



工程

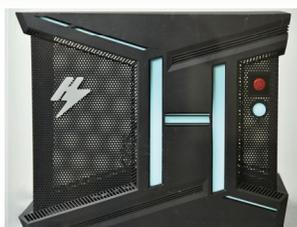
- ▶ 跨領域的永續轉型—讓綠能場域成為環境生態與社區生活的一部分
- ▶ 地熱電廠建置與運轉工程經驗談
- ▶ 臺灣氫氨發展與應用
- ▶ 廢溶劑多段回收技術，成功實現綠色生產轉型
- ▶ 刨除料資源全循環應用技術
- ▶ 太陽能模組廢棄潮來襲—回收挑戰與可拆解模組的綠色解方
- ▶ CO₂固碳生產碳酸酯類塑料技術及應用





INNOVATING
A BETTER FUTURE

工研院與產業共同打造淨零時代競爭力，邁向零碳排最後一哩路



氫能分散式發電系統



AI低碳無機聚合混凝土技術



循環包材與資源管理平台



全球首創H型鋼構雷射鐳接技術



工業技術研究院
Industrial Technology
Research Institute



更多淨零技術
請見工研院官網





綠色能源與循環經濟

本專輯以「綠色能源與循環經濟」為主題，共收錄七篇文章，展現臺灣邁向 2050 淨零排放的技術實踐與應用創新。綠能部分涵蓋了太陽光電、地熱發電與氫能應用，循環經濟則探討廢溶劑回收、瀝青再利用、光電模組拆解與 CO₂ 固碳塑料技術等。內容融合工程實務與永續理念，呼應國家政策轉型方向，期盼激發學術界、產業界與研究機構共同投入綠色研發，推動臺灣邁向潔淨永續的未來。

綠色能源與循環經濟-專輯序言

客座主編：萬皓鵬／工業技術研究院綠能與環境研究所副所長

- 3 跨領域的永續轉型—讓綠能場域成為環境生態與社區生活的一部分 / 蔡絲婷
- 12 地熱電廠建置與運轉工程經驗談 / 黃峻彬
- 23 臺灣氫氨發展與應用 / 萬皓鵬、沈政憲、潘育絜、吳鴻森、李昭仁、劉峻嶠、石菱菱
- 36 廢溶劑多段回收技術，成功實現綠色生產轉型 / 陳萬原、郭昱伶、李兆奇
- 46 刨除料資源全循環應用技術 / 陳志豪、游佩蓉、胡芳瑜、彭承祖
- 55 太陽能模組廢棄潮來襲—回收挑戰與可拆解模組的綠色解方 / 彭裕民、蘇俊瑋、潘恩郁
- 68 CO₂固碳生產碳酸酯類塑料技術及應用 / 許希彥、薛茂霖、黃英婷

回顧與展望

- 86 電機工程如何面對時代的變局及應對人工智慧帶來的衝擊與建設 / 陳昌勇、陳慶紘
- 91 2024機械產業之回顧與展望 / 蔡志成
- 96 建築教育認證 / 洪育成
- 101 台灣混凝土學會積極推動低碳與循環經濟趨勢下的規範變革 / 邱暉仁
- 105 農田水利金質工程—灌溉過去、串連未來：福馬圳百年水脈翻轉的共好工程 / 施漢鵬、陳彥儒、鍾易達、孫維廷
- 117 113年台灣鑛冶工業之進展 / 王錫福

工程與技術

- 122 機場捷運延伸線整合兩套號誌系統的驗證測試 / 李文杰、陳永森、劉少宇、李鐸、陳景池、王村竹、劉建宏

理事長 楊宗興
 常務理事 伍勝園 施義芳 陳仲賢 楊偉甫
 鄭光遠 賴建信
 理事 王宇睿 江秀丹 呂良正 宋裕祺
 李佩雯 李政安 林奇宏 林財富
 林聰利 胡竹生 莫仁維 許泰文
 陳守道 陳哲生 黃榮裕 黃維焄
 楊正君 廖學瑞 顏家鈺 嚴世傑

常務監事 楊正宏
 監事 柳文成 歐善惠 蔣啟恆 賴建宏

秘書長 李定壯
 副秘書長 胡美貞

發行所 中國工程師學會出版委員會
 主任委員 嚴世傑
 委員 呂良正 李定壯 林財富 林聰利
 胡竹生 許泰文 鄭枸瀾 蘇育弘
 總編輯 周頌安
 客座主編 萬皓鵬
 編輯 李宥萱 林秀琴 梁愛倫 蔣雪芬
 劉展宏 劉芳好

聯絡地址 105409台北市南京東路五段171號
 電話 (02)2769-8388 轉03655、03858
 傳真 (02)2763-4555
 會址 100026臺北市仁愛路二段1號3樓
 電話 (02)2392-5128
 傳真 (02)2397-3003
 網址 <http://www.cie.org.tw>
 郵政劃撥 00059892
 戶名 社團法人中國工程師學會
 編印 麥田資訊股份有限公司
 地址 新北市中和區板南路496-6號1樓
 電話 (02)2322-1930

行政院新聞處出版事業登記證局版臺誌 0765號
 中華郵政臺北誌字第721號執照登記為雜誌交寄

*入會申請手續請上本會網站查詢

綠色能源與循環經濟專題 一專輯序言

工業技術研究院綠能與環境研究所副所長 / 萬皓鵬

2050年淨零排放為全球共識，臺灣在2022年《氣候變遷因應法》通過後，奠定了法制基礎。同年，國發會發布「臺灣2050淨零排放路徑」，提出能源、產業、生活、社會四大轉型策略，輔以科技研發與氣候立法，訂定風光發電、氫能、儲能、資源經濟等12項關鍵戰略，全力朝向淨零之路邁進，而綠色能源、資源循環，亦成為開源與節流非常重要的議題。

本專輯以「綠色能源與循環經濟」為題，邀集國內研究與實務專業人士，提出在前述主題下，各領域技術創新與應用、工程實務與經驗、工程與環境永續等面向，共七篇精彩的文章分享，包括：綠色能源三篇，循環經濟四篇。

在綠色能源方面，特別邀請韋能能源公司蔡絲婷資深經理，針對嘉義「義竹太陽光電廠」，在設置過程，如何結合光電工程、社會工程，與生態工程等面向，轉型為兼顧生態與再生能源的示範場域。在「地熱電廠建置」經驗上，則邀請了環台地熱公司黃峻彬協理，針對東部金崙地熱電廠，由場址評估、地熱探勘，到電廠建廠的寶貴經驗，分享給讀者。此外，在全球積極布局的「氫應用」部分，則是邀請工研院氫能小組，由國際發展趨勢，提出臺灣2050氫應用發展技術藍圖，與對於臺灣發展氫能各面向具體建議，以分享讀者。

在循環經濟方面，在「廢溶劑多段回收」方面，邀請到崑崙綠能環保公司陳萬原助理總工程師，針對廢溶劑各種分離技術作說明，並以半導體業廢異丙醇回收為例，說明綠色生產轉型的成果。在「道路刨除料全資源循環」，則是邀請工研院綠能所陳志豪總監，分享創新的瀝青廢料全回收再利用技術，以達成資源循環應用與經濟、環境多贏目標。在「太陽光電模組回收」部分，特別邀請循旭科技公司彭裕民董事長，分享高效能易拆解太陽供電模組綠色解方，促進光電產業永續。最後，邀請工研院材化所許希彥副組長，針對「CO₂固碳產PC塑料生產技術」，分享二氧化碳捕集與轉化為高值塑膠產品的前瞻技術，為碳中和開闢新路。

本專輯中七篇相當有價值的文章，展現工程技術多元面向，呼應國發會淨零路徑的轉型願景，勾勒出永續發展的挑戰與機會。作為能源環境領域研究者，我深信研究人員與工程師的專業與創新是淨零永續的關鍵。本專輯盼串聯學術、產業與政策，激勵各界全面投入綠色技術。無論您是研究人員、學者、產業界、政策制定推動者，或對於淨零永續關注者，期盼本專輯能拓展您的視野，提昇您相關知識，共同為2050淨零排放奮鬥，共創潔淨永續的明天！



跨領域的永續轉型—讓綠能場域成為環境生態與社區生活的一部分

韋能能源環境永續與在地溝通資深經理 / 蔡絲婷

關鍵字：綠能發展、環境韌性、社會溝通、生態保育、在地共創

摘要

本文以韋能能源嘉義義竹電廠為案例，探討綠能發展如何結合生態保育、社區參與與氣候韌性，實踐跨領域的永續轉型。電廠基地位於嘉義布袋的八區鹽田，該地過去為傳統曬鹽區，2001年因鹽業機械化與國際競爭而停曬，轉型後成為重要的生態保護區與再生能源示範場域。韋能能源在此地推動的光電案場結合了光電工程、社會工程與生態工程三個層面。設計上強調低擾動與友善棲地的施工方式，以回應極端氣候挑戰；社會面則透過制度化的溝通機制，從信任建立到推動社區共好計畫，逐步深化與地方連結。綠能生態教育館亦同步啟用，作為環境教育與在地對話的平台。整體而言，此案展現出綠能不僅是發電設施，更可成為串聯自然、人群與知識的永續實踐場域。

一、前言

隨著氣候變遷日益加劇，極端氣候頻繁發生，全球各地都面臨能源轉型的迫切需求。傳統化石燃料不僅資源有限，更是造成溫室氣體排放與環境污染的主因之一。為了減緩氣候危機、達成碳中和目標，世界各國紛紛投入再生能源的發展，其中以太陽能、風力最為普及。綠能的發展不僅是永續的選擇，更是經濟與科技轉型的關鍵驅動力，能促進能源自主、創造綠色就業機會，帶動地方創生與產業創新。同時，發展綠能也有助於提升能源系統的韌性與永續性，為未來世代打造更乾淨、安全的生活環境。因此，綠能已不再只是選項，而是全球邁向永續發展的共同方向。

然而，綠能的發展並非毫無爭議。從選址開始，往往牽涉到土地使用的衝突、生態



棲地的干擾、在地居民的反對聲音，甚至影響原有的景觀與生活方式。在能源轉型的過程中，我們不斷面對「要不要建、蓋在哪裡、誰來承擔代價」等艱難的選擇。推動綠能的同時，也需要誠實面對這些妥協與爭議，尋求在發展與保護之間的平衡。唯有透過更開放的對話、共識的累積與在地參與，才能讓綠能真正成為連結人與環境的力量。

因為我們選擇的不只是一種能源型態，更是一種面對未來的態度——是集中還是共創，是犧牲還是共榮，是競爭還是共好。因此，從綠能工程的技術選擇與規劃開始，延伸到生態工程中對棲地重視與回復，再到社會工程層面對社區的理解與參與模式，需要整合不同的知識與觀點，重新想像一個能源、環境與人共生共存的未來。也期待透過韋能能源嘉義義竹電廠的實際案例與反思，盤點在推動綠能過程中，我們如何理解並回應這三種「工程」的張力與可能。

二、光電工程：以韌性為核心的電廠設計思維

在面對日益頻繁且劇烈的氣候變遷挑戰下，電廠設計從一開始即將「韌性」作為核心考量，並以歷史極端氣候事件為依據，進行一系列技術性應對規劃。根據嘉義縣義竹鄉的風速設計標準為每秒 32.5 公尺，並回顧 2001 年納莉颱風曾帶來每小時高達 477 毫米的暴雨，顯示極端氣候事件已不再是偶發現象，而正逐漸成為常態化風險。這些天氣極端化趨勢，對於基礎設施的設計與韌性提出更高標準，也迫使綠能建設必須納入氣候調適與災害風險管理的整合思維。

為此，抗颱風設計採用超越基本設計規範的風速參數（37.5 公尺／秒），以因應未來更強烈的颱風來襲。同時，因應極端降雨可能導致的洪水災害，工程團隊依據百年重現期洪水模擬結果，並搭配全場高程調整、設備基座抬升、精密排水系統與抽水幫浦配置，確保在強降雨期間仍能穩定運作。

在結構材料方面，支架系統選用具抗風、抗鹽害與耐腐蝕性的設計，對抗濱海地區的強風與高鹽環境。配合定期維護與保養，使用年限可達 30 年以上，降低因極端氣候而導致的損壞與替換成本。

此外，電力系統依據實際模組與變流器規格採 130% 至 140% 的直交流配比，提升發電效能，也預留空間因應未來能源輸出變化。電力傳輸方面，採全線地下化規劃，並以潛鑽工法（HDD）穿越排水設施，避免對水利設施造成干擾，同時保護電纜在極端氣候下的安全性。整體路線也全程利用公有土地與道路，減少用地風險與社會爭議。

除了電廠開發初期的技術設計與規劃外，為在施工期間兼顧生態保護與工程進度，團隊亦採取多項生態友善措施。首先，為確保候鳥擁有穩定的棲息環境，團隊在動工前即於保留區設置圍堤，以維持區域水量，防止乾涸。工程作業亦特別規劃由南向北進行，並刻意避開候鳥棲息季節，以降低對鳥類活動的干擾。此外，於古鹽道保留區內全面禁止使用施工機具，以減少人車對該區的擾動，並持續委託第三方單位進行動植物數量及棲地環境監測。所有相關資訊也將持續公開於韋能能源官網，以落實資訊透明與社會責任。



在施工管理上，也特別強調對環境與野生動物的尊重，除進行施工人員教育外，要求勿破壞棲地，車輛亦應避免衝撞野生動物，若發現受傷個體，須即時通報由專業團體協助照護。同時，選用低噪音工法與設備，必要時改採油壓動力或加裝緩衝裝置，以降低聲音干擾。為控制粉塵，除定時灑水、於出入口設置洗車台，並加裝防塵網，確保空氣品質與周遭環境品質。這些作為顯示出團隊對生態保護的重視，並致力於達成發展與保育共存的目標。

透過這一系列與氣候風險緊密連結的工程技術策略，嘉義義竹電廠不僅是綠能基礎設施，更是對未來氣候挑戰的前瞻回應，打造具備環境韌性與永續性的發展典範。

三、社會工程：從對話到共創：韋能能源嘉義義竹的社會溝通行動

作為全台首座由民營企業設立的綠能生態教育基地，韋能能源嘉義義竹電廠自成立以來，始終以「與土地為鄰、與社區同行」為核心價值，生態保留區的定位與地方溝通視為重要前提，以建置具生態敏感度與社會共識的綠能場域，透過透明參與與跨界合作，持續實踐一套有系統、有溫度的社會溝通策略。從信任建立、共識整合、制度化推進到穩定合作，韋能能源一步步深化與地方的連結，讓綠能不只是技術建設，更成為地方再生的催化劑。

第一階段：信任建立與初步對話（2017-2018）

社會溝通的起點，始於開發初期對棲地保育的重視。2017年起，韋能能源與崑山大

學合作，釐清生態保留區範圍，並與中華鳥會等保育團體現勘，主動回應社會關切的試樁工程影響問題。透過這些早期對話，建立基本互信，也為後續的協作鋪路。

第二階段：共識形成與方案整合（2018）

進入2018年，韋能能源擴大溝通規模，邀請第三方顧問（ERM）及保育單位參與「八區生物多樣性工作計畫」，共同討論圍堤、水位管理與生態復育策略，並向NGO與公部門說明開發選址與保留構想。同年底參與地球公民基金會論壇，更將整體願景向大眾公開，強化溝通的透明度與公共性。

第三階段：制度化推進與參與深化（2019-2020）

溝通進入深化階段後，我們透過工作坊、共創會議等方式，與地方團體與學界共同規劃教育館內容與監測機制，實踐知識共作。2019與2020年陸續舉辦「願景工作坊」，廣納能源署、國產署、保育單位意見，將參與轉化為制度，為電廠營運奠定穩定的社會基礎。

第四階段：穩定協作與效益展現（2020-至今）

2020年起，韋能能源正式啟用嘉義義竹綠能生態教育館，並與高雄市野鳥學會、東海大學合作，建立電廠內的生態保留區人為棲地管理制度，透過常態鳥調、繁殖監測與水位控制，有效提升棲地品質與物種豐度。2020年觀察紀錄顯示，義竹電廠內記錄到102隻黑面琵鷺覓食、棲息，見證光電與生態並存的可能性。



圖 1 韋能能源嘉義義竹電廠，是台灣第一座擁有生態保留區的民營太陽能電廠。

3-1 落實社會價值的具體實踐

在推動綠能轉型的同時，韋能能源不斷深化與地方的連結，透過多元的社會溝通與教育實踐，逐步形塑出一套具體且可持續的公私協作模式。過去六年來，韋能能源攜手義竹教會課輔班，以及和順國小、義竹國中、布袋國中等學校，共同推動融合科技與環境教育的「綠色科技小旅行」。活動中，孩子們手持平板、化身小小科學家，在綠能生態教育館內進行觀察與紀錄，將學習歷程轉化為專屬的科學觀察報告，展現出童趣與專注並存的學習成果。

這項寓教於樂的活動，讓孩子們近距離接觸太陽能應用、濕地生態與環境保護等議題，也在過程中培養了他們對永續發展的初步理解與興趣。透過數位科技與場域學習的結合，綠能生態教育館逐步成為義竹地區的重要環境教育據點，也持續透過策展與參訪深化公眾溝通，迄今已吸引超過3,700人次、橫跨10至90歲年齡層參與，涵蓋學校、機關與民間社群。館內「日光域」策展講述從鹽田到綠電的轉型歷程，讓參訪者從歷史與地景出發，理解能源轉型與地方再生的交織關係。



在環境教育之外，韋能能源亦積極促進社會共好。2024 年起推動「與光為鄰·社區共好計畫」，提供專案型電力開發協助金，開放雲林、嘉義、台南三地的在地立案團體申請，鼓勵發展涵蓋綠能、教育、文化與社區發展的地方行動方案。這項計畫不僅彰顯韋能能源作為在地「好鄰居」的角色，也協助地方團體實現其公共願景，累積永續行動的在地能量。

韋能能源亦持續拓展與社區的對話平台。例如，嘉義義竹綠能生態教育館接待台南新營社區大學的特別場次，主題為「『能』量的『態』度——能源與生態的平衡」，邀集

環境講師、光電產業代表與公民學習者，透過實地導覽與主題論壇，探討太陽能開發與棲地保育之間的共生可能，促進地方居民從更全面的視角理解綠能議題，並主動參與公共討論。

從孩子的科技探索，到社區的公開對話，韋能能源透過系統化的溝通策略，實踐「在地深耕、與光共好」的理念。這一連串行動不僅拉近企業與居民的距離，也透過長期對話與教育場域的經營，落實綠能與環境共生的可能性，鋪展出一條兼具綠能發展、教育參與與社區連結的永續路徑。



圖 2 2024 年韋能能源舉辦「綠能跨域共行座談會」探討綠能與生態共榮發展雙贏策略。



3-2 從溝通到共創的永續進程

韋能能源嘉義義竹電廠的社會溝通歷程，是一場從單向說明到多方共創的轉變歷程。它不只是企業履責的個案，更是綠能開發如何以核心價值、制度與行動積累社會信任的實踐範例。從保育參與、教育深化到社區共好，韋能能源以一座電廠為起點，描繪出能源與地方共生的新樣貌，實踐真正的在地永續。

四、生態工程：多樣化棲地營造策略

生態工程本質在於順應自然、尊重系統。它不以征服或扭曲自然為目標，而是從了解生態系的運作動態出發，避免在開發過程中造成不可逆的破壞。更積極地說，生態工程是一種跨領域合作的實踐，結合森林、水保、地質、土木、生態、社會與經濟等多元知識，致力於生態復育與土地永續再利用。

在韋能能源嘉義義竹電廠的案例中，生態工程並非輔助，而是貫穿整體規劃與執行的核心理念。自 2018 年 4 月起，嘉義義竹電廠即展開長期且系統性的生態監測，並根據監測成果調整設計與管理策略，實踐展現了生態保育與綠能開發的協同可能，透過多面向的監測與棲地營造策略，有效回應棲地水文變化、鳥類繁殖及生態系鏈結等挑戰。

生態工程包括重點監測黑面琵鷺、東方環頸鴿、高蹺鴿及過境候鳥，並依照繁殖季節調整調查頻率，利用物種豐富度分析和群聚結構統計工具，掌握不同季節與年度的鳥類生態趨勢。棲地改善方面，保留過往廢棄鹽田結晶池作為繁殖用地，並根據地勢與水文條件建置「水中島」為暴雨期鳥類提供緊急棲息點，清理河道密植區以利幼鳥遷徙，並鋪設碎石築巢平台、稻草蓆與蚵殼碎石等多樣微棲地，提升繁殖成功率。



圖 3 黑面琵鷺在義竹電廠的生態保育區停留與覓食。



圖4 數十隻身形優雅的高蹺鶴，在水面上悠然起舞，顯示生態保留區具備良好濕地棲地條件，生態維護成效漸顯。

為提升棲地品質，定期進行水質監測涵蓋氣溫、水溫、鹽度、pH 值、溶氧量、濁度及底泥重金屬等指標，並搭配懸浮固體監測，呈現完整的棲地水文與污染負荷輪廓。監測結果顯示水質隨季節與降雨鹽度波動，需持續追蹤以因應長期氣候變遷，並以水質數據指導復育區設計與維護。

候鳥的美食天堂，底棲動物與魚蝦蟹調查，依標準作業程序採集底棲軟體動物及魚蝦蟹，記錄物種數量與群聚狀況。調查發現魚蝦蟹數量與鳥類覓食行為密切相關，顯示下層生物群對上層生態系具決定性影響。為提升鳥類覓食機會，於特定季節、潮汐時間引進魚蝦蟹苗，作為生態操作手段。

為減少工程對生態的擾動，調整工程動線避免繁殖期干擾，施工後將壓實道路鋪回碎石，轉化為鳥類利用空間，並設立出入口控管以維持棲地穩定性。對水門與排水設施對魚蝦遷移的影響，設置對照樣點以評估並支持未來水道連通性改善。

除了水質監測，水文調節與環境風險管理對候鳥棲地環境也非常重要。因此，我們設置數個抽水站為主要水位控制設施，並維持潮溝水深至少 50 cm 以保護底棲生物及水鳥覓食環境。

嘉義義竹電廠透過長期生態監測與資料累積，建立了以數據為本的棲地管理模



圖 5 民眾參訪嘉義義竹綠能生態教育館時，可了解鹽田的歷史變遷，並觀察水鳥生態的豐富多樣。

式，實現科技與自然的協作。未來持續的監測與科學分析，將是推動「低碳、永續、生態共融」開發願景的核心基石，並為綠能人工濕地生態保育與綠能發展提供寶貴經驗。韋能能源嘉義義竹電廠不僅是綠能推動的示範基地，更是一處「綠能與生態如何共存」的戶外教室，不僅是對眼前問題的回應，也顯示了工程設施與生態系統、社會溝通需長期監測與動態管理的必要性。唯有建立從專案開發前期、施工期、維運期全流程的「生態適應性管理機制」，方能確保此地持續維持濕地功能與生物多樣性，同時實現再生能源與生態永續的雙重願景。

五、結論：以二十年為尺度，邁向韌性綠能願景

韋能能源以嘉義義竹電廠為案例，從「光電工程」、「生態工程」與「社會工程」三個相互交織的面向，探討綠能發展與環境永續如何共構共生。在氣候變遷驅動能源轉型的當下，雖然再生能源勢在必行，但若忽略濕地生態、水文條件與在地社會的歷史脈絡，反而可能引發生態衝擊與社區反感。韋能能源透過長期的生態監測、靈活調整施工策略，並積極與在地社群展開溝通協作，呈現出一種跨領域整合、工程與自然並進的實踐模式。若開發初期的設施缺乏後續的長期投入與關注，保留區將可能淪為形式化的「生



態蚊子館」。唯有不間斷的投入與持續的優化，才能落實生態共生的初衷，真正延續生命的韌性與價值，而非僅止於短期的展示與美化。

這是一場需要長時間承諾的旅程。我們一方面積極爭取內部資源，另一方面積極與外部夥伴攜手合作，為未來二十年的願景打下紮實根基。我們深信，真正具韌性的永續能源建設，不僅仰賴技術創新，更需深耕對生態系統復原力的理解，並支持地方行動力的發展。唯有透過長期對話、資源投入與科學化管理，才能實現低碳轉型、生態永續與在地共融的三重目標。

參考文獻

1. 行政院國家永續發展委員會 (2022)。《我國永續發展目標自願檢視報告 (VNR)》。 <https://nsdc.epa.gov.tw>
2. 中央氣象署 (2022)。《氣候變遷調適政策專區》。 <https://www.cwa.gov.tw>
3. IPCC (2021)。《第六次評估報告摘要：氣候變遷 2021》。 <https://www.ipcc.ch>
4. 嘉義縣政府 (2020)。《嘉義縣國土計畫書 (草案)》，內含風速與氣候資料。
5. 韋能能源 (2018-2023) 布袋鹽田濕地報告。
6. 曾憲志、劉俊志 (2021)。〈光電與生態共存的可能性：以嘉義義竹案場為例〉，《台灣能源季刊》，第 8 期，頁 34-47。
7. 中華民國野鳥學會 (2022)。《嘉義濕地與黑面琵鷺棲地觀察年度報告》。
8. 高雄市野鳥學會 (2021)。《義竹濕地人為棲地管理制度初步成果報告》。
9. 東海大學生態暨環境研究中心 (2020)。〈義竹案場鳥類調查初步成果〉。
10. 地球公民基金會 (2018)。《光電與土地：從八區案談太陽能的社會責任》，論壇記錄文件。
11. 社區大學全國促進會 (2023)。《能源公民的養成：社大課程案例分享彙編》，頁 52-59。
12. 韋能能源 (2024)。《與光為鄰·社區共好計畫簡介手冊》。
13. 和順國小、義竹教會 (2021-2024)。「綠色科技小旅行」合作計畫成果彙編。



地熱電廠建置與運轉工程經驗談

環台地熱股份有限公司營業部協理 / 黃峻彬

關鍵字：金崙地熱、地熱井、井下泵浦、ESP (Electrical Submersible Pump)、LSP (Line Shaft Pump)、big hole

摘要

本文主要是分享個人過去在地熱產業界進行金崙流域地熱發電廠的開發經驗，這個專案在臺灣的地熱產業有兩項領先引入國際地熱規格及設備的項目，包括採用大口徑 (big hole) 地熱井，以及引進臺灣第一組井下泵浦 (ESP, Electrical Submersible Pump)，建立國內首座以 ESP 增產防結垢的地熱電廠。地熱發電作為基載能源，國內已併網案場已可展現其 24 小時長期穩定運轉的能力，展望未來，引進國際鑽井技術將國內鑽井量能大幅提升，改善土地難以取得的問題後，我國地熱發電裝置容量達到數個 GW (百萬瓩) 將是指日可待。

一、前言

地熱發電產業在國際上是一個已經發展百年以上的產業，全球第一個地熱發電廠是於 1904 年由義大利科學家 Piero Ginori Conti 發明建構，從那以後各國陸續發展，根據 Think GeoEnergy 網站統計 [1]，到 2025 年 1 月的全球地熱發電裝置容量來到 16,873 MW (千瓩)，為了便於讀者了解國際上地熱發電產業的發展，以下節錄 Think GeoEnergy 網站上 2025 年跟 2015 年的各國地熱發電裝置容量統計圖表作為對照。十年以來有兩個國家呈現突飛猛進的發展，印尼從 1,345 MW 提升到 2,653 MW，增加了 1,308 MW；土耳其從 539 MW 提升到 1,734 MW (2021 年底就已經 1,710 MW 了)，增加了 1,195 MW。其他大多數國家都呈現小幅成長，僅墨西哥與義大利小幅萎縮 (圖 1 及圖 2)。

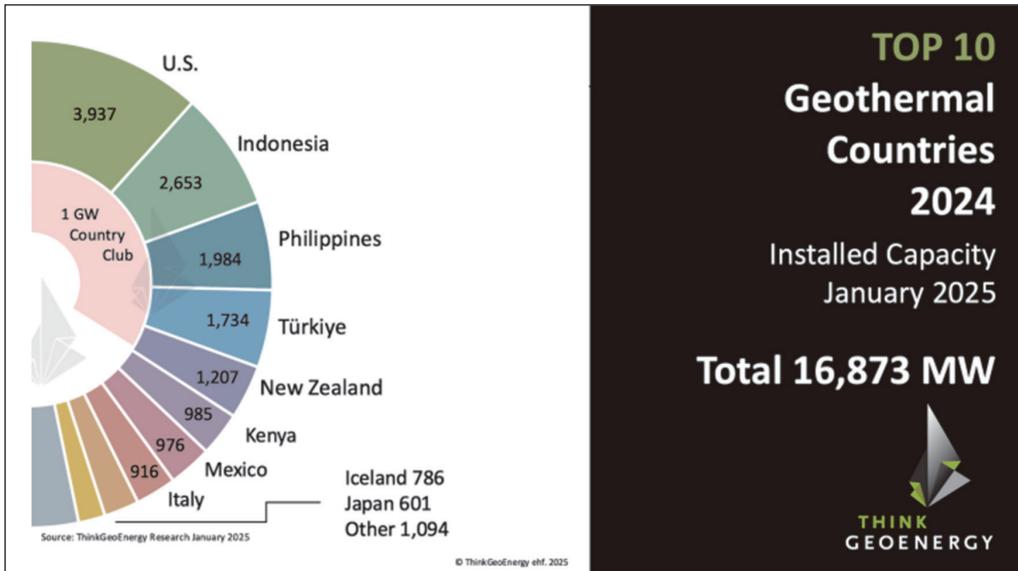


圖 1 2025 年前十大地熱發電國 [1]

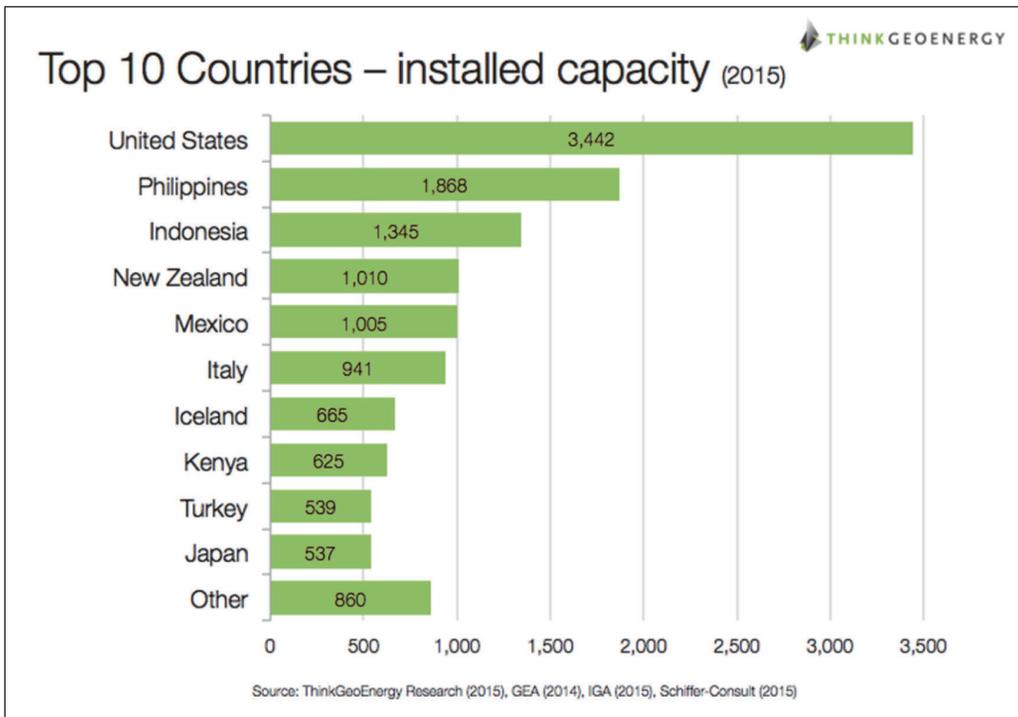


圖 2 2015 年前十大地熱發電國 [1]



由印尼與土耳其的經驗來看，當環境條件（熱源、開發技術、法規環境等等）成熟時，地熱發電的裝置容量其實是可以很快提升的，其中土耳其與臺灣地熱條件相近，以變質岩地熱為主，其裝置容量可以在 5、6 年之間快速提升 1 GW 以上，實可做為臺灣地熱產業見賢思齊的模範。

地熱發電作為我國再生能源的一員，在 2009 年再生能源發展條例元年就訂有躉購費率，然而由於涉及到的技術門檻較高，一直到 2016 年第四季宜蘭清水地熱 BOT (Build-operate-transfer)+ ROT(Rehabilitate-Operate-Transfer) 案決標後，國內始有民間企業投入地熱電廠建置。秉持對地熱發電產業的熱情，個人任職的前公司 2017 年在工研院綠能所地熱團隊的建議下，即開始投入金崙地熱發電專案。在克服新產業面臨的諸多難題後，終於在 2022 年 1 月併聯試運轉開始發電，為臺灣的地熱發電產業史開啟了新的一頁。從 2017 年 3 月開始找地租地到 2022 年 1 月併聯發電，耗時將近 5 年，說起來是個相當漫長的開發建置過程，但從這個過程中所學

習、克服的種種，目前看來對於臺灣地熱產業的推展是有相當的助益。關於該地熱電廠建置及營運過程的一些個人認為值得一提的心得，以下就以科普的方式野人獻曝，供各界先進參考指教。

二、地熱井

國際上地熱井的規格主要是沿用油氣井產業美國石油學會 (API, American Petroleum Institution) 的規格，以 API 規格的鑽頭及井管建置地熱井，因此大致可依照套管口徑的不同分為標準井 (standard hole)、大口徑井 (big hole)、微孔井 (slim hole) 三種，standard hole 顧名思義是油氣及地熱井的標準規格，因此早期投入臺灣地熱產業的團隊，大多採用 standard hole 規格的地熱井。標準井 (standard hole)、大口徑井 (big hole)、微孔井 (slim hole) 之鑽孔及套管規格詳見圖 3 [2]。

隨著各個早期投入團隊的 standard hole 地熱井陸續完工，有些問題陸續浮現，比較

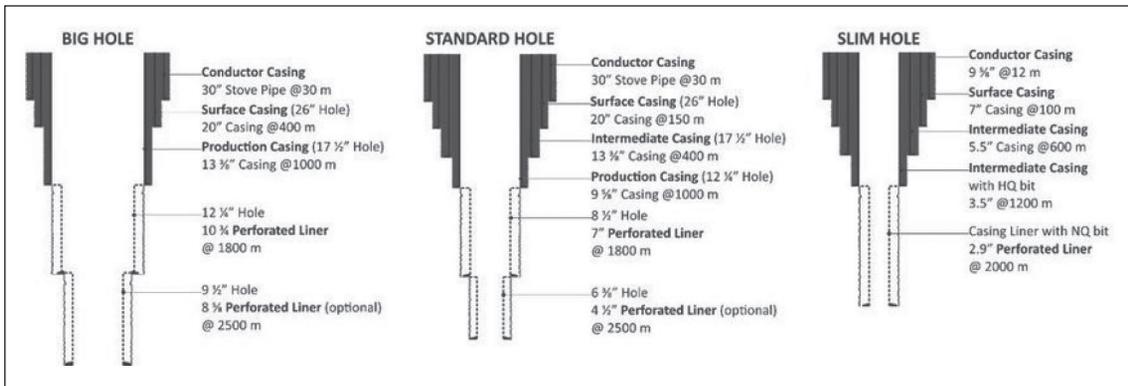


圖 3 標準井 (standard hole)、大口徑井 (big hole)、微孔井 (slim hole) 之鑽孔及套管規格 [2]



廣泛的問題是出水量測試的結果大多不理想，經濟效益偏低。以個人在前專案時經歷的第一口地熱井為例，從工研院的產能測試報告看來，井下的地熱水溫度介於攝氏 115° ~ 150°，井頭溫度最高也可達攝氏 135°，算是可以發電的溫度，且地層的熱水通道相關測試數據狀況看來應該是可以產生適宜發電的水量，但水量測試結果就是很低，所以推測是這口地熱井的施作工法有一些需要改善的部分，才會使實際產生的水量顯著低於應有水量。後續了解其他團隊的 standard hole 地熱井，看來問題是類似的。

此時浮現的問題就變成：需要做甚麼改變才能使單一地熱井獲得更有經濟效益的水溫及水量？從國外經驗看來，基本上會有以下四個方向可以改善地熱井的產能：

- 加深地熱井，尋找更高溫的儲集層。
- 改良鑽井工法，降低儲集層汗損問題。
- 採用井下泵浦 ESP 或 LSP。
- 採用大口徑的地熱井。

以下分別說明這四項改善措施。

2-1 加深地熱井，尋找更高溫的儲集層

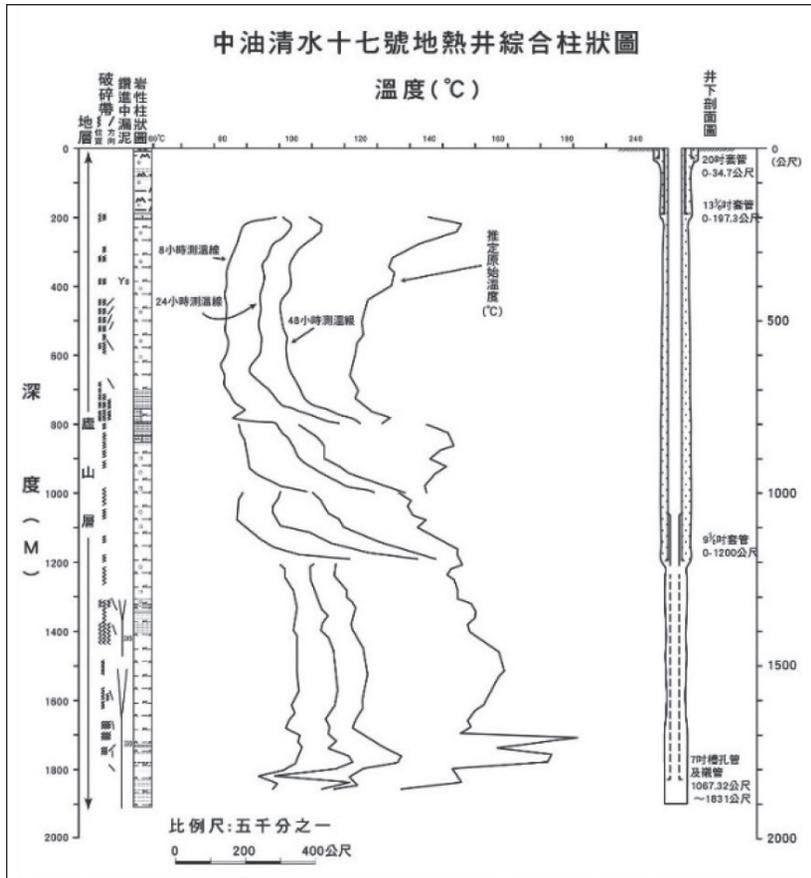
若以地溫梯度（越深越熱）的概念來看，加深地熱井是為了找尋更熱的地下水，然而，實務上地熱井溫度在幾百公尺的尺度內卻未必會與深度呈現正相關，有時候甚至是越深越冷，所以若是在一個沒有探勘井地溫資料可供參考的地區，溫度與深度的關係就只能實際鑽井確認。實務上常常遇到一開始越深越熱的井，過了一個深度後溫度反而逐

漸下滑，這時開發者可能會面臨一個風險抉擇：萬一越深越低溫，事後看來加深地熱井的經費都會變成沉沒成本，但有時繼續加深後，水溫可能又會升高，讓這口地熱井成為具經濟效益的井，因此，加深地熱井其實是一個有相當程度風險的選項。以清水 17 號井及知本 1 號井溫度 – 深度的圖表為例（圖 4 及圖 5），地熱井的溫度往往會隨著深度呈現大幅不規則波動，並不是一定越深越熱。

金崙流域過去由礦研所（後來的工研院）及中油鑽鑿了 12 口地熱探勘井，其中有 9 口數百公尺的淺井，以及 3 口 1,700 ~ 2,200 公尺深的深井，鑽探資料頗為豐富，經參酌工研院資料及建議，決定將第二口井加深至 1,000 公尺深，後續測溫發現，雖然 300 公尺深以下有一大段溫度下滑的地層，幸而在 500 公尺以後又逐步加溫到攝氏 150° 左右，使得該井的出水具有適宜發電的溫度。

2-2 改良鑽井工法，降低儲集層汗損問題

在第一口地熱井完井後，量測到的膚表因子數值甚高，顯示地層裡的水在進入地熱井內的過程中遇到偏高的阻力，這通常是鑽井泥漿及堵漏物質造成儲集層岩體孔隙或裂隙的汗損，使地熱水流入井內的過程面臨較大的阻力，因此須改良鑽井工法，降低鑽井泥漿及堵漏物質對地熱儲集層汗損的程度，最大程度保持儲集層到地熱井之間通道的暢通。國際上地熱井鑽達生產層後往往會改為只用清水鑽井，以避免鑽井泥漿對生產層的汗損，然而由於使用清水鑽井需要大量清水，未必每個井場都具備良好的清水／地下水補給條件，且



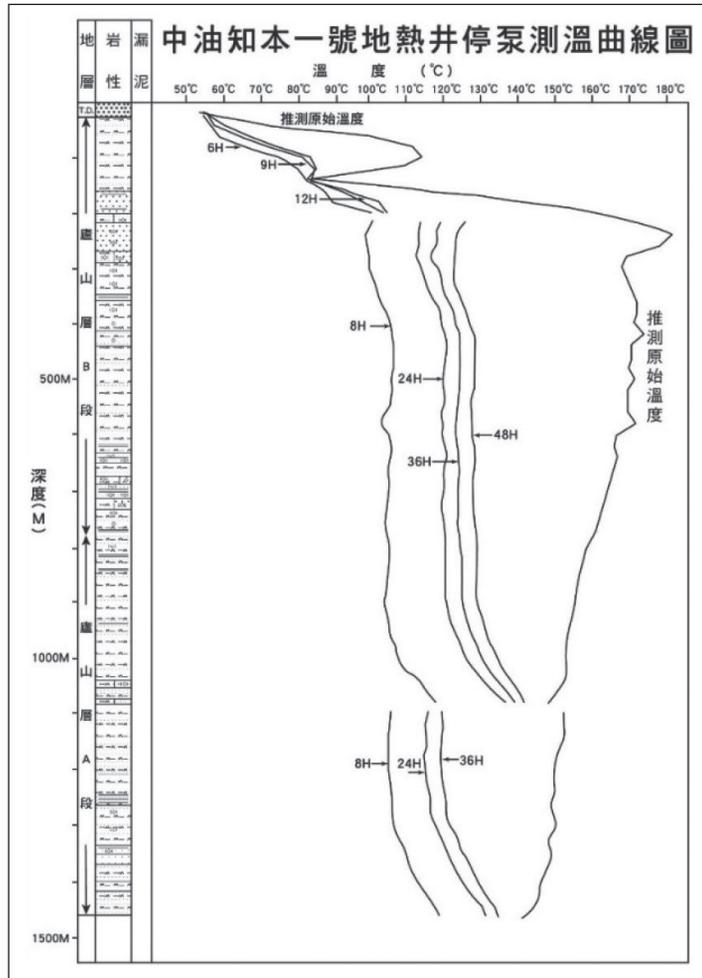
台灣油礦探勘總處地熱處

圖 4 清水 17 號地熱井測溫曲線圖 [3]

因清水比重較低，井噴或井塌卡鑽的風險較大些，因此國內目前還沒有鑽井商願意嘗試採用清水鑽井，未來若能引進國外鑽井公司的清水鑽井工法，或許有機會提高單井產能。我們在後續地熱井鑽鑿時，就請鑽井商盡量降低泥漿比重，並且注意若遇漏漿段應採用易於去除的堵漏劑，在地熱井完工後工研院執行的產能測試中，第二口地熱井測得的膚表因子數值降到 10 以下，大幅改善了地熱井汙損的問題。

2-3 採用井下泵浦 ESP 或 LSP

井下泵浦 ESP 或 LSP 的主要目的是將井內的熱水加壓打到地表，一方面增加地熱井出水量，一方面保持地熱水的壓力以降低礦物質析出結垢造成的問題。井下泵浦在油氣產業本就是已被長期廣泛運用以抽取石油的設備，後來漸漸也被引進地熱發電產業，作為溫度壓力較低而無法自湧或自湧量低的地熱井的增產設備。ESP 其實就是耐高溫高壓



台灣油礦探勘總處地熱處

圖 5 中油知本一號地熱井測溫曲線圖 [3]

的沉水泵浦，馬達 (motor) 跟幫浦 (pump) 整組連接出水管吊放於井下特定深度；LSP 則略有不同，motor 安裝在地表，以傳動軸連接到地下特定深度的 pump。兩種井下泵浦各有優缺點，國際上也各有不少應用案場。

臺灣第一組 ESP (Schlumberger 公司) 是與工研院合作引進，目前安裝在電廠的

生產井內已運轉兩年以上，對於提升地熱井水量以及保持地熱水出水壓力有顯著的成效。

目前看來 ESP 算是在中低溫 (約攝氏 100° ~ 190°) 弱酸到弱鹼地熱井中有頗大助益的設備，不過由於其價格高昂 (千萬到數千萬台幣)，所以最好先初步確認標的地熱井有良好的出水能力 (draw down、productivity



index、skin factor 等)，再來決定要不要使用 ESP，以及使用甚麼規格的 ESP。

LSP 目前國內還沒有應用案例，不過據悉國際上有些主要的地熱發電廠商出於妥善率較佳的原因而偏好使用 LSP，然而要採用 LSP 的話，考量傳動軸不能彎曲或傾斜，因此地熱井孔從地表到 pump 安裝深度之間的鉛直度要求很高，這就有賴鑽井過程中持續監測及修正井孔角度，而且傳動軸的長度不可能無限延伸，因此 pump 最深也無法超過 600 ~ 700 公尺。

2-4 考慮採用大口徑的地熱井

傳統型地熱發電必須考量的不只是地熱水的溫度，水量也是另一個重點。根據泊肅葉定律（Poiseuille's law）的管路流公式：

$$Q = (\pi d^4 / 128\mu) \times (\Delta P / L)$$

Q ：流量

d ：管路直徑

μ ：流體黏滯度

ΔP ：管路兩端壓力差

L ：管路長度

管路內同樣壓差下，流量大致與管路直徑的四次方成正比，因此可以推論，在同樣的地層及地熱井施工條件下，採用大口徑地熱井的出水流量應該會大幅大於標準口徑的地熱井出水流量。然而，如果地熱井所在地層本來就因滲透率低、缺乏裂隙等因素而含水量不多，那就算鑽再大口徑的地熱井也只是多花錢而達不到效果的，所以要決定用甚

麼口徑的地熱井，最好是透過鑽探對鑽井標的地層中的含水量有一定程度的掌握。

關於地熱井口徑的選擇，網路上可搜尋得到 Umran Serpen 與 Didem Korkmaz Basel 兩位專家的一篇論文有關於這個議題的討論 [4]，可以參考看看。關於地熱井的口徑選擇另外還有個重點，由於國際上的 ESP 主流規格是放在 9-5/8 吋或 13-3/8 吋的套管內，雖然還是有能放在 7 吋管內的 ESP，但受限於管徑，這類小口徑的 ESP 出水量較低，經濟效益比較差。因此若採 standard hole 規格的地熱井，要注意 9-5/8 吋的套管管鞋深度不要太淺，最好能達到 400 ~ 800 公尺深（視水溫及動水位而定），這樣至少還能安裝主流規格的 ESP，否則就只能採用 7 吋管適用的 ESP。若地熱井採 big hole 規格，甚至還可以使用安裝在 13-3/8 吋套管內的大口徑 ESP，取得更大的水量。

三、地熱井產能測試

目前產業界地熱井的產能測試一般是委託工研院綠能所團隊執行，主要測試項目包括：

- 恢復試驗
- 井下深度 vs. 溫度測試及出水層判釋
- 長短期出水量試驗
- 壓力回升試驗
- 水質／氣體成分檢測

透過這些檢測，可以了解地熱井的井下溫度、出水量、井體汗損程度、增產潛能，最後可以據以推估是否要採用 ESP/LSP、井下泵浦的規格，以及預期可以產生的發電



量，另外，透過水質及氣體成分檢測可以知道地熱水的結垢或腐蝕的傾向，可以據以選擇管路及熱交換器的材料，這些都是後續地表發電系統各項設備定規所需要的參數，因此是非常重要的測試程序。

