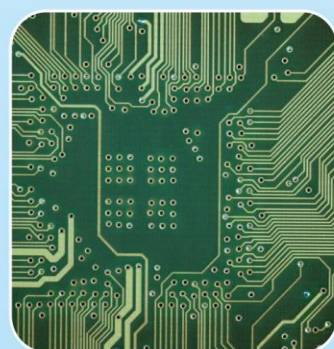
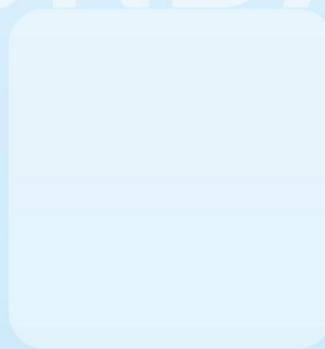


財團
法人

中技社

石化業邁向 2050 淨零碳排 技術發展與政策探討

CTCI FOUNDATION



財團法人中技社(CTCI Foundation)創立於 1959 年 10 月 12 日，以「引進科技新知，培育科技人才，協助國內外經濟建設及增進我國生產事業之生產能力」為宗旨。初期著力於石化廠之設計與監造，1979 年將工程業務外移轉投資成立中鼎工程後，業務轉型朝向裨益產業發展之觸媒研究、污染防治與清潔生產、節能、及環保技術服務與專業諮詢。2006 年本社因應社會環境變遷的需求，在環境與能源業務方面再次轉型為智庫的型態，藉由專題研究、研討會、論壇、座談會等，以及發行相關推廣刊物與科技新知叢書，朝知識創新服務的里程碑邁進，建構資訊交流與政策研議的平台；協助公共政策之規劃研擬，間接促成產業之升級，達成環保節能與經濟繁榮兼籌並顧之目標。

本著創社初衷，為求對我們所處的環境能有更多的貢獻，本社就國內前瞻性與急迫性的能源、環境、產業、社會及經濟等不同議題，邀集國內外專家進行全面的研究探討，為廣為周知，特將各議題研究成果發行專題報告，提供產官學研各界參考。

本專題報告係「石化業邁向 2050 淨零碳排策略與政策配套」議題探討後所提出之研究成果，由本社發行。研究團隊為石化公會曹明理事長、何麗君總幹事，清華大學談駿嵩教授、汪上曉教授、蔡德豪教授，台灣大學童國倫教授，成功大學謝秉志教授、李瑞元教授，台灣科技大學游承修教授，中油探採研究所陳大麟所長、黃乙倫研究員、王志文博士、葉庭瑜研究員，台灣綜合研究院陳建緯副院長，工研院材化所陳建明副所長、蘇一哲副組長、黃淑娟副組長、張王冠副組長、黎彥成副組長、劉柏逸經理、張名惠經理、盧敏彥博士，工研院綠能所黃至弘博士，工研院產科國際所劉致中組長、張志強資深研究員，中技社經產中心邱炳欽研究員。

發行人：潘文炎

主編：陳綠蔚、曹明

作者：談駿嵩、陳建緯、汪上曉、李瑞元、張王冠、劉柏逸、陳建明、蘇一哲、黃淑娟、游承修、黃至弘、張名惠、童國倫、蔡德豪、盧敏彥、陳大麟、謝秉志、黃乙倫、王志文、葉庭瑜、劉致中、張志強、邱炳欽（依章節順序）

執行編輯：王鈺裕、邱炳欽、許湘琴

發行者：財團法人中技社

地址 / 106 臺北市敦化南路二段 97 號 8 樓

電話 / 886-2-2704-9805

傳真 / 886-2-2705-5044

網址 / www.ctci.org.tw

本社專題報告內容已同步發行於網站中，歡迎下載參考

發行日期：中華民國 112 年 12 月

ISBN：978-626-98214-4-0

序

在全球淨零趨勢下，耗能產業如石化、鋼鐵、水泥、半導體等，將持續減少化石能源的使用。國際現階段減碳目標從提倡「減煤」開始，2021年召開的COP26首次明確的針對化石燃料，要求各國逐步減少煤炭使用，降低政府對化石能源的補貼。2023年舉辦之COP28達成「阿聯共識」(UAE consensus)，各國一致同意「以公正、有序且公平」的方式脫離化石燃料，50家石油與天然氣公司簽署「石油和天然氣脫碳憲章」(Oil and Gas Decarbonisation Charter)，宣示2050年以前削減「公司營運」產生的碳排放。2023年台灣通過「氣候變遷因應法」，確立邁向2050淨零碳排的決心，並預計在2024年針對排碳大戶課徵碳費，正式讓減碳成為產業的責任。

台灣工業產品以出口為導向，受到國際碳邊境稅的減碳壓力甚大，如歐盟CBAM法案，業者需要透過各種方式減碳使其產品排碳量不超出歐盟標準，否則出口歐盟的產品會被徵收碳邊境稅；美國CCA法案納管25個產業的碳排放，同樣以類似方式課徵碳稅促使業者減少出口產品的含碳量。雖然業者已紛紛設法降低碳排，但台灣受限於能源進口高達96.7%、非核家園政策、再生能源不足等因素，相對日、韓、歐、美等國家，產品碳含量偏高將造成碳競爭力劣勢。此外，目前主要的減碳技術尚不成熟，業者能夠選擇的方法不足，只能設法透過節能、能資源回收等方式來逐步降低能源使用。

石化產業使用石油作為原料，並且以燃燒化石燃料方式來取得製程所需的熱能，不僅原料含碳，製程也需消耗許多能量，要減少石化業碳排需要投入更多的努力。石化業減碳方向為以替代原料或循環經濟的方式取代石油，以減少原料的碳排，而製程所需能量透過生質能、綠能等方式來替代化石燃料，並搭配CCUS將排放的二氧化碳移除。2030年以前的減碳技術較為明確，但減碳量有限，需要技術持續進步才能得知是否趕得上2050年淨零碳排的目標。由於石化業的排碳結構

較為複雜，不如電子業80%為電力需求單純，因此更需要政府政策的支持，以美國45Q及抗通膨法案為例，業者採用CCS減碳每噸稅務補貼為85美元，CCU則為130美元。

目前台灣政府對於石化業者的減碳方針為碳費徵收、技術研發補助及以大帶小等，然而業者對於目前政府提出的政策多採觀望態度。本議題研究過程為瞭解業者對於目前遭遇到的問題及需求，多次拜訪中油等業者，並與石化公會合作召開座談會，收集產業意見。業者實際面對減碳目標時，掌握新技術才能夠逐步減碳，並開啟新的低碳營運模式，因此希望學研界能夠協助提供減碳技術資訊。有鑑於此，本社於112年度邀請多位產學研專家共同研究「石化業邁向2050淨零碳排策略與政策配套」議題，研析國內外政策、國際石化業者減碳策略、AI節能、製程減碳、再生水技術、替代原料、CO₂捕獲技術、CO₂封存、CO₂再利用技術等，提供產業界技術發展資訊，也為政府規劃減碳技術發展藍圖提供建議。

本專題報告得以順利完成，特別感謝石化公會曹明理事長擔任召集人，談駿嵩教授與何麗君總幹事指導研究方向，議題執行期間多次拜訪中油獲得寶貴實務見解，感謝中油公司李順欽董事長及石化事業部長官同仁。本研究議題召開多場次專家座談會邀請產業發展署連錦漳署長、氣候變遷署黃偉鳴副署長前來指導及聽取業者想法，也獲得台塑、中油、長春、台聚、東聯、李長榮、台灣石化合成、中石化、中鼎等業者許多寶貴意見，才能讓本研究報告順利完成。感謝撰寫本專題報告的專家：第一章台灣綜合研究院陳建緯副院長及團隊；第二章第一節清大化工系汪上曉教授、成大化工系李瑞元教授，第二節工研院材化所蘇一哲副組長，及團隊成員黃聖夫、陳建穎、郭信良、金志龍、廖釗鋳、廖苡君、劉瑞珍、蘇稚琳、張昌榮；第三章工研院材化所張王冠副組長、劉柏逸經理；第四章黃淑娟副組長，及團隊成員朱仁佑、林哲增、胡志明、郭信良、陳健誼；第五章第一節台科大化工系游承修教授，第二節工研院綠能所黃至弘博士、材化所張名惠經理，第三節台大化工系童國倫教授，第四節清大化工系蔡德豪教授，及團隊成員劉紫璇；第六章成大資源系謝秉志教授、中油探採研究所陳大麟所長、黃乙倫研究員、王志文博士、葉庭瑜研究員；第七章第一節清大化工系談駿嵩教授、工研院材化所盧敏彥博士；第八章中技社經產中心邱炳嶽研究員；以及提供第四、七章案例的工研院材化所劉致中組長、張志強資深研究員。

財團法人中技社 董事長

潘文炎

2023 年 12 月

目 錄

序	I
目 錄	III
圖目錄	VII
表目錄	XI
執行摘要	1
一、 問題及目標	1
二、 研究範圍及內容	1
三、 研究結論	2
四、 改善對策及建言	5
第一章 國內外減碳法規政策與國際石化業者減碳策略.....	7
第一節 國際減碳法規與政策	7
一、 歐盟	8
二、 美國	12
三、 中國	15
四、 日本	17
第二節 台灣淨零減碳法規	21
一、 氣候變遷因應法	21
二、 我國 2050 淨零排放路徑	23
三、 上市櫃公司永續發展路徑圖	25
第三節 國際石化業者減碳策略	29
一、 巴斯夫(BASF)	29
二、 陶氏化學(DOW Chemical).....	30
三、 中國石化(Sinopec).....	31
四、 三井化學(Mitsui Chemicals)	32
五、 住友化學(Sumitomo).....	33
六、 LG 化學的減碳淨零措施與淨零路徑	34
第四節 小結	35
第二章 石化業節能技術.....	37
第一節 石化業智慧節能與電氣化	37
一、 智慧製造及數位轉型	39

二、 人工智慧應用	46
三、 電氣化與製程強化	49
四、 小結	55
第二節 低碳高效製程技術	56
一、 應用於蒸餾節能的熱泵技術發展	56
二、 精準反應製程技術	66
三、 低碳練染同步技術發展	73
第三章 石化產業廢水再生技術應用	79
一、 全台工業及石化業用水現況	79
二、 節水相關法規政策	80
三、 石化廠廢水特性與再生方案	81
四、 廢水再生技術與經濟分析	85
五、 應用案例介紹	91
六、 結論	98
第四章 替代原料	101
第一節 塑膠循環	102
一、 智慧分選技術	102
二、 廢塑膠化學回收	104
三、 同系列材質包裝設計	113
四、 石化產業結合資源回收業之實務案例	114
第二節 生質基替代原料	124
一、 生質輕油(Bio-Naphtha)	124
二、 生物基芳香環化學品(Bio-BTX)	126
三、 木質纖維素生產化學品(Cellulose based platform chemicals)	128
第三節 小結	132
第五章 二氧化碳捕獲與藍氫技術	135
第一節 化學吸收法捕獲二氧化碳	135
一、 化學吸收法補碳成本估算	137
二、 天然氣脫硫及 CO ₂ 化學吸收	140
三、 Petra Nova 捕碳計畫	141
四、 減少土地需求的規劃方向	142
五、 國際與國內發展之超重力化學吸收捕碳製程	145
六、 小結	147

第二節 吸附法捕獲二氧化碳	149
一、 吸附劑的選擇條件	149
二、 吸脫附操作方式	150
三、 吸附劑種類	151
四、 製程與實際應用	156
五、 小結	167
第三節 薄膜法捕獲二氧化碳	169
一、 CO ₂ 薄膜捕獲技術發展方向	171
二、 CO ₂ 薄膜捕獲技術實廠測試案例	175
三、 小結	178
第四節 甲烷雙重組藍氫技術	179
一、 甲烷蒸氣重組反應製氫：直接碳排(化學反應)與間接碳排(用電) 之評估	180
二、 結合甲烷乾式重組反應與蒸氣重組反應之雙重組反應	182
三、 重要參數評估：反應溫度、進料成分、觸媒成分	185
四、 小結	188
第六章 台灣碳封存技術發展研析與長程挑戰與機會	189
一、 深部鹽水層封存二氧化碳的機制	189
二、 台灣進行二氧化碳地質封存的概念可行性	191
三、 台灣的碳封存試驗及評估計畫	192
四、 台灣碳封存技術挑戰與機會	193
五、 小結	200
第七章 二氧化碳再利用	201
第一節 捕獲二氧化碳後的直接利用	201
一、 以高壓 CO ₂ 做為綠色溶劑之應用	202
二、 植物工廠/海洋牧場	210
三、 微藻	211
第二節 二氧化碳用於生產化學及能源產品	212
一、 二氧化碳捕獲及再利用(CCU)的應用情境	212
二、 二氧化碳轉化甲醇	213
三、 二氧化碳轉化烯烴技術	214
四、 二氧化碳轉化二甲醚(DME)	216
五、 二氧化碳轉化芳香烴	217
六、 二氧化碳轉化碳酸二烷基酯(DRC)	217

石化業邁向 2050 淨零碳排技術發展與政策探討

七、 二氧化碳轉化液體燃料	218
八、 異業結合-鋼化聯產	219
第四節 小結	223
第八章 結論與建議.....	225
一、 國內外法規政策與國外石化業者發展策略	225
二、 石化業者減碳遭遇困難	226
三、 技術發展方向	229
四、 建議	233

圖目錄

圖 1.1 歐盟綠色政綱架構圖.....	8
圖 1.2 公正轉型機制三大資金來源.....	9
圖 1.3 CBAM 憑證於 EU ETS 過渡期間支付計算.....	12
圖 1.4 CCA 產業基準線調整方式.....	15
圖 1.5 溫室氣體減量及管理法架構.....	22
圖 1.6 2050 淨零轉型之 12 項關鍵戰略.....	23
圖 1.7 臺灣 2050 淨零轉型路徑規劃.....	24
圖 1.8 石化業淨零轉型策略及路徑.....	25
圖 1.9 上市櫃公司永續發展路徑圖時程規劃.....	25
圖 1.10 台塑石化子公司盤查規劃.....	26
圖 1.11 BASF 溫室氣體排放發展.....	29
圖 1.12 DOW 脫碳與成長路徑.....	30
圖 1.13 三井化學減少溫室氣體排放與避免產品生命週期的排放.....	33
圖 1.14 LG 集團預計 2050 年完全使用再生能源.....	35
圖 2.1 化學程序示意圖.....	38
圖 2.2 傳統化學工廠公用系統示意圖.....	38
圖 2.3 狹點理論示意圖.....	41
圖 2.4 製程實際熱回收狹窄分析示意圖.....	41
圖 2.5 蒸餾塔產物純度分佈.....	42
圖 2.6 單位能耗與產量關係.....	43
圖 2.7 模型預測控制示意圖.....	46
圖 2.8 人工智慧發展歷史.....	47
圖 2.9 帶記憶層序列對序列模型.....	48
圖 2.10 人工智慧模型預測控制在 C4 分離塔實施結果.....	49
圖 2.11 基於化石燃料的傳統製程能源系統.....	52
圖 2.12 可能的電氣化製程能源系統.....	52
圖 2.13 傳統集中式整廠公用事業系統.....	53
圖 2.14 結合再生電力的電氣化整廠公用事業系統.....	53
圖 2.15 使用天然氣產生蒸汽的再沸器有效功 cA	57
圖 2.16 電力碳排強度 500 gCO ₂ /kWh 下不同 COP 的減碳潛力.....	58
圖 2.17 機械氣體再壓縮(MVR)流程.....	61
圖 2.18 內熱整合蒸餾塔(HIDiC)流程.....	62
圖 2.19 氣體壓縮(VC)流程.....	63

圖 2.20 (a) TAHP-以線性馬達為驅動力(左)；(b) TAHP-以熱聲引擎為驅動力(右)	64
圖 2.21 AHP 化學能-熱能轉換工作原理	64
圖 2.22 反應器設計與演進	67
圖 2.23 反應物混合與反應型式	67
圖 2.24 微反應器技術優勢	69
圖 2.25 TFMB 反應生成 p-NB 及副產物	70
圖 2.26 利用微反應器進行多步驟串聯合成阿達巴林	72
圖 2.27 染整流程之碳排放關係價值鏈	74
圖 2.28 傳統染整製程與練染同步化染整製程圖	75
圖 3.1 全台工業及 110 年各縣市石化業用水量	79
圖 3.2 一般石化廠廢水處理再利用示意圖	84
圖 3.3 某石化廠廢水處理程序改善示意圖	85
圖 3.4 逆滲透過濾示意圖	87
圖 3.5 薄膜結垢形成示意圖	88
圖 3.6 電透析技術示意圖	89
圖 3.7(a) EDR 水處理廠及海淡 RO 水處理廠之碳排比較；(b)碳排來源分析	90
圖 3.8 不同脫鹽技術之操作成本分析	91
圖 3.9 某石化產業水資源中心之倒極式電透析系統處理流程	92
圖 3.10 倒極式電透析水回收系統：(a) SMF 單元；(b) EDR 單元	93
圖 3.11 林園污水處理廠 EDR 模廠處理流程示意圖	94
圖 3.12 BioNET 技術示意圖	94
圖 3.13 林園污水處理廠水回收系統模廠：(a) BioNET 單元；(b) UF 單元；(c) EDR 單元	95
圖 3.14 林園污水處理廠水回收系統模廠長期運轉結果	95
圖 3.15 臨海工業區水回收模廠處理流程	97
圖 3.16 EDR 系統進流導電度與水回收率之關係	98
圖 4.1 2020 及預估 2025 年全球化學品及其衍生材料所需之內含碳的量及來源	101
圖 4.2 分選料源品質，決定再生途徑的最適化	103
圖 4.3 廢塑膠產製輕油的新應用路徑	105
圖 4.4 PET 之甲醇與醇解解聚反應式	110
圖 4.5 PC 化學解聚製程	111
圖 4.6 熱塑性聚酯彈性體的(a)微觀形態示意圖，以及(b)膜材 TEM 影像	112
圖 4.7 Houston 再利用聯盟(HRC)參與單位與其角色	115
圖 4.8 Wendy's、Berry 與 LyondellBasell 合作塑膠杯的封閉循環	116

圖 4.9 SABIC、P&G 與 Fraunhofer 合作口罩的封閉循環	117
圖 4.10 全球塑膠化學回收產能趨勢(2006-2026).....	119
圖 4.11 BASF 的 ChemCycling [®] 專案與循環產業鏈.....	120
圖 4.12 荷蘭 Circularise 公司結合石化業者參與區塊鏈技術應用於 ISCC PLUS 認證..	123
圖 4.13 HVO process 流程示意圖	125
圖 4.14 纖維素生產的平台化學品	128
圖 4.15 HMF 衍生產品示意圖	130
圖 4.16 我國簡易塑膠物質流向圖	133
圖 5.1 CO ₂ 化學吸收製程示意圖	136
圖 5.2 化學吸收捕碳製程之實績.....	137
圖 5.3 不同排放源煙道氣之 CO ₂ 分壓對捕碳成本之影響	138
圖 5.4 捕碳廠規模對捕碳成本之影響.....	139
圖 5.5 30% MEA 之 Lean loading、CO ₂ 移除效率對再生能耗影響	141
圖 5.6 WA Parish 捕碳廠側視圖(左)、俯視圖(右).....	142
圖 5.7 中央汽提塔示意圖(本研究繪製)	143
圖 5.8 中國中石化之 RPB 捕碳製程(30,000 噸/年).....	146
圖 5.9 二氧化碳吸附系統示意圖	157
圖 5.10 澳洲 Hazelwood 電廠捕獲系統模廠.....	158
圖 5.11 華東理工大學 3 床之真空吸脫附系統模廠.....	159
圖 5.12 波蘭雙迴流真空變壓技術之吸附塔中雙層活性炭配置	160
圖 5.13 KCC 移動床技術流程及其先導試驗系統.....	161
圖 5.14 日本關西電力株式會社舞鶴發電廠設置之 KCC 系統位置.....	161
圖 5.15 美國 SRI 位於 NCCC 之 40 kWe 吸脫附測試系統	162
圖 5.16 美國 TDA 之吸附系統	163
圖 5.17 水泥廠中 VeloxoTherm TM 之操作流程概念圖	164
圖 5.18 鈣迴路二氧化碳捕獲系統示意圖	165
圖 5.19 鈣迴路二氧化碳捕獲系統-花蓮和平台灣水泥廠.....	167
圖 5.20 苫小牧 CCS 示範設施	175
圖 5.21 美國德州日落鎮內 Mallet 廠區鳥瞰圖。	176
圖 5.22 Mallet 廠內處理程序流程圖 ²¹⁷	178
圖 5.23 以熱力學平衡計算在不同操作溫度下，甲烷蒸氣重組反應之(a)直接碳排量(kg CO ₂ /h)，以及(b)能源消耗功率(kW)和其對應的間接碳排量(kg CO ₂ /h).....	181
圖 5.24 甲烷雙重組反應系統，結合下游產物分離(Route 1)及未轉化氣體之回流再利用 (Route 2)。	183

圖 5.25 熱力學平衡計算之 700 °C 反應溫度下甲烷蒸氣重組以及甲烷雙重組分別產生的氫氣與二氧化碳。	184
圖 5.26 熱力學平衡計算之能耗與氫氣分離效率關係圖：(a) 固定溫度(-210 °C)。 (b)固定壓力(30 bar)。	185
圖 5.27 熱力學平衡計算之不同進料比例下(甲烷：水蒸氣：二氧化碳)溫度變化對於二氧化碳轉化率的影響。	187
圖 6.1 管線運輸成本與運輸流率的關係	194
圖 6.2 國際 CCUS Hub 分布圖	196
圖 6.3 台灣二氧化碳大型排放源	199
圖 6.4 CCUS 聚落&藍氫雙軌模式營運示意圖	200
圖 7.1 逆水煤氣變換反應 CO 產物 FTS 應用	215
圖 7.2 烯烴生產製程	216
圖 7.3 CO ₂ 利用費托合轉化為液體燃料	219
圖 7.4 Steelanol 碳減排專案計畫中工業廢氣轉化為生質乙醇的製程	222

表目錄

表 1.1 進口歐盟產品享有的免費配額額度.....	11
表 1.2 CCA 管制項目.....	14
表 1.3 日本綠色成長戰略發展目標.....	17
表 1.4 東京 ETS 與埼玉 ETS 比較.....	19
表 1.5 J-credit 市場制度概要.....	20
表 1.6 《溫室氣體減量及管理法》與《氣候變遷因應法》比較.....	22
表 1.7 上市櫃公司永續發展路徑圖五大面向的推動措施.....	27
表 2.1 製程工業電氣化加熱選項.....	51
表 2.2 用於各種燃料碳排 cFuel 及對應 cSteam.....	57
表 2.3 批次反應器與微反應器反應特性之差異.....	67
表 2.4 小分子化合物在水中擴散速率.....	68
表 2.5 硝基化合物與其用途.....	70
表 2.6 不同染色機特性應用比較.....	76
表 2.7 傳統浸染式與低能耗染色機應用比較.....	77
表 3.1 石化產業製程廢水水質特性.....	81
表 3.2 石油化學業放流水水質項目及限值.....	82
表 3.3 應用於純水系統之離子交換樹脂技術碳足跡.....	86
表 3.4 脫鹽技術比較.....	90
表 3.5 某石化產業放流水和 EDR 淡水水質.....	92
表 3.6 EDR 模廠之操作成本估算.....	96
表 3.7 水回收驗證模廠操作成本估算.....	98
表 4.1 傳統輕油與生質輕油性質比較.....	125
表 4.2 石化、生質、回收 BTX 差異比較.....	127
表 4.3 工研院在 HMF、FDCA、DMFDC、PEF 的技術規格.....	131
表 5.1 CO ₂ 吸收劑特性.....	136
表 5.2 全球發展鈣迴路二氧化碳捕獲技術之團隊與模廠.....	166
表 5.3 吸附法模廠現況整理.....	168
表 5.4 幾種二氧化碳分離與捕獲方法的設計參數與能源消耗比較.....	169
表 5.5 燃燒後捕獲使用的膜技術種類.....	170
表 5.6 氣體分離所用之薄膜分類.....	171
表 5.7 Mallet 薄膜分離程序之進料氣體成份 ²¹⁷	177
表 7.1 常用於超臨界流體之物質於不同相態中的物性比較.....	203
表 7.2 各種泡材的孔洞尺寸及密度.....	209

石化業邁向 2050 淨零碳排技術發展與政策探討

表 7.3 目前國際上 CO ₂ 合成甲醇量產進展	214
表 7.4 鋼鐵工業尾氣的種類及成分占比(vol%).....	220

執行摘要

一、問題及目標

2023 年台灣通過「氣候變遷因應法」，確立邁向 2050 淨零碳排的決心，石化、鋼鐵、水泥、半導體等耗能產業首當其衝，需要透過增加使用綠電、替代原料，發展 CCUS 技術等方式減少碳排放量。國際上則是提倡「減煤」，2023 年底在杜拜舉辦之 COP28，各國一致同意「以公正、有序且公平」的方式脫離化石燃料，50 間石油與天然氣公司簽署「石油和天然氣脫碳憲章」(Oil and Gas Decarbonisation Charter)，宣示 2050 年以前削減「公司營運」產生的碳排放。國際上也透過貿易手段強迫企業減碳，如歐盟 CBAM 法案，業者需要透過各種方式減碳使其產品排碳量不超出歐盟標準，否則出口歐盟的產品會被徵收碳邊境稅；美國 CCA 法案納管 25 個產業的碳排放，同樣以類似方式課徵碳稅促使業者減少出口產品的含碳量。台灣政府預計於 2024 年徵收碳費，目標是溫室氣體年排放量合計值達 2.5 萬公噸二氧化碳當量以上的電力業及製造業為收費對象。在國內外法規要求下，碳排放將成為企業成本的一環，發展減碳技術刻不容緩。

石化業的生產過程需要大量熱能，工廠需設置鍋爐或汽電共生廠作為公用設備，透過燃燒煤炭、天然氣來獲取蒸氣做為製程使用。此外，石油為石化業的原料來源，也是石化業碳排的主要來源，要完全取代困難度極高。石化業要完成低碳轉型等於是從原料到製程都需要有全新的技術才能夠做到，相較於半導體業只需將電力改為綠電即可減少 80% 的排碳量，困難度相差甚大，需要產業與政府來共同努力。

石化業過去節能減碳已做了許多努力，碳排放量相較於過去已大幅降低，但距離淨零碳排仍有很大的距離，要做到更進一步的減碳，需要政府的大力支持才有辦法做到，以二氧化碳捕獲與封存(CCS)為例，美國抗通膨法案提供每噸 85 美元的財稅補貼，才使 CCS 減碳具有經濟可行性；日本、美國、歐盟都提供各式減碳技術的示範計畫，提供經費供企業將技術往商業化發展。在氣候變遷因應法通過後，各部會要開始為各自負責的部門制定減碳計畫，為了反映石化業當前的產業與技術現況，本專題報告透過產業座談會收集業者對於當前政府減碳政策，包括碳費徵收與使用、減碳技術發展規劃、減碳法規需求、碳權等問題提出看法；並且邀請產學研專家介紹各種短中長期減碳技術，提供給業者與政府做為發展減碳技術的參考。

二、研究範圍及內容

本專題報告由石化公會與中技社經產中心共同規劃，由石化公會曹明理事長

擔任召集人，談駿嵩教授與何麗君總幹事指導研究方向，邀請台大、清華、成大、台科大、中油、工研院、台綜院等 20 餘位專家學者及研究團隊協助撰稿，由中技社經產中心負責彙整校訂後完成。研究過程舉辦多次座談會，邀請產業發展署連錦璋署長、氣候變遷署黃偉鳴副署長前來指導及聽取業者想法，也獲得台塑、中油、長春、台聚、東聯、李長榮、台灣石化合成、中石化、中鼎等業者許多寶貴意見，彙整於本報告之結論與建議。

報告第一章「國內外減碳法規政策與國際石化業者減碳策略」由台灣綜合研究院陳建緯副院長及團隊負責撰寫；第二章「石化業節能技術」，第一節由清大化工系汪上曉教授、成大化工系李瑞元教授負責撰寫，第二節由工研院材化所蘇一哲副組長，及團隊成員黃聖夫、陳建穎、郭信良、金志龍、廖釗錡、廖苡君、劉瑞珍、蘇稚琳、張昌榮負責撰寫；第三章「石化產業廢水再生技術應用」，由工研院材化所張王冠副組長、劉柏逸經理負責撰寫；第四章「替代原料」，由工研院材化所黃淑娟副組長及團隊成員朱仁佑、林哲增、胡志明、郭信良、陳健誼負責撰寫；第五章「二氧化碳捕獲與藍氫技術」，第一節由台科大化工系游承修教授負責撰寫，第二節由工研院綠能所黃至弘博士、材化所張名惠經理負責撰寫，第三節由台大化工系童國倫教授負責撰寫，第四節由清大化工系蔡德豪教授及團隊成員劉紫璇負責撰寫；第六章「台灣碳封存技術發展研析與長程挑戰與機會」由成大資源系謝秉志教授、中油探採研究所陳大麟所長、黃乙倫研究員、王志文博士、葉庭瑜研究員負責撰寫；第七章「二氧化碳再利用」，第一節由談駿嵩教授負責撰寫，第二節由工研院材化所盧敏彥博士負責撰寫；第八章「結論與建議」由中技社經產中心邱炳嶽研究員負責撰寫；第四、七章之案例由工研院材化所劉致中組長、張志強資深研究員負責撰寫。

三、研究結論

(一) 石化業者減碳遭遇困難

國內外政府皆有相關的減碳目標、法規與政策，國際石化業大廠也積極投入，為了瞭解石化業者在規劃與實踐見碳過程中遭遇到的困難，本研究於執行期間召開多場座談會，邀請石化公會及石化業者提供意見，從中彙整相關意見提供政府參考。相關會議重點彙整如下。

1. 台灣石化業減碳發展現況：(1)鍋爐與汽電共生廠要煤轉氣，短期內中油無法供應足夠的天然氣，以及完成管線鋪設；(2)減碳成本極高，客戶必須先有低碳產品的需求才能轉嫁成本；(3)綠電成本過高，短期內難以與半導體業者競購。
2. CCS 發展：(1)法規尚不明確，只能進行地質探勘研究，需待法規完善後確認歸屬權、使用方式等，才能進行投資規劃；(2)美國抗通膨法案提供 CCS

減碳每噸 85 塊美金的補貼，目前尚未得知台灣政府的相關規劃，如無補貼業者不太可能利用 CCS 減碳；(3)需加速減碳設施的環評審查速度，否則難以達到 2030 年設定的 176 萬到 460 萬公噸減碳規劃；(4)政府需加強社會溝通的努力，讓人民認同低碳是必須發展的方向，並搭配科學數據來說服民眾地質封存有效且安全的方式。

3. 碳費與碳權：(1)台灣的碳費計算基礎與國外不同，政府需強化與民眾及環團的溝通，減輕業者的壓力；(2)資源循環為石化中下游公司的主要減碳策略，應提供碳費抵減做為誘因，將資源循環減碳納入氣候變遷因應法第 29 條。(3)石化業者的以大帶小政策需要的是技術上的交流，大公司可藉由協助供應鏈廠商減碳而取得碳權，是業者比較有能力的以大帶小方式，需要產發署與氣變署共同研議相關方案；(4)石化業可透過 CCS 與範疇二排放為主的產業(半導體、光電等)合作，透過投資取得石化業者減少碳排所獲得的碳權，為石化業創造 CCS 減碳的利基；(5)國內如東聯、長春等業者已有將 CO₂ 再利用的實績，讓業者取得二氧化碳再利用(CCU)的碳權，有助於促進發展以 CO₂ 為原料的產品。
4. 生質與廢棄物燃料：(1)生質燃料必須直接跟產地的農民合作做成生質燃料，才有辦法滿足未來的供給，建立供應體系不容易，發展速度不會太快；(2)固體再生燃料(SRF)可替代煤碳作為低碳燃料，但 SRF 近來遭受民眾與環團抗議，政府應對此表達立場，否則石化業者也會擔心投資 SRF 汽電共生廠，容易受到外部因素干擾。
5. 減碳路徑的揭露：目前業者能選擇的減碳路徑有限，而且都非常昂貴，需要依賴新的技術問世才能夠有明確的路徑，這是石化業者的難處。在減碳技術成熟度尚不明確的情況，無法揭露明確的減碳路徑，以免造成困擾。

(二) 技術發展方向

1. AI 製程節能：化工廠已具備基礎數位化設施，AI 製程節能利用廠內既有歷史數據，透過大數據分析來識別能源效率低下的主要來源，並且使用人工智慧控制減少能源消耗，可以減少 10-20%的排碳量，在不需投資額外設備的情況下，AI 製程節能是 2025 年之前石化業減碳的重點項目。
2. 製程節能設備：製程節能設備的需與製程相結合，例如：熱泵應用於蒸餾系統，微反應器應用於硝化反應、氧化反應、有機硼化物等放熱反應，練染同步化技術應用於紡織物染色。
3. 再生水：目前國內水再生法規要求開發單位使用一定以上水量，強制使用 50%以上再生水，再生水技術應盡量減少能耗。目前國內如南科、楠梓、臨海等工業園區皆已設置再生水廠，並使用較為節能的 EDR 技術。廢水中

含有有機物質，可利用厭氧消化產生沼氣，一方面可以做為生質燃料使用，另一方面可以減少處理有機廢水所需的藥品與能耗，對於減碳有一定的成效。

4. 替代原料：替代原料可分為廢塑膠回收與生質基替代原料，用來替代石油煉製生產的原料，降低產品碳足跡。塑膠循環以化學回收法為發展重點，透過高溫、醇解、酸解等方式將塑膠裂解回收，期望獲得高純度、低色度之聚合級單體才能夠做為生產原料使用，目前台灣料源不足，需透過進口來增加料源。生質基替代原料，目前技術發展趨勢是將非糧料源的木質纖維素如稻桿、蔗渣等，轉化成所需的生質原料，目前發展困境在於難以取得穩定的料源。
5. 二氧化碳捕獲(CO₂ Capture)：目前 CO₂ 捕獲技術以使用醇胺吸收劑的化學吸收法為主流技術，商用捕獲廠規模為 100-150 萬噸/年，成本介於 60-120 美元/噸之間，仍需依賴政府補貼來運行。吸附法與薄膜法則有部分技術進行模廠試驗，如技術能夠突破，或可應用於小規模的 CO₂ 捕獲需求。台灣業者發展設置 CO₂ 捕獲廠，土地問題將是發展關鍵之一，電廠、工廠多半未預留可供捕獲設施使用的土地。
6. 藍氫技術：低碳氫氣可提供低碳燃料，或做為 CO₂ 再利用的原料，天然氣重組(SMR)產氫結合 CCS 可以將重組過程產生的 CO₂ 封存，使氫氣從灰氫變成藍氫，符合減碳的需求。甲烷蒸氣重組與乾式重組的製氫技術，其優點是能夠增加製程可行性、增加產氫量及減少 CO₂ 排放，雙重組反應符合永續化工製程的理念，仍需優化程序設計，降低能源消耗，以及開發觸媒，降低反應溫度，減少能源使用及碳排放。
7. 二氧化碳再利用(CO₂ Utilization)：國內石化業者以 CO₂ 為原料生產的產品為碳酸乙烯酯、聚碳酸酯及醋酸等化學品，每年約可消耗 20 萬噸 CO₂，另有製作碳酸飲料、供應工業用 CO₂ 之用途。若要大量消耗 CO₂，需發展 CO₂ 做為碳源與氫氣反應生產如甲醇、二甲醚、碳酸二甲酯、甲酸、甲烷等需求量大的產品，以 CO₂ 替代石油生產化學品及燃料，其關鍵技術為 CO₂ 轉化為 CO 之逆水煤氣反應(RWGS)，以及 CO 與 H₂(合成氣)透過多個步驟轉化為各種化學品或燃料，目前的 TRL 為 5 至 7 之間，距離成熟可商用的 TRL 9 仍有一段差距。此外，也必須取得穩定供應且成本低廉的低碳氫氣(綠氫或藍氫)。
8. 二氧化碳封存(CO₂ Storage)：二氧化碳封存與採油技術類似屬於成熟技術，而封存地點在過去能源國家型計畫的調查結果，可以大致了解台灣西部沿海的鹽水層潛力封存點，可供政府或業者探勘與封存 CO₂。CCUS 是由石化業主導的減碳方式，可結合區域內的發電、鋼鐵、氣體等產業，形成 CCUS

hub 的營運模式，透過管線連結工業區各家業者，將捕獲後的 CO₂ 運到再利用的工廠，或是將其封存。各家公司合資設立 CCUS hub 的營運公司，加上政府的法規及政策補貼，使 CCUS 減碳成為新的行業。本報告第十三章提供高雄地區發展 CCUS Hub 與低碳燃料(藍氫)供應構想。

四、改善對策及建言

淨零成本非常高，在減碳技術路徑還不明確的情況下，石化業需採取穩步推動的策略，兼顧企業生存與減碳要求的平衡。石化業者的排碳結構主要來自使用化石燃料的鍋爐與汽電共生廠，無法單純依賴購買綠電來達成減碳任務，還需要透過智慧節能、生質燃料、CCUS、儲能等方式來達成淨零目標，石化業減碳較其他產業減碳的難度更高，需要政府提供更多的資源來協助。目前在政策推動方面，仍有許多不確定性，需要政府提供符合減碳技術發展的環境，確保業者在減碳的過程仍可保有競爭力。本研究提出以下建議：

(一) 碳費收取與使用

1. 政府碳費計算的方式應與業者及環團充分溝通，尤其是台灣與國外具有計算方法的差異，以及減碳各項制度與政策也有差異，不可完全比照國外做法。
2. 碳費收取在於促進排碳業者積極投入減碳，因此在碳費的使用上，應確立合理的比例用於協助業者減碳，投資包括研發補助、投資補助、公用設備補助(例如 CCS 的輸送管線、儲槽、港區設施等)。

(二) 政府需建立碳權制度，使業者具備發展減碳技術的利基

1. 應儘速建立碳權認定辦法與抵換機制，讓業者有投資減碳計畫的誘因。業者對於 CO₂ 封存、替代原料循環使用、CO₂ 再利用等皆有意願投入，不過尚無明確的認定方法與抵換機制，在規則尚未明確的情況下，業者對於此態度較為保留。
2. 產業發展署規劃之以大帶小的方向應朝向碳權取得與抵換的方向來規劃，大企業協助中小企業減碳如能取得碳權，將大幅增加企業投入的吸引力。
3. 石化業具有範疇一實質減碳的能力，應研究跨產業及供應鏈垂直整合減碳模式協助供應鏈減碳。石化業者可透過發展 CCSU、資源循環等方式，提供低碳原料有助於下游供應鏈減碳；或與範疇二之業者(半導體、光電等)合作投資減碳技術，透過碳權共享的方式，使範疇一為主的石化業之減碳成果可以與其他產業共享，同時也減少石化業的成本負擔。

(三) 發展負碳技術的關鍵

1. 補貼政策：目前 CCS、CCU、DAC 等技術的減碳成本太高，國外政府透過提供高額補貼來實施，例如美國抗通膨法案提供 CCS 每噸 85 美元、CCU 每噸 130 美元的補貼。政府需提供有效的補貼方案，否則負碳技術在台灣難以推動。
2. 加快環評速度：政府訂定負碳技術減碳的目標在 2030 年是 176 萬到 460 萬公噸之間，2050 年要達到 4020 萬公噸，依照現在環評的速度將會曠日費時，2030 年要達到 100 萬噸非常困難。政府應提出加快負碳技術環評審查速度的方式。
3. 政府在 CCSU 的角色：政府需積極推動以下工作，包括成本補貼、碳權取得、民眾溝通、封存地點開發與監測等。目前正在規劃 CCSU 的業者皆表明沒有政府在法規政策上的支持，CCSU 難以推動，政府的角色需更加凸顯。
4. CO₂ 捕獲土地需求：一個商業化年捕獲 100 萬公噸的捕獲設施需要約 5,000 坪的土地，對於台灣的業者是很大的難題，政府在土地方面需要去協助業界。建議企業與研究機構要發展技術，設法將製程設備往上推疊，減少土地需求，才有機會降低成本。

(四) 替代原料

1. 塑膠循環原料的需求大，除了化學回收技術需持續研發之外，料源不足是主要發展問題，政府可考量讓業者進口廢塑膠或裂解油等原料，減少對上游化學品的需求，也可有效降低塑膠產品的碳足跡。
2. 生質基替代原料能夠提供大量替代原料，目前以非糧食作物為國際發展主軸。台灣缺乏大面積種植相關產品導致發展受限，應持續鼓勵研究單位發展纖維素水解技術，讓農業廢棄物能夠充分被利用；或是將技術輸出國外，利用國外的充足產量，進行加工處理後再送回台灣使用。

第一章 國內外減碳法規政策與國際石化業者減碳策略

國際減碳行動已行之有年，1994 年起，聯合國氣候變化綱要公約(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)正式生效，透過每年締約方會議(Conference Of the Parties, COP) 的召開，建立氣候變遷相關協議，UNFCCC 規範締約方有義務提交國家清冊報告。而 COP21 簽訂的巴黎協定(Paris Agreement)希望將本世紀全球氣溫上升幅度限制在 2°C 以內，同時進一步尋求將氣溫上升幅度限制在 1.5°C 以內的措施，且規範締約方每 5 年須提送一次國家自定貢獻(Nationally Determined Contributions, NDC)。2021 年召開的 COP26 中除了要求締約方提出 2050 年長期低碳發展策略並提高 NDC 目標，首次明確的針對化石燃料予以限制，要求各國逐步減少煤炭使用，降低政府對化石能源的補貼。2023 年舉辦之 COP28 達成「阿聯共識」(UAE consensus)，各國一致同意「以公正、有序且公平」的方式脫離化石燃料，50 家石油與天然氣公司簽署「石油和天然氣脫碳憲章」(Oil and Gas Decarbonisation Charter)，宣示 2050 年以前削減「公司營運」產生的碳排放。2023 年台灣通過「氣候變遷因應法」，確立邁向 2050 淨零碳排的決心，並預計在 2024 年針對排碳大戶課徵碳費，正式讓減碳成為產業的責任。本章對於國際減碳法規與政策、台灣減碳法規政策及國際石化業者的減碳策略進行資訊收集彙整。

第一節 國際減碳法規與政策

隨著減碳趨勢的推進，許多國家已將減碳目標納入法規，如歐盟訂定於 2050 年達碳中和。而透過碳訂價制度以促使企業減碳是近年許多國家執行的方向，如歐盟在 2023 年 10 月即將試行的 CBAM 法案，針對高碳排產業課徵碳稅以刺激業者減碳；明(2024)年將在美國上路的 CCA 法案納管 25 個產業的碳排放，同樣以課徵碳稅的方式促使業者的減碳作為。此外，各國政府亦藉由輔導能源轉型、獎勵減碳作為、推廣減碳行動等方式協助民間企業減碳。

多方關注國際減碳法規除了能使我國石化業者更瞭解各國政府實施的規範與機制，也能及早制定因應對策。我國政府也能藉由比較各國的法規政策，擬訂我國未來的策略走向，並評估未來對我國可能造成的衝擊。本節將針對我國石化產品主要出口市場的減碳法規與相關規範進行探討。

一、 歐盟

(一) 歐盟綠色政綱

早在 2018 年底，歐盟即提出共享潔淨地球(A Clean Planet for all)長期戰略願景，規劃透過具有成本效益的方式進行社會公平轉型，實現 2050 年溫室氣體淨零排放，戰略行動包含如最大限度地提高能源效率的效益、發展再生能源與電力的使用等。歐盟執委會續於 2019 年 12 月發布歐盟綠色政綱(The European Green Deal)，首要目標為歐盟在 2050 年達成溫室氣體淨零排放，使歐盟成為全球首個氣候中和經濟體。歐盟綠色政綱涵蓋廣泛氣候變遷相關應對方針，其闡明如何在減少排放的同時恢復自然環境、保育野生動植物，並藉此創造經濟機會與改善人民的生活品質，也關注產業部門轉型、勞工權益等面向。

歐盟綠色政綱涵蓋 10 大面向(圖 1.1)，在氣候方面以歐洲氣候法(Climate Law)約束，以 2050 年碳中和為目標，並在 2030 年相較 1990 年降低 55%溫室氣體排放；在循環經濟方面，其於 2020 年提出新循環經濟行動計畫(New circular economy action plan)，對包含永續產品、消費者賦權與歐盟對七個具循環潛力的部門之政策規劃的內容進行更新，並新增對塑膠產業可回收成分的強制要求，特別關注微塑料、生物基與可生物降解塑料。在資金方面，為實現公正轉型，歐盟通過 1,000 億歐元的預算執行公正轉型機制(Just Transition Mechanism)援助弱勢地區，資金包含公正轉型基金(JTF)、InvestEU 特設計畫與歐洲投資銀行與公部門的區域性貸款投資合作(圖 1.2)；歐盟規劃 2021 至 2027 年間於展望歐洲(Horizon Europe)研究與創新計畫投入 1,000 億歐元，並有 35%的研究經費用於氣候友善技術；在對外關係商藉由歐盟外交資源支持上述綠色政綱措施。



圖 1.1 歐盟綠色政綱架構圖¹

¹ 資料來源：The European Green Deal, European Commission(2019).

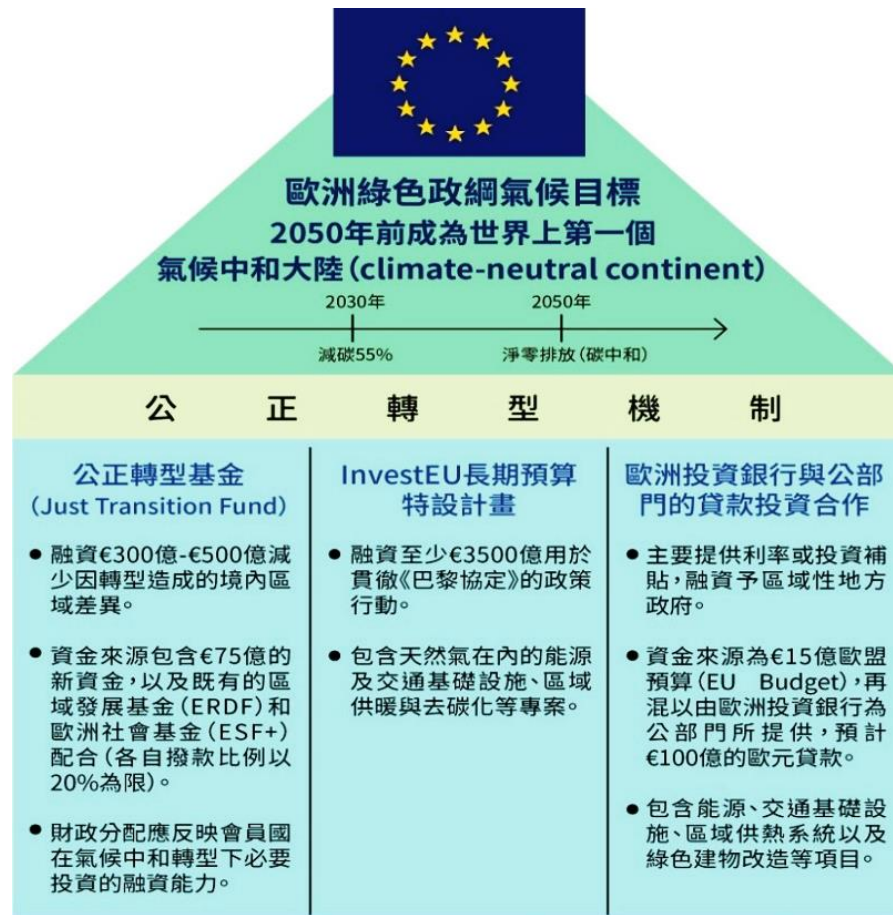


圖 1.2 公正轉型機制三大資金來源²

(二) 綠色政綱產業計畫

歐盟執委會於2023年2月提出綠色政綱產業計畫(Green Deal Industrial Plan)，作為對美國降低通膨法案的因應，主要藉由大規模投資援助、稅務減免等措施加速發展綠色產業。執委會續於3月提出淨零產業法(Net-Zero Industry Act)草案，以強化歐盟製造綠色能源技術的能力，使其能源系統更永續、安全。並搭配關鍵原物料法(Critical Raw Materials Act)草案，管制生產淨零產品的關鍵物資，並降低對第三方國家的依賴。在資金方面，強調更快速的獲取資金，歐盟將強化公共融資與歐洲資本市場聯盟(European Capital Markets Union)合作，促進私人投資於綠色轉型，使會員國更易提供輔助。在人才方面，透過培訓淨零專業人才，推動產業技能提升。在供應鏈與國際合作方面，計畫成立關鍵原物料俱樂部(Critical Raw Materials Club)，強化供應鏈並擺脫單一供應者。草案涵蓋八項淨零戰略淨零技術，分別為(1)太陽電池與太陽熱能；(2)陸域風電與離岸再生能源；(3)電池與儲能設備；(4)熱泵與地熱；(5)電解槽與燃料電池；(6)沼氣與生質甲烷；(7)碳捕獲和封存技術；(8)電網技術。除了八項主要技術，法案亦不同程度的支持其他淨零技術，

² 資料來源：台大風險中心。

包含永續替代燃料技術、核廢料最少化的先進核能技術、小型模組核反應爐與相關先進燃料技術。具體的推動措施包含：

1. 建立有利發展的環境：透過強化資訊流通、減少成立專案的行政成本、簡化核可程序與設立單一聯絡窗口的措施，以改善與發展利於投資淨零技術的環境。此外將將優先考慮能加強歐盟工業韌性與競爭性的淨零排放策略計畫，例如能安全儲存被捕獲之二氧化碳的場址規劃與建置。
2. 加速 CO₂ 捕獲：法案規範歐盟 2030 年的目標為二氧化碳儲存場址每年的注入容量應達 5,000 萬噸，歐盟石油與天然氣的生產業者需按其產量之比例做出貢獻，以促進碳捕獲和封存的發展作為經濟發展上可行的氣候解決方案，特別是針對難以減少溫室氣體排放的能源密集產業。
3. 促進市場進入：在公共採購或競標中，政府應考量產品的永續性與韌性，並建立標準，以推動公私部門對淨零技術的需求。此外鼓勵業者發展淨零技術，以提升技術的供應多樣性。
4. 提升技能：導入新興設施如設立淨零產業學院，為綠色能源轉型提供成熟的勞動力以支援淨零技術生產，並協同成員國、產業與其他利害關係人合作，設計培訓課程、重新訓練與提升相關人才的技术能力。
5. 推進創新：支持成員國設立監管沙盒(regulatory sandboxes)，在有彈性的監管條件下進行新興淨零技術測試，並促進創新。
6. 設置淨零歐洲平台：透過淨零歐洲平台(Net-Zero Europe Platform)的建立，協助歐盟執委會與成員國合作與交換資訊。除了能監測淨零產業法的執行情形，亦能透過平台確認計畫的財務需求、瓶頸、方案等，以刺激淨零相關產業投資。

除了上述能源技術，氫能亦是歐盟工業脫碳所需的能源，提高氫能產量能減少對化石燃料的依賴，滿足難以電氣化產業的需求。因此，歐盟透過歐洲氫能銀行(European Hydrogen Bank, EHB)的成立促進再生氫能生產的投資，預計投入 30 億歐元於此項目，預計在 2030 年前達成歐洲氫能產量 1,000 萬噸與氫能進口 1,000 萬噸。具體措施如補貼且降低早期再生能源的投資成本、收集需求端與供應端資訊以提升氫能流量、交易與價格的透明度、降低氫能投資風險以增強投資者、金融機構與產業的信心、支援歐盟內部與第三國再生氫能交易與談判的透明度和協調性等，預計 2023 年底投入運營。

(三) 碳邊境調整機制

歐盟碳邊境調整機制(CBAM)為解決碳排放交易系統(EU ETS)導致廠商避免成本提高而外移至歐盟以外地區的問題，旨在防止碳洩漏從而減少全球碳排放，以支持巴黎協定的目標，與此同時刺激境外產業降低產品碳足跡。2023 年 5 月 16 日，歐洲議會於歐洲公報刊登 CBAM 正式文本，並宣布於隔(17)日生效。2023 年

10月1日起，CBAM 過渡期正式開始，直至 2025 年 12 月 31 日止，正式施行日期定於 2026 年並將實際課徵碳稅，部分條文則提早於 2024 年 12 月 31 日開始實施。規範的產品部門經過多次修正，除了水泥、電力、肥料、鋼鐵與鋁，範圍擴大至氫氣、特定條件下之間接排放、部分前體化學品、若干鋁下游產品(例如鋁製容器、鋁製管配件等)與若干鋼鐵下游產品(例如螺釘、螺栓及相關產品)。歐盟執委會將於過渡期結束前評估，有機化學產品與聚合物等具有碳洩漏風險的貨物是否在 2026 年正式施行時被納入。長期而言，歐盟期望在 2030 年之前納入 EU ETS 涵蓋的所有產品。CBAM 規範產品在過渡期間享有 EU ETS 免費配額，2026 年起則逐年調降免費配額的額度，調整方式如表 1.1 所示，直至 2034 年 CBAM 完全取代 EU ETS。

表 1.1 進口歐盟產品享有的免費配額額度³

年份	免費配額額度
2026 年	97.5%
2027 年	95.0%
2028 年	90.0%
2029 年	77.5%
2030 年	51.5%
2031 年	39.0%
2032 年	26.5%
2033 年	14.0%
2034 年	0%

過渡期間，每個進口廠商或在特定季度進口貨物的間接海關代表須盡報告義務，向歐盟執委會繳交季度 CBAM 報告，並於該季結束後的一個月內繳交。2026 年 1 月 1 日起，進口廠商必須在每年 5 月 31 日之前提交上一年度 CBAM 申報，如第一次申報須在 2027 年 5 月 31 日前完成並提交 2026 年度的 CBAM 申報。

購買一張憑證能獲得排放一公噸二氧化碳當量(CO₂e)的權利，CBAM 憑證價格根據 EU ETS 每週平均收盤價格計算，若當週無拍賣，則使用拍賣平台上進行的最後一週拍賣平均收盤價格計算。廠商若是能提供進口產品已於原生產國支付碳成本之證明，則可得到歐盟相應費用的減免優惠(圖 1.3)。

³ 資料來源：European Parliament。

術製造商如碳捕獲、綠氫能源等，並為建築、製造業等領域創造就業機會。此外，藉由設立國家級的綠色銀行(Green Bank)提供融資給企業進行能源轉型，擺脫美國對化石燃料的依賴。

(三) 美國《清潔競爭法案》

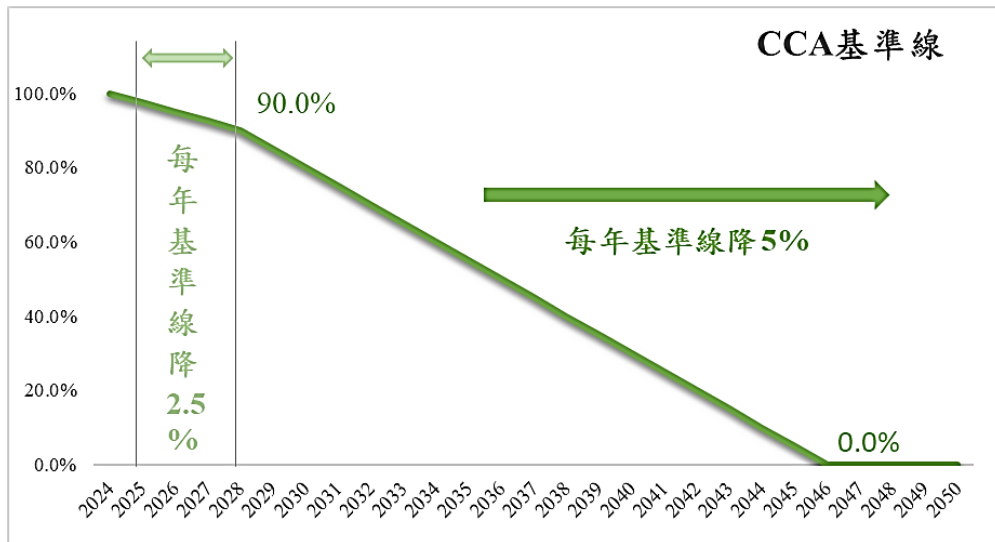
因應減碳浪潮，美國參議院於 2022 年 6 月 7 日提出清潔競爭法案(Clean Competition Act, CCA)，訂定於 2024 年正式上路，無過渡期。CCA 法案修訂美國 1986 年的國內稅收法(Internal Revenue Code)，是以碳強度與其他目的為基礎創建的碳邊境調整。該法案旨在解決溫室氣體排放的問題，亦能使美國國內的企業在全球市場上更具有競爭力。待 2024 年正式執行，將會對進口至美國的規範產品徵收二氧化碳排放費用。除此之外，為了能同時控管美國國內的二氧化碳排放量，若美國國內企業的碳排放量在其產業的平均值之上，則也須支付碳排放費用，作為對其高碳排的懲罰。

CCA 法案納管如精煉石油產品、石化產品等 25 個產業(表 1.2)，規範範圍將於 2026 年起擴大至使用能源密集型初級產品超過 500 磅的進口成品，2028 年起，會再調整範圍至使用能源密集型初級產品超過 100 磅的進口成品。美國國內製造商須向財政部提交其二氧化碳排放量、年度用電量以及年初級產量之數據資料。美國財政部根據廠商提供的資訊，計算出各個碳密集型產業在範疇 1(Scope 1)與範疇 2(Scope 2)的平均碳排放強度，作為該產業的基準線。2025 年至 2028 年期間，每年下調基準線 2.5%；2029 年起，則將擴大調整幅度，每年下調基準線 5%(圖 1.4)。碳費徵收起始價格訂定為 55 美元/噸 CO₂，並逐年以每年的通膨率加上 5% 作為價格漲幅，來自最低度發展國家的進口產品則免於被徵收任何碳稅費用。課徵到的碳排放收入的 75% 將用於資助產業，以刺激其對減少碳足跡的新技術投資，有利於刺激企業積極減排；其餘的 25% 收入則用來資助開發中國家脫碳及實踐淨零排放的行動。

表 1.2 CCA 管制項目⁵

	北美行業標準分類(NAICS 碼)	名稱
(1)	211120	石油開採
(2)	211130	天然氣開採
(3)	212112	地下採煤
(4)	322110	紙漿廠
(5)	322121	造紙廠
(6)	322122	新聞紙廠
(7)	322130	紙板場
(8)	324110	煉油廠
(9)	324121	瀝青鋪路混合物和砌塊製造
(10)	324122	瀝青瓦和塗料製造
(11)	324199	所有其他石油和煤炭產品製造
(12)	325110	石化產品製造
(13)	325120	工業氣體製造(僅適用於氫氣的生產)
(14)	325193	乙醇製造
(15)	325199	其他基本有機化學品製造(僅適用於己二酸的生產)
(16)	325311	氮肥製造
(17)	327211, 327212, 327213, or 327215	玻璃
(18)	327310	水泥
(19)	327410 or 327420	石灰和石膏產品製造
(20)	331110	鋼鐵
(21)	331313	鋁

⁵ 資料來源：S.4355 - Clean Competition Act。

圖 1.4 CCA 產業基準線調整方式⁶

三、中國

(一) 中國大陸 2030 年前碳達峰行動方案

中國大陸於 2021 年 10 月公布《2030 年前碳達峰行動方案》，期望以 2030 年作為二氧化碳排放量由增轉降的拐點，使經濟社會發展與二氧化碳排放脫鉤。方案工作原則為針對各行業因地制宜、分類施策，加強政策的系統性與協調性以推動重點領域及行業率先碳達峰，並堅持能源先立後破，以保障國家能源安全與經濟發展，逐步實現新能源替代。方案重點任務為「碳達峰十大行動」，涵蓋能源綠色低碳轉型行動、節能降碳增效行動、循環經濟助力降碳行動等。其中，在工業領域碳達峰行動中，規劃石化業可採取加強落後產業淘汰力度、引導企業轉變用能方式、推動石化化工原料輕質化、高效利用副產氣體、鼓勵企業節能升級改造、原料循環利用等低碳措施。目標在 2025 年將國內原油一次加工能力控制在 10 億噸以內，主要產品產能利用率提升至 80% 以上。國際合作方面期望深度參與全球氣候治理，發展綠色經貿、技術與金融合作，如再生能源、儲能、氫能、CCUS 等領域合作與技術交流，並推進綠色一帶一路的建設。透過政策保障，中國大陸力求加速建立統一規範的碳排放統計核算體系與健全的市場化機制，並盡快完善有利於綠色低碳發展的法律規範，如可再生能源法、清潔生產促進法等，以實現 2030 年碳達峰，並在 2060 年達碳中和。

(二) 中國大陸「碳中和補貼政策」

為因應中國大陸雙碳目標，亦即 2030 年碳達峰與 2060 年碳中和，部分地方政府推出碳中和補貼政策，獎勵投資減碳的企業，以下介紹部分地區政策。

⁶ 資料來源：S.4355 - Clean Competition Act。

1. 安徽蕪湖繁昌區—節能降碳支持措施

安徽蕪湖繁昌區人民政府於 2022 年發布節能降碳支持措施，針對主動關閉的高耗能高排放企業給予能耗獎勵，2022 年以每噸標準煤給予 900 人民幣補助，2023 年與 2024 年根據施政情況予以調整但不超過 900 人民幣，且補助總值不超過 800 萬人民幣。對停產轉型其他符合國家產業政策與繁昌產業定位的高耗能高排放企業，除上述獎勵外，再給予現行招商引資優惠政策。

2. 杭州《杭州市科創領域碳達峰行動方案》

杭州市科創領域碳達峰行動方案聚焦能源、工業、建築、交通、農業與居民生活六個領域，建構綠色低碳技術創新體系，以突破再生能源、儲能、氫能、CCUS、生態碳匯等技術為核心並給予資金支持。此外在培育低碳科技企業、建設科技創新服務平台等項目亦提供資金補助。

3. 北京通州區《通州區綠色化改造提升專案補助資金管理辦法(試行)》

為加速推動通州區製造業與軟體資訊服務業產業結構調整，2021 年 11 月，北京市通州區發佈通州區綠色化改造提升專案補助資金管理辦法，將綠色化補助資金用於對企業參與綠色製造體系建設、綠色化改造項目、發展再生能源替代專案、減碳發展等項目給予補助支援。該辦法鼓勵製造業企業建設綠色工廠、綠色供應鏈，最高一次性補助 100 萬人民幣；若生產綠色產品通過國家級評定，每項產品最高可被補助 10 萬人民幣，每年度每家企業最多獲 3 項產品補助。在減碳獎勵方面，鼓勵企業實施減碳、碳盤查、通過權威機構審核獲得碳中和企業認證，且對獲得認證的企業最高一次性補助 50 萬人民幣。對上年度全年碳排放強度(年度企業碳排放值/當年企業產值)較前一年度下降 5% 及以上之企業，與企業通過非交易行為實際減少二氧化碳排放總量上年度比之前一年度的減少量為 500 噸及以上者，經審核後，減少的 CO₂ 排放量，以不超過 200 人民幣/tCO₂e 的補助標準提供獎勵，最高補助 50 萬人民幣。

(三) 中國國家碳交易體系

中國大陸自 2021 年起建立「中國國家碳交易體系」，對國內電力產業課徵碳稅，包含汽電共生與其他產業的自備電廠，該體系針對每年排放超過 2.6 萬噸 CO₂e 的電力產業，共超過 2,100 家發電公司。碳交易體系所涵蓋的範圍超過 40 億噸二氧化碳，占中國大陸碳排放量 40% 以上，2021 年共針對 1.79 億噸 CO₂e 的排放量完成交易，未來規劃將逐步納入包含石化業在內的 7 個高耗能產業。除此之外，尚有建立八個地區碳市場試點，涵蓋未納入國家體系的產業，其中有 3 個碳交易試點覆蓋石化業，分別為北京、天津與福建試點，並可望在未來被納入國家體系。

四、日本

(一) 日本地球溫暖化對策推進法

因應京都議定書的簽署，並配合巴黎協定推動 2050 年以前達成淨零碳排，日本國會於 2021 年 5 月通過《地球溫暖化對策推進法》修正法案，作為日本減碳措施之法律依據。修正案以日本在 2050 年以前實現脫碳社會為基礎理念，規範都道府縣等地方政府須訂定與公開具體的再生能源導入目標，並由日本環境省提供相關人才支援。此外增設再生能源促進區域制度，評估建造再生能源發電設施可同時兼顧安全性與經濟性之地區。法案亦規範企業的溫室氣體排放量須以營業據點為單位做統計且對外公開、數位化，以電子系統計算、報告與公開企業溫室氣體排放制度，使大眾能具體看見企業投資於減少溫室氣體排放量的成果，並由地球溫暖化預防推進中心(JCCCA)加強對企業的宣導。藉由企業溫室氣體排放可視化，督促企業自行訂定減碳目標與實際執行。

(二) 日本推動企業減碳措施

1. 制定綠色成長戰略

日本經濟產業省(METI)選定 14 個重點領域，並分別訂定各個領域的實際的發展目標(表 1.3)，有助於達成 2050 淨零碳排。

表 1.3 日本綠色成長戰略發展目標

1. 離岸風電	2040 年達成離岸風電機組發電容量 3,000-4,500 萬 kw。
2. 燃料氫	目標為 2030 年混燒比例達 20%，發展以氫為燃料之火力發電技術，且於 3 年內進行實證研究。
3. 氫能	2030 年使用量達 300 萬噸、2050 年達 2,000 萬噸，並將氫之製造成本壓低至 20 日圓/立方公尺以下。
4. 核能	推動日本企業成為小型爐國際協力計畫主要成員，與他國核能相關單位合作推廣日本的高溫瓦斯爐規格。
5. 汽車、蓄電池	2030 年代中期禁賣燃油車；2030 年代內將車用蓄電池的價格壓低至 1 萬日圓/kwh。
6. 半導體、資通訊	立法限制資料處理中心使用的電力必須使用一定比例的再生能源；2040 年實現資通訊產業之淨零碳排。
7. 船舶	透過提升液化天然氣燃料船效率，結合低速航行與風力推進系統，減少 86%之 CO ₂ 排放；透過活用再生甲烷，達成淨零碳排。
8. 物流、人流、土木基礎建設	整備港灣設備，俾自海外引入新世代能源資源。
9. 食糧、農林水產業	檢視、修改相關法律以推動地產地消型的能源系統。

10. 飛機等航空器	目標為 2035 年導入氫能飛機，強化氫氣供應鏈與加氫設備等基礎建設。
11. 碳回收	搶佔 2050 年的全球 CO ₂ 分離回收市場 3 成之市佔率(約為 25 億噸 CO ₂)。
12. 住宅、建築物/ 新世代太陽能	推動未來新住宅及建築可達零碳建築標準；加速研發新世代太陽能發電技術。
13. 資源循環	發展廢棄物發電技術，確保垃圾品質低下時依舊可高效率回收能源。
14. 生活樣態關聯	將 J-credit 制度的申請手續電子化，並推動觀測 CO ₂ 排放量資料及 Credit 認證手續的簡便與自動化。

2. 綠色創新基金

日本政府於 2020 年編列兩兆日圓推動綠色創新(Green Innovation)基金事業，並委任新能源產業技術綜合開發機構(NEDO)執行。綠色創新基金為綠色成長戰略重點領域提供 10 年期的融資，著重綠色電力普及、能源結構轉換、產業結構轉換等項目，補助研究開發、社會實證與商業化應用相關技術。

3. 綠色能源憑證

日本企業除了能自行投資設置再生能源發電設施，亦能透過購買非化石證書(FiT NFC)證明其使用零碳排電力。由於近年來許多跨國企業要求供應鏈製程須使用再生能源，為使日本企業能滿足其需求，經產省規劃調降法定價格下限以壓低交易價格，降低企業購買再生能源的成本，並計畫擴大發行綠色能源憑證，由原先限制只能由電力零售業者購買，改為開放讓一般企業也能直接購買證書，因應對製造業使用再生能源的需求。

4. 氣候轉型金融指導方針

日本經產省、環境省與金融廳合作制定氣候轉型金融指導方針，供高碳排產業與金融業參考，促進高碳排產業以轉型債券或貸款的名義籌備資金，以利企業投資於減碳行動。方針說明籌資與出資單位應注重(1)揭露明確的氣候轉型戰略與治理模式；(2)強調商業模式中環境要素之重要性；(3)依據科學標準及數據制定氣候轉型戰略與目標；(4)盡力揭露戰略內容與資金運用等相關資訊。隨後藉由成立「推動經濟產業領域轉型金融路線圖發展研究小組」，公開募集轉型融資示範成效，以建立良好的轉型案例標竿。

(三) 日本碳交易制度

1. 東京都與埼玉縣碳交易市場

日本過往的碳交易市場偏向自願的形式，僅東京與埼玉地方政府推行強制的碳交易市場。東京都 ETS 於 2010 年 4 月啟動，是日本第一個強制性 ETS，

涵蓋東京都 20% 的排放量，例如大型建築、工廠、熱力供應商、其他消耗大量化石燃料設施的二氧化碳排放量。納管對象為工業及商業部門設施之燃料、暖氣及電力合計年能源消費量高於 1,500 公秉油當量者，規模達約 1,300 萬噸 CO₂e/年，納管約 1,200 座工業及商業建築。其涵蓋之設施皆已達成第二個計畫期(2015 至 2019 財年)的目標，即溫室氣體排放量較基準(2013)年減少 15% 至 17%，目前處於第三個計畫期(2020 至 2024 財年)。

埼玉縣 ETS 於 2011 年 4 月啟動，涵蓋埼玉縣約 20% 的排放量，納管對象為工業及商業部門設施之燃料、暖氣及電力合計連續 3 年的年能源消費量高於 1,500 公秉油當量者，納管約 600 個工業與商業建築實體，規模達約 800 萬噸 CO₂e/年。目前處於第三個計畫期(2020 至 2024 財年)，要求設施將排放量減少 20% 或 22%，且每年須監測與報告七種溫室氣體，分別為 CO₂、CH₄、N₂O、PFCs、HFCs、SF₆ 和 NF₃。東京和埼玉信用額度在這兩個司法管轄區內是可互換的，到目前為止已進行超過 50 次的信用額度轉移(表 1.4)。

表 1.4 東京 ETS 與埼玉 ETS 比較⁷

	東京 ETS	埼玉 ETS
開始時間	2010 年	2011 年
目標	2030 年：溫室氣體排放量較 2000 年減少 50%；2050 年：氣候中和	2030 年：溫室氣體排放量較 2013 年減少 26%
對象	上年度燃料、熱力、電力的使用量達 1,500 公秉/年以上原油當量的事業單位(第一計畫期間 ⁸ ：1,386 家)	連續 3 年能源使用量達 1,500 公秉以上原油當量的事業單位(第一計畫期間 ⁹ ：約 608 家)
平均配額價格	2022 年：650 日圓(約 4.73 美元)	2022 年：144 日圓(約 1.05 美元)
交易狀態	實際交易 27 萬噸(第一計畫期間)	608 家商業機構中有 66 家使用交易系統(第一計畫期間)
合規狀態	90% 的企業通過自身減排完成目標(第一計畫期間)；所有運營商都遵守目標	90% 的企業降低了目標(第一計畫期間)；99% 的運營商遵守目標

⁷ 資料來源：日本經濟產業省，「海外碳稅和排放交易例子以及對日本的啟示」； Emissions Trading Worldwide: 2023 ICAP Status Report。

⁸ 東京都 ETS 第一計畫期間為 2010 至 2014 財年。

⁹ 埼玉縣 ETS 第一計畫期間為 2011 至 2014 財年。

2. 碳信用額度試行交易(J-credit)

日本經濟產業省(METI)於 2020 年公布綠色成長戰略(Green Growth Strategy)，以 2050 年淨零碳排為目標，分別從產業面與能源政策兩個面向著手，力求 2050 年再生能源發電量占總體發電量 50%至 60%，並為 14 個有前景的重點發展領域分別設定減排目標，制定包含預算、稅收、金融、國際合作等政策之行動計畫。基於綠色成長戰略，日本經濟產業省委託東京證券交易所，於 2022 年 9 月 22 日至 2023 年 1 月 31 日實施碳信用額度試行交易(J-credit)，目標在未來在日本國內建立一個受到國際認可的碳信用市場，共計有 183 個單位或企業參與該次示範(表 1.5)。

表 1.5 J-credit 市場制度概要¹⁰

項目	J-credit
接單時間	9:00-11:29/12:30-14:59
執行方式	結算會議(11:30、15:00 各一次)
訂單類型	僅限限價訂單
交易單位	1 噸二氧化碳(CO ₂)
基價	(1)前一交易日執行價格； (2)與前一交易日相同基價(或參考價)
漲跌停板幅度	基價乘以 100%得到的數值
交易參與者	示範參與者
結算日	執行日起 6 個工作日(T+5)

¹⁰ 資料來源：Japan Exchange Group(JPX)。

第二節 台灣淨零減碳法規

我國石化產品主要出口國已紛紛著手淨零規劃，我國也已制定氣候變遷因應法對溫室氣體排放進行規範，目前最大的課題是設立交易所與碳價的訂定，如何透過適當的碳費徵收達成實質碳減量而非淪為財政工具，政府與各界單位皆須審慎評估。以下介紹目前台灣對於淨零碳排的相關法規政策。

一、氣候變遷因應法

溫室氣體減量及管理法(以下簡稱溫管法)於 2015 年 7 月 1 日公布執行，其立法原則以聯合國氣候變化綱要公約為依據，承擔共同但差異的責任，落實環境正義，確保國家的永續發展。內容共分為 6 章，總計 34 條(圖 1.5)。立法院於今 2023 年 2 月 15 日正式公布，將原先的溫管法修正為氣候變遷因應法(以下簡稱氣候法)，為因應全球氣候變遷，制定氣候變遷調適策略，減少及管理溫室氣體排放，落實世代正義、環境正義與公正轉型，善盡共同保護地球環境之責任，確保國家永續發展而制定，並預計於 6 個月後提出相關子法。

氣候法第 3 條規範溫室氣體係指二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)、氧化亞氮(N₂O)、氫氟碳化物(HFCs)、全氟碳化物(PFCs)、六氟化硫(SF₆)與三氟化氮(NF₃)。第 4 條訂定國家溫室氣體長期減量目標為 2050 年溫室氣體淨零排放，各級政府應與國民、事業、團體共同推動溫室氣體減量、發展負排放技術以及促進國際間合作，相較於溫管法規範的 2050 年溫室氣體排放量降至 2005 年的 50% 以下的目標提高。第 6 條提到國家減量目標及期程之訂定，應履行 UNFCCC 之共同但有差異的國際責任，同時兼顧我國環境、經濟及社會之永續發展。第 9 條規範中央主管機關應依據我國經濟、能源、環境情況，擬定國家因應氣候變遷行動綱領，並由溫管法的每五年檢討一次縮減為每四年檢討一次。第 10 條規範中央主管機關應訂定五年為一期的溫室氣體階段管制目標，第一期(2016 至 2020 年)目標為 2020 年降至 260.717 百萬噸 CO₂e，第二期(2021 至 2025 年)目標為 2025 年降至 241.011 百萬噸 CO₂e，意即較基準(2005)年排放量降低 10%，當中製造部門的目標為 144 百萬噸 CO₂e，未來將逐期檢視排放量達成情況並進行滾動式調整(表 1.6)。



圖 1.5 溫室氣體減量及管理法架構¹¹

表 1.6 《溫室氣體減量及管理法》與《氣候變遷因應法》比較¹²

	《溫室氣體減量及管理法》	《氣候變遷因應法》
2050 年減碳目標	降至 2005 年的 50% 以下	淨零排放
氣候變遷行動綱領	5 年檢討一次	4 年檢討一次
階段管制目標	5 年一期	
碳費徵收	否	是
公正轉型概念	無	有
調適專章	無	有

隨著 CBAM、CCA 及亞鄰國家的碳稅相關政策陸續執行，課徵碳稅除了是全球趨勢也是管制溫室氣體排放的必要政策之一，我國氣候法亦新增了碳費機制，將採用分段徵收的模式，首波將以年排放量超過 2.5 萬噸 CO₂e 之業者為主。企業可透過轉換低碳燃料、使用再生能源、提升能源效率、採用負碳排放技術等方法改善溫室氣體排放量，並向政府提出自主減量計畫以獲得優惠費率。碳費收入將作為溫室氣體管理基金，優先使用於公正轉型(Just Transition)，或者補助主管機關、獎助企業投資溫室氣體減量技術等。公正轉型以「盡力不遺落任何人」為

¹¹ 資料來源：行政院環境保護署。

¹² 資料來源：行政院環境保護署。

目標，在淨零政策對經濟與社會造成衝擊的同時，追求政策目標平衡性、社會分配公平性以及利害關係包容性。

環保署於 2023 年 8 月 22 日改制為環境部，並將行政院環境保護署氣候變遷辦公室改制為氣候變遷署，隸屬於環境部之三級機關，成為氣候變遷因應法之主管機關，專責辦理氣候變遷因應法施行推動工作。

二、我國 2050 淨零排放路徑

多數國家已設定未來減碳目標呼應全球減碳趨勢，且已有 136 個國家宣示淨零排放目標。為了達成 2050 年淨零轉型，必須及早制定務實的轉型目標並評估相關風險，因此我國於 2022 年 3 月正式發布《臺灣 2050 淨零排放路徑及策略總說明》，提供至 2050 年的淨零軌跡與行動路徑，並規劃《十二項關鍵戰略》整合跨部會資源，藉以支持所有投入的個人、企業及相關的非政府組織(圖 1.6)。



圖 1.6 2050 淨零轉型之 12 項關鍵戰略¹³

我國預計藉由推動淨零轉型達成四項目標，包含(1)能源轉型更安全，透過擴大再生能源，使自產能源占比提升，降低國際能源市場衝擊及價格波動對我國能源安全造成的影響；(2)產業轉型更具競爭力，同步推動綠能產業鏈與本土供應鏈成長，結合資訊與通信科技產業優勢，提供更高效、低碳與智慧的製程，並發展本土優勢技術加速商業化，瞄準全球淨零轉型商機；(3)生活轉型更永續，透過全民對話，提升全民對氣候變遷及淨零轉型的認知和共識，進而引發全民改變生活型態、落實低碳生活，並誘使廠商建構低碳商業模式，創造綠生活產業鏈；(4)社會轉型更具韌性，藉由社會溝通，評估淨零路徑可能造成的衝擊，全面綜合地考

¹³ 資料來源：臺灣 2050 淨零排放路徑及策略總說明。

量各項減碳方案可能的衝突點與連動性，制定跨領域的推動計畫與配套因應措施，確保符合社會公正。此項轉型也將促進經濟成長，帶動民間企業投資，並創造更多綠色就業機會。除了上述四大策略之外，淨零將建立在科技研發如淨零技術、負排放技術等，及氣候法制如碳定價、綠色金融等兩大基礎上推動轉型。

未來轉型規劃參考國際能源總署(IEA)、美國、歐盟、韓國等淨零排放能源路徑規劃，分為短期(至 2030 年)達成低碳與長期(至 2050 年)朝淨零發展兩階段。短期內致力減少能源使用與非能源使用碳排放，透過能源轉型，優先推動風電、光電，布局地熱與海洋技術研發，增加天然氣並減少燃煤的使用。長期建構零碳電力系統，減少非電力之碳排放，開發 CCUS 技術、風電和光電以及氫能發電技術。透過上述的兩階段規劃，我國預計於 2050 年達成總電力使用 60~70%的再生能源，並加上 9~12%的氫能以及搭配 CCUS 技術之火力發電 20~27%，達成整體電力供應的去碳化。在非電力能源部份，除加速電氣化進程外，亦將投入創新潔淨能源開發搭配 CCUS 技術。此外藉由積極規劃山林溼地保育提升國土碳匯量能，以抵銷其他難以削減之溫室氣體排放(圖 1.7)。

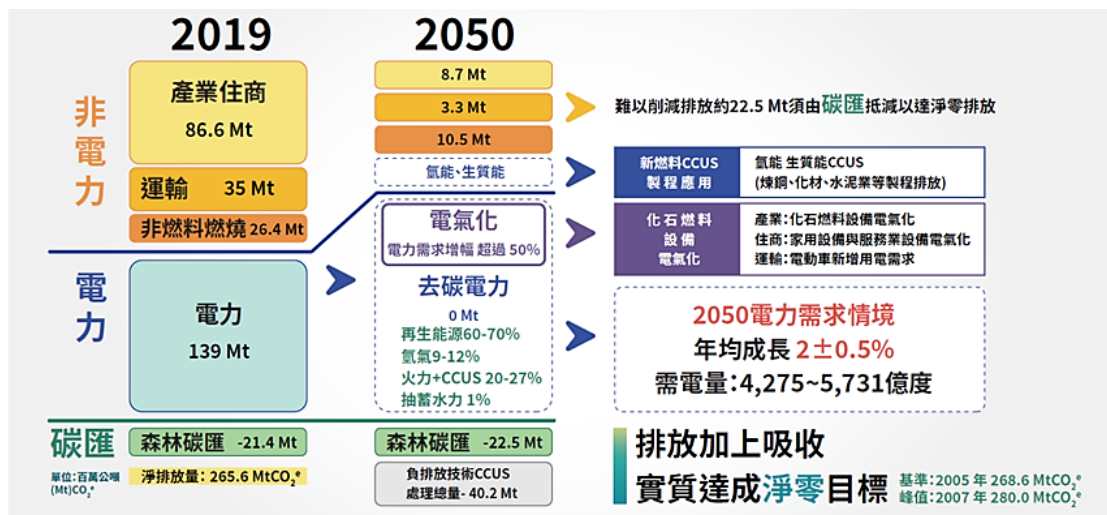


圖 1.7 臺灣 2050 淨零轉型路徑規劃¹⁴

石化業以製程改善、能源轉換、循環經濟及業界推廣作為減少碳排放量的主軸，引進新型低碳技術。製程改善以推動製程智能化提升能源使用效率與引進製程減碳新技術為主，長期下擴大導入創新技術，提升設備效能。能源轉換的短期作為是擴大以天然氣與生質能取代燃煤，並增加設置太陽光電與陸地風電，長期則導入並轉換為零碳能源並提升綠電的占比。循環經濟利用區域系統性的合作以優化配置資源，提高資源的使用效率，減少生產過程中的排放，並依市場需求擴大二氧化碳的回收。透過研發新世代觸媒與 CCUS 技術，持續去化 CO₂。短期推

¹⁴ 資料來源：臺灣 2050 淨零排放路徑及策略總說明。

動廢棄塑膠、橡膠材料循環再利用技術，長期則可以往多元進料以產製石化原料發展(圖 1.8)。



圖 1.8 石化業淨零轉型策略及路徑¹⁵

三、上市櫃公司永續發展路徑圖

基於我國 2050 年淨零排放路徑，金融監督管理委員會(以下簡稱金管會)於上(2022)年 3 月 3 日發布「上市櫃公司永續發展路徑圖」，訂定各規模上市櫃公司溫室氣體盤查資訊揭露時程(圖 1.9)，有助於企業依循與訂定自身減碳目標。透過配合政府的減碳計畫及上市櫃公司串聯供應鏈，以達企業永續發展。



圖 1.9 上市櫃公司永續發展路徑圖時程規劃¹⁶

¹⁵ 資料來源：臺灣 2050 淨零排放路徑及策略總說明。

¹⁶ 資料來源：金融監督管理委員會、公司治理中心。

上市櫃公司永續發展路徑圖自 2023 年起按實收資本額採取分階段推動，且鋼鐵、水泥業自 2023 年起揭露，目標在 2027 年全體上市櫃公司完成溫室氣體盤查，2029 年全體上市櫃公司完成溫室氣體盤查查證，當中揭露內容包含溫室氣體直接排放(Scope 1)與能源間接排放(Scope 2)。時程規劃以台塑石化為例，其公司之合併報表子公司應於 2025 年完成溫室氣體盤查、2027 年完成查證，其預計執行時程如圖 1.10 所示。



圖 1.10 台塑石化子公司盤查規劃¹⁷

金管會為使企業能持續朝實踐永續發展邁進，在上市櫃公司永續發展路徑圖及公司治理藍圖所建構的基礎下，推行上市櫃公司永續發展行動方案。以治理、透明、數位、創新四大主軸，建構五大面向，包含引領企業淨零、深化企業永續治理文化、精進永續資訊揭露、強化利害關係人溝通與推動 ESG 評鑑及數位化(表 1.7)。在引領企業淨零方面，金管會推動上市櫃公司設定減碳目標、策略及具體行動計畫，具體時間為 2026 年起須依資本額規模分階段推動，公司最遲應於揭露合併財務報告公司盤查資訊之次一年度揭露其盤查年度為基準年，所訂定之次一年度減碳目標、策略及具體行動計畫。另外鼓勵公司揭露以完成合併財務報告公司之盤查資訊為基準年，所訂定之 2030 年減碳目標、策略及具體行動計畫；鼓勵企業配合淨零轉型以因應環境部規劃，並督導證交所協助該署建置交易平台；有鑑於企業碳排放多屬範疇 3，因此鼓勵企業揭露溫室氣體範疇 3 的資訊，2023 年將參考國際規範及國內產業特性訂定建議揭露事項，後續年度將辦理宣導，並續予研議是否強制揭露；鼓勵企業發行綠色債券及可持續發展連結債券等永續發展債券。

註 1：圖內時程規劃年度係指年報申報年度，揭露前一年度盤查及確信情形。

註 2：揭露主體應與合併財務報告一致，因此國內與國外子公司均須納入。

¹⁷ 資料來源：台塑石化公司。

表 1.7 上市櫃公司永續發展路徑圖五大面向的推動措施

引領企業淨零	
1.	推動上市櫃公司設定減碳目標、策略及具體行動計畫
2.	協助建置溫室氣體減量額度交易機制
3.	鼓勵企業揭露溫室氣體範疇三資訊
4.	鼓勵企業發行綠色債券及可持續發展連結債券等永續發展債券
深化企業永續治理文化	
1.	強化獨立董事及審計委員會職能 <ul style="list-style-type: none"> (1) 強化審計委員會職能與審計品質 (2) 推動上市櫃公司獨立董事席次不低於 1/3 (3) 推動上市櫃公司獨立董事任期不得逾 3 屆
2.	推動上市櫃公司董事性別多元化
3.	推動興櫃公司採候選人提名制
4.	推動薪酬合理化 <ul style="list-style-type: none"> (1) 推動高階薪酬與 ESG 績效連結 (2) 研議推動董事酬金提報股東會
5.	推動上市櫃公司設置永續委員會(永續長)
精進永續資訊揭露	
1.	擴大永續資訊揭露範圍 <ul style="list-style-type: none"> (1) 精進年報資訊揭露規範 (2) 推動實收資本額 20 億元以下之上市櫃公司編製永續報告書 (3) 擴大應參考 SASB 準則揭露永續指標之上市櫃公司範圍
2.	提升永續資訊品質 <ul style="list-style-type: none"> (1) 研議擴大永續報告書確信範圍 (2) 強化永續報告書揭露品質 (3) 加強永續報告書確信機構管理
3.	研議推動 ISSB 永續揭露準則 <ul style="list-style-type: none"> (1) 研修永續資訊內控相關規範 (2) 成立永續準則委員會 (3) 研訂 ISSB 永續準則推動規畫

在深化企業永續治理文化方面，除了強化獨立董事及審計委員會職能，並規劃於 2023 年起推動 IPO 公司應至少委任一名女性董事、2024 年起上市櫃公司應依董事屆期完成委任至少一名女性董事；為落實股東行動主義，計畫於 2025 年起將要求興櫃公司董事選舉應採候選人提名制；鼓勵高階薪酬與 ESG 績效連結有助於落實永續發展，另研議推動董事酬金提報股東會報告之可行性；為建立企業永續價值文化，推動上市櫃公司設置永續委員會。

在精進永續資訊揭露方面，將參酌國際準則，2023 年將檢討修正年報準則，精進永續資訊揭露規範；擴大永續資訊揭露範圍：研議擴大永續報告書確信範圍，

並透過證交所及櫃買中心於 2023 年起抽查上市櫃公司永續報告書，以及 2024 年起抽核確信工作底稿，檢視確信程序是否符合規範等以提升永續資訊品質

在強化利害關係人溝通方面，為使投資人及早熟悉股東會議案之資訊，2024 年起將依資本額規模分階段推動上市櫃公司應於股東會 30 日前上傳議事手冊，14 日前上傳年報；為持續強化機構投資人之影響力與盡職治理資訊揭露之品質，集保公司及證交所將建置盡職治理報告書數位平台，並於 2024 年試行；由於利害關係人對企業推動永續發展扮演重要角色，因此將透過蒐集國外實務共同議合作法，於 2024 年修正機構投資人盡職治理守則。

在推動 ESG 評鑑及數位化方面，為協助上市櫃公司更有效率且統一格式揭露 ESG 相關資訊，證交所將建置永續報告書數位平台，並計畫於 2024 年試行；為提供一站式 ESG 資訊服務，證交所將建置 ESG 資訊平台並於 2023 年上線，為建構市場永續價值文化，將推動 ESG 評鑑；為使 ESG 相關商品多元化，證交所將持續研議編製發布 ESG 主題相關指數，如碳效率指數、人力資本相關指數，引導市場資金投入永續發展。

第三節 國際石化業者減碳策略

減碳除了需要各國政府訂定法規與執行，亦需要民間共同參與才能加速進程。近年來許多國際石化業者規劃企業自身減碳路徑與未來減碳措施，積極投資參與減碳行動，計畫透過製程改善、能源轉換等方式，達成企業自身減碳目標。以下介紹國際石化業者的減碳策略。

一、巴斯夫(BASF)

巴斯夫(BASF)自 2008 年起發布全面的企業碳足跡報告，相較於 2018 年，BASF 希望 2030 年將生產基地與能源採購的溫室氣體排放減少 25%，亦即從 2,190 萬噸減少至 1,640 萬噸，長期目標是 2050 年實現溫室氣體淨零排放(圖 1.11)。BASF 透過全面的碳管理以完成氣候保護目標，包含五項主軸減少溫室氣體排放與化石燃料需求：(1)更廣泛的使用再生能源滿足電力需求(Grey-to-green)，目標在 2030 年達再生能源供應 60%的電力需求(2022 年的再生能源佔比 16%)；(2)更多的仰賴電力蒸氣發電，並挖掘以前未曾使用過的餘熱潛力(Power-to-steam)；(3)為氣候智慧型化學開發全新的無碳與低碳製程及技術(New technologies)；(4)提昇替代原材料使用以取代化石資源(Bio-based feedstocks)；(5)不斷提高工廠的能源和流程效率(Continuous opex)。

BASF greenhouse gas emissions (Scope 1 and Scope 2) 1990–2050

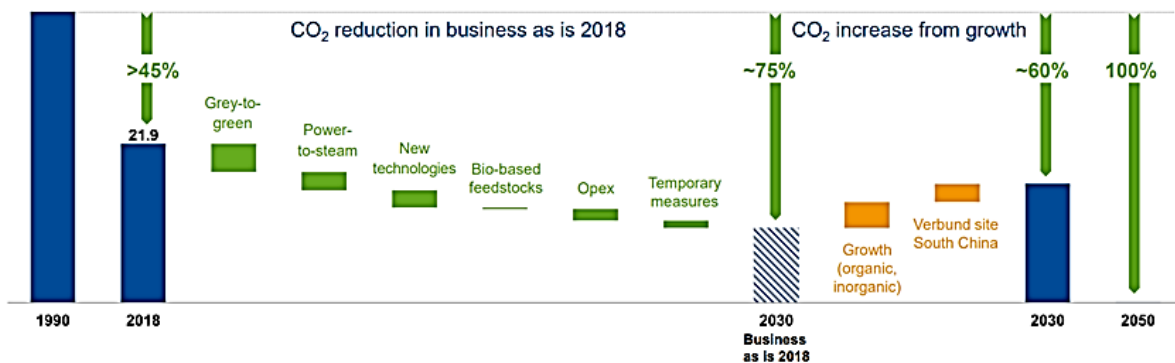


圖 1.11 BASF 溫室氣體排放發展¹⁸

在電力能源轉型中，BASF 採用自製與外購兩種方式。其一為投資再生能源，特別是海上風電廠；其二為根據地區與市場法規，藉由與工廠運營商的長期供應協議如綠色電力協議與再生能源證書的方式在市場上購買綠電。多使用電力蒸氣發電能減少二氧化碳的排放，如從生產與基礎設施的廢熱回收能源。為探索各種技術的潛力，2022 年，BASF 與其他公司合作，啟動了一項關於在德國路德維希

¹⁸ 資料來源：BASF。

港工廠建造工業規模熱泵的聯合可行性研究，每小時可以利用以前未使用的廢水產出 150 噸蒸汽，使工廠每年減少 390,000 噸二氧化碳排放。

BASF 持續開發無碳與低碳生產技術，主要聚焦於基本化學品的生產，如蒸氣重組，是最常見的獲取氫氣方式。BASF 已在港口測試替代製程—甲烷熱解，是相較於其他方式節能的獲取氫氣方式且零碳排放。並計畫與能源公司合作，在港口建造一座輸出功率為 54 兆瓦的質子交換膜水電解槽以生產無碳氫氣。

BASF 預估 2023 年的總二氧化碳排放量會介於 1,810 萬噸至 1,910 萬噸，推論為產量適度的增加與碳排放密集型工廠的產能利用率略高造成。BASF 計畫透過針對性措施，如進一步提高能源效率、製程優化與最重要的是持續將再生能源轉換為電力，以減少碳排放。

二、陶氏化學(DOW Chemical)

陶氏化學(DOW Chemical，以下簡稱 DOW)。DOW 將其永續發展策略著重於氣候保護、循環經濟與更安全的材料。在氣候保護方面，透過脫碳與成長戰略(Decarbonize and Grow strategy)以審視運營與價值鏈，在發展業務的同時降低碳足跡，旨在 2050 年實現碳中和並同時滿足客戶對永續與循環產品的需求(圖 1.12)。

