粒豐度將會與當地人口呈現正相關。

綜合以上 6 間污水處理廠之區域居住人口對塑膠微粒豐度之影響，可以了解到雖當地居住人口可評估塑膠微粒之豐度，其結果也與過去相關文獻相符，但因臺灣屬於地狹人稠之特性，在各行政區域面積並不大之情形下，加上許多工業、科技業集中設立，將吸引許多周遭地區民眾前往就業、就學以及旅遊活動等各種情形，且因周遭交通便捷，跨縣市就學、就業及旅遊等人口將影響整體塑膠微粒豐度之評估，此特性與

國外相關文獻相比係有其差異性，因此未來相關研究針對地區塑膠微粒污染風險評估時，應考量該區域之特性評估其流動人口，對於塑膠微粒豐度之評估將較為完整，且若根據人口進行評估時，也應考量該民生污水處理廠污水系統收集範圍，若其收集範圍包含工業廢水，將導致塑膠微粒豐度無法僅以人口進行評估。

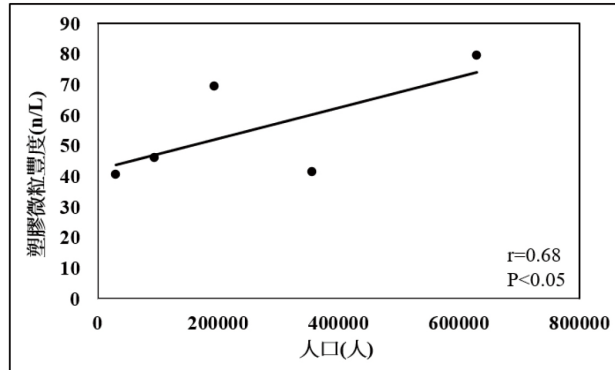


圖 8 居住人口對塑膠微粒豐度之影響

3.5 季節性影響分析

本研究選定之污水處理廠其塑膠微粒豐度會受到季節變化產生影響，而臺灣由於位處北回歸線通過之區域，以及因中央山脈阻隔導致臺灣北部與南部氣候特性呈現不同類型，因此本研究分別於臺灣北部與南部選定 3 間污水處理廠，以了解臺灣北部地區與南部地區之塑膠微粒特性差異，其研究結果如圖 9 所示。

於研究結果可以發現，對本研究所選定之污水處理廠呈現不同之影響程度，位於臺灣北部之桃園北區水資源回收中心、龜山水資源回收中心，以及大溪水資源回收中心之塑膠微粒豐度顯示，其因位處亞熱帶季風氣候，受東北季風影響導致冬季氣溫驟降且日夜溫差不明顯，也使該地區降雨日數高於夏季，在此情形之下，北部污水處理廠冬季用水量將因大量厚重紡織物之洗滌行為而高於夏季，使纖維塑膠微粒豐度高於夏季（桃園北區夏季 9.5 n/L、冬季 98.0 n/L；龜山夏季 79.8 n/L、冬季 112 n/L；大溪夏季 18.5 n/L、冬季 24.5 n/L），於塑膠微粒多樣性指數也發現，北部冬季塑膠微粒

來源因纖維狀塑膠微粒豐度較高導致其整體冬季塑膠微粒多樣性指數水平較南部污水處理廠低。

而臺灣南部由於位處熱帶季風氣候，夏季更為炎熱，且降雨大部分來自於夏季之梅雨、午後雷陣雨及颱風季節所帶來之降水；而冬季因中央山脈阻隔使東北季風對南部地區之影響較小，導致其冬季幾乎無降雨情形，且日夜溫差明顯，導致冬季白天氣溫仍可高於 20℃，甚至於夏季時因高溫，使當地民生用水更傾向於夏季有較高之衣物更換及洗滌頻率，導致六塊厝水資源回收中心與墾丁污水處理廠夏季之整體塑膠微粒豐度高於冬季（六塊厝夏季 77.9n/L、冬季 61.0n/L；墾丁夏季 47.3n/L、冬季 33.9n/L），而鳳山水資源回收中心雖結果顯示其冬季塑膠微粒豐度高於夏季，但是由於其污水收集範圍包含截流河水，其塑膠微粒豐度可能因截流河水之原因或因採樣之誤差，導致進流水中之塑膠微粒豐度呈現冬季大於夏季，但根據夏季塑膠微粒多樣性指數所示，鳳山水資源回收中心夏季塑膠微粒多樣性指數仍與墾丁污水處理廠相同為南部污水處理廠中最高（0.64），顯示其進流水組成複雜程度相同。綜合以上因素影響，雖桃園北區水資源回收中心為夏季塑膠微粒多樣性指數最高之污水處理廠，但整體而言仍以南部污水處理廠之塑膠微粒多樣性指數較高，表示南部污水處理廠夏季因氣溫、降雨量與用水量之原因導致進流水中之塑膠微粒組成較為複雜。

綜合以上針對冬季與夏季之季節性影響對臺灣北部與南部之差異性分析，臺灣北部其因季節性影響之變化程度較大，未來針對北部地區之污水處理廠進行塑膠微粒污染防治時，應考量其因季節所產生之變化，以完整評估該污水處理廠全年塑膠微粒豐度與類型之變化；而臺灣南部雖夏季與冬季因氣候型態使季節變化之影響性較北部小，但塑膠微粒多樣性指數顯示其進流水來源組成較北部複雜且多元，因此仍有進行塑膠微粒污染防治之必要性。