工研院另外有提供幾項可以考慮施作的測試服務，包括：

- 壓力干擾試驗：測試標的地熱井出水或注水時對附近其他井的干擾。
- 注水試驗：測試標的地熱井作為回注井時預計可注入的水量。
- 示蹤試驗：測試回注井與生產井之間的連通狀況，了解回注井與生產井的互動關係。

透過各項測試，可以提供開發商有關單井產能、多井間的連通關係。小至一口生產井對一口回注井的系統，大至整個地熱潛能區中多口生產井對多口回注井的關聯資訊及最佳化安排都能提供重要的資訊。

四、電廠設計與建廠

地熱電廠的建廠工程相比於鑽井及產能測試來說是比較單純且快速，畢竟地熱發電機及整廠系統都是很成熟的設備或工程，不過必須提醒的是，由於地熱電廠大多位處偏遠地區，還是有很多要事先考慮的問題需先釐清，比如說，當地吊車及吊卡車最大吊運重量是否足夠？拖板車載運重型或長型設備進出現場時，路幅是否夠寬？會不會卡在哪個轉彎處？道路耐重是否足夠？在地工班是否好調度？這些小細節都不像在人口稠密地區附近建廠那麼方

便，有時事先沒安排好，會突然出現卡住整個工程的問題，導致工程延宕。

地熱發電系統的規劃，在冷卻系統的選擇以及噪音防制方面需要特別注意。

冷卻系統的部分，如果是發電量不大（例如，2 MW 以下），且當地地下水豐沛的話，可以考慮採用冷卻塔為主的水冷系統；如果是發電裝置容量較大的系統，或是當地難以取得冷水的話，就必須採用氣冷式的冷卻系統，這是由於冷卻塔為主的水冷系統透過水的蒸發而降低水溫，因此一定規模以上發電量的系統，其耗水量是相當可觀的，而當地自然環境未必能夠提供這麼多補充水讓冷卻系統全年無休地運轉，而這也是國外很多地熱電廠採用氣冷系統的原因，可以不用考慮補充水耗損的問題。不過氣冷系統的弱點在於當夏天環境溫度大幅上升時，氣冷系統效率會顯著下滑，使系統發電量明顯降低。水冷系統雖也有相似的氣候效應，但其影響幅度比起氣冷系統來說是比較小的。

地熱發電機的噪音往往在 90 分貝上下，而冷卻系統的噪音也往往在 70 分貝以上，因此電廠設計時必須慎重考慮發電系統周遭的噪音問題。噪音一般以兩種方式處理，一是隔音機房或隔音牆，一是拉開噪音設備與周邊的距離。發電機本身是可以規劃安裝於隔噪機房內，不過由於發電機本身往往會散發很大的熱量，因此機房必須規劃通風散熱設備，否則很容易造成廠內溫度偏高，降低部分設備的壽命，但通風散熱設備又會耗掉部分電力，降低系統發電量；如果不想耗費建置機房及散熱系統的成本及用電，那就必



須在規劃時將發電機與周邊受影響主體（住家、民宿、農田等）的距離拉開到 200 ~ 500 公尺，或是在特定角度設置隔音牆，以避免噪音對周遭的影響。冷卻系統由於必須與大氣作熱交換，因此不可能安裝於室內，只能採用隔音牆隔絕噪音，或是拉開與受影響主體的距離，讓噪音消散至可接受的範圍。以上這些問題在專案規畫初期就一定要先考量好，免得後續營運時影響到鄰近居民的生活。

五、營運

地熱發電系統一般來說是妥善率很高的系統，國外的例子年度運轉時數大多在 90% ~ 95% 以上，不過在臺灣實務上由於地熱電廠大多位處偏鄉，饋線末端，如果發電系統裝置容量不大，選用低壓（380 V 或以下）併聯的話，會發現偏鄉的低壓系統常常不穩，時有過電壓或低電壓造成發電系統跳停，另一方面，偏鄉饋線因大多架空安置，颱風來襲期間時有饋線受損而欠相或斷電的風險，輕則停電停產，重則對廠內設備造成損壞，這些都會降低地熱發電系統的年度運轉時數。上述問題台電是有在努力改善，但因預算及工程排程考量，其實是難以在短時間內完成。因此，就地熱發電廠自己來說還是要自己做好電網斷電或欠相時的設備保護，盡量以高壓併聯（11.4 kV 或以上）會比較穩妥。

六、防制結垢／腐蝕

由於地熱水是從地層深處引上地表，所以水體內含有各式各樣的陰陽離子成分，不同的水質需要採用不同材料的管路、熱交換器，才能盡量延長設備的壽命。工研院產能

測試項目中的水質檢測，其中一個重點就是評估地熱水中各類成分造成結垢或腐蝕的風險，這對於開發商後續發電系統的溫度壓力參數及選材會是重要的依據。

原則上在大屯山或龜山島周遭的地熱資源屬於火山型地熱資源，出水大多是弱酸到強酸，pH 值常常出現 2 以下的數字，因此在選材上必須特別考慮酸蝕的影響，然而耐酸蝕材料往往價格高昂，大大影響專案的投資報酬率，這也是大屯山周遭目前地熱開發遇到的最大困難，有待工程界合力克服。

宜蘭、花蓮、台東、南投等其他地區的地熱資源則屬變質岩地熱資源，主要是板塊交界處張裂或擠壓造成地層深處熱岩被抬升而產生的地熱資源，大多是弱鹼性到中性的地熱水，一般而言比較容易產生結垢問題，沒有酸蝕問題，不過另外還要看水體內的氯離子濃度，如果氯離子濃度高，則對金屬也有產生腐蝕的風險，以金崙地區的地熱水為例，氯離子濃度從 800 ppm 到 2,000 ppm 以上的案例都有，加上溫度高達攝氏 140° ~ 180°，對於發電系統的熱交換器選材形成很大的挑戰，有些設備選材甚至必須使用鈦合金，使得專案成本增加不少。

地熱系統結垢一般在弱鹼性地熱水會發生，主要分為三類，碳酸鹽、硫酸鹽，以及二氧化矽結垢，處理方式主要是保持管路壓力，一方面讓水不產生蒸發，而使離子不致於過飽和而析出，一方面讓地熱水裡的二氧化碳盡量保持溶解在地熱水中，以降低碳酸鈣鎂的析出量。此外，也要注意取熱後的尾水溫度，當地熱水溫度下降時，有些結垢成



分會因溫度下降而使溶解度降低，造成過飽和析出，注入回注井後就可能造成回注井內結垢堵塞。而若以上措施都已實行但還是結垢，那就需要後處理措施，主要是高壓水刀噴洗去除結垢，或以檸檬酸或磺胺酸之類較易處理的酸液將結垢溶解清除。

七、地熱發電開發的社會議題

一般而言，各類型的開發，除非是在工業區內，否則都有地方關係的議題。地熱電廠基本上是個很環境友善的能源，但至少還是有噪音問題會對環境造成一些影響，因此在開發前必須與當地居民盡力做好充分的溝通，最主要的是要能提出與地方共存共榮的願景，這是開發團隊非常重要的任務。

地熱發電這個產業主體，拜自動化科技之賜，日常營運所需的人力雖然不多，但日常保養巡檢這類的作業還是能為在地人創造一些工作機會，且對廠商來說，在地聘用能夠顯著節省差旅及管理成本，是廠商與地方雙贏的人事策略。另一方面，地熱發電尾水一般都還有攝氏 70° 以上，作為穀物烘乾之類的熱利用或溫泉觀光用途，也有機會用來打造一些附屬產業，多創造一些就業機會，因此地熱產業界目前大致是有個共識，當發電容量規模擴大後，就會設法投注一些資源打造周邊附屬產業，加強與地方經濟的連結，目標是讓地熱電廠成為受歡迎的產業。

八、我國地熱發電開發遲緩之原因

臺灣位於太平洋火環帶，地熱資源相當豐沛，作為國家寄予厚望的再生能源第三支

箭，雖然行政團隊已訂定出遠大的目標，但是產業實際的進展說來還是很慢，其中有兩大主要因素：

1. 國內鑽井量能嚴重不足，技術及產業鏈成熟度相較國外有很大落差

目前國內鑽井商除了台灣中油公司以外，所有民營鑽井商都是從溫泉井起家，普遍缺乏 2,000 公尺以上高溫深井的經驗，同時受限於工班人數有限以及噪音控制問題，難以 24 小時施工，因此鑽一口不到 1,500 公尺的地熱井往往耗時將近一年甚至超過一年，相較於國際上地熱井常規 3,000 公尺深度可在兩個月內完成，國內鑽井速度跟國際相比存在著不忍卒睹的落差。尤其近幾年美國 Fervo 公司獲得政府支持研發 EGS (Enhanced Geothermal System) 系統，其鑽井速度又突飛猛進地推進到 3,000 公尺地熱井可在不到 20 天內完成，使得國內民營鑽井商的鑽井速度看來像是初生嬰孩的爬行。因此目前國內地熱產業界基本上是已經有共識必須引進國外鑽井技術，且必須解決 24 小時施工的障礙，藉由國外鑽井商培養本地廠商及供應鏈，才有可能讓地熱發電取得明顯的進展。

2. 土地取得難度高

我國主要的地熱潛能熱區大多位處國家公園或原住民地區這類土地無法取得或不易取得的地區。

大屯山底下有 GW 級的火山型地熱資源，但因位處於陽明山國家公園內，目前是



不開放設立地熱電廠的。國家公園管理機關保護國家公園環境生態的態度可以理解，但觀諸國際上日本、肯亞、墨西哥、印尼、菲律賓等國家都有國家公園內設置地熱電廠的案例，可以說規劃建置得宜的地熱電廠並不會對國家公園的環境生態造成影響，這點非常建議國家公園主管機關納入考量，鬆綁建置地熱電廠的相關規定。

另以金崙流域開發的經驗為例，過去工研院曾經評估有 48 MW 的地熱資源，隨著國際上地熱鑽井技術的進步，若以現行的技術進行開發，或許有機會開發出更大的地熱發電量。然而受限於此區土地已劃入原住民保留地，依法只能由原住民自然人或國家登記為所有權人，地熱開發商若要使用私有原保地，只能租用，若要使用國有原保地，則需由所在地之關係部落召開部落會議同意後才能運用，這又面臨實務上空礙難行的「諮商取得原住民族部落同意參與辦法」實施規定，以至於地熱電廠大多是向原住民地主以租約取得最長 20 年的使用期。以一個有機會永續發電的地熱電廠而言，投資鉅額資金 20 年後，萬一地主不再續租土地，就必須將所鑽的地熱井填封廢棄，電廠拆除，形成很大的資源浪費。

九、結論與展望

本文主要是介紹國內剛起步的傳統型地熱發電產業，從 2016 年底清水地熱 BOT + ROT 案決標起算，至今已經超過 8 年，國內地熱電廠併聯容量雖然僅有不到 20 MW，但後續臺東金崙、宜蘭仁澤、大屯山四磺子坪地熱陸續併聯上線，地域包括宜蘭、台東、

新北市三個主要地熱潛能行政區，類型包括變質岩區弱鹼型地熱及火山區強酸性地熱，個人是將這段期間定義為打基礎的階段，隨著開發商及相關協力廠商建構了基本的產業知識及技術，接下來透過引進國外成熟技術由本土人才逐步承接相關 know-how，到某個爆發點的時候，就有機會看到國內的地熱發電量像印尼及土耳其一樣，在 5 ~ 6 年內快速邁向 GW 俱樂部。若國際上 EGS、AGS (Advanced Geothermal System) 的技術進展也能跟上腳步，那麼未來將會很有機會看到地熱發電量達到數個 GW，成為舉足輕重的基載能源。

參考文獻

1. Think GeoEnergy 網站：<https://www.thinkgeoenergy.com>
2. Purba, Dorman P., *et al.* "Key considerations in developing strategy for geothermal exploration drilling project in Indonesia." 44th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, pp. SGP-TR-214. 2019.
3. 地熱單一服務窗口地熱資料查詢平台網站：<https://www.geothermal-taiwan.org.tw/GIS>
4. Serpen, Umran, and E. D. K. Basel. "Optimization of geothermal borehole diameters." Optimization 19. 2015.



臺灣氫氨發展與應用

工研院綠能所副所長、氫應用規劃小組計畫主持人 / 萬皓鵬

工研院綠能所經理 / 沈政憲

工研院綠能所專案經理 / 潘育絜

工研院量測中心副組長 / 吳鴻森

工研院材化所經理 / 李昭仁

工研院量測中心經理 / 劉峻愷

工研院產科國際研究所研究經理 / 石蕙菱

關鍵字：氫能、氨能、工業應用、發電應用、載具應用、法規標準、基礎設施

摘要

為實現 2050 年淨零排放目標，臺灣正積極推動氫能發展，對於需要海外大量進口氫氣的應用區域，短期氫氣載體氨，則為關注重點之一。國家發展委員會 2022 年將氫能列為 12 項關鍵技術之一，並預估氫發電在 2050 年電力結構的占比將達 9% 至 12%；經濟部於 2022 年設立氫能推動小組，以統籌資源並擬定相關發展策略。氫氨能於發電、工業、載具等領域具有顯著的減碳潛力，國發會並於 2025 年啟動「氫氨供應鏈」及「去碳燃氫發電」兩大旗艦計畫，以推動技術研發與基礎設施建設。目前，國營事業如台電、中油與中鋼，已分別展開混氫燃氣發電、混氨燃煤發電、加氫

站，及氫能冶金等相關示範驗證計畫，並配合法規與標準之完善，使臺灣氫氨能發展逐步與國際接軌。工業技術研究院於 2023 年發布「2050 年臺灣氫應用發展技術藍圖 2.0」，並陸續視國內外發展情形滾動調整，本年度工研院將進一步評估綠氨供應鏈布局，以完成「2050 年臺灣氫應用發展技術藍圖 3.0」。

一、臺灣氫氨政策發展規劃

1-1 臺灣 2050 淨零排放路徑中的氫氨能策略規劃

臺灣在氫氨政策的發展上，正朝著多元化的應用邁進，在追求淨零排放的目標上，



臺灣仍面臨法規、基礎設施及國際合作等多重挑戰，但憑藉現有產業優勢與政府的支持，有望在全球氫能經濟中占有一席之地。國家發展委員會（國發會）在「2050年淨零排放路徑及策略」中，將氫能列為關鍵技術之一，預計到2050年，氫能在能源供應中的電力結構占比將達9%至12%。策略內容包括建立穩定的氫氣供應鏈、推動氫能技術研發與應用，以及促進氫能在發電、工業和運輸等領域的廣泛應用。此外，經濟部透過成立「氫能推動小組」，整合公部門與國營事業資源，全面規劃氫能發展政策。

1-2 氫氦於六大部門減碳扮演的角色

在臺灣的六大部門減碳行動計畫中，氫能被視為重要的減碳工具，其中氫更被視為利於進口可先行供給的氫基燃料。國發會最新規劃的兩個旗艦計畫，即「氫氦供應鏈」和「去碳燃氫發電」，旨在加速氫能與氦能在臺灣的應用。在「氫氦供應鏈」計畫中，支持電解水產氫技術、建立氫能與氦能供應鏈，並推動氫氦輸儲設施建置。在「去碳燃氫發電」計畫中，政府將推動燃氫電廠轉型為採用去碳燃氫發電，以降低發電過程中的碳排放，並結合再生能源產氫，以達成零碳目標。這些措施不僅有助於實現2050年淨零排放的目標，還能促進臺灣能源結構的多元化和永續發展。

二、國內外氫氦應用技術發展重點

2-1 全球氫應用技術發展重點

氫能技術在全球發展正快速成為能源轉

型的核心，全球主要工業國家與經濟體均將氫能視為達成2050淨零排放目標重要關鍵策略，因此大量投入資源進行技術研發與基礎設施建置，為達成其對全球減排目標的貢獻並且取得氫能龐大商機。歐盟啟動的「歐洲綠氫政綱」(European Green Hydrogen Deal)，氫能被視為實現歐盟氣候中和目標的重要能源。

歐盟大型集團公司紛紛投入大型商業規模計畫，例如：法國 Total Energies 在荷蘭和比利時開發大型綠氫電解槽，利用可再生能源進行水電解生產氫氣，以減少煉油廠的碳排放 [1]。德國 Salzgitter 與能源公司 RWE 合作，從2027年起每年獲得64 GWh的綠色電力，支持其低碳鋼鐵生產計畫 [2]。西班牙 Enagas 天然氣公司：規劃在2025至2030年間投資40.4億歐元擴大建設氫能基礎設施，並參與歐洲 H2Med 氫能走廊計畫，連接伊比利亞半島與西北歐市場 [1]。

美國能源部 (DOE) 針對淨零排放願景推動，通過「射氫計畫 111」(Hydrogen Shot “111”)。目標是在十年內 (到2031年) 將氫氣的成本降低至1美元/公斤 [3]，這種降低成本將導致氫的使用量至少增加五倍。該計畫推動策略包括：擴大綠氫應用需求規模、降低電解產氫成本，及依據氫能產業發展優勢，打造重點區域氫能中心，加速規模化氫氣生產 [4]。計畫重點在於透過技術路徑來實現綠氫的大量生產和成本降低，包括：電解水技術 (發展低溫和高溫電解水技術，目標提高效率與降低成本)、碳捕獲封存技術 (針對化石能源甲烷重整 (Steam Methane Reforming 或 Autothermal Reforming) 生產



氫，將利用碳捕獲封存技術降低碳排)、光催化分解水技術(利用光催化劑在陽光下分解水生成氫氣)，及電催化還原二氧化碳技術(將二氧化碳和水通過電催化反應轉化為氫氣和其他化學品)。然而，川普政府對於新及再生能源的支持度，為左右美國氫能發展的重要變數，值得後續觀察。

日本是目前國際間對氫基燃料研究與應用最具有成果和影響力的國家之一，日本政府在 2017 年制訂「氫能基本戰略」，目標是到 2030 年實現氫能社會的基礎設施和技術應用 [5]。主要政策目標可分為以下三點：(1) 氫氣生產成本：目標到 2030 年將氫氣成本降低到 30 日元/立方米，並在 2050 年進一步降低到 20 日元/立方米；(2) 氫氣發電：計畫到 2030 年實現氫氣發電的商業化，並將成本控制在 17 日元/kWh；(3) 國際氫氣

供應鏈：日本致力於建立國際氫氣供應鏈，結合海外大量廉價的再生能源製造氫氣，建立國際供應鏈供應日本與其他國家；(4) 積極發展燃料電池應用，包括：燃料電池汽車(Fuel Cell Vehicle, FCV) 目標是到 2030 年普及 80 萬輛燃料電池汽車，並建設 900 座加氫站；到 2030 年安裝 530 萬台家庭用燃料電池。

日本在氫能的積極發展上，在考量氫能在運輸距離、基礎設施成本及儲存技術尚須投入更多資源等，相較液氫而言，液氫則相對具有相當高的潛力作為氫能長途運輸的載體 [6]。日本政府在 2020 年成立了「引進燃料氫官民協議會」，推動氫氣發電的產學研究及商用發展 [7]。此外，日本經濟產業省(METI) 將氫納入「綠色成長戰略」，目標是到 2050 年實現氫能發電占比 10% [8]。

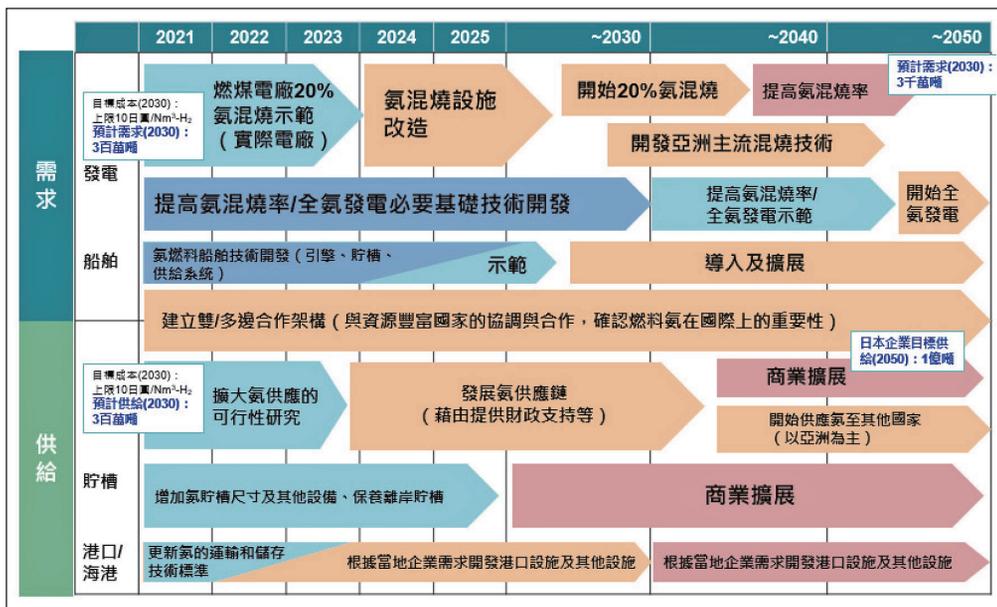


圖 1 日本氫燃料路徑圖



日本在 2021 年啟動規劃日本氫燃料路徑圖，如圖 1 所示。其中，在氫應用方面有多項規劃，主要集中在發電及船舶的應用領域。日本計畫在火力發電廠中使用氫作為燃料，以減少二氧化碳排放。例如，JERA（捷熱能源）計畫在 2030 年前實現火力發電廠煤炭混燒氫氣，在 2023 年啟動在碧南燃煤火力發電廠混燒 80% 煤炭與 20% 氫氣。並預計在 2040 年達成 100% 氫氣發電 [7,9]。值得一提的是，根據日本經濟產業省的試算結果，100% 純粹燃燒氫氣的電費，每度電為 97.3 日圓；100% 燃燒氫氣的電費，每度電只需要 23.5 日圓。氫氣發電的價格比氫氣發電更便宜 [7]

2-2 國內國營事業示範計畫

國發會宣示 2050 淨零排放目標，其中氫能發電占比將達 9% ~ 12%，同時經濟部已與台電、中油等國營事業成立氫能推動小組，氫能發展以減碳為目標，研發低碳氫生產技術，並且以發電、工業和運輸應用進行技術驗證，因此將透過天然氣混氫發電、氫能儲能系統試驗、鋼廠退火爐混燒氫基燃料與加氫站等示範驗證計畫，希望藉由國營事業氫能示範先行，評估並落實未來氫能產業應用。

國營事業氫能示範計畫主要集中在以下幾個方面：

1. 氫氣發電評估：台電公司在電力淨零排放未來推動方向，對氫能規劃朝向替代燃料及氫儲能等兩目標布建 [10]，氫基替代燃料方面，台電公司與西門子能源公司於 2022 年 4 月 26 日簽署「混氫技術」合作備忘錄，以興達電廠燃氣 3 號機第 3 部氣

渦輪發電機（91MW）為主體，進行燃燒器改造並新建氫氣、天然氣混合設備，以透過混合設備以 5% 比例與天然氣（95%）混合後，再送入既有燃氣 3 號機第 3 部氣渦輪機組（GT3-3）進行混燒發電。已於 2023 年 12 月完成原目標混氫 5%（vol.）驗證，並嘗試提升混燒比例至 10%，後續將測試機組在不同條件下的發電效率，作為相關數據蒐集參考。

由於氫能輸儲技術目前尚未成熟，因此規劃以氫為氫的載體，並與熱值接近之燃煤共同混燒。台電公司分別於 2022 年與三菱重工、2024 年與日本 IHI、住友商事簽署混氫技術合作備忘錄，預計將於林口電廠及大林電廠各選定 1 部超超臨界機組，燃煤混氫進行示範驗證工作（如下圖 2 所示）[10]，讓燃煤機組具備混燒氫氣功能，預計目標於 2028 ~ 2030 年完成 5% 混氫示範。

2. 工業爐混氫／混氫燃燒技術開發：中鋼除「以氫代碳」於冶鋼高爐透過氫取代焦炭高溫氧化還原鐵礦之外，亦規劃進行工業爐混氫／混氫燃燒技術開發 [11]，如圖 3 所示，並將以工業爐鋼捲退火爐與工業實驗爐為示範載具，再實際工業爐驗證混燒技術的可行性和效益。相。該計畫開發示範成果，將協助臺灣各種使用工業爐的產業導入低碳／無碳混燒加熱或熱處理技術。預計混氫比 40% 應用到中鋼的工業爐之後，將可達成減碳 27 萬噸目標；推廣應用到國內金屬產業工業爐後，將具減碳 516 萬噸潛力。
3. 氫氣生產儲運：中油在氫氣生產儲運投入大量資源，(1) 氫氣生產技術：中油既有天然氣重組產氫技術（Steam Methane Reforming, SMR）生產灰氫供應，並規劃透過發展關鍵碳捕獲技術（Carbon Capture

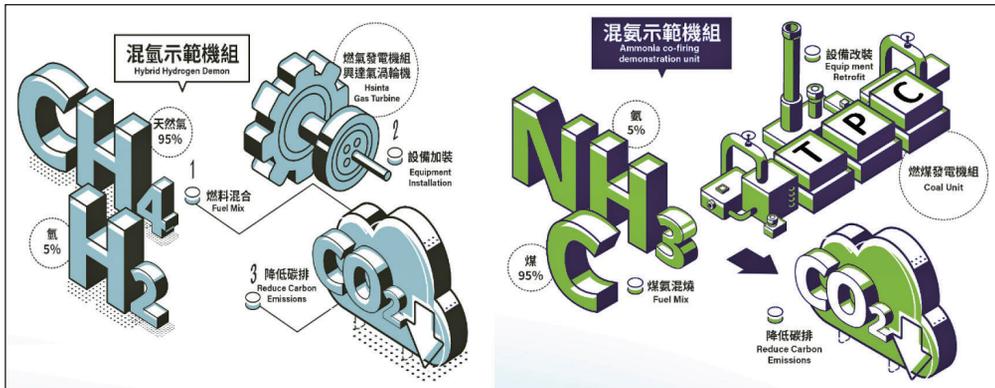


圖 2 台電公司燃料替代：燃氣混氫與燃煤混氫示範機組計畫（資料來源：台電公司官方網站）

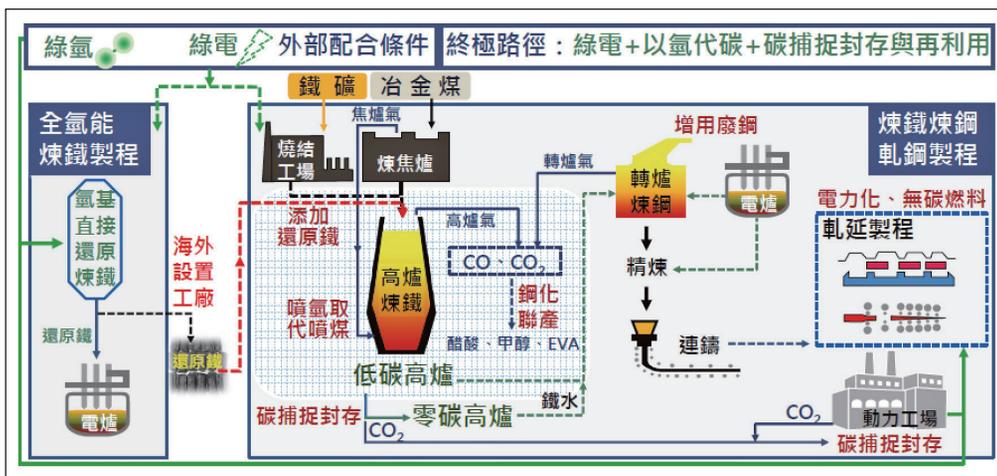


圖 3 中鋼公司碳中和路徑規劃（資料來源：中鋼集團 2024/11 法說會）

and Storage, CCS) 將灰氫轉成藍氫，短期在苗栗鐵砧山規劃碳封存試驗場域，長期朝向深部鹽水層場域；(2) 可移動式加氫站建設：中油預計今年第二季在高雄楠梓建設首座加氫示範站 [12,13]，如圖 4 所示；(3) 氫能應用：在工業方面，2023 年已完成「二氧化碳捕捉與轉化低碳甲醇」試驗設施，隨著先導試驗順利將再擴大規模；

(4) 液氫進口：與國外技術領先業者合作，共同評估液氫接收站建置可行性，以提早布局輸送氫能基礎設施。

2-3 國內民營業者發展情形

臺灣業者在氫能應用技術方面有不少進展，以下將針對主要的發展現況進行說明如下：



圖 4 中油公司可移動式加氫站模擬示意圖（資料來源：本研究）

1. 分散式發電應用

- (1) 廣達電腦公司：2024 年宣布與 Bloom Energy 合作為美國廠 AI 伺服器測試與驗證建立燃料電池微電網系統。由於美國矽谷地區電力資源緊缺，傳統電力系統連接耗時和費用高昂，Bloom Energy SOFC（Solid Oxide Fuel Cell）可使用氫氣或天然氣進料之微電網系統提供了不間斷的電力供應，確保供電穩定，Bloom Energy 將其 SOFC 系統的供電容量提升超過 150%，以滿足廣達 AI 伺服器快速成長需要，總計投資金額達新台幣 42.8 億元。
- (2) 欣興電子公司：2023 年宣布與 Bloom Energy 合作，主要目的是在臺灣打造全台首座大型定置式氫能燃料發電系統，目的在於提升了欣興電子的能源自主性。預計將於 6 廠區設置氫能燃料電池，已在中壢合江廠建置了 600kW SOFC 系統。目標裝設 33 套設備，總發電量達 10MW，一年可發電 7,800 萬度。欣興預計五年投資 40.41 億元氫能燃料電池作

為自用電力的一環，2026 年至 2030 年可能再追加投資 30 億元至 40 億元，使得整體氫燃料電池的投資上看 80 億元。

2. 氫氫供應

- (1) 亞東氣體公司：於臺南科技工業園區啟用水電解製氫設備（5MW），專門為臺灣半導體產業提供超高純度氫氣（5N9）。該公司預計 2 年內完備購買綠電的程序，以利該設備利用再生能源供電，電解超純水產出氫氣，整個生產過程無碳排放。每年預計可減少超過 35,000 噸的二氧化碳排放。
- (2) 臺灣肥料公司：2023 年向沙烏地阿拉伯沙特基礎農業營養素公司（SABIC AN）及沙特阿美公司（Aramco）採購進口臺灣第一船低碳氫，並宣布將斥資 30 億台幣增設 2 座綠氫儲槽（整體儲量達 8 萬噸），打造臺中港國際船舶加氫系統。在 2025 年 4 月宣布第一季已生產認證藍氫達 6,000 噸，並開始供貨給半導體業者；預計第 3



季產量突破萬噸，有助於解決半導體、電子、化工、運輸等企業減碳燃眉之急。

3. 基礎設施／設備生產

- (1) 台達電公司：2024 年與英國公司 Ceres Power 簽訂 4 千 3 百萬英鎊（約新台幣 17 億元）技轉授權合約。以 Ceres 領先的固態氧化物電池堆技術加上台達的電力電子及散熱技術，目標開發出高轉換效率的固態氧化物氫燃料電池系統（Solid Oxide Fuel Cell, SOFC）及水電解製氫系統（Solid Oxide Electrolysis Cell, SOEC），並預計於 2026 年底開始生產，將可進一步完整台達電在氫能基礎設施的布局，並在資料中心、半導體產業及精密工業等關鍵設施中提供穩定和高效的電力。
- (2) 中興電工公司：中興電工發展甲醇重組製氫技術，將其運用在發電和燃料電池中，並與中油合作於台北港設加氫站示範站。載具方面，中興電工主推氫燃料電池輕型載具，專注於二輪、三輪及物流巴士等載具開發，並計劃在印度和東南亞市場進行量產。此外，中興電工也推動氫燃料電池的備援電力應用，並已經出口至日本、南非、印度和東南亞等地。

三、工研院「2050 臺灣氫應用發展技術藍圖」

3-1 工研院「2050 臺灣氫應用發展技術藍圖」簡介

工研院 2021 年成立氫應用規劃小組，並於 2022 年對外正式發表「2050 我國氫應

用發展技術藍圖」。該藍圖考量國際氫應用發展趨勢、國內減碳需求及應用情境、產業發展情勢與機會等進行規劃，以提供政府、產業各界參考，後續亦滾動調整及評估，2023 年更新為工研院「2050 我國氫應用發展技術藍圖 2.0」。本（2025）年度更將納入氫應用，擘劃我國 2050 年氫應用發展技術藍圖 3.0。

3-2 臺灣氫應用情境

臺灣發展氫能以減碳為主要目標，產業發展為輔，朝發電低碳化（低碳／零碳排電力）、工業低碳化（鋼鐵、石化、半導體業等）與運輸低碳化（中大型載具為主）發展，以達到 2050 淨零排放願景。在工研院臺灣 2050 氫應用發展技術藍圖 2.0 中，對我國氫應用情境規劃建議如下：

考量氫氣運輸、區域發展特色及人民感受，可在西岸建立不同功能的氫能園區，以集中需求規劃氫氣供需（如下圖 5 所示）。例如，北部可在既有電廠原址發展氫專燒發電園區；中部方面，基於其再生能源發電潛力，可發展再生能源產氫園區，特別是利用中部離岸風電發展資源，設置綠氫生產／氫能儲能等應用園區，朝工業應用及穩定電網發展；南部方面，由於是臺灣重工業發展集中地區，難以用電氣化進行減碳，更是氫能發揮工業減碳效益的重點區域。爰此，建議南部朝工業減碳園區發展，搭配既有工業聚落及港口，評估規劃新設氫氣進口基礎設施，供給鄰近重工業低碳氫氣，以打造工業減碳園區，並於港口及周邊區域推動低碳氫應用，朝碳中和港發展。

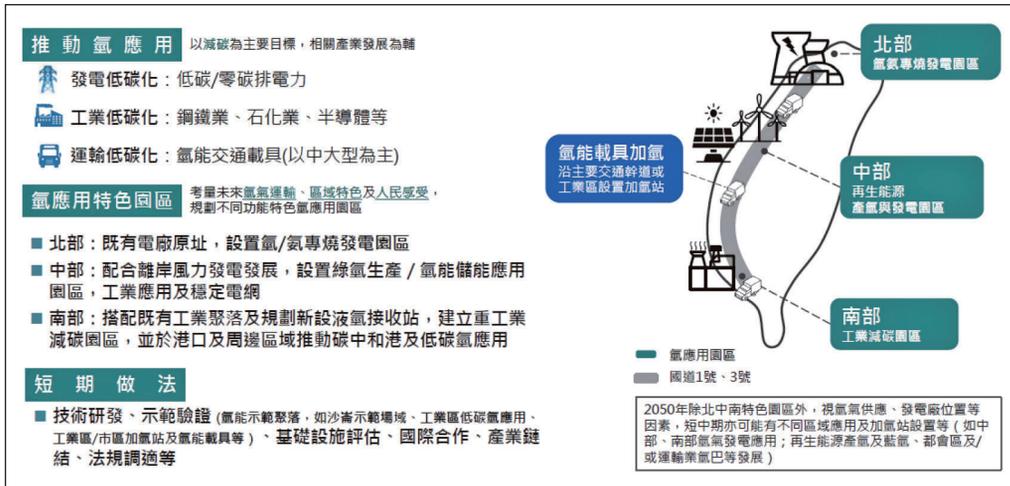


圖 5 工研院「臺灣 2050 氫應用發展技術藍圖願景規劃」

我國為能源進口國，低碳氫來源以進口為主、自產為輔，為了推動本土氫應用以達到減碳目標，工研院以國發會淨零排放路徑為基礎，初估 2050 年我國低碳氫總需求量約 721 萬噸（如下圖 6），其中，氫約 406 萬噸；氨約 315 萬噸。氫供應來源分為自產與進口，

考量我國 2050 年可能剩餘綠電量，自產藍綠氫潛力約 171 萬噸，氫及氫載體進口約為 235 萬噸（低碳氨 315 萬噸另計）。基礎設施規劃建議依氫應用聚集區域就近設置氫氨接收站、儲槽及管線等基礎設施，縮短運輸距離，維持安全存量，並鼓勵產業氫能應用。

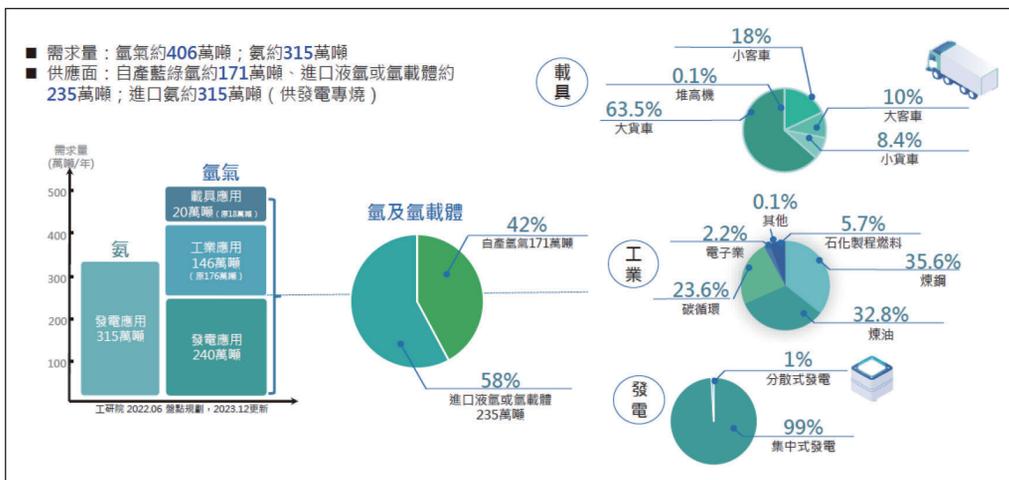


圖 6 工研院「臺灣 2050 氫氣需求及供給評估」



3-3 我國氫能應用技術發展重點建議

考量國際發展趨勢、國內產業優勢、相關技術於高再生能源電力占比下的適應能力以及關鍵材料成本，我國氫能應用技術建議朝以下方向發展：

發電應用，由於大型集中式發電機組皆自國外引進，建議與國際主要發展業者共同進行氫能發電小規模示範或機組改造評估，重點為培養本土維運能力。另一方面，由於部分關鍵零組件已切入國際燃料電池品牌供應鏈，我國業者可發展氫能分散式電力系統整合技術、後續並朝定置型燃料電池結合微電網發展，作為工業園區廠房或 AI 資料中心的穩定供電來源，以支持我國工業用電需求。

工業應用的氫減碳技術包含氫的熟應用（如汽電共生、鍋爐、溶解爐等）、鋼鐵業的高爐混氫還原鐵技術、製程餘氫純化技術（鋼鐵業、石化業、電子業等），以及既有製程用氫或天然氣轉換以綠氫為主，或導入碳捕捉

利用與封存技術以減少碳排放等創新氫能低碳化製程。

載具應用包含氫燃料電池載具示範驗證（主要特色為高功率、高效率電堆，及三電整合驗證）。氫能載具主要以推動長途、高載重、高運轉率載具氫能燃料電池化，中期目標為籌組車隊運行、國產組件導入，長期以配合基礎設施擴大布建，擴大商務與產業運輸應用為目標，包含發展我國車用燃料電池、車載氫氣瓶等關鍵零組件產業鏈。

氫能供應以自產藍綠氫為主，包含高效率電解產氫技術研發、示範與驗證（如電極材料、電堆及系統、再生能源變動產氫等）；化石燃料搭配碳捕獲再利用技術進行藍氫生產示範驗證；工業副產氫／餘氫／再利用回收物質分解產氫；發展國際供應鏈合作，穩定氫能供應來源（如經濟模型評估等）。氫能生產重點技術為水電解產氫技術，為了要極大化再生能源使用效率，建議以高效率電解技術為主，如陰離子交換膜電解技術（包

1 氫能應用	時程規劃
 <ul style="list-style-type: none"> 天然氣混燒氫能或氫能示範驗證（發電、鍋爐、溶解爐） 創新氫能低碳化製程，及製程副產氫純化技術開發（鋼鐵業、石化業、電子業等） 氫能分散式電力與氫能載具系統示範應用（多料源/100kW高功率/高效率電堆） 	<ul style="list-style-type: none"> 短期(2030)應用技術評估 中期(2040)小規模示範驗證 長期(2050)商業運轉
2 氫能供應	時程規劃
 <ul style="list-style-type: none"> 氫能輸儲基礎設施建置及評估（如：350bar/700bar加氣站、管線/儲槽之高壓抗氫脆及防逸散塗層等技術、液氫接收站評估與技術建立） 高密度（700bar）儲氫瓶及關鍵組件（閥與閥座） 流量計量標準、氫品質計量標準與檢測認證 氫能安全與性能檢測認證 	<ul style="list-style-type: none"> 短期(2030)管線與接收站初階評估 中期(2040)管線小規模示範驗證/接收站進階評估 長期(2050)純氫管線導入、建置進口接收站
3 基礎設施與環境構配	時程規劃
 <ul style="list-style-type: none"> 高效率電解產氫技術研發、示範與驗證（如：電極材料、電堆及系統、再生能源變動產氫等） 化石燃料搭配CCUS^{註1}產藍氫示範驗證 工業副產氫/餘氫/再利用回收物質分解產氫 氫裂解產氫 國際供應鏈合作確定氫能來源無虞（如：經濟模型評估等） 	<ul style="list-style-type: none"> 短期(2030)高效電解技術研發 中期(2040)量產降低生產成本 長期(2050)再生能源產氫示範 <p>註1：CCUS碳捕獲封存與再利用</p>

圖 7 我國短期氫能技術發展重點建議



含關鍵材料與系統整合)，發展高效率、低成本、可快速變載的產氫技術。

基礎設施與環構配套，重點技術包含氫氨輸儲基礎設施建置及評估（如 350 bar / 700 bar 加氫站、管線／儲槽之高壓抗氫脆及防逸散塗層等技術、液氫接收站評估與技術建立）；高密度（700 bar）儲氫瓶及關鍵組件（閥與閥座）；流量計量標準、氫氨品質計量標準與檢測認驗證；氫氨安全與性能檢測認驗證。輸儲方面技術如加氫站、接收站初步建議以國外技術引進為主，短期進行可行性評估與示範站發展，長期以建立關鍵組件自主技術及運維能力，包含發展輕量化高壓儲氫技術及智慧化輸氫管線洩漏定位技術研究、氫氣監測解決方案，朝高安全、輕量化、耐腐蝕、國產化發展。

3-4 後續規劃重點

氫能是目前國際達到 2050 淨零排放的必要選項，由於液氫供應鏈技術尚未成熟，且環構基礎設施建置時間較長，短期國際供應鏈朝低碳氫運輸與應用發展。後續工研院「2050 氫應用發展技術藍圖 3.0」將進行綠氫供應鏈評估，針對綠氫技術研發佈局策略提出建言，並發展適用於我國情境的氫氨技術行動方案。

四、我國氫氨應用發展關鍵議題及建議

當前，臺灣氫氨能的發展仍處於起步階段，基礎設施與應用技術尚未成熟，對應的工程與環構條件需加速完備，方能支撐未來

大規模發展。本節將從工程環構、法規、標準三個層面，檢視我國在氫氨基礎設施、輸儲技術、在地生產、應用導入等關鍵議題的現況與挑戰，並進一步提出建議方向。

4-1 工程技術及環構面

我國氫氨應用發展尚在起步，發展的關鍵議題可以從供應鏈布建及應用拓展兩個方向檢視工程及環構面的完成度。在供應鏈布建上，穩定的氫氨供應及配套的輸儲基礎設施是重要議題。工研院預估 2050 年我國氫氣需求達 406 萬噸，其中約 60% 仰賴進口，足夠卸收規模的液氫／液氨接收站及專用儲槽設施，將限制進口規模以及對應用端的調度能力。

此外在氫氨輸送儲存的技術與設施上，液氫技術門檻高，我國尚未掌握液氫相關技術，需仰賴國外；而液氨輸送儲存技術雖較成熟且具備實務運維經驗，但液氨轉氫效率與規模化仍在技術發展中。相較於進口氫，在地氫生產面臨國內製造業對再生能源電力的需求競爭，且以綠電電解產氫技術的議題為效率提升與規模化發展，及再生能源大規模佈建下電力調度等；至於藍氫的在地生產仍待國內碳捕存規模的提升才有望突破。

在應用拓展上，檢視氫氨導入發電、工業與載具三大領域的技術現況，關鍵議題在氫氨燃料導入氫應用上，技術驗證仍在發展階段，例如：發電設備的改良或新設機組驗證、工業製程設施調整與燃燒控制、及載具的運輸載具動力模組技術開發與燃料供應基礎設施設置等議題。



綜合以上在供應鏈布建及應用拓展上的議題，將影響氫氣供應以及在發電、工業與載具上的減碳化、區域普及與規模化。針對氫氣應用發展在工程及環構面向，建議說明如下：

1. **強化氫氣基礎設施布局：**液氫／氫接收設施、進口氫儲槽及加氫站等設置評估，支援氫能示範應用及未來規模化運作。掌握發展中技術之關鍵發展指標；與具實務經驗之業者合作加氫站及氫能載具示範，建立標準操作流程及善用 AIoT 技術，提升設施安全監控及預警／預處理能力，以確保營運安全。
2. **推動應用端技術試驗：**配合天然氣與氫氣及氫煤混燒發電應用，相關環構規劃建議朝向氫氣專燒機組發展，此外，在供給面的運儲基礎設施規劃需考量在地低碳氫氣供給或低碳氫氣進口輸送方式，及強化設施及人員操作須注意的操作標準規範、設施規格和專業訓練。
3. **提升製程氫氣在地回收循環經濟應用：**為擴大及高值化既有工業製程回收之餘氫，除了一般化學品合成之外，可評估朝高純度氫氣生產（5N 以上）為目標，可先由示範工廠以中小規模導入既有純化技術，或以電化學或鈀膜濾氫為主之新興純化技術，並針對既有工業流程、氣體管線配置、需改造或新設之關鍵設施進行盤點及預算評估。
4. **導入示範專區機制：**藉由設立示範專區推動氫氣應用技術，有助加速技術成熟與市場驗證，並透過集中氫氣需求，提高輸儲基礎設施建置的經濟效益。同時，結合科研計畫，整合產輸儲用等環構設施，強化研發與實務應用的連結，促進分散式發

電、小型綠氫生產基地等多元應用場景的落地與推廣。

4-2 法規面

為配合氫能載具發展，經濟部於 2023 年 7 月 4 日指定「氫燃料」為能源管理法第 2 條第 6 款之能源，並於 2023 年 11 月 1 日指定供氫能車輛最終使用之氫燃料為非經許可不得經營銷售業務之能源產品，並訂定發布「加氫站銷售氫燃料經營許可管理辦法」，明定加氫站之用地、設備、申請程序及經營管理等規範，提供業者申請建置加氫站的法源依據，建構完善的設置安全環境及管理機制。另為因應加油站業者多角化營運及便利加氫站之設置，經濟部於 2024 年 6 月 28 日修正「加油站設置管理規則」部分條文，明定加油站得兼營加氫站業務，增訂加油站與加氫站合併設置相關規定。

臺北市政府為推動淨零排放城市，2025 年 3 月 26 日產業發展局依「臺北市淨零排放管理自治條例」第 41 條訂定「臺北市氫能或其他新興能源發展推廣辦法」，補助或獎勵企業、法人或團體積極推動氫能及其他新興能源發展，增加低碳能源或替換低碳運具選項及設置加氫站，以減少溫室氣體排放量。

「氫」作為氫能首選載體，多年來在工業應用已多使用，國內基礎設施完整，也已經建立許多管理法規。氫是屬「高壓氣體勞工安全規則」中所稱「原料氣體」、「可燃性氣體」及「毒性氣體」。為防止製造之原料不良，引起事業之危害，而有「原料氣體」的管理辦法；為防止引起火災、爆炸及洩漏引



起中讀之危害，有「可燃性氣體」及「毒性氣體」的管理辦法。對於預防消費時發生災害而將氫歸類在「特定高壓氣體」管理中，而當其作為冷媒時，屬「冷凍用高壓氣體」的管理辦法。

氫與氨的應用，各先進國家持續投入試辦運行加速商轉，國內優先推動技術較成熟且商業化的應用，法規上現階段持續關注發展，並滾動檢討調和修正。對於目標與政策明確的應用需求，可透過監理沙盒（Regulatory Sandbox），解決現行法規與新興科技的落差，提供一個風險可控管的測試與驗證場域，暫時享有法規與相關責任的豁免，減低法規遵循風險。透過測試過程中衍生監管或法規問題，找出可行的解決方案，並作為未來修改或制定法規的參考依據。

