

碳費（稅）政策對綠色技術與創新及 GHG 減量之驅動——來自台灣與 OECD 成員國綠色成長指標表現的啟示

吳珮瑛

台灣國際研究學會 理事長

摘要

本文嘗試全面的探討為因應氣候變遷、產業面對碳費（稅）課徵的減碳政策壓力，突破層層市場、轉型與結構障礙，達成非自發性的 GHG 或 CO₂ 排放減量，及對綠色科技與技術創新潛在的驅動來源，再由 OECD「綠色成長指標」資料庫中足以反應本文所關切的碳排放及各層面的綠色支出數據資料進行初探。藉此全方位架構、作為未來檢視台灣碳費（稅）費（稅）率之高低，對特定供應鏈的 GHG 或 CO₂ 減量之影響，及對特定產業及之綠色減緩或調適技術 R&D 支出等各層面之牽動、衝擊及觸發之準備。各國經驗顯示、碳費（稅）政策是政府常用的有效減碳政策工具之一，若要帶引產業進入綠色科技或是綠色技術的新境界，除碳費（稅）政策外、尚須輔以需求拉力或技術推力多元創新政策。至於政策組合的搭配除考量產業特質、產業規模、地區、國家或區域的經濟發展程度，人們對環境管理相關制度與規範的熟識度、文化差異等諸多因素外，在精心設計的碳費（稅）費（稅）率之收入再利用，應考量各層面的利害關係人、在收入中立下補助特定類型技術如再生能源或低碳或綠色技術投資，以發揮碳費（稅）收入再利用的綠色紅利及藍色紅利之雙紅效果。此外，碳費（稅）開始課徵的初始階段，費（稅）率設定應設在較低水準、再逐步提高，以便企業有時間累積綠色創新技術所需的資金。而碳費（稅）課徵於供應鏈原料投入的初始階段，GHG 或 CO₂ 的減量效果比起課徵於末端產品的效果來得顯著；又當碳費（稅）費（稅）率較高且開發成本較低，則產品的綠色度會隨著費（稅）率的提升而增加。透過貿易連結不同國家供應鏈的結點與成員，比如 EU 即將施行的 CBAM，

影響所及除可能改變原來在 EU 交易體系成員國的採購策略外，同時也會影響 EU 成員國與非 EU 成員國之間有更佳的採購組合，使得排放承擔責任相對小的非 EU 國家與 EU 建立了新的供應鏈關係，如此將使所有產品價格提升。由於供應鏈中的任一階段均可減少 GHG 或 CO₂ 的排放量，GHG 主要來源的製造業與能源部門效率的提升，可採循環經濟的閉環供應鏈機制，循環經濟透過價值鏈合作，減少浪費、增加回收、多採用再利用及恢復原料以重組產品或服務。最後，初步檢視 OECD「綠色成長指標」發現，1990 年至最新 2021 年、台灣整體與 OECD 的 38 個成員國各國平均一樣，在氣候變遷調適技術開發、調適技術擴散及減緩技術擴散上有相當投注；而台灣、38 個 OECD 成員國及 OECD 整體成員國平均，此台灣在此三大類專利族數合計排名第 5，僅次於美國、日本、南韓及德國，又台灣此三大專利族數合計亦比 OECD 所有成員國之平均來得高，主要源自氣候變遷調適技術擴散專利族數的貢獻，但氣候調適技術開發專利族數量卻相當有限，台灣即便擠身為已開發國家，不論是沒有能力或無意願開發新的綠色調適技術，台灣的調適技術開發無可避免必須仰賴其他國家。

關鍵詞：供應鏈、循環經濟、市場失靈、政府失靈、需求拉力創新政策、技術推力創新政策、碳費收入再利用、投資洩漏、碳邊境調整機制、雙紅效果

壹、前言¹

為了達成淨零碳排放（net-zero emissions）或是低碳經濟（low-carbon economy），一般認定、以現有步伐所執行的創新即可實現淨零（Cervantes, et al., 2023）。然亦有認為，社會整體必須大刀闊斧執行前所未有的技術變革才有可能達成，綠色產業政策（green industrial policy）正是可以加速這些相關技術發展與部署的工具，因而被視為達成淨零目標系統性與綜合性的必要手段，因此，經濟合作暨發展組織（Organisation for Economic Co-operation and Development, 以下簡稱 OECD）乃於 2009 年 6 月 25 日的部長級理事會議（Ministerial Council Meeting, 以下簡稱 MCM）中通過《綠色成長宣言》（Declaration on Green Growth）、制定了「綠色成長策略」（Green Growth Strategies），此一策略於 2011 年 5 月正式公開；所謂綠色成長（green growth）意指在促進經濟成長和發展的同時，自然資產仍可持續提供人類福祉所依賴的資源和環境服務（OECD, 2011a；OECD, 2024a）。

於是，決策者的核心問題則是如何制訂有效政策、設計關鍵的變革性技術，以加速碳排放之減少，並在不降低競爭力下、提升具包容性和有效性、以能掌控經濟風險（OECD, 2024a）。又此種技術變革是要發展所謂的綠色科技（green technology）、亦簡稱綠色技術（green tech）、或稱為邁向潔淨能源生產（clean energy production），這些技術泛指使用更少的資源、使用替代燃料、以及採用對環境有害程度低於化石燃料技術之生產過程或是所有原料和零件、與所製成的產品，及分配到上游的製造商和下游各銷售環節的供應鏈（supply chain，以下簡稱 SC）（McKinsey & Company, 2022；Obobisa, 2022）²。依聯合國定義所謂綠色科技或技術，是指那些「比其替代的技術更保護環境、污染更少、以更永續的方式利用所有的資源、回收更多廢物和產品、並以更可接受的方式處理殘餘廢物的技術」（United Nations Conference on Trade and Development, 2023）。而前述定義與聯合

¹ 本文將以碳費（稅）指稱一般的碳稅，因在原理上碳費與碳稅是雷同的，由於台灣的政策為碳費，所以在一般的說明中以碳費（稅）並稱，除非是特別針對某一個國家的政策，才針對該國所採行政策而使用碳費或碳稅之別。

² 供應鏈與價值鏈（value chain）不同，價值鍊是指涵蓋創造一件可銷售產品的所有步驟，此不僅包括實體零件，還包括各種可歸類為「知識經濟」的增值活動，比如創新、設計、行銷和銷售，而這些活動最終開發或製造出可供客戶使用的產品（McKinsey & Company, 2022）。

國於 1992 年在巴西里約熱內盧舉辦的『聯合國地球高峰會』(United Nations Earth Summit) (又稱為『聯合國環境與發展會議』(United Nations Conference on Environment and Development, 以下簡稱 UNCED), 首度關注氣候變遷議題而有『21 議程』(Agenda 21) 行動宣示中的第 34 章「無害環境技術」(environmentally sound technology) 之內涵雷同 (United Nations Conference on Environment & Development, 1992)。

由此可見，綠色科技是一個總稱，廣泛指稱所使用的技術和科學以創造友善環境的產品和服務 (Jark, 2024)。而針對氣候變遷相關的科技，則是指與氣候減緩及調適等等相關之科技與技術。由於綠色科技是起步相對晚的市場，當大家慢慢注意到氣候變遷問題，又當人們已開始察覺到不可再生的化石能源等資源已逐漸耗竭，逐步脫離化石能源的綠色科技取而代之成為相對重要的課題時、綠色科技與技術才日漸獲得投資者的興趣。由 Matos 等人 (2022) 回顧 1990 年至 2021 年的創新與氣候變遷文獻明顯可看出，相關研究自 2005 年起開始對此一議題產生高度興趣，此後在 2015 年後研究數量則有更是顯著的增加。而在綠色科技與技術議題中、除提升能源效率外，移轉至具低碳特質 (low carbon feature) 的生產模式，對開發中或已開發國家中的企業、是可以共同追尋、邁進的方向；當然不同屬性的企業、由於對創新風險的偏好及能源價格的波動接受度與可忍受程度不同，因而也影響最後特定企業對最佳綠色科技或技術組合的選擇 (Yang, et al., 2020)。

而 OECD 綠色成長策略的核心是經濟和環境政策相輔相成，創新 (innovation) 是此一轉型的關鍵與重要驅動力，若無創新、將使綠色經濟轉型變成相對困難、成本也相對高 (OECD, 2011a)。又根據 OECD 的定義，創新並不是一個線性過程，而是由研究與發展 (research and development, 以下簡稱 R&D) 開始一連串的支出，由此帶引出新技術、進而可以商業化；於是，OECD 也認為創新是一個來回、啟動和停止的模式 (back-and-forth start-and-stop model)，正由於這種忙碌、無劇本且通力合作的本質 (hectic, unscripted and collaborative) 才得以成就創新發展 (OECD, 2010)。進而，世界銀行針對企業在溫室氣體 (greenhouse gas emissions, 以下簡稱 GHG) 減量及氣候變遷調適有關之綠色科技的發展指出，一般企業是投注大量資源於 R&D 上，進而再商業化其研發成果與構想，以此獲取研發構想

智慧財產權的獨佔利潤，然此種方式在智慧財產權強制力薄弱的開發中國家，反倒可以搶先進入市場而不需要有積極的研發，有鑑於此，已開發國家的創新策略乃改採資本與時間密集度低的途徑，亦即採用所謂「開放式創新」（open innovation）、藉此擴充技術經紀（technology brokering）與技術網絡（technology networking），取代大量傳統 R&D 策略的「封閉式創新」，以協助企業在開發中國家發展綠色產業（World Bank, 2016）。

此外，同步促進創新及工業發展的綠色產業政策亦可視為新產業政策（new industrial policy），此類政策目標超越過去僅強調短期競爭力和經濟成長目標，而是更廣泛的追求多元目標，以達成長期廣義「社會福利」目標。如執行這類政策以達到目前所討論的淨零目標或低碳經濟，政策面臨的最大挑戰除了降低 GHG 排放外，亦必須維持經濟成長，以確保原來的工作不被綠色產業工作取代，而這些帶有綠色特質產業政策所具有的社會目標，最明顯的是歐盟（European Union, 以下簡稱 EU）《綠色政綱》（Green Deal）中以脫碳為目標的氣候政策，加上狹義以經濟成長、廣義以社會福利為目標之產業政策（Lane, 2025；Aiginger & Rodrik, 2020；Cherif & Hasanov, 2019）。也就是說，綠色產業政策必須協調氣候政策中的脫碳目標與產業政策中的經濟成長或社會福利目標（Tagliapietra, 2022）。

然而，此種結合多目標政策可能面對的問題是，必須留意不同目標彼此間是否有所衝突；又連結既有現成政策工具是否能夠成為綠色產業政策規劃達成的目標？即便這些挑戰可迎刃而解，綠色產業政策中的產業相關政策無可避免仍會面臨一般產業政策均會面臨的問題，比如研究成果外溢、金融資本或人力市場不完善導致融資受限或人力不足等等，市場機制無法解決的問題，因此，綠色產業政策除了必須解決這些導致現有市場無法成長、新市場無法出現或發展的問題外，由於綠色產業政策的氣候政策是要降低 GHG 排放，因而也必須解決經濟活動過程中，市場機制無法讓 GHG 副產品外部性（externality）支付代價現象，但不需要因此而制訂一個全新的政策，選擇能適應綠色產業政策即可，碳訂價（carbon pricing）就是一種現成可用、且相對佳的政策工具，因碳訂價政策結合了一般產業政策與氣候政策，可使綠色產業政策達成的目標超越一般產業政策的單一化目標（Tagliapietra, 2022）；而碳訂價政策中的碳費（稅）政策又被視為可解決多種無法經由市場機制解決的最佳工具（O'Mahony, 2020），而諸多無法經由市場機制

解決問題通稱為市場失靈（market failure），後續節次針對此有完整討論。而在高度競爭市場中，政府實施碳費（稅）政策更為有效，能夠促使全產業企業選擇低碳策略；至於在低競爭市場中，即使政府實施碳費（稅）政策，也無法激勵該產業的企業選擇低碳生產策略，因此，在市場競爭程度較低的產業中，政府可以選擇其他低碳政策，鼓勵企業轉型為綠色低碳生產方式（Zheng, et al., 2023）。

而以綠色科技誘導 GHG 的減少或是環境的改善，典型的例子是美國在 2001 年布希總統退出《京都議定書》（Kyoto Protocol），表明不以議定書上如「清潔發展機制（clean development mechanism, 以下簡稱 CDM）等政策作為碳排放減量工具，而是透過綠色科技進行碳排放減量成為重要的手段（Plumer, 2013）。接續於 2008 年的金融危機，發展綠色科技成為美國歐巴馬政府復甦經濟並帶動美國成為全球潔淨能源經濟的帶領者，由此可見，綠色科技的發展不純然可達成環境目的，尚夾帶著重要的政治和經濟目的，因此，藉由綠色科技的發展而不是經由議定書的簽署以減少 GHG、視為一種典範的移轉（paradigm shift），也就是國家在議定書中由上而下（top-down）承諾減量目標，移轉成為國家由下而上（bottom-up）之自願減量、達成國際協議承諾的目標（Meltzer, 2014）。

由此可知，適當政策的選擇是可解決市場機制無法解決的市場失靈之有效工具，比如，為逐步淘汰多種導致臭氧消耗物質生產以保護臭氧層的《蒙特利公約》（Montreal Protocol）³，於 1987 年 9 月 16 日達成協議、而 1989 年 1 月 1 日正式生效；而美國於 1990 年 1 月 1 日針對破壞臭氧層的氟氯碳化物（chlorofluorocarbons, 以下簡稱 CFCs）課徵環境稅，以減少這類產品的生產與貿易，1990 年開始的稅率為每磅 1.37 美元，此已高於 CFCs 的生產成本，而至 1993 年稅率則更增加一倍（Boroshok, 1993）。然至 1995 年、卻發現全世界主要產生 CFCs 的冰箱、空調及泡沫絕緣原料消費量未減少的情況下，CFCs 使用量卻減少了 70%，表示環境稅的存在是誘使生產者採用對環境危害較小的可行技術；由此可見，環境稅是一個間接工具，同樣可引導生產者採用「合適」與「正確」技術以生產必要不可或缺產品的措施（Krass, et al., 2013）。如此也顯示，為了有效引導 GHG 排放量的降低，給予排放 GHG 適當的代價，或可發揮類同的效果。

³ 完整名稱為 *Montreal Protocol on Substances That Deplete the Ozone Layer*。

由前述說明可知，綠色創新投資與一般創新投資同樣具有公共財（public good）特質，除了創新技術可能外溢造成的無排他性（non-exclusiveness）外，綠色技術創新一旦存在、即可多人同時使用，而不減損任何人對該創新技術使用的無敵對性（non-rivalry），如此導致對創新活動的社會報酬率（social rate of return）遠比私人報酬率（private rate of return）高，而使得私人投資過低的情形（Westmore, 2013）⁴。因此綠色創新的產生需要有政府相關政策的協助，OECD 的「綠色創新策略」就是依此設立的架構，此一架構可解決完全由私部門執行創新的高風險、不確定或長時間醞釀的科學挑戰及技術摸索；此外，需要政府協助或施行相關措施的理由，主要是為克服與綠色創新市場相關的各式失靈，尤其是與現有技術、系統和現有企業主導地位有關的市場失靈（OECD, 2011a）。此外，綠色成長來源除了創新之外，OECD（2011a；2011b）尚提出可由其他幾個面向進一步強化，首先是生產力（productivity）的提升、透過此可以更有效率的方式使用各項資源，比如減少廢棄物的產生及提升能源效率；其次是新市場（new market）的創造、也就是透過綠色科技一則刺激對商品和服務的需求、進而也創造新的就業機會；再者是信心（confidence）的加強，透過提高政府處理重大環境問題的可預測性和穩定性以加強投資者信心；最後則是穩定性（stability）的增加，亦即平衡總體經濟條件，減少資源價格波動，並透過審查公共支出、效率及透過對污染訂價以增加收入等方式、維持必要的財政支出。

為了監測綠色成長來自前述相關管道的進展，則需要一些易取得、品質可信與定期更新的指標與數據，以觀察特定國家綠色成長的表現以作為跨國比較之基礎。OECD 有一套監測綠色成長指標的原則，原則之一是平衡涵蓋（balanced coverage）「綠色」與「成長」兩個面向；其次是確定需要的指標是 OECD 國家和夥伴國相關綠色成長的共同課題；進而，指標需反映綠色成長綜合性概念框架，可提供決策者和一般大眾有用之訊息；又為了因應指標不同之目的和用途，因此潛在的指標數量必然相當大，因此，最後有必要以共同標準、挑選經過驗證後的

⁴ Solow 於 1956 年、而 Arrow 在 1962 年對經濟成長過程中的經濟活動即有持有此一觀點，因此一致認為需要公共政策的矯正、以提升私人企業的投資誘因，如此、才能讓社會享有最佳的成長成果。

特定指標，而不是將符合不同目的和用途的指標均涵蓋在內（OECD, 2011b；OECD, 2011c）。除 OECD 使用這一套指標外，OECD 與聯合國環境規劃署（United Nations for Economic Programme, 以下簡稱 UNEP）、歐盟執委會（European Commission, 以下簡稱 EC）、世界銀行（World Bank）等其他國際組織通力合作，讓這些組織亦同步採用這一套指標（OECD, 2011c）。

而綠色產業政策在世界各國的具體落實，依經濟發展程度有所不同，Tagliapietra (2022) 歸納為兩大類，一類為已開發國家是由綠色開發與創新（green innovation）、進而至綠色市場建立（green market creation）、再轉變為綠色市場保護與擴展（green market protection and expansion）；另一類則是開發中國家，將技術移轉（technology transfer）自己開發中國家、進而將技術擴散應用（technology diffusion）、爾後建立綠色市場。綠色產品與解決方案的開發與創新是建立產業未來的第一步，然而，開發與創新在初期需要極高的投入，而報償回收則發生在晚期，又高投入 R&D 知識卻可能外溢給他人享有，加上資本市場的不完整，這些都會降低投資者對 R&D 投資的誘因。有鑑於此，各國政府除可提供創新所需的資金或競爭政策，糾正相關市場失靈、讓企業有明顯的誘因而導致投資過低的情形外，聯合國氣候變化綱要公約（United Nations Framework Convention on Climate Change, 以下簡稱 UNFCCC）於 2021 年在蘇格蘭格拉斯哥（Glasgow）舉辦的第 21 次締約國會議（conference of parties, 以下簡稱 COP 21），由來自約 50 個國家超過 550 個金融機構成立了「格拉斯哥淨零金融聯盟」（Glasgow Financial Alliance for Net Zero, 以下簡稱 GFANZ），由聯盟提供相關資源協助全球加速低碳或淨零的達成（Obobisa & Ahakwa, 2024）。

一般而言，開發中國家相對沒有能力投入綠色技術的創新與開發，因此，開發中國家則可移轉或擴散自己開發國家所開發及創新的綠色技術；然不論是已開發國家所開發及創新的綠色技術，或是開發中國家移轉自己開發的綠色技術，同樣都需要有一個可接受的創新綠色技術市場，此則有賴一個強而有力的氣候政策，讓企業和家計單位有動力推動投資決策與消費選擇，如此方可能刺激並建立綠色市場。而有關綠色市場的保護與擴展尚可將綠色產業政策擴展至國際面向，以這種方式支持出口不僅是促進綠色創新產業或市場快速成長的方式之一，除此之外，綠色產業政策擴展至國際尚可避免碳洩漏（carbon leakage）、比如 EU 對於進口

產品將施行的碳邊境調整機制（carbon border adjustment mechanism, 以下簡稱 CBAM）；而綠色創新產品擴展出口至開發中國家，常會因出口目的國的制度所產生的風險而遭受阻礙，比如以 EU 目前所施行的 CBAM 而言，主要是針對進口至 EU 的產品，並未針對 EU 出口至其他國家與 EU 現有 CBAM 之互補設計，在此種情況下、如 EU 出口綠色創新產品至開發中國家、然開發中國家並沒有類似 EU 之 CBAM 的阻擋，站在 EU 的立場、反而使 EU 相對難以保有這些綠色創新產品的競爭力（Yara, Belgium, 2022）。但另一方面支持 EU 的 CBAM 機制者，認為 CBAM 不僅是促進 EU 綠色創新進入快速成長的一種方式，站在全球的立場、也是促進全球脫碳的重要途徑，如此，則讓已開發國家在有關氣候融資、技術轉移和建設能力下，做出符合《巴黎協定》第 13 條促進全球脫碳的重要承諾（United Nations, 2015）。

基於此，本文以下各節的安排，期能掌握碳費（稅）政策對綠色科技與技術之驅動，及/或帶動 GHG 減量的效果，首先探討綠色科技與創新的特質，並分析推動綠色科技與技術的 R&D 投資與一般投資是否面臨類似的障礙與失靈、又或者綠色科技有其特有的障礙與失靈，在綠色技術 R&D 具公共財特質情況下，藉此探討綠色科技政策及政府的其他相關政策如何解決綠色投資仰賴市場所產生的障礙與失靈？其次，討論政府為驅動鼓勵此類相關綠色科技 R&D 與投資之政策工具；進而，選擇 OECD 所建構「綠色成長策略」主要綠色指標，觀察台灣與 OECD 各成員國在環境管理的大面向而至氣候變遷的特定面向上 R&D 之投資金額與比例及專利族數的表現；最後，因台灣針對 GHG 的排放將課徵碳費，於是有必要深入剖析碳費（稅）對綠色科技 R&D 發展的影響，分析面向除了以國家整體在氣候減緩或調適 R&D 投資為觀察對象外、亦探討並分析碳費（稅）課徵在不同樣態的供給鏈（supply chain）及供應鏈的不同結點（node）與成員，對綠色技術 R&D 投資效果產生的影響。而觀察重點選擇 OECD 成員國、主要是因為 OECD 的「綠色成長策略」中，有一系列本文所要觀察的綠色創新、相關 R&D 及 GHG 排放相關等等資料，且目前 38 個成員國橫跨北美洲、中南美洲、歐洲、亞洲及太平洋等各大洲，而相關指標尚包括 OECD 的主要伙伴國（巴西、中國、印度、印尼、南非），因此，OECD 除了涵蓋的國家數橫跨全球各洲外，國家的分布亦比聯合國及其下的相關世界性組織多元。而更難得的是、OECD 之諸多資料，

在相同基礎下也有台灣對應的相關指標數據，如此則可以一併觀察台灣與 OECD 成員國間之差異。

貳、綠色科技與技術 R&D 需突破的障礙及驅動的主要途徑⁵

OECD 自 2011 年提出「綠色成長策略」以來，經過四年、OECD（2015a）首度評估四年來落實相關綠色成長策略所面臨的主要挑戰。相關挑戰歸納為以下幾大面向，首要為如何對污染和自然資源使用進行訂價；其次是稅收制度該如何調整以促進綠色成長；進而是環境相關的補貼該如何設計；最後是各部門政策如何調整以促進綠色成長。而這些挑戰中很重要的一點是訂價、相關政策、補貼，如何決定經濟與環境的先後順序並相互搭配。針對 GHG 訂價主要政策工具有排放交易機制（emission trading system, 以下簡稱 ETS）及碳費（稅），針對兩類政策優缺點的分析可以參閱吳珮瑛（2022）一文，而碳費（稅）課徵可能面臨的阻力與各國推行時的化解之道、詳如吳珮瑛（2020）的探討。

然除了提升社會使用會產生 GHG 排放之能源的代價，以促使作為轉向低碳能源的綠色科技與技術外，亦可正面給予使用綠色科技與技術的補貼，根據世界能源總署（International Energy Agency, 以下簡稱 IEA）統計，全世界至 2013 年為止，當時各國政府對再生能源的總補助金額已達 1,210 億美元（IEA, 2014），如此使得全世界由最新的 2023 年至 2024 年再生能源消費佔最終總能源消費的 13%，IEA 進一步預估至 2030 年將持續成長至 20%，其中最大成長的消費為電力部門，約佔其中的 75%，主要源自於全世界 130 個左右的國家持續對這種綠色技術的支持，使得創新的成本降低（IEA, 2024）。即便如此，各國在這些綠色技術與科技的增長，當然未必純然是源自補貼而使得成本降低造成的結果，由於各國可能同步採取多元的政策。此處特別要探討的是碳費（稅）的課徵對綠色科技與技術所衍生的誘因，在探討碳費（稅）政策潛在對綠色科技與技術存在的誘因之前，必須要得知相關綠色科技與技術的特質，以能理解投資者由現有的技術移

⁵ 本節擴充自吳珮瑛（2025）一文。

轉到任一綠色技術可能會面對的困難與可能的解決之道，亦即掌握投資於氣候變遷減緩或調適等相關綠色科技與技術之 R&D 本身可能存在的障礙，以能得知政府對現有及綠色技術相關措施對綠色技術 R&D 投資的影響，及政府等公部門如何適時解除相關障礙，特別讓私部門在綠色科技與技術 R&D 之投資更為順暢。掌握這些困難與影響雖可妥適設計理想的政策以為因應，然由過去至今，台灣及 OECD 成員國事實上已有氣候變遷相關之 R&D 投資事實，因此，相關成果當然值得先行檢視。

一、綠色科技與技術的特質及其 R&D 投資障礙與市場各種不可行的失靈

（一）綠色科技與技術之特質

綠色科技或技術即便沒有一個廣為各方可接受的共同定義，就實體的生產製程而言，無非是製程中所用的能源相對的綠（潔淨），或者是生產製程或技術的改進，使得每單位產品所用的原物料或能源少，而所涉及的生產製程需要涵蓋由原料至產品使用後棄置的完整生命週期（full life-cycle）。另就綠色（潔淨）能源而言，則是指增加來自太陽、風力、地熱、生質或影響低的水利發電而來的綠色能源技術（green energy technology），亦可稱為綠色能源、再生永續能源或潔淨能源。而潔淨能源包含在零碳能源（zero-carbon energy）較廣的範疇內，由於潔淨能源並非百分之百可再生，因其包括核能及為達碳中和（carbon neutrality）的碳捕捉與儲存（carbon capture and storage, 以下簡稱 CCS）技術（United Nations Conference on Trade and Development, 2023）或是碳捕捉、利用與儲存（carbon capture, utilisation and storage, 以下簡稱 CCUS）（IEA, 2025），而促進 CCUS 推廣的機制應優先在電力產業低碳轉型初期實施，因隨著火力發電廠運作小時數逐漸減少，技術推廣的成本則漸增加（Han, et al., 2023）。綠色技術即便有如此多互通的稱呼，僅是綠色能源可互用的再生能源及潔淨能源，所涵蓋的對象本質上仍有些微的差異，因此，如果要一一羅列各項或各類綠色科技與技術的特徵恐過於瑣碎；若要移轉至不論哪種定義下綠色科技與技術之 R&D 或者此情境下所代表的綠色經濟（green economy），都需要瞭解這些投資本身是否與一般的 R&D 面臨

相同的困境，又或者在技術與經濟典範之移轉可能衍生新的問題。依此方能掌握要達碳中和之技術發展與政策驅動間的關係，亦即由經濟角度來看，碳訂價機制中的碳費（稅）政策，或從技術角度來看，負碳技術和再生能源研究的快速發展，如何有效成為減少碳排放的重要機制（Wei, et al., 2022；Zhang, et al., 2022）。

如果再更細緻的剖析這類型科技與技術或背後所代表的經濟體，既然稱為綠色、所強調的就是自然，換言之，綠色技術所考慮的是創新對環境的短暫、短期或長期的影響，而這些影響可能來自能源效率、資源的可回收性、創新對安全及健康等等層面的影響。因此，Kumar（2020）認為綠色科技的主要目標之一是滿足社會的需求，同時不損害或減少地球的自然資源；目標之二是在不影響品質的情況下滿足當前需求，並創造可完全回收或再利用的產品；目標之三是利用綠色科技創造能防止未來對人類和其他生物健康危害至關重要另類科技。又或者一如 Söderholm（2020）認為綠色科技與技術所帶動的綠色成長或發展，能夠在促進環境和社會福祉的當下，又同時能促進經濟發展並改善人類生活。進而，Smulders 等人（2014）將綠色技術所代表的綠色經濟、詮釋為投資於長期環境財富與降低近期貧困收入之間的一種平衡，因此，如何取得兼顧長期與短期之平衡，乃取決於移轉至綠色成長的政策指引。

而如果現在以不同比例之綠色消費組合代表綠色轉型的途徑，比例越高代表越顧及長期的環境財貨，Shayegh 等人（2023）的模擬結果顯示，不論何種比例的綠色消費組合，要達成綠色轉型，最大的困難是經由完全的 R&D 投資得到充足綠色科技與技術所需的資本形成、累積及移轉。當然，除此因素外、影響轉型至綠色經濟亦可能受傳統能源與現代能源設施之間可替代性的影響，Kander 與 Stern（2014）驗證瑞典在 1850-1950 間的能源設施創新程度發現，由傳統化石能源轉換成 1950 年代前的現代能源比起使用擁有特定技術的勞動力之替代性更大，顯見能源轉型在所有生產投入中的重要性。現代能源的使用也因此一優點，於是為了達成淨零目標、EU 可說是全世界再生能源的主要生產區域，肩負淨零的責任使歐盟在全球能源轉型中得以扮演重要任務，因此要推動淨零轉型，其推動力不僅在於技術創新，還在於外部性的內部化、並避免遭受氣候變遷造成之損害；而能源轉型必須消費者、企業和機構共同參與，選擇合適的政策工具，以刺激能源資源從化石燃料轉變成再生能源（Borghesi & Vergalli, 2022）。

而 Niu 等人（2022）進一步檢視 OECD 中的 21 個國家、影響 1990-2020 年轉型至再生能源 R&D 的投資因素外，另發現為加速這些國家轉型至再生能源，亦需鼓勵公民使用潔淨能源產品，並對污染活動徵稅，以能抑制污染活動，是改善長期環境品質的有效手段。Arogundade 與 Hassan（2024）更擴大檢視 OECD 的 37 個國家於 1990-2021 年，能源轉型在環境稅課徵下的影響，結果顯示，環境相關稅賦的課徵對經濟綠色成長有負面影響，然至一定程度，則轉為正面影響，表示越高的環境稅將帶動越高的成長，如此表示，由於環境稅並不能立即促進綠色經濟成長，因此這類稅收應逐步實施，讓企業和消費者有足夠時間調整以投資綠色替代品。再生能源的使用在產業上的改變，或是給予產業相關環境稅的課徵，最終影響並不僅限於國內，如果將能源資源或是技術轉型擴展至國際貿易，Wei 等人（2023）驗證歐洲 10 國與南韓等 11 個國家可能產生的影響，以 1990 年至 2018 年在有綠色貿易和外國直接投資（foreign direct investment, 以下簡稱 FDI）的情況下、環境品質有顯著改善，此一結果證實了「污染光環」（pollution halo）假說的存在⁶，此一實證說明有綠色貿易往來的國家，透過貿易可使雙方在環境品質及經濟上同時得利。

由前述這些說明可知，產業不論是自發性或在政策壓力下的被動行為，經由綠色科技或技術改變製程或能源使用轉型所帶動的產業變革或典範移轉，在綠色科技與技術 R&D 之投資勢必面對相當的障礙；而面對政策的被動行為，無非是政府加注於轉型至綠色科技或技術的壓力或助力。因此，如何設計或選擇適當轉型的壓力或助力，這些問題並不僅是已開發國家需解決的問題，開發中國家一樣要面對綠色科技 R&D 之投資障礙與政府適當機制的設計問題，比如非洲開發銀行於 2014 年 9 月規劃了非洲綠色成長架構，該框架名為『非洲向綠色成長轉型的行動切入點』（Entry points for action for transition to Green Growth in Africa）；主要目的是提供非洲銀行員工對綠色成長原則和實踐之聊解，以及與成員國轉型至綠色成長的共識，而該架構則準備了 2013-2022 的綠色成長策略（International

⁶ 所謂污染光環與污染者天堂（pollution haven）是相對應的概念，主要指跨國外國投資透過引進更清潔的技術和更有效率的能源以改善被投資東道國的環境條件，從而減少污染（Duan, et al., 2021）。

Institute for Sustainable Development, 2014)。因此，以下將逐一討論綠色科技與技術 R&D 投資所存在的障礙，進而再分析政府如何協助解除相關障礙，促進或加速綠色科技或技術的採行，以能順利轉型至綠色經濟。

(二) 綠色科技與技術變革性改變 R&D 投資難以迴避的失靈

不論已開發國家或是開發中國家，要移轉至綠色經濟新典範，政府部門或私人部門需要克服的是進行綠色科技與技術或低碳經濟 R&D 投資之變革性轉變 (transformative change)，所謂變革性轉變是指工作方式與系統性根本的改變，此乃有別於漸進式的 (incremental) 調整。因此，就綠色經濟而言，此種根本與系統性的改變，可能源自於與氣候變遷最直接相關的不同能源之使用，亦可能是整個生產技術與製程上的變革，當然，不排除是二者的任何形式之組合而與過去生產技術與製程上的差異。面對此種相對大的變革，Weber 與 Rohracher (2012) 歸納執行此種變革性轉變可能面臨的三大的障礙，分別為市場失靈 (market failure)、結構系統失靈 (structural system failure) 及轉型系統失靈 (transformational system failure)；而政府間氣候變化專門委員會 (Intergovernmental Panel on Climate Change, 以下簡稱 IPCC) 在第六份評估報告中，進一步將結構系統失靈及轉型系統失靈統稱為系統失靈 (system failure) (Blanco, et al., 2022)。

1. 綠色 R&D 投資之市場失靈

整體而言，市場失靈是指投資者無法完全享有投資應得的報償，也就是供給者沒有完全獲得「做中學」(learning by doing) 中的「做」得到應有的報償，或當前及未來的消費者沒有由「用中學」(learning by using) 中的「用」付出應付的代價，如此使得社會整體由創新得到的價值遠高於投資者於創新所獲得的回報，亦即創新投資知識產生了具有公共財性質的正外部性 (positive externalities)、或稱為知識外溢效果 (knowledge spill-over effect)⁷。因社會由綠色科技所獲得的價

⁷ 要矯正此種市場失靈，創新知識的公開很重要，這些知識或操作方式可回饋至下一輪生產或發展之用。

值特別顯著，若政府忽略此種市場失靈將無法適當誘導綠色科技的創新投資（Meltzer, 2014；IPCC, 2007），Solow 早在 1956 年、而 Arrow 於 1962 年即已提出創新投資存在的市場失靈問題，藉此提醒政府、要避免市場失靈現象的發生、以免創新投資過低，此種現象由農業、製造業到服務業都可能發生（Raj, 2022；Song, et al. 2022；Mohan, et al. 2021）。而發生市場失靈的原因之一是資訊不對稱（information asymmetries），這些不確定情況發生的原因之一，可能是缺乏市場化的新綠色技術及相關財務評估資訊，於是縮減對這些技術的金援，過去研究顯示，資訊越不對稱、廠商在氣候變遷的表現上越不佳（Dey, et al., 2025）。如果考量資訊不對稱對投資的影響，Barbaroux（2014）回顧相關文獻，發現資訊不對稱會影響市場上創新商品和服務的品質與數量，進而影響資源的有效配置；然資訊不對稱並非完全僅有負面影響，對某些人在資訊不對稱的情況下，認為是市場機會的主要來源，然並非每人均擁有同樣詳盡完整的資訊，當然擁有不對稱資訊是市場機會的來源者、並竟僅針對少數人有益、此種情況並非站在社會或是對社會整體資源使用的角度上來看。

又造成市場失靈的第二種原因是氣候政策帶來的不確定性（uncertainty），而不確定性的存在對國家將威脅國家長期的成長與繁榮，尤其人類呈現出野心、提議對 GHG 排放量減少以使全球平均氣溫比工業革命前低 1.50C、或是更理想的 2.00C，如此使得全球經濟成長之預測成為 30 年來最弱與最不確定的結果（International Monetary Fund, 2024），此外，不確定性也可能源自創新，因為創新本質就具有不確定性，於是創新的資訊因而不對稱、或是不完整，一般而言不確定性可說與資訊不對稱同步發生。而針對綠色科技與技術的 R&D 或投資，由於人類對於 GHG 排放減量所呈現出的野心與實際執行之間的落差，只見加大未見趨於一致的情況下，造成此一情況可能來自於不確定政府是否支持低碳投資於氣候變遷行動，當然也可能源自不確定政府是否投資於再生能源的發展。而除了前述針對特定對象所認定的不確定性外，Berestycki 等人（2022）以 OECD 的 12 國⁸於 1990 年至 2018 年歸納了新聞所涵蓋「關於氣候監督與管理弱化的討論」、

⁸ 12 國分別為澳洲、加拿大、智利、法國、德國、愛爾蘭、義大利、墨西哥、紐西蘭、西班牙、英國和美國（Berestycki, 2022）。

「可能引入或強化氣候的監督或管理」及「政策意外和/或政策頻繁反覆變更或一般的不確定性」⁹等 3 大不確定項目、6 項細目指標（分別為扭轉或改變氣候政策、降低現有氣候或能源的標準、引進新氣候管制規定、強化現有氣候管制、能源市場頻繁的變革及氣候政策的不確定性是來自非氣候特定政策之討論），利用這些指標可以用來衡量各國的表現並比較各國的差異。台灣或可參閱其中部分足以反應各產業與部門在特定期間內，於新聞上針對前述素 3 大不確定項目的討論，由中歸納各部門與產業所關切的焦點。

產生市場失靈的第三種也是最後一個原因是來自技術鎖定（*technology lock-in*）的發生，在氣候變遷上，由於主要目標是轉型至低碳經濟，因此，在此情況下市場的主要技術是要由化石燃料（「骯髒」能源）所掌控之「碳鎖定」（*carbon lock-in*）轉型至非化石燃料或潔淨燃料。而「碳鎖定」可能發生在任何產業或任一企業之不同部門，也可能發生在全球或是不同的區域（*Wen & Sun, 2023*；*Sato, et al., 2021*；*Mattauch, et al., 2015*）。不論是一般的技術鎖定或是與氣候變遷相關的「碳鎖定」，有些更擴充一般的技術（或碳）鎖定至制度層面。以傳統發電及其輸配電的電力系統而言，並非僅是硬體上建構組件所構成的技術，而是技術、使用者和生產者的行為和期望以及支撐這些行為和期望的制度互動下的產物（*Goldrick-Kelly, 2023*）。綜整而言，「碳鎖定」就是在現有技術、制度和行為規範下，共同限制未來幾十年碳排放量的減量速度和幅度，這種由物理、經濟和社會彼此約束、相互強化而產生的碳排放慣性稱為「碳鎖定」（*Seto, et al. 2016*）。

而「碳鎖定」和「高碳路徑依賴」（*high carbon path dependence*）兩個專有名詞在文獻中常交替使用（*Herman, et al., 2025*；*Tokarska, et al. 2019*；*Avner, et al., 2014*），通常「碳鎖定」在高碳使用上、經常會根深蒂固，亦即，投資者習慣不斷改善現有高碳舊技術的效率，而猶豫新技術的採用，因為轉換現有高「碳鎖定」至低碳能源類別的風險相對高，如此則使得私部門在新技術綠色能源的投資相對低（*Weber & Rohracher, 2012*）。而 *Economic Consulting Associates*（2015）設

⁹ 原文分別為 “discussions over weakening of climate regulation,” “potential introduction or strengthening of climate regulation,”及 “unexpected and/or repeated changes to policies, general uncertainties”（*Berestycki, 2022*）。

計了一套檢視「碳鎖定」的簡單評估工具，基本上如果評估的對象符合（1）有選擇碳密集型路徑；（2）一旦路徑已選擇、改變路徑方向代價是巨大的；及（3）所選擇的路徑對國家未來經濟發展/經濟競爭力產生淨負面影響；在這三個條件同時滿足的情況下，則表示受評估的對象是「碳鎖定」。此一簡單的評估工具，可為台灣借鏡，為了 2050 年的淨零，台灣在條件（1）與條件（2）似滿足「碳鎖定」，然台灣的慣例，極少評估涉及五年或十年的中長期計畫，更何況至 2050 年是 25 年後的長遠未來，加了條件（3）恐難以得知台灣是否為碳鎖定。

2. 綠色 R&D 投資之結構系統失靈

而結構系統失靈共包括四大類，分別為基礎設施失靈 (infrastructural failure)、制度失靈 (institutional failure)、網絡互動失靈 (interaction or network failure) 及能力失靈 (capabilities failure) (Weber & Rohrer, 2012)。所謂基礎設施失靈是指在氣候變遷下、熱浪、洪水、颶風和其他類似氣候事件發生的頻率和強度更佳頻繁，重大氣候事件可能會摧毀包括能源、水和交通等對經濟重要的關鍵基礎設施與網絡，因而對教育、衛生和公共安全產生連鎖影響，面對這些新氣候事件下、以老舊基礎設施因應，可能已無法應對當前和未來的極端災難，因此需要更新可以適應新氣候型態的基礎設施，然相關新設施的投資均是極大規模且需要很長的營運時間，因而使得投資當下缺乏實體基礎設施和對應之知識，在現有的基礎設施難以因應新氣候型態所造成的影響與損害即是基礎設施失靈 (Naderi, 2025; Bahrami, et al., 2024; OECD, 2024k)。至於制度失靈 (institutional failure)，在硬體層面包含缺乏正式的法律、管制與標準，而軟體層面則是文化規範與社會行為的調整與改變。在硬體層面上、因氣候變遷沒有一個全球協議，雖然國際上也簽訂了各種的議定書或協議，然這些基本上並沒有約束力；如此使得氣候變遷這個獨特的國際議題，在不同國家產生不同的制度失靈 (Pinkse & Kolk, 2012)；此外，氣候變遷的本質與其說是環境外部性所導致的經濟問題，不如說是長期制度失靈下的結果。從制度經濟學的角度來看，主流經濟理論如果對人類制度缺乏足夠的關注，面對氣候變遷議題時，制度失靈自然會發生 (Lin, 2021)。因社會規範是引導行為的「黏合劑」(glue)，依此、氣候變遷可利用文化規範或社會行為定義為一個議題或一個情境，因此，文化規範與社會行為對氣候變遷影響的減緩扮演重

要且顯著的角色，如因應氣候變遷之創新所需的規範、價值、文化、信任與對風險的接受度等，與氣候變遷減緩行為產生落差，則稱之為軟體層面向的制度失靈（Vriens & Andrighetto, 2025；O'Riordan & Jardon, 1999）。

至於網絡互動失靈是指兩個或多個系統或使用者無有效互動，或支援此類通訊的網路基礎設施完全崩潰。其中有弱網絡失靈（weak network failure）和強網絡失靈（strong network failure），所謂弱網絡失靈是指缺乏和關係較淺或互動不頻繁的人之聯繫，亦即缺乏與第三方互動的網絡，於是造成與這些行為主體的互動和知識交流極其有限，因而阻礙了知識的互補和彼此互動學習的過程（Weber & Rohracher, 2012）。此在氣候變遷的具體情境下、所謂「弱網絡失靈」是指因應氣候變遷的機構和國家之間溝通不良、合作不力，或保護區（如海洋保護區）之間連通性不足，以致阻礙了生物多樣性無法適應條件不斷變化的能力。而所謂「強網絡失靈」是指和特定網絡互動密切，然因為組織內部或特定網絡互動過於頻繁，如此可能導致短視，缺乏與其他行為主體間的聯繫，使得新穎的見解或靈感無法出現，同時養成對少數合作夥伴過度依賴，因而造成技術鎖定現象（Weber & Rohracher, 2012；Assis, et al., 2021）。最後一項結構系統失靈為能力失靈，一般而言，這是指缺乏適應新變化的環境和技術所需的能力，能力失靈一方面包含因市場失靈而造成的研發投入不足，另一方面也反映了企業因無法吸收新知識而產生的路徑依賴的系統性問題（Weber & Rohracher, 2012）。在特定事項上、Twongyirwe 等人（2019）發現，位處非洲的烏干達面對特定災害比如乾旱時，因為資源的可用性和使用情況不同，導致各家計單位對於如何降低乾旱造成災害的能力存在差異，更由於無法進入市場、也沒有管道獲得「人民的社會、經濟和政治權利」、如此又更加劇「能力失靈」，進而更導致因乾旱引發對糧食不安全之體驗出現了差異。而在國家區域層級，1960 年代後的東亞和拉丁美洲經濟體的經驗顯示，能力失靈因為會破壞新技術、新產品和新工藝的開發和傳播，並影響異質經濟體參與永續工業發展的進程（Kastelli, et al., 2023）。

3. 綠色 R&D 投資之轉型系統失靈

至於轉型系統失靈分別有方向性失靈（directionality failure）、需求銜接失靈（demand articulation failure）、政策協調失靈（policy coordination failure）及反思

性失靈（*reflexivity failure*）四種型態（Weber & Rohracher, 2012）。所謂方向性失靈係指缺乏轉型過程的共同目標和方向，因而無法進行集體協調，又指導和鞏固變革方向的法規或標準不足，同時也缺乏可以支用於研究、開發及基礎設施資金，因而無法或難以建立可接受的發展道路。Lindner 等人（2016）又更進一步闡述了創新系統中方向性的形成，認為如果要引導創新朝向預期的目標發展，他們強調這有賴價值觀的自我批判反思能力，跨學科思考和工作、對不同新知識來源、衝突的識別與銜接及整合能力，對長期影響、轉型或處理不確定性的預測能力，以及允許採用平行方法、透過各個層面和不同狀況下的學習實驗能力的建立；而 Andersson 等人（2021）則更進一步擴充詮釋方向性失靈的可能來源，認為面對氣候變遷和日益加劇的不平等挑戰，這需要創新方向在生產和消費體系變革之雙重關注，亦即某些變革方向可能被認為是人們更想要的，而另一些變革方向則是依循社會技術路徑為更可行的，如沒有在創新方向有此雙重關注，則意味著社會系統可能發生方向性失靈。而需求銜接失靈根據 Weber 與 Rohracher（2012）的定義、係指缺乏足夠的空間來預測和了解使用者需求，亦即缺乏來自公眾需求導向和缺乏表達需求能力的訊號，因而無法讓使用者接受創新所產生的失靈。但 Pihlajamaa 與 Valovirta（2024）認為、即便具挑戰導向之創新政策解決了方向性失靈，但生產者由於不瞭解公眾的需求，因此，經常無法優先考慮有利於社會變革的創新，於是發生需求銜接失靈的問題。

