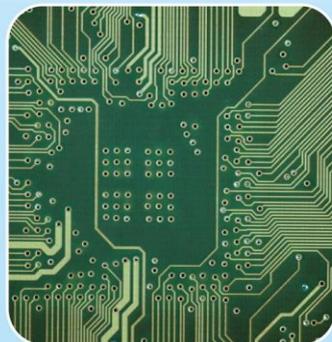


財團
法人

中技社

主要國家淨零排放路徑 之比較分析

CTCI FOUNDATION



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

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

本專題報告能得以出版，要感謝台灣科技大學化工系顧洋講座教授擔任議題召集人，邀集國內多位目前獲曾協助政府執行相關政策規劃的學者與智庫專家共組研究團隊，進行研究。比較各主要國家國淨零排放目標、政策法規、路徑與實際表現；各機構淨零排放評比方法、立論之差異，了解其背後因果，借鏡他山之政策基石，以作為政府主管機關研議能源政策之參考，謹在此致上萬分謝意。

發行人：潘文炎

主編：陳綠蔚、顧洋

作者：顧洋、謝志強、賴靜仙、黃國倉、黃釋緯、許聖民、潘述元、鄭睿合、劉致峻

執行編輯：曾志煌、劉致峻

發行者：財團法人中技社

地址 / 106 台北市敦化南路二段 97 號 8 樓

電話 / 886-2-2704-9805

傳真 / 886-2-2705-5044

網址 / www.ctci.org.tw

本社專題報告內容已同步發行於網站中，歡迎下載參考

發行日期：中華民國 113 年 12 月

ISBN：978-626-98882-9-0

序

為應對日益嚴峻的氣候變遷挑戰，歐美先進國家提出「2050年淨零排放」的目標與政策行動。綜觀各國淨零排放的目標、進程與策略，其內容包含了「聯合國氣候變遷綱要公約(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)」所公開的各國提交現況¹，因應《巴黎氣候協議(Paris Agreement)》限制升溫 1.5°C~2°C 目標，以及由各國提交的國家自定貢獻(Nationally Determined Contributions, NDCs)²等。在 2023 年底結束的聯合國氣候變遷綱要公約第 28 屆大會(COP 28)中，進行了所謂的「全球盤點(Global Stocktake)」，滾動式檢討全球各締約國的淨零成效，以作為後續路徑之修正。

為呼應全球淨零排放的趨勢，我國國家發展委員會亦以 2050 年達成淨零排放作為國家轉型目標，並接續公布「台灣 2050 淨零排放路徑及策略總說明」，闡明至 2050 年淨零之發展軌跡與行動路徑。今年更推多項相關政策，展現欲畢其功於一役之決心。國內各界與媒體亦常以諸多國際機構或非營利組織進行我國與其他國家的評比，希望台灣能在國際舞台上實現「彎道超車」，成為淨零排放的楷模。

然而，各國的國情差異顯著，實際掌握的地理與資源稟賦常有極大的不同，各國的經濟發展軌跡也有先後、貧富之分，往往難以反映各國達成淨零目標的難易程度與潛在成本。如同本社於 2023 年進行「國際氣候變遷論述與責任」議題的研究發現，氣候變遷議題的發展深受各國政治與產業利益之牽動，相關淨零排放目標與政策的設計，應謹慎以對，才能在履行氣候責任的同時，兼顧國民福祉。

有鑑於此，本社今年以「主要國家淨零排放路徑之比較分析」為題進行研究，並邀請到國立台灣科技大學顧洋講座教授擔任議題召集人。同時，邀請到國立台灣大學的黃國倉教授與潘述元教授、工研院產科國際所謝志強組長、中華經濟研究院的賴靜仙博士與鄭睿合高級分析師、台灣經濟研究院的黃釋偉研究員、台灣

¹ 含長程減碳策略，目前已有 68 國提交，在不同程度上承諾或規劃淨零目標，詳見 <https://unfccc.int/process/the-paris-agreement/long-term-strategies>

² <https://unfccc.int/NDCREG>

綜合研究院的許聖民副所長等國內學者專家及其所率領之研究團隊，與本社劉致峻研究員共同研究。一方面針對各主要國家與該國各部門的淨零排放目標、政策法規、路徑與實際表現進行比較分析；另一方面則針對各國際機構或組織提出淨零排放評比方法、立論與其背後因果之箇中差異進行了解。期能有效借鏡他山之政策基石，作為政府主管機關研議淨零排放相關政策之參考。

最後，再次感謝顧洋講座教授領導的研究團隊對於本議題研究的專注投入，以及在議題執行期間，諸多產官學研專家對本議題的無私分享，才能讓本專題報告得以順利完成。在此，謹致誠摯謝意。

財團法人中技社 董事長

潘文炎

2024 年 12 月

目錄

序	I
目錄.....	III
圖目錄.....	V
表目錄.....	VI
執行摘要.....	1
一、 問題及目標.....	1
二、 研究範圍及內容.....	1
三、 研究結論.....	1
四、 改善對策及建言.....	3
第一章、緒論.....	5
第二章、國家整體策略概述.....	9
一、 前言.....	9
二、 主要國家淨零排放國家路徑.....	12
三、 台灣淨零排放國家路徑與國際作法借鏡.....	31
第三章、電力部門.....	35
一、 全球電力部門淨零排放路徑.....	35
二、 主要國家電力部門淨零排放路徑.....	40
三、 台灣電力部門淨零排放路徑建議.....	76
第四章、產業部門.....	91
一、 前言.....	91
二、 主要國家產業部門淨零排放路徑.....	92
三、 台灣產業部門淨零排放路徑建議.....	106
第五章、住商部門.....	111
一、 前言.....	111
二、 主要國家住商部門淨零排放路徑.....	111
三、 台灣住商部門淨零排放路徑建議.....	131
第六章、運輸部門.....	139

一、 前言	139
二、 主要國家運輸部門淨零排放路徑	141
三、 台灣運輸部門淨零排放路徑建議	160
第七章、農業部門	169
一、 前言	169
二、 主要國家農業部門淨零排放路徑	170
三、 台灣農業部門淨零排放路徑建議	190
第八章、淨零排放評比方法論之比較分析	199
一、 前言	199
二、 國際間衡量淨零、永續之相關指標介紹	200
三、 主要國家淨零排放評比實績與可達成性	220
第九章、結論與建議	225
一、 研究發現	225
二、 初步建議	229

圖目錄

圖 1-1、太陽光電與陸上型風力發電的土地使用	7
圖 2-1、美國淨零路徑	14
圖 2-2、美國 2050 年各部門二氧化碳減排路徑	15
圖 2-3、英國淨零路徑	21
圖 2-4、日本淨零路徑	24
圖 3-1、全球各資源別之電力生產占比	36
圖 3-2、主要國家各資源發電量統計	36
圖 3-3、全球電力需求推估及電力資源組合	38
圖 3-4、全球各區域及各部門電力需求推估	38
圖 3-5、全球電力部門負載、發電資源及碳排放情形推估	39
圖 3-6、夏威夷州歷年發電結構	41
圖 3-7、夏威夷州歷年碳排放量	41
圖 3-8、IGP 分析使用之資源均化成本	43
圖 3-9、夏威夷基線情境之發電結構	44
圖 3-10、夏威夷基線情境之裝置容量結構	44
圖 3-11、夏威夷電力逐年減碳量推估	45
圖 3-12、歐胡島未來平均電價推估	45
圖 3-13、加州歷年發電結構	48
圖 3-14、加州歷年排碳量	48
圖 3-15、加州電力部門淨零分析採用之資源均化成本	49
圖 3-16、加州不同情境下之容量擴充分結果	50
圖 3-17、歐盟電力部門歷年發電量	52
圖 3-18、歐盟各部門歷年溫室氣體排放量	53
圖 3-19、歐盟在 1.5°C 情境下之淨零路推估分析結果	54
圖 3-20、英國電力部門歷年發電組合	56
圖 3-21、英國電力部門歷年溫室氣體排放量	57
圖 3-22、英國各情境下各資源別發電量	60

圖 3-23、英國平衡路徑各資源逐年發電量	60
圖 3-24、日本電力部門歷年發電資源組合及碳排放量	64
圖 3-25、日本電力部門於各情境分析之資源組合結果	66
圖 3-26、韓國電力部門歷年發電資源組合及碳排放量	69
圖 3-27、韓國近五次 2030 年發電組合規劃	70
圖 3-28、中國電力部門歷年發電資源組合及碳排放量	73
圖 3-29、台灣 2050 淨零排放規劃	80
圖 4-1、美國產業部門溫室氣體排放量趨勢與預測	92
圖 4-2、歐盟產業部門溫室氣體排放量趨勢與預測	95
圖 4-3、英國產業部門溫室氣體排放量趨勢與預測	97
圖 5-1、建築物使用碳排(OC)與蘊含碳排(EC)之全球占比	112
圖 5-2、美國淨零碳排建築之路徑概念圖	112
圖 5-3、美國住商部門總 CO ₂ 排放量來源比例(2016 年).....	113
圖 5-4、美國各州商業建築能源規範採用版本分布圖	116
圖 5-5、紐約市建築能源與水資源能效揭露地圖與 EnergyStar 能效標示	116
圖 5-6、英國 EPC 評級範圍	121
圖 5-7、日本 BELS 分級說明	122
圖 5-8、韓國對淨零建築政策的定義與評級方式	126
圖 5-9、台灣住商部門淨零排放之路徑概念圖	131
圖 5-10、台灣家戶主要耗能設備之汰換策略預估減碳潛力	134
圖 5-11、台灣導入 BERS 後住商部門之碳排趨勢變化	135
圖 6-1、低碳運輸三大策略	139
圖 6-2、台灣歷年公路公共運輸計畫	162
圖 7-1、美國 2050 年非二氧化碳溫室氣體減排路徑	170
圖 7-2、歐盟減量責任分配規則涵蓋部門之排放量	173
圖 7-3、歐盟農業部門 2023 年溫室氣體排放及農業部門減量措施	174
圖 7-4、英國農業部門溫室氣體減排項目淨零路徑	180
圖 7-5、韓國「2050 年農業和食品碳中和促進策略」	186

圖 7-6、台灣 2022 年農業部門溫室氣體排放結構.....	190
圖 8-1、CCPI 建構邏輯.....	201
圖 8-2、NZEI 架構.....	217

表目錄

表 1-1、IEA 更新的 2050 淨零排放路徑	6
表 2-1、主要國家淨零排放目標與重點政策	10
表 2-2、歐盟各成員國減量責任	19
表 3-1、IEA 淨零情境分類	37
表 3-2、夏威夷電力 100%再生能源路徑情境.....	42
表 3-3、夏威夷州電力部門淨零相關政策	46
表 3-4、加州 2021 淨零路徑-情境分類.....	48
表 3-5、加州各淨零路徑之總資源成本	50
表 3-6、加州電力部門淨零相關政策	51
表 3-7、歐盟淨零路徑情境設計	54
表 3-8、歐盟電力部門淨零相關政策	55
表 3-9、英國電力部門於各淨零情境計算之假設.....	58
表 3-10、英國各類發電技術成本	59
表 3-11、英國各類情境與高碳系統成本比較	61
表 3-12、英國電力系統未來結構.....	61
表 3-13、英國電力部門淨零相關政策	62
表 3-14、日本碳中和研究之情境設計	65
表 3-15、日本電力部門淨零相關政策	67
表 3-16、韓國近兩任執政者對 2050 電力部門淨零規劃比較.....	69
表 3-17、韓國電力部門碳中和相關政策	71
表 3-18、中國電力部門碳中和相關政策	75
表 3-19、各國電力部門淨零路徑規劃情形	77
表 3-20、國發會 2050 淨零排放發電情境	81
表 3-21、日本 DNE21+模型 2050 淨零排放發電情境(原版).....	83
表 3-22、國發會與日本 DNE21+模型(調整版)之 2050 淨零排放發電情境.....	84
表 3-23、各類能源技術的均化成本情境	84
表 3-24、台灣電力部門 2050 淨零排放之發電成本模擬	86

表 4-1、各國產業部門碳排放現況、減碳目標與策略比較	109
表 5-1、NBI 建議的建築法規減碳路徑	114
表 5-2、美國政府《未來十年聯邦可持續發展計畫》之目標以及具體措施	115
表 5-3、歐盟對於建築能源效率的補助資金來源與概述	118
表 5-4、德國政府設定之能源消耗個階段目標(以 1990 年為比較基準)	119
表 5-5、德國政府與 KfW 對新建建築之補助	120
表 5-6、德國政府與 KfW 對既有建築之補助	120
表 5-7、日本根據能耗表現定義三階種等級的 ZEB	123
表 5-8、日本根據能耗表現定義三階種等級的 ZEH	123
表 5-9、日本建築規範與標示彙整	123
表 5-10、日本新舊建築的 ZEB 補助金制度與補助來源總覽	125
表 5-11、日本新舊建築的 ZEH 補助金制度總覽	125
表 5-12、中國鼓勵政策類型表	130
表 5-13、為平衡氣候溫暖化增加之冷氣耗能量之建築外殼對策	132
表 6-1、美國《國家運輸藍圖》戰略推動期程	142
表 6-2、美國各類運具減碳期程及減量目標	144
表 6-3、英國「加速向零碳排運具轉變」規劃	149
表 6-4、日本《2050 年碳中和綠色成長戰略》運輸部門策略	151
表 6-5、韓國電動和氫能汽車登記數量及補助金額	156
表 6-6、主要國家運輸部門淨零策略規劃歸納	163
表 6-7、主要國家運輸部門個別推動策略比較	164
表 7-1、彙整歐盟農業部門四種情境預估減碳潛力	176
表 7-2、日本環境保護農業直接支付補貼項目及金額	184
表 7-3、台灣與主要國家農業部門淨零路徑比較	194
表 8-1、CCPI 之評估架構	202
表 8-2、CCPI 之資料來源	204
表 8-3、STI 之評估架構	205
表 8-4、STI 之資料來源	207

表 8-5、EPI 之評估架構	208
表 8-6、EPI 之資料來源	212
表 8-7、ETI 之評估架構	213
表 8-8、ETI 之衡量指標	214
表 8-9、ETI 之資料來源	216
表 8-10、NZEI 之資料來源	218
表 8-11、各淨零排放評比指標之綜整比較	219
表 8-12、各國於各指標中的排名和相對位置-總指標	220
表 8-13、各國於各指標中的排名和相對位置-環境面	221

執行摘要

一、問題及目標

為減緩氣候變遷對全人類的影響，需致力將全球氣溫相較工業革命前控制在 1.5°C 的升幅內。我國政府呼應全球淨零排放的急迫趨勢，亦端出諸多政策，盡力承擔更多減碳責任。然而，因為近年地緣政治動盪，全球面對能源安全-淨零排放-可負擔性的「三難選擇」下，沒有讓排放量拐點如預期般出現。因此，諸多機構呼籲重新修正淨零排放的具體路徑，以更務實的態度來應對本世紀人類面臨的最大挑戰。

台灣自有能源稟賦匱乏，極度仰賴進口能源，儘管近年政府投入大量財源建設再生能源，能源自主程度仍難有顯著提升。面對人口稠密、土地稀缺、孤立電網、再生能源發電不穩定、儲能與 CCUS 成本昂貴、各類型能源設施的鄰避現象，以及海峽可能面臨封鎖的國安風險等挑戰，應權衡成本效益、保持兼容各個選項的彈性，才能兼顧氣候責任與國民福祉。是故，如何制定淨零排放目標與路徑，設計相應的政策與配套措施，是當前應積極投入探討的課題。

二、研究範圍及內容

各國邁向 2050 年淨零排放目標時，均規劃適合其自身發展的路徑，以求「殊途同歸」。因此，本專題報告除了首章緒論與末章結論與建議之外，其餘各章分別從整體政策、電力、產業、住商、運輸與農業部門切入，選擇美國、歐盟、英國、日本、韓國與中國等主要國家作為比較對象，針對其淨零政策目標、路徑規劃、法規與政策措施進行廣泛且深入的比較分析。另外，挑選五個國際機構提出的淨零排放評比方法，從其立論與背後因果之箇中差異進行了解，以梳理出有效治理氣候變遷議題的路徑，並嘗試提出具體的達成淨零排放的相關政策建議。

三、研究結論

美國之減碳進展與變數：美國崇尚市場經濟，聯邦政府透過對前瞻技術的研發，降低技術成本，促使關鍵的無碳技術擴大市場；由州及其下政府的個別作法，結合非政府組織力量形成良性循環。拜登執政期間，一面重返國際氣候談判與共同行動，另一面強化國內淨零政策法規，提供再生能源和零排放車輛經濟誘因，並加嚴相關環保監管標準。然而，未來在川普重返白宮之後，將對美國未來氣候政策帶來不確定性。

歐盟之氣候治理與挑戰：歐盟作法與美國大相逕庭，習於以完善治理框架來處理氣候變遷難題，透過執委會、議會與理事會的共同決策，為成員國提供指引，淨零成效堪稱卓著。然因歐盟的氣候政策形塑係經過跨成員國與跨機構談判的層

層步驟，而近年歐盟議會分歧程度有增無減，未來歐盟的氣候變遷政策要如何在不同成員國的政治、經濟與環境條件下落實將是一大挑戰。

英國之系統性治理框架：英國透過設定積極的減碳目標，及完整的立法和一系列的政策措施，扮演好全球氣候議題倡議者之角色。即使脫離歐盟，其淨零腳步亦未停歇。以 UK-ETS 取代 EU-ETS，2021 年的《淨零策略：重建更環保未來》與 2023 年的《能源法》均為其淨零政策之延續。英國的淨零路徑注重系統性方法，以《氣候變遷法》作為明確治理框架，以「碳預算」進行路徑規劃與評估，再結合一系列政策配套措施與資金投入，以實現 2050 年淨零排放目標，並兼顧經濟發展與社會公平。

日本強調自主行動與能源多元化：日本自《京都議定書》通過後，走出一條與歐美國家截然不同的淨零排放路徑。日本於 2021 年將 2050 年碳中和目標入法，並設定 2030 年減少 46% 溫室氣體排放量的目標。整體而言，日本注重公私合作，將產業發展與淨零目標結合，推動企業自主減碳、強化建築節能標準、普及新能源車輛。日本同時致力於電力部門脫碳化，但因仰賴進口能源與獨立電網特性，近年已往核電重啟的方向進行政策調整。並另闢蹊徑，大力投入氫能等新技術研究與推廣。此外，將於 2026 年落實 GX-ETS 等制度，勾勒了整個日本社會低碳轉型的具體路徑。

韓國重視核能但面臨變局：韓國 2015 年成為東亞首個全國性排放交易制度的國家，2021 年通過的《應對氣候危機的碳中和綠色成長基本法》設定了 2030 年減碳 40% 及 2050 年碳中和的目標。各部門以擴大核能和再生能源使用，推動產業低碳化，強化建築能源效率，普及電動與氫能等零碳排車輛，再輔以技術創新與財政補貼措施，實現碳中和目標。值得注意的是，俄烏戰爭發生後，尹錫悅政府重新調整了再生能源和核電的發電比例，讓韓國成為所有研究國家中，最為依賴核能的國家。然而，近期韓國國內政治環境極為動盪，現任總統遭到國會彈劾並停職，為未來的氣候政策走向增加許多不確定性。

中國之碳達峰與一條鞭政策：中國於 2020 年承諾會在 2030 年實現碳達峰，並於 2060 年前實現碳中和。為對 2030 年碳達峰做出準備，其策略強調「務實」進行能源結構轉型、節能增效、產業升級、綠色建築和交通，及循環經濟發展。以電力部門為例，目前以提升燃煤電廠效率、改造機組，建立能吸納再生能源的電網能力為主；長期隨技術進步及成本下降，以太陽光電、風能與核電取補足能源供需缺口。整體來說，中國採取一條鞭方式，透過「行政政策」而非「法律」推動淨零排放。鑒於中國的政治治理體系特色之所在，未來的淨零路徑規劃與落實更可能受其國內產業經濟發展、社會民生情況與國際貿易氛圍影響。

各類評估指標的脈絡與應用：本專題報告選取了《氣候變遷績效指標(CCPI)》、《永續貿易指數(STI)》、《環境績效指標(EPI)》、《能源轉型指標(ETI)》與《淨零排放經濟指數(NZEI)》等五項國際組織或機構制定的淨零排放評比指標，

對其編制脈絡與用途進行了解，俾利正確解讀和應用。CCPI 和 EPI 側重於衡量環境表現，但 CCPI 以問卷方式調查 NGO 對政策的主觀判斷，受訪樣本較少；STI 與 ETI 則多方考量經濟面、社會面等其他轉型面向；NZEI 則著重於衡量一國的去碳化效率。在不同指標下，各國有著截然不同的績效表現，故應多方參考，方能做出正確判斷。即使短期氣候政策有所不足，但其他經濟、社會面向的環境或條件，其實都有助於實現長期的淨零目標。故各界宜就各指標的內涵確認其該領域之發展軌跡，從中探尋精進及提升的方向，不需對特定指標過度解讀，才能全面權衡政策優先程度，逐步提升淨零排放的實際表現。

科學化評估與政策討論有助社會共識形塑：各國均設有明確的階段性目標，並據此設計相應政策；2050 年淨零排放則受技術與各種不確定因素影響，故應參考權威機構預測，設定情境進行模擬分析，並以科學量化方法，進行目標間的權衡，才能有效對淨零路徑做出妥善規劃。各國也都認識到淨零排放需要全體社會的參與才有機會達成，所以完整的評估與政策討論是形塑社會共識不可或缺的過程。然而，國內目前缺乏廣泛、公開與透明的討論。即使主管機關有委託智庫單位進行評估，亦往往作為內部參研之用，其實不利於社會共識的形塑，是殊為可惜之處。

四、改善對策及建言

1. **整體策略：**(1)加強中央與地方協調與合作：目前僅中央主管機關設有常駐編制，地方政府則缺乏相應支持，其他部會亦無專責單位，導致各自為政，缺乏共同行動。(2)完善國內碳定價機制：國內碳定價機制尚處萌芽階段，無法有效引導資源向低碳領域流動。(3)制定部門別轉型路徑：幫助釐清部門責任，輔以多元情境模擬，有助提高政策執行的可行性與協同性。
2. **電力部門：**(1)規劃應考慮限制條件：透過跨部會協調，設計多元目標，以勾勒轉型路徑之範圍，供決策者進行權衡。(2)評估過程透明且客觀：技術參數應以權威機構數據為依據，結果需接受各界質疑與檢視，有助於促進社會共識並導引政策方向。(3)長期路徑滾動調整：基於合理假設，鑑別潛在風險與範疇，並隨技術發展與成本趨勢調整路徑，以貼近實務。(4)設立可管制的階段性目標：協助滾動追蹤與政策檢討，以落實淨零目標。
3. **產業部門：**(1)產業目標與路徑：如歐盟和日本，均制定明確的產業轉型目標和路徑，配合完善的監管和激勵機制，吸引企業及早投入淨零技術。(2)減碳規劃科學化：由於產業部門涉及眾多減碳技術，若以科學模型進行產業部門淨零推演，將有助評估相關策略成效。(3)技術應用與發展：在共通性策略的基礎上，強化數位科技(如智慧製造、數位孿生、AI 等)的應用。
4. **住商部門：**(1)建築能效之規範與評估：將建築能效評估系統納入我國建築技術規則；強制公用建築揭示能效等級，設置罰則以確保執行力；研究建築能

- 效評估與建物所有權範圍的調和，提高能效標示導入不動產交易與房屋租賃市場的可行性；建構全國性建物能效揭露網站，促進自發性行動。(2)金融與補助措施之激勵：對不同能效等級的既有建築，提供差異化的貸款額度與利息補貼，以促進節能更新；為建築設計業提供補助或設計酬金獎勵，激勵創新；並對一定規模且承諾達特定能效等級的新建建築，提供低利貸款支持；為達到特定能效等級的建築提供再生能源設施補助，並依建築規模設定每案補助上限。(3)節能改造與技術支持：建立 ESCO 媒合平台，通過節能績效保證，提升既有商業建築的能效；提供建築節能診斷服務的費用補助；為能效等級較低的既有建築，提供可行的改善建議及實施順序。(4)示範案例推廣：建立示範案例或場域，推廣淨零碳建築應用，提升市場接受度與應用範圍。
5. 運輸部門：(1)制定嚴格的車輛效能標準：提供經濟激勵，推動運具電動化與無碳化發展。(2)鼓勵運輸業者自主減碳：鼓勵業者自主碳盤查，設定減碳目標，並導入綠色管理系統。(3)促進用路人行為改變：通過教育宣導、改善公共運輸，減少私人運具使用率。(4)推動低碳交通區：建立限制高排碳車輛通行的交通區域，中央與地方協力修訂相關法規及自治條例，根據地方特點劃定低碳交通區範圍並制定實施細則。。
6. 農業部門：(1)減碳：協助農戶提升知識技能，消彌技術落差，建立數據整合與共享機制，強化精準農業發展，降低單位農產的碳排放量。(2)增匯：以細緻的國土規劃，解決植樹造林與糧食安全衝突；完善碳匯計算標準，確保其交易的公平與透明度；並透過持續管理確保碳匯的長期效果；提高獎勵措施力道，增加實際參與。(3)循環：完善農業廢棄物循環利用的市場機制；加強回收利用基礎設施；協助個體農戶跨越技術門檻。(4)綠趨勢：加強消費教育，提高消費者對綠色農產品的認可度。
7. 綜觀各國實際表現，台灣在大多數國際淨零排放指標的評比中，均達及格或更好水準。因此，政府若能以主動提供公開且具可比較性的資訊，取代對個別團體訴求的被動式回應，將更有助於促進政策共識的形成。

第一章、緒論

顧洋³、劉致峻⁴

為減緩氣候變遷對全人類的影響，國際能源總署(International Energy Agency, IEA)在 2021 年發佈了具有里程碑意義的報告《2050 年淨零排放：全球能源部門的路線圖(Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector)》，將全球氣溫平均升幅較工業革命前盡力控制在 1.5°C 以內的目標，轉化為全球邁向淨零排放的具體路線，以應對本世紀人類面臨的最大挑戰。

自此全球的潔淨能源技術的佈建以前所未有的速度激增。舉例來說，全球太陽光電的裝置容量增加了近 50%，成長速度超過了 2021 年中的預期軌跡；而電動車的銷售量則增長了 240%，這個趨勢使電動汽車有望在 2030 年佔新車銷售量的三分之二；電池儲能的裝置容量則增加了 200%。如此高的成長速度彰顯了近年清潔能源技術的進步，與其所帶來的成本顯著下降⁵，讓大規模的再生能源推廣成為了現實，這些都是令人欣慰的進展。

然而，根據「聯合國氣候變遷綱要公約(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)」的秘書處於 2023 年所彙整的「首次全球盤點技術報告(Technical Dialogue of the First Global Stocktake)」，近年全球減碳的努力雖然小有成果，但相對於預定的減碳進程與欲減少的升溫幅度，各國的具體努力仍有所不足。當前已實施的政策和行動，離實現預定 1.5°C 以內的目標的溫室氣體減量差距仍高達 203~239 億公噸二氧化碳當量。因此，需要更為積極的減碳目標與路徑，從而在 2030 年之前，將全球溫室氣體排放量比 2019 年減少 43%，並在 2035 年之前進一步減少 60%，才得以在 2050 年之前實現全球零排放目標。

此外，這段期間全球地緣政治環境也經歷了重大變化，俄羅斯於 2022 年入侵烏克蘭，造成的全球能源危機(Global Energy Crisis)，推動了化石燃料需求和供應投資的增加，讓全球的總溫室氣體排放量不減反增，2023 年達到 571 億噸的歷史最高紀錄(Emission Gap Report 2024, UNFCCC)，較 2022 年還增加 1.3%，沒有讓溫室氣體的排放拐點如當初預期般地出現。

³ 台灣科技大學化學工程系講座教授。

⁴ 財團法人中技社資源暨環境研究中心研究員。

⁵ 根據 IEA(2023)，太陽光電、風電、熱泵和電池的加權平均成本，在 2010 至 2022 年降低了近 80%。

這項事實也督促了各機構提出新的路徑，例如 IEA 即在 2023 年底提出了更新後的「2050 年淨零排放路徑(Net-Zero Emission, NZE)」，見表 1-1。由於能源部門溫室氣體排放量約占全球溫室氣體排放量的四分之三，故若要達成淨零目標，能源部門必須在 2050 年完全去碳化。因此，應將太陽光電(25.5%)、風力發電(15.5%)、固態生質能(13.5%)與核能發電(12.4%)作為能源部門去碳化的主力。

表 1-1、IEA 更新的 2050 淨零排放路徑

	2022	2030	2035	2040	2050
總能源供應(EJ)	632	573	535	528	541
再生能源(EJ)	75	166	241	306	385
太陽光電(EJ)	7	35	66	97	138
風力(EJ)	8	25	43	61	84
水力(EJ)	16	20	24	27	30
固態生質能(EJ)	35	55	65	71	73
其他再生能源(EJ)	9	31	43	50	60
核能(EJ)	29	43	53	63	67
煤+CCS(EJ)	0	2	7	10	12
氣+CCS(EJ)	1	6	9	13	18
無 CCS 化石燃料(EJ)	525	353	221	135	59

註：1 艾焦耳(EJ)約為 2.78×10^{11} kWh。

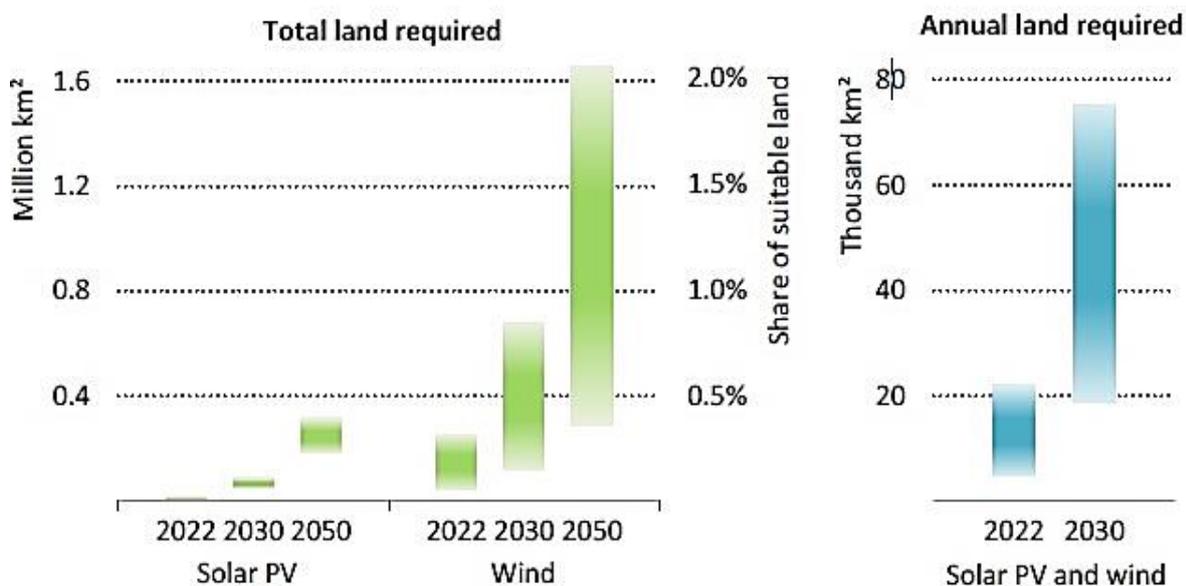
資料來源：International Energy Agency (2023), Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5 °C Goal in Reach.

此外，IEA 在 2022 年 6 月發布的「核能與安全能源轉型(Nuclear Power and Secure Energy Transitions)」報告也提及，因應再生能源滲透率提高趨勢，核能機組與其他可調度資源互補下，能提供電網穩定性、調度靈活性與系統餘裕度。故欲達成 2050 淨零排放目標，核能亦將扮演極具重要的角色。

整體而言，當前全球邁向淨零排放的動力多半還是來自小型的模組化潔淨能源技術，例如太陽光電等，但僅靠這些技術不足以實現淨零排放。IEA(2023)認為還需要更大規模的能源基礎設施，低碳燃料(包含核能)的轉換、碳捕捉與封存(CCS)，以及可發展大規模再生能源的土地資源。舉例來說，一個電廠級(Utility Scale)太陽能光電專案通常佔地 1~3 平方公里，這將使得 2050 年太陽光電將占用超過 2%的土地使用面積；一個 100 MW 陸上風力發電專案則通常涵蓋 5~30 平方公里，甚至比太陽光電還高(見圖 1-1)。而為滿足 NZE 情景的需求，IEA 也推估 2030 年以前需要以每年鋪設約 200 萬公里長的電力輸配電網。

另外，根據 IEA 《世界能源投資報告(World Energy Investment 2024)》，雖然全球 2023 年創紀錄地投資 1.8 兆美元於潔淨能源，甚至預計在 2024 年達到 2 兆美元的規模，使得目前全球對潔淨能源的投資幾乎已是化石燃料的兩倍。並且預估到了 2030 年代，潔淨能源的年投資金額將達到 4.5 兆美元。

然而，全球對潔淨能源投資目標的達成與否，一方面須仰賴富裕的先進國家率先落實其承諾之外，另一方面還須對中國以外的「新興市場和發展中經濟體 (Emerging Market and Developing Economies, EMDE)」提供足夠多的財務支持。在 NZE 情景中，IEA 推估到 2030 年代初 EMDE 的潔淨能源投資額需要激增七倍；換言之，富裕的已開發國家有必要對 EMDE 提供每年約 800 億至 1,000 億美元的優惠資金，才能彌平目前全球潔淨能源投資所存在的嚴重失衡問題。



資料來源：International Energy Agency (2023), Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5 °C Goal in Reach.

圖 1-1、太陽光電與陸上型風力發電的土地使用

而為呼應全球淨零排放的趨勢，我國國發會亦以 2050 年達到淨零排放作為國家轉型目標，並接續公布「台灣 2050 淨零排放路徑及策略總說明」，展現至 2050 年淨零之軌跡與行動路徑；並於今年出台多項政策，有畢其功於一役之勢。國內各界、媒體亦常以諸多國際機構或非營利組織進行我國與其他國家的評比，希望台灣能一舉彎道超車，成為國際淨零排放的楷模。

然而，各國國情與地緣政治環境有別，實際掌握的地理與資源稟賦有極大的不同，經濟發展軌跡也有先後、貧富之分，往往難以反應各國達成淨零目標的難易程度與潛在成本。以台灣來說，由於傳統化石能源稟賦貧乏，即使近年政府投入大量財源投入再生能源佈建，能源自主程度亦難有提升。根據經濟部能源署的資料，台灣的進口能源依存度僅從 2016 年的 97.58% 降至 2023 年 96.19%，期間下降幅度僅 1.39 個百分點。台灣近年經濟發展快速，人民生活水準提升，電氣化的腳步未停。尤其是經濟成長的主力，電子產品及電力設備製造業⁶，的電力消費大幅攀升，由 2018 年的 511.18 億度成長到 2023 年的 632.42 億度，總增幅 23.72%，

⁶ 經濟部能源署編制的能源平衡表自 107 年配合主計總處第 11 次修正行業統計分類，故本章所述之電子產品及電力設備製造業的電力消費數據亦自 2018 年起算。(應納為參考文獻)

年增幅 4.35%，遠高於全國 0.74% 的平均年增幅。然而，考量台灣地小人稠、屬於海島電網缺乏其他備援，風力發電與太陽光電易受地域、天候、季節等不確定性因素影響，核能電廠的鄰避現象，燃氣發電(加裝碳捕捉與封存)的高昂成本，以及海峽恐面臨封鎖的國家安全危機等重重難題，相關淨零排放目標與路徑的制定，與政策與配套措施的設計，應權衡彼此的成本效益、保持兼容各個選項的彈性，才能兼顧氣候責任與國民福祉。

是故，各國邁向 2050 年淨零排放目標時，均規劃出一條適合其自身發展「殊途同歸」的路徑，而本專題報告的出發點，便是嘗試從地理、能資源稟賦、發展程度或具國際競爭角度切入，選擇美國、歐盟、英國、日本、韓國與中國等主要國家，針對其整體政策、電力、產業、住商、運輸與農業等各部門之淨零政策目標、路徑規劃、法規與政策措施規劃進行廣泛且深入之比較分析。另外，還挑選出數個國際機構或組織提出淨零排放評比方法、立論與其背後因果之箇中差異進行了解，提供政府主管機關參考，以梳理出有效治理氣候變遷議題的路徑，並嘗試提出具體的達成淨零排放的相關政策建議。

最後，本專題報告能夠完成，需感謝台大生工系的黃國倉教授與潘述元教授、工研院產科國際所的謝志強組長、中經院的賴靜仙博士與鄭睿合高級分析師、台經院的黃釋偉博士、台綜院的許聖民副所長等學者專家，在百忙之中撥冗協助本議題的研討，在此敬上萬分的謝意。

參考文獻

1. International Energy Agency, (2021), Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector. https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/NetZeroBy2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector_CORR.pdf
2. International Energy Agency, (2023), Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5 °C Goal in Reach. https://iea.blob.core.windows.net/assets/8ad619b9-17aa-473d-8a2f-4b90846f5c19/NetZeroRoadmap_AGlobalPathwaytoKeepthe1.5CGoalinReach-2023Update.pdf
3. International Energy Agency, (2024), World Energy Investment 2024. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/60fcd1dd-d112-469b-87de-20d39227df3d/WorldEnergyInvestment2024.pdf>
4. UNFCCC, (2023), Technical Dialogue of the First Global Stocktake. <https://unfccc.int/documents/631600>
5. UNFCCC, (2024), Emissions Gap Report 2024. <https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2024>
6. 國家發展委員會，台灣 2050 淨零排放路徑及策略總說明。 https://www.ndc.gov.tw/Content_List.aspx?n=DEE68AAD8B38BD76
7. 經濟部能源署，能源統計。 <https://www.esist.org.tw/>

第二章、國家整體策略概述

謝志強⁷

一、前言

全球氣候變遷已成為 21 世紀最重要的環境挑戰之一，各國紛紛制定淨零排放目標以應對這一挑戰。尤其《巴黎協定》要求締約方被要求從 2020 年開始每五年提交一次新的或更新的國家自主貢獻(NDC)，以及邀請提交《21 世紀中葉長期低溫室氣體排放發展戰略》(長期戰略，或 LTS)，揭示其國家的目標與落實路徑。本文將探討美國、歐盟、英國、日本、韓國和中國等主要國家的淨零排放總體政策目標、策略路徑和實施措施。

表 2-1 彙整主要國家溫室氣體排放情形、淨零政策、目標與策略路徑。從排放現況來看，這些國家在 2022 年的人均二氧化碳排放量差異顯著。美國以每人 15.96 噸位居首，遠高於其他國家。其次是韓國每人 11.84 噸、台灣每人 11.38 噸、中國每人 8.71 噸、日本每人 8.42；歐盟和英國的排放量相對較低，分別為每人 7.02 噸 6.13 噸和每人 4.7 噸。比較各國碳排結構可見，各國存在能源結構、產業特性的差異，也凸顯了各國在減碳過程中面臨的不同挑戰。

淨零排放目標設定方面，大多數國家選擇了 2050 年作為實現淨零排放的目標年。然而，中國則將目標年定在 2060 年，反映出其作為發展中大國面臨的獨特挑戰。各國還設定了 2030 年的中期目標，以確保減碳進程的持續推進。例如，美國計劃到 2030 年將溫室氣體淨排放比 2005 年減少 50-52%，英國的目標是比 1990 年減少 68%，而日本則是比 2013 年減少 46%。這些中期目標為各國提供了明確的行動指引，也有助於國際社會監督各國的減碳進展。

在政策法源方面，各國採取了不同的立法或行政措施來確保淨零目標的法律約束力。美國通過總統行政命令，並發布了長期戰略文件；歐盟制定了《歐洲氣候法》；英國則通過了《氣候變遷法》；日本有《地球溫暖化對策推進法》；韓國頒布了《碳中和基本法》；而中國則是在《關於完整準確全面貫徹新發展理念做好碳達峰碳中和工作的意見》中提出策略方向。這些法律和政策文件為各國的減碳行動提供的制度基礎。

在具體的策略路徑方面，各國雖然有其特色，但也呈現出一些共同趨勢：所有國家都強調發展清潔能源和提高能源效率。美國提出電力脫碳，英國強調發展可靠度高、低成本的電力系統，日本和中國都提到了發展非化石能源。各國都認

⁷ 工業技術研究院產科國際所組長。

表 2-1、主要國家淨零排放目標與重點政策

	2021 年 溫室氣體排 放(GtCO ₂ e)	溫室氣體排 放全球占比	2021 年 人均碳排 (tCO ₂ e/人)	2021 年 部門碳排	淨零目標 年份	淨零目標 政策法源	目標內容	策略路徑
美國	5.29	11.13%	15.96	能源(86.79%) 農業(6.52%) 產業(4.33%) 廢棄物(2.37%)	2050	拜登政府 行政命令 政策文件	2030 溫室氣體淨排 放比 2005 年減少 50-52%；2050 前 實現溫室氣體淨零 排放	《美國 2050 年前 實現溫室氣體淨零 排放的長期策略路 徑》五個關鍵轉 型、四個戰略支柱
歐盟	3.14	6.22%	7.02	能源(80.68%) 農業(11.67%) 產業(4.46%) 廢棄物(3.19%)	2020	歐洲氣候 法	2030 溫室氣體淨排 放比 1990 年減少 55%；2050 實現溫 室氣體淨零排放	《歐洲綠色協議》 氣候中和七大路徑
英國	0.41	0.87%	6.13	能源(77.63%) 農業(11.85%) 產業(3.69%) 廢棄物(3.84%)	2050	氣候變遷 法	2030 溫室氣體淨排 放比 1990 年減少 68%；2050 實現溫 室氣體淨零排放	《淨零策略：重建 更環保未來》四項 關鍵原則、七大部 門路徑
日本	1.06	2.24%	8.42	能源(91.86%) 農業(1.96) 產業(5.6%) 廢棄物(0.59%)	2050	地球溫暖 化對策推 進法	2030 溫室氣體排 放比 2013 年減少 46%；2050 實現溫 室氣體淨零排放	《地球溫暖化對策 計劃》五大部門將 低能源碳排、非能 源碳排與其他溫室 氣體四大作法

	2021年 溫室氣體排 放(GtCO ₂ e)	溫室氣體排 放全球占比	2021年 人均碳排 (tCO ₂ e/人)	2021年 部門碳排	淨零目標 年份	淨零目標 政策法源	目標內容	策略路徑
南韓	0.61	1.29%	11.84	能源(83.62%) 農業(2.19%) 產業(12.85%) 廢棄物(1.34%)	2050	碳中和基 本法	2030年溫室氣體排 放比2018年減少 40%；2050年碳中 和	《韓國碳中推進戰 略》
中國	12.30	25.88%	8.71	能源(84.19%) 農業(4.72%) 產業(9.48%) 廢棄物(1.61%)	2060	強化應對 氣候變化 行動—中 國國家自 主貢獻	2030前實現二氧化 碳排放達峰；2060 前達到碳中和	十大領域碳達峰方 案重點
台灣	0.28	n.a.	11.38	能源(90.55%) 農業(1.09%) 產業(7.46%) 廢棄物(0.9%)	2050	氣候變遷 因應法	2050年溫室氣體淨 零排放	「能源、產業、生 活、社會」等四大 轉型、「科技研 發」、「氣候法制」 兩大治理基礎、 「十二項關鍵戰 略」

資料來源：各國碳排基本數據來自 Climatewatch 網頁、2023 年中華民國國家溫室氣體排放清冊報告

識到產業轉型的重要性，也多制定產業綠色轉政策。此外交通、建築與碳匯也是共通的方向，各國都認識到需要全社會的共同努力。

整體來說，這些主要國家的淨零排放政策呈現出共性與個性並存的特點，同時，各國也根據自身的國情和發展階段，制定了符合本國實際的具體措施。這種多樣性反映了全球應對氣候變化的複雜性，也為各國互相學習和借鑒提供了豐富的經驗。後續的分析中，將深入探討每個國家的具體政策和措施，並探討這些經驗對台灣制定和實施淨零排放政策的啟示。期能為全球應對氣候變化的共同努力提供有益的參考。

二、主要國家淨零排放國家路徑

(一) 美國

1. 政策演進

美國的氣候變遷政策與淨零排放路徑經歷了一個複雜且反覆的過程，主要受到政黨輪替和國際協議的影響。這段歷程可以追溯到 1992 年，當時喬治·H·W·布希總統在里約熱內盧地球峰會上簽署了《聯合國氣候變化框架公約》，為國際社會減少溫室氣體排放奠定了基礎。然而，美國對氣候變遷的承諾一直隨著執政黨派的更迭而搖擺不定。1997 年，克林頓總統同意根據《京都議定書》將溫室氣體排放量降至比 1990 年水平低 7%，但由於未獲得美國參議院批准，該協議並未對美國產生約束力。2001 年，喬治·W·布希總統更宣布美國不會加入《京都議定書》，理由是該議定書豁免了發展中國家的強制性減碳義務。

直到 2009 年歐巴馬時期，美國才再次展現出對應對氣候變遷與能源低碳轉型的決心。推出了《復甦與再投資法》，將再生能源、節約能源、電網及碳捕捉與封存技術納為重要的投資方向。同期間的《潔淨能源與安全法案》首度以立法方式限制溫室氣體排放，建立了排放配額市場，並提出了具體的減碳目標。

2015 年，歐巴馬總統根據《巴黎氣候協定》承諾到 2025 年將美國排放量削減至比 2005 年水平低 26% 至 28%。同年，《潔淨能源計畫》對電業碳排放作出限制，要求 2030 年碳排放量較 2005 年減少 32%。2016 年《美國深度去碳化世紀中策略》提出第一份長期戰略報告，專注於到 2050 年將淨溫室氣體排放量減少到比 2005 年水平低 80-90%。然而，這些政策面臨來自共和黨、州政府、煤炭企業和工商團體等阻力。川普上任後，更是撤銷或擱置了多個歐巴馬簽署的相關環保行政命令與備忘錄。

儘管政策執行面臨挑戰，美國在能源結構上仍取得了顯著進展。在歐巴馬政府時期，美國成功開採頁岩氣，使天然氣價格大幅下降，促使電力業者以燃氣電廠取代退休除役的燃煤電廠。2020 年美國的天然氣發電提升至 40%，再生能源提升至 21%，核電持平為 20%，燃煤發電迅速下降至 19%。

2021年，拜登政府宣布美國的新目標，即到2030年實現經濟範圍內淨溫室氣體污染比2005年水平減少50-52%。美國重新加入《巴黎協定》，並由美國國務院和美國總統行政辦公室於2021年11月在華盛頓特區發布《美國2050年前實現溫室氣體淨零排放的長期策略路徑》，設定了在2050年前實現經濟範圍內的淨零排放的目標。

2022年8月通過《通膨削減法案(Inflation Reduction Act, IRA)》為其氣候政策推動的核心。該法案將投入近4,000億美元的聯邦資金於清潔能源和氣候投資，包括清潔能源項目、電動車和節能家居改善的稅收抵免。其目標是在2030年前顯著降低國家的碳排放量，同時提升美國的全球經濟競爭力、創新能力和工業生產力。此外，2021年11月的《兩黨基礎設施法案》也為清潔能源基礎設施分配大量資金，包括充電站、電網現代化及清潔能源研發等。

2. 淨零策略

(1) 五個轉型關鍵

- 電力脫碳：在太陽能 and 風能成本下降、政策和消費需求的推動下，近年已加速清潔電力應用，目標在2035年實現100%清潔電力。
- 終端用途電氣化和轉向清潔燃料：將多數能源需求可負擔與高效率的電氣化，從車輛到建築和工業流程。在電氣化面臨挑戰的領域，如航空、航運和某些工業製程，優先考慮氫氣和可持續生質燃料等。
- 減少能源浪費：以更具效率的技術，用更少的能源來提供更好的服務，從家電到新建和既有建築效率及製程能效改善。
- 減少甲烷和其他非二氧化碳排放：目標在2030年將全球甲烷排放量至少減少30%，推動創新技術來深度減碳。
- 擴大二氧化碳去除規模：2050年前將能源生產排放降至近零，對於難以完全消除的溫室氣體，以自然碳匯技術去除。

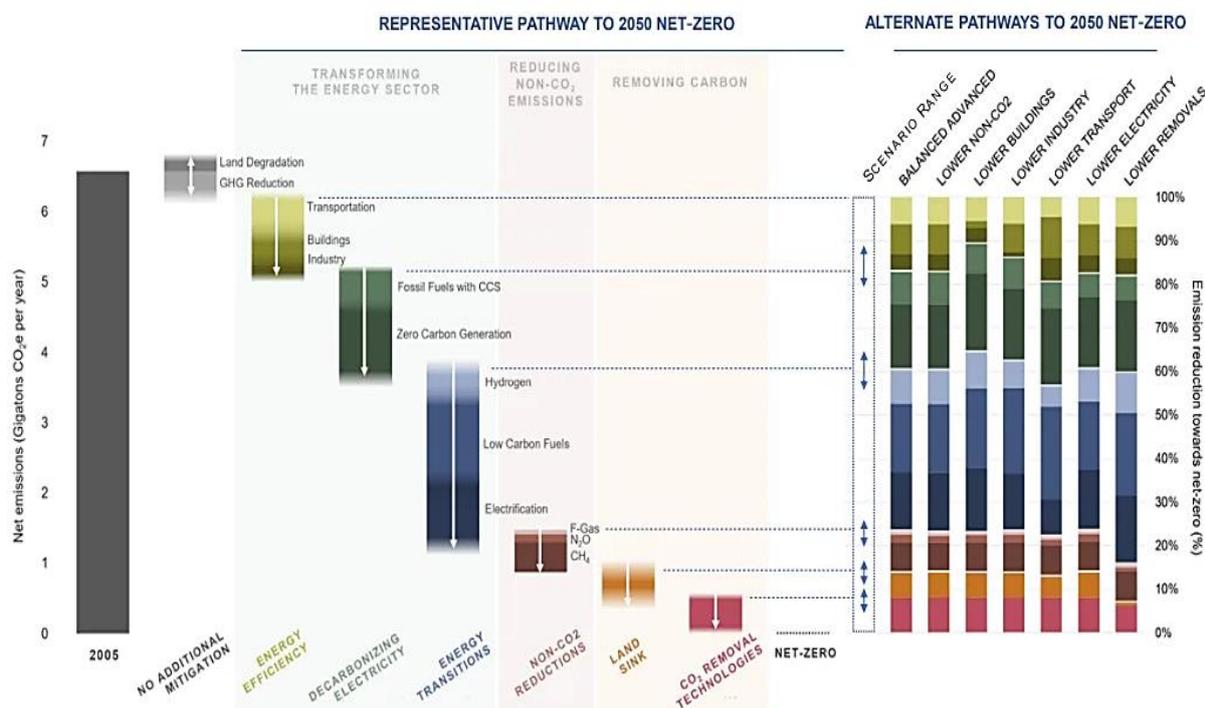
(2) 四個戰略原則

- 聯邦領導：制定和執行既有和新的法規，支持所有部門部署清潔技術的投資和激勵措施，強化自然和農林用地的減碳政策，催化市場轉型的夥伴關係，將氣候因素納入金融市場，包括加強氣候風險披露。
- 創新：支持研究、開發、示範，及聯邦、地方政府和私營部門的採購，快速部署具競爭力的技術。將新的無碳技術和製程快速導入市場。
- 非聯邦層級領導：氣候行動應涵蓋所有層級政府。

- 全社會行動：利用美國創新力和多樣性優勢的擴大研究、教育和實踐。藉由全社會的集體努力，包含大學、研究機構、投資者、企業和其他非政府組織，實現淨零轉型。

3. 淨零路徑

《美國 2050 年前實現溫室氣體淨零排放的長期策略路徑》指出，美國淨零排放路徑將取決於未來三十年的技術進步、具體政策、經濟成長、人口變化和市場動態。能源系統變革將推動約 70% 的整體減碳，透過減少浪費、電力脫碳和能源轉型，每年減少 4.5 Gt-CO₂e。每年減少非二氧化碳氣體 1 Gt-CO₂e，同時土地碳匯和去碳技術將提供約 1 Gt-CO₂e 的負排放。轉型路徑如圖 2-1 所示。



資料來源：The Long-Term Strategy of the United States: Pathways to Net-Zero Greenhouse Gas Emissions by 2050.

圖 2-1、美國淨零路徑

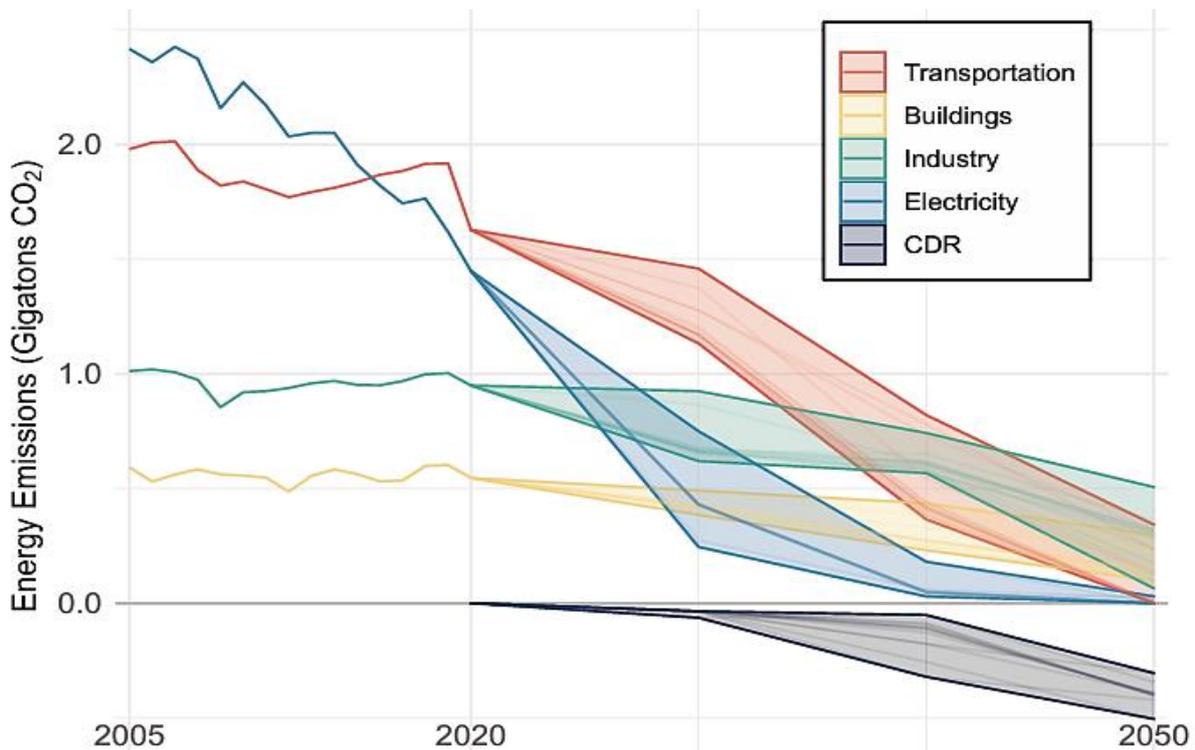
美國已設定 2030 年將其淨溫室氣體排放量減少至 2005 年 50-52% 的目標，並規劃五大部門重點推動方向。聯邦與地方政府合作，快速部署新的無碳技術和設施，並確保符合對工人、公共和環境保護的標準，為 2030 年後進一步減碳奠定基礎。還增加美國製造業技術創新投資，以降低未來所需新技術的成本，與相關供應鏈，並培訓所需的勞動力。圖 2-2 為美國淨零排放路徑下各部門二氧化碳減排規劃⁸。

美國政府亦於《美國 2050 年前實現溫室氣體淨零排放的長期策略路徑》報告中，探討不同達到 2050 年淨零目標的情境下，技術和政策策略之間的平衡可

⁸ 由於農業部門排放量佔比較小，且其排放多為非二氧化碳溫室氣體，故沒有納入。

能變化。其結果顯示，2030 年前十年的技術假設和政策目標在很大程度上已經明確，但 2030 年之後任何單一技術或部門將如何演變存在越來越多的不確定性。

整體而言，美國 2050 淨零路徑包括提高能源效率、推廣清潔能源和電氣化、減少各類溫室氣體排放，及增強自然和藉由技術的二氧化碳移除。各部門的貢獻範圍：能源轉型占 34-44%(氫能 5-10%、低碳燃料 16-21%、電氣化 8-15%)；電力脫碳占 22-25%(再生能源 15-18%、配備碳捕捉與封存的火力發電 6-8%)；能源效率占 10-19%(交通運輸 5-7%、建築 2-9%、工業 1-5%)；非二氧化碳減碳占 9-10%(主要來自甲烷、氧化亞氮和氟化氣體減碳)；二氧化碳移除占 6-8%；土地碳匯占 1-6%。



資料來源：The Long-Term Strategy of the United States: Pathways to Net-Zero Greenhouse Gas Emissions by 2050.

圖 2-2、美國 2050 年各部門二氧化碳減排路徑

4. 未來發展

美國政策形成方式在聯邦政府層面，法律幾乎完全由立法制定。這類立法源自美國國會通過的國會法案；這些法案要麼由總統簽署成為法律，要麼在總統否決後由國會通過。此外總統可以根據國會授予的自由裁量權，或根據該職位處理某些具有法律效力事務的固有權力，發布行政命令。

美國已設定在 2050 年前實現淨零排放的目標，包括主要溫室氣體(但不包含國際航空與海運)。美國計劃在未來三十年對多個關鍵領域投資，包括清潔能源、交通和建築電氣化、工業轉型、減少甲烷和其他非二氧化碳氣候污染物，及加強自然和農林用地。美國認識到未來十年的行動對加速現有減碳趨勢十分重要，因

此將重點放在快速擴大新技術的部署，如電動車和熱泵，以及為關鍵系統(如國家電網)建設基礎設施。此外，電力部門的脫碳被視為關鍵，結合終端用途的廣泛電氣化，來實現 2030 年和 2050 年的目標。除聯邦政府外，州政府也陸續訂定淨零時程目標、氣候行動計劃和政策，強化聯邦層面的不足，如夏威夷州、加州與馬里蘭州於 2045 達成淨零；克羅拉多等州則設定 2050 淨零目標。

由歷史經驗與現今大選局勢可見，未來美國淨零政策面臨重大挑戰，主要源於兩大政黨在態度上的顯著差異。總統大選為長期氣候承諾帶來了相當大的不確定性。民主黨政府通常推動更積極的氣候行動，如拜登政府加入《巴黎協定》與推出《通膨削減法案》等政策。相比之下，共和黨政府往往對氣候變遷政策持更為懷疑態度，傾向於減少對產業的管制，支持傳統能源發展。這種分歧可能導致政權更迭時的政策轉向，並影響長期氣候策略的連續性和有效性，連帶可能影響投資者對清潔能源與氣候專案的信心。

(二) 歐盟

1. 政策演進

歐盟的氣候政策源自 1987 年《單一歐洲法案》中的環境新條款，賦予理事會與歐洲議會共同決定環境法律的權力。1990 年代，歐盟開始制定專門的氣候政策。儘管碳/能源稅提案遭成員國阻擋而失敗，但歐盟仍建立了廣泛的減緩政策措施和治理工具組合，包括具有法律約束力的溫室氣體(GHG)減碳目標，以及涉及排放交易、再生能源、能源效率等方面的政策。2002 年，歐盟批准《京都議定書》，為制定全面的溫室氣體減碳政策奠定了基礎。

2000 年代中期，氣候變化議題在歐盟日益政治化。由成員國領導人組成的歐洲理事會開始每十年設定減碳目標，提升了氣候變遷政策的決策層級。2007 年，歐盟提出"20-20-20"目標，設定 2020 年排放量減少 20%、再生能源占比 20%，及能源效率提升 20%的目標。2009 年，歐盟通過《氣候與能源方案》，包含六項重要立法，涵蓋排放交易體系、再生能源等領域。這些努力使歐盟在 2012 年超額完成 8%的減碳目標，並提前達成 2020 年 20%目標，同時設定 2050 年前將溫室氣體排放減少 80-95%的長期目標。

2010 年代起，歐盟採取更長遠積極的布局。2011 年《2050 年邁向競爭性低碳經濟路線圖》，闡述達成 2050 減碳目標及各部門的具體做法。2014 年《2030 年氣候與能源框架》設定 2030 年溫室氣體減量 40%、再生能源占比 27%，及能源效率提升 27%的目標。2018 年，將上述目標被納入歐盟法律，並將再生能源和能源效率目標分別提高到 32%和 32.5%。這些目標構成歐盟在《巴黎協定》下的國家自主貢獻(NDC)承諾的基礎。

2019 年，歐盟發布《歐洲綠色協議》，為實現 2050 年氣候中和目標設定了全面框架。2021 年歐洲議會通過了《歐洲氣候法》，該法案將歐盟 2030 年淨溫室氣

體排放減少目標提高至至少 55%，並將 2050 年氣候中和目標納入法律約束。《氣候法》是歐洲綠色協議的核心，該協議為歐盟制定了路線圖。為實現其宏大的氣候中和目標，歐盟於 2023 年提出了一項全面立法，稱為《55 方案(Fit for 55)》。該方案包括一系列相互關聯的修訂法律和新提議的氣候能源法案。

2. 淨零策略

55 方案整合歐盟的氣候、能源、運輸和稅收的相關法規政策，能夠在 2030 年前將溫室氣體淨排放量至少減少 55%，到 2050 年實現溫室氣體淨零排放。過程確保經濟成長與資源使用脫鉤，且讓歐盟轉變為現代化、資源高效和具競爭力的經濟體。

(1) 碳定價：排放交易體系與碳邊境稅

碳定價和排放上限確保污染者付費，並作為投資綠色轉型的財源。歐盟排放交易體系(EU ETS)針對能源密集產業和發電部門排放配額上限和交易系統的碳市場。自 2005 年導入以來，歐盟排放量已減少 41%。歐盟近期已陸續擴大其機制，將在 2027 年納入建築、公路運輸和海運等部門。並成立一個適用於道路運輸、建築物及小型排放源的碳定價系統。此外，歐盟於 2023 年 4 月通過碳邊境調整機制(CBAM)，針對碳密集型產業的進口產品徵收碳邊境稅。減少將生產轉移到環境標準較低的國家的「碳洩漏」的風險。

(2) 擴大成員國減碳目標與範疇

依據分擔規則為成員國設定具約束力的排放目標，涵蓋未被 EU ETS 或「土地利用、土地利用變化和林業規則(LULUCF)」涵蓋的部門。特別是將建築、農業和廢物管理減碳目標從 29% 提高到 40% (相較於 2005 年) 並轉化為每個成員國的 2030 年目標。

(3) 社會氣候基金

把排交易收入用於氣候和能源項目及社會，以解決排放交易體系對社會分配的影響。該基金將納入歐盟預算，以支持最脆弱的公民和中小企業進行綠色轉型，協助他們應對能源成本上漲，並確保能源轉型的公平性。另外，最新與電力市場有關的立法倡議也加強了能源消費者的權益。

(4) 擴大運輸部門的溫室氣體減碳

要求新車和小型貨車在 2035 年實現淨零放；增加替代燃料硬體設施建置，包含電動車充電站和替代燃料車輛的加油站數量。2026 年前取消航空業的免費配額，促進航空永續燃料的使用。逐步減少船舶的溫室氣體排放，到 2050 年達 80%，推動清潔海運燃料使用。

(5) 更新再生能源和能源效率目標

修訂再生能源指令，將2030年再生能源目標提高到42.5%。修訂能源效率指令，將2030年將最終能源消費相較於2020年的預測減少11.7%。

(6) 建築能源效率提升

2024年修訂建築能源性能指令，建築部門在2030和2035分別減少16%、20-22%的能源消費；2030年新建建築淨零排放；既有建築是在未來十年內將翻新率提高至少一倍；2050年實現既有建築淨零排放。公部門則設定每年至少3%的建築翻新目標。另2027年起將建築納入排放交易。

(7) 建立氫氣和去碳氣體供應市場

提出新規則以降低天然氣市場的碳足跡，促進歐盟在2030年從天然氣轉向可再生和低碳氣體。

(8) 循環經濟

歐盟委員會於2020年3月提出了歐盟循環經濟行動計劃，旨在促進循環經濟流程、推動可持續消費並確保減少廢棄物。2022年9月，歐盟議會批准了實施歐盟新的工業戰略，以幫助企業克服與疫情相關危機，並實現循環經濟轉型。2023年12月，歐盟議會批准歐盟關鍵原材料法案，確保歐洲綠色轉型的材料供應，優先考慮再利用和回收。這些措施共同構成了歐盟推動循環經濟和永續發展的綜合策略。

(9) 引領綠色工業革命創造清潔技術和產品市場

2023年提出綠色工業協議旨在提升歐洲淨零排放產業的競爭力，並加速向氣候中和轉型。以2030年淨零排放技術部署至少達到40%為目標，將歐洲打造成清潔技術的中心，擴大清潔製造規模，創造綠色就業機會，吸引投資。

3. 淨零目標與成員國減量責任

歐盟委員會於2014年發布《2030年氣候與能源政策綱要(A 2030 Framework for Climate and Energy Policies)》，提出歐盟2030年溫室氣體排放需較1990年減量40%，其中交易部門需較2005年減量43%、非交易部門需減量30%。歐盟為實現氣候中和，於2021年提出「55方案」，將溫室氣體排放目標修正至2030年較1990年減量55%之目標。

歐盟於2023年3月透過《減量責任分配規則》修正案，將非交易部門2030年的目標提高至較2005年減量40%(原30%)，因考慮各成員國的減碳起點與能

⁹ 歐盟的溫室氣體減量目標分別針對交易部門和非交易部門進行管理。交易部門包括大型發電業、工業和航空部門，這些部門主要透過歐盟碳交易制度(EU Emissions Trading System, EU ETS)進行管制。非交易部門則包括住宅、農業、航空以外的交通和廢棄物管理，這些部門的減量目標透過「減量責任分配規則」(Effort Sharing Regulation, ESR)來確立，並對成員國設定具有約束力的溫室氣體排放減量目標。

力有所差異，故依據各國人均 GDP 和成本效益分配各自的減量責任，範圍落在 10%~50% 間。各成員國減量責任如表 2-2 所示。該規則也規範了 2021-2030 年間各成員國每年的年度排放配額(Annual Emission Allocations, AEAs)應遵循之線性減排路線，各成員國之減量目標皆會與歐洲溫室氣體減排計畫大抵符合。

表 2-2、歐盟各成員國減量責任

成員國	2018 年 目標	2023 年 目標	成員國	2018 年 目標	2023 年 目標
比利時	-35%	-47%	立陶宛	-9%	-21%
保加利亞	-0%	-10%	盧森堡	-40%	-50%
捷克	-14%	-26%	匈牙利	-7%	-18.7%
丹麥	-39%	-50%	馬爾他	-19%	-19%
德國	-38%	-50%	荷蘭	-36%	-48%
愛沙尼亞	-13%	-24%	奧地利	-36%	-48%
愛爾蘭	-30%	-42%	波蘭	-7%	-17.7%
希臘	-16%	-22.7%	葡萄牙	-17%	-28.7%
西班牙	-26%	-37.7%	羅馬尼亞	-2%	-12.7%
法國	-37%	-47.5%	斯洛維尼亞	-15%	-27%
克羅埃西亞	-7%	-16.7%	斯洛伐克	-12%	-22.7%
義大利	-33%	-43.7%	芬蘭	-39%	-50%
賽普勒斯	-24%	-32%	瑞典	-40%	-50%
拉脫維亞	-6%	-17%			

資料來源：European Commission (2023), Effort sharing 2021-2030: targets and flexibilities.

以德國為例，其於 2019 年透過、2021 年修訂的《氣候行動法》(Climate Action Law)中的大部分內容即源自於歐盟「減量責任分配規則」下的立法義務，《氣候行動法》法案將德國國家溫室氣體減量目標¹⁰入法，並根據此減量軌跡設定各部門減量目標，排放量依線性分配至各年度，若某年未達成或超過減量目標，則將差異值均勻分配至該部門剩下的年度排放量。

4. 未來發展

歐盟由三個共同決策政策的機構組成：歐盟委員會、歐洲議會和歐洲聯盟理事會。歐盟委員會是歐盟的行政機構。它擁有提出立法提案的專有權。一旦發布提案，由 705 名直接選舉產生的歐洲議會議員組成的歐洲議會，以及由成員國部長組成的歐洲聯盟理事會，就開始就提案進行談判。歐盟氣候政策在最終達成協議之前，要經過歐盟機構內部和機構之間的內部談判、討價還價和妥協過程。因此過往氣候政策制定並不順遂。近年，氣候變化在歐盟已經成為一個價值問題，分歧主要圍繞政策回應的形式和類型。歐盟綠色協議作為一個總體政策框架的承

¹⁰ 相關目標包含：2030 年溫室氣體排放量較 1990 年減量 65%、2040 年減量 80%、2045 年達成溫室氣體淨零排放、2050 年達成溫室氣體負碳排放。

諾，已突破過往歐盟氣候政策和治理的限制，但在歐盟成員國不同政治、經濟與環境條件下如何落實仍將是一大挑戰。

(三) 英國

1. 政策演進

英國是全球最積極發展氣候變遷政策的國家之一。1990年代後期，英國積極參與國際減碳公約，並制定了比《京都議定書》2012年相較1990年減量12.5%，更為積極的20%減碳目標。2008年，英國政府通過《氣候變遷法》，將溫室氣體減量目標入法，設定2050年溫室氣體排放較1990年減少80%的目標。該法案同時導入碳預算機制，政府必須從2008年至2050年，根據氣候變遷獨立委員會的建議，提前十二年制定每五年一次的碳預算，迄今已經完成第六個碳預算周期。

2019年英國修訂《氣候變遷法》，英國成為世界上第一個通過法律承諾在2050年達成淨零排放目標(該法原訂2050年排放較1990年減80%目標)，使英國成為G7第一個訂定2050年碳中和的國家。2020年12月，英國在脫離歐盟後，提交了其首個獨立的國家自主貢獻(NDC)，承諾到2030年將排放量減少至1990年水平的68%以下。英國政府於2021年4月宣布了更進一步的目標：到2035年將排放量降低78%。

英國的淨零目標涵蓋了氣候行動追蹤認為能提高透明度、目標架構和範圍的大部分關鍵要素，並達到「良好實踐」的評比。英國的淨零目標涵蓋了所有部門和溫室氣體(包括國際航空和航運排放)，並透過五年一度的法定「碳預算(Carbon Budget)」提供清晰的實施時間表。

2. 淨零策略

英國的淨零策略建立在四大核心原則之上，內涵中展現該國在推動淨零轉型時平衡經濟發展、社會公平和環境保護的努力。四大原則分別為：

- (1) 尊重消費者選擇，不強制更換現有設備；
- (2) 實施公平的碳定價，使最大污染者承擔主要轉型費用；
- (3) 通過政府支持保護弱勢群體；
- (4) 與企業合作推動技術創新，降低低碳技術成本。

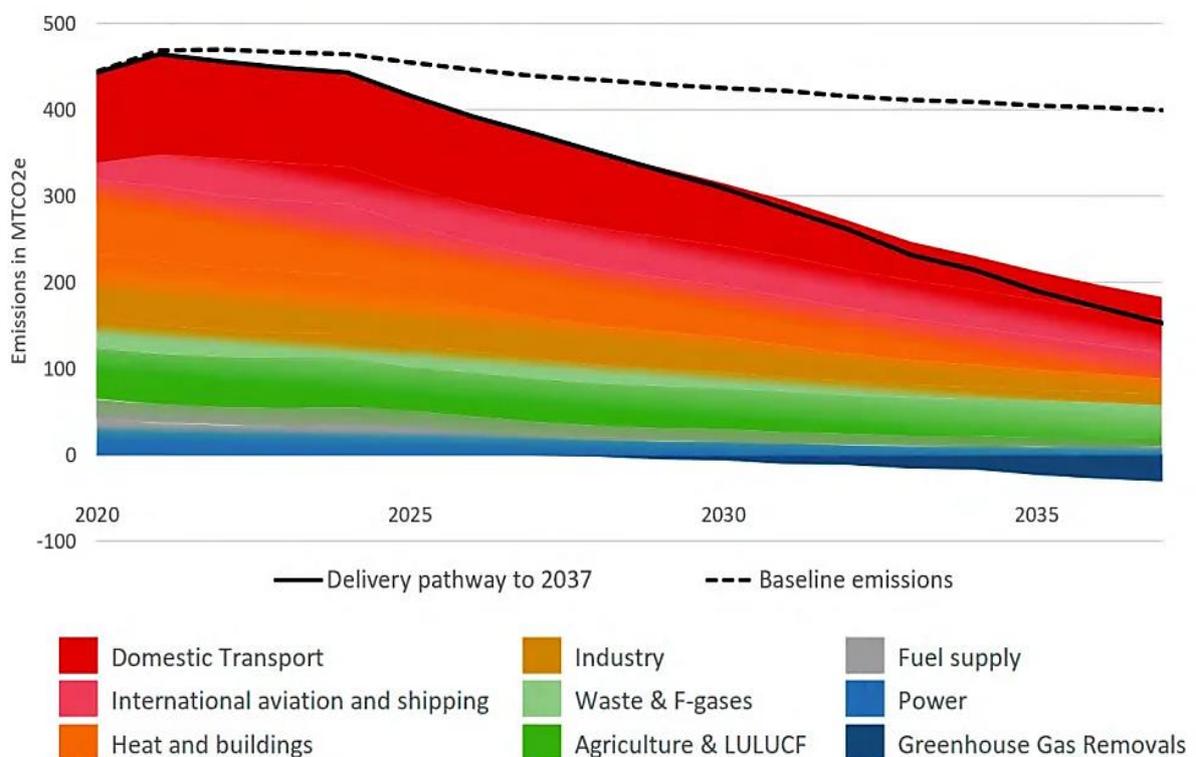
2021年，保守黨政府公布《淨零策略：重建更環保未來(Net Zero Strategy: Build Back Greener)》。制定了各項政策和提案，旨在英國所有部門脫碳，以達成2050年淨零排放目標。英國期望提早採取行動，避免氣候變化失控後需付出龐大應對成本，並在減少排放過程中，利用離岸風電市場、油氣與金融產業，以及離岸風電等潔淨科技等優勢，掌握機會振興離開歐盟後的經濟發展，促進就業等多

重效益。策略依據時任首相的《綠色工業革命十點計劃》願景為基礎，制定應對策略及一系列政策措施。

3. 淨零路徑

英國特別強調在淨零過程中需要公私部門多方行動、快速執行和管理重大不確定性，因此需要採取系統方法來制定政策，應對高度複雜性的淨零推動議題，促進創新和理想解決方案的開發，並確保在需要時做出決策，基於當時可獲得的最佳證據，並考慮盡可能全面的因素。

考慮各部門的減碳潛力英國政府在《淨零策略：重建更環保未來》中，提出了三種現階段到 2037 年(第六次碳預算)排放情境，以探索不同技術路徑的可能性，而未來將視技術演進與成本下降情況，來達成 2050 年淨零目標。(見圖 2-3)



資料來源：BEIS, “Net Zero Strategy: Build Back Greener,” 2021.

