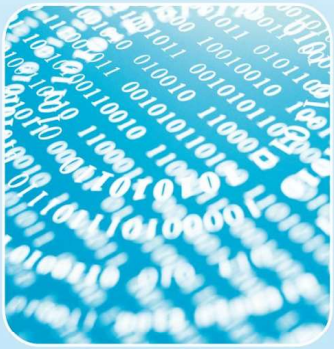
專題報告

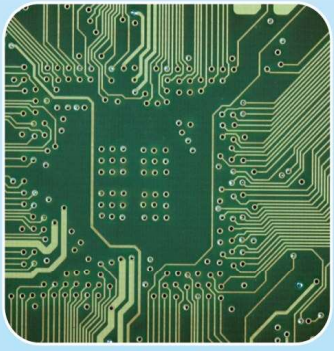
2020–03

財團法人 中技社

CTCI FOUNDATION

環境友善產品與石化產業發展策略





中華民國 109 年 12 月

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建，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「石化產業發展環境友善產品之挑戰及策略」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林福伸理事長、台灣綜合研究院林茂文總督導、陳建緯所長、黃琦雯副研究員、黃嘉蕙副研究員，台灣化學產業協會曾繁銘秘書長，工研院產科國際所范振誠經理、陳明君研究員、張怡雯副研究員，工研院材化所溫俊祥副組長、黃淑娟副組長、張珮菁經理、張光偉技術總監、汪進忠副組長，台大化工系陳誠亮教授、王聰偉、中技社能產中心許湘琴組長、邱炳嶔研究員。

發 行 人：潘文炎
主　　編：陳綠蔚、林福伸
作　　者：林茂文、陳建緯、黃琦雯、黃嘉蕙、曾繁銘、范振誠、陳明君、張怡雯、溫俊祥、黃淑娟、張珮菁、張光偉、汪進忠、陳誠亮、王聰偉、邱炳嶔、許湘琴(依章節順序)
執行編輯：王釿鋙、邱炳嶔、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 109 年 12 月
ISBN：978-986-98659-9-9

序

海洋為世界上最大的生態系統，也扮演著調節全球氣候系統的重要角色，近年來，海洋塑膠污染已造成海洋生態的改變，影響地球的生態甚鉅，人類已意識到需要盡快採取行動才能避免生態的浩劫。聯合國訂定永續發展的 17 項目標(Sustainable Development Goals 17; SDGs 17) ，範疇涵蓋全球當前最急迫的經濟、社會與環境議題，減少塑膠廢棄物將同時對氣候行動(SDGs 13)、海洋生態(SDGs 14)、陸地生態(SDGs 15)、淨水與衛生(SDGs 6)之目標帶來綜效。

國際上我們可以看到聯合國、歐盟都提出塑膠減量及回收目標；民間公司無論是品牌商或生產商也都投入大量經費，目標是將塑膠產品以永續循環使用取代一次性使用，減少對原油的依賴及降低對環境的負擔。我們也可以注意到，投入這些努力的廠商有許多國際大廠，尤其是石化業大廠幾乎都參與了，包括 BASF、Dow Chemical、Exxon Mobil 等，這些大廠的投入表示未來循環經濟的發展模式將逐漸改變傳統石化業的思考運作模式。

台灣過去在垃圾分類與資源回收有不錯的成果，對於一次性塑膠製品也有循序漸進的減量措施，從 2002 年到 2019 年分別實施減少購物用塑膠袋、管制使用免洗餐具、外帶飲料杯減量與回收、管制使用購物用塑膠袋、限制一次性塑膠吸管使用等措施。行政院環保署的目標是將廢棄物資源化妥善運用，替代自然資源開採，改變「開採、製造、使用、丟棄」的線性經濟模式，達成「資源可持續回復，循環再生」的循環經濟模式。

台灣石化業近年遭受到內外壓力，主要來自於中國大陸及東南亞採取煉化一體化石化生產基地策略，並採取原油直接煉製石化產品之模式，擴大石化產品之比例，成本也大幅降低。台灣石化業在環保法規的嚴格限制下，要能夠新建或更新現有老舊設備不易，加上出口關稅阻礙，若對於台灣石化業的未來發展沒有明確的定位，競爭力將持續下滑，連帶影響龐大的下游民生基礎產業的發展。有鑒於此，政府理應正視石化產業的發展規劃。

綜合國際塑膠循環經濟發展趨勢及石化業面臨的處境，本社邀請多位專家共同研究「石化產業發展環境友善產品之挑戰及策略」議題，彙整後出版本專題報告，希望藉由國內外政策、法規及市場情報的收集與分析，讓讀者得以獲知關於國際減塑趨勢與環境友善產品最新的發展現況；此外，本報告也介紹當前環境友善替代原物料與技術，以及塑料回收技術與案例，並對於台灣發展相關技術提出見解；最後，提出我國石化產業結合環境友善的策略與建議，期望能夠作為政府相關單位對於石化產業發展的決策參考，也提供石化業者塑膠循環經濟的趨勢與發展契機。

本專題報告得以順利完成，要特別感謝石化公會林福伸理事長及本社陳綠蔚執行長共同召集本議題之研究，以及協助撰稿的單位與專家，包含台灣綜合研究院林茂文總督導、陳建緯所長、黃琦雯副研究員、黃嘉蕙副研究員協助編撰第一章與第五章；台灣化學產業協會曾繁銘秘書長，工研院產科國際所范振誠經理、陳明君研究員、張怡雯副研究員協助編撰第二章；台灣大學化工系陳誠亮教授、王聰偉，工研院材化所溫俊祥副組長、黃淑娟副組長、張珮菁經理、張光偉技術總監、汪進忠副組長協助編撰第三章；中技社能產中心許湘琴組長、邱炳崴研究員負責編撰第四章。議題執行期間，特別感謝接受訪談的公司與專家，以及撥冗參與會議之專業學養及經驗俱豐的專家學者，讓一切順利完成，在此一併致上萬分謝意。

財團法人中技社 董事長
潘文炎
2020 年 12 月

目錄

序 I

目錄 III

表目錄 V

圖目錄 VI

執行摘要 1

第一章　國內外石化產業環境友善發展政策 7

第一節 國際資源循環政策方向 8

第二節 主要經濟體塑膠減量政策 19

第三節 台灣資源循環與塑膠減量措施 31

第四節 小結 41

第二章　環境友善替代產品發展趨勢與市場機會 47

第一節　全球環境友善產品發展趨勢與機會 47

第二節　環境友善替代產品市場 50

第三節　臺灣廠商的機會與挑戰 57

第四節　小結 59

第三章　環境友善替代原物料與技術 63

第一節　生物可分解塑膠材料發展與應用 63

第二節　環境友善生物基化學品技術發展之趨勢 73

第三節　二氧化碳捕獲技術 85

第四節　二氧化碳再利用 99

第五節　小結 115

第四章　塑料回收循環再利用技術現況與發展方向 121

第一節 塑料回收技術發展趨勢 121

第二節 塑料回收技術介紹 123

第三節 國際公司化學回收案例 129

第四節 國內公司回收案例 136

第五節 小結 143

第五章　我國石化產業發展結合環境友善之策略與作法 147

第一節　我國石化產業發展現況與展望 147

第二節　我國石化產業推動環境友善發展之可行作法 153

第三節　我國石化產業推動環境友善發展策略 158
第六章　結論與建議 161
附錄 165

表目錄

表 1- 1 G20 海洋廢棄物行動計畫優先關注領域及措施 9
表 1- 2 歐盟新循環經濟行動方案 14
表 1- 3 歐盟循環經濟中的塑膠戰略推動重點 15
表 1- 4「一次性塑膠產品指令」各類一次性塑膠產品管制措施 16
表 1- 5 廢棄物從量徵費制度之廢棄物收集分類及成本負擔者 23
表 1- 6 韓國政府各項廢棄物收費標準 24
表 1- 7 產品生命週期中廢棄物處置之各方責任 25
表 1- 8 禁止、限制使用塑膠製品及其內容 29
表 1- 9 我國循環經濟發展重點策略 33
表 1- 10 一次用飲料杯管制措施 37
表 1- 11 台灣海洋廢棄物治理行動方案(第二版) 39
表 1- 12 網購包裝減量目標 41
表 2- 1 目前市場上可見的生質塑膠種類 51
表 2- 2 國際大廠近年發展戰略 55
表 2- 3 我國生質塑膠廠商發展狀況及其主要產品 58
表 3- 1 主要生物可分解塑膠供應情形與特性比較 65
表 3- 2 生物可分解塑膠物性規格 66
表 3- 3 生物可分解塑膠認證標章資訊 70
表 3- 4 可工業堆肥認證標章資訊 70
表 3- 5 可家庭堆肥認證標章資訊 71
表 3- 6 50 個具潛力之生物合成之環境友善產品應用分類 77
表 3- 7 國內廠商以生物代謝工程技術生產環境友善產品現況 84
表 3- 8 國際上商轉中的大型碳捕獲與封存設施 88
表 3- 9 美國 45Q 碳稅抵減摘要 89
表 3- 10 發展 CO2 捕獲技術主要的國家與公司機構 92
表 3- 11 國際領導公司在 CO2 捕獲技術專利佈局狀況 92
表 3- 12 國際上 CO2 捕獲試驗工廠計畫 94
表 3- 13 應用於 CO2 捕獲的新型溶劑 96
表 3- 14 台電公司之碳捕獲驗證系統所捕獲之 CO2 規格 98
表 3- 15 二氧化碳產品製程相關資訊 100
表 3- 16 潛力產品在 3E 原則中所佔據的優勢 103

圖目錄

圖 1-1　2015 年歐洲塑膠需求比例 12
圖 1-2 英國廢棄物處理原則 19
圖 1-3 1988～2016 年塑膠廢棄物主要進口國家累計量 26
圖 1-4 2018 年主要國家塑膠廢棄物進出口流向 28
圖 1-5 2017～2018 年全球塑膠廢棄物出口至中國大陸變化 28
圖 1-6 我國資源循環相關法規及立法架構 32
圖 1-7 我國限塑相關政策推動進程 34
圖 1-8 我國 2005～2019 年飲料店營業額 37
圖 1-9 塑膠微粒對人體之影響示意圖 39
圖 1-10 台灣限用一次性塑膠製品時程表 40
圖 2-1 2015 年全球塑膠在工業應用狀況分佈 48
圖 2-2 2015 年全球各應用領域所產生之廢棄塑膠量 48
圖 2-3 全球生質塑膠產量 52
圖 2-4 2020 & 2025 全球生質塑膠應用成長狀況 52
圖 2-5 2020 & 2025 已商品化生物可降解塑膠之市場規模 53
圖 2-6 循環經濟中的塑膠化學創新 54
圖 3-1 生物可分解塑膠市場規模預測 64
圖 3-2 生物可分解塑膠分類 64
圖 3-3 不同生物可分解塑膠之材料類別產量比例[2] 65
圖 3-4 不同聚羥基烷酸酯的分子結構 67
圖 3-5 生物可分解與可堆肥在分解時間與環境需求比較圖 69
圖 3-6 循環經濟生物循環與生物精煉 75
圖 3-7 環境友善生物基化學品種類 75
圖 3-8 工研院開發生質產品 81
圖 3-9 歐盟展望 2020 農業廢棄物全利用計畫 81
圖 3-10 綠色能源製造廠商之總部於全球分布圖 82
圖 3-11 生物合成化學品製造廠商之總部於全球分布圖 82
圖 3-12 CO_2 捕獲技術分類 86
圖 3-13 CO_2 捕獲美國專利趨勢 90
圖 3-14 CO_2 捕獲專利技術個別發展趨勢 90
圖 3-15 CO_2 捕獲相關專利公告數趨勢 91
圖 3-16 工研院協助台電公司建立之二氧化碳捕獲系統流程圖 98
圖 3-17 二氧化碳產品技術成熟度評估 101
圖 3-18 二氧化碳產品的附加價值與全球市場需求量現況 102
圖 3-19 應用蒸汽暨二氧化碳重組技術的傳統甲醇製程 106
圖 3-20 完全以二氧化碳為原料進行氫化反應生產甲醇的製程 107

圖 3- 21 二氧化碳氫化生產甲醇應用於甲醇燃料電池發電的質能平衡系統..... 108
圖 3- 22 二氧化碳氫化生產甲醇應用於甲醇汽油的質能平衡系統.....110
圖 3- 23 二氧化碳氫化生產甲醇再透過甲醇羰基化製造醋酸之質能平衡.....110
圖 3- 24 電轉氣實驗工廠.....112
圖 3- 25 完全以二氧化碳為原料進行氫化反應生產甲烷的製程.....113
圖 3- 26 二氧化碳甲烷化並用於複循環燃氣發電機組發電的質能平衡系統.....114
圖 4- 1 渦旋式熱裂解反應系統示意圖 125
圖 4- 2 流體化床觸媒裂解反應系統 126
圖 4- 3 Taxaco 氣化程序示意圖 127
圖 4- 4 流體化床 MTG 程序示意圖 127
圖 5- 1 我國石化產業範疇圖 147
圖 5- 2 歷年我國石化業附加價值率變化趨勢 149
圖 5- 3 我國石化品出口情形 149
圖 5- 4 全球供應鏈及台灣因應發展方式 152
圖 5- 5 德國巴斯夫能源整合流程 154
圖 5- 6 循環經濟推動方案四大策略 156

執行摘要

一、問題及目標

塑膠是二十世紀重要的發明之一，由於具有優越與耐用的特性，加上價格便宜，取代玻璃、金屬、陶瓷等材料，廣泛應用在日常生活中，為人類生活帶來極大的便利性，但近年塑膠所衍生出的環境與健康問題日漸浮現，社會大眾開始對塑膠的產出、應用方式，以及廢棄處置有了重新的思考。為滿足經濟發展與環境保護的需求，塑膠回收再利用技術、替代原料，以及對環境友善的塑膠產品，在政府相關政策與民間行動倡議的驅動下正蓬勃發展，且是國際趨勢所趨，將為石化業者帶來挑戰，同時也帶來新的商機。

台灣石化產業擁有完整產業鏈，是創造台灣經濟奇蹟的重要基礎，如何讓台灣的石化產業對此趨勢有進一步之了解，及早做因應，故本社智庫規劃此議題之研討，同時希望能提出國內石化產業因應此趨勢之可行作法與策略，供政府相關政策制定與規劃施行，以及國內石化業界未來營運之參考。

二、研究範圍及內容

本專題報告主要針對國內外石化產業環境友善發展政策、法規及市場情報的收集與分析，並介紹環境友善替代原物料與技術，以及塑料回收循環再利用技術與發展方向，綜合各面向的探討之後，提出對於我國石化產業結合環境友善的策略與建議。

議題執行期間，為多方匯集產業意見，亦實地訪問國內多家從事塑料回收的業者，了解國內業者對於客戶需求、技術發展現況、市場未來展望及國內外投資與法規環境之看法與建議，並舉辦議題相關座談會，希望能彙集國內相關業者推展石化友善產品的關鍵點，據此提出相關可行策略與建議。

三、研究結論

隨著環保意識抬頭、環境及生態問題日益受到重視，全球性會議已訂定於 2030 年大幅度減少一次性使用、2050 年前使海洋垃圾零排放之限塑目標，故主要經濟體依據各國環境及經濟條件擬定合適之具體政策方向，如歐盟進一步設定各階段之具體減塑目標，禁止使用已有替代品之塑膠產品，並要求各會員國訂定相關措施以達成目標，減塑的國際態勢已然形成。而我國則是自 2002 年即開始陸續限制部分塑膠產品之使用，並於 2020 開始採取三階段限塑目標，預計至 2030 年全面禁用。

在上述政策下，環境友善材料的市場前景看好，據市場報告顯示，2020 年全球生質塑膠和生質聚合物的市場規模估計為 332 萬噸，預計到 2025 年將持續成長，達到 728 萬噸，複合年增長率為 17.0%。除了生質材料的發展具前景之外，回收再利用的材料更成為市場近年關注的焦點。

我國塑膠產業在生分解材料的產品發展上，因擁有優勢的塑膠改質、配方與加工應用等成熟技術，已開發出多樣化的應用產品，且大多以外銷為主，但目前所使用的生分解材料如 PLA、PBAT、PBS 等原物料仍仰賴進口。而在生物基化學品技術發展上，台灣儘管已有許多商業上成功的生物合成化學品，以及越來越多的生質化學產品滲透到不同的市場，但比起石化產品，生物合成化學品生產仍處於拓展經濟規模的初期，挑戰仍然存在。此外，在二氧化碳捕獲與再利用技術的推動與落實方面，台灣的碳捕獲示範場域也有一些陸續開始建設的跡象，但相關技術在台灣的發展仍面臨著許多挑戰，特別是產業界的投入意願與世界各國積極投入的強度相差甚遠。

在塑料回收循環再利用部分，因附加價值逐漸提升，促使更多廠商投入加快回收相關技術的開發，尤其是機械回收技術受限，化學回收技術蓬勃發展中，其中化學降解法多用於單一材質塑料回收，能源需求較低；而熱解法可將塑膠回到原料階段，可視為回收再利用的最終手段。雖技術成熟的化學回收技術眾多，但沒有既定的成功商用模式，仍需尋求上下游整合的商業模式。而國內在化學回收這部分有幾個不錯的成功案例，但仍有待克服部分環保法規限制，才能有突破性之發展。

我國石化產業推動環境友善發展上，可藉由行政院「循環經濟推動方案」四大核心策略作為發展方向，讓石化產業結合我國政策推動方向，因應作法有四項：(1)參與循環技術暨材料創新研發；(2)進駐大林蒲新材料循環示範園區；(3)進行能資源整合與產業共生；(4)生產符合綠色消費模式之產品，提升產品之附加價值與競爭力。發展策略可分為三點：(1)應加速產品應用研發和商業化，以搶佔環境友善產品的市場；(2)上下游石化業者應合作開發塑膠回收技術，並取得穩定的回收料源；(3)石化業加速汰舊換新，持續朝綠色環保之減碳模式發展。

四、改善對策及建言

綜合各個面向的分析，本專題報告提出下列建議供政府有關單位與相關業界參考。

(一) 塑膠廢棄物料源供應穩定

企業投資塑膠廢棄物循環利用廠，需確保料源穩定，投資建廠計劃才可行。來源除了自身工廠產生之廢料及購買來自回收商的廢塑膠，亦可評估開放收受同業之塑膠廢棄物。目前政府對於塑膠廢棄物跨廠移動有嚴格限制，建議主管機關研議塑膠廢棄物之跨廠轉移之較有彈性之作法，讓有意發展塑膠循環再生之廠商，能夠增加廢塑膠來源。

(二) 修改與制訂合適的塑膠再利用法規

回收後再生料的使用範疇在如食品、藥品等受到侷限，衛生福利部食品藥物管理署主管之食品安全衛生管理法所衍伸制定之食品器具容器包裝衛生標準第

二條提及塑膠類的食品器具不得回收使用。然而，國際上美國、歐洲、日本等國已開始使用回收塑膠製造食品包材並有認證標章，美國 FDA 與歐盟 EFSA 都有相關食品級包材安全規範，目前全球有 44 國准許 rPET 於食品包裝上使用。

建議國內食品安全衛生法規之解釋應與時俱進並更加明確說明"不得回收使用"之範疇，讓地方政府與業者有所依循，對於促進塑膠包材的循環產業將有很大的助益。

(三) 建立生分解材料與可堆肥化塑膠管理機制

政府對於生物可分解塑膠的管理投入不足，限塑政策建議修正回完全生分解材質製品不再限制，制定生物可堆肥相關的國家標準，確保材料分解特性對環境之影響性，並建立堆肥場域形成封閉之回收處理系統。

建立完善有機廢棄物(如農業廢棄物、廚餘、生物可分解、可堆肥化的塑膠)後端回收機制，以及建立堆肥場銜接去化的路徑，避免進到垃圾焚化爐直接燃燒，喪失生物可分解材料在堆肥分解後回到大自然的特性。

(四) 加強製品後端回收分類

廢棄寶特瓶製造的再生酯粒(rPET)在利用上，為增加回收寶特瓶可用性，我國政府可仿照日本規範及宣導瓶蓋、瓶身、標籤分開回收，不使用有色寶特瓶，可再提升回收寶特瓶轉換為產品之轉換率。生分解材料也應與一般塑膠分開回收，以堆肥方式處理，而非進到既有回收體系，應增加生分解分類標誌，或以顏色加以區隔，以利回收。

(五) 政府應鼓勵業者建構環境友善產品市場機制

環境友善產品通常成本較一般產品高，為了鼓勵業者為環境永續投入更多的成本，建議政府對於有意投入塑膠循環經濟的業者，站在鼓勵創新及促進環境友善的立場，提供研發補助、租稅優惠、回收補貼等方式來促進環境友善產品的開發。

(六) 協助廠商取得環境友善產品認證，提升產品之附加價值與競爭力

因應國際環境友善轉型趨勢與國際趨勢接軌，國內廠商應朝環境友善技術發展，生產相關產品，在我國關稅障礙難以突破的現況下，可利用先進國家對環境友善產品需求作為出海口，協助業者取得國際認證，以提升產品附加價值與競爭力。

(七) 鼓勵業者投入二氧化碳再利用技術

二氧化碳再利用的技術發展可透過減稅、碳交易之使用等方式，鼓勵廠商投入技術開發，同時廠商新設或更新設備時，也可以更符合環評審查的需求。

(八) 企業應正視減塑已成為趨勢，應掌握發展契機

環境友善產品符合 SDGs 及環境組織的要求會越來越明確，已是產業潮流，石化及塑膠產業應有所認知，Ellen MacArthur Foundation 的新塑膠經濟宣言已非常明確宣示，帶動了後面品牌商的承諾，並以所有塑膠包裝可以百分之百回收為目標。在此目標下，台灣石化業現在應該加強塑膠回收技術，上游廠商建議參考 BASF 模式，將塑膠作為煉廠的 feedstock；下游廠商發展各式環境友善材料發展過程中，須持續投入研發深化台灣既有技術能量，而技術研發策略上，專利保護要放在研發的優先考量。

財團法人中技社

緒論

塑膠製品主要由碳(C)、氫(H)、氧(O)為主要組成元素，透過聚合形成高分子有機化合物，其主要特性為重量輕、易塑形及耐久性，因此可取代玻璃、金屬、陶瓷等材料，讓人類的生活可以更加便利。煉油石化產業在 20 世紀蓬勃發展，用低廉價格製造出用於食衣住行之民生用品，提升人類的生活水準，時至今日，仍是經濟發展的主要指標，是不可或缺的基礎產業之一。自 2000 年後，全球面臨的環境問題日漸浮現，其中塑膠廢棄物因為其耐久性，不易在自然環境中分解，因而廣泛地影響到海洋、土地、水資源等多個環境資源。隨著塑膠廢棄物對環境的影響越來越顯著，聯合國在 2015 年「我們共同的未來」(Our Common Future)宣言中，將永續發展定義為「既滿足當代人的需求，又不危及後代人滿足其需求的發展」，並於「2030 永續發展目標議程」(Agenda 30)，針對全球「經濟成長」、「社會進步」與「環境保護」面向訂定 15 年(2016～2030 年)行動計畫，其中包含永續發展的 17 項目標(Sustainable Development Goals 17; SDGs 17)，範疇涵蓋全球當前最急迫的經濟、社會與環境議題，作為 2030 年前各國努力推動永續發展的指導方針。

石化生產與經濟成長成正比，隨著世界經濟的成長，對於塑膠的需求也越多，全球塑膠年產量自 1950 年的 200 萬公噸，迅速地攀升至 2015 年全球年產量達 4 億噸，累計產量達到 78 億噸。主要的生產地，分別在北美(18%)、歐洲(19%)和亞洲(50%，中國大陸占 29%)生產。而使用後的塑膠廢棄物據統計僅約 14%被回收，其餘 14%焚燒(能源轉換)、40%掩埋、高達 32%流入環境。塑膠廢棄物低回收率的主要原因在於處理成本偏高，過去先進國家將塑膠廢棄物出口到管理體系較差的中低收入國家以減少處理成本，但技術能力較差的國家，通常會以直接丟棄、掩埋等方式處理，更加劇塑膠廢棄物流入環境。中國大陸於 2017 年底公布的貿易禁令，全面禁止進口非工業塑膠廢品的政策後，迫使長期將非工業塑膠廢棄物出口的先進國家，如美國、加拿大、日本、韓國及台灣等，必須正視塑膠廢棄物處理的問題。其他工業化國家也開始效仿減少塑膠廢棄物並針對一次性塑膠頒布了禁止或限制使用之相關政策。為了遏制不負責任的海外塑膠處置的可能性，除了先進國家政府自行約束外(如澳洲已開始禁止塑膠廢棄物出口)，聯合國更宣布一項新的協議「巴塞爾公約修正案」來規範塑膠廢棄物的出口，已有 187 國簽署協議，同意對富有國家運送塑膠垃圾到貧窮國家進行管制，以阻止印尼、泰國、馬來西亞等國，變成「富國垃圾場」。2019 年聯合國環境規劃署（UNEP）在日內瓦會議中修訂了 1989 年「關於控制危險廢物的巴塞爾公約」，將塑膠廢物納入具有法律約束力的框架，修正後的巴賽爾公約，將會更進一步的促使各國加速進行減塑/限塑之立法、建立塑膠廢棄物回收利用設施與體系、區域及國際間訂定塑膠相關的回收標準並且對現行塑膠包裝生產方式、消費習慣產生變革以及影響巴賽爾公約其他種類廢棄物的處理規範。

影響世人觀感的印象是為數眾多的海洋生態浩劫，2019 年菲律賓的達沃灣(Davao Gulf)一頭鯨魚擱淺喪命，剖開後發現體內有 40 公斤的塑膠垃圾；海龜常將海裡的塑膠垃圾誤認為是水母而誤食死亡，解剖後發現胃腸裡含有大量塑膠垃圾。當塑膠垃圾進入海洋後，經過經年累月的外力破壞後，成為更細小的「微塑膠」碎片進入了食物鏈，對海洋生物、生態系統、人類健康與經濟等方面造成威脅，因而法規規範限制塑膠的生產及使用，以及發展對環境友善之產品，已成為全球關注之重要議題及努力的方向，並與聯合國提出的氣候行動(SDGs 13)、海洋生態(SDGs 14)、陸地生態(SDGs 15)、淨水與衛生(SDGs 6)等目標相關。

2018 年 10 月，艾倫麥克阿瑟基金會(Ellen MacArthur Foundation)與聯合國環境署共同發布「新塑膠經濟全球承諾」(The New Plastics Economy Global Commitment)，並邀集超過四百家政府、企業、非政府組織等簽署，承諾達成目標並定期檢視。(台灣目前已有循環台灣基金會簽署，並翻譯新塑膠經濟全球承諾正體中文版。) 2019 年 1 月，國際石化大廠為主的「終結塑膠垃圾聯盟」(The Alliance to End Plastic Waste, AEPW) 成立，成員包括巴斯夫(BASF)、埃克森美孚(ExxonMobil)、陶氏化學(Dow)、三井化學(Mitsui Chemicals)、寶潔(Procter & Gamble)等國際石化與民生用品大廠，其中台灣參加的企業有台塑集團(美國)，將以提升回收技術、開發替代產品等方式，減少和消除塑膠垃圾對環境、尤其是對海洋所產生的影響。目前的作法有兩種：一是讓塑膠產品透過設計、良好的回收機制及回收技術，增加塑膠廢棄物的回收率，促使塑膠產品可循環再生使用，避免掩埋、焚燒等方式來處理；但由於回收再生的成本較高，需要投入更多成本，並且需要品牌商與消費者願意付出更高的價格購買。另一種方式是使用生質塑膠、生物可分解塑膠等替代原料或產品，使廢棄的塑膠製品更容易被分解，減少對環境的危害，也是需要消費者付出更高的價格，並搭配良好的回收機制。

有鑑於降低塑膠對環境的影響已成國際趨勢，加速環境友善產品的研發、生產與使用是當前石化業及塑膠製品業需要關注的議題，本專題報告特別針對國內外石化產業環境友善發展政策、法規及市場情報的收集與分析。並介紹環境友善替代原物料與技術，以及台灣發展相關技術提出見解。綜合各面向的探討之後，於報告最後提出對於我國石化產業結合環境友善的策略與建議，期望能夠作為政府相關單位對於石化產業發展的決策參考，也提供石化業者塑膠循環經濟的趨勢與發展契機。

第一章　國內外石化產業環境友善發展政策

為了迎戰貧富差距、氣候變遷、性別平權等議題，2015 年聯合國啟動「2030 年永續發展目標[1]」(Sustainable Develpoment Goals; SDGs)，提出 17 項全球政府與企業共同邁向永續發展的核心目標。然而，近百年來，塑膠產業的蓬勃發展，為人類生活帶來許多便利，但也造成許多環境問題，因此在 SDGs 中第 14 項即設定「保育及永續利用海洋生態系，以確保生物多樣性並防止海洋環境劣化」之目標，保護和可永續利用海洋及海洋資源，促進永續發展，包括到 2025 年預防並大幅度減少各種海洋污染，特別是陸上活動帶來的海洋污染和優養化污染等。

在 SDGs 議程中，代表環境的「地球」為永續發展的基礎，然而海洋污染引發的生物多樣性、海洋暖化、全球經濟等負面問題，日益受到各國重視，而海洋塑膠廢棄物又是造成海洋污染的主要因素，2018 年 G7 在加拿大舉辦高峰會，於會議中即針對海洋廢棄物進行討論，並提出海洋塑料憲章(Ocean Plastics Charter)解決海洋塑膠廢棄物問題，並藉此限制各國塑膠製品的製造與使用。此外，歐盟也推動「歐盟循環經濟中的塑膠戰略」，透過訂定具體的目標，以在 2030 年有效減少塑膠廢棄物產生；而在這波抑制塑膠廢棄物產生的全球浪潮下，主要經濟體也陸續推動相關減塑政策。本章第二節及第三節將分別彙整國際資源循環政策方向及主要經濟體塑膠減量政策，並於第四節探討我國資源循環與塑膠減量措施，掌握國內外相關政策方向及發展脈動。

隨著環境永續經營、綠色消費意識抬頭，相關環境及生態問題日益受到重視，為凝聚全球對於減塑、限塑目標的共識，並提供參考依據，許多國際組織、跨國聯盟紛紛研擬並提出相關政策框架與方向，刺激各國對於減塑、限塑的推動有更積極、具體的作為。在全球層級方面，聯合國環境規劃署(United Nations Environment Programme; UNEP)提出至 2030 年前大幅減少一次性塑膠使用的目標；7 大工業國組織(Group of Seven; G7)、20 國集團(Group of Twenty; G20)峰會中，各國在海洋垃圾問題、環境永續等相關議題進行深入討論；歐盟(European Union; EU)也在環境永續經營策略中，提出限塑、減塑具體措施，設定 2030 年達到所有塑膠包裝都可重複回收利用的目標。

在這廣大地球村，塑膠污染已成為全球性的問題，我國難以在全球限塑潮流中置身事外，各國限塑政策方向更影響整體產業鏈的發展，本章將透過國際限塑政策資訊的蒐集，並借鏡英國、中國大陸及韓國等主要國家之限塑政策，並說明我國目前資源循環及限塑政策，奠定後續分析基礎。

[1] SDG 14, https://sustainabledevelopment.un.org/sdg14#targets。

第一節 國際資源循環政策方向

抑制海洋廢棄產生為聯合國永續發展目標之重要議題之一，需透過各國共同努力才能達成。由於國際限塑政策框架為各國制定相關規範的基礎，本節將分為全球層面及歐盟(區域層面)之限塑政策推動方針，蒐集全球性會議、相關組織之限塑重要內容及相關規範，分析抑制塑膠廢棄物可能之措施，勾勒出全球限塑政策推動方向及目標，作為後續分析之基礎。

一、 全球層面

全球各國逐漸意識到海洋垃圾可能對人們健康造成損害，特別是海洋塑膠垃圾和塑膠微粒，並對海洋生態、人類生計、漁業、旅遊和航運等產業產生負面影響，然而塑膠廢棄物對環境的負面影響是全球性的，需要各國共同努力，因此 20 國集團(G20)近年來也在地方、國家和地區等不同層級促進和推動減少海洋垃圾的相關措施和行動，以維護人類健康以及海洋和沿海生態系統，並減輕海洋垃圾的經濟成本和影響。

G20 在 2017 年的漢堡峰會(G20 GROUP SUMMIT HAMBURG GERMANY 2017)啟動「G20 海洋廢棄物行動計畫」(G20 Action Plan on Marine Litter)，設定到 2025 大幅度地減少海洋垃圾及其影響的目標，支持聯合國於 2015 年 9 月 25 日通過「2030 年永續發展目標」，促進永續發展；在峰會中也指出，陸上缺乏有效的固體廢棄物管理、廢水處理和雨水系統，以及不永續的生產和消費方式，為海洋垃圾的主要來源。由於相關措施的推動需要多方利益相關者的參與，並開發環保解決方案，以減少海洋垃圾。此外，G20 亦支持對於環境保護、預防海洋垃圾等相關研究，透過分享知識和經驗的方式，以填補在過去缺乏科學驗證的論述，並有效的推動減少海洋垃圾行動相關措施。而於 2018 年 6 月 G7 高峰會亦推出海洋塑膠憲章，其中加拿大、德國、英國、法國及義大利 5 國簽署同意減少一次性塑膠用量、企業增加再生塑膠使用量，及於 2030 年前企業實現 100%使用可回收、可重複使用塑膠材料、發展塑膠材料創新技術等[2]整體目標。

由於海洋垃圾最主要的來源為陸上的廢棄物，在廢棄物處理的過程中，所涉及的產業、現已存在的措施、教育及推廣等問題面相多元且複雜，無法透過單一措施而可通盤解決，因此在 G20 運作框架(G20 Operational Framework)中，將減少廢棄物、廢棄物管理及廢水管理列為優先採取行動，並提出 7 項優先關注的領域，包括制定預防海洋垃圾政策促進社會經濟利益、促進廢棄物預防和資源效率、促進永續的廢棄物管理、促進有效的廢水處理和雨水管理、提高意識並促進教育和研究、支持清除和補救措施、加強利益相關者參與，同時也提出各項領域可採取的因應政策措施，各國可依據其國情擬定該國的措施(表 1-1)。

[2] 財團法人塑膠工業技術發展中心，「全球限塑政策與產業因應對策」。

表 1- 1 G20 海洋廢棄物行動計畫優先關注領域及措施

關注領域	措施
制定預防海洋垃圾政策促進社會經濟利益	1.在創造就業方面(包括非正式部門、旅遊發展、可永續漁業、廢棄物和廢水管理、生物多樣性和其他領域)，認識並促進預防海洋垃圾和減少污染等措施的社會經濟效益 2.依據風險和影響評估確定政策措施 3.促進受影響國家、地區和其他利益相關者之間的溝通與合作 4.與經濟部門(如旅遊業、漁業、航運和郵輪、廢棄物、廢水和港口管理、塑膠和消費商品產業等)利益相關者建立夥伴關係 5.培養高品質的科學和技術人員，進行監測和評估海洋垃圾及減輕其影響(如海龜等受傷動物治療中心)
促進廢棄物預防和資源效率	1.利用廢棄物分類和減少(reduce)、再利用(reuse)、回收(recycle)之「3Rs」方法，首要選擇應為廢棄物預防，其次分別為再利用和回收 2.使生產商、進口商和零售商參與建立從設計到報廢處理的資源效率產品價值鏈的機制，並籌集廢棄物收集和處理的資金 3.大幅度減少並逐步淘汰微粒(micro-beads)和一次性塑膠袋使用 4.透過關注產品創新、產品設計和消費者產品使用行為等措施，從源頭減少廢棄物的產生，如永續材料管理(Sustainable Material Management; SMM) 5.大幅度減少在生產和運輸過程中塑膠顆粒(plastic pellets)的損失
促進永續的廢棄物管理	1.支持整體永續廢棄物管理，包括用於收集和處理廢棄物基礎設施 2.促進常見廢棄物收集的服務，以及對廢棄物管理基礎設施的投資，防止廢棄物排放到海洋中 3.必要時將非正式廢棄物工作者整合至現代化廢棄物管理系統，以改善其工作條件 4.支持 G20 各國間及與其他夥伴合作，進行設備能力開發和基礎設施投資，以改善沿海、城市和農村地區廢棄物管理系統 5.根據「防止船舶污染國際公約」(MARPOL)附件五要求，在港口和碼頭建立足夠的港口接收設施，並鼓勵對基於海洋來源的廢棄物採用合理的成本或適度情況下採無特殊費用制度 6.促進廢棄物的無害環境管理監管框架，使其在地方層級實施 7.確保廢棄物管理運作活動的交叉融資(cross-financing)，例如透過經濟鼓勵措施、費用、收費、保證金或稅收 8.降低為籌集廢棄物管理資金的障礙，例如透過減輕 G20 國家的私人廢棄物管理基礎設施投資的風險
促進有效的廢水處理和雨水管理	1.考慮提供並擴大廢水處理範圍 2.促進對廢水處理基礎設施的投資，防止廢棄物排放到海洋中 3.推廣可用的技術，避免大量固體廢棄物進入河流及海洋
提高意識並促進教育和研究	1.促進對公民和企業減少廢棄物產生、重複利用的公共宣傳運動，並增進其參與廢棄物收集系統，以避免亂丟垃圾 2.支持國家和國際組織間的研究和協調，以透過對環境無害的方法(environmentally sound methods)識別和補救海廢棄物的來源、海洋垃圾的集中區域(國家、區域、地方)，除此之外，同時考慮垃圾量、生物多樣性的敏感度、生態系統等

關注領域	措施
	3.支持關於海洋垃圾對生態系統和人類健康影響的研究 4 促進知識共享(如專家交流)，以增強機構和人員能力 5.將科學和技術方面納入措施考量，促進及支持進行中有關協調全球海洋垃圾監測，以及透過方法、數據和評估的標準化
支持清除和補救措施	1.支持研究和協調，以確定無害環境的清除和補救措施 2.制定指導和工具，並支持其實施 3.促進有計畫、定期地清理海洋垃圾的活動
加強利益相關者參與	1.在 G20 夥伴間及與第三方之間持續交流有關海洋垃圾訊息 2.實施目前有助於解決海洋垃圾的區域計畫，並在具有效果的前提下制定新的此類計畫 3.承擔適當的責任並採取行動，作為 G20 成員參與現有網絡和合作的重點 4.持續讓利益相關者(特別是地方當局、民間社會組織、業界、金融機構和科學專家)參與 5.鼓勵和支持「公私協力夥伴關係」(Public Private Partnership; PPP，即「促進民間參與公共建設」) 6.促進私營部門參與減少海洋垃圾，以及發展綜合廢棄物管理和廢水處理解決方案 7.在較高層級的經濟論壇(如 World Economic Forum 和 Green Financing Forum)討論海洋垃圾問題 8.在國際論壇上通知有關 G20 的活動 9.利用參與現有業務，促進各行業對解決海洋垃圾的貢獻進行對話 10.交流解決海洋垃圾的成果、效果、達成的措施、活動和計畫 11.促進跨部門(如淡水和海水)間的合作

資料來源：G20 Germany (Hamburg) 2017, “G20 Action Plan on Marine Litter”.

為了推動前述相關措施，G20 啟動自願性「全球承諾網絡」(Global Network of the Committed; GNC)，以解決與聯合國環境規劃署全球海洋垃圾夥伴關係[3](UNEP´s Global Partnership on Marine Litter; GPML)有關海洋垃圾的問題，並提供交流平台分享實施行動計畫相關知識和經驗。

G20 能源與環境部長會議於 2019 年 6 月 15～16 日在日本長野縣輕井澤舉行，海洋塑膠垃圾為會議主題之一。作為 2017 年所提出「G20 海洋廢棄物行動計畫」的一部分，G20 的能源與環境部長會議通過「G20 海洋塑膠垃圾行動執行框架」(G20 Implementation Framework for Actions on Marine Plastic Litter)，為國際間首次形成專門針對海洋塑膠垃圾對策的行動框架，利用國際合作，促進成員國採取生命週期方法，防止和減少進入海洋的塑膠廢棄物，並於該年 6 月 27～29 日在日本大阪召開第 14 次峰會獲得 G20 各國領導人的認同通過「大阪宣言」，G20 各國應採取措施解決海洋垃圾，並呼籲國際和國家層面應互相合作，在宣言中達

[3] UNEP, Global Partnership on Marine Litter（GPML),” Litter is found in all the world's oceans and seas, even in remote areas far from human contact and obvious sources of the problem”.

成「藍色海洋願景」(Osaka Blue Ocean Vision)國際倡議，透過提高塑膠垃圾處理能力，以及應用創新技術與方法，致力於在 2050 年前使海洋垃圾「零排放」。

雖然框架中沒有設置管制目標，但透過設計類似同儕檢視的機制，由各國各自努力削減海洋塑膠垃圾，藉由每年度的聚會，彙報各國依據 G20 海洋垃圾行動計畫所採用的政策、計畫與措施，分享策略與執行成果，經由最佳範例、創新和科學監測等經驗分享與相互學習，促進各國積極採取措施降低海洋污染。2019 年 10 月 9～10 日在日本東京舉辦「G20 資源效率對話」(G20 Resource Efficiency Dialogue)的平台，成為第一個分享解決海洋塑膠垃圾行動的機會；而歐盟也在此會議上提出塑膠、紡織品和建築材料的行動藍圖，透過循環方法解決產品設計和消費等問題，以減少前列產品的產生[4]。

另一個討論塑膠問題的國際場合，為 2019 年 3 月在肯亞首都奈羅比(Nairobi)舉辦的「第 4 屆聯合國環境大會」(Fourth Session of the UN Environment Assembly; UNEA-4)，在此次會議上審議多項有關塑膠污染和一次性塑膠的決議，包括在 2030 年前大幅度減少一次性塑膠使用，並透過加強國際行動以遏止塑膠對環境造成的污染。其中，挪威、日本和斯里蘭卡提議未來透過簽訂具有法律約束力的協議，強化海洋塑膠垃圾和微塑膠粒的國際合作與協調；印度亦提出在全球範圍內逐步淘汰一次性塑膠的提案。雖會議上並未討論到從塑膠生產至最終處置等整個生命週期的具體因應措施、解決問題所需規模與急迫性，但全球減塑行動已凝聚大多數國家的共識[5]，可能成為未來在國際會議議程持續討論的重點之一。

二、 歐盟(EU)

歐洲委員會的報告顯示[6]，2015 年歐洲地區塑膠總需求量約 4,900 萬噸，其中包裝為塑膠最大的用途，約占總需求的 39.9%，其次包括房屋與建築(19.7%)、汽車(8.9%)、電子產品(5.8%)及其他等(圖 1-1)，由於塑膠有方便、便宜、輕巧、柔韌和耐用的特性，在日常生活被廣泛及大量使用，而各式塑膠產品組成成份多元且複雜，也阻礙了塑膠回收再利用的途徑，造成塑膠在生產商、零售商和消費者之間的關係不論在社會經濟或環境層面都存在資源未循環利用的問題。該報告也指出，歐洲每年產生的塑膠廢棄物(plastic waste)約 2,580 萬噸，其中重複利用的不到 30%，全球有 85%海洋廢棄物是塑膠製品，而許多塑料產品的一次性使用、短暫的使用週期[7]，意味著大部分的塑膠已成為廢棄物，囤積在我們的環境中，甚至帶來龐大的經濟損失，該報告估計，塑膠包裝材料的價值因較短的使用週期，每年有 95%的經濟損失(估計約 700～1,050 億歐元)。

---

[4] 國際海洋資訊，「G20 同意建立減少海洋塑膠垃圾的國際合作框架」。

[5] Food Packing Forum（2019.03.18)," UN Environment Assembly on plastic pollution"

[6] European Commission（2018.01.16.), "A European Strategy for Plastics in a Circular Economy",

[7] PlasticEuroup（2019)報告指出，部分塑膠產品的使用壽命少於一年，部分則超過 15 年，有些甚至超過 50 年。另外，塑膠從生產到成為廢棄物，不同塑膠產品在各個價值鏈中有著不同的用途，因此同一年的塑膠廢棄物蒐集量不一定與塑膠供、需量相關。

資料來源：EU(2018),"A European Strategy for Plastics in a Circular Economy".

圖 1- 1　2015 年歐洲塑膠需求比例

在歐洲地區每年約有 15～50 萬噸的塑膠廢棄物進入海洋，雖然這僅占全球海洋垃圾的一小部分，但來自歐洲區域的塑膠廢棄物最終還是會出現在地中海、北極冰洋等部分地區，影響所及甚至遠達加勒比海、印度洋、太平洋和大西洋最外層的範圍[8]。許多報導指出，全球每年約有 500～1,300 萬噸的塑膠廢棄物最終流入海洋當中，歐洲議會議員表示若不採取相關措施，就重量而言，估計到 2050 年海洋中的塑膠製品將比魚還多。

歐盟估計，在歐洲海灘上出現最多的海洋垃圾，一次性塑膠產品即占 50%，其次為釣魚相關產品(27%)、非塑膠產品(16%)及其他塑膠產品(7%)，此外，在這些一次性塑膠中，使用最多的前 10 大[9]一次性使用塑膠即占 86%。上述情形促使歐盟執委會於 2018 年 5 月 28 日提出「一次性塑膠產品指令」歐盟層面的立法草案，以解決海洋中的塑膠垃圾問題。其後經過歐盟執委會、歐洲議會及理事會幾番會談與修訂，於該年 12 月 19 日就旨令草案達成暫時性協議[10]，最終歐洲議會與歐盟理事會分別於 2019 年 3 月 27 及 5 月 21 日表決通過指令，並於歐盟公報 6 月 12 日公布後 20 日生效[11]，未來歐盟所有會員國將禁止使用吸管、塑膠餐具等一系列一次性塑膠製品，且必須在 2 年時間內將其落實為國內法律並予以實施(即 2021 年 6 月 5 日前)，這意味可能在 2021 年夏天之前，歐盟國家的市面上就看不到這些塑膠製品[12]。

歐洲為全球塑膠廢料的主要出口者，在 2018 年中國大陸開始禁止塑膠廢料進口措施實施[13]之前，歐洲廢棄物出口量占全球 37%，而在全球努力邁向環境永

[8] EU（2018.01.16），"A European Strategy for Plastics in a Circular Economy" {SWD(2018) 16 final}。

[9] 「一次性使用塑膠產品指令」草案規範 10 大一次性塑膠：(一)飲料容器及其瓶蓋、杯蓋，以及飲料瓶；(二)菸品濾嘴；(三)棉花棒；(四)包裝與包裝紙；(五)濕巾與衛生棉；(六)輕便購物袋；(七)餐具、盤子、攪拌棒與吸管；(八)飲料杯；(九)氣球與氣球手持棒；(十)食品包裝。

[10] 歐盟執委會於 2018 年 5 月 28 日提出草案後，10 月 24 日歐洲議會提出其與歐盟理事會針對指令草案之談判立場；後歷經歐洲議會、理事會及執委會三方會談後，於 2018 年 12 月 19 日就指令草案達成暫時性協議。

[11] 由於在立法過程中，曾有執委會最初之立法提案、歐盟議會之談判立場，以及歐盟議會通過之指令草案等若干版本，在內容上有些許差異，本研究為針對指令中之重要內容進行說明。

[12] 關鍵評論（2018.05.30），「歐盟也提「限塑令」：10 種一次性塑膠製品入列、生產者得分擔成本」；關鍵評論（2018.10.25），「歐洲議會投票通過禁用「一次性」塑膠製品，最快 2021 年歐盟國正式入法」。

[13] 2018 年中國大陸政府對 24 種不同的回收材料實施進口禁令（包括未經分類的塑膠廢棄物、廢紙、舊光碟片及紡織品），相關內容詳見下節。

續發展、抑制海洋垃圾產生的目標下，歐洲委員會認為應有更具體及積極的作為，因此 2015 年在「歐盟循環經濟行動計畫」(EU Action Plan for a Circular Economy)中承諾將發展應對塑膠挑戰的策略，而此項承諾於 2018 年 1 月提出的「歐盟循環經濟中的塑膠戰略」(The EU Strategy for Plastics in a Circular Economy)中落實，要求在 2030 年前歐盟境內所有塑膠包裝皆採可回收材質，且減量使用一次性塑膠製品，並禁止塑膠微粒(micro-plastics)製品使用；在此戰略方向下，於 2018 年 5 月提出的「一次性使用塑膠禁令」(single-use plastic; SUPs)的具體規範。整體而言，雖然許多減少塑膠使用的政策推動仍是透過法律進行約束，藉由改變消費者使用習慣，從源頭減少廢棄物產生；但以歐盟更長遠的目標來看，則是希望採取更積極的手段減少對塑膠的依賴，因此在策略擬訂上也以新型商業模式、創新材料的開發和應用為方向，創造經濟利益和就業機會。以下將分別針對歐盟整體限塑政策推動措施進行說明。

(一)歐盟循環經濟行動計畫

歐盟在 2015 年提出的「循環經濟行動計畫」(Circular Economy Action Plan)中，著重在推動歐洲走向循環經濟，以更永續的方式使用地球資源，從生產製造、消費使用及回收處理三大面向分析問題，並提供行動建議，其措施包括建立引導廢棄物產生預防和回收利用的行動方針、推動經濟工具降低廢棄物掩埋，及改善生產者延伸責任制度等，由會員國依據其立法建議進行國內法規修改，以最大限度減少廢棄物產生，並盡可能延長產品物料之經濟價值及提高廢棄物回收再利用水準。歐盟委員會在 2018 年提出該行動計畫的修正內容，以更明確訂定目標，包括在 2035 年達到家庭廢棄物回收率達 65%、包裝廢棄物回收率達 75%及廢棄物掩埋不得超過廢棄物總量 10%；此外，亦藉由資助企業推動「延伸生產者責任」(Extended Producer Responsibility; EPR)制度，以改善其治理和成本效率，並強化廢棄物蒐集分類系統[14]。

歐盟部長理事會於 2019 年 10 月 5 日在盧森堡召開，各會員國環境部長與會討論歐盟循環經濟政策，其會議除鼓勵歐盟委員會及各會員國執行歐盟循環經濟行動方案外，也敦促委員會持續努力針對歐盟在化學物質、產品及廢棄物等法規間連結；強調投資基礎建設、刺激創新、創造高品質次級原料(secondary materials)市場及循環服務導向(circular service-oriented)，同時呼籲提出循環經濟長期策略架構，其中包括落實塑膠策略，並將該策略延伸至包裝、建築、自動化、電子產品及農業等部門。其後，歐盟委員會更在 2020 年 3 月 11 日提出「新循環經濟行動方案—使歐洲更潔淨、更具競爭力」(New Circular Economy Action Plan—For a cleaner and more competitive Europe)[15]，除加速實施 2015 年啟動的循環經濟行動計畫，亦作為歐盟綠色新政中所要求轉型變革的重要支柱之一，歐盟評估循環經

[14] EU, “First Circular Economy Action Plan”；永續新聞網，「歐盟通過循環經濟行動方案」。
[15] 經濟部國際貿易局經貿資訊網（2020.03.12)，「歐盟提出新循環經濟行動方案」。

濟將可為歐盟在 2030 年以前帶來 0.5%的 GDP 成長，並增加 70 萬個工作機會。該計畫將建立互相連貫的產品政策框架，從而使永續產品、服務和商業模式成為規範，並改變消費模式，從一開始即不產生廢棄物，同時確保有良好的二次原料市場。

歐盟新的行動計畫重點措施，提出永續產品政策法案，確保於歐盟市場內產品設計朝向壽命更為持久，更容易再利用、修理、回收及使用更高比例的再生原料，並提早淘汰及規範不合時宜之產品；提供消費者更多產品修理及使用期限相關資訊，作為環境永續產品選擇之判斷。此外，亦聚焦在目前消耗最多的資源、循環可能性較高的產品及部門，如電子暨資通訊產品、電池與汽車部門、包裝、塑膠、紡織品、房屋與建築及食品等採取具體行動(表 1-2)，確保減少廢棄物，並將廢棄物轉化為高品質二次原料。另一方面，歐盟也將設計可廣泛在歐盟範圍內使用的廢棄物回收分類模式及標示，並減少廢棄物出口與防止非法裝運。

表 1- 2　歐盟新循環經濟行動方案

實施方式	管制對象執行方式
電子暨資通訊產品	採行「循環電子計畫」，延長產品壽命，並改善廢棄電子物件收集與處理
電池與汽車部門	制定電池管理法規架構，增加電池產品之可持續性，並提高廢棄車零件回收效能
包裝	對於可於歐盟市場流通之包裝制定新強制規範，減少過度包裝
塑膠	制定新的回收成分強制規範，並特別關注微塑膠及生物材料及可生物分解塑料
紡織品	將提出歐盟紡織新策略，增進產業競爭力及創新，並促進歐盟紡織品再利用市場
房屋與建築	提出永續建築環境策略，推動建材循環利用
食品	制定新法規，以可重複使用包裝或餐具取代一次性產品

資料來源：經濟部國際貿易局經貿資訊網(2020.03.12)，「歐盟提出新循環經濟行動方案」。

(二) 歐盟循環經濟中的塑膠戰略

「歐盟循環經濟中的塑膠戰略」是第一個在歐盟範圍內推出的政策框架，旨在推動改變塑膠產品的設計、製造、使用及回收再利用的方式，採用特定材料的生命週期方法(material-specific life-cycle approach)，使塑膠重回其生命週期的循環，並設定在 2030 年以前有效達成減少塑膠廢料產生的目標，包括歐盟境內所有塑膠包裝皆採可回收材質，且減量使用僅供單次使用之塑膠製品，並禁止微塑膠製品，以遏止塑膠廢棄物對生態環境的污染及危害，同時促進歐盟塑膠產業及塑膠再生材料市場發展。

歐盟為達成前述的目標與願景，歐盟執委員於 2018 年 1 月 16 日提出一系列相關措施，如制定生物可分解及可堆肥塑料之標籤，並就包裝提出新的規定，以提高市場上使用塑料的可回收性，以及增加對再生塑料的需求；此外，為防止在

海上亂丟垃圾，針對港口接收設施制定新規定，以確保船舶或海上集裝箱產生的廢棄物不在海上拋卸，而須返回陸地妥善管理。另一方面，歐盟執委會亦將增加對會員國主管部門和企業的支持，預計增加投資 1 億歐元資助開發更智能、更利於回收的塑膠材料，並與全球各地的夥伴合作，提出全球解決方案並制定國際標準(表 1-3)。

表 1-3 歐盟循環經濟中的塑膠戰略推動重點

實施方式	管制對象執行方式
提高塑料回收的經濟價值和品質	制定生物可分解及可堆肥塑料之標籤，並就包裝提出新的規定，以提高市場上使用塑料的可回收性，並增加對再生塑料的需求
遏止塑料垃圾和亂丟垃圾	對港口接收設施制定新規定，確保船舶或海上集裝箱產生的廢棄物不在海上拋卸，須返回陸地妥善管理
推動循環解決方案的投資和創新	將增加對會員國主管部門和企業的支持，並將增加投資 1 億歐元資助開發更智能、更可回收的塑膠材料
參與全球行動	與全球各地的夥伴合作，提出全球解決方案並制定國際標準

資料來源：永續新聞網，「歐盟新塑膠回收政策」。

歐盟執委會亦展開相關立法或修法程序，包括將修訂包裝及包裝廢棄物指令(Packaging and Packaging Waste Directive)，並著手制訂廢棄物收集分類指南，以及訂定單次使用之塑膠製品法案；此外，為禁止船舶所使用及於港埠收集之塑膠廢棄物被傾倒海洋，亦訂定港埠廢棄物收集站指令草案(Directive on port reception facilities)，以推動及落實前述限塑相關政策。

(三)推動一次性使用塑膠指令

「一次性塑膠產品指令」為歐盟循環經濟行動計畫中重要的一環，也是歐盟減塑策略的一部分，該指令採取一系列不同的措施，以因應特定塑膠產品對環境的影響。指令管制的範圍以「已有替代品[16]」及「尚未有替代品」作區分，若該項產品已有替代品，如塑膠餐具、餐盤、吸管、攪拌棒等，可以紙吸管和硬紙容器替代，則要求暫停銷售其塑膠製品；另在尚未有替代品的塑膠製品，則採取預防措施及廢棄物管理，制定強制性收集和回收目標，要求各成員國必須在 2025 年減少 25%。

由於塑膠產品的差異，指令訂定七種不同的措施及定義所規範的塑膠產品範疇，並將其適用之塑膠產品清單列入指令的附件。該指令定義之「一次性塑膠產品」為完全或一部份由塑膠製成，並且未被構思、設計或使用的產品，其無法在塑膠的生命週期結束前透過生產商重新製造而多次利用。該指令針對這些塑膠產品管制措施包括消費減量(Consumption reduction)、市場限制(Restrictions on placing on the market)、產品要求(Product requirements)、標示義務(Marking

[16] 「已有替代品」指有可替代的永續產品，包括危害較小的替代品。

requirements)、生產者延伸責任(EPR)、收集目標(Separate collection)，以及提升意識(Awareness raising)，以下以 2019 年 6 月 12 日歐盟公報公布版本進行說明(表 1-4)。

表 1- 4「一次性塑膠產品指令」各類一次性塑膠產品管制措施

一次性塑膠產品	消費減量	市場限制	產品要求	標示義務	生產者延伸責任	收集目標	提升意識
食物容器	V				V		V
飲料杯	V				V		V
棉花棒		V					
餐具、盤子、吸管、攪拌器		V					
氣球棒		V					
氣球					V		V
包裝和包裝紙					V		V
飲料容器(含蓋子)			V		V		V
飲料瓶			V		V	V	V
煙草產品過濾器				V	V		V
衛生用品：濕巾				V	V		V
衛生棉				V			V
輕質塑膠袋					V		V
漁具					V		V

註：”V”為該類一次性塑膠產品於指令中採取之措施。

資料來源：European Commission, “reduction of the impact of certain plastic products on the environment”(2019.06.12).

1. 消費減量：要求各國建立減少一次性塑膠產品立法規範

會員國應採取相關措施，特別是廢棄物預防，以大幅度減少非立即可取代之塑膠產品消費，如包含蓋子的飲料杯、用於盛裝立即可食用之食物容器等，但不包括飲料容器、裝有食物的包裝紙，且成員國採取這些措施，在 2026 年前應達到較 2022 年「可量化的減少」一次性塑膠製品的消費。

為顯著地減少一次性塑膠產品，會員國可採取的措施包括訂定消費減量目標、提供消費者可重複使用的塑膠替代品、不免費提供一次性塑膠產品等，這些措施依據不同一次性塑膠產品在生命週期中對環境的影響程度而有所不同。歐盟會員國應於 2021 年 7 月 3 日前將所採取措施之說明通知委員會，並向大眾公開，並且須監控市場相關措施的執行情況向委員會報告，以建立具有約束力的消費減量目標。另一方面，委員會也將制訂具野心且可持續地減少一次性塑膠產品消費量的計算和驗證方法，並依審查程序入法。

2. 市場限制：全面禁止於歐盟銷售特定產品

自 2021 年 7 月 3 日起，成員國將全面禁止於歐盟銷售棉花棒、餐具(叉子、刀子、湯匙、筷子)、盤子、吸管、飲料攪拌棒、氣球棒等一次性塑膠產品，其中僅限「醫療器材指令」及「主動式植入醫療器械指令」範疇之特定醫療用途的吸管和棉花棒得以豁免。

除此之外，指令中亦禁止銷售用發泡聚苯乙烯[17](expanded polystyrene; EPS)製成的食物容器，若食物容器由其所製成，並且盛裝無須經烹煮、加熱立即可食用之食物，則將受到禁止；而以發泡聚苯乙烯所製成的飲料杯和飲料容器(包括蓋子)同樣也受到禁止。指令同時禁止所有由氧化式可分解塑膠[18](oxo-degradable plastic)製成之產品於市場上銷售。

3. 產品要求：飲料容器之設計應符合要求

自 2024 年 7 月 3 日起，針對於容量不超過 3 公升、帶有塑膠蓋子的一次性塑膠飲料容器[19]，要求其瓶蓋及杯蓋應與瓶身及杯身連為一體，即不脫蓋之產品設計，才可在市場上銷售。另外，亦規範塑膠瓶再生成分含量之最低目標，到 2025 年須不低於 25%，並於 2030 年塑膠瓶至少應含有 30%再生成分。

4. 標示義務：應將產品標示塑膠含量及廢棄物處理方式

在產品標示義務方面，指令要求將衛生棉、衛生棉條、濕巾和家用擦拭布，以及含有濾嘴的煙草製品及飲料杯列入產品標示義務清單中，其中標示須說明適當的廢棄物處理方式、產品中是否含有塑膠成分，以及亂丟廢棄物對環境產生的負面影響，應以明顯、清晰、易於閱讀和不可磨滅的標記，以明確告知消費者相關資訊。至於標記的規格，歐盟委員會預計於 2020 年 7 月 3 日以前制訂統一規範。

5. 生產者延伸責任：生產者承擔處理廢棄物相關措施之費用

會員國應對指令該項附件所列之一次性塑膠產品，制訂延伸生產者責任計畫，包括輕量型塑膠袋、可供立即食用或外帶食品之包裝及包裝紙，以及 3 公升以下之塑膠飲料容器和包含蓋子及瓶蓋之複合型飲料包裝等，但不包含附塑膠蓋的金屬及玻璃飲料容器。除前述產品生產者外，亦要求濕巾、氣球及含有濾嘴煙草製品之生產者承擔市場資料收集及報告、處理此類產品所產生之廢棄物，以及設置特殊基礎設施蒐集和處理這些產品廢棄物所產生的成本。前述產品除菸品生產者之生產者延伸責任義務自 2023 年 1 月 5 日開始外，其

[17] 發泡聚苯乙烯(expanded polystyrene)即俗稱之保麗龍，其因不易分解，且回收管道較不便，對環境、海洋、生態造成污染，甚至對人體健康帶來風險。

[18] 氧化式可分解塑膠(oxo-degradable plastic)雖被認為可生物分解成無害殘餘物，惟科學證據指出此種材料實際上會裂解成微型塑膠顆粒，最終流到河川和海，破壞海洋生物和水生環境。

[19] 不包含由金屬或玻璃製成者，以及不包含於歐洲議會和理事會第 609/2013 號條例之規定，設計用於特殊醫療目的的容器。

他產品之生產者應於 2024 年 12 月 31 日前開始承擔收集、運輸和處理及清理此類產品之廢棄物的成本，而前述生產者應負擔之成本(或費用)，可設定適當的多年期固定金額(multiannual fixed amounts)的形式支付。

另外，指令亦訂定關於漁具生產者之生產者延伸責任義務[20]，其規定臨海的會員國應針對含有塑膠的漁具，訂定全國年度最低收集和回收率，並向委員會報告，以期建立具有拘束力的定量收集目標，此類生產者同樣應於 2024 年 12 月 31 日前開始。此外，委員會應要求歐洲標準化組織制訂與漁具的循環設計相關的統一標準，以鼓勵提前為可在漁具生命週期的末端重複使用和促進回收作準備。

6. 收集目標：訂立廢棄物分類回收量化目標

會員國應訂立廢棄物分類回收量化目標，有別於歐洲議會談判立場規定的 2025 年塑膠飲料瓶[21]之回收與回收率須達 90%之目標，該指令最後公布於歐洲公報的版本為至 2025 年回收率至少應達 77%；至 2029 年須達 90%[22]。歐洲委員會預計於 2020 年 7 月 3 日前制訂計算和驗證方法的依據。

指令也提出會員國為達成目標可採取之措施，包括建立押金退款計畫(deposit-refund schemes)或為生產者延伸責任計畫建立收集目標，而會員國之間也可就採取前述措施之成果互相分享，以及合適或最佳作法、相關資訊的交流。

7. 提升意識：建立消費者負責任的消費行為

正確的使用方式、回收途徑，才能使塑膠廢棄物可以更妥善的分類、管理及處理，而這一部份須透過建立消費者意識、負責任的消費行為來有效達成減少指令中所列之一次性塑膠產品；另一方面，亦須告知消費者對於一次性塑料產品和含有塑料成份之漁具未妥善處理，對海洋環境、下水道網絡帶來的負面影響，從而改變消費者行為，減少一次性塑膠產品使用。而在該指令之生產者延伸責任措施中，亦將所列一次性塑膠產品之提升消費者意識費用，由生產者負擔。

[20] 依據歐洲議會和理事會的指令 2008/98/EC 第 8 條之規定；以及為對歐盟法中對於港口接收設施之漁船廢棄物適用要求之補充。

[21] 此規範僅適用於 3 公升以下飲料瓶，但不包括附有塑膠蓋的玻璃瓶或金屬製飲料瓶，以及盛裝醫療用品之容器。

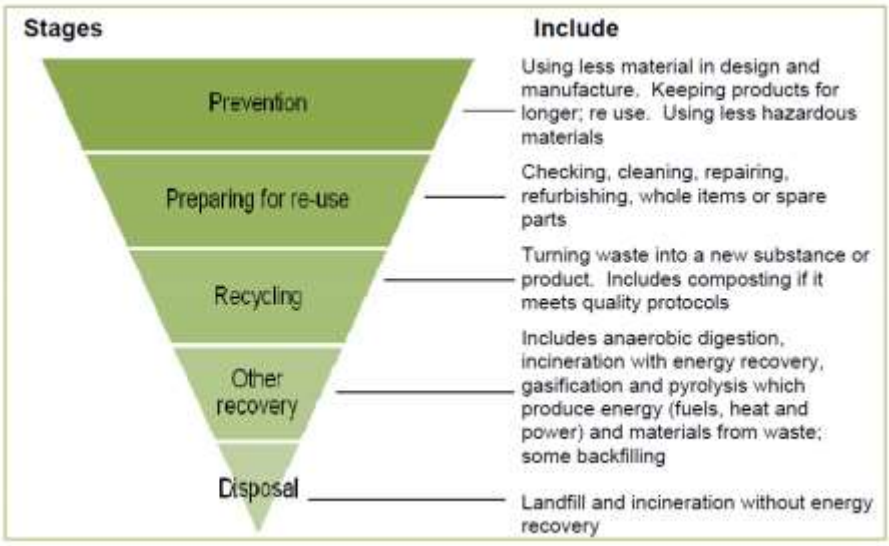
[22] 回收率是以指令中所規範之一次性塑膠產品廢棄物的數量，占投入市場總重量的比例。

第二節 主要經濟體塑膠減量政策

一、英國

英國目前的廢棄物立法依據大部分來自歐盟，雖然英國已於 2020 年 1 月 31 日正式解除長達 47 年的歐盟會員國資格正式脫歐，但依據修訂後之「2018 年歐盟(退出)法」(EU (Withdrawal) Act 2018)，於 2020 年 12 月 31 日以前仍為緩衝期，英國將在這期間進行一連串複雜的法規銜接、立法及談判等[23]，但在 2021 年之前，源自歐盟法律的現有環境法規仍具有效力。

英國環境、食品和鄉村事務部(Department for Environment, Food and Rural Affairs; Defra)(下稱環境部)提出的廢棄物管理制度，整體是依據歐盟制定的廢棄物框架指令[24](EU Waste Framework Directive)所訂定，其制定原則中突顯廢棄物的預防及再利用應優先於回收(圖 1-2)，朝向循環經濟的目標前進。在歐盟廢棄物框架指令下，其包裝和包裝廢棄物指令(Packaging and Packaging Waste Directive)、包裝廢棄物指令(Amending Packaging Waste Directive 2018)[25]，以及相關行動計畫，皆為該國制定相關規範及策略方向的參考依據，而廢棄物管理措施為英國權力下放事項，因此廢棄物管理的相關規範則交由各政府(英國、蘇格蘭、威爾斯、北愛爾蘭)分別立法。



資料來源：Defra(2011.06), Guidance on applying the Waste Hierarchy.