至於創新需要政策間的協調、協調不佳、無可避免也可能發生政策協調失靈。而政策間協調不佳所產生的失靈，並非僅發生在氣候變遷相關政策上，以台灣而言、任何政策涉及不同部會、遑論涉及中央部會與地方政府，協調不佳是司空見慣的事，或許協調不佳在部會內的不同署、科、局、處就大有問題，與部會外的其他單位協調不佳更是理所當然，然這都是阻礙政策推動的障礙。就氣候變遷相關政策而言、政策協調可能涉及國與國間的協調（Kruse-Andersen & Jacobsen, 2024），也可能是一國之內中央層級的不同部會（Weber & Rohracher, 2012），中央層級政策相對是屬於研究、技術與創新之政策，因此中央層級間需要的是部會間的橫向聯繫，或各部會和執行機構間的縱向協調；然政策相對多的執行者是地方政府，因此，地方政府需要聯繫的可能是與中央政策間的縱向聯繫或是與不同地方政府間的橫向聯繫（Armstrong, 2023）。因此，不論任何層級間的政策協調不

順暢，都將導致政策協調失靈，如此將導致政策目標和操作實施存在偏差；而氣候變遷相關政策，最後諸多均落實在私部門的任何機構，因此，政策協調失靈也可能發生在公共政策和私人企業的不同部門間協調不佳所產生的問題（Xu, et al., 2025）。而轉型系統失靈的最後一項為反思性失靈，反思性是使組織能夠匯集和各種利害關係人參與其中所產生的線索與討論，透過這種程序可以達成對不同價值觀和利益的相互認可，透過此一過程可以掌握與瞭解系統能力不足之缺失（Weber & Rohrer, 2012）。此概念在環境治理之氣候調適管理，反思性需要的是相關利害關係人共同想出多元與現有行動模式和策略不同的替代方案（Preston, et al., 2015）。

前述攸關變革性改變的三大類失靈、每類各有數個細項失靈內涵，由前述各細項失靈的定義可知，一些與政策制度相關的失靈未必與投資者是否採行低碳經濟生產模式有關，比如政策協調失靈、反思性失靈、能力失靈、方向性失靈及網絡互動失靈，但這些卻是任何變革性改變一致面對的障礙。基本上，投資者是否有意願投資氣候變遷相關的減量或調適設施，關鍵的一步是投資者判定消費者對其所投資設施之需求及整體基礎大環境有利於投資之前提條件下，進行相關投資可回收合理報償下的作為。由此可見，如何讓投資者認定其投資可獲取合理的報償，是政策可著墨之處。此外，市場、結構系統及轉型系統等三大類型失靈、特別容易發生在能源轉型上，而能源的使用乃是氣候變遷的核心問題，因此，能源轉型在前述多重失靈產生的障礙下，包括鎖定在高碳、基於化石燃料的軌跡、在傳統能源使用上受益並依賴當前社會慣用的技術軌跡（*technological trajectories*）解決問題，政府的矯正¹⁰除需確定是否有解決企業在市場上所面對的各項障礙外、更重要的是需採取更寬廣的政策、打破企業對解決問題的既定軌跡（Rogge, et al., 2017；Rogge, et al., 2020）。以下則以市場失靈代表前述廣義上所包括的所有失靈類別，除非是需要針對特定技術或創新的失靈才以前述對應的失靈名稱稱之。

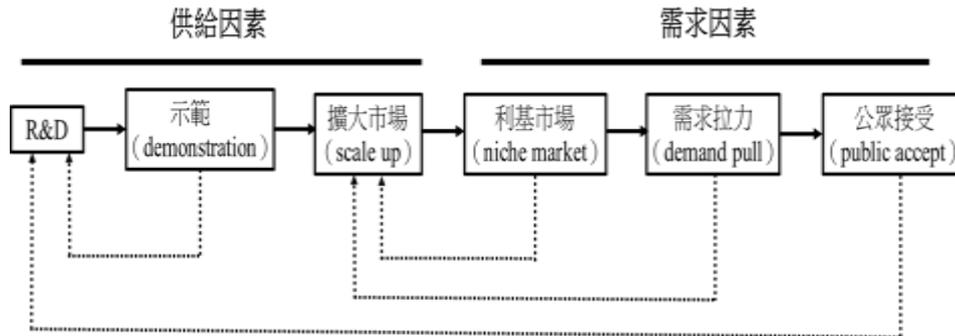
¹⁰ 此處以政府矯正或取代市場功能與角色替代傳統所使用的「政府干預」（*government intervention*）一詞，因為「干預」在中文有負面的意思，在目前的情況、僅是描寫或說明政府取代或是矯正市場無法發揮的功能與角色、使其恢復市場應有的功能，至於由政府取代或是矯正後、是否毫無缺失、是否會衍生另類的失靈則是另一回事，這是需另外討論的內容。

二、政府矯正私部門綠色科技投資市場與系統失靈之必要與管道

前述有關綠色科技與技術 R&D 投資既然有市場失靈現象，同時也存在移轉至不同典範的結構系統及轉型系統所造成的失靈，需以非市場的外在力量排除這些失靈、以去除轉移至新典範的障礙。這些失靈有些是仰賴市場無法持續有效配置資源所造成的障礙，有些是對新技術與新制度所衍生的軟硬體障礙，而另一些則是來自對陌生新典範所衍生技術交流的不順暢、尚處於規範與管制制度建立的摸索與探詢、或是合宜工作模式及互動模式之磨和階段。為了解決這些障礙與失靈、Mackay 等人（2025）認為當前的各種氣候政策過度依賴新古典主義模式，他們認為在新古典主義下、環繞以市場為主的相關政策並無法解決氣候行動規模和系統問題的本質，因此，氣候政策應重新定位政府需扮演的角色與功能。於是，就轉型至低碳經濟的綠色科技與技術而言，政府需矯正之市場失靈，首先要掌握涉及哪些相關市場失靈與障礙；其次、瞭解政府有哪些政策矯正市場失靈的政策工具，而政府的相關政策工具是否能有效減少市場失靈造成較低的經濟效率或降低所產生的「無謂損失」（deadweight loss）（Wintson, 2006）。

就第一個問題而言，無庸置疑，轉型至低碳經濟潛在就可能遇到前述所提及的各項市場失靈與障礙，前述各種市場失靈與障礙，在各種技術創新、科技與制度下都可能發生，當然在低碳經濟的綠色科技與技術亦不例外，因而有關市場失靈的內容將不再重述；至於政府取代市場角色與功能的政策工具，則需區分是技術推力（technology-push）或是需求拉力（demand-pull），同時需瞭解這兩大類型政策工具優缺點，如此區分是便於討論各自重點的差異，二者基本上猶如強調是技術推力創造需求、或者是需求驅動技術創新產生供給的難以區分，又或者二者其實僅是一個連貫流程中的不同重點（Nemet, et al., 2018），如圖 1 所呈現的創新階段，技術推力強調的是 R&D 之供給，而需求拉力則是另一方。此一概念與 Taylor（2008）認為創新的引發（call forth of innovations）是回應需求方或滿足市場需求之構想雷同；然影響 R&D 的供給方與影響 R&D 需求方因素各不相同，此也是技術推力與需求拉力需各自討論的原因。然如果專注於技術創新的討論，因創新經濟學文獻已經超越了技術推力與需求拉力的二分法，而在環境創新的相關研究上，或許也該超越二分的劃分方式；然如何劃分及劃分後各自文獻發展並非本文重點，因而，目前仍以技術推力及需求拉力劃分方式進行討論。而最後基本上

要問的是、不論政府採取何種政策工具矯正市場失靈，是否無可迴避的政府失靈也會隨之發生？掌握政府可用相關政策工具的缺失，才不會對政策有過多幻想。



註：實體箭號表示知識傳遞的過程、虛線表示可能潛在的回饋。

來源：Nemet, et al. (2018)。

圖 1：創新的各階段

（一）政府以技術推力創新政策矯正市場的失靈

IPCC 第六份評估報告認定技術推力是驅動創新的方式之一，而技術推力是透過資助與研究以增加新知識、進而刺激創新，同時也增加了訓練有素的人力，促進知識的創造並提供新技術應用的機會，私人企業因而可藉此將這些機會商業化 (Blanco, et al., 2022；Vandeplas, et al., 2022；De Mattos, 2018；OECD, 2014a)。然而，技術推力與需求拉力的創新政策，有時並不是可如此明顯的區分，比如美國加州公用事業委員會 (California public utility commission，以下簡稱 CPUC) 予發電業者回扣、而並非直接支持提供新技術知識，以此作為培育該技術的市場，亦即認定技術推力是一種對 R&D 的支援機制，於是認定給予特定技術支援而成為技術推力 (Taylor, 2008)。進而，Hötte (2022) 比較技術推力與需求拉力創新對產業規模 (以產出和專利數量為衡量)、生產力以及生產要素使用方式效果的影響，發現以技術推力帶動的技術創新在市場中成長較快、創新也相對多，主要源自於上游產業的創新外溢效應對技術知識庫的增加。然此一結果難以確定，所分析的相關產業與廠商是否可以清楚區分技術推力與需求拉力的界線。也因為技術推力與需求拉力政策難以區別，因而，Nuñez-Jimenez 等人 (2019) 分析德國太

陽能光電產業發現，注重技術推力型還是需求拉力型政策的有效性，取決於政策制定的目標及政策制定者對這一代與未來世代績效的相對權重；技術推力創新政策是追求產業政策目標且重視未來世代績效；而需求拉力形則是追求環境目標並重視這一代的績效。能區分兩種政策差異，才能制訂出所需的政策或選擇不偏廢單一類型政策、而使兩種政策間達到平衡的有效政策。

如避開技術推力與需求拉力技術創新的交織與難以切割，基本上技術推力透過教育及 R&D 可降低創新的成本 (Nemet, et al., 2018)，且技術推力同時也涵蓋了供給 R&D 之政策與管制，依此決定哪些是公用事業最佳可使用的技術項目，以美國能源對 GHG 之排放為例，美國環保署 (U.S. Environmental Protection Agency, 以下簡稱 U.S. EPA) 基本上偏向於技術推力，根據美國能資訊管理局 (U.S. Energy Information Administration, 以下簡稱 U.S. EIA) 彙整美國於 2007 及 2010 會計年度的補貼及援助計畫，發現主要是以技術推力為誘因，相關工具涵蓋協助投資於再生能源計畫的 R&D 費用、貸款擔保及稅收抵免以管制 GHG 排放源；而汽車能源效率與固定 GHG 排放源的管制，同樣也是透過技術推力作為主要管制工具 (U.S. EIA, 2011)。然利用技術推力作為管制手段，基本上也掌控人們對特定產品的需求拉力，因此，有時也稱為管制的推力與拉力 (regulatory push-pull) (Blanco, et al., 2022)，由此一名稱更可見技術推力與需求拉力間難以切割。

此外，技術推力的 R&D 重心是能源、再生能源和環境領域的公共 R&D 投資，這些通常對產業發展或競爭結果有正面影響，這些技術推力於技術發展的早期尤其重要，因為早期技術的特點是不確定性高、可取得專利性低，亦即難以仰賴市場運作即可達成理想的 R&D 及相關技術的發展，如此也面臨了前面所陳述的失靈情況，如此則有賴政府的矯正與支援，以能使私部門的綠色技術投資達到適量的規模，除非政府自行進行 R&D。除此之外，由現有技術移轉至新技術、首要面對的障礙涉及前述所提及轉換成新技術所需的高資本及能源供給所需基礎設施之使用壽命，此外，新技術除需展現其可行性外，更要展現新技術的商業化規模。又依據 U.S. EIA (2012) 預測至 2035 年為止，美國的能源供給主要仍是以天然氣與煤為主，因此，具有二氧化碳 (carbon dioxide, 以下簡稱 CO₂) 捕捉功能的整體氣化複合循環 (integrated gasification combined cycle, 以下簡稱 IGCC) 發電廠 (IGCC-MR) 仍是政府主要的援助對象 (Koc, et al., 2014)。而挪威自 1991

年開始施行碳稅以來，在 CCS 技術一直是居於領先的地位，又 IEA 指出、如果認定 CCS 在減碳上是必要的技術，如將此技術排除在外，將使得減碳成本平均提升 140% (IEA, 2017)。因此，CCS 技術的 R&D 在不同的工業部門向來都是一項挑戰，可預見早期技術的不確定性必也伴隨相對高與 CCS 相關的成本 (Størset, et al., 2019 ; Zhang, et al., 2014)。

由於綠色技術變革 R&D 知識涉及外溢效益，因此可由政府施行碳訂價政策以驅動廠商採行綠色技術或轉向成為綠色產業的途徑有效工具，而此一工具由生產投入之擷取而至消費後的棄置的完整生命週期都可施行。以碳訂價中聚焦於碳費（稅）之課徵，課徵碳費（稅），如此不僅能提升潔淨技術在本地的競爭力，也能提升在國際上的優勢，至於效果的大小取決於外溢效應之大小。又碳費（稅）如課徵於各式投入的擷取、而至末端的產出、進而至消費及消費後的棄置，不論碳費（稅）課徵於哪一階段，對於受課徵者屬於新增成本，而課徵單位則有碳費（稅）的收入。而這些收入，主要可用於三大面向，一類為支用國內外的其他互補環境政策，另一類為支用於減緩相關對象因碳費（稅）造成的負面影響，第三類則為改善整體的稅收優惠體系，當然，碳費（稅）亦可用於與氣候變遷完全無關的政府負債償還或是其他社會目標 (Bowen, 2015)。為轉型至低碳經濟的變革，碳費（稅）僅是其中一項政策工具，即便可用於技術推力的供給面創新措施，需求拉力的相關措施同樣亦可以反應環境的外部成本，由此可引發更多、更大的創新，以彌補供給面技術推力創新的不足。

（二）政府以需求拉力創新政策矯正市場的失靈

所謂需求拉力 (demand-pull) 之創新是源自市場需求，因此也稱為市場拉力 (market-pull) (Rossetto, 2024; Blanco, et al., 2022 ; Størset, et al., 2019; Koc, et al., 2014; Van Deventer, 2010) 之創新，這些政策主要目的是為鼓勵或是支援特定目的之達成，政府施行補貼、稅收抵免、公開宣傳等等政策工具，以此加速目的之達成。比如，為瞭解採用工業 4.0 技術的原因¹¹，Zhou 與 Zheng (2023) 分析發

¹¹ 「工業 4.0」的概念於 2011 年在德國漢諾威工業博覽會上首次提出，世界經濟論壇 (World

展中國家的 215 個製造商發現，在競爭壓力和政府支持下，促進市場拉力所發揮的作用比技術推力更大。又為帶動 GHG 移除（greenhouse gas removal, 以下簡稱 GGR），目前尚在發展中的 GGR 技術、成本居高不下，遑論擴展成一定程度的商業規模，因而，如果要大規模利用 GGR 技術，政府至少要在中短期內、針對性的提出推動 GGR 之研發、示範、支持等需求拉力的相關政策，並設計一個協調政府與 GGR 開發商和融資的良好運作體系，如此才能為 GGR 創新提供良好條件（Asibor, et al., 2022；Burke & Gambhir, 2022；Simon, et al., 2021；Haszeldine, et al., 2019）。GGR 的技術相當多元，由空氣中的直接捕捉（direct air capture, 以下簡稱 DAC）、空氣中的直接捕捉與與儲存（direct air carbon capture and storage, 以下簡稱 DACCS）而至以土地為基礎的造林與棲息地恢復都是 GGR 相對初始與原形的技術，當然也包括複雜的技術均數之¹²；若要將成熟技術推向市場，則需要政策的支持，同時需要為成熟度較低的技術提供研究發展與示範支援（research, development, and demonstration, 以下簡稱 RD&D），使其成為未來可行的選擇之一（Ozkan, et al., 2022；Simon, et al., 2021）。

如歐洲為了促進再生能源市場的發展，由於太陽光電等再生能源成本相對高，

Economic Forum, 以下簡稱 WEF) 前執行主席 Klaus Schwab 在 2015 年發表於 “Foreign Affairs” 的一篇文章更廣泛的介紹此一概念。德國於 2013 年正式宣布這項策略性舉措，目的是引領製造業，而現在有時是指數位轉型或「第四次工業革命」；亦即「工業 4.0」主要指的是製造業的數位化或數位轉型，主要是建立在資訊通信技術（information communication technology, 以下簡稱 ICT）和工業技術的融合；或是指人工智慧、機器人操作、物聯網等技術，前述所指內容都是「工業 4.0」的支柱（World Economic Forum, 2022）。然而，至今仍沒有一個大家一致共識的「第四次工業革命」定義（Lee, et al., 2018）。

¹² 英國皇家學會（The Royal Society）與英國皇家工程院（Royal Academy of Engineering）將 GGR 共分成 12 種，分別為造林（forestation）、棲息地恢復（habitat restoration）、土壤碳封存（soil carbon sequestration）、生物碳（biochar）、生物能源與碳捕捉與儲存（bioenergy with carbon capture and storage, 以下簡稱 BECCS）、海洋施肥（ocean fertilisation）、利用生物質建造的建築（building with biomass）、強化陸地風化作用（enhanced terrestrial weathering）、礦物碳酸化（mineral carbonation）、海洋鹼度（ocean alkalinity）、DACCS 及低碳混凝土（low-carbon concrete）（The Royal Society and Royal Academy of Engineering, 2018）等。這些方法有些偏向自然解方（natural solution）、有些是技術導向，不論哪一大類型的 GGR 方法，採用這些方法都需要水、土地、能源等資源，這些資源許多又和人類現有的活動相互衝突，因此，選擇 GGR 方法必須詳細評估其整個生命週期所需要的資源及其對環境的影響。又有些方法目前人類已在使用，然有些方法則需要更多示範以確認確實可以大規模移除 GHG 之排放，不是仍處於實驗階段。

為鼓勵再生能源業者生產再生能源，於是乃針對性的使用需求拉力政策工具，一種方式是保證再生能源發電業者在固定時間、可以固定的價格收購再生能源業者上網的電價，稱為再生能源之「躉購費率」(feed-in tariffs, 以下簡稱 FIT)(Alolo, et al., 2020)；另種方式是，給予再生能源業者財務上的支援，再生能源業者除由市場上獲得電力價格外，尚可由現行批發電力市場價格額外獲得一筆溢價，此稱為「上網溢價補貼」(feed-in premiums, 以下簡稱 FIP)(Alolo, et al., 2020)；第三種方式是經由綠色可交易憑證 (green tradable certificates, 以下簡稱 GTC)，是一種基於市場的金融工具，主要是透過為再生能源電力的「綠色屬性」(green attributes) 建立一個市場來推廣再生能源，而再生能源生產者可獲得這些憑證。再生能源技術被認為在減少溫室氣體排放方面發揮至關重要的作用，歐洲推行的需求拉力模式旨在創造對再生能源新技術的需求並促進其推廣。Baudry 與 Bonnet (2019) 檢視丹麥、德國、法國、義大利、葡萄牙及西班牙等六國，需求拉力對各國離岸風力的技術擴散，結果發現，國際外溢效應 (international spillovers) 難以促進風力發電在一個缺乏有需求拉力支持的國家中產生技術擴散，由此可知，對一個以高比例增加風力發電佔比為目標的國家而言，如沒有實施任何需求拉力政策，很難僅仰賴國際外溢效應即能夠降低風力發電成本，並促進技術擴散以使其具競爭力，亦即本國沒有施行任何需求拉力，純靠國際外溢效應基本上不可能達到本國高比例風力發電之目標。由此可見，前述三種方法都是為鼓勵再生能源的發展而設計的需求拉力政策工具。因為如完全依賴市場，由於過低的碳定價無法為再生能源創造公平競爭的機會，因而需要相關的需求拉力政策以彌補碳訂價政策的不足與缺口。

除了前述各式不同的政策工具、誘發綠色科技產生需求拉力型的創新技術外，政府帶引、驅動或支援企業創新的資金主要有三種來源，一為對負外部性的徵收 (negative externality levies)；二為收入支援機制 (revenue support mechanisms)、或稱為收入穩定機制 (revenue stability mechanisms)(Prindle, et al., 2010)；另一個為資本成本支援機制 (cost-of-capital support mechanisms)，第一個基本上是強制性，而後兩者是自願性，也就是受支援者可選擇是否接受相關的支援措施 (Rossetto, 2024)。而第一種負的外部性徵收可能是再生能源組合標準、管制性的技術標準或是課費 (稅) 等 (Argentiero, et al., 2018)，而其中最常用的是賦予

碳排放應有的價格，對碳排放訂價格使得消費者降低相對貴的碳密集產品，藉此促使消費者使用碳密集度相對低的產品，這是一種誘導創新(*induced innovation*)，亦即創新是源自極小化相對貴之要素的使用。而碳訂價中的碳費(稅)相對於 ETS 對於創新的誘導有比較顯著的影響，主要是 ETS 政策，排放許可之取得可能一如 EU 早期、免費核配給排放者，如此則降低排放者的繳費負擔；反之，在碳費(稅)的課徵下，碳費(稅)政策對降低 GHG 排放的綠色技術之創新與發展有相對大的誘因(*Meltzer, 2014*)。根據 *Goulder 與 Mathai (2000)* 探討 OECD 國家之環境稅對創新的影響，結果顯示如碳費(稅)之環境稅對創新有正面效果，碳費(稅)因而有雙紅效果(*double dividend*)，一來可以內部化 GHG 對環境造成的損害，再者，透過誘導創新可帶動綠色技術之發展。*Rivera 等人 (2016)* 探討碳稅對墨西哥 GDP 及碳排放量的影響，同樣發現碳稅收入適當地運用與分配，對 GDP 成長有助益、且同步可讓碳排放減少。而此種雙紅效果在環境相關稅賦課徵已有長久歷史的北歐四國(丹麥、芬蘭、瑞典與挪威)及 G7 國家(美國、英國、法國、德國、義大利、加拿大及日本)具體呈現出，能源稅的課徵、北歐四國與 G7 國家長期呈現出 GHG 排放的減少或燃料使用降低的綠色紅利(*green dividend*)¹³；進而，能源稅的實施、對北歐四國除了可在短期內減少扭曲稅收，又在長期不僅可促進經濟成長、尚有調整稅收結構的藍色紅利(*blue dividend*)，然對 G7 國家，長期則無藍色紅利(*He, et al. 2019*)。

至於收入支持機制或收入穩定機制是指歷史上公用事業售電費率之制訂、連結公用事業收入與售電量(*Prindle, et al., 2010*)，以英國為例，為了使航空業脫碳，對綠色氫衍生之電子燃料進行更多投資，然此類投資帶來的風險和高成本成為投資的主要障礙，而投資者最關切的是收入減少的風險，因此，收入支持機制是向投資者保證獲得穩定收入的一種方式，英國政府乃採用此一金融政策幫助航空業電子燃料(*e-fuel*)產業起步(*Doyle, 2024*)。而除減少低碳投資可能產生的

¹³ 所謂綠色紅利或稱為第一紅利(*the first dividend*)或環境紅利(*environmental dividend*)則是指對污染環境行為課稅，增加污染者的成本，可減少對環境的損害；而藍色紅利或稱為第二紅利(*the second dividend*)或非環境紅利(*non-environmental dividend*)或經濟紅利(*economic dividend*)，是指對環境行為課稅，由稅收收入再利用、除可減輕其他稅的負擔，尚能促進環保產業發展與經濟效率的提升(*European Environment Agency, 2025* ; *Giménez & Rodríguez, 2010*)。

風險與障礙外，為促成低碳經濟的成長、相關投資同時可藉助政府資金供應，因此，相關碳費（稅）收入可作為這些投資的互補政策（*supplementary policies* 或 *complementary policies*），例如印度為提倡低碳創新，乃將課徵在煤的收入投注於 2010-2011 設立之「全國潔淨能源基金」（*National Clean Energy Fund*），此一基金由設立至 2014 年共投入 67 億美元（*Seemann, 2014*）。又如擴及碳費（稅）外更大層面的碳訂價政策，歐盟（EU）要求來自 ETS 的拍賣收入至少要有 50% 支用於氣候與能源相關目的上（*EC, 2023*）。另外，美國東北部 11 州所施行的「區域溫室氣體倡議」（*Regional Greenhouse Gas Initiative*，以下簡稱 RGGI），則將 ETS 收入投資於能源效率改善、潔淨與再生能源發展及消費者效益提升等相關計畫，如此使得碳訂價收入回饋至最主要的受管制製造業部門及電力部門，以確保受影響的利害關係者願意接受碳訂價政策的施行（*Asian Development Bank, 2021*）。而碳費（稅）收入支用於國外與氣候相關之政策，最具體的是 UNFCCC 於 2009 年在哥本哈根舉辦的第 15 次締約國會議（*conference of parties*，以下簡稱 COP 15），已開發的富有國家同意至 2020 年為止投入 1,000 億美元加強對開發中國家在氣候變遷減量與調適所需之支出（*Asian Development Bank, 2021*）。而有關於資本成本支持機制主要是指給予投資者低利貸款或補助以作為回報（*Rossetto, 2024*）。而降低資本成本有助於降低離岸風電的發電成本，英國為採低碳、甚而零碳電力，同樣加速發展再生能源，然對再生能源投資者，當前的投資難以掌握未來淨零下的再生能源價格，如此也難以掌握收入，因此對再生能源的投資是一種風險，如以資本成本作為過度至再生能源風險的量化程度，發現批發市場價格變動和不確定性越大，風險和資本成本也越大，以不同再生能源政策暴露程度及投資者轉型路徑風險組合下，各組合之資本成本高達 33% 左右的差異（*Blyth, et al., 2023*）。

在創新的誘導上，碳費（稅）相對於 ETS 雖然有比較大的誘因，但僅施行碳費（稅）無法單獨讓綠色技術創新施行至最佳水準，因為碳費（稅）成本佔了綠色技術發展原本應得的絕大部分報酬（*Grubb & Ulph, 2002*），也就是需繳交的碳費（稅）與發展綠色技術投資之金額不相上下，甚而綠色技術投資所需的金額比所需繳交的碳費（稅）總額更高；因此，即便碳費（稅）無法單獨產生顯著綠色技術之變革性創新（*transformative innovation*），但研究顯示、碳費（稅）仍可成

為減少 GHG 排放遞增創新(*incremental innovation*)的有效激勵措施(*Peters, 2011*)，且碳費（稅）比起 ETS 的遞增創新校過更顯著。此外，碳費（稅）針對 GHG 排放量的課徵、可以發生在產品由生產投入的取得而至末端消費、乃至棄置的任一階段，因此碳費（稅）收入可能來自中間涉及資源開採者、生產鏈中各階段之生產者及消費者，乃至最後消費後廢棄物之處理者；除此之外，碳費（稅）的課徵亦可能改變生產者或消費的行為，而相關行為的改變，亦是綠色科技或技術發生的由來。至於碳費（稅）政策的施行使得家計單位與廠商之受害影響，亦可撥出部分碳費（稅）收入、支用於因碳費（稅）課徵所產生的受害者。此外，發行綠色債券（*green bonds*）或稱為氣候債券（*climate bonds*）¹⁴，比起僅施行任何單一的碳訂價政策，對投資於減緩 GHG 排放及氣候變遷之調適更有助益，因這些債券是由後代子孫償還，如此也表示未來世代由 GHG 減緩或調適而受益的人，由現在開始已逐步分攤今日所開展的 GHG 減緩與氣候調適工作的支出(*Dill, 2024; Heine, et al., 2019*)。而 Heine 等人（2019）又發現以碳費（稅）或是 ETS 的碳訂價政策結合綠色債券較單純的碳訂價更吸引綠色投資的原因是、可降低純粹僅課徵碳訂價的抗拒，雖然碳訂價提供了減排激勵措施，但只能間接降低經濟對氣候變遷的脆弱性，並不能補償受害者，而綠色債券則可以為同樣的氣候變遷減緩或調適提供資金，如此則可能用此於對受害者的補償。

最後，不論來自技術推力或是需求拉力創新政策所產生的創新技術，技術的生產國或是專利未必發生於技術的需求國，然只要讓技術在成本相對低的國家生產即可，此外，創新除了在國內有所影響外，在國外專利取得之多寡亦有所影響，Kim 與 Brown（2019）以照明技術為例，探討 19 個 OECD 國家在 1992 至 2007 年間，採取代表技術推力的能源效率支出水準及代表需求拉力的嚴格能源效率績

¹⁴ 綠色債券最早是由歐洲投資銀行（*European Investment Bank*）、世界銀行（*World Bank*）和瑞典北歐斯安銀行（*Swedish Stockholms Enskilda Bank*，有時亦稱為 *Enskilda Banken* 或 *SEB*）於 2007-2008 年聯合創立，目前由政府機構、多邊機構和私人企業發行（*Heine, et al., 2019*）。而綠色債券原則（*green bond principles*，以下簡稱 *GBP*）、社會債券原則（*social bond principles*，以下簡稱 *SBP*）、永續發展債券指南（*sustainable bond guidelines*，以下簡稱 *SBG*）和永續發展相關債券原則（*sustainability-linked bond principles*，以下簡稱 *SLBP*），這一系列原則是自願框架的集合，其既定使命和角色是促進全球債務資本市場、資助環境和社會的永續過程（*International Capital Market Association, 2025*）。

效標準對照明專利的影響，結果顯示國內需求拉力和技術推力對國內照明專利之申請有正向影響，此外，需求拉力創新政策對國外照明專利申請亦有正面影響，而技術推力創新政策則無此影響；此一結果表示需求拉力政策有助於改變國際低碳市場之技術創新，顯示探討需求拉力創新政策對國外影響是需要納入考慮的層面。當創新技術出口至需求國時，解決氣候變遷問題沒有理由以犧牲自由貿易為代價，因此，世界貿易組織（World Trade Organization, 以下簡稱 WTO）規範不論來自哪一個原產國的綠色技術均不能有差別待遇，不需加徵關稅、也不能採行非關稅貿易障礙（non-trade barriers）、甚而也不允許對出口品有補貼，尤其這些出口國經常是綠色技術生產成本較低的開發中國家，如此方可維持全球供應鏈（global supply chain, 以下簡稱 GSC）順暢運作（Meltzer, 2014）。相同的，Scotti 等人（2025）以 EU 的 ETS 為對象，亦發現此種需求拉力政策也對輕工業製造業的環境專利申請產生了積極正面的影響。

（三）政府以推力及拉力創新政策矯正市場失靈所產生的失靈

為轉型至綠色科技或綠色經濟典範、不論是採行技術推力或是需求拉力創新政策，無非是擬藉由政府所設計的相關政策，解決轉型所面對的各式市場失靈，然實際執行結果卻可能發現、政府一開始可能就不應該取代市場功能或矯正市場失靈，以致發生更低的效率，或者政府原本可以更有效率地解決某個問題或某一系列問題，以能有更大的淨效益，然發現實際情況並非如此時、如此即表示發生政府失靈。即便一般人普遍認為有市場失靈的現象，然仍對政府在經濟活動中採取任何行動卻有適得其反之效果表示懷疑，此種懷疑表示這些人並不認為市場失靈可透過政府採取任何行動獲得解決，如此反應政府不採行任何行動、市場失靈可以自動解決，此一認定卻無法解釋何以印度在 1946 年之前處於非干預殖民管理時期，經濟上卻難以成長的理由（Datta-Chaudhuri, 1990）。然即便認為可由政府執行適當行動以矯正市場的失靈，Hamilton 與 Viscusi（2000）觀察美國過往 30 年來因各式市場失靈所執行的公共政策結果發現，政府失靈的交易成本更高，主要是政府機構的短視、僵化和政策間的衝突，同時不同利益團體（interest group）透過政治力在各政府機構中顯著地影響民選和非民選官員，以致制訂出低效率的

政策，利益團體由此乃獲得經濟租（*economic rent*）。當然，政府失靈發生的原因也可能是政客與管制者或許原本就沒有誘因採行更有效率的政策，也可能是管制者或決策者缺乏充分與完整的資訊（*Anthoff, et al., 2009*）。由此可見，政府相關政策未必是解決市場失靈良方，因政府相關政策本身極可能也存在問題，在此種情況下，政府所設計的技術推力與需求拉力等一系列創新政策，必也遭人們的質疑（*Wintson, 2006*）。

然而，也有另種極端的看法，比如 *Furton 與 Martin (2019)* 認為在各種活動、錯綜複雜的政治經濟世界裡，市場失靈和政府失靈這兩個概念事實上有各自的問題，因此不需刻意討論，需要關注的重點應該轉向因制度失衡所造成的問題。又誘發技術推力之創新與源自需求對技術創新拉力二者既然構成整個創新流程，因而一個有關 GHG 減緩與氣候變遷調適綠色創新技術與制度的生成，未必可以清楚區分是源自自技術推力或需求拉力之創新政策。此外，既然技術推力既可以透過 R&D 之政策與管制，決定公用事業最佳可使用的技術項目，因而，在施行技術推力創新政策時，無意間亦同步制訂了管制項目，依此也執行了管制的推力與拉力。而管制一直是最具爭議的議題之一，批評者認為管制會干擾市場效率，支持者則認為，精心設計的管制不僅能提高市場效率，還能幫助確保市場更加公平；然而，並沒有一個理論可斷言政府失靈必然會超過市場失靈，也沒有任何有說服力的「反事實」，亦即沒有一個完全無管制的世界可用來對比現行體制下或多或少存在著管制的世界；然現實世界、令人擔憂的應該不僅是管制不足，而是現有管制設計過程被控制、管制措施的執行不力（*Stiglitz, 2010*）。

綜合市場失靈與政府失靈數十年來的爭辯，面對綠色科技與經濟轉型課題，如果認定政府矯正市場失靈政策有其功能，前述由政府支援或 R&D 的技術推力或需求拉力創新政策自然可派上用場。然如果對政府矯正市場失靈所施行的相關政策仍持保留態度，實務上而非理論上的操作是如何讓綠色轉型政策免除政府失靈問題，藉此以達成結構性的典範改變，*Tagliapietra 與 Veugelers (2020)* 依此歸納三點免除政府失靈的作法，首要挑戰是資訊問題，由於綠色產業政策需要對潔淨技術採取更針對性的方針，要達成此目的則有賴政府所擁有的資訊能力，以便將資源正確分配給最佳產業和參與者，比如，美國太陽能板生產商 *Solyndra* 透過美國產業政策計畫獲得生產補貼，因大多數太陽能板市場以矽為基礎，而

Solyndra 得以依賴其資訊能力而使用不同類型的太陽能板原料因此具競爭優勢¹⁵。另一個治理挑戰是綠色政策制定的高度不確定性及其對長期視野的需求，這與政治人物追求短期成功的需求相衝突；因此，綠色產業政策盡可能避免不確定性和二者在時間上不一致的問題；雖然制定長期的路徑和目標願景至關重要，但設定里程碑對政治人物則是更務實的作法，比如，上網電價保證期間為 15 至 20 年，此對長期價格具有保障，但拍賣機制則需分批進行，除適應技術成本的變化外，更重要的是給予政治人物短期可兌現的里程目標。又如將氣候變遷挑戰視為社會轉型至新永續成長路徑之契機，增強包括公民在內的利害關係人之廣泛參與是必要的，雖然增加廣泛利害關係人群體可能會加劇尋租挑戰，但也會抵消彼此的尋租動機。

參、OECD 與台灣的綠色成長指標之表現

OECD 這類國際組織的氣候相關活動一般包括相關數據蒐集、統計和測量工作，主要由 OECD 之國際組織與其專家網絡和個別國家，一起參與氣候變遷相關資訊的製作和使用（United Nations, 2024）。因此，OECD 的綠色成長指標即是在此種情況下產生，OECD 綠色成長指標自 2011 年歸類成四大類指標，第一類為指引經濟成長是否隨自然資本更有效率的使用而變得更綠，並捕捉經濟模型和會計框架中很少量化之生產面的「環境與資源生產力」（environmental and resource productivity）、第二類為「自然資產基礎」（natural asset base）意旨自然資產遞減對成長的風險、第三類則為「環境面向的生活品質」（environmental dimension of quality of life）這一類指標所關切的是環境條件對生活品質及人們福祉的影響，至於第四類的「經濟機會與政策回應」指標、主要涵蓋政策在綠色成長實現的有效性，及確保商業和就業機會所需的社會反應等（OECD, 2013；OECD, 2023a）。每一大類指標之下分別有 2 至 6 個不等的細項指標（OECD, 2011b；OECD, 2011c）。

¹⁵ Solyndra 是一間成立於 2005 年美國加州的太陽能公司，於 2011 年 9 月破產，曾獲得聯邦政府 5 億 28 萬美元貸款擔保，Solyndra 成立短短 6 年即破產，與該公司有特殊管道取得特殊資訊能力是另一回事（Boaz, 2015）。

大小各項指標、由 2014 年及 2017 年持續使用至今，而有部分指標在此期間進一步乃分得更細，然而，各國的各細項指標是否有數據，則有賴各國資料的完整性與可及性，目前四大類相關指標仍持續使用中，有關各指標方法論的完整報告分別在 2014 年及 2017 年出版，其中 2017 年報告為最新的版本（OECD, 2014b；OECD, 2017），至於各項指標的定義與說明及資料來源則記載於 2025 年的文件（OECD, 2025a）。

而資料庫中各國最新的完整資料絕大部分收錄至 2021 年，僅有少部分指標更新至 2022 年。因此，後續如果有關歷年資料，則呈現資料庫中開始收錄的 1990 年起、至 2021 年為止，而如果是跨國呈列特定綠色指標的表現與比較、則選擇所有成員國、在資料庫中最新一年 2021 年的結果進行比較。如果台灣的資料在特定指標中也有收錄，則不論是歷年變化或是跨國比較，台灣必然列為其中之一、以能與 OECD 成員國比較或檢視台灣特定指標歷年變化或是與其他國家差異的對照。又為了觀察 OECD 在綠色技術與創新上的進展，則需由資料庫中收集成員國或台灣自開始至最新年份，選擇前述四大類中有關「環境與資源生產力」與「經濟機會與政策回應」其中的一些代表性指標依序觀察，由於這兩大類指標可適當連結碳費（稅）的施行與綠色技術與創新由發想、萌芽至完成。經由「環境與資源生產力」這大類可以得知 OECD 各成員國或台灣在經濟活動的生產面或是消費面所產生的 CO₂，因為各種經濟活動所產生的 CO₂ 排放量，是促使 OECD 各成員國或是台灣減碳、並開啟相關綠色技術及創新活動的源頭。而對應的「經濟機會與政策回應」可觀察公私部門對綠色技術與創新著力，因此，掌握綠色 R&D 是重要且必要的第一步，而專利數量的多寡正提供了一種評估（中間）結果的方法（OECD, 2017）。

一、誘發綠色技術與創新的源頭

資料庫中收錄了 OECD 各國由 1990 年至 2021 年以生產為基礎的 CO₂ 排放量，而台灣在同樣期間也有各年以生產為基礎的 CO₂ 排放量，而此種 CO₂ 排放量自 1995 年起亦登錄了世界的資料。而另外以消費為基礎的 CO₂ 排放量，僅 OECD 自 1995 年起至 2018 年有此記錄，台灣與世界並無此一資料的紀錄。由此可見，

台灣、OECD 整體與世界全部以生產為基礎的 CO₂ 排放量資料相對完整，因此可以觀察以生產為基礎之 CO₂ 排放量，在台灣、OECD 整體及世界全部國家，以生產為基礎的 CO₂ 歷年來的變動趨勢。前述相關 CO₂ 排放量的詳細數據如表 1 所列，將這些數據資料以圖示表示、更可以清楚觀察台灣、OECD 全部成員國及世界所有國家以生產為排放基礎的 CO₂ 排放量之歷年變動趨勢，因台灣及 OECD 和世界以生產為基礎的 CO₂ 排放量大小差異極為懸殊，如將三個排放量劃在同一個圖形上，台灣的數值無法呈現出來，因此，台灣以生產為基礎的 CO₂ 排放量自成一個圖呈現，此一圖形和 OECD 及世界以生產為基礎之 CO₂ 排放量大小的圖形可以觀察歷年之趨勢，因此，圖 2 呈現 OECD 整體及世界所有國家的結果¹⁶，而台灣的結果另外呈現於圖 3。由圖 2 與圖 3 可見，台灣由最早的 1995 年至最新的 2018 年有逐步上升趨勢，世界各國亦復如此，而 OECD 各國整體則有緩慢下降的趨勢，由此可見，OECD 全部成員國自 1990 年以來以生產為基礎的 CO₂ 排放量的減少，比台灣及世界整體相對明顯。



來源：OECD (2024b；2025b)。

圖 2：1995-2018 年 OECD 及世界以生產為基礎的 CO₂ 排放量與對應的 CO₂ 生產排放係數

¹⁶ 因世界全部國家以生產為基礎的 CO₂ 排放量，在資料庫中是直接呈現世界全部數值，因而無法得知世界各年之相關 CO₂ 排放量所涵蓋的國家數，故無法將全部的排放量以國家數平均，以能與台灣做單一國家與經濟體的比較。因此，以生產為基礎的 CO₂ 排放量，乃用世界全部國家、OECD 整體國家與台灣，觀察期間內整體排放量的變動趨勢。



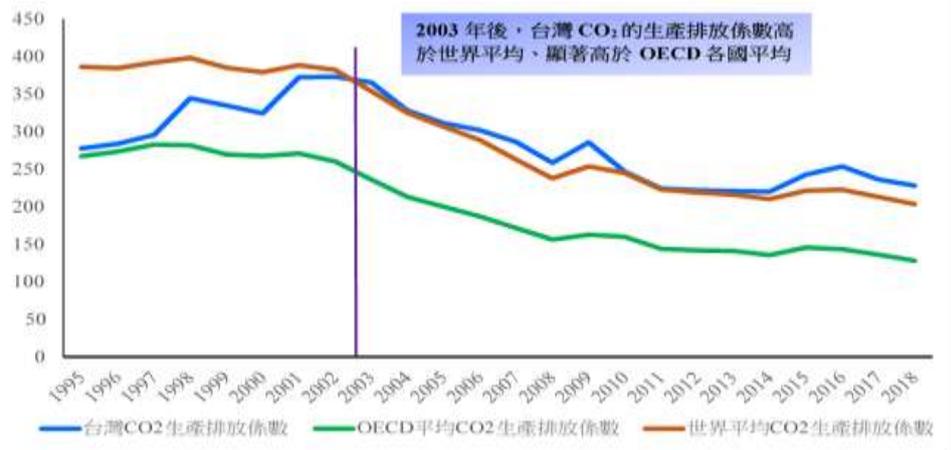
來源：OECD（2024b；2025b）。

圖 3：1995-2018 年台灣以生產為基礎的 CO₂ 排放量與對應的 CO₂ 生產排放係數

而以生產為基礎的 CO₂ 排放量，可以合理連結 CO₂ 排放係數，這表示就一個國家而言，每個活動所產生的 CO₂，經常是以每產出一單位的國內生產毛額(gross domestic product，以下簡稱 GDP)所排放的 CO₂ 的量來表示，因此，CO₂ 排放係數越大、代表生產製造的 CO₂ 越多，國家享有越高的 GDP、連帶也排放越多的 CO₂、接續就需負擔越大的 CO₂ 排放減量。由於台灣、OECD 各成員國及世界各國的 CO₂ 生產排放係數均是由 1995 年開始，為使三者可以有相同年份比較對照，資料一律由 1995 年開始。由圖 2 可以看出世界各國以生產為基礎的 CO₂ 排放量雖是增加，然而生產排放係數確是顯著的遞減；而 OECD 成員國整體以生產為基礎的 CO₂ 排放量相較於全世界的相同指標，由 1995 年至最新的 2021 年有微幅下降的趨勢，而同一時段至 2018 年的 CO₂ 排放係數則有顯著的下降，此二指標在歷年的變動趨勢，就 OECD 所有成員國而言，此一結果相當有可能是以生產為基礎的 CO₂ 排放量的降低，是來自於逐步降低之 CO₂ 排放係數的貢獻；而對世界各國、逐年顯著降低的 CO₂ 排放係數、卻沒有對 CO₂ 排放量有顯著的貢獻。而圖 3 則是台灣以生產為基礎的 CO₂ 排放量及 CO₂ 排放係的關係，在這段期間 CO₂ 排放量仍處於增加的趨勢，而對應期間之 CO₂ 排放係數，雖有高低起伏變動、然整體而言逐年下降，如此表示逐年下降的 CO₂ 排放係數對以生產為基礎的 CO₂ 排

放量的降低之貢獻相當有限。圖 4 則比較台灣、OECD 所有成員國及世界各國 CO₂ 之生產排放係數。由圖 4 可見，台灣自 2003 年起 CO₂ 的生產排放係數高於世界各國平均、也顯著高於 OECD 各國平均，由此顯見，台灣 CO₂ 生產排放係數仍有相當大的改善空間。

CO₂ 噸數/百萬美元



來源：OECD（2024b）。

圖 4：1995-2018 年台灣、OECD 各國平均與世界各國平均的 CO₂ 生產排放係數比較

如果進一步深入比較台灣及 OECD 所有成員國，以生產為基礎及以消費為基礎的 CO₂ 排放量個別差異及合計兩種 CO₂ 排放量的大小，由圖 5 可看出，OECD 所有成員國自 1995 年有完整的生產及消費為基礎的 CO₂ 排放量以來，各年以消費為基礎的 CO₂ 排放量均多於以生產為基礎的 CO₂ 排放量；至於台灣並沒有以消費為基礎的 CO₂ 排放量資料，因此每年總 CO₂ 排放量基本上是以生產為基礎的量，如果比較 OECD 所有成員國與台灣 CO₂ 的總排放量可發現，OECD 所有成員國的 CO₂ 總排放量已近入漸減的階段，而台灣整體的 CO₂ 排放量仍未有明顯的下降趨勢。而圖 6 則顯示，台灣與 OECD 成員國整體的 CO₂ 排放係數自 1995 年來均呈現下降的趨勢，然而，OECD 成員國排放係數的下降似乎有帶動以生產及消費為基礎的 CO₂ 排放量，然對台灣則似乎未有此效果；如此顯示，排放係數的降低帶來的 CO₂ 排放減少似乎仍不敵其他造成 CO₂ 排放量增加的效果。