圖 2-3、英國淨零路徑

第一種情境「高度電氣化」著重於廣泛的電氣化應用。藉由再生能源，以及其他低碳發電方式，包括核能和帶有碳捕獲、利用與封存的天然氣，大規模實現潔淨電力與氫氣的供給；道路交通和建築等部門將接近零排放，個人和重型貨物運輸可能存在少量剩餘排放；大多數建築使用電力供暖，其餘使用連接的低碳區域供熱網絡；工業部門通過綠色技術(電力、氫氣和碳捕獲、利用與封存)和能源效率措施達到接近零排放；航空、農業和廢棄物領域仍存在剩餘排放，但以永續航空燃料、更高效的農業和減少垃圾填埋等方式降低，並透過大規模造林以及移除工程來平衡。

第二種情境「高資源」探討了更廣泛低碳氫能的使用。藉由更大規模低碳氫能的生產，來滿足大部分建築供熱需求；交通因重型運輸氫能更接近零排放。更高規模的造林，提供低碳氫生產的空間；難以脫碳的航空和農業剩餘排放仍需透過移除工程來平衡。

第三種情境「高度創新」則假設航空業能夠實現更低的剩餘排放，同時碳捕獲技術效率提高，在 2040 年代部建更多的直接空氣碳捕獲與封存。大規模永續燃料和零排放飛機使得運輸、建築、農業和工業可以降低脫碳壓力，同時降低低碳電力和氫能生產需求。

這三種情境都強調了不同技術和策略的重要性，包括再生能源、核能、碳捕獲、氫能和負排放技術等。實現淨零排放的確切技術和能源組合現在無法確定，路徑將隨著時間推移和新技术的創新而變動。然而，這些情境為政策制定和技術發展提供了重要的指導方向。

4. 未來發展

英國的政治系統中，議會是最高立法機構，政府對議會負責。議會是兩院制，包括下議院和上議院。當兩院對法案的內容達成一致時，將其呈現給君主以獲得皇家同意。一旦獲得皇家同意，法案就成為議會法案並成為法律。由於政策制定的權力下放，蘇格蘭、威爾士和北愛爾蘭的行政部門各自負責實施英國氣候變化策略。英國在脫歐後面臨經濟發展的極大挑戰，因此視淨零為一大轉機，並獲的多數政黨一致的支持。

整體而言，為實現淨零目標，英國以《氣候變遷法》建立完善的治理機制，「氣候變化委員會」作為獨立法定行政機構，提供排放目標建議，並向議會報告減碳進展及應對氣候變化的適應準備。政府的碳預算則履行《氣候變遷法》規定的法定義務，制定一系列建議和政策，並列出相關時間表和交付風險。英國以《淨零策略：重建更環保未來》為核心，陸續制定一系列政策。以能源部門為例，提出《能源淨零白皮書》、《能源安全戰略》及《能源法案》，旨在投資自有能源，維持多樣性和韌性，提供更清潔、更實惠和更安全的能源系統。此外，還制定了《工業脫碳戰略》、《供暖和建築戰略》和《運輸脫碳計畫》等部門策略，並提出《氫能戰略》及《綠色金融戰略》。由於英國對於淨零有高度的企圖心，明確的治理機制、政策與資金的投入，預期未來將依規畫步調持續推動。

(四) 日本

1. 政策演進

日本的溫室氣體政策發展始於 1997 年《京都議定書》通過後，隨著國際氣候變化框架的演進而逐步發展。1998 年，日本制定《地球暖化對策推進法》，作為應對全球暖化的首個政策框架，強調國家、地方、企業及國民的共同努力。2002 年批准《京都議定書》後，日本制定了具體實施計畫並建立相應體制，以確保達

成其國際承諾。2005年《京都議定書》生效後，日本引入了排放計算和報告制度，並於2006年設立了政府和法人使用的信用額度登記與機制。日本持續完善其減碳目標和策略，如2008年制定的企業排放抑制指導方針。

2013年，日本推出新的《地球暖化對策計劃》取代《京都議定書》目標，納入了新的溫室氣體種類。2020年10月時任首相菅義偉宣示日本2050年碳中和目標，隨後日本國會於2021年5月透過「地球溫暖化對策推進法」修正案，納入2050年碳中和目標。日本內閣會議再於2021年10月通過《地球暖化對策計畫》修訂案，作為推動溫室氣體減量目標的策略指南。該計劃旨在2030年度將溫室氣體排放量減少46%(相比2013年度)，並在2050年達到淨零排放。2022年，設立脫碳化支援機構，提供資金支持以減少溫室氣體排放。2024年，日本進一步強化了聯合信用機制的管理，並促進地方再生能源的導入。

2. 淨零策略

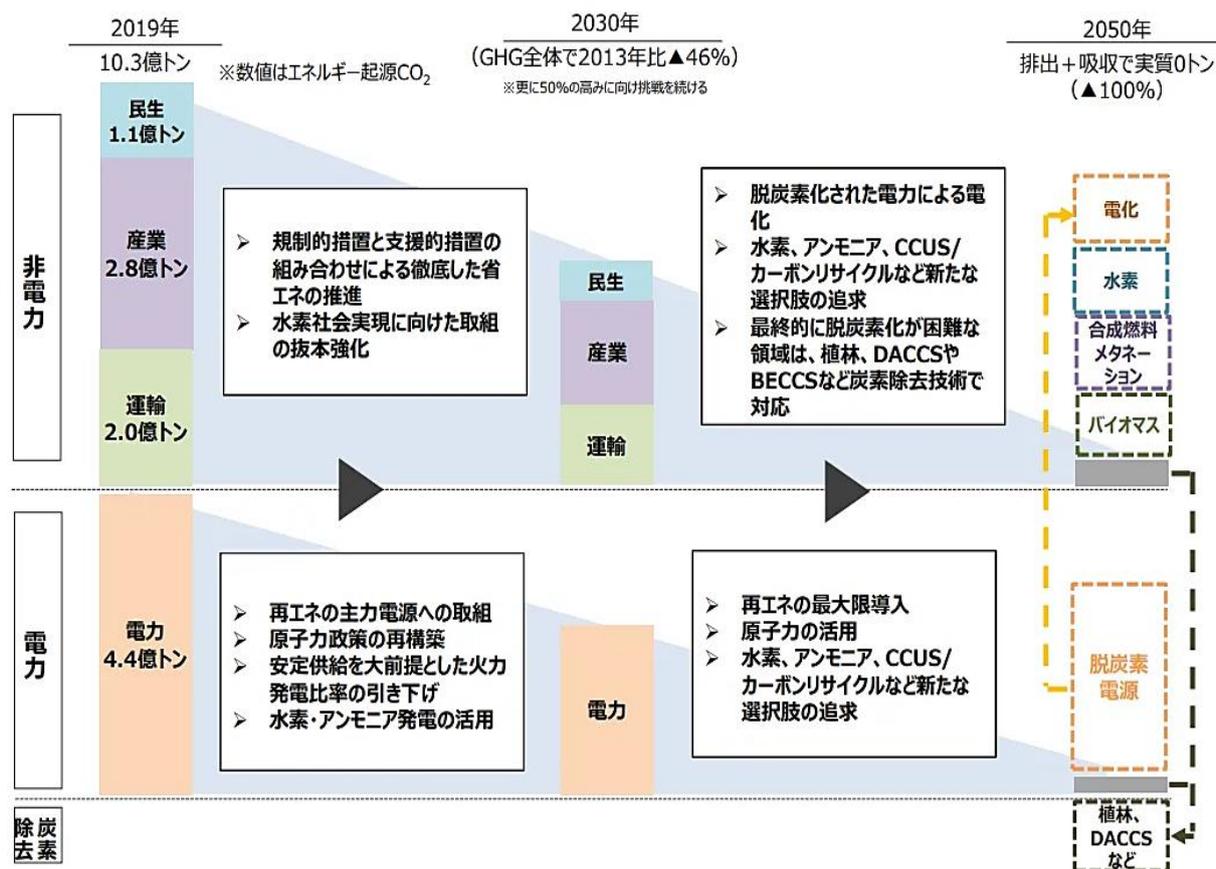
策略上，日本針對不同排放來源進行系統化分類。在減碳方面，將溫室氣體分為能源來源和非能源來源的二氧化碳，並為工業、商業、家庭、運輸及能源轉換等部門制定具體減碳措施。此外，計劃還針對甲烷等其他四類溫室氣體制定減碳策略。同時，日本注重溫室氣體吸收源管理，通過強化森林、農地土壤、都市綠化等自然吸收源，並推動藍碳等創新技術來增加碳吸收能力。

在跨領域施策方面，推廣日本減量額度(J-Credit)制度，並通過信用制度(JCM)與其他國家合作減碳。為推動社會結構向低碳轉型，日本鼓勵全民採取脫碳生活方式，並加速建立有助於脫碳的城市和區域結構。同時，日本積極推動氫能社會、發展碳定價及綠色稅制等創新政策，並促進可持續金融，以支持這些減碳措施的落實與長期發展。

3. 淨零路徑

日本於2020年3月30日向聯合國提交國家自定貢獻(NDC)目標，並於2021年4月公布修正草案，具體目標為2050年達到碳中和、2030年溫室氣體排放量較2013年減量46%。日本內閣於2021年10月22日通過《地球暖化對策計畫》，提出配合2030年較2013年減46%目標修訂下之減幅與措施。

《地球暖化對策計畫》雖然針對各類型措施有明確的2030年目標，但對於2030年至2050年發展的路徑並未有敘述。但在另一份2020年公布的《2050年碳中和伴隨的綠色成長戰略》中，可以看到2030到2050年推動經濟成長同時達成脫碳目標的碳中和路徑，見圖2-4。其中，在電力部門，將以再生能源極大化，利用氫能、氬和CCUS等技術來實現脫碳發電；在非電力消費部分，將推動電氣化，並廣泛應用氫能、氬、CCUS等多種脫碳技術；對難以脫碳領域，將採生質能、直接空氣捕集(DACCS)和生物能源碳捕集與封存(BECCS)等技術移除。此外，文件也針對14個關聯產業，制定具體的發展路徑及階段性檢核目標。



資料來源：2050年碳中和伴隨的綠色成長戰略。

圖 2-4、日本淨零路徑

4. 未來發展

當前日本係以《地球暖化對策推進法》作為溫室氣體減量的法源依據，該法經過9次修訂，逐步明確了目標、管理和配套機制。《地球暖化對策計畫》是指引2030年前減碳發展的核心策略，提供明確的目標。經產省的《2050年碳中和伴隨的綠色成長戰略》則結合淨零目標與產業發展，具體描繪了能源、運輸、製造業、家庭與建築業等14個淨零相關產業的技術發展目標、措施路徑和時程。此外，日本還設立了綠色成長基金、推動聯合減碳機制(JCM)、支持技術開發等配套政策。

日本的政策制訂，國會是國家唯一的立法機關，內閣制制度下首相由國會議員選出，並由首相選出一半以上的內閣成員。議員和內閣有資格提交法案，所有法案都提交給委員會進行審議，有時包括公開聽證會。委員會對法案進行投票後，將其提交至國會進行批准。如果兩院的投票結果不一致，會召開會議委員會試圖達成妥協。法律通過後由天皇公布並在政府公報中公告。目前日本以自民黨為最大政黨的趨勢短期趨勢不變，整體邁向淨零轉型的大方向不受影響，近期除考慮以強制性作法要求碳排大戶參與碳交易議題外，幾位自民黨主席參選人的政見也圍繞在核電重啟的議題上，在考量進口能源成本高昂與減碳壓力下，預期未來核能在日本淨零路徑上也可能成為選項。

(五) 韓國

1. 政策演進

韓國於1998年簽署《京都議定書》，但以發展中國家身份獲得豁免。2010年韓國國會頒布了《低碳綠色成長基本法》，成為韓國在氣候變化、能源和永續發展國家戰略的基礎。

2015年，韓國設定2030年溫室氣體減碳目標，計劃較基準情境(BAU)減少37%。韓國也是東亞第一個建立全國性排放交易體系的國家(於2015年1月12日正式啟動)。2016年發布「2030年實現國家溫室氣體減碳目標基本路線圖」，提出具體部門減碳計劃，並在徵詢民間意見後修訂，增加3年為基礎的減碳路徑。2019年更新為絕對目標：2030年碳排較2017年減少24.4%，並納入《低碳綠色成長基本法施行令》。

2020年10月，文在寅總統於國會演說中，宣示韓國2050年前實現碳中和。2021年9月頒布《應對氣候危機的碳中和綠色成長基本法》(2022.3.25實施)，明訂2050年碳中和與2030年較2018年排放減少35%以上目標，並在2050年達到碳中和。而後於2022年3月，再將2030年的目標修訂為較2018年減少40%(相當於較2005年減13.8%)。尹錫悅政府上台後，強調能源自主供應的重要性，因而調高了核電的發電比例，並下調再生能源的占比。

2. 淨零策略

韓國《2050 碳中和推進戰略》以「碳中和與綠色成長，躍昇為全球關鍵國家」為願景，包含3個政策方向和4大核心策略。前者強調：(1)負責任實踐，基於科學和理性的決策推動政策；(2)有序過渡，遵守法律和程序，強調合作與社會共識；(3)創新驅動，推動碳中和和綠色成長的創新模式。後者則涵蓋了能源轉型、產業創新、社會參與和國際合作等方面。內容包括：

(1) 有責任感的碳中和

- A. 能源轉型：擴大核能使用，同時最大化利用再生能源，並逐步減少燃煤發電。措施包括：重啟新韓蔚3、4號核電機組建設，繼續運營在2030年許可到期的10座核電站，在2030年前淘汰20座老舊燃煤火發電機組。
- B. 產業轉型：藉由稅收激勵和發展綠色金融，推動工業結構的低碳化和循環經濟的轉型，促進能源、原材料、工程、製造等工業過程的脫碳轉型。
- C. 國土低碳化：強化建築能源自給能力，推廣清潔交通，擴展環保農業和林業等碳吸收源，並推動產業與社會低碳轉型。措施包括：從2025年1,000平方米以上的建築強制實施零能耗建築標準，2030年推廣至

面積大於500平方米的建築物；補助氫能和電動車，使電動車普及率從2022年的1.7%提升到2030年的16.7%，2050年達到85%-97%。

(2) 由民間主導的創新型碳中和與綠色成長

- A. 技術創新：全程管理技術商業化過程，培育專業人才和減少法規管制，加速創新。盤點100項核心技術，規劃研發路徑圖。
- B. 核心產業培育：發展核能、電動車與氫能商用車和碳捕集與封存等產業。目標包括電動車單次充電行駛距離至600公里(2025年)、縮短充電時間至5分鐘(2030年)，提高氫燃料電池商用車的里程至80萬公里(2030年)，燃料效率提升至每公斤17公里(2030年)。
- C. 財政與投資擴大：通過氣候應對基金和綠色金融分類標準推動民間投資，並改進碳交易系統，引入排放權委託交易機制等。

(3) 透過全社會的共識和合作實現碳中和

- A. 能源效率及制度改革：推動高耗能產業自願性能源效率協議，提升設備效率管理與能效分級管理；住商部門節能獎勵回饋；引入電動車效率分級及中大型貨車的燃油效率制度；推動全民節能、能源稅改革、節能產品標章，。
- B. 地方減碳治理：強調地方碳中和自治，根據地區特性推動對應的碳中和與綠色成長政策和措施。
- C. 產業與就業轉型：對於受到影響的企業和人力，提供培訓和相關支援，協助產業轉型和創造就業機會。

(4) 引領氣候變遷應對的國際合作

- A. 氣候合作：積極參與國際航運業減碳，制定相關標準，提升在國際物流和航運領域的環保表現，並推動相關國際協議的實施，展現其在全球氣候行動中的積極參與和貢獻。。
- B. 氣候適應力構建：強化與國際社會合作，提供技術和人力支援，協助發展中國家應對氣候變遷。具體措施包括擴大環境合作、分享技術，並提供災害防治與恢復援助。
- C. 國際社會領導：擴大官方援助規模和其他國際合作機制，提升其在全球碳中和行動中的角色，加強與OECD國家的合作。

3. 淨零路徑

明定2030年國家溫室氣體減量目標需較2018年的排放量減少40%。其各別部門內容包括：

- (1) 電力部門：2030年減碳目標為45.9%(相對於2018年)；2030年將再生能源發電比例提升至21.6%以上，其中太陽能與風能的比例為6比4，並逐年根據國情進行調整。
- (2) 產業部門：2030減碳目標為11.4%(相對於2018年)。
- (3) 建築部門：2030年的減碳目標為32.8%(相對於2018年)。
- (4) 農畜水產部門：智慧溫室至2027年達到1萬公頃；氮肥使用量減少至2030年的115公斤；2030年將低甲烷飼料的普及率提高至30%；2027年前推廣1.1萬座智慧畜舍。
- (5) 廢棄物：2030年減碳目標46.8%(相對於2018年)。2025年65處公共廢棄物分類設施，以AI與光學分類取代手工分類。2030年有機廢棄物的生物甲烷化設施達140座。
- (6) 氫能：2030年實現8.4百萬噸的氫能應用，氫能發電在2030年占比達到2.1%、2036年7.1%；2028年完成兩個氫能示範港口。
- (7) 碳匯：2030年吸收26.7百萬噸碳排。森林管理規模2050年達48萬公頃，國產木材到800萬立方米；潮間帶濕地面積在2050年達到30平方公里；2050年前建設1.7萬公頃的城市森林和1.16萬公頃河岸等生態吸收源。
- (8) CCUS：2030年處理11.2百萬噸碳排，在2026年前構建示範與商業化平台，建立CCUS示範區，開發國內外儲存地，評估本土潛在儲量，並開發海外儲存地。

2018年韓國總排放量為7.5億噸，其中電力和產業部門排放量最大。透過上述措施，韓國《2050 碳中和路徑》提出了兩個2050淨零排放情境，但減碳方式略有不同。淨零的兩個路徑方案中，A方案透過技術創新，達到無碳電力生產；B方案則因技術發展未如預期，但整體碳排也減少超過九成，再擴大負碳技術力道達成目標。

- A方案：電力部門排放降至51.1百萬噸，產業部門降至15.4百萬噸，並通過CCUS和碳匯實現額外減碳。
- B方案：保持相似排放量，但加大CCUS和碳匯的強度。

電力部門將重點推動再生能源發電，尤其是太陽能和風能，來替代現有的化石燃料發電，並擴大使用電力於工業、運輸及供暖等各領域。也因為電氣化因素，預計電力需求將較2018年增加221.7%~230.7%，工業和建築部門將超過60%的電力需求，新的綠氫生產和二氧化碳捕集、利用與儲存運作衍生的需求也將占用電力需求的30%左右。

產業部門透過潔淨電力和氫能使用，整體碳排將減少 80.4%。建築部門透過節能、再生能源與電氣化，將化石使用降低至的 8%；電力和再生能源、區域能源的使用比例提高到 92%，整體碳排將減少 88.1%。運輸部門在 A 方案中，多數車輛已轉換為電動車、氫動力車等零排放車輛，僅少數特定用途內燃機車輛使用零排放燃料；B 方案則存在較為多數的內燃機車輛，2050 年減碳將達 90.6%~97.1%。農牧水產部門也將透過電氣化與再生能源的使用，將碳排將減少 37.7%。

廢棄物將透過減量與循環經濟，減少 74% 碳排。氫能領域將因綠氫的普及程度影響整體減碳效果，但未來也可能以藍氫(LNG 產氫加上 CCUS)而使達到淨零。未來將隨著森林老化而使碳吸收能力逐漸下降，需要透過再造林、植樹以及恢復濕地來提升，預計 2050 年將減少至 25.3mtCO_{2e}；另外需要 CCUS 來減少 55.1~84.6 mtCO_{2e} 的碳排。

4. 未來發展

《應對氣候危機的碳中和綠色成長基本法》是韓國推動淨零的法源基礎。該法要求設立 2050 年碳中和綠色成長委員會，由來自產學研與民間的專家組成七個七個子委員會，並由國家研究機構和智庫專家組成技術小組。由此委員會負責收集各界意見，審議並決定碳中和的基本方向，包括國家願景、中長期減碳目標，以及主要計劃和政策，同時監督進展和績效。法律還規定成立氣候應對基金，支持四大核心領域：減少溫室氣體排放、建構低碳產業生態系、推動公正轉型，以及建構相關制度與基礎設施。根據該法，中央政府須制定為期 20 年、每 5 年更新一次的國家碳中和總體規劃；地方政府則需在此框架下，制定 10 年的市、省、縣、區基本規劃。此外，韓國於 2012 年通過《溫室氣體排放配額分配和交易法》，並在 2015 年啟動韓國排放交易制度(K-ETS)，成為東亞首個全國性強制性排放交易制度的國家。

南韓國會是最高的立法機關，立法過程可以由國會或政府代表開始。法案在國務會議上進行審議並送交總統批准。韓國總統有五年的任期，距離下次 2027 年大選仍有多數年，儘管 2024 年國會選舉後呈現朝小野大的局勢，但因最大在野黨共同民主黨在前任總統文在寅時期即宣示 2050 年達碳中和，因此在淨零方向上應無太大影響，唯一差異可能在於現任的尹錫悅政府將更支持核電發展。

(六) 中國

1. 政策演進

中國在應對氣候變遷的政策演進大致可追溯到《十二五規劃(2011-2015)》的政策文件中，首次將氣候變遷納入專章討論，並引入碳排放強度和非化石能源占比等指標。該規劃將能源產業列為重點發展領域，並提出了電力、煤炭、油氣和新能源等行業的發展規劃，同時推動潔淨能源的多元化發展。

2015 年是中國氣候政策的關鍵轉折點，在《巴黎協定》簽訂過程中，中國將自身定位為氣候變遷的領導者。同年 9 月，習近平承諾中國二氧化碳排放將在 2030 年前達到峰值。中國在其國家自主貢獻中設定了具體目標，包括到 2030 年單位 GDP 二氧化碳排放比 2005 年下降 60%-65%，非化石能源消費占比達到 20% 左右。《十三五規劃(2016-2020)》進一步強調減緩與適應並重的策略，提出主動控制碳排放、落實減碳承諾、增強適應氣候變遷能力，以及深度參與全球氣候治理等方針。該規劃還提出了降低煤炭消費占比、提高天然氣消費占比，以及提高非化石能源消費與裝置占比的目標。由於中國在 2030 年前碳排放仍持續增加，故不論是《十三五節能減排綜合工作方案》或《十三五溫室氣體排放控制工作方案》，都沒有明確訂定各部門具體減碳的量化目標。目前減碳策略著重於碳排放較高的部門，例如綠能發展、節能環保產業發展、低碳運輸等。

2020 年 9 月，習近平在第 75 屆聯合國大會上宣布，並於 2021 年 10 月提交長期策略「中國本世紀中葉長期溫室氣體低排放發展戰略」，力爭在 2030 年前實現碳達峰，2060 年前實現碳中和。《十四五規劃(2021-2025)》設定單位 GDP 能源消耗和二氧化碳排放分別降低 13.5%、18%，主要污染物排放總量持續減少，森林覆蓋率提高到 24.1% 等氣候政策目標。

2. 碳達峰方案

根據 2021 年所提交的 NDC，中國 2030 年二氧化碳當量將達到 13.9 Gt- CO₂e，排放量比 2010 年增加 26%(排除 LULUCF)，其他目標制訂如下：

- (1) 於 2030 年前達碳排放峰值，並於 2060 年前實現碳中和。
- (2) 於 2030 年之碳強度比 2005 年降低至少 65%，且非化石燃料在一次能源消耗中比例達 25%。
- (3) 於 2030 年，森林較 2005 年增加約 6 億 m³(之前是 4.5 億 m³)。
- (4) 於 2030 年，風能和太陽能裝置容量增加到超過 1200 吉瓦。

中國的碳達峰戰略以「1+N」政策體系為核心。「1」代表頂層設計，包括《關於完整準確全面貫徹新發展理念做好碳達峰碳中和工作的意見》和《2030 年前碳達峰行動方案》，為整體戰略提供指導。「N」則涵蓋重點領域、重點行業的實施方案和配套措施。

在《2030 年前碳達峰行動方案》的「碳達峰十大行動」包括能源綠色低碳轉型、節能減碳增效、工業、城鄉建設、交通運輸等領域的碳達峰行動，以及循環經濟、科技創新、碳匯、全民行動、有序達峰等方面的策略。多數內容可見於本專題報告後續章節，以下介紹循環經濟、科技創新、全民行動、有序達峰等策略：

- (1) 循環經濟：聚焦於產業園區循環化(2030年實現省級以上重點產業園區全面循環化改造)、大宗固廢綜合利用(2030年達到大宗固廢年利用45億噸)、

健全資源循環利用體系(2030年九類主要再生資源循環利用量達5.1億噸)，以及生活垃圾減量化資源化(2030年實現全面城市生活垃圾分類，資源化利用比例提升至65%)。

- (2) 科技創新：以科技創新支持實現碳中和目標，包括完善創新體制機制、加強創新能力建設和人才培養、強化基礎研究應用及加快先進技術的研發和推廣應用(聚焦於化石能源清潔利用、再生能源、新型電力系統、節能、氫能、儲能)。
- (3) 全民行動：低碳全民行動計劃旨在提高全民的環保意識，並將綠色理念轉化為全社會的自覺行動，包括加強生態文明宣傳教育、推廣綠色低碳生活方式、引導企業履行社會責任(國有企業帶頭，並要求重點企業制定碳達峰行動方案)，及強化幹部培訓。
- (4) 有序達峰：強調因地制宜、分類施策。考慮不同地區經濟發展、產業結構和能源結構，確保碳達峰的實現符合國家規劃，又適應地方情況。要求碳排放穩定地區進一步減碳；產業、能源結構較優地區則堅持綠色低碳發展；而產業、能源結構偏向高排放地區則重點優化，實現碳排放與經濟成長脫鉤。此外，強調重點區域的引領作用，如京津冀、長三角應率先全面綠色轉型。最後，要求各省制定可行碳達峰方案，通過試點積累經驗，提供可推廣實踐模式。

3. 未來發展

中國為以《關於完整準確全面貫徹新發展理念做好碳達峰碳中和工作的意見》和《2030年前碳達峰行動方案》為淨零發展核心。在實施機制方面，中國以黨中央領導、碳達峰碳中和工作領導小組統籌的管理體系。領導小組負責整體規畫和推進，制定重大政策，並定期調度各地區和重點領域的工作進展。各級政府和部門落實，建立以碳強度控制為主、碳排放總量控制為輔的考核制度。在法律規範面，建立有利於綠色低碳發展的法律體系，如能源法、節約能源法、電力法、煤炭法、再生能源法、循環經濟促進法、清潔生產促進法等制定與修訂。同時，加快更新節能標準，健全再生能源標準體系，制定重點企業碳排放核算、報告、核查等標準，以及氫制、儲、輸、用標準。建立重點企業碳排放核算、報告、核查等標準，探索建立重點產品全生命週期碳足跡標準。積極參與國際能效、低碳等標準制定修訂，加強國際標準協調。

財務金融方面，建立支持綠色低碳發展的稅收政策體系，完善綠色電價政策，並發展綠色金融工具。政府鼓勵金融機構為綠色低碳項目提供長期低成本資金，並研究設立國家低碳轉型基金。完善碳排放權交易市場，建設用能權交易市場，並推動碳排放權、用能權、電力交易等市場。加強市場機制間的銜接與協調，將

碳排放權、用能權交易納入公共資源交易平臺。積極推行能源績效管理合約，推廣節能諮詢、診斷、設計、融資、改造、託管等一站式綜合服務模式。

整體來說，中國採取由上而下的政策制定方式。全國人民代表大會及其常務委員會負責發布法律，而國務院有權發布「行政法規」。五年計劃是最重要的政策文件，設定中國經濟的總體方向。在氣候相關問題上，2018年修訂的《憲法》將「生態文明」列為國家發展願景之一。憲法第89條賦予中央人民政府的國務院實現此目標的責任。因此，中國的氣候政策主要通過「行政政策」而非正式「法律」制定。

鑒於中國的政治治理體系及將綠色轉型列為未來重要發展方向，未來的淨零路徑規劃與落實較少受政治影響，更可能受經濟發展與國際貿易氛圍影響，綠色產業則將繼續是重點發展領域。

三、台灣淨零排放國家路徑與國際作法借鏡

(一) 台灣現況與課題

台灣積極響應全球淨零排放趨勢，於2021年4月22日世界地球日由總統正式宣示2050年達成淨零排放的目標。為實現這一目標，我國於2022年3月公布了「台灣2050淨零排放路徑及策略總說明」，提出了具體的行動路徑和策略框架。

該策略以四大轉型為核心，包括能源轉型、產業轉型、生活轉型和社會轉型，並以科技研發和氣候法制作為兩大治理基礎。同時，我國還制定了十二項關鍵戰略，涵蓋能源、產業和生活等多個領域，旨在推動綠色經濟發展，創造就業機會，並實現能源自主。

台灣的淨零轉型規劃分為兩個階段：短期(至2030年)致力於實現低碳目標，重點推動再生能源發展；長期(至2050年)則朝向零碳發展，大力推進再生能源佈建，發展碳捕捉與封存技術和氫能應用。根據初步規劃，到2050年，台灣的電力結構將以60-70%的再生能源為主，輔以9-12%的氫能和20-27%的低碳火力發電。同時，台灣也將積極發展創新清潔能源技術，推動各產業部門電氣化，並加強自然碳匯的保育與管理，以全面實現淨零排放的目標。

1. 能源轉型

採取打造零碳能源系統、提升能源系統韌性，及開創綠色成長三大策略。

零碳能源系統方面，首先，優先建置成熟技術，短中期(至2030年)目標包括到2025年安裝20GW太陽能，2026-2030年每年增加2GW；2025年累計安裝5.6GW離岸風電，2026-2030年每年增加1.5GW。長期極大化裝置容量，2050年太陽能預計達到40-80GW，離岸風電達到40-55GW。同時積極發展地熱、海洋能和生質能等前瞻能源技術，預計2050年裝置容量將達到8-14GW。其次，推動傳統能源的低碳轉型，短期是增加天然氣發電來取代燃煤發電，並開始試驗氫

能混燒技術。長期目標則是應用碳捕獲、利用與封存技術(CCUS)或碳中和天然氣，提高氫能使用比例。對於燃煤發電，短期是試驗氫氣混燒技術，長期則擴大 CCUS 技術應用，並根據低碳能源供應，將部分燃煤機組轉為備用。此外，建立無碳燃料供應體系，為產業和民生需求做準備。

能源系統韌性方面，大力投資新興技術和基礎設施建設，包括升級電網以適應高比例的再生能源，發展電網數位化技術，擴大因應再生能源變動所需儲能等彈性資源規劃，提升能源系統韌性，以確保供電穩定。

綠色成長方面，包括發展本土優勢的綠色技術，打造產業生態系，並促進投資和國際合作；建立完整的氫能供應鏈，包括進口、運輸和儲存基礎設施的建設。對於 CCUS 技術，計劃在 2025 年實現商業規模的碳捕獲，並正在探索本地碳封存的可能性。

2. 產業轉型

採取「先減少排放，再淨零排放」漸進式方針，並以「大帶小」的模式推動。具體而言，從大企業和國營事業開始，逐步擴展至中小企業，同時結合產業公會和供應鏈中心廠的力量，建立全面碳盤查與減碳能力。策略涵蓋了製程改善、能源轉換和循環經濟等三大面向和十一項具體措施，旨在打造綠色供應鏈，提升台灣在淨零轉型中的競爭力。

在製程改善方面，短期目標是更新設備和導入智慧節能管理，長期則致力於氫氣技術開發和含氟氣體削減，重點措施包含加速產業設備汰舊更新、節能與數位化管理、加速氫能技術發展與產業應用、開發含氟氣體替代技術。能源轉換策略短期以擴大使用天然氣和生質燃料為主，長期目標是實現百分百綠電和無碳能源應用。重點措施包含既由燃煤、油鍋爐以天然氣或汽電鍋爐替代；擴大水泥業及造紙業生質燃料使用；鼓勵企業裝置與購買綠電，實踐 RE100 目標。循環經濟方面，短期著重於原料替代和固體再生燃料使用；推動循環產業園區及聚落能資源整合；長期則發展碳捕捉、再利用與封存(CCUS)等創新技術。

3. 生活轉型

首先，透過對話凝聚共識，強調淨零排放是全民共同目標、責任和行動。政府與各界建立合作關係，通過多元管道進行教育和宣傳，提升民眾對氣候變遷的認知，並培育相關專業人才。其次，引導大眾思考「淨零生活」的多元做法。包括推廣「使用」取代「擁有」的生活方式，鼓勵服務化商業模式，延長物品使用壽命；培養零浪費、低碳飲食習慣，從源頭減少食物浪費，推廣低碳飲食；推動新及既有建物改造為淨零循環建築等。最後，打造低碳、共享的運輸網絡。包括減少非必要移動；創造友善的低碳交通環境；推廣智慧化運具共享與共乘服務；優化公共運輸系統，提供便捷的軌道運輸和智慧化交通服務。

4. 公正轉型

強調「化衝突為機會」，將淨零轉型視為一項社會工程，實現環境保護、社會公平和經濟發展的平衡。強調公私協力和公民參與的重要性，與民間組織、企業和利害相關團體合作，確保各界充分理解政策進程並參與其中，實現「盡力不遺落任何人」的目標。

(二) 國際借鏡

綜觀主要國家的淨零政策與策略可見，多數國家都設定了明確的目標，其中策略路徑多以短期(2030年)為主，至於2030年後到達淨零，考量技術的演進與整體經濟相關局勢發展仍有高度的不確定性，細部目標與路徑較難以明確。各國都強調了能源轉型的重要性，特別是電力部門的脫碳化。這不僅包括發展再生能源，還包括提高能源效率和推動終端用能電氣化。轉型過程中帶動的綠色經濟成長也是各國轉型的重點之一。此外，各國都認識到需要各層級政府與社會全體的參與，包括政府、企業、學術界和公民社會的共同努力。

參考國際做法，台灣在制定和實施淨零政策時可以借鏡以下幾點：首先，可以考慮制定更詳細的部門別轉型路徑，如美國的五大部門轉型路徑模型，可以幫助各部門更清晰地了解自己的責任和機會；美國、英國、韓國的多元情境模擬，也有助於更廣泛的政策討論與策略選擇。其次，可以加強創新驅動的策略，如韓國的創新驅動政策方向。這包括加大對清潔能源技術研發的投資，以及促進這些技術的商業化和規模化應用。再者，強調各級政府參與的重要性，以及中央與地方政府的協調與合作。最後，可借鏡國際完善碳定價機制與市場機制，引導市場資源向低碳領域流動。

參考文獻

1. Climate Watch , <https://www.climatewatchdata.org/>
2. EU Long Term Strategy, <https://www.notion.so/2050-long-term-strategy-233620d85a05413ab2686da743a4fdf5?pvs=25>
3. EU Climate Policy Explained, https://climate.ec.europa.eu/system/files/2017-02/eu_climate_policy_explained_en.pdf
4. Three decades of EU climate policy: Racing toward climate neutrality? <http://wires.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/wcc.863>
5. Climate Policy in European Union Politics, <https://oxfordre.com/politics/display/10.1093/acrefore/9780190228637.001.0001/acrefore-9780190228637-e-1097>
6. Commission welcomes completion of key 'Fit for 55' legislation, putting EU on track to exceed 2030 targets, https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_23_4754
7. Net zero in the UK, House of Commons Library, 2019, <https://researchbriefings.files.parliament.uk/documents/CBP-8590/CBP-8590.pdf>
8. UK Carbon Budgets, <https://commonslibrary.parliament.uk/research-briefings/CBP-7555/#fullreport>
9. The UK's Plans and Progress to Reach Net Zero by 2050 (parliament.uk)
10. 日本の挑戦：2050年までにカーボンニュートラルを達成するには, https://www.mckinsey.com/jp/~/_media/mckinsey/locations/asia/japan/our%20insights/jn_japan%20decarbonization%20short_v5.pdf
11. 日本経済産業省温暖化対策網頁, https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/index.html
12. South Korea's pledge to achieve carbon neutrality by 2050, [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2021/690693/EPRS_BRI\(2021\)690693_EN.pdf#:~:text=When the 1997 Kyoto Protocol to limit](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2021/690693/EPRS_BRI(2021)690693_EN.pdf#:~:text=When the 1997 Kyoto Protocol to limit)
13. 中国落实国家自主贡献目标进展报告(2022), [https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-06/China's Achievements%20New Goals and New Measures for Nationally Determined Contributions.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-06/China's%20Achievements%20New%20Goals%20and%20New%20Measures%20for%20Nationally%20Determined%20Contributions.pdf)
14. 中国落实国家自主贡献成效和新目标新举措 [https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-11/Progress of China NDC 2022.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-11/Progress%20of%20China%20NDC%202022.pdf)
15. 國務院印發《2030年前碳達峰行動方案》, http://big5.www.gov.cn/gate/big5/www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content_5644984.htm
16. 台灣 2050 淨零排放, https://www.ndc.gov.tw/Content_List.aspx?n=DEE68AAD8B38BD76

第三章、電力部門

賴靜仙¹¹、劉致峻¹²

電力是現代社會和經濟運作的核心，是人類生活中不可或缺的存在。隨著電動車和熱泵等電氣化設備之日益普及，電力是未來淨零轉型過程最重要的能源。IEA Electricity 2024 報告指出，「發電」是目前最大的二氧化碳排放源，且電力需求的增長受其他部門電氣化程度影響甚大。但同時，電力部門也是透過太陽能及風能等再生能源的大量佈建，降低發電的排碳，並引領淨零排放過渡的產業。本章將接續前章，討論各國電力部門之淨零路徑規劃及相關推動的措施。

本章將首先簡述全球電力部門能源使用情形及淨零排放路徑，接著說明幾個主要國家與地區的電力部門淨零規劃，分別為獨立海島電網之夏威夷、高再生能源占比的加州、第一個課徵邊境碳關稅的歐盟、擁有大量離岸風電之英國、我國貿易及技術重要夥伴的日本、貿易競爭對手的韓國、我國主要出口對象的中國。最後，參考各國的經驗，歸納出電力部門規劃淨零路徑時可借鏡的方向。

一、全球電力部門淨零排放路徑

聯合國自舉辦氣候高峰會議締約國大會(COP)以來，持續呼籲成員國降低溫室氣體排放，以控制地球升溫。在 2021 年第 26 屆 COP 會議上喊出 2050 年前達到淨零碳排的目標，至今超過百國響應。本節以全球角度蒐研電力部門淨零排放路徑，依序說明現況、IEA 規劃的淨零路徑及對電力部門之轉型建議。

(一) 現況

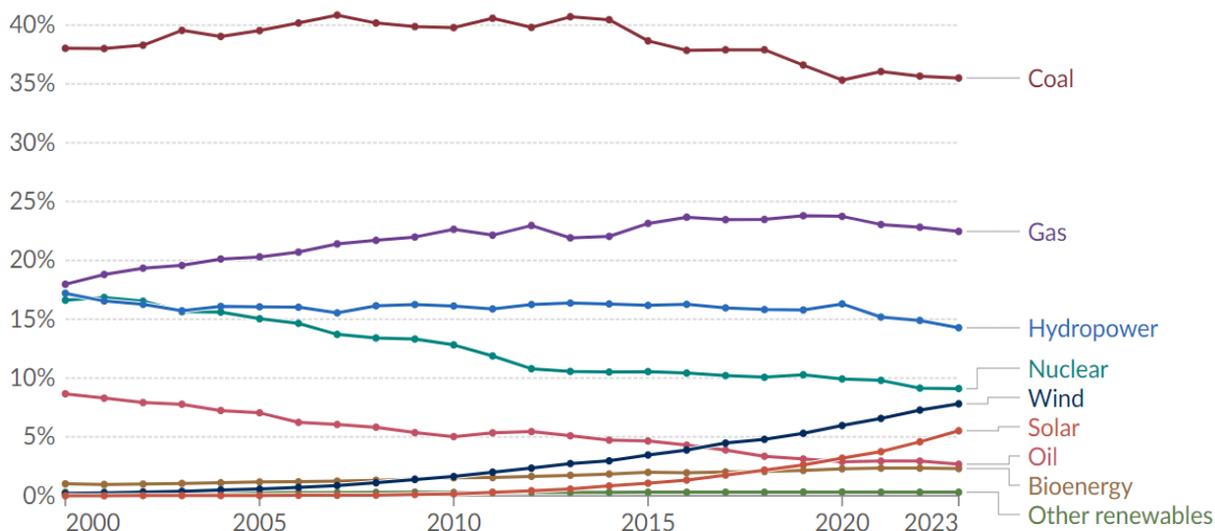
電力部門是全球最大的排放部門，2023 年占全球能源相關的碳排放量 36%。電力部門過去以化石燃料作為主要來源(如圖 3-1 所示)，但近年隨著再生能源商業化及各國減碳政策，其占比逐步下降；再生能源占比則逐漸提高，在 2023 年首次創造了 30% 的全球電力，再加上核能，全球近四成的電力來自低碳能源。其中，中國是主要貢獻者，2023 年占全球新增太陽能發電量的 51% 和新增風力發電量的 60%。然而，乾旱導致水力發電量降至五年來的低點，使得燃煤發電比例增加，導致全球電力部門排放量不減反增(+1%)。

主要國家的電力生產統計資料則如圖 3-2 所示，全球用電量呈現上升趨勢。在幾個已開發國家之歷年用電量並無顯著上升趨勢，或呈現下降，如美國、英國、德國、法國等，可能與能源價格高漲，以及經濟情勢放緩有關，而再生能源的使

¹¹ 前台灣綜合研究院研五所副所長、中華經濟研究院輔佐研究員。

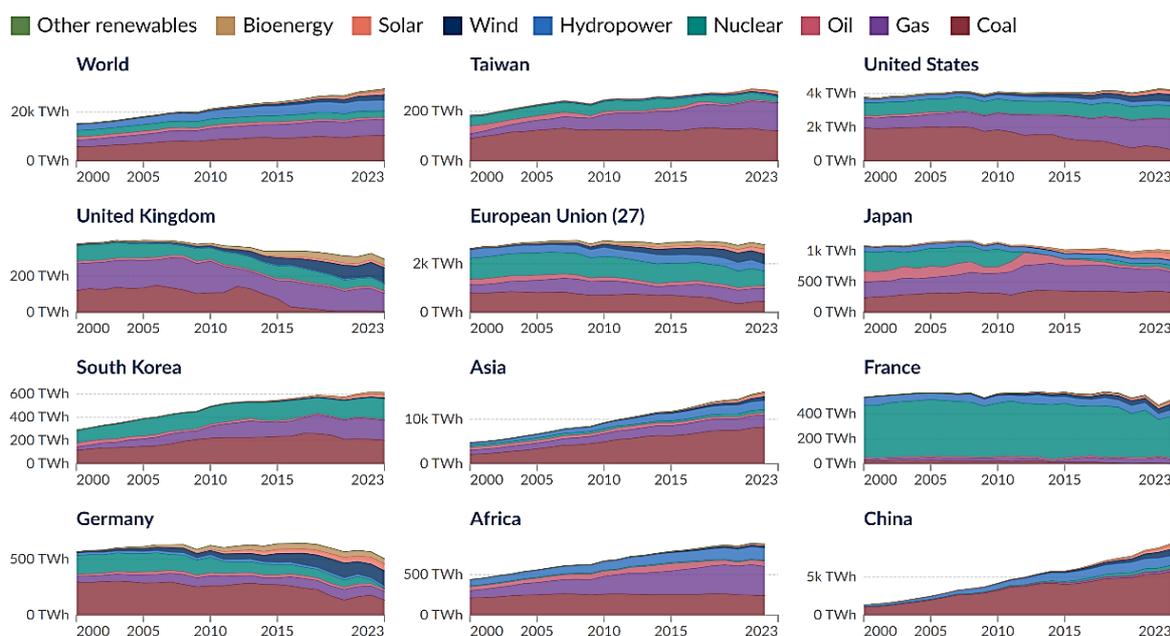
¹² 財團法人中技社資源暨環境研究中心研究員。

用呈現逐年增加。在亞洲之用電量隨疫情後的經濟復甦有上升的趨勢。其中，中國疫後經濟復甦使 2023 年電力需求成長 6.4%，又以服務業和工業部門之反彈力道最為強勁，雖太陽能及風力電發電占全球發電量之 37%，但燃煤發電量占全球一半以上，且新建之燃煤機組占全球 2/3，導致全球電力部門化石燃料使用增加。南韓及台灣等半導體製造大國隨全球晶片求增加，用電量呈現上升趨勢，再生能源的使用亦呈現微幅的上升。非洲國家 2023 年電力需求較前年上升 2%，儘管非洲國家人口占世界人口約 18%，但其電力需求僅佔全球 3% 左右，而再生能源的使用亦呈現上升趨勢。



資料來源：Ember (2024); Energy Institute - Statistical Review of World Energy (2024)

圖 3-1、全球各資源別之電力生產占比



資料來源：Ember (2024); Energy Institute - Statistical Review of World Energy (2024)

圖 3-2、主要國家各資源發電量統計

根據 IEA 在 Electricity 2024 的分析，未來三年全球電力需求將以更快的速度增長，到 2026 年平均每年增長約 3.4%。電力需求將受住宅和運輸部門持續電氣化及數據中心顯著擴張而增長。數據中心、AI 及加密貨幣等用電量可能提高一倍。而低排放能源，包括核能和太陽能、風能和水力等再生能源之發電量，將滿足未來三年全球需求的成長。儘管一些國家逐步淘汰核電或提前退役核電站，但隨著法國維護工作的完成、日本重新啟動多個核電機組以及新反應器的建設，預計到 2026 年核電發電量將平均每年增長近 3%，且在中國、印度、韓國和歐洲等多個市場開始商業營運。

(二) 淨零路徑

1. 情境設定

IEA 自 2021 年起，針對全球達成淨零目標之路徑透過科學方法進行量化分析，並逐年滾動檢討，並定期在 World Energy Outlook 報告中揭露。分析的情境分為三類，如表 3-1 所示。其中，NZE 情境係 IEA 設定全球在 2050 年達成淨零排放之設計，意即必須有更積極的承諾及作為，才可在 2050 年達到淨零。

表 3-1、IEA 淨零情境分類

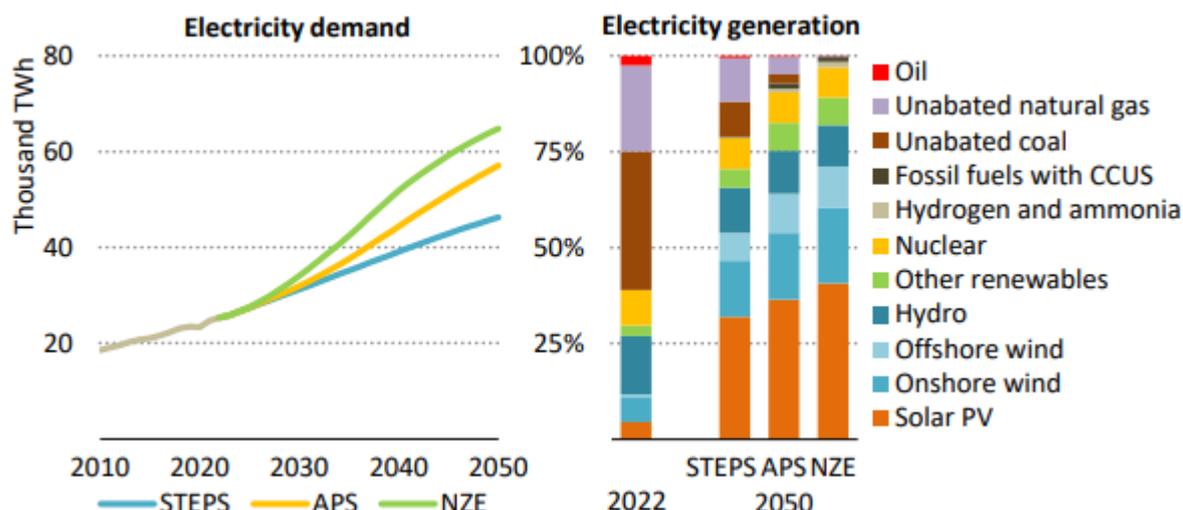
情境名稱	定義
既定政策情境-STEPS (stated policies scenario, STEPS)	涵蓋了政府既有的因應氣候變遷措施及已制訂的具體政策
承諾目標情境-APS (Announced Pledges Scenario, APS)	假設世界各國政府所做出的氣候承諾都按時達成
2050 年淨零排放情境-NZE (Net Zero Emissions by 2050 Scenario, NZE)	為全球能源部門在 2050 年達成二氧化碳淨零排放設計之路徑

資料來源：IEA, World Energy Outlook 2023

2. 電力需求(負載)趨勢及推估

根據 World Energy Outlook 2023 報告指出，如圖 3-3 所示，由於人口和收入增長，電力需求將隨其他部門電氣化程度增加而影響，至 2050 年 STEPS 情境中之電力需求將比 2022 年水準增加 80% 以上、APS 情境增加 120%、NZE 情境增加 150%。發電組合主要仰賴再生能源及核能，其次為結合碳捕捉技術之化石燃料、氫能及氨。化石燃料的使用在每一個情境中皆呈現下降的趨勢。

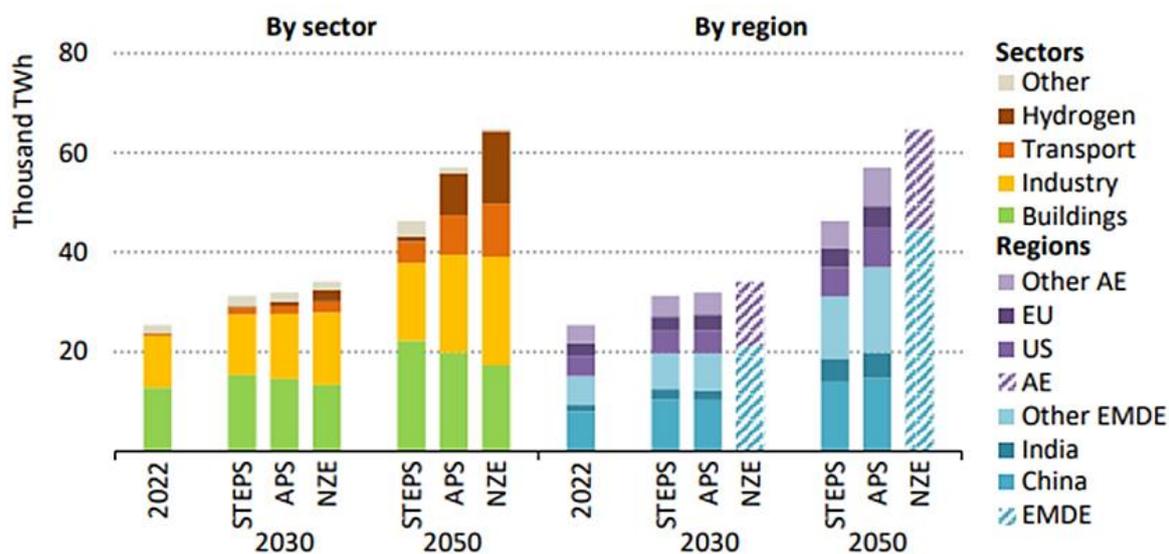
再生能源裝置容量到 2050 年將成長數倍，主要來自太陽光電和風力發電。間歇性再生能源快速增長，使電力系統的彈性成為電力安全的核心，而大量再生能源佈建，也凸顯了電網擴建的速度及必要性。核能裝機容量從 2022 年 417 GW 增長 2050 年 STEPS 情境中 620 GW，在 APS 中到 2050 年增至 770 GW，而在 NZE 中增至 900 GW 以上。增長主要來自中國和其他新興市場及發展中經濟體。化石燃料除了轉為彈性資源和提前退役外，燃煤電廠可進行混燒氫改造，為燃煤發電提供減排的方法。



資料來源：IEA

圖 3-3、全球電力需求推估及電力資源組合

在 STEPS、APS 及 NZE 情境中，至 2050 年全球電力需求增長主要由新興市場和發展中經濟體推動，如圖 3-4 所示，占全球總電力需求約四分之三。中國是最大的電力消費國，在所有情境下，平均每年超過 2% 的成長，意味著到 2050 年中國的電力消費將是其他國家的兩倍以上。印度之年均電力需求增長約 5%，電力消費僅次於中國和美國。先進經濟體的電力需求增長較低，STEPS 的年均增長率為 1.4%，而在 NZE 情境為 2.4%。



資料來源：IEA

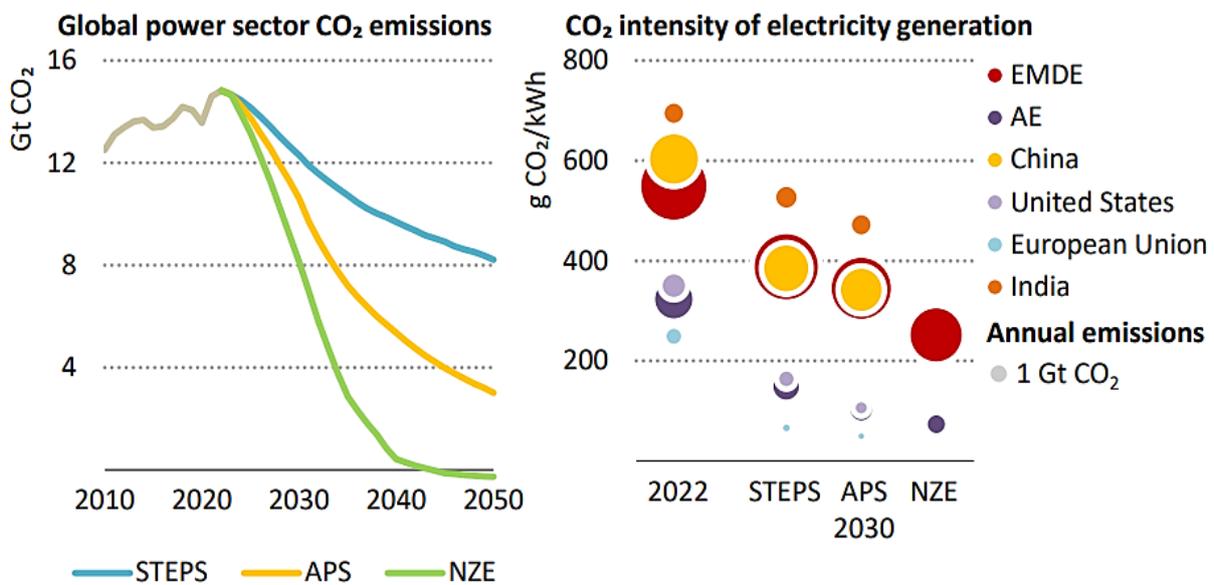
圖 3-4、全球各區域及各部門電力需求推估

電力消費受其他部門電氣化程度影響甚大，因家電、空調和暖氣及熱水供應的需求不斷增長，建築部門在 STEPS 和 APS 情境中是電力消費最大的部門。工業在 STEPS 及 APS 情境中為第二大用電部門，電動機具占其需求的大部分，且在 NZE 情境中成為最大的用電部門。運輸部門之電動車在 STEPS 中約占總電力

需求增長的 15% (2050 年)，而在 APS 和 NZE 情境中，電動車銷售增長更快，成為電力需求增長的關鍵。電解水製氫在 STEPS 中仍然有限，但在 APS 及 NZE 情境中則呈現顯著電力需求增長。上述推估尚未包含 AI 發展之用電量成長，可預期電力需求成長將超過目前推估數字。

3. 電力部門碳排放推估

全球電力部門負載、發電資源及碳排放推估如圖 3-5 所示，2022 年全球電力部門的二氧化碳排放量接近 150 億噸，佔所有能源相關碳排放量約四成。在所有情境中，電力部門的排放量均預計在短期內達到峰值，隨後開始下降。全球電力部門 2030 年的排放量，在 STEPS 情境中下降 15%，在 APS 中下降 30%，而在 NZE 情境中下降 45%。在 NZE 情境下，已開發國家電力部門將在 2035 年達成淨零排放、中國在 2040 年達成、全球在 2045 年之前達成。這使得電力部門成為第一個實現淨零排放的部門。



資料來源：IEA, World Energy Outlook 2023

圖 3-5、全球電力部門負載、發電資源及碳排放情形推估

(三) 轉型策略

完全脫碳的電力部門係淨零能源系統重要的基礎，穩定且脫碳的電力供給是現代及未來經濟的核心。在 IEA 的 NZE 情境中，電力在所有能源的消費比例終將從現有約 20%，在 2050 年超過 50%。目前化石燃料發電佔全球總發電量之 60%，若要與 NZE 情境保持一致，化石燃料發電比例必須在 2030 年下降至 30%。也提醒各國需要更多努力來達成目標，特別是燃煤減量尚未走上正軌。隨著各國政經情勢的瞬變，在邁向淨零轉型的過程，IEA 提出底下七點建議，描述如下：

1. 確保長期目標和政策穩定性：為投資者提供穩定性和長期投資訊號，進而有效促進資本密集型的低排放技術，如再生能源、核能和 CCUS。

2. 建立碳定價和相關法規：碳定價、碳稅和電廠排放的監管，可促進從燃煤轉型至天然氣，並為低排放技術提供重要的長期投資訊號。
3. 將政策轉向競爭性拍賣：再生能源集中競爭性採購之拍賣越來越普遍，且可有效使再生能源成本下降，特別是太陽光電及風能。
4. 調整市場設計，以支援間歇性再生能源：提供激勵措施給彈性資源，可有效加強發電彈性、電網級儲能和需量反應的商業案例。
5. 支援 CCUS 在電力部門的部署：由於 CCUS 技術仍處於商業化的早期階段，需要通過稅收抵免及補貼等政策措施來保障投資。
6. 國際支持對新興市場和發展中經濟體(EMDC)的煤炭加速轉型至關重要。
7. 透過企業購電協議開發再生能源：可幫助加速再生能源的佈建，且長期購電合約為開發商提供了收入穩定性，從而降低了融資成本。對大型用電企業來說，可落實降低碳排的能諾。

二、主要國家電力部門淨零排放路徑

(一)美國

1. 夏威夷州：以夏威夷電力公司為例

夏威夷群島是全球知名的度假勝地，人口約 140 萬，由八個島嶼及 100 多個無人居住的珊瑚礁、淺灘和環礁組成，綿延 2,414 公里，形成海島型之孤島電網，與我國相似。夏威夷面對氣候變遷的態度非常積極，是全美第一個宣布氣候緊急狀態的州。夏威夷已立法要求 2045 年 100% 的電力由再生能源發電¹³。約 95% 的居民從夏威夷電力公司(Hawaiian Electric, HECO)獲得電力，故該公司淨零路徑也可近似於夏威夷電力部門淨零，故本節將以 HECO 淨零路徑規劃為例，並結合夏威夷淨零政策進行說明。

(1) 現況

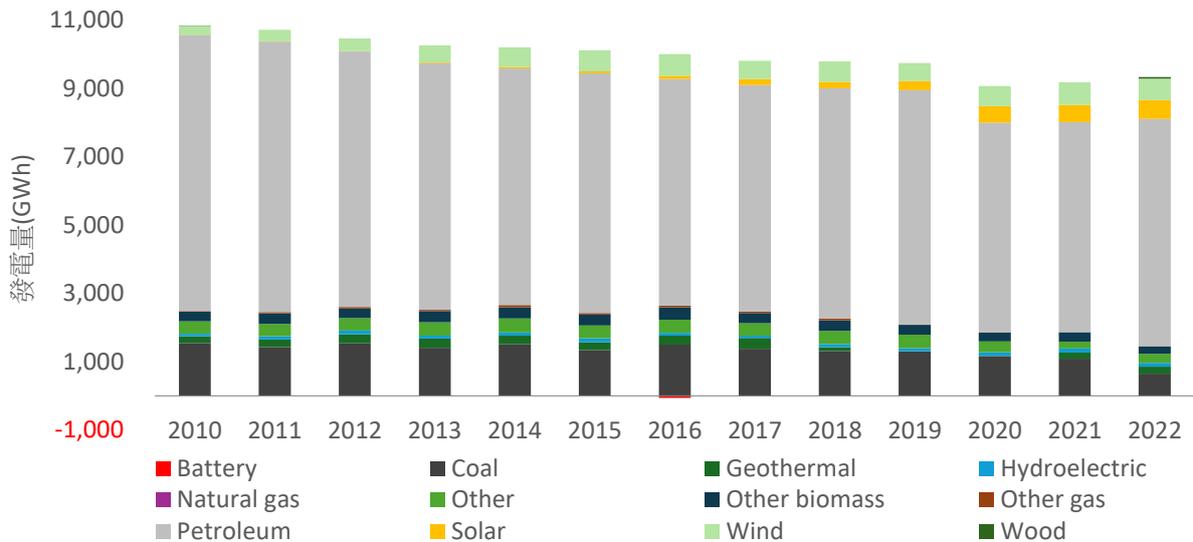
夏威夷各島間並無海底電纜連接，因此每個島嶼都自己發電。HECO 為歐胡島、茂宜島、摩洛凱島、拉奈島和夏威夷島 95% 的居民提供電力，用戶數約 471,605 戶。由圖 3-6 顯示，夏威夷州的電力供應 70% 以上為燃油，其次為燃煤、再生能源。歐胡島燃煤機組已在 2022 年底除役，故 2023 年燃油發電量增加，並設置儲能 185MW/565MWh 取代。根據官方資料統計，2023 年總裝置容量分別為穩定(火力)資源 2,168 MW、變動資源(再生能源+儲能)1,668 MW。

夏威夷州之總溫室氣體排放量如圖 3-7 所示，與 1990 年相比，2021 年夏威夷州的總排放量大約降低了 12.3%，而淨排放量則大約降低 13.6%。能源部門係

¹³ §225P-5 Zero emissions clean economy target.

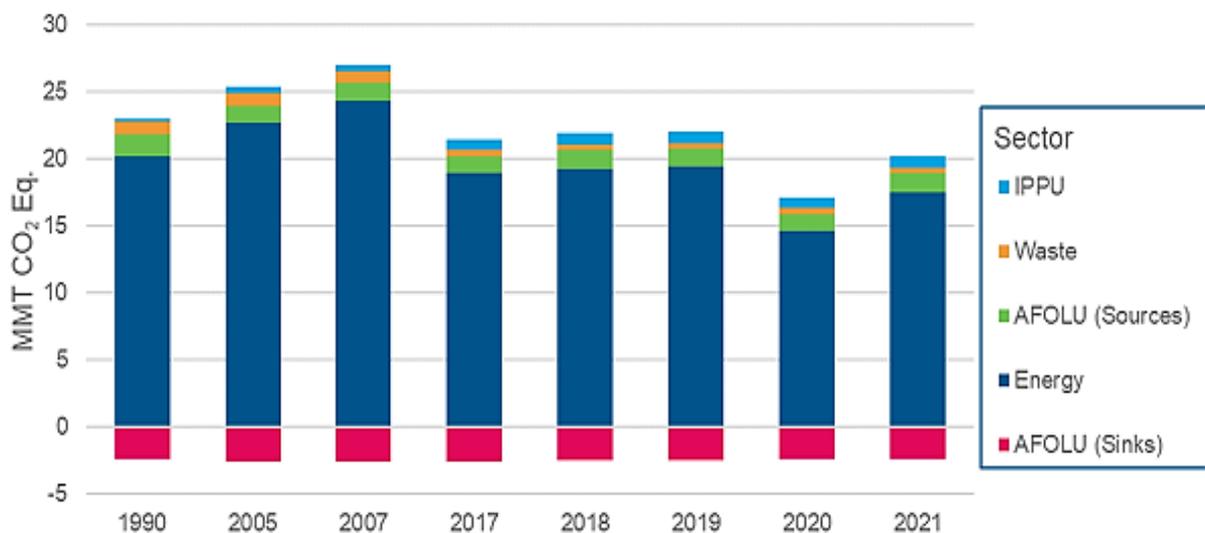
該州最大的排放部門，不過該州能源部門的統計範疇包括電力、運輸、工業及商業燃料燃燒等，其中占比最大為運輸部門。

根據 HECO 的資料顯示，2005 年電力部門碳排量約 7.5 百萬噸 CO₂e (Mt-CO₂e)。1990 至 2019 年間能源部門排放量的減少是由於來自商業和工業源的固定燃燒排放量的減少、國內海運、軍事航空與非航空排放的減少。2019 至 2020 年間，排放量一度顯著下降，主要由於新冠疫情對旅遊和其他經濟活動的影響。



資料來源：EIA, Form EIA-860, Annual Electric Generator Report.

圖 3-6、夏威夷州歷年發電結構



資料來源：State of Hawaii, Department of Health

註：1. IPPU 為工業部門、AFOLU 為農林部。

圖3-7、夏威夷州歷年碳排放量

(2) 淨零目標及路徑規劃

本節以 HECO 2023 年「綜合電網規劃(Integrated Grid Plan, IGP)」進行說明。IGP 係夏威夷 2018 年開始要求電業研制 2045 年 100%清潔能源下，電網的發展路徑規劃，定期滾動檢討，並依結果制定未來五年的開發規劃。

A. 情境

夏威夷明確立法說明未來脫碳情境完全仰賴再生能源，故 IGP 設計的各情境，皆以 100%使用再生能源為目標，整理如表 3-2。基線情境是最可能發生的路徑，各情境之差別在於能源效率、電動車成長率、售電量、尖峰負載等。值得注意的是，土地限制情境考慮歐胡島沒有足夠土地大量設置再生能源，故透過此情境，來了解太陽能、陸上風能和生物質能開發的影響。

表 3-2、夏威夷電力 100%再生能源路徑情境

情境	描述
基線 (Base)	用戶根據目前預測的市場狀況和趨勢繼續採用私人屋頂太陽能、儲能、電動車和能源效率等技術。電動車車主管理自己的充電，並且大多在太陽光電資源豐富且電價最便宜的白天充電。夏威夷電力認為這條路徑是最有可能的軌跡。
低負載 (Low Load)	用戶對能源效率和私人屋頂太陽能等技術的採用速度遠高於預期，但電動車的採用速度較緩慢。在這個情境，我們必須滿足的電力需求遠低於所有其它情境，並且達成 100%再生能源所需的大規模資源也更少。
加速新技術採用 (Faster customer technology adoption)	用戶採用所有技術，包括屋頂太陽能和電動車。與市場趨勢預測相比，能源效率更高且加速，電動車車主設法在太陽光電充足的白天為車輛充電。本情境之電力需求高於基線情境，但低於高負載情境。
高負載 (High Load)	用戶採用各類技術的速度比預期慢。基於積極的州或聯邦政策，加速電動車的採用，但車主在電網壓力最大時為車輛充電(即不受管理的電動車充電)。本情境必須滿足的電力需求遠高於所有其它情境，並且需要更大規模的資源來達成 100%再生能源目標。
土地限制 (Land-constrained)	該情境考慮到歐胡島可能沒有足夠的土地來開發大規模資源或生產 100%再生能源所需的本地生質燃料，同時平衡其它州立目標，如可負擔的房子和糧食永續。本情境有助於了解在有限的土地供應，對未來太陽能、陸上風能和生物質能開發的影響。在此情境中，用戶採用技術與基情境假設相同。

資料來源：Hawaii Powered, IGP (2023)

候選資源的選擇，以可商業化且具有成本效益的資源為主，如太陽光電、風力發電、儲能、地熱、生質能等。雖然美國能源部致力於開發氫能技術，目標 2030 年以 1 美元/公斤的成本生產氫氣。但根據《夏威夷修正法(HRS)》第 269-91 條的規定，氫氣必須從再生能源來源生產，排除了化石燃料製氫。加上州內發電設備老化，除非大規模改造並建立相關輸送基礎設施，否則無法使用氫能發電，因此 IGP 暫時排除氫能的選項。

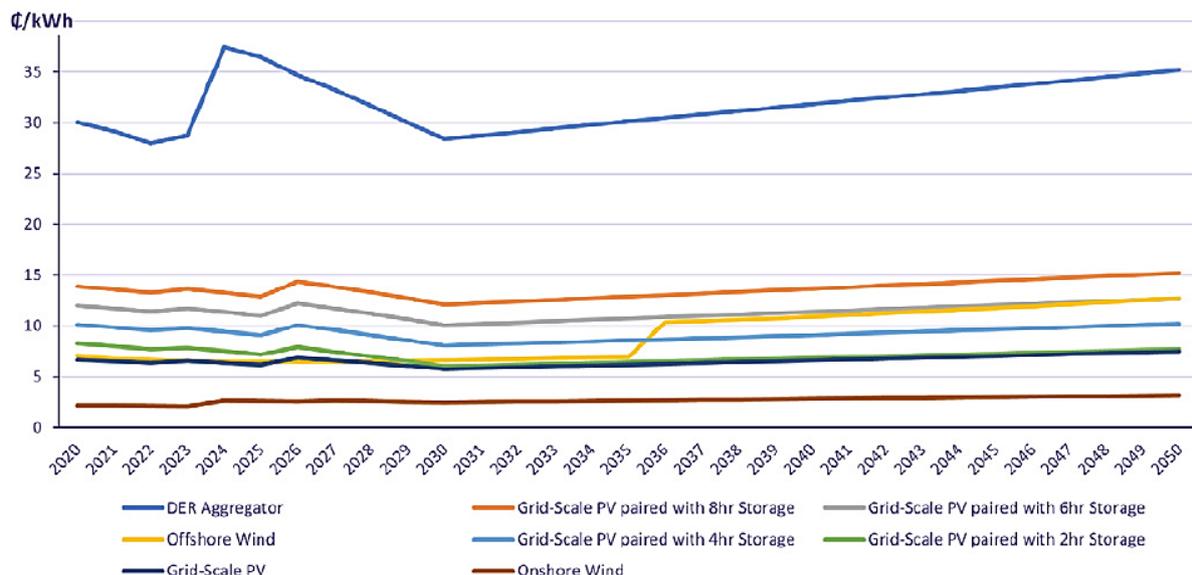
B. 架構

IGP 考慮六項目標進行未來能資源組合的評估，再透過模型串接，進行滿足電力負載需求及電網可靠度之淨零路徑規劃。分別是：

- 再生能源組合標準(Renewable Portfolio Standards)
- 系統可靠性(System Reliability)
- 可負擔價格(Affordability)
- 減少環境碳影響(Environmental Carbon Impact Reduction)
- 電網韌性(Grid Resilience)
- 社區影響和土地利用(Community Impacts and Land Use)

首先，應用容量擴充(Capacity Expansion)模型，在滿足電力需求下，依各類資源成本，計算成本最小之資源組合；再進行資源充裕性評估(Resource Adequacy)，分析各類資源在電力系統需求下之可用性，第三進行生產成本模擬(Production Cost Simulations，亦可理解為電力調度模擬¹⁴)；最後是系統安全性分析。

IGP 採用的資源成本數據係參考美國能源部(DOE)之風力發電及儲能成本評估報告、再生能源實驗室(NREL)的 Annual Technology Baseline (ATB)、能源資訊署(EIA)的新發電技術成本與效能報告為基礎，再根據夏威夷地理區域之資本和營運維護成本調整，最後加上聯邦及夏威夷州稅收優惠，刻劃各類資源的成本，如圖 3-8 所示。



資料來源：Hawaiian Electric, IGP report, 2023.

