



# 工業污染防治

## Industrial Pollution Prevention and Control

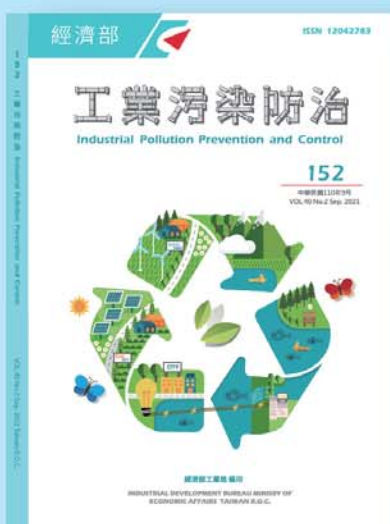
152

中華民國110年9月  
VOL.40 No.2 Sep. 2021



經濟部工業局 編印

INDUSTRIAL DEVELOPMENT BUREAU MINISTRY OF  
ECONOMIC AFFAIRS TAIWAN R.O.C.



中華民國七十一年一月創刊

中華民國一一〇年九月出刊

發行人：呂正華

總編輯：凌韻生

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

企劃：陳良棟、曾志雄、王義基、洪萱芳

執行編輯：陳見財、吳宜樺、莊茂森、陳筱薇、張映昉

發行所：經濟部工業局

出版所：經濟部工業局

台北市信義路三段41-3號

TEL：(02)2754-1255

FAX：(02)2704-3753

網址 <https://www.moeaidb.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，不代表經濟部工業局立場～

# 工業污染防治

Industrial Pollution Prevention and Control

152

中華民國110年9月  
VOL.40 No.2 Sep. 2021



經濟部工業局 編印

INDUSTRIAL DEVELOPMENT BUREAU MINISTRY OF  
ECONOMIC AFFAIRS TAIWAN R.O.C.



# 152 工業污染防治

## 環境規劃與管理類

循環經濟相關國際標準之發展及因應

..... 顧洋 1

持續追求淨零碳排海運

..... 華健、吳怡萱 15

轎車輪胎之產品環境足跡分析

..... 呂博裕、陳欽雨、韓豪程、曾琬婷 47

## 廢棄物類

矽晶型太陽能光電模組資源化技術研究

..... 陳偉聖、陳彥融 75

陰極射線管廢面板玻璃與廢觸媒燒製濕度自調節

綠色材料於室內濕度之控制 ..... 林凱隆、林雅雯、李韋皞、張文軒 105

## 廢（污）水處理類

沉浸式 UF 回收半導體封裝業晶背研磨廢水實例

..... 林政紀、吳銘昌、葉斯馨、陳進裕 131

廢（污）水生物處理氮轉化過程

林志高、黃靖修、劉穎川、胡振中、陳文興、黃良銘、黎德明、藍茜茹 145

## 環境化學與微生物類

污染場址分區改善及土地利用推動策略暨案例分析

..... 簡慧貞、王子欣、蔡豐任、朱敬平 163

## 空氣污染與噪音類

台電大林電廠 Dust Removal System (DRS) 維護實例

..... 郭函也、蔡東昇、李松明、孫振崑 185



## 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 151 期，共刊載 1,793 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「產業綠色技術資訊網」，供各界瀏覽下載。

110 年度之文稿範疇包含空污（跨媒介）整治及案例、節水廢水回收再利用、廢水氨氮及重金屬處理技術、綠色材料與永續物料管理、土壤與地下水整治、毒性化學物質管理、再生能源發展與應用、永續發展策略、生命週期評估及淨零碳排。本期共收錄 9 篇，分別撰述「循環經濟相關國際標準之發展及因應」、「轎車輪胎之產品環境足跡分析」、「持續追求淨零碳排海運」、「矽晶型太陽能光電模組資源化技術研究」、「陰極射線管廢面板玻璃與廢觸媒燒製濕度自調節綠色材料於室內濕度之控制」、「沉浸式 UF 回收半導體封裝業晶背研磨廢水實例」、「廢（污）水生物處理氮轉化過程」、「污染場址分區改善及土地利用推動策略暨案例分析」及「台電大林電廠 Dust Removal System (DRS) 維護實例」，作者慨賜宏文，提供寶貴經驗，特此致謝。

環境規劃與管理類

## 循環經濟相關國際標準之發展及因應

顧洋\*

### 摘 要

資源供需管理是人類發展過程的重要關鍵，與國家安全及民生需求息息相關。循環經濟為落實資源管理的重要策略，其理念涵蓋資源由供應、生產、消費、循環等資源生命週期階段之管理，模擬並維持自然系統之資源回復能力，以與自然系統維持和諧平衡的關係。循環經濟之推動，期望使自然資源之使用價值達到最高，並於使用後進行回收再生，降低自然資源使用及環境負荷。循環經濟之建構推動，與聯合國永續發展目標中之淨水與衛生、可負擔之能源、工業與創新基礎建設、永續城市、及責任消費與生產均有密切關連，對於產業未來發展影響極大。ISO59000 系列循環經濟標準未來可能成為國際間貿易及環保相關議題的重要里程碑，對以國際貿易為導向之我國經濟體系影響重大，應密切注意 ISO59000 系列循環經濟標準之發展狀況並加以因應配合，藉由自發性及持續性管理工作的推動，從企業經營理念開始調整規劃循環經濟之運作措施，以期達到永續發展的目標。

【關鍵字】循環經濟、永續發展目標、資源管理

\* 國立臺灣科技大學化學工程系 講座教授

### 一、前言

自然生態系統是相互依存、緊密聯繫的有機鏈結，幾百萬年來人類在與自然生態環境互動中持續生活、生產、發展。自然生態環境體系之正常運作，是人類生存發展的基礎，保護自然生態環境就是保護人類，對自然生態環境的傷害最終還是會傷及人類。回顧文明的發展歷程，人類與自然生態環境的相處長期以來大致和諧，雖然環境容量限制了經濟社會發展的空間和潛力，然而各區域環境條件的獨特性，也造成區域內人民歷史文化的多樣性以及經濟社會發展的獨特性。

自從十八世紀產業革命後，全球人口增加、生產消費形態改變，使得人類對環境資源的需求持續大幅增加，造成有限的環境資源瀕臨枯竭，也導致自然環境平衡的破壞。以我國而言，每年資源總使用量約達 3 億公噸，其中約有 70% 以上的資源仰賴進口，自產資源供給率偏低，資源供給體系的先天條件相對脆弱，每當國際間發生資源供需危機，對我國資源供給的衝擊都極為顯著。自然環境與經濟社會發展的矛盾衝突在全球各地不斷激化，自然保育理念已漸落實成為國際社會的共同典範，開始認知應匯集利害相關者共同參與規劃環境品質的維持及環境資源的公平使用，以奠定未來永續發展的基礎。近年來全球永續發展觀念的思潮，更是將範疇涵蓋「環境保護」、「社會公平」及「經濟發展」的概念。

國際自然暨自然資源保育聯盟 (International Union for Conservation of Nature and Natural Resources, IUCN) 於 1980 年首先提出永續發展定義：「在生存於不超出維生生態系統承載量的情形下，改善人類生活品質」(IUCN, 1980)。聯合國世界環境與發展委員會 (The World Commission on Environment and Development, 簡稱 WCED) 於 1987 年發表「我們共同的未來 (Our Common Future)」(WCED, 1987)，則將永續發展定義為：「滿足當代人的需求，又不危及後代人滿足其需求的發展」，說明永續發展的理念，必須具有系統整合的觀念以及跨領域、跨國界及跨世代之特性。其後由於影響永續發展的因素相當廣泛，因此國際間逐漸將社會、經濟等議題納入永續發展相關討論。聯合國又於 1992 年舉行地球高峰會議 (World Summit) 通過「廿一世紀議程 (Agenda 21)」，提出「全球考量，在地行動」概念，敦促各國制訂並實施永續發展策



略，並加強國際合作 (UNCED, 1992)。2000 年千禧年高峰會 (Millennium Summit)，通過「聯合國千禧年宣言」(United Nations Millennium Declaration)，呼籲全球於 2015 年前實現 8 項「千禧年發展目標 (Millennium Development Goals, 簡稱 MDGs)」(United Nations, 2000)。

千禧年發展目標經過 15 年的推動，以全球彙整數據來看，其中多項發展目標已經取得相當具體的改善成果，然而這些成果很大部分歸因於少數開發中國家（尤其是中國大陸）的顯著進步，亦即全球各國發展之表現落差可能越來越大，留下許多尚待努力改善的空間。因此聯合國「2015 年千禧年發展目標報告」對於後續推動全球永續發展，提出「一個都不能落後 (leaves no one behind)」的期望 (United Nations, 2015)。其後考量當前全球所面臨之多項重要議題，包括：全球氣候變化以及環境生態系統惡化情形遠超過預期；跨域間衝突（戰爭與恐怖行動等）成為人類發展的最大威脅；國際間生產與消費失衡，引發資源、經濟及失業問題嚴峻；全球城市與社區發展快速、基本服務及建設卻遠遠不足等，因此 2012 年聯合國永續發展會議 (The United Nations Conference on Sustainable Development, 或稱為 Rio+20 會議)，提出「我們需要的未來」(The Future We Want)，並於 2016 年通過「2030 年永續發展議程 (Agenda 30)」，以人類 (People)、地球 (Planet)、繁榮 (Prosperity)、和平 (Peace)、伙伴關係 (Partnership) 為主軸，其內容包括 17 項永續發展目標 (Sustainable Development Goals, 簡稱 SDGs) 及 169 個細項指標 (Targets)，作為國際間於 2016 至 2030 年間推動永續發展的依據 (United Nations, 2019)。

然而由於地緣、政治、環境、和經濟等因素的差異，對於永續發展相關的許多議題，國際間看法相當分歧，仍然不易建立共識。以政治而言，所謂大國是否願意摒除己私，針對永續發展相關的特定議題，負起國際領導責任？並且平視平等尊重其他國家的立場及參與權利？以經濟而言，已開發國家是否願意對開發中國家提供適當的協助？開發中國家是否應複製已開發國家的經濟發展歷程？經歷多年以來的努力，許多永續發展相關議題經由簽訂國際公約指令或制定國內法令規範而得到舒緩，但是仍然有更多的永續發展相關議題需要受到更多的關注，並期望能有效解決。

## 二、國際間推動循環經濟之趨勢

資源供需管理一直是人類社會經濟發展過程的重要關鍵，與國家安全及民生需求息息相關。由於自產業革命以來，資源開採、生產、使用到廢棄之傳統線性運作模式，已造成全球資源過分消費、自然資源耗竭及環境污染嚴重等問題。過去四十年以來，全球人類每年總資源使用量增加約 3 倍，2017 年全球人類每年總資源使用量第一次超過 1,000 億公噸，預期 2050 年時可能將達到約 1,800 億公噸 (OECD, 2015; PACE, 2019)。

國際間自 1980 年代起開始致力推動許多廢棄物預防及減量相關措施，我國歷年來亦陸續推動包括污染預防、環保化設計、環境管理及永續發展等理念，配合工業減廢、清潔生產技術、以及綠色工廠等措施的推動，以期降低對自然環境之衝擊 (顧洋，2016)。OECD(Organization for Economic Cooperation and Development) 於 2001 年基於生命週期概念，提出具全面性、前瞻性之永續資源管理方案 (Sustainable Material Management, 簡稱 SMM)(OECD, 2001)。其後歐盟、德國、荷蘭及日本等國家陸續推動永續資源管理相關之國家層級政策，期望結合政府、產業及民眾力量，進行關鍵資源之有效管理及回收再利用、推動生態化設計與工業生態、並開創新商業模式，朝向零廢棄、低碳排、降低環境衝擊、創造工作機會與促進經濟成長等目標。但是這樣的呼籲與行動，似乎對於全球資源過量消費趨勢的影響極為有限，近年來全球人類總資源使用量仍然持續增長。

循環經濟為落實資源永續管理的重要策略，其理念涵蓋資源由供應、生產、消費、循環等生命週期階段之管理，模擬並維持自然系統之資源回復能力，以與自然系統維持和諧平衡的關係 (Patil, et al., 2020)。麥克阿瑟基金會 (The Ellen MacArthur Foundation) 於 2013 年提出以「符合經濟效益」為基礎的循環經濟理念，運用重新設計 (ReDesign)、循環製程 (Circular Processing)、循環農業 (Circular Agriculture)、封閉循環 (Closing the Loop)、合作 (Collaboration)、創新商業模式 (Innovative Business Model) 等方式創造資源價值，以兼顧「資源利用效益極大化、環境衝擊影響極小化」之目標，促進資源永續使用、保育自然資源、及提升綠色經濟 (Ellen Mac Arthur

Foundation, 2013)。以此觀之，循環經濟並非全新的概念，其中關於資源管理、生態設計等關鍵理念及推動措施已被推動數十年，但並未廣泛落實於全球各領域。依據 PACE 發表之 2021 年循環差異分析報告 (The Circularity Gap Report - Circle Economy)，則提出 4 項推動物質流循環的策略：窄流 (Narrow flows - use less)、緩流 (Slow flows - use longer)、再生流 (Regenerated flows - make clean)、以及循環流 (Cycle flows - use again) 等 (PACE, 2021)。

2014 年世界經濟論壇 (World Economic Forum) 即已提出實施循環經濟策略對於全球個體及總體經濟都有助益，循環經濟將是價值數以兆計的發展機會，對於創新、就業、與經濟成長的潛力極大 (WEF, 2014)。歐盟環境署 (The European Environment Agency) 指出循環經濟理念可適用於各種自然資源之循環再使用，包括生物或非生物資源、水域及陸域資源。推動執行生態設計 (Eco-design)、修復 (Repair)、再利用 (Reuse)、翻新 (Refurbishment)、再製造 (Remanufacture)、產品共享 (Product sharing)、廢棄物預防及回收 (Waste prevention and waste recycling) 等策略，對於推動循環經濟都有很好的績效 (EEA, 2016)。

彙整近年來許多國家的實施成果顯示，推動各種循環經濟相關措施可以對節約成本、創造就業機會、技術創新、提升生產力及資源效益等都帶來顯著改善。但是整體而言，目前全球資源循環的比例大約只為 8.6% 左右，甚至較 2019 年的 9.1% 反而略有下降，循環經濟的推動效果似乎有限 (PACE, 2021)。麥克阿瑟基金會曾估計倘若歐盟能夠持續積極推動循環經濟相關措施，至 2030 年時每年可以節省約 6,000 億歐元的淨資源支出、提升約 3% 資源效益以及創造約 1.8 兆歐元的淨效益 (Ellen Mac Arthur Foundation, 2015)。至於推動循環經濟相關措施可衍生的環境效益部份，有學者推估瑞典若能落實推動循環經濟相關策略，全國整體能資源效益估計將可大幅提升 25% (Wijkman and Sköranberg, 2015)。據 PACE 估計全球約 70% 的溫室氣體排放與原物料開採使用有關，顯示循環經濟對於因應全球暖化的關鍵地位，若各締約國能依其提交聯合國之國家自訂貢獻 (Nationally Determined Contributions, NDCs)，積極規劃減少碳排，推動循環經濟，將有降低目前溫室氣體排放量約 39% 以及原物料耗用量約 29% 的潛力，預期 2050 年時全球人類每年總資源使用量將可能自約 1,800 億公噸降

## 6 循環經濟相關國際標準之發展及因應

低至 700 億公噸 (PACE, 2021)。依據 Ecofys and Circle Economy 的研究報告，若全球可積極推動化學品租賃、農用肥料回收、營建材料再利用、及交通工具共享模式等幾項循環經濟實務作為，全球每年可望降低約 75 億噸二氧化碳當量的溫室氣體排放量 (Ecofys and Circle Economy, 2016)。推動循環經濟相關措施對於大幅降低一般及事業廢棄物產生量亦深具潛力；可以提升廢棄物管理效能，減少對於掩埋場或焚化廠的需求 (Tisserant et al. 2017)。

至於推動循環經濟相關措施可創造就業的部份，估計目前法國大約有 800,000 個工作與循環經濟相關，占法國就業人口約 3% (Schroeder, et. al., 2018)。若全面推動循環再利用及再製造等循環經濟相關措施，依據推估英國將可以在 2030 年創造出 517,000 個技術工作職位 (Morgan and Mitchell, 2015)。而歐洲環境局 (The European Environment Bureau) 則估計，到 2025 年時歐洲將會有 63~75 萬個與循環經濟相關的工作職位 (EEB, 2014)。但是歐洲學術科學諮議委員會 (European Academies' Science Advisory Council, EASAC) 則指出，目前推動循環經濟相關技術及管理人員明顯不足，缺乏專業人員將成為全球推動循環經濟轉型的主要障礙，應迅速提升循環經濟相關教育養成及訓練 (European Academies' Science Advisory Council, 2015)。

企業經營轉型為循環經濟模式是相當大的挑戰，依據將企業實施循環經濟方式分類結果顯示 (Bocken and Short, 2016)，迄今循環經濟的推動還是以技術提升相關措施為主，包括提升物質及能源使用效率、廢棄物加值化、使用可再生能資源等。但是有關社會面的推動方式，如道德貿易 (ethical trade，指對勞工福祉、自然資源保護和環境永續等議題負責的貿易採購)、教導消費者減少非永續消費、以及發展需求驅動的企業模式 (Sufficiency-driven Business Models) 等仍然不是目前循環經濟推動的主流，因此相關循環經濟方式之開發及實務運作的推動仍待加強，而推動循環經濟對於企業及社會的具體效益亦仍待驗證。目前企業推動循環經濟主要推動力來自管理階層及全體員工對於環境資源保育的共識，而推動相關措施的主要障礙則是缺乏供需網絡以及資金 (Rizos, et al., 2016)。

循環經濟已經成為許多跨國企業經營及部份國家在資源政策管理的重要理念 (Lacy, et. al., 2014; EC, 2015)，循環經濟相關策略的推動被認為對於落實聯合國永續



發展目標 (UNSDGs) 確有具體助益。國外檢討推動各種類型循環經濟策略的績效，證實循環經濟策略有助於多項永續發展目標的達成，尤其是對於第六項 (淨水及衛生)、第七項 (潔淨能源)、第八項 (就業及經濟成長)、第十二項 (負責的消費及生產) 及第十五項 (陸域生態) 等目標有非常具體的貢獻。實施循環經濟策略，亦可間接協助其他幾項永續發展目標的推動，如第一項 (降低貧窮)、第二項 (終結飢餓) 及第十四項 (水域生態) 等。而落實聯合國永續發展目標亦有助於推動循環經濟，尤其是第四項 (教育品質) 及第十六項 (和平、正義與機構) 等目標的落實，對於提供推動循環經濟相關策略所需的專業技能及有效治理極為關鍵；而第九項 (工業、創新、及基礎建設) 目標的推動，則確保推動循環經濟相關策略所需的硬體設施及基礎建設 (Schroeder, et, al., 2018)。

我國因應國際間推動循環經濟之趨勢，行政院於 2018 年提出「循環經濟推動方案」，以「循環產業化」、「產業循環化」為主軸，藉由協助關鍵產業研發創新材料技術及推動再生資源高值化，運用產官學之研發、人才、技術等能量，建構並落實新循環示範園區，並將其整合及規劃之經驗推廣至企業、產業、既有產業園區、地區及國際輸出 (行政院，2018)。其後並於經濟部工業局成立循環經濟推動辦公室，建立溝通平台與整合機制，設置循環經濟資源資料庫，將相關資訊提供產業分享與媒合，並辦理國內外宣導、推廣、展覽等活動，使產業間相互分享經驗，強化國際交流與資源再生技術行銷，積極促進技術合作，以創造資源最大價值 (循環經濟推動辦公室，2018)。

### 三、循環經濟相關國際標準之發展歷程

循環經濟是全球推動永續發展共同面臨的重要挑戰，並且應該落實在國家、產業、和企業層級推動。近年來循環經濟相關活動蓬勃推動，已經有許多國家、產業、和企業開始推動各種的循環經濟實施計劃，提供更具積極性的循環經濟策略選擇。但各界對於循環經濟之理念內涵、實施範疇、績效呈現的差異逐漸顯現，突顯了對於循環經濟相關議題「標準化」的迫切須求，而目前各種循環經濟相關的管理規範，仍然相當不完整。為了在國際能持續且廣泛推動循環經濟相關措施及倡議，建立各界對循環經

## 8 循環經濟相關國際標準之發展及因應

濟的信心，必須整合循環經濟之認知及結合管理之理念，以協助組織能更有效的面對循環經濟相關議題。循環經濟策略管理的設計必須完整；尤其是須要依據透明、有效、且可信賴的標準化績效量測方式，認驗證循環經濟策略執行績效，降低相關數據的誤差，以做為國家、產業、和企業選擇運用循環經濟策略的依據。有關循環經濟機制之管理，其中重要的議題需求包括以下幾項：

1. 須建立國際間對循環經濟績效量測及稽核的共識。
2. 須建立獨立的循環經濟相關的實施架構及相關執行指引。
3. 須建立循環經濟相關的績效評估準則。
4. 須建立循環經濟相關數據登錄及報告格式。

國際標準組織 (International Standards Organization, ISO) 由全球一百餘國參與，具有相當完整而有效的意見討論運作機制，因此對於循環經濟牽涉這麼廣泛的議題，可充分滿足各國意見表述及討論所需要的開放空間。ISO 於 2018 年成立 ISO/TC323 循環經濟技術委員會，由法國標準協會 (AFNOR) 擔任秘書單位，目前技術委員會有 74 國之標準機構參與 (ISO, 2021)。ISO/TC 323 自 2019 年在法國巴黎召開首屆年會，匯集全球各國專家著手梳理循環經濟相關的標準化架構、指引、工具、及規範等之需求，2020 年又於法國巴黎召開第二屆年會，決議於技術委員會下設 4 個工作小組。技術委員會將循環經濟定義為可回復或可再生的經濟，並特別強調永續發展與循環經濟間密不可分且錯綜複雜的關連性，ISO/TC 323 技術委員會預計在 5 年內積極完成 ISO59000 系列循環經濟標準之訂定，目前各工作小組已積極著手起草以下 6 項循環經濟相關國際標準，包括：

1. ISO/WD 59004 循環經濟 - 實施架構與原則 (Circular economy - Framework and principles for implementation)
2. ISO/WD 59010 循環經濟 - 營運模式與價值鏈指引 (Circular economy - Guidelines on business models and value chains)
3. ISO/WD 59020.2 循環經濟 - 循環性架構量測 (Circular economy - Measuring circularity framework)

4. ISO/CD TR 59031 循環經濟 - 基於績效之方式 - 個案分析 (Circular economy - Performance-based approach - Analysis of cases studies)
5. ISO/DTR 59032.2 循環經濟 - 營運模式實施檢討 (Circular economy - Review of business model implementation)
6. ISO/AWI 59040 循環經濟 - 產品循環性數據表單 (Circular Economy - Product Circularity Data Sheet)

## 四、我國因應循環經濟相關國際標準訂定之建議

循環經濟相關國際標準的制訂與推動，目的在使組織不再滿足於被動遵守環境或資源管理相關法規，而願意成為積極推動循環經濟相關措施的參與者，以邁向永續經營的境界。產業界應認知實施循環經濟相關國際標準的目的，不僅在取得驗證以保持外銷競爭力及提升形象，更重要的是在藉系統之推行來提高公司資源管理績效及經營效率，並進而改良企業經營體質，建立永續經營基礎。以下為對於我國未來持續推動循環經濟相關策略之參考建議。

### 1. 儘速制訂與國際標準相對應之國家標準

我國應可不待 ISO59000 標準正式公布，即預先參考其 DIS 草案，儘速同步起草與 ISO59000 一致的國家循環經濟標準，未來其標準編號方式應儘量與 ISO 59000 編號相對應，可減少未來推動循環經濟標準時，標準編號不同之困擾。

### 2. 研析規劃 ISO59000 系列循環經濟標準認證體系

我國應考量國際對於 ISO59000 系列循環經濟標準認證體系之發展趨勢，研析我國建置相關認證體系之需求，規劃認證體系相關規範以及評審員之訓練登錄等，並積極參與國際認證組織，減少未來重覆評鑑需求及相關國際貿易障礙。

### 3. 規劃建立循環經濟稽核及績效評估方法

環境績效評估的發展一直受到多方重視，但環境績效評估真正有系統性的發展與定義，則始於 1990 年代 ISO 14031 環境績效評估國際標準的訂定。建議應針對我國多年以來已推動之循環經濟相關案例，探討其循環經濟相關績效評估方法與執行架

## 10 循環經濟相關國際標準之發展及因應

構，並引進 ISO59000 系列循環經濟標準之稽核及績效評估方法，建立適合我國相關應用之循環經濟績效指標。

### 4. 推動將循環經濟概念具體納入既有標章制度

環境標誌與宣告（一般稱為稱環保標章）是國際間為配合綠色消費設計的環境管理工具，以利消費者選擇有利於環境的產品，同時也促使廠商願意開發相關產品，以提升產品市場占有率及公司形象。建議未來我國環保標章相關規範，應具體納入循環經濟理念，並爭取與國內外環保標章制度之認同。

### 5. 持續進行生命週期評估技術研發並建立相關資料庫

循環經濟理念涵蓋完整的資源生命週期，係包括從資源開採、處理到產品的製造及運輸銷售，以至於使用及廢棄整個過程中資源使用、能源消耗以及污染生成狀況之了解作完整分析。生命週期研究有助於提供組織進行資源管理，我國應積極進行生命週期評估技術運用於循環經濟之研發及相關資料庫之建立。

### 6. 推動相關循環經濟標準之宣導與輔導工作

目前國內循環經濟輔導個案集中於少數輔導單位，而推動循環經濟之廠商亦以中大型廠商為主，因此輔導單位輔導經驗之擴散及加強中小廠商輔導等相關問題，應為未來推動輔導工作的重點項目。建議應依據 ISO59000 系列循環經濟標準要求，積極規劃有關循環經濟標準之宣導與訓練、推動不同類型廠商示範計畫、建立完善之輔導及教育訓練體系，以系統建制和技術改善雙向並進的方式，協助廠商推動循環經濟系統。

### 7. 考量循環經濟管理與既有環保行政措施結合之方式

符合組織所在地政府相關法規要求，為組織符合 ISO59000 系列循環經濟標準之基本要求，因此行政單位對於循環經濟認證驗證體系之支持，影響廠商建置循環經濟系統之品質。建議未來我國行政單位應檢討資源管理及環保相關法規與循環經濟之關連性，必要時進行相關法規之檢討調整，以利於我國推動落實循環經濟相關策略。

## 五、結論

推動循環經濟已經成為國際潮流，建制與運作積極有彈性的系統，應該是組織因勢利導面對永續發展挑戰，建立永續經營之新契機的終極目標。ISO59000 系列循環經濟標準未來可能成為國際間貿易及環保相關議題的重要里程碑，對以國際貿易為導向之我國經濟體系影響重大，應密切注意 ISO59000 系列循環經濟標準之發展狀況並加以因應配合。循環經濟系統的建制與運作，必須落實「持續改善」的觀念，且應該隨著社會環境的變遷、利害相關者的期望而調整。「一次完成」的管理系統，並不能提供「終身保障」。有關我國推動循環經濟相關策略面臨之挑戰為：製程及產品應依生命週期循環思維設計，考量提升資源使用效益之空間；綠色消費運作模式仍須精進；資源生命週期各階段之管理涵跨含括政府各主管機關，整合性管理挑戰度相當高。

面對未來永續發展相關課題多元而複雜的挑戰，須認知保育自然環境就是發展生產力，以建立社會經濟與自然環境的共生架構。由於國際政局變動、國際環保及貿易等趨勢日益複雜，且我國地狹人稠，自然資源有限，對循環經濟及永續發展的期望，的確比其他國家更為迫切，並且面臨更困難的挑戰，有賴各界建立共識共同努力，以主動前瞻的方式因應相關議題，規劃循環經濟及永續發展相關之運作策略，積極推動相關措施及技術，將資源管理提升至循環經濟方向邁進，以期達到永續發展的目標。



## 參考文獻

行政院 (2018)，循環經濟推動方案。

循環經濟推動辦公室 (2020)，<https://www.cepo.org.tw/PageContent.aspx?uid=af99bd0b-164f-49d5-81c3-5160acbaa1572018>。

顧洋 (2016)，「第一章國際永續發展與主要環境議題之發展趨勢與因應」，企業永續基石 - 企業社會責任與非財務資訊揭露 (簡又新主編)，台灣永續能源研究基金會。

Bocken, N. M. P. and S. W. Short (2016), Towards a Sufficiency-driven Business Model: Experiences and Opportunities, *Environmental Innovation and Societal Transitions* 18, 41–61.

EEA (European Environment Agency) (2016), Circular Economy in Europe—Developing the Knowledge Base, EEA Report No. 2/2016.

EEB (European Environmental Bureau) (2014), Advancing Resource Efficiency in Europe: Indicators and Waste Policy Scenarios to Deliver a Resource Efficient and Sustainable Europe.

EC (European Commission) (2015), Closing the Loop—An EU Action Plan for the Circular Economy.

Ecofys and Circle Economy (2016), Implementing Circular Economy Globally Makes Paris Targets Achievable, [www.ecofys.com/en/publications/circular-economy-white-paper-ecofys-circleeconomy/](http://www.ecofys.com/en/publications/circular-economy-white-paper-ecofys-circleeconomy/).

Ellen MacArthur Foundation (2013), Towards the Circular Economy, Cowes, UK: Ellen MacArthur Foundation.

Ellen MacArthur Foundation (2015), Delivering the CircularE: A Toolkit for Policymakers. Cowes, UK: Ellen MacArthur Foundation.

European Academies' Science Advisory Council (2015), Circular Economy: A Commentary from the Perspectives of the Natural and Social Sciences, Brussels and Halle, [www.easac.eu/fileadmin/Reports/Easac](http://www.easac.eu/fileadmin/Reports/Easac).

International Standards Organization (2021), <https://www.iso.org/committee/7203984/x/catalogue/p/0/u/1/w/0/d/0>.

International Union for Conservation of Nature and Natural Resources (1980), World Conservation Strategy.

Lacy, P., J. Keeble, R. McNamara, J. Rutqvist, T. Haglund, M. Cui, A. Cooper (2014), Circular advantage: Innovative Business Models and Technologies to Create Value in a World without Limits to Growth, Chicago, IL, USA: Accenture.

Morgan, J. and P. Mitchell (2015), Employment and the Circular Economy: Job Creation in a More Resource Efficient Britain, London: WRAP and Green Alliance.

OECD (Organization for Economic Cooperation and Development) (2001), OECD Environmental Strategy for the First Decade of the 21st Century, OECD Publishing.

OECD (Organization for Economic Cooperation and Development) (2015), Material Resources, Productivity and the Environment. OECD Publishing.

PACE (Platform for Accelerating Circular Economy) (2018), The Circularity Gap Report – Circle Economy.

PACE (Platform for Accelerating Circular Economy) (2021), The Circularity Gap Report – Circle Economy.

Patil, R. A., Seal, S., and Ramakrishna, S., (2020), Circular Economy, Sustainability and Business Opportunities, The European Business Review, <https://www.europeanbusinessreview.com/circular-economy-sustainability-and-business-opportunities/>

Rizos, V., Behrens, R. V., van der Gaast, A. W., Hofman, E., Ioannou, A., Kafyeke, T., Flamos, Rinaldi, A. R., Papadelis, S., Hirschnitz-Garbers, M., and Topi, C. (2016), Implementation of Circular Economy Business Models by Small and Medium-sized Enterprises (SMEs): Barriers and Enablers, Sustainability, 8, 11, 1212-1229.

- Schroeder, P., Anggraeni, K., and Webe, U. (2018), The Relevance of Circular Economy Practices to the Sustainable Development Goals, *J. Ind. Eco.*, 23, 1, 77-95.
- Tisserant, A., S. Pauliuk, S. Merciai, J. Schmidt, J. Fry, R. Wood, and A. Tukker (2017). Solid Waste and the Circular Economy: A Global Analysis of Waste Treatment and Waste Footprints. *J. Ind. Eco.*, 21, 3, 628–640.
- United Nations Conference on Environment and Development (1992), Agenda 21.
- United Nations Sustainable Development Knowledge Platform (2016), <https://sustainabledevelopment.un.org/index.html>.
- United Nations (2000), [https://www.un.org/en/development/desa/population/migration/generalassembly/docs/globalcompact/A\\_RES\\_55\\_2.pdf](https://www.un.org/en/development/desa/population/migration/generalassembly/docs/globalcompact/A_RES_55_2.pdf).
- United Nations (2015), [https://www.un.org/millenniumgoals/2015\\_MDG\\_Report/pdf/MDG%202015%20PR%20Overview.pdf](https://www.un.org/millenniumgoals/2015_MDG_Report/pdf/MDG%202015%20PR%20Overview.pdf).
- United Nations (2019), <https://sustainabledevelopment.un.org/sdgs>.
- World Commission on Environmental and Development (1987), Our Common Future.
- World Economic Forum (2014), Towards Circular Economy: Accelerating the Scale-up across Global Supply Chains.
- Wijkman, A., and K. Skånberg (2015), The Circular Economy and Benefits for Society Swedish Case Study Shows Jobs and Climate as Clear Winners. The Club of Rome.

環境規劃與管理類

## 持續追求淨零碳排放海運

華健\*、吳怡萱\*\*

### 摘 要

全球海運排碳約占全球人為總排碳量 3.3%，若不採取行動，估計此數字可在 2050 年增為 3 倍。船運採行具市場規模技術，以改善船殼、引擎及推進器的設計，可望降低燃料消耗。更積極的技術，包括像是替代燃料及例如風帆驅動等各類超低碳概念船舶，已然證明有效，但卻尚未達市場規模。目前海運所用的主要替代燃料不外液化天然氣 (liquefied natural gas, LNG) 與電動 (以岸電對電池充電)，其餘替代燃料仍極有限，然未來勢必走向採用產自再生能源零碳燃料的道路。開發大型遠洋船舶所用的零碳燃料，將需要誘因及設限並進。而透過全球以市場為基礎的工具所建立的價格信號，以阻止使用碳基燃料將不可或缺。海運是在運輸上追求永續的最佳著力點，其僅小幅改進，即可帶來重大效益。永續海運的發展，也勢將在環境、社會及經濟這三項永續性的支柱上齊頭並進。歐盟已宣布，將在 2050 年前將海運年度總溫室氣體 (greenhouse gases, GHGs) 排放至少減至 2008 年的 50%。近年來，已有愈來愈多的船運業者戮力符合永續發展的管理觀念，台灣在整體及航運政策上皆亟待迎頭趕上。

【關鍵字】海運、溫室氣體排放、永續、替代燃料、節能、減碳

\* 海洋大學輪機工程學系

教授

\*\* 東吳大學會計學系

副教授

## 一、日趨重要的永續海運

消費、海運及全球經濟之間緊密連結。海運是能源效率最高的貨運方式。例如，以船舶取代飛機運送國際貿易貨物，大約可降低 90% 以上的 CO<sub>2</sub> 排放 (Grisenko, 2017; Hansen 等，2020)。不難預期，隨著未來愈來愈多的海運取代陸路與空運，全球 CO<sub>2</sub> 排放可進一步降低。因此，在政策上與其僅止於狹隘的依許多人所主張，力圖降低食物里程 (food miles)，實應同時積極推動更有效率的海運等運輸型態。世界知名的貨櫃船運公司 Maersk Line 已能透過對個別船舶排放的調查，對其客戶提供可靠的 CO<sub>2</sub> 排放數據，作為比較參考 (OECE/ITF, 2018)。

近年來常聽到針對節能減碳的一項主張是：停止全球貿易，在地生產貨物，才是避免運輸造成排放的解決之道。但在 Transformative Solution Leadership 報告當中的 Smart Goods Transport 一節，卻有不同的論述。其建議在政策上從原本「如何降低運輸」的觀點，轉而著眼於如何將此社會所需的服務，由具最低 CO<sub>2</sub> 排放的方式提供 (Rohim, 2016)。

許多船運環境評估研究所針對的，都是諸如廢氣、廢水排放等一般污染物。其餘許多重要的污染物（例如壓艙水、防污塗料、冷媒等），卻可能對最終環境表現構成改變，導致比我們最初想到的更糟。本文從環境指標實例談起，討論當前全球共同追求的永續海運。

## 二、海運與環境

### 2.1 源自船舶的海洋污染

隨著諸如漁業資源驟降及海洋廢棄物等議題的報導與討論，海洋環境保護成為當前全球共識。爾來許多倡議團體要求針對海運對全球氣候變遷的貢獻，負起更大責任並加強規範。根據世界自然基金會 (World Wildlife Fund, WWF) 與綠色和平 (Greenpeace International) 於 2010 提交聯合國海洋環境委員會 (UN Marine Environment Protection Committee, MEPC) 的聲明：海運為尚未受到規範的排放源。另外，儘管船舶大部分時間都在海上，世界各地仍分別提出許多，減輕海運對當地環境造成衝擊的要求 (Walsh 等，2019)。



在全球海岸地區，船所排放的微粒 (particulate matter, PM) 及硫氧化物 (sulfur oxides, SOx)，估計每年造成的提前死亡人數超過 60,000 人 (Corbett 等，2018)。世界衛生組織 (World Health Organization, WHO) 於 2013 年將船舶的空氣排放，列入致癌戶外空氣污染物清單當中 (Berg 等，2012；Berkhout 等，2012)。總而言之，海運與港口對海洋環境可能造成 2 方面的影響。首先為意外事故，例如一般人所熟悉的船舶觸礁後的溢油事件；其次為「正常」運轉所造成的，例如三丁基錫 (tributyltin, TBT) 防污塗料，對海洋生物的毒性影響 (Hua & Liu, 2007)。以下摘述幾個源自船舶的污染。

### 2.1.1 溢油

溢油 (oil spills) 屬最常被提起的船舶污染，然其量數卻遠低於艙底水等船舶在日常運轉當中所排放到海洋環境的。1989 年發生在美國阿拉斯加威廉王子灣 (Prince William Sound) 的艾克森瓦爾的茲 (Exxon Valdez) 油輪，屬最有名的溢油事件。儘管經過眾多科學家與志願者的努力，仍有超過 400,000 隻海鳥、1,000 隻水獺及無數魚類死亡 (Dincer, 2018)。

### 2.1.2 艙底水

在船上，從引擎與機艙漏出的水或是從機器保養產生的油，會混合成為艙底水 (bilge water)。以一般大型郵輪為例，其每歷經 24 小時運轉，平均可產生 8 公噸的含油艙底水。為維持該船穩度及減輕油氣可能構成的危害，艙底空間須定期沖洗並將水排空。雖然正常情形下，艙底水在排出船外之前都會經過油水分離器處理，然該處理器一旦發生故障，未經處理的艙底水便很有可能旁通而直接排入海中。

### 2.1.3 污水

污水 (sewage) 主要源自於廁所、醫務室的廢水，當中所含有害細菌、病原、病毒、腸道寄生蟲、及有害營養質。排放未經處理或處理不當的污水，可造成捕魚區或甲殼魚海床的病菌或病毒污染，對人體健康構成風險。污水當中例如氮與磷等養分，可促

成藻類過度繁茂、過度消耗水中溶氧，而危及魚類生命並破壞其他水生生物。一艘搭乘約 3,000 乘客與船員的大型郵輪，估計每天可產生 55,000~110,000 公升的污水。

灰水 (greywater) 為源自船上的水槽、淋浴間、廚房、洗衣間及清洗活動的廢水。其含有各種不同的污染物質，包括糞便大腸桿菌 (fecal coliforms)、清潔劑、油、脂、金屬、有機化合物、石油碳氫化合物、營養質、廚餘、藥品及牙醫廢棄物。灰水也可因含有高濃度的營養質和其他耗氧物質，而對環境有負面影響。灰水往往是郵輪所產生最大宗的液態廢棄物 (約占全部的 90%~95%)。估計每人每日產生 110~320 公升的灰水，相當於一艘 3,000 人郵輪每天可產生 330,000~960,000 公升。

### 2.1.4 固體廢棄物

船上產生的固體廢棄物，包括玻璃、紙、厚紙板、鋁鐵罐、及塑膠。這些固體廢棄物一旦進入海洋，即成為海洋垃圾或簡稱海廢 (marine debris)，可對海洋生物、人、海岸社區及汲取海水使用的各種產業，構成威脅。商船上一般都藉由結合源頭減量、廢棄物減量及回收等作法，對固體廢棄物進行管理。然而以郵輪為例，船上人員平均每天產生將近 1 公斤固體廢棄物，有多達 75% 需透過焚化處理，其灰燼一般都海拋，有些則在靠岸時交由岸上處理。

### 2.1.5 大氣污染

船舶排放的廢氣，包括傳統空氣污染物及 GHGs 在內的重要空氣污染源。研究指出，源自於船舶的二氧化碳 (carbon dioxide, CO<sub>2</sub>)、氮氧化物 (NO<sub>x</sub>)、SO<sub>x</sub> 的排放，分別占了全球人為總排放量的 2~3%、10~15% 及 4~9% (Beecken 等，2014; Becagli 等，2012; Alföldy 等，2013)。IMO 預估，若不採取行動，在 2050 年之前，源自海運的 CO<sub>2</sub> 排放可升高 50%~250% (Pirojola 等，2014)。

### 2.1.6 壓艙水

郵輪、大型油輪及散裝貨輪等各型商船，在輕載情況下通常會汲取海岸附近的水到船上作為壓載 (ballasting)，接著在下個造訪的裝載港口，將這些壓艙水排出。排出的壓艙水一般都含有較大的動、植物及微小的病毒與細菌。其中包含非原生、嫌惡的外來物種，可能對生態與經濟構成傷害，同時也可能對人體健康，造成嚴重威脅；全球可經由壓艙水傳送的入侵物種 (invasive species)，數以百計。

### 2.1.7 船舶塗料污染

船殼上長出的生物 (biofouling) 可導致航行額外受阻、減緩航行並增加燃料消耗，同時亦可能成為全世界有害物種入侵的傳輸工具。早期航海，為防止船殼上藻類與貝類等海生物附著，用來塗在船殼上的先是石灰，接著是砷。後來，化工界開發出有效的金屬化合物防污油漆，一般也都會在船殼塗防污油漆 (antifouling paint)。但研究發現，這些逐漸析出進入海水的化合物，不只可殺死附著在船殼上的生物，其也可常存於海洋殺害其他生物、危及環境，並可能進入食物鏈。經研究證實，1960 年代所開發出最有效，含有有機錫 TBT 的防污油漆，可造成牡蠣突變及蛾螺性畸變 (Hua & Liu, 2007)。

### 2.1.8 聲響污染

近年來船舶所造成的噪音持續上升，船舶產生的噪音，可在水中傳送相當長的距離。遷徙物種保育公約 (Convention on the Conservation of Migratory Species) 指出，海洋噪音會對海洋生物構成威脅。當鯨魚賴以互相溝通的能力受到破壞，將對其構成極大威脅，甚至足以影響其生存能力 (Vakili 等，2020)。

### 2.1.9 野生動物撞擊

海洋哺乳動物像是鯨魚和海牛 (manatees) 確有遭船撞導致死傷的風險。例如有研究指出，1 艘 15 節航速的船撞上一尾鯨魚，有 79% 的機會致其於死 (Ward-Geiger

等，2005)。僅存不到 400 尾的北大西洋露脊鯨 (North Atlantic right whale)，所受到最大威脅便是遭船撞傷。由於撞船致死可導致絕跡的威脅，美國國家海洋漁業署 (National Marine Fisheries Service, NMFS) 及國家海洋與大氣局 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 於 2008 年推出，減少北太平洋露脊鯨撞船船速限制。其雖已於 2013 年失效，然到了 2017 年突然又出現死亡事件，有 17 尾北大西洋露脊鯨，主要因撞船和遭漁網纏繞而致死亡。

### 2.2 防止船舶污染海洋國際公約

透過立法以保護海洋，早已成為全球大勢所趨。自從 1973 年防止船舶污染公約 (International Convention for the Prevention of Pollution from ship, MARPOL) 公佈實施以來，各海事大國與其組成的區域，無不自訂法規以保護本國與區域的海洋環境。二戰之後，1951 年聯合國決議成立跨政府海事諮詢組織 (Inter-Governmental Maritime Consultative Organization, IMCO)，後改名為國際海事組織 (International Maritime Organization, IMO)。1954 年英國針對海洋油污染，邀集全球主要海運國家，在倫敦舉行國際海水油污染會議，通過防止海水油污染國際公約 (International Convention for the Prevention of Pollution of the Sea by Oil, 1954)。

後來人們逐漸警覺到，實際上造成海洋環境傷害的並不僅只油一種類型，才在 1973 年針對油及其他毒物、污染及垃圾等問題，通過 MARPOL 公約。當時的公約當中，附有目前公約當中之前 5 項附錄規則 (簡稱附則, Annex)。接著在 1978 年的「易燃物船及防止污染國際會議」當中，通過「關於 1973 年防止船舶污染國際公約的 1978 年議書」(Protocol of 1978 Relating to the International Convention for the Prevention of Pollution from Ship, 1973)，簡稱 MARPOL 73/78 公約，於 1983 年生效。接下來 20 年內，其餘附則亦陸續生效並付諸實施。

#### 2.2.1 特別區域

MARPOL 公約將某些特定海域範圍定義為特別區域 (special areas)，以採行防止海洋污染方法，使符合有關於海洋地理與生態狀況及海運的需求。在此公約下，這些

特別區域會受到比全球其它海域更高程度的保護。表 1 所列，為 MARPOL 各附則中，最初所訂定的特別區域 (IMO, 2018)。後續可能隨其他區域相關國家提出爭取而陸續增加。

表 1 MARPOL 公約當中劃定的特別區域

| Annex I: Oil                                          |                       |
|-------------------------------------------------------|-----------------------|
| 地中海                                                   | 亞丁灣                   |
| 波羅的海                                                  | 南極地區                  |
| 黑海                                                    | 歐洲西北海域                |
| 紅海                                                    | 阿拉伯海葉門地區              |
| 海灣區                                                   | 南非南部海域                |
| Annex II: Noxious Liquid Substances                   |                       |
|                                                       | 南極地區                  |
| Annex IV: Sewage                                      |                       |
|                                                       | 波羅的海                  |
| Annex V: Garbage                                      |                       |
| 地中海                                                   | 地中海                   |
| 波羅的海                                                  | 波羅的海                  |
| 黑海                                                    | 黑海                    |
| 紅海                                                    | 紅海                    |
| 海灣區                                                   | 海灣區                   |
| Annex VI: Prevention of air pollution by ships (ECAs) |                       |
| 波羅的海 (SOx)                                            | 北美 (SOx, NOx, PM)     |
| 北海 (SOx)                                              | 美屬加勒比海 (SOx, NOx, PM) |

\* 資料來源：整理自 IMO (2018)

2.2.2 防止源自船舶的空氣污染 -- 附則陸

IMO 於 1997 年 9 月在 MARPOL 公約當中增訂了附則陸 (Annex VI)，藉以規範源自船舶的空氣污染。附則陸的規範分成 3 個階段，如圖 1 所示。第 1 階段，針對 NOx，自 2010 年元旦起，新造船舶配置 130 kW 以上柴油引擎的規範。第 2 階段，自 2011 年起針對 NOx 排放，要進一步削減 15%~20%。第 3 階段，自 2016 年起實施

的規範，要削減 80% 目前 ECA 海域內的排放。其針對 NO<sub>x</sub> 的減量目標分 3 期：Tier I, Tier II 及 Tier III。圖 2 則針對 SO<sub>x</sub>，圖中所示上下 2 條曲線，為航行於 SECA 及全球其餘區域船舶的燃料硫份百分比上限。從圖 3 當中則可看出從目前到未來的排放管制區 (Emission Control Area, ECA) 擴充趨勢 (IMO, 2014)。

船舶的空氣污染物排放主要來自主機、發電機及鍋爐，船舶航行時主機提供主要的動力，因此主機廢氣的排放是船舶航行時最主要的排放源。在港內主機負載低，且可能會以艏推進器 (bow thruster) 輔助調整方向，此時發電機負載通常最大，污染排放也最多。

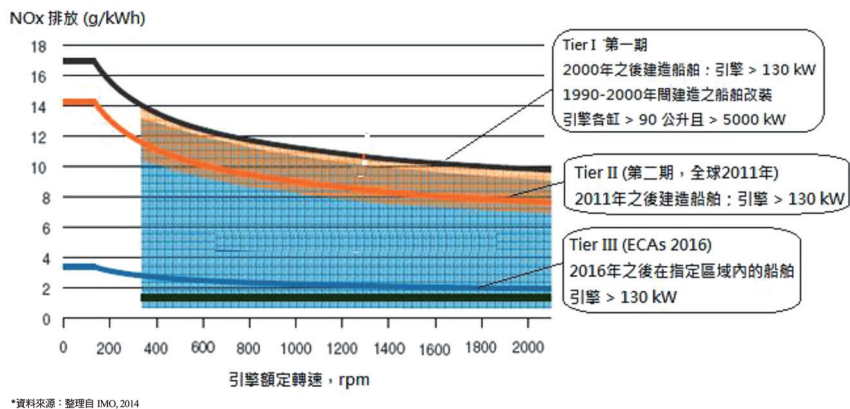


圖 1 Annex VI 三階段的 NO<sub>x</sub> 排放上限

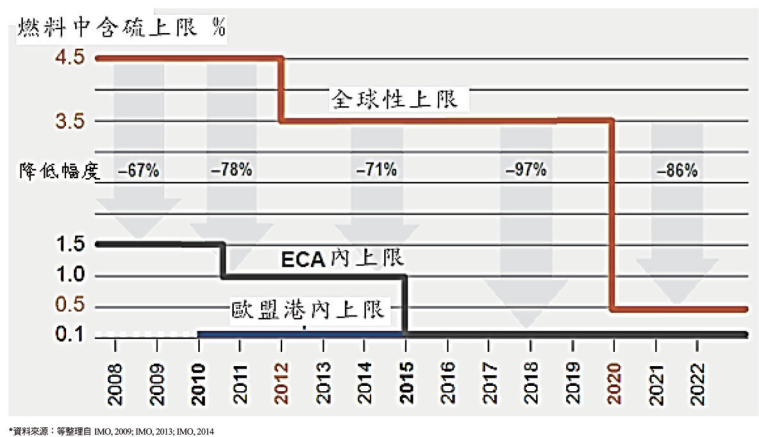


圖 2 針對 SO<sub>x</sub> 排放燃料中硫含量上限



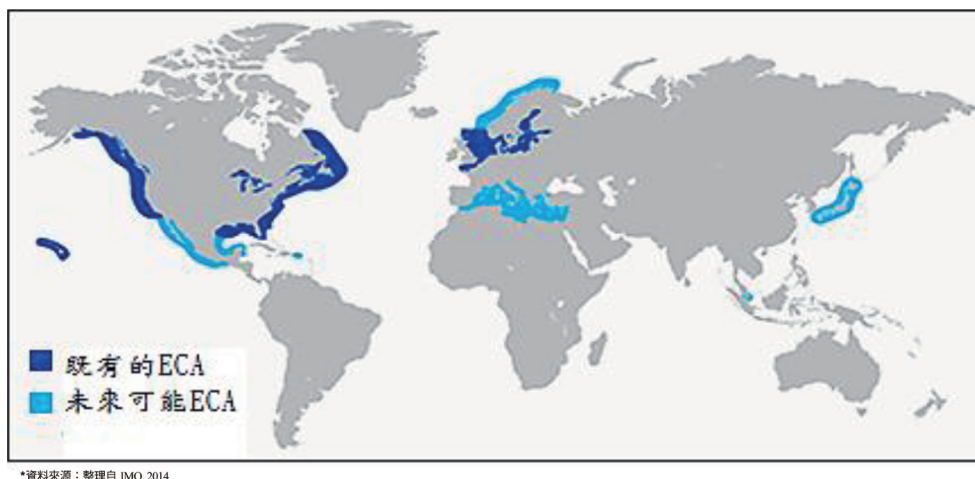


圖 3 既有和未來可能的 ECA

### 2.2.3 國際減排與潔淨燃料

MARPOL Annex VI 接下來對海運業者最大的影響，在於期原訂自 2020 年起，要求全球海運燃料的硫含量要降到 0.5%。另一個議題是，2015 年起要求採用 0.1% 硫含量燃料，ECA 的擴張情形。從圖 3 可看出，ECAs 可望擴及亞洲港口（占世界船用燃油銷售量的 32%）以及中東港口（占世界船用燃油銷售量的 12%）。然而，終究主導推動新 ECA 的並不在於 IMO，而是提交該建議的簽署國 (IMO, 2014)。

### 2.2.4 降低船舶 CO<sub>2</sub> 排放

圖 4 為針對船舶 CO<sub>2</sub> 排放的設限趨勢。IMO 於 2018 年同意在 2050 年前，將源自國際海運的 GHGs 排放，至少比 2008 年的降低 50%，並至少在 2100 年之前完全消除。其並將於 2030 年與 2050 年，將每趟運輸所排放的二氧化碳，分別比 2008 年降低至少 40% 與 70%。而為達此目標，結合引進運轉與技術措施，傳統化石燃料的使用量須大幅降低 (Rahim 等，2016)。

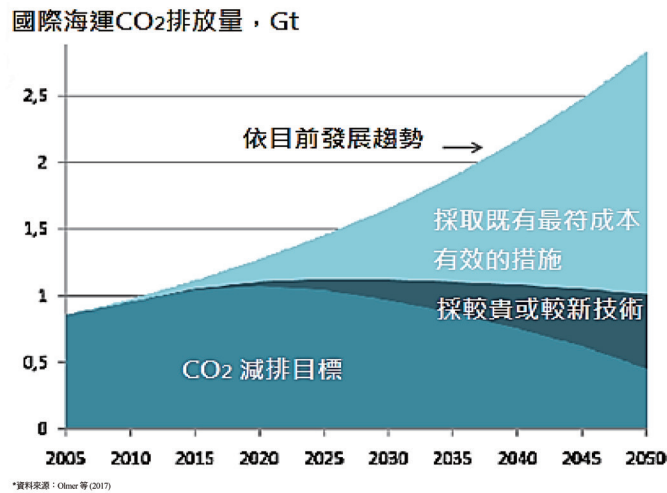


圖 4 針對船舶排放 CO<sub>2</sub> 的設限趨勢

2.2.5 壓艙水管理公約

因應對於壓艙水排放造成環境衝擊的關切，IMO 於 2004 年通過控管船舶壓艙水與底泥國際公約 (International Convention for the Control and Management of Ships' Ballast Water and Sediments)，以掌控壓艙水對環境造成的損害。該公約已於 2017 年 9 月 8 日獲得足夠國家簽屬，生效實施。自此全球船舶所排放的壓艙水與底泥，便受到該 BWM 公約控管。公約要求所有船舶落實壓艙水控管計畫 (ballast water management plan)，其中包含壓艙水紀錄簿 (ballast water record book)，並根據既有標準，進行壓艙水控管程序 (IMO, 2017)。

MEPC 接著建立了一套壓艙水處理標準，使其最終得以用來評估其他處理方案的效果，依據的是一套所謂二階段措施。第一階段包括能適用於所有船舶的要求，例如強制要求準備壓艙水與底泥管理計畫、壓艙水紀錄簿，以及新船應在一既定標準之下或標準範圍內，執行其壓艙水與底泥管控的程序。現成船則被要求採行一定的壓艙水管控程序，此程序有別於新船所適用者。第二階段包括一些可能適用在某些特別區域的特殊要求，及界定該特別區域的標準。在該區域排放與 (或) 汲取壓艙水時，還須額外加上一些管控措施。

### 2.2.6 船舶防污公約

改進船殼性質為讓船降低燃料消耗及排放的重要因素。採用適當的船殼油漆，可降低航行期間的船舶摩擦，進而導致 3~8% 的燃料節約。針對 2.1.7 小節所提 TBT 防污油漆的潛在衝擊所引發對於環境的關切，世界各國普遍提出相關法規措施。迄今全世界相關規範，對於減輕環境中 TBT 濃度已具成效。但值得關切的是，若日後發現替代塗料的防污效果並不如原先的防污技術，或其對整體環境的危害性並不亞於後者，則將導致社會、經濟及環境更嚴重的損害。

### 2.2.7 船舶回收公約

全球平均船齡 30 年，每年有 1,800 艘超過 500 GT 和 1,000 艘大過 3,000 GT 的船會被淘汰。目前有關船舶回收，依循的是 2009 年 5 月 15 日通過的香港安全暨環保船舶回收國際公約 (Hong Kong International Convention for the Safe and Environmentally Sound Recycling of Ships) (Jain 等，2014)。

## 三、綠海運趨勢

依國際間整體發展趨勢可看出，船舶在世界各地所受到的環保規範，不僅項目趨於繁多，其限制亦趨於嚴苛。根據 IMO 針對 GHGs 的研究 (3rd IMO GHGs study) 結果，每年源自海運的 CO<sub>2</sub> 排放近 1 億噸。此海運排放預計在 2050 年之前將增加 50% 到 250% 之間，端視未來經濟與能源發展狀況而定 (EEA, 2013)。全球新造船訂單持續增加，受惠於經濟規模新訂船舶更趨大型化。同時隨著全球環境規範更趨強化，老舊船舶亦加速被對環境友善且高效率的船舶所取代。

### 3.1 海運碳足跡減量趨勢

當今氣候變遷的挑戰已可謂無所不在。船運勢必成為各國乃至全世界，賴以解決氣候變遷問題的重要方案之一。然海運，尤其是較大型貨輪，相較於其他類型的運輸，無論就能源效率和對全球氣候影響，皆仍屬正面。如圖 5 所示，就每噸 - 公里，不同

大小船舶所造成的不等 CO<sub>2</sub> 排放，皆低於其他運輸模式的。例如同樣載運液態散裝貨物，經由鐵路所造成的排放大約是輪船的 3~4 倍，至於經由公路和空運的，則分別大約是比海運要高出 5~150 倍及 54~150 倍 (Lowell & Lutsey, 2013)。