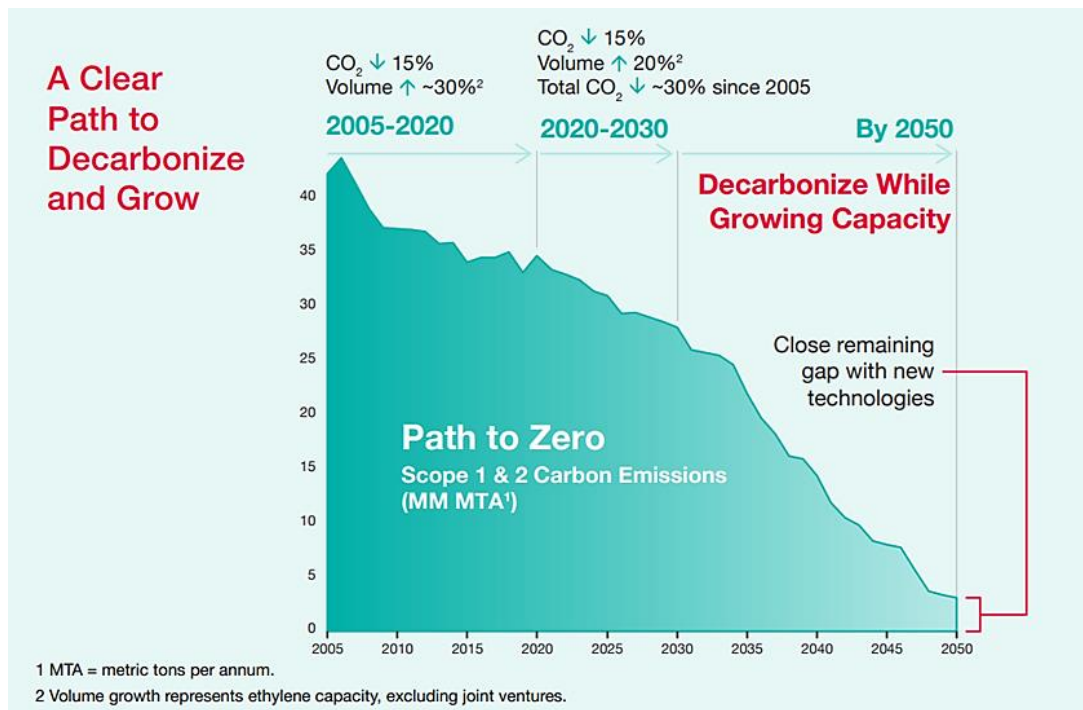


圖 1.12 DOW 脫碳與成長路徑¹⁹

¹⁹ 資料來源：DOW。

DOW 計畫每年投入 10 億美元以推動資產成長與脫碳，具體的作為包含(1)優化永續發展的製造設施與製程，DOW 在 2022 年為其碳排放量最多的 25 個場址制定範疇 1 與 2 的減碳計畫，並在加拿大建設世界上第一個淨零碳排放綜合乙烯裂解裝置和衍生品工廠，同時將現有資產改造為淨零排放，使 DOW 在全球 20% 的乙烯產能脫碳；(2)增加綠色能源與蒸氣的使用，DOW 在 2022 年將再生能源發電容量擴大到 1 GW 以上，使購買的電力中約 40% 來自再生能源；(3)投資下一代的新興製造業技術，DOW 透過投資流化催化脫氫(FCDh)、乙烷脫氫(EDH)與電裂解技術(e-cracking)等創新製造技術，使製造設施更清潔；(4)發展低碳產品與服務，DOW 透過提供促進能源效率、輕量化、燃料轉型、循環、提高運營效率、減少資源與排放的產品，幫助客戶實現氣候目標；(5)建立能創造價值的範疇 3 脫碳路徑，其中又有三大支柱，包含更精準的核算範疇 3 的碳排放量、鼓勵所有供應商公開分享有關碳排放與氣候戰略的數據，繼續調高整個供應鏈的透明度以及制定數據驅動的範疇 3 改進計畫。

在循環經濟方面，DOW 透過投資工業生態系統來收集、再利用或回收廢料並生產可回收或再生原料。其提供含有高達 70% 再生塑膠的產品，並藉由對先進回收技術投資將塑膠廢料分解為其基本元素並重新聚合成相當於原始塑料的物質，再利用再生原料生產生物機材料，相較於不可再生材料，造成較少的碳排放。DOW 在三年內投入此項目兩億美元，並透過與不同國家的合作夥伴與終結塑膠垃圾聯盟(AEPW)、Circulate Capital、Closed Loop Partner 等組織交流合作以加速推動。

三、中國石化(Sinopec)

中國石油化工集團有限公司(以下簡稱中石化)為中國大陸最大的石化產品供應商，根據其 2022 年可持續發展進展年度報告，其自 2007 年起每年發布股份公司可持續發展報告，並持續發展碳排放監測與管理，進行溫室氣體盤查與核實工作，盤查範圍包含溫室氣體的直接排放(Scope 1)與間接排放(Scope 2)。

為降低自身溫室氣體排放，中石化動態追蹤公司能源消費強度及總量控制指標，穩健推動節能降耗，並實施能效提升，藉由能量系統優化、低溫餘熱綜合利用等節能工程，強化能源計量統計管理、機電設備效能提升管理與節能監察。其嚴格管控煤炭使用，以天然氣、燃料器等低碳燃料替代高碳燃料，透過與周邊企業合作發展熱電，外購高校熱電代替自產熱電，達到提高熱電利用效率。並持續加強節能低碳技術的研發及推廣，發展節能製程，優化技術、裝備，逐步拓展創新技術的應用範圍。此外中國石化持續發展制氫、合成氫等裝置排放的高濃度二氧化碳回收利用，2022 年，透過 CCUS 技術減少 153.4 萬噸的二氧化碳排放²⁰。

²⁰ 資料來源：中石化 2022 年可持續發展進展年度報告。

作為中國大陸國家碳排放監測評估試點單位，中石化採用手工監測、衛星遙感、無人機等措施監測製程放空、火炬燃燒等甲烷排放濃度。藉由甲烷檢測，整理分析甲烷排放檢測數據與制定甲烷減碳措施基礎，2022 年一共回收 8.34 億立方公尺，等同於減少 1,250 萬噸 CO₂e 的溫室氣體排放量。

此外，中石化亦參與碳交易，規範旗下企業碳配額履約行為，並組織碳交易團隊，科學制定碳交易計畫，發展碳交易集中管理。2022 年，中國石化旗下共 15 家企業參與中國國家碳交易體系、19 家企業參與試點地區碳市場，碳交易量為 241 萬噸 CO₂e。為實踐其綠色發展理念，中石化大力推廣企業綠化管理，提升綠化覆蓋率，引導員工參與義務植樹，發揮固碳與生態改善的效果。2022 年，其公司綠地總面積達 11,805 萬平方公尺，綠化覆蓋率達 32.3%，全年共完成 193.9 萬株義務植樹。

四、三井化學(Mitsui Chemicals)

三井化學在 2020 年 11 月宣布承諾在 2050 年實現碳中和，預計到 2030 年將投入 1,400 億日圓於碳中和項目，以減少集團自身範疇 1 及 2 的溫室氣體排放量，目標在 2030 財年將溫室氣體排放量相較基準(2013)年降低 40%。為了達成 2050 年碳中和，除了上述措施，亦會透過三井化學碳中和研究中心開發新技術與轉變業務組合以追求達成較基準年降低 80% 溫室氣體排放量。三井化學另計畫開發和實施碳負排放技術(如 CCUS 技術)，以解決剩餘的 20% 排放量。

三井化學的減碳措施包含在製造過程中節約能源，如使用高性能催化劑、安裝節能設備、積極使用再生能源與使用低碳原材料和燃料等；擴大提供對環境有重大貢獻的 Blue Value™ 產品，使產品能夠在生命週期內最大限度地避免碳排放；開發回收技術，藉由有效利用廢棄物及副產物，作為原料或燃料來減少資源的使用，降低價值鏈中廢塑料與溫室氣體排放，因此致力於廢塑料化學與機械回收技術及單一材料生產包裝。根據 2021 財年(Fiscal Year, FY) Blue Value™ 產品與服務的銷售狀況，三井化學估計這些產品每年能減少約 100 萬噸碳排放量，目標在 2030 年，Blue Value™ 產品的收入份額達 40% 或更高，以實現 2050 碳中和(圖 1.13)。三井化學計畫使用氫代替甲烷，作為輕油裂解的燃料，目標使二氧化碳排放趨近於零。此外由於資源回收過程中逸出的塑料進入海洋而產生海洋塑膠垃圾，為了解決問題，三井化學加入全球聯盟如終結塑膠垃圾聯盟(AEPW)、清潔海洋材料聯盟(CLOMA)等，並簽署日本海洋環境倡議(JaIME)，為社會轉型做出貢獻，使整個社會實現碳中和。

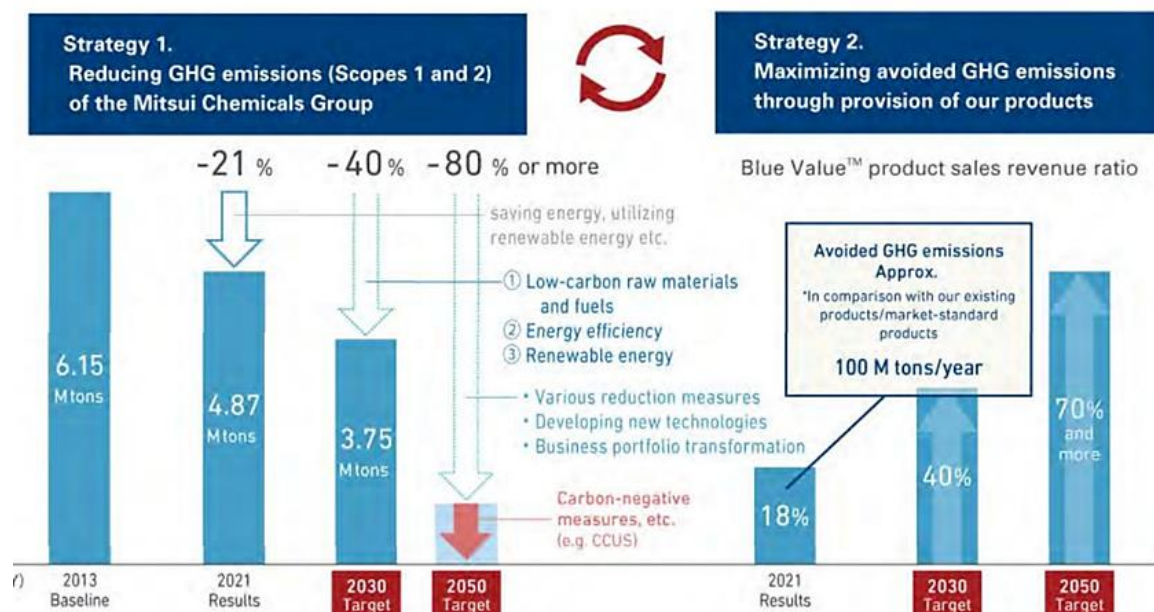


圖 1.13 三井化學減少溫室氣體排放與避免產品生命週期的排放²¹

五、住友化學(Sumitomo)

住友化學(Sumitomo)承諾在 2030 年將溫室氣體排放量減少 50% (相較 2013 年)，並於 2050 年實現溫室氣體淨零排放，透過外部合作與其他方式促進創新，以及開發相關產品與技術，以對社會減少溫室氣體排放做出貢獻。在 2013 至 2021 年間，住友化學已投資約 800 億日圓，加上預計於 2030 年前再投入的 1,200 億日圓，共計會投入 2,000 億日圓於減少溫室氣體事業。

住友化學從義務(使集團的溫室氣體排放接近於零)與貢獻(透過集團的產品與技術減少全球溫室氣體排放)兩方面推進碳中和措施。義務方面，住友化學 2021 財年的溫室氣體排放中，有 70% 來自內部發電等能源、16% 來自化學反應與廢料處理過程、14% 來自購買電力相關的能源，目標是透過重點推動向清潔能源的轉換以減少能源產生的溫室氣體，並重點開發減少過程衍生的溫室氣體之必要技術。具體措施如燃料轉換，藉由引進高效燃氣輪機發電機與淘汰一些現有鍋爐，並由原先的煤炭、石油焦和重油改為使用液化天然氣(LNG)等低排碳量的燃料。在減少過程衍生的溫室氣體方面，住友化學開發了利用生物技術的廢水處理技術。在減少購買電力的溫室氣體方面，自 2021 年 10 月起，住友集團將旗下一座工廠外購電力改為 100% 再生能源發電，並將其燃料從重油改為城市燃氣。住友化學旗下工廠皆透過安裝最新的高效設備、在生產過程中引入節能措施；改用低碳燃料和其他形式的能源、安裝 LED 照明等方式減少溫室氣體排放，並以鐵路和船舶代替卡車以減少物流產生的排碳量。

²¹ 資料來源：三井化學。

住友化學開發自己的產品碳足跡計算工具(CFP)，已於 2021 年底前完成其 20,000 個產品項目的 CFP 評估，未來計畫完成所有產品項目的評估並免費提供該工具給其他公司；住友集團透過開發化學回收技術，將垃圾與廢塑料轉換為甲醇、乙醇、烯烴等化學品基礎原料再次利用；其亦開發負碳排放技術，將存在土壤中的有用微生物附著於植物根部並讓它們共存，不僅能促進植物吸收更多的二氧化碳，還能將二氧化碳以碳水化合物形式固定在地底下，為大氣帶來更多淨負碳量；在生產氫氣方面，開發藍氫技術實現碳中和。

六、LG 化學的減碳淨零措施與淨零路徑

LG 化學為韓國第一家宣布淨零目標的石化業者，集團發布 LG 淨零特別報告 2022：Placing the First Stepping Stone，透過整合各子公司的減排措施制定碳中和綜合路線圖，以 2018 年為基準年，訂定 2030 年將範疇 1 與 2 的排放量減少 27%、2040 年減少 62%與 2050 年達碳中和的目標。其中，範疇 1 與 2 分別為商業場所使用化石燃料產生的直接排放與使用外部購買的電力和蒸汽產生的間接排放²²。主要減排措施的核心有四：(1)製程效率提升、低碳/非碳燃料轉換、製程氣體去除等；(2)開發未來創新科技如綠/藍氫、CCUS 等；(3)再生能源利用如使用自發電、簽署再生能源購電協議(PPA)²³、取得再生能源憑證(REC)²⁴、獲取綠色費率優惠等；(4)外部減排與吸收項目的開發與共同推進。由圖中分配比例可知，LG 集團將再生能源作為完成淨零路徑的最主要工具。

LG 集團的碳中和目標以直接減排、再生能源、碳抵換與氣候治理為核心。在直接減排方面，LG 集團計畫在石化領域擴大生物燃料和原材料的使用，目標在 2030 年以直接減排的方式減少 455 萬噸 CO₂e，分別在範疇 1 與 2 減少 337 萬噸 (74%)與 118 萬噸(26%)。在再生能源方面，LG 集團持續監控事業所在地區的再生能源市場環境與採購情況，以確保再生能源的穩定，並預計 2050 年實現在韓國國內外皆使用 100%的再生能源(圖 1.14)。在碳抵換方面，LG 集團計畫推動業務場所內的流程效率與燃料轉換等直接排放，以及將使用過的電力轉換為再生能源以推動溫室氣體間接減排。並藉由與政府與當地社區合作，推動範疇內的抵銷項目，從而實現碳中和與減少全球溫室氣體排放。在氣候治理方面，LG 集團自 2021 年起設立 ESG 委員會，以審查與批准 LG 集團碳中和綜合路線圖、ESG 戰略和目標等議程。並在氣候變遷、安全衛生、社會貢獻等 ESG 各領域配置專門人才，以應對各種 ESG 相關課題。

²² 資料來源：LG Net Zero Special Reporting 2022。

²³ 透過簽署再生能源購電協議(PPA)，企業能夠確保它買到的是百分之百的乾淨綠電。

²⁴ 再生能源憑證(REC)是再生能源電力生產的證明，一張憑證為 1,000 度電。

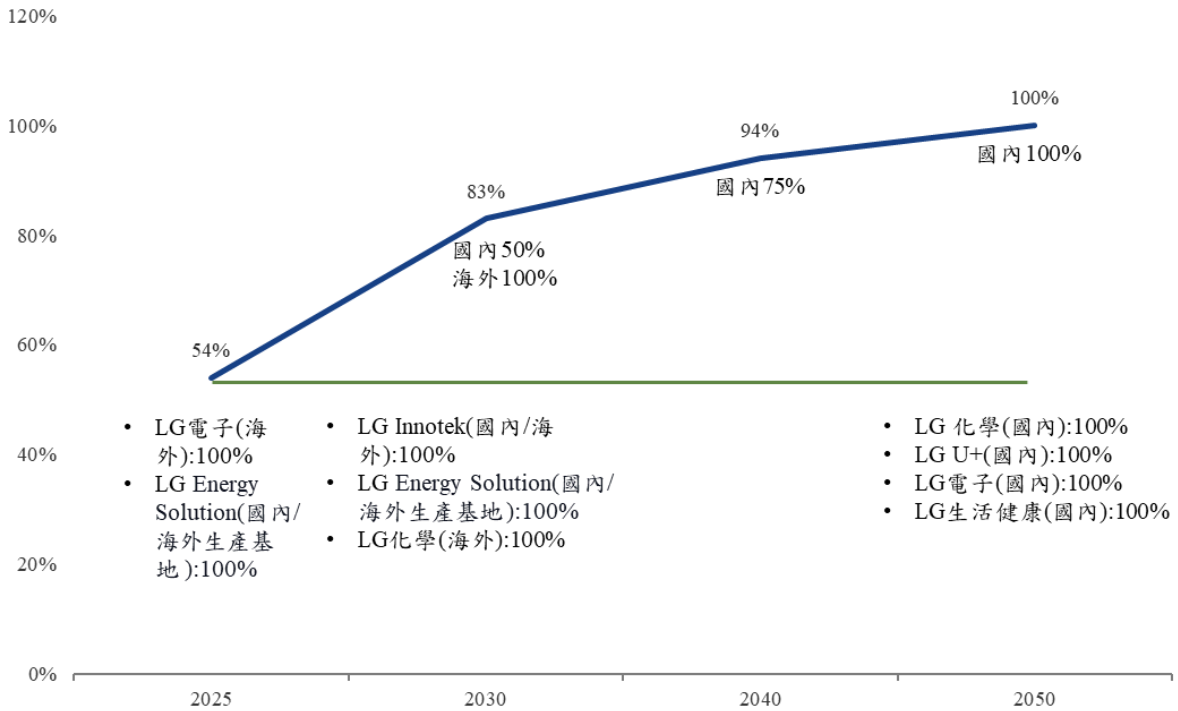


圖 1.14 LG 集團預計 2050 年完全使用再生能源²⁵

第四節 小結

各國將減碳目標納入法規，包括：歐盟綠色政綱針對塑膠產業提出循環經濟行動計畫、美國針對企業使用綠色能源給予補助、歐盟以監管沙盒與淨零歐洲平台等促使企業減碳、日本推動綠色創新基金提供企業融資等。在碳定價方面，各國的機制吸取以往的經驗進行規劃，如 CBAM 修訂過往 EU ETS 引發的碳洩漏問題，並支持巴黎協定的目標，針對高碳排產業以 EU ETS 每週平均收盤價徵收碳稅，未來還有機會擴大管制範圍。CCA 法案修訂美國過去的國內稅收法，藉由管制進口商與美國國內廠商的碳排放量，就超出規範標準的碳排放量課徵 55 美元/噸的碳稅，並逐年調整標準及提高碳稅，規範的產業範圍也將持續擴大。日本試行 J-credit，藉由觀察減碳成果作為後續推動之參考。藉由減碳目標的制定、碳定價制度以及其他轉型法規的輔助，是國際目前的趨勢，建議我國政府在規劃政策時，能夠參考上述國際法規與制度，與國際接軌。

我國加速針對減碳進行各項規範，除了整體長期目標之外，亦有針對石化業的淨零路徑規劃，淨零路徑可使業者更清楚瞭解後續減碳方針，以製程改善、能源轉換、循環經濟及業界推廣作為減少碳排放量的核心方式。氣候變遷因應法規範溫室氣體的排放，訂定以 5 年為一期的溫室氣體階段管制目標，及針對氣候變遷行動綱領進行 4 年一次的檢討，以期逐步管制及改善減碳情形，更接近 2050 淨

²⁵ 資料來源：LG Net Zero Special Reporting 2022。

零碳排的目標。亦透過溫室氣體盤查登錄，使高碳排企業的溫室氣體排放量可視化，並將藉由碳費的徵收以及碳交易所的上路，刺激企業積極減碳。隨著金管發布上市櫃公司永續發展路徑圖，訂定各規模上市櫃公司溫室氣體盤查資訊揭露時程，以利企業遵循並訂定自身減碳目標，達成企業永續發展。我國雖已在淨零目標相關規範方面跟上國際腳步，然而與國際相比，仍有許多可以改善的空間，如政府積極輔導企業能源轉型、產業轉型等。為了更加瞭解業者該如何安排自身減碳規劃與政府如何介入輔導。

國際許多石化大廠作為高碳排企業，已率先著手減碳轉型，如 BASF 透過提高使用再生能源佔比、工廠能源與流程效率等方式，積極降低企業自身碳排放量；DOW 透過優化永續發展的製造設施與製程、增加綠色能源與蒸氣的使用等方式進行減碳；中石化作為中國大陸最大的石化產品供應商，持續發展碳排放監測及管理，逐步開拓創新技術；住友化學規劃未來使用零碳能源、推進工廠設備的電氣化、應用碳資源循環技術等措施，力求企業在 2030 年前將溫室氣體排放量相較 2013 年降低 50% 並於 2050 年實現碳中和，亦計畫未來藉由開發有助於實現碳中和的技術、挑戰負碳技術開發等方式，協助削減全球溫室氣體排放量等。國際石化業者藉由規劃自身淨零路徑，將資金投入各項減碳措施，並使用低碳燃料、再生能源等作為 2050 淨零碳排的策略。

第二章 石化業節能技術

根據台灣上市公司 ESG 報告書統計指出，塑膠工業及化學工業的範疇一及範疇二排放依照自產能源比例約各佔 50%。進一步分析，範疇一主要來自自設汽電共生電廠或蒸氣鍋爐，用來發電與提供化工製程所需蒸汽；範疇二則是來自外購電力與蒸汽。石化業短期目標之一是盡量減少製程能源使用的碳排放量，業者須盡其所能降低能耗，本章介紹利用人工智慧及大數據分析的智能節能方法與案例，以及各種節能製程技術。

第一節 石化業智慧節能與電氣化

化學製造程序是使用資源將原料轉化為產品的過程，在這一過程中會使用原料以外各種資源，排放各類廢棄物，二氧化碳就是使用能源的廢棄物(圖 2.1)。對大型化學工廠而言，使用的能源是以化石燃料產生蒸汽提供熱驅動製程為主，都在自己的公用設施生產，甚至有部分由汽電共生系統產生電力外售(圖 2.2)，也就是所謂範疇一(Scope 1)溫室氣體排放²⁶。因此石化業減碳路徑規劃，第一階段為製程改善，第二階段為能源轉換，也就是使用低碳燃料如天然氣/生質能替換燃煤/燃油，以及引入再生能源設置如光電、風電、沼氣。人工智慧(AI)及大數據分析(DA)導入是第一階段製程改善及第二階段能源轉換地重要基礎，也是石化業者朝向淨零目標的必要技術。

第一階段製程改善的重點為如何減少熱驅動製程的能源需求。第二階段能源轉換將會導入低碳能源如生質能、沼氣、光電、風電及小型核能等，其原始(進入工廠)形式均為電力，從熱力學第二定律的觀點，電可以 100%轉化為熱，但熱無法 100%轉換為電，所以製程能源使用從節能的觀點，應該適度轉換為以電驅動而非以熱驅動為主。此外，利用鋼化聯產等方式取得蒸氣，也是石化業需要與其他產業結合的方向。本節將重點介紹如何將 AI 及 DA 導入，協助工廠進行淨零轉型的製程改善，也會介紹鋼化聯產之案例，以及製程設備電氣化的節能效益。

²⁶ <https://www.epa.gov/climateleadership/scope-1-and-scope-2-inventory-guidance>

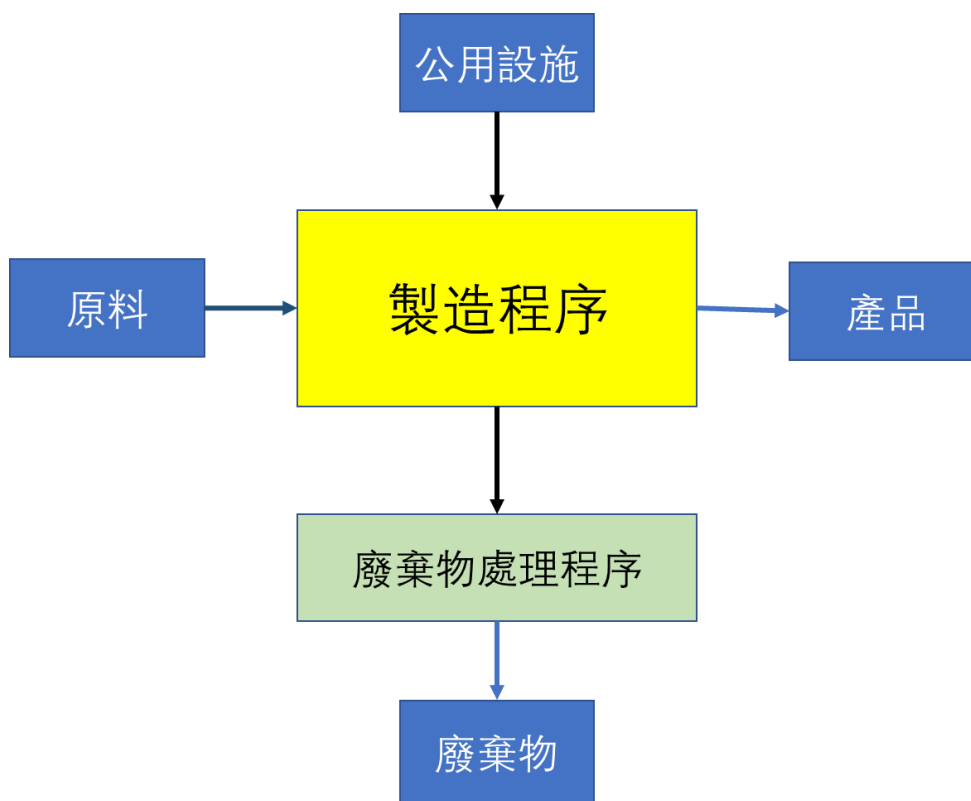


圖 2.1 化學程序示意圖

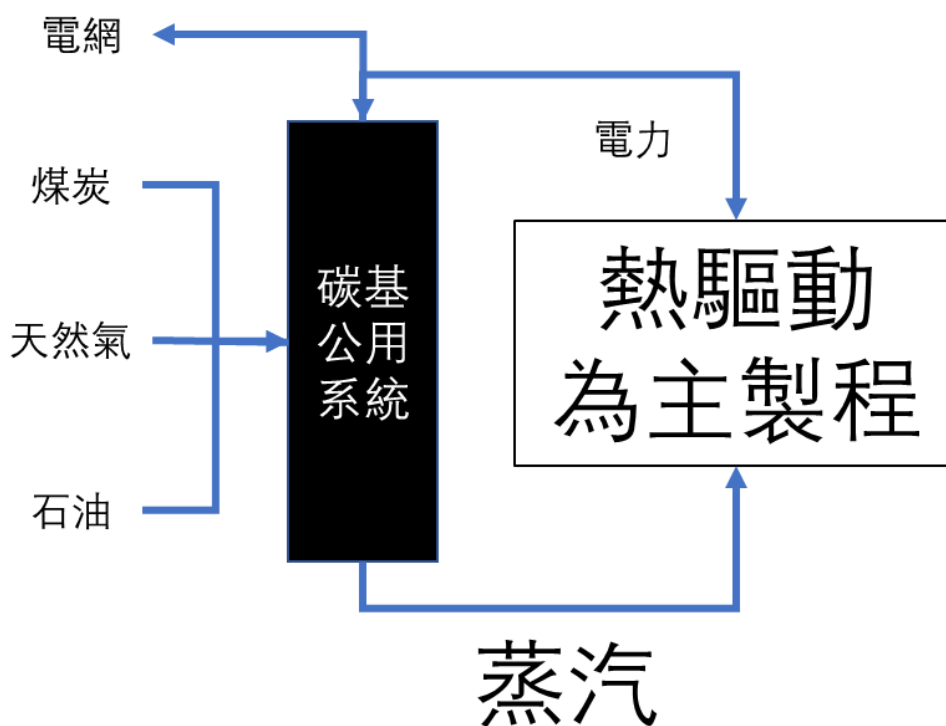


圖 2.2 傳統化學工廠公用系統示意圖

一、智慧製造及數位轉型

現代製造系統中各種傳感器和人員、智能設備不斷生成與設備、製程狀態有關的大量數據。隨著計算能力的提高，這些大數據以更新、更快、更通用、更深入的人工智慧方法行分析，開啓了被稱爲工業 4.0 的新時代，透過數位轉型(digital transformation)，將業務流程轉換爲數位格式，改善現有的產品、服務和運營或進行創新。目前專門針對使用先進的人工智慧技術進行淨零轉型的資訊不多，主要停留在政策及管理面²⁷，材料開發研究²⁸、電網管理²⁹或特殊領域如建築能耗管理³⁰，對化學工業程序的淨零轉型鮮少討論。大型化工廠都已建置完整的製程生產資訊管理系統(Process Information Management System, PIMS)³¹；歷年的操作及品質分析數據隨手可得，數位轉型的基礎建設已經相對完善，問題是如何特別針對淨零轉型進行數位智慧管理及創新。工廠在數位轉型的步驟如下：

(一) 能源供應數據盤點

能源供應盤點是指對地區、國家或企業的能源生產、供應和分配情況進行評估和分析的過程。此過程通常涵蓋下列面向：

- 評估可用能源，包括化石燃料(如煤、石油、天然氣)、再生能源(如太陽能、風力、水力、生質能)以及核能等。
- 評估能源的生產量和生產方式，包括採礦、鑽探、太陽能板或風力發電機的安裝等。
- 分析能源的消耗情況，包括工業、交通、住宅和商業等部門的能源使用，以及能源的最終用途(如發電、供熱、交通運輸等)。
- 評估能源使用效率，並提出改善措施，以減少能源浪費並提高效益
- 評估能源生產和消耗對環境的影響，包括溫室氣體排放、污染和生態系統破壞等。
- 討論能源供應的永續性，包括再生能源的推廣和能源多樣性。

²⁷ Inderwildi, O., Zhang, C., Wang, X., & Kraft, M. (2020). The impact of intelligent cyber-physical systems on the decarbonization of energy. *Energy & Environmental Science*, 13(3), 744-771.

²⁸ Peng, J., Schwalbe-Koda, D., Akkiraju, K., Xie, T., Giordano, L., Yu, Y., ... & Shao-Horn, Y. (2022). Human- and machine-centred designs of molecules and materials for sustainability and decarbonization. *Nature Reviews Materials*, 7(12), 991-1009.

²⁹ Bonilla, J., Blanco, J., Zarza, E., & Alarcón-Padilla, D. C. (2022). Feasibility and practical limits of full decarbonization of the electricity market with renewable energy: Application to the Spanish power sector. *Energy*, 239, 122437.

³⁰ Xiao, T., & You, F. (2023). Building thermal modeling and model predictive control with physically consistent deep learning for decarbonization and energy optimization. *Applied Energy*, 342, 121165.

³¹ https://en.wikipedia.org/wiki/Plant_Information_Management_System

能源供應盤點通常由政府、國際組織、能源公司和環境團體等機構進行，以制定能源政策、規劃未來能源發展，並確保能源供應的穩定和永續性。能源盤點的實施方式和範圍會因不同國家、地區和企業的需求而異，但通常會包括下列步驟和方法：

- 收集能源供應、消耗和分配的相關數據，如能源生產量、消耗量、能源供應結構、碳排放量等。
- 進行數據分析，以評估能源供應和消耗的情況，確定能源供應中的趨勢和問題，並提供改善能源效率的建議。
- 基於數據分析的結果，相關單位可制定能源政策，以確保能源供應的永續性，減少碳排放，提高能源效率等。
- 監測和評估—能源盤點是持續性的過程，需要定期監測和評估，以確保政策和措施的實施效果，並根據實際情況進行調整。

在石油化學工業進行能源供應盤點時，應考慮如原料供應、能源效率、潔淨能源、碳捕集與封存、能源供應鏈、溫室氣體排放等重點。通過深入瞭解能源供應鏈和相關的環境、政策和技術因素，可以幫助工業決策者更好地規劃和管理能源供應，以滿足生產需求和永續發展目標。

(二) 熱回收盤點(狹點分析)

利用數據進行使用端盤點更是重要。Kanisev 等³² 曾經對一些煉油廠的使用端進行盤點，發現製程實際利用率大概只有 69%，其他能源使用包括冷卻水移除佔 11%、廢氣熱損失約為 14%、換熱損失及發電約 3%。

進一步探討降低能耗的機會，需要使用狹點分析(pinch analysis，見圖 2.3)³³ 作為熱回收分析工具。製程在不同溫度區間的所有加熱需求可組成加熱需求組合曲線(heating composite curve)，同樣不同溫度區間的所有冷卻需求可組成冷卻需求組合曲線(cooling composite curve)；因為熱只能從高溫流到低溫，我們可以在橫座標方向左右移動，使得兩條曲線之間最小差為指定可以接受的最小換熱溫度(ΔT_{min} ，一般為 10°C)；從而計算出程序需要使用燃料提供的理論最小加熱量 Q_{Fuel}^* 和使用冷卻水移除的理論最小冷卻量 Q_{CW}^* ；可以透過製程熱交換的最大回收量 Q_{Rec}^* ； T_H^* 與 T_C^* 則為可以透過製程熱回收達到的冷流最高溫度及熱流最低溫度。

³² Kanischev, M. V., Ulyev, L. M., Chibisov, R. E., & Vasilyev, M. A. (2018). Benchmarking for refinery units. Chemical Engineering Transactions, 70, 1099-1104

³³ https://en.wikipedia.org/wiki/Pinch_analysis

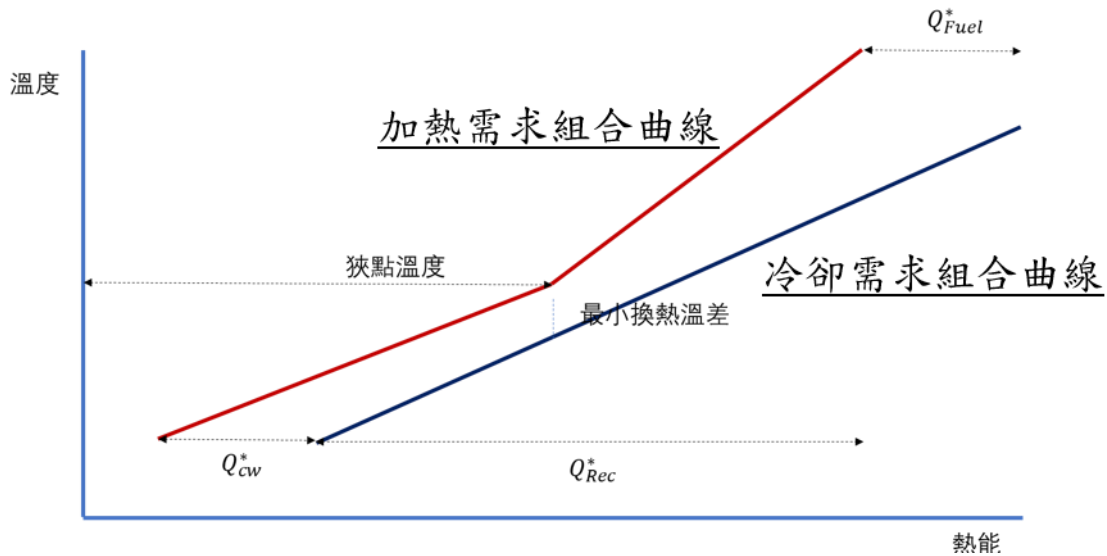


圖 2.3 狹點理論示意圖

根據製程數據計算出在任何時間所有換熱器交換的熱量 Q_{Rec} 、當時需要公用系統燃料提供的最小熱量 Q_{Fuel} 、冷卻水移走的最小熱量 Q_{CW} 、以及 T_H 與 T_C (如圖 2.4)。如果熱交換的量遠小於理論的最大換熱量 $Q_{Rec} < Q_{Rec}^*$ ；可能原因有三：(1)熱回收系統設計不好；(2)熱交換器積垢導致換熱效率不好；(3)換熱系統有熱損失。

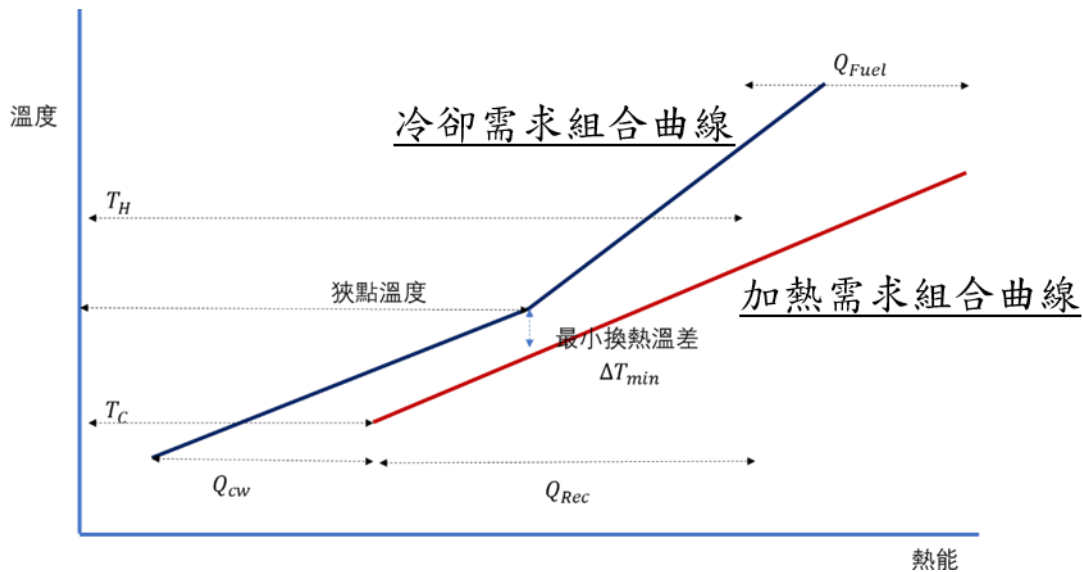


圖 2.4 製程實際熱回收狹窄分析示意圖

根據歷史數據找出歲修之後新開車的時段，製程熱回收達到的冷流最高溫度為 $T_{H,max}$ ，如果 $T_{H,max}$ 與 T_H^* 相近，熱回收系統設計沒有太大的問題，如果實際使用冷卻水移走的熱量 Q'_{CW} 小於 Q_{CW} ，可以確定必然有熱損失。實務上可以根據數據計算每一個熱交換器熱流提供的熱量 $Q_{H,i}$ 及冷流吸收的熱量 $Q_{C,i}$ ，檢查熱交換器熱損失，計算公式如下：

$$Q_{H,i} - Q_{C,i} = Q_{Loss,i}$$

以及熱交換器提供的有效熱傳係數與面積的計算公式如下：

$$UA_i = \frac{Q_{ci}}{\frac{(T_{Hin,i} - T_{C,out,i}) - (T_{H,out,i} - T_{C,in,i})}{\ln\left(\frac{T_{Hin,i} - T_{C,out,i}}{T_{H,out,i} - T_{C,in,i}}\right)}}$$

如果實際使用燃料提供的熱量 Q'_{Fuel} 大於當時需要公用系統燃料提供的最小熱量 Q_{Fuel} ，就需要檢查鍋爐燃燒效率，強化廢氣熱回收達到節能效果。

(三) 製程使用盤點

在分析了熱回收系統中節能機會之後，應進一步分析製程及設備的能源使用。Sholl 及 Lively 指出，分離過程消耗超過 50% 的過程能量需求³⁴，蒸餾是分離的主力，分析蒸餾製程的能耗找尋節能機會。蒸餾的品質要求是餾出物或底部產物的純度；然而，產品的純度越高，所使用能量就越大。由於化工設備都有規模效應，絕對能耗不能反映製程效率，通常單位能耗會隨產量增加而減少，因此可以利用歷史數據繪製蒸餾塔產物的純度分佈(如圖 2.5)，以及單位能耗對產量的關係圖(如圖 2.6)，如果存在較大的變異或與控制上限較大的偏差，可以利用先進控制手段，如人工智慧模型，獲得降低製程能耗的機會。

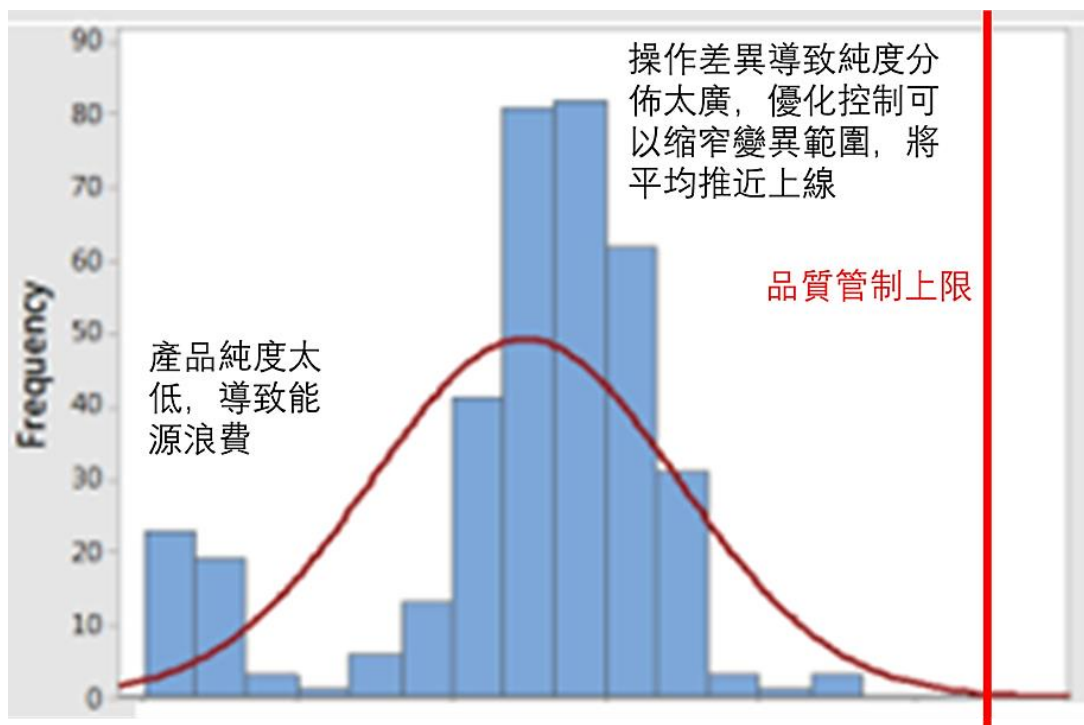


圖 2.5 蒸餾塔產物純度分佈

³⁴ Sholl, D. S., & Lively, R. P. (2016). Seven chemical separations to change the world. *Nature*, 532(7600), 435-437.

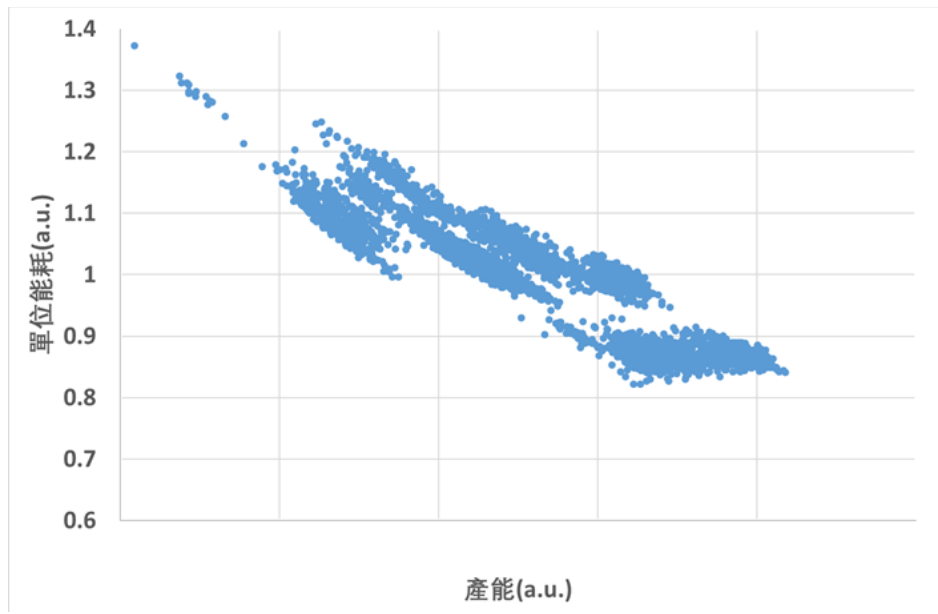


圖 2.6 單位能耗與產量關係

(四) 汽電共生碳排分配

碳排放分配方法是非常重要的能源政策工具，用以支持政府、區域和產業層級的能源系統規劃以及決策和政策制定。汽電共生(又稱熱電聯產)系統產生電能和熱能，但熱可以透過化石燃料或電力產生，效率超過 95%，而電由化石燃料/熱能產生，效率至多 45%。有鑑於此，在計算汽電共生系統的碳排放時，應分配多少排放量給電和熱的生產呢？尤其當所生產的熱、電用戶不同時，以及與其他供熱方式比較時，需要將碳排放量分配給汽電共生的能量產出。

在同時生產熱、電的汽電共生廠中，精確地將初級能源輸入、排放量或操作成本分配給兩種能量輸出是困難且具有爭議的。常用的分配方法有 energy method、alternative generation method、power bonus method、exergy method、200% method、PAS 2050 和 Dresden method，分別簡述如下。

1. **Energy method**：根據熱電產量來分配初級能源消費量及碳排放量，分配因子可表示為：

$$F_Q = Q/(Q + E)$$

$$F_E = E/(Q + E)$$

其中 F_Q 和 F_E 分別為熱和電的排放分配比例， Q 和 E 分別為熱和電的產量。此方法的優點是簡單，缺點是未考慮能量品質(energy quality)，因此可說是低估了分配給電的排放量³⁵。

³⁵ Rosen, M. A. (2008). Allocating carbon dioxide emissions from cogeneration systems: descriptions of selected output-based methods. *Journal of Cleaner Production*, 16(2), 171-177.

2. **Alternative generation method**：由芬蘭區域供熱協會(Finnish District Heating Association)制定，根據單獨生產熱、電所需的燃料量來分配資源及碳排放量³⁶，分配因子可表示為：

$$F_Q = \left(\frac{Q}{\eta_Q} \right) / \left(\frac{Q}{\eta_Q} + \frac{E}{\eta_E} \right)$$

$$F_E = \left(\frac{E}{\eta_E} \right) / \left(\frac{Q}{\eta_Q} + \frac{E}{\eta_E} \right)$$

其中 η_Q 和 η_E 分別為產熱和產電的效率。

3. **Power bonus method**：由歐洲標準(European Standards)EN 15316-4-5:2007 推廣，以熱為主產品，將所有的電都視為附加產出，並將初級能源分配給汽電共生所產的電，分配因子可表示為：

$$F_Q = F_{P,DH} Q_{del} / (Q_{del} + E_{del})$$

$$F_E = 1 - F_{P,DH} Q_{del} / (Q_{del} + E_{del})$$

其中 $F_{P,DH}$ 為區域供熱系統的初級能源因子， Q_{del} 為供應給建物的熱能， E_{del} 為汽電共生所產的電能。

4. **Exergy method**：從熱力學的角度來看，根據熱電的可用能(焓)來分配碳排放量，分配因子為：

$$F_Q = Ex_Q / (Ex_Q + Ex_E)$$

$$F_E = Ex_E / (Ex_Q + Ex_E)$$

其中熱的焓 $Ex_Q = (1 - T_0/T)Q$ ，表示熱只能部分轉換為電或其他形式的能量， T_0 為環境平均溫度， T 為介質溫度；電的焓 $Ex_E = E$ ，即電可以 100% 轉換為任何形式的能量。雖然在實際應用上相當複雜，但此方法被認為是最公平的分配方法³⁷。

5. **200% method**：由丹麥能源署(Danish Energy Agency)制定，與 power bonus method 類似，將電當作附加產出。此方法假設產熱效率為 200%，意即 2 單位的熱能來自 1 單位的燃料和 1 單位的熱回收，故分配因子可定義為：

$$F_Q = Q / 2Fuel_{in}$$

$$F_E = 1 - Q / 2Fuel_{in}$$

³⁶ International Energy Agency (2011) "The Potential for Increased Primary Energy Efficiency and Reduced CO2 Emissions by District Heating and Cooling: Method Development and Case Studies" SP Technical Research Institute of Sweden, KDHC – Korea District Heating Technology Research Institute, SINTEF Energy Research Norway ANNEX IX, 8DHC-11-01

³⁷ Energy Efficiency Council (2013) "Cogeneration – Allocation Protocol and Best Practice – Issues Paper"

其中 $Fuel_{in}$ 為汽電共生廠中消耗的初級能源總量。

6. **PAS 2050**: 由英國標準協會(British Standards Institution)制定, 分配因子表示為:

$$F_Q = Q/(nE + Q)$$

$$F_E = Q/(nE + Q)$$

其中 n 是單位產量的溫室氣體排放強度; 採用固體燃料的鍋爐(boiler-based)汽電共生系統 n 值為 2.5, 採用氣體燃料的渦輪機(turbine-based)汽電共生系統 n 值為 2。

7. **Dresden method**: 由 Zschernig 和 Sander³⁸ 提出, 以焓評估為基礎, 分配因子如下:

$$F_Q = \Delta E/E$$

$$F_E = (E - \Delta E)/E$$

其中汽電共生廠內因排熱(蒸汽冷凝)造成的電力損失 $\Delta E = Q\eta_c v_p$, η_c 為卡諾效率, v_p 為製程品質程度。

根據環境部氣候變遷署公布的汽電共生設備排放量分配公式, 蒸汽(熱能)的分配因子為(熱能產出/鍋爐產汽效率)/燃料投入量³⁹, 與 alternative generation method 相似。汽電共生碳排放分配的關鍵問題在於碳排放是否應完全歸因於電或熱, 還是該根據能源實際使用情況來分配。碳排放的歸因方式會影響企業的碳足跡評估、環境許可和碳定價等方面。因此, 汽電共生的碳排放分配問題需要在減排政策和環境法規的框架下進行處理和討論, 實際使用哪種方法取決於具體的業務需求和政策要求。

(五) 小結

目前大部分化工公司都配備了過程資訊管理系統, 可以提供大量有關能源生產、使用、操作數據, 如壓力、溫度、流量和液位及品質數據等等資料。然而重要的是利用這些資料來構建整個公司、不同廠區和不同生產單元的能源工供應系統碳強度、生產過程能源效率的全視角能源大數據系統。資訊管理系統使管理階層能夠監控過程能源效率, 確定改進目標, 進行技術儲備和業務管理, 朝向綠色能源供應系統轉型, 以實現零排放目標。建構這樣的系統在技術上並不困難, 但需要資訊工程師, 製程工程師及能源管理工程師緊密的配合。

³⁸ Zschernig, J., & Sander, T. (2007). FACHTHEMEN-KWK-Strom--Was ist das? Bewertungsmethode. Euroheat and Power-German Edition, 36(6), 26-37.

³⁹ 環境部氣候變遷署, 事業溫室氣體排放量資訊平台
https://ghgregistry.moenv.gov.tw/epa_ghg/Downloads/FileDownloads.aspx?Type_ID=1&fbclid=IwAR3JupDxpywwCuHnggXY656f-WkOmntDq75r91zIgz4Bz1sbhIQL7jm2g4E

二、人工智慧應用

工業 4.0 為對製造過程的各個階段進行分類，從機械化、電氣化/規模、自動化到智慧化。隨大數據時代的來臨及人工智慧技術的進展，智慧化生產將成為引導我們實現淨零排放目標解決方案的一部分。

(一) 自動化與智慧化

自動化可以定義為使用電腦控制系統執行從人類獲得預定命令，無需人類實際執行操作。在煉油及石化行業在 60 年代已經開始，至今幾乎在所有工廠的所有操作環節實現。自動化的行為通常是在特定的生產狀況下，由控制器(controller)根據指定的設定點(setpoint)指揮執行器(actuator)動作。當生產狀況需要適應外部變化(如客戶需求變化)，或內部變化(如催化劑衰退和熱交換器結垢)，操作方式需要調整，基本上是由操作員下達設定點改變指令完成。由於電腦運算及數據存儲能力的限制，操作員下達的指令往往是根據其經驗決定，而不是依據目前系統所提供的數據經過已知知識(模型)嚴格分析的結果。

煉油和石化工業在 80 年代首先提出模型預測控制的觀念(model predictive control, MPC)如圖 2.7，也就是根據過去一段時間的數據，利用模型估計目前製程及設備的狀態，以及預測各種操作對未來的影響，比較優劣後選定最佳決策；此一方法在大型製程如煉油廠已相當普及，也被證明對於降低能源使用有明顯地功效。然而由於電腦運算能力的限制，傳統 MPC 使用的模型，侷限為線性模型，能在一個小範圍適用，當製程外部及內部條件改變，模型經常需要重新辨識，維護成本甚高，因此除了大型煉油製程，一般石化工廠都認為效益成本比例不高，使用並不普遍。

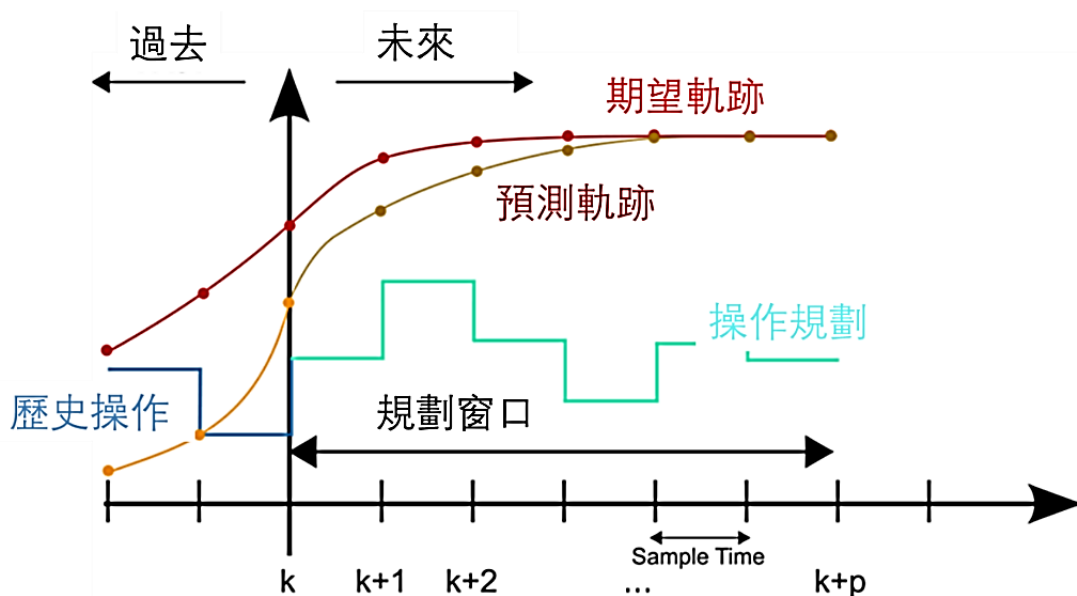


圖 2.7 模型預測控制示意圖

(二) 人工智慧發展與化學工程應用

人工智慧的發展分成萌芽期，機器學習，及深度學習三個主要的年代(圖 2.8)。1960 年前後稱為萌芽期，這個時候的人工智慧，主要是知道我們可以利用數學模型(感知器 perceptron)模擬細胞當中信號的傳輸，但實際上除了可以用來做簡單的分類外，沒有什麼太多的應用。1990 年前後，我們知道可以利用多個感知器堆疊組成一個網路來模擬大腦的記憶，稱為類神經網絡。雖然也有很多學者探討類神經網絡，在模型預測控制的應用；然而這些數據驅動模型缺乏物理意義，無法保證外插準確度；對控制動作對製程演變方向也無法保證其合理性。因此也很少直接應用於實際製程。2010 年前後，深度學習蓬勃發展，計算機領域開發了很多數字、圖形、語言、影像一體化處理的演算方法。傳統上這些深度學習模型均為特殊任務模型；但近年逐漸演變為大型語言模型(large language model)，向通用人工智慧的基礎。

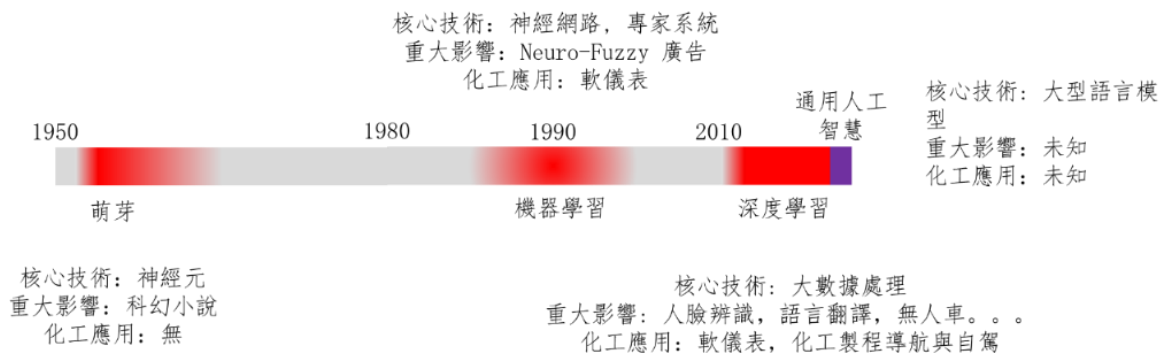


圖 2.8 人工智慧發展歷史

深度學習(deep learning)的核心為數字、圖形、語言、影像一體化處理，不過化工廠數據僅以數字為主，來自於過測量不同變量隨時間變化的數據，可以用於協助決策⁴⁰；深度學習也開發了很多現存物理知識嵌入數據驅動模型的方式⁴¹，把物理模型的等式或不等式，作為數字驅動模型的訓練限制，大幅提高人工智慧模型的可靠性。Chow 等⁴²提出可以用語言處理中常用的序列對序列模型(sequence-to-sequence model)，利用歷史數據訓練蒸餾塔的動態行為模型，使得模型預測回流量及蒸氣量對品質的影響更為合理。由於化學製程的動態行為比較遲緩，Jiang

⁴⁰ Kang, J. L. (2020). Visualization analysis for fault diagnosis in chemical processes using recurrent neural networks. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 112, 137-151.

⁴¹ Daw, A., Karpatne, A., Watkins, W., Read, J., & Kumar, V. (2017). Physics-guided neural networks (pgnn): An application in lake temperature modeling. *arXiv preprint arXiv:1710.11431*.

⁴² Chou, C. H., Wu, H., Kang, J. L., Wong, D. S. H., Yao, Y., Chuang, Y. C., ... & Ou, J. D. Y. (2019). Physically consistent soft-sensor development using sequence-to-sequence neural networks. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 16(4), 2829-2838.

等⁴³在這個模型的基礎上，加入記憶層(圖 2.9)，以及彈性網訓練，增強增益合理性指標，建立各種高分子反應器的動態行為。Kang 等⁴⁴提出滾動訓練法並應用到丙烯蒸汽再壓蒸餾，使這些模型可以在沒有新的數據輸入的條件下，進行以週為尺度的長期預測，增強以數據建立的數位分身(digital twin)的物理可解析性(physical interpretability)

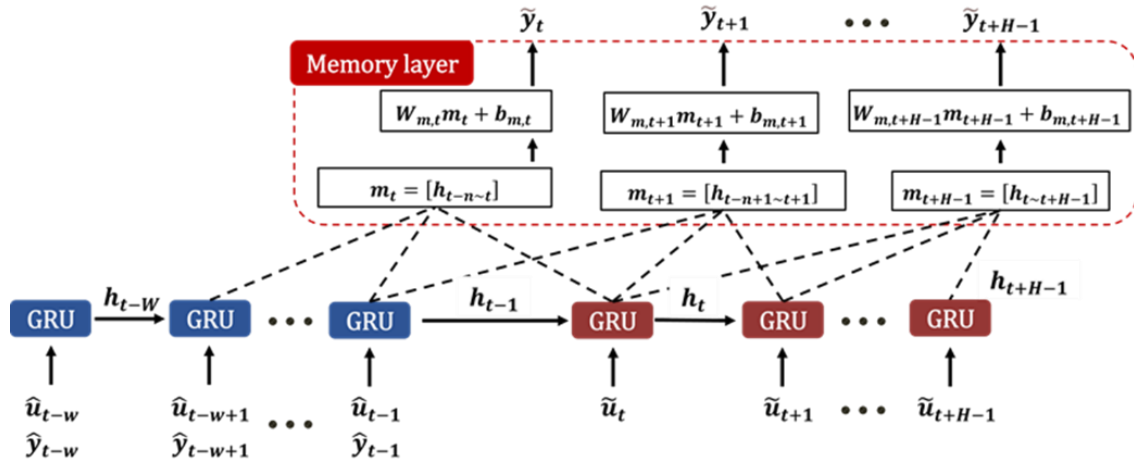


圖 2.9 帶記憶層序列對序列模型

上述深度學習模型並以模型進行模型預測控制跟傳統模型預測控制不同，我們可以根據歷史數據來訓練這些模型，而不需要進行模型辨識實驗。同時由於模型具非線性，只要歷史上出現過的操作狀況都可以被納入，大大減少了重新建模的需求，使模型預測及控制的維護成本得以大幅降低。

(三) 蒸餾塔範例

目前研究文獻已經有相當多的相關範例⁴⁵。清大汪上曉教授研究團隊已經完成很多實際上的應用。舉例而言，圖 2.10 為一個碳 4 的分離塔⁴⁶，使用上述方法進行模型預測控制後，產物濃度的變異可以大幅降低，因而降低 7% 能耗，減少二氧化碳排放量為 7,800 噸/年。使用同樣的方法丙烯/丙烷之蒸汽再壓縮蒸餾的分離，可以把能耗降到歷史最低水平，同時降低在同樣產量條件之下的變異，節能效果也達到 7%，減碳成果也接近萬噸級水準。

⁴³ Jiang et. al (2022). Model Predictive Control of Grade Transition with Attention Base Sequence-to-Sequence Model. In Computer Aided Chemical Engineering (Vol. 49, pp. 367-372). Elsevier

⁴⁴ Kang, et. al (2023). Sequence-to-sequence digital twin model in chemical plants with internal rolling training algorithm. Applied Soft Computing, 146, 110608.

⁴⁵ Drgoňa et. al (2018). Approximate model predictive building control via machine learning. Applied Energy, 218, 199-216 ; He et. al (2023). Data-driven worst case model predictive control algorithm for propylene distillation column under uncertainty of top composition. *Journal of Process Control*, 124, 199-213 ; Zhang et. al (2019). Real-time optimization and control of nonlinear processes using machine learning. *Mathematics*, 7(10), 890.

⁴⁶ 成分為具有 4 個碳基的化合物

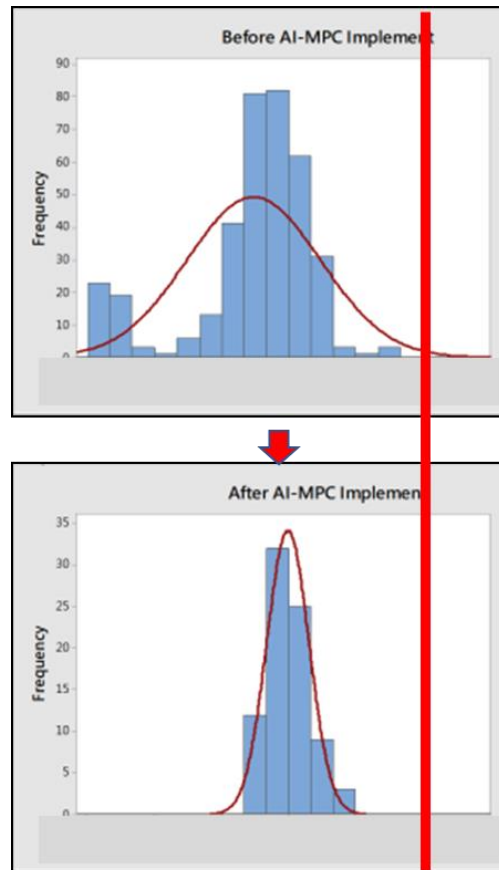


圖 2.10 人工智慧模型預測控制在 C4 分離塔實施結果

(四) 小結

從上述討論可知，利用深度學習模型為化工製程開發新型數位孿生模型 (Digital Twin) 雖然是非線性模型且訓練複雜，但實際應用時卻相當簡單。儘管使用以資料驅動方法來開發，但各種高級訓練演算法能夠增強其物理可解釋性和依從性，以及長期預測能力，因此它們特別適用於模型預測控制，可用於化工製程的智慧管理。這種深度學習模型預測控制方法目前仍然是一種新興技術，即技術成熟度 (TRL) 8~9，還沒有統包 (turnkey) 的商業解決方案。因為能夠從節能減碳方面獲得好處，值得業者儘早投資，作為短期零排放的過渡戰略。

三、電氣化與製程強化

根據國際能源署的資料顯示⁴⁷，電氣化在 2050 年將成為實現二氧化碳淨零排放的主要途徑之一，將以再生能源做為主要能源供應來源⁴⁸。考慮到低碳電力的發展趨勢，化工製程電氣化與低碳電力結合，成為脫碳得長期發展模式⁴⁹。

⁴⁷ IEA, 2021. Net Zero by 2050: A roadmap for the global energy sector.

⁴⁸ IRENA, 2020. Global Renewables Outlook: Energy transformation 2050. IRENA, 2020. Global Renewables Outlook: Energy transformation 2050.

⁴⁹ Barton, 2020. Electrification of the chemical industry. Science (1979) 368, 1181–1182; Kim, 2022. Studies on the conceptual design of energy recovery and utility systems for electrified chemical processes. Renewable

(一) 電氣鍋爐技術

電氣化加熱是能夠顯著減少碳排放的有效策略，電氣化製程加熱通常會結合廢熱等其他熱源。一些研究已確認電氣化加熱在製程工業中的效益，或評估未來電氣化在工業界減碳的潛力⁵⁰，多位學者針對特定工業部門如鍋爐產業⁵¹、化學工業⁵²、煉油業⁵³等，或特定地區如歐洲、美國等⁵⁴探討電氣化的影響。

電氣鍋爐是利用電力來產生熱能的設備，通常用於供暖、提供熱水、產生蒸汽和其他加熱應用。電氣鍋爐有多種類型，其工作原理各不相同，以下是一些常見的電氣鍋爐類型和它們的工作原理。

- 電阻式電氣鍋爐：最常見的類型，鍋爐內包含一個或多個電阻加熱元件，通常是電熱絲或電阻片。當電流通過時，電阻元件發熱，將周圍的水加熱，產生蒸汽或熱水。電阻式電氣鍋爐通常具有簡單的控制系統，可精確控制溫度和熱量產生。
- 電子電氣鍋爐：使用電子元件來產生熱能，如電子加熱器。透過電子控制系統管理電流的流動，以實現更精確的溫度控制。這類鍋爐通常反應更快，可以提供更高的溫度精度。
- 電磁加熱電氣鍋爐：使用電磁感應原理，通過電磁場將鍋爐內的水加熱。這類鍋爐通常反應迅速，因為不需要加熱元件的物理接觸。電磁加熱電氣鍋爐在一些特定的應用中非常有用，如生產高溫高壓蒸汽。

不同類型的電氣鍋爐具有各種功率和容量規格，可以根據特定的加熱需求進行選擇。因電氣鍋爐不涉及燃燒，排放極少或不排放廢氣，適用於各種工業、商業和住宅用途，是一種環保和高效的加熱解決方案。

隨著再生能源發電的容量擴大和成本下降，工業部門開始了電氣化技術的研發。市場上已推出中低溫電氣化加熱技術如電加熱器(electric heaters)⁵⁵和電極鍋爐

and Sustainable Energy Reviews 167, 112718 ; Mallapragada et. al., 2023. Decarbonization of the chemical industry through electrification: Barriers and opportunities. Joule 7, 23–41.

⁵⁰ Thiel and Stark. To decarbonize industry, we must decarbonize heat. Joule 2021;5(3):531-50.

⁵¹ Schoeneberger et. al, Electrification potential of U.S. industrial boilers and assessment of the GHG emissions impact. Adv Appl Energy 2022;5:100089.

⁵² Bonheure et. al, Dream or reality? Electrification of the chemical process industries. Chem Eng Prog 2021;117(3):37-42

⁵³ Taqvi et. al, Optimal renewable energy integration into the process industry using multi-energy hub approach with economic and environmental considerations: Refinery-wide case study. Comput Chem Eng 2021;151:107345.

⁵⁴ Madeddu et. al., The CO₂ reduction potential for the European industry via direct electrification of heat supply (power-to-heat). Environ Res Lett 2020;15:124004 ; Jadun et. al, Electrification futures study: End-use electric technology cost and performance projections through 2050, NREL 2017.

⁵⁵ Element Energy & Jacobs. Industrial fuel switching market engagement study. Final report. 2018 Dec.

(electrode boilers)⁵⁶。製程工業中有各種利用電磁場或電流的電熱(electric heating)技術，可用於不同溫度的製程加熱，如表 2.1 所示。與使用熱能加熱相比，用電加熱較易操作和控制，且有較高的能源效率^{57,58}。電加熱器和電極鍋爐目前在製程工業已有工業規模的系統實施，其技術成熟度(technology readiness level, TRL)評級為 9，然而其他電氣化技術，如紅外線加熱器(TRL 7-8)、電陶瓷窯(TRL 5-6)、微波加熱器(TRL 4-5)等，還需進一步研發以進行示範和商業化。

表 2.1 製程工業電氣化加熱選項⁵⁹

加熱技術	加熱方式	溫度
感應加熱(induction heating)	直接	100-2500°C
微波加熱(microwave heating)	直接	100-1300°C
電阻加熱(resistance heating)	直接/間接	200-1800°C
電弧爐(electric arc furnace)	直接/間接	1200-3000°C
紅外線加熱(infrared heating)	間接	300-2600°C
電漿加熱(plasma heating)	間接	1600°C(廢棄物處理)；2000°C(金屬加工)
電極鍋爐(electrode boiler)	產生蒸汽	100-350°C

(二) 公用系統電氣化

基於化石燃料的傳統製程加熱通常是以高溫爐(furnace)直接加熱，或以蒸汽間接加熱。鍋爐或熱製程流體產生的高壓蒸汽可先用於發電，而渦輪機出口的中壓蒸汽用於較低溫的製程加熱圖 2.11 所示。工廠內一般會充分利用這種熱電聯產(汽電共生)來提供所需電力，此外低壓蒸汽的產生也受限於廠內廢熱的量和溫度。圖 2.12 為一種可能的電氣化加熱策略，電爐(electric furnace)用來提供高溫熱能，電極鍋爐或電加熱器則用於一般會以蒸汽提供熱能的溫度範圍。採用電加熱器可避免廠內使用蒸汽，不過當製程需要蒸汽時，可使用電極鍋爐替代傳統化石燃料

⁵⁶ Berenschot. Electrification in the Dutch process industry: In-depth study of promising transition pathways and innovation opportunities for electrification in the Dutch process industry. 2017 Feb.

⁵⁷ Sakr M, Liu S. A comprehensive review on applications of ohmic heating (OH). Renew Sustain Energy Rev 2014;39:262-9

⁵⁸ Ehresman N. Steam vs. Electric heating – the basics. Chem Eng Prog 2020:2-6.

⁵⁹ Oliveira C, van Dril AWN. Decarbonisation options for large volume organic chemicals production, SABIC Geleen. The Hague: PBL Netherlands Environmental Assessment Agency and TNO EnergieTransitie; 2021 May. Report No.: TNO2021P10361; Gomez E, Rani DA, Cheeseman CR, Deegan D, Wise M, Boccaccini AR. Thermal plasma technology for the treatment of wastes: A critical review. J Hazard Mater 2009;161(2-3):614-26; Sharma RP, Basu GS, Prasad SB, Dhillon AS. Steel industry and climate change. In: Bandopadhyay A, Rakesh Kumar, Ramachandrarao P, editors. Environmental & Waste Management. Clean Technologies for Metallurgical Industries (EWM-2002): Proceedings of the National Seminar; 2002 Jan 24-25; Jamshedpur, India. New Delhi: Allied Publishers Pvt. Ltd.; 2002. p. 48-66.

鍋爐。當製程廢熱溫度遠高於環境溫度時，也可透過有機朗肯循環(Organic Rankine cycle, ORC)進行發電。此外當熱源溫度低於熱需求但溫差不大時，也可以用熱泵提高熱源溫度來滿足熱需求。

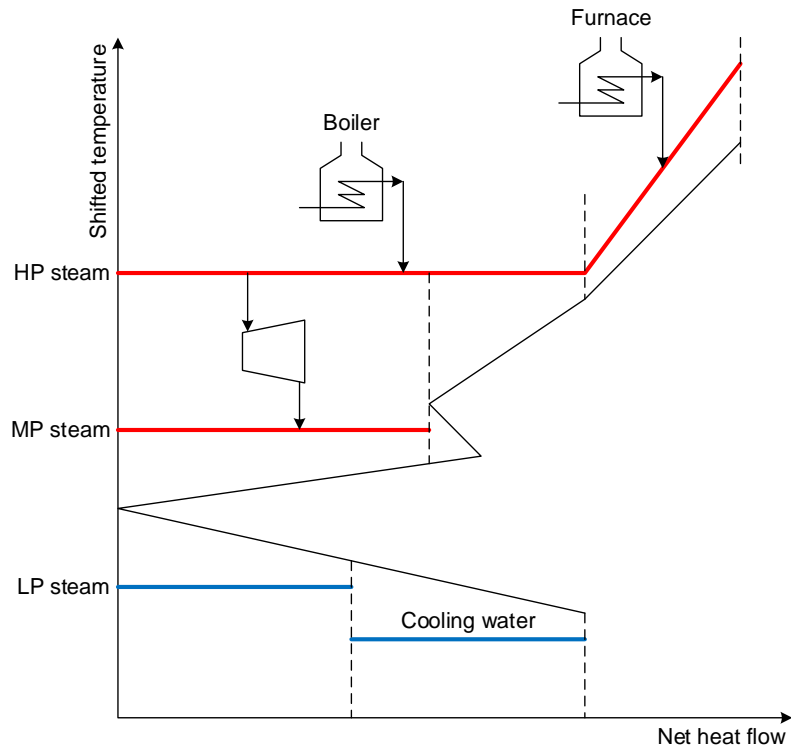


圖 2.11 基於化石燃料的傳統製程能源系統

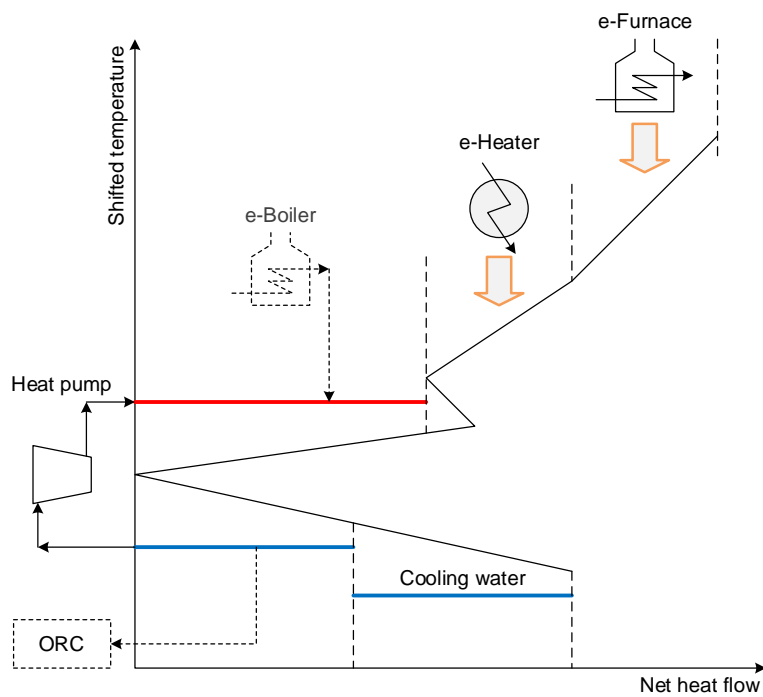


圖 2.12 可能的電氣化製程能源系統

整廠的能源系統可根據公用事業的需求及類型來設計，當一座工廠或工業園區由多個單元或製程組成時，傳統做法是以集中式公用事業系統來生產並分配蒸汽至各工廠或製程，如圖 2.13 所示。當所有的製程加熱皆改為電氣化，整廠的能源系統設計將與傳統化石能源為主的設計將截然不同，此時電是主要的能源載體，且可以結合再生能源與製程(如圖 2.14)。

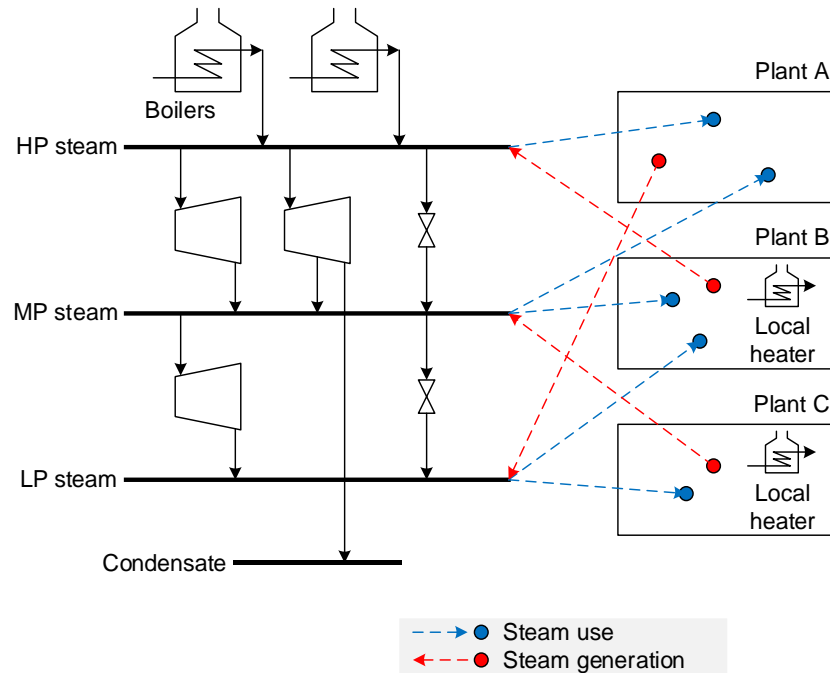


圖 2.13 傳統集中式整廠公用事業系統

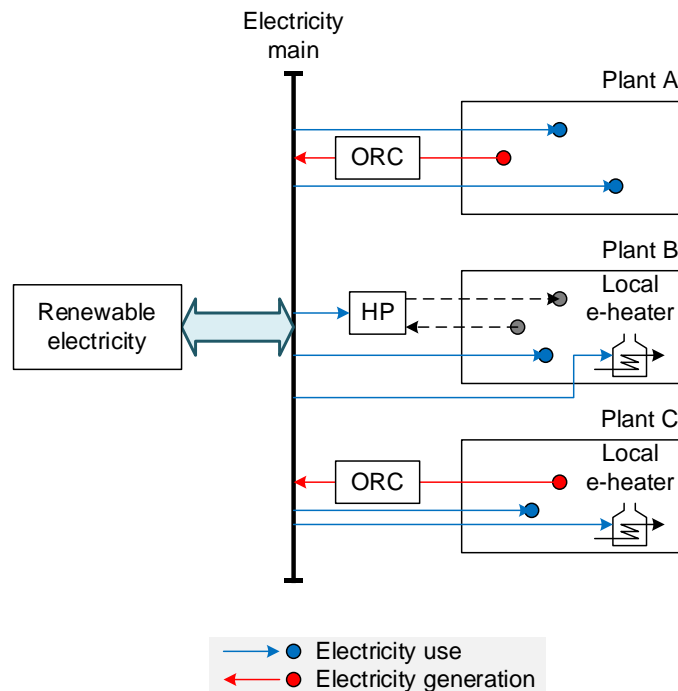


圖 2.14 結合再生電力的電氣化整廠公用事業系統

(三) 淨零碳排路線規劃

電氣化為製程工業的深度去碳提供了前景，若電力供應來自高再生能源占比的電網，以電氣鍋爐取代化石燃料鍋爐可以減少溫室氣體排放。然而，企業關於改造現有工廠或選擇在新場址採用電氣加热的決策將應取決於電網目前和未來的碳排放強度。

以多處設有工廠的跨國公司為例，電氣化決策應根據電力排放係數的預測來排程，並在子公司之間進行協調；此外，不同場址之間可以進行碳交易，使減排進度落後的工廠能夠減少其碳足跡。為了優化跨國公司的製程電氣化策略，可以運用數學模型來進行多週期長期規劃與分析，可制定為雙目標的混合整數線性規劃(mixed integer linear program)，根據各廠的製程熱需求和所在地的電網碳排係數預測，決定各處電氣化的最佳時機；此模型還可以用來決定跨國公司內部所需的碳交易量。總碳排減量和電氣化成本兩者可交替使用，一個作為模型的目標函數，另一個作為模型的重要限制。對比於純經驗法則，或是在所有場址同步進行電氣化，運用模型將可獲得較佳的電氣化方案。

電氣化規劃需求如下：

- 公司有現有工廠和新建工廠的清單，每座工廠的啟動時間和預計退役年份皆為已知。
- 每座工廠都有固定的製程熱需求，在基線情況下是由數個大小相同的傳統鍋爐單元(如天然氣鍋爐)來滿足。
- 各國在規劃時間範圍內都有確定的碳排放係數軌跡(預測值)。
- 各廠都可以選擇在某個時間點加裝電氣鍋爐，減碳量取決於電網當下的碳排放係數。
- 各別工廠可能有替代的減碳方案(如熱泵取代天然氣鍋爐)，以及對應的技術經濟限制。
- 每座工廠都可以選擇向其他工廠購買碳信用額(即跨國公司內部的碳交易)。

就製程(供熱)電氣化規劃而言，效益指標可基於成本或達成之減碳量。這兩者可以互換分別作為目標函數和限制式，例如公司或各廠可以在規劃範圍內排定逐步減碳的時間表，目標是將成本最小化。或者可以有個去碳預算，目標是在預算內得到最低的排放量。

四、小結

本節從能源供應和使用的角度研究了化學工業實現零排放目標的道路，在可見的未來，大數據分析和人工智慧將會發揮著重要作用。對於化學製程工業來說，智慧製造包括能源的高效利用，本節提供了使用大數據分析來識別能源效率低下的主要來源，以及如何使用人工智慧控制以減少能源消耗的例子。目前大多數化工廠都有實施此類解決方案的基礎數位化設施，因此這些解決方案預計會有不錯的經濟報酬、顯著的減碳效果和相對較短的專案時間。它們應該是 2025 年之前減碳發展的重點。然而，這些短期解決方案只能提供 10~20% 的碳減排量，為了實現零排放目標，中長期須逐步引入低碳電力，並從蒸汽公用系統轉變為電力公用系統。我們從技術角度說明此一轉型熱力學理論、所需技術儲備，並初步分析其經濟可行性；此一解決路徑可隨綠電技術發展進度靈活推展，是其主要優點。

第二節 低碳高效製程技術

我國石化產業 2022 年石化產業鏈產值近 4 兆(我國製造業產值達 17 兆)，相關重點產業產品外銷比例也達 50%，加上目前國際品牌大廠皆提出並要求供應鏈往淨零減碳的目標精進，石化產業鏈面臨嚴格挑戰。依據國際溫室氣體盤查議定書的範疇，我國石化產業製程碳排(scope1+scope2)已達 4,000 萬噸，石化產業因高碳排製程高能耗等，須加速高效低碳製程技術開發，以降低國內碳排量，並實現 2050 年淨零排放目標。在建立高效低碳製程技術，朝向降低副產物並減少能耗與製程碳排(scope1+scope2)，包括(1)開發蒸餾熱循環整合與節能操控技術，降低石化/化工製程碳排。(2)透過精準反應製程技術開發，降低原料用量、提高反應純度、降低純化程序，達到反應製程減碳效益。(3)開發低碳製程新材料，透過製程技術整合以簡化製程並降低加工能耗。可藉由低碳與創新製程導入石化產業，達到實質減碳並擴大我國在國際品牌低碳供應鏈之全球競爭力。

本節針對發展低碳高效製程技術目標：聚焦(1)石化中上游：應用於蒸餾節能的熱泵技術發展；(2)特化產業:精準反應製程技術發展；(3)加工製造業：練染同步技術發展，期能為國內石化在製程減碳路徑上，提供可行且具經濟性之作法。

一、應用於蒸餾節能的熱泵技術發展

蒸餾是利用沸點的差異來分離純化混合物，高溫熱能從塔底再沸器加入，再從塔頂冷凝器移走低溫熱能，熱力學效率不高於 10%。不過由於生產力高、分離效果好及富有彈性的調節能力等優點，蒸餾一直都是煉油石化產業用於混合物分離的主要技術選項，據統計全世界有 4 萬多支蒸餾塔正在運轉，能耗佔煉油石化產業能源使用需求的 40%。雖然蒸餾被廣泛使用，不過高的能量需求及低的熱力學效率一直被人詬病，隨著可持續性發展與節能減碳議題的發酵，蒸餾先天的缺點越加地突顯，推動國際大廠必須持續不斷地開發更節能的蒸餾技術用於舊廠的改造及新廠的設計中。若把蒸餾本身當作能源效率改善的中心，一個從內到外系統性地檢視程序首先會從塔的內部開始，包含改變混合物的熱力學行為、高效率塔內件更換等，第二層則是將狹點分析技術應用於單元設備間的熱整合，最後的手段才是思考借助外部力量的可能性，如將熱泵技術應用在蒸餾的節能。

(一) 熱泵蒸餾減碳原理

在普通蒸餾中，驅動力由蒸汽形式的熱量提供，蒸汽供應給再沸器。蒸汽通常在化工廠中使用不同的化石燃料(如煤、燃料油或天然氣)產生。與蒸汽產生相關的碳足跡(每單位熱能)，表示為 C_{Steam} 為：

$$C_{Steam} = \frac{C_{Fuel}}{\alpha}, (\alpha: \text{蒸汽鍋爐的效率})$$

表 2.2 用於各種燃料碳排 c_{Fuel} 及對應 c_{Steam}

Fuel	c_{Fuel} gCO ₂ /kWh	$c_{Steam}(\alpha = 0.65)$ gCO ₂ /kWh
Coal (All types)	328	505
Fuel oil	253	389
Natural gas	181	278

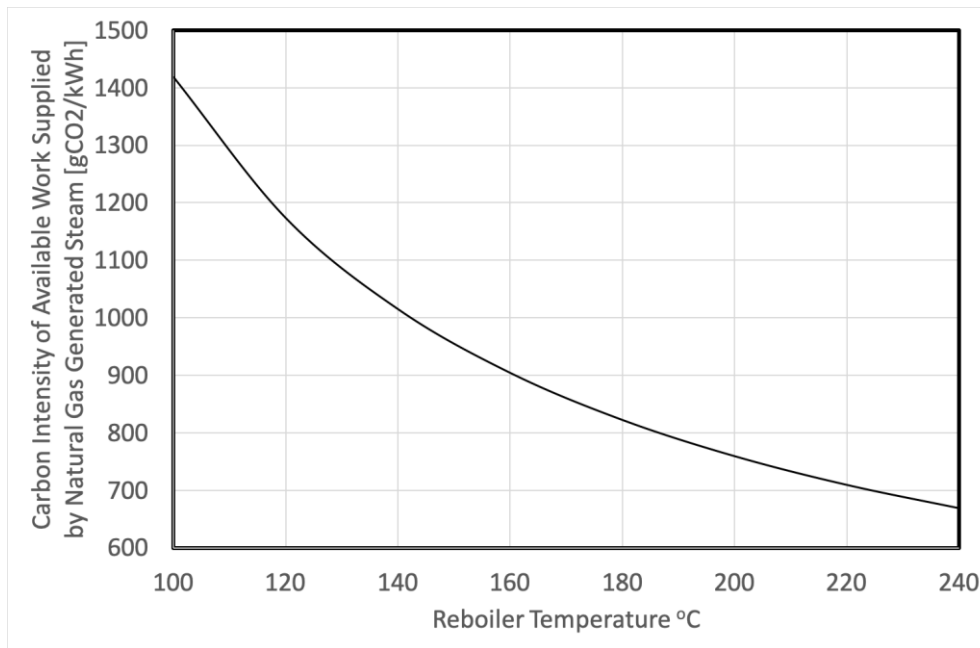
根據熱力學第二定律，在一個溫度為 T_R 再沸器中蒸汽加熱提供的可用功 (available work \mathcal{A}) 為：

$$\mathcal{A} = \left(1 - \frac{T_0}{T_R}\right) Q_{Steam}$$

其中 $T_0=300K$ 是環境參考溫度。因此再沸器蒸汽加熱提供的可用功之碳排強度可由下式表示：

$$c_{\mathcal{A}} = \frac{c_{Steam}}{\left(1 - \frac{T_0}{T_R}\right)}$$

圖 2.15 為使用天然氣產生蒸汽的 $c_{\mathcal{A}}$ ；即使在 200°C 的溫度； $c_{\mathcal{A}}$ 也高於 700 gCO₂/kWh；而目前我們電網碳排約為 500 gCO₂/kWh。所以使用熱泵輔助蒸餾理論上有非常大的減碳效果。

圖 2.15 使用天然氣產生蒸汽的再沸器有效功 $c_{\mathcal{A}}$

熱泵的效果當然取決於熱泵的性能係數(Coefficient Of Performance COP)，如果 COP 等於 4，對於一個單位的再沸器熱量，需要 0.25 單位的電力。雖然熱泵

COP 可高達 4 至 5，實際 COP 需取決於塔頂/塔底溫度差異。與傳統蒸餾相比，熱泵輔助蒸餾降低碳排強度可以計算為：

$$\gamma = \left(1 - \frac{C_{Elect}}{C_{Steam} * COP} \right) \times 100\%$$

C_{Elect} ：電力供應碳強度

以目前電力碳排強度約為 500 gCO₂/kWh 的條件下，計算不同 COP(2~4)所對應的減碳潛力如圖 2.16 所示，以目前的電力供應碳排強度估算，在 COP 達到 3 的情況下，已經有 40% 碳排放降低的潛力。

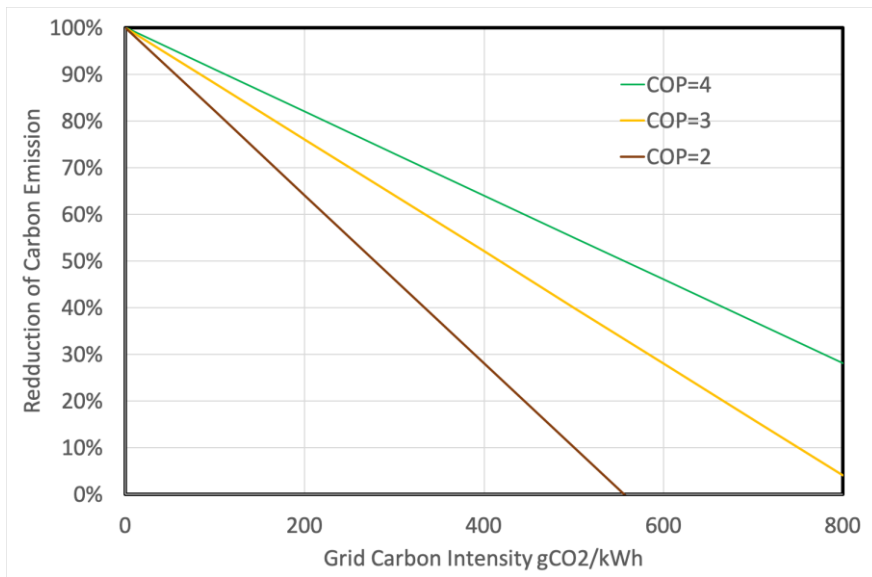


圖 2.16 電力碳排強度 500 gCO₂/kWh 下不同 COP 的減碳潛力

(二) 熱泵蒸餾減碳及操作成本分析

目前國外大廠改善蒸餾能源效率的主要做法有(1)改變混合物的熱力學行為(如萃取蒸餾)，萃取蒸餾利用額外分離劑(一般為高沸點溶劑)的加入增加欲分離混合物的相對揮發度或是破壞其共沸行為，像是芳香烴的純化、輕油裂解的丁二烯回收等；(2)更換新型塔內件提升蒸餾效率，目前塔內件供應商的開發重點聚焦在提高填料的分離效率與通量，試圖在緊湊的塔器中實現一樣的分離效果；(3)利用分隔內壁蒸餾塔(Dividing-Wall Column, DWC)取代傳統序列式雙塔；(4)內熱整合的多效蒸餾，多效蒸餾是在分離系統內透過內熱整合的方式達成對外加能量的多次利用，用於 EG 除水、SM/EM 純化等；(5)低溫熱能增壓升溫的熱泵技術，國外曾經掀起一陣將熱泵應用在工業節能的熱潮(包含石化業的蒸餾系統)，其中最具代表性莫過是殼牌石油 Pernis 工廠在高耗能 C3 splitter 的節能應用。如今因應節能減碳的趨勢，節能效益巨大的熱泵正重新回到國外大廠的視野，做為提升蒸餾效益的必要手段之一。以下舉例說明熱泵的節能效益。

使用熱泵輔助蒸餾減碳文獻範例很多，由其是溶劑回收及廢水處理。舉例而言 Chaniago 等⁶⁰ 分析了一個半導體工廠的蒸餾溶劑回收製程，使用熱泵輔助蒸餾，取代其中一根傳統蒸餾塔，可以將再沸器熱量需求從 408.6 kW 降至 90.2 kW 的電能需求；其減碳效果如下：

- 假設使用燃煤產生再沸器熱量的碳排： $408.6 \text{ kW} \times 505 (\text{gCO}_2/\text{kWh}) = 206 \text{ tCO}_2/\text{h}$ ；
- 假設使用天然氣產生再沸器熱量的碳排： $408.6 \text{ kW} \times 278 (\text{gCO}_2/\text{kWh}) = 113 \text{ tCO}_2/\text{h}$ ；
- 假設電力供應碳排系數為 $500 \text{ kgCO}_2/\text{kWh}$ ，機械效率為 75%，熱泵輔助蒸餾碳排為 $90.2 \text{ kW} \times 500 \text{ kgCO}_2/\text{kWh} / 0.75 / 1,000 (\text{kg}/\text{t}) = 60 \text{ tCO}_2/\text{h}$ 。

減碳操作成本：

- 假設燃料煤熱值價格為 $0.2327 \text{ USD}/(5,500 \text{ kcal})$ ，使用燃煤提供蒸餾所需熱量成本： $408 \text{ kW} \times 3,600 (\text{s}/\text{h}) \times 0.239 (\text{cal}/\text{J}) / 5,500 (\text{kcal}) \times 0.2327 (\text{USD}/(5,500 \text{ kcal})) \times 0.031 \text{ NTD}/\text{USD} = 478 \text{ NTD}/\text{h}$ ；
- 假設天然氣熱值價格： $0.697 \text{ USD}/(5500 \text{ kcal})$ ，使用天然氣提供蒸餾所需熱量成本： $408 \text{ kW} \times 3,600 (\text{s}/\text{hr}) \times 0.239 (\text{cal}/\text{J}) / 5,500 (\text{kcal}) \times 0.697 (\text{USD}/(5,500 \text{ kcal})) \times 0.031 \text{ NTD}/\text{USD} = 1,435 \text{ NTD}/\text{h}$ ；
- 以電力價格 $6.5 \text{ NTD}/\text{kWh}$ 計算，熱泵輔助蒸餾能源成本為 $90.2 \text{ kWh} \times 6.5 = 586 \text{ NTD}/\text{h}$ ，雖然比燃煤貴，但比直接換成天然氣鍋爐產生蒸汽便宜。

以減碳操作成本計算，成本增加 108 NTD/h，實質減碳為 146 tCO₂/h，所以減碳操作成本低於 1 NTD/tCO₂，實際成本為納入低碳電力系統的投資成本，以及增加壓縮機的投資成本。從上述分析來看，使用低碳電能加上熱泵輔助是十分經濟的減碳策略。

上述蒸餾塔使用的蒸汽量約為 0.657 t/h，為一相對小型之蒸餾塔，如果用於大型蒸餾塔，效果將更加顯著。Kansha 等⁶¹ 也曾經探討原油蒸餾塔(crude distillation unit, CDU)電氣化的研究，以 $795 \text{ m}^3/\text{h}$ (標準液體體積)原油蒸餾塔為例：

⁶⁰ Chaniago, Y. D., Khan, M. S., Choi, B., & Lee, M. (2014). Energy efficient optimal design of waste solvent recovery process in semiconductor industry using enhanced vacuum distillation. *Energy Procedia*, 61, 1451-1454.

