

本月專題

「2050 淨零排放之路：美國長期策略」之概要

曾敏雅¹

摘要

2021 年，美國重新加入《巴黎協定》，制定雄心勃勃的國家自定貢獻 (NDC)，到 2030 年將溫室氣體淨排放量較 2005 年減少 50-52%，並推動美國走上 2050 淨零之路。爰此，美國將實施一系列新政策，透過廣泛迅速布建低碳技術與投資基礎建設，支持向潔淨能源經濟轉型。關鍵策略行動包含以下 5 項技術整合應用，包括：(1)電力去碳，設定 2035 年實現 100%無碳污染電力系統，推動太陽光電、陸域風力、離岸風力等，加速潔淨電力轉型。(2)電氣化或轉換為潔淨燃料，推動運輸、建築及工業等各部門電氣化，難以現行科技實現電氣化的經濟活動，則優先推動轉換為氫能、永續生質能等潔淨燃料。(3)減少能源浪費，使用新型與更高效率的電器產品、提升建築物設備的效率與永續性的製程。(4)減少甲烷等非二氧化碳氣體排放，採取經濟效益或低成本的措施減少甲烷等排放，如設置甲烷逸散感測器與修復石油與天然氣管線的洩漏。(5)擴大移除二氧化碳，以經嚴格評估與驗證的流程與技術進行二氧化碳移除，擴大碳匯並應用工程技術協助。

採取氣候行動將可改善美國公共衛生減少空氣污染、促進潔淨產業投資帶動經濟成長，並穩定社會安全提升生活品質。

一、前言

2021 年，美國重新加入《巴黎協定》，制定雄心勃勃的國家自定貢獻，到 2030 年將溫室氣體淨排放量減少 50-52%，並啟動全球甲烷承諾，將在國內外採取更多具體行動推進氣候目標。

¹財團法人台灣綜合研究院 副研究員

2021 年發布之長期策略，闡述美國如何在 2050 年前實現其淨零排放目標，將全球升溫限制在 1.5°C 範圍，並防止氣候變遷造成的影響與風險。於 2050 年前實現淨零排放需要各個部門共同採取行動。經分析後有諸多潛在的途徑可達成，並將實現 2030 年國家自定貢獻。使美國堅定地走向實現 2050 年淨零排放，並支持總體願景建立更永續、具韌性與平等的經濟發展。

二、美國實現 2050 年淨零重要里程碑目標

為實現 2050 淨零目標，美國訂定之 2050 年淨零排放路徑(如下圖 1)，包括 2025、2030 年減量目標，並設定 2035 年實現 100%潔淨電力等重要里程碑。

- (一)實現 2030 年國家自定貢獻(NDC)，2030 年溫室氣體淨排放量較 2005 年減少 50-52%。
- (二)2035 年實現 100%潔淨電力。
- (三)不遲於 2050 年實現整體社會經濟系統的淨零排放。

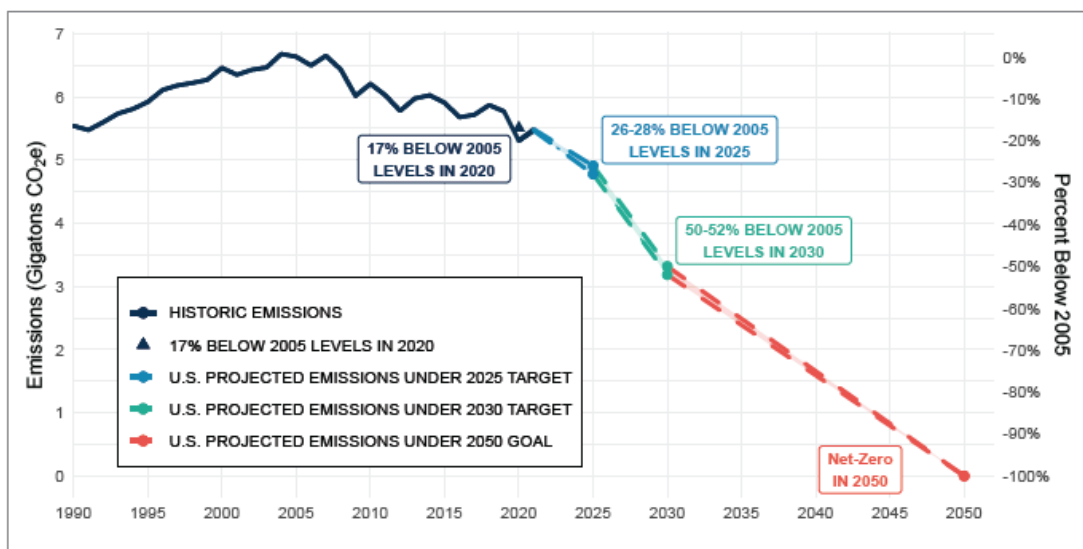


圖 1、美國 2050 年淨零排放目標下的歷史排放量與預計排放量

三、2030 年各部門目標與減碳措施

2020 年美國主要溫室氣體排放部門包括：運輸部門排放占比 27.3%、電力部門 24.9%、工業部門 23.9%、建築部門 13.2%、農業部門 10.7%。為使美