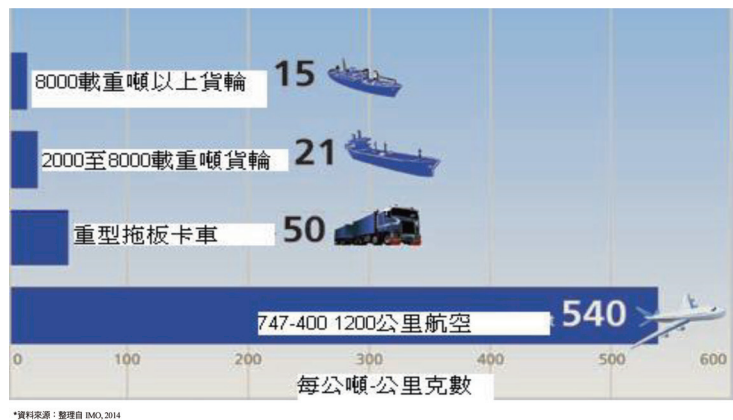


圖 5 各種不同運輸模式的碳排放比較

3.2 國際海運 GHGs 減量潛力

IMO 加強 GHGs 減量主要目標，在於建立針對船舶 GHGs 排放確切而完整的規範架構。根據 MARINTEK 的研究，2010 年的最大排放減量約 18%，到 2020 年達 28%。這些排放減量絕大部份表現在新船上，但又會隨著世界海運的持續成長，以每年約 1.5% 排放成長而被抵銷掉 (MARINTEK, 2000)。IMO 於 2011 年，針對新船通過能源效率設計指標 (Energy Efficiency Design Index, EEDI) 及船舶能源效率管理計畫 (Ship Energy Efficiency Management Plan, SEEMP)，以提升船舶能源效率。就某船而言，其最好的增進效率措施，會隨其船型、載貨路徑等因素有很大差異。新增法規要求，針對個別船舶訂定計畫，也鼓勵船運業者有系統的檢視其所採行的實務，以找出最佳平衡情況 (IMO, 2014)。

根據 IMO 委辦的研究結果，實施國際海運的強制性能源效率措施，可因為能源效率提升而導致源自船舶的 GHGs，尤其是 CO<sub>2</sub> 顯著降低。研究發現，在 2020 年之前藉由引進相關措施，平均每年可減少 1.515 億公噸的 CO<sub>2</sub> 排放，並可在 2030 年之

前提高到每年 3.3 億噸 (Dalsoren 等, 2009)。而對於船運業者本身而言, 減碳措施也可導致燃料消耗與成本顯著降低。由於 EEDI 的效果, 只有在有足夠較老舊、效率較低的船, 被效率較高的新船取代後才會顯現, SEEMP 規定所帶來的效果也會比 EEDI 的來得快 (Dalsoren 等, 2009)。

如今船運公司普遍都已有很強烈、能降低燃耗及 CO<sub>2</sub> 排放的經濟誘因。畢竟燃料成本在船舶營運支出當中占比愈趨重大, 過去 5 年內即增加近 300% (Kirstein 等, 2018), 導致船運部門因此額外多支付 700 億美元燃料費用。換言之, 這些成本應可藉著對潔淨技術的投資, 獲致重大燃料節省和快速回收而很快回收。除此潛能, 商船在持續低碳成長當中, 更潛藏著許多亟待開發的商機。

### 3.3 無壓艙水船舶

為徹底解決船舶壓艙水生物傳輸問題, 美國密西根大學持續針對流通壓載 (flow-through ballasting) 系統 (圖 6) 進行研究。該系統在空船需要壓艙時, 以吃水線下方圍繞在貨艙周圍的縱向結構的壓載艙, 取代傳統壓載艙 (SAFETY4SEA, 2020)。這些艙和位於船艏與船艉附近的吸入與排出兩道開口相通, 讓其保持淹到壓載的情況, 藉著艏與艉之間壓力差, 讓水緩緩流入, 大約每小時完成 1 次換水, 以確保壓載艙內隨時裝著當地的海水。

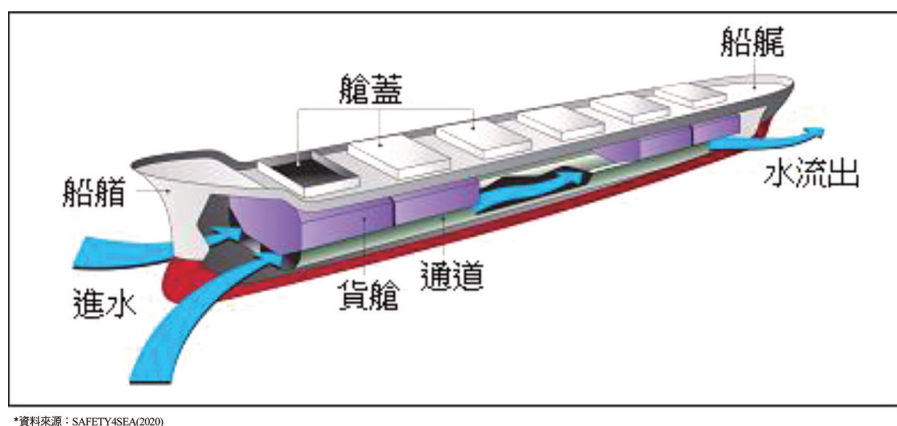


圖 6 散裝貨輪流通壓載系統示意

3.4 船舶減排選項

表 2 當中所列船舶減排措施，包括技術上的提升及運轉上的改進。針對現成船所建立的能源效率指標，可提供船東和營運者，作為在其船上引進能源效率技術的誘因。同時也可作為保養船殼與推進器，以增進能源效率的誘因。能源效率指標也可用來反映出，一些像是以風箏拖曳 (towing kites) 等節能裝置，甚至計劃性減速 (透過自發性降低額定出力) 等運轉層面措施的效果 (Mansson, 2017)。值得注意的是，表 2 當中的成本效率估算，包括年度運轉成本與資本支出。而資本支出的回收期，係依據各項措施的預期服役年限計算。因此，船的剩餘壽命，便成為決定燃料成本節約是否超過投資成本的因子 (MARINTEK, 2000)。

表 2 現成船能源效率措施之成本有效性

| 措 施           | 適用情形   | 成本效率<br>(US\$/噸 CO <sub>2</sub> ) |      |      | 低減量<br>潛力 | 高減量<br>潛力 |
|---------------|--------|-----------------------------------|------|------|-----------|-----------|
|               |        | 中                                 | 低    | 高    |           |           |
| 船殼改進          |        | -155                              | -160 | -140 |           |           |
| 逆向側推進器開口      | 所有船舶   |                                   | -160 | -140 | 0.90%     | 4.20%     |
| 航行與運轉選項       |        | -150                              | -160 | -140 |           |           |
| 軸出力計 (性能監測)   | 所有船舶   |                                   | -105 | 115  | 0.40%     | 1.70%     |
| 燃耗計 (性能監測)    | 所有船舶   |                                   | -60  | 330  | 0.40%     | 1.70%     |
| 視天氣調整航線       | 所有船舶   |                                   | -165 | -100 | 0.1%      | 3.70%     |
| 自動導航升級 / 調整   | 所有船舶   |                                   | -160 | -140 | 1.75%     | 1.75%     |
| 推進器 / 推進系統升級  | 所有船舶   | -115                              | -70  | -155 |           |           |
| 推進器 / 舵升級     | 所有船舶   |                                   | -80  | 120  | 1.60%     | 4.70%     |
| 推進器升級 (翼片、噴嘴) | 液貨輪 *  |                                   | -90  | 600  | 0.10%     | 0.90%     |
| 推進器殼帽鰭        | 所有船舶   |                                   | -155 | -150 | 3.40%     | 4.20%     |
| 其他改裝選項        |        | -110                              | -135 | -75  |           |           |
| 風箏拖曳          | 散裝輪、油輪 |                                   | -135 | -75  | 3.00%     | 8.00%     |



| 措 施            | 適用情形    | 成本效率<br>(US\$/ 噸 CO <sub>2</sub> ) |      |      | 低減量<br>潛力 | 高減量<br>潛力 |
|----------------|---------|------------------------------------|------|------|-----------|-----------|
|                |         | 中                                  | 低    | 高    |           |           |
| 船殼塗覆與保養        |         | -105                               | -65  | -140 |           |           |
| 船殼性能監測         | 所有船舶    |                                    | -150 | -45  | 0.50%     | 4.90%     |
| 船殼塗覆 (#1)      | 所有船舶    |                                    | -150 | -105 | 0.50%     | 2.10%     |
| 船殼塗覆 (#2)      | 所有船舶    |                                    | -140 | -15  | 1.10%     | 5.20%     |
| 船殼拋光           | 所有船舶    |                                    | -155 | -65  | 1.00%     | 10.00%    |
| 船殼水下噴光         | 所有船舶    |                                    | -155 | -35  | 1.00%     | 10.00%    |
| 乾塢完全噴光         | 所有老船    |                                    | -160 | -150 | 0.60%     | 1.30%     |
| 推進器保養          |         | -75                                | -120 | -65  |           |           |
| 推進器性能監測        | 所有船舶    |                                    | -160 | -130 | 0.40%     | 3.40%     |
| 推進器拋光 ( 提升頻率 ) | 所有船舶    |                                    | -160 | -130 | 0.40%     | 3.40%     |
| 推進器拋光          | 所有船舶    |                                    | -125 | -65  | 2.00%     | 5.00%     |
| 輔系統            |         | 80                                 | -90  | 250  |           |           |
| 低耗能 / 低發熱照明    | 渡輪與郵輪   |                                    | -95  | 440  | 0.00%     | 0.00%     |
| 控速泵與風扇         | 所有船舶    |                                    | -90  | 250  | 0.20%     | 0.80%     |
| 減速             |         | 110                                | 80   | 135  |           |           |
| 全船隊減速 10%      | 所有船舶 ** |                                    | 80   | 135  | 7.90%     | 7.90%     |
| 主機改裝           |         | 175                                | -120 | 470  | 0.40%     | 2.50%     |
| 主機調整           | 所有船舶    |                                    | -90  | 470  | 0.10%     | 0.60%     |
| 共軌升級           | 所有船舶    |                                    | -125 | 45   | 0.10%     | 0.40%     |

\* 包含原油 / 油品船、化學船、LNG/LPG 等散裝液體  
\*\* 渡輪與郵輪以外船舶  
\*\*\* 資料來源：MARINTEK(2000)

3.5 廢氣洗滌

目前安裝在環球航線上的洗滌器大多屬排海的開環系統 (open-loop systems)。然在 EU 任何內陸，排放這類廢水皆屬違法，亞洲一些國家也在近 2 年陸續跟進 (Walsh 等，2019)。此趨勢將對航運界的因應策略構成重大影響。

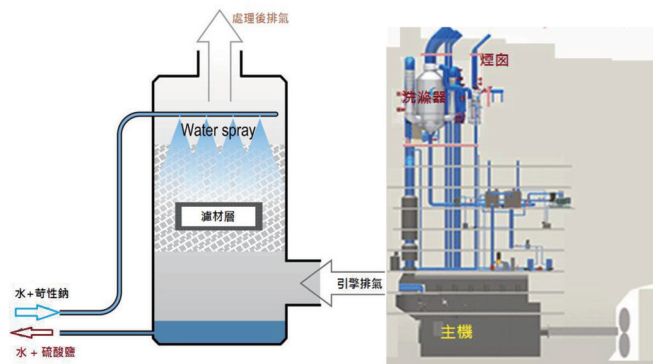


圖 7 船上以洗滌器處理主機排氣示意

圖 7 所示，為船上以洗滌器處理船舶主機排氣的情形。其可安裝在煙囪殼內，且在某些情形下，可取代傳統排氣系統的一部分。

如圖 8 所示，中國大陸海事局禁止在海岸水域，排放源自開環 EGCS 的洗滌水 (Sharafian 等，2019)。此屬中國大陸於 2019 年元旦生效的國內排放管制區 (domestic emission control area, DECA) 法規當中的一部分，目的在降低海岸海水污染。表 3 歸納列出幾個對 EGCS 設限國家及設限情況。

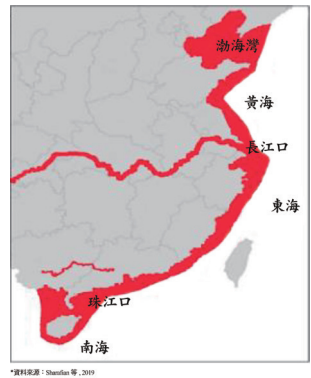


圖 8 中國大陸禁止排放源自開環 EGCs 洗滌水範圍

表 3 對 EGCs 設限的國家及設限情形

| 國家                             | 設限情況                          | 日期                         | 執行機關   |
|--------------------------------|-------------------------------|----------------------------|--------|
| 新加坡                            | 禁止使用開環洗滌器                     | 2020 年元旦                   | 海事暨航港局 |
| 阿聯酋富吉拉                         | 禁止使用開環洗滌器                     | 2020 年元旦                   |        |
| 中國                             | 擴大到更多海岸地區禁用洗滌器                | 2019 元旦                    | 海事局    |
| 馬來西亞                           | 禁止排放開環洗滌器的洗滌水                 | 2019 元旦                    | 海事部    |
| 比利時、德國、<br>立陶宛、拉脫維亞、<br>愛爾蘭、挪威 | 禁止排放開環洗滌器的洗滌水                 | 分別自 2016<br>至 2019 年<br>間起 |        |
| 歐洲 ECA                         | 非政府組織聯盟推動在歐洲的 ECA<br>禁用排氣清淨系統 |                            |        |
| 美國康乃狄克州                        | 禁止排放源自洗滌器洗滌水                  |                            |        |
| 美國與加州                          | 禁止使用洗滌器                       |                            |        |

\* 資料來源：Insurance Marine News, 2020

3.6 海運替代能源

3.6.1 燃料三角形

從圖 9 船運燃料三角形可看出，一個好的替代燃料，須具有和既有海運燃料相當的能量密度 (energy density)。能量源密度為單位體積所含能量。能量密度低的燃料，儲存所占空間大，船的裝載容量便會減損。而重燃油 (heavy fuel oil, HFO) 之所以能在過去幾十年寡占船運燃料，便在於其擁有相當高的能源密度，且價格相對低廉。其次為燃料的可獲取性及供應安全性。由於海運為全世界的產業，替代燃料也就需要在全世界各港皆可獲取，這便需要建立遍及世界的基礎設施網絡，以符合各種替代燃料的需求。此外，未來的替代燃料將會需要在從井到推進器的整條鏈上，都是 GHGs 中性 (GHGs-neutral) 的 (Le Fevre, 2018)。因此，要決定甚麼燃料可以作為未來海運所用替代燃料，便必須由引擎廠商、燃料生產者及港埠共同努力。

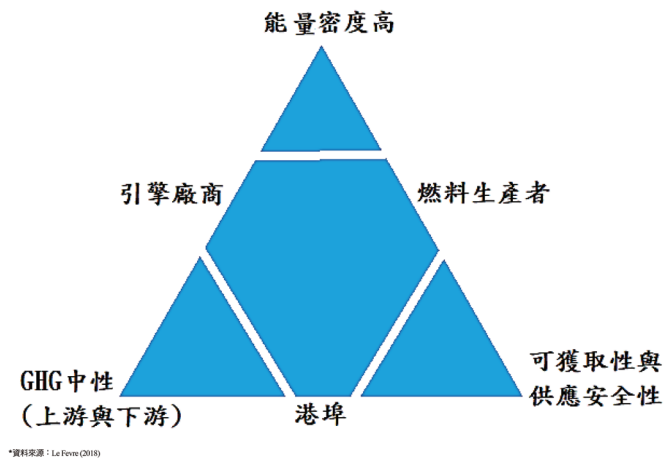


圖 9 船運燃料三角形

3.6.2 天然氣作為海運燃料

從整體能源角度來看，為大幅降低燃燒產生的污染排放，及繳納二氧化碳排放費等所可能帶來重大負擔，以及整體追求永續能源目標，以天然氣 (natural gas, NG) 取代化石燃料並作為存在著間歇性缺陷的再生能源的備用與過渡能源，似乎是經濟、可行的方案 (Einang, 2009; Boretti, 2019; Brynolf 等，2014)。

比起以油為基礎的燃料，NG 的氫 / 碳比較高，而有較低的 CO<sub>2</sub> 單位排放量 (即 kg CO<sub>2</sub>/kg 燃料)。此外，NG 無硫，因此無 SO<sub>x</sub> 排放，且幾乎也無 PM 排放。而由於在燃燒過程中的最高溫度會低許多，NO<sub>x</sub> 排放也減少了近 90% (Chen 等，2019；Anderson 等，2020)。因此，近年來有愈來愈多船東傾向採用 NG 作為替代燃料。德國 Hapag-Lloyd 航運公司於 2021 年初，訂了 6 艘超大 (23,500 TEU) 貨櫃船，採用 LNG 作為燃料，預計在 2023 年交船。圖 10 所示，為全球使用 LNG 作為燃料船舶的成長趨勢。表 4 比較燃燒 HFO 的 BMW MAN 引擎 (6S70ME-C) 和燃燒天然氣引擎 (6S70ME-GI) 排放物 (Kjell, 2008)。從表中可看出，相較於 HFO，以天然氣作為燃料，可大幅降低 SO<sub>x</sub> 排放量 (約 92%)。至於 NO<sub>x</sub>、CO<sub>2</sub>、及 PM 排放量的減幅，則分別為 24%、23% 及 37%。而使用天然氣作為燃料，HC 排放可增加 1 倍以上 (Deniz & Zincir, 2016)。

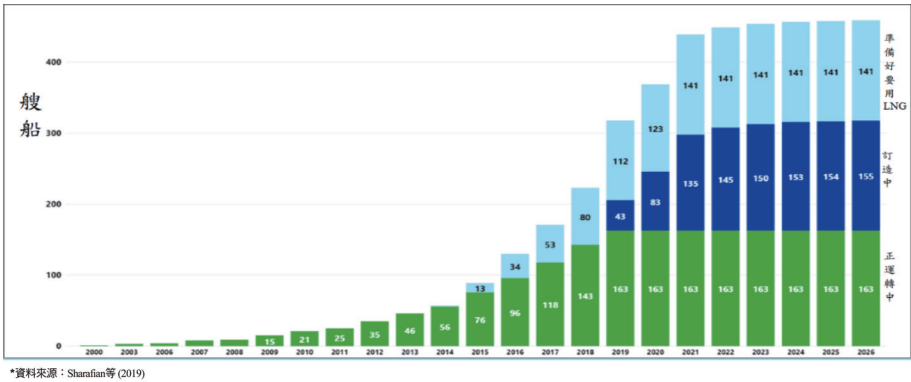


圖 10 全球使用 LNG 作為燃料船舶的成長趨勢

表 4 燃燒 HFO 和燃燒天然氣引擎排放量 (g/kWh) 之比較

| 排放物                     | 6S70ME-C | 6S70ME-GI |
|-------------------------|----------|-----------|
| CO <sub>2</sub>         | 577      | 446       |
| O <sub>2</sub> (%)      | 1359     | 1340      |
| CO                      | 0.64     | 0.79      |
| NO <sub>x</sub>         | 11.58    | 8.76      |
| HC                      | 0.19     | 0.39      |
| SO <sub>x</sub>         | 10.96    | 0.88      |
| PM (mg/m <sup>3</sup> ) | 0.54     | 0.34      |

\* 資料來源：MAN (2016)

3.6.3 生物燃料作為海運燃料

生物燃料 (biofuel) 包括生質柴油 (biodiesel)、生質酒精 (bioethanol)、以及例如乙基三級丁基醚 (ethyl tert-butyl ether, ETBE)、生物氣 (biogas)、生質甲醇 (biomethanol)、生質二甲醚 (dimethyl ether, DME) 等。以生物燃料作為海運燃料，要能夠滿足海運需求的供應量是一大挑戰。從一個中型的生物燃料廠一整年所生產的，例如 100 百萬公升，大約僅夠 1 艘大船所需 (Nelissen 等，2020)。因此，生物燃料較適合用於沿岸航行的小船，或是港內所用的輔助燃料。目前商業所提供的各種生物燃料，僅植物生質柴油或生質乙醇的產量，可能滿足一部分海運所需。

3.6.4 氨作為海運燃料

氨近幾年來被廣泛提出，可望成為不會排放的海運燃料。表 5 所列，為預估到 2050 年 3 種類型船舶，以氨氣作為推進燃料的特性與成本 (Kang & Holbrook, 2015)。

表 5 氨船舶燃料的特性與成本

| 特性                   | 單位           | 短程海運船 | 大洋海運船  | 貨櫃船    |
|----------------------|--------------|-------|--------|--------|
| 引擎出力                 | kWoutput     | 2,400 | 11,000 | 23,000 |
| 全速航程                 | h            | 162   | 720    | 360    |
| 儲槽容量                 | GJ           | 3,500 | 71,300 | 74,600 |
| 內燃機成本 <sup>1</sup>   | USD/kWoutput | 800   | 600    | 600    |
| 內燃機推進效率 <sup>1</sup> | %, LHV       | 45    | 40     | 40     |
| FC 堆成本 <sup>2</sup>  | USD/kWoutput | 925   | 925    | 925    |
| FC 推進效率              | % LHV        | 45    | 60     | 45     |
| 儲存成本 <sup>3</sup>    | USD/GJ       | 55    | 35     | 35     |
| ICE 的 SCR 成本         | USD/kWoutput | 133   | 133    | 133    |

1. 假設等於 H2 ICE  
2. 平均介於 350-1,500 USD/kW，前者為 FC 低成本估計值，1,500 USD/kW 為高成本估計值  
3. 假設為 LNG 儲存成本一半，35 USD/GJ

\* 資料來源：Kang & Holbrook (2015)

目前尚無已商業化以氨驅動船舶技術。然在研發上，例如 MAN Energy Solutions 宣稱其原本針對 LPG 開發的雙燃料引擎，可使用液態氨作為燃料。MAN Energy Solutions 並和上海船舶研究設計院及 ABS 合作開發，用於以氨作為燃料的貨櫃輪的技術。另外 EU 也贊助名為 ShipFC 的計畫，將離岸工作船改裝成以氨燃料電池驅動 (De Vries, 2019)。

3.6.5 氨作為海運燃料

IMO 既已設定最終要將源自海運的 GHGs 排放完全消除，勢必需要用到在生命週期當中，產生極低甚至完全沒有 GHGs 排放的燃料與推進技術。而已液態氫 (LH<sub>2</sub>) 驅



動燃料電池，便是這類技術之一。以氫作為船用內燃機的燃料，需在引擎設計上作一些修改。採用氫燃料電池，船上的重量、體積，以及如何掌控這些燃料都是重要考量。由於船上空間有限，在船上儲存大量氫，必須是液態。液態氫儲槽以鋁合金建造，再以雙層 75 mm、密度為 35.24 kg/m<sup>3</sup> 的封閉室發泡 (closed cell foam) 隔熱層包覆；另外在外表面和該層之間，還維持著蒸氣作為屏障 (Veldhuis 等，2007)。

目前 FC 船幾乎都以壓縮氫作為燃料，透過 FC 產生電，再以此電驅動電動引擎。燃料電池驅動渡輪可提供零排放、低噪音污染的選項，特別適用於像是市內與區域內的短程接駁。實例包括 FC 驅動渡輪 FCH2 JU, Roland Berger。此渡輪採用壓縮氫氣透過 FC 產生電力以驅動馬達。其關鍵部件包括：燃料電池堆與系統模組、儲氫槽、電池、電動馬達。由於排放和噪音得以顯著降低，以 FC 作為動力的船舶可望在休閒娛樂及人口密集的水域受到歡迎 (Bicer & Dincer, 2018)。而就海運經濟而言，氫燃料電池的初期應用，僅限於燃料需求較低的較小動力用途。這類應用包括小船的推進、大船的輔助電力、及岸電。表 6 所示，為氫燃料在不同船舶類型上的各種可能應用方式，推進電力需求可從大約 150kW 到將近 100MW 不等 (Dincer, 2018)。

表 6 氫燃料在不同船舶類型上的各種可能應用方式

| 船舶類型 / 應用方式                     | 電力需求 (MW) |
|---------------------------------|-----------|
| <b>渡輪</b>                       |           |
| 小渡輪                             | 0.24–1.0  |
| 內陸大渡輪                           | 2–12      |
| 外海大渡輪、高速                        | 20–44     |
| <b>貨輪</b>                       |           |
| 美國內陸、拖船、駁船                      | 0.13–1.0  |
| 江河、歐洲拖船、駁船                      | 0.2–4.5   |
| 江河郵輪                            | < 2       |
| 內陸貨櫃船 ( 預定 235m, 2,960 TEU 以下 ) | 11.5      |
| <b>岸電</b>                       |           |
| 貨櫃輪 (5-13k TEU)                 | 0.2–0.9   |
| 油輪                              | 3 以下      |

| 船舶類型 / 應用方式 | 電力需求 (MW) |
|-------------|-----------|
| 郵輪          |           |
| 靠泊負載        | 3-10      |
| 港內操車        | 20        |
| 緊急電力        | 2-4       |
| 推進          | 25-97     |

\* 資料來源：Dincer (2018)

3.6.6 借助風能

在船上加裝類似天帆 (Skysail) 的風箏推進系統，可減少燃料消耗以及排放達 35%。大約 10 層樓高的旋轉帆 (rotor sails)，則可減少 1 成的燃料消耗。旋轉帆靠的是氣體動力學 Magnus 效應推進船的理論。德國工程師 Anton Flettner 於 1926 年以 2 根 15 米高的鋼製轉帆橫越大西洋；然因接下來油價過低，並未找到投資者。爾來芬蘭 Norsepower 依照 Flettner 的原始設計，採用碳纖與玻纖等輕得多的新材料開發出轉帆。其最大的轉帆可提供相當於 3 MW 主機推力，所耗電力小於 90 kW。其設計與軟體連結，用以自動調整轉帆的轉速 ( 可達數百 rpm)，以達到最大的推進力。2020 年 7 月 Norsepower 與航行於北海的 SEA-CARGO，在 12,251 GT 的 SC Connector Ro-Ro 貨船上裝設高 35m、寬 5m，可傾倒的轉帆 ( 圖 11)。



圖 11 Norsepower 在 SC Connector Ro-Ro 貨船上裝設可傾倒的轉帆

## 四、從設計、建造、運轉到回收追求永續

一艘船的壽命當中分成設計、建造、運轉及回收，追求永續海運須顧及各階段。船舶設計可謂相當複雜，原本便必須同時滿足各方在安全、環境、運轉等許多相關要求。若以社會永續為導向，則勢必在設計階段顧及該船在壽終回收時，盡可能減輕工作人員的健康風險。值得慶幸的是，如此設計卻很可能反而增進整體經濟與環境層面的永續。

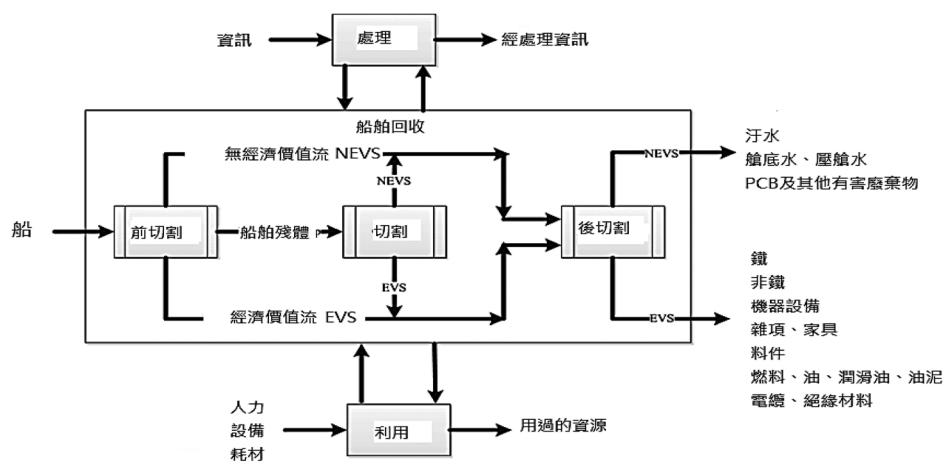
### 4.1 運轉排放監測

在船舶運轉上，IMO、EU、及美國環保署分別要求符合規定，所針對的除 NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub> 排放外，亦同時顧及 CO<sub>2</sub> 的策略性減量 (UNCC, 2014; Fedi, 2016)。EU 議會 (European Parliament) 要求使用 EU 港口的 5,000 總噸以上船舶的船東自 2018 年 1 月起，對該船舶的年度 GHGs 排放，進行量測、報告及確認 (measure, report, and verify, MRV)，期望能在增進透明度、提高競爭力及提升燃料效率之間，形成良性循環。EU 運輸政策白皮書建議，要在 2050 年之前將 EU 源自海運的 CO<sub>2</sub> 排放，比起 2005 年的至少削減 40%。其所採行的第一步，便是排放的監測與報告，一方面依法建立船舶排放相關資訊，同時也可藉以在後續國際討論中獲致最佳成果。

在 GHGs 減量市場機制當中，MRV 屬運作的核心要素，未來針對源自海運減排亦不例外。針對船舶 CO<sub>2</sub> 排放監測，可採推估或直接量測。推估法根據燃耗與適用排放因子算出，在煙囪直接量測 CO<sub>2</sub> 則處開發與認證階段，二者都能提供可靠數據，並據以申報。從國際間落實限制源自海運大氣排放相關法規的發展趨勢來看，在船上對燃氣進行自我檢測為趨勢之一。

### 4.2 船舶回收

圖 12 所示為船舶回收系統示意。全世界每年有 200 到 600 艘大型商船進行拆解、回收，且預計在未來幾年內，隨著單殼油輪被雙殼船取代而增多。平均而言，船舶有 96% 皆可回收或再利用 (Jain 等，2017)，從船殼、機器設備、裝置到家俱，幾乎可完全回收。



\*資料來源：Song等(2013)

圖 12 船舶回收系統示意

### 4.2.1 香港公約

IMO 在 2009 年 通 過 了 香 港 公 約 (Hong Kong Convention for the Safe and Environmentally Sound Recycling of Ships)。香港公約在於確保船舶在壽終進行回收時，不至於對人員健康、安全及環境構成不必要的風險。其力圖解決所有與船舶回收有關的議題，包括拆解船舶可能含有例如石棉、重金屬、碳氫化合物、臭氧耗蝕物質 (ozone-depleting substances, ODS) 等對環境有害的物質。其同時在於解決，世界上許多船舶回收場所存在的，工作與環境狀況之疑慮。其同時涵蓋船舶的設計、建造、運轉及準備，在於促進安全且符合環保的回收，而不損及該船的安全與運轉效率。其並建立了結合認證與報告要求的妥適執行機制。

### 4.2.2 從設計增進船舶回收

船舶設計所需顧及的，不僅止眼前的經濟考量，還須顧及該船在整個生命當中的發展，乃至在經濟生命終了所必須進行的拆解。平均一艘船壽終後有 96% 得以回收或再利用。然而當今拆船業的實務當中卻存在著社會與環境層面，相當嚴重的負面影響 (Jain 等，2014)。一艘船在其一生當中，從設計、建造運轉及維修過程中，加入了各

種材料。而在拆船廠對這些材料進行回收時，該船的結構複雜性及材料流，決定了回收過程對於人員健康、安全及環境所構成的威脅。因此，在船舶生命週期當中建立從最初到最終階段的關聯性，以提供作為船舶設計階段的參考，實屬當務之急。此關聯性的建立，可藉著分析船舶實際上如何回收，例如研究回收過程並評估如何讓問題，在船舶生命週期的設計與建造階段即加以解決，而終能獲致最佳回收過程，並降低整體船舶回收成本。

「為回收而設計」的觀念已成功應用在汽車工業。其在設計階段便找出回收時所面對的挑戰，並配合調整。就船舶而言，其涉及確認諸如毒性塗料等的危害性，或是諸如必須以人工清潔過後才能進行回收的油艙櫃等，既危險又缺乏效率的情形。因此船舶設計者所需考量的基本原則，便在於確保在回收時盡可能的安全、有效率及對環境友善。而不僅只要防止或減少使用諸如石棉、多氯聯苯 (polychlorinated biphenyls, PCB)、重金屬、殘留油等，在船進行拆解時可能危及工作人員及當地環境的材質，同時也要降低在船舶整個生命週期當中的風險，並降低造船人員與船員構成的風險。此觀念有 3 個關鍵目標：對有害材質提供精準的盤查，減少或取代有害材質及讓船舶易於拆解。前述最後一項可藉由採用，諸如將各船上的所有零件與設備標準化，使在船壽終時較易於辨識各部件，而得以提高重複使用及再製與回收的潛力。

### 4.3 經濟誘因機制發展

IMO 的 MEPC 早在 2007 年即曾將環境稅 (如能源稅或碳稅)、排放權交易、自願減量協定等經濟誘因工具與其他 GHGs 減量政策工具進行比較，並從質性分析初步評估。當時 IMO 政策方向對積極的市場基礎政策工具持保留但開放態度，鼓勵進一步探索與研究。

截至 2010 年底，各會員國或觀察組織曾陸續提交 IMO MEPC 的市場基礎政策工具提案多達 10 項，包括 1 項燃油捐 (levy on bunker fuels)，3 項屬於排放權交易系統的提案，3 項結合能源效率指標與經濟誘因，以及另外 3 項其他設計。

配合 IMO 於 2018 年提出的「船舶溫室氣體排放減量之初步方針」，2018 年起各

會員國與觀察組織重新興起對於市場基礎工具的關注與提案。其主要包含了三種不同層級的溫室氣體減排目標 (IMO, 2018)。

1. 對新船實施更嚴格的下一階段 EEDI 要求；
2. 降低國際海運業之碳強度 (carbon intensity)；
3. 國際海運業每年溫室氣體排放總量儘速達到排放峰值並開始進行減排。

從以上可發現近期的提案以徵收稅費為主，且搭配對於收取的基金設定指定用途，希望在 2030 年時，與 2008 年的數據相比，國際海運業的平均碳強度能降低至少 40%；到 2050 年時，與 2008 年的數據相比，平均碳強度能降低至少 70%，每年溫室氣體總排放量減低至少 50%；並以最終在本世紀結束前停止排放溫室氣體為努力方向 (IMO, 2018)。

## 五、結論

海運是在運輸上追求永續的最佳著力點，其僅小幅改進，即可帶來重大效益。

永續性的真實價值，乃取決於符合此政策作為、控管其對社會與環境造成的影響，及改善運轉效率與自然資源經營，所付出的努力。儘管船運，相較於其他運輸模式，算是安全且乾淨，其仍可對環境造成重大衝擊。因此社會也就必然會要求海運表現得更永續。而永續海運的發展，也勢將在環境、社會及經濟這三項永續性的支柱上，齊頭並進。追求環境永續海運，須分別從幾個因子來看：

- 永續生產：船舶建造生產；
- 永續運轉：燃料及各項和船舶運轉有關的事情；
- 岸上永續運轉：裝卸貨、貨櫃、所有液體；
- 利用優化：一如路上的汽車，車輛共享，以提高使用率。

國際海運業者目前以致力提升能源效率，作為因應 GHGs 減量挑戰的主要策略，目標在加強船舶的能效設計要求，逐步針對每種船舶類型分階段提高適用百分比，以降低船舶營運中的碳強度。



近年來全球海事論壇 (Global Maritime Forum)、海洋行動盟友 (Friends of Ocean Action) 和世界經濟論壇 (World Economic Forum) 聯合成立零排放聯盟 (Getting to Zero Coalition) 投入海運脫碳工作，並承諾到 2030 年前，讓使用零排放燃料的商用零排放船投入營運。EU 也已宣布，將朝向比 IMO 所訂，在 2050 年之前將海運年度總 GHGs 排放至少減半 (相較於 2008 年) 更綠的系統。而近年來，也已有愈來愈多的船運業者戮力符合永續發展的管理觀念。世界最大貨櫃航運公司之一 MAERSK，則正追求以永續能源為目標。其允諾在 2050 年之前，達到「CO<sub>2</sub> 淨零排放」(net-zero CO<sub>2</sub> emissions)，台灣無不加速行動之理。

## 參考文獻

- Anderson, M., Salo, K., Fridell, E. 2015. Particle- and Gaseous Emissions from an LNG Powered Ship. *Environ. Sci. Technol.* 2015, 49, 12568–12575.
- Berg, N., Mellqvist, J., Jalkanen, J.P., Balzani, J. 2012. Ship emissions of SO<sub>2</sub> and NO<sub>2</sub> : DOAS measurements from airborne platforms. *Atmos. Meas. Tech.*, 5(5), 1085-1098.
- Berkhout, A.J.C., Swart, D.P.J., van der Hoff, G.R., 2012, Sulphur dioxide emissions of oceangoing vessels measured remotely with Lidar, Rapport 609021119/2012, National Institute for Public Health and the Environment, Bilthoven, The Netherlands.
- Bicer, Y., Dincer, I. 2018. Environmental impact categories of hydrogen and ammonia driven transoceanic maritime vehicles: A comparative evaluation. *Int. J. Hydrogen Energy*, 43, 4583–4596.
- Boretti, A. 2019. Advantages and Disadvantages of Diesel Single and Dual-Fuel Engines. *Front. Mech. Eng.* 5, 64.
- Brahim, B., Wiese, F., Münster, M. 2019. Pathways to climate-neutral shipping: A Danish case study. *Energy* 2019, 188.

- Brynolf, S., Fridell, E., Andersson, K. 2014. Environmental assessment of marine fuels: Liquefied natural gas, liquefied biogas, methanol and bio-methanol. *J. Clean. Prod.* 74, 86–95.
- Chen, H., He, J., Zhong, X. 2019. Engine combustion and emission fuelled with natural gas: A review. *Journal of the Energy Institute.* 92(4), 1123-1136.
- Corbett, J.J., Winebrake, J.J. 2018. Life cycle analysis of the use of methanol for marine transportation, prepared for U.S. Department of Transportation, Maritime Administration.
- Dalsøren, S. Eide, M., Endresen, Ø., Mjelde, A., Gravir, G., Isaksen, I.S.A. 2009. Update on emissions and environmental impacts from the international fleet: The contribution from major ship types and ports, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9, 2171-2194.
- De Vries, N. 2019. Safe and Effective Application of Ammonia as a Marine Fuel, Delft University of Technology: Delft, The Netherlands, 2019.
- Deniz, C., Zincir, B. 2016. Environmental and economical assessment of alternative marine fuels, *Journal of Cleaner Production* 113 (2016), 438-449.
- Dincer, I. 2018. Hydrogen and fuel cell technology for sustainable future. *Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, 2(1), 1-14.
- DNV GL. 2018. Maritime Forecast to 2050. Energy transition outlook 2018, Past and Present Shipping, <https://eto.dnvgl.com/2018/maritime>. (accessed 03 23, 2020).
- Einang, P.M. 2009. LNG as a fuel for ships in Short Sea Shipping. *Marintek Review*. [http://www.sintef.no/upload/MARINTEK/Review%202-2009/MR-2\\_2009.pdf](http://www.sintef.no/upload/MARINTEK/Review%202-2009/MR-2_2009.pdf) (accessed 05 27, 2020)
- European Environment Agency (EEA). 2013. The impact of international shipping on European air quality and climate forcing. EEA Technical report No 4/2013. [https://www.envirotech-online.com/news/environmental-laboratory/7/breaking\\_news/italian\\_conference\\_showcases\\_drone\\_air\\_monitoring\\_abilities/38023/](https://www.envirotech-online.com/news/environmental-laboratory/7/breaking_news/italian_conference_showcases_drone_air_monitoring_abilities/38023/) (accessed 03 23, 2020)

- Fedi, L. 2016. The European ships' Monitoring, Reporting and Verification (MRV): Pre-evaluation of a Regional Regulation on Carbon Dioxide Inventory.
- Hua, J., Liu, S.M. 2007. Butyltin in Ballast Water of Merchant Ships. *Ocean Engineering*. 34(13):1901-1907.
- IMO. 2009. Second IMO Greenhouse Gas Study 2009.
- IMO. 2013. Air Pollution, Energy Efficiency and Greenhouse Gas Emissions.
- IMO. 2014. Guidelines of the Method of Calculation of the Attained energy Efficiency Design Index (EEDI) for New Ships, Resolution MEPC. 245(66), Adopted on 4 April, 2014.
- IMO. 2017. Implementing the Ballast Water Management Convention.
- IMO. 2018. LIST OF SPECIAL AREAS, EMISSION CONTROL AREAS AND PARTICULARLY SENSITIVE SEA AREAS, MEPC.1/Circ.778/Rev.3 2 July 2018. [http://www.gard.no/Content/26411326/IMO%20MEPC1-Circ778-Rev3\\_Special%20Areas%2C%20ECAs%20and%20PSSAs%20under%20MARPOL.pdf](http://www.gard.no/Content/26411326/IMO%20MEPC1-Circ778-Rev3_Special%20Areas%2C%20ECAs%20and%20PSSAs%20under%20MARPOL.pdf) (accessed 03 23, 2020).
- IMO. 2018. Initial IMO Strategy on reduction of GHGS emissions from ships. London: The International Maritime Organization. IMO Resolution MEPC.304(72), adopted on 13 April 2018. IMO: London. <https://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Pages/MEPC-2018-19.aspx> (accessed on Dec. 31, 2020).
- Insurance Marine News (IMN). 2020. Update on current EGCS restrictions from North. <https://insurancemarinenews.com/insurance-marine-news/update-on-current-egcs-restrictions-from-north/> (accessed 08 31, 2021).
- Jain, K.P., Pruyn, J.F.J. & Hopman, J.J. 2014. Design for recycling: a route to green ship recycling Source: Influence of ship design on ship recycling. In: *Maritime Technology and Engineering*.

- Kang, D.W., Holbrook, J.H. 2015. Use of NH<sub>3</sub> fuel to achieve deep greenhouse gas reductions from US transportation. *Energy Rep.* 2015, 1, 164–168.
- Kirstein, L., Halim, R., Merk, O. 2018. Decarbonising Maritime Transport—Pathways to Zero-Carbon Shipping by 2035, OECD International Transport Forum: Paris, France, 2018.
- Kjell, M.S., 2008. Use of natural gas as fuel for ships. Elidesvik offshore ASA, work shop on marine technology – panel 1. Norway. <<http://www.docstoc.com/docs/19963852/Use-of-Natural-Gas-as-Fuel-for-Ships>> (accessed 03 23, 2020).
- Lowell, D.W., Lutsey, N. 2013. Assessment of the Fuels Cycle Impacts of Liquefied Natural Gas as Used in International Shipping, The International Council on Clean Transportation: Washington DC, WA, USA.
- MAN. 2016. Costs and Benefits of Alternative Fuels for an LR1 Product Tanker. Key results from a DNV GL and MAN Diesel & Turbo joint study.
- Månsson, S. 2017. Prospects for renewable marine fuel, Master' s Thesis 2017: 04, Chalmers University of Technology, Department of Energy and Environment.
- MARINTEK, Study of Greenhouse Gas Emissions from Ships, Final report to the IMO 2000, 2000.
- Misra, S. 2012. Sustainable development and ship life cycle, *International Journal of Innovative Research and Development* 1 (2012) 112-120.
- Nelissen, D., Faber, J., Veen, R.v.d., Grinsven, A.v., Shanthi, H., Toorn, E. 2020. Availability and Costs of Liquefied Bio- and Synthetic Methane—The Maritime Shipping Perspective, CE Delft: Delft, The Netherlands, 2020.
- OECD/ITF. 2018. Decarbonising Maritime Transport. Pathways to zero-carbon shipping by 2035.
- Olmer, N.C., Roy, B., Mao, X., Rutherford, D. 2017. Greenhouse Gas Emissions from Global Shipping, 2013–2015, International Council on Clean Transportation: Washington, DC, USA, 2017.

- Prata, A.J. 2014. Measuring SO<sub>2</sub> ship emissions with an ultraviolet imaging camera. *Atmos. Meas. Tech.*, 7(5), 1213-1229.
- Rahim, M.M., Islam, M.T., Kuruppu, S. 2016. Regulating global shipping corporations' accountability for reducing greenhouse gas emissions in the seas. *Marine Policy*. 69, 159–170.
- Safety4Sea, 2019. Overview of scrubber discharges bans in ports: Update. Available from: <https://safety4sea.com/overview-of-scrubber-discharges-bans-in-ports-update/>.
- Sharafian, A., Blomerus, P., Mérida, M. 2019. Natural gas as a ship fuel: Assessment of greenhouse gas and pollution reduction potential, *Energy Policy*, 131(2019), 332-346.
- Sheng, D., Meng, Q., Li, Z.C. 2019. Optimal vessel speed and fleet size for industrial shipping services under the emission control area regulation. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 105(2019), 37-53.
- Song, Y.J., J. H. Woo, 2013. New shipyard layout design for the preliminary phase & case study for the green project, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 5 (2013) 132-146.
- United Nations Climate Change (UNCC), 2014, Handbook on Measurement, Reporting and Verification for Developing Country Parties.
- Vakili, S.V., Ölçer, A.I., Ballini, F. 2020. The development of a policy framework to mitigate underwater noise pollution from commercial vessels: The role of ports. *Marine Policy*, 120(2020), 140132.
- Veldhuis, I.J.S., Richardson, R.N., Ston, H.B.J. 2007. Hydrogen fuel in a marine environment. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(13), 2553-2566.
- Walsh, D., Lazarou, N.J., James, T., Price, Raucci, C., Sharmina, M., Agnolucci, P., Mander, S., Gilbert, P., Anderson, K., Larkin, A., Smith, T. 2019. Trade and trade-offs: Shipping in changing climates. *Marine Policy*. 106(2019), 1035-37.





環境規劃與管理類

## 轎車輪胎之產品環境足跡分析

呂博裕\*、陳欽雨\*\*、韓豪程\*\*\*、曾琬婷\*\*\*

### 摘 要

本研究係依據歐盟執委會所發展之產品環境足跡方法，探討轎車輪胎進行環境足跡評估之必要原則與方法，以獲致環境足跡評估結果，並針對潛在之環境績效改善方向進行情境分析。本研究以位於新竹縣新豐鄉的一家輪胎製造公司為主要個案，並選擇其所生產的一款轎車輪胎為標的產品進行環境足跡評估。本研究在系統邊界上是屬於搖籃到墳墓模式，其環境足跡量化應包含該產品生命週期之原料取得、製造、配送銷售、使用及廢棄處理等階段，功能單位（即分析單位）為「一顆轎車輪胎」，而輪胎的內徑為 14 吋，重量為 10.159 公斤。本研究結果顯示，正規化轎車輪胎環境足跡排名前 3 大之衝擊類別依序為資源耗竭 - 水 (RDW)、人類毒性 - 癌症效應 (HTCE) 及人類毒性 - 非癌症效應 (HTNCE)。綜合而言，針對正規化轎車輪胎環境足跡排名前 3 大之衝擊類別（即 RDW、HTCE 及 HTNCE），以原料取得階段之環境足跡占比最大，而原料取得階段中又以天然膠、人造膠、與碳黑對環境衝擊程度最大。針對轎車輪胎環境足跡評估結果，本研究另研擬了一個改善情境，其內容為將原料取得階段中人造膠對天然膠的比例稍作調整，針對資源耗竭 - 水 (RDW)，此舉可將正規化轎車輪胎環境足跡降低 5.26%。

【關鍵字】生命週期評估、產品環境足跡、衝擊類別、轎車輪胎

\* 明新科技大學工業工程與管理系所

教授

\*\* 世新大學企業管理學系

副教授

\*\*\* 明新科技大學工業工程與管理系所

碩士

## 一、前言

檢視世界上人口分佈，可發現大多數人口集中在高度發展的大都會區，其所產生的生活垃圾、廢水、廢氣等使環境負荷加重。另外，機動車輛的廢氣排放、工廠密度增加所產生的工業廢棄物、廢水、廢氣等可說是環境污染的主要原因。此外，化石能源（如石油、煤炭、天然氣）使用量隨著經濟發展大都呈現增加趨勢，使用能源的污染排放量隨之增加，對環境也造成相當程度的壓力。

現今全球環保意識提升，各國政府或民間公司對於商品成分甚至製程均有越來越多關於環保的要求標準，而各國除了個人或公司團體自發性的環保行動，各國政府皆針對環保事項訂定了相關政策與法規，相當程度地衍生出各行各業對環保需求（中華經濟研究院，2018）。

各國的環保意識逐漸抬頭，預期在國際綠色政策法規及市場趨勢的帶動下，許多跨國企業紛紛自主訂定相關綠色產品製造或其供應商應遵守的環保要求標準。

國際標準化組織 (international organisation for standardization; ISO) 於 2006 年推出 ISO 14040 與 14044 生命週期評估 (life cycle assessment; LCA) 國際標準，期望建立國際標準以評估產品系統整個生命週期對環境之衝擊程度，其中，ISO 14040 標準敘述生命週期評估之原則與架構，ISO 14044 標準敘述生命週期評估之要求事項與指導綱要 (ISO, 2006)。

但 ISO 14040 系列標準常遭人詬病的問題之一是並沒有指定環境衝擊類別 (impact category)，研究人員必須先深入瞭解眾多已知的環境衝擊類別之意義與內涵，然後從中挑選可能造成重大影響之衝擊類別以進行分析。因此，自 ISO 公布 ISO 14040 系列之國際標準以來，並未獲得各國政府相關部門及企業的重視與支持，更遑論廣泛應用於產品之環境衝擊評估、國家政策制定或環境標籤推動上（盧怡靜、呂穎彬，2014）。

歐盟為解決以上問題，歐盟執委會 (European Commission; EC) 於 2013 年正式發布建立綠色產品單一市場計畫，旨在統一市場規範及發展特定產品、組織的評估方法，並建立一套企業與消費者可比較的標準，為此，歐盟執委會發展了產品環

境足跡 (product environmental footprint; PEF) 指引與組織環境足跡 (organization environmental footprint; OEF) 指引。歐盟執委會希望在新的政策發布前先瞭解環境足跡方法的適用性，因此，本計畫試行為期 3 年，至 2016 年底為止，共超過 280 個自願的企業及組織參與試行工作。歐盟執委會發展的環境足跡之環境衝擊評估方法，係以生命週期評估 (LCA) 方法為基礎建立 (經濟部工業局，2018)。

輪胎的主要原料為天然膠及合成膠，並加入一些化學物 (如碳黑)，因台灣沒有生產天然膠的氣候，所以天然膠的取得需仰賴其他國家進口，長途運輸過程會造成污染。輪胎製造過程中需投入大量的電力及重油，要經過多道的加工手續及消耗大量的資源。製造過程中亦需使用重油燃燒轉變為動能，以製作成輪胎，如此會排放二氧化碳，並造成空氣污染。因輪胎是以橡膠製成固體的產物，使用後報廢，無法焚燒，僅能用特殊回收方法來降低環境影響。

總之，輪胎在原料長途運輸、產品製造、消費者使用等過程皆會造成的污染，對大氣、水、土壤等造成一定程度的傷害。

本研究係依據歐盟執委會所發展之產品環境足跡方法，探討轎車輪胎 (passenger car tires) 進行環境足跡評估之必要原則與方法，以獲致環境足跡評估結果，並針對潛在之環境績效改善方向進行情境分析。本研究以位於新竹縣新豐鄉的一家輪胎製造公司為主要個案，並選擇其所生產的一款轎車輪胎為標的產品進行環境足跡評估。本研究在系統邊界上是屬於「搖籃到墳墓」(cradle to grave) 模式，其環境足跡量化應包含該產品生命週期之原料取得、製造、配送銷售、使用、廢棄處理等階段，功能單位 (functional unit) (即分析單位) 為一顆轎車輪胎及其包裝材料，而輪胎的內徑為 14 吋，重量為 10.159 公斤。

## 二、轎車輪胎環境足跡評估

### 2.1 研究架構

本研究之研究架構，如圖 1 所示。研究架構之核心是「產品環境足跡評估」，其輸入包括：原則、目的與範疇定義、資源使用與排放輪廓之彙編與紀錄、環境足跡衝擊評估、產品環境足跡計算工具、生命週期評估軟體及資料庫等，其輸出為環境足跡評估結果及詮釋，並進行情境分析。

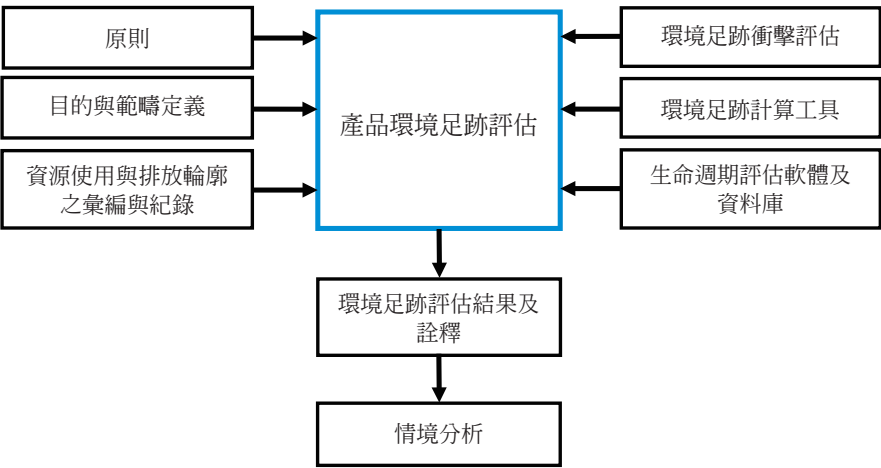


圖 1 研究架構圖

### 2.2 個案公司簡介

本研究以位於新竹縣新豐鄉的一家輪胎製造公司為主要個案（稱為個案公司），再加上其原料供應商、經銷商、特約修車廠、垃圾焚化廠、資源回收廠等，此供應鏈是本研究主要的資料蒐集來源。個案公司成立於 1959 年，前身為橡膠廠，目前主要從事製造汽車輪胎及各種輪胎為主。以市值計為國內第二大輪胎製造公司，主要產品為機動車輛使用的汽車外胎，包括：高性能輪胎、轎車輪胎、休旅車輪胎、4x4 越野車輪胎、商貨兩用車輪胎、雪地用輪胎等。

## 2.3 環境足跡研究之目的與範疇定義

### 2.3.1 標的產品及其特性與機能

本研究所選擇之標的產品為個案公司所生產的一款「轎車輪胎」，該款轎車輪胎型號是 CW-25 (185R14C)，如圖 2 所示，該款轎車輪胎為個案公司 2017 年國內最暢銷的轎車輪胎，2017 年度國內共銷售出 17,250 條。該款轎車輪胎為新世代轎車輪胎，著重於耐久及耐磨耗性能，花紋設計增強花紋塊剛性，以承擔高載重的壓力進而提升輪胎耐久性，在胎面膠料耐磨配方與花紋踏面比例擴大，使該款轎車輪胎擁有絕佳之耐磨耗性能，在溝槽設計降低噪音產生，以提升乘坐舒適度。



圖 2 一顆轎車輪胎

### 2.3.2 產品組成

轎車輪胎的產品組成包括：碳黑、天然膠、人造膠、尼龍簾布、聚酯簾布、胎牙鋼絲及鋼絲等原料，這些主要原物料於單位產品中之重量百分比已達 90% 以上。此外，還有包裝材料包括：標籤。

### 2.3.3 功能單位

本研究之功能單位為「一顆轎車輪胎」，輪胎型號是 CW-25 (185R14C)，每顆輪胎的內徑為 14 吋，輪胎周長 1,959 mm，重量為 10.159 kg。此功能單位包括一顆轎車

輪胎及其包裝材料 ( 即標籤 ) 。本研究以一顆轎車輪胎為功能單位，係因在配送銷售階段，各地區特約修車廠在銷售輪胎時是以一顆輪胎為基本單位。

2.3.4 產品生命週期系統邊界及流程

轎車輪胎環境足跡評估在系統邊界設定上是屬於「搖籃到墳墓」，環境足跡量化應包含該產品生命週期之原料取得、製造、配送銷售、使用及廢棄處理等階段。

2.3.5 挑選產品環境足跡衝擊類別

歐盟執委會所制定之「產品環境足跡指引」，其所預設之環境足跡衝擊類別共有 15 項，如表 1 所示。本研究基於完整性，因此納入產品環境足跡指引建議之所有衝擊類別 ( 共 15 項 ) 。

表 1 衝擊類別及其英文縮寫與正規化因子

| 衝擊類別                                                           | 單位                       | 英文縮寫  | 正規化因子    |
|----------------------------------------------------------------|--------------------------|-------|----------|
| 氣候變遷 (Climate Change)                                          | kg CO <sub>2</sub> eq.   | CC    | 4.60E+12 |
| 酸化 (Acidification)                                             | mole H <sup>+</sup> eq.  | Ac    | 2.36E+10 |
| 對淡水生態毒性<br>(Ecotoxicity for aquatic fresh water)               | CTUe                     | EcAFW | 4.36E+12 |
| 優養化 - 淡水 (Eutrophication - fresh water)                        | kg P eq.                 | EuFW  | 7.41E+8  |
| 優養化 - 海水 (Eutrophication - marine)                             | kg N eq.                 | EuM   | 8.44E+9  |
| 優養化 - 陸地 (Eutrophication - terrestrial)                        | mole N eq.               | EuT   | 8.76E+10 |
| 人類毒性 - 癌症效應<br>(Human Toxicity - cancer effects)               | CTUh                     | HTCE  | 1.84E+4  |
| 人類毒性 - 非癌症效應<br>(Human Toxicity - non-cancer effects)          | CTUh                     | HTNCE | 2.66E+5  |
| 游離性輻射 - 人類健康效應<br>(Ionising Radiations - human health effects) | kBq U <sub>235</sub> eq. | IRHHE | 5.64E+11 |
| 臭氧耗竭 (Ozone Depletion)                                         | kg CFC-11 eq.            | OD    | 1.08E+7  |

| 衝擊類別                                                           | 單位                       | 英文縮寫 | 正規化因子    |
|----------------------------------------------------------------|--------------------------|------|----------|
| 顆粒物質 / 呼吸性非有機物質<br>(Particulate Matter/Respiratory Inorganics) | kg PM <sub>2.5</sub> eq. | PMRI | 1.90E+9  |
| 光化學臭氧形成<br>(Photochemical Ozone Formation)                     | kg NMVOC eq.             | POF  | 1.58E+10 |
| 資源耗竭 - 水 (Resource Depletion - water)                          | m3 water eq.             | RDW  | 4.06E+10 |
| 資源耗竭 - 礦物 / 化石燃料<br>(Resource Depletion - mineral, fossil)     | kg Sb eq.                | RDMF | 5.03E+7  |
| 土地轉變 (Land Transformation)                                     | kg C (deficit)           | LT   | 3.74E+13 |

## 2.4 資源使用與排放之盤查分析

原料取得階段之活動數據蒐集方面，必須清楚瞭解產品組成與包裝材料，並測量每一產品組成與包裝材料之重量及運輸距離。

製造階段之活動數據蒐集方面，組織（即製造階段）所擁有、營運或控制之製程的環境衝擊以實地盤查為原則，製造階段活動數據蒐集係根據 ISO 14064-1 標準及歐盟產品環境足跡指引等，赴個案公司進行實地盤查以蒐集活動數據 (ISO, 2006; EC, 2012)，不過僅將具實質性貢獻衝擊來源納入計算（即衝擊來源貢獻超過 1% 者）。