表 1：台灣、OECD 及世界之生產排放係數與以生產及與消費為基礎之 CO₂ 排放量

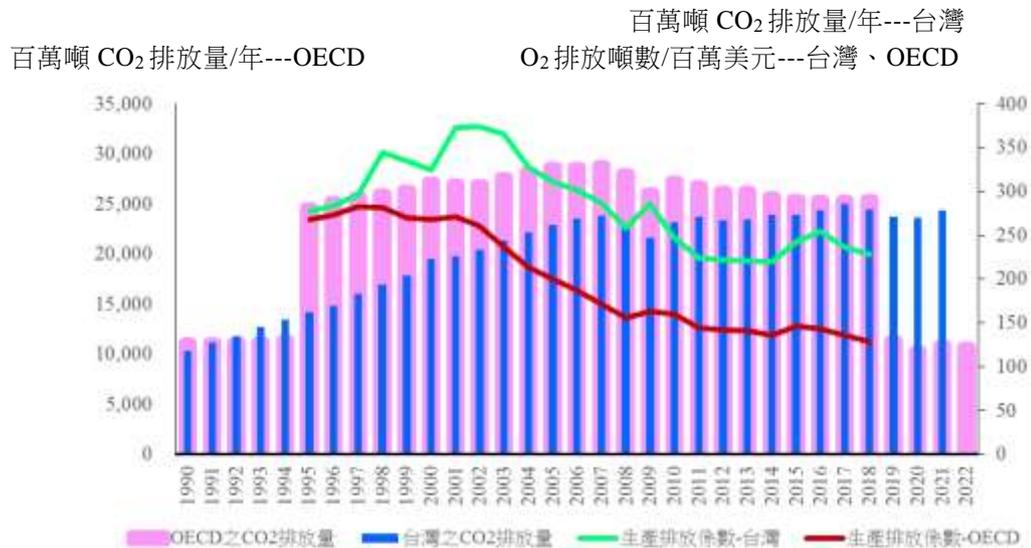
年	生產排放係數 (CO ₂ 排放噸數/百萬美元)			CO ₂ 排放量 (百萬噸)			CO ₂ 排放量 (百萬噸)		
	台灣	OECD 各國平均	世界各 國平均	生產為基礎			消費為基礎		
				台灣	OECD	世界	台灣	OECD	世界
1990	---	---	---	117.95	11,110.20	---	---	---	---
1991	---	---	---	127.62	11,153.83	---	---	---	---
1992	---	---	---	135.25	11,177.38	---	---	---	---
1993	---	---	---	144.99	11,265.24	---	---	---	---
1994	---	---	---	153.44	11,445.45	---	---	---	---
1995	277.62	267.44	386.37	161.83	11,590.62	21,367.15	---	13,015.73	---
1996	283.77	273.44	384.54	169.59	11,969.34	21,815.23	---	13,304.87	---
1997	295.81	282.84	391.93	182.53	12,229.46	22,214.49	---	13,505.52	---
1998	344.60	281.83	398.36	193.38	12,238.65	22,391.01	---	13,748.13	---
1999	334.74	269.54	384.94	203.87	12,294.04	22,526.53	---	14,043.82	---
2000	324.32	267.59	379.19	222.64	12,603.92	23,239.76	---	14,594.76	---
2001	372.32	270.92	388.53	225.76	12,623.37	23,587.41	---	14,424.58	---
2002	373.21	260.38	382.29	233.57	12,531.07	23,923.63	---	14,424.93	---
2003	365.43	236.17	353.91	243.53	12,752.50	24,955.58	---	14,917.09	---
2004	327.99	213.13	325.00	253.25	12,870.90	26,130.39	---	15,366.75	---
2005	311.19	199.92	306.64	261.14	12,910.96	27,084.10	---	15,726.59	---
2006	301.87	187.05	288.71	268.93	12,835.80	27,952.87	---	15,796.73	---
2007	286.24	171.50	262.75	271.86	12,991.30	28,999.49	---	15,856.53	---
2008	258.67	156.20	237.90	259.97	12,670.32	29,217.93	---	15,390.77	---
2009	285.63	162.71	253.76	247.16	11,947.83	28,783.73	---	14,111.69	---
2010	246.69	159.95	244.97	264.45	12,441.35	30,573.37	---	14,845.89	---
2011	224.32	143.82	222.97	270.89	12,203.35	31,452.17	---	14,633.21	---
2012	221.90	141.77	219.04	267.31	12,018.15	31,797.65	---	14,274.87	---
2013	220.81	141.06	215.97	267.86	12,080.77	32,404.09	---	14,180.60	---
2014	220.03	135.53	210.14	272.88	11,831.05	32,461.59	---	13,920.41	---
2015	242.68	145.84	221.37	273.24	11,763.74	32,361.20	---	13,707.02	---
2016	253.73	143.29	222.71	278.65	11,695.49	32,384.61	---	13,628.12	---
2017	236.44	136.05	213.22	285.24	11,663.24	32,923.32	---	13,672.69	---
2018	227.99	128.26	203.48	279.50	11,681.32	33,635.28	---	13,753.90	---
2019	---	---	---	270.63	11,307.98	21,367.15	---	---	---
2020	---	---	---	269.65	10,283.68	21,815.23	---	---	---
2021	---	---	---	278.75	10,848.22	22,214.49	---	---	---

來源：生產排放係數與世界以生產為基礎的 CO₂ 排放量來自 OECD (2024b)、其他來自 OECD (2025b)。
 註：表中標示「---」表示該年份沒有相關資料。



來源：OECD (2025b)。

圖 5：1990-2022 台灣及 OECD 各國以生產及消費為基礎
每年 CO₂ 排放量變動趨勢與比較



來源：OECD (2024b)、OECD (2025b)。

註：OECD 成員國在 2019、2020、2021 及 2022 沒有以消費為基礎的 CO₂ 排放量，因此圖中在這 4 年僅是以生產為基礎的 CO₂ 排放量。

圖 6：1990-2022 台灣與 OECD 來自以生產與消費為基礎之
CO₂ 排放總量與對應的 CO₂ 排放係數

二、台灣與 OECD 成員國公私部門投入綠色技術與創新的 R&D

（一）台灣與 OECD 成員國私人企業部門與政府部門 R&D 支出比較

國內 R&D 總支出（gross domestic expenditure on R&D，以下簡稱 GERD）是指一個國家內部在特定期間（通常以一年為期間）涵蓋主要總體政府部門、私人企業部門、教育、私人非營利組織（private non-profit organisation）等四大部門，支出於基礎研究、應用研究、實驗發展及其他未記錄的資本支出之 R&D 等所有支出，因此，GERD 包括國外資助的國內研發（OECD, 2015b），但不包括在國外進行的 R&D。而政府部門包括中央及各層級之地方政府，以下的比較主要針對前述四大部門中的政府部門及私人企業部門進行比較，因這兩部分歷年來佔所有 R&D 支出約高達 80%、甚至至達 90%，其餘則為教育及私人非營利組織兩部分。表 2 顯示，自 1990 年起，OECD 各成員國每年平均 R&D 的總支出，特別列出各國政府部門各年執行 R&D 的平均年支出及各國私人企業部門執行 R&D 年平均支出；而台灣的相同資料則自 1998 年起開始收錄。而其中政府的 R&D 預算，是指中央與各級政府經由稅收或標準審核程序所執行的 R&D 業務之撥款（government budget allocations for research and development，以下簡稱 GBARD）¹⁷，用於政府為滿足各種社會經濟目標而分配給 R&D 的資金，這其中包括政府給予私人企業部門的直接資助或是間接的 R&D 稅收抵減誘因的資金（OECD, 2025a）；後續將分析台灣或 OECD 成員國政府整體或各國政府平均給予私人企業部門的直接間接資助，尤其私人企業部門為一國整體 R&D 相對高的部門，可以觀察再加上政府的直接間接資助後的效果。

OECD 各成員國及台灣之政府及私人企業部門的 R&D 各年平均支出值，及各年平均值佔各年 R&D 總支出之比例則呈現於圖 7，由圖 7 清楚可見，OECD 各

¹⁷ GBARD 是政府公共預算的 R&D 支出以及政府對 R&D 活動的支持預算分配，GBARD 是按社會經濟目標（亦即按政府、私人企業、教育及非營利組織四大部門）等政策相關類別進行分配 R&D 支出；此與主要目的是專注於提供全面私人企業 R&D 支出數據的「分析性企業 R&D」資料（Analytical business enterprise research and development，以下簡稱 ANBERD）不同，ANBERD 資料庫包含多項估算數據，而這些估算數據是擴展各國按主要活動/行業導向的企業 R&D 數據（OECD, 2020；OECD, 2021）。

國自 1990 年以來，各國每年 R&D 平均總支出至 2005 年為遞減、此後乃遞增至 2021 年；而台灣自 1998 年來，政府及私人企業部門每年 R&D 支出總和則持續增加，如進一步觀察造成 OECD 各國由 1990 年至 2021 年 R&D 總支出遞減後再遞增，而台灣自 1998 年至 2021 年 R&D 總支出持續增加的緣由，由圖 7 可見，OECD 各國私人企業部門的 R&D 佔 R&D 總支出比在 32 年當中、有高低起伏的變化，而政府部門 R&D 的佔比則呈現漸減的趨勢，因此，兩大部門 R&D 支出和有漸減後再遞增的現象；而台灣私人企業部門 R&D 佔比在 24 年當中有極顯著的增加，至於政府部門 R&D 佔比下降的幅度比起 OECD 各成員國的平均更加顯著，因此，台灣每年整體 R&D 總支出金額的上升，甚而比 OECD 各成員國平均來得高，主要是來自私人企業部門 R&D 支出顯著增加的結果。

而如果觀察 OECD 各成員國及台灣最新一年 2021 年，各國 R&D 總支出及政府、私人企業及教育與私人非營利組織等三大部門佔 R&D 總支出及各支出佔比詳細資料如附表 1，將這些結果繪製如圖 8 可以發現，台灣與 32 個有完整資料的 OECD 成員國於 2021 年之 R&D 總支出，台灣在 33 個國家中排序第 7，R&D 總支出約屬前 20%，高於絕大部分的 OECD 成員國，此一結果主要得力於台灣私人部門企業對 R&D 支出的重視，至於 OECD 的 32 個國家，最特殊的除了荷蘭，是教育與私人非營利組織的 R&D 支出遠高於私人部門 R&D 佔 R&D 總支出比外，其他的 31 個國家亦都是私人企業部門 R&D 的高比例帶動了一國整體 R&D 的總支出；而教育及私人非營利組織的 R&D 支出佔 R&D 總支出比，除了前述的荷蘭特殊情況外，其他 32 個國家則低於私人企業部門 R&D 支出佔 R&D 總支出比、而高於政府部門的對應比。圖 8 右邊 R&D 總金額相對低的國家，教育及私人非營利組織的 R&D 支出佔 R&D 總支出比與政府部門 R&D 佔 R&D 總支出比則趨於相同，其中最特殊的是斯洛維尼亞及盧森堡，在 2021 年，教育及私人非營利組織的 R&D 支出佔 R&D 總支出比約與政府部門 R&D 支出比相同，表示這兩個國家的教育及私人非營利組織兩大部門，和政府部門對 R&D 等同的重視。

表 2：1990-2021 年 OECD 各國平均及台灣每年 R&D 總支出、政府與私人企業部門執行 R&D 支出及對應比例*

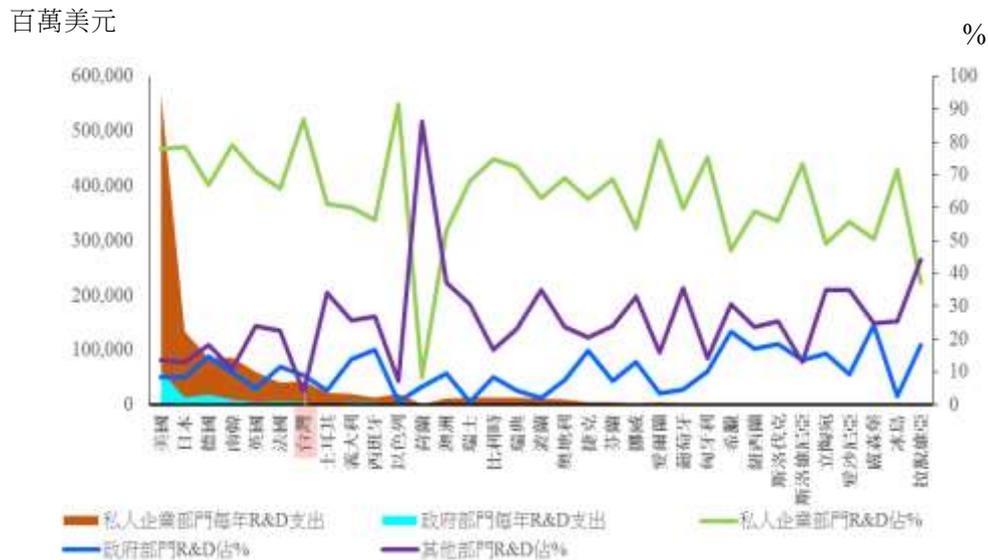
年	OECD 國家										台灣 ^b			
	OECD 各 國每年執 行 R&D 平 均總支出 (百萬元 美元)	各國政 府部門 執行 R&D 支出 (百萬元 美元)	各國政 府部門 執行 R&D 比例 (%)	各國私 人企業 部門 執行 R&D 支出 (百萬元 美元)	OECD 各 國私人企 業部門 執行 R&D 比例 (%)	台灣政 府部門 執行 R&D 支出 (百萬元 美元)	台灣政 府部門 執行 R&D 比例 (%)	台灣私 人企業 部門 執行 R&D 支出 (百萬元 美元)	台灣私 人企業 部門 執行 R&D 比例 (%)	台灣政 府部門 執行 R&D 支出 (百萬元 美元)	台灣私 人企業 部門 執行 R&D 支出 (百萬元 美元)			
1990	45,251.44	8374.96	18.51	38,198.49	84.41	---	---	---	---	---	---			
1991	46,247.15	6592.04	14.25	28,955.17	62.61	---	---	---	---	---	---			
1992	39,518.03	6224.41	15.75	26,772.07	67.75	---	---	---	---	---	---			
1993	45,776.98	6613.16	14.45	27,855.08	60.85	---	---	---	---	---	---			
1994	41,617.11	6502.00	15.62	29,893.19	71.83	---	---	---	---	---	---			
1995	33,575.78	5402.28	16.09	24,116.72	71.83	---	---	---	---	---	---			
1996	37,725.55	4979.47	13.20	27,789.48	73.66	---	---	---	---	---	---			
1997	41,052.62	5129.99	12.50	29,001.35	70.64	---	---	---	---	---	---			
1998	40,465.96	4457.24	11.02	28,279.81	69.89	10,502.38	2502.20	23.83	6745.01	64.22	64.22			
1999	41,796.52	5049.60	12.08	29,559.84	70.72	11,562.02	2708.81	23.43	7413.34	64.12	64.12			
2000	35,634.25	4207.72	11.81	26,445.61	74.21	12,103.82	2847.30	23.53	7698.32	63.60	63.60			
2001	30,904.46	3950.47	12.78	21,814.88	70.59	12,633.42	2941.95	23.29	8030.68	63.57	63.57			
2002	31,827.08	3814.33	11.99	21,700.73	68.18	13,888.67	3446.55	24.82	8637.16	62.19	62.19			
2003	29,597.13	3851.37	13.01	20,130.62	68.02	15,249.05	3761.55	24.67	9579.32	62.82	62.82			
2004	33,727.46	4118.30	12.21	22,968.31	67.92	16,649.39	3866.77	23.22	10,769.43	64.68	64.68			
2005	29,318.58	3541.81	12.08	19,651.46	67.03	18,040.65	3797.36	21.05	12,095.78	67.05	67.05			
2006	33,623.64	3881.95	11.55	23,307.20	69.32	19,962.46	3963.72	19.86	13,473.85	67.50	67.50			
2007	33,515.32	3898.67	11.63	23,026.13	68.70	21,686.84	3963.43	18.28	15,000.51	69.17	69.17			
2008	34,739.68	4097.89	11.80	25,134.48	72.35	23,527.27	3867.62	16.44	16,706.40	71.01	71.01			
2009	33,219.60	4202.75	12.65	23,024.31	69.31	24,609.67	4053.32	16.47	17,300.63	70.30	70.30			
2010	36,935.35	4449.19	12.05	24,885.17	67.38	26,887.28	4228.44	15.73	19,249.31	71.59	71.59			
2011	33,951.85	4127.17	12.16	23,074.44	67.96	28,832.72	4281.58	14.85	20,927.53	72.58	72.58			
2012	35,298.89	4080.08	11.56	24,223.11	68.62	29,923.91	4151.24	13.87	22,209.45	74.22	74.22			
2013	33,407.25	3855.30	11.54	22,966.88	68.75	31,136.12	4066.78	13.06	23,513.80	75.52	75.52			
2014	36,852.69	3904.21	10.59	25,667.47	69.65	32,369.44	3981.96	12.30	24,919.30	76.98	76.98			
2015	35,276.18	3715.33	10.53	24,635.77	69.84	33,058.82	4014.26	12.14	25,663.18	77.63	77.63			
2016	38,867.93	3803.18	9.79	27,612.63	71.04	34,745.12	4441.39	12.78	26,935.65	77.52	77.52			
2017	37,769.67	3602.04	9.54	26,804.41	70.97	37,159.17	4360.75	11.74	29,372.56	79.05	79.05			
2018	45,737.53	4274.04	9.35	31,957.26	69.87	40,079.67	4277.43	10.67	32,188.51	80.31	80.31			
2019	44,206.57	4084.75	9.24	31,922.58	72.21	43,043.57	4545.64	10.56	34,837.40	80.94	80.94			
2020	50,787.01	4685.09	9.23	35,975.90	70.84	45,981.36	4394.25	9.56	37,957.15	82.55	82.55			
2021	49,616.05	4396.00	8.86	36,691.56	73.95	51,229.88	4485.74	8.76	43,174.10	84.28	84.28			

來源：OECD (2024c)。
 註 a：依 OECD (2024c) 定義，一個國家一年的 R&D 共分成政府、私人企業、而另兩個其他部門分別為教育及私人非營利組織。
 此處僅列出政府及私人企業的 R&D 支出。
 註 b：台灣資料自 1998 年才開始收錄在 OECD 資料庫中。



來源：OECD (2024c)。

圖 7：台灣與 OECD 各國 1990-2021 每年政府及私人企業部門 R&D 總支出與各部門 R&D 佔 R&D 總支出比例之變動與比較



來源：OECD (2024c)。

圖 8：2021 年台灣與 OECD 各國政府部門與私人企業部門 R&D 支出及各支出佔 R&D 總支出比

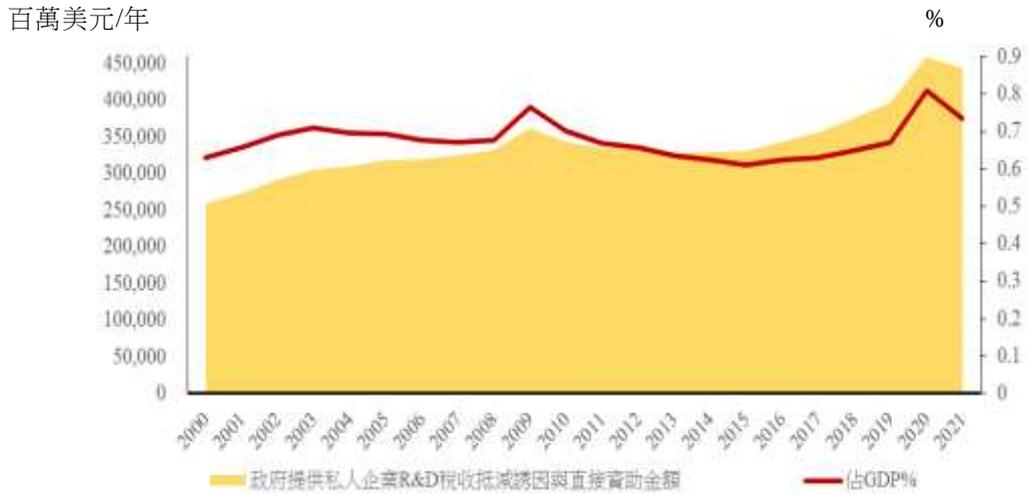
（二）私人企業對 R&D 直接投注與政府部門對企業的稅收抵減誘因與資助

不論是 OECD 成員國或是台灣，可以看出主導一國每年 R&D 總支出的多寡，主要取決於私人企業部門的 R&D，而私人部門除了企業本身所投注 R&D 支出外，OECD 各政府尚對私人企業 R&D 有稅收抵減誘因及直接資助金額（R&D tax incentives and direct funding），這些稅收抵減誘因與直接資助是反應 OECD 成員國地方與中央政府對各國 R&D 資助的一項指標。因此，就私人企業而言，除了私人企業本身於 R&D 的支出外，亦可觀察 OECD 各國政府部門歷年提供給私人企業 R&D 稅收抵減誘因與直接資助金額。而 OECD 各成員國政府部門資助的總金額，由有紀錄的 2000 年起至最新的 2021 年呈現遞增的趨勢，又 OECD 資料庫同時也紀錄政府提供的金額佔 OECD 全部成員國 GDP 的比例，資料庫所涵蓋的 22 年當中，OECD 各國政府部門提供私人企業的 R&D 稅收抵減誘因與直接資助金額總額如圖 9 所示，此一總金額有微幅上升的趨勢，而在這 22 年中，政府以不同形式提供予私人企業 R&D 的直接間接資助，平均約佔各國 GDP 的 0.7%（OECD, 2024f）。

而如果將台灣與 OECD 有完整資料之各成員國，OECD 資料庫計有這些國家歷年私人企業投注於 R&D 支出及其與政府部門提供私人 R&D 稅收抵減與直接補助，稱為私人企業 R&D 支出總和如附表 2 所列的結果。而本文進一步計算台灣及 OECD 各國年平均私人企業 R&D 支出總和，並計算此一總和佔各國每年 R&D 總支出金額比例與佔各國 GDP 比例。私人企業 R&D 支出總和佔台灣 R&D 總支出的比例，介於 62.19%和 84.28%之間，而 22 年私人企業 R&D 支出總和佔台灣 R&D 總支出的平均值為 72.5%；至於 OECD 各國年均相同的比例則介於 92.7%至 100.0%之間，22 年的平均比例為 96.39%。對於 OECD 而言，各國年均私人企業 R&D 支出總和的佔比在這一段時間、是上下起伏變動，台灣則呈現明顯的上升。至於私人企業相同的 R&D 支出總和佔 GDP 的比例極低，OECD 各年在 2000 至 2021 年約介於 0.82%至 1.1%之間，22 年間同樣是上下起伏的變動。至於相同的比例，台灣比例稍高，在同年份期間，則介於 1.17%至 3.18%之間，此一結果呈現台灣私人企業 R&D 除了來自企業本身的投資外，政府提供直接間

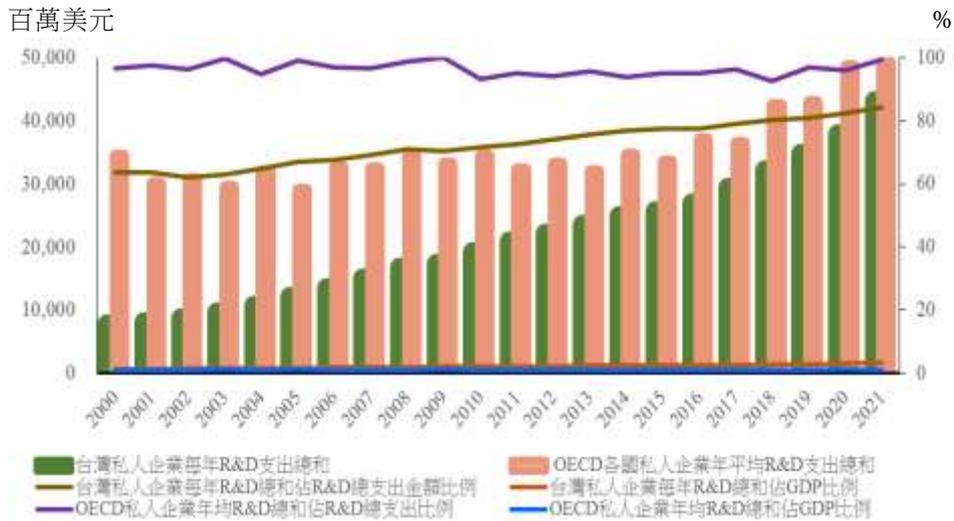
接資助總和佔 GDP 比例亦明顯高於 OECD 各國的平均，此一比例自 2000 年起有逐年上升的趨勢。附表 2 各比例結果繪製如圖 10 所示。

而如果觀察最新 2021 年，私人企業本身所投注於 R&D 支出與政府部門提供私人企業 R&D 稅收抵減誘因與直接資助金額，有完整資料的 36 個 OECD 成員國之詳細資料如表 3 所示。由於各國物價水準有高低懸殊差異，因而資料庫中乃以 2015 年之物價購買力為基準的實質 GDP 水準，如此方能讓各國在相同基準上比較私人企業本身所投注於 R&D 支出與政府部門提供私人企業的 R&D 稅收抵減誘因與直接資助金額，及私人企業部門直接投注於 R&D 及間接得自於政府部門的不同形式資助之 R&D 佔 GDP 之比例，結果如表 3 的第 5 欄所列。其結果可看出，2021 年中南美洲的智利與墨西哥，私人企業部門 R&D 直接間接支出佔該國 GDP 最低，分別為 0.188%與 0.197%；而比例最高的為南韓與以色列，分別佔其 GDP 的 5.202%及 5.827%，而台灣在同年度此一比例為 3.179%，此一比例與 36 個有完整資料的 OECD 成員國並列，則排序在第 9，屬於前三分之一高比例的國家；由於 OECD 各成員國的私人企業部門 R&D 支出、與政府部門提供私人企業的 R&D 稅收抵減誘因與直接資助金額並非各國資料均完整，有缺漏時，則無法計算各項支出佔私人企業部門 R&D 直接間接支出總和的比例。唯該資料庫已現成提供 36 個國家的私人企業部門 R&D 直接間接支出總和，於是再利用資料庫所提供以 2015 年為基準的實質 GDP 水準，計算各國私人企業部門 R&D 直接間接支出總和佔 GDP 比例呈現於表 3 第 5 欄。因此，綜合台灣與 OECD 有完整資料的 36 個成員國的表現可發現，2021 年台灣私人企業部門 R&D 支出與政府提供私人企業 R&D 稅收抵減誘因與直接資助總額、在 37 個國家中排序第 7，而這些金額佔 2021 年 2015 年實質 GDP 排序為第 9，私人企業部門 R&D 直接間接支出總額，主要還是來自私人企業部門 R&D 的直接投入，相關結果如圖 11 所呈現。



來源: OECD (2024d ; 2024e ; 2024f ; 2024g)。

圖 9：2000-2021 年 OECD 整體政府各年提供私人企業 R&D 稅收抵減誘因與直接資助金額及其佔 GDP 比例之變化



來源：(OECD, 2024h ; OECD, 2024i)。

圖 10：2000-2021 年台灣及 OECD 各國年平均私人企業 R&D 支出與政府提供企業 R&D 稅收抵減誘因與直接資助總和及各相關比例

表 3：2021 年台灣與 OECD 各國私人企業部門 R&D 支出與政府提供企業 R&D 稅收抵減誘因及資助金額及佔 GDP 比例*

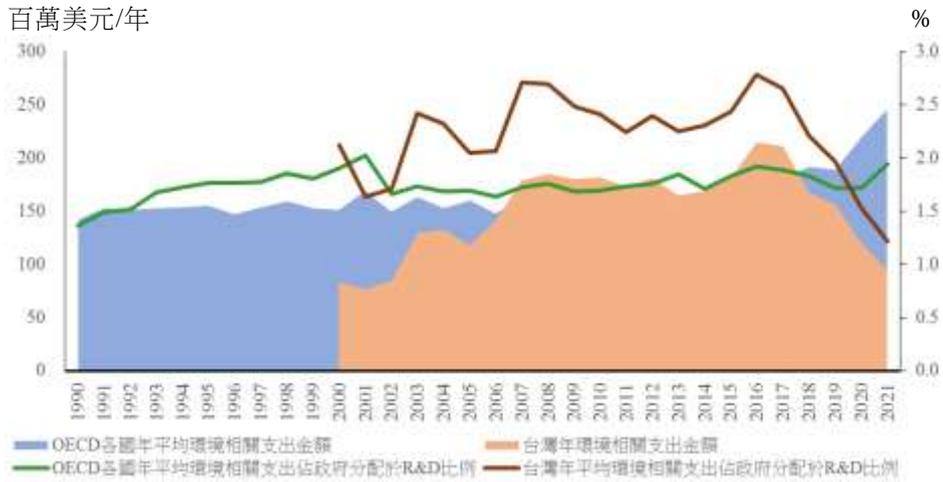
國家與區域	私人企業部門每年 R&D 支出 (百萬美元) (A)	政府每年提供企業 R&D 稅收抵減誘因和直接資助金額 (百萬美元) (B)	私人企業部門每年之 R&D 支出與來自政府提供 R&D 稅收抵減誘因與直接資助金額 (百萬美元) (C) = (A) + (B)	私人企業部門每年之 R&D 支出與來自政府提供企業之 R&D 稅收抵減誘因與直接資助金額佔 GDP 比例 (%) (C) / (D) * 100	以 2015 年為物價購買力為基準之實質 GDP 總額 (百萬美元) (D)
北中南美洲					
1 加拿大	---	8902.4	8902.4	0.512	1,738,091.5
2 美國	565,363.1	142,941.4	708,304.5	3.399	20,833,086.0
3 智利	---	858.7	858.7	0.188	457,693.9
4 哥倫比亞	---	---	---	---	---
5 哥斯大黎加	---	---	---	---	---
6 墨西哥	---	4631.1	4631.1	0.197	2,352,699.3
亞洲及太平洋					
7 日本	135,125.1	77,693.8	212,818.9	4.054	5,249,149.5
8 南韓	86,922.3	29,473.9	116,396.2	5.202	2,237,606.0
9 澳洲	11,369.8	4812.3	16,182.1	1.208	1,339,039.5
10 紐西蘭	1804.8	---	1840.8	0.872	211,041.2
歐洲					
11 奧地利	10,216.2	3667.5	13,883.7	3.051	455,039.1
12 比利時	14,312.2	4074.2	18,386.4	3.255	564,862.1
13 捷克	5027.8	2515.1	7,542.9	1.821	414303.2
14 丹麥	---	2895.2	2895.2	0.901	321,472.5
15 愛沙尼亞	474.1	332.4	806.5	1.678	48,066.7
16 芬蘭	5221.1	2265.2	7,486.3	2.948	253,984.2
17 法國	41,842.0	20,256.9	62,098.9	2.159	2,876,696.3
18 德國	86,581.4	46,228.8	132,810.2	3.213	4,134,166.5
19 希臘	2034.5	2532.9	4,567.4	1.548	295,021.2
20 匈牙利	3938.6	1432.5	5,371.1	1.691	317,595.9
21 冰島	374.8	220.4	595.2	3.158	18,847.7
22 愛爾蘭	4535.5	1113.6	5,649.1	1.068	528,826.1
23 以色列	20,053.8	2129.2	22,183.0	5.827	380,722.0
24 義大利	19,813.5	14,786.1	34,599.6	1.499	2,307,492.8
25 拉脫維亞	156.5	142.3	298.8	0.531	56,260.9
26 立陶宛	562.2	320.6	882.8	0.852	103,570.3
27 盧森堡	381.2	427.9	809.1	1.115	72,581.3
28 荷蘭	1804.8	7505.4	9,310.2	0.952	977,453.9
29 挪威	3758.4	3285	7,043.4	2.061	341,674.9
30 波蘭	11,551.2	5840.5	17,391.7	1.362	1,276,486.3
31 葡萄牙	3311.3	1197.7	4,509.0	1.357	332,206.5
32 斯洛伐克	948.6	750.6	1,699.2	0.919	184,761.7
33 斯洛維尼亞	1234.5	400.0	1,634.5	2.066	79,111.7
34 西班牙	13,459.5	10,400.6	23,860.1	1.406	1,696,698.0
35 瑞典	13,405.7	4232.3	17,638.0	3.256	541,646.8
36 瑞士	13,545.6	5951.1	19,496.7	3.247	600,375.6
37 土耳其	22,773.8	9956.8	32,730.6	1.236	2,648,229.3
38 英國	59,728.0	17,853.0	77,581.0	2.669	2,907,017.3
台灣	43,174.1	---	43,174.1	3.179	1,358,288.8

來源：OECD (2024d；2024e；2024h；2024i；2025d)。

註*：資料庫中有些國家 (A) 欄資料庫未提供數據，有些則未提供 (B) 欄位數據，然為了能有更多國家數的比較，只要有任一欄數值存在，則均計算出該國的 (C) 私人企業自行投入的 R&D 及來自政府對企業 R&D 稅收抵減誘因與直接資助總和，然對於這些國家，嚴格說資料庫是沒有提供資料，並非對應欄位的 R&D 金額為 0，因此，對私人企業所有 R&D 總和相當可能是低估。表中除了哥倫比亞 (2020 年成為會員) 及哥斯大黎加 (2021 年成為會員)，因此一資料是落後一年，於是這兩國在 2021 年尚無 (A) 與 (B) 欄位的資料，故無法計算結果。

有紀錄，而最新資料為 2021 年，而台灣則至 2000 年方有此類資料，此處乃選擇最接近於與能源使用最接近的環境支出，因而圖 12 的環境支出是選擇用於環境及化石燃料與再生能源的公共 RD&D 中涵蓋技術及創新的 R&D (technology and innovation R&D)，其下有三大項目，分別為環境相關 R&D 支出 (environment related R&D expenditure)、再生能源公共 RD&D 預算 (renewable energy public RD&D budget) 及不包含 CCS 的化石燃料公共 RD&D 預算 (fossil fuel public RD&D budget excluding carbon capture and storage) (OECD, 2025c)。根據資料庫對這三個項目的定義，環境相關 R&D 支出範疇比較廣，包括直接對控制污染和開發測量、消除和防止污染的監測設施的相關研究，因此，將其呈現於圖 12，由圖 12 清楚可現，雖然台灣有環境相關 R&D 支出記錄、但資料記錄比 OECD 各成員國晚，然台灣在這方面的年平均支出卻是高於 OECD 各成員國每年平均，同時，台灣及 OECD 各國年平均環境相關 R&D 支出，除了自 2017 年至最新的 2021 年佔政府總 R&D 支出逐年下降外，由 2000 年起、均高於 OECD 各成員國年平均，而台灣在此一比例下降至低於 OECD 成員國，OECD 成員國此一比例基本上維持在 2% 的比例，而是台灣的環境相關支出佔政府總 R&D 支出比有顯著的下降，表示台灣自 2017 年政府的 R&D 支出移往別項目上。

而技術與創新 R&D 之能源公共 RD&D 預算中，包括再生能源公共 RD&D 及不包含 CCS 的化石燃料公共 RD&D 之預算，這兩個項目是與氣候變遷 GHG 減量相關 RD&D，將其結果呈現於圖 13。可惜的是，台灣並沒有如此的資料，而 OECD 的 38 個成員國，資料庫記錄 OECD 所有成員國自 1990 年至 2021 年各國能源公共 RD&D 每年預算支出，由於各年度 OECD 成員國數不同，因此必須逐年算出每年各成員國能源公共 RD&D 預算，而後再依其所包括的再生能源公共 RD&D 及不包含 CCS 化石燃料公共 RD&D 兩大項目，逐年算出兩大項目在能源公共 RD&D 預算支出比，而自 1990 年至 2021 年 38 個成員國中亦僅有 25 個國家有如此詳細、接近碳排放減量相關技術與創新之 R&D 支出，自 1990 年的能源公共 RD&D 預算支出各年度呈現於圖 13；而 OECD 有完整資料各國最新資料比較如圖 14。



來源：(OECD, 2025c)。

圖 12：1990-2021 台灣與 OECD 各國每年環境相關支出佔政府分配於 R&D 支出之總額與比例比較

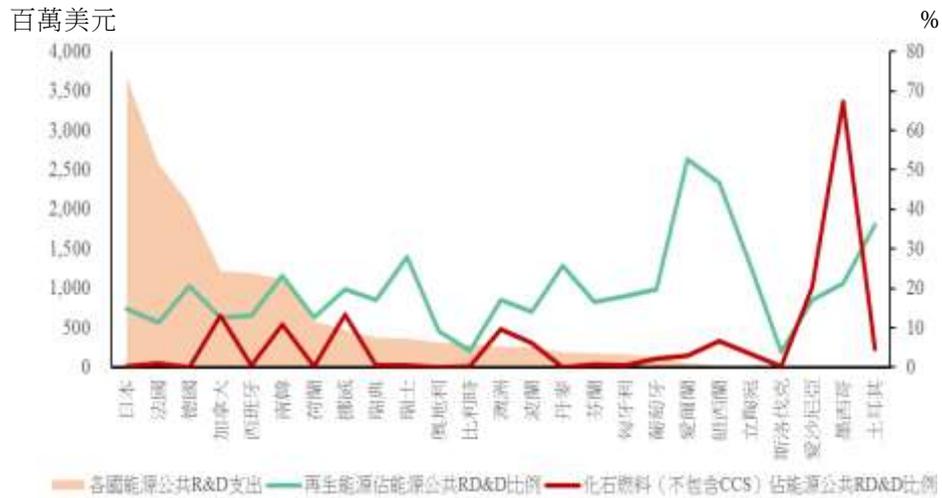
由圖 13 可看出，OECD 各國平均每年能源公共 R&D 預算支出，由 1990 年至 2022 年並未特別呈現成長或下降的趨勢，然這些預算支出，用於再生能源公共 RD&D 預算及不包含碳 CCS 化石燃料公共 RD&D 預算佔能源公共 R&D 預算支出，前者明顯呈現下降、而後者則呈現上升趨勢，顯見對於化石燃料的公共 RD&D 日漸式微，OECD 國家乃將預算著重在再生能源技術與創新上，因此，佔能源公共 R&D 預算支出比例明顯上升。另由資料庫擷取有完整資料的 25 國之最新年份的能源公共 R&D 預算支出及其所包含的前述兩大項預算支出佔比如表 4 所示，依能源公共 R&D 預算支出大小排列，所有資料均完整的 25 國中，能源公共 R&D 支出最大的是日本、最小的是土耳其，事實上有許多國在資料庫所登錄的公共能源 RD&D 預算支出均為 0.00，這些不能視為無資料，因無資料國家為空白，因此登錄為 0.00 的國家就視該國該項資料正式登錄為 0.00。最新 2021 資料年觀察有完整資料的 25 個國家在此一特定年，能源公共 R&D 預算支出，及這些預算用於不包含碳 CCS 化石燃料公共 RD&D 預算佔能源公共 R&D 支出，除墨西哥在 2020 年有相對高比例支用於不包含碳 CCS 化石燃料公共 RD&D 預算外，其他國家能源公共 RD&D 支出，與前述所有成員國自 1990 年至 2021 年各年表

現雷同，均是支用於再生能源 RD&D 比例較高。由此可見，OECD 各國自 1990 年歷年平均所有成員國能源公共 R&D 預算支出主要均是投注於再生能源公共 RD&D 支出，最新 2021 年有完整數據的 25 國亦有相同表現。



來源：OECD (2025c；2025d)。

圖 13：OECD 各國 1990-2022 年能源公共 RD&D 預算總額及用於再生能源與化石燃料 RD&D 預算總額及比例



來源：OECD (2025c)。

註：沒有出現在圖中的其他 13 個 OECD 成員國是表 4 中，三項資料任一項有缺漏、或者是記錄為 0 者，則有完整數據呈現在圖中。

圖 14：OECD 各國 2021 年能源公共 R&D 預算支出及化石燃料與再生能源佔公共 RD&D 支出比例

表 4：2021 年 OECD 各國之公共能源 RD&D 支出及支用於化石燃料與再生能源比例

國家與區域	公共能源 RD&D 支出佔 GDP 比例	納人物價購買力以 2015 年為基準之實質 GDP 總額	各國公共能源 RD&D 支出*	再生能源佔公共能源 RD&D 比例	化石燃料（不包含 CCS）佔公共能源 RD&D 比例
	(%) (A)	(百萬美元) (B)	(百萬美元) (C) = (A) * (B) / 100	(%) (D)	(%) (E)
北中南美洲					
1 加拿大	0.07	1,738,091.5	1216.66	12.65	13.10
2 美國	0.35	20,833,086.0	72,915.80	---	---
3 智利	0.00	457,693.9	0.00	65.97	---
4 哥倫比亞	---	---	---	---	---
5 哥斯大黎加	---	---	---	---	---
6 墨西哥	0.00	2,352,699.3	0.00	21.26	67.26
亞洲及太平洋					
7 日本	0.07	5,249,149.5	3674.40	14.71	0.24
8 南韓	0.05	2,237,606.0	1118.80	23.22	10.81
9 澳洲	0.02	1,339,039.5	267.81	16.97	9.66
10 紐西蘭	0.01	211,041.2	21.10	46.71	6.58
歐洲					
11 奧地利	0.07	455,039.1	318.53	9.14	0.04
12 比利時	0.05	564,862.1	282.43	4.10	0.12
13 捷克	0.06	414,303.2	248.58	8.61	---
14 丹麥	0.06	321,472.5	192.88	25.58	0.05
15 愛沙尼亞	0.01	48,066.7	4.81	16.95	20.34
16 芬蘭	0.07	253,984.2	177.79	16.42	0.63
17 法國	0.09	2,876,696.3	2589.03	11.35	0.89
18 德國	0.05	4,134,166.5	2067.08	20.49	0.00
19 希臘	---	295,021.2	---	---	---
20 匈牙利	0.05	317,595.9	158.80	17.98	0.52
21 冰島	---	18,847.7	---	---	---
22 愛爾蘭	0.01	528,826.1	52.88	52.66	2.86
23 以色列	---	380,722.0	---	---	---
24 義大利	---	2,307,492.8	---	---	---
25 拉脫維亞	---	56,260.9	---	---	---
26 立陶宛	0.02	103,570.3	20.71	26.01	3.53
27 盧森堡	---	72,581.3	---	---	---
28 荷蘭	0.06	977,453.9	586.47	12.67	0.12
29 挪威	0.14	341,674.9	478.34	19.68	13.38
30 波蘭	0.02	1,276,486.3	255.30	14.08	6.22
31 葡萄牙	0.04	332,206.5	132.88	19.69	2.18
32 斯洛伐克	0.01	184,761.7	18.48	3.82	0.10
33 斯洛維尼亞	---	79,111.7	---	---	---
34 西班牙	0.07	1,696,698.0	1187.69	13.07	0.44
35 瑞典	0.07	541,646.8	379.15	16.93	0.36
36 瑞士	0.06	600,375.6	360.23	28.04	0.51
37 土耳其	0.00	2,648,229.3	0.00	36.13	4.75
38 英國	0.06	2,907,017.3	1744.21	15.70	---

來源：OECD (2025c)。

註*：一國若 (A) 或 (B) 資料不存在，則無法算出該國 (C) 欄位之公共能源的 RD&D 支出，或者是 (D) 或 (E) 欄位數據有缺漏者，則無法有完整的數據呈現在圖 14 中。CCS 的化石燃料公共 RD&D 兩大項目，逐年算出兩大項目在能源公共 RD&D 的預算支出比，而自 1990 年至 2021 年 38 個成員國中亦僅有 25 個國家有如此詳細、接近碳排放減量相關技術與創新之 R&D 支出，自 1990 年的能源公共 RD&D 預算支出各年度呈現於圖 13。

三、專利族

前述不論是政府與私人企業部門整體的 R&D、或是特定用於氣候變遷、GHG 減量相關或是範疇相對廣的環境相關 R&D，均是事實已投注的 R&D 資金。由於政府與私人部門整體的 R&D 範圍過廣，因而此處乃限縮於與環境相關或是與氣候變遷及 GHG 減量與調適的 R&D 相關專利族，這些部門在決定是否值得投注於特定 R&D 之前，均會與一般或該特定 R&D 相關的技術或創新有專利的申請。由 Martinez (2010) 一文可知，專利族 (patent family) 的建構最早可追溯到 1940 年代，是由提供德溫特 (Derwent) 製藥公司的創始人 Monty Hyams 開始執行。剛開始時是僅針對化學領域的同族專利數據，並在 1970 年代中期擴展至所有技術和越來越多國家的專利族數，德溫特資料庫是唯一一個多年來提供私人國際專利數據的資料庫。至於公共方面的專利，國際設計研究所 (Te Institut International des Brevets, 以下簡稱 IIB) 則於 1970 年代開始建立專利族，至 1978 年、則成為歐洲專利局 (European Patent Office, 以下簡稱 EPO)。此後，國際組織如 OECD 及世界智慧財產權組織 (World Intellectual Property Organization, 以下簡稱 WIPO) 等機構則持續公布專利族資料，而在 2006 年利用專利族數據進行的研究得以有所突破，主要是 EPO 首次發布了全球專利統計資料庫 (Worldwide Patent Statistical Database, 以下簡稱 PATSTAT)，進而由 OECD 領導的專利統計工作小組，於《經濟合作暨發展組織專利統計手冊》(OECD Patent Statistics Manual) 開始有不同定義的專利族 (Westmore, 2013)。Gamarra 與 Friedl (2023) 分析 1999 -2018 年間約 20 家廠商來自 PATSTAT 的 24,701 個宣告專利族數，發現分散與平均每一個專利族群的宣告與投注於創新 R&D 總支出數成正比，然上游廠商與下游廠商有不一樣的表現，屬於上游廠商的平均每個已申請專利家族的總研發支出比下游公司少，主要原因是上游廠商可能需要精簡其內部智慧財產權和研發流程，因為它們的收入管道比下游公司少。