國走上 2050 淨零排放路徑，需在未來十年內採取變革性行動，並實現 2030 年溫室氣體淨排放量較 2005 年減少 50-52% 的目標。透過廣泛迅速布建低碳技術與投資基礎建設，支持向潔淨能源經濟轉型，預期可創造 50 萬-100 萬個工作機會。關鍵策略行動涉及電力、運輸、建築、工業以及農林與土地利用等五個部門，重點說明如下。

(一) 電力部門

1. **目標：**2035 年實現 100% 無碳污染電力系統。
2. **減碳措施：**電力部門是美國第二大排放源，因此需要快速且具成本效益的減碳投資。近年來因太陽光電、陸域風力、離岸風力與電池等關鍵技術的成本快速下降，伴隨政策支持和潔淨電力需求增加，加速潔淨電力轉型。未來美國將持續針對發電廠制定減少污染的獎勵措施與標準，加速潔淨能源布建；投資彈性電力系統技術，如輸配電、能源效率、儲能與去碳燃料等技術；布建碳捕存(CCS) 與核能技術。研發、示範與布建新式軟硬體，支持向零排放、韌性(resilient)、可靠與可負擔的電力系統轉型。

(二) 運輸部門

1. **目標：**到 2030 年銷售的所有新輕型汽車中有 50% 為零排放汽車；生產 30 億加侖永續航空燃料，加速布建並降低各種運輸形式的成本。
2. **減碳措施：**汽車已成為美國最大排放源，因此運具需要電氣化、低碳或零碳生質燃料以及應用氫能於遠距的海/空運。未來將降低車輛成本，制定輕、中和重型車輛的油耗與排放標準；獎勵零排放車輛與潔淨燃料發展；投資新的充電基礎建設用於集合住宅、公用充電站與長途旅運；擴大生質燃料；持續研發創新以降低氫能成本；投資潔淨運輸的基礎設施。

(三) 建築部門

1. **目標：**快速提高能源效率與增加潔淨高效電器的銷售占比，同時促進能源的可負擔性、公平取得高效電器、能效提升與建物中應用潔淨分散式能源(distributed energy resources)。
2. **減碳措施：**投資公共建築進行研發與示範，為高效、電網互動的電氣化建築提

供新的解決方案。

(四) 工業部門

1. 目標：工業去碳。

2. 減碳措施：

- (1) 工業部門排放溫室氣體的途徑相當多元複雜，其脫碳路徑包括能效提升；工業電氣化；低碳燃料、原料與能源；工業 CCS 等。為實現 2035 年清潔電力，需消除來自工業用的電力碳排放，並使目前以化石燃料為主的某些工業流程實現零碳電氣化成為可能。透過增加使用工業熱泵、電鍋爐或電磁加熱流程，以低或中溫加熱是工業電氣化的可能選項。
- (2) 美國將擴大支持對零碳工業創新的相關研究、開發、示範、商業化與布建，包含獎勵碳捕捉與開發綠氫為工業設施提供動力。因此透過政府採購權優先購買低/零碳工業用品。
- (3) 需要非二氧化碳溫室氣體監測與控制技術，防止營運過程中將包括甲烷、含氟氣體、黑碳與其他強效的氣候污染物釋出到大氣中。為解決甲烷逸散，為石油與天然氣生產設定更嚴格的標準，並投資防止氣體逸散。

(五) 農業、森林與土地利用

1. 目標：利用廣闊的土地減少排放與進行碳封存。

2. 減碳措施：

- (1) 主要措施包括持續擴大森林面積，延長輪作週期，保護森林，將樹木融入都市與農業，擴大覆蓋作物等氣候智慧型農業實務，並在農田上採用輪流放牧。
- (2) 促進對森林保護與森林管理的投資，擴大土地碳匯。同時，支持基於自然的沿海復育計畫，努力增加水路與海洋碳匯，確保在 2050 年前最大限度地發揮土地與海洋碳匯潛力。
- (3) 美國聯邦政府正在與各部落、州/地方政府合作，支持快速布建新的無碳污染技術與設備，同時確保其符合對工人、公共與環境安全以及環境正義的嚴格標準。為實現 2030 年目標，亦需投資於創新使美國製造業降低成本，發展其國內的製造供應鏈，並培訓所需勞動力。