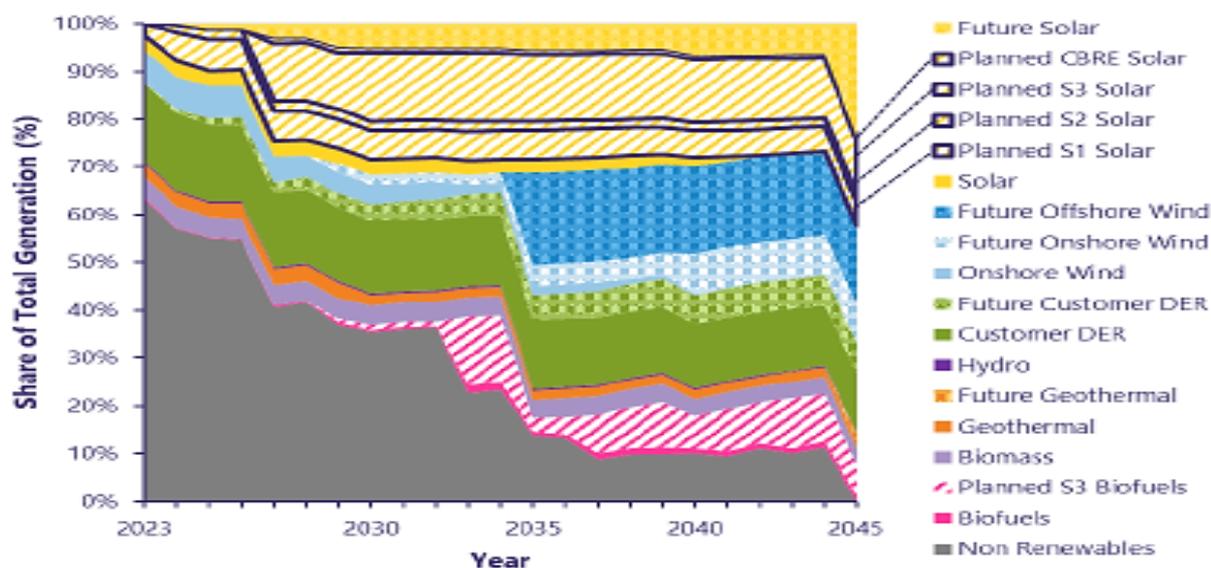
圖 3-8、IGP 分析使用之資源均化成本

¹⁴ 從容量擴充及資源可用性結果進一步分析組合是否滿足每小時調度需求，再生能源較多的系統，計算時間單位應小於 1 小時，才能有效捕捉再生能源間歇性出力時，各資源升降載能力是否滿足調度需求。

其中以陸域風電、電網級 PV 搭配儲能、離岸風電最具成本優勢。在短期內，考慮到聯邦和州投資稅收抵免後，價格有所下降。長期來看，當稅收抵免逐步縮減後，資源成本通常會隨時間增加。

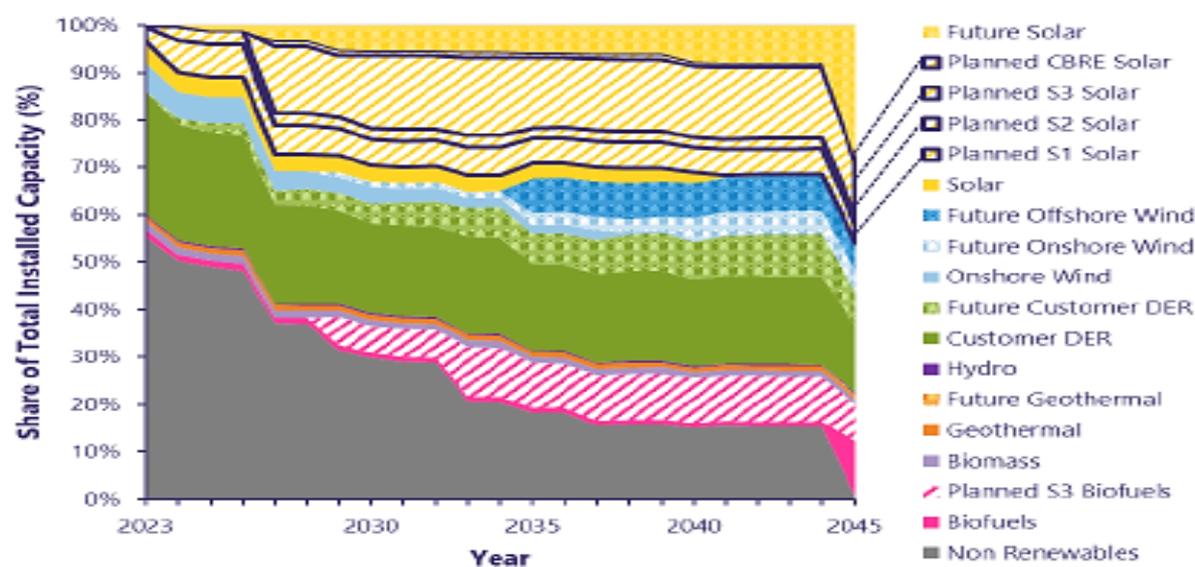
C. 結果

基線情境是雖是 IGP 認為的最可行路徑，但歐胡島土地受限之情境較為符合現況。由基線情境分析結果如圖 3-9、圖 3-10 所示，未來之裝置容量以太陽光電為主，其次為分散式電源，包括屋頂型太陽能、電池、電動車等。為因應間歇性，電池儲能系統(BESS)的持續時間由 1-2 小時，增加到 4 小時。到 2045 年尚有小部分垃圾焚燒排放，將透過碳匯移除。



資料來源：Hawaii Powered, IGP- Preferred Plans and Next Steps (2023)

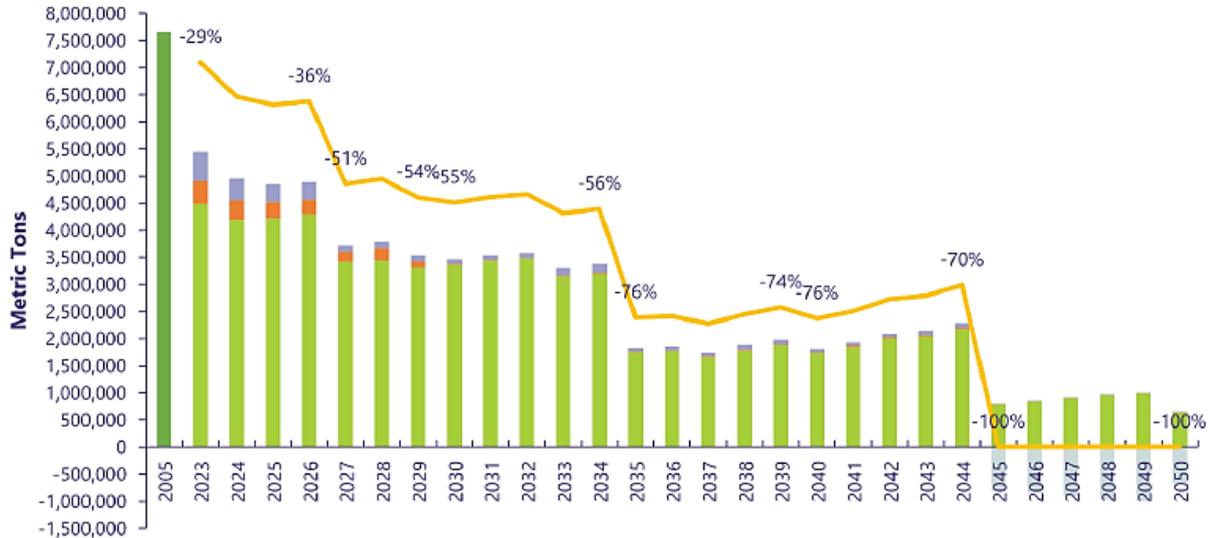
圖 3-9、夏威夷基線情境之發電結構



資料來源：Hawaii Powered, IGP- Preferred Plans and Next Steps (2023)

圖 3-10、夏威夷基線情境之裝置容量結構

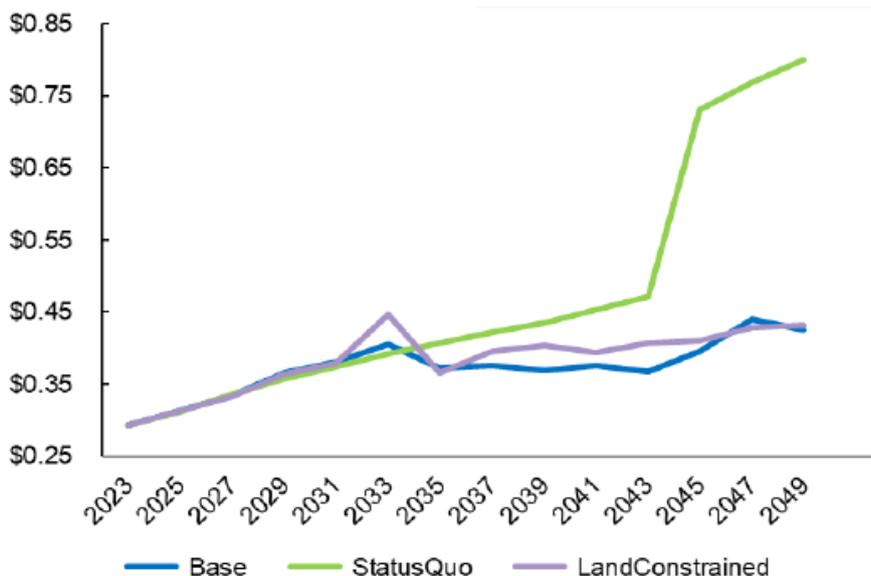
夏威夷電力逐年減碳量推估如圖 3-11 所示，到 2030 年預計將比 2005 年減少 55% 碳排放量。如前所述，夏威夷各島間並無海底電纜連接，故各島必須建至足夠的裝置容量，至 2030 年，各島再生能源發電占比目標：歐胡島 55%、夏威夷島 99%、茂宜島 91%、拉奈島 95% 和摩洛凱島 92%，平均為 65%。



資料來源：Hawaii Powered, IGP- Preferred Plans and Next Steps (2023)

圖 3-11、夏威夷電力逐年減碳量推估

用戶端平均電價試算如圖 3-12 所示，分為基本情境、現狀(持續使用化石燃料)、及土地限制情境。三種情境未來之電價皆呈現上升趨勢，但現狀情境之電價高於另外兩個情境，原因在於夏威夷以高成本的燃油發電為主，容易受油價波動影響。而大量建置再生能源對於夏威夷來說，雖然初期電網投資成本可能較高，但長期而言，提高能能源自給率後，有助於平穩長期價格。



資料來源：Hawaiian Electric, IGP report, 2023.

圖3-12、歐胡島未來平均電價推估

(3) 轉型方向與政策

夏威夷明確立法 2045 年全州將供應 100% 再生能源，並依照上述 IGP 分析制定之電源開發規劃，在 2030 年預計將有 542 MW 之火力資源退役，並新增容量約 157 MW 之混合型太陽光電+風能、BESS。新資源的建置預計將透過兩輪的採購進行招標。第三階段之資源建置規劃尚在評估中。相關政策或法案整理如表 3-3 所示。

表 3-3、夏威夷州電力部門淨零相關政策

政策領域	具體政策或法案
淨零法案	《夏威夷修正法(HRS)》§225P-5：2045 年前淨零
可行性評估	責成州能源辦公室「分析落實該州整體經濟脫碳目標的途徑並提出建議」
永續發展	《夏威夷規劃法》§226-65：要求制定夏威夷州的綜合氣候與可持續發展策略行動計劃，必須考慮促進可持續經濟復甦、減少溫室氣體排放、提高氣候韌性、推進可持續社區、促進公平、制度化可持續發展、保護自然環境及傳承夏威夷文化。
交通運輸	《夏威夷全州交通計劃》第 279A 章，要求每十年更新一次，作為全州交通系統規劃的框架。
2030 年法定目標	1. 《HRS》能源效率標準§269-96：2030 年全州電力用量減少 4,300 GWh 2. 《HRS》§269-92：售電業到 2030 年底，淨發電量 40% 來自再生能源。 3. 溫室氣體排放限制§225P-5：2030 年全州溫室氣體排放量比 2005 年的水平減少 50%。 4. 運具電動化 Act 74§ 225P-7, 264-20.7：2030 年底，輕型車必須零排放。
2035 年法定目標	1. 教育部淨零能源目標§320A-1510：夏威夷教育部 2035 年 1 月 1 日實現淨零能源使用，所有公立學校生產之再生能源與其消耗量相等。 2. 夏威夷大學淨零能源目標§304A-119：要求夏威夷大學到 2035 年 1 月 1 日實現淨零能源使用，在所有校區生產的再生能源與其消耗量相同。 3. 運具電動化 Act 74§ 225P-7, 264-20.7 2030 年底，所有輕型車輛必須為零排放車輛。
2040 年法定目標	《HRS》§269-92：要求每個售電業到 2040 年 12 月 31 日，其淨電力發電量的 70% 來自再生能源。
2045 年法定目標	1. 《HRS》§269-92：售電業到 2045 年底，淨發電量全部來自再生能源。 2. 《HRS》§225P-5：要求州政府儘快實現從大氣中吸收的碳和溫室氣體多於州內排放的目標，但不得晚於 2045 年。

資料來源：Hawaii State Energy Office, Hawaii Pathway's to Decarbonization, Dec 2023.

IGP 建議未來轉型之方向如下：

- 穩定電價並促進能源公平：雖然在短期內電費可能會上升，但未來電價將降低且不太波動，用戶帳單在長期可能會保持平穩。
- 擴大客戶規模和大型再生能源市場：用戶和社區的再生能源發電和儲能能夠提供支持電動車轉型的足夠電力，同時減少對大型再生能源所需土

地的需求。HECO 將提出多元客戶方案，透過獎勵措施來增加客戶參與屋頂太陽能、儲能、電動車充電和負載管理措施。

- 創建現代化且具有彈性的電網：預計在未來的 10 年將投資 13 億美元升級輸配電線路。
- 多樣化的能源來源和技術確保可靠性：在各種不同規模的資源上進行投資，包括電網級再生能源及其他低碳發電技術，以取代化石燃料機組，並支援用戶家中和社區依賴天氣的太陽能和風能。

2. 加州

加州係美國經濟規模最大的州，位處陽光普照的區域，擁有高科技中心和創新搖籃，矽谷，也是眾多知名科技公司基地。諸多優勢，使得加州對於環境永續的落實一直是全球先驅。加州在 2018 年訂下 100%清潔能源法案《SB 100》¹⁵，要求 2045 年售電業達到 100%清潔電力，並在「再生能源銷售組合標準(Renewable Portfolio Standard, RPS)」，要求 2030 年至少 60%為再生能源。本節將介紹加州電力部門淨零轉型推動情形，依序說明該州電力部門現況、州政府定期提出之淨零路徑分析報告、轉型及發展方向及具體政策或措施。

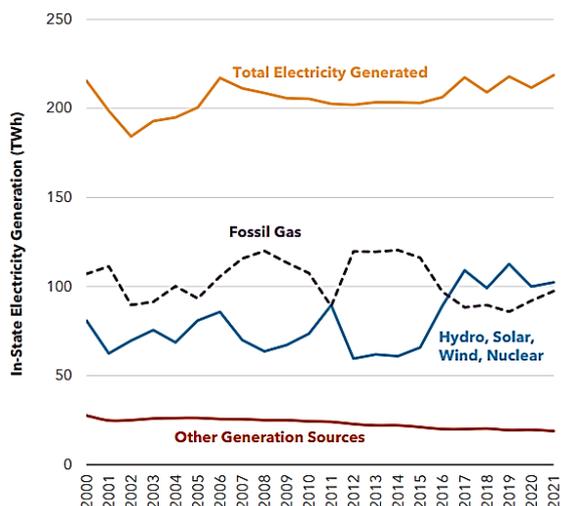
(1) 現況

加州電力系統與相鄰州互聯，藉由電力市場的開放及整合，加州可由其他州進出口電力。加州各資源發電量如圖 3-13 所示，包括化石燃料、再生能源及其他¹⁶。自 2000 年以來，化石燃料發電量持續下降。州內天然氣發電量之波動係因供給端之水力、太陽能、風能、核能發電量和負載端用電量之年際波動。加州之 RPS 計劃和碳排總量與交易(Cap-and-Trade)促使增加再生能源發電持續增加，並增加從其他地方進口太陽能和風力發電，其他資源之發電量隨時間推進逐漸下降。2021 年加州 47.5%電力(州內+進口)來自太陽能、風能、水力和核能，以滿足加州的電力負載。更高的能源效率標準也有助於抵消人口和經濟增長帶來的電力需求增長。

雖然水力發電的波動會導致溫室氣體排放變化，但發電部門的溫室氣體密度整體呈下降趨勢。2021 年電力部門排放量約占加州總排放量之 16.4%，如圖 3-14 所示。電力部門的排放主要來自化石燃料燃燒，水力發電較低的年份，因為需要更多化石燃料來滿足負載，通常導致排放增加。隨著太陽能和風能發電量增加，以及從其它州進口電力，使州內化石燃料發電需求逐漸減少。

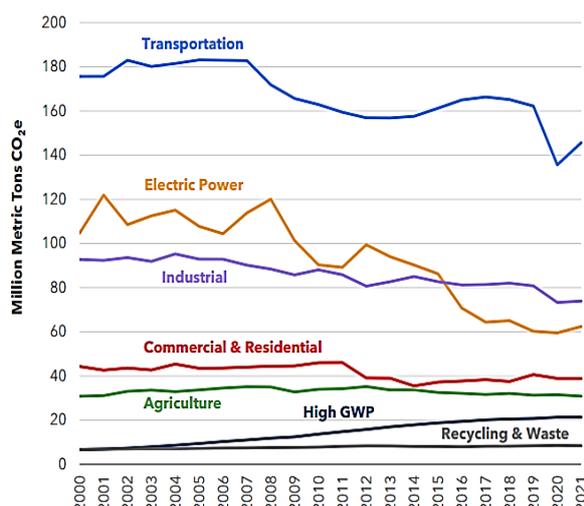
¹⁵ 加州《SB 100》法案：The 100 Percent Clean Energy Act of 2018 Senate Bill 100 (SB 100, De León)

¹⁶ 其他發電來源包括生質能、煤碳、原油、沼氣、餾出油、地熱、噴氣燃料、煤油、掩埋場氣、褐煤、城市固體廢物、石油焦炭、丙烷、購置蒸汽、煉製廠氣、殘渣燃料油、次煙煤、合成煤、輪胎、廢棄煤炭、廢棄熱量和廢油的發電。



資料來源：California Air Resources Board

圖 3-13、加州歷年發電結構



資料來源：California Air Resources Board

圖 3-14、加州歷年排碳量

(2) 淨零目標及路徑規劃

A. 情境

加州政府於 2018 年訂定《SB 100》法案後，要求能源委員會、公用事業委員會和空氣資源委員會組成聯合機構，落實 100%清潔電力。自 2021 年起，每四年發布一份聯合政策(SB 100 Joint Agency Report)。2021 年 SB 100 Joint Agency Report 設計了三種情境，前兩種分別為「核心情境」及「研究情境」，第三種為 2045 年僅達成「60% RPS」的反事實情境或稱參考基線，用以評估 100%清潔電力政策的影響。情境分類詳見表 3-4。

核心情境參數係基於公開可用成本和性能數據的商業化技術及聯合機構對《SB 100》法案的解讀，由於對一些低碳資源新技術尚未商業化，缺乏成本及性能數據及加州法規的限制，因此報告不包括下列資源新建核能¹⁷、替代燃料(綠氫及合成甲烷)、燃氣+CCS、燃煤+CCS、新建小型及大型水力發電、新建聚光太陽能發電。

表 3-4、加州 2021 淨零路徑-情境分類

情境分類	描述
60% RPS (反事實-基線)	2045 年僅達成 60% RPS
SB 100 Core Scenario (SB 100 核心情境)	範疇包括零售銷售和州負載、高電氣化需求、所有候選資源均可用。
Study, Expanded Load Coverage (研究情境-擴大負載覆蓋範圍)	範疇包含儲能和系統損耗、高電氣化需求、所有候選資源均可用。亦進行需求和資源的敏感性分析。

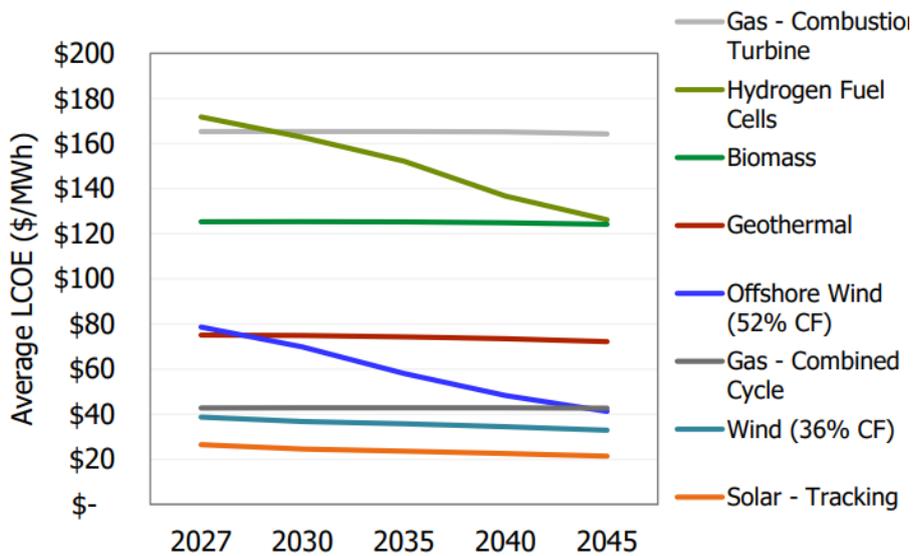
資料來源：CEC, 2021 SB 100 Joint Agency Report.

¹⁷ 基於加州法規 Warren-Alquist Act.82，該州對新的核電廠設立了禁令。

B. 架構

2021 年報告僅使用了容量擴充模型評估 2045 年政策目標，尚未包含全面的可靠性評估、環境、健康及其他社會影響的定量評估。因此發電組合及相關成本的推估，可能會在後續的評估報告中發生變化。

納入 2021 年報告之供給端資源包括再生能源、氫能、燃氣、儲能和輸電資源。需求端資源則包括用戶端太陽能、用戶端儲能和需量反應。各類資源之成本參考美國各機構定期更新之數值¹⁸。圖 3-15 即為該報告採用之資源均化成本，美國目前陸域風電及太陽光電之成本已低於燃氣複循環成本，隨著技術的進步，未來氫能及離岸風電技術的成本將接近或低於化石燃料。



資料來源：2021 SB 100 Joint Agency Report

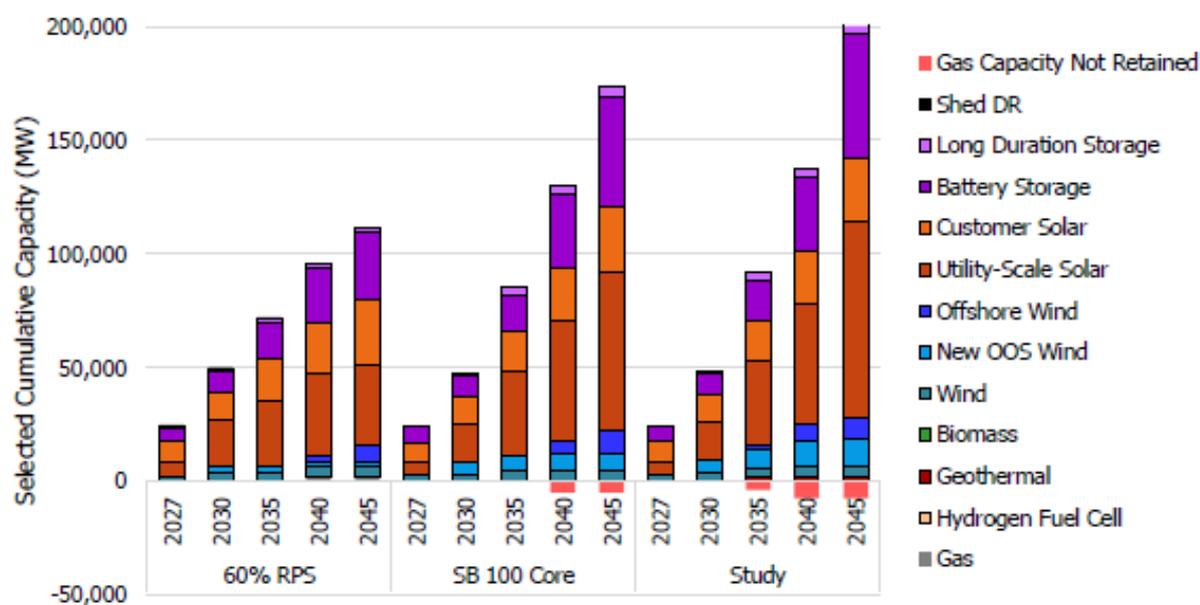
圖 3-15、加州電力部門淨零分析採用之資源均化成本

C. 結果

分析結果如圖 3-16 顯示，所有情境在 2045 年之總裝置容量皆顯著增加，60% RPS 情境須增加 73 GW、核心情境須增加 145 GW、高電氣化之研究情境須增加 173 GW。未來供電以太陽光電為主，並搭配儲能，再加上陸域/離岸風電、氫能、地熱及生質能等。在經濟最佳化的考量下，核心情境除役了 4.7 GW 燃氣機組、研究情境除役了 7.2 GW 燃氣機組。初步分析亦表明，《SB 100》在技術上是可實現的，而落實《SB 100》的總資源成本(TCR)¹⁹比 2045 年達到 60% RPS 高出約 6%，如表 3-5 所示。

¹⁸ 如 NREL 之 ATB、DOE 之氫氣分析報告、民間投資銀行 Lazard 之儲能均化成本分析及 NREL 之太陽能與儲能報告

¹⁹ 總資源成本是系統為滿足未來政策和可靠性目標所需的總成本，其中包括固定成本之發電、輸電、儲能、負載調節資源相關的均化資本投資及營運成本。也可看出隨著能源轉型的過程，每度電的成本將增加。倘若再生能源的成本趨勢下降更快速、零碳技術的成本降低和創新、彈性負載和儲能的發展，可再進一步降低實施成本。



資料來源：CEC Staff and E3 Analysis

圖 3-16、加州不同情境下之容量擴充分結果

表 3-5、加州各淨零路徑之總資源成本

\$ Billions (2016)	60% RPS	SB 100 Core	Study
Nonmodeled Cost	\$38	\$38	\$38
Scenario Fixed Costs	\$9.8	\$18.8	\$25.0
Total Operating Costs	\$7.0	\$2.5	\$0.5
Total Revenue Requirement	\$55	\$60	\$64
Customer Costs	\$6.7	\$6.7	\$6.7
Total Resource Costs	\$62	\$66	\$70
Retail Sales (TWh)	372	372	372
Average Cost (Cent/kWh)	14.8	16.0	17.1

資料來源：CEC Staff and E3 Analysis

上述的《SB 100》核心情境的分析具方向性，可初步確定加州電力部門在 2045 淨零的可行性。然而，技術成本的發展充滿不確定性，還必須進一步進行可靠性分析，才可更真實模擬未來轉型的方向，提供決策參考。加上本次分析尚有多樣資源未納進計算²⁰，故需再後續的報告中修正。

(3) 轉型方向與政策

運輸與建築部門是加州最大的兩個排放源，透過電氣化可有效降低兩者之碳排放，相對的，電力需求會上升，故訂定相關法規，管理需求增長，同時也為低碳資源開發訂定相關法規(如表 3-6)。因此，加州碳中和相關總預算約 523 億美

²⁰ 包括基於目前需求情境和資源成本預測的最低成本模型、CPUC 至 2039 年計劃、各電業資源計劃等、表前/表後分散式資源、氫能、CCS、擴大區域傳輸，允許加州與整個西部電力協調委員會之間進行更大範圍的電能交易等。

金；電力部門直接預算約 82 億美金，主要用於提升供電可靠度及加速清潔能源投資；運輸部門預算約 239 億美金，提供汽車、卡車、校車電動化；在自然為本之碳匯上，投入 14 億美金以恢復森林、林地、草原、河流和其他自然景觀。

表 3-6、加州電力部門淨零相關政策

政策領域	具體政策或法案
清潔能源銷售	SB 100：100% 清潔能源法案。2045 年 100% 清潔能源銷售。
公正轉型	SB 1020：2022 年《清潔能源工作與可負擔性法案》。在 SB 100 建立的政策框架上增加了過渡目標。
交通運輸	先進清潔汽車政策。
	先進清潔卡車政策。
	先進清潔車隊政策。
	清潔卡車合作伙伴關係。
建築物減碳化	加州空氣資源局(CARB)正在制定針對加州銷售的新空間和熱水器的零排放溫室氣體標準，計劃於 2030 年生效。
氫能發展	SB 1075：分析在加州擴大氫氣生產、傳輸和使用的機會與影響
電網可靠性	AB 205：策略可靠性備轉。加強電網可靠性，並在極端事件中提供額外資源。
核能發電廠	SB 846：魔鬼谷核能發電廠。保留延長運營的選項。
負載管理及清潔能源採購	SB 846：負載移轉目標。在不增加碳排及電價之前提下，增加需量反應和負載移轉。
	負載管理標準更新。
	過去四年內，加州公用事業委員會(CPUC)已指示售電業(LSEs)採購 18.8 GW 的清潔能源，並實施了需求面管理，如緊急抑低負載。
輸電設施規劃	SB 887：輸電設施規劃。基於可再生和零碳資源組合進行新輸電設施的規劃。
	CEC、CPUC、CAISO 之間的輸電網和資源規劃與實施之備忘錄
海上風能基礎設施開發	AB 525：海上風能基礎設施開發
自願認證計劃	AB 205：選擇參與的認證計劃。自願環境審查許可流程
鋰提取委員會	AB 1657：鋰提取藍勳帶委員會。作為從薩爾頓海地區地熱鹵水中回收鋰行業發展的指南。

資料來源：CEC, Developments in Policy and Funding to Support Achieving SB 100, Aug 2023.

加州透過明確立法之 RPS 目標規範售電業提供清潔能源的比例及時間。同時也持續推廣新興技術，例如表後用戶端 PV+儲能。加州電力市場的改革將整合整個美西區域，以利電網胃納更多的再生能源。加州也獲得美國能源部 12 億美金經費支持，建置加州氫氣中心²¹，透過再生能源及生質能製氫，在貨物交通運輸、電力部門和重工業脫碳等方面發揮作用。

²¹ 加州氫氣中心，<https://www.energy.gov/oced/california-hydrogen-hub-arches>

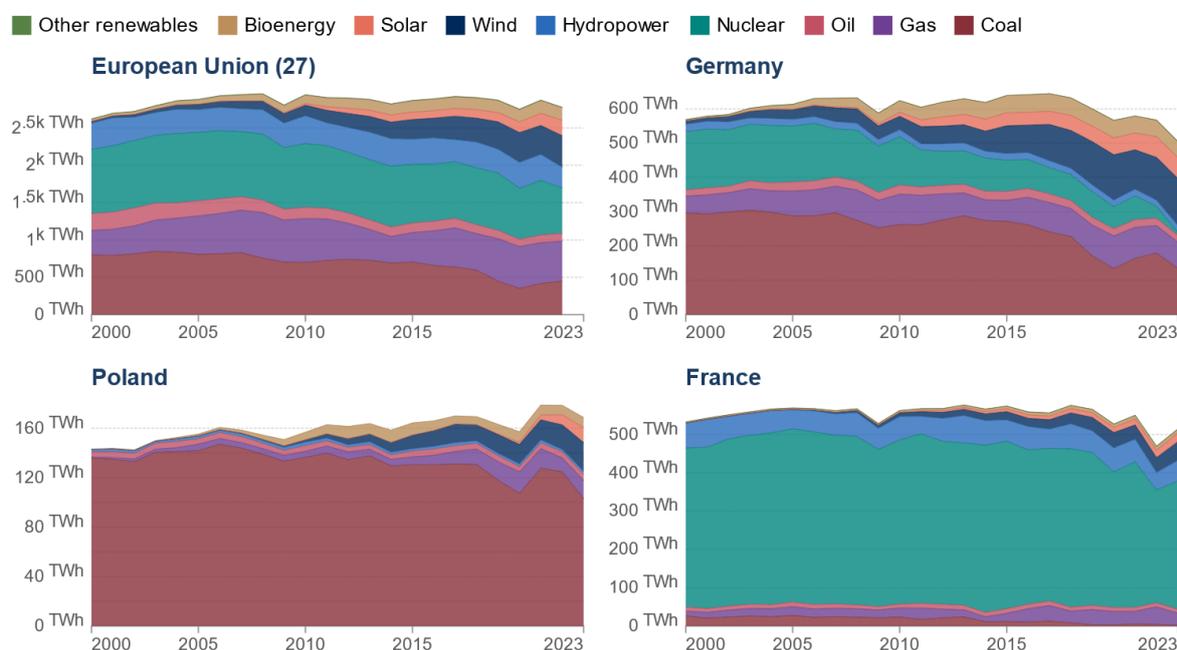
(二) 歐盟

歐盟目標成為第一個在 2050 年達成淨零的大陸，2020 年 3 月發布的《歐洲氣候法(European Climate Law)》將減排目標入法，長期目標為 2050 年達成淨零，中期目標係 2030 年之溫室氣排放量須降至 1990 年之 55%。2023 年奧地利、比利時、法國、德國、盧森堡、荷蘭和瑞士等國宣布了 2035 年實現互聯電力系統脫碳的共同目標，這是邁向歐洲脫碳共同道路的重要一步。

本節將參考歐盟委員會轄下之聯合研究中心(JCR)之全球能源及氣候展望報告中，探討歐盟電力部門淨零路徑，及結合歐盟委員會之相關法規或政策，說明歐盟電力部門淨零規劃。

1. 現況

歐盟電力部門歷年發電量如圖 3-17 所示²²，自 2005 年 EU ETS 實施以來，燃煤與燃氣發電呈現下降的趨勢，太陽光電、風能、生質能等呈現上升。2022 年俄烏戰爭導致的天然氣及石油價格飆漲，使燃煤發電增加，以德國及波蘭最明顯，幾乎占了歐盟燃煤發電之三分之二。為擺脫對俄羅斯天然氣的依賴，歐盟 2022 年推出 RepowerEU 計畫，目標在 2030 年將再生能源發電量提升至 45% (2022 年約 38%)。2023 年燃煤排放量創下了歷史性下降紀錄，而代之的是風能和太陽能。隨著許多國家接近淘汰煤炭，天然氣也將成為下一個進入衰退的能源。



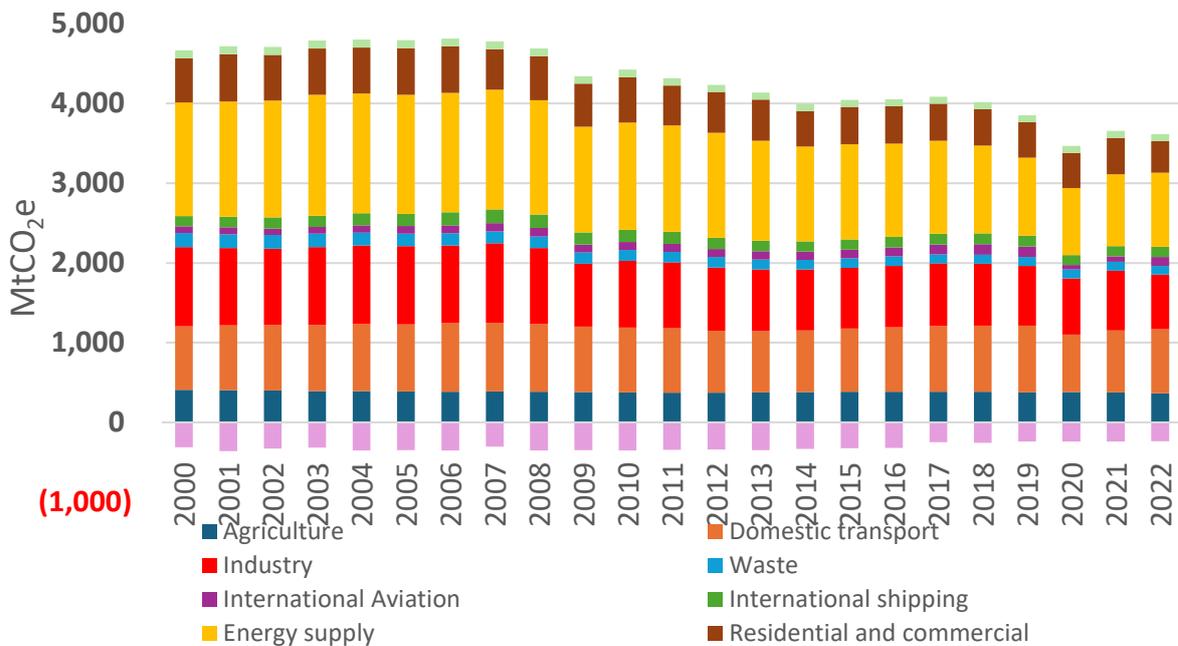
Data source: Ember (2024); Energy Institute - Statistical Review of World Energy (2024) OurWorldInData.org/energy | CC BY
Note: "Other renewables" include waste, geothermal, wave, and tidal.

圖 3-17、歐盟電力部門歷年發電量

²² 截至截稿日，歐盟官方統計資料僅到 2022 年，故再加上德國、法國及波蘭等用電量及碳排較大的國家至 2023 年發電組合一起說明。

歐盟各部門歷年溫室氣體排放量如圖 3-18 所示²³，能源部門(包含電力及天然氣)占比最高，其次為運輸及工業。溫室氣體排放整體呈現下降的趨勢，2021 年疫後復甦及 2022 年俄烏戰爭導致燃煤發電增加，導致排放量上升。

不過根據歐盟方最新資訊顯示，2024 年第一季歐盟溫室氣體排放較 2023 年同期下降 4%，其中降幅最大之部門為能源部門(-12.6%)及家庭和商業(-4.4%)。2023 年多數歐盟國家之排放量降低，主要是因為再生能源增加，取代燃煤發電。



資料來源：European Environment Agency

圖 3-18、歐盟各部門歷年溫室氣體排放量

2. 淨零目標及路徑規劃

歐盟委員會轄下之聯合研究中心(JCR)定期發布的全球能源與氣候展望報告，以科學方法進行量化分析，提供委員會進行決策判斷。本節將以該報告內容，說明歐盟淨零情境、架構及規劃結果。

(1) 情境

JCR 設計三種情境，如表 3-7 所示，除參考情境外，還有以各成員國淨零政策目標、國家自主貢獻之 NDC-LTS 情境及控制升溫 1.5°C 以下之情境。

(2) 架構

POLES-JRC 是一個全球能源經濟的部門平衡模擬模型，完整涵蓋從上游生產到最終用戶需求的能源部門。具有內生的國際能源價格，並透過世界各地區的供需滯後調整，從而描述到 2050 年的完整發展路徑。應用至電力部門，可分析新

²³ 截至截稿日，歐盟官方公開數據提供下載至 2022 年。2023 及 2024 排放量資訊為官方新聞。

電廠的容量規劃以及現有電廠的運營。此模型之功能同前述之容量擴充模型，但不包含進一步的調度分析。

表 3-7、歐盟淨零路徑情境設計

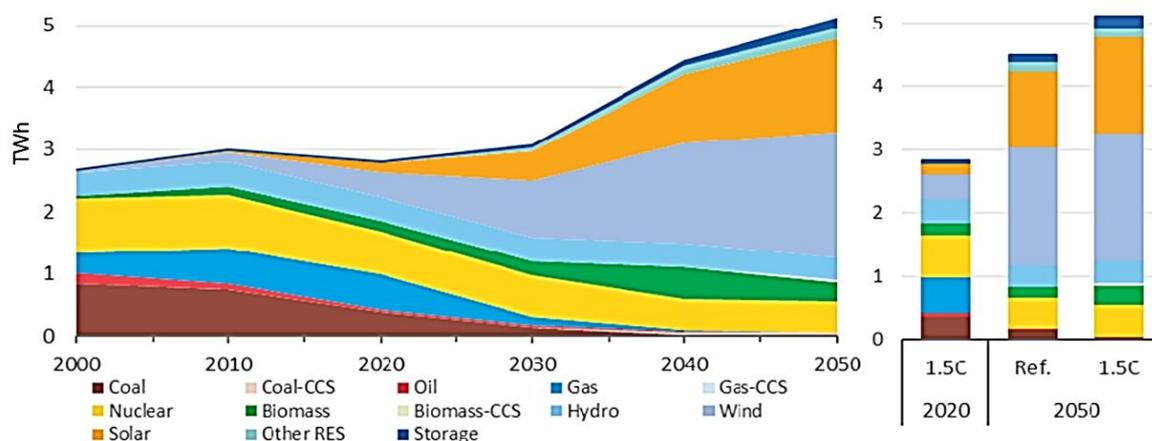
情境名稱	定義
參考情境 (Reference)	各國 2023 年 6 月前立法之淨零政策。外生的宏觀經濟預測(GDP 和人口)和 POLES-JRC 模型計算的內生能源價格與技術發展，並結合已執行的政策，產生能源系統和溫室氣體排放的預測。
NDC-LTS 情境	以各國 NDC 作為中期目標、宣示內容做為長期目標 LTS。在短期(2030)目標中，除了參考情境中已立法的措施外，還加入了碳價和其他監管工具，以達成特定部門或整個經濟的目標。在長期目標中。如果某個國家未宣布 LTS，則假定不做額外的減排努力，並保持 2030 年的碳價不變。
1.5°C 情境	將本世紀的全球溫度上升限制在 1.5°C 下之假設，該情境該情境使用單一全球碳價，從 2024 年開始並快速上升。不包括 NDC-LTS 情境由下而上之政策驅動因素(如再生能源目標)，而是基於參考情境的政策設定為基礎，推估淨零路徑。

資料來源：European Union, Global energy and climate outlook 2023, 2023.

電力需求係從各部門發展推估，容量擴充考慮了現有資源結構、負載需求預期變化、新技術之生產成本以及再生能源潛力。電廠的運營根據已安裝的容量、每種技術類型之變動成本、再生能源之可用性以及彈性需求設備(如 BESS、V2G、需求面管理)之貢獻，來匹配電力需求變化。各部門之電價取決於電力組合、負載曲線及能源稅的變化。

(3) 結果

如圖 3-19 所示，僅參考情境無法達成淨零，但 NDC-LTS 情境之能源需求增長變化，出現與電力部門的運營模式不同的狀況。在 1.5°C 情境中，化石燃料發電逐年降低，2050 年歐盟之發電結構主要由風能及太陽能主導，占比約 80%，核能是第三大發電來源。配備 CCS 技術之發電廠僅佔 1.9%的發電量。



資料來源：European Union, Global energy and climate outlook 2023, 2023.

圖 3-19、歐盟在 1.5°C 情境下之淨零路推估分析結果

3. 轉型方向與政策

歐盟委員會制定與電力部門相關之政策或法規如表 3-8 所示。整體政策包括綠色新政、55 方案及 Repower EU，旨在促進低碳能源發展，並終止對俄國油氣的依賴。另制定《歐洲氣候法》將氣候中和作為歐盟法律約束目標，並以《淨零產業法》促進再生能源、核能及 CCS 技術發展。

表 3-8、歐盟電力部門淨零相關政策

政策領域	具體政策或法案
碳定價機制	EU ETS：2013 年正式實施。發電業為其管制業別。
氣候變遷法	《歐洲氣候法》(European Climate Law)：於 2021 年 7 月立法，將氣候中和目標作為歐盟的法律約束目標，同時要求到 2030 年將溫室氣體(GHG)排放量比 1990 年水平至少減少 55%。
整體政策	<ol style="list-style-type: none"> 1. 綠色新政 European Green Deal：2019 年 12 月推出，是歐盟的長期經濟整體計劃，旨在到 2050 年使歐洲實現淨零。面向涵蓋氣候治理、能源、工業、運輸、農業、生物多樣性、污染防治、公正轉型機制、永續金融、創新研發、國際合作等。2021-2030 預計投入 1 兆歐元預算。該政策中，提出歐盟能源系統整合與氫能策略，推動電力、天然氣與供熱系統整合，檢討跨歐洲能源網路相關法規 2. 55 方案：2021 年推出，概述了到 2030 年將溫室氣體排放減少 55% 的政策措施。該方案包括修訂再生能源指令，將 2030 年歐盟資源組合中的再生能源目標從原定的 32% 提高到「至少 40%」。 3. RepowerEU：2022 年 5 月推出，該計劃旨在終止歐盟對俄羅斯石油和天然氣進口的依賴並應對氣候危機，轉型歐洲的能源系統，措施包括節能、能源供應多元化以及加速推廣再生能源，目標是到 2030 年將再生能源在歐盟能源組合中的比例提高至 45%。
綠色製造	淨零產業法案(Net-Zero Industry Act, NZIA)：2024 年 6 月立法，強化歐盟淨零技術製造韌性與競爭力，確保歐盟能源轉型。著重於增加對關鍵技術的支持，以助歐盟減少排放並轉向無碳能源生產，符合條件的技術包括再生能源、核能與 CCS 等。

資料來源：本研究整理。

而根據 JCR 的分析，加速再生能源和能源效率投資是實現 1.5°C 目標的關鍵。未來的電力系統將由風能及太陽能為供電的主導。歐盟也提出許多相對應的計畫如下所述，促進電力系統轉型。

- (1) 陸域及離岸風電政策²⁴：2021 年風電占整體再生能源 37%，2030 年至少 510 GW 風電(含 60 GW 離岸風電)，2050 年至少 300 GW 離岸風電。
- (2) 太陽光電政策²⁵：2020 年歐盟已安裝 136 GW 容量，目標 2025 年超過 320 GW，2030 年至少 600 GW。

²⁴ COM(2020)741, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM:2020:741:FIN&qid=1605792629666>

²⁵ COM(2022)221, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52022AE3515&qid=1682590629396>

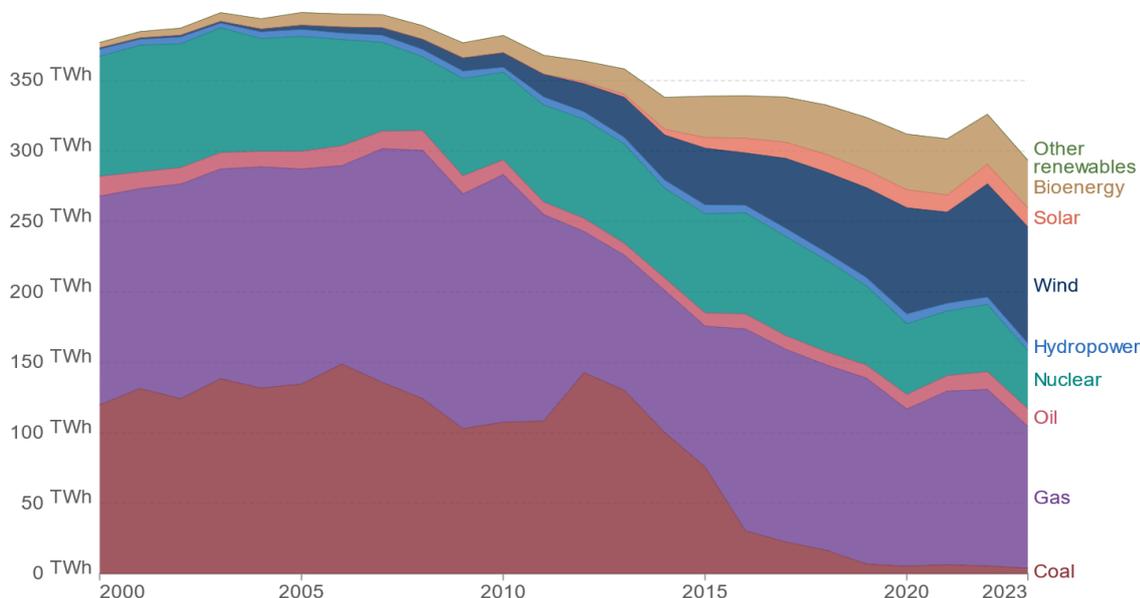
- (3) 跨歐能源網路(TEN-E)：基礎設施的建置包括離岸風電、氫能、電解槽、智慧天然氣網路、智慧電網(除傳輸線路外)；CO₂運輸網路及儲能。
- (4) 十年網路發展計劃：歐洲電網(ENTSO-E)及天然氣網路(ENTSO-G)營運商每兩年聯合發布「十年網路發展計畫(TNYDP)」，評估了 2022 年的 141 個輸電計畫(包含 85 個跨國計畫及 23 個儲能計畫)，線路總計長達 43,000 公里²⁶。

(三) 英國

英國係全球提倡溫室氣體減量的先驅國，其電力部門目標於 2035 年完全脫碳。本節以英國第六次碳預算報告中電力部門淨零路徑為主，再結合電力部門淨零相關政策，說明淨零路徑。

1. 現況

英國電網透過海底電纜與歐洲本土、挪威、愛爾蘭電網連結，必要時可藉由歐洲耦合的電力市場交易，進出口電力，有效調度資源及提升再生能源的使用。圖 3-20 為英國電力部門歷年發電資源組合，近年電力部門排放量減少主要歸因於發電燃料組合的變化，從燃煤轉向燃氣(最後一座燃煤電廠已於 2024 年 9 月關閉)，加上大量再生能源的佈建。2023 年總發電量為 293.4TWh，其中再生能源 42.64%、天然氣 31.71%、核能 13.02%、油 3.96%、煤 1.29%及進口 7.38%。



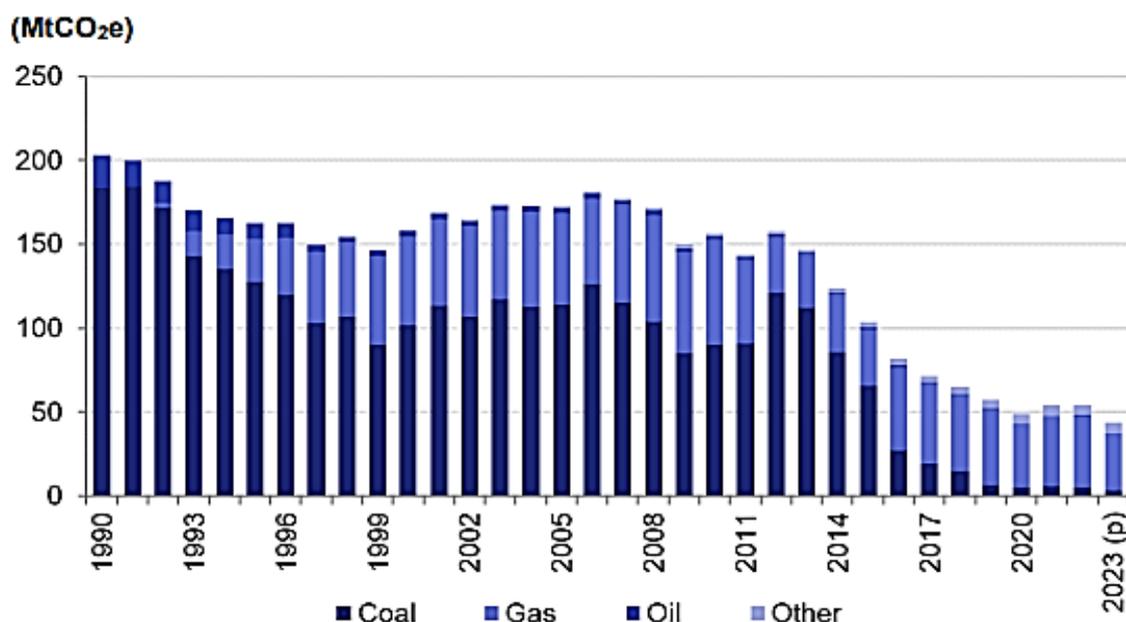
資料來源: Ember (2024)

圖 3-20、英國電力部門歷年發電組合

根據英國溫室氣體排放量報告(如圖 3-21)，2023 年電力部門的溫室氣體排放量為 4,110 萬噸二氧化碳當量，較 2022 年減少 19.6%，下降原因來自法國的電力

²⁶ 2022, TYNDP, <https://tyndp.entsoe.eu/explore/about-the-tyndp-project-portfolio>

進口增加，加上英國電力需求持續下降，使英國電廠天然氣使用量隨之減少。2023年電力部門排放量占總量之11.5%。自1990年到2023年，電力部門排放量已減少了78.4%。



資料來源：DESNZ, 2023 UK greenhouse gas emissions, provisional figures, Mar. 2024.

圖 3-21、英國電力部門歷年溫室氣體排放量

2. 淨零目標及路徑規劃

(1) 情境

第六期碳預算報告書中，設定五種情境(包含包括電力系統的基礎設施和運營情況)。其核心是在刻劃一個部門盡可能實踐高減排目標下，同時考慮現實中之限制、技術提升、供應鏈和製造部門的能源需求。部門包括運輸、建築、製造與建造、電力、製氫、農業與土地使用、航空及負碳技術。情境的設定由逆風、廣泛參與、廣泛創新三種出發，而後，整合這三種情境提出平衡路徑，進一步在提出一個較平衡路徑更積極的順風情境。表 3-9 列出各情境下電力部門之假設，其差別為負載預測、電氣化程度、再生能源裝置容量、可調度資源、核電容量、傳統天然氣除役。

(2) 架構

電力部門的分析使用了商業、能源和工業戰略部(BEIS)²⁷的動態調度模型(Dynamic Dispatch Model, DDM)。DDM 是一個考慮英國半小時基礎上的電力需求和供給之電力市場模型。該模型估計發電廠優先順序，然後與需求匹配。主要功能有調度模組及新電廠模組，與前述生產成本模型及容量擴充模型功能相同。

²⁷ 能源和工業戰略部(Department for Business, Energy & Industrial Strategy, BEIS)於 2023 年拆分為 Department for Energy Security and Net Zero (DESNZ) and the Department for Science, Innovation and Technology (DSIT)。國家安全和投資政策的責任已轉移到內閣辦公室。

表 3-9、英國電力部門於各淨零情境計算之假設

情境	Balanced Net Zero Pathway 平衡途徑	Headwinds 逆風	Widespread Engagement 廣泛參與	Widespread Innovation 廣泛創新	Tailwinds 順風
簡介	2050 達成淨零排放。基於逆風、廣泛參與、廣泛創新三種情境整合設計。	小規模推動社會/行為變革和創新。必須更倚賴大型氫和 (CCS) 基礎設施來實現淨零排放。	個人和企業更多的參與。成本降低的假設與逆風類似。	低碳技術效率提升及降低成本，使電氣化更普及。假設的社會/行為變化類似於逆風。	假設的社會/行為變化超越平衡路徑。且在 2050 前成淨零。
負載(TWh)	610	550	610	680	620
電氣化程度	小客車與貨車 加熱(局部) 製造(局部)	小客車與貨車 加熱(局部) 製造(局部)	小客車、貨車、重型貨車 加熱(全部) 製造(局部)	小客車、貨車、 重型貨車 加熱(局部) 製造(局部) DACCS	小客車、貨車 加熱(局部) 製造(局部) DACCS
RE 發電量與 裝置容量	總發電量 80% 風 125GW 光 85GW	總發電量 75% 風 90GW 光 85GW	總發電量 85% 風 130GW 光 80GW	總發電量 90% 風 175GW 光 90GW	總發電量 90% 風 160GW 光 75GW
可調度資源	總發電量 10% 65GW	總發電量 15% 5GW	總發電量 10% 55GW	總發電量 8% 65GW	總發電量 7% 65GW
核電容量	10GW	10GW	5GW	5GW	5GW
傳統天然氣 除役	2035	2040	2035	2035	2035

資料來源：CCC, The Sixth Carbon Budget-The UKs path to Net Zero, 2020.

註：RE 包括風能、太陽能及電解發電；可調度資源包括燃氣+CCS、生質能+CCS 及氫氣；這些數字不包括用電生產氫氣的需求。各情境分析僅使用餘電製氫，若無則使用甲烷重整。

DDM 模型之計算參數包括用戶端負載、天氣資料、各資源之容量、發電限制、成本、供應安全性及排放等參數。經最佳化計算後，產出最佳化目標下之資源組合，提供政策對投資和調度決策的影響評估。參數包括用戶端負載和用戶端彈性、不同發電技術可能的容量水平範圍、成本和碳價的輸入。對於每個情境，提供電力需求的假設。這些參數反映了電氣化減少其他部門碳排放的使用情況。反過來說主要取決於在其他部門的假設，包括交通運輸、製造業、建築、燃料供應、溫室氣體去除、航空和航運。

關於各情境中之各類發電資源成本假設係基於數各權威機構發布之成本推估報告，包括 BEIS 2020 年發電成本、CCC 2018 年氫能報告。表 3-10 為各類發電技術成本，包括資本、運營和維護以及燃料相關的成本。一般假設成本在各情境中保持不變，但「廣泛創新」和「順風」情境之變動性再生能源、核電及可調度資源成本會進一步降低。在不包含碳價格的前提下，與可調度的低碳資源相比，傳統燃氣電廠將繼續在系統中扮演重要角色。而當 2030 年碳價來到每噸 125 英鎊，將使複循環燃氣的發電成本增加至 130£/MWh，使得燃氣發電的優先順序降低，在系統中成為滿足供電穩定的邊際資源。

表 3-10、英國各類發電技術成本

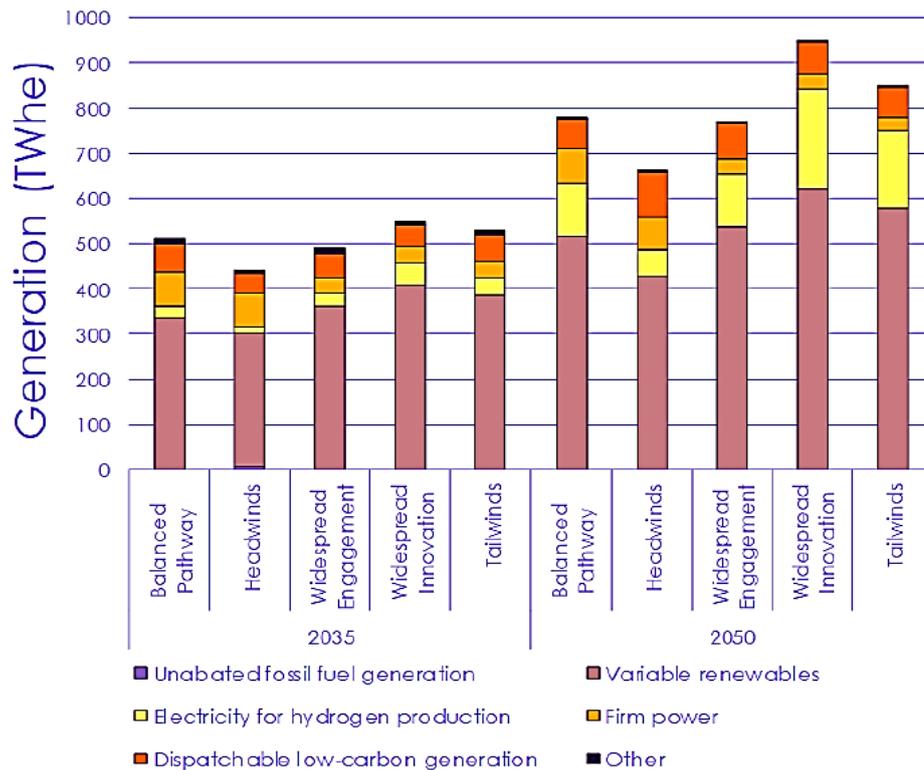
發電技術	2020 £/MWh	2035 £/MWh	2050 £/MWh
傳統複循環燃氣 CCGT(未含碳價)	50	60	60
再生能源	65	40-45	25-40
穩定供電(核電)	-	85-105	85-105
可調度低碳資源	-	100-205	110-220

資料來源：CCC, The Sixth Carbon Budget-The UKs path to Net Zero, 2020.

(3) 結果

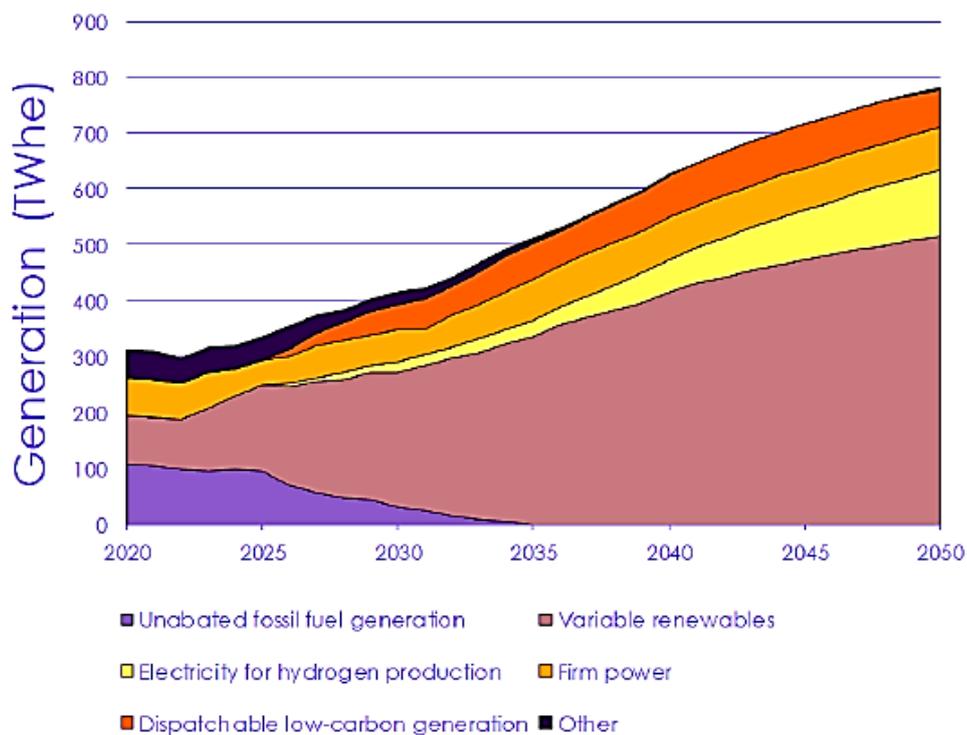
分析結果如圖 3-22 及圖 3-23 所示，各情境皆可達到淨零排放，平衡路徑是第六次碳預算之建議情境，2050 年電力需求將倍增，反映電氣化需求。英國電力部門將分為幾個過渡階段：

- 2020 年代：廣建低成本再生能源，開發天然氣與 CCS、氫氣及新核能。
- 2030 年代：到 2035 年用低碳發電取代傳統燃氣電廠，同時加大零碳發電部署，以跟上電氣化需求，透過電動車、熱泵及製氫增加需求端彈性。
- 2040 年代：電力系統可達近乎淨零狀態運轉。透過彈性的需求資源、中長期之儲能規劃及可調度低發電的搭配使用，來管理再生能源的間歇性，系統將在 2050 前接近淨零排放。



資料來源：CCC, The Sixth Carbon Budget-The UKs path to Net Zero, 2020.

圖 3-22、英國各情境下各資源別發電量



資料來源：CCC, The Sixth Carbon Budget-The UKs path to Net Zero, 2020.

圖 3-23、英國平衡路徑各資源逐年發電量

比較所有情境結果與高碳系統(即持續使用傳統天然氣的系統)，儘管各情境的減排路徑大致相似，但電力需求和資源組合不同，這些因素都影響總成本，電力需求較高的情境，總成本通常較高，因為需要更多的發電能力和電網建置投資。

各類情境在 2035 及 2050 年與高碳系統成本比較如表 3-11 所示，除平衡途徑外，其他四種情境與高碳系統在 2050 年之成本呈現持平或需額外支出 20 億至 90 億英鎊。相較高碳系統，平衡途徑的系統成本在 2035 年雖然較高，但隨著再生能源成本持續降低，在 2050 年減少 50 億英鎊支出。

表 3-11、英國各類情境與高碳系統成本比較

幣別：英鎊

情境	2035	2050	原因
平衡途徑	+30 億	-50 億	隨著較便宜的再生能源使用率提高而降低成本。
逆風	-	+20 億	該情境需求最低(550TWh)，且昂貴技術比例最高，平均發電成本相對較高。
廣泛參與	-	-	儘管需求較高(610TWh)，但相比逆風情境更多利用了較便宜的再生能源。
廣泛創新	-	+20 億	平均發電成本最低。相比逆風情境，滿足多 25% 的電力需求，成本不變。
順風	-	+90 億	採用昂貴技術(如 BECCS)之比例較高，且需求相對較高。

資料來源：CCC, The Sixth Carbon Budget-The UKs path to Net Zero, 2020.

3. 轉型方向與政策

英國電力系統現況及淨零系統的結構變化如表 3-12 所示。再生能源的大量使用可能會導致電力市場的「負電價」時期增加，從而有投資中斷風險。未來的電力系統將需要高度彈性，以適應高占比之間歇性再生能源。而市場機制應提供可預測的價格信號，以確保供應安全。

表 3-12、英國電力系統未來結構

項目	系統現況	淨零系統
電力需求	300TWh	上看 1000TWh
單位排碳量	~200 gCO ₂ /kWh	1-2 gCO ₂ /kWh
再生能源	總發電 20%	總發電 90%
系統結構	透過供給端彈性滿足需求	透過供給端/負載端之彈性滿足需求
需求作用	被動的	彈性，包括用於製氫
成本架構	邊際成本為主	資本成本為主

資料來源：作者整理。

英國電力部門淨零轉型有明確定義的階段，這將需要不同的發展方向。面對電力需求的翻倍增加、單位排碳量的降低、再生能源建置目標之嚴峻挑戰，氣候變遷委員會提出關於英國電力部門脫碳的政策建議。

- (1) 開發大規模低碳電力：2035 年低碳電力發電須達 485 TWh，才能落實電力部門脫碳並滿足 50% 新增負載。為使低碳電力如期建置，應加速制定整體佈建策略之規劃及立法。並確保電網投資能適應未來之需求水準。
- (2) 傳統燃氣電廠除役：在確保供應安全的前提下，至 2035 年逐步淘汰傳統天然氣發電，確保新的燃氣電廠盡快(2025 年)做好 CCS 和氫氣發電的適當準備。
- (3) 可落實淨零排放之電力市場設計：政府應為淨零電力系統制定一致的願景。依完全脫碳電力系統目標下之市場設計，訂定明確的長期策略、繼續使用長期雙邊合約作為適當的投資機制、著重發展燃氣+CCS 及氫氣市場，大力佈局低碳發電，逐步淘汰傳統燃氣電廠。

英國電力部門淨零相關政策或法案如表 3-13 所示。自碳訂價機制實施以來，有效管制電力部門排碳及大量使用再生能源。2008 年《氣候變遷法》立法後，政府透過碳預算設立減碳目標，並定期檢討。

表 3-13、英國電力部門淨零相關政策

政策領域	具體政策或法案
碳定價機制	1. UK ETS：取代英國對 EU ETS 的參與。發電業為其管制業別。 2. 碳價支持(Carbon Price Support)：自 2013 年起，向發電所用化石燃料徵收稅金，以彌補 EU ETS 碳價偏低的問題，並促使燃煤發電量從 2015 年超過 1/5 下降到 2022 年的僅 2.2%。
氣候變遷法	Climate Change Act 2008：於 2008 年立法，2019 年修法將 2050 淨零排放入法。該法藉由碳預算設定各部門每 5 年之減碳標。
整體政策	1. Power Up Britain：2023 年 3 月發布，闡述政府採取行動，以實現國家能源安全與淨零排放目標。行動包括推動新核能計畫、落實 CCS、加速再生能源佈建、實現氫經濟、去碳運輸等。 2. The Labour Government and Net Zero：2024 年 7 月發布。承諾將推行《能源獨立法案》，此法案將建立一個框架，使英國成為「清潔能源超級強國」。工黨還承諾設立「英國國有能源公司」，這是一家公營的清潔能源公司，旨在提高能源安全並協助電網去碳化。 3. 清潔能源資金：英國政府為下一次再生能源拍賣提供 15 億英鎊預算支持工業界，提高能源安全。其中 11 億用於離岸風電、2.7 億用於服飾風機及海洋能、1.85 億用於陸域風電及 PV。
能源法	The Energy Act 2023：2023 年 10 月立法，旨在透過加強能源安全、落實淨零排放，並確保家庭帳單長期可負擔性來轉變該國的能源體系。立法範疇包括推動電力市場改革、發展關鍵低碳技術(氫能、CCS)、發展核電、加速再生能源佈建、提升建築效率、確保天然氣來源穩定。

資料來源：本研究彙整

2019 年將 2050 淨零排放入法，成為第一個宣布淨零的 G7 國家。同時，在第六期碳預算中，評估各部門淨零路徑，並設定電力部門 2035 年脫碳目標，並隨負載成長，持續保持至 2050 年。

2023 年發布 Power Up Britain 政策，以第六期碳定價之建議為基礎，規劃各類資源佈建量及期程。同年 10 月訂定《能源法 2023》，旨在透過法律加強能源安全、落實淨零排放，並確保家庭帳單長期可負擔性來轉變該國的能源體系。

工黨在 2024 年大選承諾推行《能源獨立法案》，此法案將建立一個框架，使英國成為「清潔能源超級強國」。工黨還承諾設立國有之清潔能源公司，旨在提高能源安全並協助電網去碳化，且期望電力部門脫碳時間提前至 2030 年。2024 年 7 月宣布提高清潔能源預算達 15 億英鎊。

(四) 日本

日本是全球前五大的經濟體，也是我國長期在貿易及技術上的重要夥伴。日本的電源結構與我國相似，約有七成能源仰賴進口，且發電結構高度仰賴化石能源，在俄烏戰爭期間也受能源價格攀升，影響國內電價。

2020 年 10 月時任首相菅義偉宣示日本將在 2050 年碳中和。2022 年 8 月時任首相岸田文雄在第二次「綠色轉型(Green Transformation, GX)」執行會議²⁸中表示：「為因應俄烏戰爭引起的世界能源危機，全球能源供需產生劇烈變化的情勢，再加上氣候變遷推動綠能轉型，日本必須採取萬全的準備。除加速再生能源的佈建外，各方在確保安全的前提下集體努力重啟核電站和延長運行期限。」故日本的電源結構將從化石燃料轉向再生能源，而核能在轉型過渡期間將扮演重要角色。

本節將介紹日本電力部門淨零轉型推動情形，依序說明目前電力使用現況、日本經產省對於淨零情境分析報告、轉型及發展方向及具體政策或相關措施。

1. 現況

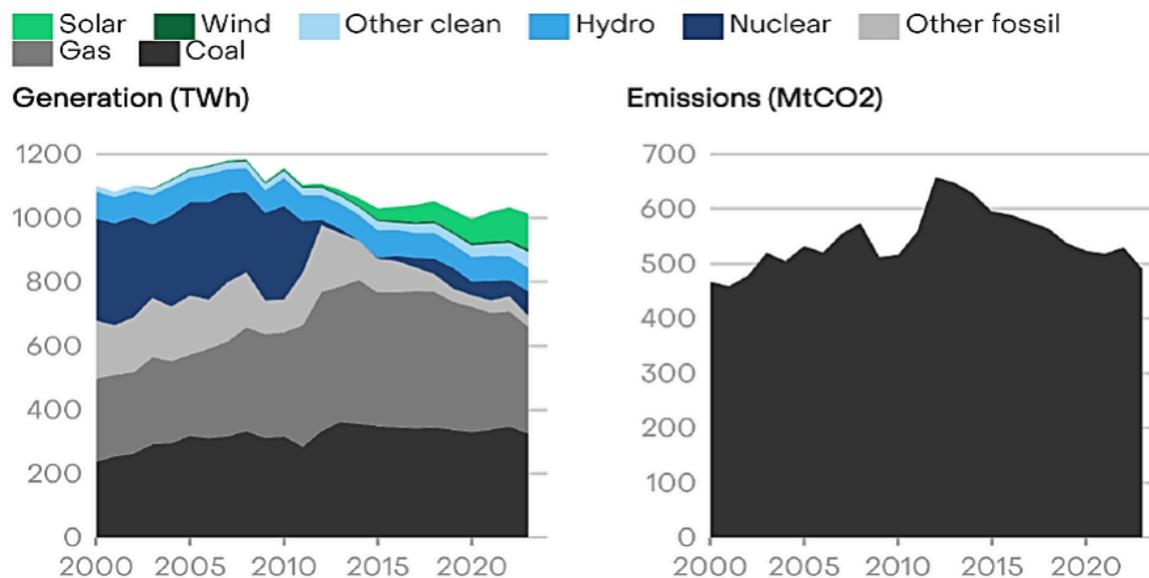
日本為無跨國電網互聯的島國，需平衡自身電力的生產及消費，其電力系統共劃分十個區域，每個區域有一個輸電系統營運商(TSO)，除沖繩外，其餘九個 TSO 位於北海道、本州、四國及九州，並透過電網互聯。2011 年福島核災後成立電力廣域運營推進機關(OCCTO)協調不同地區間的電力交換。日本電力部門歷年電力資源組合與碳排放量如圖 3-24 所示。

日本電力系統因 2011 年福島核事故而受到嚴重影響，此後暫停所有核能發電，確認安全無虞後，再逐步恢復。事故發生前，核電約佔日本發電量 25%，2023 年核電發電量約 1013.51 TWh，約佔 7.6%，另燃油(約 32%)及燃氣(約 33%)，再生能源則占 24%，其中太陽光電約 11%、風力發電約 0.9%、水力發電約 7.3%。近十年的清潔能源增長主要來自太陽光電。

日本是全球第六大電力部門碳排放國，福島核災後暫停核能發電，導致排放量急劇增加，電力部門排放量在 2012 年達到峰值。2023 年日本電力部門的碳排

²⁸ 第二次 GX 執行會議, https://www.kantei.go.jp/jp/101_kishida/actions/202208/24gx.html

放量為 491 Mt CO₂，比 2022 年減少了 7.3%。下降的原因係因燃煤及天然氣的使用減少，以及清潔電力增加與電力需求下降所致。



資料來源：Annual electricity data, Ember.

圖 3-24、日本電力部門歷年發電資源組合及碳排放量

2. 淨零目標及路徑規劃

(1) 情境

日本經產省委託地球環境產業技術研究機構(RITE)進行 2050 年碳中和情境分析，電力部門共規劃六種情境(分別為 100%再生能源、再生能源創新、提高核能使用、氫能創新、提高 CCUS 使用及電力需求轉型)，加上參考情境，探討日本的淨零路徑，如表 3-14 所示。各情境差異主要在資源成本、核電比例、CCUS 儲存量、自動駕駛之共享汽車普及程度。所有發電方式都需克服技術、自然、社會和經濟挑戰，且假設這些挑戰均能夠被克服。

(2) 架構

地球環境產業技術研究機構(RITE)之能源評估模型 DNE21+ (Dynamic New Earth 21+)用於評估全球能源及減排技術的系統成本，對約 500 種技術進行建模，並考慮設備的使用壽命，以線性規劃方法，求解最小化全球能源系統成本。

在電力部門的分析，加上由東京大學和日本能源經濟研究所(IEEJ)開發的發電結構模型，涵蓋日本五個區域及其區域電網連接，來估算間歇性再生能源(VRE)的整合成本，並整合到 DNE21+模型中。VRE 輸出的時間波動是基於全國氣象數據進行建模，透過線性規劃來估算最佳配置(發電和儲能系統)及年發電量。使用小時級模型計算，並將日本分為五個區域(北海道、東北、東京、九州及其他區域)。發電成本、資源限制等前提條件與 DNE21+一致。建模考慮因素包括：輸出控制、儲能系統(抽蓄水力、鋰電池和氫氣儲能)、發電設備可用率降低、區域間電力傳

表 3-14、日本碳中和研究之情境設計

情境	再生能源成本	核能比例	氫能成本	CCUS (儲存潛力)	完全自動駕駛 (共享汽車)	再生能源之發電占比	資源成本假設 (¥/kWh)	情境說明	
參考情境	標準成本	10%	標準成本	國內儲存： 91MtCO ₂ /年， 海外運輸： 235MtCO ₂ /年	標準假設 (完全自動駕駛汽車無普及)	54% (最佳化結果)	PV:10-17 風:11-20 核能:13 氫/氨:16-27 CCUS-熱能:13-16	所有發電方式都需克服技術、自然、社會和經濟挑戰。此情境假設這些挑戰能夠被克服，但每種發電方式都面臨難以實現的目標。	
1.100%再生能源		0%				幾乎 100% (假設)			假設再生能源佔比為 100%的情境。
2.再生能源創新	低成本	10%				63% (最佳化結果)	PV:6-10 風 8-15 其他同參考情境	與參考情境相比，再生能源具有更多創新，如更高發電效率之 PV 或風力發電機開發和商業化。引入的再生能源量高於參考情境，並且已克服自然和社會的限制。	
3.提高核能使用	標準成本	20%				53% (最佳化結果)	同參考情境	核能發電的組合上限為 20%，假設核電廠的替換或新建是基於對核能的公共理解進行的，這與參考案例相比有所提高。另也分析占比 50%。	
4.氫能創新		10%				氫氣生產如水電解、液化設施等成本減半	47% (最佳化結果)	氫/氨:13-21 其他同參考情境	相關的技術創新實現顯著降低氫氣成本，以及隨著私營投資增加而擴大的市場。需要額外的氫氣供應基礎設施，其規模與參考情境中假設的相似。
5.提高 CCUS 使用						標準成本	國內儲存： 273MtCO ₂ /年 海外運輸： 282MtCO ₂ /年	44% (最佳化結果)	同參考情境
6.電力需求轉型		標準成本	國內儲存： 91MtCO ₂ /年， 海外運輸： 235MtCO ₂ /年	2030 年後完全自動駕駛普及，及因車量減少使材料生產減少	51% (最佳化結果)	同參考情境	假設完全自動駕駛車輛普及，以及汽車共享和搭乘共享的顯著普及。		

資料來源：Keigo Akimoto, Scenario Analyses for 2050 Carbon Neutrality in Japan(Interim Report), Advisory Committee for Natural Resource and Energy Strategic Policy Committee, May 2021.

