



全球碳中和趨勢下 臺灣材料產業的新契機

工研院材料與化工研究所經理 / 吳正宇
工研院材料與化工研究所管理師 / 林幸慈

關鍵字：碳中和、淨零碳排、永續材料科技、循環經濟

摘要

全球氣候行動，碳中和議題成為國際共識與永續發展的首要目標。臺灣以出口為導向且位居全球供應鏈的要角，對淨零碳排趨勢將首當其衝，影響甚巨。本文將從國際碳中和趨勢、臺灣面臨之現況等面向檢視產業將會面對到的問題，進而歸納可創新技術之方向，透過材料科技研發創新技術，為臺灣產業淨零轉型解鎖，並與全球同步邁向淨零排放之未來。

一、全球永續挑戰

聯合國秘書長 Antonio Guterres在「2020年全球氣候狀況（State of the Global

Climate 2020）報告」發表會上呼籲2021年將是全球氣候行動成敗關鍵一役，各國應有積極作為與具體的進展，以穩定氣候並結束人類與自然的戰爭[1]。

回顧疫情籠罩的2020年，Covid-19爆發讓許多國家進入鎖國封城的狀態，停工、停飛讓人類經濟活動一度停擺，打亂全球化的製造業供應鏈模式（圖1），雖然瞬間讓碳排放大幅下降5.8%（約20億噸）[2]，卻也更確定經濟、產業的發展與碳排放有高度關聯（圖2），而高碳排所導致的全球暖化、極端氣候，也令人類陷入無法招架的災難性危機。根據世界氣象組織報告，2020年暖化溫度高於工業化前1.2°C、CO₂濃度攀升至410.5 ppm等多項氣候指標持續惡化，而氣候變遷

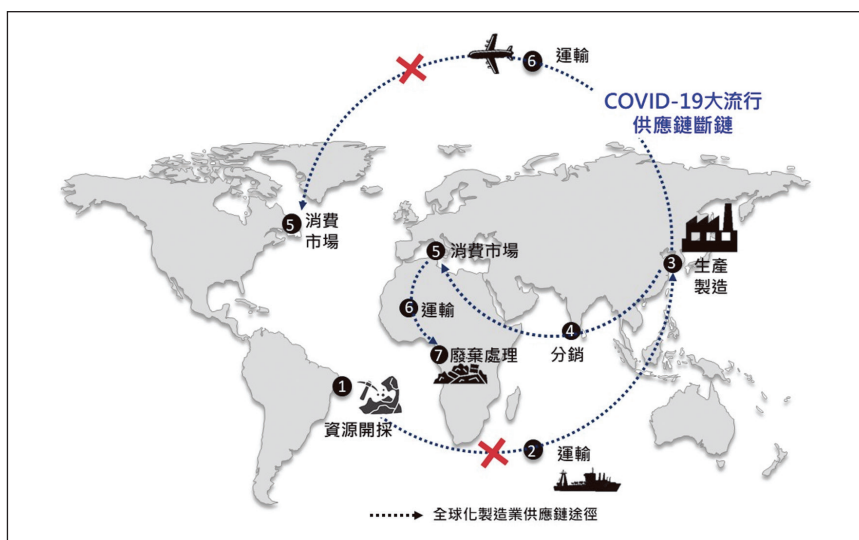
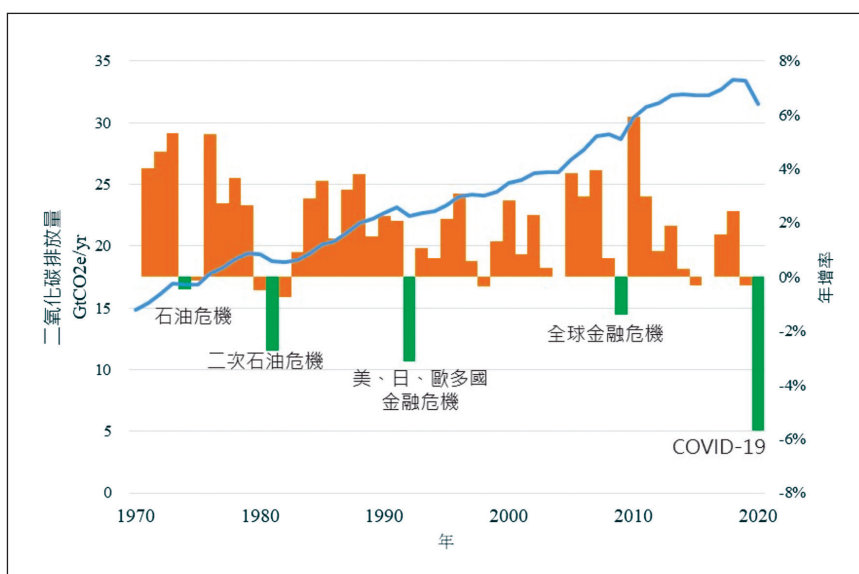