圖 1- 2 英國廢棄物處理原則

英國政府於 2018 年 1 月提出「25 年環境計畫」(25 Year Environment Plan)，旨在透過創造更豐富的野生動物棲息地，改善空氣、水質，以及解決海洋塑膠垃

[23] 英國新的貿易關係、新國防合作，以及複雜的法規銜接及移民、邊境管控問題，卻必須在 2020 年底以前完成談判並結束立法。

[24] EU Waste Framework Directive(2008/98 / EC)

[25] Packaging and Packaging Waste Directive, 94/62 / EC；Amending Packaging Waste Directive 2018, EU 2018/852。

圾問題及改善人類的環境條件，並訂立「2042 年以前消除可避免之塑膠廢棄物」及「致力於 2050 年以前實現可避免之廢棄物降至零」之目標；除此之外，亦於 2018 年 12 月提出「資源和廢棄物策略」(Resoures and Waste Strategy)，透過制定具體規範對廢棄物系統進行全面的檢視，以有效抑制塑膠廢棄物的產生，針對「25 年環境計畫」所提到「可避免」之塑膠廢棄物，在「資源和廢棄物策略」中定義為可重複使用或回收之塑膠、可重複使用或回收之替代品及於開放環境中可作為肥料或可生物分解之產品，藉由在塑膠生產及消費過程的每個階段設下限制，特別是終端消費行為，務求在 25 年內達到全面停用非必要的塑膠用品的階段目標。

另一方面，英國政府過去於「環境法」(Environment Act)中即訂定包裝廢棄物之生產者延伸責任，然而在處理廢棄物物污染的相關費用中，企業僅負擔 10%，其餘皆由納稅人透過地方政府支付。為符合污染者付費原則，以及 2018 年歐盟包裝和包裝廢棄物指令修訂後的規範，修訂包裝處理的生產者延伸計畫，要求製造或使用包裝的一定規模企業承擔法律義務，全權支付產生的廢棄物處理費用，並針對罐頭、玻璃或寶特瓶推出押金退還計畫。為達成前述目標，英國環境部於 2019 年 2 月 18 日針對主要方案展開公眾諮詢，並於 2019 年 7 月 23 日發布結論及主要關注重點，決議將利用「2019～2020 環境法案」(Environment Bill 2019～2020)法律效力，在 2023 年以前引入有關包裝處置的生產者延伸責任，以及其次級法案具體內容展開相關工作(如諮詢會、立法等)，並於權力下放的政府中強化處理塑膠廢棄物的相關政策。「2019～2020 環境法案」中有關處理塑膠廢棄物的具體內容，包括塑膠包裝稅、改革包裝生產者延伸責任、禁止使用一次性塑膠、押金退還制度、回收物品一致性，其各項推動內容說明如後。

(一)徵收塑膠包裝稅

英國政府引用 2018 年針對使用一次性塑膠的意見調查，其結果顯示，對生產商而言，循環利用回收塑膠的成本高於使用新塑膠，因此 2019 年 2 月 18 日發布之「塑膠包裝稅：諮詢」結論，英國政府採取全球領先的政策，針對生產或進口可回收含料少於 30%的塑膠包裝品徵收稅費，以經濟手段降低使用一次性塑膠的誘因。此項政策將於 2022 年 4 月於全英國範圍內實施，其徵稅範疇除包括再生成分少於 30%之塑膠包裝外，亦擴大到填充塑膠包裝(filled plastic packaging)，後續將考慮針對某些類型之醫療包裝給予豁免。英國政府於 2020 年 3 月 11 日進一步發布徵收細節諮詢，包括稅收範圍、稅收責任、不包括小型營運商、證據要求、出口及註冊、執行等事項徵求各方意見，並於 5 月 20 日結束。

(二)改革包裝生產者延伸責任

誠如前述，英國政府自 1997 年開始實施生產者延伸責任措施以來，以有效將塑膠垃圾回收率從 25%增加到 2016 年的 64.7%，由於目前英國包裝生產商僅支付約 10%產品生命週期末端之處理費用，未來「2019～2020 環境法案」修訂包括改革目前包裝處置之生產者延伸責任制度，生產者將承擔塑膠包裝完整生命週期中的所有相關處理費用，使生產者更具動機改善塑膠包裝成分，或思考如何改

變消費者行為等措施。依據「2019～2020 環境法案」修訂規劃之時程，預計將於 2023 年實施。

(三)禁止使用一次性塑膠

2018 年 10 月英國政府發布禁止銷售塑膠吸管、塑膠棉花棒和塑膠攪拌棒提案，並宣布此項禁令從 2020 年 4 月開始實施。在塑膠吸管方面，除了醫療及特殊需求外，在商業餐飲場所，將不可主動提供塑膠吸管；塑膠棉花棒則除醫療用途、科學研究及法醫可獲得豁免以外，將全面禁止供應；在塑膠攪拌棒方面亦屬於禁止提供之項目。此外，政府將在明(2021)年進行一次盤點，以評估採取這些措施的效果及影響。

基於英國政府的目標，威爾士政府(Welsh Government)於 2019 年 12 月將針對禁止銷售普遍使用之一次性塑膠製品進行諮詢，其包括吸管、攪拌棒和棉花棒，以及一次性塑膠餐具、膨脹聚苯乙烯食品包裝與飲料容器等，將採取措施減少其產生或使用。蘇格蘭政府(Scottish Government)早於 2018 年 4 月 27 日針對禁止在蘇格蘭生產和銷售塑膠棉花棒之提案進行諮詢[26]，另於 2019 年 11 月發布有關禁止特定一次性塑膠製品銷售之立法建議，其塑膠產品包括塑膠刀具、盤子、吸管、飲料攪拌棒、氣球棒、膨脹聚苯乙烯製成之食品及飲料容器、含氧分解塑膠製成之產品，以及已經禁止的棉花棒等海洋常見塑膠廢棄物，遵循歐盟逐步淘汰一次性塑膠的願景與期限，預計在 2020 年完成立法方案諮詢，並在 2021 年以前禁止或限制一次性塑膠產品的銷售。

(四)制定容器押金退還制度

容器押金退還制度運作方式為消費者在購買一次性容器裝盛裝之產品(通常為飲料產品)時，即先支付一筆預付款，未來在退還空瓶或容器時，消費者可以透過自動販賣機或直接退還給零售商，同時贖回押金，藉由押金退還制度，防止飲料容器亂丟並促進回收利用。該項制度主要針對鋁罐、玻璃瓶和塑膠瓶，但未來可能排除部分需以其盛裝的產品(如牛奶)。目前研議「全包型」(all-in model)及「隨身型」(on-the-go model)兩種實施方式並進行諮詢，前者不會限制飲料容器的尺寸，將針對市場上銷售量大之飲料為實施目標；而後者則是集中回收 750ml 以內之容器，其為消費者經常購買飲料之容器大小。此項措施在諮詢過程中，大部分受訪者認同政府推動此項措施，政府亦將針對此制度之押金金額、退貨地點、容器材料及產品等相關細節，並擬在「2019～2020 年環境法案」中建立押金退還制度之法規，規劃於 2023 年開始實施。

(五)回收物品一致性

2019 年 2 月政府針對家庭和企業集中回收物品的一致性進行諮詢[27]，其目的

[26] 有關禁止在蘇格蘭生產和銷售塑膠棉花棒提案諮詢之結果於 7 月 30 日發布，於「2019 年環境保護（棉花棒)（蘇格蘭)條例」(Environment Protection（Cotton)（Buds) Regulations 2019)引入禁令及罰款制度。

[27] Consultation on Consistency in Household and Business Recycling Collections in England。

在於建立一套一致性的可回收物品的準則，並同時可在英國全範圍內適用，減少對大眾對於會收物品的混淆，以提高回收率。英國政府 2019 年 7 月發布諮詢的結果，未來各政府將修法制定各類回收物品之回收標準(包括玻璃瓶容器、紙類、塑膠瓶及容器、鐵和鋁罐等)，並於 2023 年起實施；此外，政府亦考慮將其他類型之塑膠材料，如塑膠袋和薄膜納入需收集的核心材料中，惟是否納入目前各界仍有許多意見。此項政策未來也將納入「2019～2020 年環境法案」中制定法規。

除前述政策以外，英國政府提出多項減少塑膠廢棄物的推動資金。2018 年英國總理宣布成立「塑膠研究與創新基金」(Plastics Research and Innovation Fund; PRIF)，此項基金與企業、政府和研究與創新者建立網絡，透過知識交流，開發減少塑料進入環境的解決方案；此外，設立「塑膠和廢棄物投資基金」(Plastic and Waste Investment Fund)擴充 PRIF，專注於研究和開拓創新方法，以提高回收率和減少垃圾，如智慧垃圾箱、創新包裝材料等。2019 年 6 月英國政府宣布成立「資源行動基金」(Resource Action Fund)，用於創新解決方案，推動難以回收的塑膠包裝進行回收，包括創新的篩選或分離設備，為不同材料提供更智慧的分選系統。

二、韓國

根據朝鮮日報的資料顯示，韓國(本節指南韓)每年大約用掉 257 億個一次性塑膠杯、100 億根一次性塑膠吸管，以及每人每年平均使用高達 420 個塑膠袋，而韓國每天產生的塑料廢棄物量，從 2011 年的 3,949 噸，到 2016 年增加為 5,445 噸，且約只有 30％至 40％的廢塑料被回收利用。為不再製造更多塑膠產品以及減少資源浪費，韓國政府加強環保政策，於 2018 年制定減少塑膠生產量的「十年計畫」，提出在 2027 年以前，將逐步禁止一次性塑膠杯及塑膠吸管，產品過度包裝也會被禁止。

在 1986 年以前，韓國廢棄物管理由「垃圾清潔法」及「環境保護法」所規範，其制定目的主要集中在擴建廢棄物後期處理設施，以提供安全清潔的環境，相關管理職責由地方政府承擔。隨著韓國經濟快速成長，加速都市化及工業化發展，韓國政府意識到擴建廢棄物處理設施難以應付廢棄物處理需求增長的速度，因此政策重心逐步由廢棄物管理的被動策略轉向需求管理的預防性策略，以更有效的減少廢棄物量產生。韓國政府陸續於 1986 年公布「廢棄物管制法[28]」及 1992 年「資源節約與促進資源再利用法[29]」，並於 1993 年制定「資源節約與促進資源再利用執行細則[30]」，由前者訂定基本廢棄物管理事宜，後兩者則規範廢棄物回收的框架及執行的規則，且廢棄物管理的責任不再由地方政府獨力承擔，而是與消費者和生產者共同分擔。前述有關廢棄物管理的框架制定後，促進韓國回收利用的政策和體系的發展，包括減少不易回收之包裝材料生產、推動一次性產品規範、

[28] http://www.law.go.kr/법령/폐기물관리법

[29] http://www.law.go.kr/법령/자원의절약과재활용촉진에관한법률

[30] http://www.law.go.kr/법령/자원의절약과재활용촉진에관한법률시행규칙/(00798,20181231)。

制定廢棄物存放制度、廢棄物收費制度、培育循環經濟產業等規範陸續推出，整體政策推動方向由「廢棄物減少」及「廢棄物回收」兩個面向進行，而韓國政府更於 2018 年 5 月 10 日宣示，2030 年之前將廢塑料量減少 50%，回收率從 34%提高到 70%。而為提升回收率，韓國提出一系列從源頭到末端回收的控制方法。

(一)廢棄物減少

在廢棄物減少方面，採取的措施包括「廢棄物從量徵費制度」、「限制(商界)使用即棄產品」及「限制使用難以回收包裝材料」。「垃圾從量制度」於 1995 年實施，其主要是針對阻止住宅及小型商業機構[31]廢棄物產生的措施，被譽為激勵市場改變的法規之一，在實施以前，韓國廢棄物處理採收費模式，透過物業稅或月費徵收，不論廢棄物的數量皆以固定金額收取，這使得大眾較無減少廢棄物排放和增加回收之誘因，因此在「垃圾從量制度」實施後，秉持產生者自付的原則，按產生的廢棄物量支付其棄置成本，作法上為從地方政府購入容量不同的專用垃圾塑膠袋棄置家庭廢棄物，違規者亦有相對應的處罰機制，而可循環再造的廢棄物及家庭電子產品等大型物品再從中分類及棄置(表 1-5)，透過改變生產者和消費者的消費及棄置行為，進而從源頭即減少廢棄物產生。

表 1- 5 廢棄物從量徵費制度之廢棄物收集分類及成本負擔者

廢棄物類型 [1]	使用專用垃圾袋	產生者負擔成本
家庭廢棄物	是	是
可循環再造之廢棄物 [2]	否	否
大型廢棄物	否	是
建築或拆卸工程廢棄物	否	是
廚餘 [3]	否	是

註：1.針對市區住宅及小型商業機構之規範。

2.可循環再造材料之基本分類為紙、罐、瓶、廢鐵和塑膠。

3.廚餘回收有其他制度進行規範及處置，不於本研究中討論。

參考資料：吳穎瑜(2013.03.26)，香港立法會秘書處，「南韓的廢棄物管理政策」資料摘要。

在「限制使用即棄產品」方面，主要針對使用一次而設計的產品進行規範，自 1994 年韓國限制餐廳及食堂使用即棄的杯子、碟子、碗、筷子、牙籤等，且不可免費提供即棄製品，若違反規定店家將被處以罰款，而此項規範執行多年以來，政府亦不斷擴充限制使用清單，如自 2018 年 8 月韓國政府已經開始推動咖啡店的減塑措施，其中包括內用的客人不能要求使用外帶杯、使用外帶杯的客人不能坐在店內等，另外亦有部分咖啡店開始停止提供塑膠吸管，改為提供玻璃吸管或紙吸管，以更積極地減少塑膠相關產品的使用。

為進一步鼓勵大眾減少塑膠袋使用，環境局自 1999 年在百貨公司及市場推行退款制度，消費者若將塑膠袋使用後退還，即可獲得退款，此制度實施後，使

[31] 小型商業機構包括小型商戶及辦公室。此規定不是用於每日產生多於 300 公斤廢棄物的大型商業機構，需自行安排收集廢棄物。

塑膠袋的銷售量大幅下降。另於 2010 年 10 月即開始實行「再生計量收費垃圾袋銷售」制度，規定超市不得免費提供一次性塑料袋，政府亦與少數幾家大型連鎖超市簽署合作協議，積極推動用環保容器替代一次性塑料袋；為擴大政策強度，2018 年底韓國政府修訂「節約資源及促進資源回收再利用法」之規範，自 2019 年 1 月 1 日起，韓國逾 2,000 間超市和 11,000 家面積超過 165 平方公尺的大賣場禁用一次性塑膠袋(除盛裝肉類、魚類等含水分製品)，未來也可能不再提供封箱用膠帶、塑膠繩等打包服務，或改採按量收費方式，在政府的努力推動及業者響應之下，將有更多大賣場逐漸跟進。

由於產品過度包裝對環境帶來負面影響，韓國政府推動禁止使用難以循環再造的包裝材料，如含聚氯乙烯(PVC)、收縮包裝或塗層之包裝材料，並逐步淘汰人造樹脂等材料。此外，過度包裝往往來自於誇張的包裝方式，為有效控制包裝的方式，針對包裝後多出的空間、盒內或容器內包裝層數進行規範，視產品類型差異，包裝多出的空間限於包裝容量的 10～35%、包裝層數限於兩層，規範產品範疇包括食品、化妝品、清潔劑、醫療用品、服裝等。

(二)廢棄物回收

韓國政府制訂有關廢棄物回收的政策包括「廢棄物收費制度」及「生產者延伸責任」。「廢棄物收費制度」於 1993 年開始實施，其主要目的為針對廢棄物管理中難以回收再利用，且容易製造有害物質的產品、材料和容器，向其製造商及進口商徵收處理這些廢棄物所需的費用，以盡量減少生產不可循環再造的廢棄物，以及推動有效處置廢棄物的方法。產品範疇包括殺蟲劑及其有毒化學物品容器、防凍劑、口香糖、一次性尿布、菸草製品和塑膠產品，其收費標準依據各項產品對環境損害的程度訂定(表 1-6)，並將收取的費用存放在環境改善特別帳戶系統(Special Account System for Environmental Improvement)中，使用於購買和儲存可循環再利用之資源、廢棄物回收利用計畫、廢棄物處理設施之設置，以及有效回收廢棄物之相關研究或技術開發。

表 1-6 韓國政府各項廢棄物收費標準

規範產品(單位)		收費標準	新臺幣[註]
農藥及有毒產品容器 (每單位)	塑膠容器 (a)500 毫升或以下 (b)500 毫升以上	 (a) 24.9 韓元 (b) 30.7 韓元	 0.7 元 0.8 元
	玻璃容器 (a)500 毫升或以下 (b)500 毫升以上	 (a) 56.2 韓元 (b) 84.3 韓元	 1.5 元 2.3 元
	金屬容器(僅有毒廢棄物) (a)500 毫升或以下 (b)500 毫升以上	 (a) 53.9 韓元 (b) 78.2 韓元	 1.4 元 2.1 元
防凍劑 (公升)		189.8 韓元	5.1 元
口香糖 (銷售價格/進口價格%)		1.8 %	-

規範產品(單位)		收費標準	新臺幣[註]
一次性尿布 (每單位)		5.5 韓元	0.1 元
菸草製品 (每 20 支)		7 韓元	0.2 元
塑膠產品 (每公斤合成樹脂含量)	一般塑膠產品	150 韓元	4.0 元
	建築用塑膠	75 韓元	2.0 元

註：依據台灣銀行 2020 年 6 月 8 日公告之匯率，韓元兌新臺幣為 1：0.027。

資料來源：韓國環境公司(Korea Environment Corporation, 2020)。

「生產者延伸責任」於 2003 年實施，設立目的針對產品製造及進口的生產者施加更多收集與回收的責任，要求生產者每年需達到環境局規定的回收量，其強制回收的物品包括包裝材料、紙類、金屬罐、玻璃瓶和合成樹脂等包裝材料，以及潤滑劑、電池、輪胎、日光燈等產品，而生產者可透過直接回收再造、直接交由回收公司及付費加入生產者責任組織以履行其回收義務，若未能履行將被收取回收相關費用。此外，主要回收責任除了由生產者承擔外，產品生命週期內所涉及的消費者、地方政府、權責機構及中央政府等各自亦需負擔一部份之責任(表 1-7)。韓國政府於 2003 年推出分類棄置標籤制度，要求生產者在強制回收產品或包裝產品附上分類棄置標籤及回收類別，除幫助消費者正確分類廢棄物以外，同時提高消費者對分類棄置及回收的意識，以提升回收效果及強化生產者的責任。

表 1- 7 產品生命週期中廢棄物處置之各方責任

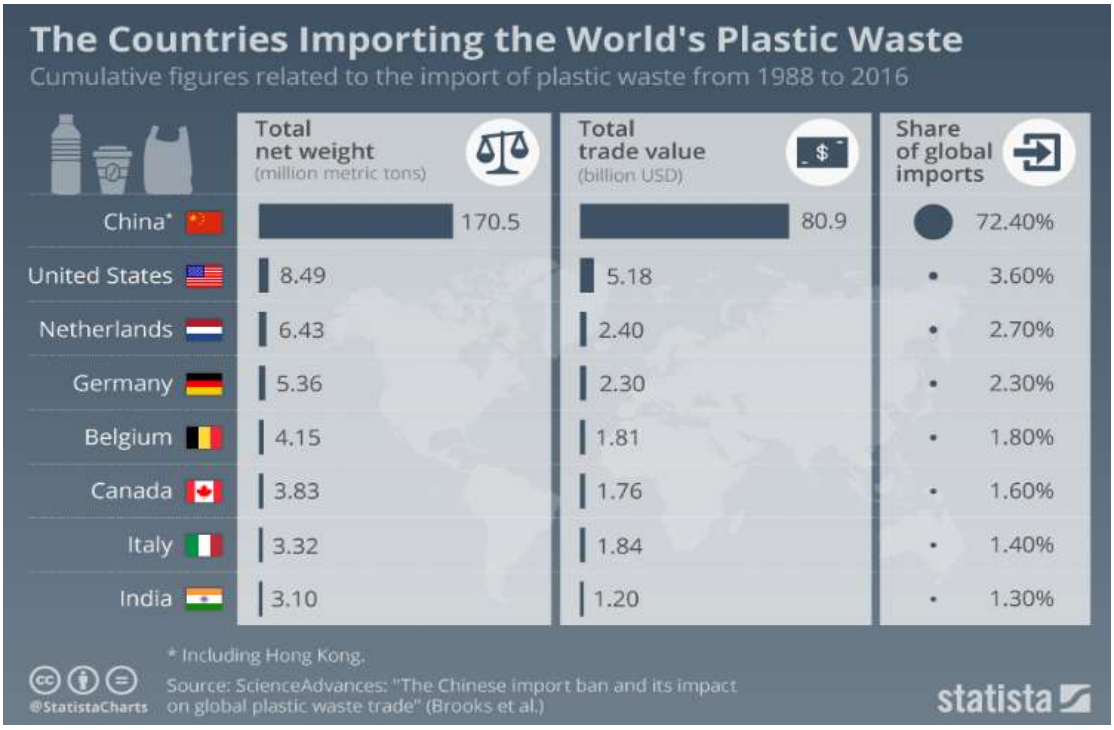
主體	負擔責任
消費者	確實回收及分類
生產者	履行回收責任，或加入生產者責任組織(Producer Responsibility Organization; PRO)來操作包裝材料的分類回收標記系統，以確保從源頭分開回收
地方政府	分別收集生產者延伸責任的目標項目
韓國環境公司 (Korea Environment Corporation)	● 同意和批准生產商的銷售、進口紀錄及責任履行計畫 ● 同意職情情況報告及驗證、檢查其表現 ● 管理與生產者延伸責任的監督，包括收取回收費用
韓國環境局 (Ministry of Environment)	● 操作整體生產者延伸責任計畫，並制訂、修訂法律、法規及方針 ● 計算並宣布每個項目的回收目標率

資料來源：韓國環境公司(Korea Environment Corporation, 2020)。

總而言之，為達成減少塑膠生產量「十年計畫」(2018～2027)的目標，韓國環境部指出，未來在整個生產、消耗、管理及回收過程中減少浪費，並將廢棄物重新分配至生產過程中，以更永續的利用資源。在塑膠產品製造的部分，透過重新審查材料及訂定法律的方式，從生產端逐步淘汰難以回收的產品，如不同顏色的寶特瓶有不同價值的回收方式，而在 2020 年將全面改為透明無色之寶特瓶，並於 2022 年之前增加可回收材質的製品，提高資源再利用性，預計將使廢棄物裡不可回收的廢棄物比例從 2016 年的 38.8%降至 10%。

三、 中國

1980 年代中國大陸為緩解原料不足，決定接受國外可作為原料使用的固體廢棄物，以彌補國內資源的短缺，因此中國大陸很快的成為全球最大的廢棄物進口國，以進口廢紙、塑膠及金屬為大宗，亦成為全球最大、最重要的回收塑膠加工國，1988～2016 年中國大陸塑膠廢棄物累計進口量高達 1.7 億噸、貿易額約 809 億美元(圖 1-3)，另依據中國大陸國務院及環境保護部(Ministry of Environmental Protection; MEP)統計資料顯示，2016 年中國大陸進口約 735 萬噸的塑膠廢料及 2,850 萬噸的紙類，即占全球固體塑膠廢棄物的一半以上，而這些廢棄物主要來自歐洲、日本和美國，進口後經過加工成為日常用品，並重新進入經濟體系。



資料來源：Statista(2018.06.22)，“The Countries Importing the World's Plastic Waste.”

圖 1- 3　1988～2016 年塑膠廢棄物主要進口國家累計量

然而，由於各國可回收之廢棄物(包含五金、塑膠、紙類及其他等)品質不一，部分廢棄物已不適合再利用或進行後續回收處理，且在廢棄物的清洗等相關處理過程中，所產生的有害物質亦可能對回收工作者的健康造成危害，甚至對空氣、水及土壤造成污染。基於保護國內人民健康及環境安全，中國大陸政府於 2013 年 2 月發起「綠籬行動」(operation green fence)，透過加強出口至中國大陸可回收材料的檢查，防止非法進口和受污染的「洋垃圾」，以提高進口可回收廢棄物的品質。此外，於 2017 年 7 月向世界貿易組織(WTO)提交備忘檔，國務院辦公廳隨即發布「禁止洋垃圾入境推進固體廢棄物進口管理制度改革實施方案[32]」的通知(下稱方案)，於 2018 年 1 月開始禁止進口生活來源廢塑膠、未經分類廢紙、紡織廢料

[32] 相關細節請見中華人民共和國中央人民政府國務院。

及釩渣 4 類共計 24 種固體廢棄物，同時調整並公告「進口廢棄物管理目錄」，由原本的「限制進口」調整列入「禁止進口」[33]；另依據該方案，於 2019 年底前陸續針對各項細節制訂相關規範及制度，並配合修訂「中華人民共和國固體廢棄物污染環境防治法」、「固體廢棄物進口管理辦法」等規範，提高對走私洋垃圾、非法進口固體廢棄物等行為的處罰標準。

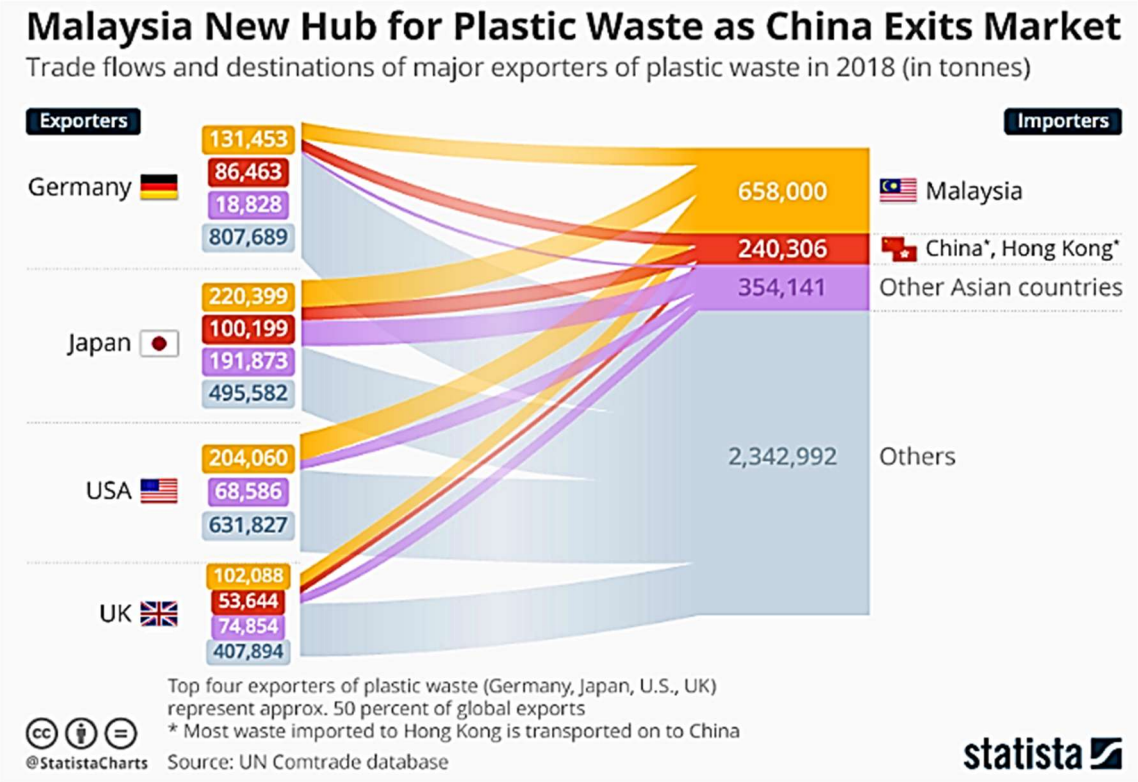
不僅明訂禁止部分廢棄物的進口，針對回收品質方面，中國大陸提高對進口廢棄物含雜率[34]的要求，於 2017 年 8 月 10 日公布新修訂的「進口可用作原料的固體廢棄物環境保護控制標準(徵求意見稿)」，要求進口廢紙和廢塑膠中的含雜率不能超過 0.3%(原要求為廢紙 1.5%和廢塑膠 0.5%)，並同時向 WTO 提交含雜率的初稿草案，最後於 2017 年 11 月提交之版本，將廢塑膠和廢紙的含雜率提高到 0.5%，於 2018 年 3 月起實施。

由於全球廢棄物出口高度依賴中國，如英國將有一半的出口廢塑膠不符合中國大陸的新標準，因此在禁令實施後，迫使長期向中國大陸出口固體廢棄物的國家需尋覓其他國家作為新的出口地點(如馬來西亞)(圖 1-4)，使全球廢棄物出口流向及回收產業掀起波瀾。而國家地理(National Geographic)資料顯示，中國大陸在更嚴格的固體廢棄物進口標準實施後，向中國大陸出口塑膠廢棄物的國家數量亦從 2017 年約 90 個大下降到 2018 年約 40 個(圖 1-5)。

中國大陸在對內限塑政策方面，其實早在 2007 年底國務院辦公廳即公布「關於限制生產銷售使用塑膠購物袋的通知」(下稱通知)，成為第一個在全國範圍全面實施的「限塑令」，該規定自 2008 年 6 月 1 日起全國禁止生產、銷售、使用厚度小於 0.025 毫米的塑膠購物袋；同時，所有超市、商場、集貿市場等商品零售場所實行塑膠購物袋有償使用制度，一律不得免費提供塑膠購物袋，均要標明價格並單獨收費。相關資料顯示，2008～2016 年主要零售場所減少塑膠袋約 700 億個，平均每年減少約 87.5 億個，從數據上確實減少塑膠袋使用，然而在 10 年前推動「限塑令」時未預料到的是，隨著電商飛速發展，快遞、外賣已經成為人們生活的一部分，其中塑料餐盒、塑料包裝等的消耗量快速上升，一次性塑膠製品在日常生活中隨處可見，使得過去採行「限塑令」的效果也面臨全新挑戰。

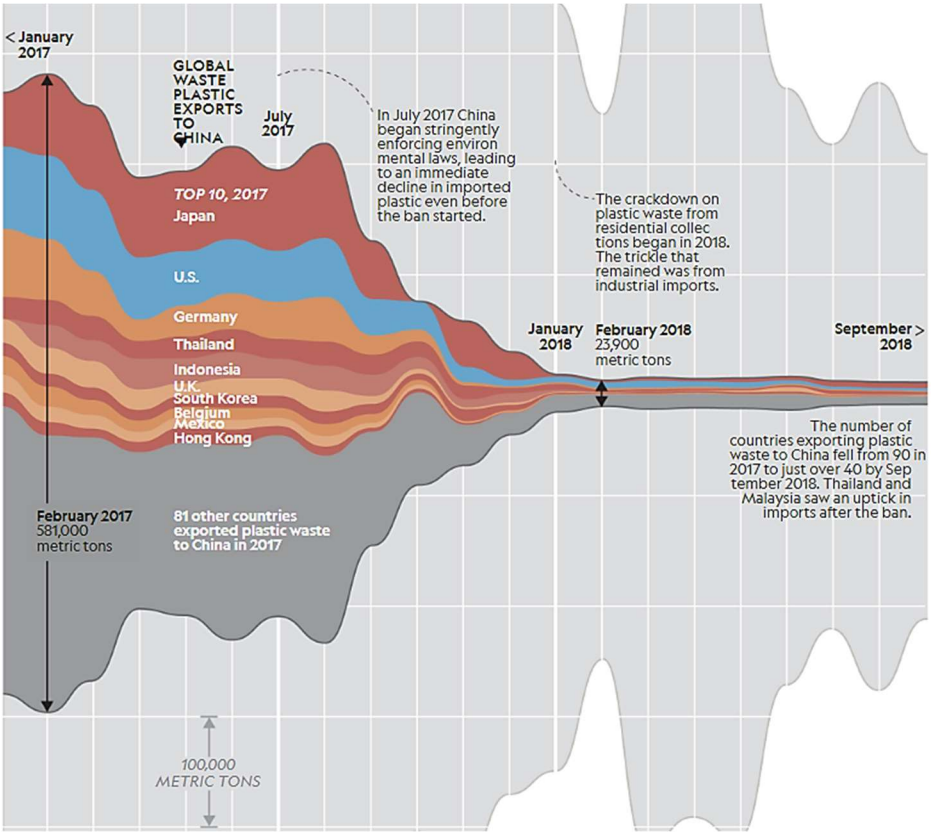
[33] 環保部、商務部、國家發展改革委員會、海關總署、質檢總局對現行的「禁止進口固體廢棄物目錄」、「限制進口類可用作原料的固體廢棄物目錄」、「非限制進口類可用作原料的固體廢棄物目錄」進行了調整和修訂：將生活來源的廢塑膠（8 個品種)、未經分類的廢紙（1 種)、廢紡織原料（11 種)、釩渣（4 種)等 4 類 24 種固體廢棄物，從「限制進口類可用作原料的固體廢棄物目錄」調整列入「禁止進口固體廢棄物目錄」。

[34] 含雜率為進口廢棄物中不可利用的雜質占比。



資料來源：Statista(2019.06.20), “Malaysia New Hub for Plastic Waste as China Exits Market.”

圖 1- 4　2018 年主要國家塑膠廢棄物進出口流向



資料來源：https://www.nationalgeographic.com/magazine/2019/06/china-plastic-waste-ban-impacting-countries-worldwide/

圖 1- 5　2017～2018 年全球塑膠廢棄物出口至中國大陸變化

在全球日漸升溫的環保意識及國際對環境永續發展的期待，再加上國內塑膠廢棄物進口量因實施禁令而降低，中國大陸境內再生塑膠產業面臨重新布局及轉型壓力，政府需採取更積極的措施因應市場環境的轉變。國家發展改革委員會、生態環境部 2020 年 1 月 16 日公布「關於進一步加強塑料污染治理的意見」(下稱意見)，從 2020 年開始，將逐步在部分地區、部分領域，禁止、限制部分塑膠製品的生產銷售和使用；到 2022 年明顯減少一次性塑膠製品消費量，並推廣應用替代產品和模式；至 2025 年建立塑膠製品生產、流通、消費和回收處置等環節之管理制度，將按意見中所提出之「禁限一批、替代循環一批、規範一批」的原則，推進「禁止、限制部分塑膠製品的生產、銷售和使用」、「推廣應用替代產品和模式」及「規範塑膠廢棄物回收利用和處置」三項主要任務。

(一)禁止、限制部分塑膠製品的生產、銷售和使用

在禁止生產、銷售的塑膠製品方面，禁止生產和銷售厚度小於 0.025 毫米的超薄塑料購物袋、厚度小於 0.01 毫米的聚乙烯薄膜[35]，以及禁止以醫療廢棄物為原料製造塑料製品、全面禁止廢塑料進口。到 2020 年底，禁止生產和銷售一次性發泡塑料餐具、一次性塑料棉花棒；禁止生產含塑膠微珠的日常用化學產品(如洗髮精、洗面乳等)，並至 2022 年底禁止銷售。

另外，在明確禁止、限制使用的塑膠製品方面，包括不可分解塑膠袋、一次性塑膠餐具、快遞塑膠包裝，以及賓館、酒店一次性塑膠用品，亦採分階段逐步限制使用，目標到 2025 年底以前，在指定範圍、領域或場所停止或禁止使用，以及不可分解一次性塑膠餐具消耗減少 30%(表 1-8)。

表 1-8 禁止、限制使用塑膠製品及其內容

禁止、限制使用	內容
不可分解塑膠袋	• 2020 年：直轄市、省會城市、計畫單列市城市建成區的商場、超市、藥店、書店等場所以及餐飲打包外賣服務和各類展會活動，禁止使用不可分解塑膠袋，集貿市場規範和限制使用不可分解塑膠袋 • 2022 年：實施範圍擴大至全部地級以上城市建成區和沿海地區縣城建成區 • 2025 年：上述區域之集貿市場禁止使用不可分解塑膠袋。鼓勵有條件的地方，在城鄉結合部、鄉鎮和農村地區集市等場所停止使用不可分解塑膠袋
一次性塑膠餐具	• 2020 年：全國範圍內之餐飲行業禁止使用不可分解一次性塑膠吸管；地級以上城市建成區、風景區之餐飲堂食服務，禁止使用不可分解一次性塑膠餐具 • 2022 年：縣城建成區、景區景點餐飲堂食服務，禁止使用不可分解一次性塑膠餐具

[35] 薄膜塑膠又稱農膜、地膜，用於覆蓋農田，以提高地表溫、保持土壤濕度，有促進種子發芽、抑製雜草生長的作用。

禁止、限制使用	內容
	• 2025 年：地級以上城市餐飲外賣領域不可分解一次性塑膠餐具消耗減少 30%
賓館、酒店一次性塑膠用品	• 2022 年：全國範圍星級賓館、酒店等場所不再主動提供一次性塑膠用品，可透過設置自助購買機、提供續充型洗潔劑等方式提供相關服務 • 2025 年：實施範圍擴大至所有賓館、酒店、民宿
快遞塑膠包裝	• 2022 年：北京、上海、江蘇、浙江、福建、廣東等省市的郵政快遞網點，先行禁止使用不可分解的塑膠包裝袋、一次性塑膠編織袋等，降低不可分解之塑膠膠帶使用量 • 2025 年：全國範圍內之郵政快遞禁止使用不可分解的塑膠包裝袋、塑膠膠帶、一次性塑膠編織袋等

資料來源：中華人民共和國國家發展和改革委員會。

(二)推廣應用替代產品和模式

研發推廣綠色環保的塑料製品及替代產品，例如在商場、超市、藥店、書店等場所，推廣環保布袋、紙袋等非塑膠製品和可生物分解購物袋，並提高民眾取得的便利性(如設置自助式、智慧化投放裝置)；在食品包裝、餐飲及外賣方面，生鮮產品使用可分解包裝膜、袋，以及使用符合食品安全要求的秸稈餐盒等以生物為基礎產品、可分解塑膠袋等替代產品。此外，塑膠製品生產商除需嚴格遵守規範，並生產符合標準之塑膠製品，且不得違規添加對人體、環境有害之化學添加劑外，亦需提升塑膠製品的安全性和回收利用性能，採用新型綠色環保功能材料，加強可循環、易回收、可分解替代材料和產品之研發，以降低應用成本、增加綠色設計之產品供給。

對於電子商務、外賣等平台加強管理，制定一次性塑膠製品減量替代實施方案，並向社會大眾發布執行情況，同時以連鎖商超商、大型集貿市場、物流倉儲、電商快遞等為實施重點，推動企業透過設備租賃、融資租賃等方式，積極推廣可循環、可折疊包裝產品和物流配送工具，並鼓勵企業使用商品和物流一體化包裝，建立可循環物流配送回收體系；此外，亦強化企業綠色管理責任，推動綠色供應鏈，培育有利於規範回收和循環利用、減少塑料污染的新型態商業模式。

(三)規範塑膠廢棄物回收利用和處置

加強塑膠廢棄物回收及清運，包括透過結合垃圾分類，加大塑膠廢棄物等可回收物分類收集和處理力度，禁止隨意堆放、傾倒造成塑膠垃圾污染，並在塑膠廢棄物產生量大的場所增設回收設施。另一方面，推動電子商務外賣平台、相關部門及企業的多方合作，在重點區域設置快遞包裝、外賣餐盒等回收設施，並建立健全廢棄薄膜塑膠回收體系，以及廢舊漁網漁具回收處置規範。此外，透過推動規範塑料廢棄物資源化利用和無害化處置，並開展塑料垃圾專項清理，提高塑膠廢棄物資源化利用水準，加強垃圾焚燒發電等企業的運行管理，確保各類污染

物穩定達標排放，以最大限度降低塑膠垃圾直接掩埋量，解決隨意傾倒衍生之塑膠污染問題,以及農藥化肥塑膠包裝等清理整治工作,逐步降低農田殘留薄膜量。

為了有效推動前述三項任務，該「意見」也提出建立健全法規制度、促進相關科技及技術的研究，並嚴格監督與執法，以完善相關政策及措施的推動，以期可以有效解決中國大陸塑膠廢棄物的問題。本研究僅歸納整理「關於進一步加強塑料污染治理的意見」重點資訊，相關細節詳見中華人民共和國國家發展和改革委員會所發布之內容。

第三節 台灣資源循環與塑膠減量措施

循環經濟議題時常成為各國政府理想的發展模式，也是追求永續發展的具體思維，雖然我國目前尚未針對循環經濟制定專法，廢棄物管理及資源循環利用是透過「資源回收再利用法[36]」及「廢棄物清理法[37]」兩部母法進行規範，而我國資源回收體系發展至今，已有令全世界刮目相看的成果，更提供台灣發展循環經濟的重要基礎。以下首先將針對我國資源循環法規架構及發展策略進行說明；另一方面，海洋廢棄物已成為全球關注之議題，我國執行塑膠減量政策已十餘年，迄今仍持續推動減塑措施，以期在永續發展目標上與國際接軌。

一、 資源循環規範

我國「資源回收再利用法」於 2002 年制定，旨在節約自然資源使用，減少廢棄物產生，促進物質回收再利用，以減輕環境負擔，並要求生產者負擔一定程度之回收責任義務，強化產品在生命周期後端之處置；而於 1974 年制定之「廢棄物清理法」則是為有效清除、處理廢棄物，改善環境衛生，維護國民健康，以及訂定違反規定之相關罰則，加強執法力度，同時針對容易對環境造成污染的產品另制定相關辦法進行管制，從源頭減少廢棄物的產生。

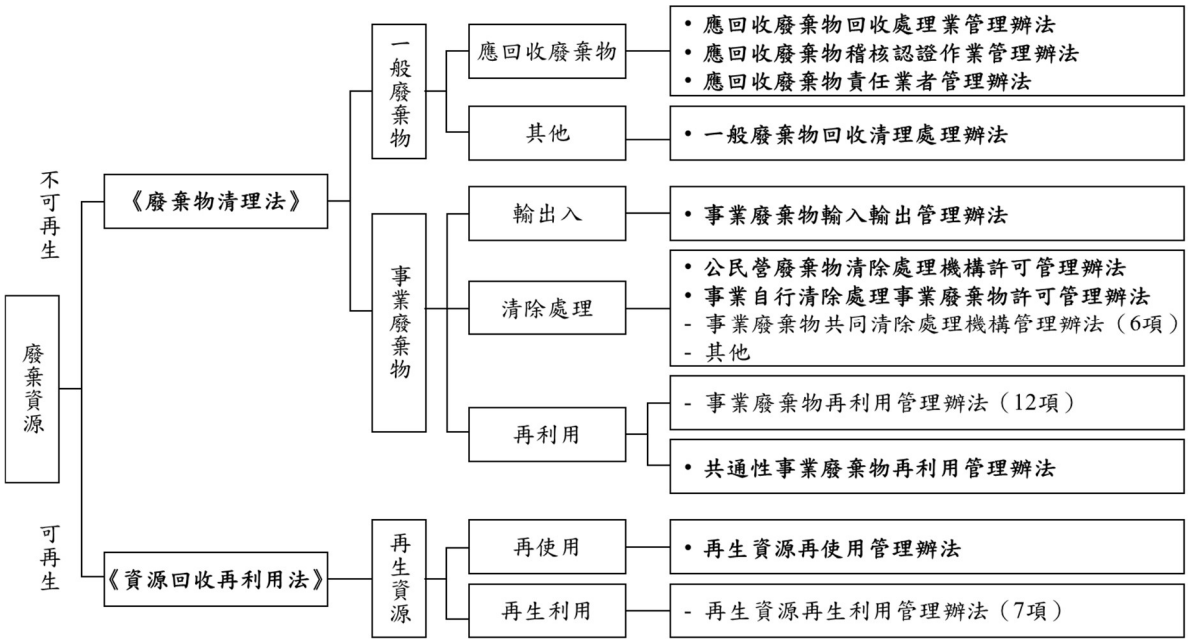
在我國廢棄物管理整體法規架構上(圖 1-6),首先可以物質原效用減失但符合再生資源條件，作為分別兩部母法之適用基礎，若符合再生資源條件，則適用「資源回收再利用法」之規範，反之則為「廢棄物清理法[38]」，兩者針對不同類型之廢棄資源，由不同主管機關制訂法規與執行。「廢棄物清理法」將廢棄物分類為「一般廢棄物」與「事業廢棄物」，一般廢棄物之回收、處理及再利用等辦法，由中央主管機關行政院環保署制定，事業廢棄物再利用則由各產業主管機關制定管理辦法；「資源回收再利用法」則以「再使用」與「再生利用」作為分類，並由各目的事業主管機關分別制訂其辦法。雖「資源再利用法」是作為廢棄物再利用的法規

[36] 為節約自然資源使用，減少廢棄物產生，促既物質回收再利用，減輕環境負荷，於 2002 年 7 月 3 日公布「資源回收再利用法」，並於公布後 1 年實施。現行為 2009 年 1 月 21 日修正版本。

[37] 為有效清除、處理廢棄物，改善環境衛生，維護國民健康，於 1974 年 7 月 26 日公布「廢棄物清理法」。現行為 2017 年 6 月 14 日修正之版本。

[38] 依據「廢棄物清理法」第 2 條對廢棄物之認定：「一、被拋棄者。二、減失原效用、被放棄原效用、不具效用或效用不明者。三、於營建、製造、加工、修理、販賣、使用過程所產生目的以外之產物。四、製程產出物不具可行之利用技術或不具市場經濟價值者。五、其他經中央主管機關公告者。」

基礎，但在廢棄物處理的整體法規內容制訂上，仍是以「廢棄物清理法」較為完整，且兩部法規內容概念重疊之部分，亦以該法較為具體。



資料來源：台灣經濟研究院，台灣經濟研究月刊第 42 卷第 6 期(2020.05.21)；本研究整理。

圖 1- 6　我國資源循環相關法規及立法架構

由此可見，廢棄物管理是由不同政府部門所管轄之產業範疇制定廢棄物專法，而非以廢棄物之種類制訂，雖具有各主管機關可依據產業發展狀況制定管理辦法，並公告各產業之主要廢棄物品項，以利管理之優點；然而，此管理模式當同種類或同性質之廢棄物從不同產業產生時，便會出現負責之主管機關不同、廢棄物歸類也不同之情形，且不同主管機關在管理同性質廢棄物時，也有可能產生對法規解釋有所落差，因此行政院環保署在 2018 年制定「共通性事業廢棄物再利用管理辦法」，以解決部分跨部門管理之問題，但仍有部分同性質廢棄物無法透過此辦法進一步解決[39]。

在我國政府與民間皆有推動資源永續循環的意識下，完整的法規配套措施則與推動的成效呈現正向關係，因此如何使各項廢棄物較容易於跨產業間流動，將使資源再生利用上有較大的操作空間。雖我國未針對循環經濟制定相關規範，但近年我國政府將「廢棄物資源化」作為「五加二產業創新」重要政策之一，除透過健全法令、提升技術及良善管理等機制外，行政院環保署亦於 2018 年 1 月提出「資源回收再利用推動計畫」(107 至 109 年)，從物質生產、消費、廢棄及再生等各階段，推動物料永續循環，將廢棄物資源化妥善運用(表 1-9)[40]，以替代自然資源開採，改變「開採、製造、使用、丟棄」的線性經濟模式，達成「資源可持續回復，循環再生」的循環經濟模式。

[39]「循環經濟與臺灣廢棄物法規之現況探討」(2020.05.21)，台灣經濟研究月刊第 42 卷第 6 期。
[40] 參考並彙整自行政院「政策與計畫」之「重要政策」及「院會議案」內容。

表 1-9 我國循環經濟發展重點策略

階段	效益	策略
生產	增加資源使用效率	● 健全物料基線資料，掌握全國物料使用情形：盤點關鍵物料能資源使用情形，以提升使用效率及循環率。 ● 推動朝更耐久、易修復、可回收之易循環的產品設計：推動搖籃到搖籃(cradle to cradle)設計，以減少原物料開採，讓材料資源不斷循環利用；鼓勵業者商品朝環保化設計，商品取得環保標章可享回收清除處理費優惠。 ● 促進產業鏈結共生，提高生產流程能資源效率，減少廢棄物產生。
消費	減少浪費	● 創造綠色消費模式、減少使用拋棄式產品、加強教育及宣導：減少一次用飲料杯、限制包裝飲用水、購物用塑膠袋及免洗餐具等一次性用品使用；推動產品重複使用示範計畫，落實廢棄物源頭減量精神。 ● 推動政府綠色採購，公共工程使用再生粒料：依《政府採購法》授權政府在招標時，可優先採購具有環保標章或效能相同之產品，目標為 109 年政府機關綠色採購金額達 90 億元。另底渣是焚化爐燃燒廢棄物後剩下的殘渣，處理後的再生料粒，可作為工程之替代料粒，目標為 109 年各縣市使用焚化再生粒料數量於公共工程比例達 70%。 ● 延長產品壽命及延伸生產者責任制：透過媒合維修管道和延長產品保固等方式延長產品壽命。另推動生產者保留產品所有權，帶動生產者延伸責任制，也就是生產者須負起產品使用後的回收、再利用或處理責任。
回收	減少廢棄	● 強化回收循環體系，加強前端分類及回收成效，升級回收再利用：加強回收廢塑膠、工業用包裝材、關鍵金屬物料、營建廢棄物等工作。 ● 強化再生能源技術及新興產業發展，促進能源回收：如建置廚餘生質能源廠、推動小型廚餘堆肥工作，有效提升生廚餘、農林資材、禽畜糞尿等有機廢棄物再利用管道，產出之沼氣純化後用於發電，沼液、沼渣供農地提升肥分利用。 ● 完備法規制度，檢討資源回收再利用相關法規。
再生	強化循環程度	● 確保二次料或再利用產品品質，與建立監督機制，完備再利用規範。 ● 加強技術研發與創新，強化資源再生與回收再利用的資源循環技術，如補助廢棄物技術創新研發、提升底渣再利用技術。 ● 提供經濟誘因，刺激物料循環及循環經濟之推動。

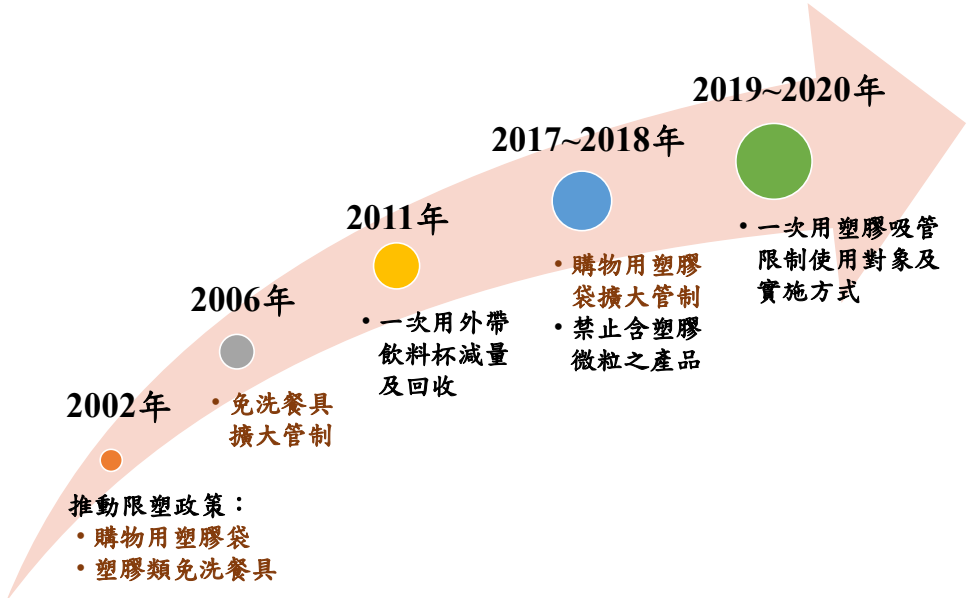
資料來源：行政院「政策與計畫」網站資料(2018.03.02)；本計畫整理。

近年全球積極推動抑制海洋廢棄物之行動，尤其對於塑膠廢棄物之循環利用方式，除透過制訂個階段之目標引導消費者減少塑膠製品之使用，同時創造生產者研發及生產對環境友善之塑膠產品，已為各國努力的方向。依據「廢棄物清理法」第 15 條之規定，物品或其包裝、容器經食用或使用後，若為不易清除及處

理、有害物質、具回收再利用價值之產品，由其責任業者[41]負責回收、清除、處理，並由販賣業者負責回收；另依據 16、17 條之規定，責任業者應繳納回收清除處理費，作為資源回收管理基金[42]。此外，為有效抑制對環境有污染之虞的廢棄物產生，中央主管機關得依據 21 條公告禁用或限制製造、輸入、販賣、使用；另亦可依據第 22 條制訂回收獎勵金方式，回收應回收廢棄物之種類及其回收獎勵金數額。我國雖未特別針對塑膠廢棄物之特定物質制訂管理方式，但現行法律框架制訂塑膠減量相關措施、未來目標及國際推動目標接軌，以下進一步說明。

二、 塑膠減量措施

根據台灣非營利社會團體荒野保護協會過去響應國際淨灘行動(International Coastal Cleanup, ICC)之統計數據顯示，寶特瓶、塑膠吸管、免洗餐具、手搖飲料杯和塑膠袋為海洋垃圾前 5 名，為有效抑制海洋廢棄物，自 2002 年起即陸續針對一次用物品，在有替代品的情形下，用法令限制使用，並務實針對難以執行情形，訂定排除條款，規範範疇包括購物用塑膠袋、塑膠類免洗餐具、一次用外帶飲料杯、塑膠微粒的產品及一次用塑膠吸管等進行規範(圖 1-7)。其中，除一次用外帶飲料杯之管制手段是採回收獎勵[43]外，其他則是採限制其使用進行管制[44]，藉由法令引導，以循序漸進方式推動，讓販賣業者配合政策逐步改變營業模式、民間企業發展替代材質技術或新型消費模式、民眾調整消費習慣，以下分別說明。



資料來源：行政院環保署一次用產品源頭減量宣導網站；本研究整理。

圖 1- 7 我國限塑相關政策推動進程

[41] 責任業者為該物品或其包裝、容器之製造、輸入或原料之製造、輸入業者。
[42] 委託金融機構收支保管；其收支保管及運用辦法，依「資源回收管理基金非營業基金部分收支保管及運用辦法」執行。
[43] 依據「廢棄物清理法」第 22 條訂定授權辦法。
[44] 依據「廢棄物清理法」第 21 條訂定授權辦法。

(一)購物用塑膠袋

為呼應聯合國及國際對海洋塑膠垃圾議題的重視，環保署自 2002 年即制訂作業辦法[45]推動購物用塑膠袋減量工作，於 2002 年 7 月 1 日起規定量販店、超級市場、連鎖便利商店等 7 大類約 2 萬家商店不得免費提供購物用塑膠袋，並禁用厚度低於 0.06 公釐的塑膠袋，以養成民眾自備購物袋的習慣。然而，塑膠袋增厚之後，重複使用的情況並未隨之提高，導致塑膠袋使用重量不減反增，因此環保署於 2006 年頒布「限塑政策精進方案」，取消對有店面餐飲業購物用塑膠袋厚度、不得免費提供之限制，改由源頭課稅方式以量制價[46]；另一方面同時加強回收再利用，於 2006 年 5 月起由清潔隊試辦塑膠袋回收，並待再利用管道健全後，公告塑膠袋為「執行機關一般廢棄物應回收項目」，配合垃圾強制分類由清潔隊全面進行回收。此外，部分各地方政府亦祭出相關管制措施，如台北市及新北市推出兼具購物及專用垃圾袋功能的賣場購物袋，並持續擴大合作店家；台北市亦與量販業者合作推出「押金環保袋」，給付購物袋押金，並可在 30 天內退還購物袋同時取回押金。

至 2018 年起更擴大管制對象，從現行 7 大類增至 14 類，擴增管制對象包括藥妝店、醫療器材行、家電攝影資訊及通訊設備零售業、書局及文具零售業、洗衣店業、飲料店業及西點麵包店業，總計約 10 萬家業者不得免費提供購物用塑膠袋。此外，由於 100%生物可分解塑膠袋無法由外觀分解材質，且僅能於適合條件下自然分解，因此同步將其列管為不可免費提供項目，同時環保署也明確規範購物用塑膠袋種類，包括手提袋、背心袋、腰孔袋、T 型袋等。另針對垃圾費採隨袋徵收之地區，要求轄內量販店、超級市場、連鎖便利商店之購物用塑膠袋全面改為可做為專用垃圾袋使用之兩用袋(即不再販售一般購物用塑膠袋)，供消費者付費購買。依據環保署資料顯示，2002 年實施管制後，估計塑膠袋使用由每年 34.3 個減少至 14.3 個(減幅達 58%)；而至 2018 年擴大管制對象後，每年將再減少約 25 億個。

(二)塑膠類免洗餐具

我國 1980 年代由於 B 型肝炎盛行，考量可能透過共用餐具互相傳染，因此衛生署研擬出餐飲業管理政策—推行用公筷母匙和免洗餐具，鼓勵及規定飲食店家採用拋棄式餐具，雖然後來醫學研究證實 B 型肝炎不會透過口水傳染，但「免洗餐具」已經成為民眾眼中「衛生飲食」、「便宜方便」之象徵。由於民眾生活型態改變，再加上外飲、外食機會增加，消費者行為從使用可重複餐具轉向大量使

[45] 原於 2002 年 12 月 18 日公告「購物用塑膠袋及塑膠類（含保麗龍)免洗餐具限制使用政策執行認定原則」，改法於 2006 年 6 月 9 日廢止，並於同日分別公告「購物用塑膠袋限制使用對象、實施方式及實施日期」及「免洗餐具限制使用對象、實施方式及實施日期」。

[46] 自 2008 年 1 月 1 日起將塑膠袋公告為應回收廢棄物，納入資源回收管理基金管理會（簡稱基管會)運作，同步推動業者自行建構回收再利用體系，由責任業者履行生產者責任，藉由業者增加製造成本而提高塑膠袋售價，達以價制量目的。

用一次性免洗餐具，而在使用後未妥善的處置，導致一次性免洗餐具成為名列我國海洋廢棄前五名之產品。

環保署有感於一次性免洗餐具對環境造成的負擔，希望逐步改變民眾拋棄型之消費型態，減少免洗餐具之使用，自 2002 年 7 月規定公部門、私立學校、百貨公司及購物中心、量販店、超級市場、連鎖便利商店、連鎖速食店、有店面餐飲業等 8 大類管制對象不得提供塑膠類免洗餐具。至 2006 年 6 月 9 日擴大管制政府部門、學校餐廳內用飲食不得提供各類材質免洗餐具。至 2019 年 8 月 8 日更新增百貨公司、購物中心及量販店餐廳內用不得提供各類材質免洗餐具。而以其他替代材質[47]、完全生物可分解材質製成之免洗餐具則不再限制使用範圍內，以及特殊情況(如傳染病、缺水)時可向地方主管機關提出暫時提供免洗餐具之申請。

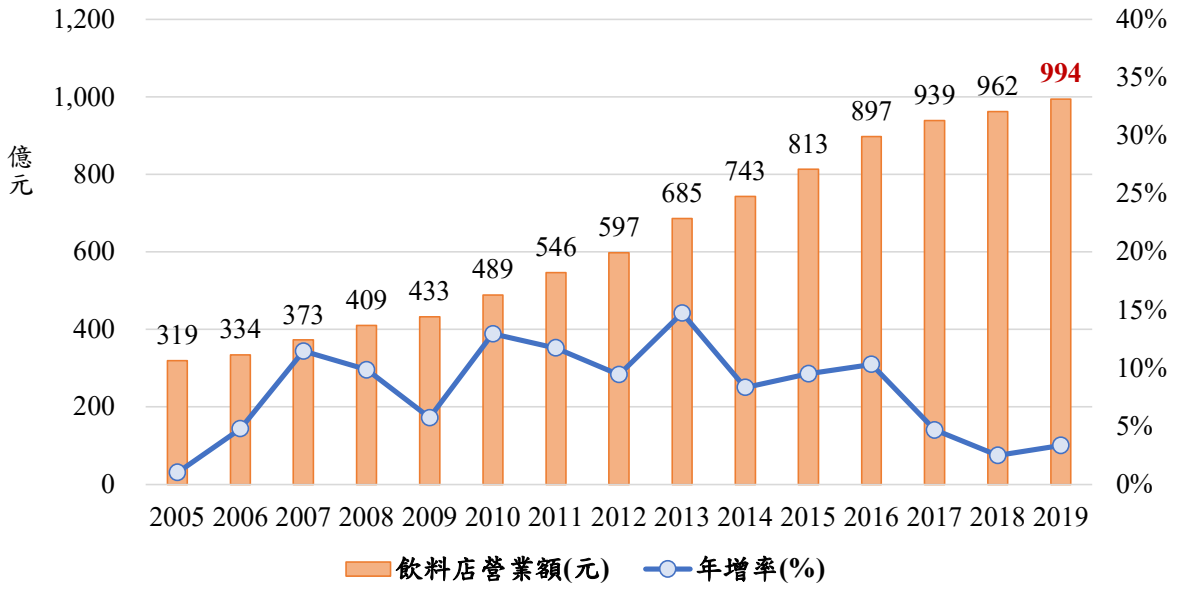
依據環保署資料顯示，管制措施實施後，管制對象之塑膠類免洗餐具使用個數每年減少約 20 億個(減量 85.54%)、重量部分減少約 19,899 公噸；而政府部門、學校餐廳之各類材質免洗餐具(含塑膠類)使用個數每年減少約 3.2 億個(減量 87%)、重量部分減少約 3,856 公噸。

(三)一次用外帶飲料杯

由於民眾飲食習慣轉變，除外食、外帶頻率增加，加上台灣人喜歡喝飲料，各式各樣的飲料店據點擴增、飲料口味推陳出新，人手一杯手搖飲料逐漸成為具有台灣特色的飲食文化。依據經濟部統計處之資料顯示，飲料店營業額自 2005 年逐年攀升，近年來更隨著外送及其他新興商業模式興起，帶動飲料店蓬勃發展，至 2019 年營業額已達 994 億元(圖 1-8)。若每杯飲料以 50 元估算，相當於產生將近 20 億個飲料杯，其中絕大部分都是一次性使用的塑膠杯、保麗龍杯，長久累積下來相當可觀，而早期我國環保意識較薄弱、欠缺完善回收機制，這些外帶飲料杯往往被視為一般垃圾掩埋、棄置，對於環境造成嚴重傷害。

有別於其他產品採用限制使用的措施，一次用外帶杯飲料則採取受管制對象實施「回收獎勵金」機制或提報「源頭減量計畫」之方式，減少一次用外帶杯之使用及增加回收，管制對象包括 2 家門市以上之連鎖飲料店、便利商店及速食店。以「回收獎勵金」之作法，消費者可持品牌及回收獎勵標示之一次用外帶飲料杯至其任一門市回收，管制對象應予兌換回收獎勵金每 2 個 1 元；而受管制對象若透過提報「源頭減量計畫」，須於計畫中訂定提供給消費者自備飲料杯之優惠措施，並須經環保署核可後實施，鼓勵消費者自備飲料杯進行消費，達到源頭減量的目的；而依核可後計畫執行之受管制者，則可免實施回收獎勵金規定(表 1-10)。依據環保署一次性產品源頭減量宣導網之管制成果，一次性塑膠杯管制對象使用量每年約 15 億個，此措施推動後約減量 10%，相當於減少 1.5 億個。

[47] 非管制之免洗餐具，包括以紙類或木片、甘蔗、蘆葦、麻、稻草、麥桿、稻殼等植物纖維為主體，塗佈塑膠、貼合塑膠薄膜或其他以物理方式即可分離出塑膠成分之免洗餐具，其塑膠成分含量重量低於該免洗餐具整體重量扣除蓋子重量後之百分之十以下者。



資料來源：經濟部統計處(2020)。

圖 1- 8 我國 2005～2019 年飲料店營業額

表 1- 10 一次用飲料杯管制措施

實施方式	原則	管制對象執行方式
回收獎勵金	管制對象應予提供消費者回收獎勵金每2個1元	• 自籌並管理回收獎勵金 • 飲料杯體明顯標示「回收獎勵金」標誌 • 兌換時應請民眾於回收獎勵金登記簿簽章，保存5年 • 同一民眾於同日內，兌換不得超過100元(同一門市) • 已兌換回收獎勵金之飲料杯上應戳洞或於標示處明顯註記 • 若民眾所持之一次用外帶杯非其所屬連鎖體系品牌，管制對象可拒絕回收獎勵金
提報「源頭減量計畫」	管制對象需依核可之計畫內容提供消費者自備飲料杯優惠	• 管制對象提報「一次用外帶飲料杯源頭減量計畫」並經環保署核可，方可提供給消費者自備飲料杯之優惠措施。不得因各項促銷活動而取消提供消費者折扣優惠。 • 優惠包括現金回饋、集點優惠、飲料加量等，範例如： - 現金回饋：購買之飲料容量650毫升(含)以上，每杯至少折2元，以下至少折1元；或飲料售價9折 - 集點優惠：購買1杯飲料集1點，集買至多10點可兌換或折抵至少30元之店內商品 - 飲料加量：如以中杯飲料價格購得大杯飲料，中杯與大杯飲料之價差至少2元 - 其他：更優惠之一次用飲料杯源頭減量方式 • 減量計畫經環保署核可後，應依計畫內容辦理，並於營業場所明顯處標示「提供自備飲料杯優惠」字樣，每字邊長至少2公分

資料來源：經濟部環保署一次用產品源頭減量宣導網。

(四)塑膠吸管

我國每年塑膠吸管使用量約 30 億根，塑膠吸管質輕、容易取得、體積小，然而使用後隨意棄置，使其成為歷年淨灘廢棄物排名前 5 名；另在國際上[48]，塑膠吸管對於海洋的危害引起各界重視，因此在限制使用之一次性塑膠相關法令的制定集管制清單亦包含吸管在內。考量減塑是國際趨勢，環保署為引導民眾改變習慣，優先從「不一定需要使用吸管」的內用環境開始管制，逐步引導民眾及業者適應。

我國於 2019 年 5 月 8 日公告「一次用塑膠吸管限制使用對象及實施方式」，自 7 月 1 日起，針對政府部門、學校、百貨公司及購物中心、連鎖速食業者，要求「內用」不得提供一次用塑膠吸管，替代方式包括直接飲用，或改用替代材質之吸管(如紙、竹、不鏽鋼、矽膠等材質之吸管)。此項規範排除經認定符合行政院環境保護署公告之環保標章規格標準項目「生物可分解塑膠」，並取得環保標章使用證書者，以及工廠出廠已附有吸管之商品，且公開陳列供選購者。此外，後續規劃於 2020 年擴大至其他提供餐飲業者，並至遲於 2025 年前，研析外帶使用一次用塑膠吸管的管制措施，因此政府亦呼籲相關業者即早因應，不主動提供吸管供消費者使用，而民眾亦可自備可重複清洗之吸管，以減少資源浪費；另針對市售利樂包所附吸管部分，將在蒐集國外經驗與國內各界意見後，審慎評估是否納入下階段管制措施中。

(五)塑膠微粒

由於塑膠微粒粒徑過小，污水處理設施無法有效收集去除，使用添加塑膠微粒產品，致易排入水域中。水中生物誤認為食物吞食後存於體內，再經由食物鏈進入人類體內(圖 1-9)，對健康造成危害。環保署於 2017 年 8 月 3 日公告「限制含塑膠微粒之化粧品與個人清潔用品製造、輸入及販賣」，自 2018 年起不得製造、輸入含塑膠微粒產品[49]，2018 年 7 月起不得販賣含塑膠微粒產品，管制產品包括洗髮用、洗臉卸妝用、沐浴用之化妝品類，以及香皂類、磨砂膏、牙膏等產品。

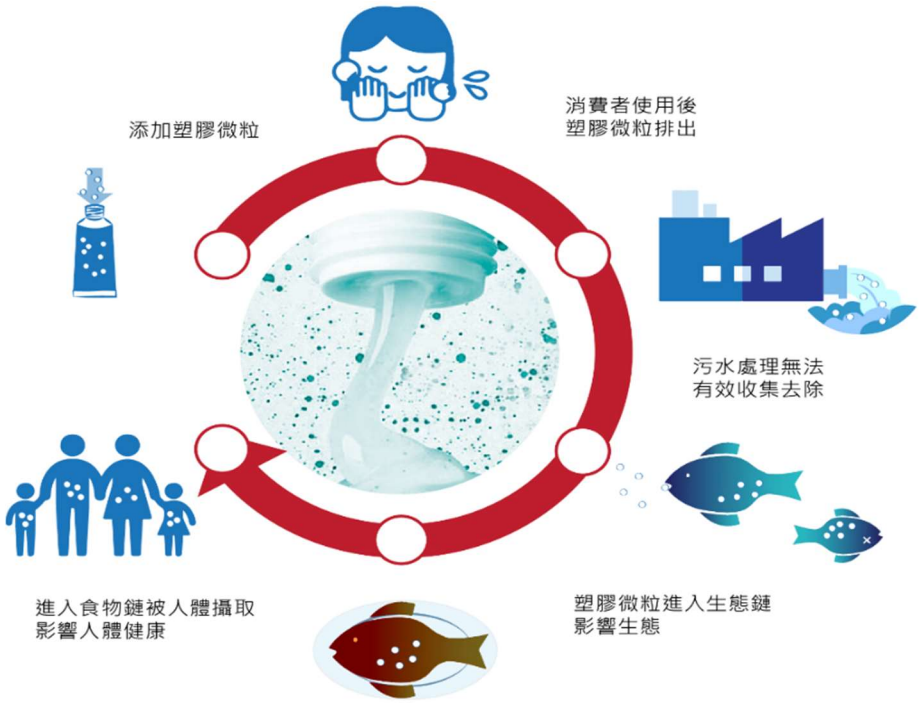
除此之外，2017 年 7 月環保署亦與環保公民團體[50]共同成立「臺灣海洋廢棄物治理平台」，並於 2018 年 8 月提出「海洋廢棄物行動方案行動計畫」(第二版)，執行期間暫訂為 5 年(2018～2022 年)，重點涵蓋「源頭減量」、「預防與移除」、「研究調查」及「擴大合作參與」4 大面向，分別採取不同策略(表 1-11)，以公私