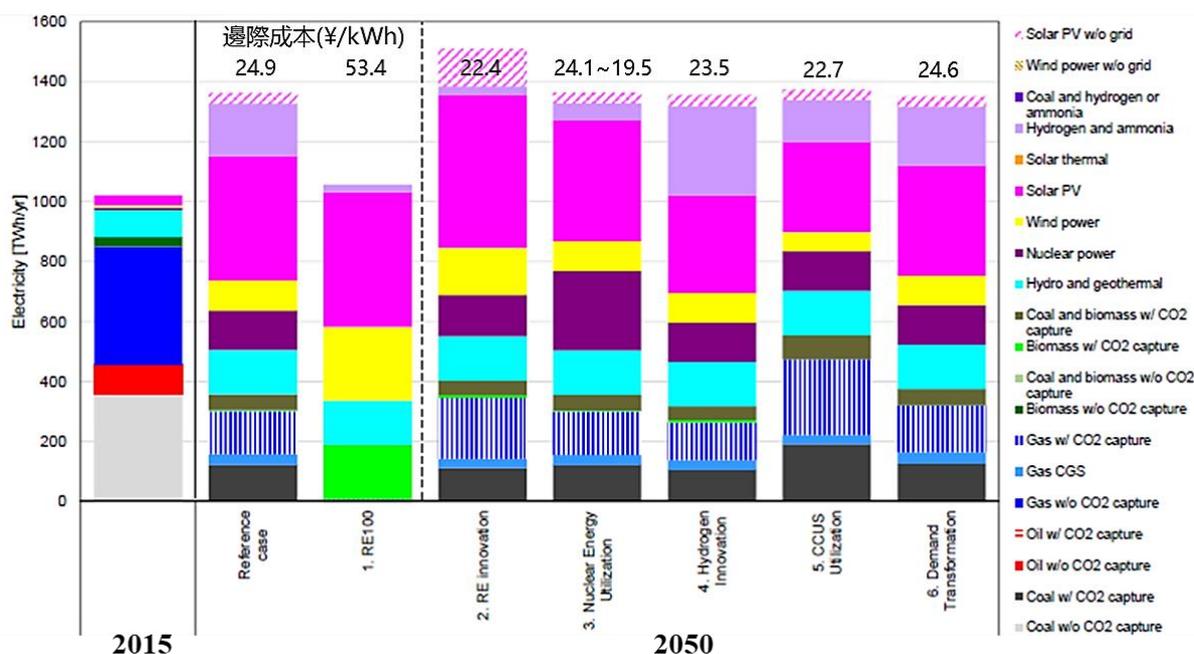
輸線、儲能和傳輸損失。

各類資源成本則參考國際間權威機構之數據，再經本地化而得，資料來源包括經產省、NEA²⁹、NREL、IRENA³⁰、IEA World Energy Outlook、NASA Geographic Information Systems (GIS)等。未考慮因素則包括：區域內的電力傳輸線、電網、旋轉慣量減少的影響、電動車的電網儲能、VRE 的預測誤差、無風無光期間電力供給中斷的風險。

本次分析的情境假設，如各資源的使用量或成本，並未詳細考慮日本的自然或社會限制，且成本是基於國際組織等的成本預測進行假設的。各類資源成本在各情境中的假設如表 3-14 所示，以參考情境設定為標準成本，除再生能源創新情境及氫成創新中之成本與標準成有差異外，其他皆同標準成本。

(3) 結果

一般而言，各國電力邊際成本都會為實現碳中和而上升。而日本由於再生能源和電網整合成本較高，及碳封存潛力的限制，預計成本增幅更大。各情境 2050 年之發電量、電力資源組合及系統邊際成本分析結果如圖 3-25 所示。



註：成本不包括電力傳輸和配電成本，但包括再生能源的電網整合成本。

資料來源：Keigo Akimoto, Fuminori Sano, Scenario Analyses for 2050 Carbon Neutrality in Japan (Interim Report), RITE, May 2021.

圖 3-25、日本電力部門於各情境分析之資源組合結果

²⁹ NEA, The OECD Nuclear Energy Agency.

³⁰ International Renewable Energy Agency

在電力資源組合方面，未來的發電資源將以太陽光電、風力發電、氫能及氬能專燒、核能、水力與地熱等低碳資源為主，其次為化石燃料+CCUS。再生能源占比若高於參考情境，則整合費用就會上升。在 100%再生能源情境中，由於大量使用再生能源(約 97%)，導致系統整合成本爆增，經電價反映後，使得電力需求降低。但現實中，由於自然條件或社會限制，極高程度依賴再生能源發電方式是困難的，也表示該情境並非可落實的路徑。當核電站比提高時，可有效降低邊際成本。另外，當再生能源、氫能及 CCUS 等新能源技術成本降低時，也有助於系統邊際成本降低。

基於分析的啟示，各種技術創新是確保未來碳中和的關鍵。考慮到技術的不確定性，對於需要穩健去碳化的電力部門，應利用已成熟的去碳技術，如太陽光電、風電及核能。此外，應有更廣泛的政策推動，以確保去碳技術的持續可用性，而不應過度縮減政策選項。鑒於新技術的突破與創新，應對每個領域(包括氫、氬和 CCUS)的創新實現進行政策響應，而不應偏向特定領域。

3. 轉型方向與政策

日本電力部門淨零相關政策或法案如表 3-15 所示，自 2020 年底宣示 2050 年碳中和目標，2021 年立法 2050 年達碳中和，並積極研擬相關措施。透過研究探討達成淨零可能的路徑：即利用已建立的去碳技術，如再生能源及核能，達成去碳化目標的轉型方向。

表 3-15、日本電力部門淨零相關政策

政策領域	具體政策或法案
碳中和目標	2020.10.26，日本首相菅義偉宣示日本 2050 年碳中和目標
碳定價機制	1. GX 碳排放交易制度:2023 年試運行，2026 年度正式運作 2. 2033 年度起，碳排放配額將有償分配給發電業 3. 碳稅:2028 年實施，含蓋高排放產業及擴及更廣泛的產業。
氣候變遷法	《促進全球變暖對策法》：於 2021 年立法，將 2050 年達碳中和立法。
整體政策	1. 綠色成長策略: 2020 年 12 月 2. Strategic Energy Plan: 2021 年 10 月 3. 綠色轉型(GX)基本方針：2023 年 2 月發布。
法案	1. 《GX 推進法案》：2023 年 3 月通過。 2. 《GX 零碳電力法案》：2023 年 4 月通過。
2030 年目標	1. 溫室氣體減量目標：2030 年 GHG 排放 46%。 2. 再生能源：維持 2030 年占電力結構 36~38%之目標，其中太陽光電 2030 年裝置容量目標 104-118GW；離岸風力 2030 年 10GW、2040 年 30-45GW；氫/氬 2030 年各 300 萬噸之目標。 3. 核能：維持 2030 年電力占比 20-22%的目標。 4. 電池：2030 年國內每年 150GWh 的電池及材料製造基礎。

資料來源：本研究彙整。

是故，日本經產省提倡綠色轉型(GX)，將 2030 年溫室氣體減量目標作為經濟增長的機會，以減少排放、提高產業競爭力，致力於整個經濟社會體系的轉型，

並在 2050 年達成碳中和。2022 年制定《GX 實現基本方針》著眼於彙整日本未來 10 年內的具體策略與行動，提出充分利用再生能源、核能等有助能源安全並對去碳化有顯著效果的能源。達到 2030 年再生能源占比 36~38%，並致力開發和建設具新安全機制的下一代創新反應爐，及延長現有機組運轉年限。其他包括氫能/氬能之燃料導入、碳封存技術、儲能電池產業發展。同時，為確保電力穩定供應，於 2024 年啟動容量市場，並透過去碳化電力拍賣支持系統化投資去碳化電力，並將開發全國電網和海底直流傳輸系統。另外，在負載預測中也納入隨 GX 帶動之電氣化、資料中心造成之負載增加的考量。

《GX 實現基本方針》也催生 GX 相關政策及法案，包括《GX 推進法》及《GX 零碳電力法》等。《GX 推進法》引入碳訂價制度，預計 2028 年針對化石燃料業者課稅，2033 年起進行發電業碳排放配額制；從 2023 年開始發行 20 兆日圓規模、為期 10 年的 GX 經濟轉型債券債券，預計促成公私部門 150 兆日圓的 GX 投資。《GX 零碳電力法》則整合《電氣事業法》、《原子爐等規制法》、《原子力基本法》、《再生能源特殊措施法》、《用過核燃料再處理法》等五個法律。允許核電機組運行 60 年以上、移轉核電機組延役權至經產省、最大化導入再生能源及電力公司提前繳交核電廠除役經費。

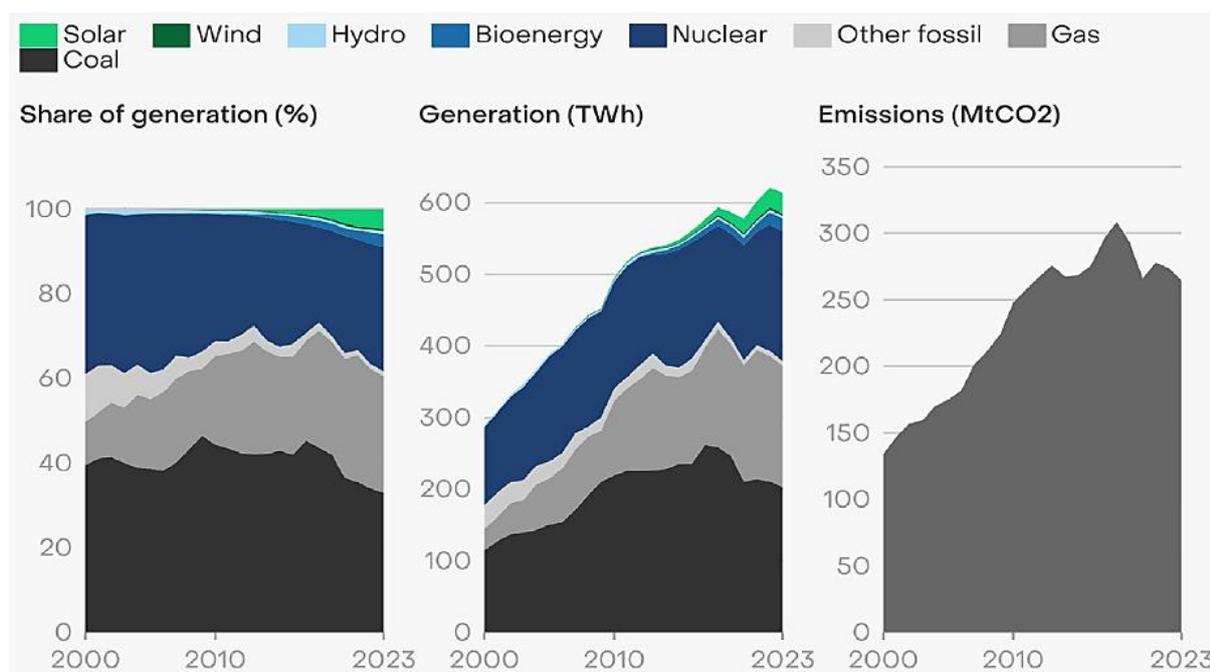
(五) 韓國

南韓是全球第 13 大經濟體，約有 93% 能源仰賴進口，電源結構約有 64% 來自化石燃料、核電約 29%，其能源價格也易受國際情勢波動。韓國是能源密集和出口為導經濟，半導體產業是韓國經濟的命脈，與我國是貿易競爭對手，穩定的電力供應，成為支持韓國經濟發展重要的因素。過去南韓雖逐步淘汰核電，但俄烏戰爭引發能源供應擔憂，成為韓國最迫切問題之一，使核電政策轉向。

1. 現況

南韓電力系統係獨立電網，並未與鄰國電網(如中國或日本)跨國互聯。電力市場的自由化止步於零售電業開放，售電業則維持韓國電力(KEPCO)一家。韓國電力部門歷年發電組合及碳排放量如圖 3-26 所示。

韓國早前實行逐步淘汰核電，依賴燃煤和天然氣來滿足電力需求的增長，故電力部門的排放量增加，一度使核電占比於 2018 年降至 22.5%，但近年核電及再生能源取代了燃煤及燃氣發電量，進而降低碳排放。尹錫悅上台後，強調再生能源與核電並行的重要性，採取能源分散風險策略，提高國家能源自給率，以實現碳中和目標。2023 年韓國 64% 的電力依賴化石燃料，最大單一的低碳電力來源是核能約占 30%，再生能源僅占 6%。韓國目前的再生能源占比低於鄰國日本(24%)及台灣(9.47%)。



資料來源：Annual electricity data, Ember.

圖 3-26、韓國電力部門歷年發電資源組合及碳排放量

2. 淨零目標及路徑規劃

韓國之淨零路徑的規劃在兩任總統政黨輪替後有所調整。官方目前也尚無公布透過科學方法推估較細緻的淨零路徑。本節整理近兩任執政者公布之淨零規劃，以說明韓國電力部門淨零規劃上之可能差異，如表 3-16 所示。

表 3-16、韓國近兩任執政者對 2050 電力部門淨零規劃比較

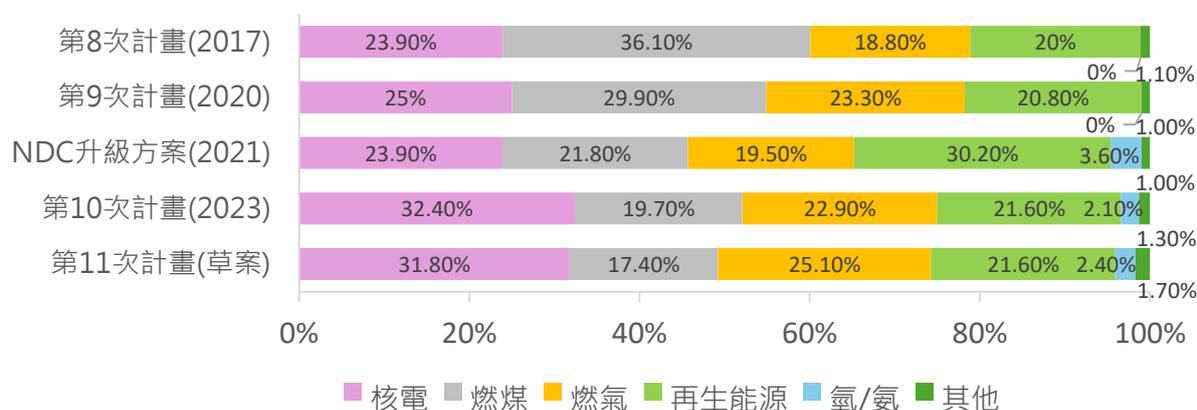
項目	文在寅任期 (2017 年 5 月~2022 年 5 月)		尹錫悅任期 (2022 年 5 月~迄今)
國家 NDC	上調 2030 國家溫室氣體減排目標，將較 2018 年的峰值減少 40%。惟各部門的排放目標進行調整，其中發電部門減量率則從 44.4% 增加到 45.9%。		
情境	方案 A (全面停止火力發電)	方案 B (保留部分 LNG，並使用 CCUS)	減少燃煤、擴大核能及再生能源、提升能源效率
各類資源發電占比	核電：6.1% 燃煤：0% LNG：0% 再生能源：70.7% 燃料電池：1.4% 東北亞電網：0% 零碳燃氣：21.5% 廢氣：0.3%	核電：7.2% 燃煤：0% LNG：5% 再生能源：60.9% 燃料電池：10% 東北亞電網：2.7% 零碳燃氣：13.8% 廢氣：3.9%	尚未提出 2050 規劃。第 11 次長期電力供需基本計畫提出 2038 年之發電占比如下： 核能：35.6% 燃煤：10.3% LNG：11.1% 再生能源：32.9% 氫能：5.5%

資料來源：本研究彙整

2020 年時任總統文在寅宣布 2050 年碳中和目標，2021 年發布 2050 年碳中和方案，且上調 2030 年國家溫室氣體減排目標，相較 2018 年排放值減少 40%。

同時強調降低核電，並增加再生能源及零碳燃氣(增加再生能源並生產綠氫)。文在寅政府提出的兩個方案皆可在 2050 達到淨零排放，分別為全面停止火力發電的方案 A 及保留部分 LNG 並使用 CCUS 的方案 B(且不排除從中、俄兩國電網進口電力)。

尹錫悅上台後，因俄烏戰爭引發能源危機，大幅度調整政策方向，未來淨零情境將朝向減少燃煤、擴大核能及再生能源、提升能源效率與提高能源自給率為主。雖然尹錫悅政府尚未提出 2050 年的各類發電組合規劃，不過依據韓國電業法，需每兩年提出未來 15 年長期電力供需基本計畫，圖 3-27 為近五次該計畫提到的 2030 年發電組合，可看出前後兩任總統之差異。2021 年前為文在寅發布，第 10 及 11 次為尹錫悅發布，顯示能源政策的大幅調整(增加核電，降低排碳及提高能源自給率)。此外，過去韓國再生能源發展遇到收益惡化、居民矛盾與補償、開發許可延遲發放等諸多問題，造成發展緩慢。故尹錫悅上台後，亦大幅下修 2030 年再生能源目標。



資料來源：本研究彙整。

圖 3-27、韓國近五次 2030 年發電組合規劃

3. 轉型方向與政策

依據韓國 2022 年施行的《應對氣候危機的碳中和綠色成長基本法》第十條，政府應每五年制定國家碳中和綠色成長基本計畫。第一次國家碳中和綠色成長基本計畫於 2023 年 4 月發布，該報告當時引用《第 10 次長期電力供需基本計畫》並進行調整，電力部門未來發展方向為：

(1) 減少化石燃料使用，擴大核電和再生能源

- 燃煤：原則上淘汰設計壽命超過30年的煤電機組。
- 核電：恢復韓蔚3、4號機建設，許可10座到期機組運作至2030年。
- 再生能源：推進國土有效利用及再生能源普及，加強與居民溝通。

(2) 引入零碳新電源，推動平衡的電源組合

- LNG+氫氣：利用零碳電源氫氣來減少溫室氣體。LNG機組進行50%

氫氣混燒(2030年)並逐步擴大。

- 煤(淘汰)+氫氣：推進淘汰老舊煤電機組及氫能混燒。
- 在2030年前淘汰20台燃煤機組台，並實施氫能20%混燒發電(2030年)

(3) 完善電力網絡

- 確保核電和再生能源的及時供應，並運輸多餘電力至其他地區。
- 投資ESS等備用設施以應對再生能源擴大帶來的波動性。目標在第10次電力供應基本計劃期間(至2036年)推動約26.3GW的ESS建設。

而後的《第11次長期電力供需基本計畫(草案)》規劃了韓國2024-2038年之電力供需。草案將前述第一次國家碳中和綠色成長基本計畫之內容納入負載預測及電源規劃模型中計算，並滾動檢討可行性。電力供給方面，在2038年的核電將提升至35.6%、再生能源占比為32.9%、氫能為5.5%，低碳能源總計約74%。值得注意的是2038年將運轉共30台核電機組。預計2034年將推動0.7GW SMR示範。另外，2038年前將新建三部1.4GW APR 1400核電機組，共4.2GW。顯示韓國大力推動核電的方向；電力需求方面，2024-2038年GDP年均成長率1.63%，考量經濟、人口、產業結構變化，且半導體及人工智慧產業擴張導致電力需求大增，預計2038年尖峰負載為128.9GW，較2023年增加30.6GW，後續將透過能源效率資源標準(EERS)進行需求管理。而韓國電力部門淨零相關具體政策整理如表3-17。

表 3-17、韓國電力部門碳中和相關政策

政策領域	具體政策或法案
碳中和目標	2020.10.28，時任總統於國會宣示韓國2050年前實現碳中和。
碳定價機制	韓國ETS：於2015年1月12日正式啟動，是東亞第一個全國性排放交易體系，目前已邁入第三階段(2021-2025)。涵蓋年碳排放量超過12.5萬噸之事業單位及年碳排超過2.5萬噸之設備，包括發電業。
氣候變遷法	《應對氣候危機的碳中和綠色成長基本法》：2021年立法，要求政府制定國家碳中和綠色成長戰略並每五年進行檢討。明訂2050年碳中和與2030年較2018年排放減少35%以上目標(後修正為40%)。
整體政策	1. 碳中和綠色成長推動戰略: 2022年10月。 2. 第1次國家碳中和綠色成長基本計畫: 2023年4月，每5年滾動檢討1次。
2030年目標	根據《第11次長期電力供需基本計畫》規劃，預計2030年無碳能源將達52.9%，2038年達70.2%。各類發電資源發電占比如下： 1. 核能：2030年31.8%；2038年35.6%。 2. 燃煤：2030年17.4%；2038年10.3%。 3. LNG：2030年25.1%；2038年11.1%。 4. 再生能源：2030年21.6%；2038年32.9%。 5. 氫能：2030年2.4%；2038年5.5%。

資料來源：本研究彙整

此外，自文在寅任期起，韓國開始強化地方政府在能源轉型中的角色，要求制定具地方特色的能源基本計畫，並引入再生能源利益共享機制。例如全羅南道新安郡的光電開發計畫³¹。

(六) 中國

中國是世界第二大經濟體，受惠於其豐沛的煤礦蘊藏，能源自給率達 90%。但同時，中國也是全世界最大的石油進口國，並於 2021 年超過日本成為全球最大的天然氣進口國。儘管能源自給率高，但過去也曾在能源供需緊張期間，多個省分進入用電荒。中國學者推測其原因為電力需求增長過快導致的供給相對不足、發電用煤價格上漲、及受到「雙控政策」³²影響。

2020 年國家主席習近平宣示中國將在 2060 年之前達到碳中和，並在 2030 年之溫室氣體排放量達到峰值。由於中國是重要的出口對象及台商生產基地，其轉型政策與台灣息息相關。然而，中國目前並未提出具體細節，故本節將整理中國官方政策文件，依序說明目前電力使用現況、電力部門淨零目標與路徑規劃、轉型方向及政策。

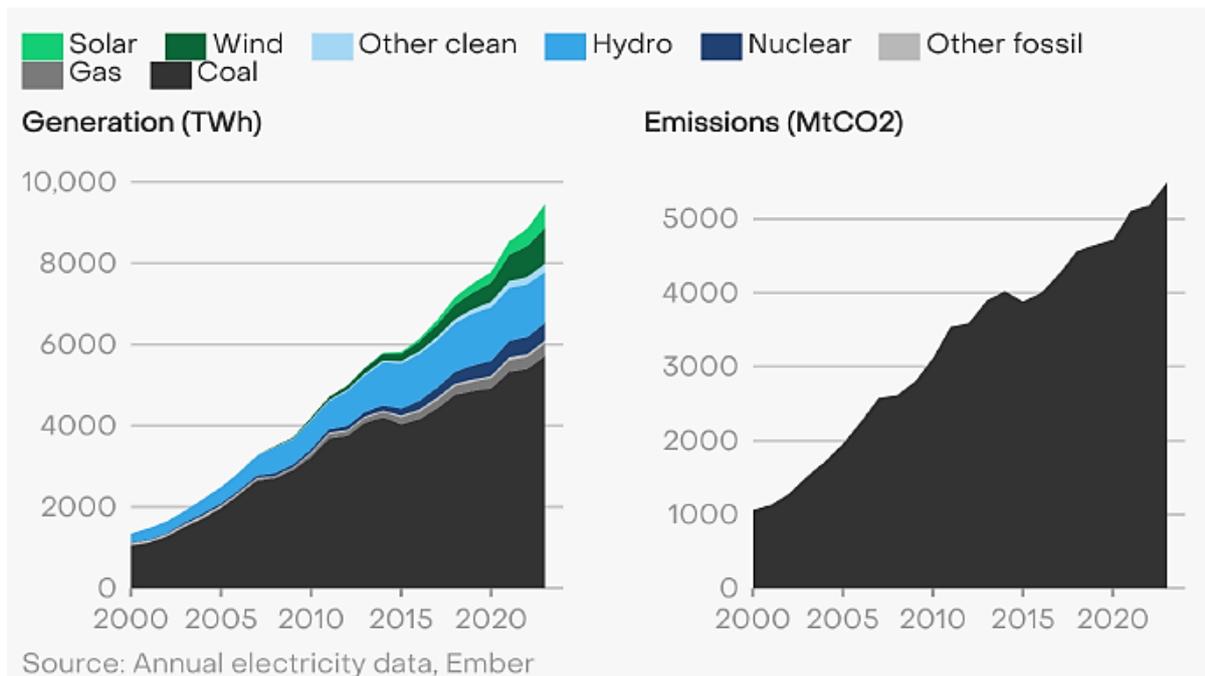
1. 現況

由於經濟快速增長，中國 2023 年的電力需求(9,441 TWh)比 2000 年(1,347 TWh)高出七倍以上。中國目前主要的發電資源為燃煤，約占 60%，低碳能源的發電約占 33.3%，燃油及天然氣發電約占 4%，如圖 3-28。雖然中國在 2023 年是全球風力及太陽光電新增發電量主要的貢獻國，但中國同時也是全球興建燃煤機組最多的國家，且其燃煤發電量占全球的一半以上，導致全球發電用之化石燃料增加。

隨著中國電力需求持續的增長，電力部門排放量在過去二十年中也大幅增加。中國為目前全球最大的電力部門排碳國，其燃煤發電量在 2000-2023 年期間，自 1,060 TWh 增加到 5,716 TWh，增長了五倍以上，滿足超過一半的電力需求增長。導致碳排放量從 2000 年之 1,062 Mt-CO₂ 上升到 2023 年之 5,491 Mt-CO₂。近年來排放增長已經放緩。2001 年至 2015 年間，排放量年均增長 9%，但 2016 年至 2023 年間，增長率下降到每年 4.4%。主因是再生能源增長了 13 倍以上，特別是風力及太陽光電。2023 年中國太陽光電和風電的發電量佔全球的 37%，新增量占全球一半以上。

³¹ 新安郡於 2018 年制定《新能源和再生能源開發利益共享條例》，要求東南電力公司應建立居民共享發電收益計畫，居民和新安郡廳至少入股 30% 或總開發成本的 4%，並將參與居民範圍擴大到 5 公里內，按距離電廠遠近分配收益，並以商品券而不是現金發放，鼓勵居民在地消費，振興地方經濟。(施怡君，2022)

³² 「雙控政策」是指實施能源消耗總量和強度雙控。



資料來源：Annual electricity data, Ember.

圖 3-28、中國電力部門歷年發電資源組合及碳排放量

2. 淨零目標及路徑規劃

中國宣示 2060 年達到碳中和後，尚未透過科學方法推估較細緻的淨零路徑，本節將以中國官方文件「中國本世紀中葉長期溫室氣體低排放發展戰略」、「十四五再生能源發展規劃」及「2030 年前碳達峰行動方案」，說明中國電力部門 2030 年碳達峰及 2060 年碳中和的規劃。

(1) 中國本世紀中葉長期溫室氣體低排放發展戰略

中國宣告到 2030 年每單位 GDP 之碳排放將比 2005 年下降 65% 以上，非化石能源占能源消費比重將達約 25%，風電、太陽光電總裝置容量將達到 1,200GW 以上。到 2060 年，能源效率達到國際先進水準，非化石能源消費比重達約 80%。

將加速建設新型電力系統，大力發展風力、太陽能、生質能、海洋能等再生能源，並因地制宜開發水力；並在確保安全的前提下有序發展核電等非化石能源，提高其在能源消費中的比重。另外，積極發展新能源+儲能、源網荷儲³³和多能互補，支援分散式能源合理配置儲能系統，推動清潔電力資源大範圍優化配置。並在負載端將加快提升終端用能領域電氣化水準，使電力成為終端部門用能主力。

(2) 2030 年前碳達峰行動方案

電力部門之重點為煤炭消費替代和轉型升級、發展新能源、因地制宜開

³³ 「源網荷儲」係電源，「電網、負載、儲能」的組合，旨在實現能資源最大化利用的運行模式和技術。

發水電、安全有序發展核電、合理調控油氣消費、加快新型電力系統建設。此外，在政策上，將建立統一規範的碳排放統計核算體系、健全法律法規標準、完善經濟政策、建立健全市場化機制。

(3) 十四五再生能源發展規劃(第十四個五年規劃，期間為2021-25年)

2021-2025年是中國加快能源綠色低碳轉型、落實應對氣候變化國家自主貢獻目標的攻堅期。電力部門目標為2025年再生能源年發電量達到0.33 TWh，相關內容包括：

- 新增再生能源占全社會新增用電量的50%，風電和太陽光電加倍。
- 2025年再生能源消費量達到10億噸標準煤，占一次能源消費18%。
- 全國再生能源占比和非水力再生能源占比分別達到33%和18%，利用率保持在合理水準。
- 太陽能熱利用、地熱供暖、生質供熱、生質燃料等非電利用規模達到6,000萬噸標準煤以上。

綜合上述，未來中國電力部門的淨零規劃，將透過減少煤碳的使用、增加再生能源佈建，同時發展核能、CCUS及其他低碳資源。同時，其他部門的電氣化程度也將影響用電負載，但原有使用煤炭作為燃料的部門，如工業、運輸、民生供暖，排放量將大幅降低。

3. 轉型方向與政策

中國電力部門轉型方向可從以下的四份官方文件一窺端倪：

(1) 能源碳達峰碳中和標準化提升行動計畫

2022年發布，建立電力部門轉型所需要的行業標準供業者遵循。在2025年初步建立較為完善、可引領低碳轉型的能源標準體系；在2030年建立合理的能源標準體系，範疇包括非化石能源標準化(如再生能源及核電、新型電力系統標準、新型儲能技術標準)、能效相關標準(如燃煤發電效率)、能源產業鏈碳減排標準(如CCUS標準體系和示範)。

(2) 加快構建碳排放雙控制度體系工作方案

2024年發布，能源的監管將從能耗雙控轉向碳排雙控的新機制，在2025年，完善碳排放統計核算體系，實施企業碳排放核算相關標準和產品碳足跡標準，建成並定期更新國家溫室氣體排放資料庫，為十五五時期在全國範圍實施碳排放雙控奠定基礎。十五五時期則實施以強度控制為主、總量控制為輔的碳排放雙控制度，建立碳達峰碳中和綜合評價考核制度。碳達峰後(十六五時期及以後)，實施以總量控制為主、強度控制為輔的碳排放雙控制度，建立碳中和目標評價考核制度。

(3) 加快構建新型電力系統行動方案(2024-2027年)

2024年發布，聚焦新型電力系統亟待突破的關鍵領域，提升電網對清潔能源的接納、配置、調度能力，內容包括：電力系統穩定保障；大規模高比例新能源外送攻堅；配電網高品質發展；智慧化調度體系建設；新能源系統友好性能提升；新一代煤電升級；電力系統調節能力優化；電動汽車充電設施網路拓展；需求側協同能力提升等九項行動方案。

(4) 煤電低碳化改造建設行動方案(2024-2027年)

2024年發布，分兩階段進行，2025年，首批燃煤低碳化改造專案開工，改造機組之電力碳排放較2023年同類機組平均碳排放值降低20%。2027年，隨著燃煤低碳發電技術發展和運行成本下降，改造機組之電力碳排放較2023年同類機組平均碳排放值降低50%左右，以接近燃氣機組碳排放水準。改造和建設方式包括生物質混燒10%以上、綠氫混燒10%以上、碳捕捉、利用與封存。措施則包括利用超長期特別國債等資金予以支持。

中國電力部門碳中和政策整理如表 3-18 所示，依據目前的規劃，2025 年將是為 2030 年碳達峰準備的諸多方案之起點。中國電力部門的轉型除持續大量建置再生能源外，短期將以提升燃煤電廠效率，透過改造及新建機組降低燃煤電廠的排放量。同時提升電網對清潔能源的接納、配置、調度能力，促進新能源的開發。隨著技術進步及成本下降，以再生能源、核電等資源，取代燃煤發電。

表 3-18、中國電力部門碳中和相關政策

政策領域	具體政策或法案
碳中和目標宣示	2020.9，中國國家主席習近平於 2020 年宣示中國將在 2060 年之前達到碳中和，並在 2030 年之溫室氣體排放量達到峰值。
碳管制機制	1. 《關於開展碳排放權交易試點工作的通知》，2011 年 10 月。 2. 《碳排放權交易管理辦法(試行)》，2021 年 1 月公布，7 月全國碳交易市場正式啟動。 3. 《碳排放權交易管理暫行條例》:2024 年 1 月立法，5 月施行。
整體政策	1. 中國本世紀中葉長期溫室氣體低排放發展戰略：2021 年 10 月。 2. 2030 年前碳達峰行動方案：2021 年 10 月。 3. 十四五再生能源發展規劃(2021-2025)：2022 年 6 月。 4. 能源碳達峰碳中和標準化提升行動計畫：2022 年 9 月。 5. 加快構建碳排放雙控制度體系工作方案: 2024 年 7 月。 6. 加快構建新型電力系統行動方案(2024—2027)：2024 年 7 月。 7. 煤電低碳化改造建設行動方案(2024—2027)：2024 年 6 月。
2030 年目標	1. 中國二氧化碳排放力爭於 2030 年前達到峰值。 2. 溫室氣體減量目標：2030 年每單位 GDP 之二氧化碳排放量較 2005 年下降 65%，非化石能源占一次能源消費比重將達到 25%。 3. 再生能源：風電、太陽光電總裝置容量將達到 1.2 TW 以上。 4. 其他：建立起結構優化、先進合理的能源標準體系

三、台灣電力部門淨零排放路徑建議

本章比較的國家地區包括孤島電網且缺乏天然資源的國家，如夏威夷、日本及韓國，也包括可與鄰國(州)電網互聯的國家地區，包括加州、歐盟、英國，燃煤資源豐富的中國。

綜觀各國主要發電資源仍以化石燃料為主，一旦大量使用再生能源，必須考慮成本及供電可靠度的問題。電力部門淨零路徑也受其他部門電氣化程度影響，電源開發規劃須滿足電力負載成長。在減碳、穩定供電、電力成本的三難下，如何因地制宜合適的淨零路徑及兼顧經濟發展的需求，也是各國政府積極面對的議題。各國政府制定出之淨零路徑也非絕對，隨該國關注的因素，定期滾動調整。各國電力部門淨零路徑規劃情形彙整於表 3-19，可歸納出下列借鏡方向。

(一)路徑規劃應考慮本身條件

淨零情境的設計必須考慮各國國情、未來發展及天然限制，設計時著重的幾個考量，如負載成長、新技術普及程度、土地限制、資源選擇與能源技術成本等，且相關情境也需跨部會協調出一致目標，例如電動車數量與運輸部門有關、設備電氣化與工業及住商部門有關、可建置再生能源的土地與農林漁部門有關。情境也必須多元，才能勾勒出轉型路徑之範圍。

在電力部門的分析中，除了評估裝置容量的擴充外，也須考量該裝置容量在未來電力系統的可用性及實際調度情形，否則會發生資源充裕度不足的問題，進一步影響即時電力調度。除了韓國、中國及我國尚未「公布」經科學模型推估的淨零路徑外，其他國家(州)皆據此研擬可行路徑。透過量化的科學模型分析，有助於決策者在減碳/穩定供電/電力成本三面的難題取得權衡。

以夏威夷為例，由於係做為未來五年電力公司電網及電源建置之用，因此其分析最為完整。在情境設計時，考慮了新技術普及程度造成的負載高低、海島環境的土地限制。其推估結果表明，在轉型初期，電能成本將增加，但長期則可能低於已燃油為主的化石燃料發電方式。

(二) 路徑評估應透明客觀

從國外案例可發現，技術成本的推估對於一國淨零路徑之規劃影響深遠，在夏威夷的案例中，因為核電及氫能需要龐大的基礎建設投資，故不列入該州淨零選項；而加州則因為成本的不確定性，將不成熟的技術排除。

然而，各類技術成本推估通常參考該國或國際上權威機構發布的數據，在經過本土化而成。因為由政府或權威機構發布的成本數據，可增加資料可信度，也有助於學術及商業的研究及分析。其評估結果，才能接受各界的質疑與挑戰，並有助於社會共識的形成，進而導引政策方向。

表 3-19、各國電力部門淨零路徑規劃情形

項目	夏威夷	加州	歐盟	英國	日本	韓國	中國	台灣
法案名稱	夏威夷修正法 §225P-5	《SB 100》	《歐洲氣候法》	《氣候變化法》	《促進全球變暖對策法》	《應對氣候危機的碳中和綠色成長基本法》	中國本世紀中葉長期溫室氣體低排放發展戰略	《氣候變遷因應法》
電力部門脫碳目標年	2045	2045	2050	2035	2050	2050	2060	2050
電力系統型態	孤島且天然資源缺乏	與鄰近州互聯	與鄰國互聯	與鄰國互聯	孤島且天然資源缺乏	孤島且天然資源缺乏	與鄰近省分互聯	孤島且天然資源缺乏
再生能源發電占比現況(含水力)	2022: 18%	2023: 46%	2022: 38%	2023: 42.6%	2023: 24%	2023: 6%	2023: 27%	2023: 8.65%
主要發電資源	油(71%)	天然氣(34%)	核電(22%)	天然氣(31.7%)	天然氣(33%)	燃煤(33%)	燃煤(60%)	燃煤(43.6%)
路徑評估方式	容量擴充模型 資源充裕性評估 生產成本模型 系統安全性分析	容量擴充模型	容量擴充模型	容量擴充模型 生產成本模型	容量擴充模型 生產成本模型	-	-	-
路徑檢討	5年	4年	-	5年	-	5年	-	-
情境設計考慮因素	負載高低(含 PV 及電動車)、新技術普及、土地限制	再生能源占比、負載、電氣化需求、僅成熟技術選用	成員國淨零政策、NDC、溫升 1.5°C	負載、電氣化需求、再生能源裝置容量、可調度資源、核電	再生能源成本、核電比例、CCUS 儲存潛力、共享汽車	-	-	-
資源選擇	太陽能、風能、儲能、地熱、生質能、需量反應	太陽能、風能、儲能、地熱、生質能、需量反應、天然氣	太陽能、風能、核能、生質能、水力、儲能、化石燃料+CCS	太陽能、風能、核能、生質能、水力、儲能、氫能、化石燃料+CCS	太陽能、風能、核能、生質能、水力、儲能、氫/氫、化石燃料+CCS	太陽能、風能、核能、氫/氫混燒+CCS	太陽能、風能、儲能、地熱、生質能、海洋能、需量反應、氫/氫混燒+CCS	太陽能、風能、儲能、地熱、生質能、海洋能、需量反應、氫/氫混燒+CCS

主要國家淨零排放路徑之比較分析

項目	夏威夷	加州	歐盟	英國	日本	韓國	中國	台灣
燃料或資源 成本數據引 用來源	NREL, EIA, RSMears	NREL, DOE, Lazard	POLES-JRC 模 型內生	BEIS, CCC	經產省, NEA, NREL, IRENA, IEA, NASA GIS	-	-	
電能成本	短期增加，長 期低於化石燃 料	增加	-	增加	增加	-	-	-
2030 年 RE 發電目標	推估 65% 政策 40%	政策 60%	政策 45%	推估 52%	政策 36~38%	政策 21.6%	PV+風能裝置容 量達 1.2TW	政策 30%

以日本為例，地球環境產業技術研究機構的分析研究，指出當時以再生能源為主流的日本能源政策，不切實際之處³⁴。100%再生能源對發電成本與對日本經濟與產業的衝擊，也引起媒體的廣泛報導，進而對日本後續能源政策造成影響，如今已從 100% 再生能源使用發展，改往保有核電選項並投入新能源技術的開發的方向。

(三) 長期路徑應滾動調整

長期規劃雖然充滿不確定性，但透過合理的假設，可鑑別風險的種類及範圍。並隨現況、新技術成熟程度及成本趨勢滾動調整淨零路徑，以求更貼近實務狀況，有助淨零目標的落實。

以英國為例，將碳預算報告的最可行路徑立法為國家的建碳目標，並隨情勢變化調整。在第五期碳預算時期，全球尚未有淨零共識，但在第六期碳預算即將淨零正式納為分析範疇，並探討可行的路徑規劃。在韓國的案例中，現任執政者面臨能源危機及國內經濟低迷的壓力下，調降了 2030 年再生能源的占比及提升核電的使用，若再輔以科學數據說明，更能完整解釋相關細節。夏威夷及加州也會因為技術進步超過預期，而上修政策目標。

(四) 應有可管制的階段性具體目標

一般而言，邁向淨零的實際成效往往有異於原始規劃，故應設有可管制的階段性具體目標，才能有效管理。尤其是受經濟發展及其他部門電氣化程度影響甚大的電力部門。階段性目標若能明確，除有助於電源開發及電網建設規劃，亦有利於前項提到的淨零路徑的滾動修正，避免淨零願景淪為政策口號。

四、台灣電力部門淨零排放成本模擬

綜上所述，吾人可知各主要國家的淨零排放目標與情境設計考慮了其經濟發展、地理資源及能源稟賦的限制，參考合理的各類能源技術發展趨勢，再進行完整的模擬分析，方能對各國淨零排放路徑進行合理規劃。

為達成 2050 年達到淨零排放的目標，國家發展委員會於 2022 年 3 月正式公布「台灣 2050 淨零排放路徑及策略總說明」，展現我國至 2050 年淨零之軌跡與行動路徑；並在「能源、產業、生活、社會」等四大轉型及「科技研發」、「氣候法制」兩大治理基礎上，輔以「十二項關鍵戰略」來整合跨部會資源，制定行動計畫，主政機關業依分工研擬行動計畫。然而，公開的資訊雖有政策目標、策略內容，卻對達成路徑之設計與其可能影響之評估付之闕如。即使政府可能委託產學研智庫協助內部評估，但欠缺公開與透明之資訊，無法有益於各界共識之形塑，進而難以形成社會共同行動。

³⁴ Renewable Energy Institute, Why is METI Aiming to Limit Renewable Energy Generation to 50-60% of Total Output? Questioning the 53.4 yen/kWh Estimate for a 100% Renewable Energy Scenario, Jun 2021

有鑑於此，本節參考各國對其電力部門淨零排放路徑之規劃作法，嘗試對台灣電力部門達成 2050 淨零排放目標時，不同發電配比情境下的發電成本變化，進行初步模擬。本節內容僅為拋磚引玉，希望能促使主管機關或台電公司公開更多相關評估資訊，供各界參研。

(一) 台灣電力部門淨零排放情境設定

本節首先參考國發會公布之 2050 淨零排放路徑，如圖 3-29 所示。在滿足電氣化與經濟成長的需求下，假設電力需求年均成長 $2\pm 0.5\%$ 的三個低、中、高情境，2050 年全國電力需求量將會增加至 4,275~5,731 億度電的規模。本節在此參考國發會電力需求的中估計，亦即假設 2050 年電力需求 5,000 億度作為評估標的。



資料來源：國家發展委員會

圖 3-29、台灣 2050 淨零排放規劃

本節根據「台灣 2050 淨零排放路徑及策略總說明」勾勒之 2050 年電力部門發電配比設定，並輔以「十二項關鍵戰略」計畫核定本之計畫內容，設定我國 2050 年各類發電資源的總裝置容量與發電量，請見表 3-20 所示。

- (1) 太陽光電：政府規劃太陽光電 2025 年、2030 年及 2050 年總裝置容量分別為 20 GW、31 GW 及 40~80 GW；2030 年及 2050 年總發電量分別為 387.5~500 億度及 1,000 億度。故本研究設定 2050 年太陽光電占比為 20%。
- (2) 離岸風電：政府規劃離岸風電 2025 年、2030 年及 2050 年總裝置容量分別為 5.6 GW、13.1 GW 及 40~55 GW；2030 年發電量為 491 億度。故本研究設定離岸風電 2050 年占比為 40%，與太陽光電加總後，符合國家整體目標 60~70% 的區間。

值得注意的是，由於政府並未設定 2050 年離岸風電發電量目標，故本研究係根據其 2030 年離岸風電總裝置容量目標與發電量目標的比率，結合太陽光電 2050 年 1,000 億度之發電量規模。故可合理推測離岸風電 2050 年總裝置容量須達上限 55 GW，年發電量達 2,061 億度之規模（即為 5,000 億度的四成），才足以符合 2050 年再生能源占比 60~70% 的目標。

表 3-20、國發會 2050 淨零排放發電情境

能源技術		發電目標	容量目標	2050 年設定
再生能源	太陽光電	60~70%	40~80 GW	20%
	離岸風電		40~55 GW	40%
	慣常水力		-	1%
	地熱		3~6.2 GW	-
	生質能		1.4~1.8 GW	2%
	海洋能		1.3~7.5 GW	-
燃煤(CCS)		20~27%	-	-
燃氣(CCS)			-	27%
燃氣 CGS(CCS)			-	-
核能		0%	-	-
氫/氨		9~12%	-	10%
小計				100%
抽蓄水力		-	-	3.015GW
電池儲能		-	2030 年 5.5GW	10.485GW

資料來源：國發會，作者推估。

- (3) 慣常水力：本研究設定 2050 年為 1%，此係考量近四年台電慣常水力發電量介於 22.7~38.8 億度之間，在未來擴增慣常水力機組極為不可能的前提下，1% 已是極樂觀數字。
- (4) 火力機組：考量投資大量燃氣機組、淘汰燃煤機組已成既定政策³⁵，本研究設定 2050 年搭設 CCS 技術的燃氣機組發電占比為 27%，符合國家整體去碳火力發電 20~27% 的區間。

³⁵ 根據 2024 年 8 月 8 日國家氣候變遷對策委員會簡報資料，未來「以氣代煤」已成政策。

- (5) 前瞻能源：政府規劃地熱、生質能及海洋能 2050 年總裝置容量分別為 3~6.2 GW、1.4~1.8 GW 及 1.3~7.5 GW。為簡化評估，本研究假設生質能占比 2%
- (6) 氫能：本研究設定 2050 年氫能占比 10%，符合政府規劃之 9~12% 區間。
- (7) 抽蓄水力：目前現有及新增抽蓄水力機組規劃，設定 2050 年總裝置容量為 3.015 GW。
- (8) 電池儲能：本研究設定之 2050 年電池儲能量為 10.485 GW，係根據變動型再生能源(Variable Renewable Energy, VRE)總裝置容量(2050 年達 135 GW)的 10%，再扣除台灣上限 3.015 GW 的抽蓄水力後得出。乍看之下，高於政府規劃之 2025 與 2030 年電池儲能目標³⁶，但此係因目標年不同，且考量 2050 年不可調度的變動型再生能源裝置容量占整體供電系統比率增加，儲能需求將大幅攀升(RITE, 2024)。

而為進行敏感度分析，本節亦參考本章第二節的第四小節中，地球環境產業技術研究機構(RITE)利用 DNE21+ 模型評估日本電力部門 2050 年淨零排放之八個情境(設定內容詳見第二節第(四)小節)，並從中選擇基本情境、再生能源創新情境、善用核能情境等三個情境(如表 3-21 所示)，理由如下：

- (1) 基本情境：2050 年發電占比分別為再生能源 57.6%、核能 10%、氫能 13%、搭配 CCS 的火力發電 19.4%，考量各類發電占比除核能外，均與國發會規劃差異較小，故選擇之。
- (2) 100% 再生能源情境：2050 年發電 100% 來自再生能源，但因成本高昂，且台灣土地等資源不足，台灣難以對照，故不選擇。
- (3) 再生能源創新情境：再生能源成本大幅度降低，2050 年發電占比 63%，與國發會規劃差異較小，故選擇之。
- (4) 善用核能情境：2050 年核能 20%，考量其他情境核能均為 10%，故選擇之，作為與其他情境之對照。
- (5) 氫能創新情境：氫能成本大幅度降低，2050 年占比高達 23%，故不選擇。
- (6) CCUS 創新情境：強調 CCUS 成本大幅降低，化石燃料發電占比達 35%，但須運至國外儲存，由於其外運成本難以估計，故不選擇。
- (7) 需求變化情境：強調電動車、共享汽車等電力需求變化的情境，由於國發會情境係採 2050 年電力需求為 5,000 億度，故不選擇。
- (8) 採購國外碳權情境：國內僅減碳 63%，非淨零排放，故不選擇。

³⁶ 政府規劃之 2025 與 2030 年電池儲能目標為電網端 1 GW 及 3 GW；發電端 0.5 GW 及 2.5 GW；用戶端則不供調度。

表 3-21、日本 DNE21+模型 2050 淨零排放發電情境(原版)

能源技術		基本情境	再生能源創新	善用核能
再生能源	太陽光電	34.77%	42.48%	33.73%
	離岸風電	7.77%	10.58%	7.78%
	慣常水力	11.47%	9.94%	11.49%
	地熱			
	生質能(CCS)	3.60%	3.34%	3.73%
	海洋能	-	-	-
燃煤(CCS)		7.82%	6.97%	7.77%
燃氣(CCS)		9.39%	12.73%	9.32%
燃氣 CGS(CCS)		2.19%	1.97%	2.18%
核能		10.00%	10.00%	20.00%
氫/氨		13.00%	2.00%	4.00%
小計		100%	100%	100%
抽蓄水力		27.4 GW	27.4 GW	27.4 GW
電池儲能		> 870 GWh	>> 870 GWh	870 GWh

資料來源：RITE。

此外，日本部分能源技術應用狀況與台灣不同，故本研究亦予以調整或整併估計值。舉例來說，日本太陽光電的占比遠高於離岸風電，與台灣國發會的規劃正好相反，故在太陽光電與離岸風電 2050 年總占比不變的前提下，將兩者占比調換；其次，日本有較高占比的慣常水力與地熱，然而台灣水資源較為缺乏，地熱發電亦尚無具體進展，故在慣常水力維持 1% 下，將兩者剩餘占比算入離岸風電；再者，日本仍維持 7% 的燃煤發電占比，與我國「以氣代煤」政策相悖，故將將搭配 CCS 技術之燃煤發電占比併入搭配 CCS 技術燃氣發電中；最後，日本是抽蓄水力大國，其全國總裝置容量高達 27.4 GW³⁷，與台灣的抽蓄水力機組規模差異過大，故將其配比經換算後，歸於電池儲能³⁸。

調整後的日本 2050 淨零排放情境如表 3-22，並據此與國發會 2050 淨零排放發電情境進行模擬比較。

³⁷ JEPIC (2024), "The Electric Power Industry in Japan 2024", Japan Electric Power Information Center.

³⁸ 以日本 VRE 占比/台灣 VRE 占比(60%)*135GW*10%，再扣除 3GW 抽蓄水力，得出電池儲能的裝置容量。

表 3-22、國發會與日本 DNE21+模型(調整版)之 2050 淨零排放發電情境

能源技術	國發會	參考日本RITE			LCOE (NTD/KWh)
		基本情境	RE創新	善用核能	
再 太陽光電	20.00%	18.20%	19.50%	18.00%	3.10
生 (離岸)風電	40.00%	34.80%	42.50%	33.00%	4.13
能 慣常水力	1.00%	1.00%	1.00%	1.00%	2.37
源 生質能	2.00%	3.60%	3.30%	4.00%	5.31
燃煤(CCS)	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	4.18
燃氣(CCS)	27.00%	19.40%	21.70%	20.00%	3.59
核能	0.00%	10.00%	10.00%	20.00%	2.18
氫/氨	10.00%	13.00%	2.00%	4.00%	4.49
小計	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	-
抽蓄水力(GW)	3.015	3.000	3.000	3.000	6.92
儲能(GW)	10.485	8.900	11.000	8.500	42.96

資料來源：本研究。

(二) 各類能源技術成本情境

由於各類能源技術成本的推估對於電力部門達成淨零排放的發電成本影響極大，故本研究主要參考「美國再生能源實驗室(National Renewable Energy Laboratory, NREL)」發布的 2024 年「年度科技基線(Annual Technology Baseline, ATB)」進行除了氫能以外，各類能源技術成本推估值，在根據台灣現況進行調整。而氫能部分則參考日本《水素基本戰略》設定值調整之，詳細各類能源技術成本情境如表 3-23 所示，而換算的各類能源技術成本則可見於前表 3-22。

表 3-23、各類能源技術的均化成本情境

單位：US\$/MWh

LCOE(US\$/MWh)	2024	2030	2037	2050	來源
太陽光電(Utility, Class 10, CRP: 20 yrs)	59.5	39.8	22.7	12.4	NREL
太陽光電(Commercial, Class 9, CRP: 20 yrs)	97.9	79.5	62.4	47.0	NREL
離岸風電(Fixed, Class 6, CRP: 20 yrs)	147.6	112.0	87.8	81.0	NREL
離岸風電(Floating, Class 13, CRP: 20 yrs)	-	206.0	127.1	100.6	NREL
核能(SMR, CRP:30yr)	-	88.7	74.3	59.9	NREL
核能(SMR, CRP:60yr)	-	79.3	67.2	55.1	NREL
氫能(以 2018 年日圓兌美元平均匯率計算)	-	153.9	-	108.6	經產省
Biopower(Conservative, CRP: 20 yrs)	173.0	167.0	163.4	156.7	NREL

註 1：CRP 為 Cost Recovery Period。

註 2：生質發電部分，以木質燃料代表性成本進行推估，並假設機組為 50 MW。

資料來源：NREL、日本經產省，本研究整理。

舉例來說，NREL 的太陽光電均化成本(Levelized Cost of Energy, LCOE)依據其容量因素(Capacity Factor)分 10 級，電廠級(Utility-Scale)的容量因素最低的第 10 級為 21.4%，遠高於台灣日照條件最佳南部縣市；而商用級(Commercial)第 9 級的 CF 為 14%與則略高於台灣平均日照條件縣市，故本研究選擇商用級第 9 級的太陽光電成本進行 LCOE 估算。

在離岸風電部分，NREL 考量水下基礎、風速、水深等因素，將風場分成 14 種，其中 1~7 為固定式，8~14 為浮動式。而台灣近年離岸風電躉購費率每度約 4.5 元，與固定式第六級最相近。而根據我國「十二項關鍵戰略」計畫核定本，未來我國離岸風電將朝浮動式機組發展。故以浮動式為參考依據，並比照現行固定式的第 13 級為推估值。

核能部分，則因為現有的核能機組即使延役 20 年，依舊不會影響 2050 年的發電占比及其成本，故本研究係用新建的 SMR 核能機組進行成本估算。氫能則初步製參考日本《水素基本戰略》設定 2050 年 H₂ 供給以每公斤 2 美元(20 円/Nm³)為目標。但因為其價格自 2018 年後即未調整過，考量日幣匯率變化極大，故以 2018 年平均日幣兌美元匯率，再換算成美元。

在燃煤與燃氣機組搭配 CCS 技術部分，則分成兩個步驟：(1)利用計量經濟方法，以國際能源總署(IEA)的化石燃料價格預測值，對台電公司發購電成本進行預估，不過值得注意的是，IEA 預估的天然氣價格，在 2022 年美國與日本的價差為 10.8 美金/MBtu，但該價差在 2050 年每 MBtu 僅 2.9 美金，隱含了天然氣液化、運輸、儲存與再氣化成本大幅下降的假設；(2)收集 NREL 對其機組之固定資本投入、運轉與維護成本、營建財務成本等預測值；將二者結合後，進行燃煤與燃氣機組搭配 CCS 技術的 LCOE 估算。其中，燃煤機組搭配 CCS 技術部分共有五種技術，考量台灣以超超臨界機組為主，故選擇燃煤機組搭配封存純度 95% 的 CCS 技術為技術情境；燃氣機組搭配 CCS 技術部分共有七種技術，考量台電公司新建機組以 2-on-1 複循環機組為主。目前興達、大潭使用美國 GE 機組(H-frame)，故選擇 NG 2-on-1 複循環機組(H-frame) 搭配封存純度 95% 的 CCS 技術為情境。

另外，NREL 亦提供電池儲能系統的有其固定資本投入、運轉與維護成本、營建財務成本等預測值；故將以「外掛」方式，估算電池儲能系統造成整體能源系統成本的增額。

(三) 初步模擬結果

表 3-24 則是本研究所估算出的電力部門達成 2050 年淨零排放目標的四個情境下的 2050 年發電成本整理。從中可以發現，本研究初步模擬的 1+3 情境，以國發會情境的 2050 年發電成本最高，若能將核能占比提升至 10%~20%，約可降低發電成本 2.98%~8.70%。受限於台灣本土能資源條件限制，太陽光電、慣常及抽蓄水力與地熱等資源相對日本較少，2050 年的能源供應將極度仰賴離岸風電與

燃氣發電，若能源選項能更多元，將有助降低能源供應集中度，有助國家能源安全。

不過要注意的是，本發電成本模擬係按照國發會「中情境」的電力需求，規劃電力供給配比，並未考量電力成本變化對電力價格的影響，及進而對電力需求的影響，這樣的狀況亦顯示出目前國發會的規劃係建立在極為不合理的假設中，應該重新檢討。另外，本研究所估算之再生能源對發電成本的影響，與未來的技術進步與成本下降的趨勢息息相關，而這方面的技術情境則須仰賴各領域專家的集思廣益。

表 3-24、台灣電力部門 2050 淨零排放之發電成本模擬

能源技術	國發會	參考日本RITE		
		基本情境	RE創新	善用核能
再 太陽光電	15.72%	14.74%	16.02%	15.49%
生 (離岸)風電	41.83%	37.51%	46.44%	37.80%
能 慣常水力	0.60%	0.62%	0.63%	0.66%
源 生質能	2.69%	4.99%	4.64%	5.89%
燃煤(CCS)	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
燃氣(CCS)	24.52%	18.16%	20.59%	19.89%
核能	0.00%	5.70%	5.78%	12.11%
氫/氨	11.36%	15.22%	2.37%	4.98%
抽蓄水力	1.29%	1.33%	1.34%	1.41%
儲能	2.00%	1.75%	2.19%	1.77%
小計(元/度)	3.95	3.83	3.78	3.61
	-	-2.98%	-4.31%	-8.70%

註：本發電成本模擬係按照國發會「中情境」的電力需求，規劃電力供給配比，並未考量電力成本變化對電力價格的影響，及進而對電力需求的影響。

資料來源：本研究整理。

參考文獻

1. EMBER, Global Electricity Review 2024, May 2024.
2. IEA, Electricity 2024, May 2024.
3. IEA, Net Zero by 2050-A Roadmap for the Global Energy Sector, Oct 2021.
4. IEA, World Energy Outlook 2023, Oct 2023.
5. IEA, Tracking Clean Energy Progress 2023, July 2023.
6. IEA, Electricity-Energy System, <https://www.iea.org/energy-system/electricity>
7. 加州 SB100 法案，<https://www.energy.ca.gov/sb100>
8. California Air Resources Board, California Greenhouse Gas Emissions from 2000 to 2021: Trends of Emissions and Other Indicators, Dec 2023.
9. CEC, 2021 SB 100 Joint Agency Report, Mar 2021.
10. Jane CS Long et al, Clean Firm Power is the Key to California’s Carbon-Free Energy Future, 2021.
11. CPUC, Proposed Decision Determining Need for Centralized Procurement of Long-Lead Time Resources, July 2024.
12. Ejeong Baik and Sally M. Benson, Pathways to Carbon Neutrality in California: Decarbonizing the Electricity Sector, Stanford Center for Carbon Storage and Stanford Carbon Removal Initiative, March 2022.
13. CEC, Developments in Policy and Funding to Support Achieving SB 100, Aug 2023.
14. EIA, Form EIA-860, Annual Electric Generator Report. <https://www.eia.gov/electricity/state/hawaii/>
15. 夏威夷電力公司發電資源裝置容量，<https://www.hawaiianelectric.com/about-us/power-facts>
16. State of Hawaii, Department of Health, Hawaii Greenhouse Gas Emissions Inventory for 2020 and 2021, May 2024.
17. Hawaii Powered, Integrated Grid Plan-A pathway to a clean energy future, May 2023.
18. Hawaii Powered, Integrated Grid Plan- Preferred Plans and Next Steps, Nov 2023.
19. Hawaii State Energy Office, HAWAI‘I PATHWAYS TO DECARBONIZATION, Dec 2023.
20. European Commission, European Climate Law, https://climate.ec.europa.eu/eu-action/european-climate-law_en

21. European Commission, The European Green Deal, https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en
22. European Union, Global energy and climate outlook 2023, 2023.
23. Péter Horváth et al, European Union's Action Plan for Power Sector Decarbonisation, CEM14, July 2023.
24. European Commission, The Net-Zero Industry Act, https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en
25. European Commission, REPowerEU, https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repowereu-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe_en
26. European Commission, EU ETS, https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets_en
27. Climate Change Committee, A legal duty to act, <https://www.theccc.org.uk/what-is-climate-change/a-legal-duty-to-act/>
28. 英國最後一座燃煤發電廠將於 9 月底關閉，<https://www.trade.gov.tw/Pages/Detail.aspx?nodeid=45&pid=789622>
29. 英國歷年電力生產比例，<https://ourworldindata.org/grapher/electricity-mix-uk?time=1989..latest>
30. DESNZ, 2023 UK greenhouse gas emissions, provisional figures, Mar. 2024.
31. CCC, The Sixth Carbon Budget-Methodology Report, 2020.
32. CCC, The Sixth Carbon Budget-The UKs path to Net Zero, 2020.
33. CCC, Policies for the Sixth Carbon Budget and Net Zero, 2020.
34. DECC, Dynamic Dispatch Model, May 2012.
35. BEIS, Assessing the Cost Reduction Potential and Competitiveness of Novel (Next Generation) UK Carbon Capture Technology, Oct 2018.
36. BEIS, BEIS electricity generation cost report (2020), Aug 2020.
37. House of Commons Library, The UK's plans and progress to reach net zero by 2050, Sep 2024.
38. JEPIC (2024), “The Electric Power Industry in Japan 2024”, Japan Electric Power Information Center.
39. Keigo Akimoto, Scenario Analyses for 2050 Carbon Neutrality in Japan, IRENA Forum, Jun 2021.
40. Keigo Akimoto, Fuminori Sano, Scenario Analyses for 2050 Carbon Neutrality in Japan (Interim Report), RITE, May 2021.

41. 林韋廷、黃莉婷、王婷虹，日本的綠色轉型 GX 是什麼？政策、法規、策略作法脈絡彙整與簡介，ITRI，2023 年 9 月。
42. METI，The Basic Policy for the Realization of GX - A roadmap for the next 10 years，Feb 2023.
43. 方玉恆，日本通過《促進全球變暖對策法》修正案，將 2050 淨零碳排目標明確入法，能源知識庫。https://km.twenergy.org.tw/Data/db_more?id=6844
44. 黃莉婷、林韋廷，日本眾議院通過《GX 零碳電力法案》之包裹式修法，核電機組未來得運轉超過 60 年，並將核電延役與否之主責權限移交至經產省，能源知識庫。https://km.twenergy.org.tw/Data/db_more?id=7148
45. S&P Global, 1 company controls most of South Korea's power generation supply, <https://www.spglobal.com/marketintelligence/en/news-insights/latest-news-headlines/1-company-controls-most-of-south-korea-s-power-generation-supply-69622713>
46. 2050 탄소중립위원회, 2050 탄소중립 시나리오, 2021。
47. 楊怡真，韓國內閣會議通過 2050 碳中和情境與 2030 國家減排目標，能源知識庫，Oct 2021. https://km.twenergy.org.tw/Data/db_more?id=6928
48. 鄧澤宇、張景淳，韓國產業通商資源部 2024/5/31 公布「第 11 次長期電力供需基本計畫」，目標 2030 再生能源三倍增、2034 推動 0.7GW SMR 示範，能源知識庫，https://km.twenergy.org.tw/Data/db_more?id=7243
49. 產業通商資源部，전력산업정책과, 「제 11 차 전력수급기본계획」 실무안 공개，May 2024. <https://www.motie.go.kr/kor/article/ATCL3f49a5a8c/169132/view?mno=&pageIndex=1&rowPageC=0&displayAuthor=&searchCategory=0&schClear=on&startDtD=&endDtD=&searchCondition=1&searchKeyword=#>
50. 施怡君，碳中和 vs.能源安全南韓尹錫悅的能源政策「三支箭」，台大風險中心，<https://rsprc.ntu.edu.tw/zh-tw/m01-3/en-news/1721-0819-korea.html>
51. 張素美，中國承諾 2030 年以前達到碳排放峰值，及 2060 年實現碳中和，能源知識庫，Sep 2020. https://km.twenergy.org.tw/Data/db_more?id=3802
52. BBC，中國拉開限電衝擊居民生活背後三個原因，Sep 2021. <https://www.bbc.com/zhongwen/trad/chinese-news-58707959>
53. 中國國務院，2030 年前碳达峰行动方案，Oct 2021. https://www.gov.cn/zhe ngce/content/2021-10/26/content_5644984.htm
54. 中國發改委，“十四五”可再生能源发展规划，2021
55. 中國國家能源局，能源碳达峰碳中和标准化提升行动计划，Sep 2022. http://www.nea.gov.cn/2022-10/09/c_1310668927.htm

56. 中國發改委，煤电低碳化改造建设行动方案(2024-2027 年)，Jun 2024.
57. 中國國務院，加快构建碳排放双控制度体系工作方案，Jul 2024. https://www.gov.cn/zhengce/content/202408/content_6966079.htm
58. 中國發改委，加快构建新型电力系统行动方案(2024-2027 年)，Jul 2024.
59. 中國發改委，关于加强煤炭清洁高效利用的意见，Sep 2024. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202409/t20240929_1393429.html

第四章、產業部門

謝志強³⁹

一、前言

產業部門的溫室氣體排放相對複雜，包括通過電力消費間接排放的二氧化碳，以及直接燃燒排放的二氧化碳，還有製程的二氧化碳或其他溫室氣體的排放與逸散。各國因其工業部門結構有別，而出現差異化的脫碳策略。由於產業部門減碳涉及獨特性高的製程，因此減少相關溫室氣體排放，相較於其他部門，面臨更加獨特與艱鉅的挑戰。

2023年《IPCCC 第六次評估報告》針對產業部門提供七大面向建議，包含：材料需求、材料利用率、循環經濟與工業廢棄物、能源效率、電氣化與燃料轉換、碳捕捉封存或利用、策略互動與整合。首先，效率提升是達成減碳的重要手段，涉及材料需求減少、材料利用率提高、循環經濟，以及能源效率等解決方案，降低對原生資源的依賴，最大化的提升能源與資源使用效率，同時也有助於原材料開採(如天然氣、石油開採時的洩漏)與轉化過程中產生的碳排。其次，鼓勵產業部門轉向使用低或零溫室氣體排放的能源和原材料，例如再生能源、氫能、生質燃料等。此外，透過碳捕捉、封存或利用(CCUS)，降低生產過程中的碳排。上述策略的推動，需要大規模的技術開發與硬體設施的佈建，包含智慧電網、氫氣製造與運輸系統，以及碳捕捉封存與利用技術。此外，該報告也針對重點產業(鋼鐵、水泥、塑膠和化學業)提出建議。以鋼鐵業為例，藉由提高材料效率、增加鋼材回收率及發展基於氫能和電力的製造技術來減少排放；推動水泥業的材料替代技術，如使用低排放黏合劑替代傳統水泥，並應用CCUS於製程；化學業則需要推動生質材料和回收原料的使用。

產業部門除了上述技術開發、硬體設施的佈建外，亦需借助碳定價、獎勵補助、創新投資等市場干預機制來提供經濟誘因。另外，系統性思維的規劃與策略間的互動整合也相當重要，例如考量區域性資源與需求的整體性規畫，利用太陽能和風能產生零排放電力和低成本氫氣的潛力，或以其他低排放源生產的氫氣，重塑目前排放密集型基礎材料生產的地點、價值鏈、貿易模式及國際航運運輸；擁有豐富太陽能和風能資源的地區，或CCS地質條件共存的地區，可能成為氫氣或氫載體的出口地，或成為鐵鋼、有機化學製品和其他能源密集型材料生產的所在地。

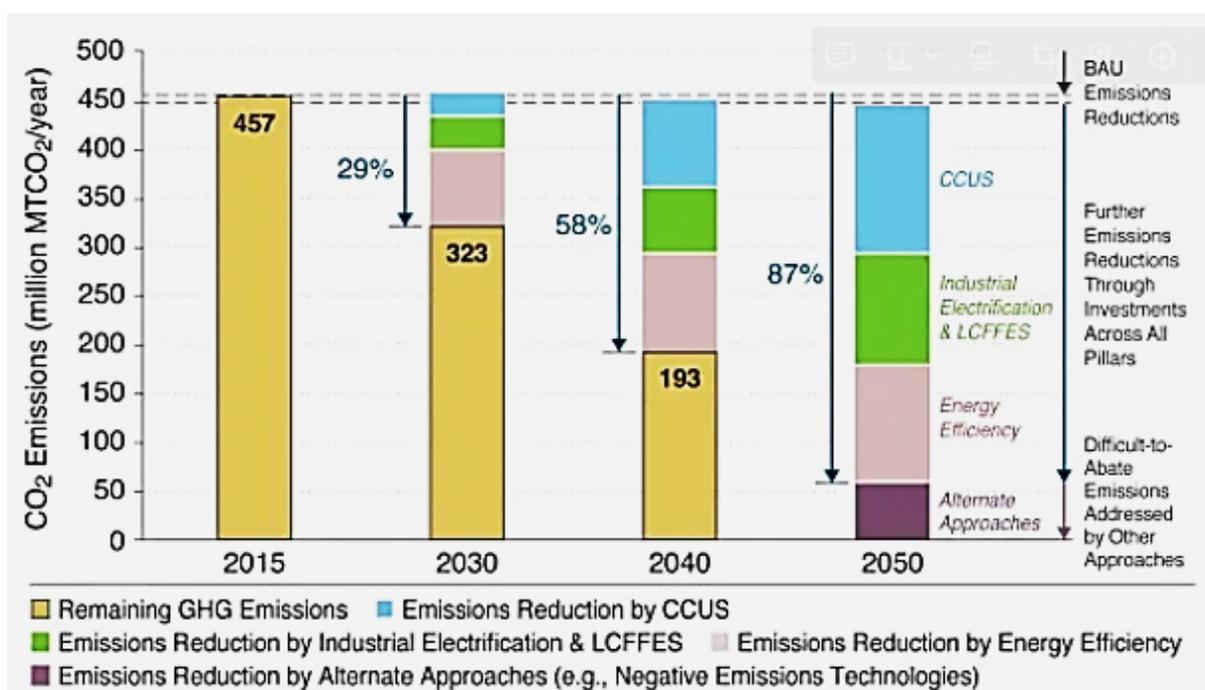
³⁹ 工業技術研究院產科國際所組長。

二、主要國家產業部門淨零排放路徑

(一) 美國

1. 美國產業部門排放趨勢

2022 年美國產業部門的直接和間接溫室氣體排放合計占美國排放總量的 30%，為第二大排放源。能源密集型和排放密集型的行業包括採礦、鋼鐵製造、水泥生產和化學品生產，共同產生了近一半的排放量。除了用電導致的間接排放外，包含製程中直接的排放溫室氣體⁴⁰。從趨勢來看，自 1990 年以來，產業部門(包括電力)的溫室氣體排放量相對 2015 年已下降 22%，並推動透過多項措施的推動(包括提高能源效率、產業電氣化、使用低碳燃料和原料及 CCUS)在 2050 年降低至 87%。(見圖 4-1)



資料來源：EPA, US, <https://www.epa.gov/system/files/styles/large/private/images/2024-04/industry-timeline-2024.png?itok=4ofec0GC>

圖 4-1、美國產業部門溫室氣體排放量趨勢與預測

2. 產業脫碳支柱

為產業部門邁向淨零提供路線指引，美國能源部(DOE)於 2022 年發布《產業脫碳路線圖》，以四大支柱減緩五個子部門的排放，並透過整體電力系統的潔淨化實現淨零碳排。期望讓政府、產業和其他利益相關者共同合作，並將美國定位為

⁴⁰ 包括現場能源使用和原料的化石燃料使用、水泥生產和其他行業的直接過程排放二氧化碳，以及硝酸和己二酸生產過程中非二氧化碳溫室氣體(如 N₂O)的排放。大部分直接排放來自消耗化石燃料以獲得製程所需能源。較小部分的直接排放，約三分之一，來自天然氣和石油系統的洩漏、生產中使用的燃料(如用於製造塑料的石油產品)，以及在生產化學品、金屬(如鋼鐵)和礦物(如水泥)過程中的化學反應。

全球減碳創新的領導者。四個脫碳支柱包括能源效率、電氣化、低碳能源與原料，及碳捕捉、利用和儲存，分別說明如下：

(1) 能源效率

能源效率是最基礎且具成本效益的選擇。技術上，除了設備效率提升技術的開發外，數據分析和智慧製造也可釋放設備、製程到整個供應鏈的能效潛力，並提高生產力。但也必須同時考量額外的數據存儲、運算對能源和溫室氣體排放的影響。推動上，透過市場介入措施加速高效率產品的滲透率，並結合「戰略性能源管理(Strategic Energy Management, SEM)」，促進企業自發性採取能源管理，包含設置能管人員和實行能源查核)。針對熱能的生產使用(如製程加熱、鍋爐和熱電聯產系統)⁴¹及馬達動力系統(如泵、風扇、壓縮空氣等)採許對應作法⁴²。

(2) 電氣化

製程加熱占美國工業能源消費的五成，其溫室氣體排放占製造業總能源排放的三成，故電氣化被視為重要淨零選項。電氣化技術，包括感應、輻射加熱和先進熱泵，可應用於中低溫範圍，屬於相對成熟的技術；但高溫製程的電氣化(如鋼鐵或水泥窯)，仍有待技術開發與驗證，或採用氫氣的替代方案。另外電解製氫於工業應用也可視為電氣化的一環。

(3) 低碳能源與原料

替代傳統高碳排放的燃料和原料來減少工業生產的碳排。包含：開發具有燃料靈活性的製程，使工廠能夠根據不同條件選擇適合的低碳燃料；將氫能整合到產業應用中，利用氫氣作為清潔能源和原料；以生質燃料和原料的生產和使用，減少對化石燃料與原料的依賴；利用集中式太陽能、核能和地熱等清潔能源技術，為產業提供穩定的清潔電力。

(4) 碳捕獲、利用與封存

CCUS屬於對難以減碳的部分提供補強的長期策略。CCUS的流程包括：從化石燃料燃燒或製成排放的CO₂捕捉，從捕捉介質中釋放CO₂，以便再利用或送往儲存。但是，吸附劑或吸收劑再生通常會產生能源損失。再利用時需要大量能源來重新活化。因此，CCUS技術的效率、經濟性和安全性還需要進一步驗證，儘管近十多年的技術發展與示範，已為大規模推動可能遭遇的挑戰提供方向，但如何降低高昂成本、建立監管制度等仍需要突破。

⁴¹ 特別是較低溫度(低於 150°C)的製程加熱。

⁴² 例如動力設備效率提升，以及動力系統的能耗優化；採用熱電聯產系統，或廢熱再利用，提高熱能生產利用效率，或熱電技術節能潔淨電力來取代傳統鍋爐加熱，廢熱或餘熱的發電或儲熱技術，也是可能的發展方向。