於是，OECD 於 2009 年明確定義專利族是指「在多個國家提交、彼此之間通過一項或多項共同優先權申請相互關聯專利(或申請)的集合」(OECD, 2009)。而工作小組的成員除 EPO 外，尚包括美國專利商標局 (United States Patent and Trademark Office, 以下簡稱 USPTO)、日本特許廳 (Japan Patent Office, 以下簡

稱 JPO)、WIPO、美國國家科學基金會 (U.S. National Science Foundation, 以下簡稱 U.S. NSF) 和 EC。而專利族中最特殊的是三元 (triadic) 專利家族, 是指針對同一項發明, 向 EPO 和 UPO 提交申請, 並在美國專利及商標局 (United States Patent and Trademark Office, 以下簡稱 USPTO) 獲得授權的一系列專利 (United States Patent and Trademark Office, 2023), 此種專利通常價值較高, 受專利傾向的影響小於用其他方式衡量的專利 (De Rassenfosse & Van Pottelsberghe, 2009)。然而, 這部分重點不在於探討各種定義下、專利族數據研究成果的差異, 而是觀察台灣與 OECD 成員國, 專利族群數對政府或私人企業部門 R&D 的影響。Caselli (2005) 的研究顯示, 在已開發國家, 所得的差異並非來自大量的勞動力及有形資產所造成, 主要是透國創新與擴散累積無形資產的能力。此外, 研究亦發現屬商業的私人企業部門和非商業的政府部門之 R&D 均對專利活動有正向影響; 相反的, 對私人企業部門的商業 R&D 而言, 其與專利存量呈正相關 (Jaumotte & Pain, 2005)。也就是說, 不論是政府或是私人企業部門, 只要 R&D 興盛者均能帶動專利活動的盛行, 而專利存量多的私人企業, 又特別使其 R&D 活動活絡, 可說是專利與 R&D 形成良性的循環。由此可見, 專利或是專利族數, 與公私部門 R&D 的活絡互為一體。因此, 以下則檢視台灣及 OECD 成員國一般性的環境專利族數與聚焦於氣候變遷減緩與調適相關技術創新與擴散的各種表現。

(一) 環境相關技術與氣候變遷調適技術總專利族數

台灣與 OECD 成員國自 1990 年即有總專利族數紀錄, 而目前最新資料至 2021 年為止, 由相關資料庫中特別選擇其中與環境相關技術與氣候變遷調適技術有關的總專利族數, 及這兩類技術專利族數佔總專利族數的比例, 詳細資料記錄如附表 3, 而對應的結果繪製如圖 15。由於資料庫所呈現的結果是 OECD 各年整體成員國的總數, 由於無法得知各年整體成員國涵蓋多少國家, 因此 OECD 則以整體成員國的總專利族數呈現, 如此和台灣單一經濟體的數量差異很大, 然由歷年的總專利族數或是對應的比例所要觀察的是, 自 1990 年來專利族數的變化趨勢。由圖 15 搭配附表 3 的結果可看出, 就趨勢上而言, 台灣和 OECD 整體成員國的總專利族數自 1990 年以來, OECD 除 2021 年稍為減少外, 由 1990 年以來基本上是逐年增加。這些總專利族數是涵蓋各式各樣 R&D 的前身。其中如果

特別觀察與環境相關技術專利族數佔總專利族數比，台灣與 OECD 自 1990 年來在環境相關專利族數的申請有日趨增加的趨勢，然 OECD 整體成員國在環境的專利族數佔總專利族數比遠大於台灣；如進一步再限縮至氣候變遷調適技術專利族數佔總專利族數比，此一比例對台灣及 OECD 整體成員國，明顯的均小於層面比較大的環境相關專利族數。而對台灣而言，此一比例除 1993 年達特別高的 1.055% 外，其他各年氣候變遷調適技術專利族數佔總專利族數比介於 0.127%-0.619% 之間，而 OECD 則為 0.684%-1.273%，由此可見，OECD 成員國自 1990 年以來、投注於氣候變遷調適技術的專利族佔總專利族數比為台灣的兩倍有餘。



來源：OECD (2024j)。

圖 15：1990-2020 台灣與 OECD 年環境相關技術專利與氣候變遷調適技術總專利族數

(二) 技術開發與技術擴散、氣候變遷調適、減緩相關之技術開發與擴散總專利族數及佔比

台灣及 OECD 各成員國自 1990 年以來即有各式各樣技術開發及技術擴散的專利族數記錄，資料庫中有關技術開發是涵蓋範圍相對廣的環境相關範疇，包括環境管理、水資源相關調適及氣候變遷減量技術等，這些技術包括在國內的技術開發與在全世界的技術開發；而技術擴散專利族數則可追蹤環境相關技術的創新，

依此可評估各國的創新績效及政府的環境創新政策（OECD, 2023b；OECD, 2023c）。台灣及 OECD 成員國各年的技術開發與技術擴散專利總族數如附表 4 所示，而圖 16 則先分別呈現台灣與 OECD 技術開發與技術擴散的專利族數，由圖 16 可看出，台灣總技術開發專利族數比 OECD 各國每年平均總專利族數多，而台灣技術擴散總專利族數自 2002 年以來、歷年亦比 OECD 各國平均高，由此可見，在技術開發專利族數，台灣不僅比 OECD 成員國各國平均高，技術擴散專利族數二十餘年來亦比 OECD 各國多。當然這些涵蓋前述與環境相關的技術開發與技術擴散，而環境相關技術範圍相當廣，這些技術開發與技術擴散專利族數是否真正轉換成相關 R&D 投資是另一回事；而這些技術開發與技術擴散專利族數未必與氣候變遷相關技術與擴散有關，必需觀察其他資料才能確定。

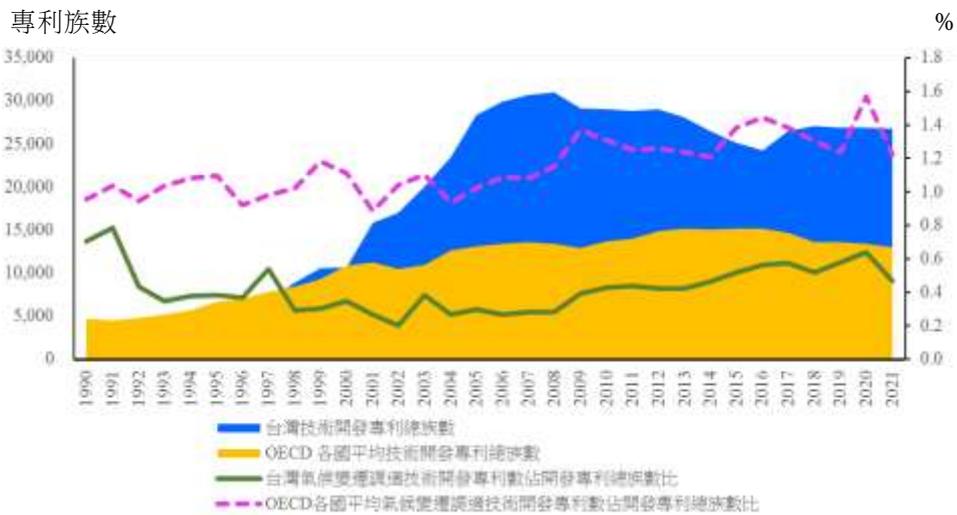
由附表 4 可進一步觀察涵蓋氣候變遷減緩技術開發、調適技術開發與擴散技術開發的專利族數及其佔專利總族數比，由圖 17 先繪製台灣及 OECD 各成員國年平均技術開發專利總族數，及其中與氣候變遷調適技術開發專利族數的佔比。台灣各年技術開發專利族數比 OECD 各國平均顯著的高，然其中的氣候變遷調適技術開發總專利族數佔比，OECD 各國平均比台灣高，在 1990-2021 年間，台灣氣候變遷調適技術開發專利佔總專利族數比介於 0.2%-0.734%，而 OECD 各成員國平均則為 0.884%-1.566%，由此顯示 OECD 各成員國平均對於氣候變遷調適技術開發比台灣相對重視。又由圖 18 可看出，環境相關的技術開發中之氣候調適擴散技術及減緩擴散技術專利分別佔總專利族數之比，不論是台灣或是 OECD 各國平均，氣候變遷減緩技術擴散專利均比氣候變遷調適擴散技術比來得高，如此表示，對台灣及 OECD 各成員國，相對重視氣候變遷減緩技術的擴散。而台灣氣候變遷減緩技術擴散專利佔總專利族數比介於 3.661%-9.351%、而 OECD 各國平均介於 4.292%-10.59%，此一結果顯示台灣和 OECD 各成員國之氣候變遷減緩技術擴散專利佔專利族數比接近；至於氣候變遷調適技術擴散專利佔總專利族數比，台灣為 0.298%-1.831%、而 OECD 各國平均則為 0.714%-2.185%，此顯示，台灣在氣候變遷調適技術擴散專利數明顯低於 OECD 各國平均。由此顯示，氣候變遷調適技術比起氣候變遷減緩技術，不論在台灣或 OECD 各成員國相對不受重視，然台灣投注於氣候變遷調適技術擴散之專利在總專利族數比例更低，表示台灣相對不重視氣候變遷調適技術。

專利族數



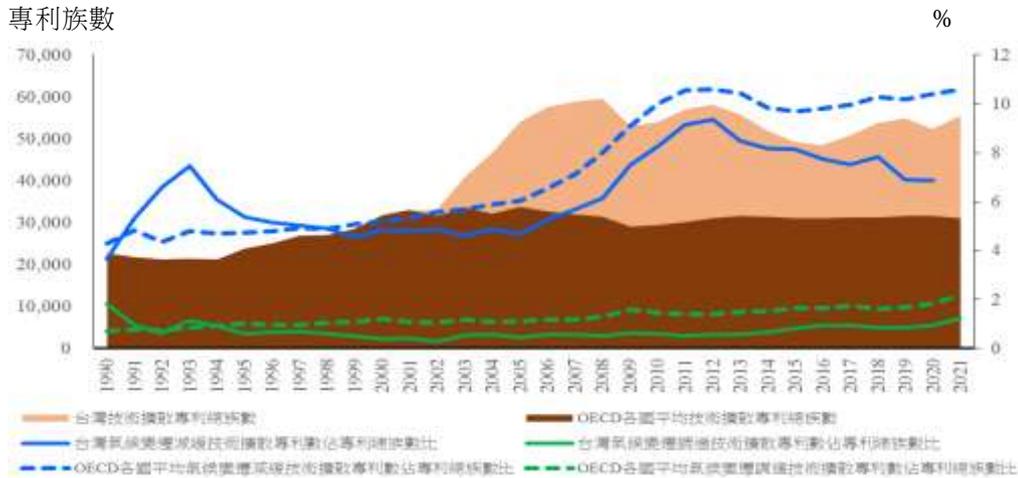
來源：OECD（2025e；2025f）。

圖 16：1990-2021 台灣與 OECD 各國每年技術開發與技術擴散專利總族數及每年各類專利佔專利總族數比



來源：OECD（2025e；2025f）。

圖 17：1990-2021 年台灣與 OECD 各國年平均技術開發專利總族數及氣候變遷調適技術開發專利數比

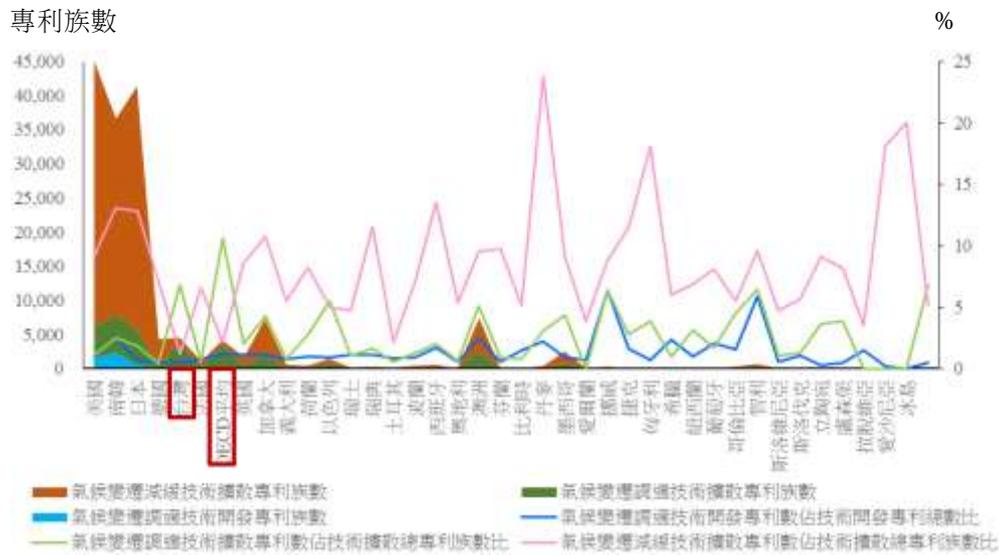


來源：OECD（2025e；2025f）。

圖 18：1990-2021 年台灣與 OECD 各國年平均技術擴散專利總族數及氣候變遷減緩與調適專利數佔比

最後，附表 5 呈現台灣及 OECD 各國平均在最新資料 2021 年之氣候變遷調適技術開發、減緩技術開發及減緩技術擴散之專利族數，相關結果繪製於圖 19，而圖 19 以氣候變遷調適技術開發專利族數、調適技術擴散專利族數及減緩技術擴散專利族數之總專利族數大小排序，同時也一併呈現，三大專利族數佔對應總專利族數的比例。台灣與其他 38 個 OECD 成員國與 OECD 的平均一起呈列，台灣在 40 個單位中此三大類專利族數合計排名第 5，主要來自氣候變遷減緩技術擴散專利族數的貢獻，而台灣前述三大專利數合計比 OECD 所有成員國平均來得高。此一結果顯示，台灣整體而言，比起 OECD 所有 38 個國家的平均，在氣候變遷調適技術開發、調適技術擴散及減緩技術擴散上有相當的投注；而由相關專利族數亦可觀察出，台灣在氣候變遷擴散技術擴散的專利族數最多，這些可能是取用他國的研發成果而來的擴散專利族，或者是由台灣擴散至其他國家的調適技術，此一現象基本上也呼應，台灣即便身為已開發國家、卻可能是相對沒有能力或意願開發新的綠色技術，由附表 5 亦可見，台灣氣候調適技術開發專利族數量相當有限，因此，調適技術開發專利族數比較可能是由其他已開發國家擴散而

來，由台灣擴散至其他開發中國家的可能性相對低。而更明顯的是，在沒有台灣及 OECD 各成員國的減緩技術開發專利族數資料下，氣候變遷減緩技術擴散專利族數比較大的國家，比如專利族數排序在台灣前面的美國、日本與德國等，可能就是台灣氣候變遷減緩專利族數擴散的來源國，由此可見，這也是台灣未來需強化重是的 R&D 方向。



來源：OECD (2025e；2025f)。

圖 19：2021 年台灣與 OECD 各國氣候變遷調適技術開發專利族數與減緩技術擴散專利族數及調適技術擴散專利族數佔對應總專利族數比

肆、課徵碳費（稅）對綠色科技與創新之驅動與失靈的矯正

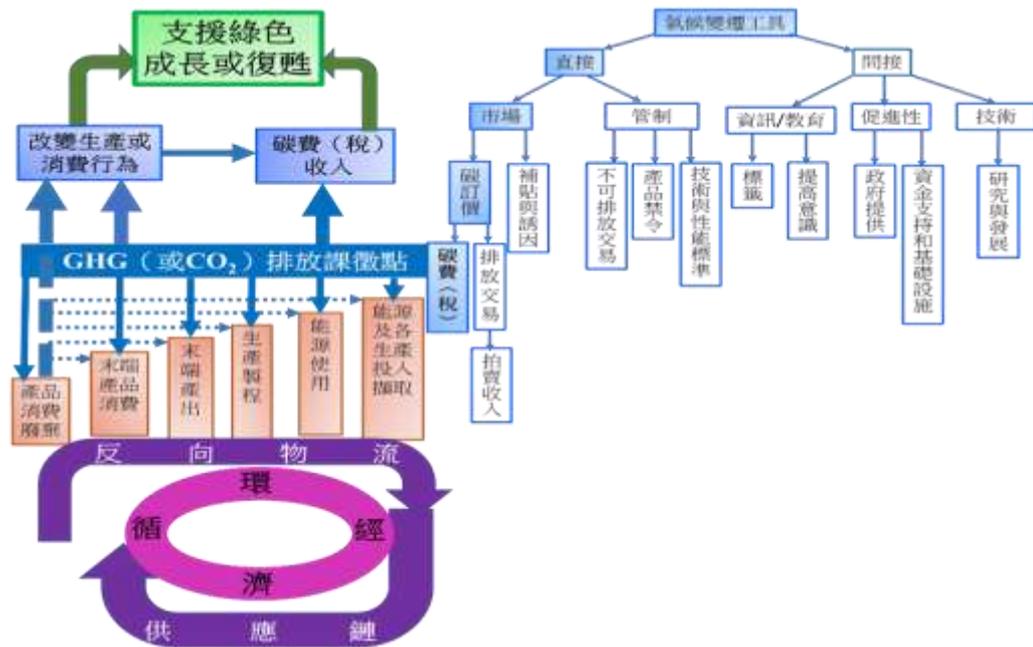
一、碳費（稅）收入再利用對綠色科技發展的優缺點

亞洲開發銀行 (Asian Development Bank) 於 2021 曾論述碳訂價對綠色成長與復甦在各層面的影響 (Asian Development Bank, 2021)，本節歸納相關論述，作

為分析碳費（稅）對綠色科技與創新之驅動及私人於綠色相關技術投資失靈矯正之架構。碳訂價中的碳費（稅）政策，是屬於氣候變遷減緩政策的直接手段，透過市場機制中設定費（稅）率（價格）的工具，在特定費（稅）率下課徵 GHG 排放量，必然產生碳費（稅）收入，此一收入之用途對綠色科技發展的影響，可以設計為使政府收入增加，也可以設計為針對產業特定實體如利害關係人（stakeholder）或消費者補貼的收入中立（revenue-neutral），或對特定類型技術如再生能源或低碳或綠色技術投資的收入中立。所謂收入中立表示由碳費（稅）課徵而來的收入，與用於補貼或是投資之金額正好相等（Yamazaki, 2017）。而投資於再生能源或低碳技術，正是碳費（稅）對綠色科技的誘發來源之一；此外，碳費（稅）的課徵，不論是廣義涵蓋燃料稅或是產品稅的課徵碳費（稅），就稅而言、一般可以利用現有的稅收系統部署，以能快速執行。又課徵於涵蓋整個供應鏈的不同階段與對象上，對綠色技術的誘發影響力各不相同，歸納碳費（稅）課徵於不同型態供應鏈誘發綠色科技發展的異同，則於後續討論。最後，在碳費（稅）政策下，除了使用實質碳費（稅）收入誘發綠色科技的發展、而課徵於不同類型供應鏈的不同對象、也驅動各式綠色科技發展外，碳費（稅）的存在，亦可能改變生產者及消費者的行為，而相關行為的改變，均可能朝向更綠色的生產模式以節省成本或是朝向低碳的消費模式，當然，面對此種碳費（稅）政策的執行、生產者與消費者無可迴避時，生產行為或是消費習慣的改變，最務實的理由是為了減少碳費（稅）的繳交，然只要此一政策存在，利用由此一政策而來的收入可更進一步強化或引導生產或消費邁向綠色成長，因而形成一良性循環，這些說明綜整呈現於圖 20。

氣候轉型過程中的當務之急、是透過精心設計的氣候政策，加速向低碳經濟轉型，而碳費（稅）是最重要、最廣泛討論的政策工具之一，它除了可將碳排放外部成本內部化外，也是激勵企業和社區採用更潔淨的方案。為確保碳費（稅）得以持久執行，精心設計的政策組合是可以抵消公眾對因碳費（稅）造成價格上漲的反對，比如同步採取促進減稅、收入分配、收入使用以支援氣候行動、綠色投資和創造就業機會等配套政策；當然綜合技術-經濟-環境生命週期，以能訂定最適費（稅）率，使碳費（稅）成為強而有力的政策工具亦是必要（Chai, et al., 2025；Domguia, et al., 2024；Muth, et al., 2024；Shahbazi, et al., 2024；Shahbaz, et

al. 2024 ; Timilsina, et al., 2024 ; Wang, et al., 2024 ; Liu, et al., 2022 ; Mo & Wang, 2022)。為了進一步建立長期民眾對政策的信任，公開透明傳達收入再分配至關重要，如加拿大英屬哥倫比亞省收來的碳稅用於支持低碳轉型工業計劃，並向利害相關者保證碳稅會持續為所有人帶來利益 (Ahmadi, et al., 2022)。而新加坡預計在未來十年內不會從碳稅中獲得額外的淨收入，而當前所收取的碳稅收入將用於支持脫碳工作和綠色經濟轉型 (Ministry of Finance, Singapore, 2025 ; Jebeli & McCarney, 2024)。



來源：本文繪自 Asian Development Bank (2021) 文字說明。

圖 20：碳費（稅）政策課徵及碳費（稅）收入對綠色產業可能的影響途徑

此外，由於能源部門是主要的碳排放來源，為了實現環境永續性和低碳發展，研究顯示碳費（稅）的環境稅收比來自能源產業相關的稅收對環境的貢獻更大，因此碳費（稅）負擔應由再生能源技術轉移到化石燃料產業，以降低 GHG 排放與碳強度、強化能源轉型 (Jabeen, et al, 2025)。如何有效的使用碳費（稅）收入，Koval 等人 (2022) 分析 EU 在 2000 年至 2020 年期間國家預算中之環境稅收顯

示，預算中所有環境稅的總收入增加了 53%，而針對 GHG 排放的碳稅收入在稅率增加 1.5 倍的情況下增加了 71%，表示環境收入不足以支付 GHG 排放造成之環境損害所需的環境保護成本，建議潔淨技術在不同的發展階段應施行差異化的碳稅率。碳稅帶來顯著的社會、經濟與環境效益需要建構政策持久的驅動力，且各國政府需要為綠色轉型創造條件，亦即需有計劃地投資於特定領域的脫碳，比如能源生產、企業和供應鏈、交通運輸、建築和社區，加拿大英屬哥倫比亞省的「潔淨 BC」計劃（clean BC program in British Columbia）和新加坡的行業轉型框架（industry transition framework in Singapore）（CleanBC, 2025；National Climate Change Secretariat, Singapore, 2025）即是典型的範例。而推動低碳經濟、除綠色技術的發展外，尚包括培養與儲備具備風力和太陽能設施技術與知識的工程師、營運排放測量、報告和驗證（measurement, reporting, and verification, 以下簡稱 MRV）、數據系統和碳交易平台的數位技術專家、協助企業經營低碳足蹟的管理人員，以及來自不同學科的研究人員，以能持續發展開發創新方案以加速綠色轉型（United Nations Development Programme, 2025）。

雖然將碳費（稅）收入以補貼方式回到原繳費（稅）廠商，援助綠色技術、減碳技術、能源效率及再生能源的綠色轉型所需經費，是比較容易讓民眾接受以碳費（稅）課徵為減碳政策的作法，然收入再回到原繳費廠商需注意，如果這些廠商是屬同一產業，且廠商間的知識外溢效果相對顯著，表示一個廠商採行新技術，將順勢讓同產業的其他廠商也可以較低成本減碳，如此也同時降低其他廠商採行綠色新技術的誘因，為了避免此種情況的發生，碳費（稅）收入再利用的設計，應該將不同產業混和在收入使用的架構中，藉此提升非競爭同業間的縱向知識外溢（vertical knowledge spillover），降低不同產業競爭廠商的橫向知識外溢（horizontal knowledge spillover）現象，以避免其他競爭廠商降低採行綠色技術的誘因（Holtmark, 2024；Liu & Zhu, 2024）。又如果將碳費（稅）收入再利用回到一般環境政策收入的使用，比如作為綠色運輸基礎設施的發展和再生能源之整合，就公平性而言，收入用於此、並不會排除社會相對脆弱的族群，因收入使用的對象是一般人都有機會用到的設施（Pranita & Sarjana, 2025）。此外，不論對低所得或是中所得國家，如果為最貧困的群體提供碳費（稅）收入再利用，以取得這個群體的高度支持，成為可否實現有效、可接受且公正的碳費（稅）政策的關

鍵因素 (Malerba, et al., 2024)。

這是碳費 (稅) 收入再利用對同世代不同族群的影響，而如果考量對跨世代的可能影響，綠色技術相對於「骯髒」的化石能源技術，綠色技術屬於資本密集型，而這一代如享有綠色技術、則猶如給予這一代人類似資本補貼的技術政策，如此對後代則產生較大的負擔，而對技術補貼的政策與碳訂價的碳費 (稅) 政策相比，由於使得受補貼者在技術的選擇與使用相對沒有彈性，因而，使得此種針對特定技術的補貼政策，較碳費 (稅) 在激勵節能或替代「骯髒」能源上相對無誘因 (Li, M. et al., 2024; Ren & Lu, 2023; Rausch & Yonezawa, 2021)。當然技術政策未必經由補貼，基本上技術政策是一種管制類型的績效標準 (performance standard)，可以有多種不同形式，如在能源部門的綠色配額 (green quota)¹⁸、潔淨能源標準及補貼再生能源技術等，不論在開發中或是已開發國家使用均相當普遍 (Rausch & Yonezawa, 2023)。即便碳費 (稅) 收入再利用至各式綠色相關技術轉型，不同情況下各有優缺點，然根據國際能源總署 (International Energy Agency, 以下簡稱 IEA) 估計，到 2050 年全世界要實現淨零碳排放所需的潔淨能源投資，約 70% 需來自私人融資、開發商和消費者 (Edelman & Bhattacharya, 2024)。由此可見，轉型至潔淨能源即便僅有 30% 的投資來自既有的碳費 (稅) 收入再利用，碳費 (稅) 政策的設計亦需避免收入再利用可能產生的缺點。

如果要觀察台灣與 OECD 各成員國自 1990 年以來至最新的 2021 年，投資於氣候變遷綠色技術的各種 R&D 與 CO₂ 排放量的關係，藉此瞭解是否 R&D 的支出與 CO₂ 的排放量呈現相反的關係？亦即 R&D 支出越多，CO₂ 排放量則越少。由於 OECD (2025a) 資料庫中並沒有對應各國歷年支出於與直接與氣候變遷相關的整體綠色技術 R&D 支出，假設一國支出於一般 R&D 多，合理的情況亦會支出於氣候變遷綠色技術之 R&D 也相對會多，僅是數值會比一般 R&D 支出少。

¹⁸ 所謂綠色配額是指強制規定廠商生產過程、產品或是供應鏈中，所用的能源需有特定比例來自再生能源會是對環境友善的能源，來自再生能源的綠色配額憑證之優點在於，由於憑證價格由市場力量決定，因此可以以極具成本有效性的方式實現再生能源政策目標。然多個國家的經驗表明，再生能源配額和憑證計劃，與上網電價 (FIT) 等替代性再生能源支援計劃相比，總體成本往往更高，因為綠色配額電價除了電價風險外尚包括綠色憑證的價格風險 (EnergyPedia, 2014)。

而 R&D 支出則為每年台灣及 OECD 各國之政府部門及私人企業部門的投資，至於 CO₂ 排放量則以資料庫中所列的台灣及 OECD 各國以生產及以消費為基礎的 CO₂ 排放量總和，然台灣沒有以消費為基礎的 CO₂ 排放量，因此 CO₂ 主要為以生產為基礎之排放量，相關詳細資料列在附表 6。而這些資料則繪如圖 21，由圖 21 明顯可見，OECD 各國每年平均以生產及消費為基礎的 CO₂ 排放量，遠高於台灣，而 OECD 各成員國 CO₂ 排放量由 1990 年至 2021 年有逐漸下降的趨勢，反之、台灣則是上升，而同在這一段時間內，OECD 各成員國平均每年政府部門及私人企業部門的 R&D 支出，由 1990 至 2012 均比台灣高，而自 2013 年起，台灣私人企業及政府兩個部門的 R&D 支出則高於 OECD 各成員國平均，而不論是 OECD 各成員國或是台灣，私人企業部門之 R&D 支出均佔有極高的 R&D 支出比。由此一結果可看出，台灣即便有逐年上升的私人企業部門 R&D 支出或政府部門及私人企業部門的總 R&D 支出，然 CO₂ 總排放量的降低並未得利於這些 R&D 之支出，顯示相關 R&D 支出相當有可能並未用在氣候變遷相關的綠色技術投資上。



來源：OECD（2024c）、OECD（2025b）。

圖 21：台灣與 OECD 各國平均年 CO₂ 排放量與各國政府與私人企業部門 R&D 年支出的關係

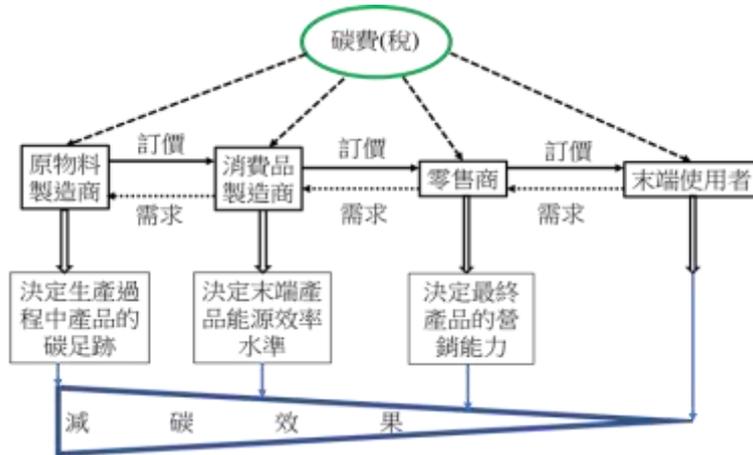
二、碳費(稅)課徵在不同型態供應鏈的影響

(一) 碳費(稅)課徵於供應鏈上中下游對碳減量及採行綠色創新技術的影響

碳費(稅)可以徵收整個供應鏈的上游、下游或任何中介位置,上游碳費(稅)是根據化石燃料進入經濟體之前、碳含量的徵收,瑞典、芬蘭、瑞士、法國、加拿大英屬哥倫比亞省、墨西哥、阿根廷和哥倫比亞等國家的碳稅屬於此種方式,這種方式是利用了現有消費稅的徵稅框架,因而施行起來更簡便且節省行政成本;反之,下游碳費(稅)(也稱為「直接排放」方法)是針對特定來源(例如發電廠或工業設施)直接排放到大氣中的 CO₂ 或是 GHG,比如新加坡、智利和南非等國家所採用即是此一方式;此種方式由於需要追蹤碳排放量,因此下游徵費(稅)需要 MRV 系統,這可能會導致更高的實施行政成本,因此導入數位技術以融入 MRV,是可以提高氣候數據的透明度和準確性,以加強國家或廠商在排放減量的承諾(United Nations Development Programme, 2025)。為瞭解碳費(稅)課徵於圖 20 左下方,亦即由能源及各項生產投入擷取至消費後棄置之任一對象之課徵,對採行綠色創新技術的影響,可以將其轉換成以 Guo 與 Xi (2022) 提供由原物料、至消費品生產、零售、到最後產品使用的上中下游之供應鏈如圖 22 所示,碳費(稅)課徵在不同供應鏈端點會帶來成本的增加,其中對原料生產者的利潤影響最大,至於碳費(稅)對課徵於原料至零售末端的供應鏈的不同端點,碳排放量減量效果逐漸下降,也就是促使排放減量的邊際效果呈現遞減,亦即圖 22 所示在供應鏈不同端點之課徵,圖下方呈現的遞減排放量,如果碳排放量降低是代表邁向綠化,邊際排放減量的遞減效果,代表隨著碳費(稅)率的上漲,綠化成本亦將超過碳費(稅)率,隨著碳費(稅)率增加到一定水準,企業的邊際減量成本(marginal abatement cost, 以下簡稱 MAC)將逐漸超過費(稅)率,如此使得企業停止綠色創新,因而,比較理想的作法是,碳費(稅)開始課徵的初始階段,費(稅)率設定在較低水準、再逐步提高,以便企業有時間進行綠色技術創新,累積持續在綠色創新所需的資金和技術。

而要促使企業技術創新、政府首先要誘導企業投資於 R&D,最佳 R&D 策略需能夠降低技術成本,從而降低所需碳費(稅)成本,以提高因應氣候政策的有

效性 (Wu, Q., et al., 2024; Fang, et al., 2023)。此外，人均 R&D 投入的增加，加上創新投資的費（稅）收入和金融激勵措施，將提高創新成果的達成 (Li, J., et al., 2024)。一般而言，R&D 支出佔低碳整體轉型財務須求比例相對低，Reis 等人 (2023) 估算 2021 年 OECD 低等及中等國民所得國家，控制在 20C 的 R&D 支出佔氣候財務總額的 3.0%-3.2%，而如果控制在 1.50C 則 R&D 支出則佔整體氣候財務的 12%-13%。當碳費（稅）課徵在上游端而使得燃油價格上漲，在此種情況下，Barbieri (2016) 以專利代表創新，探討 1982-2008 全世界 54,370 個三元專利族 (triadic patent families)¹⁹發現，企業則有效地將專利申請活動從非綠色技術領域轉向綠色技術領域，如果企業不受財務約束時，綠色創新的增加導致非環境創新的減少，然並不表示社會和私人效益會受到排擠，但企業也不會一躍即涉入完全不同典範的技術範疇中，基本上仍鎖定在次優替代技術上，以汽車產業的 R&D 而言，環境技術領域的競爭集中在「綠色」傳統汽車和開發低排放汽車，而非跨足至電動車等截然不同技術的 R&D。進而 Hashmi 與 Alam (2019) 分析 OECD 國家在 1999-2014 資料發現，環保專利數量每增加 1%，碳排放量就減少 0.017%，人均環境稅收收入每增加 1%，碳排放量則減少 0.03%。



來源：修正自 Guo 與 Xi (2022)。

圖 22：上中下游供應鏈對產品碳足跡、能源效率及營銷能力之影響

¹⁹ 根據 OECD 所定義的三元專利族是指在 EPO、USPTO 和 JPO 獲得一組具有一個或多個共同屬性的專利，而其中一個屬性是，這些專利必須屬於同一專利家族 (Dernis & Khan, 2004)。

至於對技術長期的 R&D 或是投資，應該專注於單一技術或是多元技術併行發展？做中學建議專注於單一技術，而差異化和規模收益遞減則有利於多元化的發展，目前歐洲的純電動公車（battery electric buses, 以下簡稱 BEB）引領這項變革，逐步縮小與柴油汽車總成本的差距，Kasser 等人（2024）分析歐洲大眾運輸交通工具中燃料電池電動公車（fuel-cell electric buses, 以下簡稱 FCEB）和現有 BEB 之間的競爭，由於目前 FCEB 總成本為 BEB 的兩倍，因此，FCEB 利基市場需佔有市場的 10%-20%，且縮小與 BEB 總成本差距，FCEB 方可能與 BEB 成為併行使用的技術。除了技術創新 R&D 可以成就多元的運輸工具，另提升能源效率與使用再生能源則是另一可行的途徑（Ahmad, et al., 2024；Tanaka, 2011）。又如果要精準的掌握碳費（稅）之環境稅、綠色技術的環境創新與碳排放量的關係，Ali 等人（2023）探討瑞士、瑞典、芬蘭、盧森堡與丹麥等五國發現，碳排放來源主要與以消費為基礎的不可再生能源之使用有關，當然這五國是人均 GDP 極高的國家，是屬於碳排放來自消費遠比來自生產高的型態，與中國及印度屬發展中國家型態自然極不相同，因此，碳排放的減少應著力於再生能源消費的增加。Ramzan 等人（2023）研究碳稅對英國環境與生態的影響亦發現，再生類型的綠色能源能夠顯著減少環境足跡，當局應監控家庭能源使用強度，並以再生能源取代化石燃料能源、有效減輕環境足跡。

除了關切綠色技術創新與非環境創新之間的競爭外，特定國家碳費（稅）的課徵可能導致選擇至不同國家投資綠色創新產業，特別是國土相連的歐洲大陸國家，比如荷蘭超過 20% 的 CO₂ 排放來自鹿特丹港口區域，港口主要從事能源和 CO₂ 密集產業，而鹿特丹港擁有超過 45 家石化公司和 5 家煉油廠，是世界上最大的石油和化學中心之一，如針對這些區域課碳費（稅），但在 CO₂ 的 MAC 不斷增加的情況下，雖然荷蘭的工業部門技術較諸多歐洲國家都先進，然荷蘭工業漸增的 MAC、頂多使其投資吸引力與其他國家相當，更多時候甚至更低，因此其他國家要投資脫碳技術時，選擇優先投資其他國家更為合理；然投資其他國家並非說走就可立即實現，因為投資洩漏（investment leakage）的威脅遠比碳洩漏需要的業務遷移複雜得多，因為既有投資的巨額固定成本、對供應商和客戶的長期承諾、基礎設施和物流帶來的高營運效率以及聚集外部性，這些因素會緩和碳費（稅）迫使企業往境外的遷移（Gianoli & Bravo, 2020）。又 Gramkow 與 Anger-

Kraavi (2018) 分析開發中國家巴西，在 2001-2008 的 24 種製造業、10 萬多家企業面對政府的補貼創新融資措施，由於正向回饋、規模報酬遞增和外溢效應，結果有 14% 的企業採用更綠色的技術，可見綠色創新專案的財政激勵措施確實對綠色技術的採用產生影響，因而也讓這些政策在綠色經濟轉型中發揮作用。

過去研究也顯示，考慮綠色創新在廠商、區域或是國家等不同規模之效果下，政府應提供多元政策工具，比如減量目標設定、設立專款、給予企業稅收減免、引導銀行等金融機構參與轉型，則可給予企業達到永續發展不同綠色創新路徑的選擇 (Liu, et al., 2024; Wang, M., et al., 2022; Zhao, et al., 2022; Calderón, et al., 2016)。當政府財政壓力較低、轄區間競爭激烈、且地方政府更重視環境保護時，多元政策間的綜效更強；或者中央政府積極運用給地方政府的移轉支付 (transfer payment) 以減輕地方政府的徵稅力道和企業稅賦，促進企業生產技術升級，最終降低企業碳排放 (Fan & Liang, 2023; Yu, et al., 2022)。前述各種情況是假設沒有排放不對稱 (emission asymmetry) 的情形時²⁰，然因不同企業採用的生產流程和能源效率各不相同，因此，排放不對稱普遍存在，當有排放不對稱情況發生時，徵收碳費（稅）並不一定會促使人們採用綠色技術，然 Fu, K. 等人 (2023) 的分析發現，碳效率低的企業比碳效率高的企業更可能從綠色技術中獲益，綠色技術的採行無形中似乎為碳效率低的企業提供了一個消除低碳效率的方法，讓碳效率低的企業因有獲益而投資新技術、而成為有機會超越競爭對手的重要驅動力。

（二）碳費（稅）課徵在不同型態供應鏈下對促成綠色產品的影響

低碳供應鏈管理 (low carbon supply chain management, 以下簡稱 LCSCM) 是指特別針對產品整個生命週期中的 GHG 排放供應鏈碳減量 (supply chain carbon abatement)，基本上是推動社會經濟低碳轉型、因應全球氣候變遷的重要途徑，而 Shaharudin 等人 (2019) 及 Mishra (2023) 各自回顧 1989-2018 及 2009-

²⁰ 所謂排放不對稱即是排放不平衡的意思，意指正面條件造成排放量的增加或是負面條件造成排放量減少的量不會正好相等，也可能是指不同排放來源，如不同產業的相同排放量，因每單位排放的碳強度 (emission intensity) 不相同所造成 (Zickfeld, et al., 2021)。

2021 年有關 LCSCM 中為了達成淨零經濟的相關研究發現，由累積一定程度可供分析的研究成果歸納得知，位處不同區域的不同經濟發展程度(開發中及已開發)國家、產業別與部門別的 LCSCM 各不相同。Wu, D. 等人 (2024) 則更具體的回顧包括碳費(稅)政策在內的不同類型環境政策對永續或綠色營運和供應鏈管理的影響，並歸納在特定營運管理決策下，評估反應涵蓋經濟績效 (economic performance, 以下簡稱 ECP)、環境績效 (environmental performance, 以下簡稱 ENP) 與社會福利 (social welfare, 以下簡稱 SW) 各層面的永續績效。如果更進一步以協調整個組織和流程，促進合作、適應變化、技術利用和培養人才的供應鏈領導力 (supply chain leadership, 以下簡稱 SCL) 為探討對象，無論 SCL 是發生在供應鏈的那一端²¹，在碳費(稅)的課徵下，是藉由供應鏈各端透過成本分攤以達最佳的排放量減少、同時顧及各方利潤，這是讓供應鏈與環境達成雙贏的重要課題，因此，掌握 SCL 的各種型態是重要且必要 (Li, G., et al., 2024; Li, et al., 2022a)。

供應鏈除了可以上中下游為主體呈現如圖 22 外，尚可以特定廠商為焦點及其與其他對象之買賣關係，而形成不同焦點廠商供應鏈關係，Mokhtar 等人 (2019) 由產業相關研究篩選出 120 個成果，歸納以特定廠商為觀察焦點，稱為焦點廠商 (focal firm) 的買方及賣方在不同關係下，所形成的不同類型 SCL；圖 23 強調的是買賣雙方關係一對一相對單純的二元關係供應鏈 (dyadic relationship SC)；而三角關係供應鏈 (triadic relationship SC) 如圖 24，焦點廠商負責整合上游如原料供應商之間的流程與活動，以能提升交付給下游廠商的績效與營運規劃；而多層次關係供應鏈 (myriad/multi-tier relationship SC)，如圖 25 中的焦點廠商有責任確保與各級供應商建立密切夥伴關係，以改善供應鏈協調及環境和社會的永續性。而不論圖 23、圖 24 或圖 25 哪一種型態的供應鏈，無論消費者對碳排放敏感

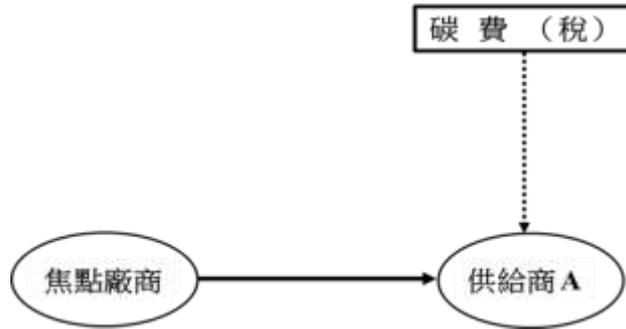
²¹ 世界經濟論壇架構了一個培養領導成功的供應鏈和業務所需要的重要技能，稱為 CHAIN，包括合作的 (collaborative)、整體的 (holistic)、有適應性 (adaptable)、有影響 (influential) 及有故事性 (narrative)，其中比較特殊的是有故事性，表示供應鏈不僅僅是表格上的數字，而是每個數字背後都是一個活生生的故事和業務的命脈，這才是使工作變得有意義的重要來源 (World Economic Forum, 2023)。所以領導供應鏈強調的是透過合作，主動引導整個網絡實現共同目標的方法。

度的高低，最佳碳費（稅）的設計，必須考量產業部門的差異，同時也需考慮供應鏈的權力結構（power structure）²²與減碳的成本效率，才能讓製造商和零售商在不同的供應鏈權力結構下，投資適當的綠色技術（Chen, et al., 2020）。

前述二元關係供應鏈強調的是三種供應鏈其中任何買賣的相對關係，而買賣雙方可能是買者與提供者，亦可能是買方和零售商、買方和經銷商或者是買方和物流服務提供者，而多層次供應鏈關係是此類供應鏈的一個通稱，並不限於圖 25 中的二層次，亦可衍生出比圖 25 更多層次的供應鏈關係，圖 25 僅是呈現出一個有多角關係的供給買賣關係為代表。因而，如碳費（稅）課徵在前述不同型態的供應鏈上，不論是二元關係供應鏈、三角關係供應鏈或多層次關係供應鏈，對研發的影響程度各不相同。此外，在一個國家內，碳費（稅）課徵造成結果的差異，除了源自各產業 SC 的不同外，另各產業投入結構、能源來源和技術類型的差異，也使得不同生產者因為碳費（稅）的課徵而產生不同碳隱性成本（hidden cost of carbon）（Ma, et al., 2023），因此所增加碳隱性成本的大小、正可能是相關廠商是否採行綠色科技與技術的關鍵因素。而如果所施行的碳稅稅率是逐漸提升或是對不同部門稅率是高低有別的高階梯式碳稅（high-tiered carbon tax）政策，對前述圖 23、圖 24 或是圖 25 供應鏈之最佳決策，均可以適當運用碳減排技術投資成本分擔（carbon reduction technology investment cost sharing）或碳稅成本分擔（carbon cost sharing）兩種策略，如此不僅可有效減緩製造商（生產者）的成本負擔，進而激勵製造商（生產者）R&D 投資顛覆性之減排技術，並與零售商由碳稅成本分攤中獲更大的利潤空間（Fu, M., et al., 2023）。如此表示，當製造商在製造過程或供應鏈中為降低排放之財務負擔較高，而分配給綠色專案的金融資源對企業碳效率、低碳產品市場需求低時，零售商的低碳投資對供應鏈是有益的，如此可使得製造商和零售商的利潤增加，因此，零售商和製造商在供應鏈中提供良好共享契約是必要的（Zou, et al., 2020）。