4-3 標準面

經濟部標準檢驗局近幾年積極制定（修訂）氫能相關的 CNS 國家標準，至 2024 年底已陸續制定（修訂）公告 23 份 CNS 國家標準，以因應中油公司「加氫站示範場域建置」、能源署「加氫站銷售氫燃料經營許可管理辦法」、交通部「氫燃料電池大客車試辦運行計畫」以及其他業界廠商提出之標準制定需求。

標準檢驗局亦於 2024 年成立跨部會之氫能標準工作小組，持續與各部會和國營事業協調溝通標準制定需求，並擴大盤點與研析氫能相關的國際標準，內容涵蓋產輸儲氫設備安全與性能、加氫站與加氫協定、氫能載具安全與性能、氫燃料品質與分析、燃料電池單電池／

電池組／模組／發電系統／儲能系統、液態氫、低溫容器、低碳氫驗證等領域。

預計 2025 年將再制定 11 份 CNS 國家標準，並滾動檢討 2026 年以後 CNS 國家標準制定（修訂）之策略方針與優先順序，將氫與其他氫載體也列入考量，作為國內發展氫能技術與應用推廣之參考依據。

五、結語

根據國際能源署 2024 年報告統計 [14]，根據已公告的專案計畫推估，至 2030 年全球低碳氫產量可望達到每年 4,900 萬公噸。然而，為達成此目標，全球氫能產業必須以遠超過過往經驗、甚至高於太陽光電的年均複合成長率來發展。另一方面，國際能源署也指出，部分產氫計畫已出現延遲或取消的情形，原因包括需求不確定性、財務挑戰、誘因機制延宕、法規與許可程序的不明確，以及營運層面的困難等。可見，氫能經濟的發展仍面臨諸多不確定性與挑戰。此外，相較於未來低碳氫的潛在產能，全球需求擴展的腳步相對較慢，可能造成供過於求的風險。同時，低碳氫相關法規的調適壓力、地緣政治變動所帶來的風險，亦加劇整體產業的財務負擔，增加專案如期落實的不確定性。

對於擁有豐沛再生能源的國家而言，發展低碳氫氫的生產與出口或許是理所當然的選項。然而，對於如臺灣這樣倚賴能源進口的國家，若要實現 2050 淨零排放目標，除了導入與本土產業相契合的氫能應用技術外，如何為綠能技術建立可與傳統技術競爭的整體配套環境，恐怕才是產業界更為關注的重點。



短期內液氫海運貿易鏈尚未成熟的情況下，善用氫載體氫的既有供應鏈與基礎設施，將是我國推進氫能應用發展的關鍵策略。鑒於全球經濟正處於調整階段，而氫能仍是達成 2050 淨零排放目標的重要途徑，短期聚焦於氫載體（例如：氨）的應用，將是我國當前相對務實且可行的發展方向。

參考文獻

1. 能源 | 氫能即將顛覆歐洲能源市場？企業投資熱潮與挑戰大揭秘 - 優分析 UAnalyze
2. 儲能未來趨勢，氫能市場成長：全球綠氫 CAGR 38.77%，各國政策補貼具體落地 - 優分析 UAnalyze
3. Hydrogen Shot: An Introduction
4. 蔡英文，工研院/材化所，綜觀 2023 美國 DOE 氫能年會成果及策略發展：材料世界網
5. https://km.twenergy.org.tw/Data/db_more?id=2468，林祥輝
6. 張勳承，陳瑀婕，鄭華琦，氫應用發展及國際現況分析，IEK 產業情報網，2024/07/17
7. 張郁婕，日本看上新戰略資源 比氫氣更穩定、更便宜的「氨氣」發電,2023
8. 2050 年實現碳中和的綠色增長戰略 / 經濟產業省
9. 石蕙玲，日本氨燃料應用於火力發電 - 能源知識庫
10. 台電公司 (2025) 電力淨零排放。 <https://www.taipower.com.tw/2289/2363/2391/2392/10771/>
11. 經濟部能源署，氫能推動進度，<https://www.ey.gov.tw/File/2A02B090828FB37E?A=C>
12. WindTAIWAN 氫能為淨零轉型重要關鍵！中油催生首座官方加氫示範站
13. 加氫站設置宣導，臺灣中油公司。
14. IEA (2024) GlobalHydrogenReview2024



廢溶劑多段回收技術，成功實現 綠色生產轉型

崑鼎綠能環保股份有限公司助理總工程師 / 陳萬原
信鼎技術服務股份有限公司工程師 / 郭昱伶
信鼎技術服務股份有限公司工程師 / 李兆奇

關鍵字：廢異丙醇回收、循環經濟、蒸餾技術應用

摘要

本文探討廢溶劑處理如何透過製程優化與技術精進整合，選用可循環且環境友善的技術，提升能資源使用效率，延長產品生命週期並強化循環再利用機制。更進一步，以工業循環中的「再利用」與「再生處理」為核心，帶動產業邁向高價值循環的發展目標。以半導體產業中的廢異丙醇（IPA）回收處理技術為例，說明崑鼎在高科技產業廢溶劑管理上的投入策略。針對低濃度異丙醇廢液，崑鼎設定回收純度目標為 99.99%，因此評估並採用多段式分離技術，以兼顧適用於多種濃度廢液來源、多純度產品輸出、低能源消耗與低碳排放等多重需求。崑鼎所規劃的多段分離程序，不僅可有效達成節能目標，亦同步

導入蒸汽滲透（Vapor Permeation）薄膜分離技術。透過技術整合與製程精進，落實綠色製造理念，並創造資源循環最大化效益，進而推動創新商業模式，實踐循環經濟的核心價值。

一、前言

循環經濟體系分為生物循環與工業循環兩個部分（參考圖 1）[1]，生物循環係指產品由生物可分解的原料製成，透過萃取生化原料、厭氧消化／堆肥、沼氣等方式，回歸至土壤提供養分。以養豬業為例，在養豬業轉型的過程中，可以透過多元生產、製程優化與全利用來發揮豬隻價值達到零廢棄。另生物質的廢棄物，如廚餘，可透過飼料化、肥料化等方式進一步處理回用到循環體系中

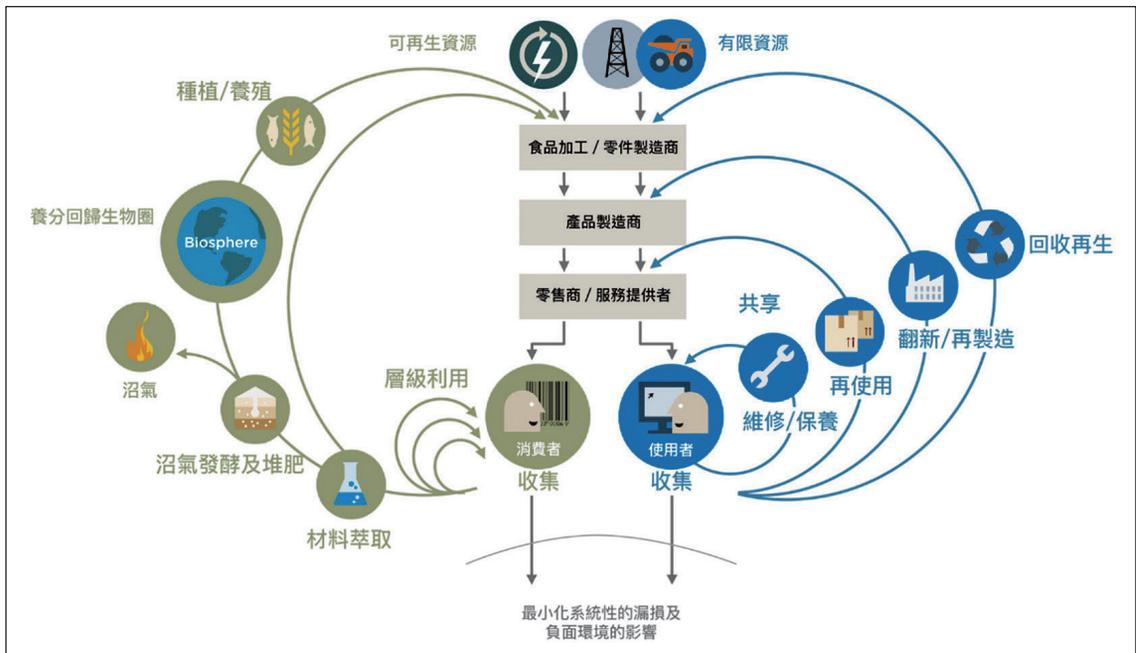


圖 1 循環經濟圖

作為另一資源再生的角色，亦可於養豬過程中產生的糞尿，透過厭氧消化產生沼氣，再以沼氣發電等方式將能源回收再利用。

而工業循環則指原料非生物可分解，而是化合物、合金等物質，透過維修、產品共享、延長壽命、再利用、翻新、回收再製造等的模式，將產品維持高價值的狀態保留在整個循環中，並使之能被更有效的被運用。透過最初材料的選擇，使用可循環、安全無毒的材料；經過產品設計，使產品便於後續的維修、回收再造等流程，再回到循環體系，目的為的是能使產品生命週期得以延長並節省能資源消耗；再透過製程優化，以製造過程中應用的能資源使用效率最大化為目標，減少對環境造成的衝擊，或是導入新興的商業模式，以租賃代替購買。

在工業循環裡以半導體產業製造晶圓的過程中所產出的廢溶劑為例，過去廢溶劑多是以焚燒的方式處理，產生蒸氣後發電，這也是屬能資源回用。現今，依廢溶劑特性透過傳統的分離技術包含蒸餾、萃取或薄膜分離的方式處理，達到節能及效率最佳化的目標，開始有突破傳統、透過製程改善或精進整合的技術開展而出，將廢溶劑經過處理後產出工業級溶劑，甚至電子級，回用到工業循環體系中，作為油漆等參配原料或回到半導體製程直接使用，因此只要有決心將資源放置在對的位置，便能達到循環經濟概念中工業生態與共生的目標。

二、廢溶劑分離技術

郭昱伶等人著作 [2] 曾詳細彙整相關廢溶劑的分離技術，其提到石化產業中，有多



種分離與純化操作技術，例如蒸餾、薄膜、結晶、吸附、吸收等分離程序 [3]。傳統的廢溶劑處理技術多採用蒸餾法進行溶劑的分離與純化，過程中無需添加額外化學藥品，即可確保最終蒸餾產物的高純度，且不含其他雜質。然而，若廢溶劑具有熱敏感性、容易熱分解或在高溫下會發生化學反應，又或其組成會形成共沸混合物時，則需採用萃取分離或共沸蒸餾等替代技術，視原料特性選擇最合適的處理方式。

為提升產業對環境的友善度，可在製程中導入高效節能技術，選用無毒或低環境風險的原料，並採用壽命較長且可重複使用的材料，皆為產業邁向永續轉型的重要策略。有關蒸餾純化技術與薄膜分離技術將逐項說明如下，並比較不同薄膜分離技術的差異性，及透過製程優化技術，提升整體廢溶劑回收與再利用的效益。

2-1 蒸餾純化技術

(廢) 溶劑提高純度採用真空蒸餾、共沸蒸餾或萃取蒸餾等技術為石化產業常用的技術，當溶液出現共沸現象時，氣相與液相在共沸點下具有相同組成，形成所謂的共沸混合物。由於此類混合物無法透過傳統蒸餾方式被有效分離，因此需以特殊技術處理。除可透過改變系統壓力、藉以改變共沸點組成的真空蒸餾外，亦可加入共沸劑，因共沸劑會與系統中至少一個成分產生沸點較低的新共沸物，如此便可透過蒸餾將低沸點共沸物自塔頂移除，另保留於塔底的溶劑則可進行純化與回收。另亦可考慮採用萃取蒸餾，其原理是加入高沸點、易溶解且不易揮發的

萃取劑，用以破壞原有的共沸關係，使高揮發度的物質從塔頂分離，而下層含有萃取劑的液體，則可經由第二道蒸餾程序將萃取劑分離純化並繼續循環利用。

上述蒸餾技術主要依賴蒸餾塔來達成分離目的。蒸餾塔雖為化工製程中最常見的分離設備之一，卻也是最耗能的單元操作。根據工研院於 2011 年發表的《能源統計月報》資料顯示，工業部門的能源消耗長年佔全國總用能的 50% 以上，其中化工業約占工業部門能耗的 48%，其中又以蒸餾單元比重最高 [4]，因此，若能有效降低蒸餾單元的能源消耗，同時提升分離效率，將對整體製程優化與永續發展具有重大意義，也因此成為眾多研究機構與產業界積極投入的研發重點。

在蒸餾技術的設計階段，可透過優化蒸餾塔結構設計（如塔高、塔徑與塔內填充物配置），或調整操作參數，以達到節能目的。此外，亦可透過蒸餾系統間的熱整合，提升整體熱能利用效率。進一步而言，改變操作壓力可突破熱傳限制，使蒸餾塔本身達成熱整合的效果。其中，多效蒸餾純化技術就是一種典型應用。

多效蒸餾純化技術在 1950 年 [5] 即提出，是一種熱整合節能蒸餾技術。該技術透過蒸餾塔本體的特殊設計，藉由調節塔內壓力以產生溫度差異，再將高壓塔頂冷凝時所釋放的熱能，作為低壓塔的加熱熱源，實現雙塔間的能量再利用。相較於傳統蒸餾系統中每座塔需分別配置冷凝器與再沸器，多效蒸餾則可使同一熱交換器同時兼具冷凝與再沸功能。例如，高壓塔頂的蒸汽可直接加熱



低壓塔底部的再沸器，藉此達到內部熱整合，提升蒸汽使用效率，進而節省能源成本並提高蒸汽經濟性。Cheng 和 Luyben [6] 和 Emtir [7] 等人的研究已探討預分餾器與多效蒸餾塔的整合應用，證明了這種安排可以大幅節省能源。此外，國際間已有許多實例被應用，如海水淡化處理。多效蒸餾技術可以分離雙成分或三成分的液體，適用於相對揮發度低、所需理論板數多或操作回流比高的系統。

2-2 薄膜分離技術

薄膜分離技術也是一種常見的分離與純化方法。其原理是藉由一層具有半透性或選擇性滲透能力的膜材，在適當的驅動力作用下，使特定分子或離子通過膜層，而阻隔其他分子，從而達成分離目的。在膜分離的過程中，進料液有一部分會穿透膜層，稱為滲透液或濾液 (Permeate)，而被膜所阻擋的成分則保留在膜的進料側，稱為濃縮液或滲餘液 (Retentate)，如圖 2 所示 [8]。而薄膜分離的驅動力可依應用類型主要分為壓力差、濃度差、電位差與溫度差，其中利用壓力差者有逆滲透 (Reverse Osmosis, RO)、奈米

過濾 (Nanofiltration, NF)、超過濾 (Ultra Filtration, UF)、微過濾 (Microfiltration, MF)；利用濃度差者包含透析 (Dialysis)、氣體分離 (Gas Separation) 及滲透蒸發 (Pervaporation, PV)；利用電位差則是電透析 (Electrodialysis, ED)；以及利用溫度差的薄膜蒸餾 (Membrane Distillation, MD) [9]。

薄膜分離技術能突破傳統分離技術的限制，尤其適用於共沸混合物、沸點接近的組分或熱敏感型混合物的分離。此技術具備多項優勢，包括：節能低耗、設備體積小、操作與維護簡便、以及模組化設計與建置彈性高，同時也易於與傳統分離設備整合與擴充，因此在多項應用中備受重視。其中，滲透蒸發 (Pervaporation, PV) 是一種近年受到高度關注的分離技術。在 PV 程序中，無需高溫操作，僅利用薄膜兩側的壓力差，使進料液相穿透薄膜、並於膜內部汽化為氣相以完成脫水分離。該氣相產物 (滲透蒸氣) 隨後再經冷凝回收 [10]，為近年來極受矚目的分離技術之一。

2-2-1 滲透蒸發 (Pervaporation, PV)

滲透蒸發 (Pervaporation, 以下簡稱 PV) 分離技術最早由 Kober 於 1917 年提出 [11]，並於 1935 年由 Farber 首次應用於分離與濃縮過程中 [12]。自 1960 年代以來，該技術已廣泛應用於有機水溶液與有機混合物的分離。

PV 分離程序係依循「溶解－擴散機制」進行，如圖 3 所示。進料液經由選擇性吸附

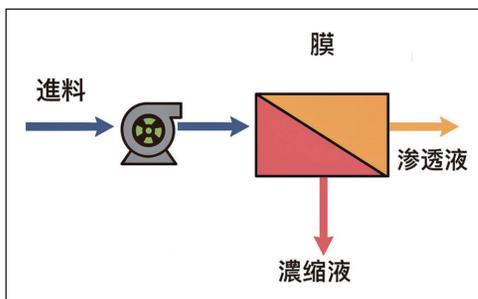


圖 2 薄膜分離過程圖

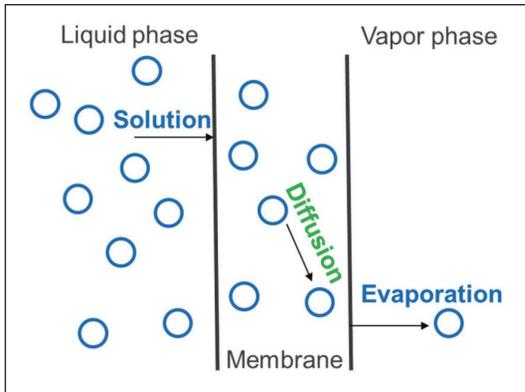


圖 3 薄膜溶解擴散模型

與擴散，透過薄膜達成分離效果。首先，進料液接觸薄膜上游端表面後，其組成物依據化學活性與分子尺寸的差異，與膜材產生不同程度的親和性，導致具有選擇性的吸附現象，進而使特定組成物進入膜內。接下來，在薄膜內部，不同組成物根據其分子形狀、尺寸以及與膜材官能基之間的親和力進行選擇性擴散，朝薄膜下游端移動。最終，當滲透物抵達薄膜下游端時，藉由真空抽氣或載氣吹掃的方式維持下游側低壓環境，使滲透物在低壓下汽化，並自膜表面脫附蒸發達到分離。因此，PV 分離效率決定於液體組成與膜間分子互相作用的關係。

相較於傳統的蒸餾、萃取等純化技術，滲透蒸發 (PV) 分離程序具備多項優勢，包括節省能源、設備構造簡單、無需高溫操作，且不需添加第三成分化學品等特點。此外，PV 技術對於同分異構物 (Isomers)、共沸混合物 (Azeotropic mixtures)、熱敏感物質 (Heat-sensitive compounds) 以及高沸點化學品的分離亦具有良好成效。PV 分離程序的主要應用領域包含 (1) 有機溶劑脫水；(2)

分離少量有機物質的水溶液；(3) 分離有機混合物 [13][14]。只要選擇合適的膜材，即可對應不同類型的溶液條件，涵蓋從低濃度至高濃度的有機物水溶液，展現出高度的操作彈性與廣泛的應用潛力。

2-2-2 蒸汽滲透技術 (Vapour Permeation, VP)

蒸汽滲透 (Vapor permeation, 以下簡稱 VP) 與滲透蒸發 (Pervaporation, PV) 皆被視為「潔淨技術 (Clean technologies)」[15]，在過去發展 PV 技術與其工業應用的基礎上，VP 在近十年間快速發展 [16]。VP 與 PV 常被統稱為「溶液－擴散」或「吸附－擴散」型分離程序，其主要驅動力為薄膜兩側的液相濃度差或氣相分壓差。兩者的最大差異在於進料成分的相態與流動性質：PV 使用液體進料，而 VP 則處理氣態進料，如圖 4 [17] 與表 1 [20] 所示。VP 與 PV 均可利用化學組成或活性差異所產生的驅動力，有效分離揮發性化合物混合物，且不受化合物間分子大小或結構相似性的限制 [17]。

VP 是分離混合蒸氣的有效技術之一。在蒸氣滲透過程中，由於薄膜僅與蒸氣相接觸，若採用有機高分子膜，可有效減少因液相溶劑造成的膨潤現象，因此 VP 不僅保留 PV 部分的優點，也克服 PV 在某些操作條件下的限制 [19]。在操作條件上，VP 系統需特別注意進料溫度，應維持在較高溫度以防止蒸氣凝結；而 PV 系統則需維持進料側適當壓力，以避免進料物質汽化，同時確保液體能穩定流經薄膜模組並完成分離程序。

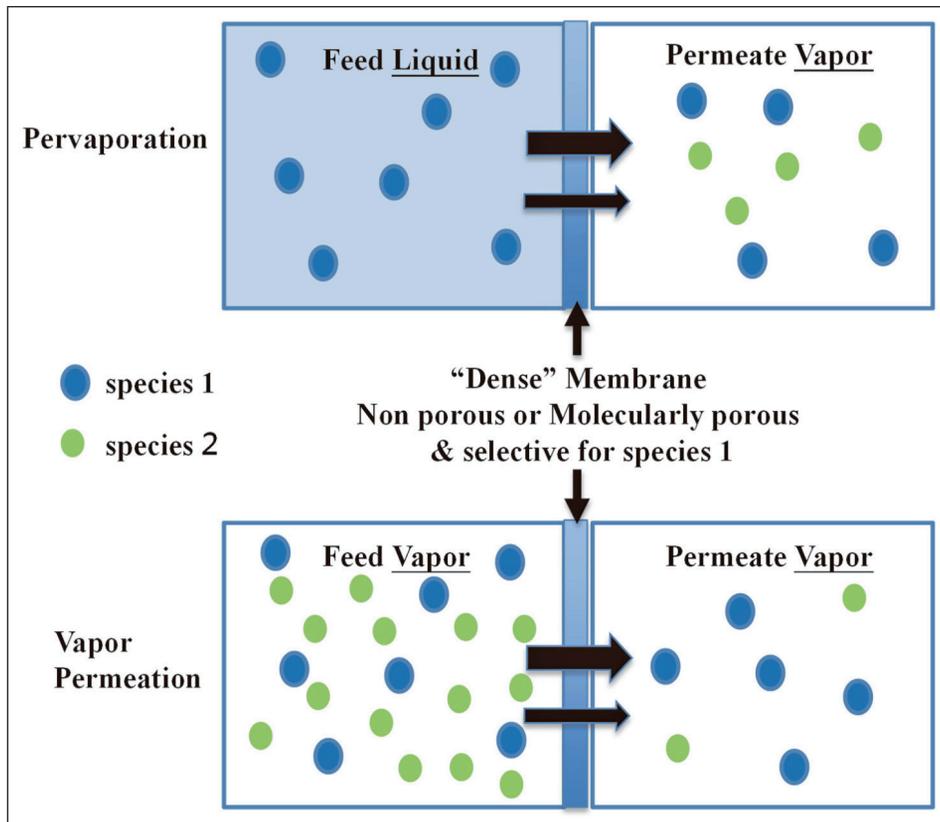


圖 4 滲透蒸發 (Pervaporation) 與蒸汽滲透 (Vapor permeation) 比較圖

表 1 滲透蒸發 (Pervaporation) 與蒸汽滲透 (Vapor permeation) 比較表

滲透蒸發 (Pervaporation, PV)	蒸汽滲透 (Vapor permeation, VP)
進料為液體	進料為蒸汽或蒸汽與氣體的混合物
需要液體-蒸汽相變化, 涉及汽化的焓	不需要相變, 且不需薄膜上游端與下游端的溫度差
驅動力為薄膜兩側化學勢、濃度梯度差	驅動力是進料中各組分的分壓
不能透過薄膜兩側間的壓力差來增加驅動力	可以通過壓力增加來增加驅動力
滲透液 (Permeate) 必須具揮發性	可以應用於更大的模組
薄膜與液體直接接觸, 反應過程中可能會使薄膜劣化	因薄膜不與反應環境直接接觸, 薄膜使用壽命長

舉例而言, 若選用對乙醇具選擇性的薄膜, 可自乙醇-水混合物中選擇性移除乙醇並進一步濃縮滲透液; 反之, 若選用對水具選擇性的薄膜, 則可從相同混合物中去除水

分, 達成脫水與濃縮的目的。無論是 VP 或 PV 皆不受熱力學平衡的限制, 因此即使在共沸條件下, 亦能有效分離並除去溶劑中的水分 [20]。此外, 相較於傳統以蒸餾為主的分



離技術，若能選用具高選擇性的膜材進行 VP 或 PV 操作，僅需供應目標組成物所需的蒸發潛熱，即可實現有效分離，從而大幅降低能源消耗 [17]。

一般而言，PV/VP 薄膜材料可分為有機膜、無機膜及有機－無機混合／複合膜三大類。有機膜通常指高分子膜，具有製備與加工容易、結構多樣、應用廣泛等優勢，常見材料包括幾丁聚醣（Chitosan）、聚乙烯醇（Polyvinyl alcohol, PVA）、聚丙烯腈（Polyacrylonitrile）、聚酯（Polyester）、醋酸纖維素（Cellulose acetate）、聚磺（Polysulfone）等，但高分子具有不耐高溫及不耐高壓的先天限制，因此在某些工業程序上會降低其實用性。無機膜材則有陶瓷膜、金屬膜、分子篩膜等，具有優異的耐高溫、耐酸鹼與化學穩定性，且分離性能穩定可靠。惟其製備工藝較為複雜，成本也相對較高，但從長期穩定性與可持續應用的角度來看，無機膜依然具備發展優勢。為了兼顧有機膜與無機膜各自的優點，有機－無機混合／複合膜應運而生。此類膜材可透過將有機材料塗覆於無機支撐層上，或反之，將無機材料塗覆於有機支撐層上，以結合兩者的功能性與結構強度，是一種實用且具潛力的發展方向。

此外，也有透過技術整合以降低能源消耗的應用實例。Brüschke 與 Tusel 將滲透蒸發技術與傳統蒸餾設備結合，成功將乙醇濃度由 94% 提升至 99.85%。經操作成本比較分析，兩項技術合併使用後，相較於單獨使用蒸餾與滲透蒸發技術，操作成本分別降低約 40% 與 28% [21]。另有瑞士公司專注於無機膜材的開

發，利用其具備耐高溫、耐化學腐蝕、高通量與高選擇性等特性，導入於滲透蒸發程序中，並與傳統蒸餾技術整合應用，以進一步提升分離效率與系統穩定性 [15]。針對異丙醇脫水應用，Zuo 等人之研究顯示，無論採用 PV 或 VP 皆能有效除水，但 VP 方式在處理異丙醇時展現出更佳的脫水效果 [22]。

三、產品市場定位與服務模式

崑鼎投入廢溶劑回收產業，不僅是肩負企業使命的展現，更是經過縝密的多方評估與審慎決策。從技術可行性、市場趨勢、財務效益到風險控管，皆進行全方位的評估分析，確保投入方向與策略具備前瞻性與穩健性。本著「成為最值得信賴的永續資源循環領導者」的自我期許，崑鼎在產品定位上亦採取差異化策略，明確與市場現有產品做出區隔，且回收產品以「回歸製程使用」為核心目標，共同協助企業實現永續循環目標。

基於上述理念，崑鼎積極透過產官學合作管道投入資源，開發高純度（99.99%）廢溶劑回收技術，並同步針對具規模與成熟製程尋求產業合作機會，加速布局廢溶劑回收市場。因此，「耀鼎資源循環股份有限公司」（以下簡稱「耀鼎」）應運而生，作為崑鼎推動資源循環願景的推手。

3-1 產品生產技術評估

耀鼎標的設定為高科技產業廢溶劑一低濃度異丙醇，其主要組成為水及異丙醇，成分雖較為單純，但若須達到崑鼎設定的回收純度目標 99.99% 異丙醇，則需選用多段的分



離技術才能達成，且符合適用大範圍濃度的廢異丙醇料源、多種純度的異丙醇產品、低能源消耗與低碳排的目標。耀鼎規劃的多段分離技術說明如下：

第一段分離技術：透過傳統的蒸餾分離技術初步提濃異丙醇濃度，不需透過添加大量的萃取劑或是使用薄膜分離的方式，便可以有效將低濃度異丙醇提濃至 85% 以上之工業級異丙醇。

第二段分離技術：採用萃取精餾技術將異丙醇濃度由 85% 提濃至 99.5%，該技術則需導入破共沸技術，加入低沸點的共沸劑提濃異丙醇，或添加高沸點的萃取劑，達到分離效果。

第三段分離技術：採用薄膜分離技術，VP 技術不須加入第三成分，即能將異丙醇濃度由 85% 提濃至高濃度 99.99%。但高科技產業對於產品中的雜質微粒要求十分嚴格，管制元素多達 40 餘種，且濃度須達 ppb 等級才能符合半導體電子級規格，因此除透過 VP 提濃到 99.9% 外，還必須經過多道離子交換方式，去除異丙醇中的雜質。VP 技術其具有低能耗、處理效率高、設備佔地面積小、建構容易、可全自動操作、維護簡便等優點。

上述製程規劃的優點為每段的單元都能獨立操作或串聯操作，增加製程的彈性，因此可針對科技廠產出不同濃度的廢異丙醇，選用較佳的回收單元進行處理，或是依據產品端客戶的需求，產出不同純度的產品。透過整合蒸餾分離及無機蒸發滲透膜技術的彈性運用，能有效降低製程操作能源消耗及碳排。

3-2 服務模式

耀鼎致力將自身經驗與業界分享，於各大研討會與論壇，分享耀鼎建置歷程，並向企業推動一條龍服務，以自身經驗，協助企業規劃廠內自設廢溶劑處理設施。儘管在廠內自建處理設施已逐漸成為半導體產業的趨勢，但實務執行上仍面臨諸多挑戰。多數半導體廠為既有廠房，其空間配置相對受限，如何在有限空間中整合處理設備，並確保與既有廠區公用系統（如電力、冷卻水、壓縮空氣、廢氣處理等）順利銜接，是規劃設計初期的重要課題。此外，考量廢溶劑具高度易燃性，自設處理設施須嚴格遵循相關消防法規與危險物品儲運規範，亦大幅提升工程設計與施工的複雜度。

耀鼎與客戶協同合作，建置的蒸餾系統，可將低濃度廢溶劑（約 10%）經由廠內自設的提濃系統產生高濃度廢溶劑（約 85%），可將廢棄物產出量減量約 88%，在產源端將廢棄物減量高值化，再將高濃度廢溶劑送至耀鼎進行精餾提濃，產出工業級或電子級產品回到市場。

另一成功案例為協助客戶於廠內規劃與建置多功能廢溶劑處理設施，該系統具備處理多種廢溶劑的能力，並預先保留升級至電子級製程的擴充彈性。預期該系統完成設備建置後，年處理量約 9,000 噸廢溶劑採全回收，實現約 98% 的減量效益。同時可協助客戶產品去化，提高客戶投資意願，以「轉廢為資」的方式與企業共同實踐循環經濟。



四、實現綠色生產轉型

為達成再生低碳電子級異丙醇之製造目標，耀鼎積極與產業界及學術研究單位建立技術合作，致力於廢溶劑源頭減量、回收製程之精密優化、以及高效能節能減排技術的導入。在製程端更導入碳盤查系統，依據 ISO 14064 標準，全面性盤點各單元操作之碳排放量，並透過數據分析辨識高碳排熱點，進一步研擬單元操作優化、熱能回收、替代能源使用等減碳技術方案。

此外，耀鼎持續提升回收 IPA 純化後的品質穩定性，藉由自動化監控系統與先進分析儀器，確保產品穩定達成電子級（99.99%）規範，進一步提高市場回用率。最終目標為建構一個封閉式循環、零廢棄且具備碳中和潛力的再生 IPA 處理製程，實踐搖籃到搖籃的循環經濟願景。

為推動綠色製造，耀鼎依據碳盤查結果擬定多項減碳的方針，如在製程熱源選擇上，使用碳排放量相對較低的燃氣鍋爐，同時可克服台灣普遍缺電的問題；另 VP 系統在滲透液側仍會存在少量異丙醇，在珍惜資源的理念下，耀鼎仍設法將其進一步回收利用，故在製程技術整合上，思考將滲透液回送到蒸餾塔再處理，達到資源再利用最大化，並思考製程餘熱回收再利用的可行性。因此，耀鼎從 2021 開始，逐年編列預算進行製程改，如於 2021 年將鍋爐燃料自重油改為低碳的天然氣、回收鍋爐尾氣廢熱加熱燃燒空氣等；2022 年提升進料熱交換器容量，年節省 8,780 度天然氣，並透過增設廢氣引風機變頻器，年節電約 1.1 萬度，這些節能減碳作為，

使耀鼎於 2021 年及 2022 年陸續榮獲獲得臺灣循環經濟績優企業（二星獎），及第 4 屆國家企業環保獎（銅級獎）殊榮。2023 年耀鼎持續精進，找出減碳熱點，更新冷卻水塔及空壓機，年減碳約 4.7 噸，單位碳排已降低 13.2%。2024 年接續將廠內電熱鍋爐更換為貫流式蒸汽鍋爐，預期年減碳 185 噸，單位碳排可再降低 10%，這三年的努力成果更獲得台灣永續行動獎 SDG 12 金獎的肯定。

除上述製程減碳外，耀鼎亦推動廠區使用綠電，透過碳權抵換，宣告 2020 年 6 月 1 日自 2021 年 5 月 31 日達碳中和，成為全國首家取得循環經濟與碳中和雙證書的企業，耀鼎攜手客戶為 2050 年淨零碳排放做出實質貢獻，助力地球永續，打造更美好的未來，朝向「低碳永續經營」之藍圖逐步落實。

五、結論

在 ESG 壓力日益升高的今日，企業面對的不只是減碳，更是全面的綠色轉型挑戰，崑鼎秉持專業、誠信、團隊與創新的企業文化，提供高純度、具價格優勢的回收異丙醇（IPA）解決方案，並協助企業同時落實企業社會責任。

我們不僅是再利用廠商，更是企業落實 ESG 目標的策略夥伴。從客製化的廢溶劑純化系統建置，到閉環循環資源規劃，崑鼎深入客戶產線，與企業並肩合作，共同落實：

- 減廢：從源頭降低廢液產出
- 減容：提升處理效率，減少環境負荷
- 減碳：降低碳足跡，提升綠色競爭力



以實踐環保的專業，用誠信贏得信賴，崑鼎將持續與企業攜手，打造更永續的資源循環供應鏈生態系。

參考文獻

1. 循環台灣基金會。〈循環經濟企業轉型路徑圖〉(改編自 Ellen MacArthur Foundation, “Towards the Circular Economy Vol. 1: Economic and Business Rationale for an Accelerated Transition”, Ellen MacArthur Foundation, UK, 2013)。循環台灣基金會，台灣，取自 <https://www.circular-taiwan.org/ceroadmap>
2. 郭昱伶、顏欣卉、林明志、徐承澤、林佩妤，〈精進廢溶劑分離純化技術以實踐再利用循環經濟〉，《工業污染防治》，第 149 期，第 129–147 頁，2020 年。
3. Nishihama, Syouhei and Yoshizuka, Kazuharu, “Ion exchange adsorption of molybdenum with zeolitic adsorbent,” *Journal of Environmental Engineering & Management*, Vol. 19, No. 6, pp. 365–369, 2009.
4. 何宗仁，〈多效蒸餾技術〉，收錄於《低碳製程技術研討會—蒸汽優化技術(107年8月)》講義，主辦單位：經濟部工業技術研究院材料與化工研究所，台灣台北，2018年8月。檢自：https://ghg.tgpf.org.tw/Resources/lecture_more?id=67730f26e10642da802b2a9fc525a2dc
(圖中數據引用自：經濟部能源局，《能源統計月報—伍、能源需要》，2012年8月10日更新，https://web3.moeaboe.gov.tw/ECW/populace/web_book/WebReports.aspx?book=M_CH&menu_id=142&sub_menu_id=678)
5. C.S. Robinson and E.R. Gilliland, “Elements of Fractional Distillation”, (4th. Ed.), McGraw-Hill Book Co., New York, pp. 168-191, 1950.
6. H.C. Cheng and W. Luyben, “Heat-integrated distillation columns for ternary separations”, *Industry & Engineering Chemistry Process Design and Development*, Vol. 24, No. 3, pp. 707–713, 1985.
7. M. Emtir, E. Rev and Z. Fonyo, “Rigorous simulation of energy integrated and thermally coupled distillation schemes for ternary mixture”, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 21, Nos. 13–14, pp. 1299–1317, 2001.
8. Hua Wang and Hongyi Zhou, “Understand the Basics of Membrane Filtration”, *Chemical Engineering Progress*, Vol. 109, No. 4, pp. 33-40, 2013.
9. 徐嘉婉，「薄膜分離技術應用於水處理之案例探討」，碩士論文，逢甲大學，台灣台中，2007。
10. Richard A. Kirk, Maia Putintseva, Alexey Volkov and Peter M. Budd, “The potential of polymers of intrinsic microporosity (PIMs) and PIM/graphene composites for pervaporation membranes”, *BMC Chemical Engineering*, Vol. 18, 2019.
11. P.A. Kober, “Pervaporation, perstillation and percrystallization”, *Journal of the American Chemical Society*, Vol. 39, pp. 944–948, 1917.
12. L. Farber, “Application of pervaporation, *Science*”, *Science*, Vol. 82, No. 2120, p. 158, 1935.
13. 賴君義，「薄膜科技概論」，台灣台北，五南圖書出版公司，2018。
14. J. G. Wijmans, R.W. Baker and A.L. Athayde, “Pervaporation: Removal of Organics from Water and Organic/Organic Separations”, *Membrane Technology and Research*, Vol. 272, pp. 283-316, 1994.
15. Anne Jonquière, et al., “Industrial state-of-the-art of pervaporation and vapour permeation in the western countries”, *Journal of Membrane Science*, Vol. 206, Nos. 1–2, pp. 87-117, 2002.
16. 陳鎮、秦培勇、陳翠仙，「透汽化和蒸汽滲透技術的研究、應用現狀及發展」，《膜科學與技術》，第 04 期，2003。
17. Leland M. Vane, “Pervaporation and Vapor Permeation Tutorial: Membrane Processes for the Selective Separation of Liquid and Vapor Mixtures”, *Separation Science and Technology*, Vol. 48, No. 3, pp. 429–437, 2013.
18. Catia Cannilla, Giuseppe Bonura and Francesco Frusteri, “Potential of Pervaporation and Vapor Separation with Water Selective Membranes for an Optimized Production of Biofuels—A Review”, *Catalysts* 7 (2017): 187.
19. 王洪軍、張麗、趙莎莎、王丹，「蒸汽滲透膜分離技術的研究現狀及其應用前景」，《科技資訊》，第 36 期，2009 年。
20. Leland M. Vane, “Review of Pervaporation and Vapor Permeation Process Factors Affecting the Removal of Water from Industrial Solvents”, *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, Vol. 95, No. 3, 2019.
21. G. Tusel and H. Brüsckke, “Use of pervaporation systems in the chemical industry”, *Desalination*, Vol. 53, Nos. 1–3, pp.327-338, 1985.
22. Jian Zuo, Dan Hua, Verma Maricar, Yee Kang Ong, and Tai-Shung Chung, “Dehydration of industrial isopropanol (IPA) waste by pervaporation and vapor permeation membranes”, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 135, No. 24, 2017.



刨除料資源全循環應用技術

工業技術研究院正工程師 / 陳志豪
工業技術研究院研究員 / 游佩蓉
工業技術研究院研究員 / 胡芳瑜
工業技術研究院副研究員 / 彭承祖

關鍵字：刨除料、ITRI 瀝青再生劑、ITRI 生物菌劑、瀝青剝除技術、瀝青砂石分離

摘要

隨著台灣道路柔性鋪面邁向定期養護需求，每年產生達 500 萬噸之瀝青刨除料，但因再利用規範不完善、材料品質變異大，使實際再利用率偏低。為提升刨除料再利用效率，本文提出兩項創新技術路徑。首先，透過工研院開發之 ITRI 瀝青再生劑，有效還原老化瀝青性質，使刨除料可混摻達 50% 並重製為高品質再生瀝青混凝土，驗證結果顯示黏彈性與抗車轍性能可兼備，已成功應用於全台多處道路鋪面。其次，開發「刨除料瀝青砂石分離技術」，結合生物菌劑與瀝青剝除技術，將瀝青與骨材有效分離，產出可完全取代天然砂石之再生骨材與瀝青砂，達成 100% 刨

除料全循環利用。本研究顯示上述技術不僅解決刨除料堆置問題，更有助於減少天然資源依賴，提升鋪面壽命與工程效益，對實現低碳轉型與循環經濟具關鍵貢獻，未來可作為永續鋪面工程之發展方向。

一、台灣鋪面的使用現況

1.1 國內使用柔性鋪面為大宗

根據交通部統計查詢網 [1] 資料，截至 2023 年台灣道路長度為 42,992 公里，道路面積已超過 5 億平方公尺，且近十年來，台灣道路面積平均每年仍有 1% 成長幅度，以上資訊可預期國內每年身負龐大的道路養護需求。



國內道路鋪面面層材料，大多以瀝青混凝土（Asphalt Concrete, AC）為主，稱之柔性鋪面，組成為砂石（約 95%）與瀝青（約 5%）。依據經濟部礦物局土石資源服務平台 [2] 數據可知，全台每年砂石使用量約 7,000 萬噸，其中自產砂石量約 3,000 ~ 4,000 萬噸，無法滿足國內需求，不足的砂石量多由進口砂石補充。而每年使用於柔性鋪面的砂石約 670 萬噸，占比為全年砂石使用量的一成左右，也是全台砂石的第二大用途。

1.2 國內柔性鋪面刨除後的問題

國內當前路面養護多以刨除重鋪為主，換言之，每年因道路修繕而被挖（刨）除的柔性鋪面物料，稱之為刨除料（Reclaimed Asphalt Pavement, RAP），相對應產出約 500 ~ 600 萬噸左右。

目前刨除料再利用可作為基、底層及施工便道鋪築材料，但重劃區與新闢道路相對少，故應用量少；另外，將刨除料添加再生劑，使刨除料恢復原有材料性質，再加入新粒料調整級配與新瀝青拌合後，重新作為道路面層鋪築之用，明確定義在「公共工程施工綱要規範第 02966 章再生瀝青混凝土鋪面」，也是再利用途徑之一。但是，工程驗收條件無法如實呈現鋪面品質，使得主辦機關在標案設計中避免使用刨除料。以上種種因素，導致全國刨除料的再生應用比率低，僅 18%，其中中央 8%、地方 28%、六都 24% ~ 46%。

根據台灣區瀝青工業同業公會於 2018 年調查全國刨除料數量，估計全台刨除料約有

2,100 萬噸 [3]。時至今日，刨除料刨鋪不平衡的現狀仍然存在，可預見累計的刨除料堆置數量只有更多，遠超過業者可承受的環境負荷能力，廠區又受環保法規約束與各縣市政府環保單位稽查，業者常因刨除料堆置問題而被連續開罰。

二、拓展多元刨除料應用路徑

但一味的由刨除料去化角度，要求主辦機關使用刨除料再生瀝青混凝土，實為越俎代庖，應由正確的規範指引，以確保良好的鋪面品質，才能讓主辦機關敢用、願意用。以下由刨除料材料的角度切入，提出更臻完善工程規範作參考，以確保維持鋪面品質與延長道路壽命效益。另外，目前第 02966 章再生瀝青混凝土鋪面（V7.0 版）規範刨除料添加上限為 40%，所餘 60% 仍無法使用。因此尋求刨除料其他去化辦法，亦迫在眉睫，工研院進而開發刨除料全循環技術，將刨除料上瀝青與砂石分離，再予以各別利用。多元刨除料再利用相關技術說明如下。

2.1 再生瀝青混凝土

2.1.1 刨除料

刨除料主要組成為砂石與老化瀝青。刨除後的砂石性質不會改變，僅粒料尺寸的變化，具降級的現象；然瀝青的質變，對再利用的影響較為顯著。瀝青組成複雜可概分四種類別，分別是烷烴類（Saturates）、芳香烴（Aromatic）、膠質（Resins）與瀝青質（Asphaltenes）。而瀝青老化的原因，係開放



交通使用期間鋪面受車輪摩擦、日曬與空氣及水的接觸，瀝青長期氧化，相對較輕質的化合物（烷烴類、芳香烴、膠質）逐漸聚合成硬質的化合物（瀝青質）。

當瀝青質占比逐漸增加，表示瀝青老化程度逐漸增高，對應的參數包括黏度高，針入度低。一般全新料現地鋪築，初始之瀝青黏度設計在 3,250 ~ 6,750 poise 之間；使用後刨除之老化瀝青黏度提升至 10 ~ 50 萬 poise，中南部尤為嚴重，黏度飆升至 50 ~ 200 萬 poise 的刨除料大有所在。另外，瀝青老化作為結合料的特性變化 [4]，還包含延展性和滲透性降低，與軟化點和閃火點升高；至於機械性能變化，由於老化瀝青變硬，剛度增加，瀝青混合料對永久變形的抵抗力和承載能力提高，但也因又硬又脆，在低溫下容易崩解或疲勞開裂。在國際的研究中 [5]，刨除料混摻比例 < 20%，可以直接加入新瀝青，仍保有的混合料的黏彈性與施工性；當混摻比例 > 20%，則需要額外加入瀝青再生劑，讓老化瀝青回復原有的性質，才能確保鋪面品質。除此之外，影響瀝青再生劑添加量，還有一因

子，即瀝青的老化程度，越老化，瀝青再生劑添加量需要提高。

2.1.2 ITRI 瀝青再生劑

依據施工綱要規範第 02966 章 (V7.0 版)，若使用再生劑材料應符合 CNS 15359 之規定。工研院所開發瀝青再生劑產品，符合 CNS 15359 之規定，屬於 RA1 等級，如表 1 說明。ITRI 瀝青再生劑產品原料源自生質物，非石化產品，具環境友善性，能還原老化瀝青，並有助於新舊瀝青相容之特性。研究初期，針對不同老化程度刨除料，與 ITRI 瀝青再生劑添加量作探討，結果於表 2 所示。再生瀝青混凝土在驗收含油量時，再生劑會被萃取計算在含油量內。因此，再生劑添加量控制很重要，添加比例不宜多，仍需足夠的新瀝青，來滿足粒料的黏結性。ITRI 瀝青再生劑使用量，即便是老化程度高的刨除料（94 萬 poise），RAP 的混摻比例高達 50%，其再生劑添加量也只占每單位再生瀝青混凝土重量的千分之 2，占總含油量重量百分之 4，再製的混合料黏度亦可如新料組成一般，落在 3,250 ~ 6,750 poise 之間。

表 1 ITRI 瀝青再生劑產品規格

	標準號	RA1 等級	ITRI 瀝青再生劑
黏度，60°C (cS)	CNS 14249	50 ~ 175	69
閃火點 (°C)	CNS 3775	> 218	230
飽和度 (wt.%)	-	< 30	0.42
以薄膜烘箱 (163°C) 試驗後之殘餘物測試，CNS 14250 或 CNS 14937			
黏度比	-	> 3	0.42
重量變化，± (%)	-	> 4	-3.34
比重	-	依報告	0.936



表 2 不同老化程度的刨除料使用 ITRI 瀝青再生劑後之混合料黏度變化

RAP 老化程度，黏度，60°C (Poise)	每單位再生瀝青混凝土混合料		再生劑占總含油量比例 (%)	混合料黏度，60°C (Poise)
	RAP 添加比例 (%)	再生劑添加比例 (%)		
20 萬	30	0.08	1.6	4,840
	40	0.1	2.0	4,200
	50	0.11	2.2	4,100
	60	0.12	2.4	4,300
94 萬	30	0.15	3.0	5,300
	40	0.17	3.4	4,800
	50	0.20	4.0	4,100

2.1.3 再生瀝青混凝土成效

國際上針對刨除料混摻（比例 < 30%）轉製再生瀝青混凝土，與全新瀝青混凝土進行研究比較，實驗室結果與現地鋪築 6 ~ 17 年的驗證 [6]，再生瀝青混凝土在永久變形部分，顯示出比全新瀝青混凝土具有相同或更優異的性能。當刨除料混摻比例高（40% ~ 50%）的再生瀝青混凝土，抗車轍性能都沒有問題，除非使用錯誤的再生劑或添加太多量。更甚者，依據國家、區域的地理環境，再區分與評估瀝青混凝土混摻刨除料的必要性，在熱的環境使用刨除料，具優化道路性能之效益；在冷的區域使用刨除料，則有疲勞開裂的現象 [7]。以台灣而言，介於熱帶與亞熱帶間，屬於高溫多雨環境，因此，刨除料直接再利用重回鋪面是合適的。