3. 產業脫碳路徑

由於不同行業都有其能源使用及碳排特性，故《產業脫碳路線圖》亦針對合計化工、煉油、鋼鐵、水泥以及食品飲料等五大行業⁴³，提出個別減碳策略。

化工業減碳策略包括開發低熱製程加熱解決方案、擴大先進反應和催化劑應用、製程電氣化並使用清潔能源，及提高材料效率和循環性。煉油業則著重於提高能源效率、降低碳足跡及 CCUS。鋼鐵業則轉向低碳和無碳燃料及原料、擴大電氣化，及進行創新製程發展。水泥業針對製程改進、廢棄物減少、材料和能源效率提高、CCUS 及增加使用低碳黏結材料。食品飲料業策略集中在提高能源效率、減少浪費，及推動包裝材料回收。其內容可多見於四個核心支柱中，再依產業適用性和相對重要性，及成本、當地能源或碳儲存的可用性以及基礎設施通盤考量。同時針對競爭性技術進行開發，例如鋼鐵業使用清潔氫氣的直接還原煉鐵和電解煉鐵，以探詢更多淨零的可能性。

4. 數位技術

美國能源部結合大數據、物聯網應用、自動化與智慧製造，將「工業 4.0」視為產業脫碳的跨領域機會，並透過清潔能源智慧製造創新研究所(Clean Energy Smart Manufacturing Innovation Institute, CESMII)進行布局。期能從流程控制、系統模擬、感測、供應鏈和設施選址優化等面向，幫助製造業從設備層面到整個供應鏈提升生產力，同時提高能源效率，讓製造業更具競爭力。值得注意的是，不同行業有不同的技術開發需求。例如在食品飲料業，整合熱系統及製冷和供應鏈優化，最小化浪費；鋼鐵、化工業可優化能源管理系統，或以機器學習改善流程和做到預防性維護。另外，雖然數位製造能為製造部門釋放更多潛力，但過程中的排碳，如數據運算所需電力，仍需要更多的研究來驗證相互的影響。

5. 能源轉型

一大部分的產業碳排放源自能源消耗，故能否達成脫碳，除了設置自有再生能源設施外，還取決於整體能源系統。特別是在電氣化策略下，清潔電力(包括核能、再生能源，及配備 CCUS 的化石燃料發電)是建立低碳電網的重要元素。智慧電網和能源儲存技術也將支持產業有效地利用間歇性再生能源。

6. 產業脫碳的資金投入

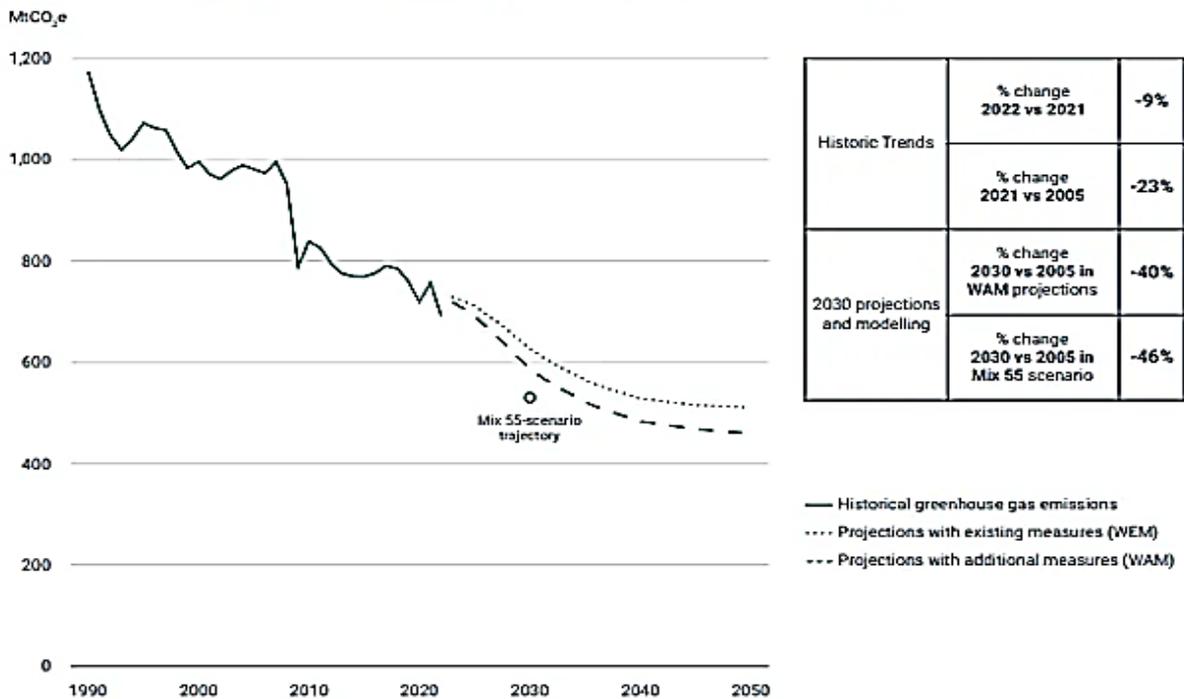
產業脫碳需要創新技術的突破與示範，美國能源部透過補助計畫來擴大產業夥伴關係，加速研發與應用進程。2023 年拜登政府投入 1.35 億美金於扶持大學、國家實驗室和企業的創新的產業脫碳技術開發。包含化工材料先進分離和反應器、加熱技術；低排放鋼鐵；食品飲料製程低碳加熱技術；次世代水泥及 CCUS；新型木材乾燥、製漿與造紙技術；熱泵和從廢熱發電等跨行業技術。

⁴³ 占美國產業部門能源相關 CO₂ 排放量 51%、占整體經濟 CO₂ 總排放量的 15%。

(二) 歐盟

1. 歐盟產業部門排放趨勢

2021 年歐盟產業的直接和間接溫室氣體排放合計占歐盟排放總量的 21%，自 1990 年以來已下降 35%，如圖 4-2。主要來自於歐洲產業結構的轉變、能源效率提升與製程改善。另外，自 2005 年實施以來，EU ETS 已將多數能源密集產業和電力部門涵蓋其中，也對溫室氣體減量有相當貢獻。為提升產業競爭力與避免碳洩露，歐盟於 2023 年開始推動碳邊境調整機制(CBAM)。



資料來源：EC; EEA

圖 4-2、歐盟產業部門溫室氣體排放量趨勢與預測

為達成 2030 年溫室氣體減量 55% 的總目標(55 方案)，產業部門相較 2005 年基期年將減少 46% 碳排。為此，歐盟透過獎勵機制來鼓勵產業綠色轉型，特別是提高能源效率、循環經濟⁴⁴、製程轉型(電氣化、氫氣等碳中和燃料)及擴大 CCUS。也投入淨零技術(熱泵、電池、太陽能板、電解槽、燃料電池)的開發應用。

在 55 方案的架構下，歐盟委員會主席馮德萊恩在 2023 年 1 月宣布《綠色協議產業計劃》，關注產業部門綠色轉型。此計畫結合 2024 年《淨零產業法案》，藉由支持工業製造和淨零產品的戰略性國際化，擴大清潔技術投資來提升產業競爭力，持續成為全球碳中和倡議的引導者。此外，也將由關鍵原材料法案，確保能獲得清潔技術與產品的稀土等重要材料。

⁴⁴ 歐盟特別強調要求產品設計須考量拆解、維修與循環，並優化物料流動並盡可能轉向能源密集度較低的二次原料。

2. 綠色協議產業計劃

在《綠色協議產業計劃》中提出產業綠色轉型的四大支柱。包含可預測且簡化的監管環境、加快融資取得、技能提升，及供應鏈韌性化。

首先，在監管方面，以 2024 年《淨零產業法案》確定產業淨零目標，並提供適合快速佈建的監管框架，另將制定標準以支持歐盟單一市場的技術規模化。這將輔以《關鍵原材料法案》確保關鍵材料的取得，及藉由《電力市場設計改革》，使消費者取得較低成本的再生能源。其次，在融資方面，將加速清潔技術生產的投資，包括利用現有的歐盟資金，如 REPowerEU、InvestEU 和創新基金；透過修訂國家援助框架、簡化批准程序，更大規模的導入私人資金；引導來自 11 個歐盟計劃資金形成《歐洲戰略科技平台》。第三，在技能方面，委員會將提議建立淨零產業學院，推動技能提升和再培訓計劃。最後，在供應鏈方面，將聚焦全球合作，發展自由貿易協定網絡，創建關鍵原材料夥伴，確保全球供應安全，以及清潔技術、淨零產業的夥伴關係。

3. 淨零產業法案

歐盟理事會於 2024 年五月批准《淨零產業法案》，制定一系列擴大歐洲關鍵技術能力的政策框架，來實現歐盟氣候目標。

該法案預計將加速歐美中等國在淨零與產業綠色轉型發展中的競合。如該法案設定達成淨零轉型所需的技術，在 2030 年將有四成產能來自歐盟本土。法案除涵蓋八大淨零技術⁴⁵的產品、組件和機械設備，另也包含核能技術(核分裂、核燃料循環)、替代燃料、水力發電、能源系統、生物氣候解決方案、用於脫碳的革新技术、碳運輸與利用、用於運輸的風力和電力推進技術。法案中還涵蓋一系列的規範，包含簡化許可程序、公部門採購納入永續性和韌性標準、以政策鼓勵家庭和企業購買淨零產品、設立淨零學院培育人才、建立「監管沙盒」測試創新技術、發展淨零產業群聚

4. 產業碳管理策略

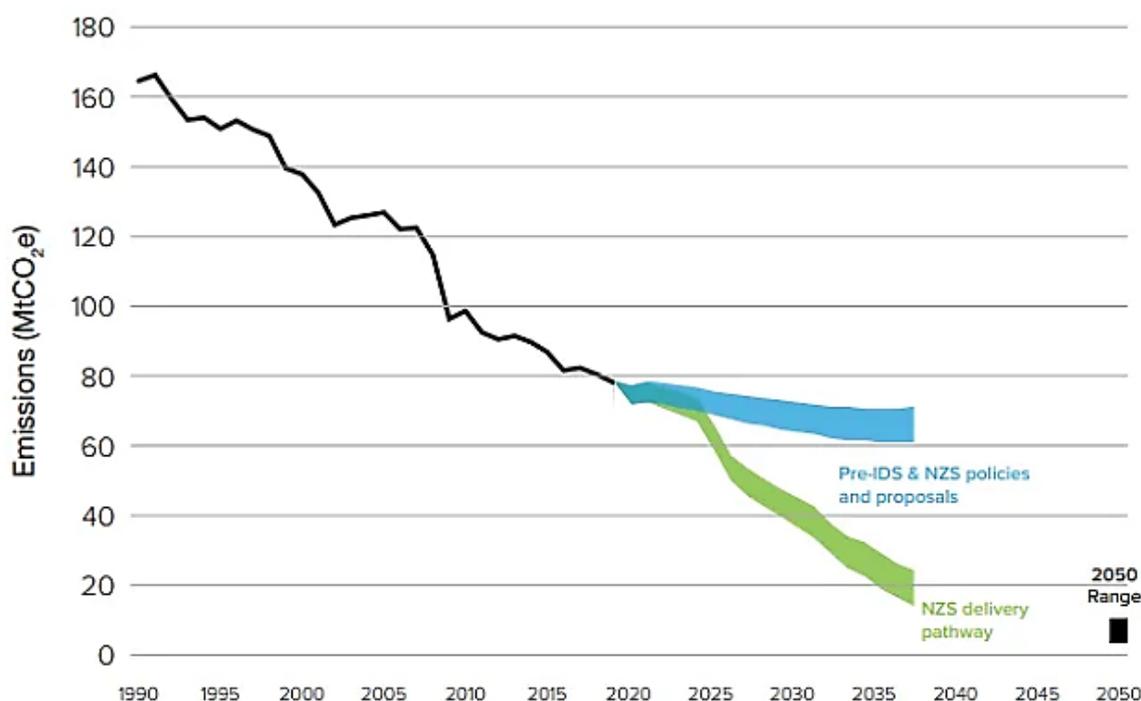
在前述《淨零產業法案》中，目標在 2030 年每年至少地質儲存 5 千萬噸 CO₂。而在歐盟達成淨零情境中，2040 年需要捕捉約 2.8 億噸，2050 年需要捕捉約 4.5 億噸。因此，歐盟另提出《產業碳管理策略》，透過開發捕捉(含直接空氣捕捉技術)、儲存、運輸及再利用等相關技術，來應對部分產業(如鋼鐵、水泥、煉油、低碳氫生產等)，難以達到淨零的挑戰。並建立法規制度和投資框架。期望在 2040 年形成碳價值鏈，將生物或大氣碳轉化為碳基工業製程原料或運輸燃料的主要來源，成為經濟體系的一部分。

⁴⁵ 包括太陽能光電和太陽熱能、陸域和離岸型再生能源、氫能(電解槽和燃料電池)、電池和儲能、熱泵和地熱、永續生質氣體與甲烷、碳捕捉和儲存、電網等關鍵技術。

(三) 英國

1. 英國產業部門排放趨勢

2022 年英國產業部門溫室氣體排放占排放總量的 14%，為第三大來源部門。整體碳排呈現下滑的趨勢，自 1990 年以來已下降 63%，主要來自產業結構的轉變、能源效率提升，以及低碳燃料使用，如圖 4-3 所示。此外，英國自 2005 年開始推動的總量管制與交易的碳定價機制，也有助於產業部門減碳的進展。英國脫歐後，也在 2021 年啟動 UK-ETS 機制，也在評估發展自己的碳邊境調整機制。



資料來源：BEIS Analysis

圖 4-3、英國產業部門溫室氣體排放量趨勢與預測

2020 年提出《綠色產業革命十點計劃》，融合綠色復甦、創造綠色就業機會加速邁向淨零。

2. 產業脫碳戰略

2013 年英國政府與產業開始合作，為產業制定長期脫碳和能源效率路徑圖，聚焦於熱能用量及排放量大的產業。最終在 2015 年公布《2050 年產業脫碳與能源效率路徑圖》，為八個能源密集型行業制定了一系列減排路徑。並於 2020 年提出《綠色產業革命十點計劃》，融合綠色復甦、創造綠色就業機會，加速邁向淨零。

2021 年正值疫情後的經濟復甦期，英國發布《產業脫碳戰略》，為全球第一個針對產業部門提出的減碳戰略的國家。英國以此戰略作為《綠色產業革命十點計劃》的核心，預計到 2035 年排放量需下降 67% (相較 2019 年)，到 2050 年至少減少 90%，剩餘排放量藉由負碳技術來移除。在實現國家淨零的同時，吸引內

部投資，協助企業與區域產業轉型，確保就業與經濟發展。

《產業脫碳戰略》中特別強調，這份指引將因應經濟與技術發展，每五年檢討更新。為達成 2035 年目標，該戰略提出七個階段性發展重點，包含三個 2030 年達成的量化目標：(1)四個主要工業區與必要的脫碳基礎設施相連接；(2)產業排放的二氧化碳捕獲量每年達 300 萬噸；(3)每年至少 20 TWh 的化石燃料被低碳燃料取代。此外，也包含四個質化目標，(1)透過循環經濟等措施，將能源、資源和材料效率極大化；(2)發展低碳材料市場；(3)利用產業脫碳帶來的新機會促進當地就業；(4)與他領先國家合作並支持發展中國家，以確保全球共同發展產業脫碳。

業脫碳戰略也提出了三個政策框架。首先，「主要部門減碳激勵機制」通過碳定價和產品標準來激勵現有和新興產業降低排放。其次，「碳洩漏緩解機制」避免因各國氣候政策差異導致的產業外移，主要透過氣候外交、提高生產力和進口產品碳排標準等方式實現。最後，「更廣泛的支持政策框架」旨在促進跨部門的淨零轉型，包括人才的技能轉型、產品能源與資源效率規範，以及針對創新和減碳困難地點特別的支持。

英國產業脫碳戰略還分為三個階段。第一階段著重於政策框架的建立，奠定產業減碳基礎，包括企業開始進行初步減碳，建設 CCS 和氫能基礎設施，同時政府提供資金支持並設立碳排放交易系統，支持技術創新，及發展氫能與電氣化等燃料轉換的政策。第二階段聚焦在政策框架的完善，支持更廣泛的產業減碳。讓更多企業開始深度減碳，低碳產業園區開始運作；引入競爭性商業模式，降低先期補助；導入需求面政策導引消費選擇；政府增加對技術創新和基礎設施開發的資金投入。第三階段則是實現長期持續、全部門參與的深度減碳，低碳產業園區使用氫能和 CCUS 基礎設施；強化需求面政策，促進消費者低碳消費；政府通過碳交易系統和產品標準控制排放，政策推動整個經濟體綠色轉型。

3. 推動策略

(1) 促進低碳投資：一般來說，低碳產品的成本高於碳密集生產方式，為促使企業低碳投資，需要幫企業制定短期回收投資的可行方案：

- A. 以碳定價作為市場信號：碳定價是具成本效益的工具，可促使企業決策時考慮其排放成本。
- B. 支持CCUS和氫能基礎設施的資金機制，降低企業在技術初期的成本和風險。
- C. 建立促進燃料轉換的政策：評估現有政策並制定新的政策，支持工業燃料轉換，並探討如何利用智慧技術(如儲能和需求反應)來提高能源使用靈活性。
- D. 建立負碳技術碳交易市場：推動直接空氣捕集與碳封存(DACCS)

和生物能源碳捕集與封存(BECCS)技術，評估納入UK ETS中。

- E. 採取針對性的政策減少碳洩漏風險：優化碳定價政策，逐步減少免費排放配額；另針對境外的洩漏，採取貿易手段與氣候外交對應。
- F. 與歐盟合作：與歐盟和英國的企業、學術界和政府利害關係人合作，確保企業不受歐盟CBAM政策衝擊。

(2) 促進消費者低碳產品：成本較高的低碳產品，短期內需要政府干預，來促進消費者選用，讓企業和消費者公平分配脫碳成本。

- A. 資訊揭露：提高碳排、用能資訊以及氣候相關財務揭露。
- B. 制定低碳產品標準：幫助低碳產品在市場脫穎而出。
- C. 產品標籤系統：提供充分資訊讓消費者選擇。
- D. 公部門採購：直接增加市場需求，以規模經濟降低成本。
- E. 私部門集體採購低碳產品：形成自願買家聯盟，使企業結合購買力，降低採購成本。

(3) 策略性採用低風險技術，並建立基礎設施(2020至2030年)

- A. 與產業合作，支持CCUS發展和部署(含選址和設置)；2030年，每年捕捉並儲存300萬噸CO₂，並在2050年，年增8-14百萬噸。
- B. 支持低碳燃料的轉換：包含氫能、電氣化和生質能源。
- C. 鋼鐵業脫碳：2035年前達到近零排放。
- D. 協助產業更好的預測設備生命週期，確保關鍵設備在需要更換時能夠用低碳替代品替換。
- E. 針對非產業群聚的水泥業協助脫碳：通過鐵路或公路運輸二氧化碳的替代方式。
- F. 評估碳密集度較低分散工業場域脫碳措施。
- G. 以《國家基礎設施戰略》確保在2030年前低碳基礎設施能夠快速發展並投入使用。
- H. 確保去碳化技術不對其他環境目標產生不利影響。

(4) 提升能源效率

- A. 鼓勵企業導入ISO 50001能源管理系統。
- B. 推廣熱能回收。
- C. 提供資金或輔導能源密集度較低場域提升效率。

D. 以培訓、實務分享及數位工具，使企業自助提高能源效率。

E. 推動循環經濟轉型，鼓勵企業通過重複使用、修復和再製造延長產品壽命；減少製造過程中對原材料的需求。

(5) 加速低碳技術創新：對仍在早期發展階段的低碳技術，提供支持。

(四) 日本

1. 日本產業部門排放趨勢

2022 年日本產業部門的直接和間接溫室氣體排放合計占溫室氣體排放總量的 34%，近年整體碳排呈現下滑的趨勢，自 2013 年以來已下降 24%，依賴化石燃料提供熱源的鋼鐵和化學業，排放量分別下降 23%和 14%。這些減碳成果主要來自於化石燃料的替代、設備效率提升與節能技術的導入。

在日本的《低碳社會實行計劃》，對於政府各省管轄的各別行業，詳實的評估與檢驗產業自發性減碳的成果。而「經團聯」在日本推動產業減碳中扮演重要的角色，也是日本《地球溫暖化對策計劃》中，產業減碳的核心。其在 2013 年發起的「經團聯低碳社會實行計劃」中，提出了四大核心目標：(1)設定 2020 年國內業務的減排目標、(2)加強消費者與客戶在內的多方協作、(3)推動國際減碳貢獻、(4)開發革新技術。2021 年再提出「經團聯碳中和行動計劃」，目前已有 114 個產業自發性響應。

2. 產業脫碳的七大方向

日本未對於產業部門設定明確目標或路徑。但在《地球溫暖化對策計劃》中有具體的導入措施，及在 2025 年與 2030 年具體的減碳貢獻值。該計畫將日本產業部門減碳歸納成七大面向：

- (1) 以《低碳社會實行計劃》推動產業自發性減碳：導入最佳可行技術，鏈結政府2030年減碳與2050年淨零目標。推動企業的去碳化管理，包含支持氣候相關財務揭露(TCFD)、設立中長期減排目標，例如科學基礎減碳目標(SBT)和RE100等，及供應鏈共同減碳。
- (2) 高效率設備的導入：包含空調系統、產業熱泵、照明、低碳與高效率鍋爐、動力設備、熱電聯產等；另外也針對鋼鐵、化工、造紙、建築與特殊運具、農林魚牧業推動高效率設備與製程。
- (3) 產業共同節能：透過企業間的能資源共享、成功經驗分享，共同達成省能法的節能目標並分享減碳成果。
- (4) 電氣化與燃料轉換：包括將高碳排的化石燃料(如煤炭和重油)逐步替換為碳排放較低的燃料(如天然氣)；隨著電力部門去碳化，推動製程電氣化(如中低溫的加熱與乾燥)、熱電聯產系統、燃料電池，以及推動需量

反應調節高耗能製程時程，和燃氣空調，移轉電力需求高峰。

- (5) 導入能源管理系統及IoT技術：提高能源管理系統的滲透率及用能範疇，以客觀數據制定節能方案。
- (6) 推動中小企業節能減碳：包含宣導與專業培訓、提供診斷輔導、成功經驗分享、設備更新獎勵、區域性的一站式服務平台。
- (7) 建立典範模型並複製擴散：支持企業設立具體減碳目標和路徑，導入高效率設備和優化製程改善，並透過示範宣導在行業間擴散。

3. 碳排放資訊揭露

日本在 2018 年提出《全球價值鏈中商品或服務的溫室氣體減排量量化指導方針》，產業部門可以量化減碳貢獻，並將相關資訊提供給投資者和消費者等利益相關者，並促使企業及其價值鏈實現減碳。另外，日本針對碳排大戶設有碳排申報、報告與公開機制，企業於線上申報資料，經由政府彙整與公布，提升排放數據的透明度，以促進企業自主減碳。

4. GX 實現基本方針

日本 2022 年制定了《GX 實現基本方針》，逐步實現去碳化、能源安全、提高產業競爭力與促進經濟成長的多重目標，其中涵蓋能源結構轉型、產業低碳化、技術創新和法律配套等多個層面。推動包含產業部門在內的用能管理與節能推廣措施，及促進大型能源用戶提交中長期非化石能源轉換計劃並定期報告。

其中，針對高耗能的五大產業(鋼鐵、化工、水泥、造紙和汽車製造業)提供非化石能源轉換指引；引入自願公開報告機制，鼓勵企業積極分享節能與非化石能源轉換的成果。在先進技術開發上，投入氫能應用技術的開發和示範，推動氫還原煉鐵等製程轉型，並開發適用於氫氣燃燒的大型鍋爐技術，及擴大供應網絡以降低成本。另發展合成甲烷和合成燃料，提供更多元的低碳燃料選擇。

此外，日本近期逐步推動碳定價制度，促使企業增加節能減碳投資。首先在 2023 年試行的「GX 聯盟排放交易制度」以企業自願參與為主，並推動企業自主設置減排目標。到 2026 年，將加強制度規範，提升參與率；2028 年起，針對碳排放實施一律的碳附加費。另外，政府也從 2023 年開始發行 20 兆日圓規模、為期 10 年的 GX 經濟轉型債券債券，預計促成公私部門 150 兆日圓的 GX 投資。

(五) 韓國

1. 韓國產業部門排放趨勢

2022 年韓國產業部門的直接和間接溫室氣體排放合計占溫室氣體排放總量的 36%，相較於 2018 年減少 6%。然而，根據韓國碳中和進程分析報告顯示，儘管已推動高碳排產業導入減碳技術和替代能源，但近兩年的碳排減少主因係國際

市場需求下降所致。

2. 產業脫碳策略

然而韓國貿易依存度高的經濟結構特性，難以僅依靠減少碳排放規範來轉向低碳經濟，因此需要採取更全面的策略來應對國際淨零趨勢，特別是逐漸興起的碳邊境調整機制的潛在影響。

為進一步推動產業部門脫碳，韓國於2021年4月成立了「碳中和產業轉型推進委員會」。該委員會邀集包括鋼鐵、水泥、汽車、半導體、顯示器等12個高排放行業的代表企業及產學研專家，共同討論低碳轉型策略。委員會下設有技術創新協商會、標準化戰略協商會和標準化論壇，用來促進行業低碳轉型和相關標準制定，作為韓國產業部門達成2030年相對2018年減碳11.4%目標的基礎。為了實現目標，產業部門減碳的四個核心包括：

(1) 確保碳中和核心技術

- A. 關鍵技術：擴大碳中和研發投入，如2023年啟動預算高達9,352億韓元的核心技術開發事業，因應產業需求對應開發減碳技術，例如與水泥、石化業共同開發CCUS技術與設備，及和半導體與顯示器行業制定低碳製程技術時間表，透過示範應用加速商業化，計劃2035達到廣泛應用，2050全面普及。
- B. 早期技術：設立了碳中和技術創新基金，支持突破型技術的早期發展；推動「碳中和技術評價體系」來擴大金融業對環境友善新創企業的投資。此外，擴展碳中和技術專用平台，在國家技術銀行(NTB)運營專門平台，積極支持民間企業的創新構想。
- C. 國際合作：韓國持續追蹤全球技術趨勢，通過國際聯盟平台，推動技術引進與共同開發，以加強碳中和技術能量。

(2) 強化企業淨零轉型之財稅、金融與制度面支援

- A. 財稅面：政府計劃將碳減排技術列為「新成長、原創技術」，提供更多稅收優惠，並為中小企業提供環保設備、太陽能設備購置和生質燃料進口等補助。
- B. 金融面：引入碳減排合同制(CCfD)，為企業提供價格保證以減少風險，同時強化政策性金融的風險分擔功能，支持大型減碳項目⁴⁶。
- C. 制度面：完善低碳技術應用的標準和法規，包括發布「碳中和標準化戰略」，計劃制定100項符合國際標準的國內標準；強化達成國家

⁴⁶ 例如，2023年政府提供1,470億韓元的專項融資，支持碳中和先導項目，融資條件優惠，包括最高500億韓元的額度，最長10年還款期，以及50%至100%的融資比例。

自主貢獻(NDC)目標的企業端政策措施，例如認可企業減碳成果、提供廢塑料再生利用投資許可，及新建工業區設置太陽能發電設施義務等；擴大綠色認證制度的適用範圍，鼓勵企業永續投資。推動高排放產業園區的燃料轉換，支持從煤炭轉向液化天然氣等潔淨燃料等。

(3) 強化碳交易制度

韓國在 2012 年通過《溫室氣體排放配額分配和交易法》，並在 2015 年啟動排放交易制度(K-ETS)，產業部門為主要參與者，故推動產業部門脫碳中，碳交易制度被視為重點：

- A. 擴大減碳激勵機制：針對交易體系內的合格企業，提供多樣化激勵措施，包括對使用環境友善原料、減排設備及再生能源的企業給予額外激勵，及補助設置與汰換節能減碳設備。
- B. 擴大排放效率標準範圍：從3個行業擴展到12個行業，預計於2026年起將鋼鐵、石化、建築、造紙等產業納入，涵蓋範圍從6%增加到66%。
- C. 擴大企業減碳責任：2026年起逐步提高企業有償配額的比例，特別針對高碳排產業，擴大碳交易市場規模。
- D. 開放權交易仲介：為提高市場流動性和透明度，自2021年12月起允許碳權交易仲介公司參與市場，促進專業交易公司協助企業碳權交易，目前已有20多家證券公司加入，提升市場交易效率。
- E. 多樣化排放權的供應，支援企業資金周轉，並推動碳權擔保相關金融產品。如參考歐盟模式，逐步引入衍生品交易。在擴大市場內供應的流動性後，將允許企業更靈活地使用排放權。
- F. 改善碳排放評估與認證機制：包含改進排放量計算方法以提高精確性和可信度，及涵蓋的技術範疇。並增設自動化評估功能，系統內記錄的排放數據，以減少人工操作誤差。

(4) 完善公私部門協力體系

首先，設立「碳中和產業轉型委員會」和「行業別協商會議」等平台，促進政府、大型企業、中小企業、研究機構等多方利益相關者的交流與合作。其次，協助碳權交易制度優化，通過公私合作模式，反映企業需求，改善排放權分配和流通機制。最後，完善產業部門減碳轉型的測量基礎，建立涵蓋產品全生命周期的溫室氣體減排評估體系，開發符合國際標準的碳排放數據庫並擴大其公開範疇。

(六) 中國

1. 中國產業部門排放趨勢

2021年中國產業部門的直接和間接溫室氣體排放約占全國總排放量的85%。儘管近年中國致力於優化產業結構和發展低碳產業，但整體碳排放仍呈上升趨勢。這主要歸因於中國快速的工業化發展，特別是鋼鐵、水泥和化工等高碳排產業的大幅成長，以及產業部門對化石燃料的高度依賴。

2. 工業領域碳達峰實施方案

(1) 重點目標

為應對這一挑戰與達成淨零目標，2022年發布《工業領域碳達峰實施方案》。該方案針對「十四五」(2021-25年)和「十五五」(2026-30年)兩階段，設定階段性方向與目標。

- A. 十四五期間：致力於產業與用能結構優化，大幅提升能源利用效率，並建設綠色工廠和工業園區。同時，強調低碳、零碳和負碳技術的研發和應用，目標在2025年，規模以上工業單位能耗較2020年下降13.5%，二氧化碳排放強度下降幅度要大於全體社會的平均值。
- B. 十五五期間：進一步優化產業結構，持續降低工業能耗強度和CO₂排放強度，建立以高效、綠色、循環、低碳為特色的現代化工業體系，並在2030年前達到碳排放的峰值。

(2) 重點任務

- A. 產業結構調整：實現碳達峰最關鍵的措施，從源頭來抑制高耗能、高排放產業的盲目發展；針對重點產業區域計劃性的有序轉移和承接，將有色金屬等高碳排產業轉移到再生能源資源豐富的地區，以及推動產業群聚，強化能源整合應用與降低產品物流。
- B. 節能與效率提升：為因應持續增長的能源消費的最優先辦法，深入節能減碳推動，大幅提升重點行業與產品的能源效率，推動用能低碳化、智慧化與系統化。優化用能結構、工業用能電氣化、工業綠色微電網建設、強化節能監管與國營企業帶頭發展自願性承諾等。
- C. 綠色製造轉型：從工廠、供應鏈、園區等多層面推廣綠色製造模式，針對中小企業提供節能診斷服務、低碳產品開發、低碳技術創新等服務；另以清潔生產的審核和評鑑認證機制來管理與評估成果。
- D. 發展循環經濟：包括推動水泥摻配原料、再生能源製氫、石化原料多元化替代；金屬、塑橡膠、退役光電、風電組件和電池等循環利用；發電機、機器人等關鍵元件再製造；礦粉、粉煤灰等廢棄物再利用等。

- E. 綠色低碳技術研發和應用：以企業為主體，結合產學研推動關鍵基礎原料、高效儲能、能源電子、氫能、CCUS 等低碳技術突破；發布工業重大低碳技術目錄，加大低碳技術推廣力度；以及鋼鐵、建材、石化、有色金屬、機械、紡織等重點行業升級改造示範。
- F. 數位轉型賦能：以大數據、5G、AIoT、雲端運算、數位孿生、AI 等新技術對製程和設備進行升級；建立數位化碳管理體系；結合 AIoT 與綠色低碳，鼓勵電信與資訊服務業和工業跨領域合作，促進低碳資訊與基礎數據共享。

(3) 重點行動

A. 重點行業碳達峰行動：

高耗能產業方面，針對鋼鐵、建材、石化化工、有色金屬等行業提出嚴格的產能控制與升級措施。例如，鋼鐵業鼓勵發展電爐煉鋼，推廣低碳煉鐵技術，提高低碳鋼材應用；建材業的水泥、平板玻璃淘汰落後產能，推廣節能技術和設備，並鼓勵使用非碳酸鹽原料製造水泥；石化業提高低碳原料比重，推廣先進技術，並開發以再生能源生產高價化學品技術；有色金屬業避免產能盲目擴張，推廣先進技術，鼓勵使用再生金屬原料。

在消費品、設備製造和電子等行業，側重推廣綠色低碳技術和提高能源效率。例如，造紙業建立生物質回收體系，發展替代化石能源技術，推廣低碳技術裝備，提高熱電聯產比例；紡織業發展智慧化高效製程、低能耗印染設備技術，並推動廢舊紡織品循環利用。設備製造業推動智慧化、綠色化轉型，發展滿足節省能源和節料的技術及產品，研究制訂電力設備和技術的綠色發展路徑。電子業強調產業群聚和低碳發展，以及要降低非電能源的使用比例，並設定一些電子零組件生產技術的提升。

B. 綠色低碳品供給提升行動：

在產品開發方面，推動工業產品綠色設計，以產品全生命週期計算碳足跡，推動綠色標章標示制度，並鼓勵企業自願性參與；在能源生產領域，加強能源電子產業發展，推動太陽光電、新型儲能及重點終端應用和關鍵資訊技術產品的共同創新；運輸領域，推廣節能與新能源汽車的應用、電動重型卡車、氫燃料汽車的研發及示範應用，加快構建充電網絡體系；發展綠色智慧船舶的研發與示範，發展電動飛機等新能源航空器；在城鄉建設領域，將水泥、玻璃、陶瓷等碳排放指標納入綠色建材標準體系，加速推動綠色建材產品認證，及高效節能空調、照明器具、電梯等用能設備，以及太陽能熱水器、熱泵等清潔能

源設備。

(4) 政策配套

- A. 法律法規：修訂節約能源法、再生能源法、循環經濟促進法、清潔生產法等法規，制定工業節能監察、機電產品在製造管理、新能源汽車電池回收等管理辦法，以完善工業領域碳達峰的法律體系。
- B. 標準計量：擴大能耗標準範疇、額和能效標準，並鼓勵參與對接國際標準。開發工業關鍵計量測試和技術研究，以健全國家的計量體系。
- C. 經濟政策：完善綠色稅收政策，落實節能節水和資源綜合利用的稅務優惠，獎勵採用綠色低碳技術與設備。
- D. 市場機制：完善碳權、用能權，及電力交易市場。逐步擴大碳權交易市場覆蓋範圍，並研究重點行業排放基準，以科學方法訂定企業碳排放配額；發展綠色電力交易示範，發展綠色電力交易、電網調度、市場價格等機制。健全綠色產品認證與標識制度，強化綠色低碳產品、服務、管理體系認證。
- E. 綠色金融：以市場化、法治化為原則，研究制定轉型金融標準，引導金融機構支持工業綠色低碳發展。
- F. 國際合作：以共商共建共享原則、利用既有雙邊和多邊機制，來參與全球工業綠色低碳發展與技術、政策、貿易交流。

三、台灣產業部門淨零排放路徑建議

(一) 台灣產業部門排放趨勢

2022 年台灣工業(製造)部門的直接和間接溫室氣體排放約占全國總排放量的 51.37%，相較 2019 年下降約 1.5%。整體工業部門碳排放自 2006 年達到高峰後呈現下降的趨勢。碳排放以鋼鐵、水泥、電子、石化等產業為主要來源，台灣產業以出口為導向，近年產業結構由傳統產業轉向電子、半導體等高科技產業的調整，碳排放強度有顯著下降的趨勢。主要來自於產業積極推動節能、低碳能源替代，及電子業含氟氣體減量的效果。

(二) 產業淨零轉型推動策略

為達成 2050 年淨零排放目標，台灣產業部門採取「先減少排放，再淨零排放」的策略，推動 3 大面向、11 項措施。措施包括製程改善、能源轉換和循環經濟。製程改善方面，短期以設備汰舊更新及導入智慧節能管理為主，長期發展氫氣技術和含氟氣體削減等創新技術。能源轉換方面，短期擴大使用天然氣及生質燃料，長期朝向 100%使用綠電及無碳能源。循環經濟方面，短期推動原料替代和使用固體再生燃料，長期發展 CO₂ 捕捉與再利用(CCU)等創新技術。並採取以

大帶小的模式，由國營事業先行；同時結合產業公會及供應鏈中心廠作法，推動中小企業建立碳盤查與減碳能力，帶動上、下游廠商，進行綠色採購、綠色生產等合作減碳，並形成綠色供應鏈來提升產業國際競爭力。

(三) 重點產業推動作法

針對六個重點碳排產業，分就前述製程改善、能源轉換和循環經濟三個面向，制定具體推動作法。石化業著重於製程智慧化、使用低碳與再生能源，和廢棄塑膠材料循環、CO₂ 回收利用，及多元料源技術開發。電子業重點包括製程端導入 ISO 50001 能源管理系統及智慧化的能源監控系統、使用綠電及實現 RE100 目標和參與負碳技術開發取得碳權等作法。鋼鐵業聚焦提升能源效率與導入節能設備，發展智慧高爐、增加天然氣等天然氣使用，以及導入綠電和購買綠電憑證，增加廢鋼使用、發展 CCU 及鋼化聯產技術。水泥業推動設備更新與導入智慧化生產系統、擴大生質燃料使用和原料替代。紡織業和造紙業則致力於製程改善、能源轉換和循環材料利用。

(四) 配套政策

在協助產業淨零轉型的政策配套方面，採取四大面向和兩大合作模式來實施，旨在提升企業的碳管理能力、減碳能力，並促進綠色金融發展。首先，建構企業碳盤查能力，包括組織講習訓練，同時，成立了產業服務團，提供諮詢和診斷輔導，以及建立數位服務平台，提供簡易的碳盤查計算工具和知識資源。

其次，提供專家諮詢和診斷輔導，協助企業制定合適的碳盤查和減碳策略；輔導企業動循環經濟創新技術、綠色設計、製程改善與營運服務模式等；協助企業建立溫室氣體管理系統、進行碳足跡和水足跡盤查，以及建置能源管理系統，並取得國際碳足跡驗證。第三，幫助企業掌握各國環境政策和碳邊境調整機制 (CBAM) 等國際減碳資訊的最新進展，舉辦產業說明會，並提供諮詢服務；以標竿企業綠色轉型激勵更多企業參與。

第四，以公私協力，建構永續金融生態系統，促進綠色金融市場的發展。短期目標是建立有效的市場運作框架，提高資訊透明度，引導資金流向綠色和永續發展產業。長期目標則是強化金融業應對氣候變遷風險的能力，並通過金融機制推動企業重視 ESG(環境、社會和公司治理) 議題。其中包含「獎勵本國銀行辦理新創重點產業放款方案」、鼓勵投資風力等再生能源，和活絡及發展我國永續發展債券市場、SG 相關主題基金(ETF)和綠色保險商品。另也針對企業減碳及資訊揭露、氣候風險調適揭露增修訂相關辦法。

最後，採取以大帶小的模式，鼓勵大企業帶動其上下游供應鏈和產業鏈的中小企業共同減碳；成立了涵蓋七大產業的淨零工作小組，定期討論產業減碳策略和技術。

(五) 國際借鏡

整體而言，主要國家都認知到產業部門減碳的重要性，並採取多樣化的政策工具和措施來推動產業綠色轉型，如表 4-1 所示。產業部門減碳路徑上，主要依其國家產業特性、結合整體淨零戰略推動架構之差異而有不同的主軸與策略。然而，廣泛來看，有幾個共通性，包括全面的政策框架和配套措施、聚焦重點產業的減碳策略、推動循環經濟和資源效率提升、強化碳交易制度、推動綠色金融發展等，台灣亦然。從國際作法上，有幾個值得參考借鑒的方向：

1. 淨零產業發展與機會上，歐盟《淨零產業法案》和日本《GX 實現基本方針》，制定了明確的產業綠色轉型目標和路徑，並提供更完善的監管機制和激勵措施，吸引企業投入淨零技術的研發和應用。
2. 此外，制定部門別減碳階段性目標雖然具有挑戰性，但國際上歐盟與英國以減碳模型推演產業部門目標設定，有助於減碳策略整體評估，並引導產業進行低碳投資和技術研發，提升減碳行動的效率和效果。
3. 技術應用與發展上，除了能源效率、電氣化與再生能源應用、CCUS 等較具共通性的策略外，美國強調數位科技的應用，例如智慧製造、數位孿生、人工智慧等技術，可以提升能源效率、優化生產流程、發展循環經濟等。
4. 最後，各國都積極推動國際合作和技術交流，分享減碳經驗和最佳實務。

表 4-1、各國產業部門碳排放現況、減碳目標與策略比較

	產業碳排占比(2022)	產業減碳目標	產業部門策略和作法
美國	30%	-	四大支柱:能源效率、電氣化、低碳能源與原料、碳捕獲利用和封存 五大產業脫碳路徑: 煉油、化工、鋼鐵、水泥、食品 其他配套: 數位製造、材料效率、技術創新
歐盟	21%	2030 相對 2005 減碳 46% (基於 Fit55 情境)	四大支柱: 監管環境、加快融資、提升技能, 開放貿易 其他配套: 淨零產業法案、產業碳管理策略
英國	14% ^{註 1}	2035 相對 2019 減碳 67%; 2050 年至少減碳 90%	三個政策框架: 主要部門減碳激勵機制、碳洩漏緩解機制、更廣泛的支持政策框架 策略方向: 促進低碳投資、促進消費低碳產品、技術發展與建立必要基礎設施、提升能資源效率、加速低碳技術創新
日本	34%	-	七大方向: 推動企業自願減碳、推動中小企業節能減碳、建立典範模型並複製擴散 其他配套: 綠色轉型(GX)、碳排放資訊揭露與碳訂價制
南韓	36%	2030 相對 2018 減碳 11.4%	確保碳中和核心技術、強化企業淨零轉型之財稅金融與制度面支援、強化碳交易制度、完善公私部門協力體系
中國	85% ^{註 2}	2030 年前達到碳排放峰值	六大任務: 產業結構調整、節能減碳、綠色製造、循環經濟發展、技術創新、數位化轉型 兩個重大行動: 重點行業碳達峰行動、綠色低碳品供給提升行動
台灣	51%	-	三大面向: 製程改善、能源轉換、循環經濟 重點產業推動作法: 石化、電子、鋼鐵、水泥、紡織、造紙 四大面向政策配套: 建構企業碳盤查能力、提供專家諮詢和診斷輔導、掌握國際減碳資訊、促進綠色金融發展

註 1: 不含間接排放; 註 2: 2021

參考文獻

1. Greenhouse Gas Emission-Sources of Greenhouse Gas Emissions; US EPA; <https://www.epa.gov/ghgemissions/sources-greenhouse-gas-emissions#industry>
2. Reducing Greenhouse Gases in the United States: A 2030 Emissions Target; [https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-06/United States NDC April 21 2021 Final.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-06/United%20States%20NDC%20April%2021%20Final.pdf)
3. DOE Industrial Decarbonization Roadmap; <https://www.energy.gov/industrial-technologies/doe-industrial-decarbonization-roadmap>
4. European Commission Net-Zero Industry Act, https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_24_680
5. IPCC Sixth Assessment Report, Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change, <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>
6. European overview of GHG emissions, <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-du-climat-2023/en/7-european-overview-of-ghg-emissions>
7. Trends and projections in Europe 2023, EEA, EU, https://www.eea.europa.eu/publications/trends-and-projections-in-europe-2023/at_download/file
8. The Green Deal Industrial Plan: putting Europe's net-zero industry in the lead, EU, https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_23_510
9. Strategic Technologies for Europe Platform, EU, https://strategic-technologies.europa.eu/index_en
10. Net Zero Industry Act, EU, https://single-market-economy.ec.europa.eu/publications/net-zero-industry-act_en
11. Net Zero Strategy: Build Back Greener
12. 2022 UK Greenhouse Gas Emissions, Final Figures, <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/65c0d15863a23d0013c821e9/2022-final-greenhouse-gas-emissions-statistical-release.pdf>
13. Industrial Decarbonization in Japan 2023 Edition, WEF, https://www3.weforum.org/docs/WEF_Industrial_Decarbonization_in_Japan_2023.pdf
14. 2022 年度における地球温暖化対策計画の進捗状況, https://www.kantei.go.jp/jp/singi/ondanka/2022/2022_sinchoku.pdf
15. 2022 년도 탄소중립 녹색성장 이행점검 결과, <https://www.korea.kr/common/download.do?fileId=197586854&tblKey=GMN>
16. Jinghang Xu, Yuru Guan, Jonathan Oldfield, Dabo Guan, Yuli Shan, China carbon emission accounts 2020-2021, Applied Energy, Volume 360, 2024,
17. 工业领域碳达峰实施方案, https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-08/01/content_5703910.htm
18. 國家溫室氣體排放清冊報告(2024 年版), <https://www.cca.gov.tw/information-service/publications/national-ghg-inventory-report/12003.html>

第五章、住商部門

黃國倉⁴⁷

一、前言

為了降低氣候變遷的衝擊，全球已有超過 140 個國家倡議或規劃在 21 世紀中達到國家溫室氣體的淨零排放，許多國家亦將在 2050 年前將淨零排放或碳中和目標納入該國法律中，以宣示其國家溫室氣體減量之決心。在達到 2050 年淨零排放目標中，IEA 指出有三大關鍵，其一為全球各國在各部門領域持續進行能源使用效率的提升，以及能源部門採用減排措施與技術，積極推動再生能源及使用新興燃料。在其「IEA2050 淨零路徑(Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector)」報告中，除了提出淨零路徑里程碑作為各國政府的行動準則，同時指出建築產業應發展高效能且直接使用再生能源或全脫碳能源的近零碳建築，要求所有新建建築在 2030 年、50%以上既有建築在 2040 年以及超過 85%所有建築在 2050 年均應達到近零碳建築水準。

建築物的碳排放可區分為營建過程蘊含於建築材料中的蘊含碳排(Embodied Carbon, EC)以及建築使用中的營運耗能(Operational Carbon, OC)。聯合國環境署(United Nations Environment Programme, UNEP)在 2022 年發布了一份全球性報告，談到全球建築物使用碳排 OC 與蘊含碳排 EC 在全球溫室氣體排放占比高達 28% 與 9%。其中，住宅直接排放、住宅間接排放、非住宅直接排放與非住宅間接排放占使用碳排 OC 之占比分別為 6%、11%、3%、8%；建築產業、混凝土、鋁和鋼占蘊含碳排 EC 之占比為 6%，磚和玻璃等材料占蘊含碳排 EC 之占比為 3%。二者共佔了全球碳排放總量的 37%，是各部門排放來源中之最大者，其次則是工業部門的 30%。其中，建築完工後日常使用時之能源使用碳排放量是減碳之關鍵熱點，如圖 5-1。而有關建築部門主要著重在導入建築節能技術同時結合再生能源，以降低建築的總體耗能。

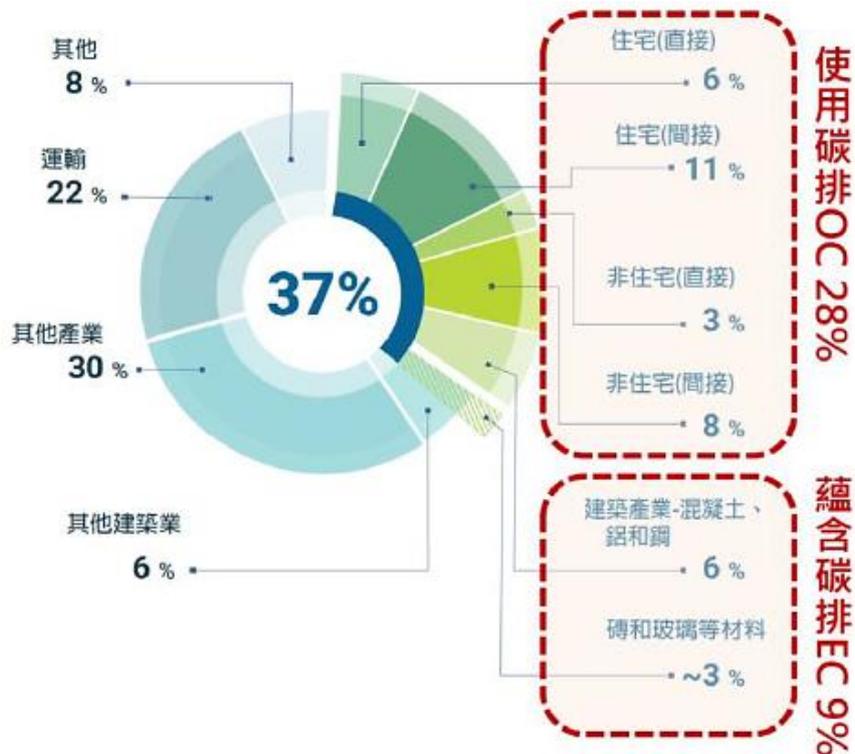
二、主要國家住商部門淨零排放路徑

(一) 美國(以紐約州為例)

美國已宣示在 2050 年前實現淨零排放的全國性目標。早在 2007 年，美國便通過《能源獨立與安全法案》，規定在 2030 年前，所有新建建築必須達到淨零能源標準；2040 年前，全國一半的非住宅類建築也需符合此標準；而到 2050 年，所有非住宅建築都必須達到淨零能源要求。同年，美國能源部(Department of

⁴⁷ 台灣大學生物環境系統工程學系教授。

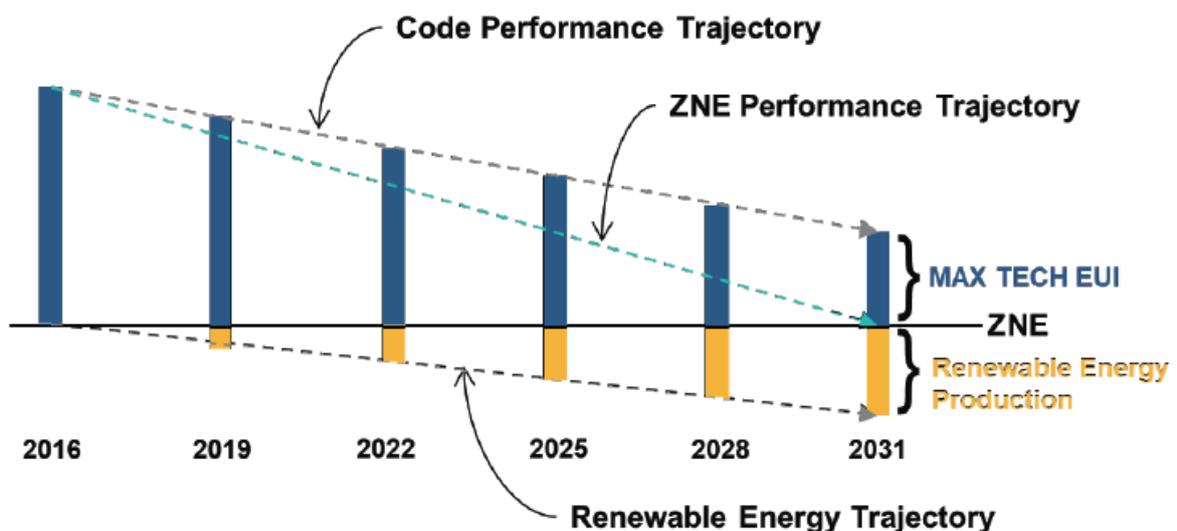
Energy, DOE)推出「2030 挑戰計畫」，要求所有新建建築在 2020 年和 2025 年分別減少 80%和 90%的化石燃料使用，並於 2030 年實現碳中和。



資料來源：內政部建築研究所(2024)

圖 5-1、建築物使用碳排(OC)與蘊含碳排(EC)之全球占比

該計畫承襲了非政府組織 Architecture 2030 提出的願景，其達成淨零碳排放建築的路徑如圖 5-2 所示。除了逐年增加建築再生能源的使用(如該圖下方的長條圖所示)，建築節能也通過強化法規來推動(如該圖上方的長條圖所示)。



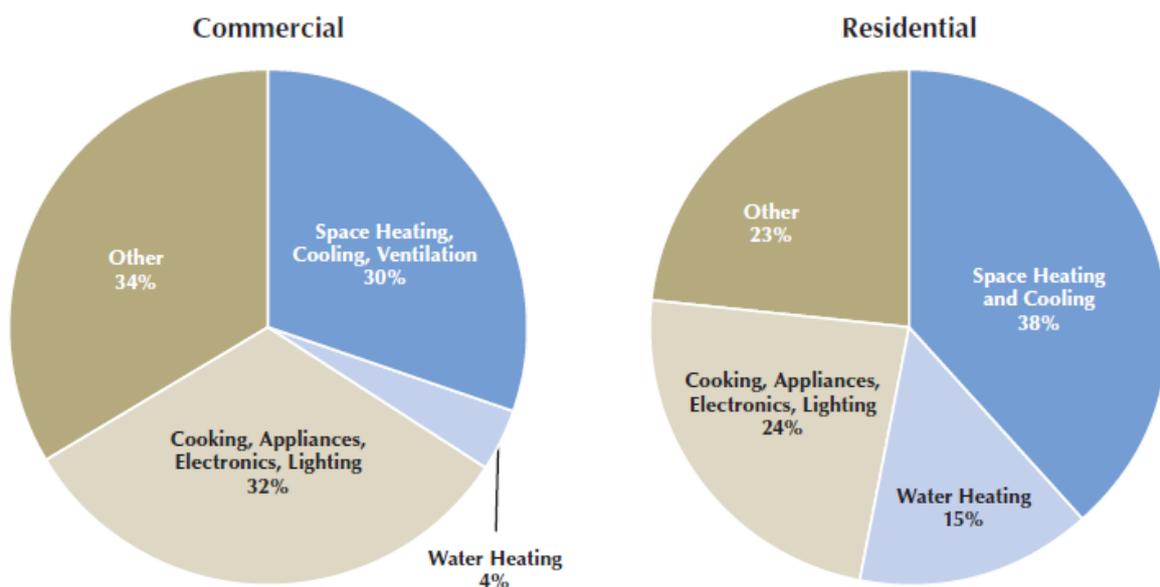
資料來源：Cortese and Lyles (2020)

圖 5-2、美國淨零碳排放建築之路徑概念圖

該計畫將「零碳排建築」定義為，首先需通過建築設計和設備系統的高效能來減少能源需求，然後逐步引入再生能源，最終達到真正的淨零排放。為實現這一目標，政府通過強化建築節能法規，對新建建築的能源效率進行更嚴格的規範。不過，美國各州在建築節能法規的嚴格程度有所不同。以紐約州為例，該州在 2014 年推出了「80x50 計畫」，宣示紐約市到 2030 年和 2050 年時，分別比 1990 年減少 40% 和 80% 的溫室氣體排放；並在 2025 年前減少 35%。此外，自 2017 年起，所有新建建築的節能標準須比現有的法規提高 50%。紐約州的「80x50 計畫」是目前全美最積極的建築減碳計畫之一。

美國針對住商部門的溫室氣體減量，主要由兩大機關負責：環境保護署 (Environmental Protection Agency, EPA) 和能源部。其中，EPA 是聯邦的獨立機關，而 DOE 隸屬於聯邦行政體系。EPA 負責建築部門的溫室氣體排放量監測、減碳路徑預測及策略擬定；DOE 則專注於減碳技術的研發、住商部門節能法規的制定、推動零能耗建築及再生能源在建築中的應用。這兩個機關共同制定了「Energy Star」節能認證標章，用於推廣電器設備的節能標示，其中的「Energy Star Certified Homes」是美國建築能效標示制度的核心。

建築部門消耗了全美超過 40% 的能源和 76% 以上的電力，同時也占全美溫室氣體排放量的 40%。如圖 5-3 所示，不論是商業建築還是住宅建築，空調系統 (包括冷氣和暖氣) 的能耗均佔有最大比例，分別達到 30% 和 38%；照明和電器能耗則分別占 32% 和 24%。



資料來源：(U.S. Energy Information Administration 2018)

圖 5-3、美國住商部門總 CO₂ 排放量來源比例(2016 年)

為了實現淨零碳排建築的目標，美國成立了新建築研究機構(New Building Institute, NBI)，作為淨零碳排建築的第三方認證機構。NBI 建議，為了達成淨零碳排，建築節能法規需按照表 5-1 中的「五步驟法規強化路徑」逐步提升。具體

而言，至 2025 年，建築節能法規需提升 60%，且再生能源使用率達到 25%，同時鼓勵在建築基地內設置儲能設備；到 2030 年，法規達到實現 100% 再生能源使用，從而達到淨零碳排建築的目標，並強制要求在基地內安裝儲能系統。這些建築節能規範遵循美國冷凍空調師協會(American Society of Heating, Refrigeration and Air-conditioning Engineers, ASHRAE)的 90.1 標準，並通過逐年強化和評估來達成最終目標。

表 5-1、NBI 建議的建築法規減碳路徑

Proposed Code Roadmap						
	Existing Code Context	Step One (sample year: 2019)	Step Two (sample year: 2022)	Step Three (sample year: 2025)	Step Four (sample year: 2028)	End Goal (sample year: 2031)
Code Improvement ¹		25%	40%	60%	75%	Max Tech
Renewable Energy Offsets	Not Required	5%	10%	25%	50%	100% (ZNE)
Energy Storage	Not Required	Not Required	Encouraged	Encouraged	Required	Required
Back Stop Code	None	90.1-2016	90.1-2016	90.1-2019	90.1-2022	90.1-2025
Modeling Requirements	Not required	Model to establish EUI target	Model to EUI target	Model to EUI target	Model to EUI target	Model to EUI target
Outcome Requirements	None	Report on discrepancy in disclosure data	Within 15% of target	Within 10% of target	Achieve target	Achieve ZNE
Normalization to Modify Target	N/A	Report on discrepancy	Document use changes in model	Document use changes in model	Document changes in model	Not allowed
Enforcement Mechanism	Certificate of Occupancy	Certificate of Occupancy, Disclosure	Disclosure; Bond or Solar Credit	Disclosure; Bond or Solar Credit	Bond or Solar Credit	Bond or Solar Credit
Prescriptive Path	Small/Remodel Projects only	Small/Remodel Projects only	Add renewables	Add renewables	Not Allowed	Not Allowed

1. Over ASHRAE 90.1-2016

美國眾議院於 2009 年 6 月通過了《美國清潔能源與安全法規(The American Clean Energy and Security Act, ACESA)》，要求提高新建及既有建築物之能源效率，包括頒布執行新建築、家用電器以及工業之節能標準，例如：於第二篇能源效率章節中，(1)規定新建的商用以及民用建築能效要提高 30%、(2)提供 1976 年以前建造之既有建築物的能效改造補貼並且、(3)實施建築能效標示計畫。

在 2015 年 3 月，時任美國總統歐巴馬簽屬了行政命令 EO 13693《未來十年聯邦可持續發展計畫(Planning for Federal Sustainability in the Next Decade)》，訂定聯邦政府之清潔能源與減排目標，其中的目標包括：(1)未來十年，聯邦政府溫室氣體排放量將比 2008 年減少 40%；(2)未來聯邦政府使用的電力必須有 30% 來自再生能源。關於此項法律訂立之目標以及具體措施如表 5-2 所示。

表 5-2、美國政府《未來十年聯邦可持續發展計畫》之目標以及具體措施

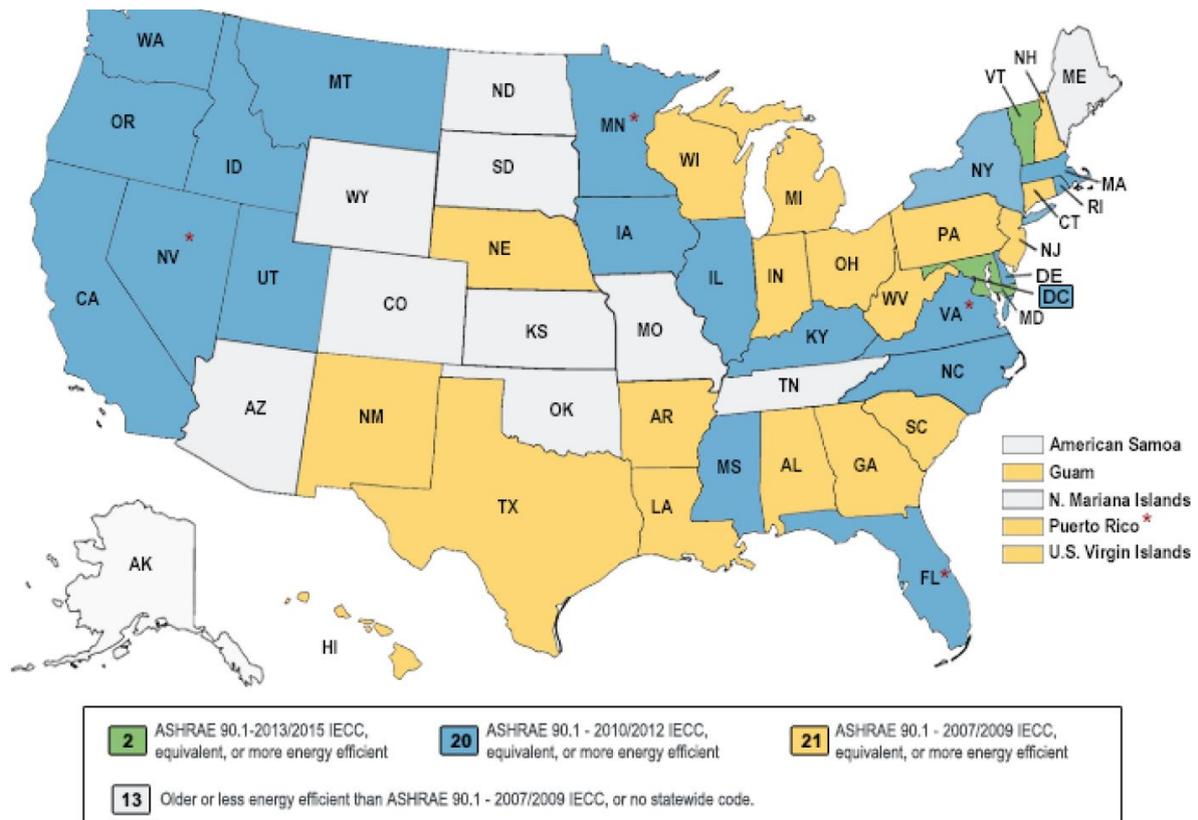
項次	項目	具體措施
1	推進並提高建築節能，效率和管理	2015年至2025年期間每年降低聯邦大樓2.5%的能源使用
2	確保在特定百分比，建築所消耗的電力和熱能來源來自可再生電能源和替代能源的最低限度	聯邦大樓2025年總能量消耗的25%需來自清潔能源
3	提高機構水資源利用效率和管理	至2025年聯邦大樓每年降低2%的用水強度
4	提高機構車隊和車輛的使用效率和管理，如果該機構有20輛以上汽車組成的車隊	2025年需減少聯邦車隊每英里溫室氣體排放量30%(以2014年為基準)

資料來源：the White House

此外，於同年的4月30日，時任美國總統歐巴馬簽屬通過另一份法案，名為《能源效率改善法案(The Energy Efficiency Improvement Act of 2015)》，主要分為三個部分：包含較佳建築(Better Buildings)、供熱水設備以及商業建築能源使用資訊。在較佳建築(Title I)的項目中，訂立了聯邦政府相關建築物之能源效率，以及住屋者之星計畫(Tenant Star Program)。規定主管機關(主要是聯邦不動產服務部門)應訂定可鼓勵建築物所有人與租賃者共同提升設備用能與用水效率的建築租賃契約規範。而住屋者之星計畫為目前建築節能措施計畫能源之星(Energy Star)計畫中之一部份，獎勵承租商用辦公大樓的用戶安裝節能燈具與建築設備系統，為美國政府第一個商業大樓內租用空間永續設計和營運的認可標章。另在供熱水設備(Title II)的項目中，規定電熱水器在2015年前須改為熱泵熱水器。

另一部與建築能源有關法案為《美國建築能源規範(Building Energy Code)》，由美國DOE規定並執行。現有之商業建築大多根據前面曾提及之美國冷凍空調協會的ASHRAE 90.1標準或根據國際能源法規委員會(International Energy Conservation Code, IECC)的標準建造。IECC於2015提出IECC 2015，對建築之外殼、暖通空調、熱水器、照明以及對能源效率有更嚴格之規定，美國各州採用的標準亦不盡相同，如圖5-4所示。

紐約市的建築能效標示制度是美國最積極推動的之一，並通過一系列立法嚴格執行。根據紐約市的《LL84地方法案(Local Law 84)》，要求面積超過25,000平方英尺的私有建築物和超過10,000平方英尺的公有建築物，必須每年進行能源審計並提交建築性能報告。這一制度不僅強調對建築物能源使用的監控，還要求將結果公開，以促進透明度與問責性。自2018年起，紐約市進一步強化了此制度，規定建築物必須在入口的顯眼位置揭示其能效等級。這一標示制度依據「Energy Star」系統進行評分，將建築物的能效分為A至F六個等級，A級代表最高的能源效率，而F級則表示能源消耗最多的建築物，如圖5-5所示。



資料來源：Department of Energy (2015)

圖 5-4、美國各州商業建築能源規範採用版本分布圖



資料來源：NYC Energy & Water Performance Map, 2024

圖 5-5、紐約市建築能源與水資源能效揭露地圖與 EnergyStar 能效標示

紐約市的建築能效標示不僅是為了提高建築物的能源性能，更希望透過公開揭露的方式激勵建築所有者進行必要的節能升級。這一制度促使房地產市場對高能效的建築給予更高評價，並為租戶和買家提供透明的能耗資訊。紐約市還透過一系列激勵措施，鼓勵建築所有者採取節能改善，例如稅收優惠、低息貸款和技

術輔導。不僅能幫助建築物達到更高的能效標準，也有助於全市減少溫室氣體排放，推動紐約市達到其 2030 與 2050 年的減碳目標。這一全面的建築能效標示制度不僅使紐約市成為全美能效管理的領頭羊，還為其他城市提供了寶貴經驗，推動美國其他地區立法和實施建築能效揭露的制度。

(二) 歐盟(含德國)

1. 歐盟

建築部門佔歐盟國家近 40% 的能耗和 36% 的溫室氣體排放，歐盟推行「近零能建築(Nearly Zero Energy Building, NZEB)」，作為實現 2050 年淨零排放目標的關鍵策略。在歐盟，近零能建築被定義為具有極高能源效率，其少量能源需求應儘可能由建築基地內或鄰近地區的再生能源補足。

早在 2002 年，歐盟便開始推動建築能效評估，並採用兩種主要方法：「計算評估法(Calculated Rating)」和「能源單據評估法(Measured Rating)」。歐盟的建築能效認證系統也分為兩類：針對「新建」建築的「建築能效認證(Energy Performance Certification, EPC)」，及針對「既有」公共建築的「能源揭露認證(Display Energy Certification, DEC)」。計算評估法通常應用於新建建築，而能源單據評估法則適用於既有建築，而且兩者經常配合使用(Healy 2013)。

歐盟「建築能源效率指令(Energy Performance of Buildings Directive, EPBD)」自 2002 年起，要求成員國對新建建築採並導入 EPC，並於 2006 生效。但自 2008 年 10 月起，歐盟管轄範圍內之建築物無論買賣、建造或租賃，所有權人都需提具建築物能源效能證書。2010 年 EPBD 在修正改版時，要求 2019 年起所有新建的公有建築需達到近零耗能水準，而 2021 年起則是所有新建築(包含民間)都需達到近零耗能之標準。然而，歐盟並對「近零」耗能無一致的定義，允許成員國可就國內現況與市場機制，根據自身的「成本有效性(Cost-effectiveness)」加以規範。另在節能政策上，計算評分法與能源單據評分法兩者是相輔相成的策略，目前歐盟在公共建築銷售與租賃階段採 EPC 之計算評分法，但歐盟 EPBD 只針對公有建築物強制採用能源揭露認證 DEC 之能源單據評分法。

歐洲現有三分之二的建築低於能源建築物效率標準，每年翻修率約 0.4~1.2%。為加快建築翻修率，大幅度降低能源消耗，提出了一連串促進措施，包括鼓勵使用資訊及智慧技術於現代建築，例如在大型商業建築設置自動化控制系統及電動車充電設施，並導入智慧指標(Smartness Indicator)評估建物及電網間的技术準備情況，促使建築物能源效率更佳且更具智慧性；鼓勵建築物裝修，透過資金及能源效率認證，加強國家中長期建築物翻修率策略；此外，亦放寬建築物能源效率及再生能源的民間融資規定。加速建築物改造不僅有助於能源和氣候的挑戰，亦帶來 9% 的歐洲國內生產總值，及 1,800 萬個就業機會，並有助於城市化、數位化等經濟和社會面的挑戰。另針對能源貧困之問題，各成員國應進行

監測並制定相關措施，以助於經濟弱勢族群進行建築物能效提升。因此，建築部門為能源效率政策的核心，可說是歐盟僅次於能源部門第二重視的產業發展核心。

歐盟能源效率指令要求成員國必須使政府之建築節能達到每年 3%。在 2012 年時，又提出「能源效率指令(Energy Efficiency Directive, EED)」，除在原有基礎上進一步要求成員國除了提出一份關於資金、投資銀行以及其他公共融資機構的有效性分析外，還要求成員國提出建築改造的投資計畫，並建立能源效率目標，並在 2020 年達成設定的節能量，但在執行上允許彈性做法。建築能源績效指令與能源效率指令，使得歐盟建築業主和管理者面臨比美國更加嚴格的節能政策。表 5-3 為歐盟國用於建築改造計畫的資金來源與其投資額。

表 5-3、歐盟對於建築能源效率的補助資金來源與概述

資金來源	補助措施與機制	補助總金額	Funding for EE
歐盟共同法律基金 Cohesion Policy Funding	資金操作成居包括各式金融商品(如JESSICA) Operational Programmes incl. financial instruments (e.g. JESSICA)	為再生能源 (RES & EE) 提供最高 101億歐元	針對EE、能源效率和管理提供最高55億歐元
研究資金	Sevemth Framework Programme (FP 7)，如： Concerto, E2B PPP, Smart Cities)	針對能源提供23.5億歐元的研究資金	針對能源效率提供2.9億歐元的研究資金
產業發展擴張 Enlargement	政策資助於IFI 機構 Policy Funding IFI facilities (SMEFF, MFF, EEFF)	最高5.523 億歐元	約有三分之一的資金用於工業和建築部門的項目
歐洲能源效率基金 European Energy Efficiency Fund (EEEF)	歐洲能源回收計畫 European Energy Recovery (EEPR)	最高2.65億 歐元	針對能源效率約提供70% 歐元的研究資金
競爭力與創新基金 Competitiveness and Innovation Funding	歐洲智慧能源計畫、信息 與通訊係數政策支持計畫	每個項目約 上限7.3億 歐元	針對能源效率約提供50% 歐元的研究資金

資料來源：European Commission (2013)

在多國年度財政會議(Multi-Annual Financial Framework, MFF)提出的建議中，歐盟委員會建議增加對低碳經濟歐盟共同法律基金(Cohesion Policy Funding)的補助，並提出要將資金的 20%用於較發達及正在經濟轉型的地區以建設再生能源與提升能源效率；其次，6%用於剩餘發展遲緩地區。針對公共建築，可藉由「能源績效認證(Energy Performance Certificate, EPC)」，讓能源服務公司(Energy Service Corporation, ESCO)通過前期投資來提供資金，並推過實現承諾的節約量進行再融資，來實現能源效率提升。因此，EPC 被歐盟視為提高能源效率的金融

工具，且不需要客戶投入前期的資金成本。此外，在此會議當中還特別指出政府須加強對 ESCO/EPC 市場的支持，例如，建立更多貸款擔保系統，提高公民對 EPC 的信任等。歐盟規定每年有 3% 的政府部門的建築需進行翻修，因此如果融資難度下降，將有助於公門建築能源效率的改善。

2. 德國

早在 1976 年，德國實施《節約能源法(EnEG)》，次年推出《建築節能法》。此後，德國不斷修訂新建建築的能耗標準，從 1977 年的 330 kWh/(m².a) 逐步降低，至 2009 年已降至 50 kWh/(m².a)，未來目標是控制在 25~30 kWh/(m².a)。2013 年，德國通過修訂版的《建築節能法》，增加了對新建零能耗建築和能源績效證書的規定。自 2020 年起，所有新建建築必須符合近零能耗建築(NZEB)的標準，政府機關的新建非住宅建築則自 2018 年起實施。2014 年，德國進一步修訂《節能條例(EnEV)》，要求新建建築的能源消耗降低 25%，建築外殼的隔熱性能提高 20%，以期在 2020 年將全國能源消耗降低五分之一，各階段目標可參考表 5-4。

表 5-4、德國政府設定之能源消耗個階段目標(以 1990 年為比較基準)

項目	2011	2020	2030	2040	2050
減少溫室氣體排放	-27%	-40%	-55%	-70%	-80%
再生能源占能源總耗量	10%	18%	30%	45%	60%
再生能源占電力使用量	16%	35%	50%	65%	80%

資料來源：Federal Ministry for Economic Affairs and Energy

2020 年 11 月，德國推行新版的《建築能源法》，統整並取代原有的《節能條例》、《節約能源法》及《再生能源供熱法(EEWärmeG)》。德國聯邦政府針對建築節能和能源效率的政策主要分為：(1) 規範新建建築的能源使用密度和建築外殼性能；(2) 提供既有建築的低利貸款和節能改造補助。此外，《能源服務暨其他能源效率法(EDL-G)》旨在推動具成本效益的能源服務，目標是到 2050 年實現近碳中和的建築。

根據《節能條例》，建築物必須取得能源證書(分為九個等級)，內容包括建築基本資料、能源需求、消耗量及改善建議，並公開於網絡上。若建築內有 30 年以上的老舊鍋爐，必須強制更換。若出售或出租建築物，必須提供完整的能源證書，否則將面臨最高 15,000 歐元的罰款(Deutsche Energie-Agentur)。這一制度通過市場機制促進建築所有者提升其建築的能源效率，從而影響房價和租金。

德國為推動高能效建築，德國聯邦政府與德國復興信貸銀行(KfW)提供專項貸款與補助，促進新建建築的能耗改善。自 2021 年 7 月起，購買或建造新建建築的民眾可根據建築的能源等級獲得補助，具體依據基本能源需求(QP)與傳輸熱損失(HT)來決定貸款額度與補助金額。