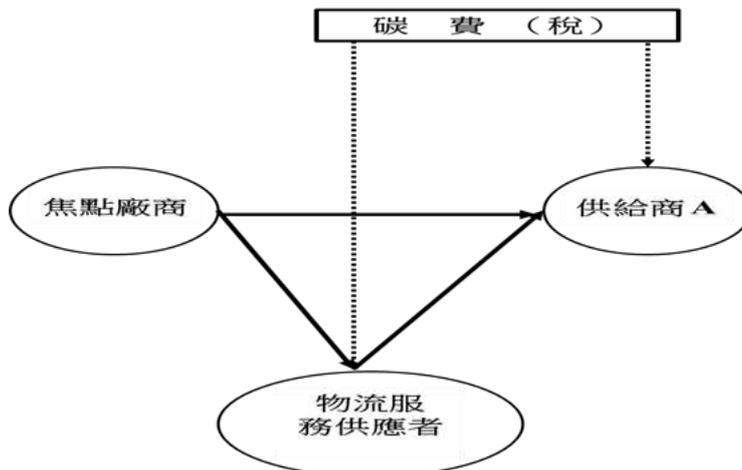
為瞭解碳費（稅）政策和消費者產品接受度如何影響生產者選擇產品線之策略，Wang 與 Wang（2022）分析生產者考慮消費者對產品之接受度之情況下，對

²² 供應鏈中的權力結構是指，在供應鏈不同成員間之影響力和控制權的分配，決定誰有能力做出關鍵決策、決定價格和訂定條款，Nurhayati 等人（2021）一文對此有詳細的回顧與討論。



來源：修正自 Mokhtar 等人 (2019)。

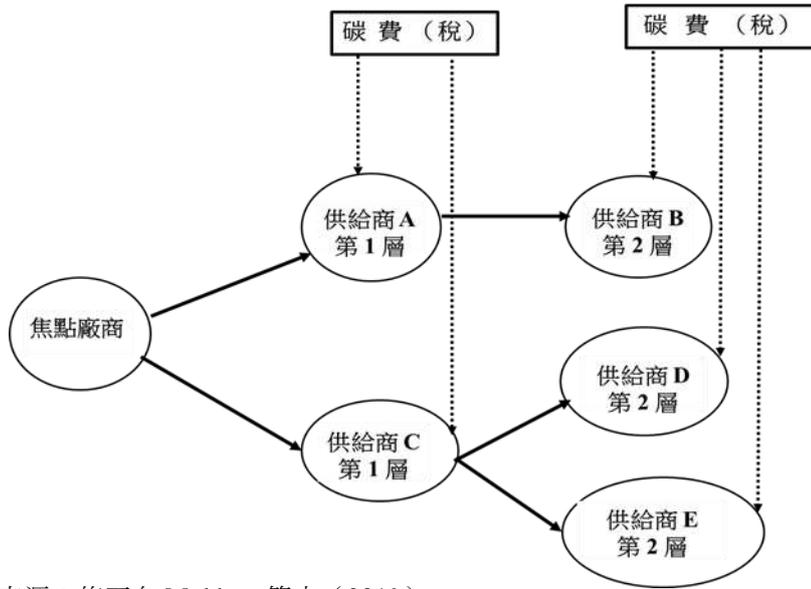
圖 23：碳費（稅）課徵於二元關係供應鏈



來源：修正自 Mokhtar 等人 (2019)。

圖 24：碳費（稅）課徵於三角關係供應鏈

不同產品線之選擇，而不同產品線背後隱含的是碳稅政策所帶來不同成本的增加，第一種是生產碳排放量較高的一般產品、第二種為生產低碳排放但單位成本較高的產品，第三種為同時生產碳排較高及低碳排產品，生產者可以選擇以碳稅政策為導向的產品線，以實現碳減排和永續發展，生產者在選擇了不同的產品線基本上也決定了碳費（稅）在供應鏈上的課徵點。又因為消費者的環境意識與行為，顯著影響其對綠色產品的偏好，當消費者在供應鏈中對末端綠色產品的偏好提升、則預期利潤亦將提高，又當對末端綠色產品偏好消費者比例較高時，每單位產品的高碳費（稅）可能會增加零售商的利潤，而降低供應鏈的利潤，反之，當偏好



來源：修正自 Mokhtar 等人 (2019)。

圖 25：碳費（稅）課徵於多層次關係供應鏈

末端綠色產品之消費者比例相對低時，每單位產品的高碳費（稅）無意中可能導致 GHG 排放量的增加，尤其是在 R&D 成本較低的情境下 (Deng, et al., 2023)。同樣的結果亦出現於 Liu 與 Hu (2020) 的分析上，他們發現隨著消費者綠色偏好的增加，產品的綠色度也會提升，因消費者的偏好可促進更多綠色產品的生產，如此意味著政府可以透過提升消費者的綠色意識來促進綠色生產；同時，供給商的開發成本越低，產品綠色度就越高。由於市場存在不確定，因而整個供應鏈就存在風險，在此種情況下，製造商和零售商應採取較低的風險規避策略，如此可提高各自的利潤；而如要提高整個供應鏈的利潤，製造商應採取較高的風險規避策略，而零售商則應採取較低的風險規避策略 (Li, et al., 2022b)。

碳費（稅）率之高低對產品成為綠色的影響，Liu 與 Hu (2020) 以類似圖 25 的兩層供應連分析發現，當碳費（稅）率較低時、產品的綠色度會隨著碳費（稅）率的提升而增加，而如果費（稅）率較高且開發成本較低，則產品的綠色度會隨著碳費（稅）率的增加而增加；相反的，如果碳費（稅）率較高且開發成本也較高時，則產品的綠色度會降低。也就是說，當碳費（稅）率較低時，價格的負面影響會隨著消費者對價格的擔憂而增加，因此，圖 25 中的供給商 A 或供給商 C

會透過提高綠色度來抵消負面影響，而當費（稅）率較高且開發成本較低時，消費者對價格的擔憂越高，產品的綠色度就越高，相反的，如果費（稅）率較高且開發成本較高，產品的綠色度就會下降。又分散式決策模式，會增加對零售商的低碳補貼可以實現供應鏈與政府的雙贏；通路競爭有利於改善供應鏈，提升社會效益。因此，政府有責任採取合理的補貼政策，制定產業低碳標準，並引導供應鏈成員之間的競爭，以實現更高的利潤。

又不論前述哪一種類型的供應鏈，供應鏈的兩端可能是在不同國家，比如 EU 即將上路的 CBAM，雖然 EU 整體的碳訂價政策是 ETS，然有超過一半的國家除有 ETS 政策外，亦採行碳稅政策²³，以法國而言，在 EU ETS 自 2005 年開始施行後的第 10 年、於 2014 年又針對 CO₂ 排放課徵碳稅，Coster 等人（2024）探討碳稅和 CBAM 實施後企業潔淨和污染投入來源變化的影響發現，法國企業如增加來自碳費（稅）的課徵比法國低或是非 EU ETS 國家的貿易份額，如此則與排放承擔責任相對小的非 EU 國家建立了新的供應鏈關係，這些進口品如依循法國的碳稅水準及 EU 的 CBAM 標準，如此將使所有產品價格提升，即便法國企業調整採購自 EU 及非 EU 潔淨產品和「骯髒」產品之組合與比例，由於 CBAM 的存在，產品價格提升的影響必然存在。由此可見，透過貿易供應鏈任何一端的碳排放減量政策，也會影響供應鏈的另一端，而 EU 的 CBAM 影響所及，除了可能改變原來在 EU 交易體系之成員國的採購策略外，同時也會影響 EU 成員國與非 EU 成員國間有更佳的採購組合（Cosbey, et al., 2019）。而排放減量政策或是依此所誘發的綠色技術，除了會影響供應鏈的東道國（host country）採購策略，也會影響母國（parent country）貿易策略，比如中國在潔淨技術諸如電池、電動車、太陽能與風力等之主導地位反映了其在相關技術的領先、規模經濟和技術學習曲線效應，使得潔淨技術的成本得以降低、此將促使全球以更經濟的方式轉型為淨零經濟，因技術學習的存在產生所謂技術分叉（technology bifurcations）²⁴，可以在

²³ 參與 EU ETS 的 30 個國家中有課徵碳稅的分別為：芬蘭、波蘭、瑞典、丹麥、斯洛維尼亞、愛沙尼亞、拉脫維亞、挪威、冰島、列支登士頓、愛爾蘭、西班牙、法國、葡萄牙、盧森堡、荷蘭、奧地利。

²⁴ 所謂技術分叉係指技術發展和標準因地緣政治和經濟因素的不同，所造成的科技分叉，如此將使技術獲得與技術成就、或技術使用與創新有所差異，依此而造成高科技與低科技、已開發國

不增加太多成本的情況下引導經濟走向低碳經濟（Chi, et al., 2012），然而，出於經濟和國家安全雙重考慮，與中國有貿易往來國家也可能考慮減少對單一國家的依賴（Energy Transitions Commission, 2025）。

（三）不同碳費（稅）、補貼或稅收抵減政策對綠色供應鏈的誘發

由前述討論可知，在碳費（稅）政策下、對任何形式供應鏈的 CO₂ 排放及受政策影響供應鏈中的任何結點（node）或是成員（member），因而可能更綠化。依此，則可進一步觀察，當大多數國家面臨碳排放的嚴峻挑戰時，一個源自在這種不可避免環境危機下的概念，綠色供應鏈（green supply chain, 以下簡稱 GSC）之形成。GSC 的特徵是碳費（稅）課徵在供應鏈每一個結點或是成員的活動過程上，表示供應鏈中各節點或成員每一單位污染的排放對環境之負面影響都必須承擔應有的責任（Eslamipoor & Sepehriyar, 2024；Waltho, et al., 2019）。在 GSC 中、政府的綠色敏感度（green-sensitive）反應出其對監管成本之敏感度，而企業的綠色敏感度意味著他們對綠色生產策略所付出的額外成本比較敏感，因此願意承擔更高的生產成本以承擔綠色生產的社會責任，又 GSC 中對綠色敏感的消費者，表示對綠色產品表現出偏好，並且願意為綠色產品支付更高的價格（Long, et al., 2021）。此外，對碳費（稅）效果持有完全不同看法的人，認為碳費（稅）基本上是不受歡迎，由於決策者理解這點、因此設定的費（稅）率水準實質上均低於碳的社會成本（social cost of carbon, 以下簡稱 SCC）²⁵，當訂定碳費（稅）政策面臨阻力時，費（稅）率將因此而訂得顯著低於 SCC，此時，政府可能資助廠商低碳投資，或者不是僅使用單一的碳費（稅）政策，而是同時降低消費稅或引入化石燃料補貼和綠色補貼等多元配套政策推動經濟轉向綠色能源，如此使得以綠色技術達成減碳與移轉至綠色經濟典範的政策，是多元政策搭配下的結果（Van der Ploeg, 2025；Jiang, et al., 2024；Liu, et al., 2024；Lyu, et al., 2024；Chien, et al.,

家與開發中國家對技術的需求不同（Drori, 2010）。

²⁵ 碳的 SCC 是指以貨幣為單位估算向大氣中額外排放一噸 CO₂ 造成的經濟損失，SCC 將氣候變遷的影響以貨幣表示，如此能幫助政策制定者和其他決策者理解增加或減少 CO₂ 排放所帶來的經濟影響（Rennert & Kingdon, 2025）。

2023；Mu & Zhao, 2023；Zhu, et al., 2023；Zhang, et al., 2022；Shu, et al., 2017；Rozenberg, et al., 2013；Sawangphol & Pharino, 2011）。

而碳稅與其他政策的搭配在 Rahman 等人（2024）針對全球南方國家（包括中國、印度和巴基斯坦）等 GHG 主要排放國家也有一樣的效果，他們分析三個國家 1990 年至 2022 年的資料發現，碳稅、綠色創新、能源轉型、數位基礎設施（digital infrastructure）、永續礦產開採和 GDP 對碳中和有顯著影響，乃建議政府應透過補貼鼓勵使用綠色能源，並支持減少碳排放的技術。又 Geroe（2022）分析澳洲達淨零路徑，建議技術支援與碳稅如何有效的交替實施，因為即便諸多情況均顯示碳稅對碳排放減量有經濟效率，然在技術使用初期，澳洲的技術是依靠政府的財政支援來減少碳排放，也就是依循「技術而非稅收」（technology not taxes）原則。而採行新科技、不論是來自碳費（稅）的誘發或是財政的直接支援，新技術雖存在利潤、然企業在進行技術創新決策時，會面臨技術、市場、收益及難以預測新技術 R&D 發展的多種風險，因此政府常需綜合運用稅收、投資融資等財政手段，以調整創投與創投公司間的關係（Li, et al., 2015）。

當有不同政策搭配施行時，則需注意政策間對達成目標的互補或互斥性，比如 Gu, J. 等人（2024）模擬施行 ETS，發現短期內碳排放量和總產出會同步增加，然而，如施行能源技術補貼政策（energy technology subsidy policies）則可立即減少 GHG 排放量，同時帶動總產出和消費等總體成長；反之，採行化石能源技術補貼政策（fossil energy technology subsidy policies），在推動碳減排方面更為有效，且能促進經濟發展發揮關鍵作用；由此可見，在實施 ETS 時，應優先補貼化石燃料，以實現高效率的 GHG 排放減量，爾後再將重點轉向再生能源技術，以優化能源結構，促進經濟發展；此亦隱含、相關政策執行的先後順序亦適用於與 ETS 同為碳訂價政策的碳費（稅）政策上。另 Yu 等人（2022）及 Yu 等人（2021）分析在單一累進碳費（稅）率下，結合綠色創新補貼與碳費（稅）政策對綠色創新效果具有疊加效果，更對擁有高的低碳技術企業帶來顯著的綠色創新激勵效果。又 Meltzer（2014）分析美國對綠色技術的各種補貼，除了有低利貸款及獎勵措施外，如再課予碳稅，發現如此將促進美國對減少 CO₂ 排放之綠色技術需求的成長，進而也會激勵全球加強對此類技術的 R&D 能力；由此可見，為了 GHG 排放之減緩，不論是單獨執行碳費（稅）政策或是與其他政策結合運用，碳費（稅）

政策均有助於綠色科技發展，僅是與不同政策搭配需注意不同政策在減量與綠色科技發展所產生的加乘效果或相互抵減的可能，當然企業及政府的財務負擔亦不可忽視（Abolhosseini & Heshmati, 2014）。

又綠色技術的創新，最關鍵的是否可取得足夠資金，因此，在碳費（稅）課徵的誘導下，可同時結合給予私人部門不同潔淨技術研究的補貼，以促使短期內採取更強的減緩措施，讓不同主體、技術或地區獲得資金的成本差異得以加速縮小，走向更統一或相似的成本結構（Campiglio, et al., 2024）。此外，碳費（稅）政策是一般的稱呼，如果將其細分，有一般能源稅（general energy tax）、CO₂稅（carbon dioxide tax）與 SO₂稅（sulfur dioxide tax），比如丹麥於 1977 年開始課徵一般能源稅，此種稅收主要是針對汽油產品、電力與天然氣，後來於 1982 年也課徵於煤，至於 CO₂稅則是課徵各部門的能源使用，而稅率是根據不同燃料的 CO₂含量來區分，至於 SO₂稅則根據燃料的含硫量徵收或是 SO₂的實際排放量。不論是哪一種碳稅，主要是透過影響每單位產品的碳費（稅），以此影響供應鏈轉變成綠色的驅動力，無論碳費（稅）政策是否為單一費（稅）率（uniform rate）或是非單一費（稅）率（non-uniform rate），每單位產品碳費（稅）的增加都會帶來更高的 R&D 之投入（Deng, et al., 2023）。

此外，前述不論圖 23、圖 24 或是圖 25 中、至少都有一個是製造商（生產者）及零售商，如果綠色技術的 R&D 是生產者（製造商）的義務，而零售商的責任則是銷售對綠色產品有偏好的消費者，雖然消費者對低碳產品的偏好使得企業更加關注自身的減碳水準，然而，製造商的資金約束和供應鏈成員的權力結構也限制了企業的減碳行為；在此種情況下政府可選擇課費（稅）或是補貼來推動綠色技術發展，至於是補貼或是課費（稅）政策對生產者或是零售商有較大的減碳誘因及利潤，需視減碳創新的技術成本及污染邊際損害的關係，而這二者的關係會改變，原則上，綠色技術創新的成本較低或污染的邊際損害較高，政府就應該實施綠色補貼，如果情況相反，則採行碳費（稅）的課徵，將此兩種政策作最佳的組合以達到減緩目標（Yi, et al., 2022）。進而，Li 等人（2022a）假設生產者是利用碳配額質押融資（carbon quota pledge financing）來投資碳減排技術，碳交易價格的提高，增加了供應鏈的經濟效益，也降低了供應鏈的碳減排水準，但卻損害了零售商的利益；然而，當質押融資利率上升、生產者的融資成本也隨之上

升，如此則導致供應鏈的利潤和碳減排水準降低，此乃不利綠色供應鏈的形成。Zhou 等人（2021）回顧了有關碳稅對供應鏈各層面的影響，除了提出未來在技術可改進化與加強之處外，另特別強調，過去這方面的相關研究絕大部分侷限於一種政策，即便僅是針對碳費（稅）政策對供應鏈的影響，各國的碳費（稅）政策或多或少均有差異，因此，未來在碳費（稅）政策對供應鏈影響的探討，可考慮區域內和區域間的比較分析與整合地理因素的研究。

（四）碳費（稅）對循環經濟的誘發

在碳費（稅）的課徵下，圖 21 或圖 22 供應鏈中的任一階段均可減少 GHG 的排放量，比如工業部門效率的提升，可以來自與熱能利用和加工製程改進相關效率之提升，也可以來自產品製造所需原料的替代、輕量化和循環經濟（circular economy）等措施達成碳排放的減少，亦可從化石燃料經濟邁向循環生物經濟（circular bio-based economy）之轉型（Barrett, et al., 2018）。進而，亦可採循環經濟的閉環供應鏈機制，所謂閉環供應鏈（closed-loop SC）是正向物流（forward logistic）與逆向物流（reverse logistic）的結合，即傳統由生產至消費末端物流，與反向由消費至生產端物流的完整生命週期之結合，其目的是透過減少浪費和能源消耗來提高效率 and 獲利能力（Jauhari, et al., 2024；Govindan, et al., 2023；Ofori, 2023；Wang, M., et al., 2023；Lyu, et al., 2022；Prajapati, et al., 2022；Kazemi, et al., 2019）。因此，循環經濟不僅關注減少視環境為殘留物之儲存槽，也關注創造可自我維持的生產系統，讓原料可以反覆利用（Genovese, et al., 2017）。進而，循環經濟措施亦被英國的商業、能源和工業策略部（The Department of Business, Energy, and Industrial Strategy, 以下簡稱 BEIS）稱為「價值鏈合作」（value chain collaboration），主要目的是減少（reduce）浪費、回收（recycle）、再利用（reuse）及恢復（recover）原料重組產品或服務，循環經濟的實踐應因地制宜，例如應考量能源和資源供應、產業結構和經濟發展階段的差異，提高資源利用效率，並盡最大可能減少其負面影響，此類措施將充分減少產品消耗、減緩氣候變遷以實現永續發展目標（Xie, et al., 2023；Zhang, et al., 2022；Cooper & Hammond, 2018）。而為轉型至低碳技術，關鍵原料來源壓力則持續增加，而所謂關鍵原料是指供應

鏈中斷風險較高且替代性有限的原料，在此背景下，稀土元素、鉑族金屬、鋰和鈷原料，對於邁向低碳經濟和永續發展轉型尤為重要（Florek, et al., 2024）。而對於非稀有資源如銅金屬，銅資源因其良好的導熱性、導電性、可塑性和延展性同樣備受重視，其受重視的理由是，碳中和目標帶來的全球電力結構轉型將促使增加銅的需求，預計到 2050 年，全球精鍊銅資源需求比 2020 年增加 1.6 倍來到 6 千 2 百萬公噸（Gu, Y., et al., 2024）。由此顯示，經由循環經濟減少正向物流對銅原生金屬在電力生產過程中的投入，得以讓全球在不耗費過多精鍊銅資源下達成碳中和目標。

過去文獻預測經濟全面轉型至低碳，基本上將是各式自然資源原料與能源高度密集。而自然資源、除了金屬資源本身直接間接受到影響外，其他資源亦受影響，典型的消費性電子產品如智慧型手機，包含了各式各樣的金屬投入原料，而這些資源的生產需要用水，不僅使淡水短缺也同時產生水污染，而這些產品所用的一般金屬、貴重金屬、危險金屬和關鍵金屬的萃取和整個生產之生命週期，對水資源消耗及水質均有不同影響，Madaka 等人（2022）的研究發現，貴重金屬對水資源消耗與水質影響最大，這是因為採礦作業直接消耗水資源，能源生產則間接消耗水資源、而金屬排放則導致水質污染，因此為減少水資源消耗及受污染，相關解決方案需要閉環供應鏈各結點或成員的密切合作，以能有更好產品設計和材料選擇，將產品使用、壽命和報廢管理連結起來，而低碳的綠色技術也有類似問題、因此亦可採類似的作法。Hu 等人（2024）回顧 2002-2022 年間能源與各式原料間的關係，以能在達到永續氣候減緩之際亦能對資源管理有更佳的掌握。另 Song 等人（2023）的研究發現，中國從現在到 2060 年所設定的淨零年，如延長原料使用壽命，可減少 3% 的 GHG 排放量，而如果提高廢料回收率累積則可減少 10% 的 GHG 排放量，又提高密集利用率進而可減少 21% 的 GHG 排放量，由此顯見循環再利用對 GHG 排放減少的貢獻。

而循環經濟除了針對能源及其他自然資源外，亦可直接針對 GHG 標中最重要的標的物 CO₂ 予以減少，碳捕捉與利用（carbon capture and utilization, 以下簡稱 CCU）即是將 CO₂ 轉化為有附加價值之化學產如甲烷、甲醇、乙醇、烯烴（如乙烯）、甲酸和碳氫化合物的方式（Thielges, et al., 2022；Rodin, et al. 2022），而轉換所要的能源則需由煤或天然氣的化石燃料提供，如此則產生更多的 GHG 排

放，核電廠不僅在發電上是一種低碳能源，它還是一種為 CO₂ 化學轉化提供良好的熱能和輻射的來源（Ramirez-Corredores, et al., 2021）。進而，如果循環經濟和 GSC 結合，EU 國家結果顯示，如此更能強化環境永續性和增加 CO₂ 排放減量，且二者的結合亦可鼓勵產品設計和生產流程的創新，並讓各行各業轉向更永續的消費和生產模式，因此，政府相關決策者應透過補貼、稅收減免和管制框架來激勵企業採用循環經濟和 GSC 的實踐（Mohsin, et al., 2024；Wang, X., et al., 2022；Varbanov, et al., 2021）。由此可見，綠色循環轉型的成本相對比較高，但如果能夠促進創新、加強供應鏈合作並減少浪費，就能產生經濟收益，而這些收益足以抵消永續實踐帶來的更高成本（Dwivedi, et al., 2023）。

三、生產或消費行為改變對綠色科技發展之影響

前述有關碳費（稅）課徵在不同型態供應鏈之影響所討論的各議題，基本上是生產者或與消費者對此一政策的態度與在此一政策下行為的改變所造成。理論上而言，碳費（稅）政策的實施，對於綠色科技的創新雖然相當程度有驅動效果，然由於碳費（稅）政策本質是不受歡迎，即便可以說服人們、此一政策除可降低人們不易感受到的碳排放之外，尚可讓人們知道伴隨此一政策而來的其他各種共伴好處與效益（吳珮瑛，2020），然整體而言，碳費（稅）政策仍須在適當設計下，再結合其他減碳政策或是獎勵綠色措施，對綠色科技與技術創新之進展才能產生顯著的驅動效果。OECD（2015c）曾經以相關之經濟手段與工具，討論更廣層面對環境有害產品，如何減少污染或提供誘因以推出更綠的產品，其中提及如針對產品之銷售課稅、主要目的是在改變消費者的購買行為和企業的產品供應，因為更高的稅率使得消費「骯髒」商品的代價提升，並降低這些商品生產者的獲利，透過此一壓力鼓勵他們轉向更潔淨的替代品；而如果對產品或環境課稅，比如產品稅（product taxes）、基於環境因素的稅收差異（tax differentiation based on environmental factors）、押金退款機制（deposit-refund systems）或生產者延伸責任（extended producer responsibility, 以下簡稱 EPR），這些課徵在消費面與生產面的稅賦，直接間接與碳排放有關，而無論這些稅課徵的初衷為何，經由生產者和消費者態度與行為的改變，才能對環境產生效果。

然不論是消費者或是生產者，人們對碳費（稅）政策的態度取決於其教育程度、對政府的信任及認定碳費（稅）收入對個人和企業之影響（Zhang, et al., 2021）。因此，相關政策或是影響態度的因素改變、就會改變消費者或生產者（不論是工業與家庭、甚至是政府）在產品的使用；消費者可能透過如延長產品使用壽命或由實體商品消費轉向消費更多服務；而生產者除實質技術的改變外，也可以提升包括與熱能利用和加工製程相關之效率，以進一步減少能源需求（Barrett, et al., 2018）。又政府亦可採稅收抵減鼓勵綠色技術投資，鼓勵企業投資和開發低碳減排技術，當生產者瞭解如此做、在一定程度上可以優化和改善生產製程，如此則可能引導推動碳減排技術及創新，藉此使生產者改變生產決策（Changsong, et al., 2023；Datta, 2017）。進而，政府也可以協助特定產業設定合理有效的碳費（稅）率，讓製造商在供應鏈中、得以向供給者提出最適採購量使總成本最小；或製造商採多元採購策略，維持穩定的供應和較大的訂單量可以有效減少供應商的碳排放，以使供應鏈更綠色也更環保；而生產者在供應鏈中的最適決策，同樣可擴大至全球供應鏈的生產決策（Guchhait & Sarkar, 2024；Konso, et al., 2019；Bao & Zhang, 2018；Ma, et al., 2018）。不可否認、經由碳費（稅）的徵收是環境稅的一種，不僅可提高環境效率，有助於源頭廢棄物的產生，以提高環境績效，如此則是實現社會福利最大化的一種環境設計（Design for Environment, 以下簡稱 DfE），此正是達成永續的實務操作（Cai, et al., 2022）。Zhou 等人（2025）更發現，在沒有碳費（稅）的情況下，當社會對個人的影響力不強時²⁶，企業會從母品牌向子品牌延伸，因為市場擴張效應大於蠶食效應（cannibalization effect）²⁷；然當政府課徵碳費（稅），使得成本提升，企業能夠從品牌延伸策略中獲益的社會影響範圍則會縮小。除前述因素會影響生產決策外，企業社會責任（corporate social responsibility, 以下簡稱 CSR）中的綠色行為也有影響，可能的原因是實施 CSR

²⁶ 文獻上討論的社會影響力一般是指，勢利者（snobs）的排他性效應和順從者（conformists）的從眾效應；當某種產品的消費者數量增加時，勢利的消費者基於炫耀的心理、不太可能選擇該種產品，而順從者的行為則正好相反（Amaldoss & Jain, 2015）。

²⁷ 所謂蠶食效應是指公司推出新產品時，當新產品與現有產品相似且擁有相同的客群時，就會發生市場蠶食現象，亦即新產品的銷售量雖有所成長，但公司的市佔率卻沒有增加，表示公司並沒有因新產品的推出而增加新的客群，而是吸引了原有的客群去消費新產品（Kenton, 2025）。

會為企業帶來包括顯性成本（explicit costs）和隱性成本（implicit costs）²⁸，如此則會在短期內降低企業經濟表現（corporate economic performance, 以下 CEP）²⁹，於是對企業價值產生負面影響（Zhang, et al., 2020）。

相關因素的改變、因直接間接影響生產者利潤進而改變生產行為外，影響消費者相關因素的改變，亦會改變消費者行為，如此同樣反應至供應鏈的結點或成員的供給者或是製造商，比如消費者對零售通路的偏好程度（由零售通路至直銷通路），會影響末端零售商的利潤。Liu 等人（2021）的研究發現在去中心化供應鏈（decentralized supply chain）中³⁰，當製造商投資減少碳排放時，如政府對零售商進行低碳補貼，消費者對零售通路的偏好較高（表示偏好至零售通路購物）時，則會增加零售商的利潤；反之，在集中式供應鏈（centralized supply chain）中，政府如採取激勵措施以最大化供應鏈利潤，消費者無論對零售通路偏好程度為何，都有利改善整體供應鏈利潤。而 Saelim（2019）針對特定國家的研究顯示，如在開發中國家泰國課徵碳稅，且碳稅收入透過老年退休金再利用之情況下，消費者對價格變動的行為反應顯示，可以降低貧窮率，並改善收入最低 20% 家庭的福利，同時對泰國的所得不均和貧窮減少產生有利影響，由此可見，碳稅收入的適當利用，不僅有利於環境的改善、同時在不阻礙經濟發展情況下又可改善所得不均度。而針對如 EU 的國際組織，EU 的碳信託（carbon trust）案例顯示，約 30% 的消費者受到生態標章和產品綠色程度的影響，並傾向於購買這些產品，由此可見 GSC 目前仍處於低發展階段，政府應積極承擔綠色責任，加大綠色生產與消費的宣傳，並針對 GSC 的相應階段，制定有針對性的綠色政策（Long, et al., 2021）。隨著企

²⁸ 顯性成本是指企業可以量化的操作成本與支出，亦稱為會計成本；而隱性成本並非金錢支出，而是資源的支出，例如，培訓新員工操作機器或編寫並提交報告所需的時間就是隱性成本，一般難以量化，因此不紀錄為企業經常性會計帳的一部分（Corporate Financial Institute Team, 2025a；Corporate Financial Institute Team, 2025b）。

²⁹ 所謂企業經濟表現可定義為公司在特定時期內所完成活動的整體成果，反應管理階層實現其目標的成功程度（M. Nasser & Partners, Law Firm, 2022）。

³⁰ 根據 Das 等人（2022）的定義，所謂去中心化供應鏈是指同一供應鏈中的每個結點或成員都傾向於考慮增強其結構時，該系統被認為是去中心化；大多數情況下，供應鏈中各結點或成員的目標可能是相互衝突的，因此，如果一個結點或成員掌握了他們的政策，將以對自己最有利的的方式運作，而不是對整個供應鏈最有利。而集中式供應鏈則是指只有一個決策者，該決策者不斷嘗試改進整個供應鏈。

業和消費者綠色敏感度的逐步提高，政府對企業和消費者的補貼及碳費（稅）折扣可以慢慢降低，亦即當企業和消費者都具備一定程度的綠色敏感度時，則消費者和企業可逐步達完全自主階段³¹。

又對於如 OECD 這類組織之成員國而言，由於各成員國在發展程度上有顯著差異，且在碳排放減量承擔的責任也不相同，因此，其中的開發中或已開發國家的碳費（稅）率是否應相同？Boroumand 等人（2022）的研究指出，認為應相同的主張是，站在氣候角度，無論排放活動的性質或地點為何，每個 CO₂ 分子造成的損害程度皆相同，然事實上各 CO₂ 排放都並非處於平等地位；此外，有些排放對改善「發展中」國家人民的生活是必要的，而發展達一定水準後、有些改善並非不可或缺，如此表示此種國際組織在討論各自的碳費（稅）率時，都納入相關因素以凸顯彼此的差異，他們則建議納入人類發展指數（human development index, 以下簡稱 HDI）和人均 CO₂ 排放量為參考來決定碳費（稅）水準，由此改變的能源價格將整合氣候損害成本，因此納入適當因素反應各國的發展程度，方能有效改變能源供應和消費模式，而碳費（稅）率的高低也將改變決策過程和投資策略，因此不僅影響能源公司、也影響大多數企業和組織的能源使用與電力消費模式。

伍、結論

本文嘗試全面的探討為因應氣候變遷、當產業面對碳費（稅）課徵的減碳政策壓力，如何突破市場難以解決的層層障礙，達成此種非自發性的 GHG 或 CO₂ 排放減量，及對綠色科技與技術創新潛在的驅動來源，再輔以 OECD「綠色成長指標」資料庫中足以反應本文所關切的碳排放及各層面的綠色支出數據資料，進而，歸納現有文獻在此相關議題所著墨與分析角度。擬藉此全方位架構、待台灣

³¹ 所謂消費者自主權指消費者一般俱有自主批判性市場上的相關訊息，確定自己可以在不同市場進行選擇，相關訊息傳統上主要集中在廣告對消費者自主選擇的影響，近年來，因技術進步、因此亦加入技術進步對消費者自主性可能的影響（Anker, 2024）。而企業自主是指數位化和自動化的方式執行企業核心日常業務功能，以最少的人力將人工智慧嵌入許多系統中（Burnett, 2022）。

開始課徵碳費有完整相關數據資料時，未來可選擇適當議題角度結合數據資料、輔以適當數據分析工具，為檢視台灣碳費（稅）費（稅）率之高低，對特定產業及/或特定供應鏈的 GHG 或 CO₂ 減量之影響，對特定產業及/或特定供應鏈在特定綠色氣候變遷減緩或調適技術 R&D 支出的牽動，對特定供應鏈結點或成員利潤的衝擊，對資源回收再利用至生產製程之觸發，及對整體經濟利弊得失之評估預作準備。

由各國經驗顯示、碳費（稅）政策是政府常用的有效減碳政策工具之一，然完全仰賴碳費（稅）政策，經常難以帶引產業進入綠色科技或是綠色技術的新境界，尚須輔以需求拉力或技術推力多元創新政策，需求拉力如政府之鼓勵或補貼、稅收抵免、公開宣傳等等，技術推力則為透過政府資助與研究以增加新知識、進而刺激並促進創新，同時也增加訓練有素人力，並提供創新技術之應用，使私人企業得以進一步商業化創新知識，發揮技術擴散與移轉效果。由 OECD 收錄之台灣與其各成員國相關整體技術擴散資料顯示，自 1990 年至最新的 2021 年，台灣總技術開發專利族數比 OECD 成員國各國平均每年技術開發總專利族數還多，而台灣的技術擴散的總專利族數自 2002 年以來、亦比 OECD 各國歷年平均高。而如果聚焦於氣候變遷的相關技術，同一期間、不論是台灣或是 OECD 各國平均，氣候變遷減緩技術擴散專利均比氣候變遷調適技術佔專利總族數高；此一結果表示，不論在台灣或 OECD 各成員國相對不重視氣候變遷調適技術擴散，而台灣投注於氣候變遷調適技術擴散之專利在總專利族數的比例又更低，這凸顯台灣在氣候變遷調適技術擴散成長相對緩慢的原因之一。

台灣整體而言、與 OECD 的 38 個成員國各國平均一樣，在氣候變遷調適技術開發、調適技術擴散及減緩技術擴散上有相當的投注；而台灣與其他 38 個 OECD 成員國及 OECD 整體成員國平均之中，此三大類專利族數合計排名第 5，僅次於美國、日本、南韓及德國，又台灣此三大專利族數合計亦比 OECD 所有成員國之平均來得高，主要源自氣候變遷調適技術擴散專利族數的貢獻。台灣有相對高的氣候變遷調適技術擴散專利族數，但氣候調適技術開發專利族數量卻相當有限，由此顯示、台灣即便擠身為已開發國家，不論是沒有能力或無意願開發新的綠色調適技術，使得調適技術開發相當程度必須仰賴其他國家，且極有可能是由其他已開發國家擴散而來。台灣是否得以邁入綠色經濟的新典範，技術開發或

技術擴散專利族數除了隱含經濟轉型採行技術來源的差別外，尚須視專利族數不是僅停留於專利、而是進一步有真正的對應 R&D 投資，否則再多的專利族數並不保證有對應相對多的 R&D 投資。

在具體落實 R&D 投資上，碳費（稅）結合其他需求拉力或技術推力綠色創新政策，世界各國的經驗顯示對綠色科技創新及 GHG 減量確實為有效的政策工具。至於相關政策如何搭配使用，並沒有放諸四海皆準的模式可套用至任何地區、國家或區域，相關政策組合需考量產業特質、產業規模、地區、國家或區域的經濟發展程度，人們對環境管理相關制度與規範的熟識度、文化差異等諸多因素。唯有一些原則性的準則可以參酌，精心設計的碳費（稅）費（稅）率，除了直接間接影響綠色科技發展外，由此衍生的收入再利用，雖在不同情況下各有優缺點，然依據國際能源總署估計，至 2050 年全世界要實現淨零碳排放所需的潔淨能源，即便全部碳費（稅）收入全投入再利用亦僅佔所需經費的 30%。又收入再利用仍應考量各層面的利害關係人、特定類型技術如再生能源或低碳或綠色技術投資的收入中立，如此，方可發揮碳費（稅）收入再利用的綠色紅利及藍色紅利之雙紅效果。此外，碳費（稅）開始課徵的初始階段，費（稅）率設定應設在較低水準、再逐步提高，以便企業有時間進行綠色技術創新，累積持續在綠色創新所需的資金和技術，甚而在技術 R&D 初期，可仿效澳洲依循「技術而非稅收」原則。至於擔心碳費（稅）的課徵是否會發生企業選擇至其他國家投資綠色創新產業投資洩漏，由於企業已投資的巨額固定成本、對供應商和客戶的長期承諾、基礎設施和物流帶來的高營運效率以及聚集外部性，投資洩漏所涉及的問題、遠比碳洩漏需要的業務複雜得多，因此，這些因素會緩和碳費（稅）迫使企業往境外遷移。

又碳費（稅）課徵於供應鏈的不同結點與成員，對 GHG 或 CO₂ 減量及綠色技術創新的影響各不相同，原則上課徵於原料投入的初始階段，GHG 或 CO₂ 的減量效果比起課徵於末端產品的效果來得顯著。又當碳費（稅）費（稅）率較低時、產品的綠色度會隨著費（稅）率的提升而增加，而如果費（稅）率較高且開發成本較低，則產品的綠色度會隨著費（稅）率的提升而增加。此外，如透過貿易連結不同國家供應鏈的結點與成員，供應鏈一端的碳排放減量政策，也會影響在他國供應鏈的另一端，比如 EU 即將施行的 CBAM，影響所及除了可能改變原來在 EU 交易體系成員國的採購策略外，同時也會影響 EU 成員國與非 EU 成員

國之間有最佳的採購組合。因 CBAM 的存在，使得排放承擔責任相對小的非 EU 國家與 EU 建立了新的供應鏈關係，這些進口品如依循 EU 的 CBAM 標準，如此將使所有產品價格提升。由於供應鏈中的任一階段均可減少 GHG 或 CO₂ 的排放量，GHG 主要來源的製造業與能源部門效率的提升、可來自與熱能利用或生產、加工製程改進效率之提升，也可以來自產品製造所需原料的替代、輕量化和循環經濟等措施達成，亦可由化石燃料經濟邁向循環生物經濟之轉型。亦即採循環經濟的閉環供應鏈機制，循環經濟主要是減少將環境視為殘留物之儲存槽，也透過價值鏈合作，減少浪費、增加回收、多採用再利用及恢復原料以重組產品或服務。

由此可見，為了 GHG 或 CO₂ 減量所施行的碳費（稅）政策，受課徵產業或是部門 GHG 或 CO₂ 排放減量的變動不是唯一課題，尚涉及上中下游產業或部門，及其完整生命週期循環所觸及其他更廣層面的產業與部門的多元議題，當然，整個經濟體所受之影響亦需同等備受關注。

參考文獻

- 吳珮瑛，2025。「私部門投資綠色產業與創新的障礙與表現」，『綠色經濟電子期刊』，環境政策特刊，Vol. 11, pp. B1-B11。
- 吳珮瑛，2022。「碳稅與碳排放交易機制選擇——綜觀世界各國碳定價政策施行現況」，『永續產業發展期刊』，92 卷，頁 1-25。
- 吳珮瑛，2020。「台灣課徵碳稅面面觀——「有感」空氣污染降低引領之共伴效益」，『台灣國際研究季刊』，16 卷，2 期，頁 1-78。
- Abolhosseini, Shahrouz, and Almas Heshmati. 2014. “The Main Support Mechanisms to Finance Renewable Energy Development.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 40, pp. 876-85.
- Ahmad, Mushtaq, Zhang Jida, Izhar Ul Haq, Muhammad Tufail, and Shah Saud. 2024. “Linking Green Transportation and Technology, and Environmental Taxes for Transport Carbon Emissions.” *Transportation Research Part D*, Vol. 136, 104450 (DOI: 10.1016/j.trd.2024.104450).
- Ahmadi, Younes, Akio Yamazaki, and Philippe Kabore. 2022. “How Do Carbon Taxes Affect Emissions? Plant-Level Evidence from Manufacturing.” *Environmental and Resource Economics*, Vol. 82, pp. 285-325.
- Aiginger, K. and D. Rodrik. 2020. “Rebirth of Industrial Policy and an Agenda for the Twenty-First Century.” *Journal of Industry, Competition, and Trade*, Vol. 20, pp. 189-207.
- Ali, Kishwar, Du Jianguo, Dervis Kirikkaleli, Judit Oláh, and Satar Bakhsh. 2023. “Do Environmental Taxes, Environmental Innovation, and Energy Resources Matter for Environmental Sustainability: Evidence of Five Sustainable Economies.” *Heliyon*, Vol. 9, e21577 (DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e21577).
- Alolo, Mutaka Alolo, Alcino Azevedo, and Izidin El Kalak. 2020. “The Effect of the Feed-in-system Policy on Renewable Energy Investments: Evidence from the EU Countries.” *Energy Economics*, Vol. 92, 104998 (DOI: 10.1016/j.eneco.2020.104998).
- Amaldoss, Wilfred, and Sanjay Jain. 2015. “Branding Conspicuous Goods: An Analysis of the Effects of Social Influence and Competition.” *Management Science*, Vol. 61, No. 9, pp. 2064-79.
- Andersson, Johnn, Hans Hellsmark, and Björn Sandén. 2021. “The Outcomes of Directionality: Towards a Morphology of Sociotechnical Systems.” *Environmental Innovation and Societal Transitions*, Vol. 40, pp. 108-31.

- Anker, Thomas Boysen. 2024. "Consumer Autonomy and Social Technology: The Case of Social Media Algorithms and the Metaverse." In *Welcome to The New Normal: Life after The Chaos*, Edited by Vincent Jeseo and Juliann Allen, pp. 99-110. Developments in Marketing Science: Proceedings of the Academy of Marketing Science. Cham, Switzerland: Springer (<https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-031-49039-2.pdf>) (2025/9/26).
- Anthoff, David, and Robert Hahn. 2009. "Government Failure and Market Failure: On the Inefficiency of Environmental and Energy Policy." *Climates of Change: Sustainability Challenges for Enterprise*, Smith School Working Paper Series, University of Oxford: Smith School of Enterprise and the Environment (<https://www.smithschool.ox.ac.uk/sites/default/files/2022-03/Government-Failure-and-Market-Failure.pdf>) (2025/9/3).
- Argentiero, Amedeo, Carlo Andrea Bollino, Silvia Micheli, and Constantin Zopounidis. 2018. "Renewable Energy Sources Policies in a Bayesian DSGE Model." *Renewable Energy*, Vol. 120, pp. 60-8.
- Armstrong, John H. 2023. "Formal Local Government Coordination to Mitigate Climate Change." *Urban Climate*, Vol. 51, 101636 (DOI: 10.1016/j.uclim.2023.101636).
- Arogundade, Sodiq, and Adewale Samuel Hassan. 2024. "The Path to Green Economy: Do Environmental Taxes and Renewable Energy Transition Matter in OECD Countries?" *World Development Sustainability*, Vol. 5, 100189 (DOI: 10.1016/j.wds.2024.100189).
- Arrow, Kenneth J. 1962. "Economic Welfare and the Allocation of Resources to Invention." *The Rate and Direction of Inventive Activity*, Princeton University Press. 引用於 Westmore, Ben. 2013. "R&D, Patenting and Growth: The Role of Public Policy." OECD Economics Department Working Papers No. 1047. (https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2013/05/r-d-patenting-and-growth_g17a22cf/5k46h2rfb4f3-en.pdf) (2025/8/11).
- Asian Development Bank. 2021. *Carbon Pricing for Green Recovery and Growth*. Manila, Philippines: Asian Development Bank.
- Asibor, Jude O., Peter T. Clough, Seyed Ali Nabavi, and Vasilije Mano. 2022. "A Country-level Assessment of the Deployment Potential of Greenhouse Gas Removal Technologies." *Journal of Environmental Management*, Vol. 323, 116211 (DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.116211).
- Assis, Jorge, Elize Fragkopoulou, Ester A. Serrão, Barbara Horta e Costa, Miguel Gandra,

- David Abecasis. 2021. “Weak Biodiversity Connectivity in the European Network of No-take Marine Protected Areas.” *Science of the Total Environment*, Vol. 773, 145664 (DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.145664).
- Avner, Paolo, Jun Rentschler, and Stéphane Hallegatte. 2014. “Carbon Price Efficiency: Lock-in and Path Dependence in Urban Forms and Transport Infrastructure.” Policy Research Working Paper 6941. World Bank (<https://openknowledge.worldbank.org/server/api/core/bitstreams/3f89af7a-163f-57e1-b834-10278afc1d97/content>) (2025/8/24).
- Bahrami, Mahdi, Bardia Roghani, Franz Tscheikner-Gratl, and Marius Møller Rokstad. 2024. “A Deep Dive into Green Infrastructure Failures Using Fault Tree Analysis.” *Water Research*, Vol. 257, 121676 (DOI: 10.1016/j.watres.2024.121676).
- Bao, Xiao-Ying, and Lei Zhang. 2018. “Green Procurement Relationships Development under Carbon Emissions Regulations: A Bi-Level Programming Approach.” *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Vol. 15, No. 10, 2183 (DOI: 10.3390/ijerph15102183).
- Barbaroux, Pierre. 2014. “From Market Failures to Market Opportunities: Managing Innovation under Asymmetric Information.” *Journal of Innovation and Entrepreneurship*, Vol. 3, 5 (<http://www.innovation-entrepreneurship.com/content/3/1/5>) (2025/8/24).
- Barbieri, Nicolò. 2016. “Fuel Prices and the Invention Crowding out Effect: Releasing the Automotive Industry from Its Dependence on Fossil Fuel.” *Technological Forecasting & Social Change*, Vol. 111, pp. 222-34.
- Barrett, John, Tim Cooper, Geoffrey P. Hammond, and Nick Pidgeon. 2018. “Industrial Energy, Materials and Products: UK Decarbonisation Challenges and Opportunities.” *Applied Thermal Engineering*, Vol. 136, pp. 643-56.
- Baudry, Marc, and Clément Bonnet. 2019. “Demand-Pull Instruments and the Development of Wind Power in Europe: A Counterfactual Analysis.” *Environmental and Resources Economics*, Vol. 73, pp. 385-429.
- Berestycki, Clara, Stefano Carattini, Antoine Dechezleprêtre, and Tobias Kruse. 2022. “Measuring and Assessing the Effects of Climate Policy Uncertainty.” OECD Economics Department Working Papers No. 1724 (https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2022/08/measuring-and-assessing-the-effects-of-climate-policy-uncertainty_57535c59/34483d83-en.pdf) (2025/8/24).