[48] 第四屆聯合國環境大會 170 個與會國誓言在西元 2030 年前大幅削減免洗塑膠製品，歐盟已規劃將於 2021 年禁用包含吸管在內已有適合替代品的一次用塑膠產品。

[49] 塑膠微粒係指粒徑範圍小於五公釐，做為人體去角質或清潔用途之固體塑膠顆粒，其材質包含生物可分解塑膠。

[50] 參與之公民團體包括台灣蠻野心足生態協會、社團法人台灣環境資訊協會、海湧工作室有限公司、社團法人中華民國荒野保護協會、財團法人海洋公民基金會、財團法人慈心有機農業發展基金會、財團法人綠色和平基金會、財團法人黑潮海洋文教基金會、看守台灣協會、台灣環境保護聯盟、中華鯨豚協會、社團法人台灣重新思考環境教育協會。

協力為原則的實際與未來行動，減少海洋廢棄物之產生，以及帶動整體社會關注與響應；並針對購物用提袋、免洗餐具、外帶飲料杯及塑膠吸管等 4 項一次用塑膠製品，擘劃我國未來三階段限塑政策目標，於 2020 年擴大限用範圍、2025 年全面限用，預計在 2030 年全面禁用(圖 1-10)。



資料來源：行政院環保署一次用產品源頭減量宣導網站。

圖 1- 9　塑膠微粒對人體之影響示意圖

表 1- 11 台灣海洋廢棄物治理行動方案(第二版)

方案面向	策略	行動方案
源頭減量	政策規範	・進行中行動：5 項 ・未來行動：5 項
	企業生產者延伸責任	・進行中行動：1 項 ・未來行動：2 項
	教育及促進大眾餐與	・進行中行動：5 項
預防與移除	有效或於熱點移除廢棄物	・進行中行動：1 項 ・未來行動：3 項
	防止垃圾進入海洋	・進行中行動：14 項 ・未來行動：7 項
	教育及促進大眾餐與	・進行中行動：6 項 ・未來行動：2 項
研究調查	以研究監測掌握臺灣海岸/海洋污染狀況	・進行中行動：4 項 ・未來行動：6 項
	教育及促進大眾餐與	・進行中行動：3 項
擴大合作參與	擴大及強化多方合作關係	・進行中行動：2 項 ・未來行動：4 項
	擴大民眾意識及社會關注	・進行中行動：3 項 ・未來行動：1 項

資料來源：行政院環保署(108 年 8 月)，「臺灣海洋廢棄物治理行動方案」(第二版)。

資料來源：台灣環境資訊協會(TEIA)，https://teia.tw/zh-hant/recent/campaign/16043。

圖 1- 10 台灣限用一次性塑膠製品時程表

隨著電子商務平台的蓬勃發展，民眾購物型態改變，國內網路購物使得物流業務大幅成長，其所衍生大量使用包裝材料之問題，環保署為推動包裝減量，2019 年 10 月與網購業者訂定「網購包裝減量指引」，並授予業者「網購包裝減量標章」，呼籲消費者至有此標章的網購平臺消費。另也成立「網購包裝減量聯盟」串聯網購平台、包材業者及物流業者，啟動國內網購包裝減量政策，規劃 4 年分三階段逐步實施，達成減量目標。第一階段為於 2019 年底前達成包裝材總重量低於包裹總重的 10%、封箱膠帶不超過包裝箱長高總和的 2.5 倍；第二階段為至 2020 年底前達成包裝材單一可回收材質(紙或 PE)、包裝箱(袋)使用 100%回收紙或 25%塑膠再生材料製作、紙板保持原色、印刷面積小於 50%、包裝箱(袋)、緩衝材、膠帶不使用 PVC 等規範；第三階段為 2022 年網購包裝出貨使用可重複循環包裝箱(袋)達 10%[51](表 1-12)。環保署表示，參與此計畫的網購平台業者每年出貨量約 4,200 萬件，減量指引實施後，預計第一年可減少 1,700 公噸包裝材料[52]。

目前以指引、標章等機制的方式，讓業者自願加入配合，並藉由提高民眾環保意識，期盼消費者選擇願意與環保做得更好的通路購物，透過綠色消費減少對於環境的負擔。現階段多家電商業者表示，前二階段應有信心於規範時間甚至提前達標，然而第三階段可循環利用之包裝需設置回收站，亦會改變現有運送制度等商業模式，困難較大。另一方面，2020 年疫情(COVID-19)爆發，使網購數量大

[51] 目前擬議提前第三階段之目標至 2021 年前達成。
[52] 環保署環保新聞專區：「網購認標章，包裝減量不浪費！」(2019 年 10 月 21 日)。

增，導致要在 2020 年前達成第二階段包裝減量的目標有其難度，但政府包裝減量的目標不會改變，不排除透過法律規定等方式，來限制網購包裝或鼓勵減量[53]。

表 1- 12 網購包裝減量目標

規劃時程	減量目標
2019 年	•網購包裝以 90%產品重量對應 10%包裝重量為原則，即包裝材之重量應低於包裹總重量之 10% •封箱膠帶不超過包裝箱長度高度總和之 2.5 倍
2020 年	•使用之包裝材質需可回收且為單一材質(紙或 PE) •包裝箱(袋)以 100%回收紙或以摻配 25%以上塑膠再生料製作 •紙箱保持紙板原色，包裝箱(袋)印刷面積小於 50% •包裝箱(袋)、緩衝材、封箱膠帶不使用 PVC 材質
2022 年	•使用可回收循環之循環箱(袋)，使用比例提升至 10%

資料來源：環保署(2019)，網購包裝減量指引；本研究整理。

第四節 小結

2015 年聯合國啟動「2030 年永續發展目標」提出 17 項全球政府與企業共同邁向永續發展的核心目標，其中第 14 項即設定「保育及永續利用海洋生態系，以確保生物多樣性並防止海洋環境劣化」之目標，保護和可永續利用海洋及海洋資源，促進永續發展。然相關研究指出，一次性塑膠的廣泛及大量使用，已對海洋生態造成嚴重負擔，隨著環保意識抬頭、環境及生態問題日益受到重視，環境永續經營已成為當前最重要的課題之一。針對本計畫現階段之研究成果彙整如下：

一、 **環境友善之精神在於產品生命週期對環境的影響最小：**環境友善主要是指產品在設計、生產至回收之生命週期，不僅要減少物質和能源的耗用，以及減少有害物質的排放，亦須減少廢棄物(Reduce)、循環再生(Recycle)及資源再利用(Reuse)，以極大化產品的使用效率及極小化對環境造成的負面衝擊，亦需透政府制定相關措施、生產者發展環境友善產品及消費者建立正確的消費行為，達成環境永續發展目標。

二、 **全球性會議已訂定於 2030 年大幅度減少一次性使用、2050 年前使海洋垃圾零排放之限塑目標：**在全球層級方面，G20 峰會多次針對海洋垃圾問題提出討論，除設定到 2025 大幅度地減少海洋垃圾及其影響、2050 年前使海洋垃圾「零排放」的長遠目標外，同時也提出可採取的措施供各國參考；而 G7 中之加拿大、德國、英國、法國及義大利更簽署協議，目標在 2030 年以前企業實現 100%使用可回收、重複利用之塑膠材料，以及發展塑膠材料創新技術的目標。2019 年之舉行之聯合國環境大會，亦通過決議，於 2030 前大幅度減少一次性塑膠使用。

[53] 環境資訊中心，2020 年 4 月 20 日「疫情導致網購量大增 環保署長：今年包裝減量目標有難度」。

三、 **歐盟分別設定各階段之具體減塑目標，禁止使用已有替代品之塑膠產品，並要求各會員國訂定相關措施以達成目標：**在歐盟層則在整體限塑目標上，制定指令於 2021 年禁用已有替代品之一次性塑膠產品，另訂定到 2025 年歐盟市場上之塑膠包裝材料有 50%可重複回收利用或可經濟有效地回收利用、25%塑膠瓶原料必須來自回收塑膠(2030 年達 30%)，以及至 2029 年塑膠回收瓶回收率提高至 90%，並訂定於 2030 年所有塑膠包裝皆可重複使用之目標。

四、 **在全球限塑目標下，主要經濟體依據各國環境及經濟條件擬定合適之具體政策方向：**英國訂定到 2042 年以前消除可避免之塑膠廢棄物，並致力於 2050 年以前實現可避免之廢棄物降至零；韓國則於 2018 年制定減少塑膠生產量的「十年計畫」，預計在 2027 年以前逐步禁止一次性塑膠杯及塑膠吸管。而過去中國大陸為全球最大塑膠廢棄物進口國，為保護其人民健康及環境安全，該國自 2018 年實施固體廢棄物進口禁令，除使全球廢棄物出口流向出現轉變外，中國大陸訂定限塑目標因應國內外市場的變化，規劃自 2020 年逐步禁止、限制部分塑膠製品的生產銷售和使用、到 2022 年大幅度減少一次性塑膠製品消費量，並推廣應用替代產品；至 2025 年建立塑膠製品從生產到回收處置各環節之管理制度。

五、 **我國自 2002 年即開始陸續限制部分塑膠產品之使用，並於 2020 開始採取三階段限塑目標，預計至 2030 年全面禁用：**我國自 2002 年即陸續針對塑膠購物袋、免洗餐具、飲料杯、吸管及塑膠微粒，制定相關規範加以限制其使用、生產與販售，並逐步擴大管制對象。為因應國際趨勢，我國亦制定三階段限塑目標，於 2030 年擴大限用、2025 年全面限用，並至 2030 年全面禁用之具體目標。

六、 **相關政策涉及層面廣泛且複雜，在難以透過禁令、限制使用之措施加以規範者，則透過生產者延伸責任進行要求：**大部分國際組織或政府推動限塑政策，除透過法律規範(限制、禁令)、經濟手段(生產者延伸責任、對生產者及消費者課稅或收費)以外，亦常透過與企業合作，由企業帶頭推動減塑。然而，正確的使用方式、回收途徑，才能使塑膠廢棄物可以更妥善的管理及處理，而這一部份須透過建立消費者意識、負責任的消費行為才能達成。本研究發現，在政策制定上，除已有替代品之塑膠產品可明確採用限制、禁止使用有效進行約束外，部分產品因成份複雜、不易分類而導致回收效果不佳者，政府則是透過生產者延伸責任，賦予生產者更多改善回收品質、發展可生物分解之產品、充分利用再生資源之義務，以創造更加永續、可循環之環境友善產品，減少對環境的衝擊。

為擬定我國石化產業發展策略藍圖，並借鏡國際環境友善發展方向，同時貫徹 3R 之精神，本研究後續將於第二、三章說明環境友善替代產品發展趨勢與市

場機會，以及環境友善替代原物料與技術，並於第四章進一步分析塑料回收循環再利用技術現況與發展方向；最後，綜整前述各面向之研究成果，研提我國石化產業發展結合環境友善之策略與作法。

參考資料

1. 吳彥容，2019.05.27，簡介歐盟一次性塑膠產品指令，2019 年，經貿法訊第 252 期。
2. 行政院環保署，2019.08，臺灣海洋廢棄物治理行動方案(第二版)
3. 吳穎瑜，2013.03.26，南韓的廢棄物管理政策，香港立法會秘書處。
4. European Commission, “Closing the loop – An EU action plan for the Circular Economy,” Brussels, 2.12.2015.
5. European Commission, “A European Strategy for Plastics in a Circular Economy,” Brussels, 16.1.2018.
6. European Commission, “A new Circular Economy Action Plan For a cleaner and more competitive Europ,” Brussels, 11.3.2020.
7. Council of the EU, “Single-use plastics: Presidency reaches provisional agreement with Parliament,” 19.12.2018
8. Official Journal of the European Union, “DIRECTIVE (EU) 2019/904 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCILof 5 June 2019 , on the reduction of the impact of certain plastic products on the environment,” 5.6.2019
9. European Commission, “Changing the way we use plastics,”
10. European Commission, “Proposal for a DIRECTIVE OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on the reduction of the impact of certain plastic products on the environment,” Brussels, 28.5.2018.
11. “For G20 Resource Efficiency Dialogue 2019 and Follow-up of G20 Implementation Framework for Actions on Marine Plastic Litter—Chair’ s Summary,”
12. PlasticsEurop (2019), “Plastic-the Facts 2019”
13. Sang-Hun Lee,“Policies for Sustainable Resources Management in the Republic of Korea,”.
14. House of Commons Library (2020), “Plastic Waste-briefing paper,” 2020.03.31.
15. UNEP, “G20 Report on Actions against Marine Plastic Litter-First Information Sharing based on the G20 Implementation Framework,”
16. Emma Watkins (IEEP) and Jean-Pierre Schweitzer (IEEP), “Moving towards a circular economy for plastics in the EU by 2030,” 2018.10.12
17. G20 Germany 2017, “G20 Action Plan on Marine Litter,”
18. Ellen MacArthur Foundation(2019), New Plastics Economy Global Commitment Report.
19. Indorama Ventures(2019), Sustainability Report Executive Summary.
20. Closed Loop Partners(2020), Accelerating Circular Supply Chains for Plastics.
21. McKinsey& Company(2018), How Plastics Waste Recycling Could Transform The Chemical Industry.

22. McKinsey& Company(2018), No Time To Waste: What Plastics Recycling Could Offer.
23. Hildagarde McCarville(2019), Turning The Netherlands Into a Plastic Circular Hotpot.
24. Plastic energy, Congreso Internacional Tenerife Sostenible.
25. Woldemar d'Ambrieres(2019)，Plastics recycling worldwide: current overview and desirable changes.
26. 日本環境省，"Results of G20 Resource Efficiency Dialogue 2019 and follow up of the G20 Implementation Framework for Actions on Marine Plastic Litter," Retrieved from https://www.env.go.jp/en/water/marine_litter/2019g20fu.html
27. 荒野保護協會，Retrieved from https://www.sow.org.tw/
28. 行政院環保署，一次用產品源頭減量宣導網，Retrieved from https://hwms.epa.gov.tw/dispPageBox/onceOff/onceOffHp.aspx?ddsPageID=EPATWH
29. 全國法規資料庫，Retrieved from https://law.moj.gov.tw/Index.aspx
30. Ministry of Government Legisiation, Retrieved from http://www.law.go.kr/LSW/eng/engMain.do
31. CNN, "South Korea bans single-use plastic bags from major supermarkets," 2018.12.31, Retrieved from https://edition.cnn.com/2018/12/31/asia/south-korea-plastic-bag-ban-intl/index.html
32. 國務院辦公廳，Retrieved from http://www.gov.cn/zfwj/bgtfw.htm
33. Alexander H. Tullo(2019), Plastic has a problem; is chemical recycling the solution? Retrieved from https://cen.acs.org/environment/recycling/Plastic-problem-chemical-recycling-solution/97/i39
34. Alexander H. Tullo (2019), Firms back chemical recycling of plastics，Retrieved from https://cen.acs.org/environment/sustainability/Firms-back-chemical-recycling-plastics/97/i10
35. INEOS Styrolution and Agilyx Advance Polystyrene Chemical Recycling Plant in Channahon, Illinois，Retrieved from https://www.prnewswire.com/news-releases/ineos-styrolution-and-agilyx-advance-polystyrene-chemical-recycling-plant-in-channahon-illinois-300971066.html
36. Indorama Ventures and Loop Industries JV to Introduce New Era in Pet and Polyester Recycling，Retrieved from https://www.globenewswire.com/news-release/2018/09/24/1574797/0/en/Indorama-Ventures-and-Loop-Industries-JV-to-Introduce-New-Era-in-Pet-and-Polyester-Recycling.html
37. European Circular Economy Stakeholder Platform，Retrieved from https://circulareconomy.europa.eu/platform/en/commitments/pledges
38. Total(2019), Plastics Recycling: Total Announces Plans to Double Its Capacity of Recycled Polypropylene for The Automotive Industry，Retrieved from https://www.total.com/media/news/press-releases/plastics-recycling-total-announces-plans-double-its-capacity-recycled-polypropylene-automotive

39. Mike Scott(2019), Oil Majors Face Further Pain As Plastics Fall Out Of Fashion，Retrieved from https://www.forbes.com/sites/mikescott/2019/09/16/oil-majors-face-further-pain-as-plastics-fall-out-of-fashion/#4c0dd9495ac2
40. BASF(2018), BASF for the First Time Makes Products with Chemically Recycled Plastics，Retrieved from https://www.basf.com/global/en/media/news-releases/2018/12/p-18-385.html
41. BASF(2019), BASF Invests in Quantafuel to Jointly Drive Chemical Recycling of Mixed Plastic Waste，Retrieved from https://www.basf.com/global/en/who-we-are/sustainability/whats-new/sustainability-news/2019/basf-invests-in-quantafuel.html
42. Zero waste(2019), How To Solve The World'S Plastics Problem: Bring Back The Milk Man，Retrieved from https://zerowastesonoma.gov/news/how-to-solve-the-worlds-plastics-problem-bring-back-the-milk-man
43. Sean Ottewell(2019), How Industry Tackles Plastics Plague，Retrieved from https://www.chemicalprocessing.com/articles/2019/how-industry-tackles-plastics-plague/
44. Sabic(2019), Sabic Demonstrates Leadership in Sustainable Packaging Solutions at K 2019，Retrieved from https://www.sabic.com/en/news/21664-sabic-demonstrates-leadership-in-sustainable-packaging-solutions-at-k-2019

第二章　環境友善替代產品發展趨勢與市場機會

如本報告第一章所述海洋塑膠污染的問題，已經列入聯合國永續發展目標第14項海洋生態目標，在各國政府制定環境友善替代產品法規、民眾環保意識上升、和國際品牌廠商綠化供應鏈風潮下，發展環境友善替代產品已經成為塑膠產業未來發展趨勢。日本前首相安倍晉三主持(G20)大阪峰會領袖，會後發表2050年達成海洋零污染的目標宣言，同時明確記載塑膠在社會上扮演的重要角色。安倍晉三說塑膠是人類偉大的發明之一，日本重視使用後塑膠管理和技術創新解決塑膠污染問題。

塑膠製品價格相對低廉市場滲透率高，具有質輕、使用方便、耐用、且易加工特點，所以廣泛的應用在食衣住行育樂中。因此，在過去的數十年中，塑膠產量隨著人類的經濟活動，迅速成長了200多倍，年產量從200萬噸增加到4億多公噸。但是塑膠耐久不易分解的特性，由於不當棄置造成環境污染，變成海洋塑膠，進而危害地球物種的生存。根據統計，全球每年超過150萬個海洋生物，因廢棄塑膠而喪命；另外，塑膠經過焚化燃燒處理，若處裡不當則有廢毒氣產生等問題；而不完善的回收策略設計，則會產生一定比例無法回收再利用的塑膠廢棄物，繼續對全球環境造成危害。

塑膠污染問題是21 世紀的主要挑戰之一，解決塑膠污染成為全球環保風潮，國際品牌商、塑膠製造商、消費者紛紛提出解決方案，其中2018年10月Ellen MacArthur基金會提出了「新塑膠經濟全球承諾」方案中，列舉可回收產品設計、塑膠再利用、生質塑膠成為環境友善的解決方案。我國製造業是全球材料供應鏈上重要一環，在這消費者環境意識覺醒的時代，必須及早因應環境友善材料趨勢。

環境友善(Eco-Friendly)(又稱環境友好、自然友善或綠色友好)並非新的概念，國際上目前沒有一個明確的定義與解釋，但就字面上來看，可以解讀為「對環境所造成的損害較少的產品」。因此在各個應用領域裡，都可看見「環境友善產品」的應用。例如：提倡不使用化學燃料的電動車，減少燃料使用也減少碳排放；強調生物來源、或為回收料再生而成的塑膠製品；不含環境賀爾蒙的塑膠製品；甚是使用再生包裝材料、減少包裝材料使用的產品等。在此概念下，環境友善產品與目前循環經濟的概念息息相關，本章將從全球限塑發展、塑膠應用趨勢等角度切入，探討環境友善產品的趨勢與市場機會。

第一節　全球環境友善產品發展趨勢與機會

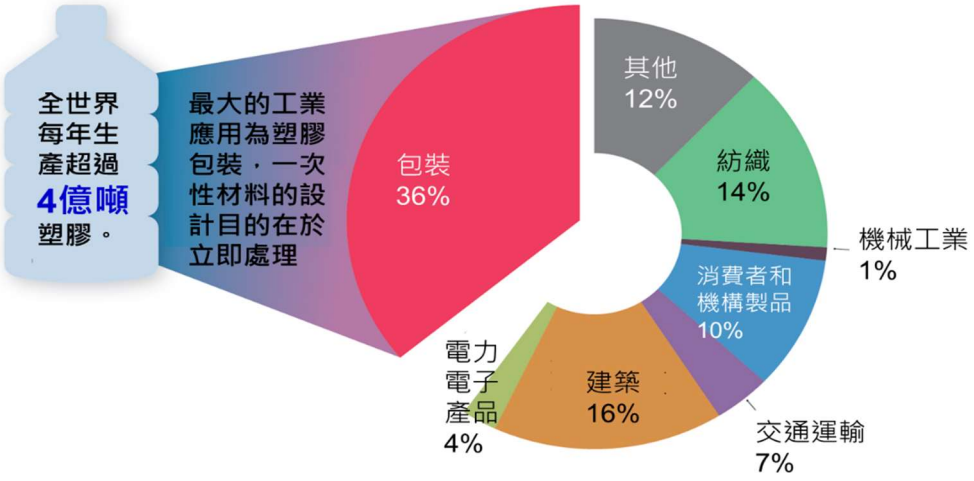
一、趨動全球環境友善產品發展的動力因素

根據聯合國報告估計，全球每年使用5,000億個塑膠袋，每分鐘就使用1,000萬個，韓國和加拿大人均塑膠年消費量接近100公斤(2015年)、美國為80公斤、歐洲為60公斤、中國大陸為45公斤，但印度只有10公斤、非洲最少，只有5公

斤。至於我國的部份，根據環保署一般廢棄物資料統計估算，每年人均塑膠用量約為 53 公斤。

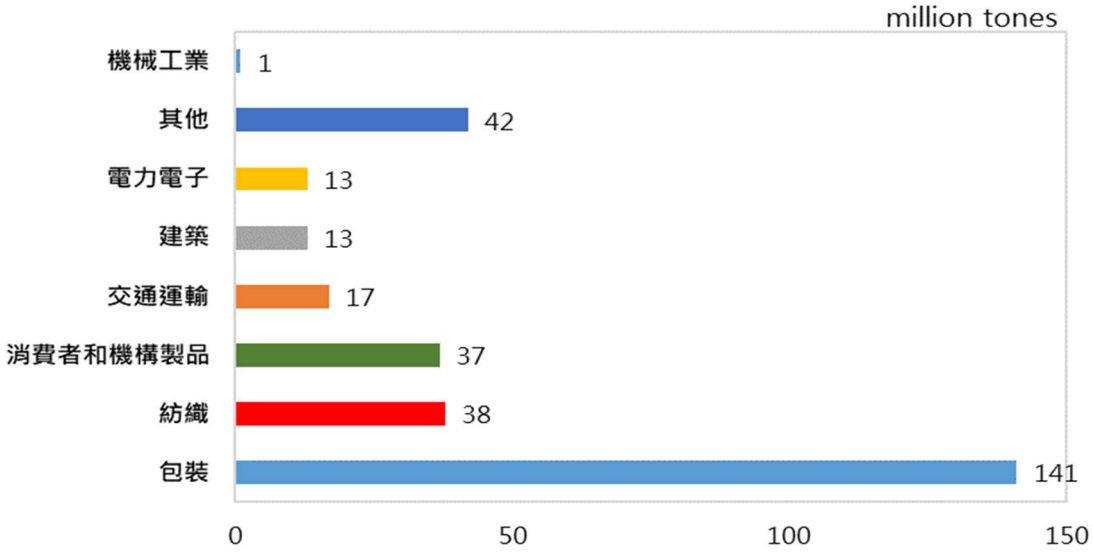
目前，多數塑膠都具有很高的技術含量，並已嵌入到日常生活中，使用期限可達十數年或數十年不等。根據歐洲塑膠協會的統計資料顯示，塑膠的應用範圍之廣，已成為人類生活中一項不可或缺的材料。就整體應用類別分析，以包裝領先，占所有塑膠應用的 36%，其餘則分佈於建築、汽車、電子、紡織、農業以及其他。塑膠於各應用類別所占的比例，請參考圖 2-1。

塑膠最主要的應用在包裝產業，但是通常它的使用壽命極短，使用一次之後便丟棄(部份有可能被回收利用)，相對的塑膠廢棄物的量也為之可觀。就 2015 年全球各應用領域所產生之廢棄量統計，達 1.41 億噸。塑膠於各應用中所產生的廢棄量，請參考圖 2-2。



資料來源：UN Environment

圖 2- 1　2015 年全球塑膠在工業應用狀況分佈



資料來源：Our World in Data

圖 2- 2　2015 年全球各應用領域所產生之廢棄塑膠量

二、 環境友善概念下創新的商業模式

目前已有許多國家將生產者延伸責任(Extended Producer Responsibility, EPR)的觀念納入法制政策，這些法令中明確要求生產企業的相關責任，包括：產品在生命週期裡每個階段對環境造成的影響，尤其是對終端廢棄物的回收、再使用、再生利用與最終處理。過去廢棄物棄置在大自然中的環境成本由所有人共同承擔的概念，影轉嫁到生產者的成本內，如此將驅使生產者在設計產品時，更加考慮環境友善的設計。

以塑膠製品為例，塑膠製品的可循環利用性，取決於最初的生產方法及設計，因此不利於塑膠循環利用的設計應會逐步排除，例如塑膠添加劑，其類型、功能及添加量(小於 1%的 PET 至 50-60%的 PVC)會依塑膠種類的不同而有相當大的差異。許多塑膠添加劑對人體健康恐會有潛在的危害性，然而在機械法循環利用的過程中，塑膠添加劑通常無法移除，而持續保留於塑膠中，因此在兼顧功能性的需求下，使用無毒性安全的塑膠添加劑及減少其添加量，將是未來塑膠朝循環經濟發展需要考量的要點。在此概念下，衍生出許多創新的商業模式應運而生，主要有幾種方向：

(一) 使用權與擁有權脫鉤

為了降低傳統商業模式下，化學品買賣以量壓價的模式，逐漸興起「化學品租賃」模式。「化學品租賃」的商業模式，是將客戶對化學品的「使用權」與「擁有權」脫鉤，客戶對化學品的使用，從現行需有化學品「擁有權」的商業模式，轉成為僅具化學品「使用權」的商業模式。由於化學品的「擁有權」仍在「供應商」身上，化學品使用過程中所衍伸出的運輸、儲放、管理、使用與操作的安全性、廢棄後的處理問題，均由對化學品性質與性能最了解的「供應商」進行操作與後續處理，降低對環境危害的風險，也改善傳統追求量與價的消費行為，減少不必要的使用與浪費。

(二) 盡量減少自然資源的消耗

減少自然資源消耗主要有兩個方向，一是從廢棄產品裡重新再製，降低對自然資源的消耗，例如：達能(DANONE)發表公司未來永續策略，到 2025 年前採用 100%可回收、可再利用或可堆肥的材料製成包裝，策略包括、改進產品的設計、在包裝中加入更多的回收材料；投資有效和高效的回收系統。雀巢(Nestlé)在瑞士成立環保包裝研發中心，專注於可回收、生物可分解或可堆肥聚合物以及功能性紙張、新包裝概念和技術的研究，以提高改善塑膠包裝的可循環利用，目標至 2025 年增加其在歐盟市場中銷售的各種食品的包裝中再生塑膠使用量。因應循環經濟所衍生的生產者責任，生產者將更注重後端回收的處理。

為使用生物基來源的原料為另一項改變，替代部份傳統資源的消耗。樂高(LEGO)預計在 2030 年前要將主要的積木產品與包裝材料採用可持續性的材料，樂高期望在不需要更換生產模具與生產參數的條件下進行材料的更換，消費者更

不會感受到產品因使用新材料後，產品有太大的差異。目前樂高已經採用 bio-PE(生質聚乙烯)取代產品中的 HDPE 與 LDPE。BASF 致力從植物來源萃取相關成分，開發個人護理產品，以取代傳統來自石化原料的產品。

第二節　環境友善替代產品市場

「對環境所造成的損害較少的材料」皆可稱之為環境友善材料，包含了具生物基、生物可分解、可堆肥以及傳統塑膠的回收再生材料等，這些對環境影響較小、消耗較少資源，甚至是解決廢棄塑膠問題的材料，便成為替代傳統原生塑膠材料的選項。以下就針對環境友善材料的發展，分述如下：

一、生質塑膠

增加生質塑膠減少對石化資源的依賴及溫室氣體排放，被視為推動塑膠產業朝循環經濟發展的方式之一。而生質塑膠的發展受限於商業化的原料有限，成本也需要持續減少。

(一) 生質塑膠的種類

目前的技術已可生產多樣化的生質塑膠，生產原料大致有油料作物、糖類作物及纖維原料等三項來源，其中油料作物主要生產的生質塑膠為聚醯胺(PA)類塑膠(俗稱尼龍)及環氧樹脂(Epoxy resin)；醋酸纖維素(Cellulose acetates)、再生纖維(Regenerated cellulose)及呋喃衍生聚合物(Furan-base polymer)則只能以纖維原料生產，原則上這兩類原料生產的生質塑膠大多屬於熱固性塑膠(thermosets)，不易重新塑形利用。

大部分熱塑性生質塑膠的生產原料仍以蔗糖及澱粉為主，未來則有機會擴大至纖維原料，常見的塑膠種類包括生質 PET(寶特瓶材料)、生質聚乙烯(PE)、生質聚丙烯(PP)、聚乳酸(PLA)等，其中大部分生質塑膠並不具生物可分解性，僅 PLA、聚烴基烷酯(PHA)、熱塑性澱粉(TPS)、聚丁二酸丁二醇酯(PBS)等具生物可分解性。

表 2-1 目前市場上可見的生質塑膠種類

	源自石化	石化x生物	生物衍生
生分解性	PVA、PGA PBS、PBSA、PBAT PETS 其他	Bio-PBS PBAT / PLA化合物 澱粉聚酯樹脂…	PLA PHA系（PHBH等）
非生分解性	PE PP PET PTT PVC PS ABS、PC、PBT POM、PMMA PPS、PA6、PA66 PU、酚醛樹脂 環氧樹脂 其他	Bio-PET Bio-PTT Bio-PA610、410、510 Bio-PA1012、10T Bio-PA11T、MXD10 Bio-PA56 Bio-PC Bio-PU 芳族聚酯 生物酚醛樹脂 生物環氧樹脂 生物不飽和聚酯...	Bio-PE Bio-PA11 Bio-PA1010

註：PVA：聚乙烯醇、PGA：聚乙醇酸、PETS：琥珀酸對苯二甲酸乙二酯、PTT：聚對苯二甲酸丙二醇酯、PC：聚碳酸酯、PBT：聚對苯二甲酸丁二醇酯、POM：聚縮醛、PMMA：聚甲基丙烯酸甲酯、PPS：聚苯硫醚、PA：聚醯胺、PU：聚氨酯

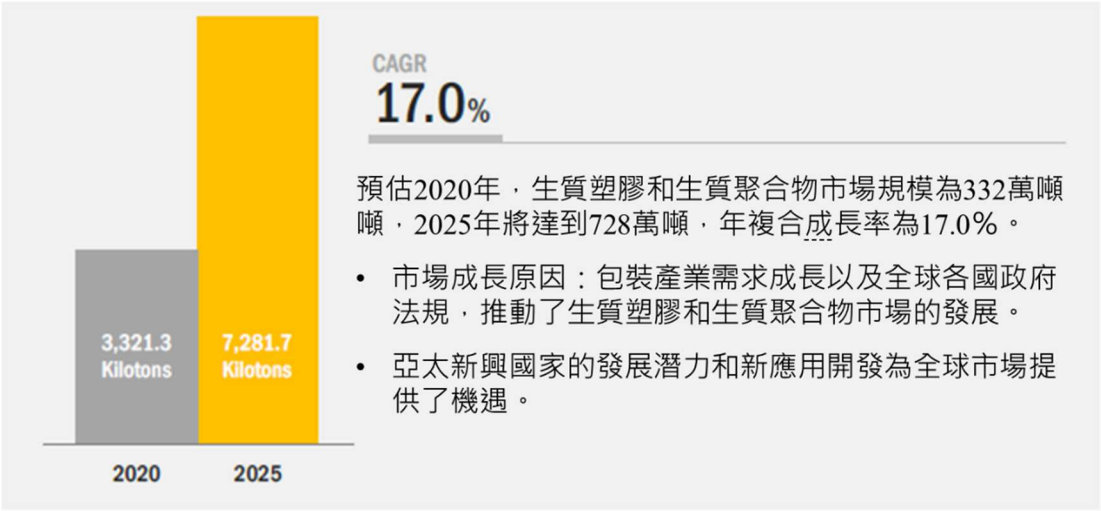
資料來源：工研院產科國際所

(二) 生質塑膠市場概況

根據 MarketsandMarkets 市場報告顯示，到 2020 年，全球生質塑膠和生質聚合物的市場規模估計為 332 萬噸，預計到 2025 年將達到 728 萬噸，複合年增長率為 17.0%。詳細圖示，請參考圖 2-3。

近期受惠於環境議題，許多國家頒佈禁用一次性塑膠，為不影響生活的便利性，部份國家改以生質塑膠的生物可降解塑膠為替代材料，造成了 2019 年生質塑膠市場出現了供不應求的動盪時期，如 PLA 和 PHA(儘管 PHA 有所擴張)。另外，市場亦增加了 PBAT、PBS、bioPE、含澱粉混練聚合物、環氧樹脂以及 bioPP 等產品。

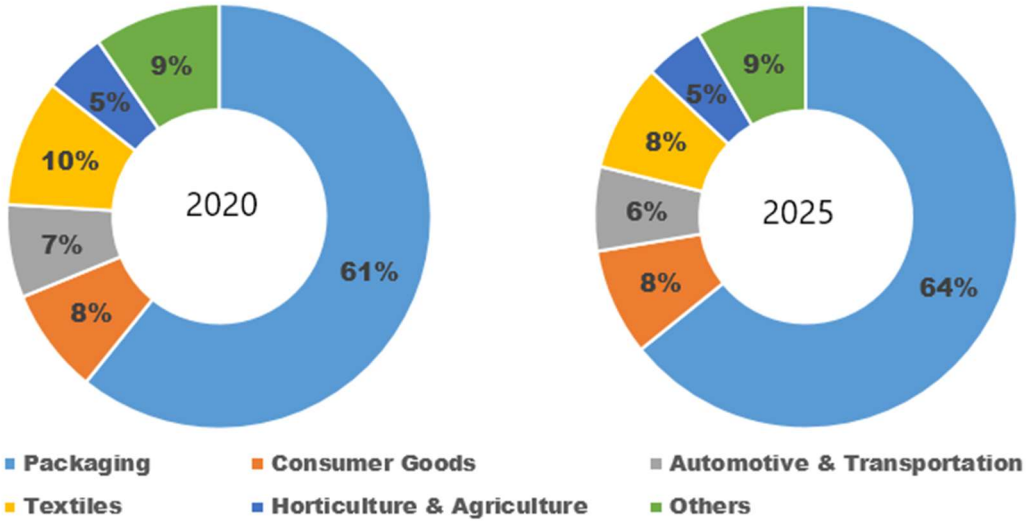
在眾多生質聚合物中，唯一呈現產量下滑的，為 bioPET。主要原因在於國際品牌大廠 CocaCola、百事可樂等朝向循環經濟方向發展以及進一步的遵循歐盟的塑膠回收政策，推動了 PET 回收再利用的回收系統，再加上 bioPET 價格高於傳統 PET，進一步的限制了其使用量。



資料來源：MarketsandMarkets

圖 2- 3 全球生質塑膠產量

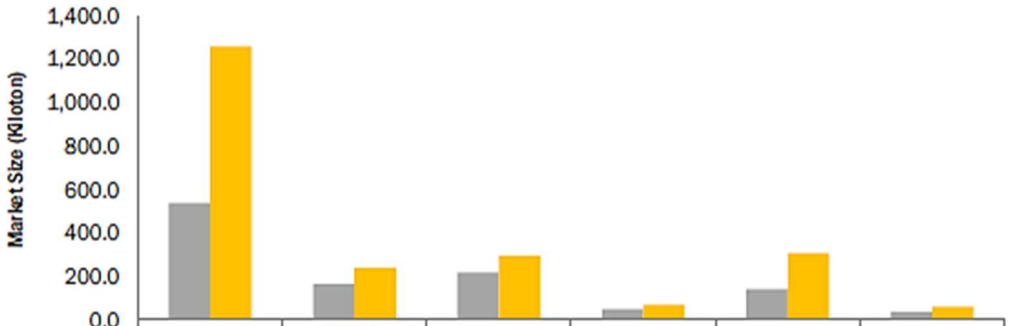
生質塑膠已廣泛地涵蓋各應用層面，包括工業、交通運輸、食品包裝和飲料裝瓶、生物醫學、肥料、農業及紡織品等。應用類型則是以包裝為最主要之應用領域，包括食品和飲料、電子商務和快速消費品，詳細的應用項目及比例可參考圖 2-4。



資料來源：MarketsandMarkets

圖 2- 4 2020 & 2025 全球生質塑膠應用成長狀況

由於近期受惠於環境議題，各國陸續頒佈禁用一次性塑膠之政策法規，為不影響消費者生活的便利性，部份國家改以生質塑膠中的生物可降解塑膠為替代材料，使得 PLA 在 2018~2019 年間出現了供不應求的動盪時期，預估 2020~2025 年 PLA 仍將主導生質塑膠市場。



	PLA	Starch blends	PBAT	PBS	PHA	Others
2020	536.1	163.7	214.9	48.6	141.1	34.9
2025	1,257.4	239.9	294.6	68.2	304.5	59.0
CAGR (2020-2025)	18.6%	7.9%	6.5%	7.0%	16.6%	9.0%

資料來源：MarketsandMarkets

圖 2- 5 2020 & 2025 已商品化生物可降解塑膠之市場規模

(三) 生質塑膠產能分佈與成長因素

生質塑膠的發展重心在歐洲，但亞洲是主要的生產中心，主因在於亞洲擁有豐富的生質作物以及大規模的耕地面積，並具有生物多樣性。2018 年，亞洲生產的生質塑膠已超過 50%，領先其它區域，其次為歐洲，約占 19%。歐洲則是生質塑膠產業發展的主要樞紐，在各項生質材料技術與研發能量居全球之冠，是全球最大的應用市場。

法國石油公司 Total 和荷蘭阿姆斯特丹的 Corbion 合資的 Total Corbion PLA，年產能 75,000 噸 PLA，2018 年底於泰國羅勇廠正式投產，進一步擴大了全球 PLA 的整體產能。其次，則為聚對苯二甲酸丙二醇酯(PTT)以及美國澱粉混合物生產的擴大。另外，PLA 與澱粉混合物，預估將持續顯著成長。

生質聚酰胺(PA)、生質聚乙烯(PE)和生質聚丙烯(PP)和聚己二酸丁二醇酯-共聚對苯二甲酸酯(PBAT)的新產能也將增加。聚乙烯呋喃酯(PEF)在 2019 年 BASF 退出與 Avantium 合資的 Synvina 公司後，預估可能在 2023 年之後，才能開始提供商業產能。

就整體環境而言，雖然全球各國提出了不同時程的禁止使用一次性塑膠製品禁令或者改以生質塑膠製品為替代品，但生質塑膠產能與成本限制，再加上未有相關的回收政策進行搭配，讓生質塑膠市場環境仍充滿挑戰。

二、 回收再生塑膠原料

目前全球廢塑膠的回收再利用集中在 PET、PE 與 PP 等三種塑膠材質，而且主要的回收方式以機械回收為主，但塑膠材料在經過多次回收使用後，面臨結構材質強度的減弱，以及再加工技術的限制，難以持續循環使用。為了克服機械法循環利用的限制，許多廠商開始尋求化學回收的方式來達到企業永續發展的承諾。

歐洲化學工業理事會為了促使歐洲能資源應用更具效率，成為其戰略發展的一部分，支持向循環經濟邁進。透過改善產品設計來實現產品在整個生命週期中避免不必要的材料和能源的損失，並且在材料首次使用之後仍能持續循環使用，讓材料價值最大化。回收技術包括熱裂解、溶劑萃取、氣化技術、生物降解等方式，如圖 2-6 所示。

資料來源：European Chemical Industry Council

圖 2- 6 循環經濟中的塑膠化學創新

在全球環保新政策的聲浪下，企業也開始積極的著手進行各項戰略來面對與因應。可口可樂(Coca Cola)在 2018 年 1 月宣布推動「沒有廢棄的世界」，預計在 2025 年達到所有包裝材質 100%可以回收，目前已經達到 87%。並在 2030 年所有的包裝都使用 50%以上的再生(回收)材料製作；雀巢(Nestle)於 2019 年 1 月公布未來將停止使用的塑膠材料、添加劑以及配件清單，預計在 2024 年完成。並從 2019 年 2 月起開始取消使用塑膠吸管，使用紙或其他材質取代。在美國已經開始推動可重複使用的容器服務，未來也規劃在其他國家推動。並預計在 2025 年前所有 PET 瓶裝水再生(回收)材料達 35%；麥當勞(McDonald)目標 2025 前，全球包裝材料不含塑膠成分且使用可回收或可再生的材質，並 100%回收使用過的包裝垃圾。表 2-2 就全球領導大廠所提出至 2025 年公司針對使用回收材料的發展戰略規劃進行綜整：

表 2- 2 國際大廠近年發展戰略

廠商	內容
百事可樂	• 2025 年之前，將可回收塑膠的包材含量提升至 25%； • PET 飲料瓶，2025 年，再生 PET 含量提高到 33%； • 與供應商及合作廠商進行合作，在部分市場對消費者進行科普教育，支持回收基礎設施的建設以及法規的改革； • 與加拿大塑膠回收加工企業路普工業公司(Loop Industries, Inc)簽訂合作協議。2020 年上半年前其產品包裝中採用路普工業公司的再生塑膠。 • 投資回收設施和技術，提高全球對塑膠廢棄物的回收和處理能力，推動再生材料在塑膠包裝中的應用。
達能	• 2025 年之前採用 100%可回收、可再利用或可堆肥的原料生產包裝材料； • 改善產品的設計； • 在包裝中加入更多的回收材料； • 投資有效和高效的回收系統； • 2025 年前，將致力於投資前 20 大銷售市場中的收集和回收基礎設施建設； • 達能公司在飲用水及其他飲料產品的包裝中，約採用 14%的再生 PET(rPET)，目標是 2025 年前，採用 rPET 的比例可提高至 50%，並繼續提高可再生材料及生物基材料在包裝中的應用。
莊臣 (SC Johnson)	• 加快推動塑膠回收和再利用技術的進步； • 為減少自身的塑膠足跡，支持塑膠瓶透過濃縮補充包重新填充； • 減少多餘塑膠的使用，從 2011 到 2017 年，已減少包裝中 950 萬公斤的材料。 • 2025 年起，100%塑膠包裝將可回收、可重複使用或可堆肥，目前已達到 90%； • 2025 年，提高北美和歐洲瓶中使用 PCR 塑膠比例從目前的 20%提高到 2025 年的 40%。

雀巢	• 在瑞士成立環保包裝研發中心，專注於可回收、生物可分解或可堆肥聚合物以及功能性紙張、新包裝概念和技術的研究，以提高改善塑膠包裝的可循環利用； • 增加其在歐盟市場中銷售的各種食品的包裝中再生塑膠使用量； • 塑膠瓶 rPET 含量提高至 25%； • 層壓食品包裝中的 rPET 層提升至 25%； • 玻璃罐和罐頭的瓶蓋中再生聚丙烯(rPP)含量達到 30%； • 肉製品托盤中的 rPET 含量達到 50%； • 收縮膜中的 rPE 含量達到 50%； • 與 Danimer Scientific 合作開發可生物分解(PHA)瓶。
可口可樂	• 2030 年所使用的包裝材料中，至少 50%材料為可回收材料。 • 研發「販賣回收一體機 Vencycling」。
北歐化工	• 至 2025 年將其再生塑膠的產量增加四倍以上； • 簽署新塑膠經濟的”A Line in the Sand”協議，致力於從源頭上消除塑膠廢物和污染。
帝斯曼	• 與泰國知名水上運動器材製造商 Starboard 合作，進行廢棄漁網的收集、回收再利用，用於製作衝浪板零部件等消費品的材料。
Faerch Plast	• 100%可循環再生 PET 製成的新包裝材料，用於食物包裝，有助於減少初級材料的用量，並且有助於建立 PET 循環系統。
Agilyx	• 擴大塑膠循環回收產能，將廢塑膠進行回收處理之後，用於還原生產乙烯、丙烯等樹脂。
杜邦帝人薄膜	• 推出新款 Harvest Fresh rPET 系列可熱封聚酯薄膜，可使消費後 rPET 再回收率提升至 50%。 • 從德國、瑞典、挪威、芬蘭和丹麥回收一次性塑膠瓶作為原材料。

註：達能公司已經與雀巢、百事可樂和 Origin Materials，共同加入 NaturALL 瓶子聯盟 (NaturALL Bottle Alliance)。該聯盟預計到 2021 年，將實現首批生物基含量 75%的塑膠瓶進行商業化生產，並在 2025 年實現第一批商業化規模 100%生物基材料的塑膠瓶

資料來源：European Chemical Industry Council

第三節 臺灣廠商的機會與挑戰

臺灣產業發展一直以來以出口為主要導向，加上地小人稠，產業發展所需要的能資源更是以仰賴進口為主，產業位階居於整體產業鏈中的中下游位置，產業發展以國際代工為主。產業型態則以中小企業為主，目前全台共有 140 萬餘家，吸納 881 餘萬的就業人口，是我國經濟成長和社會安定的基石。

另外，臺灣中小企業長期以來，因產業位階與發展導向，必需以更具有靈活的彈性及創意，才能與國際競爭，因此，在面對國際發展環境友善產品的潮流，必須隨時掌握趨勢，才能保持在市場的競爭位置，下列就我國廠商的機會與挑戰，分述如下。

一、機會

(一) 擁有成熟的機械回收技術能量

塑膠產業從石油開採到成為製成塑膠的原料，製品加工成為塑膠等消費市場所需的材料，是生活關聯性最高，支援關聯產業發展最強的角色，在國際這波限塑與循環經濟趨勢下，成為重要與不可或缺的重要產業。而臺灣廠商在塑膠回收方面，透過機械回收塑膠之發展，早已在國際開創出一片天地，最為完整的，就屬 PET 寶特瓶回收。加上產業的創意，將回收後的塑膠材料製成多項產品，成功的出口國際，因此被譽為「資源回收王國」。除了 PET 這個揚名國際的案例之外，其他具代表性的個案如下：

1. 歐萊德：臺灣知名的髮妝品牌，一直以來的發展，都以環保永續為出發，由最初的生分解「瓶中樹」的設計概念導入；近期更結合大豐環保回收廠商以及國內塑膠射出廠商集泉塑膠，以回收的牛奶瓶再生粒製成產品的瓶器及押頭，並獲得國際綠色環保獎項，成功的銷售於國際美髮市場；
2. 大愛感恩：回收各種廢棄塑膠，研發改質技術製作再生酯粒，將錯置的資源化廢為寶。近期，更朝向循環經濟的發展，打造產品的閉環迴圈，朝向單一材質的方向發展，目標為一體化，使用回收再生的聚酯粒製成鈕扣、拉鏈，以減少回收時，因不同材質而造成回收與再加工的困難。
3. 大豐環保：2012 年大豐環保科技成立綠色研發中心，從成立回收站到再生處理，到應用材料研發，建構線上環保媒合平台，提升廢棄物清運效率，落實回收處理一條龍模式。2017 年，大豐環保更結合網路，發表 zero zero App，讓回收變得即時，透過科技、傳統與創新的結合，打造資源循環生態系的商業模式。
4. 遠東新世紀：打造 r-PET 綠色材料循環應用產業鏈。
   - 遠東新世紀旗下主掌回收事業的子公司，於 2019 年正式獨立更名為「亞東綠材公司」，是臺灣寶特瓶再生工廠，也是臺灣 PET 再生原料主要供

應商之一。目前年產能 55,000 噸，可處理臺灣近一半的寶特瓶。

- 串連下游品牌應用品牌，如 Adidas 海洋廢棄物回收材料供應鏈的合作夥伴，主要負責處理回收海洋瓶，再透過遠東新世紀垂直整合的化纖一條龍，實現 Adidas「One Stop Shopping」，將廢塑變成海洋回收紗，重新打造出鞋材、衣服等紡織產品。根據統計，自 2016 年來，海洋回收紗產品計畫已成功攔截超過 2,000 公噸的海洋廢塑料，並轉化為全新的產品。

(二) 生質塑膠產業的發展已初步成型

我國在生質塑膠的發展上，就整體產業鏈現況分析，在上游不具產業優勢，故上游原料僅能仰賴國外進口，產業活動主要集中於中游進行改質和混煉、直接加工或接受委託代工製成成品，再交由下游應用端進行銷售，另外，更因國內市場有限，廠商多以外銷歐美市場為主。因此，就整體產業的現況分析，我國廠商在中下游的生質塑膠製品加工具極大能量。

另外，我國自 2002 年實施限塑政策以來，逐漸改變國內消費者的使用習慣，而執行的結果，造成 60%以上的塑膠袋工廠面臨倒閉或關門的困境，因此政府編列預算來輔導協助塑膠業者進行轉型，此舉使得符合環保概念的生物可分解塑膠製品得以在國內市場上流通，如以 PLA(聚乳酸)製成的塑膠類蛋盒、生鮮托盤、糕餅麵包盒、購物袋(便利商店咖啡提袋、特定夜市承裝食品之塑膠提袋等)等，促使生物可分解塑膠在臺灣市場應用上逐漸展開。

目前從事生質塑膠之業者除少數幾家大廠商外，多數亦仍集中於中小企業，原料仰賴進口，產品集中於生鮮蔬果盒、蛋盒及冷飲杯等食品容器，少部份以免洗餐具、包裝袋、購物袋及長效型的生活製品；製成品又以外銷歐美等國為主，但由於國內在生質塑膠的用量不大，尚不具回收的經濟價值，使用後廢棄的生質塑膠製品多以焚燒進行能源回收。國內從事生質塑膠發展的廠商列舉如下表所示。

表 2-3 我國生質塑膠廠商發展狀況及其主要產品

公司名稱	發展情形	主要產品
宏力	• Starch-blends，供替代一次使用性之塑膠包裝材 • 應用於射出類、吹塑類、押出加工等民生工業用途製品。	• 育苗杯、農業覆蓋膜、垃圾袋、便利商店咖啡袋(已於 2018 年限塑政策禁止使用)等產品
金元福	• 創立於民國 67 年，為真空成型大廠。 • 目前自行押出的板材包含了：PP、PS、PLA、PET、LDPE 及雙色 PP 和 PS。	• PLA 產品：食品盒、水果盒、杯架、托盤、蛋盒等產品，出口為主。
銘安	• 2003 年成立，2019 年增加兩大投資者—台塑與日本三井物產。預計未來將往上游生質原材料(PBS、PBAT)發展。	• 吸管、刀叉西餐具、購物袋、垃圾袋等生物可堆肥製品和樹脂製造商，製品以出口為主。

公司名稱	發展情形	主要產品
喬福材料	•喬福集團子公司，以進行環保材料(Biomass composite materials)，包含環保可分解、環保無鹵、環保植纖等開發。	•生物可降解農膜等相關產品、3D列印線材。
遠東新世紀	•遠東企業研究發展中心研究所-綠色材料組進行研發及新產品開發 1. 生質化學品開發。 2. 木質纖維素精煉技術。	•100% Bio-PET 包裝瓶。 •100% 生質聚酯衣。
長春集團	•工廠位於彰濱工業區內，生產 PBAT、PBS 生物可分解聚酯	•PBAT、PBS
彩麗薄膜	•主要以銷售塑膠產品為主。	•PLA 薄膜
宇瑩實業	•為專業吸管製造商，如坊間各大飲料專賣店、連鎖咖啡店、餐廳及便利超商所使用的吸管。	•PLA 吸管
協鈺	•2005 年投入研發 PLA 塑膠射出技術 •2007 年投入 PLA 耐熱成型製程，是 PLA 塑膠產品專業製造廠，生產耐熱 90℃以上安全環保產品	•餐具、幼兒用品、家用品、文具等。 •可依客戶需求開立專屬產品樣式台灣生產製造。

資料來源：工研院產科國際所整理

二、 挑戰

全球塑膠產業鏈的上中下游業者目前正透過創新循環技術發展以協助塑膠產業轉型循環經濟的商業模式，目的在減少塑膠廢棄物的同時也能創造經濟利益。雖然目前限塑政策的頒布對於臺灣塑膠原料業者影響尚未顯現，惟廠商認知此為國際不可逆趨勢。因此，也開始及早思考未來轉型方向，成為產業最主要的挑戰。

第四節 小結

一、 結論

(一) 發展環境友善材料成為國際趨勢

歸納國際發展趨勢，環境友善替代產品的開發，已成為產品未來發展之必要方向；限塑政策以及循環經濟，更已然成為產業發展之趨動力。根據聯合國環境署公布的統計資料所示，目前全球已有約 127 國，分別以各種形式來禁止使用一次性塑膠製品；另外，向來為全球環保領頭羊的歐盟，於 2018 年 4 月正式通過歐盟循環經濟行動方案(Circular Economy Package; CEP)成為正式法律，其中，環境友善替代產品的開發項目，更是在行動方案中扮演了重要的角色(包含低碳排與可循環再生的生物塑膠(bioplastics)、回收再生製品等)。因此，環境友善材料未來市場發展前景看好。

(二) 環境友善材料市場前景看好

由於綠色環保議題已成為國際趨勢，許多國家頒布禁用一次性塑膠，鼓勵使用替代性的綠色材料，使得環境友善材料的市場前景看好。根據MarketsandMarkets 市場報告顯示， 2020 年全球生質塑膠和生質聚合物的市場規模估計為 332 萬噸，預計到 2025 年將持續成長，達到 728 萬噸，複合年增長率為 17.0%。除了生質材料的發展具前景之外，回收再利用的材料更成為市場近年關注的焦點，不再以生質材料為發展的單一目標。如國際品牌大廠 CocaCola、百事可樂等朝向循環經濟方向發展以及歐盟的塑膠回收政策，進一步推動 PET 回收再利用的回收系統，改變先前發展生質 PET 的單一模式。

二、 建議

雖然從國際整體限塑情勢的觀察與分析，有助於業者加速導入環境友善材料，或是改變消費者使用一次性塑膠的習慣。但是，限塑政策仍有其限制與瓶頸，包括：未對源頭進行管制、限塑政策為部分限制而非全部限制。限塑只是一種手段，若需要擴大環境友善材料的使用，有賴政府、業者以及消費者多面向的貢獻，才可加速環境友善材料的發展。

(一) 政府在法規上引領協助產業因應環境友善材料發展

傳統石化塑膠產業正在經歷一種變動的趨勢，而發展友善環境材料成為技術創新的重要方向，因此部分國家正在轉移使用一次性塑膠製品的管制對象，不僅限制民眾一次性材料的使用，還要求企業肩負更大的責任。生產者必負責其產品的清潔或回收，包括產品於生產、分銷、使用、收集、再使用、回收、再加工和處置的所有過程的管理。針對生產者的延伸責任則可要求廠商在生產時，更加的去思考其後續的處理與管理。延伸生產者責任的概念就是擴大生產者必須肩負的責任，若生產者可以從源頭設計改變使用的材料，或是設計出易回收的產品，皆有助於環境友善材料的推廣。我國目前已經有幾個成功的案例，可以算是延伸生產者責任的展現。如歐萊德以環保永續為出發，由最初的生分解「瓶中樹」的設計概念導入，近年更結合大豐環保回收廠商以及國內塑膠射出廠商集泉塑膠，整合供應鏈的夥伴，擴大環境友善材料使用的更大效益。相關建議如下：

1. 政府在行政和立法上，協助我國產業界需妥善因應環境友善材料的風潮。例如:放寬回收塑膠用於食品包裝的限制。
2. 規範業者強化延伸生產者責任(EPR)構建環境友善材料供需鏈結，政府可以透過政策工作，強制企業肩負更多的責任；企業也必須自身做起，與供應鏈上下游夥伴一同提出更具經濟效益的環境友善材料解決方案，在企業獲益之餘也可兼顧環境永續的概念。

(二) 政府提供業者投入環境友善產品政策上的鼓勵

聯合國永續發展目標成為各國施政和法規的重要依據，我國為在全球產業供應鏈上具有關鍵地位。在國際品牌廠商要求，以及消費者對綠色材料的覺醒，對於環境友善產品的需求越來越多，我國政府也應加緊腳步，協助廠商在國內外發展相關環境友善產品，建議如下：

1. 將回收塑膠製品、生質塑膠製品列入政府綠色採購項目，提昇政府機關綠色採購比率，推廣綠色消費
2. 政府在政策上可提供研發補助、稅務減免等方式，協助環境友善材料產業的發展，包括生分解材料、可回收塑膠、生質塑膠等。

(三)建議塑膠原料業者及早因應環境友善材料產業趨勢

環境友善材料的風潮已經成為全球塑膠材料發展趨勢，未來產業鏈的材料要求需符合環境友善材料規範，我國業者為國際供應鏈上的一環，因此建議塑膠原料製造業者及早因應。建議作法如下：

1. 整合上游原料業、塑膠材料業、塑膠製品業、回收業、消費者力量建立完整塑膠分類、回收、再利用產業。
2. 研發先進回收塑膠再利用技術：
   (1) 研發、引進溶劑輔助化學觸媒降解 polyester、nylon 技術吸引各種類型的廠商投入發展，促進塑膠回收
   (2) 配合回收廠商建立再利用塑膠回收機制、分類技術
   (3) 研發再利用塑膠反應設計、混練技術、確保品質技術
   (4) 取得驗證機構生質塑膠、再利用塑膠摻配比例證明
   (5) 研發無法分類的回收塑膠 plastics to liquid 技術，未分類塑膠當成裂解進料再利用
3. 研發生質基的塑膠原料和製品：
   (1) 選擇適合台灣發展之生質原料種類，研發非食用生質原料生產技術
   (2) 研發生質塑膠技術，針對應用場域需求，分別研發生質塑膠材料的耐久性、柔韌性、強度、透明度、可印刷性等性質，擴充升值塑膠應用。
   (3) 研發在一定區間環境下，考慮堆肥條件下、地面上、海水中的分解速度，以達到可降解的生質塑膠產品。
   (4) 和下游製品業者合作開發生質塑膠製品，針對應用廠域所需條件，研發調整生質塑膠性質，開發適用之生質塑膠製品

4. 集合塑膠廠商業者能量消費者、公益團體、配合政府法規建立完善塑膠回收制度，減少環境污染，符合全球產業潮流。可採取的措施包括：

   (1) 促進防止海洋塑料廢物方案

   (2) 改善廢物管理和回收利用的技術，商業模式。

   (3) 投資環境友善材料的技術和製造，掌握全球永續發展潮流。

(四) 塑膠製品業者採用環境友善材料並設計可回收利用

1. 注意國際領導公司對於永續發展的策略，使用環境友善材料為原料
2. 研發回收再利用技術，針對應用廠域所需條件，參考回收料和新料物化性差異，研發新料加入回收料調整塑膠原料性質，研發摻配回收塑膠製品之物化性質，提升再利用塑膠之使用
3. 研發生質塑膠、再利用塑膠的摻配、加工、成型技術
4. 再設計(redesign)塑膠製品，使塑膠製品易回收
5. 取得驗證機構生質塑膠、再利用塑膠比例證明
6. 和回收廠商合作建立塑膠分類、回收制度
7. 參加公益團體環境友善材料活動

參考文獻

1. 行政院環保署一次用產品源頭減量宣導網，檢自 https://hwms.epa.gov.tw/dispPageBox/onceOff/onceOffHp.aspx?ddsPageID=EPATWH
2. 聯合國環境署 2018 年一次性塑膠可持續發展路線圖，檢自 https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/25496/singleUsePlastic_sustainability.pdf?sequence=1&isAllowed=y
3. The New Plastics Economy: Rethinking the future of plastics & catalysing action (2017). Ellen MacArthur Foundation.
4. The New Plastics Economy Global Commitment (2019). Ellen MacArthur Foundation.
5. Bioplastics & Biopolymer market – global forecast to 2025 (2020). MarketsandMarkets™.
6. Green technology and Sustainability market - global forecast to 2024, August 2019 © MarketsandMarkets™
7. 政府在塑膠禁用法規和相關政策的實施構想(2020 年 2 月)，環保署廢管處。
8. 臺灣海洋廢棄物治理行動方案簡報(2018 年)，環保署。

第三章　環境友善替代原物料與技術

本章將介紹生物可分解塑膠材料及生質材料兩種目前世界上主要的傳統塑膠替代原料，將從料源、合成技術、應用產品、未來展望等觀點出發。二氧化碳捕獲與再利用也是目前積極發展中的技術，捕獲來自電廠、工廠之二氧化碳將減少碳排放，若能善加利用捕獲之二氧化碳，重新製作成化學原料，如甲醇或甲烷，將可以衍伸出許多化學原料，重新製作產品達到循環再生的目標。本章最後依照目前技術發展現況，以及台灣目前產業現況，分析適合台灣發展環境友善替代原物料與技術，提出相關結論與建議。

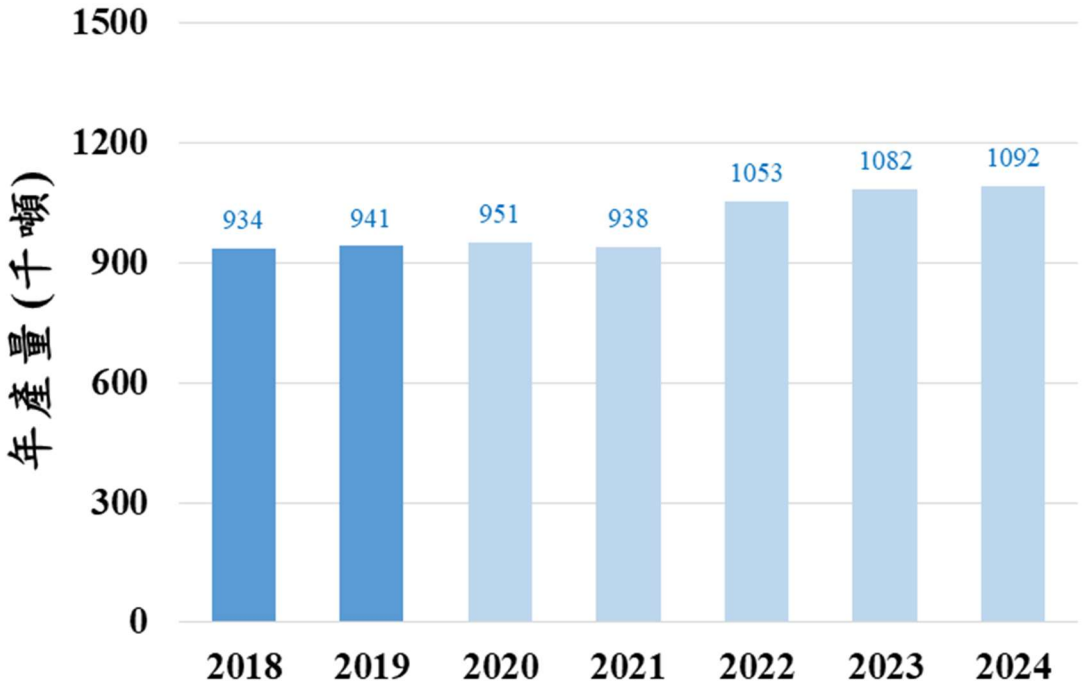
第一節 生物可分解塑膠材料發展與應用

一、 生物可分解塑膠類別與發展狀況

由於人類活動與經濟行為的快速發展，對於環境生態與資源已經造成嚴重的衝擊。過去十年中，隨著全球對於生態環境永續發展意識的覺醒，在塑膠材料利用上，逐漸從循環使用模式，轉向透過生質料源與永續設計進行更全面性的材料發展。然而，在協助改善環境的諸多因應對策中，廢棄物的減量以及再利用有更多層面屬於行為教育問題，而塑膠材料的再循環則與料源、材料設計及後續回收、廢棄物處理的整體模式與基礎設施息息相關。生物可分解塑膠的研究開發也成為近期全球各國相當重視的研發標的。

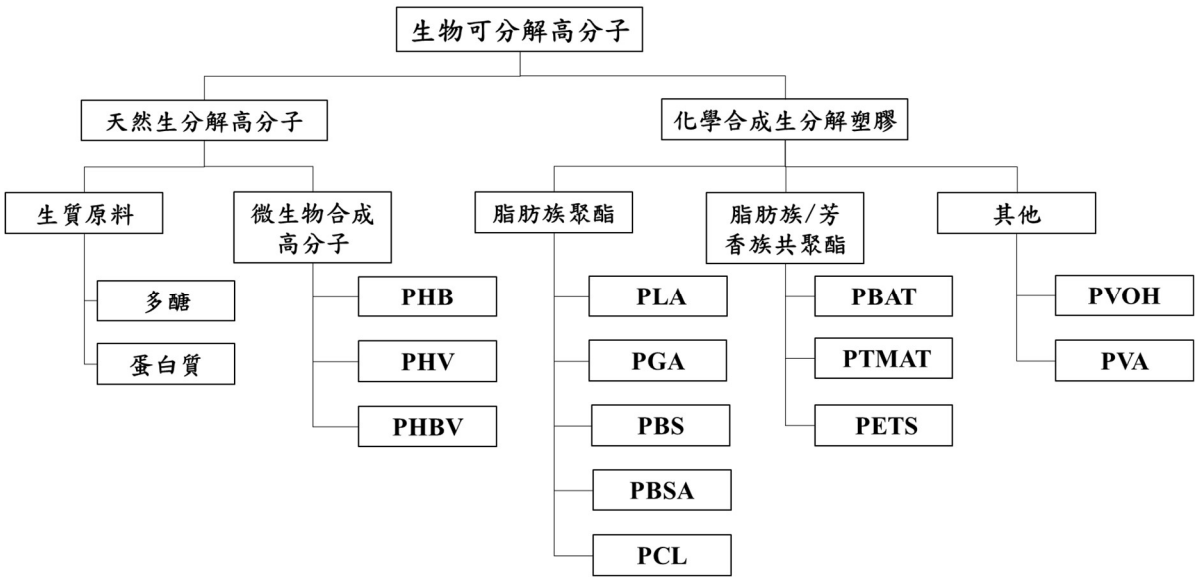
根據美國材料與試驗協會(ASTM)與國際標準化組織(ISO)的定義，生物可分解塑膠是指能在諸如細菌、真菌和藻類等自然界微生物的作用下發生降解的塑膠。市場調查報告指出，2019 年的全球生物可分解塑膠年產量高達 94 萬噸(圖 3-1)，約占總塑膠產量的 0.3%，預期在 2024 年總產量可增加至近 110 萬噸。目前生物可分解塑膠在包含冷食餐具/盛盤及飲料杯等包裝、購物袋、農地覆蓋膜(mulch film)等不同應用領域中已逐漸取得成功，其中包裝材料仍為其最重要的應用市場，但在許多產品應用上，現階段由於生物可分解塑膠的成本過高以及部分應用特性尚未被滿足的狀態下，整體市場滲透率仍低。然而隨著各國政府限塑法令的推動及人們對於廢塑膠處理的意識不斷提高，將為各種生物可分解材料技術開創新的契機。

根據高分子形成方式與來源的不同，生物可分解塑膠可大致分為天然生物可分解高分子、微生物合成以及化學合成生物可分解塑膠等三大類(圖 3-2)，其主要生物可分解塑膠材料市占率及其供應資訊分別整理於圖 3-3 及表 3-1，相關物性則列於表 3-2。