後續三個階段（即配送銷售階段、使用階段、廢棄處理階段）之活動數據蒐集方面，則依其情境內容而定。

凡一產品是持續性的提供，環境衝擊評估應涵蓋至少長達一年；凡一產品是以時間作為區隔（如季節性產品），環境衝擊評估應涵蓋該產品生產的特定期間（環保署，2010）。本研究所探討之產品是屬於持續性的提供，數據蒐集期間為 2017 年 1 月 1 日至 2017 年 12 月 31 日止。而各階段之運輸距離是運用 Google Map 進行估算。

產品環境足跡計算應包含所有單元過程中，可能造成該產品生命週期環境衝擊實質貢獻 (material contribution) 之衝擊。實質貢獻指的是產品任一衝擊來源貢獻超過 1% 的預期生命週期環境衝擊，均須納入環境足跡計算。建立 1% 的截斷原則以確保任何微小來源之生命週期環境衝擊，不用比照重大衝擊來源的處理方式進行評估（環保署，2010）。



活動數據如需進行分配時，可依質量、進料量、重量、工時等物理性質作為分配基礎，如以物理關係無法建立或作為分配之基礎，則可依不同產品經濟價值的比例分配之（環保署，2010）。本研究選擇個案公司所生產的一款轎車輪胎進行環境足跡分析，在數據蒐集期間，製造階段所使用的能資源及產生的廢棄物，係依輪胎的生產量進行分配。2017 年期間，個案公司全年度共生產各系列輪胎 3,792,242 條。

2.4.1 原料取得階段

原料取得階段需蒐集的項目包括：

- 1. 與製造完成品各原料相關之生命週期環境衝擊（含運輸過程之環境衝擊）。
- 2. 與製造完成品各包裝材料相關之生命週期環境衝擊（含運輸過程之環境衝擊）。

原料取得階段所蒐集之數據如表 2~ 表 4 所示，其中，表 2 為原料取得階段有關產品組成所蒐集之數據，表 3 為原料取得階段有關包裝材料所蒐集之數據，表 4 為原料取得階段有關運輸所蒐集之數據。

表 4 中，碳黑、尼龍簾布、聚酯簾布、鋼絲簾布、鋼絲等原料是從中國進口，天然膠原料是從印尼進口。

表 2 原料取得階段有關產品組成所蒐集之數據

| 原料 / 包裝材料名稱                | 活動數據 (kg) ( 每功能單位 ) | 主要成份                 |
|----------------------------|---------------------|----------------------|
| 碳黑 (carbon black)          | 3.143               | 碳氫化合物                |
| 天然膠 (natural emulsion)     | 2.061               | 異戊二烯                 |
| 人造膠 (artificial glue)      | 2.910               | 聚苯乙烯、丁二烯             |
| 尼龍簾布 (nylon-66)            | 0.122               | 己二胺、己二酸              |
| 聚酯簾布 (polyester tire cord) | 0.641               | 聚乙烯 (PE)             |
| 鋼絲簾布 (steel cord)          | 0.892               | 聚異戊二烯、碳 ( 黑煙 )、不溶性硫磺 |
| 鋼絲 (steel wire)            | 0.390               | 碳鋼                   |
| Total                      | 10.159              |                      |

表 3 原料取得階段有關包裝材料所蒐集之數據

| 包裝材料名稱 | 活動數據 (kg) (每功能單位) | 主要成份       |
|--------|-------------------|------------|
| 標籤     | 0.00001           | 聚氯乙烯 (PVC) |
| Total  | 0.00001           |            |

表 4 原料取得階段有關運輸所蒐集之數據

| 衝擊類別 | 運輸區間<br>(起點 / 終點)      | 距離<br>(km) | 載重 (ton)<br>(每功能單位) | 載具                |
|------|------------------------|------------|---------------------|-------------------|
| 碳黑   | CSRC 碳黑公司中國重慶廠 / 中國重慶港 | 67.5       | 0.003143            | 重型卡車 / 營業大貨車 (柴油) |
| 碳黑   | 中國重慶港 / 台灣基隆港          | 1562.44    | 0.003143            | 貨運船               |
| 碳黑   | 台灣基隆港 / 個案公司           | 89.4       | 0.003143            | 重型卡車 / 營業大貨車 (柴油) |
| 天然膠  | PT 公司印尼廖內省廠 / 印尼雅加達港   | 1316       | 0.002061            | 重型卡車 / 營業大貨車 (柴油) |
| 天然膠  | 印尼雅加達港 / 台灣基隆港         | 3799       | 0.002061            | 貨運船               |
| 天然膠  | 台灣基隆港 / 個案公司           | 89.4       | 0.002061            | 重型卡車 / 營業大貨車 (柴油) |
| 人造膠  | CM 實業公司 / 個案公司         | 252        | 0.002910            | 重型卡車 / 營業大貨車 (柴油) |
| 尼龍簾布 | FE 工業公司中國蘇州廠 / 中國張家港   | 92.5       | 0.000120            | 重型卡車 / 營業大貨車 (柴油) |
| 尼龍簾布 | 中國張家港 / 台灣基隆港          | 500        | 0.000120            | 貨運船               |
| 尼龍簾布 | 台灣基隆港 / 個案公司           | 89.4       | 0.000120            | 重型卡車 / 營業大貨車 (柴油) |
| 聚酯簾布 | FE 工業公司中國蘇州廠 / 中國張家港   | 92.5       | 0.000641            | 重型卡車 / 營業大貨車 (柴油) |
| 聚酯簾布 | 中國張家港 / 台灣基隆港          | 500        | 0.000641            | 貨運船               |
| 聚酯簾布 | 台灣基隆港 / 個案公司           | 89.4       | 0.000641            | 重型卡車 / 營業大貨車 (柴油) |
| 鋼絲簾布 | HT 公司中國江蘇廠 / 中國江蘇港     | 145        | 0.000892            | 重型卡車 / 營業大貨車 (柴油) |
| 鋼絲簾布 | 中國江蘇港 / 台灣基隆港          | 766.2      | 0.000892            | 貨運船               |

56 轎車輪胎之產品環境足跡分析

| 衝擊類別 | 運輸區間<br>(起點 / 終點)     | 距離<br>(km) | 載重 (ton)<br>(每功能單位) | 載具                   |
|------|-----------------------|------------|---------------------|----------------------|
| 鋼絲簾布 | 台灣基隆港 / 個案公司          | 89.4       | 0.000892            | 重型卡車 /<br>營業大貨車 (柴油) |
| 鋼絲   | KL 公司中國青島廠 /<br>中國青島港 | 77         | 0.000390            | 重型卡車 /<br>營業大貨車 (柴油) |
| 鋼絲   | 中國青島港 / 台灣基隆港         | 1233       | 0.000390            | 貨運船                  |
| 鋼絲   | 台灣基隆港 / 個案公司          | 89.4       | 0.000390            | 重型卡車 /<br>營業大貨車 (柴油) |
| 標籤   | TH 興業公司 / 個案公司        | 134        | 0.00000001          | 重型卡車 /<br>營業大貨車 (柴油) |

2.4.2 製造階段

製造階段需蒐集的項目包括：

- 1. 與完成品製造 / 組裝相關之生命週期環境衝擊 ( 含能資源供應、廢棄物運輸與處理過程之環境衝擊 )。
- 2. 與完成品包裝相關之生命週期環境衝擊 ( 含能資源供應、廢棄物運輸與處理過程之環境衝擊 )。

製造階段所蒐集之數據如表 5~ 表 7 所示，其中，表 5 為製造階段有關能資源所蒐集之數據，表 6 為製造階段有關廢棄物運輸所蒐集之數據，表 7 為製造階段有關廢棄物處理所蒐集之數據。

表 5 製造階段有關能資源所蒐集之數據

| 能資源 / 廢棄物名稱 | 屬性 | 活動數據 ( 全廠全年度 ) | 活動數據 ( 每功能單位 ) |
|-------------|----|----------------|----------------|
| 電力          | 能源 | 83,011,200 度   | 21.88974 度     |
| 重油          | 能源 | 8,256,087 kg   | 2.17710 kg     |
| 乙炔          | 能源 | 501 kg         | 0.00013 kg     |
| 柴油          | 能源 | 162,018.4 kg   | 0.04272 kg     |
| 自來水         | 資源 | 1,111,000 kg   | 0.29297 kg     |

表 6 製造階段有關廢棄物運輸所蒐集之數據

| 廢棄物名稱 | 運輸區間<br>(起點 / 終點)   | 距離<br>(km) | 全廠全年度<br>總量 (ton) | 載重 (ton)<br>(每功能單位) | 載具                    |
|-------|---------------------|------------|-------------------|---------------------|-----------------------|
| 廢輪胎   | 個案公司 / YT<br>國際企業公司 | 116        | 487.25            | 0.000128            | 重型卡車 / 營業<br>大貨車 (柴油) |
| 廢胎體   | 個案公司 / DY<br>環保科技公司 | 136        | 406.34            | 0.000107            | 重型卡車 / 營業<br>大貨車 (柴油) |
| 上膠簾布  | 個案公司 / DY<br>環保科技公司 | 136        | 284.73            | 0.000075            | 重型卡車 / 營業<br>大貨車 (柴油) |

表 7 製造階段有關廢棄物處理所蒐集之數據

| 能資源 / 廢棄物名稱 | 活動數據 (kg) (每功能單位) | 處理方法  |
|-------------|-------------------|-------|
| 廢輪胎         | 0.128             | 回收再利用 |
| 廢胎體         | 0.107             | 回收再利用 |
| 上膠簾布        | 0.075             | 回收再利用 |

### 2.4.3 配送銷售階段

製造階段需蒐集的项目包括：

1. 與完成品運輸過程相關之生命週期環境衝擊。
2. 與完成品安裝過程相關之生命週期環境衝擊 (含能資源供應、廢棄物運輸與處理過程之環境衝擊)。

在配送銷售階段，個案公司所生產的轎車輪胎先運送到各地區經銷商，再由經銷商配送到各地區特約修車廠。主要銷售地區包括：北基、新北、桃園、新竹、苗栗、中投、彰雲、嘉義、台南、高屏、宜蘭，且是透過各地區特約修車廠進行銷售。因此在完成品配送方面，先是以個案公司為起點，以各地區經銷商為終點，計算其運輸距離；接著是以各地區經銷商為起點，以各地區特約修車廠為終點，再取其平均運輸距離。

配送銷售階段所蒐集之數據如表 8 所示，即表 8 為配送銷售階段有關完成品運輸所蒐集之數據。

表 8 配送銷售階段有關完成品運輸所蒐集之數據

| 配送點名稱 | 運輸區間<br>(起點 / 終點)  | 距離<br>(km) | 載重 (ton)<br>(每功能單位) | 占比     | 載具                |
|-------|--------------------|------------|---------------------|--------|-------------------|
| 北基    | 個案公司 / 台北中山區經銷商    | 64.8       | 0.01015901          | 15.14% | 輕型卡車 / 營業小貨車 (柴油) |
| 北基    | 台北中山區經銷商 / 北基特約修車廠 | 2.8        | 0.01015901          | 15.14% | 輕型卡車 / 營業小貨車 (柴油) |
| 新北    | 個案公司 / 新北汐止經銷商     | 79.6       | 0.01015901          | 17.62% | 輕型卡車 / 營業小貨車 (柴油) |
| 新北    | 新北汐止經銷商 / 新北特約修車廠  | 7.4        | 0.01015901          | 17.62% | 輕型卡車 / 營業小貨車 (柴油) |
| 桃園    | 個案公司 / 桃園大園經銷商     | 37         | 0.01015901          | 16.20% | 輕型卡車 / 營業小貨車 (柴油) |
| 桃園    | 桃園大園經銷商 / 桃園特約修車廠  | 3.1        | 0.01015901          | 16.20% | 輕型卡車 / 營業小貨車 (柴油) |
| 新竹    | 個案公司 / 新竹香山經銷商     | 19.1       | 0.01015901          | 2.14%  | 輕型卡車 / 營業小貨車 (柴油) |
| 新竹    | 新竹香山經銷商 / 新竹特約修車廠  | 4.4        | 0.01015901          | 2.14%  | 輕型卡車 / 營業小貨車 (柴油) |
| 苗栗    | 個案公司 / 苗栗後龍經銷商     | 44.4       | 0.01015901          | 0.18%  | 輕型卡車 / 營業小貨車 (柴油) |
| 苗栗    | 苗栗後龍經銷商 / 苗栗特約修車廠  | 5.1        | 0.01015901          | 0.18%  | 輕型卡車 / 營業小貨車 (柴油) |
| 中投    | 個案公司 / 台中大雅經銷商     | 97.9       | 0.010159            | 13.36% | 輕型卡車 / 營業小貨車 (柴油) |
| 中投    | 台中大雅經銷商 / 中投特約修車廠  | 4.7        | 0.010159            | 13.36% | 輕型卡車 / 營業小貨車 (柴油) |
| 彰雲    | 個案公司 / 彰雲虎尾經銷商     | 173        | 0.01015901          | 7.39%  | 輕型卡車 / 營業小貨車 (柴油) |
| 彰雲    | 彰雲虎尾經銷商 / 彰雲特約修車廠  | 6.7        | 0.01015901          | 7.39%  | 輕型卡車 / 營業小貨車 (柴油) |
| 嘉義    | 個案公司 / 嘉義西區經銷商     | 190        | 0.01015901          | 2.49%  | 輕型卡車 / 營業小貨車 (柴油) |
| 嘉義    | 嘉義西區經銷商 / 嘉義特約修車廠  | 4.1        | 0.01015901          | 2.49%  | 輕型卡車 / 營業小貨車 (柴油) |
| 台南    | 個案公司 / 台南歸仁經銷商     | 249        | 0.01015901          | 4.14%  | 輕型卡車 / 營業小貨車 (柴油) |
| 台南    | 台南歸仁經銷商 / 台南特約修車廠  | 7.3        | 0.01015901          | 4.14%  | 輕型卡車 / 營業小貨車 (柴油) |
| 高屏    | 個案公司 / 高屏仁武經銷商     | 283        | 0.01015901          | 19.56% | 輕型卡車 / 營業小貨車 (柴油) |

| 配送點名稱 | 運輸區間<br>(起點 / 終點)    | 距離<br>(km) | 載重 (ton)<br>(每功能單位) | 占比     | 載具                |
|-------|----------------------|------------|---------------------|--------|-------------------|
| 高屏    | 高屏仁武經銷商 /<br>高屏特約修車廠 | 8.9        | 0.01015901          | 19.56% | 輕型卡車 / 營業小貨車 (柴油) |
| 宜蘭    | 個案公司 /<br>宜蘭羅東經銷商    | 130        | 0.01015901          | 1.77%  | 輕型卡車 / 營業小貨車 (柴油) |
| 宜蘭    | 宜蘭羅東經銷商 /<br>宜蘭特約修車廠 | 3.6        | 0.01015901          | 1.77%  | 輕型卡車 / 營業小貨車 (柴油) |

#### 2.4.4 使用階段

使用階段需蒐集之項目包括：消費者使用完成品過程相關之生命週期環境衝擊（含能源供應、廢棄物運輸與處理過程之環境衝擊）。

在使用階段，首先轎車車主在各地區特約修車廠更換新輪胎，即產品安裝（含輪胎平衡定位）；使用之後如果輪胎有裂痕或破洞，則回到各地區特約修車廠進行產品（即輪胎）維修（含輪胎平衡定位），假設在輪胎使用終了前（一顆輪胎平均壽命約為 5 年），輪胎之平均維修次數為 2 次。

在廢棄物（即標籤）處理方面，係運送到各地區垃圾焚化廠，即以各地區修車廠為起點，以各地區垃圾焚化廠為終點，再取其平均運輸距離，處理方式為焚化。

使用階段所蒐集之數據如表 9~ 表 12 所示，其中，表 9 為使用階段有關產品安裝所收集之數據，表 10 為使用階段有關廢棄物運輸所蒐集之數據，表 11 為使用階段有關廢棄物處理所蒐集之數據，表 12 為使用階段有關產品維修所蒐集之數據。

表 9 使用階段有關產品安裝所蒐集之數據

| 能資源名稱 | 屬性 | 活動數據 (每功能單位) |
|-------|----|--------------|
| 電力    | 能源 | 0.408 度      |
| 鉛塊    | 資源 | 0.05 kg      |

表 10 使用階段有關廢棄物運輸所蒐集之數據

| 廢棄物名稱 | 運輸區間<br>(起點 / 終點)    | 距離<br>(km) | 載重 (ton)<br>(每功能單位) | 占比     | 載具                    |
|-------|----------------------|------------|---------------------|--------|-----------------------|
| 標籤    | 北基特約修車廠 /<br>內湖垃圾焚化廠 | 9.9        | 0.00000001          | 15.14% | 重型卡車 / 營業大<br>貨車 (柴油) |
| 標籤    | 新北特約修車廠 /<br>新店垃圾焚化廠 | 23.3       | 0.00000001          | 17.62% | 重型卡車 / 營業大<br>貨車 (柴油) |
| 標籤    | 桃園特約修車廠 /<br>中壢垃圾焚化廠 | 6.8        | 0.00000001          | 16.20% | 重型卡車 / 營業大<br>貨車 (柴油) |
| 標籤    | 新竹特約修車廠 /<br>新竹垃圾焚化廠 | 6.2        | 0.00000001          | 2.14%  | 重型卡車 / 營業大<br>貨車 (柴油) |
| 標籤    | 苗栗特約修車廠 /<br>竹南垃圾焚化廠 | 14.9       | 0.00000001          | 0.18%  | 重型卡車 / 營業大<br>貨車 (柴油) |
| 標籤    | 中投特約修車廠 /<br>后里垃圾焚化廠 | 13         | 0.00000001          | 13.36% | 重型卡車 / 營業大<br>貨車 (柴油) |
| 標籤    | 彰雲特約修車廠 /<br>雲林垃圾焚化廠 | 35.9       | 0.00000001          | 7.39%  | 重型卡車 / 營業大<br>貨車 (柴油) |
| 標籤    | 嘉義特約修車廠 /<br>鹿草垃圾焚化廠 | 23.9       | 0.00000001          | 2.49%  | 重型卡車 / 營業大<br>貨車 (柴油) |
| 標籤    | 台南特約修車廠 /<br>永康垃圾焚化廠 | 6.6        | 0.00000001          | 4.14%  | 重型卡車 / 營業大<br>貨車 (柴油) |
| 標籤    | 高屏特約修車廠 /<br>岡山垃圾焚化廠 | 28.7       | 0.00000001          | 19.36% | 重型卡車 / 營業大<br>貨車 (柴油) |
| 標籤    | 宜蘭特約修車廠 /<br>利澤垃圾焚化廠 | 10.3       | 0.00000001          | 1.77%  | 重型卡車 / 營業大<br>貨車 (柴油) |

表 11 使用階段有關廢棄物處理所蒐集之數據

| 廢棄物名稱 | 活動數據 (kg) (每功能單位) | 處理方法 |
|-------|-------------------|------|
| 標籤    | 0.00001           | 焚化   |



表 12 使用階段有關產品維修所蒐集之數據

| 能資源名稱      | 屬性 | 活動數據<br>(每功能單位且為使用終了前之使用量) |
|------------|----|----------------------------|
| 電力         | 能源 | 0.408 度 (維修一次) x 2         |
| 補膠片 (丁基橡膠) | 資源 | 0.086 kg (維修一次) x 2        |
| 肥皂         | 資源 | 0.1 kg (維修一次) x 2          |
| 自來水        | 資源 | 0.1 kg (維修一次) x 2          |

#### 2.4.5 廢棄處理階段

廢棄處理階段需蒐集的項目包括：完成品使用終了的廢棄物運輸與處理過程相關之生命週期環境衝擊。

在廢棄處理階段，即轎車輪胎使用終了，最終廢棄物係利用垃圾車運送到各地區的垃圾焚化廠，即以各地區特約修車廠為起點，以各地區的垃圾焚化廠為終點，再取其平均運輸距離，例如：新竹之特約修車廠係將最終廢棄物運送到新竹南寮垃圾焚化廠處理，運輸距離是運用 Google Map 進行估算，處理方式為回收再利用。

廢棄處理階段所蒐集之數據如表 13~ 表 14 所示，其中，表 13 為廢棄處理階段有關最終廢棄物運輸所蒐集之數據，表 14 為廢棄處理階段有關最終廢棄物處理所蒐集之數據。

表 13 廢棄處理階段有關最終廢棄物運輸所蒐集之數據

| 最終廢棄物名稱 | 運輸區間<br>(起點 / 終點)    | 距離<br>(km) | 載重 (ton)<br>(每功能單位) | 占比     | 載具                |
|---------|----------------------|------------|---------------------|--------|-------------------|
| 廢輪胎     | 北基特約修車廠 /<br>內湖垃圾焚化廠 | 9.9        | 0.010159            | 15.14% | 輕型卡車 / 營業小貨車 (柴油) |
| 廢輪胎     | 新北特約修車廠 /<br>新店垃圾焚化廠 | 23.3       | 0.010159            | 17.62% | 輕型卡車 / 營業小貨車 (柴油) |
| 廢輪胎     | 桃園特約修車廠 /<br>中壢垃圾焚化廠 | 6.8        | 0.010159            | 16.20% | 輕型卡車 / 營業小貨車 (柴油) |
| 廢輪胎     | 新竹特約修車廠 /<br>新竹垃圾焚化廠 | 6.2        | 0.010159            | 2.4%   | 輕型卡車 / 營業小貨車 (柴油) |

62 轎車輪胎之產品環境足跡分析

| 最終廢棄物名稱 | 運輸區間<br>(起點 / 終點) | 距離<br>(km) | 載重 (ton)<br>(每功能單位) | 占比     | 載具                |
|---------|-------------------|------------|---------------------|--------|-------------------|
| 廢輪胎     | 苗栗特約修車廠 / 竹南垃圾焚化廠 | 14.9       | 0.010159            | 0.18%  | 輕型卡車 / 營業小貨車 (柴油) |
| 廢輪胎     | 中投特約修車廠 / 后里垃圾焚化廠 | 13         | 0.010159            | 13.36% | 輕型卡車 / 營業小貨車 (柴油) |
| 廢輪胎     | 彰雲特約修車廠 / 雲林垃圾焚化廠 | 35.9       | 0.010159            | 7.39%  | 輕型卡車 / 營業小貨車 (柴油) |
| 廢輪胎     | 嘉義特約修車廠 / 鹿草垃圾焚化廠 | 23.9       | 0.010159            | 2.49%  | 輕型卡車 / 營業小貨車 (柴油) |
| 廢輪胎     | 台南特約修車廠 / 永康垃圾焚化廠 | 6.6        | 0.010159            | 4.14%  | 輕型卡車 / 營業小貨車 (柴油) |
| 廢輪胎     | 高屏特約修車廠 / 岡山垃圾焚化廠 | 28.7       | 0.010159            | 19.56% | 輕型卡車 / 營業小貨車 (柴油) |
| 廢輪胎     | 宜蘭特約修車廠 / 利澤垃圾焚化廠 | 10.3       | 0.000159            | 1.77%  | 輕型卡車 / 營業小貨車 (柴油) |
| 鉛塊      | 北基特約修車廠 / 內湖垃圾焚化廠 | 9.9        | 0.00005             | 15.14% | 輕型卡車 / 營業小貨車 (柴油) |
| 鉛塊      | 新北特約修車廠 / 新店垃圾焚化廠 | 23.3       | 0.00005             | 17.62% | 輕型卡車 / 營業小貨車 (柴油) |
| 鉛塊      | 桃園特約修車廠 / 中壢垃圾焚化廠 | 6.8        | 0.00005             | 16.20% | 輕型卡車 / 營業小貨車 (柴油) |
| 鉛塊      | 新竹特約修車廠 / 新竹垃圾焚化廠 | 6.2        | 0.00005             | 2.4%   | 輕型卡車 / 營業小貨車 (柴油) |
| 鉛塊      | 苗栗特約修車廠 / 竹南垃圾焚化廠 | 14.9       | 0.00005             | 0.18%  | 輕型卡車 / 營業小貨車 (柴油) |
| 鉛塊      | 中投特約修車廠 / 后里垃圾焚化廠 | 13         | 0.00005             | 13.36% | 輕型卡車 / 營業小貨車 (柴油) |
| 鉛塊      | 彰雲特約修車廠 / 雲林垃圾焚化廠 | 35.9       | 0.00005             | 7.39%  | 輕型卡車 / 營業小貨車 (柴油) |
| 鉛塊      | 嘉義特約修車廠 / 鹿草垃圾焚化廠 | 23.9       | 0.00005             | 2.49%  | 輕型卡車 / 營業小貨車 (柴油) |
| 鉛塊      | 台南特約修車廠 / 永康垃圾焚化廠 | 6.6        | 0.00005             | 4.14%  | 輕型卡車 / 營業小貨車 (柴油) |
| 鉛塊      | 高屏特約修車廠 / 岡山垃圾焚化廠 | 28.7       | 0.00005             | 19.56% | 輕型卡車 / 營業小貨車 (柴油) |

| 最終廢棄物名稱 | 運輸區間<br>(起點 / 終點) | 距離<br>(km) | 載重 (ton)<br>(每功能單位) | 占比     | 載具                |
|---------|-------------------|------------|---------------------|--------|-------------------|
| 鉛塊      | 宜蘭特約修車廠 / 利澤垃圾焚化廠 | 10.3       | 0.00005             | 1.77%  | 輕型卡車 / 營業小貨車 (柴油) |
| 補膠片     | 北基特約修車廠 / 內湖垃圾焚化廠 | 9.9        | 0.000172            | 15.14% | 輕型卡車 / 營業小貨車 (柴油) |
| 補膠片     | 新北特約修車廠 / 新店垃圾焚化廠 | 23.3       | 0.000172            | 17.62% | 輕型卡車 / 營業小貨車 (柴油) |
| 補膠片     | 桃園特約修車廠 / 中壢垃圾焚化廠 | 6.8        | 0.000172            | 16.20% | 輕型卡車 / 營業小貨車 (柴油) |
| 補膠片     | 新竹特約修車廠 / 新竹垃圾焚化廠 | 6.2        | 0.000172            | 2.4%   | 輕型卡車 / 營業小貨車 (柴油) |
| 補膠片     | 苗栗特約修車廠 / 竹南垃圾焚化廠 | 14.9       | 0.000172            | 0.18%  | 輕型卡車 / 營業小貨車 (柴油) |
| 補膠片     | 中投特約修車廠 / 后里垃圾焚化廠 | 13         | 0.000172            | 13.36% | 輕型卡車 / 營業小貨車 (柴油) |
| 補膠片     | 彰雲特約修車廠 / 雲林垃圾焚化廠 | 35.9       | 0.000172            | 7.39%  | 輕型卡車 / 營業小貨車 (柴油) |
| 補膠片     | 嘉義特約修車廠 / 鹿草垃圾焚化廠 | 23.9       | 0.000172            | 2.49%  | 輕型卡車 / 營業小貨車 (柴油) |
| 補膠片     | 台南特約修車廠 / 永康垃圾焚化廠 | 6.6        | 0.000172            | 4.14%  | 輕型卡車 / 營業小貨車 (柴油) |
| 補膠片     | 高屏特約修車廠 / 岡山垃圾焚化廠 | 28.7       | 0.000172            | 19.56% | 輕型卡車 / 營業小貨車 (柴油) |
| 補膠片     | 宜蘭特約修車廠 / 利澤垃圾焚化廠 | 10.3       | 0.000172            | 1.77%  | 輕型卡車 / 營業小貨車 (柴油) |

表 14 廢棄處理階段有關最終廢棄物處理所蒐集之數據

| 最終廢棄物名稱 | 活動數據 (kg) (每功能單位) | 處理方法  |
|---------|-------------------|-------|
| 廢輪胎     | 10.159            | 回收再利用 |
| 鉛塊      | 0.05              | 回收再利用 |
| 補膠片     | 0.172             | 回收再利用 |

### 2.4.6 資源使用與排放係數

各階段之資源使用與排放係數選用方面，衝擊類別「氣候變遷」是取自國內環保署產品碳足跡計算服務平台之碳足跡資料庫（環保署，2017）；其餘 14 項衝擊類別，由於國內尚未建置這些衝擊類別之資料庫，因此皆取自生命週期評估軟體 / 資料庫 GaBi 7 中之 Impacts ILCD/PEF recommendation (thinkstep, 2017)。

## 2.5 轎車輪胎環境足跡衝擊評估與結果詮釋

本研究納入歐盟產品環境足跡指引所預設之所有 15 項環境足跡衝擊類別，以瞭解轎車輪胎對這些衝擊類別之環境衝擊程度。

將上一節資源使用與排放輪廓之彙編與紀錄（即生命週期盤查分析）結果加以計算與彙整，可得到轎車輪胎環境足跡，如表 15 所示。再將表 15 之轎車輪胎環境足跡除以對應之正規化因子，可得到正規化轎車輪胎環境足跡，如表 16 所示，進一步將表 16 繪製成圖形，如圖 3 所示。表 15 與表 16 皆涵蓋 15 項衝擊類別，且皆依生命週期各階段加以分類，而表中數據則代表每功能單位（即一顆轎車輪胎）之環境足跡。

本研究所採用之正規化因子係代表 2010 年歐盟在各衝擊類別所發生之總衝擊，係歐盟執委會 (EC) 所編撰之「Product Environmental Footprint Pilot Guidance」所建議之正規化因子 (EC, 2016)。

表 16 與圖 3 中，正規化數值越大之衝擊類別代表其對環境衝擊程度越大，由表 16 與圖 3 可看出，正規化轎車輪胎環境足跡排名前 3 大之衝擊類別依序為資源耗竭 - 水 (RDW)、人類毒性 - 癌症效應 (HTCE) 及人類毒性 - 非癌症效應 (HTNCE)。

接著，將表 15 或表 16 之環境足跡依生命週期各階段分別計算其環境足跡占比，結果如圖 4 所示。圖 4 中，針對正規化轎車輪胎環境足跡排名前三大之衝擊類別（即 RDW、HTCE、HTNCE），可發現「原料取得階段」之環境足跡占比皆較其他階段之環境足跡占比來得大，即原料取得階段之環境足跡占比皆占 79% 以上。進一步分析原料取得階段之環境足跡，可發現最大環境足跡占比者為天然膠、人造膠、與碳黑，這三種原料合計皆占其原料取得階段之 95% 以上。

綜合而言，針對正規化轎車輪胎環境足跡排名前三大之衝擊類別（即 RDW、HTCE、HTNCE），以原料取得階段之環境足跡占比最大，而原料取得階段中又以天然膠、人造膠、與碳黑對環境衝擊程度最大。

表 15 轎車輪胎環境足跡評估結果彙整

| 衝擊類別<br>(英文縮寫)[單位]                                                                               | 階段<br>原料取得<br>(每功能單位) | 製 造<br>(每功能單位) | 配送銷售<br>(每功能單位) | 使 用<br>(每功能單位) | 廢棄處理<br>(每功能單位) | 合 計<br>(每功能單位) |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|
| 氣候變遷<br>(Climate Change; CC)<br>[kg CO <sub>2</sub> eq.]                                         | 2.418E+1              | 2.324E+1       | 8.843E-1        | 1.902          | 1.262           | 5.147E+1       |
| 酸化<br>(Acidification; Ac)<br>[mole H <sup>+</sup> eq.]                                           | 1.604E-1              | 6.540E-2       | 1.668E-3        | 1.040E-2       | 1.123E-2        | 2.491E-1       |
| 對淡水生態毒性<br>(Ecotoxicity for aquatic<br>fresh water; EcAFW)<br>[CTUe]                             | 8.811                 | 1.330          | 4.784E-2        | 5.089E-1       | 1.716E-1        | 1.087E+1       |
| 優養化 - 淡水<br>(Eutrophication - fresh<br>water; EuFW)[kg P eq.]                                    | 1.971E-3              | 1.558E-5       | 1.346E-6        | 1.547E-4       | 1.040E-6        | 2.144E-3       |
| 優養化 - 海水<br>(Eutrophication - marine;<br>EuM)[kg N eq.]                                          | 4.502E-2              | 1.428E-3       | 7.887E-4        | 1.529E-3       | 2.287E-3        | 5.106E-2       |
| 優養化 - 陸地<br>(Eutrophication -<br>terrestrial ; EuT)<br>[mole N eq.]                              | 4.667E-1              | 8.609E-2       | 8.830E-3        | 1.953E-2       | 2.529E-2        | 6.065E-1       |
| 人類毒性 - 癌症效應<br>(Human toxicity - cancer<br>effects; HTCE)[CTUh]                                  | 2.902E-7              | 5.502E-8       | 1.323E-9        | 1.094E-8       | 8.246E-9        | 3.658E-7       |
| 人類毒性 - 非癌症效應<br>(Human toxicity - non-<br>cancer effects; HTNCE)<br>[CTUh]                       | 3.936E-6              | 4.277E-7       | 2.023E-8        | 9.060E-8       | 7.303E-8        | 4.547E-6       |
| 游離性輻射 - 人類健康<br>效應<br>(Ionizing radiation,<br>human health; IRHHE)<br>[kBq U <sub>235</sub> eq.] | 4.493E-1              | 2.165          | 2.870E-4        | 1.317E-1       | 2.160E-1        | 2.963          |

| 階段<br>衝擊類別<br>(英文縮寫)[單位]                                                                              | 原料取得<br>(每功能單位) | 製 造<br>(每功能單位) | 配送銷售<br>(每功能單位) | 使 用<br>(每功能單位) | 廢棄處理<br>(每功能單位) | 合 計<br>(每功能單位) |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|
| 臭氧耗竭<br>(Ozone depletion; OD)<br>[kg CFC-11 eq.]                                                      | 1.326E-8        | 9.860E-9       | 8.105E-13       | 4.442E-10      | 7.194E-8        | 9.551E-8       |
| 顆粒物質 / 呼吸性非有機物質<br>(Particulate matter/<br>Respiratory inorganics;<br>PMRI)[kg PM <sub>2.5</sub> eq.] | 8.758E-3        | 3.830E-3       | 4.593E-5        | 4.983E-4       | 6.032E-4        | 1.374E-2       |
| 光化學臭氧形成<br>(Photochemical ozone<br>formation; POF)<br>[kg NMVOC eq.]                                  | 1.145E-1        | 2.578E-2       | 2.611E-4        | 4.153E-3       | 7.022E-3        | 1.517E-1       |
| 資源耗竭 - 水<br>(Resource depletion -<br>water; RDW)<br>[m3 water eq.]                                    | 7.254E-1        | 1.171E-1       | 7.053E-5        | 6.378E-2       | 3.747E-3        | 9.101E-1       |
| 資源耗竭 - 礦物 / 化石<br>燃料<br>(Resource depletion -<br>mineral, fossil; RDMF)<br>[kg Sb eq.]                | 3.718E-5        | 3.575E-5       | 5.467E-8        | 4.412E-4       | 1.033E-4        | 6.175E-4       |
| 土地轉變<br>(Land Transformation;<br>LT)[sqm]                                                             | 1.086E+1        | 2.800E-2       | 1.681E-7        | 8.579E-1       | 5.265E-5        | 1.175E+1       |

表 16 轎車輪胎環境足跡評估結果彙整

| 階段<br>衝擊類別<br>(英文縮寫) | 原料取得<br>(每功能單位) | 製 造<br>(每功能單位) | 配送銷售<br>(每功能單位) | 使 用<br>(每功能單位) | 廢棄處理<br>(每功能單位) | 合 計<br>(每功能單位) |
|----------------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|
| 氣候變遷 (CC)            | 5.257E-12       | 5.053E-12      | 1.922E-13       | 4.134E-13      | 2.744E-13       | 1.119E-11      |
| 酸化 (Ac)              | 6.797E-12       | 2.771E-12      | 7.066E-14       | 4.406E-13      | 4.759E-13       | 1.056E-11      |
| 對淡水生態毒性<br>(EcAFW)   | 2.021E-12       | 3.051E-13      | 1.097E-14       | 1.167E-13      | 3.935E-14       | 2.493E-12      |
| 優養化 - 淡水 (EuFW)      | 2.660E-12       | 2.103E-14      | 1.817E-15       | 2.088E-13      | 1.403E-15       | 2.893E-12      |
| 優養化 - 海水 (EuM)       | 5.334E-12       | 1.692E-13      | 9.344E-14       | 1.812E-13      | 2.710E-13       | 6.049E-12      |

| 衝擊類別<br>(英文縮寫)          | 階段 | 原料取得<br>(每功能單位) | 製 造<br>(每功能單位) | 配送銷售<br>(每功能單位) | 使 用<br>(每功能單位) | 廢棄處理<br>(每功能單位) | 合 計<br>(每功能單位) |
|-------------------------|----|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|
| 優養化 - 陸地 (EuT)          |    | 5.328E-12       | 9.828E-13      | 1.008E-13       | 2.229E-13      | 2.887E-13       | 6.923E-12      |
| 人類毒性 - 癌症效應 (HTCE)      |    | 1.577E-11       | 2.990E-12      | 7.191E-14       | 5.947E-13      | 4.482E-13       | 1.988E-11      |
| 人類毒性 - 非癌症效應 (HTNCE)    |    | 1.480E-11       | 1.608E-12      | 7.605E-14       | 3.406E-13      | 2.746E-13       | 1.709E-11      |
| 游離性輻射 - 人類健康效應 (IRHHE)  |    | 7.967E-13       | 3.839E-12      | 5.089E-16       | 2.335E-13      | 3.829E-13       | 5.253E-12      |
| 臭氧耗竭 (OD)               |    | 1.228E-15       | 9.130E-16      | 7.505E-20       | 4.113E-17      | 6.661E-15       | 8.844E-15      |
| 顆粒物質 / 呼吸性非有機物質 (PMRI)  |    | 4.609E-12       | 2.016E-12      | 2.417E-14       | 2.623E-13      | 3.175E-13       | 7.229E-12      |
| 光化學臭氧形成 (POF)           |    | 7.244E-12       | 1.632E-12      | 1.652E-14       | 2.629E-13      | 4.444E-13       | 9.600E-12      |
| 資源耗竭 - 水 (RDW)          |    | 1.787E-11       | 2.885E-12      | 1.737E-15       | 1.571E-12      | 9.228E-14       | 2.242E-11      |
| 資源耗竭 - 礦物 / 化石燃料 (RDMF) |    | 7.392E-13       | 7.107E-13      | 1.087E-15       | 8.772E-12      | 2.054E-12       | 1.228E-11      |
| 土地轉變 (LT)               |    | 2.905E-13       | 7.488E-16      | 4.495E-21       | 2.294E-14      | 1.408E-18       | 3.142E-13      |

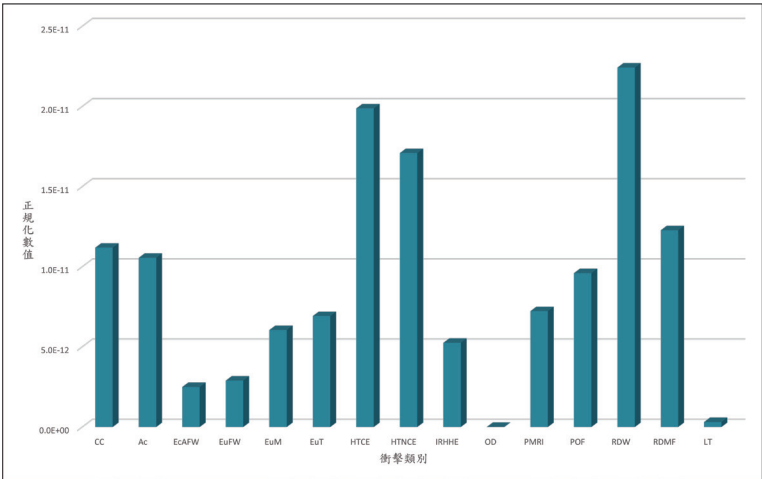


圖 3 正規化轎車輪胎環境足跡



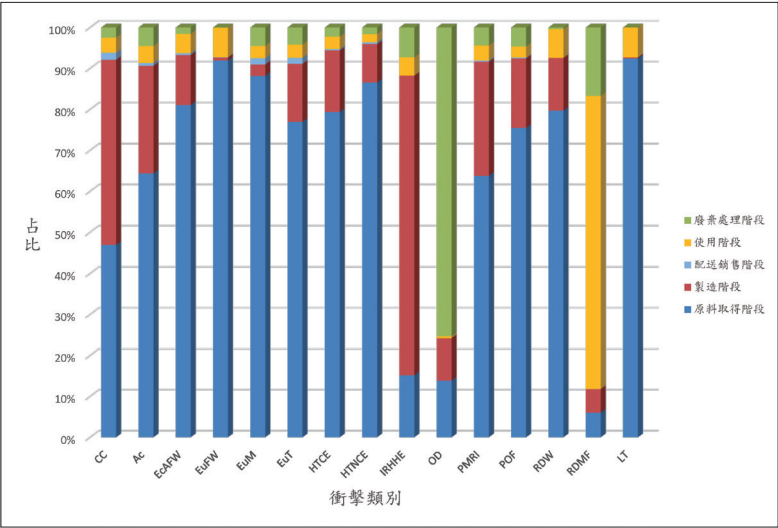


圖 4 以占比表示之轎車輪胎環境足跡

### 三、情境分析

#### 3.1 改善情境之內容

針對正規化轎車輪胎足跡（稱為基本情境）排名前 3 大之衝擊類別（即 RDW、HTCE 及 HTNCE），由於原料取得階段中之「天然膠與人造膠」是造成環境衝擊的主要項目之一，因此調整天然膠與人造膠之比例乃試圖改善轎車輪胎生命週期環境績效之優先考慮方向。

因此，本研究研擬了一個模擬情境（稱為改善情境），此改善情境之內容為：將原料取得階段中天然膠與人造膠之比例由 1.0:1.4 調整為 1.0:1.6，但每功能單位的天然膠與人造膠之總重量維持不變（即 4.971 kg）。亦即每功能單位的天然膠與人造膠之重量分別由 2.061 kg 與 2.910 kg 調整為 1.912 kg 與 3.059 kg。改善情境之其他內容則與前述基本情境相同。

### 3.2 改善情境之轎車輪胎環境足跡評估結果

將改善情境之轎車輪胎環境足跡除以對應之正規化因子，可得到改善情境之正規化轎車輪胎環境足跡，繪製成圖形如圖 5 所示。

圖 5 中，正規化數值越大之衝擊類別代表其對環境衝擊程度越大，由圖 5 可看出，改善情境之正規化轎車輪胎環境足跡排名前三大之衝擊類別依序為資源耗竭 - 水 (RDW)、人類毒性 - 癌症效應 (HTCE)、人類毒性 - 非癌症效應 (HTNCE)，此與基本情境之排名完全相同。

接著，將基本情境與改善情境之正規化轎車輪胎環境足跡進行比較，如圖 6 所示。針對正規化轎車輪胎環境足跡排名第一名之衝擊類別（即資源耗竭 - 水 (RDW)），其改善情境之正規化環境足跡 ( $2.124\text{E-}11$ ) 僅為基本情境之正規化環境足跡 ( $2.242\text{E-}11$ ) 的 94.74%，也就是改善後正規化環境足跡降低了 5.26%。這是因為其原料取得階段之環境足跡占比為 80%，且在原料取得階段中天然膠之影響占 93%，而人造膠之影響只占 3% 之故。

針對正規化轎車輪胎環境足跡排名前三大之衝擊類別（即 HTCE、CC、HTNCE），其改善情境之正規化環境足跡總和 ( $5.866\text{E-}11$ ) 為基本情境之正規化環境足跡總和 ( $5.939\text{E-}11$ ) 的 98.77%，也就是改善後正規化環境足跡總和降低了 1.23%。

針對所有 15 項衝擊類別，也就是將 15 項衝擊類別之正規化環境足跡加總起來，其改善情境之正規化環境足跡總和 ( $1.323\text{E-}10$ ) 為基本情境之正規化環境足跡總和 ( $1.342\text{E-}10$ ) 的 98.58%，也就是改善後正規化環境足跡總和降低了 1.42%。

70 轎車輪胎之產品環境足跡分析

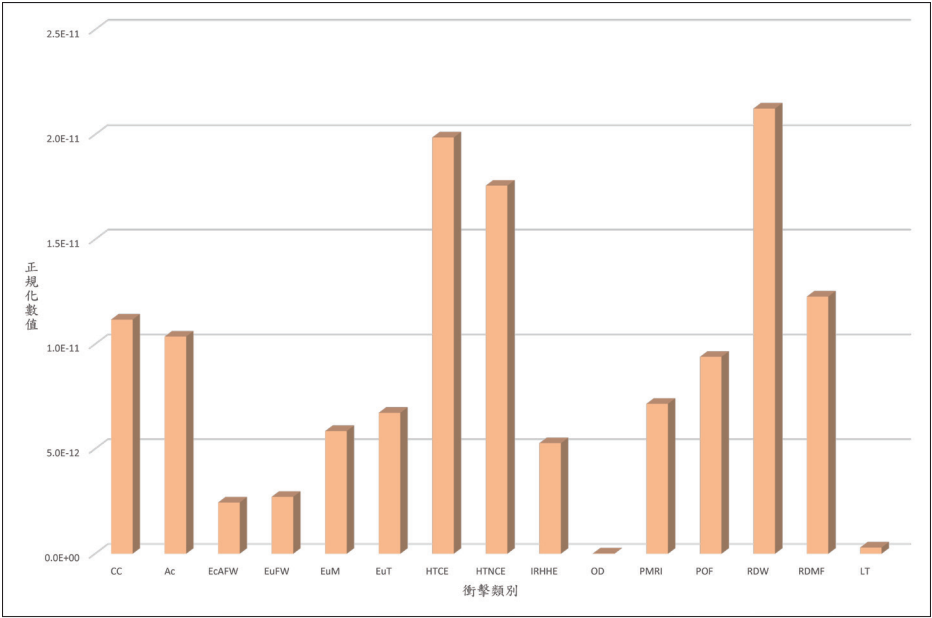


圖 5 改善情境之正規化轎車輪胎環境足跡

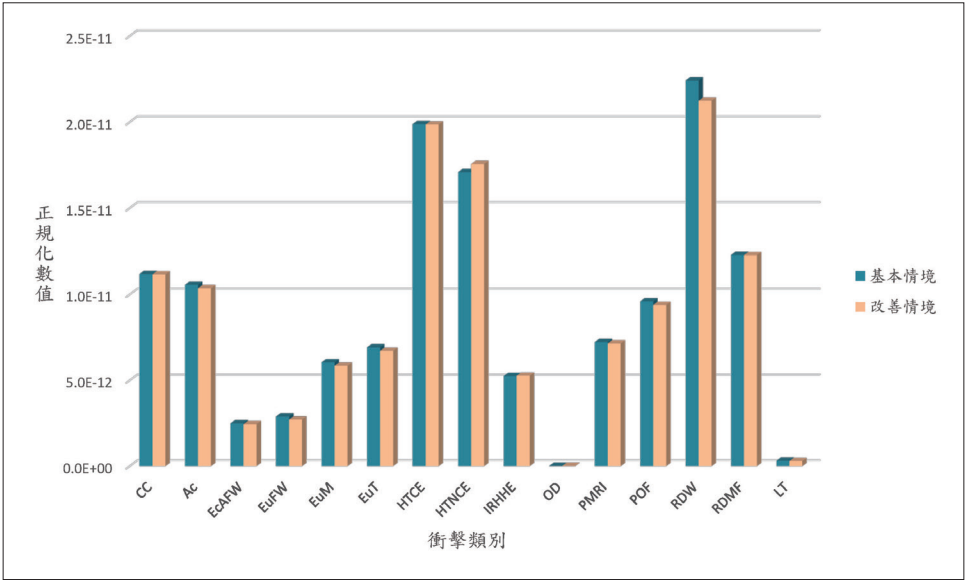


圖 6 基本情境與改善情境之正規化轎車輪胎環境足跡比較

## 四、結果與討論

本研究結果（指基本情境）顯示，正規化轎車輪胎環境足跡排名前三大之衝擊類別依序為資源耗竭 - 水 (RDW)、人類毒性 - 癌症效應 (HTCE)、人類毒性 - 非癌症效應 (HTNCE)。

針對正規化轎車輪胎環境足跡排名前三大之衝擊類別（即 RDW、HTCE、HTNCE），可發現「原料取得階段」之環境足跡占比皆較其他階段之環境足跡占比來得大，即原料取得階段之環境足跡占比皆占 79% 以上。進一步分析原料取得階段之環境足跡，可發現最大環境足跡占比者為天然膠、人造膠、與碳黑，這三種原料合計皆占其原料取得階段之 95% 以上。

綜合而言，針對正規化轎車輪胎環境足跡排名前三大之衝擊類別（即 RDW、HTCE、HTNCE），以原料取得階段之環境足跡占比最大，而原料取得階段中又以天然膠、人造膠、與碳黑對環境衝擊程度最大。針對正規化轎車輪胎環境足跡排名前三大之衝擊類別（即 RDW、HTCE、HTNCE），由於原料取得階段中之「天然膠與人造膠」是造成環境衝擊的主要項目之一，因此調整天然膠與人造膠之比例乃試圖改善轎車輪胎生命週期環境績效之優先考慮方向。

因此，本研究研擬了一個模擬情境（稱為改善情境），此改善情境之內容為：將原料取得階段中天然膠與人造膠之比例由 1.0:1.4 調整為 1.0:1.6，但每功能單位的天然膠與人造膠之總重量維持不變（即 4.971 kg）。亦即每功能單位的天然膠與人造膠之重量分別由 2.061 kg 與 2.910 kg 調整為 1.912 kg 與 3.059 kg。改善情境之其他內容則與基本情境相同。

改善情境之評估結果顯示，改善情境之正規化轎車輪胎環境足跡排名前三大之衝擊類別依序為資源耗竭 - 水 (RDW)、人類毒性 - 癌症效應 (HTCE)、人類毒性 - 非癌症效應 (HTNCE)，此與基本情境之排名完全相同。

若將基本情境與改善情境之正規化轎車輪胎環境足跡進行比較，針對正規化轎車輪胎環境足跡排名第一名之衝擊類別（即資源耗竭 - 水 (RDW)），其改善情境之正規

化環境足跡 (2.124E-11) 僅為基本情境之正規化環境足跡 (2.242E-11) 的 94.74%，也就是改善後正規化環境足跡降低了 5.26%。

針對所有 15 項衝擊類別，也就是將 15 項衝擊類別之正規化環境足跡加總起來，其改善情境之正規化環境足跡總和 (1.323E-10) 為基本情境之正規化環境足跡總和 (1.342E-10) 的 98.58%，也就是改善後正規化環境足跡總和降低了 1.42%。

本研究結果可作為輪胎業者進行產品生命週期環境績效改善之依據，並作為未來配合國內或國際間綠色認證的基礎，亦可提供關心環保議題之消費者在選用轎車輪胎時的參考。此外，企業強化企業社會責任 (CSR) 已是全球政府與民間機構之共識，轎車輪胎環境足跡的評估、改善及揭露將可提昇業者在 CSR (尤其是環境層面) 的形象與聲譽。

本研究研擬了一個改善情境，以探討將原料取得階段中天然膠與人造膠之比例由 1.0:1.4 調整為 1.0:1.6，對轎車輪胎環境足跡造成之影響，後續研究可針對更多可行的改善熱點進行探討，例如：更換原料取得階段中「碳黑」之材質，因為針對正規化轎車輪胎環境足跡排名第二名之衝擊類別 (即 HTCE)，「碳黑」之環境足跡占其原料取得階段之 48%，因此嘗試更換其材質有可能進一步降低轎車輪胎環境足跡。

## 參考文獻

中華經濟研究院，「台灣環保產業發展概況」，2018。

經濟部工業局，「歐盟環境足跡」，產業永續發展整合資訊網，<https://proj.ftis.org.tw/isdn/Carbon/Index/A66B50E5E25FD8E9>，2018。

盧怡靜、呂穎彬，「ISO 14040 生命週期評估的下一步」，永續產業發展季刊，第 66 期，pp. 29-35，2014。

環保署，產品與服務碳足跡計算指引，2010。

環保署，產品碳足跡計算服務平台，<https://cfp-calculate.tw/cfpc/WebPage/LoginPage.aspx>，2017。

EC, Organisation Environmental Footprint (OEF) Guide, 2012.

EC, Product Environmental Footprint (PEF) Guide, 2012.

EC, Product Environmental Footprint Pilot Guidance. Guidance for the Implementation of the EU Product Environmental Footprint (PEF) during the Environmental Footprint (EF) Pilot Phase, Annex A – Normalization factors, 2016.

ISO, ISO 14040 - Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework, 2006.

ISO, ISO 14044 - Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines, 2006.

ISO, ISO 14064 - Greenhouse gases - Part 1: Specification with guidance at the organisation level for quantification and reporting of greenhouse gas emissions and removals, 2006.

ISO, ISO 14067 - Greenhouse gases - Carbon footprint of products - Requirements and guidelines for quantification, 2018.

thinkstep, GaBi 7, <http://www.thinkstep.com>, 2017.