目前，新建建築的能耗需達到參考建築的 75%，方可獲得資金的補助(見表

5-5)。例如，KfW 效能房屋 55 要求能耗降低至 55%，並提高建築外殼隔熱性能 30%，方可獲得 KfW 的補助資金。而效能更高的 KfW 房屋 40+則多配備自發電、自用電設備，以及儲電裝置和具熱回收功能的通風系統，進一步節能。若建築的供熱系統超過 55%依賴再生能源，還可申請更高額度的補助。

表 5-5、德國政府與 KfW 對新建建築之補助

效能等級	基礎能源需求 Q_p (%)	建築外殼構造熱損失 H_T (%)	最高貸款額度(歐元)及政府補貼(%)
效能房屋 40+	40	55	貸款€150,000，補貼 25%
效能房屋 40	40	55	貸款€120,000，補貼 20%
效能房屋 40 (含再生能源)	40	55	貸款€150,000，補貼 22.5%
效能房屋 55	55	70	貸款€120,000，補貼 15%
效能房屋 55+ (含再生能源)	55	70	貸款€150,000，補貼 17.5%

資料來源：KfW (2021)

既有建築的翻新同樣享有補助(見表 5-6)，其為自用建築所有權人提供為期 8 年、最高 300 萬歐元的補貼，促進其達成近零耗能標準。KfW 的「節能改善翻新計畫」針對效能房屋分類從 40 至 100 不等，翻新補助甚至高達 45%。若供暖系統採用超過 55%的再生能源，補貼額外提高 5%，貸款額度增加 30,000 歐元。對於古蹟等文化遺產建築，還有專項節能計畫以保護其歷史價值。

表 5-6、德國政府與 KfW 對既有建築之補助

效能等級	基礎能源需求 Q_p (%)	建築結構熱損失 H_T (%)	最高貸款額度(歐元)及政府補貼(%)
效能房屋 40	40	55	貸款€120,000，補貼 45%
效能房屋 55	55	70	貸款€120,000，補貼 40%
效能房屋 70	70	85	貸款€120,000，補貼 35%
效能房屋 80	80	100	貸款€120,000，補貼 30%
效能房屋 100	100	115	貸款€120,000，補貼 27.5%

資料來源：KfW (2021)

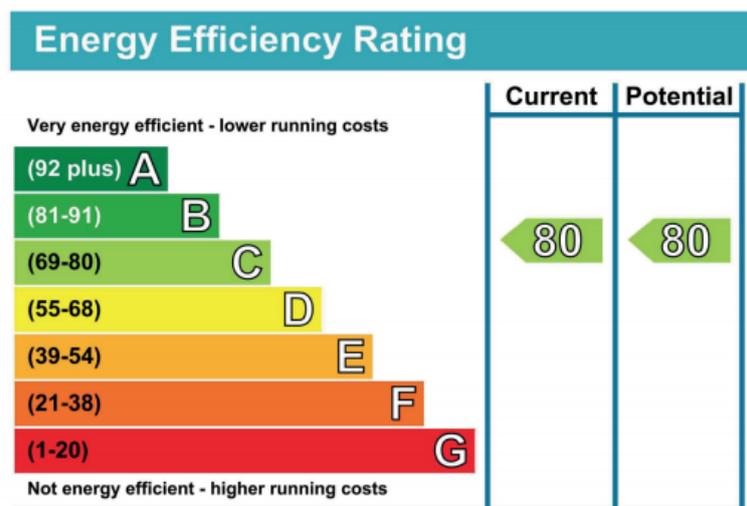
(三) 英國

英國政府基於 2008 年通過的《氣候變遷法(Climate Change Act, CCA)》，並依據巴黎協定的目標，制定了減少溫室氣體排放的法規。該法案強調在經濟發展的同時，持續減少溫室氣體排放，並規範了減碳目標，並以每五年滾動檢討各部門的責任分工，與我國情況類似。據此，英國成立獨立的氣候變遷委員會(Climate Change Council, CCC)，以負責監測和評估國家的減碳進度，並向政府與國會提供政策建議。2020 年，CCC 提出的第六次碳預算報告《建築碳排放預算》要求 2035 年將溫室氣體排放量在 1990 年基準上減少 78%，與巴黎協定一致。目前，英國已減少 63%的排放，並開始實施第六階段計畫，目標於 2050 年達成淨零排放。

此外，還提出具體的減緩與調適策略，將氣候變遷議題納入政治討論。由英國商業、能源及工業策略部(BEIS)與氣候變遷委員會共同監督減碳進度，並提供相關科學數據。

BEIS 每年估算各部門的排放量趨勢，並發布國家溫室氣體排放報告。2020 年住宅與公共部門排放了 75.4 百萬噸二氧化碳當量(Mt-CO₂e)，占總溫室氣體排放的 23.2%。住宅與公共部門的主要能耗來自天然氣供熱系統。建築部門的室內電力消耗占全國總用電量的 58%，相當於 31 Mt-CO₂e 的間接排放量。隨著建築能效的提升，2015 年相較於 1990 年，建築部門的化石燃料排放量下降了 19%。其中，間接電力需求的減少及低碳電力的發展，解釋了 2009 年起每年約 10% 的排放減量。

在英國，建造、出售或出租房屋時，需提供「能源績效認證(Energy Performance Certificate, EPC)」。該認證會顯示建築物的供暖系統和照明成本、二氧化碳排放量，以及提高能源效率的建議。EPC 將建築物的能源效率從 A(最高效率)到 G(最低效率)進行分級，認證有效期為十年，如圖 5-6 所示。



資料來源：Energy (2021)

圖 5-6、英國 EPC 評級範圍

不過，英國有不同自治地區，故標準也有所不同。例如，蘇格蘭規定，自 2024 年起，自住房屋需達到 EPC 第 C 等級標準，並提供高達 15,000 英鎊的補助。意味著任何未達到 C 級的房屋在出售前必須進行升級；但並非所有地區(如威爾士和北愛爾蘭)都有相同的補助政策。

(四) 日本

1. 建築體系規範

日本國土交通省於 2013 年進行建築能耗調查，並於 2014 年內閣會議通過《能源基本計劃》，以實現「零排放建築(Zero Emission Building, ZEB)」。2015 年，

日本完成了 ZEB 的定義與路徑規劃，明確規定在不使用再生能源的前提下，必須將一次性能源消耗量較基準值減少 50% 以上。若加入再生能源，能耗減少 75% 以上稱為「近零排放建築(Nearly ZEB)」，而減少 100% 或以上才是完全 ZEB。同年 7 月，環境省向聯合國提交了 2020 年後的溫室氣體減排政策，目標是到 2030 年將溫室氣體排放量較 2013 年減少 26%，其中住宅與非住宅建築的排放量應減少 40%。

為實現此一目標，環境省於 2016 年制定了減碳策略，確立了三大節能政策：新建建築物的節能強制化、既有建築物的節能改善以及推動零能源建築。此外，經濟產業省也推動高效照明和家用電池的普及，並引入「建築能源管理系統(BEMS)」和「家庭能源管理系統(HEMS)」，以加強建築能源的管理。

在國家建築能源政策方面，日本政府的相關策略由國土交通省、環境省和經濟產業省三大部門合作推動。國土交通省負責制定建築節能法規和基準；環境省則以巴黎協定為基礎，制定減碳政策；經產省則負責制定國家能源基本計劃和前瞻策略。

自 2016 年起，日本實施《改善建築能耗性能法(亦稱建築節能法)》，推出了兩項輔導政策：第一項為節能改進計劃認證，對獲得高節能性能認證的建築，提供容積獎勵；第二項為推行「建築能源標示制度(Building Energy Labeling System, BELS)」。前述的近零能源建築(ZEB)能源計算通過 BELS 系統進行，而該系統已納入日本的《建築基準法》，並成為所有新建建築在申請許可時的必要文件。

BELS 評估項目與我國綠建築評估系統的節能項目類似，將建築區分為三種類別，其節能性能分為 1 星至 5 星。基準是參考 2013 年建築耗能普查所的平均值，訂定各類建築耗能基準值為(如圖 5-7 所示)。自 2017 年起，大規模非住宅建築強制通過 BELS 認證，而所有中型以上建築物在申請建造執照時，需提交「建築耗能指數(BEI)」的計算結果，作為強制性規定的一部分。

☆數	住宅用途	非住宅 用途1 (事務所等、學校等、工場等)	非住宅 用途2 (ホテル等、病院等、百貨店等、飲食店等、集会所等)
★★★★★	0.8	0.6	0.7
★★★★	0.85	0.7	0.75
★★★ 誘導基準	0.9	0.8	0.8
★★ 省エネ基準	1.0	1.0	1.0
★ 既存の省エネ基準	1.1	1.1	1.1

資料來源：日本建築研究所(2022)

圖 5-7、日本 BELS 分級說明

2019年5月，國土交通省對《建築節能法》進行修訂，進一步強化建築的節能措施，以達成《巴黎協定》設定的溫室氣體減排目標。修訂後，規定所有中等規模的非住宅建築(300 m²以上)需強制計算 BEI，並符合節能基準。此外，新增建築節能性能評價，並要求設計單位有義務向建築所有者揭露建築的節能性能。

在零排放建築(ZEB)與零排放住宅(ZEH)政策方面，到2020年所有新建公有建築需符合 ZEB 標準，並規定2030年50%的新建建築達到 ZEB 標準；同樣，2030年50%的新建住宅需符合 ZEH 標準。對於既有建築，政策仍以設備更換補助及節能改善工程補助等激勵措施為主。日本的 ZEB 依據實現建築零耗能的比例劃分為三個等級，定義如表 5-7 所示。相比之下，由於住宅基地條件與使用情況較為複雜，淨零能源住宅(ZEH)的定義與說明如表 5-8 所示。以住宅而言，比基準節能 20%即可認定為準零能源住宅(ZEH Ready)。

表 5-7、日本根據能耗表現定義三階種等級的 ZEB

等級	定義
ZEB 淨零能耗建築	當再生能源與建築能源量相同時，也就是節能量 100%，則達成淨零能耗建築。
ZEB Nearly 近零能源建築	將 ZEB Ready 導入再生能源以減少建築耗能 25%，也就是實質節能 75% 以上時，即為近零能源建築。
ZEB Ready 準近零能耗建築	透過 BELS 計算建築設計之成果可較同類型的基準耗能量節能 50%

資料來源：日本建築研究所(2022)

表 5-8、日本根據能耗表現定義三階種等級的 ZEH

等級	定義
ZEH 零能源住宅	當再生能源與建築能源量相同時，也就是節能量 100%，則達成淨零能耗建築。
ZEH Nearly 近零能源住宅	將 ZEH Ready 導入再生能源以減少建築耗能，讓實質節能 75% 以上時，即為近零能源建築。
ZEH Ready 準零能源住宅	透過 BELS 計算建築設計之成果可較同類型的基準耗能量節能 20%

資料來源：日本建築研究所(2022)

綜上所述，日本的建築體系規範主要由《建築節能法》、「建築能源標示(BELS)」和「零排放建築(ZEB)」構成，所有計算均依據 BEI 指標。表 5-9 提供了三項規範的比較。

表 5-9、日本建築規範與標示彙整

建築節能規範	節能要求	法律強制性	指標分級
建築節能法	低	強制	無
建築耗能標示(BELS)	中	部分強制	5 級
住宅及建築物之零耗能(ZEB/ZEH)	高	鼓勵	3 級

資料來源：日本建築研究所(2022)

2. 淨零能源建築發展與鼓勵機制

在節能設備推動上，從供應端與需求端同步進行。供應端，以「最低能源效率標準(MEPS)」限制廠商生產或進口未達標準的低效能設備，以提升市場整體能效(陳麒任 2017)。在需求端，積極提高消費者採用節能設備的意願，並引入「能源服務公司(ESCO)」制度，透過設備監控和驗證機制，確保節能效果。

(1) 建築耗能揭露與淨零建築產業的登錄與表彰

經產省召集專家組成委員會，針對 ZEB 及 ZEH 進行統一定義，制定政策藍圖，並定期檢討執行情況。相關工作則由日本社團法人共創倡議(Sustainable Innovation Initiative, SII)負責執行⁴⁸。

建築耗能揭露制度包含 ZEB Planner、ZEB Leading Owner、ZEH Planner、ZEH Builder 和 ZEH Developer 登錄。若符合條件，則頒發註冊證書。ZEB 與 ZEH Planner 登錄對象分為設計、施工與顧問單位。資格要求具備近零能源建築或節能建築的規劃設計實績，並對外公開。此外，登錄單位需承諾在 2020 年後推出的新案中，至少 50% 為近零能源建築，並在竣工後提供一年的建物能源使用數據。通過登錄為 ZEB 及 ZEH Planner，將有助於其他開發者尋找優秀夥伴，也是對規劃設計單位的一種表彰。ZEH Builder 專注於施工廠商，ZEB Leading Owner 則針對擁有 ZEB 認證的業主進行登錄，並藉此公開表彰。不僅能成為該單位的公共關係亮點，還能提升企業的社會責任，並推廣近零能源建築的理念。ZEH Developer 則針對大型建案開發商，目標與 ZEB Leading Owner 相似，都以開發者為導向推廣。所有登錄單位均可獲得相應的近零能源建築標示，並自由使用於自身的宣傳中。

(2) 補助金制度

ZEB 及 ZEH 補助金制度由經產省和環境省指導，並由不同法人單位負責檢核申請資料及發放補助。ZEB 的補助對象主要是建物所有人或 ESCO 廠商。根據表 5-10，補助金依據建築面積及補助單位進行劃分。當建築面積小於 2,000 m² 時，新舊建築的業主可根據所獲得近零建築能效證書(ZEB 或 Nearly ZEB)向環境省申請補助；對於面積在 2,000 m² 至 10,000 m² 之間的新建築，可向環境省申請補助，而既有建築則需向當地政府申請，或選擇向經產省提出申請。當建築面積超過 10,000 m² 時，不論是新建或舊有建築，皆只能向經產省或當地政府申請補助。以上來自環境省和經產省的補助上限均為每年 5 億日圓。

而對於新舊住宅建築的補助機制如表 5-11 所示，可知環境省除了對新建獨棟建築的定額補助外，尚有特別鼓勵再生能源同時結合蓄電池應用之補助；經產省則以提升高效率的節能設計為主，針對新建獨棟住宅或大規模集合住宅提供資金支援。

⁴⁸ <https://www.sii-inc.org/>

表 5-10、日本新舊建築的 ZEB 補助金制度與補助來源總覽

總面積	環境省		經濟產業省	
	新建築	既有建築	新建築	既有建築
< 2000m ²	1. ZEB:補助比例 3/5 至 2/3 2. ZEB Nearly: 1/2 - 3/5 3. ZEB Ready: 未補助或 1/2 上限 1 年 5 億日圓	1. ZEB: 2/3 2. ZEB Nearly: 2/3 3. ZEB Ready: 不在補貼範圍內或 2/3	-	-
2,000 m ² - 10,000 m ²	1. ZEB: 3/5-2/3 2. ZEB Nearly: 1/2-3/5 3. ZEB Ready: 1/3-1/2 上限 1 年 5 億日圓	地方政府補助	-	最高補助 2/3，上限為 1 年 5 億日圓
≥10,000 m ²	地方政府補助	地方政府補助	最高補助 2/3	最高補助 2/3，上限 1 年 5 億日圓

資料來源：Seiko Instruments Inc (2022)

表 5-11、日本新舊建築的 ZEH 補助金制度總覽

來源	補助建築類型	補助說明	補助範圍
環境省	新建獨棟住宅	對新建符合獨立屋 ZEH 發行要求的新房定額補貼	定額補助 550,000 日元/戶
	新建/既有獨棟住宅	獨立式住宅(ZEH+)統一補貼，通過比 ZEH 更節能和設備高效運行來提高再生能源的自用率	定額補助 100 萬日元/戶
	新建、既有獨棟住宅	安裝併網蓄電池，使用一定數量或更多有助於低碳化的材料，如正交層壓木(CLT)等，或單獨使用先進的再生能源熱利用技術	單獨的補助蓄電池 20,000 日元/kWh(上限 200,000 日元/個)
	既有獨棟住宅	既有獨棟建築保溫改造	最高可補助 1/3，上限為 120 萬日元/家(蓄電池和電熱泵熱水器分開補助)
	既有 6 至 20 層之集合住宅	補助對象為開發商	最高可補助 1/2，上限為 1 年 4 億日圓
經產省	新建獨棟住宅	符合 ZEH 定義並導入更高效率的節能設計之新建住宅建造或購入個人	定額補助 125 萬日元/戶
	21 層以上集合住宅 (新建：≥ 10,000 m ² 既有：≥ 2,000 m ²)	符合 ZEH 定義並導入更高效率的節能與續能設計之住宅建造開發商或購入個人	最高可補助 2/3，上限為 1 年 5 億日圓

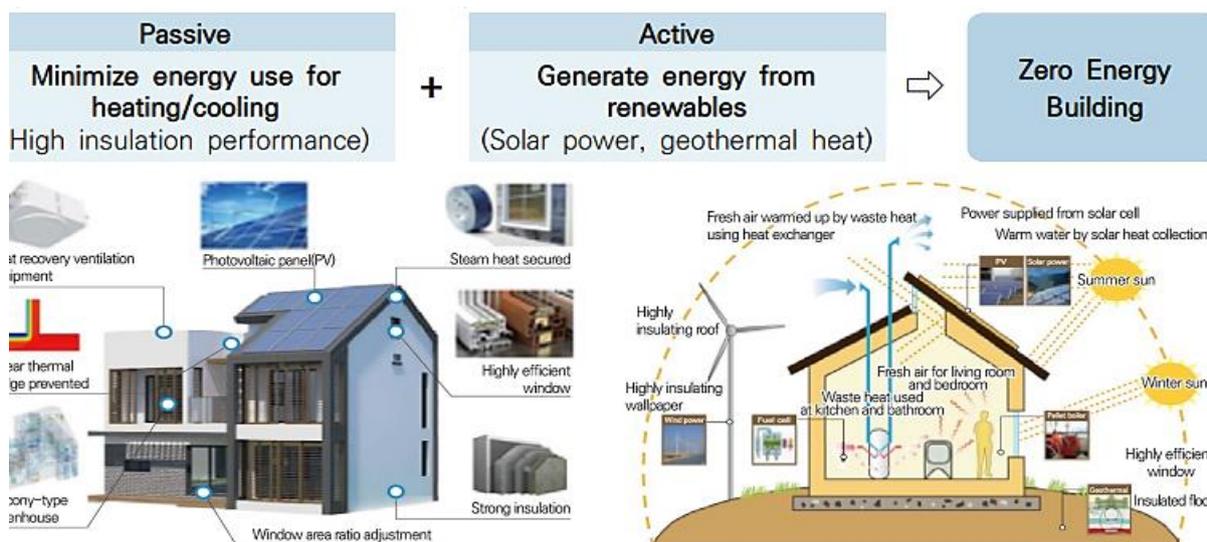
資料來源：Seiko Instruments Inc (2022)

(五) 韓國

1. 韓國淨零能源建築政策

根據 2017 年的統計，韓國建築部門排放量約占全國總排放的 7%。韓國政府規定自 2020 年起，所有新建的 1000 m² 及以上的公共建築必須取得零能源建築認證。到 2025 年，改造要求將擴大至所有面積超過 500 m² 的公共建築，以及面積超過 1000 m² 的私人建築，同時，超過 30 戶的集合住宅也需進行零能源建築改造。到 2030 年，所有新建築及面積在 500 m² 以上的新建建築必須強制達成零耗能目標。

在韓國，零耗能建築(Zero Energy Buildings, ZEBs)的定義是：建築對於非再生的一次性能源(Non-renewable Primary Energy, NRPE)的使用需低於 60 kWh/(m²·yr)，非住宅建築則為 80 kWh/(m²·yr)，且再生能源使用比例必須至少占總能耗的 20%。推動 ZEBs 的主要方法包括改善建築被動式設計(Passive Design)及提升再生能源的使用，以減少對化石燃料等一次性能源的依賴，如圖 5-8 所示。



Energy efficiency grade 1⁺⁺ or higher and equipped with a Building Energy Management System (BEMS). Classified into five grades based on energy independency.

Energy efficiency grade	Energy Independency *	Zero Energy Grade
Grade 1 ⁺⁺ or higher	100% or higher	1
(* Saving 80% of energy compared to Grade 7)	80 ~ 100%	2
	60 ~ 80%	3
※ Korea's energy efficiency grade:	40 ~ 60%	4
Highest: Grade 1 ⁺⁺⁺ - Lowest Grade 7	20 ~ 40%	5

資料資料：Korea (2020)

圖 5-8、韓國對淨零建築政策的定義與評級方式

韓國國土交通部(相當於我國內政部)負責監督與管理建築能源使用，而產業通商資源部(相當於我國經濟部)則主導再生能源推廣及減少化石燃料使用。在推動零耗能建築的過程中，兩個部門密切合作。為進一步推動零耗能建築，韓國各

部門於 2019 年 4 月修訂《綠色建築創建支持法》，宣布通過強制認證來促進 ZEB 的發展，並推出「建築能效評估(Building Energy Rating, BER)」。

自 2017 年 1 月起，ZEB 認證啟動，認證標準包括再生能源使用量超過 20%及 BER 等級達 1++ 以上。

2. 韓國政府推動零耗能建築的獎勵機制

韓國政府於 2010 年發布《再生能源應用標準》，計劃到 2035 年再生能源應用比例提高至 11%。2015 年，韓國投入近 5.5 億美元預算在再生能源，主要用於再生能源強制性併網電價補貼。根據要求，到 2020 年所有新建及改建的公共建築，其樓地板面積達 1,000 m² 以上時，再生能源應用必須占總能源需求的 30% 以上。針對增量成本，韓國政府為住宅提供了 4,740 萬美元的補貼，並為大型建設項目設立了 2,000 萬美元的補助。

此外，韓國政府積極推動零能耗建築產業化，並頒布了一系列財政激勵措施，包括：

- (1) 放寬建築管制：在現有標準上，放寬容積率和建築高度限制。
- (2) 稅收減免：購買零能耗住宅的消費者可在前五年內獲得 15% 減稅優惠。
- (3) 住宅公積金貸款：針對既有建築的節能改建，提供低利息的住宅公積金補助，並提高貸款額度超過 20%。
- (4) 企業所得稅：對零能耗建築建造者及相關產業業主，若採用特定被動式建築技術(如外牆保溫材料和高性能窗戶)，可享有部分企業所得稅免除。

另外，也針對獲得建築耗能認證的建築，額外提供以下相關補貼：

- (1) 針對被動式設計技術之獎勵：對於採用被動技術的建築項目，如高熱性能的建築外殼結構設計，將給予一定比例的改善成本補助，住宅建築為 15%，公共建築為 50%。
- (2) 再生能源設施成本的補貼：對於採用再生能源的建築項目，如太陽能、地源熱泵或其他再生能源系統，可以申請系統成本的 50% 作為補貼。
- (3) 建築能源管理系統裝設費用之補貼：對於採用建築能源管理系統的建築項目，可以申請 50% 的系統費用作為補貼。
- (4) 技術支援：建商或相關建築從業人員可向「零能耗中心(Zero Energy Center)」諮詢有關建築技術等，並免費獲得零耗能建築認證費用。

然而，韓國推廣零能耗建築也面臨了許多困難和障礙(韓國環境部，2021)，主要集中在以下幾個方面：

- (1) ZEB 市場小：由於韓國本身需求量較小，國內生產的被動技術建築材料種類很少，需要使用昂貴的進口產品。因此，在沒有任何配套政策和法

規的情況下，零能耗建築產業很難培育起來。

- (2) 與普通建築相比，零能耗建築成本將增加 30%，如果政府在補貼和稅收方面的支持力道不足，將減少建商對興建 ZEB 的意願。
- (3) 韓國政府在建築部門的補貼政策主要針對再生能源應用，對於被動技術應用的資金支持較少。

(六) 中國

1. 低能耗建築政策與鼓勵機制

中國碳中和目標設定為 2060 年，計劃自 2025 年起，所有新建建築全面按照綠色建築標準進行建設，並在 2030 年前將建築物再生能源使用率提高至 8%。同時，新建公有機關建築和廠房屋頂的太陽能使用率也將提升至 50%。

截至 2019 年底，中國建築總量已達到 620 億 m^2 的樓地板面積，建築能耗約占全國總能耗的 22%。2017 年中國住建部在建築節能與綠建築的「十三五」規劃中，首次明確提出大力發展低能耗建築。2019 年，首部引導性建築節能國家標準《近零能耗建築技術標準》頒布，明確定義了超低能耗、近零能耗和零能耗建築，並規定了室內環境參數與能效指標。

補助政策在中國推動低能耗建築方面扮演關鍵作用。為推廣住宅及商業建築的節能發展，河北省、黑龍江省、河南省、重慶市、保定市及青島市等地於 2020 年 1 月頒布了支持低能耗建築發展的專項規劃、實施方案及指導意見等文件，明確了低能耗建築的發展目標、任務與路徑，並對低能耗建築項目提供資金補貼、容積率獎勵等多項政策激勵措施，以促進低能耗建築產業的培育與布局。截至 2020 年 6 月，共有 10 個省及自治區和 17 個城市頒佈了共計 47 項政策，對超低能耗建築項目設定了明確的發展目標或激勵措施。例如，2016 年，北京市頒佈了「推動超低能耗建築發展行動計劃」，目標是在三年內建設 30 萬平方公尺的示範建築，以加快推進近零能耗和超低能耗建築相關產業發展。

2. 低能耗建築推行措施

中國各地政策中針對超低能耗建築項目的激勵措施主要有 15 類項目。在這 15 項補助措施中，設立地方規劃目標的推行措施佔比最大，達 29%；其次是資金補助，佔 25%；容積率獎勵補助則佔 10%。其他補助措施還包括用地保障、流程簡化及預售等。以下說明這 15 項補助措施的內容及各省應用情況。

- (1) 設立地方規劃目標：7 個省及自治區的 14 個城市明確設定了 30 項低能耗建築的具體發展規劃和目標，主要以總面積和占比要求為主。例如，石家莊市實施《石家莊市建築節能專項資金管理辦法》，指出到 2020 年，全市累計開工建設低能耗建築面積不低於 100 萬 m^2 。
- (2) 資金補助：6 個省及自治區的 12 個城市擬定了 25 項補貼政策。例如，

北京自 2016 年起對超低能耗建築提供 1000 元/m² 的直接補貼；保定市、張家口市和承德市的超低能耗建築示範項目可申請 100 元/m² 的補貼，及最高 300 萬元的資金支持。

- (3) 容積率獎勵：4 個省的 10 個城市推行了 14 項容積率獎勵政策，對建築面積核定給予 4%至 9%的獎勵，根據各地區實際發展情況，容積率獎勵比例有所不同。例如，天津市對外牆保溫層厚度超過 7 公分的部分不計入建築面積；石家莊市對地上建築樓地板面積給予 9%獎勵，不計入容積率；鄭州市則規定，對於採用超低能耗建築技術的商品住宅，地上建築樓地板面積的 4%可不計入容積率。
- (4) 配套產業優先補助：7 個城市推行 8 項配套產業優化策略。例如，河北省石家莊市、衡水市、滄州市及山東省青島市均實施了配套產業優先補助政策，利用基金對超低能耗建築的配套產業鏈企業提供優先補助。
- (5) 優先用地保障：1 個省的 6 個市對按照低能耗建築標準建設的項目提供優先用地權。例如，青島市、宜昌市、石家莊市和邯鄲市均對超低能耗項目提供優先用地保障。
- (6) 提前預售：7 個城市推行了商品房提前預售政策，例如，承德市、滄州市和邯鄲市為超低能耗建築項目加速取得建築執照。對主動採用超低能耗建築方式建造的獨棟建築，若開發資金達到工程總投資的 25%以上且施工進度達主結構體動工後，即可辦理《商品房預售許可證》預售。
- (7) 提供超低能耗建築技術支援：1 個省的 5 個城市推行了超低能耗建築相關技術支援，解決工程技術難題，為項目的規劃、設計、施工及後期使用提供技術支持。
- (8) 綠色金融：1 個省的 5 個市推行了綠色金融獎勵政策，例如，承德市、邯鄲市和青島市等改善超低能耗建築的金融服務，擴大綠色信貸支持。
- (9) 流程優化：4 個城市推行了行政流程簡化措施，例如，石家莊市簡化了超低能耗建築項目的報建手續和辦事流程；宜昌市也推行了綠色辦事流程等獎勵政策。
- (10) 允許房價制度上調：4 個城市推行房價制度上調政策，對滿足要求的超低能耗建築項目，在辦理房價備案時可適當上調房屋售價，例如，保定市和石家莊市均可將房屋售價上調 30%。
- (11) 貸款獎勵政策：4 個城市推行了政府住房公積金貸款政策，例如，青島市規定購買超低能耗建築商品房的政府基金貸款可優先考慮發放；滄州市規定使用住房政府基金貸款購買二星級以上綠色建築且為超低能耗建築的自住住房，可在不超過政府基金貸款最高額度下，上調 15%。

- (12) 規費減免：2 個城市實行規費減免政策，規定示範項目不再增收土地價款和城建配套費，且通過評審的項目規費享有系列優惠。例如，保定市對非計容積面積不徵收城市基礎設計規費或增收土地價款；焦作市規定超低能耗改造建築可享受減免差別補貼費。
- (13) 評獎優先：青島和宜昌兩個城市推行評獎優先政策，規定超低能耗建築在評優時可優先考慮，參建單位在信用考核中可獲得加分獎勵。
- (14) 稅收優惠：河北省和青島市推行稅收優惠政策，規定超低能耗建築的單位和企業可享受稅收優惠，按 15% 稅率繳納企業所得稅。
- (15) 基金即徵即退：海門市對徵收的牆改基金和散裝水泥基金實施即徵即退，揚塵排污費按規定核定相應的達標削減系數執行。

上述 15 類針對低能耗建築之主要鼓勵措施，按照其激勵模式和鼓勵力度可分為流程支持、間接經濟效益和直接資金獎勵，表 5-12 為鼓勵政策的類型。

表 5-12、中國鼓勵政策類型表

政策類型	獎勵項目
行政流程支持	設立地方規劃目標、優先用地保障、提供超低能耗建築技術支援、評獎優先、流程優化
間接經濟效益	容積率獎勵、提前預售、允許房價制度上調、綠色金融、稅收優惠、規費減免、貸款獎勵政策
直接資金獎勵	配套產業優先、基金即徵即退、資金補助

資料來源：中國建築科學研究院(2022)

直接資金獎勵類政策能顯著增強開發商參與低能耗建築項目的積極性，並進一步吸引更多開發商。直接資金獎勵政策由政府自上而下明確提供，並在項目實施過程中結合明確的規劃和容積率獎勵來擴大項目規模、提升執行力度，故此類政策的激勵效果最為明顯。

間接經濟效益類政策雖然並不提供直接資金補助，但可為開發商和消費者帶來一定的經濟利益。例如，建築容積率獎勵可以直接提高建築規模，從多方面推動低能耗建築項目的實施；而提前預售政策與商品房價格上調相結合，能夠加快資金回籠，提升開發商利潤。此外，公積金獎勵、綠色金融和稅收優惠等政策則若從消費者角度出發，為購買超低能耗住房提供社會福利和貸款優惠等經濟效益。綜合而言，這類政策對於完善低能耗建築項目的配套設施及竣工後商品房的銷售具推廣作用。

行政流程支援類政策主要針對低能耗建築項目在規劃、施工、運營、後期評估和預售等流程中的各項工作進行激勵，旨在為項目的順利實施提供協助，並不直接提供資金補助或間接經濟獎勵。例如，土地保障政策可確保開發商在決定開展超低能耗建築項目時，擁有足夠且優先的開發用地；科技支持政策則能解決技

術難題，提高工程實施效率和技術水平；流程優化政策則使得交接、報批、報建和審核等關鍵行政流程更有效率。總體而言，雖然此類政策不直接產生經濟利益，但通過提升各環節的實施效率，確實能使項目的進展更加順利。

三、台灣住商部門淨零排放路徑建議

(一) 台灣住商部門現況與課題

依經濟部能源署統計，我國住宅與商業(服務業)部門之溫室氣體排放量約佔全國總排放量的 22%，僅次於工業部門的 49%，是減碳熱點。為達成 2050 淨零排放目標，我國住商部門之淨零排放路徑概念如圖 5-9 所示，其概念與美國淨零路徑相似。一方面，由內政部主導建築節能以達「近零碳排建築」目標；另一面，由經濟部負責再生能源在建築部門之導入與配套，理想情況預計於 2050 年時二者達到真正淨零碳排。

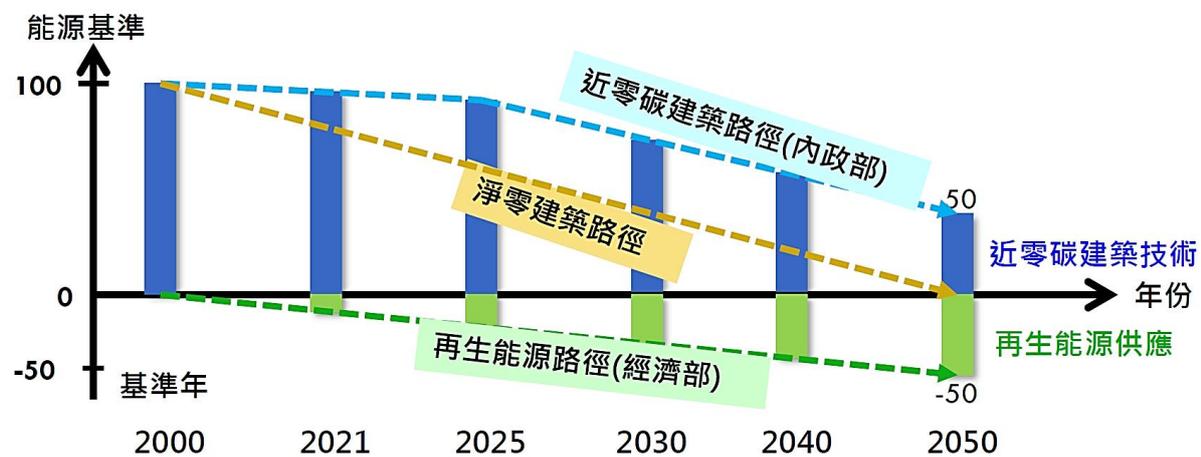


圖 5-9、台灣住商部門淨零排放之路徑概念圖

此外，行政院於 112 年 4 月核定了 12 項關鍵戰略計畫，住商節能部分主要分為「節能」與「淨零綠生活」兩項關鍵戰略，以及於 111 年 9 月核定的第二期住商部門溫室氣體排放管制行動方案等三個部分。這些計畫包括推動淨零碳排建築、節能設備系統、建築材料的碳儲存、推廣綠色標章及提高家電能效。在達成零碳排放建築方面，根據目前住商部門減碳路徑規劃，預計到 2030 年，所有公有新建建築將達到建築能效 1 級或近零碳建築；到 2040 年，50%既有建築將更新為建築能效 1 級或近零碳建築；到 2050 年，所有新建建築及超過 85%的既有建築都需達到近零碳建築標準。

在國內未來住商部門節能推動策略方面，主要分為以下四大主軸：(1)提高新建建築物的能源效率；(2)改善既有建築物的能源效率；(3)提升家電和設備的能源效率；(4)研發與推廣建築節能減碳的新技術及工法(國家發展委員會，2022)。

在邁向住商部門淨零排放的路徑上，關鍵政策之一是「建築能效評估系統 (Building Energy-Efficiency Rating System, BERS)」，該系統針對建築的能效進行評

估和分級。BERS 的評估方法類似於歐盟與英國的「能源績效認證(EPC)」，是實現住商部門淨零排放及契合國發會關鍵戰略的重要政策。

我國 BERS 評估方法分為「計算評估法」和「能源單據評估法」，這一點與歐盟相同。計算評估法僅依賴標準化理論來反映設計節能技術的耗能預估；而能源單據評估法則為了反映實際用電費，必須納入使用行為、營運時程及設備效率的評估，並符合建築市場的實際電費統計分布的驗證。對於新建建築的能效評估，僅採用簡單的計算評估法，而對於既有建築則結合以上兩種方法進行評估。評估系統的分類則有兩類，包括專門針對住宅建築的 R-BERS(Building Energy-Efficiency Rating System for Residential Buildings)和非住宅建築的 BERS。

非住宅專用的 BERS 根據建築使用目的不同，又分為新建建築能效評估系統 BERSn、既有建築能效評估系統 BERSe 及便利商店能效評估系統 BERSc。其中，BERSn 是針對新建建築所設立的能源評估系統，而 BERSe 和 BERSc 則屬於既有建築的評估系統。根據目前的建築能效標示，評分尺度分為七個等級，外加一個「1+」等級。其中，達到 1+ 等級者相當於我國所定義的近零碳建築。

此外，我國推動淨零碳排建築所面臨之困境有：

1. 既有建築外殼減碳潛力有限與推動不易

氣候變暖對建築空調耗能有顯著影響。為抵消未來氣候變暖對空調耗能的增幅，假設僅透過改善建築外殼的熱性能，且不考慮成本的情況下，為了在世紀末時實現與今日相仿的空調耗能，提升建築外殼熱性能的理论對策，及其效果整理如表 5-13 所示。

表 5-13、為平衡氣候溫暖化增加之冷氣耗能量之建築外殼對策

建築外殼項目	現在性能水準	改善對策	世紀末性能需提升水準
1. 外牆隔熱性能	外牆構造熱傳透率 $U=3.5 \text{ W/m}^2\text{K}$	增加 2.5cm 隔熱層	外牆構造熱傳透率 $U=0.38 \text{ W/m}^2\text{K}$
2. 屋頂隔熱性能	屋頂構造熱傳透率 $U=1.18 \text{ W/m}^2\text{K}$	增加 7.5cm 隔熱層	屋頂構造熱傳透率 $U=0.28 \text{ W/m}^2\text{K}$
3. 窗玻璃日射透過率與玻璃熱傳透率	玻璃 SHGC=0.8 ; $U= 5.73 \text{ W/m}^2\text{K}$	原 8mm 清玻璃改為電致變色雙層中空玻璃	玻璃 SHGC=0.31 ; $U=2.71 \text{ W/m}^2\text{K}$
4. 開口部水平外遮陽	深度比=0	窗上緣增加 1.5 倍窗高深之水平外遮陽	深度比=1.5
2000 年代之全年空調耗能量	35.0 kWh/m ² .yr	-	-
2080 年代之全年空調耗能量	63.9 kWh/m ² .yr	-	39.4 kWh/m ² .yr

資料來源：Huang and Hwang (2016)

除了加強外牆與屋頂的隔熱性能外，建築開窗部位的玻璃熱性能在日射遮蔽和隔熱能力上也需同步提升。此外，在建築開口部增設外遮陽設施的條件下，有望將遠未來的空調耗能量降低至 $39.4 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{yr}$ ，這與當前的 $35.0 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{yr}$ 相當。然而，這一理論上最終的外殼改善策略在面對既有建築的改造時，實務上將面臨可行性與改造成本的挑戰，因此幾乎難以實現。

針對未來的新建築，或可通過強化建築節能法規或逐步導入建築能效標示等措施來應對。近年新建建築物在設計之初即遵循較為嚴格的建築外殼節能規範，這樣的設計具有一定的節能效果。

然而，由於既有建築數量佔比龐大，針對既有建築直接實施減碳策略將是更為有效的方法。針對既有建築外殼的節能改善政策，應優先著手於能源使用效率較差的老舊建築，特別是 1995 年建築節能法規上路前的老建築，這些建築的外殼節能改善效果更為明顯。但過去研究顯示，對既有建築進行外殼節能改善的效果有限，而所需的經費卻相當龐大，因此，僅靠既有建築外殼的節能改善策略恐難以見效。

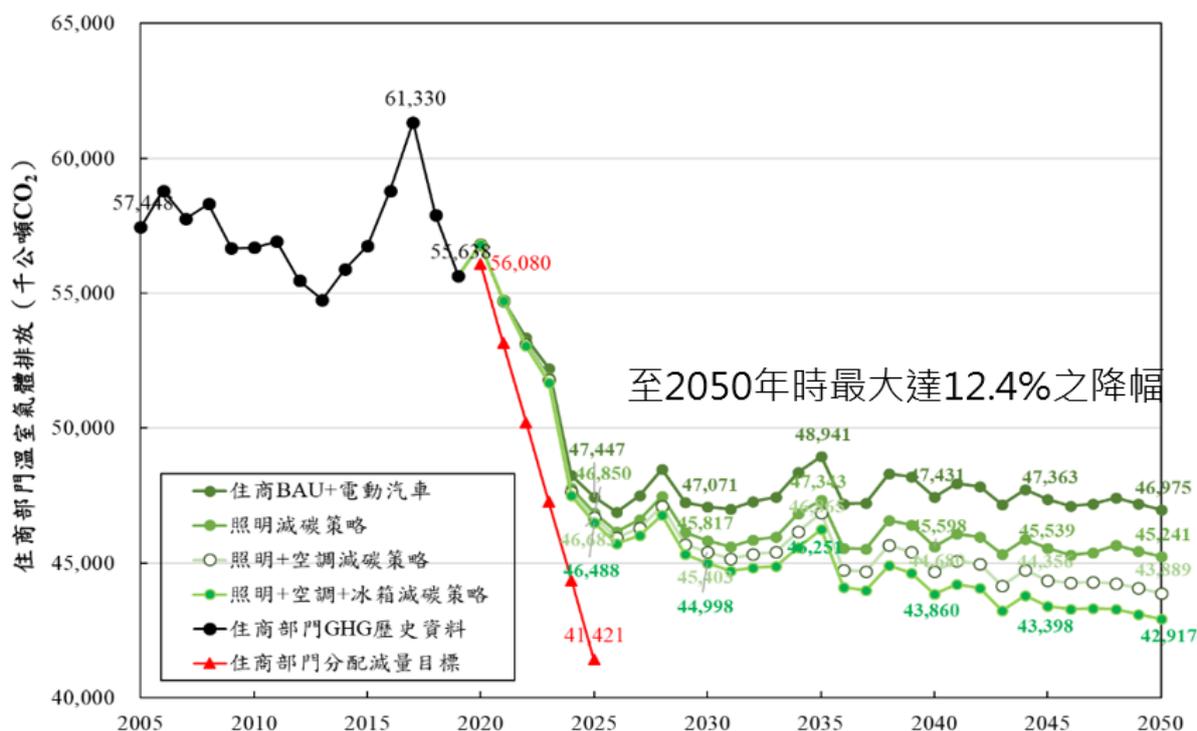
以商業建築為例，若將外牆構造的 U 值大於 $2.75 \text{ (W/m}^2 \cdot \text{K)}$ 、開口率大於 40%，且窗玻璃的日射遮蔽係數(Solar Heat Gain Coefficient, SHGC)大於 0.6 的老建築，逐年進行外殼節能改善，將其外牆優化至 $U=2.75 \text{ (W/m}^2 \cdot \text{K)}$ 和窗玻璃的 SHGC 達 0.6 的節能水準，其節能效益僅佔我國住商部門溫室氣體排放總量的 2.62%，成效有限，但改善的成本卻相當高昂(黃國倉 2023)。

故較為務實的方法可考慮在老舊建築進行外牆整修(外牆拉皮)或屋頂防水層更新時，同步提升建築外牆或屋頂的隔熱性能，使其至少達到當前的隔熱水準。然而，單靠老舊建築的更新過程，汰換速度緩慢。另一方面，任何既有建築的改善措施往往需要經過管理委員會同意，這也成為推動的障礙。此外，既有建築的設計相較於新建築較少專業建築師的協助，缺乏對建築節能與成本的認識，老建築的更新需要具備一定的節能知識與技術認識，這樣才能更容易達成共識以便落實。技術認知的落差恐怕也是既有建築節能更新的一個潛在推動障礙。

2. 建築設備家電減碳潛力較佳，但首重汰換速率

考慮節能效果、汰換成本及政策擴散率等三個因素，推動建築設備效率提升及加速主要耗能家電的汰換，可能是較為務實的減碳方案。這也是經濟部能源署目前推動的節能家電補助方案及各縣市共同倡導的節能政策的主要項目之一。

住宅家電設備耗能約佔全年家戶總耗能的 40%至 50%，其中冷氣和照明用電各占 20%。因此，針對這三個主要耗能設備，提出以下減碳措施：(1)照明燈具的節能汰換；(2)空調設備的效率提升；(3)冷凍設備和冰箱的能效提升。假設每一項目以每年 3.5%的汰換速率估算其潛在減碳量，並預測未來我國的發電結構逐漸向低碳轉型，電力排放係數將逐年下降，至 2050 年的減碳趨勢如圖 5-10 所示。



資料來源：王安強、黃國倉等人(2021)

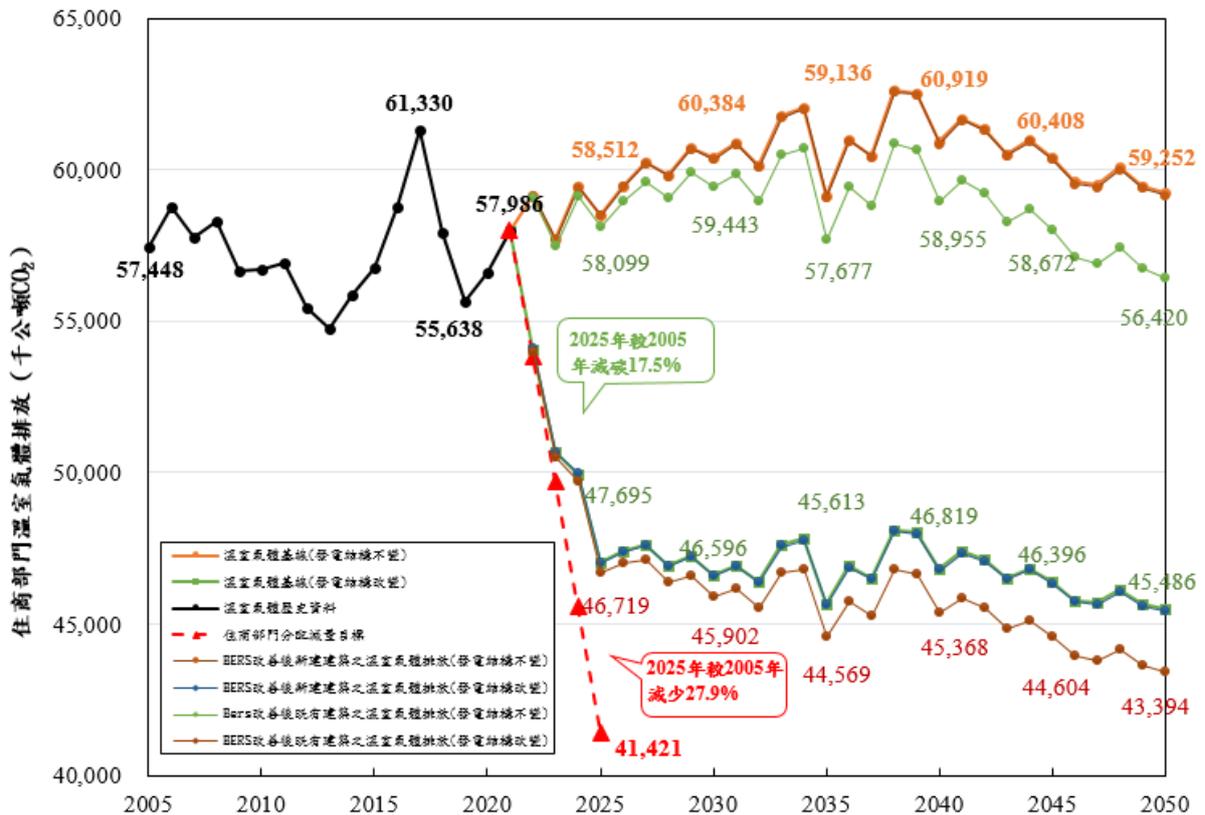
圖 5-10、台灣家戶主要耗能設備之汰換策略預估減碳潛力

如果僅執行照明節能改善措施，至 2050 年末，住商的溫室氣體排放量將從原本基線預估的 46,975 千公噸 CO₂e 降至 45,241 千公噸 CO₂e，減碳幅度為當年度基線的 4.0%；若再增加空調效率提升的減碳策略，則 2050 年的減碳幅度將達到 10.1%；再加上冰箱汰換效率提升的措施，則減碳幅度將達到 12.4%(王安強、黃國倉等人，2021)。然而，此推估係基於未來家電能效與當前相當的假設，並未考量未來科技進步可能帶來的設備能效提升，故為保守估計。

3. 制度面之減碳潛力效果有限

綜觀國外建築減碳措施方面的經驗，新建建築與既有建築通常是雙管齊下，同步推進。一方面，針對新建建築，修訂建築基本法中的節能規範並逐步加嚴。特別是在以溫度差為主的節能對策上，其重要性將愈加凸顯。另，對於既有建築的應對措施，英國和歐盟已早早實施強制建築能效揭露制度，並將不同能效等級的建築與不動產交易市場、房屋租賃市場、減稅優惠及貸款利率等配套措施結合，促使建物所有權者自主改善，形成正向的節能循環，呈現事半功倍的效果。

根據國發會的新舊建築 BERS 推動路徑，可能實現的減碳量如圖 5-11 所示。圖中未來年的上方曲線是基於未來每度用電的碳排放係數仍維持在 2021 年的 0.509 Kg-CO₂e/kWh 的假設，而下方曲線則依據目前能源署對能源轉型後的碳排放係數所做的推估。推估顯示，若我國電力碳排放係數如預期下降，則 2050 年全國住商建築的碳排放量有望相比 2005 年減少 24.5%(王榮進、黃國倉等人，2022)。



資料來源：王榮進、黃國倉等人(2022)

圖 5-11、台灣導入 BERS 後住商部門之碳排趨勢變化

「未來氣候變遷影響」、「都市熱島嚴重化」與「建築規模逐年成長」等皆是住商部門碳排的增量因子，在此前提下建築部門碳排放需回到 2005 年基線的一半以下，確實不容易。

根據推動政策的擴散率與設備汰換速率的假設下，單就既有建築之外殼節能改善效益，至 2050 年可減碳 2.4% 之譜；而照明、冷氣系統與冰箱等主要耗電設備能源效率之提升汰換，可進一步減碳 12.4%；而依國發會所提新舊建築導入建築能效標示制度則又約可減碳 24.5%。意即，上述策略同步推動下，預期整體住商部門之減碳量在未來住商建築仍持續成長下，可於 2050 年時比基準年 2005 年減碳四成，但仍與淨零排放之國家目標相距甚遠。

故其他可能之減碳途徑包括基地內再生能源應用之創電及創電後之儲電配電、倡導綠色生活的行為改變帶來之節電，甚至輔以自然解方(Nature-based Solution)之都市熱島降溫手法，藉由改善微氣候環境，達成都會區內建築之空調節能等，這些非建築設計或設備節能之策略亦需同步重視，以共同達到建築零碳排之目標(黃國倉 2023)。

(二) 台灣住商部門淨零排放路徑規劃建議

考慮到我國目前 900 多萬戶住宅，僅依靠目前的政策並不足以引導全台的住宅淨零轉型。分析我國住商部門溫室氣體可參採的策略與其他主要國家淨零碳排

建築政策進行比較後，可行之推動機制如下：

建築節能方面，以美國為例，為達其國家淨零目標，逐步檢討修正建築節能法規以使新建建築物得以因應氣候變遷。而歐盟亦是以建築節能優先，優先透過強化國家建築節能規範，使新建建築物達到近零耗能或超低耗能建築。

此外，適當之補政策貼是必要且有助於激勵淨零碳建築產業之發展與推動。在美國各州針對高能效建築提供不等的技術服務或高效設備建置之補助或無息貸款⁴⁹。歐盟結合能源服務業(ESCOs)，透過節能績效保證合約協助既有建築降低初始投資成本之門檻以進行節能改善。

最後，在減量政策上，歐盟的「55 方案(Fit for 55)」設定了商業建築物之溫室氣體排放量上限，並分期訂立汰換之門檻⁵⁰，以滾動式之碳排評比逐步淘汰高碳排之建築。

綜上所述，彙整出 12 項建議以加速我國推動住商淨零排放之進程：

1. 建議我國評估現行建築節能規範，以強化應對氣候變暖的必要性。建築能效評估系統(BERS)是達成近零建築的重要評估指標，建議將其納入我國之建築技術規則中，規範一定規模之新建建築應取得一定等級之建築能效。將有助於誘導建築設計界朝近零建築設計，同時提升我國建築產業的淨零轉型。
2. 對取得不同能效等級的既有建築，提供不同程度的貸款額度放寬和利息補貼政策，以促進既有建築的節能更新。
3. 建立示範建築或場域，透過實施各種建築被動式設計技術、高效率設備系統的引入，及再生能源應用等多元手法，實現淨零碳建築，證明在台灣亞熱帶熱濕氣候區實現零碳建築的可行性，以推廣至業界。
4. 政府應整合能源服務業(ESCOs)與業界，建立媒合平台，通過節能績效保證專案，為既有商業建築提供能源效率提升的專業協助，以減少建築使用階段的碳排放。
5. 提供建築節能診斷的專業服務費用的補助，以提高企業主對建築溫室氣體減排的意願，並降低節能改善策略在專業知識上的門檻。
6. 針對建築設計業者的經濟誘因，初期可對取得不同等級認證的建築能效標示案例，為建築設計業者提供不同程度的補助或設計酬金獎勵。
7. 針對建築開發業者的經濟誘因，可結合金融融資制度，對於規模達到一

⁴⁹ 如猶他州，按建築節能績效給予不等的補助計畫。佛蒙特州則針對承諾興建高建築能效等級之建築，州政府給予專業技術服務之補助。羅德島州提供新建淨零能源住宅免費之節能模擬與專業輔導。麻州則補助專業顧問服務之費用，免費進行建築節能與被動式設計技術導入之評估。

⁵⁰ 以佔全體建築一次能源使用密度(EUI)之百分等級，分期訂立汰換之門檻。

定標準且承諾達到第 1 級或第 1+級建築能效的新建建築，提供不同程度的低利貸款。

8. 建議可仿效國外以設立能源基金之方式，針對已取得建築能效 1+等級者，於規劃基地內建置再生能源等創能設施(含儲能裝置)之初期成本提供補助，同時依建築規模設置每案之補助上限。以鼓勵取得近零碳排之建築進一步達成淨零碳排之目標。
9. 建構全國層級的建築物能效標示揭露網站與資料庫，表彰建築能效優異的案例，同時將取得不同等級能效標示的建築公佈於網路平台上，透過同儕比較來提升建築能效的自發機制。
10. 為落實建築能效標示並達到揭露目的，促使建築所有權人自主改善建築能效，可以強制規定公有或供公眾使用建築在主要入口明顯處揭示建築能效等級，並設立違規的罰則。
11. 建築能效標示內容，除了能效等級外，還可對於能效等級較差的建築，同時列出可行的能效改善建議及實施順序，以供業主參考。
12. 多國已將建築能效標示納入不動產交易和房屋租賃市場，並要求交易時主動揭露，有助於建物所有權者自主提升建物的能效。故建議可對建築能效評估範圍與建築物所有權範圍的調和進行研究，以提高未來建築能效標示導入房屋交易市場的可行性。

參考文獻

1. Cortese, A. and M. Lyles (2020). Energy code roadmaps for getting to zero outcomes - Developed in support of Zero Cities Project. Portland, OR, USA, New Buildings Institute.
2. Department of Energy (2015). "American State Building Codes." <https://www.buildingsguide.com/blog/resources-building-codes-state/>(Accessed Date: 2021.02.15).
3. Deutsche Energie-Agentur "zukunft haus." <https://www.zukunft-haus.info/start/>(Accessed date: 2021.02.15).
4. Energy, E. (2021). "EPC rating bands." <https://www.edfenergy.com/energy-efficiency/how-improve-your-epc-rating>.
5. European Commission, J. R. C. J., PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, (2013). "Emission Database for Global Atmospheric Research (EDGAR), Release Version 4.2 FT2010." <http://edgar.jrc.ec.europa.eu>.
6. Federal Ministry for Economic Affairs and Energy "Energiewende." <https://www.bmwi.de/Navigation/DE/Home/home.html> (Accessed date: 2021.02.15).
7. Healy, D. (2013). Asset Ratings and Operational Ratings-The relationship between

- different energy certificate types for UK buildings. Liverpool, UK: CIBSE Technical Symposium, Liverpool John Moores University.
8. Huang, K.-T. and R.-L. Hwang (2016). "Future trends of residential building cooling energy and passive adaptation measures to counteract climate change: The case of Taiwan." *Applied Energy* 184: 1230-1240.
 9. KfW (2021). "The efficiency house levels for a new building." <https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Privatpersonen/Neubau/Das-Effizienzhaus/>.
 10. Korea (2020). "2050 Carbon Neutral Strategy of the Republic of Korea." https://unfccc.int/sites/default/files/resource/LTS1_RKorea.pdf
 11. Seiko Instruments Inc (2022). "SII 網站."
 12. White House "Executive Order - Planning for Federal Sustainability in the Next Decade." <https://obamawhitehouse.archives.gov/the-press-office/2015/03/19/executive-order-planning-federal-sustainability-next-decade>(Accessed date: 2021.02.15).
 13. U.S. Energy Information Administration (2018). *Annual Energy Outlook 2018*. Washington, DC, USA, U.S. Department of Energy.
 14. Y. Li, W. Gao, X. Zhang, Y. Ruan, Y. Ushifusa and F. Hiroatsu (2020). "Techno-economic performance analysis of zero energy house applications with home energy management system in Japan." *Energy Build*.
 15. 中國建築科學研究院 (2022). "中國建築科學研究院網站."
 16. 內政部建築研究所 (2024). *建築能效評估手冊*.
 17. 日本建築研究所 (2022). "<https://www.kenken.go.jp/english/index.html>."
 18. 王安強, 黃國倉, 黃瑞隆, 林國華 and 楊忻婕 (2021). *住商部門溫室氣體減量策略成本效益之研究*. 台北, 內政部建築研究所.
 19. 王榮進, 黃國倉 and 黃瑞隆 (2022). *住商部門淨零排放策略及減碳潛力之研究*. 台北, 內政部建築研究所.
 20. 國家發展委員會 (2022). *台灣 2050 淨零排放路徑及策略總說明*.
 21. 陳麒任 (2017). "推動既有建築節能改善策略與效益之研究." 內政部建築研究所自行研究報告.
 22. 黃國倉 (2023). "台灣建築溫室氣體減量的潛力與障礙." *建築師雜誌特刊「永續及近零建築新趨勢-零的挑戰」*: p114-121.
 23. 韓國環境部 (2021). "韓國 2021 碳中和執行計畫."

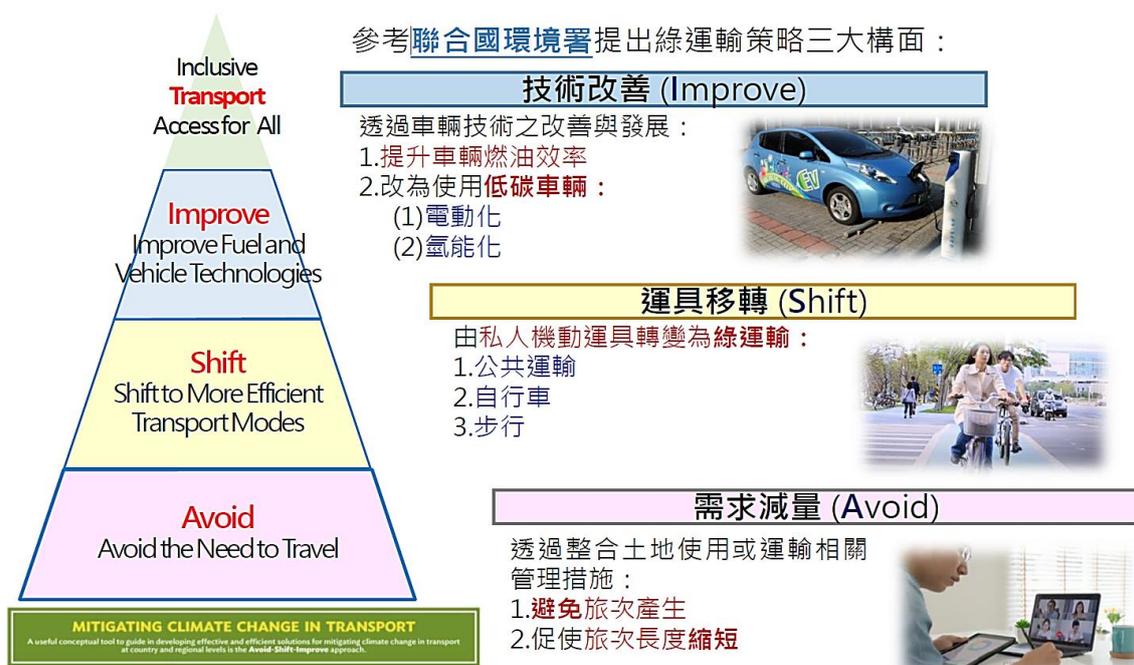
第六章、運輸部門

黃釋緯⁵¹

一、前言

(一) 綠色運輸的重要性

綠色運輸旨在通過技術創新和政策引導，實現交通運輸系統的永續發展，重要政策不僅包括電動車和氫燃料電池車等新型交通工具的推廣，也包括公共運輸系統的最佳化和非機動交通方式的推廣，如步行和自行車道建設，低碳運輸的推動對於環境、經濟和社會的影響深遠而廣泛，還可以提升城市的宜居性，提高居民的生活品質。許多國家已開始實施運輸轉型策略，以應對氣候變遷的挑戰。主要策略涵蓋三大構面：需求減量、技術改善和運具移轉，如圖 6-1。



資料來源：曾佩如(2023)，運輸部門 2050 淨零排放發展策略。

圖 6-1、低碳運輸三大策略

需求減量(Avoid)通過整合土地使用和運輸管理來減少不必要的旅運需求。例如，通過城市規劃和公共運輸的最佳化，減少對私人交通工具的依賴，遠距工作和視訊會議等方式，也能有效減少通勤需求。技術改善(Improve)強調制定嚴格標準提升車輛燃油效率，並提供財政激勵以促進低碳車輛普及。運具移轉(Shift)旨在推動公共運輸(如地鐵和輕軌)、自行車和步行等綠色運輸模式的普及。

⁵¹ 台灣經濟研究院研究員。

(二) 綠色運輸技術與模式

綠色運輸的實現依賴多種技術和模式的整合，其中電動車技術的快速發展是低碳運輸的關鍵。電動車以其零排放和低噪音的特性，成為城市交通系統的重要一環。隨著電池技術的不斷進步和充電基礎設施的逐步完善，電動車的市場接受度和普及率不斷提高。氫燃料電池車則提供了另一種解決方案，相較電動車，氫燃料電池車在續航里程和加氫時間上具有一定的優勢。然而，氫燃料基礎設施的不足仍然是其普及應用的主要障礙，這需要政府和企業的共同努力來解決。

除了技術創新，運輸模式的轉變同樣重要。公共運輸系統的最佳化可有效減少私人車輛的使用，從而降低碳排放。共乘交通模式，如共享汽車和共享自行車，可提高交通工具的使用效率，促進了低碳運輸的實現。非機動交通方式，如步行和自行車，在短距離交通中發揮著無可替代的功能，除有助減少碳排放，還能改善城市居民的健康。

(三) 政府運輸政策與規劃的角色

政府在推動綠色運輸中扮演著非常重要的角色，通過制定和推動政策，可有效引導市場和社會資源朝低碳方向前進。首先，政府可以規範明確嚴格的燃油效率標準和污染排放值，從而促進低碳交通工具的發展與利用。此外，政府還可以通過提供購車補貼和稅收減免等激勵措施，鼓勵消費者選擇低碳交通工具。基礎設施的投資是政府的重要手段，充電樁和加氫站建設是普及電動車和氫燃料電池車的必要條件。

公共交通運輸基礎設施的改善，可提高公共運輸的吸引力和利用率，減少私人運具的使用。此外，政府還可以通過制定都市規劃政策，發展非機動交通方式，如擴大自行車道和步行區覆蓋範圍。政策實施需要政府各部門之間的協調與合作，還需要與企業和社會組織合作，形成綜效。

(四) 綠色運輸的社會經濟影響力

低碳綠色運輸對社會和經濟的影響深遠。首先，低碳運輸行業的發展可以創造大量的就業機會，特別是在製造和技術維修服務領域。這不僅有助於經濟成長，還能提高社會的整體就業水準。其次，低碳運輸的普及有助於改善城市空氣質量，減少噪音污染，從而提升居民的生活質量。這對於提高城市的宜居性和吸引力具有重要意義。

然而，低碳運輸的推廣也可能帶來社會公平問題。如何確保低碳交通工具和服務的普及不會加劇社會不平等，是政策制定者需要考慮的問題。確保公共運輸的可及性，並通過教育和宣傳提高公眾對低碳運輸的接受度和參與度。社會各界的參與和社區合作，可提高實施效果，並促進社會永續發展。

二、主要國家運輸部門淨零排放路徑

(一) 美國

1. 運輸淨零排放策略

運輸部門的溫室氣體排放量佔美國總量三分之一，同時交通也是美國家戶消費的第二大開支且逐年增加，對於貧困的弱勢群體而言是相當沉重的負擔。美國《國家運輸藍圖》的設計目的除規劃運輸系統的減碳期程，也期待能通過淨零轉型提供公平與便利的運輸，解決弱勢族群的問題，並藉由開發電動車、氫能、永續燃料等清潔能源技術及基礎建設，創造運輸產業的就業機會。

《國家運輸藍圖》中提出實現減碳的 3 項關鍵策略：增加便利(Increase Convenience)、運具效率提升(Improve Efficiency)和運具燃料轉型(Transition to Clean Options)。詳細策略、措施及推動期程請參考表 6-1。

- (1) 增加便利：以社區為單位，重新規劃其土地使用，保障在該區域內之就業、消費、教育、娛樂等基本功能，使民眾減少長途運輸需求，除減輕通勤負擔，亦可提升生活品質。此外，為鼓勵主動運輸，需改善步行和自行車使用環境，通過最佳化交通系統設計，增加區域內便利性。
- (2) 運具效率提升：各類型運具效能隨著技術進步得到提升，擴大客運、鐵路等相較汽車更具效率的公共運輸。
- (3) 運具燃料轉型：汽車、卡車、船舶、飛機等各類型運輸將全面汰換成零排放運具或清潔燃料替代，以達到運輸部門淨零轉型。

前兩項策略雖有利於排放減量，但其效益屬於間接，故美國淨零政策的主力將集中於運具清潔燃料轉型，整個淨零目標的成功將奠基於各類新型運具和燃料替代方案。《國家運輸藍圖》將車輛整個生命週期的排放納入，逐項展現各主要運輸模式現有減碳技術應用和未來可能存在之減碳挑戰，在各階段的碳排放，如生產及報廢的排放也須處置，廠商亦可通過直接方案(如採購流程)直接選擇低碳原料，或間接使用環保永續之工程技術(如數位化應用)等方式減量。

為實現 2050 淨零目標，除了政策導入外，亦應考慮期間人口增加、經濟成長所產生的運輸需求，綠色運具的推廣和燃料技術的改革必須加速普及，方能落實深度減量。同時《國家運輸藍圖》規範了一切運輸部門有關政策、策略及措施，都須遵循五大指導原則：

- (1) 可量化的積極行動：由於氣候危機的緊迫性，減碳規劃必須大膽、快速，其成果也必須存在可量化之指標，便於滾動式檢討政策成效。
- (2) 創新的運輸系統設計：引入一系列先進技術與新型態商業模式的減碳新方案，包括土地使用規劃、基礎設施投資、鼓勵人流物流的清潔運輸、推廣零排放汽車(純電動車、插電式混和動力車和氫燃料電池車)等。

表 6-1、美國《國家運輸藍圖》戰略推動期程

期程	分類	內容
<p>~2030</p> <p>《兩黨基礎建設法》和《降低通貨膨脹法》的歷史性投資，推動公部門政策佈署及促進私部門投資</p>	運輸系統設計與土地利用	與當地社區合作，開發有效、公平和可擴展的當地或區域土地利用和規劃解決方案，透過減少或縮短人們的交通次數來增加便利性並減少排放。
		與公共和私營部門合作夥伴合作，以建立更公平、更健康的交通系統，包括支持大眾運輸發展。
		支持土地使用、街道設計和開發政策，使步行和騎自行車更容易、更安全、更方便。
		2030 年將國家交通成本負擔減少至少 5%。
	運具效率提升	投資鐵路、公共運輸和主動運輸的基礎設施，以提供使用更實惠、更節能的交通方式的選擇。
		提供激勵措施支援使用高效率的交通方式和車輛管理，減少弱勢社區的交通成本負擔。
		持續強化標準，提高車輛效率。
	高碳燃料替代	為所有運輸方式設定明確、可實現目標(如零排放車輛銷售份額、永續燃的數量、減量目標)。
		鼓勵國際航運和航空快速減碳，與國際合作夥伴合作制定目標、基礎設施標準和實施計劃。
		投資研究和創新，進一步開發和示範清潔技術(例如，實現電池、氫電解和永續燃料成本目標)並實現能源系統整合。
		繼續並擴大資金和市場激勵措施，以加速低排放或零排放車輛的普及，並投資於支持性基礎設施(例如車輛回扣和電動車充電基礎設施)，特別是在低收入和負擔過重的社區。
		培養國內和國際供應鏈勞動力隊伍，以確保美國能夠製造足夠的清潔車輛和燃料來滿足快速成長的需求。

期程	分類	內容
2030-2040 改革加速，依全球動態、技術進步、消費者反應，擴大和調整淨零轉型方案	運輸系統設計與土地利用	實施適當規模土地利用和規劃解決方案和政策，同時確保交通基礎設施公平且能適應氣候變遷。
		實施前瞻性政策，最大限度發揮自動化等變革性技術在生活品質和排放方面的正面影響。
	運具效率提升	繼續投資並鼓勵多使用高效的客運和貨運，以最適化的運輸和貨運物流並提高燃油經濟性。
		利用技術和創新商業模式實現多式聯運和共乘。
		持續強化標準，進一步提高車輛效率。
	高溫室氣體燃料替代	將所有新車銷售轉向零排放技術，並擴大永續燃料的生產和使用。
確保支援清潔技術的基礎設施(如電動車充電、清潔氫氣和永續燃料)並完全整合到能源系統中。		
建立彈性的供應鏈，擴大基礎設施，並實施強力的勞動力發展策略，實現向零排放的全面轉型。		
2040-2050 完成轉型，確認轉型過程中無人被遺漏	運輸系統設計與土地利用	繼續支持實施公平的區域土地使用和規劃和政策，以減少排放並實現淨零排放目標。
	運具效率提升	充分利用鐵路、公共運輸和共用多式聯運等高效模式的全面潛力，最大限度地提高車輛效率。
	高溫室氣體燃料替代	支持車隊汰換，以清潔零排放完全取代傳統車輛和石油基礎設施。
全面整合清潔交通和清潔能源系統，確保交通、貨運、能源供應及其配送可靠運行。		

- (3) 保障轉型過程的安全性、公平性和可用性：增進社區淨零活動參與、在滿足消費者需求的基礎上進行減碳、提升運輸的近用性、可負擔的運輸成本、公平分配轉型利益等，最終目標為國家氣候調適能力的加強、生活品質的提升、人民身心健康和經濟機會的增進。
- (4) 加強跨部門合作：除了聯邦級別的合作計畫，政府也支持其他類型的合作形式，如中央與地方、公私部門、區域組織或團體與其他利害關係人的夥伴關係。
- (5) 確立美國在運輸技術主導地位：在全球減碳競賽之中，美國必須處於絕對領先地位，通過運輸部門的清潔能源轉型，為美國創造就業機會，強化美國能源安全，建立全球最強大的永續交通技術供應鏈。

2. 運具轉型措施

《國家運輸藍圖》根據不同的運輸模式規劃了不同的減量目標和路徑，大致分為以下幾種運具：輕型車、中重型車、非道路車輛、鐵路、航運、空運、管道。具體減量期程與目標請見表 6-2。

表 6-2、美國各類運具減碳期程及減量目標

運輸模式	現行排放比例	聯邦溫室氣體減量目標
輕型車	49%	<ul style="list-style-type: none"> • 2030 年實現 50% 的新車銷售實現零排放，並確保新的內燃機車輛盡可能高效 • 2030 年佈署 50 萬個電動車充電器 • 確保到 2027 年聯邦車隊採購 100% 零排放
中重型車	21%	<ul style="list-style-type: none"> • 目標是到 2030 年使 30% 的新車銷售實現零排放，到 2040 年使 100% 實現零排放 • 2035 年聯邦車隊採購 100% 零排放
非道路車輛	10%	<ul style="list-style-type: none"> • 集中開發技術途徑並設定效率和零排放設備目標
鐵路	2%	<ul style="list-style-type: none"> • 集中開發技術途徑並設定效率和零排放車輛目標 • 鼓勵更多客運和貨運應用，以減少道路車輛排放
航運	3%	<ul style="list-style-type: none"> • 支援零排放航運任務(ZESM)目標，確保 2030 年全球 5% 深海船隊使用零排放燃料，至少 200 艘船舶在主要深海航線上使用這些燃料，覆蓋至少三大洲的 10 個大型貿易港口供應零排放燃料 • 透過對永續燃料進行研發來支持美國海事部門，並激勵美國商船營運商降低溫室氣體排放 • 與國際海事組織各國合作，制定 2050 年實現國際航運零排放的目標
空運	11%	<ul style="list-style-type: none"> • 基線情境下，2030 年航空排放量減少 20% • 2050 年實現美國航空業溫室氣體淨零排放 • 2030 年每年至少增產 30 億加侖 SAF，到 2050 年產量約 350 億加侖，足以供應整個產業

運輸模式	現行排放比例	聯邦溫室氣體減量目標
管道/線	4%	<ul style="list-style-type: none"> 到 2036 年，修復或更換 1,000 英里高風險、易洩漏、社區遺留的天然氣分配管道基礎設施，預計將減少 1,000 噸甲烷排放 消除外洩並允許使用管道輸送清潔、永續的燃料
總計	100%	<ul style="list-style-type: none"> 2050 年減量 80-100%。

(二) 歐盟

歐盟於 2021 年 7 月推出「永續及智慧移動策略(Sustainable & Smart Mobility Strategy)」及「55 方案(Fit for 55)」中與交通運輸(Mobility and Transport)有關的內容，說明如下：

1. 公路運輸

公路運輸為歐盟最主要的載客與載貨的運輸量，也為歐盟運輸部門中能耗、排碳與相關空水廢產生量最高的運輸模式。為達成 2050 年時公路運具零排放目標，歐盟針對公路運輸設定：運具電動化及使用非化石燃料之替代燃料；將客運與貨運由主要使用公路運輸，移轉至水路和鐵路的複合運輸；由全歐交通網絡(Trans-European Transport Network, TEN-T)提供公路建設；加速智慧化無紙化公路通關服務；加強公路普及性和大幅降低道路交通事故等目標。