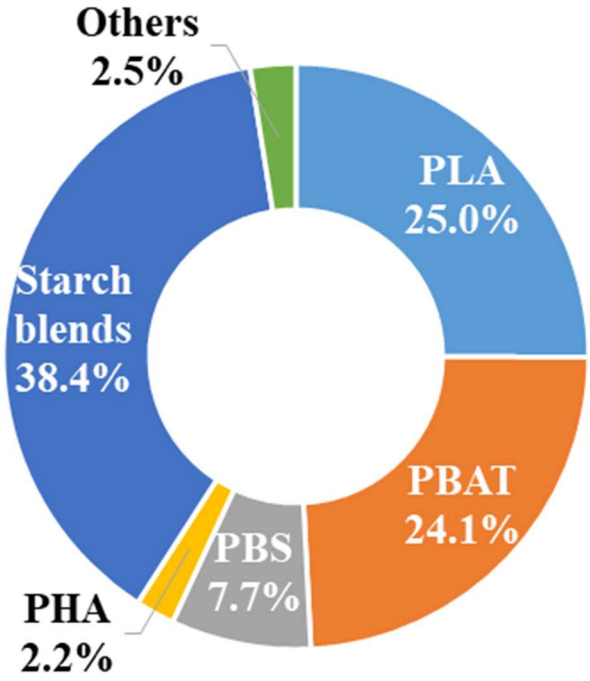
資料來源：European Bioplastics: www.european-bioplastics.org/market; Renewable Carbon-Bio- and CO_2-based Economy website: www.bio-based.eu/markets

圖 3- 1 生物可分解塑膠市場規模預測



資料來源：綜合整理本節參考文獻的 3 至 13 篇。

圖 3- 2 生物可分解塑膠分類



資料來源：European Bioplastics: www.european-bioplastics.org/market; Renewable Carbon-Bio- and CO_2-based Economy website: www.bio-based.eu/markets

圖 3-3 不同生物可分解塑膠之材料類別產量比例

表 3-1 主要生物可分解塑膠供應情形與特性比較

塑膠種類	供應廠商	年產量	缺點
澱粉混摻	Novamont、Cargill、ADM	~36 萬噸	強度差、耐熱性差
PLA	Natureworks、Corbion	~23.6 萬噸	韌性不足、耐熱性差
PBAT	BASF、Novamont、珠海萬通化工、金暉兆隆	22.7 萬噸	耐熱性差、分解速率慢
PBS	Mitsubishi Chemical、PTT MCC Biochem、安慶和興化工、杭州鑫富	~7.3 萬噸	韌性差、易水解
PHA 系列	Kaneka (PHBH)、Danimer (PHB)	~2 萬噸	成本高，PHB 產量較高，但韌性差易脆裂。PHBV 及 PHBH 具有較佳物性。

註：我國長春集團近期投資生產 PBS、PBAT

資料來源：European Bioplastics: www.european-bioplastics.org/market; Renewable Carbon-Bio- and CO_2-based Economy website: www.bio-based.eu/markets

表 3- 2 生物可分解塑膠物性規格

項目 \ 材料		PLA	PBAT	PBS	PBSA	PHB
材料物性	密度(g/cm^3)	1.24	1.26	1.26	1.24	1.24
	拉伸強度(MPa)	48	22	36	24	28
	伸長率(%)	3	620	210	380	1.4
	耐衝擊強度(J/m)	16	45	10	47	12
	熱變形溫度 HDT (°C)	55	45~55	95	46	87
	玻璃轉移溫度 T_g (°C)	58	-28	-32	-45	4
生分解特性		工業堆肥	工業堆肥/家庭堆肥及土壤分解較慢	工業堆肥/家庭堆肥及土壤分解較慢	工業堆肥/家庭堆肥/土壤分解	工業堆肥/家庭堆肥/土壤分解/海洋分解

資料來源：綜合整理參考文獻第 4 至 13 篇。

(一) 天然生物可分解高分子

包含澱粉、纖維素、木質素、甲殼素、殼聚醣等多醣體，以及玉米蛋白、膠原蛋白等各式蛋白質皆屬此類。由於此些天然高分子無論在本質物性與加工性上與合成塑膠差異甚大，因此需透過材料改質以改變物性(如修飾澱粉)，或是單純作為添加劑與一般塑膠進行混摻以形成具有生物可分解特性的複合材料。在實際應用上，由於澱粉料源不虞匱乏且成本低廉，因此澱粉混摻複材為現階段生物可分解塑膠的最大宗，占比高達近 4 成，但由於混摻後的機械特性通常會有顯著的衰退，因此須依據應用產品需求進行配方組成設計。

(二) 微生物合成高分子

微生物合成高分子則是泛指由天然糖類或脂類經過微生物發酵所形成的高分子材料，最主要的類別為聚羥基烷酸酯(Polyhydroxyalcanoate, PHA)，但不同的微生物與培養基會直接造成合成分子結構的改變。依據烷基取代結構的不同，可細分為聚羥基丁酯(PHB)、聚羥基戊酯(PHV)、以及 3-羥基丁酸酯/3-羥基戊酸酯共聚物(PHBV)與羥基丁酸酯/羥基己酸酯共聚物(PHBH)等共聚物(圖 3-4)。相較於天然生物可分解高分子，PHAs 除了具備生物可分解性外，亦具優異的生物相容性，多應用於組織工程、醫材等領域。PHB 的物性較脆，韌性不佳，通常需在結構中導入 PHV 改質，才具有較好的韌性與應用性。然而生物合成的 PHVB 的 PHV 含量不易提高，且受限於微生物發酵製程在產量與生產速率，故應用領域與產品尚無法大幅拓展。日本鐘淵(Kaneka)公司建立微生物合成之聚羥基烷酸系熱可塑性聚酯樹脂的 3-羥基丁酸-co-3-羥基己酸酯聚合物(PHBH)之商業規模的製造技術，與硬質聚乳酸相比，顯示具有由硬質到軟質的廣泛物性，具有類似聚乙烯及聚丙

烯之特性，並有較佳的韌性與加工性；此外，PHBH 亦擁有在土壤、海洋的生物分解性。因應日益漸增的需求，Kaneka 將由目前 5,000 噸產能持續加速擴產(Kaneka Biopolymers website)。

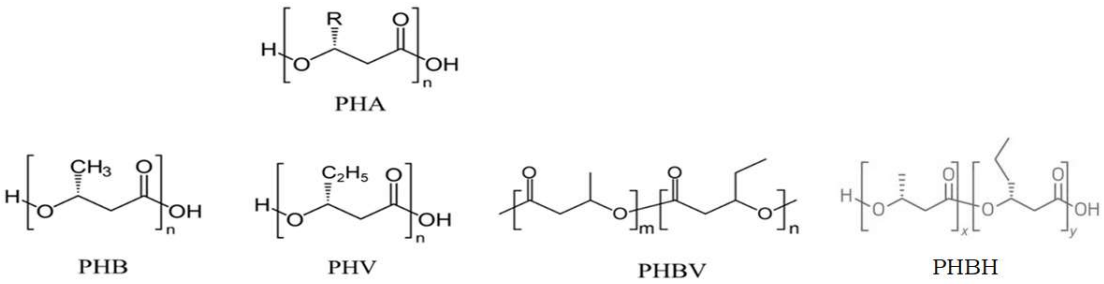


圖 3- 4 不同聚羥基烷酸酯的分子結構

(三) 化學合成生物可分解塑膠

由於採用化學合成技術，此類生物可分解塑膠具有較多的結構與組成設計彈性，依據分子結構可進一步區分為脂肪族聚酯、脂肪族/芳香族共聚酯及其他等三類。其中，常見的生物可分解脂肪族聚酯材料包含聚乳酸(Polylactic Acid, PLA)、聚丁二酸丁二醇酯(poly butylene succinate, PBS)、聚丁烯琥珀酸己二酸共聚物(Poly(butylene succinate-co-adipate), PBSA)、聚己內酯(polycaprolactone, PCL)以及聚甘醇酸(Polyglycolic Acid, PGA)等；而脂肪族/芳香族共聚酯則主要為聚己二酸-對苯二甲酸丁二酯(PBAT)，其餘尚包含聚己二酸-對苯二甲酸丁四酯(PTMAT)及聚丁二酸-對苯二甲酸乙二醇酯(PETS)等材料。其他非聚酯材料部分則以含有較多親水官能基的聚乙烯醇(Polyvinyl Alcohol，PVOH)與聚醋酸乙烯酯(Polyvinyl Acetate, PVA)。

PLA 為目前完全採用生物資源為原料且大量生產的化學合成生物可分解高分子，2019 年的全球市場規模達 23 萬噸，用量僅次於澱粉混摻複材，主要應用至食品盛盤、包裝、電子菸濾嘴等產品，市場需求持續穩定增長中。量產製程是先將玉米澱粉等生質料源經糖化、發酵形成乳酸後，再利用丙交酯開環聚合法(ring-opening polymerization of lactide)形成高分子量 PLA。在材料特性上，PLA 具有較佳的機械強度，但面臨質脆、韌性不足、耐熱溫度較低等問題，也限制其應用領域。結構相似的 PGA 為最簡單的線性脂肪族聚酯，除了具可分解的特性外，更具備生物體可吸收性，因此為醫學上使用最廣泛的合成生分解塑膠，工業中同樣是利用開環聚合反應進行生產。

PBS 是通過 1,4-丁二醇與丁二酸縮聚反應合成，相較於 PLA，PBS 主鏈較為柔軟，可經證實能被自然界中多種微生物或動植物體內酵素所分解代謝，具有較平衡的機械特性、生物降解性、耐熱性以及熔融加工性，能廣泛應用至各式產品，年產量已達 7.2 萬噸，整體市場需求呈現快速增長。日本三菱化學透過與泰國國家石油公司(PTT)共同成立 PTT-MCC Biochem 公司，生產 100% 生質料源之

bioPBS，具有更佳的永續性。但由於其高結晶速率和高結晶度，雖具有較好的耐熱性，但也導致生分解速率較慢。為了進一步提升生物降解速率，可於結構中導入己二酸以形成 PBSA 共聚酯，除了加速生分解速率外，延伸性也有明顯增加，但耐熱性則會由原始的 95ºC 降低至~60ºC。

芳香族聚酯具有優異的熱穩定性、機械強度以及價格低廉等特性，長期以來已被廣泛使用。但其生物降解能力差，故能透過導入脂肪族結構以破壞材料的結晶性。PBAT 為一最常使用的脂肪族/芳香族共聚酯，因結構不具規則性，材料的結晶度低，反映於高柔韌性與低剛性等特性，整體特性與低密度聚乙烯近似，故適合應用至膜材、膜袋等產品。目前包含 BASF、Novamont、珠海萬通化工、金暉兆隆等公司皆已量產，全球年產量約達 23 萬噸。

二、 生分解性與可堆肥分解性

全球投入生物可分解塑膠的研究開發已有數十年的時間，但整體發展相較於各式塑膠材質的歷史仍較短，儘管各國陸續投入資源建立合適的評估方法與標準制定，但迄今仍缺乏完整的國際標準與認證。然而，目前在生物可分解材料相關的文獻或是法規/標準上，大致會使用「生物可分解」(biodegradable)及「可堆肥分解」(compostable)兩個詞彙進行描述，雖然兩者在表面字義上皆具有材料在環境中能進行生物降解的含意，但實則在定義上仍有明顯的不同。此外，如前所述之各種生物可分解高分子儘管皆可在環境中有分解的特性，但其分解速率及分解後產生的代謝物質會因分解環境及材料結構而異。而同一種結構的生分解高分子，其分解速率又會受到材料的厚度、結晶性及尺寸大小的影響，因此針對生分解高分子的產品，除了原料需要有認證外，更需針對其最終產品進行相關認證。

圖 3-5 描述生物可分解塑膠與可堆肥塑膠在分解時間與環境需求差異。「生物可分解」一詞可追溯至 60 年代，依據 DIN 54900 標準指出，生物可分解性的定義為有機材料在有氧或厭氧條件下，可經由微生物分解及代謝形成二氧化碳/甲烷、水、礦物質和生物質。通常此生物降解程序可在未經人為控制的土壤、海水等自然環境或是特殊人為控制環境下進行，所需的分解時間也隨分解環境的差異而有很大的落差。而「堆肥」一詞最早出現於 13 世紀，意為「用以肥沃土地的葉子、肥料等混合物」，後期堆肥則表示為微生物將生物基質分解轉化成肥料的過程。有別於前述的自然環境，堆肥程序通常需要在富含碳、氮元素的物質以及水分與氧氣的特定人為環境下進行，此時細菌、真菌等微生物可透過需氧消化將有機質轉化為水、二氧化碳及腐殖質(humus)等養分，有利於植物的生長。由於處理環境富含養分，微生物所需的分解時間相對也較短。在材料具有可堆肥分解性(compostable)的認定上，除了基礎的材料崩解與分解性外，還必須通過分解過後的重金屬殘留以及生物毒性檢測，以彰顯材料分解後對於環境並不會造成危害。因此，後期在生物可分解塑膠的研究與評估上，較傾向以於堆肥環境下之分解性取代生分解性測試。

在生物可分解與可堆肥塑膠的國際標準與規範推動上，以可堆肥系統有較完整的規劃。現階段在生物可分解塑膠部分僅有 EN 17033 規範制定出土壤環境的生分可分解認證(表 3-3)。而在海洋或水環境僅有測試方法，尚無國際規範 (既有規範已撤銷，相關規範仍在研議中)。TÜV AUSTRIA 則參考 ASTM 的測試方法，參考舊有的規範提供相關認證。在可堆肥塑膠的分類與認證上，主要以操作溫度與環境分為可工業堆肥及可家庭堆肥兩類，其中，可工業堆肥是透過工業化設施所完成的，允許操作溫度較高(通常規範為 58ºC)；而家庭堆肥則僅在室溫環境(20-30ºC)下進行。此外，更依據塑料、包裝以及紙材塗層等不同產品形式已訂定出多種國際規範。目前各種工業堆肥與家庭堆肥的認證標章相關資訊分別整理如表 3-4 及表 3-5。如表所示，包含 DIN CERTCO、BPI、JBPA、TÜV AUSTRIA 等單位皆依據 EN 13432、ISO 14851、ASTM D6400 等國際規範提出高達 7 種以上的可工業堆肥產品認證。而目前可家庭堆肥的認證僅有 3 種，主要依據澳洲標準 AS 5810 或參考 EN 13432 進行修訂。

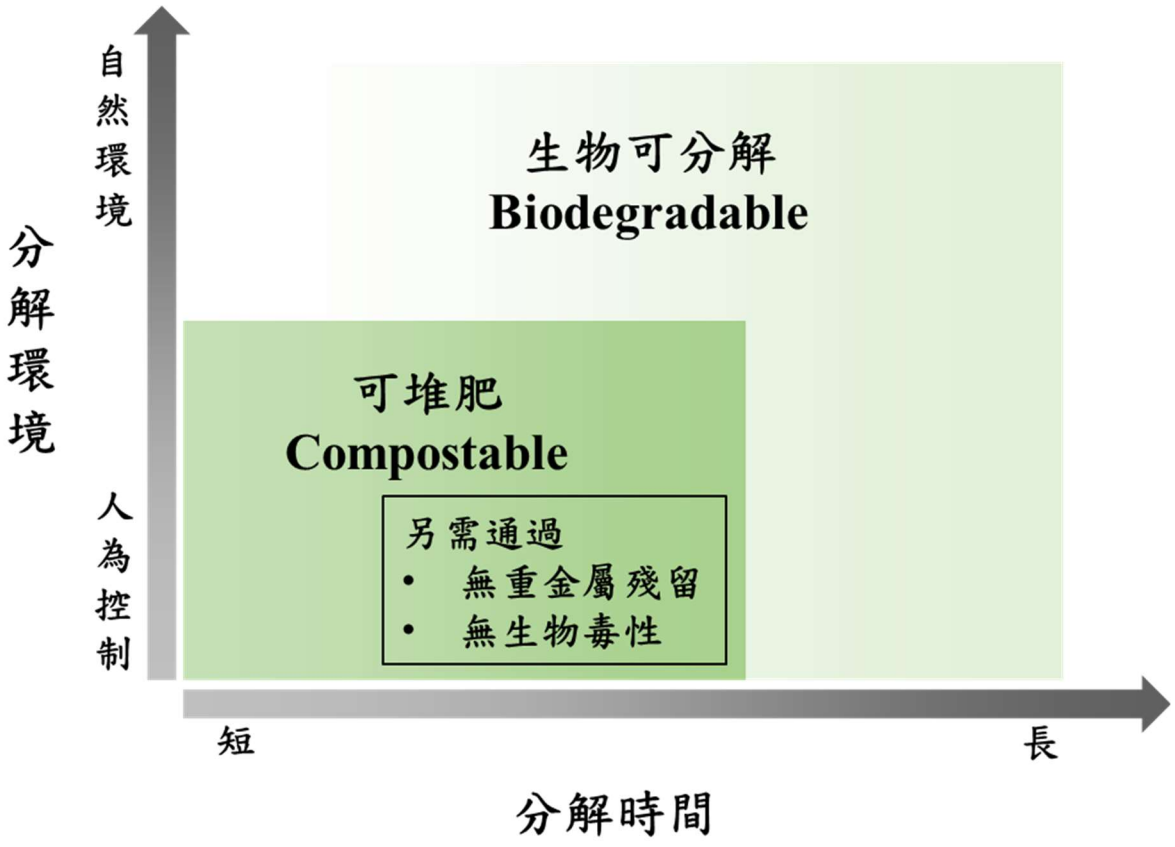


圖 3- 5 生物可分解與可堆肥在分解時間與環境需求比較圖

表 3- 3 生物可分解塑膠認證標章資訊

認證標章	認證機構	依循規範
SOIL OK bio-degradable TÜV AUSTRIA SOIL S0720	TUV AUSTRIA (AIB Vincotte)	EN 17033
BIODEGRADABLE IN SOIL DIN Geprüft	德國/歐盟 DIN CERTCO	EN 17033
MARINE OK bio-degradable TÜV AUSTRIA MARINE S0720	TÜV AUSTRIA (AIB Vincotte)	依 ASTM D6691 方法測試，認定標準則參考已撤銷之規範 ASTM D 7081-05

表 3- 4 可工業堆肥認證標章資訊

認證標章	認證機構	依循規範
幼苗(seedling)可堆肥標章	德國/歐盟 DIN CERTCO	EN 13432
INDUSTRIAL COMPOSTABLE DIN Geprüft	德國/歐盟 DIN CERTCO	EN 13432
OK compost TÜV AUSTRIA INDUSTRIAL S0720 OK compost 可堆肥標章	TÜV AUSTRIA (AIB Vincotte)	EN 13432 ISO 14851 ASTM D5988
BPI COMPOSTABLE IN INDUSTRIAL FACILITIES Check locally, as these do not exist in many communities. Not suitable for backyard composting. CERT # SAMPLE	BPI 國際生物分解產品協會及美國堆肥協會	ASTM D6400 ASTM D6868
グリーンプラ 生分解性プラスチック GreenPla 可堆肥標章	日本生物可分解塑膠協會(JBPA)	ISO 14851 JIS K 6950, 51, 53

	Jatelaitonsyhdisys (Finland)	EN 13432 ISO 14851
 幼苗(seedling)可堆肥標章	紐澳生物可分塑膠協會	AS 4736

表 3- 5 可家庭堆肥認證標章資訊

認證標章	認證機構	依循規範
	DIN CERTCO	AS 5810
	DIN CERTCO/ ABPA	AS 5810
	TÜVAUSTRIA (AIB Vincotte)	參考 EN 13432 並進行測試溫度修正

三、 技術發展趨勢與挑戰

不同高分子系統在機械特性、熱性質與所適合的生分解環境皆有明顯差異，因此材料的技術演進也會各自朝向較適合的應用領域開發，如表 3-2 所示。目前最被廣泛使用的 PLA，由於量產技術成熟且相對價格較為低廉，因此在近期的技術發展上則朝向應用層面開發。因 PLA 剛性較高且僅能進行工業堆肥，因此較多的研究開發則是朝向透過合膠的組成設計來改善柔韌性與加工性，或是透過結晶行為的控制以提升材料的耐熱性。而具有在所有自然環境皆具分解特性的 PHAs，現階段面臨材料生產成本過高以及質脆與加工性不足等問題，雖然市場需求逐漸增加，但未來市場發展狀況仍未明朗，因此開發更低成本的製程技術以及透過側鏈結構控制為近期主要的挑戰。而 PBS 有較均衡的機械物性、耐熱性與生分解性，因此在膜材、包裝、容器、醫材等應用領域皆具有發展潛力，但目前仍面臨高結晶性所導致的常溫環境分解速率較慢以及產品價格偏高等問題；而低結晶性的

PBAT 與 PBSA，由於長碳鏈單體的導入使材料具備高延展性與柔韌性，但卻損失其機械強度與耐溫性，因此產品市場以非耐溫的膜袋應用為主。

材料的生分解特性與高分子結構、分子量、結晶型態、玻璃轉移溫度以及與微生物的親和性等息息相關，由於酯基水解活化能較低且較易被微生物和水解酶等所分解，因此生物可分解塑膠的開發幾乎使用聚酯材料，但機械特性的表現往往與生分解特性相抵觸，如何兼具良好的機械物性與分解速率實為生物可分解材料待突破的技術瓶頸。但從目前生分解材料發展歷史可知，全新結構的高分子材料系統從初期開發到技術成熟至少需花費數十年的時間，因此在既有材料系統與製程技術架構下，透過分子結構設計、配方調控、加工製程與結晶行為控制以進行特性的操控，是生分解材料的主要發展方向。工研院近期亦針對能兼具於土壤環境分解及家庭堆肥條件下之生分解特性與膜材應用特性的生分解聚酯進行特定結構設計開發與相關專利佈局。藉由在脂肪族聚酯系統中導入能提升菌種親和性的寡聚物鏈段，以有效進行整體材料在常溫土壤環境下之生分解速率調控，並能同步提供相當的延伸性與耐衝擊特性。未來將持續依據廚餘袋、農膜、耐熱塑膠袋等各種應用載具進行生分解材料特性調整以及合成與製程技術之開發。

四、 結論與建議

我國產業在生分解材料的發展，受惠於塑膠改質與下游加工應用技術優勢，具有多樣化的應用產品，且大多以外銷為主。包括一次性飲料杯、沙拉盒、蛋盒及生鮮盛盤等，相關廠商包括瑞興、金元福等；此外，藉由材料改質及摻混配方開發生分解淋膜紙杯、購物塑膠袋、農膜、吸管及耐熱餐具等，相關業者包括銘安、宏力、苔曙等。然而生分解材料如 PLA、PBAT、PBS 等多須由國外進口。近年來各國限塑政策與品牌需求日益增加，使生分解材料供不應求。我國長春集團近期投入以石化料源合成 PBAT 與 PBS，預期可提供國內自主的上游生分解材料。

在應用推動面上，生分解材料的落實仍與政府的相關配套措施息息相關。例如：生分解材料應與一般塑膠分開回收，以避免污染既有的循環回收體系；為讓消費者容易分辨生分解材質的包裝，建議生分解包裝材應有易於清楚標誌或以顏色區隔；需有適當的堆肥場與法源可進行生分解材料回收後的處理，同時也須落實生分解材料各項認證，以確保材料的分解特性與對環境的影響性。此外，在技術發展上，結合研發單位與產業面，掌控材料設計與分解機制，共同開發具差異化的材料，串聯國內上中下游產業鏈並與國際接軌，以開創台灣石化與塑膠產業新商機與提升競爭力。

第二節 環境友善生物基化學品技術發展之趨勢

生物基化學品技術被認為是一種永續的綠色科技，非農糧的生質料源(biomass)，經過生物轉化程序之後，衍生出六碳醣等原料，再透過整合生物精煉(integrated bio-refinery)技術，將多種生質料源整合進而轉化生產高值化之化學品。其中利用生物代謝工程技術生產化學品，主要是透過修飾或改質生物體基因，賦予其生產特定化學物質的能力，是石化原料化學品合成技術以外的另一種高潛力新化學品料源生產技術。由於微生物具有容易培養、生長週期短、以及易於基因改質等特性，因此多數的生物合成化學品主要是透過微生物進行生產。微生物代謝工程技術以非農糧之生物質或回收有機廢棄物為料源生產化學品，是符合生物循環產品之概念，以下將介紹生質料源與其相關轉化技術，以及利用生物代謝工程發展化學品合成技術之發展趨勢。

一、 生質料源

全球約有 44 億公頃的樹林，也是地表最有效減輕環境變遷的一環，每年約可吸收 2,000 億噸的二氧化碳，也就是降低大氣中 25%的二氧化碳，而每公頃林地每年可產生約 10 噸乾重的生質料源，這些都是可替代石油，生產塑膠化學品的可再生料源。生質料源本質上密度低，區域分散且種類繁多，因此要成為有經濟價值的料源，先要考量，運輸成本及其組成份。生質料源的選擇與後續品質穩定性，對生物精煉，包括生化轉化、快速熱裂解及水熱液化、氣化等製程的效益有絕對的影響。

生質料源為生產化學品的豐富資源，目前技術開發著重於木質纖維素(lignocellulose)，也就是非農糧作物料源，包括農業副產物、能源作物、林業產物及工業與民生廢棄物。如此豐富的料源，在搜集、運輸與處理上雖有一定程度的進展，但相關產業的發展仍在萌芽階段。而且所有的生質料源並非都適用於生質精煉製程，除了變易性大外，是否有利於下游加工與應用之組成與轉化特性，都需要加以考量，一個能大量供應、品質穩定且易於轉化的料源供應體系是必要的。依據不同的料源，已有許多轉化技術被開發出來，但是各項技術對於所使用料源也有其特定規範。其中重要的指標，包括物理特徵及化學組成；以尺度來分，則大致可分成三個區塊：(1)巨觀的物理表徵；(2)微觀的結構型態；及(3)分子組成份，這些因素通常會交互影響轉化效率。

以一般的石化產品來說，官能基數愈多的化學品，其產量愈低，價格也愈高；生質料源以碳為主架構(back bone)，並具有許多不同的化學官能基，因此生質料源生產化學品的最佳應用情境是發展多官能基的功能性化學品與材料。當然這也要考慮現有石化供應鏈上、下游的平衡與需求，直接取代將降低石化上游投資的回收利潤，下游則需考量加工的方便性；須從生質料源特性及如何發揮其功能來思考切入點，尤其是因為生質料源從種植、採收、運輸、前處理及轉化等製程都相當耗能，需由產品的整個生命週期(Life Cycle Assessment, LCA)作詳細分析。

二、 生質料源前處理技術

以木質纖維素(lignocellulose)為例，其主要組成份包括纖維素(cellulose)、半纖維素(hemicellulose)與木質素(lignin)，要應用這些組成份製成各種化學品與材料，首先要透過前處理(pretreatment)技術，將上述成份分離出來，以發揮各組成份的最佳應用效率；例如不同型態的纖維素(micro fibrillated cellulose, MFC; nano-crystalline cellulose, NCC)可作為塑膠應用的補強材料，半纖維素則可製成阻隔氧氣的塗料，木質素的多元醇構造可應用於 PU 發泡材。這些材料亦可裂解成寡聚合物(oligomer)或單體(monomer)，再衍生出更多的生物基化學品。纖維素與半纖維素可轉化形成基本的單元五碳醣與六碳醣的醣料源並形成一「醣平台」，可提供後端生物精煉-生物代謝工程生產化學品所需的醣料源。所以前處理技術的效益重點在得到最高可醱酵醣(fermentable sugars)的回收率，首先是將纖維素及半纖維素水解(hydrolysis)成單醣(monomer sugars)，步驟包括酸水解製程或酵素分解製程，再經細菌或酵母進行醱酵製成醣。影響水解效率包括料源的孔隙度(porosity)、結晶度與各組成分的比例，尤其是木質素的量，木質素會影響酵素或酸與纖維素的接觸；因此前處理技術在於調整生質料源的大小、結構及組成，以提高產醣率。前處理方式包括：

1. 物理法(milling, grinding…)
2. 化學法(steam explosion, ammonia fiber explosion)
3. 物理化學法(酸、鹼前處理、氧化法、organ solve)
4. 生物法或
5. 以上之組合。

木質纖維素的三個主要組成份，有各自不同的化學組成與結構，分子結構中碳、氫、氧的組成比例也大不同，反應性自然大有出入，加以生質料源因產地與季節亦多所變化，因此催化製程是為一關鍵技術。多數以生質料源合成化學品的技術發展，集中在以醣類(carbohydrate sugar)為原料，近期整合生物精煉製程，木質素的應用也必需一併考量，以降低製程成本。

三、 生質料源轉化技術-生質化學品

常見的生質料源的轉化反應可包括化學法的脫水(dehydration)、氫化(hydrogenation)、加氫脫氧(hydrodeoxygenation)等化學法催化製程，再來便是高潛力的生物合成化學品技術，有別於石化原料及化學合成技術，生物合成化學品技術被認為是一種永續的綠色科技。生物代謝工程技術可將纖維素前處理所得的醣類轉化成各種生物基化學品(圖 3-6)。

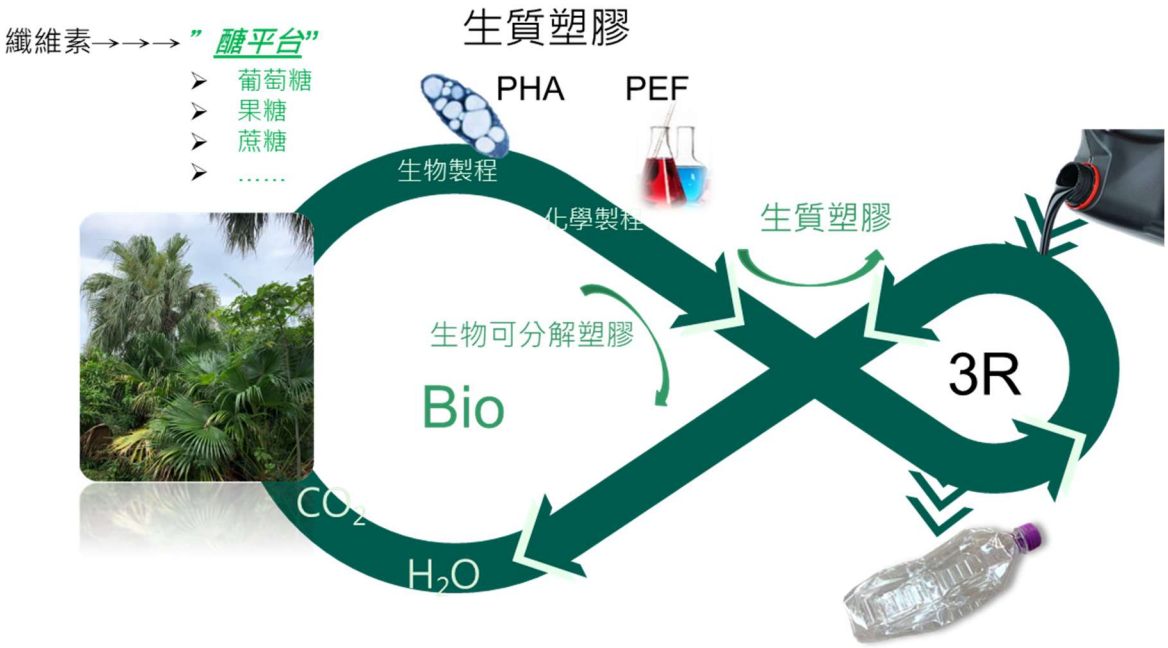
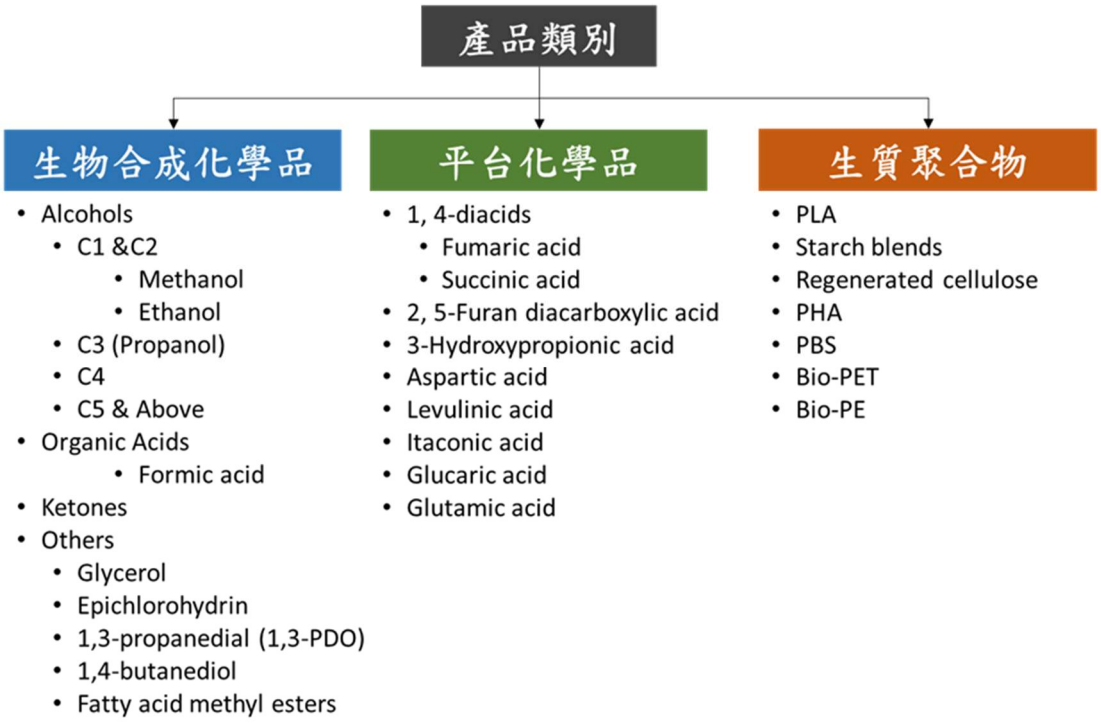


圖 3- 6 循環經濟生物循環與生物精煉

在我們日常生活中不可或缺的化學品，由早期高度仰賴原油的石化產業相關技術發展至今，為滿足綠色循環製程與環境相容的全球趨勢，合成生物透過改質微生物轉化有機物質為化學品的產業，為當前重要的新興產業，其生產之環境友善產品以可分為三大類，分別是，(1)生物合成化學品；(2)平台化學品以及(3)生質聚合物(圖 3-7)(IEA Bioenergy Task 42, 2020)。



資料來源：Secondary Literature, Expert Interviews, and MarketsandMarkets Analysis

圖 3- 7 環境友善生物基化學品種類

美國能源部在 2004 年透過石化產業之市場分析，再根據化學品之結構和反應特性，選出了 12 種高潛力及具發展性的生物合成化學品，可用以取代石化原料，包括：3-羥基丙酸(3-hydroxypropionic acid)、甘油(glycerol)、琥珀酸(succinic acid)、天冬胺酸(aspartic acid)、3-羥基丁內酯(3-hydroxybutyrolactone)、衣康酸(itaconic acid)、4-戊酮酸(levulinic acid)、麩胺酸(glutamic acid)、木糖醇(xylitol)、2,5-呋喃二甲酸(2,5-furan-dicarboxylic acid)、葡萄糖二酸(glucaric acid)及山梨糖醇(sorbitol)(Werpy and Petersen, 2004)。隨著生物技術演進，新的潛力生物合成化學品亦陸續被加入產業發展行列。

隨著全球逐步走向循環經濟，歐盟在生物基化學品部分透過 RoadToBio 計畫進行整體化學工業的路線藍圖規劃，並以可滿足 2030 年的社會需求為目標，期望能達到 25%以上的生物基化學產品取代現有化學品。從 building block 化學品開始，延伸至塑膠製品、溶劑、以及界面活性劑，並將應用目標著重於人造纖維、油漆和塗料、黏著劑、化妝品原料、潤滑劑、染顏料、鍍膜以及農業化學品(Yamini Panchaksharam *et al.*, 2019)。在 2019 年分析十大類主要生物合成化學品應用的領域分析報告中，將各大類較具潛力之生物合成化學品應用進行細分類，挑選出具代表性的 50 個生物合成之環境友善產品，如表 3-6 所示(Jurjen *et al.*, 2019)。

除此之外，全球生物合成化學品的成長動能強勁，生物合成塑膠材料的市場於 2019 年已有 211 萬噸的規模，預計 2024 年將有 243 萬噸(檢自 European Bioplastics, 2020)。其中，聚乳酸(polylactic acid, PLA)、聚羥基烷酸酯(polyhydroxyalkanoate, PHA)與生質聚乙烯 (bio-ethylene)為最具備潛力之生物合成化學品，且產品應用領域，已廣泛在生活中出現，包含工業使用、交通運輸、食品包裝、生醫、農牧業、紡織產業等。

表 3- 6 50 個具潛力之生物合成之環境友善產品應用分類

產品 / 類別	生物合成之環境友善產品	
平台化學品	Ethylene Ethylene glycol Propylene glycol (1,2-propanediol) 1,3-Propanediol Acetic acid	Acetic anhydride Sebacic acid Lactic acid Epichlorohydrin
溶劑	Isobutanol Ethyl acetate Ethyl lactate	Acetone Wood turpentine
塑膠聚合物	PE PET Starch used for plastics	PHA PLA
染、顏料、墨水、塗布	Ricinoleic acid PUR	Alkyd resins Bio-dyestuffs
界面活性劑	Glycolipids (other than sophorolipids) Esterquats Sophorolipids	APG Carboxymethyl starch
粧品、個人照護	Limonene Lauryl alcohol Stearyl alcohol Vanillin	Xanthan Ethoxylated fatty alcohols N-acetyl glucosamine
黏著劑	Methacrylates Furfuryl alcohol	Epoxy resins Tall oil rosin
潤滑劑	Isoalkanes Tall oil fatty acids	FAME (e.g. methyl palmitate) Fatty acid PEG esters (e.g. polyoxyethylene oleate)
塑化劑、穩定劑	Azelaic acid Succinic acid	ESBO
人造纖維	PTT Rayon Cellulose acetate	Polyamide-11 (nylon-11) Polyamide-4,10 (nylon-4,10)

四、 生物基化學品之國際技術發展趨勢

2004 年美國能源局提出了 12 種可用以取代石化原料的生物合成化學品後，許多國際組織陸續將生物合成化學品開發技術列入重大開發項目和未來極具潛力之技術，包括美國國家科學院NAKFI (National Academies Keck Futures Initiative)計畫在 2009 年即以「Synthetic Biology: Building on Nature's Inspiration」為主題，討論對合成生物學相關目標共識以及相關應用和未來，此外麥肯錫公司、世界經濟合作暨發展組織(OECD)、美國國防部、英國商業創新及技能部、新加坡國立研究基金會等，匯聚大量的經費及資源投入生物合成化學品以及其衍生物的開發及應用(Synthetic biology project, 2015)。

近年來，糠醛(furfural)相關化學品與衍生物技術發展已近成熟，並具商業應用機會，其中包括糠醛、羥甲基糠醛(hydroxymethyl furfural, HMF)與 2,5-呋喃二甲酸(2,5-Furandicarboxylic acid, FDCA)。商業化生產糠醛的方式是由半纖維素經無機酸水解出五碳醣後，脫水製成。料源包括木屑、蔗渣或玉米秸稈等，全球產量約 30 萬噸，其中七成以上都是用於生產呋喃甲醇(furfuryl alcohol)。生質平台化學品 2,5-呋喃二甲酸，因為有可能可以用來取代石化來源的對苯二甲酸(terephthalic Acid, PTA)，用於合成下世代聚酯、聚呋喃甲酸乙二醇酯(polyethylene furanoate, PEF)，以作為未來生質食品包裝，紡織等產業之基礎原料，而備受關注。因為 2,5-呋喃二甲酸的結構不對稱性，以至合成出的 PEF，相較於石化的對應聚酯、聚對苯二甲酸乙二酯(PET)有更高之阻氣特性，可作成寶特瓶或其他食品包裝材，將可提昇內容物之保鮮期限，有助於降低食品浪費。PEF 除可像 PET 回收再利用，不堪使用時亦可在 250 天左右生物分解，在生命週期中進行生物與工業的接續循環，有助於環境的永續發展，因此近年陸續有國際知名大廠投入量產，包括 Avantium、DuPont、ADM 及 Novamont 等，2,5-呋喃二甲酸亦可應用於合成聚醯胺或可塑劑等生物基材料。此多用途生物基化學品則是由另一具多重衍生應用的羥甲基糠醛經氧化而製得。羥甲基糠醛可以單醣或多醣為原料，經酸催化脫水反應來生產，因產物在水中不穩定，因此通常在有機溶劑或兩相系統中進行反應合成，羥甲基糠醛亦可衍生合成生質能源用二甲基甲醯胺(N,N-dimethylformamide, DMF)或生物基化學品如 1,6-已二醇(1,6-hexanediol, 1,6-HDO)等。

可生物分解塑膠聚丁二酸丁二醇酯(polybutylene succinate, PBS)的關鍵單體琥珀酸(succinic acid, SA)，傳統的合成方法是以石化料源馬來酸(maleic acid, MA)氫化或丁二醇(butanediol, BDO)氧化製成，琥珀酸亦可衍生成 BDO、四氫呋喃(tetrahydrofuran, THF)等多項化學原料，2013 年產值約為 1 億美金，預估 2020 年將大幅成長到 10 億美金。山梨糖醇(sorbitol)與木糖醇(xylitol)分別以六碳葡萄糖氫化及五碳木糖還原反應而得，均用於替代蔗糖，應用於不同的食品添加劑。山梨糖醇的全球產量約 80 萬噸，可用於生產異山梨酯(isosorbide)或透過氫化反應製成低碳醇，如甘油(glycerol)、丙二醇(propylene glycol, PPG)、乙二醇(ethylene glycol,

EG)、乙醇、甲醇等，亦可應用於合成多種功能性生物基塑膠。木糖醇可以用生物法合成或者直接由半纖維素轉化合成。異戊二烯(isoprene)可聚合成高分子被廣泛應用於運動器材、鞋子、輪胎及醫療器材等，目前商業化生產仍使用石化原料；然而在此同時，一些生物技術公司如美國的 Genencor 公司(DuPont 子公司)、Amyris 公司及 Brashem 公司均與各輪胎廠合作開發生物精煉製程，並以合成此重要的生質平台化學品異戊二烯。

微生物生產甘油的技術已有上百年的歷史，是主要的生產方法，一直到近年在生產生質柴油的過程中，另可得到約 10%的甘油副產品，而提供另外的來源；2012 年甘油產量約為 2 百萬噸，預計到 2022 年全球甘油市場規模將達到 410 萬噸，甘油可成為一生質平台化學品，並可衍生大量的工業用化學品，已成為一個重要的生質料源。例如美國 ADM(Archer Daniels Midland)公司、DOW Chemical 公司 (已併入 DuPont 公司)及 Huntsman 公司等將甘油合成聚丙二醇(polypropylene glycol)，或是使用甘油作為醱酵製程的碳源，合成 1,3-丙二醇(1,3-propanediol, 1,3-PDO)、衣康酸(itaconic acid, IA)、聚羥基烷酸酯等。Solvay 公司及 DOW Chemical 公司(已併入 DuPont 公司)則以此平台化學商業生產環氧氯丙烷(epichlorohydrin)。乳酸(lactic acid, LA)同樣也是透過生物代謝工程技術的醱酵製程合成的，全球年產量約為 35 萬噸。另一個被廣泛重視的生物基有機酸，是 3-羥基丙酸(3-hydroxypropionic acid, 3-HP)，因為此平台化學品可衍生出一系列重要化學原料，包括丙烯醛(acrolein)、壓克力酸(acrylic acid, AA)、壓克力酸酯(acrylic acid esters)、丙烯醯胺(acrylamide)、1,3-丙二醇、丙二酸(malonic acid)及 3-羥基丙酸(3-hydroxypropionic acid)等，但目前尚未有商業化生物製程，還有一些技術瓶頸待突破。生物代謝工程技術的國際發展趨勢由生物合成 C1-C6 building block 的開發已成熟進入後端應用驗證，並將技術投入至各產業領域之應用創造新形態之環境友善產品，未來將透過生物代謝工程技術平台與其他領域技術之結合，強化整體生產效率、研發速度及產品創新，在未來循環經濟趨勢中成為開發環境友善產品之核心技術。

John Cumbers 2019 年在 SynBioBeta 上的報導指出：生物合成公司，近十年內快速崛起，2009-2018 年間，針對生物合成公司投入之經費顯著提高，並在 2018 年，有 98 家生物合成新創公司成立，總計募得 38 億美元的資金，這意味著未來以生物代謝工程技術為本的生物合成公司，將會出現爆發性的成長。生物代謝工程技術的未來發展，將進一步結合資訊、工程、大數據資料庫、AI 運算等應用，以加速其發展速度。根據 Frost & Sullivan 報告指出，至 2023 年，最具有成長潛力的生物代謝工程技術應用的五個領域為：(1)再生性能源領域，以藻類、生質能源為主要開發標的，將達到 30 億美金規模；(2)環境工程領域以生物環境偵測為主，規模約 10 億美金；(3)農業領域應用於農產品、合成食物新型態農作物、基因修飾等技術規模約 15 億美金；(4)生物安全領域包含生物晶片、AI 模擬設計微生物、可穿戴式裝置整合應用，規模約 600 萬美金以及(5)智能治療領域，包括藥

物開發及人工器官等產值達 42 億美金。

五、 國際企業範例

生物基材料產業的形成與發展，有賴於有效將具大量之生質料源及小量高值生物精煉產品切入市場應用。生質料源的本質特性，則可藉由特定法令規範，如優先採購等，及消費者環保意識，促進相關產品的商業化推廣。生物基材料亦可透過特有的抗菌、抗氧化、或醫藥功能之商業解決方案，以與現有商品有所區隔，以作適當的產品開發，切入市場。

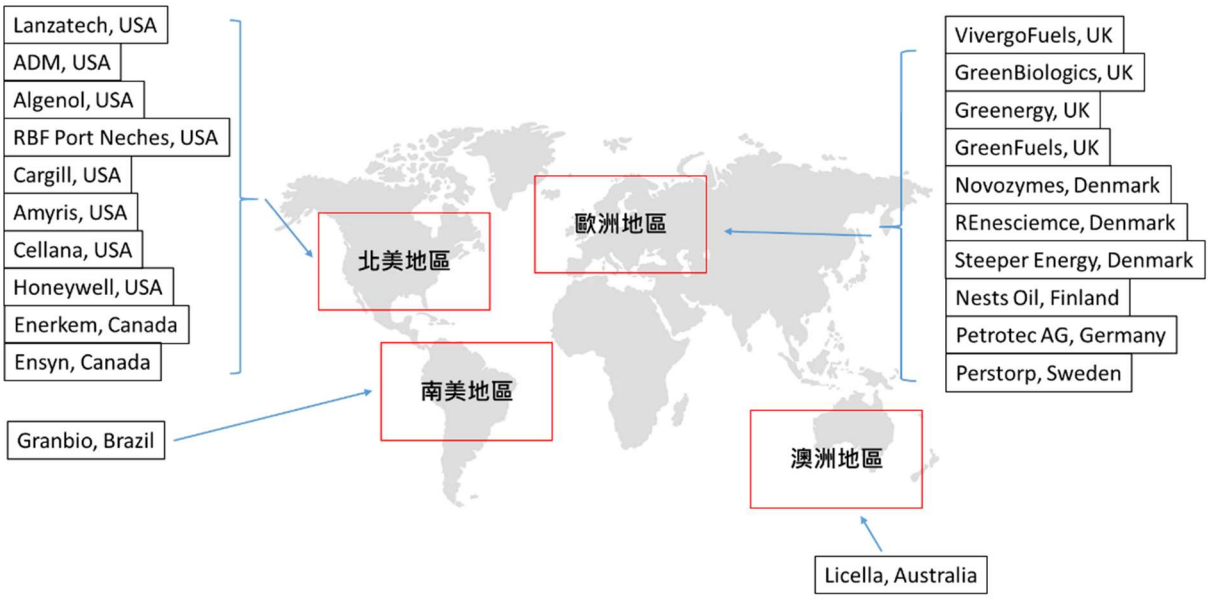
國內廠商與研究單位亦注意到此國際發展趨勢，現在生物精煉技術已有一定進展，加以環保意識與各國法令支持，國內業界與研究單位開始在工業與生物兩循環中找平衡點，於是在 2010 年組成生質材料產業化聯誼會(ABbI)，除透過合作，並與政府單位建立溝通管道，加速產品開發與商業化，亦開發出一系列生物基產品。19 世紀人們用改質的纖維素材料作成類象牙製品，20 世紀我們挖出石油，製成各種食、衣、住、行、育樂必需品，現在生物精煉技術進步了，我們可以製成許多生物基化學品替代石化的製品(圖 3-8)，包括：如全生物基的聚酯 PEF，有很好的阻氣效果，可延長食物保鮮期，減少食物浪費，以生質柴油副產物甘油為原料，可合成生物基彈性纖維，織成衣物，生物基助劑則可增進織物觸感，吸濕功能等，另可降低建築塗料的有機揮發性物質，生物基精煉的低熔點纖維可應用於新型鞋子製作，降低人工成本。城市與農業廢棄物為重要有機料源，高值資源化成為未來趨勢，歐盟展望 2020(Horizon 2020)計畫則以瀑布式 cascade 農業廢棄物應用技術(圖 3-9)，整合生產生質能與材料，由 10 個歐盟國家及 3 個非歐盟成員國，包括我們台灣工研院團隊，30 幾個研究單位與企業，共同分工合作，以南法釀酒殘餘葡萄渣為例，先萃取出高值多酚、纖維素，剩餘物質再作醱酵產生沼氣轉化成能源，或精煉成化學品再聚合成生物基塑膠，工研院團隊的工作，將上游多酚，下游生物基塑膠，組合成抗菌食品包材，延長食品保鮮期，降低食品浪費，最後剩餘的物質還可做肥料或飼料，每階段副產物都加以利用。國內廠商也開始有農廢應用及 cascade 應用概念，展售系列生質產品，我們除了看到遠東新世紀公司以回收寶特瓶製成的運動衫穿在世界各國運動員身上，他們也開發出全生物基聚酯運動衫，2019 更有效應用現有聚酯生產設備，成功產出亞洲第一個阻氣 bio-PEF 汽水及啤酒瓶，展現發展生物基產品的決心與能力。興采公司領導創新，將非糧源的生質材料導入功能服飾中，並與歐美知名品牌合作，銷售全球。其中最具知名代表性的咖啡紗就是將我們喝剩的咖啡渣研製成各種功能性纖維，並將咖啡渣中的咖啡油製成防水透濕薄膜，供戶外服飾使用。禾益佳公司除了紙塑餐具，也利用回收 PET 製成的食品包裝用 rPET，展現我國的技術能量，外銷歐美，目前他們也將歐盟展望 2020 計畫，抗菌技術，應用於食品包裝中，以提升產品功能與價值。喬福公司的材料則著重 PLA 改質應用於各類餐具、文具，也將可分解塑膠結合農業廢棄物，如啤酒渣，製成農地膜，收成後不必費工夫收集，

直接掩埋分解。除了塑膠相關產品，生質料源亦可用於他產品的製造，如穩譚公司的植物萃取滅火劑，取得國家消防型式認可與 SGS 多項環保及毒性檢測，能幫助人員火場逃生。其生物分解度大於 97%，滅火後及期限到期後還可當清潔劑。

圖 3- 8 工研院開發生質產品

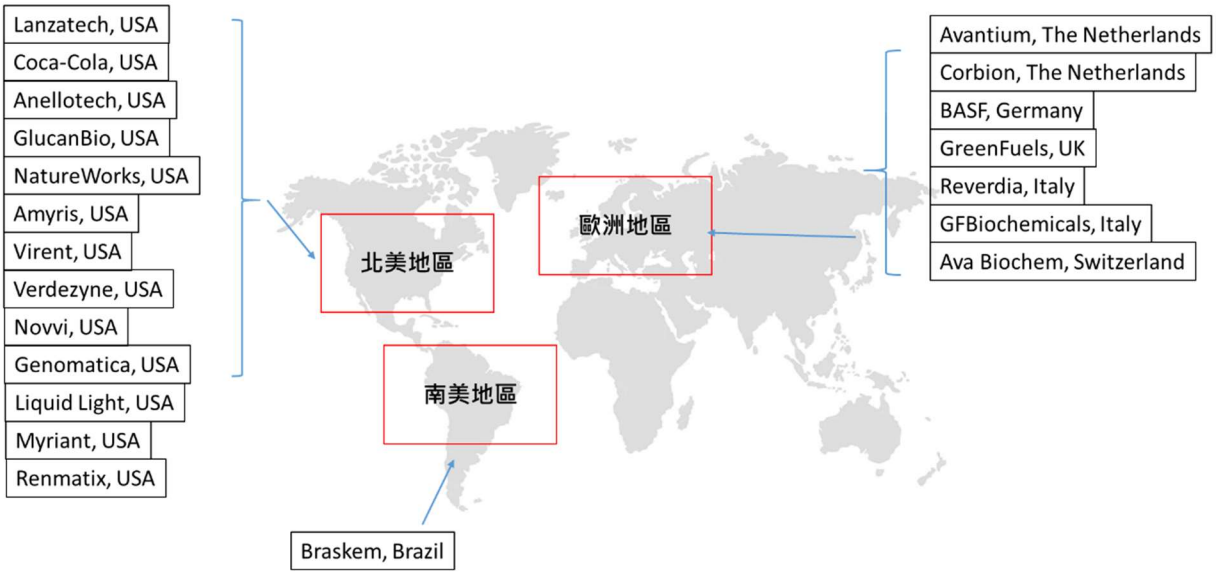
圖 3- 9 歐盟展望 2020 農業廢棄物全利用計畫(No Agro Waste, NoAW)

根據國際能源署的最新數據，環境友善與可再生能源在全球化工與能源結構中的重要性正在增長，領導企業多集中於美國及歐洲，如圖 3-10、圖 3-11 所示。



參考資料：https://www.fuelsandlubes.com/fli-article/five-bio-based-companies-to-watch/, 2020)。

圖 3- 10 綠色能源製造廠商之總部於全球分布圖



參考資料：https://www.fuelsandlubes.com/fli-article/five-bio-based-companies-to-watch/, 2020)。

圖 3- 11 生物合成化學品製造廠商之總部於全球分布圖

ADM 公司耕耘農業加工，希望成為全球領導者的地位。他們建立 Evolution Chemicals™品牌，開發一系列可再生的原料化學品組合。ADM 公司亦有丙二醇工廠，年生產規模為 10 萬噸；該工廠將生產工業級和美國醫藥級(USP-NF)產品，原料是大豆或低芥酸菜子。該公司分析顯示，與石化生產丙二醇之製程相比，其溫室氣體排放量減少 80%。

2010 年，由 Amyris Biotechnologies, Inc 改名的 Amyris, Inc，深耕生物合成技術，為利用微生物代謝工程技術生產許多環境友善產品的代表廠商，已有許多配方產品應用於消費保健品、特用化學品、運輸燃料等領域。核心產品項目：商品 Biofene (trans-ß-farnesene)轉化的鯊烷(squalane)，主要應用在化妝品潤膚劑、個人護理產品、香精香料用之天然精油與芳香族化學品中；還有提供可再生溶劑、聚合物之各種原材料及可再生燃料。

Braskem 是巴西的一家石化公司，美洲最大的化學品生產商，也是聚丙烯生產的全球領導者。 2007 年，他們推出由甘蔗轉化之乙醇生產的生物合成聚乙烯。產品發表後，在南里奧格蘭德州的特里尼福建置一座 20 萬噸的工廠，耗資 3 億美元。該工廠生產各種等級的 HDPE 和 LLDPE。Braskem 公司的研究指出，每生產 1 噸聚乙烯，就會封存 2.5 噸二氧化碳。Braskem 公司現已為 TetraPak 公司和 LEGO 公司等多家公司提供產品。

NatureWorks LCC 公司是世界領先的聚乳酸(PLA)生物基聚合物供應商和創新者。它的 Ingeo 天然材料由可再生原料製成，其材料性能和經濟效益可與石化生產之塑料和纖維競爭。NatureWorks LCC 公司由泰國最大的化學品生產商 PTT Global Chemical 和 Cargill 合資成立。NatureWorks LCC 公司具有年生產規模為 15 萬噸的工廠位於美國內布拉斯加州的布萊爾。2016 年，新成立醱酵實驗室，以開發乳酸醱酵技術。NatureWorks LCC 公司聚合物產品涵蓋相當多產業類別，包括不同需求的剛性和軟性包裝材料、食品餐具、健康和個人護理、家庭用品、家電和電子類別的耐用產品以及 3D 列印材料。

Genomatica 是一家專注於開發平台化學品與生物合成之前驅物等技術的公司，並將其技術授權其他公司進行商業化開發產品。Genomatica 公司所開發並授權生產丁二醇製程(GENO BDO™)已成為平台化學品的技術開發案例，該公司在田納西州的杜邦公司的 Tate & Lyle 廠在五週內生產了 5 百萬磅可再生丁二醇。其 GENO BDO™亦授權給 BASF 公司和 Novamont 公司。Genomatica 公司所開發的生物製程可直接透過微生物醱酵生產丁二醇以及丁醇(butylene glycol)，成本極具競爭力；傳統生產丁二醇，需先透過生物合成琥珀酸，再其轉換成丁二醇，如今 Genomatica 公司所開發的生物生產丁二醇製程也間接造成以石化料源生產琥珀酸廠商陸續關廠，奠定 Genomatica 公司在生物合成丁二醇的地位。

Reverdia 公司的創立目標為生產生物合成之琥珀酸，使其商業化並進入市場。Biosuccinium®即是領先的生質平台化學品，可做為石化來源替代品。該公司具有

優良專利醱酵技術，Reverdia 公司所生產的生質琥珀酸具有從包裝到鞋類以及化粧品的廣泛應用。2012 年起，Reverdia 公司於義大利開始運轉全球首家琥珀酸量產工廠，每年利用酵母菌生產琥珀酸規模達一萬噸。

在許多投入生物合成產業公司近幾年發展，幾家化學品巨頭已經注意到變化，並逐漸將其業務擴展到包括可再生能源，包括 Coca-cola 公司、BASF 公司、杜邦公司、Honeywell UOP(Universal Oil Products)公司、DONG Energy 公司、殼牌(Shell)公司和沙索(Sasol)公司，顯見石化來源化學品產業即便是在石油價格崩盤時，仍積極找尋環境友善的化學品方案。

六、 結語

要降低對石化料源之依賴，轉換到更能永續發展之生物經濟，則有賴於具有整合性之生物精煉技術的開發與精進、一個有競爭力之生物精煉技術，除了要能順應多元進料之變化，能簡易調整製程外，亦需要能與現有的產業整合銜接，才能在成本和產品價值上與發展超過百年的石化產業競爭，雖然一些生物基化學品及材料已成功商業化，然整合之生物精煉技術仍在發展階段，關鍵要能協同高值化產品的生產，才能產生相當的成效。

我國自蔡總統上任以來，政府全力推動「5+2 產業創新計畫」，其中「綠能科技」、「生醫產業」、「新農業」及「循環經濟」便與生物代謝工程技術息息相關。台灣於民國五十年代初期便由蘇遠志博士成功培養新菌種(Brevibacterium divaricatum)以微生物醱酵生產麩胺酸，使台灣的味精生產技術有了突破性發展，能夠利用便宜的糖質原料轉化為味精，成本降低三分之一，產量驟增十倍，自此開啟台灣生物科技產業新的一頁。民國八十年之後，台灣生技產業將焦點逐漸放在以生物代謝工程技術改良菌種，應用於醱酵生產機能性食品素材。隨後則以生物合成健康食品、保養品及生產綠色能源為主。然而，應用生物代謝工程技術生產環境友善產品，例如：生質塑膠或衣康酸等等則是近期台灣化學廠商積極投入的部分，特別以生質塑膠材料與纖維素高值化應用為大宗。工研院材化所因應生質化學品發展趨勢，建立生物合成化學品開發平台，利用合成生物學和代謝工程有系統地改造微生物，並開發醱酵生產製程，使其將生質原料高效率轉化為生質化學品並導入循環經濟概念，為傳統石化產業轉型升級的有效策略。目前台灣應用生物代謝工程技術生產環境友善產品國內目前產業狀態如下表 3-7 所示：

表 3- 7 國內廠商以生物代謝工程技術生產環境友善產品現況

產品與應用 / 廠商	產品	應用說明
全瑩生技	蝦紅素	健康食品、色素
中華化學	生質衣康酸	樹脂、橡膠、化纖
李長榮化工	生質琥珀酸	聚氨酯(PU)、塗料

台灣儘管已有許多商業上成功的生物合成化學品以及越來越多的生質化學產品滲透到不同的市場，比起石化產品，生物合成化學品生產仍處於拓展經濟規模的初期，挑戰仍然存在。最大的挑戰是發展高性能菌株，菌株建構需要時間、人力和經費。合成生物學、系統生物學和馴化工程(evolutionary engineering)的進步，以及對代謝路徑的了解和相關的研發策略，將有效地降低工業菌株開發時間與成本，並提高成功建構生產菌株的可能性，隨著對生物代謝路徑的了解加深、菌種改質與醱酵工程的進步，最終將可建立一個對環境更加有善的永續生物合成化學品工業。

第三節 二氧化碳捕獲技術

人類排放大量二氧化碳(CO_2)等溫室氣體造成導致地球暖化，引發極端氣候，屢屢造成嚴重災害，危及人類生命安全。聯合國於 1992 年通過聯合國氣候變化綱要公約對「人為溫室氣體」排放做出全球性管制協議；1997 年在日本京都召開第三次締約國會議，通過京都議定書(Kyoto Protocol)；2012 年 12 月聯合國舉辦的氣候變遷會議決議，將全球唯一約束溫室氣體排放的「京都協定書」，效期延長至 2020 年，繼續規範各國溫室氣體排放量；2015 年 12 月 12 日聯合國氣候峰會通過巴黎協議，期望能共同遏阻全球暖化趨勢，努力將氣溫升幅限制在工業化之前的水準 1.5℃以內，同時引導資金流動符合低碳排的路徑，許多人發現低碳新經濟已然悄悄的來。

降低 CO_2 排放量的方案有很多種，包括提高能源使用與生產效率、有效運用再生能源、改善發電效率、改變燃料種類和使用 CCSU 技術等等。CCSU 是透過分離、收集、儲存與再利用各種方法，減少 CO_2 排放到大氣中，普遍被認為是因應氣候變遷控制全球升溫的潛力途徑之一。全球著名的微軟公司宣稱希望在 2050 年前捕獲所有散發的 CO_2，該公司希望到 2030 年實現負碳排放，但是實現目標所需的技術仍然昂貴，因此該公司計劃在未來四年中花費 10 億美元，資助捕獲大氣中 CO_2 的創新(Calma, 2020)。這顯示出碳捕獲不僅被石油、化石、燃料工業所重視，各行各業都會被捲入這股碳捕獲風潮之中。

在全球減少 CO_2 排放的共識下，台灣從 1998 年開始召開全國能源會議，因應國際減碳趨勢，推動能源轉型政策。行政院於 2008 年通過「永續能源政策綱領」，並將碳捕獲與封存(Carbon Capture and Storage, CCS)技術納為我國 CO_2 減排的重要手段。2015 年 通過溫室氣體減量及管理法，明訂台灣溫室氣體長期減量目標為 2050 年溫室氣體排放量降為 2005 年 50%以下。台灣長期以來高度仰賴化石能源，根據經濟部能源局能源統計年報的統計，2018 年我國能源總供給量為 148,923.6 千公秉油當量，其中進口能源占總供給量 98.06%，而煤及煤產品占 29.38%，石油占 48.28%，天然氣占 15.18%，整體化石燃料比例高達 92.84%，對於使用化石能源比例這麼高的台灣而言，減少 CO_2 排放明顯是非常重要的課題。

碳捕獲事實上是全球性的重要議題之一，每年都有許許多多的文獻報導，例如全球碳捕獲與封存研究所(Global CCS Institute, GCCSI)發表「全球 2019 碳捕獲和儲存狀態」(Global CCS Institute, 2019)，揭示世界各國在 CCS 方面許多政策和產業上的積極作為；在台灣也有許多團隊為 CCSU 做出貢獻，其中清華大學談駿嵩教授團隊在相關的研究報導也提供很多的說明，論述碳捕獲相關技術的文章網路上俯拾皆是，碳捕獲的重要性不言可喻。本章僅嘗試介紹目前國際上 CO_2 捕獲的狀況，整理各國推動 CO_2 捕獲技術產業化的進展，從專利的角度介紹技術領先公司的專利投資與佈局，並概略回顧台灣在 CO_2 捕獲技術的研發進展，希望讓讀者對國內外的碳捕獲技術之發展有全貌的概念。

一、 國際 CO_2 捕獲發展現況

CO_2 捕獲技術一般依應用程序區分為 Post-Combustion、Pre-Combustion、Oxy-Fuel 三類，如圖 3-12 所示(Hussin and Aroua, 2020)。Post-Combustion 為燃燒後碳捕獲，從燃燒後的煙氣中以 CO_2 吸收劑等將 CO_2 分離出來；Pre-Combustion 為燃燒前碳捕獲，燃料先經氣化等複雜程序後再將 CO_2 分離出來，合成氣用於發電；Oxy-Fuel 為富氧燃燒，燃燒前先分離空氣，供應純氧燃燒，目前國際上以燃燒後捕獲技術相對成熟。

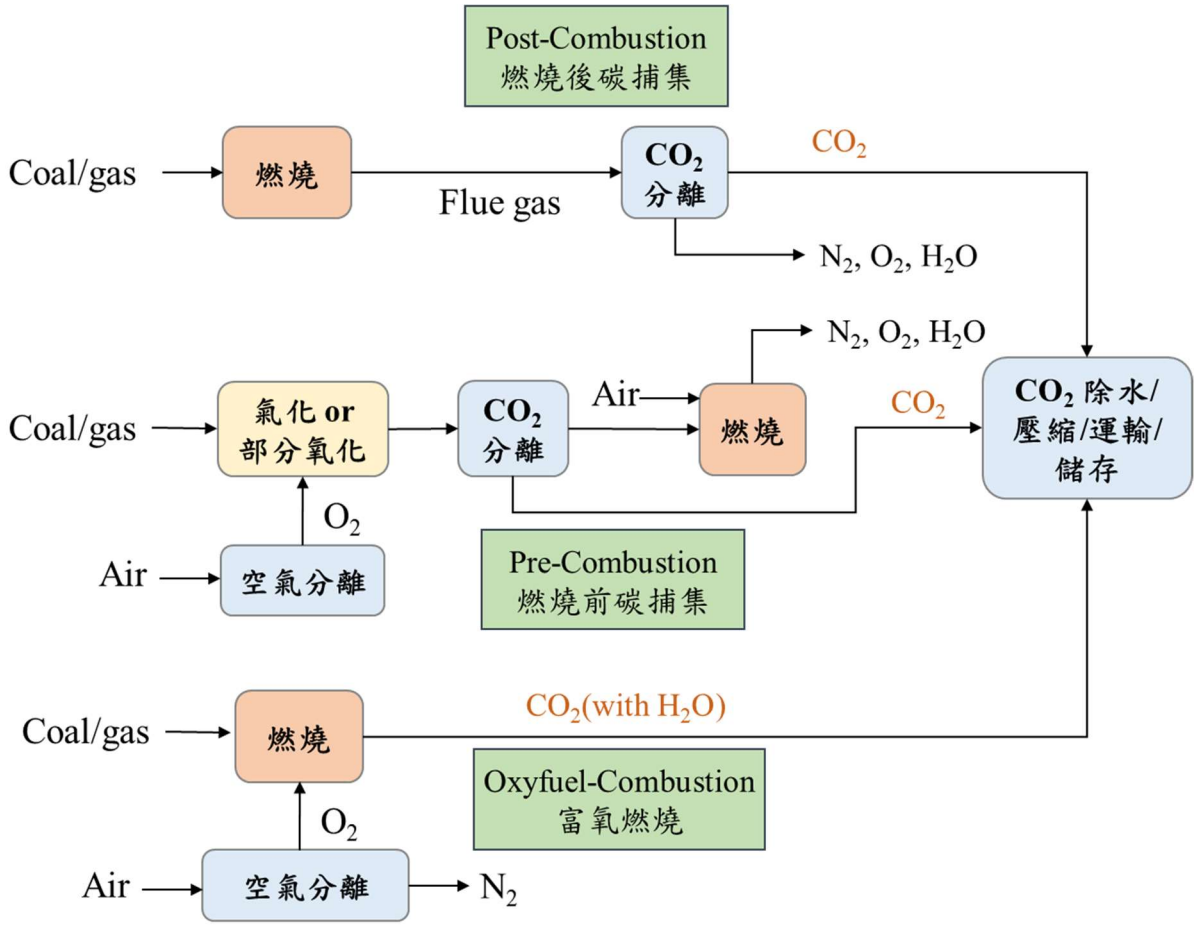


圖 3- 12 CO_2 捕獲技術分類

根據 GCCSI 發表「全球 2019 碳捕獲和儲存狀態」的報告(Global CCS Institute, 2019)，到 2019 年大型 CCS 設施已經有 51 座，其中有 19 座已在運轉、有 4 座正在建設，10 座正在使用專門的前端工程設計方法進行高階開發，還有 18 項計畫處於早期開發的階段。美國很早就發展碳捕獲技術，最初主要是為了增加油氣採收(EOR)，促進經濟效益是主要的發展目的，這方面的碳捕獲技術算是相當成熟，目前有 9 座大型碳捕獲設施商業化運轉中，CO_2 捕獲量超過 22 Mtpa。運營中的大型 CCS 設施的捕獲能力到 2019 年已增加為 39.25 Mtpa，各個開發階段的所有設施的總能力則達到 97.5 Mtpa，這顯示世界各國都加大投入的力道。