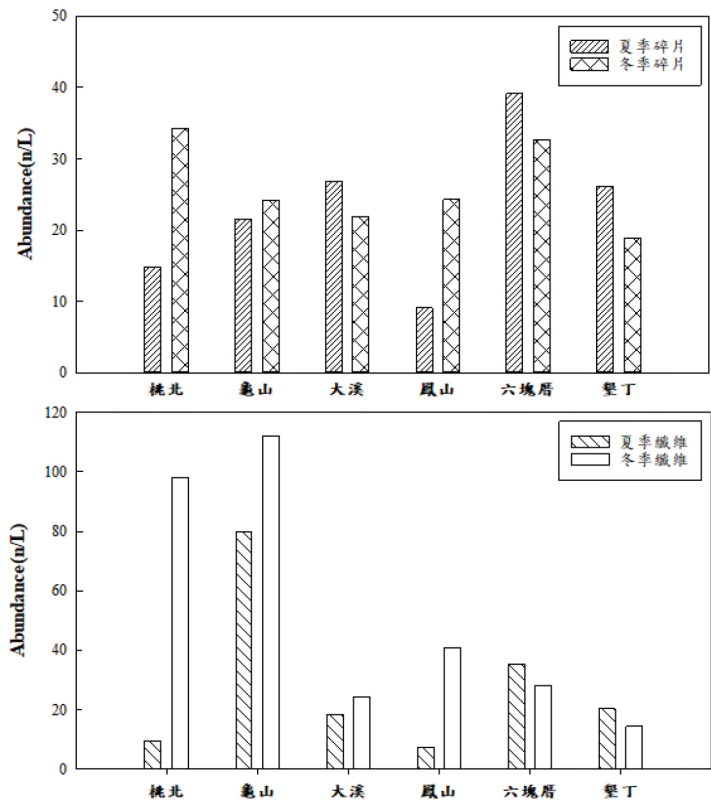


圖 9 污水處理廠碎片與纖維豐度季節差異

3.6 污水處理廠規模對塑膠微粒豐度之影響

本研究比較污水系統收集範圍僅收集民生用水之污水處理廠，仍可發現其塑膠微粒豐度水平大致上會因污水處理廠規模大小而產生變化，從圖 10 可以發現，塑膠微粒豐度大致上呈現越小型之污水處理廠其塑膠微粒豐度越低，大型污水處理廠之桃園北區水資源回收中心，其因大量進流水導致塑膠微粒豐度高於中型污水處理廠之六塊厝水資源回收中心，而大溪水資源回收中心以及墾丁污水處理廠因其進流量較少之因素導致塑膠微粒豐度水平較低，因此未來針對污水處理廠塑膠微粒污染防治，應優先考量大型污水處理廠以及污水系統收集範圍包含工業用水之污水處理廠。

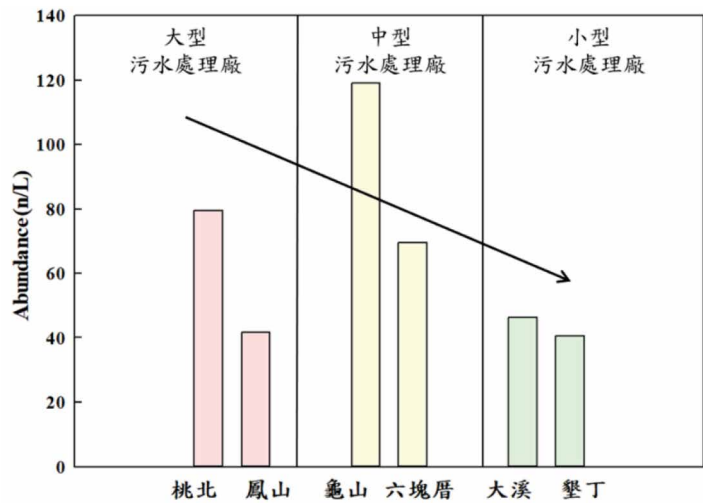


圖 10 污水處理廠規模與塑膠微粒豐度差異

3.7 旅遊地區之差異性分析

旅遊區域之污水處理廠因較密集之旅遊活動會使塑膠微粒豐度水平提升 (Zhang et al., 2021)，因此本研究於北部選取大溪水資源回收中心以及南部之墾丁污水處理廠，比較旅遊人口與塑膠微粒豐度變化，以瞭解旅遊人口是否影響塑膠微粒豐度。

根據大溪水資源回收中心與墾丁污水處理廠調查結果顯示，其與文獻相符 (Zhang et al., 2021)，顯示雖塑膠微粒豐度會因許多因素如氣候與降雨等之變化而產生影響，但旅遊人口變化對於位處旅遊區域之污水處理廠也會造成影響，大溪水資源回收中心因冬季之遊客人數較夏季高約 35,000 人，導致冬季塑膠微粒之豐度較夏季高 1.4 n/L；墾丁污水處理廠其遊客人數與塑膠微粒豐度變化結果與大溪水資源回收中心相同，其因夏季旅遊人口湧入，使夏季遊客人數較冬季高約 147,000 人，導致夏季塑膠微粒豐度較冬季高 13.4 n/L。因此未來針對相關位於旅遊區域之污水處理廠，應考量其旅遊人口變化對塑膠微粒產生之潛在污染風險，以評估其對塑膠微粒污染產生之影響。