廢棄物類

## 矽晶型太陽能光電模組資源化技術研究

陳偉聖\*、陳彥融\*\*

### 摘 要

近年來，國內外太陽能設備安裝量逐年上升，預估未來將有大量太陽能廢棄物產生，為及早防治廢棄物堆積對國內產生環境危害等問題，本文針對市占率最高之矽晶型太陽能光電模組進行資源化技術開發，將太陽能模組層層分離回收，並純化其金屬產物至可循環回產業應用，其技術分為 4 大部分，包含模組前處理、矽晶型太陽能電池片雜質去除與純化、鍍錫銅帶金屬分離純化與太陽能電池金屬產物析出。前處理以有機溶劑與熱處理將模組鋼化玻璃、塑膠背板與 EVA 樹脂（乙烯-醋酸乙烯共聚物）去除回收；太陽能電池片雜質去除則是利用溶劑浸漬電池片將雜質溶出，回收高純度矽資源，其純度可達 99.84%；鍍錫銅帶金屬分選先以濕法冶金技術中的酸溶浸漬和溶媒萃取方式分離回收銀、銅、錫與鉛，最後以沉澱煅燒或還原法製成金屬銀、氧化銅、氧化錫與氧化鉛，回到產業端進行應用，其純度分別為 98.85%、99.7%、99.68%、99.47%。

【關鍵字】矽晶型太陽能光電模組、資源再生、濕法冶金、溶媒萃取

\* 國立成功大學資源系 副教授

\*\* 國立成功大學資源系 研究生

## 一、前言

隨著全球能源需求量快速增加導致石化燃料污染，促使綠色能源迅速發展，以替代具高污染性的發電設施。其中，太陽能產業因為其發電無污染、無噪音且使用壽命長等優點，於世界各地廣泛安裝。根據國際可再生能源機構 (IRENA) 統計，截至 2019 年底，全球太陽能安裝容量高達 586.4GW(IRENA, 2020)，而國內也已完成 3.559GW 之建置 (台灣電力公司, 2020)，就意味著未來國際與國內將有大量太陽能廢棄物產出，不僅浪費貯存空間，未友善處理的廢棄物亦會造成土壤與水質的破壞。現代社會強調資源再生循環，與降低環境污染，如何有效回收太陽能廢棄物中的有價物質與再利用，成為即將面對的一大挑戰 (Paiano, 2015)。

市面上最常見的太陽能板材料主要分為以結晶矽 (Crystalline silicon) 為主的材料與薄膜材料 (Thin-film) 兩大類。結晶矽型太陽能模組因晶格排列較一致，具有較高的轉換效率而被廣為安裝，近 20 年來占總太陽能產業 90%；而薄膜型材料由於光電轉換效率低且材料昂貴，市占率不高。太陽能電池使用年限約為 20-25 年，IRENA(圖 1) 由此推估於 2030 年將會有第一波太陽能廢棄物產生，在 2050 年更高達 600 萬噸 (ISE, 2020)。矽晶型太陽能模組廢棄物之體積較龐大且結構緊密，導致不易回收太陽能板內的有價與有害物質，利用掩埋、焚化方式處理，又將造成環境與人體危害 (T. Doi, 2001)，因此針對矽晶型太陽能模組廢棄物開發有效的資源再生技術尤其重要。

矽晶型太陽能板主要回收目標金屬皆存在於矽晶片 (Photovoltaic cell) 與做為傳遞電子橋梁的鍍錫銅帶 (Photovoltaic ribbon)，太陽能廢棄物內的金屬回收技術主要以物理分選與冶金方式處理，其中冶金技術包含火法冶金 (Pyrometallurgy) 及濕法冶金 (Hydrometallurgy)，文獻指出矽晶片資源化的處理方式有研磨拋光 (Park J, 2014)、金屬浸出 (Ewa RADZIEMSKA, 2010) (Kang S, 2012)(Klugmann-Radziemska E, 2010) 與火法冶金；鍍錫銅帶資源化的處理方式則包含物理分選、火法冶金、酸溶浸出、溶媒萃取等方式。本研究主要以濕法冶金方式處理，藉由連續性處理與化學藥劑回用等優勢，能有效分選與回收廢棄物內有價物質，降低資源再生成本。

目前國際針對矽晶型太陽能廢棄物資源化實廠技術僅進行至外殼鋁框、鋼化玻璃、接線盒與背板分離回收，對板內矽晶片與鍍錫銅帶資源化技術開發仍在實驗階段且缺乏統整性，面對未來太陽能模組廢棄物大量產生情況，研發一套能有效資源化太陽能模組廢棄物之技術，並將分選純化後的有價物質循環再利用，有助於地球環境友善發展。本研究以礦物分選技術將太陽能廢棄物比喻做礦山，利用濕法冶金技術有效的將各有價物質分離並循環回產業。

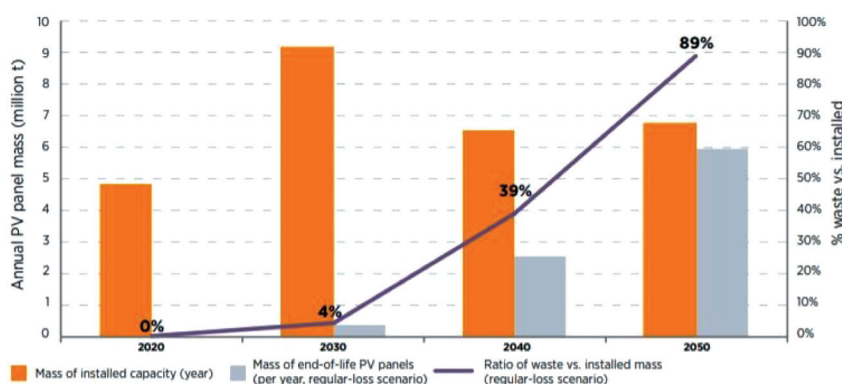


圖 1 太陽能模組安裝量與廢棄量預估圖 (2020-2050)

## 二、矽晶型太陽能電池

### 2.1 矽晶型太陽能模組介紹

太陽能電池為利用太陽光照射發電材料產生光伏效應 (photovoltaic effect) 發電，與一般電池不同，太陽能電池是以光做為發電來源，使半導體材料吸收光子能量產生自由電子，利用電壓差發電。此特點可以降低火力發電燃煤消耗導致的空氣污染問題，也讓太陽能光電模組被譽為目前最環保的綠色能源。

太陽能電池依照不同材料可分為矽基材料型與其他化合物型兩大類，矽晶材料型太陽能又可依照基板矽結晶型態分為單晶矽 (Single crystalline silicon) 與多晶矽 (Poly-crystalline silicon) 太陽能電池，化合物型則可區分為 III-V 族 (如氮化鎵、砷

化鎵、磷化銮與磷化鎵銮等)、III-VI 族(如硒化鎘、銅銮鎵硒等)或其他材料(生物材料)。矽的能隙僅  $1.12\text{eV}$ ，是屬於間接能隙型材料，跟大部分其他化合物相比吸光性較差，但由於矽資源豐富、氧化物穩定且不易溶於水，故被現今半導體與太陽能產業廣為使用，矽晶型太陽板近 20 年市占率占 90%，為太陽能產業最大宗。從矽晶型太陽能電池結構圖(圖 2)可了解太陽能電池片結構，從上到下分別為銀漿製成的頂接觸電極(Front contact)、抗反射層(Antireflection later)與表面粗糙層(texturization)、p-n junction 發射層、矽太陽能基板(Substrate)與鋁漿製成的背面電極網印(Back surface field metallization, BSF)。抗反射層與表面粗糙層主要成分為柱狀氮化矽，用以減低光反射、增加光子吸收與電池效率。銀漿與鋁漿製成的接觸電極網印主要用作提高太陽能元件電流密度並藉此提升光轉效率，銀漿做為上層電極需具有對氮化矽抗反射層有良好的反應性，而鋁電極網印則是需要對矽有良好的反應性，並提供太陽能電池均勻的背面電場(吳耀杉, 2018)(William R, 1960)。矽晶型太陽能電池模組是由多個太陽能電池片互相串並聯組成的，如圖 3 所示，電池片與電池片之間會以鍍錫銅帶做為橋梁、從正面電極接到另一片的背面電極，拼接完後以電池片為中心上下兩層均以乙烯-醋酸乙烯共聚物(Ethylene-vinyl-acetate, EVA resin)高分子塑料做為保護層，上層再以具高透光性與機械強度的鋼化玻璃與下層不透光高分子化合物塑料(PVDF、PET、PVDF)連同矽晶型太陽能電池放入層壓機封裝，外層以鋁殼包覆後接上接線盒即成為現在最常見的矽晶型太陽能模組結構。太陽能模組在發電過程中僅利用太陽進行光伏效應即可發電，過程中無額外副產物產出，能有效減少火力發電燃煤使用與有毒氣體排放，可廢棄太陽能模組因為其結構完整不易分解回收，廢棄物累積問題便會浮出，其中的有價物質如銅、銀、錫等將會被浪費，矽晶型太陽能板內含有鉛金屬，惡意丟棄恐導致鉛中毒，而鉛中毒將會導致智能障礙與行為問題，是永久性的影響，嚴重甚至會死亡。

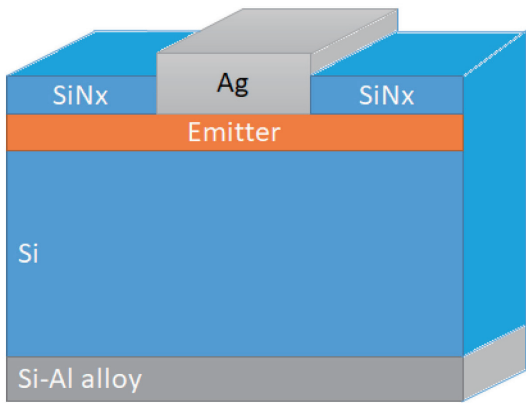


圖 2 矽晶型太陽能電池結構圖

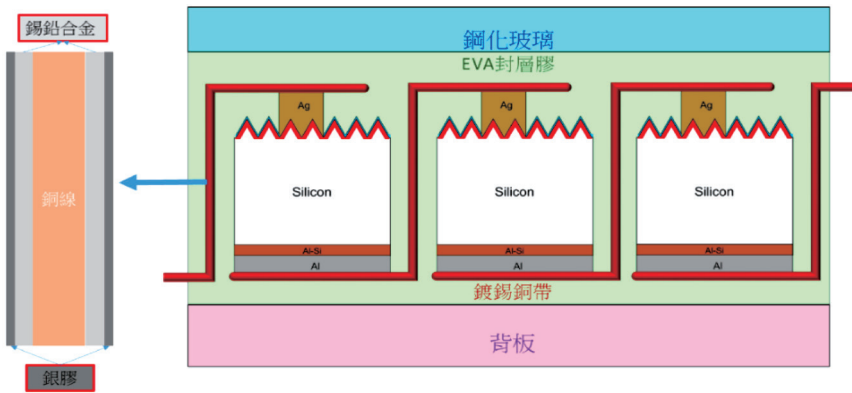


圖 3 矽晶型太陽能電池模組剖面圖

2.2 矽晶型太陽能模組資源化技術

目前國際間對於太陽能模組資源循環技術開發成果有限，僅在鋼化玻璃去除、鋁框 自動化去除兩大部分有進入到商業化範疇，對太陽能電池片與鍍錫銅帶兩項具高價值金屬與矽資源元件仍在實驗室開發階段。目前針對矽晶型太陽能廢棄物資源化技術文獻主要分為三大部分，分別為太陽能模組鋼化玻璃與 EVA 樹脂去除、矽晶片純化、鍍錫銅帶金屬分選與純化。本節將介紹矽晶電池片與鍍錫銅帶的資源化處理方法。

### 2.2.1 太陽能矽晶電池片矽資源純化

鋼化玻璃與 EVA 樹脂去除後，將太陽能矽晶片與鍍錫銅帶分開處理。由於廢棄太陽能矽晶片矽純度高，且雜質分佈位置集中在電池片上層發射層、氮化矽表面粗糙層、表層銀膠和下層鋁膠電極網印，故多數文獻以表面處理方式即可得到高純度矽。文獻中常見的表面處理技術包含物理研磨與濕式蝕刻，而太陽能矽晶片濕式蝕刻常用方法則包含氫氟酸混合藥劑蝕刻(Teng, 2012)(Frisson L, 2000)(Park J, 2014) (Chang Y, 2018)與酸、鹼兩段式金屬溶出(Shin J, 2017)(E Bombach, 2006)(Yousef S, 2019)(Yi Y, 2014)。使用氫氟酸進行蝕刻能夠一次性去除表面雜質，且能夠防止電池片表面在蝕刻過程中被氧化成二氧化矽，但由於氫氟酸成本較高、需要搭配其他無機酸增加電池片表面銀漿與鋁膠溶出率且具有高污染性與高毒性，故本研究使用酸、鹼兩段式金屬溶出來純化矽資源。針對矽晶電池片表面銀、鋁、氮化矽，使用酸浸漬僅能處理銀、氮化矽和下層部分鋁電網，而鹼浸漬則是用以去除電池片在鋁製程中沉降在底層的矽 - 鋁合金。Rong Deng 等人(Deng R, 2019)整理了使用酸、鹼兩段式金屬溶出常用藥劑，酸浸漬常見的有硝酸( $\text{HNO}_3$ )與磷酸( $\text{H}_3\text{PO}_4$ )；鹼浸漬常見的則以氫氧化鉀(KOH)居多，依據處理量與處理效率需求調整濃度、操作時間與溫度皆可有效去除矽晶型太陽能電池片表面雜質，浸漬後的銀離子( $\text{Ag}^+$ )則與氯離子( $\text{Cl}^-$ )形成氯化銀( $\text{AgCl}$ )白色沉澱析出回收。

### 2.2.2 鍍錫銅帶金屬分選

鍍錫銅帶功能為太陽能板中負責傳導光伏效應後產生的電子，其主要成分為銅(Cu)、錫(Sn)、鉛(Pb)與在電池片分離時沾黏在銅帶表面的銀漿(Ag)。目前利用濕法冶金分別以銅、錫、鉛、銀為回收目標的文獻很多，但針對鍍錫銅帶回收的文獻較少。現有鍍錫銅帶分選與純化文獻中，主要使用物理分選、酸溶浸漬與溶媒萃取來回收鍍錫銅帶內的銅金屬與銀漿。以下介紹鍍錫銅帶內金屬物理分選與濕法冶金回收文獻。

#### 1. 鍍錫銅帶物理分選

Jin-Seok Lee 等人(Lee J, 2018)利用高溫氧化鍍錫銅帶表面錫、鉛鍍層，使表面從具有延展性的鉛錫合金轉化成結構較硬且不具延展性的氧化金屬，再使用球磨分



選，將表層氧化物去除，留下內層銅帶，最後利用甲烷製造還原環境，將銅帶純化蒐集成 4N 的銅錠。此方法能夠有效分離表面鍍層與銅帶，藉此回收高純度銅金屬。

## 2. 鍍錫銅帶濕法冶金技術

Jung B 等人 (Jung B, 2016) 以硝酸和氫氧化鉀做浸漬液，將矽晶片與鍍錫銅帶內銅、錫、鉛、銀、鋁金屬溶出，並利用 LIX84-I 萃取劑回收銅；利用鹽酸將銀離子沉澱回收。Kim Soolyung 等人 (Kim S, 2014) 則是以硝酸將無鉛鍍錫銅帶內金屬溶出，將錫金屬轉變為  $\text{H}_2\text{SnO}_3$ ，再以氯離子將銀離子沉澱。Moon 等人 (G.H. Moon, 2017) 則是使用鹽酸選擇性浸漬無鉛銅帶，將金屬銀以氯化銀固體沉澱蒐集，並在溶液內加入過多的錫離子，利用電位差異將銅離子還原成金屬銅，並利用磷酸三丁酯 (TBP) 做為萃取劑將使用後的錫離子萃取純化。

# 三、研究方法與步驟

## 3.1 研究樣品

本研究處理之太陽能廢棄物來源於屏東尼伯特、莫蘭蒂颱風吹落之廢棄模組，如圖 4 所示，總重約 18.5kg，總發電面積為  $1,636 \times 983 \text{mm}^2$ ，發電效率為 250W。



圖 4 本研究所使用之矽晶型太陽能模組



3.2 研究架構

圖 5 為本研究架構圖，本研究蒐集因颱風災害而淘汰的矽晶型太陽能模組後剝除鋁框與接線盒，利用不同有機溶劑分選背板與鋼化玻璃後運用熱處理將 EVA 樹脂從矽晶電池片與鍍錫銅帶表層剝除並探討其效率。剝除後的矽晶電池片以兩階段浸漬純化矽資源，鍍錫銅帶則是運用酸溶浸漬與物理分選方式將各金屬分離且離子化，以利後續金屬分選流程進行。最後將太陽能模組內各個有價金屬離子沉澱後以煅燒法與還原法得到最終金屬產品。

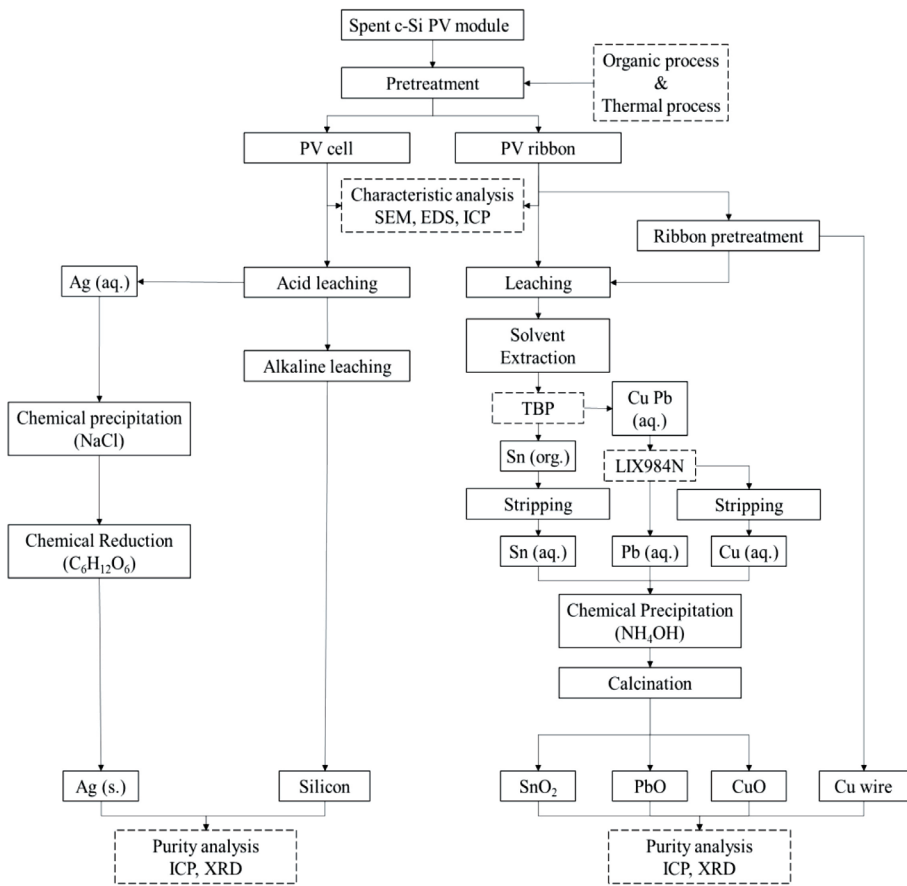


圖 4 本研究所使用之矽晶型太陽能模組

### 3.3 研究流程

#### 3.3.1 太陽能模組前處理

本研究將矽晶型太陽能模組切割至  $10\text{cm}^2$  大小，以利於後續研究進行。利用有機溶劑 - 甲苯 (Toluene)、右旋 - 檸檬烯 (D-Limonene)、氯仿 (Chloroform)、四氫呋喃 (Tetrahydrofuran, THF)、乙醇 (Ethanol)、丙酮 (Acetone) 做為分選鋼化玻璃的膨潤劑，並觀察各有機溶劑玻璃去除能力，選出最具分選效益的有機溶劑。將鋼化玻璃與背板去除後，以純水利用超音波震盪將分選後的太陽能模組水洗 60 分鐘後，以熱差 / 熱重分析儀 (TG/DTA)，分別以有氧環境與無氧環境模擬煅燒法與裂解法對 EVA 樹脂的去除效率，並過篩分選矽晶型太陽能電池片與鍍錫銅帶。

#### 3.3.2 矽晶型太陽能電池片純化

在酸、鹼溶浸漬步驟中，矽晶型太陽能電池片上下兩層金屬將會轉變成水溶液，形成金屬離子態，以利後續金屬離子分選。浸漬過程中受原料成分、浸漬液種類、浸漬環境所影響，為求出電池片最佳酸鹼浸漬條件，本研究將會針對浸漬液種類、浸漬液濃度、浸漬液與原物料比例、浸漬反應溫度與浸漬反應時間進行探討。

##### 1. 矽晶電池片酸浸漬

酸浸漬最佳參數實驗首先以 7M 固定濃度的硫酸、鹽酸、硝酸在液固比 100(L/kg)、反應溫度 80 度、時間 12 小時環境下探討各金屬溶出效率。結果顯示，各酸類對鋁金屬溶出效率差異不大，但以硝酸對銀金屬溶出效率最佳，故本實驗以硝酸做為酸溶浸漬液。接著探討浸漬液濃度、浸漬液與原物料比例、浸漬反應溫度、浸漬反應時間對電池片金屬浸漬效率影響。

##### 2. 矽晶電池片鹼浸漬

鹼浸漬最佳參數實驗首先以 5M 固定濃度之氫氧化鈉與氫氧化鉀在液固比 100(L/kg)、反應溫度 80 度、時間 12 小時環境下探討各金屬溶出效率。實驗結果得知，氫氧化鈉在反應完成後較容易因為溫度浮動導致鋁離子在檢測前先行沉澱沾黏在電池片表面，

不利於結果測量，因此本實驗以氫氧化鉀做為鹼浸漬液。接著探討浸漬液濃度、浸漬液與原物料比例、浸漬反應溫度、浸漬反應時間對矽晶電池片金屬浸漬效率影響。

以上流程為本研究矽晶型太陽能電池片酸、鹼溶浸漬實驗流程，其浸漬效率皆以 ICP- OES 分析浸漬液中 Al、Ag、Si 含量與王水 + 氫氟酸消化法進行全溶金屬含量比較得到結果。兩階段浸漬結束後，矽資源將以 3 次純水水洗 20 分鐘後回收，獲得冶煉級矽資源。

### 3.3.3 太陽能鍍錫銅帶金屬資源化

本研究以將鍍錫銅帶溶出，以利於後續金屬分選進行，並探討其效率與可行性。

#### 1. 鍍錫銅帶浸漬

首先以 5M 的鹽酸、硫酸、硝酸在液固比 100(L/kg)、反應溫度 80 度、時間 12 小時環境下探討各金屬溶出效率。結果顯示，硫酸對鍍錫銅帶內金屬浸漬效率趨近於零；硝酸環境中，銅、鉛、銀皆有良好的溶出率而錫僅有約 30% 的溶出率；鹽酸環境中，銅、鉛皆有良好的溶出率，錫金屬約 70% 溶出率而銀金屬浸漬效率趨近於零，為了能夠有效提高浸漬效率且初步分選銀金屬，本研究選擇使用鹽酸並添加雙氧水做為氧化劑，探討其添加量與浸漬效率關係。藉由上述實驗接續探討浸漬酸液濃度、廢棄物與浸漬液比例、反應時間與反應溫度對浸漬效率的影響。

#### 2. 鍍錫銅帶金屬離子分選

經過酸溶浸漬過程後，由於鍍錫銅帶中各項金屬成份並非固定，因此溶媒萃取實驗將根據酸溶浸漬實驗結果進行濃度模擬。以  $\text{CuCl}_2$ 、 $\text{SnCl}_4$ 、 $\text{PbCl}_2$  配置金屬濃度  $\text{Cu}^{2+}:\text{Sn}^{4+}:\text{Pb}^{2+}=2,000:200:100\text{mg/L}$  模擬液後，進行金屬分離溶媒萃取實驗。本研究之溶媒萃取採用兩階段式萃取分離，第一階段以 TBP 做為萃取劑，將酸溶浸漬過後的錫離子分離，減少調整 pH 值藥劑使用亦防止銅、鉛離子後續共萃取與共沉澱負面現象產生。第二階段以 LIX984N 做為萃取劑，將銅離子分離。本研究主要探討溶媒萃取效率參數為萃取系統中的反應 pH 值、萃取劑濃度、油水比、反應時間與反萃取系統之反萃取劑濃度、油水比、反應時間。

### 3.3.4 金屬化合物析出

經過前述電池片與鍍錫銅帶金屬分選所得的離子水溶液，本研究利用化學沉澱結晶法，藉由添加沉澱劑與金屬離子反應成難溶化合物後煅燒成金屬氧化物回收。含銀之硝酸水溶液利用化學沉澱結晶法，藉由添加氯化鈉與氫氧化鈉使銀離子沉澱成氧化銀 ( $\text{Ag}_2\text{O}$ ) 後蒐集；銅、鉛、錫離子水溶液同樣使用化學沉澱結晶法，藉由添加氨水觀察金屬離子沉澱範圍，最大化金屬沉澱效果，再利用熱重分析銅、鉛、錫氧化物理想煅燒溫度，將銅、鉛、錫氫氧化物除水後得到最終產物  $\text{CuO}$ 、 $\text{PbO}$ 、 $\text{SnO}_2$  回收再利用，並以 ICP-OES、XRD、SEM、EDS 分析最終產物純度與性質。

## 四、結果與討論

### 4.1 矽晶型太陽能廢電池模組預處理與特性分析

#### 4.1.1 物理預處理與重量分析

本研究所使用的廢矽晶型太陽能電池模組，其構造由上至下為鋁框、鋼化玻璃、EVA 樹脂、太陽能電池、EVA 樹脂、背板、接線盒。本研究以砂輪機切割太陽能模組鋁框，將鋁框與太陽能板分離，再以砂輪機切割大小約  $10\text{ cm}^2$  太陽能板後分離各層物質並回推完整板各層重量比例。結果如表 1 所示，與茂迪 2015 年 X-72 型模組提供比例和 Latunussa 等人 (Cynthia E.L. Latunussa, 2016) 對每千公斤太陽能板廢料各部分比例相近，由各界太陽能模組重量比例來看，鋼化玻璃占近 7 成的廢模組重量，故可得若有效處理鋼化玻璃將能減少 70% 以上的模組廢棄物重量。本研究拆解接線盒內主要成分為上下兩塑膠外殼、3 顆鋁電解電容與 4 顆導電架橋，其重量百分比分別為 84.9%、4.9% 與 10.3%，經過拆解後即能重複使用。

表 1 矽晶型太陽能電池模組重量分析

| 成份     | 本研究模組<br>組成比例 (wt%) | 茂○ 2015 年模組<br>組成比例 (wt%) | Latunussa 文獻<br>組成比例 (wt%) |
|--------|---------------------|---------------------------|----------------------------|
| 鋼化玻璃   | 70.8                | 68.4                      | 70                         |
| 太陽能電池  | 70.8                | 3.1                       | 3.65                       |
| 鍍錫銅帶   | 3.3                 | 1.3                       | 1                          |
| EVA 樹脂 | 1.1                 | 7.6                       | 5.1                        |
| 背板     | 5.7                 | 3.6                       | 1.5                        |
| 接線盒    | 3                   | 1.3                       | --                         |
| 鋁框     | 1.1                 | 14.7                      | 18                         |

4.1.2 鋼化玻璃與塑膠材料分解回收方法

本節目標為處理太陽能電池片外層塑膠材料與鋼化玻璃，方便後續金屬分選流程進行。如圖 6 所示，太陽能電池與背板、鋼化玻璃間皆以 EVA 樹脂黏牢固定，外層 EVA 樹脂亦會影響後續矽晶型電池片與鍍錫銅帶濕法冶金處理，故進行塑料與鋼化玻璃去除處理，回收後的鋼化玻璃則有機會進行資源化研究。本節探討各有機溶液對鋼化玻璃回收效率與鋼化玻璃分離後有氧燃燒、無氧裂解對 EVA 樹脂去除效果差異。

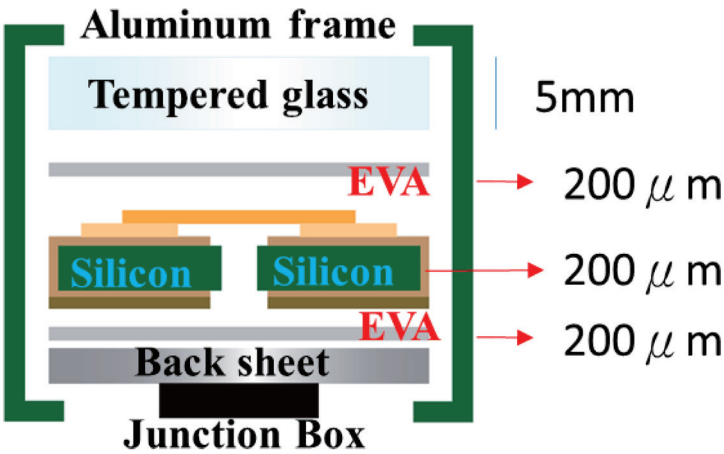


圖 6 矽晶型太陽能模組層析圖

1. 有機溶劑回收鋼化玻璃與背板

根據 Sukmin Kang 等人 (Kang S, 2012) 研究得知，有機溶劑反應機構為透過外界加入有機物質中的具極性官能基，讓聚合的乙烯醋酸 - 乙烯酯間的聚合鍵通過酯交換分開成雙鍵氧與氫氧根，藉此達到鋼化玻璃與太陽能電池片分離。本研究利用右旋 - 檸檬稀、甲苯、氯仿、四氫呋喃、乙醇與丙酮做為剝除劑，在室溫攝氏 50 度環境下記錄 1、30、60、120、1,440 分鐘鋼化玻璃與背板分離程度。結果如表 2 所示，右旋 - 檸檬稀與甲苯於 30 分鐘後能有效剝除鋼化玻璃與背板、氯仿與四氫呋喃；於 60 分鐘後即可有效剝除鋼化玻璃與背板，乙醇與丙酮則是完全無法剝除鋼化玻璃。剝除後的鋼化玻璃可重新製造成玻璃產品。剝除後的太陽能背板則是蒐集後集中資源化處理。

表 5 有機溶劑對鋼化玻璃與背板剝除效果

| 有機溶劑     | 1 分鐘 | 30 分鐘 | 60 分鐘 | 120 分鐘 | 1,440 分鐘 |
|----------|------|-------|-------|--------|----------|
| 右旋 - 檸檬稀 | 無法剝除 | 可剝除   | 可剝除   | 可剝除    | 可剝除      |
| 甲苯       | 無法剝除 | 可剝除   | 可剝除   | 可剝除    | 可剝除      |
| 氯仿       | 無法剝除 | 無法剝除  | 可剝除   | 可剝除    | 可剝除      |
| 四氫呋喃     | 無法剝除 | 無法剝除  | 可剝除   | 可剝除    | 可剝除      |
| 乙醇       | 無法剝除 | 無法剝除  | 無法剝除  | 無法剝除   | 無法剝除     |
| 丙酮       | 無法剝除 | 無法剝除  | 無法剝除  | 無法剝除   | 無法剝除     |

2. 高溫去除 EVA 樹脂

剝除鋼化玻璃後仍有 EVA 樹脂沾黏於太陽能電池與鋼化玻璃表面，此部分利用高溫去除有機物特性，對矽晶型太陽能電池進行高溫處理去除 EVA 樹脂，藉此增加後續矽晶型電池片與鍍錫銅帶濕法冶金效率，藉由 TG/DTA 分析在氧化（空氣）與裂解（氮氣）環境下不同溫度變化所導致重量變化，以此得知最佳熱處理環境溫度，圖 7(a) 與 (b) 為 EVA 樹脂在不同載體 TG/DTA 分析圖。

由 TG 分析可得知在氧化環境中，300° C 後重量開始損失，代表 EVA 樹脂中的有機物斷鍵形成含碳氣體開始逸散，溫度達到 520° C 後達到重量平衡；裂解環境中，重量於 200° C 即開始發生重量損失，同樣於 500° C 後達到重量平衡。殘餘重量在氧化環



境中由於 EVA 樹脂均氧化成碳氧氣體逸散，占原重量 65%；而在無氧環境中由於 EVA 樹脂在裂解過程中進行碳化反應，有較多碳粒沾黏電池片表面，因此殘餘重量稍高於氧化環境，約為 74%，經過裂解處理的太陽能電池以水洗後能夠去除大部分殘碳。

從 DTA 分析中可得知，在氧化環境下階為放熱反應，其中以 460° C 有一最大的放熱峰值，推測為 EVA 樹脂完全反應前所放出的；在裂解環境下起初為放熱反應，於 330° C 左右出現第一個吸熱峰值，推測為具極性聚合物醋酸根 (VA) 裂解，而在 500° C 重量平衡前 (480° C 左右) 有一明顯吸熱峰值變化，推測為裂解反應劇烈進行區段，將 EVA 樹脂主鏈乙炔聚合物 (E) 長鍵斷裂後對短鍵進行裂解成碳粒。

實際利用 500° C 去除 EVA 樹脂，兩者皆能有效去除太陽能電池表層 EVA 樹脂，裂解後形成的碳粒可經過清水沖洗震盪去除；以操作溫度環境而言，兩者平衡溫度皆為 500° C 左右，並無優劣之分，但從重量開始損失溫度而言，無氧環境中所需溫度較低，意味著反應進行速率較快，對於後續嘗試以較低溫度搭配物理分選方式而言較具有發展效益，且過程中由於沒有氧氣參與裂解過程，較少廢氣排出，故推薦以裂解方式處理 EVA 樹脂。圖 8 為本研究前處理後的各元件。

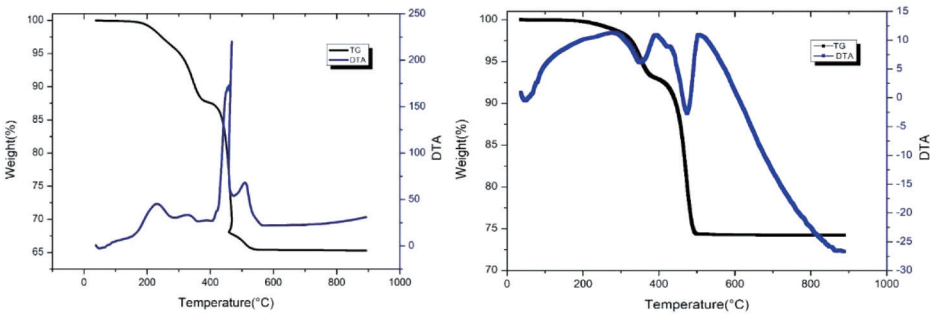


圖 7 EVA 樹脂 TG/DTA 分析結果 (載體：(a) 空氣、(b) 氮氣)

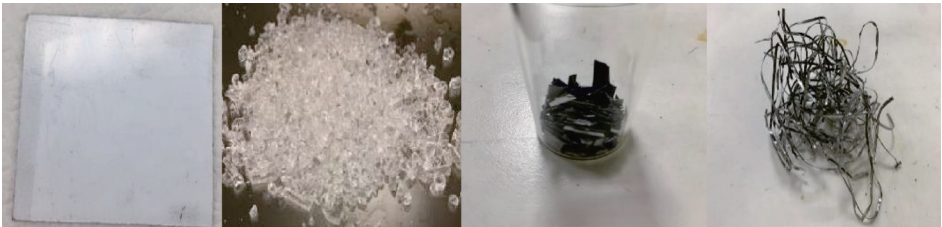


圖 8 經本研究前處理後之背板、鋼化玻璃、太陽能電池片與鍍錫銅帶



## 4.2 矽晶型電池片與鍍錫銅帶特性分析

由於矽晶型太陽能模組有價金屬皆存在於太陽能電池片與鍍錫銅帶中，本小節為矽晶型太陽能模組分離拆解後之矽晶型電池片與鍍錫銅帶特性分析，經過前處理後電池片與鍍錫銅帶均已分離且去除表層 EVA 樹脂層，藉由分析結果訂定後續濕法冶金步驟，分析項目包含電池片與鍍錫銅帶表層元素分布、表面性質、組成成分。

### 4.2.1 矽晶型電池片

為了解矽晶型太陽能電池片各層特性，本研究以 SEM 與 EDS 進行表面特性分析，SEM-EDS 結果如圖 9 至圖 11 所示，電池片表層組成為抗反射層、導電銀膠與半導體擴散製程遮蔽層，主要元素有 Si、Ag、N、O，抗反射層主要化合物為氮化矽；遮蔽層則為氧化矽；根據圖 10 所示銀膠主要組成物質是 Ag 金屬，中間半導體層則是高純度矽，下方鋁電極網印層則是根據圖 11 所示，以矽鋁合金組成，主要元素為 Si 和 Al。為有效純化矽資源與回收電池片表層銀膠，在後續研究將採用酸溶後鹼溶金屬浸漬方式，針對銀、鋁、矽元素進行分離純化，並得到高純度的矽與銀化合物。

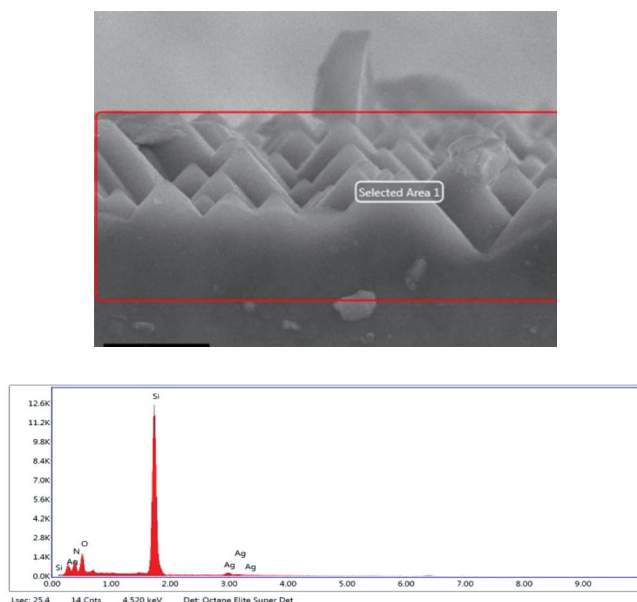


圖 9 矽晶型電池片表層 SEM-EDS 分析圖

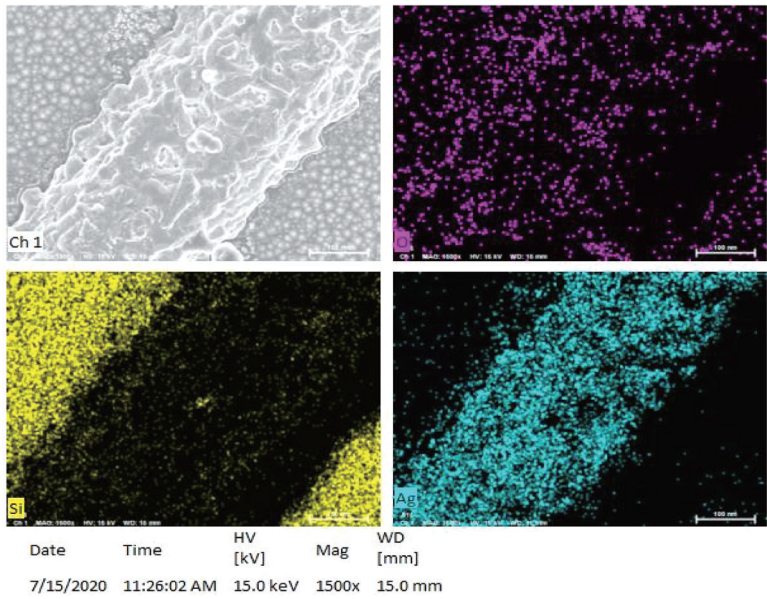


圖 10 銀膠 SEM-EDS 元素分析圖

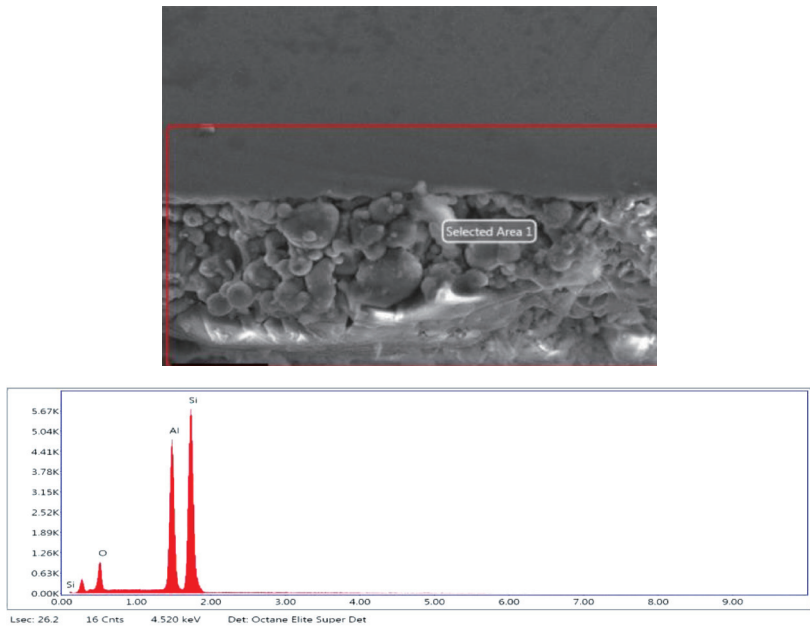


圖 11 鋁電極網印 SEM-EDS 分析圖

為了解矽晶型電池片各金屬種類與比重，本研究利用 XRF 進行化學成份半定量分析後，依據主要元素種類與成份比重，利用王水與氫氟酸消化全溶分解，以 ICP-OES 進行化學成份定量分析，得到較準確金屬組成比例，結果如表 3 所示。由分析結果得知，在矽晶型太陽能電池片中，元素矽占 93.38% 重量比例，若能有效將其他元素去除即可提升矽資源純度，電池片表面銀金屬雖僅占 0.91% 重量比例，但銀金屬具有高單價，亦具有高回收價值。根據研究得知，以金屬溶出方式將電池片雜質元素溶出瓶頸為鋁電極網印內層的矽鋁合金，故在後續研究中將著重探討矽、鋁、銀溶出效率。

表 3 矽晶型太陽能電池電池片成份分析

| Element | Si    | Al   | Ag   | Bi    |
|---------|-------|------|------|-------|
| wt%     | 93.38 | 5.25 | 0.91 | 0.011 |

4.2.2 鍍錫銅帶

為了瞭解鍍錫銅帶金屬元素分布比例，以 SEM-EDS 對經過 Cross-section 處理鍍錫銅帶表層錫鉛鍍層進行分析，SEM-EDS 分析結果如圖 12 所示。主要金屬元素為 Cu、Pb、Sn、Ag，其鍍錫銅帶組成為於銅線表層鍍上鉛錫焊料，以增加結構強度與耐腐蝕性，表面錫鉛鍍層厚度約 24.14  $\mu$ m，而最上層的銀元素來源自矽晶電池片表層銀膠，在分離過程中被扯成兩部分，分別黏在鍍錫銅帶與電池片表面。由於鍍錫焊料與銅線金屬分布差異明顯，Pb、Sn、Ag 均集中於鍍錫銅帶表層，Cu 則集中在鍍錫銅帶內層。Jin-Seok Lee 等人 (Lee J-K, 2018) 對鍍錫銅帶分析結果與本研究結構相似，均為鍍層於外層、銅帶於內層，故可嘗試使用研磨或選擇性浸漬，降低資源化成本。本研究分別探討鍍錫銅帶酸溶浸漬與鉛、錫鍍層剝除後浸漬之間差異，以此來得到高純度金屬化合物。

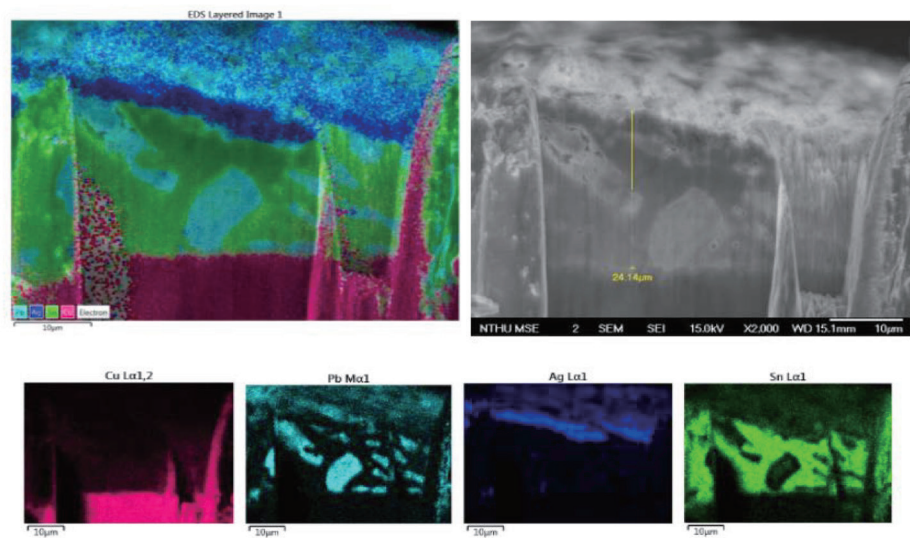


圖 12 鍍錫銅帶 SEM-EDS 分析圖

為了解鍍錫銅帶中所含金屬元素與成分比例，本研究利用王水消化法將鍍錫銅帶全溶後，以 ICP-OES 進行化學成份定量分析，以此得到準確的金屬成分比例，結果如表 4 所示。根據分析結果得知，鍍錫銅帶中 Cu 元素占總重量 79.6%、Ag 占 3.02%、Sn 占 8.64% 與 Pb 占 5%。Jin-Seok Lee(Lee J-K, 2018) 鍍錫銅帶資源化研究中，銅帶金屬元素成分比例為 Cu：Ag：Sn：Pb=86.5%：0.94%：6.94%：5.999%，其比例與本研究有些微差距，但主要組成物質相同，其中的銀金屬具有回收效益。根據圖 12 切面分析得知，銅元素與鍍層元素分布位置明顯，無嚴重參雜，藉此特性利用濕法冶金技術將鍍錫銅帶各金屬成份分離純化為本研究主題。

表 4 鍍錫銅帶金屬成分分析

| Element | Cu   | Pb | Sn   | Ag   |
|---------|------|----|------|------|
| wt%     | 79.6 | 5  | 8.64 | 3.02 |

4.3 矽晶型電池片矽資源純化

矽晶型太陽能電池片內含有高純度的矽資源與具高單價的銀金屬，為太陽能模組中最有價值物質之一，為有效純化電池片，本研究進行兩段式浸漬以確保矽晶圓表層

雜質 去除，本節探討浸漬溶液對電池片浸漬反應影響，根據研究結果得到最佳浸漬參數與 效率。

#### 4.3.1 矽晶型電池片表層雜質去除

本小節利用酸溶浸漬將銀、鋁膠從電池片表層去除，藉此純化太陽能板矽資源。實驗參數設定為浸漬液濃度、液固比、浸漬溫度、反應時間，依據三種實驗參數設定對浸漬液中  $\text{Ag}^+$ 、 $\text{Al}^{3+}$ 、 $\text{Si}^{4+}$  濃度變化，觀察電池片酸溶浸漬反應。首先以 7M 固定濃度的硫酸、鹽酸、硝酸在液固比 100(L/kg)、反應溫度 80 度、時間 12 小時環境下探討各金屬溶出效率，各酸類對鋁金屬溶出效率皆在 76% 左右，而以硝酸對 Ag 溶出效率最佳，達 99.2% 遠勝於鹽酸 42.79%，因此本研究以硝酸做為電池片酸浸漬液，以達到最佳浸漬效率。圖 13 顯示第一階段硝酸浸漬的最佳參數，以 5M 濃度的硝酸在液固比 25(L/kg)、反應時間 1 小時與反應溫度 80°C 能夠浸漬 99.4% 的銀與 76% 的鋁，而剩餘較難處理的矽鋁合金部分則是利用後續鹼浸漬方式來去除。

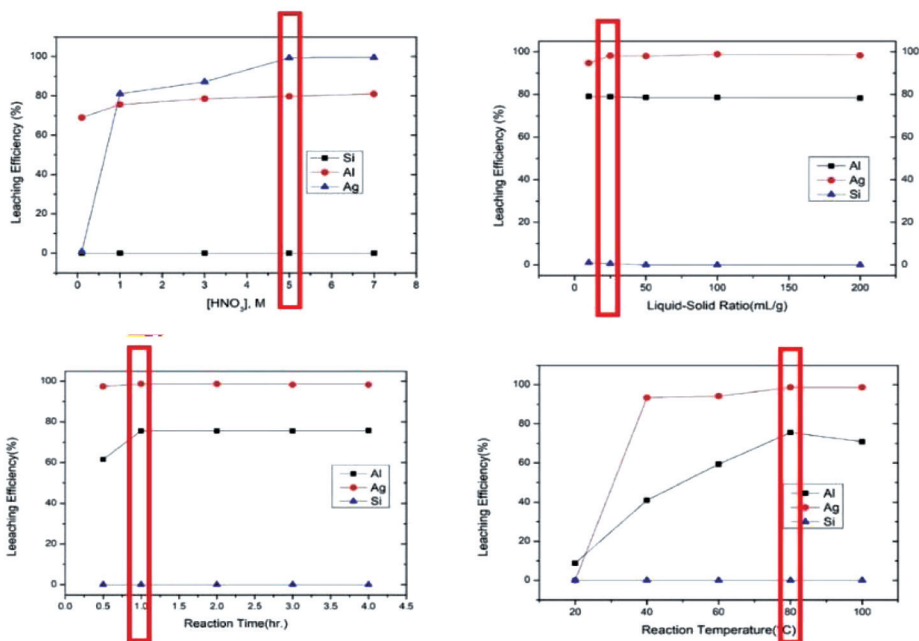


圖 13 第一階段硝酸浸漬最佳參數 (硝酸濃度、液固比、反應時間、反應溫度)

為能有效去除第一階段未能去除的鋁元素，本研究以氫氧化鉀做為第二階段浸漬液，能夠有效去除電池片表層剩餘 97.4% 鋁元素，圖 14 顯示第二階段氫氧化鉀浸漬最佳參數，以 1M 氫氧化鉀在液固比 50(L/kg)、反應時間 1 小時、反應溫度 80° C 條件下即可達到最佳浸漬效果。經過兩階段浸漬去除電池片表層雜質，本研究如表 5 所示得到近 3N 的矽 (99.84%)，且矽資源回收率達 99.9%，其效率不亞於使用氫氟酸做為浸漬液方式，但由於使用氫氧化鉀做為浸漬液導致有 0.03% 的鉀離子滲入。

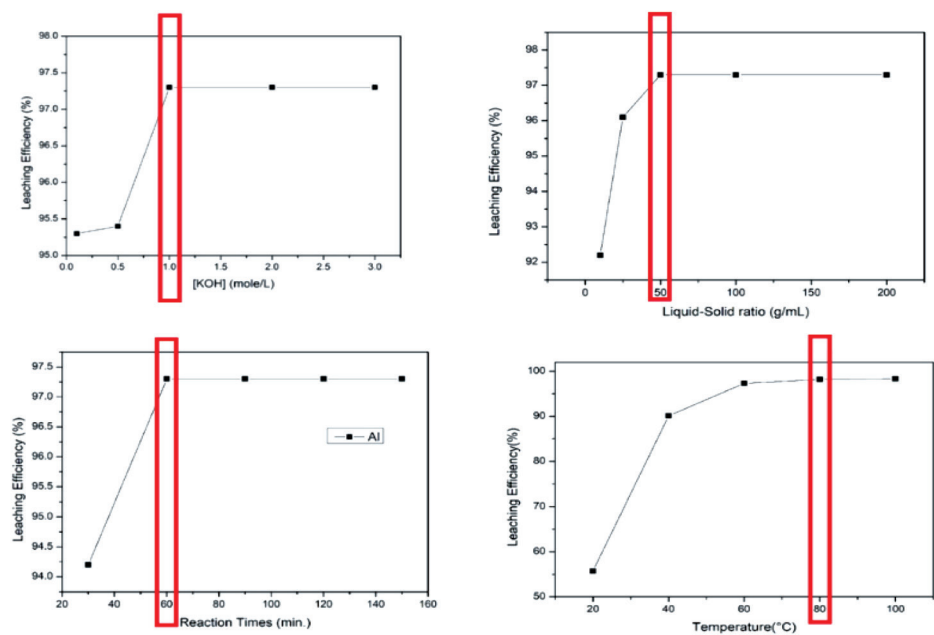


圖 14 第二階段氫氧化鉀浸漬最佳參數 ( 硝酸濃度、液固比、反應時間、反應溫度 )

表 5 太陽能電池片在各階段雜質重量比例

| Element | PV cell(ppm) | 1 <sup>st</sup> leaching | 2 <sup>nd</sup> leaching |
|---------|--------------|--------------------------|--------------------------|
| Al      | 567.5        | 189.85                   | 12.82                    |
| Ca      | 0.7925       | 0.45                     | 0.19                     |
| Zn      | 0.907        | N.D.                     | N.D.                     |
| Fe      | 0.344        | 0.03                     | 0.07                     |
| Ag      | 98.37        | 0.59                     | 0.1                      |



| Element     | PV cell(ppm) | 1 <sup>st</sup> leaching | 2 <sup>nd</sup> leaching |
|-------------|--------------|--------------------------|--------------------------|
| Bi          | 1.0795       | N.D.                     | N.D.                     |
| K           | N.D.         | N.D.                     | 2.97                     |
| Si(purity%) | 93.38%       | 98.8%                    | 99.84%                   |

4.4 鍍錫銅帶有價金屬的資源化

4.4.1 鍍錫銅帶資源化前處理

如圖 12 所示，鍍錫銅帶各金屬分布分散，增加表面處理的可行性，故本研究以 3 種方式對鍍錫銅帶做前處理，以利於後續金屬分選，分別為直接浸漬溶出、以反應時間控制表層溶出與物理研磨方式。圖 15 為直接浸漬溶出的最佳參數，以 3M 鹽酸搭配 6% 的雙氧水在液固比 50 (L/kg)、反應時間 1 小時、反應溫度 60° C 條件下可以有效將鍍錫銅帶內銅、鉛、錫金屬離子化成水溶液與 Ag 沉澱物分離，其浸漬效率分別為銅 99.65%、鉛 98.3%、錫 99% 與銀 0%。

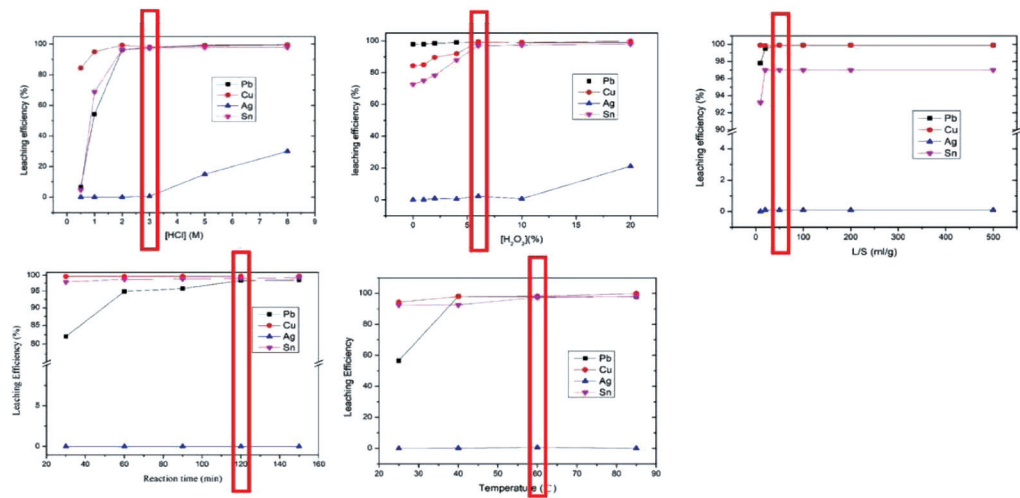


圖 15 鍍錫銅帶鹽酸浸漬最佳參數 ( 鹽酸濃度、氧化劑濃度、液固比、反應時間、反應溫度 )



經過上述直接浸漬研究後得知，鍍錫銅帶在溶出過程中會傾向先溶出表層鉛錫度層 後溶出銅帶，故本研究以反應時間控制鹽酸溶出效率藉此剝除表層鍍層，並回收銅帶。以 3M 鹽酸搭配 6% 雙氧水在 80° C 下做短時間反應時間參數如 圖 16(a) 所示，在反應時間 90 秒時鉛的溶出效率雖僅有 80.8%，但銅離子溶出率與 120 秒相比僅 10% 溶出於水溶液，能夠減少銅帶的消耗，故選擇 90 秒為最佳參數；未完全溶出的鉛則藉由添加氯離子來增加其溶出效率，其結果如圖 16(b) 所示，添加 1.5M 的氯離子後鉛的溶出率及提高到 99.9% 且銅離子溶出效率僅提升 2% 至 12%，最終各金屬溶出效率為鉛 99.9%、錫 99.7%、銅 12%， 產出的銅帶純度為 99.56%。

物理分選銅帶是利用氧化物與金屬延展性差異來分離銅帶鍍層的方式，本研究在 1 大氣壓下對鍍錫銅帶做 20° C-1,000° C 的熱重 / 熱差 (TG/DTA) 分析後發現在 600° C 與 830° C 有兩段明顯的熱重變化 ( 圖 17)，故推測第一段為表面鉛錫鍍層開始氧化、第二段為內部銅帶開始氧化所造成的熱重變化，因此本研究將鍍錫銅帶在大氣環境下加溫至 800° C，氧化表面度層，而後利用研磨方式將表面鍍層研磨剝除，在剝出總重量 27% 後即可得到 99.63% 純度的銅帶。表 6 為利用反應時間控制與物理分選方式回收銅帶後銅帶的純度比較，可發現由於添加氯離子會有鈉鹽滲入問題，但是化學法相較於物理分選法有較好的 能力去除金屬雜質，故未來仍是具有開發淺力的技術。

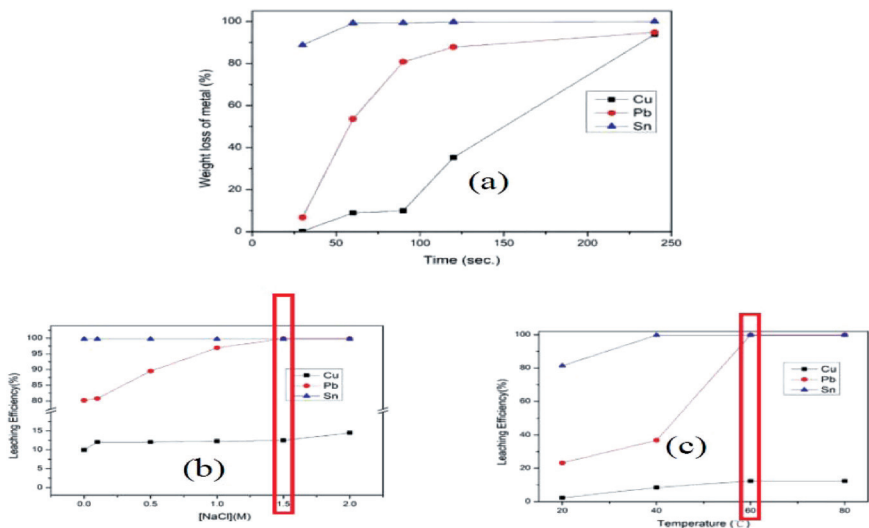


圖 16 以反應時間控制鍍錫銅帶溶出效率最佳參數  
(a) 反應時間 (b) 氯化鈉添加濃度 (c) 反應溫度

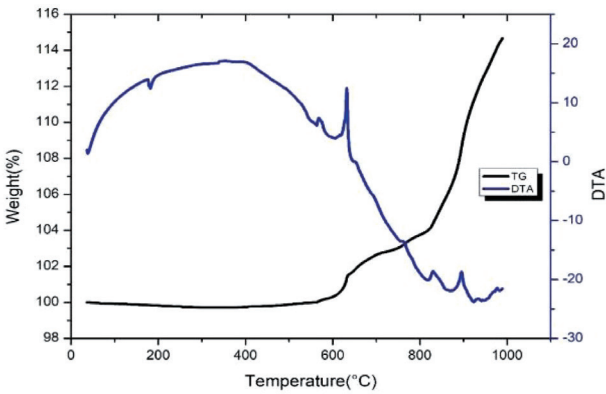


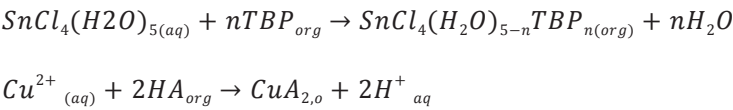
圖 17 鍍錫銅帶熱重 / 熱差分析結果

表 6 以反應時間與物理分選方式分離鍍層後銅帶雜質重量分析

| Element     | Cu wire purity      |                     |
|-------------|---------------------|---------------------|
|             | chemical separation | physical separation |
| Pb          | 0.05%               | 0.1%                |
| Sn          | 0.15%               | 0.27%               |
| Ag          | N.D.                | N.D.                |
| Na          | 0.23%               | N.D.                |
| Cu (purity) | 99.57%              | 99.63%              |

4.4.2 鍍錫銅帶金屬分選

鍍錫銅帶經過前處理後離子化成銅、鉛、錫水溶液，本研究使用磷酸三丁酯 (TBP) 做為錫離子萃取劑與 LIX984N 做為銅離子萃取劑，以兩階段萃取將金屬分離回收，其化學反應式如下方所示：



TBP 萃取過程中需要以氯離子來促使反應發生，與本研究浸漬過後環境符合，且圖 18(a) 指出 TBP 在高酸性環境下擁有較好的萃取效率，故使用 TBP 可以直接將前處理後的銅鉛錫浸漬液萃取。圖 18(c) 顯示 TBP 在水油比為 2 時錫萃取效率達 98.5%，

往後則隨之降低，但由於在水油比為 10 時，錫萃取效率可達 86.22% 且與銅、鉛離子分離效率優，將水油比最佳參數設定為 10 可藉由高水油比富集約 8.6 倍濃度錫離子，後續則利用 McCable-Thiele Diagram 模擬多階萃取將剩餘錫離子萃出回收，其結果如圖 18(e) 所示，經過 3 階段萃取即可達到 99.9% 錫離子萃取效率，最佳參數為  $\text{pH} = -0.75$ 、萃取劑濃度 30%、水油比 10、反應時間 5 分鐘。

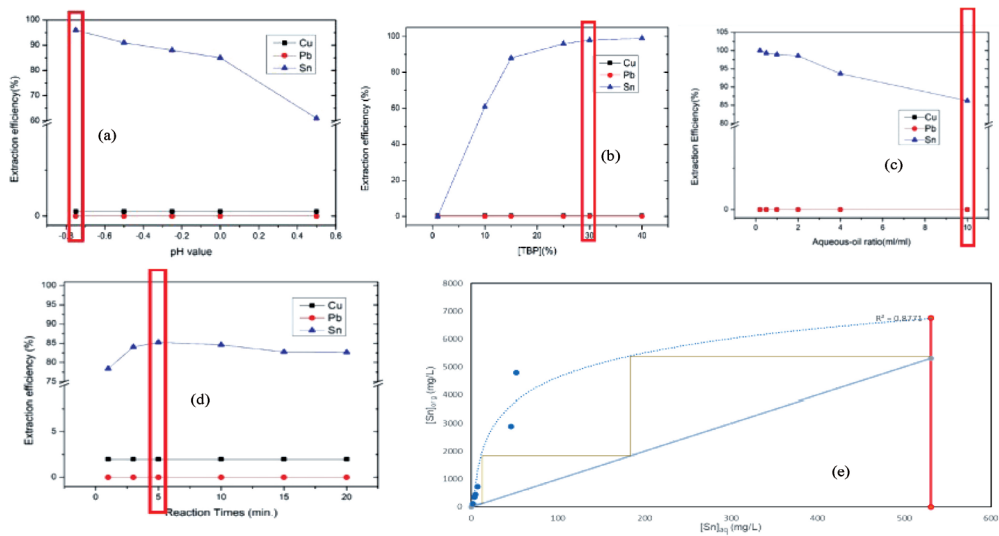


圖 18 以 TBP 做為錫離子萃取劑參數 (a) pH 值 (b)TBP 濃度 (c) 水油比 (d) 反應時間 (e) McCable-Thiele Diagram