四、2050 淨零排放路徑

前述章節的政策與目標有助於美國實現 2030 年目標。同時，相關行動也將催化美國能源、工業與土地系統的長期轉變以達到 2050 淨零目標。

(一) 整合五項關鍵互補技術實現淨零轉型：

1. **電力去碳化**：近年來因風力與太陽能發電成本快速降低、政府政策引導與消費需求增加等，加速潔淨能源轉型。在此基礎上，美國訂定 2035 年達到 100% 潔淨電力的目標，並作為不遲於 2050 年實現淨零排放的重要基礎。
2. **電氣化或轉換為潔淨燃料**：推動各部門電氣化，使運輸、建築物及工業製程等，使用成本合理且具效率的電力作為主要能源。針對航空、海運及部分工業，難以現行科技實現電氣化的經濟活動，則優先推動轉換為氫能、永續生質能等潔淨燃料。
3. **減少能源浪費**：使用新型與更高效率的電器產品、提升建築物設備的效率與永續性的製造流程。
4. **減少甲烷等非二氧化碳氣體排放**：採取具經濟效益或低成本的措施減少甲烷、氫氟碳化合物(HFCs)、氮氧化物(N₂O)等非二氧化碳溫室氣體之排放，如設置甲烷逸散感測器與修復石油與天然氣管線的洩漏，將冷卻設備中的冷媒從氫氟碳化合物更換為對環境友善的其他物質。美國發起全球甲烷承諾，到 2030 年與其合作夥伴減少全球甲烷至少 30%。
5. **移除大氣中二氧化碳**：以經嚴格評估與驗證的流程和技術從大氣中移除二氧化碳。擴大碳匯並應用工程策略。

(二) **2021 排放趨勢**：美國溫室氣體淨排放量在 2007 年達到峰值，主要來自於燃燒化石燃料，以滿足對能源持續增加的需求。自達到峰值以來，溫室氣體淨排放量在多種力量共同推動開始下降。其中聯邦政策扮演重要角色，包含透過研發與投資使煤炭轉向天然氣發電的改變，與積極發展再生能源；對再生能源與零排放汽車的獎勵措施；設定特定行業的法規，如發電廠的排放標準、燃油經濟性、電器能效標準等。

(三) **2050 淨零排放的全經濟路徑**：欲實現 2050 年淨零排放目標需將淨排放量較

2005 年減少約 6.6 Gt/年(2020 年 5.7 Gt CO₂e)，方不遲於到 2050 年降為零。美國以上述五項關鍵技術，包含能源系統轉換、非二氧化碳溫室氣體排放與移除二氧化碳等相互搭配實現該目標，且使各部門對達成淨零排放皆有所貢獻。下圖為從 2005 年淨排放量到 2050 年的代表性路徑，並說明為達淨零排放，各部門貢獻的約略估計值。

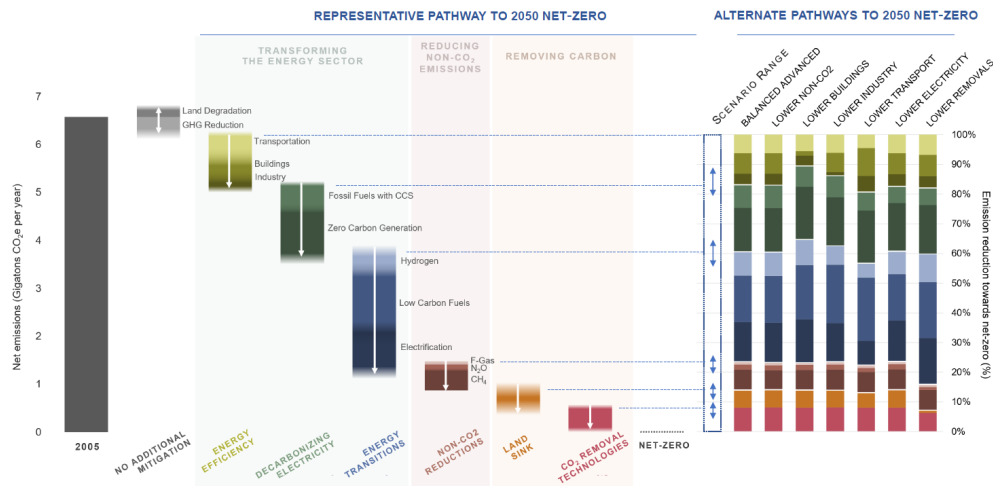


圖 2、實現美國 2050 淨零排放之路徑

五、2050 能源系統轉型

能源部門對 2050 年實現淨零排放至關重要，且取決於未來 30 年技術與政策之演變。所建構一系列假設路徑如下圖。所有情境下來自電力、運輸、建築與工業部門產所生的二氧化碳皆大量下降。其中電力部門減少最多，其次是運輸部門，非陸地碳匯的二氧化碳移除量增加也有所貢獻。