柔性鋪面在抗車轍性能測試上，國際上多使用濕式漢堡輪跡試驗作為指標，是一種對瀝青混凝土試體進行嚴苛的水浸害評估方法，係利用一組加載 705N 的鋼輪，對浸泡在水中（50°C）之瀝青混凝土試體進行來回的往覆運動，目的在綜合評估瀝青混合料抵抗車轍與剝脫（水浸害）的潛能，其建議值為

當鋼輪來回滾壓 12,000 次，車轍深度不得大於 12.5 mm。國內尚未訂定明確之國家標準，目前參考國際標準 AASHTO T 324 試驗方法。

目前，國內瀝青分類採用 25°C 針入度或 60°C 黏滯度，僅判別瀝青軟硬程度。因此，本研究將瀝青材料物性分析結果，搭配瀝青混凝土的濕式漢堡輪跡試驗，要求同時符合數值限制，以確保鋪面的品質。表 3 為使用 ITRI 瀝青再生劑產製之再生瀝青混凝土，可同時通過代表柔性的黏度指標與代表剛性的濕式漢堡輪跡試驗結果。當使用 40% 刨除料搭配 0.1% ITRI 瀝青再生劑，添加新瀝青 AC10，完成配合設計後，瀝青混凝土試體黏度為 5,730 poise，當輪跡試驗車轍下陷深度為 12.5 mm，鋼輪來回滾壓達 16,612 次，符合標準 > 12,000 次，顯示再生瀝青混凝土剛性與柔性兼備。

目前，添加 ITRI 瀝青再生劑製得之再生瀝青混凝土已在全台各地鋪設，涵蓋新北、桃園、新竹、苗栗、台中、彰化、台南、高雄、屏東、宜蘭及花蓮等地，鋪設面積達 2,600 萬平方公尺，且所有工程均通過驗收，充分證明技術的可靠性與有效性。



2.1.4 動態剪切流變儀試驗 (Dynamic Shear Rheometer, DSR)

關於再生瀝青鋪面的性能表現，其關鍵取決生產過程中 RAP 結合料的活化程度 [7]。在國內，交通部公路總局，鋪面工程曾採用動態剪切流變儀試驗作為驗收指標，量測瀝青膠泥的複合模數 G^* (Complex Shear Modulus)，研擬在 64°C 條件，限定 G^* 值應 $< 10 \text{ kPa}$ 。 G^* 值可以判斷瀝青分子間作用力的差異。當 G^* 值越大，代表瀝青質相互鍵結與聚集現象明顯，由此可檢視刨除料添加量或老化瀝青程度的合理性。由添加再生劑的角度切入，當添加對的再生劑，使老化瀝青整體組成比例調整與新瀝青較一致，讓再生劑具活化效果，可與瀝青質相容性提

升，使聚合作用不顯著，則 G^* 值就下降；反之，不對的再生劑，與老化瀝青相容性較差，使瀝青質聚合作用顯著，則 G^* 值變大，故推測可藉此判斷使用的再生劑材料合理性。

添加 ITRI 瀝青再生劑之再生瀝青混凝土試體，依不同刨除料黏度，調整刨除料使用比例，23.2 萬 poise 刨除料，重新配合設計占比 60%，再生劑添加量 0.1%；而極老化 (> 100 萬 poise) 的刨除料，重新配合設計占比 40%，再生劑添加量上限仍不超過 0.2%，皆可使瀝青黏度符合 3,250 ~ 6,750 poise 之間，而 G^* 值皆符合 $< 10 \text{ kPa}$ 以下，如表 4 所示。顯示 ITRI 瀝青再生劑與瀝青質具相容效果。

表 3 再生瀝青混凝土黏度及漢堡輪跡試驗均符合規範

再生瀝青混凝土：40% 刨除料 + 0.1% ITRI 瀝青再生劑 + AC10		
成效	黏度 (poise)	5,730
	濕式漢堡輪跡 (下陷深度 12.5 mm 之滾壓次數)	平均：16,612；SD:611.62

表 4 再生瀝青混凝土黏度及 DSR 複合模數 G^*

分析項目	實驗組數 1	實驗組數 2
刨除料黏度 (poise)	232,000	$> 1,000,000$
再生劑添加量 (%)	0.1	0.2
刨除料比例 (%)	60	40
刨除料含油量 (%)	4	3.5
新瀝青 AC10 添加量 (%)	2	2.9
瀝青混凝土試體最終含油量 (%)	4.5	4.5
瀝青混凝土試體萃取瀝青		
黏度 (poise)	3,784	5,784
DSR 複合模數 G^* (kPa)	3.16	7.33



2.2 刨除料瀝青砂石分離技術

刨除料除了再生瀝青混凝土應用，為加速去化與資源整合應用，工研院進而開發「刨除料瀝青砂石分離技術」，邁向「刨除料全循環再生應用藍圖」(如圖 1)。本技術運用「生物菌劑」搭配「瀝青剝除技術」，成功將刨除料重生成為 70% 再生石及 30% 瀝青砂，搭配本院瀝青再生劑，即可 100% 將刨除料重新應用於道路鋪面。

2.2.1 生物菌劑

本技術所開發的「生物菌劑」，主要由重油污染土壤中，篩選與馴養獲得可降黏瀝青的環境微生物。篩選過程中以重油為唯一碳源，最終選取可高效分解重油做為生長碳源之菌株，由此可得到適宜降解瀝青中直鏈烷烴、芳香烴及瀝青質的菌株。且本技術所使用的菌株經驗證微生物分級為 RG1，屬對人



圖 1 刨除料全循環再生應用藍圖

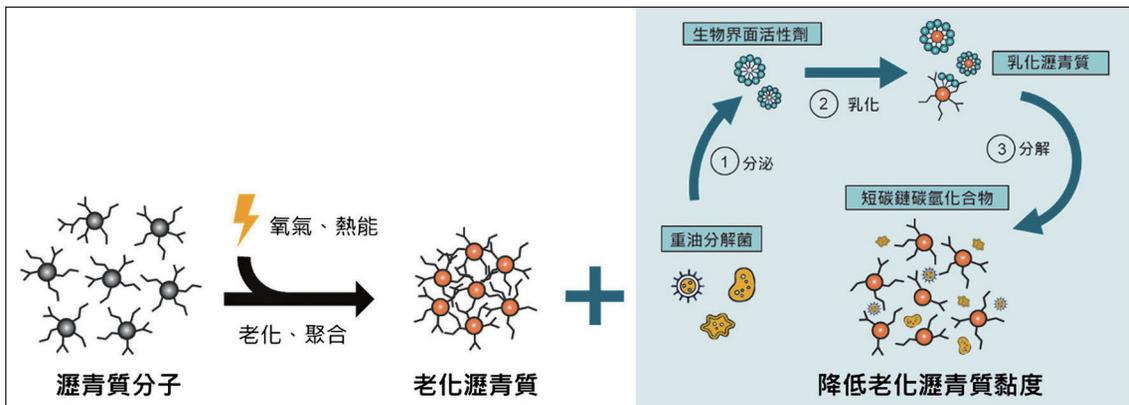


圖 2 生物菌劑降黏原理



體／環境造成危害的風險是最低的，顯示實際應用產品為安全無害的。

2.2.2 瀝青剝除技術

剝除料與生物菌劑接觸後，再導入「瀝青剝除技術」，以水作為載體，將剝除料浸置其中，並讓剝除料間進行碰撞，藉由水將細小的瀝青膠泥粉體帶出，並因極性的不同，可避免瀝青膠泥重新附著於石料表面，達到剝除料瀝青／砂石分離的目的。技術系統設計與運轉參數得以讓砂石保有完整破裂面與菱角，最終可獲得粒徑 > 2 mm 與低瀝青含量 (< 1%) 之再生石，以及粒徑 < 2 mm 且高瀝青含量 (> 5%) 之瀝青砂 (如圖 3)。

其中，再生石可符合 CNS15308 瀝青鋪面混合料用粗粒料標準 (如表 5)，代表其品質已符合全新砂石標準，未來可以新砂石形式使用，將不再受限於剝除料 40% 的使用限制。

2.2.3 分離後再生石及瀝青砂配合設計

本技術有效消除剝除料應用於再生瀝青混凝土之假粒徑、瀝青老化程度不一、瀝青

含量不均等困境，將剝除料瀝青／砂石分離並透過水循環系統，分級骨材真粒徑，濃縮瀝青並使其均質化。將分離後的再生石與瀝青砂重新進行配合設計，搭配 ITRI 瀝青再生劑，以重載車流模擬下，皆可滿足馬歇爾法的試驗要求，詳如表 6 所示。依目前的試驗結果，從剝除料分離的再生石及瀝青砂重新配合設計，再利用的量已突破 85%，預期取得篩分更臻完善再生石與瀝青砂，未來可達成 100% 全循環再利用。

除此之外，再生石可適用於各式工程粒料，如控制性低強度回填材料 (Controlled Low Strength Materials, CLSM) 等，亦達成讓物料循環再生 100% 應用，進而解決砂石短缺、剝除料堆置問題，也達成「循環經濟」體系中零廢棄最終理想目標，並可降低了對

表 5 再生石符合 CNS 15308 瀝青鋪面混合料用粗粒料標準

級配料試驗項目	分離後砂石	
	試驗值	規範值
洛杉磯磨損試驗 (%)	17	≤ 40
粒料中破碎顆粒含量 (%)	96	≥ 90
粒料健度試驗 (%)	0.4	≤ 12



圖 3 剝除料瀝青剝除成果



表 6 再生石及瀝青砂配合設計

混合料種類	12.5 mm 密級配									
	50% 再生石 +50% 天然砂					55% 再生石 +30% 瀝青砂 +ITRI 瀝青再生劑				
粒料組成	1 cm	0.8 cm	0.5 cm	天然砂	填縫料	1cm	0.8 cm	0.5 cm	天然砂	瀝青砂 ^{註 1}
		10	10	29	49	2	10	10	35	15
建議瀝青含量 (%)	5.1					4.5				
ITRI 再生劑添加量 (%)	0					0.35				
新瀝青添加量 (%)	5.1					2.1				
單位重 (kg/m ³)	2379					2377				
穩定值 (kgf) ^{註 2}	1397					1464				
流度值 (0.01cm) ^{註 3}	9					14				
空隙率	4					3.9				

註 1：瀝青砂含油量 7.8%，黏度 91.36 萬 poise。

註 2：穩定值標準 > 817 kgf。

註 3：流度值標準介於 8~14 之間。

天然資源和外國進口的依賴，對國家 2050 淨零排放政策有持續發展可行性。

2.2.4 落實商業化

比較現有瀝青砂石分離技術 [8] (如表

7)，使用化學技術，因大量使用有機溶劑，建廠與營運成本過高，每噸處理費用 2,000 元以上，難以落實商業化。本技術以水為介質，且可回收再使用，大幅降低處理成本，每噸處理費用 300 元以下，以每噸瀝青混凝土材料價值 1,500 元評估，業界均認為極具商業化價值。

表 7 刨除料瀝青砂石分離技術比較 [8]

技術類型	既有技術		工研院創新技術
	物理技術	化學技術	
技術特性	靠機械衝擊進行兩種材料的分離分離，屬剛性破碎。	使用化學溶劑（有機溶液、熱鹼溶液、強氧化劑）溶解瀝青，技術系統應包括混合溶液透過萃取、濃縮分離瀝青與溶劑。	由培育自然界微生物，使改變老化瀝青與砂石的黏結力，再透過水為載體，讓刨除料間產生碰撞、摩擦外力，使瀝青膠泥脫離石料表面達到分離的作用。
優點	成熟技術，成本低。	能徹底分離瀝青和砂石，分離效率高。	環保、成本低、分離效率佳。水全循環。
缺點	瀝青殘留在骨料表面仍多。仍存在假粒徑現象。	使用化學溶劑有環境安全、工作安全疑慮，成本高，設備等級高。	-
技術成熟度	成熟相對技術，應用於冷再生技術較多。	屬於工業化早期階段，但成本高，工業化困難度高。	TRL 等級為 8，已有業者投資建廠中。
成本	低	高	低—中等。



本技術以創新思維開拓產業應用新局，成功將科研成果轉化為具體價值，為傳統營建產業注入升級轉型的新動能。於 2024 年 8 月與業界合作簽訂「刨除料瀝青砂石分離建廠計畫」，年處理量可達 8 萬噸刨除料，預計 2025 年底完工。

未來技術擴大應用，以每年 500 萬噸刨除料處理量推估，將可產製 350 萬噸再生砂石，減少天然砂石開採需求，相當於滿足國內砂石需求的 10%，大幅緩解天然資源短缺的壓力；再生瀝青砂則可替代 15 萬噸化石瀝青，助力營造業每年減少 27 萬噸碳排放，展現低碳環保的強大效益。估每年可創造超過 80 億元產業產值，將傳統瀝青產業轉型成為低碳鋪面材料供應者，不僅促進經濟效益，亦推動循環經濟產業的全新成長動能。

三、總結

面對全球減碳趨勢與循環經濟政策目標，提升道路鋪面材料的循環利用率，不僅是工程技術的革新，更是國家永續發展的重要戰略。

本文提出兩大創新技術路徑，有效拓展刨除料的應用可能性。其一為「ITRI 瀝青再生劑」的應用，成功還原老化瀝青特性，提升再生瀝青混凝土之鋪面性能與耐久性，並已在全台多地區完成鋪設驗證，技術穩定且具實績佐證；其二為「刨除料瀝青砂石分離技術」，運用生物菌劑與瀝青剝除技術，實現刨除料中瀝青與骨材的高效分離與再製，使原本受限於刨除料比例的再生混凝土，達到近乎 100% 的循環再利用目標。

兩者技術不僅解決刨除料堆置與資源浪費問題，更大幅降低對進口砂石與天然資源的依賴，並落實從源頭減碳、減廢到末端高值化利用的全循環經濟理念。展望未來，隨著相關規範與制度的完善，刨除料多元再利用的推動將成為連結工程效益、環境保護與產業升級的關鍵環節，進一步助力國家邁向 2050 淨零碳排的永續目標。

參考文獻

1. 交通部統計查詢網, <https://stat.thb.gov.tw/hb01/webMain.aspx?sys=100&funid=51100>
2. 經濟部礦物局土石資源服務平台, <https://amis.mine.gov.tw/>
3. 顏寬恒、林紫婕,「瀝青的現在未來方程式」, 土木水利, 第四十九卷, 第四期, 2022 年。
4. Okan Sirin, Dalim K. Paul, Emad Kassem, "State of the Art Study on Aging of Asphalt Mixtures and Use of Antioxidant Additives", *Advances in Civil Engineering*, 2018.
5. Brett A. Williams, J. Richard Willis, Ph.D., Joseph Shacat, "Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt", National Asphalt Pavement Association, Federal Highway Administration Office, 2019.
6. Copeland, A., "Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice", Federal Highway Administration, McLean County, 2011.
7. Jiangmiao Yu, Zengyao Lin, Guilian Zou, Huayang Yu, Zhen Leng, Yuan Zhang, "Long-term performance of recycled asphalt mixtures containing high RAP and RAS", *Journal of Road Engineering*, vol.4, 36-53, 2024.
8. Decheng Feng, Jiwei Cao, Libo Gao, Junyan Yi, "Recent developments in asphalt-aggregate separation technology for reclaimed asphalt pavement", *Journal of Road Engineering*, vol. 2, 332-347, 2022.



太陽能模組廢棄潮來襲— 回收挑戰與可拆解模組的綠色解方

循旭科技股份有限公司創辦人兼董事長 / 彭裕民
工業技術研究院副組長 / 蘇俊瑋
工業技術研究院研究員 / 潘恩郁

關鍵字：太陽能模組、循環經濟、可拆解、廢棄回收

摘要

隨著全球太陽能產業快速發展，廢棄太陽能模組預計在未來數十年將大幅增加，造成環境的挑戰。各國政府已開始建立模組回收規範並推動回收技術發展。傳統太陽能模組因封裝結構難以拆解，導致回收成本高、效益低。為解決此問題，工研院攜手國內廠商，共同開發可拆解太陽能模組技術，從源頭設計導入熱塑性與熱固性材料雙層封裝設計，不僅提升模組回收效率，實現再生矽材料的回收與再利用，有效降低碳排放達50%。此創新技術成功技轉產業界，建立台灣自主太陽能模組供應鏈，為全球循環經濟與綠色能源發展提供具體解方，開創低碳、永續的未來。

一、全球太陽能模組回收趨勢

隨著再生能源快速發展，全球太陽光電裝置量迅速成長，廢棄太陽能模組的問題也逐漸浮現。根據國際可再生能源機構（International Renewable Energy Agency, IRENA）與國際能源總署太陽能發電系統計劃（International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme, IEA PVPS）於2016年所發出的警訊，預估至2050年，全球累積的太陽能廢棄物將達7,800萬噸（圖1）[1][2]。然而，目前全球的回收市場尚未準備好應對這波即將來襲的廢棄潮，模組回收面臨許多挑戰，包括回收設施不足、技術門檻高、經濟誘因不足等。若未妥善處理，這些廢棄物將對環境造成重大負擔，也會削弱太

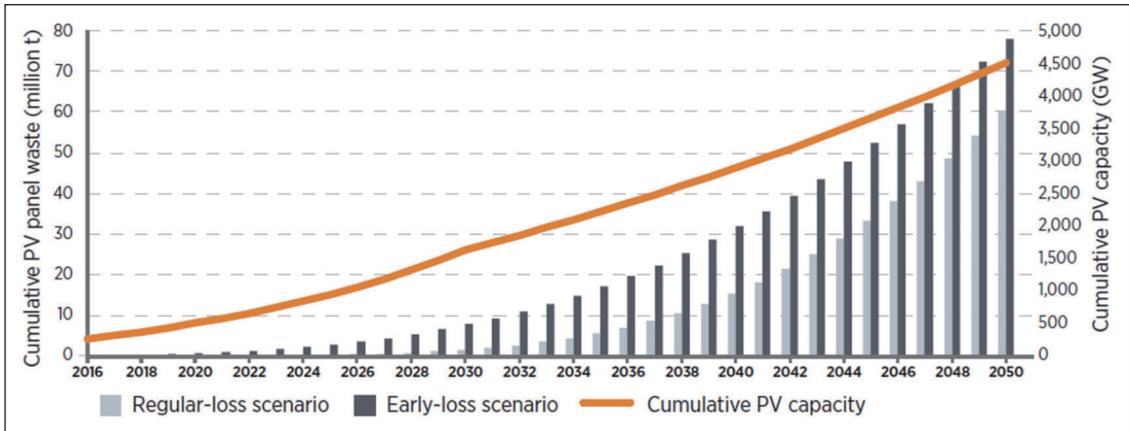


圖 1 全球累積的太陽能廢棄物統計 [1]

陽能作為綠色能源的永續價值。如何有效回收廢棄模組，已成為各國政府與太陽能產業無法忽視的關鍵課題。

儘管如此，太陽能回收市場也逐漸展現其潛力與契機。隨著再生能源需求持續攀升，回收市場也邁向可持續發展的方向。越來越多企業投入模組材料分離與再利用技術的研發。美國國家可再生能源實驗室 (National Renewable Energy Laboratory, NREL) 預測，到 2032 年，太陽能模組回收將成為一項具盈利潛力的產業；到 2040 年，回收材料可望滿足美國本土 30% 至 50% 的太陽能模組製造需求 [3]。此外，根據能源顧問公司 Rystad Energy 預估，2030 年全球太陽能模組中可回收材料的總價值將超過 27 億美元，並在未來幾十年加速成長，至 2050 年時其價值將逼近 800 億美元 (圖 2) [4]。因此，若能加速建立完善的回收體系與政策引導，太陽能廢棄物不僅不再是負擔，更可轉化為資源循環與產業創新的新動能。以下分別就全球主要國家對於太陽能模組回收現況整理：

歐洲

歐洲作為全球綠能發展的先驅，也較早面臨太陽能模組退役與回收的挑戰。歐盟早在 2003 年即頒布《廢棄電器電子設備指令》(Waste Electrical and Electronic Equipment Directive, WEEE)，並引入「生產者責任延伸」(Extended Producer Responsibility, EPR) 的概念，要求產品生產者負責其產品生命週期終了後的回收與處理責任。於 2012 年公布新版本的 WEEE Directive 2012/19/EU，將廢棄太陽能模組納入回收管制，並設下明確回收目標：太陽能模組的總回收率需達 85%，其中可再利用與材料回收率須達 80% [5]。這項規定不僅為廢棄模組的處理提供制度基礎，也促使產業朝永續循環的方向邁進。為了配合指令的實施，歐洲太陽能產業界於 2007 年成立了專責機構「PV Cycle」，協助處理太陽能模組回收與再利用計畫，並整合歐盟各成員國的模組回收與處理機構，成員包含模組製造商、廢棄物管理業者等，建構完善的回收處理網絡 [2]。

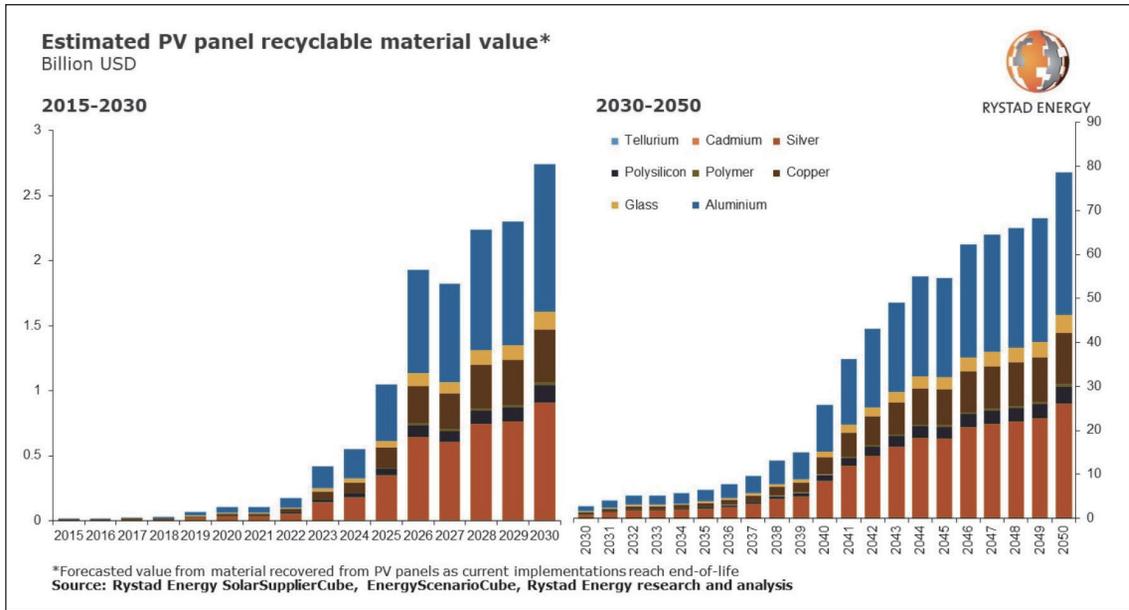


圖 2 全球太陽能模組可回收材料的總價值分析 [4]

德國

德國根據歐盟 WEEE 指令，於 2018 年『德國電器和電子設備法案』(German Electrical and Electronic Equipment Act – ElektroG3) 正式將 PV 納入管轄。在德國銷售的 PV 模組都必須登記，並依據模組尺寸進行分類 (ElektroG, 2022)。模組廢棄物可分為兩種處理途徑：企業對消費者 (Business to consumer, B2C)，大多為住宅用途約占 15%，製造商銷售模組並確保報廢管理的義務，消費者不須承擔額外的費用。企業對企業 (Business to business, B2B)，約占德國 PV 市場的 85%，為主要交易模式，商業客戶則需要支付相關的回收費用。德國採取生產者責任的原則，製造商必須確保達到 85% 的模組回收率，以及在回收模組中至少有 80% 的材料需要被有效的再利用 [6][7]。

Reiling 集團為德國主要負責回收的處理廠，主要有 3 座回收廠處理 PV 模組，目前處理量能約 10,000 噸/年。2023 年打造了一座回收廠專職回收矽晶模組，可連續處理廢棄模組，預估處理量能可以到 50,000 噸/年。其處理方法為粉碎法分離玻璃，其他以機械方式處理剩餘物質。而德國 Suez GmbH 與 Geltz-Umwelttechnologie 合作以熱裂解法使高分子材料裂解而將分離玻璃，然而高溫下易造成玻璃破碎，再以化學電解法從餘料中將矽、銅、銀分離出來。2022 年德國 Flaxres 設計以脈衝光設備 (light pulses) 分離模組，為非物理破壞性方式可取得完整的玻璃板，可再用於高品質的玻璃製品，矽晶片再以真空吸取分離。根據計算 7.5 噸的 PV 模組可回收超過 200 公斤的矽料、4 公斤的銀以及 4.9 噸的玻璃板。該設備設計為可移動式，以方便增加拆解利用率。該技術與歐



盟的 Veolia、ROSI Solar、Evonik 等合作測試，2024 年已有 5 個處理站開始營運，規劃到 2030 年將在全球成立 400 座處理站。

而針對回收物料的回用研究，德國研究機構 Center for Silicon Photovoltaics、Fraunhofer ISE 與德國太陽能回收公司 Reiling GmbH & Co. KG 合作，2022 年研發 PV 模組適用的回收再造技術，讓廢棄模組重生 [8]。團隊透過分類將 0.1 至 1um 的電池碎片從玻璃、塑膠中提取出來，再以濕化學蝕刻技術（Etching technology）逐步去除電池上的鍍層，最終將回收模組製成 PERC 電池，轉換效率高達 19.7%，雖比 PERC 太陽能電池 22.2% 的轉換效率較低，但其發電量一定比廢棄太陽能電池還要高。

法國

在法國，模組回收以生產者付費的模式運行，太陽能模組製造商及進口商，須向 PV CYCLE 協會註冊登記，並由光電產業公司合作共同協調處理廢太陽能模組。法國政府協助成立 Soren 專職管理太陽能板廢棄物的機構，並建立完整的收集、回收、運送、分類、拆解光電組件的回收體系，而 Soren 的前身為 PV CYCLE France [7]。2018 年法國環保公司 Veolia 打造歐洲第一座太陽能專門回收廠，主要的處理方式為粉碎法。2022 年 Soren 和專注電氣電子廢棄物回收處理的 Envie 2E 聯盟合資的太陽能板回收廠啟用，為全歐第一條標榜再利用之回收處理線，首先鑑定每片太陽能模組的狀況，玻璃是否破裂等，判斷其可再用性，並以獨特熱刀剝離技術，可更有效回收。

法國 ROSI Solar 研發出獨步全球技術，可成功分離矽、銀、銅，並能大規模回收再利用。該公司使用的技術分別為熱能、機械和化學處理，目標是希望能回收 99% 的材料。廢太陽能模組首先會由 Soren 以熱刀法卸除玻璃、鋁框後，送至 ROSI 進行熱裂解去除封裝膜等高分子材料。接著透過機械方式，將含有銀線和銅線的矽組件取出。第三步則是將金屬按順序放進 5 個化學藥劑池中，以化學方式分離銀和銅。2023 年的回收處理量為 3,000 噸／年，約 15 萬片太陽能模組，即回收 3 噸銀和 90 噸高純度的矽。ROSI 計畫處理量擴充到 10,000 噸／年，持續於德國、西班牙等地建廠中 [9]。

義大利

義大利在 2014 年第 49 號立法法案（Legislative Decree No. 49/2014）根據電廠規模可分為小於 10kWp 的家用 WEEE，大於 10kWp 的專業 WEEE，回收規範。義大利能源服務管理公司（Gestore dei Servizi Energetici SpA, GSE）負責主導模組回收，並為家用及商業用途的模組設立不同的處理途徑，家用模組可以將廢棄模組送至各地的收集中心，或是將模組送回至購買的經銷商或安裝商處理。而商業用途由於規模較大，需授權機構進行廢棄物處理或運送至處理廠進行其中處理。

義大利礦業公司 Minerali Industriali 子公司與義大利玻璃製造商合作成立的新創公司 Tialpi Srl，年處理量達 3,000 噸，可回收高達 97% 的材料。採用自動化設計，首先用機械手臂將太陽能板從裝有 25 片廢棄模組的



倉庫中移出，去除後方的電纜跟接線盒後，用四台自動操作切割鋁框，接著以紅外線加熱模組以刀具切割玻璃。經過篩選留下 2 ~ 10 mm 的玻璃後，再用光學技術分離出不透明的顆粒玻璃，留下高品質玻璃再以利用。最後則是提取純度高達 99% 的銅以及回收塑膠。Tialpi Srl 表示，整體回收過程相當環保，能耗低每片模組僅需 1kW，回收的鋁材可用於汽車、建築等各產業，優質玻璃可用於容器玻璃和平板等用途。

美國

美國太陽光電產業協會（Solar Energy Industries Association, SEIA）成立了回收專案小組，推動太陽能產業的環境與社會責任協議。華盛頓州是美國第一個制定 PV 系統回收的州，規定要求製造商負責回收，而不對系統持有者增加額外成本。然而在實施上面卻遇到困難，歷經兩度延宕，目前擬定延後至 2025 年 7 月實施 [10]。加州則是首個制定廢棄太陽光電模組回收法規的州，將 PV 模組歸類於普遍廢棄物，並進一步推動回收 PV 產業發展。其他州也陸續制定了相關法規，明確責任歸屬和回收處理費用標準，然而在聯邦方面仍缺乏針對 PV 模組回收的法規。

根據 2022 年美國能源部的行動計劃中指出，回收單一模組的成本估計在 15 美元至 45 美元間，遠高於將其送往垃圾掩埋場的成本，掩埋的成本僅為 1 美元至 5 美元 [11]，成本差異阻礙了回收工作。此外，由於 PV 模組體積大，收集及運輸成本很高，也導致市場推動困難。目標在 2030 年前將 PV 模組

回收成本降至每模組 3 美元（每噸 150 美元）；美國能源部太陽能技術辦公室（Solar Energy Technologies Office, SETO）亦廣邀研究單位開發新世代的模組及新的回收方法，以解決目前模組回收的難題。

美國太陽能電池和模組製造商 Qcells 和美國 PV 回收商 Solarcycle 聯手回收美國退役的模組，推動再生能源供應鏈，以減少對進口原料的依賴。Solarcycle 的技術可從 PV 模組中提取率達 95% 以上的材料回用，並幫助 Qcells 回收電池上的材料，包括鋁、銀、銅、矽和鐵等，在供應鏈中重複使用，降低成本和碳排放，而且能夠成為更永續的再生能源產業之一 [12]。

日本

日本在 2012 年開始實施電力固定價格收購制度（Feed in tariff, FIT）後，大量太陽能模組建置，這些模組預料在 2030 年後陸續報廢，預計會產生約 50 ~ 80 萬噸的廢棄 PV 模組，使工業廢棄物處理設施承受龐大壓力。2024 年 9 月日本經濟產業省（Ministry of Economy, Trade and Industry, METI）與環境省（Ministry of the Environment, MOE）開始研擬最新回收制度，規定由太陽能模組製造商與進口商繳交回收費用，而太陽能設施業主負責支付拆除費用，這些上繳的基金由第三方機構管理，但家用 PV 模組尚未涵蓋在這項費用分擔計畫。政府計劃於 2024 年內敲定制度框架，並將在 2025 年例行國會中提交相關法案 [13][14]。回收費將於產品銷售時收取，拆除費則於啟動發電前繳納，這項方案用意，是避免製造商、進口商或業主在 PV

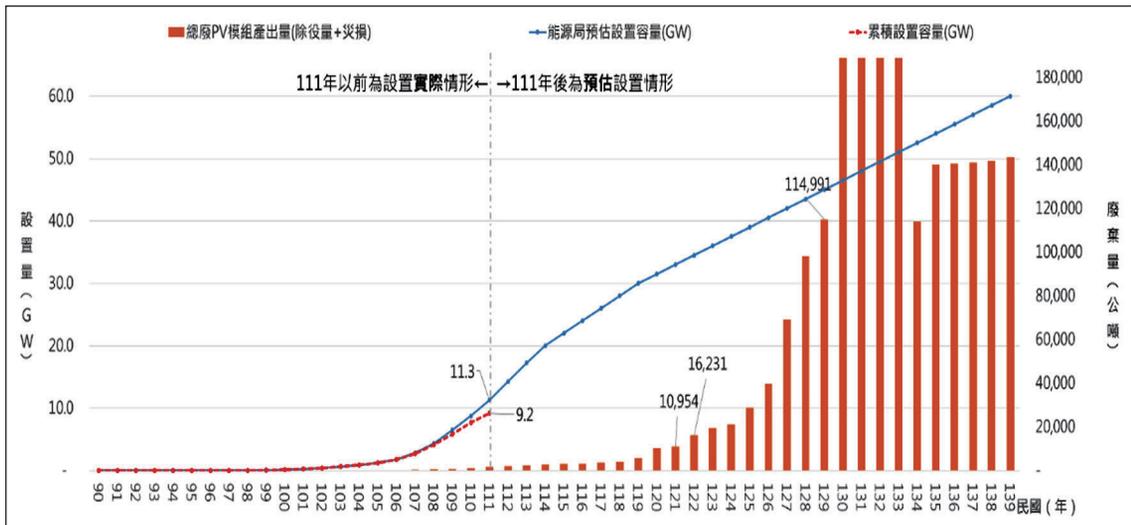


模組屆滿服役壽命前倒閉，所可能引發的資金短缺。在完成拆除和回收作業後，第三方機構將透過業主，向經政府認證的拆除承包商和回收業者支付款項。

根據日本光電能源協會 (Japan Photovoltaic Energy Association, JPEA) 已有 29 家公司可進行 PV 模組回收，但由於目前廢棄量相對較小，回收廠的運轉率仍然偏低。日本新能源產業技術綜合開發機構 (New Energy and Industry Technology Development Organization, NEDO) 的研究專案中已有顯著的進展，包含物理分離熱刀法、化學處理及熱裂解法。熱刀法為日本公司 NPC 的專利技術，利用加熱的刀具切開封裝膜，將玻璃與矽晶片分離，是一種可以回收完整玻璃的技術，而剩餘的部分，再以稱之為濕式法的化學處理法，去除殘餘的封裝膜。雖然熱刀法可以回收完整的玻璃，但刀具的使用壽

命、處理速度等是這個技術的關鍵。日本新菱開發的回收法為熱裂解法，EVA 熱裂解後送入燃燒裝置並通入液化天然氣 (Liquefied Natural Gas, LNG)，作為尾氣處理 [15]。

隨著太陽能產業的快速發展，各國政府對於廢棄太陽能模組的回收問題也日益重視，紛紛制定相關法規與政策來加以管理。不過，目前的回收市場尚未成熟，現行的回收方式多以「便利處理」為主，並未有效回收模組中真正具價值的材料。其背後的挑戰主要來自於模組本身拆解困難。拆解後的材料混雜，導致分類與處理需要耗費大量時間與成本，進而影響整體回收的效率與意願。若能從產品設計階段即考量回收需求，例如開發更易拆解的新型模組，或導入低碳、高效率的回收技術與流程，將有助於提升資源回收率，實現資源的永續利用，也為低碳未來奠定基礎。



資料來源：經濟部能源局、台灣電力公司；太陽光電協會團隊推估繪製

圖 3 國內太陽能廢棄模組預估 [16]



二、國內回收現況與技術開發

綠能科技之太陽光電產業為政府推動再生能源、綠色家園的重要政策之一。台灣 2025 年淨零轉型策略中的能源轉型，提升太陽光電累積裝置容量至 40GW 之重要政策目標。台灣在現有政策推動情境下，廢棄模組將於 2035 年將達 10 萬噸，詳細請見圖 3 [16]。

2020 年 3 月，台灣正式啟動「太陽光電回收處理體系」，由環境部、經濟部能源署及太陽光電產業協會共同推動，建立起一套完整的太陽能模組回收流程。根據環境部所訂定的標準程序，廢棄模組會被運送至合格廠商（代號 D-2528，指裝置使用後廢棄之太陽能光電板）進行回收與處理。早在 2019 年，經濟部能源署便依據《再生能源發電設備設置管理辦法》第 17 條，向太陽能設備設置者預收每千瓦 1,000 元的回收處理費。這筆費用納入再生能源發展基金，用以補助太陽能電廠未來退役模組的清除與回收處理，避免遭到隨意棄置。

環境部負責建立回收機制與稽核制度，透過線上登記模組序號的方式，作為日後廢棄物處理認證的依據。此舉可讓相關單位掌握退役模組的流向與數量。當模組退役需回收時，持有者可上網登記，依規定進行收集，並交由具認證資格的業者清運與處理。為加強管理，政府也規劃未來將立法規範，若任意棄置太陽能模組，最高可處新台幣 300 萬元罰鍰。太陽光電產業協會則負責核對每一片模組的序號是否與案場登記資料相符，並安排合格的清運與處理業者進行後續作業，確保整體回收流程的透明與有效性。

目前全台已有 5 家取得廢太陽能模組處理廠，處理量能 10 萬公噸／年 [17]。

三、可拆解太陽能模組：從設計源頭實現綠色循環

自工業革命 19 世紀以來，傳統的線性經濟模式一直主導著全球的發展。這種模式以「取用－製造－使用－丟棄」為主軸，人們從自然中大量開採資源，將其加工成產品供消費者購買使用，在失去使用價值後棄置。這種以追求快速、便利與獲利為導向的經濟系統，雖促進了工業與經濟的快速成長，卻也加劇了地球資源的消耗與環境壓力。然而，面對資源有限與氣候變遷的雙重挑戰，「循環經濟」成為替代線性經濟的關鍵解方。循環經濟強調資源的高效使用與延續其生命週期，目的在於提升整體價值並減少浪費。不同於用完即丟的傳統模式，循環經濟透過修復、再利用、回收與再製等方式，讓材料能夠持續在經濟體系中循環流動。不僅能有效降低資源消耗，更能減輕對環境的負擔，朝向更永續的未來邁進。為了實現 2050 年全球淨零碳排的目標，推動循環經濟已成為各國共同努力的重要方向 [18]。

傳統太陽能模組在設計上，主要考量其需長期暴露於戶外環境，因此結構上必須具備良好的耐候性與穩定性，以確保電池效能不因氣候與時間而劣化。既有太陽能模組基本結構（圖 4），由上而下分別是前板玻璃、第一層封裝膜（Ethylene-vinyl Acetate, EVA）、太陽能電池、第二層封裝膜（EVA），最底層為背板。其中，EVA 封裝膜的雙層設計扮演關鍵角色：上層封裝膜需與玻璃前板

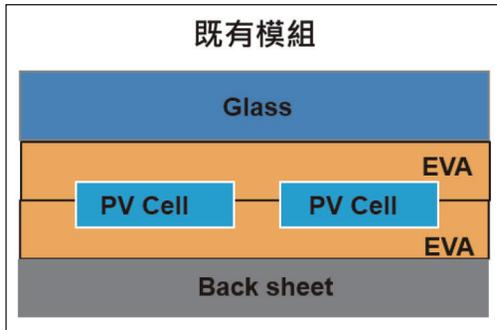


圖 4 既有模組結構

緊密貼合，並維持高透光率，以提升光電轉換效率；下層封裝膜則提供電池片下方的保護，避免製程中產生的應力造成損傷，並與背板緊密結合，強化模組的絕緣性、防水與耐溫耐濕等性能，進一步延長模組的使用壽命。然而，傳統熱固型 EVA 在封裝後的交聯結構，使模組難以拆解。這不僅增加廢棄模組的處理困難度，也可能在回收過程中產生環境污染物，對未來的循環經濟構成挑戰。若無法從材料與結構設計上進行創新，勢必將影響產品的永續性與市場競爭力。為解決上述問題，工研院從源頭著手，研發可兼容現有製程設備的創新材料與結構，無需更換生產流程，即可協助模組或材料製造商提升產品的可回收性與環境友善程度，同時增強其在市場中的競爭力與實用性。

工研院材化所的創新材料與結構設計，成功導入循環經濟的理念，研發出「可拆解太陽能模組」，為全循環太陽能模組提供了一個新解決方案。這款可拆解封裝膜採用特殊的熱固與熱塑複合材料（Thermoplastic Elastomer, TPE），如圖 5 所示。透過溫度調控，能夠有效分離模組各層材料，高價值材料如矽晶片、玻璃及高純度銀的完整回收。新模組不僅不會增加製程工序或成本，還能使太陽能模組更具綠色能源特性，並建立太陽能產業的全循環路徑。目前，可拆解太陽能模組已獲得德國萊因（TÜV Rheinland）頒發的臺灣首張國際電工委員會（International Electro Technical Commission, IEC）證書，第二代可拆解模組也已通過樹德（TÜV SÜD）認證（圖 6）。此外，此模組還通過國內標準局的自願性產品驗證（VPC），其驗證標準比 IEC 更為嚴苛（圖 7）[16]。

本技術與法國 CEA Liten 合作於法國 Cadarache 建置 6kW 高日曬嚴苛場域驗證。CEA Liten 為法國原子能和替代能源委員會 CEA Tech 所屬之三大研究機構之一，主要負責新型能源暨奈米材料研究，涵蓋太陽能系統價值鏈，從材料、電池到模組系統。

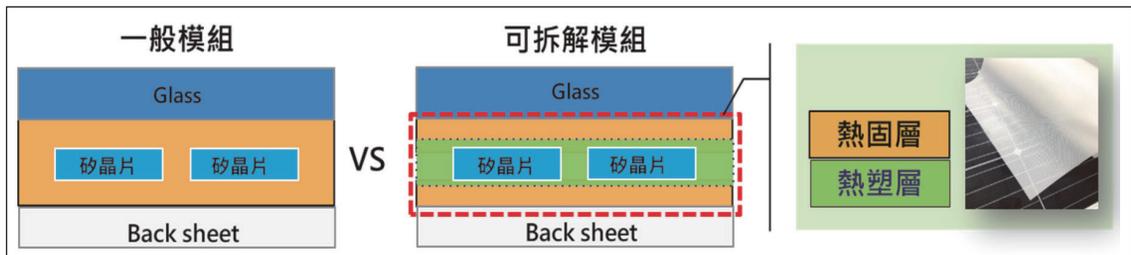


圖 5 可拆解太陽能模組的特殊結構設計

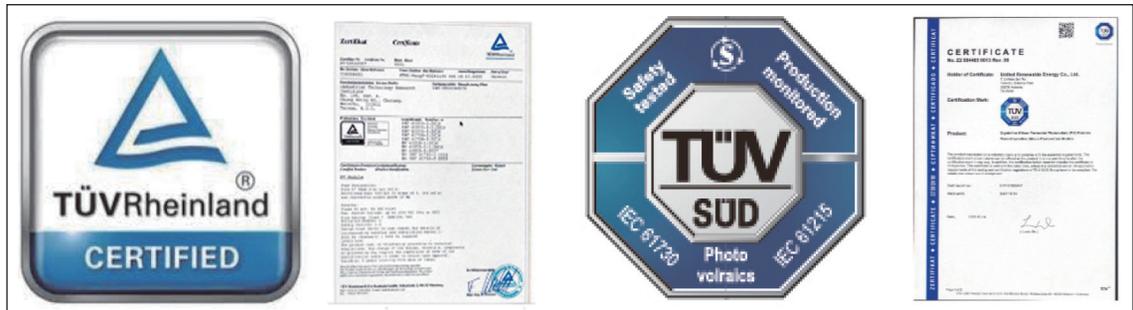


圖 6 TÜV Rheinland & TÜV SÜD 認證

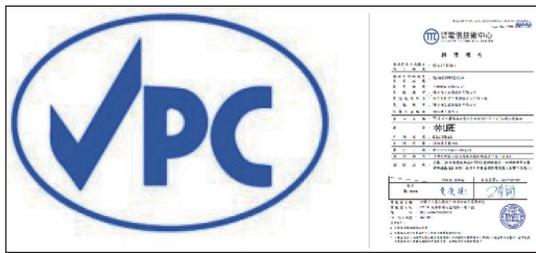


圖 7 國內標檢局 VPC 認證

Cadarache 屬地中海型氣候，日照強烈，夏季受熱浪影響溫度高達攝氏 39° 以上，冬季寒冷會有霜凍。全年日夜溫差大，對模組具有冷熱衝擊性及強烈日照曝曬影響，挑戰可拆解模組之熱塑型材料的耐候性，完成一年期的實場測試及分析，確立模組多樣化耐候適應性，提升國外系統商採用信心並提升品牌口碑，為國內廠商帶入歐洲國際市場(圖 8)。此外，亦針對可拆解模組進行生命週期評估 (Life Cycle Assessment, LCA)，以確立其在減碳方面的效益，並藉此開拓循環減碳的新商機和利基市場。

可拆解模組的設計源自於熱固 + 熱塑雙層結構，其中 TPE 可在加熱時軟化，使電池串列與玻璃得以分開來，並且保持太陽能

電池片的完整性。傳統模組如果利用高溫法來進行回收處理時，EVA 在加熱時醋酸基分解變成醋酸氣體，此時由於電池串列被 EVA 牢牢的包覆固定著，氣泡無法排出，擠壓電池片造成破裂，甚至玻璃也可能造成破裂，使得材料混雜不易處理 (圖 9)。可拆解模組在熱裂解回收時，TPE 會優先軟化包覆住電池串列成為一個緩衝保護層，當 EVA 產生氣體形成氣泡時，軟化的 TPE 層可吸收壓力，避免壓力直接傳遞到太陽能電池片上，生成的氣泡累積聚集後會沿著玻璃板與 TPE 的介面朝向邊緣移動，最後由模組邊緣逸出。

當可拆解太陽能模組汰役後，可經由物理拆解分離鋁框、接線盒及背板，透過熱解回收與綠色濕法有價金屬提取技術，讓廢棄模組回收再生，不僅可將材料回用到太陽能產業使用，廢棄量也大幅降低至 1/100。可完整回收高清淨度的再生矽晶片或是高純度矽材 (~6N8)，與高純度銀化合物；同時玻璃面板也可完整保留，可回用生產太陽能模組或可加工玻璃板應用，整體模組材料的回收率 92% 以上，達到 PV to PV 永續循環利用 (圖 10)。



圖 8 法國 Cadarache 建置 6kW 高日曬嚴苛場域驗證

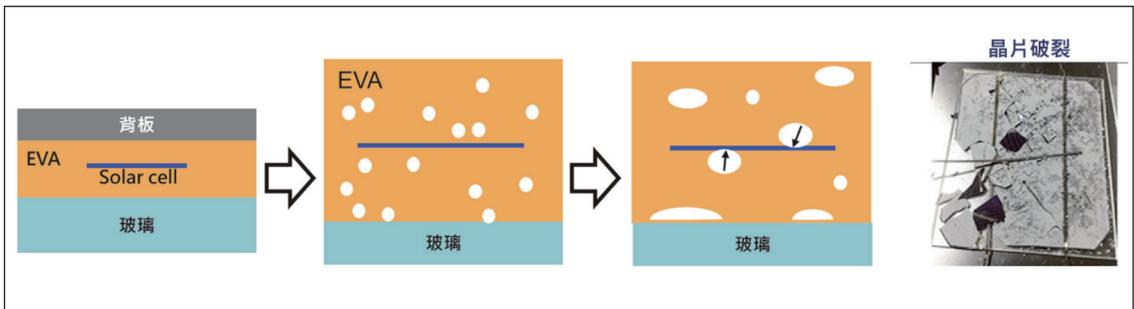


圖 9 傳統模組熱解法造成玻璃、電池片破裂

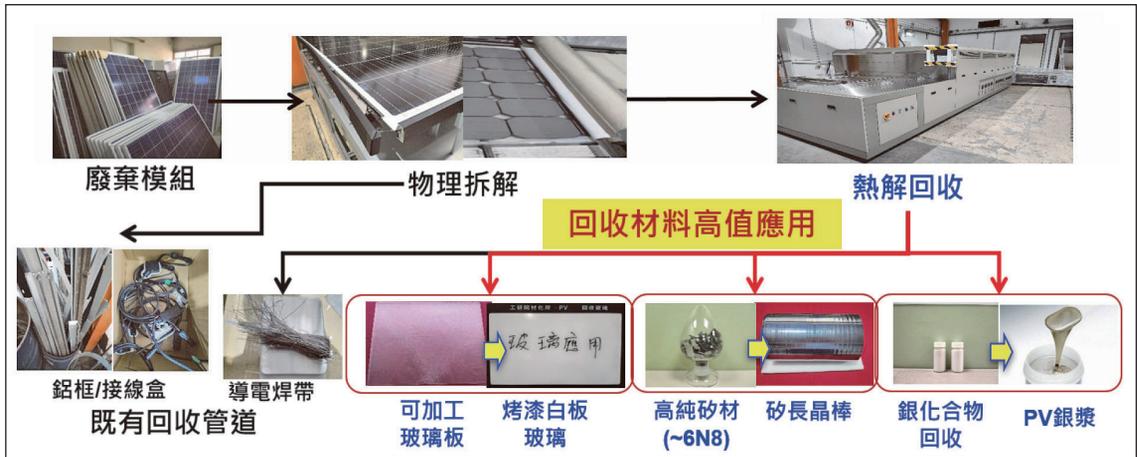


圖 10 可拆解太陽能模組拆解流程

四、再生矽材料：降低碳排、強化自主原料供應

太陽能產業在模組製造生產過程上，一直以來被視為高碳排放的產業，矽原料的生產與矽電池片的製造是主要的碳排放來源。矽電池片從來源採礦、熔煉、長晶等都屬於高碳排放量的製程，太陽能模組總碳排放的 64% 是來自於矽晶片的生產，可謂是減碳的關鍵。而可拆解太陽能模組的開發讓太陽能模組有別於傳統