經過 TBP 萃取後的浸漬液僅剩下鉛離子與銅離子在水溶液中，本研究以常見的螯合銅萃取劑 LIX984N 將水溶液中的銅離子與鉛離子分離。LIX984N 雖然為螯合型萃取劑，但是由於其反應機構仍需要有氫離子來驅動反應進行，故氫離子的濃度也是需要探討的參數。圖 19(a) 顯示 30% 濃度的 LIX984N 在 pH 值為 1 時即達到最高萃取效率，故設其為最佳參數，但由於初始配置萃取劑濃度過高，導致鉛離子有近 30% 的共萃效應，因此在圖 19(b) 本研究將萃取劑濃度調整至 5%，降低鉛離子共萃問題至 10% 以下，藉此防止後續產品純化困難。最終銅離子萃取最佳參數為以 5% 萃取劑在 pH 值為 1、水油比 1、反應時間 30 秒即可有效萃取 99.4% 的銅離子。

經過兩階段萃取後可有效將銅、鉛、錫三金屬離子分離，但仍需要進行反萃取將錫離子與銅離子從萃取劑中脫去，方便後續產品製造。表 7 顯示本研究反萃取最佳參數，利用 1M 的硝酸與 3M 的硫酸可將錫離子與銅離子從萃取劑中脫除，其反萃取效率分別為 97.3% 與 99.4%。

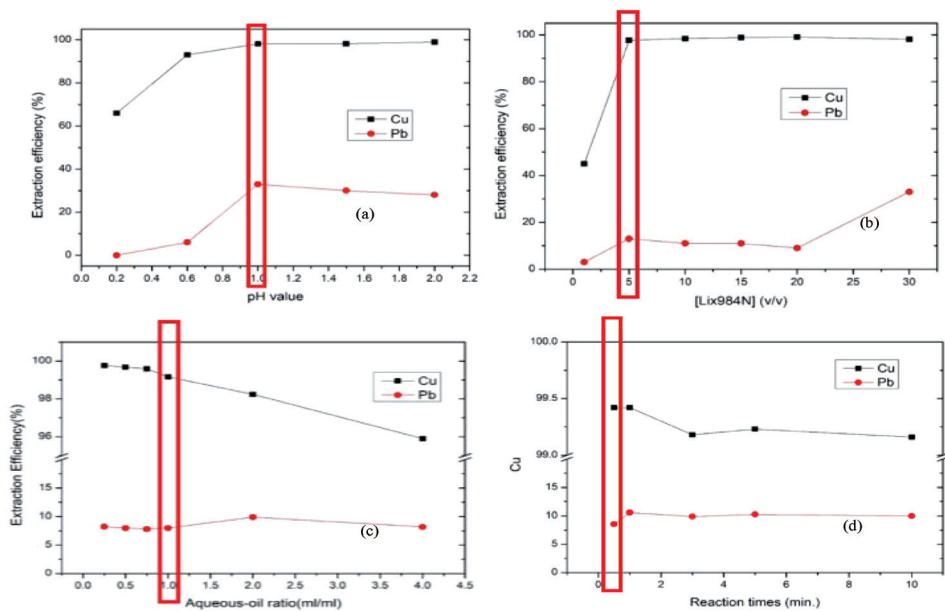


圖 19 LIX984N 萃取銅離子最佳參數 (a)pH 值 (b) 萃取劑濃度 (c) 水油比 (d) 反應時間

表 7 TBP 與 LIX984N 反萃取最佳參數

|        | concentration of stripping liquid |    | O/A | reaction time (min) | Efficiency |
|--------|-----------------------------------|----|-----|---------------------|------------|
| Tin    | HNO <sub>3</sub>                  | 1M | 1   | 10                  | 97.3%      |
| Copper | H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>    | 3M | 1   | 10                  | 99.4%      |

4.5 金屬化合物採取與分析

經過鍍錫銅帶浸漬後的銀渣以太陽能電池片第一階硝酸浸漬溶液溶出後加入氯離子沉澱，而後以氫氧化鈉將其轉變為氧化銀 (Ag<sub>2</sub>O) 後以葡萄糖做為還原劑還原成金屬銀，其純度為 98.85%、回收率為 99.7%。

銅鉛錫金屬離子經過溶媒萃取分離後以氨水做為沉澱劑將其沉澱，並如圖 20 所示以 TGA 從 20° C-1,000° C 分析尋找煅燒平衡溫度，其平衡溫度分別為銅 700° C、錫 400° C 與鉛 550° C。最後以 X 光繞射分析儀 (XRD, Haoyuan DX-2000) 與電感耦合電漿體原子發射光譜儀 (ICP-OES) 做最終產品純度與晶項分析，其結果如圖 21 所示，最終純度分別為氧化銅 99.7%、氧化錫 99.47% 與氧化鉛 99.68%，各金屬回收率分別為銅 98.5%、錫 96.5% 與鉛 88.9%。

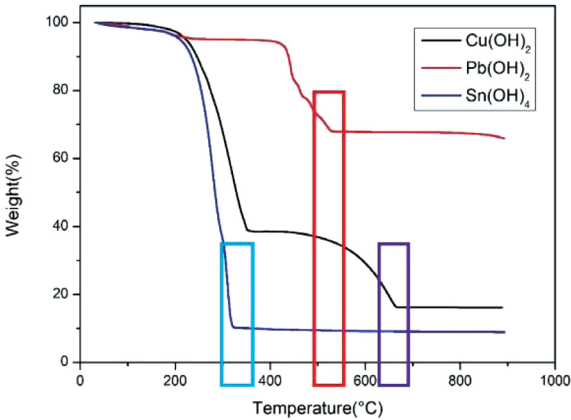


圖 20 金屬沉澱物熱重分析結果

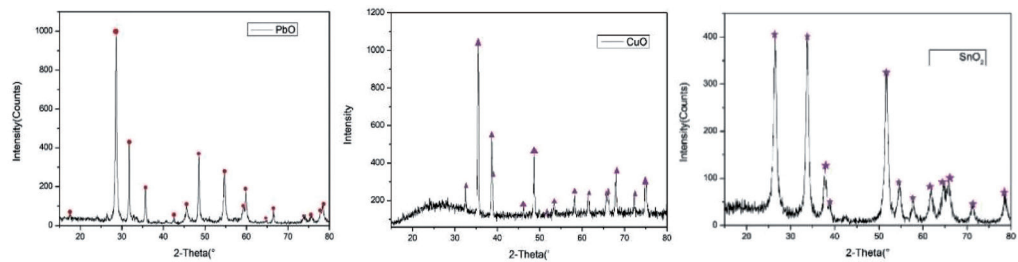


圖 21 金屬氧化物產品 XRD 分析結果 (氧化銅、氧化錫、氧化鉛)

五、結論

- 1. 電池片主要元素含 Si 93.38%、Al 5.25%、Ag 0.91%，矽晶型電池片純化流程中以 5M 硝酸與 1M 氫氧化鉀進行酸溶浸漬後鹼溶浸漬，可去除 99.7% 銀與 98.9% 鋁並得到 99.84% 純度矽資源，矽資源的回收率為 99.9%。

2. 鍍錫銅帶主要元素含 Cu 79.6%、Pb 5%、Sn 8.64%、Ag 3.02%。鍍錫銅帶前處理以 3M 鹽酸、6% 雙氧水能溶出 Cu 99.65%、Pb 98.3%、Sn 99%、Ag 0%，將鍍錫銅帶溶出並分離銀金屬。由於鍍錫銅帶分層明顯，因此可以藉由時間參數控制浸漬效率將鍍層先行溶出，回收銅帶純度為 99.57%，或經 800°C 熱處理後將鉛錫鍍層氧化並與銅帶分離，回收銅帶純度為 99.74%。
3. 鍍錫銅帶金屬分選流程中金屬離子分選第一階段溶媒萃取為 TBP 系統，用以萃取錫離子，最佳萃取效率分別為：Sn 86.22%、Cu 2%、Pb 0.6%，再經由 McCabe-Thiele Diagram 計算錫離子理論萃取階數，以三階萃取可將 99.9% 錫離子萃出。而利用 1M 硝酸做為反萃取劑可反萃 97.6% 錫離子。第二階段溶媒萃取為 LIX984N 系統，用以萃取銅離子，可萃取 99.4% 銅離子。而利用 3M 硫酸做為反萃取劑可反萃 99.4% 銅離子。
4. 將鍍錫銅帶分選後的銀沉澱物以電池片純化流程中 5M 硝酸溶出後沉澱還原回收金屬銀，得到純度 98.85% 銀金屬，其回收率為 99.7%。鍍錫銅帶內銅、鉛、錫離子以沉澱劑調整 pH 值至完全沉澱後以煅燒法得到氧化物產品，煅燒後得到 CuO、PbO、SnO<sub>2</sub>，純度分別為 99.7%、99.47%、99.68%，回收率為 98.5%、96.5%、88.9%。
5. 本研究透過物理與濕法冶金將矽晶型太陽能廢模組層層分離並回收鋼化玻璃，純化矽、銀、銅、錫、鉛資源，利用本研究技術能處理 95% 以上鋼化玻璃、EVA 樹脂、太陽能電池片與鍍錫銅帶，可有效減少太陽能廢棄物體積，各金屬經由純化後的產品可運用於各產業使用，達到資源循環目的，為環境與未來廢棄太陽能板回收產業做出一些貢獻。

## 參考文獻

台灣電力公司，歷年再生裝置容量 (97-108)，2020。

吳耀杉，王雨筠，鄭隆藤，姜暉先，林福銘，日本太陽光電模組回收技術解析，工業材料雜誌 381 期，2018。

IRENA (2020), Renewable capacity statistics 2020 International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi.

- Paiano, A. Photovoltaic waste assessment in Italy. *Renewable Sustainable Energy Rev.* 41, 99–112, 2015.
- Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems (ISE), Photovoltaic report, 2020.
- S.Weckend, A.Wade, and G.Heath, End-of-life management: Solar photovoltaic panels. 2016.
- T. Doi, I. Tsuda, H.Unagida, A.Murata, K.Sakuta, and K.Kurokawa, “Experimental study on PV module recycling with organic solvent method,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 67, no. 1–4, pp. 397–403, 2001.
- Park J, Kim W, Cho N, Lee H, Park N. An eco-friendly method for reclaimed silicon wafers from a photovoltaic module: from separation to cell fabrication. *Green Chemistry*. 18(6):1706- 1714, 2016.
- Yousef S, Tatarianis M, Denafas J, Makarevicius V, Lukošius S, Kruopien J. Sustainable industrial technology for recovery of Al nanocrystals, Si micro-particles and Ag from solar cell wafer production waste. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 191:493-501, 2019.
- Yi Y, Kim H, Tran T, Hong S, Kim M. Recovering valuable metals from recycled photovoltaic modules. *J Air Waste Manage Assoc.* 64(7):797-807, 2014.
- Fiandra V, Sannino L, Andreozzi C, Corcelli F, Graditi G. Silicon photovoltaic modules at end-of-life: Removal of polymeric layers and separation of materials. *Waste Management*. 87:97- 107, 2019.
- Klugmann-Radziemska E, Ostrowski P, Drabczyk K, Panek P, Szkodo M. Experimental validation of crystalline silicon solar cells recycling by thermal and chemical methods. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 94(12):2275-2282, 2010.
- Kang S, Yoo S, Lee J, Boo B, Ryu H. Experimental investigations for recycling of silicon and glass from waste photovoltaic modules. *Renew Energy*. 47:152-159, 2012.



- Ewa RADZIEMSKA<sup>1</sup>, Piotr OSTROWSKI, Adam CENIAN and Mirosław SAWCZAK.  
Chemical, thermal and laser processes in recycling of photovoltaic silicon solar cells and modules. *Ecological chemistry and engineering*, Vol. 17, No. 3, 2010.
- Park J, Park N. Wet etching processes for recycling crystalline silicon solar cells from end-of-life photovoltaic modules. *RSC Adv.* 2014;4(66):34823-34829.
- Deng R, Chang N, Ouyang Z, Chong C. A techno-economic review of silicon photovoltaic module recycling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 109:532-550, 2019.
- Lee J-K, Lee J-S, Ahn Y-S, Kang G-H, Song H-E, Kang M-G, et al. Simple pretreatment processes for successful reclamation and remanufacturing of crystalline silicon solar cells. *Prog Photovoltaics Res Appl* 26:179–87, 2018.
- Lee J, Ahn Y, Kang G, Wang J. Recovery of 4N-grade copper from photovoltaic ribbon in spent solar module. *Materials Technology.* 31(10):574-579, 2016.
- Jung B, Park J, Seo D, Park N. Sustainable system for raw-metal recovery from crystalline silicon solar panels: from noble-metal extraction to lead removal. *ACS Sustainable Chem Eng.* 4:4079-4083, 2016.
- G.H. Moon, and K.K. Yoo, 2017: Separation of Cu, Sn, Pb from photovoltaic ribbon by hydrochloric acid leaching with stannic ion followed by solvent extraction, *Hydrometallurgy* 171, p.123-127, 2017.
- Williams R. Becquerel Photovoltaic Effect in Binary Compounds. *J Chem Phys.* 1960;32(5):1505-1514, 1960.
- Chang Y, Lee C, Popuri S et al. Recovery of silicon copper and aluminum from scrap silicon wafers by leaching and precipitation. *Environ Eng Manag J.* 17(3):561-568, 2018.
- Teng-Yu Wang, Jui-Chung Hsiao, Chen-Hsun Du, Recycling of materials from silicon vase solar cell module, 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conf., 2012.

- Frisson L, Lieten K, Bruton T, Declercq K, Szlufcik H, De Moor H, et al. Recent improvements in industrial PV module recycling. 16th Eur. Photovolt. Sol. Energy Conf. vol. 5, 2000.
- Park J, Park N. Wet etching processes for recycling crystalline silicon solar cells from end-of-life photovoltaic modules. RSC Adv. 4(66):34823-34829, 2014.
- Shin J, Park J, Park N. A method to recycle silicon wafer from end-of-life photovoltaic module and solar panels by using recycled silicon wafers. Solar Energy Materials and Solar Cells. 162:1-6, 2017.
- E. Bombach, I. Röver, A. Müller, S. Schlenker, K. Wambach, R. Kopecek, E. Wefringhaus, Technical experience during thermal and chemical recycling of a 23 year old PV generator formerly installed on pellworm island. 21st Eur. Photovlt. Sol. Energy Conf., 2006.
- Yousef S, Tatariants M, Denafas J, Makarevicius V, Lukošius S, Kruopien J. Sustainable industrial technology for recovery of Al nanocrystals, Si micro-particles and Ag from solar cell wafer production waste. Solar Energy Materials and Solar Cells. 191:493-501, 2019.
- Yi Y, Kim H, Tran T, Hong S, Kim M. Recovering valuable metals from recycled photovoltaic modules. J Air Waste Manage Assoc. 64(7):797-807, 2014.
- Cynthia E.L. Latunussa, Fulvio Ardente, Gian Andrea Blengini, Lucia Mancini. Life cycle assesment of an innovative recycling process for crystalline silicon photovoltaic panels. Solar Energy Materials & Solar cells 156(2016), 101-111, 2016.
- Kim S, Lee J, Lee K, Yoo K, Alorro R. Separation of Tin, Silver and Copper from Waste Pb-free Solder Using Hydrochloric Acid Leaching with Hydrogen Peroxide. Materials Transactions. 55(12):1885-1889, 2014.

廢棄物類

## 陰極射線管廢面板玻璃與廢觸媒燒製濕度自調節綠色材料於室內濕度之控制

林凱隆\*、林雅雯\*\*、李韋皞\*\*\*、張文軒\*\*\*\*

### 摘 要

本研究係回收再利用廢觸媒以不同比例 (0~40%) 取代陰極射線管 (Cathod Ray Tube, CRT) 廢面板玻璃，以燒結溫度為 620-710℃ 以燒製濕度自調節綠色材料，並藉由巨微觀檢測濕度自調節綠色材料是否符合 CNS 之試驗規範，輔以精密儀器探討微觀結構等變化。結果顯示，當廢觸媒取代量為 40% 之濕度自調節綠色材料於相對濕度為 95% 時，其平衡含水率有上升之趨勢。當燒結溫度為 710℃ 時，廢觸媒取代量為 20% 之濕度自調節綠色材料可符合 CNS 3298 陶質壁磚之抗彎試驗規範。綜合研究結果顯示，未來回收再可利用 CRT 廢面板玻璃添加量為 80% 製備濕度自調節綠色材料，可達到環境保護與經濟發展兼籌並重，並符合環保署零廢棄、零掩埋、資源化之永續發展目標。

【關鍵字】陰極射線管廢玻璃、廢觸媒、燒結、調濕建材、綠色材料

\* 國立宜蘭大學環境工程學系

特聘教授

\*\* 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

助理教授

\*\*\*\* 國立宜蘭大學環境工程學系

碩士

## 一、前言

近年來，隨著科技越來越進步，消費者對於產品越來越要求，其中電腦、電器、電子產品已成為訊息傳播及對外溝通之網絡。在早期傳統電視機及電腦螢幕大多使用陰極射線管 (Cathod Ray Tube, CRT) 顯示器，如今平面顯示器已逐漸取代傳統陰極射線管顯示器，進而產生廢電視機螢幕。根據 109 年環保署廢棄物管理統計廢電視機回收量為 28,280 公噸 (行政院環保署，2021)。而根據文獻指出面板玻璃所占的比例約有 52%，故約有 14,706 公噸 CRT 廢面板玻璃尚待處理。另外，國內石化煉油廠在煉製石油過程中，於加氫脫硫處理程序所使用之觸媒，經長期使用後會喪失其原本催化效果便會予以棄置。根據全國事業廢棄物申報統計資料顯示，廢觸媒申報量為 20,520 公噸亟待處置 (行政院環保署，2021)。由於事業廢棄物的數量龐大，組成分亦日趨複雜，將造成嚴重的環境負荷。若能將 CRT 廢面板玻璃及廢觸媒等事業廢棄物，有效的資源化再利用，不僅可以減少對環境上的負荷，並可構築一完整資源之生命週期，以達成妥善處理事業廢棄物之目的。

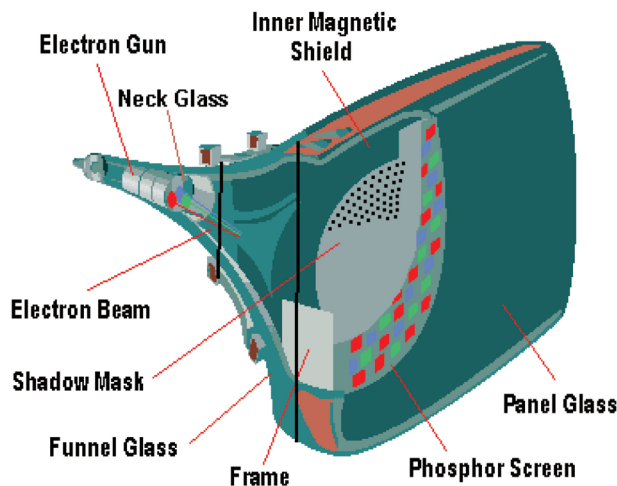
此外，台灣地區屬季風型海島性氣候，在夏天高溫多濕，尤以夏季為甚，高溫高濕易引起悶熱感，且易造成室內霉菌急速繁殖，形成一種不衛生的空間環境進而影響居住者之身心健康。一般而言，在高濕的環境 (相對濕度達 70% 以上) 會造成活動的遲鈍，而太乾燥的環境下 (相對濕度 40% 以下) 則會引起鼻黏膜的疼痛，尤其是空氣中之菌類孢子的生存會受室內濕度的影響 (Xie et al., 2017; He et al., 2021)。根據文獻記載，人體最舒適的相對濕度範圍為 40-70% (Yuk et al., 2021)。因此，如何將室內相對濕度控制在此舒適範圍，不僅對人體健康有益，亦可減緩建築物內之材料老化與劣化。而一般住宅內部居住環境可利用冷暖氣機、除濕機械設備進行調節，但機械馬達的運轉不但會造成熱氣之排出，更會使得外部環境惡化。若能在建築結構上將調濕材料應用於建築材料，不僅可以改善室內相對濕度，從而有利於舒適生活和人體健康，同時正確地進行建築調濕材料，能有效的減少除濕機械設備的能源消耗 (Jansen et al., 2020)。故自動調節空氣相對濕度之調濕材料之研發即顯得相當重要。

近幾年廢棄物材料資源化已成為世界各國主要發展的方向，而將廢棄物轉換成有用之物質，以減少對環境生態之衝擊，達到自然資源保育之目的，並提升工業經營之效率。在現今環保意識日愈提升及全球資源日益匱乏之趨勢下，廢棄物資源化再利用之推廣，應可營造工業良好潔淨之形象，並使環境保護與經濟發展得以相輔相成。故本研究係研發陰極射線管顯示器產業之廢面板玻璃添加廢觸媒廢棄物燒製濕度自調節綠色材料之特性，濕度自調節綠色材料之來源包括 CRT 廢面板玻璃和廢觸媒等。主要利用 CRT 廢面板玻璃添加廢觸媒於製坯燒結技術經燒結緻密化程序，使資源再生材料具有極大之微孔及吸附、調濕、催化或轉化等特性，進而應用於營建材料，使其具能調節濕度、吸收臭氣、隔音、隔熱及轉化污染物之自淨作用。

## 二、CRT 廢面板玻璃與廢觸媒之來源與資源化技術

### 2.1 CRT 廢面板玻璃之來源及特性

圖 1 為 CRT 組成。主要分為電子槍 (Gun)、偏向線圈 (Yoke)、錐管玻璃 (Funnel)、面板玻璃 (Panel)、蔭罩 (Musk) 及螢光粉 (Fluorescent)。表 1 為某廠商所提供 CRT 之材料組成。



(資料來源：台灣某公司, 2001)

圖 1 CRT 內部之構造

表 1 CRT 顯示器材料組成

| 物件名  | 重量     | 組成                                                                                            |
|------|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| 玻璃   | 5.2 kg | 0.4 kg BaO、0.4 kg PbO、99 g SrO、19 g Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 及 SiO <sub>2</sub> 等一般玻璃成分 |
| 金屬   | 0.7 kg | 主要為鐵、其他為鎳、鉻、鋁                                                                                 |
| 螢光物質 | 0.9 g  | ZnS、Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 、Eu                                                         |
| 偏向單元 | 0.7 kg | 0.315 kg 的 Cu、0.315 kg 的金屬陶瓷複合材料及 0.07 g 的塑膠                                                  |

資料來源：台灣某公司，2001。

2.2 CRT 廢面板玻璃之資源化再利用技術

一般 CRT 玻璃於拆解過程中，會產生出面板玻璃、錐管玻璃、頸部玻璃等廢玻璃，面板玻璃可進行回收再利用。目前國內面板玻璃資源化再利用技術可分為 4 類：

1. 面板玻璃回到原料中使用

面板玻璃回用至原製程中，為所有資源化方式中最符合經濟效益，係因製造業者可節省購買原料費用，因此可順利解決廢面板玻璃的問題。但隨著 CRT 已逐漸被 LCD 所取代，面板玻璃產量亦相對降低，此時有大量之 CRT 廢棄玻璃，廢面板玻璃呈現供過於求的現象。

2. 應用於建築材料

(1) 面（地）磚製作

面（地）磚胚體的成份以黏土、石英及長石為主，玻璃可替代長石及石英作為面磚胚土。若將玻璃應用於面（地）磚坯體，由於玻璃韌度較大，須配合旋鎚碎礦機、球磨機等設備進行粉碎(約 325 mesh)。王文生等人進行廢玻璃應用於地(壁)磚製造的試驗，結果顯示玻璃料添加比例過高，會導致試體變形；且燒結溫度隨著添加比例增加而降低，導致燒結溫度愈高吸水率愈低的現象(王文生，1999)。

(2) 景觀石的製作

景觀石為玻璃粒料和環氧樹脂混合所製備，該產品因玻璃之光澤而增加美觀。日本已成功將碎玻璃磨成粉末而添加在磁磚、塊磚中或用來製造輕質粒料。目前已有工廠引用此技術製造上述產品；另外，將回收玻璃熔化再作成人工大理石及景觀石，如日本廣島縣、岩手縣及宮城縣等。

3. 應用於混凝土工程

由於玻璃之化學組成主要以  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$  及  $\text{MgO}$  為主，與水泥相近，玻璃密度約  $2.5 \text{ g/cm}^3$  與混凝土密度  $2.4 \text{ g/cm}^3$  相近，玻璃抗壓強度約 39-88 MPa 與混凝土抗壓強度 30-80 MPa 相近，詳見表 2 之玻璃粒料混凝土與混凝土相關物性比較所示。王文生等人指出，進行廢玻璃替砂石粒料應用於混凝土製作的研究結果，發現玻璃所製備之混凝土較天然河砂所製備之混凝土為佳。因此，面板玻璃取代河石或河砂應用於混凝土工程 (王文生，1999)。

表 2 玻璃粒料混凝土與混凝土物性比較

| 項目    | 玻璃粒料混凝土                           | 一般混凝土                              |
|-------|-----------------------------------|------------------------------------|
| 密度    | $2.5 \text{ g/cm}^3$              | $2.4 \text{ g/cm}^3$               |
| 抗壓強度  | 39-88 MPa                         | 30-80 MPa                          |
| 彈性係數  | 65 Gpa                            | 25 Gpa                             |
| 熱膨脹係數 | $6 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ | $10 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ |
| 熱傳導係數 | 3 W/m.k                           | 3 W/m.k                            |

資料來源：王文生，1999。

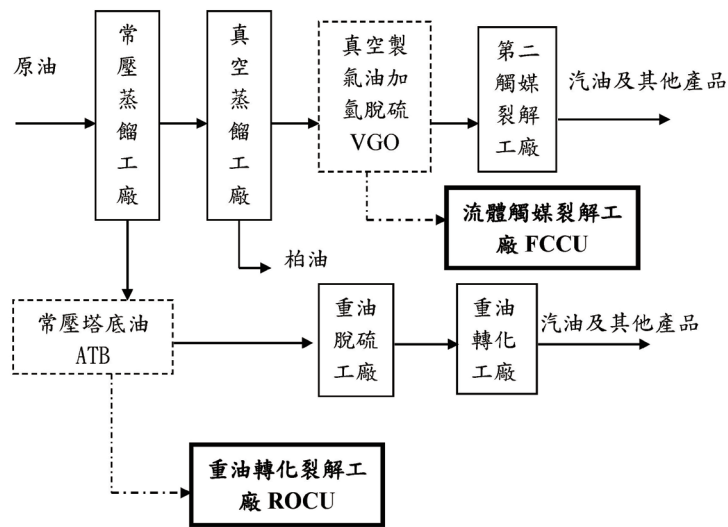
4. 其他玻璃製品

目前國內進行回收再製之玻璃，大都回收同類型玻璃如飲料玻璃瓶再製，一般而言，良好的玻璃製品之碎玻璃添加量很少超過 40%，係因熔製碎玻璃時，產生許多氣泡滲入而停留於玻璃中，而氣泡會影響玻璃之物性，如無法耐高壓等問題，故有添加比例的限制 (關家倫，2001)。



2.3 廢觸媒之來源及特性

觸媒應用於原油之裂解 (Catalytic Cracking) 時，由於沸石之活性太大，在實際應用上通常會與矽石 (SiO<sub>2</sub>) 和礬土 (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 混合使用，可提高對熱或毒化之抵抗能力，且具有更佳的選擇性，以提高汽油之產率 (胡興中，1998)。由於石油中之重金屬如鈮 (V)、鎳 (Ni)、鉻 (Cr)、鐵 (Fe) 及鋅 (Zn) 等存在，在裂解時，石油內所含的重金屬會附著在觸媒表面上，造成觸媒活性降低及積碳增加等現象。觸媒應用於精煉或石化製程中，隨著使用時間的增加會失去活性，而普遍造成觸媒失活的原因有積碳、燒結及毒化。其中最主要的原因為積碳的形成；第二個為在裂解及再生的高溫環境下，觸媒的活性相結構被破壞分散，即為活性燒結；第三種原因則是受到製程中使用的化學物質及重金屬污染，吸附於觸媒表面活性位點上，稱為毒化 (Arslano lu and Yara , 2021)。觸媒裂解工廠之進料流程如圖 2 所示。



(資料來源：陳宗輝，1999；台灣中油股份有限公司，2021)

圖 2 觸媒裂解工廠之種類與進料流程

2.4 廢觸媒之資源化再利用技術

目前廢觸媒之資源化技術需視各類觸媒之成份而定，但資源化回收之技術，大致皆遵循冶金方法加以回收，主要以乾式冶煉法、濕式冶煉法及乾式合併法等 3 種為主。

根據文獻上記載 FCC 廢觸媒處理方法可分為掩埋法 (Landfill)、再生法 (Re-Generation) 及再利用法 (Re-Use)。掩埋法由於掩埋場地難覓及環保問題難以獲得解決，不適合在台灣繼續使用。而目前再生法所使用之最重要方法為 Demet 程序 (為使一般讀者易懂或易於查詢，專有名詞第一次出現時，請協助補充本名詞中文或英文全名)。根據資料顯示，Demet 程序可降低廢觸媒產量至原先的 1/5；此法雖可處理大部分之 FCC 廢觸媒，但剩餘廢觸媒仍需以其它方法加以處理。燒結製磚方式因可產生化性極安定之燒結物外，所耗能源較熔融法少，燒結磚體之穩定性亦較水泥固化法為佳，並兼具資源回收之利，可回收再利用作為紅磚等營建材料，因此備受矚目，成為一極具潛力之技術。一般而言，燒結製磚是在低於熔融的溫度下進行，廢觸媒所含之  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  及  $\text{CaO}$  等氧化物，在燒結製磚過程中伴隨熱分解及固相反應，產生玻璃化、收縮、緻密化及再結晶等作用，使粉體粒子間相互結合固化，增加燒結體強度。本研究針對廢觸媒資源化之資源化技術彙整如表 3。

表 3 廢觸媒資源化技術彙整

| 技術名稱       | 原理流程                      | 特點                                                                       |
|------------|---------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| 充作瀝青混凝土填充料 | 利用瀝青混凝土之多項多成分結構，於常溫下添加允許量 | 1. 增加瀝青混凝土抗壓強度<br>2. 增加抗浸水剝落能力<br>3. 降低瀝青混凝土成本                           |
| 燒結製磚       | 利用廢觸媒與陶瓷建材及耐火材料組成相近之原因    | 1. 可添加至陶瓷原料中 2-40%<br>2. 可降低陶瓷製造成本                                       |
| 替代水泥原料     | 將廢觸媒取代水泥原料                | 1. 產品工作性及抗壓強度提升<br>2. 增加水泥耐久性及磨耗強度                                       |
| 回收貴重金屬鈇、鉬  | 以濕式法回收氧化鈇及三氧化鉬等鈇、鉬貴重金屬    | 1. 可回收貴重金屬鈇、鉬元素<br>2. 乾式冶金處理程序有污染空氣之虞，需投入污染防制設備<br>3. 濕式冶金處理程序較複雜，需有高度技術 |
| 色料合成技術     | 利用鈷鉬系廢觸媒經發色處理獲得藍色釉料       | 在 1,250℃ 溫度下仍能呈現穩定且均勻色澤                                                  |

資料來源：陳宗恩，2007；張仁杰，2011；張文軒，2015。

### 三、調濕材料之原理與應用

#### 3.1 調濕材料之原理

調濕材料係指不需藉由任何耗費能源和機械設備，利用材料毛細現象之吸放濕性能，感應室內空氣溫濕度的變化，而自動調節空氣相對濕度的材料。當環境濕度較潮濕時，會吸收環境中的水分並儲存在調濕材料內，如環境相對濕度較低時，調濕材料會將水分釋放至空氣中，以達到控制濕度的目的 (王傳勻，2019)。調濕材料吸放濕行為如圖 3 所示，水蒸氣的吸收和釋放是由介質中的分壓力 ( $P_s$ ) 及環境中的水蒸氣分壓力 ( $P_a$ ) 來決定。當  $P_s < P_a$  時，則會進行吸濕反應；當  $P_s > P_a$  時，則會進行放濕反應；若  $P_s = P_a$  時，則達到平衡狀態。調濕材料的反應機制，如圖 4 所示，吸濕情況下材料內部的移動 ( $P_s < P_a$ )；放濕情況下材料內部的移動 ( $P_s > P_a$ )。

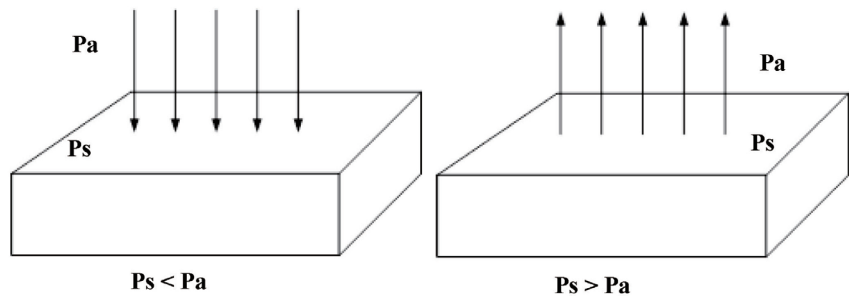


圖 3 調濕材料之吸放濕行為 (資料來源：本研究繪製，2021)

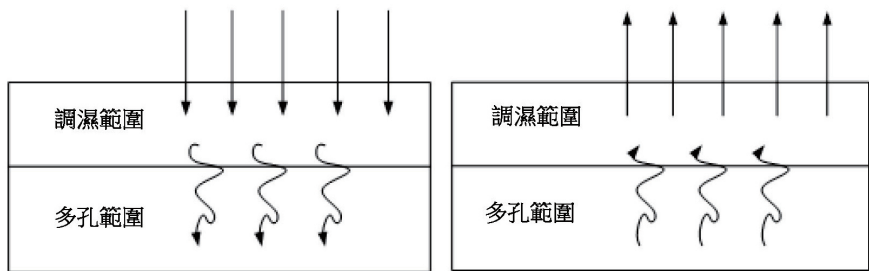


圖 4 調濕材料之反應機制 (資料來源：本研究繪製，2021)

調濕材料的調濕原理可以由吸放濕曲線來說明，圖 5 表示。當環境相對濕度大於  $\varphi_2$  值（調濕材料進行吸濕後環境相對濕度）時，平衡含濕量會急速增加，調濕材料將吸收環境中的水分，以阻止環境相對濕度的上升；當環境中相對濕度低於  $\varphi_1$  值（調濕材料進行放濕前環境相對濕度）時，平衡含濕量會急速降低，調濕材料所放出水分子於空氣中增加濕度，阻止環境相對濕度持續下降，因此，只要調濕材料的含濕量在  $d_{\min} \sim d_{\max}$  之間，環境相對濕度就會保持在  $\varphi_1 \sim \varphi_2$  之間。若吸放濕曲線間的遲滯環寬度小， $\varphi_1 \sim \varphi_2$  間斜率大，則可以作為建材中使環境相對濕度穩定在相當狹小的範圍內。調濕原理的吸放濕曲線可按照 JIS A 1475 建築材料的平衡含水率測定方法，於相對濕度 10%、30%、55%、75%、85% 及 95% 的吸放濕過程，測定多孔調濕材料多功能之不同相對濕度下的平衡含水率，以描述調濕材料之吸放濕性能。

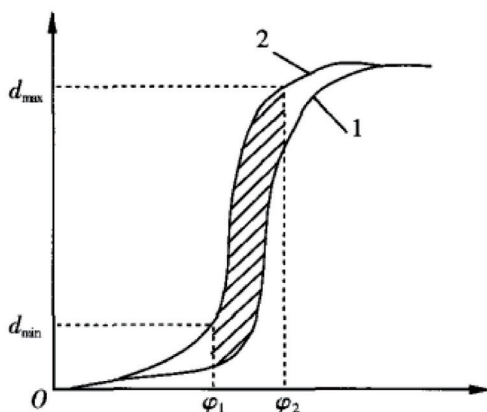


圖 5 調濕材料之吸放濕曲線（資料來源：孫學峰，2006）

### 3.2 調濕材料之國內外相關研究

國內目前製備陶瓷調濕材料之研究並不多，大部分學者都是利用天然調濕材料混合無機性調濕材料或將粉末狀調濕材料打入水泥或石膏中，藉以探討其調濕性能。製備多孔陶瓷調濕材料之困難性，即燒結後之調濕材料雖具有高強度，但受到緻密化影響，將使孔隙受到破壞，進而減少孔洞吸附，故如何在高調濕性能與高強度之間達到平衡點，係為製作調濕陶瓷考慮要因。

Kurimoto 等人利用不同炭化溫度 (400-900℃ )，以不同配比之木炭原料製備調濕材料進行調濕性能之研究 (Kurimoto et al., 2004)。如圖 6 所示，炭化溫度和炭化材料隨著配比、形狀及溫度變化影響調濕性效果，在密閉空間內調濕材料配比為 2-3 g/L 之操作條件下則擁有最好之調濕效能。

然而，日本和台灣均為海島型國家，由於早晚溫差大，造成濕度波動差距大，導致住宅因相對濕度差距大而形成結露現象。日本學者大畑敬利用木質材料和無機物質材料混合配製調濕材料。其研究係將木質纖維依照不同截面積、厚度來測試調濕性能 (大畑敬，2012)。由分析結果證實調濕材料依不同厚度影響吸放濕之性能，當厚度增加則吸放濕性能上升；當吸濕量達飽和狀態時，則有放濕之現象。

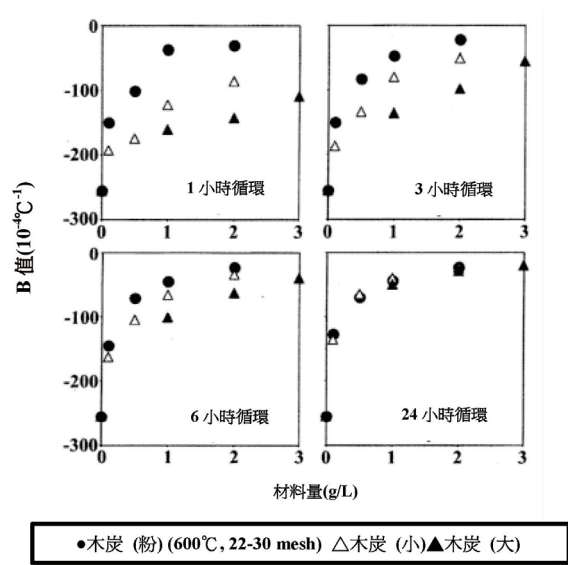


圖 6 不同木炭配比的吸放濕性能指標 ( 資料來源：Kurimoto et al., 2004)

### 3.3 調濕材料於建築上之熱能管理及應用

調濕材料在建築物上之應用如圖 7 所示。建築結構、材料、門、空調系統、冰箱和家用電腦是能源消耗之主要來源，因此，在建築上需提升調濕材料之應用率。調濕材料可分為無機類、有機類和金屬類。首先，調濕材料之應用需符合建築工程對熱能管理、燒結溫度及接近人體舒適溫度之標準 (Khudhair et al., 2004)。選擇調濕材料時，

對室內熱能管理之標準如下：(一) 低成本；(二) 高潛熱、高比熱及良好的熱傳導係數；(三) 製備過程中體積收縮小；(四) 穩定性、無毒性、不可燃和非爆炸性；(五) 隨著當地氣候條件而改變。在進行建築物之室內熱能管理時，調濕材料與建築材料所應用方法，是將調濕材料鋪設於地板或牆壁上。

調濕材料鋪設於室內中，具有儲熱及調濕功能且符合節能和環保之觀念。Otaka and Nagata 等人 (2005) 文獻提出利用輕質土製備調濕材料，應用於屋頂、天花板、樓板、牆壁、門和窗簾來控制室內之溫度及濕度 (Otaka and Nagata., 2005)。

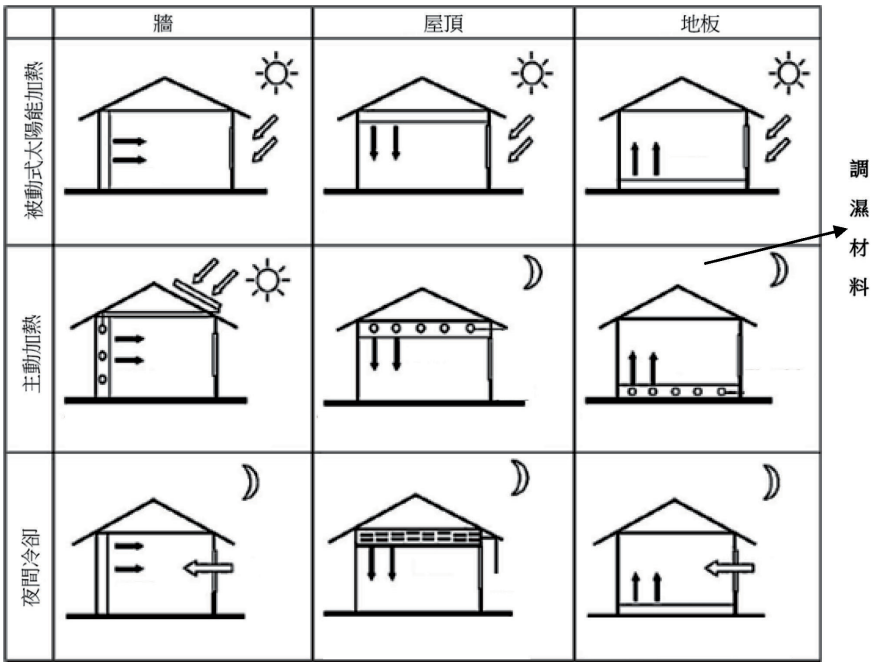


圖 7 室內調濕材料之裝設 (Khudhair et al., 2004)

#### 四、實驗材料與方法

本研究係以 CRT 廢面板玻璃經前處理後，以廢觸媒粉體依不同比例 (0~40%) 混合取代部分 CRT 廢面板玻璃的成分製作樣品，並且在製程控制上改變半乾式加壓成形法，以成形壓力 (50 kgf/cm<sup>2</sup>) 及燒結溫度 (620~710 °C)，以最適化燒製條件燒製濕度自調節綠色材料並進行物化特性分析，藉以判定其作為濕度自調節綠色材料之可適

性，並建立功能性濕度自調節綠色材料之功能性參數及其檢測分析方法與環境調濕優化性能測試。對於調濕優化性功能研究，主要針對製程條件 (Processing)，微觀結構 (Microstructure) 以及孔洞性質 (Properties)。微結構性質包括孔洞內比表面積、孔容積、孔徑大小分佈，以及表面反應性質。本研究之試驗項目包括抗彎試驗、BET 及 X 光繞射分析，以及調濕性能等項目分析。調濕優化性能則是測定濕度自調節綠色材料之不同環境相對濕度下之 48 小時於中濕域 ( 相對濕度 53~75%) 之吸放濕量。完成濕度自調節綠色材料之調濕特性分析，建立本土化綠色多孔環境調濕材料資源化之背景資料，期能將 CRT 廢面板玻璃和廢觸媒應用於營建工程中，以達更有效的資源利用。CRT 廢面板玻璃與廢觸媒燒製濕度自調節綠色材料之照片如圖 8 所示。

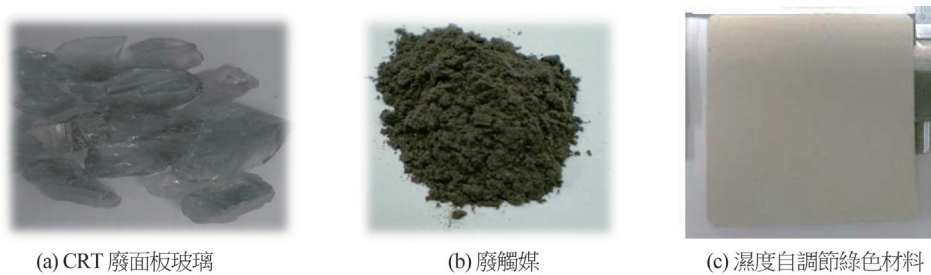


圖 8 CRT 廢面板玻璃與廢觸媒燒製濕度自調節綠色材料之照片

## 五、結果與討論

### 5.1 基本材料特性分析

CRT 廢面板玻璃及廢觸媒之物理性質如表 4 所示。根據環檢所公告 NIEA R208.03C 標準方法，測得 CRT 廢面板玻璃之 pH 為 10.80，其本身所含金屬元素較多，故溶於水中屬於鹼性物質；而廢觸媒之 pH 為 7.76，於製程中其金屬與酸性物質混合後所產生，故廢觸媒為中性物質。另外，CRT 廢面板玻璃和廢觸媒之比重分別為 1.58 和 1.41。而 CRT 廢面板玻璃之粒徑分佈主要於 44~177  $\mu\text{m}$ ，占整體之 96.13%。



表 4 材料之基本物理特性

| 樣品        | pH    | 比重   | 水分 (%) | 密度 (g/cm <sup>3</sup> ) | 燒失量 (%) |
|-----------|-------|------|--------|-------------------------|---------|
| CRT 廢面板玻璃 | 10.80 | 1.58 | 0.11   | 1.04                    | -       |
| 廢觸媒       | 7.76  | 1.41 | 1.30   | 2.00                    | 0.50    |

材料之化學組成分析其結果如表 5 所示。CRT 廢面板玻璃主要成分為 SiO<sub>2</sub> 及 Na<sub>2</sub>O，而 K<sub>2</sub>O 所占百分比為 7.40%，Na<sub>2</sub>O 及 K<sub>2</sub>O 常扮演著助熔劑的角色，如比較鹼金屬族與鹼土金屬族之助熔效果；廢觸媒主要成分為 SiO<sub>2</sub> (43.40%) 及 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (51.50%)，可見廢觸媒之化學成分以 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 為主，而 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 為高熔點且耐熱性的物質，在燒結過程中可增加物質的黏滯性。而重金屬總量分析結果如表 6 所示，CRT 廢面板玻璃之重金屬總量 Pb 和 Zn 含量分別為 240 mg/kg 和 150 mg/kg，並含有 Cr 為 88.33 mg/kg，其來源應為面板玻璃進行組裝中所需要的材料；廢觸媒之重金屬總量中之 Ni 及 Zn 含量分別為 953.33 mg/kg 和 68.33 mg/kg。TCLP 重金屬溶出結果顯示，廢棄物中主要以 Pb、Zn 及 Ni 為主。CRT 廢面板玻璃之 Pb 溶出量為 3.73 mg/L，Zn 溶出量為 1 mg/L；廢觸媒之 Ni 溶出量為 2.06 mg/L，而 Zn 溶出量為 0.12 mg/L。由上述可知，CRT 廢面板玻璃及廢觸媒之溶出值均符合法規值，具資源化再利用之潛力。

表 5 原料之化學組成

| 樣品            | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO  | Na <sub>2</sub> O | SO <sub>3</sub> | K <sub>2</sub> O |
|---------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|-------------------|-----------------|------------------|
| CRT 廢面板玻璃 (%) | 63.20            | 1.52                           | 0.21                           | 0.85 | 8.60              | 0.20            | 7.40             |
| 廢觸媒 (%)       | 43.40            | 51.50                          | 0.80                           | 0.53 | -                 | 0.32            | 0.13             |

表 6 原材料之重金屬總量及溶出試驗結果

| 樣品          | Pb     | Cr**  | Cu*   | Zn     | Cd*** | Ni***  |
|-------------|--------|-------|-------|--------|-------|--------|
| 總量 (mg/kg)  |        |       |       |        |       |        |
| CRT 廢面板玻璃   | 240.00 | 88.33 | 20.00 | 150.00 | N.D.  | 40.00  |
| 廢觸媒         | N.D.   | N.D.  | 23.33 | 68.33  | N.D.  | 953.33 |
| TCLP (mg/L) |        |       |       |        |       |        |
| CRT 廢面板玻璃   | 3.73   | N.D.  | N.D.  | 1.00   | N.D.  | N.D.   |
| 廢觸媒         | N.D.   | N.D.  | N.D.  | 0.12   | N.D.  | 2.06   |
| 法規標準        | 5.00   | 5.00  | 15.00 | —      | 1.00  | —      |

\*Cu 之偵測極限 <0.020 mg/Kg ;\*\*Cr 之偵測極限 <0.016 mg/Kg  
\*\*\*Cd 之偵測極限 <0.014 mg/Kg ;\*\*\*Ni 之偵測極限 <0.014 mg/Kg

5.2 濕度自調節綠色材料之機械特性

圖 9 為濕度自調節綠色材料之孔隙率變化。從圖中可知，當燒結溫度為 620℃ 時，廢觸媒添加量為 10~40% 之濕度自調節綠色材料，其孔隙率分別為 42.37%、45.24%、49.48% 和 52.67%；當燒結溫度為 710℃ 時，CRT 廢面板玻璃添加廢觸媒為 10%~40% 之濕度自調節綠色材料，其孔隙率分別為 20.88%、33.15%、40.68% 和 46.69%。當燒結溫度增加時，濕度自調節綠色材料表面及內部形成頸部成長，造成孔隙率下降，係由於廢觸媒主要成分為 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>，且熔點溫度較高，於燒結過程中降低燒結驅動力，難以形成緻密化現象，具有大量之孔洞存在，故孔隙率有上升之現象。

圖 10 為濕度自調節綠色材料之吸水率變化。由圖中可知，當燒結溫度為 620℃ 時，廢觸媒添加量為 10~40% 之濕度自調節綠色材料，其吸水率分別為 21.54%、23.47%、26.57% 及 29%；當燒結溫度為 710℃ 時，廢觸媒添加量為 10~40% 之濕度自調節綠色材料，其吸水率分別為 8.98%、15.77%、20.93% 及 25.47%。由此可知，當燒結溫度上升時，使顆粒內晶粒開始成長形成孔隙通道，並藉由燒結驅動力使晶粒間孔洞結構縮小 (Soltani et al., 2013)，形成緻密化之濕度自調節綠色材料，故吸水率隨燒結溫度上升而有下降之現象。

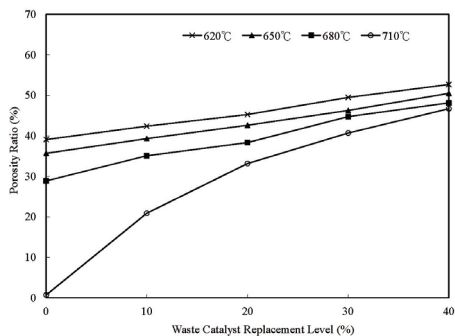


圖 9 濕度自調節綠色材料之孔隙率

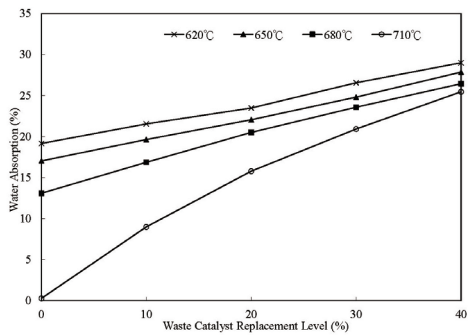


圖 10 濕度自調節綠色材料之吸水率

圖 11 為濕度自調節綠色材料之抗彎強度變化。由圖中可知，當燒結溫度為 620℃時，廢觸媒添加量為 10~40% 之濕度自調節綠色材料，其抗彎強度分別為 2.19 kgf/cm<sup>2</sup>、1.8 kgf/cm<sup>2</sup>、1.25 kgf/cm<sup>2</sup>、0.63 kgf/cm<sup>2</sup>；當燒結溫度 710℃時，廢觸媒添加量為 10%~30% 之濕度自調節綠色材料，其抗彎強度分別為 174.69 kgf/cm<sup>2</sup>、95.11 kgf/cm<sup>2</sup>、38.03 kgf/cm<sup>2</sup>，當燒結溫度為 710℃時，其內部孔隙通道進行封閉，形成緻密化之濕度自調節綠色材料；另外，廢觸媒本身含有水分，根據 Itinoche 等人 (2006) 指出材料中含有水分使抗彎強度下降 (Itinoche at el, 2006)，故廢觸媒添加量為 40% 之濕度自調節綠色材料，其抗彎強度明顯下降至 7.97 kgf/cm<sup>2</sup>。

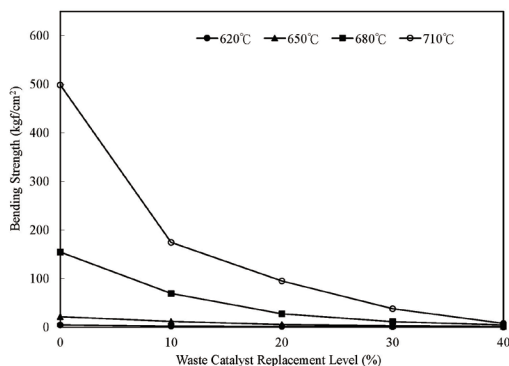


圖 11 濕度自調節綠色材料之抗彎強度

5.3 濕度自調節綠色材料之 X-ray 晶相繞射分析

圖 12 為濕度自調節綠色材料晶相種類之變化情形。圖中所示，當燒結溫度為 620~710℃時，CRT 廢面板玻璃為低結晶相，並根據 Fernandes et al. 等人 (2013) 指出結晶相形成和結晶程度與燒結溫度有相互關係，為濕度自調節綠色材料與結構變化之重要因素；另外，該燒結作用顯示無結晶相或石英相，表示濕度自調節綠色材料為低結晶化 (Fernandes et al., 2013)。由圖中顯示，當燒結溫度為 620~710℃時，CRT 廢面板玻璃廢觸媒添加量為 10~20% 之濕度自調節綠色材料，分別於 2θ 為 16°、37°、46°及 67°顯示 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 之繞射峰；另外，當燒結溫度為 620~710℃時，CRT 廢面板玻璃添加廢觸媒為 30-40% 之濕度自調節綠色材料分別於 2θ 為 6°、10°、12°、20°、24°及 27°顯示 SiO<sub>2</sub> 之繞射峰。

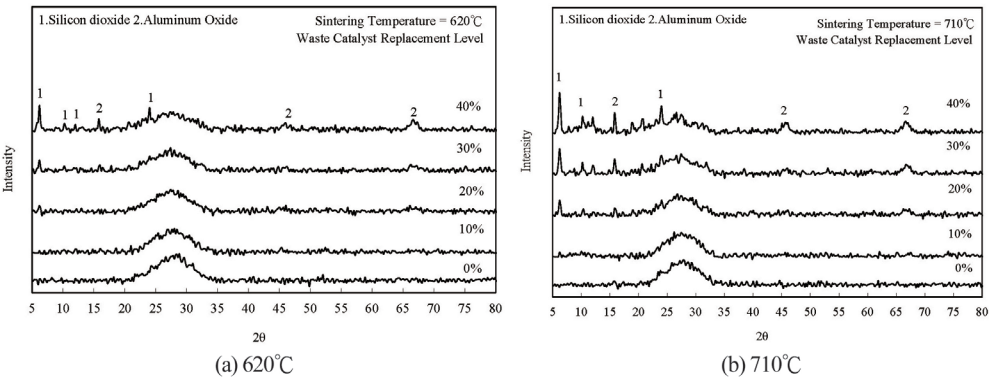


圖 12 濕度自調節綠色材料之 XRD 圖譜

5.4 濕度自調節綠色材料之孔洞特性

圖 13 為濕度自調節綠色材料之氮氣吸脫附曲線。由圖中顯示，當燒結溫度為 620℃時 (圖 12(a))，廢觸媒添加量為 10~40% 之濕度自調節綠色材料，氮氣等溫吸脫附曲線於相對壓力為 0.8 時，其吸附量分別為 2.4 cm<sup>3</sup>/g STP、3.5 cm<sup>3</sup>/g STP、11 cm<sup>3</sup>/g STP 及 14.3 cm<sup>3</sup>/g STP；當燒結溫度 710℃時 (圖 12(b))，廢觸媒添加量為 10~40% 時，其吸附量分別為 3 cm<sup>3</sup>/g STP、8.66 cm<sup>3</sup>/g STP、13.7 cm<sup>3</sup>/g STP 及 16.2 cm<sup>3</sup>/g STP。由上述可知，吸附量隨燒結溫度增加而有下降之現象，係因 SiO<sub>2</sub> 形成玻璃化物質以

黏滯流填補孔洞，故吸附量低。另外，由於廢觸媒主要成分為  $\text{SiO}_2$  與  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ，並根據 Maeda and Ishida 等人 (2009) 文獻指出  $\text{Al}_2\text{O}_3$  屬於中孔之結構，且中孔吸附能較大造成吸附含量增加 (Maeda and Ishida, 2009)，故吸附量隨廢觸媒添加量增加而有增加之現象。另外，根據 IUPAC 的報告中顯示，本研究濕度自調節綠色材料之氮氣等溫吸脫附曲線產生的遲滯環線像是屬於 H3 類型，H3 類型在中高  $P/P_0$  時，沒有任何吸附的限制，且具有較寬的遲滯環，此種遲滯現象通常出現在以平板排列造成的狹縫形狀的孔隙結構 (Ma et al., 2021)。

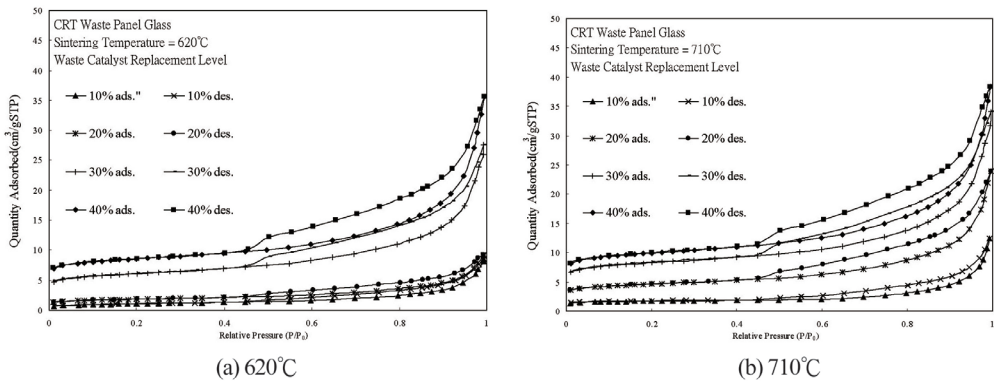


圖 13 濕度自調節綠色材料之氮氣等溫吸脫附曲線

圖 14 為濕度自調節綠色材料之孔徑大小與孔容積分佈曲線。當燒結溫度為  $620^\circ\text{C}$  時，廢觸媒添加量為 10%~40% 之濕度自調節綠色材料，其孔容積隨廢觸媒添加量之增加而明顯上升，係因廢觸媒為多孔之結構，故孔容積隨廢觸媒添加量增加而明顯上升；當燒結溫度為  $710^\circ\text{C}$  時，廢觸媒添加量為 10%~40% 之濕度自調節綠色材料，其孔容積有收縮之趨勢，係因矽酸鹽類經黏滯流機制形成玻璃化物質填補孔隙，故孔容積有明顯縮小之趨勢。綜合上述可知，濕度自調節綠色材料在吸脫附過程中，在不同相對壓力下的吸附量與孔徑大小的不同以及孔容積，產生的結果與氮氣等溫吸脫附曲線結果相符合。另外，由孔洞特性分析結果顯示，當燒結溫度為  $710^\circ\text{C}$  時，添加廢觸媒為 40% 之濕度自調節綠色材料，其濕度自調節綠色材料之比表面積和孔容積分別下降為  $31.94 \text{ m}^2/\text{g}$  和  $0.0512 \text{ cm}^3/\text{g}$ 。由結果顯示，燒結溫度達  $710^\circ\text{C}$  時，CRT 廢面板玻璃之  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Na}_2\text{O}$  成份於燒結過程中，熔融形成矽酸鹽玻璃化物質並填滿其內部孔隙