除了美國，加拿大、澳洲、巴西、挪威、中國、沙烏地阿拉伯、阿拉伯聯合大公國等許多國家都有計畫投入中，例如加拿大艾伯塔省的碳幹線(ACTL)，一條 240 公里的二氧化碳管道，預計於 2020 年上線，為加拿大艾伯塔省的工業提供二氧化碳運輸服務，Sturgeon 精煉廠和 Agrium 化肥廠將通過管道共同向阿爾伯塔省中部的 EOR 供應約 1.6 Mtpa 的二氧化碳；加拿大 Boundary Dam CCS 自 2014 年底開始投入營運，該設施在 2019 年的二氧化碳捕獲量到達 300 萬噸。澳洲於 2019 年 8 月在 Gorgon 天然氣加工廠開始注入 CO_2，其將成為世界上最大的專用地質 CO_2 封存設施，屆時最大容量每年可存儲 4.0 Mtpa CO_2。巴西 Petrobras 不斷擴大其浮動生產存儲和卸載裝置的能力，旨在到 2025 年累計注入 4,000 萬噸二氧化碳。

從表 3-8 所列商轉中的大型碳捕獲設施以天然氣加工的燃燒前捕獲和燃燒後捕獲技術為主(Vega *et al.*, 2020)，其中燃燒前碳捕獲主要應用場域在於油氣事業的氣體分離。近來，天然氣發電的 CO_2 排放量和較高的操作靈活性引起許多的關注，高效率和具有競爭力的富氧燃燒循環也有更多的探討，對最先進的燃氣動力循環的技術經濟評估顯示，表現出色的阿拉姆循環效率可達 55.1%，目前在(1)氧氣的生產方法和純度；(2)廢氣再循環的型式；(3)操作條件等方面仍然面臨挑戰，但是未來的發展潛力有可能逐漸增加，應持續關注其發展動向。以台灣的產業型態研判，燃燒後捕獲技術可能比較適合短中期台灣產業的應用發展，本文討論的內容以燃燒後捕獲技術為主。

第一代燃煤電廠的 CO_2 捕獲技術每噸成本 100 多美元，曾經被認為過於昂貴，但是投資者從邊做邊學之中也獲得持續降低成本的好處，到 Petra Nova 運轉的成本已經下降到每噸 CO_2 捕獲成本 65 美元以下。據估計在 2024-28 年開始營運的捕獲成本(使用成熟的胺基捕獲系統)，每噸 CO_2 的成本約為 43 美元，而中試規模的新技術則有望使每噸 CO_2 的捕獲成本進步到約 33 美元。伴隨著技術的進展，若是政府部門對產業的發出支持信號，產業協同導入各種清潔能源技術，將有助於工業界投入的力道持續增強。

表 3- 8 國際上商轉中的大型碳捕獲與封存設施[7]

場域名稱	國別	規模 Mtpa	年代	技術別	利用型式
Val Verde (TERREL)	USA	1.3	1972	燃燒前天然氣加工	1
Enid Fertilizer	USA	0.7	1982	工業分離	1
Shute Creek	USA	7	1986	燃燒前天然氣加工	1
Century Plant	USA	8.4	2010	燃燒前天然氣加工	1
Air Products	USA	1	2013	工業分離	1
Coffeyville	USA	1	2013	工業分離	1
Lost Cabin	USA	0.9	2013	燃燒前天然氣加工	1
Petra Nova	USA	1.4	2016	燃燒後	1
Illinois Industrial	USA	1	2017	工業分離	2
Great Plains	USA/ Canada	3	2000	燃燒前 gasfication	1
Boundary Dam	Canada	3	2014	燃燒後	1
Quest	Canada	1.6	2015	工業分離	2
Petrobras Pre-Salt	Brazil	1	2013	燃燒前天然氣加工	1
Sleipner	Norway	0.9	1996	燃燒前天然氣加工	2
Snøhvit	Norway	0.7	2008	燃燒前天然氣加工	2
Uthmaniyah	Saudi Arabia	0.8	2015	燃燒前天然氣加工	1
Abu Dhabi (Phase 1)	United Arab Emirate	0.8	2016	工業分離	1
CNPC Jilin	China	0.75	2017	燃燒前天然氣加工	1
Gorgon	Australia	4.0	2017	燃燒前天然氣加工	2

Mtpa:百萬噸/年

利用型式：1- EOR; 2- Geological storage; 3- Geological and onshore saline formations; 4- Geological and offshore depleted reservoir

美國 45Q 是政府部門對減排的鼓勵與支持最顯著的例子。2018 年美國會通過的 FUTURE 法案(Furthering carbon capture, Utilization, Technology, Underground storage, and Reduced Emissions Act)為針對 CCUS 及減排的關鍵法令，法案中最受矚目之措施是 Section45Q 減稅額度的延伸與擴大，鼓勵產業投入 CCUS 發展。2018 年針對 EOR 之減稅額度為每噸 12.83 美元，地質封存為每噸 22.66 美元。新修訂法規將逐年調升前述額度，至 2026 年 EOR 減稅額度將提高至每噸 35 美元，地質封存則提高至每噸 50 美元。這是世界上最先進的 CCS 特定激勵措施，自美國國會通過 45Q 稅收抵減法條以來，已啟動許多開發項目，在同一時期，各州和公用事業公司為自己設定了零碳電力的目標。如加州和紐約等州已承諾實現零碳電力系統，提供美國 40%以上電力的公用事業公司已承諾將其二氧化碳排放量減少 80%至 100%。自從歷史上被視為氣候政策黃金標準的加利福尼亞通過零碳電力授權，以及到 2050 年實現碳中和的目標之後，其他州如蒙大拿州、路易斯安那州，德州和北達科他州等州也緊隨其後，都為 CCS 的部署提供稅收優惠，其他世界各國政府推動 CCUS 與減排的措施自不在話下，由於國際產業鏈緊密相扣，當美中歐日等大國推動之後，相信所有公司行業的未來營運發展都會受到二氧化碳排放減量政策的影響。

表 3- 9 美國 45Q 碳稅抵減摘要[8]

	用於非 EOR	用於EOR
2018	$25.70	$15.29
2019	$28.74	$17.76
2020	$31.77	$20.22
2021	$34.81	$22.68
2022	$37.85	$25.15
2023	$40.89	$27.61
2024	$43.92	$30.07
2025	$46.96	$32.54
2026	$50.00	$35.00

二、CO_2 捕獲技術發展狀況

二氧化碳捕獲技術早在 1970 年代便有專利產出，相關技術在美國的發展算來已經有 50 年，初始主要是應用在增加油氣採收(EOR)，在 1999 年前產出之專利件數相對有限，如圖 3-13 所示。隨著全球暖化議題升溫發酵，各國日益重視環保議題，以及京都議定書簽訂，公約參加國針對減少溫室氣體排放量達成共識，積極推動節能減碳運動，二氧化碳捕獲技術逐漸受到重視，各國紛紛投入二氧化碳捕獲技術之發展，專利數量逐漸擴大，顯見 CO_2 捕獲技術已經受到世界各國所重視而大量投入。

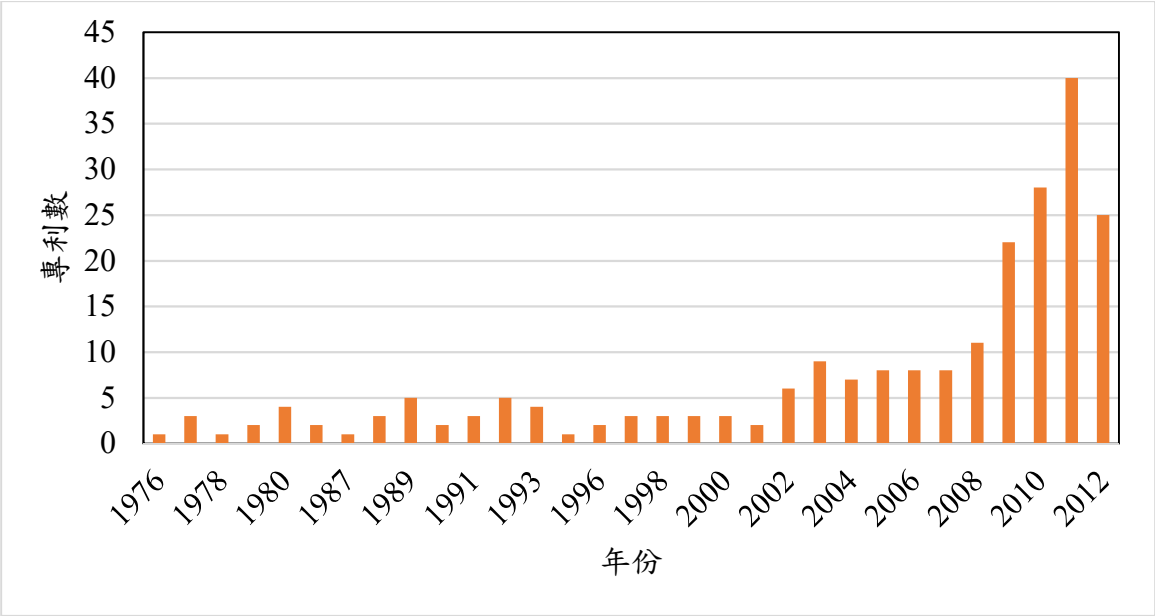


圖 3- 13 CO_2 捕獲美國專利趨勢

自煙道氣中分離 CO_2 之技術包括吸收、吸附、薄膜分離等等，從 2000 年至 2020 年(中)，利用 Derwent Innovation 專利資料庫工具，以關鍵字搜尋分別以 carbon dioxide(CO_2)和 flue gas、purification、absorption、membrane、adsorption 等進行檢索，與 CO_2 捕獲相關個別技術的專利數整理如圖 3-14 所示，不難從其中發現化學吸收應用最為廣泛，但薄膜和吸附技術也是佔有相當高的比重，而且自 2000 年至今各種有關 CO_2 捕獲技術的專利數持續大幅成長，如圖 3-15 所示，無論是吸收、吸附或薄膜等技術呈現百家爭鳴的態勢，據 Massimo Barbieri 的對 CO_2 捕獲專利的分析預測，大約要到 2050 年，有關 CO_2 捕獲技術的專利申請數量才會趨於飽和，隱含未來 30 年陸續會出現許多創新的技術。

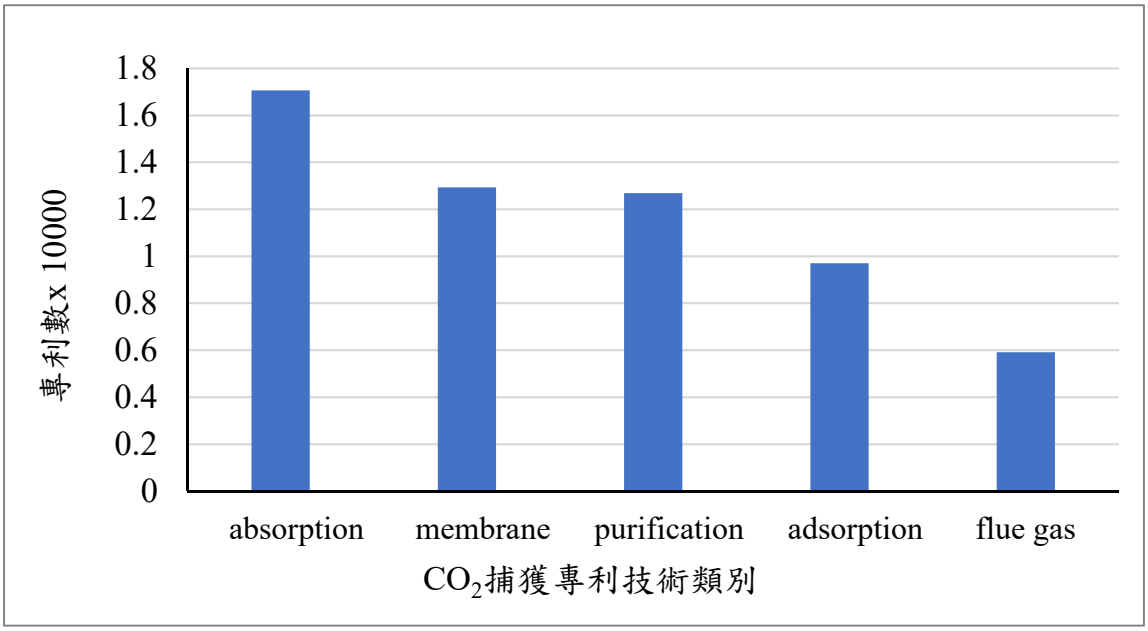


圖 3- 14 CO_2 捕獲專利技術個別發展趨勢

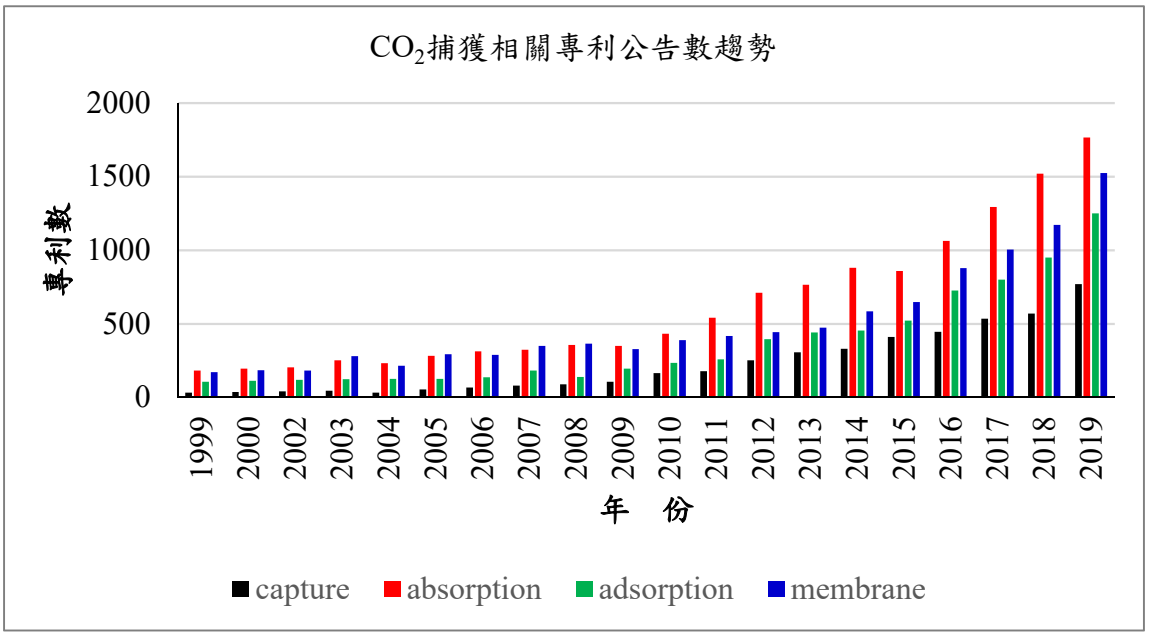


圖 3- 15 CO_2 捕獲相關專利公告數趨勢

CO_2 捕獲技術的專利數量雖然大幅成長，但是大部分集中在少數國家的公司與機構，如表 3-10 所示，各別公司機構在不同領域的專利數量如表 3-11 所示。日本主要的技術掌握在三菱重工 Mitsubishi、Fujifilm、日立 Hitachi、Matsushita、Nippon steel、Toyoko electron 公司等，在二氧化碳分離、回收、純化的製程技術與設備等方面有完整的布局。其中三菱重工在鋼鐵廠和燃煤電廠的場域示範 CO_2 捕獲技術展現相當出色的成果，受到非常多的關注。美國是最早投資 CO_2 捕獲技術的國家，雖然早期主要應用在生產原油和天然氣等領域，但是美國主要掌握技術的研發公司包括 Air product、Exxonmobil、GE、Praxair 、UOP、Invista、DOW、UCC 等等，近年在開發碳捕獲技術仍然非常強勢，美國能源部對研發捕獲二氧化碳技術的補助和通過 Q45 法案對實用化推廣增強力道，預期美國在相關領域持續具有獨特的技術優勢。德國 linde 集團是工業氣體和工程技術領域公認的技術最先進的大公司，加上 BASF 和 Siemens 等傳統石化化工領域的領導廠商共同投入，德國在二氧化碳分離、提取、回收、純化的過製程與設備等方面的專利申請數量比較多，用催化劑處理廢氣中氮氧化物的技術有較多著墨。法國 Alstom 公司在全球有多個試驗場域驗證碳捕獲有關技術，Air liquide 是全球工業氣體行業中規模最大的兩家企業之一，法國石油研究院 IFP 在相關領域也擁有許多的專利，顯示法國在二氧化碳方面的研發投資也不遑多讓。除美、歐、日等先進國家大力推動 CO_2 捕獲技術，中國的專利布局也急速增加，但目前技術主要以大學研發為主力，包括浙江大學、四川大學、廣州大學、東南大學、清華大學等學術機構，Sinopec 和華能集團也開始在產業界導入測試，中國在此領域相關的發展應用也是未來必須關注的重點。

表 3- 10 發展 CO_2 捕獲技術主要的國家與公司機構

國家	公司/機構
日本	三菱重工 Mitsubishi、Fujifilm、日立 Hitachi、Matsushita、Nippon steel、Toyoko electron
美國	Air product、Exxonmobil、GE、Praxair 、UOP、Invista、DOW、UCC
德國	Linde、BASF、Siemens
法國	Alstom、Air liquide、IFP
中國	Sinopec、華能集團、浙江大學、四川大學、廣州大學、東南大學、清華大學
英國	Astrazeneca

表 3- 11 國際領導公司在 CO_2 捕獲技術專利佈局狀況

Removal		Separation		Purification		Flue gas	
公司/機構	篇數	公司/機構	篇數	公司/機構	篇數	公司/機構	篇數
Mitsubishi	320	Mitsubishi	325	Air liquide	181	Alstom	131
Hitachi	272	Air liquide	292	Linde	75	Guizhou U.	90
Linde	271	Sichuan U.	269	Nanjing Zelang	53	Mitsubishi	55
Air liquide	216	Linde	228	Sinopec	50	SoutheastU.	51
Nippon steel	186	Hitachi	211	Mitsubishi	46	mobil	49
Air product	180	Air product	171	Matsushita	42	Air liquide	38
Exxon	155	Zhejian U.	159	Sedin engn.	41	HuazhongU.	38
GE	145	Siemens	154	Air product	40	Siemens	37
Merck	134	GE	129	Zhejian U.	39	Tsinghua U.	36
DOW	133	Guizhou U.	129	UOP	37	GE	34

Absorption		Membrane		Adsorption		Capture	
公司/機構	篇數	公司/機構	篇數	公司/機構	篇數	公司/機構	篇數
Mitsubishi	162	Air liquide	100	Air liquide	165	Alstom	117
Sinopec	82	UOP	61	Air product	101	IFP	55
Hitachi	76	GE	61	Hitachi	85	Exxon	79
Alstom	74	Toyoko electron	56	Mitsubishi	76	SoutheastU.	47
Zhejian U.	71	Mitsubishi	56	Linde	66	GE	46
Tsinghua U.	70	Astrazeneca	52	Praxair	66	Air liquide	41
BASF	58	Zhejian U.	52	Exxon	63	華能/china	38
Linde	58	Invista	47	Zhejian U.	57	IFP	37
Fujifilm	56	U. California	46	UCC	41	GE	35
Mitsubishi_JKK	55	Hitachi	44	Exxon	40	Exxon-REC	29

上述的專利檢索結果主要是針對 2000~2019 年各國發表的專利，雖然不一定能夠展現二氧化碳捕獲技術發展的全貌，但大致上還是有助於了解技術面的發展趨勢。特別要強調的是，通常申請專利的目的是要保護具有較高技術和經濟價值的新發明或創新的成果，專利的獲得絕大部分是透過最初始的研發、試驗工廠階段到工業應用各階段種種的技術累積而得，而能夠進入 pilot 階段的技術通常都是具有一定程度的可行性，也可能是為了驗證相對較新穎的技術，不論是為了產業應用或是技術研究開發，了解目前國際上進入試驗工廠階段的技術也是具有參考價值。

表 3-12 提列目前文獻報導近年國際間進行的 CO_2 捕獲試驗工廠計畫，其中部分試驗工廠測試新型溶劑和混合物，其目的是要降低溶劑再生所需能量，期望新型合成溶劑能夠獲得理想的特性，利用優良的特性降低相關製程的能量損失。溶劑特性應當多方面兼顧，包括腐蝕性、降解率、降解過程產生的副產物、環境影響、成本以及操作條件(例如循環容量、溶劑流速和汽提條件)，以評估其整體效益。從表 3-12 也可以約略窺見歐美日技術領先的公司大多有投入為開發工業規模 CO_2 捕獲而展開的試驗計畫，從表 3-12 中也顯示一般試驗工廠的 CO_2 容量介於 0.1~1 噸 CO_2 /天(低容量水平)和 10~80 噸 CO_2 /天(高容量水平)之間，這些資訊可提供給有意投資相關技術者參考。雖然很多碳捕獲技術已經被發展出來，但是碳捕獲成本是實現技術最關鍵的因素，因此降低碳捕獲成本是技術發展的目標。使用高性能的吸收劑也是其中的方案之一，表 3-13 則摘錄文獻中應用於 CO_2 捕獲的新型溶劑供參考。

表 3- 12 國際上 CO_2 捕獲試驗工廠計畫

公司/機構	啟動年	計畫名稱	Flue gas (Nm3/h)	CO_2 捕獲率 (%)	Solvent	捕獲量 (t/day)
KEPRI-MHI	2013	NankoPilot	350	90	MEA 30 wt%	2
KEPCO-MHI	2016	Matsushima Pilot- KM-CDR™ process	1750	90	KS-1™	10
DOW-ALSTOM	2015	Advance Amine Process(AAP)	2500 – 5000	90	URCASOL™	25
Babkock-Hitachi	2012		1000	80–95		–
BASF-LINDE	2011	Charleston – RWE PS at Niederaussem	1550	90	MEA 30 wt%	7.2
EON-FLUOR	2009	Coal-fired PP at Wilhelmshaven	19,400	90	Econoamine FG plus^{SM}	67.2
IHI	2014	Aioi Pilot	4000	90	ISOL's	20
RITE	2018	RITE #1 and #2	–	–	IPAE-based solvent	1
DONG Energy	2019	Esbjerg pS	5000	90	MEA 30 wt% and CASTOR	1
MONGSTAD	2017	Statoil, Gassnova, Aker, TCM DA	30000–60000	60–95	MEA 30-40 wt%	80–275
CO2CR-CSIRO	2017	Huaneng Changchun pilot	–	80–98	MEA 30 wt%	2.4
CO2CR-CSIRO	2017	Loy Yang PS in Newcastle (AUS)	110 – 130	80–85	AMP 25wt%/PZ 5 wt%	0.1–0.2

Univ. Stuttgart and Kaiserslautern	2017		30–110	50–75	MEA 30 wt%	0.1–0.25
Univ. Stuttgart and Kaiserslautern	2017	CESAR Project	-	90	AMP 28wt%/PZ 17 wt% and EDA 32 wt%	-
Univ. Stuttgart and Kaiserslautern	2018	CASTOR project (BASF)	30–110*	54–79	MDEA 25wt%/n-MPDA 15 wt% and AMP 25wt%/n-MPDA 15 wt%	0.1–0.25
Univ. Stuttgart and Kaiserslautern	2018	CESAR#3	-	–	MEA and AMP 27wt %/EDA 19 wt%	-
Univ. Texas	2016		180–900	84.5–99	PZ/K2CO3	-
Univ. Bucharest	2007	CFBC with capture	–	90	MEA 30-40 wt%	-
NTNU energy	2018		150	–	MEA 30 wt% and MAPA/ DMMEA (15%)	0.3
Univ. Kentucky	2017		23.8	67–71	CAER-B2	-
Univ. Graz	2017	CO2SEPPL process at EVN PS at Dürnrohr	100	90	PZ 25–36.7 wt%; EDA 32 wt%; NaGly 15	-
Pilot-scale Advanced Capture Technology (PACT)	2018		210	90	MEA 30 wt%	-
Jaworzno II Power Plant	2013	Jaworzno II Power Plant	292	75–89	MEA 30 wt%	1
UNO MK 3	2017	UNO MK 3	24–30	20–35	K2CO3 20-40 wt%	-

表 3- 13 應用於 CO_2 捕獲的新型溶劑[7]

Solvent	Abbreviation
Piperazine/potassium carbonate	PZ + K_2CO_3
2-((2-aminoethyl)amino)ethanol	AEEA
2-amino-2-ethyl-1,3-propanediol	AEPD
N-methylmonoethanolamine	MMEA
N-ethylmonoethanolamine	EMEA
Piperazine/2-amino-2-methyl-1-propanol	PZ + AMP
1,2-ethanediamine/2-amino-2-methyl-1-propanol	EDA + AMP
Dimethyl-monoethanolamine/3-methylamino propylamine	DMMEA + MAPA
N,N,N,N,N-pentamethyldiethylenetriamine and diethylenetriamine	PMDETA + DETA
Monoethylene glycol/monoethanolamine	MEG + MEA
Monoethylene glycol/N,N-dyetilethanolamine	MEG + DEEA
Amino-functionalized ionic liquids/triethylenetetramine L-lysine	AFIL + [TETAH][Lys]
Carbonic anhydrase promoted potassium carbonate	CA + K_2CO_3
Diethylenetriamine	DETA
3-dimethylaminopropylamine/3-diethylaminopropylamine/3- piperidinopropylamine	DMAPA + DEAPA + 3PDPA

三、 國內 CO_2 捕獲技術研發概況

台灣在二氧化碳捕獲技術的研發以行政院科技部的「能源國家型計畫」第一期能源國家型計畫(NEP-I)為發展主軸，推動「淨煤、捕碳與儲碳」專案計畫，並以第二期能源國家型計畫(NEP-II)以NEP-I的研究成果為基礎，持續推動我國的碳捕獲與封存試驗計畫較具代表性。國立清華大學化學工程學系談駿嵩教授團隊(談駿嵩，2015；2017；2019)在NEP-I和NEP-II發展CO_2捕獲技術多年，以填充塔結合超重力旋轉床技術，大幅減少能耗、強化製程效率及可縮小整體設備體積，已於台塑石化麥寮廠建立示範驗證設施，並曾經協助中鋼公司建立一座以化學吸收法每日捕獲0.1噸CO_2之示範工廠，以DETA+PZ為吸收劑配方應用於此CO_2捕獲示範工廠中，其再生能耗約較MEA低 30%。

NEP-I和NEP-II另一個重要的案例是經濟部能源局與工研院綠能所開發

之鈣迴路捕獲CO_2技術(徐恆文，2015)，係利用天然石灰石為原料，經由碳酸化與煅燒兩種反覆循環的化學反應，捕獲來自電廠或工業製程煙氣中之 CO_2。利用氧化鈣(CaO)與煙氣中的CO_2碳酸化反應形成碳酸鈣 ($CaCO_3$)，產生之碳酸鈣再經由煅燒再生為氧化鈣與高濃度二氧化碳。吸附劑(CaO)於碳酸化與煅燒反應器間形成一循環迴路，可捕獲煙氣中之CO_2並濃縮至90%以上。

鈣迴路捕獲 CO_2 技術已於台灣水泥公司和平廠建立1.9MWt 與500kWt 先導試驗工廠，1.9MWt 系統 CO_2 捕獲量為 1 ton/hr，累積運轉>2600 小時，連續運轉時數>106 小時，CO_2 捕獲效率＞80%，Ca/C 莫耳比 6。500kWt 系統 CO_2 捕獲量 0.27ton/hr，整合蒸汽水合程序於多階旋風式鈣迴路捕獲系統，連續捕碳運轉>101 小時，系統的 CO_2 捕獲效率可達 90%，Ca/C 莫耳比 3.9。

國立成功大學化學工程學系陳志勇教授團隊[14]開發低能耗醋酸鉀法 CO_2 捕獲與再生技術(條件 60~110℃、1atm)，已完成 CO_2 吸收/解吸之再生系統串聯操作，在 60℃~80℃溫度下即可進行 CO_2 的解吸，解吸率>85%、再生率>95%。這項技術目前正與臺灣塑膠工業股份有限公司合作，預計在 2021 年建立 CO_2 捕獲量 100 kg/day 的試驗工廠。

有些較前瞻性的研究，如國立臺灣大學陳誠亮教授團隊開發中空纖維的快速變溫吸附(Rapid Temperature Swing Adsorption, RTSA)方法，以雙塔操作程序連續處理來捕獲燃煤電廠所排放的 CO_2，可以縮短操作時間，並使用低階能量來進行脫附(Chen *et al.*, 2020)。國立臺灣大學童國倫教授團隊開發中空金屬纖維吸附器，纖維表面上含有大量均勻分散的二氧化矽多孔吸附粒子，且擁有非常龐大之單位吸附面積(>500 m^2/m^3)，可快速捕捉二氧化碳，再將高濃度的二氧化碳脫附再利用，其碳捕捉的材料技術獲得美國匹茲堡發明競賽金牌獎，碳分離與轉化反應器核心技術也獲得第十四屆國家新創獎。國立交通大學王誠佑教授團隊進行金屬有機骨架材料在二氧化碳捕捉之研究，發展"奈米限制"(nanoconfinement)技術，將金屬氧化物加到具有微孔結構的材料中(MO@MOF)以行氣體吸脫附應用；以及中興大學盧重興教授開發多塔式吸附反應器捕獲回收煙道氣二氧化碳之研究等等。

最後特別要提到的是工研院材化所協助台灣電力公司綜合研究所在台電火力發電廠(台中)建立一套二氧化碳捕獲驗證系統，此為國內在燃煤電廠驗證二氧化碳捕獲技術的重要案例，CO_2 的來源為台中電廠第九號、第十號燃煤電廠的煙道氣，CO_2 捕獲量 20 kg/day。本系統測試 MEA 吸收劑及複合型吸收劑連續自動操作，MEA 吸收劑捕獲 CO_2 的捕獲率藉由調整吸收劑與煙道氣流量比調控，可達 90%以上，捕獲的 CO_2 純度約在 99.9%，吸收劑的再生能耗約 4.27 GJ/ t CO_2。複合型吸收劑捕獲 CO_2 的捕獲率約 90%左右，捕獲的 CO_2 純度約在 99.9%，如表 3-14，捕獲之 CO_2 符合 CNS9179 工業級規格，而且吸收劑的再生能耗約 2.98 GJ/ tCO_2，顯示製程性能相當優秀，圖 3-16 是本系統之二氧化碳捕獲系統流程圖。

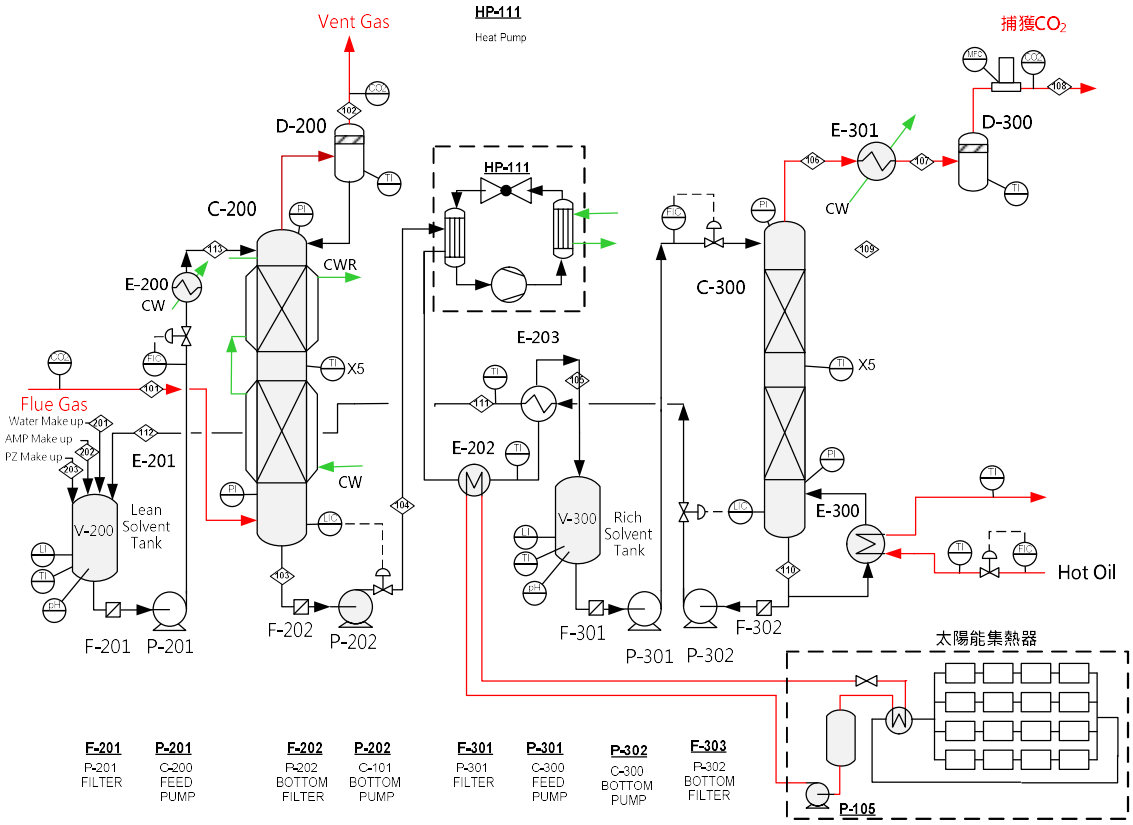


圖 3- 16 工研院協助台電公司建立之二氧化碳捕獲系統流程圖

表 3- 14 台電公司之碳捕獲驗證系統所捕獲之 CO_2 規格

項目	CO_2 純度 (%)	THC (ppm)	水份 (ppm)	TS(總硫) (PPM)	CO (PPM)
CNS9179	>99.5	<20	<1,200	<0.1	<10
捕獲 CO_2	99.9	8	332	0	0

四、 結論

碳捕獲技術正在全世界密集發展，全世界許許多多的政府機關、研發機構、學術團體和私人企業都有緊密合作夥伴關係，大型實用化的案例陸續出現，更多進入場域實地驗證的技術正在進行，技術發展的速度越來越快，雖然有很多人質疑政策不明，缺少經費補貼及獎勵措施，使得碳捕獲技術的推動困難重重，但是相關議題將會是海嘯型的衝擊，相關單位已經沒有猶豫的空間，盡速投入研發布署方為上策。

通過專利文獻初步的檢索分析，可以看出碳捕獲技術正處於大幅成長的階段，隨著全球氣候變化問題的加劇，CCSU技術受到廣泛關注和重視，專利數量還會迅速增加，科技強權如美國、德國、日本等無不大力投資發展，新興大國如中國、

韓國等則正急起直追。我國整體能源供應幾乎完全依賴化石燃料，可謂是人均碳排大國，「2020年氣候變遷績效指標」(Climate Change Performance Index，CCPI 2020)評比，台灣後退三個名次為第59名，列為評比國家倒數第三，是台灣各界須警惕的事件，讓世界看見台灣在減碳與碳捕獲技術方面的努力與進展非常重要。

近年來台灣有需多團體努力從政策、法規和技術各方面逐漸開始重視 CCSU 技術的推動與落實，台灣的碳捕獲示範場域也有一些陸續開始建設的跡象，但相關技術在台灣的發展仍面臨著許多挑戰，特別是產業界的投入意願與世界各國積極投入的強度相差甚遠。隨著地球越來越熱，民眾愈發有感之時，相信 CCSU 技術將會逐漸成為國內各界關注的熱點。

第四節　二氧化碳再利用

CO_2 再利用可簡略歸類成：(1)直接應用、(2)礦物碳酸化、(3)燃料、以及(4)化學品生產四大應用方向(Brinckerhoff, 2011)。二氧化碳直接應用包括飲料碳酸化、咖啡因萃取、作為密封氣體、冷媒、石油開採填充氣體、發電工作流體等。二氧化碳直接應用屬於一次性消耗，投入後會持續循環使用，例如：二氧化碳可作咖啡因萃取的溶劑，在完成一次的萃取後，很容易利用分離技術，將咖啡因從二氧化碳中分離，而二氧化碳則可以回收再進行下一次的萃取。但是，二氧化碳應用於製造業如飲料碳酸化，所需要的二氧化碳總量，相對於二氧化碳每年全球人為總排放量(大約每年 370 億噸)來說，其數量相對地少。因此，二氧化碳直接應用能夠消耗掉的二氧化碳總量非常有限，無法真正有效減少目前的二氧化碳總量。

二氧化碳礦物碳酸化技術包括以二氧化碳為原料製造碳酸鈣、碳酸鎂、小蘇打等產品；二氧化碳製成燃料則包含甲烷、甲醇、甲酸、碳酸二甲酯、二甲醚等製程；而尿素、聚合物、水楊酸等製程則可歸類於二氧化碳化學品的製程。據此，將二氧化碳碳酸化、轉置成燃料或化學品(Pieri *et al.*, 2018)，可歸類為大宗的製造業，其產品在市場上有一定的價值與需求量。換句話說，這三種再利用可以持續性地消耗各產業捕捉到的二氧化碳，對於減碳的目標，有比較顯著的效果。因此，本節會著重在這三種再利用技術的評估與分析。

一、 二氧化碳產品潛力分析

二氧化碳再利用的方式雖然相當多元，不同的利用方式多各有其優缺點，可從 **3E** 原則來選擇發展方向：即工程技術可行性(**E**ngineering Technical Feasibility)、經濟成本競爭性(**E**conomic Cost Competitiveness)、環境影響持續性(**E**nvironmental Impact Sustainability)等三大方向(Zimmermann and Schomäcker, 2017)。

(一) 工程技術可行性(Engineering Technical Feasibility)

由於礦物碳酸化、燃料與化學品製程的二氧化碳產品種類相當多，所以必須從眾多產品中挑選出一些能夠在中、短期內技術發展成熟，並且具有商業化潛力

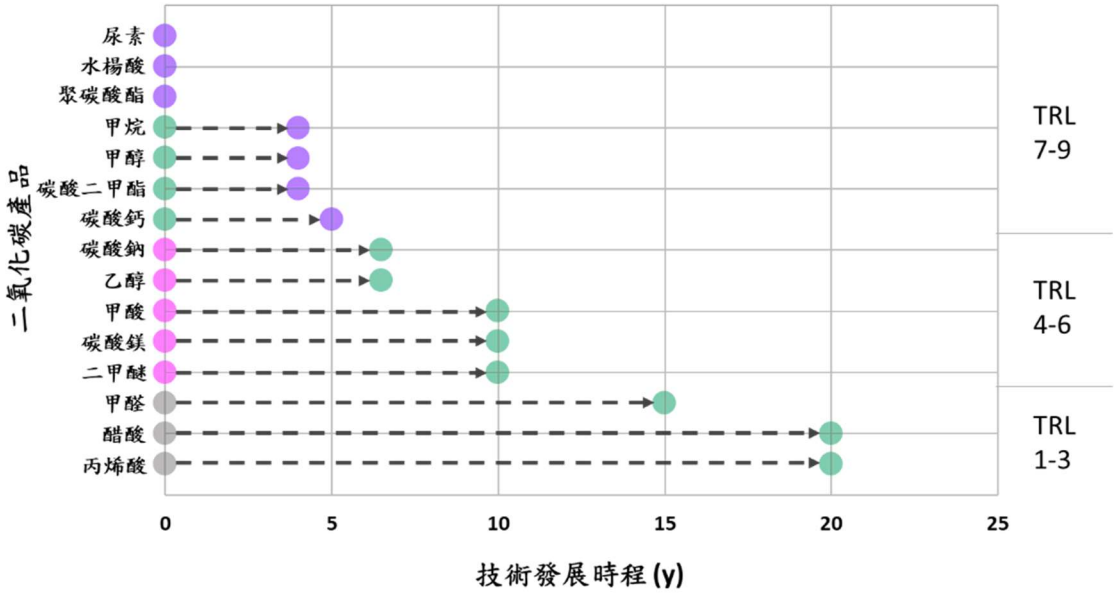
的產品。表 3-15 中簡單列出一些可以利用二氧化碳為原料生產的產品與其相關資訊，其中包括各產品現階段的全球年產量(或市場需求量)、比質量(生產每噸的產品所能消耗的 CO_2 量)、CO_2 的年消耗潛力、製程方法與相對應的技術成熟度(Technology Readiness Levels，TRL)等(Chauvy *et al.*, 2019)。表 3-15 所列的 TRL 評量是由美國提出針對技術發展純熟度的一套標準，此評量分為 9 個等級，等級數值越高表示技術越成熟。此 9 個等級也可粗略劃分為三個區塊，1-3 為技術研發階段，4-6 為實驗階段，7-9 則是建廠階段。舉例來說，目前已廣泛應用的聚碳酸酯、尿素及水楊酸等，都是相當成熟的商業化製程，因此其 TRL 等級為 9；而轉製成甲烷、碳酸鈣、甲醇、聚氨酯與碳酸二甲酯等之製程技術，目前已經有幾個相當樂觀的試驗結果，並已建立實驗工廠或放大製程供作量產測試，因此其 TRL 等級為 7-8；反觀，甲醛、二甲醚、醋酸、丙烯酸與碳酸鎂等產品，仍處於研發階段，近期內廣泛應用其難度最高，因此其 TRL 等級為 1-3。

本節著重於篩選出能夠在中、短期內發展完成與商業化的潛力產品，時間因素是一個重要的考量點，因此各個二氧化碳產品的技術成熟度，依時間推進的發展進度的預測結果皆呈現於圖 3-17 中。此結果顯示甲烷、甲醇、碳酸二甲酯(DMC)、碳酸鈣等化學品，最有希望在五年內發展到商業化的階段，而這些產品都是目前 TRL 等級較高的產品。因此，本節將聚焦介紹 TRL 等級高的產品。

表 3- 15 二氧化碳產品製程相關資訊

CO_2 產品	年產量 (Mt/y)	比質量 (tCO_2/t 產品)	CO_2 消耗潛力 ($MtCO_2$/y)	製程方法	技術成熟度 (TRL)
甲烷	1,130	2.750	3,500.000	加氫甲烷化	7-8
尿素	180.0	0.735	132.300	有機合成	9
碳酸鈣	113.9	0.439	50.002	礦物碳酸化	7
乙醇	80.0	1.911	152.880	微生物轉換	6-7
甲醇	65.0	1.373	89.245	氫化	8-9
碳酸鈉	62.0	0.415	25.730	礦物碳酸化	6
甲醛	21.0	1.450	30.450	電化學還原	1-3
碳酸鎂	20.5	0.261	5.350	礦物碳酸化	3-4
聚氨酯	15.0	0.300	4.500	兩步合成	8-9
二甲醚	11.4	1.911	21.785	氫化	1-3
醋酸	10.3	0.733	7.513	甲烷合成	3
丙烯酸	5.9	0.611	3.574	乙烯合成	3
聚碳酸酯	5.0	0.173	0.865	有機合成	9
碳酸二甲酯	1.6	1.466	2.346	兩步合成	8-9
甲酸	1.0	0.956	0.956	電化學還原	6
水楊酸	0.2	0.319	0.054	苯酚合成	9

資料來源：Chauvy et al. (2019)



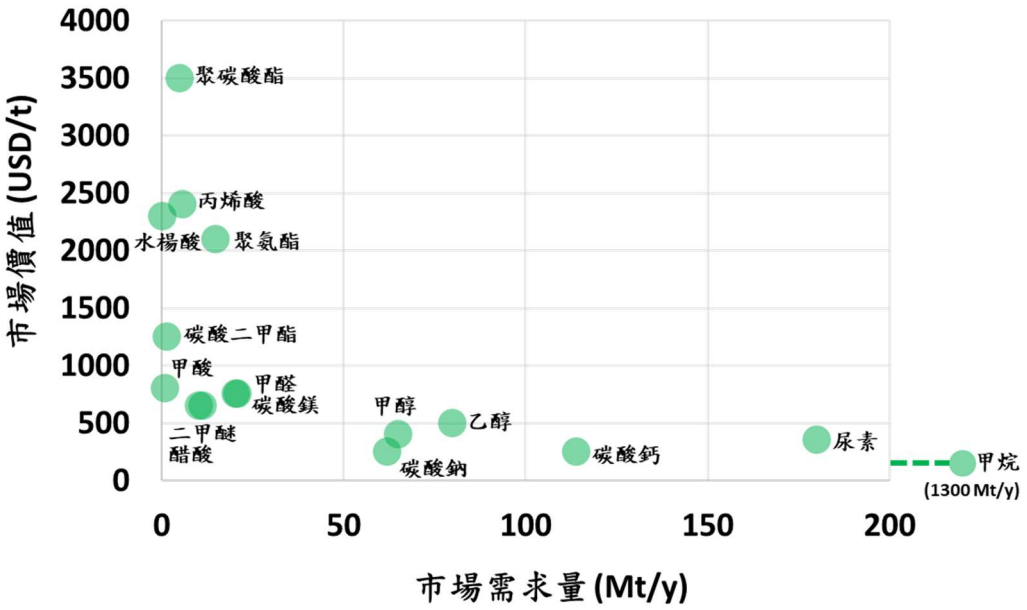
資料來源：Ampelli et al.(2015)；Quadrelli et al.(2011).

圖 3- 17 二氧化碳產品技術成熟度評估

(二) 經濟成本競爭性(Economic Cost Competitiveness)

若從經濟、成本的角度篩選，產品的市場價值與市場需求量為最直觀的兩項評量標準。圖 3-18 顯示部分二氧化碳產品的市場價值(縱軸)與市場需求量(橫軸)，目前沒有任何一個潛在產品同時具備高附加價值和高市場需求量的特性。也就是說，大部分產品的附加價值與需求量往往都是反比關係，亦即附加價值高的產品其市場需求量通常也較低，而市場需求量較高的產品其附加價值通常也比較低。舉例來說，二氧化碳產品如甲烷、甲醇、乙醇、尿素、碳酸鈣與碳酸鈉等，其市場需求量都很高，但是其市場價值卻也較低；而聚碳酸酯、丙烯酸、聚氨酯、水楊酸及碳酸二甲酯等，雖均屬於較高價值產品，但是其市場需求量並不高。在這兩者中，本小節更傾向於發展市場需求量高之產品，其主要原因有二。其一，市場需求量大，表示產品年產量高，也意味著一年內能夠消耗的二氧化碳總量，相較於需求量低的產品來得高；第二點則是，過度發展價值高但需求量低的產品，將容易導致該產品的生產與銷售失衡的情形，並因為大量新增供應而使得價格急劇下滑，讓其失去原來高價值的優勢。

此外，產品的競爭性也可以從其製程設計的角度去評估。除了設備等固定成本之外，直接影響二氧化碳產品競爭力的最重要關鍵成本之一，就是能源需求量。但是若單純以不同產品的製程能源需求量進行比較並不公平，主要是因為每項產品的用途或燃料的能源密度(Energy Density 或稱為低熱值)並不相同，能夠應用的層面可謂有霄壤之別。因此，在下一個小節會針對各潛力產品製程的能量輸出與能量輸入的比值進行探討，以評估該產品能夠帶來的效益。



資料來源：Forti and Fosse et al. (2015).

圖 3- 18 二氧化碳產品的附加價值與全球市場需求量現況

(三) 環境影響持續性(Environmental Impact Sustainability)

推動二氧化碳產品減少碳排放，其目的在於解決二氧化碳過度排放所衍生出溫室效應、氣候變遷等一系列環境問題。因此，產生每噸的二氧化碳產品能夠消耗的二氧化碳總量，即為比質量，對於環境永續性來說是一項重要的考量因素。從表 3-15 得知，甲烷的比質量是眾多產品在排行最高的，乙醇與二甲醚次之，接著則是碳酸二甲酯、甲醛及甲醇。這些產品在這方面表現優異，但仍需考量到產品的年產量。

大多數的產品都有需求量的現實限制，如果轉製的產品數量超過原使用量，除了影響原來產業的產銷平衡之外，其能消耗掉的二氧化碳量也可能有其限制。因此，如果同時考量到產品的使用量與比質量，表 3-15 中二氧化碳的消耗潛力較高者，可視為環境友善產品。若從永續性發展的角度考量，將二氧化碳轉製成某種形式的燃料，不僅可以持續性的消耗二氧化碳，產品也比較不會受限於市場需求量。譬如，如果能夠成功地以具備經濟競爭力的方式將二氧化碳轉製成甲烷或甲醇，由於甲烷可以用於燃氣發電，其使用潛力相當大，除了不至於讓市場無法負荷，也可以降低由國外進口大量液化天然氣的能源安全隱憂。另外甲醇也可以透過燃料電池發電或替代部分汽油，其市場消耗量也可以大幅擴充，也是相當有潛力的二氧化碳產品。

綜合各方面的考量，Chauvy 等人(2019)認為在中、短期內最適發展的產品為甲烷(Methane)、甲醇(Methanol)以及碳酸二甲酯(Dimethyl Carbonate)等項目。表 3-16 中簡略彙整兩項經評估最具潛力產品在 3E 原則中所佔據的優勢，這兩項推薦的產品也與國立清華大學化工系談駿嵩教授於 2008 年所撰寫的「二氧化碳再利

用成為新興產業的可能性」報告結論大致吻合。談教授建議若要以二氧化碳為原料轉製成為化學品，則以甲醇、碳酸二甲酯及二甲醚(Dimethyl Ether, DME)最具潛力。其中，由於碳酸二甲酯之年產量及其二氧化碳消耗潛力遠低於甲烷與甲醇，同時二甲醚的製程發展技術尚不成熟，故不納入本節後續討論。

表 3- 16 潛力產品在 3E 原則中所佔據的優勢

潛力產品	工程技術可行性		經濟成本競爭性		環境影響持續性
	技術純熟度(TRL)	距商業化時間 (年)	附加價值 (USD/噸)	年產量 (Mt/y)	CO_2 消耗潛力 (Mt/y)
甲烷	高(7)	<5	<300	<1,500	<4,000
甲醇	高(8-9)	<5	<500	65	<90

二、 甲醇與甲烷應用分析

接下來，將更進一步地分析甲醇與甲烷這二項最具廣泛運用與潛力的二氧化碳產品，從原料供應與製程技術的能耗，以及產品使用需求量，探討其可行性。

(一) 甲醇

以目前來說，甲醇最大的用途是作為甲醛、二甲醚等化學品的原料，其次則是作為燃料電池、內燃機的燃料或汽油的替代燃料。相較於氣態的甲烷與氫，液態的甲醇作為燃料不僅在每次運輸的總量與安全性都具有明顯的優勢，也是一種相對穩定的型態來貯存能源。因此，諾貝爾化學獎得主 George Olah，在後期積極投入甲醇相關研究，並推崇甲醇經濟(Olah, 2005)。甲醇的辛烷值高達 107，相對於辛烷值為 90-100 的汽油，其抗爆震能力也極佳。籍此，也有建議說將甲醇作為汽油添加劑，以提高汽油的辛烷值。同時，因其體積能量密度與安全性高，美國已有一些實例應用甲醇作為一些賽車或改裝車如印地賽車(IndyCar)與怪獸卡車(Monster Truck)內燃機的燃料。市面上合成甲醇的主要原料為化石燃料如天然氣、頁岩氣等，但持續地依賴有限的石化燃料顯然不是長久之計，隨著技術的推進，CRI (Carbon Recycling International)公司在 2012 年於冰島地熱發電廠啟用以二氧化碳作為原料轉化成甲醇的製程，CRI 甲醇工廠目前的規模，已經能應夠滿足冰島當地約 2.5%的汽油需求量，持續推動甲醇製程的發展，不僅能夠減少對石化燃料的依賴性，也能夠有效且持續地消耗各廠區所排放的二氧化碳(Olah, 2013)。

甲醇用於直接甲醇燃料電池(DMFC)或非直接甲醇燃料電池(RMFC)也是甲醇經濟中非常重要的一環，如果能夠大規模在許多大型用電單位佈設甲醇燃料電池，以分散性的方式，補充供應區域性乾淨電力，不僅可以降低對大規模電廠的依賴，也可以減少輸配電系統的負擔與損失，應該可以實踐分散式供電系統的目的。另外，由於液態的甲醇能源密度高，其燃料電池的模組小，能夠低溫運作且便於攜帶。因此，甲醇也可能適合作為數位相機、智慧型手機等小型電子產品的能量來源。在燃料電池方面，由於技術尚未成熟，因此仍無法用於大型汽車，但

是目前已經能夠支持堆高機等較小型的車型運作一段時間。此外，甲醇產品二甲醚(DME)也是一種非常優異的柴油替代燃料，因為 DME 的十六烷值約為 55-60，較傳統的柴油(45-55)來得高。同時，合成 DME 的另一項重要的原料是二氧化碳。在持續發展再生甲醇製程的同時，亦能推動目前技術水平較低的二甲醚發展，對於減碳的目標有著雙贏之勢(Abdalla and Liu, 2018)。如一開始所說的，甲醇除了作為燃料，也是一種重要化學品的原料，在了解甲醇的重要性後，ExxonMobil、巴斯夫、UOP 等許多國際公司皆積極投入將甲醇製成烯烴(MTO)的技術開發，而此項技術也應用於生產乙烯與丙烯兩項可作為重要的化學品原料的大宗產品(Tian *et al.*, 2015)。由此可見，在甲醇經濟的推動下，再生甲醇的應用節節提升的同時，也能夠持續性的減少碳排放，故本章節將甲醇視作潛力產品。

(二) 甲烷(CH_4)

由於天然氣的主要成分是甲烷，因此目前市面上甲烷的主要來源是天然氣或頁岩氣。甲烷是結構最簡單的碳氫化合物，可以作為許多化學品或高分子製程的原料。同時，甲烷也可稱為最潔淨的石化燃料，作為燃料，其碳排放量相對於其他的碳氫化合物低。亞洲國家包括日本、中國大陸、韓國、印度等，每年進口液化天然氣高達 320 百萬噸，其中台灣年進口量約 17 百萬噸，大約八成用於發電。因此，目前甲烷(液化天然氣主要成分)的市場需求量相當高，在全球普遍講究潔淨能源的趨勢之下，未來的市場需求量將會更高，在二氧化碳潛在產品中，其市場需求量穩居第一。雖然甲烷的市場需求量高，由於天然氣或頁岩氣的開採技術已經相當成熟且穩定，現有儲存量也相當多，市場競爭性也高。若使用二氧化碳為原料量生產甲烷替代部分進口的(液化)天然氣，必然會面臨成本可能偏高的問題。另外，還有技術成熟度、觸媒取得性、製程投資成本、其他原料(主要是氫氣)取得成本等問題都需要進一步考量。

目前，台灣的天然氣來源主要仰賴進口，天然氣出口國在開採天然氣後，必須將天然氣冷卻液化，再透過船運的方式送至台灣。接著，液化天然氣需在接收站氣化後，供給各運用單位使用。此過程由於牽涉大量的能耗與運輸成本，因此進口天然氣的售價約為管線(內陸)運輸天然氣的數倍之多。影響進口能源的因素很多且其牽涉層面甚廣，同時，液化天然氣進口過程伴隨的能源安全風險，不管是運輸過程遇到意外或航運路線的阻礙，都很容易造成運輸的延遲，或是出口國無法持續性穩定供應，也都很容易會對台灣造成或大或小的能源供應危機。因此，若將這些原因納入考量，將二氧化碳作為原料產製甲烷，供作複循環電廠的部分燃料，或許是一項相當值得探討的自產能源解決方案。

三、 甲醇與甲烷製程與原料能耗分析

以下將簡要描述甲醇與甲烷這兩項篩選出來的主要二氧化碳潛力產品的先進製程，由於評估製程投資額度的工程較大，變數亦多，因此，以下將特別著重於能耗分析，能耗的計算尤其將包括獲取主要原料來源所需能耗，透過整體能耗

分析，吾人將可以更具宏觀的角度，分析發展各項二氧化碳產品產業的可行性與合宜性。

(一) 甲醇(**Methanol**)

傳統的甲醇製程是使用費托合成法(Fischer–Tropsch process)，將天然氣和水蒸汽透過蒸汽重組反應先轉化成為一氧化碳及氫氣(合成氣，Syngas)，再反應合成甲醇，其相關的反應式如(1)及(2)所示，(3)為整體反應式：

$$CH_4 + H_2O \rightleftharpoons CO + 3H_2 \qquad \Delta_R H^0 = 206\,kJ/mol \qquad (1)$$

$$CO + 2H_2 \rightleftharpoons CH_3OH \qquad \Delta_R H^0 = -128\,kJ/mol \qquad (2)$$

$$CH_4 + H_2O \rightleftharpoons CH_3OH + H_2 \qquad \Delta_R H^0 = 78\,kJ/mol \qquad (3)$$

因此，傳統的甲醇製程可以簡略區分為天然氣蒸汽重組、甲醇合成反應與分離純化三大部分(Blumberg *et al.*, 2017)。生產每噸的甲醇所需要的電能及熱能換算為初級能源大約是 31 GJ，另外，由於蒸汽重組技術必須在高溫(700-1000ºC)的環境下操作，除了透過燃燒石化燃料提供熱能時會持續排放二氧化碳之外，再加上所使用的蒸汽、熱能與電能也會造成間接碳排放，綜合直接與間接二氧化碳的排放，估計生產每噸的甲醇大約會排放 0.768 噸的二氧化碳(Jarvis and Samsatli, 2018)。甲醇的能量密度為 19.9 GJ/噸，因此，傳統的甲醇製程能量輸出與能量輸入的比值僅有 0.64 (= 19.9/31)。雖然其比值遠低於 1，但是相對於天然氣，轉換成液態甲醇比較容易貯存、運輸，甲醇又很容易可以轉製成許多重要化工原料，因此，利用天然氣製造甲醇是重要的化工製程之一。

伊朗於2000年3月在波斯灣附近啟用年產能近百萬噸的蒸汽重組甲醇工廠，由上述的反應可知，蒸汽重組合成甲醇的製程中，氫氣是過剩的副產物，換句話說，主要反應物天然氣所能提供的碳源並不充足。當時由於可以從此一甲醇工廠鄰近的另一個石化工廠捕捉到高純度的二氧化碳，因此，Holm-Larsen 在 2001 提出在原蒸汽重組製程中補充適量的二氧化碳製成合成氣(蒸汽暨二氧化碳重組技術)，讓一氧化碳及氫氣的比例與合成甲醇的需求相符(Holm-Larsen, 2001)，其反應式如式(4)至(6)所示，(7)為整體反應式：

$$3CH_4 + 3H_2O \rightleftharpoons 3CO + 9H_2 \qquad \Delta_R H^0 = 206\,kJ/mol \qquad (4)$$

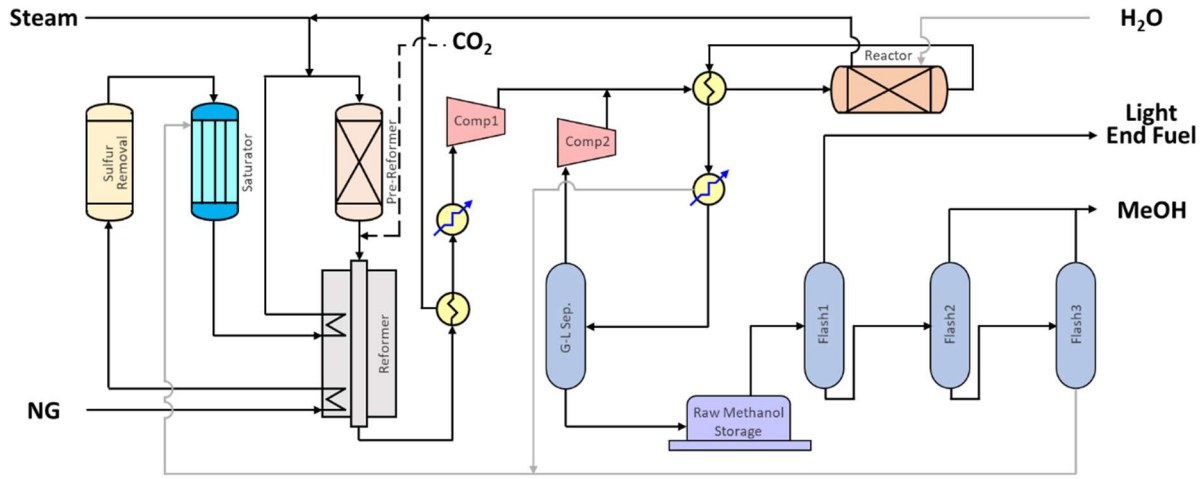
$$CO_2 + H_2 \rightleftharpoons CO + H_2O \qquad \Delta_R H^0 = 41\,kJ/mol \qquad (5)$$

$$4CO + 8H_2 \rightleftharpoons 4CH_3OH \qquad \Delta_R H^0 = -128\,kJ/mol \qquad (6)$$

$$3CH_4 + CO_2 + 2H_2O \rightleftharpoons 4CH_3OH \qquad \Delta_R H^0 = 147\,kJ/mol \qquad (7)$$

透過適量補充二氧化碳為碳源，此一蒸汽暨二氧化碳重組製程不僅能夠製造適當的合成氣以合成甲醇，同時也能夠消耗其他碳排放量高的工廠所排放的二氧化碳。圖 3-19 顯示應用蒸汽暨二氧化碳重組技術的甲醇製程，此製程主要可分成

蒸汽暨二氧化碳重組、甲醇合成反應以及甲醇蒸餾提純三大部分。如圖所示，天然氣經過除硫化後與水蒸氣及二氧化碳進行重組反應產生合成氣，接著將合成氣送入反應器再合成甲醇，然後透過蒸餾分離取得高純度甲醇。



資料來源: Holm-Larsen (2001)

圖 3- 19 應用蒸汽暨二氧化碳重組技術的傳統甲醇製程

從能耗的角度評估，蒸汽暨二氧化碳重組技術之甲醇製程的每噸甲醇能耗大約是 29 GJ 左右，略低於傳統蒸汽重組甲醇製程的每噸甲醇能耗 31 GJ，除了能耗方面的優勢，補充二氧化碳後的甲醇製程，生產每噸的甲醇還可以額外消耗約 0.12 噸的二氧化碳，換句話說加入二氧化碳重組技術後的甲醇製程能夠有效降低大約 20-25%的碳排放，確實可以在技術與經濟均可行的情況之下，透過二氧化碳再利用的技術，達到部份減碳的目標。

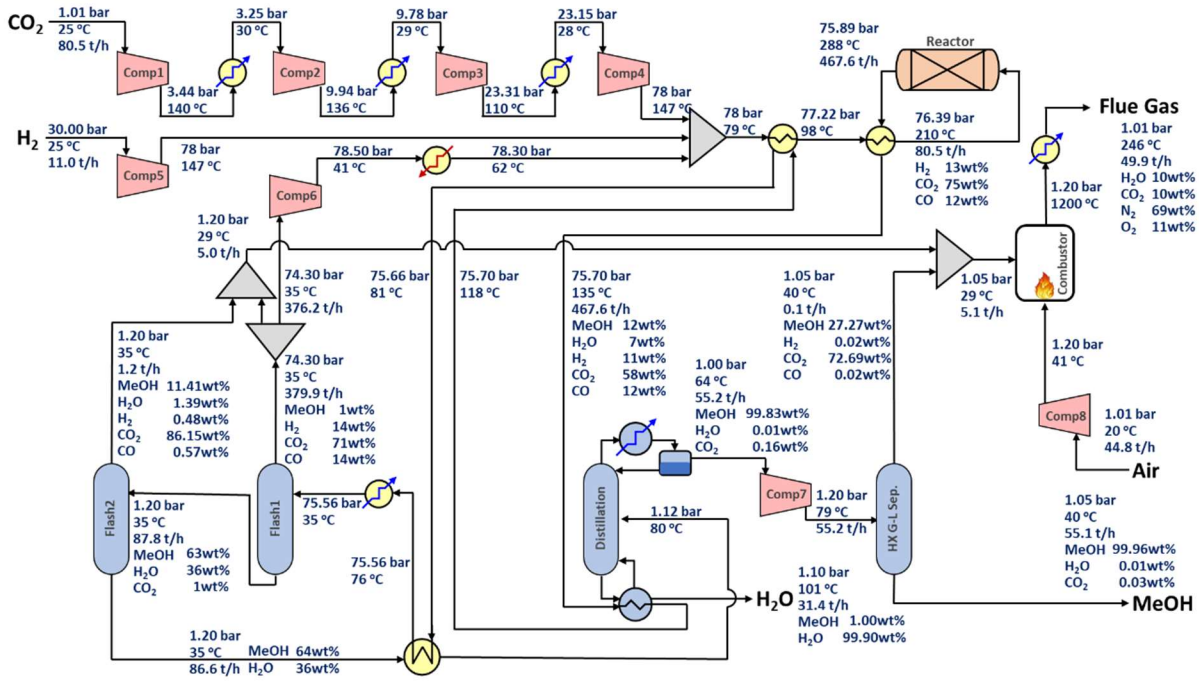
基於更有效減碳的需求，Van-Dal and Bouallou (2013)提出完全以二氧化碳為原料，應用填充床反應器(填充物為商業化觸媒 $Cu/ZnO/Al_2O_3$)，進行氫化反應來生產甲醇的製程，其反應式如下：

$$CO_2 + H_2 \rightleftharpoons CO + H_2O \quad \Delta_R H^0 = 41\,kJ/mol \qquad (8)$$

$$CO + 2H_2 \rightleftharpoons CH_3OH \quad \Delta_R H^0 = -128\,kJ/mol \qquad (9)$$

$$CO_2 + 3H_2 \rightleftharpoons CH_3OH + H_2O \quad \Delta_R H^0 = -87\,kJ/mol \qquad (10)$$

此二氧化碳氫化反應為放熱反應，因此反應器出口流的溫度超過 280°C，這股熱流中所蘊含的熱能若可以充分利用，將可以降低此一製程的能耗。因此，Perez-Fortes 等人(2016) 針對該製程進行熱整合分析，熱整合後的製程顯示在圖 3-20 中。



資料來源: Perez-Fortes (2016)

圖 3- 20 完全以二氧化碳為原料進行氫化反應生產甲醇的製程

此二氧化碳氫化製程可以分為三大主要的部分，分別是二氧化碳氫化合成甲醇反應、甲醇蒸餾提純與殘餘物燃燒反應。圖 3-20 中，每小時 80.5 噸二氧化碳經過多段加壓冷卻後達到 78 bar 與 147°C，與 11 噸氫氣混合後送入氫化反應器合成甲醇和水，除了透過熱整合降低整廠能耗，反映後的甲醇和水送入兩個連續閃蒸塔與一個蒸餾塔等分離裝置中純化甲醇，經過冷卻後液化的甲醇作為此製程的最終產物，其純度高達 99.96 wt%，殘餘物則與空氣後混合送入燃燒器中製造蒸汽，回收部分熱能。此製程的二氧化碳轉化率更是高達 93.85%，因此，其技術可行性應無問題，但是經濟競爭力的高低，除了製程本身的能耗之外，氫氣的來源更將是關鍵因素，茲分析如下。