廢模組處理方法，廢棄物可循環再製成為新的太陽能模組材料－再生矽晶片／再生矽材料，可再次回到模組製造端使用。新模組回收可減少 99% 光電模組廢棄量，若矽晶片回收後完整再生，碳排放僅原生矽晶片生產的 0.4%，若再生矽晶片直接導入太陽能電池生產線使用，如此太陽能模組可降低 64% 的製造碳排放；或者，再生矽晶片作為長晶 50% 原料添加，也可為太陽能模組降低 20% 的製造碳排放，同時降低太陽能模組製造時的碳排放（圖 11）。

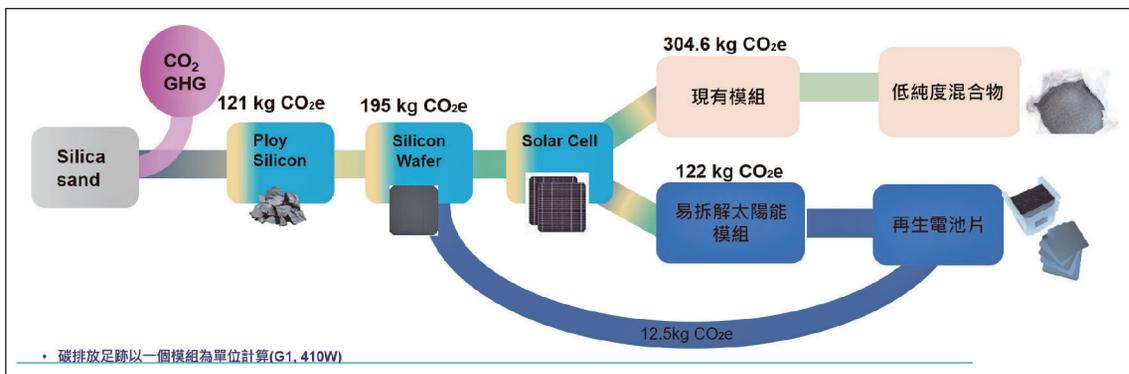


圖 11 可拆解模組減碳效應



由於臺灣並沒有生產這些原物料，絕大多數需要進口，透過回收方式，可降低原物料開採需求，替代臺灣產業所需之進口原物料，相較傳統模組，大幅降低進口原料的依賴提供低碳解決方案。可拆解模組的減碳效應不只有綠能發電，其模組循環再製亦可省下 50% 以上的碳排放量，讓綠能更綠能，為產業界解決未來回收及資源短缺的難題。

五、建構國產綠能供應鏈，共築太陽能循環新生態

為推動可拆解模組技術在產業端的落實，工研院材化所攜手國內材料大廠三芳化學，協助其建立太陽能封裝膜的專業生產

線，涵蓋從製程開發、量產製造到品質控管，並確保產品能因應不同模組廠的需求。在工研院的技術輔導下，這項可拆解封裝膜已順利導入聯合再生、安集、元晶等國內主要模組製造商的產線，完成模組製作並通過量產測試（圖 12）。更進一步技轉給聯合再生與循旭科技，成功建立起台灣自主可控的可拆解太陽能模組產業供應鏈。

2024 年，工研院於中興院區 77 館、79 館以及六甲院區 PMC，建置全台首座可拆解模組示範場域，總裝置容量達 403kW。經過一年以上的實際運轉，累積發電量達 532MWh，年減碳效益高達 262 公噸，相當於每年種植 26,500 棵榕樹（圖 13）。可拆

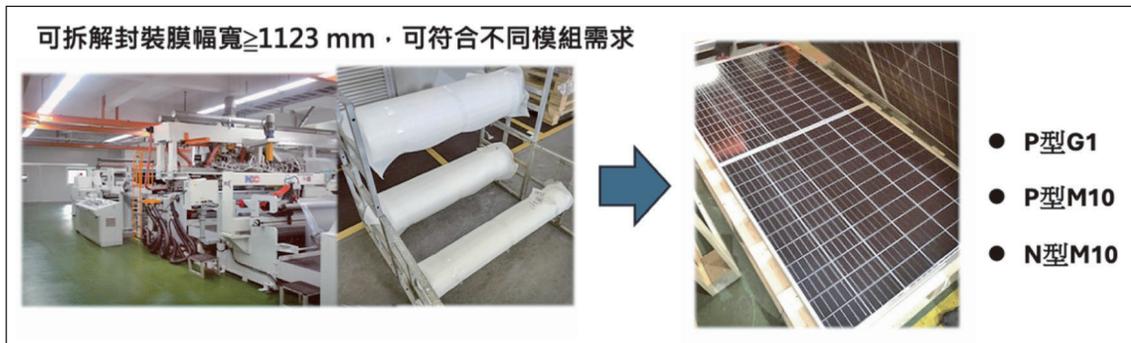


圖 12 可拆解封裝膜導入模組生產線



圖 13 全台首座可拆解太陽能模組示範場域



解模組不僅展現綠色創新的技術優勢，也獲得國內產業界的高度支持與認同，正積極攜手進軍國際市場。這項來自台灣的獨特創新技術，未來可望為台灣綠能產業注入全新價值，成為提升國家品牌的重要推手。

六、結論

當全球加速邁向淨零排放之際，如何妥善處理即將退役的大量太陽能模組，已成為刻不容緩的課題。傳統模組的回收困境不僅牽動環境永續，也牽動產業競爭力與資源自主性。工研院結合國內產業力量，成功開發可拆解模組技術，不僅解決模組難以拆解、回收效率低的問題，更為太陽能產業提供一條高效、低碳的永續發展之路。太陽能發電原本為潔淨能源，但唯有從模組設計、生產到廢棄處理，皆納入循環經濟與減碳考量，才能讓綠能真正落實永續。透過從材料設計開發到案場的建置，台灣正逐步建構起屬於自己的綠能循環體系。未來，隨著可拆解模組技術持續優化並拓展至國際市場，將有助於推動全球太陽能產業從「一次性使用」走向「資源再生」，不僅守護地球環境，也為台灣在國際綠能版圖中奠定關鍵地位。

參考文獻

- IRENA, "END-OF-LIFE MANAGEMENT Solar Photovoltaic Panels", IRENA Publications, 2016.
- IEA, "Status of PV Module Recycling in Selected IEA PVPS Task12 Countries", IEA Publications, 2022.
- Walzberg, J., Carpenter, A. & Heath, G.A, "Role of the social factors in success of solar photovoltaic reuse and recycle programmes", *Nat Energy* 6, 913–924, 2021.
- Rystad Energy, "Reduce, reuse: Solar PV recycling market to be worth \$2.7 billion by 2030", September, 2023. (<https://www.rystadenergy.com/news/reduce-reuse-solar-pv-recycling-market-to-be-worth-2-7-billion-by-2030>)
- European Union, "Waste from Electrical and Electronic Equipment (WEEE)", 2012.
- IEA, "Status of PV Module Take-Back and Recycling in Germany", Report IEA-PVPS T12-27:2024, IEA Publications, 2024.
- Z. Ngagoum Ndalloka et al., "Solar photovoltaic recycling strategies *Solar Energy*", 270 (2024) 112379, DOI: 10.1016/j.solener.2024.112379
- Fraunhofer ISE, PRESSEINFORMATION 7, February 2022.
- ROSI SOLAR: (<https://www.rosi-solar.com/news/rosi-is-selected-by-soren-to-recycle-photovoltaic-modules-in-france>)
- Department of Ecology, State of Washington, "Solar Panels": (<https://ecology.wa.gov/waste-toxics/reducing-recycling-waste/our-recycling-programs/solar-panels>)
- US Department of Energy, Office of energy efficiency & renewable energy, "Solar Energy Technologies Office Photovoltaics End-of-Life Action Plan", DOE/EE-2571, March 2022.
- Solarcycle: (<https://www.solarcycle.us/>)
- 日本環境省“再生可能エネルギー 電設備の廃棄・リサイクルに係る現状及び課題について”，令和5年4月。
- The Japan Times, "Disposal of used solar panels emerging as challenge in Japan", (<https://www.japantimes.co.jp/news/2025/01/05/japan/japan-used-solar-panel-disposal/>)
- 日本太陽光電模組回收技術解析，工業材料雜誌 381期 2018/09
- 李宗銘、蘇俊璋，“新世代易拆解循環太陽能面板關鍵材料技術”，永續循環經濟 2024，社團法人永續循環經濟發展協進會，2024。
- 行政院環境部資源循環署，廢太陽光電板回收處理說明，2024，(<https://pvis.moenv.gov.tw/pvis/info/Plan>)
- 陳靜珊、宋敬、許祥瑞，“塑造永續商業模式：永續材質圖書館”，永續循環經濟 2024，社團法人永續循環經濟發展協進會，2024。
- Hsieh, H. H., Chen, S. H., Lai M. T., Huang C. P., Kuo C. W., Kuan T. M., Yu, C.Y., "Methodology for evaluating solar module encapsulant materials", 38th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 719-722, 2021.



CO₂ 固碳生產碳酸酯類塑料技術及應用

工研院材化所副組長 / 許希彥
工研院材化所技術經理 / 薛茂霖
工研院材化所資深研究員 / 黃英婷

關鍵字：二氧化碳、碳酸酯、環碳酸酯、聚碳酸酯

摘要

二氧化碳 (CO₂) 是主要的溫室氣體來源，若能有效轉化為化學品與聚合物，將有助於實現碳固定與達成淨零碳排目標。近年來，CO₂ 與環氧化物、烯烴、炔烴及共軛二烯等化合物進行加成或聚合反應的技術受到多方研究，可生成多樣化的化學品與高分子材料。其中，碳酸酯類聚合物因具備良好的熱穩定性與機械性能，已廣泛應用於塑膠、塗料、鋰電池溶劑等產業。其碳酸酯材料可分為非環狀直鏈型、環狀與聚碳酸酯類型，目前已開發應用於塗層塗料、輕質發泡、防火阻燃、UV 光固化與水性塗料等多項應用產品。雖然目前大多數碳酸酯材料仍依賴石化來源，但面對環保與減碳轉型趨勢，發展源自 CO₂ 低碳來

源的聚合物已成熱門方向。利用 CO₂ 製備高分子聚合物材料，不僅展現低碳永續的潛力，更為新型高分子材料的研發開啟創新途徑。

一、CO₂ 轉換固碳化學品類型

二氧化碳 (CO₂) 是主要的溫室氣體來源，若能將其轉化為化學品與聚合物將可達到固碳的環保低碳效益。然而，CO₂ 是高氧化態的分子，在熱力學上極為穩定，難以直接參與化學反應。若要有效轉化 CO₂，即必須搭配高活性的化學品及催化劑系統，才能轉化成固碳化學品。

目前已有多種 CO₂ 與化學品的反應路徑 (圖 1)，以 CO₂ 製造尿素和水楊酸的應用

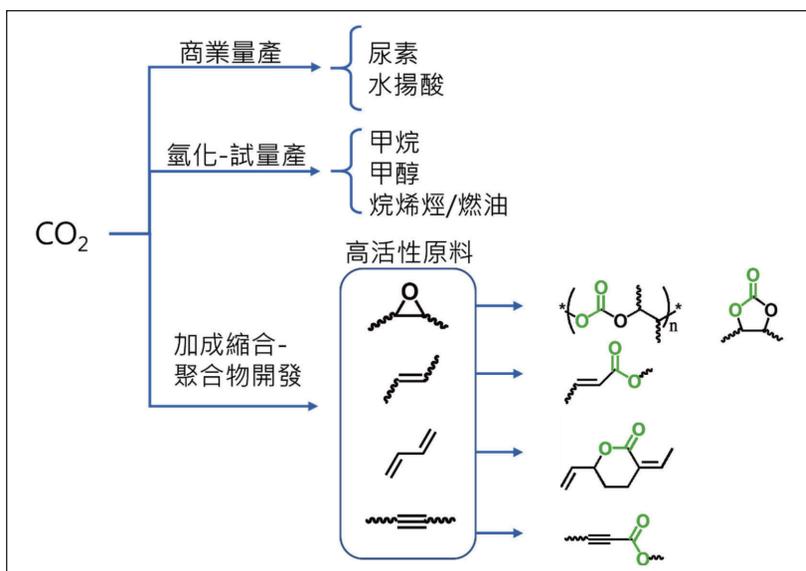


圖 1 CO₂ 合成多樣化的固碳化學材料

已被大量商業化產出，與氫氣進行氫化反應生成甲醇、甲烷、二甲醚、乙烯、丙烯、油料等產品也已進入試量產階段。而 CO₂ 與其它化學品的加成反應則在積極開發中，其中包括與環氧化物、烯烴、炔烴及共軛二烯（如丁二烯）等化合物反應，可以分別進行羧化、環化加成或聚合反應。這些反應產生不同類型的化學品與聚合物，部份產物更具有實際商業應用潛力。例如，CO₂ 與環氧化物反應在催化劑作用下可生成碳酸酯類聚合物（polycarbonates）與環狀碳酸酯（cyclic carbonates）。CO₂ 與烯烴反應可經由羧化反應生成不飽和羧酸化合物。與丁二烯反應，可生成具有單體潛力的 δ-戊內酯單體，其衍生的共聚物將開啟新的高分子綠色材料。在此眾多產物中，使用 CO₂ 合成聚合物－碳酸酯類聚合物的產品，因為具有良好的熱穩定性與機械性能，下游已有明顯應用於塑膠、塗料及鋰電池溶劑等多種產業。本文將說明

CO₂ 轉化碳酸酯類塑料的技術及應用端發展現況。

二、有機碳酸酯結構類型

根據結構及應用性進行分類，有機碳酸酯可區分為無環（或直鏈）、環狀以及聚碳酸酯材料（圖 2）。無環碳酸酯常用作汽油添加劑、化妝品增稠劑以及殺蟲劑。環狀碳酸酯則被應用為鋰離子電池的電解質、聚合物合成的前驅物，以及替代性的「綠色」偶極非質子溶劑，此係因其屬於無毒、可生物降解且無腐蝕性之化學物質。聚碳酸酯（polycarbonate）由於具光學透明性及抗衝擊性能，使其成為重要的塑膠產品。有機碳酸酯自上世紀中葉起即為工業上重要的化學品，主要由石化原料製備，近年來因二氧化碳減量議題興起，以二氧化碳作為 C1 碳源製備碳酸酯化學品已成為工業生產的重要途徑。

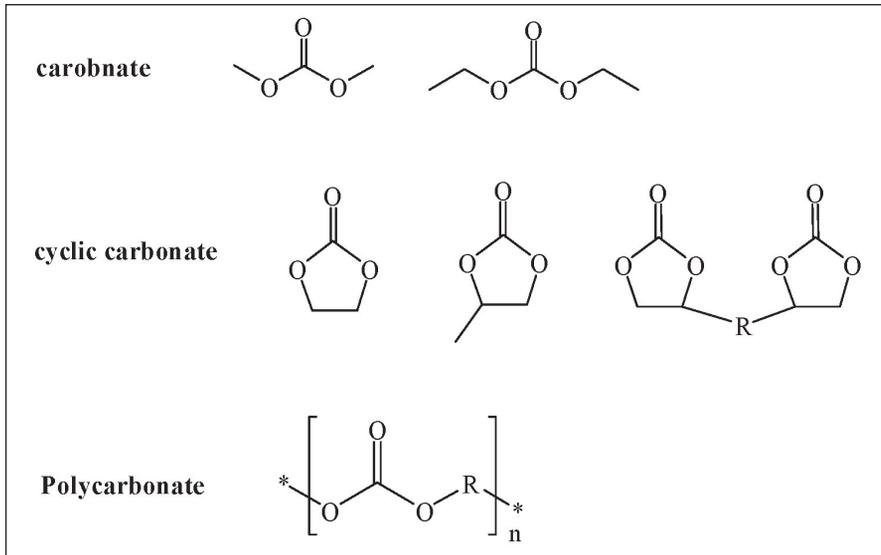


圖 2 有機碳酸酯結構及類型

二氧化碳為大量豐沛、便宜、無毒且可再生的 C1 資源，將其轉化為高附加價值燃料或材料引起廣泛興趣。據估計，至 2030 年，全球二氧化碳基化學品及聚合物市場規模將達 300 億美元，未來將呈現強勁成長，以因應減少碳排放及緩和氣候變遷影響的迫切需求。這些創新材料可替代傳統石化碳源產品外，亦具備卓越的物化性材料特性。隨著二氧化碳捕獲與轉化成本的持續降低，基於二氧化碳的化學品及聚合物的經濟可行性亦逐步提升，增強其在各產業廣泛應用的經濟性，進而推升市場規模的成長。

三、CO₂ 製備多環碳酸酯及非異氰酸酯聚氨酯 (NIPU)

根據圖 3 所示，二氧化碳與環氧單體反應可製造出環碳酸酯單體。在此反應中，多官能性環碳酸酯進一步與胺基化合

物發生聚合反應，從而製造出聚氨酯材料 (polyurethane)。由於該製程未使用高毒性異氰酸酯原料，因此這類型產品又被稱為非異氰酸酯聚氨酯 (non-isocyanate polyurethane, NIPU)。NIPU 具有傳統聚氨酯 (Polyurethane, PU) 的結構和特性，且高分子鏈上存在羥基胺甲酸酯基 (Hydroxyurethane)，其中羰基與 β 碳原子鍵合的羥基形成分子內氫鍵，有助於提高材料的耐水解性、抗滲透性、耐久性及機械性能 (如圖 4 所示)。此外，其製備過程不使用高毒性異氰酸酯原料，綠色環保的特性符合日益嚴格的法規要求 [1-4]。值得注意的是，環碳酸酯單體對水氧具有較高的穩定性，這與異氰酸酯單體的懼水性不同，因此操作過程中不會因產生氣泡而導致材料結構缺陷，不論是原料儲存還是產品施工都更加便利。NIPU 已被視為替代傳統異氰酸酯型 PU 的新一代環保應用材料。

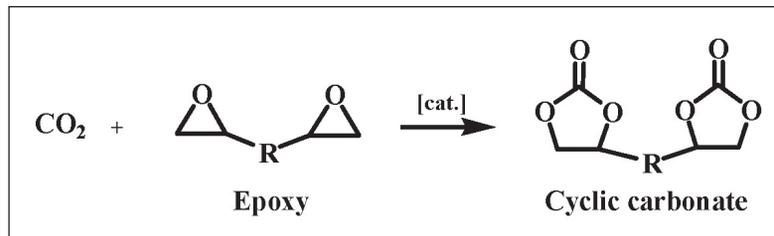


圖 3 二氧化碳製備環碳酸酯

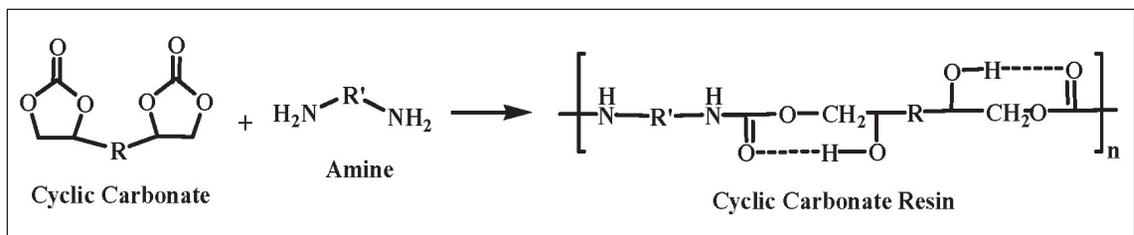


圖 4 非異氰酸酯聚氨酯樹脂製備

在適當觸媒的催化下，二氧化碳與環氧單體可完全轉化為環碳酸酯單體，常見的觸媒包含鹼金屬鹽類、有機金屬錯合物、離子溶鹽、四級銨（磷）鹽鹵化物、無機擔體型觸媒等，對反應提供優異的催化活性。環氧樹脂除了一般常見的石化原料來源外，也可取自生質環氧植物油，如環氧大豆油等，其具有價格低廉及綠色生質性質。目前全球在 NIPU 材料的研究開發及產品應用上投入許多工作，並不斷推出新的商品化應用，如塗料、彈性體、接著劑、輕質發泡等領域 [5-7]。

Hybrid Coating Technologies Inc (HCTI) 公司為全球 NIPU 早期的製造商之一，由 HCTI 創立的 Hybrid Coating 公司推出多款 NIPU 地坪塗層塗料，並以 Green Polyurethanes® 產品名在美國（可

於加利福尼亞州聖安娜 White Cap 商店購買）、墨西哥、義大利及歐洲多處地區銷售。近年 Hybrid Coating 公司更與國際塗料大廠 PPG 結盟，使產品滲透至各式民生塗料。

在國內方面，工業技術研究院近年來致力於非異氰酸酯聚氨酯材料製程技術及產品應用的研發，成功建立二氧化碳活化觸媒技術，並掌握環碳酸酯單體及聚合物合成的關鍵製程。藉由專利智慧財產權的佈局，目前已擁有多項國內外專利，同時開發出多種應用產品，包含（一）塗層塗料；（二）輕質發泡；（三）防火阻燃材料；（四）UV 光固化材料；（五）水性塗料等，如圖 5 所示。這些創新技術與產品的開發，不僅有助於降低產業對環境的衝擊，亦能提升國內相關產業的競爭力。

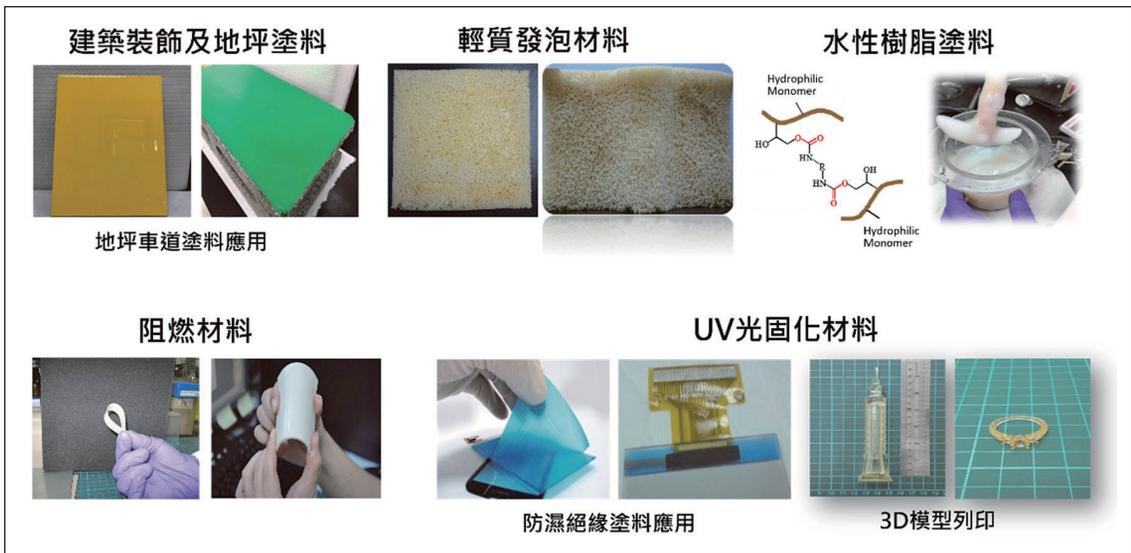


圖 5 工研院非異氰酸酯聚氨酯材料應用發展

四、CO₂ 製備脂肪族聚碳酸酯

以二氧化碳作為起始原料製備而成的脂肪族聚碳酸酯 (Aliphatic polycarbonate, APC)，屬於永續性高分子材料 [8]，此類聚合物最早於 1969 年由日本京都大學的井上祥平教授首度研究合成，依其分子量的大小可區分為低分子量聚碳酸酯多元醇 (Polycarbonate polyol) 以及高分子量可生物降解的聚碳酸酯 (APC) 產品應用。利用二氧化碳做為化學材料的分子鏈組成構件，有潛力實現「綠色化學」，近年來逐漸獲得越來越多的探討，特別是在生物醫學上的應用以及做為聚氨酯的成分。脂肪族聚碳酸酯具有透明度佳、阻隔水氣及氧氣效果好、印刷性良好等特性，燃燒時不會產生煙霧，可應用於無毒材料，且為可生物降解的高分子材料，適用於包裝材料、農業地膜、食品包裝紙等領域，因而引發廣泛的興趣與商業應用 [9]。

在不同型態觸媒的催化下，聚碳酸酯會呈現出不同的組成。在 [Cr]、[Co]-salen、[Zn] 及 [Mg] 鹽類等觸媒的催化下，讓二氧化碳與烷烴基環氧化物共聚，可形成交替式的聚碳酸酯 (alternative polymer) 共聚物組成。若以 DMC (dimetal cyanide) 及 [Cr]-bishydroxyquinolin 等觸媒催化二氧化碳與烷烴基環氧化物共聚，則容易獲得含有碳酸酯和醚鍵的聚醚碳酸酯，如圖 6 所示 [10,11]。

若於共聚反應中添加多元醇起始劑，可將聚碳酸酯末端官能化，製備聚碳酸酯多元醇 (polycarbonate polyol, APC-polyol) [12]，如圖 7 所示，此產物可應用於多項工業產品，如聚氨酯類製品。由於聚醚碳酸酯多元醇具有低黏度及適當的 T_g 值，使其易於利用工業上製備聚氨酯 (PU) 泡棉的標準設備進行加工，從而加快產品導入工業生產的速度。以二氧化碳為基質的聚碳酸酯多元醇

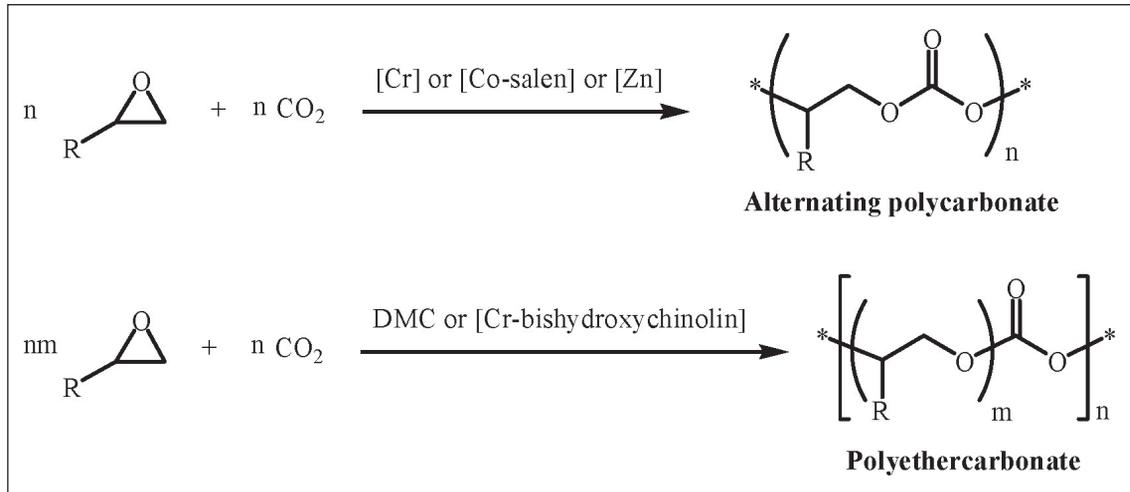


圖 6 交替聚碳酸酯及聚醚碳酸酯合成

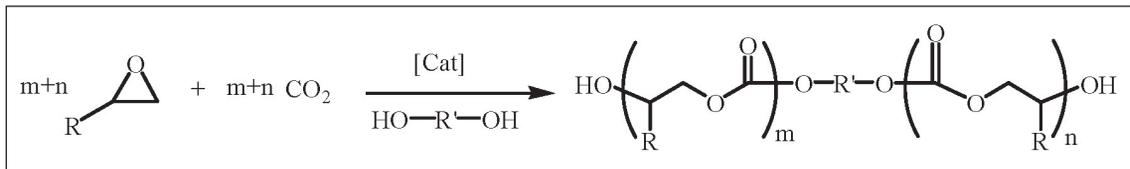


圖 7 二氧化碳製備聚碳酸酯多元醇

所製備之聚氨酯發泡材料，其機械性能表現優異，如表 1 所示，拉伸強度及材料延伸率均有明顯提升。此外，相較於傳統聚氨酯泡棉，以聚碳酸酯多元醇製備聚氨酯泡棉的熱穩定性更佳，其熱分解溫度 (T_d) 明顯超過 300°C 。

根據聚合物的分子量，高分子量之 APC

($M_n > 5 \text{ kg/mol}$) 具有非晶型 (amorphous) 及疏水性質，能溶於多數有機溶劑，惟不溶於長鏈烷烴及鏈烷醇，亦不溶於水及乙二醇。研究顯示，聚合物的分子量會影響 APC 的 T_g 及 T_d 點，如表 2 所示，隨著分子量的提升，材料的 T_g 及 T_d 點明顯提高。不同結構的 APC 共聚物，其基本性能概述如表 3 所示。

表 1 二氧化碳基質聚碳酸酯多元醇製備聚氨酯發泡性能比較 [1]

材料特性	PU 材料			
	CO ₂ -based		Conventional	
Core density [kg/m ³]	23.1	37.3	23.4	38.6
Tensile strength [kPa]	102	92	111	74
Elongation at break [%]	165	178	215	151



表 2 APC 分子量對熱性質影響 (based on PPC)

Mn, kg/mol	50	105	158	211	280	360
T _g , °C	33.2	35.3	36.1	36.8	37.6	39.1
T _d - 5%, °C	201.8	207.3	213.1	217.5	228.1	232.6

資料來源：Green Chemistry and Chemical Engineering pp 323-347.

表 3 不同結構 APC 共聚物的基本性能表

Property ^a	PEC	PPC	PBC	PCHC	PStC
T _g , °C	0.5	20 ~ 45	60	112 ~ 115	76 ~ 80
Modulus, MPa	2.1	993	2,190	–	2,400
Tensile strength, MPa	5.9	33.2	37.0	–	54.1
Density, g/cm ³	1.429	1.275	1.180	–	1.27
Dielectric constant (10 ³ Hz)	4.32	3.0	–	–	3.25

^a PEC: copolymer of ethylene oxide and CO₂; PPC: copolymer of propylene oxide and CO₂; PBC: copolymer of butylene oxide and CO₂; PCHC: copolymer of cyclohexyl oxide and CO₂; PStC: copolymer of styrene oxide and CO₂.

根據研究顯示，二氧化碳與環氧單體合成的 APC 表現出優異的生物降解性，將塑膠產品經由堆肥掩埋的方式最終分解為二氧化碳和水，不會對環境造成任何汙染。此種材料的應用範圍十分廣泛，包含農用地膜、物流快遞包裝、生活用品、食品包裝、醫療敷材、無甲醛高分子接著劑等領域。

此外，APC 優異的阻氧特性（數值遠低於現行的生物可分解性高分子），使其逐漸受到重視，如表 4 所示，此產品具有應用於一次性食品包裝材料市場的潛力。這不僅可減少塑料對環境的汙染問題，更能延長食品包

裝的貨架期，維持食品品質的一致性及新鮮度，無須添加化學防腐劑或穩定劑。

總而言之，APC 材料的特性使其在眾多產業中展現出廣闊的應用前景，不僅有助於環保議題的解決，亦能滿足市場對於包裝材料性能的要求。

根據目前市場情況，已有多家國際知名企業投入二氧化碳基質聚碳酸酯的生產。其中，旭化成 (Asahi Kasei) 公司主要專注於芳香族聚碳酸酯的製造，而其他如 Covestro、Empower Materials、Saudi Aramco

表 4 不同材質對 O₂ 及 H₂O 阻隔性能 (at 20 °C)

Polymer	BOPET	BOPP	HDPE	PPC	PLA	PBS
H ₂ O permeability (g/m ² /24h)	100	–	20	40 ~ 60	325	–
O ₂ permeability (cm ³ /m ² /d/atm)	60 ~ 100	2,000	1,400	10 ~ 20	700	1200,

BOPET: Bi-oriented polyethylene terephthalate; BOPP: Bi-oriented polypropylene; HDPE: High-density polyethylene; PPC: Poly (propylene carbonate); PLA: Polylactide; PBS: Polybutylene succinate.



術界和工業界的廣泛關注，成為極具發展潛力的技術。將聚碳酸酯應用於聚氨酯材料的製備，可展現出顯著的 CO₂ 減量實質效益。鑑於聚氨酯市場規模龐大，此技術有潛力成為二氧化碳在聚合物工業中作為 C1 結構單元的最大應用之一。

利用二氧化碳與環氧單體共聚合所製備的脂肪族聚碳酸酯 (APC)，其應用特性亦

隨之多樣化，廣泛應用於各式工業塑膠製品，如圖 9 所示。除此之外，藉由導入第三單體（例如酸酐）進行共聚合，可進一步製備出聚碳酸酯共聚酯 (Poly (carbonate-ester), PCE)，有效提升材料的耐熱性及隔氣性，如圖 10 所呈現，且此類材料特別適合運用在肉製品冷藏膜材等領域 [13,14]。脂肪族聚碳酸酯多元醇 (APC-polyol) 經由經取代官能基團的置入，可參與聚酯材料的合成，目前

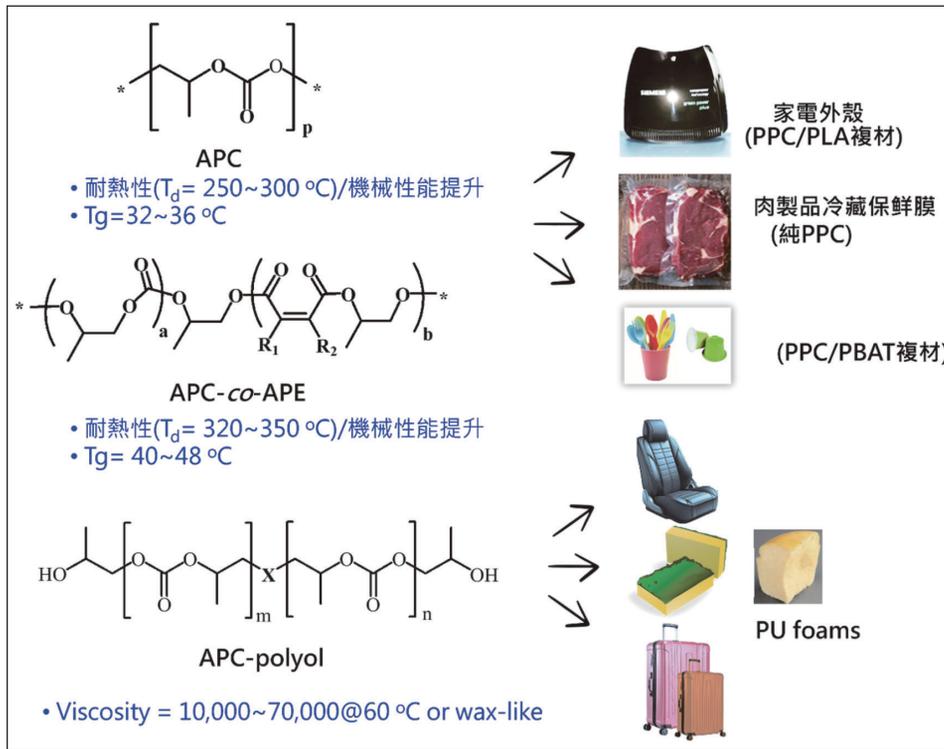


圖 9 聚碳酸酯共聚物產品應用

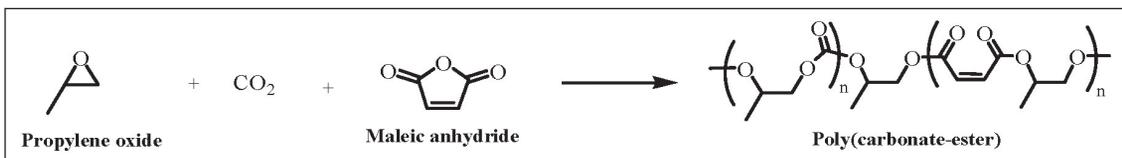


圖 10 聚碳酸酯共聚酯合成



在工業上主要應用於民生用輕質發泡材的生產，如德國 Covestro 公司已成功實現二氧化碳為基質的低碳輕質發泡產品的工業化生產。

聚合物多元醇在聚氨酯產業的應用廣泛，每年全球消耗量超過 1,000 萬噸。現今，多數聚合物多元醇仍源自石油基原料。在環保及經濟問題日趨嚴峻之際，開發源自再生或低碳來源的多元醇已成為熱門趨勢。利用二氧化碳為原料製備高分子材料，符合高分子材料低碳、永續發展的理念，亦為新型結構高分子材料的製備開創新途徑。

國內學術研究單位對於二氧化碳製備聚碳酸酯及相關應用議題十分重視。例如，工研院便著力於均相有機鈷金屬觸媒組成及有

機硼 (B) 觸媒的應用研究，成功開發出聚碳酸酯及聚碳酸酯多元醇產品製備技術。此技術不僅可用於單聚合反應，也可導入酸酐第三單體共聚合，進而合成出聚碳酸酯共聚酯材料 (如圖 11 所示)。

五、CO₂ 製備芳香族聚碳酸酯

全球 BPA 型芳香族聚碳酸酯 (polycarbonate, PC) 市場在 2023 年的產能約為 785 萬噸 [15]，預估市場從 2023 年至 2032 年間的年均複合增長率估計 (CAGR) 為 6.3%，到 2032 年將達到 310 億美元 [16]，亞太地區在全球聚碳酸酯的生產和消費方面占據主導地位，歸因於興盛的汽車產業以及在電子和電氣製造業中的需求。

<p>Polycarbonate</p>	<p>Polycarbonate polyol</p>
<ul style="list-style-type: none"> • [Cat.] = [Co] or TBAP • P_{CO₂} = 300~400psi • Mn = 8,000~35,000 g/mol • PDI < 1.5 • Ether linkage < 1% 	<ul style="list-style-type: none"> • [Cat.] = [Co] or TBAP • P_{CO₂} = 100~300psi • Mn = 2,000~6,000 g/mol • PDI < 1.3 • Ether linkage < 1%~30% • Appearance: Liquid (viscosity=120,000cps@25°C) or wax-like (viscosity=137,500cps@75°C)

圖 11 工研院 CO₂ 製備脂肪族聚碳酸酯 (APC) 技術發展



中國是 BPA 型聚碳酸酯的主要需求國也是主要製造國，需求約占全球聚碳酸酯產能的 60%，其 BPA 型聚碳酸酯產能預計將從 2021 年的 232 萬噸翻倍至 2032 年的 445 萬噸。而全球其他 BPA 型聚碳酸酯主要製造商為科思創 (Covestro)、沙特基礎工業公司 (SABIC)、三菱瓦斯化學 (Mitsubishi Gas Chemicals)、樂天化學 (Lotte Chemicals)、帝人 (Teijin)、LG 化學 (LG Chemicals)、奇美實業 (Chi Mei Corporation)、台灣化學纖維 (Formosa Chemicals & Fiber Corporation) 等。

BPA 型聚碳酸酯最早期的製作方法為光氣法 (界面縮聚法)，使用光氣與雙酚 A (Bisphenol A, BPA) 合成聚碳酸酯，此方法可生產高分子量、高透明度的聚碳酸酯，然而光氣具有高毒性，因而後續旭化成公司 (Asahi Kasei) 發展非光氣法 (熔融酯交換法) 製備聚碳酸酯，此方法主要是開發出使用碳酸二苯酯 (diphenyl carbonate, DPC) 與 BPA 進行酯交換反應製造聚碳酸酯，相對光氣法較為安全。近年由於氣候的變遷，世界各國政府及企業紛紛宣布減碳策略，再加上碳稅機制，因而如何降低產品的碳足跡，演變成各個企業的發展重點，故最新的聚碳酸酯製作方法則是開發出以 CO₂ 直接轉化製備碳酸酯 (dialkyl carbonate, DRC)，DRC 再與苯酚 (phenol) 及 BPA 進行二次酯交換反應以製造聚碳酸酯，為具有減碳效益的新製程。

5-1 碳酸酯單體製備方法

BPA 型聚碳酸酯的前驅物為直鏈型碳酸酯單體，其製備方法包含光氣法、氧化法、

CO₂ 轉換法，製備碳酸二烷酯與雙酚 A 反應形成 BPA 型聚碳酸酯，茲將說明如下。

5-1-1 光氣法 (Phosgene method)

傳統製程為光氣法，最早於 1958 年由拜耳 (Bayer) 公司成功商業化，推出 Makrolon® 聚碳酸酯產品 [17]。圖 12 為光氣法的化學反應式，此製程採用界面縮聚法 (Interfacial Polymerization Process)。其方法是將一氧化碳與氯氣於光氣合成反應器生成光氣，光氣溶解於有機溶劑二氯甲烷後與 BPA 反應，和無機相雙酚 A 的鈉鹽溶液在兩相界面進行反應生成低分子量的聚碳酸酯，然後加入催化劑和氫氧化鈉，將低分子量聚碳酸酯縮聚到高分子量的聚碳酸酯。副產物有大量氯化鈉廢棄物，使用的溶劑二氯甲烷是毒化物，反應物光氣更是劇毒，八小時日時量平均容許濃度僅為 0.1 ppm，在製程設計上必須考量製程安全性和設備須具防腐蝕性，而且製程對環境造成沉重負擔。不過，由於光氣法製備聚碳酸酯具有相當多優勢，因而在市場上仍有相當多的公司採用光氣法製備聚碳酸酯。

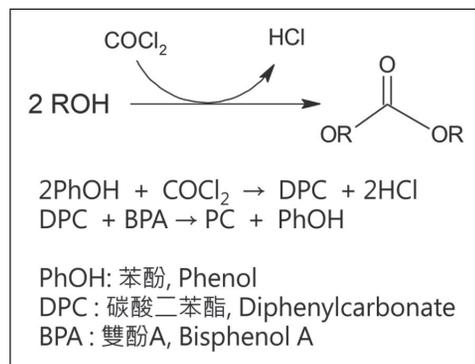


圖 12 光氣法化學反應式

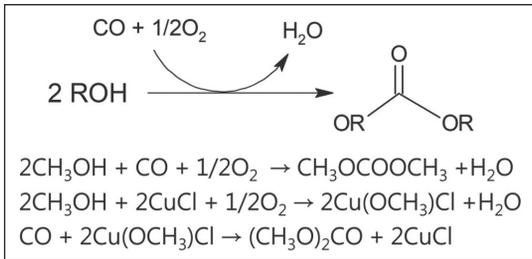


圖 14 直接氧化法化學反應式

劑氧氣的作用下，合成碳酸二烷酯，這種方法不需要使用光氣，因此被視為更環保的光氣替代技術。然而 CO 和 O₂ 共存具有爆炸風險，因此宇部興產 (UBE Corporation) 公司進一步開發了間接氧化法 (圖 15)，在第一反應器中先將 NO、CH₃OH 與 O₂ 反應生成甲基亞硝酸酯 (Methylnitrite, RONO) 並將副產物水移除，接著在第二反應器將一氧化碳和甲基亞硝酸酯作為原料，利用 Pd/C 催化劑合成碳酸二甲酯 (dimethyl carbonate, DMC)，如圖 16 所示。在此技術中，UBE

公司使用甲基亞硝酸酯作為氧化劑以取代氧氣，進而降低爆炸的風險。此外，該方法在第二反應器合成碳酸二烷酯時不會產生水，因此可避免水對催化劑的負面影響。合成過程分為兩個步驟，可以避免甲醇-水-碳酸二甲酯形成三元共沸物 (ternary azeotrope)，使產品的分離變得更加容易並於 1978 年實現該技術的工業化。然而，氮氧化物 (NO_x) 和甲基亞硝酸酯皆具有毒性和腐蝕性，在製程安全上以及對環境的影響仍有疑慮。

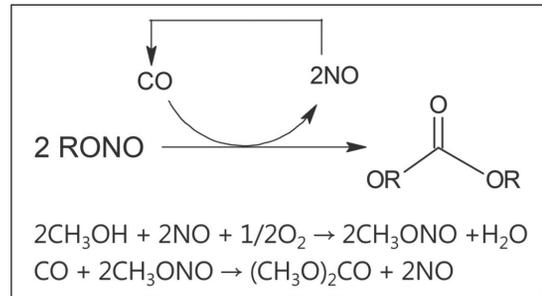


圖 15 間接氧化法化學反應式

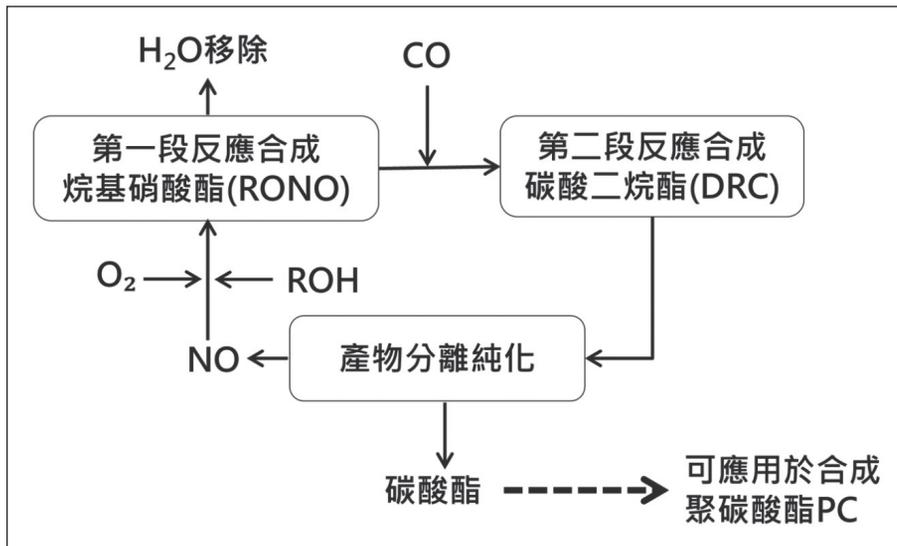


圖 16 UBE 碳酸二烷酯製程示意圖



5-1-3 CO₂ 轉換法 (Conversion of CO₂)

CO₂ 轉換法包含以環氧乙烷 (Ethylene oxide, EO)、尿素 (urea) 為起始物以及 CO₂ 直接轉換法。

1. CO₂ 與環氧乙烷反應轉換法

為了改善光氣法及氧化法的缺點，旭化成公司 (Asahi Kasei) 開發以環氧乙烷 (Ethylene Oxide) 為起始物與 CO₂ 反應製備碳酸二烷酯，過程中沒有使用光氣，反應包含兩步驟如圖 17，為其製程流程示意圖如圖

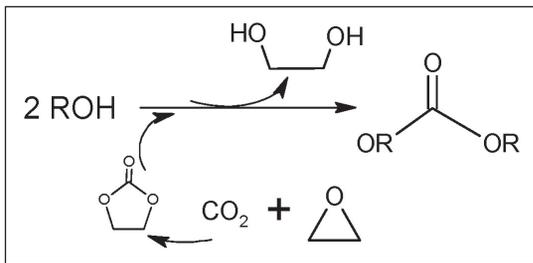


圖 17 從環氧乙烷製備碳酸酯化學反應式

18。首先環氧乙烷與 CO₂ 反應生成乙烯碳酸酯 (ethylene carbonate, EC)，接著乙烯碳酸酯與醇進行酯交換反應，生成碳酸二烷酯。乙二醇為此反應的副產物，進一步純化可提升經濟效益。此製程能夠在溫和條件下將 CO₂ 轉化為高附加價值化學品，是目前最成熟且已商業化的碳酸二烷酯合成方法之一，然而，環氧化物的生產仍然是此技術的主要瓶頸，而副產物乙二醇也可能產生去化的問題。但是此方法與光氣法相比具有相當多的優點如下：