⁶¹ Kansha, Y., Kishimoto, A., & Tsutsumi, A. (2012). Application of the self-heat recuperation technology to crude oil distillation. *Applied thermal engineering*, 43, 153-157.

- ▶ 使用預熱回收的 CDU 需要的燃料熱量為 50.67 MW，假設加熱爐使用天然氣作為燃料，產生的碳排： $50.67 \text{ MW} \times 0.278 \text{ tCO}_2/\text{MWh} = 14 \text{ tCO}_2/\text{h}$ ；
- ▶ 使用電氣化 CDU 需要的電能為 26.29 MW，假設目前台灣電力碳排強度為 $0.5 \text{ tCO}_2/\text{kWh}$ ，電氣化 CDU 的碳排： $13.3 \text{ tCO}_2/\text{h}$ ，碳排節約為 5%。如果將電力碳排強度降至以核電為主的法國： $0.085 \text{ tCO}_2/\text{kWh}$ ；電氣化 CDU 的碳排 $2.2 \text{ tCO}_2/\text{h}$ ，碳排節約為 84%。

上述範例說明蒸餾塔電氣化的減碳效果與電力供應的低碳化程度成正比，在低碳能源持續增佳的情境下，具備深度減碳的潛力，石化業者可逐步將設備電氣化。近年來也有不少模擬研究，證明熱泵輔助蒸餾可以搭配其他強化技術達到減排效果；舉例而言

- ▶ Li 等⁶² 探討了一個 Acetonitrile/ethyl-acetate/n-hexane 異相共沸蒸餾的範例，模擬結果顯示使用熱泵輔助蒸餾及進料預熱可以降低總年成本(Total Annual Cost, TAC) 52%，降低 CO₂ 排放 66%。
- ▶ Gao 等⁶³ 探討一個 isopropyl acetate 反應蒸餾範例，使用熱泵輔助蒸餾及隔牆蒸餾，相對於傳統反應蒸餾可以降低 TAC 13%，降低 CO₂ 排放 20%。

以上研究雖然還沒有實際案例證明這些方案的有效性，但這些研究確實揭露一些在不增加成本情況下，結合製程改善及能源轉型的減碳路徑，值得投入先導製程研究，設法解決設備限制的實際問題，累積相關技術儲備。以下介紹各種熱泵技術。

(三) 內循環熱泵技術

1. 機械氣體再壓縮(Mechanical Vapor Recompression, MVR)

因蒸餾塔的塔頂需進行移熱故可視為熱源(heat source)，而塔底需加熱則視為 heat sink，但因塔頂的溫度低於塔底，故熱能無法進行有效過去，故藉由機械氣體再壓縮 MVR 以將塔頂氣相物流加壓升溫，可讓塔頂的熱量提供給塔底加熱使用。因此，塔頂氣相物流直接進壓縮機是 MVR 的操作特點(如圖 2.17)，僅適用於塔溫差小於 30°C、且無腐蝕與亦變質的混合物分離純化，當塔溫差越大伴隨壓縮機建置與操作成本的大幅增加，MVR 即不再是具競爭力

⁶² Li, X., Ye, Q., Li, J., Yan, L., Jian, X., Xie, L., Zhang, J., 2023. Investigation of energy-efficient heat pump assisted heterogeneous azeotropic distillation for separating of acetonitrile/ethyl acetate/n-hexane mixture. Chin J Chem Eng 55, 20–33. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2022.04.015>

⁶³ Gao, X., Yang, Y., Chen, M., Cheng, Q., Lu, K., 2022. Novel heat pump reactive distillation and dividing-wall column reactive distillation processes for synthesizing isopropyl acetate to save TAC and reduce CO₂ emissions. Chemical Engineering and Processing - Process Intensification 171, 108746. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2021.108746>

的技術選項。

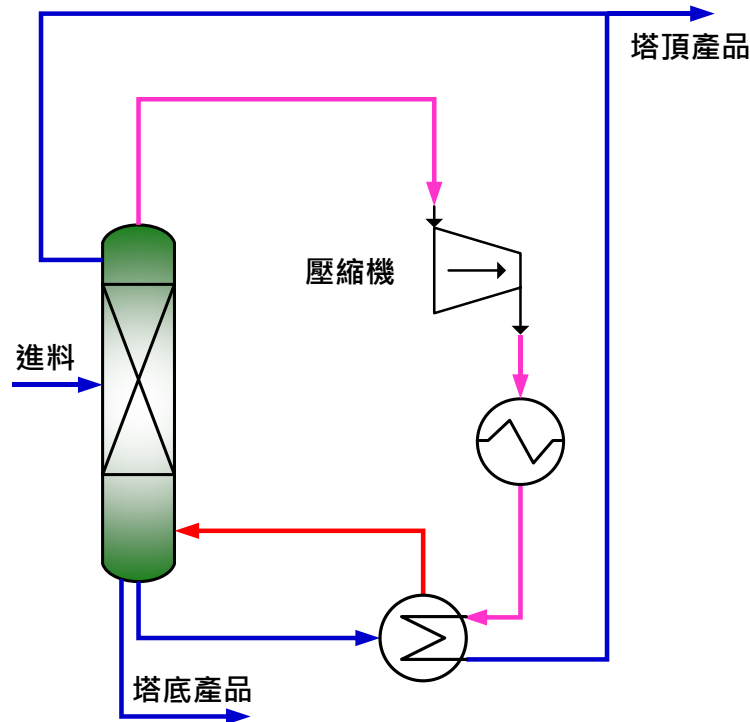


圖 2.17 機械氣體再壓縮(MVR)流程

2. 內熱整合蒸餾塔(Heat-Integrated Distillation Column, HIDiC)

內熱整合蒸餾塔 HIDiC 操作示意如圖 2.18 所示，來自氣提段的氣相經壓縮後輸送至精餾段，故精餾段的溫度高於氣提段，所以精餾段冷凝的能量可以用於氣提段液體的汽化。HIDiC 透過塔內部自身的熱整合 將高壓精餾段的熱量提供給低壓的氣提段，整個精餾段都是熱源且整個氣提段都是 heat sink，不同於原本單點冷凝器/再沸器的方式，是熱泵在蒸餾應用的理想極致狀態。相較於 MVR，HIDiC 需要的溫度抬升只有一半；另外，HIDiC 的氣液質傳依靠的是整段內部回流的液體，非塔頂的單一外部回流，所以分離的能源效率較高。雖然 HIDiC 理想上很完美，但實務上有其窒礙難行之處，為了將精餾段的熱量傳送至氣提段導致複雜的塔結構設計，甚至還可能因此犧牲塔器的質傳效率，本末倒置，即使採取更高的壓縮比也很難完成所有熱量的傳遞，導致節能效果與理想狀態存在較大落差。

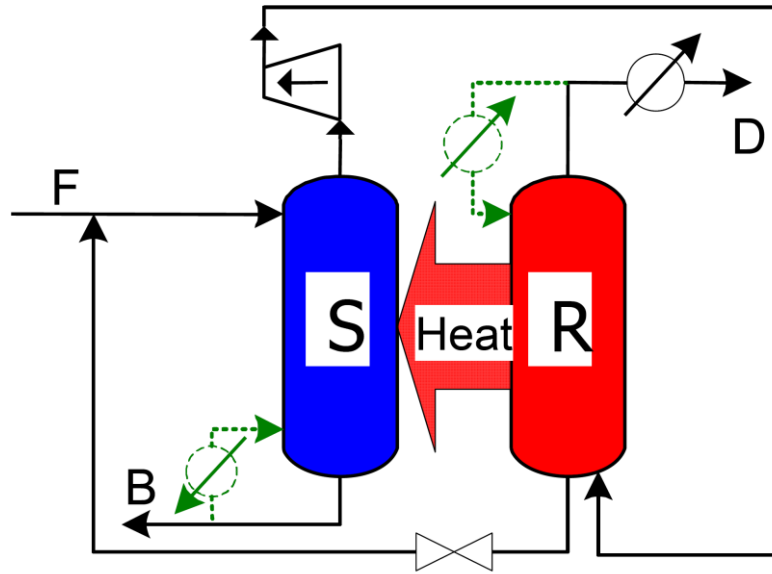


圖 2.18 內熱整合蒸餾塔(HIDiC)流程

(四) 外循環熱泵技術

1. 氣體壓縮(Vapor Compression, VC)

氣體壓縮(VC)跟家裡冷氣機把室內熱量移到室外的的工作原理一樣，它包含了蒸發器、壓縮機、冷凝器與節流閥形成一個封閉循環(圖 2.19)，工作流體在管線內循環藉由相的變化完成熱能由低溫處往高溫處轉移的過程。因為塔頂冷凝器要移熱且 VC 蒸發器要加熱，故可以結合為一體；而塔底再沸器要加熱且 VC 冷凝器要移熱，同樣可進行整合。所以 VC 涉及原本兩個獨立系統的高度集成整合，設計與操控難度遠高於 MVR。不過也因為 VC 相對蒸餾系統而言算是外部單元，舊廠改造時對原系統的變動很小。在熱交換器的設計上，相較於 MVR 的一次換熱操作，VC 需要兩次，所以 VC 的溫升比 MVR 多了一次的熱傳溫差，意味著需要更大的溫度抬升，對此，結構緊湊、允許較小熱傳溫差的新型熱交換器的導入是決定 VC 能源效率的關鍵。

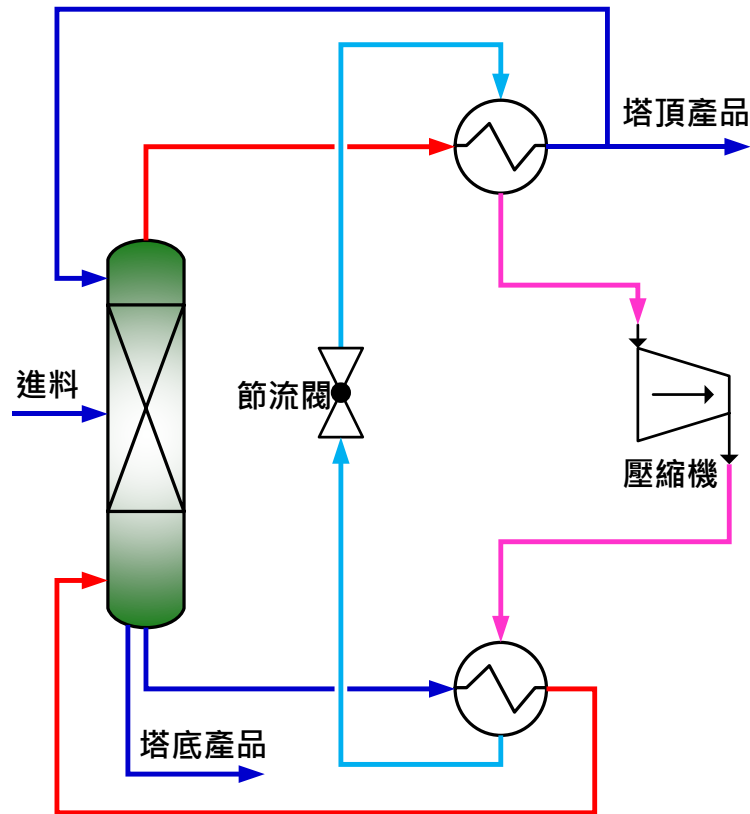


圖 2.19 氣體壓縮(VC)流程

2. 壓縮再吸收熱泵(Compression Resorption Heat Pump, CRHP)

CRHP 的流程架構跟 VC 相同，但需具備更高的工作溫度及溫度抬升能力。前述所提之 VC 與 MVR，塔頂跟塔底產物皆以純物質進行說明，因此冷凝或汽化過程的溫度曲線都是恆定，沒有露點與泡點的差異。但實務上石化廠蒸餾塔的塔頂跟塔底大都仍為多成分物流，所以冷凝器/再沸器的溫度曲線會呈現一趨勢軌跡介於該物流的露點與泡點間，導致在熱交換過程中烓(exergy)的損失。為了使壓縮流體的溫度曲線擁有相同的軌跡，首先它必須是非共沸物，如氨-水混合物，並透過摻配濃度的調整來修正軌跡，最終使系統的熱力學效率最大化。由於水的存在，無油、允許液滴夾帶的壓縮機是 CRHP 能否付諸實行的關鍵。

3. 熱聲熱泵(Thermo Acoustic Heat Pump, TAHP)

為了將低溫廢熱升級為製程可利用的熱能，需要更高的溫度提升，而熱聲熱泵 TAHP 是另一具有發展潛力的技術選項。TAHP 是熱聲效應的應用，利用輸入的聲波能量在共振管內產生溫差，達成熱能與聲能的互相轉換。TAHP 產生聲波的驅動方式主要為線性馬達，它位在共振管的一側，另一側則為被兩個熱交換器前後包覆的多孔蓄熱器，線性馬達產生的聲波藉由共振管

內的聲波媒介(一般為氦)流向另一端,將來自塔頂氣相的低溫熱能升級成可用於塔底加熱的高溫熱能,而溫度抬升的程度則由共振管尺寸、聲波媒介的物性及壓力所決定,產生的頻率越高溫度抬升就越大。驅動 TAHP 需要非常強大的聲波,所需聲能可以透過多種方式產生,除了上述的電力驅動外,使用熱源驅動的熱聲引擎也是主要的研究方向。

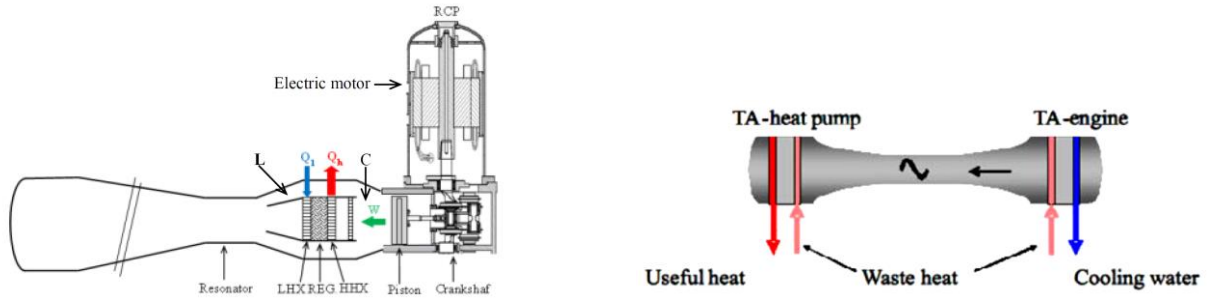


圖 2.20 (a) TAHP-以線性馬達為驅動力(左)；(b) TAHP-以熱聲引擎為驅動力(右)

4. 吸收式熱泵(Absorption Heat Pump, AHP)

吸收式熱泵 AHP 則是以化學能進行驅動,溫度抬升可達 50 至 100°C,透過如 NH₃ 的工作流體在低溫鹽與高溫鹽的吸附/解析循環中完成熱量的提階升溫。如圖 2.21 所示,將 AHP 與蒸餾塔進行集成,塔頂的冷凝熱將低溫鹽 LiCl₃NH₃ 所在反應器的 NH₃ 釋放出來,產生的 NH₃ 利用壓力差流動至另一個反應器被高溫鹽 MgCl₂.2NH₃ 吸附,吸附所放出的高溫熱量則用於加熱塔底再沸器。為了達成系統的連續運轉需要兩組低溫鹽/高溫鹽反應器,一組進行吸附的同時另一組正在解析。

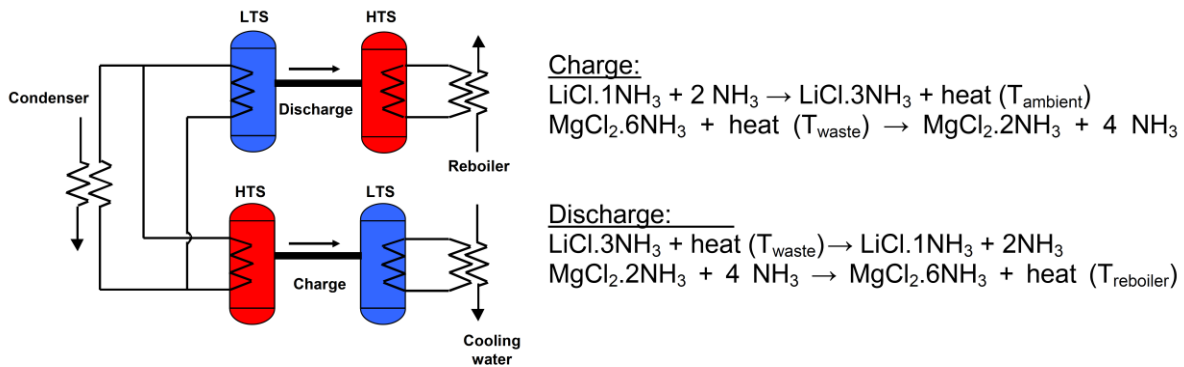


圖 2.21 AHP 化學能-熱能轉換工作原理

(五) 應用方式

由於熱能只能從高溫處往低溫處流動傳遞,熱泵則是利用額外動力將熱能由低溫往高溫輸送的裝置的概稱,日常生活與工業界中最常見的熱泵應用技術包含冷氣機、電冰箱、冰水製冷系統以及食品倉儲的冷凍庫等。目前熱泵在工業的應用大都在製冷及小於 80-90°C 的加熱,然而蒸餾塔的操作溫度普遍不低,為了滿

足熱泵在蒸餾塔的應用需求，勢必要進一步提高現行熱泵的工作溫度。除了工作溫度，溫度抬升(temperature lift)是熱泵另一個關鍵指標，熱泵在蒸餾的功能是將塔頂要移除的低溫熱能用於加熱高溫的塔底，所以塔頂跟塔底的溫差會決定熱泵升溫的幅度，所需升溫幅度愈小，熱泵負荷愈低，效益就愈顯著，所以當溫度抬升超過某一程度時，熱泵就不再具經濟效益。如今在新一代熱泵技術的加持下，已能將溫度抬升的範圍擴大到 100°C，如熱聲熱泵(TAHP)與吸附式熱泵(AHP)。傳統的熱泵視需要的體積流量及溫度抬升由壓縮機或風機驅動，如 MVR 與 VC。20-30°C 的塔溫差是傳統熱泵適用的經濟範圍，超過 30°C 就較不具經濟效益，然而工業蒸餾塔對加熱範圍的需求會更大，所以新一代的蒸餾熱泵技術則是以擴大這個範圍為努力方向。

熱泵與蒸餾的結合時至今日已經發展出多種型態，但是基本上可以依製程氣體是否直接進入驅動設備分為內循環與外循環兩大類型，沒有一種熱泵技術可以涵蓋所有的應用需求，不同應用情境有其最適的技術選項，所以不同的熱泵技術間不存在絕對的競爭優勢。

(六) 國際發展現況

設計架構同 VC 的 CRHP 是荷蘭 TU Delft 大學長期研究發展的熱泵技術之一，2000 年首次在實驗室測試成功，並於 2004 年成立新創公司進行 CRHP 的商用運轉推廣，該技術建立在標準 25bar 的壓縮機上，並以氦-水混合物做為工作流體將溫度提升至 120 °C，擴大 CRHP 於蒸餾塔加热的應用範圍。至於 AHP 與 ATHP 是荷蘭能源研究中心(簡稱 ECN)鎖定的研究方向，被 ECN 視為最有發展潛力的工業熱泵技術，因為兩者都具備最高 250°C 的工作溫度及 100°C 的溫度抬升能力，目前兩個技術都已經完成 pilot 等級的場域驗證。

國際上致力於 HIDiC 研究與商業應用首推日本與荷蘭。日本最早於 2002 年由產業技術綜合研究所帶頭(簡稱 AIST)，集合日本多家石化、機械設備廠商開發出第一代單塔結構的 HIDiC，至今唯一的實績是 2005 年丸善石化 C5-splittr 第一支塔的平行示範線，號稱節能達 60%。第二代則是沒有壓縮機的版本 CF-HIDiC，計畫由關西化學機械主導，無壓縮機節能效果較低只有 30%，同樣至今仍無商業應用實績。日本東洋工程 TOYO 與 AIST 合作的第三代，採雙塔架構，將用於兩塔間進行熱傳的熱交換器獨立出來並與塔器嵌合，以避免第一代單塔熱傳面積先天的限制，不過因為只有部分內熱整合，節能效果打了折扣。2014 年該技術應用於完善石化 MEK 的蒸餾純化，由 TOYO 設計建造，是第一套商業化的 HIDiC 系統，TOYO 甚至有專門的部門在做 HIDiC 的推廣應用與設計建造。至於荷蘭則是由 TU Delft 大學主導，專注在開創性的塔器結構設計以獲得更好的熱傳效果，系統驗證方面目前只停留在 pilot 階段。

(七) 小結

熱泵需要外加的驅動力才能使熱能由低溫往高溫處轉移，雖然文獻表明以壓縮機為驅動力的熱泵如 MVR、VC，其改造投入的成本可以在 2 至 3 年內回收，但是由於技術決策者對熱泵技術的不熟悉，加上現場人員對於驅動設備的本能排斥，限制了熱泵在蒸餾的應用潛力，所以只有消除技術決策者及工廠生產端的疑慮，熱泵在蒸餾的節能應用才能順利推廣。因國內目前尚未具相關技術之應用，工研院材化所近期投入熱泵相關技術的規劃與研發，藉由自主設計能量建立以及高熱傳效率熱交換器與蒸餾系統整合開發，建置節能測試系統以補足國內技術缺口，強化技術導入石化產業之能力等效益。在節能減碳的大趨勢下，熱泵將是一個不可或缺且非常有效的方法，期望透過節能蒸餾製程強化設計與技術推動，以顯著改善石化產業蒸餾能耗與石化產品碳足跡，提升國內石化相關產品之競爭力。⁶⁴

二、精準反應製程技術

微反應器技術(Micro-Reactor Technology, MRT)是一種精準反應製程技術，主要是反應器內的微結構讓質量傳送(Mass transfer)與熱量傳送(Heat transfer)效率大幅提升，增強對製程參數的控制，使反應物得以在最佳條件下進行生產，提高製程選擇性、降低副產物生成、減少廢棄物，進而提升生產效率、降低成本、實現低碳製程目標。

化工製程演進是建立在不降低產能的前提下，不斷縮小製程尺度、增加產物的流通量，強化製程中反應原料的流動、混合、傳送速率和可控制性，提高反應產率並縮短或簡化純化步驟。製程反應器由早期大型批次反應器(Batch Reactor)逐漸發展成連續攪拌槽反應器(Continuous Stirred-Tank Reactor, CSTR)、管式反應器(Tubular Reactor)直到最新的微反應器技術，目的都是為了更精準控制製程提高產線效率，降低製程能耗及減少廢棄物排放。

⁶⁴ 本節參考文獻：

1. Bruinsma, D. and Spoelstra, S., Heat pumps in distillation, Distillation & Absorption Conference, 2010, Eindhoven.
2. Industrial Heatpumps in the Netherlands, IEA Heat Pump Programme Annex 35, 080514-0.8
3. Sabroe high-temperature hybrid heat pumps, Johnson Controls, Brochure
4. Spoelestra, S., Industrial heat pump developments at ECN, Public Service Review: Europe, 24, Energy Research Centre of the Netherlands
5. Tijani, M.E.H, Lycklama à Nijeholt, J.A., Spoelstra, S., Development of a thermoacoustic heat pump for distillation column, 2017, 12th IEA Heat Pump Conference
6. Kiss, A. A., Energy efficient distillation powered by heat pumps, 2014, Engineering, NPT Procestechologue

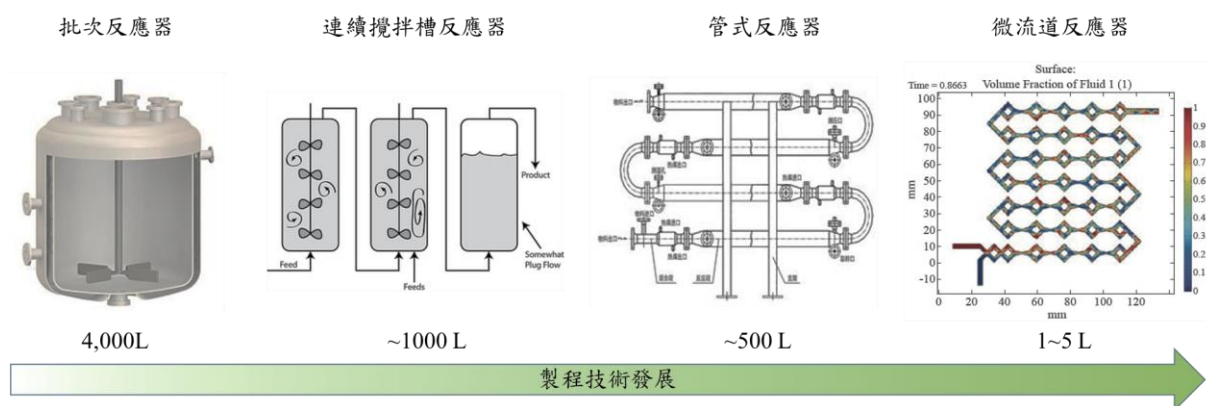


圖 2.22 反應器設計與演進

微反應器技術是將反應的尺度微縮到毫米或微米尺度的通道中進行混合反應的一項新技術。在微小的通道內進行反應可以獲得優異的混合效率與熱傳導性，更容易且更精準地控制製程參數，讓製程趨近於理想反應，達成高效率、節能、減碳、低廢棄物、安全的生產環境。使用幫浦推動反應物，連續不間斷穩定生產，用時間累積產量，以符合量產製程需求。

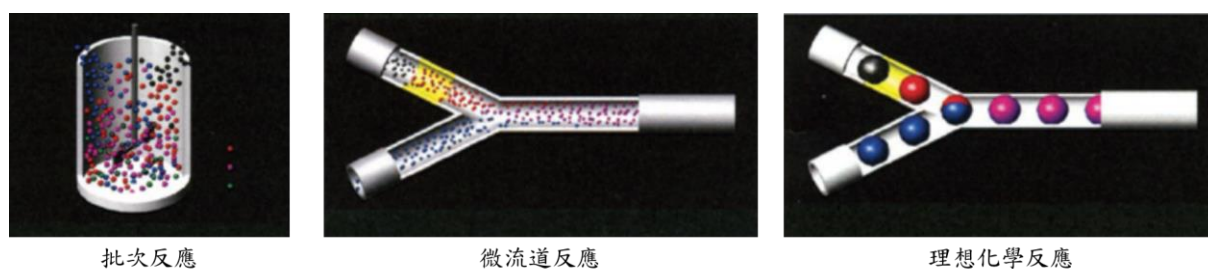


圖 2.23 反應物混合與反應型式

表 2.3 批次反應器與微反應器反應特性之差異

參數	批次反應器	微流道反應器
反應體積	4000 L	1 ~5 L
反應效率	差	佳
單位表面積(m^2/m^3)	< 10	> 1000
放大效應	有	無
設備面積(m^2)	> 100	< 50

(一) 質量與熱量傳送優點

質量傳送是指物質由一個地方移動到另一個地方的過程，或者可以說是物質間的混合效率，質量傳遞效率越好，物質間的混合越有效率。傳統批次製程是將原料加入反應槽中以攪拌的方式進行反應，原料在反應槽內經由擴散(Diffusion)或對流(Convection)的方式進行混合，這種混合方式效率較差容易在反應槽內產生濃度梯度，小規模測試時濃度梯度效應不明顯，量產製程使用噸級反應槽時必須

重新設計製程，利用進料方式、攪拌方式與溫度控制等手段，盡量減少濃度梯度對於反應效率的影響，但往往對於反應效率提升的效果有限。此外，進行非均相反應時(氣-液相反應、液態非均相反應等)，好的質量傳遞效率更是重要，以傳統批次反應槽進行非均相反應，批少量產製程無法提升混合效率，不僅反應時間大大增加，產物的轉化率與選擇性更是大幅降低。

表 2.4 小分子化合物在水中擴散速率⁶⁵

擴散距離(μm)	擴散所需時間(sec)
1	0.0005
10	0.05
100	5
1,000 (1 mm)	500 (8.3 min)
10,000 (1 cm)	50,000 (14h)

優異的混合效率可以實現反應時間在毫秒內的快速化學(Flash chemistry)，在有機合成領域當中，具有高活性的試劑往往不穩定，容易與分子結構中不同點位進行反應，反應速度極快，不穩定的中間體結構生命週期(Lifetime)極短，受限於批次製程操作限制，無法快速處理不穩定中間體，通常只能經由降低反應槽溫度、延長不穩定中間體生命週期，才能順利進行操作。微反應器技術具有優異的混合效率，經由改變反應試劑的流速精準控制反應時間，讓反應可以在瞬間充分混合並立刻進行下一步操作，達到毫秒級的反應控制，實現快速化學。

微反應器具有高表面積體積比(Surface to Volume ratio)為傳統槽式反應器的100倍以上，高接觸表面積讓熱量傳送更快更即時，熱量傳送速度遠高於傳統槽式反應器，沒有傳統反應槽的溫度梯度現象，可以精準控制反應溫度，同時避免瞬間放熱導致熱聚集，產生熱衝擊(Thermal shock)與熱失控(Thermal runaway)現象，提升製程穩定性與安全性。化學反應中熱量傳遞過程：(1)加熱反應液至反應需求溫度；(2)反應生成熱傳遞給反應器；(3)反應器將反應生成的熱能排除到外界。反應器材質選擇對熱傳導效率影響甚鉅，批次反應槽製程若無法有效排除熱能產生蓄熱現象，過熱的易燃化學蒸氣容易累積在反應槽上面空間，進而導致爆炸。微反應器具有快速加熱以及快速排熱特性，讓反應器內部達到穩定地等溫(Isotherm)反應條件，給予反應物特定的活化能，避免局部高溫產生副產物，提高製程選擇性獲得高純度產物。快速導熱的特性也使微反應器適合用於操作高放熱反應製程，如：硝化反應(Nitration)、氧化反應(Oxidation)、有機金屬反應(Organometallic-based Reactions)等。

微反應器技術高效率質傳與熱傳特點，讓我們可以精準控制實驗參數(溫度、壓力、時間)、實現極快速混合(碰撞)、極短時間的反應與優異的熱量傳導(高表面

⁶⁵ J. Yoshida, Basics of flow microreactor synthesis, Yoshida, J. Springer (2015)

積)，能在更溫和的條件下生成並使用中間體(減少能源損耗)。相較於傳統批次製程微反應器技術可以使用更少的原料、獲得更好的轉化率與反應選擇性，提升產物純度、減少或簡化純化步驟、降低廢棄物排放，特別是傳統製程不易控制的高放熱反應、選擇性較低的快速反應，導入微反應器技術精準控制製程參數，不僅能提升反應選擇性與製程效率，更可以降低製程風險、節省時間、人力與空間，實現低碳生產的目標並改善製程效率，降低成本並有效減少二氧化碳排放。

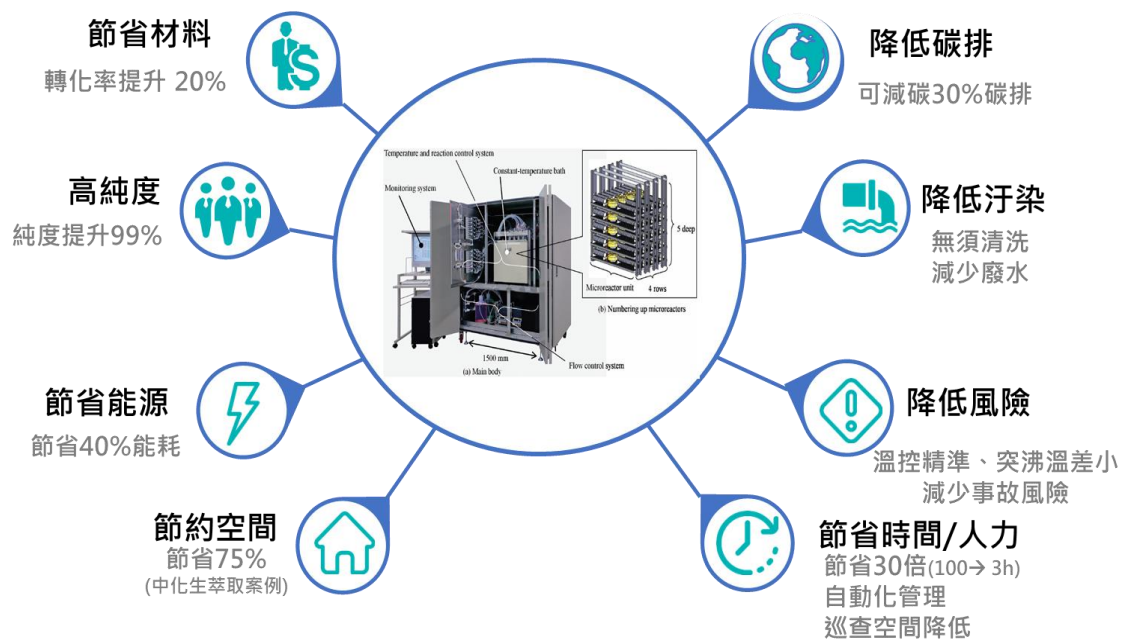


圖 2.24 微反應器技術優勢

(二) 硝化反應製程(Nitration process)

硝化反應是成熟且重要的化工製程，典型的硝化反應是使用硝酸作為原料，以硫酸催化形成具有親電子性的硝鎊離子(Nitronium ion, NO_2^+)與反應物進行取代，通常製程是在有機相與酸的水溶液下進行，兩者不互溶屬於液態非均相反應，反應快速並伴隨著劇烈放熱。硝基化合物通常會進一步還原成胺基化合物使用，大部分的胺基化合物最終被使用於生物試劑、樹脂、紡織品、彈性體及藥物等不同領域，有 65% 以上的生物活性分子含有胺基結構。雖然硝基化合物及其衍生物在日常生活中隨處可見，但由於製程難度較高，量產技術仍掌握在國外大廠中，目前國內雖有生產能力，受限於製程技術，部分高階產品只能向國外廠商購買。

表 2.5 硝基化合物與其用途

化學品	產品應用
TAPS	生物緩衝劑
Bronopol	抗菌劑
m-nitrophenol	殺菌劑
p-nitrophenol	防腐劑(中間體)
2,4-dinitrophenol	木材防腐劑、顯影劑
4-amino-2-nitrophenol	染髮劑、皮革染劑
2-nitro-p-phenyldiamine	染髮劑、皮革染劑
Aniline Yellow	偶氮染料
Toluene diisocyanate	聚氨酯
2,4,6-Trinitrotoluene	火藥

傳統硝化反應使用批次或半批次製程，通常會稀釋反應濃度降低反應性，讓反應得以順利進行。然而這種製程方式難以進行放大，主要原因：

1. 批次製程表面積小，熱交換性差，反應劇烈放熱容易造成局部高溫，導致產物選擇性降低。
2. 液態非均相反應混合性差，隨著反應時間增加，反應速度越來越慢，甚至無法完全反應，使轉化率降低，需要延長反應時間或者必須使用過當量的酸來提升轉化率。
3. 批次再現性差，目前國際上已有硝化廠導入連續式硝化製程進行量產，不僅能有效提升產量與安全性，更減少酸的使用量與設備體積。

以三氟甲氧基苯胺(Trifluoromethoxybenzenamine, p-NB)製程為例，p-NB 是一個關鍵中間體，可以用於合成藥物、液晶、殺蟲劑，使用三氟甲氧基苯(Trifluoromethoxybenzene, TFMB)作為原料，與硝酸、硫酸混合液進行硝化反應，生產過程會劇烈放熱、反應非常快速，由於批次反應無法快速將生成熱排除，為了抑制副產物生成，製程必須控制在 -10°C 下並延長反應時間至 28 小時進行，批次製程的效率與再現性差。

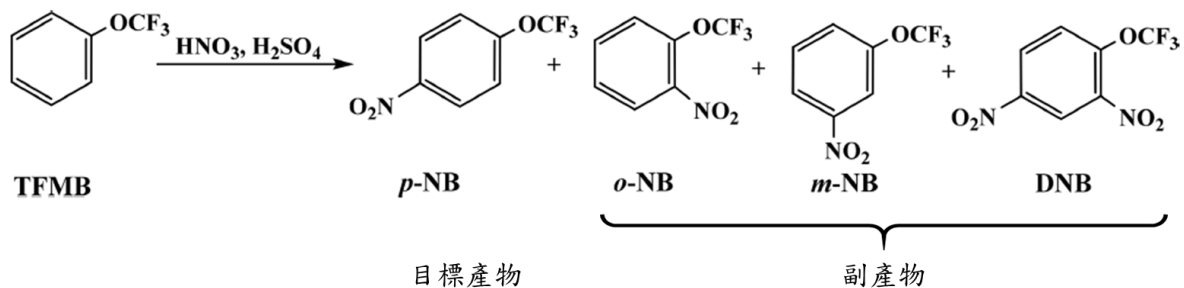


圖 2.25 TFMB 反應生成 p-NB 及副產物

導入微反應器製程，可藉著優異的熱傳可以將反應生成熱快速排除使系統維持在 0°C，讓反應在 0°C 下穩定且快速進行，精準混合控制正確的反應物當量能大幅降低雙取代反應發生。藉由精準控制反應溫度及反應當量數，讓反應可以在 1 分鐘內快速完成，達到轉化率 99.6%、選擇性 90.9%，抑制副產物生成並簡化純化步驟，有效提升生產效率 66。微反應器製程可以讓反應在穩定條件下進行操作，大幅降低熱失控風險，化學反應在完全密封環境下進行不僅減少操作空間也大大降低接觸有害物質的機會。

(三) 氧化反應製程(Oxidation process)

氧化反應製程大部分屬於高放熱反應，氧化劑通常需具備有高度活性才能進行氧化，因進行量產製程時不易控制且再現性差，化工廠往往避免此類型的反應。然而有機化合物往往具有多個反應點，進行氧化反應時需要藉由反應溫度精準控制反應點位，若無法將反應生成熱即時排除、精準控制反應溫度(活化能)，會產生大量副產物，導致反應選擇性變差、產率下降，產能放大時影響更是明顯。化工廠常使用氧氣作為氧化劑，而使用氧氣進行氧化反應必須搭配高活性的金屬氧化物觸媒，才讓反應在相對溫和的情況下進行，因此製程中常見氣/固/液三相並存。非均相反應在批次生產過程中質傳速率不足，導致反應性及再現性變差，雖然可以經由提高氧氣壓力與溫度來克服，但這也為製程開發帶來更高的挑戰，需要確保在反應系統中或其他開放空間內的有機溶劑與氧氣濃度保持在可燃極限下，或嚴格控管反應物與氧化劑之間的混合以確保製程安全性。傳統的批次或半批次反應器，由於上述多種原因並不適合用來進行氧化反應製程。

微反應器提供非均相氧化反應優異的質傳效率，得益於微流道反應體積較小的優勢，可以使用背壓調節器(Back pressure regulator, BPR)適度的增加系統壓力，讓反應溫度高於常壓下溶劑沸點、增加反應物間的碰撞機率，達成超高反應溫度及高壓反應，並同時維持保有安全性與再現性。在苯甲醇(Benzyl alcohol)氧化成苯甲醛(Benzaldehyde)的案例⁶⁷，奧地利的 Kappe 教授將氧化鐵的奈米粒子塗佈在矽酸鋁上作為固體觸媒，使用氧氣作為氧化劑，利用市售的微反應器 H-cube，以正庚烷(n-Heptane)與二噁烷(1, 4-Dioxane)作為溶劑，在 25 bar 壓力下將反應溫度提升至 140°C (常壓下正庚烷沸點 98°C、二噁烷沸點 101°C)，最終將苯甲醇氧化合成苯甲醛，轉化率 >99%，選擇性 >95%。

(四) 有機鋰/硼化製程(Organolithium/Boration process)

有機金屬催化耦合反應是有機合成技術中相當重要的一門科學，主要是利用金屬催化芳香族鹵化物與受質建立碳-碳鍵，根據不同的受質分類，常見的有機金

⁶⁶ Z. Wen. et al., *Org. Process Res. Dev.* **2017**, *21*, 1843–1850

⁶⁷ D. Obermayer, et al., *Green Chem.*, **2013**, *15*, 1530–1537

屬催化耦合反應有：鈴木耦合(Suzuki coupling)、史帝利耦合(Stille coupling)、赫克反應(Heck reaction)等。有機硼化物結構穩定、容易保存、反應溫和效率高，是鈴木耦合重要原料，被廣泛運用在化學工業上，市面上已有大量的化學品中使用該技術，金屬催化耦合反應已是今日不可或缺的合成技術。

有機硼化物化合物，通常使用鹵化物與金屬進行反應，形成高活性中間體，再進一步與硼酯進行取代反應取得。芳香族鋰試劑(Ar-Li)便是利用芳香族鹵化(Ar-Br)與丁基鋰(Butyl lithium)進行 Li-Br 置換反應取得。Li-Br 置換反應幾乎是瞬間完成(反應時間<0.1 毫秒)同時釋放大量熱能，有機鋰試劑不穩定，一般必須在-78 度下緩慢加料避免反應劇烈放熱造成有機鋰試劑裂解，在低溫下延長有機鋰化合物的生命週期，才能進行後續實驗操作。

微反應器除了優異的質傳效率、熱傳效率及精準控制反應時間外，還能進行多步驟實驗串聯，利用流速精準控制反應時間讓反應完成後串聯下一步反應。在微反應器技術中，可以將多組通道進行串聯反應，當芳香族鹵化物與有機鋰試劑完成置換後，緊接著在極短時間內(避免高活性中間體裂解)直接完成硼化反應，直接取得有機硼化物。微反應器技術可以進行傳統批次化學無法達成的製程操作，實現傳統批次反應無法進行的快速化學反應。

許多報導也將有機硼化物串聯後續耦合反應，利用多通道串聯，將 Li-Br 置換、硼化製程與耦合反應，三步驟反應同時進行，直接取得最終產物(如圖 2.26)。第三代青春痘用藥阿達巴林(Adapalene)的合成便可用此方式進行⁶⁸，將起始物與有機鋰試劑反應 1.7 秒後，直接進行硼化取得有機硼化物，接著再通過固相觸媒管柱於 120 度下反應 4.8 分鐘，取得最終產物。

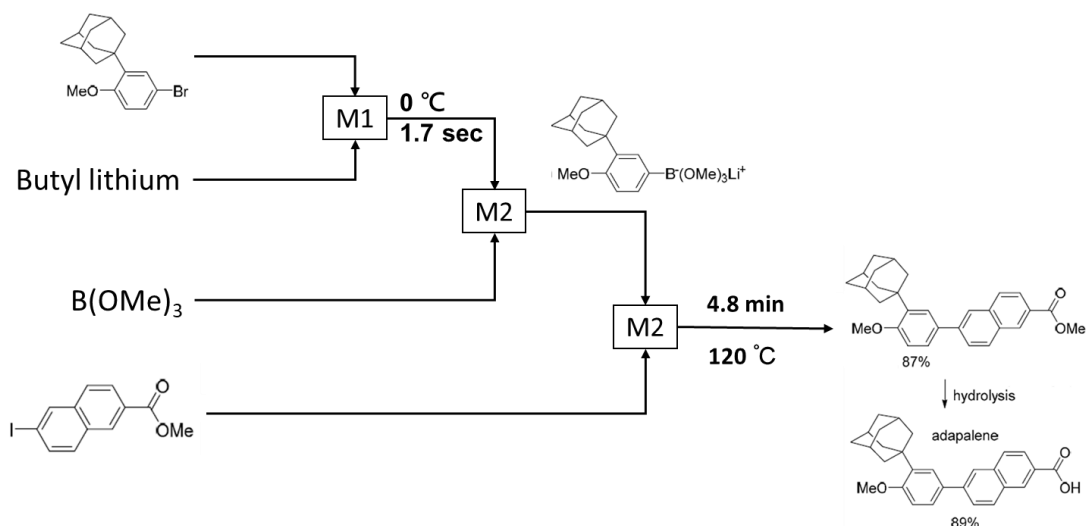


圖 2.26 利用微反應器進行多步驟串聯合成阿達巴林

⁶⁸ A. Nagaki, et al., *Catalysts* **2019**, 9, 300

(五) 小結

微反應器技術的高效率、高可控性優勢，讓我們將製程精準控制在最佳反應參數並提升穩定性與再現性，藉由精準參數控制提高製程轉化率、選擇性與產率，簡化或省略純化步驟，不僅降低生產成本，更達到減碳目標，提升產品價值。以傳統化工製程為例，導入微反應器技術，讓硝化反應、氧化反應、有機硼化物等劇烈放熱反應，得以進一步精進，縮短反應時間、提升轉化率與選擇性，有效減少廢棄物，改善製程效率。此外，微反應器還具有高安全性、低廢棄物與佔地小等優勢，讓製程量產變得更容易。微反應器技術不僅用於化工製程改善，更能用於精密化學品及製藥產業，藉由快速且彈性生產能力可以加速製程開發，利用串接的方式能夠直接放大產能，縮短量產時程，提升我國化工合成技術能量，強化對關鍵化學品的自主生產能力。

三、 低碳練染同步技術發展

近年來，全球矚目的氣候變遷問題日益嚴峻，環保議題已成為各界關注的焦點，全球溫室氣體排放中紡織業占比約 8%，其生產過程所帶來的碳排放與廢水排放(含染料和化學品)受到關注，直接影響全球的環境健康與永續發展，因此，紡織業必須思考如何能改善這些問題，以打造可持續發展的未來。紡織品的需求在時尚業、家居、醫療和防護產業的高性能應用領域持續增長，使得紡織業在確保供應的同時，亦需承擔對環境的責任，為了因應這一挑戰，紡織業積極探索創新的低碳技術，以降低生產過程中的能源使用量(電、燃料油消耗以及碳排放)，減少對自然資源的消耗(水、化學品消耗以及廢棄物的產生)，並在可持續性發展的框架下繼續提供高品質的紡織產品，開發更環保的生產技術、使用可再生和可持續材料，以及改進染整製程，這樣的努力不僅有助於保護環境，還能夠滿足越來越重視可持續性的消費者需求，同時也將為紡織業帶來更長遠的發展機會。

本節將探討紡織低碳技術包括從助劑選擇、染整製程優化到技術應用等環節，深入探討染整製程現所面臨的問題，並闡述低碳技術如何在紡織業的各個層面得以應用，以及實際應用中所帶來的效益和挑戰。透過這份研究，我們希望能為紡織業的各個參與者提供有價值的資訊，協助實踐低碳技術，為未來的可持續發展做出積極貢獻。

(一) 現有練染製程分析與問題

台灣的紡織業正面臨多重挑戰，其中勞動力短缺、客製化需求複雜性、國際競爭壓力等問題逐漸浮現，然而，更值得注意的是，為了達到 2050 年淨零碳排放(Net Zero)目標，加上必須應對環境法規趨嚴和碳稅等挑戰下，低碳技術的引入成為重要課題，包括再生能源應用、高效的生產方法以及染色加工技術的改進。紡織業所產生的高碳排放來自染整製程，每年碳排放高達約 326 萬噸，約佔整個紡織

業總碳排的 34 %，且因紡織品的價值鏈始於石油業，所使用的原物料中約 70 % 含有塑料，包含聚酯 (Polyester)、尼龍 (Nylon)、聚氨酯 (Spandex) 或丙烯酸 (Acrylic) 等合成纖維。以染整製程方面，主要分為前處理、染色、定型和後整理，如圖 2.27 所示，除了需要大量的水量和高耗電量，製程中所使用的化學品，例如退漿使用的助劑、精練劑、染整使用的染劑與助劑等，其中染劑通常為合成染料，然而染料與纖維之間的固色效果受多種因素影響，因此不可能 100 % 的固色，在清洗過程將會消耗大量的化學品、水、能源等，最後造成環境汙染問題。

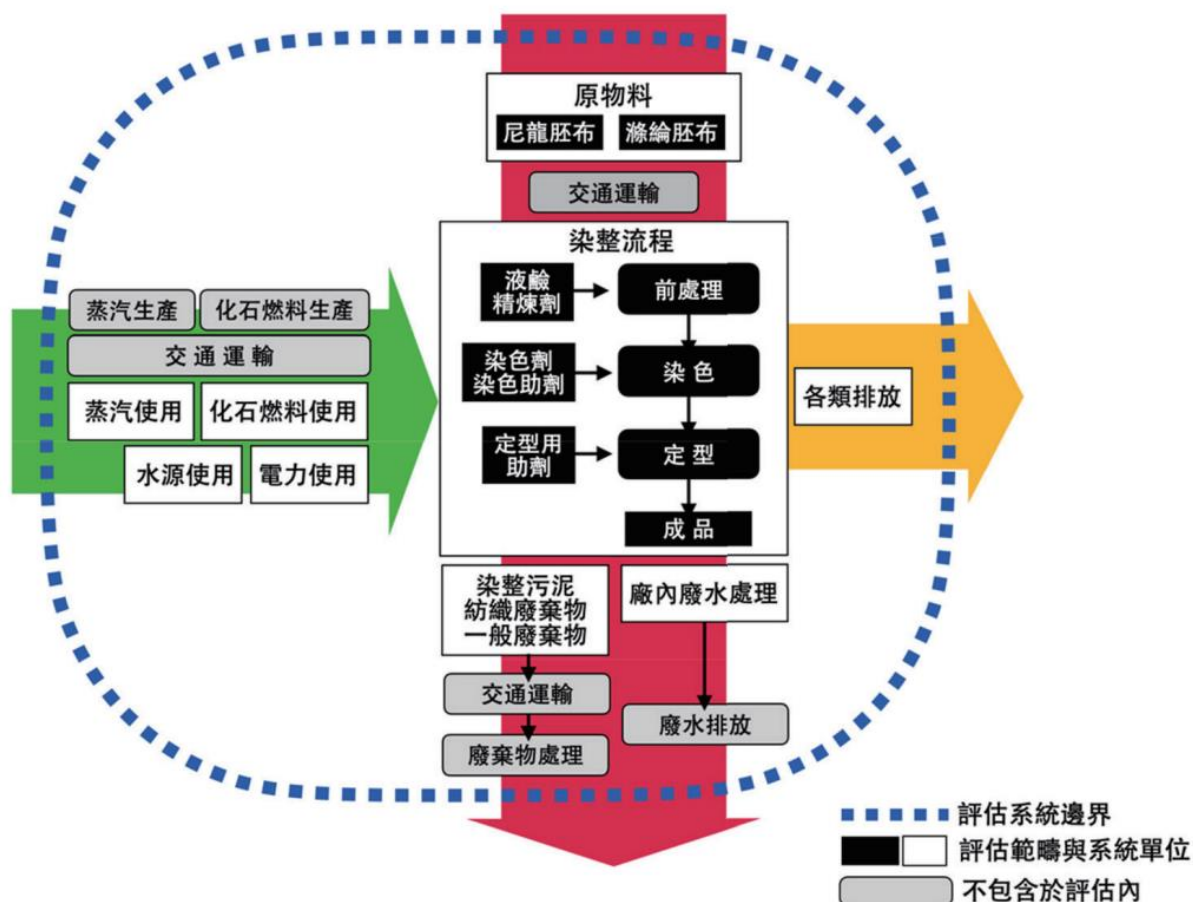


圖 2.27 染整製程之碳排放關係價值鏈⁶⁹

綜合上述問題，染整製程在勞動力、成本、法規遵循、品質控制等方面面臨著複雜多變的挑戰，需要在這些問題上找到平衡點，以提升製程效率與實現環保需求，將是台灣染整業所需克服的重要課題。

(二) 練染同步技術概述

為了實現低碳目標，台灣紡織業正積極探索節能減排的技術，針對現有環境和製程方式，深入了解主要的能源消耗來源，從根本去減少能源消耗為首要任務，並對製程設備進行碳盤查。而紡織業主要以染整製程為主軸，目前染整製程的問

⁶⁹ 資料來源：施孟芬、林俊德，染整廠能源供應模式更替環境評估之個案研究。工業污染防治第 155 期(2022)

題在於對色率低，且缺乏標準化程序，導致重新染色次數增加，進而增加生產成本。以國內染色技術來說，主要會經過精練與染色兩段製程，在精練製程中，對於選擇適當的精練劑與浸浴設備，將對最終產品的品質有重大影響，尤其對不需退漿的聚酯、尼龍等合成纖維來說，其精練過程變得至關重要，主要目的為去除整理劑、潤滑油和污垢等雜質，通過精練劑可有效去除油脂和蠟質，對纖維進行脂肪酸的皂化，並乳化除去蠟狀物質，提高織物的吸收性，從而增強織物的染色效率。而染色製程方面，對於選擇適當的染色加工條件(配方、浴比等)與染浴設備，將會影響染色的品質，因染色為通過化學物質(染料和顏料)處理來為織物添加顏色的過程，不僅能增加織物的美觀，還提高產品的附加價值。

對於許多台灣染整代工廠而言，實現製程的節能減碳和產品品質的穩定性為重大挑戰，且引入低碳技術需要在品質和成本之間取得平衡。若將精練與染色製程以同一浴化的方式(如圖 2.28)，將重點放在設備整合優化，第一步採用低能耗的染整設備，透過調控制程參數，達到生產效率最佳化；第二步即可精簡染整製程，引入高效除油精練劑，使得最終產品的性能如耐洗、色牢度等保持穩定性，將會節省大量的能源與廢水產生，從而達到節能減碳之目的。

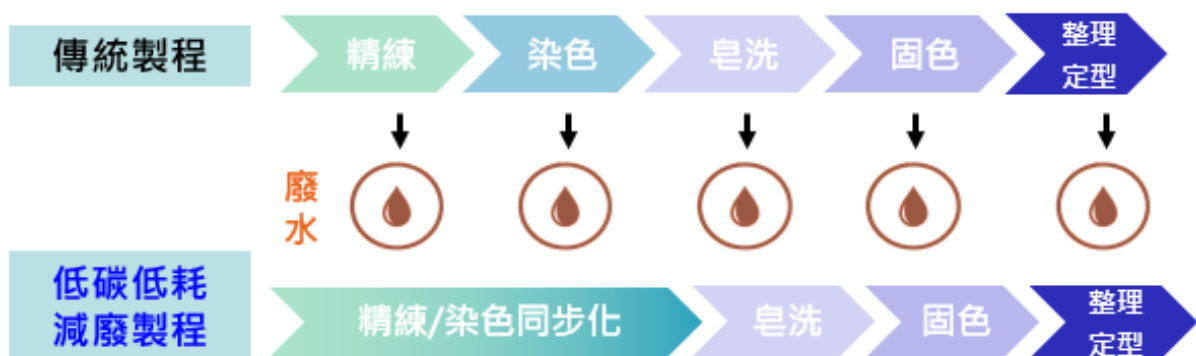


圖 2.28 傳統染整製程與練染同步化染整製程圖

總體來說，對於助劑的選擇和製程方法，都將對最終產品質量產生重要影響，若藉由優化設備引入低能耗智慧型染色機，其效能可達到超低浴比，所需的水資源和化學品用量也會相應減少，有助於節省生產成本。同時，為了減少能源的使用，採用節能的染整設備，能夠將技術整合，精確地控制能源的耗用，以縮小能源成本。

(三) 練染同步製程應用

傳統的染色設備通常採用高浴比的浸染方式，造成織物的染色不均勻，而且製程相當耗時，其過程還會產生高碳排與廢水的問題，因此，染色機設備商紛紛推出低浴比、省能源、降低成本、提高布料品質的染色機，以改善染色瑕疵與染色效率的問題，透過優化設備可解決多種因素，例如壓染機壓力、染料分配、左右張力、熱處理不均勻或設備運轉異常等發生，這些潛在問題都將經由監控和管

理，以確保染色製程的高效運作和品質控制。

為了實現均勻的織物染色，其中關鍵挑戰為控制染液的製程參數，包括溫度、時間、浴比、PH 值等，而這些因素的優劣直接受所選用的染浴設備影響，如表 2.6 所示，因各個設備結構的組成不同，其中採用繩狀浸染機的話，其設計過程是以導布棍牽引布匹運行，最終會呈現高浴比、高液量與高張力的結果，導致染色再現性較差，相反地，若採用溢流與噴射式的染色，其設計過程是由導布棍將織物從染浴中提起，依靠水流(染液)來帶動布匹運行，而採用氣流式染色則是依靠氣流(空氣)來牽引布匹運行，這樣的染色循環方式，相較於傳統染色的運作時間短，更能夠節省能源、降低碳排放，實現織物與染液間的均勻接觸，提高染液對纖維的滲透力，使最終產品的染色再現性高。

表 2.6 不同染色機特性應用比較⁷⁰

	卷染機	繩狀浸染式	經軸式	溢流式	氣流式	噴射式
特點	操作簡單， 高溫高能耗	觸感尚可， 生產效率差	經濟效益高， 但易起波紋	大容量，但易 起泡	低能耗，但成 本維護高	低能源，但易 起毛
染色再現性	低， 邊中色差大	超低	中	中	高	高
染色浴比	低 ~1:5	超高 ~1:20	中 ~1:6	低 1:4~1:8	超低 ~1:3	低 1:4~1:8
染程時間	長	長	中	短	短	短
設備成本	低	低	中	低	高	中
適用	各種厚、薄織 物	薄針織	薄針織，鬆散、 易變形織物	各種厚、薄織 物	薄針織	中、薄織物

另一方面，染整設備包含染色機、精練水洗機、後整理機台以及廢水回收系統等公用設備，透過導入製程整合技術，將製程中的精練與染色一浴化，即可直接減少精練水洗機的使用，並可藉由智慧型低耗能染色機達到超低浴比，如義大利 DANITECH 推出圓型高溫染色機，相較於長型染缸，其特點為運行行程較短，使得低浴比、低液量、低張力，不需要用大量水資源進行染色，並搭配智慧型水洗系統，可以監控染色階段的實際液比、排出與注入水液的量，同樣地，七信工業公司開發智慧型輸送帶式高溫定速染色機，藉由機械動力來帶動布匹染色，可有效降低廢水與 CO₂ 排放量 65% 以上，並導入染程智慧化全自動控制，排除人為操作問題。

練染同步技術能夠發揮降低碳排放的關鍵作用，而選擇低能耗的染色設備對於實現均勻染色至關重要，染整廠可通過汰換節能染整設備，並藉由製程同步化來實現製程的節能減碳技術。

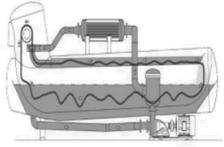
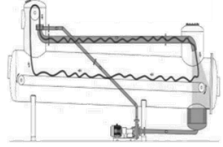
⁷⁰ 資料來源：絲織工業同業公會

(四) 練染同步減碳效益

在練染製程中，引入製程整合的概念具有顯著的減碳效益，可透過優化製程將兩個步驟合併成一個步驟，減少中間能量轉換的損耗，這樣的整合可以降低能源消耗約 20%，節省水資源約 25%，而製程整合的重點在於將不同的製程相互聯結，最大限度地減少能源的浪費並提高生產效率，此外，利用先進的設備監控生產數據系統，能夠即時追蹤與分析異常狀況，進而採取及時的措施，減少生產過程中可能產生的浪費和能源損失。對於減碳效益來說，如表 2.7 所示，以整個紡織製程中的染色部分進行預期效益的評估，練染一浴化製程簡化後，染整加工碳排放由 6.26 kg CO₂/kg 布減量為 4.20 kg CO₂/kg 布，且製程耗水量減少約 25%，預估 2030 年產業化後可減量達 100 萬噸碳排放，與現有製程相比降幅達 33%，達到精簡染整製程、節水生產達到低碳排目標。

值得注意的是，練染同步技術的優勢在於節省能源、水資源和降低碳排放，同時，製程整合還能夠合理規劃資源利用，包括增加設備機台使用空間，可提高生產效率，其有助於靈活應對市場需求的變化。綜合來看，製程整合不僅提高生產效率和品質，同時有效地減少碳排放，實現更加環保和可持續的染整製程。

表 2.7 傳統浸染式與低能耗染色機應用比較

設備	傳統浸染式染色機	智慧型低能耗染色機
生產流程	精練 → 染色 → 皂洗 → 固色 → 整理定型	精練/染色同步化
環境污染(碳排/BOD/COD/)	高	低
染色機之浴比	高浴比 1:10~1:12	低浴比 1:3~1:5
染色機示意圖		
泵浦馬力	40HP · 耗電高	20HP · 耗電低
染缸長度	~900cm · 耗水多	~750cm · 耗水少
減碳效益	染整加工碳排放由6.26 kg CO ₂ /kg布減量為4.20 kg CO ₂ /kg布，減碳量計算如下: [水+電碳排] =(用水減少5720000噸x0.152kgCO ₂ /度)+(耗電520000噸紡織品 x 每公斤耗電量1.62度x減耗量33%x0.509kgCO ₂ /度)≐100萬公噸/年。	

(五) 小結

隨著社會對紡織品加工的要求逐漸提高，為了解決紡織業所造成的環境污染威脅，減碳策略包含「綠電」、「能源優化」、「設備優化」以及「製程優化」將成為主要趨勢，必須優化整個生產加工技術，以最大限度地減少能源的使用，而練染同步化技術的創新不僅能夠製程節能，還可以減少染料和化學品的使用，

實質的降低對環境的迫害，這樣的轉變使得紡織品具有明顯優勢競爭力，透過深入了解生產過程的動力學、操作程序和穩定性，我們可以克服技術障礙，推動先進的設備整合技術和高效的染色技術，以節約能源並減少環境污染。⁷¹

⁷¹ 本節參考文獻：

1. Smart Fibers and Textiles for Personal Health Management, ACS Nano 2021, 15, 8, 12497–12508
2. Elastane fabrics – A tool for stretch applications in sports, Indian Journal of , Fibre & Textile Research , Vol. 36, September 2011, pp. 300-307
3. 染整廠能源供應模式更替環境評估之個案研究，工業污染防治，第 155 期 (Sep. 2022)
4. Exploring an alternative to the Chilean textile waste: A carbon footprint assessment of a textile recycling process, Volume 830, 15 July 2022, 154542
5. Analysis of the polyester clothing value chain to identify key intervention points for sustainability, Palacios-Mateo et al. Environ Sci Eur (2021)
6. <https://ws.ndc.gov.tw/001/administrator/18/refile/6037/8756/625322f6-efbc-44c4-be5c-b79aace23d24.pdf>,
7. <https://greyviews.com/reports/sports-apparel-market/95>
8. <https://zhuanlan.zhihu.com/p/31664485>
9. [https://www.obrsim.com/upload/file/20210706/%E7%BA%BA%E7%BB%87%E5%93%81%E6%B0%94%E F%BC%88%E6%BA%A2%EF%BC%89%E6%B5%81%E6%9F%93%E8%89%B2%E8%BF%87%E7%A8 %8B%E8%99%9A%E6%8B%9F%E4%BB%BF%E7%9C%9F%E5%AE%9E%9%AA%8C-%E7%9F%A5%E8%AF%86%E7%82%B9\(2\)_636.pdf](https://www.obrsim.com/upload/file/20210706/%E7%BA%BA%E7%BB%87%E5%93%81%E6%B0%94%E F%BC%88%E6%BA%A2%EF%BC%89%E6%B5%81%E6%9F%93%E8%89%B2%E8%BF%87%E7%A8 %8B%E8%99%9A%E6%8B%9F%E4%BB%BF%E7%9C%9F%E5%AE%9E%9%AA%8C-%E7%9F%A5%E8%AF%86%E7%82%B9(2)_636.pdf)
10. <https://www.tipo.org.tw/tc/includes/GetFile.ashx?mID=23&id=8531&chk=30962a9b-7b3a-4af3-9de1-902f8f8cb800>
11. <https://acmemach.com.tw/tw/am-icd-type-k-2/>
12. <https://read01.com/K00gLn6.html>

第三章 石化產業廢水再生技術應用

近年來氣候變遷造成降雨型態改變，乾旱、水患等災害的頻率每年攀升，2020～2021年台灣西半部地區發生56年來首次大規模旱災，一般民眾與產業皆深深體會到限水的不便，水資源短缺不僅影響產業營運，連帶波及台灣整體經濟成長，尤其對正在加速發展產業的南台灣更形成巨大的威脅，為此政府推動各項水資源政策，期望在水資源永續經營的前提下，達到供需平衡的目的。

一、全台工業及石化業用水現況

石化產業是國內產業發展基石，為相當重要的傳統產業，台灣雖擁有世界級的煉油和石化工程技術，但也正面臨氣候變遷帶來的挑戰，石化產業相比其他產業有更高的能資源需求，具有高耗能與高耗水的製程特性，以用水量來說(圖 3.1)，2021年逢百年大旱全台工業用水量為1,425百萬噸/年，石化產業用水量約為379百萬噸/年，佔總工業用水26.6%；相較2020年，工業用水量(1,803百萬噸/年)減少20%，石化產業用水量(614百萬噸/年)減少38%。由資料可知石化產業用水占整體工業用水約3成左右的水量，如積極執行水資源管理，配合製程污水回收再利用，將可降低整體的用水量，達到源頭減量的目的，反轉石化產業高耗水、高污染的負面形象。110年石化產業各縣市用比如圖 2-3-2，以雲林縣用水占比最高為35% (133百萬噸/年)，次之為高雄市24% (91百萬噸/年)。國內石化產業分為中油及台塑兩大企業，台塑集中在雲林離島式基礎工業區，中油則集中在高雄地區並分散於仁武、大社、林園、高雄臨海、大發等5個工業區。

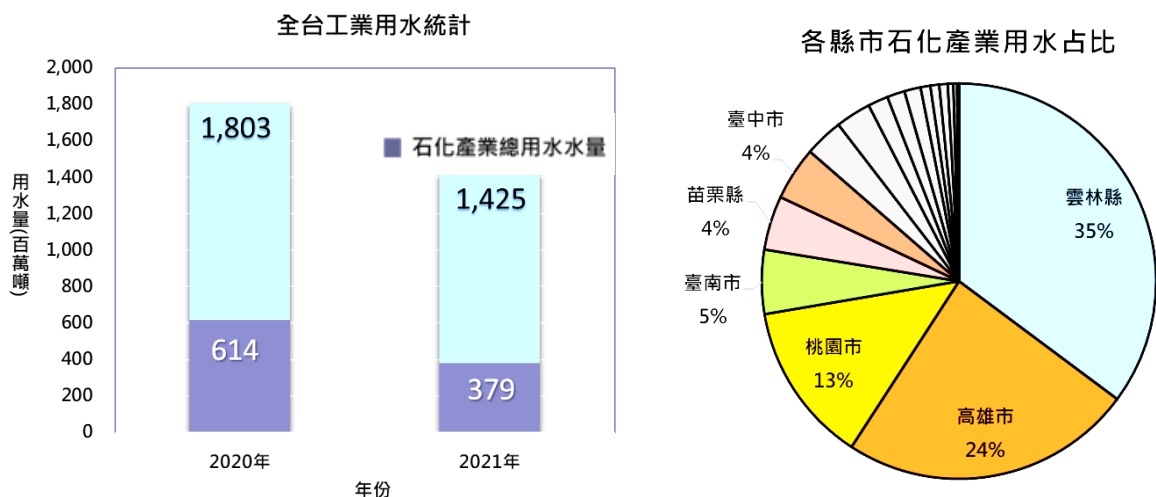


圖 3.1 全台工業及 110 年各縣市石化業用水量⁷²

⁷² 資料來源：經濟部水利署各項用水統計資料庫

石化業用水主要的區域為雲林縣與高雄市。雲林離島式基礎工業區於 1990 年經濟部工業局為因應基礎工業之建廠需求而著手規畫並於隔年啟動開發案，累計至 2022 年區內生產中工廠共有 21 家，其中 19 家為石化工廠，區內用水大戶有台塑關係企業、大連化學工業麥寮分公司、中塑油品股份有限公司、長春人造樹脂廠麥寮分公司、長春石油化學麥寮分公司等。高雄市是國內最早發展石化產業的重鎮，1970 年代政府為規劃我國工業升級，將高雄設為發展石化產業的重點地區，陸續設立了仁武、大社、林園、高雄臨海、大發等大型工業區。累計至 2022 年這 5 個工業區共計有 146 家石化工廠，區內用水大戶有台灣中油股份有限公司、長春人造樹脂廠股份有限公司、大連化學工業股份有限公司、國喬石油化學股份有限公司、中國石油化學工業開發股份有限公司等。

二、節水相關法規政策

節水相關法規包括再生水資源發展條例、水利法等，陸續於 2022 年、2023 年修正並完成公告，相關子法修正包括開發單位使用再生水辦法中規定工業用水大戶需使用一定比例再生水及耗水費徵收辦法訂定等法令，對產業影響較大，因此，茲就上述開發單位使用再生水辦法及耗水費徵收辦法進行說明。

(一) 開發單位使用再生水辦法

此辦法依據再生水資源發展條例第 4 條規定，工業用水大戶必須使用一定比率之系統再生水。而經濟部已於 2023 年 8 月 8 號公告相關子法，開發單位使用再生水辦法第 3 條規定，每日用水量達 2 萬噸之開發單位，未來新建廠或擴建廠時，用水計畫中工業用水必須使用 50% 系統再生水，相關規定將於 2024 年 2 月 1 日正式施行。辦法中提及若特定區內之系統再生水供應條件不足時，開發單位使用再生水辦法第 3 條也公告以下兩項因應辦法：

1. 開發單位可自主回收再生水：取用廢(污)水放流或排放點後，未排入下水道系統之廢(污)水或放流水，經處理再利用。
2. 交換水源：與同一自來水供應地區內的既有用水事業交換水源，以代替履行使用系統再生水義務。

(二) 耗水費徵收辦法

耗水費徵收辦法依水利法第 84 條之 1 第 3 項規定，為水資源有效及永續利用，中央主管機關得向用水超過一定水量之用水人徵收耗水費。此辦法已於 2023 年 2 月 1 日啟動開徵，第 3 條第 2 項規定用水人每月使用自來水及地面水總用水量超過 9,000 噸，針對超過的部分每噸以新臺幣 3 元計算收費，地下水則以總用水量每噸以新臺幣 3 元計算收費。為降低產業的衝擊，辦法公告 114 年 6 月之前

為緩衝階段，費用將減半徵收。其中針對耗水費徵收辦法中廠商如使用再生水或設置節水設備予以減徵或抵減條文先做說明，條文簡述如下：

1. 再生水及海淡水於前一年7月1日至當年6月30日合計使用量達6,000噸以上並取得證明，得以依照耗水費辦法附表減徵費額。但未達當年度用水計畫書承諾再生水或海淡水使用量80%者不適用。
2. 投資水資源開發或節水設備，經中央主管機關核定之經費，得於十年內分年抵減至核定投資經費之一半。

以上為政府促進產業節水並落實強化用水韌性所訂定的辦法，希冀在開發再生水資源的同時，促進產業投資節水設備，讓水資源能夠達到最有效的利用。

三、石化廠廢水特性與再生方案

石化產業常見製造產物為燃料氣、汽油、焦炭、乙二醇、丙烯酸酯、硫酸及氫氣等化學品，由於生產產品不同，對於用水要求也有所差異，建議依照製程需求水質進行水再生規劃，相關製程廢水水質特性如表 3.1 所示：

表 3.1 石化產業製程廢水水質特性⁷³

製程	廢水特性
燃料氣、汽油、焦炭、煤焦油	pH：7.3~11.4 EC：3,000~37,500 mg/L COD：600~35,000 mg/L Oil：0.1~10.8 mg/L
乙二醇、丙烯酸酯、硫酸、氫氣	COD：500~150,000 mg/L BOD：500~5,000 mg/L 氫氣：1~300 mg/L

行政院環境保護署於 106 年 12 月 25 日修正發布並於 110 年實施第一階段放流水標準加嚴及新增管制項目，如氨氮、重金屬、致癌性物質及真色色度等，並於 113 年開始實施第二階段氨氮限值加嚴管制。現階段石油化學業放流水規範項目值皆低於 113 年第二階段加嚴限值，但石化業廢水因製程特性導致成份複雜，經處理後雖可達放流水標準(表 3.2)，但如以廢水再生為目標，則水中鹽類(含易結垢離子)及難分解有機物需進一步去除。

⁷³ 資料來源：經濟部工業局產業用水最適化節水技術指引

表 3.2 石油化學業放流水水質項目及限值⁷⁴

項目		限值 (毫克/公升)	
氫離子濃度指數(無單位)		6.0~9.0	
硝酸鹽氮		50	
氨氮	排放於自來水水質水量保護區內者	10	
	排放於自來水水質水量保護區外者	民國 100/12/1 前完成建造、建造中或已完成工程招標者之非高含氮製程	20
		民國 100/12/1 前完成建造、建造中或已完成工程招標者之高含氮製程	60
		民國 100/12/1 前尚未完成工程招標者	20
正磷酸鹽	排放於自來水水質水量保護區內者	4.0	
酚類		1.0	
陰離子界面活性劑		10	
油脂(正己烷抽出物)		10	
硫化物		1.0	
化學需氧量		100	
懸浮固體		30	
真色色度(無單位)	民國 106/12/25 前完成建造、建造中或已完成工程招標者	400	
	民國 106/12/25 前尚未完成工程招標者	300	
自由有效餘氯		2.0	
苯		0.05	
乙苯		0.4	
二氯甲烷	石油化學基本原料製造業、石油化學中游產品製造業、石油化學下游產品製造業	0.2	
三氯甲烷		0.6	
1,2-二氯乙烷、氯乙烯		0.1	
DMP、DEHP		0.2	
DEP、DBP、BBP		0.4	
DNOP		0.6	
丙烯腈		核准排水量>1,0000CMD 以上者。	0.2
1,3-丁二烯		但僅生產天然氣者，不在此限。	0.1

⁷⁴ 資料來源：摘錄放流水標準法規(附表三)

(一) 石化業廢水面臨問題

石化專區污水廠放流水水質特性包含⁷⁵：

1. 導電度與總溶解固體：製程之純水及軟水系統樹脂再生時所使用之硫酸、鹽酸及氫氧化鈉等。
2. 陰離子：石化廠原油蒸餾過程中，氯鹽受熱水解成氯化氫，上升至原油蒸餾塔頂部，溶入水蒸氣冷凝析出一股鹽酸水，導致排放水氯化物偏高。
3. 有機物：BOD 及 COD 多以溶解性物質為主，難以被生物分解之污染物，須透過高級氧化或逆滲透膜濾除溶解性物質。
4. 含氮物質：來源包含氨水、氯化銨、胺類顯影劑與去光阻劑及硝酸等含氮藥劑，廢水處理廠碳源不足導致無法有效生物處理而殘留於放流水中。
5. 重金屬：放流水中主要含有鈉、鉀、鎂，其次為鋁、鐵、錳，雖然經過各廠之化學混凝系統處理，但其放流水仍殘留低濃度重金屬。

現階段國內水處理與再生產業廠商主要集中於管材、閥件、機械設備、工程規劃設計與代操作，雖然在幫浦、閥件與管材已可自製，但是在關鍵材料/模組及系統技術，大部分需仰賴進口或國外技術移轉；國內廠商即使投入研發，在後續推廣應用上，較缺乏大型的場域驗證，因此實廠應用將面臨瓶頸。

(二) 可能回用目標

石化廠放流水可回用目標大致為製程用水、鍋爐用水與冷卻水塔用水三項，此三項為一般石化廠之重大用水單元。石化產業依產品不同導致製程廢水特性差異極大，而製程用水水質也因製程要求而不同；鍋爐因較易產生腐蝕及結垢的現象，故用水之水質要求較高，是否能使用再生水需審慎評估；冷卻用水為石化產業中需求量大且水質要求較低之用水單元，水質要求主要為降低結垢、管線腐蝕及生物生長等問題，相對上較易解決以上問題。

除上述用水單元之外也可考量將再生水使用於次級用水，例如：沖廁、廠區道路清洗及其他不與人體直接接觸等用途。

(三) 廢水再生建議方案

廠內廢水建議分流回收並依水質狀況使用不同設備處理，首先評估各用水單元之排放水是否可回用至其他用水單元，最終可再考慮由末端放流水進行回用，建議流程如圖 3.2：

⁷⁵ 黃聖智，廖昌郁，蔡翼澤，潘毅峰，陳慶隆，石化業綜合放流水回收再生之場域驗證研究，工業污染防治第 148 期(2020)

石化業邁向 2050 淨零碳排技術發展與政策探討

1. 製程與鍋爐用水單元前端皆會設置純水或軟水系統，系統的濃排水以過濾模組+EDR 模組處理後可再回用至冷卻水塔當循環水使用，或回原水端循環再利用。
2. 石化業製程特性會產生大量蒸汽，可回收蒸汽冷卻之後形成的冷凝水，如冷凝水水質較好建議可回製程再利用，如冷凝水偏酸性則可充當脫鹽槽、煙道洗滌或相關管線清潔用水。
3. 冷卻水塔增設旁濾 EDR 模組處理內部循環水，減少原水補水量並同時達到節能省電目標。如以單一廠 2,000 R.T.冷卻水塔補水量 100 CMD 為例，增設 EDR 旁流處理設備後，冷卻水塔補水量降低 13%，廢水量減少 56%，加藥量降低 30%，總計一年可減少碳排量 143 噸 CO₂e/年，耗電量減少 29 萬 kWh/年。
4. 可評估製程中較低污染排放水經 EDR 簡易處理可用於非人體接觸之次級用水(沖廁或澆灌)。
5. 最終放流水可使用高級氧化系統+MBR+EDR，處理水可再回原水槽使用。

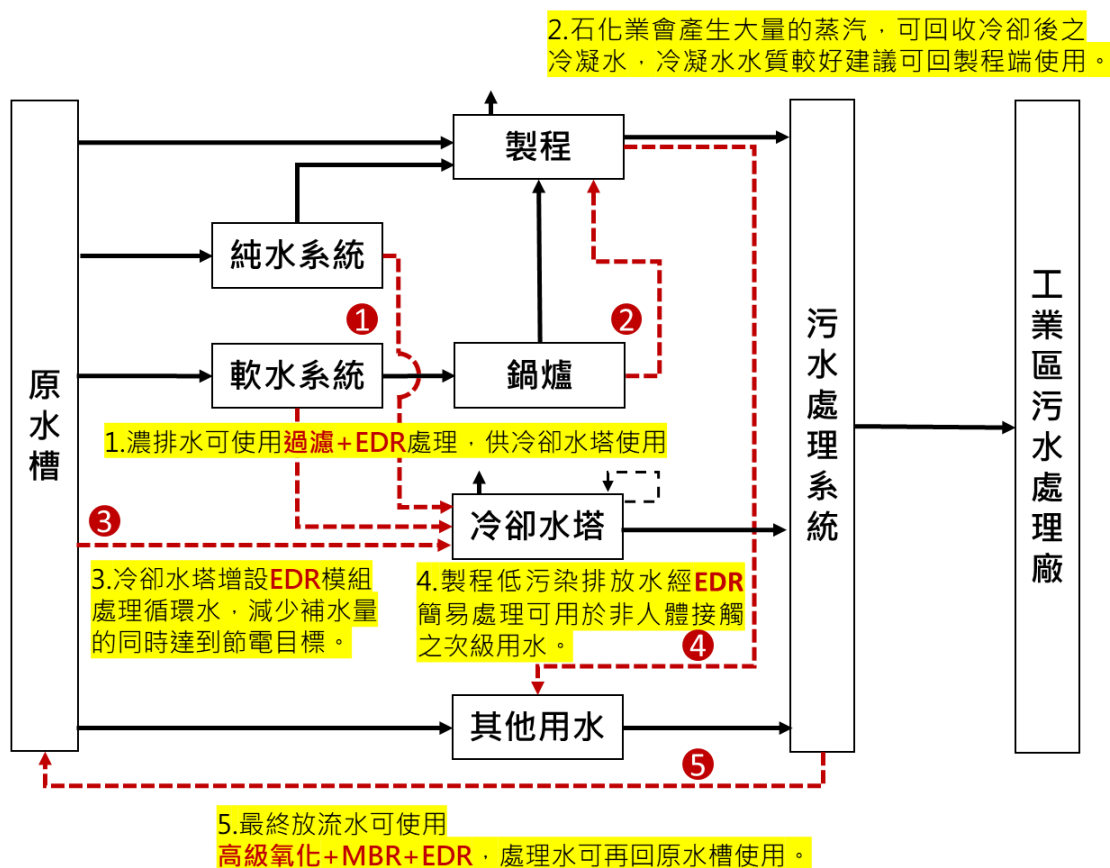
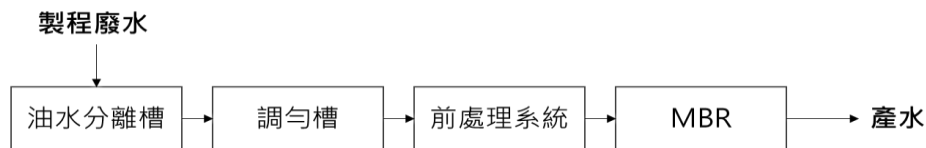


圖 3.2 一般石化廠廢水處理再利用示意圖

(四) 廢水處理程序改善減碳案例

在進行廢水再生並同時希望達到減碳之目標，除廢水再生單元需盡量降低碳排外，也需向上延伸降低前端廢水處理之碳排，以達到整體廢水再生減碳之目的。國內石化產業廢水目前多以好氧生物處理單元去除有機物及氮氮，好氧生物處理需提供大量曝氣以維持系統生物反應，以過去工程經驗每去除 1 kg COD 需耗用 0.8~1.0 kWh 之電力，若能規劃導入厭氧生物處理技術(如 UASB)，則能有效降低廢水處理能耗並進而收集沼氣產電自用，達到能源中和、淨零碳排之目標。下列以某石化廠廢水處理流程為例，如圖 3.3 所示，其廢水處理量為 10,000 CMD 與 COD 濃度 700 mg/L，依此石化廠之總污染量為 7,000 kg COD/day 計算碳排放量，曝氣碳排約 1,150 公噸 CO₂e/年與污泥處置碳排約 1,380 公噸 CO₂e/年，其既有程序總碳排約 2,530 公噸 CO₂e/年。若以增設厭氧生物處理技術(UASB)做為低碳廢水處理之目標，除減少曝氣所需電量外，能有效降低 MBR 處理負荷與污泥量進而減少碳排量，預估減碳效益每年可減少 2,173 公噸 CO₂e 碳排放量，其中曝氣碳排約 345 公噸 CO₂e/年、污泥處置碳排約 682 公噸 CO₂e/年與沼氣產能(負碳排)約 671 公噸 CO₂e/年，此低碳廢水處理流程總碳排約 356 公噸 CO₂e/年。

既有廢水處理流程



建議改善處理流程

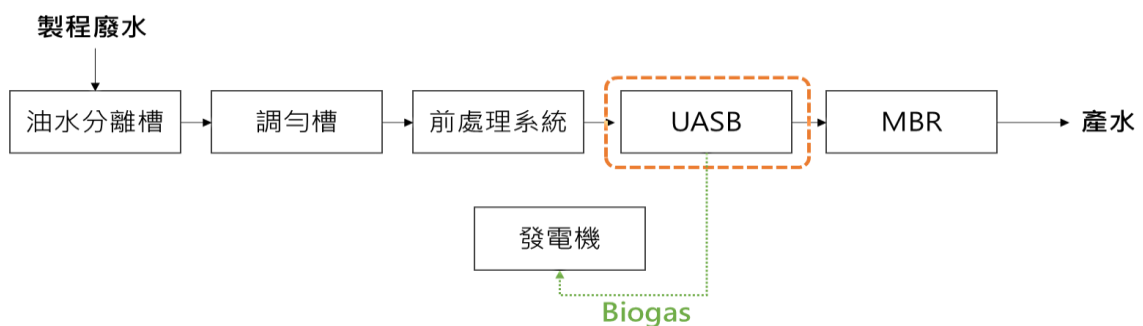


圖 3.3 某石化廠廢水處理程序改善示意圖

四、廢水再生技術與經濟分析

石化工業因產品種類多樣且製程複雜，其產生之廢水成分亦相對複雜及多樣性，再加上亦屬於高耗水之產業，在現今水資源匱乏之環境條件下，工業放流水再生為勢必為產業需面對之課題；而在滿足有效地處理廢水之基本要求下，也需同時節省能源和降低碳排放，將更能契合未來之環保策略。國內工業放流水因法規限制，其水中有機物質和重金屬往往已移除至一定濃度以下，但大部分之放流

水並未明確管制排放之導電度或總溶解固體物(Total Dissolved Solid, TDS)濃度，而石化業產業因製程特性，導致其放流水中導電度通常偏高($> 5,000 \mu\text{S/cm}$)。若欲使再生水質符合一般製程、補注用水或生活雜用等之目的，透過脫鹽程序進一步降低排放水導電度為廢水再生之核心工作。而在工業放流水再生程序上，目前常見用來降低水中 TDS 之技術為離子交換、逆滲透及電透析等方法。

(一) 離子交換樹脂(Ion exchange resin)

石化產業製程包含：催化、分離、處理、改質等工作，過程中常常使用各種化學藥劑，故使其放流水之導電度通常主要係由硫酸根離子、鎂離子、鈣離子、氯離子、鈉離子等溶解性離子所貢獻。採用離子交換樹脂將水中陰、陽離子置換至相對應之樹脂上，進而達到降低導電度之效果，為大部分產業通常優先採用之手段。然而，離子交換樹脂在使用一段時間後會達飽和，意即將喪失置換之功能，此時需以酸、鹼藥劑進行樹脂再生。一般而言，使用離子交換樹脂作為降低石化業放流水 TDS 之手段，通常有幾個需要考慮的問題，例如：(1) 樹脂使用壽命較低：石化工業放流水之離子濃度通常較高，運轉上可能面臨再生頻率過高之現象，進而大幅度縮短離子交換樹脂之使用壽命，降低了實務操作之可行性。此外，例如應用於純水系統之離子交換樹脂技術其碳足跡達 $1.8 \text{ kg CO}_2\text{-eq}$ ，頻繁更替離子交換樹脂並非對環境友善的最好選擇；(2) 廢液處理：由於樹脂再生過程會衍生廢酸或廢鹼之問題，若在再生頻率過高的操作模式下，廢液處理將是一筆昂貴的費用；(3) 碳排放：由於樹脂再生過程會使用大量之酸鹼藥劑，而化學藥劑製造過程通常需要化石燃料或其他能量來源，例如行政院環境保護署 2022 年公告之 45% 液鹼碳足跡數值為 $0.675 \text{ kgCO}_2\text{-eq}$ ，大量使用化學藥劑將會導致增加碳排放。

表 3.3 應用於純水系統之離子交換樹脂技術碳足跡⁷⁶

項目	內容	碳足跡($\text{kg CO}_2\text{e/m}^3$)
離子交換樹脂工藝	生產	1.04×10^{-2}
	操作	1.78
	廢棄	3.92×10^{-3}
合計		1.80

⁷⁶ Yuan Y., Lu J., Gu D., Lou Y., Xue N., Li G., Liao W., Zhang N., Deduction of carbon footprint for membrane desalination processes towards carbon neutrality: A case study on electrodeionization for ultrapure water preparation, Desalination 559, 116648 (2023).

(二) 逆滲透(Reverse osmosis, RO)

RO 程序是一種憑藉半透膜進行過濾之物理行為，通過壓力促使水分子從高濃度溶液流向低濃度溶液(如圖 3.4 所示)，而達到淨化水質的目的。目前 RO 程序被廣泛應用於海水淡化、工業用水處理、純水製造、醫療等多種用途，皆能夠有效獲得優質之處理水，故亦是通常被考慮應用於工業放流水再生之技術。

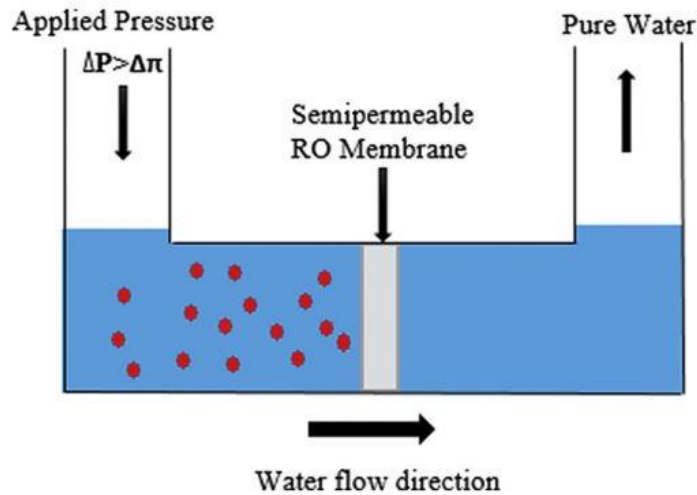


圖 3.4 逆滲透過濾示意圖⁷⁷

然而，RO 單元對於進水水質有極高之要求，通常淤泥阻塞指數(Silt density index, SDI)必須 <2 ，故多以超過濾(UF)作為 RO 單元之前處理程序，用以延長 RO 薄膜之使用壽命。一般而言，RO 系統的設置時間短，且佔地面積小，為其主要之應用優勢，但若水中含有一些高結垢潛勢之成分存在，往往會造成系統無法長期運轉，此為工業廢水回收常面臨之問題。然而，RO 之操作成本主要在於系統所施加之壓力，其取決於廢水之滲透壓(與導電度成正比)，故操作成本主要是由相對應之能耗所貢獻。RO 在長期操作下會有薄膜結垢之問題，在高導電度環境下，於薄膜表面之結垢生成如圖 3.5 所示，此時結垢層形成阻力而造成薄膜效能下降，必需經由酸、鹼洗以再生薄膜；當嚴重阻塞時，RO 薄膜需更換廢棄。在碳排放量部分，除日常酸鹼洗之碳排外，廢棄膜管之焚燒處理亦是重要來源。

⁷⁷ Piyadasa, C., Ridgway, H. F., Yeager, T. R., Stewart, M. B., Pelekani, C., Gray, S. R., Orbell, J. D., The application of electromagnetic fields to the control of the scaling and biofouling of reverse osmosis membranes - A review. *Desalination*, 418, 19–34 (2017).

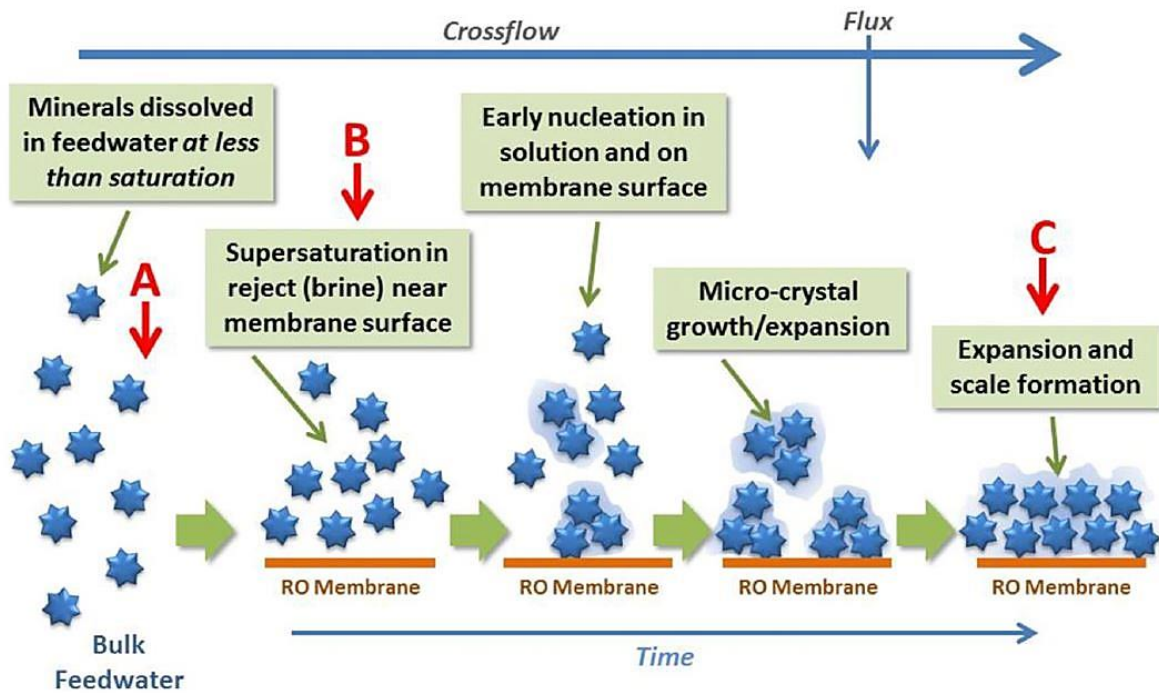


圖 3.5 薄膜結垢形成示意圖⁷⁸

Cornejo et al.⁷⁹以每噸產水為單位，估算 RO 處理不同鹽濃度進料時之各別碳排，海淡 RO 之碳排放範圍為 0.4-6.7 kgCO₂e/m³，半鹹水 RO 為 0.4-2.5 kgCO₂e/m³，而水回收系統之 RO 則是 0.1-2.4 kgCO₂e/m³。而 Thi et al.⁸⁰則分別計算建置 RO 系統及操作維運之碳排放量，分別為 4.3 kgCO₂e/m³ 及 0.43 kgCO₂e/m³。RO 技術在石化業廢水再生中具有重要的應用價值，但在使用過程中需要仔細考慮水質、前處理、能源成本和膜結垢等因素，以實現最佳的效益。

(三) 電透析(Electrodialysis, ED)

電透析技術是藉由維持適當電場，並將陰離子交換膜及陽離子交換膜交互堆疊而成，其對陰、陽離子做分離選擇，陽離子只能穿透陽離子交換膜，陰離子則只能穿透陰離子交換膜，而主要驅動水中離子移動則是靠外加電場，藉此達到脫鹽降導之目的，電透析之示意圖如圖 3.6 所示。電透析僅需施加電場驅使離子移

⁷⁸ Hailemariam, R. H., Woo, Y. C., Damtie M. M., Kim, B. C., Park, K.-D., & Choi, J.-S., Reverse osmosis membrane fabrication and modification technologies and future trends: A review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 102100 (2019).

⁷⁹ Cornejo P. K., Santana M. V. E., Hokanson D. R., Mihelcic J. R., Zhang Q., Carbon footprint of water reuse and desalination: a review of greenhouse gas emissions and estimation tools. *J. Water Reuse Desalin.* 4(4), 238-252 (2014).

⁸⁰ Thi. H. T. D., Toth A. J., Investigation of carbon footprints of three desalination technologies: Reverse osmosis (RO), multi-stage flash distillation (MSF) and multi-effect distillation (MED). *Period. Polytech. Chem. Eng.* 67(1), 41-48 (2023).