2. 軌道運輸

歐盟將軌道運輸視為運輸淨零轉型的重大手段，除將協助轉移公路運輸運量，也設定明確目標：至 2030 年運量增加 50%、高鐵運量翻倍，2050 年運量增加一倍；以跨歐洲複合運輸網絡強化軌道運輸，至 2030 年啟動核心路線營運、至 2050 年全面營運。在制度面提出加強單一歐洲鐵路區域(Single European Rail Area)，推動歐洲鐵路交通管理系統(European Rail Traffic Management System, ERTMS)，並提議將 5G 和衛星數據等新技術納入更新之技術互通性技術規範(Technical Specifications for Interoperability, TSIs)。軌道運輸的列車燃料預定全面電氣化外，無法電氣化路線將以氫氣為替代燃料。

3. 航空運輸

由於廉價航空的便利及多元，歐洲境內的航空運輸運量持續攀升，但航空運輸至今無法大幅度以電氣化進行燃料轉型。故 ReFuel EU 航空(Refuel EU Aviation)倡議刺激永續航空燃料的生產及需求，並規劃將航空部門免費排放額度(Free Emission Allowances)逐步取消並自 2026 年起實施，至 2030 年底，2 千萬噸免費排放額度保留給汰換化石航空燃料之航空營運商，歐洲區域(含英國、瑞士)將由 EU ETS 進行航空碳排額度管控。航空管制層面，由歐盟委員會和新一代歐洲(Next Generation EU)優先推動單一歐洲領空(Single European Sky, SES)。創新科技則以「無人機戰略 2.0 (Drone Strategy 2.0)」全力支持無人機和無人飛機(Unmanned

Aircraft)佈署，並將進一步制定相關規則，包括關於 U 空域(U-Space)的規則。委員會將提議修訂《航空服務法規(Air Service Regulation)》。

4. 水運和海運運輸

水運和海運運輸是國際貨運主力，歐盟以 Fuel EU 海運(Fuel EU Maritime)倡議激勵永續海運燃料的生產及需求。且與國際海事組織(International Maritime Organization, IMO)合作，規劃在所有歐盟水域內，建立規範船舶的「排放控制區域(Emission Control Area)」，實現海運部門對空氣和水的零污染，現僅規範北海、大西洋法國屬地海域，正著手建置地中海海域，並將規劃類似工作來涵蓋黑海。歐盟亦將在 IMO 中，推動船舶交通監控和訊息系統(Vessel Traffic Monitoring and Information Systems, VTMIS)，有助於實現自動化和自治海運營運的功能安全佈署。委員會計劃對船旗國(Flag State)責任、港口國檢查(Port State Control)和事故調查(Accident Investigation)等現有的法規進行審查，同時繼續加強對認可組織的歐盟規則。總體目標是實現功能安全、資訊安全和高效的海運，降低企業和行政機構的成本。

5. 人本運輸

歐盟規劃提高團體運輸、步行和自行車的運輸模式比例。運用自動化、連結性和複合運輸顯著降低交通污染和壅塞，尤其是解決城市交通狀況，且改善人們健康和幸福感。設定運輸營運商在 2030 年之前為歐盟內 500 公里以下的預訂團體旅遊(Scheduled Collective Travel)提供碳中和選擇，並在觀光旅運上提供消費者永續旅運選項。並提供環境足跡的完整資訊，讓消費者可自願進行旅程抵消，消費者和企業將有能力作出更永續的客運和貨運選擇。並確保新型交通在所有地區及對於所有乘客，包括行動不便人士，都可負擔且容易取得運輸服務。

6. 複合運輸

歐洲區域內明顯缺乏轉運基礎設施的地區，特別是內陸複合運輸中轉站，需要複合運輸數據交換及智慧交通管理系統。規劃結合歐盟資金、政策、研究及創新，並提供鐵路國家補貼規則，為公共資助複合運輸提供了靈活框架。並制定公平的歐洲運輸績效監測機制，衡量運輸和物流碳排放(包括營運與基礎設施)。引入經濟激勵措施，結合複合運輸物流、提高電子商務使用量及使用層級、通過專用的永續城市物流計劃納入貨運維度，提供零排放解決方案佈署，包括貨運自行車、自動化交付和無人機，及更好地利用內陸水道進入城市。

7. 運輸科技與創新

針對燃料轉型，結合歐盟能源系統整合計畫(EU Energy System Integration)、氫能策略(Hydrogen Strategies)、電池策略行動計畫(Strategic Action Plan on Batteries)支持零排放車輛發展，並大力推動電動車(Battery-electric Vehicles)應用，車種包含市區使用之汽車、貨車、巴士，亦投入開發氫能燃料電池車輛，車種包

含商用貨車、巴士和重型車輛(Heavy Duty Vehicle)。委員會通過監管和金融工具支持策略價值鏈(包括電池、原物料、氫和再生低碳燃料)，確保永續運輸所需的材料和技術供應，避免歐洲在策略領域依賴外部供應商，以實現戰略自主。

8. 永續運輸的經濟誘因

將歐盟排放交易體系(EU Emission Trading System, EU ETS)擴展到海運部門；對於航空，提出修改 EU ETS 提案，特別是減少給航空公司的免費排放額度。另考慮在既有的「再生能源指引(Renewable Energy Directive)」中，增加最低永續燃料比例的規範；建立複合、航空及水路運輸的永續分類標準(Sustainable Taxonomy Criteria)，以利融資單位就每種運輸模式的特殊性設定融資條件。

為降低能耗、減少碳排，解決道路壅塞，規劃歐洲境內的內陸貨運由公路貨運轉移 75%到鐵路和內陸水道/短程海運。在所有運輸模式中立即實施污染者支付和用戶支付原則，以實現公平和有效的定價，並運用政策與措施調和排放交易、基礎設施費用、能源和車輛稅。除此之外，考慮對基礎設施的使用進行收費，特別是在道路運輸方面：規劃修改「歐洲公路費指令(Eurovignette Directive)」，根據車輛類型和使用時間的不同收取不同的道路使用費率。

修訂城市交通運輸套案(Urban Mobility Package)提供地方清晰的交通運輸管理指導，包括城市規劃、連結農村和郊區地區、便利通勤者獲得永續運輸選項。以財政支持 TEN-T 在城市交通運輸的運作，包括複合運輸樞紐、停車場、步行和自行車的安全基礎設施的首/末哩解決方案，並協助城市現代化。其政策工具箱包括微型運輸(Micro-mobility)、支持公共採購零排放運具及相關基礎設施。

9. 運輸融資

首先，運輸類融資優先納入歐盟自有的資金計畫，應優先考慮對具有最高社會、環境、經濟的附加價值，及對就業、成長和韌性產生直接影響的計畫。其次，應通過金融工具解決政策優先領域中的市場失靈和次優投資水準問題，必要時可以進一步使用混合金融工具。

10. 能力建構

邁向永續、智慧和具有韌性的交通運輸必須是公正的，為使新型運輸在所有地區及對所有乘客，都可負擔和容易取得交通運輸服務，繼續通過對較不發達的成員國和地區提供凝聚基金(Cohesion Fund)和歐洲區域發展基金(ERDF)的支持，幫助實現目標。

(三) 英國

1. 運輸部門淨零政策

英國 2020 年 11 月宣佈「綠色產業革命十項計畫(The Ten Point Plan for a Green Industrial Revolution)」，於此基礎上，商業、能源暨工業策略部(Department for

Business, Energy and Industrial Strategy, BEIS)於 2021 年 10 月發布「淨零戰略：綠色重建(Net Zero Strategy: Build Back Greener)」。其中，與運輸部門之目標：承諾於 2030 年停售汽油車及柴油車，國內所有車輛將於 2035 年實現淨零排放。而為實現此一目標，將投入 6.2 億英鎊(約新臺幣 250 億元)支持零碳排汽車和電動車的基礎設施建設、透過汽車轉型基金(Automotive Transformation Fund)支持汽車與其供應鏈電氣化、大規模試驗重型貨車零排放技術、增設公共運輸網絡建設與服務、推動地方交通系統淨零轉型、展開潔淨船隻、基礎建設示範及技術試驗來促進海事部門減碳、提高永續航空燃料(Sustainable Aviation Fuels, SAF)及支持 SAF 工廠建置。

如第二章內容，英國於 2008 年公佈「氣候變遷法案」後，建立「碳預算制度(Carbon Budget, CB)」，作為該法案之核心。自 2019 年 6 月起，碳預算制度之目標皆依據能源與排放預測報告(Energy and Emissions Projections, EEP)進行預測。目前正實現第四期(CB4)的 2023~2027 年目標；另，最新 CB6(2033~2037 年)目標和實際排放量之間的差距仍存在，但小於排放基線之預測值。因此，BEIS 於 2023 年 5 月更新能源與排放預測報告中，於 CB4 期間較運輸部門基線減少 10 百萬噸 CO₂e (Mt-CO₂e)，並於 CB5 期間更減少 39 Mt-CO₂e，CB6 期間減量增加至 54 Mt-CO₂e。主要驅動因素是增加了電動車普及率的預測。係由統計數據顯示消費者選擇純電動車和插電式混合動力車，電池於預測中成本較低，使純電動車對消費者更具吸引力。

2. 運具淨零推動策略

英國綠色產業革命十項計畫中與運輸部門有關項目，以第 4 點「加速向零碳排運具轉變」、第 5 點「綠色公共運輸、自行車和步行」及第 6 點「航空淨零和綠化船舶」三項延伸重點，相關說明臚列如下：

(1) 加速向零碳排運具轉變

英國在電動車市場不落人後，於英國量產的「Nissan Leaf」係 2019 年歐洲銷量第三高的電動車，目前也有近百種電動車型號於英國市場流通。因此，英國政府曾承諾於 2030 年起停售汽油車及柴油車，所有車輛將於 2035 年實現淨零排放。不過後續於 2023 年 9 月將目標年度延後到 2035 年，提供企業及人民更寬裕的時間來因應淨零挑戰。

由於傳統車輛排放佔總排放量將近 20%，故英國政府預計與產業合作，投入資金支持零碳排汽車和電動車的基礎設施建設、透過汽車轉型基金(Automotive Transformation Fund)支持汽車與其供應鏈電氣化、大規模試驗重型貨車零排放技術、增設公共運輸網絡建設與服務及推動地方交通系統淨零轉型。隨此轉變推進，需確保稅收制度宜鼓勵電動車同步使用稅收，以確保能持續為人民與家庭之公共服務和基礎設施提供資金。相關措施整理如下表 6-3。

表 6-3、英國「加速向零碳排運具轉變」規劃

措施	內容
激勵政策	稅收制度鼓勵使用電動汽車，以及延長電動車補助
電動車供應鏈	規劃並支持英國汽車的電氣化及其供應鏈，包括在英國設立大規模生產電池的超級工廠(Gigafactories)。
充電基礎設施建設	投入高速公路與主要道路設置快速充電站(預計至2035年英格蘭高速公路和主要公路將有約6,000個充電站)，以及在家庭與工作場所附近設置路邊充電站。
重型貨車汰舊換新	2021年就淘汰新柴油重型貨車(HGV)銷售時程進行諮詢，並投入2,000萬英鎊進行氫能與其他零排放貨車試驗。
制定排放規範	2021年發布「綠皮書」，提出英國脫歐後之排放法規及汽車與貨車淘汰時程等。

(2) 綠色公共運輸、自行車和步行

英國政府預計提升公共運輸、自行車和步行之比例，擴大鐵路、公共汽車服務，增設自行車和行人基礎措施，加速大眾運輸系統達成目標。做法包括創建一體化的公車及火車網絡，擴大圍繞曼徹斯特和伯明罕等大區域城市的鐵路網絡，並恢復在英國鐵路系統重組時期拆除的軌道路線。2021年5月，英國政府提出「公車淨零復甦：國家公車發展策略(Bus Back Better: National Bus Strategy)」，承諾投入30億英鎊資金用於改善倫敦以外之公共運輸系統。目標是使總體乘客量超越疫情前之水準，相關作為包含增設新路線、簡化費率、增加班次及投資1.2億英鎊增加4,000輛英國製造的使用電力或氫能的零碳排公車(Zero Emission Bus, ZEB)；2023年5月宣佈提供1.6億英鎊之額外資金加強公車服務改善計畫，允許各地當局依此計畫自行推動相關作為；並於2023年6月透過公車服務營運商補助金計畫，再向營運商提供1.4億英鎊補助金。另將於交通流量低之區域創建更多近數千英里的獨立自行車道；擴建學校街道，改善學校周圍交通亂源和空氣污染；同時也透過單車步行投資計畫(Cycling Walking Investment Strategy)改善區域自行車與步行道及普及率。

(3) 航空淨零和綠化船舶

第一架由氫燃料電池驅動的商用飛機在2020年9月於克蘭菲爾德起飛，開創將化石燃料旅程轉變為低碳旅運之機會。英國還成立航空淨零委員會(Jet Zero Council, JZL)，與航空業合作技術研發，制定淨零飛行策略；同時向Fly Zero企業投資1,500萬英鎊，由航太技術研究所(Aerospace Technology Institute, ATI)探討宜於2030年投入的零排放飛機設計和技術開發與商業策略。英國建立歐洲首家永續航空燃料(SAF)資訊交換所，推動該領域技術創新與認證。並就永續航空燃料進行授權協商，以開創替代燃料市場需求。英國亦投資於研發及升級機場基礎設施，如轉為電池或氫能。英國造船業有著悠久歷史，故將投資2,000萬英鎊於清潔海事示範計畫，以開發清潔海事技術。目前已在Orkney群島進行氫渡輪試驗，並將在Teesside啟動氫燃料補給港，並正尋求國內其他適合建置之港口。

(四) 日本

1. 運輸淨零政策

日本於 2020 年宣佈其碳中和計畫，並於隔年修訂《全球暖化對策推進法》，明確日本將邁向減碳社會，政策目標為較 2020 年的溫室氣體減量 50%。同年，日本多個部會共同編寫《2050 年碳中和綠色成長戰略》；在地方層面，多個城市宣佈成為低碳城市，如北海道的「零碳北海道」工程。根據 2021 年公佈的區域減碳路線圖，預計於 2030 年將有 100 個地區成為「減碳領先地區」，鼓勵其通過各自的優勢推動減碳行動，作為其他城鎮的示範案例。

2. 運具淨零推動策略

《2050 年碳中和綠色成長戰略》劃定了 14 項對碳中和有益且極具潛力的產業，包含相關運具淨零推動策略如下(亦可參見表 6-4)：

(1) 汽車與蓄電池產業

- A. 電氣化目標：針對電動車新車售銷量設定目標。乘用車方面，2035 年的新售車輛全面電動化，商用車方面，新售車在 2030 年的電動車佔比須滿足 20-30%，且 2040 年實現新售車 100% 為電動車或使用減碳合成燃料車。至於重型汽車，日本正在對其進行技術示範，目標為在 2030 年前引入 5,000 輛進入市場，並在 2030 至 2040 年間完成普及。
- B. 蓄電池目標：配合電動車，大規模對車載蓄電池進行投資，以保障其產能充分。氣候調適上，電動車所用之蓄電池可在災害發生時加強民眾抵抗與恢復的能力。
- C. 智慧化：通過智慧化及自駕技術，提高交通的安全性與便利性，實現零事故、無障礙模式，以解決交通擁堵問題。
- D. 安裝充電站和加氫站：2030 年前完成 15 萬個充電站與 1,000 個加氫站佈署，使次世代汽車補充燃料的便利性與傳統燃油車相當。

(2) 船舶產業

- A. 開發零排放船舶：推廣氫燃料電池系統與針對小型短途船隻的電動推進裝置，預計 2025 年開始示範，2028 年前實現商業化。
- B. 制定低碳船舶標準：實施船舶能效指數(EEXI)和年度運營碳強度指標評級(CII評級)，要求現有船舶與新型綠色船舶效能表現相當，激勵老舊船舶的汰換。
- C. 提高LNG燃料船的能源效率：研發LNG燃料與風力結合之推進系統，有效減量86%的碳排放。

表 6-4、日本《2050 年碳中和綠色成長戰略》運輸部門策略

產業	發展目標	項目	~2030	~2040	~2050
汽車/蓄電池產業	電動化	電動車		新售車輛 100% 電動化 (2035)	汽車全生命週期碳中和
		燃料電池、電機等相關技術		技術示範	
	燃料碳中和	提高效率及降低成本	技術研發	技術示範	成本低於汽油價格
	蓄電池	降低價格	車用電池組價格低於 1 萬日圓/kWh	擴大使用規模	
		次世代電池		技術研發	技術示範 擴大使用規模
		標準化		擴大應用規模	
船舶產業	無碳替代燃料	氫燃料電池船	擴大使用規模		商業化
		電動船	擴大使用規模		商業化
		氫氨燃料船	技術示範 擴大使用規模		商業化
	新能源船	混和動力船	擴大使用規模		商業化
	制定國際框架	新造船		加強燃油消耗性能規範	提高監管力度
		現有船		燃油效率法規 燃油效率績效評級系統	修訂法規新標準
		船舶公司			以經濟手段促進研發
物流、人流	碳中和港口	港口建成	模範港口示範		全國推廣
		氫氨燃料船	技術演示		商業化
		沿海企業減碳	模範港口示範		全國推廣
		海外港口投資	投資海外港口出口新能 源		建立新能源進口體系
	轉換運輸模式	MaaS 普及	規劃低碳公共運輸系統		民眾多元交通選擇

主要國家淨零排放路徑之比較分析

產業	發展目標	項目	~2030	~2040	~2050
	推廣綠色物流、提升運輸效率	推廣自行車			改善自行車環境
		提高運輸效率	引入評價系統		推廣運輸協作
		燃料電池鐵路		技術演示 相關法規訂定	成本降低
		無人機物流	提升無人機性能及尺寸 多架遠程操作技術示範		導入使用
航空產業	航空運輸	推進系統電氣化	技術示範	擴大使用規模	
		氫能飛機	技術研發	技術示範	擴大使用規模
		提升發動機效率	技術示範	擴大使用規模	
		碳纖維複合材料	技術示範	擴大使用規模	商業化
		航空燃油(生物燃料、 合成燃料)	製造技術穩定並降低成本		擴大航空燃料供應競爭力

(3) 航空產業

- A. 電氣化技術研發：在2030年起突破電機、電池等飛機動力之核心技術。
- B. 推進氫能飛機技術研發：推進燃料箱、引擎等核心技術的研發，規劃機場周邊氫燃料運輸、儲存等基礎建設。
- C. 引進輕量化航太新材料：建立先進材料數據庫，要求本國製造商與全球技術水準一致。與汽車製造商合作，研究碳纖維複合材料回收技術。

(4) 物流、人流、土木基本建設產業

- A. 電動車使用高速公路獎勵：透過給予獎勵誘因，將交通流量由普通道路移轉至高速公路，同時推廣電動車普及。
- B. 推動無人機全面應用與商業化：以無人機進行偏遠地區的配送，減少貨運排放
- C. 建立碳中和港口：根據2021年的編纂的《碳中和港口形成計畫》，在2025年有20個以上的碳中和港口建造完成。
- D. 促進機場減碳：計畫將機場轉變為再生能源基地，通過使用再生能源來減少機場設施與車輛的碳排放，航班方面，以空中交通管制的方式實現營運減碳。

3. 運輸部門減碳具體措施

運輸部門減量目標設定為 35%，參考國土交通省提供的《環境行動計畫》，該部門所推動之政策具體施行措施如下：

(1) 都市土地利用最佳化

全面解決都市結構問題，需要公私部門共同合作轉型，包括在都市內建設氣候緩解與調適設施。以區位最佳化與區域公共運輸為準則的計畫，在完成地方減碳目標的同時，實現緊湊型的城市網絡。將城市結構集中並結合提升公共運輸的土地利用重劃，打造緊湊、宜居的都市環境，活化步行與自行車使用空間。數位化可提升城市資產的功能與價值，令管理效率最大化。AI、物聯網等新技術將融入城市，土地重劃將導入3D城市模型輔助，進行全方位環境模擬和監測，同時，以智慧能源系統透過實現高效能源利用。

(2) 鐵路

以氫燃料電池為未來主要動力，根據其商業化進程推行示範實驗，明確其審查標準再於全國範圍內實施。為了往後鐵路運輸補充燃料，預計將在各樞紐車站周邊設置綜合加氫站，除供火車使用外，也可供應

大客車、公車、卡車等運具之需求。

(3) 航空

航空運輸的減量手段有限，最有效的方式之一即航空交通管制。基於飛行共用資訊，進行根本性國內空域及飛行計畫重組，以最佳化整體空中運輸，其他方式如提昇航線自由度、推廣節油、縮短候機時間等均為機場端營運階段節能改善案例。

新型飛機或新型技術的引進，重點關注於電動化、氫能化、減重，考察前景與國際競爭優勢，並制定與實施支援國產技術認證計畫，內容包含技術審查、制定技術安全標準、國際標準化等。另外，日本預計設定2030年航空公司總燃油量的10%為永續航空燃油(SAF)，並推出「以SAF替代SAF」的政策目標，希望通過生產國產SAF替代進口SAF，預計在2030年實現商業化並完善包括進口SAF在內的供應鏈，由此滿足需求。

(4) 港口

日本航運減碳的推動方向以氫氣、燃料氫等為主，據其盤點99.6%的日本港口可作為大量進口氫、氫的卸收口岸。預計將在港口建立穩定、廉價、大量進口氫、氫燃料環境，並同步建立起風險可控的國際供應鏈，以港口為樞紐，向沿海甚至內陸城市供應燃料。此外，要實現港口減碳，離岸風電是擴大再生能源應用的關鍵，故將港口建設成運維基地，還將進一步評估浮動式離岸風力發電的安全設置地點及方式。這些電力不只可供給港口作業及周邊產業，還有供電給停泊船舶，防止其空轉耗油，剩餘電力將投入製造綠氫，從而完成港口碳中和。

(5) 船舶低碳化

目標為在2050年船舶全面轉向氫、氫等替代燃料，為此建立燃氣船舶生產基地，意圖引領相關產業發展，預計將在2025年啟動零排放船舶示範工程，2028年實現其商業化，並爭取在2030年前達到普及使用。另推動航運碳回收技術研究，包括航行中二氧化碳回收、液化二氧化碳海上運輸等。不僅航運運具轉型為替代燃料，周邊輔助貨物進出口的裝卸機具、車輛等也將改為使用氫燃料。

(6) 次世代汽車普及並提高其燃油效率標準

汽車的溫室氣體排放量為日本總排放量的16%，為了提升民眾購買次世代汽車的意願，政府將該政策與高速公路使用獎勵措施結合，在促進次世代汽車普及的同時，引導車輛從一般道路轉移至高速公路，進而減少排放。如要求汽車製造商須符合根據技術進步持續更新的燃油效率標準。

(7) 次世代運具在物流的應用

運輸業將推動區域內的配送服務轉型，以電氣化或氫能化為目標，並將自動駕駛等技術引入，以提高運輸效率及道路安全。未來也將持續針對長途物流運輸所用之燃料電池汽車投入研發。

(8) 充電裝置基礎設施

除在公共道路上廣設充電樁，也加強充電設施引導標誌，以便民眾在充電設施較少的地區時能快速找到明確的充電地點。研發移動式充電技術(含可嵌入供電系統之道路結構)，預計在2025年開始示範實驗。

(9) 電動車的供電功能

推廣V2H系統，將電動車與家庭供電系統連接，實現能源共用與互換，有助電力系統彈性，在家戶遭逢氣候災害時，電動車可作為暫時電源，加強家戶應對氣候變遷時的調適能力。

(10) 智慧交通

擴大應用ICT技術等新科技，減少交通堵塞及換乘頻率，以有效降低排放。2020年11月的《地域公共運輸活性化再生法》，推動交通行動服務(Mobility as a Service, MaaS)，利用大數據整合各交通節點的功能，提供緊湊無縫的運輸服務，導引民眾偏好與行為改變。

(11) 卡車運輸向鐵路、海運轉換

根據《物流綜合效率法》推動物流運輸模式轉變，通過補貼運輸業利害關係人方式，促使其制定物流運輸模式移轉計畫，搭建低碳物流體系，例如盡可能以鐵路或海運的靜脈物流模式取代陸上貨運。

(五) 韓國

韓國「應對氣候危機的碳中和綠色成長基本法」明確規範 2050 年實現碳中和，並在 2030 年國家溫室氣體排放量需較 2018 年減少 40%以上。亦針對各部門願景及關鍵策略設立相關碳中和轉型規劃要點。韓國運輸部門排放量占總排放量的 14%⁵²。其減碳作法要點有二，即綠色和智慧。預計將現有使用燃料油之運輸系統，轉為以環保和自動駕駛汽車為特色的未來移動方式，並結合燃油效率法規制定政策，促進低碳燃料的使用。

為在 2030 年成為全球最具競爭力的移動產業，目前韓國正極力投資綠色汽車生產之創新技術，同時提出各種激勵計畫，以促進國內對環保汽車的需求。並要求汽車商生產和銷售一定比例的環保汽車(如 2020 年為銷售量的 15%)。並規定自 2020 年起，公共運輸用車種僅採購環保汽車。具體作法包括：

⁵² 2017 年數據。

1. 環保車輛(電動和氫能車)擴大佈署

2030年電動車和氫能車將佔新車銷售的30%，約莫300萬輛電動車和85萬輛氫能車。同時為不同類型車輛提供環保車輛補貼，專注建設必要的交通基礎設施，以確保電動車使用者可於輕鬆找到可用的充電站。根據表6-5的整理，近年韓國環保車輛數已大幅成長，2019年佈署全球最大的氫動力車隊，另電動車累計數量排名世界第八。

表 6-5、韓國電動和氫能汽車登記數量及補助金額

單位：億韓元

汽車種類		2015	2016	2017	2018	2019
環保車輛 登記 (累計)	電動	5,451	10,484	24,749	55,843	90,923
	氫能	48	96	179	908	5,097
	油電混合	178,102	238,303	322,058	416,597	520,799
補助 (億韓元)	電動	707	1,882	2,432	3,905	6,330
	氫能	19.8	79.5	185.8	298.4	2,265

建設電力和氫燃料基礎設施是另一個關鍵策略。若環保汽車用戶能夠輕鬆方便地使用全國的電動或氫氣充電站，將極大提高其市場滲透率。政府會繼續加大充電站建設強度。

另外，排放法規也是使汽車製造商提高汽車引擎燃油效率同時銷售環保汽車之重要策略。目前排放法規僅適用於乘用車、貨車和卡車，但中型和重型車輛也將在未來幾年受到排放法規約束。

2. 增加低碳燃料使用

生質燃料是指由化石燃料和生物原料(生物質)混合產生的燃料，例如生物乙醇和生物柴油。生質燃料可容易地用於現有引擎中，被視為電力或氫能燃料有所瓶頸下的替代選擇。故韓國於2015年通過運輸燃料再生燃料標準(Renewable Fuels Standard, RFS)，要求在運輸燃料中混合一定程度生質燃料，例如乘用車柴油使用3%以上的生物柴油。RFS的範圍計劃擴大到包括汽油、船舶或航空噴氣燃料，且最低百分比也將增加。然而生質燃料仍有缺點，如生質燃料生產可能導致糧作匱乏，且韓國對其依賴進口。

3. 推動海運和航空運輸潔淨化

韓國航空和航運業的核心緩解策略係基於清潔能源。短期緩解策略包括岸電系統(Alternative Maritime Power, AMP)、增加生質燃料和使用液化天然氣動力船舶以及通過經濟營運提高效率。長遠來看，電力和氫能飛機和船舶將成為一項緩解策略之核心。例如國家級研發中心正投入氫能列車、輪船和無人機商業佈署研究。

4. 運輸需求管理及車輛營運最佳化

韓國總人口近一半居住在首爾首都圈，以公共運輸進出首都圈將有助解決高峰時段的交通擁堵。在偏遠地區擴大汽車共用服務，以減少汽車數量。透過開發協作智慧運輸系統(Cooperative-Intelligent Transport Systems, C-ITS)和自駕車(AV)的商業化佈署，可以實現最佳化現有道路系統的汽車運行和降低能源消耗。

5. 貨運模式轉變

韓國的物流系統主要圍繞公路運輸發展，主要使用貨運卡車，故將貨運模式從公路轉向鐵路和航運做為低碳替代方案。例如引進液化天然氣燃料船和擴大海上運輸的岸邊產電量能。

(六) 中國

1. 中國綠色運輸發展願景

中國作為全球第二大經濟體和人口最多的國家，其交通領域的碳排放壓力尤為巨大。然而，中國也在積極推動綠色低碳發展道路，通過政策支持、技術創新和基礎設施建設，實現交通領域的全面綠色轉型。根據2020年《中國交通的永續發展》白皮書勾勒了一個中國綠色運輸推動願景，其內容大體可歸納如下：

(1) 全面推進節能減排和低碳發展

堅定嚴格實施能源消費總量，著力提升交通運輸綜合效能，例如全國鐵路電氣化比例達到71.9%，新能源公車超過40萬輛，新能源貨車超過43萬輛，天然氣運營車輛超過18萬輛，液化天然氣(LNG)動力船舶建成290艘，機場新能源車輛設備佔比約14%，飛機輔助動力裝置(APU)替代設施全面使用，郵政快遞車輛中新能源和清潔能源車輛的保有量及在重點區域的使用比例穩步提升。

(2) 強化資源節約利用

結合國土空間規劃，統籌鐵路、公路、水運、民航、郵政等領域發展，推動鐵路、公路、水路、空域等資源集約利用，提高資源利用效率。因地制宜採用低路基、以橋(隧)代路等，加強公路、鐵路沿線土地資源保護和綜合利用，減少環境影響。加強航道建設的生態保護和綠色建養，推進航道疏浚土綜合利用，嚴格港口岸線使用審批管理與監督，提高岸線使用效率，探索建立岸線資源有償使用制度。推動廢舊路面、瀝青、廢舊輪胎、建築廢料等材料資源化利用。

(3) 強化大氣與水污染防治

用嚴格、嚴密的法規治理環境污染。在沿海和長江等水域設立船舶大氣污染物排放控制區，按照國際公約要求對進入中國水域的國際航行船舶

實施船用燃油硫含量限制措施，推動船舶使用清潔能源和加裝尾氣污染治理裝備，建立船用低硫燃油供應保障和聯合監管機制。執行船舶水污染物排放控制國家強制性標準，推動港口船舶含油污水、化學品洗艙水、生活污水和垃圾等接收處置設施建設，開展港口粉塵污染控制。

(4) 加大生態保護與修復力度

嚴格落實生態保護和修復。交通基礎設施建設實行「避讓、保護、修復」模式，推進生態選線選址，強化生態環保設計，避讓耕地、林地、濕地等具有重要生態功能的國土空間，例如在鐵路、公路、航道沿江沿線開展綠化行動，提升生態功能和景觀品質。

2. 中國綠色運輸減量策略

中國 2018 年的交通排放量佔全球的 11%，僅次於美國的 21%。與電力和工業領域排放量的下降趨勢不同，中國的交通排放量仍在上升。依目前的趨勢持續下去，2050 年中國將成為全球道路貨運活動最多的國家。

中國規劃在 2030 年前達到碳排放峰值，並在 2060 年實現碳中和。世界資源研究所(WRI)評估中國減少運輸排放的可能路徑，及不同減碳政策的成本效益。例如《2030 年前碳排放達峰行動方案》、《新能源汽車產業發展規劃(2021-2035 年)》和《節能與新能源汽車技術路線圖 2.0》，中國道路運輸排放量可望在 2030 年前達到峰值，石油消耗量則在 2027 年前達到峰值。若進一步推動結構性變革政策(如提升車輛載客率，並從私家車和卡車轉向巴士和鐵路等低排放模式)，溫室氣體排放峰值可提前至 2025 年，石油消耗峰值可提前至 2024 年。

而中國運輸部門的當前目標是在 2024 年之前將二氧化碳排放強度較 2020 年降低 5%。這一目標是中國政府在《2024-2025 年節能降碳行動方案》中明確提出的。為了實現這一目標，將重點推廣電動和混合動力汽車，並鼓勵使用低碳燃料，如 E10(含 10%乙醇的汽油)。在中國《2024 年政府工作報告》中，有關交通運輸節能減碳行動提出以下策略：

(1) 低碳交通基礎設施建設

提升車站、鐵路、機場等用能電氣化水準，推動非道路移動機械新能源化，加快國內運輸船舶和港口岸電設施匹配改造。鼓勵交通樞紐場站及路網沿線建設光伏發電設施。加強充電基礎設施建設。因地制宜發展城市軌道交通、快速公交系統，加快推進公交專用道連續成網。完善城市慢行系統。

(2) 交通運輸裝備低碳轉型

加快淘汰老舊機動車，提高營運車輛能耗標準。逐步取消新能源汽車購買限制。落實新能源汽車通行支持政策。推動公共領域車輛電動化，有

序推廣新能源中重型貨車，發展零排放貨運車隊。推進老舊運輸船舶報廢更新，推動開展沿海內河船舶電氣化改造工程試點。到2025年底，交通運輸領域二氧化碳排放強度較2020年降低5%。

(3) 最佳化交通運輸結構

推進港口疏運鐵路、物流園區及大型工礦專用鐵路建設，推動大宗貨物及集裝箱中長距離運輸「公轉鐵」、「公轉水」。加快發展多式聯運，推動重點行業清潔運輸。實施城市公共運輸優先發展戰略。加快城市貨運配送綠色低碳、集約高效發展。到2025年底，鐵路和水路貨運量分別較2020年成長10%、12%，鐵路單位換算周轉量綜合能耗，較2020年降低4.5%。

3. 中國綠色運輸發展進展

(1) 推廣新能源汽車

自2010年以來，中國政府出臺一系列支持新能源汽車政策，包括購車補貼、稅收減免和牌照優惠等。至2023年，中國的新能源汽車保有量已突破1,300萬輛，成為全球最大新能源汽車市場。這些政策不僅促進電動車普及，也帶動了相關產業鏈發展，包括電池、充電樁和電動車製造業。2020年發布《新能源汽車產業發展規劃(2021-2035年)》，明確提到2035年新能源汽車將成市場主流，公共領域用車實現全面電動化。

此外，地方政府也積極響應。例如重慶市於2024年推出了《重慶市新能源汽車便捷超充行動計劃(2024-2025年)》，計劃在兩年間建設多個超級充電站，以解決充電難題。上海市和廣東省佛山市建立了氫能園區，並試點運行氫燃料公車和物流車。

(2) 公共運輸的綠色化與智慧化

中國城市化進程加速，公共運輸需求不斷增加。以北京和上海為例，已經實現公車全面電動化，並計劃在未來幾年內將地鐵能源轉換為再生能源。截至2019年底，全國新能源公車數量已達41萬輛，占總數59%。另外，引入大數據和人工智慧至公共運輸系統，例如智慧公交系統根據實時交通流量調整運營路線和班次，智慧地鐵系統通過人流量監測和自動化調度，提高使用效率，並減少因交通擁堵引起的碳排放。

(3) 鐵路貨運與多式聯運

鐵路貨運適合大宗商品和長距離運輸，中歐班列的開通實現了亞洲與歐洲之間的高效物流連接，並降低航空和公路運輸的碳排放。多式聯運則是通過鐵路、公路、水運和航空等多種運輸方式的無縫銜接，提高物流效率並降低能源消耗。如長三角地區已建立了多個多式聯運樞紐，實現了港口與內陸城市之間的高效物流連接。

(4) 都市計劃與綠色旅遊

中國許多城市正在重新設計城市交通網絡，增加自行車道和步行道的比例，並最佳化公共運輸的佈局。例如深圳市在十年中增加超過500公里的自行車道，並建設了多個綠色交通示範區。同時，共用經濟模式的興起也為綠色交通提供了更多選擇。共用單車和共用電動車的普及，使得短途運輸更加便利和環保。

儘管中國在推動綠色低碳交通方面取得了顯著成效，但仍面臨一些挑戰。首先，新能源汽車的普及率在農村地區和三四線城市仍然較低，主要原因是充電基礎設施不完善。其次，氫能源車成本較高，限制了其大規模應用。此外，智慧交通技術仍處於初期階段，需要更多技術創新。未來，中國需要進一步加強政策支持 and 技術研發，特別是在新能源技術、智慧交通和綠色基建方面。同時，加強國際合作，學習其他國家的成功經驗，例如歐盟在推動跨國鐵路運輸和新能源汽車標準化的做法，對中國綠色運輸發展具重要的借鑒意義。

三、台灣運輸部門淨零排放路徑建議

極端氣候事件如颱風、洪水等可能對運輸系統造成了嚴重影響。例如颱風的強降雨常導致公路和鐵路毀壞，影響交通系統正常運行。提醒我們在應對氣候變遷時，不僅需要考慮減少排放，還需要提升基礎設施的抗災能力與韌性。因此，2050 淨零排放的發展策略中，我國運輸部門的綠色轉型實現，不僅止於減少排放，還希望能夠提升運輸系統的韌性，使其更好地應對未來的氣候變遷挑戰。

(一) 台灣運輸部門課題、現況

2021 年運輸部門排放量占全國總排放量的 11.94%。其中，公路運輸占比達 96.82%。而小客車和機車是最主要排放源，分別占運輸部門排放的 49.26% 和 13.57%。大、小貨車的排放也不容忽視，分別為 16.27% 和 13.72%。而台灣運輸部門減碳面臨以下多重挑戰。

首先，私人運具的高使用率不僅增加了交通擁堵，還導致大量溫室氣體排放。由於私人運具對化石燃料的依賴很高，電力僅占 1%。意味著在短期內，完全依賴電動車來實現減碳是困難的。因此，提升現有燃油車輛的能源效率，並推動混合動力車普及，是一個可行選擇。

再者，台灣步行和自行車旅次數僅占總旅次 11%，低於全球主要城市的平均水準。反映出都市規劃和交通政策上，仍需進一步努力來提升綠色運輸的吸引力。

另外，油價難以市場化也是減碳過程中的挑戰。油價波動直接影響著私人運具的使用量，當油價較低時，民眾更傾向於使用私人交通工具，這對減碳目標的實現造成了阻礙。因此，政府需要制定合理的油價政策，以引導消費者選擇更環保的交通方式。

(二) 台灣運輸部門現行策略

1. 轉型願景

運輸轉型是實現 2050 淨零排放目標的重要組成，涵蓋運具電動化、綠運輸、私人汽機車管理、能源效率等多方面。

首先，政府計畫提高電動車市場佔有率，創造國內市場需求，並推動製造在地化和使用環境的完善(詳如本節第 2 小節)。並呼應下面的綠運輸策略，計畫在 2030 年前實現市區公車的全面電動化。

綠運輸方面，首先是提升公路公共運輸服務的便利性和吸引力(詳如本節第 3 小節)，如票價優惠和跨運具票證整合等。其次是提升軌道運輸的服務品質，鼓勵使用高效的軌道運輸。智慧運輸(智慧交通信號控制、實時交通資訊發布和智慧停車管理等)也是重要方向，通過系統整合提高效率，減少碳排放。

抑制私人運具使用率的成長，包括提高油價以反映其外部成本，並通過宣導來改變公眾的交通習慣，如鼓勵一週內有幾天不使用私人交通工具，並推廣視訊會議和遠程工作等方式。

最後，在能源效率方面，包括制定更嚴格的燃油效率標準和推動技術創新，以確保現有車輛排放能夠達到最低，並根據不同車種制定相應的能源效率規範。

2. 運具電動化的推動目標與策略

(1) 運具電動化之推動目標

通過補助換購電動車輛，帶動市場需求，並調適車輛管理法規，以創造適合電動車使用的環境。措施旨在降低消費者購買電動車門檻，促進電動車市場成長。其次，完善使用環境配套是推動電動化的重要策略。這包括建置充換電設施與場站，提供電動車友善措施及誘因。另將推動相關產業升級轉型，促進關鍵零組件在地製造。此外，交通部、經濟部及環境部等多個部會將協同推進運具電動化策略的實施。

(2) 推動具體計畫及策略

- A. 市場推動方面，政府將加強與企業的合作，鼓勵企業加大對電動車和無碳運具的投資力度。這包括支持企業進行技術創新和產品開發，並通過政策激勵和市場引導，促進電動車的普及和應用。
- B. 環境配套方面，政府將推動充電設施的數量提升，並最佳化充電設施相關規定，提高充電設施設置的普及性，降低轉換電動車的門檻。並計畫推動充電設施智能化，以提升充電效率和用戶體驗。
- C. 產業技術升級轉型方面，將推動運具相關產業升級轉型，發展在地電動運具生產、製造與維修量能，以及培植開創新興技術領域。

D. 公正轉型方面，政府將配合教育訓練等培力計畫，協助從業人員技術能力轉型，與運具電動化發展接軌。

E. 平衡城鄉區域方面，政府將兼顧偏鄉運具轉型特性，尋找適合當地的低碳運具導入。

3. 第五期公運計畫「公路公共運輸永續及交通平權計畫(114-117年)」

交通部自 99 年開始辦理公路公共運輸計畫(簡稱公運計畫，詳見圖 6-2)，迄今辦理四期計畫，在中央、地方及業者合作下，已顯著改善公車之軟硬體設備及服務品質；尤其是資源較不充足的縣市，在增加路線、車輛、智慧候車亭等方面都有相當成果。公車載客量從 98 年至 108 年間成長 20%，扭轉運量下跌趨勢。

惟 109 年起受疫情影響運量大幅下滑，至 111 年下半年疫情對公共運輸之直接衝擊才逐漸淡去，然而民眾旅運習性已明顯改變，加上疫情期間公車駕駛員流失問題尚未完全消除，使得公車載客量回升速度緩慢，以 113 年 4 月為例，市區公車運量相較疫情前 108 年同期仍有 19% 跌幅，公路客運則仍有 38.3% 跌幅。

因此交通部將在 114-117 年推動第五期公運計畫，包含 34 項行動方案，四年經費合計新臺幣 200 億元資源，協助公車業者在既有基礎下持續提升服務品質與競爭力並擴充服務量能，以利促進低碳與綠色運輸推廣以及落實人本與交通平權理念等重要政策。

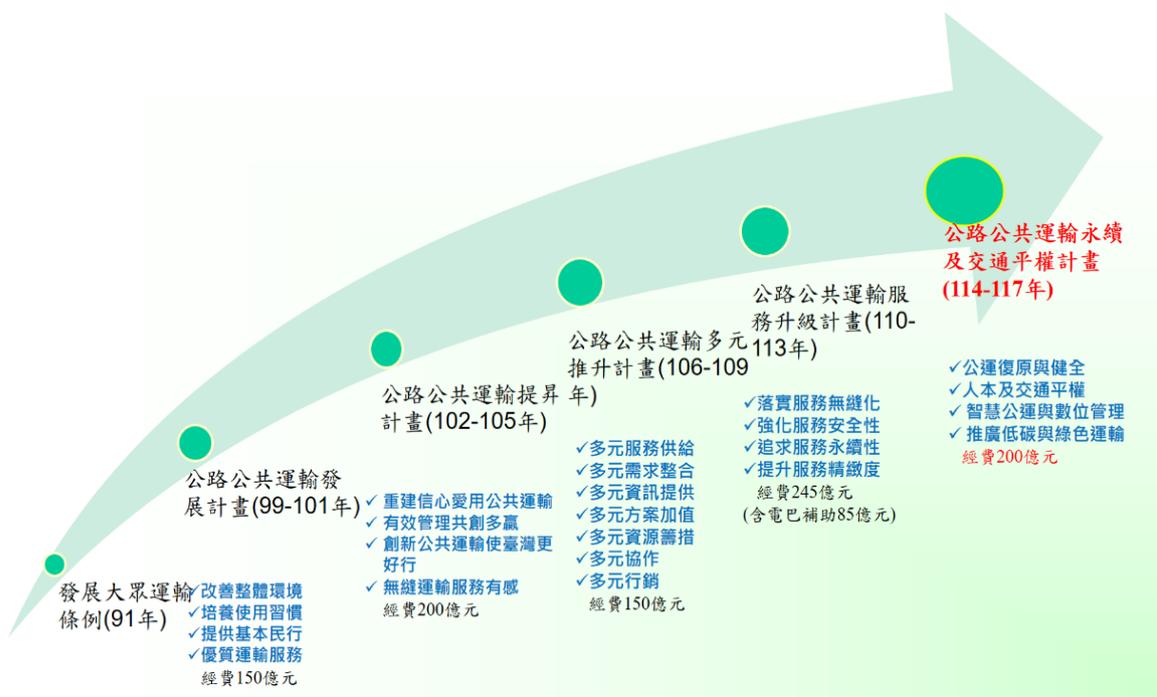


圖 6-2、台灣歷年公路公共運輸計畫

(三) 台灣運輸部門淨零排放路徑規劃建議

1. 主要國家運輸政策比較

(1) 共同推動方向

各國除設立 2050 年長期碳中和目標外，亦設立的階段性目標，旨在確保減少溫室氣體排放進程，並協助檢討政策方向。

在策略上，推廣清潔能源運具為各國減少運輸部門碳排放的重要策略之一。為了促進電動車和氫能車的普及，各國制定多項獎勵措施，包括稅收優惠、購車補貼、充電基礎設施建設等。

提高公共運輸使用率是減少個人交通碳排放的重要手段。各國都積極投資公共運輸基礎設施的建設和升級，以提升其服務質量和覆蓋範圍。措施包括擴大地鐵和輕軌網絡、增加公車路線、提升班次頻率及改善乘客體驗等。此外，公共運輸最佳化還有助於改善城市整體交通狀況，提升城市宜居性。許多城市還在探索智慧交通系統應用，以提高交通運行效率，減少能源消耗。

科技創新和基礎設施建設是實現運輸部門淨零排放的重要支撐。這包括充電站、氫能基礎設施的完善，及前述智慧交通系統的開發。這些技術不僅能提高運輸效率，還能減少交通事故和堵塞，進一步促進運輸部門的永續發展。

綜合上述，各國在核心目標和策略上有著共通的理念與努力，其的經驗和教訓可以相互借鑒。其擴大合作將有助於實現全球的碳中和目標，並為未來的永續發展鋪平道路。

表 6-6、主要國家運輸部門淨零策略規劃歸納

策略措施	內容
零碳目標	所有國家均設立 2050 年實現碳中和的目標。
短期減量目標	各國均設定中期減量目標，例如韓國要求 2030 年減少 35%，美國希望達成 50%。
推廣清潔能源運具	各國均重視電動車及氫能車的推廣，並制定相關的補助和激勵措施來促進環保車輛的使用。
大眾運輸系統的發展	各國都強調提高公共運輸的使用率，並計劃擴大公共運輸的覆蓋範圍，以減少個人交通帶來的碳排放。
科技創新與基礎設施建設	各國均提到需要投資於相關技術和基礎設施建設，以支持清潔能源的轉型。

資料來源：本研究整理。

(2) 策略差異比較

雖然各國的核心理念上存在相似之處，但在具體策略上卻有著顯著差異，反映了各國在應對氣候變遷和不同需求和挑戰。透過對差異比較(可見表 6-7)，吾人可更好地理解各國背後的考量。

表 6-7、主要國家運輸部門個別推動策略比較

	具體政策法規	運具使用	低碳燃料	運輸需求管理	財務與獎勵措施
美國	1.2030 新車 50% 零排放 2.各州自訂更嚴格標準 3.CAFE 燃油效率標準	1.汽油、柴油為主 2.電力逐步提升 3.生質燃料應用	1.生質燃料配比規定 2.可再生燃料標準 3.氫能示範計畫	1.彈性工時 2.HOV 車道 3.停車管理 4.共享運具	1.電動車稅收抵免 2.充電設施補助 3.舊車汰換獎勵 4.州政府額外補助
歐盟	1.2035 禁售燃油車 2.Euro 7 排放標準 3.碳邊境調整機制	1.積極發展電動化 2.氫能技術研發 3.生質燃料推廣	1.RED II 再生能源指令 2.航空生質燃料規範 3.氫能基礎建設	1.低排放區域 2.擁擠收費 3.公共運輸優先 4.自行車路網	1.購車補助 2.碳稅制度 3.基礎建設投資 4.研發補助
英國	1.2030 禁售燃油車 2.2035 全面零排放 3.交通十點計畫	1.電動化轉型 2.氫能發展 3.替代燃料研究	1.充電網絡建設 2.氫能基礎設施 3.生質燃料標準	1.低碳區域規劃 2.擁擠收費 3.公共運輸整合	1.零排放車補助 2.充電設施補貼 3.研發資金支持
日本	1.2035 全面電動化 2.次世代車輛標準 3.氫能社會規劃	1.高效率內燃機 2.混合動力技術 3.氫能推廣	1.氫能基礎建設 2.生質燃料研發 3.合成燃料開發	1.大眾運輸導向 2.緊密城市規劃 3.停車管制	1.節能車補助 2.充電設施補助 3.氫能設施補助 4.研發投資
韓國	1.2030 新車 30% 零排放 2.氫能經濟發展 3.綠色成長戰略	1.發展氫燃料電池 2.電動車推廣 3.傳統燃料轉型	1.氫能車推廣 2.生質燃料研發 3.再生能源整合	1.智慧交通系統 2.公共運輸最佳化 3.共享 mobility	1.購車補助 2.氫能設施建設 3.研發資金 4.稅收優惠
中國	1.2035 新能源車主導 2.雙積分政策 3.國六排放標準	1.電動車為主 2.混合動力發展 3.氫能試點	1.充電網絡建設 2.換電模式推廣 3.氫能示範城市	1.限行管制 2.公共運輸優先 3.共享平台管理	1.購置補貼 2.免徵購置稅 3.充電設施獎勵 4.地方配套補助
台灣	1.2040 新車全面電動化 2.公車電動化 3.機車電動化	1.汽柴油為主 2.電動化轉型 3.生質柴油推廣	1.電動車充電網 2.公車電動化 3.生質柴油添加	1.大眾運輸補貼 2.停車收費 3.汽燃費徵收	1.購車補助 2.充電設施補助 3.舊車汰換獎勵 4.使用優惠

資料來源：本研究整理。

A. 政策配套的差異

歐盟有著全面的框架，「55方案」規範2035年禁售燃油車，並要求2030年重型車輛減碳30%；同時將運輸部門納入碳定價體系，展現出強而有力的政策組合。美國則因為其聯邦體制，拜登政府雖提出2030年電動車市占率50%的目標，但各州保有較大的自主權。如加州即實施更積極的零排放車輛規定；而聯邦政府則主要透過車輛能效標準(CAFE)和稅收優惠等措施推動低碳轉型。英國制定明確的階段性目標，2030年禁售純燃油車，2035年起僅允許零排放車輛銷售，並搭配完整的基礎建設規劃。日本採取產業政策導向的管理方式，透過「綠色成長戰略」推動運具電動化和氫能發展，特別強調技術研發和產業升級。韓國亦將運具零排放與產業發展策略緊密結合。中國採取強制性與激勵性並行的管理模式，一方面引導車廠轉型，一方面實施嚴格的車輛能效標準。台灣則以2040年公務車和公車全面電動化為目標，透過補助和示範推動政策。

整體而言，各國政策法規雖然目標一致，但在實施路徑和時程規劃上因地制宜，反映出各自的政經環境特色。

B. 運具與燃料選擇的差異

歐盟與英國均透過嚴格的禁售政策與車輛能效標準來推動低碳運具的發展；低碳燃料上，歐盟積極發展生質燃料，制定明確的混合比例目標，英國則採取多元策略，並設定明確的化石燃料淘汰時程。美國則採取彈性的做法，雖也設定2035年新車需達到零排放的目標，但允許部分混合動力車的銷售，且各州可依據自身情況調整實施進度。燃料方面採行技術中立原則，亦投入相當資源發展生質燃料，並特別關注重型運輸領域的低碳解決方案。日本特別強調氫燃料電池技術的發展，除建立完整的氫能與氫能車輛供應鏈外，也支持混合動力技術的轉型應用，展現出較為漸進的轉型策略。韓國則採取雙軌並行的策略，則同時推動電動車和氫燃料電池車，並在商用車領域特別著重氫能應用。中國則聚焦於純電動車的發展，同時也布局氫能重型車輛應用，特別是在公共運輸和重型運輸領域。台灣規劃2040年公務車和公車全面電動化，2030年機車全面電動化，並透過補助政策推動電動運具的普及。

整體而言，不管是運具還是低碳燃料的選擇上，各國時程均採取階段性規劃，而技術路徑則反映出各國產業結構、市場條件、能源結構和地理條件的不同考量。反映出各國在面對相同減碳目標時，會根據自身條件選擇最適合的技術路徑。

C. 運輸需求管理策略

歐盟採取較為全面且強制性的管理措施，包括在多個城市實施低排放區

域管制，並推動擁擠收費等經濟工具，同時也透過停車管理和車輛限制方式，調節市區交通流量。美國則採取較為彈性的做法，主要透過高承載車道優先通行權，及在部分城市實施擁擠收費等措施，鼓勵民眾共乘或使用大眾運輸工具。英國則是以系統性方式進行管理，包括實施電子道路收費系統、車輛配額制度，及公共運輸網絡等。日本特別重視大眾運輸系統的整合，引導民眾使用公共運輸工具。韓國則採取較為多元的管理措施，包括實施差別費率停車收費、低排放區域管制，及提供共享運具優惠等方式，降低私人運具的使用需求。中國在大城市普遍採取車牌限號或拍賣制度，並實施差別化的停車收費政策，同時也積極推動共享運具服務。台灣則是透過停車收費差別費率、汽機車總量管制等措施，並持續強化大眾運輸服務。

綜上，歐美國家結合經濟誘因和管制措施的結合，而亞洲國家則傾向採用直接的限制措施，並特別重視公共運輸系統。各國的做法雖有差異，但都朝向減少私人運具使用、提升運輸效率的共同目標邁進。

D. 財務及獎勵措施

歐盟採取「獎勵」與「管制」雙軌並行的策略，除了提供購車補助外，也透過低排放區域管制和擁擠收費等經濟工具來推動轉型。美國則以《降低通貨膨法案(IRA)》為核心，提供電動車補助，同時允許各州根據地方需求制定額外的獎勵措施，展現出更具彈性的財政支持模式。日本除提供新能源車購置補助外，特別著重於氫能基礎設施的財政支持，並持續對混合動力技術提供補助。韓國採取全方位的補助政策，同時支持車輛購置和充電設施建置，特別強調氫能車輛的推廣補助。中國實施多層次的補助方式，包括中央與地方政府的購車補貼，並投入大量資源於充電基礎設施建設。台灣則採取涵蓋了電動車購置、充電設施建置，及加強對公共運輸電動化的各類財政支持，同時也提供租稅優惠措施。

整體而言，各國都提供購車補助作為基本措施，但在補助力度、配套措施和特定技術支持上各有側重。歐美國家傾向採用市場機制和管理工具相結合的方式，而亞洲國家則普遍採取更直接的補助方式，並結合產業發展策略。

總上所述，各國運輸部門淨零排放政策有許多共同的目標和理念，但在具體的政策法規、能源使用、技術推廣和資金支持等方面卻存在不小差異。反映了各國在面對氣候變遷的挑戰時，根據自身的社會經濟背景和環境需求所制定的適應性策略。未來，各國在推進運輸部門的淨零排放政策時，應該加強國際合作，互相學習借鑒，並根據各自的特點和需求，制定更加符合實際的政策措施。

2. 政策方向建議

為應對減碳挑戰，運輸系統需引進更高效的減碳技術和政策措施，政策制定、技術應用和社會參與。運具電動化和無碳化是實現減碳目標的關鍵。這需要政府制定嚴格的車輛效能標準，並提供經濟激勵來促進電動車的普及。此外，應持續鼓勵社會各界的參與，一方面通過教育宣導來促進行為改變，改善公共運輸基礎設施和服務質量來吸引更多人使用公共運輸，從而減少私人運具的使用；另一方面將鼓勵運輸業者自主進行碳盤查，制定其減碳目標，並導入綠色管理系統，以提高整體運輸效率，降低運輸部門的碳排放。

在推動低碳交通區方面，這些區域將限制高排碳車輛的通行，鼓勵使用電動車、油電混合車或氫能車等。低碳交通區的設立需要中央和地方政府的協力合作，通過修訂相關法規和制定自治條例來支持低碳交通區的發展。地方政府可以根據當地的特點，劃定低碳交通區的範圍和實施細則，並監督其執行。

展望未來，台灣綠色運輸發展將更多地依賴於技術創新、政策支持和社會意識的提升。自動駕駛技術和共乘模式可能成為未來綠色運輸的重要組成，進一步提高交通效率，降低環境負擔。故政府可以通過制定長期的綠色運輸發展計劃，明確目標和路徑，並監督其實施。未來還需要加強與國際社會的合作，參與全球減碳行動，並在技術和政策上進行交流和合作。這將有助於台灣在全球綠色運輸發展中發揮更大的作用，同時也為我國的經濟發展創造更多機會。

參考文獻

1. 日本國土交通省，2023 年版交通政策白皮書，https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/transport/sosei_transport_fr_000154.html。
2. 中華人民共和國生態環境部(2022)，中國應對氣候變化的政策與行動 2022 年度報告，中華人民共和國生態環境部。
3. 交通部(2023)，台灣 2050 淨零轉型「運具電動化及無碳化」關鍵戰略行動計畫。
4. 交通部運研所，運輸部門淨零排放與溫室氣體減量推動工作暨評估模型強化(1/2)，2023 年 12 月。
5. 曾佩如(2023)，「運輸部門 2050 淨零排放發展策略」，推動公共工程節能減碳經驗交流講習會-行政院公共工程委員會。
6. 經濟部國際貿易局全球碳規範指引，日本淨零排放政策，<https://netzeropolicy.com.tw/country/%e6%97%a5%e6%9c%ac/>
7. 經濟部國際貿易局全球碳規範指引，韓國淨零排放政策，<https://netzeropolicy.com.tw/country/%e9%9f%93%e5%9c%8b/>
8. 經濟部國際貿易局全球碳規範指引，歐盟淨零排放政策，<https://netzeropolicy.com.tw/country/%e6%ad%90%e7%9b%9f/>
9. European Commission (2023). Sustainable transport: rules to boost intelligent transport systems for safer and more efficient transport agreed. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_23_3101
10. ITF (2021), ITF Transport Outlook 2021, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/16826a30-en>
11. METI. (2021), *Overview of Japan's Green Growth Strategy Through Achieving Carbon Neutrality in 2050*, METI.
12. The United States Department of State. (2022). Driving the Clean Energy Transition: A Progress Report on Implementing U.S. Efforts to Advance Clean Energy.
13. UNFCCC, COP 28: What Was Achieved and What Happens Next? <https://unfccc.int/cop28/5-key-takeaways>
14. World Bank. (2021). *Maldives: Towards a Sustainable Net-Zero Future*. World Bank.

第七章、農業部門

許聖民⁵³、潘述元⁵⁴

一、前言

氣候變遷所帶來的極端氣候對農業部門之衝擊日益嚴峻，如何有效落實農業溫室氣體排放減緩與調適已成為全球農業部門亟需面對之重大挑戰。另一方面，隨著世界人口持續增長，糧食需求不斷攀升，如何在滿足糧食(農業)安全之原則下，同時實現農業部門之淨零排放，儼然成為一大挑戰。

於此國際趨勢下，美國、歐洲、英國、韓國、日本和中國等主要經濟體，已紛紛承諾碳中和目標，並為此制定相應減碳政策。這些政策不僅影響各國氣候行動，也在深刻地改變著國內的經濟結構、社會形態及生態環境。儘管各國因天氣條件、產業結構、地理分布、經濟發展等多種不同影響因子，導致農業部門政策存在些許差異，然而，各國仍有許多共通政策發展方向，可供吾人參考。在此背景下，本章將聚焦於各國在氣候目標和主要農業減碳政策方面的進展與挑戰，特別強調農業部門的角色。

農業不僅是全球糧食生產之基礎，亦是甲烷(CH₄)及氧化亞氮(N₂O)等溫室氣體排放之主要來源之一。因此，推動農業減碳政策對於實現國家及全球氣候目標具有重要意義。根據聯合國糧食及農業組織(FAO)報告，農業、森林和土地利用(AFOLU)的排放約占全球溫室氣體排放之23%。意味著，若要有效地減少全球排放，必須針對這些領域進行相應的改進。農業部門的減碳具體措施包括提高能源效率、減少化肥使用、改進土壤管理、推動再生能源的使用，及支持農業氣候技術的研發。此外，增強碳匯能力也是減少農業部門排放關鍵，例如透過擴大森林面積和恢復濕地來提升碳存儲潛力；然而，各國在推動農業減碳政策的過程中，不僅面臨技術挑戰，還需要充分考慮農民生計和糧食安全。唯有如此，才能在推動減碳的同時，維持農業生產力和糧食供應的穩定。

農業減碳政策的制定和實施不僅涉及環境問題的解決，也關乎糧食安全和經濟永續發展。因此，本章首先針對美、歐、英、日、韓和中國等主要經濟體，回顧其減碳目標與相關政策制定背景，深入研究各國在農業減碳的具體措施、成效及面臨的挑戰，將有助於找出如何在保持糧食安全的同時，推動低碳農業發展的最佳路徑。進而能夠替台灣的農業部門找出有效的減碳解決方案，進而對於全球氣候行動做出貢獻。

⁵³ 台灣綜合研究院研五所副所長。

⁵⁴ 台灣大學生物環境系統工程學系副教授。

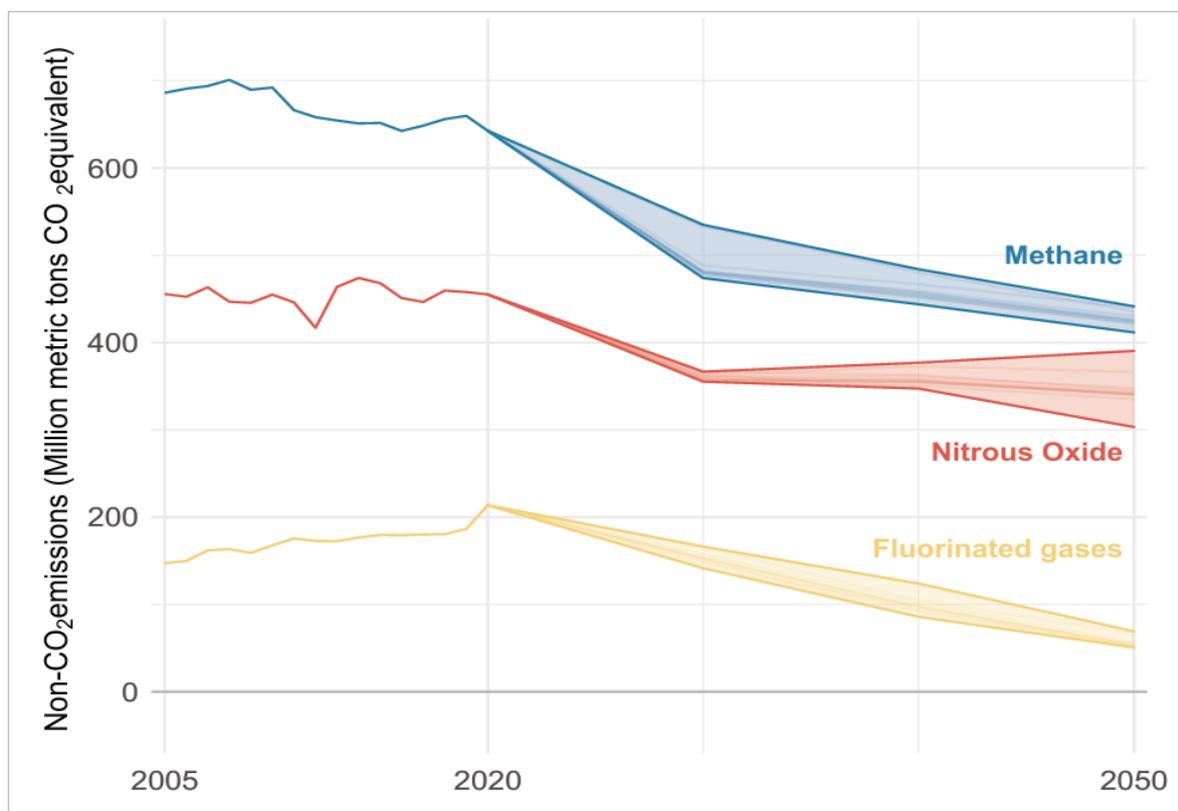
二、主要國家農業部門淨零排放路徑

(一) 美國

1. 美國農業部門淨零路徑

根據美國於 2024 年 4 月提送 UNFCCC 之國家溫室氣體盤查報告：2022 年農業部門約占美國溫室氣體排放量約為 11%，593.4 百萬噸 CO₂e (Mt-CO₂e)。其中，農地土壤排放約為 290.8 Mt-CO₂e，畜牧腸胃發酵排放約為 192.6 Mt-CO₂e 及畜牧糞尿排放約為 81.7 Mt-CO₂e。然而，由於農業部門的排放多為非二氧化碳溫室氣體，故第二章所勾勒的美國淨零排放路徑下各部門二氧化碳減排規劃，並沒有納入農業部門的減碳分配。

圖 7-1 為美國非二氧化碳溫室氣體減排路徑規劃。美國 2022 年農業部門共排放 593.4 Mt-CO₂e，其中 CO₂ 為 8.6 Mt-CO₂e，CH₄ 為 276.8 Mt-CO₂e，N₂O 為 308.0 Mt-CO₂e。在碳稅為每噸 100 美元的情境下，相較於 2020 年，農業部門在 2030 年將有 71.7 Mt-CO₂e 之 CH₄ 減排潛力(包含禽畜產業 70 Mt-CO₂e 及農田和稻米 Mt-CO₂e)；並在 2030 年將有 26.5 Mt-CO₂e 之 N₂O 減排潛力(包含農業土壤 8.8 Mt-CO₂e 及化肥 17.7 Mt-CO₂e)。由此可計算美國農業部門在 2030 年非二氧化碳溫室氣體的減排潛力約為 16.37%(相較於 2020 年)。



資料來源：The Long-Term Strategy of the United States: Pathways to Net-Zero Greenhouse Gas Emissions by 2050.

圖 7-1、美國 2050 年非二氧化碳溫室氣體減排路徑

2. 美國農業部門重要減碳政策與財源

美國農業部(USDA)推動之農業減碳措施包含了農業耕作及畜牧業養殖改變、消費型態改變、土地利用改變、促進土壤健康、改善養分管理等，並保護私人及公共的森林資源；此外，亦致力於提高能源效率、開發再生能源，並利用生物質作為燃料，以滿足供熱、製冷和電力需求。透過一系列自願性計畫和舉措，美國農業部預計到 2025 年每年可減少超過 120 Mt-CO₂e 的淨排放，相當於整體淨溫室氣體排放量之 2%。

2023 年 3 月白宮發布海洋氣候行動計畫，旨在協調聯邦政府與社會的海洋行動，包含以調適策略取代減緩，提供氣候變化解決方案、確保永續的魚類資源、產製生態系統狀態報告，及早預警氣候變化、評估主要魚類的氣候脆弱性及使用模擬工具制定有效的漁業管理策略。其重大措施有：

- (1) 擴大海洋風能產業：批准六個大型風電場，增加 10 GW 清潔能源，足以供電 350 萬戶家庭。
- (2) 減碳海洋運輸系統：投資美國港口 30 億美元，實現海洋運輸系統脫碳。
- (3) 增強社區適應能力：透過 2.6 億美元的資金保護沿海社區，並恢復海洋資源，近 4 億美元用於部落優先事項。

另外，USDA 規劃透過節約能源和水資源、實施再生能源項目、建設和運營新設施、減少固體廢物、採購商品和服務，及永續採購和運營新車隊來實現減碳目標。以下是目標及行動措施：

- (1) 100%無碳污染電力：透過 e-GRID，優先選擇可購買無碳污染電力(CFE)的區域，並作為安裝電源供應設施的地點。在 2030 年前達到 CFE 100%的目標，其中 50%全天候供應。
- (2) 100%零排放車輛：到 2035 年實現 100%零排放車輛(ZEV)的採購，包括 2027 年完成 100%輕型車輛的 ZEV 採購。
- (3) 淨零排放建築、園區和設施：USDA 目前運營三個淨零能源設施並持續建設更多。此外，透過增加員工在家辦公的職位、能源節約績效合約、提高運營效率和設備控制以提高其設施的用水及能源效率。
- (4) 減少廢物和污染：透過追蹤回收量、提高購買具有高回收率的材料、努力減少並正確處置有害廢棄物，以達成 2025 年前每年無害固體廢物分流率 55-50%，並在 2030 年前達成 70%。
- (5) 永續採購：透過審查招標文件，提高政府購買生物基產品要求之合適性。

⁵⁵ 分流率 (diversion rate) 意指可回收再利用、卻被丟棄的用材，從廢棄物中被分流出來；回收率 (recycling rate) 則指回收物佔整體垃圾製造量的比例。

- (6) 建立以氣候和永續為重點的聯邦勞動力：透過持續學習、專業認證、培訓課程和網絡研討會以及內部工作組和通訊等現有通訊渠道，提高員工實現 USDA 的永續目標。
- (7) 環境正義：USDA 將採取更多措施教育員工關於環境正義，包括氣候變化帶來不成比例的影響，以及減輕這些影響和促進利益公平分配如何與 USDA 的機構、計畫和活動相關。
- (8) 合作加速進展：USDA 正在建立和發展外部合作夥伴關係，以加速實現 E.O. 14057 目標的進展。2022 年優先行動包括與私部門、州和地方政府及聯邦政府內的各利益相關者建立合作夥伴關係。合作夥伴包括能源部、聯邦能源管理計畫、國家再生能源實驗室和總務管理局，這些機構將支持 USDA 繼續計畫、設計和執行其車隊的電氣化。

除上所述，USDA 現行改善環境、氣候、溫室氣體排放等政策，還包含「氣候智慧商品合作計畫」及美國 2022 年通過的《降低通膨法案》的部分政策。

(1) 氣候智慧商品合作計畫

- A. 為參與夥伴提供資金，以實施持續一至五年的大規模試點項目，創造使用農業氣候智慧方法生產的商品市場機會，並減少排放。
- B. 資助與激勵：透過試點項目資助合作夥伴，提供生產者和土地所有者實施氣候智慧生產方法的激勵，並測量、監測和驗證與相關的減排效益，推廣由此產生的氣候智慧商品。
- C. 目前 55 個州及地區參與該計畫，共 141 個專案，經費來源為 50% 聯邦投資及 50% 非聯邦基金，其中 135 個專案已在各州實施。
- D. 農產品與管理方法：涵蓋 102 個主要農產品和 202 個農地經營/管理方法，投入金額達 30.3 億美金。

(2) 降低通膨法案(Inflation Reduction Act)

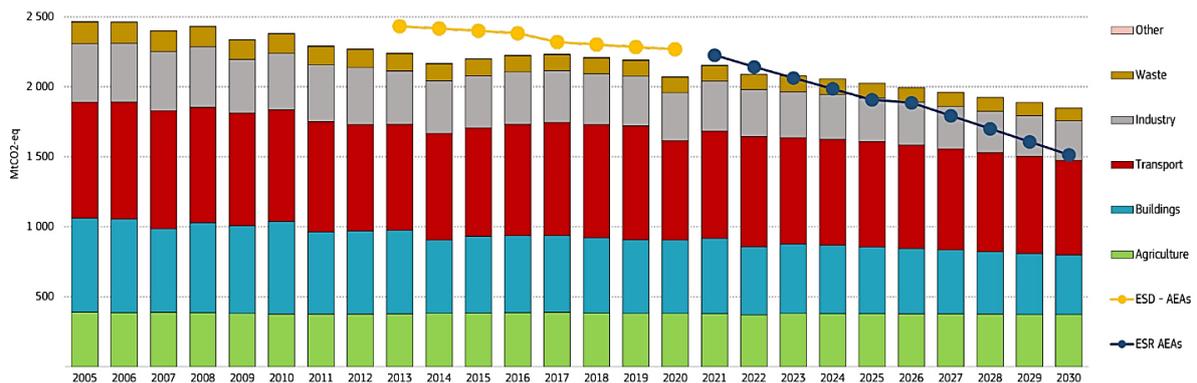
- A. 該法案撥款超過 180 億美元，用於氣候智慧農業和林業(CSAF)的溫室氣體減排和碳捕捉活動，涵蓋 USDA 現有的保育計畫，如 EQIP、CSP、ACEP 和 RCPP。
- B. 財政懸崖：規定所有項目或資金不得延續至 2031 年 9 月 30 日之後，促使將法案資源納入農業法案並建立永久基線。
- C. 根據 USDA 資料，法案在五年內額外提供 195 億美元於 USDA 的保育計畫，資金於 2023 年開始提供，具體分配如下：
 - (a) 環境質量激勵計畫(EQIP)：84.5 億美元
 - (b) 區域保育夥伴關係計畫(RCPP)：49.5 億美元

- (c) 保育管理計畫(CSP)：32.5 億美元
- (d) 農業保育地役權計畫(ACEP)：14 億美元
- (e) 保育技術援助：10 億美元
- (f) 測量、評估和量化的保育和溫室氣體減排投資：3 億美元

(二) 歐盟

1. 歐盟農業部門淨零路徑

根據歐盟 2023 年發佈的「氣候行動進展報告(Climate Action Progress Report, CAPR)」，受「減量責任分配規則」規範的部門，其排放趨勢及政策如圖 7-2。其中，歐盟農業溫室氣體排放量約占總量之 10%，其中約三分之二來自畜牧業，2005 年至 2021 年間每年平均減少 0.7 Mt-CO₂e。成員國的最新溫室氣體排放預測表明，在現有措施下，到 2030 年減排速度不會改變(比 2021 年減少 1%，即每年平均減少 0.6 Mt-CO₂e)。然而，採取額外措施後，農業的總體排放到 2030 年將會顯著下降(減少 5%，即每年平均減少 2.2 Mt-CO₂e)。



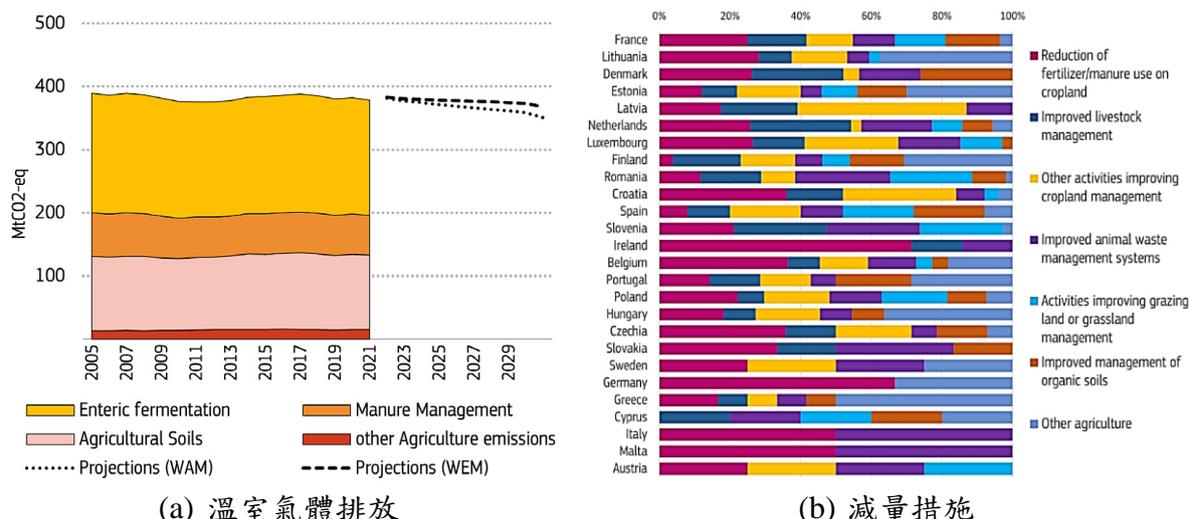
資料來源：European Commission (2023), Climate Action Progress Report.