- 無需使用劇毒光氣
- 不會產生廢棄副產物 HCl 或 NaCl
- 可利用 CO₂ 作為原料，促進碳捕獲與再利用
- 改變醇原料分子結構，可生產多種碳酸二烷酯
- 減少設備維護需求
- 與光氣法相比每生產 1Kg PC 將減碳 0.173 Kg [20]

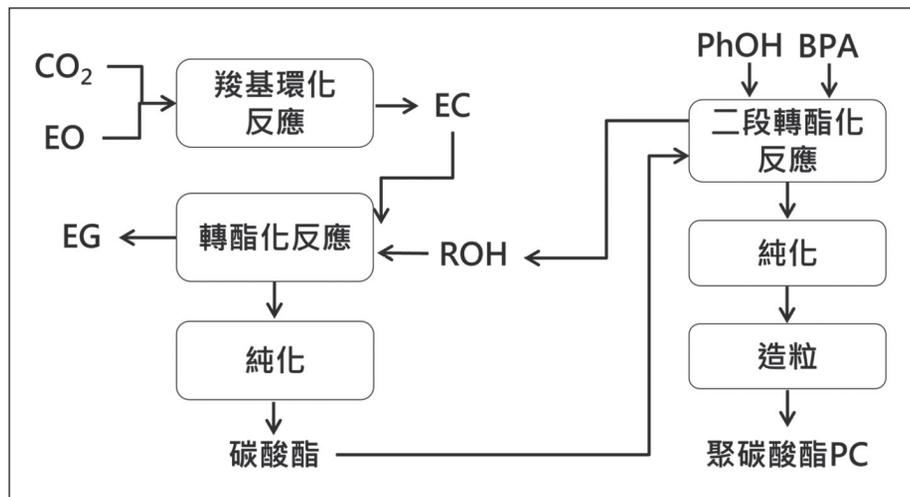


圖 18 旭化成公司開發由 EO 製備碳酸二烷酯流程示意圖



非光氣法製備聚碳酸酯在環保、安全、經濟性和產品質量上均優於傳統光氣法，已成為主流技術趨勢。SABIC 公司的聚碳酸酯年產能約為 143 萬噸，原先的製作方法也以光氣法為主，近年則進行轉型，將光氣法逐漸轉為非光氣法，在 2023 年與中國石化（Sinopec）合作 [21]，以旭化成開發的非光氣法於天津建廠生產聚碳酸酯，年產能 26 萬噸，PC 產品為 LEXAN™。樂天化學也是採用非光氣法生產聚碳酸酯，其年產能約為 54 萬噸 [22]，PC 產品品牌為 HOPELEX 系列。奇美實業與旭化成公司合作開發非光氣法 PC 技術並與東聯合作，東聯應用該公司生產環氧乙烷製程的副產物 CO₂ 生產碳酸乙烯酯，並將此碳酸乙烯酯販售給奇美，奇美應用碳酸乙烯酯生產碳酸二甲酯進而製備聚碳酸酯，年產能約為 15 萬噸，推出的 PC 品牌為 WONDERLITE®。

2. CO₂ 與尿素反應轉換法

此方法可結合捕碳技術將 CO₂ 轉化為尿素，再以尿素為原料與醇類反應以生成碳酸酯單體（圖 19），目前僅在試量產階段 [23]，尚未商業化。其缺點是副產物為氨，氨具腐蝕性將對設備的規格需求較為嚴格，轉化率也偏低，若能有效提升轉化率並與尿素製程結合，則此製程將開啟 CO₂ 再利用的新篇章。

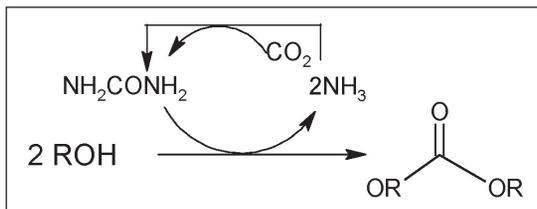


圖 19 由尿素製備碳酸酯化學反應式

3. CO₂ 直接轉換法

圖 20 為從 CO₂ 直接製備碳酸酯，與其他合成路徑不同，此方法的羰基基團（Carbonyl Group）直接來自二氧化碳，無需其它中間體，唯一的副產物為水，無使用有毒的光氣，也避免了使用氧氣與一氧化碳共存所帶來的爆炸風險。此方法的重點則著重於催化劑的開發，此項技術最早由 Asahi Kasei 公司開發的碳酸酯合成反應技術 [24]。主要是藉由二丁基氧化錫觸媒與醇類進行活化，形成活化態之後與 CO₂ 進行酯化反應生成碳酸酯，圖 21 為 CO₂ 合成碳酸酯的四個反應過程，包含：① 錫觸媒的第一段脫水反應。② 錫觸媒的第二段脫水反應，形成含醇氧基的活性錫類中間體。③ CO₂ 與活性錫類中間體

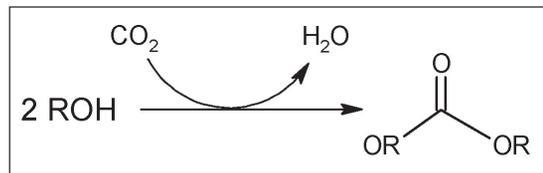


圖 20 由 CO₂ 直接製備碳酸酯化學反應式

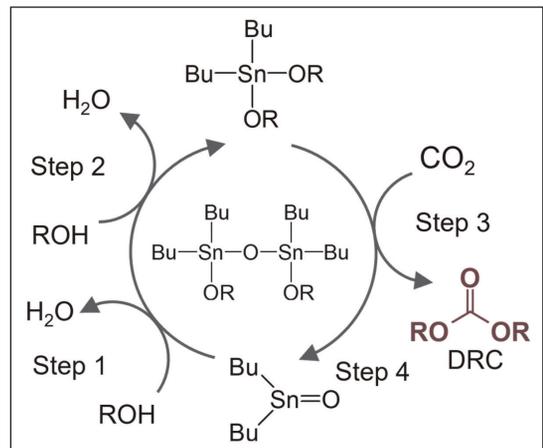


圖 21 CO₂ 合成碳酸酯的四個反應過程（Sn 觸媒）



進行酯化反應生成 DRC 粗產物。④ DRC 分離純化與錫觸媒分離回收等。

由於在高溫下，二烷基錫化合物容易進行熱分解反應變成三烷基錫化合物而失活，因而工研院開發新型雙金屬觸媒以改善二烷基錫化合物的缺點，同樣可使用於直接將 CO₂ 轉化為碳酸酯，目前已進入試量產測試階段 [25]。基於上述各種優勢，CO₂ 直接轉換法被認為是一種符合綠色化學的可連續製程並具減碳效益。

5-2 芳香族 BPA 型聚碳酸酯的應用

BPA 型聚碳酸酯以其無定形 (amorphous) 結構和透明清澈的外觀而聞名，賦予其類似玻璃的優異透光性。此外，聚碳酸酯還具備卓越的抗衝擊強度、耐用性且比玻璃輕得多。因此，聚碳酸酯在許多傳統應用中逐步取代玻璃，包括窗戶和瓶子等。表 7 說明聚碳酸酯其應用領域及特性。表 8 為說明現今市場上生產聚碳酸酯公司的生產方法及產能。

表 6 碳酸酯合成方法比較

技術方法	主要原料	副產物	技術成熟度	優點	缺點
光氣法	光氣, 醇	HCl (NaCl)	工業化	轉化率高, PC 機械性能佳, 透明度佳	光氣劇毒, 副產物具腐蝕性 氯化鈉廢棄物
直接氧化法	CO, O ₂ , 醇	水	成熟 (Lummus)	轉化率高, 無有害副產物	CO、O ₂ 共存易爆炸
間接氧化法	O ₂ , NO, 醇、CO	水	成熟 (UBE)	轉化率高, 無有害副產物	反應物具腐蝕性
環氧乙烷法	環氧乙烷, CO ₂ , 醇	乙二醇	工業化	副產物為醇類, 可純化再利用	環氧化物具有爆炸風險
尿素法	尿素, 醇	氨	試量產階段	與尿素工廠整合, 可將 CO ₂ 循環利用, 降低碳足跡	轉化率低 副產物具腐蝕性
CO ₂ 直接合成法	CO ₂ , 醇	水	試量產階段	無有害副產物, 醇類、觸媒可回收再利用	轉化率低

表 7 聚碳酸酯應用範圍

應用領域	特性	應用範圍
電子與電氣	高耐衝擊性、良好尺寸穩定性、電絕緣性佳	連接器、電池外殼、開關面板、絕緣元件
光學應用	高透明度、高折射率、抗刮耐磨	眼鏡鏡片、相機鏡片、雷射光學設備、顯示器
汽車工業	耐高溫、高強度、抗衝擊、可回收	汽車儀表板、前燈罩、後視鏡、車窗
建築與建材	耐候性強、耐紫外線、高耐衝擊	採光板、屋頂建材、溫室玻璃、隔音牆
醫療設備	可高溫滅菌、耐化學性高、生物相容性佳	血液透析器、培養皿、注射器、醫療容器
消費品與家電	輕量、高強度、耐熱、耐用	咖啡機外殼、吹風機、手機保護殼、食品容器
安全防護	防爆裂、高透明度、耐衝擊	防彈玻璃、安全護目鏡、耐撞擊防護罩



表 8 聚碳酸酯生產廠商及生產方法

公司	科思創	SABIC	樂天化學	帝人	台化	奇美
PC 產能 (t/y)	165 萬	143 萬	54 萬	43.5 萬	20 萬	15 萬
生產方法	光氣法	光氣法 非光氣法	非光氣法	光氣法	光氣法	非光氣法
PC 品牌	Makrolon®	LEXAN™	HOPELEX	Panlite®	TAIRILITE® TARFLON®	WONDERLITE®

六、結論

隨著大眾對於氣候變遷淨零碳排議題的關注，各產業亦日漸認知到尋找傳統材料的永續替代品之必要性。以二氧化碳為基礎製備的化學品及高分子聚合物具有豐富的可利用性、原料無毒性及低碳製程等特性，而成為極具希望的低碳材料。

以 CO₂ 取代高毒性異氰酸酯原料製備聚氨基酯，可製造塗料、發泡、阻燃與光固化材料。以 CO₂ 製備脂肪族聚碳酸酯 (APC)，具備生物可降解特性、良好阻氧性與良好加工性，可應用於農用膜、食品包材、醫療與環保膠材等實用性材料。以 CO₂ 製備傳統 BPA 型聚碳酸酯，可應用於汽車與電子產業及生醫高性能材料的需求。

藉由這些低碳材料，產業得以將碳排放轉化為具價值與實用性的固碳產品。隨著二氧化碳的捕獲與轉化成本持續下降，預計此類固碳材料市場將逐漸增加。二氧化碳不再只是溫室氣體的代名詞，而是具備高潛力的「碳資源」，將成為綠色經濟與低碳材料發展的關鍵原料。

參考文獻

1. C. D. Diakoumakos & D. L. Kotzev, "Non-Isocyanate-based polyurethanes derived upon the reaction of amines with cyclocarbonate resins", *Macromol. Symp.*, Vol. 216, No. 1, pp. 37-46, 2004.
2. J. Guan, Q. Zheng, et al., "Progress in study of non-isocyanate polyurethane", *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. 50, No. 11, pp 6517-6527, 2011.
3. J. Ke, J. Wang, et al., "The hybrid polyhydroxyurethane materials synthesized by a prepolymerization method from CO₂-sourced monomer and epoxy", *Journal of CO₂ Utilization*, Vol. 16, pp 474-485, 2016.
4. G. Rokicki & A. Piotrowska, "A new route to polyurethanes from ethylene carbonate, diamines and diols", *Polymer*, Vol. 43, No. 10, pp. 2927-2935, 2002.
5. J. Dong, B. Liu, X. Wang, et al., "Construction of ultralow-molecular-weight CO₂-polyols with self-catalytic performance in polyurethane preparation", *Macromolecules*, Vol. 57, No. 6, pp. 2706-2714, 2024.
6. O. L. Figovsky, L. Shapovalov, O. Axenov, "Advanced coatings based upon non-isocyanate polyurethanes for industrial applications", *Surface Coatings International Part B: Coatings Transactions*, Vol. 87, No. B2, pp. 83-90, 2004.
7. (a) O. Birukov, "A-Epoxy-amine composition modified with hydroxyalkyl urethane", US 7,989,553 B2, Aug. 2, 2011; (b) C. D. Diakoumakos, "Non-isocyanate-based polyurethane and hybrid polyurethane -epoxy nanocomposite polymer compositions", US 8,450,413 B2, May 28, 2013; (c) G. L. Wilkes, "Nonisocyanate polyurethane materials, and their preparation from epoxidized soybean oils and related epoxidized vegetable oils, incorporation of carbon dioxide into soybean oil, and carbonation of vegetable oils", US 7,045,577 B2, May 16, 2006; (d) J. Hwuang, "Polyurethane prepolymer prepared by functional



- polyurethane prepolymer and application thereof”, US 9,399,242 B2, Jul. 26, 2016; (e) S. Swarup, “Polyether carbamate compounds, compositions containing such compounds, and methods related thereto”, US 7,288,595 B2, Oct. 30, 2007.
8. Y. Qin, X. Wang, (2018). Conversion of CO₂ into Polymers. In: Meyers, R. (eds) Encyclopedia of Sustainability Science and Technology. Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2493-6_1013-1
 9. L. Karulf, T. Repo, et al., “Carbon dioxide utilization: CO₂-based polyurethane foam”, Journal of CO₂ Utilization, Vol.91, 2025, ISSN 2212-9820, Article 103000.
 10. Y. Qin, F. Wang, et al., “Fixation of carbon dioxide into aliphatic polycarbonate, cobalt porphyrin catalyzed regio-specific poly(propylene carbonate) with high molecular weight”, Journal of Polymer Science: Part A: Polymer Chemistry, Vol. 46, No. 17, pp 5959-5967, 2008.
 11. Z. Qin, G. W. Coates, et al., “Cobalt-based complexes for the copolymerization of propylene oxide and CO₂: Active and selective catalysts for polycarbonate synthesis”, Angew. Chem. Int. Ed., Vol. 42, No. 44, pp 5484-5487, 2003.
 12. J. Langanke, C. Gurtler, et al., “Carbon dioxide (CO₂) as sustainable feedstock for polyurethane production”, Green Chem., Vol. 16, No. 4, pp 1865-1870, 2014.
 13. V. K. Chidara, X. Feng, et al., “Triethylborane-assisted synthesis of random and block poly(ester-carbonate)s through one-pot terpolymerization of epoxides, CO₂, and cyclic Anhydrides”, Macromolecules, Vol. 54, No. 6, pp 2711-2719, 2021.
 14. B. Han, P. Theato, et al., “CO₂-tuned sequential synthesis of stereoblock copolymers comprising a stereoregularity-adjustable polyester block and an atactic CO₂-based polycarbonate block”, Macromolecules, Vol. 50, No. 23, pp 9207-9215, 2017.
 15. GlobalData, “Polycarbonate Industry Outlook by Capacity and Capital Expenditure Forecasts with Details of All Active and Planned Plants to 2028”, (2024), Report Code: GDCH012761CR-ST, Available on web: <https://www.globaldata.com/store/report/polycarbonate-market-analysis/>
 16. Prismane Consulting, “Polycarbonate Market Analysis, By Types, By Applications [Packaging, Optical Media, Construction, Medical Devices, Others] & Forecast Analysis, 2036”, Report Id: GMB-021, Available on web: <https://prismaneconsulting.com/report-details/global-polycarbonate-market-study>
 17. 有盛公司 (Bayer Makrolon 拜耳 PC 實心板 - 中部總經銷), Available on web: <https://www.yspcsheet.com.tw/brands.php>
 18. 台灣化學纖維股份有限公司, “台化塑膠事業部簡介”, Available on web: <https://www.fcfc-plastics.com/list/manufacturing-plants-styrenics.htm>
 19. S. Huang, X. Ma, et al., “Recent advances in dialkyl carbonates synthesis and applications”, Chem. Soc. Rev., Vol. 44, No. 10, pp 3079-3116, 2015.
 20. S. Fukuoka, S. Konno, et al., “A novel non-phosgene polycarbonate production process using by-product CO₂ as starting material”, Green Chem., Vol. 5, No. 5, pp 497-507, 2003.
 21. L. G. Langton, “SABIC and Sinopec launch mass polycarbonate production plant for Greater China region”, Packaging Insights, Available on web: Sep. 05, 2023, <https://www.packaginginsights.com/news/sabic-and-sinopec-launch-mass-polycarbonate-production-plant-for-greater-china-region.html>
 22. D. Williams, “Lotte to Double Polycarbonate Output in Korea”, CHEManager International, Available on web: July 14, 2017, <https://www.chemanager-online.com/en/news/lotte-double-polycarbonate-output-korea>
 23. 孫子罕, “一種用尿素和甲醇合成碳酸二甲酯的方法”, CN1204109 C, Jul. 23, 2003.
 24. M. Shinohata, “Process for producing dialkyl tin dalkoxdes”, US8008518 B2, Aug. 30, 2011.
 25. 吳國棟, “工研院攜奇美 助石化業淨零轉型”, 經濟日報, Available on web: Nov. 01, 2024, <https://money.udn.com/money/story/11799/8329711>



電機工程如何面對時代的變局及 應對人工智慧帶來的衝擊與建設

中國電機工程學會秘書長 / 陳昌勇
國立海洋大學電機工程研究所 / 陳慶紘

一、認識中國電機工程學會

「中國電機工程學會」於民國二十三年在上海創立，至今已有九十一年歷史，是我國最悠久的電機學術團體。在歷任理事長、理監事、全體的會員支持下，各項會務發展迅速，分別於 1953 年成立高雄分會，1956 年成立花

蓮分會，1982 年成立台中分會，以聯絡電機工程同好，研發電機工程學術，協力發展我國電機工程事業為宗旨。目前擁有個人會員一萬一仟餘人，團體會員九十五個單位，是一個很大的社會團體，專業領域也隨著科技進展，從電力、電信，擴展至電子、資訊等領域，現任理事長為國科會吳誠文主任委員。



圖 1 吳誠文理事長



圖 2 90 週年慶祝大會本會常務理事陽明交大林一平講座教授（左）、成功大學蘇炎坤院長（中）主持會議與陳昌勇秘書長（右）會務報告

二、近年電機領域的發展

電機工程對於推動近代人類文明發展可謂居功厥偉。台灣從二十世紀 70 年代開始，在產官學研各界的共同打拼下，時至今日儼然已經成為世界公認的科技之島，而電機工程領域包括電信、電力、電子、資訊，無疑是位在這個科技發展歷程的中心軸線上，相關產業更是推升台灣經濟起飛的最大的動力。在過去十年，電機相關科技的進展速度令人目不暇給，在電信領域，通訊科技不但已經徹底改變人類溝通的方式，更逐步朝整合陸海星空、無遠弗屆以及萬物聯網的願景發展；在電力領域，我

們深刻感受到因應氣候變遷對淨零碳排的迫切需求，以及在多元化再生能源供應的趨勢下，未來在維持供電穩定、強化電網韌性以及智慧能源管理的重要發展方向；在電子領域，矽晶片過去在摩爾定律下不斷地推進，台灣更因此站上世界的最前端，未來矽晶片如何突破物理極限，以及新興化合物半導體的發展，仍將是推動其他科技領域發展最重要的基礎；在資訊領域，過去除了帶動各行各業的數位轉型，近來人工智慧的風起雲湧，更勢將對人類社會帶來前所未有的衝擊。可以說，我們目前正站在尖端科技加速發展的風尖浪頭上，面臨諸多的挑戰，但也帶來相當多的機會。



三、人工智慧的崛起

人工智慧 (Artificial Intelligence) 在 2000 年後崛起，AI 技術的應用範圍也迅速擴展，如今已成為現代社會不可或缺的重要科技，現代 AI 技術的發展，特別是深度學習、生成式模型和大型語言模型 (LLM) 的應用，對運算資源、記憶體、電路設計等各方面都提出了極高的需求與挑戰。AI 對運算環境的高度需求，也一同帶動諸多相關產業，諸如 Nvidia (輝達)、AMD (超微) 等公司，在近年都有非常亮眼的成績；Nvidia 創辦人黃仁勳以及 AMD 董事長蘇姿丰皆為電機科技人。2024 年黃仁勳在臺灣出席台北國際電腦展期間，曾受訪表示：「臺灣是世界上最重要的電子產業的中心。」其核心原因就是臺灣優秀的半導體產業鏈，臺灣以「護國神山」台積電為首，已成為世界的半導體產業中心，政府也積極規劃相關政策，如前瞻基礎建設計畫特別預算辦理「Å 世代半導體 – 前瞻半導體及量子技術研發計畫」(Å 世代半導體計畫)，國科會推動「智慧終端半導體製程晶片系統研發專案計畫」(半導體射月計畫)，國科會跨部會推動的「晶片驅動臺灣產業創新方案」(晶創臺灣方案)，教育部的「智慧創新關鍵人才躍升計畫」、「人工智慧技術及應用人才培育計畫」等等，從產業、研究、人才培育多個面向齊頭並進，期望奠定臺灣於世界科技電子產業界的領頭羊地位。

四、人工智慧帶來的衝擊與展望

國科會在 2017 年提出以「小國大戰略」的思維來推動人工智慧的策略，藉此策略引導臺灣成為人工智慧發展重鎮，進而孕育人

工智慧新興產業應用發展。於 2016 至 2018 年間，可說是人工智慧最易募資期，只要你有創意的想法，創投公司就毫不手軟地挹注資金，人工智慧的新創公司可說是遍地開花。但那段期間的人工智慧新創公司最後大都因為缺乏成熟產品及穩定的商業化模式而虧損或退出市場。

然而在 2022 年 11 月橫空出世的 ChatGPT 讓生成式 AI 變成全民運動，各行各業和不同的年齡層的使用者都競相投入此類工具的使用，上線 5 天就吸引到 100 萬使用者的嚐鮮使用，兩個月後更有上億使用者的踴躍參與，立下人工智慧發展史的另一個難以跨越的里程碑。2023 年彭博情報 (Bloomberg Intelligence) 的研究報告顯示，生成式 AI 可望為 AI 產業帶來新一波爆發性的成長，預計 2032 年市場規模有望成長至 1.3 兆美元 (約 40 兆台幣)。所以，全球又再度把目光聚焦於 AI 產業如雨後春筍般地於世界各地冒出來。雖然 AI 產業看起來情勢大好，但生成式 AI 極度仰賴高價的算力和龐大的數據資源。若是沒有成功的商業模式，沒有任何一家企業可以持續這種耗費鉅資的算力軍備競賽。

生成式 AI 夾帶著其日新月異的強大功能，正無所不在地在各個領域造成莫大的影響和衝擊，雖然帶來很大的發展機會，但也伴隨著很高的風險挑戰。無論是生成文字、影像、音樂或影片的生成式 AI 工具，不僅可以減輕繁瑣的工作負擔，更是創意的來源，可以快速地驗證概念的可行性、組合出新作品或創造出新的服務。但也伴隨著許多有待解決的高風險，如：極度仰賴數據量和算力



的規模（未來人工智慧的話語權很可能逐漸集中在掌握人才、數據和最豐沛軟硬體資源的大型公司或國家手裡）、資料的智財權問題、工具濫用問題和答案正確性等問題。

人工智慧的影響可能會遠超過工業革命。人工智慧可說是一把雙面刃，它一方面可以促進社會福祉（如：智慧醫療、智慧城市、智慧教育、智慧製造、智慧農業、智慧電商、智慧娛樂、智慧資安、智慧財務、智慧社群等），但若沒有適當的規範，可能會適得其反，造成極大的社會衝擊。不能因為擔心 AI 的負面影響，就因噎廢食，不積極投入

AI 的研究。在發展的同時，必須及早制定好相關的法律和倫理的規範，以確保人類的基本權利、法治、環境永續性和降低使用風險。

如何面對產業轉型、地球環境變遷和功能日益強大的人工智慧的挑戰呢？必須在人工智慧、半導體、網通科技、智慧醫療、數位學習、能源科技和永續發展等技術研發和人才培養上需要盡早提出因應措施。惟有及時擬出具引導性的政策發展策略、組成堅強的跨域研究團隊、投入前瞻技術的研發和培育足夠多的跨域人才，才能解決產業轉型升級和台灣科技島人才荒的問題。



圖 3 吳誠文理事長（前左 8）與理監事合影，由左至右依序為清華大學徐碩鴻院長、中山大學李志鵬校長、清華大學王晉良講座教授、陽明交大林一平講座教授、台灣大學吳宗霖院長、中研院逢愛君主任、中華電信資分公司楊慧琪總經理、長庚大學郭斯彥院長、台灣大學廖婉君副校長、中華電信黃志雄執行副總經理、國科會吳誠文主委、成功大學李清庭名譽講座教授、台電公司許國隆副總經理、國科會林法正副主委、前資策會執行長卓政宏、中華電信簡志誠董事長、台達電郭大維技術長、工研院電光所張世杰所長、陳昌勇秘書長



圖 4 全球生成式 AI 市場規模

五、結語

協助產業轉型升級和人才培育，中國電機工程學會扮演了功不可沒的角色。學會匯集了產官學研各界的精英們，針對國家的產業發展提出重要的建言、研擬資訊通信相關國家標準、協助教育部辦理過大學院校電機與資訊相關系所的學門評鑑、出版極具影響力的電機工程學刊和電工通訊季刊等刊物、舉辦多場介紹新知的重要學術演講及具影響力的國際研討會、設置多項獎項獎勵電力、電信、電子、資訊等電機相關領域有重大貢獻的學者與工程師。

AI 是人類發明的極佳科技，徹底顛覆既有生活型態，更將創造過去無法想像的價值。每當突破性的新技術或工藝出現時，人們總是會擔心自己的生計受到威脅，例如：18 世紀，工

人們反對蒸汽動力的出現；30 年前，網際網路懷疑論者也數不勝數。不過，歷史告訴我們，隨著新技術的發展，我們在這個星球上的角色將隨之不斷改變。如今我們已開始適應並應用 AI 技術在許多領域，並將其嵌入到日常生活中，也逐漸在創造新的工作文化，透過 AI 工具提升我們的能力。AI 宛若是一個巨大的「新能源」，也是一種新的生產力，你現在已經可以輸入幾個簡單的指令，就讓 ChatGPT 生成出完整的文案，甚至可以任意的更換文案內容的風格、語言及情境，AI 使我們更聰明地工作，而不是更努力地工作。共同推動 AI 技術的進步和發展，為社會和產業的發展作出更大的貢獻。

參考文獻

1. 中國電機工程學會成立 90 週年紀念專刊。
2. Generative AI Market – Forecast to 2028 (MarketsandMarkets, 2023/4)。



2024 機械產業之回顧與展望

中興大學教授兼工學院副院長、機械工程學會理事 / 蔡志成

機械工業為產業之母，舉凡民生工業、金屬機電工業、航太運輸工業、醫療設備以及新科技之電子、半導體、光電產業皆需機械工業的搭配，機械產業長年以來創造經濟與就業，根據工研院 IEK 統計，2024 年台灣機械產業產值約 1 兆 830 億元，而機械公會的統計也顯示 2024 年機械設備出口值 292.75 億美元，換算為新台幣為 9,391 億元，是國家重要的產業。前幾年由於疫情的影響，國內機械產業雖有部分次產業例如腳踏車與健身器材有所成長，但整體產業受到波及而下跌；近年則因俄烏戰爭以及美中對峙所實施的管制措施，使得機械產業更因此失去不少多年努力建立的新興市場，對企業造成損失，也影響從業人員；而今年以年來美國對鐵鋁等金屬製進口產品課 25% 關稅，加上今年四月執行的全球對等關稅被加徵 10% 關稅，對機械設備與製品產業更是雪上加霜。

雖然疫情與關稅是全球性的，但管制措施對我國的機械產業有較大的影響，對於近

年來這些變化，產業界莫不絞盡腦汁思考對策，政府這幾年來也持續規劃與推動智慧製造、智慧機械、智慧化與低碳化等各式計畫，協助產業導入智慧化轉型與鼓勵採購國產設備，更鼓勵企業研發創新給予補助，也透過產學研合作以及人力紮根計畫，研發切入新科技產業所需之高階機械技術與設備，同時為產業留才，打造產業韌性。

在此期間，台灣的資通訊（ICT）產業與半導體產業因掌握全球高階伺服器與晶片的生產製造，讓全球體認到台灣的重要性，加上台灣原已具備的 ICT 產品技術，機械產業除了既有的產品與技術之外，多年來已隨著新科技產業鏈的引領，逐步跨入這些產品生產製造所需之加工與設備鏈，包括生產自動化產線及其製造、組裝與檢測之技術與設備。除此之外，也有部分企業在既有的基礎下持續發展無人載具相關技術與產品，包括一般大眾熟悉的自駕車之零組件以及感測、控制系統，而無人機也如火如荼地發展，其



關鍵零組件產製、組裝與系統整合等技術也陸續在國內紮根；而隨著全球人口老化以及對於健康醫療的需求，醫療與照護器械是機械產業另一塊切入的應用產業，包括醫療影像技術與設備、生化檢測設備、手術器械、透析設備、監護設備、醫療床與移送設備以及復健設備與訓練設備，也都是以機械技術為主，整合生物醫療領域的知識，發展醫療與照護器械與設備。除此之外，因應少子化與高效率化的趨勢，機器臂與機器人也大量使用在自動化系統中，特別是製造、組裝、物流等重複性或重負荷作業場域，機器人所需之馬達、減速器、夾爪、感測與整合控制也一一在產業落實。上述新科技產品與設備是以機械技術為核心，結合應用領域知識，跨入新科技應用領域，也見證國內機械產業的彈性與韌性。

機械工程學會宗旨在於結合會員研究機械工程學術課題並協力發展我國之機械工程建設，長期以來一直扮演國內機械產業與學術界連結的重要角色，2024年推動執行的主要業務包括：(1) 規劃辦理年會暨學術研討會，在楊慶煜校長與方得華院長的支持下，2024年於高雄科技大學辦理，論文分六大領域69項主題發表，同時辦理學會各獎項的頒發以及機械女力座談會；(2) 辦理機械專業人才認證，人才是產業重要的資產也是產業發展不可或缺的一環，透過機械專業認證制度，讓產業在徵選人才時有個明確的標準與依據外，學會辦理之機械專業證照為經濟部認可之iPAS證照，認證考試相當於專業能力的會考，亦可做為學校教育方針調整的依據，以培育具備完整機械領域基礎知識的畢業生，促進學生的職能學習方向。(3) 承辦

上銀科技公司與上銀科技教育基金會委託之「上銀機械碩士論文獎」，該獎由產業提供巨額獎助金，有機械界諾貝爾獎之稱，多年來已鼓勵許多優秀的碩士學生投入機械領域的專業研究與養成碩士研究生的研究與表達能力，圖2為2024年第21屆頒獎典禮中獲獎師生與貴賓合影。(4) 推動產學合作與產業參訪，學會在每年的年會與學術研討會中，邀請產業界資深人士參與座談與合作設展，並邀請產官學界有經驗的資深人士擔任榮譽顧問，強化機械領域的產學合作與交流，圖3為2024年理監事組團赴日本九州工業大學與TSMC熊本廠參訪之剪影。(5) 遴選「中技社機械學術獎」，此獎頒給於機械領域有重大事蹟與成就會員的榮譽獎章，以鼓勵並提升機械人才榮譽感與貢獻度。(6) 辦理學會會士、機械工程獎章、傑出教授與傑出工程師等各項榮譽選拔，藉以表揚在產業界與學術界對機械技術提供卓越貢獻的人士。(7) 辦理機械女力聯誼會與座談會，有鑑於機械產業長期以來男性多於女性的現象，為促進兩性平權，學會於多年前成立「機械女力發展委員會」，為機械領域注入多元創新的力量，並定期聚會討論，分享心得，圖4為113年機械女力座談會合影。透過上述多管齊下的業務推動，機械工程學會期能有效串接產業與學界，協助國內機械產業在衝擊下持續強化、轉型。

展望未來，機械產業除了既有的產品與技術之外，可透過機械產業多年來逐步建構並略有基礎的新科技產業鏈，跨入這些產品生產所需之設計分析與加工技術及設備鏈，在此以產品領域分類，提供下列數項可跨入發展的新科技次領域供參酌，並以與產業共勉，期可繼續再創新局。



- (1) 半導體材料備製技術與設備：在半導體製造過程中，包含了從原材料的處理、晶片的製造到封裝等多個環節，機械產業可在這些環節中介入，提供高效的加工技術、設備和解決方案，例如材料純化設備、晶圓切割設備、晶圓清洗技術、化學氣相沉積與物理氣相沉積設備、擴散爐、高精度量測設備、自動化檢測系統、先進封裝技術與設備以及自動化裝配設備。在半導體前端製造的各個環節中，機械產業具多樣化的特性，通過技術創新和設備升級來滿足快速變化的市場需求，隨著半導體技術的持續進步，對高效率、高精度的加工設備和解決方案的需求將會不斷增長，為機械產業提供了良好的發展機會。
- (2) 無人載具技術與產品：無人載具是典型的機械技術搭配 ICT 技術的產品，近年的烏俄戰爭及以巴衝突也顯示無人載具亦是軍工產業的一環，機械產業可進入的領域與產品包括應用電腦輔助設計與流力分析、3D 列印原型製作測試、動力設計與元件選用、高能量（電池）密度技術、飛行姿態與路徑控制技術、導航軟硬體（影像視覺、LiDAR 等）、感測與數據處理分析技術、邊緣計算技術、量產與模具技術等。
- (3) 醫療與照護器械產品：隨著全球人口老齡化和健康意識的提高，醫療與照護器械產業正迎來快速發展的機遇，機械技術和設備的應用廣泛而多樣，從從診斷、治療到病人照護各方面。機械產業可投入的產品包括診斷用的影像學設備（X 光機、磁共振成像設備、電腦機斷層掃描設備等）與生化分析儀器（自動化生化分析儀、分子診斷儀器等），治療用的手術機器人、雷射手術設備、血液透析機、腹膜透析機等，病人照護用的多參數監護儀、心電圖機、電動醫療床與病人搬送設備等，康復用的超聲波治療儀、電刺激設備及虛擬實境訓練系統等。



圖 1 2024 年會暨學術研討會



圖 2 第 21 屆上銀機械碩士論文獎得獎師生與貴賓合影



圖 3 理監事組團赴日本九州工業大學參訪



圖 4 113 年機械女力座談會合影

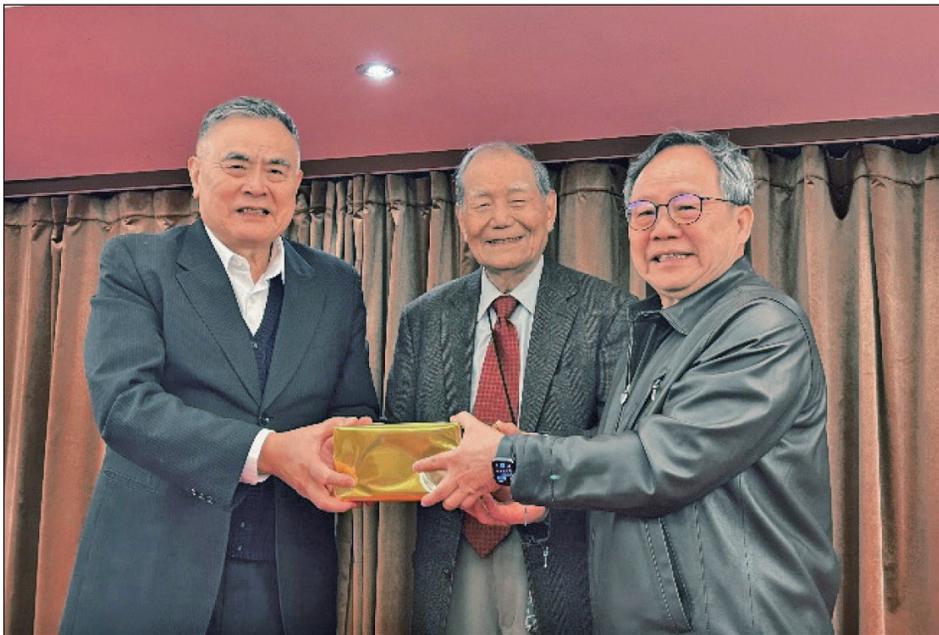


圖 5 第 58 屆理事長李偉賢校長及 59 屆理事長盧鏡來董事長交接



建築教育認證

第 22 屆臺灣建築學會建築教育委員會主任委員 / 洪育成

為使台灣的建築教育與國際接軌，具有國際競爭力，台灣需建立專業的建築教育認證制度。

台灣建築學會之**建築教育委員會**參考美國 **National Council of Architectural Registration Board (NCARB)** 之建築教育認證單位 **National Architectural Accrediting Board (NAAB)** 之制度，訂定台灣**建築教育認證制度**。並參考 **NCARB** 建築教育之 Education Guidelines，訂定台灣的**建築教育準則**。

建築教育委員會也從美國之 **NCARB** 系統性解讀美國建築師養成，包括 **NAAB (教育)**、**AXP (實務經驗)**、**ARE (考試)**。

主要目的

- 借鑑美國建築師養成制度，探討台灣目前制度問題點與可能的改善方向

- 減少目前台灣建築師執業所需的技能與建築師考試內容的差異
- 建立教育、考試、實習、執業相輔相成的有效制度
- 台灣建築師養成制度與國外制度在各不同環節的接軌可能性，如教育認證協定
- 提升未來台灣年輕建築師在國際上的競爭力

建築師養成的途徑與制度統整

建築師養成過程中，執照取得途徑和教育、經驗、考試等制度環環相扣。建築師是一個專業的行業，在美國要成為建築師必須經由專業的建築教育訓練取得學位，並在建築師事務所工作實習，累積必要的實務工作經驗，且經過認證之後才能參加建築師執照考試。通過建築師考試並取得執照後，才能執業。

美國的全國建築師註冊委員會 **National**



Council of Architectural Registration Boards (NCARB) 在建築師的專業教育，實務工作經驗，建築師考試及執照的取得流程中，扮演了統整性的角色。

制定建築執業的標準

美國的建築師協會 **AIA** 於 1857 年在紐約州成立，至今有 168 年的歷史。

AIA 在 1919 年建立了 **NCARB**，主管全美國建築師的專業教育，實務經驗，以及證照取得之標準與流程。其主要目的是為了確認建築執業能保護公眾的衛生、安全及福祉 (Protect the health, safety, and welfare of the public.)

美國建築師協會 **AIA** 與全國建築師註冊委員會 **NCARB** 合作，共同制定並規範建築執業的標準。

NCARB 除了制定建築執業標準，也致力於協助建築系學生畢業後，進一步成為執業建築師。**NCARB** 的服務涵蓋建築職業生涯的各個階段，包括**建築實務工作經驗計劃 (AXP)**、**建築師註冊考試 (ARE)**，以及獲取 **NCARB** 認證。

取得建築師執照

在美國，正式稱自己為建築師之前，必須先取得建築師執照。一旦擁有正式執照，建築師必需確認他能夠保護在建築環境中居住和工作的人的健康、安全和福祉。為使建築師的專業養成及訓練達成這個目標，

NCARB 訂定了具體標準，主要包括**學歷**、**實務經驗**、**證照考試**三個方面：

學歷

1940 年，美國建築師協會 **AIA** 和 **NCARB**，以及 **ACSA** 合作成立了 **National Architectural Accrediting Board (NAAB)**，主管美國的建築教育之規範與認證。

NAAB 負責評估美國大學系所的建築專業學程 (建築學士及建築碩士)，以確保畢業生具備進入建築專業的基礎教育。

成為建築師的第一步，是進入具有 **NAAB** 認證過，並可頒發建築專業學位與學程的學校系所。在美國的大學，符合 **NAAB** 認證的建築系所超過 120 所學校。但假如沒有從 **NAAB** 認證過的系所學位，仍可以從某些管轄區的替代途徑取得執照。

NCARB 為 **NAAB** 認證的建築系所訂定了建築教育標準 — 建築教育總計 150 學分，6 大類別要求如下

1. 博雅學科 Liberal Arts

總共需要 42 個學期制學分，其中至少 3 個學分必須為英文作文。其餘 39 個學分可來自人文學科領域的任一或多種領域課程。包括

- A. 溝通技巧
- B. 英語作文
- C. 人文和藝術
- D. 數學
- E. 自然科學
- F. 社會科學



2. 歷史、理論和人類行為 History, Theory, and Human Behavior

至少需修滿 12 個學期制學分小時，每種課程領域的最低要求如下所述。

剩餘的 3 個學期制學分小時可在歷史、理論與人類行為領域的任意一或多個領域課程中取得。包括

- A. 建築歷史和理論
- B. 都市主義歷史和理論
- C. 人類健康和行為

3. 設計整合 Design Synthesis

總共至少需要 40 個學期制學分，且每個類別至少 10 個學分。剩餘的 10 個學分可以在設計整合的一個或多個課程領域中取得。

設計整合被定義為數據或資料的收集、分析、綜合、判斷的運用，以及建築師用來理解、評估、整合和表達導向建築專案的想法發展和工具、方法交流。包括

- A. 基礎設計
- B. 調查設計
- C. 設計與建築整合

4. 建築技術 Building Technology

總共至少需要 27 個學期制學分，每個類別要求如下

- A. 結構系統
- B. 環境控制系統
- C. 建築材料和構造
- D. 建築設備和外殼系統
- E. 技術文件
- F. 專案成本分析
- G. 建築性能

5. 專業實務 Professional Practice

至少需要 12 個學期制學分，最低學分要求如下所示。其餘 7 個學分必須分配在各類別課程中，經營管理最多可計 3 個學分。包括

- A. 專案管理
- B. 經營管理
- C. 法律和法規
- D. 道德和職業操守

6. 選修課 Electives

選修課旨在鼓勵深度或專門領域的學習，包括但不限於輔修課程，可以來自任何上述五個主題領域或以下列出的領域課程。上述五個課程領域的最低學期制學分總計為 133 學期制學分，並還需要 17 學分的選修課程。

包括任何上述主題領域內的類別，或：
商業管理／電腦科學／工程學／室內設計／景觀建築／法律／公共管理／城市設計／規劃／構造／材料科學／研究類課程／政治學／其他經 NAAB 事先批准的課程

實務經驗

大學系所的建築教育雖是專業教育的一個環節，但只是起步，實戰經驗非得上戰場才能領會。所有的專業領域，例如醫學、法律、會計也都是如此。在醫學的訓練過程，除了完成學校的教育，還得需要經過 Intern（臨床實習）的訓練才可考照成為醫生。

在美國的醫學教育，不論是醫生、護士、藥劑師都得經過 Intern 的訓練才能考照，而且在他們的專業倫理認知裡，有經驗有證照的專業人員是有使命來教導及訓練剛出校門的 Intern。



主管美國建築師考照的 **NCARB** 開宗明義的提到，建築師對他所設計的建築及環境裡的使用者負有**健康、安全及福祉**的責任。建築師對使用者的責任就如同醫療人員一般，須將他們所服務的人的健康，安全與福祉列為優先考量。

為了達到完整的建築專業養成，美國建築師協會 **AIA** 及 **NCARB** 於 1976 年借鏡醫學教育的 Intern 制度，建立了實習建築師訓練制度 Intern Development Program (**IDP**)。 **IDP** 要求拿到 **NAAB** 認證建築學位的畢業生，必需在建築師事務所或 **NCARB** 認可的單位全職工作實習，並以事務所的主管作為實習督導 (**IDP Supervisor**)，在其監督之下完成 5,600 小時的實務經驗，並向 **NCARB** 登錄後，才有資格參加建築師考試 (**ARE**)。

IDP 規定 5,600 小時的實務實習需包含 4 個領域：

1. Pre-Design

所需時數：260 小時
含計畫書、可行性評估、預算等

2. 設計 Design

所需時數：2,600 小時
含初步設計、細部設計、法規檢討、施工圖、結構、水電空調、材料規範等

3. 專案管理 Project Management

所需時數：720 小時
含發包、工地視察等

4. 營運管理 Practice Management

所需時數：360 小時
含公司管理、領導統御等

IDP 實務實習的 5,600 小時中除了上述四個領域外，另有 1,860 小時可以參加 **NCARB** 認可的在職教育 (Continuing Education) 課程，或經由實習督導 (**IDP Supervisor**) 認可的教學研究，取得這些小時數的認證。

實習制度與考試內容 因為 **IDP** 的規定以及事務所的配合，使得畢業生在事務所工作三年之後，可以對建築專業的實務執行有全面的實際體驗。美國建築師考試 (**ARE**) 所考的內容就是 **IDP** 訓練的內容，所考的題目，幾乎就是過去三年實習過程中每日的演練與所面對的問題。

一般經由 **IDP** 實習訓練的考生，大都在畢業後 7 年左右通過 **ARE** 考試取得執照。也因此在美國很少聽說有人為了建築師考試，不工作而請假去補習班準備考試的現象。因為在美國事務所的 **IDP** 實習訓練，每日面對的業務與工作就是 **ARE** 考試要考的內容。

IDP 實務實習制度自從 1976 年開始，在美國實施了 40 年之後，**NCARB** 決定將「**建築實習計畫**」 Intern Development Program (**IDP**) 更名為「**建築實務經驗計畫**」 Architectural Experience Program (**AXP**)，並將 Intern「實習生」的名稱改為 licensure candidate「執照候選人」

AXP 制度引入及整體改革於 2016 年正式啟動。在 **AXP** 計畫中，原本的 17 個經驗類別被重新整合為 6 項經驗領域，以更貼近當代建築實務。



執照候選人必須在 6 項經驗領域獲得 3,740 小時的經驗才能完成 AXP。

AXP 6 項經驗領域總共 3740 小時，包括 ~

1. 實務管理 (Practice Management)

所需時數：160 小時

2. 專案管理 (Project Management)

所需時數：360 小時

3. 規劃與分析 (Programming & Analysis)

所需時數：260 小時

4. 專案規劃與設計 (Project Planning & Design)

所需時數：1,080 小時

5. 專案發展與文件製作 (Project Development & Documentation)

所需時數：1,520 小時

6. 施工與評估 (Construction & Evaluation)

所需時數：360 小時

在 AXP 的建築實務經驗訓練的過程中，事務所的主管（需是有美國證照的建築師）作為候選人的 Supervisor，負責審查和指導候選人工作，並確保其工作達到可接受品質標準的人。

候選人也可以找一位導師 (Mentor)，導師是一位忠實的顧問、教師或指導者。AXP 導師必須是註冊建築師，並對候選人的專業成長做出長期承諾。

候選人需要在執業建築師的監督下獲得經驗。AXP 提供了指導候選人取得和記錄專業經驗的架構，包含敷地計畫到專案管理。候選人也可在高中畢業或完成同等學歷後開始填報相關經驗。

國際接軌，互相認證

互惠對等協議 Mutual Reciprocity Agreement (MRA) 為建築師的執業打開了國際的大門，使得建築師在跨國業務的執行上更為順暢。

美國 NCARB 透過 MRA 協議，協助持有美國建築師證照者可以在以下國家申請互惠認證～加拿大，英國，紐西蘭，澳洲

這些國家在**建築教育、建築實務訓練及建築師證照考試**的內容與標準大致相符，因此美國的 NCARB 分別與 ROAC（加拿大），ARB（英國），AACA（澳洲），NZRAB（紐西蘭）簽訂互惠對等認證協議，使得美國的建築師可以在這些國家申請執業，這些國家的建築師也可以到美國申請執業。

國際接軌，互相認證，跨國合作會是未來建築執業的趨勢。台灣在**建築教育、建築實務操作以及建築師證照考試**，需要考慮未來的國際競爭與國際合作，與國際接軌是必然的趨勢，NCARB 的制度與標準值得台灣參考。訂定與國際接軌的**建築教育認證制度及建築教育準則**是台灣建築學會過去多年努力的目標。