圖 1 全球化的製造業供應鏈模式



資料來源：IEA；Le Quéré et al. (2021)；工研院材化所整理 (2021/06)

圖 2 1970-2020 全球碳排放變化 [2] [4]

帶來的洪水、乾旱與森林大火等，不僅讓社會經濟發展受影響、流離失所的人口增加、

糧食安全問題衍生，還造成海洋生態系統的破壞[3]。這股大自然反撲的力道，迫使人類



必須大步邁向全球永續發展，正面積極的迎接一系列的威脅與挑戰。

碳中和是永續發展的關鍵，2015年「巴黎氣候協定」要求全球暖化溫度控制在 2°C 內；2018年科學研究發出氣候緊急警示，將溫控目標推向 1.5°C 以內，致使碳排放目標於2030年需減量45%（較2010年），並於2050年達到淨零排放[5]。各國也依此作為緩解氣候危機的重要指標，甚至立法且設定更積極的碳中和目標，從國家、城市到企業機構，這關鍵的一役沒有人是局外人。

二、國際碳中和推動現況與發展趨勢

截至2021年5月底，聯合國氣候公約會員國共197個，巴黎協定締約國有191個，提交國家自定貢獻（Nationally Determined Contributions, NDCs）則有192個國家，其中有80個國家首次提交，有8個國家做第二次提交，而非洲厄利垂亞雖尚未成為巴黎協定會

員國，但也已提交NDCs [6]。隨著碳中和議題在全球蔓延，已有132個國家將淨零碳排放目標納入政策議程討論、政策擬訂或立法，有84個城市、34個地區、419家企業提出淨零承諾[7]，設定科學基礎減量目標，或加入「碳揭露專案」、「Race to Zero」計畫和「氣候雄心聯盟（Climate Ambition Alliance）」等，顯示各國對減碳的強烈共識與決心。

在巴黎協定簽訂滿五周年前夕，全球最大碳排放的中國宣布2060碳中和，而後日本、韓國也陸續發布2050年脫碳；此外美國也在拜登上任後重新加入巴黎協定，並主導舉辦全球氣候峰會。於該峰會中，各國領袖也為大幅降排做出新的承諾，表1彙整全球主要國家減碳目標：

為達成2050淨零排放，國際間減碳二大作法：一為能源結構的調整，大幅提升能源效率，擴大再生能源，發展新興能源技術與應用。例如：氫能、低碳合成燃料擴大應

表 1 全球主要國家減碳目標 [8]

國家	目標
美國	2030年溫室氣體排放量較2005年減少50~52%；2035年零碳電力供應（提出2兆美元法案，助美國轉向潔淨能源）；2050年碳中和
歐盟	2030年溫室氣體淨排放量比1990年減少55%（原為40%）；2050年碳中和
中國	2030年碳達峰（碳排放量達到歷史最高值後，進入下降階段）；2060年碳中和
日本	2030年溫室氣體排放量較2013年減少46%（朝50%努力）；2050年碳中和
加拿大	2030年溫室氣體排放量較2005年減少40~45%；2050年碳中和
英國	2035年溫室氣體排放量減少78%（相較1990年）；2050年碳中和

資料來源：全球氣候峰會總結；工研院材化所整理（2021/06）

用範圍；運輸、工業與建築電氣化發展，結合再生能源發電；永續生質能前期在運輸部門，後期在工業部門應用；碳捕獲再利用與封存系統（CCUS），及其他負排放技術（例如BECCS）[9]。一為產品生產製造模式的改變，從產品生命週期碳足跡著手，包括提升材料使用效率、生產製程效率以及產品壽命終止廢棄再循環率，發展低碳/零碳新材料技術、新製程優化設計、新商業模式。例如：循環材料rPET採用、導入綠能（氢能、沼氣）生產製程、CO₂料源的化學技術開發等。