結構，使比表面積和孔容積下降，來降低吸附性能。另外，當燒結溫度為 710℃ 時，廢觸媒添加量為 10~40% 之濕度自調節綠色材料，其比表面積分別為 5.4 m<sup>2</sup>/g、15.22 m<sup>2</sup>/g、6.72 m<sup>2</sup>/g 和 2 31.94 m<sup>2</sup>/g，孔容積分別為 0.0179 cm<sup>3</sup>/g、0.0426 cm<sup>3</sup>/g、0.0343 cm<sup>3</sup>/g 和 0.0512 cm<sup>3</sup>/g。由上述可知，廢觸媒之比表面積和孔容積較高，故隨廢觸媒添加量增加，其比表面積和孔容積有增加之現象。

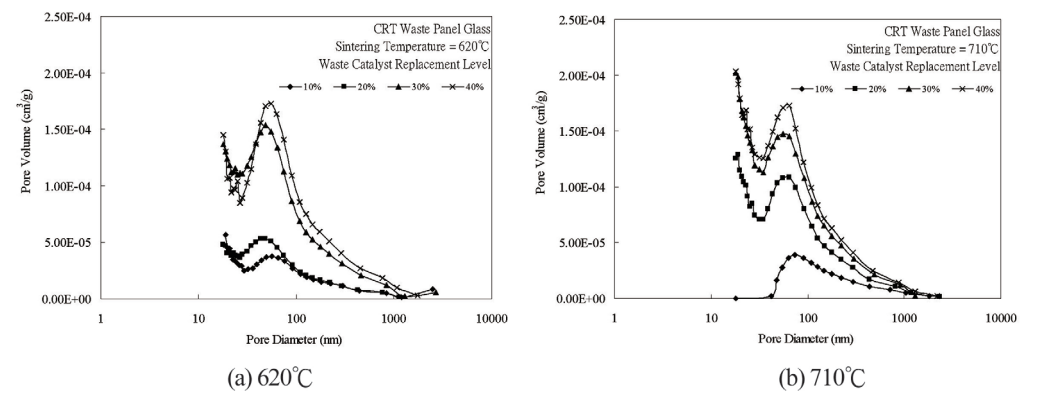


圖 14 濕度自調節綠色材料之孔徑大小分佈與孔容積分佈曲線

5.5 濕度自調節綠色材料之調濕性能

根據日本工業規範 JIS A 1470 之濕度應答法的實驗步驟，測試濕度自調節綠色材料在相對濕度 53~75% 和 75~53% 的吸放濕速率；先將濕度自調節綠色材料放入相對濕度 53% 的環境下達到飽和，再將相對濕度調至 75% 下進行吸濕過程，並於 24 小時連續監測其濕度自調節綠色材料之重量變化，其置入相對濕度 53% 下進行放濕過程，24 小時連續量測濕度自調節綠色材料之重量變化，最後求得單位面積於不同時間下的水蒸氣吸脫附曲線。圖 15 為濕度自調節綠色材料之 48 小時連續吸放濕試驗結果。由圖中可知，當燒結溫度提高為 710℃ 時，廢觸媒添加量為 10~40% 之濕度自調節綠色材料，24 小時之吸濕量降低至 31.12~120.24 g/m<sup>2</sup> 之間，係因燒結溫度為 710℃ 時，CRT 廢面板玻璃所含之 SiO<sub>2</sub> 經熔融形成玻璃晶相，藉由顆粒間以原子擴散方式，其表面能往內部自由能移動達到化學位能平衡，使玻璃相物質填補濕度自調節綠色材料內部孔洞，形成緻密化之濕度自調節綠色材料，故吸濕量明顯下降。另外，濕度自調



節綠色材料之吸放濕量會隨廢觸媒添加量增加而有所提升，係因廢觸媒成分為  $\text{Al}_2\text{O}_3$  其熔點溫度較高，無法形成燒結作用使濕度自調節綠色材料內孔隙較多。故於各燒結溫度下，濕度自調節綠色材料之 48 小時吸放濕量隨廢觸媒添加量增加而增加。

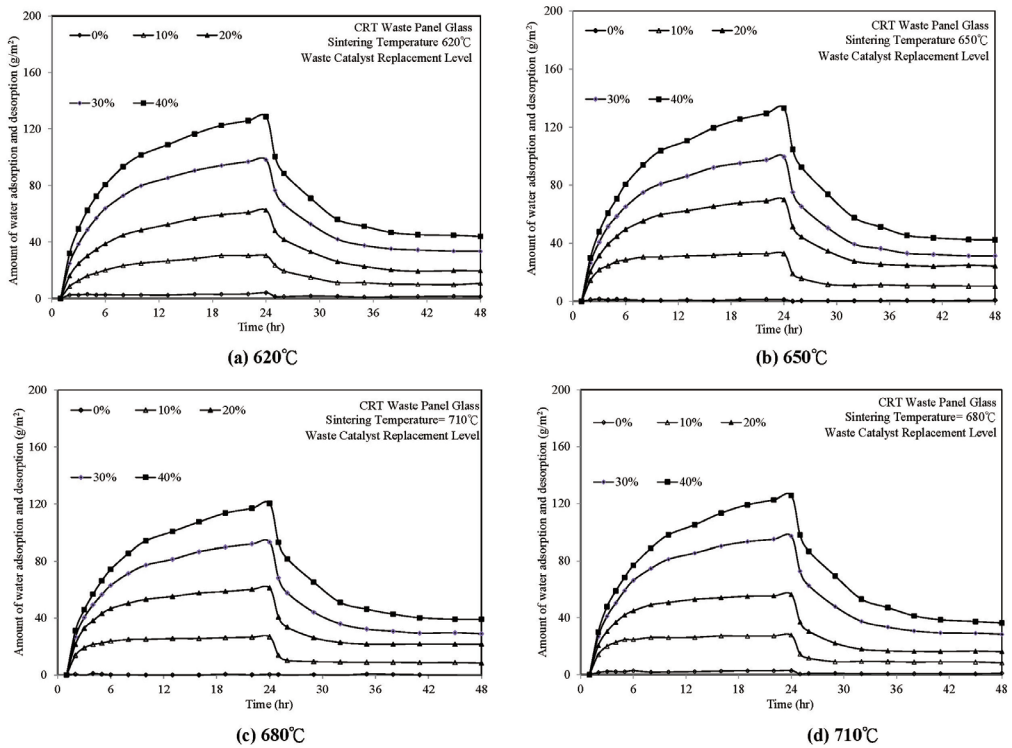


圖 15 濕度自調節綠色材料之 48 小時吸連續放濕試驗

## 5.6 環境及經濟效益評估

人類發展過程中，對環境的損害，除了排放大量溫室氣體，造成空氣污染及增強溫室效應外，所衍生之廢棄物問題亦不容忽視。廢棄物處理方式不論是焚化、掩埋或堆置，對空氣、水及土壤等所潛藏的污染，更影響到人類健康福祉；全球資源有限，若可從資源回收著手，使資源循環利用除可減輕環境污染問題，亦可減少垃圾運輸、焚化或掩埋等垃圾處理成本。表 7 為燒製濕度自調節綠色材料之成本評估。由表中得知，利用陰極射線管 (CRT) 顯示器產業之廢面板玻璃製備濕度自調節綠色材料可減輕



CRT 廢面板玻璃與廢觸媒之處置成本 (5,000~6,000 元 / 噸 )，亦可降低對環境之負荷，並可創造有價商品 (3,000~6,000 元 /m<sup>2</sup>)，達成環保署零廢棄之資材化之目標。相信未來在產、官、學界共同推廣下，兼具節能、環保等優點的濕度自調節綠色材料應用在建築工程尚將是可被預期的。

表 7 濕度自調節綠色材料之成本評估

| 項目        | 成本費用                          |
|-----------|-------------------------------|
| CRT 廢面板玻璃 | -6,000~7,000 元 / 噸            |
| 廢觸媒       | -2,000~3,000 元 / 噸            |
| 日本市售調濕建材  | 2,130~2,995 元 /m <sup>2</sup> |
| 台灣進口調濕材料  | 3,000~6,000 元 /m <sup>2</sup> |
| 本研究調濕建材   | 148~194 元 /m <sup>2</sup>     |

六、結論

本研究利用 CRT 廢面板玻璃做為基底材料，添加不同取代量 (0~40%) 之廢觸媒，並改變不同燒結溫度 (620℃ ~710℃ ) 等操作條件，將 CRT 廢面板玻璃和廢觸媒共同燒製濕度自調節綠色材料，並建立濕度自調節綠色材料之巨微觀分析。其分析結果如下：

- (一) 經 TCLP 溶出試驗結果顯示，CRT 廢面板玻璃及廢觸媒皆符合重金屬溶出量法規標準，故 CRT 廢面板玻璃及廢觸媒皆具資源化之潛力。
- (二) 當燒結溫度為 680℃ 至 710℃ 時，CRT 廢面板玻璃燒結體皆形成液相燒結，並於燒結過程中金屬熔化形成液相燒結其填滿顆粒間之孔隙，形成緻密化之濕度自調節綠色材料，故濕度自調節綠色材料有較高之抗彎強度。
- (三) 當燒結溫度於 710℃ 時，CRT 廢面板玻璃添加廢觸媒之濕度自調節綠色材料於低取代量為 10~20% 時，濕度自調節綠色材料有良好之機械特性。
- (四) 當燒結溫度 710℃，廢觸媒添加量為 10~40% 時，其吸附量分別為 3 cm<sup>3</sup>/g STP、8.66 cm<sup>3</sup>/g STP、13.7 cm<sup>3</sup>/g STP 及 16.2 cm<sup>3</sup>/g STP，顯示吸附量隨燒結溫度增加而有下降之現象，係因 SiO<sub>2</sub> 形成玻璃化物質以黏滯流填補孔洞。

- (五) 當燒結溫度為  $710^{\circ}\text{C}$  時，添加廢觸媒為 40% 之濕度自調節綠色材料，其濕度自調節綠色材料之比表面積和孔容積分別下降為  $31.94\text{ m}^2/\text{g}$  和  $0.0512\text{ cm}^3/\text{g}$ ，顯示廢觸媒之比表面積和孔容積較高，故隨廢觸媒添加量增加，其比表面積和孔容積有增加之現象。
- (六) 當燒結溫度提高為  $710^{\circ}\text{C}$  時，廢觸媒添加量為 10~40% 之濕度自調節綠色材料，24 小時之吸濕量介於  $31.12\text{--}120.24\text{ g/m}^2$ ，係因燒結溫度為  $710^{\circ}\text{C}$  時，CRT 廢面板玻璃所含之  $\text{SiO}_2$  經熔融形成玻璃晶相，藉由顆粒間以原子擴散方式，其表面能往內部自由能移動達到化學位能平衡，使玻璃相物質填補濕度自調節綠色材料內部孔洞，形成緻密化之濕度自調節綠色材料。
- (七) 綜合上述分析結果得知，濕度自調節綠色材料之吸放濕量會隨廢觸媒添加量增加而有所提升，係因廢觸媒成分為  $\text{Al}_2\text{O}_3$  其熔點溫度較高，無法形成燒結作用使濕度自調節綠色材料內孔隙較多。故於各燒結溫度下，濕度自調節綠色材料之 48 小時吸放濕量隨廢觸媒添加量增加而增加，致使濕度自調節綠色材料能保持良好之水蒸氣吸附特性。
- (八) 利用陰極射線管 (CRT) 顯示器產業之廢面板玻璃製備濕度自調節綠色材料可減輕 CRT 廢面板玻璃與廢觸媒之處置成本 ( $5,000\text{--}6,000$  元 / 噸)，亦可降低對環境之負荷，並可創造有價商品 ( $3,000\text{--}6,000$  元 /  $\text{m}^2$ )。
- (九) 本研究以 CRT 廢面板玻璃及廢觸媒進行 100% 廢棄物作為調濕材料，減少台灣進口調濕材料之費用，並低於日本市售調濕材料之售價，亦可 100% 回收再利用產業廢棄物，已達零廢棄、零掩埋資源化再利用之目標。

## 七、建議

- (一) CRT 廢錐管玻璃在進行燒結過程中，需要加裝空氣污染防治設備，將氧化鉛氣體進行捕捉與處理。
- (二) 廢觸媒若能進行再生處理，可能會使材料之比表面積提升，還會增加燒結體之調濕能力。

## 參考文獻

- 大畑敬・河村進 (2012)，各種建築材料の基本的吸放湿性能の評価，島根県産業技術センター研究報告，第 48 号。
- 王文生，廢玻璃容器資源化暨再生技術應用之研究，1999。
- 王傳勻 (2019)，珪藻土塗層調濕性能之研究，國立臺灣海洋大學河海工程學系，碩士論文。
- 王愷懃 (2010)，廢電子電器物品循環利用與物料供應系統之研究，國立台北科技大學環境工程與管理研究所，碩士論文。
- 台灣中油股份有限公司，加氫脫硫製程，<https://www.cpc.com.tw/cp.aspx?n=146>，2021。
- 行政院環保署 (2021)，<http://www.epa.gov.tw/mp.asp?mp=epa>。
- 林南西 (2013)，加氫脫硫廢觸媒中有價金屬鎳、鈳、鉬浸出之研究，國立成功大學資源工程學系碩博士班，碩士論文。
- 胡興中，觸媒原理與應用，高立圖書有限公司 (1998)。
- 張仁杰 (2011)，廢玻璃混合廢棄多孔材料燒製環保觸媒對環境調濕性能之研究，國立宜蘭大學環境工程研究所，碩士論文。
- 張仁杰，廢玻璃混合廢棄多孔材料燒製多孔陶瓷對環境調濕性能之研究，宜蘭大學環境工程研究所，碩士論文，2011。
- 陳宗恩，再生廢觸媒吸附染料之特性研究，義守大學土木與生態工程學系，碩士論文，2006。
- 陳宗輝，石油工業廢觸媒資源化之研究，雲林科技大學環境與安全工程技術研究所，碩士論文，1999。
- 黃俊傑 (2011)，廢觸媒再生與活化技術之研究，弘光科技大學環境工程研究所，碩士論文。
- 蔡宗勳 (2005)，都市垃圾焚化飛灰燒結之研究，國立中興大學環境工程研究所，碩士論文。

簡尚弘 (2009)，強塑劑及磁化水對廢觸媒自充填混凝土工程性質之影響，國立雲林科技大學營建工程系碩士班，碩士論文。

關家倫，映像管玻璃資源化途徑之探討及展望，第三屆台灣環境資源永續發展研討會，2001。

Álvarez-Ayuso E., Querol X., Plana F., Alastuey A., Moreno N., Izquierdo M., Barra M. (2008). Environmental, physical and structural characterisation of geopolymer matrixes synthesised from coal (co-) combustion fly ashes, *Journal of hazardous materials*, 154: p 175-183.

Arsllano lu H., Yara A. (2021). Recovery of molybdenum, cobalt and nickel from spent hydrodesulphurization catalyst through oxidizing roast followed by sodium persulfate leaching, *SM&T*, 28: e00286.

Chen M., Zhu L., Zhang Y., Zou J., Tang H. (2017). Cobalt particles encapsulated and nitrogen-doped bamboo-like carbon nanotubes as a catalytic and adsorptive bifunctional material for efficient removal of organic pollutants from wastewater, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5: p 5322-5330.

Fernandes H.R., Andreola F., Barbieri L., Lancellotti I., Pascual M.J., Ferreira, J.M. (2013). The use of egg shells to produce Cathode Ray Tube (CRT) glass foams, *Ceramics international*, 39: p 9071-9078.

He X., Zhang H., Qiu L., Mao Z., Shi C. (2021). Hygrothermal performance of temperature-humidity controlling materials with different compositions, *Energy Build*, 236, 110792.

Itinoche K.M., Özcan M., Bottino M.A., Oyafuso D. (2006). Effect of mechanical cycling on the flexural strength of densely sintered ceramics, *Dental Materials*, 22: p 1029-103.

Jansen K.M.B., Zhang M.F., Ernst L.J., Vu D.K., Weiss L. (2020). Effect of temperature and humidity on moisture diffusion in an epoxy moulding compound material, *Microelectron Reliab*, 107: 113596.

- Khan A.M., Fatima N., Hussain MS., & Yasmeen K. (2016). Biodiesel production from green seaweed *Ulva fasciata* catalyzed by novel waste catalysts from Pakistan Steel Industry, *Chinese journal of chemical engineering*, 24(8): p 1080-1086.
- Khudhair A.M., Farid M.M. (2004). A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials, *Energy Conversion and Management*, 45 (2): p 263-275.
- Kurimoto Y., Kano K., Sawabe O. (2004). Porosity and pore structures of sugi (*Cryptomeria japonica*) wood pyrolyzed under different temperatures and atmospheres, *Journal of the Japan Wood Research Society*, Volume 50.
- Ma K., Cui H., Zhou A., Wu H., Dong X., Zu F., Yi J., Wang R., Xu, Q. (2021). Mesoporous hydroxyapatite: Synthesis in molecular self-assembly and adsorption properties, *Microporous Mesoporous Mater*, 111164.
- Maeda H., Ishida E.H. (2009). Water vapor adsorption and desorption of mesoporous materials derived from metakaolinite by hydrothermal treatment, *Ceramics International*, 35: p 987-990.
- Otaka T., Nagata K. (2006). Performances of thermal energy storage unit using light weight soil for a green roof building air-conditioning system, In: *Proceedings of the 3rd Asian conference on refrigeration and air-conditioning*, p 753–756.
- Pant D., Pooja S. (2013). Chemical modification of waste glass from cathode ray tubes (CRTs) as low cost adsorbent, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 1(3): p 226-232.
- Rajesh S., Jantunen H., Letz M., Pichler-Willhelm S. (2011). Low Temperature Sintering and Dielectric Properties of Alumina-Filled Glass Composites for LTCC Applications, *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 9: p 52-59.

- Soltani N., Pech-Canul M.I., Bahrami A. (2013). Effect of 10 Ce-TZP/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanocomposite particle amount and sintering temperature on the microstructure and mechanical properties of Al/(10Ce-TZP/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) nanocomposites, *Materials & Design*, 50: p 85-91.
- Xie H.H., Gong G.C., Wu Y. (2017), Investigations of equilibrium moisture content with Kelvin modification and dimensional analysis method for composite hygroscopic material, *Constr Build Mater*, 139: p 101-113.
- Yuk H., Yang S., Kim Y.U., Yun B.Y., Wi S., Kim S. (2021). Analysis of the influence of moisture and temperature control according to the combination of porous sediment and MPCM, *J Ind Eng Chem*, 97: p 390-401.





廢(污)水處理類

## 沉浸式 UF 回收半導體封裝業晶背研磨 廢水實例

林政紀\*、吳銘昌\*\*、葉斯馨\*\*\*、陳進裕\*\*\*\*

### 摘 要

近年來由於全球氣候變遷因素極端氣候影響越明顯，且發生缺水的頻率也越來越頻繁，台灣在 2020 年發生近 50 幾年來無颱風，導致颱風季節降雨量偏低，中南部水情非常嚴重，因此產業水回收相對非常重要，可減少用水量維持產線運作，不致影響經濟發展。台灣半導體業上下游垂直整合完整，用水量相當可觀，在半導體封裝製程中大量使用純水作為晶背研磨清洗水，本廠晶背研磨廢水 (BGW, Back Grinding Wastewater) 每日廢水量約 830 CMD，具有低導電度  $<5 \mu\text{S}/\text{cm}$ 、高濁度約 10,000 NTU、二氧化矽 ( $\text{SiO}_2$ ) 濃度約 280 mg/L 的特性，粒徑分析 (particle size analyzer) 結果顯示 90% 廢水粒徑大於  $0.057 \mu\text{m}$ 。本廠選擇  $0.04 \mu\text{m}$  沉浸式 UF (Submerged Ultrafiltration) 進行過濾處理，回收率可達 90% 以上，每日回收量約 720 CMD，產水水質濁度低於 0.5 NTU，二氧化矽 ( $\text{SiO}_2$ ) 濃度降至 15 mg/L，UF 產水後搭配活性碳過濾塔及 RO (Reverse Osmosis)，RO 產水可供應工業水池作為純水製程水源，RO 濃縮水則可提供次級用水使用如冷卻水塔 (Cooling tower) 等，回收水做有效的使用，達到水循環再利用節省水資源。

132 沉浸式 UF 回收半導體封裝業晶背研磨廢水實例

【關鍵字】晶背研磨廢水、沉浸式UF、粒徑分析、濁度、二氧化矽

---

- |                        |              |
|------------------------|--------------|
| * 台灣美光記憶體股份有限公司台中二廠    | 資深工程師        |
| ** 台灣美光記憶體股份有限公司台中二廠   | 資深工程師 Leader |
| *** 台灣美光記憶體股份有限公司台中二廠  | 廠務處處長        |
| **** 台灣美光記憶體股份有限公司台中二廠 | 廠務處經理        |

## 一、前言

台灣位於亞熱帶區域天氣多變化，全年降雨量雖然高於世界平均值，但位置及季節分布非常不平均，近年來全球暖化造成極端氣候發生，台灣也明顯受到影響出現缺水的頻率是越來越頻繁，且台灣地區的水庫數量也幾近飽和，因此水資源在台灣地區相形之下非常重要。

台灣是全球科技重鎮半導體業蓬勃發展，上下游垂直整合完整包含 IC 設計、IC 製造和 IC 封裝，IC 製造和封裝測試廠皆在全球名列前茅。在半導體製程中有許多道會使用大量的純水清洗晶圓，將晶片上化學品及雜質清洗乾淨。IC 製造進入後段 IC 封裝製程中，第一道製程為晶背研磨和切割作業。晶背研磨係將晶片背面研磨到需要的晶片厚度之過程，目的是使晶圓厚度減小，以允許堆疊和高密度 IC 封裝 (黃曉鳳等, 2020)。研磨的同時會用純水進行清洗去除殘留在晶片上的雜質，因此會排放許多晶背研磨廢水 (BGW, Back Grinding Wastewater)。沉浸式超過濾 (Submerged Ultrafiltration, SUF) 中空絲膜 pilot 系統用來處理個案工廠之 BG 廢水；BG 廢水經沉浸式超過濾膜過濾後的水質極佳，優於生活次級用水及自來水供水標準。在不須增設任何水處理設備下，即可適用於冷卻水塔之水源補充及生活次級用水 (張岳永等, 2014)。沉浸式 UF 已廣泛運用有機生物處理系統中薄膜生物反應器 (MBR, Membrane Bio-Reactor)，其優點可以節省空間、產水再處理後可回收再利用。

因為大部分水中含有微量溶解性及懸浮性之二氧化矽，在逆滲透操作時若水中含有過量二氧化矽會造成嚴重的積垢問題，所以 UF 過濾程序對極微小物質的控制可說是相當有效，不但能夠降低水中微小物質濃度，進而延長逆滲透的使用期限，降低阻塞的機會，且能產生品質良好的去離子水以供製程使用。(林欣慧, 2005)

台灣水資源面臨了分布不均及使用量增加等問題，因此廢水回收是刻不容緩的議題，廢水回收可減少廢水排放量又可減少水資源的使用，進而減少產業對水的依賴程度。

## 二、系統水質水量介紹

本廠位於中部科學園區管理局后里園區內，主要從事 IC 封裝製程，法規要求製程用水回收率需達 85% 以上，全廠回收率需達 75% 以上，本廠自 2018 年起投入運轉，隨著產能增加所產出的晶背研磨製程廢水也逐漸增加如圖 1，以 2020 年 1~12 月廢水量最高達 836 CMD，且為本廠各股廢水中最大量如圖 2 所示，占總廢水量比例為 41%，需進行有效回收處理方可達成回收率要求。

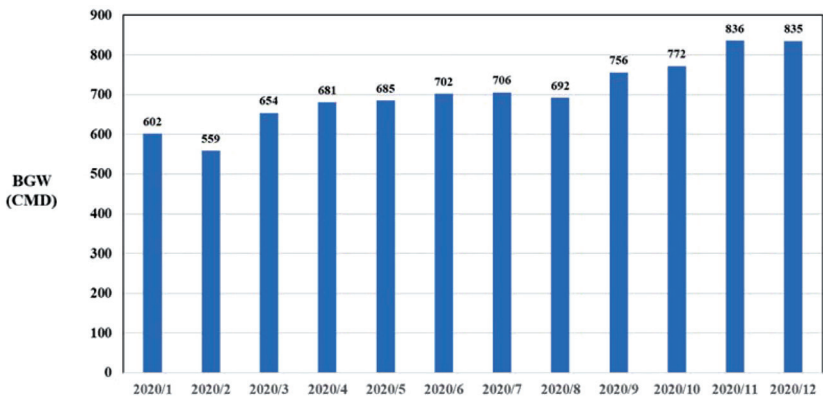


圖 1 晶背研磨廢水量

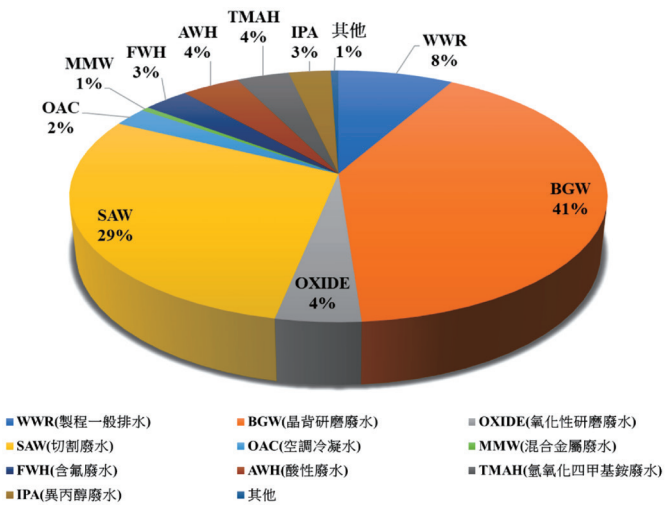


圖 2 廢水種類及比例

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

晶背研磨廢水主要為晶圓研磨清洗水。黏著膠帶 (Adhesive Tapes) 應用於半導體 (Semiconductor) 方面主要有晶背研磨 (Wafer Back Grinding) 及晶圓切割 (Dicing) 等兩大製程。晶背研磨膠帶主要功能是在晶背研磨期間能完全保護晶片表面，並防止研磨液的滲入而造成污染 (黃曉鳳等, 2020)。故主要成分為二氧化矽和膠帶有機成分，晶背研磨廢水中二氧化矽非常細，根據廢水粒徑分析結果顯示 90% 小於  $0.167\text{ }\mu\text{m}$  如圖 3，水質特性不易沉澱，分析懸浮固體 (SS) 時會穿透  $0.45\text{ }\mu\text{m}$  濾紙，無法量測其水中懸浮固體，如圖 4。

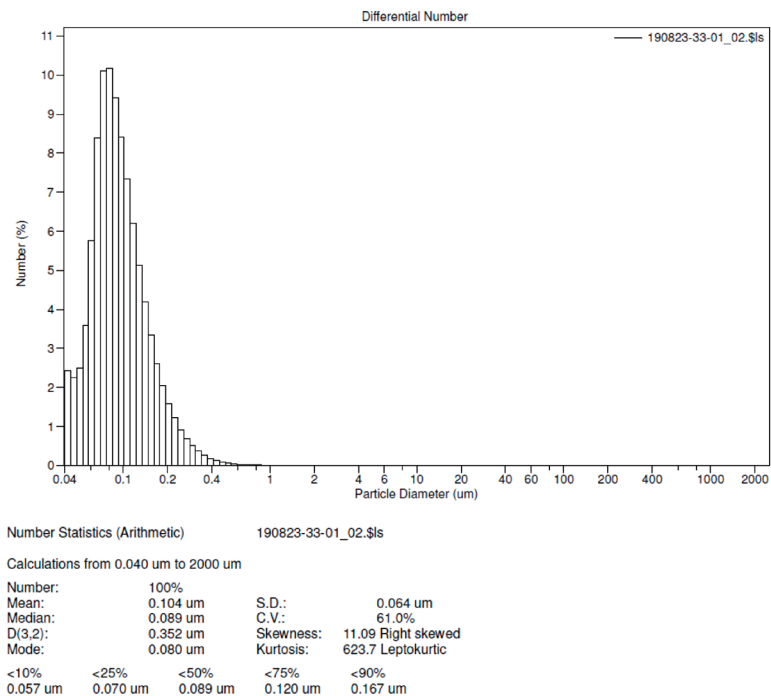


圖 3 晶背研磨廢水粒徑分析

本廠則以濁度作為量測的指標，其原水濁度約在 10,000NTU，因製程中因有使用膠帶，分析原水中總有機碳 (Total Organic Carbon, TOC) 值為 860 ppb，除此之外研磨製程無再添加任何化學品且使用超純水進行清洗晶圓，分析其廢水水質 pH=5~6，導電度  $<5\text{ }\mu\text{S/cm}$ 。顯示本廠晶背研磨廢水特性主要含有大量顆粒物質和部分有機成分物質。



圖 4 晶背研磨廢水外觀及穿透濾紙

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

### 三、系統處理流程及效果

本廠因應晶背研磨廢水量持續增加超過既有回收系統的負荷，於 2019 年規劃新增晶背研磨廢水回收系統，設計回收產水量達 720 CMD，主要處理流程如圖 5，各單元的處理功能及效果如下：

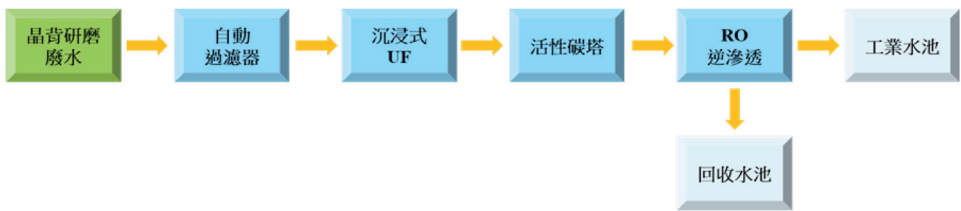


圖 5 晶背研磨廢水回收處理流程

#### 3.1 自動過濾器

採用 100  $\mu\text{m}$  不鏽鋼自動過濾器，可將  $>100\ \mu\text{m}$  顆粒過濾且雜質攔截避免刮傷後續 UF 膜處理單元。

### 3.2 沉浸式 UF

沉浸式 UF 處理單元為回收處理流程中最重要核心部分，本廠依據粒徑分析的結果顯示  $>90\%$  粒徑大於  $0.057\ \mu\text{m}$  (如圖 3)，故採用  $0.04\ \mu\text{m}$  孔徑、材質為 PVDF 中空纖維膜沉浸式 UF 作為過濾單元，每套配置 2 膜箱 (cassette) (如圖 6)、每一膜箱 12 組膜絲、分成 2 排膜絲，每套共 24 組膜絲，本單元共有 2 套合計 48 組膜絲，每套產水設定 20 CMH，且此型號 UF 膜在有機廢水使用上具有豐富的實績，但用於處理晶背研磨廢水實廠為首次運用，不同於有機廢水的使用而是將此沉浸式 UF 作為無機廢水過濾使用。



圖 6 沉浸式 UF 單膜箱外觀

#### 3.2.1 沉浸式 UF 處理機制

當原水經過自動過濾器後進入沉浸式 UF 後達到設定的液位後產水泵開始產水，以由外向內方式通過膜表面上的微細孔洞，過濾後的水則透過各套的產水泵送至產水槽，在產水泵出口有設置濁度計，如圖 7，監測產水的水質及追蹤 UF 膜產水狀況。

設計條件為  $95\%$  以上的時間產水濁度  $<1\text{NTU}$ ，若當濁度有異常時則須進行 UF 單元系統檢查。從系統正式運轉至今，進流水濁度平均  $10,000\ \text{NTU}$  經沉浸式 UF 過濾 (如圖 8) 處理前後水質外觀差異明顯，處理後水質透明清澈。沉浸式 UF 產水濁度超過  $95\%$  的時間皆低於  $0.5\ \text{NTU}$  (如圖 9)，濁度去除率可達  $99.9\%$  以上。





圖 7 UF 產水線上濁度計

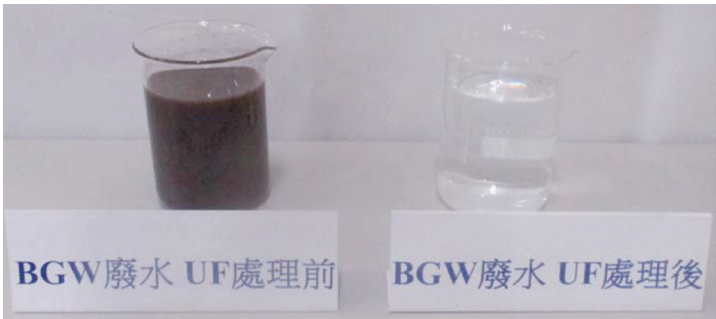


圖 8 BGW 廢水在沉浸式 UF 處理前後外觀

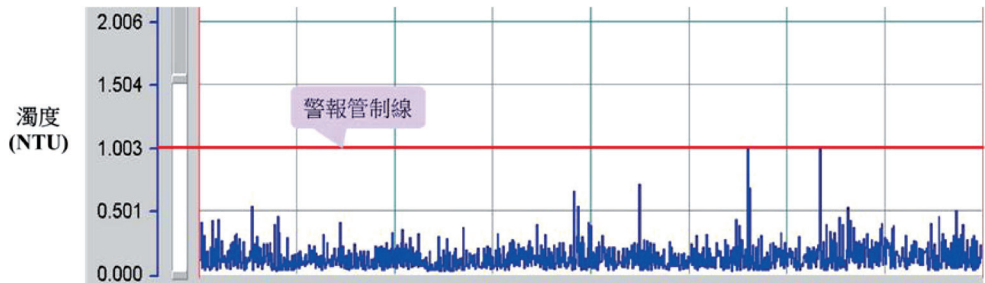


圖 9 沉浸式 UF 產水線上濁度監測 (2021/4/7~2021/4/17)

二氧化矽 ( $\text{SiO}_2$ ) 可由每週採樣分析結果如圖 10，進流濃度平均 280 mg/L，經 UF 過濾後可降至平均 15 mg/L 以下，去除率可達 94.6%。顯示沉浸式 UF 可有效去除晶背研磨廢水中之濁度和二氧化矽物質，此單元因無加入任何化學品，產水導電度仍為  $<5 \mu\text{S}/\text{cm}$ ，故其產水水質已優於回收至次級用水等級的水準 (如表 1)。

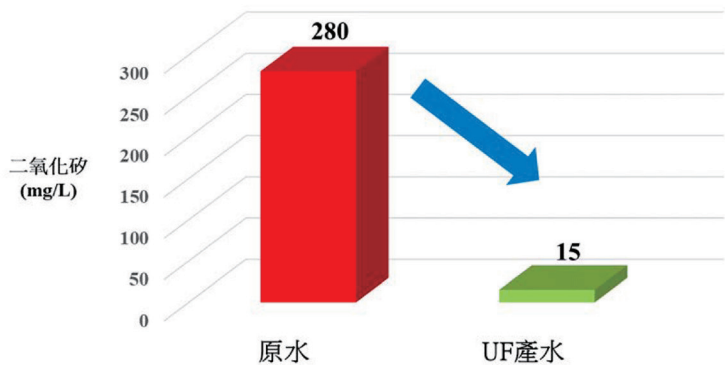


圖 10 沉浸式 UF 處理前後二氧化矽平均濃度

表 1 沉浸式 UF 產水水質與回收水水質標準比較

| 水質項目              | 沉浸式 UF 產水水質 | 回收水水質標準 |
|-------------------|-------------|---------|
| 導電度 ( $\mu$ S/cm) | <5          | <350    |
| 濁度 (NTU)          | <0.5        | <20     |
| 二氧化矽 (mg/L)       | 15          | <25     |

3.2.2 沉浸式 UF 膜系統操作

膜表面利用有效的自動清洗來維持膜的效率，其中包括反沖洗 (Backpulse)、維護性清洗 (Maintain clean) 及恢復性清洗 (Recovery clean) 等，本系統除恢復性清洗須採半自動方式進行外，其餘皆自動化清洗。上述之操作經實際廢水試車運轉後進行設定相關參數。

反沖洗是 UF 在過濾過程中懸浮固體物質逐漸累積附著在膜表面，以透膜壓差 (Transmembrane Pressure, TMP) 監測，以試車結果顯示本廠每產水 15 分鐘後隨即進行反沖洗，從而使 TMP 恢復到前一個產水週期中正常 TMP 值。反沖洗階段則須有從膜下方注入空氣對膜絲外表進行擦洗，空氣擦洗產生垂直方向的混合攪動對膜表面進行擦洗，有利於將污染物衝離膜絲進入膜池中。當每作完 7 次反沖程序後會第 8 次進行反洗排空，其主要目的為將累積在膜池中的污染物進行部分排空，避免膜池內污染物濃度累積過高。目前 2 套 UF 的 TMP 值如圖 11 皆在控制範圍內。

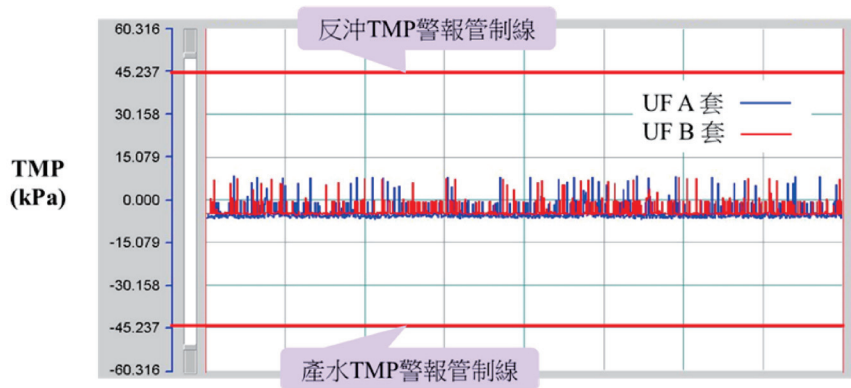


圖 11 沉浸式 UFA 套及 B 套 TMP 值 (2021/4/7~2021/4/17)

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

維護性清洗是一種清洗膜的方法來恢復膜的透水率，減少恢復性清洗頻率。維護性清洗包括膜池排水至膜絲頂部，進行反沖洗去除膜絲表面污染物，最後排空膜池。隨後膜池注入反沖洗水，同時注入化學品進入膜池，清洗濃度為 100 mg/L 次氯酸鈉。膜絲沉浸在清洗液中曝氣 30 秒浸泡約 5 分，曝氣和浸泡步驟反覆 3 次後清洗液排空，然後補充 BGW 原水至膜絲高度液位後再排空 1 次，膜池補水到設定液位後系統恢復繼續產水。

恢復性清洗是一種當膜透水率低於正常運行範圍時強度更高的清洗方式，恢復性清洗先將膜池停機，然後膜池中的水裝至膜絲頂部位置，然後進行反沖洗，並將膜池排空。然後膜池將注入清洗水，同時將相應的化學藥品注入到管路中，使膜池中的藥劑到一定的清洗濃度。清洗藥劑濃度分別為 500 mg/L 次氯酸鈉或 2,000 mg/L 檸檬酸。膜絲在恢復性清洗浸泡時約為 6 小時。次氯酸鈉用於去除有機和生物污堵，檸檬酸用於去除無機污堵。

### 3.3 活性炭塔

以防止離子交換樹脂及 RO 的劣化，對於餘氯的完全去除，設置活性炭為一有效方法 (莊順興等，2008)，通常 RO 進水前須維持 0.5~1.0 mg/L 餘氯 (林哲昌，2007)，本單元設置 2 塔活性炭、每塔充填 1,710 L 活性炭，採一用一備方式運轉，當其中一塔

產水時間或噸數到達需進行反洗時，另一塔可及時銜接繼續產水。主要功能為去除水中餘氯以保護 RO 膜免於破壞，活性碳產水出口安裝線上餘氯計以監測活性碳去除自由餘氯的效能，正式運轉至今皆自由餘氯皆低於 0.1 mg/L 符合 RO 膜使用規範。

### 3.4 RO 逆滲透處理單元

逆滲透裝置可去除水中有機物及降低水中固體物濃度。在半導體製程，晶片研磨或洗滌的程序，會產生含矽粒子的廢水。其中較大的矽粒子可利用 MF 或 UF 來去除，但一些溶於水中的小粒子，則要靠 NF 或 RO 方能去除 (王大銘, 2004)。本系統設置 2 套 RO，每套採二段式運轉，第一段 8 支 RO 膜，第二段 4 支 RO 膜每套 12 支 RO 膜，合計 24 支 RO 膜。進入 RO 單元前的水質雖然導電度  $<5 \mu\text{S/cm}$ ，但其產水二氧化矽濃度仍未達到工業水池進水標準，故利用 RO 逆滲透的機制去除水中的 TOC 和二氧化矽，TOC 採線上儀器即時監測產水水質，處理後平均皆低為 50 ppb 如圖 12，二氧化矽去除方面去除率可達 90% 以上。

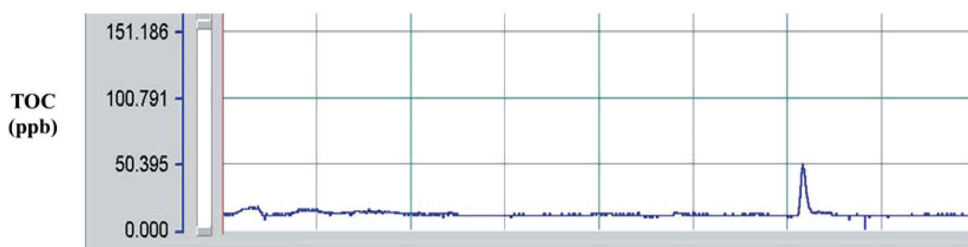


圖 12 RO 產水線上 TOC 監測 (2021/4/7~2021/4/17)

RO 產水水質如表 2 所示各項水質項目皆低於工業水池的標準，因此 RO 產水導入工業水池進入純水製程前段，回收晶背研磨廢水至製程用水。RO 濃縮水則回收至廠內次級用水：冷卻水水塔、洗滌塔、廁所沖洗水等使用。

表 2 RO 產水水質與工業水池水質標準比較

| 水質項目              | RO 產水水質 | 工業水池水質標準 |
|-------------------|---------|----------|
| 導電度 ( $\mu$ S/cm) | <5      | <350     |
| 濁度 (NTU)          | <0.2    | <3       |
| TOC (mg/L)        | <0.08   | <2       |
| 二氧化矽 (mg/L)       | 2       | <8       |

四、效益說明

本實廠利用沉浸式 UF 搭配活性碳塔及 RO 單元順利將晶背研磨廢水回收再使用，於 2020 年 8 月試車，2020 年 9 月起系統 24 小時運轉每月回收水量約 21,600 m<sup>3</sup>，估計每年回收量可達 262,800 m<sup>3</sup> 相當約 105 座標準游泳池，其中 66% 回收至工業水池進入純水製程，同時也為公司節省自來水和污水納管費用約 6,701,400 元 / 年。處理流程中僅在沉浸式 UF 單元每週維護性清洗時加入約 6.3 L 的 12% 次氯酸鈉外，並無再添加任何藥劑，原物料的使用非常節省。

系統啟用後讓廠內製程回收率持續優於法規的要求，且供給純水製程的水質優於自來水，亦減輕純水單元處理的負擔。在這水資源有限甚至用水車載水維持產線運作的情況下每噸水費用高達數十倍，每一滴水彌足珍貴，廢水回收再利用可減少水資源使用同時降低產線停產的風險和鉅額費用支出。

五、結論與建議

晶背研磨廢水為本廠中水量最大的廢水，若不能有效的回收處理將無法符合中部科學園區製程回收率的要求，放流水甚至會超出納管標準，產線將面臨到必須配合停產的風險。

本系統建置初期考量廢水特性，分析廢水中粒經分布選擇適當孔徑和材質的沉浸式 UF 作為重要過濾設備，將大部分的污染物去除。沉浸式 UF 首次應用於實廠晶背研磨廢水回收，經過至少 8 個月以上 24 小時連續運轉，濁度去除皆可達 99.9% 以上，

二氧化矽去除率 94.6%，產水透膜壓差 (TMP) 約為 -8 kPa 低於系統膜絲設計範圍值 -45 kPa，水回收率可達 90% 以上，顯示此沉浸式 UF 可有效處理晶背研磨廢水，且可依回收水的用途搭配其他處理單元做回收水有效的運用，同時也可減輕後續單元運轉負荷，但其膜絲操作及過濾程序考量有別以往使用在有機廢水處理豐富操作經驗，仍需要長期持續追蹤膜絲透膜壓差 (TMP)、產水濁度變化等。

本系統可將廢水回收製程超純水前段及次級用水使用，不僅提高廢水回收的價值，且在冬冬季節冷卻水塔使用回收水量偏低情況，可避免回收水無處去的狀況，充分達到廢水回收的效益、減少水資源的使用。

美光公司屬於國際級公司，身為地球公民的一份子，善盡企業社會責任，對於環境保護及水資源珍惜不遺餘力，投資相當多的金額進行廢水回收系統的建置和改善。雖然業界有很多晶背研磨廢水回收技術，各有其特殊性，然而本廠藉著此次晶背研磨廢水回收成功的經驗與業界先進分享，提供一個廢水回收實廠技術的參考。也期待所有產業界共同珍惜水資源的使用，讓產業永續發展，經濟和環保兼顧。

## 參考文獻

- 王大銘 (2004)，「薄膜分離技術於廢水處理之應用概述」，工安環保報導，<https://www.ftis.org.tw/cpe/download/she/issue23/current23.htm>
- 林欣慧 (2005)，利用 UF 配合鎂鹽前處理移除 CMP 廢水矽酸之研究，國立交通大學，p26。
- 林哲昌 (2007)，淨水薄膜前處理程序評估與應用，中興工程，第 96 期，p75-84。
- 莊順興、柯貴城、歐陽嶠暉 (2008)，超純水製造技術，工業污染防治，第 107 期，p145-163。
- 張岳永、張翼 (2014)，矽晶圓之晶背研磨廢水處理及回收再利用評估，工業安全衛生，第 299 期，p49-69。
- 黃曉鳳、簡佩琪 (2020)，「半導體用黏著膠帶技術」，材料世界網，<https://www.materialsnet.com.tw/DocView.aspx?id=44180>。





環境規劃與管理類

## 廢（污）水生物處理氮轉化過程

林志高\*、黃靖修\*\*、劉穎川\*\*\*、胡振中\*\*\*\*、陳文興\*\*\*\*\*、  
黃良銘\*\*\*\*\*、黎德明\*\*\*\*\*、藍茜茹\*\*\*\*\*

### 摘 要

當前氮的嚴格放流水標準已施行，工業廢水 / 民生污水處理廠必須增加或提升除氮功能。本文介紹廢水生物處理氮轉化過程，如硝化 / 反硝化、亞硝化 / 反亞硝化、和新穎的部分亞硝化 / 厭氧氨氧化。與硝化 / 反硝化相比，部分亞硝化 / 厭氧氨氧化（又稱 deammonification）主要優點有：不需要有機碳、能耗減少約 60%、污泥產量減少約 90%、以及降低溫室氣體（CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O）的排放。隨機 3 次採樣台北市迪化污水處理廠側流水包括濃縮過濾液、厭氧消化液、脫水過濾液，各項水質濃度偏低且變異大，但仍在典型值範圍內。污水處理廠不僅處理原廢水，而且包括含高濃度固體物、有機物、營養鹽的側流水。有鑑於此，為了節能減碳，生物除氮需要從高耗能的硝化 / 反硝化轉變為下一代新穎技術（Deammonification），如此可高效節能除氮，且能穩定操作。目前已有超過 200 座的 Deammonification 污水處理廠，且已成功地應用於側流處理，並有顯著的節能減碳效果；然因一些關鍵差異使主流處理面臨挑戰，但對應用於主流處理仍有莫大的期望，並有積極的作為，目前已有 2 個成功的主流厭氧氨氧化實廠在運行 - 奧地利的 Strass 污水處理廠和新加坡的樟宜污水處理廠。

【關鍵字】側流水、生物除氮、氮循環、硝化/反硝化、亞硝化/反亞硝化、部分亞硝化/厭氧氨氧化

---

|                              |        |
|------------------------------|--------|
| * 國立陽明交通大學                   | 榮譽退休教授 |
| * 滄安研究社股份有限公司                | 社長     |
| ** 美商傑明工程顧問(股)台灣分公司          | 總經理    |
| *** 美商傑明工程顧問(股)台灣分公司         | 協理     |
| **** 台北市政府工務局衛生下水道工程處迪化污水處理廠 | 廠長     |
| ***** 國立宜蘭大學                 | 教授     |
| ***** 國立成功大學                 | 教授     |
| ***** 利德邁環境科技股份有限公司          | 董事長    |
| ***** 利德邁環境科技股份有限公司          | 經理     |

## 一、前言

自工業革命以來，人類的各種行為活動如工業、農業等的無限制發展，導致地球氣候暖化、海洋酸化等 10 項變化有超越地球限界 (planetary boundaries) 之虞 (Rockström *et al.*, 2009)；其中，生物地球化學的氮循環系統，已大大超越了地球可承載的限界。我國身為地球村的一份子，當與世界各國共同維護地球寧靜和諧與互利共生，並使人們居住環境免於遭受污染破壞，致力維持生態體系平衡，追求永續發展。爰此，行政院環境保護署基於河川水體水質氨氮排放消耗水中溶氧影響水體品質，已於民國 106 年 12 月 25 日公告修正放流水標準，增列氨氮、總氮管制項目，以維水體品質。

## 二、氮循環 (Nitrogen Cycle)

氮循環在自然界和環境生物技術具有重要意義。Kuypers *et al.* (2018) 彙整相關文獻，綜述了當前的氮循環及其中的新發現。圖 1 顯示氮有 8 種氧化態 (oxidation states)，在有機氮 (Org-N) 與氨 (指總氨， $\text{NH}_4^+$  和  $\text{NH}_3$ ) 的相互轉化中，氧化還原狀態沒有變化，同為 -3。其他，微生物利用 14 個不連續的氧化還原反應 (圖 1，反應 ① 至 ⑭) 將跨越氧化還原狀態的氮化合物從氨 ( $\text{NH}_4^+$ , -3) 轉換為硝酸鹽 ( $\text{NO}_3^-$ , +5)。其他常見的氧化態是通過硝化或反硝化 (又稱「脫硝」) 反應形成的亞硝酸鹽 ( $\text{NO}_2^-$ , +3)。另一種為通過次硝酸 (nitroxyl,  $\text{HNO}$ , +1) 硝化或通過一氧化氮 ( $\text{NO}$ , +2) 反硝化形成的物種，一氧化二氮 ( $\text{N}_2\text{O}$ , +1)，這是一種強溫室氣體，它造成溫室效應的效果大約是二氧化碳 ( $\text{CO}_2$ ) 的 265 倍 (Stocker *et al.* IPCC 2013)。除此而外，地球大氣大約 78% 是零氧化態的氮氣 ( $\text{N}_2$ )，這種惰性型式的氮對植物的生長沒有直接作用；然而，許多不同的微生物可以通過固氮過程將  $\text{N}_2$  轉化成氨或硝酸鹽，即可被植物利用。參與固氮作用的固氮微生物，如光合藍細菌 (photosynthetic cyanobacteria) 和固氮菌 (*Azotobacter*) (圖 1，反應 ⑪)，它們主要與豆科植物有關。一些大氣中的氮也可以通過高溫燃燒或通過閃電電擊形成一氧化氮 ( $\text{NO}$ , +2) 和二氧化氮 ( $\text{NO}_2$ , +4)。

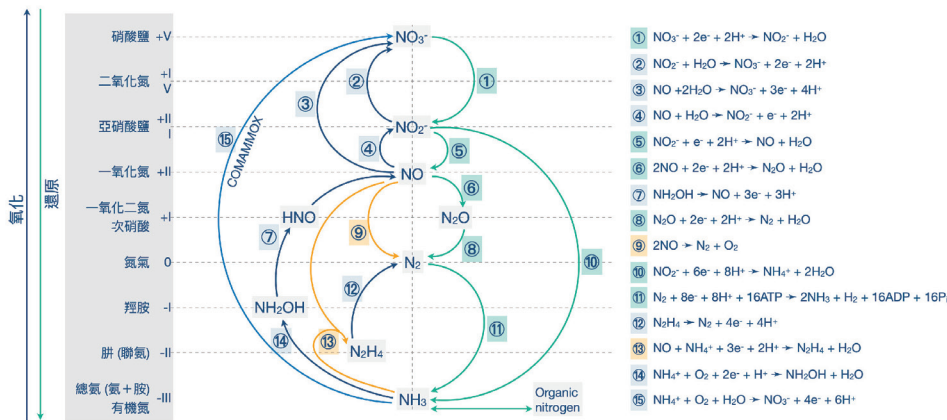


圖 1 氮循環 (參考 Kuypers et al. (2018) 繪製) 氧化反應 ② ③ ④ ⑦ ⑫ ⑭ ⑮ ; 還原反應 ① ⑤ ⑥ ⑧ ⑩ ⑪ ; 反應 ⑨ 為歧化反應 (disproportionation or dismutation); 反應 ⑬ 為反自身氧化還原或歸中反應 (comproportionation); 硝化反應 ⑭ ⑦ ④ ③ 或 ⑮ ; 反硝化反應 ① ⑤ ⑥ ⑧ ; 厭氧氨氧化反應 ⑤ ⑬ ⑫ 。

參與氮循環的氮轉化酶 (nitrogen-converting enzymes) 通常存在於非常多樣化的微生物中 (Kuypers et al., 2018), 其中許多酶最近才被發現。在過去十多年中, 研究發現了 4 種新反應, 分別是:

1. 羰胺 (hydroxylamine,  $\text{NH}_2\text{OH}$ , -1) 為硝化過程中的重要中間產物, 羰胺可氧化成一氧化氮 ( $\text{NO}$ , +2) (圖 1; 反應 ⑦)。
2. 一氧化氮 ( $\text{NO}$ , +2) 經「歧化反應」 (disproportionation or dismutation) 生成氮氣 ( $\text{N}_2$ ) 和氧氣 ( $\text{O}_2$ ) (反應 ⑨) (Ettwig et al., 2010)。
3. 肼 (又稱聯氨, hydrazine,  $\text{N}_2\text{H}_4$ , -2) 的合成, 此合成反應為反自身氧化還原或「歸中反應」 (comproportionation) (反應 ⑬) (Kartal et al., 2011)。
4. 聯氨氧化成氮氣 (反應 ⑫) (Kartal et al., 2011)。

此外, 還發現了許多新的代謝途徑, 如光養型亞硝酸鹽氧化 (phototrophic nitrite oxidation) (Griffin and Schink, 2007) 和完全氨氧化 (complete ammonia oxidation, comammox) 生成硝酸鹽 (反應 ⑮) (Daims et al., 2015, van Kessel et al., 2015); 其他鑑定出新的微生物, 有氨氧化古菌 (ammonia-oxidizing archaea, AOA) (Konneke et al., 2005)、反硝化真核有孔蟲 (denitrifying eukaryotic foraminifera) (Risgaard-

Petersen *et al.*, 2006) 和共生異營型固氮藍藻 (symbiotic heterotrophic nitrogen-fixing cyanobacteria) (Thompson *et al.*, 2012)。

### 三、主流與側流 (Mainstream and Sidestream)

相較於氮在自然生態系統中的回收和保存，廢水處理廠的生物除氮 (biological nitrogen removal, BNR) 旨在將氮轉化為氮氣，然後排放到大氣中。

現代典型廢水處理廠 (圖 2) 不僅處理廢水，對於因廢水處理產生的污泥亦需進行處理；前者稱為主流 (mainstream) 污水處理，包括前處理、初級處理、二級處理、三級處理等；後者則稱為側流 (sidestream) 污泥處理，包括污泥濃縮、污泥厭氧消化、污泥脫水等。側流處理產生的濃縮液、厭氧消化液、脫水液等，匯集後稱為「側流水」。

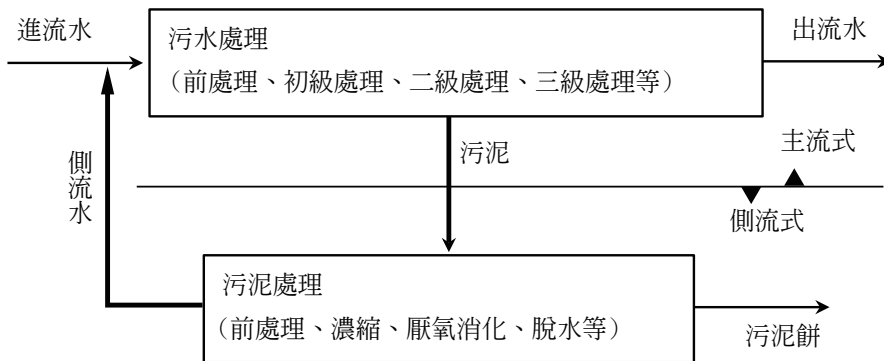


圖 2 典型廢水處理廠示意圖

典型重力濃縮液、厭氧消化液、帶濾式脫水過濾液，水質特性變化範圍大，表 1 顯示其懸浮性固體 (suspended solids, SS) 濃度為數百、數千甚至達萬 mg/L，有機物 (BOD) 濃度為數百至數千 mg/L，氮磷 (N, P) 濃度亦為數百至上千 mg/L。對比原污水 (都市污水)，側流水 (液) 含高濃度固體物、有機物、氮磷，且濃度為原污水的數十倍、數百倍不等，由表 1 可見，典型污水氨氮及總凱氏氮 (total Kjeldahl nitrogen, TKN = 氨氮 + 有機氮) 濃度分別約為 20 mg/L 和 35 mg/L，而側流水分別可達 1,300 mg/L 和 1,800 mg/L。本團隊曾針對迪化污水處理廠隨機進行 3 次側流水採樣，瞭解其為平順