- Blanco, Gabriel, Heleen de Coninck, Lawrence Agbemabiese, El Hadji Mbaye Diagne, Laura Diaz Anadon, Yun Seng Lim, Walter Alberto Pengue, Ambuj D. Sagar, Taishi Sugiyama, Kenji Tanaka, Elena Verdolini, Jan Witajewski-Baltvilks. 2022. "Innovation, Technology Development and Transfer." in Priyadarshi R. Shukla, Jim Skea, Raphael Slade, Alaa Al Khourdajie, Renée van Diemen, David McCollum, Minal Pathak, Shreya Some, Purvi Vyas, Roger Fradera, Malek Belkacemi, Apoorva Hasija, Gabao Lisboa, Sigourney Luz, and Juliette Malley, eds. *IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, UK: Cambridge University Press (DOI: 10.1017/9781009157926.018).
- Blyth, Will, Robert Gross, Jamie Rickman, Callum MacIver, and Keith Bell. 2023. "Transition Risk: Investment Signals in a Decarbonising Electricity System." *Applied Energy*, Vol. 352, 121938 (DOI: 10.1016/j.apenergy.2023.121938).
- Boaz, David. 2015. "Solyndra: A Case Study in Green Energy, Cronyism, and the Failure of Central Planning." CATO at Liberty, Washington, DC: CATO Institute (<https://www.cato.org/blog/solyndra-case-study-green-energy-cronyism-failure-central-planning>) (2025/9/12).
- Borghesi, Simone and Sergio Vergalli. 2022. "The European Green Deal, Energy Transition and Decarbonization." *Environmental and Resource Economics*, Vol. 83, pp. 1-3.
- Boroshok, Sara P. 1993. "Environmental Excise Taxes, Focusing on Ozone-Depleting Chemicals, 1993." (<https://www.irs.gov/pub/irs-soi/93exenviro.pdf>) (2025/1/15).
- Boroumand, Rapha"el-Homayoun, St'ephane Goutte, Thomas Porcher, and Thomas F. Stocker. 2022. "A Fair and Progressive Carbon Price for a Sustainable Economy." *Journal of Environmental Management*, Vol. 303, 113935 (DOI: /10.1016/j.jenvman.2021.113935).
- Bowen, Alex. 2015. "Carbon Revenue: How Best to Use the Revenue?" Policy Brief, Climate Change and the Environment, Grantham Research Institute, London School of Economics and Political Science (<https://www.lse.ac.uk/GranthamInstitute/wp-content/uploads/2015/11/Bowen-policy-brief-2015.pdf>) (2025/6/15).
- Burke, Joshua, and Ajay Gambhir. 2022. "Policy Incentives for Greenhouse Gas Removal Techniques: The Risks of Premature Inclusion in Carbon Markets and the Need for a Multi-pronged Policy Framework." *Energy and Climate Change*, Vol. 3, 100074 (DOI: 10.1016/j.egycc.2022.100074).
- Burnett, Sarah. 2022. *The Autonomous Enterprise: Powered by AI*, Swindon, United

- Kingdom: The Chartered Institute for IT
 (<https://ws1.nbninternational.com/fusion/v2.0/supplement/620d2de2646eb178d84dd484.pdf>) (2025/9/26).
- Cai, Ya-Jun, Tsan-Ming Choi, Lipan Feng, and Yongjian Li. 2022. “Producer’s Choice of Design-for-environment under Environmental Taxation.” *European Journal of Operational Research*, Vol. 297, pp. 532-44.
- Calderón, Silvia, Andrés Camilo Alvarez, Ana María Loboguerrero, Santiago Arango, Katherine Calvin, Tom Kober, Kathryn Daenzer, and Karen Fisher-Vanden. 2016. “Achieving CO2 Reductions in Colombia: Effects of Carbon Taxes and Abatement Targets.” *Energy Economics*, Vol. 56, pp. 575-86.
- Campiglio, Emanuele, Alessandro Spiganti, and Anthony Wiskich. 2024. “Clean Innovation, Heterogeneous Financing Costs, and the Optimal Climate Policy Mix.” *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 128, 103071 (DOI: 10.1016/j.jeem.2024.103071).
- Caselli, Francesco. 2005. “Chapter 9: Accounting for Cross-Country Income Differences.” *Handbook of Economic Growth*, Volume 1A. Edited by Philippe Aghion and Steven N. Durlauf, Vol. 1, Part A, pp. 679-741. North Holland: Elsevier.
- Cervantes, Mario, Chiara Criscuolo, Antoine Dechezleprêtre, Dirk Pilat. 2023. “Driving Low-carbon Innovations for Climate Neutrality.” OECD Science, Technology and Industry Policy Papers, No. 143. Paris: OECD Publishing (<https://doi.org/10.1787/8e6ae16b-en>) (2025/7/5).
- Chai, Shanglei, Wenjing Huo, Qiang Li, Qiang Ji, and Xunpeng Shi. 2025. “Effects of Carbon Tax on Energy Transition, Emissions and Economy Amid Technological Progress.” *Applied Energy*, Vol. 377, 124578 (DOI: 10.1016/j.apenergy.2024.124578).
- Changsong, Ma, Tiantong Yuan, Lei Zhong, and Wei Liu. 2023. “Production Decision-making System for Manufacturing Enterprises Constrained by Carbon Reduction Policies.” *Complex & Intelligent Systems*, Vol. 9, pp. 2393-411.
- Chen, Xu, Huan Yang, Xiaojun Wang, and Tsan-Ming Choi. 2020. “Optimal Carbon Tax Design for Achieving Low Carbon Supply Chains.” *Annals of Operations Research* (DOI: 10.1007/s10479-020-03621-9).
- Cherif, Reda, and Fuad Hasanov. 2019. “The Return of the Policy That Shall Not Be Named: Principles of Industrial Policy.” IMF Working Paper, No. 2019/074, International Monetary Fund (<https://www.imf.org/en/Publications/WP/Issues/2019/03/26/The-Return->

- of-the-Policy-That-Should-Not-Be-Named-Principles-of-Industrial-Policy-46710)
(2025/7/3).
- Chi, Chunjie, Tiejun Ma, and Bing Zhu. 2012. "Towards a Low-carbon Economy: Coping with Technological Bifurcations with a Carbon Tax." *Energy Economics*, Vol. 34, pp. 2081-88.
- Chien, Fengsheng, Trong Lam Vu, Thi Thu Hien Phan, Sang Van Nguyen, Nguyen Ho Viet Anh, and Thanh Quang Ngo. 2023. "Zero-carbon Energy Transition in ASEAN Countries: The Role of Carbon Finance, Carbon Taxes, and Sustainable Energy Technologies." *Renewable Energy*, Vol. 212, pp. 561-69.
- CleanBC, Government of British Columbia. 2025. "About CleanBC." British Columbia, Canada (<https://cleanbc.gov.bc.ca/about-cleanbc/>) (2025/9/6).
- Cooper, Samuel J. G., and Geoffrey P. Hammond. 2018. "Decarbonising' UK Industry: Towards a Cleaner Economy." *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Energy*, Vol. 171, No. 4, pp. 147-57.
- Corporate Financial Institute Team. 2025a. "Explicit Costs." (<https://corporatefinanceinstitute.com/resources/accounting/explicit-costs/>) (2025/9/26).
- Corporate Financial Institute Team. 2025b. "Implicit Cost." (<https://corporatefinanceinstitute.com/resources/accounting/implicit-cost/>) (2025/9/26).
- Cosbey, Aaron, Susanne Droege, Carolyn Fischer, and Clayton Munnings. 2019. "Developing Guidance for Implementing Border Carbon Adjustments: Lessons, Cautions, and Research Needs from the Literature." *Review of Environmental Economics and Policy*, Vol. 13, No. 1, pp. 3-22.
- Coster, Pierre, Julian di Giovanni, and Isabelle Mejean. 2024. "Firms' Supply Chain Adaptation to Carbon Taxes." Staff Reports, no. 1136, Federal Reserve Bank of New York (https://www.newyorkfed.org/medialibrary/media/research/staff_reports/sr1136.pdf) (2025/9/17).
- Das, Manojit, Dipak Kumar Jana, Shariful Alam. 2022. "Comparative Study of Centralized and Decentralized Scenarios of a Three Tiered Green Supply Chain in Two-period Using the Game Theoretical Approach." *Cleaner Logistics and Supply Chain*, Vol. 4, 100054 (DOI: 10.1016/j.clscn.2022.100054).
- Datta, Tapan Kumar. 2017. "Effect of Green Technology Investment on a Production-Inventory System with Carbon Tax." *Advances in Operations Research*, Vol. 2017, 4834839 (DOI: 10.1155/2017/4834839).

- Datta-Chaudhuri, Mrinal. 1990. "Market Failure and Government Failure." *Journal of Economic Perspectives*, Vol. 4, No. 3, pp. 25-39.
- De Rassenfosse, Gaetan, and Bruno van Pottelsberghe. 2009. "A Policy Insight into the R&D-patent Relationship." *Research Policy*, Vol. 38, No. 5, pp. 779-92.
- De Mattos, Fernanda Bárcia. 2018. "Green Growth, Just Transition, and Green Jobs: There's a Lot We Don't Know." Employment Research note. Switzerland: Employment Policy Department, Employment and Labour Market Policies Branch, International Labour Office (https://www.ilo.org/sites/default/files/wcmsp5/groups/public/%40ed_emp/documents/publication/wcms_628605.pdf) (2025/9/18).
- Deng, Liurui, Jie Tan, and Jiawu Dai. 2023. "Analysis of Decision-Making in a Green Supply Chain under Different Carbon Tax Policies." *Mathematics*, Vol. 11, 4631 (DOI: 10.3390/math11224631).
- Dernis, H el ene, and Mosahid. Khan. 2004. "Triadic Patent Families Methodology." OECD Science, Technology and Industry Working Papers, 2004/02. Paris: OECD Publishing (<http://dx.doi.org/10.1787/443844125004>) (2025/9/15).
- Dey, Sajal Kumar, Sudipta Bose, Le Luo, and Syed Shams. 2025. "Impact of Corporate Climate Change Performance on Information Asymmetry: International Evidence." *Journal of International Accounting Research*, Vol. 24, No.1, pp. 13-45.
- Dill, Helena. 2024. "Carbon Pricing Initiatives and Green Bonds: Are They Contributing to the Transition to a Low-carbon Economy?" *Climate Policy*, Vol. 24, No. 4, pp. 529-44.
- Domguia, Edmond Noubissi, Hilaire Nkengfack, Thierry Messie Pondie, and Borice Augustin Ngounou. 2024. "Do Environmental Taxes Encourage the Decarbonization of Economies?" *Environment, Development and Sustainability* (DOI: 10.1007/s10668-024-05571-9).
- Doyle, Nuala. 2024. "What is the UK Government's Revenue Support Mechanism, and How Can It Be Good for E-fuels?" SASHA Coalition (<https://www.sashacoalition.org/blog/revenue-support-mechanism>) (2025/6/25).
- Drori, Gili S. 2010. "Globalization and Technology Divides: Bifurcation of Policy between the 'Digital Divide' and the 'Innovation Divide'." *Sociological Inquiry*, Vol. 80, No. 1, pp. 62-90.
- Duan, Yuwan, and Xuemei Jiang. 2021. "Pollution Haven or Pollution Halo? A Re-evaluation on the Role of Multinational Enterprises in Global CO2 Emissions." *Energy Economics*, Vol. 97, 105181 (DOI:10.1016/j.eneco.2021.105181).

- Dwivedi, Ashish, Claudio Sassanelli, Dindayal Agrawal, Md. Abdul Moktadir, and Idiano D'Adamo. 2023. "Drivers to Mitigate Climate Change in Context of Manufacturing Industry: An Emerging Economy Study." *Business Strategy and the Environment*, Vol. 32, pp. 4467-84.
- Economic Consulting Associates. 2015. "Carbon Lock-in Toolkit." UK: Economic Consulting Associates Limited (https://assets.publishing.service.gov.uk/media/57a08978ed915d622c000223/61516_Carbon_lock-in_toolkit.pdf) (2025/8/24).
- Edelman, Brent, and Sandeep Bhattacharya. 2024. "Carbon Taxes and Fossil Fuel Subsidies." *The Governance Brief*, Issue 58. Asian Development Bank (<https://www.adb.org/sites/default/files/publication/1022066/governance-brief-058-carbon-taxes-fossil-fuel-subsidies.pdf>) (2025/9/7).
- Energypedia. 2014. "Renewable Energy Quota and Certificate Schemes." (https://energypedia.info/wiki/Renewable_Energy_Quota_and_Certificate_Schemes) (2025/9/14).
- Energy Transitions Commission. 2025. "Global Trade in the Energy Transition: Principles for Clean Energy Supply Chains & Carbon." Version 1.0, Briefing Note. SYSTEMIQ Ltd.: London (https://www.energy-transitions.org/wp-content/uploads/2025/06/Global-trade-in-the-energy-transition_vf.pdf) (2025/9/17).
- Eslamipoor, Reza, and Abbas Sepehriyar. 2024. "Promoting Green Supply Chain under Carbon Tax, Carbon Cap and Carbon Trading Policies." *Business Strategy and the Environment*, Vol. 33, pp. 4901-12.
- European Commission. 2023. "Report from the Commission to the European Parliament and the Council: EU Climate Action Progress Report 2023, {SWD(2023) 338 final} - {SWD(2023) 339 final}" (https://www.astrid-online.it/static/upload/com_/0000/com_2023_653_en_0.pdf) (2025/7/22).
- European Environment Agency. 2025. "Double Dividend." (<https://www.eea.europa.eu/help/glossary/eea-glossary/double-dividend>) (2025/9/19).
- Fan, Hongmin, and Chen Liang. 2023. "The Pollutant and Carbon Emissions Reduction Synergistic Effect of Green Fiscal Policy: Evidence from China." *Finance Research Letters*, Vol 58, 104446 (DOI: 10.1016/j.frl.2023.104446).
- Fang, Xingcun, Yang Yang, and Wei-Chiao Huang. 2023. "The Impact of Green Taxation on Green Low-carbon Development in Yangtze River Delta Region of China: Based on

- Mediating Effect Model and Spatial Durbin Model.” *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 30, pp. 103674-89.
- Florek, Justyna, Masaki Negoro, Yimu Hu, Kazuyoshi Kanamori, Kazuki Nakanishi, and Freddy Kleitz. 2024. “The Role of Nanoporous Adsorbents in the Circular Economy-Closing the Loop of Critical Materials Recovery.” *Advanced Functional Materials*, 2409462 (DOI: 10.1002/adfm.202409462).
- Fu, Ke, Yanzhi Li, Huiqiang Maoc, and Zhaowei Miao. 2023. “Firms’ Production and Green Technology Strategies: The Role of Emission Asymmetry and Carbon Taxes.” *European Journal of Operation Research*, Vol. 305, pp. 1110-12.
- Fu, Min, Wensong Wu, Lixin Tian, Zaili Zhen, and Jing Ye. 2023. “Analysis of Emission Reduction Mechanism of High-Tiered Carbon Tax under Green and Low Carbon Behavior.” *Energies*, Vol. 16, 7555 (DOI:10.3390/en16227555).
- Furton, Glenn, and Adam Martin. 2019. “Beyond Market Failure and Government Failure.” *Public Choice*, Vol. 178, pp. 197-216.
- Gamarra, Yanis Luca, and Gunther Friedl. 2023. “Declared Essential Patents and Average Total R&D Expenditures per Patent Family.” *Telecommunications Policy*, Vol. 47, 102575 (DOI: 10.1016/j.telpol.2023.102575).
- Genovese, Andrea, Adolf A. Acquaye, Alejandro Figueroa, S. C. Lenny Koh. 2017. “Sustainable Supply Chain Management and the Transition towards a Circular Economy: Evidence and Some Applications.” *Omega*, Vol. 66, pp.344-57.
- Geroe, Steven. 2022. “‘Technology not Taxes’: A Viable Australian Path to Net Zero Emissions?” *Energy Policy*, Vol. 165, 112945 (DOI: 10.1016/j.enpol.2022.112945).
- Gianoli, Alberto and Felipe Bravo. 2020. “Carbon Tax, Carbon Leakage and the Theory of Induced Innovation in the Decarbonisation of Industrial Processes: The Case of the Port of Rotterdam.” *Sustainability*, Vol. 12, 7667 (DOI: 10.3390/su12187667).
- Giménez, Eduardo L., and Miguel Rodríguez. 2010. “Reevaluating the First and the Second Dividends of Environmental Tax Reforms.” *Energy Policy*, Vol. 38, pp. 6654-61.
- Goldrick-Kelly, Paul. 2023. “A Way to Understand Institutional Carbon Lock-in.” Ireland: Nevin Economic Research Institute (<https://www.nerinstitute.net/blog/way-understand-institutional-carbon-lock>) (2025/8/24).
- Goulder, Lawrence H., and Koshy Mathai. 2000. “Optimal CO2 Abatement in the Presence of Induced Technological Change.” *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 39, No. 1, pp. 1-38.

- Govindan, Kannan, Farhad Salehian, Hadi Kian, Seyed Teimoor Hosseini, and Hassan Mina. 2023. "A Location-inventory-routing Problem to Design a Circular Closed-loop Supply Chain Network with Carbon Tax Policy for Achieving Circular Economy: An Augmented Epsilon-constraint Approach." *International Journal of Production Economics*, Vol. 257, 108771 (DOI: 10.1016/j.ijpe.2023.108771).
- Gramkow, Camila, and Annela Anger-Kraav. 2018. "Could Fiscal Policies Induce Green Innovation in Developing Countries? The Case of Brazilian Manufacturing Sectors." *Climate Policy*, Vol 18, No. 2, pp. 246-57.
- Grubb, Michael, David Ulph. 2002. "Energy, the Environment, and Innovation." *Oxford Review of Economic Policy*, Vol. 18, No. 1, pp. 92-106.
- Gu, Jianping, Yi Li, Jingke Hong, and Lu Wang. 2024. "Carbon Emissions Cap or Energy Technology Subsidies? Exploring the Carbon Reduction Policy Based on a Multi-technology Sectoral DSGE Model." *Humanities & Social Sciences Communities*, Vol. 11, 798 (DOI: 10.1057/s41599-024-03320-x).
- Gu, Yifan, Hongyang Yang, Yufeng Wu, Mingxuan Tuo, Ming Xu, Guangwen Hu, and Tiejong Zuo. 2024. "Regulation Mechanism for Designing Decarbonization Pathways in the Copper Industry Toward Carbon Neutrality." *Environmental Science & Technology*, Vol. 58, pp. 1518-30.
- Guchhait, Rekha, and Biswajit Sarker. 2024. "A Decision-making Problem for Product Outsourcing with Flexible Production under a Global Supply Chain Management." *International Journal of Production Economics*, Vol. 272, 109230 (DOI: 10.1016/j.ijpe.2024.109230).
- Guo, Jidong, and Menghao Xi. 2022. "Greening, Pricing and Marketing Coordination for a Complex Three-Level Supply Chain Under the Carbon Tax in China." *IEEE Access*, Vol. 10, pp. 76895-905.
- Hamilton, James T., and W. Kip Viscusi. 2000. "Calculating Risks? The Spatial and Political Dimensions of Hazardous Waste Policy." *Southern Economic Journal*, Vol. 66, No. 4, pp. 1012-15.
- Han, Jian, Qinliang Tan, Qingchao Ji, Yihan Li, Yuan Liu, and Yuwei Wang. 2023. "Simulating the CCUS Technology Diffusion in Thermal Power Plants: An Agent-based Evolutionary Game Model in Complex Networks." *Journal of Cleaner Production*, Vol. 421, 138515 (DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.138515).
- Hashmi, Rubayyat, and Khorshed Alam. 2019. "Dynamic Relationship among

- Environmental Regulation, Innovation, CO2 Emissions, Population, and Economic Growth in OECD Countries: A Panel Investigation.” *Journal of Cleaner Production*, Vol. 231, pp. 1100-09.
- Haszeldine, Stuart, Andrew Cavanagh, Vivian Scott, Saran Sohi, Ondřej Mašek, and Phil Renforth. 2019. “Greenhouse Gas Removal Technologies - Approaches and Implementation Pathways in Scotland.” ClimateXChange, Scotland’s Centre of Expertise Connecting Climate Change Research and Policy (<https://www.climateexchange.org.uk/wp-content/uploads/2023/09/greenhouse-gas-removal-technologies.pdf>) (2025/8/31).
- He, Pinglin, Lu Chen, Xiaonan Zou, Shufeng Li, Huayu Shen, and Jianhui Jian. 2019. “Energy Taxes, Carbon Dioxide Emissions, Energy Consumption and Economic Consequences: A Comparative Study of Nordic and G7 Countries.” *Sustainability*, Vol. 11, 6100 (DOI: 10.3390/su11216100).
- Heine, Dirk, Willi Semmler, Mariana Mazzucato, João Paulo Braga, Michael Flaherty, Arkady Gevorkyan, Erin Hayde, and Siavash Radpour. 2019. “Financing Low-Carbon Transitions through Carbon Pricing and Green Bonds.” Policy Research Working Paper 8991, World Bank (<https://documents1.worldbank.org/curated/en/808771566321852359/pdf/Financing-Low-Carbon-Transitions-through-Carbon-Pricing-and-Green-Bonds.pdf>) (2025/8/31).
- Herman, Kyle S., Jeremy K. Hall, Benjamin K. Sovacool, and Marfuga Iskandarov. 2025. “The Industrial Decarbonization Paradigm: Carbon Lock-in or Path Renewal in the United Kingdom?” *Ecological Economics*, Vol. 235, 108628 (DOI: 10.1016/j.ecolecon.2025.108628).
- Holtmark, Katinka. 2024. “Can Revenue Recycling Kill Green Technology?” CESifo Working Paper No. 11510. The International Platform of Ludwigs-Maximilians University’s Center for Economic Studies and the Ifo Institute, Germany (https://www.econstor.eu/bitstream/10419/308406/1/cesifo1_wp11510.pdf) (2025/9/6).
- Hötte, Kerstin. 2022. “Demand-pull, Technology-push, and the Direction of Technological Change.” *Research Policy*, Vol. 52, No. 2, 104740 (DOI: 10.1016/j.respol.2023.104740).
- Hu, Xueyue, Chunying Wang, and Ayman Elshkaki. 2024. “Material-energy Nexus: A Systematic Literature Review.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 192, 114217 (DOI: 10.1016/j.rser.2023.114217).
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2007. “Climate Change 2007: Working Group III: Mitigation of Climate Change: The public-sector Role in Technological

- Change.” *Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report: Climate Change 2007*, Geneva, Switzerland
(https://archive.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg3/en/ch2-ens2-7-2-3.html)(2025/7/1).
- International Energy Agency (IEA). 2014. “Energy Efficiency Market Report 2014.” Paris: International Energy Agency (<http://dx.doi.org/10.1787/9789264218260-en>) (2025/8/15).
- International Energy Agency (IEA). 2017. *Energy Technology Perspectives 2017: Catalysing Energy Technology Transformations*. France: International Energy Agency (<https://www.iea.org/etp2017/summary/>) (2025/6/12).
- International Energy Agency (IEA). 2024. “Renewables 2024: Analysis and Forecast to 2030.” (<https://iea.blob.core.windows.net/assets/17033b62-07a5-4144-8dd0-651cdb6caa24/Renewables2024.pdf>) (2025/8/16).
- International Energy Agency (IEA). 2025. “Carbon Capture, Utilisation and Storage.” Paris: International Energy Agency (<https://www.iea.org/energy-system/carbon-capture-utilisation-and-storage>) (2025/9/16).
- International Institute for Sustainable Development. 2014. “AfDB Launches Green Growth Framework.” (<https://sdg.iisd.org/news/afdb-launches-green-growth-framework/>) (2025/8/19).
- International Capital Market Association. 2025. “Green Bond Principles: Voluntary Process Guidelines for Issuing Green Bonds.” Paris: International Capital Market Association (<https://www.icmagroup.org/assets/documents/Sustainable-finance/2025-updates/Green-Bond-Principles-GBP-June-2025.pdf>) (2025/9/16).
- International Monetary Fund. 2024. “Resilience in the Face of Change.” IMF Annual Report 2024
(<https://cdn.sanity.io/files/yg4ck731/production/305c76ee35a5e231ed9b2720ff64d8f980a4101e.pdf/English%202024%20IMF%20Annual%20Report.pdf>) (2025/8/24).
- Jabeen, Gul, Dong Wang, Stefania Pinzón, Cem Isik, Munir Ahmad, Ali Rehmani, and Muhammad Khalid Anser. 2025. “Promoting Green Taxation and Sustainable Energy Transition for Low-Carbon Development.” *Geoscience Frontiers*, Vol. 16, 101928 (DOI: 10.1016/j.gsf.2024.101928).
- Jark, Daniel. 2024. “What Is Green Tech? How It Works, Types, Adoption, and Examples.” *Investopedia* (https://www.investopedia.com/terms/g/green_tech.asp) (2024/12/22).
- Jauhari, Wakhid Ahmad, Devina Nur Affifah, Pringgo Widyo Laksono, and Dana Marsetiya

- Utama. 2024. “A Closed-loop Supply Chain Inventory Model with Stochastic Demand, Exchange Rate, Green Investment, and Carbon Tax.” *Cleaner Logistics and Supply Chain*, Vol. 13, 100168 (DOI: 10.1016/j.clscn.2024.100168).
- Jaumotte, Florence, and Nigel Pain. 2005. “From Ideas to Development: The Determinants of R&D and Patenting.” OECD Economics Department Working Papers No. 457. (https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2005/12/from-ideas-to-development_g17a1746/702226422387.pdf) (2025/8/12).
- Jebeli, Hossein, and Geoffrey R. McCarney. 2024. “Green Skills and Climate Policy: Evidence from British Columbia’s Carbon Tax.” Clean Economy Working Paper Series, August 2024/ WP 24-1, Prosperity Institute (https://institute.smartprosperity.ca/sites/default/files/Jebeli_McCarney_GreenSkills_ClimatePolicy.pdf) (2025/9/6).
- Jiang, Pansong, Donglan Zha, Guanglei Yang, and Dan Xia. 2024. “Which Decarbonization Policy Mixes Are Better for China’s Power Sector? A Simulation Balancing Aggregate Abatement Effects and Economic Impacts.” *Energy Economics*, Vol. 139, 107900 (DOI: 10.1016/j.eneco.2024.107900).
- Kander, Astrid, and David I. Stern. 2014. “Economic Growth and the Transition from Traditional to Modern Energy in Sweden.” *Energy Economics*, Vol. 46, pp. 56-65.
- Kasser, Albin, Elodie Le Cadre Loret, Guy Meunier, Jean-Pierre Ponsard, and Murès Zarea. 2024. “Decarbonization with Induced Technical Change: Exploring the Niche Potential of Hydrogen in Heavy Transportation.” *Journal of Cleaner Production*, Vol. 437, 140743 (DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.140743).
- Kastelli, Ioanna, Lukasz Mamica, and Keun Lee. 2023. “New Perspectives and Issues in Industrial Policy for Sustainable Development: From Developmental and Entrepreneurial to Environmental State.” *Review of Evolutionary Political Economy*, Vol. 4, No. 1 (DOI: 10.1007/s43253-023-00100-2).
- Kazemi, Nima, Nikunja Mohan Modak, and Kannan Govindan. 2019. “A Review of Reverse Logistics and Closed Loop Supply Chain Management Studies Published in IJPR: A Bibliometric and Content Analysis.” *International Journal of Production Research*, Vol. 57, No. 15-16, pp. 4937-60.
- Kenton, Will. 2025. “What Is Market Cannibalization? Types and How to Prevent It.” Investopedia (<https://www.investopedia.com/terms/m/marketcannibalization.asp>) (2025/9/24).

- Kim, Yeong Jae, and Marilyn Brown. 2019. "Impact of Domestic Energy-efficiency Policies on Foreign Innovation: The Case of Lighting Technologies." *Energy Policy*, Vol. 128, pp. 539-52.
- Koc, Reyhan, Nikolaos K. Kazantzis, and Yi Hua Ma. 2014. "Membrane Technology Embedded into IGCC Plants with CO2 Capture: An Economic Performance Evaluation under Uncertainty." *International Journal of Greenhouse Gas Control*, Vol. 26, pp. 22-38.
- Koval, Viktor, Olga Laktionova, Iryna Udovychenko, Piotr Olczak, Svitlana Palii, and Liudmyla Prystupa. 2022. "Environmental Taxation Assessment on Clean Technologies Reducing Carbon Emissions Cost-Effectively." *Sustainability*, Vol. 14, 14044 (DOI: 10.3390/su142114044).
- Krass, Dmitry, Timur Nedorezov, and Anton Ovchinnikov. 2013. "Environmental Taxes and the Choice of Green Technology." *Production and Operations Management*, Vol. 22, No. 5, pp. 1035-55.
- Kruse-Andersen, Peter K., and Marc S. Jacobsen. 2024. "A Coordination Failure between EU Climate Policies Exemplified by the North Sea Energy Island." *Climate Policy*, Vol. 24, No. 5, pp. 633-45.
- Kumar, Prafull. 2020. "An Overview on Green Technology." *Journal of the Gujarat Research Society*, Vol. 22, No. 1, pp.1341-47.
- Lane, Nathan. 2025. "Manufacturing Revolutions: Industrial Policy and Industrialization in South Korea." *The Quarterly Journal of Economics*, Vol. 140, No. 3, pp. 1683-71.
- Lee, MinHwa, JinHyo Joseph Yun, Andreas Pyka, DongKyu Won, Fumio Kodama, Giovanni Schiuma, HangSik Park, Jeonghwan Jeon, KyungBae Park, KwangHo Jung, Min-Ren Yan, SamYoul Lee, and Xiaofei Zhao. 2018. "How to Respond to the Fourth Industrial Revolution, or the Second Information Technology Revolution? Dynamic New Combinations between Technology, Market, and Society through Open Innovation." *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, Vol. 4, No. 3 (DOI: 10.3390/joitmc4030021).
- Li, Changhong, Jiani Gao, Jiaqi Guo, and Jialuo Wang. 2022a. "Low-Carbon Supply Chain Decisions Considering Carbon Emissions Right Pledge Financing in Different Power Structures." *Energies*, Vol. 15, 5721 (DOI: 10.3390/en15155721).
- Li, Changhong, Jialuo Wang, Jiao Zheng, and Jiani Gao. 2022b. "Effects of Carbon Policy on Carbon Emission Reduction in Supply Chain under Uncertain Demand."

- Sustainability, Vol. 14, 5548 (DOI: 10.3390/su14095548).
- Li, Fangwang, Fangfang Liu, and Wen Wanying. 2015. “The Research on Financial Risk Investment Policy to High Technology Industry.” *Asian Social Science*, Vol. 11, No. 18, pp.25-30.
- Li, Guozhi, Mengying Jiang, Yidan Yuan, Xunuo Chen, and Dandan Fu. 2024. “Supply Chain Carbon Abatement under Different Power Structures: Impact of Consumers’ Low-carbon Preference and Carbon Tax Policy.” *Frontier in Environmental Science*, Vol. 12, 1376970 (DOI: 10.3389/fenvs.2024.1376970).
- Li, Jing, Guilong Li, Jiaping Xie, and Guangsi Zhang. 2024. “Dynamic Simulation of Policy-Driven Green Technology Innovation Networks: Digital Empowerment and Collaborative Efficiency.” *Heliyon*, Vol. 10, e36622 (DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e36622).
- Li, Minjie, Jianlin Luan, Xiaodong Li, and Peng Jia. 2024. “An Analysis of the Impact of Government Subsidies on Emission Reduction Technology Investment Strategies in Low-Carbon Port Operations.” *Systems*, Vol. 12, 134 (DOI: 10.3390/systems12040134).
- Lin, Chi-ang Brian. 2021. “Institutional Failure and Sustainability Policy.” *Journal of Economic Issue*, Vol. 55, No. 2, pp. 454-60.
- Lindner, Ralf, Stephanie Daimer, Bernd Beckert, Nils Heyen, Jonathan Köhler, Benjamin Teufel, Philine Warnke, and Sven Wydra. 2016. “Addressing Directionality: Orientation Failure and the Systems of Innovation Heuristic: Towards Reflexive Governance. Fraunhofer ISI Discussion Papers Innovation Systems and Policy Analysis, No. 52 (<https://www.econstor.eu/bitstream/10419/145315/1/865637946.pdf>) (2025/8/23).
- Liu, Bingquan, Xuran Chang, Boyang Nie, Yue Wang, and Lingqi Meng. 2021. “Government Low-Carbon Regulations Based on Supply Chain Members’ Behavior and Consumers’ Channel Preference in a Dual-Channel Supply Chain.” *Complexity*, Vol. 2021, 9967381 (DOI: 10.1155/2021/9967381).
- Liu, Jian, and Chao Hu. 2020. “Study on Green Supply Chain Cooperation and Carbon Tax Policy Considering Consumer’s Behavior.” *Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 2020, 4131936 (DOI: 10.1155/2020/4131936).
- Liu, Qiyao, and Xiaodong Zhu. 2024. “How Carbon Tax Policy Affects the Carbon Emissions of Manufacturers with Green Technology Spillovers?” *Environmental Modeling & Assessment*, Vol. 29, pp. 971-85.
- Liu, Weijiang, Min Liu, Yangyang Li, and Tingting Liu. 2024. “How to Promote China’s

- Green Economic Development? The Combination Effects of Consumption Tax and Carbon Tax Policies.” *Energy & Environment*, Vol. 35, No. 3, 1374-95.
- Liu, Weijiang, Min Liu, Tingting Liu, Yangyang Li, and Yizhe Hao. 2022. “Does a Recycling Carbon Tax with Technological Progress in Clean Electricity Drive the Green Economy?” *Internal Journal of Environmental Research and Public Health*, Vol. 19, 1708 (DOI: 10.3390/ijerph19031708).
- Long, Qingqi, Xiaoying Tao, Ying Shi, and Shuzhu Zhang. 2021. “Evolutionary Game Analysis Among Three Green-Sensitive Parties in Green Supply Chains.” *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol. 25, No. 3, pp. 508-23.
- Lyu, Hengyu, Chunai Ma, and Farnoosh Arash. 2024. “Government Innovation Subsidies, Green Technology Innovation and Carbon Intensity of Industrial Firms.” *Journal of Environmental Management*, Vol. 369, 122274 (DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.122274).
- Lyu, Shan, Yuyu Chen, and Lei Wang. 2022. “Optimal Decisions in a Multi-Party Closed-Loop Supply Chain Considering Green Marketing and Carbon Tax Policy.” *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Vol. 19, 9244 (DOI: 10.3390/ijerph19159244).
- Ma, Qiang, Peter Merrill, Verena Quitta, and Cameron Stonestreet. 2023. “The Hidden Cost of Carbon.” PwC (<https://www.pwc.com/gx/en/issues/esg/the-hidden-cost-of-carbon/the-hidden-cost-of-carbon.pdf>) (2025/9/5).
- Ma, Xin, Ping Ji, William Ho, and Cheng-Hu Yang. 2018. “Optimal Procurement Decision with a Carbon Tax for the Manufacturing Industry.” *Computers and Operations Research*, Vol. 89, pp. 360-68.
- Mackay, Samuel, Rob Hales, John Hewson, Rosemary Addis, and Brendan Mackey. 2025. “Addressing Climate Inaction as Our Greatest Threat to Sustainable Development.” *Global Environmental Change*, Vol. 91, 102969 (DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2025.102969).
- Madaka, Hema, Callie W. Babbitt, and Erinn G. Ryen. 2022. “Opportunities for Reducing the Supply Chain Water Footprint of Metals Used in Consumer Electronics.” *Resources, Conservation & Recycling*, Vol. 176, 105926 (DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105926).
- Malerba, Daniele, Babette Never, Lukas Fesenfeld, Hanna Fuhrmann-Riebel, and Sascha Kuhn. 2024. “On the Acceptance of High Carbon Taxes in Low- and Middle-income Countries: A Conjoint Survey Experiment.” *Environmental Research Letters*, Vol. 19, 094014 (DOI: 10.1088/1748-9326/ad616b).
- Martinez, Catalina. 2010. “Insight into Different Types of Patent Families.” OECD

- Science, Technology and Industry Working Papers 2010/2
(https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2010/02/insight-into-different-types-of-patent-families_g17a1daa/5kml97dr6ptl-en.pdf) (2025/7/29).
- Matos, Stelvia, Eric Viardot, Benjamin K. Sovacool, Frank W. Geels, and Yu Xiong. 2022. “Innovation and Climate Change: A Review and Introduction to the Special Issue.” *Technovation*, Vol. 117, 102612 (DOI: /10.1016/j.technovation.2022.102612).
- Mattauch, Linus, Felix Creutzig, and Ottmar Edenhofer. 2015. “Avoiding Carbon Lock-in: Policy Options for Advancing Structural Change.” *Economic Modelling*, Vol. 50, pp. 49-63.
- McKinsey & Company. 2022. “What is Supply Chain?”
(<https://www.mckinsey.com/featured-insights/mckinsey-explainers/what-is-supply-chain#/>) (2025/10/1).
- Meltzer, Joshua. 2014. “A Carbon Tax as a Driver of Green Technology Innovation and the Implications for International Trade.” *Energy Law Journal*, Vol. 35, No. 1, pp. 45-69.
- Mishra, Ruchi, Rajesh Singh, and Kannan Govindan. 2023. “Net-zero Economy Research in the Field of Supply Chain Management: A Systematic Literature Review and Future Research Agenda.” *The International Journal of Logistics Management*, Vol. 34, No. 5, pp. 1352-97.
- Ministry of Finance, Singapore. 2025. “Singapore Green Bond Investment.”
([https://www.mof.gov.sg/docs/default-source/policies/fiscal/singapore-green-bond-framework-\(january-2025\).pdf](https://www.mof.gov.sg/docs/default-source/policies/fiscal/singapore-green-bond-framework-(january-2025).pdf)) (2025/9/6).
- M. Nasser & Partners, Law Firm. 2022. “The Importance of the Corporate Economic Performance Department in Light of the Egyptian Companies Law.” Dubai: Saudi Arabia
(<https://mnasserlaw.com/corporate-economic-performance/>) (2025/9/25).
- Mo, Shu, and Ting Wang. 2022. “Synergistic Effects of International Oil Price Fluctuations and Carbon Tax Policies on the Energy-Economy-Environment System in China.” *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Vol. 19, 14177 (DOI: 10.3390/ijerph192114177).
- Mohan, Preeya, Eric Strobl, and Patrick Watson. 2021. “Innovation, Market Failures and Policy Implications of KIBS Firms: The Case of Trinidad and Tobago’s Oil and Gas Sector.” *Energy Policy*, Vol. 153, 112250 (DOI: 10.1016/j.enpol.2021.112250).
- Mohsin, A.K.M., Markus Gerschberger, Michael Plasch, Sayed Farrukh Ahmed, Arifur Rahman, and Md. Rashed. 2024. “Examining the Synergy of Green Supply Chain Practices,

- Circular Economy, and Economic Growth in Mitigating Carbon Emissions: Evidence from EU Countries.” *Journal of Environmental Management*, Vol. 371, 123109 (DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.123109).
- Mokhtar, Ahmad Rais Mohamad, Andrea Genovese, Andrew Brint, and Niraj Kumar. 2019. “Supply Chain Leadership: A Systematic Literature Review and a Research Agenda.” *International Journal of Production Economics*, Vol. 216, pp. 255-73.
- Mu, Yinping, and Juan Zhao. 2023. “Production Strategy and Technology Innovation under Different Carbon Emission Policies.” *Sustainability*, Vol. 15, 9820 (DOI: 10.3390/su15129820).
- Muth, Daniel, Csaba Weiner, and Csaba Lakócai. 2024. “Public Support and Willingness to Pay for a Carbon Tax in Hungary: Can Revenue Recycling Make a Difference?” *Energy, Sustainability and Society*, Vol. 14, 30 (DOI: 10.1186/s13705-024-00463-2).
- Naderi, Yahya. 2025. “Energy Infrastructure vs Climate Change: Increasing Resilience.” Ricardo (<https://www.ricardo.com/en/news-and-insights/industry-insights/energy-infrastructure-vs-climate-change-increasing-resilience>) (2025/8/21).
- National Climate Change Secretariat, Singapore. 2025. “Carbon Tax.” Strategy Group Prime Minister’s Office (<https://www.nccs.gov.sg/singapores-climate-action/mitigation-efforts/carbontax/>) (2025/9/6).
- Nemet, Gregory F., Max W. Callaghan, Felix Creutzig, Sabine Fuss, Jens Hartmann, Jérôme Hilaire, William F. Lamb, Jan C. Minx, Sophia Rogers, and Pete Smith. 2018. “Negative Emissions-Part 3: Innovation and Upscaling.” *Environmental Research Letters*, Vol. 13, 063003 (DOI: 10.1088/1748-9326/aabff4).
- Niu, Xiaoyan, Zhili Zhan, Baoqi Li, and Zhenling Chen. 2022. “Environmental Governance and Cleaner Energy Transition: Evaluating the Role of Environment Friendly Technologies.” *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol. 53, 102669 (DOI: 10.1016/j.seta.2022.102669).
- Nuñez-Jimenez, Alejandro, Christof Knoeri, Joern Hoppmann, and Volker H. Hoffmann. 2019. “Balancing Technology-push and Demand-pull Policies for Fostering Innovations and Accelerating Their Diffusion.” Paper Presented at the 4th International Conference on Public Policy, P08 The Design and Organisation of Innovation Policy. Montreal, Canada: Concordia University, June 26-28 (<https://www.ippapublicpolicy.org/file/paper/5cfd327a05d96.pdf>) (2025/9/3).
- Nurhayati, Kartika, Jafar Rezaei, and Lóránt Tavasszy. 2021. “The Interplay between Power

- Structure and Decision-making in Supply Chains: A Systematic Review.” *Journal of Supply Chain Management Science*, Vol. 2, No. 3-4, pp. 85-114.
- Obobisa, Emma Serwaa. 2022. “Achieving 1.5°C and Net-zero Emissions Target: The Role of Renewable Energy and Financial Development.” *Renewable Energy*, Vol. 188, pp. 967-85.
- Obobisa, Emma Serwaa, and Isaac Ahakwa. 2024. “Stimulating the Adoption of Green Technology Innovation, Clean Energy Resources, Green Finance, and Environmental Taxes: The Way to Achieve Net Zero CO2 Emissions in Europe?” *Technological Forecasting & Social Change*, Vol. 205, 123489 (DOI: 10.1016/j.techfore.2024.123489).
- Ofori, Peres. 2023. “Circular Economy Practices in Third World Nations: Challenges and Implications for Environmental Sustainability.” *Environment, Development and Sustainability*, Vol. 27, pp. 1691-745.
- O’Mahony, Tadhg. 2020. “State of the Art in Carbon Taxes: A Review of the Global Conclusions.” *Green Finance*, Vol. 2, No. 4, pp. 409-23.
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). 2009. “OECD Patent Statistics Manual.” Paris: OECD Publishing (https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2009/02/oecd-patent-statistics-manual_g1gh9fa4/9789264056442-en.pdf) (2025/8/10).
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). 2010. “Taxation, Innovation and the Environment.” Paris: OECD Publishing (<https://doi.org/10.1787/9789264087637-en>) (2025/7/10).
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). 2011a. “Fostering Innovation for Green Growth.” OECD Green Growth Studies, Paris: OECD Publishing (https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2011/09/fostering-innovation-for-green-growth_g1g1499f/9789264119925-en.pdf) (2025/7/5).
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). 2011b. “Towards Green Growth.” Paris: OECD Publishing (<http://dx.doi.org/10.1787/9789264111318-en>) (2025/7/6).
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). 2011c. “Towards Green Growth: Monitoring Progress: OECD Indicators.” Paris: OECD Publishing (<http://dx.doi.org/10.1787/9789264111356-en>) (2025/7/6).
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). 2013. “What Have We Learned from Attempts to Introduce Green-growth Policies.” OECD Green Growth

- Papers, No. 2013/02, Paris: OECD Publishing (<https://doi.org/10.1787/5k486rchlnxx-en>) (2025/7/5).
- Organisation for Economic Co-operation and Development. 2014a. “Greener Skills and Jobs.” OECD Green Growth Studies, Paris: OECD Publishing (<http://dx.doi.org/10.1787/9789264208704-en>) (2025/7/5).
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). 2014b. “Green Growth Indicators 2014.” OECD Green Growth Studies, Paris: OECD Publishing (<http://dx.doi.org/10.1787/9789264202030-en>) (2025/7/6).
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). 2015a. “Towards Green Growth? Tracking Progress.” OECD Green Growth Studies, Paris: OECD Publishing (<http://dx.doi.org/10.1787/9789264234437-en>) (2025/6/15).
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). 2015b. “Frascati Manual 2015: Guidelines for Collecting and Reporting Data on Research and Experimental Development, The Measurement of Scientific, Technological and Innovation Activities.” Paris: OECD Publishing (<http://dx.doi.org/10.1787/9789264239012-en>) (2025/6/15).
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). 2015c. “Creating Incentives for Greener Products: A Policy Manual for Eastern Partnership Countries.” OECD Green Growth Studies, Paris: OECD Publishing (<http://dx.doi.org/10.1787/9789264244542-en>) (2025/6/5).
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). 2017. “Green Growth Indicators 2017.” OECD Green Growth Studies, Paris: OECD Publishing (<https://doi.org/10.1787/9789264268586-en>) (2025/6/5).
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). 2020. “OECD Research and Development Expenditure in Industry: ANBED.” Paris: OECD Publishing (<https://doi.org/10.1787/c86631b8-en>) (2025/6/5).
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). 2021. “The OECD Analytical Business Enterprise Research and Development (ANBERD) Database.” (https://web-archiv.eoecd.org/2021-04-01/244900-ANBERD_full_documentation.pdf) (2025/10/2).
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). 2023a. “OECD Work on Green Growth.” Paris: OECD Publishing, Paris (<https://issuu.com/oecd.publishing/docs/oecd-work-on-greengrowth-brochure-2023>)

(2025/6/6).

Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). 2023b. “Environment and Climate Change, Technology and Innovation, Patents: Technology Diffusion” ([https://data-explorer.oecd.org/vis?fs\[0\]=Topic%2C1%7CEnvironment%20and%20climate%20change%23ENV%23%7CTechnology%20and%20innovation%23ENV_TEC%23&pg=0&fc=Topic&bp=true&snb=5&df\[ds\]=dsDisseminateFinalDMZ&df\[id\]=DSD_PAT_DIFF%40DF_PAT_DIFF&df\[ag\]=OECD.ENV.EPI&df\[vs\]=1.0&dq=TWN%2BUS%2BGBR%2BTUR%2BCHE%2BSWE%2BESP%2BSVN%2BSVK%2BPRT%2BPOL%2BNOR%2BNZL%2BNLD%2BMEX%2BLTU%2BLUX%2BLVA%2BKOR%2BJPN%2BITA%2BISR%2BIRL%2BISL%2BHUN%2BGRC%2BDEU%2BFRA%2BFIN%2BEST%2BDNK%2BCZE%2BCRI%2BCOL%2BCHL%2BCAN%2BBEL%2BAUT%2BAUS.A.TOT._Z&pd=2021%2C2021&to\[TIME_PERIOD\]=false](https://data-explorer.oecd.org/vis?fs[0]=Topic%2C1%7CEnvironment%20and%20climate%20change%23ENV%23%7CTechnology%20and%20innovation%23ENV_TEC%23&pg=0&fc=Topic&bp=true&snb=5&df[ds]=dsDisseminateFinalDMZ&df[id]=DSD_PAT_DIFF%40DF_PAT_DIFF&df[ag]=OECD.ENV.EPI&df[vs]=1.0&dq=TWN%2BUS%2BGBR%2BTUR%2BCHE%2BSWE%2BESP%2BSVN%2BSVK%2BPRT%2BPOL%2BNOR%2BNZL%2BNLD%2BMEX%2BLTU%2BLUX%2BLVA%2BKOR%2BJPN%2BITA%2BISR%2BIRL%2BISL%2BHUN%2BGRC%2BDEU%2BFRA%2BFIN%2BEST%2BDNK%2BCZE%2BCRI%2BCOL%2BCHL%2BCAN%2BBEL%2BAUT%2BAUS.A.TOT._Z&pd=2021%2C2021&to[TIME_PERIOD]=false)) (2025/7/11).

Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). 2023c. “Environment and Climate Change, Technology and Innovation, Patents: Technology Development” ([https://data-explorer.oecd.org/vis?fs\[0\]=Topic%2C1%7CEnvironment%20and%20climate%20change%23ENV%23%7CTechnology%20and%20innovation%23ENV_TEC%23&pg=0&fc=Topic&bp=true&snb=5&df\[ds\]=dsDisseminateFinalDMZ&df\[id\]=DSD_PAT_DEV%40DF_PAT_DEV&df\[ag\]=OECD.ENV.EPI&df\[vs\]=1.0&dq=TWN%2BOECD%2BOECD%2BOECD%2BOECD%2BOECD%2BEU27_2020%2BUS%2BGBR%2BTUR%2BCHE%2BSWE%2BESP%2BSVN%2BSVK%2BPRT%2BPOL%2BNOR%2BNZL%2BNLD%2BMEX%2BLUX%2BLTU%2BLVA%2BKOR%2BJPN%2BISR%2BITA%2BIRL%2BISL%2BHUN%2BGRC%2BDEU%2BFRA%2BFIN%2BEST%2BDNK%2BCZE%2BCRI%2BCOL%2BCHL%2BCAN%2BBEL%2BAUT%2BAUS.A.OCEAN%2BADAPT%2BENV_PAT%2BTOT.PT_PATN%2BPATN.ONE.F&pd=2021%2C2021&to\[TIME_PERIOD\]=false](https://data-explorer.oecd.org/vis?fs[0]=Topic%2C1%7CEnvironment%20and%20climate%20change%23ENV%23%7CTechnology%20and%20innovation%23ENV_TEC%23&pg=0&fc=Topic&bp=true&snb=5&df[ds]=dsDisseminateFinalDMZ&df[id]=DSD_PAT_DEV%40DF_PAT_DEV&df[ag]=OECD.ENV.EPI&df[vs]=1.0&dq=TWN%2BOECD%2BOECD%2BOECD%2BOECD%2BOECD%2BEU27_2020%2BUS%2BGBR%2BTUR%2BCHE%2BSWE%2BESP%2BSVN%2BSVK%2BPRT%2BPOL%2BNOR%2BNZL%2BNLD%2BMEX%2BLUX%2BLTU%2BLVA%2BKOR%2BJPN%2BISR%2BITA%2BIRL%2BISL%2BHUN%2BGRC%2BDEU%2BFRA%2BFIN%2BEST%2BDNK%2BCZE%2BCRI%2BCOL%2BCHL%2BCAN%2BBEL%2BAUT%2BAUS.A.OCEAN%2BADAPT%2BENV_PAT%2BTOT.PT_PATN%2BPATN.ONE.F&pd=2021%2C2021&to[TIME_PERIOD]=false)) (2025/7/11).

Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). 2024a. “Green Industrial Policies for the Net-zero Transition.” Policy Papers No. 2. OECD Publishing, Paris (https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2024/10/green-industrial-policies-for-the-net-zero-transition_1e066699/cc326d3-en.pdf) (2025/7/2).

Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). 2024b. “OECD Data

Explorer, Archive, Carbon Dioxide Emissions Embodied in International Trade.” 2021 Ed. ([https://data-explorer.oecd.org/vis?tenant=archive&lc=en&df\[ds\]=DisseminateArchiveDMZ&df\[id\]=DF_IO_GHG_2021&df\[ag\]=OECD&df\[vs\]=1.0&av=true&dq=PROD_CO2...&lom=LASTNPERIODS&lo=5&to\[TIME_PERIOD\]=false](https://data-explorer.oecd.org/vis?tenant=archive&lc=en&df[ds]=DisseminateArchiveDMZ&df[id]=DF_IO_GHG_2021&df[ag]=OECD&df[vs]=1.0&av=true&dq=PROD_CO2...&lom=LASTNPERIODS&lo=5&to[TIME_PERIOD]=false)) (2025/7/11).

Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). 2024c. “OECD Data Explorer, Science, Technology and Innovation, Research and Development (R&D): Gross Domestic Expenditure on R&D by Sector of Performance and Type of R&D.” ([https://data-explorer.oecd.org/vis?df\[ds\]=DisseminateFinalDMZ&df\[id\]=DSD_RDS_GERD%40DF_GERD_TORD&df\[ag\]=OECD.STI.STP&dq=TWN%2BUSIA%2BGBR%2BTUR%2BCHE%2BESP%2BSWE%2BSVN%2BSVK%2BPRT%2BPOL%2BNOR%2BNZL%2BNLD%2BMEX%2BLUX%2BLTU%2BLVA%2BKOR%2BJPN%2BITA%2BISR%2BIRL%2BISL%2BHUN%2BGRC%2BDEU%2BFRA%2BFIN%2BEST%2BDNK%2BCZE%2BCHL%2BCAN%2BBEL%2BAUT%2BAUS.A..GOV%2BBES%2B_T...T...USD_PPP%2BXDC.Q&pd=1990%2C2022&to\[TIME_PERIOD\]=false](https://data-explorer.oecd.org/vis?df[ds]=DisseminateFinalDMZ&df[id]=DSD_RDS_GERD%40DF_GERD_TORD&df[ag]=OECD.STI.STP&dq=TWN%2BUSIA%2BGBR%2BTUR%2BCHE%2BESP%2BSWE%2BSVN%2BSVK%2BPRT%2BPOL%2BNOR%2BNZL%2BNLD%2BMEX%2BLUX%2BLTU%2BLVA%2BKOR%2BJPN%2BITA%2BISR%2BIRL%2BISL%2BHUN%2BGRC%2BDEU%2BFRA%2BFIN%2BEST%2BDNK%2BCZE%2BCHL%2BCAN%2BBEL%2BAUT%2BAUS.A..GOV%2BBES%2B_T...T...USD_PPP%2BXDC.Q&pd=1990%2C2022&to[TIME_PERIOD]=false)) (2025/7/13).

Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). 2024d. “OECD Data Explorer, Science, Technology and Innovation, Research and development (R&D): Government budget allocations for R&D.” ([https://data-explorer.oecd.org/vis?df\[ds\]=DisseminateFinalDMZ&df\[id\]=DSD_RDS_GOV%40DF_GBARD_NABS07&df\[ag\]=OECD.STI.STP&dq=TWN%2BCHE%2BSWE%2BESP%2BSVN%2BSVK%2BPRT%2BPOL%2BMEX%2BLUX%2BLTU%2BLVA%2BKOR%2BJPN%2BITA%2BISR%2BIRL%2BISL%2BHUN%2BGRC%2BDEU%2BFRA%2BFIN%2BEST%2BDNK%2BCZE%2BCOL%2BCHL%2BCAN%2BBEL%2BAUT%2BAUS%2BNOR%2BNZL%2BNLD%2BTUR%2BGBR%2BUSIA.A.._T...USD_PPP%2BXDC.Q&pd=1990%2C2022&to\[TIME_PERIOD\]=false](https://data-explorer.oecd.org/vis?df[ds]=DisseminateFinalDMZ&df[id]=DSD_RDS_GOV%40DF_GBARD_NABS07&df[ag]=OECD.STI.STP&dq=TWN%2BCHE%2BSWE%2BESP%2BSVN%2BSVK%2BPRT%2BPOL%2BMEX%2BLUX%2BLTU%2BLVA%2BKOR%2BJPN%2BITA%2BISR%2BIRL%2BISL%2BHUN%2BGRC%2BDEU%2BFRA%2BFIN%2BEST%2BDNK%2BCZE%2BCOL%2BCHL%2BCAN%2BBEL%2BAUT%2BAUS%2BNOR%2BNZL%2BNLD%2BTUR%2BGBR%2BUSIA.A.._T...USD_PPP%2BXDC.Q&pd=1990%2C2022&to[TIME_PERIOD]=false)) (2025/7/15).

Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). 2024e. “OECD Data Explorer, Science, Technology and Innovation, Research and Development (R&D): R&D Tax Expenditure and Direct Government Funding of BERD.” ([https://data-explorer.oecd.org/vis?fs\[0\]=Topic%2C1%7CScience%252C%20technology%20and%20innovation%23INT%23%7CResearch%20and%20development%20%28R%26D%29%23INT_RD%23&fs\[1\]=Reference%20area%2C0%7COECD%23OECD%23&pg=0&fc=Reference%20area&snb=3&df\[ds\]=dsDisseminateFinalDMZ&df\[id\]=DSD_RDTAX%40DF_RDT](https://data-explorer.oecd.org/vis?fs[0]=Topic%2C1%7CScience%252C%20technology%20and%20innovation%23INT%23%7CResearch%20and%20development%20%28R%26D%29%23INT_RD%23&fs[1]=Reference%20area%2C0%7COECD%23OECD%23&pg=0&fc=Reference%20area&snb=3&df[ds]=dsDisseminateFinalDMZ&df[id]=DSD_RDTAX%40DF_RDT))

AX&df[ag]=OECD.STI.STP&df[vs]=1.0&dq=OECD.A.GBARD.USD_PPP%2BPT_B1GQ..&pd=2000%2C2021&to[TIME_PERIOD]=false) (2025/7/17).

Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). 2024f. “OECD Data Explorer, Science, Technology and Innovation, Research and Development (R&D): R&D Tax Expenditure and Direct Government Funding of BERD.” ([https://data-explorer.oecd.org/vis?fs\[0\]=Topic%2C1%7CScience%252C%20technology%20and%20innovation%23INT%23%7CResearch%20and%20development%20%28R%26D%29%23INT_RD%23&fs\[1\]=Reference%20area%2C0%7COECD%23OECD%23&pg=0&fc=Reference%20area&snb=3&df\[ds\]=dsDisseminateFinalDMZ&df\[id\]=DSD_RDTAX%40DF_RDTAX&df\[ag\]=OECD.STI.STP&df\[vs\]=1.0&dq=OECD.A.GBARD.PT_B1GQ..&pd=2000%2C2021&to\[TIME_PERIOD\]=false](https://data-explorer.oecd.org/vis?fs[0]=Topic%2C1%7CScience%252C%20technology%20and%20innovation%23INT%23%7CResearch%20and%20development%20%28R%26D%29%23INT_RD%23&fs[1]=Reference%20area%2C0%7COECD%23OECD%23&pg=0&fc=Reference%20area&snb=3&df[ds]=dsDisseminateFinalDMZ&df[id]=DSD_RDTAX%40DF_RDTAX&df[ag]=OECD.STI.STP&df[vs]=1.0&dq=OECD.A.GBARD.PT_B1GQ..&pd=2000%2C2021&to[TIME_PERIOD]=false)) (2025/7/17).

Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). 2024g. “OECD Data Explorer, Science, Technology and Innovation, Research and Development (R&D): R&D Tax Expenditure and Direct Government Funding of BERD.” ([https://data-explorer.oecd.org/vis?fs\[0\]=Topic%2C1%7CScience%252C%20technology%20and%20innovation%23INT%23%7CResearch%20and%20development%20%28R%26D%29%23INT_RD%23&fs\[1\]=Reference%20area%2C0%7COECD%23OECD%23&pg=0&fc=Reference%20area&snb=3&df\[ds\]=dsDisseminateFinalDMZ&df\[id\]=DSD_RDTAX%40DF_RDTAX&df\[ag\]=OECD.STI.STP&df\[vs\]=1.0&dq=OECD%2BEU27_2020%2BUSIA%2BGBR%2BTUR%2BCHE%2BESP%2BSWE%2BSVN%2BSVK%2BPRT%2BPOL%2BNOR%2BNZL%2BNLD%2BMEX%2BLUX%2BLTU%2BLVA%2BKOR%2BJPN%2BISR%2BITA%2BIRL%2BISL%2BHUN%2BGRC%2BDEU%2BFRA%2BFIN%2BEST%2BDNK%2BCZE%2BCRI%2BCOL%2BCHL%2BCAN%2BBEL%2BAUS%2BAUT.A.GBARD.USD_PPP..&pd=2000%2C2021&to\[TIME_PERIOD\]=false](https://data-explorer.oecd.org/vis?fs[0]=Topic%2C1%7CScience%252C%20technology%20and%20innovation%23INT%23%7CResearch%20and%20development%20%28R%26D%29%23INT_RD%23&fs[1]=Reference%20area%2C0%7COECD%23OECD%23&pg=0&fc=Reference%20area&snb=3&df[ds]=dsDisseminateFinalDMZ&df[id]=DSD_RDTAX%40DF_RDTAX&df[ag]=OECD.STI.STP&df[vs]=1.0&dq=OECD%2BEU27_2020%2BUSIA%2BGBR%2BTUR%2BCHE%2BESP%2BSWE%2BSVN%2BSVK%2BPRT%2BPOL%2BNOR%2BNZL%2BNLD%2BMEX%2BLUX%2BLTU%2BLVA%2BKOR%2BJPN%2BISR%2BITA%2BIRL%2BISL%2BHUN%2BGRC%2BDEU%2BFRA%2BFIN%2BEST%2BDNK%2BCZE%2BCRI%2BCOL%2BCHL%2BCAN%2BBEL%2BAUS%2BAUT.A.GBARD.USD_PPP..&pd=2000%2C2021&to[TIME_PERIOD]=false)) (2025/7/19).

Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). 2024h. “OECD Data Explorer, Science, Technology and Innovation, Research and Development (R&D): R&D Tax Expenditure and Direct Government Funding of BERD.” ([https://data-explorer.oecd.org/vis?fs\[0\]=Topic%2C1%7CScience%252C%20technology%20and%20innovation%23INT%23%7CResearch%20and%20development%20%28R%26D%29%23INT_RD%23&fs\[1\]=Reference%20area%2C0%7COECD%23OECD%23&pg=0&fc=Reference%20area&snb=3&df\[ds\]=dsDisseminateFinalDMZ&df\[id\]=DSD_RDTAX%40DF_RDTAX&df\[ag\]=OECD.STI.STP&df\[vs\]=1.0&dq=OECD%2BEU27_2020%2BUSIA%2BGBR%2BTUR%2BCHE%2BESP%2BSWE%2BSVN%2BSVK%2BPRT%2BPOL%2BNOR%2](https://data-explorer.oecd.org/vis?fs[0]=Topic%2C1%7CScience%252C%20technology%20and%20innovation%23INT%23%7CResearch%20and%20development%20%28R%26D%29%23INT_RD%23&fs[1]=Reference%20area%2C0%7COECD%23OECD%23&pg=0&fc=Reference%20area&snb=3&df[ds]=dsDisseminateFinalDMZ&df[id]=DSD_RDTAX%40DF_RDTAX&df[ag]=OECD.STI.STP&df[vs]=1.0&dq=OECD%2BEU27_2020%2BUSIA%2BGBR%2BTUR%2BCHE%2BESP%2BSWE%2BSVN%2BSVK%2BPRT%2BPOL%2BNOR%2))

BNZL%2BNLD%2BMEX%2BLUX%2BLTU%2BLVA%2BKOR%2BJPN%2BISR%2BITA%2BIRL%2BISL%2BHUN%2BGRC%2BDEU%2BFRA%2BFIN%2BEST%2BDNK%2BCZE%2BCRI%2BCOL%2BCHL%2BCAN%2BBEL%2BAUS%2BAUT.A.GBARD.US D_PPP..&pd=2021%2C2021&to[TIME_PERIOD]=false) (2025/7/18).

Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). 2024i. “OECD Data Explorer, Science, Technology and Innovation, Research and Development (R&D): R&D Tax Expenditure and Direct Government Funding of BERD.” ([Organisation for Economic Co-operation and Development \(OECD\). 2024j. “OECD Data Explorer, Science, Technology and Innovation, Intellectual Property, Patents: Environment-related Technologies Patents.” \(\[Organisation for Economic Co-operation and Development \\(OECD\\). 2024k. “Infrastructure for a Climate-Resilient Future.” OECD Publishing, Paris \\(\\[https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2024/04/infrastructure-for-a-climate-resilient-future_c6c0dc64/a74a45b0-en.pdf\\]\\(https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2024/04/infrastructure-for-a-climate-resilient-future_c6c0dc64/a74a45b0-en.pdf\\)\\) \\(2025/8/21\\).\]\(https://data-explorer.oecd.org/vis?tm=Patents&pg=0&hc\[Measure\]=&snb=36&df\[ds\]=dsDisseminateFinalDMZ&df\[id\]=DSD_PATENTS%40DF_PATENTS_ENVIROMENT&df\[ag\]=OECD.STI.PIE&df\[vs\]=1.0&dq=9P50_3%2BUS50%2B9P50_2%2B6F0%2B9P50_1.A.PF.PATN_FM.PRIORITY.OECD%2BUSA%2BGBR%2BTUR%2BCHE%2BESP%2BSWE%2BSVN%2BSVK%2BPRT%2BPOL%2BNOR%2BNZL%2BNLD%2BMEX%2BLUX%2BLTU%2BLVA%2BKOR%2BJPN%2BITA%2BISR%2BIRL%2BISL%2BHUN%2BGRC%2BFRA%2BDEU%2BFIN%2BEST%2BDNK%2BCZE%2BCRI%2BCOL%2BCHL%2BCAN%2BAUT%2BBEL%2BAUS%2BTWN..INVENTOR...ADAPT%2BENV_PAT%2B_T&pd=1990%2C2021&to\[TIME_PERIOD\]=false\) \(2025/7/29\).</p></div><div data-bbox=\)](https://data-explorer.oecd.org/vis?fs[0]=Topic%2C1%7CScience%252C%20technology%20and%20innovation%23INT%23%7CResearch%20and%20development%20%28R%26D%29%23INT_RD%23&pg=0&fc=Measure&bp=true&snb=19&df[ds]=dsDisseminateFinalDMZ&df[id]=DSD_RDTAX%40DF_RDTAX&df[ag]=OECD.STI.STP&df[vs]=1.0&dq=OECD%2BEU27_2020%2BUSA%2BGBR%2BTUR%2BCHE%2BSWE%2BESP%2BSVN%2BSVK%2BPOL%2BPRT%2BNOR%2BNZL%2BNLD%2BMEX%2BLUX%2BLTU%2BITA%2BISR%2BLVA%2BKOR%2BJPN%2BIRL%2BISL%2BHUN%2BGRC%2BDEU%2BFRA%2BFIN%2BEST%2BDNK%2BCZE%2BCRI%2BCOL%2BCHL%2BBEL%2BAUT%2BAUS.A.GBARD.USD_PPP..&pd=2021%2C2021&to[TIME_PERIOD]=false) (2025/7/19).</p></div><div data-bbox=)

- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). 2025a. “OECD Data Explorer, Environment and Climate Change, Green Growth: Database Documentation.” ([https://data-explorer.oecd.org/vis?tm=RD%26D%20budget&pg=20&snb=47&df\[ds\]=dsDisseminateFinalDMZ&df\[id\]=DSD_GG%40DF_GREEN_GROWTH&df\[ag\]=OECD.ENV.EPI&df\[vs\]=1.1&dq=ITA%2BUSA%2BGBR%2BCHE%2BTUR%2BSWE%2BESP%2BSVN%2BSVK%2BPRT%2BPOL%2BNOR%2BNZL%2BNLD%2BMEX%2BLUX%2BLTU%2BLVA%2BKOR%2BISR%2BIRL%2BISL%2BHUN%2BGRC%2BDEU%2BFRA%2BFIN%2BEST%2BDNK%2BCZE%2BCRI%2BCOL%2BCAN%2BCHL%2BBEL%2BAUT%2BJPN%2BTWN%2BAUS..TECHPAT_RD%2BFFRD_ERD%2BERD_GDP%2BRERD_ERD%2BENVRD_GDP%2BENVRD_GBAORD.PT_B1GQ%2BPT_GBARD%2BPT_RDD_BDG_NRG.&pd=1990%2C2022&to\[TIME_PERIOD\]=false](https://data-explorer.oecd.org/vis?tm=RD%26D%20budget&pg=20&snb=47&df[ds]=dsDisseminateFinalDMZ&df[id]=DSD_GG%40DF_GREEN_GROWTH&df[ag]=OECD.ENV.EPI&df[vs]=1.1&dq=ITA%2BUSA%2BGBR%2BCHE%2BTUR%2BSWE%2BESP%2BSVN%2BSVK%2BPRT%2BPOL%2BNOR%2BNZL%2BNLD%2BMEX%2BLUX%2BLTU%2BLVA%2BKOR%2BISR%2BIRL%2BISL%2BHUN%2BGRC%2BDEU%2BFRA%2BFIN%2BEST%2BDNK%2BCZE%2BCRI%2BCOL%2BCAN%2BCHL%2BBEL%2BAUT%2BJPN%2BTWN%2BAUS..TECHPAT_RD%2BFFRD_ERD%2BERD_GDP%2BRERD_ERD%2BENVRD_GDP%2BENVRD_GBAORD.PT_B1GQ%2BPT_GBARD%2BPT_RDD_BDG_NRG.&pd=1990%2C2022&to[TIME_PERIOD]=false)) (2025/7/7).
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). 2025b. “OECD Data Explorer, Environment and Climate Change: Green Growth.” ([https://data-explorer.oecd.org/vis?fs\[0\]=Topic%2C1%7CEnvironment%20and%20climate%20change%23ENV%23%7CGreen%20growth%23ENV_GRG%23&pg=0&fc=Topic&bp=true&snb=2&df\[ds\]=dsDisseminateFinalDMZ&df\[id\]=DSD_GG%40DF_GREEN_GROWTH&df\[ag\]=OECD.ENV.EPI&df\[vs\]=1.1&dq=TWN%2BOECD..CO2_PBEM%2BCO2_DBEM.T_T&pd=1990%2C2022&to\[TIME_PERIOD\]=false](https://data-explorer.oecd.org/vis?fs[0]=Topic%2C1%7CEnvironment%20and%20climate%20change%23ENV%23%7CGreen%20growth%23ENV_GRG%23&pg=0&fc=Topic&bp=true&snb=2&df[ds]=dsDisseminateFinalDMZ&df[id]=DSD_GG%40DF_GREEN_GROWTH&df[ag]=OECD.ENV.EPI&df[vs]=1.1&dq=TWN%2BOECD..CO2_PBEM%2BCO2_DBEM.T_T&pd=1990%2C2022&to[TIME_PERIOD]=false)) (2025/7/12).
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). 2025c. “OECD Data Explorer, Environment and Climate Change: Green Growth.” ([https://data-explorer.oecd.org/vis?tm=RD%26D%20budget&pg=20&snb=47&df\[ds\]=dsDisseminateFinalDMZ&df\[id\]=DSD_GG%40DF_GREEN_GROWTH&df\[ag\]=OECD.ENV.EPI&df\[vs\]=1.1&dq=ITA%2BUSA%2BGBR%2BCHE%2BTUR%2BSWE%2BESP%2BSVN%2BSVK%2BPRT%2BPOL%2BNOR%2BNZL%2BNLD%2BMEX%2BLUX%2BLTU%2BLVA%2BKOR%2BISR%2BIRL%2BISL%2BHUN%2BGRC%2BDEU%2BFRA%2BFIN%2BEST%2BDNK%2BCZE%2BCRI%2BCOL%2BCAN%2BCHL%2BBEL%2BAUT%2BJPN%2BTWN%2BAUS..TECHPAT_RD%2BFFRD_ERD%2BERD_GDP%2BRERD_ERD%2BENVRD_GDP%2BENVRD_GBAORD.PT_B1GQ%2BPT_GBARD%2BPT_RDD_BDG_NRG._T&pd=1990%2C2022&to\[TIME_PERIOD\]=false](https://data-explorer.oecd.org/vis?tm=RD%26D%20budget&pg=20&snb=47&df[ds]=dsDisseminateFinalDMZ&df[id]=DSD_GG%40DF_GREEN_GROWTH&df[ag]=OECD.ENV.EPI&df[vs]=1.1&dq=ITA%2BUSA%2BGBR%2BCHE%2BTUR%2BSWE%2BESP%2BSVN%2BSVK%2BPRT%2BPOL%2BNOR%2BNZL%2BNLD%2BMEX%2BLUX%2BLTU%2BLVA%2BKOR%2BISR%2BIRL%2BISL%2BHUN%2BGRC%2BDEU%2BFRA%2BFIN%2BEST%2BDNK%2BCZE%2BCRI%2BCOL%2BCAN%2BCHL%2BBEL%2BAUT%2BJPN%2BTWN%2BAUS..TECHPAT_RD%2BFFRD_ERD%2BERD_GDP%2BRERD_ERD%2BENVRD_GDP%2BENVRD_GBAORD.PT_B1GQ%2BPT_GBARD%2BPT_RDD_BDG_NRG._T&pd=1990%2C2022&to[TIME_PERIOD]=false)) (2025/7/21).
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). 2025d. “OECD Data Explorer, Environment and Climate Change: Green Growth.” ([https://data-explorer.oecd.org/vis?fs\[0\]=Topic%2C1%7CEnvironment%20and%20climate%20change](https://data-explorer.oecd.org/vis?fs[0]=Topic%2C1%7CEnvironment%20and%20climate%20change))

%23ENV%23%7CGreen%20growth%23ENV_GRG%23&fs[1]=Frequency%20of%20obs
 ervation%2C0%7CAnnual%23A%23&fs[2]=Measure%2C2%7CSocio-
 economic%20context%23SOCECO%23%7CEconomic%20context%23ECO%23%7CReal
 %20GDP%23GDP_R%23&pg=0&fc=Measure&snb=1&df[ds]=dsDisseminateFinalDMZ
 &df[id]=DSD_GG%40DF_GREEN_GROWTH&df[ag]=OECD.ENV.EPI&df[vs]=1.1&dq
 =TWN%2BOECD%2BUSA%2BGBR%2BTUR%2BCHE%2BSWE%2BESP%2BSVN%2
 BSVK%2BPOL%2BPRT%2BNOR%2BNZL%2BNLD%2BMEX%2BLUX%2BLTU%2B
 LVA%2BKOR%2BJPN%2BITA%2BISR%2BIRL%2BISL%2BHUN%2BGRC%2BDEU%
 2BFRA%2BFIN%2BEST%2BDNK%2BCRI%2BCZE%2BCOL%2BCHL%2BCAN%2BB
 EL%2BAUT%2BAUS..GDP_R.USD_PPP_T&pd=1990%2C2022&to[TIME_PERIOD]=f
 alse) (2025/7/21).

Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). 2025e. “OECD Data Explorer, Environment and Climate Change, Technology and Innovation: Patents- Technology Development.” ([https://data-explorer.oecd.org/vis?tm=patents&pg=0&snb=36&df\[ds\]=dsDisseminateFinalDMZ&df\[id\]=DSD_PAT_DEV%40DF_PAT_DEV&df\[ag\]=OECD.ENV.EPI&df\[vs\]=1.0&dq=OECD.A.TOT%2BENV_PAT.PATN.ONE.&pd=1990%2C2021&to\[TIME_PERIOD\]=false](https://data-explorer.oecd.org/vis?tm=patents&pg=0&snb=36&df[ds]=dsDisseminateFinalDMZ&df[id]=DSD_PAT_DEV%40DF_PAT_DEV&df[ag]=OECD.ENV.EPI&df[vs]=1.0&dq=OECD.A.TOT%2BENV_PAT.PATN.ONE.&pd=1990%2C2021&to[TIME_PERIOD]=false)) (2025/7/27).

Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). 2025f. “OECD Data Explorer, Environment and Climate Change, Technology and Innovation: Patents - Technology Diffusion.” ([https://data-explorer.oecd.org/vis?tm=patents&pg=0&hc\[Regional%20patent%20office\]=&snb=36&df\[ds\]=dsDisseminateFinalDMZ&df\[id\]=DSD_PAT_DIFF%40DF_PAT_DIFF&df\[ag\]=OECD.ENV.EPI&df\[vs\]=1.0&dq=TWN%2BUSA%2BGBR%2BTUR%2BCHE%2BSWE%2BESP%2BSVN%2BPRT%2BSVK%2BPOL%2BNOR%2BNZL%2BNLD%2BMEX%2BLUX%2BLTU%2BLVA%2BKOR%2BJPN%2BITA%2BISR%2BIRL%2BISL%2BHUN%2BGRC%2BFRA%2BDEU%2BFIN%2BEST%2BDNK%2BCZE%2BCRI%2BCOL%2BCHL%2BCAN%2BBEL%2BAUT%2BAUS.A.TOT%2BADAPT%2BCCM.._Z&pd=1990%2C2022&to\[TIME_PERIOD\]=false](https://data-explorer.oecd.org/vis?tm=patents&pg=0&hc[Regional%20patent%20office]=&snb=36&df[ds]=dsDisseminateFinalDMZ&df[id]=DSD_PAT_DIFF%40DF_PAT_DIFF&df[ag]=OECD.ENV.EPI&df[vs]=1.0&dq=TWN%2BUSA%2BGBR%2BTUR%2BCHE%2BSWE%2BESP%2BSVN%2BPRT%2BSVK%2BPOL%2BNOR%2BNZL%2BNLD%2BMEX%2BLUX%2BLTU%2BLVA%2BKOR%2BJPN%2BITA%2BISR%2BIRL%2BISL%2BHUN%2BGRC%2BFRA%2BDEU%2BFIN%2BEST%2BDNK%2BCZE%2BCRI%2BCOL%2BCHL%2BCAN%2BBEL%2BAUT%2BAUS.A.TOT%2BADAPT%2BCCM.._Z&pd=1990%2C2022&to[TIME_PERIOD]=false)) (2025/7/26).

O’Riordan, Timothy, and Andrew Jordan. 1999. “Institutions, Climate Change and Cultural Theory: Towards a Common Analytical Framework.” *Global Environmental Change*, Vol. 9, pp. 81-93.

Ozkan, Mihrimah, Saswat Priyadarshi Nayak, Anthony D. Ruiz, and Wenmei Jiang. 2022.

- “Current Status and Pillars of Direct Air Capture Technologies.” *iScience*, Vol. 25, No. 4, 103990 (DOI: 10.1016/j.isci.2022.103990).
- Peters, Michael, Malte Schneider, Tobias Griesshaber, and Volker H. Hoffmann. 2011. “The Quest for Adequate Technology-push and Demand-pull Policies: Country-level Spillovers and Incentives for Nonincremental Innovation.” SSRN (<http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.1752414>) (2025/7/10).
- Prajapati, Dharendra, Sunil Kumar Jauhar, Angappa Gunasekaran, Sachin S. Kamble, and Saurabh Pratap. 2022. “Blockchain and IoT Embedded Sustainable virtual Closed-loop Supply Chain in E-commerce towards the Circular Economy.” *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 172, 108530 (DOI:10.1016/j.cie.2022.108530).
- Pranita, Diaz, and Sri Sarjana. 2025. “A Conceptual Approach to Defining a Carbon Tax in the Transport Sector in Indonesia: Economic, Social, and Environmental Aspects.” *Energies*, Vol. 18, 3493 (DOI: 10.3390/en18133493).
- Preston, Benjamin L., Lauren Rickards, Hartmut Funfgeld, and Rodney J. Keenan. 2015. “Toward Reflexive Climate Adaptation Research.” *Current Opinion in Environmental Sustainability*, Vol. 14, pp. 127-35.
- Rahman, Zia Ur, Wajid Khan, and Dostdar Hussain. 2024. “The Role of Carbon Taxing and Green Innovation in Achieving Decarbonization Goals in Global South.” *Journal of Tax Reform*. Vol. 10, No. 3, pp.524-38.
- Ramzan, Muhammad, Ummara Razi, Muhammad Umer Quddoos, and Tomiwa Sunday Adebayo. 2023. “Do Green Innovation and Financial Globalization Contribute to the Ecological Sustainability and Energy Transition in the United Kingdom? Policy Insights from a Bootstrap Rolling Window Approach.” *Sustainable Development*, Vol. 31, pp. 393-414.
- Reis, Lara Aleluia, Zoi Vrontisi, Elena Verdolini, Kostas Fragkiadakis, and Massimo Tavoni. 2023. “A Research and Development Investment Strategy to Achieve the Paris Climate Agreement.” *Nature Communications*, Vol. 14, 3581 (DOI: 10.1038/s41467-023-38620-4).
- Rennert, Kevin, and Cora Kingdon. 2025. “Social Cost of Carbon 101: A Review of the Social Cost of Carbon, from a Basic Definition to the History of Its Use in Policy Analysis.” Washington, DC: Resources for the Future (<https://www.rff.org/publications/explainers/social-cost-carbon-101/>) (2025/9/8).
- Plumer, Brad. 2013. “Obama Ties the Kitchen-sink Approach to Global Warming.” *The*

Washington Post, June 25.

(<https://www.washingtonpost.com/news/wonk/wp/2013/06/25/obama-tries-the-kitchen-sink-approach-to-global-warming/>) (2025/7/10).

- Pihlajamaa, Matti and Ville Valovirta. 2024. "The Potential of Innovation Contests in Articulating Demand for System-level Transformation: The Case of the Helsinki Energy Challenge." *Environmental Innovation and Societal Transitions*, Vol. 53, 100916 (DOI: 10.1016/j.eist.2024.100916).
- Pinkse, Jonatan, and Ans Kolk. 2012. "Multinational Enterprises and Climate Change: Exploring Institutional Failures and Embeddedness." *Journal of International Business Studies*, Vol. 43, pp. 332-41.
- Prindle, Bill, Jay Zarnikau, and Erica Allis. 2010. "Chapter 8: Barriers and Policy Solutions to Energy Efficiency as a Carbon Emissions Reduction Strategy." In *Generating Electricity in a Carbon-Constrained World*, Edited by Fereidoon Sioshansi, pp. 207-39, London: Elsevier, Inc. (DOI: 10.1016/B978-1-85617-655-2.00008-0).
- Raj, Nitesh. 2022. "Information Asymmetry and Market Failure." *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, Vol. 11, No. 1, 1020-27.
- Ramirez-Corredores, M.M., Luis A. Diaz, Anne M. Gaffney, and Christopher A. Zarzana. 2021. "Identification of Opportunities for Integrating Chemical Processes for Carbon (Dioxide) Utilization to Nuclear Power Plants." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 150, 111450 (DOI: 10.1016/j.rser.2021.111450).
- Rausch, Sebastian, and Hidemichi Yonezawa. 2021. "Green Technology Policies versus Carbon Pricing: An Intergenerational Perspective." Discussion Papers No. 965, Statistics Norway, Research Department (https://www.ssb.no/en/natur-og-miljo/forurensning-og-klima/artikler/green-technology-policies-versus-carbon-pricing/_attachment/inline/fe68d3cd-5337-434e-a08e-43b826a42ee3:fa49cb4ddd8fd6e507a12e8e465d03efb37823be/DP965_web.pdf) (2025/9/6).
- Rausch, Sebastian, and Hidemichi Yonezawa. 2023. "Green Technology Policies versus Carbon Pricing: An Intergenerational Perspective." *European Economic Review*, Vol. 154, 104435 (DOI: 10.1016/j.euroecorev.2023.104435).
- Ren, G. F., and Y. X. Lu. 2023. "Does Environmental Tax Promote Green Investment of Manufacturing Firms? Evidence from Chinese Heavy-polluting Listed Companies." *Applied Ecology and Environmental Research*, Vol. 21, No. 2, pp. 1581-94.

- Rivera, Gissela Landa, Frédéric Reynès, Ivan Islas Cortes, François-Xavier Bellocq, and Fabio Grazi. 2016. “Towards a Low Carbon Growth in Mexico: Is a Double Dividend Possible? A Dynamic General Equilibrium Assessment.” *Energy Policy*, Vol. 96, pp. 314-27.
- Rodin, Valerie, Lukas Zeilerbauer, Johannes Lindorfer, Christian Paulik, and David Finger. 2022. “Life Cycle Assessment of a Novel Electrocatalytic Process for the Production of Bulk Chemical Ethylene Oxide from Biogenic CO₂.” *Frontier in Sustainability*, Vol. 3, 799389 (DOI: 10.3389/frsus.2022.799389).
- Rogge, Karoline S., Florian Kern, and Michael Howlett. 2017. “Conceptual and Empirical Advances in Analysing Policy Mixes for Energy Transitions.” *Energy Research & Social Science*, Vol. 33, pp. 1-10.
- Rogge, Karoline S. Rogge, Benjamin Pfluger, and Frank W. Geels. 2020. “Transformative Policy Mixes in Socio-technical Scenarios: The Case of the Low-carbon Transition of the German Electricity System (2010-2050).” *Technological Forecasting & Social Change*, Vol. 151, 119259 (DOI: 10.1016/j.techfore.2018.04.002).
- Rossetto, Daniel. 2024. “The Role of Border Carbon Adjustments and Subsidies in Incentivising Investment: Comparing Equivalence in the Context of Steel Recycling and Decarbonisation.” *Discover Sustainability*, Vol. 5, 132 (DOI: 10.1007/s43621-024-00337-9).
- Rozenberg, Julie, Stéphane Hallegatte, Baptiste Perrissin-Fabert, and JeanCharles Hourcade. 2013. “Funding Low-carbon Investments in the Absence of a Carbon Tax.” *Climate Policy*, Vol. 13, pp. 134-41.
- Saelim, Supawan. 2019. “Carbon Tax Incidence on Household Demand: Effects on Welfare, Income Inequality and Poverty Incidence in Thailand.” *Journal of Cleaner Production*, Vol. 234, pp. 521-33.
- Sato, Ichiro, Beth Elliott, and Clea Schumer. 2021. “What Is Carbon Lock-in and How Can We Avoid It?” Washington, DC: World Resources Institute (<https://www.wri.org/insights/carbon-lock-in-definition>) (2025/8/24).
- Sawangphol, Narumitr, and Chanathip Pharino. 2011. “Status and Outlook for Thailand’s Low Carbon Electricity Development.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, pp. 564-73.
- Schwab, Klaus. 2015. “The Fourth Industrial Revolution: What It Means and How to Respond.” (<https://www.foreignaffairs.com/world/fourth-industrial-revolution>).

- Scotti, Francesco, Andrea Flori, Riccardo Crescenzi, and Fabio Pammolli. 2025. "Demand-pull and Technology-push Environmental Innovation: A Policy Mix Analysis on EU ETS and EU Cohesion Policy." *Climate Policy*, Vol. 25, No. 2, pp.153-70.
- Seemann, Heike. 2014. "India: The National Clean Energy Fund." Green Growth (<https://sdghelpdesk.unescap.org/sites/default/files/2018-03/India%20Energy%20The%20National%20Clean%20Energy%20Fund.pdf>)(2025/1/15).
- Seto, Karen C. Seto, Steven J. Davis, Ronald B. Mitchell, Eleanor C. Stokes, Gregory Unruh, and Diana Urge-Vorsatz. 2016. "Carbon Lock-In: Types, Causes, and Policy Implications." *Annual Review of Environment and Resources*, Vol. 16, pp. 425-52.
- Shaharudin, Muhammad Shabir, Yudi Fernando, Charbel Jose Chiappetta Jabbour, Robert Sroufe, and Muhamad Fairuz Ahmad Jasmi. 2019. "Past, Present, and Future Low Carbon Supply Chain Management: A Content Review Using Social Network Analysis." *Journal of Cleaner Production*, Vol. 218, pp. 629-43.
- Shahbazi, Ashkan, Akram Avami, Moein Moeini-Aghtaie, and Hamidreza Tavassoti. 2024. "Optimum Carbon Tax Rate for Emission Targets of Electricity Generation System by Life Cycle Techno-economic-environmental Optimization Model." *Renewable Energy*, Vol. 237, 121877 (DOI: 10.1016/j.renene.2024.121877).
- Shahbaz, Muhammad, Nikunj Patel, Anna Min Du, and Shabbir Ahmad. 2024. "From Black to Green: Quantifying the Impact of Economic Growth, Resource Management, and Green Technologies on CO2 Emissions." *Journal of Environmental Management*, Vol. 360, 121091 (DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.121091).
- Shayegh, Soheil, Severin Reissl, Elnaz Roshan, and Matteo Calcaterra. 2023. "An Assessment of Different Transition Pathways to a Green Global Economy." *Communications Earth & Environment*, Vol. 4, No. 1 (DOI:10.1038/s43247-023-01109-5).
- Shu, Tong, Zhizhen Peng, Shou Chen, Shouyang Wang, Kin Keung Lai, and Honglin Yang. 2017. "Government Subsidy for Remanufacturing or Carbon Tax Rebate: Which Is Better for Firms and a Low-Carbon Economy." *Sustainability*, Vol. 9, 156 (DOI:10.3390/su9010156).
- Simon, Richard, Amelia Mitchell, Chris Evans, Jeanette Whitaker, Amanda Thomson, and Aidan Keith. 2021. "Greenhouse Gas Removal Methods and Their Potential UK Deployment." A Report Published for the Department for Business, Energy and Industrial Strategy by Element Energy and the UK Centre for Ecology and Hydrology (<https://assets.publishing.service.gov.uk/media/616ff80ce90e07197b571c95/ggr-methods->

- potential-deployment.pdf) (2025/8/31).
- Smulders, Sjak, Michael Toman, and Cees Withagen. 2014. “Growth Theory and ‘Green Growth’.” *Oxford Review of Economic Policy*, Vol. 30, No. 3, pp. 423-46.
- Söderholm, Patrik. 2020. “The Green Economy Transition: The Challenges of Technological Change for Sustainability.” *Sustainable Earth*, Vol. 3, 6 (DOI: 10.1186/s42055-020-00029-y).
- Solow, Robert Melton. 1956. “A Contribution to the Theory of Economic Growth.” *The Quarterly Journal of Economics*, Vol. 70, No. 1, pp. 65-94.
- Song, Saw Imm, Jennifer Tunga Janang, Erimalida Yazi, and Fareiny Morni. 2022. “The Effects of Market Strength, Information Asymmetry, and Industrial Characteristics on Malaysian Firms’ CAR During COVID-19 Pandemic.” *Capital Markets Review*, Vol. 30, No. 1, pp. 1-15.
- Song, Lulu, Stijn van Ewijk, Eric Masanet, Takuma Watari, Fanran Meng, Jonathan M. Cullen, Zhi Cao, and Wei-Qiang Chen. 2023. “China’s Bulk Material Loops Can Be Closed But Deep Decarbonization Requires Demand Reduction.” *Natural Climate Change*, Vol. 13, 1136-43.
- Stiglitz, Joseph E. 2010. “One: Government Failure vs. Market Failure: Principles of Regulation.” In *Government and Markets: Toward a New Theory of Regulation*, Edited by Edward J. Balleisen and David A. Moss, pp. 13-51. Cambridge University Press (government-failure-vs-market-failure-principles-of-regulation.pdf) (2025/9/2).
- Storset, Sigmund Ø., Grethe Tangenb, David Berstada, Peder Eliassonb, Karl Anders Hoffb, Øyvind Langørgena, Svend Tollak Munkejorda, Simon Roussanallya, and Malin Torsæterb. 2019. “Profiting from CCS Innovations: A Study to Measure Potential Value Creation from CCS Research and Development.” *International Journal of Greenhouse Gas Control*, Vol. 83, pp. 208-15.
- Tagliapietra, Simone. 2022. *Green Industrial Policy: A Global Perspective*. United Nations Department for Economic and Social Affairs (https://financing.desa.un.org/sites/default/files/2023-05/Green_Industrial_Policy_Final%20Paper.pdf) (2025/8/3).
- Tagliapietra, Simone, and Reinhilde Veugelers. 2020. “A Green Industrial Policy for Europe.” Bruegel (https://www.bruegel.org/sites/default/files/private/wp_attachments/Bruegel_Blueprint_31_Complete_151220.pdf) (2025/9/4).