首先從能量的角度評估製程本身的競爭力，此製程合成每噸甲醇大約需要 0.17 MWh_e 或 0.61 GJ_e (= 0.17MWh_e x 3.6GJ_e/MWh_e)的電能以及 0.44 MWh_t (1.58 GJ)的熱能，其中耗電裝置主要是用於加壓二氧化碳用的壓縮機以及水循環的驅動器。根據經濟部能源局公佈的資料，可以估計台灣在 2019 年的平均發電效率大約為 40%，因此，若要計算此製程的能耗，必須將電能還原成發電所需消耗的初級熱能，再以熱能的形式進行加總。根據以上方式計算結果，此製程的總能耗大約是每噸甲醇 3.11 GJ (= 0.61/0.4 + 1.58)。相較於傳統甲醇製程每噸甲醇所需能耗的 31 GJ，會發現二氧化碳氫化甲醇製程本身在能源需求方面有絕對的優勢。但是實際上傳統蒸氣重組製程絕大部分的能耗都用於利用甲烷製造合成氣，亦即一氧化碳及氫氣，然而，上述二氧化碳氫化甲醇製程的能耗計算中，並沒有考慮到製造氫氣及捕捉二氧化碳所需的能耗，因此以上計算與比較還不夠周延。

一般而言，目前全球製造氫氣的主要原料是天然氣。但是，基於減碳的目的，

應該避免使用石化燃料為製氫原料，比較合理的無碳氫氣來源是透過水電解。當然，電解所需的電能如果來自於各類型火力發電廠，仍然會有間接的碳排放問題。如果電力來源均能取自再生能源，例如太陽能、風力，即可達到幾乎零碳排放(carbon-free)的氫氣來源目標，因此，無碳或低碳電力的來源，也是此二氧化碳氫化甲醇製程的關鍵因素。為了清楚呈現分析的細節，我們以生產一噸的甲醇為例，於圖 3-21 中列出 Perez-Fortes (2016)之二氧化碳氫化製程的質能平衡系統資料。

氫氣的能量密度約為 120 MJ/kg H_2,當能源轉換效率為 100%時，水電解生產氫氣每公斤大約需要 33.33 kWh_e。根據 Kumar (2019)中的資料，目前水電解的效率大致落在 60%-80%間，因此吾人假設水電解之能源轉換效率為 70%，則水電解生產每公斤的氫氣需要 47.61 kWh_e。此外，依據 Gabrielli (2020) 的資料，從燃煤發電廠煙道氣中捕獲高純度二氧化碳，每公斤二氧化碳所需能耗大約是 0.10 kWh_e 的電能與 0.95 kWh_t 的熱能。而生產每噸的甲醇大約需要 0.2 噸的氫氣及 1.46 噸的二氧化碳，水電解製造 0.2 噸氫氣需要 9.52 MWh_e 的電能(Abanades *et al.*, 2017)，相當於 34.27 GJ_e 或是 85.68 GJ (= 34.27/0.4)的初級能源(假設平均發電效率為 40%)；從燃煤電廠煙道氣捕捉 1.46 噸二氧化碳需要 0.15 MWh_e (0.54 GJ_e 或是相當於 1.35 GJ 的初級能源)及 1.38 MWh_t (4.97 GJ)，亦即，捕捉 1.46 噸二氧化碳所需總能耗合計是 6.32 GJ。值得注意的是，事實上從燃料電池設備捕捉二氧化碳的能耗，應該遠低於從燃煤電廠捕捉之能耗(Gabrielli *et al.*, 2020)。再加上此製程合成每噸甲醇所需要的 3.11 GJ，生產每一噸甲醇，實際所需的初級能耗合計將高達 95.11 GJ (= 85.68 + 6.32 + 3.11)。然而甲醇的能源密度僅有 19.9 GJ/t_{MeOH}，因此，如果考量到水電解產氫與燃煤電廠二氧化碳捕捉的能耗，此二氧化碳氫化合成甲醇製程的能源效率僅約 20.9% (= 19.9 / 95.11 x 100%)，其中，電解水的能耗占比高達 90% (= 85.68/95.11x100%)。

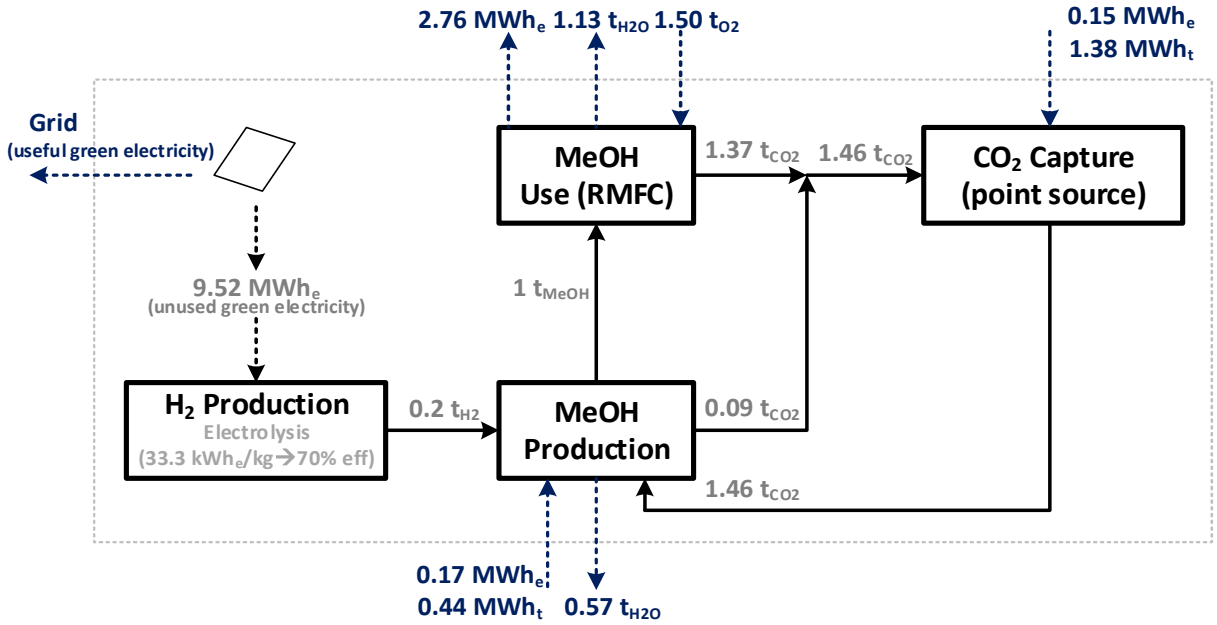


圖 3- 21 二氧化碳氫化生產甲醇應用於甲醇燃料電池發電的質能平衡系統

假設進一步將所合成的甲醇，於需要電力時透過發電效率 50%的甲醇燃料電池發電，一噸甲醇將可以發出 2.76 MWh_e 的電力，而其中的 0.32 MWh_e (=0.15+0.17) 將使用於甲醇製程以及捕碳製程，因此真正剩餘可用電力將僅剩下 2.44 MWh_e，也就是說，吾人消耗了 9.52 MWh_e 的電力來電解水產製氫氣，氫化二氧化碳合成甲醇之後，於需要用電時透過高效率甲醇燃料電池發電，最終只能回收 2.44 MWh_e 的有效電力可用，此一淨電力回收率為 25.6% (= 2.44/9.52x100%)。

上述分析顯示，透過電解水產氫並用二氧化碳氫化合成甲醇以及甲醇燃料電池發電的電力運用方式似乎效率偏低，那麼，我們究竟有何理由，花那麼多力氣採用此一複雜的程序呢？唯一的理由是：水電解僅限使用無碳綠色電力，而當原來用來電解水的綠色電力，因故無法納入電網(例如為了維持電網的穩定性，無法再提高光電以及風電比例)，又因種種限制，已經沒有更有效率的方式儲存這些寶貴的綠色電力(例如抽蓄水庫、大型電池等均已飽和)，因此，透過水電解產製氫氣的方式，達到貯存化學能的目的，這些因故無法納入電網或用其他方式儲存的 9.52 MWh_e 電力，可以透過合成一噸甲醇(另一種化學能)以及燃料電池發電的方式，於需要時回收 25.6%的電能。值得注意的是，在合成甲醇過程中所消耗的二氧化碳，在燃料電池發電的過程中，還是排放出來了，此一儲能循環過程本身似乎並未達到減碳的目的，但是因為畢竟能有效儲存 25.6%的無碳電力(9.52 MWh_e 的未使用無碳電力中，回收 2.44 MWh_e 的有用電力)，因此，仍然可以減少傳統火力發電的需求，傳統燃煤電廠減少發出 2.44 MWh_e 的電力，大約可以減少排放 2.44 噸二氧化碳，減碳成效還是相當顯著。

以上是討論將合成甲醇透過燃料電池發電的情況，合成甲醇事實上也可以添加入車用汽油中，取代部分汽油(例如添加 15%甲醇)，甚至也已經有部分地區，成功發展出全部使用甲醇為燃料的汽車，其系統質能平衡如圖 3-22 所示，其中必須先強調，這些添加的甲醇，經過引擎燃燒之後，將排放 1.36 噸的二氧化碳，看似將捕碳合成甲醇的減碳量又排放掉了，但是其減碳成效，其實必須看甲醇取代汽油的總量及燃燒這些汽油的排碳量。從低熱值量來看，標準汽油的低熱值是 42.9 MJ/kg，甲醇則僅有 19.9 MJ/kg。因此，理論上一噸甲醇可以取代 0.464 噸的汽油(= 19.9/42.9*1)，由於甲醇的辛烷值較高，因此，可以假設一噸甲醇可以取代 0.5 噸的汽油。每公秉汽油(相當於 0.75 噸)燃燒後會排放 2.2 噸二氧化碳，亦即，每噸汽油燃燒的碳排放量大約為 3.05 噸二氧化碳，所以，當我們使用一噸合成甲醇取代半噸的汽油時，所減少的二氧化碳排放量大約是 1.53 噸(= 0.5x3.05)。

目前為止的討論，是將所生產的甲醇當作燃料，透過燃料電池發電，或是透過取代部分汽油。吾人當然也可以將所得的甲醇當作原料，透過是當製成生產所需要的化學製品。圖 3-23 還原二氧化碳得到一氧化碳後，再透過甲醇羰基化反應製造醋酸的綠色製程示意圖，如圖所示，製造一噸醋酸可以消耗 2.84 噸的二氧化碳，需要 9.52MWh_e 無法用其他方式有效儲存的電力電解水產製 0.2 噸氫氣，當

作製造甲醇的原料之一，這些電力大約占了所需能耗的 84%。如果甲醇另有適當來源，那麼透過甲醇羰基化反應製造醋酸的綠色製程，製造一噸醋酸，可以消耗 0.73 噸的二氧化碳，同時還可以製造 0.5 噸的氧氣，也可以算是一個相當綠色的製程。

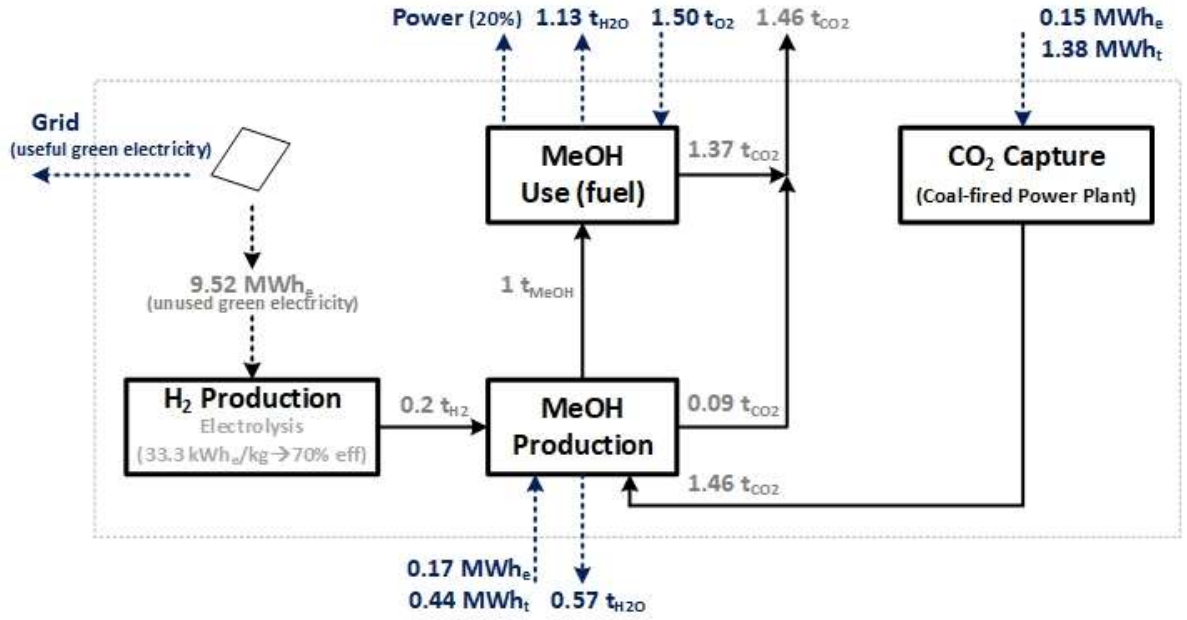


圖 3- 22 二氧化碳氫化生產甲醇應用於甲醇汽油的質能平衡系統

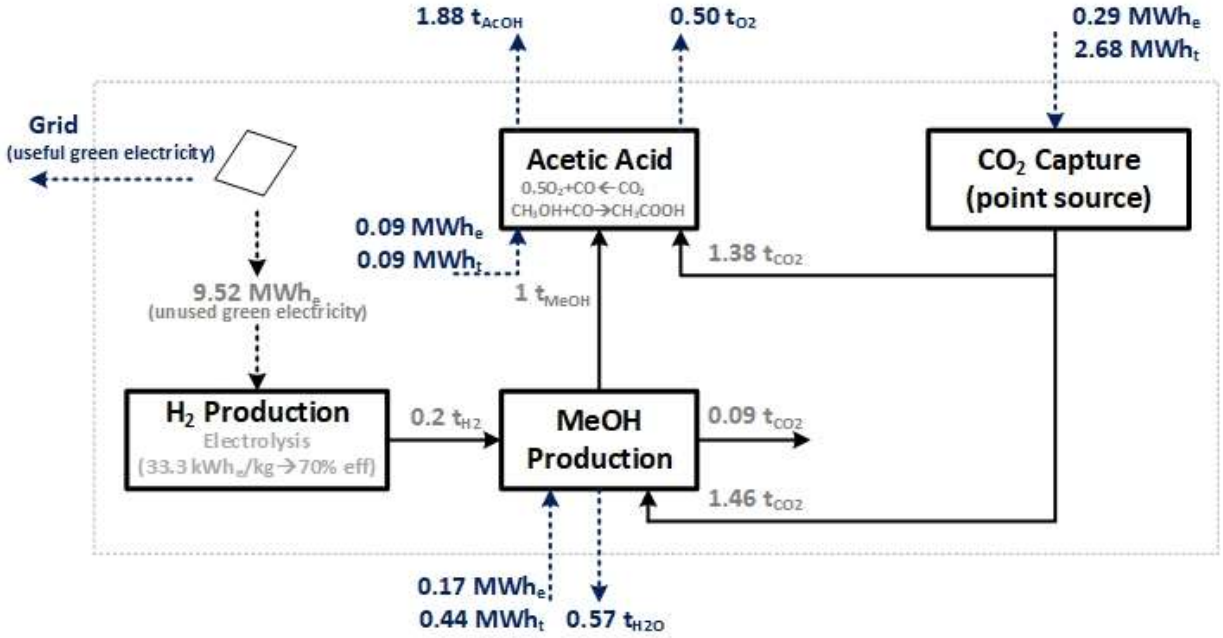


圖 3- 23 二氧化碳氫化生產甲醇再透過甲醇羰基化製造醋酸之質能平衡

(二) 甲烷(Methane)

法國化學家保羅·薩巴捷在 1902 年提出，在高溫條件下，透過鎳觸媒能夠將二氧化碳和氫氣催化合成甲烷與水，簡稱薩巴捷反應(Sabatier reaction)或二氧化碳甲烷化(CO_2 methanation)，如反應式(11)所示。

$$CO_2 + 4H_2 \rightleftharpoons CH_4 + 2H_2O \quad \Delta_R H^0 = -165\,kJ/mol \qquad (11)$$

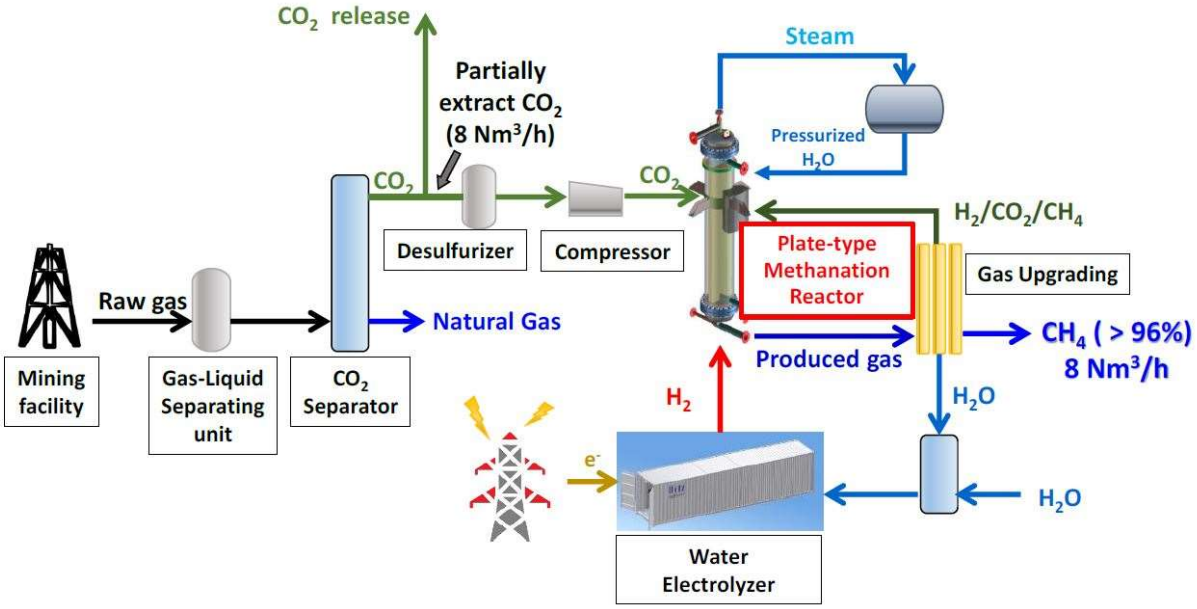
除了鎳觸媒，釕(Ru)觸媒及鋁(Al)觸媒更能夠提高反應效率。Veselovskaya et al. (2018)針對薩巴捷反應製程的觸媒進行深入研究，將二氧化碳與氫氣送入觸媒反應器，在 Ru/Al_2O_3 觸媒的幫助下，二氧化碳合成甲烷的轉化率高達 98%，但是 Ru 觸媒相當稀有，若要投入商業化製程將二氧化碳甲烷化，觸媒的價格與其取得方便性將是一個重要的考量點(Veselovskaya *et al.*, 2018)。從能源的角度來看，產生每公噸的甲烷的能耗約為 2.8 GJ，由於薩巴捷反應屬於放熱反應，進行熱回收後扣除所需能耗約可回收 7 GJ/t_{CH4} 的熱能，因此，回收的熱能可以用於發電或製造蒸汽等盈利用途，以提高製程的整體效益。但是，此研究中沒有針對整體製程進行更深入的探討，在分離及純化的過程中，可能會有一些必要的能耗導致可輸出的熱能總量可能會更低。即便無法回收熱能，每公噸甲烷的低熱值約為 50.0 GJ，其能源輸出與輸入的比值將近 18 倍，在不考慮原料來源時，其經濟效益似乎相當可觀。然而，若將取得氫氣原料所需的能耗一併納入考量，則將會面對與二氧化碳氫化甲醇製程一樣的瓶頸，亦即，氫氣的生產所需要的高能耗以及此一能量的來源，將是二氧化碳甲烷化是否有發展空間的關鍵因素。

德國數家企業聯合研發電轉氣(Power-to-Gas，PtG)系統，主要是利用再生能源如太陽能發電、風力發電等相對比較不穩定的電力，用於電解水產製氫氣，再與二氧化碳作用，透過薩巴捷反應製程將二氧化碳和氫氣轉換成甲烷與水，以甲烷的形式將能量保存下來。目前在市場上可取得的二氧化碳甲烷化技術大約有三個，分別是 Outotec、EtoGas、以及 MAN，主要的差異在於反應器和冷卻系統的設計，分別是分段冷卻的固定床反應器、蒸汽冷卻之盤型反應器、與熔融鹽冷卻之等溫固定床反應器。在 2009 年至 2012 年間，德國 EtoGas 公司建造了數家電轉氣的實驗工廠，並於 2013 年成功建造商業化工廠(Rönsch *et al.*, 2016)。

Audi 公司則與 EtoGas 公司合作，將二氧化碳甲烷化技術產生出來的甲烷作為汽車的動力源。根據 Audi 於 2014 年所作的報告，該工廠應用 MAN 技術，使用等溫固定床反應器，每小時能夠產生 455 公斤的甲烷，其電轉氣的效率大約為 54% (Otten, 2014)。另外，日本的 NEDO、INPEX、和 Hitachi 三家公司也針對將二氧化碳和氫氣甲烷化的技術進行研發，並在 2019 年於日本長岡市工廠投入此技術，此製程之示意圖如圖 3-24 測試設備在實際運作後，該製程應用盤型反應器(Plate-type reactor)，每小時能夠產生 11.2 kg (8 Nm^3)的甲烷，其濃度更是高達 96 mol%。然而，在工廠全面營運前，尚有許多技術問題仍需要持續精進。

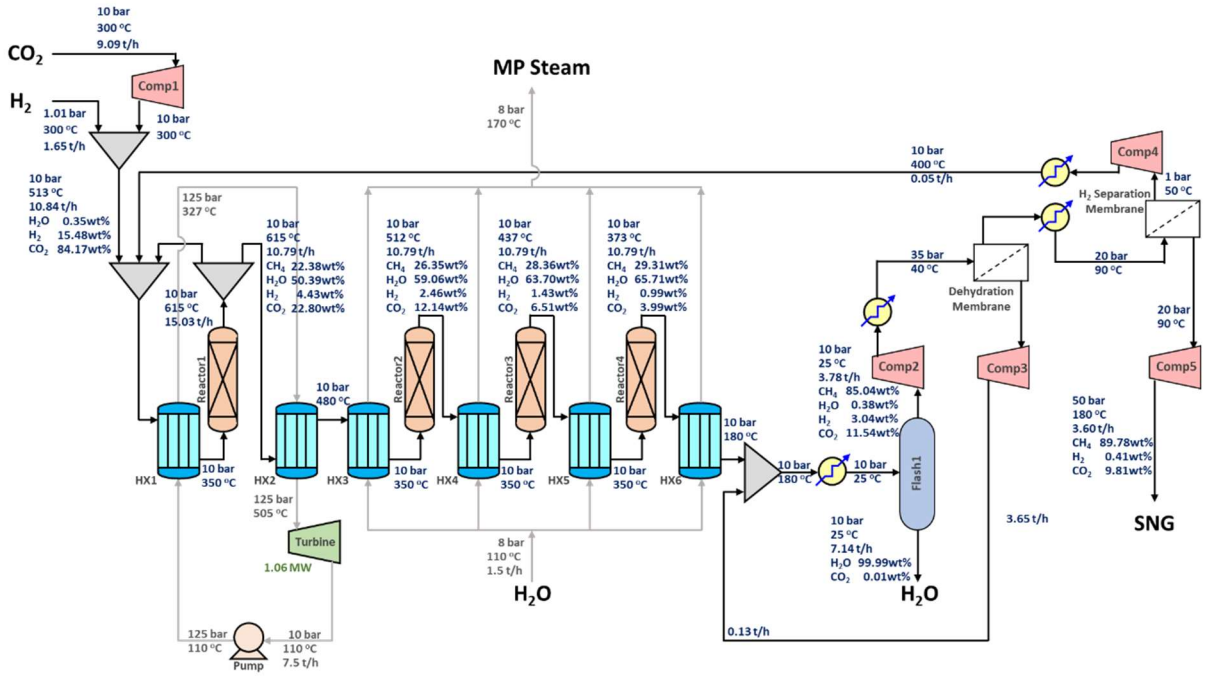
Chauvy 等人(2020)近年以 $Ni/MgAL_2O_4$ 為觸媒，詳細探討應用填充床絕熱反

應器進行二氧化碳甲烷化生產合成天然氣(Synthesized Natural Gas，SNG)的製程，如圖 3-25 此 SNG 製程可簡略劃分為甲烷化反應、熱回收與發電、以及分離純化三大部分。每小時 9.09 噸二氧化碳與 1.65 噸氫氣混合後，送入四個串聯的絕熱反應器中進行甲烷化反應。由於二氧化碳甲烷化為高度放熱反應，反應器出口流的溫度會急劇上升至 615ºC，為防止反應器溫度高於 650 ºC 導致觸媒燒結(Sintering)，在進入下一個反應器之前，必須利用冷水降低反應器入口處的溫度至350ºC，如圖中所示。多次反應後，反應器四出口處的甲烷濃度可提高至 29.31 wt% (30.20 mol%)。接著進入純化的階段，首先，將反應器四出口流降溫至 25ºC，使水蒸汽凝結液化後，送入閃蒸塔中進行氣液分離，以便移除液態的水。隨後，氣體送入脫水膜(Dehydration membrane)中，移除剩下的水分子，再送入氫氣分離膜(H_2 separation membrane)，將過剩的氫氣回收並送出甲烷濃度高達 89.78 wt% (92.9 mol%)的合成天然氣。製程中，Chauvy 等人(2020)也對反應器出口流進行熱回收，其中由於反應器一(Reactor 1)的進料與出口流溫度較高，所以利用 125 bar 高壓水回收熱能，轉製成 125 bar 的高壓蒸汽後，送入渦輪機發電，以供應此製程所需的電能消耗。此外，此製程也利用 8 bar 中壓水回收反應器二至四的出口流熱能，並轉製成中壓蒸汽，此中壓蒸汽將可運用於捕碳製程之中，降低捕碳製程所需的額外能耗。此一製程技術，透過熱能回收、發電，與捕碳程序熱整合的結果，發現生產每噸甲烷，可以淨輸出 1.61 MWh (5.8 GJ)的熱能。



資料來源：Otten (2014).

圖 3- 24 電轉氣實驗工廠



資料來源: Chauvy et al. (2020)

圖 3- 25 完全以二氧化碳為原料進行氫化反應生產甲烷的製程

為了清楚呈現分析的細節，我們以生產一噸的甲烷為例(圖 3-26)，計算二氧化碳甲烷化製程的質能平衡。由於 Chauvy 甲烷化製程所生產的 SNG 中，甲烷成分為 89.78 wt%、二氧化碳成分為 98 wt%，為了方便分析，以下的數據都是採用 100 wt%的甲烷與二氧化碳。生產每噸甲烷大約需要 2.75 噸的二氧化碳以及 0.5 噸的氫氣，水電解製造 0.5 噸的氫氣需要 23.8 MWh_e 的電能，相當於 85.68 GJ_e 或是 214.2 GJ (= 85.68/0.4)的初級能源(假設平均發電效率為 40%)；從燃煤電廠煙道氣捕捉 2.75 噸二氧化碳需要 0.28 MWh_e (1.01 GJ_e 或是相當於 2.52 GJ 的初級能源)及 2.60 MWh_t (9.36 GJ)，亦即，捕碳 2.5 噸所需總能耗合計是 11.88 GJ。而合成每噸甲烷的製程可以淨輸出 5.8 GJ 的熱能，因此，生產每一噸甲烷，實際所需的初級能耗合計將高達 220.28 GJ (= 214.2 + 11.88 – 5.8)。然而甲烷的能源密度大約為 50 GJ/t_{CH4}，因此，如果考量到水電解產氫與燃煤電廠二氧化碳捕捉的能耗，此二氧化碳甲烷化合成甲烷製程的能源效率僅約 22.7% (= 50 / 220.28 x 100%)，其中，電解水的能耗占比高達 97% (= 214.2/220.28x100%)。假設進一步將所合成的甲烷，於需要電力時透過發電效率 50%的複循環燃氣發電機組發電，一噸甲烷將可以發出 6.94 MWh_e 的電力，而其中的 0.28 MWh_e 將使用於捕碳製程，因此，真正剩餘可用電力將僅剩下 6.66 MWh_e，也就是說，吾人消耗了 23.8 MWh_e 的電力來電解水產製氫氣，透過二氧化碳甲烷化合成甲烷之後，於需要時透過高效率複循環燃氣發電機組發電，最終能回收 6.66 MWh_e 的有效電力可用，此一淨電力回收率為 28%。

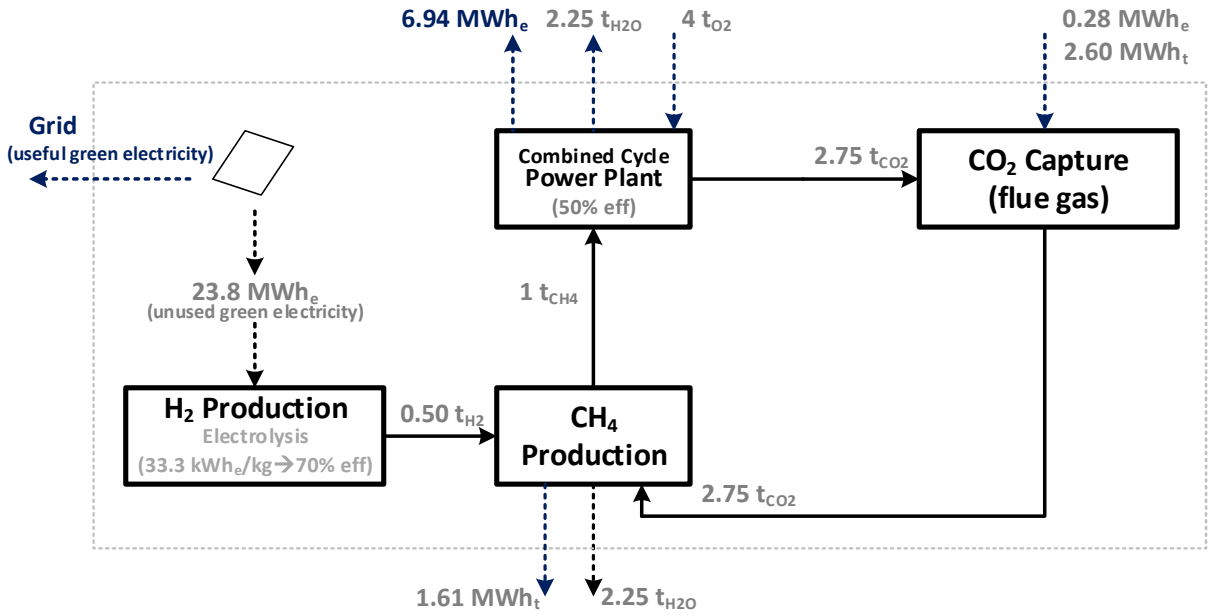


圖 3- 26 二氧化碳甲烷化並用於複循環燃氣發電機組發電的質能平衡系統

四、 結論與建議

由於二氧化碳是一種相當穩定的化合物，用二氧化碳當作原料生產各種可能的化學品，例如本結討論的甲醇、甲烷等，除了觸媒與製程等工程技術的挑戰之外，最主要的難題是總體能耗過大，導致單位成本偏高。譬如，二氧化碳氫化製得甲醇的單位成本，大約是傳統石化製程的二至三倍以上，其經濟競爭性實屬嚴重偏低。大量能耗中，大約有九成是用於電解水產製氫氣，因此，如果是利用既有電網中的電力電解水產製氫氣，那麼不僅二氧化碳產品本身將毫無經濟競爭力，企圖透過將二氧化碳轉製甲醇、甲烷以達到減碳的目的，也將不具備可行性與合理性。但是，在再生能源的占比即將越來越高的趨勢之下，風力發電與太陽能發電的發電量將相對比較不穩定，因此，未來勢必將常有一部分再生能源電力無法及時納入既有電網，此時，必須有大規模的儲電設備儲存這些寶貴的低碳或無碳電力，如果有可能，相信大規模蓄電池、抽蓄水力等設施的儲電效率應該均高於50%，確實應該優先採用，但是，這些儲電設備的可能規模大多有實務上的限制。此時，透過電解水產製氫氣的方式先將殘餘電力轉化為化學能儲存，再與二氧化碳透過氫化產製甲醇、或甲烷化產製合成天然氣，並於需要時，透過燃料電池或複循環燃氣機組發電，所能回復的電能可以達到原來電解水所耗電能的 26%-28%，透過這種可以大規模使用的儲能措施，可以減少傳統方式的發電量，進而降低總體排碳量。也就是說，化工產業界或許可以透過大規模的電解水、碳捕捉、二氧化碳氫化或甲烷化等等措施，積極參與大幅提高再生能源比例的國家級計畫。

第五節 小結

全球在人口增長、環境與氣候變遷的挑戰下，面臨著不可再生資源日漸耗竭、物料價格上漲、塑膠微粒進入生態食物鏈中、工業產出和污染產生等問題。促使各國積極發展循環經濟(Circular Economy)，以物料資源重複使用增加價值及產生新經濟活動。2015 年聯合國提出永續發展目標(Sustainable Development Goals, SDGs)，期望透過全球有高度共識的 17 項目標，兼顧經濟發展、社會進步與環境保護，邁向永續之路。

近年來永續經營概念逐漸受到市場認同，國際品牌廠商對於低碳排放、節能以及可循環使用的環境友善原物料需求強烈，正積極拓展將可循環或環境友善原物料導入產品系統中。材料與化工產業占我國工業 GDP 的 37%(約新臺幣 6.82 兆元)，主要是供應民生內需以及中下游製造加工出口業；而且我國的重要原物料高度仰賴進口，面對此一巨大轉變，材料與化工相關產業應將永續發展列為重要研發目標，發展環境友善原物料與技術包括：生物可分解塑膠材料、環境友善生物基化學品技術與碳捕獲及再利用等相關技術，轉型成為全球環境友善的綠色供應鏈的重要一環。

一、 生物可分解塑膠材料發展與應用建議

我國塑膠產業在生分解材料的產品發展上，因擁有優勢的塑膠改質、配方與加工應用等成熟技術，已開發出多樣化的應用產品，且大多以外銷為主，但目前所使用的生分解材料如 PLA、PBAT、PBS 等原物料仍仰賴進口。因此，以石化料源合成的 PBAT、PBS 生物可分解聚酯的合成技術，可作為國內石化業者初步投入項目，目前長春集團已投入開發並取得初期成果，預期將可提供國內自主的上游生分解材料；進一步則可以此類高分子材料為基材，進行改質與優化讓其應用特性及加工性更加合宜。

在應用推動面上，生分解材料的落實仍與政府的相關配套措施息息相關。建議：1).為避免生分解材料進入既有的塑膠循環回收體系，生分解包裝材應有法規明定易辨識的標誌或顏色加以區隔；2). 生分解材料並非可隨地棄置，仍需有適當的堆肥場與法源以進行生分解材料回收後的處理;以及 3).同時也須落實生分解材料各項認證，以確保材料的分解特性與對環境的影響性。

在技術發展上，結合研發單位與產業面，掌控材料設計與生分解機制，共同開發具差異化的材料，串聯國內上中下游產業鏈，並與國際接軌，以開創台灣石化與塑膠產業的環境友善新商機與提升競爭力。

二、 環境友善生物基化學品技術發展之趨勢

生物經濟(bioeconomy)，係指研究主要以生物科學與生物技術為主，使用生物類生質資源或是生物精煉（biorefinery）製程，以生產具附加價值產品而產生的

經濟活動；希望透過此一環境友善的方式，降低石化原料的使用與二氧化碳排放量，解決持續惡化的全球環境污染問題並達到低碳排放的社會與工業的目標。依據經濟合作暨發展組織(Organization for Economic Cooperation and Development, OECD)估計，全球有超過 4 兆美元的產品來自石化產業，其中至少有 20%在未來 10 年，將由生物基產品所替代。

為降低對石化料源之依賴，轉換成為永續發展之生物經濟，需仰賴整合性生物精煉與合成技術的開發與精進，製程技術除了要能夠適應多元進料、簡易調整製程以及能夠與現有的產業整合銜接，才能在成本和產品價值上與成熟的量產石化產業競爭。目前，雖然已有一些生物基化學品及材料已成功商業化，但整體需求而言，生物精煉與合成技術仍處於發展初期，需要投入大量的研發資源。

我國生物科技的發展，由蘇遠志博士在 1960 年代初期便成功培養出新菌種(Brevibacterium divaricatum)，並建立以微生物醱酵生產麩胺酸(味精)的突破性技術，該技術使用便宜的糖質原料，成本降低三分之一，產量驟增十倍，自此開啟我國生物發酵產業技術的新頁。此後陸續發展了生物代謝工程技術並改良菌種，應用在生產機能性食品素材、營養品、保養品以及生質柴油等化學品。目前，我國應用生物代謝工程技術，生產環境友善產品的產業狀態可參考表 3-7。

台灣儘管已有許多商業上成功的生物合成化學品以及越來越多的生質化學產品滲透到不同的市場，但比起石化產品，生物合成化學品生產仍處於拓展經濟規模的初期，挑戰仍然存在。生物代謝工程所需要的高性能菌株的發展，需要時間、人力和經費。相關技術發展建議：(1)擬定生質原料供應策略以保障生質原料能夠穩定的供應，投入發展多樣化生質料源、建置生質廢棄物、農業與森林生質原料的蒐集與運輸系統；(2)整合系統生物學、合成生物學和馴化工程(evolutionary engineering)；(3)建立對代謝路徑的了解和相關的研發策略，以降低工業菌株開發時間與成本，並提高建構生產用的菌株的可能性；以及(4)建立先導工廠協助新技術和新產品越過研發至商業化發展中間過程之死亡之谷(Valley of Death)，透過提供試量產相關設備與服務，以降低技術、組織、市場等風險和不確定性。最終將可建立一個對環境更加有善的永續生物合成化學品工業。

三、CO_2捕獲與再利用技術

眼前極端氣候的現實問題，讓聯合國的SDGs、各大品牌廠商與投資機構，一再提出降低碳排放的訴求；降低碳排放的浪潮將會是海嘯型的衝擊，唯有加速投入開發與布署方為上策。全球碳捕獲與再利用技術發展，許多的技術場域實證正在進行，大型實用化的案例也陸續出現，各國政府機關、研發機構、學術團體和私人企業都有緊密合作夥伴關係。但二氧化碳捕獲與再利用技術的推動，仍受限於總體能耗、成本與去化問題，而困難重重。主要高能耗是來自於，(1)自吸收劑中，將捕獲二氧化碳釋出時的能耗；與(2)再利用時，轉化成可儲能的甲烷或甲醇反應(可大量去化二氧化碳)，所需的重要原料氫氣，來自高能耗的電解法。

我國整體能源供應幾乎高度依賴化石燃料，依據國際能源總署IEA/OECD於2019年出版之能源使用二氧化碳排放量統計資料顯示，我國2017年二氧化碳排放總量為268.9百萬公噸，全球排名第21位。歐盟2021年執委會將提案修改「能源稅指令」，並準備提出「碳關稅」機制；一旦施行，以歐盟為台灣第4大出口國，年貿易額達505億歐元，對我國的出口競爭力勢必產生巨大的影響，我國必須要能在碳捕獲與再利用技術與實質減碳上做出成績。

近年來我國許多團體努力從政策、法規和技術各方面逐漸開始重視 CCSU 技術的推動與落實，台灣的碳捕獲示範場域也有一些陸續開始建設的跡象，但相關技術在台灣的發展仍面臨著許多挑戰，特別是產業界的投入意願與世界各國積極投入的強度相差甚遠。建議：(1)創造市場及需求：其推動方式包括了，減稅、碳交易系統之使用、發展高值減碳產品，讓減碳的數量可以成為一種商品，以利捕碳技術的發展；(2)擬定國家整體能源使用與降低碳排放整體政策，建立二氧化碳轉化成儲能化學品(綠電)及石化基礎料源架構；以及(3)高效率電解產氫氣技術。

參考文獻

第一節：

1. R. Narayan and C. A. Pettigrew (1999). ASTM Standardization News.
2. European Bioplastics website. Retrived from: www.european-bioplastics.org/market
3. Renewable Carbon-Bio- and CO_2-based Economy website. Retrived from: www.bio-based.eu/markets
4. R. Chamy(2013). Biodegradation: Life of Science, BoD – Books on Demand.
5. J. Rydz, W. Sikorska, M. Kyulavska and D. Christova (2015). Polyester-Based (Bio)degradable Polymers as Environmentally Friendly Materials for Sustainable Development International. Journal of Molecular Sciences, 16, 564-596.
6. https://www.natureworksllc.com/
7. 楊斌(2010)，PLA 聚乳酸環保塑膠，五南圖書出版股份有限公司。
8. ecoflex®: The Original since 1998 – Certified Compostable Plastic. Retrived from: plastics-rubber.basf.com/global/en/performance_polymers/products/ecoflex.html
9. Mitsubishi Chemical website. Retrived from: m-chemical.co.jp/en/products/departments/mcc/sustainable/product/1201025_7964.html
10. Kaneda Biopolymers website. Retrived from: kanekabiopolymers.com/
11. E. Bugnicourt, P. Cinelli, A. Lazzeri, V. Alvarez (2014). Polyhydroxyalkanoate (PHA): Review of synthesis, characteristics, processing and potential applications in packaging. eXPRESS Polymer Letters, 8(11), 791-808.
12. 郭信良、林品宥、黃淑娟(2019)，生分解材料的專利分析與發展趨勢，工業材料，396，34-43。
13. D. Elvers, C. H. Song, A. Steinbüchel and J. Leker (2016). Technology Trends in Biodegradable Polymers: Evidence from Patent Analysis. Polymer Review, 56(4), 584-606.

第二節：

1. 張光偉, 謝元凱 (2020)。當你體內的塑膠微粒等於「每週吞一張信用卡」，我們還要繼續傷害世界嗎？檢自 https://opinion.cw.com.tw/blog/profile/466/article/9721?

2. Chang, P. C.; Hsu, H. Y.; Jang, G. W. “Biological Routes to Itaconic and Succinic Acids” Biomaterials, Rafael Luque and Chun Ping Xu ed. Chapter 7, De Gruyter, 2016.
3. European Bioplastics. (2020). Bioplastics market data. Retrieved from https://www.european-bioplastics.org/market/
4. Filoklis, D. P., & Maria, M. T. (2016). Levulinic Acid Biorefineries : New Challenges for Efficient Utilization of Biomass. *Chem Suschem 9*, 562-582. doi: 10.1002/cssc.201501405
5. IEA Bioenergy Task 42. (2020). Bio-Based Chemicals: a 2020 Update. Retrieved from https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2020/02/Bio-based-chemicals-a-2020-update-final-200213.pdf
6. Jang, G. W. “Catalysing the circular economy”, Impact 2020. Retrieved from https://impact.pub/Impact2020-Octoberdigitaledition/
7. Jang, G. W. ; Huang, Y. T.; Wong, J. J.; Huang, C. J.; Li, C. L . “Synthesis of HMF in Ionic Liquid – Biomass derived product”, Ionic Liquids in the Biorefinery Concept, R. Bogel-Lukasik ed. September 2015.
8. John, C. (2019). Synthetic Biology Has Raised $12.4 Billion. Here Are Five Sectors It Will Soon Disrupt. Retrieved from https://www.forbes.com/sites/johncumbers/2019/09/04/synthetic-biology-has-raised-124-billion-here-are-five-sectors-it-will-soon-disrupt/#694f3d1c3a14.
9. Huang, Y. T.; Wong, J. J.; Huang, C. J.; Li, C. L.; Jang, G. W. “2,5-Furandicarboxylc Acid Synthesis and Use”, Chemicals and Fuels from Bio-Based Building Blocks, Volume 1, Chapter 8, Fabrizio Cavani, Stefania Albonetti, Francesco Basile, and Alessandro Gandini ed. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. April 2016.
10. Kirtika, K., Ravindra, P., & Brajendra, K. S. (2019). Bio-Based Chemicals from Renewable Biomass for Integrated Biorefineries. *Energy, 12*(2), 233. doi:10.3390/en12020233
11. Synthetic biology project. (2015). *U .S. Trends in Synthetic Biology Research Funding*.
12. Sudhakar, T., & Tao, L. (2018). An Overview of Biorefinery Derived Platform Chemicals from a Cellulose and Hemicellulose Biorefinery. *Clean Technol Environ Policy. 20*(7), 1615-1630. doi: 10.1007/s10098-018-1568-5
13. Spekreijse, J., Lammens T., Parisi, C., Ronzon T.& Vis, M. (2019). *Insights into the European market for bio-based chemicals (No.19).*
14. Werpy, T. & Petersen, G. (2004). *Top Value Added Chemicals from Biomass: Volume I -- Results of Screening for Potential Candidates from Sugars and Synthesis Gas*. doi: 10.2172/15008859
15. Yamini, P., Pragna K., Ausilio B. (2019). *Roadmap for the Chemical Industry in Europe towards a Bioeconomy*. Retrieved from https://cordis.europa.eu/project/id/745623.
16. Yun, C. & Jens, N. (2013). Advances in metabolic pathway and strain engineering paving the way for sustainable production of chemical building blocks, *Current Opinion in Biotechnology, 24*(6), 965–972. doi: 10.1016/j.copbio.2013.03.008
17. *Five bio-based companies to watch | F&L Asia.* Retrieved from https://www.fuelsandlubes.com/fli-article/five-bio-based-companies-to-watch/ (May 20, 2020)
18. *Global Synthetic Biology Industry Outlook.* Retrieved from https://store.frost.com/global-synthetic-biology-industry-outlook.html (Jun. 03, 2020)

第三節：

1. J. Calma (2020). Microsoft wants to capture all of the carbon dioxide it’s ever emitted (2020). Retrived from: www.theverge.com/2020/1/16/21068799/microsoft-carbon-capture-climate-change.

2. Global CCS Institute(2019). Global Status of CCS 2019-Targeting Climate Change.
3. F. Hussin, M.K. Aroua (2020). Recent trends in the development of adsorption technologies for carbon dioxide capture: A brief literature and patent reviews (2014–2018). *J. Cleaner Prod.,* 253, 119707.
4. F.Vega, F.M.Baena-Morenoa, Luz M.Gallego Fernández, E.Portillo, B.Navarrete, Z. Zhang (2020). Current status of CO_2 chemical absorption research applied to CCS: Towards full deployment at industrial scale. *Applied Energy,* 260, 114313.
5. 談駿嵩(2015)。能源國家型科技計畫減碳淨煤主軸中心之推動及管理計畫(I)-MOST103-3113-P007-004。
6. 談駿嵩(2017)。第二期能源國家型科技計畫減碳淨煤主軸中心之推動及管理計畫(III)- MOST 105-3113-F-007-002。
7. 談駿嵩(2019)。能源國家型科技計畫減碳淨煤主軸中心之推動及管理計畫-MOST107-3113-F007-001。
8. 徐恆文(2015)。二氧化碳捕獲及封存技術研發與示範計畫，經濟部能源局。
9. 陳志勇，二氧化碳捕獲及再生化學品技術之開發：第二期能源國家型科技計畫National Energy Program-PhaseII-總期程期末成果彙編, P179.
10. K. C. Chen, J. Y. Lee, C. L. Chen (2020). Hollow fiber-based rapid temperature swing adsorption process for carbon capture from coal-fired power plants. Sep. Purif. Technol., 247, 116958.
11. 童國倫。二氧化碳捕獲之創新型快速溫變吸脫附複合中空纖維管、模組與可調適型系統開發(II)- MOST107-3113-E002-009,2019
12. 王誠佑(2018)。金屬有機骨架及其複合材料之二氧化碳捕捉研究-MOST106-2221-E009-202。
13. 盧重興(2015)。多塔式吸附反應器捕獲回收煙道氣二氧化碳之研究，科技部補助專題研究計畫成果報告-MOST101-2221-E-005-042-MY3。

第四節：

1. P. Brinckerhoff (2011). Accelerating the uptake of CCS: industrial use of captured carbon dioxide. *Global CCS Institute*, *260*.
2. T. Pieri, A. Nikitas, A. Castillo-Castillo, A. Angelis-Dimakis (2018). Holistic assessment of carbon capture and utilization value chains. *Environments*, *5* (10), 108.
3. R. Chauvy, N. Meunier, D. Thomas, G. De Weireld (2019). Selecting emerging CO_2 utilization products for short-to mid-term deployment. *Applied Energy*, *236*, 662-680.
4. A. W. Zimmermann, R. Schomäcker (2017). Assessing Early-Stage CO_2 utilization Technologies—Comparing Apples and Oranges? *Energy Technology*, *5* (6), 850-860.
5. C. Ampelli, S. Perathoner, G. Centi (2015). CO_2 utilization: an enabling element to move to a resource-and energy-efficient chemical and fuel production. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, *373* (2037), 20140177.
6. E. A. Quadrelli, G. Centi, J. L. Duplan, S. Perathoner (2011). Carbon dioxide recycling: emerging large-scale technologies with industrial potential. *ChemSusChem*, *4* (9), 1194-1215.
7. L. Forti, F. Fosse (2015). *Panorama 2016-Chemical recycling of CO_2*; IFP Energies nouvelles: 2015.
8. G. A. Olah (2005). Beyond oil and gas: the methanol economy. *Angewandte Chemie International Edition*, *44* (18), 2636-2639.
9. G. A. Olah (2013). Towards oil independence through renewable methanol chemistry. *Angewandte Chemie International Edition*, *52* (1), 104-107.

10. A. O. Abdalla, D. Liu (2018). Dimethyl carbonate as a promising oxygenated fuel for combustion: a review. *Energies*, *11* (6), 1552.
11. P. Tian, Y. Wei, M. Ye, Z. Liu (2015). Methanol to olefins (MTO): from fundamentals to commercialization. *Acs Catalysis*, *5* (3), 1922-1938.
12. T. Blumberg, T. Morosuk, G. Tsatsaronis (2017). Methanol production from atural gas – a comparative exergoeconomic evaluation of commercially applied synthesis routes.
13. S. M. Jarvis, S. Samsatli (2018). Technologies and infrastructures underpinning future CO_2 value chains: A comprehensive review and comparative analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *85*, 46-68.
14. H. Holm-Larsen (2001). CO_2 reforming for large scale methanol plants—an actual case. *Stud. Surf. Sci. Catal.*, *136*, 441-446.
15. É. S. Van-Dal, C. Bouallou (2013). Design and simulation of a methanol production plant from CO2 hydrogenation. *Journal of Cleaner Production*, *57*, 38-45.
16. M. Pérez-Fortes, J. C. Schöneberger, A. Boulamanti, E. Tzimas(2016). Methanol synthesis using captured CO_2 as raw material: Techno-economic and environmental assessment. *Applied Energy*, *161*, 718-732.
17. J. C. Abanades, E. S. Rubin, M. Mazzotti, H. J. Herzog (2017). On the climate change mitigation potential of CO_2 conversion to fuels. *Energy & Environmental Science*, *10* (12), 2491-2499.
18. P. Gabrielli, M. Gazzani, M. Mazzotti (2020). The Role of Carbon Capture and Utilization, Carbon Capture and Storage, and Biomass to Enable a Net-Zero-CO_2 Emissions Chemical Industry. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, *59* (15), 7033-7045.
19. J. V. Veselovskaya, P. D. Parunin, O. V. Netskina, L. S. Kibis, A. I. Lysikov, A. G. Okunev (2018). Catalytic methanation of carbon dioxide captured from ambient air. *Energy*, *159*, 766-773.
20. S. Rönsch, J. Schneider, S. Matthischke, M. Schlüter, M. Götz, J. Lefebvre, P. Prabhakaran, S. Bajohr (2016). Review on methanation–From fundamentals to current projects. *Fuel*, *166*, 276-296.
21. R. Otten (2014). The first industrial PtG plant-Audi e-gas as driver for the energy turnaround. *CEDEC Gas Day*.
22. R. Chauvy, L. Dubois, P. Lybaert, D. Thomas, G. De Weireld (2020). Production of synthetic natural gas from industrial carbon dioxide. *Applied Energy*, *260*, 114249.

第四章　塑料回收循環再利用技術現況與發展方向

塑膠已是經濟活動的象徵，隨著經濟成長，廣泛應用人類生活中，年產量高達 4 億多公噸，其中有許多是一次性的材料，短暫的使用後即遭到丟棄，對環境造成嚴重的危害。根據 2017 年艾倫麥克阿瑟基金會(Ellen MacArthur Foundation)發表新塑膠經濟(The New Plastics Economy)之報告，大多數的包裝材料沒有良好的回收機制，使廢棄塑膠累積在環境中，讓環境負擔越來越嚴重，其中海洋垃圾更成為關注的焦點，甚至對海洋生物造成生存的危害。雖然目前透過回收及焚化的方式可以避免塑膠洩漏到環境中，但燃燒不完全時，仍有空氣污染的問題，亦非最佳的處理方式。塑料回收循環已發展超過 30 年，只能使用物理性的回收再製方式，增加塑料的生命週期，對於回收塑料的清潔度、雜質含量都有一定的要求，導致塑膠材料的回收率僅 14%，遠不及紙類 58%、鋼鐵 70-90%。為了提升塑膠材料的回收率，使用化學回收法成為提升塑膠回收率的主要方式，須透過技術與商業模式的創新才有辦法達成。

根據環保署資料庫統計 2018 年台灣生產超過 970 萬噸的一般廢棄物，根據不同的文獻估計，廢塑膠約占 160-200 萬噸之間，至少約有 100 萬公噸廢塑膠未進入再利用體系，僅能依賴焚化或掩埋方式處理 (林其瑞與鄭承熙，2019；楊仁泊與劉耀仁，2017)。依照環保署公告應回收廢物品及容器回收量統計數據，塑膠容器以 PET 寶特瓶每年約 10 萬噸最多，接下來為 PP/PE 8 萬噸、PS 4 千噸、PVC 8 百噸 (行政院環境保護署，2020)，其中以 PET 寶特瓶的回收最為確實，約有 95%可被回收再利用，用於製造寶特瓶、聚酯纖維等之原料，台灣也有遠東新世紀、南亞、新光等化纖大廠長期投入 (經濟部，2017)。

本章將透過收集資料與訪談，了解目前國內外塑膠回收技術的發展現況，以技術成熟度高、能夠成為材料循環經濟一環的技術為主。本章首先將簡要回顧國內外塑膠回收推動趨勢，及透過文獻分析各種化學回收技術的成熟度。接下來以能夠處理複合塑膠、熱固型塑膠的熱解法及化學降解法進行技術介紹，並搭配國內外案例來分析各式化學回收技術的優缺點。最後比較各種化學回收技術，提出結論與建議。

第一節 塑料回收技術發展趨勢

塑料回收技術眾多，根據技術特性可分為機械回收(Mechanical recycling)、化學回收(Chemical recycling)、能源回收(Energy recovery)等類型(Ragaert *et al.*, 2017；Kalargaris *et al.*, 2017)。由於機械回收已發展多年，技術相當成熟，適合用於單一材質的熱塑型塑料，如寶特瓶(PET)，若回收料含有色素等雜質，則需搭配純化程序，將塑膠所含的色素等雜質分離，才可再次使用。對於為了增加功能性的複合塑料，如鋁箔包、便當盒等，需透過化學回收技術將塑料高分子降解後，獲得新

的原料，再回到製程中重新使用；化學回收技術也常搭配觸媒或微波，以減少能量消耗或增加處理效率 (Solis and Silveira, 2020)。能源回收在處理上是最簡單的方式，以焚化爐將塑料燃燒，產生的熱能用於推動發電機組產生電能；能源回收雖然是最容易的處理方法，但是塑料無法持續循環使用，產品所需的原料仍要持續從原油煉製而來，無法達到真正的循環再生。

為了達成國際上及各國所訂出的限制或使用再生塑膠的目標，使用化學回收法增加回收率，是當前的研發趨勢，大部分的 AEPW 聯盟[54]成員也多著重在化學回收相關技術的開發(AEPW, 2020)。目前塑膠回收率低的原因在於許多包裝材料因功能需求，必須採用多種塑膠材質，甚至與金屬、紙類等材質結合，不利於回收再利用。為了將回收率提升至 50%以上，需針對化學回收技術，如熱裂解(pyrolysis)、觸媒裂解(catalysis cracking)、氣化(gasification)、醇解等分解塑料高分子的技術加以開發。

根據 Solis and Silveira (2017)所發表的論文，以 TRL (Technology Readiness Level)評估個別化學回收技術成熟度，依照技術成熟度之排列如表 4-1，TRL8~9 為技術具有可商轉的成熟度，並已成功建廠處理塑膠廢棄物，現有商轉之熱裂解廠每日可達 3 噸/日以上、觸媒裂解可達 40 噸/日、氣化廠可達 300 噸/日，視原料可取得性狀況決定設置之回收廠之規模。

根據 Close-loop Partners 組織於 2019 年所發表的研究報告，塑料回收依照產物的型態，可歸類為溶劑純化法(purification)、轉化法(conversion)、分解法(decomposition)等三大類，其中溶劑純化法是將塑料溶解在溶劑中，將添加劑和染料分離，讓塑料得以重新使用，分子結構不會被改變；分解法是破壞塑料的高分子結構，回到聚合成高分子的單體(monomer)分子結構或是其他較小的分子結構，讓這些小分子可重新作為原料，循環製造高分子塑料；轉化法是將高分子深度的分解，回到原油煉製原料的狀態，形成類似原油(crude oil)、氣態烴類(C1-C4)或合成氣(H_2/CO)等原料，再進一步透過石化煉製程序生產燃料(汽、柴油)或石化產品(石油腦)，讓再生原料回到產品製造的流程。在該報告中，分析了國際上 90 間投入各式化學回收技術的公司，並挑選 60 間進行介紹，若從處理廢棄物類型來做分析，可以大致得出混合塑膠以熱分解及熱轉化法較為適合，單一材質的塑膠則適用純化法(Closed Loop Partners, 2020)。本章第三節將挑選部分案例進行探討。

根據以上歸納結果，第二節的塑料回收技術介紹，及第三、四節的國內外案例分享，將著重於技術成熟可商業化的為探討範疇，以了解回收各種塑料時可使用的化學回收技術有哪些，又應該要如何與既有的製程或商業模式進行整合。

[54] AEPW 聯盟：終結塑膠垃圾聯盟 (The Alliance to End Plastic Waste)

表 4-1、化學回收法技術成熟度[55]

技術	應用階段/每日處理量		TRL
熱裂解 (Pyrolysis)	商轉	3 噸/日以上	9
觸媒裂解 (Catalytic cracking)	商轉	40 噸/日以上	9
氣化 (Gasification)	商轉	300 噸/日以上	9
電漿氣化 (Plasma gasification)	商轉 (裂解有害廢棄物)		8
加氫裂解 (Hydrocracking)	模廠		7
電漿熱裂解 (Plasma pyrolysis)	實驗室		4
微波輔助裂解 Microwave assisted pyrolysis	實驗室		4
Pyrolysis with in-line reforming	模廠		4

參考資料：Solis and Silveira (2017)

第二節 塑料回收技術介紹

從近期塑料回收產業趨勢,大致可歸納出兩點:(1)針對寶特瓶以外的塑膠袋、餐具、保鮮膜、塑膠玩具、保麗龍等混合或不易循環再生的塑膠製品提出回收方法;(2)以化學回收法為主要方式,可將高分子轉化為小分子,或深度分解為各式液、氣體原料。

從技術角度來看,機械回收法已臻成熟,但回收塑料種類限定於熱塑型塑膠且回收塑料須成分單純,混合型及熱固型塑膠不易透過機械回收法回收再利用,需以熱解、醇解等化學回收技術,將塑料降解為寡聚物或單體,才能做為原料循環再生。從第一節文獻分析結果可以發現,已達到 TRL8-9 或已有實務應用的技術,主要以熱解法及化學降解法兩種系列的技術較為成熟,以下就兩種系列的技術進行介紹。

一、 熱解法 (Thermal Degradation)

塑膠產品的製造流程是由有機化合物,如乙烯、丙烯等,經過聚合反應(polymerization)形成的高分子化合物,一般來說分子量介於 10,000 到 1,000,000 之間,常見的高分子如聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)、聚對苯二甲酸乙二酯(PET)、聚苯

[55] TRL1~4 為實驗室階段；TRL5~7 為技術驗證階段，包含模廠試運轉；TRL8 技術已通過驗證；TRL9 技術已透過實際運作證明可實用。

乙烯(PS)等。高分子化合物多以固體顆粒形式存在，經由成形技術製作出寶特瓶、包裝材料、人造纖維、餐具等塑膠產品。經過聚合反應所形成的塑膠產品在常溫常壓下難以分解，如果沒有妥善回收處理，將造成環境危害。

熱解是利用溫度對高分子結構的破壞來回收各種有機化合物成分，塑膠置於高溫環境下，達到分解溫度以上(根據塑膠種類而異)才會開始產生裂解的現象，通常溫度介於攝氏 300 至 400 度之間。分解過程中，通常會先從能階較低的鍵結開始裂解，因此在不同的溫度下會裂解為不同的化學物質，主要產物仍為不同形式的高分子聚合物，也會伴隨產出有機氣體、裂解油、焦碳等，裂解後的產品會有多種形態，所需的產物須透過分離純化程序而獲得。

各類回收的塑膠經過熱解後，超過 90%是以有機揮發物存在，其餘成分為焦炭、灰分及水分，有機揮發物冷卻後分子量高的會以油的形態存在，分子量小的以氣體形式存在。因為塑膠本身具有高熱值，所產生的裂解油可用於燃料使用，已是一項成熟且普遍的技術；為了達到循環利用的目的，裂解油經過蒸餾、加氫反應等程序，也可製作成化學工業所需的原料，(如：甲醇)，甚至是塑膠產品的原料(如：乙烯、丙烯)，重新循環使用。接下來介紹使用熱能來分解塑膠的各項技術，包括單純利用溫度的熱裂解(pyrolysis)、利用觸媒降低裂解溫度或提高產物選擇率的觸媒裂解(catalytic cracking)、將塑膠氣化為 CO 與 H_2 為主要成分的合成氣(syngas)的氣化反應(gasification)。

(一) 熱裂解 (Pyrolysis)

熱裂解的原理簡單，也非新的技術，日本、歐洲等地已有許多回收廠，為成熟應用技術，可針對處理不易回收再利用的都市塑膠垃圾，回收小分子單體、液體燃料及化學品，屬於可大量回收且較具經濟性的化學回收技術。

熱裂解回收塑料可分為三個步驟，如圖所示：

1. 進料：將收集到的塑料進行清潔、乾燥、破碎等前處理程序後，將塑料以擠出機(extruder)送入反應器進行熱裂解。
2. 熱裂解：熱裂解有各式的反應器可以使用，像是旋轉床(rotating bed)、流體化床(fluidizing bed)、流化催化裂化器(fluid catalytic cracker)等。一般來說操作在 500℃且無氧環境下，透過流體讓反應器內的塑膠顆粒均勻受熱，讓大分子塑膠顆粒裂解為小分子有機分子，在高溫下以氣體形式存在，無法被裂解氣化部分則成為焦炭(char)以固體形式排出收集。
3. 分離：經由熱裂解反應後，高溫有機氣體進入蒸餾塔，將裂解後的有機氣體依照分子量大小，可進一步分離為合成氣、輕油、煤油、柴油等。

熱裂解的產物組成複雜且分子量高，需要透過大型蒸餾塔來分離出各種化學品及液體燃料，雖然技術上較為成熟，但蒸餾塔所需進料(feedstock)需

有一定的規模，要找到足夠且具有經濟效益的回收塑膠料源較為困難。不過若是與既有的 Olefin complex 結合，將裂解油做為替代進料，會較獨立設廠更具有可行性與經濟性。目前相關熱裂解廠規模約在 1,000-14,800 噸/年之間 (Butler *et al.*, 2011)。

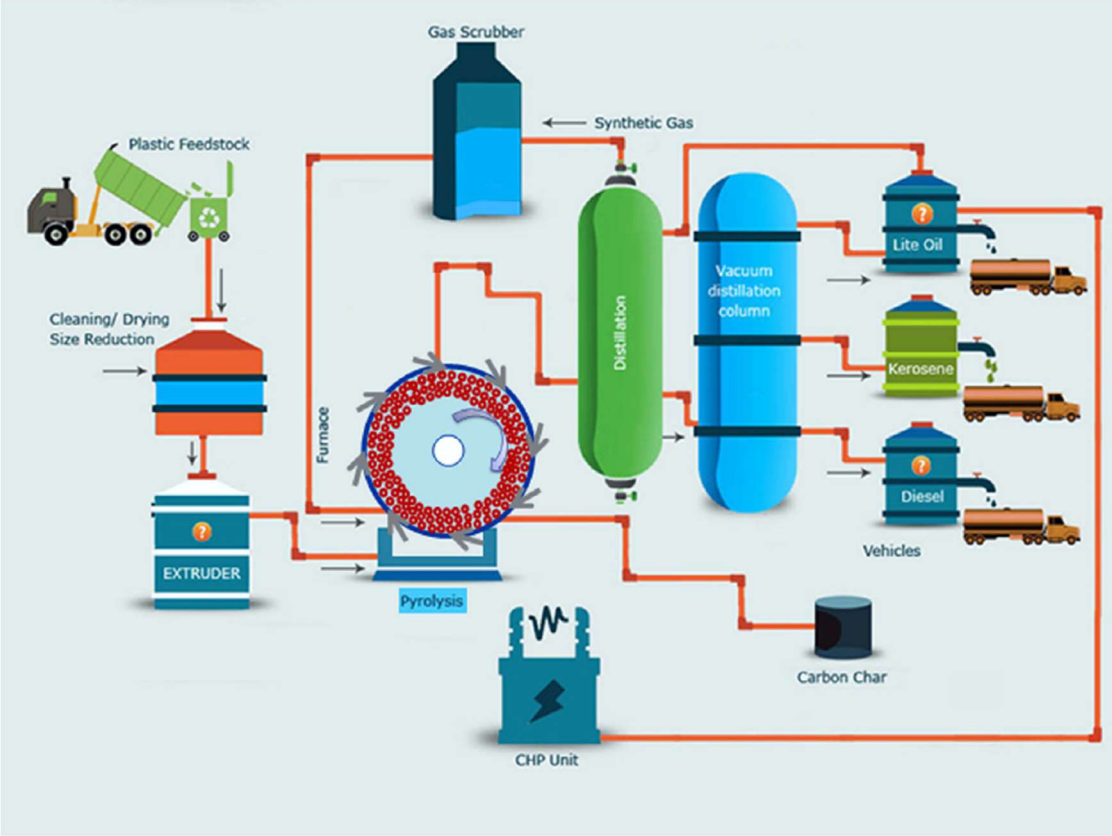


圖 4- 1 渦旋式熱裂解反應系統示意圖 (Ragaert *et al.*, 2017)

(二) 觸媒裂解 (Fluid Catalytic Cracking, FCC)

觸媒裂解與熱裂解的程序基本相同，並以流體化床為反應器，透過將觸媒與塑膠顆粒以流體化方式，在反應器內均勻接觸，透過觸媒作用降低反應活化能。進而降低反應溫度，並增加特定產物的產率，使產品更具經濟價值。過去已有許多研究嘗試利用 FCC 將塑料直接轉化為汽柴油、各式大宗化學品。Schirmer 等人的研究指出，使用不同的觸媒可將原本產出以 C15 以上高碳產品為主，調控為產出 70%的 C5-C15 產品及 20%的 C1-C4 產品，可有效增加產品的經濟價值與再利用性(Schirmer *et al.*, 2001)。

FCC 為石化業之成熟技術，也已在印度、波蘭、美國、日本等地的回收廠採用，操作溫度介於 300-450℃，使用進料包含 PE、PP、PS、PVC、PET 等，產出主要是汽油、柴油、燃料油等產品。目前之商用技術可處理量為超過 10,000 噸/年之規模 (Butler *et al.*, 2011)。