動，因此它主要優勢之一是能耗相對低，並且不需額外添加化學藥劑(如抗垢劑、殺菌劑等)。

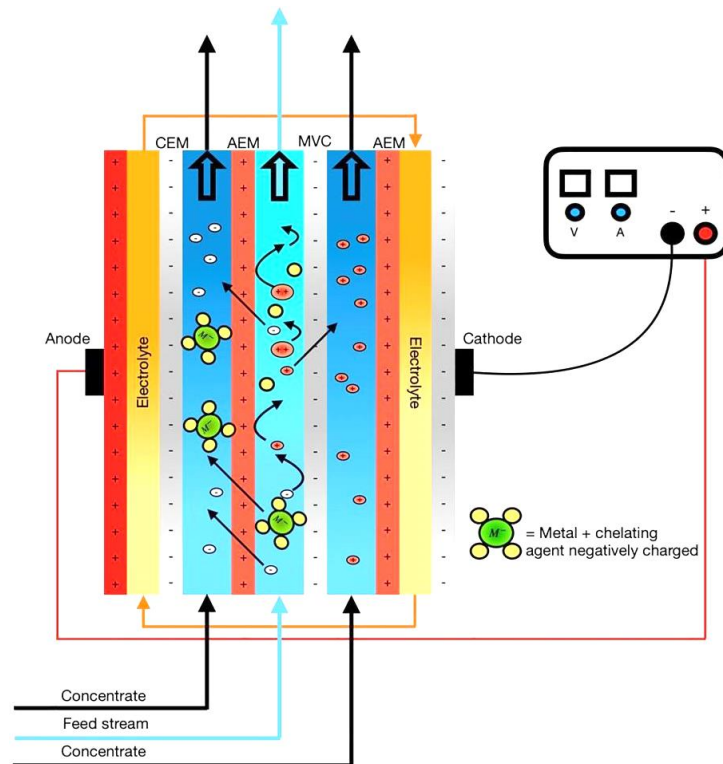


圖 3.6 電透析技術示意圖⁸¹

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

倒極式電透析係以電透析為基礎並在操作過程中加入反轉電極極性之操作模式，意即在電透析操作一定時間後將正負極直流電進行切換，此目的在於預防離子交換膜上之結垢，且可達到自動清洗之功能，藉此可增加電透析系統之操作穩定度以及延長離子交換膜之使用壽命。因此相較於 RO，EDR 之優勢在於其可接受 SDI < 15 之進流水，且可適用於處理高導電度或具結垢潛力之廢水。

石化業廢水再生程序仍是以 RO 為主流，但近期已有將 EDR 取代 RO 或是將 EDR 串接在 RO 濃排水之後以進一步濃縮，提升整體水回收率之應用，EDR 在此條件下更能突顯其優勢，在 Zhao et al. 研究中⁸²，其針對 RO 及 EDR 進行能耗及優缺點分析，結果如表 2-3-3，高壓 RO 每噸產水之能耗約 2-6 kWh/m³ (約 1-3 kg CO₂/m³)，而 ED/EDR 則為 1-12 kWh/m³ (約 0.5-6 kg CO₂/m³)，高能耗之 ED/EDR 係因為用於處理 RO 之濃排水。

⁸¹ Juve J.-M. A., Christensen F. M. S., Wang Y., Wei Z., Electrodialysis for metal removal and recovery: A review. Chem. Eng. J., 435, 134857 (2022).

⁸² Zhao D., Lee Y. L., Ong S. L., Chowdhury P., Siah K. B., Ng H. Y., Electrodialysis reversal for industrial reverse osmosis brine treatment, Sep. Purif. Technol., 213, 339-347 (2019).

表 3.4 脫鹽技術比較

技術	能耗 (kWh/m ³)	優勢	劣勢
高壓 RO	2-6	技術成熟 能耗較低(與熱法相比)	低水回收率 薄膜結垢問題
ED/EDR	1-12	脫鹽效率高 低結垢機率 可操作於高鹽濃度(TDS 200 g/L)	高建置成本

而在 Marin et al.⁸³之研究中，其比較 EDR 水處理廠(Llobregat WTP)及海淡 RO 水處理廠(Llobregat SWRO)之碳排比較，結果顯示 EDR 之碳排放量僅 0.48 kg CO₂/m³(如圖 3.7(a))，而其中僅有 39%來自於能源消耗(電能)，而 RO 則有 95%之碳排為能源所貢獻(圖 3.7(b))，由此可知道，EDR 可應用之領域寬廣，亦可作為 RO 濃排之處理以提升整體水回收率。

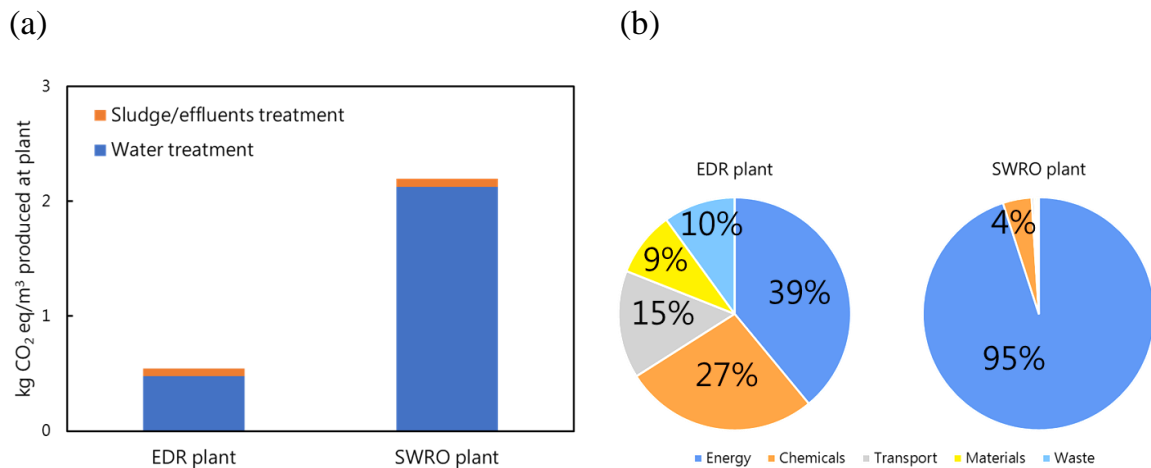


圖 3.7(a) EDR 水處理廠及海淡 RO 水處理廠之碳排比較；(b)碳排來源分析

在 Baker et al.對脫鹽技術之經濟評估分析中⁸⁴，比較不同脫鹽技術之操作成本，如圖 3.8 所示，離子交換樹脂與一般電透析之操作成本隨鹽濃度上升而有直線上升之趨勢，說明其在低鹽濃度範圍較具經濟效益，而 RO 之操作成本上升幅度則較為趨緩，說明其可應用之鹽濃度範圍較為廣泛，而多效蒸發程序則在不同鹽濃度之操作成本則較無明顯之差異，然而，EDR 之技術可應用之鹽濃度範圍較一般電透析更為廣泛，且其操作成本亦較低。

⁸³ Marin D., Junca S., Massague A., Cortina J. L., Fonseca I., Valero F., Impacts on climate change of three drinking water treatment plants supplying Barcelona Metropolitan Area0 In: World congress on water, climate and energy. International Water Association, Dublin, 1-8 (2012).

⁸⁴ Baker, R. W., Membrane technology and applications, Membrane Technology and Research, Inc., Menlo Park, California (2004).

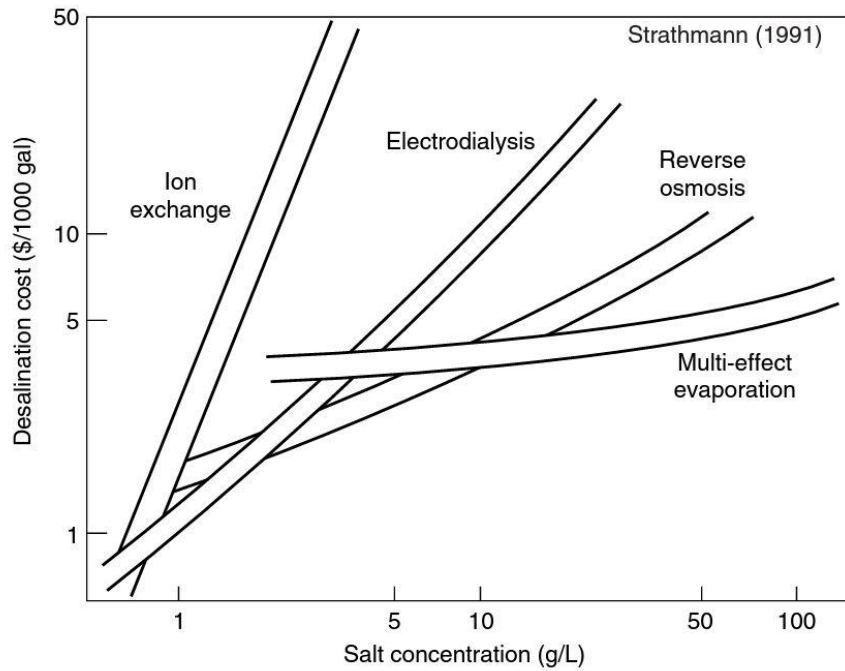


圖 3.8 不同脫鹽技術之操作成本分析

黃聖智等估算以 EDR 用於石化業放流水回收之成本分析⁸⁵，其產水成本約 16.3 元/m³，相較於海淡 RO 產水成本 35 元/m³ 以及工業廢水 RO 系統之產水成本 22~28 元/m³ 而言，EDR 作為水回收單元具良好競爭力。RO 及 EDR 可應用於處理複雜且高導電度之石化業廢水，然而在能耗比較中，EDR 僅利用電場驅使離子移動，因此相較於 RO 而言，EDR 具有較低能耗及碳排量，尤其是處理高導電度廢水，而 RO 則需透過高壓以克服滲透壓，因此當廢水導電度越高則需更多能耗，相對產生更多碳排量。RO 之能耗為 4 - 6 kWh/m³ (2 - 3 kg-CO₂)，而 EDR 則可達到 2 - 3 kWh/m³，相較 RO 而言，EDR 可節省 50% 之能耗⁸⁶。然而石化業廢水較複雜，能耗及碳排放量則會因環境而有所不同，需因應環境進行評估，尋求適切之處理程序以達到碳排及水質需求之平衡點。

五、應用案例介紹

(一) 倒極式電透析應用於石化產業放流水再生

位於國內台南地區之某石化產業公司深諳水資源珍貴，為應對全球缺水問題，希望減少廠內自來水的使用量，在積極尋求解決方案後，決定將廠區放流水進行水回收再利用。最後，透過導入由工研院開發的倒極式電透析(Electrodialysis Reversal, EDR)技術，做為水再生程序之核心單元，成功建立了一座水資源中心，每日可產出 3,000 m³ 以上之再生水。

⁸⁵ 黃聖智，胡伯瑜，石化廢水水回收的可行性評估，工業材料雜誌 391 期(2019)。

⁸⁶ 莊雅茹，林冠佑，新興海淡水處理技術：現況及未來發展，工業材料雜誌 416 期(2021)。

石化產業放流水通常含有較高的鈣離子與硫酸根離子濃度，如表 3.5 所示，本案例之放流水通常含有 400~600 mg/L 之濃度，而 RO 程序在處理該種水體時容易產生結垢問題，進而影響水回收效率並增加設備維護成本。相對而言，EDR 技術由於其特殊的電場分離機制，對於前述水體有較強的適應性，具有更好的水回收率，以及保持穩定的處理效能。該石化業者放流水再生系統的核心設備包括前處理的 SMF(Submerged Membrane Filtration)過濾單元，以及進行後續脫鹽的 EDR 單元(參見圖 3.9)。在前處理過程中，三級廢水首先經過自清式過濾器後，進入 SMF 系統進行超過濾程序，通過強化型 PVDF 中空過濾纖維，實現高效的過濾效果，用以降低水中的懸浮固體、濁度和粒子等濃度，進而提高後續脫鹽單元之處理效率並延長薄膜的使用壽命。強化型 PVDF 中空過濾纖維平均過濾孔徑為 0.05 μm ，共有兩套系統，每套為 6 個模組(5 用 1 備)，每個模組過濾面積為 1,500 m^2 ，總處理量 >250 CMH(圖 3.10 (a))。脫鹽系統則由電透析脫鹽模組、濃水循環系統、淡水進流系統、藥洗系統、整流器和控制閥件等組成。EDR 系統設計為 4 段 4 級 220 對膜設計，採用立式 EDR 模組(圖 3.10 (b))，脫鹽設備共計 14 條線，每條線處理能力為 14-18 CMH，每組每天可產水 19 小時。為了確保水質標準，系統設置了多個控制閥件、壓力計和導電度計進行管理，並在濃水放流前設置了熱交換器和微過濾器，以達到放流水標準。

表 3.5 某石化產業放流水和 EDR 淡水水質

項目	石化產業放流水	EDR 淡水水質
pH	6.5-9.0	5.5-7.5
導電度($\mu\text{S}/\text{cm}$)	<6,500	<550
COD(mg/L)	<70	<60
Na^+ (mg/L)	<350	<100
Ca^{2+} (mg/L)	<600	<80
Mg^{2+} (mg/L)	<35	<10
Cl^- (mg/L)	<2,000	<250
SO_4^{2-} (mg/L)	<600	<200

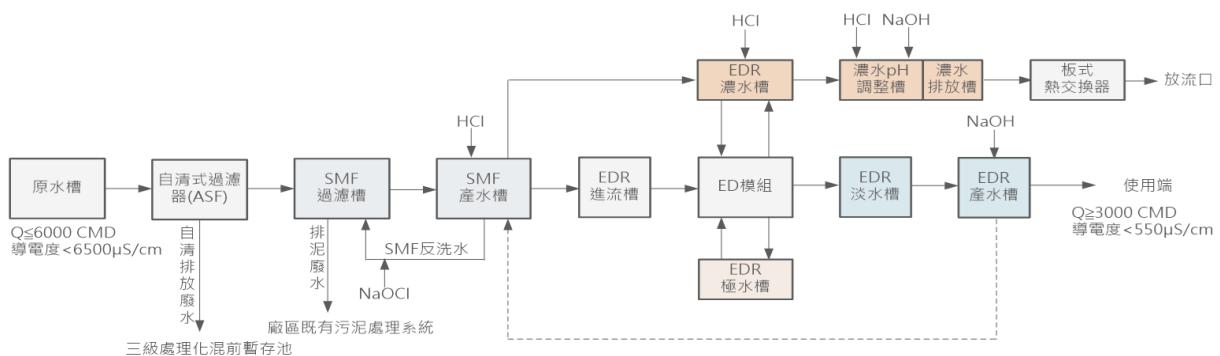


圖 3.9 某石化產業水資源中心之倒極式電透析系統處理流程

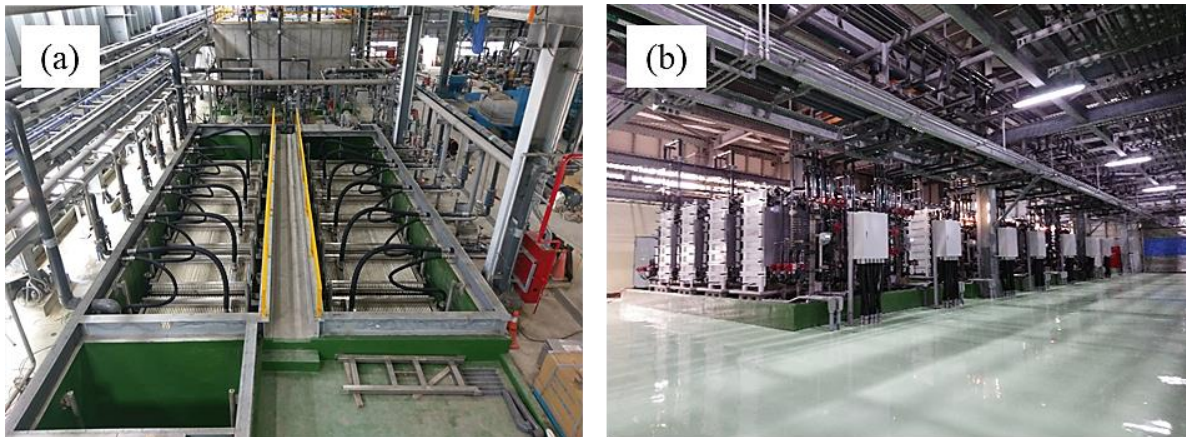


圖 3.10 倒極式電透析水回收系統：(a) SMF 單元；(b) EDR 單元

EDR 水再生系統於石化產業放流水的成功運轉，不但降低了水資源缺乏帶來的產線停工風險，實現了水資源的再生利用最大化，也給予國內產業水資源管理帶來了全新的可能，為解決全球水資源短缺問題提供了一個重要的參考。

(二) 林園工業區污水處理廠 EDR 模廠

一般而言，石化業廢水經傳統水處理程序處理(二級處理)後通常可達現行之放流水標準，但若想進一步將其回收再利用，則必須考量放流水中殘餘之污染物質，方得以規劃適切之水回收技術，石化業放流水特點如下：(1)鹽度偏高：導電度 $>3,000 \mu\text{S}/\text{cm}$ 及總溶解固體物 $>1,000 \text{mg}/\text{L}$ ；(2)結垢潛勢高：鈣鹽 $>100 \text{mg}/\text{L}$ 及硫酸鹽 $>400 \text{mg}/\text{L}$ ；(3)殘餘之有機物質多難以被生物分解： $\text{BOD} < 10 \text{mg}/\text{L}$ 及 $\text{COD} < 40 \text{mg}/\text{L}$ 。綜合而言，可能影響石化業放流水回收成效之影響因子複雜，場域驗證具有其必要性，透過模廠進行長期操作運轉與測試，可建立前處理技術及脫鹽系統之操作參數，作為後續設計之依據。

於 2018 年 10 月開始，工研院團隊在林園工業區污水處理廠進行了約為期 1 年的 EDR 技術模廠驗證工作，其進流水係取自污水處理廠之調和池，水質內容如下， $\text{pH} 7.5\sim 8.0$ 、 $\text{CODs} 50\sim 70 \text{mg}/\text{L}$ 、導電度 $7,000\sim 9,000 \mu\text{S}/\text{cm}$ 、鈣離子濃度 $100\sim 300 \text{mg}/\text{L}$ 、硫酸鹽濃度 $2500\sim 3500 \text{mg}/\text{L}$ 。而 EDR 模廠處理流程示意如圖 3.11 所示，抽取來自污水處理廠調和池之廢水，將先透過 BioNET 生物處理程序移除水中殘餘有機物，再以 UF 單元移除水中懸浮固體物，接著，再進入到 EDR 系統進行脫鹽，所得之淡水即為再生水。

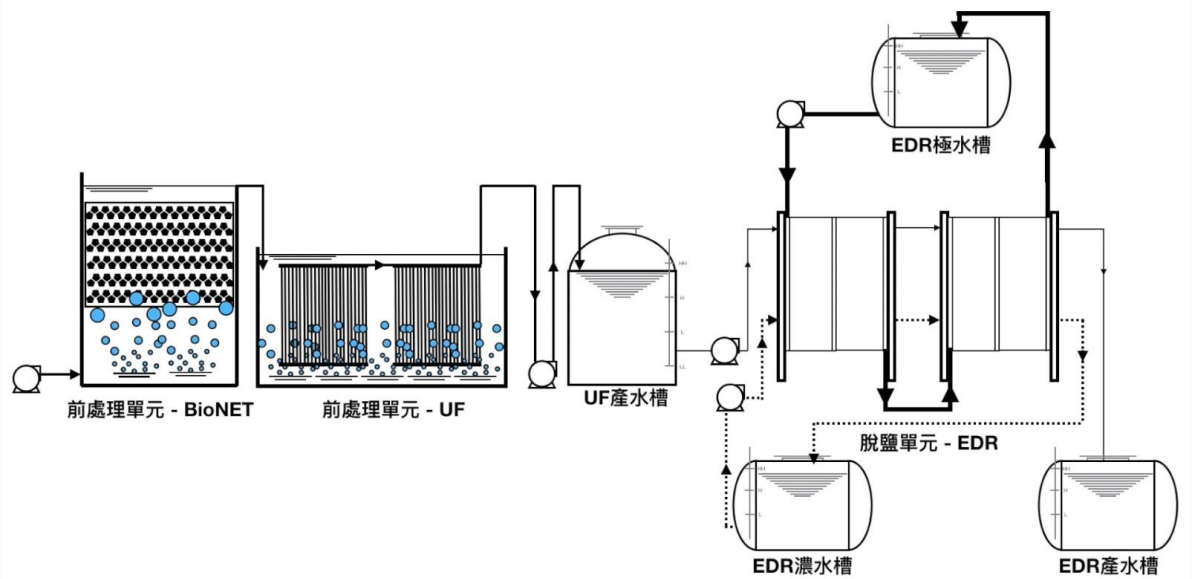


圖 3.11 林園污水處理廠 EDR 模廠處理流程示意圖

BioNET 技術為工研院開發以「多孔性生物擔體」為核心之新型生物處理系統，其採用多孔性擔體作為反應槽之介質，進而提高懸浮固體物被攔截之機會。同時，又因擔體可提供廣大之表面積作為微生物附著、增殖之介質，故能累積大量及特定族群之生物膜微生物於系統中，有助於達到去除多種污染物之目的(圖 3.12)，尤其適合處理低負荷，高流量之操作。BioNET 系統中多孔性生物擔體屬於 Polyurethanes-base 系列之開放型孔洞之網狀結構物，孔隙率約為 84%，平均孔洞直徑為 0.3 mm，外觀形狀為四葉扇葉形。生物擔體之填充量則依反應槽之操作條件和處理對象而定，約為 30 - 70 % 之間。

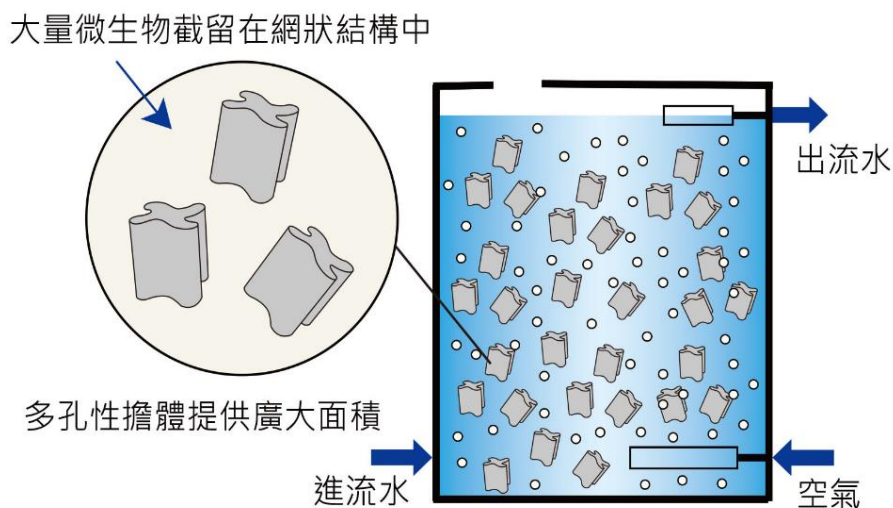


圖 3.12 BioNET 技術示意圖

本案 EDR 模廠之 BioNET 系統設計之反應槽處理量為 15-16 m³/h，水力停留時間為 1 小時以上。UF 單元則選用聚偏二氟乙烯 (Polyvinylidene fluoride, PVDF)

材質，以及孔徑 $0.04 \mu\text{m}$ 之平板膜，總膜面積為 220 m^2 ，產水量約 $4.0 \text{ m}^3/\text{h}$ 。EDR 採用 2 級 2 段 (150 對薄膜/段) 設計，串聯 2 套模組，總膜片為 600 對離子交換膜，以定電壓操作，系統淡室進流量約 $4.0 \text{ m}^3/\text{h}$ ，有產水迴流設計，用以調整進入脫鹽系統之導電度，主要將其控制在 $6,000 \mu\text{S}/\text{cm}$ 以下。



圖 3.13 林園污水處理廠水回收系統模廠：(a) BioNET 單元；(b) UF 單元；(c) EDR 單元

EDR 模廠於 300 日以上的運轉過程中，其脫鹽效能如圖 3.14 所示，利用產水迴流調整進流水，並控制導電度於 $5,500\text{-}6,000 \mu\text{S}/\text{cm}$ 之操作條件下，正極和倒極之脫鹽率幾乎皆可達 88% 以上，產水導電度介於 $300\text{-}650 \mu\text{S}/\text{cm}$ 之間，產水回收率介於 50-65%。整體而言，EDR 模廠脫鹽效果良好，且產水水質符合工業用途之 Class B 再生水水質，可作為工業冷卻用水。

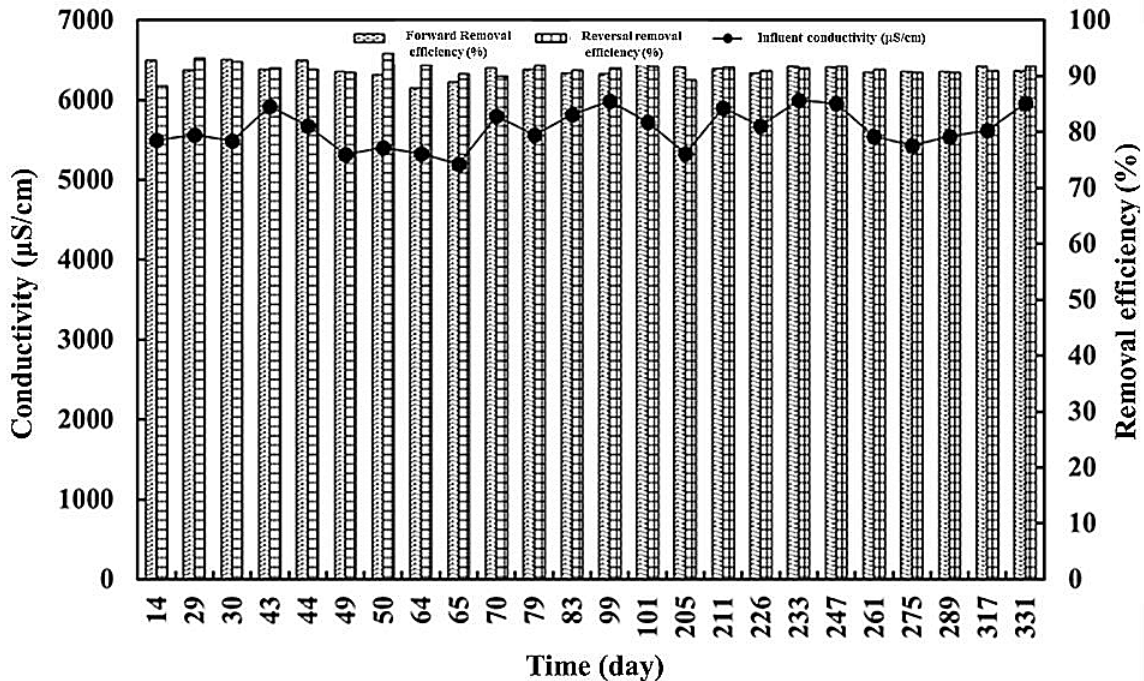


圖 3.14 林園污水處理廠水回收系統模廠長期運轉結果

水回收系統之產水成本與原水(放流水)水質、產水水質要求與操作條件如回收率等參數直接相關。本案例 EDR 模廠之處理流程包括生物前處理(BioNET)、薄膜過濾 (UF 過濾) 及脫鹽 (EDR 系統)等流程，若以電費、藥劑費和維護費等操作費用進行估算，不含設備攤提及管理費，整體產水成本約 23~25 元/m³，而若僅以 EDR 單元進行計算，則其產水成本約為 16.3 元/m³ (參見表 3.6)。與 RO 系統相比 (在工業廢水脫鹽能耗約 1.5-2 kWh/m³，產水成本約 22-28 元/m³；海淡能耗約 3.5-4.5 kWh/m³，產水成本大於 35 元/m³)，具有良好競爭力。此外，石化產業放流水通常含有較高的鈣離子與硫酸根離子濃度，RO 程序在處理該類進流水時容易產生結垢問題，進而影響水回收效率並增加長期操作之設備維護成本，而 EDR 技術由於其特殊的電場分離機制，對於進流水體之允收水質通常有較強的寬容性，優於 RO 技術在此類水質應用之表現。

表 3.6 EDR 模廠之操作成本估算

編號	項目	每噸產水使用量		單價		成本	
1	電費	4.6	kWh/m ³	3.0	元/kWh	13.8	元/m ³
2	藥劑費	0.5	kg/m ³	4.5	元/kg	2.5	元/m ³
合計(1+2)						16.3	元/m ³
估算基準： 進水導電度：<5,500 μS/cm 出水導電度：<1,000 μS/cm 水回收率：54% 產水量：100 CMD 產水日數：360 日							

(三) 臨海工業區污水處理廠水回收模廠

近年來，國內常有水資源不足之情事發生，儘管已有「再生水資源發展條例」作為推動依據，目標於未來的十年內，即 2031 年達到 77 萬 CMD 的再生水量，但仍極具挑戰。國內雖然已有一定技術能量，但缺乏大型的驗證場域，進一步推動本土再生水技術應用。為此，工研院協助國內企業執行 A+企業創新研發計畫，並由臨海工業區污水處理廠提供驗證場所，整合國內水再生相關產業之技術亮點，共同針對污水處理廠放流水進行再生水系統運轉測試，找出最適化膜材、操作參數與流程規劃，提升再生水之處理效能進而降低相關成本。

臨海工業區水回收模廠運用之處理技術包含：Ozone 高級氧化處理、BioNET 生物處理、MMF 多層過濾器、平板膜超過濾系統、中空纖維膜超過濾系統、RO 系統、EDR 系統等單元，其流程如圖 3.15 所示。該膜廠之設計處理量為 200 CMD、

再生水產量為 >130 CMD、水回收率 $>65\%$ ；而水質方面，進流水質要求為 $\text{COD}<100$ mg/L、 $\text{SS}<30$ mg/L、導電度 $<9,500$ $\mu\text{S/cm}$ 、總硬度 <400 mg/L as CaCO_3 ，再生水水質則目標為 $\text{TOC}<500$ $\mu\text{g/L}$ 、導電度 <70 $\mu\text{S/cm}$ 。

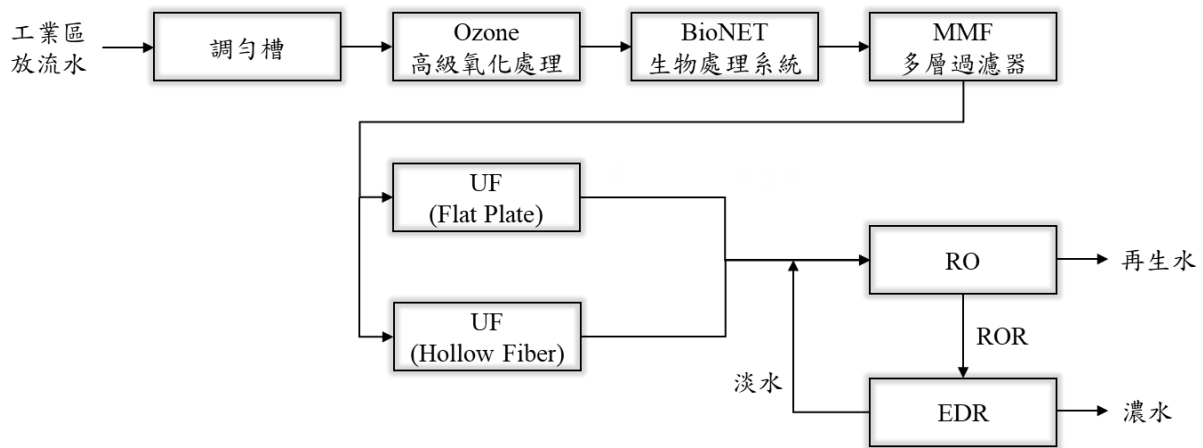


圖 3.15 臨海工業區水回收模廠處理流程

本案例之臭氧微細氣泡技術有別於傳統臭氧曝氣方式，係以 $0.2\sim 30$ 微米之微細氣泡進行高級氧化程序，具有粒徑小、數量多、接觸表面積增加、浮力減小、作用時間加長、微粒子浮除效果加強等物理特性，有利於臭氧水中溶解與氧化。試驗過程中，可使水中臭氧濃度達 3 mg/L以上，且 TOC 去除率 $>20\%$ ，對去除後續薄膜系統之污堵因子具有貢獻。BioNET生物處理系統則係透過生物擔體累積大量生物膜微生物，達到去除水中 COD 和氨氮之目的，系統設計之單一處理槽有效體積為 22 m^3 ，共 2 槽，水力停留時間為 4 小時以上。測試結果顯示，進流水 COD 大多介於 $20\sim 50$ mg/L，而出流水 COD 則可降 $10\sim 40$ mg/L，平均去除率約 17% ；氨氮方面，進流水氨氮落在 $10\sim 30$ mg/L之間，而出流水氨氮則可降至 10 mg/L以下，去除率 $>50\%$ 。超過濾膜程序部分，平板膜系統可穩定操作在 49 LMH產水量，產水 SDI 值落在 $1.5\sim 2.3$ ；而中空纖維膜則可產出濁度低於 1 NTU且 SDI 低於 2.5 之過濾水，回收率達到 90% 以上。在同等比較水準上，平板膜產水量較高，中空纖維膜產水水質較佳，但都能符合後續 RO 系統需求。

脫鹽系統部分， RO 系統採two-pass方式全自動運轉，進水和出水流量設計為 10 CMH和 5 CMH，試驗過程可產出 TOC 低於 500 $\mu\text{g/L}$ 且導電度小於 100 $\mu\text{S/cm}$ （去除率 $>99.9\%$ ）之再生水。EDR系統方面，模組設計採二級二段，模組數量為 2 套，離子交換膜每組為 200 片，進流水質在導電度 $14,000$ $\mu\text{S/cm}$ 以下，產水水質可降至小於 $1,000$ $\mu\text{S/cm}$ 。但由於EDR進流水為 RO 系統之濃水，所以ROR導電度對EDR系統之水回收率有極大的影響，在淡水導電度 $1,000$ $\mu\text{S/cm}$ 之允收條件下，當ROR導電度大於 12 mS/cm時，平均水回收量約 21% ；ROR導電度介於 $8\sim 12$ mS/cm，則平均水回收量約 32% ，而ROR導電度小於 8 mS/cm時，平均水回收量可達 56% （圖 3.16）。

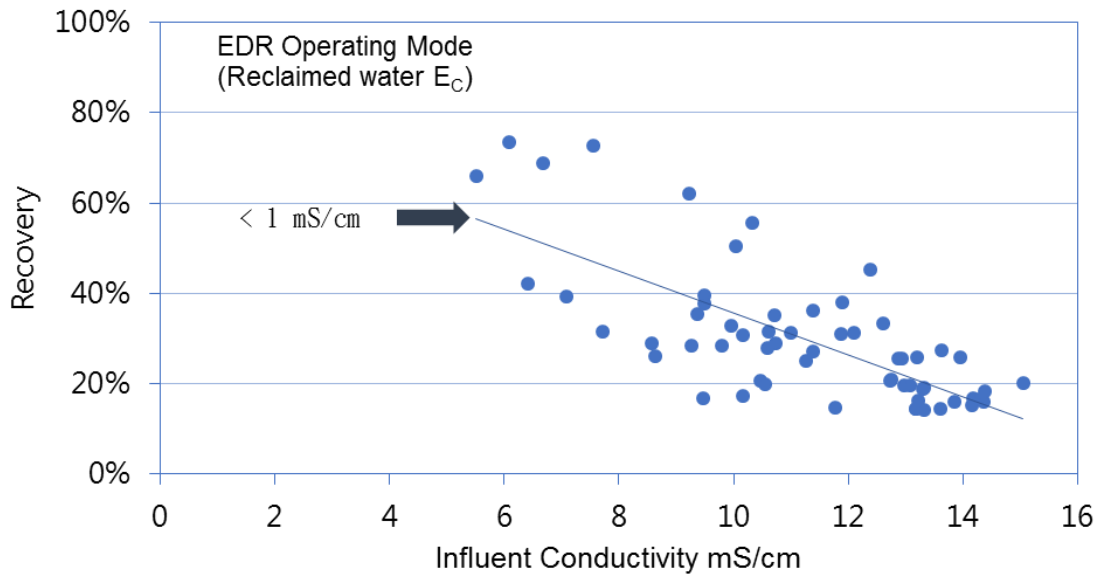


圖 3.16 EDR 系統進流導電度與水回收率之關係

水回收模廠以電費、藥劑費、膜材置換費和管理費等項目進行操作成本估算，整體產水成本為 26.5 元/m³ (參見表 3.7)，其中，在無高級氧化處理條件下，則為 20.9 元/m³。而現行常見之 UF+RO 系統，其在工業廢水脫鹽之產水成本約 22-28 元/m³，與本案水回收模廠差異不大，但前者水回收率較高(>65%)，而 UF+RO 系統用於工業廢水再生之水回收率通常<50%。綜合而言，臨海工業區水回收模廠試驗成果證實國內再生水產業之技術能量已不弱於國際水平，極具推廣價值。

表 3.7 水回收驗證模廠操作成本估算

編號	項目	每噸處理水單價(元/m ³)	備註
1	電費(a+b)	20.5	3 元/kWh
	a.生物前處理+脫鹽	14.9	-
	b.高級氧化處理	5.6	-
2	藥劑費	1	-
3	薄膜(UF 及 RO)置換費	2.5	-
4	管理費	2.5	40,000/人月
合計(1+2+3+4)		26.5	-

六、結論

石化產業為台灣重要的基礎產業，為其他產業提供製造所需原料及能源。近年來，由於地球溫室效應日趨顯著，全世界開始對各產業之溫室氣體排放及資源有效利用要求標準提高。傳統上，石化產業需要消耗大量能源及水資源以達有效生產之目的，因此與其他產業相較，溫室氣體排放量佔相當顯著之比重。因應全球對溫室氣體排放之管制，石化業尤需率先投入能資源有效利用，使製程逐漸達

到低碳排之要求。石化產業用水需耗費大量能資源淨化水質，如能節約用水，對溫室氣體減排將有明顯助益。綜合上述，建議如下：

- (一) 目前國內水再生法規漸趨完善，開發單位使用一定以上水量，強制使用 50% 以上再生水；另徵收耗水費，亦有鼓勵產業節約用水及使用再生水之目的。不過目前廢水處理及再生相關業務跨及多個政府部門，包括水利署、國土管理署、國科會、環境部及經濟部等單位，後續如何整合相關單位，更有效推動廢水再生業務，值得深思。
- (二) 廢水再生的核心技術為脫鹽程序，不同的脫鹽技術需求不同的能量消耗，相對的代表不同的排碳量，通常要得到較好的再生水質，需要的能耗也越高。因此，在規劃廢水再生時，應依需求水質規劃合適的脫鹽程序，除可以較合適成本獲得再生水，亦可減少碳排放。另外，廢水再生前處理為廢水再生成敗關鍵因素，在規劃脫鹽程序時，亦需使用相對應之前處理程序，才能達到廢水再生穩定運轉之目的。
- (三) 在水資源日益缺乏的今日，廢水不應該再被視為製造終端之廢棄物質，而是應該將廢水及所含成分視為潛在的資源。因此廢水處理不僅是處理至合乎排放法規，而是應將廢水處理當作廢水再生之前處理。藉由整合低能耗廢水處理及再生程序，將可有效降低廢水處理及再生之碳排，並降低系統成本與造水費用，提升水回收比率與再生水質，以達最終淨零排放之目標。

第四章 替代原料

根據 CDP 組織(carbon disclosure project) 2022 年報導的數據¹，化學產業總碳排中範疇 3 排放占了將近 77%，其中以外購原料碳排貢獻最大。Renewable Carbon Initiative (RCI) 2022 年的報告指出化學品的溫室氣體足跡約 2/3 來自於分子中的碳，而這些分子中的碳大多是透過原油、天然氣或煤炭等從地下提取的額外化石碳(fossil carbon)，最終會以 CO₂ 形式釋放到大氣中。隨著人口增加與文明發展，化學材料的需求會成長，因此用於這些有機化學品及其衍生材料內含的”碳”也將隨之增加。如果不阻止這些額外化石碳的持續提取和相關的 CO₂ 排放，就算能源已轉型為不使用化石燃料，仍將無法達到淨零的目標。

Renewable Carbon Initiative (RCI) 2022 年的報告指出化學品的溫室氣體足跡約 2/3 來自於分子中的碳，而這些分子中的碳大多是透過原油、天然氣或煤炭等從地下提取的額外化石碳(fossil carbon)，最終會以 CO₂ 形式釋放到大氣中。RCI 報告中，針對 2050 的淨零路徑，擘畫了完全以回收(55%)、生質基(20%)與 CO₂ 轉換(25%)的料源來取代化石碳源的情境(圖 4.1)。本章將介紹塑膠循環及生質基替代原料的相關技術與應用瓶頸。

Global Carbon Demand for Chemicals and Derived Materials
in 2020 and Scenario for 2050 (in million tonnes of embedded carbon)

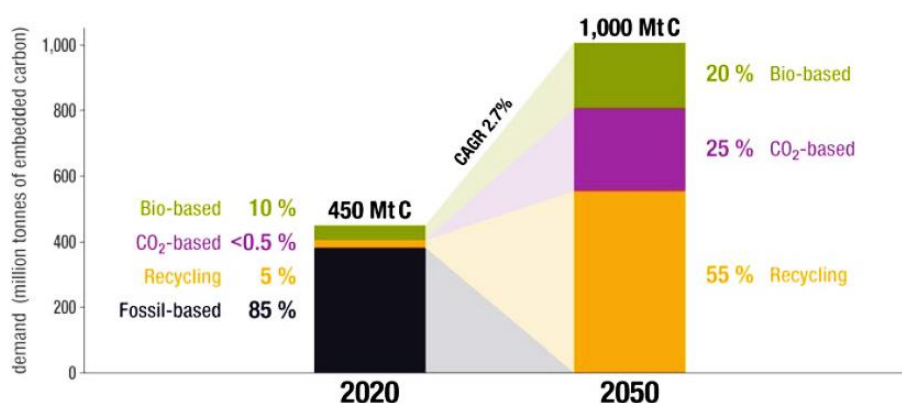


圖 4.1 2020 及預估 2050 年全球化學品及其衍生材料所需之內含碳的量及來源⁸⁷

⁸⁷ 資料來源: Renewable Carbon Initiative (RCI)

第一節 塑膠循環

塑膠自 1950 年代開始被大量製造與使用，目前全球每年生產約 3.9 億公噸的塑膠，然而將近 80% 的廢棄塑膠最終被以掩埋或焚燒處置，根據 Ellen MacArthur 基金會的研究報告統計⁸⁸，廢棄塑膠僅有 14% 會進入回收體系，而回到原本塑膠產品(閉循環)更只有 2%。因應 2050 淨零排放目標，全球主要國家皆提出相關的減碳策略與技術，台灣亦明確地將「資源循環零廢棄」項目納入十二項關鍵戰略中。近年來國際品牌大廠都陸續宣示採用回收或再生材料的時程以及減碳的里程碑，目前我國除推動廢棄物源頭減量並強化物理回收外，需要發展更精準的廢棄物分選技術及先進化學回收製程與再利用驗證，促進廢棄物轉換再生資源的循環經濟目標，並透過材料材質與產品的創新設計，提升回收品質與再利用率，達成最大化材料的生命週期。

一、智慧分選技術

台灣資源回收效率高居全球第二，僅次於德國，尤其在寶特瓶回收及再利用比例已達到 95% 以上，是一成功循環經濟的案例。但有許多不同應用的塑膠廢棄物循環回用比例仍低，有待技術積極發展及產業鏈結來突破困境，打造零廢棄的資源永續循環的目標。

剖析塑膠循環的五大流程，分別是收集、分選、處理、再生及產品化，再回到消費者手中。塑膠是屬於人為製造的高分子，而高分子是由小分子單體聚合而成，原料來自石油化學品，如果將廢棄塑膠要再重製成新塑膠，國際上大部分採用物理回收或化學回收方法，物理回收要求高純度料源，較適合單一材質塑膠，而化學回收會將高分子裂解回小分子單體，再經純化處理，對料源純度要求較寬鬆。然而兩種回收方式都需要將廢棄塑膠進行分選，惟要達到物理回收的要求，更需導入先進的分選技術。因此，再生前的料源分選技術是決定後端再生途徑的重要關鍵(圖 4.2)。

⁸⁸ 資料來源: <https://ellenmacarthurfoundation.org/plastics-and-the-circular-economy-deep-dive>

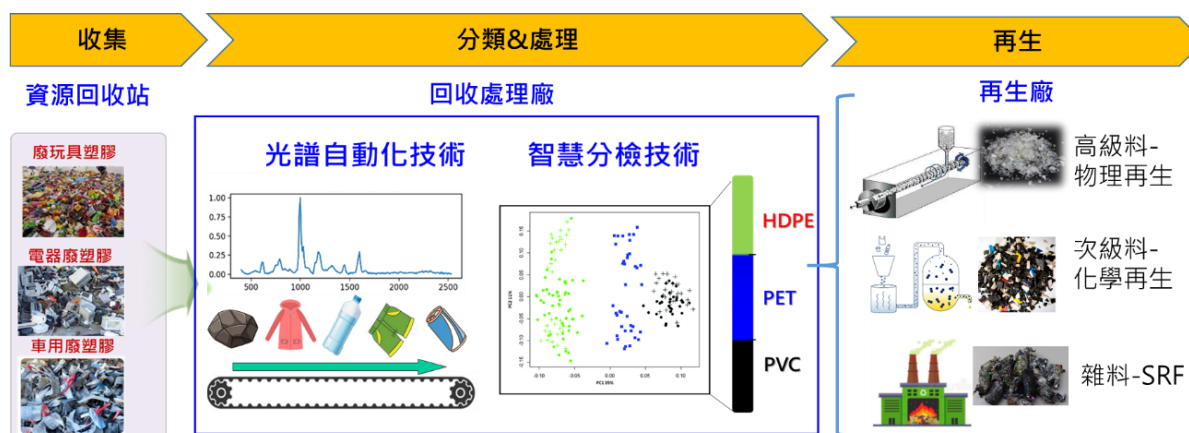


圖 4.2 分選料源品質，決定再生途徑的最適化

以下簡要介紹三種常使用在塑膠分選的光譜技術，分別為近紅外光反射光譜、拉曼散射光譜及雷射誘導擊穿光譜。

1. 近紅外光反射光譜技術: 主要量測 $-CH$ 、 $-OH$ 、 $-NH$ 三種分子尾端官能基振動光譜，此技術因為訊號強，分選速度快，主要用在單一材質塑膠，目前已廣泛應用於塑料檢測和識別，國際上有多家公司如 Tomra、Valvan 等販售商用化產品，目前國內瓶罐分選主要採用這技術，輔以後端人工挑揀雜質，透過优化的分選流程，分選材質純度已經可以達到 99% 以上，缺點是對於異材質及深色塑膠分選精確度低，應用會局限在部分塑料分選領域。
2. 拉曼散射光譜技術: 使用雷射光與樣品分子碰撞後發生了能量交換，光子將部分能量誘發高分子的振動，透過光譜分析，獲得高分子的材質。此技術因為解析度高，主要用在混合塑膠的分選上，缺點是訊號較弱，分選速度較紅外光反射光譜慢，需要有特殊光學設計，來彌補分選速度的不足，目前國際上相關產品較少。
3. 雷射誘導擊穿光譜技術: 利用高能雷射轟擊材料表面產生高溫，表面原子游離成激發態後放光回到基態，藉由收集原子放光光譜，獲得材料資訊，此技術因為感度高，主要應用在深色及具有添加劑的塑膠材質上，缺點是目前缺乏塑膠材質的辨識演算法，需要進一步的開發。國際上主要是用在煤炭、陶瓷及金屬的品質鑑定，尚未為有針對塑膠分選的產品。

以紡織品回收為例，全球成衣年產量超過一千億件，其中聚酯纖維約占全球纖維產量的 44%，高達 5,400 萬噸，目前纖維回收再製比例不到 2%，大部分仍仰賴石化原料的供給，難以達到產業自給自足的內循環目標。2018 年初，在 Global Fashion Agenda 的號召下，全球知名大廠承諾在品牌廠增加回收聚酯(recycle PET, rPET)的使用量，規劃到 2030 年 rPET 使用率達 100% 全回收目標，影響 200 億美元的經濟產值。紡織品使用的纖維材料種類太多元，因不同的機能性用途，採用混紡纖維，大幅增加了織物回收分類的困難性，工研院採用拉曼散射光譜，特殊

光學設計，突破過去該技術分選速度的不足，挑選的聚酯纖維的純度>95%明顯優於國際上競爭廠商(fibersort) 82%，分選產量每台設備達 7,000 噸/年，與 fibersort 相當，非常適合用在紡織品的回收分類上，該技術入圍 2022 年 R&D100，獲得國際肯定。對於深色及具添加劑的塑膠，工研院開發出雷射誘導擊穿光譜分選技術，可準確分篩具阻燃劑或玻纖複合材料，並同步辨識塑膠組成，優化的光學系統及演算法開發，可以針對廠商的場域需求，做客製化設計，提升料源分類純度，可應用在電子、電器、車用塑膠的分類。

再生塑料是具有戰略價值的商品，高純度分類意味著塑料可以重複使用並保留其價值。歐洲環境諮詢公司 Eunomia 在 2017 年對 400 多家塑料加工商進行一項調查顯示，供貨品質和可靠性是使用再生塑料的主要障礙，規劃塑料收集計畫有助於提高分類產量，呼籲整個歐洲為高品質分類製定標準，透過精準分類技術，提供再生業者高品質的綠色料源。國內公告回收廢棄物，尤其是瓶罐回收，已逐步形成產業鏈，寶特瓶再製成高價值紡織品已是成熟技術，目前透明瓶片所製成的聚酯酯粒價格已經高於石化來源，證明只要有合適的分選及再生技術，廢棄物也能變黃金。

二、廢塑膠化學回收

廢塑膠化學回收轉化為石化基礎料源被國際視為可解決現有物理回收量能有限以及再生產品品質不佳的關鍵發展技術項目。現階段廢塑膠的化學回收技術主要包含利用熱裂解將其轉化為最上游的輕油或是合成氣的大循環，以及解聚回原塑膠單體兩大類。依據不同廢塑料源的特性與複雜程度有其適合的循環途徑，以下將針對各化學回收技術發展與現況進行說明。

(一) 廢塑膠裂解轉化為再生輕油

台灣包含聚乙烯(Polyethylene, PE)和聚丙烯(Polypropylene, PP)的聚烯烴年產量高達 260 萬噸，廣泛應用至各式包材，目前除了特定的牛奶瓶等容器有較完整的物理回收外，其餘廢棄物多以混合廢塑膠進行焚化處理。而廢塑膠的熱裂解是一種針對難以回收塑膠的化學回收手段，塑膠在無氧加熱條件下可於特定溫度範圍內進行裂化反應，使其分子結構產生斷鍵，形成涵蓋了不同分子量之氣態、液態與固態焦炭等產物。一般而言，裂解後產物成分與廢塑膠本身的組成與結構息息相關，PE 與 PP 因擁有大量直鏈或分支碳氫烷鏈，裂解溫度約 490°C，裂解產物以脂肪族的烷烯烴為主；聚苯乙烯(polystyrene, PS)則因含苯環結構而較易產出芳香烴化合物，起始裂解溫度約為 400°C。因此，當所收集廢塑膠愈為混雜時，

進行熱裂解反應時不易選擇較適化反應溫度，其產物組成也愈趨複雜，將影響其利用價值，因此廢塑裂解油目前多作為低階鍋爐燃油使用(圖 4.3)⁸⁹。

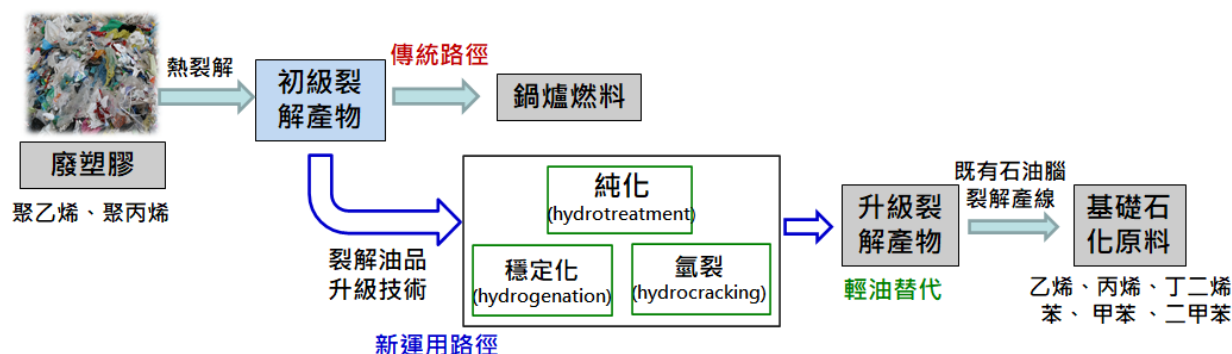


圖 4.3 廢塑膠產製輕油的新應用路徑

為因應全球減少原油開採的去碳化趨勢，包含 SABIC、Chevron、IFP、BASF 與中國石油化工等國際領導廠商皆投入裂解油轉化輕油(Naphtha)技術，期望透過裂解油品升級技術，使其品質提升至符合現有輕油裂解的入料規格，以接續既有石化製程，產製低碳乙烯、丙烯等基礎烯烴料源。然而，裂解油是否可用作輕油料源的關鍵，在於油品所含之雜質、飽合烴組成與碳數分佈。目前初級裂解油在前述項目皆無法符合現有輕油規格，需進一步藉由純化除雜、氫化飽和以及裂解碳數調整等多道處理程序，才能作為輕油裂解料源。在廢塑裂解油升級轉化輕油技術方面，現有裂解觸媒製程需在相對高溫(>450°C)下進行，因而產生較多過度裂解之氣態產物；此外，為避免裂解反應積碳，需藉由先氫化再裂解等反應過程，更增加製程成本與複雜度，而在觸媒設計上，由於裂解產物多具有雜原子(S、N、O、金屬等)，觸媒需具有基本抗毒化特性，為化學回收領域的關鍵技術。

而在國際發展與關鍵技術佈局上，IFP 與法國 Axens 及西班牙 Repsol，共同合作開發名為 Rewind™ Mix process 的裂解油升級技術，此技術包含純化去雜、穩定化與碳數分布調整，使產物可以直接進入現有石化裂解製程，生產烯烴單體⁹⁰；此外，IFP 並布局以蒸餾/萃取/裂解/異構化等方式調整裂解產物組成與對應之觸媒技術⁹¹。Chevron、SABIC 與中國石油化工則主要布局包含以過渡金屬/金屬氧化物等多組成觸媒與載體設計的觸媒技術，以氫化處理純化裂解後產物後，再

⁸⁹ 張志強，全球石化及化學產業相關之減碳技術與近期發展狀態 -廢塑膠化學熱裂解技術，IEK Consulting，2022.10.17.

⁹⁰ <https://www.ifpenergiesnouvelles.com/article/repsol-axens-and-ifpen-develop-new-process-boost-circular-materials-production>

⁹¹ FR3103822B1, 為了在蒸汽裂化單元中使用塑料熱解油而對其進行處理的方法, IFP; FR3107530B1, 處理塑料熱解油以改善其用途的優化方法, IFP; FR3113060A1, 含兩步加氫裂解之用於處理塑膠熱解油之方法, IFP.

以蒸餾/氫化裂解/氫化等方式調整裂解產物組成⁹²。近期 SABIC 與英國 BP 合作，使用先進回收技術將劣質混合塑膠和轉化為裂解油後，於 BP 的煉油場進行加工，以生產經認證之名為 TruCircle™ 的可回收產品，此可回收產品的材料，有和原始聚合物相同特性，並可重複進行回收而不會損失任何特性⁹³。Chevron 於 2023 年與美國 Nexus circular 公司合作，由 Nexus circular 提供與原始石化料源品質一致的單體料源，給 Chevron 公司進行再生聚乙烯生產 (MarlexR Anew™ Polyethylene)，預計 2030 年可生產 10 億噸再生聚乙烯⁹⁴。ExxonMobil 提出先進化學回收技術 (Exxtend™ technology)，可將廢塑膠打斷成分子級別的組成單元，同時去除污染物⁹⁵；該公司與 Agilyx 共同組建的合資公司 Cyclyx International LLC，著力開發用於收集和預處理大量廢塑膠的創新型解決方案⁹⁶。BASF 則分別與挪威 Quantafuel 公司以及 ARCUS 進行合作，於杜拜及德國建置年產數萬噸級之裂解廠，以拓展 BASF ChemCycling™ 業務⁹⁷。

在整體關鍵技術布局上，為有效進行裂解油升級，首要技術著重在觸媒的研製，除利用多效觸媒設計能於較溫和條件下完成氫化/氫裂反應以進行碳數調整與提升選擇率，並降低積碳以延長壽命外，亦須針對裂解油除雜技術進行開發。

(二) 氣化產生合成氣

廢塑膠的熱裂解程序除了可產生以液態為主的烯烴產物外，亦可透過處理溫度或與其他製程技術結合將其氣化形成合成氣(CO+H₂)，合成氣必須連結後段製程產出化學品，因此氣化製程被視為廢塑膠回收再利用製程的中間程序。

⁹² SG162515B, Process for preparing a pour point depressing Lubricant base oil component from waste plastic and use thereof, Chevron ; KR2012103544A, Hydroprocessing catalyst and method of making the same, Chevron ; EP2847302B1, Process for making high vi lubricating oils, Chevron ; US10,738,246 B2, Process for producing aromatics from a heavy hydrocarbon feed, SABIC ; USB10865348, Processing which does simultaneous dehydrochlorination and hydrocracking of pyrolysis oils from mixed plastic pyrolysis while achieving selective hydrodealkylation of C9+ aromatics, SABIC ; US20190055482A1, An integrated process for increasing olefin production by recycling and processing heavy cracker residue, SABIC ; CN 114806632A, 一種廢塑料油和/或廢舊輪胎油生產車用燃料的方法和系統, 中國石化公司 ; CN115487838A, 一種加氫脫氯催化劑、催化劑體系和高氯含量廢塑料裂解油的加氫精製工藝方法, 中國石化公司.

⁹³ https://www.sohu.com/a/456447998_825950

⁹⁴ <https://www.recyclingtoday.com/news/chevron-phillips-chemical-nexus-circular-sign-plastic-feedstock-agreement/>

⁹⁵ <https://www.exxonmobilchemical.com/en/exxonmobil-chemical/sustainability/advanced-recycling-technology/exxtend-technology-q-and-a>

⁹⁶ <https://www.agilyx.com/news-events/>

⁹⁷ <https://www.basf.com/global/en/who-we-are/sustainability/whats-new/sustainability-news/2021/basf-quantafuel-and-remondis-want-to-cooperate-on-chemical-recycling-of-plastic-waste.html>

氣化是在有限的氧氣下所進行的一種熱裂解過程，透過不同的氧化劑與反應溫度和操作條件的選擇，可發生不同程度的氣化反應。中溫氣化溫度範圍約為 900-1,650°C，而低溫氣化的溫度則為 700-900°C，而使用的主要氣化劑為空氣、蒸氣和氧氣。氣化製程的主要優點之一為能夠處理所有類型的塑膠物和幾乎所有由有機材料組成的進料⁹⁸，儘管該技術可以處理混合和污染的塑料，但仍然需要穩定的進料成分，因此仍須包含廢棄物分類、篩選等預處理步驟。

而在廢塑膠轉合成氣技術發展上，亦可藉由結合重組反應器進行製程設計。第一階段先將塑膠熱裂解為較小分子的碳氫化合物，再接續使用觸媒催化蒸汽重組。在設計反應器時，兩階段可為各自獨立的反應器，以利於能分別控制反應參數，並優化熱裂解及蒸汽重組反應。於第二階段反應器進行重組反應時，可進一步分為直接進行蒸汽重組反應、二氧化碳進行乾式重組反應、蒸汽及二氧化碳進行雙重組反應以及利用氧氣形成部分氧化重組反應等四種型式以提升合成氣產率。Enerkem 公司為少數進入量產階段的公司，該公司於加拿大所建立量產工廠，每年能夠處理約 10 萬噸廢棄物，只需不到五分鐘的時間就能將廢物產生合成氣體，並將其轉化為甲醇與乙醇等低碳燃料⁹⁹。

(三) 化學回收得到循環再生單體

廢塑膠的化學回收成為現今國際循環技術的一個重大挑戰，除前述將混合廢塑膠透過熱裂解轉為輕油等最上游石化原料外，將特定塑膠轉化為其原始單體則是另一發展重點，可依據不同塑膠材料本質特性區分為熱裂解以及透過轉酯化水解等兩大類處理程序。

熱裂解是一種通過高溫處理來分解物質的過程，目前可透過熱裂解產製單體的塑膠系統包含聚苯乙烯(PS)以及聚甲基丙烯酸甲酯(polymethyl methacrylate, PMMA)，PS 熱裂解的主要產物為苯乙烯單體(styrene monomer)，而 PMMA 裂解的產物則為甲基丙烯酸甲酯(MMA)。此類回收單體可經收集與純化後再製成新的高分子，實現循環再用，達到減少塑料浪費和對環境的影響。國際上能見度較高的裂解系統包含螺桿壓出機、流體化床、微波輔助連續攪拌器及迴轉式窯爐。

1. 苯乙烯單體(PS)

針對 PS 熱裂解技術，螺桿押出機系統開發者包含美國 Agilyx、韓國 KRICT 以及德國 KIT 等，裂解溫度介於 550~750°C，特色在於透過螺桿傳動將裂解過程中產生的固體殘渣排出，可避免積碳，達到連續生產的目的。Agilyx 宣告的試量產產能可達 100 噸/天，其合作對象包含 INEOS Styrolution、

⁹⁸ <https://enerkem.com/feedstock/flexibility/>

⁹⁹ <https://enerkem.com/process-technology/carbon-recycling/>

Trinseo、Amsty、TOTAL、Toyo Styrene、Kumho 等 PS 製造或使用大廠，為現今最接近商業化運轉的製程技術¹⁰⁰。流體化床系統開發主要包含德國 BASF 與英國 Recycling Technologies，裂解溫度介於 500~700°C，透過高熱氮氣與導熱床砂，可在短時間內將 PS 裂解氣化，再經旋風分離器、靜電除塵、冷凝捕獲等單元整合，產製出含有苯乙烯單體的裂解油。然而因物料需滿足流體化狀態，氣體耗用量大，且氮氣須先行預熱，相對較耗時耗能。Recycling Technologies 產能為 25 噸/天，主要合作對象有 INEOS Styrolution、Trinseo，並與 Synova 將在比利時 Tessenderlo 建造年處理量 1.5 萬噸的熱裂解裝置¹⁰¹。

近期有許多微波輔助熱裂技術的研究成果發表，著眼於其高效率的電熱轉換以及快速升溫特性，可降低製程能耗，目前多以學研機構發表為主，技術成熟度相對較低。加拿大 Pyrowave 屬於此項技術的早期開發者¹⁰²，以連續攪拌槽反應器為基礎，外罩微波加熱模組，搭配碳化矽作為微波吸收劑在相對低的溫度(350~500°C)進行熱裂解，處理量 2 噸/天，並與 INEOS Styrolution、Trinseo 與 TOTAL 展開合作。

2. 對苯二甲酸二(2-羥乙基)酯(BHET)

聚對苯二甲酸乙二酯(Polyethylene terephthalate, PET)為目前最為廣泛使用的塑膠之一，全球年需求量高達 7,200 萬噸，主要應用至寶特瓶等食品包裝與紡織產業。然而，除了瓶裝容器經長達 20 年以上的回收機制與循環技術能量的建立，迄今全球僅有 4 成以上的瓶裝用聚酯已經由物理回收導入聚酯循環鏈外，其他 PET 產品因成分複雜與回收分類的困難，難以進行有效的循環利用。《氣候行動時尚產業憲章》提出 2030 年在包裝材以及紡織的回收比例需求，現有寶特瓶的物理回收總量並不足以支撐整體循環聚酯市場，經化學回收產製再生單體是補足材料缺口的關鍵。

化學回收技術透過化學反應將其高分子結構進行斷鍵以形成可再聚合的單體。PET 的化學回收製程上主要依據解鏈劑的不同進行分類，大致可區分為甲醇解(methanolysis)、醇解(glycolysis)、水解(hydrolysis)、胺解(aminolysis)以及生物酵素解聚。其解聚反應顯示如圖 4.4¹⁰³。甲醇與 PET 在高壓和高溫下

¹⁰⁰ <https://www.agilyx.com/trustyrenyx/>; <https://www.sustainableplastics.com/news/ineos-styrolution-agilyx-build-ps-recycling-plant-us>

¹⁰¹ <https://www.agilyx.com/trustyrenyx/>

¹⁰² <https://www.sustainableplastics.com/news/trinseo-chemical-recycling-plant-progressing-schedule>

¹⁰³ Sheel and D. Pant, 4 - Chemical Depolymerization of PET Bottles via Glycolysis, Recycling of Polyethylene Terephthalate Bottles, 61-84 (2019); Chemical Recycling of PET, PEP Report 199D, HIS Markit, Aug 2019; <https://www.loopindustries.com/en/technology/environmental-impact>; <https://www.jeplan.co.jp/en/>; <https://ioniqa.com/>; <https://garbo.it/>; <https://www.demeto.eu/press-area>

進行酯交換反應，形成對苯二甲酸二甲酯(dimethyl terephthalate, DMT)和乙二醇(ethylene glycol, EG)。DMT 因沸點相對較低，因此可利用蒸餾進行提純，但在現有 PET 量產製程上，幾乎已無使用 DMT 作為原料，因此相對較難直接進行使用。國際上目前仍有 Eastman 與 Loop Industries 公司投入此技術的開發，其中 Loop Industries 宣布與 Indorama Ventures 成立合資企業，通過改造 Indorama 在美國東海岸的現有工廠，該工廠預估年產能可達到 20,700 噸，其生命週期評估報告指出當採用 Loop 技術所製備而得的 PET 可減少近 75% 能耗、58% 煙霧釋放以及~60% 溫室效應影響性¹⁰⁴。PET 水解製程可將 PET 轉為 TPA 與乙二醇，雖 TPA 為目前 PET 生產的基礎原料，但該製程較大的技術困難點除了需在高溫高壓條件下進行外，更面臨大量廢水以及 Na₂SO₄ 副產物去化的問題。目前國際上僅瑞士 Gr3n 公司投入該技術之研發。乙二醇醇解製程為目前 PET 解聚技術中最被廣泛研究的方法之一，主要透過過量乙二醇做為解鏈劑，可在 180-220°C 之常壓條件下進行解聚反應，整體製程與設備需求較為單純，解聚產物主要為對苯二甲酸二(2-羥乙基)酯(Bis(2-Hydroxyethyl) terephthalate, BHET)，目前國際上投入醇解製程技術開發的廠商較多，包含 JEPLAN、Ioniqa、Cumapol、Garbo、樹業環保等，分處不同發展階段。相較於 DMT，BHET 可直接導入現有 PET 生產製程技術，有利於聚酯廠投入相關製程開發與整合。BHET 的純化可以藉由過濾、脫色、離子交換以及在結晶等多種程序設計，或是結合多步真空精餾/分子蒸餾來進行，但由於 BHET 高沸點特性，使其欲經蒸餾製程進行純化較為困難。目前採用醇解製程較具規模化的國際領導廠商為日本 JEPLAN 公司¹⁰⁵，在日本荻町建立以回收瓶片為料源的醇解製程回收工廠，最大產能達 27,500 噸，開發之專利導入分子蒸餾技術改善 BHET 產品的純度與色度。Garbo 則開發了一種稱為 ChemPET® 的化學回收技術¹⁰⁶，關鍵創新技術為 BHET 的回收和純化，可處理目前無法回收的 PET 廢料，並與 Chemtex Corporation 進行合作，在義大利建立一商業規模的 PET 回收工廠。國內包含遠東新、南亞塑膠以及新光合纖等聚酯廠亦因應國際發展趨勢，各自投入初期化學醇解技術的研發。

¹⁰⁴ <https://www.loopindustries.com/en/technology/environmental-impact>

¹⁰⁵ <https://www.jeplan.co.jp/en/>

¹⁰⁶ <https://garbo.it/>

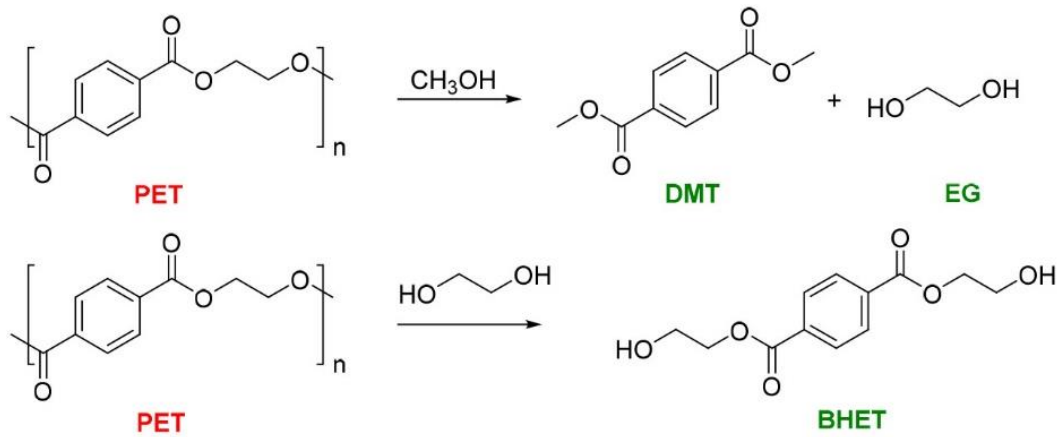
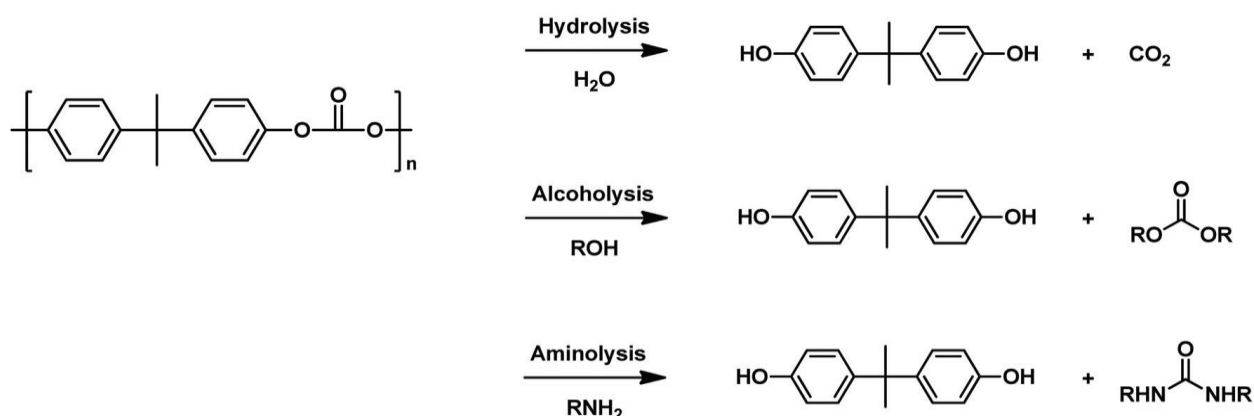


圖 4.4 PET 之甲醇與醇解解聚反應式

3. 雙酚 A

雙酚 A (Bisphenol A, BPA) 則為近期另一獲得關注的再生料源之一，由於雙酚 A 為聚碳酸酯 (polycarbonate, PC) 與環氧樹脂的關鍵原物料，能廣泛應用至光學板材、印刷電路板等產業，且台灣具有完整的產業鏈，除國內 BPA 產能高達 79 萬噸/年外，也為全球重要的聚碳酸酯及環氧樹脂的供應國，在整個下游應用鏈中也扮演極重要的角色，但目前國內尚未有回收 BPA 料源，因此國內產業亟須發展 rBPA 材料與製程技術以因應下游品牌對碳中和訴求。

而在 BPA 的化學回收技術上，由於環氧樹脂合成已透過 BPA 與環氧單體進行開環交聯，因此欲經由斷鍵回至 BPA 單體的困難度大，故仍以具有可進行轉酯化反應的廢 PC 為主要料源。現階段針對 PC 所提出的化學解聚製程包含水解、醇解與胺解 (Aminolysis) 等，皆能透過碳酸酯基的斷鍵產製 BPA 單體 (圖 4.5)。考量經濟效益與可量產性，更集中在水解與醇解的兩種反應技術開發。水解法可使 PC 的碳酸酯鏈分解成 BPA 和碳酸，雖然將水作為反應試劑較為環保，但此製程需要高溫高壓條件才能達到高反應轉化率，高能耗與高設備需求將造成製程成本偏高而不易實現大規模量產。醇解法則是將 PC 與醇反應生成 BPA 和有機碳酸酯，醇解反應效率較高，若搭配適當的觸媒與溶劑，有機會在較低的反應溫度下實現 PC 解聚，故醇解法是現行最有機會達成低耗能且具經濟效益的 PC 化學解聚技術。

圖 4.5 PC 化學解聚製程¹⁰⁷

全球經由化學回收產製 BPA 之技術仍處於研發階段，包含帝人株式會社 (Teijin)、SABIC 與 BAYER 等國際大廠皆已佈局相關 PC 解聚製程專利，但目前尚未進入量產階段。SABIC 在 2021 年首先透過將混合塑膠分解成熱解油，進一步反應至苯、酚等原料，後續再合成出回收 BPA，並成功推出經認證的循環 PC，其宣稱碳足跡相較於現有產品可減少高達 23%¹⁰⁸。然而，SABIC 的技術缺點在於混合塑膠裂解技術製程步驟繁瑣，這過程中的高能耗與副產物的純化分離技術使其在成本與量產技術面臨挑戰。作為國際先進材料供應商的科創 (Covestro) 公司於 2023 年發布在 PC 化學回收技術得到顯著的進展¹⁰⁹，並於德國勒沃庫森的工廠進行了試量產技術之測試驗證，以做為未來量產製程設計之參考。日本三菱化學集團 (MCG 集團) 於 2022 年在日本環境部計畫經費資助下，啟動 PC 化學回收技術研究，目標尋求成為世界上第一個將 PC 樹脂化學解聚技術商業化的公司，且於 2030 年實現每年約 1 萬噸量產規模的生產，計劃於 2023 年於福岡工廠完成化學回收驗證設備建置¹¹⁰。預計隨著電子、塑膠等產業對於關鍵循環物料與低碳轉型，PC 化學解聚與循環 BPA 之市場需求將會顯著成長。

在料源選擇上，目前較高純度的廢 PC 已建立物理回收產業鏈，但針對污染程度較高的廢 PC 以及 PC/ABS 複合材料，現因無法物理回收而只能焚化處理，將來有機會成為再生 BPA 的料源。在技術方面，雖醇解製程可將 PC 進行解鏈，但尚未有完整的 BPA 純化製程技術以生產高品質聚合級 BPA。

¹⁰⁷ Kim, J. gon. (2020). Chemical Recycling of Poly(Bisphenol A Carbonate). *Polym. Chem.*, 11, 4830-4849. <https://doi.org/10.1039/c9py01927h>

¹⁰⁸ <https://www.sabic.com/en/news/30235-sabic-first-in-industry-to-launch-circular-polycarbonate-produced-from-post-consumer-mixed-plastic>

¹⁰⁹ <https://www.covestro.com/press/chemical-recycling-of-polycarbonates-reaches-a-major-milestone/>

¹¹⁰ Kim, J. gon. (2020). Chemical Recycling of Poly(Bisphenol A Carbonate). *Polym. Chem.*, 11, 4830-4849. <https://doi.org/10.1039/c9py01927h>

因此，針對較為複雜的 PC 與 PC/ABS 混合廢料源，若能及早布局具低能耗特性之低溫常壓化學回收技術，以及異材質分離程序與純化/精煉技術，建構高品質之低碳聚合級 BPA 循環料源能量，將能協助國內業者降低對於石化 BPA 之需求，實現低碳循環料源自主化與提升環氧樹脂與聚碳酸酯等產業鏈競爭力。

(四) 循環聚酯轉化彈性體技術

縮聚高分子除透過化學解聚製程形成再生單體以進行後續循環利用外，亦可直接透過解聚與新單體導入之縮合程序以將回收塑膠轉化成高值化機能性材料。針對聚酯材料系統，熱塑性聚酯彈性體(Thermoplastic Polyester Elastomer, TPEE)為符合環境 3R(reduce、recycle、reuse)趨勢之高值化材料。組成由短的剛硬鏈段(結晶相)和長的軟鏈段所構成的共聚高分子，因特殊的化學結構，使同時具有橡膠的彈性、柔軟性和熱塑性樹脂的剛硬性和易加工性。其化學與物理性質由高分子的軟硬鏈段結構和組成決定，彈性與強度介於塑料和橡膠之間。

典型的熱塑性聚酯彈性體，其結構組成是以聚對苯二甲酸丁二酯(Poly(butylene terephthalate), PBT)做為硬鏈段，並連結提供柔軟性的聚四氫呋喃(Poly(tetramethylene oxide), PTMEG)做為軟鏈段，在微觀結構(圖 4.6)，結晶態的 PBT 鏈段會分散在由軟鏈段 PTMEG 和硬鏈段非結晶態 PBT 所組成的無定型區域(amorphous domains)內，因熱力學不相容性形成微相分離的結構。結晶態硬鏈段所形成的區域，是結構中的物理交聯點，提供材料形變時的尺寸安定支撐點，其比例越高，材料的硬度、機械強度、耐熱與耐溶劑性等性質就越好，而材料的彈性及低溫撓曲性則是受無定型軟鏈段的比例決定。

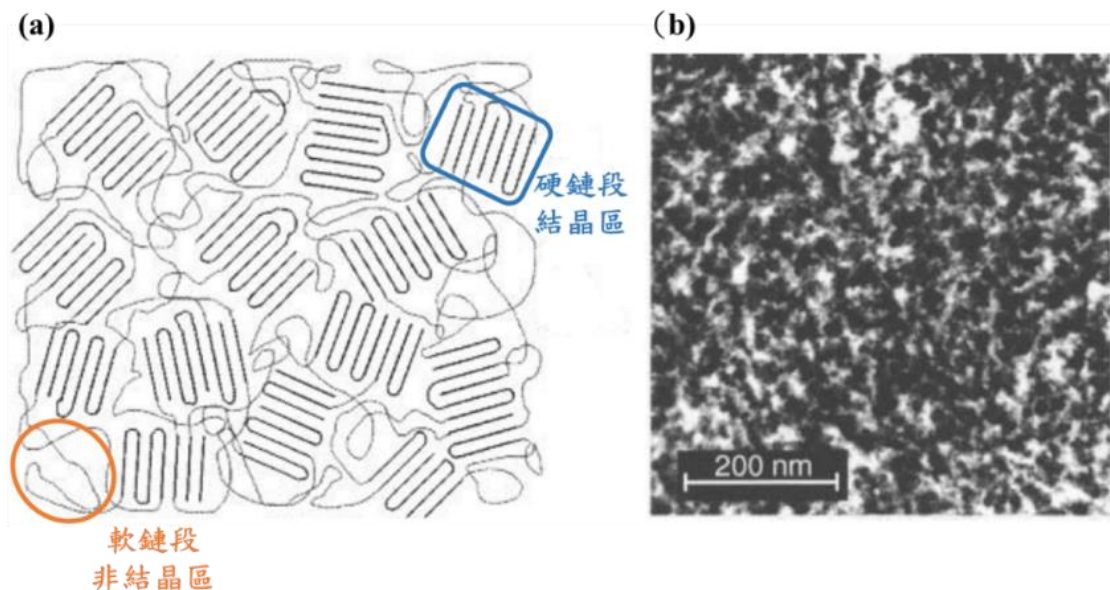


圖 4.6 熱塑性聚酯彈性體的(a)微觀形態示意圖，以及(b)膜材 TEM 影像

傳統的機能織物(防水透濕、彈性)及運動鞋材產品由異材質所構成，廢棄物因拆解與分離困難導致回收不易，最終只能以焚燒處理。使用可回收之 TPEE 有利於產品循環再利用，TPEE 將逐漸成為替代傳統熱固材料之材料。根據 Grand View Research 市調的統計，2021 年全球 TPEE 市場規模估計達 14.7 億美元，預計至 2030 年，年複合增長率(CAGR) 可達 5.2%，廣泛應用於汽車零部件、電子工業配件、3C 線材、運動器材和民生消費等領域。受到各國政府與國際品牌大廠提出減碳的時程表與里程碑後，開始要求其供應鏈需降低碳排放，促使國內外樹脂廠積極佈局以回收 PET(碳排：0.35 kgCO₂e/kg)取代對苯二甲酸(PTA，碳排：1.76 kgCO₂e/kg)之低碳 TPEE 製程技術。國際上以 Sabic 公司最早投入，於 2010 年發表 PBT-PTMEG 製程專利，國內則有遠東新於 2015 年針對防水透濕膜應用發表 PBT-PEG 結構之循環製程專利。力麗 2022 年發表 PET-PTMEG 組成，應用於防水透濕膜、長纖維及射出或射吹成型件等領域。與新料製程相比，碳排可減少約 10%。為強化減碳力道，除透過回收料的循環製程外，更可進一步結合生質料源持續降低材料碳排放量。在高值化聚酯彈性體的應用產品設計，可搭配結構設計使其成為鞋中底用發泡材，同時可結合改質製程開發止滑耐磨之鞋大底材料，除料源減碳可達 20% 以上，並透過單一聚酯可回收鞋的設計組裝，可減少廢棄物焚燒所產生的碳排，有效降低產品生命碳足跡。

三、同系列材質包裝設計

全球塑膠包裝有 95% 一次性使用後即丟棄，其中僅 2% 能循環回用於包裝材，這是由於市售包裝種類繁多，其中軟性塑膠包裝參雜並貼合許多異質材料，使得消費者無法直觀分類，導致絕大部分軟性塑膠包裝都作為一般垃圾丟棄，最終進到焚化爐處理而造成大量碳排。為達到 2050 歐盟淨零碳排目標，近年歐盟軟包裝循環經濟組織(CEFLEX)結合歐洲各大上中下游產業鏈針對包裝材料重新進行設計，除了主打軟性包裝取代現行硬質包裝，達到減少運輸空間及產品包裝比，亦同時推行材料單一化，包含 Dow、Toppan、Sumitomo 等國際大廠均在 2023 德國 Interpack 國際包裝展上，展出以聚乙烯為主體材料的單一化軟性包裝，並符合 CEFLEX 制定之可回收單一包裝條件：大於 90% 材料為單一材質，其他功能性材料單項不超過 5%。

聚乙烯(PE)單一化包裝設計優勢在於回收次數優於聚丙烯(PP)，且 PE 物理回收加工溫度低於 PP，可維持較良好的回收料物性，因此 PE 單一材質包裝的技術開發及拓展應用市場成為現階段包裝減碳的關鍵。工研院材化所針對單一化軟性包材進行技術解析，發現國際大廠在包裝結構中，特別開發出延伸級 PE 薄膜，用以取代現行軟性包裝常用之 PET 或 OPP 薄膜。工研院材化所希望在技術上能帶領國內包裝廠商進行相關技術開發，因此近年逐步投入單向與雙向延伸聚乙烯(MDOPE/BOPE)薄膜的原料配方開發，並持續與包裝廠商密切合作，期望不僅能在國內提供低碳包裝，亦可在國際包裝市場上佔有一席之地。

四、石化產業結合資源回收業之實務案例¹¹¹

廢塑膠的封閉循環再利用，橫跨廢棄物收集分類、再利用轉換、純化煉製等過程，因此牽涉政府廢棄物管理制度、廢棄物回收清除處理、石化煉製業者、塑膠製造業者、品牌產銷業者，乃至於再生料認證業者之間的合作。資源回收產業可說是串起塑膠封閉循環的關鍵角色，因此無論是石化業者、塑膠製造業者、終端消費品牌業者，在推動淨零減塑的合作策略上，皆與資源回收產業有所連結。

以下舉例說明：(1)石化產業如何利用新技術導入塑膠回收分選，並與政府、廢棄物管理與再利用公司合作，以鎖定、擴大廢塑膠料源；(2)石化產業與品牌業者合作，建立回收通路，共同達成塑膠封閉循環；(3)國際石化大廠與化學回收技術業者合作，將廢塑膠轉化為再生油品或單體；(4)導入資源回收機的新商業模式，擴大民眾參與減塑減碳；(5)石化業者投入參與永續認證新技術開發。

(一) 石化業者競業/異業結合，與政府部門強化料源供應鏈

1. 石化業競業/異業合作穩定廢塑膠料源

國際石化大廠在料源開拓方面進行跨業、甚至競業合作。ExxonMobil 與 Agilyx 合資成立 Cyclyx 公司，結合雙方在製程放大與化學回收之經驗，利用 GE 公司授權的人工智慧(AI)技術，開發 AI 機具以改進廢塑膠回收分選的選擇性。Cyclyx 公司主要業務是提供廢塑膠料源收集與客製化供應，後續吸引 SABIC、LyondellBasell、Dow、INEOS、Chevron Phillips Chemical 等企業陸續加入。

北歐化工(Borealis)與荷蘭廢棄物資源回收公司 Renasci 簽署協議，將從 Renasci 位於比利時 Oostende 的高科技回收中心收購再生材料，預計每年可向北歐化工交付 2 萬公噸廢塑膠，該協議將使北歐化工擴大再生料源取得管道，可以生產更多再生塑膠。Renasci 的 ISCC PLUS 認證回收中心處理的廢棄物主要來自乾燥的家庭廢物和一些工業廢物，其回收步驟首先將廢塑膠進行多次分類，提取適合機械回收的廢塑膠，不能進行機械回收的廢塑膠再作為化學回收料源。奧地利國際石油公司 OMV 持有北歐化工 75% 股權，Renasci 提供的廢塑膠有助於 OMV 公司推展之 ReOil 化學品回收計畫。

2. 石化業與政府單位合作，建立廢塑膠回收管道

2022 年 1 月美國 Houston 市政府與石油公司 ExxonMobil、石化公司 LyondellBasell、塑膠化學回收公司 Cyclyx 與收集家用廢塑膠並進行分類的環保公司 FCC Environmental Services，簽訂合作備忘錄，結合廢塑膠循環再利

¹¹¹ 本節由工研院產科國際所劉致中組長及張志強資深研究員撰寫。

用產業鏈，成立 Houston Recycling Collaboration (HRC)聯盟，透過公私部門聯合合作，建立起廢塑膠供應鏈，目的在提高城市的塑膠回收率，降低該市廢塑膠進入掩埋處理場的量。參與單位分別扮演不同的角色，如圖 4.7 所示。

如何改善城市裡塑膠廢棄物收集與儲放的基礎建設是這項計畫的一個關鍵行動，因此在 2022 年 10 月，Cyclyx、ExxonMobil 與 LyondellBasell 共同發表聲明投資 1 億美元，用於廢塑膠分選與處理設備。另外，這項計畫也將讓塑膠回收的流程變得更簡便，減少各社區消費者回收塑膠的負擔，提高個人參與塑膠回收的意願，進而提高回收率並減少掩埋。這項計畫也具有拋磚引玉的作用，藉由增加社區層面的回收管道，可為整個回收價值鏈提供明確的投資與教育發展策略。



圖 4.7 Houston 再利用聯盟(HRC)參與單位與其角色¹¹²

(二) 結合品牌業者建構塑膠封閉循環

1. LyondellBasell 與 Wendy's 漢堡合作使用再生塑膠飲料杯

石化業者的合作對象，也擴及下游品牌業者。LyondellBasell 使用化學回收技術將廢飲料杯再生製造聚丙烯原料，提供給 Berry Global 生產 ISCC 認證可回收塑膠杯供應 Wendy's 漢堡，協助 Wendy's 達成 2023 年所有飲料杯都將使用含有再生塑膠的承諾(圖 4.8)。值得注意的是，塑膠對環境的汙染往往是未盡完善或執行不力的廢棄物管理政策所造成，本案例在國際減用一次性塑膠的趨勢下，突顯利用廢塑膠可循環再利用的特性，也是一種減少廢塑膠

¹¹² 資料來源：City of Houston, Director Solid Waste Management Department (2023)

的選項。美國加州議會通過第一個減少一次性塑料法律(No. 54, 2022/06/30)，在禁用發泡聚苯乙烯食品容器的同時，提供業者彈性的作法，只要生產廠商證明可符合達到逐年增加之回收率目標(2025 年 25%，2032 年 65%)，即可使用發泡聚苯乙烯食品容器。我國近年開始實施塑膠一次用飲料杯限用政策，業者大多改用紙杯因應，但紙杯內層常附有塑膠淋膜，因此紙杯在回收再利用時，需透過散漿程序分離紙漿與塑膠淋膜，回收塑膠淋膜的純度低只能降階再利用或做成固體再生燃料(SRF)，回收紙漿也多用於工業用紙器而無法再回到食品包裝用途，因此紙杯的永續性與減碳效益仍有待商榷。採用塑膠杯並導入封閉循環再利用的模式，可以在塑膠杯禁用政策下，提供另一種彈性的作法。

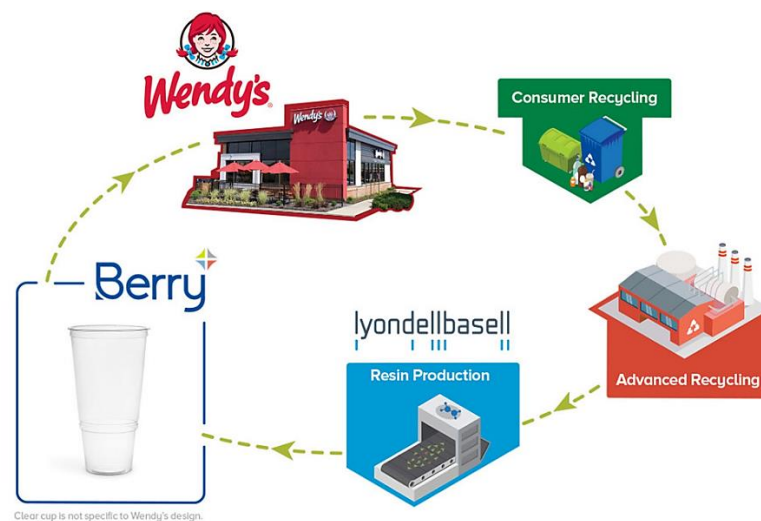


圖 4.8 Wendy's、Berry 與 LyondellBasell 合作塑膠杯的封閉循環¹¹³

2. Dow Chemical 與包材公司 Hefty 合作，收集難以回收塑膠製成裂解油

陶氏化學(Dow Chemical)與伊利諾州一間消費品公司合作，以塑膠包材業者 Hefty 所製造的一種稱作 EnergyBag 的橘色塑膠袋，進行難以回收(hard-to-recycle)廢塑膠的收集，後續並交由 Agilyx 公司透過熱裂解技術將塑膠轉化為裂解油。這項試點計畫的成功，促使陶氏化學和眾多合作夥伴擴大規模，在 2018 年底達到超過 12.5 萬戶的社區參與，所收集到的廢塑膠最終交由 Renewlogy、Nexus Fuels 等公司，以熱裂解技術轉化為再生油品，而陶氏化學則利用這些裂解油，透過自身開發的純化改質技術，轉製成再生塑膠原料。

3. SABIC、P&G 和 Fraunhofer 公司合作，將口罩進行封閉循環再利用

SABIC、寶潔(P&G)和 Fraunhofer 公司合作，進行一次性口罩封閉循環的回收試點計畫(圖 4.9)。寶潔公司收集其德國製造和研究基地員工佩戴或提供

¹¹³ 資料來源：Berry

給訪客用過的口罩，Fraunhofer 公司則負責將廢口罩粉碎，並利用化學熱裂解技術，在壓力和溫度的條件下將塑膠分解成分子碎片轉化為裂解油，同時消滅任何殘留的污染物或病原體。熱裂解油隨後被送往 SABIC 用作生產新的 PP 樹脂原料，可以符合醫療產品品質要求。這些樹脂在生產過程中將再生原料與化石原料結合，透過廣泛認可的質量平衡法(mass balance approach)去認列產品的產生材料比例。最後，這些原料將供應給寶潔公司，重新製作成不織布纖維材料，用於製造新口罩。這項試驗計畫證明，透過整個價值鏈參與者的積極合作，口罩的封閉循環回收再利用是可以實現的，可防止有價值的廢棄塑膠變成廢物，並減少使用石油資源。

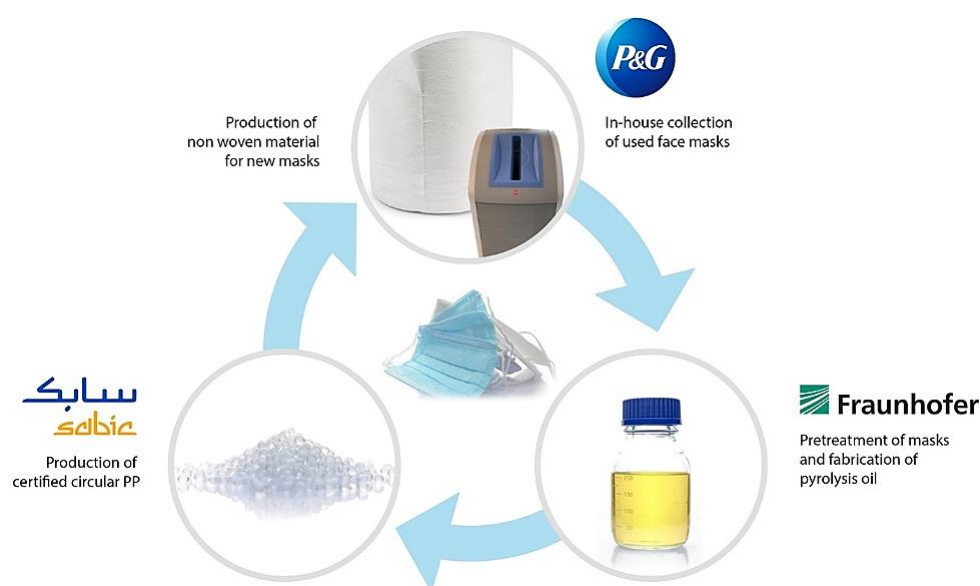


圖 4.9 SABIC、P&G 與 Fraunhofer 合作口罩的封閉循環¹¹⁴

4. 三星電子與複材公司 Hanwha Compound 合作，以廢漁網製作手機材料

塑膠產品的用途廣泛，即使是電子產品也普遍使用到塑膠材料。三星電子與高科技複合材料公司 Hanwha Compound 合作，將廢棄漁網轉化為再生聚醯胺樹脂，其中包含至少 20%的再生漁網成分，最終運用於三星 Galaxy S22 旗艦系列手機的主托座及 S Pen 內罩等元件上。雖然塑膠應用於手機上之成本占比相較於其他電子零組件並不多，驅使品牌業者極盡巧思採用再生塑膠做為零組件的最大驅動力，應是為因應減碳環保等趨勢。採用再生材料雖有可能增加成本，但可獲得投資者、環保消費市場的認同。三星公司於 2020 年永續發展年報揭示，氣候行動與循環經濟已被三星評析為受投資者重視之重大議題，同時兼具高度商業與社會衝擊，因此設定該公司 2020 年 100%使用可再生包裝材，2030 年使用再生塑膠達 50 萬公噸。