台灣混凝土學會積極推動低碳與循環經濟趨勢下的規範變革

台灣混凝土學會秘書長 / 邱暉仁

因應全球氣候變遷及循環經濟趨勢，水泥與混凝土的組成原料將有所變革，包含水泥使用各式工業副產品替代石灰石、鐵礦、矽礦、燃料、或調整熟料比例，亦或混凝土使用多元膠結材輔助材料替代部分水泥等，相關混凝土規範勢必檢討與修訂。為此，台灣混凝土學會近年來推動規範檢討與修訂工作，主要概述如下：

混凝土氯離子規範修訂

1. 新增硬固混凝土水溶性氯離子規定

本會於歐昱辰主任委員的協助下，已完成修訂內政部國土管理署「建築物混凝土結構設計規範」中硬固混凝土之規範值，並已於 113 年 2 月 19 日以内授國建管字第 11308007841 號函勘誤「建築物混凝土結構設計規範」部分之規定，於第 19.3 節混凝土耐久性要求之混凝土中氯離子含量相

關規定進行了修正（如表 1、表 2），以參考 ACI 318-19 之硬固混凝土中最大水溶性氯離子含量限值，替代既往作為新建混凝土工程之施工品質控管之新拌混凝土中氯離子含量規定，即 CNS 3090 中對於新拌混凝土中最大水溶性氯離子含量限制值為 0.15 kg/m^3 。其中對於非預力混凝土，ACI 318-19 要求硬固混凝土中最大水溶性氯離子含量為相對於配比中總膠結材質量比，並針對不同暴露環境給予合適之含量限值，其中 C0 為乾燥環境，例如沙漠地區，因鋼筋腐蝕之疑慮甚低，因此允許更高的混凝土氯離子含量，該分級不適用於臺灣海島環境，而對於臺灣潮濕環境多屬於 C1 等級，其氯離子與總膠結材質量比上限皆為 0.30%；鄰近海濱之環境因有外來氯鹽之影響，則歸屬於 C2 等級，其氯離子與總膠結材質量比上限皆為 0.15%；對於預力混凝土，不論暴露程度，氯離子與總膠結材質量比上限皆為 0.06%。



表 1 勘誤前新版規範表 19.3.2.1 中混凝土中氯離子含量

暴露分級	最大 w/cm	最小 f_c' (kgf/cm^2)	新拌混凝土中最大水溶性氯離子 (Cl^-) 含量, kg/m^3		額外規定
			非預力混凝土	預力混凝土	
C0	N/A	210	應符合 CNS 3090「預拌混凝土」中有關「新拌混凝土中最大水溶性氯離子含量」之相關規定		-
C1	N/A	210			-
C2	0.40	350			混凝土保護層厚度

表 2 勘誤後新版規範表 19.3.2.1 中混凝土中氯離子含量

暴露分級	最大 w/cm	最小 f_c' (kgf/cm^2)	硬固混凝土中最大水溶性氯離子含相對於配比中 總膠結材質比 (%)		額外規定
			非預力混凝土	預力混凝土	
C0	N/A	210	1.00	0.06	-
C1	N/A	210	0.30	0.06	-
C2	0.40	350	0.15	0.06	混凝土保護層厚度

內政部國土管理署亦於 113 年 12 月 19 日以台內國字第 1130814258 號令頒布「施工中建築物混凝土氯離子含量檢測實施要點」，以逐步將硬固混凝土中最大水溶性氯離子含量限值納為工程勘驗報告之一環。另已建請內政部地政司將「成屋買賣定型化契約應記載及不得記載事項」中，原使用新拌混凝土氯離子規定，改成硬固混凝土的氯離子規範，一方面落實耐久性設計。

2. 調整新拌混凝土中水溶性氯離子之規定值

根據日本土木學會的混凝土標準示方書—施工篇規定，新拌混凝土中氯離子含量限

制為 0.3 kg/m^3 。而臺灣 CNS3090 標準歷經多次修訂，1994 年規定一般環境之新拌鋼筋混凝土構件 (RC) 中水溶性氯離子含量限制為 0.6 kg/m^3 ，需考量耐久性環境之 RC 為 0.3 kg/m^3 ，預力混凝土構件 (PC) 中水溶性氯離子含量限制為 0.15 kg/m^3 ；1998 年修訂將 RC 的環境考量去除，以最嚴格之 0.3 kg/m^3 為標準；2015 年進一步將 RC 標準制定為更嚴苛的 0.15 kg/m^3 ，故 RC 與 PC 新拌混凝土中最大水溶性氯離子含量限制皆為 0.15 kg/m^3 ，如表 3 所示；惟此水溶性氯離子含量向下修訂是因應早年部分不肖建商使用淡水河海砂，致生海砂屋問題及輿論壓力，較欠缺科學依據，應有修正空間。

表 3 新拌混凝土中最大水溶性氯離子含量限制整理

國家	規範	新拌混凝土中最大水溶性氯離子含量 (kg/m^3)
日本	混凝土標準示方書施工篇	0.30
台灣	CNS 3090 預拌混凝土	0.15



因應淨零碳排政策，本會在水泥公會及預拌混凝土公會的合作下，建請國家標準檢驗局於 CNS 61 中，I 型水泥氯離子含量由 240 ppm 提升至 350 ppm，以及 CNS 3090 中，一般混凝土氯離子含量由 0.15 kg/m³ 提升至 0.3 kg/m³。目前國家標準技術委員會已審查通過。預計近期將公告實施。

卜特蘭石灰石水泥混凝土使用手冊之制訂

國發會在 2022 年 3 月 30 日正式公布臺灣 2050 淨零排放路徑及策略後，同年底國發會再進一步宣布「淨零轉型 12 項關鍵戰略行動與計畫」，以落實推動 2050 淨零，並將 2030 年臺灣減碳目標上修至 24±1%，這數字比先前預定的 20% 來得更高，這也是政府有史以來時程最長、規模最大國家發展計畫。可見全世界及我國對淨零排放的高度重視及決心，營建產業自無法置身於外，面對淨零轉型的巨大浪潮，未來營建業應配合於各階段減碳。

有鑑於此，國內水泥生產業者多已推動包括綠能、鈣迴路技術碳捕捉、循環經濟及低碳水泥等減碳方案，預計於 2030 年減碳 25% ~ 27%，其中以卜特蘭以石灰石水泥取代傳統卜特蘭 I 型水泥為一快速有效的方法，目前已有多家水泥廠可量產卜特蘭石灰石水泥。

台灣混凝土學會以「結合從事混凝土材料與工程相關之產官學力量，共同促進混凝土科技提升及產業發展，增進工程品質」為宗旨，近年與國內多家水泥廠合作，積極驗證卜特蘭

石灰石水泥與傳統卜特蘭水泥的物理特性及化學特性，以及使用不同礦物摻料、不同骨材的施工性與耐久性影響，並已於 113 年 3 月將團隊以卜特蘭石灰石水泥應用於混凝土之研究成果編撰成「卜特蘭石灰石水泥混凝土使用手冊」，以使工程產業界能對卜特蘭石灰石水泥之應用有更進一步的瞭解。

該手冊內容說明卜特蘭石灰石水泥應用於混凝土時，兩種水泥混凝土之 40 分鐘坍損沒有很明顯的差異，卜特蘭石灰石水泥混凝土的初凝時間和終凝時間則較卜特蘭 I 型水泥混凝土快，初凝時間約快 0 ~ 1.7 小時、終凝時間約快 0 ~ 2.8 小時；在抗壓強度部分卜特蘭石灰石水泥混凝土的早期抗壓強度，較卜特蘭 I 型水泥混凝土為高，其中又以有添加爐石粉的組別更為明顯，而在 28 天與 56 天齡期時，卜特蘭石灰石水泥的混凝土抗壓強度與卜特蘭 I 型水泥相近或略高，而在較長的 91 天及 180 天齡期，則有部分組別較卜特蘭 I 型水泥為低，其差異約在 10% 以內且皆已高於配比之設計強度值。彈性模數試驗結果，大部分卜特蘭石灰石水泥的組別，其彈性模數較卜特蘭 I 型水泥組別為高，體積穩定性上無論是純水泥組別或添加爐石粉 35% 飛灰 15% 的組別，其混凝土的體積穩定發展趨勢非常接近。

至於環境耐久性部分，卜特蘭石灰石水泥混凝土浸泡硫酸鹽後的長度變化率，皆較卜特蘭 I 型水泥混凝土為高，但當混凝土中添加輔助膠結材料後，其浸泡硫酸鹽後的長度變化量皆會明顯降低，而卜特蘭石灰石水泥添加爐石粉 35% 飛灰 15% 後的長度變化量，則與卜特蘭 I 型水泥混凝土相當，顯示若工程有暴露於



硫酸鹽環境，可依相關規範進行膠結材料組合後之硫酸鹽溶液浸泡試驗並量測其膨脹率，以確保混凝土有足夠抵抗硫酸鹽侵蝕之能力。在貯鹽試驗之氯離子擴散係數試驗結果如圖 11 所示，當採用純水泥配比時，卜特蘭石灰石水泥混凝土的氯離子擴散係數與卜特蘭 I 型水泥混凝土相當，在添加 35% 爐石粉及 15% 飛灰後，卜特蘭 I 型水泥混凝土降低了 80%，卜特蘭石灰石水泥混凝土降低了 78%，此結果同樣顯示，添加爐石粉及飛灰，有助提升混凝土抵抗氯離子之耐久性能。

歐洲使用石灰石水泥已有近 60 年的歷史，依據歐洲水泥協會（Cembureau, European Cement Association）統計資料顯示，2000 ~ 2010 年間歐洲使用最多的水泥類型為 CEM II（Portland composite cement，卜特蘭混合水泥），約占總使用量之 60%，而 CEM II 水泥中又以卜特蘭石灰石水泥的使用量最高，約占 CEM II 水泥用量的一半，推估歐洲石灰石水泥的使用量約占全部水泥用量的 30%；美國約從 2020 年底開始大量生產石灰石水泥，當時卜特蘭水泥協會（Portland

Cement Association, PCA）推出了一個網站，透過討論混合水泥的應用和優點來促進其使用，並於 2021 年 10 月發布混凝土的碳中和路線圖，其中石灰石水泥即被列為減碳的重要途徑，而截至 2024 年 2 月為止，美國各州皆已同意使用石灰石水泥。

國內在產學的努力下，已建立「卜特蘭石灰石水泥混凝土使用手冊」，將有助於工程師在進行混凝土工程的減碳設計與施工時應用，也讓混凝土產業的 2050 淨零碳排目標更加接近一步。

近年來台灣地區混凝土品質有長足的進步，但是泵送施工管理上則需共同來合作來改善，尤其是泵送人員的教育訓練與人員、泵車的認證制度建立。日本全國混凝土壓力輸送商業協會聯合會透過產業安全衛生法規定的特殊教育、完成特殊教育者的再教育、舉辦的全國統一安全技術研討會、混凝土泵送核心技術人員的培訓、合格混凝土泵送施工技術人員的施工推廣、推動混凝土泵車法定檢驗等，值得我們台灣來效法改進。

表 4 卜特蘭石灰石水泥混凝土第三方驗證結果彙整表

項目	石灰石水泥 (PLC) 混凝土 vs. I 型水泥混凝土
工作性 (坍度、坍損)	與 I 型水泥混凝土相當或 P 略佳
泌水率	與 I 型水泥混凝土相當或 P 略佳
凝結時間	PLC 混凝土較短，初凝約減少 0 ~ 1.7 小時，終凝約減少 0 ~ 2.8 小時。
抗壓強度	PLC 混凝土 3 天及 7 天抗壓強度略高於 I 型水泥混凝土，28 天後則相當。 添加 35%S+15%F 和 50%S 表現更佳
彈性模數、劈裂強度	與 I 型水泥混凝土相當或略佳
乾燥收縮、自體收縮	與 I 型水泥混凝土相當
抗硫酸鹽能力	PLC 混凝土略差，同 I 型可透過添加礦物摻料改善
抗氯離子能力	與 I 型水泥混凝土相當
不同粒料之影響	與 I 型水泥混凝土一致



農田水利金質工程—灌溉過去、串連未來：福馬圳百年水脈翻轉的共好工程

農田水利署彰化管理處三等助理工程師 / 施漢鵬
農田水利署建設組工程員 / 陳彥儒
農田水利署建設組科長 / 鍾易達
農田水利署建設組組長 / 孫維廷

關鍵字：農田水利署、福馬圳、金質獎

一、前言：福馬圳的回憶與轉機

彰化「福馬圳」開鑿至今三百餘年，源自烏溪，灌溉彰化市、和美、線西及伸港等地，早期因水流湍急而有「惡馬圳」之稱。昔日的圳路，不僅是農田的生命線，也是居民洗衣、戲水、垂釣的日常場域，承載著一代代人的生活記憶。隨著都市化推進，圳路護岸老舊、水質惡化，親水空間逐漸失落，居民與學童難以親近，對水岸生活的懷念與重建渴望日益濃烈。本工程位於糖友里與百年歷史新庄國小之間，承載著生活、人文與灌溉多重意義。如何在有限空間中重塑人與水的連結，不僅是技術挑戰，更是一場記憶與未來交織的重生旅程。

二、跨越挑戰，實踐願景

2.1 基地環境的歷史深度與人文情懷

圳路北岸為彰化縣和美鎮糖友里住宅區約 5,200 人居住，日據時期為新高製糖公司中寮製糖廠所在地，從事蔗糖加工，因取其與糖親之如友而得名。圳路南岸為百年歷史古校新庄國小，校園內保存著樹齡超過百年的兩棵珍貴老樟樹，依舊翠綠茁壯，陪伴了無數新庄學童的成長與學習，悠久的創校歷史見證著歷代的成長與記憶，更是社區深厚情感的重要象徵（圖 1）。

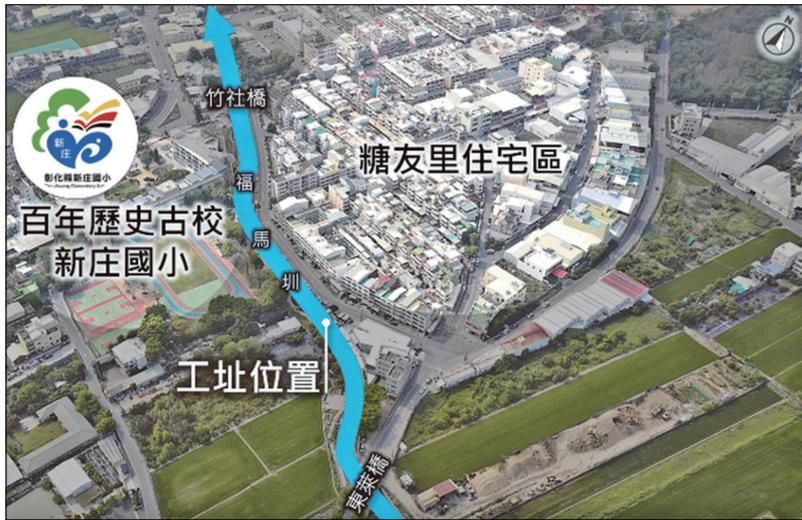


圖 1 工程基地位置

2.2 施工難題與 40 天的極限挑戰

福馬圳肩負北彰化農田灌溉，並支應彰濱工業區調度用水，為地區水資源的重要生命線（圖 2）。工程基地受限於空間狹

窄、占用問題及位屬交通要道，施工動線規劃困難，且每年僅有歲修期 40 天可進場施工，稍有延誤即影響春耕灌溉與產業運作，施工品質與進度雙重壓力，對工程團隊是一大考驗。



圖 2 福馬圳灌溉範圍



2.3 以人為本，重建人水連結的目標願景

農田水利署自 109 年 10 月成立，戮力推動農田水利設施改善，農田水利署彰化管理處從 109 年起分年分期改善福馬圳系統，針對本區段擬定提高圳路輸水效能、圳旁隙地空間活化及賦予圳路教育意義等 3 項目

標，並以「歷史為經，美學為緯」為願景，期望打造出北彰化圳路新生活圈，營造以人為本，重視人與福馬圳的連結，希望重塑福馬圳的親水價值，透過綠化步道及教育設施，讓居民與學生得以重拾昔日的親水生活，重新打造北彰化居民引以為榮的新生活圈（圖 3）。



圖 3 工程目標

三、從設計出發，打造居民與圳路共好的生活

3.1 通學也能散步：全齡步道串起城市與自然

為提升圳路輸水效能並兼顧環境友善，工程團隊透過三維立體模型清楚呈現改善方案，俾利居民與學校瞭解設計內容，即時反映意見並達成共識，施工同時穩固結構並落實生態對策（圖 4）。依循居民參與成果，活化福馬圳旁原本破碎閒置的空間，鋪設串聯

社區與校園的全齡化綠廊步道，配合新設新庄國小北側門（圖 5），提供安全便捷的通學新路徑，有效紓解原單一出入口交通壅塞問題。如今，步道不僅是學童安心通學的走廊，也成為居民日常散步、親近水圳的重要生活軸線，讓城市與自然重新交融，復甦了福馬圳的人水情感。

3.2 藍綠基盤編織軸帶：創造共同公共場域

工程團隊積極與當地居民、糖友里社區及新庄國小師長深入溝通，凝聚出地方需求

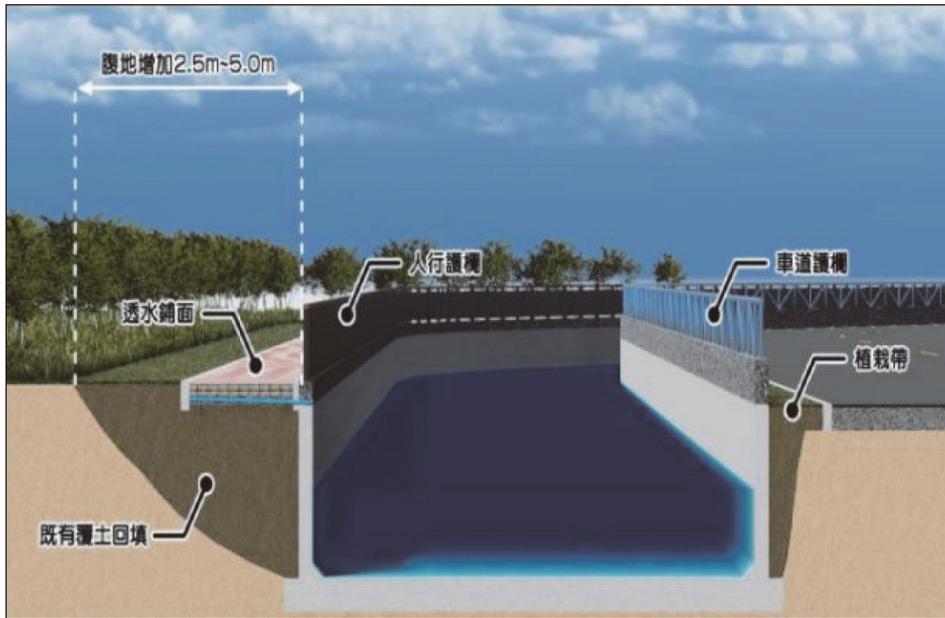


圖 4 使用三維立體模型以利瞭解工程佈置及完工樣貌



圖 5 新建步道及造型版橋成為學童安全通學環境



圖 6 積極與地方溝通、瞭解需求

與願景（圖 6），並設計版橋與摩斯密碼座椅，兼具交通安全與趣味性，迅速贏得居民與學童喜愛。利用綠廊步道旁隙地設置教學農園，提供師生共同體驗務農辛勞，結合食農教育課程，深化環境與農業的連結，讓圳路不僅輸水，更輸送生活文化與永續價值（圖 7）。

3.3 走讀古圳歷史文化：回溯都市文明源頭

結合新庄國小的書香氣息與地方歷史底蘊，本工程在綠廊步道上下游腹地設置入口廣場與戶外迷宮，以及設立多面生動的歷史解說牆（圖 8），讓居民與學童能於日常中走讀古圳故事、理解地方發展脈絡。工程團隊亦



圖 7 學童於食農教育場域體驗耕種樂趣



圖 8 入口廣場歷史解說牆

透過立體圖說與現地協調，將社區需求轉化為具體設計行動，使福馬圳成為兼具教育、休憩與文化傳承功能的生活水岸，強化社區認同感，讓圳路故事在新世代中繼續流動。

3.4 節能也美學：打造會呼吸的永續廊道

為推動公共工程落實節能減碳理念，建構優質永續之公共建設，本工程設計時納入相關工法，以結構設施符合設計強度為原則，達成減少鋼筋混凝土用量之目標，例如以透水鋪面工法減少 17% 鋼筋混凝土用量；步道鋪面採用紙塑透水孔模具及透水磚進行設計，並於步道下方設置 4 吋 HDPE 透水管，高步道洩水效率；人行版橋使用旋楞鋼管設計，除滿足結構強度，亦可減少 15% 鋼筋

混凝土用量，另於步道沿線增設太陽能路燈及透空欄杆，減少金屬材料用量及每日用电量，並新植複層植栽 1,435 平方公尺，提供陸域生物棲地同時增加吸碳效果，以及現地土方挖填平衡固碳、降低碳足跡，合計減少 310.5 公噸之二氧化碳排放，致力落實公共工程節能減碳（圖 9）。

四、工程蛻變新樣貌，社區共享新未來

4.1 童趣與創意共融：摩斯座椅與吊橋童話

入口廣場設置摩斯密碼造型座椅，排列出福馬圳（FU-MA-ZUN）字樣，結合植栽與童趣元素，吸引民眾認識圳路文化。配合

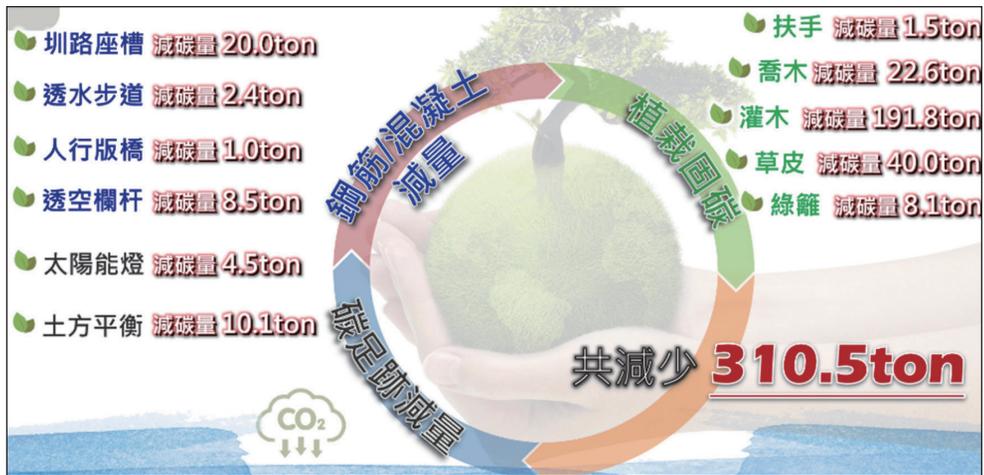


圖 9 落實公共工程節能減碳



圖 10 造型座椅配合摩斯密碼解謎增加親子互動

新庄國小北側新校門規劃，工程團隊設置版橋，造型取自城門吊橋概念，並以鮮豔鋼索增添視覺趣味，不僅緩和傳統版橋生硬感，亦有效分流通學人潮，大幅提升交通安全，並為學童上下學增添更多樂趣（圖 10）。

4.2 爭分奪秒的 40 天挑戰：歲修期內如期完工

為保障北彰化春耕及彰濱工業區供水無虞，工程必須於每年僅有的 40 日歲修期內



完成主體施作。施工前，彰化管理處即密集邀集設計單位與地方民意代表與耆老溝通，掌握需求並精確安排施工動線。施工期間同步分上下游兩處作業，靈活運用模組化鋼模、渠底施工動線，並配合噪音管理調整作業時段，最終僅花 35 天即完成主體工程，成功確保第一期作農田順利春耕灌溉。

4.3 色彩美學與生態植栽並行：打造視覺與生態雙贏廊道

環境營造融入馬賽克及十字色彩分析，硬體設施以低彩度、暖色系為原則，導覽設施及版橋採高明度、冷色系來突顯，營造柔和亦協調之視覺景觀，且依施工前所盤點計畫周邊 1 公里內物種資料，補植苦楝、春不老及狼尾草等誘鳥、蜜源植栽，使農田水利設施具安全且高輸水效率，亦兼顧生態永續性及柔和視覺景觀（圖 11）。

4.4 邊界清晰，通學無障礙：貼心動線設計

藉由工程釐清水利用地範圍及占用排除，公、私有地以新設步道、植栽予以劃分，亦可作為兩者緩衝區帶。新設步道採緩坡無障礙方式串聯既有路廊，配合開闢校門及新設版橋，改善以往學校僅由西側單一校門出入，所產生之人車壅塞情形，達到通學車潮分流、提高學童安全性，有效降低車禍發生率（圖 12）。

4.5 喬木與生態系統共生：友善工法保護自然環境

經套疊相關生態圖資，本工程未涉及生態敏感區域，惟區域仍有既有喬木為保護對象，爰本工程遵循「農田水利署生態檢核注意事項」之規定，辦理生態檢核作業，採「迴避」、「縮小」、「減輕」及「補償」四大措施因應，施工前即對圳路旁既有喬



圖 11 環境色彩分析



圖 12 水利地界確認



圖 13 落實生態友善措施

木、棲地進行保護，謹慎規劃渠道、步道及圍牆之施設位置，並考量施工動線，以求保持喬木根系透氣，精準放樣以維持步道線型，迴避既有喬木及棲地，並妥為防護等等（圖 13）。

4.6 讓維護成為日常：建立公私協力的永續機制

為利後續設施、植栽維護管理，設計噴灌系統減少維護人力，並制定智慧灌溉操作



手冊（SOP）及環境維護管理手冊（SMP）建立完善管理機制。此外，為讓相關設施持續發揮效益，與新庄國小簽訂合作備忘錄 MOU，偕同糖友里社區發展協會、厚達教育機構共同維護本工程相關設施，以公群力、公私協力、跨域共同合作，確保相關設施運作及環境整潔，永續經營民眾安全通行、休閒遊憩及環境教育之舒適場所（圖 14）。

在工程的最後階段，當地居民與學生首次踏上這條融合自然與設計的綠廊步道時，臉上流露的欣喜成為最動人的回饋。過去因圳道失修、水流湍急而遠離的「惡馬圳」，如今化身為安全宜人、兼具教育與休憩功能的社區水岸空間，不只是農田灌溉的命脈，更是居民記憶與生活的延伸。福馬圳的重生，不僅是硬體改善，更象徵著人與水、土地與文化之間重新建立的連結。



圖 14 與新庄國小簽訂維護合作備忘錄



五、工程成效肯定，品質備受認同

本工程為福馬圳幹線系統改善的最後一哩路，結合環境永續、社區參與與文化再生三大主軸，成功實現「如期施工、品質卓越、效益具體」的政策目標。依據居民的參與意見精心規劃，善用圳旁閒置空間，建設融合自然景觀的綠廊步道，結合食農教育課程，深化學童對農業與環境的理解認同，拉近都市與農業距離，串聯糖業、灌溉與地方人文記憶，讓圳路不只是水利通道，更成認識土地文化的場域。

工程導入節能減碳設計，同時每年減少渠道輸漏水損失 27,160 噸，穩定灌溉 2,682 公頃農田，提高農業產值約 683 萬元，減少維護成本約 150 萬元，展現公共工程在永續環境與農業經濟上的實質貢獻。本案工程品質獲「公共工程金質獎品質優良獎（優等）」與「農業部優良農業建設工程獎（優等）」肯定，不僅展現工程團隊專業能力，更深獲地方居民與使用者高度肯定，成為水利工程融合創新、文化與效益的代表案例（圖 15 至圖 17）。



圖 15 公共工程金質獎公共工程品質優良獎頒獎



圖 16 新庄國小於入口廣場舉辦環境教育活動



圖 17 工程具體效益



113 年台灣鑛冶工業之進展

中國鑛冶工程學會理事長、國立臺北科技大學校長 / 王錫福

一、前言

中國鑛冶工程學會團體會員包括：鋼鐵、煉油、電力能源、水泥、石材礦產、資源回收等產業，涵括了國內最主要的幾個碳排放來源，隨著科技進步與淨零碳排目標日益受到重視，本會持續關注會員廠商如何發揮鑛冶專業，協助產業提升能源使用效率、減少碳排放，也是本會持續推動的核心工作。本會自 111 年起連續三年均以「淨零排放」作為年會主題，也在本屆會期中成立「淨零碳排永續發展專門委員會」推動相關工作，期望能夠集聚產業在淨零碳排工作上的執行經驗、並與會員廠分享政府在法制面的相關因應措施。

隨著全球低碳轉型與綠能發展趨勢，台灣積極推動能源自主與低碳轉型。113 年，面對能源進口依賴，政府強化綠色能源與國際合作，並促進智慧產業升級與永續發展，

力求提升經濟競爭力與環境可持續性。據經濟部地質調查及礦業管理中心資料指出，113 年臺灣地區進口之礦產品總值為新臺幣 1 兆 5,899 億 946 萬元，較前一年減少 5.3%；進口總量為 1 億 6,138 萬 6,148 公噸，微幅增加 0.34%。其中以能源礦物進口值最高，達 1 兆 4,451 億 4,474 萬元，年減 6.13%，進口量則為 1 億 1,694 萬 5,767 公噸，略減 0.93%。金屬礦物與工業原料礦物進口則呈現雙增趨勢，金屬礦物進口值與進口量分別增加 3.52% 與 4.72%，工業原料礦物亦分別增加 5.24% 與 2.76%。主要進口品項包括煤、原油、天然氣及鐵礦砂、鹽、卵礫石等。113 年礦產品出口總值為新臺幣 378 億 9,717 萬元，出口總量為 115 萬 1,502 公噸，分別較前一年減少 12.74% 與 8.76%，出口品項以金屬礦物與工業原料礦物為主。

本文將針對 113 年我國油氣礦業、鋼鐵工業、非鐵金屬工業、粉末冶金工業之進展



情形進行重點摘錄。此外，中國鑛冶工程學會開始成立於民國 15 年，即將在 115 年迎來百年會慶，本會自 113 年起成立「百周年慶籌備小組」，陸續展開包括百年 logo 設計、以及各項出版、活動、展覽等工作規劃，屆時歡迎各專業學會共同歡慶。

二、油氣礦業

臺灣自產能源有限，主要依賴進口化石能源。面對能源需求增長及經營環境挑戰，台灣中油公司積極執行政府「深化能源供應安全機制，推動國際能源合作」政策。其策略以「積極擴充、集中聚焦」為基礎，朝「拓展國外、精實國內」、「探勘併購、齊頭並進」及「培育人才、開創新局」等目標邁進，期望提升自主能源比例，並多元發展低碳能源等轉型領域。為配合國家綠能發展及淨零排碳政策，推動地熱發電及碳捕存再利用等轉型工作。期望能逐步提升自主能源比例，朝低碳能源發展。

為配合國家綠能發展及淨零排碳政策，台灣中油公司推動地熱發電及碳捕存再利用等轉型工作，民國 113 年完成宜蘭縣員山 — 大同地區地熱地質調查，同時在宜蘭土場完成鑽探 19 號地熱井，並持續進行 20 至 22 號井的鑽鑿作業及 5.4MW 地熱發電廠建設工程，更於同年 10 月在員山地區啟動了台灣第一口深層地熱井鑽探計畫，未來還計畫在台灣其他具有潛力的深層地熱區域及大屯火山區進行鑽探。在碳封存方面，持續推動「鐵砧山碳封存示範計畫」，另在臺灣西部海域碳封存場址評估臺西盆地為最佳，將進行場址特性分析，作為後續可行性研究及開發工程規劃。

1. 國內外油氣探勘與開發：

自民國 101 年起與哈斯基能源國際有限公司合作進行臺南盆地部分深水礦區探採。至民國 113 年，已完成二維及三維震測資料採集、處理與解釋，並確認該礦區具油氣潛能。民國 114 年起，將進行礦區南部三維震測計畫，以及整體油氣評估與初步鑽井設計。

2. 國外油氣探勘與開發：

重大國外礦區進展包括：尼日 Agadem 礦區自 3 月起外輸原油，惟受政經局勢影響產量波動產量較不穩定。澳大利亞 Ichthys 礦區維持穩定生產並如期進行二期開發計畫，獲利前景可期；澳大利亞 Prelude 礦區持續生產 LNG 供臺灣內需能源市場；查德奧瑞油田、美國 Guardfish 礦區及厄瓜多 17 號礦區維持穩定生產。民國 113 年取得澳大利亞 AC/RL7 礦區 2.625% 工作權益，並預計於民國 114 上半年完成礦區交割。

3. 持續推動地熱發電及碳封存示範場域：

民國 113 年配合執行國家綠能發展政策，完成宜蘭縣員山 — 大同地區地熱地質調查面積共計 72 平方公里，同年 10 月，於員山啟動台灣第一口深層地熱井鑽探計畫。未來計畫於其他潛力區域及大屯火山區進行鑽探，探持續深耕台灣地熱勘探與開發，並積極推動綠色能源轉型。

三、鋼鐵工業

113 年全球經濟仍面臨高通膨與高利率的衝擊，隨下半年通膨逐步緩解，美國聯準會啟動降息循環，全年降息 1%，有助於支撐用鋼需求。臺灣的公共建設投資達新台幣 7,400



億元，內需市場回溫，推動經濟成長率達 4.59%，鋼材需求回升，基礎建設、製造業與汽車產業需求穩定，鋼鐵市場逐步回穩，鋼廠減產與去庫存調整助推供需平衡。

展望未來，國際貨幣基金（IMF）預測 2024 年與 2025 年全球經濟成長率為 3.3%，顯示穩健增長。鋼鐵產業將朝向高值化、低碳轉型發展，電爐與氫能煉鋼等低碳技術將成為未來重要課題。美國政策調整與貿易保護主義持續升溫，對鋼市構成挑戰。需求方面，世界鋼鐵協會預估 114 年全球鋼鐵需求將穩定成長，總需求量達 17.715 億噸，較 113 年成長 1.2%。新興市場的復甦將帶動基礎建設與製造業需求，穩定鋼材消耗。

在供應端，2023 年全球粗鋼產量達 18.394 億噸，較 2022 年減少 0.9%。中國大陸繼續減產，2023 年粗鋼產量為 10.051 億噸，減少 1.7%，未來將進一步推動產業減產與重組，緩解供過於求壓力。

臺灣方面，政府啟動「兆元投資國家發展方案」，預計吸引大量資金投入基礎設施建設，並預測 2024 年經濟成長率為 3.14%，景氣將穩步回升。

1. 國內市場供需

(1) 粗鋼、鋼材產量：113 年粗鋼產量 1,919.5 萬公噸，較 112 年 1,918.3 萬公噸增加 0.1%。其中高爐廠產量 1,141.1 萬公噸，增加 0.7%，電爐廠產量 778.4 萬公噸，減少 0.8%。鋼材產量 2,244.2 萬公噸，較 112 年 2,318.0 萬公噸，減少 3.2%。

(2) 鋼材、半成品進出口量：113 年鋼材進口量 488.9 萬公噸，增加 37.9%；出口量 886.5 萬公噸，減少 3.9%。半成品（扁鋼胚 + 小鋼胚）方面，113 年進口量 320.3 萬公噸，減少 5.5%；出口量 8.60 萬公噸，增加 35.3%。

(3) 粗鋼、鋼材表面消費量：113 年鋼材表面消費量 1,846.66 萬公噸，增加 5.5%。

2. 新技術、新產品開發與製程改善成果及與鋼鐵業者合作情形

(1) 高值手工具鋼：

針對高強韌鋼材的應用需求，中鋼運用微合金元素鈮（Nb）的細晶增韌效應開發一系列新鋼種，包括泛用型鋼 50Nb35，讓一般手工具也能增加抗扭能力及耐疲勞特性，及高階手工具用鋼 41Nb40、61Nb50 可提供更強韌的特性與疲勞壽命。後續中鋼將擴大推廣以爭取市場訂單。

(2) 綠色能源及家電用鋼：

隨著全球環保意識提升及碳中和趨勢，熱浸鍍鋅電腦及伺服機殼品牌廠提出高再生鋼材需求，透過冶煉技術提升，突破關鍵瓶頸，建立有別以往的轉爐增用廢鋼生產技術，成功開發出再生料占比超過 60% 的 RC60 鍍鋅鋼品，並順利取得 UL 2809 證書。

(3) 超能效電磁鋼：

因應電動車驅動馬達之需求，開發極薄厚度之電磁鋼，具備極低鐵損、高強度，以滿足馬達低損耗、高轉速之高效能運轉。透過關鍵技術的建立，已開發出具有更低鐵損、更高磁通、更高強度之極薄尺寸電



磁鋼，如 20CS1150FY、25CS1150AFY、20CS1100AFY 等多項產品，且成功導入電動車大廠的使用，使中鋼成為重要的電磁鋼供應商。

四、非鐵金屬工業

1. 鋁產業市場應用與概況：

根據國際鋁業協會（IAI）統計，2024 年全球原鋁產量達 7,276 萬公噸，年增 2.9%，其中中國大陸佔比最大。2024 年全球原鋁消費量為 7,186 萬公噸，年增 2.2%。LME 原鋁價格在 2025 年 1 月為 2,592 美元／公噸，較去年同期上漲 15.7%。台灣 2024 年鋁錠產量增長 27.6%，進口量為 56.5 萬公噸，出口量 8.2 萬公噸。根據聯合國環境署（UN Environment Programme）的估算，建築業佔全球碳排放量高達 38%。因應 ESG（環境、社會、企業治理）趨勢，建築業綠色轉型已不可避免。

2. 鋅產業市場應用與概況：

台灣 2024 年鋅合金進口量約 19.6 萬噸，高於 2023 年鋅原料進口量約 17.1 萬噸，其市場需求量亦有明顯減增之趨勢。具有權威的國際市場調查公司：Lucintel 表示，鋅全球市場正在持續成長，預計到 2030 年，全球鋅市場預計將達到 901 億美元，該市場的主要促進因素是印度、巴西和印尼等新興市場對鍍鋅鋼板的需求不斷成長以及基礎設施的發展。智慧型手機、電動車、輕度混合引擎和電網儲存等利基應用的需求不斷成長將推動全球鋅市場的發展。

3. 鈦產業市場應用與概況：

2024 年我國在鈦材進口量為 5,350 公噸，與上年同期比大幅成長 45%；出口量 3,059 公噸，與上年同期比亦大幅成長 56%，依據金屬中心資料顯示 2024 年主要出口國家之鈦金屬及製品出口值中，前五名依序為美國、中國大陸、英國、日本以及法國，主要進口國家前五名依序法國、美國、德國、中國大陸、英國以及韓國。

依據金屬中心分析台灣鈦金屬產業在下游應用主要分為製造業與民生休閒領域。製造業主要涵蓋航太、醫療生物科技和海洋工程等領域，需求以鈦板、鈦棒、鈦管為主。民生休閒領域則涉及高價精品消費需求，如鈦合金邊框的高階智慧型手機及運動器械等。

五、粉末冶金工業

回顧 2024 年全球經濟成長率為 3.3%，粉末冶金產業相較 2023 年變化不大，通膨、戰爭、區域經濟、地緣政治等對台影響仍持續。反觀資訊通訊 IT、人工智慧 AI 產業成長則較為強勁，反全球化（區域性經濟）的現象，在 2024 年底才逐步的緩解，美中貿易政策、美國關稅變動、歐盟碳關稅（CBAM）等外部環境，讓全球供應鏈重新洗牌。台灣對中貿易因關貿協定不確定性與大陸內捲趨勢影響，加上美、歐等地政策調整，產業面臨多重挑戰。

大環境對粉末冶金產業的發展也同樣產生了變化，隨著燃油汽車的銷售受到電動車成長的影響而減少，歐美一些粉末冶金製造



成本增加，在需求減少的情況之下，陸續出現關廠，或停線，使得部分供應鏈出現重整，或整合 GKN 併入 AAM 亦為北美重大供應鏈整合案例，值得觀察。技術層面，AIoT 智慧工廠、3D 列印與積層製造技術導入，推動轉型，應用已擴展至航太、無人機、機器人等領域。因應碳排趨勢，氫能、SOFC 等潔淨能源也成為粉末冶金新機會。

汽車市場上，由於充電樁及電池續航力、壽命的議題，使得油電混合動力車成為過渡到純電車的新主流，純電車反而被分散注意力。粉末冶金應擴大研發佈局，強化齒輪傳動、輕量化、高強度應用，尋求與環境、能源、AI 產業的整合。展望未來，唯有技術創新、拓展應用，建立競爭力，台灣才能突破製造瓶頸，重現粉末冶金的榮景。

六、材料技術研發

2024 年我國在金屬材料領域之相關研究，除了著重於運輸、生醫等高附加價值製品之相關應用外，亦配合國家促進產業創新以及國際科技發展潮流趨勢之政策，持續針對循環經濟、低碳材料及製品、高值化金屬製品與輕量化材料及構件等議題之相關產業，聚焦其所需之金屬材料與製程之自主開發量能建立，其中主要的成果包括：智能機器人多層道焊接技術、高純鋁材再生純化技術、真空碳氮共滲表面處理技術、伺服沖壓／鍛壓成型技術、輕量化材料如碳纖維材、摩擦攪拌銲接等技術研發。這些技術已成功輔導國內業者導入於電動車、太空／航太、半導體、國防、5G 訊號量測、重電及建築領域。

此外，先進陶瓷與無機半導體材料是現代科技的重要基石，涵蓋各種高性能材料的應用，如碳化矽材料的生產技術優化為高功率電子與光電元件技術的發展提供了強大材料技術支撐；鋁鈦合金濺鍍靶材則為次世代通訊技術進步奠定了基礎；超硬材料技術進步，促進了高負荷工業應用的發展；而無機聚合物技術則為建材領域的綠色轉型帶來新契機。

面對全球資源與能源挑戰，礦業也導入循環經濟與低碳技術，以實現資源最大化利用與環境衝擊最小化。刨除料全循環技術減少原始礦產開採與砂石進口依賴；固態磨料高值循環技術提升廢棄磨料回收再利用率；創新高效率／低成本太陽光電技術則可作為礦區的主要電力來源，讓礦場邁向「零碳採礦」。從道路廢棄物再利用、半導體廢料回收及再生能源採礦等不同層面，展現了資源循環與科技創新的重要性。隨著這些技術的推廣與應用，不僅可降低對原生資源的依賴，也將提升礦業的綠色競爭力，為全球永續發展目標做出貢獻。

透過持續製程優化與材料研發，這些鑛冶相關研發領域不斷突破，滿足現代科技日益增長的性能需求。而隨著技術的持續突破和應用領域的拓展，材料技術將在未來高性能電子、工業製造及永續建築等領域扮演更為重要的角色。



機場捷運延伸線整合兩套號誌系統的驗證測試

中興工程顧問公司機場捷運延伸線監造工程處經理 / 李文杰
中興工程顧問公司機場捷運延伸線監造工程處副經理 / 陳永森
中興工程顧問公司機場捷運延伸線監造工程處號誌主辦工程師 / 劉少宇
中興工程顧問公司機場捷運延伸線計畫總顧問 / 李鐸
台北市捷運工程局副局長 / 陳景池
交通部鐵道局北部工程分局副分局長 / 王村竹
交通部鐵道局北部工程分局第五工程隊隊長 / 劉建宏

關鍵字：新舊號誌系統整合、新舊系統的邊界概念、雙號誌系統相互監視且各自獨立的控制權限

摘要

桃園機場捷運（簡稱機捷）延伸路段 106 年 3 月正式營運通車至今，初期網路僅提供 A1 台北車站至 A21 環北站的營運服務，後續機捷持續往南延伸新建至 A22 老街溪站時，面臨原號誌系統廠商（英商英維斯）被德國西門子併購之困境，在未能延用原號誌系統的前提下，延伸路段必須採用另一套新的號誌系統，於此同時，為達成服務旅客一車到底的營運目標，新、舊路段的兩套號誌系統間的整合成為本工程最重要的課題。

雙號誌系統整合過程中，除了必須保持原線路段 A1 台北車站至 A21 環北站的正常營運，同時需建置延伸路段 A21 環北站至 A22 老街溪站的新號誌系統，以及既有 20 列普通列車的改造作業，以利列車可以分別在新、舊號誌系統的路段正常運行。核心機電工程自 108 年 10 月 15 日開工至 112 年 7 月 31 日順利達成 A22 站商轉營運通車，未來將接續延伸至 A23 中壢車站。

主線上建置雙號誌系統之操作運轉，首要重點在於雙號誌系統間界面的整合，除必



須先克服新、舊號誌系統軟、硬體界面整合的問題外，更要作好與營運單位的溝通。前者尚可透過合約規範及新號誌廠商的經驗逐一克服，後者要如何取得營運單位針對新、舊號誌系統本質上差異的認知與理解，尤其營運單位早已熟悉舊的號誌系統且已營運多年，現因延伸路段必須同時併用一套全新的號誌系統，無論在操作運轉的習慣與熟悉度上，都面臨著適應上的挑戰。這段難得的經歷是國內前所未見的捷運機電整合案例，本文將藉由新建過程中獲取的經驗，分享雙號誌系統整合過程驗證重點與尚待克服之課題。

一、前言

此計畫最艱鉅的挑戰在於系統上的整合，依據合約之規定「新建系統對舊有系統需滿足所有相關整合、相容之責任」，所以我們需要面對一個以小區段併入大區段的整合問題；對機捷延伸線而言，新增路段係以舊路段 21 個營運車站再往南延伸的工程，從新舊號誌系統的自動列車監控（ATS，Automatic Train Supervision）所管轄的路段範圍來看，舊號誌系統 ATS 所管轄的範圍佔了 98.5%（自 A1 站至 A21 站，約 53 公里），而新的號誌系統 ATS 現階段所管轄的範圍只佔 1.5%（自 A21 站至 A22 站，約 0.8 公里）。

當列車由 A1 站往南行駛並停妥至原終點站 A21 站，須進行新舊號誌系統的切換，方允許取得列車繼續往新增路段前進之授權，反之當列車由新路段返回 A21 站，號誌系統須再切換為舊的號誌系統；因此 A21 站在新舊號誌整合上，作為非常重要的界面整合車

站，新舊號誌系統的管轄權在 A21 站如同有一條無形的邊界（Boundary），新的號誌系統管轄著自己的領土（Territory）A21 至 A22 區間，舊的號誌系統仍管轄著既有舊路段 A1 至 A21 區間，如何讓兩套號誌系統須相互溝通及監視，且又有各自獨立控制的權限，是確保雙號誌系統安全上最重要的一環。

機捷延伸線的新舊號誌系統整合過程，從初始面臨要如何在既有普通列車上加裝另一套車載號誌系統的困難，至最終的關鍵也是最困難的兩套 ATS 間的整合，此種的整合模式因為沒有前例可循，只憑著建造團隊秉持「相信」的信念一路前行，前言爬梳至此，相信曾有捷運號誌經驗的先進們，心裡是否會想著「真的有辦法達成」嗎？

二、新增號誌系統的設計概念

2.1 新號誌系統採更進化的架構說明

新號誌系統由德國西門子設計，在設計階段即碰到兩個整合上課題，首先由於舊號誌系統是由英商英維斯設計，所以新號誌系統必須處理新舊號誌系統間的整合，以達到安全且自動化的功能；其既有電聯車是由日本川崎重工製造，既有電聯車的加減速、車內最終電氣線路圖及與控制監視系統（CMS，Control Monitoring System）溝通等等的關鍵參數，這些重要的關聯廠商均非本工程的參與成員，致使資料的取得與確認更加困難，期間藉由交通部鐵道局北工分局、總顧問與監造單位，偕同日本、英國、德國等國際廠商耗費長時間的共同努力彙整，方始設計工作得以順利推動。



2.2 新舊號誌系統差異的簡要說明

舊號誌系統 (DTG-R, Distance To Go - Radio) 由英商英維斯設計, 自動運轉等級 (Grades of Automation, GoA), 屬第二等級 (GoA 2) 的半自動駕駛, 控制列車之自動運轉及停止, 需要由駕駛員關門和處理故障事件; 既有之普通列車四節車廂, 設備主要安裝於第一節車廂, 備援系統則位於第四節車廂, 列車定位、速度及通訊天線皆安裝於車廂外部, 資訊傳輸係透過硬線收集至列車界面單元 (TIU, Train Interface Box) 機櫃, 透過 CIB (CMS Interface Box, CMS 界面箱) 將故障訊息顯示於 CMS 及駕駛顯示單元 (DDU, Driver's Display Unit) 上; 號誌系統經由 CIB 連接至 CMS 採用 RS485 協定, 達到車內到站顯示器 (TDDU, Train Door Display Unit) 跑馬燈顯示正確到、離站資訊 (詳圖 1)。