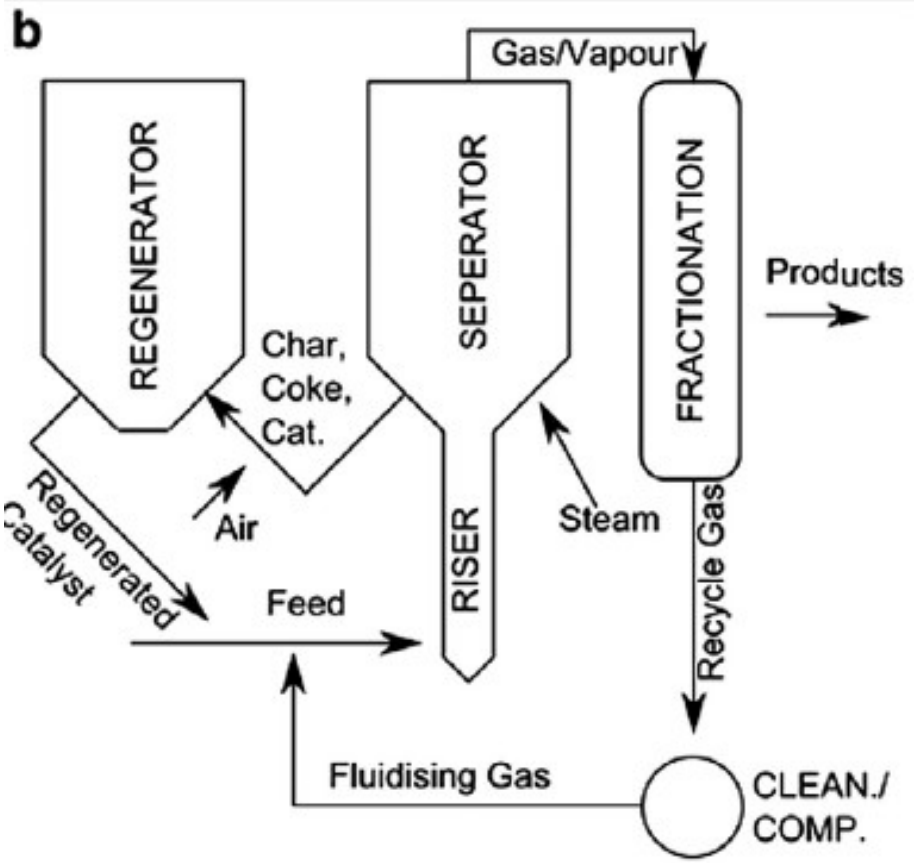


圖 4- 2 流體化床觸媒裂解反應系統(Butler *et al.*, 2011)

(三) 氣化 (Gasification)

塑膠成分為碳氫化合物，因此塑膠氣化的程序與甲烷重組(Methane steam reforming)、煤炭氣化(Coal gasification)及生質物氣化類似，也是以製造合成氣(syngas)為目標。氣化反應過程中需在氣化爐中通入水蒸氣、氧氣或空氣等含氧物質與塑膠反應，將塑膠裂解為合成氣，主要成分為 CO/H_2。Texaco 氣化程序是常見的塑膠氣化程序，如圖 4-3 所示，塑膠首先切成顆粒進入液化槽，將塑膠顆粒液化為重油與氣體，再將重油混和氧氣進入氣化槽，在 1200-1500°C 下將重油氣化後，經過數道分離步驟，將 HCl、HF、S 等雜質移除，形成以 CO 及 H_2 為主要成分的合成氣，取得合成氣(CO/H_2)之後可透過不同的化工程序轉化為甲醇(methanol)，再從甲醇轉化為汽油(gasoline)或烯烴(olelin) (Brem *et al.*, 2015; Ragaert *et al*., 2017)。

合成氣(CO/H_2)轉化為甲醇的技術在 1920 年由 BASF 開發出來，需在 350°C、200-300 atm 的條件下合成，並以 ZnO/Cr_2O_3 作為反應觸媒(Waugh, 1992)；ICI 公司在 1966 年將 Cu 加入觸媒中，讓反應溫度與壓力分別降到 220-275°C 及 50-100 atm 即可合成甲醇(Waugh, 1992；Spath and Dayton, 2003)。甲醇作為化學品上游原料可製造的產品眾多，可與氧氣反應生成醋酸，甲醇縮合反應可製造碳氫化合物(hydrocarbon)、芳烴(aromatic hydrocarbon)、烯烴(olelin)、汽油(gasoline)等類型的

產品。從甲醇轉換為汽油(MTG)或烯烴(MTO)已是化工業成熟技術，可衍伸的產品包括甲醛、DMT、醋酸、MTBE、DME 等化學產品。值得一提的是 ExxonMobil 與 UOP/HYDRO 曾提出多項 MTO 程序專利，透過一系列反應將甲醇轉換為 C1-C5 的碳氫化合物，也包括了製造乙烯(ethylene)與丙烯(propylene) (Brown *et al.*, 2005；Barger *et al.*, 1993)。

從文獻介紹可知，氣化可視為終極的化學回收手段，從合成氣、甲醇到乙烯、丙烯等塑膠原料，可實現塑膠循環再生使用的目標。但氣化與轉化過程繁複，且氣化溫度高達上千度，整體能耗偏高，如果只是為了塑膠回收而設置一系列設備，恐怕成本過高，但若是與石油煉化製程結合，以煉化製程為主體，回收塑膠作為替代原料，以減少石油用量，可行性較高。

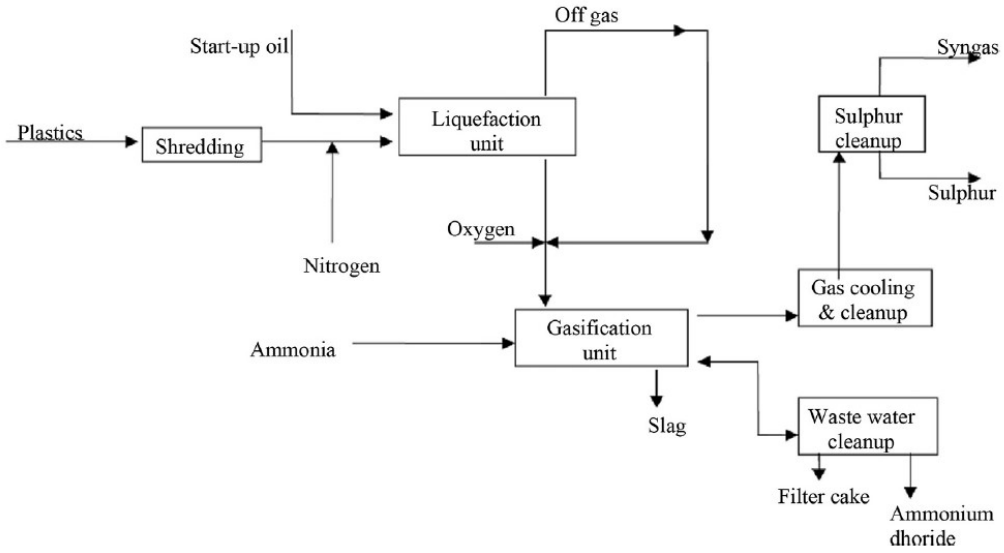


圖 4- 3 Taxaco 氣化程序示意圖(Brem *et al.*, 2015)

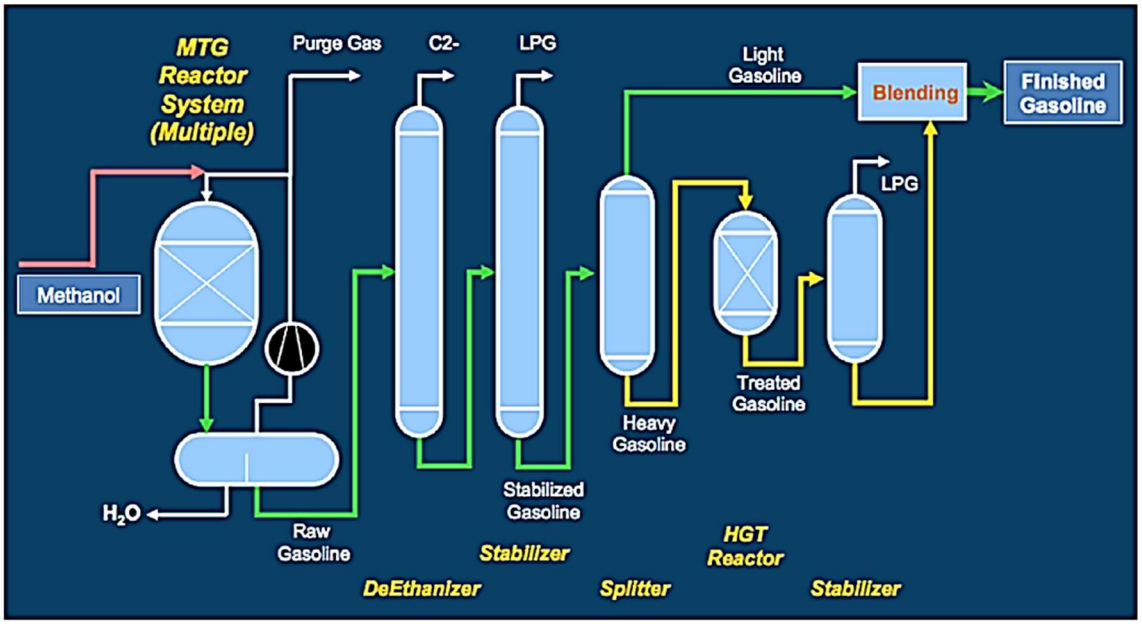


圖 4- 4 流體化床 MTG 程序示意圖(Ragaert *et al.*, 2017)

二、化學降解 (Chemical Degradation)

利用化學反應將塑膠的高分子結構降解為寡聚體(oligomer)或單體(monomer)，為化學降解法處理塑膠的方式。處理流程一般來說會先將廢塑料破碎至合適大小，再置入批式反應器與解鏈劑(de-crosslinking agent)及觸媒混合進行反應，可操作變因包括解鍊劑種類、觸媒種類、操作溫度、壓力等。塑膠由高分子降解為分子量較小的產物後，與解鏈劑及觸媒分離後，可做為原料循環使用。根據文獻，過去曾探討以化學降解法處理的塑膠種類有 PET、PU、PI、Nylon[56]等，可使用水解法、醇解法、胺解法、酸解法等使用不同解鏈劑的方法 (林其瑞與鄭承熙，2019)。由於各種塑膠種類及解鏈劑的搭配組合眾多，效率與成本各異，因此列舉部分常見的塑膠種類與解鏈劑的組合進行介紹。

(一) 聚酯醇解

聚酯泛指由多元醇(polyol)和多元酸缩聚而得的聚合物，包含聚酯纖維 PET、PBT、PAR，以及聚酯彈性體 TPEE，因此在回收技術的應用上，這些聚酯類的醇解回收都可透過類似程序來完成。由於寶特瓶為取得回收 PET 的主要來源，回收料成為人造纖維的主要原料，因此以下以 PET 醇解為例。

PET 以醇解法降解是較為成熟的解鏈方法，常用乙二醇(EG)作為醇解劑，搭配催化劑(轉酯化)可將 PET 在 180-240°C 下降解成 BHET[57]，可用於製作 PET、PU 泡棉等；也可使用甲醇作為醇解劑，將 PET 降解為 DMT[58]；甚至已有廠商將聚酯回收物降解為 PET 的主要原料 PTA[59]。醇解法的反應溫度低、操作條件單純，商業化技術成熟。BHET 及 DMT 的純化是後續應用的關鍵，需經過多道純化程序分離醇解劑及觸媒才可用於食品級原料，或是用於製作機能性衣物、鞋布等聚酯纖維產品，純化是製程技術研發重點。

從 PET 裂解而來的 BHET 可與 BHET 新料混合用於製造 PET、PU 泡棉、共聚酯、疏水性染料、不飽和樹酯及丙烯酸塗料；DMT 可製作纖維、接著劑、模材及塗料等。若是用於衣物、鞋等聚酯纖維之應用，對於純度的要求會較低，可維持與新料差不多的製造成本；若是用於食品級包裝材料，所需的純化成本較高，與石化原料所生產的原料價差可達 50%，需持續透過技術研發來降低成本。

(二) PU 醇解

PU 可透過醇解處理回收的 PU 硬泡、PU 鞋底等 PU 製品，再重新製作 PU 產品的原料。PU 醇解是利用多元醇，如乙二醇、二乙二醇、二丙二醇做為醇解劑，讓 PU 降解為多元醇、芳香多元醇及芳香胺等原料。目前工研院已有開發出

[56] PU: Polyurethane(聚氨酯)；Nylon(尼龍)；
[57] BHET: Bis(2-Hydroxyethyl) terephthalate (對苯二甲酸雙（2-羥乙基)酯)
[58] DMT: Dimethyl terephthalate (對苯二甲酸二甲酯)，可與乙二醇(MEG) 透過縮合反應成聚酯纖維
[59] PTA (純對苯二甲酸)從上游原料 PX(對二甲苯)而來，可與乙二醇(MEG)透過縮合反應成聚酯纖維

具有零廢棄物、產物均一性與製程單純的 PU 醇解技術，醇解產物可全部作為多元醇原料，用於 PU 軟泡再製 (林其瑞，2020)。

(三) Nylon 氨解

Nylon 是一種縮合聚合物，其組成單位由醯胺連接，因此它也是聚醯胺的一種。根據杜邦公司的程序，將 Nylon (來自廢地毯)切成顆粒，以水、氨(NH_3)及$(NH_4)_2HPO_3$ 的觸媒在 300°C 下進行氨解，可獲得高純度的己內醯胺單體(林其瑞，2020)。

第三節 國際公司化學回收案例

為了讓石化產品能對環境更為友善，近年有不少國際公司紛紛投入上一節所介紹的化學回收技術，針對不同的化學回收思維，本節挑選出目前已進行商轉或接近商轉的國際公司案例作介紹，藉此可初步了解化學回收方法在國際上的實際應用情況，案例的挑選，以台灣的需求為前提，且以不同技術，不同進料組成為原則。而最後一個案例，則跳脫技術案例層面，挑選了為下一個 20 年積極布局的德國 BASF，介紹其所提出的「化學循環專案」(ChemCycling)，提供讀者一個整合性化學循環的參考案例。

一、 Agile Process Chemicals LLP

- **技術型態: 熱裂解 (thermal-pyrolysis)**
- **進料: 混合廢塑膠、廢輪胎...**
- **產出:裂解油、碳黑、烴類氣體(C_3、C_4...)**
- **日處理量: 3-48 噸的廢塑膠量**
- **技術特點: 1.高效與安全的連續式熱裂解技術；**
  2.擁有獨特催化劑提高製程效率；
  3.進料有彈性

Agile Process Chemicals LLP(apc)，是一家提供混合廢塑膠與廢輪胎回收技術與設備的公司，從技術開發、設備設計與製造，到設備安裝、試車，以及運維服務，提供整廠輸出(Turnkey Solution)垂直整合的解決方案。主要是利用熱裂解(Pyrolysis)方式將多種類混合廢塑膠和廢輪胎轉換成裂解油(Pyrolysis oil)、碳黑，以及烴類氣體。在一般熱裂解過程中，因溫度高很容易產生熱爆炸現象，造成危險，此公司所開發的 APChemi 專利先進技術，主要是利用獨特的催化劑提高工藝效率，降低焦炭產量，提高油產量和質量，並藉由高能效的熱裂解反應器設計，盡可能降低溫度和熱負荷，確保最高的熱裂解效益，且不需經過蒸餾即可產製高質量的裂解油，且在轉換效率上，混合廢塑膠轉換成熱裂解油的產率高於 95%，而以廢輪胎為進料，產率亦可高於 60%，並符合歐盟排放標準，轉換成每公升熱

裂解油的成本低於 0.22 美金[60]。

此外，在進料上相當有彈性，可同時處理消費後和工業生產廢塑膠，包含層壓板、多層塑膠、包裝材，以及從都市固體廢棄物(Municipal solid waste, MSW)分離出來的混合廢塑膠和廢輪胎。目前此技術已經在英國、印度、肯亞等多國設置超過 35 個熱裂解廠，每天分別可處理 3-48 噸的廢塑膠量。並宣稱透過 APChemi 專利技術，至今已防止每天有 7.5 萬公斤的塑料垃圾進到掩埋場。(Closed Loop Partners, 2020；Agile Process Chemicals website)

二、 Plastic Energy Limited

- **技術型態: 熱無氧轉化 (Thermal anaerobic conversion, TAC)**
- **進料: LDPE, HDPE, PS, PP 等**
- **產出:柴油、Tacoil、合成氣**
- **日處理量: 20 噸的廢塑膠量**
- **技術特點: 1.Tacoil 可以直接進料到目前石化煉廠製程；**
  2.廢塑料到 Tacoil 的轉化率高。

於 2011 年成立的 Plastic Energy 公司，技術總部在英國倫敦，使用成熟的 Cynar 熱無氧轉化技術(thermal anaerobic conversion, TAC)，讓原本將被運往掩埋場或焚化廠或排放到海洋中的廢塑料，轉化成再生石化原料(Tacoil)，Tacoil 可以回到既有的石化製程，重新產出新的塑料，目前在西班牙的 Seville 和 Almeria 擁有兩個廢塑料處理工廠，並已實際運作 5 年。

這個技術專門處理無法藉由機械回收的廢塑料，這些廢塑料要進行前處理，移除一些雜質，如金屬、較重的塑料，以及殘留在塑料中的水分，盡量只剩下 LDPE, HDPE, PS, PP 等材質，讓後續處理能維持一定的品質，接著利用 TAC 製程，精準控制長烴鏈裂解，先將這些廢塑料加熱到 280°C 熔融成液態，接著在沒有氧氣的條件下加熱到 500°C，聚合物就會被分解形成富含飽和碳氫化合物的蒸汽，再將這些蒸氣進行冷凝，可以被冷凝下來的部分，再進到常壓蒸餾塔進行蒸餾，根據分子量的大小，將此蒸氣分離成柴油、和類似石油腦的 Tacoil，以及合成氣，而不可冷凝的氣體，則被分別收集，當作燃料為整個製程提供熱源。

這種利用熱量將塑料反向回到原始的液態成分，可回到現有石化煉製製程，產出燃料與新的塑料，讓廢塑料可重新再製與使用，藉由不斷回收以前無法回收的廢塑料，形成一個封閉式塑膠循環再生的系統，讓石化產品的使用對環境更為友善。在技術轉化率上，1 噸的廢塑料約可產製 850 公升的 Tacoil。

近期與全球最大的石化產品製造商之一的 Sabic 簽署了一項 MOU，將於荷蘭

[60] 產率與成本，將隨著進料品質與操作方式而變動

Geleen 建立一個原料供應工廠，透過 TAC 技術，供應 Tacoil 給 Sabic 位於荷蘭的輕裂設備廠煉製，生產類似原生的再生塑料。同樣地，也跟馬來西亞 PETRONAS 石油化學集團(PCG)簽署一項 MOU，將由廢塑料生產出來的 Tacoil，用在 PCG 所屬的綜合石化中心 Pengerang Integrated Complex 的聚合物生產。也與印尼西爪哇省達成了建立五個化學回收廠的協議，積極布局東南亞。(Closed Loop Partners, 2020；Plastic Energy Limited website)

三、 安徽奧生資源利用科技有限公司 Anhui Oursun Resource Technology

- **技術型態: 催化裂解 (catalytic cracking)**
- **進料:rPP、rPE、rPS**
- **產出:精製油(柴油、汽油)、可燃氣(C5 以下)、爐渣(活性碳、碳棒)**
- **日處理量: 10-500 噸的廢塑膠量**
- **技術特點: 1.擁有自身開發之塑料裂解催化劑與裂解工藝技術；**
  2.利用製程所產生的可燃氣副產品提供製程所需耗能，環保又有經濟效益。

位於安徽合肥的安徽奧生資源利用科技有限公司，是由中美台三國合資興建的一家以技術開發為導向的環保企業，集技術研發，設計，生產，銷售為一體。該公司自行研發催化裂解技術，並擁有多項相關專利，主要是將 PP、PE、PS 塑膠廢料在常壓反應器內經催化裂解，把廢舊塑膠中的有機高分子鏈切斷，還原成低分子的碳氫化合物，再經過蒸餾等分離程序後，產出柴油、汽油、可燃氣、水和爐渣。此公司專有的塑料裂解催化劑和工藝，是結合液相催化裂解與氣相催化裂解兩種方式，可兼得液相催化裂解溫度較低與氣相催化裂解產製品質較高油品的優點，除此之外，因催化裂解技術能使廢舊塑膠中的有機成份完全裂解，產油率依不同進料，從 50%到 90%不等。整個製程還有一個大特色是，在裂解過程中所產生的可燃氣(每噸進料約可產生 60 Kg 的可燃氣)，經氣體回收裝置回收，穩壓後由管道輸送到燃油器燃燒，直接回到製程的加熱系統，可降低製程能源耗用量，而以 60 Kg 可燃氣的熱值約可節約大於 500 度的電量，以 30 噸設備每天生產實際情況為基數，用電量在 12,000-18,000 度之間，此外，更可避免可燃氣體直接排放所造成的污染或處理成本，提高整個製程的經濟效益(所增加的經濟效益每噸約可大於 60 元美金)。

目前已開發到第五代環保節能型廢舊塑膠常壓裂解燃油設備，結構簡單，投資成本低、回報快、能生產出優質燃油，且能耗低、占地面積小、操作簡單、自動化程度高，現場只需要 3 個人即可以完成整個操作，油品的品質達到標準要求，整體效益更加顯著。(Closed Loop Partners, 2020；Anhui Oursun Resource Technology website)

四、 PowerHouse Energy Group plc.

- **技術型態: 電漿氣化 (plasma gasification)**
- **進料: 混合廢塑料、木質生物質、廢輪胎等**
- **產出:合成氣(syngas)、電力、熱**
- **日處理量: 25~40 噸廢料**
- **技術特點: 1.進料彈性可多元化；**
  2.操作溫度低於傳統氣化，殘留物少並可簡單處理；
  3.屬於分散式模組化系統，可小規模進行廢塑料處理。

成立於 2000 年的 PowerHouse Energy Group plc.，是一家總部設於英國並且是股票上市的公司。該公司致力於開發和商業推廣廢物轉化能源系統，目前開發的 DMG®(distributed modular generation)系統，主要機制是一個熱轉化，在可調控的氧化劑存在下，結合間接的強熱能條件(約 1000°C)下進行，當進料一進到 DMG® 系統，就馬上被轉化成氫和有商業價值化學前驅物所組成的生態合成氣(EcoSynthesis Gas)。而這個氣體經過淨化處理，除了可進一步轉化成氫氣、合成柴油等燃料之外，亦可產生電力，多餘的熱能還能回到 DMG® 系統提供動力使用。

在進料上，DMG® 系統也相當有彈性，包括混合廢塑料、木質生物質、廢輪胎等，且經過特殊設計的 DMG® 系統，能夠具經濟性的處理製藥、化工或其他工業產生的劇毒廢料，目前進料標的也鎖定廢車殼經粉碎分類後，所殘留下之不可回收資源物質-廢機動車輛粉碎分類處理殘餘物(Automobile Shredder Residues，ASR)，將 ASR 中不可回收的有機成分，轉化成 EcoSynthesis Gas，並為拆卸操作提供動力。讓這些原本直接進入垃圾掩埋場或焚化爐的廢料，回收成可再生燃料或替代燃料使用，再一次增加其價值。

DMG® 系統不是"燃燒"反應，而是經過一個精密的熱轉化過程，所以除了比焚化方式相比減少二氧化碳(CO_2)的產生外，整個製程所產生的殘留物、灰分或焦炭，非常少，而且透過一些簡單的方式就可完善管理，如產生的氫氣，經過簡單的處理就可達到 99.999%的純度，可直接供給氫能交通載具使用，也不會有在熱解或低溫燃燒系統中會產生的戴奧辛與呋喃等有毒物質。而此系統的一大特色，是分散式模組化的單元，可以實現廢塑料處理小型化，為加氫站的氫氣提供另一個可能來源。

2019 年與 Peel Environmental(房地產和基礎設施開發公司) and Waste2Tricity(W2T,資源回收公司)達成協議，要在 Peel 擁有的土地上開發 11 個 DMG® 系統，並由 W2T 提供料源，初估整個計畫的開發成本至少要 1.3 億英鎊(約 1.65 億美金)，而第一座將設在英國的 Cheshire，預估耗資 700 萬英鎊(約 890 萬

美金)，將處理 35 噸的廢塑料，每天約可產生 2 噸氫氣，同時發電 3.8MW[61]。(Closed Loop Partners, 2020；PowerHouse Energy Group website)

五、 perPETual Global Technologies Ltd.

- **技術型態: 化學醇解 (chemical-glycolysis)**
- **進料:rPET**
- **產出:酯類單體重新聚合成高品質聚酯纖維**
- **日處理量: 200 萬個廢塑料瓶**
- **技術特點: 1.製程溫度低能耗少；**
  2.回收製程僅需添加原料之一的乙二醇，確保解聚後單體純度。

成立於 2007 年的 perPETual 集團，銷售和營銷中心位在英國倫敦，製造跟加工廠則分布於印度、土耳其，以及韓國，從 2015 年開始至今，已完成超過 30 億個塑膠瓶的回收，製成 4,500 萬平方公尺的高品質聚酯纖維。主要是將用過的 PET 塑膠瓶，經過清洗切成細片後，利用化學方法的糖解(glycolysis)解聚(depolymerisation)方式，先將固體的聚酯轉變成液體的聚酯，再將液體的聚酯分解成酯類單體(monmers)，再將這些單體使用專有的微米及過濾方式，去除像膠水、染料、香料、色料等所有的污染物後，重新聚合成聚酯，品質與石化產製的聚酯幾乎一樣，可被用來製造高品質的紡織長纖。此製程最大特色是，製程溫度不高，且只加入合成酯類的兩個原料之一的乙二醇(MEG)當作溶劑，相較於其他傳統解聚方法，需在高溫環境下，或需添加額外的化學品，如催化劑等，更能確保解聚後單體的純度。

perPETual 在位於印度 Nashik 的工廠(Polygenta Ltd.)已經可以使用廢棄 PET 塑料瓶產製聚酯的原料，日處理量約 200 萬個廢塑料瓶，每天可生產 20 噸的回收聚酯，除轉化成纖維長絲外，也開發成功轉化成 BOPET 包裝薄膜、PET 瓶，以及其他 PET 產品，並比使用 PTA 和 MEG 產製的傳統石化酯更加便宜，整個製程利潤高並少有浪費，一公噸的廢棄 PET 瓶罐細片可產製出 950 公斤以上的聚酯，轉化率 100%，目標在 2021 年底每天可處理超過 5000 萬個廢塑料瓶。目前使用 perPETua 所產製的回收聚酯纖維以有 40 多家，如 adidas、H&M、DECATHLON、PUMA、ZARA 等。(Closed Loop Partners, 2020；perPETual Global Technologies website)

61 https://www.rechargenews.com/transition/turning-plastic-waste-into-hydrogen-first-commercial-plant-moves-step-closer/2-1-733678

六、 Sabic Innovative Plastics

- **技術型態: 化學解聚 (chemical decomposition)**
- **進料:rPET**
- **產出:PBT**
- **技術特點: 1.製程能耗少；**
  2.透過生命週期評估，利用 PET 回收產製的 PBT 相較於石油產製的 PBT，有更低能耗與碳足跡，對環境確實友善。

SABIC 是世界頂級石化企業之一，主要是生產聚乙烯、聚丙烯和其他先進的熱塑製品、乙二醇、甲醇和化肥等。近年意識到國際社會對氣候變遷與資源短缺的憂慮，故致力於循環經濟理念的落實，減少塑料廢棄物。策略上是將廢塑料和其他副產品變為有價值的生產原料，開發出多種再生材料，如 2019 年推出的 LNP™ ELCRIN™ iQ 聚對苯二甲酸丁二醇酯(PBT)產品，這個升級再生改性塑料，就是由回收後的聚對苯二甲酸乙二醇酯(rPET)處理再生而成，首先將回收後經過清洗切成薄片的 PET 與乙二醇或丁二醇，加入觸媒一起高溫反應，利用化學解聚方式將 rPET(主要是一次性飲料瓶)先解聚成寡聚合體，再透過酯交換反應，在觸媒的催化下，將 PET 官能基換成 PBT 官能基，最後將 PBT 寡聚合體重新聚合成 PBT 聚合物，此製程最大的優點是能耗低，經估算，從石油產製的 PBT 每公噸約需 50GJ 的能耗，而用回收 PET 產製的 PBT 每公噸能耗僅 20GJ。

回收 PET 產製的 PBT，與從石油生產的 PBT 具有相同的機械、物理和化學特性，且在加工性能上，回收 PET 產製的 PBT 更具優勢。由於 PBT 具有高強度、高剛性、耐熱性、耐候性、耐藥品性、電氣特性佳、吸水性小、光澤良好，廣泛應用於電子電器、汽車零件、機械、家用 品等，且為五大泛用工程塑料之一員。將較不耐用性塑膠 PET 水瓶，轉製成較耐用性 PBT，另一方面不但延長了原生 PET 的使用期限，而且轉換成更具價值的產品，這就是一種”向上循環”(upcycling)最佳範例。

根據能源消耗累計值(CED)和全球變暖潛能值(GWP)測算，與原生 PBT 材料相比，此回收材料還減少了產品在生產到消費過程中對環境的影響。而經過生命週期評估(LCA)研究顯示，相較於原生 PBT 材料可減少能源消耗約 61%，碳足跡也可減少 49%。而每一公斤的 LNP™ ELCRIN™ iQ 塑材，相當於回收多達 67 個使用後的 0.5 公升 PET 水瓶。

SABIC 的再生 PBT 聚合物已經在全球銷售，並在聯合利華、Vinventions、威凱集團和貝里等企業進行實證，廣泛應用在食品、飲料、個人和家庭護理產品等領域的消費品。(Closed Loop Partners, 2020；Sabic Innovative Plastics website)

七、BASF

德國 BASF 化學公司，在德國 Ludwigshafen 擁有全球面積最大的化學品生產基地，20 年前即規畫成循環園區，其污染與碳排放量已減至近極限，為了下一個 20 年，已著手開發下一個世代的技術，將進料從原油導向廢塑料，更提出「化學循環專案」(ChemCycling)，積極開闢目前無法回收利用塑膠廢棄物循環再利用的全新領域，從廢棄物管理公司到技術提供商和包裝生產商，建構循環價值鏈，從一開始的產品開發設計、製造生產，到使用和再利用整個系統的整合，積極地從整個供應鏈的角度一起提升價值，進而去處理塑膠垃圾議題。

把塑膠垃圾重新變成原料，是個很複雜的挑戰。BASF 在「化學循環專案」中提出兩個策略，一個是"Keep it smart"，就是供應鏈的每一份子在自己的生產製程中要不斷努力提高效率，並且避免浪費。所以 BASF 提出一體化(verbund)原則，利用一個製程的副產品可當作另一個製程原料的思維加以整合，為基本原料到高附加價值產品的生產系統創造高效的價值鏈，在這個系統中，每個製程盡可能地消耗更少的能源，減少廢棄物的產生，進而更能節約能源。

第二個策略則是延伸到產品回收處理的"Close the loops"，就是封閉式循環的概念，當產品使用壽命結束後，應加以回收處理，回到生產製程中重新使用。所以提出物料平衡法(mass balance)，BASF 先帶頭使用由廢塑料回收產製的可再生原料取代一定數量的石化原料，接著按照比例分配到銷售的產品中，並透過獨立認證機構向客戶證明 BASF 在產品中使用了一定數量的可再生回收料。

而目前這個專案也有一些令人振奮的消息，如 BASF 與德國原材料回收系統設計公司 Recenso 合作，在德國 Ludwigshafen 一體化生產園區進行化學循環專案，將廢塑料裂解生成的合成氣與油，替代輕油等化石能源，循傳統化學製程做成塑膠製品，2019 年 10 月，首批由廢塑膠裂解產生的油料已送至 Ludwigshafen 一體化生產園區的蒸氣裂解裝置中，藉以生產乙烯和丙烯，並進一步製造多種化學產品。

而這些化學產品也在許多中下游廠商的產品得到應用，比如與跨國包裝大廠蒙迪(Mondi)集團和荷蘭蔬果保存公司 COROOS 合作，共同生產一種站立式的包裝袋，用於 COROOS 自有品牌產品的蔬果汁包裝，整個包裝的 12%重量是由「化學循環專案」所生產的再生塑料所製成。除了飲料包裝，BASF 的再生塑料也實際應用在車商捷豹路虎(Jaguar Land Rover)I-Pace 原型車的端車架上。此外，德國包裝緩衝材公司 Storopack 應用於製造對溫度敏感性藥品的阻隔包裝，以及應用於運輸鮮魚等食品和電子產品的緩衝材；德國薄膜包裝公司 Südpack 則應用於莫札瑞拉奶酪(mozzarella)的特殊密封包裝；全球能源管理巨頭施耐德電機(Schneider Electric)也利用「化學循環專案」所生產的再生塑料製造一款斷路器。

透過這些不同應用案例，實際驗證了以化學回收的再生塑料，與以原石化物

料製造的產品相比，表現出一樣的品質和性能。而 BASF 提出的「化學循環專案」目標是處理目前無法回收的塑料廢棄物，這樣的成果，亦足以顯示"化學循環"將可成為現有循環和回收流程中，解決塑料廢棄物問題的終極手段。

根據 2018 年麥肯錫報告，全球塑膠回收及再利用率可在 2030 年達到 50%(目前為 16%)，其中 BASF 這種化學式循環的比率，可望從目前的 1%成長至 17%，一年回收 7400 萬噸塑膠廢棄物。

而為了擴大再生塑料的產能，BASF 在 2019 年也宣布投資 2,000 萬歐元於挪威 Quantafuel 公司，該公司專門為塑膠廢棄物熱解(pyrolysis)與熱解油純化(purification)，計畫於 2019 年底在丹麥投資建立 6,000 萬噸/年產能的塑膠廢棄物熱解純化工廠，將廢棄物進行預處理成液體原料，再運回德國一體化園區替代化石原料，就近解決體積龐大廢棄物，降低運輸阻礙與成本。Closed Loop Partners, 2020；Circular Economy at BASF website)

第四節 國內公司回收案例

除了國外公司案例之外，研究團隊也透過訪談方式，收集國內熱裂解及化學降解法的相關公司案例，了解目前台灣回收產業發展現況，從業者的角度來看未來市場的趨勢，以及目前法規與政策對業者來說有那些助力及阻力。以下由研究團隊訪談遠東新世紀、南寶樹脂及環拓科技等三間業者，透過國內回收再生產品的經驗，了解目前國內廠商的技術能力，以及收集目前遭遇的困難及相關建議。

一、 遠東新世紀

遠東新世紀成立於 1949 年，是全球領先的化學製造商之一，Virgin PET 寶特瓶原料生產全球排名第三。回收 rPET 全球排名第二、亞洲第一，短纖維(staple fiber)全球第二，包裝膠片亞洲第一，尼龍 66 做長纖維(filament)是亞洲第一。遠東新世紀在各種產業應用上，都名列世界前茅。生產基地遍布台灣、中國、越南、美國、日本。

遠東新世紀製造之綠色環保食品級瓶用酯粒可取代來自於石油之瓶用酯粒，實現瓶到瓶(Bottle to Bottle)的環保概念，通過美國食品藥物管理局(FDA)食品級認證，歐盟 EFSA 食品級認證，證實應用於食品包材無安全疑慮。也獲得國際飲料品牌認證，包括可口可樂(Coca-Cola)、百事可樂(Pepsi)、法國 Danone、雀巢(Nestle)等。

遠東新世紀在全球食品級再生聚酯業務中排名第二，再生事業分佈於台灣、日本及美國。在日本，2012 年 5 月創立遠東石塚 GREEN PET 公司(FIGP)，生產及銷售食品級回收聚酯(rPET)給飲料和非飲料製造商。 FIGP 東京工廠於 2014 年投產，現已成為日本最大的 rPET 工廠。

(一) 發展歷程

遠東集團在石化業上游有亞東石化、東聯化學、遠東新世紀，下游有不同的產品別，包括聚酯粒(寶特瓶)、短纖(地毯、填充物)、長纖(成衣)等。遠東新世紀1988 年開始做回收，當初台灣還沒有回收寶特瓶，與新光和黑松共同成立台灣再生公司。2006 年起由遠東收購獨資經營。近年來開始強調循環經濟，遠東新世紀對於食品包材的研發投入許多心力，使用 rPET 的原料來製作寶特瓶，也獲得國際飲料大廠的青睞。遠東新世紀從 30 年前主要是以 rPET 做短纖的填充棉、地毯等較低階產品，到了近 10 年發展機能性織布、食品級再生寶特瓶等。由於循環經濟已成國際共識，品牌商開始宣示自己的產品要含有一定回收比例的原料，增加產品的環保附加價值，遠東新世紀期許成為最創新的傳統產業，去年聯合國理事會環境委員會的會長到遠東新世紀參觀，他感到很驚訝，台灣這麼小的島嶼能夠做出那麼多創新的綠色產品。

(二) 回收食品包材及家用品之市場需求

可口可樂、百事可樂、Danone、Nestle 等大品牌都規劃在 5 年內要有積極作為，推動回收產品使用在包材裡面，屬於食品包材，規格很高；聯合利華、P&G 的產品是家用品，使用較多的是 PP 及 PE，而 PP 及 PE 的回收產業鏈沒有 PET 完整，未來也會選擇 PET 作為包材，也因此遠東新世紀的產品也橫跨到家用品。服飾品牌 Nike 宣布 2020 年使用回收材料要到 80%，Adidas 宣布 2024 年要 100%使用回收聚酯纖維。除了食品、服飾，還有許多國際知名家用品品牌都是遠東新世紀的客戶，這些成果都是累積 30 年的經驗與技術，取得客戶的信任，與客戶一起努力的成果。

(三) 遠東新世紀技術發展現況

遠東新世紀與客戶攜手合作同開發技術，包括邀請品牌廠設計師一起討論，避免設計元素過多造成回收困難；使用高規格的生產機台與良好的管理，取得客戶信賴。相關技術研發以下分為物理回收法及化學回收法兩種：

1. 物理回收法：使用物理回收法回收所獲得的 rPET，已可用來製造含有 100% rPET 的寶特瓶，但因各國回收率不同，實際回收量低，可使用的回收原料供應量不足，難以完全使用回收料來製造寶特瓶。且實務上，因每年持續有新料進入市場，故要使單一 PET 持續進入回收體系數次，預估發生機率較低。遠東新世紀使用歐洲最好的機台，確保可以製造食品級的包材使用，也透過抽絲機台，做成 filament grade。
2. 化學回收法：遠東新世紀除了在物理回收技術已經發展 30 年之外，也積極走向化學回收技術的研發與商業化。化學回收技術可以讓材料回到與石油原料生產之產品相同的物性，並且可以減少 CO_2 排放，品牌客戶也希望可以獲得化學回收法所製造的聚酯原料。化學回收技術門檻較機械回收高，

生產商必須持續投入研發以降低成本，品牌商也必須堅持永續循環理念持續支持，才能夠有效減少石油原料之產品使用。

為了實現減少來自石油原料的依賴，遠東新世紀近 5、6 年推動 TopGreen®ChemCycle 聚酯化學品回收技術，將廢棄聚酯寶特瓶和其他廢棄聚酯產品加以降解回收與再製(如：聚酯纖維、聚酯膠片、聚酯收縮膜等)。

(四) 台灣產業現況

1. 回收率與化纖業需求相關:遠東新世紀每年在台灣處理超過 50%回收寶特瓶。重點不只是回收量，而且是回收的品質要如何提升，是持續努力的方向。再製 PET 食品應用出口市場逐漸成長，下游產品需求增加下，國內寶特瓶回收率得以具有一定的支撐。
2. 技術與形象佳：國外品牌商認為台灣國際形象較佳，相較於中國大陸及東南亞可能會有童工、血汗工廠等問題，在台灣採購回收料製造的功能性布料會比較放心。
3. 回收料源取得現況：台灣紡織業回收需求量超過 15 萬噸，可用回收原料卻有限，國內供應的回收料量較為不足。雖然如此，遠東新世紀支持環保署把關管控進口廢 PET 料源的作法，讓具有完善再利用處理能力的優良廠商才有進口資格。

(五) 遭遇問題或挑戰

1. 環保法規:建議減少有色寶特瓶，因為有色寶特瓶回收回來附加價值較低，建議台灣也能仿照日本使用透明寶特瓶，產品以外加標籤方式行銷。台灣在寶特瓶回收已達 95%，領先全世界 55%，可以仿照日本在回收時把瓶蓋、標籤拿掉，回收時減少廢棄物。。
2. 回收產品成本高：回收產品的價錢不會隨油價變動，而石油原料生產的產品會隨油價波動，因此，能否持續發展回收產品業務的關鍵在於品牌商對於企業永續目標的堅持，
3. 再製 PET 用於食品包材：歐盟、日本、美國都能夠允許回收料用於食品包材，而台灣與中國大陸目前不允許。5、6 年前遠東新世紀在日本蓋廠時，日本的法規也還沒通過，後因日本政府政策帶領推動，順利地讓回收料用於食品包材。台灣在回收料用於食品包材的法規推動上，目前與國際先進國家仍有落差。
4. Covid-19 疫情影響：今年紐約州、加州等回收大州因病毒傳播的疑慮關閉了回收站，多數寶特瓶都只能廢棄。這次疫情就可以看出來上游回收料源多元化的重要性；同時，下游有足夠的需求，上游的料源才會穩定。
5.

(六) 推動塑膠回收及發展循環園區之建議

1. 更加落實回收分類：日本在回收寶特瓶就做得很徹底，將瓶身、瓶蓋及標籤分開回收交給不同的處理鏈，所以可以得到較高的產率，。對於提升回收材料的產率，需要從回收端開始，業界可以在產品設計上改進，讓瓶子可以更好回收，政府則是需要努力去宣導，一起合作努力推動。
2. 法令規範：去年歐盟為了減塑，希望所有的塑料都可以含有 25%以上的回收成分；美國有 11 州實施押瓶費制度，提升該州回收率。有些國家訂出如果沒有一定比例的回收，要支付回收費用。期待透過政府法令的訂定來促進回收循環產業的發展。
3. 減少產品外銷的關稅障礙：台灣面對出口關稅的挑戰，希望政府可以協助，應該想辦法透過 Green product 當作突破點，來跟鄰近的日本、東協國家談關稅減免。如果我們要在國內設置新的投資規劃，要先想到如何讓產品有競爭力的賣出去，稅是一大關鍵。
4. 協助廠商取得各項認證：政府在規劃循環園區時，可協助讓園區產品取得各項國際認證，包含產品品質之國際認證、生產原物料履歷等。將有助於園區內廠商提升競爭力。

(七) 結論

1. 遠東新世紀居回收業界領先地位，是國內推動環境友善產品發展不可或缺的公司，具有豐富的研發能量與市場經驗，特別是與國外品牌商的合作經驗。
2. 化學回收技術有其困難之處，但減少碳排放與環境負擔已成共識下，品牌商將會在企業社會責任及利潤之間取得平衡，對於技術領先者將是新的機會。
3. 塑膠的回收循環需要生產者共同投入，應減少生產者投入的法規障礙，例如上述提到的落實回收分類、避免使用有色寶特瓶，以及再製 PET 應用於食品包材，如何法制化和標準化評估程序等。
4. 對於材料循環園區，如果政府能夠提供出口關稅的協助、輔導取得國際產品認證，對於廠商來說可增加誘因。

二、 南寶樹脂

南寶樹脂主要業務在鞋膠、接著劑及塗料。在循環經濟的議題上，南寶開發綠色永續的環保材料，並符合 ZDHC[62]的要求，南寶樹脂使用木質素、植物纖維與植物油等生質材料作為 filler 或合成生質的高分子，已投入 5 年以上的時間；近年來投入回收聚酯纖維、PET 寶特瓶，製作接著劑、塗料或高物性聚酯。

(一) **產品**：鞋面布的低熔點紗材料主要有聚醯胺、共聚酯、TPU 等三類，聚醯胺通常是 PA6、PA66、PA12 等聚醯胺多元共聚物，聚酯類為 PET、PBT 等聚酯共聚物。聚酯紗線市場占八成以上，是主要製鞋原料之一。由於品牌廠逐漸要求供應商提供使用環保材質的商品，目前已有許多使用回收聚酯紗的衣物、背包等，已成為歐美市場主流環保商品。

(二) **聚酯寶特瓶及纖維回收技術**

1. 一般聚酯纖維與低熔點共聚酯纖維的成分均為聚酯(polyester)，用於衣著紡織品及編織鞋面布，這些聚酯布料纖維可一起回收，利用化學回收法降解為寡聚物或單體。
2. 回收流程是將聚酯纖維廢料利用化學降解方法，將塑料降解為寡聚物，再透過聚合、造粒製成接著劑、塗料或高物性 PU 或聚酯等產品。除了既有的聚酯纖維廢料，也可將回收 PET 寶特瓶片作為降解反應的原料。
3. 化學回收法所需的成本、能源及時間都高於物理回收法，但將廢塑料切成寡聚物或單體，再重新聚合時，可以利用精準的化學合成控制生產出品質較好的產品。透過不同的聚合方法，也可製作出纖維、接著劑、塗料及膜材之原料。

(三) **商業模式**

1. 原料：國內可從回收商取得乾淨的 PET 瓶片及聚酯纖維廢料。
2. 製程：以化學降解法將 PET 或聚酯纖維廢料解聚，變成寡聚物或單體，再重新聚合生產接著劑、塗料或高物性聚酯等既有產品。製程中無廢棄物產生，不會造成二次污染，也可充分使用原料，並可沿用現有生產設備與管線。製程中主要成本在於 PET 或聚酯纖維廢料取得成本及生產規模。目前南寶樹脂擁有 14 噸之反應槽。
3. 市場銷售：國際品牌商對於使用環保材質，可接受稍高的價格，對於企業社會責任是有正面形象。

[62]國際服裝及鞋類品牌商聯手推出了名為 ZDHC（Zero Discharge of Hazardous Chemical，有害化學物質零排放)的去毒計劃，承諾於 2020 年前帶領整個行業生產鏈的有毒有害化學物，推動行業價值鏈中的危險化學物質零排放，改善環境和民生。

(四) **發展現況與展望**

1. 南寶樹脂目前生產的回收聚酯類產品，提供品牌商及業者，大多為既有客戶，在成本控制得宜下，新產品的導入較為容易推動。
2. 台灣廠商在使用回收材料開發新產品的能力，包括化學合成、鑑定等技術較沒有問題，但要導入目前化工產品的製程中取代既有原料，尚需要政府政策的引導。
3. 國際塑膠回收的商業模式仍有待完善，主因在於整體供應鏈細節不完整，且成本偏高，目前國際大廠還沒有主要的產品出現。

(五) 結論

1. 由於南寶樹脂不涉入上游回收，僅針對塑料回收的製程進行開發，在沒有產生新的廢棄物的情況下，較不受政府法規的限制。
2. 無論導入生質材料或是塑料回收，都是針對環保產品趨勢及品牌客戶需求而開發，產品銷售以既有市場為主，其他應用市場仍值得持續開發。
3. 台灣在材料研發方面有成熟的環境，也可找到合適的實驗室鑑定相關產物，但須有相當的研發成本投入，才可提升研發能力。
4. 政府法規方面，希望相關事業廢棄物及不良品應用有完善的環保法規及租稅優惠，鼓勵業者多投入循環經濟開發及應用。

三、 環拓科技

環拓科技成立 16 年，廢輪胎裂解為主要業務，相關製程設備自行投入研發，光是反應器就歷經改了 7 次的大整改。公司表示像我們這種資源回收公司，一般 3-5 年會遇到瓶頸，從廢棄物而來的產品在市場上要找到客戶使用，否則裂解後的產品就會面臨再次廢棄的問題。為了增加客戶的信賴，環拓建立品管實驗室以確保提供品質穩定的產品。

(一) **技術與產品**：廢輪胎回收技術：廢輪胎是以熱解法(pyrolysis)來處理，其中包含 16-18%是裂解氣，可直接作為製程所需能源，其他的部分裂解產品則為環保碳黑(carbon black)及裂解油(pyrolysis oil)，由於環保碳黑中內含約 16%灰份，必須藉由調整製程進料比例以控制產品品質。環拓目前主要產品為環保碳黑，用於製作輪胎、潛水衣、網球、油墨等應用，由於具有環保效益且品質與一般碳黑無異，下游廠商會優先採用具有環保效益的產品。

(二) **商業模式**：廢輪胎依賴小型回收商取得料源，裂解處理後可獲得環保署之補助(回收補貼價格：3,200 元/噸，含稅價)。廢輪胎裂解後，主要產品為環保碳黑及裂解油，環保碳黑為主要產品，裂解油則作為廠內鍋爐燃料使用。積極尋找需要環保碳黑的客戶，並開發各式規格的環保碳黑。目前導入的應用產

品包括輪胎、潛水衣、網球、油墨等。依照熱裂解操作條件參數，設定可控項目，建立產品品質標準。廠內生產的多餘蒸氣，可利用管線供應其他有需求的廠商使用。

(三) 發展現況與展望

1. 台灣廢輪胎回收現況：廢輪胎回收後主要是破碎後作為燃料使用，國內年回收量為 12-14 萬噸。環拓則是回收廢輪胎後，以熱裂解方式，以環保碳黑形式循環利用，每年回收約 2.5 萬噸，佔國內回收量約 20%。
2. 遭遇困境：產出的裂解油閃火點太低，僅能廠內自用。目前裂解油作為廠內鍋爐燃料使用，但由輪胎裂解而來的裂解油硫含量偏高，多大於 1%，無法滿足環保署對於燃料油的要求(<0.5%)，即使搭配末端脫硫程序處理，也無法獲得環保署空保處的許可。這也導致即將開工的新廠區，工廠登記證一直沒法核批下來，成為自營運以來最大的關卡
3. 發展策略：
   - 提高附加價值：以環保碳黑、石墨烯及奈米碳管混合製作的輪胎，可降低滾動阻力，同時維持耐磨性，符合電動車需求，但有成本過高的問題。
   - 設備整廠輸出：已在泰國設立年處理 3 萬多噸之廢輪胎裂解廠，由於泰國汽車產業發達，因應周邊輪胎產業需求，配合供應商至泰國設廠；此外，潛水衣大廠薛長興也早在泰國設廠，可就近供應環保碳黑。
   - 廢橡膠處理商機：目前台電、中鋼每年都要淘汰橡膠輸送帶各約 5,000-6,000 噸，過去這些廢橡膠淘汰時仍堪用，會被收購後運往海外再使用，然由於各國已開始拒絕他國廢棄物，而造成國內處理上的困難。台灣每年廢橡膠可達 35,000 噸的規模。而中國大陸類似橡膠廢棄物，很多都就地掩埋，市場潛力更高。

(四) 結論

1. 台灣本土機械與材料廠商眾多，且分工精細，製程開發過程中，容易找到合適廠商，因此台灣廠商在製程系統化具有優勢。
2. 可行的商業模式是維繫公司營運的命脈，環拓科技除了投入技術研發之外，不斷尋找合作對象，利用品牌廠對於環保的需求，建立商業合作關係。
3. 回收產品可提供環保附加價值，薛長興公司所生產的潛水衣使用環保碳黑後，減少了 70%的碳足跡，對於越來越重視環保的國際企業來說，在成本可負擔的前提下，具有很大的吸引力。

4. 當國際上期望生產者負擔產品回收責任的同時，主管機關對於廢棄物資源化理應站在鼓勵，甚至是協助的立場。但環拓在裂解油再利用遭遇法規上的困難，卻有可能導致營運上的困難。

第五節 小結

一、 環境友善產品附加價值逐漸提升，回收技術發展迅速：

聯合國、歐盟紛紛提出塑料回收目標，也獲得各大品牌商的響應，上游石化業者也必須投入化學回收技術的研發。雖然使用回收或低碳足跡等環境友善產品對於業者的獲利並無助益，甚至是增加成本，但在減量目標已明確訂出後，上游廠商將會加快回收技術的發展腳步，讓回收原料成本接近原生原料，以滿足政策法規的要求。

二、 機械回收技術受限，化學回收技術蓬勃發展中：

機械回收對於回收料的收集、分選及材質單一性要求高，且生產再生產品的轉換率低，也不適用於複合塑膠，使用範圍受限。為了增加塑膠回收率，熱解和化學降解兩種化學回收方式，可將塑料的聚合物長鏈解鏈成寡聚物，或也可讓塑膠回到與原料相同的狀態。雖然所需的成本、能源耗損等都高於機械回收方式，但因不受限於回收次數，且再製後的產品與原生產品幾乎一樣，為了達到提升回收率的目標，已成為有愈來愈多的商業化製程被開發出來。

三、 化學降解法多用於單一材質塑料回收，能源需求較低：

化學降解方式多用於單一材質的廢塑料回收，除了先解聚成單體，再重新聚合成原聚合物外，也有僅解鏈成寡聚合物，再透過一些化學反應，再聚合成更具價值的聚合物，有著向上循環的概念。回收廢塑料的品質與乾淨程度對解聚的轉化率影響甚鉅，目前以 PET 瓶片解聚成 PTA 單體再聚合成 PET 的方式較為成熟，台灣也有廠商將回收的 PET 解聚成寡聚合物或單體，投入到原製程中應用到不同產品線。

四、 熱解法可將塑膠回到原料階段，可視為回收再利用的最終手段：

熱解法的熱裂解(pyrolysis)、觸媒裂解(cracking)，以及氣化(gasification)，都是把廢塑料的長鏈解鏈的更短更小，甚至斷鏈到合成氣(CO 和 H_2)的程度，可想而知所需的能量要更高，要付出更高的成本，但相對的在進料上就會較為彈性，可以同時處理多種形態的混合廢塑料，故被視為廢塑膠處理回收再利用的最終手段之一。目前台灣也有廠商將廢輪胎熱裂解成裂解油和環保炭黑，根據回收到的不同種類輪胎，累積豐厚的經驗與參數，其裂解技術在國際上亦具競爭力有商業化之製程。惟觸媒裂解與氣化部分，目前台灣還未有商業化之實績。

五、 化學回收需尋求上下游整合的商業模式：

技術成熟的化學回收技術眾多，但沒有既定的成功商用模式，主因在於塑料回收再利用偏向區域性產業，上下游的供應與需求視當地狀況而定。商業模式需包含：(1)能夠取得穩定的回收料源；(2)生產具有競爭力的產品；(3)發展循環經濟的目標需獲得下游品牌商的認同與支持。本章探討的案例中，BASF 收集歐洲各地的裂解油，再集中到位於德國的煉化一體化園區煉製所需原料及生產產品；遠東新世紀與下游品牌商有共同目標，致力於降低化學回收技術成本，主要技術方向是將回收寶特瓶及聚酯纖維解聚為 PTA，再進入生產流程製造寶特瓶或纖維；環拓科技將回收廢輪胎轉換為碳黑，生產低碳足跡的碳黑，開發環保輪胎、潛水衣等利基市場。

六、 國內發展材料循環園區需克服環保法規限制：

高雄設置材料循環園區需克服環保法令限制，否則會讓循環園區推動寸步難行，包括農業廢棄物進到工業區後變成工業廢棄物、輪胎裂解後的可燃氣硫含量太高不能使用、二氧化碳排放總量管制等。相關建議如下：

(一) 化學降解法適用於聚酯纖維回收，可推廣廠內回收再製：

化學降解法可批次處理廠內工業聚酯廢料，降解為可再次利用的寡聚物減少原物料的損失，在目前技術相對成熟的情況下，因此應鼓勵生產聚酯類產品的工廠設置廠內回收設備

(二) 政府推動材料循環園區，建議以石化業生產鏈為主，廢棄塑橡膠回收再生為輔：

不易分選的混合塑膠、都市塑膠廢棄物及廢橡膠需由熱裂解法轉換為裂解油，再經由煉製程序形成 C1-C5 的碳氫化合物，再進一步生產所需產品。依照 BASF 之模式，將裂解油做為部分煉製原料，減少對石油的使用，可達到增加塑膠廢棄物回收率的目標。

混合塑膠及廢橡膠的回收量遠小於石化產品原料需求且成本較高，難以獨立設廠回收並生產產品。材料循環園區除了可提供石化業更新製程需求，也可納入廢塑膠或廢橡膠的回收再生製程，以石化業生產鏈為主，廢棄塑橡膠回收再生為輔。石化業者使用廢棄塑橡膠裂解後的產物作為進料，可減少對石油需求，另一方面所生產的產品為具有低碳、綠色等產品附加價值，將有助於行銷。

國內目前缺乏混合塑膠的大規模的觸媒裂解或氣化的技術實例，建議由國內上游煉化大廠評估整合裂解油進料的可行性，也可洽國外廠商尋求合作 turnkey。

(三) 政府應鼓勵業者投入塑膠循環經濟，提供租稅優惠及補貼促進產業升級：

對於有意投入塑膠循環經濟的業者，政府應站在鼓勵創新及促進環境友善的立場，提供租稅優惠及補貼，讓技術能夠持續發展，促進產業升級。

(四) 政府協助廠商取得綠色產品認證，提升產品之附加價值與競爭力：

國內廠商生產的環境友善產品取得國際認證將有助於外銷，台灣在關稅障礙難以突破的現況下，可利用先進國家對綠色產品的需求作為突破口，政府若能協助業者取得綠色產品的認證，將是企業根留台灣的利基之一。

(五) 減少塑料廢棄物跨廠轉移限制：

目前政府對於塑料廢棄物跨廠移動有嚴格限制，因中小企業如果有心發展廠內塑料廢棄物循環利用，可能會受限於自身廢棄物料源不足，不具經濟規模而放棄。建議在促進塑料廢棄物的目標下，對於塑料廢棄物的跨廠轉移能夠有更彈性的作法，讓願意發展塑料循環再生的廠商，得以接收同業所釋出的塑料廢棄物，讓處理規模能夠具有成本效益。

(六) 強化寶特瓶回收分類方式：

為了增加回收寶特瓶的可用性，我國政府可仿照日本規範及宣導瓶蓋、瓶身、標籤分開回收，以及不使用有色寶特瓶，可再提升回收寶特瓶轉換為產品的轉換率。

參考文獻

1. Alliance to End Plastic Waste website (2020). Retrieved from https://endplasticwaste.org/members/
2. Agile Process Chemicals LLP(apc) website, Retrieved from https://www.pyrocratsystems.com/about-us.html
3. Anhui Oursun Resource Technology website, Retrieved from http://www.oursunchina.com/
4. BASF (2020). *Circular Economy: Decoupling growth from resource consumption*.
5. Barger, P.T., Wilson, S.T. and Holmgren, J.S. (1993). Process for Converting Methanol to Olefins Using an Improved Metal Aluminophosphate Catalyst. Google Patents.
6. Brems, A., Dewil, R., Baeyens, J., Zhang, R. (2015). Gasification Of Plastic Waste As Waste- To- Energy Or Waste- To- Syngas Recovery Route, Solid Waste as a Renewable Resource. Apple Academic Press, pp. 241–263.
7. Brown, S.H., Shinnar, R. and Weber, W.A.(2005). Process for Converting Methanol to Olefins. Google Patents.
8. Butler, E., Devlin, G. and McDonnell,K. (2011). Waste Polyolefins to Liquid Fuels via Pyrolysis: Review of Commercial State-of-the-Art and Recent Laboratory Research. *Waste and Biomass Valorization*, 2, 227-255.
9. Closed Loop Partners (2020). *Accelerating Circular Supply Chains for Plastics*.
10. Circular Economy at BASF, Retrieved from https://www.basf.com/global/en/who-we-are/sustainability/we-drive-sustainable-solutions/circular-economy.html
11. Kalargaris, I., Tian, G. and Gu. S. (2017). The utilisation of oils produced from plastic waste at different pyrolysis temperatures in a DI diesel engine. *Energy*, 131, 179-185.
12. perPETual Global Technologies Ltd. Website, Retrieved from https://www.perpetual-global.com/

13. PowerHouse Energy Group plc. Website, Retrieved from https://www.powerhouseenergy.net/
14. Plastic Energy Limited website, Retrieved from https://plasticenergy.com/
15. Punkkinen, H. (2017). *Thermal conversion of plastic containing waste: A review*.
16. Ragaert, K., Delva, L. and Van Geem, K. (2017). Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste Management*, 69, 24-58.
17. Sabic Innovative Plastics website, Retrieved from https://www.sabic.com/en
18. Schirmer, J., Kim, J.S. and Klemm, E. (2001). Catalytic degradation of polyethylene using thermal gravimetric analysis and a cycled-spheres-reactor. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 60(2), 205-217.
19. Spath, P.L. and Dayton, D.C.(2003). *Preliminary Screening-Technical and Economic Assessment of Synthesis Gas to Fuels and Chemicals with Emphasis on the Potential for Biomass-Derived Syngas*. National Renewable Energy Laboratory, USDOE.
20. Solis, M., Silveira, S.(2020). Technologies for chemical recycling of household plastics – A technical review and TRL assessment. *Waste Management*, 105, 128-138.
21. Waugh, K.C. (1992). Methanol Synthesis. *Catalysis Today*, 15(1) 51-75.
22. Zero Waste Europe (2019). *El Dorado of Chemical Recycling - State of play and policy challenges*.
23. 林其瑞、鄭承熙(2019)。化學回收產業趨勢與應用(上)。*工業材料雜誌*，396，051-058。
24. 林其瑞、鄭承熙(2020)。化學回收產業趨勢與應用(下)。*工業材料雜誌*，397，051-058。
25. 楊仁泊、劉耀仁(2017)。臺灣熱裂解處理廢塑膠再利用製油技術介紹。*工業污染防治*，141，77-95。
26. 經濟部(2017)，*循環經濟下的資源加值應用-工業循環*。
27. 行政院環境保護署，公告應回收廢物品及容器回收量。檢自 https://data.epa.gov.tw/dataset/stat_p_133 (2020)。

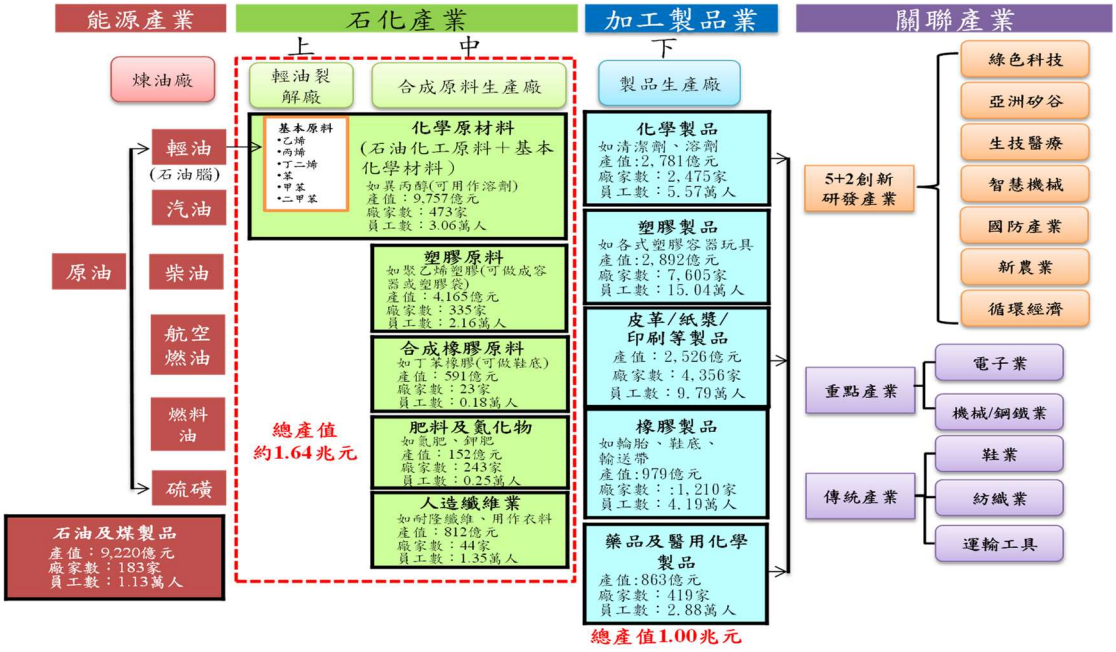
第五章　我國石化產業發展結合環境友善之策略與作法

第一節　我國石化產業發展現況與展望

一、我國石化產業發展現況

我國石油化學工業的發展係以逆向整合方式，自下游加工業需求，向上發展中、上游石化原料，進而建立國內石化工業完整上、中、下游一貫作業體系。石化上游原料為有機化學、塑膠、橡膠原料，屬資本及技術密集產業，其產能規模大為高度連續式自動生產；而石化下游製品包含塑膠及橡膠加工，製品產品範圍廣，多為中小企業、廠商家數多，屬勞力密集產業，為國內創造許多就業機會。

在我國石化產值[63]方面，若化學原材料、肥料、氮化合物、塑橡膠原料及人造纖維製造業估算(圖 5-1)，2019 年石化產業總產值約 1.64 兆元新台幣，而 2018 年廠商數約 1,118 家及就業人數約 7 萬人，石化產值占整體製造業產值 12%。若加計上游能源產業與下游加工製品產業，整體化學產業總產值於 2019 年則達到約 3.57 兆元新台幣，在 2018 年廠商數約 1.74 萬家及就業人數約 45.6 萬，占整體製造業產值 27%。



註：產值資料數據為 2019 年，廠家數與員工數為 2018 年。
資料來源：經濟部統計處(2020)。

圖 5-1 我國石化產業範疇圖

目前國內產業發展注重在高附加價值結構轉型發展，產業在創新能力與技術提升方面，可從附加價值率[64]指標來看。歷年我國石化業附加價值率變化趨勢如

63 產值以經濟部統計處工業產銷存動態調查業別中的生產價值為主。

64 產業附加價值率依經濟部主計處計算方式，為國內生產毛額 GDP/生產總額。其中生產總額為商品及服務按銷售價格計算之生產價值，扣除原材物料、半成品及服務等中間投入，則為附加價值，又稱

圖 5-2，依化學材料製造業之附加價值率來看，此業別大致涵蓋我國石化工業之上、中游，自 2000 年至 2012 年期間由於台塑公司麥寮六輕相繼投產，並以生產大宗石化品作為出口主力，使整體產業附加價值率較顯著下降，由 2000 年附加價值率 21.5%一路下探至 2012 年 8.4%。而 2012 年起經濟部工業局開始推動石化高值化政策，以協助企業自主轉型為目的，鼓勵企業提高研發投入資金、整合產業資源與異業結盟，朝技術門檻較高、未來發展潛力大之高值化領域發展，政府並提供相關專案輔導計畫與投資障礙排除等措施，而使附加價值率有較顯著提升。然而附加價值易受到原物料價格波動之影響，以 2018 年為例，由於原油價格走高，使得廠商進料成本增加，加上受到全球經濟減緩與美中貿易摩擦等影響，產品需求削弱，進而影響煉製及石化基本原料的獲利空間，2018 年化學材料製造業附加價值率相較於前一年(2017 年)下滑，約落在 19.0%。在石化產業鏈下游部分，其中以橡膠製品製造業附加價值率顯著高於整體製造業，主因我國輪胎產業面臨新興國家低價競爭，業者積極轉型使得附加價值能夠有效提升。而塑膠製品製造業與其他化學製品製造業則與整體製造業之附加價值率相近。

我國石化品貿易情形部分，台灣一直以來倚靠國際貿易賺取大量外匯，在國際供應鏈占有一席之地，尤其是石化工業，石化加工品出口值占台灣總出口值相當大的比重，對提高國民所得與促進國內經濟建設有重要貢獻，我國石化品主要貿易對象包括中國大陸、美國、日本及越南等國，其中出口至中國大陸的石化品數量占最大宗。然而過去在兩岸關係相對穩定的時空背景下，2010 年台灣與中國大陸簽屬之兩岸經濟合作架構協議(Cross-Straits Economic Cooperation Framework Agreement，ECFA)，參考東協與中國大陸於 2002 年所簽署之「東協－中國全面經濟合作架構協定[65]」之模式，並於 2010 年 6 月簽署架構協議後，於 2011 年 1 月 1 日實施早期收穫計畫（以下簡稱早收清單）期望透過 ECFA 簽訂以降低我國對最大出口國-中國大陸之關稅障礙，並透過中國大陸的關稅減免前進東協國家，促使兩岸貿易正常化。被列入早收清單之降稅貨品，主要包括農產品、石化、紡織、金屬及機械等，在石化產業部分，我國出口中國大陸石化品共計 136 項[66]列入早收清單，中國大陸進口我國石化品則為 36 項[67]，清單商品分三階段降稅，至 2013 年 1 月 1 日關稅皆降為零。對於我國以出口導向的石化產業來說，關稅是很大競爭成本，享有零關稅待遇對於提升我國石化品競爭能力有相當大的幫助。