¹¹⁴ 資料來源：Fraunhofer

5. 台化、福懋與漁具製造之金洲公司合作，以廢漁網製作化纖材料

台化與世界第二大漁網製造商金洲公司攜手合作建立回收通路，雙方共同簽訂合作意向書，展開合作建構一個生產、使用、回收再利用的全面循環經濟典範。台化以漁網之耐龍材料回收再製的己內醯胺，較石化提煉的原生己內醯胺可節電 15%、減碳 49%。台化持續投資提升產能合計每月達 1,250 噸，回收產品占總產量 12%。台化纖維部是全球少數成功量產以化學散聚回收耐隆 6 的企業之一，而福懋興業為國內紡織成衣大廠，兩者在 2018 年即進行「漁網回收計畫」試產環保耐龍布，從智利、秘魯等南美洲國家回收廢棄漁網，經過初步清潔處理並裁切為適當尺寸後，整批運送至越南進行熔融造粒，最後送抵台灣，由台化負責抽絲、福懋織布。台化自 2021 年起，擴大將耐龍蚵繩、纜繩等納入回收原料，並與地方政府、漁會及資源回收業者合作，建構回收程序及管道，設置回收漁網整理據點，回收範圍擴及離島金門，至 2021 年底累計回收處理超過 1,600 噸。金洲為全球第二大漁網製造商，同時為台化重要客戶之一，這次合作進行漁網回收再利用，可擴大回收耐龍漁網去化管道，近期舊漁網回收後再製的產品比新漁網的訂單還多，顯示再生產品市場愈來愈受重視。

6. 正新、台化、福懋聯手，將廢棄漁網應用於自行車胎

耐隆化纖用途廣泛，除前述製造成衣之外，也可用於輪胎簾布。正新橡膠 2023 年與台塑集團旗下台化、福懋興業合作，利用漁業廢棄漁網，由台化製成耐龍簾布絲，再由福懋興業製成輪胎簾布，最後由正新製成自行車胎，成為全球首例。這項再生材料首先投入在單車輪胎產品上進行試驗，未來有可能擴大到機車、汽車用胎上，透過「回收材質」來降低輪胎生產的碳排放，而低碳輪胎或許會成為未來車廠選擇配胎時的考量點。

7. SABIC、INEOS Olefins & Polymers Europe 利用廢塑膠回收製造食品/醫療用包材

SABIC 採用來自難以回收再利用的家用廢塑膠 PP 包裝作為原料，生產經過認證的 TRUCIRCLE 循環塑膠產品。Huhtamaki 公司應用 TRUCIRCLE 循環塑膠材料生產包裝薄膜 Terolen 產品，提供 Mars Petcare 用於濕式寵物食品的包裝，於 2022 年在歐洲推出含有再生塑膠包材的貓糧品牌 Sheba 產品。此合作計畫有助於加速 Mars Petcare 在 2025 年之前實現應用可回收塑膠材料 30%和減少使用原生塑膠 25%的目標。寵物食品的包裝條件仍有一定的物理要求，包括在-20°C 低溫環境下，仍具有高衝擊強度和抗穿刺性，對於濕食品包裝，袋子還必須能夠承受高溫滅菌製程，通過在 135°C 的蒸煮溫度下，維持 60 分鐘的材料穩定性測試。

INEOS Olefins & Polymers Europe 和 Plastic Energy 在 2022 年宣布一項合作計畫，將塑膠軟性包裝等難以處理的塑膠材料應用化學回收處理技術轉化為食品級的塑膠材料，未來規劃應用於生產食品包裝和醫療級塑膠產品。該計畫在蘇格蘭 Grangemouth Petrochemicals 石化工廠(INEOS 與中國石油的煉油和能源貿易合資企業)進行初步測試，使用 Plastic Energy 公司生產的 Tacoil 裂解油為原料取代傳統石化原料，生產經過認證的循環塑膠原料，提供 INEOS Olefins & Polymers Europe 生產醫療級與食品級包裝塑膠材料。

(三) 石化大廠與化學回收技術業者合作，將廢塑膠轉化為再生油品或單體

近幾年國際石化大廠布局塑膠化學回收技術，透過與 Mura、Plastic Energy 等具有多年開發塑膠裂解系統業者合作，在全球建立塑膠化學熱裂解系統，將 PE/PP/PS 為主的混合廢塑膠轉化成裂解油(pyrolysis oil)，經加氫飽和、純化與改質後，可作為輕油裂解製程進料。具有特定官能基而容易被化學解聚的塑膠，如 PET、PMMA、PS、Nylon 等，則有業者投入化學解聚廠，將廢塑膠轉化成單體或多元醇，可重新回到石化原料原生製程，製造出與石化原生材料品質無異的再生材料。根據 Chemical Market Analytic 的研究資料顯示(圖 4.10)，在未來幾年全球塑膠化學回收的產能將快速增長。以下針對化學熱裂解、化學解聚說明國際石化產業的合作案例。

Capacity (TPA) running total by Date of Operation/Commissioning

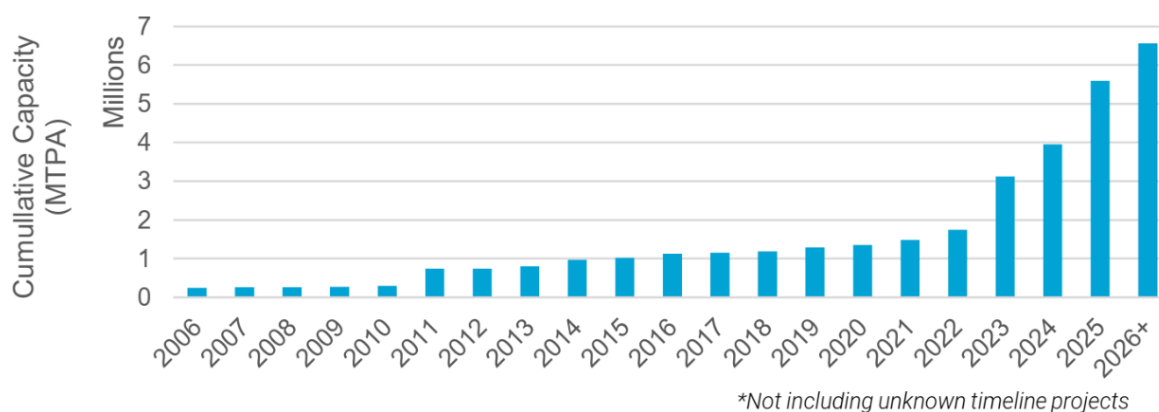


圖 4.10 全球塑膠化學回收產能趨勢(2006-2026)¹¹⁵

1. 石化業投入熱裂解技術的合作案例

DOW 與 New Hope Energy、fuenix、MURA 等公司合作，由這些公司分別在美國、荷蘭、英國設置塑膠裂解廠，Dow 收受這些裂解油進行再利用，為符合石腦油之規格，Dow 除了與 Haldor Topsøe 合作開發裂解油的純化技術

¹¹⁵ 資料來源：Chemical Market Analytic, APIC 2023

之外，同時也與 Gunvor 公司簽訂合作，將裂解油交由該公司改質純化為石腦油，以提供 Dow 進一步作為蒸汽裂解製成之進料。

BASF 與裂解技術業者 Quantafuel 合作，直接收受 Quantafuel 在挪威、丹麥所建立的裂解廠產出之裂解油，並透過 BASF 自身開發的 ChemCycling[®] 專案技術(圖 4.11)，做為石化煉製廠進料。其中丹麥裂解廠的廢塑膠料源是由廢棄物收集分選技術業者 Remondis 合作提供。



圖 4.11 BASF 的 ChemCycling[®] 專案與循環產業鏈¹¹⁶

Shell 採用多方收集裂解油的模式，分別收受 Pryme、Nexus 兩家公司位於荷蘭、美國的裂解油，另與 BlueAlp 在荷蘭合資興建 3 萬噸裂解廠，Shell 本身則開發裂解油的純化精煉技術。Shell 於 2019 年即設定目標，要在 2025 年達到回收 1 百萬噸塑膠，將其轉化為再生輕油用於製造化學品。

ExxonMobil 以自身石化園區為中心，自行開發化學回收技術為主，預計分別在美國、加拿大、新加坡、荷蘭等建立裂解廠，目標在 2026 年達到 50 萬噸規模，另與 Plastic Energy 合作在法國建立塑膠裂解廠，最終規模目標為 3.3 萬噸¹¹⁷。

由以上案例說明可看出，石化大廠在歐美布局塑膠化學裂解技術，透過與各家裂解技術業者合作，在各地區建立塑膠裂解油生產廠，其最終目的是要將廢塑膠裂解油轉作為再生輕油(r-naphtha)，再透過既有蒸汽裂解製程，產製再生烯烴。

¹¹⁶ 資料來源：BASF

¹¹⁷ 資料來源：ExxonMobil, WPC 2023

(四) 石化業投入化學解聚技術的合作案例

Eastman 在法國投資高達 10 億美元的「材料至材料」(material-to-material)分子回收設施。此設施是使用 Eastman 的聚酯再生技術，可回收處理每年多達 20 萬公噸目前以焚化處理的塑膠廢物。這項投資包括：(1)混合廢塑膠加工廠；(2) 廢塑膠甲醇解聚的化學回收工廠；(3)用於特用、包裝和紡織等領域的低碳聚合物生產線。Eastman 還計劃建立一個分子回收創新中心，使法國能夠在全球循環經濟發展上保持領導地位。此創新中心將精進回收技術和應用，以減少塑膠垃圾焚化與化石原料開採。第一階段工廠預計將在 2026 年完工，可創造約 350 人就業機會，同時在回收、能源和基礎設施方面增加 1,500 個間接工作機會。

截至 2023 年，Eastman 與法國廢棄物管理領導廠商 Paprec，以及歐洲最大塑膠分選廠領導廠商 Interzero 等達成協議，鎖定供應 Eastman 第一階段工廠所需廢塑膠料源。Eastman 的投資還獲得 LVMH Beauty、The Estée Lauder Companies、Clarins、Procter & Gamble、L'Oréal 和 Danone 等全球品牌支援，他們與這家工廠簽署了多年供應協議意向書，共同致力解決世界塑膠廢物問題，並將化學回收視為實現循環的關鍵工具。

(五) 導入資源回收機的新商業模式，擴大民眾參與減塑減碳

統一超商與統一企業集團旗下的統奕包裝，共同研發「循環經濟資源回收機」，透過專利 AI 光學辨識回收寶特瓶，進入機台內則有絞碎機可將寶特瓶絞碎成瓶片，減少回收體積，且回收機俱備回饋機制，民眾兌換 5 個寶特瓶或 5 顆電池即可獲得 1 元購物抵用金或 1 點 OPEN POINT 點數回饋，可吸引一般民眾參與回收，並提高到店率。回收的寶特瓶結合南亞塑膠的聚酯回收技術重生為寶特瓶，重新賦於廢棄寶特瓶全新生命。這項合作不僅是品牌零售商、包裝商、塑膠製造商的結合，更串聯起機具製造業、機台服務軟體業與消費者，而我國政府早已建立的廢塑膠容器回收清除處理基金管理政策更是幕後的重要推手。

2023 年 9 月桃園市在觀光景點大溪老街設置我國首座「iTrash 智慧垃圾箱」，收取垃圾、廚餘與回收資源物。該機台設置地點以「清潔人力有所不及之處」或「垃圾量過多的特定熱點」優先設置，可避免垃圾車堵塞交通，且機台以租賃方式辦理，符合新的循環經濟模式。機台本身在廢棄物處理端具有滿溢偵測、自動通報功能，可做為市府後續廢棄物管理政策調整之參考依據；個人消費端則提供紀錄 APP、碳排估算功能。

同年 11 月，新竹縣竹北市公所和全豐光電共同推動「淨零排放智慧環境專案」，在市公所等 6 個點裝設智慧回收機，把現有 16 道回收再生流程簡化為 7 道，提升前端回收分類效率，並提供參與民眾現金儲值的回饋。該回收機目前以回收寶特瓶與電池為主，同時搭建 AIoT 智慧聯網，透過大數據分析，量化民眾環保

回收行為，民眾可下載 APP 取得個人減碳紀錄，累積的回收歷程可兌換綠色商品、參加抽獎，或用一卡通做現金儲值回饋。收取的寶特瓶結合遠東新世紀的環保再生技術，回收清洗除污後再製成食品級酯粒。

這種資源回收機(Reverse Vending Machine)是一種與自動販賣機功能相反的機具，透過收取物品而與消費者進行回饋機制的交換，其設置地點在不同區域有其特定功能：例如在回收車因成本與時間因素不利到達的郊區，可提供民眾便利與時間彈性的回收據點；在人口密集而資源回收物量大的城市，可提供更多分散的回收管道，以減少傳統資源回收點的人力與佔地。根據國外市調機構的預測，自從國際上限制廢塑膠跨國輸出入，以及塑膠低碳循環趨勢興起之後，區域性廢塑膠收集處理再利用需求激增，這種資源回收機自 2023 年到 2030 年將有 5.2~6.6%不等的年均複合成長率，未來回收機台將具備更多功能，可回收更多種資源，並提供多種回饋機制，甚至可提供廢棄物料源分析的資料，作為管理政策與市場開發的參考，結合下一段說明之認證技術，可建構更完整的永續循環經濟架構。

(六) 石化業者投入參與永續認證新技術開發

目前國際上多種循環回收再利用產品透過第三方認證以獲取該產品在永續減碳貢獻的證明，在塑膠回收再生方面，多家業者透過德國 ISCC (International Sustainability & Carbon Certification)協會取得 ISCC PLUS 認證。ISCC 協會是由德國聯邦食品和農業部(BMEL)所支持的 ISCC 認證計劃建立，ISCC PLUS 認證則是該協會其中一項自願性認證方案，適用於生物經濟和循環經濟領域，例如透過使用再生能源之製程所製造之食品、飼料、化學品、塑膠、包裝、紡織品等可再生原料。ISCC PLUS 已獲得 SAI、Blue Angel、Textile Exchange、FEFAC、FSS 及 CDP 等機構的認可，與塑膠相關通過 ISCC PLUS 認證之案件至今已累積達 1,686 案，其中 2023 年至今通過案件就高達 556 案。通過的認證有效期僅一年，且愈來愈多的認證需求，讓 ISCC PLUS 引入區塊鏈技術的必要性應運而生。

區塊鏈是一種雲端技術，具有去中心化、可追溯、透明、不易竄改的特性，可用來建立循環價值鏈物質流數據，除用來進行數位化認證可大幅加速認證程序之外，尚具有溯源功能可提供供需業者之間快速查詢。2016 年成立於荷蘭的 Circularise 便是一家以區塊鏈技術為核心的新創公司，提供數位產品護照、質量平衡簿記軟體之服務與產品。該公司於 2022 年 9 月結合旭化成、Borealis、Neste、Trinseo 及 Shell 等製造業者，Arcelik、飛利浦家電及 EVBox 等品牌業者，Marubeni 及 Itochu 等貿易業者，參與利用區塊鏈技術進行 ISCC PLUS 認證(圖 4.12)，該專案採用公共區塊鏈對資料進行身份驗證、去中心化和加密，以驗證物質流的永續性。未來認證將變得更加數位化，可簡化供應鏈參與者的審核過程並降低出錯的風險，企業將有更簡單的方式來遵循審核規則並證明其永續減碳特性。

循環經濟需要跨單位合作才能達成，尤其循環物質流與循環路徑上碳足跡的資料是鏈結各單位合作的基礎，因此 LyondellBasell 與 Circularise 攜手上下游價值鏈業者，包括可再生原料供應者 Neste，機械回收業者 QCP，回收基礎系統建造者 Uponor，行李箱製造業者 Samsonite，參與使用 Circularise 開發之數位產品護照，以使參與業者了解其供應鏈關係與產品之碳足跡。

即使目前歐盟 CBAM 制度僅設計針對範疇一(本身製程直接碳排)、範疇二(本身製程間接碳排)之碳排進行關稅徵收，但石化大廠布局減碳策略早已涉及碳排量更大、更複雜的範疇三(其他範疇一、二之外的碳排)範圍。為大幅降低範疇三數據收集與供應的困難性，SABIC 與 Circularise 合作，透過採用區塊鏈技術之數位產品護照，將其在原料製造端之範疇一、二碳排數位化，提供整個價值鏈業者計算其產品範疇三(例如來自 SABIC 供應原料之碳排)之資料來源之一。

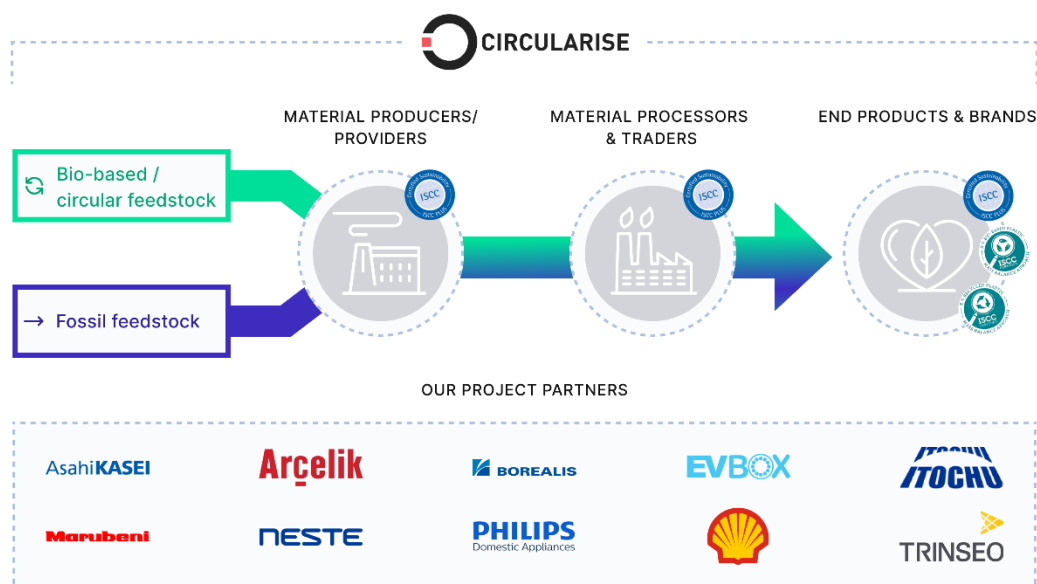


圖 4.12 荷蘭 Circularise 公司結合石化業者參與區塊鏈技術應用於 ISCC PLUS 認證¹¹⁸

¹¹⁸ 資料來源：Circularise, 2022

第二節 生質基替代原料

生物質(biomass)是指源自植物和動物的有機物質，目前佔全球能源供應的 9.4%和化學品原料的 10%¹¹⁹。生物質為人類歷史上最早的燃料，也是 19 世紀中葉之前的主要能源。由於淨零碳排與石化燃料枯竭等議題，生物質作為燃料和化學品開發再次引起產業界的廣泛關注。木質纖維素是各種生物質中最具代表性的原料，具有低成本、易取得等優勢，預估每公斤木質纖維素原料可將轉化為 6 MJ 的能源，或是 0.8kg 的化學品¹²⁰。

儘管生物質資源具有作為生物燃料和化學品生產原料的潛力，但其仍未得到充分利用。傳統上，生物質廢棄物的處理方式是露天焚燒或填埋，這伴隨著空氣污染和土壤惡化等環境問題。鋸末、稻殼和甘蔗渣等殘留物可以被壓縮成固體燃料顆粒作為燃料，但與石化燃料相比熱值較低¹²¹，為了提高生物質的能量密度，可以將生物質轉化為其他結構燃料，例如生質乙醇、生質柴油、合成氣與輕油等。此外，素生物質可合成 200 多種一般與特用化學品，其中 BTX、丁醇、乳酸、甘油、山梨醇、琥珀酸、衣康酸等化學品已有工業規模生產，杜邦、巴斯夫、SABIC、陶氏化學等大型化學企業已逐步擴展生物質產品的開發與應用。

一、生質輕油(Bio-Naphtha)

輕油(naphtha)，又稱輕油，為一種碳氫的混和物，其組成大多為碳數為 5 到 12 的烷烴類及部分環烷烴類，沸點介於 25-180°C 之間，且外觀呈透明或微黃色。是一種可以藉由裂解、加工產出各種不同日常生活用品或汽油等多種產品，具有高度經濟價值的石化原料。輕油，可以利用獲得方式分成兩種，其一為由原油分餾所得到一般傳統的直餾輕油，另一種則是利用生質物(biomass)進行加工所得到的生質輕油(bio-naphtha)。相較於傳統的輕油，生質輕油和其他的生質物、生質能源一樣具備低碳足跡及可再生的特性，同時維持和傳統輕油相同的特性進行塑膠製品的製作。因此在未來淨零碳排的布局中，生質輕油必定會大量取代傳統輕油成為許多塑膠製品的原料，其未來性十分可期¹²²。

¹¹⁹ IEA, Key world energy statistics 2021 ; United Nations, The Sustainable Development Goals Report 2021

¹²⁰ V.G. Yadav, Clean Technol. Environ. Policy 2020

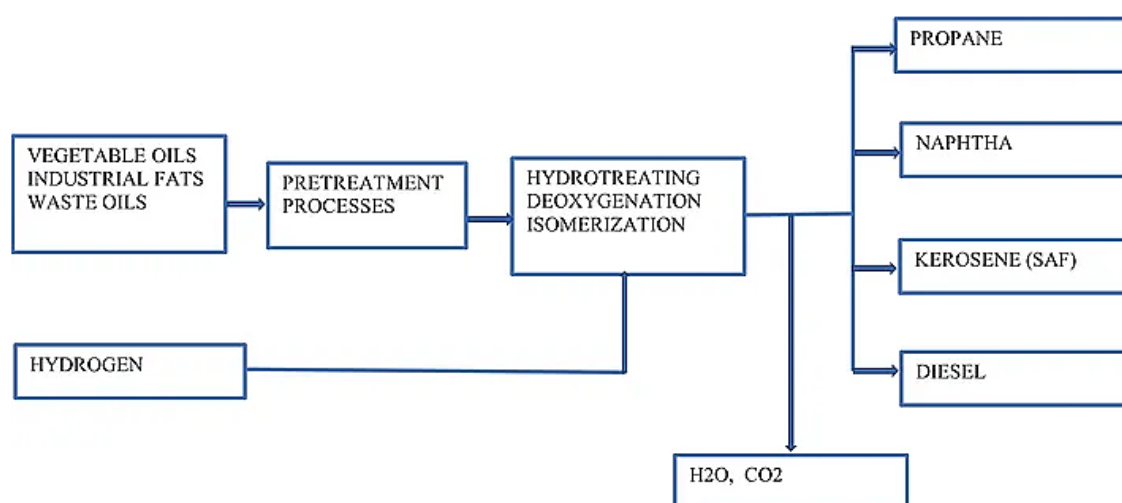
¹²¹ K. Sivabalan, J. Phys. Conf. 2021

¹²² International Journal of Chemical Engineering and Applications, Vol. 10, No. 3, June 2019

表 4.1 傳統輕油與生質輕油性質比較¹²³

Parameter	Naphtha	Bio-Naphtha
Boiling point (°C)	25-180	30-200
Density (kg/m ³)	700	670
Total Sulphur (ppm Max)	650	0
Color	Colorless	Colorless
Olefin (% wt)	Max 1	< 0.5
Aromatics (% wt)	5	< 1

目前生質輕油的來源大多是對植物油進行加氫處理 (hydrotreated vegetable oil process, 簡稱 HVO process, 圖 4.13), HVO process 由多種不同觸媒在氫氣下和甘油三酯分子(triglyceride) 反應的程序所組成, 一開始先進行氫化的反應將分子由原本的不飽和烴類轉化為飽和烴類。接著再利用氫裂觸媒將原本的長碳鏈分子進行切割, 最後得到的產物再根據其目的經由脫氧、脫羧等不同程序, 反應出生質輕油、生質航空油等不同的產品¹²⁴。

圖 4.13 HVO process 流程示意圖¹²⁵

生質輕油目前在工業上大多被用來製造可回收的燃料油或裂解出乙烯、丙烯等生質基礎原料, 並以這些原料為基礎加工製成聚乙烯、聚丙烯塑膠等產品。現今已有超過 17 家廠商、每年 4,750,000 噸的生質輕油被投入產業中, 其中又以芬蘭的石油大廠 Neste 公司, 以及同屬芬蘭的造紙工業集團 UPM 兩家公司較為知名。UPM 利用其造紙製程中(主要是在軟木製漿時)的副產品妥爾油(Tall oil), 進行氫化與裂解得到生質輕油, 再提供給石油公司裂解得到烯烴等石化基礎原料。Neste 公司在 2021 年更是與日本三井化學以及豐田通商達成協議, 將生質輕油投

¹²³ 資料來源: Candra Lutfi Widikrama and Indah Dwi Rachmawati, 2019

¹²⁴ Bionaphtha: The Renewable Alternative to Fossil-Based Naphtha, Omni Tech, 2022

¹²⁵ 資料來源: Candra Lutfi Widikrama and Indah Dwi Rachmawati, 2019

入乙烯工廠，生產可回收的聚乙烯材料，目前已經成功製成相關可回收產品並販售，有效的降低二氧化碳的排放量，成為日本首例¹²⁶。美國的 DOW 公司在 2019 年也正式跟 UPM 公司達成協議，利用生質輕油進行低密度聚乙烯(LDPE) 的合成，並和其他包裝材料的相關業者合作，推出了百分之百可回收的包裝材料，除了材料本身可回收之外更是降低了製程上的碳排放，建立了一條環境友善的產業鏈，做為未來淨零碳排的先驅。

台灣雖然有做生質柴油的能量，如承德油脂以廢食用油為原料，進行氫化後再加入甲醇進行轉酯化，得到脂肪酸甲酯，並產生副產物甘油。但此種製程得到的產物與石化系的柴油結構不相同，含有較多的氧含量，因此主要是用摻配的方式和石化系的柴油混合使用。國內目前還未有廠商開發生質輕油相關產品。在工業局的統整中，目前 HVO 相關的產品在國內仍有原料供應及價格問題，導致市場上接受度較低等¹²⁷。然而隨著全球產業朝向低碳料源的發展，生質輕油因為可做為低碳烯烴料源，未來的需求量將會大幅成長並帶動其市場價格。2022 年初，奇美實業也和三菱商事簽訂了生質苯乙烯的供應可行性評估備忘錄，是為國內產業的先驅，同年底奇美也和芬蘭的 Neste 公司及日本的出光興業、三菱商事達成生質 ABS 的產業合作，並於 2023 年初預計推出相關產品，為國內及日本的首例。

二、生物基芳香環化學品(Bio-BTX)

苯、甲苯和二甲苯(BTX)被廣泛應用作各種化學品的原料，如聚對苯二甲酸乙二醇酯(PET)、苯胺、尼龍、苯乙烯、酚、防爆汽油添加劑等。依據 Mordor Intelligence 分析指出¹²⁸，全球年產量已超過 1.5 億噸，預計從 2021 年到 2026 年，BTX 市場將以約 3.76%的複合年增長率迅速擴大。在印度、中國、日本等國家積極推動重大發展方針的帶動下，苯和甲苯在多種化學應用中的重要性日益突顯，成為 BTX 市場強大的推動力¹²⁹。BTX 的製備來源目前有石化、生質、塑料回收三大來源，石化 BTX 的製備方法涵蓋石腦油裂解法、苯和甲苯的烷基化、甲苯的二甲化、芳香烴混合物的精餾分離等，主要的生產方法來自於石油煉油廠中的催化石腦油，還原芳香烴衍生物而得¹³⁰。回收料 BTX 採用單一熱催化反應器¹³¹，將

¹²⁶ <https://corporate.dow.com/en-us/news/press-releases/dow-and-upm-partner-to-produce-plastics-made-with-renewable-feedstock.html>

¹²⁷ 氫化植物燃料油 (HVO)，石化高值化推動專案
[https://www.pipo.org.tw/Content/Files/userfiles/pipo/files/%E6%B0%AB%E5%8C%96%E6%A4%8D%E7%89%A9%E7%87%83%E6%96%99%E6%B2%B9HVO\(%E7%A7%91%E6%99%AE%E6%95%99%E8%82%B2%E7%89%88\).pdf](https://www.pipo.org.tw/Content/Files/userfiles/pipo/files/%E6%B0%AB%E5%8C%96%E6%A4%8D%E7%89%A9%E7%87%83%E6%96%99%E6%B2%B9HVO(%E7%A7%91%E6%99%AE%E6%95%99%E8%82%B2%E7%89%88).pdf)

¹²⁸ BTX MARKET SIZE & SHARE ANALYSIS - GROWTH TRENDS & FORECASTS 2023-2028

¹²⁹ GII Global Information-Benzene-Toluene-Xylene (Btx) Market - Growth, Trends, And Forecasts 2023- 2028

¹³⁰ Sabic annual report 2022

¹³¹ Annelotech, Pearl River, N.Y., August 29, 2022

各種混合的廢塑料轉化為有價值的化學原料，包括苯、甲苯和二甲苯(BTX)，以及乙烯、丙烯和丁烯等輕質烯烴，這些原料可以用於高品質塑料的生產。這一技術依賴於專有催化劑和流化床反應器-再生器系統(fluid bed reactor-regenerator system)，創建一條全新的生產途徑，能夠直接從異質塑料廢物流中產生輕質烯烴和芳烴，而無需使用傳統的蒸汽裂解爐。此技術的優勢在於它能高效處理各種廢塑料，不論是單一塑料還是複合材料，包括聚烯烴、聚酰胺(尼龍)、PET、聚碳酸酯和聚苯乙烯等。Bio-BTX 的生質原料來源主要包括木質纖維素和液體生物質源，生產過程將生物質加熱至高溫，通過芳構化催化劑的作用，轉化為 Bio-BTX。然而由於木質纖維素生物質具有高含氧量和礦物質，這使得在實際應用時的技術經濟可行性存在爭議，因此液體生物質源，如生物乙醇、熱解油、黑液和粗甘油，這些生質原料相對更容易處理，並具有較低的技術門檻，使其成為 Bio-BTX 生產的實際應用主力。表 4.2 將針對石化、生質與回收三種 BTX 生產技術進行比較。

表 4.2 石化、生質、回收 BTX 差異比較¹³²

項目	石化	生質	回收料
廠商	Sabic	BioBTX B.V.	Anellotech
技術	氫化裂解	ICCP	Plas-TCat
方法	重裂解/溶劑提取/ 萃取法	催化熱解	催化熱解
來源	石腦油	農業廢棄物、生質 乙醇、油酸、木質 纖維素	異質塑料
催化劑	沸石、金屬氧化物	沸石、金屬氧化物	專有催化劑和流化 床反應器
技術優勢	價格優勢	減少碳足跡、副產 物少	無需蒸汽裂解爐
技術成熟度(TRL)	9	5	6
產能 (噸/年)	4 百萬	40	180
售價	2.7-4.5 萬台幣/噸	未公開	未公開

Bio-BTX 作為一個創新的綠色技術，具有巨大的前景，有望減少對有限的石化原料的需求、能源消耗以及溫室氣體排放。然而、目前由於生產技術相對複雜，且需要克服生物質原料高含氧量、礦物質含量和氧化性等問題，催化劑開發和優

¹³² 資料來源：Sabic annual report 2022; University of Florence, DIF-Department of Industrial Engineering-Biomass pyrolysis for liquid biofuels production and use Bio-based products –from idea to market“15 EU success stories” (February 2019) Digital refining 2022/08/29, 工研院整理

化將是突破的關鍵技術，此外，Bio-BTX 的生產流程也需要進一步的優化和規模化來降低成本。

三、木質纖維素生產化學品(Cellulose based platform chemicals)

木質纖維素是地球上最豐富的可再生資源，可以由農業廢棄物，例如稻稈、甘蔗渣、木薯下腳料等獲得，木質纖維素主要由纖維素、半纖維素、木質素組成，依來源種類不同，組成略有不同，主要含有 30~50% 纖維素、20~35% 半纖維素及 15~25% 木質素，其中纖維素、半纖維素經分解後的主要組成為葡萄糖及木糖。纖維素的衍生化學品包含 5-羥甲基糠醛(5-Hydroxy Methyl Frufural, HMF)、2,5-呋喃二甲酸(2,5-furandicarboxylic acid, FDCA)、乙醇(Ethano)、琥珀酸(Succinic Acid, SA)、正丁醇(n-Butanol)、葡萄糖二酸(Glucaric acid)、乙醯丙酸(levulinic Acid, LA)等¹³³，由纖維素生產的平台化學品概述如圖 4.14 所示。纖維素可製備的化學品相當多，除了廣泛已知的生質酒精之外，茲將簡介具應用發展性的正丁醇、琥珀酸、乙醯丙酸以及 5-羥甲基糠醛。

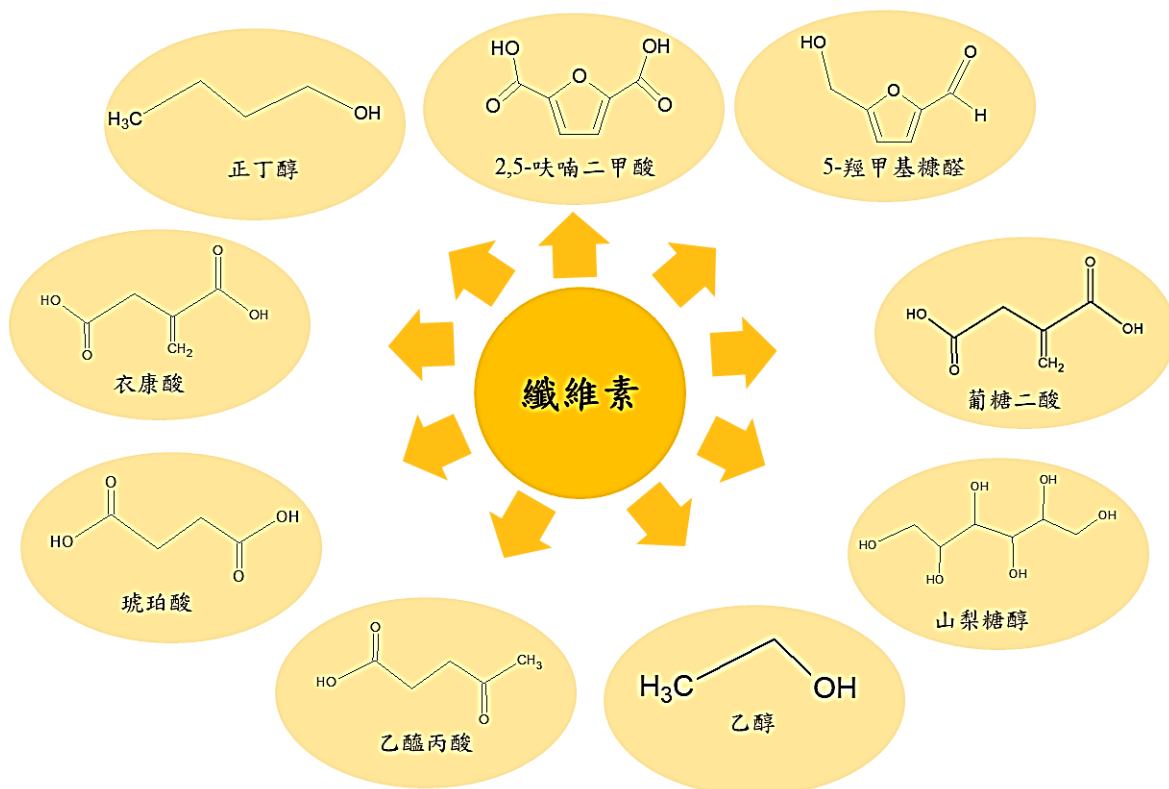


圖 4.14 纖維素生產的平台化學品

¹³³ Lethiwe D. Mthembu, Rishi Gupta, Nirmala Deenadayalu, Conversion of Cellulose into Value-Added Products

(一) 正丁醇

將纖維素水解後可以產生糖，進而將糖醱酵則可以生成正丁醇，正丁醇主要為製造正丁酯類塑化劑的原料、藥物合成的上游原料(如維生素、抗生素和激素)、油脂和香料的萃取劑以及脫蠟劑等。中國大陸、巴西與美國等地皆有廠商進行商業化生產，如 Eastman、Green Biologic、Granbio、Celtic Renewables、凱賽生物科技(Cathy Industrial Biotech)與 Coblat Technology 等公司。

(二) 琥珀酸

以稀酸預處理植物纖維加上醱酵法可以生產琥珀酸，琥珀酸可做為 1,4-丁二醇(1,4-butanediol,BDO)、聚琥珀酸丁酯 (Poly(butylene succinate), PBS)、四氫呋喃(1,4-epoxybutane, THF)等多種重要化合物的前驅物¹³⁴，可應用於藥物、食品、塗料、顏料、介面活性劑、生物可降解塑膠合成等，是具有市場潛力的平台化學品，根據 Market Research Future 市場報告資料顯示，2022 年琥珀酸市場規模為 1.3 億美元(包含生物基、石化)，市場預計將從 2023 年的 1.5 億美元成長到 2030 年的 3 億美元。生質琥珀酸生產商目前有 6 家，總產能約為 1.3 萬噸，分別為義大利的 Roquet S.A、西班牙的 Succinity GmbH 和法國的 Technip Energies、美國的 GC Innovation、台灣李長榮化工加拿大廠和中國山東藍點生物科技¹³⁵。

(三) 乙醯丙酸

植物纖維以稀酸預處理，經高溫高壓水解可以生產乙醯丙酸(levulinic Acid, LA)，乙醯丙酸可應用於香精、乳液化妝品添加劑、介面活性劑、藥物、樹脂、塗料、除草劑等，是用途廣泛的平台化學品。國際上製備生質乙醯丙酸的廠商為義大利的 GFBiochemicals、Bio-on、Eridania Italia 及 GreenSolRes 聯盟¹³⁶。

(四) 5-羥甲基糠醛

將纖維素水解為葡萄糖，進一步異構化可獲得果糖，5-羥甲基糠醛(5-Hydroxy Methyl Frufural, HMF)可由果糖或葡萄糖脫水製備，是一種具多功能平台的化學品，以 HMF 作為起始物可以衍生各種化學品，如圖 4.15 所示。

¹³⁴ Davinia Salvachúa, Holly Smith, Peter C. St. John, Ali Mohagheghi, Darren J. Peterson, Brenna A. Black, Nancy Dowe, Gregg T., Bioresource Technology, August 2016, 558

¹³⁵ IEK, 生質琥珀酸發展概況, 2023

¹³⁶ <http://www.gfbiochemicals.com/products/>

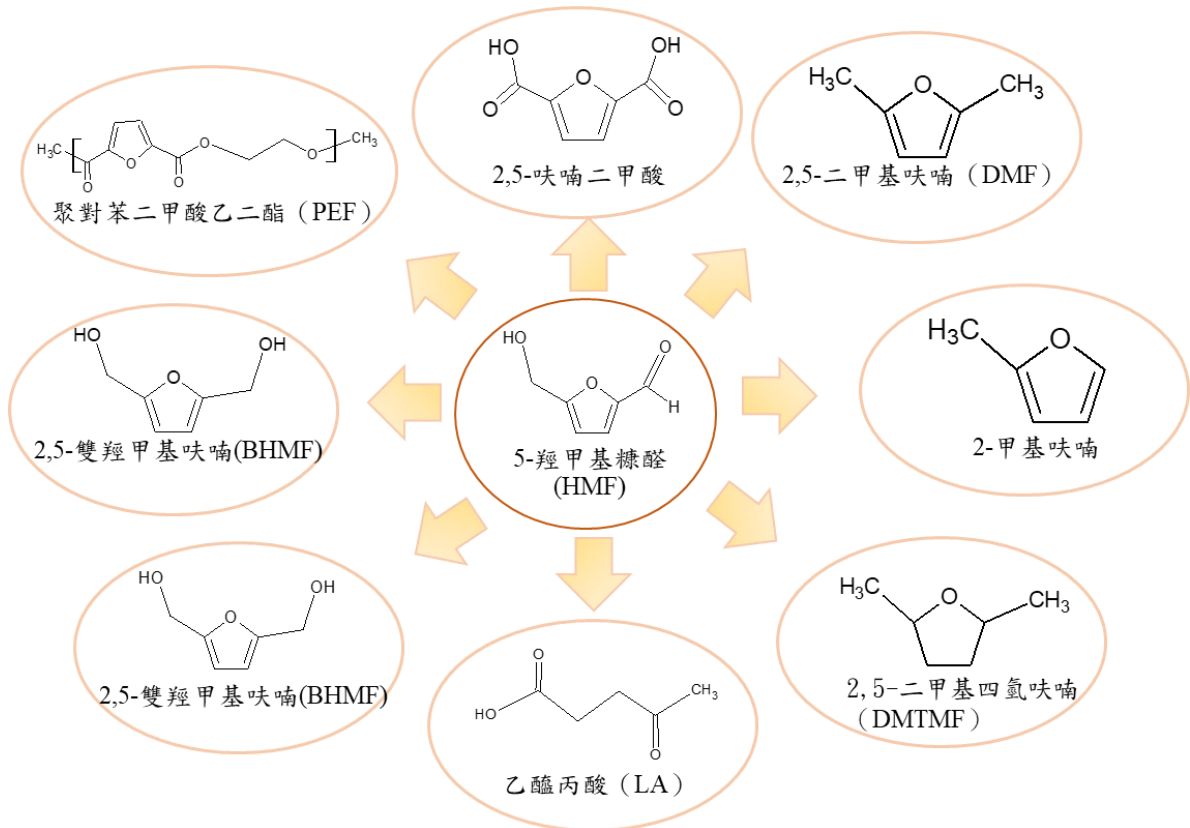


圖 4.15 HMF 衍生產品示意圖

將 HMF 藉由氧化、氫化等反應可開發各種化學品及其下游衍生產品，氫化後可生成 2,5-二甲基呋喃(2,5-dimethylfuran, DMF)、2,5-二甲基四氫呋喃(2,5-dimethyltetrahydrofuran)，此兩種化學品都可作為生質燃料，預估到 2027 年，全球生質燃料總需求預計將增長 22%⁵⁸。將 HMF 進行氧化反應可製備具有雙羧酸官能基的 2,5-呋喃二甲酸(2,5-furandicarboxylic acid, FDCA)，FDCA 可作為聚酯的單體，生產聚 2,5-呋喃二甲酸乙二酯(polyethylene 2,5-furandicarboxylate, PEF)，PEF 的阻氣性已經被證明優於聚對苯二甲酸乙二酯(PET)，預估 PEF 在寶特瓶、機能性纖維和包裝材料都能廣泛的應用。HMF 及其衍生的化學材料具有相當多的工業應用潛力範圍，不僅引起學術界廣泛的研究，Avantium 公司藉由募款成立聯盟等方式開發 HMF 及其下游衍生物相關技術，其中 FDCA 在國際上商業量產的發展如下：

1. Stora Enso 在比利時根特附近建立 FuraCore® FDCA 試產工廠，並將於 2023 年開始試生產。
2. Novamont 公司宣布計劃在義大利建造生產 FDCA 的示範工廠，FDCA 可以在 Novamont 現有生產線上進行加工，並與其他生物單體一起用於開發和合成新的可堆肥產品“fifth-generation Mater-Bi”，開發新型可再生材料，用於需要良好阻隔性能(氧氣和二氧化碳)的應用，如食品包裝行業、咖啡膠囊等，以取代傳統塑料。

3. Avantium 公司預計建立第一個 FDCA 旗艦工廠，年產能為 5,000 噸，建造地點在荷蘭 Delfzijl，預計於 2023 年底完成建設並於 2024 年完工，目前已完成 70 % 的建設工程。除此之外，Avantium 公司與日本 Mitsui、Toyobo 公司聯盟積極發展 PEF 酯粒、PEF 薄膜產品技術，將能擴展 FDCA 的市場需求量¹³⁷。

工研院材化所投入生質 HMF 研究與應用開發多年，並建立 HMF 及其下游衍生物技術平台，從 HMF、FDCA、2,5 呋喃二甲酸二甲酯(Dimethyl furan-2,5-dicarboxylate, DMFDC)以及 PEF 皆提供小量供貨及技術驗證(表 4.3)並具有 HMF、FDCA 及 PEF 關鍵技術專利，同時積極推廣生質 HMF 系列的生質化學品，與國內遠東新公司展開合作，遠東新公司成功於 2019 年產出亞洲第一個生質阻氣 Bio-PEF 汽水瓶及啤酒瓶。

表 4.3 工研院在 HMF、FDCA、DMFDC、PEF 的技術規格

	Fructose to HMF	HMF to FDCA	FDCA to DMFDC	PEF
進料濃度(wt%)	30~40	10~20	10~15	-
反應方式	batch	batch	batch	batch
反應器容積(L)	200	100	100	5/60/200
轉化率(%)	>99.9	>99.5	>95	-
產率(%)	~90	~78	~90	-
產物	HMF	FDCA	DMCHD	PEF
產能(batch)	~20 kg	~5 kg	~5 kg	1~10 kg
純度(%)	>99	>98 (crude) >99.5(purified)	>99.5	IV 0.8~1.0

木質纖維素先經酸性溶劑或物理方式預處理，可以打破木質纖維素的結構，再以水解酵素或微生物處理可生產單糖。纖維素不僅可以用來製備生質乙醇、丁醇以做為生質燃料，除此之外還能做成生質化學品如琥珀酸、葡萄糖二酸以及 5-羥甲基糠醛等，用途相當多元。

¹³⁷ <https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2023/07/17/avantiums-advance-and-the-laws-of-corporate-thermodynamics/>

第三節 小結

國內石化產業供應民生工業、電子、汽車等產業的必要原物料鏈，產業鏈總產值近 4 兆元，產品外銷比例高達 50%，為國內發展極其重要的產業之一。然而，隨著 2050 淨零排放目標以及減少對石化料源依賴的國際發展趨勢，循環再生料源的相關技術發展將成為石化產業轉型的必要關鍵。尤其在未來終端產品與品牌對於產品低碳化與回收含量需求的提升下，上游低碳原料的取得將直接影響中下游產品的市場競爭力。儘管國際大廠已分別投入各類廢塑膠的化學回收技術，但整體預估量能仍遠遠不及各國既有的需求量，也將增加國內廠商取得再生料源的困難性與成本。國內如工研院近年來積極投入各式塑膠化學回收技術開發，著重於包含聚酯織物等含染料之廢聚酯的醇解及純化製程技術、低製程能耗之 PC 及 PC/ABS 廢料解聚與純化技術，以降低裂解溫度的 PS 熱裂解與蒸餾分離技術等，以期生產高純度、低色度之聚合級單體以因應產業現有需求；另亦投入廢塑膠裂解油轉製輕油之關鍵觸媒與除雜技術，以協助解決國內混合廢塑膠的循環去化問題。此外，工研院亦著重於回收聚酯的高值化技術，透過製程與結構設計產製可應用至鞋材、纖維等聚酯彈性體及機能性聚氨酯產品，以因應終端應用單一材質設計與改善循環利用可能性。期盼透過上中下游產業鏈的串聯進行全面化產品設計與開發，以提升產品的競爭優勢。

推動廢塑膠循環轉化為低碳料源的發展上，廢塑膠的回收分選為達成循環減塑的第一步，雖然國內已有相對完整的回收體系與物理回收技術，但物理回收的料源品質要求高，符合此規格的回收料受限。因此政府與業者應致力於以下工作：

- (一) 導入 AIoT 新技術有利於提升廢塑膠的分選，並取得量化數據以便於未來更複雜的再生資源循環追蹤認證。
- (二) 廢塑膠回收必須透過政府政策與資源回收業者的合作，並藉由延伸生產者責任制度，提供資源回收所需的基礎建設以及經費，形成資源回收經濟模式，才能進一步擴大廢塑膠的回收，並杜絕廢塑膠流入環境。
- (三) 石化產業與品牌業者基於淨零減塑的國際趨勢，應設計單一材質材料的產品，以及帶頭建立回收通路，透過更先進的塑膠回收再利用技術，擴大再生塑膠材料的應用。
- (四) 化學回收技術將補足機械回收之不足而用於處理難以回收廢塑膠，擴大回收來源及再生產品的品質。依據環境部針對我國塑膠的物質流資料顯示，民國 110 年我國約產製 1394 萬噸的塑膠製品與酯粒，外銷 1,090 萬噸，國內使用約 304 萬噸¹³⁸。若僅以台灣回收的廢棄塑膠作為料源，將無法滿足產業所需

¹³⁸ 環保署民國 110 年資源循環再利用年報

的循環物料。除了以國內收集的塑膠進行裂解轉化，未來仍需由國外進口塑膠裂解油取代原油進口。因此建立塑膠裂解油的純化及升級處理製程技術，再導入國內煉化廠將符合進料規格之循環輕油進入輕油裂解產線，生產乙烯、丙烯、丁二烯等石化基本原料，可帶動國內相關低碳化學品產業鏈整體發展。

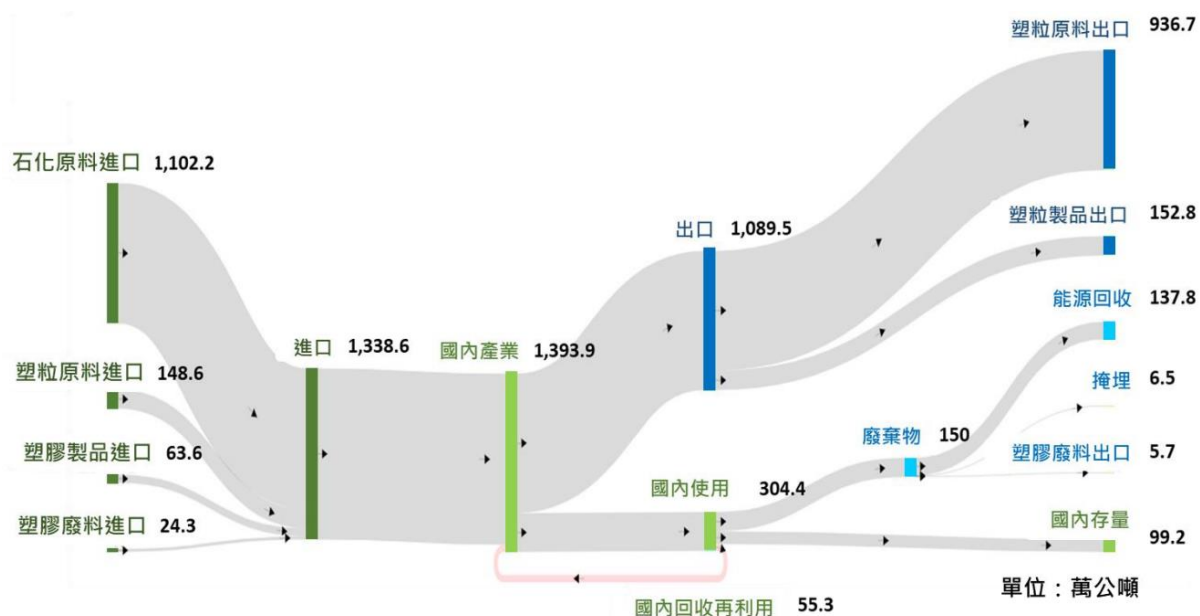


圖 4.16 我國簡易塑膠物質流向圖¹³⁹

在生質基替代料源方面，利用非糧料源的木質纖維素如稻桿、蔗渣等轉化是發展的主要趨勢，相關產業發展仍在萌芽階段。目前主要生質塑膠的料源仍以農業作物為主，如蔗糖、澱粉、植物油等。台灣的原物料受限，因此大多進口生質塑膠粒再進行改質與加工。在生物基化學品及材料的發展，中短期以發展以鏈結東南亞生質料源豐富的國家，進口原物料再轉製為高值的化學品及材料為較具可行的發展方向，長期則需投入二代木質纖維素的轉化技術。因為第一代的生質料源須考量種植及農地耗用所耗費的碳足跡與環境衝擊。第二代生質料源轉化的化學品或材料甚至有機會達到負碳的可能。生質基料源儘管豐富，但其變異性大且結構更多元，不管是利用觸媒或是微生物轉化，及後續的純化工序都可能較現有的石化製程更加複雜甚至耗能。此外也須計入採收及運輸等碳排，因此須從整體的生命週期及經濟效益做詳細分析。

¹³⁹ 資料來源：環保署 110 年資源循環再利用年報

第五章 二氧化碳捕獲與藍氫技術

依據 IEA 的估算，CO₂ 捕獲量將從 2020 年的 4 千萬噸，成長到 2030 年的 16.7 億噸，其中近 80% 來自於化石燃料燃燒製程，15% 來自生質能源生產與燃燒，到了 2050 年可望成長到 76 億噸，二氧化碳捕獲將是未來的 30 年內成為最主要的減碳方式之一。工業製程中將 CO₂ 捕獲與封存，成本目前約為 50~250 美元/噸 CO₂¹⁴⁰，其中約 7-8 成的成本來自捕獲，因此 CO₂ 捕獲成本需降低，結合封存 (Storage) 或再利用 (Utilization) 才能夠具有經濟可行性。目前由於成本問題，各國推動 CO₂ 捕獲多推出補貼政策提供業者投資誘因，例如美國之 45Q 稅負抵減條款及抗通膨法案，將補貼二氧化碳捕獲與封存 (CO₂ Capture and Storage, CCS) 每噸 85 美元，以及二氧化碳捕獲與再利用 (CO₂ Capture and Utilization, CCU) 每噸 130 美元。就技術成熟度而言，目前以化學吸收法最為廣泛應用，而各種吸附法及薄膜法也有許多模廠級 (pilot plant) 的示範案，因此在捕獲成本未能有效降低之前，各種技術仍有時間能夠持續進步，需要政府與學研界共同努力。

第一節 化學吸收法捕獲二氧化碳

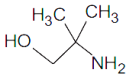
以化學吸收法來處理天然氣中的酸性氣體 (如硫化氫及二氧化碳) 最早始於 1930 年¹⁴¹，常用的吸收劑包含類型包含一級、二級、三級醇胺、立體障礙醇胺或碳酸鹽，它們的特性如表 5.1 所示。迄今，已有數百座工廠使用化學吸收法來對天然氣和氫氣進行酸性氣體處理。由於此法已行之有年，而且醇胺吸收劑對酸性氣體 (如硫化氫、二氧化碳) 的吸收能力不同，在調整吸收劑後，相同的製程流程可用來處理煙道氣中的二氧化碳 (CO₂)。根據 Science 期刊指出，此技術亦為 2030 年前最具應用性之 CO₂ 捕獲技術¹⁴²。典型化學吸收捕碳製程包含一固定床吸收塔及一固定床汽提塔，如圖 5.1 所示。CO₂ 氣體與吸收液在吸收塔中以逆流方式接觸，於填料表面進行質傳。吸收液離開吸收塔後隨即進入汽提塔，以加熱之方式再生吸收液，使製程得以循環操作。汽提塔塔頂之氣體為含有水、吸收劑及 CO₂，經冷凝器將水及吸收劑冷凝下來後，便得到高純度 CO₂，供封存與再利用之用。

¹⁴⁰ The Green Engine of Economic Recovery, Goldman Sachs (2020).

¹⁴¹ Bottoms, R.R., Girdler Corp, Separating acid gases. US Patent 1783901 (1930).

¹⁴² Rochelle, G.T., Amine scrubbing for CO₂ capture, Science, 325, 1652–1654 (2009).

表 5.1 CO₂ 吸收劑特性¹⁴³

Class	Typical reaction	反應熱 -ΔH _{abs} (kJ/mol)	反應速率
Carbonate	$CO_3^{2-} + CO_2 + H_2O \leftrightarrow 2HCO_3^-$	40	Very slow
Tertiary amine	$R_3N + CO_2 \leftrightarrow R_3NH^+ + HCO_3^-$	60	Slow
Hindered amine	 + CO ₂ $\leftrightarrow AMPH^+ HCO_3^-$	60 - 70	Moderate
Secondary or primary amines	$2R_2NH + CO_2 \leftrightarrow R_2NHCOO^- + R_2NH_2^+$	70 - 80	Fast

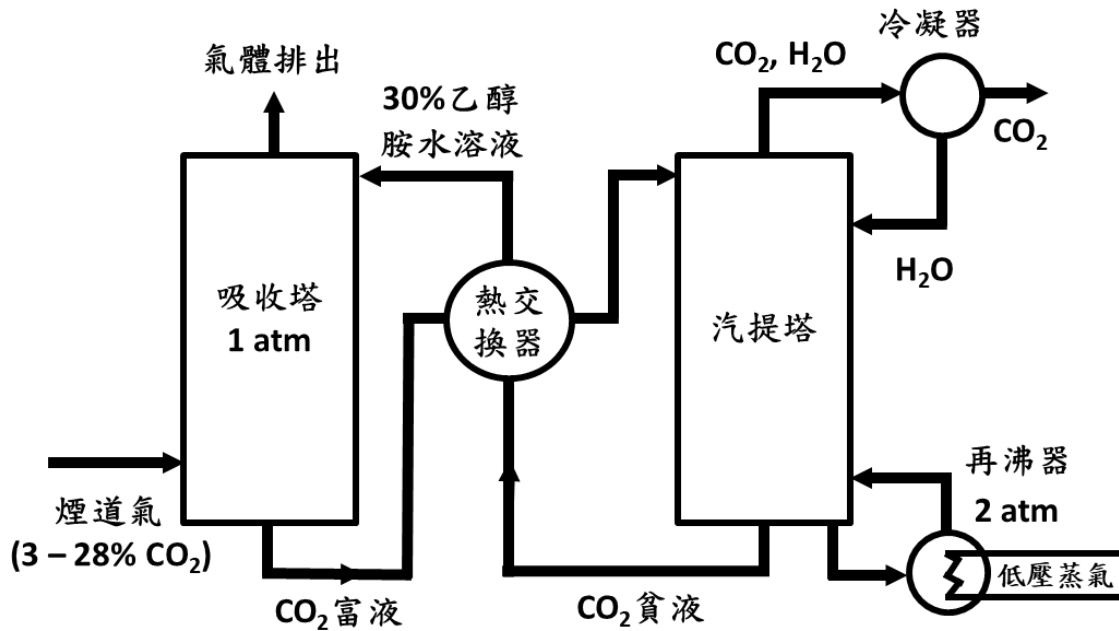


圖 5.1 CO₂ 化學吸收製程示意圖

Global CCS Institute 於 2021 年的資料中指出，化學吸收法捕碳技術成熟度 (Technology readiness level, TRL) 為 9，為技術純熟且達商業化服務 (Normal commercial service) 的階段¹⁴⁴。此技術之技術開發商眾多，國外如 Mitsubishi Heavy Industry (MHI) 迄今已有十五座商業規模及示範場規模實績(圖 5.2)，捕碳量自 0.3 至 4,776 噸/日，相當於約 100 至 158 萬噸/年(以 330 日/年估算)¹⁴⁵。國內自 2008 年開始即有示範工廠規模之化學吸收捕碳製程，捕碳量約介於 6.6 至 528 噸 CO₂/

¹⁴³ Rochelle, G.T., Chapter 3 - Conventional amine scrubbing for CO₂ capture, absorption-based post-combustion capture of carbon dioxide, 35-67 (2016).

¹⁴⁴ Global CCS Institute, Technology readiness and costs of CCS (2021).

¹⁴⁵ <https://www.mhi.com/products/engineering/projectrecords/co2plants.html>

年不等(以 330 日/年估算)¹⁴⁶，部分示範廠使用超重力旋轉床(Rotating packed bed, RPB)作為製程強化設備，並針對 RPB 及固定床的捕碳效能進行對比，實測結果顯示相近的 CO₂ 捕獲效率下，RPB 之體積為固定床的 33%，RPB 旋轉需要的能量約佔再生能耗的 2%¹⁴⁷，可為台灣土地資源稀少提供解方。

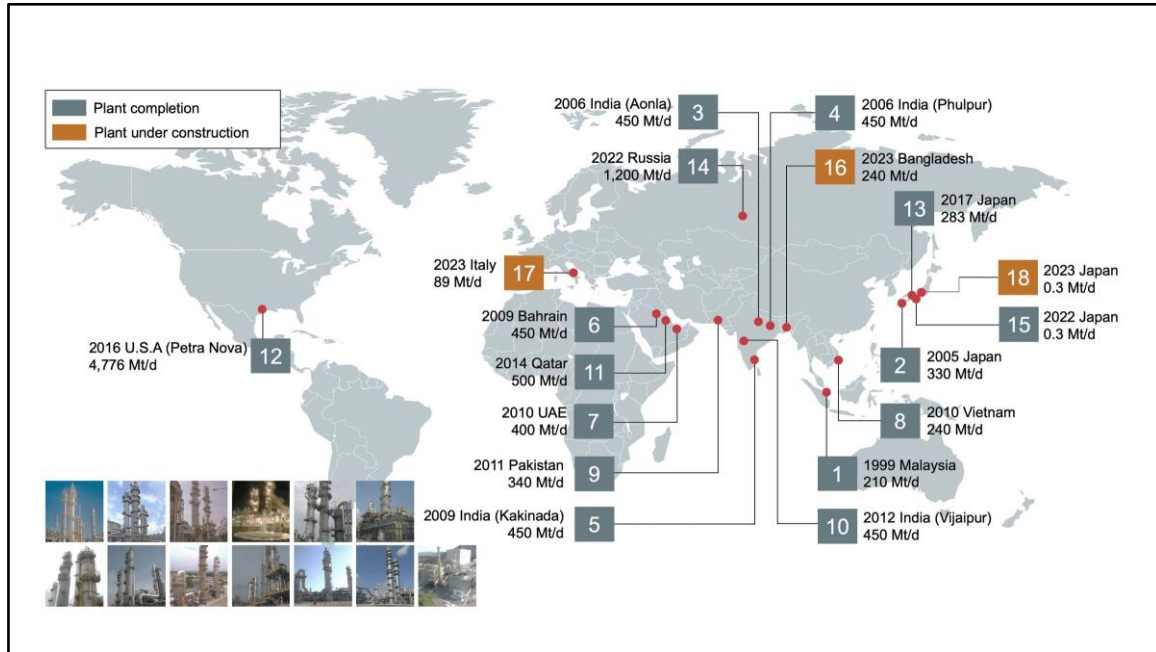


圖 5.2 化學吸收捕碳製程之實績¹⁴⁸

一、化學吸收法補碳成本估算

電廠或鍋爐排放之煙道氣，其 CO₂ 分壓影響著捕碳製程的設備大小與能量消耗，進而影響了捕碳成本，不同製程之煙道氣特性可見圖 5.3。高 CO₂ 分壓的氣體意味著單位體積之 CO₂ 量較多，因此在達相同捕碳量的前提下，需要的設備體積較小，有較少的設置成本(Capital cost)。在吸收液條件固定的情況下，氣體中 CO₂ 分壓較高有著較大的質傳驅動力，使單位吸收液中的 CO₂ 吸收量增加，因而有著較低的能源消耗。大多工業程序中，較大產量的製程有著較低的單位成本，CO₂ 捕獲製程也是如此。在製程放大時，資本成本與捕碳量放大的倍數關係如下¹⁴⁹：

$$\text{Cost of Plant A} = \text{Cost of Plant B} \left(\frac{\text{Capacity of plant A}}{\text{Capacity of Plant B}} \right)^n$$

¹⁴⁶ 談駿嵩，二氧化碳捕獲封存及再利用(2021).

¹⁴⁷ Chamchan, N., Chang, J. Y., Hsu, H. C., Kang, J. L., Wong, D. S. H., Jang, S. S., Shen, J. F. Comparison of rotating packed bed and packed bed absorber in pilot plant and model simulation for CO₂ capture. J. Taiwan Inst. Chem. Eng., 73, 20–26 (2017).

¹⁴⁸ <https://www.mhi.com/products/engineering/projectrecords/co2plants.html>

¹⁴⁹ Global CCS Institute, Technology readiness and costs of CCS (2021).

其中，n 約介於 0.6 (Single train) 至 0.8 (Multiple trains in parallel)。當捕碳廠之捕碳量提升兩倍，資本投資可減少約 60% (Single train)。此資本投資的減少在捕碳量有大幅提升時(如一次放大 10 倍)將非常顯著。n 的數值會因製程、設備種類等不同而有所改變，因此若要更仔細地推估資本成本，需就此類型經驗式的適用範圍與條件加以確認。以上資訊提供有意設置 CO₂ 捕獲製程的企業參考。Global CCS Institute 針對不同排放源之煙道氣濃度，估算其捕碳成本(圖 5.3)，此估算以化學吸收法配上乙醇胺水溶液(商業吸收劑)做為基準，因其與 CO₂ 反應及相關物化性都已建立完備。估算結果顯示，當 CO₂ 分壓越高(1 - 41 kPa)，捕碳成本越低 (~300 - ~50 USD₂₀₂₀ per tonne CO₂)。圖 5.3 亦顯示在氣源固定時，捕碳場規模對捕碳成本的影響，如以 Natural gas combined cycle (NGCC) 及 Steel Sinter 廠為例，其 CO₂ 排放濃度~4 kPa，當捕碳廠規模為 0.07 - 0.66 (百萬噸 CO₂/年, Mtpa)時，捕碳成本約介於 75 - 125 USD₂₀₂₀ per tonne CO₂。捕碳廠規模對捕碳成本的影響在 CO₂ 分壓低時非常顯著，但在 CO₂ 分壓高時則影響不明顯。

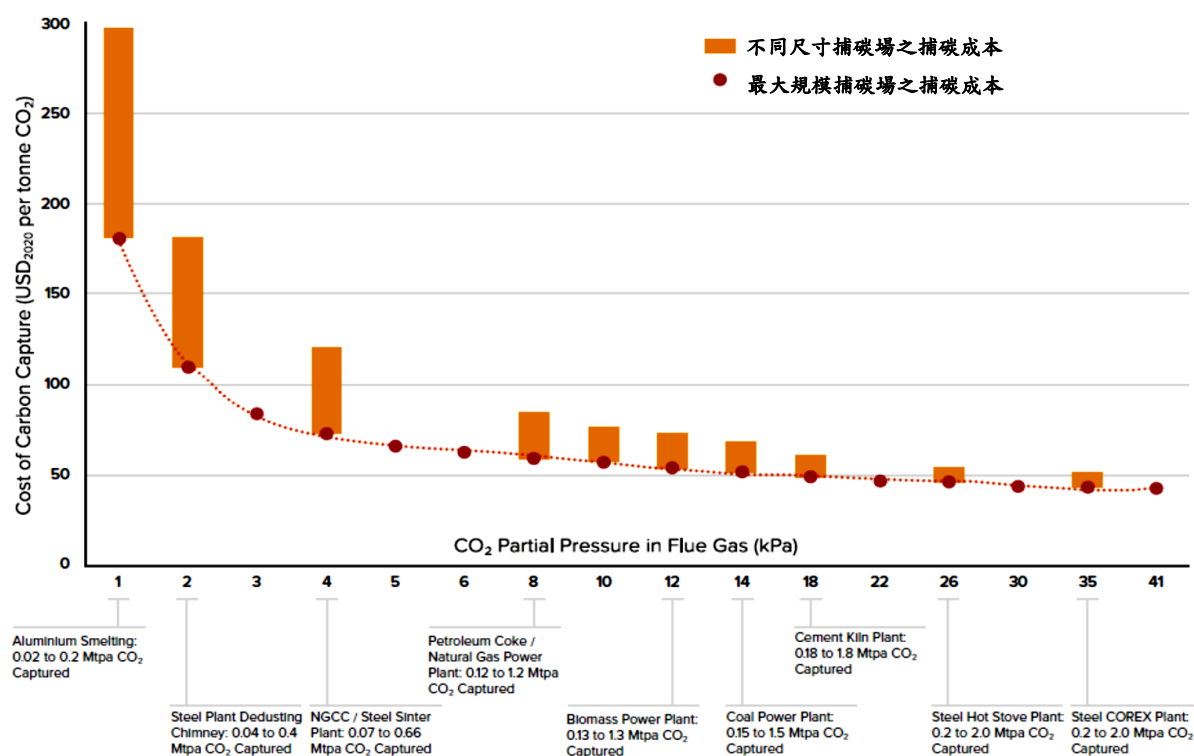


圖 5.3 不同排放源煙道氣之 CO₂ 分壓對捕碳成本之影響¹⁵⁰

除上述討論，Global CCS Institute 也針對具「經濟規模」之捕碳廠大小做一探討，並以 NGCC 及 Supercritical pulverized coal (SCPC) 兩製程進行捕碳為例，結果如圖 5.4 所示。捕碳成本隨捕碳廠規模增加先是大幅下降再持平，規模在 0.4 - 0.5 Mtpa 時捕碳成本便不再下降。此顯示了在進行碳捕獲時，為盡可能地降低碳成本，建議的捕碳廠規模至少需要 0.4 Mtpa 以上。

¹⁵⁰ Global CCS Institute, Technology readiness and costs of CCS (2021).

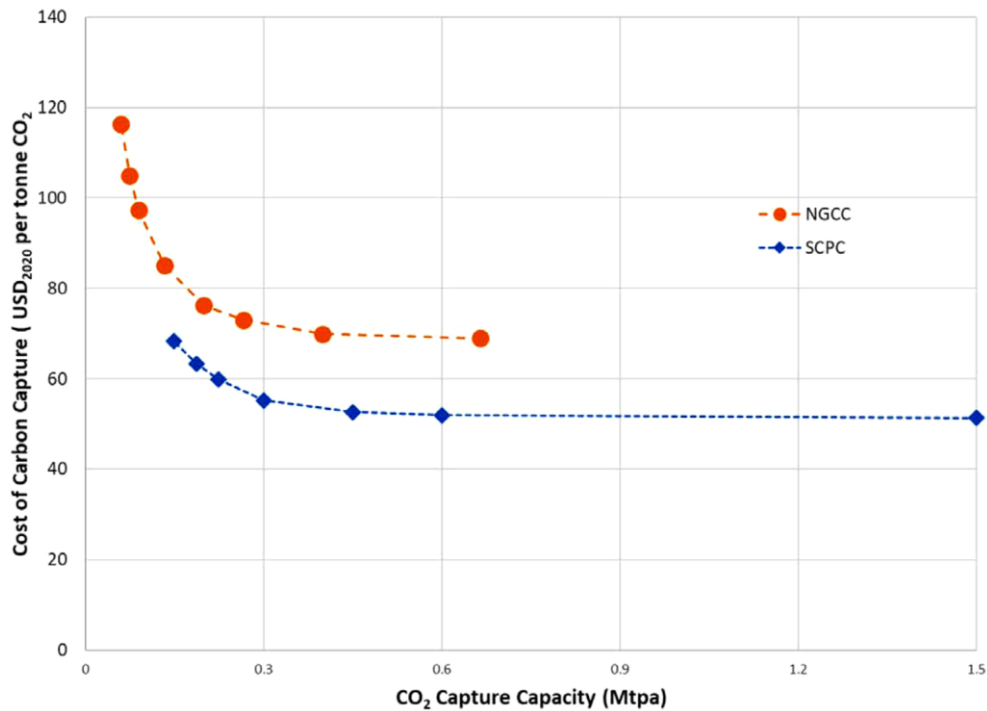


圖 5.4 捕碳廠規模對捕碳成本之影響¹⁵¹

化學吸收法雖為一相當成熟的捕碳技術，藉由吸收劑或操作條件的調整也可達成 80% (甚至 95% 以上) 的 CO₂ 回收率(CO₂ recovery)，並得到純度為 99% 以上的 CO₂ 氣體。為了讓此技術更廣為運用，國內外研究團隊仍持續針對吸收劑配方¹⁵²及製程進行開發¹⁵³，更進一步降低再生能耗及縮小設備體積。吸收劑配方開發(或醇胺遴選)須考量能量表現(Energy criteria for amine selection)及吸收劑的管理(Absorbent management for amine selection)¹⁵⁴。配方的能量表現由四個元素決定，分別為(1) CO₂ 負載量(Liquid absorption capacity)，決定資本成本及熱交換器的能量損失；(2) CO₂ 吸收速率(Rate of CO₂ absorption)決定吸收設備填料的填充量；(3) CO₂ 吸收熱(Heat of CO₂ absorption)和(4)最高操作溫度，這兩個元素決定了壓縮機、再沸器和汽提塔的設備成本和功損失(Lost work)。此四個元素都與資本成本及能源使用有關，且為一權衡(Trade-off)的關係，需透過新穎的製程設計來達最佳效果。吸收劑的管理是指在 CO₂ 吸收過程中損失的活性物質及對造成環境影響，如醇胺的揮發或是損失(形成氣凝膠)排放至環境。另外，氧化降解(Oxidative degradation)也為一煙道氣捕碳會出現的問題，即使經過詳細的調查與研究，在過

¹⁵¹ Global CCS Institute, Technology readiness and costs of CCS (2021).

¹⁵² Yu, C.H., Huang, C.H. and Tan, C.S. A review of CO₂ capture by absorption and adsorption. *Aerosol Air Qual. Res.*, 12, 745–769 (2012).

¹⁵³ 黃欣凱，描述不同受阻程度的胺水溶液的二氧化碳吸收能力，國立清華大學化工系碩士論文，中華民國 112 年。

¹⁵⁴ Rochelle, G.T., Chapter 3 - Conventional amine scrubbing for CO₂ capture, absorption-based post-combustion capture of carbon dioxide, 35–67 (2016).

去的 15 年裡，研究人員對於氧化降解的機制還沒有徹底的了解。吸收劑配方或醇胺遴選時考量因素眾多，原理及細節可詳見 Rochelle 之文章¹⁵⁵。

由於工廠煙道氣之氣量龐大、CO₂ 濃度低且氣液間存在明顯質傳阻力，使此法需要龐大的氣體吸收設備(吸收塔)。因此有必要藉由捕碳製程的效能強化來縮小吸收塔體積，解決場地或空間不足的問題。以下段落將就(1)天然氣脫硫及 CO₂ 化學吸收、(2) Petra Nova 捕碳計畫、(3)化學吸收法結合超重力技術、(4)國際與國內發展之超重力化學吸收捕碳製程及(5)結語與建議來進行說明。

二、天然氣脫硫及 CO₂ 化學吸收

現有化學吸收法使用乙醇胺吸收劑時，再生能耗約介於 3.2 – 5.5 GJ/噸 CO₂¹⁵⁶，影響再生能耗多寡的因素眾多，例如，氣體排放源之 CO₂ 分壓、離開捕碳系統氣體之 CO₂ 分壓、系統的不可逆性等皆會影響再生能耗。天然氣脫硫或加氫脫硫製程也是使用醇胺類吸收劑來吸收氣體中酸性成分(如硫化氫、CO₂ 等)，若需將天然氣中的硫化氫處理到很低的濃度時(ppm level)，製程的再生能耗會相當高，因汽提塔需加熱將液體中的硫化氫脫除到 ppm 等級，才能讓氣液間存在硫化氫的濃度差或逸度(Fugacity)差，讓質量傳遞得以驅動¹⁵⁷。

再生吸收液時，吸收液 Lean loading 降低導致再生能耗提升的現象也在化學吸收捕碳製程中觀察到。Abu-Zahra 等人¹⁵⁸指出，在達不同 CO₂ 捕獲效率的前提下，30% 乙醇胺(Monoethanolamine, MEA)的 CO₂ Lean loading 在 0.28 – 0.34 mol CO₂/mol MEA 時有一最佳值(圖 5.5)，所對應的再生能耗~3.4 GJ/ton CO₂。若將 Lean loading 降低，由 0.28 降至 0.20 mol CO₂/mol MEA，再生能耗會由~3.6 提升至 5.0 GJ/ton CO₂ (圖 5.5 中 90% Removal efficiency 的線)。由圖的趨勢可看出，若降低 Lean loading，再生能耗將會大幅提升，此現象與上述 MDEA 吸收 H₂S 的例子呼應。另由圖 5.5 也可看出，捕碳製程的 CO₂ 移除效率降低，再生能耗也可因而降低。因此，捕碳製程的 CO₂ 捕獲效率須與能耗同時考量，而適度的放鬆 CO₂ 移除效率的要求或許是個可參考的方向。

¹⁵⁵ Rochelle, G.T., Chapter 3 - Conventional amine scrubbing for CO₂ capture, absorption-based post-combustion capture of carbon dioxide, 35–67 (2016).

¹⁵⁶ Rochelle, G. T., Chen, E., Freeman, S., van Wagener, D., Xu, Q., Voice, A., Aqueous piperazine as the new standard for CO₂ capture technology. Chem. Eng. J., 171, 725–733 (2011).

¹⁵⁷ Jassim, M.S., Sensitivity analyses and optimization of a gas sweetening plant for hydrogen sulfide and carbon dioxide capture using methyldiethanolamine solutions. J. Nat. Gas Sci. Eng., 36, 175–183 (2016).

¹⁵⁸ Abu-Zahra, M.R.M., Schneiders, L.H.J., Niederer, J., Feron, P.H.M., Versteeg, G., CO₂ Capture from power plants: Part I. A parametric study of the technical performance based on monoethanolamine, Int. J. Greenh. Gas Con., 1, 37–46 (2007).

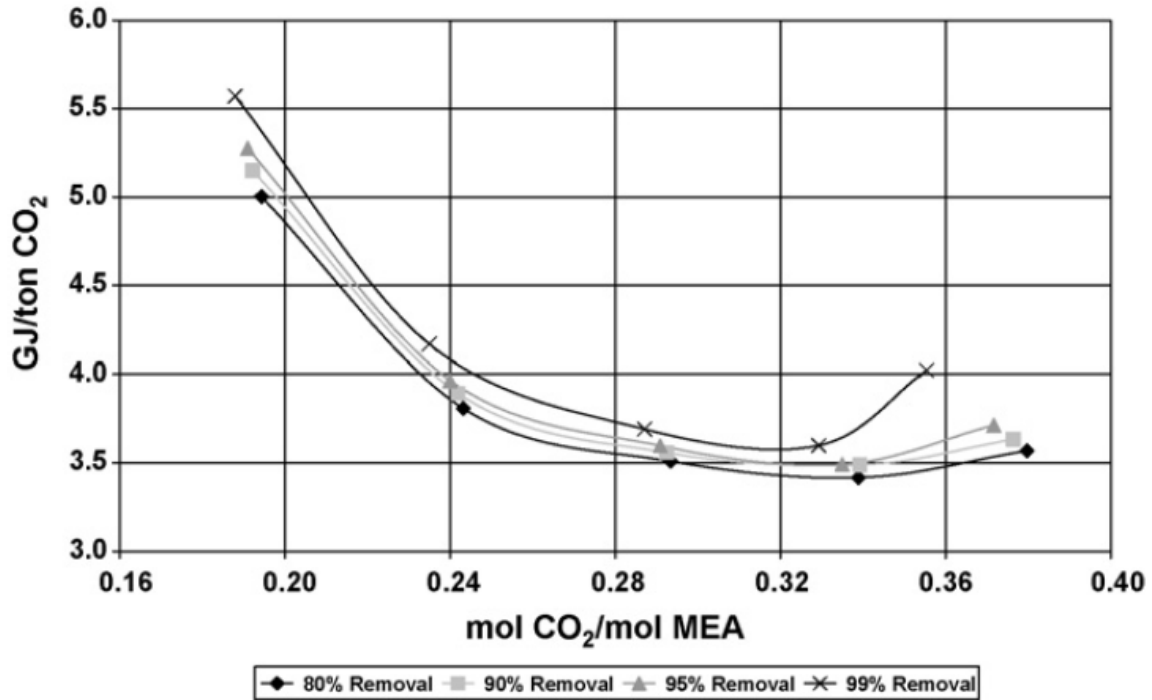


圖 5.5 30% MEA 之 Lean loading、CO₂ 移除效率對再生能耗影響¹⁵⁹

三、Petra Nova 捕碳計畫

現有化學吸收捕碳製程之技術開發商眾多，且不同規模之捕碳製程(實績)皆已建立，本文將不逐一介紹，而是以目前全世界最大規模的捕碳製程進行說明。位於美國德州的 Petra Nova 計畫為美國最大型的燃燒後捕捉 CO₂ 工廠，將 NRG Energy 公司位於德州 Parish 地區的燃煤發電廠排放的尾氣，利用三菱重工 (Mitsubishi Heavy Industries, MHI) 提供的化學吸收技術捕獲其中的 CO₂，並將 CO₂ 注入 80 公里外的 West Ranch 油井以提高石油採收率 (Enhanced Oil Recovery, EOR)，年捕碳量達 158 萬噸 (4,776 噸 CO₂/日，以 330 日/年計算)，相當於一 240 MW 電廠的排碳規模。其所捕下之 CO₂ 供提升油產量 (Enhanced oil recovery, EOR) 之用，將油品產量自 500 提升至 15,000 桶/日¹⁶⁰。資料顯示，此製程之捕碳成本為 65 美金/噸 CO₂¹⁶¹。由於製程能耗為 1.09 噸蒸氣/噸 CO₂¹⁶²，若以低壓蒸氣 (如 5 kg/cm² g 蒸氣) 之熱值來計算，能耗為 2.30 GJ/ton CO₂。此捕碳廠自測試運轉的

¹⁵⁹ Abu-Zahra, M.R.M., Schneiders, L.H.J., Niederer, J., Feron, P.H.M., Versteeg, G., CO₂ Capture from power plants: Part I. A parametric study of the technical performance based on monoethanolamine, *Int. J. Greenh. Gas Con.*, 1, 37–46 (2007).

¹⁶⁰ US DOE, Secretary Perry celebrates successful completion of Petra Nova carbon capture project (2017).

¹⁶¹ Baylin-Stern, A., Berghout, N., Is carbon capture too expensive? Commentary (2021)

¹⁶² Hirata, T., Kishimoto, S., Inui, M., Tsujiuchi, T., Shimada, D., Kawasaki, S., MHI's commercial experiences with CO₂ capture and recent R&D activities. *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*, 55, 32–37 (2018).

三年期間(2017/1-2019/12)，共捕獲 350 萬噸 CO₂。在 2020 年時，工廠雖因石油價格下跌而停止運轉，但此廠的運轉經驗及結果代表著在實施大規模捕碳時，化學吸收法為一可靠且可用來大規模捕碳的技術。

化學吸收捕碳技術雖已可用來大規模捕碳，但國內外研究團隊仍致力於吸收劑配方與製程的開發，以降低再生能耗及減少佔地需求。就佔地需求而言，以 WA Parish 電廠的捕碳廠為例(圖 5.6)，其吸收塔高度為 110 公尺(直徑未揭露)、汽提塔的高度及直徑分別為 49 及 8.2 公尺¹⁶³；若以 Google 地圖的比例尺來估算，此工廠的長與寬估計都為 130 公尺，面積估計為 1.67 公頃，佔地相當可觀。由於電廠排放氣之 CO₂ 濃度低、排放量大且氣液間有明顯的質傳阻力，需要的氣體吸收設備也相當龐大，圖中可以看出吸收塔體積明顯大於汽提塔。



圖 5.6 WA Parish 捕碳廠側視圖(左)、俯視圖(右)¹⁶⁴

四、減少土地需求的規劃方向

上述實績顯示捕碳廠的佔地相當可觀，值得注意的是，因電廠排放氣的特性是固定的(CO₂ 濃度低、排放量大)，使用其他方法來捕獲電廠排放氣也會面臨設備體積、佔地面積龐大的問題。在土地為相當珍貴資源的臺灣，大多企業對工廠的場地規劃並無預留捕碳製程，工廠的主要、次要 CO₂ 排放源位置不一，有些可用場地甚至有高度及空間限制。為減少土地需求，可以中央汽提塔(Central regenerator)及製程強化來規劃，減少佔地的需求。

¹⁶³ <https://www.powermag.com/capturing-carbon-and-seizing-innovation-petra-nova-is-powers-plant-of-the-year/>

¹⁶⁴ Hirata, T., Kishimoto, S., Inui, M., Tsujiuchi, T., Shimada, D., Kawasaki, S., MHI's commercial experiences with CO₂ capture and recent R&D activities. Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, 55, 32–37 (2018).

(一) 中央汽提塔

中央汽提塔的觀念來自於天然氣脫硫的經驗，多個吸收塔來配搭一個汽提塔，如圖 5.7 所示。在每個 CO₂ 排放源旁設立一吸收塔，CO₂ 吸收液從多個吸收塔匯集在同一個塔槽內，再一同輸送到汽提塔進行再生。然而，每個吸收塔的 CO₂ 進料濃度可能不同，為了都達成 90% 的捕獲效率，需將吸收液的 Lean loading 降到比較低。因此相較於使用傳統的一吸收塔配搭一汽提塔，中央汽提塔之概念在實施時的再生能耗可能會較高，此也為土地、能耗之間的權衡。類似中央汽提塔的概念也在 Global CCS Institute 的報導中顯示¹⁶⁵，若有多個 CO₂ 排放源是鄰近的，可以將它們蒐集並匯入同一捕碳製程。氣源混合時 CO₂ 分壓降低可能增加捕碳成本，但卻為有效利用空間的方法。關於製程強化與化學吸收法的結合，將於下個小節呈現。

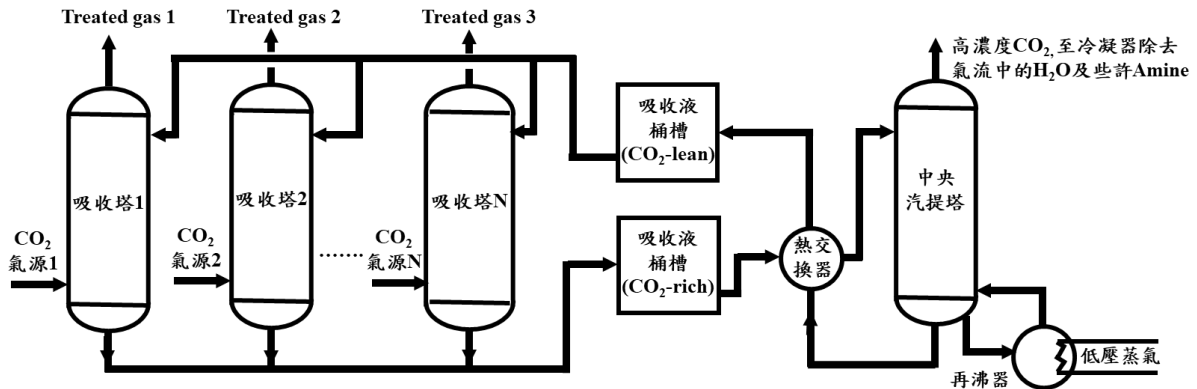


圖 5.7 中央汽提塔示意圖(本研究繪製)¹⁶⁶

(二) 製程強化結合化學吸收法

超重力旋轉床(Rotating Packed Bed, RPB)為製程強化方法中的一個常用的製程強化設備，且已被廣泛運用在利用重力增加質傳效能之單元操作如 CO₂ 吸收¹⁶⁷、吸收劑再生¹⁶⁸、廢水中氨氮氣提、揮發性有機物質吸收、蒸餾及臭氧氧化等。現

¹⁶⁵ Global CCS Institute, Technology readiness and costs of CCS (2021).

¹⁶⁶ Emerson process management, Control valve sourcebook – Refining (2014); EPA, Environmental impact statement, Alaska Petrochemical company refining and petrochemical facility, Valdez, Alaska (1979).

¹⁶⁷ Chamchan, N., Chang, J. Y., Hsu, H. C., Kang, J. L., Wong, D. S. H., Jang, S. S., Shen, J. F. Comparison of rotating packed bed and packed bed absorber in pilot plant and model simulation for CO₂ capture. J. Taiwan Inst. Chem. Eng., 73, 20–26 (2017); Lin, C.C., Liu, W.T., Tan, C.S., Removal of carbon dioxide by absorption in a rotating packed bed. Ind. Eng. Chem. Res., 42, 2381–2386 (2003); Tan, C.S., Chen, J.E., Absorption of carbon dioxide with piperazine and its mixtures in a rotating packed bed. Sep. Purif. Technol., 49, 174–180 (2006).

¹⁶⁸ Wang, Y.M., Chen, Y.S., Capture of CO₂ by Highly Concentrated Alkanolamine Solutions in a Rotating Packed Bed, Environ. Prog. Sustainable Energy, 38, 13263 (2019); Chen, H., Tsai, T.C., Tan, C.S., CO₂

有之工業化應用如超重力脫硫、油田注水脫氧、海水脫氧等皆為成功之案例¹⁶⁹。在眾多應用中，Dow Chemical 之次氯酸生產製程用三個 RPB 來取代一噴霧洗滌塔(Spray tower)為一成功的放大案例。此案例顯示若以 RPB 進行次氯酸生產，相較於 Spray tower，RPB 之體積縮小 40 倍、設備投資成本節省 70%，產率也自 80% 提升至 96%，壓降減少 50%¹⁷⁰。迄今，已有許多學者將 RPB 應用於化學吸收法捕碳，以鹼性或醇胺吸收液來捕獲濃度 1 - 30% 的 CO₂ 氣體，成果顯示 RPB 之總氣相質傳係數(Overall volumetric mass transfer coefficient, $K_G a$)為傳統固定床之 2 - 10 倍¹⁷¹；RPB 之質傳單元高度(Height of transfer unit, HTU)小於 27 公分，遠小於為固定床之 3.4 公尺¹⁷²；RPB 體積為固定床之 33%¹⁷³，當使用 RPB 進行吸收劑再生時，RPB 體積為固定床之 10%¹⁷⁴。然而，以 RPB 結合化學吸收法捕獲碳時，RPB 體積能夠縮小的極限關係到此設備在工廠的實用性，至今尚未有一系統性的探討，這也是國內外研究團隊正關注的項目。

無論將 RPB 應用在 CO₂ 吸收或是吸收劑再生，若要在工業應用，都需要可靠的 RPB 模型。在傳統吸收塔中，當吸收劑之熱力學與動力學模型皆已驗證的情況下，可靠的質傳經驗式為放大設計的基石¹⁷⁵，此論點也適用在 RPB 的模擬。現今已有非常多的吸收劑對 CO₂ 的化學吸收效能是優於 MEA 水溶液，但因為 MEA 的熱物性質非常齊全，且可用於描述 MEA-CO₂-H₂O 系統的熱力學與動力學模型都已被驗證，故以此為系統來建立 RPB 模型及預測捕碳效率時，可避免參數缺少的問題。國內外已有許多學者以自行撰寫程式或以商用製程模擬軟體(如 Aspen Plus)為基礎，來建立 RPB 捕碳模型，其中，Yu 等人¹⁷⁶在文獻回顧中將既有的 RPB 捕碳模型(MEA 吸收劑)進行詳細模型架構分析，指出先前技術需改善的地方，並

Capture Using Amino Acid Sodium Salt Mixed with Alkanolamines. *Int. J. Greenh. Gas Con.*, 79, 127–133 (2018).

¹⁶⁹ 林佳璋，超重力反應結晶法合成奈米粉體 (2004).

¹⁷⁰ Quarderer, G.J., Trent, D.L., Stewart, E.J., Tirtowidjojo, D., Mehta, A.J., Tirtowidjojo, C.A., Method for synthesis of hypochlorous acid. U.S. Patent, 6,048,513 (2000).

¹⁷¹ Munjal, S., Dudukovic, M.P., Ramachandran, P.A., Mass transfer in rotating packed beds: II. development of gas-liquid and liquid-solid mass-transfer coefficients. *Chem. Eng. Sci.*, 44, 2257–2268 (1989).

¹⁷² Jassim, M.S., Rochelle, G.T., Eimer, D., Ramshaw, C., Carbon dioxide absorption and desorption in aqueous monoethanolamine solutions in a rotating packed bed. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 46, 2823–2833 (2007).

¹⁷³ Chamchan, N., Chang, J. Y., Hsu, H. C., Kang, J. L., Wong, D. S. H., Jang, S. S., Shen, J. F. Comparison of rotating packed bed and packed bed absorber in pilot plant and model simulation for CO₂ capture. *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, 73, 20–26 (2017).

¹⁷⁴ Cheng, H. H., Lai, C.H., Tan, C.S., Thermal Regeneration of Alkanolamine Solutions in a Rotating Packed Bed, *Int. J. Greenh. Gas Con.* 16, 206–216 (2013).

¹⁷⁵ Hanley, B., Chen, C-C., New Mass-transfer correlations for packed towers. *AIChE J.*, 58, 132–152 (2013).

¹⁷⁶ Yu, C.H., Lin Y.J., Wong, D.S.H., Chen, C.C., Process simulation of CO₂ absorption with monoethanolamine aqueous solutions using rotating packed bed. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 61, 33, 12142–12152 (2022).

納入模型建立的考量。他們模型的假設為：「RPB 與固定床的模擬本質相同，不同的地方為幾何形狀及超重力場增強了物質在氣膜、液膜的質傳與熱傳」。在此原則下，他們進一步地說明了氣相質傳係數(k_G)、液體持液量(h_L)及液相質傳係數(k_L)的經驗式選定對捕碳效率的影響，而非測試不同組合的質傳經驗式。如就 k_G 而言，因以醇胺吸收 CO_2 為一個液膜控制的過程，故 k_G 的增加(或減少)不影響 CO_2 捕獲效率。就 h_L 而言，因經驗式計算的是流體區的持液量(或稱 Bulk holdup)，而 CO_2 與 MEA 的反應主要發生在液膜中(Film holdup)，因此，改變 Holdup correlation 不影響 CO_2 捕獲效率的計算。最後，由於 RPB 提供的高剪切力將液體切割成較小的液滴及較薄的液膜，且高速旋轉下，吸收液於填料表面更新的速度加快。因此 k_L 已不再是控制汽液間質傳的阻力，增加(或降低) k_L 不影響 CO_2 捕獲效率。反倒是吸收液與 CO_2 的反應速率加快時，對 CO_2 捕獲效率的影響程度較大，顯示吸收液配方開發的重要性，與先前的實驗觀察呼應。在分析完各項質傳參數的影響後，他們在結論說明可靠的氣液接觸面積經驗式是 RPB 效能預估、放大設計的關鍵。然而就 RPB 而言，上述質傳經驗式與 RPB 內所填充的填料種類及 RPB 幾何形狀有高度相關性，在放大設計時經驗式的選定相當重要，必要時得自行建立。

由上述資訊可見，國內已有學者將 RPB 技術應用在化學吸收捕碳製程上，且持續針對吸收劑配方及製程技術進行開發，應用在處理不同 CO_2 濃度的氣源，接下來將介紹此些研究結果放大到工業實際應用時的進展。

五、國際與國內發展之超重力化學吸收捕碳製程

截至目前為止，中國中石化(Sinopec)的 RPB 捕碳製程規模為全世界之最，達 3 萬噸 CO_2 /年¹⁷⁷。他們於吸收塔及汽提塔旁分別建立一座 RPB 來進行 CO_2 吸收及吸收液再生，並與傳統固定床進行對比(如圖 5.8)。測試結果顯示，在相同氣體處理量下，RPB 之體積、高度、佔地面積與設備成本分別僅為固定床之 20%、5%、40%及 50%，顯示 RPB 優越的質傳性能帶來的製程強化效益。另外，他們以自行開發之 MSA-II 吸收劑配方(組成比例未公開)進行捕碳， CO_2 捕獲效率可達 80% 以上，且可獲得之 CO_2 純度高達 99.5%。雖他們的資料未揭露固定床與 RPB 之設計細節(如填料區尺寸、Flooding capacity 等)，但測試結果也證實了 RPB 放大的到商業化規模是可行的。惟近年來已無該廠的相關資訊，因此沒有工程應用上的經驗可參考。另外，他們所揭露的資料中說明 RPB 之體積為固定床之 20%；然而，由圖 5.8 可看出，RPB 體積為固定床的 4% 左右(以固定床及 RPB 尺寸計算)；而圖 5.8 標示的直徑與高是設備外殼的尺寸。對業者而言，一吸收設備的佔地是包含填料區及外殼，因此相較於傳統製程，以 RPB 捕碳能夠達到相當程度減少設備的體積。

¹⁷⁷ 陸詩健，中石化 CO_2 捕集、輸送集驅油封存關鍵技術與工程實踐 (2017)。



圖 5.8 中國中石化之 RPB 捕碳製程(30,000 噸/年)¹⁷⁸

除中國中石化之外，英國 Carbon Clean Solution Ltd (CCSL) 與美國 Gas Technology Institute (GTI) 共同執行能源部 (US Department of Energy, USDOE) 之計畫 (2018/10 - 2022/3)，將實驗室之發展之 RPB 放大至示範工廠規模，捕碳量約為 330 噸/年¹⁷⁹。他們以一個雙層的 RPB 吸收氣體中的 CO₂，再以一個單層 RPB 進行吸收液再生，將 RPB 建立在一小且緊密的空間，徹底實現製程強化及體積縮小的概念，並達成 (1) 累積 1,000 小時運轉測試；(2) 達 90% CO₂ 捕獲效率；(3) RPB 填料使用高度較傳統固定床的 20% 以下；(4) 吸收液循環量較傳統製程低 70%；(5) 溶劑中水的比例較傳統製程低 25%。值得注意的是，以一雙層 RPB 來進行 CO₂ 吸收的概念與以兩個單層 RPB 來進行 CO₂ 吸收的概念類似，後者卻早在 2016 年就有國內學者發表¹⁸⁰，並分別於 2018 及 2019 年取得中華民國及美國專利¹⁸¹。這也顯示關於 RPB 結合化學吸收法的研究領域，國內學者是走在比較前面的。據 CCSL 的網頁資料顯示，他們正測試 3,000 及 3 萬噸/年規模的捕碳廠¹⁸²。由此也

¹⁷⁸ 陸詩健，中石化 CO₂ 捕集、輸送集驅油封存關鍵技術與工程實踐 (2017)。

¹⁷⁹ Akpolat, O., ROTA-CAP: An intensified carbon capture system using rotating packed beds. DOE Contract No. DE-FE0031630

¹⁸⁰ Yu, C.H., Chen, M.T., Chen, H., Tan, C.S., "Effects of process configurations for combination of rotating packed bed and packed bed on CO₂ capture", Applied Energy, 175, 269-276 (2016).