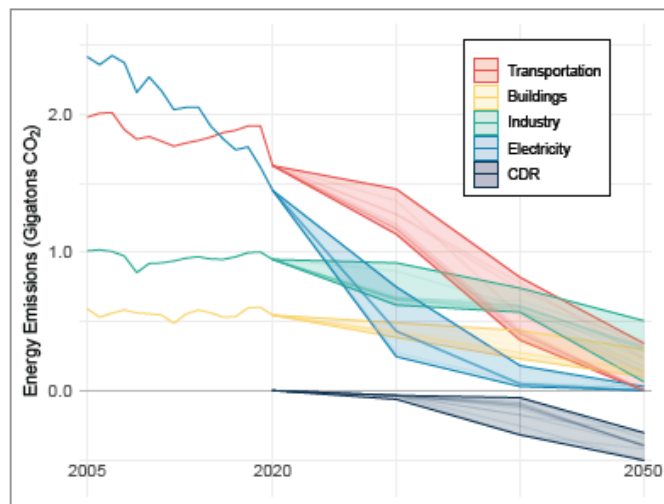


圖 3、美國 2050 能源相關二氧化碳排放路徑

(一) 電力部門

美國訂定 2035 年達到 100% 潔淨電力目標，為達 2050 淨零路徑，取決於快速的電力去碳化，以及各部門擴大使用去碳電力來取代形成污染的燃料。電力部門排放量占美國總排放量 1/4，為逐年減少二氧化碳排放，最重要的變革即是增加再生能源並減少燃煤。隨著發電與儲能成本持續降低，預計電力部門排放量將迅速減少。新政策、獎勵措施與市場改革等行動，可確保電力需求成長的同時，持續降低排放量。

到 2050 年太陽能與風力發電規模將繼續擴大，現有的核電仍會持續運作，並可能在 2030 與 2040 年代呈現成長；現有的發電廠開始裝設碳捕集裝置，未配備 CCS 技術的化石燃料發電將減少。到 2050 年，潔淨電力將為其他領域的經濟活動提供零碳電力，約占初級能源 15%-42%。研究顯示，到 2030 年轉型為潔淨電網時，平均而言電力批發價格不會有太大改變，變動約為-4%~3%，且預計將可減少美國消費者面對燃料供應的衝擊。

為滿足各個部門電力需求成長，清潔能源發電的投資必須持續到本世紀中葉。需持續布建先進的新技術，如新型的輸配電網與儲能基礎建設，長時儲能解決方案與適當的獎勵機制也相當重要。加速大規模布建再生能源，投資電網基礎建設，包括新建遠距高壓傳輸計畫，以增進電網韌性與可靠性，並整合各種發電來源、降低成本。另外，先進技術如潔淨氫燃燒或燃料電池、強化地熱系統、長時儲能、先進核電與裝載 CCS 的化石燃料發電，可提供多種潔淨發電來源。

(二) 運輸部門

運輸部門是美國最大的排放源，占比達 29%。為實現 2050 年淨零目標，必須確保 2030 年代初，零排放車輛的銷售占主導地位，同時必須建構公共交通基礎建設，如火車、腳踏車與大眾運輸等。

美國將持續擴大電氣化，運輸部門將以永續方式生產低碳燃料取代化石燃料。未來電力、生質燃料與氫能將越來越潔淨。對於低碳燃料的供給與採用，將取決於生產與採購的經濟性、技術競爭力、政策支持與私人投資等。生質能

源則取決於對環境的影響。由於法規與技術進步，共同推動效率提升，即使運輸服務需求增加，但該部門整體能源消耗呈下降趨勢。

美國運輸部門的長期策略核心，就是擴大應用新的運輸技術，迅速推廣輕型、中型與重型的零排放汽車。拜登總統已宣示 2030 年銷售的新車中，有一半為零排放汽車。但零排放汽車的布建仍存在諸多挑戰，如電池技術、燃料與充電基礎建設的成本居高不下。航空部門短期內難以實現電氣化等。上述問題有賴加速發展與擴增新型運輸技術之整合性策略，包括擴大公共運輸路網、鐵路電氣化、V2G(Vehicle to Grid)創新技術應用等。加速低碳燃料如綠氫、永續生質燃料等的研發、示範與布建，有助於航空、海運以及中重型卡車等脫碳。