三、2050 淨零碳排新時代，臺灣準備好了嗎？

臺灣在2015年發布施行「溫室氣體減量及管理法」，規範臺灣溫室氣體排放量2030年

較2005年減少20%；2050年減少50%（圖3）[10]。然而在全球氣候行動大步邁向淨零排放，國際間將祭出「碳邊境調整機制」的貿易政策態勢已日漸明朗，各大品牌業者也加入零碳排行列訂定綠色供應鏈規範，對於我國以製造業見長，且高達65%的GDP需仰賴外銷的出口導向國家，要持續保有全球供應鏈要角之地位，在溫室氣體的減量上，勢必調整內部作法以因應淨零的國際趨勢及各項要求，加速並提升目標以達成2050碳中和。若不趁此趨勢大破大立，恐成為我國經濟發展的一大隱憂。

因此，政府已積極與各界展開對話，並盤點國內碳排放現況，期能找出最符合臺灣未來永續發展的氣候治理路徑，以及運用新興科技為產業帶來永續發展新契機。

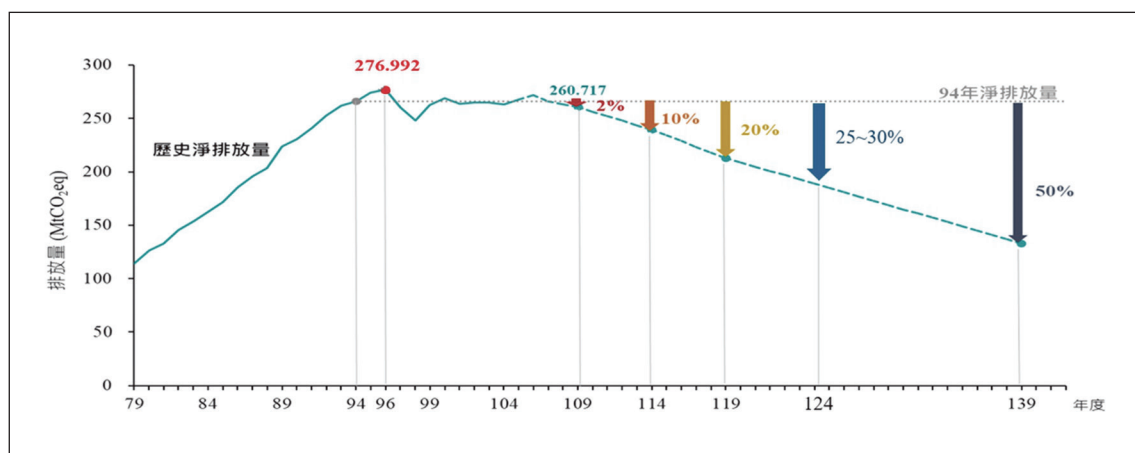


圖 3 國家溫室氣體階段管制規劃 [10]



（一）我國製造部門排放現況

2019年我國整體電力消費與非電力消費的排放（含不確定性分析）約為2.6億噸，其中製造部門排放約1.27億噸約佔整體排放49%，若再加上製程中的排放約2.25千萬噸，則總數約為1.496億噸佔整體排放51%[11]。若以排放來源來看，2019年製造部門的排放來源及佔比如下：

- 電力消費（63%）：泛指使用電力換算回發電時所排放數量。
- 非電力消費（22%）：泛指使用之非電力消耗之能源，如鍋爐使用煤炭、燃料油、天然氣等化石燃料燃燒後排放 CO₂e 等。
- 製程排放（15%）：泛指製造過程中，因為化學反應或相關作業產生之排放氣體，如電子業蝕刻製程含氟氣體排放（PFCs），鋼鐵、水泥、石化製程原料化學反應釋出等。

（二）我國製造部門減碳策略

面對2050碳中和目標，臺灣企業已紛紛響應，政府也要求各部門進行評估，並提出相關因應對策逐步達標。針對製造部門的碳排放，提出以下解決策略並逐步執行：

1. 能效提升：節能 / 能源管理、能資源整合、智慧化能源管理等
2. 燃料轉換及電氣化：轉換低碳燃料（天然氣）、廢棄物衍生燃料（SRF）、氫能、製程及供熱設備電氣化等