四、結論與建議

4.1 結論

1. 塑膠微粒豐度範圍為 17.6~136 n/L；類型主要以碎片與纖維為主，其範圍為 21.2%~58.7% 與 37.7%~82.0%；白色為主要顏色，占有顏色百分比 11.9%~80.5%。
2. 塑膠微粒多樣性指數結果顯示桃園北區水資源回收中心於夏季進流水有較複雜之特性組成；墾丁污水處理廠則於冬季進流水具較複雜之特性組成；龜山水資源回收中心因處理工業用水使其進流水塑膠微粒組成較為單一。
3. 影響因子對塑膠微粒豐度影響程度由大至小為人均 GDP ($r=0.91$) > 人口 ($r=0.68$) > 氣溫 ($r=-0.51$) > 降雨量 ($r=0.29$)。
4. 季節性影響分析顯示北部污水處理廠因低溫使冬季塑膠微粒豐度較高，南部因溫差不明顯以及夏季用水量大使夏季塑膠微粒豐度較高。
5. 污水處理廠規模對塑膠微粒豐度差異性分析顯示，塑膠微粒豐度會隨污水處理廠處理量增加而越高。
6. 旅遊區域之污水處理廠其塑膠微粒豐度與遊客人數呈正比，遊客人數越高，塑膠微粒豐度越高。

4.2 建議

1. 由於目前針對塑膠微粒分析尚無完整之採樣方法與前處理實驗流程，以及對塑膠微粒尺寸、顏色等特徵之明確規範，因此未來需建立一套針對塑膠微粒完整之分析方法，以使未來相關研究之比較更具參考價值。
2. 未來可針對更多污水處理廠進行採樣分析以瞭解臺灣整體污水處理廠中塑膠微粒豐度水平。
3. 未來可針對單一污水處理廠進行長期採樣以瞭解降雨量對塑膠微粒之影響。
4. 本研究以地區差異性分析，結果表示未來針對污水處理廠之塑膠微粒污染防治，應優先考量大型污水處理廠、污水系統收集範圍包含工業用水之污水處理廠，以及位處工商業高度發展之污水處理廠，且季節性影響分析顯示，需額外考量其因季節性變化而

產生之塑膠微粒豐度峰值變化。

5. 由於國內部分污水處理廠係位於旅遊區域，對於此類污水處理廠之塑膠微粒污染風險應考量其旅遊人口之變化，以了解旅遊人口對污水處理廠中塑膠微粒豐度之影響。

參考文獻

林育仲（2021），台灣西南沿海沉積物塑膠微粒分布與組成，國立高雄科技大學海洋環境工程系暨研究所碩士論文，p22。

Bayo, J., Olmos, S., & López-Castellanos, J. (2020). Microplastics in an urban wastewater treatment plant: The influence of physicochemical parameters and environmental factors. *Chemosphere*, 238.

Bayo, J., Olmos, S., & López-Castellanos, J. (2021). Assessment of microplastics in a municipal wastewater treatment plant with tertiary treatment: Removal efficiencies and loading per day into the environment. *Water (Switzerland)*, 13 (10).

Ben-David, E. A., Habibi, M., Haddad, E., Hasanin, M., Angel, D. L., Booth, A. M., & Sabbah, I. (2021). Microplastic distributions in a domestic wastewater treatment plant: Removal efficiency, seasonal variation and influence of sampling technique. *Science of the Total Environment*, 752.

Capó, X., Company, J. J., Alomar, C., Compa, M., Sureda, A., Grau, A., Hansjosten, B., López-Vázquez, J., Quintana, J. B., Rodil, R., & Deudero, S. (2021). Long-term exposure to virgin and seawater exposed microplastic enriched-diet causes liver oxidative stress and inflammation in gilthead seabream *Sparus aurata*, Linnaeus 1758. *Science of the Total Environment*, 767.

Chen, H. L., Selvam, S. B., Kang, & Ting, N., & Gibbins, C. N. (2021). Microplastic pollution in freshwater systems in Southeast Asia: contamination levels, sources, and ecological impacts.

- Cunsolo, S., Williams, J., Hale, M., Read, D. S., & Couceiro, F. (2021) . Optimising sample preparation for FTIR-based microplastic analysis in wastewater and sludge samples: multiple digestions. *Analytical and Bioanalytical Chemistry* (2021) 413:3789–3799
- Fang, Q., Niu, S., & Yu, J. (2021) . Characterising microplastic pollution in sediments from urban water systems using the diversity index. *Journal of Cleaner Production*, 318.
- Hidayaturrahman, H., & Lee, T. G. (2019) . A study on characteristics of microplastic in wastewater of South Korea: Identification, quantification, and fate of microplastics during treatment process. *Marine Pollution Bulletin*, 146, 696–702.
- Jiang, J., Wang, X., Ren, H., Cao, G., Xie, G., Xing, D., & Liu, B. (2020) . Investigation and fate of microplastics in wastewater and sludge filter cake from a wastewater treatment plant in China. *Science of the Total Environment*, 746.
- Kaposi, K. L., Mos, B., Kelaher, B. P., & Dworjanyn, S. A. (2014) . Ingestion of microplastic has limited impact on a marine larva. *Environmental Science and Technology*, 48 (3) , 1638–1645.
- Liu, W., Zhang, J., Liu, H., Guo, X., Zhang, X., Yao, X., Cao, Z., & Zhang, T. (2021) . A review of the removal of microplastics in global wastewater treatment plants: Characteristics and mechanisms. In *Environment International* (Vol. 146) . Elsevier Ltd.
- McCormick, A., Hoellein, T. J., Mason, S. A., Schluep, J., & Kelly, J. J. (2014) . Microplastic is an abundant and distinct microbial habitat in an urban river. *Environmental Science and Technology*, 48 (20) , 11863–11871.
- Nakao, S., Akita, K., Ozaki, A., Masumoto, K., & Okuda, T. (2021) . Circulation of fibrous microplastic (microfiber) in sewage and sewage sludge treatment processes.