(三) 建築部門

住宅和商業建築排放量占美國能源系統排放量的 1/3 以上，其中大約 2/3 的建築排放來自電力，其他則是來自於供熱、烹飪等直接燃燒使用的天然氣與石油。減少建築排放的關鍵在於終用途，如供暖、烹飪等的電力使用效率。建築效率改善亦可減少對能源的整體需求。

即使整體能源需求下降，但隨著最終使用端電氣化，電力在終端能源需求的占比將由 2020 年的 50% 增加至 2050 年的 90% 甚至更高。然而，能源需求的成長依然受限於能源效率與高效電氣化。同時，建築部門的能源需求將在 2030 年減少 9%，2050 年減少 30%。

由於建築物使用年限長，包含外牆、供暖與空調系統、電器與照明設備等皆會對其使用效率帶來影響，因此須採取行動改善之，如廣泛應用改造與新的建築技術，並提供融資工具等，減少融資障礙並確保費者保護。

減少碳排的三個重要來源：包含提升外牆與窗戶的隔熱技術、提高電力最終用途(例如照明、電器設備等)的效率，以及建築物內部的高效電氣化。高效與電氣化的建築為民眾帶來諸多實質利益。因減少能源使用與能源降格降低，因此使家庭與企業因此減少直接與間接的電費。建築物也可以支援更廣泛的能源轉型，如電動車充電基礎設施與屋頂太陽能裝置。

(四) 工業部門

工業部門的排放占美國溫室氣體排放約 23%，占能源系統排放 30%。能源密集與高碳排產業，如礦業、鋼鐵製造、水泥與化工，共占工業部門排放量的一半。儘管工業活動有許多難以脫碳的因素，透過投資於先進的無碳燃料、提高能源效率與電氣化，於 2050 可使工業部門碳排放減少 69%-95%。從化石燃料轉而使用清潔電力、氫能或生質燃料。所有模擬情境中，低碳燃料(包括電力)占能源使用總量的百分比皆持續成長。

為加快工業部門能源轉型實現脫碳，其關鍵策略包括能源效率、材料效率、電氣化、採用低碳燃料與原物料以及 CCS。能源效率、餘熱回收與加速採用先進技術如積層製造(Additive Manufacturing)等，可顯著減少能源需求並降低企業成本。

六、非二氧化碳減量與碳移除

(一)非二氧化碳減量

非二氧化碳溫室氣體占美國對全球暖化的貢獻高達 20%。由於其為高效吸熱氣體，對近期氣候造成的影響甚至比 CO₂ 更大。美國的非二氧化碳溫室氣體主要由甲烷、氧化亞氮與包含氫氟碳化物的氟化氣體所組成。主要排放源包括農業部門、家畜與能源部門。若透過提高效率與燃料轉換來減少化石燃料的使用，進而減少甲烷逸散，有可能進一步將非二氧化碳溫室氣體排放量降低 19%。即便如此，到 2050 年仍存有非二氧化碳溫室氣體，需依靠大氣移除 CO₂ 作為抵銷。

由於部分部門的減緩策略不足，且長期以來對非二氧化碳溫室氣體減量關注度不足，因此可用的減緩技術相對較少，甚至處於早期的技術發展階段。若要長期大幅度地實現非二氧化碳減量，則需發展新的或更有效的減量技術與對策。甚至對各部門與個別氣體皆須發展相對應的策略。

(二)二氧化碳移除：從大氣中移除二氧化碳是達到淨零排放的重要環節。主要透過兩項活動達成。一是基於土地與海洋等自然碳匯，透過擴大或強化保護、復育與永續管理等，以及其他移除碳的自然解方，同時保護自然生態系統與生物多樣性。第二種方式是透過各種技術與程序從空氣直接捕集與封存(DACCS)。

七、氣候行動的好處

採取氣候行動將可改善美國公共衛生減少空氣汙染、避免民眾健康與氣候損害、促進潔淨產業投資帶動經濟成長，並穩定社會安全提升生活品質。

參考文獻

1. The Long-Term Strategy of the United States: Pathways to Net-Zero Greenhouse Gas Emissions by 2050, United States Department of State and the United States Executive Office of the President, November 2021.