¹⁸¹ 游承修、談駿嵩，吸收氣體中一成分之裝置，中華民國專利，I613003；Yu, C.H., Tan, C.S., Apparatus and method for absorbing a component from a gas mixture using rotating packed bed unit. US Patent, US10413862B2.

¹⁸² <https://www.carbonclean.com/media-center/news/breakthrough-industrial-carbon-capture-solution>

可見，他們對於 RPB 捕碳製程的放大，是以每次放大~10 倍的捕碳量來進行，至於之後是否有更大規模的捕碳廠會建立，至今還沒有相關資訊。

就臺灣超重力捕碳技術的實測方面，藉由能源國家型科技計畫(National energy project, NEP)，學界的捕碳技術已從實驗室規模放大到示範工廠規模，於企業排放源實測捕碳效能。迄今，臺灣已有中國鋼鐵(China Steel Corporation, CSC)、長春人造樹脂與台塑石化等公司與學界合作，結合學界的技術(吸收劑遴選、配方開發、RPB 及製程設計)及業界的工程能量，將清大實驗室 RPB 成功地放大到示範工廠規模(~33 - 528 噸 CO₂/年, 330 日/年計算)，於不同氣體排放源實測試捕碳效能，重要成果為：(1)相近捕碳效率及再生能耗下，RPB 之體積為固定床之 33%，RPB 旋轉需要的能量約佔再生能耗的 2%¹⁸³；(2)捕碳能耗可降至 2.8 ~ 3.0 GJ/噸 CO₂¹⁸⁴。值得一提的是，長春石化的捕碳製程是建立在一有空間限制的場域¹⁸⁵。該捕碳製程是先於工廠外部將組建與管線大致組裝完成，再進入廠區進行最少且必要的施工焊接，實現了製程強化及模組化的概念，提高工廠營運效率及安全性。在上述三個國內的捕碳示範場測試中，CSC 的測試結果，除說明 RPB 體積可縮小的程度，另也揭露了 RPB 之尺寸(內徑、外徑、高)及操作條件(氣液進料及轉速)等資訊，對於後續的放大設計有很大的幫助。

由上述資訊可看出，以製程強化結合化學吸收捕碳相當具有應用潛力，且國外公司、美國能源部也積極投入 RPB 捕碳的技術研發。臺灣已累積 RPB 捕碳的示範工廠建造及操作經驗，且迄今也放大至~500 噸 CO₂/年的規模。若以工程放大每次為~10 倍的比例來看，下一階段即可放大到 5,000 或直接到 3 萬噸 CO₂/年，達國際現有最大的 RPB 捕碳廠規模，建立自有技術並將技術落實於臺灣的企業。

六、小結

眾多捕碳技術中，化學吸收法技術純熟度最高且已有商業化規模捕碳實績。本文蒐集並彙整國內外化學吸收捕碳技術發展情形，結語與建議總結如下：

(一) 政府(或企業)支持設立示範工廠：國內在吸收劑配方及製程技術的開發皆具研發能量及基礎，超重力化學吸收捕碳製程規模已達~500 噸/年，若能獲得政府(或企業)的支持，再進行一至兩次的工程放大便可達國際水準(3 萬噸/年)。示範工廠的建立也意味著國內已具有化學吸收法捕碳製程的設計、建造及運轉的能力、經驗與人才。學研界、工程公司及可靠的 RPB 設備商共同合作，

¹⁸³ Chamchan, N., Chang, J. Y., Hsu, H. C., Kang, J. L., Wong, D. S. H., Jang, S. S., Shen, J. F. Comparison of rotating packed bed and packed bed absorber in pilot plant and model simulation for CO₂ capture. *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, 73, 20–26 (2017).

¹⁸⁴ 談駿嵩，二氧化碳捕獲封存及再利用(2021).

¹⁸⁵ 全民行健、里山和諧[伍]，中華民國 108 年 2 月

有望建立出達國際水準之自有技術並於臺灣業界落實。國內外的廠測結果多以文宣或簡報等方式呈現，相關實測數據揭露有限。就國內而言，若是以政府資源挹注來建立的示範廠，在不揭露製程機密的前提下，適度的數據報導有助於加快技術發展。

- (二) **加速環差或環評的時間**：企業於廠內建立捕碳廠時需經過環差(或環評)的分析，在相關資料備齊的情況下，政府應可加速審查程序，縮短環差或環評的時間，以加速捕碳製程於企業落實及人才的培育。
- (三) **強化產學交流**：排放氣源條件不同時適用的捕碳技術應有所不同。政府、研究法人、公會等應投入資源在教育訓練上，如請學界開設捕碳技術相關課程，讓業界同仁了解技術內容及如何挑選適合的技術。業界的經驗也可回饋給學研界，分享技術在實際應用時需有的考量。

第二節 吸附法捕獲二氧化碳

吸附法依吸附劑的方式可分為物理吸附(physical adsorption 或 physisorption)與化學吸附(chemisorption)；前者為吸附劑藉由凡得瓦力(Van der Waals force)來吸附氣體在物體表面上，因吸附能小，被吸附的物質很容易再脫離；化學吸附為吸附劑分子與吸附氣體會產生化學反應，吸附能較大，因此脫附時亦需要吸收較高的能量。吸附法用於二氧化碳捕獲有以下優點：二氧化碳在吸附劑孔徑間的擴散速率快(相對於氣液界面的質傳速率，可達 1,000 倍以上)¹⁸⁶、高二氧化碳捕獲效率(uptake efficiency)、易於再生、操作簡單、製程可操作範圍廣、材料穩定性、可使用廢棄物製備吸附劑的可能性等¹⁸⁷。然而，吸附法用於二氧化碳捕獲的挑戰也很明顯：在低壓下的二氧化碳吸附能力較低、受水蒸氣和二氧化碳以外氣體的影響。吸附法能否推廣至實廠應用，關鍵在於吸附劑的選擇和捕獲製程的設計，以及兩者的搭配能否有效且儘可能低成本捕獲二氧化碳。

一、吸附劑的選擇條件

- (一) **平衡吸附量**：係指在固-氣界面處相平衡狀態下(此時的吸附與脫附速率相等)，該吸附劑單位重量下可以吸附的二氧化碳量，此量值與吸附劑的比表面積、孔徑、表面化學性質有關，且吸附量愈高，代表相同重量、單一循環下能夠捕獲以及再生的二氧化碳量也愈高，有利於降低吸附劑成本。
- (二) **選擇性**：當進氣的組成成份多元時，吸附劑對二氧化碳的選擇性十分重要，特別是針對物理吸附劑；其影響二氧化碳選擇性的因素取決於孔徑大小、形狀及分佈情形。若材料對二氧化碳的選擇性愈高，在實際應用上也相對有利於自複雜的進氣中捕獲二氧化碳，從而降低吸附劑成本支出。
- (三) **吸/脫附的動力學特性**：為吸附或脫附反應發生的速率，與吸附劑的孔徑、進氣裡面的二氧化碳濃度有關，在某些情況下，反應過程中形成的化學鍵類型也有著重要影響。在實際操作上，也會需要能夠快速建立吸附劑與二氧化碳的平衡狀態，以及讓吸附劑表面在脫附環境下可以快速再生。
- (四) **表面化學性質**：除了孔徑、比表面積等物理特性外，吸附劑的吸附能力也可以透過其表面上的雜原子官能基存在而增加。例如含有氧原子的官能基，可讓材料結構內

¹⁸⁶ C.H. Yu, C.H. Huang, C.S. Tan. A review of CO₂ capture by absorption and adsorption, *Aerosol and Air Quality Research*, 12 (5) (2012), pp. 745-769.

¹⁸⁷ M. Pardakhti, T. Jafari, Z. Tobin, B. Dutta, E. Moharreri, N.S. Shemshaki, R. Srivastava. Trends in solid adsorbent materials development for CO₂ capture *ACS applied materials & interfaces*, 11 (38) (2019), pp. 34533-34559.

部表面呈非極性的疏水特徵，而外表面則呈現極性的親水特徵，當進氣組成中可能有水氣成分時，有利於針對二氧化碳有效吸附。

- (五) **再生能力**：指的是吸附劑成功捕獲二氧化碳後，經脫附程序放出二氧化碳，從而恢復吸附劑的性能。此特性也是目前吸附劑研究的重要領域之一，主要在於考量溫度、壓力等條件下，對於製程(如PSA、VSA...等)的選擇。
- (六) **材料穩定性**：可泛指吸附劑在多次循環操作下的結構穩定性及性能穩定性。結構穩定性取決於製程設備操作過程中的耐磨損、抗裂抗碎等機械性質，以及在不同環境條件下(如進氣中含有水蒸氣、CO、SO_x、NO_x、顆粒物、微量元素等雜質)的抗化學性與耐熱性；性能穩定性則是多次循環操作下，材料本身能否儘可能的保持吸附量或吸脫附速率。換言之，材料穩定性高的吸附劑，可以提高其使用壽命，降低更換頻率，從而減少可能增加的額外成本。
- (七) **生產成本**：綜合考量上述條件，實際量產製備吸附劑的費用，這也是商業化十分重要的參數。目前已有不少以循環經濟角度為出發點，使用廢棄物做為吸附劑或取代一部份功能的料源，從而降低吸附劑的生產成本。

二、吸脫附操作方式

二氧化碳吸脫附製程，會依據吸附劑類型來設計，主要是透過調控壓力或溫度的操作方式，來達成並控制二氧化碳的吸脫附，常見的方式有：

- (一) **變壓吸附(Pressure Swing Adsorption, PSA)**：利用氣體在高壓時的吸附量較低壓時大很多，而以周期性的壓力變化程序使得吸附劑在高壓吸附、低壓脫附二氧化碳。
- (二) **變溫吸附(Temperature Swing Adsorption, TSA)**：在同樣的壓力下，因氣體的吸附量隨溫度增加而下降，而使吸附劑低溫吸附、高溫脫附來分離二氧化碳。
- (三) **變電吸附(Electrical Swing Adsorption, ESA)**：原理類似變溫吸附，但是在吸附塔加入直流電源，當吸附劑達飽和時，即通以電流來加熱吸附劑使氣體脫附。
- (四) **真空吸附(VSA, vacuum swing adsorption)**：為變壓吸附的一種，製程主要使用沸石、活性炭等物理吸附劑，以13X沸石為例，若欲將脫附純度拉升至95%，脫附壓力需要降至10 kPa以下，為了提升效率，製程設計以分層填料或多段配置等方式來進行。

多種吸附劑、製程裝置持續被提出，也持續有中大型模廠建立，並推算其二氧化碳捕獲之成本，總目標為降低其成本。以下就各種二氧化碳吸附劑、製程設計與技術特點、成本預估、面臨的技術挑戰等面向簡要介紹。

三、吸附劑種類

目前最常被研究及使用於捕獲二氧化碳的吸附劑為二氧化矽(Silica)、碳基(Carbon-based)材料、金屬有機框架(Metal-Organic Frameworks, MOFs)、多孔性有機高分子(Porous Organic Polymers, POPs)、沸石(Zeolites)、金屬氧化物(Metal Oxides)等材料¹⁸⁸。材料結晶度對吸附劑來說有很重大的影響，具備有序排列、週期性結構的吸附劑，可在實廠或製程的嚴苛環境下保持高穩定性，而可調控的孔徑尺寸及分佈，讓吸附劑可以針對捕獲專案的需求進行最佳化設計。與之相對的非晶型材料，通常會形成更高的比表面積及孔隙率，將有助於提升二氧化碳捕獲量，然而，非晶型材料的結構穩定性及選擇性也相對較低。因此，當專案在設計時，可根據實際需求來選擇合適的吸附劑，或是透過晶型、非晶型不同比例的組合以達成捕獲效率最佳化。

(一) 二氧化矽(Silica)

1. 發展現況：

- (1) 以有序中孔二氧化矽(Ordered Mesoporous Silica)為主流，包括以MCM型為大宗的M41S家族，以及SBA、MSU、KIL、FSM、FDU、KIT等系列材料¹⁸⁹。
- (2) 上述材料共通特色在於高比表面積(可達到1,000 m²/g以上)、可調且相對較大的孔徑(2~10 nm)，彼此之間的差別在於這些中孔的排列情形。其他特色包括：製備成本低、優良的再生穩定性及機械穩定性、低再生能量，對CH₄和N₂的選擇性高、反應速率快¹⁹⁰。
- (3) 適合在高壓(~45 bar)、室溫、乾燥的環境下捕獲二氧化碳。
- (4) 挑戰為水熱穩定性低(因為Si-O-Si鍵的水解)、常壓環境下的二氧化碳吸附能力不夠高。

¹⁸⁸ B. Dziejarski, J. Serafin, K. Andersson, R. Krzyżyńska, CO₂ Capture Materials: A Review of Current Trends and Future Challenges, *Materials Today Sustainability*, <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2023.100483>.

¹⁸⁹ MCM: Mobil Composition of Mater ; SBA: Santa Barbara Amorphous ; MCU: Michigan State University ; KIL: Kemijski Institut Ljubljana ; FSM: Folded Sheet Materials ; FDU: Fudan University ; KIT: Korean Advanced Institute of Science and Technolog

¹⁹⁰ D. Barthomeuf. Framework induced basicity in zeolites Microporous and mesoporous materials, 66 (1) (2003), pp. 1-14 ; Y. Belmabkhout, R. Serna-Guerrero, A. Sayari. Adsorption of CO₂ from dry gases on MCM-41 silica at ambient temperature and high pressure. 1: Pure CO₂ adsorption *Chemical Engineering Science*, 64 (17) (2009), pp. 3721-3728 ; T.L. Chew, A.L. Ahmad, S. Bhatia. Ordered mesoporous silica (OMS) as an adsorbent and membrane for separation of carbon dioxide (CO₂) *Advances in colloid and interface science*, 153 (1-2) (2010), pp. 43-57.

2. 未來方向：

- (1) 開發複合材料，如：將不同金屬奈米粒子分散在二氧化矽結構內。
- (2) 與其他吸附劑的組合，如奈米碳管(Carbon Nanotube)或MOFs。
- (3) 表面改質，如：利用胺類物質或離子液體來改變二氧化矽表面的化學性質，從而增加二氧化碳吸附能力。

(二) 碳基(Carbon-based)材料

1. 發展現況：

- (1) 整體而言，碳基材料具有不同形態與結構，可分為無晶型(amorphous)的水熱炭(Hydrochar)、生物炭(Biochar)、活性碳(Activated carbon)、，以及結晶型(crystalline)的石墨(Graphite)、石墨烯(Graphene)、富勒烯(Fullerene)和奈米碳管(Carbon nanotube)。
- (2) 特點包括：低成本的前驅材料、低密度、多樣化結構形式(粉末、纖維、氣凝膠、複合材料、片材、整體材料、管材)、高表面積、可調的表面化學性(O、N、S、P、F或摻雜其他原子)、良好的材料穩定性(特別是在高溫和潮濕的環境中)、表面疏水性(亦即二氧化碳在吸附劑表面不受水份影響)、再生能量少。
- (3) 無晶型碳基材料(水熱炭/生物炭/活性碳)：
 - 水熱炭與生物炭均是以富含炭(char)的生物質為原料，前者經水熱法(180~260°C)、後者經熱裂解法(300~650°C)所製備；至於活性碳，則是以高碳(carbon)且低無機質含量的生物質、煤炭或高分子材料為原料，透過物理活化(以熱化學法為主，800~1,000°C)或化學活化(輔以化學試劑，450~900°C)等方式得到。
 - 三種材料均為多孔性且廣泛分佈，以活性碳表現較佳，以微孔和中孔尺度為主，比表面積介於500~3,000 m²/g之間，故有不錯的吸附能力；生物炭與水熱炭以微孔尺度為主，前者比表面積約為200~600 m²/g之間，後者大多小於100 m²/g，但在高鹽度條件下製備的水熱炭可將比表面積提升到500~600 m²/g。惟，三種材料都因料源之間的差異性，導致所製備的吸附劑結構差異大，因此吸附過程表現也是不穩定。
 - 成本方面，活性碳最高、生物炭次之(約為活性碳的1/6)、水熱炭最低(約為生物炭的1/3)。

- 挑戰：由於此類型材料對煙氣中的NO_x、SO_x等雜質較敏感，導致在低二氧化碳分壓下的吸附能力較差，故應用僅限於處理高壓氣體，且碳質材料在50-120 °C範圍內對二氧化碳的吸附較弱，對溫度敏感性較高，整體來說操作選擇性相對較低。

(4) 結晶型碳基材料(石墨/石墨烯/富勒烯/奈米碳管)：

- 均為碳的同素異形體(allotrope)，差別在於結構組成不同。石墨烯為單層緻密的二維蜂巢晶格結構，石墨則為多層石墨烯組成的複雜空間結構，層與層之間僅透過弱凡得瓦力連接；富勒烯則是一系列由多個碳原子以籠狀或球狀等不同立體形式組成的結構；奈米碳管可視為管狀的富勒烯材料，其特色為幾何相位排列的空心管結構。
- 石墨可透過調整層與層之間的距離達到儲存二氧化碳的功能，惟其表面對二氧化碳的親和力較弱，且比表面積也較低，限制了二氧化碳吸附能力。石墨烯則具有高比表面積、高導電率、高機械強度以及易於表面改質等特點，也表現出高二氧化碳吸附能力與選擇性(相較於甲烷和氮氣)。然而，由於分子間作用力強且官能基數量少，故分散性和相容性較差。另外，石墨的氧化態(Graphite Oxide)與石墨烯的氧化態(Graphene Oxide)以及還原氧化態(Reduced Graphene Oxide)等具有較多含氧官能基的形式，是相對較容易改質、二氧化碳吸附性能較佳、應用範圍較廣的選擇。
- 富勒烯與奈米碳管均擁有規則的幾何結構，顯示了良好的表面特性(表面積及材料穩定性)。富勒烯主要透過密度泛函理論(Density Functional Theory, DFT)方法來研究其幾何結構、電子密度與電荷分布等特性，目前比較常被用來探討二氧化碳捕獲的是C60，另外用硼取代碳的B40與B80等富勒烯材料也是具有吸附二氧化碳潛力的材料。奈米碳管則基於空間結構中存在的石墨烯層數，又可分成單壁(SW)、雙壁(DW)、多壁(MW)等不同形式的奈米碳管，橫切面直徑可達數十奈米，管長可達微米或毫米級，因此可依直徑大小的調整來針對特定氣體進行有效的吸附，被認為是具開發潛力的吸附劑，其中單壁奈米碳管的比表面積與活性碳相當(高達3,000 m²/g)，但多壁結構被認為更具開發潛力。

2. 未來方向：無晶型碳基材料(水熱炭/生物炭/活性碳)：主要為調整材料的表面特性(如：孔徑、鹼度等)來提升吸附能力，方式多以調整吸附劑製備過程的參數，以及後處理(如：化學活化、物理活化、胺官能基修飾、氫化、摻雜金屬等)兩種方式為主。活性碳方面，除了上述兩種方式外，也朝複合材料發展，故也發展出MOF、Zeolite、碳基奈米材料等吸附劑。此外，由於料

源朝向廢棄物再利用，故此類吸附劑的穩定性及可再生性的提升也是重要課題。

3. 結晶型碳基材料(石墨/石墨烯/富勒烯/奈米碳管)：主要有設計新結構、後處理改質、複合材料等選擇，以提高二氧化碳吸附性能；另外，富勒烯的純化會影響其價格，故為其研究重點之一。

(三) 金屬有機框架(Metal-Organic Frameworks, MOFs)

1. 發展現況：

(1) 由含有金屬的節點組成，節點與有機配位基透過強共價鍵自組裝，形成一維、二維或三維的結構，且依結構特性的不同，可分為剛型(rigid)、動態/可變型(dynamic/flexible)、表面功能化型(surface functionalized)、開放金屬點位型(open metal sites)、路易斯鹼性點位型(Lewis basic sites)、開放金屬和路易斯鹼性點位型(both open metal and Lewis base sites)、微孔型(microporous)、合成後改質型(post-synthetically modified)、以及複合型(composites)等類型的MOFs。

(2) 具有超高的比表面積(可達6,000 m²/g以上)與孔隙率、可調控的孔隙結構與表面特性、高純度、明確的晶體幾何特性等優點，在高壓、純二氧化碳的環境中表現出卓越的吸附能力。

(3) 挑戰：目前MOFs在量產製備上仍有困難，現有技術多屬於小規模或實驗級；另外，MOFs的材料穩定性不佳，在有水份的情況下晶體結構容易分解，對二氧化碳與氮氣混合氣的選擇性低，且材料製備成本高，均是MOFs走向商業化的重大挑戰。

2. 未來方向：主要為提高二氧化碳吸附量與選擇性同時降低再生所需的能量、提升框架結構穩定性、降低成本。具體透過改變/固定孔隙形狀和尺寸、修飾金屬點位/路易斯鹼、金屬離子摻雜、創造新穎結構、優化再生和回收程序、孔洞表面功能化、合成MOFs複合材料等方式進行。

(四) 多孔性有機高分子(Porous Organic Polymers, POPs)

1. 發展現況：

(1) POPs是近年來較引起注意的多孔性材料，由較輕的成份以強共價鍵連接而成，依不同的反應路徑可分成共軛微孔高分子(conjugated microporous polymers, CMPs)、超交聯高分子(hyper-crosslinked polymers, HCPs)、固有微孔高分子(polymers of intrinsic microporosity, PIMs)、共價有機框架(covalent organic frameworks, COFs)、共價三嗪框架(covalent triazine

frameworks, CTFs)等類型，其中少數COFs、CTFs可透過熱力學控制產生有序晶型結構，其他都是非晶型結構。

- (2) 具有密度低、比表面積大(COFs最高可達 $4,600 \text{ m}^2/\text{g}$ 左右，其他類型大約在數百到 $3,000 \text{ m}^2/\text{g}$ 之間)、孔徑可調、具有大量可用於化學反應的通道和活性位點、易於調控的功能、良好的物理化學穩定性，以及設計合成方法多樣性等特色。
 - (3) 挑戰：在高溫和低壓下的捕獲性能較低、在水份和高溫環境下的穩定性、吸附劑成本仍高等。
2. 未來方向：主要為提高二氧化碳吸附量與選擇性、提升材料在實際環境下的應用性，以及降低成本。

(五) 沸石(Zeolites)

1. 發展現況：

- (1) 已發展多年，可分為天然沸石和合成沸石兩大類型，具有多孔性的鋁矽酸鹽晶型結構，若鋁原子成份提高，則材料的鹼度也提高，有助於提升對二氧化碳的吸附能力、耐酸性以及高溫下的穩定性，但相對的材料親水性也增加。整體而言，沸石具有材料穩定性(循環、機械強度等)、比表面積夠高($< 800 \text{ m}^2/\text{g}$)、強吸附位點、結構孔徑可調控故相對其他吸附劑有較快的動力學等特色，在中等操作條件下($0-100^\circ\text{C}$, $0.1-1 \text{ bar}$)也具有不錯的吸附能力。
- (2) 挑戰：受溫度影響很大，並且與其孔徑呈正比；如果操作溫度接近 100°C ，對二氧化碳的吸附能力急劇下降，而研究指出其理想的吸附溫度為 70°C ，低於一般煙道氣的實際溫度，限制工業應用規模。
- (3) 未來方向：除了上述實際應用所面臨的挑戰外，沸石本身的吸附效率很大程度上受其尺寸、電荷密度和多孔結構中陽離子的化學組成的影響。因此，研究方向朝新料源、新合成方法、結構與成分設計(如改變 Si/Al 比的組成或提高孔隙率等)、陽離子交換(以鹼金屬或鹼土金屬)、胺基官能化、開發複合材料等方式進行，期提高沸石的二氧化碳吸附能力。

(六) 胺基(Amine-based)吸附劑

1. 發展現況：

- (1) 如前面幾種物理吸附劑所提到，用帶有鹼性官能基的胺類對具有高表面積的固體材料(以下稱為基材)表面進行化學修飾，從而提高原材料對二氧化碳的吸附量和選擇性，是目前許多研究所投入的方向。另外，可依

據胺與基材之間相互作用的類型，分成含浸法(impregnation)、嫁接法(grafting)及直接合成法(direct synthesis)等三種胺基吸附劑。

- (2) 含浸法是將胺類披覆在基材孔洞及表面上，故基材的孔體積與表面積愈高，含浸法可負載的胺量也高，亦即二氧化碳吸附量高，但二氧化碳進入胺類的擴散阻力也提高。嫁接法透過共價鍵結的方式，讓帶有官能基團的胺類可以跟基材表面的官能基結合，從而具有比含浸法更高的吸附速率及更高的穩定性，但能嫁接的量取決於基材表面的官能基團，往往造成形成嫁接上去的胺含量相對較低。直接合成法則是在基材製備時利用含胺的前驅物同時聚合生成，可減少合成步驟(意即降低成本)，且吸附劑的氨基團(amino group)分佈也更均勻。
- (3) 整體而言，與胺類溶液相比，胺基吸附劑具有再生能量較低的優點；與一般物理吸附劑相比，胺基吸附劑對二氧化碳的親和力較高，且有優異的耐水性。
- (4) 挑戰：大部份的胺基吸附劑呈現粉末狀，導致二氧化碳吸附過程中的熱傳與質傳阻力增加；此外，二氧化碳吸附能力仍有限，製備成本較高，且長時間的實廠操作下會導致氨基的損失。

2. 未來方向：基材部份的開發如同前面幾種物理劑，其他方向包括選擇合適的胺來製備具有更好的吸附能力或更低脫附溫度的胺基吸附劑；使用高氮含量的胺類，以及可有效將胺類引入的方法(儘可能增加氮的含量)；另外，也需要降低吸附劑製備成本並儘可能簡化步驟，以及製成整體式(monolithic)但又不損失其吸附能力的方法。

四、製程與實際應用

在工業實際應用上，二氧化碳吸附系統多以雙塔操作模式進行，如圖 5.9 所示：系統包含兩個吸附塔，其中一塔通以煙氣，使反應器內之吸附劑進行二氧化碳之吸附反應；同時，另一塔則進行脫附，反應器操作在低壓或高溫，使得吸附劑脫附出高純度之二氧化碳；如此兩個反應器不斷反覆吸脫附操作，可達到連續分離二氧化碳的效果。物理吸附法之優點為操作較簡單及維修容易。其缺點則是需先對在排放氣中之硫化物及水氣等做前處理，以免影響到吸附劑之吸脫附能力；而吸脫附過程因涉及變換操作壓力與溫度，因此造成大量耗能。

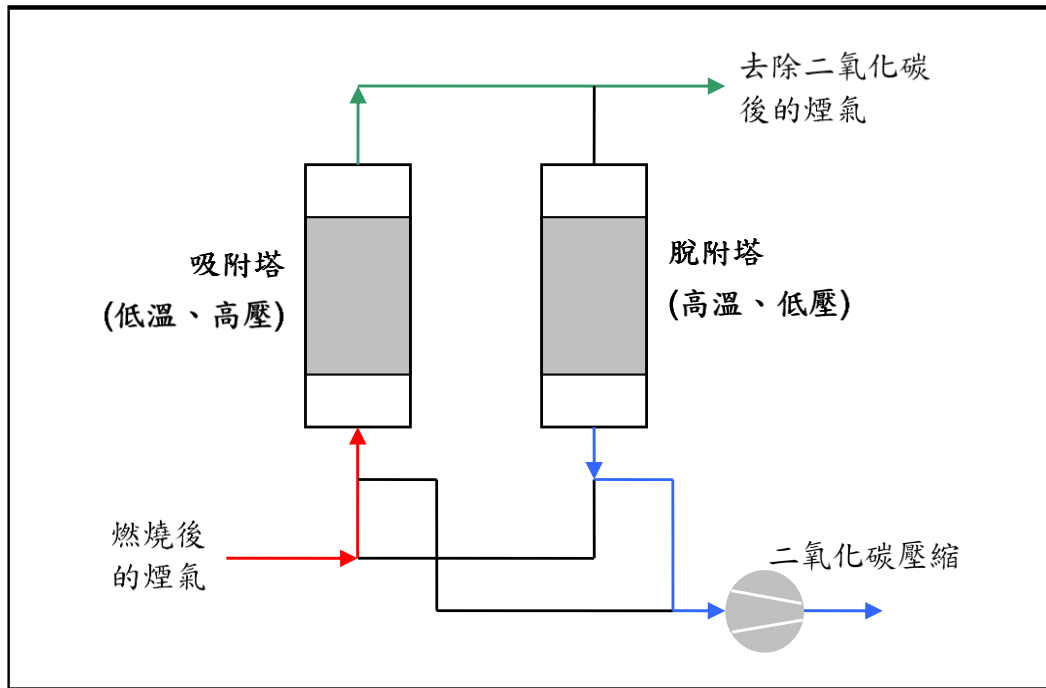


圖 5.9 二氧化碳吸附系統示意圖

以下僅就各種二氧化碳吸附製程之設計及其技術特點、成本預估，並探討其面臨的技術挑戰做一介紹。

(一) 日本橫須賀熱電站/PTSA與PSA系統

最早之二氧化碳吸脫附系統設置於日本橫須賀熱電站(Yokosuka Thermal Power Station)¹⁹¹，煙氣流量約 1,000 m³/h，二氧化碳處理量約 4.5 t/day，在進行二氧化碳捕獲反應前需先使用氧化鋁將煙氣進行乾燥以免影響吸附劑性能，使用 Ca-X 沸石作為吸附劑，第一步驟反應器使用 PTSA 操作，第二步驟使用 PSA 操作，經過兩步吸附後，二氧化碳純度可達 99%。在第一步驟中使用蒸氣加入熱量使其具有變溫與變壓操作，提升整體反應效能，降低約 11% 電力消耗。第二個兩段 PSA 裝置系統容量為 110 Nm³/h¹⁹²，用以分離鍋爐煙氣中之二氧化碳，測試結果認為每階段 2 床操作即可使產品之二氧化碳純度達 99%，分離效率 80%。

¹⁹¹ M. Ishibashi, H. Ota, N. Akutsu, S. Umeda, M. Tajika, J. Izumi, A. Yasutake, T. Kabata, Y. Kageyama, Technology for removing carbon dioxide from power plant flue gas by the physical adsorption method, *Energ. Convers. Manage.* 37 (1996) 929–933 ; M. Ishibashi, K. Otake, S. Kanamori, A. Yasutake, Study on CO₂ removal technology from flue gas of thermal power plant by physical adsorption method, in: D. J. Williams, R.A. Durie, P. McMullan, C.A.J. Paulson, A.Y. Smith (Eds.), *Proceedings of the Fifth International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies*, CSIRO Publishing, Australia, 2001, pp. 95–106.

¹⁹² S.-H. Cho, J.-H. Park, H.-T. Beum, S.-S. Han, J.-N. Kim, A 2-stage PSA process for the recovery of CO₂ from flue gas and its power consumption, in: S.-E. Park, J.-S. Chang, K.-W. Lee (Eds.), *Studies in Surface*

(二) 澳洲Hazelwood發電廠/VSA系統

澳洲維多利亞(Victorian)州政府提供資金，由 CO2CRC (CO₂ Collaborative Research Center)示範在實際電廠(Hazelwood)環境中採用不同的碳捕獲技術，如 5.10。吸附部份，採用 VSA 吸附系統搭配沸石(13X 及 calcium chabazite)¹⁹³，其處理量約為 10.5 t/day，配置 6 步驟 3 床之循環吸脫附系統，在無任何系統優化下分離出之二氧化碳純度約 71%，回收率約為 60%。

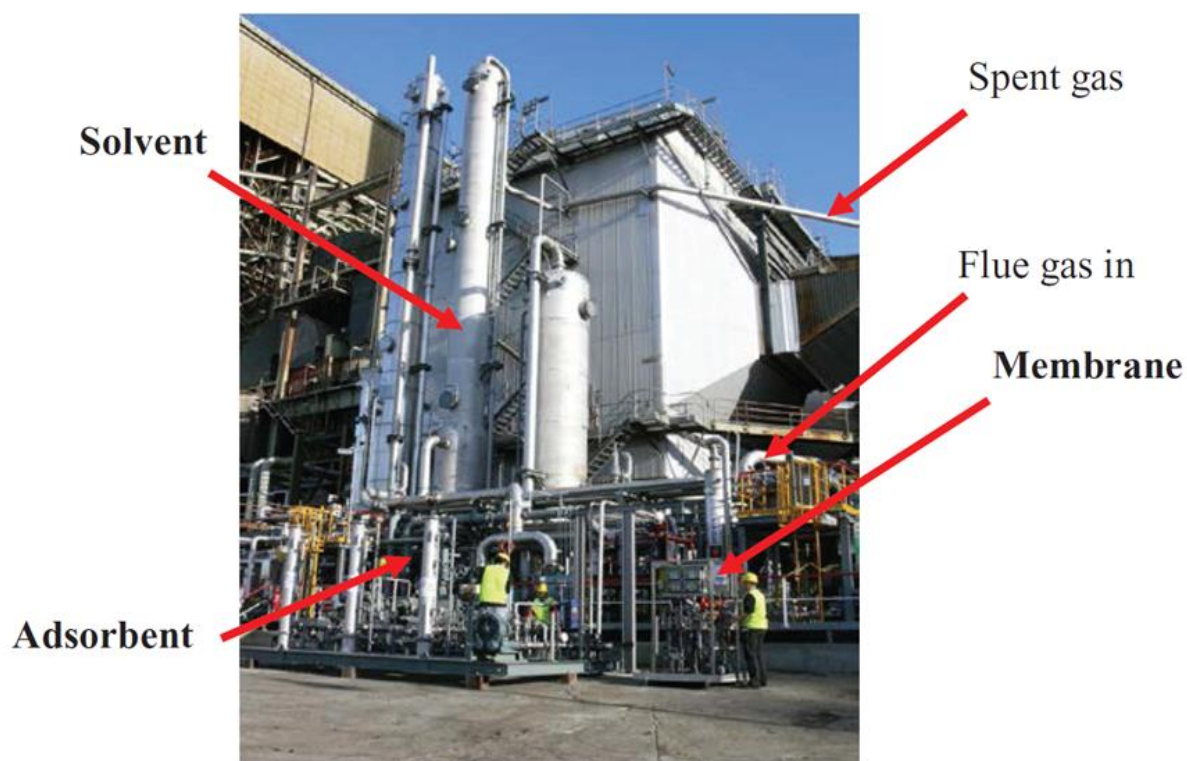


圖 5.10 澳洲 Hazelwood 電廠捕獲系統模廠

(三) 中國大陸華東理工大學模廠/VSA系統

大陸華東理工大學團隊研究一段、兩段與多段式吸脫附系統並研究其效能，發現當採用兩段單元時，二氧化碳脫附濃度可提升至 95.6%；多床系統中，於 32.9~45.9 Nm³/h 的煙氣流量下，捕獲效率可達 85~95%，回收之二氧化碳純度為

Science and Catalysis. Proceedings of the 7th International Conference on Carbon Dioxide Utilization, Elsevier, Netherlands, 2004, pp. 401–405.

¹⁹³ A. Qader, B. Hooper, T. Innocenzi, G. Stevens, S. Kentish, C. Scholes, K. Mumford, K. Smith, P.A. Webly, J. Zhang, Novel post-combustion capture technologies on a lignite fired power plant – results of the CO2CRC/H3 capture project, Energy Procedia 4 (2011) 1668–1675.

73~82%。然而其使用 3 床 8 段式操作下，測得鼓風機與真空泵能耗為 1.79~2.14 MJ/kgCO₂，真空泵之能耗仍然過大，使此方法的能耗成本過高¹⁹⁴。

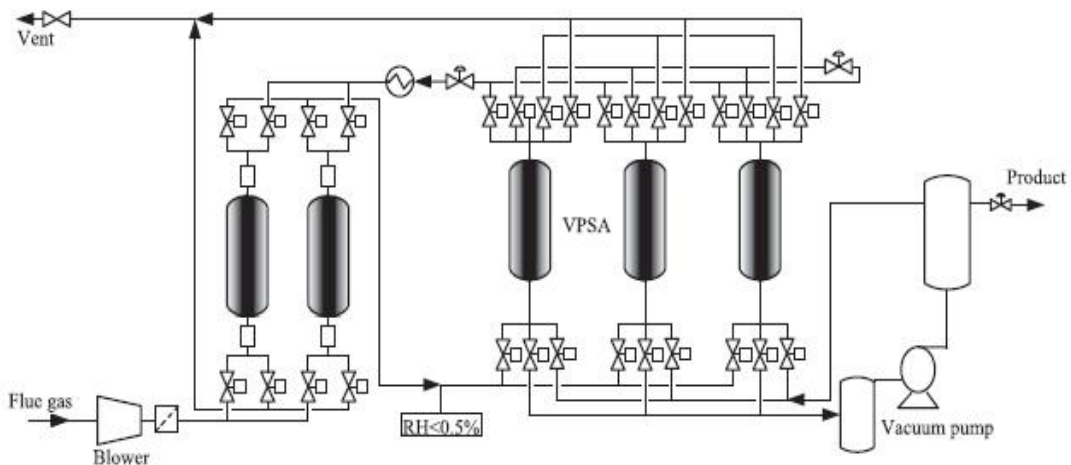


圖 5.11 華東理工大學 3 床之真空吸脫附系統模廠

(四) 波蘭Łagisza電廠/雙迴流真空變壓(DR-VPSA)系統

波蘭先進能源技術研究所使用雙迴流真空變壓技術(DR-VPSA, dual-reflux vacuum pressure swing adsorption)捕獲二氧化碳¹⁹⁵，測試實驗位於波蘭的 Łagisza 電廠，煙氣來源為歐洲最大的高效超臨界循環鍋爐，發電量為 460 MW。其先導試驗廠，由四個固定吸附塔組成，每個吸附塔中分為上下兩段，以雙迴流式真空變壓吸附模式進行。床層中總共使用兩種活性碳，如圖 5.12 所示，總重量為 540 kg，將吸附塔分成上下兩部份，進行 9 步驟的變壓吸脫附分離，研究結果顯示：最佳操作參數為氣體流量 100 Nm³/h，吸附步驟所需時間為 300 秒，脫附最佳二氧化碳純度為 87.5%，生產量為 11.4 kg/m³h，氣體壓縮與抽真空能耗為 978 kWh/tCO₂。再加上煙氣需提前乾燥，VSA 系統能耗約為 1.5~3 GJe/tCO₂。

¹⁹⁴ Wang L, Yang Y, Shen W, et al. Experimental evaluation of adsorption technology for CO₂ capture from flue gas in an existing coal-fired power plant. *Chem Eng Sci*, 2013, 101: 615–619.

¹⁹⁵ Wawrzyńczak D, Majchrzak-Kuceba I, Srokosz K, et al. The pilot dual-reflux vacuum pressure swing adsorption unit for CO₂ capture from flue gas. *Sep Purif Technol*, 2019, 209: 560–570.

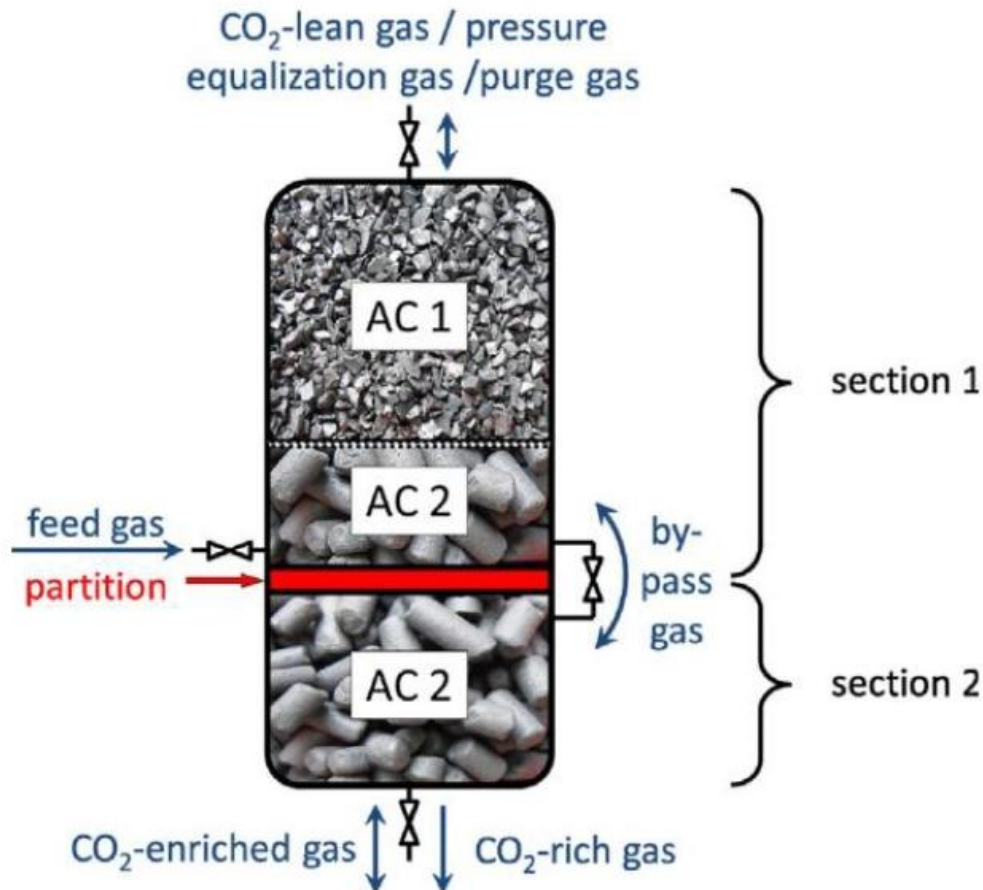


圖 5.12 波蘭雙迴流真空變壓技術之吸附塔中雙層活性碳配置

(五) 日本川崎重工二氧化碳捕獲計畫/TSA系統

除了上述變壓吸附之外，另一種常使用之燃燒後捕獲二氧化碳的方法為變溫吸附(TSA)，其相比於變壓吸脫附之優點為煙氣不需要經預熱乾燥過程，可減少約 2~3 GJ_{th}/tCO₂ 能耗¹⁹⁶。由於使用變溫系統，因此為了提升熱傳效能，氣體流速需要提升，吸附系統型式會使用移動床或流體化床，相比於固定床，二氧化碳的捕獲容量得以提升。

日本川崎重工之二氧化碳捕獲計畫(KCC, Kawasaki CO₂ Capture)測試聚胺含浸矽基多孔吸附材(由 RITE 研發, Research Institute of Innovative Technology for the Earth)應用於二氧化碳捕獲，於小型工廠使用固定床系統，於中大型工廠使用移動床系統，最大特色為吸附劑之再生是使用廢熱回收系統提供之 60°C 低溫蒸氣。其移動床測試的結果中，於進料氣體流量為 530 Nm³/h、二氧化碳濃度為 13%時，二氧化碳捕獲速率約 3 t/day，純度可達 95% 以上¹⁹⁷，並於優化測試中最高捕獲速

¹⁹⁶ 朱炫灿、葛天舒、吳俊晔、楊凡、王如竹，吸附法碳捕集技術的規模化應用和挑戰，科學通報，2021 年，第 66 卷 第 22 期，2861-2877

¹⁹⁷ T. Okamura, KCC (Kawasaki CO₂ capture) system utilizing low temperature waste heat, Japan-Norway Energy Science Week 2015, Tokyo, May 27-28, 2015.

率可達 7.2 t/day，測試系統如圖 5.13 所示，後續以此測試數據進行系統放大。次一階段目標為將示範規模放大至 40 t/day，建置於關西電力株式會社舞鶴發電廠 (Maizuru Power Plant of Kansai Electric Power Co., Inc.)，預定於 2022 年底完工並進行捕獲示範實驗¹⁹⁸，設置區域如圖 5.14 所示。

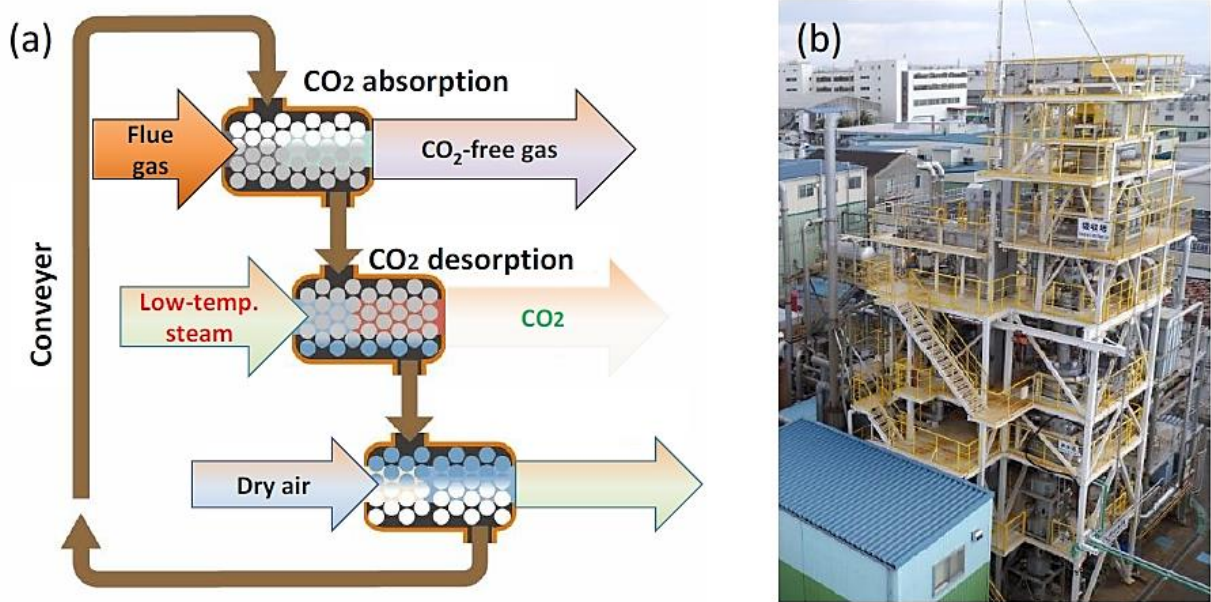


圖 5.13 KCC 移動床技術流程及其先導試驗系統



圖 5.14 日本關西電力株式會社舞鶴發電廠設置之 KCC 系統位置

¹⁹⁸ Hohei Nishibe, Katsuhiro Yoshizawa, Takeshi Okumura, Ryohei Numaguchi, Tomohiro Kinoshita, Takayasu Kiyokawa, Quyen T. Vu, Firoz A. Chowdhury, Katsunori Yogo, and Kazuo Tanaka, Demonstration of Kawasaki CO₂ Capture (KCC) Moving-bed System with Solid Sorbent at Coal-fired Power Plant, GHGT-16, 2022.

(六) 美國國家碳捕集中心測試機組/TSA系統

美國國際斯坦福研究所(SRI International)與林德公司(Linde)、美國紡織企業協會(ATMI, American Textile Manufactures Institute)及美國電力研究院(EPRI, Electric Power Research Institute)於 2014 年起執行美國能源部(DOE, Department of Energy)之計畫¹⁹⁹，於美國國家碳捕集中心(NCCC, National carbon Capture Center)開發先進二氧化碳捕獲與分離技術，此計畫中開發出之碳材吸附劑具有低吸附熱(25 kJ/mol)、高吸附能力與高選擇性，特色在於不使用腐蝕性化學品或液體，僅使用碳顆粒。計畫中建立 40 kWe 測試機組，測試系統於接近常溫環境下進行，吸附劑由上向下傳輸，如圖 5.15 所示，脫附溫度約 100°C，於反應器底部與低壓蒸氣接觸，測試之 250 小時運轉過程中達到 68%捕獲效率與 93%二氧化碳純度，捕獲成本約 52 美元/tCO₂。該吸附劑並於計畫中完成 0.5 MWe 捕獲系統設計，整體預計建造成本為 427 萬美金，目標以低於 40 美金/tCO₂ 成本捕獲二氧化碳，然而於 2016 年 6 月此計畫中止。

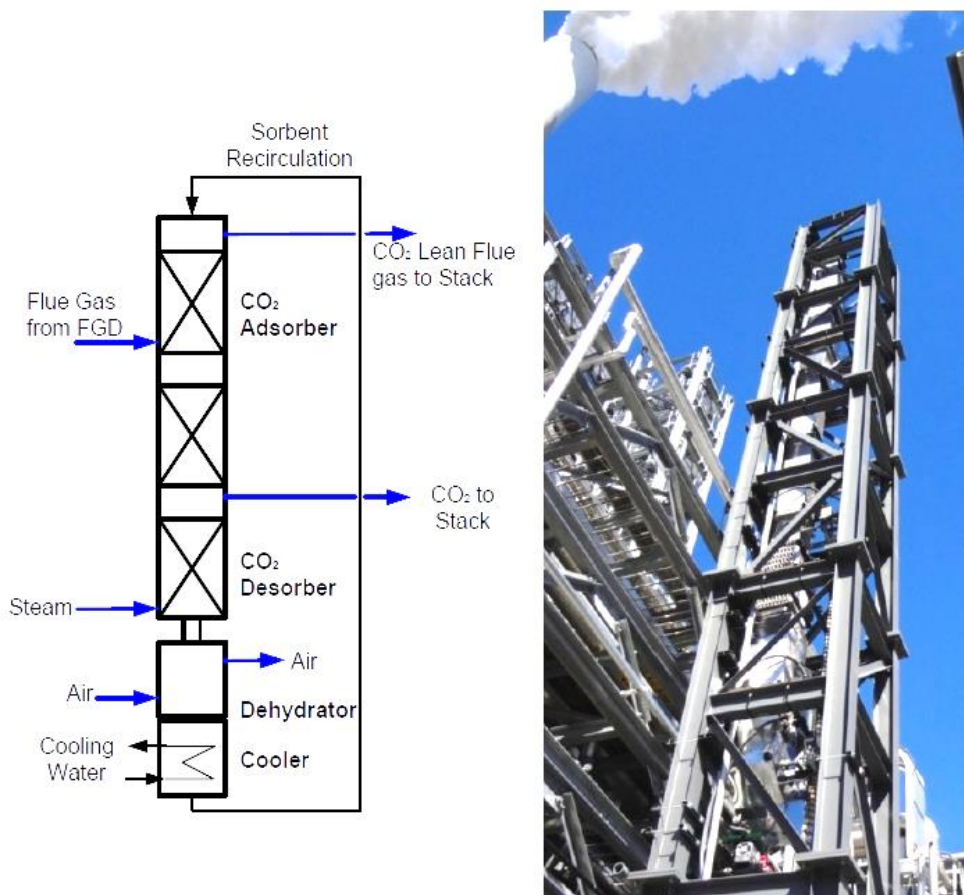


圖 5.15 美國 SRI 位於 NCCC 之 40 kWe 吸脫附測試系統

¹⁹⁹ Marc D. Hornbostel, Pilot-Scale Evaluation of an Advanced Carbon Sorbent-Based Process for Post-Combustion Carbon Capture, Final Report, U.S. Department of Energy, 2016/9/30.

(七) 美國TDA Research公司測試裝置/TSA系統

美國 TDA Research 公司開發鹼性氧化鋁之低成本吸附劑²⁰⁰，並以 10 個固定床系統模擬移動床系統來進行運轉，以降低移動床中固體顆粒傳輸的成本較高的問題，並優化系統流動模式操作，大幅減少再生蒸汽使用量(圖 5.16)。同時，吸附劑亦進行改良，可於原地進行再處理程序，吸附劑可於操作 1,250 小時後進行再生恢復性能，可有效延長吸附劑壽命。測試裝置的系統容量為 0.5 MWe，每個固定床大小可裝設 1.75 m³ 之吸附劑，並設置自動化裝置使系統得以 24 小時連續運轉，目前已完成兩個月的運轉測試，具有 90% 二氧化碳捕獲效率，並可得到純度 95% 以上之二氧化碳；另外，三個月測試後吸附劑仍具有原始吸附容量之 91.7%，整體測試系統容量達 0.62 MWe，估計捕獲成本可降至 34.5 美元/tCO₂，具有商業化潛力。

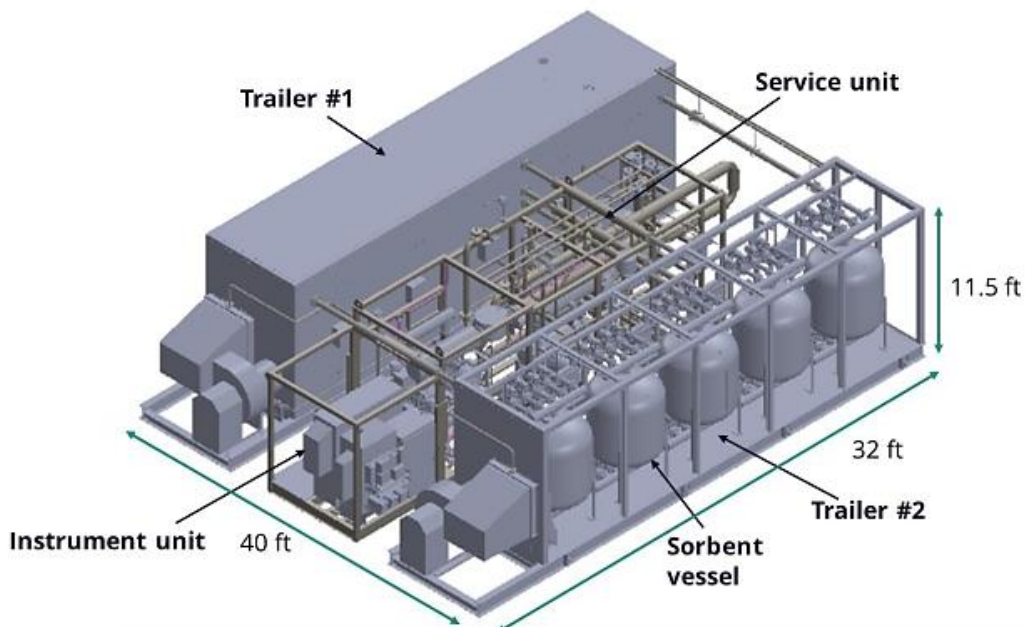


圖 5.16 美國 TDA 之吸附系統

(八) 加拿大Svante公司碳捕獲技術/TSA系統

加拿大 Svante 公司設計碳捕獲技術(VeloxoThermTM)²⁰¹以改善移動床需要的固體輸送，以轉盤形式與專利結構葉片設計，可使用有機胺之二氧化矽結構型吸附材或金屬有機框架，使同一轉盤上可同時實現煙氣吸附、蒸汽再生、煙氣脫離與冷卻等四個步驟，並可以連續操作。系統中壓降低，並且具有高熱傳效率，可

²⁰⁰ Fei Yi, Sorbent based post-combustion CO₂ slipstream testing, Final Report, U.S. Department of Energy, 2022/10/27.

²⁰¹ David Greeson, NRG C02NCEPT - CONFIRMATION OF NOVEL COST-EFFECTIVE EMERGING POST-COMBUSTION TECHNOLOGY, Final Technical Report, U.S. Department of Energy, 2016/9/16.

實現快速吸脫附循環，反應於 60 秒內完成。目前該公司於美國科羅拉多州 Lafarge Holcim 水泥廠規劃設置 2 Mt/年的捕獲系統，估計捕獲成本為 50 美金/tCO₂，可與美國稅收抵免、美國 EOR 費率以及美國二氧化碳價格等相互比較後，具有經濟可行性²⁰²。

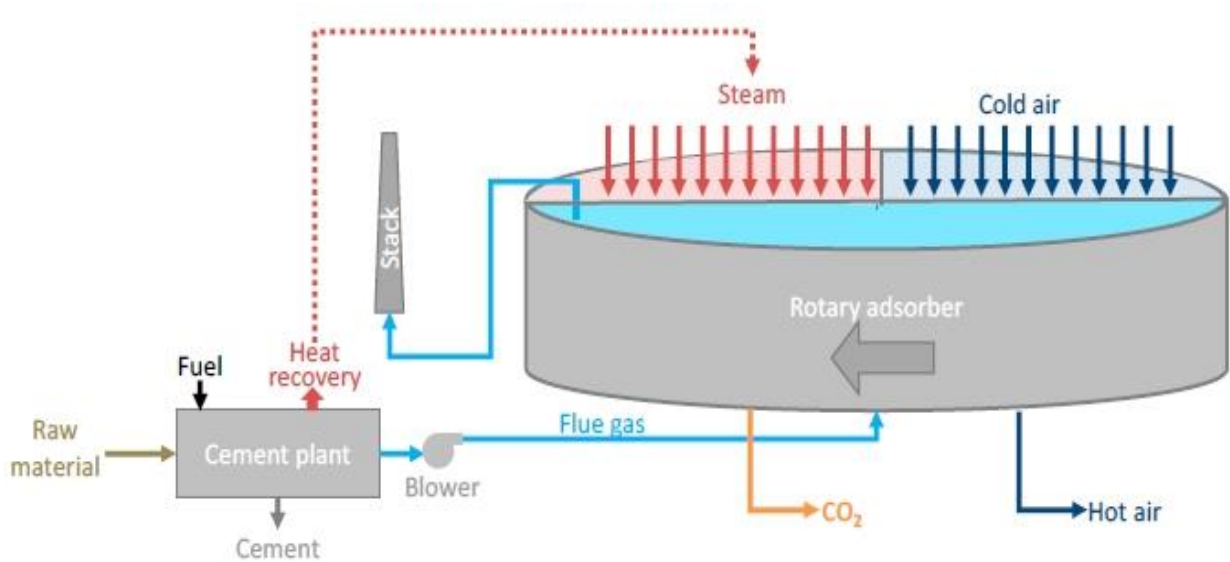


圖 5.17 水泥廠中 VeloxoTherm™ 之操作流程概念圖

(九) 鈣迴路捕獲技術/TSA系統

常見的物理吸附劑為活性炭與分子篩(沸石)，而化學吸附劑則多為金屬氧化物。其中，使用氧化鈣作為吸附劑的鈣迴路二氧化碳捕獲技術(Calcium-Looping)，主要化學反應式如下：



由 Eq.(1)可以看出，將 CaO 粉體加熱至 600-700°C 時，CaO 可與氣流中之二氧化碳反應生成碳酸鈣(CaCO₃)，其為吸熱反應；若再將之煅燒至 800-900°C 時，放出之高純度二氧化碳可另外收集，固體則回到 CaO 可再重複進行反應 Eq.(1)捕獲新的二氧化碳。目前使用的 CaO 來源主要為煅燒石灰石(CaCO₃)而來，石灰石在自然界中礦藏量豐富且價格便宜，但由於其煅燒會產生二氧化碳，因此得到的 CaO 必須重複利用才能達到二氧化碳減量之目的。使用 CaO 作為吸附劑有許多優點，其相對於其他化學吸收劑而言，其成份安全、穩定、價格便宜，且吸附量較大(44/56 = 0.786 g CO₂/g CaO)。

²⁰² Marta G. Plaza , Sergio Martínez and Fernando Rubiera, CO₂ Capture, Use, and Storage in the Cement Industry: State of the Art and Expectations, Energies, 2020,13,5692

目前發展出的 Ca-looping 系統主要目標是應用於火力發電廠所產生之煙道氣中的二氧化碳捕獲，捕獲系統示意圖如圖 5.18，主要裝置包含一碳酸化爐(carbonator)與一煅燒爐(calciner)：含二氧化碳之煙氣進入碳酸化爐於 600-700°C 下與吸附劑 CaO 反應生成 CaCO₃，出口的煙氣則幾乎不含二氧化碳，生成的 CaCO₃ 則進入煅燒爐中，經約 750-850°C 高溫脫附再生成 CaO 流回碳酸化爐，脫附放出之高純度二氧化碳則可另外收集後將之封存或作其他再利用，多次循環使用後失活的 CaO 吸附劑則會排放作其他目的使用，因此會補充新鮮之 CaCO₃ 進入煅燒爐以產生新鮮的 CaO 吸附劑。國外發展鈣迴路二氧化碳捕獲技術的團隊有西班牙 CSIC、德國 IFK、德國 darmstadt 技術大學、美國俄亥俄州立大學等，台灣主要研發團隊隸屬於工業技術研究院(下稱工研院)，各廠發展規模整理如表 5.2，現今發展規模最大為 2 MWth 先導廠，處理之二氧化碳量約為 1 t/h²⁰³。

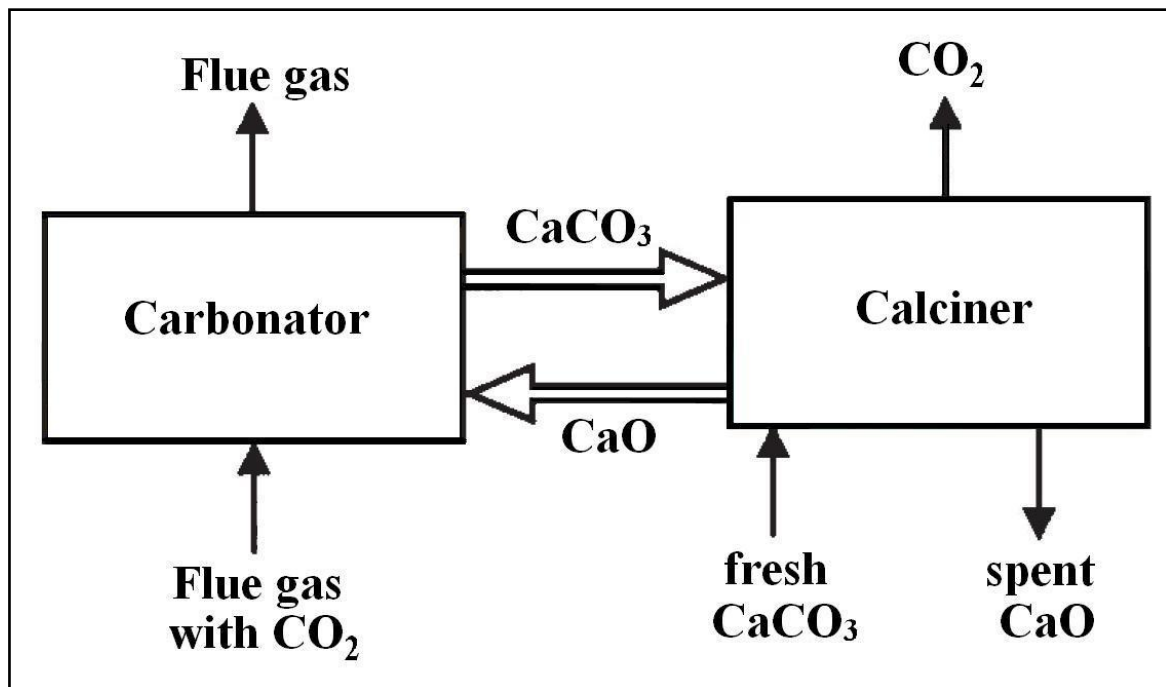


圖 5.18 鈣迴路二氧化碳捕獲系統示意圖

²⁰³ Ming-Hui Chang, Wei-Cheng Chen, Chin-Ming Huang, Wan-Hsia Liu, Yiang-Chen Chou, Wen-Chen Chang, Wang Chen, Jui-Yen Cheng, Kuo-En Huang, Heng-Wen Hsu, Energy Procedia, 63 (2014), pp. 2100-2108

表 5.2 全球發展鈣迴路二氧化碳捕獲技術之團隊與模廠

國家	機構	模廠大小
西班牙	國家研究委員會(Spanish National Research Council, CSIC)	10 kWth
西班牙	國家研究委員會(Spanish National Research Council, CSIC)	1.7 MWth
德國	達姆斯塔特大學(Technical University of Darmstadt, TUD)-EST	1 MWth
德國	斯圖加特大學(University Stuttgart) IFK	200 kWth
加拿大	加拿大礦物與能源研究中心(Canada Centre for Mineral and Energy Technology, Canmet)	40 kWth
美國	俄亥俄州立大學(The Ohio State University)	250 kWth
台灣	工業技術研究院(Industrial Technology Research Institute, ITRI)	3 kWth
台灣	工業技術研究院(Industrial Technology Research Institute, ITRI)	1.9 MWth

工研院於 2012 年底於花蓮和平之台灣水泥和平廠興建 1.9 MW_{th} 先導試驗廠(pilot plant)，其流程圖如圖 5.19，特色為碳酸化爐使用氣泡式流體化床、煅燒使用旋轉窯系統，雖然大型系統煅燒耗能驚人，然而相反的在碳酸化爐則為高度放熱反應，此高放熱則有助於進行煙氣預熱、粉體預熱等等。另外，此系統建置於水泥廠，失活的吸附劑為氧化鈣/碳酸鈣混合粉體，則可直接作為水泥原料，相較於其他碳捕獲技術，本技術具有無衍生廢棄物之優點。工研院於 2014 年起提出「HECLOT」技術(High Efficiency Calcium Looping Technology)技術並獲得該年度 R&D100 全球百大科學研究獎，並於 2014 年底起建造鈣迴路 500 kWt 二代廠，兩反應器改用特殊設計之多階旋風式系統、並加入水合反應器，可有效降低碳酸化溫度、並提升捕獲效率。迄今台灣水泥公司將目標改向富氧煅燒系統，可直接使煅燒系統提升效率、降低煤炭使用以及降低二氧化碳排放。

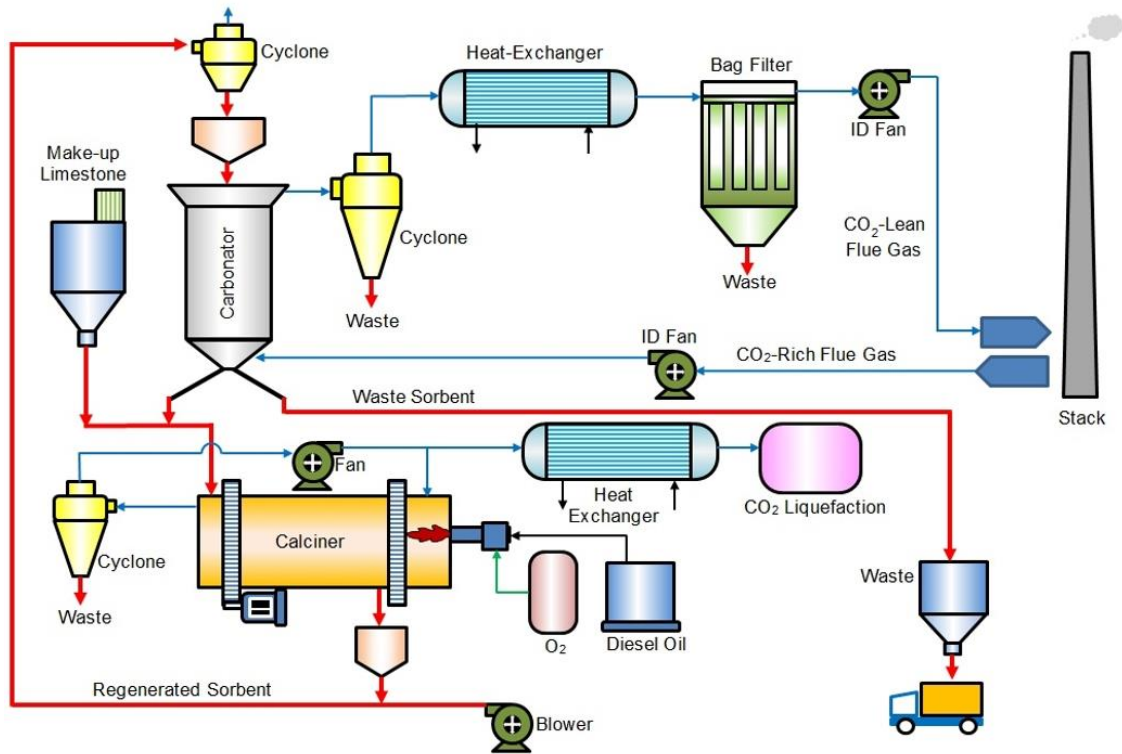


圖 5.19 鈣迴路二氧化碳捕獲系統-花蓮和平台灣水泥廠

表 5.3 盤點了上述幾個場址與案例的發展現況，並將排放源、捕獲裝置等幾個關鍵參數整理於表中，以利更好的將這些案例進行分類或對照。

五、小結

以上整理目前較熱門的二氧化碳吸附劑類型，以及各自的發展現況與未來方向等。雖然投入開發的單位均看好吸附劑對於煙道氣捕獲二氧化碳有著巨大潛力，成本效益等也有機會與其他捕獲方式競爭，但要進一步實際應用甚至是商業化，卻也面臨一定的限制與挑戰，例如大多數的吸附劑都需要再進一步提升吸附能力、循環使用的穩定性、對水或其他雜質的抵抗性，以及降低材料的生產成本等等，因此也不斷有許多改進策略提出。此外，除了追求性能的提升，在永續與淨零的趨勢下，納入循環經濟思維(例如使用農業廢剩資材等生質物做為料源)以及考慮碳足跡的材料開發(例如減少能源消耗或使用化學溶劑造成的環境影響)，也是逐漸受到重視的策略。

本節盤點了幾個目前較有進展的製程與實際應用案例，可發現吸附技術的選擇，需考慮地理位置、碳稅、蒸汽源、燃料價格、工廠相關配置等因素，另外考慮相關的吸附劑原料來源與失活吸附劑去化方式，方能選擇較適合的吸附技術，並進行相關經濟與技術評估。整體來說，相較於化學吸收法捕獲二氧化碳已達到TRL 9，吸附系統目前評估仍在TRL 6~7之間，而吸附劑製造成本、系統操作成本以及能耗等，仍需學研界持續努力不斷突破，使技術真正達到商業化。

表 5.3 吸附法模廠現況整理

國家/廠址或案名	排放源		捕獲端					
	煙氣流量	CO ₂ 濃度	吸附材	製程/操作條件	處理量	回收效率/純度	能耗	成本(美金/噸)
日本/橫須賀(Yokosuka) 熱電站	1,000 m ³ /h	--	沸石(Ca-X)	兩階段： PTSA+PSA	4.5 t/d	回收 80% 純度 99%	560 kWh/tCO ₂	--
澳洲/Hazelwood 發電廠	--	10~15%	--	VSA (3 床 6 步)	0.5 t/d	回收 60% 純度 71%	--	--
中國/華東理工大學模廠	32.9~45.9 Nm ³ /h	15.5%~ 16.5%	沸石 13XAPG	VSA (3 床 8 步)	--	回收 85~95% 純度 73~82%	497~594 kWh/tCO ₂ ²⁰⁴	--
波蘭/Lagisza 電廠	100 Nm ³ /h	11.1%	活性炭	DR-VPSA (4 床 9 步)	11.4 kg/m ³ h	回收 44.6% 純度 87.5%	534 kWh/tCO ₂ ²⁰⁵	--
日本/川崎重工二氧化碳 捕獲計畫	530~1,000 Nm ³ /h	13%	胺基(含浸法)	TSA	3~5.5 t/d	純度>95%	361~444 kWh/tCO ₂	--
美國/國家碳捕集中心測 試機組 ²⁰⁶	--	--	碳	--	~0.7 t/d ²⁰⁷	回收 68% 純度 93%	1.7 kg steam/kg CO ₂	52
美國/TDA Research 測試 裝置	78,693 mol/h	--	氧化鋁	TSA	9.1 t/d ²⁰⁸	回收 90% 純度>95%	--	34.5 (預估)
加拿大/Svante 公司	--	--	胺基/SiO ₂ 或 MOF	--	--	--	--	50 (預估)
臺灣/台泥和平廠鈣迴路 先導試驗廠	3 t/h	22%	CaO	TSA	1 t/h	回收 85% 純度>90%	--	30

²⁰⁴ 鼓風機與真空泵能耗值，原報導值為 1.79~2.14 GJ/tCO₂

²⁰⁵ 氣體壓縮、真空泵的能耗值。若加上實際操作時的煙氣預處理(乾燥)能耗，VSA 系統能耗約為 1.5~3 GJ/tCO₂，相當於 416~833 kWh/tCO₂

²⁰⁶ 測試計畫於 2016 年 6 月中止

²⁰⁷ 以測試裝置容量 40 kWe 計算，年排放量約 250 噸，相當於每日 0.7 噸

²⁰⁸ 以測試裝置容量 0.5 MWe 計算，年排放量約 3,314 噸，相當於每日 9.1 噸

第三節 薄膜法捕獲二氧化碳

從經濟部委託工研院開發的能源工程模型「台灣 MARKAL」中得知，目前台灣二氧化碳有六成來自發電業，七成五以上來自燃煤發電廠，因此要進行碳捕獲最直接的方式便是從發電廠後端產生的煙道氣進行處理，也稱為「燃燒後捕獲 (post-combustion)」。燃燒後捕獲主要分離 CO₂ 與 N₂ 以及少量硫化物，一般如果燃燒煤或石油，CO₂ 濃度在 12~18%，天然氣大約是 3~8%，如果以傳統方式將此低濃度的 CO₂ 提濃至 90% 以上，需要相對高的成本。表 5.4 整理了薄膜分離、吸收、冷凍三種 CO₂ 捕獲方法相關的參數以及能耗²⁰⁹，薄膜分離每單位二氧化碳只需要 0.5~6 MJ 的能量²¹⁰，是三種中最為節能的，考慮到容易規模放大、佔地面積小等優點，薄膜法捕碳相當具有潛力。

表 5.4 幾種二氧化碳分離與捕獲方法的設計參數與能源消耗比較

項目	薄膜法	吸收法	冷凍法
操作彈性	High (CO ₂ % > 20%) Low (CO ₂ % < 20%)	Moderate	Low
應對氣體成分變化的速度	Instantaneous	Rapid (5-15 min)	Slow
氣體成分變化後的重啟時間	Extremely short (10 min)	1 h	8-24 h
可靠度	100%	Moderate	Limited
操作需求	Low	High	High
可擴展性	Very high(modularity)	Moderate	Very low
能源需求	0.5-6 MJ/kgCO ₂ ²¹¹	4-6 MJ/kgCO ₂ ²¹²	6-10 MJ/kgCO ₂ ²¹³

²⁰⁹ A. Brunetti, F. Scura, G. Barbieri, E. Drioli, Membrane technologies for CO₂ separation, Journal of Membrane Science 359(1-2) (2010) 115-125.

²¹⁰ R. Bounaceur, N. Lape, D. Roizard, C. Vallieres, E. Favre, Membrane processes for post-combustion carbon dioxide capture: a parametric study, Energy 31(14) (2006) 2556-2570 ; E. Favre, Carbon dioxide recovery from post-combustion processes: can gas permeation membranes compete with absorption?, Journal of Membrane Science 294(1-2) (2007) 50-59 ; L. Eide, M. Anheden, A. Lyngfelt, C. Abanades, M. Younes, D. Clodic, A. Bill, P. Feron, A. Rojey, F. Giroudiere, Novel capture processes, Oil & gas science and technology 60(3) (2005) 497-508.

²¹¹ R. Bounaceur, N. Lape, D. Roizard, C. Vallieres, E. Favre, Membrane processes for post-combustion carbon dioxide capture: a parametric study, Energy 31(14) (2006) 2556-2570.

²¹² E. Favre, Carbon dioxide recovery from post-combustion processes: can gas permeation membranes compete with absorption?, Journal of Membrane Science 294(1-2) (2007) 50-59.

²¹³ L. Eide, M. Anheden, A. Lyngfelt, C. Abanades, M. Younes, D. Clodic, A. Bill, P. Feron, A. Rojey, F. Giroudiere, Novel capture processes, Oil & gas science and technology 60(3) (2005) 497-508.

燃燒後捕獲使用的膜技術主要分為二種，分別是氣體分離薄膜程序(gas separation membrane process)、薄膜吸收式接觸器(membrane absorption contactor)，在表 5.5 中進行比較。

表 5.5 燃燒後捕獲使用的膜技術種類

項目	氣體分離薄膜	薄膜接觸器
常見材料	高分子薄膜為主 無機材料薄膜：二氧化矽薄膜、沸石薄膜、碳膜、有機無機混合基材薄膜	疏水性薄膜:聚四氟乙烯、聚二氟乙烯、聚丙烯、聚醚砜
效能	CO ₂ /N ₂ 的選擇比約在 10~25 滲透率大約 100 GPU	填充密度(packing density) 約為傳統吸收塔的 10~100 倍
實例	美國 Membrane Technology and Research 公司開發了 MTR 北極星膜組，CO ₂ 滲透量比醋酸纖維膜高上 10 多倍。2009 年底在全羅電廠的示範系統，處理實際的燃煤煙氣和生產每天一噸的 CO ₂ ，未來將放大應用於一 600 MW 的傳統燃煤電廠，每天可處理 10,000 噸的二氧化碳 ²¹⁴	日本在 Nanko 發電廠建的試驗碳捕獲廠捕獲 2817 噸/天 CO ₂ ，操作成本和固定成本比起傳統胺吸收工廠分別下降 30% 和 9% ²¹⁵
面臨的挑戰	膜的長期穩定性 膜對水的耐受性 ²¹⁶	膜濕潤 膜汙染
近年熱門的研究方向	新穎金屬有機配位薄膜、沸石薄膜	綠色溶劑:離子液體

薄膜分離技術可以與其他分離技術有效地結合，並且通常使用更少的能源，被視為傳統分離製程的節能替代方案，因此在淨化小型來源(例如廢物焚燒裝置和鋼鐵或水泥生產設施)排放的煙氣方面已具有經濟競爭力。且各種特定功能的薄膜可針對不同氣體進行材料設計而達到高溶解度、熱穩定性和機械穩定性等，且薄膜模組便於製造，也因此被視為煙氣淨化的前瞻技術。本節將介紹從煙氣中分離 CO₂、SO₂ 和 NO_x 的最先進的薄膜技術。表 5.6 描述了用於氣體淨化的常見膜類

²¹⁴ S. Shelley, Capturing CO₂: membrane systems move forward, Chemical Engineering Progress 105(4) (2009) 42-47.

²¹⁵ D.C. Thomas, S.M. Benson, Carbon dioxide capture for storage in deep geologic formations-results from the CO₂ capture project: Vol 1-capture and separation of carbon dioxide from combustion, Vol 2-geologic storage of carbon dioxide with monitoring and verification, Elsevier2005.

²¹⁶ M. Kárászová, B. Zach, Z. Petrusová, V. Červenka, M. Bobák, M. Šyc, P. Izák, Post-combustion carbon capture by membrane separation, Review, Separation and Purification Technology 238 (2020) 116448.

型，依薄膜材料種類做區分，可區分為傳統使用的高分子膜、無機膜、以及有機無機混成薄膜(Mixed Matrix Membrane, MMM)，並列出了它們的主要優缺點。

表 5.6 氣體分離所用之薄膜分類

薄膜類型	分離機制	優勢	劣勢
無機膜	分子篩	高溫下可長時間操作 對極端條件的耐受性能 易清洗 可能做為催化反應膜	高建置成本 易脆易裂 較難達到高選擇性 在中溫下通量較低 單位體積的薄膜面積較低
聚合物膜	溶液-擴散機制	價格低廉 易組裝 可操作在低溫 對模組化而言，組裝要求與材料要求較低 加工性能佳	薄膜製備與膜組化成本高 薄膜壽命有限 高溫或較極端條件下薄膜易老化
混合基質膜(MMM)	溶液-擴散機制與分子篩分	高通量 選擇性佳 可針對不同雜質做薄膜設計 高官能化的傳輸性能	填充無機粒子易沈積或聚集 介面孔洞造成薄膜缺陷 填充材和聚合物相容性差 複雜的薄膜組成與條件造成 薄膜性質難以控制與掌握
擴散促進膜	擴散促進機制	同時具有高通量與高選擇性	低穩定性 載體洩露 載體飽和 操作條件需嚴格控制

一、CO₂ 薄膜捕獲技術發展方向

膜分離的碳捕獲技術利用 CO₂ 與其他氣體的分子大小和反應性質的差異來實現分離的。目前，應用於氣體分離種類包括：無機膜、聚合物膜、混合基質膜(MMM)和碳分子篩(CMS)，其中，無機膜具有高滲透性和穩定性，但成膜性差、製備成本高限制了其大規模發展；聚合物薄膜的製備成本較低，但滲透性和選擇性很容易受到權衡效應的限制。由於微孔材料本身具有均勻分佈的奈米孔，有利於較小氣體分子的優先通過，提高薄膜的篩選性能。因此，微孔膜正成為目前氣體分離的研究熱點。具有優異選擇性和高滲透性的膜材料是高效膜分離的關鍵，可以透過膜結構的合理設計和膜孔徑的精確調控，提高微孔膜的氣體篩選性能。根據其尺寸和形狀，材料可分為零維(0D)、一維(1D)、二維(2D)和三維(3D)材料，其中二維材料依其孔隙結構又可分為二維無孔材料及二維微孔材料。層狀雙氫氧化物(Layered double hydroxide, LDH)、六方氮化硼(h-BN)、過渡金屬二鹵化物(TMD)

和 MXene 是典型的二維無孔材料。二維無孔材料由於其較大的橫向尺寸和自身對氣體分子的不滲透性而阻礙了氣體分子的傳輸，從而降低了膜的滲透性，因此將其用作分離膜材料時，既要考慮層間通道間距的滲透性，又要考慮材料本身的阻隔效應，二維微孔材料如多孔 g-C₃N₄、PGO、MOF 和 COF 將有潛力作為高性能分離膜。以下說明各種二維分離膜：

(一)g-C₃N₄

g-C₃N₄ 是一種新型二維微孔材料，由於其可調節的表面性質、均勻的奈米孔、穩定的孔結構和超薄的厚度，在氣體分離領域具有重要的潛力。它具有類似石墨烯的層狀結構，其中各層透過弱范德瓦力相互吸引。氮化碳層由均三嗪(1,3,5-Triazine)基本構件組成。此結構主要由六元環組成，其中 sp² 雜化的 C 和 N 原子互連可形成芳香族 p-共軛體系。穩定的化學結構保證了 g-C₃N₄ 結構的長期穩定性。此外，g-C₃N₄ 均勻奈米孔的存在，其孔徑介於 H₂ 和較大氣體分子(如 CO₂、N₂、CH₄ 等)之間，為 g-C₃N₄ 基膜提供了高氣體選擇性。g-C₃N₄ 具有均勻的奈米孔和富含胺基的表面，故有親 CO₂ 特性，有利於 CO₂ 分子的選擇性分離。藉由控制 g-C₃N₄ 奈米片的厚度和孔洞結構對 CO₂ 吸附和分離性能的差異有利於膜的擴散和吸附係數的增強，進而提高膜的氣體分離性能。然而，在剝離成奈米片的過程中，很難保持塊狀 g-C₃N₄ 在其 2D 平面上的結構完整性，從而阻礙了高性能 g-C₃N₄ 氣體分離膜的製備。有研究使用具有豐富官能基的柔性氧化石墨烯(graphene oxide, GO)奈米片來補償 g-C₃N₄ 在剝離過程中產生的結構缺陷。利用 g-C₃N₄ 中的末端-NH₂/-NH 與 GO 官能基中的-COOH 共價相互作用來補償 g-C₃N₄ 膜的非選擇性缺陷。

(二)PGO 膜

新興的石墨烯基材料，如 GO 和 PGO(Phosphonated graphene oxide)，因其化學可調性、優異的機械強度和獨特的二維結構而受到關注。通常，單一奈米片表面的高電子密度導致 GO 奈米片本身完全不滲透，進而降低膜的分離性能，因此，GO 基膜的氣體篩分性能主要基於相鄰奈米片之間分子空隙的形成或奈米片上可能存在的缺陷。此外，還可以透過控制層壓堆疊結構來實現不同尺寸氣體分子的分離。多孔還原氧化石墨烯(PRG)奈米片摻入 Pebax®1657 聚合物中，製備出具有優異 CO₂ 分離性能的薄膜，部分還原的奈米片表面殘留的官能基促進了膜內有效分子篩層狀板結構的形成，確保可從其他較大氣體分子中有效篩選二氧化碳。同時，層壓板上的微孔提供了快速的氣體傳輸通道，有利於提高氣體分子的分離性能。多孔氧化石墨烯(porous graphene oxide, PGO)被用來生長 ZIF-8 製備了 ZPGO 奈米填料，結果顯示摻雜 ZPGO 奈米填料的膜尺寸明顯改善，氣體分離性能顯著增強。此外，ZPGO 可以有效抑制 CO₂ 塑化，在實際中顯示出巨大的應用潛力。

(三) MOFs 膜

金屬有機框架材料(Metal-Organic Framework, MOF)是一類由金屬/金屬簇與有機配體自組裝而成的具有週期性網狀結構的結晶多孔材料。它是一種典型的二維微孔材料，具有規則的孔隙結構和可調的孔徑。因此，MOF 被廣泛用作提高膜的分離性能。當 MOFs 用作微孔填料時，填料與聚合物的界面相容性以及界面缺陷的產生是影響膜分離性能的重要因素。此外，MOFs 微孔膜的面內孔和奈米片的層間空間可以作為較小氣體分子的額外傳輸通道，這也是影響膜分離性能的關鍵因素。超薄 MOF 奈米片被作為溝槽層整合到高性能柔性薄膜複合膜中，以實現高效 CO₂ 捕獲。採用界面活性劑輔助方法製備超薄 MOF 奈米片，然後透過真空過濾將其塗覆到柔性多孔支架上。此方法的優點是產生超薄 MOF 奈米層，可顯著降低氣體傳輸阻力並有利於增強 CO₂ 滲透性。具有高透氣性的超薄 MOF 奈米片有望成為製備高性能氣體分離膜的最佳材料。2D MOF 奈米片以層生長方法製備了由二維 MOF 奈米片接種的聚合物支撐的 MOF 膜，2D MOF 奈米片溝槽層具有超薄的厚度層和極低的氣體傳輸阻力，從而最大化膜的氣體滲透性，由於 MOFs 槽層膜設計的高透氣性和選擇性，它將成為未來製備高性能氣體分離膜的重要方法。具表面微孔的二茂鐵基 MOF(Zr-Fc MOF)奈米片用於高效捕獲 CO₂，Zr-Fc MOF 奈米片的表面微孔有利於 CO₂ 的滲透，從而提高了氣體篩選性能，其 CO₂/N₂ 選擇性高達 216.9。

(四) COF 膜

COF 是典型的二維微孔材料，由於其高比表面積、永久孔隙率、優異的耐熱性和高結晶度，近年來在氣體分離領域受到越來越多的關注。大多數 COF 都有自己的二維層狀結構，這使得它們能夠成功剝離成具有獨特性能的單層或多層奈米片。然而，直接以 COFs 作為填料的微孔膜迄今報告較少，這可能與其複雜的成膜過程有關。因此，在聚合物基體中摻入少量 COFs 填料來製備高性能薄膜是一個不錯的選擇。由於有機填料和有機聚合物基質之間的界面相容性優於 MOF 基膜。因此，純有機成分的 COF 更適合用來製備無缺陷膜。由於 COF 本身的孔徑大於較小氣體分子的動力學直徑。因此，精確控制 COF 的孔徑以實現對較小氣體分子的有效篩分仍然很困難。COF 具有高孔隙率、有序的微孔排列和高穩定性，是氣體分離的理想膜材料。然而，大孔徑結構和複雜的膜製造過程限制了 COF 在篩選小氣體分子中的應用。趙團隊採用多界面工程策略，利用兩種不同孔徑的 COF，透過逐層界面反應，在較大孔徑的 COF(COF-LZU1)膜上形成較窄的 COF-COF 界面。製備無缺陷分離膜的關鍵是在大孔徑 COF 膜表面生長多層窄孔徑 COF 分離層。結果表明，所製備的超薄多層 COF 膜具有較高的氣體分離性能，超過了 2008 年的 Robeson。COF 由於其可調節的孔徑結構和高孔隙率，在建構快速氣體傳輸通道方面發揮重要作用。然而，連續 COF 膜的合成仍然是一個挑戰。Caro 團隊利用溶劑熱法在多孔載體上製備了 2D ACOF-1 膜。透過 PXRD 圖譜顯示

ACOF-1 膜具有晶體結構。此外，該膜具有 $8\mu\text{m}$ 的超薄厚度，對 CO_2/CH_4 的選擇性為 86.3。隨後，其研究小組利用變溫溶劑熱法在多孔支架上合成了新型二維雙層 COF-COF 膜，以連續調節亞胺基 COF-LZU1 和鋅基 ACOF-1 層的生長使其在表面上形成連續的 COF-LZU1-ACOF-1 層，沒有裂縫或缺陷。他們也研究了 H_2/CO_2 、 H_2/N_2 和 H_2/CH_4 對三種膜的 H_2 滲透性的影響。結果表明，COF-LZU1-ACOF-1 膜的滲透性和選擇性比其他膜更高，並超過了 2008 年 Robeson 上限。透過簡單的溶劑熱法在多孔氧化鋁載體上合成了具有高 CO_2 分離性能的無缺陷、連續的二維 COF 膜。

(五)小結

二維奈米材料由於其橫向延伸的尺寸、超薄的厚度和層狀結構而受到矚目，與 1D 和 3D 奈米材料相比，2D 奈米材料在建構氣體傳輸通道方面具有優勢，可以透過使用層間奈米通道有效篩選氣體分子來改善薄膜的選擇性傳輸，二維層狀材料上方的奈米孔可用作氣體分子的額外傳輸通道，利用二維奈米材料本身的奈米孔洞增加層間通道的協同效應對於提高分離膜的選擇性非常重要。然而，當二維層狀材料的氣體傳輸通道與膜表面平行時，往往會導致奈米片相互堆積和彎曲，從而導致膜缺陷而產生氣體分離性能下降。因此，未來二維奈米材料的研究應主要集中在如何有效建構氣體傳輸通道以提高氣體篩分性能。

LDH、MXene、GO 等二維無孔材料自身表面無孔結構，不利於氣體分子穿透。它們的無孔缺陷阻礙了氣體分子的傳輸並減少了薄膜表面的氣體滲透。因此，氣體分子只能透過板材相關層之間的孔隙進行傳輸。然而，當使用二維無孔材料來建構氣體傳輸通道時，奈米片本身的不滲透性以及相鄰片層之間的狹窄通道是阻礙氣體分離性能提高的重要因素。相較之下，具有均勻奈米孔的二維微孔材料更有希望成為高性能分離膜的理想材料。由於二維微孔材料固有的微孔結構可以作為小氣體分子傳輸的快速通道，進一步增強了膜的篩分性能，同時可以提高膜的滲透性。此外，二維微孔材料具有孔徑可控、孔隙率高的優點，可以有效精確篩選氣體分子。因此，二維微孔材料以其奈米孔結構均勻、孔徑可調的自身優勢將成為氣體分離膜的首選材料。然而，如何精確調節孔徑以建立高效的氣體傳輸通道，同時提高其在惡劣環境下的穩定性將是二維微孔材料發展的發展方向。未來二維微孔膜的研究應著重於以下四個領域：(1)開發更多新穎的二維微孔材料，包括一些在其他領域已經取得成功的材料。(2)高滲透性、選擇性和穩定性的膜的製備也是未來研究的重點。(3)考慮 CO_2 分離成本與環境污染。合理降低膜分離製程的操作條件，減少環境污染。(4)降低膜材料消耗成本也是膜永續發展的綠色方向。

二、CO₂ 薄膜捕獲技術實廠測試案例

(一) 日本北海道苫小牧 CCS 示範計畫

位於日本北海道的苫小牧 CCS (Tomakomai Carbon Capture and Storage) 示範計畫(如圖 5.20)，展示碳捕獲與封存(CCS)技術的可行性，主要目標包括：

1. 碳捕獲技術: 此專案旨在展示碳捕獲技術的有效性，特別是來自工業來源的碳捕獲技術，例如天然氣發電廠和煉油廠。它展示了在這些設施排放到大氣中之前捕獲二氧化碳的過程。
2. CO₂ 的運輸和儲存: 該計畫也著重於捕獲的二氧化碳的運輸和儲存，包括建造管線，將捕獲的二氧化碳運送到海上地質儲存地點，安全儲存以防止其釋放到大氣中等。
3. 碳捕獲與封存(CCS)大規模驗證：CCS 技術可行性和可擴展性。



圖 5.20 苫小牧 CCS 示範設施

該計畫發現薄膜分離程序處理二氧化碳會遇到一些問題，提出下列注意事項：

1. 由於處理量大，所以薄膜有效面積也需要大量增加，但也需要考量空間成本，因此必須選擇裝填密度較高的薄膜模組；
2. 如何在低成本考量下，提供驅動力讓薄膜系統正常操作；
3. 廢氣中的組成份包含飛灰、二氧化硫、水和尖銳固體是否會對薄膜產生損害或降低效益。

(二) 美國德州 Mallet 廠

美國德州日落鎮內 Mallet 廠區將高濃度二氧化碳和碳氫化合物氣體之回收再利用，廠內設有一座薄膜分離成序設備系統和二座溶劑回收成序設備系統。該廠進料入口氣體流速與壓力分別為 102 MMSCFD(Million standard cubic feet per day)和 350 psig，其二氧化碳的含量約為 90 %。薄膜分離成序設備主要是從石油煉製氣體回收二氧化碳後，注入含有石油的地底層中，以增加石油的採收率(Enhanced Oil Recovery, EOR)。圖 5.21 為整個廠區的鳥瞰圖，而薄膜分離模組系統位於右下角。其中進料氣體含有二氧化碳、氮氣、硫化氫和碳氫化合物等，其組成比例如表 5.7 所示。



圖 5.21 美國德州日落鎮內 Mallet 廠區鳥瞰圖²¹⁷。

²¹⁷ G. Blizzard, D. Parro, K. Hornback, Mallet gas processing facility uses membranes to efficiently separate CO₂, Oil & gas journal 103(14) (2005) 48-53.