地進行污泥處理，操作過程中匯入流量不等的回收水，致使側流水包括濃縮過濾液、厭氧消化液、脫水過濾液各項水質濃度偏低且變異大，但仍在典型值範圍內，也高於初沉池進流水濃度（參見表 1）。如前所述，當厭氧消化污泥經脫水後，所產生的脫水液與污泥濃縮液匯集，是為總側流水，必須返送至主流處理（此時之側流水又可稱為「側流迴流液」），換言之，污水處理廠不僅處理原廢水，而且應包括含高濃度固體物、有機物、營養鹽的側流水。有鑑於此，為了節能減碳，側流水可預先處理再返送，以降低主流處理的負荷。

表 1 側流水（液）水質特性

| 水質<br>mg/L                       | 典型污水處理廠 <sup>1</sup>          |           |              |           | 迪化污水處理廠 <sup>3</sup> (採樣日期 2020 年 3 月 26 日，7 月 7 日，8 月 24 日) |                                   |                    |                    |                    |                    |      |      |  |  |
|----------------------------------|-------------------------------|-----------|--------------|-----------|--------------------------------------------------------------|-----------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|------|------|--|--|
|                                  | 原污水                           | 側流水       |              |           | 初沉池進流水                                                       | 側流水                               |                    |                    |                    |                    |      |      |  |  |
|                                  |                               | 重力<br>濃縮液 | 厭氧<br>消化液    | 脫水<br>過濾液 |                                                              | 濃縮過濾液                             | 厭氧消化液 <sup>4</sup> |                    |                    | 脫水過濾液 <sup>6</sup> |      |      |  |  |
| 進流量<br>%                         | Q                             | 3-5       | 0.1-0.5      | 1-2       | Q                                                            | 三次總側流水流量分別為 Q 的 1.15%，1.36%，1.19% |                    |                    |                    |                    |      |      |  |  |
| SS                               | 130-390<br>(195) <sup>2</sup> | 100-350   | 1,000-11,500 | 100-2,000 | 163 83 98                                                    | 100 233 290                       | 26 <sup>4</sup>    | 13260 <sup>5</sup> | 26943 <sup>5</sup> | 23                 | 700  | 25   |  |  |
| BOD <sub>5</sub>                 | 133-400<br>(200)              | 60-400    | 500-5,000    | 50-500    | 260 133 116                                                  | 20 58 40                          | 4670               | -                  | -                  | -                  | 35   | 16   |  |  |
| COD                              | 500                           |           |              |           | 467 441 261                                                  | 3,930 335 300                     | 11,126             | 521                | 243                | 16,640             | 958  | 119  |  |  |
| TKN                              | 24-70<br>(34)                 | 20-70     | 850-1,800    | 410-730   | 28 29 47                                                     | 77 14 43                          | 859                | 986                | 1,075              | 889                | 38   | 763  |  |  |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N  | 14-41<br>(20)                 | 8-45      | 800-1,300    | 400-650   | 26 21 33                                                     | 14 9 36                           | 853                | 791                | 972                | 876                | 34   | 563  |  |  |
| NO <sub>x</sub> -N               | 0                             | 0-8       | 0            | 0         | <1 <1 <1                                                     | <1 <1 2.5                         | 2                  | 2.9                | 2.1                | 1.6                | 2.4  | 3.7  |  |  |
| PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> -P | 5.6                           | 2-7       | 100-350      | 50-180    | 1.6 1.6 2.7                                                  | 29.7 7.9 13.1                     | 62.9               | 165                | 261                | 49.4               | 11.4 | 14.2 |  |  |

<sup>1</sup> Metcalf & Eddy (2014); <sup>2</sup> 平均值; <sup>3</sup> 台北市政府迪化污水處理廠 (2021); <sup>4</sup> 厭氧消化液為 C 槽厭氧消化污泥離心後 (6,000 rpm, 10 min) 液體; <sup>5</sup> C 槽厭氧消化污泥; <sup>6</sup> 3 月 26 日以污泥脫水機進流厭氧消化污泥離心後 (6,000 rpm, 10 min) 液體為脫水過濾液。

許多氮轉化在廢水處理中特別重要，如硝化 / 反硝化 (nitrification/ denitrification)、亞硝化 / 反亞硝化（又稱「脫亞硝」）(nitritation/denitritation)、部分亞硝化 / 厭氧氨氧化 (deammonification)，它們之間的相關性和比較如圖 3 所示。又依據化學計量學 (stoichiometry) 和能量學 (energetics) 可推導出這些轉化的微生物生長的總反應，如表 2 所示，對於定量的基質（如有機物、氨氮），為能夠滿足微生物的能量、營養、和環境需求等，各種氮轉換的總反應式可用於計算其必須提供的化學物質的量（如碳源、氮源、氧）。此外，還可以估算系統中最終產物的量（如污泥產量）。

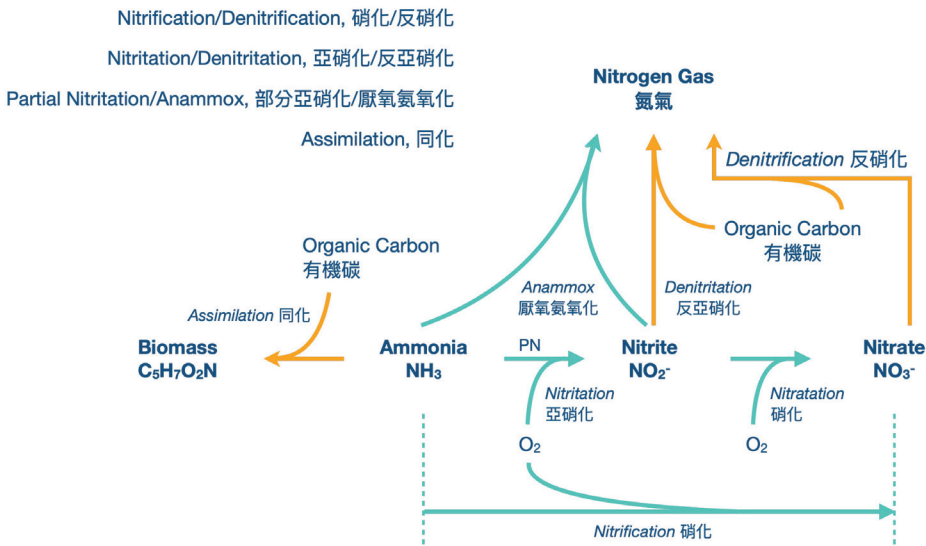


圖 3 應用於生物除氮的氮轉化過程 (參考 Winkler and Straka (2019) 繪製)

表 2 氮轉換的總反應

| 氮轉換    | 反應式                                                                                                                                                | $fs^0$ | b    |
|--------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|------|
| ㉑硝化    | $NH_4^+ + 1.904 O_2 + 0.055 CO_2 + 0.014 HCO_3^- \rightarrow 0.014 C_5H_7O_2N + 0.986 NO_3^- + 1.973 H^+ + 0.972 H_2O$                             | 0.08   | 0.11 |
| ㉒反硝化   | $C_{10}H_{19}O_3N + 6.509 NO_3^- + 6.509 H^+ \rightarrow 0.873 C_5H_7O_2N + 5.509 CO_2 + 3.254 N_2 + 0.127 NH_4^+ + 0.127 HCO_3^- + 9.382 H_2O$    | 0.58   | 0.05 |
| ㉓亞硝化   | $NH_4^+ + 1.429 O_2 + 0.044 CO_2 + 0.011 HCO_3^- \rightarrow 0.011 C_5H_7O_2N + 0.989 NO_2^- + 1.978 H^+ + 0.978 H_2O$                             | 0.082  | 0.11 |
| ㉔反亞硝化  | $C_{10}H_{19}O_3N + 10.409 NO_2^- + 10.409 H^+ \rightarrow 0.939 C_5H_7O_2N + 5.245 CO_2 + 5.204 N_2 + 0.061 NH_4^+ + 0.061 HCO_3^- + 11.266 H_2O$ | 0.63   | 0.05 |
| ㉕厭氧氨氧化 | $NH_4^+ + 1.155 NO_2^- + 0.122 CO_2 + 0.031 HCO_3^- \rightarrow 0.017 C_5H_7O_2N + 0.983 N_2 + 0.172 NO_3^- + 1.948 H_2O$                          | 0.174  | 0.05 |
| ㉖好氧異營化 | $C_{10}H_{19}O_3N + 9.02 O_2 \rightarrow 0.696 C_5H_7O_2N + 6.216 CO_2 + 0.304 NH_4^+ + 0.304 HCO_3^- + 6.304 H_2O$                                | 0.6    | 0.1  |

註：微生物利用電子供體基質進行合成代謝、基質分配，一部分電子  $fe^0$  傳遞給電子受體以產生能量，使其他的電子  $fs^0$  轉化進入微生物細胞以合成新細胞， $fs^0 + fe^0 = 1$ 。合成的細胞 ( $fs^0$ ) 因代謝 (maintenance) 或被捕食 (predation) 而衰減 (decay)，亦即  $fs^0$  中的一部分電子傳遞給電子受體再產生能量，剩餘的轉化為沒有生物活性的細胞殘餘物 (cell residual)，微生物衰減速率以  $b$  ( $d^{-1}$ ) 表示。  
假設：電子傳遞效率  $\varepsilon = 0.5$ ，細胞合成的氮源為氨氮，都市污水和合成細胞分子式分別為  $C_{10}H_{19}O_3N$  和  $C_5H_7O_2N$ ，水溫  $20^\circ C$ ，SRT 20 d。



## 四、硝化 / 反硝化 (Nitrification/Denitrification)

典型都市污水含氮物質常以 TKN( 總凱氏氮含氮 20 mg/L 和有機氮 15 mg/L) 型式存在。傳統污水處理廠如活性污泥法，主要去除有機碳 (BOD, COD)，並僅將 TKN 或氮氮轉化為硝酸鹽氮，無完整除氮功能。當前都市污水廠為了因應氮的嚴格放流水標準，傳統處理廠可升級為「前脫氮處理程序」(pre-denitrification)，即缺氧 / 有氧 (anoxic/oxic, AO) 系統，如圖 4 所示，包括缺氧槽、有氧槽、沉澱池、硝化液迴流、污泥迴流等，以進行生物除氮。AO 程序中的有氧槽行硝化，將氮氧化成硝酸鹽 ( $\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^-$ )；然後有氧槽的硝化液迴流至缺氧槽行反硝化，將硝酸鹽還原為氮氣 ( $\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO} \rightarrow \text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2$ )。近 30 年來，已經開發了許多分離式和整合式 (separate and integrated) 的硝化 - 反硝化程序應用於側流水處理，且已有許多成功的實例。主要的流程有 BAR/R-D-N (bioaugmentation reaeration/regeneration-denitrification-nitrification)、InNitri<sup>®</sup>、ScanDeNi<sup>®</sup>、序批式反應槽 (sequencing batch reactor, SBR)，詳見 Metcalf & Eddy (2014) 表 15-4。

硝化需要大量曝氣，以提供氧氣使氮氧化成硝酸鹽，每氧化 1 單位氮氮需消耗 4.43 單位氧氣 (4.43 g  $\text{O}_2$ /g  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ , 表 2 ㉔)，又硝化菌為自營菌 (autotrophs)，以無機碳 (鹼度) 為碳源，每氧化 1 單位氮氮需消耗 7.14 單位鹼度 (7.14 g  $\text{CaCO}_3$ /g  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ , 表 2 ㉔)，但反硝化反應每還原 1 單位硝酸鹽氮可產生 3.57 單位鹼度 (3.57 g  $\text{CaCO}_3$ /g  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ , 表 2 ㉔)，故 AO 程序處理都市污水每去除 1 單位氮僅需消耗 3.57 單位鹼度 (3.57 g  $\text{CaCO}_3$ /g  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ )，一般都市污水鹼度約為 200 mg  $\text{CaCO}_3$ /L，故鹼度是足夠的；若廢水鹼度不足，則需添加重碳酸鹽 (bicarbonate) 如碳酸氫鈉 (小蘇打)。

相較於硝化菌，反硝化菌 (denitrifiers) 屬於異營菌 (heterotrophs) 其電子供體和電子受體分別為有機碳和硝酸鹽，每還原 1 單位硝酸鹽氮需消耗 4.41 單位 BOD (4.41 g BOD/g  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ , 表 2 ㉔)，若進流水 BOD 足夠反硝化菌所需、且有餘，則有氧槽中的好氧異營菌 (aerobic heterotrophs) 可氧化所剩的 BOD；反之，若進流水 BOD/N 太低，致使反硝化反應有機碳不足，則需額外添加有機碳 (如甲醇)，以利硝酸鹽還原為氮氣。AO 程序中硝化液迴流比  $R^2$  (圖 4) 對出流水硝酸鹽影響極大，但  $R^2$  的變化對其

他的設計結果影響很小。典型的  $R^2$  值範圍是 4~6，如此，約有 80%~86% 的氮可被去除 (Rittmann and McCarty, 2020)。

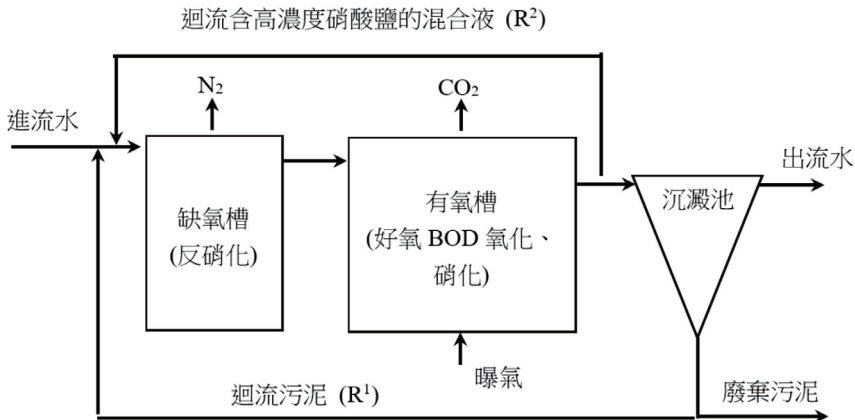


圖 4 AO 系統示意圖

AO 系統不但營運成本高 - 能耗費高 (曝氣、迴流硝化液和污泥)，且需藥品費 (如額外添加碳源)，而且還會產生溫室氣體一氧化二氮 ( $N_2O$ )，導致全球暖化更嚴峻。Winkler and Straka (2019) 指出通過監測和控制可優化硝化 / 反硝化，達到降低能耗和藥品的需求；雖如此，新穎的生物除氮技術如低耗能的亞硝化 (nitrification) 反應 ⑭⑦④ / 反亞硝化 (denitrification) 反應 ⑤⑥⑧ 和更節能的部分亞硝化 (partial nitrification) / 厭氧氨氧化 (anammox) 反應 ⑤⑬⑫，為目前最具前瞻性的替代方案。

## 五、亞硝化 / 反亞硝化 (Nitrification/Denitrification)

反硝化菌以亞硝酸鹽或硝酸鹽為電子受體，如前述，完全硝化需消耗  $4.43 \text{ g O}_2/\text{g N}$ ，而亞硝化只需  $3.27 \text{ g O}_2/\text{g N}$  (表 2 ㉔)；因此，亞硝化可以節省約 25% 的曝氣成本。此外，反亞硝化速率比反硝化快 1.5~2 倍，且有機碳消耗量 ( $2.74 \text{ g BOD/g NO}_2\text{-N}$ , 表 2 ㉔) 約可減少 40%。在污泥產量方面，亞硝化 ( $0.09 \text{ g biomass/g N}$ ) / 反亞硝化 ( $0.73 \text{ g biomass/g N}$ ) 與硝化 ( $0.11 \text{ g biomass/g N}$ ) / 反硝化 ( $1.08 \text{ g biomass/g N}$ ) 相比，分別減少了 ~21%/~33% (依據表 2 ㉔㉕㉖㉗計算)。

亞硝化 - 反亞硝化程序也已全面開發和實施，主要應用於側流處理，其流程有：BABE<sup>®</sup> (biological augmentation batch enhanced)，序批式反應槽 SHARON<sup>®</sup> (stable reactor system for high ammonia removal over nitrite)；Metcalf & Eddy (2014) 表 15-5 提供了這些程序的流程圖和相關的詳細資料。

亞硝化 / 反亞硝化 (短程硝化 / 短程反硝化) 主要的設計參數是污泥停留時間 (sludge retention time, SRT, d) 和氨氮體積負荷率 (ammonium-N loading rate, ANL, kg N/m<sup>3</sup>-d)。然而，短程生物除氮的關鍵控制因子為抑制亞硝酸鹽氧化菌 (nitrite-oxidizing bacteria, NOB) 且同時富集氨氧化菌 (ammonia-oxidizing bacteria, AOB)。許多不同策略可達成此目的，包括：交替缺氧和有氧、控制污泥停留時間、階梯式進料和間歇曝氣 (Gu *et al.*, 2018; Erdirencelebi and Koyuncu, 2017)、游離氨抑制、和游離亞硝酸抑制，其中後 2 種抑制效果取決於反應槽的 pH 值。間歇曝氣已廣泛應用於廢水處理廠，與傳統 BNR (硝化 / 反硝化) 相比，除氮效果好且節能效果佳 (Sun *et al.*, 2017)。NOB 活性在從缺氧狀態轉變為有氧條件後，會經歷一遲滯期 (Kornaros *et al.*, 2010)，且間歇曝氣致使溶氧 (DO) 降低，這控制方法可有效抑制 NOB 生長；同時，Blackburne *et al.* (2008) 也指出 AOB 的 DO 親和力大於 NOB，因此在低溶氧條件下操作，可使 NOB 生長最小化。但在低溶氧時，短程生物除氮易產生溫室氣體 N<sub>2</sub>O，這溫室氣體的產生抵消了能源消耗減少帶來的優勢 (Massara *et al.*, 2017)。

## 六、部分亞硝化 / 厭氧氨氧化 (Deammonification)

亞硝化 / 反亞硝化的進一步節能改進是將部分亞硝化與厭氧氨氧化結合使用 (partial nitrification with anammox (PNA)，又稱 deammonification、部分短程硝化 / 厭氧氨氧化)，如圖 5 (a) 所示。厭氧氨氧化菌使用亞硝酸鹽 (亞硝酸鹽由 AOB 產生) 作為電子受體將氨直接氧化為氮氣。在目前的應用中，部分 (大約一半) 的氨被 AOB 氧化成亞硝酸鹽，剩下的一半被厭氧氨氧化菌氧化；故 PNA 僅需消耗 1.75 g O<sub>2</sub>/g N，對比 AO 程序，可節省能耗 >60%。厭氧氨氧化菌和 AOB 皆是自營菌，因此 PNA 需要無機碳為碳源。依據表 2 ②和③計算，PNA 每去除 1 g N 需要消耗 2.10 g 鹼度 (2.10 g CaCO<sub>3</sub>/g N)。迪化污水處理廠總側流水 TKN 75 mg/L，計算 PNA 需消耗鹼度 158

mg/L as  $\text{CaCO}_3$ ，又為緩衝生物處理系統 pH，需要鹼度  $\sim 70$  mg/L as  $\text{CaCO}_3$ ，故總鹼度需要濃度為 230 mg/L as  $\text{CaCO}_3$ ，遠低於總側流水鹼度 420 mg/L as  $\text{CaCO}_3$ ；以此水質數據推估，則無需額外添加鹼度。

與傳統 BNR 相比，PNA 的主要優點是：1. 不需要有機碳；PNA 完全自營除氮，2. 曝氣能量減少約 60%，3. PNA 污泥產量 0.11 g biomass/g N，與 AO 程序相比，污泥產量減少約 90%（依據表 2 ㉑㉒㉓㉔計算），以及 4. 降低  $\text{CO}_2$  和潛在的  $\text{N}_2\text{O}$  排放，因為這 2 種氣體都不會在厭氧氨氧化代謝中產生 (Kartal *et al.*, 2010; Ma *et al.*, 2016)。

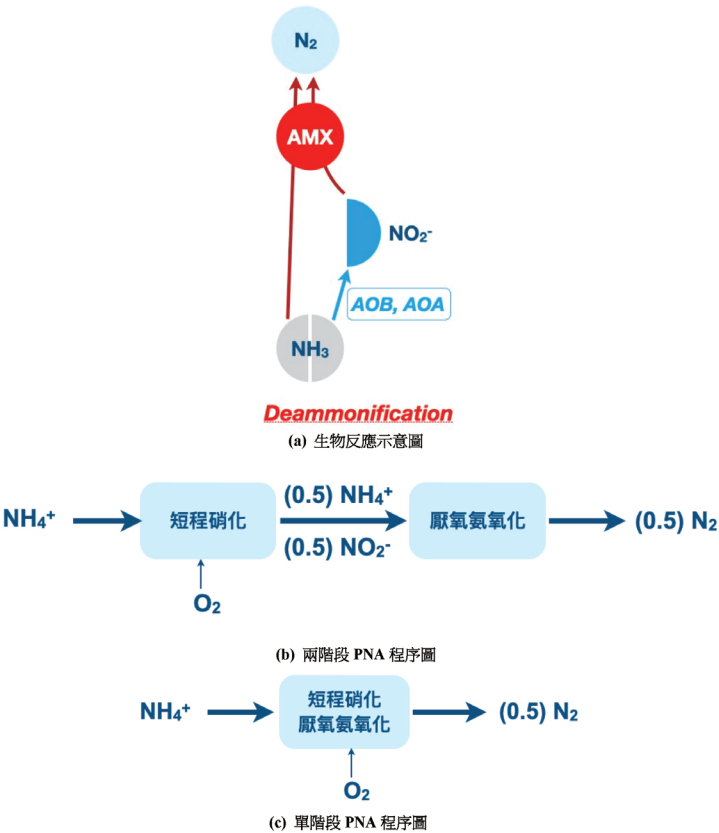


圖 5 部分短程硝化厭氧氨氧化 (PNA)

Cao *et al.* (2017) 和 Lackner *et al.* (2014) 統計指出，有超過 200 座的污水處理廠已成功地使用 PNA，主要是針對水溫  $>25^{\circ}\text{C}$ 、低 COD/N ( $<1$  g COD /g N) 且高氨氮

濃度 (500~1500 mg N/L) 的污水。PNA 程序可以設計為單階段或 2 個階段。在 2 階段程序 (圖 5 (b))，約一半的氨被 AOB 氧化成亞硝酸鹽，所得亞硝酸鹽和剩餘的氨進入 anammox 反應槽。第一階段是一個亞硝化反應槽，由於側流水溫度較高，致使 AOB 比 NOB 有更高的生長速率 (Lackner *et al.*, 2014; Hellinga *et al.*, 1998)。在隨後的厭氧氨氧化反應槽中，由於缺氧，有利於 anammox 菌生長，而不利於 AOB 和 NOB 生長。單階段 PNA (圖 5 (c))，亞硝化和厭氧氨氧化結合在一個反應槽中，條件因生物膜梯度而異，例如：移動床生物膜反應槽、顆粒污泥和旋轉生物接觸槽 (Lackner *et al.*, 2014)，生物膜的外層含有產生亞硝酸鹽的 AOB，內層為缺氧或厭氧狀態，致使 anammox 在內層中進行厭氧氨氧化反應。側流 PNA 是一種低能耗方法，應用於側流處理可以減少氮迴流至處理廠前端。然而，由於側流水氨氮和磷酸鹽濃度高，亦適合通過物理 / 化學方法或微生物電化學電池回收氮。

由於 PNA 成功地應用於側流處理，且有顯著的節能減碳效果，雖然因一些關鍵差異使主流處理面臨挑戰，但人們對 PNA 應用於主流處理仍有莫大的期望，並有積極的作為。針對主流處理的差異和挑戰，Winkler and Straka (2019) 整理了相對應之解決方法：

1. COD/N 比率較高，導致異營菌生長過度，因此不選擇生長較慢的厭氧氨氧化菌。針對此，可以在 PNA 處理之前預先除碳，以降低 COD/N 比例。
2. 氨負荷太低，限制了厭氧氨氧化菌和 AOB 的生長和富集，這可以使用膜生物反應槽或生物膜 / 顆粒系統以貯留更多的生物質，以解決因低水溫及低氨氮濃度致使厭氧氨氧化菌活性降低的問題 (Laureni *et al.*, 2016)。
3. 溫度較低時，較不利於厭氧氨氧化菌和 AOB 的生長，但利於 NOB 的生長，可以通過不涉及溫度的機制來抑制 NOB 生長，如控制 DO、多段進水和間歇曝氣 (Erdirencelebi and Koyuncu, 2017)。
4. 主流處理氨的排放標準值遠低於側流處理的排放值 (Cao *et al.*, 2017)；採用嚴謹的程序控制可以克服此障礙 (Jiang *et al.*, 2018)。

藉由以上所述的解決方法，已有研究實驗證明 PNA 程序可成功地應用於主流處理 (Cao *et al.*, 2017)。

目前奧地利的 Strass 污水處理廠和新加坡的樟宜污水處理廠已運行 PNA 程序於主流處理 (表 3)。Strass 污水處理廠進流水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  15~40 mg/L、COD/N 9.2 以 DEMON 側流處理的厭氧氨氧化顆粒植種於主流處理系統，並以水力旋流器選擇厭氧氨氧化顆粒將其保留在系統；應用間歇曝氣可穩定抑制 NOB (Wett *et al.*, 2015)。樟宜污水處理廠採用多段進水活性污泥法 (step feeding activated sludge)，進流水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  31 mg/L、COD/N ~7，以交替有氧 / 缺氧條件來抑制 NOB，雖然該廠因氣候緣故，污水溫度可維持在 30℃ 左右，且污泥富含厭氧氨氧化菌，但經由氮平衡分析，發現厭氧氨氧化比反硝化僅多占 10.4% (曹 2017)。表 3 顯示 Strass 污水處理廠和樟宜污水處理廠應用 PNA 程序所得操作參數，水力停留時間分別為 5.6 和 5.7 h、氮體積負荷率 (nitrogen loading rate, NLR) 分別為 0.19 和 0.17 kg N/m<sup>3</sup>/d、總氮去除率則分別為 82 和 88%。Winkler and Straka (2019) 指出這些處理廠證明了主流 PNA 的潛力，但其為特例，仍然需要進一步了解才能廣泛應用。

表 3 PNA 程序應用於實廠的設計操作參數及結果

| 污水處理廠                        | Strass (奧地利)                                                                                 | 樟宜 (新加坡)                                                                                                  |
|------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| PNA 程序                       | 單段 one stage                                                                                 | 多段進水                                                                                                      |
| 池體積 (m <sup>3</sup> )        | 10,460                                                                                       | 56800                                                                                                     |
| HRT (h)                      | 5.6                                                                                          | 5.7                                                                                                       |
| 水溫 (°C)                      | 9-15                                                                                         | 30                                                                                                        |
| pH                           | NA                                                                                           | 6.5-7.3                                                                                                   |
| 進流水 (mg/L, C/N)              | $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 15-40<br>COD/N 9.2                                                  | $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 30.8<br>$\text{NO}_2^-\text{-N}$ 0.4<br>$\text{NO}_3^-\text{-N}$ 0.7<br>COD/N ~7 |
| NLR (kg N/m <sup>3</sup> /d) | 0.19                                                                                         | 0.17                                                                                                      |
| NRR (kg/m <sup>3</sup> /d)   | 0.15                                                                                         | 0.15                                                                                                      |
| 總氮去除率 (%)                    | 82                                                                                           | 88                                                                                                        |
| 出流水 (mg/L)                   | $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 2.7<br>$\text{NO}_2^-\text{-N}$ 2.0<br>$\text{NO}_3^-\text{-N}$ 1.9 | $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 1.7<br>$\text{NO}_2^-\text{-N}$ 1.2<br>$\text{NO}_3^-\text{-N}$ 1.1              |

註：NLR: 氮體積負荷率 (nitrogen loading rate)。NRR: 氮體積去除率 (nitrogen removal rate)

## 七、完全氨氧化 (COMAMMOX)、厭氧甲烷氧化 (N-damo)、硫酸鹽還原自營反硝化硝化一體化 (SANI)

Daims *et al.* (2015) 和 van Kessel *et al.* (2015) 同時發現了能夠完全氧化氨的微生物 ( $\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^-$ ; complete ammonia oxidation, COMAMMOX), Dimitri Kits *et al.* (2017) 指出完全氨氧化菌對氨表現出極高的親和力, 若 comammox 產生硝酸鹽, 則不利於 PNA 程序。然而, Dimitri Kits *et al.* (2017) 也指出其早期研究結果顯示 Comammox 在亞硝酸鹽氧化方面效率不高, 其功能如氨氧化菌, 此外, 推測 Comammox 可以將硝酸鹽異化還原為亞硝酸鹽, 這有利於 Anammox 系統。

最新研究顯示, 主流厭氧氨氧化可與氨氧化古細菌 (ammonium oxidizing archaea, AOA) 或硝酸鹽依賴型厭氧甲烷氧化 (nitrate-dependent anaerobic methane oxidizing, N-damo) 古細菌結合。AOA 功能和 AOB 一樣, 可將氨氧化成亞硝酸鹽, 但它們對氨和氧具有更高的親和力 (Limpiyakorn *et al.*, 2013), 因此, 可能更適用於主流 PNA。N-damo 可以用甲烷作為電子供體將硝酸鹽還原為亞硝酸鹽, 這可能為 Anammox 提供比 AOB 更可靠的亞硝酸鹽供應, 並且不需要抑制 NOB (van Kessel *et al.*, 2018)。N-damo 所需甲烷可以來自有機物的污水厭氧處理或污泥厭氧消化, 如此將減少能量回收; 但如果與厭氧氨氧化結合使用, 與傳統 BNR 相比, 曝氣能量仍會降低。此外, 甲烷的純化處理和氣提 (將溶解的甲烷轉化為氣體) 是成功應用的潛在瓶頸 (Winkler *et al.*, 2015)。除了亞硝酸鹽外, 研究發現小分子有機物、硫酸錳和鐵 (III) 亦可為厭氧氨氧化的電子受體 (Li *et al.*, 2017), 使得厭氧氨氧化的應用更寬廣。

除厭氧氨氧化外, 另一種自營除氮技術是硫酸鹽還原、自營反硝化、硝化一體化 (sulfate reduction, autotrophic denitrification, nitrification integrated, SANI)。SANI 技術已在香港實施, 其中因廁所用海水沖洗, 導致污水中硫酸鹽濃度高 (500 mg S/L)。有機碳以硫酸鹽為電子受體氧化 (而不以能耗密集型曝氣), 因此形成的硫化物用於將硝酸鹽 (來自硝化反應槽) 還原為氮氣 (Wang *et al.*, 2009)。



## 八、結語

所有生物除氮技術都有其優點和缺點，它們不是相互排斥的，如處理高氮廢水的程序可以依序串連接低氮廢水處理程序。若僅以一程序（如 AO 程序 - 圖 4、PNA 程序 - 圖 5）生物除氮系統通常會節省初設成本（capital cost），但它可能不如結合 2 種或以上不同程序（如 PNA 程序串連 AO 程序）那麼省能或穩定。展望未來，生物除氮需要從高耗能的硝化 / 反硝化轉變為下一代新穎技術。污水處理以「部分短程硝化 / 厭氧氨氧化」Deammonification 程序，可高效節能除氮，且能穩定操作，符合環保法規更嚴格的氮排放標準。

## 參考文獻

- 曹業始 (2017) 200,000 m<sup>3</sup>/d 主流部分短程硝化和氨氮厭氧氧化：反應器構型，運行和與傳統的生物脫氮工藝的比較。污水處理廠提標改造高級研討會 9 月 16-19 日 2017。鑫江溫德姆酒店，青島。
- Cao, Y., M.C.M. van Loosdrecht, G.T. Daigger (2017) Mainstream partial nitrification-anammox in municipal wastewater treatment: status, bottlenecks, and further studies. *Appl Microbiol Biotechnol*, 101:1365-1383.
- Blackburne, R., Z. Yuan, J. Keller (2008) Partial nitrification to nitrite using low dissolved oxygen concentration as the main selection factor. *Biodegradation*, 19:303-312.
- Daims, H. *et al.* (2015) Complete nitrification by *Nitrospira* bacteria. *Nature*, 528:504-509.
- Dimitri Kits, K. *et al.* (2017) Kinetic analysis of a complete nitrifier reveals an oligotrophic lifestyle. *Nature*, 549:269-272.
- Erdirencelebi, D., S. Koyuncu (2017) Operational strategies and environmental conditions inducing aerobic denitrification in short-cut biological nitrogen removal at side-line treatment. *J Environ Sci Heal Part A*, 52:607-615.

- Ettwig, K. F. *et al.* (2010) Nitrite-driven anaerobic methane oxidation by oxygenic bacteria. *Nature*, 464:543-548.
- Griffin, B. M., J. Schott, B. Schink (2007) Nitrite, an electron donor for anoxygenic photosynthesis. *Science*, 316:1870-1870.
- Gu, J., Q. Yang, Y. Liu (2018) A novel strategy towards sustainable and stable nitrification-denitrification in an A-B process for mainstream municipal wastewater treatment. *Chemosphere*, 193:921-927.
- Jiang, H., G. Liu, Y. Ma, X. Xu, J. Chen, Y. Yang, X. Liu, H. Wang (2018) A pilot-scale study on start-up and stable operation of mainstream partial nitrification-anammox biofilter process based on online pH-DO linkage control. *Chem Eng J*, 350:1035-1042.
- Hellenga, C., A. Schellen, J. Mulder, M.C.M. van Loosdrecht, J. Heijnen (1998) The SHARON process: an innovative method for nitrogen removal from ammonium-rich waste water. *Water Sci Technol*, 37:135-142.
- Kartal B., J.G. Kuenen, M.C.M. van Loosdrecht (2010) Sewage treatment with Anammox. *Science*, 328:702-703.
- Kartal, B. *et al.* (2011) Molecular mechanism of anaerobic ammonium oxidation. *Nature*, 479:127-130.
- Konneke, M. *et al.* (2005) Isolation of an autotrophic ammonia-oxidizing marine archaeon. *Nature*, 437:543-546.
- Kornaros M, S.N. Dokianakis, G. Lyberatos (2010) Partial nitrification/ denitrification can be attributed to the slow response of nitrite oxidizing bacteria to periodic anoxic disturbances. *Environ Sci Technol*, 44:7245-7253.
- Kuypers, M.M.M., H.K. Marchant and B. Kartal (2018) The microbial nitrogen-cycling network. *Nature Reviews Microbiology*, 16:263-276.

- Lackner, S., E.M. Gilbert, S.E. Vlaeminck, A. Joss, H. Horn, M.C.M. van Loosdrecht (2014) Full-scale partial nitrification/Anammox experiences - an application survey. *Water Res*, 55:292-303.
- Laureni, M., P. Falås, O. Robin, A. Wick, D.G. Weissbrodt, J.L. Nielsen, T.A. Ternes, E. Morgenroth, A. Joss (2016) Mainstream partial nitrification and anammox: long-term process stability and effluent quality at low temperatures. *Water Res*, 101:628-639.
- Li, X., Y. Huang, H. Liu, C. Wu, W. Bi, Y. Yuan, X. Liu (2017) Simultaneous Fe (III) reduction and ammonia oxidation process in Anammox sludge. *J Environ Sci*, 64:42-50.
- Limpiyakorn, T., M. Fühacker, R. Haberl, T. Chodanon, P. Srithep, P. Sonthiphand (2013) AmoA-encoding archaea in wastewater treatment plants: a review. *Appl Microbiol Biotechnol*, 97:1425-1439.
- Ma, B., S. Wang, S. Cao, Y. Miao, F. Jia, R. Du, Y. Peng (2016) Biological nitrogen removal from sewage via Anammox: recent advances. *Bioresour Technol*, 200:981-990.
- Massara, T.M., S. Malamis, A. Guisasola, J.A. Baeza, C. Noutsopoulos, E. Katsou (2017) A review on nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) emissions during biological nutrient removal from municipal wastewater and sludge reject water. *Sci Total Environ*, 596-597:106-123.
- Metcalf & Eddy (2014) *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*. 5<sup>th</sup> Edition, McGraw-Hill, New York.
- Risgaard-Petersen, N. et al. (2006) Evidence for complete denitrification in a benthic foraminifer. *Nature*, 443:93-96.
- Rittmann, B.E., P.L. McCarty (2020) *Environmental Biotechnology: Principles and Applications*. Second Edition, McGraw-Hill, New York.
- Rockström, J. et al. (2009) A safe operating space for humanity. *Nature*, 461:472-475.
- Stocker, T. F. et al. IPCC (2013) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Cambridge Univ. Press, 2013).

- Sun, Y., Y. Guan, M. Pan, X. Zhan, Z. Hu, G. Wu (2017) Enhanced biological nitrogen removal and  $N_2O$  emission characteristics of the intermittent aeration activated sludge process. *Rev Environ Sci Biotechnol*, 16:761-780.
- Thompson, A. W. et al. (2012) Unicellular cyanobacterium symbiotic with a single-celled eukaryotic alga. *Science*, 337:1546-1550.
- van Kessel, M.A. et al. (2015) Complete nitrification by a single microorganism. *Nature*, 528:555-559.
- van Kessel, M.A.H.J., K. Stultiens, M.F.W. Slegers, S.G. Cruz, M.S.M. Jetten, B. Kartal, H. Op den Camp (2018) Current perspectives on the application of N-damo and anammox in wastewater treatment. *Curr Opin Biotechnol*, 50:222-227.
- Wang, J., H. Lu, G. Chen, G.N. Lau, W.L. Tsang, M.C.M. van Loosdrecht (2009) A novel sulfate reduction, autotrophic denitrification, nitrification integrated (SANI) process for saline wastewater treatment. *Water Res*, 43:2363-2372.
- Winkler, M.H., K.F. Ettwig, T.P.W. Vannecke, K. Stultiens K, A. Bogdan, B. Kartal, E.I.P. Volcke (2015) Modelling simultaneous anaerobic methane and ammonium removal in a granular sludge reactor. *Water Res*, 73:323-331.
- Winkler, M.K.H., L. Straka (2019) New directions in biological nitrogen removal and recovery from wastewater. *Curr Opin Biotechnol*, 57:50-56.

環境化學及微生物類

## 污染場址分區改善及土地利用的示範場址 篩選原則及分析

簡慧貞\*、王子欣\*\*、蔡豐任\*\*\*、朱敬平\*\*\*\*

### 摘 要

行政院環境保護署(下稱環保署)推動污染場址改善至今 20 餘年,已有相當之成果,為開啟我國污染場址改善的新里程碑,導入新穎觀念及工具,如污染場址分區改善結合土地利用就是其中之一。考量污染場址之土地整治往往耗時多年,且部分土地可能因整治技術與環境背景等因素,難以達成管制目標,造成污染土地長期閒置,無法發揮土地效益。國內雖已有污染土地整治與開發再利用的併行機制,然社會大眾普遍對於污染土地持有疑慮,加上缺乏整治及再利用併行的執行先例。本研究以國內污染場址為主體,依土地活化規劃方向,提出篩選具土地再利用可能性的污染場址之原則,透過土地適宜性分析與風險地圖建置,進而擬定污染場址的風險管理措施與土地再利用空間規劃。整體場址的再利用規劃經法律分析、土地取得、維護管理與民眾參與等面向,均得到可推行之評估結果,本研究對於國內污染場址土地再利用,推動示範場址的篩選極具參考價值。

【關鍵字】污染土地再利用、褐地、污染改善、分區改善

\* 行政院環保署土壤及地下水污染整治基金管理會

執行秘書

\*\* 行政院環保署土壤及地下水污染整治基金管理會

組長

\*\*\* 行政院環保署土壤及地下水污染整治基金管理會

環境技術師

\*\*\*\* 財團法人中興工程顧問社環境工程研究中心

副主任

一、國內推動污染土地利用之發軔

我國現行「土壤及地下水污染整治法」(以下簡稱土污法)規範污染土地再利用方式可分為 2 種，一為「整治至解列後再利用」，以低於管制標準為目標，進行污染整治至解除列管，場址即可回歸一般土地，進行再利用；二為「整治及再利用併行」，土地開發配合污染整治作業，確保人體與環境健康安全無虞後，推動再利用。然國內普遍對於污染土地持有疑慮，且缺乏「整治及再利用併行」的執行先例，因此至今仍以「整治至解列後再利用」的方式為主。

當面臨污染整治技術不足或缺乏整治誘因時，將造成場址難以解列。統計國內公告列管長達 10 年以上之污染場址，至今仍多達 50 幾處(以事業場址為例，詳見圖 1 及圖 2)，因此，為加速污染場址解列，對於符合相關規範之場址，可運用健康風險評估方式，另訂污染場址整治目標，以符合人體與環境健康安全為基準，執行場址整治工作，並投入再利用規劃，可透過持續性污染改善作業與風險管理措施，藉以加速污染場址活化與確保民眾健康。

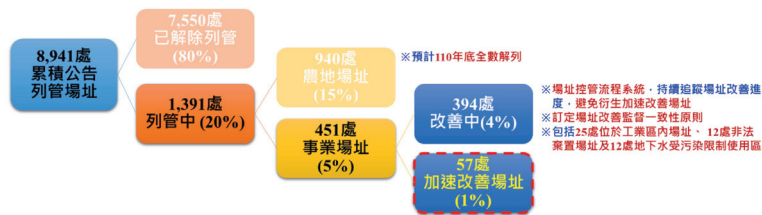


圖 1 國內污染場址之列管情形

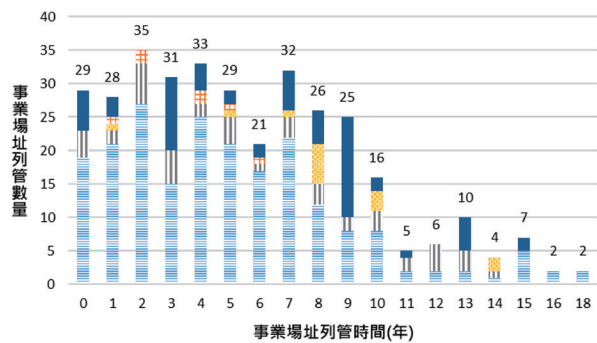


圖 2 國內污染場址整治完成而解除列管的時間：以事業場址為例

環保署參照國外經驗，自 100 年基於土污法研議推動污染土地再利用，管轄權限優先考量已明確受污染且公告列管之整治與控制場址，希冀鼓勵土地關係人以外的民間企業共同投入場址整治與管理，藉土地建設帶動經濟效益，回饋整治經費。更於 110 年 5 月 25 日，發布多元整治、互利多贏之「污染場址分區改善及土地利用作業原則」。污染土地整治及再利用併行策略後續推動的重點為建立示範場址，本文因此提出污染場址篩選原則，並建立再利用的分析規劃辦法，作為國內推動示範場址之參考。

## 二、國外污染土地再利用定義

污染土地利用，亦稱為褐地活化 (Brownfield Revitalization)，最早發源自對荒廢且受污染之工業地區的區域性復興，而英、美等國所指「褐地」包含已受或潛在污染的廢棄土地，策略以整體區域整治與重建為主軸，透過整治與開發併行作法，除能節省工時，更能以分期付款的概念，取得開發獲益，並持續投入污染整治，相關案例包含老舊工業區活化、都市更新與城鄉再造、污染土地再利用等。

各國對「褐地」的定義有不同之詮釋 (詳見表 1)，美國為褐地定義最清楚的國家，其對褐地場址的廣泛定義為已受污染之土地，且使得該土地發展變得複雜者。美國政府為有效管控污染土地，於褐地法規中載明，保留政策主導者一定的裁量權，讓其就地方經濟、人體健康、社會福祉與環境保護等方面，酌情考量將部分原非屬褐地之場址納入褐地範圍，一旦被歸類為褐地場址，則該場址的一切管理與開發方式，皆須遵循褐地法案。歐盟與英國對於褐地之定義則不侷限於已受污染的土地，只要土地屬於曾使用過，但現況為廢棄與未充分利用者 (可能有真正或潛在污染問題)，皆列入褐地範圍。因此，歐盟對於土地是否應列入褐地場址，乃採取個案評估方式，依據相關污染與開發法規，酌情認定。而在澳洲，相關褐地制度規範僅於澳洲最大州—新南威爾斯州，其定義限於污染土地，並未明確定義此污染土地即為該州認定之褐地總定義。綜上，我國主要污染場址如國內工廠、加油站、非法棄置場址、儲槽、其他等，皆可歸類於褐地範疇，故可借鏡國外污染土地再利用的成功經驗作為推動我國褐地活化之參考。



表 1 各國褐地 / 污染土地廣泛定義

| 國家            | 定義                                                                     | 單位                            |
|---------------|------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| 美國            | 褐地：指因有害物質、污染物或污染的存在而其擴建、再發展或再利用變得複雜之不動產。                               | USEPA<br>美國國家環境保護署            |
| 歐盟            | 褐地：為曾使用過，但現被遺棄與未充分利用，其可能有真正或潛在污染問題，且主要是在已開發都市區域內，須採取行動，使重新恢復至具利用價值之土地。 | RESCUE<br>歐洲城市與都市環境<br>土地再生組織 |
| 英國            | 褐地：於曾經被開發但目前被遺棄或閒置的土地上，具有正在或曾經被使用之永久結構建物，包含其已發展土地上之住宅與固定於表面之任何公共建物。    | DCLG<br>社區和地方政府部              |
| 加拿大           | 褐地：一個廢棄、閒置或沒有得到充分利用的商業或工業土地產權，因過去的行為已造成實際或可能性的污染存在，但仍具有重建發展潛能者。        | MMAH<br>市政與房屋事務廳              |
| 澳洲<br>(新南威爾斯) | 污染土地：指位於土地的地表上、地表下或土地內，具有濃度高於自然存在者之任何物質，而該物質對於人類健康或環境造成或可能造成立即或長期之風險。  | NSWEPA<br>新南威爾斯州環境保護局         |

三、國內污染土地利用之發展

綜上述之國外土地再利用理念與定義，褐地利用精神是自清除到再利用 (From Cleanup to Reuse)，分別以效益成本分析 (Benefit-Cost Analysis, BCA) 的觀念，提供量化社會福祉評估及經濟影響分析 (Economic Impact Analysis, EIA)，分析區域性經濟資源分配與再分配 2 項工具，以提供政策與計畫決策之權衡 (Trade-off) 依據。

國內有多處污染場址長期未解除列管，造成污染持續留存，影響土地價值，為達到加速污染改善與土地資源活化之目標，可透過適當法令促成褐地「活化」(包含開發與利用)，以場址開發利用構成誘因，俾利導入外部資源以改善污染。褐地依整治難度與土地價值，可分成 A、B 及 C 共 3 種類型，如圖 3 所示。A 型具高經濟收益性，整治難度低，一般商業利益即可驅動，且易由私部門投入，整治達符合管制標準後，便可進行開發；B 型具高經濟價值，但整治難度也高，介於收益邊界，須透過公私部門共同合作活化土地，利用國家整體政策和地方政府整合去驅動；C 型具低經濟價值，整治難度高，活化效益低，此因須仰賴公部門協助，透過公部門力量持續投入，以利用型態為主，結合風險評估與管理，訂定污染改善目標。

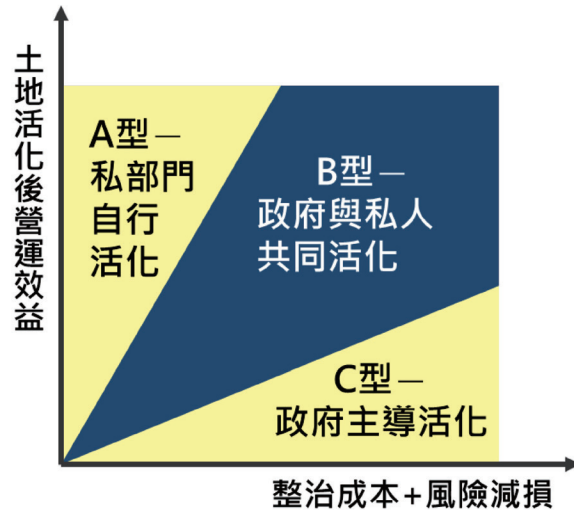


圖 3 污染土地的活化利用類型

針對 A 型褐地，多數位於都市計畫區或已整治完成的控制場址，現行場址管理政策已可驅動之。目前國內已有許多案例，如位於新北市的某電器廠場址，過去因工廠營運造成土壤受重金屬鎘、銅與汞污染，由身為債權人的國內某建設公司以 20 億元標下土地進行整治，由於當地生活機能成熟，且周邊住宅少，因此看好當地房市發展，將原工業用地變更為住宅用地，並回饋 2,600 坪左右之公園用地給政府，後於 108 年初與鄰近土地共 10,465 坪以 46 億元賣給開發公司。

B 型及 C 型褐地因活化效益較低，須藉由公部門參與以利於推動土地活化，考量土地利用為地方權責，宜由地方政府介入推動，爰此，環保署訂定分區作業原則，規範配合土地開發利用另訂整治目標審理之作業原則，使跨縣市整體作法更有規範，亦尊重地方政府對於利用之意見。B 型褐地的推動是希望能透過土地開發的誘因，使第三者介入關係人無力改善的污染土地，其典型案例為位於高雄市的亞洲新灣區，過去為嚴重污染的工業港灣，經高雄市政府大力推動污染整治與產業轉型，現已成為多功能經貿園區，其重大建設包含高雄港埠旅運中心、海洋文化及流行音樂中心、高雄世貿展覽會議中心、高雄市立圖書館總館與輕軌捷運，以提升生活品質、發展文化產業、帶動國際觀光與活絡國際交易為目標，成功擴大相關產業與經濟的發展，創造至少 8,000 個以上的就業機會。

C 型褐地則是因為受土污法的限制而不能利用的土地，在特許情況下可以控制住污染並同時利用，一方面保護健康，一方面避免影響地方發展，但國內目前並沒有相關案例，尚待由公私部門共同投入。

針對 B 型及 C 型褐地活化之推動可結合都市整體規劃或適當之土地利用樣態，地方政府主導推動，並由開發商參與污染改善工作，若無相關之土地利用規劃，建議可以建置太陽光電設施做為土地利用方式，藉太陽光電業者之投入，辦理場址污染改善，同時提升我國再生能源裝置容量，以解決當下能源之需求，可謂是公私協力、共創雙贏的作法，值得成為未來推動目標。

#### 四、透過污染土地利用政策引導，以加速污染改善之考量面向

地方政府對於污染土地之開發具有主導面向，亦負責相關污染改善之管制，另考量污染土地之再利用規劃，主要受到場址條件與未來發展需求 2 項重大因素的影響，本研究提出 4 點篩選原則評估污染土地再利用之基本需求，據以篩選出適合進行污染土地再利用規劃之候選場址，可供地方政府持續推動，篩選原則詳見圖 4。

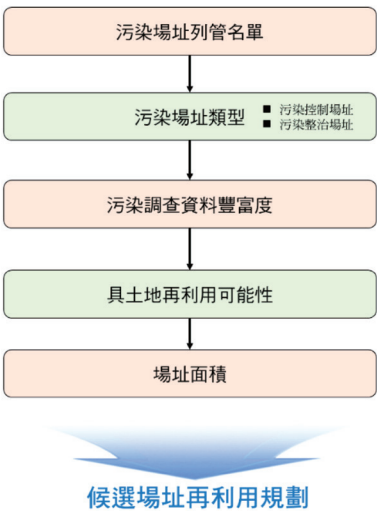


圖 4 污染土地再利用規劃候選場址的篩選原則

### 1. 污染場址類型

依現行土污法規，污染土地分為 2 階段管制，經調查之污染濃度高於法定管制標準，即列管為污染控制場址；控制場址經評估後，若有嚴重危害國民健康與生活環境之虞，則進一步列管為污染整治場址。後者依法為禁止處分登記，因此不得進行土地轉移或買賣，此外，土地開發行為須待公告解除整治場址列管才可實施。故若選用污染整治場址進行再利用規劃，依土污法第 24 條第 4 項，整治場址得依風險評估另訂整治目標，待場址污染降至另訂之整治目標，且切實完成與執行管理措施，即可解除整治場址列管狀態，施行開發利用行為。

### 2. 污染調查資料豐富度

執行污染場址風險評估作業須利用土壤及地下水污染調查資料，調查資料越完整，風險評估結果越具代表性，若污染調查資料不足，則須進行補充調查。

### 3. 具土地再利用可能性

具再利用需求之廢棄或歇業場址，將有較高的土地再利用適用性與彈性，若選用持續營運或使用中的場址，則再利用規劃須考量相關使用行為限制。

### 4. 場址面積大小

各直轄市、縣(市)政府為土壤、底泥及地下水污染整治之地方主管機關，對於其轄區內土地污染情形應給予重視，採取必要之計畫推動方式解決土地污染問題。污染土地再利用場址面積影響層面甚多，大面積場址具有指標性作用，可結合土地開發計畫，達土地資源永續利用之目的。

## 五、研擬污染土地分區改善作業原則

為推動我國應加速改善場址活化，期透過土地利用促使申請者投入污染改善，因此，環保署基於上述篩選因子，訂定「污染場址分區改善及土地利用作業原則」，明定分期分區作業方式，提供申請者辦理場址土地運用之彈性，同時為確保污染受到積極改善與管理，規範土地利用收益須持續投入改善作業之機制，達到提升環境品質與土地價值之目的，整體重點如圖 5 所示。

作業原則訂定目的為提供地方政府環保局辦理依土污法第 51 條第 2 項之場址土地再利用規範所提出之申請案件有所依循，針對其整治計畫擬定、審查、管理，以及污染改善與土地利用之作業機制進行規範，期能確保申請案件的品質。此外，為維護社會大眾權益，考量部分土地因地質背景因素等問題，改善至低於土壤及地下水污染管制標準所需時間較長，甚至是屬於技術不可行，因此規範特定土地用途及其風險管理方式，以及依土污法第 24 條第 4 項另訂整治目標，得透過阻絕污染、限制活動範圍或禁用地下水等作法，應用環保署建立之健康風險評估系統，產製風險評估報告與改善目標，該系統係依「土壤及地下水污染整治場址環境影響與健康風險評估辦法」建立，符合相關作業規範；另就限定用途則以專案審議小組機制進行審查，簡化審查機制，期能大幅提升審查效率，達到避免民眾暴露之目的，即早恢復民眾使用土地的權益與兼顧環境保護，促使土地資源永續利用。

依據「污染場址分區改善及土地利用作業原則」提出之污染場址改善及土地利用申請案件，須符合下述條件：(1) 整治場址具土地開發利用規劃者，得於整治計畫納入土地開發利用計畫，然該土地利用規劃應先與直轄市、縣(市)主管機關達成共識，主管機關視實際情況同意辦理場址分期分區改善與利用；(2) 污染場址改善及土地利用之申請者，應提出全場整治計畫與目標，其整治目標應低於管制標準為主，若場址分區符合附表規範特定土地用途及其風險管理方式者，得依土壤及地下水污染整治場址環境影響與健康風險評估辦法另訂整治目標。作業原則的執行流程及架構如圖 6 及圖 7 所示，以下分別說明作業原則的主要內容與訂定考量：



圖 5 「污染場址分區改善及土地利用作業原則」重點



圖 6 「污染場址分區改善及土地利用作業原則」流程

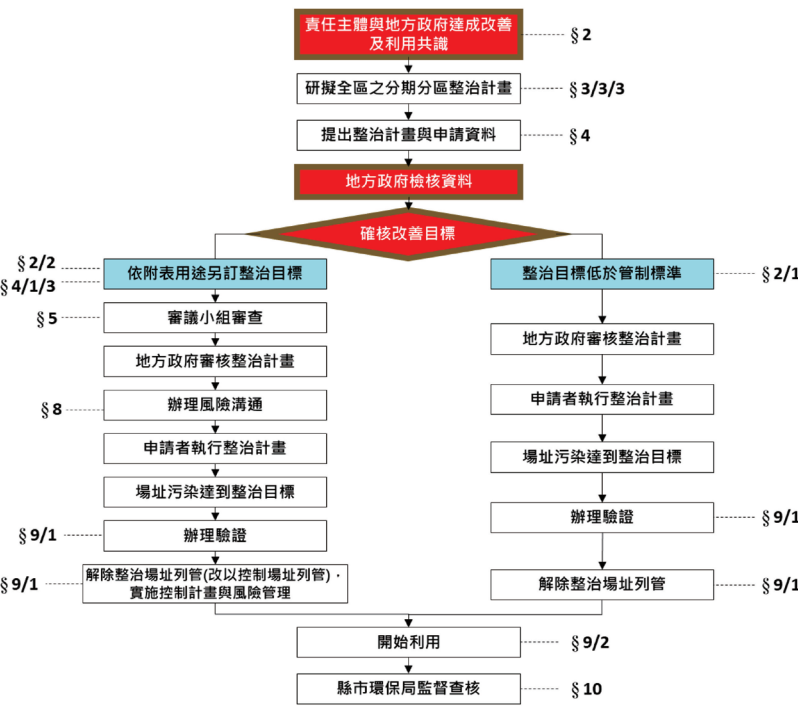


圖 7 「污染場址分區改善及土地利用作業原則」架構

1. 與直轄市、縣(市)主管機關達成共識

整治計畫得搭配土地利用規劃同時提出，然該規劃應先與直轄市、縣(市)主管



機關達成共識，確保土地利用符合地方發展需求，污染處置作為必須符合外界期待，共識詳見圖 8。



圖 8 「場址分期分區改善與土地利用作業原則」共識

2. 整治目標訂定

配合土地利用之場址污染整治目標，應以污染物濃度低於管制標準為主，惟考量部分土地因地質背景因素等問題，改善至低於管制標準所需時間較長，因此於作業原則附中明定三大類土地用途及風險管理方式，須利用環保署建立之健康風險評估系統產製風險評估報告與改善目標，並於系統中述明途徑與參數之設定原因。於此制度下之場址污染物濃度雖無法低於管制標準，但透過妥善執行風險管理，可降低民眾暴露風險，以保障民眾使用土地的權益及確保土地利用行為不造成人體健康影響，如圖 9 所示。