Science of the Total Environment, 795.

Salmi, P., Ryymin, K., Karjalainen, A. K., Mikola, A., Uurasjärvi, E., & Talvitie, J. (2021) . Particle balance and return loops for microplastics in a tertiary-level wastewater treatment plant. *Water Science and Technology*, 84 (1) , 89–100.

Uogintė, I., Pleskytė, S., Pauraitė, J., & Lujanienė, G. (2022) . Seasonal variation and complex analysis of microplastic distribution in different WWTP treatment stages in Lithuania. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194 (11) .

Üstün, G. E., Bozdaş, K., & Can, T. (2022) . Abundance and characteristics of microplastics in an urban wastewater treatment plant in Turkey. *Environmental Pollution*, 310.

Zhang, L., Liu, J., Xie, Y., Zhong, S., & Gao, P. (2021) . Occurrence and removal of microplastics from wastewater treatment plants in a typical tourist city in China. *Journal of Cleaner Production*, 291.

Zhou, G., Wang, Q., Zhang, J., Li, Q., Wang, Y., Wang, M., & Huang, X. (2020) . Distribution and characteristics of microplastics in urban waters of seven cities in the Tuojiang River basin, China. *Environmental Research*, 189.

空氣污染與噪音類

大型柴油車汰舊換新之空污減量推動成效

湯雅芳*、謝明機**、胡承瑄***、許仲豪****、呂澄洋*****、
張根穆*****、蔡孟裕*****

摘 要

依據環境部臺灣空氣污染物排放量清冊（TEDS9.0），我國 $PM_{2.5}$ 年平均濃度來自境內污染源比率約 65%，移動污染源占整體 $PM_{2.5}$ 約 27.5%，其中以較老舊、依 1 至 3 期排放標準出廠之大型柴油車排放占比 59%，且 101 年世界衛生組織國際癌症研究署（IARC）將柴油廢氣列為一級致癌物，為改善其污染，環境部參考國際間共通作法，研擬補助 1 至 3 期大型柴油車汰舊換新、加裝污染防制設備或調修燃油控制系統等措施，與車主共同合作，改善污染排放。

統計 103 年至 105 年（未推動補助前），1 至 3 期大型柴油車每年自然淘汰數約為 2,767 輛，推動大型柴油車汰舊換新補助後，1 至 3 期大型柴油車 106 年至 111 年平均每年汰舊數約 1 萬 1,350 輛，成長將近 4 倍；且 106 年至 112 年 6 月間，全國已淘汰 1 至 3 期大型柴油車 7 萬 133 輛，空氣污染減量約 10 萬 3,969 公噸 / 年，其中 $PM_{2.5}$ 共計減少 3,643 公噸 / 年、 NO_x 共計減少 6 萬 3,541 噸 / 年（ NO_x 相當於減少 64.6 座燃煤機組的污染排放）。藉由經濟誘因，提升車主申請意願，加速老舊車輛報廢，改善移動污染源。

另觀察 102 年至 111 年全國交通測站監測數據 $PM_{2.5}$ 和 NO_x 皆呈現下降趨勢，其中 $PM_{2.5}$ 由 102 年 $32.9 \mu g/m^3$ 降至 111 年 $15 \mu g/m^3$ ，改善幅度約 54 %； NO_x 由 102

年 53.4 ppb 降至 111 年 34 ppb，改善幅度約 36.3 %，皆顯示車輛污染已逐年改善。

【關鍵字】汰舊換新、空氣品質改善、移動污染源系統

*	環境部大氣環境司	助理環境技術師
**	春迪企業股份有限公司	課長
***	春迪企業股份有限公司	工程師
****	環境部大氣環境司	科長
*****	環境部大氣環境司	簡任技正
*****	環境部大氣環境司	副司長
*****	環境部大氣環境司	司長

一、前言

國內近年來由於各項工程興建、經濟活動頻繁、國道及公路運輸發達，大量使用柴油車輛載運貨物及旅客，隨著國內開放中古車輛及柴油小客車進口，國內柴油車數量亦持續增加，對於空氣品質的影響也日益嚴重，尤其近年來民眾環保意識隨著國際潮流，在要求環境品質隨國民所得增加而升級的呼聲下，車輛排放污染造成都會區空氣品質劣化的問題，遂成為環保及交通主管單位加強管制重點之一。

環境部依據空氣品質模式分析結果（吳義林（民 103）、張良輝（105）），我國 $PM_{2.5}$ 年平均濃度，來自境內污染源比率約 60 %~66 %。而境內各類污染源對 $PM_{2.5}$ 濃度影響，則主要可分為工業源（如電力設施、鍋爐、鋼鐵業、石化業、水泥業、化學製品製造）、移動污染源（如交通工具）及其他污染源（如餐飲油煙、營建揚塵、露天燃燒），移動污染源占整體 $PM_{2.5}$ 約 27.5%，其中以較老舊、依 1 至 3 期排放標準出廠之大型柴油車排放占比 59%。

有鑑於移動污染源中， $PM_{2.5}$ 以 1 至 3 期大型柴油車污染排放量大，且 101 年世界衛生組織國際癌症研究署（IARC）將柴油廢氣列為一級致癌物。故環境部自 106 年起陸續針對 1 至 3 期大型柴油車提供多元補助方案，包含購車低利信貸及利息補貼、減徵汰舊換新之新車貨物稅及零組件免關稅、汰舊換新補助、調修燃油控制系統及加裝空氣污染防制設備等，與車主共同合作，改善污染排放，以維護國民健康及生活環境。