表 5.7 Mallet 薄膜分離程序之進料氣體成份²¹⁷

成份	比例(%)
二氧化碳	89.9
氮氣	0.7
硫化氫	0.3
碳氫化合物	3.8
甲烷	1.8
乙烷	1.5
丙烷	1.1
丁烷	0.5
戊烷	0.4
己烷和其餘烷類	9.1

Mallet 廠區利用薄膜系統、甲基二乙醇胺(N-Methyldiethanolamine, MDEA)和 AP-810(MDEA)溶劑來回收二氧化碳或降低碳氫化合物氣體內的酸性氣體，例如二氧化碳和硫化氫，如圖 5.22 所示。

2. 進料氣體前處理

為了增加薄膜的操作效能與延長使用壽命，須針對進料氣體進行前處理程序，首先低溫的進料氣體會經過交錯式熱交換器加溫，再將進料氣體送入添加少量丙烷的冷凍分離器，將溫度降至 70 °F，經過冷凍分離器處理之後可移除 12 % 己烷、41% 庚烷、67% 辛烷和 75% 壬烷。接著將處理完畢的氣體送入二氧化矽凝膠填充塔內進行脫水程序，其主要目的在於避免液態水產生會造成氣體分離膜效能降低，也可以防止高烷類進入薄膜系統降低操作效能。

3. 薄膜分離 CO₂

進料氣體會經過二階段薄膜模組系統，第一階段薄膜處理器出口氣體的壓力與流量分別為 225 psig 和 50 MMscfd，把原先 90 % 的二氧化碳回收或移除到剩下 27 %；第二階段薄膜處理器出口氣體壓力與流量分別為 85 psig 和 17 MMscfd，而整體出口二氧化碳之回收率約為 70 %，該廠預計 2005 年擴展到 200 MMscfd 的進料處理量。有別於傳統溶劑回收系統，添加了薄膜分離程序系統後，使得後續醇胺吸收劑用量減少 40 % 以上，因此薄膜分離程序有著極高的競爭優勢。

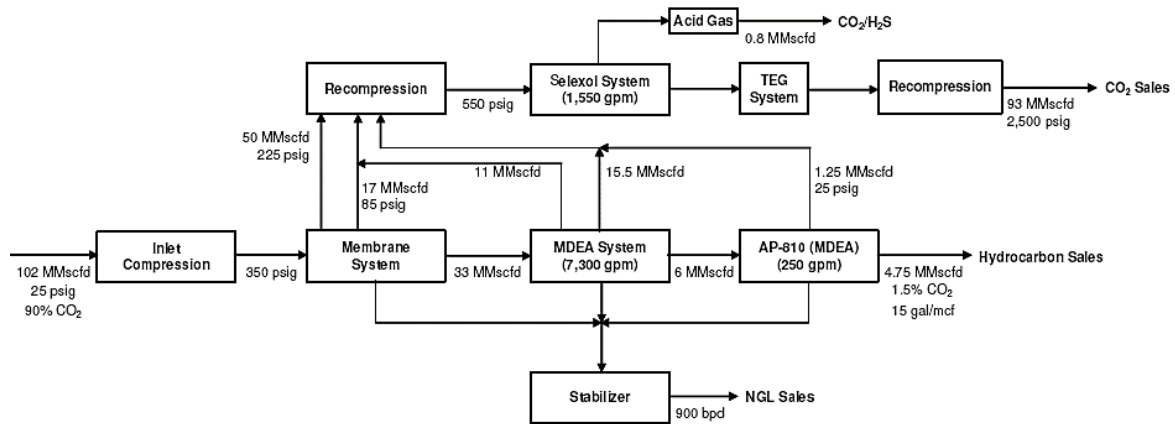


圖 5.22 Mallet 廠內處理程序流程圖²¹⁷

三、小結

薄膜法捕獲 CO₂ 已進入模廠試驗階段，雖具備技術可行性，仍需要持續提升模材料，增加效率與使用壽命，並需依照不同的煙道氣體成分，並結合工業製程，提出解決方案。以下是薄膜法捕獲 CO₂ 之發展重點：

- (一) 開發對二氧化碳比其他氣體具有高選擇性的先進膜材料是發展趨勢，包括(1)提高選二氧化碳的選擇性；(2)提高膜滲透性，以提高二氧化碳捕獲率，有助於提高捕獲系統整體能源效率；(3)提高在惡劣條件下(腐蝕性氣體、高溫 and 壓力變化)的穩定性；(4)抗結垢和降解；(5)延長膜材使用壽命；(6)發展大面積的薄膜膜材提升處理量。
- (二) 與工業流程整合：設法將膜技術與二氧化碳捕獲工業流程相結合，針對不同處理進料條件，找尋出薄膜分離系統程序之最適化設計，並與廠內能資源整合減少能源消耗並降低成本。
- (三) 模組化和緊湊型系統：模組化和緊湊型膜式二氧化碳捕獲系統的優點為(1)易於安裝，並最大限度地減少安裝過程中的停機時間；(2)節省空間的設計；(3)簡化的操作和維護，減少日常維護對於對專業知識的需求。

第四節 甲烷雙重組藍氫技術

氫氣擁有高熱值(140 kJ/g)²¹⁸可替代傳統化石燃料(煤礦、石油、天然氣)的替代能源，氫氣也可用作各種高價值化學品的原料²¹⁹。據統計，全球氫氣的使用量在2020年約為120 Mt，約70 Mt用於石油精煉和氫生產，約20 Mt用於甲醇生產和鋼鐵製造，約30 Mt則用於發電和供熱²²⁰。預計到2050年將增加至530 Mt，其中約40%用於運輸，約35%用於工業，約20%用於發電，其餘5%則用於農業、建築和石油精煉²²¹。

因製氫過程的料源和製造方式的差異而導致的排碳量差異，我們可以把所生成的氫分類為灰氫、棕氫、藍氫與綠氫。在這些技術中，運用天然氣(主要成份為甲烷)進行蒸氣重組反應是主要的製造氫氣方式，佔全球氫氣產能約76%，因其過程會產生大量二氧化碳，因此稱為灰氫。而其他主要的23%來源則是通過煤炭等化石原料來轉成氫氣(稱為棕氫)¹⁴⁹。甲烷蒸氣重組反應之其優點包括可通過一個單一反應實現高氫氣產量(一莫耳的甲烷將可產生三到四莫耳的氫氣)。此外，灰氫製程具有較高的操作可控性，能夠實現穩定、可預測的連續式氫氣量產，這對於工業應用和能源供應鏈的穩定性至關重要。然而近年來製氫技術正面臨技術性轉型之需要，在生產氫氣的同時，需減少製程的溫室氣體排放，以應對氣候變遷的挑戰。運用甲烷蒸氣重組反應製程所產生之氫氣會伴隨排放二氧化碳，除了無法顯現採用氫能的優勢，也會對使用氫氣之化學品製程增加了排碳成本。

在低碳趨勢下可能面臨碳稅等挑戰，相較於現有的蒸氣重組(灰氫)技術，發展較低碳生成之氫能技術為重要科技發展目標。其中依照其特性，可以分為綠氫與藍氫²²²。綠氫技術長久以來為廣為探討的方向，並在目前製氫技術中已有相當成果，概念上通過再生能源在電解槽中進行水電解製造，在電化學反應的過程中不產生碳排放。藍氫(Blue Hydrogen)則是透過化石燃料或天然氣製氫，再結合二氧化碳捕獲、封存或再利用技術，實現低碳氫氣生產。

²¹⁸ G.-H. Lai, J.H. Lak, D.-H. Tsai, Hydrogen production via low-temperature steam-methane reforming using Ni-CeO₂-Al₂O₃ hybrid nanoparticle clusters as catalysts, ACS Applied Energy Materials 2(11) (2019) 7963-7971.

²¹⁹ J.D. Holladay, J. Hu, D.L. King, Y. Wang, An overview of hydrogen production technologies, Catalysis Today 139(4) (2009) 244-260.

²²⁰ M. Hermesmann, T. Müller, Green, turquoise, blue, or grey? Environmentally friendly hydrogen production in transforming energy systems, Progress in Energy and Combustion Science 90 (2022) 100996.

²²¹ S. Bouckaert, A.F. Pales, C. McGlade, U. Remme, B. Wanner, L. Varro, D. D'Ambrosio, T. Spencer, Net zero by 2050: A roadmap for the global energy sector, (2021).

²²² 石蕙菱(工研院), 產業技術評析-全球氫氣生產方式的發展與趨勢, 2021.

藍氫製造的發展受到石化公司的青睞，主要在美國、加拿大等地發展相關示範計畫，包括 Shell(Lambeth, London, England) 在加拿大亞伯達省，Air Products(Allentown, Pennsylvania, U.S.) 在美國德州²²³。Lake Charles Methanol(LCM) 公司在美國德州提出藍色甲醇生產計畫，LCM 公司是一間具有世界級規模的石油焦(Petcoke)回收設施和世界最大的工業 CCS 計畫項目的公司，每年可將 250 萬公噸的石油焦轉化為甲醇和其它化學產品。Lake Charles Methanol 公司的 Lake Charles Methanol II 計畫是利用天然氣重整技術(Steam Reforming)和二氧化碳捕獲和封存技術(CCS)來生產低碳氫，將捕獲濃縮的二氧化碳壓縮後，以管線將其輸送到封存服務提供者 Denbury 公司所營運的二氧化碳管線系統中。將二氧化碳輸送到一個或多個封存地點，並將其注入深層鹹水層中進行永久封存；氫氣則是轉化為藍色甲醇，產量超過 360 萬公噸。該計畫結合了藍氫生產、CCS 技術，可以生產出多用途氫載體燃料，為一項耗資 40 億美元的清潔氫項目²²⁴。

藍氫的製造過程與現今主力產氫的甲烷蒸氣重組反應製程相似，唯一不同是在過程中須結合捕獲、儲存或再利用二氧化碳的方法，才能大幅降低二氧化碳排放。由於與甲烷蒸氣重組反應製程相似，藍氫製程在設備與技術方面具有相對成熟的基礎，使其具有短期內大規模生產氫氣的優勢，有機會在迅速將灰氫製程轉換成藍氫製程，在 2030 年達成產氫製程中大規模減碳的里程碑。降低生產成本並且提高二氧化碳捕獲效率，是藍氫技術的挑戰，因此本節將專注於透過甲烷蒸氣重組反應(SRM)生產低碳氫氣的方法。

一、甲烷蒸氣重組反應製氫：直接碳排(化學反應)與間接碳排(用電)之評估

甲烷蒸氣重組反應(Steam Reforming, SRM)作為主要的大規模氫氣生產方法，受到了廣泛的關注。為了有效探討將此產氫方法由灰氫製程轉變為藍氫製程，在本文中，我們將針對甲烷蒸氣重組製氫中的碳源與兩大碳排放方式，直接碳排(化學反應)和間接碳排(能耗，如用電)，來進行探討與分析。首先，甲烷蒸氣重組反應是一種通過將甲烷和蒸氣進行反應，生成氫氣和一氧化碳的過程。這一過程可以通過以下化學方程式來表示： $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{H}_2 + \text{CO}$ 。然而，在一般操作情形下(註：較低溫度； $< 900^\circ\text{C}$)，一部分所生成的 CO 會與水蒸氣發生水煤氣反應： $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \text{CO}_2$ 。由於水煤氣反應參與其中，因此在一般操作條件下，甲烷蒸氣重組之淨反應為 $\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{H}_2 + \text{CO}_2$ ，而此化學反應所產生之直接碳排也因此而生。從直接碳排的角度來看，每公斤氫氣的產生將產生約 5.5 公斤的

²²³ R.W. Howarth, M.Z. Jacobson, How green is blue hydrogen?, Energy Science & Engineering 9(10) (2021) 1676-1687.

²²⁴ 資料來源：<https://www.lakecharlesmethanol.com/products>

二氧化碳，這對於減少碳排放構成了挑戰。熱力學平衡分析，如圖 5.23 (a)顯示，甲烷蒸氣重組反應的直接碳排放量會隨著溫度的升高而增加，並在 400-500 °C 之間達到一最大值。隨後，隨著溫度持續升高，水煤氣反應變得較為不明顯，淨反應式逐漸轉變為 $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{H}_2 + \text{CO}$ ，並在 900 °C 左右達到零碳排。

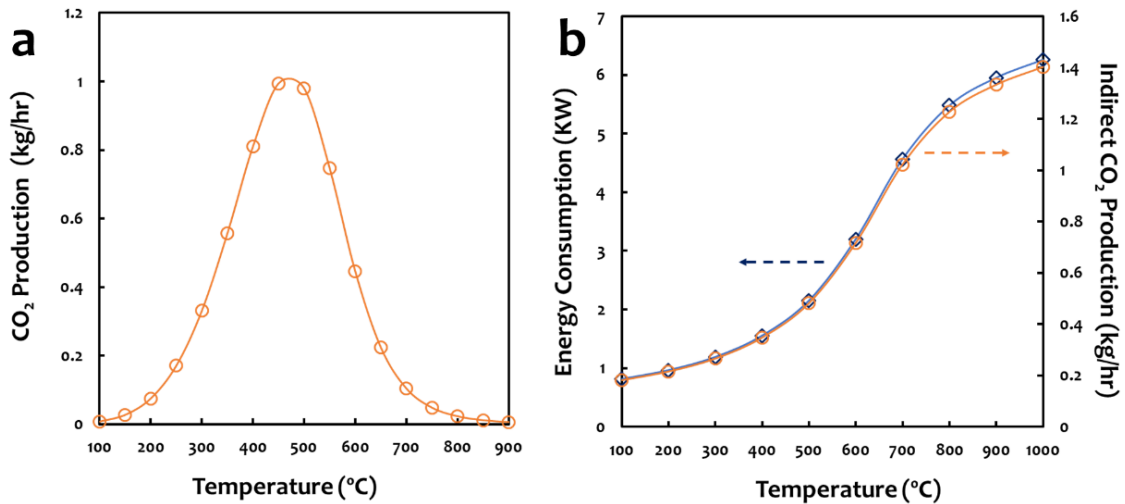


圖 5.23 以熱力學平衡計算在不同操作溫度下，甲烷蒸氣重組反應之(a)直接碳排放量(kg CO₂/h)，以及(b)能源消耗功率(kW)和其對應的間接碳排放量(kg CO₂/h)

在探討甲烷蒸氣重組反應製氫所造成的碳排放時，我們必須深入考慮反應所需能源消耗對應的碳排放情況(間接碳排)。雖然從圖 5.23 (a)可以看出提高反應溫度將有助於減少化學反應之直接碳排放量，然而此提高甲烷蒸氣重組反應溫度的做法，同時會帶來能源消耗量大幅增加的問題，對應於所需能耗增加所造成之間接碳排放量也會因此而上升。能源消耗主要來自於為了升溫與恆溫所需的能量，而這種能源的來源往往也導致相應的二氧化碳排放。這涉及到一個複雜的平衡，需要同時關注能源效率和碳足跡。需要注意的是，在高溫條件下，熱效率較低，會導致更多的能源消耗和隨之而來的更多碳排放。另一方面，由於甲烷蒸氣重組反應為吸熱反應，在較高溫下進行重組時雖會減少碳排放，但單位氫氣產量的吸熱焓則是大幅上升。舉例而言，完全燃燒甲烷($\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$)可提供的能量為 890.4 kJ/mol。假設甲烷蒸氣重組進料中包含 1 kg/h 的甲烷和 1.12 kg/h 的水蒸氣(1:1 莫耳比)，根據圖 5.23 (b)熱力學平衡計算結果顯示，隨著操作溫度升高，所需能量以及相對應的二氧化碳間接生成(甲烷燃燒提供能量所致)在理論計算上也呈現線性上升之趨勢；而實際上隨著反應溫度上升而所造成的熱傳損失會更高，使得間接碳排放量會隨反應溫度呈現級數上升之趨勢。在 500 °C 到 800 °C 之間，能源消耗和相對應的碳排放顯示出較高的增加斜率。這一現象可以歸因於前面所提到的原因，即放熱水煤氣反應(焓變值為 -41.2 kJ/mol)逐漸不再參與反應，導致化學反應更傾向於只有吸熱的甲烷蒸氣重組反應($\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{H}_2 + \text{CO}$ ；焓變值為 206 kJ/mol)。這一變化使得在這個溫度範圍內，能源效率下降，同時伴隨着更多的間接碳排放，每單位甲烷所生成的氫氣量也會下降 25%。

無論是化學反應直接排碳還是能耗間接造成的碳排，在以甲烷蒸氣重組反應為基礎之氫能技術中不可忽視，必須尋找方法來在碳排放和能源效率之間找到平衡。藍氫技術的目標，是實現更為“清潔”的氫氣生產，即在氫氣製備過程中產生的二氧化碳排放量更少甚至趨近於零。首先，選擇適當的反應溫度與操作條件是關鍵，在甲烷蒸氣重組過程中，反應溫度直接影響到甲烷轉化率、氫氣產量以及碳排放，考慮碳排量所增加的生產成本和氫氣產量之間的平衡，我們需要找到一個適中的反應溫度，既能夠保持較高的氫氣產量，又能夠有效降低碳排放。此外，引入替代的反應途徑也是一種有效的策略，將產氫方法由灰氫製程轉變為藍氫製程，甲烷雙重組反應是一種新型的製氫方法，它通過兩個連續的反應步驟來實現氫氣的製備，從而在一定程度上減少了二氧化碳的產生。以下探討結合甲烷乾式重組反應(dry reforming; DRM)與蒸氣重組反應(SRM)之雙重組反應(BRM)。

二、結合甲烷乾式重組反應與蒸氣重組反應之雙重組反應

甲烷雙重組反應(bi-reforming)是將甲烷乾式重組(dry reforming)與甲烷蒸氣重組(steam reforming)兩種化學反應結合在一起，實現更有效率的氫氣生產製程。甲烷乾式重組將甲烷和二氧化碳轉化，生成氫氣和一氧化碳($\text{CH}_4 + \text{CO}_2 \rightarrow 2\text{H}_2 + 2\text{CO}$)；而甲烷蒸氣重組(steam reforming)則是將甲烷和水蒸氣轉化，同樣產生氫氣，但由於水煤氣反應(water-gas shift reaction)的參與，導致二氧化碳的生成($\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{H}_2 + \text{CO}_2$)。甲烷雙重組反應將兩個反應結合在一起($3\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \rightarrow 8\text{H}_2 + 4\text{CO}$)，讓甲烷蒸氣重組過程中可以減少二氧化碳，增加氫氣和一氧化碳(合成氣, syngas)，合成氣可作為化學製程的原料。此外，甲烷雙重組反應的產物氣體組成，可以透過提供不同比例的甲烷、水蒸氣和二氧化碳進料來進行調整，為後段製程所需的 H_2/CO 比例提供彈性。

從製氫技術的角度來看，提高水蒸氣量將有助於採用甲烷雙重組反應來作為製氫技術。相較於甲烷蒸氣重組的情況(二氧化碳為產物)，甲烷雙重組中由於二氧化碳作為反應物，氫氣和二氧化碳之間的變化比($\Delta\text{H}_2/\Delta\text{CO}_2$)呈現負值。雖然單位甲烷的理論產氫量下降 34%($\Delta\text{H}_2/\Delta\text{CH}_4$ 自 4 下降到 2.67)，但 $\Delta\text{H}_2/\Delta\text{H}_2\text{O}$ 可以提升一倍，顯示甲烷雙重組反應在水蒸氣製氫利用上的效能更高。從概念上來看，甲烷雙重組反應可以作為藍氫製程，主產物為 H_2 ，副產物為 CO 。

本研究所提出的藍氫技術製程如圖 5.24 所示，基於甲烷雙重組反應之概念。在這項減碳製氫技術中，藍氫為主要的產物，可以在 Step 1 中以蒸汽重組(第一迴圈)與雙重組反應(第二迴圈開始)來生成，藉由常壓冷凝器將水與其他氣體成份進行分離(Step 2)後，進入氣體分離裝置，以將所生成之氫氣與反應後氣流分離(Step 3)。在完成氫氣分離程序後，可以以兩條路線來運用附加產物 CO 。在 Route 1 中，一氧化碳可以進一步從反應後氣流(氫氣、一氧化碳、以及未完全反應之甲烷與二氧化碳)分離出來，並用於其他工業用途。例如，一氧化碳在費托合成中扮演著重

要角色，它可以被轉化為有用的燃料和化學品。同樣地，一氧化碳也在化學合成、金屬冶煉以及化學還原等過程中有著廣泛的應用。這種多樣性的應用使得一氧化碳不再是一種單一的副產物，而是一種有價值的資源，有助於提高整體能源利用效率和可持續性。以此程序來看，可以藉由 CO₂ 再利用方式達到減碳製氫的目的。

此外，我們可以選擇將從反應後產物中分離出來的成分進行回流，如 Route 2 所示，這包括了雙重組反應中的附加產物 CO，副產物 CO₂，以及未完全反應的甲烷和二氧化碳。通過將這些成分重新引入到反應進料中，我們可實現持續的藍氫生產。這種回流的方式有助於最大程度地利用原料，除了減少了資源的浪費，有助於提高生產的效率之外，也可以在新增設備上的阻力減至最小，提升技術完備等級上(Technology Readiness Level, TRL)，使其更具有應用性。

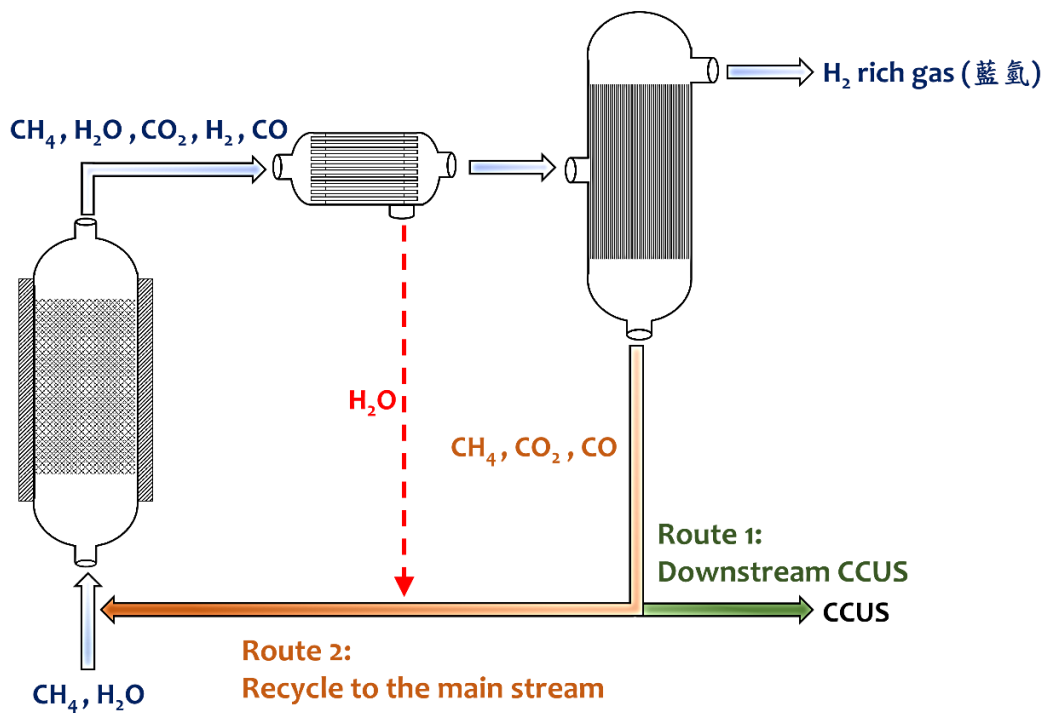


圖 5.24 甲烷雙重組反應系統，結合下游產物分離(Route 1)及未轉化氣體之回流再利用(Route 2)。

本研究進行 11 次迴圈反應(一次 SRM，接續 10 圈 BRM)的熱力學平衡計算，以模擬可能的氫氣產量與化學碳排量。圖 5.25 顯示熱力學平衡模擬計算之 700°C 反應溫度下甲烷蒸氣重組以及甲烷雙重組分別造成的氫氣與二氧化碳產量。以 1 kg/h 甲烷和 1.12 kg/h 的水蒸氣(1:1 莫耳比)進料為例，蒸氣重組(SRM)中氫氣和二氧化碳的總產量分別為 0.287 kg/h 和 0.234 kg/h，每生產 1 公斤氫氣會造成 0.82 公斤的二氧化碳排放。在第一個甲烷雙重組循環中(BRM Cycle 1)，我們按照圖 5.24 中展示的 Route 2，將所有蒸氣重組未轉化的進料(甲烷和水蒸氣)和副產物(二氧化碳和一氧化碳)在去除氫氣後回流到反應系統中進行循環再利用，可避免二氧化碳排放，並且產生更多的氫氣(0.33 kg/h)。為了避免顯著的體積擴張(假設我們

的反應系統體積流速上限為 500 L/min)，從第二個循環開始，必須排放部分產物流(按照圖 5.24 中的 Route 1)，而剩餘部分仍然回流到反應系統中。在此模擬系統中，30%的產物排放後進行處理碳捕獲、一氧化碳分離等處理。從第四個循環開始，體積擴張再次接近上限，因此，可以通過調整新鮮進料的流量來控制整體體積流速。在此系統中，從第四個循環開始，新鮮水蒸氣進料的流量減少 5% 至 1.06 kg/h，而甲烷進料保持不變。在經過十個循環操作後，可以看到氫氣產量可以穩定地保持在 0.32 kg/h，同時二氧化碳/氫氣比也可以保持在約 0.66 左右。10 次迴圈的甲烷雙重組路線顯示出比 10 次迴圈的蒸氣重組路線高約 15% 的總氫氣產量，同時減少了約 20% 的二氧化碳排放，並且二氧化碳/氫氣產量比則減少了約 30%。這些結果僅基於熱力學平衡計算而得出，在實際應用中，許多因素將影響反應的表現，例如所使用的觸媒、不同反應器的設計、反應物純度、高壓操作下的反應等。因此，在實際操作中，可能會觀察到不同於熱力學平衡計算結果的效果。

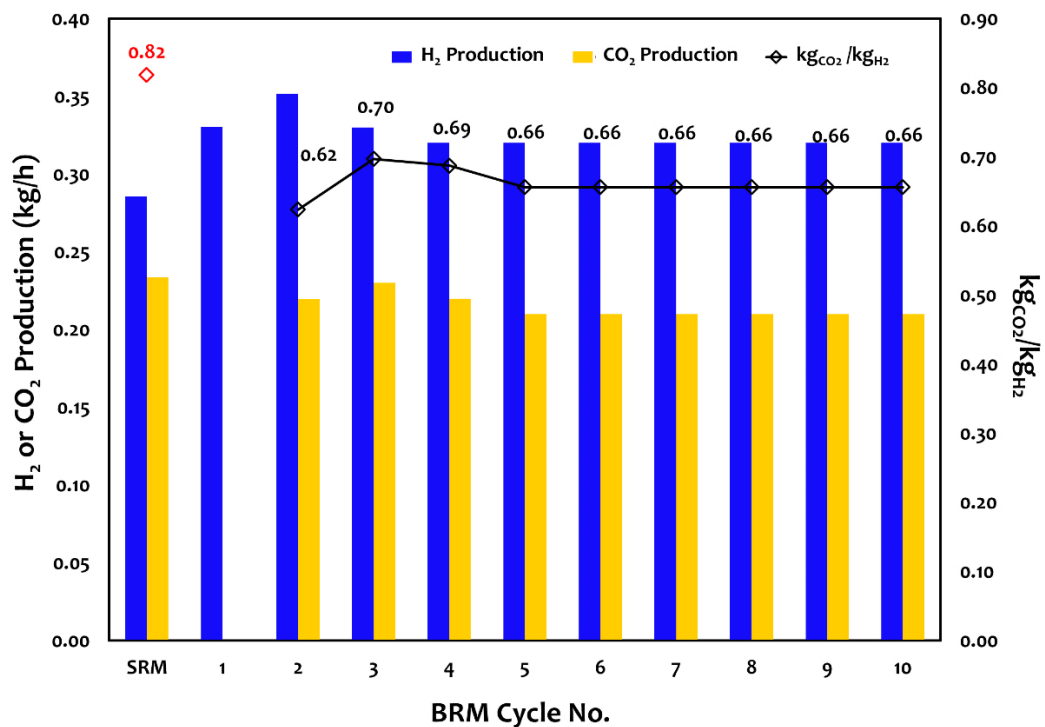


圖 5.25 熱力學平衡計算之 700 °C 反應溫度下甲烷蒸氣重組以及甲烷雙重組分別產生的氫氣與二氧化碳。

可以運用多種分離技術從甲烷雙重組的產物中分離出純淨的氫氣，以實現氫氣的高純度回收和利用。首先，加壓液化法是一種常見的方法，其利用不同氣體成分的液化溫度差異來實現分離。一氧化碳的液化溫度是-190°C，二氧化碳的液化溫度是-78°C，甲烷的液化溫度是-162°C，而氫的液化溫度則是-253°C，透過調節壓力和溫度，可以將一氧化碳、二氧化碳和甲烷液化，讓氫氣保持在氣態進行分離。圖 5.26 (a) 顯示在相同溫度但不同操作壓力下，所需的能耗與氫氣分離效率之間的關係。隨著操作壓力的上升，氫氣分離效率與能耗也會上升，並且能耗與

氫氣分離效率呈線性關係。而在相同壓力但不同溫度的情況下(圖 5.26 (b))，能耗的增加幅度則更為顯著。與在不同操作壓力下觀察到的線性關係不同，這裡能耗隨著溫度的下降呈現出高斜率的直線上升趨勢，需移除熱能降低溫度才能提升氫氣分離效率。然而，降低溫度需要運用製冷循環或其他方式移除熱能，這些冷卻過程通常具有相對較低的熱力學效率，將消耗更多的能量；此外，在與周圍溫度差異越大的情況下，移除熱能也需要更多的能量，進一步增加了降溫過程的能耗。然而，我們需要注意到增加操作壓力也伴隨著一些其他重要考慮因素。比如高壓系統通常需要更複雜、更堅固的設備，會導致氫氣分離單元的設備成本上升。此外，高壓操作可能涉及安全風險，因此需要嚴格的安全措施和監管。因此，選擇增加操作壓力或降低溫度取決於多個因素，包括成本、能源效率、安全性以及所需的分離效率，最佳解決方案需要在這些因素之間取得平衡。

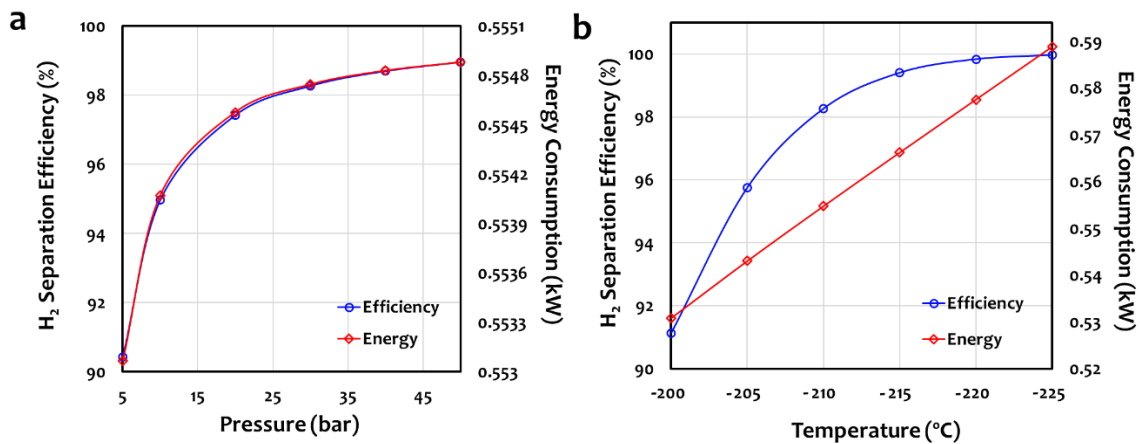


圖 5.26 熱力學平衡計算之能耗與氫氣分離效率關係圖：(a) 固定溫度(-210 °C)。(b) 固定壓力(30 bar)。

其他分離方法包括變溫與變壓吸脫附法，利用不同成分在吸附材料表面的吸附能力差異，透過控制溫度和壓力，使特定成分在吸附和釋放過程中被捕獲和釋放。此外，薄膜分離法也是一種有效的技術，使用特殊的薄膜材料，通過選擇性地允許或阻隔特定成分通過，從而實現氣體的分離。在甲烷雙重組反應後的氣體流中，薄膜可以被設計成僅允許氫氣通過，同時阻止其他成分的通過。這樣，就可以獲得高純度的氫氣，同時有效地保留其他成分在薄膜的另一側。這兩種方法的操作成本不僅受能耗影響，還取決於所使用的吸附材料和薄膜材料等因素。

三、重要參數評估：反應溫度、進料成分、觸媒成分

綜合以上分析，在藍氫技術製程所述之各項單元操作條件上進行優化，對於實現有效、具有商業上可行的產氫製程是成功要素。本節探討甲烷雙重組反應(Step 1)之重要參數評估。甲烷雙重組反應製氫的有效性主要體現在如何達到最佳

的反應轉化率、減少未反應的二氧化碳，以及實現高氫氣產率與低碳排量。在甲烷雙重組的設計中，需要綜合考慮操作條件、反應物料配比以及催化劑的選擇，以確保同時滿足高二氧化碳轉化率以及高氫氣產率。操作溫度是一個關鍵的參數，理想的操作溫度應該能夠在降低所需能耗(間接碳排)的同時實現高的反應轉化率，以減少直接碳排與提升氫氣產率。一般來說，操作溫度越高，氫氣產率越高，然能耗造成的間接碳排也會大幅增高。降低操作溫度雖可以減少熱能損失，但同時也可能限制反應的進行速率，以致氫氣產率降低。因此，需要找到一個最適合的操作溫度，在保證高轉化率的同時，最大程度地降低能耗與間接碳排量。

甲烷雙重組的操作溫度對於影響反應效率和產物成分扮演著關鍵角色外，也對於二氧化碳轉化率有很大的影響(註：化學減碳量)。圖 5.27 為以熱力學平衡計算，在不同進料比例下(甲烷：水蒸氣：二氧化碳)，溫度變化對於二氧化碳轉化率的影響。當甲烷、水蒸氣和二氧化碳進料比為 3:2:1，處於較低的溫度範圍(300 °C 至 600 °C)時，二氧化碳的平衡轉化率呈現出負值，意味著水煤氣反應的進行，導致二氧化碳成為反應的產物之一，以致反應出口 CO₂ 量會高於進料量。當溫度在 300 °C 到 500 °C 之間升高時，CO₂ 轉化率下降，顯示水煤氣反應隨著溫度的增加變得更加明顯。然而，當溫度超過 500 °C 後，二氧化碳的轉化率開始上升(註：富轉化率下降)。從 600 °C 開始，二氧化碳的轉化率呈現正值，並隨著反應溫度的提高而逐步增加。在高溫環境下(1000 °C)，最終能夠達到將近 100% 的轉化率。總和來說，以熱力學平衡來看，操作溫度的不同範圍對於甲烷雙重組反應的產物分佈產生明顯影響，在較低的溫度下，水煤氣反應佔主導地位，以致 CO₂ 平衡轉化率不理想。隨著溫度升高，反應情況有所變化，二氧化碳的轉化率逐漸上升，最終可在高溫條件下實現 CO₂ 完全轉化。

清大蔡德豪教授使用 NiPdCeO_x@SiO₂ 作為觸媒，來催化進行甲烷雙重組反應²²⁵，隨著反應溫度的升高，甲烷轉化率、二氧化碳轉化率和氫氣產率同時增加，並在大約 800 °C 時達到將近 100% 的甲烷轉化率。藉由添加少量的貴金屬於觸媒材料，可以在較低溫的 550 °C 下仍具有相對高的反應活性(即甲烷轉化率 40%)，因此可以在這個低溫下進行長達 100 小時的穩定性測試，由於使用的溫度偏低，不會引起嚴重的觸媒燒結現象，所以操作穩定性維持良好。使用 NiO/MgO 作為觸媒進行高壓甲烷雙重組的研究²²⁶，在 7 大氣壓和 830 °C 的條件下，可以實現約 70% 的甲烷和二氧化碳轉化率。當溫度從 830 °C 升至 910 °C 時，甲烷和二氧化碳的轉化率均提高了約 15%。這些實驗結果突顯了在甲烷雙重組反應中，溫度是

²²⁵ Y.-S. Lin, J.-Y. Tu, D.-H. Tsai, Steam-promoted methane-CO₂ reforming by NiPdCeO_x@SiO₂ nanoparticle clusters for syngas production, *International Journal of Hydrogen Energy* 46(49) (2021) 25103-25113.

²²⁶ Y.-S. Lin, J.-Y. Tu, D.-H. Tsai, Steam-promoted methane-CO₂ reforming by NiPdCeO_x@SiO₂ nanoparticle clusters for syngas production, *International Journal of Hydrogen Energy* 46(49) (2021) 25103-25113.

實現高效率和穩定性的關鍵參數之一；惟此在相對高溫與較高壓的結果，在反應器的材質、設計與升溫維持高壓所需的能耗，均為其應用上的挑戰。

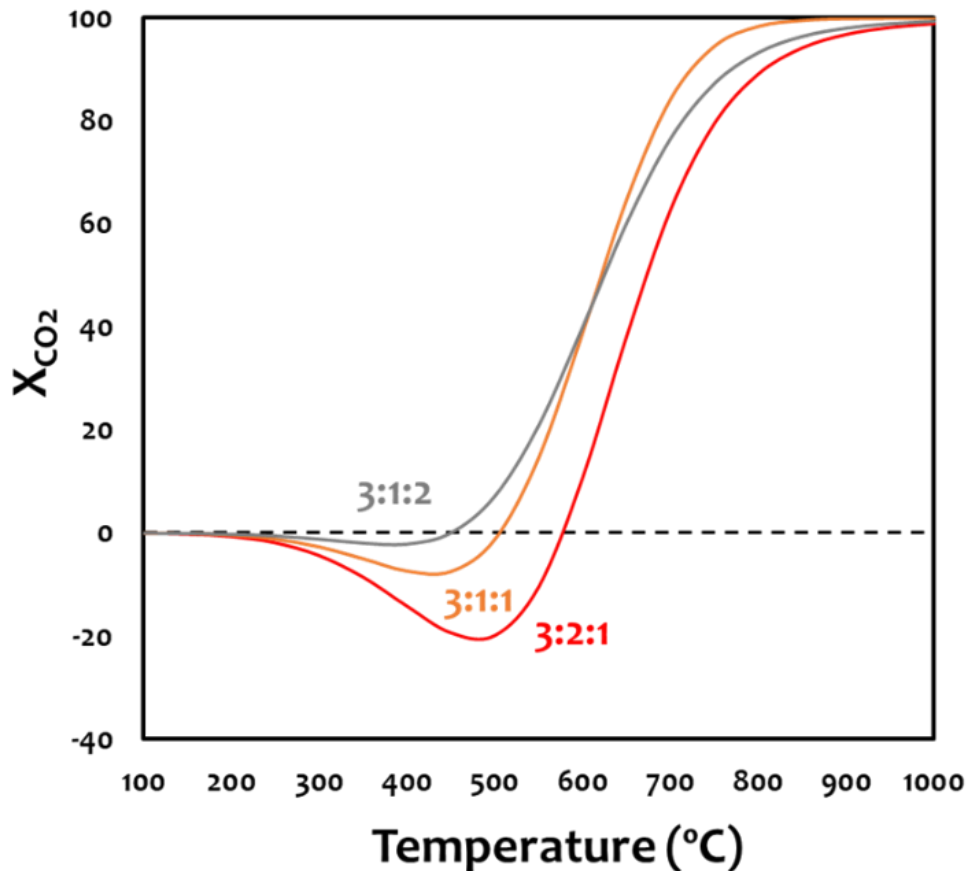


圖 5.27 熱力學平衡計算之不同進料比例下(甲烷：水蒸氣：二氧化碳)溫度變化對於二氧化碳轉化率的影響。

理想的進料比也是實現甲烷雙重組效能的關鍵因素(甲烷、水蒸氣和二氧化碳的比例)，其變化會直接影響主產物氫氣和副產物一氧化碳的產率，同時也影響二氧化碳的轉化率(排放量)。圖 5.27 是不同進料比例(甲烷：水蒸氣：二氧化碳)對於二氧化碳平衡轉化率的影響，當進料中二氧化碳的濃度增加時(3:2:1→3:1:1→3:1:2)，在較低溫區間(300 至 600 °C)負轉化率的趨勢變得較不明顯，因為增加二氧化碳進料可抑制水煤氣反應，減少二氧化碳生成。然而，這種情況下也伴隨著水蒸氣進料的減少，這可能導致氫氣的產率下降，因為氫原子來源於甲烷和水蒸氣，因此必須找到反應的平衡條件，維持低二氧化碳轉化率，並且保持足夠的水蒸氣進料，確保氫氣的產量不會受到影響。

甲烷雙重組反應的技術發展方向是在較低操作溫度下進行反應，同時壓制水煤氣反應以減少二氧化碳排放，或在特定進料比內實現高二氧化碳轉化率和高氫氣產率，技術發展重點則是觸媒的開發。觸媒如鎳，能有效催化甲烷重組反應，但其易積碳且容易燒結的特性使通常需要添加助觸媒或載體，以在獲得高催化活性的同時確保觸媒的穩定性。另外，在觸媒材料中添加如氧化鈣、氧化鈉或氧化

鎂作為二氧化碳吸附劑，也是一種有效提升催化效應的方法，因其具有較高的鹼性，有助於捕獲二氧化碳，進而協助後續的轉化過程，減少二氧化碳排放。將鎳觸媒擔載在氧化鎂-層狀雙氫氧化物(LDH)載體上，並添加鉀作為助觸媒，降低了二氧化碳中碳氧雙鍵的穩定性，有利於催化 CO₂ 轉化反應²²⁷。另一項使用 CeNiO₃-鈣鈦礦作為觸媒的研究成果顯示，添加了鈾並具備鈣鈦礦結構可帶來特殊物理化學特性，展現較其他鎳基觸媒更卓越的活性²²⁸。

四、小結

以甲烷蒸氣重組與甲烷乾式重組結合式反應的製氫技術在減碳效益上具有相當大的應用潛力，並能夠實現多方面的優化，包括了製程可行性、成本估算及減碳成效。結合式的製氫方法不僅能夠有效地轉化甲烷，同時還能減少單一甲烷蒸氣重組反應製氫程序的大量二氧化碳排放，以實現低碳排、高氫氣產率之目標，相對於單一的甲烷蒸氣重組反應，雙重組反應更符合永續化工製程的理念。由於可在現有甲烷蒸氣重組系統的基礎下進行，預估技術成熟時間相對較快，還需要產業界與學術界合作開發，改良既有天然氣重組製氫程序，也需要國家在研發與產業發展政策上給予業界支持。技術未來發展方向如下：

- (一) 化工單元操作程序設計優化：減少整個製氫過程中可能產生的能源消耗，包括冷凝、氣體分離及回流設計的研究和改進，並考量相關設備需求，提高製程可行性。
- (二) 觸媒研發：觸媒選擇和應用是關鍵的技術突破點，研究適合的固體觸媒，降低反應溫度，減少能源使用及碳排放。

²²⁷ A.F. Cunha, S. Morales-Torres, L.M. Pastrana-Martínez, A.A. Martins, T.M. Mata, N.S. Caetano, J.M. Loureiro, Syngas production by bi-reforming methane on an Ni-K-promoted catalyst using hydrotalcites and filamentous carbon as a support material, RSC advances 10(36) (2020) 21158-21173.

²²⁸ N. Tri, N.P. Anh, T.D. Huy, D.B. Long, H.C. Anh, P.H. Phuong, N.T.T. Van, T.-T. Nguyen, L.C. Loc, In situ synthesis of highly effective nickel nanocatalyst for methane bireforming, Journal of Science: Advanced Materials and Devices 8(1) (2023) 100529.

第六章 台灣碳封存技術發展研析與長程挑戰與機會

國發會提出了台灣 2050 淨零排放的目標規劃，透過非電力類的強力減排以及搭配碳匯以達碳中和，也透過電力類的去碳電力，協助台灣達成淨零目標。國家也透過盤點，確認 2050 年再生能源極大化以及導入氫能的工作之下，仍需要火力發電的電力供應。因此，為達成去碳電力的目標，這些火力發電設備都需要搭配碳捕獲、再利用與封存(CCUS)，才能有實質去碳。為此，在台灣 2050 淨零轉型的 12 項關鍵戰略中，碳捕獲再利用與封存(CCUS)成為一個必需要達成的技術發展工作。

二氧化碳捕獲、再利用與封存(CCUS)的核心概念，是將「碳」視為一種循環資源。當初從地下地層中取出「碳」及其化合物供做能源使用，燃燒它獲得能量後，我們可以考慮再將「碳」(以二氧化碳的形式)送回地下地層去，某種程度達成碳的資源循環。而在封存之前，也可以將所捕獲的二氧化碳先進行最大程度的再利用。若在再利用的階段無法去化所有捕獲的二氧化碳，則可以無法再利用去化的二氧化碳進行封存，以達成實質去碳工作。而在封存階段，最有工程績效的封存方式就是地質封存。

合適於二氧化碳地質封存(簡稱「碳封存」)的地下環境有很多，主要有深部鹽水層封存以及耗竭油氣層封存。二氧化碳也是一種協助油氣生產的資源物質，所以可以利用二氧化碳進行油氣層增強採收(Enhance oil recovery, EOR)後再進行封存。另外，在某些國家富含有豐富的地下煤層資源，二氧化碳也可以封存於煤層地層中。總歸來說，合適於二氧化碳地質封存的地下地質環境很多，但以封存量的角度來思考，深部鹽水層作為二氧化碳封存的目標地層是最具有封存潛力。

一、深部鹽水層封存二氧化碳的機制

二氧化碳主要經過電廠燃料燃燒後產生、水泥及鋼鐵或化工製程中產生。在管道及煙道中的二氧化碳先進行捕獲，形成高濃度的二氧化碳後，再經過壓縮形成液態方便進行運輸。所捕獲的二氧化碳可以經由車載、管線或是海運運輸，運送到合適於再利用或是封存的場域，然後再進行二氧化碳封存。二氧化碳地質封存是碳捕存(CCS)的最後一站。

目前最合適於進行大量二氧化碳地質封存的場域是深部鹽水地層。而合適於封存二氧化碳的地下深度是超過 800 米或 1000 以下的地層。主要的原因是二氧化碳在 800 米以下的地層中，因為地層本身的孔隙壓力以及其地層溫度，可以使二氧化碳形成超臨界態(Supercritical phase)。超臨界態的二氧化碳有類似液體的密度但確有類似氣體的擴散流動能力，在有限的地下孔隙空間中，可以有效的

將較多的二氧化碳質量放置於地層內，也可以利用壓力差異使二氧化碳容易在地層內流動。

但深部鹽水層內封存的二氧化碳雖然是超臨界態，但其密度仍是比原始存在於地層孔隙空間中的鹽水還要低，所以在兩種流體所產生的密度差之下，所封存的二氧化碳是趨於向上移動，因此，為了有效阻隔二氧化碳在地層內，需要在封存二氧化碳的地層上方有一個幾乎沒有滲透能力的蓋岩阻隔層。類似於天花板的功用一樣，這一個沒有滲透能力的蓋岩阻隔層可以將想要往上浮動的二氧化碳阻隔於下方，以達到地質封存的目的。除了利用蓋岩阻隔層將會流動的超臨界二氧化碳進行阻擋之外，深部鹽水層內的微小孔隙、地層水、以及地層岩石礦物都會跟二氧化碳產生交互作用。這些作用配合了蓋岩的阻擋性，就可以將二氧化碳安全的封存在地層深度。

(一) 孔喉效應：殘餘氣封存機制(Residual gas trapping)

地層孔隙的微小孔喉在二氧化碳較大壓力流動時，可以允許二氧化碳通過，但當二氧化碳停注或是二氧化碳流動壓力較低時，這些孔喉會限制住部分的二氧化碳使其殘存於孔隙中，這就是「殘餘氣封存機制(Residual gas trapping)」。在殘餘氣封存機制之下，二氧化碳雖然還是超臨界相態，但卻喪失了移動能力，所以是一種安全的封存機制。殘餘氣封存機制約可以讓 20-30% 的二氧化碳被限制在孔隙中而不會流動。

(二) 溶解效應：溶解封存機制(Solubility trapping)

地層鹽水與二氧化碳產生溶解效應，使地層水會變成飽和二氧化碳的液體(CO₂-rich water)，比重會比原先的地層水還重，所以會逐漸的向下沉降。而這一個向下沉降的過程，又會引發下方的地層水向上活動，最終會造成一種對流現象，而使得溶解效應可以持續的發生。溶解了二氧化碳的飽和水溶液的運動方向是往下，這一個方向是遠離上方生物圈的方向，代表這一種封存機制是安全的封存機制。這就是「溶解封存機制(Solubility trapping)」。

(三) 礦化封存：離子封存機制(Ionic trapping)

透過溶解封存機制而成為溶液態的二氧化碳，很快的會跟地層水產生化學作用，而解離出碳酸氫根(HCO³⁻)及氫根(H⁺)離子，或解離出碳酸根(CO₃²⁻)離子，這一個作用就是離子封存機制(Ionic trapping)。因為有氫根的產出，所以地層水的 pH 值降低，使溶液形成酸性。酸性的地層水會將岩石中的礦物的鈣、鎂或鐵離子分解出來。而溶於水的二氧化碳形成碳酸氫根後，再與水溶液中的鈣、鎂或鐵離子發生反應，形成碳酸鹽礦物(例如碳酸鈣)。這樣就完成了二氧化碳的固化。這就是「礦化封存(Mineralization trapping)」。通常在碳酸鹽礦物形成後，也會伴隨次

生礦物的形成(例如：高嶺土)。透過礦化封存機制而以岩石型態固定在地層內的二氧化碳將不會有任何的移動能力，這也是二氧化碳地質封存的最後一步。

綜合以上所述，二氧化碳注儲於地下地層中，不會是只有向上移動的型態。有多數的二氧化碳會透過殘餘氣封存機制、溶解封存機制及離子封存機制的的作用，以不同的型態被封存於地層內。上述的這些封存機制都有能力將地層內儲存的二氧化碳帶遠離於地表生物圈，也會讓二氧化碳洩漏風險降低，這些都是安全的封存機制。透過良善的工程設計，可以將這些安全的封存機制所封存的二氧化碳數量極大化，使得二氧化碳地質封存可以安全且有效。

二、台灣進行二氧化碳地質封存的可行性

台灣西部的地質條件是否存在有進行二氧化碳地質封存的可行性，這一個問題的答案其實是大自然告訴我們的。台灣其實已經存在有一個「類」碳封存的地質現場，就在苗栗的出磺坑礦區。苗栗的出磺坑礦區是亞洲最古老的天然氣田，之所以與二氧化碳地質封存有關，是因為這裡地下所儲存的天然氣中，有高達40%的成分是二氧化碳。以類比的角度來說，出磺坑氣田可以視為一個「類」碳封存的地層。因為這一種特殊的高濃度的二氧化碳成分存在於地下深處，沒有發生過自然洩漏現象，且歷史的地震活動也沒有誘發過這些氣體洩漏，可以證明台灣的地下地層是相當有能力可以封存二氧化碳。事實上，早期出磺坑氣田所產的氣體中因為二氧化碳含量過高，所以廠區還曾設有二氧化碳脫除設備，這一個設施也可以看做是一種捕獲設備。所以台灣的地質條件有機會可以做到安全的碳封存是大自然告訴我們的。

但確實天然氣的生產過程與二氧化碳的注入過程還是有方向性的差異，一個是產出(由地下產出氣體到地表)，另一個是注入(由地面向地下注入氣體)。二氧化碳封存雖然是油氣生產工程的反向工程，但台灣是否具備有注入二氧化碳的工程能力仍需要確認。而這一個確認工作可以由另一個天然氣礦區-苗栗通宵的鐵砧山礦區來進行反向工程的驗證。台灣事實上已經擁有了將氣體注入回地層儲存的工程實績，在鐵砧山儲氣窖，透過注氣井可以將卸收並運輸的天然氣進行調節。當市場用氣較低時，會將管線運輸的天然氣注回地層中，而當市場需要更多的天然氣時，可以利用生產井將所注入的天然氣生產出來。鐵砧山儲氣窖的工程實務告訴我們，台灣已經具備了注入氣體到地層的工程能力。

台灣可以進行二氧化碳地質封存的可行性概念可行性的最後一步就是確認台灣有足夠的地下孔隙空間可以安全的封存二氧化碳。從2009年開始執行的能源國家型計畫中的碳封存研究可以得知，我國具有很好的二氧化碳地質封存潛能。若以陸上的耗竭的油氣田以及其相關的封閉構造來說，初步估計的二氧化碳封存潛能可以達到28億噸。若是以台灣西部濱海區以及鄰近台灣的海峽區域海床下的開放

型深部鹽水地層來說，初步估計可以封存二氧化碳的潛力更高達數百億噸。所以，總和評估台灣既有的地下天然氣體儲存場域、注入工程的實務經驗、以及初步評估的鹽水層封存潛力等各個面向，都顯示台灣是很有機會可以運用碳封存技術來協助台灣的淨零目標。

三、台灣的碳封存試驗及評估計畫

在確認台灣進行二氧化碳地質封存的概念可行之後，需要的是進行現場的注入實證，並透過完善的監測計畫來確認二氧化碳地質封存是安全且有效的淨零技術。台電公司於台中電廠的碳捕存計畫是一個「源匯合一」的二氧化碳「捕獲-運輸-封存」計畫。由電廠煙道氣中透過碳捕獲方式，將二氧化碳捕獲下來之後，送至廠區內的封存井，再向地下地層注入所捕獲的二氧化碳。台中電廠的碳捕存試驗將是一個每年 2,000 噸的先導型試驗計畫。這一個計畫也是世界少數的發電廠的碳捕存計畫。本案也已經通過環差評估，並正規劃後續鑽井工程及監測工作中。

台灣中油公司也啟動了一個碳封存試驗計畫。在台灣中油公司的鐵砧山廠區，預備進行一個年注入量 10 萬噸的示範計畫。本計畫的二氧化碳來源將會與外部公司合作以提供氣源，中油公司則透過一口注入井及地表的注入設備，將二氧化碳注入到地下深處的鹽水層中。也透過修井，將廠區外側的兩口既有的生產井修井成為具有監測能力的監測井，以觀察這一個為期 3 年每年 10 萬噸(總計 30 萬噸)的注入計畫。台灣中油公司的碳封存計畫也通過了環差評估，目前正進行修井、預備鑽鑿注入井、地表設施建置及安排監測工作中。

除了國營企業(台電公司及中油公司)的碳封存試驗計畫啟動之外，民營的石化公司(台塑化公司)也啟動了初步的碳封存潛能評估計畫。透過與學術單位(成功大學與中央大學)及國內工程顧問公司(中興工程顧問社)的合作，台塑化公司也在尋求碳封存技術應用於石化廠區的可能性。目前所啟動的碳封存調查計畫先以封存潛能評估為主，就現有可得的公開地質資料及前期的模擬計算方式，評估在雲林沿海場域碳封存的潛能。本計畫將視後續的碳封存法規發展，逐步決定碳封存計畫的進展。

國家的研究機構(國科會)也在淨零的關鍵 12 項戰略的指引下，今年(2023 年)也啟動了碳封存的科研計畫。以科技發展及專業人才培育為主軸之下，國科會依序啟動了潮間帶震測探勘計畫、陸海域潛力場址調查計畫、以及碳封存監測系統計畫。以科技研發的角度，與經濟部實場計畫相互配合，並協同環境部的碳封存法規建置，期能在技術-工程-法規三方面建構台灣的碳封存環境，協助碳封存技術落地發展。

四、台灣碳封存技術挑戰與機會

(一) 台灣長程的碳封存機會是 CCUS Hub

CCUS Hub (Carbon Capture, Utilization and Storage Hub) 用意在於蒐集來自不同產業排放的二氧化碳，例如鋼鐵廠、電廠、石化廠或水泥廠等，透過共享運輸及封存設施的方式，將二氧化碳集中運送與儲存，可以帶動更多小規模捕獲工廠在符合經濟效益情形下進行減碳。其中一種形式的 CCUS Hub 會圍繞工廠密集的地區（或稱之為工業聚落）而建，以利集中蒐集特定區域排放的二氧化碳，例如英國 Net Zero Teesside 計畫²²⁹及荷蘭 Porthos 計畫²³⁰。而部分 CCUS Hub 蒐集的排放源則相距較遠且分散，個別透過合適的運輸方式統一集中封存，例如挪威 Northern Light 計畫²³¹。此外，亦有針對低碳燃料供需所建構 CCUS Hub，如英國的 HyNet 計畫，利用天然氣生產藍氫，再將二氧化碳運往鄰近海域場址進行封存。

(二) CCUS Hub 與單一 CCUS 計畫之差異

單一 CCUS 計畫通常是指收集某單一排放源的二氧化碳，再以特定方式運輸至目標場址進行封存。一般來說，通常由一間公司主導整個碳捕獲到封存的運作，此計畫相對單純；CCUS Hub 計畫會涉及多個排放源、多種運輸方式，甚至是多個碳封存場，其涵蓋的利害關係人(Stakeholder)廣泛，合作的情境與需解決的問題亦更為複雜。然而，CCUS Hub 具有許多單一 CCUS 計畫無法達成的優點，故能吸引各國爭相投入，其關鍵點包含：

1. **快速擴大規模**：為因應氣候變化並實現全球減碳目標，CCUS 技術需要快速擴大規模。受限於單一碳排放源之規模，單一 CCUS 計畫年封存量通常僅能達到百萬噸級(例如：加拿大 Boundary Dam 電廠 CCS 計畫，100 萬噸/年)，然而，CCUS Hub 計畫得利於服務多個碳排放源的之特性，年封存量初期先以百萬噸級為目標，後續隨著各個碳排放源之捕獲量能逐步提升，具有快速地擴大規模之潛力(如荷蘭 Porthos CCUS Hub 計畫，初期 250 萬噸/年，2030 年達到 1,000 萬噸/年)。
2. **低成本及投資風險**：藉由共享運輸、再利用或封存基礎設施來收集工業區的二氧化碳，可以促進規模經濟、降低成本並分擔投資風險。以管線運輸為例(圖 6.1)，其運輸量需達到特定規模，方能大幅降低成本。然而，對於單一 CCUS 計畫而言，排放源供應量相較 CCUS Hub 計畫少，難以達到經濟規模，常使得成本過高導致計畫難以順利推動。另外，CCUS Hub 為

²²⁹ 資料來源：<https://www.netzeroteesside.co.uk/>

²³⁰ 資料來源：<https://www.porthosco2.nl/en/>

²³¹ 資料來源：<https://norlights.com/>

了滿足各排放源與封存場之需求，在規格制訂及程序規劃上具有較完善的制度，以降低跨產業鏈之風險。

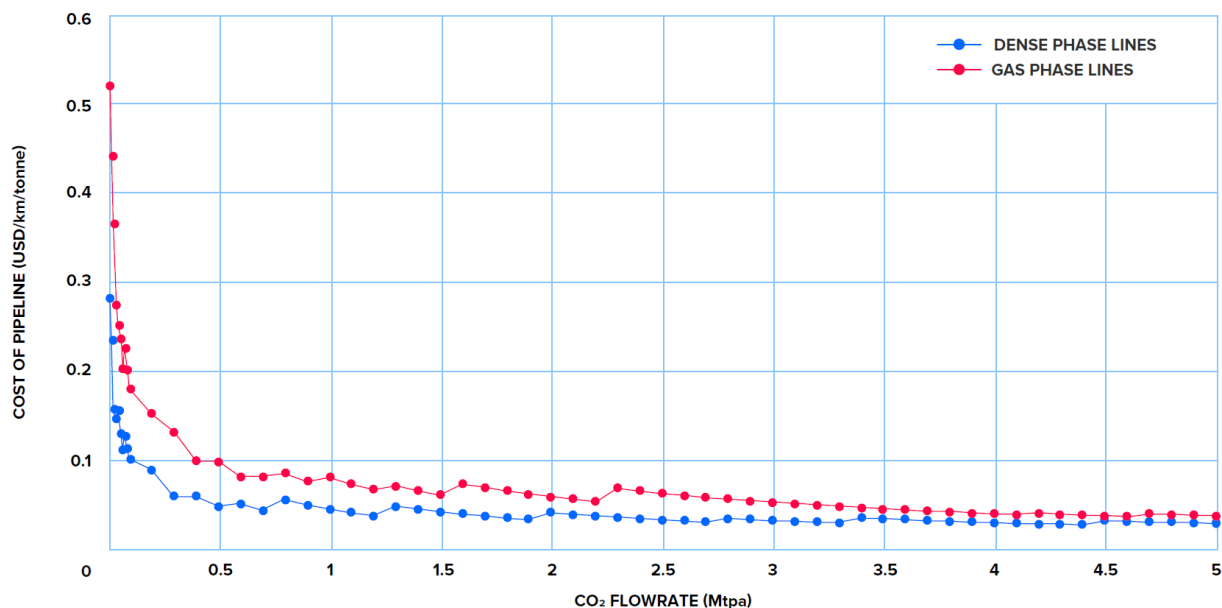


圖 6.1 管線運輸成本與運輸流率的關係²³²

3. 政府更多的支持：建立 CCUS Hub 不僅有助於實現整個地區的碳減排目標，還能夠創造就業機會，吸引更多低碳能源產業的投資，從而增加政府支持的可能性，政府可能會制定相關的政策和激勵措施，以支持參與 CCUS Hub 的碳排放源和封存業者。

(三) 驅動 CCUS Hub 發展之條件

推動 CCUS Hub 發展需對碳封存有一定程度的認知與信心、國家及區域支持、利害關係人的認同，以及跨國合作等條件，這些條件與論點，可以從目前正在發展階段的 CCUS Hub 相關計畫和其過去歷史背景來綜合歸納。

1. 對碳封存的信心：CCUS Hub 的成功建設需要對碳封存有一定程度認知與信心。這種信心主要建立於過去對 CCUS 的研究工作、涉及地質封存和運輸的公司的參與經驗。舉例來說，挪威的 Northern Lights 計畫借鑒了在北海地區封存二氧化碳超過 20 年的經驗；荷蘭的 Porthos 計畫建立在 ROAD 計劃的基礎上，利用了 ROAD 計劃中獲得的經驗和技術，並在荷蘭鹿特丹港區建立了碳捕獲和封存的基礎設施，以實現更大規模的 CCS 發展，包括囊括更多的工業排放源和提高的二氧化碳封存量能。因此，先前經驗為建立 CCUS Hub 提供了寶貴的信心基礎。

²³² 資料來源：Global CCS institute(GCCSI), Global Status of CCS 2021 report, 2021.

2. **國家和地區的支持**：CCUS Hub 的建設需要大規模且高風險的資本投資，因此國家和區域的支持至關重要。不同國家的政府都承諾提供資金支持和政策激勵措施。例如，挪威政府在 Northern Lights 計畫的第一階段，補貼排放源和運輸封存基礎設施約 80% 的投資成本，這為計畫的實施提供了相當關鍵的資助。荷蘭 Porthos 計畫亦透過當地政府的 SED++ 補貼計畫，針對綠能及減碳相關技術發展提供資金上的支持。
3. **利害關係人的認同**：CCUS Hub 的價值需要受到相關利害關係人接受和認同。包括政府部門和產業協會，相關利害關係人在知識傳遞和宣導方面發揮了重要作用，並協助推動項目順利進行。
4. **跨國參與及合作**：跨國合作是 CCUS Hub 發展的不可或缺的因素。首先，在汲取過去的計畫經驗與資訊的交流，有助於加速發展當地的 CCUS Hub 計畫，降低成本及風險；其次，跨國間的合作可以各取所長及發揮在地優勢，部分國家境內較缺乏碳封存潛能，但對高碳排放產業的減碳需求強烈，例如新加坡、南韓及日本，部分地區則具有豐富的封存潛能，例如澳洲、馬來西亞及印尼，透過跨境運輸及 CCUS Hub 的建立，可串聯起源(source)與匯(sink)的合作模式，為各方提供加速減碳的機會。

(四) 國際 CCUS Hub 案例概述與商業模式探討

根據油氣產業氣候倡議組織(Oil and Gas Climate Initiative, OGCI)的統計目前國際上規劃建置的 CCUS Hub 共有 38 個，如圖 6.2 所示，主要集中於北美與歐洲等兩地區，顯示其將 CCUS 視為關鍵的減碳措施。CCUS Hub 經營者可大致區分為以下幾種類型：

- 為碳排放源提供運輸和封存服務之業者(如 Northern Lights)。
- 由公營與私人企業合作，旨在發展戰略基礎設施，以支持該地區的工業與就業(如 Porthos)。
- 私人企業組成的聯盟，旨在透過 CCUS 解決所在地區的碳排放障礙(如 Antwerp)。
- 初期僅服務公司內部，但未來考慮將運輸和封存基礎設施開放給其他排放源(如 Liberty Louisiana, Junggar Basin 和 Ravenna)。
- 基礎設施公司，例如管線公司希望開發新市場。



圖 6.2 國際 CCUS Hub 分布圖²³³

CCUS Hub 係由碳排放源、運輸與封存業者組成，其各自的商業模式與收入來源不同，以下分項論述。

3. **碳排放源**：碳排放源主要負責從其經營活動中捕獲二氧化碳，並將其純化以符合相關規格，並將其輸送至指定的收集點。碳排放源的商業模式係確保其能獲得收入來彌補碳捕獲、純化與壓縮設施之成本，以及支付運輸與封存業者之費用。其收入可來自多種來源，視當地法規和最終用戶對二氧化碳及相關產品的需求而定。依各地區之法規與條件不同，可能的收入來源包含有：

- 強制性市場：在強制性市場(compliance market)中，針對捕獲並封存的二氧化碳，碳排放源可降低碳稅支出或減少排放許可證(emission allowance)購買。然而，目前大多數強制性市場的碳價格仍低於 CCS 的成本，故政府通常需要提供額外的投資激勵措施。
- 自願性市場：在缺乏強制性市場的地區，碳排放源可依據其參與 CCUS Hub 所實現的已認證的減排量在自願性市場中出售碳權(carbon credit)。受到企業承諾實現淨零排放目標的影響，自願性市場目前正在擴大中。CCS+和 ACCU 等倡議刻正開發透明的方法來產生碳權。

²³³ Oil and Gas Climate Initiative(OGCI), The CCUS Hub A playbook for regulators, industrial emitters and hub developers, 2023.

- ▶ 稅收抵免：由政府提供基於績效的稅收抵免(tax credit)以鼓勵投資 CCUS 計畫。美國的 45Q 稅收抵免係一個成功的案例，針對符合資格的碳排放源，如發電廠和工業設施，可為每噸安全封存或防止其釋放到大氣中的方式產生聯邦稅收抵免。此類抵免可由碳排放源直接使用，亦可於美國境內進行交易。
 - ▶ 二氧化碳作為商品：捕獲下來的二氧化碳，經去除雜質與純化後，可直接售予相關業者，如農產品生產、食品加工、焊接、滅火、冷凍與清潔等。二氧化碳亦可經過轉化再製成其他產品，如合成燃料、生質燃料、化學品與建材等，惟轉化再製(再利用)之成本較高，目前占比較低。
 - ▶ 低碳產品：碳排放源可透過 CCS 生產低碳產品而獲得額外收益。如美國加州與加拿大 BC 省採行的低碳燃料標準法規，為符合此標準之燃料創造額外的收入。低碳採購為低碳產品創造額外商機，為了降低產品碳足跡，例如汽車業開始採購低碳鋼材，以滿足對於環保產品的需求。
4. **碳運輸與封存業者**：碳運輸和封存業者主要負責將二氧化碳從指定的收集點運輸至封存場，並將其注入地下儲存。其商業模式相對簡單：透過收取費用以運輸和封存其碳排放源捕獲的二氧化碳。由於目前碳訂價偏低且對低碳產品的需求尚處於起步階段，碳運輸和封存的商業模式仍需要政府支持。其商業模式亦反映了不同的市場條件與政府參與程度，有三種主要的類型：
- ▶ 作為承攬商向國家提供服務：此模式較適用於市場和政策激勵措施較弱時。主要由政府提供計畫所需資金，再將規劃、開發和營運發包給國營或私人企業，如 Northern Light 計畫的第一階段由政府出資 80%，交由 Equinor、Shell 與 TotalEnergies 組成的合資公司負責經營，並由國營機構 Gassnova 負責監督。
 - ▶ 自由市場：此模式適用於市場和政策激勵措施強大，私人企業在無具體國家指導的情形下開發與管理運輸設施和封存場。各公司可依自身狀況及業務規劃自行決定 欲投資的運輸設施與封存場規模，此為美國的發展方式，如 Liberty Louisiana CCS Hub，Shell 公司之初始目標係透過 CCS 協助自有石化廠脫碳，後續將擴充至鄰近其他碳排放源(包括鋼鐵、造紙、水泥、製氫與生質能等)。
 - ▶ 啟用市場：啟用市場(enabled market)係一種混合模式，其政府參與程度介於前述兩者之間，由一家受管制的機構負責建設與經營運輸與封存的基礎設施，並要求其需負責處理碳排放源所捕獲的所有二氧化

碳。如 Northern Endurance Partnership 獲得英國政府核發的執照，該執照賦予其收取受管制價格的權利，並要求其負責經營運輸與封存的基礎設施。前述收管制價格係由主管機構設定，考量固定時間內之可允許支出，以確保成本是必要且合理的。

(五) 台灣推動 CCUS Hub 構想

台灣二氧化碳排放主要來自於能源部門、工業製程及產品使用部門、農業部門和廢棄物部門，根據 2021 年國家溫室氣體排放清冊報告顯示，由於疫後經濟復甦，2021 年淨排放量不減反增，較基準年 2005 年增加 2.57%，不僅離第二期目標(2025 年減 10%)有相當大距離，連第一期目標(2020 年減 2%)也未能達標，減碳腳步稍嫌落後。由環境部環境資源開放資料平台彙整主要碳排放源(>100 萬噸/年)分佈於台灣西部及東北部沿海，如台電大潭與台中火力發電廠、中鋼小港廠及台塑麥寮石化廠等，發電產業及重工業(如水泥、鋼鐵、石化產業等)為台灣主要排放大戶(圖 6.3)。評估 CCUS 單一計畫或是 CCUS Hub 何者較適合我國現有條件，需先探討台灣未來碳封存服務市場及二氧化碳的可取得性，除瞭解排碳源分布外，未來亦需評估各產業別之製程碳捕獲技術成熟度，分析前述排碳企業導入碳捕獲之可行性及應用年限等，進而推估國內未來碳封存服務之需求。

高雄地區具備完整石化產業、鋼鐵業與電力業等，故以高雄地區做為台灣第一個 CCUS Hub 與低碳燃料供應示範區有其必要。本構想是以高雄洲際第三期填海造陸土地做為接收/卸收儲槽與營運碼頭(圖 6.4)，建置的步驟如下：

1. **產業訪談：**與高雄地區各產業公司進行訪談，瞭解各公司對於導入碳捕獲設備、碳再利用與更換使用低碳燃料的意願與想法，依此推估未來區域二氧化碳的捕獲量、再利用量、封存量與低碳燃料的需求量，可做為中、長期推動 CCUS Hub 與低碳燃料供應規劃之依據。
2. **二氧化碳捕獲技術選擇與規範制定：**針對有碳捕獲意願的公司，蒐集各排放煙囪的尾氣成分，除了可作為碳捕獲技術選擇之參考外，亦將不同來源二氧化碳尾氣進行綜合分析，制定用於碳再利用與碳封存的二氧化碳濃度與雜質含量規範。
3. **陸上碳運輸與氫氣管線運輸：**對於有意願投入碳捕獲的工廠，需評估內陸的碳運輸管線至洲際三期的二氧化碳儲槽，再經由船舶或是海底管線輸送二氧化碳至碳封存場址封存。對於有意換更換低碳燃料的工廠，需評估由洲際三期氫氣儲槽輸送至各工廠的氫氣輸送管線。
4. **液化天然氣接收站：**因應區域建置蒸汽甲烷重組(Steam Methane Reforming, SMR)設備生產藍氫之天然氣供應，規劃於洲際三期建設液化天然氣儲槽，

可從國外進口液化天然氣暫存於儲槽中，除了可提供工廠天然氣使用外，也可作為更換低碳燃料之用。

5. **SMR 與碳捕獲場建置：**規劃於洲際三期建置 SMR 與碳捕獲場工廠，所捕獲二氧化碳輸送至鄰近二氧化碳儲槽，再經由船舶或是海底管線輸送二氧化碳至碳封存場址封存。所製成藍氫暫存於氫氣儲槽後，藉由陸上氫氣管線輸送至各工廠。

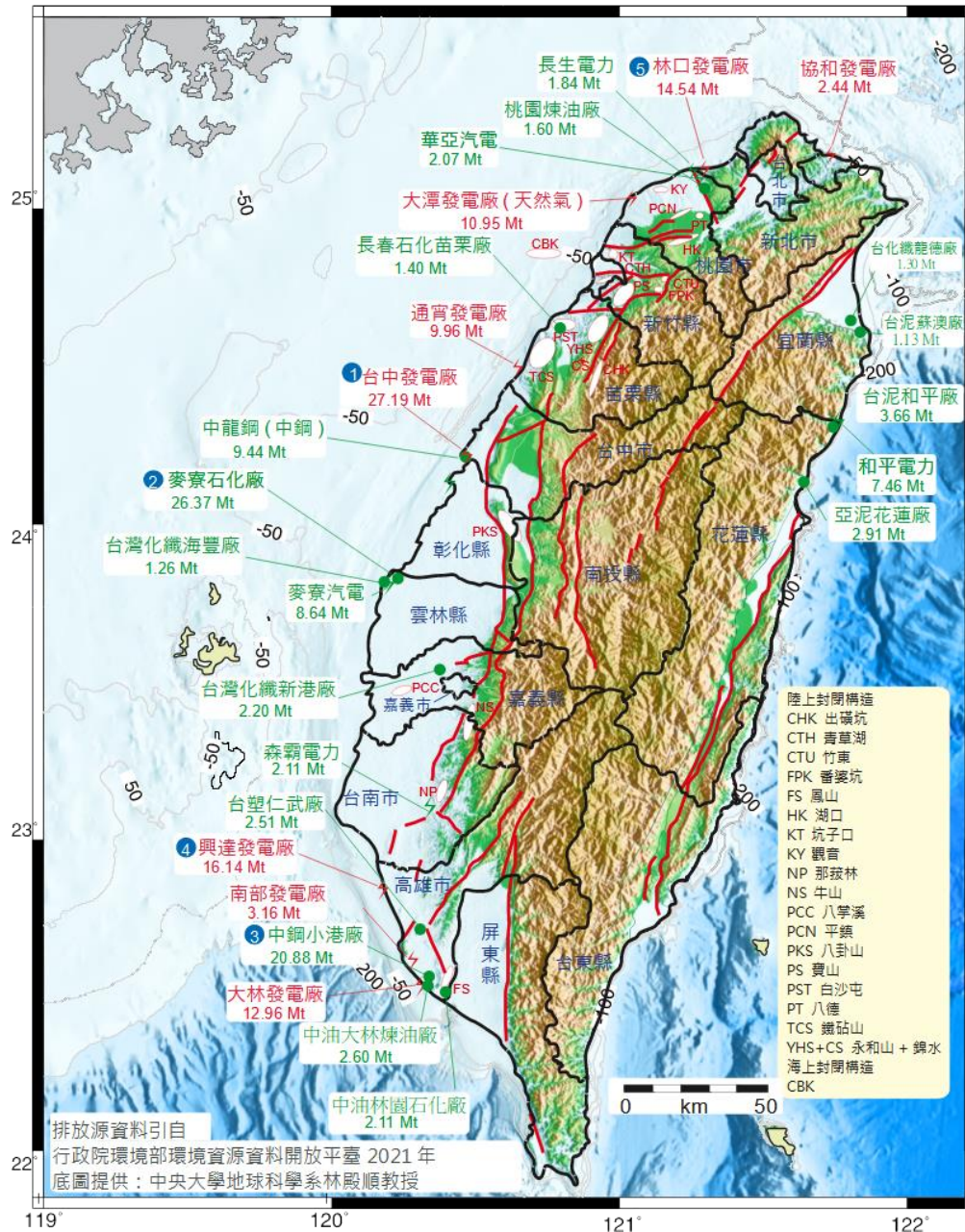


圖 6.3 台灣二氧化碳大型排放源²³⁴

²³⁴ 圖片來源：中央大學地球科學系林殿順教授；碳排放數據資料來源：行政院環境部

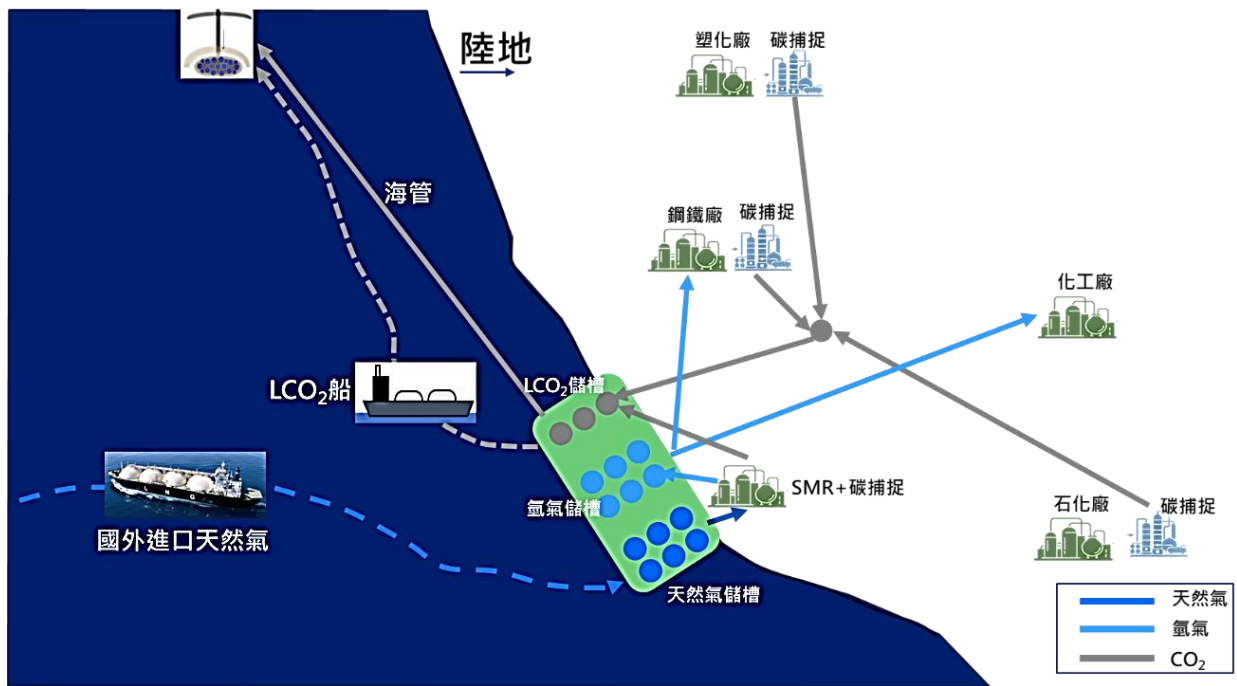


圖 6.4 CCUS 聚落&藍氫雙軌模式營運示意圖

五、小結

從國外 CCS、CCUS Hub 或 CCS 合併低碳燃料供應的經驗，本報告提出以下幾點結論與建議：

- (一) 建議政府應訂定明確的法規指引，以規範碳捕獲、運輸與封存應執行的工作項目，以及如何進行驗證。
- (二) 因 CCUS 計畫通常涉及多個主管機關，建議設計許可程序時，應考量如何在眾多主管機關間實現流程優化，以提升案件審核效率。
- (三) CCUS 計畫之投資金額高昂，初期在缺乏政府支持的情形下，難以吸引業界投入，故建議可將 CCUS 計畫視為公共建設，建立相關激勵政策，以鼓勵業者投資，例如：利用前瞻建設經費、碳費或減/免稅來挹注或獎勵業者建置碳捕獲、運輸與封存等基礎設施。
- (四) 建議 CCUS 計畫除強調減碳的重要性外，亦應量化其社會經濟價值，如保留或創造工作機會的潛力，以突顯減碳外之計畫效益。
- (五) 鑒於 CCUS 相關資訊尚不普及，民眾對此認知有限，建議應由政府、業者與學界合作展開公眾宣導與溝通，透過展覽、公聽會、環境教育與網路媒體等管道，傳遞正確的資訊與解答民眾的疑慮，以提升民眾接受度。
- (六) 建議由政府主導高雄地區 CCUS 碳聚落與低碳燃料供應(氫能)，除了推動台灣以碳封存技術作為淨零轉型技術外，更以台灣中、長期推動氫能供應目標方向邁進。

第七章 二氧化碳再利用

將 CO₂ 做為化學產品的原料，可減少來自化石原料的需求，屬於循環經濟的概念，然而 CO₂ 是一相當穩定的化合物，要將 CO₂ 轉化為化學品，需要消耗大量能量，需要找出適切之反應途徑及降低反應溫度的觸媒。國內石化業者已採用 CO₂ 為原料在不需氫氣的情況下生產碳酸乙烯酯、聚碳酸酯及醋酸等化學品，每年約可消耗 20 萬噸 CO₂，符合循環經濟之概念，只是化學品的市場有限，無法大量使用 CO₂。若以 CO₂ 做為碳源與氫源生產如甲醇、二甲醚、碳酸二甲酯、甲酸、甲烷等能源產品，則可取代化石燃料，會有相當的市場需求量，只是氫的來源及成本即相當重要，此外亦需開發高效率的觸媒或使用生物技術加以達成，是 CO₂ 再利用能否普及化的關鍵因素。本章第一節介紹 CO₂ 直接利用，在無需反應轉化的條件下進行再利用；第二節介紹 CO₂ 轉化化學品與燃料，需在特定條件下與氫氣反應轉化為甲醇等基礎化學品，在透過各種反應步驟產出需要的產品。

第一節 捕獲二氧化碳後的直接利用

若能將捕獲的 CO₂ 加以利用，因可獲得經濟效益，如此可補貼捕獲及封存 CO₂ 的成本。再利用可分為兩大類，一是 CO₂ 的直接利用，另一則是將 CO₂ 做為碳源與氫或含氫化合物反應生成化學或能源產品。由於目前尚無法進行大量 CO₂ 地質封存以及受限於氫氣來源與價格，因此是需極力發展 CO₂ 直接利用技術與產品，方能使捕獲下來的 CO₂ 有所出路。

由於民眾對 CO₂ 地質封存之安全性尚存疑慮，加上 CO₂ 封存是一沒有收益的去碳途徑，因此許多國家開始重視捕獲後 CO₂ 的再利用，如直接利用或將 CO₂ 做為碳源與氫或含氫的化合物反應生成化學或能源產品。基於 CO₂ 再利用可增加經濟收益，降低 CCS(CO₂ Capture and Storage) 的成本，又因可使用自火力發電廠、石化廠、鋼鐵廠等排放氣中所捕獲之 CO₂，這些因素均加速 CO₂ 再利用之發展。由於目前氫氣的來源有限以及成本相當的高，特別是由再生能源電解水所產生的綠氫，國內在 2030 年前，將捕獲的 CO₂ 直接利用可能是達到國發會在 2022 年所提出的淨零路徑中 CCSU(CO₂ Capture, Storage and Utilization) 目標的主要途徑。

CO₂ 的直接利用已有不少的回顧文獻可供參考²³⁵，過去 CO₂ 大多應用在碳酸飲料、殺菌劑、滅火劑、焊接、推進劑等方面，雖然這些應用已商業化，但其市

²³⁵ Huang, C.H. and Tan, C.S., A Review: CO₂ Utilization, *Aerosol & Air Quality Res.*, 14, 480 (2014) ; Koysoumpa, E. I., Bergins, C. and Kakaras, E., The CO₂ Economy: Review of CO₂ Capture and Reuse Technologies, *I. Supercr.Fluids*, 132, 3 (2018) ; Hepburn, C., Adlen, E., Beddington, J., Carter, E. A., Fuss,

場規模有限，對 CO₂ 總體減量的影響不是很大，因此近幾年的應用及研究就擴展到以高壓 CO₂ 做為綠色溶劑、燃料電池、植物工廠、海洋牧場、微藻、建築材料等方面，本文就這些方面加以說明，並提出可在國內推動的建議。

一、以高壓 CO₂ 做為綠色溶劑之應用

台灣石化上中下游產業及高科技產業如電子、半導體、光電、封裝、通訊產業等，雖然發展蓬勃，但由於使用有機溶劑也造成不少污染事故，此外歐盟的 REACH 及 RoHS 以及一些其他全球性法規對化學品的使用有所規範與限制，為能使台灣產業降低甚而不產生汙染以及克服國際間對毒性及管制化學品的要求，必須建立綠色製程方能增加產業的進競爭力。

要能達到綠色製程的要求，近年來綠色化學的概念受到廣泛的重視，其希望在進行分離或反應時，可降低對環境的汙染及減少能源的使用。在應用綠色化學時需遵守 Anastas 與 Warner 於 1998 所提出的「綠色化學 12 條原則」²³⁶，很顯然的若要符合綠色化學的概念，應盡可能不使用有機溶劑，但在絕大部分的製程中，有機溶劑的使用又是不可避免的，也因此若能使用綠色溶劑時若能克服溶解度、黏度、質傳、熱傳、輸送、成本等限制，是有機會取代毒性或被管制使用的有機溶劑。通常綠色溶劑的分類如下²³⁷：

- 水；
- 生質溶劑例如生質酒精；
- 超臨界流體，目前只包括超臨界 CO₂ 以及 CO₂ 膨脹液體；
- 離子液體，常壓下含陰陽離子的溶劑。

水雖然是一對環境最友善的溶劑，但水的介電常數與絕大多數的有機物有所差異，因此相容性不佳，故在石化產業中使用水做為溶劑的製程幾乎沒有；至於生質溶劑，目前以生質酒精為主，但生質酒精的產量不多，此外價格也高，因此生質酒精的應用實例也很少見；至於離子液體，雖然有非常多的離子液體揭露於文獻中，但因黏度甚高且價格昂貴，因此應用實例不多，若未來能藉由溶劑性質的改變或不同溶劑種類的配搭而能克服這些限制，絕對具應用的潛力。在尚未實際應用前，超臨界 CO₂ 以及 CO₂ 膨脹液體是一已具應用實例的綠色溶劑。所謂超臨界流體，是一物質處在的溫度和壓力高於其臨界溫度和壓力，由於 CO₂ 的臨界溫度接近室溫，只有 31.2°C，臨界壓力 7.38 MPa 也不算太高，因此不需投入很多能源即可加以使用。

S., Niall Mac Dowell, N.M., Minx, J.C., Pete Smith, P. and Charlotte K. Williams, C.K., The Technological and Economic Prospects for CO₂ Utilization and Removal, *Nature*, 575, 87 (2019).

²³⁶ Anastas, P.T. and Warner, J.C., *Green Chemistry: Theory and Practice*, Oxford University Press (1998).

²³⁷ Jessop, P.G. and Subramaniam, B., Gas-Expanded Liquids, *Chemical Reviews*, 107, 2666 (2007).

超臨界 CO₂ 與液相和氣相的 CO₂ 不僅物理性質有所不同，在化學性質上亦有相當大的差異(表 7.1)，例如氣相 CO₂ 不具有萃取能力，但超臨界 CO₂ 則具有溶解有機物質的能力，且可藉由操作的溫度與壓力不同而改變溶解能力。由於超臨界 CO₂ 具有低黏度、高密度、幾無表面張力、親有機性、可隨溫度與壓力調整溶解度等特性，加上 CO₂ 具無毒、不可燃、價格不高、來源廣、易於達到臨界點等特點，因此可成為替代有機溶劑的溶劑。只是超臨界 CO₂ 雖具親有機性，但其溶解有機物質的能力與有機溶劑的溶解力仍有十分大的差距，因此超臨界 CO₂ 大多應用在高價的產品上。為能增廣應用性，CO₂ 膨脹液體是另一可供選擇的替代溶劑。所謂 CO₂ 膨脹液體是指 CO₂ 可溶於有機溶劑中並造成有機溶劑之膨脹，通常體積膨脹度會隨溫度下降及壓力增加而增加，一般來言，溫度在室溫左右，壓力也不需太高，例如將 55 大氣壓的 CO₂ 於 25°C 溶於甲苯中，即會造成甲苯體積膨脹至原來的 3 倍，此時 CO₂ 膨脹液體對有機溶質的溶解度會隨膨脹度的不同而有所不同，分子量越高的溶質溶解度下降的幅度越大，另 CO₂ 膨脹液體之擴散係數、黏度、氫與氧的溶解度等也會不同於沒有溶解 CO₂ 之有機溶劑。基於上述超臨界 CO₂ 及 CO₂ 膨脹液體的特性，目前在產業方面主要的應用包括分離純化、吸附劑再生、清洗、微粒製備、觸媒製備、染色、反應、發泡、地熱介質、壓縮儲能等，下面就部份的應用做一介紹，各公司可評估是否有機會使用超臨界 CO₂ 或 CO₂ 膨脹液體取代有機溶劑，至於對製程及產品的減碳功效，則需藉由碳足跡的計算加以確認。

表 7.1 常用於超臨界流體之物質於不同相態中的物性比較

物性	相態		
	氣相	超臨界相	液相
密度 (g / cm ³)	(0.6~2.0)×10 ⁻³	0.2~0.9	0.6~1.6
擴散係數(cm ² /s)	0.1~0.4	(0.2~0.7)×10 ⁻³	(0.2~2)×10 ⁻⁵
黏度 (cp)	(1~3)×10 ⁻²	(1~9)×10 ⁻²	0.2~0.3

(一) 萃取/分離純化

超臨界 CO₂ 最早的商業化應用是在食品萃取上，包括去除咖啡豆中的咖啡因、萃取啤酒苦味花等，超臨界 CO₂ 萃取達到分離純化的有效性，端視超臨界 CO₂ 對欲被萃取物的溶解度而定，由於 CO₂ 屬非極性物質且分子量不大，對極性及分子量大的物質，自然溶解度有限。一般來言，物質含有的配基會影響到在超臨界 CO₂ 中的溶解度，酯、醇、醛、酮等的化學物在超臨界 CO₂ 中的溶解度就會高於酸，高分子單體在超臨界 CO₂ 中的溶解度就會高於高分子。現以去除咖啡因中的一特

定製程為例加以說明如何利用超臨界 CO₂ 的特性達到去除咖啡因的操作方式。此特定製程分為三個階段，第一階段為利用乾燥之超臨界 CO₂ 萃取咖啡豆中的香味成份，然後將萃取出之成份經減壓後放置於一特定區域，此階段可看出乾燥的 CO₂ 具選擇性，其不會萃取咖啡豆中之高極性的咖啡因。另減壓後之 CO₂ 對香味成份之溶解度會大幅降低，由此可看出壓力對溶解度的影響；第二階段為減壓之 CO₂ 經壓縮並於其中帶有定量之水份再通入裝有咖啡豆之槽中，此時因 CO₂ 含有水，因而具有極性，因此可萃取出咖啡因，離開萃取槽後經由減壓而將咖啡因與 CO₂ 加以分離；第三階段則是利用超臨界 CO₂ 再溶解放置於特定區域之香味成份，然後送回到萃取槽，將香味成份放回到咖啡豆中。此三階段皆可顯示超臨界 CO₂ 因不具表面張力而可滲入咖啡豆內部，另亦可顯示改變 CO₂ 之物理及化學性質以及壓力和溫度是可影響溶解能力及選擇性。

近年來因超臨界 CO₂ 可萃取有機物和水以及沒有表面張力可滲入到奈米及更小的孔徑中的特性，因此也應用到半導體晶圓、精密電子零件以及光纖等的清洗中。清洗這些具奈米孔徑或高深寬比結構時，過去所用的清淨方法之一為使用酸鹼性溶液，雖然有效，但需使用大量純水和化學試劑，這會造成產品及環境的污染以及在處理後需加以乾燥。基於新一代晶圓越來越小的孔徑例如 2 或 3 奈米，則會受制於液體的表面張力，不易進入結構內部加以清洗且不易乾燥，因之可利用超臨界 CO₂ 低黏度、高擴散性、低表面張力等特性進行清洗。另也可用於光阻劑之去除，因去除機制中包括光阻劑的膨潤、塑化、裂解、溶解、輸送等，可利用超臨界 CO₂ 的上述特性加上可使光阻劑膨潤及塑化以及超臨界 CO₂ 密度接近液體不會造成結構的崩塌，可帶入裂解劑至奈米孔道中進行光阻劑的去除。

對於超臨界 CO₂ 可萃取(溶解)物質的能力，目前還沒有可事前精確推估的模式，主要原因是在高壓下操作，不易計算出偏離理想氣體及理想液體的程度。現最常用的模式是使用立方狀態方程式，當溶質為非高分子固體時，可假設超臨界 CO₂ 不會被固體所吸收，但當溶質為液體時，因 CO₂ 亦會被液體所吸收，因此模式中之液相也使用狀態方程式進行模擬。由於萃取時至少包括兩個(含)以上的物質，配搭狀態方程式時之混合定律即非常重要，但由於不同物質間會具有不同程度相互作用力，只能藉由不同溫度及壓力下所量測的飽和溶解度數據加以回歸計算出混合定律中的參數，也因此只能內插得知在其他溫度及壓力下的飽和溶解度。

(二) 揮發性有機化合物去除

許多產業在製造過程中常需使用揮發性有機化合物(Volatile Organic Compounds; VOCs)，由於 VOCs 對人體健康及環境造成危害，因此必須在排放氣中去除 VOCs。通常去除的方法包括冷凝、物理及化學吸收、物理吸附、薄膜及焚化等，由於一般工業排放氣中 VOCs 濃度不高，因此使用會產生毛細現象的中

孔徑活性碳進行 VOCs 之吸附，是許多工廠採用的方法，通常在 42°C 下進行。當吸附一段時間後活性碳吸附能力會趨近飽和，這時則需脫附被吸附的 VOCs，通常使用超過 100 °C 水蒸汽進行脫附，至少需要兩個固定填充床(Packed Bed)，一個進行吸附，另一個則進行脫附。採用水蒸汽脫附時，需耗費能源，另若 VOCs 與水互溶時又需在脫附後經由分餾方可獲得 VOCs；此外因脫附時溫度高，會使尚未脫附留在活性碳中的 VOCs 進行聚合反應而沉積在活性碳表面，降低活性炭的吸附能力，吸附力將持續下降。

超臨界 CO₂ 脫附方法取代將水蒸汽脫附²³⁸，較佳的脫附溫度為 42°C 左右，壓力則是越高越好，但建議在 130 atm 左右。在使用超臨界 CO₂ 脫附方法時顯示出遠較水蒸汽脫附方法具有更佳的去 VOCs 效果，就其原因為：脫附時的溫度可與吸附的溫度相同，如此就不需耗費能源產生水蒸汽；因吸附及脫附的溫度可相同，可再次立即吸附 VOCs，不若水蒸汽脫附後造成活性碳溫度的升高，需在降溫後才能發揮吸附的功效，以及再次吸附時的前段是在趕走留在活性碳內的水份；因脫附溫度低，不會產生高溫下所生成的聚合物造成活性碳表面的失活，自然增加活性碳使用壽命；在脫附後只需減壓，VOCs 與氣相的 CO₂ 自然分開而加以收集，這可免除分餾而獲得 VOCs，這特別有利於會與水互溶的 VOCs。

若再能將屬傳統填充床(Packed Bed)的吸附槽及脫附槽改為高速旋轉填充床(Rotating Packed Bed, RPB)²³⁹，由於高速旋轉，通常超過每分鐘 500 轉，會產生幾十到幾百的重力場，因此會提升質傳速率，如此可大幅縮減去除 VOCs 的設備體積，此種操作屬於製程強化(Process Intensification)，因此在設備體積、能耗、效率、成本上通常都會有些利基。由使用活性碳去除四氟丙醇及甲苯的實驗數據可證實²⁴⁰，在使用較小體積的 RPB 時，超臨界 CO₂ 脫附活性碳之效果遠較使用填充床更能有效的脫附被活性碳吸附的四氟丙醇與甲苯，亦即超臨界 CO₂ 能結合離心力而在脫附中產生加乘之效果。

(三) 觸媒及反應溶劑

由於超臨界 CO₂ 不具表面張力，因此可將金屬前驅物(如有機金屬)，帶入觸媒支撐物內部，再經熱或化學還原後即可製得帶有奈米金屬之觸媒。通常有機金屬前驅物的有機配位基包括 β -Ketonates、Cyclic Ligands 及 Fluorinated Compounds 三類，在超臨界 CO₂ 中的溶解度以 Fluorinated Compounds 最高，但價格最高， β

²³⁸ Tan, C.S., and Liou, D.C., Desorption of Ethyl Acetate from Activated Carbon by Supercritical Carbon Dioxide, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 27, 988 (1988).