3. 循環經濟：廢棄物循環材料高值應用、再生料替代原生料、CO₂捕獲再應用、汽電共生園區能資源整合等
4. 創新技術：模組 / 材料 / 製程重新設計、製程 VOC 削減技術等

四、材料技術創新，為產業淨零轉型解鎖

材料科學為工業之母，我國材料與化工產業亦為臺灣經濟的重要貢獻者，因此在產業邁向淨零轉型的過程中，工研院材化所不但不能缺席，更致力於淨零碳排技術的研發，並著重在源頭材料組件與製程，導入循環經濟與減排設計的創新應用，以達到零碳甚至負碳的效益。目前已有相當的進展與研發成果，期能成為產業淨零轉型的助力，與產業界共同提升減碳效果。

列舉幾項技術成果如下：

（一）二氧化碳捕獲與再應用技術：

全球現在約有40種以上之CO₂捕獲系統，平均能耗約為3.5 GJ/ton-CO₂，工研院材化所開發新的化學吸附劑配方（sterically hindered amines）可將能耗控制在3 GJ/ton-CO₂以下且成本小於\$32 USD/ton-CO₂。目前已於多家業界進行二氧化碳捕獲場域實證技術及設備建置，包含於臺中火力發電廠設置20公斤級/日的CO₂捕獲系統，已運行超過5,000小時；另外，與國內石化廠也展開100公斤級/日CO₂捕獲系統之場域驗證。



圖 4 臺中減碳技術園區 - 碳捕集場域驗證

並透過CO₂轉化技術開發甲醇/NIPU/PU/多元醇的環保應用材料產業技術，串聯相關應用產品，協助產業除降低直接碳排外並開拓綠色循環新應用商機。

(二) 綠色生質聚酯材料：

呋喃二甲酸（Furandicarboxylic Acid, FDCA）是聚呋喃二甲酸乙二酯（Polyethylene Furanoate, PEF）的主原料，而生質聚

酯材料PEF比現有的PET包裝材料具有更高的氣體阻隔性，其阻氧氣能力高於PET材料達10倍以上，因此PEF的未來應用與市場規模極具潛力。然目前FDCA市場皆被國際大廠avantium、SYNVINA、DUPONT等公司壟斷。

工研院材化所目前已建立百公斤級Pilot連續式FDCA試產技術，並已協助遠東新公司取得高品質生質單體，建立PEF聚合研發能量，改善PEF產品品質，拓展PEF產品應用範圍。此外，針對上游料源，更協助國內上游廠商投入FDCA之原料5-羥甲基糠醛（HMF）製程開發，建置實驗室規模製程設備，加速HMF工業化製程之開發。