二、國外推動情況

考量小到我們日常隨身使用的面紙、大到占滿整個貨櫃的重型機具設備，全都靠貨運業及辛苦的運將們利用大型柴油車日以繼夜、運有送無，讓我們大家可以享有便利的日常生活跟穩定的經濟成長。因此，為協助改善其污染排放，環境部參考鄰近我國之韓國及日本共通性作法，即推動各項補助措施，包括汰舊換新、加裝空氣污染防制設備等。各國推動作法分項說明如后。

2.1 韓國

根據韓國空氣保護法，為加速報廢排放污染的老舊柴油車輛和老舊工程機械，韓國提出報廢補助及安裝空氣污染防制設備之補助方案，如提前報廢或淘汰老舊柴油車、報廢柴油車後新購 1 噸 LPG 卡車、將現有柴油引擎轉換為 LPG 引擎、於柴油車安裝 DPF 或 p-DPF，或於大型客運或貨運同時安裝減少 PM 及 NOx 的設備，符合相關資格皆提供補助，惟只能申請 1 項不能重複領取補助款項。其中針對汰舊補貼金額請參考表 1。

若是報廢老舊柴油車後新購 1 噸 LPG 車輛，則每輛享報廢基本補貼外，可另享有 400 萬韓元的補助額（相當於 9 萬 4,400TWD）。

表 1 韓國淘汰老舊柴油車補貼方案

車輛種類		補助上限
總重 <3.5 噸		3,000,000KRW（約 70,900TWD）
總重 3.5 噸以上	排氣量 ≤3,500cc	4,400,000KRW（約 104,000TWD）
	3,500cc< 排氣量 ≤5,500cc	7,500,000KRW（約 177,000TWD）
	5,500cc< 排氣量 <7,500cc	11,000,000KRW（約 260,000TWD）
	7,500cc≤ 排氣量	30,000,000KRW（約 710,000TWD）
混凝土攪拌車、混凝土泵車		40,000,000KRW（約 947,000TWD）

資料來源：<http://www.me.go.kr/mamo/web/index.do?menuId=16216>

2.2 日本

有關日本柴油車補貼政策，環保車輛推進機構 LEVO（Organization for The Promotion of Low Emission Vehicles）於西元 2022 年針對二氧化碳排放控制措施項目進行補助，也就是支持引進燃油效率高的低碳柴油車，以促進低碳社會建設。補助對象針為中小企業規模之運輸公司，意指資本額低於 3 億日元或 300 人以下的公司；補助車輛為車輛總重超過 3.5 噸的車輛，並於 2022 年 4 月 1 日至 2023 年 1 月 31 日新登記的新車車輛，補助金額請參考表 2。

表 2 日本淘汰老舊柴油車補貼方案

車輛種類	補助費用（萬元）	
	有報廢車輛	無報廢車輛
3.5 噸至 7.5 噸	150,000JPY（約 32,600TWD）	100,000JPY（約 21,700TWD）
7.5 噸至 12 噸	420,000JPY（約 91,300TWD）	280,000JPY（約 60,900TWD）
超過 12 噸	500,000JPY ~750,000JPY （約 108,700TWD~163,000TWD）	375,000JPY ~500,000JPY （約 81,500TWD~108,700TWD）

資料來源：https://www.levo.or.jp/fukyu/hojokin/r4_index.html

三、大型柴油車汰舊換新補助政策

環境部對於大型柴油車的管制，是以輔導改善減少空氣污染物排放為主，只要車輛符合原出廠時的排放標準，就可以持續使用，並非屬強制性管制措施。另一方面，考量老舊大型柴油車車主因經濟問題無法加速改善黑煙排放，相關車輛又為全家唯一經濟來源，恐無經費換購新車。

因此，環境部自 106 年 8 月起陸續推動汰舊、加裝空氣污染防治設備補助，並於 108 年 5 月參採各界意見，增加汰舊換新、調修燃油控制系統補助；不僅如此，針對經濟有困難之車主，環境部更提供老舊大型柴油車汰舊換新車之最高 1% 貸款利息及貸款信用保證，協助車主渡難關。

除調修燃油控制系統補助外，各項補助措施已於 111 年底截止申請，大型柴油車汰舊換新補助業已完成階段性任務，環境部已於 112 年 1 月 11 日訂定「老舊車輛汰舊換新空氣污染物減量補助辦法」，導入創新之媒合平臺及開發單位資源，減少車輛排放及維持投資臺灣的經濟動能等多贏局面。民眾可將車輛汰舊換新減量效益藉由媒合平臺賣給須作環評之開發單位，領取須作環評之開發單位之收購價金，開發單位收購之空氣污染物減量效益可做為環境影響評估開發案所增加排放之空氣污染物抵換之用。未有開發單位提出購買需求之區域，可領取環境部空氣污染減量效益補助。茲就大型柴油車汰舊換新補助及老舊車輛汰舊換新空氣污染物減量補助，說明如后。

3.1 大型柴油車汰舊換新補助

統計 105 年國內大型柴油車總數約 23 萬輛，其中 95 年 9 月 30 日以前出廠之老舊大型柴油車占 14.4 萬餘輛，為改善空氣品質，改善老舊大型柴油車污染排放，環境部自 106 年 8 月 16 日起發布實施「淘汰老舊大型柴油車補助辦法」，鼓勵 1~2 期出廠之老舊大型柴油車儘速汰除，車主只要完成車體回收及車籍報廢手續，並於 108 年 12 月 10 日前提出申請，最高可補助 40 萬元。