²³⁹ Ramshaw, C.; Mallinson, R. H. Mass Transfer Process. U.S. Patent 4, 383, 255, 1981.

²⁴⁰ Tan, C.S. and Lee, P.L., Supercritical CO₂ Desorption of Activated Carbon Loaded with 2,2,3,3-Tetrafluoro-1-Propanol in a Rotating Packed Bed, *Environ. Sci. Technol.*, 42, 2150 (2008).

-Ketonates 為最低，與 Fluorinated Compounds 的差異超過兩個數量級，若要增加 β -Ketonate 在超臨界 CO₂ 中的溶解度，有時需借助有機溶劑做為共溶劑，至於還原有機金屬前驅物的方法通常採用氫解，由金屬氧化還原電位決定是否亦需熱解做為輔助，此製備方法稱之為化學流體沉積法(Chemical Fluid Deposition, CFD)。CFD 與化學氣相沉積法(Chemical Vapor Deposition, CVD)的原理類似，只是 CVD 是靠前驅物的蒸發，而 CFD 則是靠超臨界流體的萃取，因此 CFD 可以在不是很高溫的操作下帶入更多的金屬前驅物。CFD 能有效地將奈米金屬粒子沉積於孔道較小的中孔洞基材(2~50 nm)中，由於超臨界流體具較高的密度，基材經高壓處理中不會造成孔道崩塌，仍可維持原本的多孔結構，也不會如一般濕式沉積方法，在去除溶劑時，會因前驅物的表面親和力、強制對流及擴散的不同，而有蛋殼或蛋黃型的金屬分佈，也因此，CFD 較容易製備金屬均勻分佈於擔體之觸媒。

談駿嵩教授研究團隊曾以 CFD 製備的中孔觸媒針對不同芳香族化合物，特別是不會溶於有機溶劑的化合物如雙酚 A、PET、PBT、Dimethyl Phthalate 等²⁴¹，進行氫化反應，例如利用 CFD 製得的 Ru/MCM-41²⁴²進行雙酚 A 的氫化，由於 BPA 具苯環結構，在 UV 測試以及耐熱測試中會產生嚴重的黃變，但完全氫化後的 BPA 則不會，如此可增加其應用範圍及價值。在該研究之中，亦發現可利用水分散固態的 BPA 並進行氫化，雖然水與 BPA 幾乎是不互溶，但卻能在短時間內完全被氫化，推測氫化是在 BPA 與水的界面上進行，也就是所謂的「On-Water Mechanism」²⁴³，此時水扮演三種不同的角色，一是水能提供氫鍵對 BPA 的苯環產生質子化，降低氫化活化能；二是水能與 BPA 上的親水 OH 基形成氫鍵，使得觸媒 Ru/MCM-41 對親油性苯環的親和力提高；三是由於 MCM-41 表面具親水性的矽氧基，故在水中時會與水產生氫鍵，得到非常好的分散性。至於其他不溶於有機溶劑的化合物的氫化，亦觀察到相同的結果。

CFD 也可用來製備雙或多金屬觸媒，由於不同金屬會具有不同的功效，因此能展現與單金屬觸媒不同的性質，此外也能利用較便宜的金屬來取代部份單價較高的單金屬觸媒，降低觸媒成本。以 CFD 法製備的雙金屬觸媒 Rh-Pt/SBA-15 為例，Rh-Pt 合金具有比 Rh 單金屬具有的氫化苯環能力，以及較低吸附氫氣的活

²⁴¹ Yen, C.H., Lin, H.W. and Tan, C.S., Hydrogenation of bisphenol A – Using a mesoporous silica based nano ruthenium catalyst Ru/MCM-41 and water as the solvent, *Catalysis Today*, 174, 121 (2011) ; Phan-Vu, D-H. and Tan, C.S., Synthesis of Phthalate-Free Plasticizers by Hydrogenation in Water Using RhNi Bimetallic Catalyst on Aluminated SBA-15, *RSC Advances*, 7, 18178 (2017) ; Lende, A.B., Bhattacharjee, S. and Tan, C.S., On-Water Hydrogenation of Polyethylene Terephthalate to Environmentally Friendly Polyester by the Catalyst Rh_{2.5}Pt_{2.5}/SBA-15, *ACS Sustainable Chem. Eng.*, 9, 7224 (2021).

²⁴² Tan, C.S., and Liou, D.C., Desorption of Ethyl Acetate from Activated Carbon by Supercritical Carbon Dioxide, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 27, 988 (1988).

²⁴³ Minakata, S. and Komatsu, M., Organic Reactions on Silica in Water, *Chemical Reviews*, 109, 711 (2009).

化能，因此對於苯環類的化合物如對苯二甲酸具有更好的氫化活性²⁴⁴。在此研究中也觀察到若於水中溶解高壓的 CO₂，稱之「高壓 CO₂ 水溶液」，由於 CO₂ 會於水中形成碳酸，藉由產生的酸性更有利於催化氫化反應。基於水和超臨界 CO₂ 皆屬綠色溶劑，而且操作壓力可遠低於 CO₂ 的臨界壓力，因而使用高壓 CO₂ 水溶液做為反應的溶劑是可符合綠色製程的概念²⁴⁵。

CFD 亦可應用在製備含金屬的高分子複材，其原理是一般熱塑性高分子可吸收超臨界 CO₂，吸收後高分子會由玻璃態轉成塑化態並會產生膨脹而開口，此時再通入溶解有機金屬的超臨界 CO₂，因超臨界 CO₂ 沒有表面張力，因此可滲透到高分子內部，之後再通入氫氣進行還原將金屬粒子沉積在高分子內部，至於被還原的配位有機體則會被超臨界 CO₂ 帶離高分子，待有機金屬完全還原後，只要緩慢洩壓，帶有金屬的高分子會再回到玻璃態，當然若快速洩壓則會使高分子發泡產生孔洞。

(四) 奈米粒子

利用超臨界或高壓 CO₂ 亦可製備微米及奈米粒子，所採取的操作方式視溶解度而有所不同。若超臨界 CO₂ 可溶解溶質，則可利用噴嘴使之瞬間減壓而獲得極大的過飽和度而生成固體溶質，此方式稱之為 Rapid Expansion from Supercritical Solution (RESS)²⁴⁶。通常 RESS 藉由噴嘴尺寸及前後之溫度和壓力，可在 10-8 至 10⁵ 秒間即產生大於 10⁵ 之過飽和度，由此可獲得極微小且分佈均勻的顆粒，此外亦可獲得不同的晶形如圓球或纖維狀的固體物質。此快速噴灑方法可較傳統機械研磨及溶液結晶有利之處為：不會有高溫產生，因之適用於熱敏感性的物質、不會有溶劑殘留的問題、產生十分高的過飽和度，可控制粒徑及其分佈等。

由於超臨界 CO₂ 對大多數固體溶質特別是高分子的溶解度很低甚至不溶，因之無法使用 RESS，因此需使用另一方法，即是使用前述的 CO₂ 膨脹液體，先藉由有機溶劑溶解有機固體，再藉由通入不同操作溫度及壓力的 CO₂ 改變溶劑的膨脹度，進而降低固體與有機溶劑間之親和力，因此固體即會沈積出來。此操作

²⁴⁴ Yu, W., Hsu, Y.P. and Tan, C.S., "Synthesis of Rhodium-Platinum Bimetallic Catalysts Supported on SBA-15 by Chemical Fluid Deposition for the Hydrogenation of Terephthalic Acid in Water", *Appl. Catal. B. Environmental*, 196, 185-192 (2016).

²⁴⁵ Lin, H.W., Yen, C.H. and Tan, C.S., Aromatic Hydrogenation of Benzyl Alcohol and Its Derivatives Using Compressed CO₂/Water as the Solvent, *Green Chemistry*, 14, 682(2012); Lin, H.W., Yen, C.H., Hsu, H. and Tan, C.S., CO₂ Promoted Hydrogenolysis of Benzylic Compounds in Methanol and Water, *RSC Advances*, 3, 17222 (2013).

²⁴⁶ Jung, J. and Perrut, M., Particle Design Using Supercritical Fluids: Literature & Patent Survey, *J. Supercrit. Fluids*, 20, 179 (2001).

方式中 CO₂ 扮演的角色即是反溶劑，因而此方法稱之為壓縮流體反溶劑沈積法 (Precipitation with Compressed Fluid Anti-Solvent)²⁴⁷。由此方法可獲得次微米及微米之高分子球形晶體，以環烯共聚物為例，在 25°C 及 63 大氣壓下，藉由 CO₂ 做為反溶劑，此共聚物可自甲苯溶液中以 0.1~0.8 次微米之圓形球體沈積出來。另因有機溶質在不同膨脹度的有機溶劑中溶解度不同，也可進行分餾及純化，例如將殘留的單體及 Oligomer 從 PET 及 PBT 中移除，獲得窄分子量分布的 PET 及 PBT²⁴⁸。

欲將奈米粒子均勻分散在有機溶劑中，亦可在 CO₂ 膨脹液體中同時進行合成及分散奈米粒子，為達到此目的則需使用適當之有機金屬前驅物及以氫氣還原前驅物。談駿嵩教授實驗室曾利用陽離子交換法將異硬脂酸生成異硬脂酸金屬鹽，再於 CO₂ 膨脹液體中進行奈米粒子還原²⁴⁹，利用此方法製備導電性薄膜²⁵⁰，製備方法為先將硬脂酸銀鹽分散於己烷中，再通入高壓 CO₂ 造成膨脹，之後通入氫氣進行還原，由於生成的異硬脂酸可當作保護基可避免奈米銀粒子的聚集，使奈米銀均勻分散在膨脹的己烷中；之後繼續升壓會使液體繼續膨脹而將奈米銀沉積在基材上，由於是奈米銀，鍛燒溫度僅需 175°C 即可獲得完整的銀膜，也因此基材亦可使用高分子材質如 PET。另利用相同的方法可製得微粒之球型聚醯胺酸，之後只要經過加熱醯胺化後，即可製得具有低介電常數之球形聚亞醯胺(PI)²⁵¹。

(五) 發泡

發泡方式可略分為化學發泡和物理發泡兩類。雖然使用化學發泡劑的設備成本較低，但有些發泡劑已被管制使用，此外發泡過程中產生的氣體在分子中的分散性較差，另需溫度裂解發泡劑使操作不易控制等因素，現很多的發泡改用物理發泡方式。物理發泡的原理是利用發泡劑的相變化進行發泡，因此可使用氣體型的惰性物理發泡劑，例如 CO₂ 以及 N₂，操作方式是將惰性氣體藉由高壓含浸入

²⁴⁷ Reverchon, E., Della Porta, G. and Falivene, M.G., 2000. Process Parameters and Morphology in Amoxicillin Micro and Submicro Particles Generation by Supercritical Antisolvent Precipitation, *J. Supercrit. Fluids*, 17, 239 (2000) ; Jessop, P.G., Subramaniam, B., Gas-Expanded Liquids, *Chem. Rev.*, 107, 2666 (2007) ; Lin, I.H., Liang, P.F. and Tan, C.S., Precipitation of Submicrometer-Sized Poly(methyl methacrylate) Particles with a Compressed Fluid Antisolvent, *J. Appl. Polym. Sci.*, 117, 1197 (2010).

²⁴⁸ Yu, W., Huang, J.H. and Tan, C.S., Purification of Polybutylene Terephthalate by Oligomer Removal Using a Compressed CO₂ Antisolvent, *Polymers*, 11(7), 1230 (2019).

²⁴⁹ Hsieh, H.T., Chin, W.K. and Tan, C.S., Facile Synthesis of Silver Nanoparticles in CO₂-Expanded Liquids from Silver Isostearate Precursor, *Langmuir*, 26 10031 (2010).

²⁵⁰ Huang, Y.C., Yen, C.H., Lin, H.W. and Tan, C.S., Direct Preparation of Silver Nanoparticles and Thin Films in CO₂-Expanded Hexane, *J. Supercrit. Fluids*, 89, 137 (2014).

²⁵¹ Lin, H.W. and Tan, C.S., Preparation of Polyamic Acid and Polyimide Nanoparticles by Compressed Fluid Antisolvent and Thermal Imidization, *J. Supercrit. Fluids*, 99, 103 (2015).

高分子後，再藉由升高溫度或降低壓力使溶解的氣體釋放而發泡。由於超臨界 CO₂ 親有機的特性使其在大部分的高分子材料中的溶解度遠高於 N₂，故超臨界 CO₂ 現成為常用的氣體型物理發泡劑。

發泡材料依孔洞尺寸可以約略分為四類，分別為傳統泡材、細孔泡材、微米泡材和奈米泡材，如表 7.2 所示。發泡材料的機械性質與孔洞尺寸有密切的關聯性，發泡材料能利用孔洞的性質來增加機械強度，使其應用於包裝甚至到建材。發泡材料的衝擊強度會隨著比重下降而下降，但當孔洞尺寸在 10 μm 附近時，卻可觀察到材料在比重降低的同時仍可保有發泡前的機械性質。奈米孔洞是近年來熱門的議題之一，因許多文獻顯示當孔徑小於 0.1 μm 時，材料會擁有非常優異的特性，如低熱傳導係數、優異的機械特性、透明的奈米泡材、良好的介電和聲學性質以及高表面積。以發泡的聚醚醯亞胺(PEI)為例，當獲得微米以及奈米孔洞後，發現不論是拉伸應力或耐衝擊度皆隨孔徑的下降而顯著提升，當孔洞尺寸降至 100 ~ 200 nm 甚至以下時，表面積殘餘應力以及表面彈性會隨著孔洞尺寸減小而增大，使得彈性模數以及降伏應力足以制衡因比重降低所造成機械性質的減耗，讓奈米泡材的抗衝擊能力上升許多。

表 7.2 各種泡材的孔洞尺寸及密度

	傳統泡材	細孔泡材	微米泡材	奈米泡材
Cell size (μm)	> 100	10 ~ 100	1 ~ 10	< 0.1
Cell density (cells/cm ³)	< 10 ⁶	10 ⁶ ~ 10 ⁹	10 ⁹ ~ 10 ¹²	> 10 ¹²

若欲生成奈米孔洞尺寸的發泡材，文獻中顯示需使用超臨界 CO₂ 做為發泡劑以及使用高分子複材。超臨界 CO₂ 發泡機制一般包括四個步驟：(1)在高壓以及特定溫度下，使超臨界 CO₂ 溶解於高分子中以形成 CO₂/高分子勻相溶液；(2)成核，藉由快速升溫或降壓使得聚合物中 CO₂ 的溶解度降低，產生過飽和狀況，此時高分子與 CO₂ 之間會發生相分離，CO₂ 會在高分子中成核；(3)成長，高分子中的 CO₂ 會擴散到成核的孔洞中，使孔洞逐漸成長。此時所控制的含浸溫度及含浸壓力會影響到孔洞尺寸及孔洞密度；(4)穩定，孔洞在成長的過程中會因為驅動力下降而趨於穩定，最後透過冷卻使孔洞結構穩固。在發泡過程中，有時會出現諸如孔洞聚併、孔洞熟成等現象，使得孔洞大小不均一而影響發泡材結構的穩定性，另由於一般超臨界 CO₂ 因擴散快，往往在發完泡後 CO₂ 快速的逸散會導致孔洞塌陷造成泡材縮小，這些都是在發泡過程中會影響發泡材的性能。

談駿嵩教授執行清大長春產學大聯盟計畫期間，獲得長春人造樹脂公司所提供多種不同軟硬比例的 TPEE(Thermoplastic Elastomer)，使用超臨界 CO₂ 做為發

泡劑進行發泡，開發的一階段模具發泡成型技術，可將特定軟硬比的 TPEE 母粒經由超臨界 CO₂ 發泡後獲得易脫模的 100 mm × 100 mm × 12 mm 墊片，其密度為 0.07 g/cm³、平均孔洞尺寸為 8.2 μm 及孔洞密度為 1.82×10⁹ cells/cm³，此墊片與商用 EVA 以及 TPU 進行符合 ASTM 規範之回彈性測試，所製得的墊片回彈率均超過 50%，在最適的軟硬比 TPEE 時甚至可達 58%，對比商用 EVA 的 34.4% 以及 TPU 的 47.8%，擁有更高的回彈性，另在發泡過程中發泡溫度可較文獻報導的操作溫度低了 30°C，也可達到降低能耗的目的。

二、植物工廠/海洋牧場

除培養微藻或巨藻外，亦可配合再生能源及含有藻類營養源之廢棄物，建立植物工廠或海洋牧場。植物工廠的定義是在一個封閉的成長系統中採用垂直堆疊的方式種植蔬果，經由控制土壤、溫度、光波長、濕度、CO₂ 濃度等因素，能夠一年四季生產蔬果。根據北海道苫小牧市植物工廠 JFarm 之經驗，該工廠利用荷蘭栽種技術並將煙道氣中捕獲之 CO₂ 進行溫室栽培，依他們簡報，栽種一英畝之蔬菜(計 144 種，依季節而變)及番茄，投資金額約 1,000 萬美元，每年可有約 60 萬美元左右的盈餘，這種又可再利用捕獲之 CO₂，又可栽種蔬果獲利，在台灣應可加以推廣。

海洋牧場之概念以鋼廠為例，其操作方式係於離岸處以太陽光電或風力發電等再生能源供應所需電力，進行廢水處理和 CO₂ 捕獲，再將捕獲之 CO₂ 處理鋼廠中廢棄的爐石做為置放於海床上之人工魚礁，之後將處理過含有巨藻生長所需礦物質的廢水及捕獲之 CO₂ 與人工魚礁接觸藉以培養巨藻，如此可進行周邊海域之生態復育，另亦可利用處理過之廢水和 CO₂ 於岸邊或海水表面培養微藻，再藉由綠色溶劑超臨界 CO₂ 處理微藻以獲得高價保健品、化學品或生質能源，如葉黃素、生質燃油等。此方式具減碳、降低汙染、使用再生能源、產生化學品或生質能源以及提供海洋生物棲息等功能，建立一符合生態之產業。

在 2015 年國家型能源計畫中減碳淨煤主軸即支持中鋼、成大、中山大學及海洋生物博物館共同投入海洋牧場之研發，在中鋼內將 2 噸轉爐石經由 CO₂ 處理將其中的氧化鈣及氧化鎂轉化成碳酸鈣及碳酸鎂，此碳酸化的轉爐石置放於枋山港的海床上做為人工魚礁，經過一段時間後，觀察到約有 20 多種的魚在礁石附近，且置放位置並沒有移動。經估算人工魚礁之固碳功效包括：每公噸轉爐石約可吸收 156 公斤的 CO₂、使用轉爐石製作魚礁可較使用水泥約少 470 公斤的 CO₂ 排放、微藻附著之磚體放入培養池中有助藻類之生長，固碳速率可提升到 272 mg/L/d。

三、微藻

以微藻做為生質能源來源具備下列之優點如下：培養一噸微藻需 1.8 到 2.0 噸的 CO₂，因此是一很好再利用捕獲 CO₂ 的方式、可取代食用性農作物做為料源、較其他農作物有更快的生長速率，也因此一公頃微藻可產生之生質燃料較棕櫚油及麻瘋樹油等為高、較石化柴油對環境的衝擊為小、「國際航空運輸協會」認可之航空生質燃油等，除了藻中油脂可用來製備生質能源外，不少微藻中也含有其他成份，從中可獲得健康保健食品或可替代石化的生質化學品。為了獲得微藻中之油脂，傳統上多利用有機溶劑進行萃取，只是萃取過程往往長達 24 小時以上，這是由於微藻具有堅硬的細胞壁，故僅藉由有機溶劑進行萃取效率不高，因此開發有效的破壁及萃取技術是能否量化的關鍵技術。常見的破壁技術包含了均質研磨機、超聲波輔助溶劑萃取及微波法等，然而這些技術皆會面臨到高能耗或效率不佳的問題。在利用 CO₂ 膨脹甲醇處理微藻時，觀察到可克服上述技術所面臨的問題，例如以 CO₂ 膨脹甲醇以連續方式處理微藻 *Chlorella vulgaris*，對比只用甲醇、高壓甲醇及超臨界 CO₂，油脂萃取率可高出 20 到 60%，顯示破壁與萃取可同時進行²⁵²。由於萃取出來之油脂會與甲醇進行轉酯化反應生成生質柴油，因此離開萃取槽後之溶液即可進行轉酯化反應。既然破壁與萃取可同時進行，若再添加可協助破壁的共溶劑並改變操作溫度與壓力，破壁、萃取及轉酯化也可同時進行，本人實驗室的確觀察到若在 *Chlorella vulgaris* 中添加蓖麻油，在溫度 220 °C、壓力 95 atm 及操作時間 30 分鐘時，微藻油生成生質柴油的比例達 66.2%，較未添加的 43.5% 有顯著的提升，此外也有 67.9% 的蓖麻油經由轉酯化反應生成生質柴油。由於使用高壓的甲醇，在微藻仍含有 20% 水份情況下，沒有觀察到皂化的產生，如此也可節省乾燥微藻的能耗及時間，降低生產生質柴油的成本²⁵³。

²⁵² Yang, Y.H., Klinthong, W. and Tan, C.S., Optimization of Continuous Lipid Extraction from *Chlorella vulgaris* by CO₂-Expanded Methanol for Biodiesel Production, *Bioresource Technol.*, 198 550 (2015).

²⁵³ Chang, C.H., Wei, H.Y., Chen, B.Y. and Tan, C.S., *In Situ* Catalyst-Free Biodiesel Production from Partially Wet Microalgae Treated with Mixed Methanol and Castor Oil Containing Pressurized CO₂, *J. Supercrit. Fluids*, 157, 104702(2020).

第二節 二氧化碳用於生產化學及能源產品

碳捕獲和利用是指將捕獲二氧化碳並在各種產品中直接(即不發生化學變化)或間接(即過轉化)使用的一系列應用。如今，二氧化碳主要用於化肥工業和提高石油採收率(enhanced oil recovery, EOR)，將來以二氧化碳為永續料源的合成燃料、化學品和建築骨材等新用途會是新的發展方向。2021 年 CCSU 的 CO₂ 減量約 4,000 萬噸，其中從固定來源捕獲，例如電力發電廠，並被運送到現場並儲存在鹽水層或其他地下沉積物中 CO₂ 的減量占 27%，餘下的 73% 用於 EOR，將捕獲的 CO₂ 轉化成化學品的比例少於 1%；而隨著技術進展，預估 2050 年 CCSU 的 CO₂ 減量貢獻將增至 50 億噸。越來越多的研究都在探討如何將二氧化碳捕獲後，轉化為有用的燃料或化學品(CO₂ Capture and Utilization, CCU)，與地質封存相比，更符合永續循環的理念。

一、二氧化碳捕獲及再利用(CCU)的應用情境

CCU 首先須捕獲二氧化碳，來自於化石燃料電廠或從大氣中捕獲，其捕獲方法請參閱第九至十一章，而目前捕獲成本偏高，仍須透過政策補貼方式才能商業化(如美國抗通膨法案補貼 CCU 每噸 CO₂ 130 美元)，CCU 的商業化將會隨著捕獲成本的降低而逐步實現。

CCU 除了已商業化的肥料製程($\text{NH}_3 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{Urea}$)之外，沒有太多具有消耗 CO₂ 潛力的應用。對於 CCU 的期望則是在於 CO₂ 與氫氣能夠產出的化學品及燃料，主要為甲醇與甲烷。我們期望透過 CCU 產出的低碳產品，氫氣來源就非常重要，最好來自於再生能源產生的綠氫，而綠氫是否充足，以及成本能否負擔就成為發展 CCU 的關鍵因素。從再生能源的觀點，將來在以再生能源為主的供電環境下，透過 CCU，可將捕獲之二氧化碳與剩餘再生能源轉換為甲烷、甲醇等化學品作為能源載體，相較於氫氣更容易儲存、運輸和分配。從產品生命週期的觀點，CCU 產生之化學品，估計與現有的化石同類產品相比，可減少 50 至 90% 排放，對於解決石化業的範疇 3 排放具有重要意義。

CCU 的應用條件為 CO₂ 捕獲符合成本效益，以及可獲得充足便宜的綠氫，雖然目前還沒有足夠的發展條件，但化學產業走向循環經濟是業界共識，製程技術應盡快投入，當以上兩個條件符合時，方可因應市場需求。

二、二氧化碳轉化甲醇

甲醇是全球交易的主要化學品之一，預計到 2030 年需求量將達到每年 1.9 億噸²⁵⁴。甲醇的重要性主要體現在其作為中間化學品的價值上，它可以生產甲醛、二甲醚和醋酸等產品。它還可用作生產烯烴的原料，而烯烴是形成日常生活中所消耗的多種化學品(包括塗料、塑料、樹脂、粘合劑和防凍添加劑)的中間體。諾貝爾獎獲得者 George A. Olah 教授提出「甲醇經濟」的概念，主張通過減少溫室氣體，將二氧化碳轉化為甲醇，用於直接甲醇燃料電池(DMFC)及合成烯烴和其他碳氫化合物的原料。考慮到以液態或壓縮形式儲存和運輸氫氣所面臨的挑戰，甲醇成為一種很有前途的液體載體。以下是 CO₂ 轉化為甲醇的反應方程式。



以合成氣(CO+H₂)生產甲醇已是工業極成熟的技術，2020 年全球甲醇產量約 1 億噸，是生產量前十名的化學品，經由合成氣體、非均相觸媒生產約占九成，主要生產商包括 Methanex Corporation, SABIC, Zagros Petrochemical Co. (伊朗), Yankuang Group (中國兗礦集團), and Proman AG(瑞士)等。CO 及 CO₂ 與氫氣反應生成甲醇都屬高放熱反應，觸媒除了必須具備良好的催化功能外，亦須具備良好的熱穩定性，眾所周知關鍵技術為非均相 Cu-ZnO-Al₂O₃ 觸媒的商業化及其不斷的進步暨製程技術的精進，傳統合成氣產甲醇觸媒由 Cu、ZnO 和 Al₂O₃ 混合而成的混合氧化物(表 7.3)，雖然 Cu 可以單獨用於甲醇合成，但本身的催化活性不高，活性因與 ZnO 的相互作用而大大的提升，目前商業化觸媒供應商包括 Cariant (前身 Sud Chemie)、BASF、Halder Topsoe、Johnson Matthey (前身 ICI)、Sinopec 及中國昊華化工集團等；甲醇製程供應商包括 Air Liquide (前身 Lurgi)、Johnson Matthey、Topsoe、Casale 及 BASF 等。商業化銅鋅觸媒，銅活性中心在反應過程中被氧化而降低了催化能力，必須透過快速進行還原(H₂)回還原態的金屬銅奈米顆粒來恢復催化功能。目前商業化製程銅鋅觸媒的壽命約 4-6 年，觸媒失活主要原因是毒化及過熱衍生的燒結，排除原料雜質是避免毒化的關鍵，原料必須純化後才能使用。以 CO₂、CO、H₂ 為原料生產甲醇，目前技術 TRL 為 7-9。

²⁵⁴ Battaglia et al., "Methanol synthesis through CO₂ capture and hydrogenation: Thermal integration, energy performance and techno-economic assessment," *Journal of CO₂ Utilization*, 44, 101407 (2021)

表 7.3 目前國際上 CO₂ 合成甲醇量產進展

No	Location	Team	Date	Capacity (m ³ /h)	Remarks
1	日本	Tohoku Institute of Technology	2003	1	Tohoku University catalytic 技術
2	德國Werlte	Audi	2013	325	Green H ₂ ; biogas ; 1000t/a
3	丹麥Foulum	El-opgraderet	2013-17	10	Biogas : Topsoe製程
4	德國, KIT	HELMETH	2014-17	5.42	Karlsruhe
5	德國Rostock	Exytron	2015	1	Power plant
6	丹麥哥本哈根	丹麥技術大學 (DTU)	2016	10	Biogas : MeGa-StoRe 2 ; 丹麥技術大學
7	Falkenhagen	Uniper	2018	57	Biogas
8	Poland	Łaziska power	2018	4.5	Geothermal power
9	Nagaoka, JP	INPEX, 日立造船	2019	8	Power plant
10	Fos-sur-Mer, FR	CEA, GRTGaz	2020	25	Jupiter 1000 plan
11	Yokohama, JP	Tokyo Gas	2022	NR	ITM power/日立造船技術
12	Anyang, CN	Henan Shuncheng	2022	400	日立造船技術

三、二氧化碳轉化烯烴技術

烯烴(包含乙烯、丙烯、丁二烯等)是現代化學工業的基的原料,透過輕油裂解而來(steam cracking),2022年乙烯需求量約1.77億噸,預計2035年將增加至3億噸,主要用於HDPE、LLDPE、LDPE、Ethylene Oxide (EO)、Ethylene Dichloride (EDC)合成,其他用途包括Ethylbenzene (EB)、Alpha Olefins、Vinyl Acetate (VAM)、Polypropylene (PP)、PO等。丙烯2022年需求量約1.25億噸,2035年將增加至2.25億噸主要用於PP、PO及ACN合成。乙烯及丙烯在裂解製程中需要大量熱量造成能源消耗,每生產1噸產品,會產生約1.5噸碳排放,平均而言,2022年分別生產乙烯1.77億噸及丙烯1.25億噸,共排放超過4.52億噸的二氧化碳,預計全球烯烴市場在未來仍將以相當大的速度成長(CAGR 4~5%),要達成淨零碳排必須從CCU著手,將CO₂循環利用作為石油的替代原料。

逆水煤氣變換反應(Reverse water-gas shift reaction, RWGS)於19世紀被發現,是一種利用二氧化碳和氫氣生產一氧化碳和水的方法(Eq. 4)。RWGS產生合成氣的主要碳源CO,而CO是具有反應活性,與氫氣透過觸媒反應生成各種化學品,包括:甲烷、甲醇和乙烯和丙烯等,是CCU技術的關鍵技術之一。RWGS與費托反應(Fischer-Tropsch process, FT合成)結合(圖7.1),可製造烯烴(Olefin),其化學通式為C_nH_{2m},其分子結構中有兩個相鄰碳原子彼此間以雙鍵結合,如乙烯、丙烯、丁二烯等,為化學品主要的上游原料。產生的烯烴由於受傳統的Anderson-Schulz-Flory (ASF)分佈所局限,C₂-C₄(包括石蠟和烯烴)的最高選擇性不會超過

58%，要打破 ASF 分佈並進一步提高低碳烯烴的選擇性，必須進行新型觸媒開發和新策略進行更廣泛及深入的研究。目前技術成熟度 TRL 約為 6。

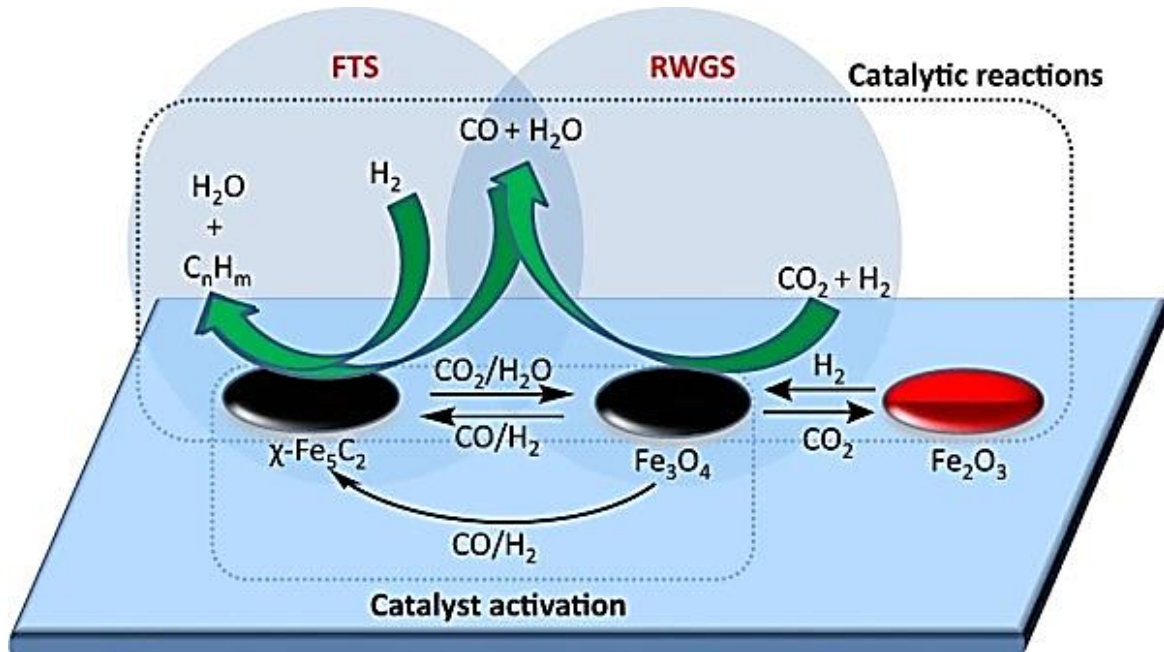


圖 7.1 逆水煤氣變換反應 CO 產物 FTS 應用²⁵⁵

(一) 雙功能觸媒：二氧化碳-甲醇-烯烴

近年來，雙功能氧化物-沸石觸媒將 CO₂ 轉化為低碳烯烴已成為研究主要策略之一。例如一種由 ZnGa₂O₄ 氧化物和 SAPO-34 沸石組成的雙功能觸媒，用於 CO₂ 直接轉化為輕烯烴，實現了 86% 的低碳烯烴選擇性和 13% CO₂ 轉化率。在這個觸媒系中，CO₂ 首先經由氧化物觸媒轉化為甲醇，甲醇中間產物在沸石觸媒的作用下轉化為低碳烯烴。另一種由 In-Zr 複合氧化物和 SAPO-34 沸石組成的雙功能觸媒也實現了 80% 的低碳烯烴選擇性和超過 35% 的 CO₂ 轉化率。此觸媒系統利用甲醇作為中間體獲得高烯烴產率。此外，許多其他研究也探索了不同的雙功能氧化物沸石觸媒來提高低碳烯烴的產率，例如 In₂O₃-ZnZrO_x/SAPO-34、In₂O₃/SAPO-34、Cu-CeO₂/SAPO-34、ZnAl₂O₄/SAPO-34 等。

²⁵⁵ Yao et. al., "Transforming carbon dioxide into jet fuel using an organic combustion-synthesized Fe-Mn-K catalyst," Nature Communications, 11, 6395 (2020)

(二) 串聯反應器系統：二氧化碳-甲醇-烯烴

除了使用雙功能觸媒，經由甲醇為中間體外的一步合成低碳烯烴外，亦可以使用串聯反應器系統將 CO₂ 經兩步轉化成低碳烯烴。第一步可以經由氫化反應生成甲醇(CO₂ 轉甲醇)；第二步則是甲醇經由 MTO 製程轉化成乙烯及丙烯，其中 MTP (methanol-to-propylene, 甲醇轉丙烯) 是已商業化的製程，MTE (methanol-to-ethylene, 甲醇轉乙烯) 已接近商業化階段。目前 CO₂ 轉化低碳烯烴技術 TRL 為 3-6。各種生產烯烴方式如圖 7.2 所示。

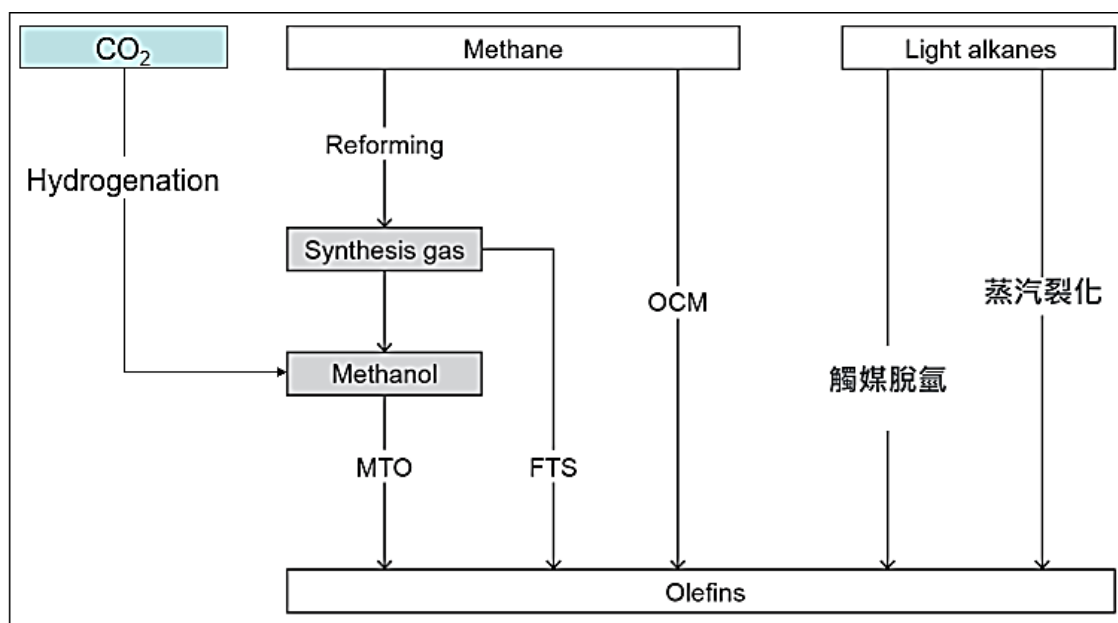
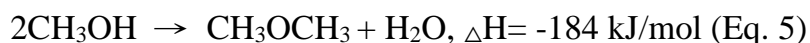


圖 7.2 烯烴生產製程

四、二氧化碳轉化二甲醚(DME)

在從甲醇中提取的化學品中，二甲醚(DME)因其物理化學特性而具有用作燃料的潛力。它不僅與液化石油氣(LPG)相似，氮氧化物、硫氧化物和顆粒物排放量低，而且還是生產輕烯烴和汽油的重要化學中間體。以二氧化碳為原料生產二甲醚分為兩個步驟，首先，從二氧化碳加氫中獲得甲醇，然後將甲醇脫水為二甲醚。直接合成二甲醚的主要挑戰在於開發高效的多功能催化劑，這種催化劑具有合成甲醇的金屬位點和甲醇脫水生成二甲醚的酸性位點，這兩個反應位點都需具有高選擇性，以避免形成副產品。

二甲醚的反應為甲醇脫水(如 Eq. 5)，其製程分為兩個步驟，第一個步驟是在 240-280°C，以 Cu/ZnO 催化劑，從合成氣(CO/H₂)中生產甲醇；第二個步驟是在 240-280°C 和 3-7 MPa 的條件下，甲醇在酸催化劑的作用下轉化為二甲醚。目前此技術 TRL 為 4-6。



五、二氧化碳轉化芳香烴

苯、甲苯和二甲苯(Benzene, Toluene and Xylene, BTX)是用於聚合物和其他石化合成的石化原料，全球對 BTX 的需求不斷增長，2022 年 BTX 市場約 1.29 億噸，預計 2031 年將增至 1.8 億噸。BTX 可以透過許多不同的方法來製備，例如，透過 C2 和 C3 烯烴合成，或者在煉油廠中，透過從煉油廠蒸餾和萃取來取得。

二氧化碳直接加氫為芳香烴(芳構化反應)是二氧化碳再利用的途徑之一，目前一步直接氫化的製程仍未成熟，主要是選擇性未臻理想。CO₂ 加氫芳構化使用串聯觸媒設計方式較為有效，但仍未達到商業化階段。CO₂ 生產 BTX 有兩種主要途徑來自(1)費托合成(FT)途徑：CO₂ 先轉化為 C2+碳氫化合物，然後以沸石觸媒轉化為芳香烴；(2)甲醇途徑：甲醇首先由二氧化碳合成，再以沸石觸媒轉化為烯烴，最後轉化為芳香族化合物。FT 途徑首先透過 RWGS 反應產生 CO，然後 CO 轉化為 C2+化合物，最常使用的觸媒是鐵基和鈷基觸媒，但選擇性仍有局限性，其中對 C2+ 化合物的選擇性受到 Anderson Schulz-Flory (ASF) 分佈的限制，FT 途徑對 C2+ 烴類的典型選擇性值低於 60%。甲醇途徑不受 ASF 分佈限制，比 FT 途徑具有更高的選擇性。

六、二氧化碳轉化碳酸二烷基酯(DRC)

碳酸二烷基酯(dialkyl carbonate, DRC)包含碳酸二甲酯(DMC)，碳酸二乙酯(DEC)，碳酸二辛酯(DOC)，碳酸二苯酯(DPC)等多項有用的碳酸二烷基類化合物。其中以碳酸二甲酯的需求量最高，預估全球每年可達 50 萬噸需求量，若經轉化成國內產業需求的產品約可達 10 萬噸，即約含有 5 萬噸 CO₂ 的消耗量。其可應用產品為(1)做為甲基化、乙基化或羰基化等反應試劑，應用生產聚碳酸酯(PC)、異氰酸酯、聚氨基甲酸酯、聚碳酸酯二醇等化學品、(2)做為無毒的溶劑，與大多有機物具有優良的溶解性能、黏度低、介電常數小及表面張力大等特質，用於塗料、化學合成、清潔用等溶劑；(3)用於汽油添加劑，可提高汽油中的高辛烷值作用，降低汽車廢氣總排放量，及不溶於水、低毒和快速生物分解性等性質；(4)在鋰電池中作為電解液使用；(5)做為化妝品及個人護理用之配方助劑，碳酸二辛酯主要做為膚感乾爽的新型潤膚劑。

(一) 聚碳酸酯二醇(PCDL)

主要具有特殊物性的應用產品即為以 DRC 合成聚碳酸酯二醇(Polycarbonate diols, PCDL)，透過二元醇(Diol)與碳酸二烷基酯(Dialkyl carbonate, DRC)共聚而成之多元醇寡聚物(Polyol)，其中，分子鏈兩個末端都帶羥基(-OH)，分子主鏈中則含有脂肪族亞烷基和碳酸酯基(-OC=OO-)重複單元，主要用途為組成聚氨酯分子結構中的軟鏈段，改善聚氨酯彈性體的柔順性和韌性，具有較優異機械特性。然而，相對於傳統聚酯多元醇與聚醚多元醇，聚碳酸酯多元醇中碳酸酯基團具有

特殊的結構特性，其碳酸酯基具有較佳耐水解性及相對於醚基(-R-O-R-)，碳酸酯基具有較佳耐熱、耐候、耐氧化降解等特性。因此以聚碳酸酯二醇為軟鏈段之熱塑性聚氨酯在耐水解、耐熱、耐油與耐候等特性上有較優異的表現。因此由碳酸二烷基酯類衍生而成的 PCDL，每年需求量約有 12 萬噸，不但可消耗 5 萬噸的 CO₂。同時 PCDL 更可做為高附加價值的化學品。

(二) 碳酸二甲酯(DMC)

碳酸二甲酯(DMC)是分子量最小的碳酸酯類化合物。傳統生產 DMC 的方法是採用含有劇毒的光氣原料法，反應快速且光氣成本低，可大量生產。但因光氣為劇毒化學品，且伴隨產生大量氯化鈉副產物，對設備造成腐蝕及增加廢棄物處理的費用，因應環保要求而逐漸減少使用。目前工業界最常用的製程方法是以 CO 和甲醇進行氧化反應而生成 DMC，但目前 CO 仍來自於煤、天然氣等石化原料，無法提供有效的 CO₂ 減量效果。而以 CO₂ 為料源製備 DMC 的方法早在 2000 年即為東聯化工與奇美公司合作所採用的生產方法。先以 CO₂ 與環氧乙烷(Ethylene oxide, EO)反應合成碳酸乙烯酯(Ethylene carbonate, EC)，EC 再和甲醇進行酯交換反應生成 DMC，而後轉成 DPC 及生產 PC 聚合物。此製程從 2000 年開始即每年使用 3 萬噸的 CO₂ 產製 PC 產品，此製程為早期使用 CO₂ 開發的優良環保製程。

七、二氧化碳轉化液體燃料

全球運輸部門使用 60% 石油生產量，台灣運輸部門排碳量約佔 13%，雖然電動化是主要發展趨勢，但仍需考量航空器及船舶不易獲得電能的狀況，發展低碳燃料仍有其需求。電子燃料(e-fuel)是一種合成燃料(Synthetic Fuel)，廣義上泛指所有利用電能製造的可燃燃料，包含利用再生能源電解水製造的綠氫，以及利用綠氫製作的衍生燃料，可顯著減少二氧化碳排放，減量約 70%，並具備下述優點：(1)與電池相比，e-fuel 具有更高的能量密度，因此可以為無法使用電力替代品的用途提供解決方案，例如航空器和船舶；(2)液體 e-fuel 比儲存電力更容易，也更容易移動，有助於能源安全；(3)現有基礎設施可以繼續用於運輸和儲存，例如：天然氣運輸網路、液體燃料分配基礎設施與管道、加油站、儲能設施等，有些 e-fuel 可以立即使用在車輛上，不需要改變引擎設計即可減少溫室氣體排放。

(一) 汽油及柴油

汽油及柴油是由石油通過精煉過程製成的，其中包括蒸餾、轉化和處理等製程。生產 1 噸汽油的 CO₂ 排放量約為 0.973 噸(well-to-tank)，生產 1 噸柴油的 CO₂ 排放量約為 0.865 噸，使用 CO₂ 作為永續料源製造低碳汽、柴油，可大幅減少運輸部門的碳排，對淨零碳排有重要的貢獻。費托製程用於合成氣(syngas, CO+H₂)生產汽、柴油已是成熟的商業製程，由於成本高於煉油製程，是目前仍未普及之主要原因。CO 從 CO₂ 轉化而成(例如 RWGS 或乾式重組製程)，再使用費托合成(FT)製造長鏈碳氫化合物(如 Eq. 6、7)取代汽、柴油。該程序是在鐵或鈷觸媒存

在下、在中等溫度(200-350°C)和壓力(約 20-50 bar)下進行，但由於 CO₂ 的高穩定性，目前產率仍有待改善，目前此技術 TRL 為 5-8。

Fischer-Tropsch reaction:

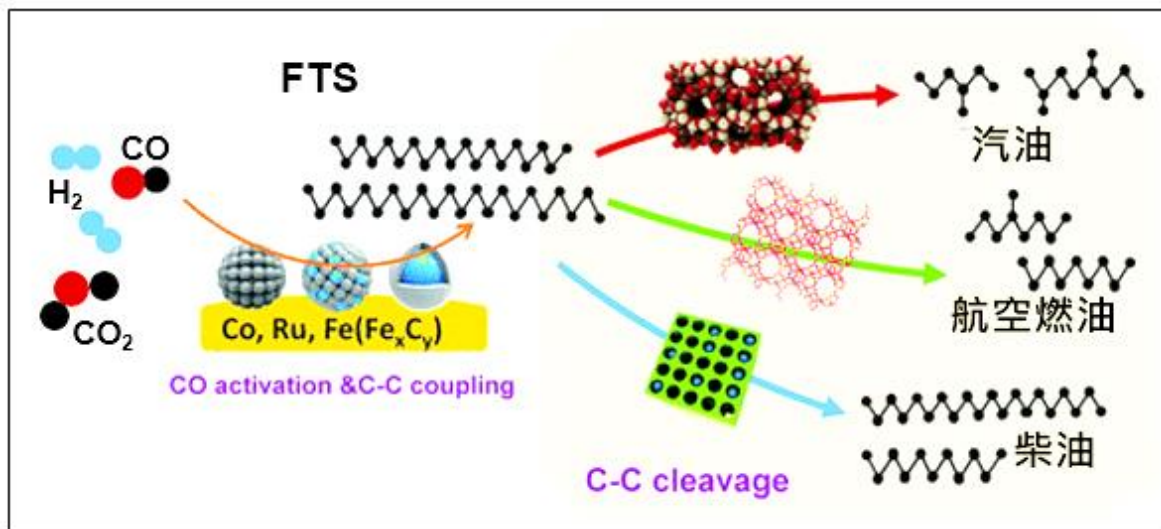


圖 7.3 CO₂ 利用費托合轉化為液體燃料

(二) 永續航空燃油(sustainable aviation fuel, SAF)

2022 年全球 CO₂ 排放約量航空排放量約為 9.4 億噸(2.5%)。國際航空運輸協會 (IATA) 指出，與傳統煤油燃料相比，永續航空燃料(SAF)可碳排放量減少 80%，是航空業重要的減碳方式。目前 SAF 供應量仍然偏低，歐盟航空使用 SAF 燃料僅為總量的 0.05% 以下。歐盟委員會提議對向歐盟機場供應的燃料增加 SAF 的混合比例，從 2025 年的 2% 逐漸增加到 2050 年的 63%，因此到 2030 年將需要約 230 萬噸 SAF，到 2040 年將需要 1,480 萬噸，到 2050 年將需要 2,860 萬噸。目前，經過認證的 SAF 與化石航空燃料的最大混合比例為 50%，取決於原料生產途徑，產業和燃料標準委員會計畫 2030 年使用 100% SAF。雖然 SAF 目前比傳統航空燃料更昂貴，但預計透過未來的生產規模經濟將顯著節省成本。SAF 價格會根據生產途徑、生產成本和能源市場的波動而變化。

八、異業結合-鋼化聯產²⁵⁶

鋼鐵廠尾氣含有 CO、CO₂ 及 H₂ 適合做為石化業 CO₂ 再利用的原料，本節所提到的轉化技術，充分利用鋼鐵廠排放之尾氣，一方面可減少鋼鐵廠 CO₂ 排放，另一方面使用再利用技術獲得原料或燃料。以鋼鐵廠的高爐-轉爐製程為例，其尾

²⁵⁶ 本節由工研院產科國際所劉致中組長、張志強資深研究員撰寫。

氣種類及成份比例如表 7.4 所示。高爐、轉爐和焦爐煤氣經過氣體分離製程後，提純出一氧化碳和氫氣；一氧化碳和氫氣再經過化學反應可以生產氨氣、甲醇等各種化工產品。目前，氣體合成化工產品技術已經成熟並商業化，氣體分離提純則是技術關鍵所在，也是製程成本最高的地方。

表 7.4 鋼鐵工業尾氣的種類及成分占比(vol%)²⁵⁷

爐氣	氫氣	一氧化碳	二氧化碳	氨氣	甲烷	氧氣
高爐氣	50~60	20~30	9~24	1.5~2	0.01~0.5	0.05~0.1
轉爐氣	10~20	50~60	15~20	1.5~2	0.01~0.2	0.1~0.5
焦爐氣	3~7	5~8	1.5~3	55~60	23~27	0.1~0.5

目前鋼化聯產技術仍有一些需要注意的地方如下：

- 當前鋼鐵製程的副產物—煤氣基本已經平衡使用，主要應用於軋鋼加熱爐、高爐熱風爐的加熱燃料，剩餘煤氣也用於發電。若將煤氣回收製成化工產品，則需要另外尋找新的熱源滿足軋鋼及高爐系統的加熱需求或增加外購電力比例。
- 鋼化聯產減少了二氧化碳和其餘有害氣體的排放，但是氣體分離淨化成本仍高。
- 鋼化聯產受燃料與化學品市場價格波動的影響很大。2023 年以來由於俄烏戰爭造成國際大宗燃料商品價格大幅上漲影響，鋼化聯產要保留煤氣作燃料，抑或是要用煤氣做基礎化工產品，仍然充滿很大的不確定性。
- 對鋼鐵老廠而言，原有的輸氣管道為配合鋼化聯產需進行改造仍面臨很多困難，而且會使企業增加大量的硬體投資。

以下為國際上幾項鋼化聯產的試驗型計畫：

(一) 德國 thyssenkrupp Steel 公司的 Carbon2Chem®聯合專案計畫

此計畫由德國工業技術研究機構 Fraunhofer UMSICHT，thyssenkrupp AG 集團與 MPI-CEC (Max Planck Institute for Chemical Energy Conversion)研究所等 16 家來自不同行業的基礎及應用研究機構參與計畫，並由德國聯邦教育和研究部 (BMBF) 出資。該計畫的目標是將未來工業部門的碳排放透過再生能源全部轉化為化學工業中的化石原料，來自鋼鐵、水泥和石灰行業的製程氣體和廢熱用作生產合成燃料、塑膠和其它基本化學品的原料。同時採用模組化、分步驟的碳利用方法，在跨產業的領域中應用，可以讓德國在保護氣候的同時和世界其它地區的大型工業園區相比仍保持競爭力。

²⁵⁷ 資料來源：碳中和背景下“鋼化聯產”現狀與前景，綠色製造(2022)

Carbon2Chem®計畫的第一階段(2016年6月至2020年5月)重點在於開發和研究合適的技術種類，這個階段的核心要素包括了展示技術的可行性並證明這些方法不僅在經濟上可行，而且具有可持續性。Carbon2Chem®計畫的第二階段，研究人員主要在確認第一階段開發的技術適合大規模應用，從而為低碳基礎材料產業奠定基礎。BMBF在第二階段的計畫投入了更多資金，預計到2024年將投入7,500萬歐元，而計畫的合作夥伴到2025年將額外投資超過1億歐元。Carbon2Chem®第一階段建立了位於Fraunhofer UMSICHT園區的實驗室大樓，擁有500平方米的實驗室空間和30個辦公空間，該空間用於開發特定氣體的淨化技術並生產甲醇和高級醇。然後在技術中心用真實氣體進行進一步測試，該技術中心佔地3,700平方米，位於thyssenkrupp stell歐洲公司工廠旁。

第二階段，研究人員將重點放在實驗室和技術中心的共同合作長期測試，進一步驗證其技術，並從2025年起擴大其工業應用。在第二階段，合成氣子計畫中的L-III團隊將在thyssenkrupp工廠對冶煉氣體以及其它製程氣體的成分、淨化和加工進行深入研究。這些子計畫L-II、L-III、L-IV和L-V專注於各種不同的產品，即甲醇、尿素、高級醇和聚合物的合成技術開發。此子計畫的另一個重點是評估適合大規模碳捕獲和氫氣利用技術和二氧化碳基礎設施。

Carbon2Chem®計畫下Polymers子項目的參與者Covestro正在研究利用鋼鐵工業氣體中的一氧化碳(CO)作為進料，生產聚碳酸酯。Covestro已在其位於德國Leverkusen附近的Dormagen基地建造了一座小型工廠，用於測試氣體中的一氧化碳質量，是否符合規格要求，並可以進行進一步加工的測試場域。

(二) 比利時 ArcelorMittal Temirtau 鋼鐵公司的 Steelanol 碳減排專案計畫

Steelanol 碳減排專案計畫目的主要透過新型氣體發酵技術，將含 CO₂ 的工業廢氣轉化為生質乙醇，為運輸部門提供生質燃料。本計畫主要的參與者有(1) ArcelorMittal Temirtau 鋼鐵公司，是位於比利時盧森堡 Gent 港的綜合鋼鐵廠；(2) Primetals Technologies 公司，總部位於英國倫敦，是金屬產業工程、工廠建設和提供產品生命週期設計服務的廠商；(3) LanzaTech 公司，為擁有將廢氣(含有 CO、CO₂ 或 H₂)回收成高品質、有用的化學產品，如：燃料乙醇、噴射燃料(Jet fuel)或作為生產尼龍和塑膠的原料；(4) E4tech 公司，專注於永續能源的國際策略顧問公司，提供客觀、策略性的業務和政策建議。在 Steelanol 計畫中針對生產的乙醇對環境的影響評估。本計畫獲得歐盟 Horizon 2020 研究和創新計畫的資助，專案整體投資額為 1.65 億歐元，依據 2020 年 5 月 ArcelorMittal Temirtau 公司官網發佈消息—該專案得到了歐洲投資銀行的貸款支持。

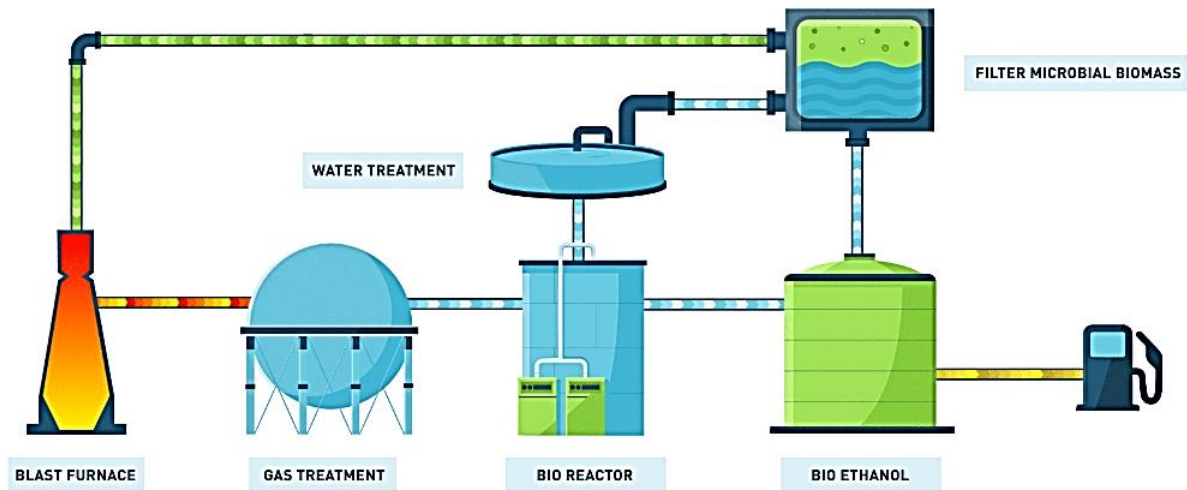


圖 7.4 Steelanol 碳減排專案計畫中工業廢氣轉化為生質乙醇的製程

ArcelorMittal Temirtau 公司 Gent 鋼廠的乙醇生產流程採用了 LanzaTech 公司的技術，透過微生物發酵鋼鐵生產過程中產生的氣體轉化為乙醇。E4tech 公司則將依據 Gent 鋼廠的數據進行生命週期評估(LCA)，深入了解生質乙醇的環境效益。Steelanol 碳減排專案計畫的合作夥伴將能夠利用 LCA 結果，從環境角度優化 Gent 鋼廠，以及未來其它鋼廠的優化。2023 年 6 月 Steelanol 碳減排專案計畫開始全面運營，該設施將煉鋼過程中捕獲的 CO₂，透過 LanzaTech 公司的生物基製程，透過生物催化劑將其轉化為生質乙醇。未來該生質乙醇將由 ArcelorMittal 和 LanzaTech 公司以 Carbalyst® 的品牌聯合銷售。Steelanol 碳減排專案計畫的示範工廠每年可生產 8,000 萬公升的生質乙醇，約佔比利時當前總需求的一半。Gent 鋼廠預計每年減少 12.5 萬噸碳排放，從而達到歐盟 2030 年氣候計畫的目標，即到本世紀末將溫室氣體排放量減少 55%。專案合作夥伴 Primetals Technologies 和 E4tech 並得到歐洲氣候、基礎設施和環境執行機構 CINEA 的計畫支持。

(三) 中國大陸首鋼郎澤公司燃料乙醇開發計畫

2011 年中國大陸首鋼引進美國朗澤科技公司的生物發酵技術，將鋼廠尾氣中的一氧化碳轉化成化工產品。經過多年的中試開發研究，2018 年 3 月，首鋼郎澤公司開始進行大規模的生產燃料乙醇、農業飼料及化工產品，首鋼郎澤公司為北京國營企業首鋼在曹妃甸所屬的新能源科技公司。與現有鋼鐵產業尾氣利用方式相比，採用一氧化碳生產燃料乙醇的經濟價值是燃燒發電的 2.5~3 倍，能源利用效率是燃燒發電的 1.5~2 倍，實現二氧化碳一次減排約 30%；燃料乙醇添加到汽油中實現二氧化碳二次減排約 30~35%。依照其規劃，至 2025 年，首鋼郎澤公司預計燃料乙醇產能將可達到 50 萬噸/年，減少二氧化碳排放量 90 萬噸/年。

第四節 小結

國發會在 2022 年發表的「臺灣 2050 淨零轉型路徑」中針對 CCSU 的目標，訂定在 2030 年時希望能有 176 到 460 萬噸，2050 年時能達到 4,020 萬噸，由於目前 CCS 在全球仍在起步階段，所投入的成本不低，為能在產業發展不會受到很大的影響下達到所訂定的目標，政府必須要建立完整的配套措施，諸如政策、策略、法規、環評、財務、稅收、技術、經費、人才培養、教育、宣導等，特別是現今民眾對最能大量去碳的 CO₂ 地質封存之安全性仍存有疑慮的情形下。若無法在短時間內進行 CO₂ 地質封存，即必須投入到 CO₂ 再利用，方可使捕獲的 CO₂ 有個出海口。所以有這樣的考量，乃是基於必須在國內建立自主的 CO₂ 捕獲技術，如此未來減碳成本方不會受制於國外的技術，另也顯而易見的是 CO₂ 捕獲成本不能下降，後續的 CCS 及 CCU 的成本一定會高。

目前氫氣來源仍侷限在灰氫，另綠氫價格也居高不下，發展 CO₂ 直接利用的技術與產品是短期可以努力的方向，本章即介紹 CO₂ 直接利用中的高壓 CO₂ 做為綠色溶劑、植物工廠、海洋牧場、微藻等的技術。所以選擇高壓 CO₂ 做為綠色溶劑的原因，除可使捕獲的 CO₂ 能有出處外，另考量的是無論那一產業未來必須要能降低環境汙染及減少能源及水使用的綠色製程，因此使用綠色溶劑高壓 CO₂ 以取代毒性及被管制的化學溶劑以及減少用水量即是其中的一條路。雖然在使用 CO₂ 做為綠色溶劑的量對比 CO₂ 封存量不大，且使用後仍需收集以再次使用，但對各產業必須要提出的環境社會公司治理(ESG)及企業社會責任(CSR)以及達到供應鏈的要求，或是一仍可保有經濟效益的一種考量，例如紡織產業使用超臨界 CO₂ 取代水進行染色、使用超臨界 CO₂ 進行鞋底材的發泡，以及半導體產業針對晶圓清洗時，不能再使用 REACH 及 RoHS 限制使用的清洗化學品等。至於對減碳有多大助益，則需計算原本使用有機溶劑或水時及改用高壓 CO₂ 綠色溶劑時在範疇 1、2 及 3 的碳排數據。

植物工廠、海洋牧場、微藻可持續消耗捕獲的 CO₂，且能獲得經濟效益。生質能(Bioenergy)加上 CCUS 屬於負碳技術，若能藉由培養微藻或大型藻時可吸收大量的 CO₂ 以及將微藻中油脂生成生質燃料，能取代化石燃料而減少 CO₂ 的排放。至於使用各項生質能時對負碳會有多大的貢獻，則需視何種生質料源、栽種技術、使用的氮肥量、收集、運送、轉化成生質能的技術與能源的使用、副產品等，這些需藉由碳足跡的計算及生命週期的評估方能得知。欲選擇開發那一種生質燃料時可就國際上是否有減碳目標來定，例如「國際航空運輸協會」已訂定航空業逐年使用永續生質航空燃油的目標，因此生質航空燃油就會有市場，即使現今價格仍遠高於石化燃油，航空公司仍會購買，因此若能開發成功降低成本的技術絕對會有利益。國內目前休耕農田超過 24 萬公頃，若能使用部份休耕地提供給植物工廠、生質農作物料源、微藻等所需土地，再加上石化產業在相關前處理、

觸媒、反應、分離純化等技術上的投入，或許有機會在台灣建立一新興產業。對於 CO₂ 直接利用項目，建議透過碳足跡、生命週期評估(LCA)及技術經濟評估(TEA)，選擇出最適合國內產業及各公司發展的路徑及產品。

CO₂ 轉化為化學基礎原料是消耗大量 CO₂ 的主要方法，但轉化過程需要能耗高，且需要使用低碳氫氣來降低碳排放量，因此目前仍需持續投入技術，並設法降低氫氣成本來實現 CO₂ 再利用減碳。本章所述的各種 CO₂ 再利用產製之化學品及燃料，其關鍵因素在於：(1)CO₂ 轉化為 CO 之 RWGS 反應；(2)合成氣(CO+H₂) 轉化為各種化學品及燃料的反應系統及觸媒；(3)低碳氫氣得取得與成本；(4)製程需盡量使用的低碳電力。對於產業及學研界，前兩個關鍵因素需要投入資源研發，力求將 TRL 從目前的 5~7，提升到 9。本章探討的製程中，甲醇可做為許多化學品的中間產物，透過甲醇做為上游原料是未來發展的趨勢，建議學研界可在相關高效能觸媒進行研究。從國外示範案例來看，異業結合可滿足其他產業的低碳需求，藉由與其他產業的合作可以創造出新的需求；此外，如果政府可以提供計畫補助，協助業者透過實廠運作逐步提升技術能力，將可提升工業減碳的速度。

第八章 結論與建議

石化產業對台灣的經濟貢獻卓著，包括傳統、電子資訊、高科技產業及綠能產業，所使用的材料許多來自石化產業，其中半導體的原材料使用化學品 佔材料比重達六成以上，石化產業鏈透過直接、間接效果，每年對台灣 GDP 的貢獻高達 15 至 18% 之間。石化業受到減碳壓力不只來自於碳費、碳關稅，也來自於客戶端，因此石化業具有非減不可的壓力。石化產業排碳結構包含原料(石油)與製程能源使用(煤炭、天然氣)，要完成低碳轉型等於是從原料到製程都需要有全新的技術才能夠做到，相較於半導體業只需將電力改為綠電即可減少 80% 的排碳量，困難度相差甚大，需要產業與政府來共同努力。

本專題報告邀請台大、清華、成大、台科大、中油、工研院、台綜院等 20 餘位專家學者及研究團隊協助撰稿，由中技社經產中心彙整校訂後完成本研究報告。本章第一節，首先總結報告第一至三章國內外與產業政策發展方向。本章第二節總結石化業者對於當前減碳政策的看法，相關內容來自於本年度召開的多場座談會，會中邀請台塑、中油、長春、台聚、東聯、李長榮、台灣石化合成及中石化等業者發表意見，亦邀請石化公會、工研院、台綜院及學者專家提供看法，相關意見彙整於本章，作為政策建議的參考內容。本章第三節總結技術發展研討內容，第四至八章為當前石化業正在推展的減碳技術，是業者可以立即投入就有減碳績效的技術；第九至十五章則是 CCUS 技術，為發展中但石化業需要的關鍵技術。從技術發展的時程來看，2030 年以前的減碳技術較為明確，而 2030-2050 年則有待技術持續進步才能得知是否趕得上 2050 年淨零碳排的目標。本章第四節彙整座談會結論與技術發展重點，提出政策建言，傳達石化業者在減碳路上遭遇的困難，期望在政策的制定上，能夠兼顧業者的競爭力與減碳目標的達成。

一、國內外法規政策與國外石化業者發展策略

(一) 國內外發展趨勢

各國將減碳目標納入法規，包括：歐盟綠色政綱針對塑膠產業提出循環經濟行動計畫、美國針對企業使用綠色能源給予補助、歐盟以監管沙盒與淨零歐洲平台等促使企業減碳、日本推動綠色創新基金提供企業融資等。在碳定價方面，各國的機制吸取以往的經驗進行規劃，如 CBAM 修訂過往 EU ETS 引發的碳洩漏問題，並支持巴黎協定的目標，針對高碳排產業以 EU ETS 每週平均收盤價徵收碳稅，未來還有機會擴大管制範圍。CCA 法案修訂美國過去的國內稅收法，藉由管制進口商與美國國內廠商的碳排放量，就超出規範標準的碳排放量課徵 55 美元/噸的碳稅，並逐年調整標準及提高碳稅，規範的產業範圍也將持續擴大。日本

試行 J-credit，藉由觀察減碳成果作為後續推動之參考。藉由減碳目標的制定、碳定價制度以及其他轉型法規的輔助，是國際目前的趨勢。

台灣以氣候變遷因應法為核心，逐步管制及改善降低碳排，採取措施包括溫室氣體盤查登錄、碳費的徵收、成立碳交易所、金管會訂定各規模上市櫃公司溫室氣體盤查資訊揭露時程等。而石化業主管機關產業發展署則是希望透過技術研發補助、以大帶小等方式來協助石化業者減碳。

(二) 國際石化業者減碳措施

國際許多石化大廠著手減碳轉型，宣示 2050 淨零碳排或碳中和，採取的減碳措施包括：BASF 透過提高使用再生能源佔比、工廠能源與流程效率等方式，積極降低企業自身碳排放量；DOW 透過優化永續發展的製造設施與製程、增加綠色能源與蒸氣的使用等方式進行減碳；住友化學規劃未來使用零碳能源、推進工廠設備的電氣化、應用碳資源循環技術、開發負碳技術等方式。

二、石化業者減碳遭遇困難

國內外政府皆有相關的減碳目標、法規與政策，國際石化業大廠也積極投入，為了瞭解石化業者在規劃與實踐減碳過程中遭遇到的困難，本研究於執行期間召開多場座談會，邀請石化公會及石化業者提供看法，從中彙整相關意見提供政府參考。相關會議重點彙整如下。

(一) 台灣石化業現況：

1. 台灣石化業面臨外部因素影響：

- (1) **關稅障礙**：台灣業者被排除在 RCEP 及 CPTPP 等國際經貿組織之外，難以與中國大陸、東協等國家競爭。中國大陸取消 ECFA 12 項石化產品關稅優惠，台灣石化業受到衝擊程度高。
- (2) **景氣低迷**：石化業 2023、2024 年景氣不佳，獲利出現嚴重衰退，甚至虧損，加上減碳成本將會雪上加霜。
- (3) **中國大陸擴產導致供過於求**：台灣石化業出口中國大陸佔比高，隨著中國大陸七大石化園區產能迅速提升，化學品產量已嚴重供過於求，台灣業者經營將越來越艱困。

2. **增加天然氣使用的困境**：天然氣不管是替代煤炭，還是做成去碳燃氫也好，都是必須走的一條路，降低氫氣含碳量才有辦法用於 CO₂ 再利用。高雄市是石化重鎮，要求 2025 年鍋爐與汽電共生廠要脫煤，雖然空污法第 30 條第 3 項已載明業者的相關權利，但業者仍遭遇到地方政府的強制要求。實際上在沒有新建天然氣接收站的情況下，業者也無法從中油取得天然氣來

替代燃煤，也需要有天然氣管線來做搭配。並非石化業者不願意脫煤，而是沒有辦法取得替代之天然氣。

3. **減碳技術成本高**：業者表示，如果要做到淨零，投入金額與建廠金額相差無幾，而每年操作成本也相當高。這麼大的一個資本支出跟操作成本，一定要有人負擔，如果市場上之客戶有低碳產品的需求，業者才能夠投入。
4. **碳費影響石化業競爭力**：石化業上下游連結程度高，尤其上游煉製能源消耗大，根據業者估計，若轉嫁給下游業者，主要產品每噸將增加 600 至數萬元，造成的後果是中下游業者負擔增加或改採購國外原料，而上游業者面臨減產，影響台灣整體石化業競爭力。
5. **目前技術發展策略**：在減碳技術發展尚不明確的時候，業者只能參考國內外企業的走向，並設法跟上。
6. **綠電成本過高**：對風電業者來講，他們希望整批賣出，石化業者必須聯合起來才能達到足夠的經濟規模。但是目前卡在開價實在太高，而且一簽就是 25 年，對業者來講，預算已在不可負擔的範圍內，在台灣取得綠電仍有困難。

(二) CCS 發展：

1. **法規**：部分業者投入進行地質探勘研究，但業者擔心在沒有法規的狀況下，即使有合適的封存地點，未來歸屬權、使用方式等，在沒有法規的情況下要如何進行投資規劃。
2. **補貼**：美國抗通膨法案提供 CCS 減碳每噸 85 塊美金的補貼，目前尚未得知台灣政府的相關規劃；也有業者表示就算將 CO₂ 捕獲廠建設完成，如果在成本偏高且沒有補貼的情況下，也不一定啟用。在國外積極補貼 CCUS 發展之下，台灣若沒有相關的政策與補助 CCUS 技術發展，將來台灣引進 CCUS 技術減碳的成本勢必更高，產業競爭力就會更低，政府應考量國際 CCUS 技術的發展模式，給予經費上的支持。
3. **環評審查**：依照目前的環評審查速度，難以達成政府訂定 CCUS 減碳的目標，在 2030 年達到 176 萬到 460 萬公噸之間的規模，環境部應提供加速審查的方案，以利業者儘早提出計畫。
4. **社會溝通**：過去中油的經驗，民眾擔心二氧化碳外洩問題而長期反對，政府應訂定法規與管理方法，讓業者能夠有所依據來與民眾溝通。以加拿大為例，首先，政府需讓人民認同低碳是必須發展的方向，並搭配科學數據來說服民眾地質封存有效且安全的方式。

(三) 碳費與碳權：

1. **碳費計算基礎溝通：**環團很關心碳費收取的價格，但國外與我們的計算基礎不同，像歐盟的 CBAM 只計算範疇一溫室氣體直接排放的部分，在範疇二的部分是沒有計價的，但我們民眾可能不清楚，而且歐盟 CBAM 是一個單位產品的碳排放量，跟我們直接碳費的基礎也不同，民眾可能因此誤會我們跟歐盟怎麼價格差這麼多，這個部分需要政府跟民眾之間，或者環團有些溝通，讓業者減輕一些壓力。
2. **資源循環的碳費抵減：**氣候變遷因應法第 29 條，自願減量抵換的部分有提到很多低碳技術都可以去做。業者提到資源循環再利用，也就是廢棄物的資源循環，也有很多的減碳技術，資源循環應適用於第 29 條自願減量上面。業者不管是去採購比較低碳的原料，還是廢棄物循環，確實對產品碳足跡的碳減是有幫助的，可提供石化中下游公司更多的減碳誘因。
3. **以大帶小應提供碳權作為誘因：**石化業者的以大帶小政策需要的是技術上的交流，讓大公司可以去帶領供應鏈底下的廠商，目前產發署提供的補助方案業者缺乏意願。如果大公司可藉由協助供應鏈廠商減碳而取得碳權，可能是業者比較有興趣的以大帶小方式，需要產發署與氣變署共同研議相關方案。
4. **石化業可透過 CCS 與進行異業合作：**以範疇二排放為主的產業(半導體、光電等)，需要更多的減碳技術來降低出口產品的含碳量，與範疇一產業合作是他們有興趣的方式。半導體業者需要大量電力來生產，目前僅依賴購買綠電，而透過與石化業者合作以 CCS 減少碳排，可透過投資取得碳權，其成本未必比綠電高，對半導體業者具有誘因。如果可以透過法規建立 CCS 獲得碳權的法規，可促進產業間的合作，為石化業創造 CCS 減碳的利基。
5. **二氧化碳再利用(CCU)的碳權：**國內如東聯、長春等業者已有將 CO₂ 再利用的實績，除了補貼之外，如果可以獲得碳權，可以促進更多以 CO₂ 為原料的產品，例如：電動車的關鍵化學品、水泥與清潔劑的添加劑等。而業者也反應，如果減碳可透過碳權取得，有助於在公司財報列舉價值和費用，才能在公司的營運上看出減碳的價值。

(四) 生質與廢棄物燃料：

1. **生質燃料：**因為減碳需求，全球的生質燃料大家都在搶，如果要取得生質燃料，必須直接跟產地的農民合作做成生質燃料，才有辦法滿足未來的供給，這些都是很長期的工作，不確定性很高，很難快速將供應體系建立起來，發展速度不會太快。如果政府鼓勵業者採用生質燃料，建議協助業者取得國外生質料源。

2. **固體再生燃料(SRF)**：SRF 可替代煤碳作為低碳燃料，但 SRF 近來遭受民眾與環團抗議，政府應對此表達立場，若是鼓勵 SRF 作為低碳燃料，應協助建立制度與溝通管道，否則石化業者也會擔心投資 SRF 汽電共生廠，受到外部因素干擾，導致無法商轉，造成血本無歸。

(五) **減碳路徑的揭露**：目前業者能選擇的減碳路徑有限，而且都非常昂貴，需要依賴新的技術問世才能夠有明確的路徑，這是石化業者的難處。因此在減碳技術成熟度尚不明確的情況，業者的減碳路徑仍有許多不確定性。

三、技術發展方向

從業者提供的資訊可知，大家都已認知淨零碳排是一條必走的發展道路，而業者擔憂受到減碳要求而降低產品競爭力，特別是國際上普遍透過補貼方式來發展減碳技術。石化產業在 2021 年排放約 6,500 萬噸二氧化碳，佔了全國碳排約 22%，未來如何在結構、能源、產品、技術等調整下因應淨零碳排的要求，是需及早加以規劃並付諸行動，如能獲得政府的政策配合才能事半功倍。本專題報告之技術研討結論歸納如下：

(一) AI 製程節能

石化業的短期減碳應從能源供應和使用的角度來改善，大數據分析和人工智慧在智慧製造中將會發揮重要作用。由於目前大多數化工廠都有實施此類解決方案的基礎數位化設施，因此這些解決方案預計會有積極的經濟報酬、減碳效果和相對較短的專案時間。目前已有業者投入 AI 製程節能，利用廠內既有歷史數據，透過大數據分析來識別能源效率低下的主要來源，並且使用人工智慧控制減少能源消耗，可以減少 10-20% 的排碳量，在不需投資額外設備的情況下，AI 製程節能是 2025 年之前石化業減碳的重點。

如果將 2050 淨零碳排做為長期目標，必須逐步引入更多的低碳電力，並從以蒸汽為基礎的公用系統轉變為電氣化公用系統，第四章從技術角度說明了此一轉型的熱力學理論以及所需的技術儲備，並初步分析其經濟可行性；此一解決路徑的主要優勢是可以隨綠電技術發展靈活推展。除了期待台電可以持續降低電力排放係數，石化業的特色是能源自給自足，綠色能源使用是石化業應持續投入的方向。

(二) 製程節能設備

第五章提供熱泵、微反應器及練染同步化技術之節能改善方法，雖然這些技術已發展出來，但需重新調整製程或更新製程設備，將會妨礙日常生產排程，不見得受到業者的歡迎。但是在減碳的壓力越來越大時，業者可能會考慮使用更為

節能的設備。製程節能設備需與製程相結合，例如：熱泵應用於蒸餾系統，微反應器應用於硝化反應、氧化反應、有機硼化物等放熱反應，練染同步化技術應用於紡織物染色。

(三) 再生水

石化產業除了消耗大量的能源之外，也需要使用水資源來達有效生產之目的，為了讓石化業廢水達到合格的排放標準，或是在水資源短缺的情況下，需要減少再生水回收所需的能源，水處理/再生技術亦是石化業減碳的一環。目前國內水再生法規要求開發單位使用一定以上水量，強制使用 50% 以上再生水，再生水技術應盡量減少能耗。目前國內如南科、楠梓、臨海等工業園區皆已設置再生水廠，並使用較為節能的 EDR 技術，詳見第六章。石化業廢水常為高鹽、含硫等條件，對於水處理/再生水技術備受考驗，要得到較好的再生水質，需要的能耗也越高，因此目前石化業的導入方式為先進行模廠試驗，找到符合業者需求的水質(排放水或再生水)，再來是透過統包方式建置實廠，目前已有相關石化業者透過這種方式建立自己的再生水廠。此外，廢水中含有有機物質，可利用厭氧消化產生沼氣，一方面可以做為生質燃料使用，另一方面可以減少處理有機廢水所需的藥品與能耗，對於減碳有一定的成效。

(四) 替代原料

國內石化產業供應民生工業、電子、汽車等產業的必要原物料鏈，產業鏈總產值近 4 兆元，產品外銷比例高達 50%，因此 2050 淨零排放目標以及減少對石化料源依賴的國際發展趨勢對於石化業者衝擊甚大。目前國內業者受到品牌方的壓力，已陸續導入替代原料取代化石原料。替代原料可分為廢塑膠回收與生質原料，用來替代石油煉製生產的原料，降低產品碳足跡。本研究報告第七、八章探討塑膠循環與生質基替代原料，重點節錄如下。

1. 塑膠循環

目前塑膠物理回收技術已臻成熟，對於回收 PET、聚酯纖維等有不錯的效果，但對於 PC、ABS、PS 或混合塑膠需要依靠化學回收法來處理。化學回收法透過高溫、醇解、酸解等方式將塑膠裂解回收，期望獲得高純度、低色度之聚合級單體才能夠做為生產原料使用。目前工研院開發各種回收技術，例如含染料聚酯織物的醇解及純化製程技術、PC 及 PC/ABS 廢料解聚與純化技術、低溫 PS 熱裂解與蒸餾分離技術。

民國 110 年我國約產製 1,394 萬噸的塑膠製品與酯粒，外銷 1,090 萬噸，國內使用約 304 萬噸²⁵⁸。若僅以台灣回收的廢棄塑膠作為料源，將無法滿足

²⁵⁸ 環保署民國 110 年資源循環再利用年報

產業所需的循環物料。另除了以國內收集的塑膠進行裂解轉化生產裂解油外，未來仍需由國外進口塑膠裂解油以取代原油進口，因此建立塑膠裂解油的純化及升級處理製程技術，再導入國內煉化廠將符合進料規格之循環輕油進入輕油裂解產線，生產乙烯、丙烯、丁二烯等石化基本原料，可帶動國內相關低碳化學品產業鏈整體發展。

2. 生質基替代原料

在生質基替代料源方面，為了不與糧食作物競爭，目前世界趨勢是利用非糧料源的木質纖維素如稻桿、蔗渣等作為原料，轉化成所需的生質原料為主，目前尚無規模較大的產品，產業仍在發展中。台灣的原物料受限，因此大多進口生質塑膠粒再進行改質與加工。在生物基化學品及材料的發展，中短期以鏈結東南亞生質料源豐富的國家，進口原物料再轉製為高值化學品及材料為較具可行的發展方向，長期則需投入二代木質纖維素的轉化技術，第二代生質料源轉化的化學品或材料甚至有機會達到負碳的可能。生質基原料雖然豐富，但其變異性大且結構更多元，不管是利用觸媒或是微生物轉化，及後續的純化工序都可能較現有的石化製程更加複雜甚至耗能，也須計入採收及運輸等碳排，整體的生命週期碳排放能否比石化產品更低是商用關鍵。

(五) 二氧化碳捕獲、再利用與封存 (CO₂ Capture, Utilization and Storage, CCUS)

就 CCSU 相關技術來看，石化產業使用的技術，包括吸收、吸附、薄膜、觸媒、反應、分離、純化、輸送等，均可加以應用，只是處理的對象與以石油為原料的有所不同，因此必須加以調整以開發出適切之 CCUS 技術。

1. 二氧化碳捕獲(CO₂ Capture)

CO₂ 捕獲效率與成本會因處理氣體中 CO₂ 的濃度不同而有所不同，全球目前絕大部分之 CO₂ 捕獲工廠，其 CO₂ 來源主要來自天然氣田、合成氣或產氫廠，因此 CO₂ 濃度很高，甚至超過 95%。但燃煤電廠之 CO₂ 含量只有 10~15%，因此捕獲成本會更高，也因此 2020 年時全球自燃煤電廠捕獲 CO₂ 的量只不過 240 萬噸；而台灣現又欲將燃煤電廠改為燃氣電廠，雖然排放氣中 CO₂ 只有 3~5%，但更難在低成本下捕獲 CO₂，必須開發出具更高效率、更低能耗及更低成本之捕獲技術方能實際應用在不同 CO₂ 排放源中。

化學吸收法為目前國際上用於電廠，作為大規模捕獲的主要技術，其成本介於 60-120 美元/噸之間，需要依賴政府補貼來運行，由於台灣沒有油田不能如國外透過 EOR 來增加產油量，因此如何再利用捕獲之 CO₂ 使其增加經濟效益，是需加以考量的。對於台灣業者來說，土地問題也是能否推動的關鍵之一，台灣工業區土地稀有，當初在規劃電廠、工廠時並未預留可供捕獲設施使

用的土地，依照 Petra Nova 的案例，一座具經濟規模，年捕獲百萬噸以上的捕獲廠占地約需 5,000 坪，對於石化業者來說不易找到合適的地點。因此台灣應發展自身技術，透過使用超重力旋轉填充床(RPB)，以堆疊方式以節省土地需求，過去能源國家型計畫已有模廠試驗相關成果，可以提供參考。

吸附法及薄膜法大多為模廠等級規模，處理電廠等級的排放量仍需依賴化學吸收法。不過在小規模捕獲，如年捕獲 10 萬噸(300 噸/日)以下，或是直接空氣捕獲(Direct Air Capture, DAC)，或許吸附法及薄膜法有其利基。石化業中，除了中油、台塑、長春等大型廠商之外，許多業者排放量在 50 萬，甚至 10 萬噸以下，以目前的技術應有機會作為中小型業者的減碳方式，再搭配 CO₂ 再利用，創造資源循環機制。

2. 藍氫技術

低碳氫氣可提供低碳燃料，或做為 CO₂ 再利用的原料，在再生能源電解水產氫成本有效降低之前，天然氣重組(SMR)產氫仍是較佳的選擇。將 SMR 結合 CCS 可以將重組過程產生的 CO₂ 封存，使氫氣從灰氫變成藍氫，符合減碳的需求。第十二章探討結合甲烷蒸氣重組與乾式重組的製氫技術，其優點是能夠增加製程可行性、增加產氫量及減少 CO₂ 排放，相對於單一的甲烷蒸氣重組反應，雙重組反應更符合永續化工製程的理念。技術發展方向包括：(1) 化工單元操作程序設計優化，改善冷凝、氣體分離及回流設計，降低能源消耗；(2) 開發觸媒，使反應溫度降低，減少能源使用及碳排放。

3. 二氧化碳再利用(CO₂ Utilization)

目前國內石化業者已採用 CO₂ 為原料在不需氫氣的情況下生產碳酸乙烯酯、聚碳酸酯及醋酸等化學品，每年約可消耗 20 萬噸 CO₂，符合循環經濟之概念。此外，直接利用如製作碳酸飲料，以及供應工業用 CO₂ 都是目前的應用方式。如果要進一步將 CO₂ 大量使用，則需發展 CO₂ 做為碳源與氫氣反應生產如甲醇、二甲醚、碳酸二甲酯、甲酸、甲烷等需求量大的產品，以 CO₂ 替代石油生產化學品及燃料。

本研究報告第十五章提出多種 CO₂ 再利用的產品與技術，其步驟為 CO₂ 轉化為 CO 之逆水煤氣反應(RWGS)反應，CO 與 H₂(合成氣)透過多個步驟轉化為各種化學品或燃料，目前的 TRL 為 5 至 7 之間，距離成熟可商用的 TRL 9 仍有一段差距。發展 CO₂ 再利用的困難在於 CO₂ 是一相當穩定的化合物，要將 CO₂ 轉化為化學品，需要消耗大量能量。發展 CO₂ 再利用的關鍵在於：(1) 找出適切之反應途徑及觸媒；(2) 取得更應穩定及成本低廉的低碳氫氣(綠氫或藍氫)。石化產業將 CO₂ 替代石油作為原料將是一段漫長的過程，持續投入

技術開發是目前的發展方向，也需要外在因素的配合才能夠成功，如綠電供應成本、CO₂捕獲成本、政策補貼、碳權取得與交易等。

4. 二氧化碳封存(CO₂ Storage)

二氧化碳封存與採油技術類似屬於成熟技術，而封存地點在過去能源國家型計畫的調查結果，可以大致了解台灣西部沿海的鹽水層潛力封存點，可供政府或業者探勘與封存 CO₂。從國際上的案例可知，CCUS 雖是由石化業主導的減碳方式，但結合發電、鋼鐵、氣體等產業逐漸成為發展趨勢，因此發展 CCUS hub 的營運模式，透過管線連結工業區各家業者，將捕獲後的 CO₂ 運到再利用的工廠，或是將其封存。各家公司合資設立 CCUS hub 的營運公司，加上政府的法規及政策補貼，使 CCUS 減碳成為新的行業。

第十三章提出台灣 CCUS Hub 與低碳燃料(藍氫)供應構想。高雄地區具備完整石化產業、鋼鐵業與電力業等，並且高雄洲際第三期填海造陸土地可做為接收/卸收儲槽與營運碼頭，具備營運 CCUS hub 的條件。目前推動仍在構想階段，需要逐步進行(1)產業訪談：了解區域二氧化碳的捕獲量、再利用量、封存量與低碳燃料的需求量；(2)二氧化碳捕獲技術選擇與規範制定，制定用於碳再利用與碳封存的二氧化碳濃度與雜質含量規範；(3)陸上碳運輸與氫氣管線運輸建置評估：內陸的碳運輸管線、洲際三期的二氧化碳儲槽、經由船舶或海底管線輸送二氧化碳至碳封存場址封存、洲際三期氫氣儲槽輸送至各工廠的氫氣輸送管線；(4)液化天然氣接收站建置規劃：因應區域建置蒸汽甲烷重組(SMR)設備生產藍氫之天然氣供應；(5)SMR 與碳捕獲工廠建置：規劃於洲際三期建置 SMR 與碳捕獲工廠生產藍氫。

四、建議

淨零成本非常高，有業者提到，如果要達到淨零，需投資與建廠成本相同的金額，而且這些成本在當前的環境下是沒辦法獲利的，在減碳技術路徑還不明確的情況下，石化業採取穩步推動的策略，兼顧企業生存與減碳要求的平衡。氣候變遷因應法已明確訂定 2050 淨零排放，國發會也在 12 項戰略訂出國家減碳路徑，因此台灣企業需要更努力投入減碳工作。石化業者的排碳結構主要來自使用化石燃料的鍋爐與汽電共生廠，無法單純依賴購買綠電來達成減碳任務，還需要透過智慧節能、生質燃料、CCUS、儲能等方式來達成淨零目標，石化業減碳較其他產業減碳的難度更高，需要政府提供更多的資源來協助。目前在政策推動方面，仍有許多不確定性，需要政府提供符合減碳技術發展的環境，確保業者在減碳的過

程仍可保有競爭力，以下彙整業者對於目前減碳所遭遇的問題與擔憂²⁵⁹，研提以下建議：

(一) 碳費收取與使用

1. 政府碳費計算的方式應與業者及環團充分溝通，尤其是台灣與國外具有計算方法的差異，以及減碳各項制度與政策也有差異，不可完全比照國外做法。
2. 碳費收取在於促進排碳業者積極投入減碳，因此在碳費的使用上，應確立合理的比例用於協助業者減碳，投資包括研發補助、投資補助、公用設備補助(例如 CCS 的輸送管線、儲槽、港區設施等)。

(二) 政府需建立碳權制度，使業者具備發展減碳技術的利基：

1. 應儘速建立碳權認定辦法與抵換機制，讓業者有投資減碳計畫的誘因。業者對於 CO₂ 封存、替代原料循環使用、CO₂ 再利用等皆有意願投入，不過尚無明確的認定方法與抵換機制，在規則尚未明確的情況下，業者對於此態度較為保留。
2. 產業發展署規劃之以大帶小的方向應朝向碳權取得與抵換的方向來規劃，大企業協助中小企業減碳如能取得碳權，將大幅增加企業投入的吸引力。
3. 石化業具有範疇一實質減碳的能力，應研究跨產業及供應鏈垂直整合減碳模式協助供應鏈減碳。石化業者可透過發展 CCSU、資源循環等方式，提供低碳原料有助於下游供應鏈減碳；或與範疇二之業者(半導體、光電等)合作投資減碳技術，透過碳權共享的方式，使範疇一為主的石化業之減碳成果可以與其他產業共享，同時也減少石化業的成本負擔。

(三) 發展負碳技術的關鍵：

1. **補貼政策**：目前 CCS、CCU、DAC 等技術的減碳成本太高，國外政府透過提供高額補貼來實施，例如美國抗通膨法案提供 CCS 每噸 85 美元、CCU 每噸 130 美元的補貼。政府需提供有效的**補貼方案**，否則負碳技術在台灣難以推動。
2. **加快環評速度**：政府訂定負碳技術減碳的目標在 2030 年是 176 萬到 460 萬公噸之間，2050 年要達到 4020 萬公噸，依照現在環評的速度將會曠日費時，2030 年要達到 100 萬噸非常困難。政府應提出加快負碳技術環

²⁵⁹ 本研究於 2023 年 11 月 9 日於中技社舉辦產業座談會，收集石化公會及業者之相關意見。

評審查速度的方式。

3. **政府在 CCSU 的角色：**政府需積極推動以下工作，包括成本補貼、碳權取得、民眾溝通、封存地點開發與監測等。目前正在規劃 CCSU 的業者皆表明沒有政府在法規政策上的支持，CCSU 難以推動，政府的角色需更加凸顯。
4. **CO₂ 捕獲土地需求：**一個商業化年捕獲 100 萬公噸的捕獲設施需要約 5,000 坪的土地，對於台灣的業者是很大的難題，政府在土地方面需要去協助業界。建議企業與研究機構要發展技術，設法將製程設備往上推疊，減少土地需求，才有機會降低成本。

(四) 替代原料

1. 塑膠循環原料的需求大，除了化學回收技術需持續研發之外，料源不足是主要發展問題，政府可考量讓業者進口廢塑膠或裂解油等原料，減少對上游化學品的需求，也可有效降低塑膠產品的碳足跡。
2. 生質基替代原料能夠提供大量替代原料，目前以非糧食作物為國際發展主軸。台灣缺乏大面積種植相關產品導致發展受限，應持續鼓勵研究單位發展纖維素水解技術，讓農業廢棄物能夠充分被利用；或是將技術輸出國外，利用國外的充足產量，進行加工處理後再送回台灣使用。

國家圖書館出版品預行編目(CIP)資料

石化業邁向 2050 淨零碳排技術發展與政策探討/談駿嵩, 陳建緯, 汪上曉, 李瑞元, 張王冠, 劉柏逸, 陳建明, 蘇一哲, 黃淑娟, 游承修, 黃至弘, 張名惠, 童國倫, 蔡德豪, 盧敏彥, 陳大麟, 謝秉志, 黃乙倫, 王志文, 葉庭瑜, 劉致中, 張志強, 邱炳嶽作. -- 臺北市 : 財團法人中技社, 民 112.12

236 面 ; 20*29.7 公分. -- (專題報告 ; 2023-13)

ISBN 978-626-98214-4-0(平裝)

1. CST: 石油化學業 2. CST: 永續發展 3. CST: 碳排放

486.5

112022758

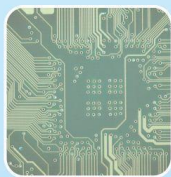
版權聲明©財團法人中技社

本手冊用於教育或非營利目的時，得在未取得原版權所有人允許下複製全部或部分內容，唯須註明出處。財團法人中技社感謝您提供給我們任何以本手冊做為資料來源出版的相關出版品。

未取得財團法人中技社書面同意，禁止使用或轉售本手冊於其他商業用途。

免責聲明

本出版品所提及的實體名稱和資料之表示，並不代表財團法人中技社的觀點：包括不同國家、領土、城市或區域的法律地位及其地位的權威性，以及國與國之間邊界



財團
法人 **中技社**

CTCI FOUNDATION

106 台北市敦化南路2段97號8樓

Tel : 02-2704-9805~7 Fax : 02-2705-5044

<http://www.ctci.org.tw>