- Tanaka, Kanako. 2011. "Review of Policies and Measures for Energy Efficiency in Industry Sector." *Energy Policy*, Vol. 39, No. 10, pp. 6532-50.
- Taylor, Margaret. 2008. "Beyond Technology-push and Demand-pull: Lessons from California's Solar Policy." *Energy Economics*, Vol. 30, pp. 2829-54.
- The Royal Society and Royal Academy of Engineering. 2018. "Greenhouse Gas Removal." The Royal Society and Royal Academy of Engineering (<https://royalsociety.org/-/media/policy/projects/greenhouse-gas-removal/royal-society-greenhouse-gas-removal-report-2018.pdf>) (2025/8/31).
- Thielges, Sonja, Barbara Olfe-Kräutlein, Alexander Rees, Joschka Jahn, Volker Sick, and Rainer Quitzow. 2022. "Committed to Implementing CCU? A Comparison of the Policy Mix in the US and the EU." *Frontiers in Climate*, Vol. 4 (DOI: 10.3389/fclim.2022.943387).
- Timilsina, Govinda R., Yuanhua Chang, Jun Pang. 2024. "Economic Impacts of Meeting China's NDC through Carbon Taxes with Alternative Schemes for Recycling Tax Revenues." *Resources, Conservation & Recycling*, Vol. 207, 107696, (DOI: 10.1016/j.resconrec.2024.107696).
- Tokarska, Katarzyna B., Kirsten Zickfeld, and Joeri Rogelj. 2019. "Path Independence of Carbon Budgets When Meeting a Stringent Global Mean Temperature Target After an Overshoot." *Earth's Future*, Vol. 7, No. 12, pp. 1283-95.
- Twongyirwea, Ronald, David Mfitumukiza, Bernard Barasa, Barbara R. Naggayi, Hannington Odongo, Viola Nyakato, and Grace Mutoni. 2019. "Perceived Effects of Drought on Household Food Security in South-western Uganda: Coping Responses and Determinants." *Weather and Climate Extremes*, Vol. 24, 100201 (DOI: 10.1016/j.wace.2019.100201).
- United Nations. 2015. "Paris Agreement." (https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf) (2025/7/4).
- United Nations. 2024. "Data for Climate Action: How National Statistical Offices Can Contribute." United Nations Publication, United Nations Economic Commission for Europe, Geneva (<https://www.preventionweb.net/media/104175/download?startDownload=20250309>) (2025/8/9).
- United Nations Conference on Environment & Development. 1992. "Agenda 21." United Nations Sustainable Development. Rio de Janeiro, Brazil, June 3-14 (<https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/Agenda21.pdf>) (2025/8/18).
- United Nations Conference on Trade and Development. 2023. "Green Technology: Concepts

- and Main Characteristics.” Technology and Innovation for Cleaner and More Productive and Competitive Production, pp 4-6, UN-iLibrary (<https://doi.org/10.18356/9789210028295c006>) (2025/8/18).
- United Nations Development Programme. 2025. “Carbon Tax in an Evolving Carbon Economy: Policy Design & Digital Innovations.” (<https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/2025-03/undp-carbon-tax-in-an-evolving-carbon-economy-digital-version.pdf>) (2025/9/6).
- U.S. Energy Information Administration (U.S. EIA). 2011. “Direct Federal Financial Interventions and Subsidies in Energy in Fiscal Year 2010.” Washington, DC: Independent Statistics & Analytic, U.S. Department of Energy (<https://docs.wind-watch.org/US-subsidy-2010.pdf>) (2025/7/12).
- U.S. Energy Information Administration (U.S. EIA). 2012. “Annual Energy Outlook 2012: With Projections to 2035.” DOE/EIA-0383(2012), Washington, DC: Independent Statistics & Analytic, U.S. Department of Energy (http://www.eia.gov/forecasts/aeo/MT_coal.cfm#lto) (2025/7/12).
- United States Patent and Trademark Office. 2023. “IP5 Statistics Report, 2022 Edition.” European Patent Office, Japan Patent Office, Korean Intellectual Property Office, China National Intellectual Property Administration, United States Patent and Trademark Office. (<https://link.epo.org/ip5/statistics2022>) (2025/7/29).
- Van der Ploeg, Frederick. 2025. “Why Green Subsidies Are Preferred to Carbon Taxes: Climate Policy with Heightened Carbon Tax Salience.” *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 130, 103129 (DOI: 10.1016/j.jeem.2025.103129).
- Vandeplas, Anneleen, Istvan Vanyolos, Mauro Vigani, and Lukas Vogel. 2022. “The Possible Implications of the Green Transition for the EU Labour Market.” Discussion Paper 176. Directorate-General for Economic and Financial Affairs, European Commission (https://economy-finance.ec.europa.eu/system/files/2022-12/dp176_en_green%20transition%20labour.pdf) (2025/9/18).
- Van Deventer, Jannie S. J., John L. Provis, Peter Duxson, and David G. Brice. 2010. “Chemical Research and Climate Change as Drivers in the Commercial Adoption of Alkali Activated Materials.” *Waste and Biomass Valorization*, Vol. 1, No. 1, pp. 145-55.
- Varbanov, Petar Sabev, Xuexiu Jia, and Jeng Shiun Lim. 2021. “Process Assessment, Integration and Optimisation: The Path towards Cleaner Production.” *Journal of Cleaner Production*, Vol. 281, 124602 (DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124602).

- Vriens, Eva, and Giulia Andrighetto. 2025. "Why Social Norms May Fail Us When We Need Them Most." *Current Opinion in Psychology*, Vol. 62, 101975 (DOI: 10.1016/j.copsyc.2024.101975).
- Waltho, Cynthia, Samir Elhedhli, and Fatma Gzara. 2019. "Green Supply Chain Network Design: A Review Focused on Policy Adoption and Emission Quantification." *International Journal of Production Economics*, Vol. 208, pp. 305-18.
- Wang, Hua, and Lan Wang. 2022. "Product Line Strategy and Environmental Impact Oriented to Carbon Tax Constraints." *Sustainable Production and Consumption*, Vol. 32, pp. 198-213.
- Wang, Manman, Shi Yin, and Shuai Lian. 2022. "Collaborative Elicitation Process for Sustainable Manufacturing: A Novel Evolution Model of Green Technology Innovation Path Selection of Manufacturing Enterprises under Environmental Regulation." *Plos One*, Vol. 17, No. 6 (DOI: 10.1371/journal.pone.0266169).
- Wang, Xinyue, Zhimei Li, and Peinan Liu. 2023. "Recycling/Production and Incentive-Penalty Strategies in Closed-Loop Supply Chains under Remanufacturing Policies." *Sustainability*, Vol. 15, 9750 (DOI: 10.3390/su15129750).
- Wang, Xue-Chao, Aoife Foley, Yee Van Fan, Sandro Nižetić, and Jiří Jaromír Klemeš. 2022. "Integration and Optimisation for Sustainable Industrial Processing within the Circular Economy." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 158, 112105 (DOI: 10.1016/j.rser.2022.112105).
- Wang, Yinsu, Kui Zhou, Xinyu Wang, Tingting Yang, and Huiting Chen. 2024. "Can Carbon Tax Revenue Recycling Coordinate Climate Mitigation and Energy Poverty Alleviation?" *Energy*, Vol. 308, 132363 (DOI: 10.1016/j.energy.2024.132363).
- Weber, K. Matthias, and Harald Rohrer. 2012. "Legitimizing Research, Technology and Innovation Policies for Transformative Change Combining Insights from Innovation Systems and Multi-level Perspective in a Comprehensive 'Failures' Framework." *Research Policy*, Vol. 41, pp. 1031-47.
- Wei, Shanxiang, Wen Jiandong, and Hummera Saleem. 2023. "The Impact of Renewable Energy Transition, Green Growth, Green Trade and Green Innovation on Environmental Quality: Evidence from Top 10 Green Future Countries." *Frontiers in Environmental Science*, Vol. 10, 1076859 (DOI: 10.3389/fenvs.2022.1076859).
- Wei, Yi-Ming, Kaiyuan Chen, Jia-Ning Kang, Weiming Chen, Xiang-Yu Wang, and Xiaoye Zhang. 2022. "Policy and Management of Carbon Peaking and Carbon Neutrality: A

- Literature Review.” *Engineering*, Vol. 14, No. 2, pp. 52-63.
- Wen, Limin, and Shufang Sun. 2023. “Can Environmental Protection Tax Drive Manufacturing Carbon Unlocking? Empirical Evidence from China.” *Frontiers in Ecology and Evolution*, Vol. 11, 1274785 (DOI: 10.3389/fevo.2023.1274785).
- Westmore, Ben. 2013. “R&D, Patenting and Growth: The Role of Public Policy.” OECD Economics Department Working Papers No. 1047. (https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2013/05/r-d-patenting-and-growth_g17a22cf/5k46h2rfb4f3-en.pdf) (2025/8/11).
- Wintson, Clifford. 2006. “Government Failure vs. Market Failure: Microeconomics Policy Research and Government Performance.” Brookings, Aei-brookings Joint Center for Regulatory Studies, Washington, DC. (<https://www.brookings.edu/wp-content/uploads/2016/06/20061003.pdf>) (2025/8/26).
- World Bank. 2016. “Connecting Green Technology Entrepreneurs: Implications for Public Program Design.” Climate Technology Program, in Brief No. 3 (<https://documents1.worldbank.org/curated/en/434281470900048448/pdf/107749-REVISED-PUBLIC-inBrief-3-update-08-29-16.pdf>) (2025/6/18).
- World Economic Forum. 2022. “What Is 'Industry 4.0' and What Will It Mean for Developing Countries?” Jobs and the Future of Work (<https://www.weforum.org/stories/2022/04/what-is-industry-4-0-and-could-developing-countries-get-left-behind/>) (2025/9/3).
- World Economic Forum. 2023. “Supply Chains and Transportation: 5 Must-deliver Skills for Becoming a Supply Chain Leader.” World Economic Forum (<https://www.weforum.org/stories/2023/03/supply-chain-leadership/>) (2025/9/5).
- Wu, Dandan, Hao Ding, and Yang Cheng. 2024. “How Does Environmental Policy Affect Operations and Supply Chain Management: A Literature Review.” *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 197, 110580 (DOI: 10.1016/j.cie.2024.110580).
- Wu, Qingyang, Yaqi Wang, and Guangjun Shen. 2024. “The Green Bonus of Tax Incentives: Evidence from China.” *Journal of Economic Behavior and Organization*, Vol. 227, 106740 (DOI: 10.1016/j.jebo.2024.106740).
- Xie, Jinliang, Ziqian Xia, Xi Tian, and Yiwei Liu. 2023. “Nexus and Synergy between the Low-carbon Economy and Circular Economy: A Systematic and Critical Review.” *Environmental Impact Assessment Review*, Vol. 100, 107077 (DOI: 10.1016/j.eiar.2023.107077).

- Xu, Lei, Xuanyu Du, and Qiuyu Tang. 2025. "Certainty in Uncertainty: Assessing the Impact of Climate Policy Uncertainty on the Green Transformation of Manufacturing firms in China." *Journal of Cleaner Production*, Vol. 522, 146280 (DOI: 10.1016/j.jclepro.2025.146280).
- Yamazaki, Akio. 2017. "Jobs and Climate Policy: Evidence from British Columbia's Revenue-neutral Carbon Tax." *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 82, pp. 197-216.
- Yang, Yong-cong, Pu-yan Nie, and Jin-bo Huang. 2020. "The Optimal Strategies for Clean Technology to Advance Green Transition." *Science of the Total Environment*, Vol. 716, 134439 (DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.134439).
- Yara, Belgium. 2022. "Yara Recommendation for the CBAM Trilogues." Knowledge Grows. Yara, Belgium (https://www.yara.com/siteassets/sustainability/sustainable-agriculture-in-europe/fit-for-55/cbam/yara-recomendations-for-the-cbam-trilogues_nov-2022.pdf) (2025/7/4).
- Yi, Yongxi, Yangyang Wang, Chunyan Fu, and Yuqiong Li. 2022. "Taxes or Subsidies to Promote Investment in Green Technologies for a Supply Chain Considering Consumer Preferences for Green Products." *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 171, 108371 (DOI: 10.1016/j.cie.2022.108371).
- Yu, Xiao, Yingdong Xu, Meng Sun, and Yanzhe Zhang. 2021. "The Green-Innovation-Inducing Effect of a Unit Progressive Carbon Tax." *Sustainability*, Vol. 13, 11708 (DOI: 10.3390/su132111708).
- Yu, Xiao Yu, Yingdong Xu, Jian Zhang, and Yue Sun. 2022. "The Synergy Green Innovation Effect of Green Innovation Subsidies and Carbon Taxes." *Sustainability*, Vol. 14, 3453 (DOI: 10.3390/su14063453).
- Zhang, Ning, Xiahui Lin, Yantuan Yu, and Yanni Yu. 2020. "Do Green Behaviors Improve Corporate Value? An Empirical Study in China." *Journal of Cleaner Production*, Vol. 246, 119014 (DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119014).
- Zhang, Shuwei, Nico Bauer, Gunnar Luderer, and Elmar Kriegler. 2014. "Role of Technologies in Energy-related CO₂ Mitigation in China within a Climate-protection World: A Scenarios Analysis using REMIND." *Applied Energy*, Vol. 115, pp. 445-55.
- Zhang, Yaming, Majed Abbas, and Wasim Iqbal. 2021. "Analyzing Sentiments and Attitudes toward Carbon Taxation in Europe, USA, South Africa, Canada and Australia." *Sustainable Production and Consumption*, Vol. 28, pp. 241-53.

- Zhang, Zheng, Guangwen Hu, Xianzhong Mu, and Li Kong. 2022. “From Low Carbon to Carbon Neutrality: A Bibliometric Analysis of the Status, Evolution and Development Trend.” *Journal of Environmental Management*, Vol. 322, 116087 (DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.116087).
- Zhao, Changying, Shenghong Ju, Yuan Xue, Tao Ren, Ya Ji, and Xue Chen. 2022. “China’s Energy Transitions for Carbon Neutrality: Challenges and Opportunities.” *Carbon Neutrality*, Vol. 1, 7 (DOI: 10.1007/s43979-022-00010-y).
- Zheng, Jialin, Keqiang Li, Ya Zhou¹, and Xi-yin Zhou. 2023. “The Effect of the Carbon Tax on the Low-carbon Level under Different Market Powers.” *Environment, Development and Sustainability*, (DOI: 10.1007/s10668-023-03929-z).
- Zhou, Baoru, and Li Zheng. 2023. “Technology-pushed, Market-pulled, or Government-driven? The Adoption of Industry 4.0 Technologies in a Developing Economy.” *Journal of Manufacturing Technology Management*, Vol. 34, No. 9, pp. 115-38.
- Zhou, Pin, He Xu, Xu Liu, and Dan Gao. 2025. “Brand Extension Strategy in the Presence of Carbon Tax Regulation Policy and Social Influence.” *Omega*, Vol. 131, 103210 (DOI: 10.1016/j.omega.2024.103210).
- Zhou, Xiaoyang, Xiaoya Wei, Jun Lin, Xin Tian, Benjamin Lev, and Shouyang Wang. 2021. “Supply Chain Management under Carbon Taxes: A Review and Bibliometric Analysis.” *Omega*, Vol. 98, 102295 (DOI: 10.1016/j.omega.2020.102295).
- Zhu, Jianhua, Ying Lu, Zhiting Song, Xuefeng Shao, and Xiao-Guang Yue. 2023. “The Choice of Green Manufacturing Modes under Carbon Tax and Carbon Quota.” *Journal of Cleaner Production*, Vol. 384, 135336 (DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.135336).
- Zickfeld, Kirsten, Deven Azevedo, Sabine Mathesius, and H. Damon Matthews. 2021. “Asymmetry in the Climate-carbon Cycle Response to Positive and Negative CO₂ Emissions.” *Nature Climate Change*, Vol. 11, pp/ 613-17.
- Zou, Fei, Yanju Zhou, and Caihua Yuan. 2020. “The Impact of Retailers’ Low-Carbon Investment on the Supply Chain under Carbon Tax and Carbon Trading Policies.” *Sustainability*, Vol. 12, 3597 (DOI:10.3390/su12093597).

附表 1：2021 年台灣與 OECD 各國每年 R&D 總支出與政府及私人企業部門 R&D 支出及對應比例

國家	2021 年各國每年 R&D 總支出及政府與私人企業部門 R&D 支出			2021 年各國每年政府、私人企業部門與其他部門 R&D 支出佔 R&D 總支出比例			政府與私人企業部門 R&D 支出佔 R&D 總支出比例合計	2021 年政府及私人企業外其他兩大部門 R&D 支出佔 R&D 總支出比例
	私人企業支出 (百萬元)	政府支出金額 (百萬元)	R&D 總支出金額 (百萬元)	私人企業支出 (%) (A)	政府支出 (%) (B)	其他部門支出 (%) (C)		
							(%) (D) = (A) + (B)	(%) (E) = 100 - (D)
北中南美洲								
1 加拿大	---	---	---	---	---	---	---	---
2 美國	565,363.140	60,407.392	725,643.651	77.912	8.325	13.763	86.237	13.763
3 智利	---	---	---	---	---	---	---	---
4 哥倫比亞	---	---	---	---	---	---	---	---
5 哥斯大黎加	---	---	---	---	---	---	---	---
6 墨西哥	---	---	---	---	---	---	---	---
亞洲及太平洋								
7 日本	135,125.062	14,372.696	172,002.571	78.560	8.356	13.084	86.916	13.084
8 南韓	86,922.294	10,734.789	109,863.758	79.118	9.771	11.111	88.889	11.111
9 澳洲	11,369.764	2033.079	21,344.851	53.267	9.525	37.208	62.792	37.208
10 紐西蘭	1804.827	523.644	3058.083	59.018	17.123	23.858	76.142	23.858
歐洲								
11 奧地利	10,216.175	1118.565	14,834.972	68.865	7.540	23.594	76.406	23.594
12 比利時	14,312.235	1639.605	19,162.350	74.689	8.556	16.754	83.246	16.754
13 捷克	5027.830	1333.637	8007.914	62.786	16.654	20.560	79.440	20.560
14 丹麥	---	---	---	---	---	---	---	---
15 愛沙尼亞	474.086	79.135	849.018	55.839	9.321	34.840	65.160	34.840
16 芬蘭	5221.052	556.146	7590.405	68.785	7.327	23.888	76.112	23.888
17 法國	41,842.038	7461.193	63,660.360	65.727	11.720	22.553	77.447	22.553
18 德國	86,581.362	19,154.886	129,348.452	66.937	14.809	18.255	81.745	18.255
19 希臘	2034.516	964.518	4323.187	47.061	22.310	30.629	69.371	30.629
20 匈牙利	3938.565	532.175	5219.722	75.455	10.195	14.349	85.651	14.349
21 冰島	374.830	14.784	523.093	71.656	2.826	25.517	74.483	25.517
22 愛爾蘭	4535.543	197.387	5636.943	80.461	3.502	16.037	83.963	16.037
23 以色列	20,053.756	233.705	21,908.493	91.534	1.067	7.399	92.601	7.399
24 義大利	19,813.530	4596.127	32,916.782	60.193	13.963	25.844	74.156	25.844
25 拉脫維亞	156.535	77.102	419.832	37.285	18.365	44.350	55.650	44.350
26 立陶宛	562.234	180.122	1143.790	49.155	15.748	35.097	64.903	35.097
27 盧森堡	381.167	183.556	752.648	50.643	24.388	24.969	75.031	24.969
28 荷蘭	1804.827	1184.273	21,650.616	8.336	5.470	86.194	13.806	86.194
29 挪威	3758.424	919.287	6977.771	53.863	13.175	32.963	67.037	32.963
30 波蘭	11,551.208	374.345	18,309.584	63.088	2.045	34.867	65.133	34.867
31 葡萄牙	3311.349	261.164	5549.547	59.669	4.706	35.625	64.375	35.625
32 斯洛伐克	948.567	313.059	1692.611	56.042	18.496	25.463	74.537	25.463
33 斯洛維尼亞	1234.479	227.320	1683.493	73.328	13.503	13.169	86.831	13.169
34 西班牙	13,459.521	4039.494	23,944.207	56.212	16.870	26.918	73.082	26.918
35 瑞典	13,405.746	816.626	18,504.330	72.447	4.413	23.140	76.860	23.140
36 瑞士	13,545.617	186.446	19,840.582	68.272	0.940	30.788	69.212	30.788
37 土耳其	22,773.796	1672.851	37,130.634	61.334	4.505	34.160	65.840	34.160
38 英國	59,727.973	4283.018	84,219.356	70.920	5.086	23.995	76.005	23.995
台灣	43,174.101	4485.738	49,616.050	87.016	9.041	3.943	96.057	3.943

來源：OECD (2024c)。

註：依 OECD (2024c) 定義，一個國家一年的 R&D 共分成政府、私人企業、而另兩個其他部門分別為教育及私人非營利組織，此處僅列出政府及私人企業的 R&D 的支出。

附表 2：2000-2021 年台灣及 OECD 各國年平均私人企業 R&D 支出與政府預算分配於 R&D 支付企業 R&D 稅收抵減誘因與直接資助總金額及對應比例^a

年	各年 OECD 政府預算分配於 R&D 支付企業 R&D 稅收誘因與直接資助總額			私人企業年均 R&D 支出及政府提供企業 R&D 稅收抵減誘因與直接資助總金額		私人企業年平均 R&D 支出與政府提供企業 R&D 稅收抵減誘因與直接資助總金額的各種比例			
	OECD 全部國家	佔 OECD 全部國家 GDP 比例	OECD 各國平均 ^b	台灣私人企業部門 R&D 支出 ^c	OECD 私人企業部門 R&D 支出與政府提供企業 R&D 稅收抵減誘因與直接資助合計	台灣 R&D 總支出比例 ^d	佔年 GDP 比例	OECD 各國 R&D 總支出比例 ^d	佔各國年 GDP 比例
	(A)	(B)	(C)	(D)	(F)	(G)	(H)	(I)	(J)
2000	258,736.30	0.63	7963.88	7698.32	34,409.49	63.60	1.17	96.56	0.82
2001	272,936.90	0.66	8340.17	8030.68	30,155.05	63.57	1.29	97.58	0.91
2002	291,420.90	0.69	8989.00	8637.16	30,689.73	62.19	1.31	96.43	0.98
2003	306,290.10	0.71	9408.76	9579.32	29,539.38	62.82	1.40	99.80	1.04
2004	309,963.40	0.70	9064.21	10,769.43	31,972.51	64.68	1.47	94.80	0.97
2005	317,858.00	0.69	9409.29	12,095.78	29,060.76	67.05	1.57	99.12	1.03
2006	319,882.30	0.68	9268.14	13,473.85	32,575.34	67.50	1.65	96.88	0.94
2007	326,185.00	0.67	9364.82	15,000.51	32,390.94	69.17	1.72	96.65	0.94
2008	331,986.50	0.68	9203.51	16,706.40	34,337.99	71.01	1.90	98.84	0.93
2009	361,898.00	0.76	10,221.96	17,300.63	33,246.27	70.30	2.00	100.08	1.10
2010	343,448.00	0.70	9511.08	19,249.31	34,396.25	71.59	2.02	93.13	0.97
2011	334,694.10	0.67	9185.90	20,927.53	32,260.33	72.58	2.11	95.02	0.93
2012	333,310.30	0.66	9008.38	22,209.45	33,231.49	74.22	2.19	94.14	0.90
2013	328,416.40	0.64	8999.73	23,513.80	31,966.61	75.52	2.27	95.69	0.89
2014	329,486.70	0.62	8905.41	24,919.30	34,572.88	76.98	2.29	93.81	0.84
2015	330,464.20	0.61	8931.47	25,663.18	33,567.24	77.63	2.33	95.16	0.83
2016	343,330.40	0.62	9393.21	26,935.65	37,005.84	77.52	2.39	95.21	0.84
2017	356,445.20	0.63	9633.66	29,372.56	36,438.07	79.05	2.53	96.47	0.86
2018	376,831.90	0.65	10,440.28	32,188.51	42,397.54	80.31	2.69	92.70	0.86
2019	397,030.50	0.67	11,002.94	34,837.40	42,925.52	80.94	2.83	97.10	0.90
2020	459,435.10	0.81	12,733.63	37,957.15	48,709.53	82.55	2.98	95.91	1.09
2021	443,464.00	0.74	12,629.35	43,174.10	49,320.91	84.28	3.18	99.41	0.99

來源：OECD (2024c；2024d；2025h；2024i)。

註 a：資料庫自 2000 年起才開始有紀錄。

註 b：資料庫中記錄的是 OECD 全部國家之政府支付企業 R&D 稅收抵減誘因與直接資助金額佔全部國家 GDP 比例，此處呈現 OECD 各國平均政府預算分配於 R&D 支付企業 R&D 稅收抵減誘因與直接資助金額，亦用 (B) 欄位中相同的 GDP%，計算相關結果。

註 c：資料庫中並無台灣政府支付企業 R&D 稅收抵減誘因與直接資助之金額，因此，台灣私人企業部門 R&D 的總額即是私人企業部門 R&D 支出。

註 d：各國年 R&D 總支出是私人企業、政府部門、教育及分營利組織等四大項所執行的 R&D 支出總和，OECD 即正文表 2 的第 2 個欄位之總和，台灣則為同一個表的第 7 個欄位之 R&D 支出總和。

附表 3：台灣與 OECD 1990-2020 年環境相關技術專利族數與氣候變遷調適技術專利族數及佔總專利族數比^a

年 ^b	專利族總數 ^c		環境相關技術專利族數				氣候變遷調適技術專利族數			
	台灣	OECD 整體	台灣		OECD 整體		台灣		OECD 整體	
	(A)	(B)	專利族數 (C)	佔總專利族數比 (%) (D) = (C) / (A)	專利族數 (E)	佔總專利族數比 (%) (F) = (E) / (B)	專利族數 (G)	佔總專利族數比 (%) (H) = (G) / (A)	專利族數 (I)	佔總專利族數比 (%) (J) = (I) / (B)
1990	266	112,998	7	2.632	7991	7.072	1	0.376	773	0.684
1991	323	110,288	16	4.954	8248	7.479	2	0.619	811	0.735
1992	347	110,693	23	6.628	8504	7.683	1	0.288	838	0.757
1993	379	115,212	30	7.916	8971	7.787	4	1.055	908	0.788
1994	347	120,840	9	2.594	9169	7.588	2	0.576	977	0.809
1995	348	133,534	13	3.736	9745	7.298	2	0.575	1064	0.797
1996	984	149,026	33	3.354	11,095	7.445	4	0.407	1273	0.854
1997	1461	162,510	45	3.080	11,760	7.236	5	0.342	1400	0.861
1998	2190	171,491	54	2.466	12,473	7.273	4	0.183	1467	0.855
1999	2320	188,019	72	3.103	14,569	7.749	6	0.259	1601	0.852
2000	2758	214,810	83	3.009	16,670	7.760	14	0.508	1851	0.862
2001	4100	208,895	124	3.024	16,896	8.088	9	0.220	1705	0.816
2002	5364	222,669	209	3.896	18,007	8.087	13	0.242	2057	0.924
2003	6575	225,038	284	4.319	19,129	8.500	19	0.289	1938	0.861
2004	7074	240,820	339	4.792	20,972	8.709	12	0.170	2099	0.872
2005	8176	246,208	365	4.464	22,411	9.102	16	0.196	2234	0.907
2006	8793	242,131	460	5.231	23,993	9.909	15	0.171	2153	0.889
2007	9279	236,187	521	5.615	25,044	10.603	18	0.194	2234	0.946
2008	10,254	224,313	692	6.749	25,260	11.261	13	0.127	2531	1.128
2009	10,476	223,903	853	8.142	29,491	13.171	33	0.315	2477	1.106
2010	11,116	235,564	942	8.474	33,023	14.019	30	0.270	2622	1.113
2011	12,396	241,926	1006	8.116	34,537	14.276	41	0.331	2529	1.045
2012	12,743	248,431	975	7.651	34,920	14.056	43	0.337	2664	1.072
2013	11,737	255,781	839	7.148	33,414	13.064	40	0.341	2954	1.155
2014	10,524	252,712	766	7.279	33,188	13.133	39	0.371	2813	1.113
2015	10,550	253,039	710	6.730	32,824	12.972	56	0.531	3066	1.212
2016	10,031	256,746	760	7.577	33,401	13.009	39	0.389	3118	1.214
2017	11,448	262,038	792	6.918	33,946	12.955	56	0.489	2965	1.132
2018	11,788	265,184	828	7.024	34,078	12.851	45	0.382	2910	1.097
2019	11,058	269,683	773	6.990	33,255	12.331	53	0.479	2679	0.993
2020	11,162	215,468	731	6.549	29,135	13.522	51	0.457	2742	1.273

來源：OECD (2024j)。

註 a：表中所有專利數來自 IP5 及三方同族專利所核發。

註 b：2020 年是最新資料年。

註 c：專利族總數包括環境相關專利族數、氣候變遷調適技術專利族數及永續海洋經濟專利族數三大類，此處列出總專利族數及環境相關專利族數、氣候變遷調適技術專利族數二類。

附表 4：1990-2021 年台灣與 OECD 各國年平均技術開發及技術擴散專利數及其中有關氣候變遷減碳與氣候變遷調適技術開發與擴散專利數與估專利總數之比。

年	總技術開發專利				氣候變遷調適技術開發專利				氣候變遷調適技術擴散專利				氣候變遷調適技術開發專利				氣候變遷調適技術擴散專利				
	台灣專利數	各國平均專利數	國家數	估專利總數比 (%)	台灣專利數	各國平均專利數	國家數	估專利總數比 (%)	台灣專利數	各國平均專利數	國家數	估專利總數比 (%)	台灣專利數	各國平均專利數	國家數	估專利總數比 (%)	台灣專利數	各國平均專利數	國家數	估專利總數比 (%)	
1990	1133	4743	38	0.706	8	0.706	29	0.957	457	22,802	35	16	3,661	979	32	4,292	8	1,831	163	32	0.714
1991	1403	4556	38	0.784	11	0.784	29	1.037	2397	21,764	36	128	5,340	1048	33	4,816	23	0,960	172	31	0.789
1992	2088	4775	38	0.431	9	0.431	32	0.944	7095	21,250	37	467	6,582	930	37	4,375	46	0,648	159	36	0.749
1993	2861	5216	38	0.350	10	0.350	54	1.056	8694	21,479	37	649	7,465	1032	36	4,804	98	1,127	183	34	0.854
1994	3453	5638	38	0.379	61	0.379	61	1.084	10,603	21,341	38	646	6,093	1004	38	4,705	97	0,915	197	36	0.923
1995	3916	6656	38	0.383	73	0.383	32	1.095	12,851	23,878	38	690	5,369	1132	37	4,743	76	0,591	242	35	1.011
1996	5697	7081	38	0.369	21	0.369	38	0.921	15,564	25,102	38	801	5,146	1207	36	4,809	102	0,655	241	35	0.962
1997	6860	7798	38	0.539	76	0.539	34	0.980	19,597	26,814	38	985	5,026	1318	37	4,916	140	0,714	261	37	0.973
1998	8876	8389	38	0.293	86	0.293	34	1.022	21,995	27,129	38	1082	4,919	1330	38	4,903	133	0,605	287	36	1.057
1999	10,571	9337	38	0.303	110	0.303	33	1.182	23,096	28,491	38	1055	4,568	1443	38	5,066	121	0,524	308	38	1.082
2000	10,694	10,870	38	0.346	121	0.346	35	1.111	26,930	31,811	38	1306	4,850	1655	38	5,202	107	0,397	386	36	1.212
2001	15,807	11,234	38	0.266	99	0.266	38	0.884	32,739	33,086	38	1580	4,826	1771	38	5,351	135	0,412	365	38	1.103
2002	17,006	10,469	38	0.200	109	0.200	35	1.041	33,197	33,582	38	1899	4,871	1762	38	5,385	99	0,298	337	36	1.069
2003	20,444	10,925	38	0.384	120	0.384	34	1.100	41,081	33,582	38	2280	4,883	1886	38	5,708	225	0,548	401	35	1.194
2004	23,446	12,608	38	0.269	118	0.269	37	0.937	46,694	32,096	38	2280	4,883	1886	38	5,708	266	0,570	347	38	1.080
2005	28,393	13,129	38	0.299	134	0.299	35	1.020	54,248	33,788	38	2544	4,690	2042	38	6,043	236	0,435	374	38	1.106
2006	29,912	13,372	38	0.267	145	0.267	35	1.086	57,439	32,775	38	3046	5,295	2140	38	6,529	325	0,565	390	37	1.189
2007	30,721	13,624	38	0.281	147	0.281	37	1.081	58,849	32,076	38	3343	5,681	2285	38	7,124	346	0,588	382	38	1.192
2008	30,987	13,425	38	0.281	155	0.281	37	1.153	59,540	31,427	38	3659	6,145	2516	38	8,006	307	0,516	407	37	1.294
2009	29,103	12,910	38	0.392	176	0.392	37	1.367	53,138	29,137	38	3980	7,487	2647	38	9,085	343	0,645	461	36	1.383
2010	29,065	13,685	38	0.430	179	0.430	37	1.306	53,927	29,293	38	4459	8,269	2937	38	9,994	322	0,597	433	38	1.475
2011	28,868	14,009	38	0.436	176	0.436	37	1.253	57,049	30,136	38	5211	9,134	3186	38	10,573	288	0,505	423	38	1.402
2012	28,998	14,823	38	0.424	187	0.424	36	1.258	58,200	31,004	38	5442	9,351	3283	38	10,590	327	0,562	439	37	1.415
2013	28,047	15,140	38	0.424	187	0.424	37	1.235	55,716	31,611	38	5442	8,504	3295	37	10,423	320	0,574	476	36	1.507
2014	26,492	15,108	38	0.464	182	0.464	38	1.205	52,012	31,350	38	4262	8,194	3086	38	9,845	343	0,659	482	36	1.537
2015	25,122	15,155	38	0.517	209	0.517	36	1.382	49,173	31,057	38	4013	8,161	3010	38	9,691	408	0,830	515	35	1.659
2016	24,290	15,126	38	0.564	218	0.564	37	1.443	48,556	31,124	38	3757	7,737	3057	38	9,823	468	0,964	513	38	1.648
2017	26,498	14,667	38	0.574	203	0.574	36	1.381	50,856	31,321	38	3832	7,535	3126	38	9,982	484	0,952	543	36	1.734
2018	27,061	13,597	38	0.517	177	0.517	37	1.305	53,885	31,276	38	4219	7,830	3213	38	10,272	463	0,859	506	38	1.617
2019	26,877	13,641	38	0.580	168	0.580	36	1.235	54,871	31,619	38	3787	6,902	3219	38	10,180	468	0,853	527	36	1.667
2020	26,897	13,379	38	0.639	172	0.639	38	1.566	52,430	31,563	38	3603	6,872	3285	38	10,408	491	0,936	577	37	1.829
2021	26,836	13,011	38	0.470	159	0.470	38	1.224	55,626	31,137	38	3786	6,806	3296	38	10,385	692	1,244	680	34	2.185

來源：本文計算整理計算 OECD (2023e；2023f)。
 註 a：表中特別列出 OECD 在特定項目下的國家數，是為觀察與氣候變遷直接相關技術開發及技術擴散專利數是否有差異，亦即觀察研發調適技術的開發專利數或是減碳技術擴散專利數與調適技術專利數的國家數是否有顯著不同。
 註 b：資料庫中總技術開發專利包含一個以上發明者之有環境相關技術、氣候變遷調適技術、永續海洋經濟、化石燃料技術(fossil fuel technologies)等。然目前的選擇組合沒有化石燃料技術開發專利；而此處特別列出氣候變遷調適技術開發專利數是為觀察與氣候變遷調適技術開發專利數及其佔總技術開發專利數比例。
 註 c：資料庫中總技術擴散專利包含環境相關技術擴散、氣候變遷減碳技術擴散與氣候變遷調適技術擴散三大類，此處特別列出與氣候變遷相關的兩種技術擴散專利。

附表 5：2021 年台灣與 OECD 各國技術開發專利、技術擴散總專利族數及氣候變遷調適技術開發、減緩技術擴散與調適技術擴散專利族數與佔比^a

國家	技術開發				技術擴散			
	專利總族數	氣候變遷調適技術專利族數	專利族數佔技術開發總專利族數比 (%)	專利族數佔技術開發總專利族數比 (%)	專利總族數	氣候變遷減緩技術專利族數	專利族數佔技術擴散總專利族數比 (%)	專利族數佔技術擴散總專利族數比 (%)
美國	161,660	1,604	0.992	425,228	38,720	9.106	4,669	1.098
南韓	88,809	2,320	2.612	221,068	28,815	13.034	5,480	2.479
日本	85,930	633	0.737	276,870	35,647	12.875	1,833	0.666
德國	49,782	232	0.465	53,412	7,167	13.416	239	0.447
台灣	26,836	126	0.469	55,626	692	1.244	3,786	6.806
法國	16,748	130	0.779	13,281	872	6.566	78	0.587
OECD 平均	13,011	159	1.222	31,137	680	2.184	3296	10.585
英國	12,391	148	1.174	14,742	1273	8.635	296	2.008
義大利	10,488	121	1.158	47,301	5081	10.742	2,052	4.338
荷蘭	7,916	60	0.768	91,633	505	0.551	70	0.076
以色列	5,800	54	0.925	32,233	266	0.823	90	0.279
瑞士	5,734	64	1.123	13,595	685	5.039	750	5.517
瑞典	5,588	65	1.162	17,112	198	1.156	28	0.163
土耳其	5,570	47	0.839	53,118	115	0.216	32	0.060
波蘭	3,820	37	0.958	42,533	302	0.710	55	0.129
西班牙	3,811	67	1.754	35,477	480	1.353	72	0.203
奧地利	3,361	19	0.576	13,116	71	0.539	8	0.060
澳洲	3,103	77	2.487	50,404	4819	9.561	8	0.089
芬蘭	2,822	15	0.537	15,733	153	0.972	15	0.954
比利時	2,813	42	1.509	11,566	60	0.519	9	0.779
丹麥	2,437	55	2.253	15,133	361	2.386	47	3.106
墨西哥	1,279	12	0.899	18,488	1,691	9.146	809	4.376
愛爾蘭	1,265	9	0.711	129	5	3.876	-----	-----
挪威	1,261	80	6.383	1,424	126	8.848	91	6.390
捷克	948	15	1.617	531	61	11.488	15	2.825
匈牙利	661	5	0.681	907	164	18.082	35	3.859
希臘	655	16	2.393	798	48	6.015	8	1.003
紐西蘭	648	7	1.029	347	24	6.916	11	3.170
葡萄牙	639	13	2.074	702	57	8.120	12	1.709
智利	507	8	1.544	3,003	166	5.528	135	4.496
斯洛維尼亞	490	29	5.879	3,841	368	9.581	247	6.431
斯洛伐克	342	2	0.585	275	13	4.727	3	1.091
立陶宛	317	4	1.104	158	9	5.696	2	1.266
立陶宛	294	1	0.283	165	15	9.091	6	3.636
盧森堡	194	1	0.517	1,608	132	8.209	62	3.856
拉脫維亞	130	2	1.536	86	3	3.488	-----	-----
愛沙尼亞	92	0	0.180	22	4	18.182	-----	-----
冰島	56	-----	-----	10	2	20.000	-----	-----
哥斯大黎加	49	0	0.306	750	39	5.200	51	6.800

來源：OECD (2023c; 2023f)^b

註 a：表中標示「-----」表示資料庫中該國在 2021 年相關資料為 0 或是資料庫中無該年資料記錄。

註 b：本表以各國技術開發專利總族數大小排序

附表 6：台灣與 OECD 各國平均年 CO₂ 排放量與各國政府與私人企業部門 R&D 年支出的關係

年	以生產及消費為基礎的 CO ₂ 排放量 (百萬噸/年)			政府與私人企業部門 R&D 年支出 (百萬美元/年)			
	台灣	OECD	OECD 國 家數*	私人企業部門 R&D 支出		政府與私人企業部門 R&D 支出	
				台灣	OECD 各國平均	台灣	OECD 各國平均
1990	117.95	462.93	24	---	38,198.49	---	46,573.45
1991	127.62	464.74	24	---	28,955.17	---	35,547.21
1992	135.25	465.72	24	---	26,772.07	---	32,996.48
1993	144.99	469.39	24	---	27,855.08	---	34,468.24
1994	153.44	457.82	25	---	29,893.19	---	36,395.19
1995	161.83	946.40	26	---	24,116.72	---	29,519.00
1996	169.59	871.52	29	---	27,789.48	---	32,768.95
1997	182.53	887.41	29	---	29,001.35	---	34,131.34
1998	193.38	896.10	29	6745.01	28,279.81	9247.21	32,737.05
1999	203.87	908.20	29	7413.34	29,559.84	10,122.15	34,609.44
2000	222.64	906.62	30	7698.32	26,445.61	10,545.82	30,653.33
2001	225.76	901.60	30	8030.68	21,814.88	10,972.63	25,765.35
2002	233.57	898.53	30	8637.16	21,700.73	12,083.71	25,515.06
2003	243.53	922.32	30	9579.32	20,130.62	13,340.87	23,981.99
2004	253.25	941.26	30	10,769.43	22,908.31	14,636.20	27,026.61
2005	261.14	954.59	30	12,095.78	19,651.46	15,893.14	23,193.27
2006	268.93	954.42	30	13,473.85	23,307.20	17,437.57	27,189.15
2007	271.86	961.59	30	15,000.51	23,026.13	18,963.94	26,924.80
2008	259.97	935.37	30	16,706.40	25,134.48	20,574.02	29,232.37
2009	247.16	868.65	30	17,300.63	23,024.31	21,353.95	27,227.06
2010	264.45	802.57	34	19,249.31	24,885.17	23,477.75	29,334.36
2011	270.89	789.31	34	20,927.53	23,074.44	25,209.11	27,201.61
2012	267.31	773.32	34	22,209.45	24,223.11	26,360.69	28,303.19
2013	267.86	772.39	34	23,513.80	22,966.88	27,580.58	26,822.18
2014	272.88	757.40	34	24,919.30	25,667.47	28,901.26	29,571.68
2015	273.24	749.14	34	25,663.18	24,635.77	29,677.44	28,351.10
2016	278.65	723.53	35	26,935.65	27,612.63	31,377.04	31,415.81
2017	285.24	723.88	35	29,372.56	26,804.41	33,733.31	30,406.45
2018	279.50	706.53	36	32,188.51	31,957.26	36,465.94	36,231.30
2019	270.63	---	36	34,837.40	31,922.58	39,383.04	36,007.33
2020	269.65	---	37	37,957.15	35,975.90	42,351.40	40,660.99
2021	278.75	---	38	43,174.10	36,691.56	47,659.84	41,087.56

來源：OECD (2024c) 與 OECD (2025b)。

註*：由於 OECD 目前的 38 個成員國，由於 OECD 資料庫 (2025a) 中有關生產或是消費的 CO₂ 排放量所呈現的是 OECD 所有成員國整體的結果，為了與台灣對照，乃將總排放量除以各對應年的成員國數，目前的 38 個總成員國陸續加入 OECD，分別為 1961 年：奧地利、比利時、加拿大、丹麥、法國、德國、希臘、冰島、愛爾蘭、盧森堡、荷蘭、挪威、葡萄牙、西班牙、瑞典、瑞士、土耳其、英國、美國；1962 年：義大利；1964 年：日本；1969 年：芬蘭；1971 年：澳洲；1973 年：紐西蘭；1994 年：墨西哥；1995 年：捷克；1996 年：匈牙利、南韓、波蘭；2000 年：斯洛伐克；2010 年：智利、愛沙尼亞、以色列、斯洛維尼亞；2016 年：拉脫維亞；2018 年：立陶宛；2020 年：哥倫比亞；2021 年：哥斯大黎加，共 38 個國家。這是假設每個國家一旦成為成員國，都會提供以生產及以消費為基礎的 CO₂ 排放量，然沒有各國的個別排放資料，以資料庫中各年 OECD 所有成員國總排放量除以總國家數，如果某些成員國在特定年事實上並未提供 CO₂ 排放量資料，目前附表中 OECD 各國歷年以生產及以消費為基礎之 CO₂ 平均排放量可能是低估的。

The Driving Force of Carbon Fee (Tax) Policy on the Innovation of Green Technology and Reduction of GHG Emissions: The Implication from the Performance of Green Growth Indicators for Taiwan and OECD Member Countries

Pei-Ing Wu

Taiwan International Studies Association President, Taipei, TAIWAN

Abstract

This study attempts to explore the market, transformation, and structure barriers that an industry confronts under the implementation of carbon fee (tax) policy to achieve the non-spontaneous reduction of GHG/CO₂ and comprehend the driving force of green technology innovation. Furthermore, the “green growth indicators” prepared by OECD are used to connect the GHG emissions and different aspects of green expenditures. The comprehensive framework constructed by this study will be used to examine the design of carbon fee in relation to the change of GHG/CO₂, the mitigation and adaptation R&D expenditure. It shows from the experiences of other countries, carbon fee (tax) is an effective GHG/CO₂ reduction tool. It requires, however, simultaneously implement demand-pull or technology-push innovation policies to lead the industries to green technology paradigm. The policy combinations have to account for the attributes and scale of the industry, the level of the economic development, people’s families with institution and rule in related to the environmental management, and the cultural differences. The carbon fee (tax) revenue recycle under careful design of fee (tax) level should take into account the stakeholders of all kinds and subsidize specific technology such as renewable energy or low-carbon or green technology under revenue neutral. It is suggested that the fee (tax) is set at low level to let business sector have enough time to cumulate required capital for green technology innovation. Moreover, the GHG/CO₂