環境部於淘汰老舊大型柴油車補助辦法推動後，仍然持續蒐集各界意見，並滾動檢討補助辦法，後於 108 年 5 月 27 日修正補助辦法並更名為「大型柴油車汰舊換新補助辦法」，申請補助對象也擴大至 1 至 3 期大型柴油車，且除繼續推動報廢老舊柴油車之車主可申請補助外，另擴及報廢舊車並購買中古車、新車以及三期柴油車換購新車之車主亦可請領補助，並將補助期間延長 111 年 12 月 31 日，車主最高可獲得 65 萬元補助。

於大型柴油車汰舊換新補助辦法推動期間，受嚴重特殊傳染性肺炎（COVID-19）影響，導致許多 1 至 3 期大型柴油車車主欲申請汰舊換新補助，卻因領不到新車牌照、交車不及影響權益，環境部蒐集各界意見後，於 111 年 8 月 24 日修正補助辦法調整可於 111 年 12 月 31 日前檢附舊車行車執照影本及新車買賣契約書影本提出申請，亦可獲得補助資格，惟車主至遲仍須於 112 年 12 月 31 日前完成舊車車體回收與牌照報廢、新車領牌及申請資料補正（圖 1）。



圖 1 汰舊換新補助宣傳圖卡

3.2 老舊車輛汰舊換新空氣污染物減量補助

大型柴油車汰舊換新補助期間至 111 年 12 月 31 日止，現已完成階段性任務，環境部為持續推動老舊車輛汰換改善空氣品質，並配合 2050 淨零排放目標，於 112 年 1 月 11 日訂定發布「老舊車輛汰舊換新空氣污染物減量補助辦法」及「老舊汽車汰舊換新溫室氣體減量獎勵辦法」，112 年 1 月 1 日起至 113 年 12 月 31 日車主將車輛汰舊並換購電動車輛或低污染車輛，且同意將大型柴油車汰舊換新之空氣污染減量效益歸屬於環境部者，環境部將給予每輛 3 萬元補助金（圖 2）。

環境部也導入創新之補助或媒合模式，民眾可將大型柴油車汰舊換新空氣污染減量效益藉由「汰舊換新抵換媒合平臺」（圖 3）歸屬給實施環境影響評估之開發單位（每輛最低 19 萬元之收購價金），作為實施環境影響評估之開發業者所增加排放之空氣污染物及溫室氣體抵換之用（車主減空污、減碳效益僅能選擇歸屬環境部或給開發業者收購僅能二擇一），透過媒合平臺無紙化線上申請作業，快速又環保提供車主申請及查詢申請進度管道。

2023年老舊車輛汰舊換新新制

4大車種金額方案 2擇1 一張圖帶你輕鬆算

		減碳	減空污	既有回收獎勵	至少可領
機車 燃油↔電動	A方案 環保署	1,000元	+ 1,000元		2,300元
	B方案 開發單位	1,500元	+ 2,000元	+ 300元	3,800元
小客貨車 汽油↔電動	A方案 環保署	12,000元	+ 2,000元		15,000元
	B方案 開發單位	12,000元	+ 5,000元	+ 1,000元	18,000元
小客貨車 柴油↔電動	A方案 環保署	15,000元	+ 2,000元		18,000元
	B方案 開發單位	15,000元	+ 7,000元	+ 1,000元	23,000元
大客貨車 老舊↔六期柴油	A方案 環保署		30,000元		31,000元
	B方案 開發單位		190,000元	+ 1,000元	191,000元

補助金單位：以每車輛車計算

圖96.6.30前的老舊機車報廢，於112年底前可再加領2,000元汰換補助

圖 2 車輛汰舊換新減量效益補助金及收購價金



圖 3 車輛汰舊換新抵換媒合平臺

四、推動成效

統計 103 年至 105 年（未推動補助前），1 至 3 期大型柴油車每年自然淘汰數約為 2,767 輛，推動大型柴油車汰舊換新補助後，1 至 3 期大型柴油車 106 年至 111 年平均每年汰舊數約 1 萬 1,350 輛，成長將近 4 倍，顯示藉由經濟誘因，可提升車主申請意願，加速老舊車輛報廢，改善移動污染源。故本節茲就推動各項多元關懷策略後之成效，包括空品改善、歷年陳情案件數逐年下降、舊柴油車不合格率逐年下降，以及污染減量效益等，分項說明如后。

4.1 空品改善，全民有感

查 105 年 1 至 3 期大型柴油車剩餘輛數約有 14.4 萬輛，統計截至 112 年 6 月全國已淘汰 1 至 3 期大型柴油車 7 萬 133 輛，相對推動前 105 年 14.4 萬輛，減少老舊大型柴油車比例超過 45%，已投入經費約 187.3 億元，空氣污染減量約 9 萬 6,206 公噸，其中 NO_x 共計減少 6 萬 3,541 噸，相當於減少 64.6 座燃煤機組的污染排放；另減少溫室氣體 CO₂ 排放約 130 萬公噸，相當於 3,402 座大安森林公園 CO₂ 吸附量（圖 4），顯見對於改善國內空氣品質，已達階段性目標。