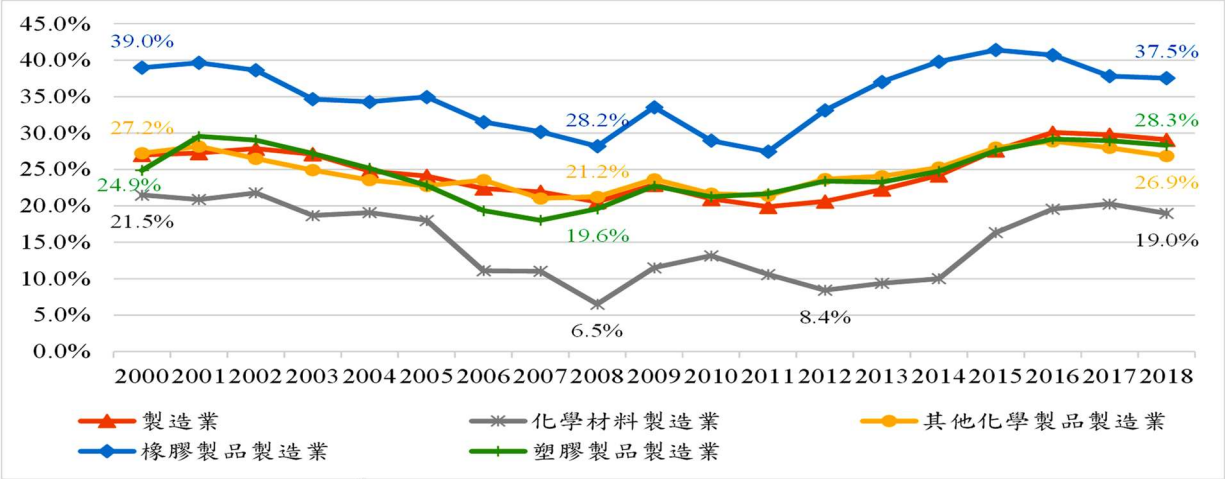
國內生產毛額(GDP)。

[65] 2002 年 11 月 4 日在柬埔寨簽署「東協－中國全面經濟合作架構協定」(the Framework Agreement on Comprehensive Economic Co-operation Between ASEAN and China)，承諾東協 6 個創始會員國（印尼、馬來西亞、菲律賓、泰國、新加坡與汶萊）與中國於 2010 年成立「東協－中國自由貿易區」(ACFTA)，東協其餘各國則承諾於 2015 年加入。

[66] 2010 年為 88 項，因稅號分類不同現為 136 項，其中稅則 HS29 有機化學品 28 項、HS39 塑膠及其製品 99 項與 HS40 橡膠及其製品 9 項。

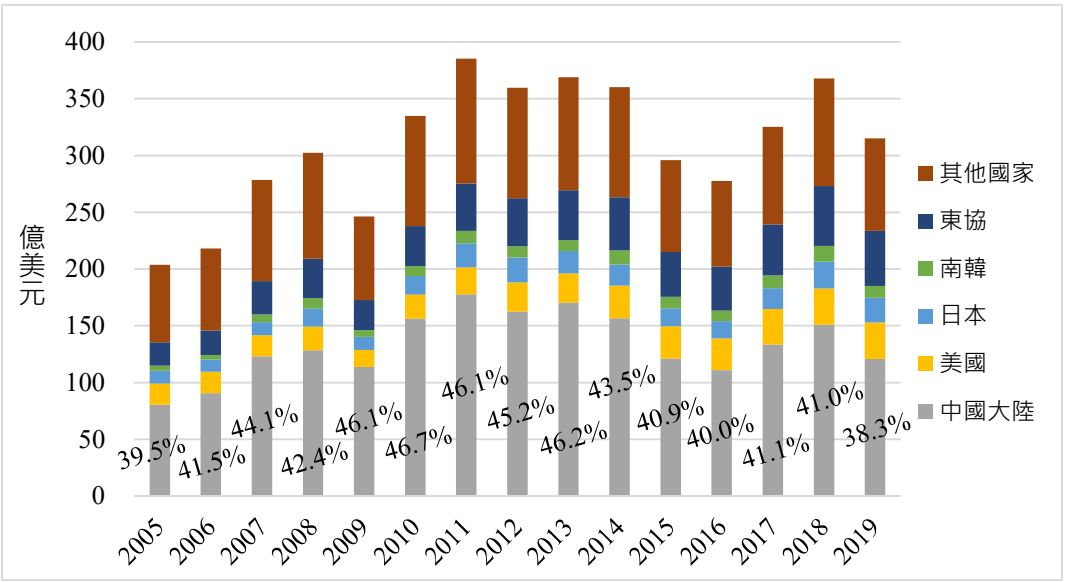
[67] 2010 年為 42 項，因稅號分類不同現為 36 項，其中稅則 HS29 有機化學品 16 項、HS39 塑膠及其製品 17 項與 HS40 橡膠及其製品 3 項。

由台灣石化出口情形來看(圖 5-3)，我國近幾年出口至中國大陸占總出口值 40%以上，而在簽屬 ECFA 後，出口占比達 46%，比重過高顯示我國石化品出口需仰賴中國大陸供應鏈發展。近幾年中國大陸石化品自給率提升，也與其他國家簽訂 FTA，如 2015 年中韓簽訂 FTA，使得我國出口至中國大陸的關稅優勢降低，2018 年爆發美中貿易戰，中國大陸整體石化品需求降低，衝擊到我國出口量，去年(2019 年)我國石化品出口額約 315.6 億美元，其中以中國大陸出口值 120.7 億最高，占整體石化出口比例約 38%，其次則為東協國家 48.5 億美元(16%)與美國 32.13 億美元(10%)。



註 1：附加價值率採名目計算。
註 2：化學材料製造業範疇包括基本化學材料製造業、石油化工原料製造業、人造纖維製造業、肥料製造業，以及合成樹脂、塑膠及橡膠製造業，大致上涵蓋石化工業之上、中游。
註 3：其他化學製品製造業包括農藥及環境用藥製造業、塗/染料及顏料製造業、清潔用品製造業、化粧品製造業以及其他化學製品製造業。
資料來源：行政院主計總處；本報告繪製。

圖 5- 2 歷年我國石化業附加價值率變化趨勢



註：石化品關稅項目包括稅則 HS29 有機化學品、HS39 塑膠及其製品與 HS40 項膠及其製品。
資料來源：財政部關務署(2020)；本研究繪製。

圖 5- 3 我國石化品出口情形

雖然石化產業為我國相當重要的產業之一，但在發展上我國石化業目前主要面臨之問題有以下幾點：

(一) 石化品出口市場過於依賴中國大陸

我國石化品出口過於依賴中國大陸需求市場，尤其在 ECFA 簽屬後幾年達到高峰，我國早收清單上石化商品出口至中國大陸於 2010 年開始比例皆超過 1/3，雖然近年來因中國大陸石化業規模不斷擴大與美中貿易戰影響，出口量下降，但依舊占有一定比例。2020 年 ECFA 已簽署屆滿十年，貿易協定到期並面臨續存問題，若 ECFA 不續約，我國出口至中國大陸之關稅成本提高，將可能喪失中國大陸市場，或是得赴中國大陸投資設廠或是東南亞設廠再出口到中國大陸或其他國家。如由台聚集團主導的福建古雷煉化一體化項目，自 2017 年底開工後，包括 80 萬噸乙烯輕裂廠與下游 EVA、EO/EG、SM、PP、SBS 的衍生品工廠，最快今年（2020 年）陸續投產。中油公司也於 2020 年 6 月與印尼國營石油公司（PT Pertamina）簽署印尼石化園區上游輕裂廠合資前約，擴大轉投資業務，將於印尼共同推動 100 萬噸乙烯輕裂廠投資案、石化下游工廠。

市場偏重單一市場也容易暴露在貿易風險中，2018 年美中關係緊張並引發貿易戰後，美國對中國大陸提出四波商品懲罰性課稅清單，中國大陸也提出反制行動，對美國加徵進口關稅，石化商品在第二、三波受到影響較大，儘管貿易戰剛開始時，台灣因為美國減少從中國大陸進口量影響，而獲得部分出口至美國的轉單效應，但貿易戰衝擊全球經濟與中國大陸整體石化品需求，需求衰退間接影響台灣出口至中國大陸商品數量，顯示我國石化商品出口過於倚賴中國大陸需求市場。

(二)疫情衝擊影響全球石化品需求

近年來傳統石化產業面臨頁岩氣開採與煉化生產一體化整合，加上新興國家如中東、中國大陸、東協石化品需求成長，各國紛紛投入石化產業鏈，擁有原料優勢的大型石油商也往下游發展，到新興市場尋求合作機會，帶動石化產能擴充，使得石化品價格競爭劇烈，市場重新組合。

然而今年度(2020 年)新冠肺炎疫情蔓延全球讓全球需求急縮，國際油價驟跌，市場對於未來石化需求看淡，預期石化主要產品價格將較先前下挫，使得價格與產量同步下跌，供過於求，造成石化公司營收減少，石化廠需要減少資本支出以因應低油價之衝擊，然而石油價格也衝擊美國乙烷長期所擁有之成本優勢，石油價格甚至低於乙烷價格，種種影響將使得全球先前規劃之石化擴充計畫，企業執行暫緩或取消計畫，疫情影響也使得企業重新思考全球化之影響。

(三)國內石化產業內在發展環境面臨多重困境

我國石化產業除了面臨外在環境激烈競爭、石化品需求波動與貿易困境以外，內在產業發展也面臨重大威脅。在廠房設備與土地方面，由於國內申請新建或擴

建廠房不易，部分石化廠已運作多年，設備老舊無法維持穩定營運，恐影響原料供應，再加上既有工業區面臨降編，降編後將面臨原建物不得增建、改建限制，可能影響石化產業鏈生存空間；在環保方面，由於環保意識提升，國內環保法規趨嚴，如高屏地區空氣污染妨害與 CO_2 排放總量管制，石化業者新建或擴建廠房容許排放量空間受到限制；在工安方面，由於工業管線途經高雄市區，管線分散輸送不易，徒增運輸成本以外，也存在工安風險。

綜上所述，我國石化產業除了須面臨國際市場競爭，國內發展也受到原料供應缺乏、土地不足、環保要求與工安管線等限制，在政府產業發展政策與相關法令不明確的情況之下，業者缺乏在台投入技術與研發資金等誘因，國內石化產業處境頗為艱難。

二、 我國石化產業必要性與未來展望

石化產業為國內產業發展基石，占有不可或缺的重要地位，石化整體產業發展完善，產業關聯效果高，支援民生工業需求各項產品，深入民眾食衣住行當中，並可應用在許多產業之中，除了鞋業、紡織業等傳統產業、電子/機械與鋼鐵等我國長期發展之重點產業，石化產業更是我國近年來發展「五加二」產業創新之根本，不論在綠能、生技、新農業或是循環經濟上，都扮演不可或缺的角色。

尤其今年度(2020 年)全球爆發新冠肺炎(COVID-19)疫情，口罩瞬間成為全球各國搶購的防疫物資之一，過去口罩大多仰賴由中國大陸單一市場出口，但在疫情影響之下，口罩產量無法滿足突然其來的需求暴增，口罩主要材料嚴重不足，但由於我國具有完整石化產業鏈,挪出產能優先製造口罩所需的原料聚丙烯(PP),再製作成熔噴不織布，讓我國口罩供應無虞。

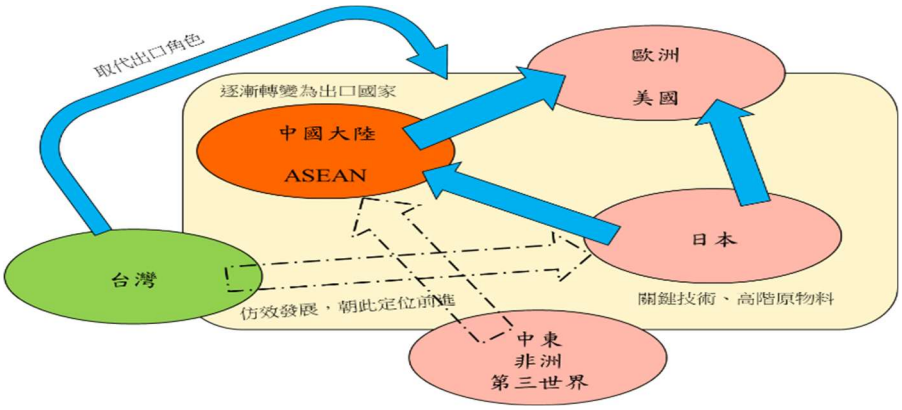
石化產業蓬勃發展下，為人類生活帶來許多便利性，然而石化產業主要生產的塑膠產品使用後所產生之廢棄物，在沒有妥善處理的情況下，對環境造成嚴重負擔，如何解決廢塑膠污染成為各國棘手的問題，為降低塑膠廢棄物對環境造成的負荷，各國政府與組織紛紛針對傳統塑膠制定使用限制，如何開發出環境友善產品以解決塑膠污染成為國際企業轉型之重點，而我國石化產業在此環境友善潮流下，如何順應國際發展趨勢，結合國內石化產業優勢，以突破貿易困境，實為產業發展重點。產業展望如下：

(一)重新定位國際產業鏈角色，發展高附加價值之材料

近期幾次國際貿易衝突使得原有的國際分工體系產業鏈產生改變，全球貿易量萎縮，如美中貿易戰，特別是中國大陸身為全世界最大加工製造國，鄰近國家如日本、韓國與台灣出口中間財，中國大陸出口衰退將連帶影響這些國家供應，尤其台灣過去有投入相當高的資金至中國大陸，經過幾十年發展形成完整供應鏈，貿易戰衝突也衝擊這些企業。而受貿易戰影響之企業可選擇續留中國大陸、朝南向發展或移回台灣，政府也提出回台投資、根留台灣等政策。

為突破台灣現階段貿易困境，加入區域貿易協定或與單一國家簽署 FTA 為解決方案之一。如以日本主導的跨太平洋夥伴全面進步協定（Comprehensive and Progressive Agreement for Trans-Pacific Partnership, CPTPP），成員國[68]共 11 國，除了新加坡與紐西蘭已與我國簽屬 FTA，其他貿易夥伴如日本、馬來西亞、越南等國並無我國簽署 FTA，彼此間仍存在著貿易障礙。而中國大陸為首的東協區域全面經濟夥伴架構協議(ASEAN Framework for Regional Comprehensive Economic Partnership, RCEP)預計將於今年(2020 年)生效，成員國[69]共 16 國，關稅逐步調降為零。這兩個貿易協定生效後，將加速亞太地區經貿整合，然而政治因素影響，台灣皆未加入區域貿易協定中，而我國主要出口之石化品項目大多為泛用石化產品，成本易受關稅影響，將進一步衝擊我國在亞太供應鏈之地位。

另一方式則是台灣石化產業藉由升級轉型，取代過去大量製造出口模式，促使台灣仿效日本發展高階原物料以及不可替代的關鍵技術，如 2019 年日韓爆發貿易戰，日本經濟產業省宣布限制半導體原料出口至韓國，其中含有製造手機螢幕與 OLED 面板的氟聚醯亞胺、光阻劑及高純度氟化氫等三種原料，氟化聚醯胺及氟化氫占全球約 9 成產量，而光阻劑也占全球約 7 成產量，半導體為韓國重要產業之一，占出口總額 20%，原料進口受阻對韓國衝擊影響相當大。若我國可朝此方向發展部分關鍵材料技術，取代原先出口大眾石化原料的模式，強化台灣石化產業在全球的重要性，突破現階段貿易困境(圖 5-4)。



資料來源：美中貿易戰升級-台灣新機會研討會；本研究繪製。

圖 5- 4 全球供應鏈及台灣因應發展方式

(二)掌握環境友善關鍵技術，並與異業或品牌需求商合作

塑膠產品為石化業者主要產品之一，但塑膠廢棄物對環境造成負擔，處理廢棄塑膠成為棘手的問題，為了降低塑膠廢棄物對環境造成的負荷，除了從源頭減少塑膠材料使用外，部分塑膠需求轉向使用對環境相對友善的替代產品，如源自於生物質原料之生物基塑膠與生物可分解塑膠，或是使用具有回收料的塑膠製品，使得傳統塑膠產業鏈與品牌商面臨轉型壓力。

[68] CPTPP 成員國包括澳洲、汶萊、加拿大、智利、日本、馬來西亞、墨西哥、紐西蘭、祕魯、新加坡與越南。

[69] RCEP 成員國包括東協 10 國、中國大陸、日本、韓國、澳洲、紐西蘭與印度。

品牌商為達到國際聯盟與各國政策目標，提出企業承諾，致力轉向循環供應鏈發展，石化產業等上游材料供應商為滿足市場需求，開始朝環境友善材料發展，優化其產品性能並擴大應用範圍，並與回收技術商合作，朝回收技術發展，以取得穩定的回收料源，並協助應用端客戶更改原有產品設計、使用方式，將新材料應用至產品上。

因應國際環境友善轉型趨勢，我國石化產業應積極朝環境友善關鍵技術發展，與國際趨勢接軌，如生質塑膠或塑膠回收再利用技術，並尋求國際企業合作機會，找到需求市場拓展新出海口。

(三)石化產業發展朝綠色環保之循環經濟模式邁進

配合政府五加二產業創新政策與循環經濟各項目標之推動，如我國政府刻正推動新材料循環園區，推動大林蒲地區遷村，重新建構高雄地區住宅與工業區布局，優化整體空間配置，遠離住宅區降低反對聲浪，並將石化新材料產業列為重點發展產業，期望透過推動能資源整合鏈結，促成能資源循環永續利用，業者配合我國循環經濟政策推動，在煉化製程上朝綠色製程、循環再生與降污減排之方向發展，並結合 AI、大數據等數位技術應用，帶動產業升級轉型與創新領域應用，讓煉化產業在我國能持續蓬勃發展，能兼顧產業發展與環境永續，讓經濟發展與資源耗損脫鉤。

第二節 我國石化產業推動環境友善發展之可行作法

為了降低塑膠廢棄物對環境造成的負荷，針對廢塑膠再利用及開發可再生循環利用之塑膠，或是使用生質塑膠作為石油基塑膠之替代品，都是各國政府與企業重要的課題，積極投入資源，以減少資源浪費與環境衝擊。各國為促進能資源永續循環利用，以既有或是新建工業園區作為體現之場域，發展出具循環型生態化的產業群聚區域，建構從動脈產業中的製造與消費到靜脈產業中的資源回收再利用的循環發展模式，藉由整合區域內不同產業或企業間各種形式的合作或交易，於工業區內形成循環鏈圈，從傳統工業園區轉型成能資源整合的生態工業園區，促使能資源循環能妥善被利用，提升使用效率及產品或服務之環境經濟效益，減緩天然能資源消耗與廢棄物排放，並有效降低環境衝擊，在追求區域永續發展的過程當中，兼顧產品附加價值與企業獲利，改善企業與工業區於公眾間的形象，確保經濟發展與環境保護。

一、 國際循環型生態化園區-以德國為例

德國的化學及相關加工工業於歐洲排名第一，是全球最大的化工產品出口國，擁有超過 55 個化工基地。德國的聯邦環境、自然保育及核能安全部（BMU）為了提高資源利用效率、資源可持續性與促進環境技術創新制定激勵性的公共政策。由企業至區域建立試驗示範物流管理模式並透過專業化的園區管理者（顧問公司）以共生合作的方式實現，如巴斯夫（BASF）與馬爾化學工業園區。

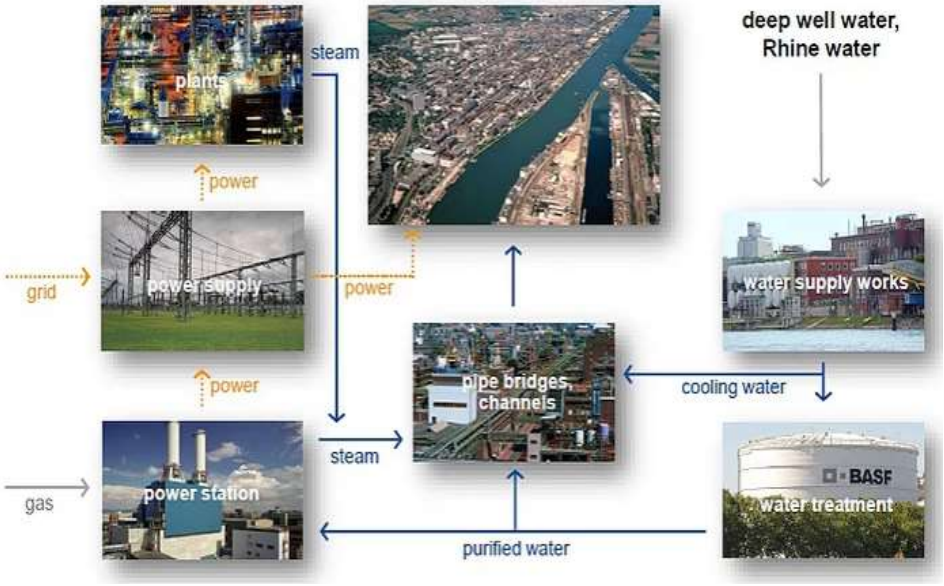
BASF 為世界第一大的化學品製造廠，總部位於巴斯夫路德維希港園區，發展全世界最大用於生產複雜而精煉的化學製品之整合式化學品生產園區，稱之為 Verbund 系統，將生產設施連接起來，園區內生產製造透過各個環節分成供給整合、能源整合與架構整合三部分：

(1) **供給整合：**園區內各個生產廠以管線連接，並用來運輸基本的生產原料以及製程的中間產物，安全快速地降低運輸成本與對環境的影響。

(2) **能源整合：**生產丙烯酸的過程中使用到的丙烯，在反應過程中會產生大量熱能，為使用這些熱能而將其轉換成蒸汽，並透過管線輸送到其他生產廠，成為重要能量來源。

(3) **架構整合：**BASF 的污水處理廠透過處理園區內 160 個生產廠、路德維希港以及其他外部客戶的廢水達成了規模經濟。

藉由以上的整合過程(圖 5-5)，使得中間產物及生產殘留的殘留物、過程產生的廢棄物變成其他生產過程所需的資源，減少運輸、廢棄物處理成本以及氣體的排放，也提升能源及資源的使用效率，創造一條互相加值的供應鏈。BASF 園區主要成功因素為地理位置與交通便利性，園區附近有萊茵河通道、碼頭、鐵路、高速公路與物流中心，以及完善的基礎設施，此外，透過民間參與公共建設[70](Public-private partnership, PPP)的方式建立化學技術中心 chem²biz，著重在化學、奈米技術與新材料研發領域。



資料來源：BASF，BASF Ludwigshafen Site.

圖 5- 5 德國巴斯夫能源整合流程

另一個德國馬爾化學園區(Marl Chemical Park)案例，園區位於德國北萊茵-威

[70]民間參與公共建設，又稱為公私合作夥伴關係、公用事業市場化或公用事業民營化，是公共建設的開發模式之一，由公共部門與私營部門合作提供公共建設的建設與服務，在實現公共建設功能的同時，也為私營部門帶來利益。

斯特法倫州，面積 650 公頃，是德國第三大綜合工業基地，也是德國化工公司贏創(Evonik)最大生產工廠所在地，園區透過民間參與公共建設(PPP)合作模式 ChemSite 建立溝通網絡，為化工業與相關價值鏈、政府、公會等提供服務，致力於化學領域進行市場行銷，維持並改善化工業及相關產業的框架條件，以及扶持中小型公司與新創企業，促進與大型企業之間的聯繫，並強化相關職能技術教育和資格認證培養人才。

馬爾化學園區內包括完善的基礎設施，如污水處理廠、廢棄物焚化爐、3 個燃氣與燃煤發電廠(汽電共生)、排放測量系統，以及周遭交通網絡連結，如公路、鐵路、貨運港口和貨櫃碼頭，以滿足業者生產運輸需求。該園區有 30 個企業，約 100 個生產工廠，產出超過 4,000 種化工產品，從基本原料如苯、乙烯、丙烯與其衍生物，以及精細與特用化學品皆有，透過物料流系統於各站點之間傳送。

馬爾化學園區成功因素除了獲得州政府與歐盟資金扶持以外，由於園區位於歐洲中心位置，透過健全的交通網絡可將產品銷到歐洲市場，且經由協調組織或機構設置作為橋樑，為企業之間提供合作平台與基礎設施管理，讓園區整合運作更具有效率。

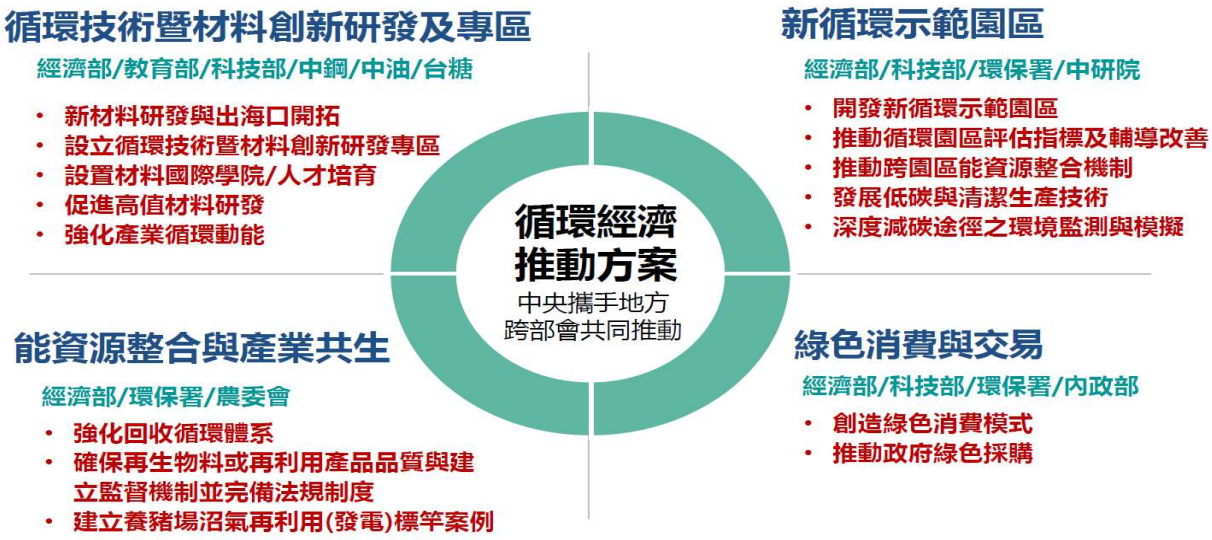
二、 我國石化產業推動環境友善發展之作法

因應國際推動循環經濟之潮流，台灣於 2016 年將循環經濟納入「五加二」[71]產業創新計劃政策，行政院於 2018 年 12 月 20 日通過經濟部提出的「循環經濟推動方案」，針對國內金屬與石化兩大重點關聯產業，以綠色生產、回收再利用與綠色消費為主要推動面向，以建構新材料創新研發體系與出海口，及推動能資源整合與循環產業共生聚落為目標，以石化、鋼鐵業重要基地—高雄為循環經濟優先示範空間，建構並落實新循環園區，並將其經驗擴散至企業、產業、既有產業園區、地區及國際輸出。循環經濟推動方案四大策略如圖 5-6。

為實現循環經濟推動方案之策略，強化循環經濟與產業發展之結合，行政院於 2019 年 6 月 5 日審查通過經濟部所提之「全國循環專區試點暨新材料循環產業園區申請設置計畫」共兩分項計畫。試點計畫是作為新材料循環產業園區之前導驗證評估與規劃參考，做系統性的規劃設計，並期望將此經驗擴散之全國既有之工業園區。新材料循環產業園區規畫將高雄大林蒲地區作為新設產業發展空間，透過綠色創新材料產業之培育研發，以零廢棄、零污染與零工傷的三零概念，追求產品低污染、低毒性、低排碳及完全循環之特性，透過廠商間共同合作，從生產、貯存、輸送、利用、回收及廢棄作整體性的規劃設計，將園區內的產品、原物料、副產品、廢料、電力與熱能等資源整合鏈結，建立能資源循環永續利用，並以園區產業共生的方式降低污染排放與環境負荷，並配合周邊重要交通與產業

[71] 五加二產業包括亞洲矽谷、智慧機械、綠能科技、生技醫藥及國防等五大創新產業再加上新農業與循環經濟。

建設，如國道七號、高雄港自由貿易港區及洲際貨櫃二期中心，搭配大林蒲遷村計畫啟動，優化高雄市工業及住宅空間布局。



資料來源：循環經濟推動辦公室(2018)。

圖 5- 6 循環經濟推動方案四大策略

在我國石化產業推動環境友善發展上，可藉由行政院「循環經濟推動方案」四大核心策略作為發展方向，讓石化產業結合我國政策推動方向，因應作法如下：

(一)參與循環技術暨材料創新研發

配合我國推動以新材料產業為發展重心，導入重新設計、製程改善、資源循環利用等概念，研發易於循環回收、高值之材料，強化產業循環動能，鼓勵業者與我國研發單位合作，於新材料創新研發中心共同參與研發，並與材料國際學院一同加強高階專業人才培育，加速與國內關鍵產業合作，強化石化產業於我國存在之必要性。以下為我國石化業未來可開發之關鍵材料項目建議：

1. 塑膠循環回收再利用

全球塑膠消費量不斷增加，衍生出來許多塑膠廢棄物問題，然而現階段塑膠回收技術選擇有限且價值低，以往廢塑膠處理大多使用機械回收法，將廢塑膠物理加工成塑膠顆粒，再重新投入回到塑膠生產製程當中進行二次加工，此法對於回收料收集、分選及材質單一性要求高，然而塑膠產品成長步伐快速，部分產品混合多種材料，也提高回收困難度，再生產品轉換率低，使用範圍受限。

隨著廢塑膠回收技術日益發展，可利用熱解法和化學降解這兩種化學回收方式提高回收率，不需事先將廢棄物分類，也能處理受污染之塑膠廢棄物，並重新投入至前端的塑膠聚合或是煉製階段。儘管處理成本與過程中能源耗損高於機械回收方式，但不受限於回收次數，可同時處理多種形態的混合廢

塑膠，透過回收機制將廢棄物轉化成高質量的再生資源，再進一步生產所需產品或是製成裂解油，裂解油可做為部分煉製原料，投入至石化廠進行煉製，減少來自石油原料的依賴，提高塑膠廢棄物回收率的目標。

2. 生質塑膠創新應用

源自於生物質原料之生物基塑膠與生物可分解塑膠，相較傳統化石基塑膠可降低石油資源消耗，減少對化石能源的依賴。在生物基塑膠方面，其化學、物理與機械性能與傳統塑膠相同，可直接取代傳統化石基塑膠並可使用現有設施生產與回收再利用，如利用 Bio-PET 製成包裝水瓶子，取代傳統 PET 瓶，可在既有的製品加工設備中將 Bio-PET 進行注塑、吹塑和擠出，並在現有設備中進行回收。

而在生物可分解塑膠方面，其性質不同於傳統塑膠，具有可分解、可堆肥之特性，透過改質技術提高其耐用度與耐熱性等。我國塑膠業者在生物可分解材料的產品發展上已具有塑膠改質、加工應用等成熟技術，開發出多樣化的應用產品，然而目前生物可分解材料如 PLA 等原料仍需仰賴進口供應。故以化石基為主之 PBAT、PBS 的生物可分解聚酯合成材料技術，可作為國內石化業者初步投入項目，目前國內長春集團已投入開發並取得初期成果，預期可提供國內自主的上游生分解材料；進一步則可以此類高分子材料為基材，進行改質與優化讓其應用特性及加工性更加合宜。

3. 高值材料創新研發

我國石化產業其技術層次與附加價值高，在特用、精密化學品或以生物技術為基礎的化學品帶動國內許多高科技產業發展，扮演不可或缺的原料與材料供應者。因此我國在既有良好石化技術基礎下，參與高科技產業所需材料之開發，如半導體、面板、綠能科技、5G 應用、電動車等相關材料，依個別產業需求進一步精進客製化，開發不同品級與性質之塑化材料，掌握關鍵技術，擴大石化產品之價值，與國際市場作出區隔，協助在嚴峻的貿易條件下取得更有力的競爭地位。

(二)進駐大林蒲新材料循環示範園區

新材料循環產業園區以高雄大林蒲地區作為基地，鄰近中油大林煉油廠與洲際貨櫃二期的石化油品儲運中心，具有地利之便優勢，可就近且穩定地供應循環園區內所需原料，降低原料管輸成本，且靠近高雄自由貿易港區，可考量國內外石化市場情形，靈活調整進料項目，亦有利於國際貿易推動，重新建構高雄地區住宅與工業區布局，提供石化業者更新製程或新建廠房區位需求，透過園區內能資源整合鏈結，促進產業多元永續利用，減少污染改善環境。將環境友善的產品或技術帶入到新材料循環園區，並整合循環經濟概念，結合動脈產業製造與靜脈產業回收，納入廢塑膠或廢橡膠的回收再生製程，以石化產業

鏈為主，廢棄塑橡膠回收再生為輔，將廢棄物資源轉換成再生資源，生產出具有低碳、綠色與環境友善等產品，或是將石化業者使用廢棄塑橡膠裂解後的產物作為進料，減少對石油需求。

(三)進行能資源整合與產業共生

整合既有園區與周邊工廠的產業資源，如原物料供應、水資源、熱能、電能等能資源整合，或是公用設備、物流與專業知識共享等，企業間相互運用未充分利用的資源繼續創造價值，進而擴大推動區域能資源整合。如與資源再生產業共同合作，將各產業之廢棄物回收再利用成為其他產業原物用料，或是將適合燃燒不易回收之廢棄物再回收產製成再生燃料供應給汽電共生鍋爐作為燃料，產出蒸汽供應給鄰近廠商，不僅能處理部分廢棄物問題，也能減少企業採購原料之成本。

而能資源整合除了帶來提高能源使用與生產效率、有效運用再生能源、發電效率優化等優點以外，也能降低 CO_2 排放量，或是在工業區中使用碳捕獲與再利用(CCU)技術等，使得 CO_2 透過分離、收集與再利用，避免 CO_2 排放至大氣中。

(四)生產符合綠色消費模式之產品，提升產品之附加價值與競爭力

環境友善材料為目前全球塑膠材料發展趨勢，未來材料生產需符合環境友善材料規範，台灣石化業身為全球產業供應鏈一環，藉由掌握各國政府對環境友善材料之規範與國際品牌企業需求，與供應鏈上下游廠商共同合作生產符合國際規範之產品，並取得相關國際認證，在關稅障礙難以突破的現況下開拓新的出海口。而我國政府在綠色消費模式下推動循環材料驗證媒合平台，以進行循環物料由產源至應用驗證，透過平台之媒合協助大宗循環材料去化，提升資源循環率，石化產業在其中也扮演不可或缺之角色，不管是廢塑膠回收再利用或是使用稻稈、蔗渣等農業廢棄物作為生質塑膠原料，透過循環再利用或是能資源化等方式處置廢棄物資源，創造廢棄物資源化價值。

第三節　我國石化產業推動環境友善發展策略

限塑政策與循環經濟為國際發展重點趨勢，聯合國、歐盟紛紛提出塑膠回收與環境友善替代產品使用目標，獲得各大品牌商與石化產業響應，透過生產者延伸責任，由企業帶頭推動減塑與推動循環經濟，讓業者改善回收品質、發展生物質或生物可分解之產品，建立永續、可循環之環境友善產品週期，減少對環境之衝擊，而國內石化業者身為國際塑膠供應鏈中重要角色之一，對此趨勢更應積極與妥善因應，不被市場變化所衝擊，以下提出我國石化產業推動環境友善發展策略建議。

一、 加速產品應用研發和商業化

企業應加強技術研發以提高產品質量，強化企業競爭力，結合研發單位共同

進行研究與設計，開發出具差異性之材料，串聯國內上中下游產業鏈，並與國際接軌，以開創台灣石化與塑膠產業的環境友善新商機與提升競爭力。在塑膠回收再利用上，針對應用廠域所需條件與考量回收料和新料物化性差異，研發新料加入回收料調整塑膠原料性質與摻配回收塑膠製品之物化性質；在生質基化學品技術上，投入發展多樣化生質料源，建置生質廢棄物、農業與森林生質原料的蒐集與運輸系統，並建立先導工廠透過提供試量產相關設備與服務，以降低在技術、組織與市場等風險；在生物可分解塑膠方面，持續朝石化料源合成的 PBAT、PBS 生物可分解聚酯的合成技術投入，供應國內穩定之生物可分解料源，降低無自主原料之風險，進一步針對此生物可分解技術上專研改質與優化技術，讓應用特性及加工性更加合宜。

二、 發展塑膠回收技術並取得穩定的回收料源

塑膠產業鏈與品牌商在限塑議題與環境友善等議題發酵下，面臨企業轉型之壓力，企業致力於轉向循環供應鏈發展，石化產業等上游材料供應商為滿足市場需求，開始朝環境友善材料發展，優化其產品性能並擴大應用範圍，並與回收技術商合作，以取得穩定的回收料源，並發展環境友善產品與技術，提升回收品質，並協助應用端客戶更改原有產品設計、使用方式，將新材料應用至產品上。而國內目前尚缺乏大規模混合塑膠的觸媒裂解或氣化之技術實例，建議由國內上游煉化大廠評估整合裂解油進料之可行性，也可洽國外廠商尋求合作機會。

三、 持續朝綠色環保之減碳模式發展

因應國際減碳趨勢，配合我國能源轉型與循環經濟政策推動，在生產製程上朝綠色製程、循環再生與降污減排之方向發展，讓經濟發展與資源耗損脫鉤，兼顧產業發展與環境永續。近年來石化產業也在能耗上做許多自願性減量措施，如改變燃料種類、製程上觸媒改善與蒸餾塔改善等，但欲新增大規模的減碳空間，除非透過興建新廠之方式，否則效果有限，故透過碳捕獲與封存技術，利用分離、收集、儲存與再利用各種方法，減少 CO_2 排放，可成為石化產業降低碳排放的方法之一。

參考文獻

1. 陳綠蔚、林茂文、林金柱，2019 年，「當前煉油石化面臨之挑戰與因應」，財團法人中技社。
2. Massard, G., Jacquat, O., Zürcher, D. (2014). International Survey on Eco-innovation Parks. Learning from Experiences on the Spatial Dimension of Eco-innovation.
3. 行政院主計總處，檢自 https://www.dgbas.gov.tw/mp.asp?mp=1
4. 經濟部統計處調查資料庫，檢自 https://www.moea.gov.tw/Mns/dos/content/SubMenu.aspx?menu_id=21041
5. 經濟部國際貿易局經貿資訊網，檢自 https://www.trade.gov.tw/
6. 經濟部工業局循環經濟推動辦公室，檢自 https://www.cepo.org.tw/
7. 財政部關務署海關進出口查詢，檢自 https://portal.sw.nat.gov.tw/APGA/GA30
8. BASF, BASF Ludwigshafen Site. Retrived from https://www.basf.com/global/en/who-we-are/organization/locations/europe/german-sites/ludwigshafen.html
9. Germany Trade& Invest(2015), Marl Chemical Park. Retrived from https://www.gtai.de/gtai-en/invest/industries/chemicals-materials/chemical-parks-in-germany/marl-chemical-park-48990
10. Chemiepark Marl. Retrived from https://www.chemiepark-marl.de/cms/cpm/de

第六章　結論與建議

本專題報告從國際法規政策、環境友善產品市場趨勢、替代產品及原料技術發展、回收技術等面向來探討，最後也針對我國石化產業結環境友善之策略提出分析，期望透過本報告的研究，能夠對於政府規畫石化產業政策提供相關參考資訊。

從環境友善產品的法規、政策及產業發展趨勢來看，政府與民間對於環境保護的重視程度持續地提升，也落實在環境政策、環評、產品生產、消費行為等各個面向。在此趨勢下，連帶影響產品製造商及品牌商傾向製造與銷售環境友善產品，無論是使用回收料的產品，或是可在環境中分解的產品。我們可以歸納出石化業及塑膠製品業若要持續發展，必須理解到企業在投資與決策時，維護地球環境永續發展與企業獲利需同時納入考量，甚至在環境永續發展上，需投入更多的重視。

從本報告的多個案例中可以得知，歐美日等先進國家的消費端對於環境友善產品需求量漸增，台灣廠商以出口為導向需配合國際品牌商，提供回收塑料所製造的產品或生物分解塑膠產品，並且需要獲得各國環保產品認證，與一般塑膠產品做出新的市場區隔，也成為國內廠商投入各種環保產品的開發的驅動力。從案例中也可以觀察到，品牌商的態度是高成本的環保產品能否持續發展的關鍵因素，需要有一定程度的承諾才足以讓製造商投入大量成本研發與投資產能，其中有兩項評估重點，一是產品需要拿到當地的標章或認證，例如食品級包材、生分解塑膠等，若能拿到標章或認證，即可與一般產品做出區隔；另一項是結合當地合作夥伴，透過合資或合組產業鏈的方式，確保長期投資意願。廠商投入環境友善產品的市場，除了生產成本與原料取得需長期投入發展之外，當地法規、產品標章、在地經營都是不可或缺的一環。

塑膠回收率低是造成環境污染的主因之一，目前僅有 PET 以機械法回收較有效益，其他像是複合塑膠、熱固型塑膠等需透過化學回收法才能夠回到原料階段，再重新製造塑膠產品。為提升塑膠回收率，本報告介紹了熱解法、化學解聚等方法，已有許多技術已達商業化階段，但受限於原料取得不易或不穩定、回收成本過高等問題，需透過循環園區與既有石化產業鏈結合，才能夠發會綜效，最著名的案例為 BASF 在德國的循環園區，將熱解後的熱解油投入煉製廠煉製石化原料，重新循環使用。

生分解塑膠、生質塑膠及捕獲之二氧化碳為本研究報告探討的替代原料或替代產品。生分解塑膠在國內已有不錯的基礎，包括上游有長春生產 PBT、PBAT 原料，下游有銘安科技、四維企業等公司製造各式生分解產品，目前主要以國外市場需求為主。生質塑膠的原料可從各種植物或廢棄物而來，可製造的化學原料也非常多，若有充足的供應量可替代現有的原油生產；然而，生質料源從種植、

採收、運輸、前處理及轉化等製程都相當耗能，與糧食爭地也是另一個問題，目前的應用會偏向少量、高值化的產品。二氧化碳捕獲是達成全球溫室氣體減量的手段之一，但受限於捕獲能耗、成本、去化等問題，目前未有較具規模的商業化案例可供參考；二氧化碳再利用目前可用於乾冰製造、碳酸飲料，純度較高的二氧化碳可用於半導體製程、醋酸製造等，其他像是製造甲烷及甲醇，再衍伸到製造化學品，在油價偏低的情境下，不具有成本可行性。

綜合各個面向的分析，我國石化產業推動環境友善發展策略，可分為三點：(1)應加速產品應用研發和商業化，以搶佔環境友善產品的市場；(2)上下游石化業者應合作開發塑膠回收技術，並取得穩定的回收料源；(3)石化業加速汰舊換新，持續朝綠色環保之減碳模式發展。

本報告最後列出以下幾點建議，提供給政府作為政策規畫參考：

一、 塑膠廢棄物料源供應穩定

企業投資塑膠廢棄物循環利用廠，需確保料源穩定，投資建廠計劃才可行。來源除了自身工廠產生之廢料及購買來自回收商的廢塑膠，亦可評估開放收受同業之塑膠廢棄物。目前政府對於塑膠廢棄物跨廠移動有嚴格限制，建議主管機關研議塑膠廢棄物之跨廠轉移之較有彈性之作法，讓有意發展塑膠循環再生之廠商，能夠增加廢塑膠來源。

二、 修改與制訂合適的塑膠再利用法規

回收後再生料的使用範疇在如食品、藥品等受到侷限，衛生福利部食品藥物管理署主管之食品安全衛生管理法所衍伸制定之食品器具容器包裝衛生標準第二條提及塑膠類的食品器具不得回收使用。然而，國際上美國、歐洲、日本等國已開始使用回收塑膠製造食品包材並有認證標章，美國 FDA 與歐盟 EFSA 都有相關食品級包材安全規範，目前全球有 44 國准許 rPET 於食品包裝上使用。

建議國內食品安全衛生法規之解釋應與時俱進並更加明確說明”不得回收使用”之範疇，讓地方政府與業者有所依循，對於促進塑膠包材的循環產業將有很大的助益。

三、 建立生分解材料與可堆肥化塑膠管理機制

政府對於生物可分解塑膠的管理投入不足，限塑政策建議修正回完全生分解材質製品不再限制，制定生物可堆肥相關的國家標準，確保材料分解特性對環境之影響性，並建立堆肥場域形成封閉之回收處理系統。

建立完善有機廢棄物(如農業廢棄物、廚餘、生物可分解、可堆肥化的塑膠)後端回收機制，以及建立堆肥場銜接去化的路徑，避免進到垃圾焚化爐直接燃燒，喪失生物可分解材料在堆肥分解後回到大自然的特性。

四、 加強製品後端回收分類

廢棄寶特瓶製造的再生酯粒(rPET)在利用上，為增加回收寶特瓶可用性，我國政府可仿照日本規範及宣導瓶蓋、瓶身、標籤分開回收，不使用有色寶特瓶，可再提升回收寶特瓶轉換為產品之轉換率。生分解材料也應與一般塑膠分開回收，以堆肥方式處理，而非進到既有回收體系，應增加生分解分類標誌，或以顏色加以區隔，以利回收。

五、 政府應鼓勵業者建構環境友善產品市場機制

環境友善產品通常成本較一般產品高，為了鼓勵業者為環境永續投入更多的成本，建議政府對於有意投入塑膠循環經濟的業者，站在鼓勵創新及促進環境友善的立場，提供研發補助、租稅優惠、回收補貼等方式來促進環境友善產品的開發。

六、 協助廠商取得環境友善產品認證，提升產品之附加價值與競爭力

因應國際環境友善轉型趨勢與國際趨勢接軌，國內廠商應朝環境友善技術發展，生產相關產品，在我國關稅障礙難以突破的現況下，可利用先進國家對環境友善產品需求作為出海口，協助業者取得國際認證，以提升產品附加價值與競爭力。

七、 鼓勵業者投入二氧化碳再利用技術

二氧化碳再利用的技術發展可透過減稅、碳交易之使用等方式，鼓勵廠商投入技術開發，同時廠商新設或更新設備時，也可以更符合環評審查的需求。

八、 企業應正視減塑已成為趨勢，應掌握發展契機

環境友善產品符合 SDGs 及環境組織的要求會越來越明確，已是產業潮流，石化及塑膠產業應有所認知，Ellen MacArthur Foundation 的新塑膠經濟宣言已非常明確宣示，帶動了後面品牌商的承諾，並以所有塑膠包裝可以百分之百回收為目標。在此目標下，台灣石化業現在應該加強塑膠回收技術，上游廠商建議參考 BASF 模式，將塑膠作為煉廠的 feedstock；下游廠商發展各式環境友善材料發展過程中，須持續投入研發深化台灣既有技術能量，而技術研發策略上，專利保護要放在研發的優先考量。

附錄

「推動環境友善產品的石化產業政策」座談會

會議紀要

一、時間：109 年 12 月 2 日(週三) 下午 14:00-16:30

二、地點：中技社會議室 (台北市大安區敦化南路二段 97 號 8 樓)

三、主持人： 陳綠蔚 執行長　　中技社

林福伸 最高顧問　　長春集團

四、引言人： 邱炳崴研究員　　中技社能產中心

五、與會專家：

官方代表：陳良棟 副組長　　經濟部工業局

劉瑞祥 副處長　　環保署廢管處

產業代表：曹　明 理事長　　石化公會

黃烈啟 副秘書長　　塑膠製品工業同業公會

曾繁銘 秘書長　　台灣化學產業協會

黃建銘 董事長　　銘安科技(股)公司

湯守立 處長　　台灣中油公司企研處

許程宇 經理　　大豐環保(股)公司

學研代表：林茂文 總督導　　台灣綜合研究院

陳哲陽 副所長　　工研院材化所

吳嘉文 教授　　台灣大學化工系

陳建緯 所長　　台灣綜合研究院

列　　席：呂智偉 高專　　大豐環保(股)公司

詹政訓 企控師　　台灣中油(股)公司

黃嘉蕙 副研究員　　台灣綜合研究院

黃琦雯 副研究員　　台灣綜合研究院

王釿鋊 主任　　中技社能產中心

許湘琴 組長　　中技社能產中心

劉致峻 研究員　　中技社能產中心

六、 會議紀要：

(一)陳綠蔚執行長 主席致詞

因應國際上的限塑趨勢及環境友善與永續發展議題，今年我們規劃了「石化產業發展環境友善產品之挑戰及策略」，希望探討國內產業應如何去因應並把握發展機會。今天這場會議將今年議題的研究成果做一個整理，請各位專家幫忙提供意見。今年是動盪的一年，不確定性很高，感謝林最高顧問，還有研究團隊的協助，讓議題得以順利完成。

(二)林福伸最高顧問 主席致詞

感謝中技社可以提供這個機會把學者專家們聚集在一起，在短時間內提出這麼多資料及建言，探討的題目切中目前產業面臨的狀況，對業界很有幫助。台灣缺乏資源，但人才資源不輸其他國家，我們要來看看業界應如何上下游共同合作，讓產業繼續發展下去。像長春生產 PBAT，也要看下游要怎麼來應用，要怎麼提升附加價值，其中有許多的技術在裡面，有很大的發展空間，適合台灣廠商來發展，呼籲大家一同結合產學的力量，走在其他國家的前面。

目前生分解塑膠，大陸規劃 2023 年 PBAT 會達到 84 萬噸，生產規模很大，成本很低，台灣廠商常常碰到大陸傾全國之力來發展就沒轍。生分解塑膠雖然產品很好，但市場很嚴苛，必須追求差異化、高附加價值。希望透過中技社的平台，大家看看能夠怎麼來合作。

(三)邱炳崴研究員 引言報告(略)

(四)曹明理事長(石化同業公會)

塑膠用料對環境、對海洋有影響，讓大家開始來思考要如何減塑，對生態、對能源使用都是挑戰，也是很好的機會。雖然減塑就會影響到石化產品的產量，不過石化同業公會很鼓勵會員來做這些工作。

台塑企業總管理處對於永續性的策略也有專門的小組來做整個企業的管理，也提出永續報告來說明做了哪些工作。要從 Flue gas 中把 CO_2 分離是目前比較困難的事，也有業者花了很多錢來做。我們也有跟成大合作，透過加氫與 CO_2 反應，轉化為甲烷，再重組為乙烷及丙烷，但是氫氣成本非常高，除非可以透過綠能產生電，再透過電解水產生氫氣，或是透過低成本的水力發電才有機會，但以目前的電價仍不可行。國外有些廠商是將 CO_2 用管線打入地底或近海封存，但台灣是地震帶，民眾可能不太容易接受這種減碳的方式。

回收與減塑的議題比較可以做，將廢塑膠裂解，像 BASF 的作法，出來的裂解油之外還有 Ash 需要分離，不過沒有毒性物質倒是比較好處理。而裂解油裡含硫量高，就需要經過加氫脫硫程序，越重的油成本就越高，而裂解油比一般的燃料油更重，需要更高的成本。因此企業要做的話，也希望政府有補助、獎勵的措施，剛剛有提到台灣的環保法令很嚴，做這些事情綁手綁腳，也要老闆同意投資，且一項高值化的產品從開發到上市，並且受到社會大眾的接受，這過程都是一連串的挑戰與風險，如果是不能回收的投資，老闆們的意願就會很低，因此會比較

希望政府能夠補助。此外，也希望學界可以投入開發更好的技術，不過台灣雖然有不錯的人才，但是設備與經費與國外差異太多，也是技術研發上的困難。

(五)黃烈啟副秘書長(塑膠製品公會)

國際上日本、歐盟等國家著重於以物質流管制方式，勾稽更透明的塑膠回收流向，儘量管制減少以能量流方式回收。廢塑膠回收再利用除了以物質流及能量流方式來管制，導入類似區塊鏈的數位金融方式分類與管制塑膠回收再利用，可能為塑膠循環的靜脈產業注入誘因。

另目前塑膠二次再生料應用於食品容器及包裝方面，在我國仍有法令上的限制，歐盟及美國均已訂出二次料使用餘食品容器及包裝的相關標準規範；目前我國相關業者相關再利用產品多有符合歐洲、美國認證標準，並且已有外銷輸出實績，建議主管機關可以考量調整相關法令。

目前國際多數品牌商提出需含 25%以上比例的再生用料，建議政府配合品牌商與容器製造業提出適用國內塑膠產業可推行之驗證及獎勵制度，逐步提高包裝添加塑膠再生料之比例，擴大推動塑膠循環利用資源化。

(六)湯守立處長(中油公司)

我認同曹理事長所提的看法，對於中油來說感受更深，中油作為國營事業有更多的程序必須去遵守，所有的投資都需要中央主管機關來核准，例如先前兩個高值化的合作計畫，推動三至五年後都結束了，關鍵因素在於無法取得建廠許可，在地方政府溝通上始終無法突破，需要主管機關的協助才有辦法。

回收會再做一次加工，會投入額外的能源，也會產生新的廢棄物，最後的終端廢棄物要如何處理是不得不考慮的，今天提到環拓科技處理廢輪胎，最後的熱裂解油就沒辦法處理，必須要有人來幫忙，但硫含量太高，即使中油公司也沒辦法來處理。但既然 2050 年要達成淨零碳排放的目標，其中運輸過程的碳排放也是主要的碳排放來源，如何減少運輸過程，會牽涉土地區劃的配置、廠要設在哪裡、那些廠商要進駐、有哪些廢棄物會產生、要怎麼回收、能不能在一開始大家就講好使用相同規格的材質，以便於回收再利用等問題需要討論。而在回收再利用的過程中，氫氣的使用大概是不可避免的，除此以外，還有懸浮微粒、VOC 的容許排放量該怎麼設定，建議要一併予以考慮。再來就是考慮如何在經濟上有競爭力，讓大家都願意投資。

目前二氧化碳捕獲、封存與再利用(CCSU)幾乎變成顯學了，中油過去曾經利用永和山的廢油氣田來當作碳封存的實驗場域，實驗幾乎完成也算成功，但因為媒體以非洲過去失敗的案例來攻擊，導致到目前為止都沒辦法繼續下去，這個問題很難解。除了民眾教育之外，媒體也是需要溝通，否則很難推動。

(七)黃建銘董事長(銘安科技)

“生分解塑膠”看起來像塑膠，用起來像塑膠，但是他不會有塑膠廢棄物的麻煩。塑膠是台灣 20 世紀民生工業的基石，物美價廉，唯一的缺點就是無法被自然分解。生分解塑膠又稱可堆肥塑膠，是為了因應不易回收的一次性塑膠製品所出

現的解答。

現況一：生分解塑膠目前國際上已有完整的可堆肥化認證標準，以確保被環境分解後的殘留物對土壤與海洋完全無害。生分解是一種概念，被環境分解的速度是可控的，可藉由不同基材的組合及製程來做調整。通常使用期限可由 3 至 36 個月期間任意調整。目前是國際社會解決一次性塑膠製品污染的最重要解決方案之一。

現況二：自廢棄物清理法制定限塑政策以來。對塑膠袋與容器等一次性用品的使用與製造有所規範，但完全可分解的製品則不在此限。國內外一些重視品牌形象的廠商為了公司 CSR 的口碑與形象，近 20 年來競相採用這種可堆肥化製品。台灣的 7-11 等便利商店也提供一次性的咖啡塑膠袋給消費者使用，無形中形成環境、廠商、消費者三贏局面。但近兩年來，環保署擴大限塑之後，將可生分解塑膠袋與傳統塑膠袋一視同仁，消費者都要付費取得，兩者變成無差異化，反而促使 7-11 等商家回復成使用 PP 製的不織布網袋，傳統塑膠廢棄物不減反增。

現況三：可堆肥化的生分解塑膠於國內的堆肥廠實際驗證過完全可分解完畢，不影響堆肥品質，但目前環保署的法規並未將生分解塑膠列入回收系統內，造成堆肥場無法合法使用此類可堆肥化產品當堆肥資材使用，實屬可惜。

現況四：國內關於生分解塑膠的環保標章與國際的可堆肥標章有所差異，希望能同步接軌，讓業者不需重複投資，或花費大額的檢測費用。

建議政府部門：

1. 建議有機廢棄物(organic waste)，如農業廢棄物、廚餘、生物可分解、可堆肥化的塑膠的管理機制，建議與堆肥場銜接去化的路徑。
2. 限塑政策建議修正回完全生分解材質製品不再限制，前提是不含傳統塑料 PS、PP、PVC、PET、PE 等具國內外可堆肥化證明者，才容許使用。

(八) 許程宇經理(大豐環保)

中技社至本階段所做的研究已經涵蓋了大部分環境友善塑膠之範疇，包含(1)回收；(2)生分解；(3)生質，並且已點出各大領域面對的問題，由研究亦可發現許多問題點並不在於石化業者的技術能力，而是在於政府的政策，以及回收策略與後續的處理措施。

回收後產製再生料的使用範疇在如食品、藥品等受到侷限，因此國內食品安全衛生法規是否也應與時俱進，例如：食品器具容器包裝衛生標準第二條提及之「不得回收使用」，需更加明確定義。

(九) 呂智偉高專(大豐環保)

台灣塑膠回收技術與制度，跟其他國家相比相對完整，且目前國際產業情勢，回收料的需求大於供給，這對台灣而言，是一大利基，但現行回收率低，計算標的來源應深入探討，擴展可回收品項和增加誘因才有機會提升。

(十) 吳嘉文教授(台大化工系)

這一、兩年 COTC 技術(crude oil to chemical)受到極大注目，世界許多知名石化大廠皆投入此一新製程的研發，或許也是個契機，增加化學品的生產，減少燃油生產。

化學解聚塑膠相較於物理法的優勢還有「可脫色」這項優點，而化學解聚的關鍵則是觸媒，如何將生物性觸媒精準的特性，結合化學觸媒快的特性，將是化學解聚觸媒未來的發展方向。

產學合作可考慮組業界-法人-學校的團隊，學校可以挑戰困難度較高的問題(TRL1~3)，某些較成熟的技術可到法人進行放大或製程優化(TRL3~5)，最後落實到業界(TRL6~7)。

（十一） 曾繁銘秘書長(台灣化學產業協會)

法規方面再生料用於食品容器就是在法規方面受阻，應該有更好的解釋或界定。

環境友善產品符合 SDGs 及環境組織的要求會越來越明確，已是產業潮流。我想我們化學工業界應該認知到：時間已經到了，不要再遲疑了。

我建議大家要看 Ellen MacArthur Foundation 的新塑膠經濟宣言，帶動了後面這些廠商的承諾，並以所有塑膠包裝可以百分之百回收為目標。在此目標下，台灣現在應該加強塑膠回收技術，我認為不管是中油還是台塑應該要去參考 BASF 模式，將塑膠作為煉廠的 feedstock，這就是我們現在應該學習的，但是我們缺少技術。國際趨勢已經很清楚了，但要如何投入還差臨門一腳，建議要組台灣隊來做這件事。

生質塑膠方面，台灣在原料的專利非常少，建議在現有原料的基礎下，建議在現有的產品持續往下深化去做，可能比較可行。

總結以上發言，提出以下三點建議：

(1) 中小企業要自己來推動很不容易，建議協會、中油、台塑、中技社來帶頭推動。

(2) 技術評估方面，作法上可以邀請國外專家來報告，再來評估哪個技術是最好的。對於塑膠回收上，須優先評估 PVC 的處理問題，避免戴奧辛的排放。

(3) 最後，建議參考 BASF 在歐洲的做法。

（十二） 陳哲陽副所長(工研院材化所)

我們一直在觀察全世界循環經濟的走向，今天談的都是我們關注的，也列入聯合國 SDG 的政策目標，連帶的各品牌商也依照目標設下各自的 milestone。目前已經宣示 2030 年所有紡織品都要添加 25%回收料，導致廠商競相收購回收料；2035 則是要求要有 100%的回收料。這樣的變革會對石化業、塑膠業造成很大改變，也是台灣廠商需要面對的。現在正是台灣廠商的機會，應該要勇敢的面對。

目前全世界的機能性紡織品有 70%是台灣出產的，所有品牌商要求台灣的代

工廠須使用回收料或生物可分解材質，染料使用生質染劑。EVA 鞋材，NIKE 與 ADIDAS 已將全回收材質列為發展目標，台灣廠商必須將目前使用的 EVA 材質改為可回收材料，是危機也是廠商的機會。台灣的車燈產業每年高達兩千億台幣，以前都是用熱固型材料，未來也要改為熱塑型的可回收材料，是傳統材料廠商的危機，也是台灣廠商非常大的商機。建議要有系統地把這些事情談清楚，然後來看要怎麼做。

PET 用在寶特瓶其實只佔 PET 總用量不到 20%，如果只依賴 PET 寶特瓶回收，其回收料的供應量不足以滿足 2035 年使用 100%回收料的需求，這代表紡織品是更需要被回收的物資，但紡織品複合了很多材料還有顏料，要怎麼分離是個問題，也是廠商要克服的，是危機也是轉機。

台灣下游產業具有技術、產業鏈、人才的優勢，也很了解市場在哪，應該有系統的分析盤點之後，了解機會在哪裡，與上游業者結合起來共同合作。

（十三）劉瑞祥副處長(環保署)

聯合國資源循環目標有三大方向：減少洩漏、提升回收及替代原生料，對應國內推動的目標就是源頭減量、資源回收及再生料使用，源頭減量及資源回收已經有初步成果方向，但再生料使用需大力推廣，全世界都在找再生料，因為台灣回收做得最好，最後都找到台灣來了。歐盟也已提出 2025 年塑膠瓶需有 25%再生成分。

推動環境友善產品可以從生活面及生產面改變既有的思維模式，例如生活面推動以租代買、共享經濟，生產面以逆向回收、再生料使用。

靜脈產業(回收業、處理業)與動脈產業(製造業)相互聯結，聯結的關鍵在「驗證的標準流程」、「再生料品質規範」、「指引手冊」，這部分是亟需大力推動的。

台灣的寶特瓶今年回收了 10 萬 7 千公噸，寶特瓶回收做出的再生料出口了 25 萬公噸，中間的差距是來自於國外的塑膠資源，經過加工後成為紡織品再出口。現在國內外對於塑膠跨境轉移有嚴格的限制，2019 年巴賽爾公約將舊塑膠列為關注性物質，只要有塑膠轉移就要特別去查驗；接下來 2021 年起就只限於單一型態、單一物質的塑膠轉移，其他的塑膠廢棄物就要以廢棄物來申報與管理，對於產業來說的確有很大的轉型挑戰，大家應該一同來思考與面對。

食品容器屬於衛福部食藥署的管轄範圍，依據食品衛生管理法來管理，並依照母法訂定食品器具包裝衛生標準，其中第二條就提到塑膠類的食品器具不得回收使用，為了這一條我們與遠東新世紀溝通過很多次，到上個月還在談，其中牽涉到很多層面，其中主要是食品界有不同的看法，不過開始有鬆動的跡象了。而環保署站在環保的立場，可重複使用且安全無虞，沒有道理不去推動，而且重複使用也可以減少三分之二的碳排放量。

（十四）陳良棟副組長(工業局)

氣候變遷及循環經濟議題已是聯合國及各先進國家共同關心及謀求改善的主題，過去化石材料(石油、煤等)主要用於燃料，引起大量 CO_2 排放及空氣、水

源、土壤、海洋等污染，造成大眾對石化產業的負面印象，對於石化產業的發展極為不利，本研究議題對石化產業極為重要。

化石原料地球儲量有限，用於生產產品是較正確的方向，石化產業是促成化石原料生產為產品的重要產業，過去著重大量生產，生產原生料供下游產業生產各項民生產品，下游產業規模較小，若產品廢棄後不做材料循環使用，大部分廢棄物最後都必須到掩埋場或焚化爐，形成環境負荷增加。期望上游石化產業除致力研究環境友善產品之石化材料外，仍須對應用這些材料所生產產品在其廢棄階段，如何回收其材料資源，再生產為其他產品，使原料在其生命週期中多次使用，到最終只剩一小部分回到能源回收。

台灣有些專注於塑、橡膠回收的廠商，但常因經費不足、法規限制、產品去化等問題，而失敗收場。在現在循環經濟推動之下，由政府在法規方面的修正，大企業資金的協助，這些回收業者必可獲得重大突破。

（十五） 陳建緯所長(台綜院)

上週工業局召開關於 RECP 的會議，會中就有業者問到大社工業區要怎麼處理，副局長提到大社勢必要轉型，可能新材料園區是未來的方向，三年內會報部處理，更重要的是這三年期間要做哪些準備與規劃。今天這個題目正好討論到這一點，要怎麼將循環產業納入材料園區的規劃，以及對環保團體的說帖，我們不只要講高值化、差異化，也要對 SDG、永續發展提出規劃。當天與局長也有提到原料可由中油就近提供，洲際貨櫃二期可以來做一些思考，剩下的就由業者評估要投入哪些產品。也有談到半導體、5G 的原料供應，甚至塑膠回收也可以作為規劃的其中一部份。

目前缺乏整合的回收業者，未來回收料越來越少，也可能散布在各個地方，須要有整合型的業者來做收集，或是有一個回收的機制，這部分可能需要政府出面來做一些獎勵。

（十六） 林福伸最高顧問 主席結語

機械回收是最簡單的回收方式，未來石化原料來源會多元化，可能有生質原料可以做乙烯，另外很大一塊會從回收料來，我們台灣石化業應該要學習 BASF 走化學回收，很多塑膠材料不是像 PE、PP 那麼單純，像添加碳纖維、ABS 等是很難透過機械回收來處理的，可斷定未來會走向化學回收。而化學回收就需要跟石化業來結合，以 PET 裂解來講，會變成 EG 和 PTA，就很適合跟既有的聚酯廠結合，如果回收回來是裂解油，就要跟煉油廠做結合，可以將蒸氣與電充分利用，減少能源損耗，成本可以節省 30-40%。

技術研發策略上，首先專利保護要放在研發的第一位，像是現在 PBAT 的製程就已經掌握在國外大廠手上。而觸媒技術也需要保有，要不要自己生產是另一回事，若是給別人生產比較便宜，也不須自己生產，但保有觸媒技術與專利可以更有競爭力。

（十七）陳綠蔚執行長 主席結語

在我們的報告裡有分析許多技術，有一些是技術上具可行性，但成本仍偏高，是不是政府可以有一些補助或獎勵措施，過去產業發展過程中，有很多成本都是轉嫁到環境，現在開始要將成本回到內部，我想需要大家共同來努力。今天也提到回收再利用是很重要的課題，包括標準制定、驗證等，技術方面也談了觸媒、專利等課題。在環境法規方面，不管是未來對於塑膠使用的限制也好，或是對於再生料的掌握，需要政府與業者共同討論，讓產業鏈可以完善。

最後，我們今天談的內容，會後請能產中心同仁將大家的發言紀錄下來，系統性的整理後，我們會放在年底發表的專題報告中。

七、 散會：16:40

國家圖書館出版品預行編目(CIP)資料

環境友善產品與石化產業發展策略 / 林茂文, 陳建緯, 黃琦雯, 黃嘉蕙, 曾繁銘, 范振誠, 陳明君, 張怡雯, 温俊祥, 黃淑娟, 張珮菁, 張光偉, 汪進忠, 陳誠亮, 王聰偉, 邱炳崴, 許湘琴作 ; 陳綠蔚, 林福伸主編. -- 臺北市 : 財團法人中技社, 民109.12
172面 ; 20*29.7公分
ISBN 978-986-98659-9-9(平裝)

1.石油化學業 2.環境保護 3.產業發展

486.5 109019539

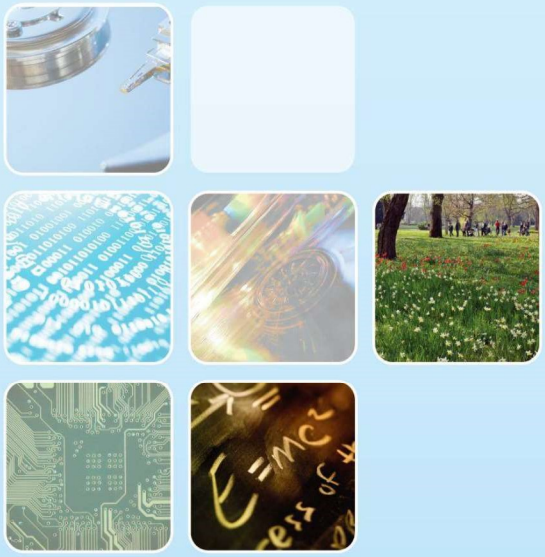
版權聲明©財團法人中技社

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和臨界的界定。此外，文中觀點與所提及的貿易名稱或商業程序，並不代表財團法人中技社的觀點或政策。



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