新號誌系統 (TGMT, Trainguard MT) 基本設計架構為無人駕駛, 自動運轉等級為第四等級 (GoA 4), 但考量新、舊系統列車運作的一致性, 故設計仍以 GoA 2 之模式營運; 新號誌系統具備兩組自動列車運轉 (ATO, Automatic Train Operation) 及自動列車保護 (ATP, Automatic Train Protection) 其餘配置之邏輯與既有車載號誌類似, 新號誌系統車載新增單元配置圖 (詳圖 2), 相較於既有系統自動化程度較高, 並採用網路線串接, 故障資訊可透過網路傳送至行控中心的 S&D (Service & Diagnostics) 監視, 新、舊號誌系統的差異比較 (詳表 1)。

2.3 新號誌系統設計初期的可行性研究 (Feasibility Study)

設計初期德國技師抵台調查評估車載新增號誌設備的安裝空間及位置, 後因受全

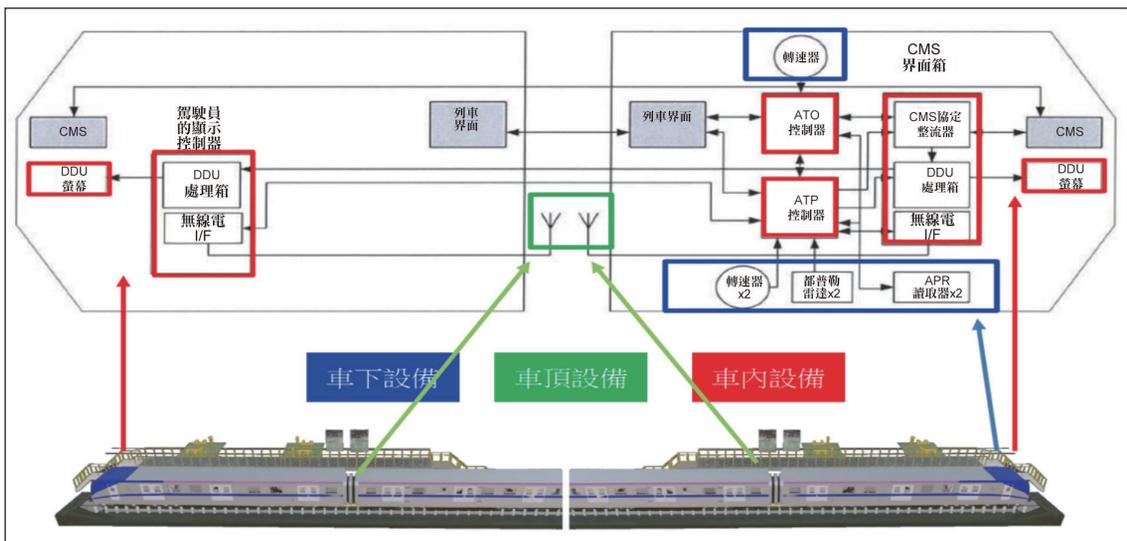


圖 1 既有車載號誌系統配置

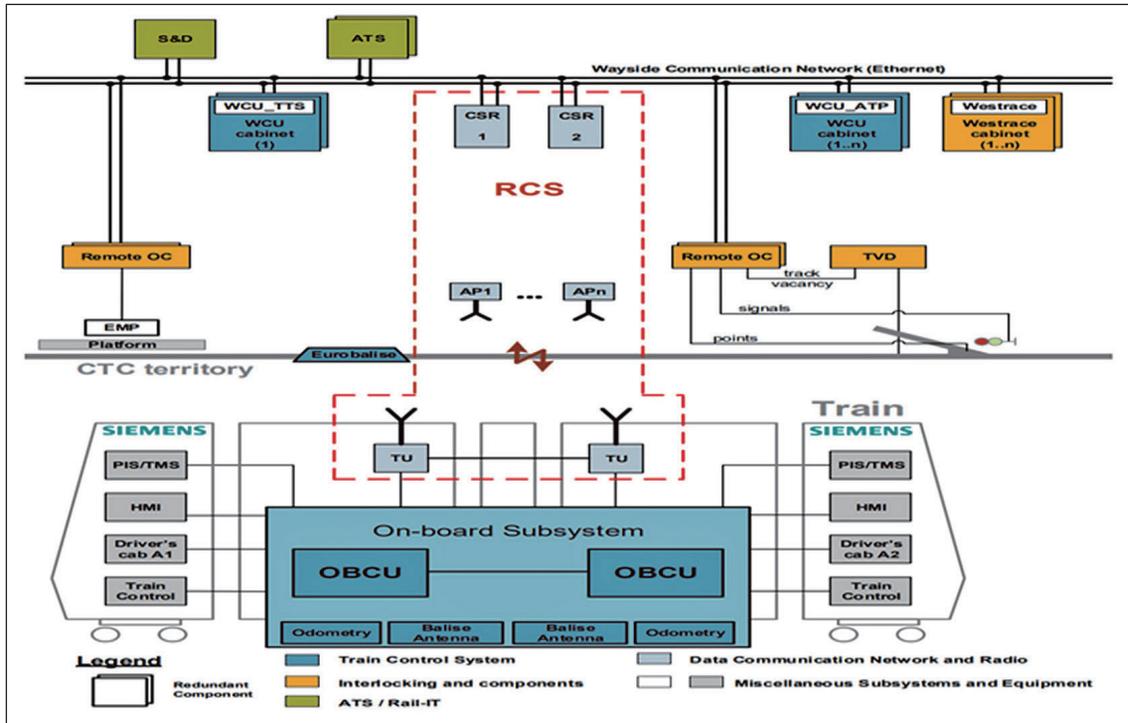


圖 2 車載號誌系統新增設備配置概述

表 1 列車控制單元 (OBCU, OnBoard Control Units)

	DTG-R	TGMT
ATO(自動)	1選1	2選1
ATP(人控)	3選2	2選1
HMI(人機界面)	CMS+DDU	DMI
子系統介接	硬線	網路線
模式	AM/SM	AM/SM

球 COVID 19 影響，與德國設計團隊改採遠距視訊的方式確認。經檢視第一節車廂底部已過於密集，方決定以第二節車廂作為車載號誌設備的規劃設計，經研析車載號誌安裝於第二節車廂空間過於侷促，列車控制單元 (OBCU, OnBoard Control Units) 的安裝位置，經現場評估後須拆除既有乘客座椅 (如下圖 3)。

新車輛號誌設備硬體說明如下 (如圖 4 所示)：

雙端駕駛室新增的硬體設備：人機介面 (HMI)、控制台按鈕／開關面板 (Desk elements)、無線電天線 (Radio antenna)、資料通訊系統 (DCS)、微型斷路器 (MCB)、車載通訊網路設備 (OCN)。

第 2 節車廂內新增硬體設備：車載控制單元 (OBCU) 與繼電器端子台固定板 (RTB)。

第 2 節車廂車底新增硬體設備：信標天線 (Balise antenna)、雷達傳感器 (Rader sensor) 與測速計 (OPG)。車廂間第 1 ~ 2、2 ~ 3、3 ~ 4 車間頂端新增硬體設備：車間電纜 (Jumper cable) 及支撐架。



圖 3 列車控制單元 (OBCU, OnBoard Control Units)

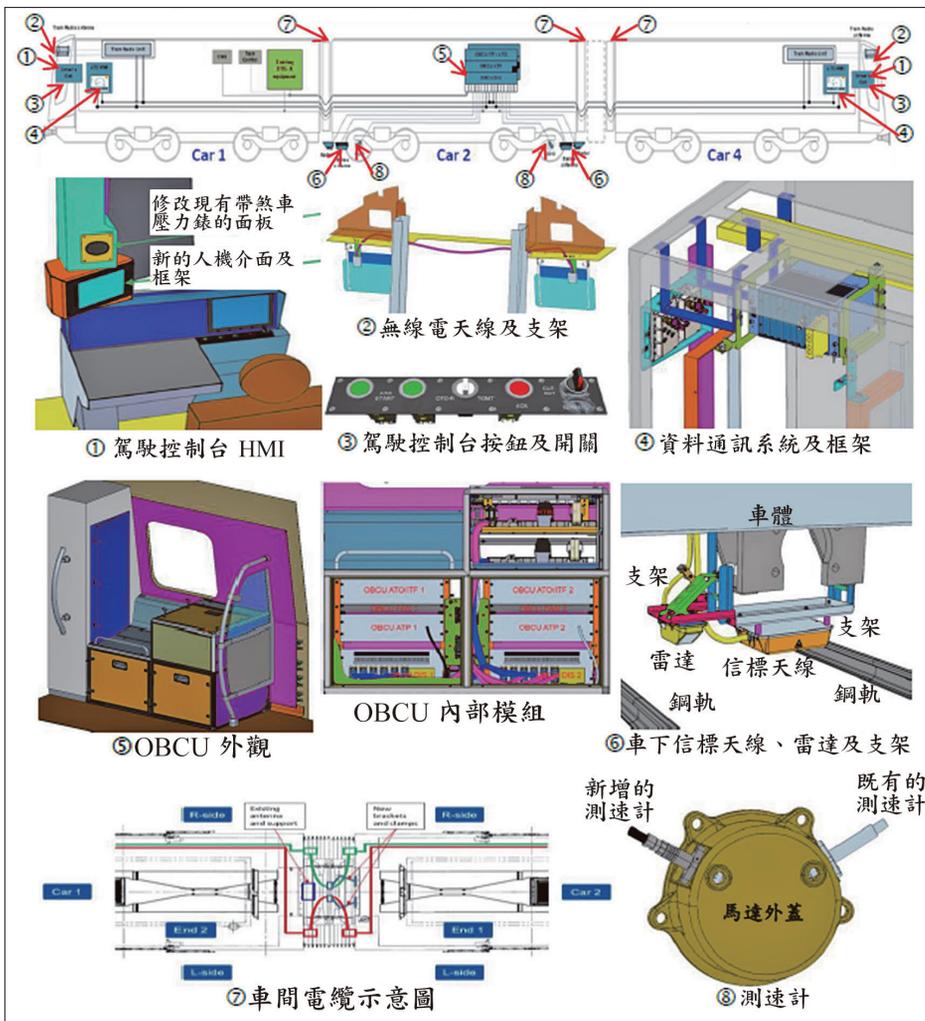


圖 4 列車新增硬體設備示意圖



2.4 新車載號誌取得既有電聯車參數的困難性

電聯車參數取得遭遇的困難，由於新增的延伸線並無既有電聯車廠商的參與，電聯車的參數及 CMS 的參數都只能藉由既有的竣工文件，逐一確認電聯車之列車尺寸、最大營運車速、不同負載的車重、不同強度的煞車與牽引型態、延遲及動態特性等等，最終透過交通部鐵道局北工分局、中興總顧問與中興監造單位，偕同日本、英國、德國等國際廠商，耗費長時間的共同努力彙整始能確認設計參數，並以西門子對電聯車控制系統的經驗，進行車載新號誌系統的設計。

2.5 其他界面上遭遇的困難

舊號誌系統利用 CIB 界面箱取得電聯車控制及監視系統 (CMS) 通訊設備狀態及號誌信息，為了避免新舊號誌切換過程，影響電聯車重要設備功能，本次採用硬線切換原

訊號傳輸線；另外面臨訊號格式的挑戰，雖藉由既有電聯車的界面文件了解主要的資料格式，但訊號加密格式仍然是個挑戰，依據廠商調查循環榮冗餘檢查碼 (CRC, Cyclic Redundancy Check) 加密共有 24 種變形，經桃捷公司協助提供已擷取之數據，傳回德國設計團隊解密後，新號誌系統方能向 CMS 傳輸到、離站訊號，並正確的顯示於 TDDU。

三、A21 站由舊 (原) 端末終點站變更為新舊號誌系統 (切換站) 的邊界 (Boundary) 概念

1. A21 站由舊 (原) 端末終點站轉變為中繼站，且作為新舊 (原) 號誌系統的切換站，新舊 (原) 兩系統以 A21 站為中心，互有重疊，其分為信標、計軸器 (新系統)、音頻軌道電路 (舊 (原) 系統)、號誌無線電、號誌機等道旁號誌子系統。新舊 (原) 道旁號誌系統區域佈置概念 (詳圖 5)，橙色區域為舊 (原) 號誌系統 (A21 站以北

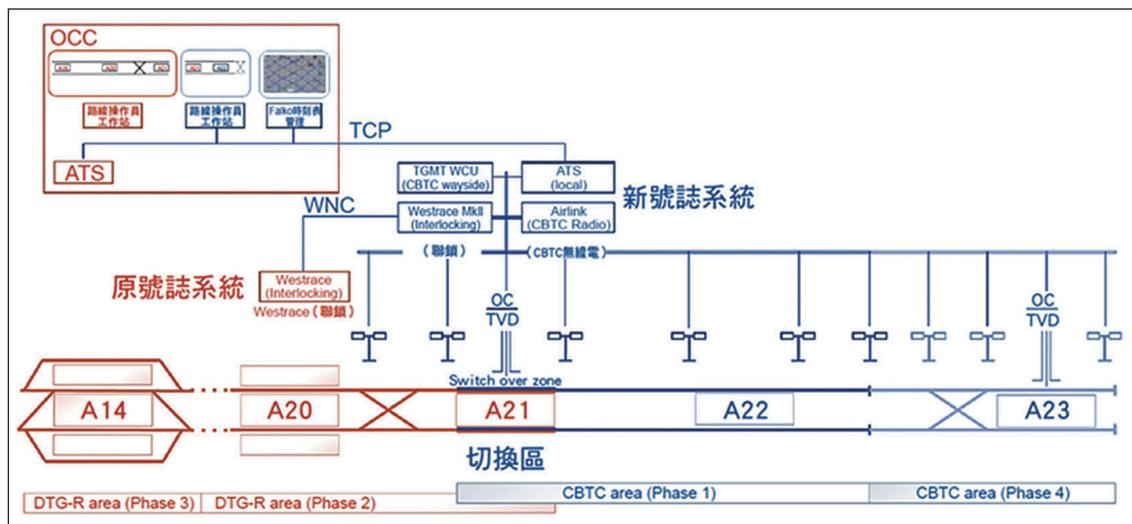


圖 5 新舊 (原) 道旁號誌系統區域概念



至 A1 站) DTG-R, 採 MKI (音頻軌道電路搭配 APR / 信標); 藍色區域表示新號誌系統建置範圍, 採 MKII (計軸器搭配 Balise / 信標), A21 站作為兩系統切換區的邊界站, 列車駕駛員必須於此站, 進行手動的切換以行駛於新舊號誌系統之間(配合上下行方向所進入之系統區域), 新舊(原)道旁號誌系統配置說明:

- (1) 舊(原)系統於 A21 站尾端上下行增設號誌燈及 6 個信標(上下行各三個), 以利列車從 A22 站往 A21 站進站時原車載系統能預先定位。
- (2) 新系統為因應 A21 站的車載系統切換, 於 A21 站進站前, 佈置(新增)號誌無線電、計軸器、信標, 為了幫助新系統於列車往 A21 站進站前, 即能檢知列車並開始定位。

2. A21 站作為新舊(原)號誌系統的切換站, 整合上面臨的問題

A21 站作為新舊(原)號誌系統的邊界站, 基本上須滿足當列車由舊(原)號誌進入新系統時, 當載入正常營運班表下, 自動列車調度(ATR, Automatic Train Regulation)能自動成立, 讓列車能順利行駛往返 A22 站, 且不會造成路徑設定衝突的安全疑慮。

新增路段雖已通過 RAM 展示所有 KPI 的測試, 且經 112 年 7 月營運至今的異常樣態統計, 只剩 A21 站月台門異常告警(PSD-AO)及 A21 站的靜態 EB 等兩項非常態樣態, 其發生的頻率相較於其他態樣雖較為頻繁, 經確認並無營運安全之虞, 也不影響營運的

準點率, 後續仍由新建團隊持續的優化並研析原因如下:

(1) A21 站月台門告警異常(PSD-AO):

當列車欲由舊號誌系統(DTG-R)進入至新號誌系統(TGMT)時, TGMT 系統在 A21 站會發出「月台門(PSD)異常開啟」之告警。分析其原因: 當列車南下行駛並停妥於 A21 站的過程中, 新、舊號誌系統兩套 ATP 均會監督 PSD 狀態, 以確保行車安全, 唯有在列車完全靜止於正確的月台停車點(「完全駐車」), 號誌系統才會發出訊號允許 PSD 開啟。於此同時, 由於 A21 站南下列車傳送給 PSD 之訊號仍屬於 DTG-R 所主導, 當 DTG-R 已經判定安全無虞並通知 PSD 開啟的瞬間, 會偶然發生 TGMT 系統 ATP 評估仍處於「列車尚未為靜止狀態」, 故 TGMT 在 A21 站會發出「PSD 異常開啟」之告警, 則會觸發 PSD-AO 之誤告警訊號。鑒於上述, 該異常肇因可分為兩部分探討「時間點問題」與「定位不確定性」。

「時間點問題」係起因於兩個 ATP 系統內部處理時間差異可能導致 DTG-R 比 TGMT 早一步判定列車已達到釋放月台門開啟訊號之條件。第二個問題則為「定位不確定性」, 其係起因南下列車於 A21 站過低的列車趨近速度(主因於作為末端站的進站速度, A21 站原為末端站)。對於 TGMT 系統而言, 列車慢速行駛時, 例如低於 10 km/h, 督卜勒雷達(Doppler rader)感測器的測量資訊會有較大的誤差, 繼而導致位置之不



確定性相對增加。停車位置、慢速和雷達誤差之組合，偶爾會造成已確定的列車位置與非維生停車範圍不一致。依據 TGMT 之安全設計，倘若 DTG-R 在這些情境下開啟 PSD，則監視的 TGMT 之 ATS 系統將視之為異常 PSD 開啟，並觸發相應告警，但實際上此時列車仍屬於安全營運之狀態，這類告警屬於不必要之誤告警。

經由前揭論述觀察，為減緩／降低 PSD AO 告警發生之頻率，建議先將月台門系統調整一至兩秒的延遲時間，以作為現階段的營運模式。未來將優化 TGMT 系統，即 TGMT 未接管列車前抑制此 PSD AO 告警（目前正由 R&D 持續研發中），作為永久解決之方案。

(2) 切換列車控制系統當下發生靜態緊急煞車 (EB, Emergency Brake)：

經工程改裝後之列車，車上同時存在兩套號誌系統之設備，當兩獨立列車控制系統進行切換時，電聯車電路系統所反應之行為，其係由新系統與舊（原）系統界接所引起。當 DTG-R 切換至 TGMT 或由 TGMT 切換至 DTG-R 時，偶有列車靜止狀態下發生緊急煞車之情況，為找出其根本原因，針對電聯車電路設計進行詳細分析，期能提出因應的減緩措施，分析說明如下：經查證靜態 EB 發生與緊急煞車繼電器電路分支的短暫斷電有關，儘管該異常係主要與供電電壓之瞬間中斷有關，由於 EBRI 繼電器與其自身輸出接點串聯，繼而受影響之繼電器輸出無法自行恢復，導致該

分支中各元件的連鎖反應所招致之最終結果。

計畫也針對列車控制系統切換設計進行相關的安全確認，確認所選之接點繼電器均符合低壓控制裝置、控制設備和切換開關元件相關標準之規定；亦針對所有用於操作切換雙車載號誌系統間，配置於繼電器端子板 (RTB) 內之繼電器開關，均依據 EN50126-2 和 EN50129 之標準納入設計考量；依 SIL4 安全邏輯設計考量，列車並不允許有兩套車載號誌系統同時介入煞車系統，因此在雙號誌系統切換的過程中，必須採取先斷後接的設計，其系統切換過程之時間差，必然引致該繼電器之迴路瞬間中斷，進而可能造成列車其他繼電器之連鎖反應，導致 EB 訊號被觸發，因雙車載號誌系統中的其中之一發生故障或進行干預時，運行中的列車會固定採用緊急煞車，其可稱之為「正確側故障 (right-side failure, RSF)」，經評估應不屬於系統異常，且透過妥善的操作程序即可將列車回復正常營運的狀態，對雙車載號誌系統和煞車系統之安全性不會產生影響，煞車系統安全性業經由安全評估人員進行安全評估並取得相關安全評估報告 (ISA)。

四、新、舊號誌系統的 ATS R9K/SCS 整合驗證測試

舊路段 A21 站延伸路段至 A22 站，新、舊號誌系統區域概念如圖 6，係以聯鎖邊界 (IXL Boundary) 作為一個分界面，橙色區

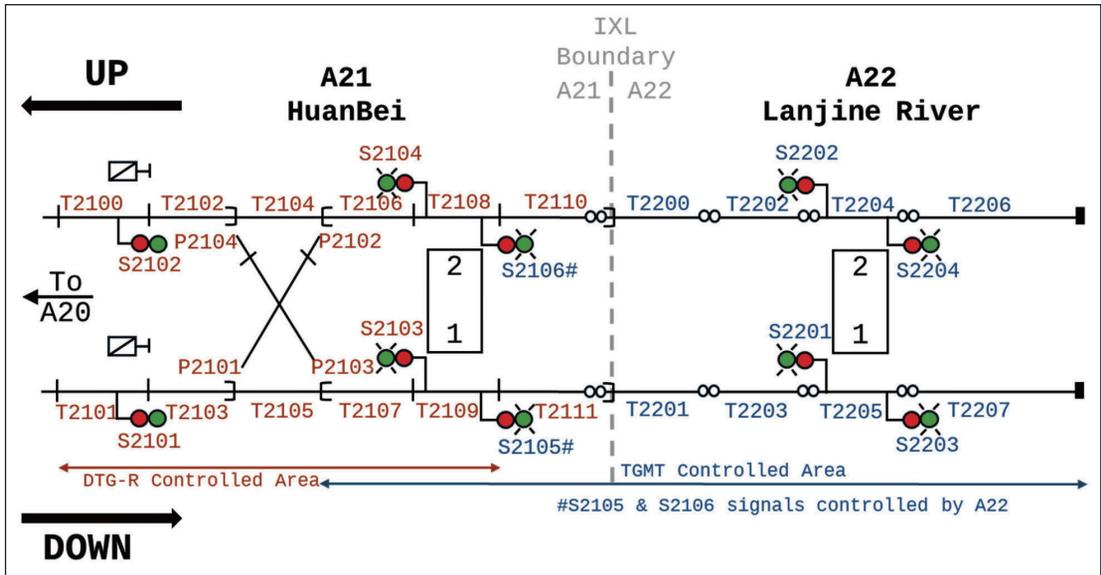


圖 6 新、舊號誌系統延伸路段 A21-A22 區域架構

域係指舊號誌系統 DTG-R 控制區，採用既有 Westrace MKI 進行通訊聯鎖、ATS 透過 Service Control System (SCS) 作為界面功能管理；藍色區域係指新號誌系統 TGMT 控制區，新建置 Westrace MKII 進行通訊聯鎖、ATS 則以 Rail 9000(R9K)作為界面功能管理。

當舊路段 A21 站延伸路段至 A22 站的號誌系統硬體建置完成後，後續依據界面整合測試程序，進行新號誌 ATS (R9K) 與舊號誌 ATS (SCS) 界面功能的驗證測試。

新、舊號誌系統界面整合測試程序，說明如下：

1. 初始測試階段，驗證新、舊號誌系統之間的連線測試

新、舊號誌系統在正常營運且保持連線的條件下，首先要確認雙方保持訊號連線同

步，當其中一方呈現離線狀態時，另一方能監控系統的連線狀態；其次驗證測試模擬 R9K 與 SCS 離線的反應，首先模擬 R9K 離線狀態，SCS 會持續傳送連線訊息，當嘗試與 R9K 連線三次失敗後，SCS 與 R9K 的連線將被認定已中斷，隨後進行 R9K 系統重啟，並由 SCS 傳送連線訊息至 R9K，確認雙方連線恢復並可正常接收訊息。反之模擬 SCS 離線狀態，R9K 同樣會持續傳送連線訊息，當嘗試與 SCS 連線三次失敗後，R9K 與 SCS 的連線將被認定已中斷，隨後進行 SCS 系統重啟，並由 R9K 傳送連線訊息至 SCS，確認雙方連線恢復並可正常接收訊息。

2. 驗證新、舊號誌系統之間的資料傳輸

前置條件 R9K 與 SCS 保持連線，並將列車停放置 A21-A22 區間，測試發送相關指令資訊之完整性，確保系統之間資訊傳輸未遭



失或錯誤，同時測試新、舊系統之間的資訊相容性並能正確解析與處理。

- (1) R9K/SCS 是否收到雙方傳送的指令資訊：
首先由 SCS 發送「資料傳送需求」給予 R9K，並可得到 R9K 的回復確認，接著測試 R9K 陸續發送「資料傳送需求」相關資訊（如 Switchover Controls、Train Berth Report、Code RED、Code AMBER 等）給 SCS 接收確認，確認雙方的指令資訊相容並可正常執行。
- (2) R9K 是否能收到由 SCS 傳送的任務資訊：
SCS、R9K 同時載入班表，並由 SCS 修改原班表資訊（更改班表只能在 SCS 進行），驗證方式由 SCS 發送「任務傳送需求」給 R9K 的回復確認，接著測試 R9K 陸續發送（如 TAlloc Report、Switchover Controls、Trip Cancel Cmd、Trip Create Cmd、Trip Edit Cmd、Train Berth Report 等）給 SCS 接收確認，確認雙方的任務資訊相容並可正常執行。

3. 驗證載入班表及既有班表的修改（如新增與取消及編輯列車車次等）

當新（R9K）、舊（SCS）號誌系統間的傳輸功能被確認後，後續將驗證由 SCS 載入的班表，經修改班表的車次（如新增、取消及編輯車次等），並輸入對應修改車次所需資料（如變更目的地碼、列車／車次編號、路徑控制等），SCS 依據修改需求向 R9K 發送資訊，R9K 接收資訊並對應班表修改資料進行相對應的調整。

4. 驗證列車動向預測

- (1) 驗證 SCS 與 R9K 之間的列車資訊預測交換：
當列車需於 SCS 與 R9K 區間往返時，SCS 與 R9K 係以 A21 作為一個切換站，當列車於 SCS 區域載入班表資訊並指派列車前往 A21 站月台，SCS 需提供時刻表資訊（有效車組編號及列車動向行程）給予 R9K，確認 R9K 可接收到 SCS 傳送之列車動向資訊。

反之，當列車由 A22 站（終點站）出發並指派列車前往 A21 站月台，R9K 需提供時刻表資訊（有效車組編號及列車動向行程）給予 SCS，確認 SCS 可接收到 R9K 傳送之列車動向資訊，作為兩個系統之間的列車資訊交換並正常運作。

- (2) 列車雙向移動停留點的確認：
SCS 和 R9K 之間列車雙向移動停留點的確認，當列車於下行由 A20 往 A21 站行駛，途經軌道電路 T2103 與 T2105 時（如下圖 7），即會觸發佔據／淨空之訊號給 R9K，SCS 會依照列車之動向資訊（行駛／調度至 A21 站上行或下行）傳送給 R9K，通知即將有列車即將進入 A21 站，並隨著列車輪軌所經過的每段軌道電路，不斷傳送佔據之訊號，確認列車所停留之區間位置；當列車行駛進入 A21 站（軌道區間 T2109）佔據時，此時 DTG-R 需完成系統切換至 TGMT，因列車將離開 A21 站進入新號誌系統區域（A22 站）。

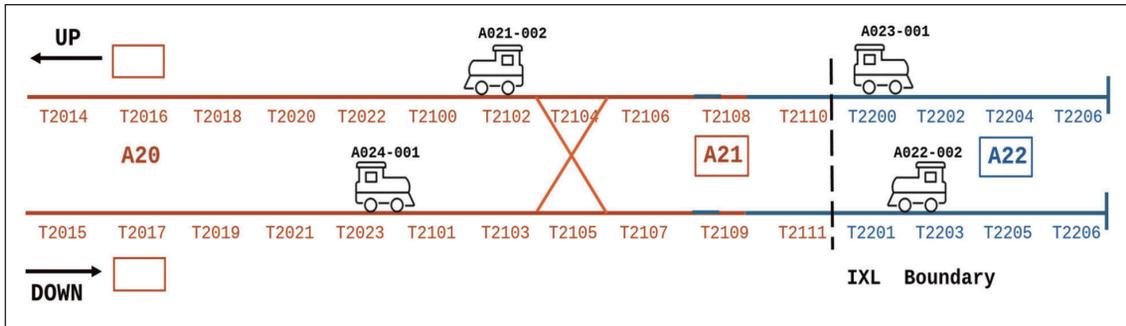


圖 7 列車雙向移動停留點的確認

承上述，依照 SCS 所排定列車之動向資訊（行駛／調度至 A21 站上行或下行），當列車由 A22 往 A21 站行駛，途經軌道電路 T2011 或 T2110 時，亦會觸發佔據／淨空之訊號給 SCS，通知即將有列車即將進入 A21 站，並隨著列車輪軌所經過的每段軌道電路，不斷傳送佔據之訊號，確認列車所停留之區間位置；當列車行駛進入 A21 站（軌道區間 T2109 或 T2108）佔據時，此時 TGMT 需完成系統切換至 DTG-R，因列車將離開 A21 站進入舊號誌系統區域（A21 ~ A1 站）。因雙號誌系統需同時保存運作，故於既有軌道電路（T2103、T2102）開始設置新系統信標設備，同時也在新系統區域軌道電路（T2111、T2110）設置舊系統信標設備，係為兩套系統必須相互監視列車佔據訊號，待確認系統切換／接管後，便可擁有獨立控制之權限。

5. 當列車於 A21 站進行新、舊系統切換時，列車門及月台門的連動性

A21 站作為新、舊號誌系統列車的切換

站，並藉由單線雙向行駛的測試，以驗證兩系統間的切換控制，列車動向資訊及通訊協定資料的相互傳遞。

- (1) TGMT 系統接管：SCS 向 R9K 發送列車動向資訊，當列車已進 A21 站停妥，列車門及月台門此時連動開啟，確認旅客上下車完畢，列車門及月台門此時連動關閉。此時 SCS 向 R9K 會發送接管通知，將進行切換至 TGMT 控制權啟動後，列車由 A21 站發車行駛前往 A22 站。
- (2) DTG-R 系統接管：R9K 向 SCS 發送列車動向資訊，當列車已停妥 A21 站，列車門及月台門已此時已關閉，確認旅客上下車完畢，列車門及月台門此時連動關閉。此時 R9K 向 SCS 會發送接管通知，將進行切換至 DTG-R 控制權啟動後，列車由 A21 站發車行駛前往 A20 站。

五、結語

機場捷延伸線 A22 站工程總體施工工期耗約長達近 3 年 10 個月的時間，其中包括基



本設計約 1 年；另完成 20 輛普通車的改車，包括車載號誌的研析、安裝、靜動態測試約耗時長達 2 年，這其中耗時約 1 年 5 個月進行首列車的研析及完成確認驗證首列車的靜、動態測試；後續再耗時約 7 個月完成所有列車的改裝；最終進行道旁與新舊 ATS 號誌系統軟體上的整合測試。

由於 A1 台北車站至 A21 環北站間自通車至今已近 8 年多的時間，營運單位已熟悉舊系統的營運操作模式，如今新增一套號誌系統同時的併行操作，從營運單位的操作角度來看，容易產生習慣性的差異比較，營運單位總希望新建的系統能盡量比照舊系統，以減少營運操作上多樣性的風險，但回歸到系統的本質，它終究是存在著兩套不同的號誌系統，由於舊號誌系統非屬新號誌系統廠商所提供的系統，其間的差異性是必然存在。這些營運操作面的差異性，常需透過營運單位的適時回饋，才能讓新建單位了解其間存在的差異，讓營運單位儘早適應兩者間的差異並建立營運上相對應的 SOP；同時也要求新的號誌設備廠商，不斷優化新系統與舊系統間的整合，讓兩個系統間的差異越趨縮小，機捷延伸線所完成的雙號誌系統整合工程，為國內過往捷運工程中前所未有的案例，相關整合的經驗，仍有待時間一點一滴慢慢的累積與成長。

如今旅客乘坐機捷前往老街溪步道慢步品嚐美食，當列車緩緩駛入 A21 環北站，隨著月台門開啟與關閉，列車再次移動前往目的地 A22 老街溪站時，此刻乘客完全感受不到兩套號誌系統的切換，這就是一車到底的服務，步出車站，老街溪，我們來了。

參考文獻

1. 台灣桃園國際機場聯外捷運系統建設計畫機電系統統包工程 ME01 標文件編號 CKS-ME01-DDD-ESN-0003，號誌系統細部設計：延伸概念，英商英維斯，99 年 4 月。
2. 台灣桃園國際機場聯外捷運系統建設計畫機電系統統包工程 ME01 標 CDS 文件編號 CKS-ME01-DDD-ESN-2002，號誌系統細部設計：ATC 號誌原則，英商英維斯，99 年 7 月。
3. 機場捷運增設機場第三航廈站 (A14 站) 暨延伸至中壢火車站建設計畫機電系統工程 ME06A 標文件編號 CKS-ME06A-DDD-ESN-0016，系統設計規範 - 列車駕駛功能，德國西門子，109 年 9 月。
4. 機場捷運增設機場第三航廈站 (A14 站) 暨延伸至中壢火車站建設計畫機電系統工程 ME06A 標文件編號 CKS-ME06A-DDD-ESN-0029，Trainguard MT 硬體規格說明 - 車載，德國西門子，109 年 10 月。
5. 機場捷運增設機場第三航廈站 (A14 站) 暨延伸至中壢火車站建設計畫機電系統工程 ME06A 標文件編號 CKS-ME06A-FDD-ESN-0020，ME01 既有號誌系統設計文件更新，德國西門子，110 年 4 月。
6. 機場捷運增設機場第三航廈站 (A14 站) 暨延伸至中壢火車站建設計畫機電系統工程 ME06A 標文件編號 CKS-ME06A-DDD-ESN-0036，列車特性需求，德國西門子，110 年 5 月。
7. 機場捷運增設機場第三航廈站 (A14 站) 暨延伸至中壢火車站建設計畫機電系統工程 ME06A 標文件編號 CKS-ME06A-IDD-ESN-0005，IXL 細部界面規範 (A21)，德國西門子，110 年 12 月。
8. 機場捷運增設機場第三航廈站 (A14 站) 暨延伸至中壢火車站建設計畫機電系統工程 ME06A 標文件編號 CKS-ME06A-IDD-ESN-0006，界面規範 SCS-Rail9K，德國西門子，111 年 4 月。
9. 機場捷運增設機場第三航廈站 (A14 站) 暨延伸至中壢火車站建設計畫機電系統工程 ME06A 標文件編號 CKS-ME06A-IDD-ESN-0001，細部界面規範 (車載)，德國西門子，111 年 10 月。
10. 機場捷運增設機場第三航廈站 (A14 站) 暨延伸至中壢火車站建設計畫機電系統工程 ME06A 標文件編號 CKS-ME06A-FDD-ESN-0014，列車調度與派遣規範，德國西門子，113 年 9 月。
11. 李文杰、陳永森、何建菁、陳諾賢、陳景池、史春華、王村竹、吳鳳慶、劉建宏，「機場捷運與延伸線號誌系統的共融性」，中國工程師學會會刊第 95 卷 01 期，111 年 3 月。

夢想和幸福

零距離的接軌

技術必須經得起考驗，專業來自於永不妥協的堅持，
夢想的城堡、幸福的家園，就座落在不遠的前方，
台灣世曦和您一起攜手而行，用築夢的心、關懷的情，
戮力建設出每一項希望的工程。



Creativity · Excellence · Conservation · Integrity



台灣世曦
工程顧問股份有限公司

台北市11491內湖區陽光街323號
Tel:(02) 8797 3567 Fax:(02) 8797 3568
<http://www.ceci.com.tw> E-mail:pr@ceci.com.tw



中油愛惜每一片土地

守護各場域珍貴動植物

一起發現中油生態之美

分享能源單位與在地共融的成果





綠能與環境研究所

面臨能源、氣候與環境的劇烈改變，為善盡世界公民之義務並促進永續發展，綠能與環境研究所秉持誠謹耕耘的性格，延伸一貫的堅持與時俱進，致力於展現多元化專業格局，以開拓綠能與環境科技新領域。綠能所期望藉專業人才、前瞻規劃、國際合作與跨域交流等全方位投入，於前瞻創新、產品研發、專利佈局三大構面上發展出世界級的技术與應用。未來除了持續提供高品質、高價值的產業知識服務外，在2050淨零趨勢下，推廣節能減碳理念，創造綠能環境、永續資源與低碳技術的新契機。

▶ **願景** 世界級綠能與環境產業孕育搖籃

▶ **五大領域營運技術主軸**

再生能源與零碳能源

- 太陽光電
- 地熱
- 風力發電
- 海洋能
- 氫能/氨能
- 生質能
- 電子燃料 (e-fuel)



能環政策

- 政策智庫
- 淨零策略
- 政策推動
- 能源查核
- 環境調適



最適節能與效率

- 能源管理系統
- 冷凍空調設備
- 熱能應用與散熱系統
- 建築節能
- 工業節能



智慧電網與電力電子

- 智慧電網
- 電力電子
- 儲能系統
- 虛擬電廠
- 防爆與電力安全



永續環境

- 碳捕捉、封存及再利用
- 污染防治與復育
- 資源循環再利用
- 化災應變
- 核廢處理



歡迎加入工研院綠能所



Q 工研院綠能所



材料與化工研究所

Material and Chemical Research
Laboratories Introduction



ITRI

重點研發領域 (成果案例)



材化所研發成果

CO₂循環利用/碳源化學品
塑膠循環/廢塑裂解轉化烯烴原料
鋰電池/太陽光電回收循環
半導體製程廢氫回收
全循環聚烯/聚酯創新材
永續水處理材料與系統
生質染料與循環染整製程

永續循環

新世代半導體構裝材料
化合物半導體材料
電子/半導體低碳材料與製程
次太赫茲通訊元件與材料
管線智慧監測診斷系統
無光罩面板製程材料
高階CVD SiC鍍膜製程

新世代ICT

韌性自主

綠色能源

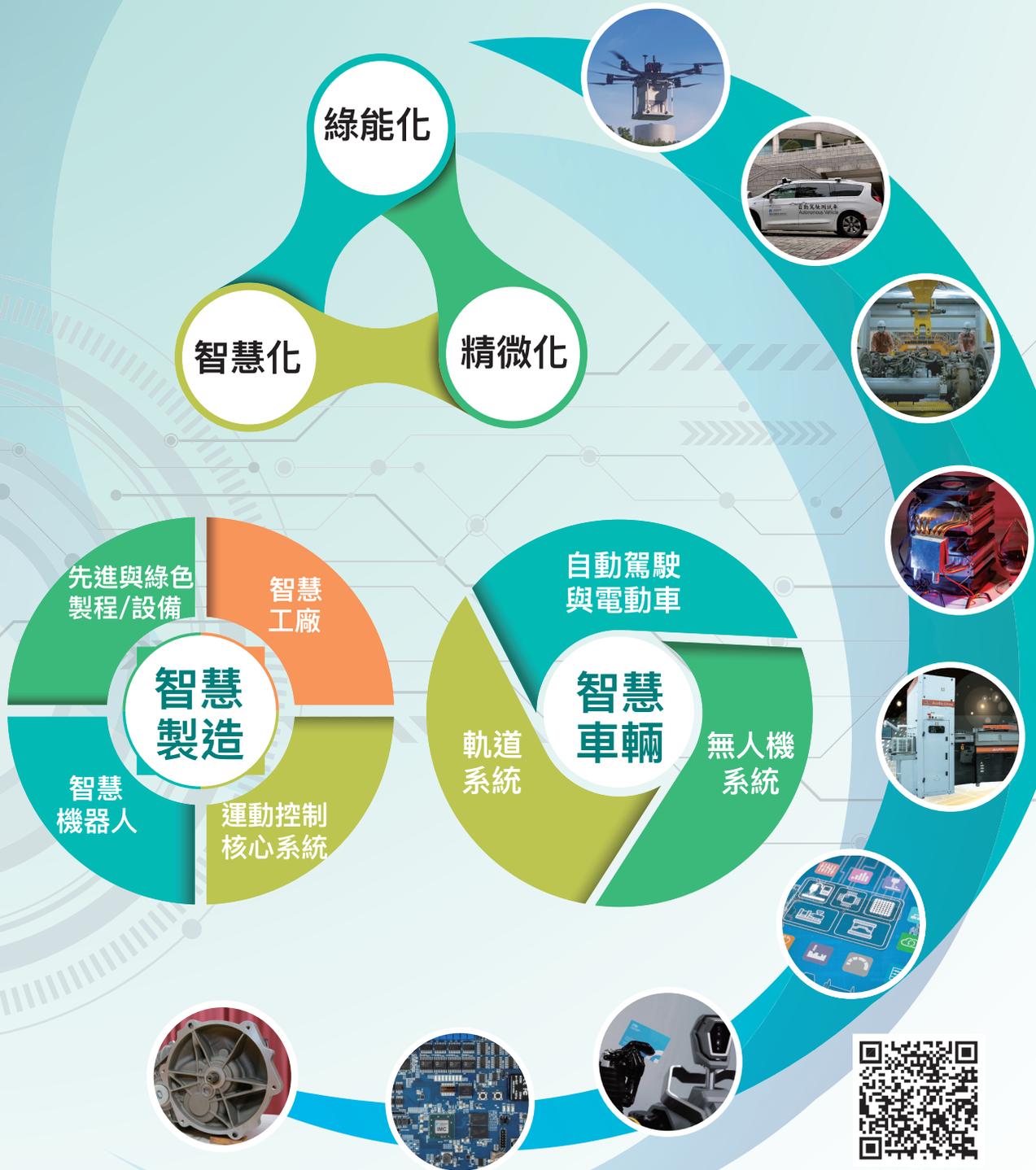
燃料電池與低成本電解產氫
化學產氫(低碳排解氫/厭氧共發酵/氣化反應/甲烷去碳製氫)
氫氣儲存/氫氣運送
高能量鋰固態電池/材料
高效率/低能耗合成製程技術
節能永續塗料

水資源回收再利用
管線安全、洩漏檢測、保固技術
鈹/鎢稀土原料自主
鋼鐵低碳原料/低碳直接還原鐵製程
傳產(造紙/玻璃/水泥)自主材料
航太/電廠發動機用特殊合金
高碳數烯烴/芳香烴材料
輕量化複材/高性能碳纖維



機械與機電系統研究所

MECHANICAL AND MECHATRONICS SYSTEMS RESEARCH LABORATORIES, MMSL.



綠能化

智慧化

精微化

先進與綠色
製程/設備

智慧
工廠

智慧
製造

智慧
機器人

運動控制
核心系統

自動駕駛
與電動車

智慧
車輛

軌道
系統

無人機
系統



更多技術介紹

智慧領航 加速淨零未來

企業面對能源轉型與淨零排放挑戰，導入AI技術已勢在必行。從智慧電網調度、儲能系統優化，到氫能技術與再生能源應用，AI正全面提升能源效率與供電穩定性。同時，智慧碳管理與近零建築設計，正是企業實現低碳轉型、強化永續競爭力的關鍵。

淨零永續

- ☑ 永續碳管理
- ☑ 能源系統
- ☑ 低碳導入
- ☑ 循環再生
- ☑ 負碳加值

智慧電網與綠能

- ☑ 再生能源
- ☑ 智慧電網
- ☑ 儲能
- ☑ 能源管理
- ☑ 電力電子

加入【工研院產業學院】前瞻課程
打造引領未來的綠色競爭力！

<https://college.itri.org.tw/>



致力資源永續及價值創新 成為循環經濟的卓越企業



國家品質獎
NATIONAL QUALITY AWARD

高爐石粉、高爐水泥
飛灰爐石粉、地質處理劑
氣冷高爐石級配料
轉爐石瀝青鋪面用粒料
氟化鈣污泥回收利用
人造螢石



中聯資源股份有限公司

總公司：高雄市前鎮區成功二路88號22樓 TEL：07-336-8377 FAX：07-336-8433 <http://www.chc.com.tw/>



加入IEK產業情報網會員 | 掌握產業趨勢脈動

產業焦點

提供超過17,500篇
產業焦點評析，每
年新增600篇以上

趨勢資料庫

總體經濟觀測、產
業趨勢預測、前瞻
議題偵測

到府簡報

根據每季最新情報，以特
定主題方式，由產科國際
所產業分析師針對企業客
戶進行專場產業簡報

顧問服務

產科國際所研究團隊擁
有豐富專案委託服務經
驗，可依實際需求執行
專業顧問服務

產業簡報

超過3,500篇研討會
簡報，每年新增200
篇以上

其它服務

- 平面出版品（年鑑 / 專論）
- 新興 / 熱門產品研討會
- IEK Talks趨勢影音

產業新聞

提供超過300,000
筆產業新聞，每日
新增150則以上

諮詢服務

提供線上填單服務，
諮詢內容將於48小
時內回覆

IEK Consulting

掃描加入會員



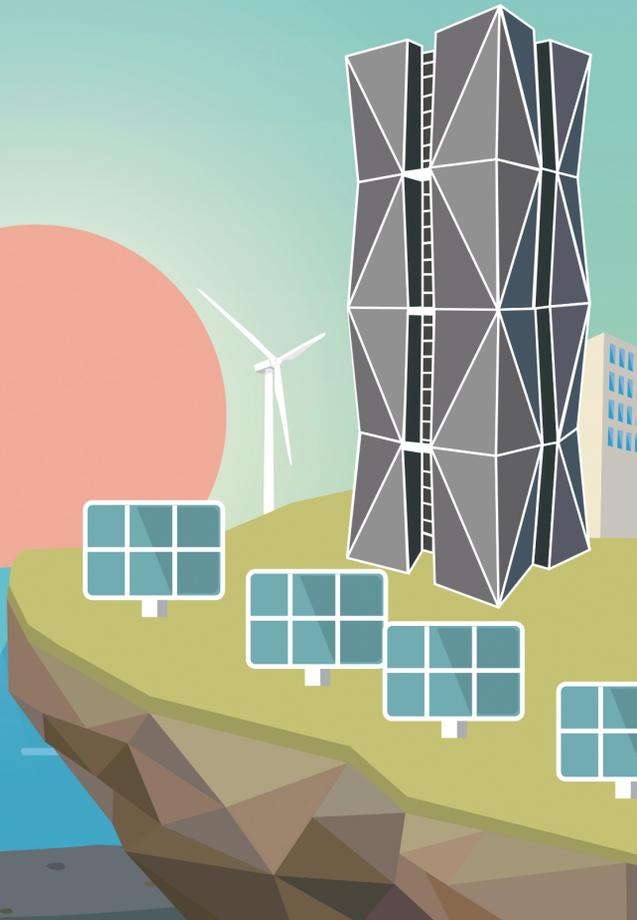
綠 產業發展 能

綠能科技

循環經濟



再生能源



CTCI 中鼎集團

CTCI 中鼎集團 (TWSE: 9933, TPEX: 5209, TPEX: 6803) 為國際級統包工程公司，承攬多元化重大工程，致力提供全球最值得信賴的工程服務。於全球逾 10 個國家成立約 50 個據點，集團員工總數約 8,000 人。因應 ESG 永續及淨零的趨勢及挑戰，CTCI 自許為「地球永續的把關者」，持續打造與地球永續息息相關的「綠色工程」，並積極帶動全球合作夥伴打造低碳供應鏈，為地球的永續發展做出具體貢獻，優異實績入選道瓊永續指數 (The Dow Jones Sustainability Indices, DJSI)。



業務領域

- 環境
- 煉油
- 石化
- 電力
- 交通
- 一般工業
- 高科技設施
- 液化天然氣

服務內容

- 專案管理
- 可行性研究及前端工程設計
- 工程設計
- 工程採購
- 設備製造
- 工程建造與維修
- 工廠試車
- 智能解決方案
- 自動化控制
- 無塵室與機電系統
- 智能頂進工法
- 地盤冷凍工法
- 操作及維護

產品項目

- 設備製造
- 能源管理系統及溫盤模組
- 化學添加劑

CTCI
中鼎集團

111046 台北市士林區中山北路六段89號

Tel: (886)2-2833-9999

Fax: (886)2-2833-8833

www.ctci.com



CTCI
Discover Reliable