圖 4 汰舊換新減碳效益推估

統計 102 年至 111 年全國交通測站監測數據 PM_{2.5} 和 NO_x 皆呈現下降趨勢（圖 5 及圖 6），其中 PM_{2.5} 由 102 年 32.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 降至 111 年 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，改善幅度約 54%；NO_x 由 102 年 53.4 ppb 降至 111 年 34ppb，改善幅度約 36.3%，皆顯示車輛污染已逐年改善。另亦顯示多項關懷及措施有助於空氣品質改善，又依環保署與國家衛生研究院研究報告，PM_{2.5} 移動平均濃度由 37.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 改善至 27.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 時，可降低出生孩童過敏、氣喘等問題，顯示空氣污染改善有益於人民健康，爰相關措施推動可謂全民獲利。

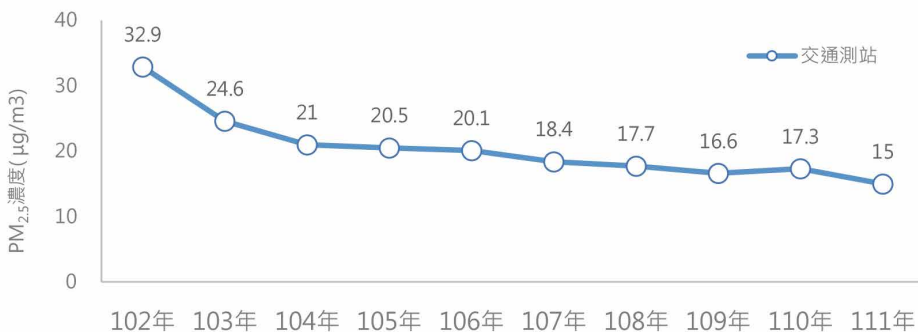
圖 5 歷年交通空氣品質測站 PM_{2.5} 檢測成果



圖 6 歷年交通空氣品質測站 NO_x 檢測成果

4.2 民眾檢舉，逐年下降

依據空污法第 46 條第 2 項規定：「人民得向主管機關檢舉使用中汽車排放空氣污染物情形，被檢舉之車輛經主管機關通知者，應於指定期限內至指定地點接受檢驗。」，民眾可向環保單位檢舉有污染之虞車輛，經環保單位查證後通知被檢舉車主限期到檢。故統計 106 年至 111 年，民眾陳情柴油烏賊車案件數已由 2,126 件下降至 544 件（檢舉數變化如圖 7），顯示柴油車黑煙排放已逐年改善。

另一方面，為加強稽查高污染柴油車，各縣市環保單位係採不定期檢驗，包括目測判煙與民眾檢舉等通知到檢、主動到檢、路邊攔檢 3 種稽查篩選管道。其中，目測判煙係透過依據空污法第 46 條第 1 項規定：「使用中之汽車排放污染物，經主管機關之檢查人員目測、目視或遙測不符合第 36 條排放標準者，應於主管機關通知期限內修復，並至指定地點接受檢驗。」，各縣市環保局指派取得環訓所訓練合格之目測判煙專業人員，不定時不定點於轄區內各柴油車常行駛路段，篩選有污染之虞柴油車並拍攝照片或影片佐證，通知車主限期至全國任一柴油車底盤動力計排煙檢測站。另路邊攔檢則依據空污法第 45 條第 1 項規定：「各級主管機關得於車（機）場、站、道路、港區、水域或其他適當地點實施使用中交通工具排放空氣污染物不定期檢驗或檢查，或通知有污染之虞交通工具於指定期限至指定地點接受檢驗。」各縣市環保局委託專業人員依據「使用中汽車排放空氣污染物不定期檢驗辦法」，於柴油車常行經之適當地點，隨機攔查行經之柴油車，針對可疑柴油車即現場執行無負載測試，如不合格當場告發，並得要求限期改善。故統計全國柴油車不合格率由 10.1% 降至 3.9%，