目前針對綠色生質聚酯材料，已串聯國內廠商建立臺灣PEF生質聚酯產業聯盟。透過上中下游產業鏈連結，技術創新與應用一體，取得全球綠色生質材料重要地位。

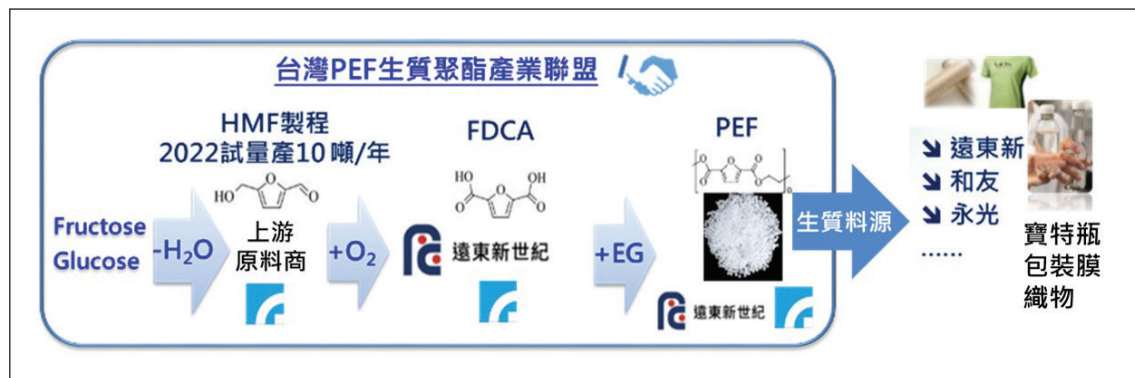


圖 5 臺灣 PEF 生質聚酯產業聯盟

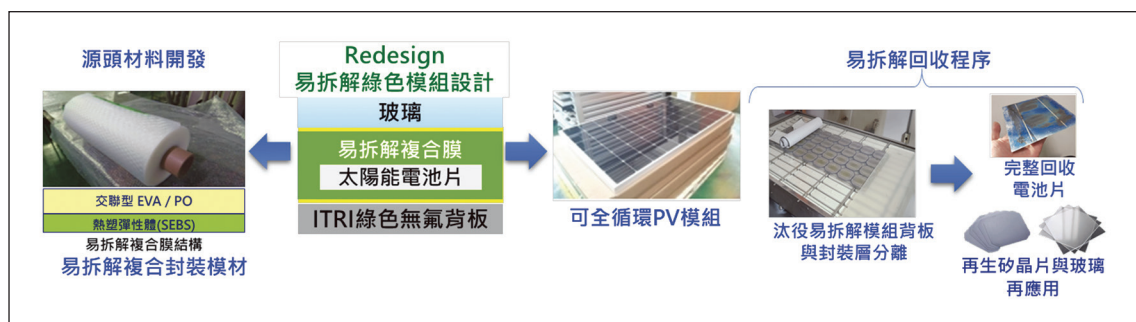


圖 6 全循環 PV 回收價值鏈

（三）太陽能模組材料資源高值化技術

碳中和趨勢下綠電將逐步取代現行之火力發電，其中又以太陽光電系統發電作為重要綠電來源，全球大力推動普建太陽光電系統下，汰役的廢棄模組是近年來國際環保與循環經濟重要課題，預估全球太陽能廢棄模組（常規汰役與災損廢棄）在2030年將超過600萬噸，而臺灣於2023年累積將超過1萬噸，若未及早因應，模組廢棄問題恐持續擴大，將阻礙國內綠能產業發展之機會。

工研院材化所打破傳統掩埋處理模式，從源頭材料檢視，導入易拆解太陽能模組 Redesign，研發新型複合熱塑封裝材料，啟動易拆解回收程序，打造全循環PV回收價值鏈。所開發的綠色製程，可將回收模組的回收率提高至95%，分別轉化為高純度的超白玻璃粒料（含鐵量小於0.01%），並回用於玻纖、平板玻璃等一般玻璃產品製程；回收之長晶製程矽輔料（5N）與特用銀化合物等也

都可回到原製程或提供其他高值化應用等，以此技術建立退役模組循環再運之運作模式。目前工研院材化所開發之技術已可與國際（例如：歐洲Veolia太陽能電池廢棄模組處理）並駕齊驅。

（四）可循環熱固型樹脂合成設計

我國每年生產15萬噸PCB用銅箔積層板用樹脂與3萬噸熱固性複合材料用樹脂，傳統熱固性樹脂（如：環氧樹脂、酚醛樹脂、不飽合聚脂等），因架橋網狀結構無法熱融或溶解，只能掩埋或燃燒處理，造成環境負擔。面臨未來碳中和趨勢品牌商開始要求供應商提供可循環物料及再生物料下，需要技術創新應對。本所從源頭重新設計可循環熱固型樹脂分子結構，突破傳統熱固型樹脂無法重複製造之技術瓶頸，並擁有高耐熱、高環保、高機械強度等特性，新型熱固型樹脂可應用在PCB、碳纖維複合材料、接著劑及塗料等產業，目前已與國內銅箔基板廠商和