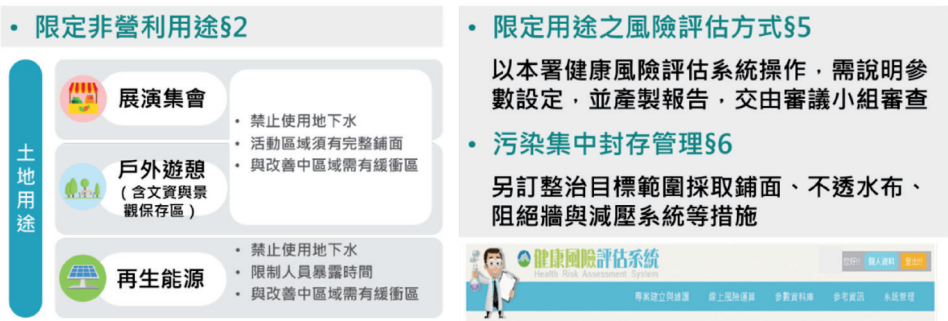


圖 9 「場址分區改善與土地利用作業原則」－ 特定用途風險評估與管理作業

3. 場址污染整治與分期分區作業

污染場址改善及土地利用之申請者，不論利用範圍，應提出全場整治計畫與目標，避免非利用區未進行改善，或利用區受到未改善區污染影響之情形，土地利用則視實



際所需範圍規劃。如須辦理分期分區改善，應先取得直轄市、縣（市）主管機關同意後為之，應於整治計畫中清楚說明規劃與依據，由於土地開發利用樣態多元，因此整治計畫中須一併說明土地開發利用之相關事項，以利直轄市、縣（市）主管機關審視合理性，避免未來監督查核之認定爭議。

#### 4. 持續投入整治作業

為確保申請者持續投入污染改善（包含執行風險管理），整治計畫應納入土地利用之收益持續投入該場址後續污染整治之方式，如成立污染改善之專用存款帳戶或信託專戶、契約協議改善、提供編列改善預算之證明等方式，詳見圖 10，並為確保申請者釐清日後土地買賣時，應說明發生污染爭議之處理機制。



## 污染改善專款§3.11

明列投入額度於第三點「**附件 整治計畫撰寫說明**」：

- 整治經費應納入因開發利用所得收入於扣除已符合整治目標區域之基本維護費用外，全數做為未達整治目標區域之污染整治；前述基本維護費用不應超過前述收入三分之一。
- 成立污染改善之專用存款帳戶或信託專戶等帳戶證明，或另以契約協議之文件

圖 10 「場址分區改善與土地利用作業原則」收入作為污染改善專款

## 5. 風險評估審議機制

配合土地利用另訂整治目標場址，得依「土壤及地下水污染整治場址環境影響與健康風險評估辦法」評估受體影響，提送相關資料至中央主關機關審查，然現行審查作業分為兩階段執行，第一階段須提出風險評估計畫書，先由風險評估小組確認執行方式是否有需調整之處，核定後再行第二階段，執行風險評估作業與研擬整治目標，送風險評估小組審查。由於整體執行政程序繁瑣且難以預期完成時間，對於土地開發利用而言會有時效之影響，因此為減少時間的不確定性，且考量現行土污法相關規範中未定有第 24 條第 4 項配合土地開發利用另訂整治目標之風險評估規範，因此對符合作業原則附表用途之場址，其整治目標審查作業方式，參考土污法第 24 條第 2 項與第 3 項，以及「土壤及地下水污染場址環境影響與健康風險評估小組初審會議作業要

點」之規範，簡化審查機制，詳見圖 11，申請者以環保署健康風險評估系統產製報告與提出整治目標後，送直轄市、縣（市）主管機關收受，並轉送環保署以專案組成之審議小組審查，其審查會議以不超過 3 次為原則，每次成員應維持一致。

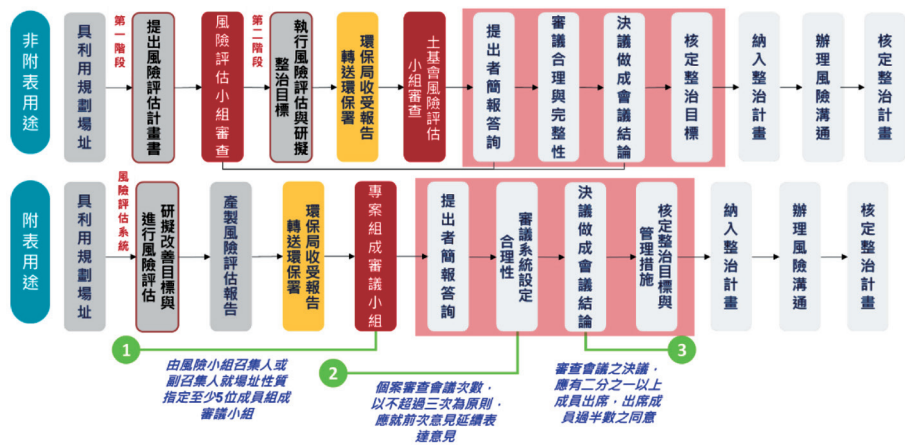


圖 11 配合土地開發利用另訂整治目標之簡化的風險評估程序

6. 整治計畫審查原則

為避免開發利用行為再次造成環境危害與影響人體健康，利用範圍須妥善處理非法棄置之掩埋廢棄物與可能產生污染的固定設施（如油槽、油管），開發利用行為不得影響整治計畫之執行，或致使污染擴大與二次污染，為確認上述行為，於實務執行時，直轄市縣（市）主管機關應邀集土地利用行為涉及的有關機關一同進行審查，以確認規劃內容無缺失且具可行性，據以核定整治計畫。整治計畫須明定另訂整治目標範圍，提供場址如評估污染不適合外運時，得於場址內特定區塊集中封存污染物。在另訂整治目標之污染範圍，其管理措施得採取鋪面、不透水布、阻絕牆、減壓系統等阻絕與封存措施，排除可能影響受體之暴露途徑，以及避免污染移動擴散。

7. 風險溝通作業

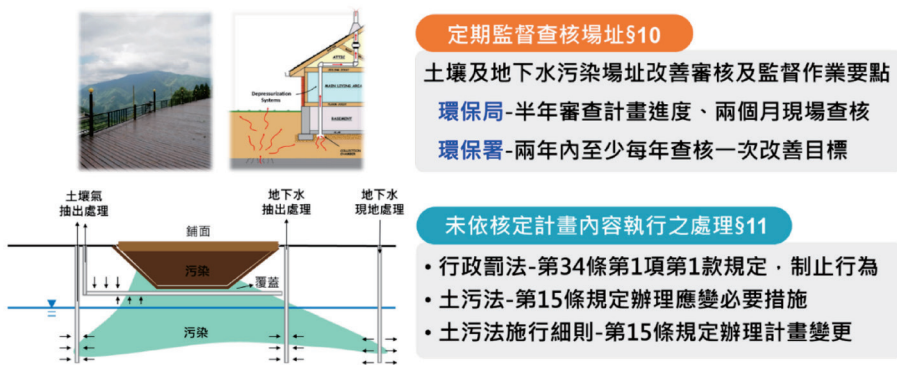
應透過公民參與機制促使民眾參與、瞭解場址污染處置作為，以及應配合管理事項。除透過網際網路發布訊息、於適當地點公開閱覽或其他適當方法將風險評估執行情形及資訊予以公開外，應於整治目標核定後舉行說明會。

## 8. 土地開發利用時機

污染場址改善作業期間，申請者得辦理土地開發利用計畫的行政申請程序，在完成整治計畫核定之目標與管理措施後，即可申請驗證，於驗證通過後取得土地開發利用計畫相關作業許可，藉此即早恢復土地用途，並作為啟動整治的誘因，後續因土地活化利得，亦可成為申請者持續投入整治的量能。

## 9. 場址監督作業

為確保污染場址土地開發利用期間，計畫提出者確實依核定內容執行風險管理作業，直轄市、縣（市）主管機關仍應依土壤及地下水污染場址改善審核及監督作業要點辦理監督查核。如有未依核定計畫內容實施、進度落後未能改善、違背法令或執行不當造成場址二次污染等情事，直轄市、縣（市）主管機關得依行政罰法第 34 條第 1 項第 1 款規定，即時制止其行為外，應依土污法第 15 條規定辦理；必要時，亦得依土污法施行細則第 15 條規定辦理計畫變更，詳見圖 12。



## 六、污染土地分區推動土地利用適宜性分析

綜觀國內土壤污染場址案例，整體再利用區域的環境敏感因子包含地質、土石流、生態、土地使用、文化景觀與污染情形等，須先進行土地適宜性分析，界定出優先、一般、條件與限制發展區域，以利後續再利用規劃。

### 1. 土地利用適宜性分析

#### (1) 地質敏感區

依據經濟部中央地質調查所提供之地質敏感區查詢系統，得知場址再利用區域之土地若列為山崩地滑潛勢區之地質敏感區，此區域類型可能發生地層滑動、山崩等地質災害問題，須納入整體考量。

#### (2) 土石流潛勢影響區

依據內政部國土測繪中心之圖資套繪系統，得知場址再利用區域之土地若位於土石流潛勢影響區，此區域類型可能發生土石流等地質災害問題，須納入整體考量。

#### (3) 山坡地保育區

依據主管機關地籍資料之使用分區資訊，得知場址再利用區域之土地若位於山坡地保育區，整體規劃應考量生態保育與資源問題。

#### (4) 文化景觀保存區

依據內政部營建署所公布之環境敏感地區相關資訊，得知場址再利用區域之土地若為環境敏感地區第二級之文化景觀保存區，整體規劃應納入文化景觀保存區用途。

#### (5) 污染場址

依據環保署公告之污染整治場址相關資訊，得知場址再利用區域之土地若有土壤污染及地下水污染問題，整體規劃應納入污染整治問題。

### 2. 土地發展限制

為反映土地資源特性，將各個評估因子進行綜合分析，並配合低度開發以及既有建築再利用原則，界定出場址優先、一般、條件與限制發展區域，以提供各分區發展型態之考量；結合土地適宜性分析與風險地圖成果，納入再利用規劃構想之中，並考量環保主管機關及各責任主體立場，期提高責任主體進行再利用的意願，進而擬定污染場址土地再利用規劃方案，規劃流程如圖 13。

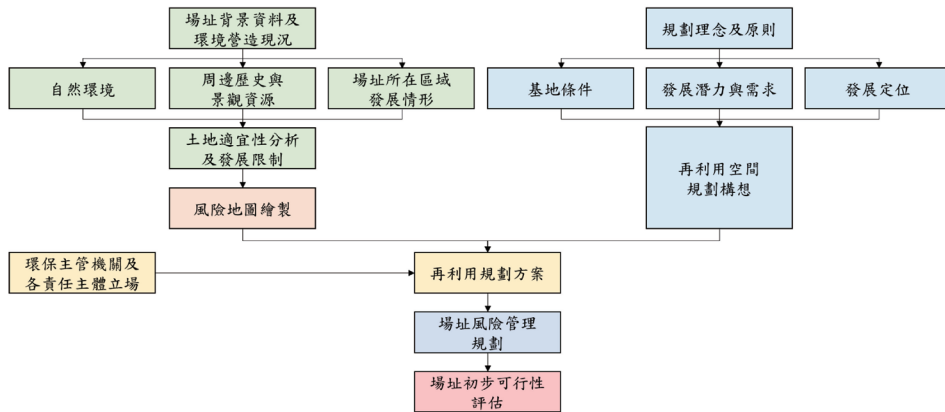


圖 13 污染場址土地再利用規劃流程圖

### 3. 再利用空間規劃

考量國內土壤污染場址案例多擁有著名文化遺產與良好景觀資源，常吸引許多遊客慕名而來，故本研究依此特色提出再利用規劃：

#### (1) 公共設施區

規劃腹地廣大且地勢平坦的場址區域，作為遊客觀光之停車場使用。

#### (2) 視覺景觀區

規劃絕佳的自然景觀與古蹟觀賞位址且空間平坦廣闊的場址區域，開放給遊客使用，應選擇較低風險的區域，並經適度的工程控制。

#### (3) 歷史建築保存區

規劃擁有年代悠久的建築物所在地，然建築物若已殘破不堪、具危險性，且為場址內較高風險的區域，則不應開放遊客使用，建議經適當的整修與工程控制，並配合參觀動線規劃，提供安全位置，使遊客可遠觀歷史建築之景色。

#### (4) 生態環境保育區

若污染場址區域之土地位於山坡地保育區，且擁有文化景觀存在，建議規劃以生態保育與原貌保留為發展重點，禁止開發利用行為與提供遊客通行。

4. 援引健康風險概念設定分區整治目標

申請者可利用環保署土污基管會所建置之「健康風險評估系統」(<https://sgwenv.epa.gov.tw/Risksystem/>)，如圖 14 所示，輸入主要污染物濃度及暴露情境，進行風險評估作業，其結果不僅有助於了解污染物對民眾健康造成之危害程度，亦能為後續風險管理措施提供實證基礎，達到最低風險、最適成本與最大效益之目標。基於污染場址之區域規劃包含展演集會、戶外遊憩及再生能源、非住宅區或工商業區，故應於系統中選擇第三層次風險評估，僅依照土地利用方式及實際情境變動暴露期間及暴露頻率數值，系統會依照選定之暴露途徑提供預設之水文地質參數及受體參數等，並產製風險評估報告。若最終計算結果得知，致癌總風險小於  $10^{-6}$ ，非致癌總風險小於 1，表示應依個別狀況採取積極管理，才可符合標準規定。



圖 14 健康風險評估系統網頁畫面

5. 分區健康風險管理

在風險管理規劃方面，公共設施與視覺景觀區應選擇較低風險處，以開放民眾進入，依此方案搭配風險管理規劃內容如下：



### (1) 持續改善污染

風險管理措施之優先手段為移除污染，目的為消除危害、確實阻斷污染源，使污染不再繼續影響場址，依據再利用規劃方案，應於公共設施與視覺景觀區視場址污染狀況採取必要之整治手段，如採用排客土法，移除污染表土，並回填乾淨客土；對於暫時無法完全移除之區域，可以鋪面之方式進行阻絕；對於無法整治至管制標準之下之區域可選用適宜之植生復育法，進行污染改善。

### (2) 阻絕暴露途徑

依風險評估結果可知，土壤及地下水介質所造成之吸入、食入與皮膚接觸為主要的暴露途徑，因此可透過前述污染改善作為阻絕場址之暴露途徑，或透過限制人員進入阻絕暴露，針對污染濃度較高區域，為避免吸入的暴露途徑，可採用覆蓋方式避免污染擴散危害。在地下水方面則採用禁止抽取使用，以阻絕其暴露。

### (3) 行政管理

行政管理主要為透過禁止或限制受體行為，達到降低或隔離受體暴露在污染環境中，應視場址利用行為規劃開放及管制區域，而在出入場址後，須清洗手部以降低攝入揚塵之機率。此外，定期調查土壤及地下水中污染物經植生復育的降解情形，並監測地下水污染傳輸情形，藉以判別是否須採取其他管控措施。

## 6. 多面向可行性分析

多面向可行性評估方面，提出可能之限制並進行分析，包含法律可行性、土地取得可行性、維護管理可行性及民眾參與可行性等面向。

### (1) 法律可行性

污染場址再利用規劃涉及三類法規，分別為土地、環境、文化與開發，分析說明如下：

#### a. 土地法規

污染場址再利用規劃所涉及之土地法規包含國土計畫法、區域計畫法、非都市土地使用管制規則、非都市土地開發審議作業規範，以及非都市土地使用分區及使用地變更申請案件委辦直轄縣（市）。



(a) 國土計畫法

若污染場址所在地涉及環境敏感區位，包含山坡地保育區、地質敏感區與文化遺址，依國土計畫法規定，會被劃定為國土保育區，其開發使用將會受到限制，因此污染行為人兼土地所有人，應洽地方及中央主管機關討論發展方式，以利後續利用。

(b) 區域計畫法

若污染場址位於區域計畫所劃定的第二級環境敏感地區，包含土石流潛勢溪流、山坡地、文化景觀保存、礦業及地質敏感山坡地滑區，未來引入活動設施將會受到限制，例如加強管制條件、規範土地使用種類與強度、開發行為應落實整體規劃開發為原則、因應地質敏感特性提出具體的防範與補救措施、各目的事業主管機關訂定開發總量及標準，作為使用分區或使用地檢討變更之依據。

(c) 土壤及地下水污染整治法

若污染場址為公告列管之污染場址，進行開發利用行為，須符合土污法規範辦理，並於提送污染控制 / 整治計畫時，採用風險評估所提出的污染改善目標與風險管理規劃。此外，應提出申辦計畫書報請環保署審查，並副知直轄市、縣(市)主管機關，經同意後實施。未來當土壤及地下水污染濃度符合管制標準時，即可報請直轄市、縣(市)主管機關或中央主管機關核准，以解除場址公告列管狀態。

b. 文化法規

若污染場址上有登錄公告之文化古蹟與歷史建築，則涉及文化資產保存法與古蹟修復及再利用辦法。進行開發再利用須保持文化遺產的原始樣貌，並將場址內現況已畸零破舊、年代久遠已朽壞建物之既有建築修建，保障民眾之生命安全，提供民眾、財團法人及團體使用。

c. 開發法規

由於場址再利用規劃方案是以生態環境保育發展為原則，因此不進行設施開發及引入行為，僅會針對既有殘破不堪之建築進行整修，因此所涉及法規較少，依建築法辦理建築執照請領，以及負擔相關費用（基礎公設與修建費用）即可。

(2) 土地取得可行性

過往許多開發案常因土地取得問題，影響相關期程之推動，然若污染場址之土地所有人皆為單一所有權人，則問題相對單純，一般情況須進行土地權屬現況之調查，並分析土地取得方式。

(3) 維護管理可行性

若污染場址為公告列管之污染土地，進行開發再利用須顧及環境忍受力，並依以下幾個面向進行規劃：

a. 風險管理維護

依所採取的風險管理措施（包含持續改善污染、阻絕暴露途徑與行政管理措施），可進行的風險管理維護包含污染阻絕設施的檢查維護、環境污染的監測維護，以及植生復育植物的生長維護。

b. 施工期間管理維護

依據再利用規劃與污染控管內容，提出施工期間須注意的管理項目，以確保場址污染在預期範圍內進行整治工程時，避免外露或流出污染物之疑慮。

c. 營運期間管理維護

場址完成開發再利用之後，仍持續進行污染控制計畫與風險管理，當涉及開發利用工程，其建設完成後的管理維護，可與土地所有人合作，舉辦說明會及工作坊，向民眾揭露場址資訊，以及說明相關規範與應變處理，並於未來定期派員負責場地及設備之管理維護。

#### (4) 民眾參與可行性

進行場址的開發再利用，皆須考量對在地居民產生的負面影響及觀感，以及可提供當地的生活機能與土地價值。而民眾參與時機應自規劃開始至計畫完成，因此在先期規劃階段須與民眾達成共識，透過說明會等方式，建立民眾、遊客及土地所有人對於場址再利用的重視與認知，俾利後續工作之執行推動。

透過上述法律、土地取得、維護管理及民眾參與等面向進行可行性評估，污染場址的污染行為人兼土地所有人遵循相關申請作業程序、搭配適宜的配套規劃與溝通，皆可得到高可行性之評估結果。

## 七、結論

整體污染場址的再利用規劃構想，結合考量人文與環境因子的土地適宜性分析，將場址界定出優先、一般、條件與限制發展區域，藉以有效運用土地資源；此外，考量土壤及地下水污染情形，透過調查成果進行健康風險評估，並繪製風險地圖，應用於地理資訊系統，有助於呈現風險分布，協助決策者將受體差異納入設計考量。上述的分析方法與應用工具，可作為場址再利用規劃與風險管理規劃的依據，提供場址適宜適性的發展方向。本研究並對對規劃構想就法規、土地取得、維護管理與民眾參與等面向進行可行性評估，透過遵循相關申請作業程序、搭配適宜的配套規劃與溝通，得到可推行之評估結果。後續可作為國內污染土地整治與再利用併行制度的示範場址推動，藉以促進污染土地的再利用活化，使土地資源得以永續利用，民眾與環境健康獲得保障，達到雙贏之局面。

## 參考文獻

行政院環境保護署 (2021)，污染場址分區改善及土地利用作業原則。

李翠萍 (2012)，公共行政，褐地重建政策分析：社區能力的觀點，五南。

卓瑜玉 (2015)，建立臺灣褐地再開發流程及排序評估工具，臺灣大學環境工程學研究所學位論文，p 1-118。

高志明、盧至人，褐地專書編寫小組 (2017)，褐地與污染土地再利用：再創土地新生機，五南。

Chen, X., Liu, M., Ma, J., Liu, X., Liu, D., Chen, Y., Li, Y., and Qadeer A. (2017), Health risk assessment of soil heavy metals in housing units built on brownfields in a city in China. *Journal of Soils and Sediments*, 17(6), 1741-1750.

Ferber, U., Grimski, D., Millar, K., and Nathanail, P. (2006), Sustainable brownfield regeneration: CABERNET network report. University of Nottingham: L and Quality Management Group.

Greenberg, M., Craighill, P., Mayer, H., Zukin, C., and Wells, J. (2001), "Brownfield redevelopment and affordable housing: a case study of New Jersey." *Housing Policy Debate*, 12(3), 515-540.

Litt, J. S., Tran, N. L., and Burke, T. A. (2002), Examining urban brownfields through the public health" macroscope". *Environmental Health Perspectives*, 110(suppl 2), 183-193.

Li, H., and Ji, H. (2017), Chemical speciation, vertical profile and human health risk assessment of heavy metals in soils from coal-mine brownfield, Beijing, China. *Journal of Geochemical Exploration*, 183, 22-32.

Li, H., Ji, H., Shi, C., Gao, Y., Zhang, Y., Xu, X., Ding, H., Tang, L., and Xing, Y. (2017), Distribution of heavy metals and metalloids in bulk and particle size fractions of soils from coal-mine brownfield and implications on human health. *Chemosphere*, 172, 505-515.

Ministry of Municipal Affairs and Housing (2007), A Practical Guide to Brownfield Redevelopment in Ontario, Fall, Ontario, Canada.

New South Wales Government (1997), Contaminated Land Management Act 1979 No. 140. Sydney: New South Wales Parliamentary Counsel' s Office.

Office of the Deputy Prime Minister (2004), Planning Policy Statement 3: Housing-Annex B: Definitions.

O'Reilly, M., and Brink, R. (2006), Initial risk-based screening of potential brownfield development sites. *Soil & Sediment Contamination*, 15(5), 463-470.

Regeneration of European Sites and Cities and Urban Environments (2005), Best Practice Guidance for Sustainable Brownfield Regeneration.

Ren, W., Geng, Y., Ma, Z., Sun, L., Xue, B., and Fujita, T. (2015), Reconsidering brownfield redevelopment strategy in China' s old industrial zone: a health risk assessment of heavy metal contamination. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(4), 2765-2775.

US Environmental Protection Agency (2001), Small Business Liability Relief and Brownfields Revitalization Act, Public Law 107-118 (H.R. 2869), Washington DC, USA.

US Environmental Protection Agency (2013), Brownfields Federal Programs Guide, United States Environmental Protection Agency.

空氣污染與噪音類

## 台電大林電廠 Dust Removal System (DRS) 維護實例

郭函也\*、蔡東昇\*\*、李松明\*\*\*、孫振崴\*\*\*\*

### 摘 要

台電大林電廠更新改建計畫首次採用袋式集塵器粒狀物去除設備 (Dust Removal Syetem, DRS)。長時間觀察 DRS 倉室壓差有逐漸升高之趨勢，遂於歲修期間進行分段濾袋更換。本專案透過長期監測及分析濾袋收塵機各倉室的壓差，並利用大林電廠一、二號機 108、109 年的歲修更換壓差過高倉室的濾袋，以確保粒狀物去除系統之效率，且符合電力設施空氣污染物排放標準 ( $\leq 10 \text{ mg/Nm}^3$ )。本文分享此大型袋式集塵器之歲修經驗以及降低壓差之技術。

【關鍵字】粒狀物去除系統(Dust Removal System)、微粒(Particle matter)、袋式集塵器(Fabric filter)

\* 台灣電力公司大林發電廠

\*\* 昇台工程股份有限公司

\*\*\* 昇台工程股份有限公司

\*\*\*\* 昇台工程股份有限公司

鍋爐組煤灰課煤灰處理維護專員

副總經理

技術支援處經理

技術支援處產品工程師

## 一、前言

大林發電廠位於高雄市小港區，扮演南部供電之重要角色，但也因為是燃煤發電廠，長期以來承受來自各界對空污批評的負面壓力。舊有燃煤一號與二號機組已於民國 101 年除役拆除，經行政院核准更新擴建計畫，於拆除後的空地興建 2 部單機裝置容量達 800 MW 的高效率超超臨界燃煤汽輪發電機組，分別於民國 107 年、108 年開始商轉。

大林一號與二號 2 部新機組，為因應日趨嚴謹的環保法規以及永續經營概念，於興建時已規劃採用固定污染源最佳可行技術 (Best Available Control Technology, BACT)，其中粒狀污染物排放控制選用袋式集塵器 (又稱 Dust Removal System, DRS) 做為主要空污防制設備，以收集鍋爐後端燃煤煙氣中之粒狀污染物。此設計在國內外大型燃煤機組均不常見，但幾年運轉下來，大林電廠實測的粒狀污染物排放和設計值要求值一致，此標準為台灣燃煤電廠中之最高標準。本文分享該機組在第一次停機歲修的檢修經驗，作為後續大型袋式集塵器操作、維護和維持排放效率的參考。

## 二、袋式集塵器

鍋爐後端懸浮粒狀物控制設備常見有靜電集塵器 (Electrostatic Precipitator, ESP) 與袋式集塵器。前者為採用靜電吸引力來分離排放煙氣中的粒狀物，其收塵效率會受到設計、溫度、濕度及飛灰成分的多重影響，煙氣中所含的含水率及硫化物 (SO<sub>x</sub>) 含量都會影響到煤灰的電阻率，從而影響到收塵效率。因此，靜電集塵器的收塵效率有其侷限，後者收塵效率較前者高。雖然袋式集塵器已廣泛應用於各產業，如水泥或化學產業使用的袋式集塵器但規模較小。

袋式集塵器主要構件如下，並套用大林電廠的設計來加以說明。

### 1. 濾袋室 (Housing)

含塵煙氣從入口煙道進入，通過各個進口風門分別側向進入袋室。袋室內安裝有氣流均佈裝置，使煙氣進入袋室後得到均佈和擴散的向上運動，再經由上部進入內部的過濾區，通過濾袋的過濾後，粉塵被阻留在濾袋外表面，淨化後的煙氣通過濾袋內側，經由淨氣室和出口風門進入出口煙道，完成煙氣的淨化作用。



大林一、二號機組為相同設計，燃煤鍋爐所產生的煙氣由 2 條 (Line) 煙氣入口進入後各有 8 個倉室 (Compartment)，每一倉室有 2 個分室，2 條 (Line) 煙氣互不相通，各以 A、B 為編號，由入口處至出口處各排以 1 至 4 為編號。如圖 1。

|   |  | Line A |       | Line B |       |
|---|--|--------|-------|--------|-------|
|   |  | Ax1    | Ax2   | Bx1    | Bx2   |
| 1 |  | A11-1  | A12-1 | B11-1  | B12-1 |
|   |  | A11-2  | A12-2 | B11-2  | B12-2 |
| 2 |  | A21-1  | A22-1 | B21-1  | B22-1 |
|   |  | A21-2  | A22-2 | B21-2  | B22-2 |
| 3 |  | A31-1  | A32-1 | B31-1  | B32-1 |
|   |  | A31-2  | A32-2 | B31-2  | B32-2 |
| 4 |  | A41-1  | A42-1 | B41-1  | B42-1 |
|   |  | A41-2  | A42-2 | B41-2  | B42-2 |

圖 1 袋式集塵器各倉室配置圖

2. 灰斗 (Hopper)

每個倉室底下設有灰斗，主要收集濾袋清潔過程中所掉下來來的粉塵。在最大煙氣流量的操作運轉下，灰斗可儲存 12 小時的排灰量。此外，每個灰斗裝有電加熱器 (Electrical Heater)、電振動器 (Electrical Vibrator) 及料位計 (Level Switch)，可用以偵測灰位，以避免飛灰硬化及架橋。

3. 風門 (Damper)

每個倉室配置有 2 座百葉窗式 (Louver) 的進口風門、2 座單層提升閥式 (Single Blade Poppet Valve) 出口風門；兩條中央煙氣通道各設有 14 座雙層提升閥式 (Double Blade Poppet Valve) 旁通風門，1 列 7 座，共 2 列 14 座，風門均使用氣壓缸進行推拉動作的操作。

大林電廠 DRS 系統煙氣路徑由入口風門、出口風門及旁通風門控制，流量則由引風機 (ID Fan) 導引煙氣進入倉室，經由濾袋過濾後的煙氣再經由出口風門進入出口煙道，而旁通風門為常關閉狀態，僅會於緊急情況的時候開啟，如圖 2。緊急情況例如：煙氣溫度太高。

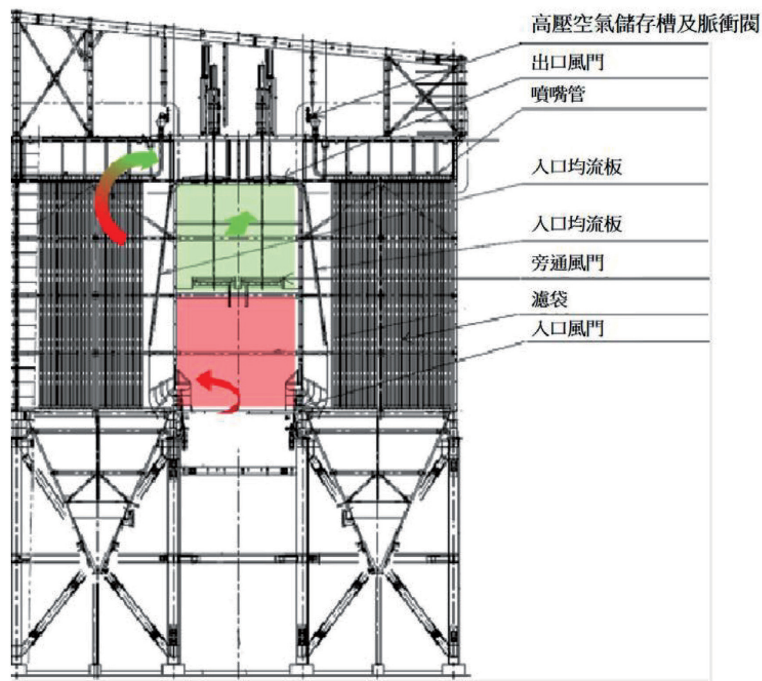


圖 2 進出口煙道 (風門) 示意圖

4. 濾袋 (Filter Bag) 及籠架 (Cage)

大林電廠 DRS 濾袋材質選用聚苯硫醚 (Polyphenylene Sulfide, PPS)，表面有聚四氟乙烯 (Polytetrafluoroethylene, PTFE) 塗層，長度約為 10 公尺，最高工作溫度 170℃。濾袋作用為過濾粉塵，在表面形成粉餅，經空氣脈衝後落至灰斗收集，此型濾袋最佳使用效率為 4 年，之後收塵效率會逐漸降低。濾袋內部則設有籠架支撐濾袋，使濾袋在過濾及噴氣清潔時仍能維持擴張狀態，並可避免濾袋隨氣流晃動，與鄰近濾袋摩擦加速濾袋破裂及降低過濾效率。籠架的材質為碳鋼 (Carbon Steel)，分為上、中、下節安裝，每節的長度都不相同，每節之間以扣環相接。

表 1 大林電廠 DRS 濾袋設計參數

| 項目     | 設計型式 ( 值 )                               |
|--------|------------------------------------------|
| 供應製造商  | Izumi Cosmo Company LTD.                 |
| 主材質    | PPS                                      |
| 表層處理方式 | PTFE 塗層                                  |
| 最高操作溫度 | 170℃                                     |
| 透氣性    | 13 cm <sup>3</sup> /cm <sup>2</sup> ·sec |
| 重量     | 0.575 kg/m <sup>2</sup>                  |
| 內徑     | 129 公厘                                   |
| 長度     | 10,027 釐米                                |

5. 脈衝空氣清潔系統

脈衝空氣清潔系統包括高壓空氣儲存槽 (Pressure Tank)、脈衝閥 (Pulse Valve)、噴嘴管 (Nozzle Pipe) 及噴嘴 (Nozzle)。壓力設定值：最大值為 0.7 MPa，最小值為 0.5 MPa，每個分室有 2 個高壓空氣儲存槽，每個儲存槽有 17 個脈衝閥，每個脈衝閥配有 1 排噴嘴管，每排噴嘴管有 30 個噴嘴。高壓空氣透過脈衝閥開啟時間讓空氣通過，流經噴嘴管路後，由噴嘴向下噴吹高壓脈衝空氣可將濾袋瞬間撐開，使附著在濾袋表面所累積的塵餅 (Dust Cake) 掉落，以達到清潔的效果。如圖 3。

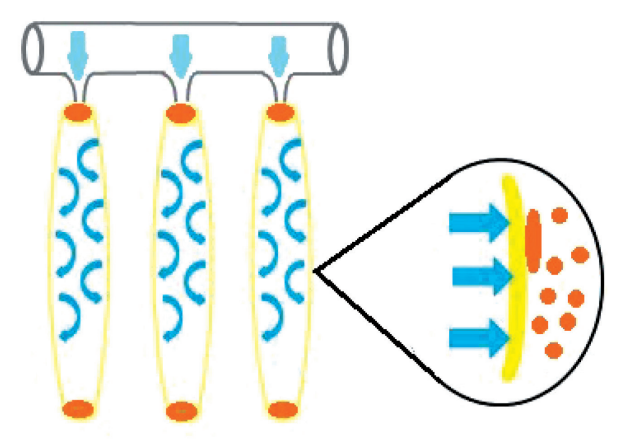


圖 3 脈衝空氣清潔示意圖

大林電廠 DRS 系統設計參數總結如表 2。

表 2 大林電廠 DRS 設計參數

| 項目         | 設計型式 ( 值 )                  |
|------------|-----------------------------|
| 清潔系統       | 空氣脈衝清潔系統                    |
| 入口最大煙氣量    | 2,725,795 m <sup>3</sup> /h |
| 入口設計煙氣最高溫度 | 165℃                        |
| 倉室數目       | 16 個                        |
| 每一倉室之濾袋數目  | 1,020 只                     |
| 濾袋長度       | 10,065 mm                   |
| 濾袋總數       | 16,320 只                    |
| 總過濾面積      | 65,280 m <sup>2</sup>       |
| 入口風門數      | 32 座                        |
| 出口風門數      | 32 座                        |
| 旁通風門數      | 28 座                        |

袋式集塵器是透過濾袋的過濾特性來達到低放的環保要求，因此濾袋的選型及使用壽命，成為影響袋式集塵器最主要的因素。濾袋壽命的長短主要由抗拉強度 (Tensile Strength) 及透氣性 (Air Permeability) 作判斷。大林電廠袋式集塵器選用 Izumi Cosmo Company 所生產的濾袋，規格如前述表 2。為符合大型袋式集塵器的特殊需求，針對濾袋做了特殊設計：

1. 增加濾袋強度：提高中層紗布 (Scrim) 重 150 g/m<sup>2</sup>，使濾袋布總重約 575 g/m<sup>2</sup>，以降低長濾袋之縱向縮收率。並降低基材纖維不純度 (Fiber Impurity)，以提高濾袋強度。
2. 接縫處理：為降低粉塵洩漏的可能性，不同於一般車縫線固定，於接縫處以熱溶的處理工法。濾袋上方金屬彈片 (Snap Ring) 使用 SUS631，此材料韌性佳，不易因高溫或彈性疲乏而變形，確保粉塵不會從濾袋與多孔板接合處洩漏。
3. 特殊熱處理：針對濾布在高溫操作產生之縮收，採用二段熱處理，以提高尺寸穩定度。第一段是針對 Scrim 熱處理，第二段為針刺後 (Needle Punching) 的整體熱處理，經由特殊熱處理方式降低變形量，使濾袋不易在高溫運轉下收縮變形。

實際運轉下來，亦觀察到原廠濾袋皆無因變形或疲勞且無任何破損，且在濾袋表面上積灰  $500\sim 800\text{ g/m}^2$ ，低於一般常見數據。雖然隨著運轉時間越長，壓差也會隨著升高，但濾袋的透氣性仍維持其水準使壓差趨勢仍在可控範圍。綜合以上，該濾袋證明吻合原廠評估是適合大林發電廠的設計。

### 三、歲修成果

#### 1. 歲修重點項目與成果

為確保 DRS 於下次歲修前壓差仍能維持低於  $1.6\text{ kPa}$  理想區間，因此歲修更換相當比率之濾袋、風門檢測及新濾袋預塗層處理 (Pre-Coating) 與線上塗層 (Online Coating) 是歲修之重點工作。

##### (1) 濾袋更換

108 年大林電廠一號機已運轉 2 年，考量可停機歲修時間及效益問題，濾袋的壽命可由壓差高低來研判。以大林電廠為例，標準區間為  $1.2\sim 1.6\text{ kPa}$ ，高於  $1.6\text{ kPa}$  代表濾袋過濾效果已不佳；低於  $1.2\text{ kPa}$  則是有破孔的可能性，如只更換一部分濾袋，由於新更換的區域壓差較低，導致大部分的粉流會導入此倉室內，反而加快縮減濾袋的使用壽命，建議全面更換濾袋是最佳的方式，換下之濾袋經中間處理程序後，進行地面掩埋處理。

大林電廠一、二號機在 108 年時，依照當時袋式集塵器的情況，陸續規劃出每年歲修所需要更換濾袋的倉室，如表 3。在正式商轉 2 年多後，DRS 總壓差約  $1.65\sim 1.75\text{ kPa}$  區間。為維持壓差於理想狀態之  $1.6\text{ kPa}$  以下，考慮試運轉期間的狀況，故於 108 年度一號機大修更換 1 排共 4 倉室 4,080 只濾袋。在 108 年 11 月完成 4 倉室 4,080 只濾袋後，總壓差降回至  $1.58\text{ kPa}\sim 1.61\text{ kPa}$  區間，如表 4 及圖 4 所示，穩定運轉。更換濾袋之第 4 排倉室壓差亦明顯較其他倉室低，如表 5 及圖 5。

表 3 大林電廠各機組歲修濾袋更換順序一覽表

| 施工工期                  | 停機機組 | 濾袋更換範圍                     |
|-----------------------|------|----------------------------|
| 108 年 11 月至 109 年 2 月 | 一號機  | 第 4 排 ( 共 4 倉 /4,080 個 )   |
| 109 年 3 月至 109 年 5 月  | 二號機  | 第 3、4 排 ( 共 7 倉 /7,140 個 ) |

表 4 一號機歲修前後各煙道總壓差

| 一號機<br>總壓差   | 年月      | 108 年<br>10 月 | 108 年<br>11 月 | 109 年<br>1 月 | 109 年<br>2 月 | 109 年<br>3 月 | 109 年<br>4 月 | 109 年<br>5 月 | 109 年<br>6 月 |
|--------------|---------|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 煙道<br>Line A | Line A1 | 1.74          | 1.74          | NA           | 1.60         | 1.59         | 1.59         | 1.60         | 1.61         |
|              | Line A2 | 1.73          | 1.73          | NA           | 1.58         | 1.60         | 1.60         | 1.60         | 1.60         |
| 煙道<br>Line B | Line B1 | 1.61          | 1.67          | NA           | 1.58         | 1.58         | 1.59         | 1.59         | 1.59         |
|              | Line B2 | 1.60          | 1.67          | NA           | 1.59         | 1.60         | 1.60         | 1.60         | 1.59         |

單位：kPa

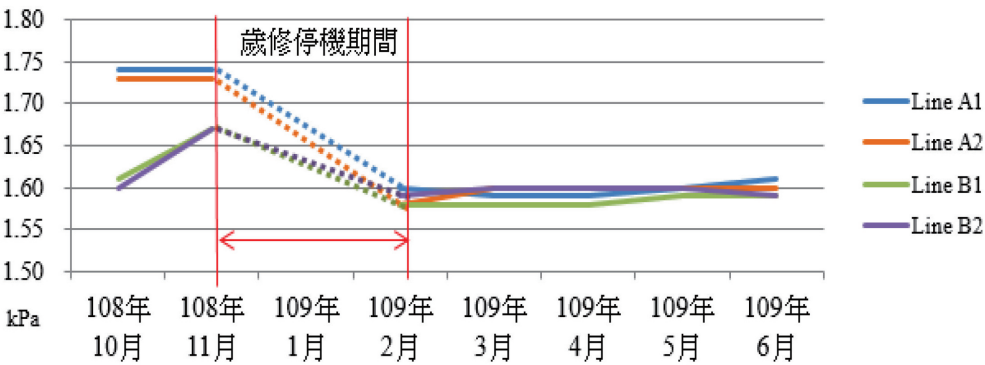


圖 4 一號機歲修前後各煙道總壓差

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

表 5 一號機歲修後各倉室壓差

|                   |           | 更換前        |           | 更換後       |           |           |           |
|-------------------|-----------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 抄表日期<br>總壓差 (kPa) | 2019/10/8 | 2019/11/20 | 2020/2/20 | 2020/3/16 | 2020/4/20 | 2020/5/18 | 2020/6/15 |
| A11               | 1.55      | 1.53       | 1.44      | 1.41      | 1.41      | 1.39      | 1.42      |
| A21               | 1.42      | 1.51       | 1.45      | 1.43      | 1.43      | 1.43      | 1.45      |
| B1                | 1.42      | 1.56       | 1.44      | 1.44      | 1.44      | 1.41      | 1.39      |
| B21               | 1.30      | 1.60       | 1.47      | 1.47      | 1.47      | 1.44      | 1.43      |
| 1 排平均             | 1.42      | 1.55       | 1.45      | 1.44      | 1.44      | 1.42      | 1.42      |
| A12               | 1.60      | 1.52       | 1.49      | 1.49      | 1.50      | 1.46      | 1.47      |
| A22               | 1.55      | 1.53       | 1.52      | 1.51      | 1.51      | 1.48      | 1.48      |
| B12               | 1.48      | 1.59       | 1.46      | 1.43      | 1.43      | 1.44      | 1.46      |
| B22               | 1.45      | 1.57       | 1.44      | 1.44      | 1.44      | 1.47      | 1.48      |
| 2 排平均             | 1.52      | 1.55       | 1.48      | 1.47      | 1.47      | 1.46      | 1.47      |
| A13               | 1.40      | 1.59       | 1.50      | 1.50      | 1.50      | 1.50      | 1.51      |
| A23               | 1.55      | 1.55       | 1.47      | 1.48      | 1.48      | 1.48      | 1.49      |
| B13               | 1.50      | 1.62       | 1.54      | 1.52      | 1.52      | 1.49      | 1.49      |
| B23               | 1.50      | 1.68       | 1.55      | 1.53      | 1.53      | 1.52      | 1.52      |
| 3 排平均             | 1.49      | 1.61       | 1.52      | 1.51      | 1.51      | 1.50      | 1.50      |
| A14               | 1.65      | 1.62       | 1.43      | 1.41      | 1.41      | 1.53      | 1.54      |
| A24               | 1.60      | 1.63       | 1.44      | 1.46      | 1.46      | 1.52      | 1.54      |
| B14               | 1.55      | 1.71       | 1.43      | 1.45      | 1.45      | 1.51      | 1.52      |
| B24               | 1.58      | 1.61       | 1.40      | 1.39      | 1.39      | 1.47      | 1.48      |
| 4 排平均             | 1.60      | 1.64       | 1.43      | 1.43      | 1.43      | 1.51      | 1.52      |



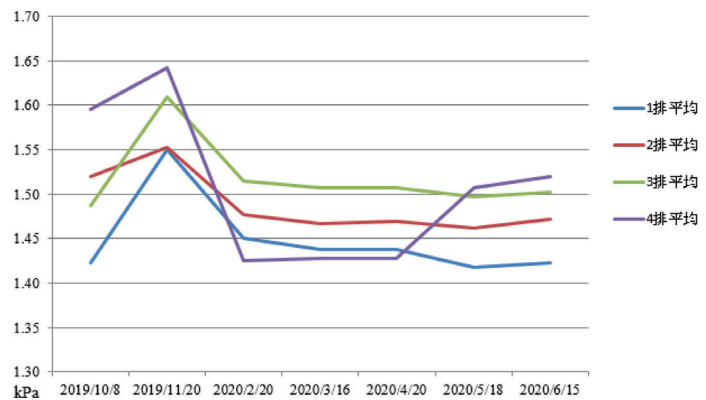


圖 5 一號機歲修後總壓差

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

依一號機歲修更換 4 倉 /4,080 只濾袋經驗，推算所需之時程，下次在相同歲修停機時間內，若要更換剩餘的 12 倉 /12,240 個濾袋時程上相對緊迫。故二號機提高更換數量至 7 倉 /7,140 只濾袋，以確保之後歲修停機時如期完成更換濾袋工作。

二號機更換濾袋倉室之原則，是根據長期記錄各倉室壓差變化值，選擇壓差相對高之倉室為選定基準。DRS 系統是以總壓差為監控基準，每條 Line 設置 2 組差壓計，迴授至控制室，唯各單獨倉室之壓差值則須至現場記錄。依觀察記錄結果，第三、四排之壓差值與其他一～二排的倉室皆相對略高 ( 表 7)，故選定更換第三、四排。

表 6 二號機歲修前後總壓差

|              |         | 更換前         |             | 更換後         |            |             |             |             |             |             |
|--------------|---------|-------------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 二號機<br>總壓差   | 年月      | 108年<br>12月 | 109年<br>01月 | 109年<br>02月 | 109年<br>3月 | 109年<br>04月 | 109年<br>05月 | 109年<br>06月 | 109年<br>07月 | 109年<br>08月 |
| 煙道<br>Line A | Line A1 | 1.59        | 1.59        | 1.59        | NA         | NA          | 1.57        | 1.59        | 1.58        | 1.58        |
|              | Line A2 | 1.56        | 1.60        | 1.57        | NA         | NA          | 1.57        | 1.58        | 1.59        | 1.59        |
| 煙道<br>Line B | Line B1 | 1.60        | 1.68        | 1.61        | NA         | NA          | 1.57        | 1.59        | 1.59        | 1.58        |
|              | Line B2 | 1.61        | 1.57        | 1.61        | NA         | NA          | 1.57        | 1.58        | 1.60        | 1.59        |

單位：kPa

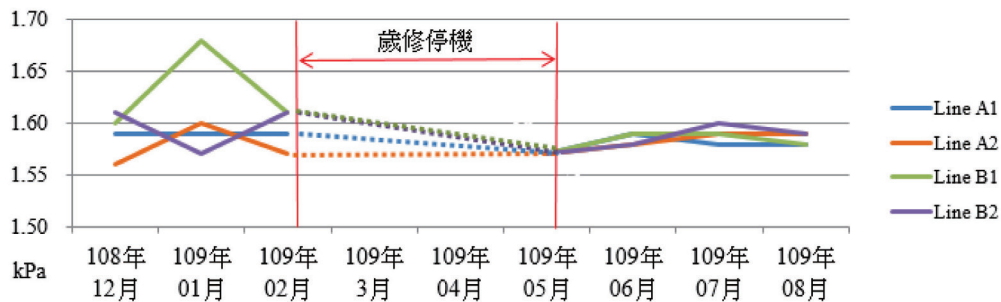


圖 6 二號機歲修前後總壓差趨勢圖

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

表 7 二號機歲修前後各倉壓差

| Unit2             |            | 更換前        |           |           | 更換後       |           |           |
|-------------------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 抄表日期<br>總壓差 (kPa) | 2019/11/27 | 2020/01/08 | 2020/2/27 | 2020/5/18 | 2020/6/15 | 2020/7/10 | 2020/8/12 |
| A11               | 1.40       | 1.48       | 1.41      | 1.45      | 1.44      | 1.44      | 1.47      |
| A21               | 1.35       | 1.50       | 1.39      | 1.38      | 1.38      | 1.37      | 1.40      |
| B1                | 1.45       | 1.50       | 1.42      | 1.47      | 1.45      | 1.42      | 1.44      |
| B21               | 1.45       | 1.50       | 1.42      | 1.46      | 1.40      | 1.42      | 1.42      |
| 1 排平均             | 1.41       | 1.50       | 1.41      | 1.44      | 1.42      | 1.41      | 1.43      |
| A12               | 1.48       | 1.49       | 1.48      | 1.39      | 1.41      | 1.41      | 1.43      |
| A22               | 1.40       | 1.51       | 1.42      | 1.47      | 1.45      | 1.45      | 1.46      |
| B12               | 1.45       | 1.50       | 1.48      | 1.38      | 1.42      | 1.43      | 1.45      |
| B22               | 1.48       | 1.53       | 1.50      | 1.43      | 1.45      | 1.47      | 1.47      |
| 2 排平均             | 1.45       | 1.51       | 1.47      | 1.42      | 1.43      | 1.44      | 1.45      |
| A13               | 1.50       | 1.52       | 1.50      | 1.48      | 1.50      | 1.50      | 1.52      |
| A23               | 1.45       | 1.58       | 1.50      | 1.39      | 1.40      | 1.42      | 1.41      |
| B13               | 1.51       | 1.60       | 1.51      | 1.41      | 1.48      | 1.44      | 1.45      |
| B23               | 1.51       | 1.60       | 1.52      | 1.39      | 1.47      | 1.44      | 1.45      |
| 3 排平均             | 1.49       | 1.58       | 1.51      | 1.42      | 1.46      | 1.45      | 1.46      |
| A14               | 1.40       | 1.55       | 1.38      | 1.36      | 1.46      | 1.47      | 1.49      |
| A24               | 1.40       | 1.60       | 1.41      | 1.32      | 1.36      | 1.40      | 1.40      |
| B14               | 1.40       | 1.60       | 1.40      | 1.50      | 1.58      | 1.54      | 1.52      |
| B24               | 1.40       | 1.62       | 1.40      | 1.51      | 1.57      | 1.55      | 1.54      |
| 4 排平均             | 1.40       | 1.59       | 1.40      | 1.42      | 1.49      | 1.49      | 1.49      |

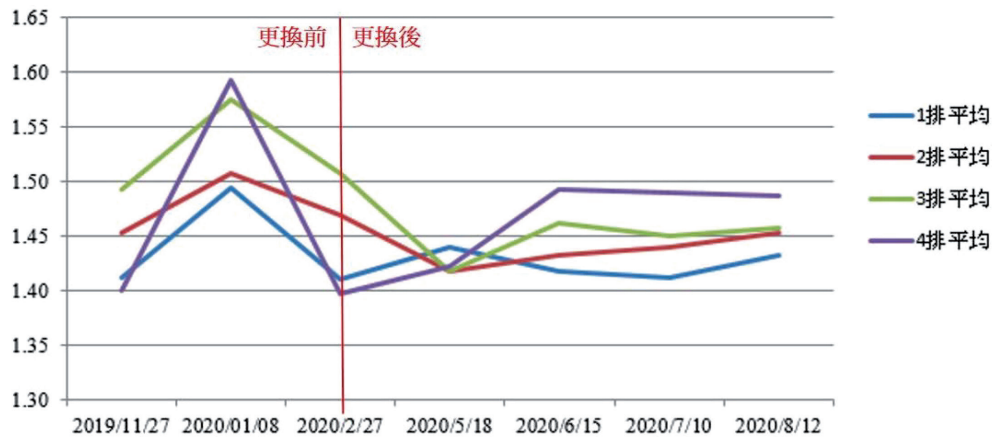


圖 7 二號機歲修前後總壓差

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

除了更換倉室選擇外，濾袋安裝後的檢查和塗層測試 (Coating) 也極為重要，避免影響起機後的效率及使用年限，分別敘述如下。

(2) 新濾袋預塗處理 (Pre-coating)

在新濾袋安裝完成後、初次使用之前，需用粉罐車先將熟石灰由 DRS 進口煙道之噴注口注入，以約 15 分鐘 1 公噸之穩定速度，並於每 10 分鐘記錄 1 次壓差，直至達到目標值，此過程使新濾袋表層形成一層塵餅 (Dust Cake) 以保護濾袋免於堵塞、濕氣，提高粉塵收集效率，並增強濾袋的使用壽命和透氣性及提高脈衝清洗效果。

為確保預塗處理成效建彰，施作期間全程監控倉室壓差變化及再開蓋檢視是必要步驟。

(3) 線上塗裝 (On-line Coating)

線上塗裝的重要性之一為避免在鍋爐燃輕油起機期間，油灰伴隨煙氣進入濾袋室，造成濾袋表面的酸化侵蝕及堵塞，而降低濾袋使用壽命，甚至造成未來籠架「卡袋」之情形，反向增加下次更換濾袋的難度、工期、歲修成本，亦可能在更換時損害籠架。

和其他廠區不同，由於大林電廠未設置自動飛灰注入系統 (Ash Injection System)，須由灰罐車接上輸送管路送至入口煙道注入口，由地面操作人員進行輸灰流量控制。實際操作時，為了配合灰罐車調度，無法連續操作，易有煙氣中之油灰流入濾袋室之疑慮。增設自動飛灰注入系統，則可免除人工操作之變數。

#### (4) 風門檢測

風門的作用為控制煙氣流向，正常運轉下，含粉塵煙氣 (Dirty Air) 由入口煙道，藉由進口風門導引，經過均流板使煙氣均勻進入濾袋室。濾袋過濾後之乾淨煙氣 (Clean Air)，再由出口風門進入出口煙道排出。當發生緊急狀況時，如煙氣溫度到達  $165^{\circ}\text{C}$ ，或壓差上昇至  $2.0\text{ kPa}/10\text{ mins}$ ，進、出口風門立即關閉，而旁通風門開啟，將含粉塵煙氣由入口煙道直接通過旁通風門進入出口煙道排出。

風門在長時間經過煙氣腐蝕及煙氣溫度導致表層的熱變形，易有關閉不緊的情況。檢查時以厚薄規，針對閥板進行多點間隙量測，確保關閉時可隔絕煙氣通過。

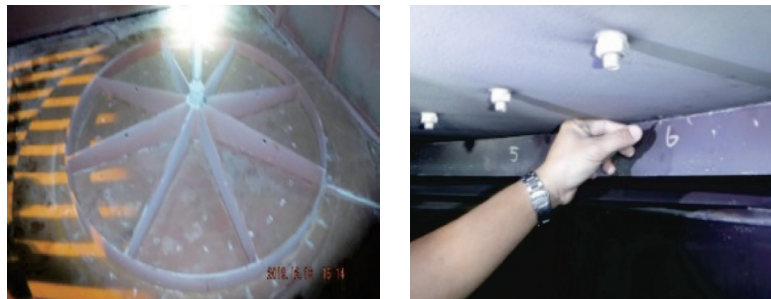


圖 8 風門檢測

## 2. 歲修後追蹤事項

大修結束後，施工團隊與電廠持續追蹤運轉數據，以期 DRS 系統在下次大修來臨前都能穩定運轉。

#### (1) 定期監測

透過定期紀錄 DRS 各倉壓差、脈衝壓力與各相關數值 (風量、發電量等)，可從數據趨勢做為判斷 DRS 系統運轉與濾袋壽命的基準之一，也能做為未來任何系統問題分析的資料來源。

(2) 舊袋檢測

在未更換新濾袋的倉室，隨機抽樣各 1 只濾袋送第三方檢測，檢測項目為透氣性 (Air Permeability) 與抗拉強度 (Tensile Strength)，解讀此數據有助電廠評估濾袋剩餘使用年限和潛在問題。

(3) 下次大修規劃

長遠而言，電廠若能提前在下次大修前做規劃，例如備品準備。以大林機組為例，閥類的損耗為最常見之問題，如有足量的備品，可縮短大修修復的時間，也可保證閥類的使用年限。

## 參考文獻

P. Wieslander, S. Francis S and A. Vajpeyi, High Ratio Fabric Filters with 12 m Long Bags for Large Coal Fired Power Plants, 11th International Conference on Electrostatic Precipitation, Bangalore, India.

Tanaka(2016)，Particle Removal System Operation & Maintenance Manual.

# 工業污染防治刊物徵稿

主辦單位：IDB 經濟部工業局 執行單位：IDB 台灣產業服務總中心

「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治之技術及管理工具，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109年已發行150期，專業論著已逾1,786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. **空氣污染與噪音類**：空污減量、多污染與跨媒介之整治案例
2. **廢(污)水處理類**：節水廢水回收再利用、廢水氨氮及重金屬處理技術
3. **廢棄物類**：綠色材料與永續物料管理
4. **環境化學及微生物**：土壤與地下水整治、毒性化學物質管理
5. **環境規劃與管理**：再生能源發展與應用、永續發展策略、生命週期評估及淨零碳排

## 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



張工程師 專線電話：(02)7704-5176

E-mail：[yingfang@ftis.org.tw](mailto:yingfang@ftis.org.tw)

陳工程師 專線電話：(02)7704-5167

E-mail：[sabinachen@ftis.org.tw](mailto:sabinachen@ftis.org.tw)



經濟部工業局 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 109 年已發行 150 期，專業論著已逾 1,786 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) 空氣污染與噪音類
  - (2) 廢(污)水處理類
  - (3) 廢棄物類
  - (4) 環境化學及微生物類
  - (5) 環境規劃與管理類
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:sabinachen@ftis.org.tw。
6. 詢問本刊相關事宜，請電(02)2784-4188 轉 5167 「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 3.4cm、下界 6.4cm、左界 2.05cm、右界 5.34cm；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/m<sup>3</sup>、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，p 3-9。

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.

附件

## 著作權讓渡同意書

作 者：\_\_\_\_\_

題 目：\_\_\_\_\_

作者通訊處：\_\_\_\_\_

一、保證本篇文章除本次投稿外，相同內容未投國內外其他有版權之期刊，或有抄襲之情事；如 有上述情形願抽回本文。

二、同意將本篇文章之著作權自接受刊登日起，讓渡給經濟部工業局，財團法人台灣產業服務基金會因承辦經濟部工業局計畫，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，但須註明本文章作者。作者保留引用文章在自己著作之權利。如爾後有抄襲、版權、著作權等之法律紛爭，文責由作者自負。

此 致

財團法人台灣產業服務基金會

作者：\_\_\_\_\_簽章

年 月 日

發行所：經濟部工業局  
106臺北市大安區信義路三段41之3號(信義大樓)  
TEL: (02) 2754 - 1255  
FAX: (02) 2704 - 3753  
本期刊全文網址：<https://proj.ftis.org.tw/eta/>



本期刊下載

|      |            |
|------|------------|
| ISSN | 12042783   |
| GPN  | 2007100008 |
| 工本費  | 250元       |