降幅為 61.4%，顯示柴油車空氣污染物排放已逐年改善（圖 8）。

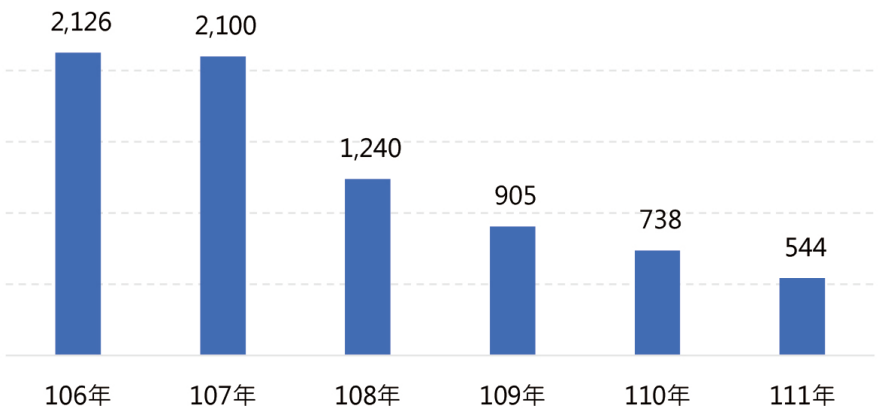


圖 7 歷年柴油車烏賊車陳情案件數

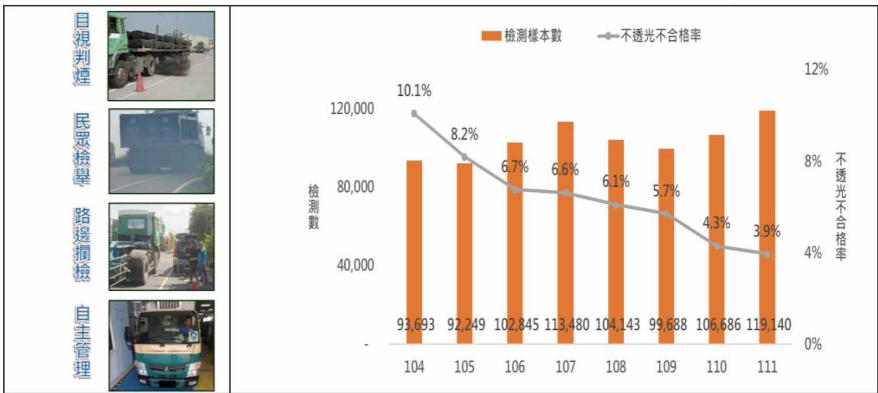


圖 8 近 6 年柴油車黑煙檢測不合格率逐年下降

五、結語

參考歷年空氣品質監測成果，全國各項空氣污染物濃度均呈現下降趨勢，111 年更為近 5 年（107~111 年）以來最好，顯然各項管制措施已回應民眾對空氣品質提升之殷切期盼，環境部將以更積極的態度來面對空氣污染改善課題，並以民眾的健康及成本效益為出發點思考各項管制作為，持續整合部會量能、強化中央地方合作、促進全民共同參與，達到外界對空氣品質之期待。

參考資料

吳義林（民 103）。臺灣細懸浮微粒（PM_{2.5}）成分與形成速率分析。行政院環境保護署。

張良輝（105）。強化空氣品質模式制度計畫（第二年）。行政院環境保護署。

韓國 環境部都市空氣質量辦公室

<http://www.me.go.kr/mamo/web/index.do?menuId=16216>

日本 一般財團法人 環境優良車普及機構

https://www.levo.or.jp/fukyu/hojokin/r4_index.html

徵稿

工業污染防治刊物



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



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

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

本刊特點



1. 為國內歷史最悠久之環保期刊之一，至112年已發行158期，專業論著已逾1,847篇。
2. 列入國內重要專業期刊，專業技師投稿將取得60分之積分。
3. 納入國家圖書館期刊文獻資訊網，各期紙本刊物於國家圖書館永久保存。

徵稿範疇與方向



1. 空氣污染與噪音：空污防制及案例
2. 廢(污)水處理：節水及廢水回收再利用、廢水及重金屬處理技術、碳中和
1. 廢棄物：資源循環及減碳行動
2. 土壤處理與毒化物：土壤與地下水整治、毒性化學物質管理
3. 環境管理規劃：永續發展策略、生命週期評估、減碳管理議題、再生能源發展與應用

投稿辦法



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

聯絡窗口



詹奇君助理工程師

專線電話：(02)7704-5157

E-mail：cjjhan@ftis.org.tw

陳靖瑜工程師

專線電話：(02)7704-5156

E-mail：watch8630@ftis.org.tw



經濟部產業發展署 廣告

「工業污染防治」廣邀各界投稿

一、本刊特點

1. 為國內歷史最悠久之環保期刊之一，於71年1月創刊，至 112 年已發行158期，專業論著已逾 1,847 篇。
2. 列入國內重要專業期刊，專業技師投稿將取得60分之積分。
3. 本刊物納入國家圖書館期刊文獻資訊網，各期紙本刊物於國家圖書館中永久保存。

二、徵稿內容

1. 本刊闢有下列類型領域，凡有處理技術、工程規劃設計、操作維護、污染防治實例、清潔生產、污染預防、資源循環技術及法令規章等稿件均歡迎。
 - (1) 空氣污染與噪音
 - (2) 廢(污)水處理
 - (3) 廢棄物
 - (4) 土壤處理與毒化物
 - (5) 環境管理規劃
2. 來稿限未在其他刊物發表過之文稿。稿件請勿一稿兩投，文稿篇幅盡量勿超過 25頁(含圖表)，請附中文摘要(300字以內)，並附關鍵字。一經採用酌酬稿費，其版權歸本刊所有，請檢附「著作權讓渡同意書」。
3. 來稿請附真實姓名、服務單位、地址及電話，以利聯絡並對讀者負責。
4. 本刊對來稿有刪改權，不採用恕不退稿，如需退稿或不願被刪改，請在來稿中註明。
5. 來稿請寄「工業污染防治編輯組」E-mail:cjjhan@ftis.org.tw；或透過計畫網站線上投稿 <https://proj.ftis.org.tw/oss/index.html#/>
6. 詢問本刊相關事宜，請電(02)2784-4188轉5157「工業污染防治」編輯組。

三、刊物編寫格式(文稿格式範例請洽本刊編輯組)

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

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

期 刊：作者(出版年)。篇名。出處。卷期。頁數。

書 籍：作者(出版年)。篇名。出處。頁數。

機關出版品：編寫機構(出版年)。篇名。出版機構。頁數。

研討會論文：作者(出版年)。篇名。會議論文冊名稱。主辦單位。頁數。

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

網 頁：作者(網頁日期)。資料名稱。網站站名網域網址。

【參考文獻 格式範例】

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

林靜宏翻譯(1999)，儀器分析，美亞書版股份有限公司。

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

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

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

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

著作財產權讓與同意書

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

※如不敷記載可自行增列

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

此致

經濟部產業發展署

作者：_____ 簽章
年 月 日

_____ 簽章
年 月 日

_____ 簽章
年 月 日



本期刊下載

發行所：經濟部產業發展署
台北市106信義路三段41-3號

TEL：(02)2754-1255

FAX：(02)2704-3753

本期刊全文網址：<https://proj.ftis.org.tw/eta/>