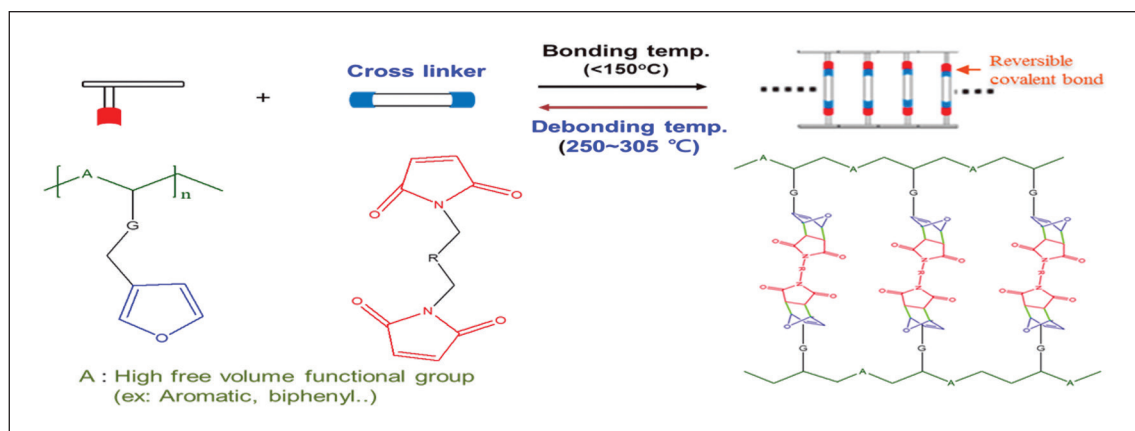


圖 7 工研院材化所開發可循環熱固型樹脂

印刷電路板廠商進行加工製程相容評估，未來將協助臺灣材料產業搶攻全球綠色商機。

五、結論

今年4月由美國拜登政府所舉辦的全球領袖氣候峰會中，各國政府皆宣示了未來碳中和的時程及其階段性目標；知名的領導品牌如Apple、Nike、三星等也都制定了企業的碳中和計畫並同步要求供應商共同實施。從國家的政策與品牌商的經營策略來看，淨零碳排綠色經濟已成為顯學。

臺灣為外銷導向之國家，經濟發展隨著出口國家及下游品牌商之策略影響，若不積極於淨零碳排規劃部署，對於未來發展影響甚深。

能源效率提升、燃料轉化及電氣化、循

環經濟及創新技術是未來重要戰略發展項目，其中材料科技的創新更可從源頭改變生態鏈價值體系，臺灣材料產業勢必要好好把握碳中和趨勢之經濟脈絡，檢視既有能量透過循環經濟概念導入創新技術，立足臺灣引導全球供應鏈，勢必可開創淨零碳排之產業新契機。

參考文獻

1. António Guterres, "Opening remarks at press conference to launch the "State of the Global Climate in 2020 Report" ", available on web: April 19, 2021, <https://www.un.org/sg/en/content/sg/speeches/2021-04-19/remarks-press-conference-launch-state-of-global-climate-2020-report>.
2. IEA, Global energy-related CO₂ emissions, 1990-2020, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-energy-related-co2-emissions-1990-2020>
3. World Meteorological Organization, "State of the Global Climate in 2020", WMO, (2021), WMO-No.1264, ISBN 978-92-63-11264-4, available on web: https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=21880#.YH2STpMzZR4
4. Liu, Z., Ciaia, P., Deng, Z. et al. , "Near-real-time monitoring of global CO₂ emissions reveals the effects of the COVID-19 pandemic", Nat Commun 11, 5172,



- (2020). <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18922-7>
5. IPCC, 2018: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)].
 6. UNFCCC, “Nationally Determined Contributions (NDCs)”, available on web: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/nationally-determined-contributions-ndcs/nationally-determined-contributions-ndcs>
 7. Energy & Climate Intelligence Unit, “Net Zero Tracker”, available on web: <https://eciu.net/netzerotracker>
 8. The White House, “Leaders Summit on Climate Summary of Proceedings”, available on web: April 23, 2021, <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2021/04/23/leaders-summit-on-climate-summary-of-proceedings/>
 9. IEA, “Energy Technology Perspectives 2020”, available on web: <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020>
 10. 蔡玲儀,「我國溫室氣體減量推動辦理情形」,行政院環保署,行政院能源及減碳辦公室,109年第1次委員會議,109年12月。<https://www.ey.gov.tw/File/FA4B4A35EE23E674?A=C>
 11. 經濟部能源局,「108年度我國燃料燃燒 CO₂ 排放統計與分析」,109年7月。https://www.moeaboe.gov.tw/ecw/populace/content/ContentDesc.aspx?menu_id=12036