圖 7-2、歐盟減量責任分配規則涵蓋部門之排放量

2. 歐盟農業部門重要減碳政策與財源

2023 年歐盟各成員國有超過 300 項減少農業部門排放的措施，占所有緩解型氣候變遷措施的 13%，主要措施包括減少耕地上的化肥和糞便使用(22%)及改善畜牧管理(16%)。這些措施大多得到新《共同農業政策(CAP)》的資金補貼，另一些則獲得國家資金的支持。農業部門溫室氣體排放及 2023 年農業部門減量措施如圖 7-3 所示。

以下根據 2022 年歐盟國家通訊第八版及雙年度報告第五版(Eighth National Communication and Fifth Biennial Report from the European union under the UN Framework Convention on Climate Change)之內容，整理歐盟農業部門相關溫室氣體排放管制政策。



資料來源：European Commission (2023), Climate Action Progress Report

圖 7-3、歐盟農業部門 2023 年溫室氣體排放及農業部門減量措施

(1) 硝酸鹽指令(Nitrates Directive)

該指令旨在保護水質及減少農業對環境的負面影響。要求成員國設立行動計畫，限制氮肥的使用和時機，改進管理以減少硝酸鹽的流失。此外，成員國必須設立監測網絡，定期報告水體的硝酸鹽濃度，並根據監測數據評估行動效果。指令還設置了施用氮肥的限制標準，確保農業活動不會導致水體污染，每個成員國應根據當地農業和環境條件制定具體的國家行動計畫，從而保護歐盟的水環境。

(2) 從農場到餐桌策略(Farm to Fork Strategy)

該策略旨在推動歐盟食品系統向永續方向轉型，以應對日益嚴峻的氣候和食品安全挑戰。目標包括 2030 年將農藥使用量減少 50%、肥料使用減少 20%；此外，策略還設定減少食品浪費目標，以促進公平的飲食模式。

(3) 有機農業行動計畫(Organic Farming Action Plan)

此為歐盟有機農業發展的綜合性戰略。著重於三大主軸：(1)市場需求增長、(2)生產和供應鏈優化，以及(3)政策和法律環境優化。計畫設定了明確的 2030 年目標，確保至少有 25%的歐盟農地轉向有機農業。

(4) 歐盟減少甲烷排放策略(EU Strategy to Reduce Methane Emissions)

農業為歐盟內最主要的人為甲烷排放來源之一，故委員會成立專家小組分析甲烷的生命周期排放指標，並推動最佳和現有技術應用，特別是針對瘤胃發酵的控制技術。此外，還強調了促進創新減排措施的採納，並提供支持工具，幫助農業生產者計算和改進農場的碳平衡，從而實現環境永續發展和氣候保護的雙重目標。

(5) 土地利用、土地利用變化和林業規則(LULUCF Regulation)

歐洲議會於 2023 年 3 月 14 日透過林業和其他土地使用的法規修正案，期藉由恢復濕地及沼澤、造林、停止伐林等手段，提升自然碳匯量。修正案提出於 2030 年達成「淨」移除至少 300 Mt-CO_{2e} 目標，並要求各成員國根據自身碳移除潛力，設定至 2030 年之自然碳匯目標；此外，歐盟更採用地理資訊系統和遙測技術進行碳排放/移除量之監測和核查，若未達標將啟動懲罰機制，成員國必須在 2030 年之目標上，增加額外減量任務，加碼額度是 2026~2029 年間溫室氣體排放量之 108%。

(6) 農業補貼政策

歐盟與農業相關的補貼政策為自 1962 起實施《共同農業政策(Common Agricultural Policy, CAP)》，透過補貼以鼓勵農業轉型，包括：農藥管理與減量、自願性有機耕作、於水土保持區保留 4%非生產性土地、增加土壤碳儲存等。歐盟已在 2021-2027 年預算中，預留 3,860 億歐元用於農業，其中，約有 2,910 億歐元用於歐洲農業擔保基金，照顧農民收入；另有 950 億歐元用於歐洲農村發展基金，為永續農村、積極氣候行動及自然資源管理提供資金。CAP 亦規定農民必須遵守氣候和環境友善做法，且各成員國有義務確保至少 35%的農村發展預算和至少 25%的預算專款專用於環境和氣候相關措施。

(7) 漁業減排政策

根據歐洲議會研究服務處(European Parliamentary Research Service)於 2023 年 6 月發表「歐盟漁業和水產養殖部門的能源轉型(Energy Transition in the EU Fisheries and Aquaculture Sector)」報告，能源是歐盟漁業和水產養殖業之主要成本項目，2022 年能源危機造成船用燃料上漲，暴露了該產業對化石燃料高度依賴之弱點，因此建議進行能源轉型，除降低成本外，也有助於實現歐洲氣候中和目標。歐盟委員會於 2023 年 2 月 21 日發布「漁業和海洋」一籃子計畫，包括歐盟漁業和水產養殖脫碳行動計畫的兩項重點：(1)提高中短期能源效率(包括降低燃料使用強度)；(2)逐步從化石燃料轉向再生和低碳能源。並設定階段性目標，2030 年化石燃料強度(每公斤陸地產品消耗的公升數)減少至少 15%，以實現 2050 年碳中和。而為加速轉型，該計畫提出包括刺激研發、勞動力技能發展及改善商業環境(包括融資機會)等措施。

綜合以上，歐盟於農業部門碳排減量措施及相關策略之減碳潛力彙整如表 7-1 所示。

表 7-1、彙整歐盟農業部門四種情境預估減碳潛力

情境	情境 1	情境 2	情境 3	情境 4	
	在不發生重大土地利用變化下，提高效率及碳封存	在沒有重大土地利用變化的情況下，改變生產和碳封存	在沒有重大土地利用變化的情況下，提高效率、改變生產和碳封存	在有土地利用重大變化下，改善效率、改變生產及碳封存	
減量假設	<p>實施集約式畜牧方式飼育場：2050 年乳牛及牛增加量為 50%；山羊及綿羊為 20%；飼料轉換效率為 40%(相較於 2015 年)</p> <ul style="list-style-type: none"> • 放牧場：2050 年集中程度增加 50%；飼料轉換效率為 40%(相較於 2015 年) 	<p>透過消費模式與貿易影響生產水準下降和生產結構變化</p> <ul style="list-style-type: none"> • 熱量消耗減少 10%(相較於 2015 年) • 肉類消費減少 75%(相較於 2015 年) • 反芻動物在肉類消費比例為 10%(相較於 2010 年) • 歐盟食品與肉品自給自足 	<p>實施集約式畜牧方式飼育場：2050 年乳牛及牛增加量為 50%；山羊及綿羊為 20%；飼料轉換效率為 40%(相較於 2015 年)</p> <ul style="list-style-type: none"> • 放牧場：2050 年集中程度增加 50%；飼料轉換效率為 40%(相較於 2015 年) 	<p>實施集約式畜牧方式飼育場：2050 年乳牛及牛增加量為 50%；山羊及綿羊為 20%；飼料轉換效率為 40%(相較於 2015 年)</p> <ul style="list-style-type: none"> • 放牧場：2050 年集中程度增加 50%；飼料轉換效率為 40%(相較於 2015 年) 	
	<p>農作物生產大幅增加，其中 30%源自於肥料使用</p> <ul style="list-style-type: none"> • 2050 年增加 50%(相較於 2015 年) • 1.5%用於生質能作物 		<p>農作物生產大幅增加，其中 30%源自於肥料使用</p> <ul style="list-style-type: none"> • 2050 年增加 50%(相較於 2015 年) • 1.5%用於生質能作物 	<p>農作物生產大幅增加，其中 30%源自於肥料使用</p> <ul style="list-style-type: none"> • 2050 年增加 50%(相較於 2015 年) • 1.5%用於生質能作物 	<p>農作物生產大幅增加，其中 30%源自於肥料使用</p> <ul style="list-style-type: none"> • 2050 年增加 50%(相較於 2015 年) • 1.5%用於生質能作物
	<p>農場生產廢棄物蒐集大幅改善</p> <ul style="list-style-type: none"> • 2050 年廢棄物收集率為 50% • 2050 年農產肉類廢棄物為 80% 		<p>農場生產廢棄物蒐集大幅改善</p> <ul style="list-style-type: none"> • 2050 年廢棄物收集率為 50% • 2050 年農產肉類廢棄物為 80% 	<p>農場生產廢棄物蒐集大幅改善</p> <ul style="list-style-type: none"> • 2050 年廢棄物收集率為 50% • 2050 年農產肉類廢棄物為 80% 	<p>農場生產廢棄物蒐集大幅改善</p> <ul style="list-style-type: none"> • 2050 年廢棄物收集率為 50% • 2050 年農產肉類廢棄物為 80%
	<p>透過消費模式與貿易影響生產水準下降和生產結構變化</p> <ul style="list-style-type: none"> • 熱量消耗減少 10%(相較於 2015 年) • 肉類消費減少 75%(相較於 2015 年) 		<p>透過消費模式與貿易影響生產水準下降和生產結構變化</p> <ul style="list-style-type: none"> • 熱量消耗減少 10%(相較於 2015 年) • 肉類消費減少 75%(相較於 2015 年) 	<p>透過消費模式與貿易影響生產水準下降和生產結構變化</p> <ul style="list-style-type: none"> • 熱量消耗減少 10%(相較於 2015 年) • 肉類消費減少 75%(相較於 2015 年) 	<p>透過消費模式與貿易影響生產水準下降和生產結構變化</p> <ul style="list-style-type: none"> • 熱量消耗減少 10%(相較於 2015 年) • 肉類消費減少 75%(相較於 2015 年)

			<ul style="list-style-type: none"> • 反芻動物在肉類消費比例為10%(相較於2010年) • 歐盟食品與肉品自給自足 	<ul style="list-style-type: none"> • 反芻動物在肉類消費比例為10%(相較於2010年) • 歐盟食品與肉品自給自足
	農田轉變為永久草地或森林時，才會產生與土壤碳儲量變化相關的緩解效益。	農田轉變為永久草地或森林時，才會產生與土壤碳儲量變化相關的緩解效益。	農田轉變為永久草地或森林時，才會產生與土壤碳儲量變化相關的緩解效益。	農田轉變為永久草地或森林時，才會產生與土壤碳儲量變化相關的緩解效益。
	假定釋放的土地主要用作臨時草地/牧場，其次用作森林和永久草地。LULUCF的所有土壤碳儲量變化均歸因於農業。	假定釋放的土地主要用作臨時草地/牧場，其次用作森林和永久草地。LULUCF的所有土壤碳儲量變化均歸因於農業。	假定釋放的土地主要用作臨時草地/牧場，其次用作森林和永久草地。LULUCF的所有土壤碳儲量變化均歸因於農業。	假定釋放的土地 80%改為森林、20%為永久草原。LULUCF的所有土壤碳儲量變化均歸因於農業。
結果	2050年相較於2010年減量約10%。	2050年相較於2010年減量約33%。	2050年相較於2010年減量約46%。	2050年相較於2010年減量約81%。

資料來源：IEEP(2019)。

(三) 英國

1. 英國農業部門淨零路徑

英國是第一個訂定 2050 年碳中和的 G7 國家。農業部門作為重要排放源，必須為實現目標做出貢獻。然而，英國尚未公布詳細之農業減碳時程，不過若從整體氣候政策來看，農業部門相關重要里程碑包括：

- (1) 短期目標：2030 年前實現大幅度減排，為 2050 年的最終目標打下基礎。
- (2) 中期評估：定期評估減排進度，並根據實際情況調整政策。
- (3) 長期願景：至 2050 年實現農業部門淨零排放，成為低碳永續產業。

2. 英國農業部門重要減碳政策與財源

英國在農、林、漁、畜等部門採取多面向之減碳策略，目標係協助農業部門在保持經濟效益之同時，達成淨零碳排放之目標：

(1) 農業、林業

A. 環境土地管理計畫(Environmental Land Management Scheme, ELMS)：該計畫在脫歐後推出，旨在用一套永續發展和生態保護的激勵機制來取代原歐盟 CAP 農業補貼模式。ELMS 推動農民和土地擁有人透過改善土地管理來促進環境保護、減少碳排、提升生態系統服務，並達成廣泛的氣候和生物多樣性目標。ELMS 由三部分組成：

- 永續農業激勵計畫(Sustainable Farming Incentive)：鼓勵農民採用永續耕作方法來管理農田和草地，以保護和增強自然資源。具體措施包括改進土壤質量以增強碳捕捉、鼓勵保護野生動植物棲息地，例如：田地邊緣草地、花卉草地等。
- 本地自然恢復計畫(Local Nature Recovery)：鼓勵更有針對性的生態保護行動。具體措施包括創建或恢復生態棲息地、泥炭地，進行河流和湖泊的修復行動。
- 景觀恢復計畫(Landscape Recovery)：針對大面積土地和農業企業進行大規模的景觀和生態恢復工作。具體措施包括恢復濕地、河流及森林來增強碳捕捉、透過連接分散的自然區域來促進野生動植物的遷徙、透過改變土地利用方式，減少土壤退化。

B. 農業創新與投資基金(Farming Innovation Programme and Farming Investment Fund)：是英國為推動農業技術創新和永續農業發展的主要資金計畫，為農民、農業技術企業、學術機構和其他利益相關者提供資金支持，幫助開發和應用創新技術(如使用低碳能源、安裝太陽

能設施、智慧農業技術投資等)。

- C. 樹木行動計畫(England Tree Strategy)：在 2050 年前大幅增加森林覆蓋率，以提升碳捕捉能力。計畫到 2025 年每年新增 3 萬公頃的森林，並提供補助鼓勵農民在農田中進行樹木種植。
- D. 林地減碳守則(Woodland Carbon Code, WCC)：WCC 為一自願減量機制，旨在促進林地碳補償項目，以支持樹木種植和森林管理，減少氣候變化影響。WCC 要求參與項目遵循特定標準並接受第三方驗證，生成可用於抵消排放的碳信用。除減少排放，WCC 還有促進生物多樣性、水質改善和社區參與等環境和社會效益。

(2) 漁業

英國環境、食品和農村事務部(Department for Environment, Food and Rural Affairs, Defra)於 2021 年資助《邁向淨零碳漁業(Towards Net Zero Carbon Fisheries)》計畫，針對英國漁業當前及過去之碳排放進行研究，並提出一未來漁業之減排路徑，包括：

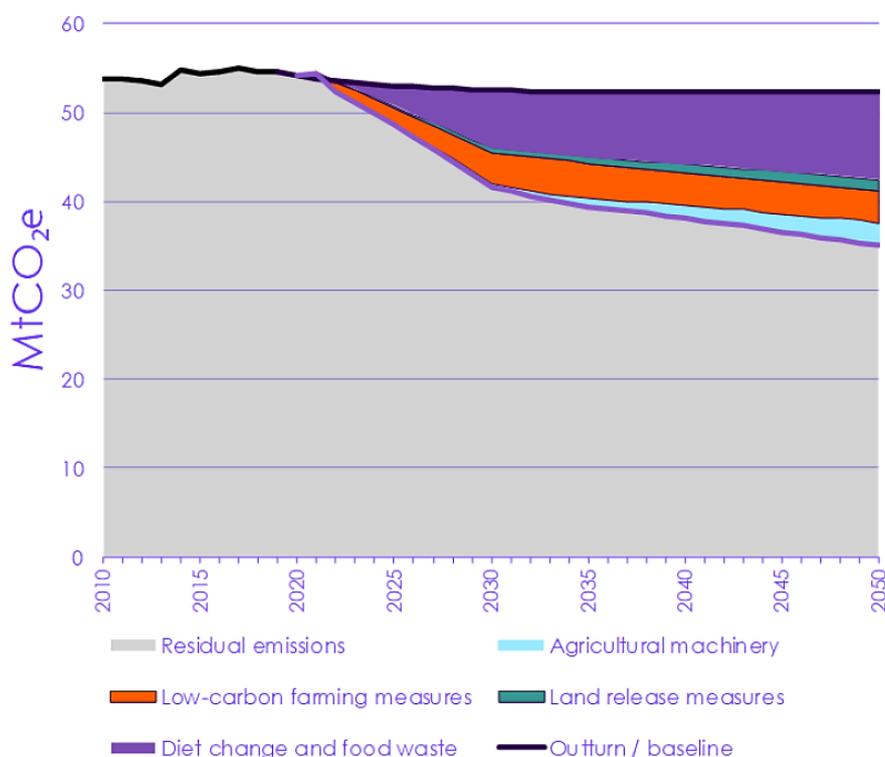
- A. 技術作為(Technological Changes)：實施可於短期內擴大的成熟技術，例如：轉向替代燃料(生物燃料、混合柴油-電力等)；納入可能在中期納入的新興技術，例如：電池或太陽能驅動的船隻；投資可能於長期內產生重大影響之新技術研發，例如：氫或氫驅動之船隻。
- B. 運營作為(Operational Changes)：利用運營和行為變化來適應燃料成本上升，包括引擎定期維護以確保燃油效率；減少航行速度和距離；減少多餘重量，及避免在惡劣天氣下出海。
- C. 政策作為(Policy Changes)：在短期內實現減排的有效方法(但可能不足以實現淨零排放)及長期措施，包括：燃料政策，例如補貼低排放設備或對高排放設備進行課稅(或取消補貼)；低排放設施激勵措施，例如，如果提供低排放船隻更好的價格或市場優惠。

(3) 畜牧業

在第六期碳預算計畫(CB6)中，亦針對畜牧業提出以下措施：

- A. 強化飼料產業管理：支持養殖動物精準飼餵，精準飼養需進行完善之飼料評估，包括：飼料成分、數量、動物飼料需求等，以提高飼料利用率，穩定動物腸胃發酵，促進動物健康，減少糞便中營養物等，有效減少溫室氣體排放。
- B. 推廣抑制甲烷排放之飼料產品：使用抑制甲烷排放之飼料產品，減少反芻動物腸胃甲烷之排放，例如：3-硝基氧丙醇(3-Nitrooxypropanol)、硝酸鹽添加劑等。

另根據英國氣候變遷委員會(UK Climate Change Committee, CCC)在 CB6 中，曾初步勾勒的農業部門淨零排放路徑(如圖 7-4)，透過以下的關鍵減碳措施，可使 2035 年農業部門的溫室氣體排放降至 40 Mt-CO₂e。



資料來源：CCC (2020)。

圖 7-4、英國農業部門溫室氣體減排項目淨零路徑

(1) 推廣低碳農業措施：

土壤(例如草肥和覆蓋作物)、牲畜(例如飲食和飼養)及廢棄物和糞便管理措施(例如厭氧消化)，至 2035 年減少 4 Mt-CO₂e 的農業排放量。

(2) 減少農業化石燃料使用：

農用車輛、建築和機械使用 18 TWh 化石燃料，總排放量為 4.6 Mt-CO₂e。假設從 2020 年代中期開始採用生質燃料和電動化方案，從 2030 年開始採用氫能源，到 2035 年將排放量將減少 2 Mt-CO₂e。

(3) 土地利用變化：

消費者和農民行為的變化可減少農業用地，同時保持高糧食生產率，至 2035 年可將農業溫室氣體年排放量減少 8 Mt-CO₂e，至 2050 年將增加到略高於 11 Mt-CO₂e，其中飲食變化最為顯著：

A. 改變飲食習慣：2030 年減少 20%的肉類和乳製品攝食量，2050 年進一步減少 15%的肉類攝入量，此類產品將被植物性食品替代，符合氣候大會 2050 年將肉類和奶製品消費量減少 20-40%的建議。此途

徑可減少牲畜數量和草地面積，到 2035 年每年減少 7 Mt-CO₂e，2050 年預估至近 10 Mt-CO₂e。

- B. 減少食物浪費：根據廢棄物與資源行動計畫，至 2030 年供應鏈的食品浪費將減少一半。使英國在 2035 年排放量減少近 1 Mt-CO₂e。
- C. 提高農業生產力：在 2035 和 2050 年減少 1 Mt-CO₂e 排放量。措施涵蓋農作物和牲畜，包括：透過改進農法和技術創新，考慮氣候影響，無需額外投入(例如化肥和農藥)即可提高作物產量。至 2050 年小麥產量從 8 噸/公頃增加至 11 噸/公頃(其他作物產量亦相應增加)；或透過提高草原生產力和輪牧等管理措施，提高牲畜放牧率。
- D. 改變園藝環境：於受控環境下將 10%之園藝生產轉移到室內，可減少碳、養分、土地和水足跡。
- E. 減少消費或進口高碳排食品：實現減排，不應以增加「碳洩漏」風險之食品進口為代價。

為實現目標，2035 年需轉變 9%農業用地以減少排放和固碳行動，2050 年則需要轉變 21%農業用地；此外，2035 年農業減碳投資需增加至 15 億英鎊(此投資亦將促進農業生態系服務功能價值，包括：健康、娛樂、空氣品質、防洪和生物多樣性等)。

(四) 日本

1. 日本農業部門淨零路徑

日本於 2020 年 3 月 30 日向聯合國提交國家自定貢獻(NDC)，並於 2021 年 4 月第 45 次「地球溫暖化對策推進本部會議」中，公布修正草案，具體目標為 2050 年達到碳中和、2030 年溫室氣體排放量較 2013 年減量 46%(原訂減 26%)。其中，農業部門減排目標為 14%。

日本內閣後於 2021 年 10 月 22 日通過《地球暖化對策計畫》，提出配合 2030 年較 2013 年減 46%目標的非燃料燃燒減排措施，包括：推動更換冷媒材料、減少家畜排泄物、廚餘及垃圾等產生的甲烷排放，以達成減少 37 百萬噸(-21%)二氧化碳當量的目標，另外透過植樹育林增加碳匯量，並透過海洋生物碳匯技術發展藍碳，目標減少 48 百萬噸的排放量。

2. 日本農業部門重要減碳政策與財源

日本農林水產省於 2021 年發佈「關於農業領域的氣候變遷與全球暖化對策(農業分野における気候変動・地球温暖化対策について)」，提出農業部門 2030 年減量目標：希望達成 2030 年較 2013 年減量 3.5%，其中包括實施「減少排放對策」達減碳量 0.2%之目標及實施「吸收源對策」達 3.3%之目標。關於日本農業部門重要減碳政策與財源，內容彙整說明如下：

(1) 農業減排策略

根據日本農林水產省農產局發佈「關於農業領域的氣候變遷與全球暖化對策」，引進溫室園藝節能設備(2030年減量155萬噸)和農業機械節能設備(2030年減量79萬噸)；將漁船改造為節能漁船(2030年減量19.4萬噸)；實施農業土壤相關減量措施，包括透過延長旱季減少稻田的甲烷排放(2030年減量104萬噸)及透過適當施肥減少二氧化氮排放(2030年減量24萬噸)。另一方面，日本致力推廣精準農業技術，最佳化水、化肥及農藥等投入品之使用，包括GPS引導設備、土壤感測器和數據分析，以提高生產力並減少對環境之影響；此外，支持將再生能源納入農業經營，鼓勵農民於自己土地上安裝太陽能電池板，並使用以農業剩餘資材為基礎之生質能源，以減少農業活動碳足跡。

(2) 畜牧業減排策略

改進飼料管理和畜牧糞尿管理及再利用，包括於飼料中使用添加劑來減少消化過程中之甲烷排放，以及採用厭氧消化系統來處理畜牧糞尿等。

(3) 漁業減排策略

根據經產省《2050年碳中和綠色成長策略(2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略)》及農林水產省公佈的《推動綠色食品體系戰略(みどりの食料システム戦略の推進)》，漁業減排策略如下：

A. 2050年碳中和綠色成長策略

2050年船舶(包括漁船)減量1,000萬噸CO₂排放之目標，包含占國內貨運量40%以上的沿海航運；此外，透過技術開發結合綠色創新基金等，目標至2025年啟動零排放船舶示範工程，並提前達成2028年零排放船舶商業化目標，相關措施如下：

- (a) 無碳替代燃料：在小型、短程船舶上廣泛使用氫燃料電池系統和電池推進系統，在大型、長途船舶上發展氫/氨燃料引擎。
- (b) 提高LNG燃料船舶效率：將LNG燃料與低速航行、風力推進系統等結合使用，以達成86%之CO₂減排率；此外，為推動利用碳回收甲烷實現實質上的零排放，開發具有溫室氣體減排效果的引擎技術，推動開發空間效率較高的創新燃料箱和燃料供應系統，並建立其生產基礎。

B. 推動綠色食品體系戰略

在水產養殖和漁業之採購部門分三個面向：(1)透過開發和改良種苗生產技術以及開發新的養殖對象魚種，推動使用人工種苗的完全養殖。(2)開發新型養魚飼料原料，從生餌轉換為配合飼料，並使用大豆等魚

粉替代原料。(3)促進漁業和養殖業用塑膠的資源循環，包括抑制廢塑膠的產生、開發回收技術及使用生物可分解材料。

在水產養殖和漁業之生產部門，著重於漁業脫碳，分為兩大政策：(1)永續利用水產資源，透過行政機構、研究機構和業者進行資源調查、評估資源量和漁獲強度，並設定防止過度捕撈的管理目標。(2)減少CO₂排放和碳匯政策，透過推進漁船動力的電氣化和氫燃料電池化，利用海草床作為CO₂吸收來源以增加碳匯潛力，並保護和再生海草床與潮間帶，實現有效的環境保護和碳吸存。

(4) 增強碳匯策略

A. 森林碳匯

《森林及林業基本計畫(森林・林業基本計畫，2021年6月15日閣議決議)》提出發揮森林多功能性及林產品供應與利用的目標，透過適當的森林整備與保護、木材利用等措施，確保並加強中長期森林吸收量，以達成2030年的溫室氣體減量目標(森林吸收量的目標約為3,800萬噸CO₂，占2013年總排放量2.7%)。

2008年推動日本抵換減量額度(Japan Verified Emission Reduction, J-VER)，並於2013年過渡至現行的日本減量額度(J-Credit)制度，透過減少溫室氣體排放、增加碳吸收或再生能源來獲得減量額度，其中規範有「森林經營活動」與「植林活動」兩種取得森林碳匯方式。目前每噸CO₂e的森林碳權約為5,000日圓，較各國平均價格8.03美元/噸(約800~1,084日圓)高出許多，原因包括日本與歐陸體系的林業機械近代化效率、地形、氣候、山坡斜率之差異。此外，日本每年約可獲得7.78百萬噸的森林碳匯量，但2021年實際取得J-Credit認證的碳匯僅有3.5萬噸，占潛在碳匯量的0.45%、全體碳匯認證量的1.5%，雖然目前與森林管理相關的碳匯認證可取得80%~100%的補助，但企業仍傾向選擇便宜的碳匯產品，森林碳匯還無法順利推進。

B. 土壤碳匯

透過連續施用堆肥和綠肥等有機物、及施用生物炭等土壤改良措施來增加農地及草地土壤中的碳吸收量，以達2030年減量850萬噸之目標，約占2013年度總排放量的0.6%。

C. 海洋碳匯

發展藍碳方法學，並將其納入溫室氣體排放和吸收清單的IPCC指導方針中。此外，加速藻類增殖技術、進行藻類耐性改良的品種研發，以提升CO₂吸收效率，計畫在2030年實施大規模驗證，將生產成本

從目前每公升 1,600 日圓降低到每公升 100 日圓。

於財源部分，日本政府提供各種財政獎勵措施來支持農民採用綠色手段，包括：補貼、低利率貸款及用於安裝再生能源系統和實施永續農業手段之補助計畫等。以補貼政策為例，2015 年《農業多功能化推進法(農業の有する多面的機能の發揮の促進に関する法律)》納入環境保護農業直接支付補貼政策(環境保全型農業直接支払交付金)，鼓勵農民採取對環境有益的農業實踐，減少農業生產對環境之衝擊，主要措施包括補貼有機農業、綠肥使用、農藥和化肥減量等環境友好型活動。補貼的對象是「農業者組織的團體」或「符合特定條件的農業者」，補貼項目及金額如表 7-2 所示。

此外，農林水產省於 2021 年 5 月推出「永續糧食系統策略(簡稱 MIDORI)」，是一項實現農、林、漁業部門之綜合計畫，目標應對氣候變遷、生物多樣性喪失和農村人口老化等挑戰。MIDORI 中關於補貼方面，為採用智慧農業技術之農民提供財政誘因，抵消設備和技術的初始成本；於低利貸款方面，日本政府提供特別貸款計畫，可用於支持智慧農業基礎設施和技術之投資。

表 7-2、日本環境保護農業直接支付補貼項目及金額

全国共通取組		交付単価 (国と地方の合計)
有機農業	そば等雑穀、飼料作物以外	12,000円/10a
	このうち、炭素貯留効果の高い有機農業を実施する場合に限り※1、 2,000円を加算。	
	そば等雑穀、飼料作物	3,000円/10a
堆肥の施用※2		4,400円/10a
カバークロープ		6,000円/10a
リビングマルチ (うち、小麦・大麦等)		5,400円/10a (3,200円/10a)
草生栽培		5,000円/10a
不耕起播種※3	〔前作の畝を利用し、畝の播種部分のみ 耕起する専用播種機により播種を行う取組〕	3,000円/10a
長期中干し※4	〔14日以上の中干しを実施する取組〕	800円/10a
秋耕※4	〔主作物の収穫後(秋季)に耕うんをする取組〕	800円/10a

※1 「炭素貯留効果の高い有機農業」を選択する場合、土壌診断を実施するとともに、堆肥の施用、カバークロープ、リビングマルチ、草生栽培のいずれかの取組を行っていただきます。

※2 堆肥の施用とは「炭素貯留効果の高い堆肥の水質保全に資する施用」のことをいいます。都道府県によって交付単価が異なる場合がありますので、都道府県、市町村にご確認ください。

※3 対象作物は、麦(小麦、二条麦、六条大麦及びはだか麦)、大豆です。

※4 対象作物は、水稻です。

資料來源：農林水産省(2020)，環境保全型農業直接支払交付金。

(五) 韓國

1. 韓國農業部門淨零路徑

農業部門約占韓國國內生產毛額之 1.8%，耕地占土地總面積之 16%。水稻是韓國最重要之農作物，稻田面積約 70.8 萬公頃(占 45%)；但近年來，蔬果、人參及芝麻等農作物用地比例不斷增加。

根據 2021 年 9 月頒布《應對氣候危機的碳中和綠色成長基本法》，韓國明訂 2050 年碳中和與 2030 年較 2018 年排放減少 40% 的目標。其中，亦規定農業部門 2030 年將排放量從 2018 年之 2,470 萬噸二氧化碳當量減少到 1,800 萬噸，減少 27.1%。

2. 韓國農業部門重要減碳政策與財源

上述目標將透過跨部門的多項減排策略來實現，涉及農業、食品和農村事務部以及海洋事務和水產部。根據韓國《碳中和綠色成長推動戰略》，韓國將轉型為低碳結構農業，實現農業、畜牧業和漁業之永續發展，其減量措施包含：

- (1) 農業：利用數位技術推廣智慧農業，積極推廣低碳農業技術，例如水田水份管理和氮肥減量等。
- (2) 畜牧業：開發使用低甲烷、低蛋白飼料；透過基於 ICT 科學管理，改善飼料和其他畜牧結構等。
- (3) 漁業：開發使用 LPG、混合動力等低碳/零碳漁船；利用水產養殖廢水發電；擴大水產養殖/海產品加工設施中之智慧能源管理等。

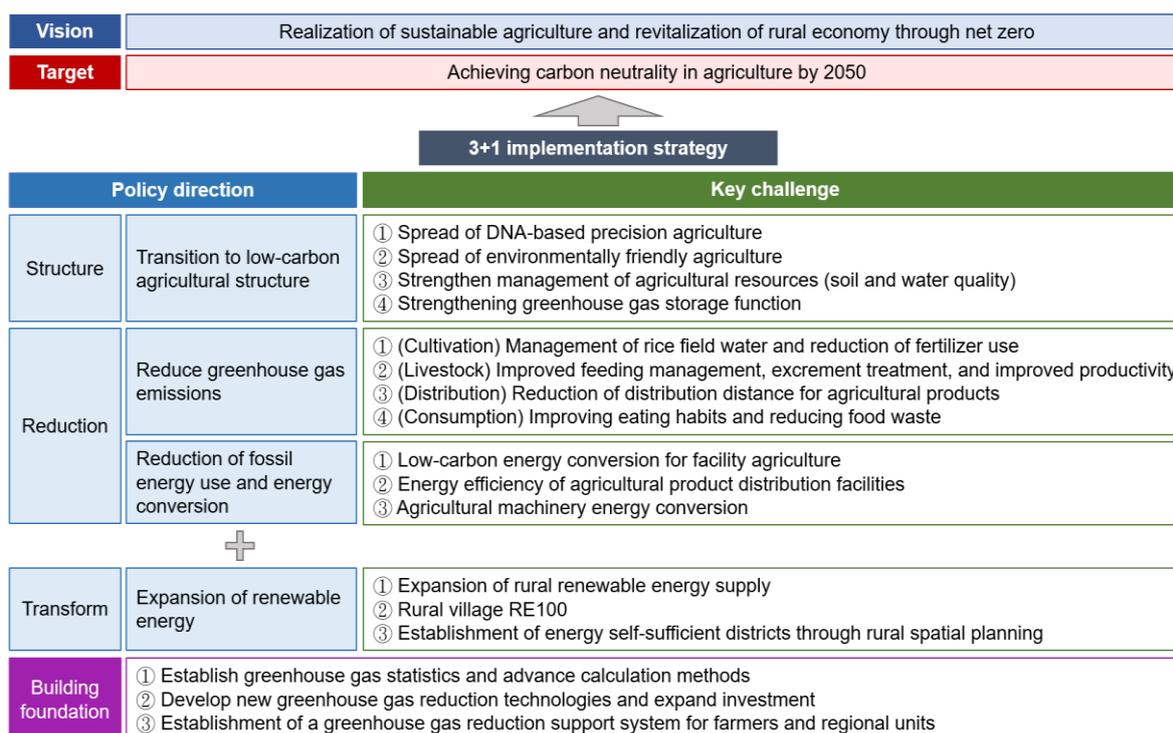
農業食品和農村事務部 2021 年的《2050 年農業和食品碳中和促進策略》，如圖 7-5 所示，為韓國農業淨零政策之專門文件，提出目標、實施策略以及相應的挑戰。此報告提到的每一項挑戰，政府都詳細闡述現狀、條件、目標和行動計畫、2021 至 2050 年的短期和長期路線圖。讓政府和民眾能逐年檢視實現目標的狀況，從而增加韓國在 2050 年實現農業碳中和的可能性。另外，在 2020 年發布之「2050 年碳中和政策(2050 Carbon Neutral Strategy)」，農業部門減排手段包含：

(1) 燃料轉換：

漁船、農機燃料電/加氫推廣、高效率 能源設施佈局、生質能轉換等。如農業和畜牧業可以透過供應再生能源，以及用於農業機械和鍋爐等的煤油和柴油加氫，創造農村能源自給自足的村莊；漁業可以擴大舊漁船更新方式，提升設備效率。

(2) 改良耕作方法：

透過改進耕作方法，例如減少化學肥料和擴大實施生態友善耕作方法，抑制 CH₄ 和 N₂O 之產生，例如改善稻田水管理方法和農業用地，減少水稻



資料來源：Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (2021)。

圖 7-5、韓國「2050 年農業和食品碳中和促進策略」

種植之溫室氣體排放；減少氮肥使用，擴大生物炭(於無氧條件下，在 300-350 °C(或更高溫度)下熱解木材等製成的木炭型有機材料，具有碳儲存功能)等新技術

(3) 畜牧業管理：

透過擴大畜牧廢棄物資源循環，建立低碳畜牧業管理體系，例如擴大低甲烷、低蛋白飼料供應，減少糞便中甲烷氣體和氮的排放，這些氣體佔畜牧業產生的溫室氣體的 48%；透過精確的牲畜規格提高牲畜生產力，並透過數位牲畜管理降低死亡率；將糞便排放之甲烷回收並用作能源，提高畜禽廢棄物能源設施的處理率(2018 年約 5%，2050 年超過 35%)。2020 年「資源循環基本法(Framework Act on Resource Circulation)」提到，於 2027 年禁止直接掩埋(廚餘垃圾和脫水污泥已禁止)，推廣沼氣生產作為有機廢棄物的標準處理；於 2022 年「沼氣法(Biogas Act)」根據有機廢棄物產生量，向市政當局和大型畜牧場分配使用沼氣能源生產需求；同時，對厭氧消化和沼氣利用的政府給予財務和行政支持，重點是共消化技術(食物垃圾+污水污泥+牲畜糞便+未利用的生物質)示範。

(4) 飲食生活方式的改變：

飲食改變、替代加工食品。

韓國鼓勵農民自願參與減排活動。最常見的減緩措施是提高農場的能源效率，農林畜產食品部的「農業能源使用效率改善計畫」是一項代表性政策，透過政府補貼和貸款，誘導農民自願採用減排設施。針對能源密集型的園藝和畜牧業領域實施，其提倡的節能設施包括多層保溫簾、自動保溫罩、循環水膜栽培設施、熱回收通風設備、排氣熱回收裝置、空氣加熱和冷卻設施等；而新能源和再生能源設施包括地熱加熱和冷卻設施、廢熱再利用設施、木質顆粒加熱器等。

此外，另有「自願溫室氣體減排計畫」和「低碳農業和畜牧產品認證系統」等補貼計畫。農業實體若採用政府批准的減排技術，都可申請補貼。前者試圖以間接補助(諮詢和驗證費用)及直接補助(經濟激勵，減排認證每噸 10,000 韓元)，誘導農民自願碳減排。後者則包括認證諮詢和驗證費用補貼等，如果消費者購買經認證的低碳農產品和畜產品，並使用 Eco-Money 聯盟卡，將獲得購買價格 15% 的現金獎勵(由政府補貼)。其他農林畜產食品部已制定並積極實施農業補貼政策項目還包括：

- (1) 環保農業直接補貼：根據認證階段和項目組別而有所不同，每個農戶支付限額為 0.1 至 5.0 公頃⁵⁶。
- (2) 有機肥料補貼：有機肥料包括混合油肥、混合有機肥和複合有機肥。分解肥料包括畜禽糞便堆肥和一般堆肥。有機肥料的單位補貼價格為每 20 公斤 1,100 韓元。分解有機肥料的單位補貼價格根據肥料等級不同而有所變化⁵⁷。
- (3) 有機農業材料補貼：提供在閒置農田上種植綠肥作物⁵⁸之種子補貼⁵⁹，以增加土壤有機質含量(保持在 2-3%)，以增強土壤肥力和保護農業環境。
- (4) 直接交易環保農產品補貼：擴大環保農產品和畜產品的市場，協調供需並穩定價格，建立銷售場地提升消費者對此類產品的接觸。提供從事環保農業的農民、生產者組織及有機和無農藥加工食品公司購買國內環保農產品相關補貼⁶⁰。此外，補貼還用於當環保農產品專賣店新開或擴展時的租賃押金和設施(包括商店、貨架、冷凍和冷藏設施，但不包括消耗性設備)。

⁵⁶ 2020 年每公頃直接補助單價為：果樹方面，有機栽培 140 萬韓元，無農藥農業 120 萬韓元；蔬菜、特色作物和其他作物方面，有機農業為 130 萬韓元，無農藥農業為 110 萬韓元；稻田方面，有機農業 70 萬韓元，無農藥農業 50 萬韓元，此外還有水稻收入補償的直接補助。對於獲得有機認證並在五年內獲得直接補助的農田，自第六年起持續直接補助：果樹 70 萬韓元，蔬菜、特色作物和其他作物 65 萬韓元。此外，稻田支付 35 萬韓元。

⁵⁷ 特級肥料每 20 公斤 1,100 韓元，一級肥料每 20 公斤 1,000 韓元，二級肥料每 20 公斤 800 韓元。地方政府每 20 公斤袋補貼 600 韓元，並可根據其財政狀況提供額外補貼。

⁵⁸ 如毛苕子、綠肥大麥、黑麥、紫雲英和蘇丹草(早熟、中熟和晚熟的蘇丹草)，其莖或葉用作肥料替代品，具有有機氮固定的效果。

⁵⁹ 國家給予 20% 的種子補貼，地方給予 30% 的種子補貼，其餘 50% 由參與項目的農民和農業公司自付。

⁶⁰ 國家補貼費用的 80%，其餘 20% 由參與的農民、組織或公司支付。補貼限額為每家公司 30 億韓元，每個設施或商店 5 億韓元。

- (5) 畜禽糞便處理補貼：提供畜禽糞便處理設施和設備補貼⁶¹，將畜禽糞便轉化為堆肥、液態肥、能源等，從而促進自然循環農業並防止環境污染。
- (6) 農業環境保護項目：透過振興農村社區、提高農民對農業環境保育的認識，促使農民參與農業環境改善和保育活動，從而提升農業公共價值。目標是每個行政單位中至少有 20 名農民或居民參與，並由國家及地方政府各補貼 50%⁶²。
- (7) 低碳農產品認證和溫室氣體減排計畫：鼓勵消費者購買經認證的低碳農產品參與減少溫室氣體排放的活動⁶³。

(六) 中國

1. 中國農業部門淨零路徑

中國規劃於 2030 年達到碳排放峰值 13.9 Gt-CO₂e，排放量比 2010 年增加 26%(排除 LULUCF)，並於 2060 年前實現碳中和。在其《2030 年前碳達峰行動方案》的「碳達峰十大行動」中，與農業部門或碳匯有關的目標為：於 2030 年，全國森林覆蓋率提高到 25%左右，森林蓄積量達到 190 億 m³。換言之，2030 年森林蓄積量相較 2005 年將增加 6 億 m³(之前是增加 4.5 億 m³)。

為了保障糧食穩定安全供給，提出了《“十四五”推進農業農村現代化規劃》、《全國國土空間規劃綱要(2021~2035 年)》、《“十四五”農業農村現代化重大工程建設總體規劃》等政策，農業農村部、國家發展改革委、財政部及自然資源部等單位發布《全國現代設施農業建設規劃(2023~2030 年)》，提供中國農業展部門的中期發展路徑，其重點任務為建設以節能機械為主的現代設施種植業、建設以高效集約為主的現代設施畜牧業、建設以生態健康養殖為主的現代設施漁業。以提高光、熱、水、土等農業資源利用率和要素投入產出率，並依靠市場力量及政府指導，提升設施農業集約化、標準化、機械化、綠色化、數位化水準，加快農業轉型。

⁶¹ 個別處理設施的補貼包括 20%的國家補貼、20%的地方政府補貼和 60%的國家資助貸款；聯合畜禽廢物處理設施，如堆肥和液化、沼氣連接和村莊資源化堆肥等活動的補貼包括 40%的國家補貼、30%的地方政府補貼和 30%的國家資助貸款；能源化活動包括 50%的國家補貼、30%的地方政府補貼和 10%的自費資助。關於補貼成本的上限，個別處理設施(個別農戶)最高補貼為：豬 500 萬韓元、韓牛和奶牛 300 萬韓元、雞 200 萬韓元；個別處理設施(公司等)，最高補貼為：豬 20 億韓元、韓牛和奶牛 8 億韓元、雞 10 億韓元；聯合資源設施每天處理 70 噸畜禽排泄物用於：(1)堆肥和液化，補貼為每噸 70 萬韓元；(2)能源化，補貼為每噸 1 億韓元；(3)沼氣發電，補貼為每噸 5400 萬韓元。

⁶² 每個項目地點提供五年的補貼，部分用於個別和聯合居民活動，年度補貼上限為每人 200 萬韓元，其餘用於項目管理、農業環境診斷、村莊居民的教育和諮詢。補貼比例為第一年可以提供 100%的補貼，第二年至第五年則提供不超過 30%的補貼。

⁶³ 截至 2017 年，逾 2,760 個農場(主要是果園)通過低碳認證。政府幫助經認證的農場提高其市場參與度，以增加認證農場的數量。此外，該計畫驗證農民自願減排量，並允許交易。農業中的溫室氣體減排項目包括農村自願溫室氣體排放減排項目和排放交易計畫下的外部項目。對於參與自願溫室氣體排放減排項目的農民，政府以每噸 10,000 韓元的價格向他們購買經認證的溫室氣體減排量。從 2012 到 2017 年，共有 46 項活動被註冊為自願溫室氣體減排活動。

2. 中國農業部門重要減碳政策與財源

根據中國 2022 年發布的《中國落實國家自主貢獻目標進展報告》，農業減排計畫有以下幾點：

- (1) 推動農耕節能及減排：推廣水田高產量、低排放(特別是 CH₄)及稻稈還田之整合創新耕作模式，預期水稻增產至少 4%，增加氮肥利用效率至少 30%，減少水田 CH₄ 排放至少 31.5%；推廣節水抗旱稻種，預期每畝水田之 CH₄ 排放降低九成；持續推動化學肥料減量，以減少土壤 N₂O 排放。
- (2) 推動畜牧業減排降碳：提升畜禽糞尿資源化程度，建立畜禽糞密閉處理及畜禽糞尿還田等基礎設施，建置畜禽糞尿再利用示範案例。
- (3) 推進漁業減排增匯：建置國家級海洋牧場示範案例，投放人工魚礁，以提升海洋碳匯容量。
- (4) 推進農機節能減排：推動農機報廢更新補貼機制，加快老舊農機淘汰更新，最佳化農機裝備結構，以促進農業安全生產和節能減排。
- (5) 增強藍碳發展：近年中國在藍碳領域多有研究及政策項目，例如：低碳漁業、漁業碳匯、大型藻類碳匯等。根據《農業農村減排固碳實施方案》，在近海及泥灘等主要漁業水域，開展多營養層級立體生態養殖，提升貝類藻類固碳能力，增加漁業碳匯。目前，已完成多筆海水藻類養殖碳匯交易專案⁶⁴。自「十三五」以來，中國在國家農業產業技術體系中新增藻類體系，中央財政每年投入約 1,500 萬人民幣，支持藻類遺傳改良、栽培、病害防控、加工、機械設備等領域關鍵技術研發與集成示範工作⁶⁵。

另一方面，中國農業綠色轉型需求顯著，策略有二：一在不破壞環境的前提下節約成本、提高效率，從注重農產品「數量」轉向注重「品質」；二是節約環境資源，減少碳排放，順應國際綠色農業發展趨勢。因此，中國農業減碳亦朝向氣候智慧農業發展⁶⁶，重要策略包括：

- (1) 注重防災減災：農業生產容易受到氣候和旱澇自然災害影響。為確保農業穩產，將加強災害預報，儲備救災物資，完善農保制度。
- (2) 節能減排技術應用：推廣生態農業、循環農業、精準農業，減少化肥農藥使用，減少非點源污染；加強畜禽糞再利用、節能減排技術推廣等。
- (3) 透過稻稈永續管理加強碳匯：推動稻稈還田，增加土壤碳含量，稻稈用作有機肥，推廣節約型農業和循環經濟。

⁶⁴ 例如福建省福州市連江縣 1.5 萬噸養殖海帶碳匯獲得轉讓價款 12 萬元。

⁶⁵ 2021 年 12 月，財政部修訂出臺《中央財政農業保險保費補貼管理辦法》，將地方優勢農產品保險獎補推廣至全國，未來可擴展至大型海藻。財政部透過基本科研業務費等，支持中央級科研院所圍繞國家戰略部署及行業要求，自主開展包括大型海藻栽培在內的科學研究。

⁶⁶ <https://www.fao.org/3/cc2200en/cc2200en.pdf>

(4) 減少化肥農藥使用：實施化肥農藥使用零增長行動，有效控制農藥和農膜使用量。

(5) 建立主要農作氣候智慧生產之示範：選育高產抗逆作物品種，最佳化種植結構，以完善農業生產基礎設施。

三、台灣農業部門淨零排放路徑建議

(一) 台灣農業部門現況與課題

我國農業部門 2022 年的非燃料燃燒溫室氣體排放量為 323.14 萬噸 CO₂e；燃料燃燒排放量(含電力消費)約為 317.8 萬噸 CO₂e，總排放量約為 616.8 萬噸 CO₂e，約占全國排放量 2.16%(如圖 7-6)，且相較 2005 年 707.3 萬噸 CO₂e，已減少約 12.8%。主因為加入世界貿易組織(World Trade Organization)後，經貿自由化影響國內農業生產，造成耕地面積及畜禽飼養減少。

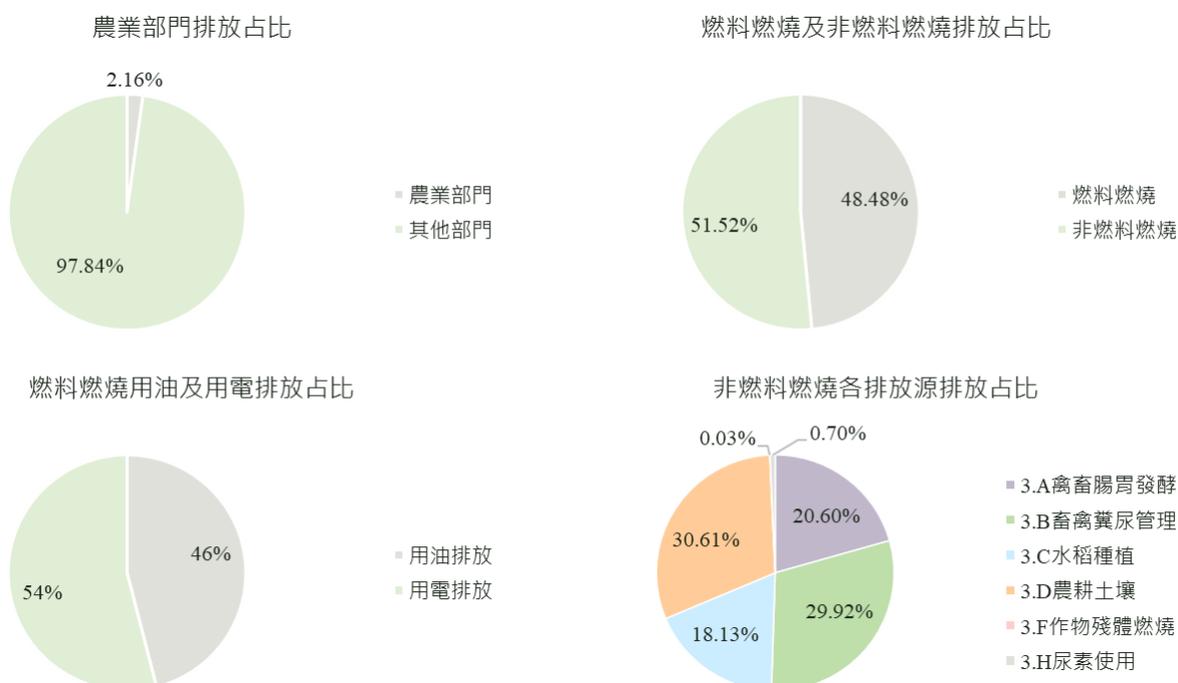


圖 7-6、台灣 2022 年農業部門溫室氣體排放結構

林業碳匯部分，歷年吸收量呈現略有起伏增減的趨勢，惟每年碳匯量變化不大，主要係由森林資源年生長所增加的碳匯量為主，而造林所增加之碳匯量及森林干擾所減少之碳匯量較少。

我國溫室氣體排放清冊報告統計與農業部相關之燃料燃燒部分為能源部門(CRF1)之農林漁牧(1.A.4.c)；非燃料燃燒部分則為農業部門(CRF3)及土地利用、土地利用變化及林業部門(CRF4)。其中，非燃料燃燒大約占農業整體排碳量的 48.48%，主要來自以下幾個生產活動：

- (1) 水稻栽培：水田環境容易產生甲烷，加上肥料的使用，使得水稻栽培成為台灣農業主要的溫室氣體排放源之一。
- (2) 畜牧業：畜禽腸胃發酵、糞尿管理及飼料生產都會產生甲烷和氧化亞氮。
- (3) 肥料使用：化學肥料生產和施用過程會產生溫室氣體，尤其是氮肥。
- (4) 農地土壤：土壤中微生物活動也會產生溫室氣體。

燃料燃燒部分，包含能源部門(CRF1)之農林漁牧(1.A.4.c)能源使用及農業部門(含電力消費排放)之溫室氣體排放量，其占整體排放量 51~52%。主要來自於相關產業的用油與用電。

- (1) 電力排放⁶⁷：過往為穩定國內蔬果農產供應，增加農業生產自動化設施，收成期採用調製機械烘乾及冷藏(凍)設備保存，使農業用電量有微幅成長趨勢。近年林業用電量極少，變動不大。就產業發展而言，家畜產業之總飼養頭數囿於環境壓力難以增加，在自動化設備引入下，考量節能效率因素，推估未來用電量持續微幅波動。漁業用電(養殖業)因近年漁撈轉養殖業蓬勃發展，因此歷史用電量近年維持平穩增加。
- (2) 農、畜、漁、林用油排放⁶⁸：主要為漁船用油，佔農業總用量 99% 以上。自 2004 年漁業署啟動以航程紀錄器時數核配漁業用油管理機制後，漁業用油量減少六成以上，並於近年維持穩定。根據漁船限建政策，預估未來漁船總船數及總噸數控制在固定限額下，應不會有大幅變動。

(二) 台灣農業部門現行策略

我國農業部門淨零排放四大主軸包括：「減量」、「增匯」、「循環」與「綠趨勢」，為我國於推動農業部門淨零排放目標的重要策略：

減量策略著重於降低農業生產過程中的碳排放，主要透過改善土壤健康、優化資源利用及推廣低碳技術來實現，例如：透過精準農業技術，農民可以有效監測作物生長狀況，精確施肥與灌溉，從而減少過量施用化肥和水資源浪費；推廣再生能源如太陽能與風能的利用，以減少化石燃料使用。

增匯策略旨在增加碳匯能力，特別是透過植樹造林及改善土地管理來達成，包括：推動農業與森林的結合，利用農地邊緣或閒置地種植樹木，提升生物多樣性，同時增加土壤和植被中的碳儲存；鼓勵農民參加碳匯計畫，為其提供相應之經濟獎勵。

循環經濟概念在農業中的應用是強調資源的再利用和廢棄物的減少，例如，推動有機農業及綠色肥料使用，降低對化學肥料依賴；同時，農業廢棄物如稻稈

⁶⁷ 包含農藝及園藝用電、農事服務用電、其他(農田水利)用電、畜牧業用電、林業用電與漁業用電。

⁶⁸ 接駁工具、幫浦燃料、穀物乾燥、園藝溫室及其他農林漁牧燃料使用等。

和動物糞便可被回收用於製作生物能源，進一步減少溫室氣體排放。這樣的措施不僅能夠創造更永續的生產模式，還能提高農業的整體效益。

綠趨勢是指推動農業生產模式向永續和環保的方向發展，包括支持有機農業、精準農業等新型農業技術的採用。這一策略強調對農產品的市場需求轉型，以滿足消費者對健康和環保的需求。透過政策支持和教育宣導，農民能夠更好地了解並應用這些綠色技術，進而提升農業的市場競爭力。

(三) 台灣與主要國家的比較分析

1. 各國農業部門減碳目標比較

隨全球氣候變化挑戰日益嚴峻，各國已意識到減少農業部門碳排放的重要性，並設定了具體的氣候目標以促進永續發展。這些目標不僅反映各國對於減碳承諾，也顯示農業在應對氣候變化中之關鍵角色。

- (1) 美國：2030 年較 2005 年減少 50~52%排放量，但農業未設定目標。
- (2) 歐盟：2030 年較 1990 年減少 55%排放量，並設定農業目標為-8%。
- (3) 英國：2030 年減少 68%排放量，農業部門占全國的 10%，但農業未設定目標。不過，在 CB6 中農業部門 2035 年排放量將降至 40 Mt-CO_{2e}。
- (4) 日本：2030 年較 2013 年減少 46%排放量，並設定農業目標為-14%。
- (5) 韓國：2030 年較 2018 年減少 40%排放量，並設定農業目標為-27.1%。
- (6) 中國：2030 年達到碳排放峰值，目前尚無農業部門具體減碳目標。
- (7) 台灣：2030 年減少 24%±1%之溫室氣體排放。

2. 各國農業部門減碳措施比較

各國針對減碳的措施各具特色，從改善生產方式到推動再生能源使用，反映了各國對其政策優先程度的考量：

- (1) 美國：重點在改善土壤健康、優化養分管理及保護森林資源，碳捕捉技術的推廣和生物質燃料的使用也被納入策略中。措施旨在提高農業的永續性，減少碳排放並提升環境韌性。
- (2) 歐盟：採取了一系列綜合措施，包括硝酸鹽指令和「從農場到餐桌」策略，政策強調有機農業推廣和甲烷減排。此外，LULUCF 規則也強調了土地管理的重要性，支持漁業和水產養殖部門的能源轉型。
- (3) 英國：包括環境土地管理計畫(ELMS)、樹木行動計畫、林地減碳守則，重點在減少生物燃料的碳排放。推動漁船的氫驅動技術和飼料產業措施，並抑制排放甲烷的產品使用。
- (4) 日本：推廣有機農業和引進節能設備，減少稻田甲烷排放及降低農業土

壤排放，同時推動無碳燃料漁船的使用及綠色食品體系戰略。

- (5) 韓國：採用數位化管理和智慧農業，提高牲畜生產效率，並透過生物炭等技術減少甲烷和氧化亞氮排放。此外，鼓勵漁船和農機使用清潔能源。
- (6) 中國：重點在推動種植業節能減排、提高糞污資源化利用、更新老舊農機，及建立海洋牧場和人工魚礁，增強海洋固碳能力。
- (7) 台灣：推廣有機與友善耕作、推動綠色環境給付，並減少稻作面積。推廣生物性資源物及畜牧場沼氣再利用，致力於森林經營與獎勵休漁計畫。

3. 各國農業部門減碳政策財源

- (1) 美國：包括《氣候智慧商品合作計畫》和《降低通膨法案》。鼓勵農民採用環境友好的耕作方式，提升農業氣候韌性，並提供資金支持以推廣永續農業實踐，例如土壤健康管理與碳捕捉技術。
- (2) 歐盟：以全面性農業補貼政策，鼓勵農民參與，並資助有機農業和氣候友善的生產技術，以「從農場到餐桌」促進食品系統轉型，減少整體碳足跡。
- (3) 英國：農業創新與投資基金是主要資金來源，用於推動低碳技術的發展，幫助新技術導入，並透過 ELMS 提供經濟激勵，鼓勵永續土地管理。
- (4) 日本：以《農業多功能化推進法》、永續糧食系統策略提供農民經濟誘因，並促進有機農業發展。
- (5) 韓國：提供低碳農業補貼與有機農業補貼，也提供減排獎勵，以鼓勵農民採用環保耕作方式。
- (6) 中國：目前尚未設定具體的減碳補助計畫，但開始建立農業轉型基金，為農民提供資金支持，具體的激勵措施尚在制定中。
- (7) 台灣：透過農業轉型基金鼓勵有機和友善耕作。

總結來說，這些多元化的減碳措施和資金激勵不僅為農業部門的減排目標提供了實質支持，也為全球應對氣候變遷提供多種可能的解決方案。各國透過這些政策的實施，能更有效地推動農業向綠色、永續的方向發展，為實現全球氣候目標貢獻力量，詳細台灣與各主要國家農業淨零目標、減碳措施如表 7-3。

表 7-3、台灣與主要國家農業部門淨零路徑比較

項目	美國	歐盟	英國	日本	韓國	中國	台灣
(1)2030 年減碳目標	2030 年減少 50-52%(相較 2005 年)	2030 年減 55%(相較 1990 年)	2030 年減 68%(脫歐之後，相較 1990 年)	2030 年減 46%(相較 2013 年)	2030 年減 40%。(相較 2018 年)	2030 年之前達到碳排放峰值	2030 年減少 24%±1%(相較 2005 年)
(2)2050 年淨零目標	2050 淨零長期策略	「共享潔淨地球」訂定歐盟 2050 年氣候中和願景	透過修訂氣候變遷法，更訂 2050 年淨零排放目標，使英國成為 G7 第一個訂定 2050 年碳中和的國家	「地球溫暖化對策推進法」修正案，納入 2050 年碳中和目標	「應對氣候危機的碳中和綠色成長基本法」明訂 2050 年碳中和	2060 年之前實現碳中和	「氣候變遷因應法」納入 2050 年淨零排放目標
(3)農業部門淨零規劃	無，農業部門的排放量將佔美國整體減排目標的 25-29%	2030 年較 1990 年減 55%目標 (原減 40%，農業排放量減少 8%)	無，農業部門佔英國總排碳 10%	2030 年較 2013 年減 46%目標 (原訂減 26%，其中農業部門的減排目標為 14%)	2030 年(較 2018 年)農業減少 27.1%。	無，2022 年農業佔中國溫室氣體排放量的 7.65%	第三階段管制目標
(4)農糧減碳措施	改善土壤健康、優化養分管理 etc 農業耕作	硝酸鹽指令、從農場到餐桌策略、有機農業行動計畫、歐盟減少甲烷排放策略	推廣低碳農業措施、減少農業化石燃料使用、土地利用變化(改變飲食習慣、減少食物浪費、提高生產力)、改變園藝環境、減少消費或進口高碳排食品	引進溫室園藝節能設備和農業機械節能設備、實施農業土壤相關減量措施、致力推廣精準農業技術，最佳化水、化肥及農藥等投入品之使用、土壤碳匯	採用數位化管理技術和智慧農業，運用 ICT 技術提高牲畜生產效率	以節能機械為主的現代設施種植業，示範推廣水稻高產低排放技術模式、培育並推廣節水抗旱稻	推廣有機與友善耕作、推動對地的綠色環境給付

項目	美國	歐盟	英國	日本	韓國	中國	台灣
(5)畜牧減碳措施	畜牧業養殖改變、消費型態改變	歐盟減少甲烷排放策略	飼料產業措施、抑制甲烷的飼料產品	促進改進飼料管理和畜牧糞尿管理及再利用	發展低甲烷飼料和畜禽糞便綜合利用	穩步提升畜禽糞資源化利用水準、建設畜禽糞密閉處理和糞肥還田等基礎設施	推廣生物性資源物及畜牧場沼氣再利用
(6)漁業減碳措施	減碳海洋運輸系統、增強社區適應能力	支持漁業和水產養殖部門的能源轉型	推動漁船的氫驅動技術、飼料產業措施，特別關注抑制甲烷產品的使用	將漁船改造為節能漁船、海洋碳匯	低碳船舶至電動漁船(如氫氣發電)、擴大海洋能使用、藍碳產業、零排放港口、加強海洋廢棄物之回收利用	建設以生態健康養殖為主的現代設施漁業，建立海洋牧場和人工魚礁，增強海洋固碳能力	獎勵休漁計畫
(7)林業措施	保護森林資源	LULUCF 規則也強調了土地管理的重要性	環境土地管理計畫、英國樹木行動計畫、林地減碳守則	森林碳匯	造林大幅增加碳匯量	森林碳匯	致力於森林經營
(8)其他措施	碳捕捉技術的推廣和生物質燃料的使用	農業補貼政策來鼓勵農業的綠化和永續轉型	農業創新與投資基金提升農業部門的生產力、永續性和應對氣候變化的能力	將再生能源納入農業經營(安裝太陽能電池板)。並使用以農業剩餘資材為基礎之生質能源，以減少農業活動之碳足跡。另，外推動綠色食品體系戰略	透過生物炭等技術減少甲烷和氧化氮的排放、低碳農產品認證、碳捕捉與封存、飲食生活方式的改變	更新老舊農機和促進節能減排的措施、推廣生態農業、循環農業、精準農業等生態友好農業模式	農地種電、漁電共生

資料來源：本研究整理。

(四) 台灣農業部門淨零排放路徑規劃建議

我國農業部門的「減量」、「增匯」、「循環」與「綠趨勢」四大主軸確實為台灣農業邁向淨零排放指出了明確方向，但仍有幾點值得深入探討與改進：

1. 減量主軸建議

- 技術普及率低：精準農業技術導入需要一定的經濟成本，且需要農民具備相關知識與技能，造成中小農戶的負擔，導致技術落差。
- 數據共享與整合：各部門蒐集的農業數據分散，缺乏整合與共享機制，限制了精準農業的發展。
- 水資源管理：雖提及精準灌溉，但對於台灣水資源短缺的問題，仍需更深入探討如何提升農業用水效率。
- 政策激勵不足：對低碳技術的推廣的激勵措施不足，導致參與度不高。

2. 增匯主軸建議

- 土地利用衝突：農地與林地間存在競爭，推動植樹造林可能與糧食安全衝突，需要更細緻的國土規劃。
- 碳匯計算標準：計算標準仍需完善，以確保碳匯交易的公平與透明度。
- 生物多樣性挑戰：植樹造林可能會引發生態平衡問題，如單一樹種的種植可能會對當地生物多樣性產生負面影響。
- 長期管理：碳匯穩定性需要持續管理與維護，才能確保碳匯的長期效果。
- 經濟獎勵不夠：目前獎勵措施的吸引力不足，實際參與碳匯計畫的農民數量仍然有限。

3. 循環主軸建議

- 市場機制：農業廢棄物的循環利用需要完善的市場機制，以確保廢棄物能有效地轉化為資源。
- 技術門檻：農業廢棄物轉化為生物能源具技術門檻，中小農戶難以負擔。
- 回收系統不健全：農業廢棄物的回收利用需要完善的基礎設施，目前部分地區尚未形成有效的回收系統。

4. 綠趨勢主軸建議

- 市場機制與消費者推廣：綠色農產品成本較高，市場需求仍有待提升。需要透過加強消費教育，提高消費者對綠色農產品的認可度。

綜合以上，極端氣候變遷及溫室效應對全球糧食生產安全(Food Security)造

成重大挑戰，我國農業部門應持續佈局溫室氣體排放減緩與農業生產安全調適工作，減少因氣候變遷造成糧損之策略與措施。我國農業部門於減少溫室氣體排放之同時，必須維持(甚至提升)糧食自給率，以確保我國糧食安全，因此，建議農業部門宜加強面對未來極端天氣事件之韌性(Resilience)，調適策略(Adaptation)應更優先於減緩策略(Mitigation)，並應強化農業生態系服務功能及創造負碳來源，以將危機化為轉機。

參考文獻

1. OECD, Green growth in Southeast Asia: Trends and commitments. 2024.
2. Institute for European Environmental Policy, "NET-ZERO AGRICULTURE IN 2050: HOW TO GET THERE?," 2019.
3. G. H. Engelhard, O. L. Harrod, and J. K. Pinnegar, "Carbon emissions in UK fisheries: recent trends, current levels, and pathways to Net Zero," MB2305746, 2022. [Online]. Available: <https://www.cefas.co.uk/media/x2wh5q45/final-report-zero-carbon-fisheries-final.pdf>
4. MIDORI 策略, https://www.maff.go.jp/e/policies/env/env_policy/midori.html
5. United Kingdom Government CCC, "The Sixth Carbon Budget – The UK's path to Net Zero," 2020.
6. 農林水産省農産局農業環境対策課, "農業分野における気候変動・地球温暖化対策について," 2021.
7. F. a. R. A. 농림축산식품부 (Ministry of Agriculture, "2050 농식품 탄소중립 추진전략 (2050 Agricultural and Food Carbon Neutrality Promotion Strategy)," 2021.

第八章、淨零排放評比方法論之比較分析

鄭睿合⁶⁹

一、前言

國際上有許多指標用於衡量國家邁向淨零目標、能源轉型、永續發展的情況，透過定期檢視各國的績效表現以及給予評比，讓各界得以持續追蹤一國的狀態與相對排名(例如屬於領先群或落後群)，進而從中探討應強化及改善的面向。

然而，不同機構發布的指標，因目的性存在差異造成同一國家在各指標間的排名差異甚大，例如環保團體德國看守協會(Germanwatch)之《氣候變遷績效指標(Climate Change Performance Index, CCPI)》於2024年的報告⁷⁰中，若以總指數而言，美國在63個評比國家裡排名第57位⁷¹、台灣排名第61位，表現並不理想；但是在洛桑管理學院(IMD)與韓禮士基金會(Hinrich Foundation)發布的2023年《永續貿易指數(Sustainable Trade Index, STI)》⁷²，30個受評比國家裡，美國排名第9位、台灣排名第10位，位居前段班。以日本與韓國而言，兩國在CCPI的排名分別為第58名、第64名，亦屬於後段班，卻在STI中分列第8名及第6名，為受評比國家的領先群體，具有相當大的差異之處。

是故，本章選取國內政府機關、產學單位或媒體較關注、曾公開報導，及能同時進行美國、歐盟⁷³、英國、日本、韓國、中國與台灣等跨國比較之國際指標，包含德國看守協會的《CCPI》、洛桑管理學院與韓禮士基金會發布的《STI》、耶魯大學的《環境績效指標(Environmental Performance Index, EPI)》、世界經濟論壇(World Economy Forum, WEF)的《能源轉型指標(Energy Transition Index, ETI)》與資誠聯合會計師事務所(PwC)之《淨零排放經濟指數(Net Zero Economy Index, NZEI)》⁷⁴，探討各項指標的編製目的、指標項目、計算方式和資料來源等，俾利正確解讀和應用指標結果，同時瞭解各國推動在轉型進程中的概況。

⁶⁹ 中華經濟研究院高級分析師。

⁷⁰ Germanwatch (2023), "The Climate Change Performance Index 2024: Results," <https://ccpi.org/download/climate-change-performance-index-2024>.

⁷¹ CCPI 各國排序中，前三名從缺。

⁷² Hinrich Foundation and IMD (2023), "Sustainable Trade Index 2023," <https://www.hinrichfoundation.com/research/project/sustainable-trade-index/>.

⁷³ 若無歐盟資料則改以德國、法國數據呈現。

⁷⁴ PwC (2023), "Net Zero Economy Index 2023," <https://www.pwc.co.uk/services/sustainability-climate-change/insights/net-zero-economy-index.html>.

二、國際間衡量淨零、永續之相關指標介紹

本節分別說明 CCPI、STI、EPI、ETI 與淨零排放經濟指數等指標之建構目的與評估面向、計算方法和資料來源。

(一) 氣候變遷績效指標(Climate Change Performance Index, CCPI)

1. 目的

CCPI 是由德國看守協會、新氣候研究所與歐洲氣候行動網絡共同發布，指標的編製和發布目的在於提高國家及國際間的氣候政策透明度，及凸顯有著良好表現的國家⁷⁵，並指出國家和國際氣候政策制定中的弱點和優勢⁷⁶，對政策決策者施加政治壓力，推動保護氣候的相關行動。

在 2005 年 COP 11 蒙特婁氣候會議首次對外宣布後，CCPI 歷經多次改版。2007 年⁷⁷版進行各國能源、運輸、住宅與產業部門的排放趨勢、排放水準和氣候政策之評估，權數分別為 50%、30%及 20%，涵蓋國家數為 56 個(不含台灣)，約占當年全球 CO₂ 排放量的九成。排放趨勢裡又分成實際趨勢的原始數據(占 35%)和目標趨勢與實際趨勢的比較(占 15%)兩個部分，至於能源、運輸、住宅與產業部門的權重，則取決於其與氣候變遷的相關性。例如，能源產業約佔全球能源相關 CO₂ 排放量的 40%，運輸、住宅和產業部門各佔約 20%。

2. 評估面向

2024 年的報告中，評比國家數總計 63 個(含台灣)和歐盟地區，包含溫室氣體排放、再生能源、能源使用及氣候政策等四個評估面向，權重上則分別占 40%、20%、20%與 20%，並衍伸出 14 個指標。透過各國當前概況、未來設定的目標、氣候政策領域的野心和進展等，和 2°C 路徑之相容性，進行跨國比較，進而加強該國在國內和國際外交應對氣候變遷的行動。

一個國家的表現透過其在四個等權重指標結果來呈現⁷⁸，反映四個不同維度，即「當前水準」、「近期發展(五年趨勢)」、「目前水準和 2°C 路徑的相容性」和「2030 年目標和 2°C 路徑的相容性」，衡量在國家氣候政策和其實踐的績效。CCPI 同時衡量排放趨勢和水準值，避免過於凸顯歷史排放量較多但近年努力減量的國家，也不會為過往排放量較低但因近年經濟成長而增加的國家帶來優勢。此外，CCPI 自 2017 年後納入一個國家排放水準距離 2°C 路徑的落差⁷⁹，嘗試追蹤對該國的

⁷⁵ Germanwatch (2007), "The Climate Change Performance Index 2007: Results," <https://ccpi.org/download/the-climate-change-performance-index-2007/>.

⁷⁶ Germanwatch (2016), "The Climate Change Performance Index 2017: Results," <https://ccpi.org/download/the-climate-change-performance-index-2017/>.

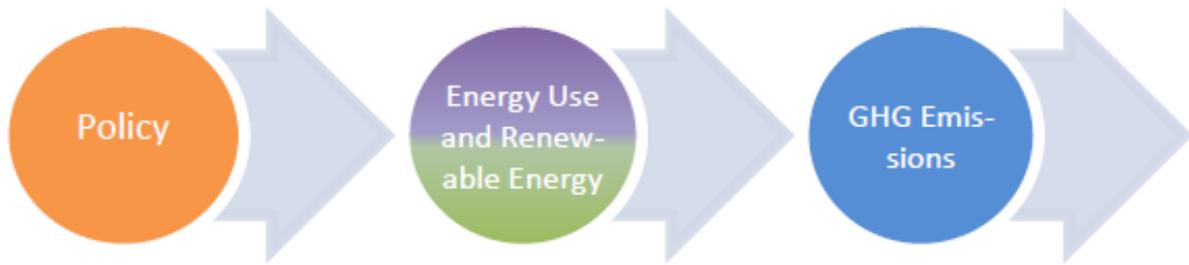
⁷⁷ Germanwatch (2023), "The Climate Change Performance Index 2024: Results," <https://ccpi.org/download/climate-change-performance-index-2024/>.

⁷⁸ CCPI 為每個指標設有「非常好」、「好」、「中等」、「差」及「非常差」等五個評級，有關標準見附件。

⁷⁹ 在 2024 版的溫室氣體排放與能源使用類別裡，改為以 2030 年目標與 2°C 路徑的「絕對」差異而非「相對」差異進行計算。

能否達成淨零的可行性。

就建構邏輯而言，各國是否正努力取得更好的表現，可從「氣候政策」指標中的得分來推斷。如果政策得以有效實施，會反應在「再生能源」和「能源使用」的表現上，進而改善「溫室氣體排放」。因此可從該國在「再生能源」和「能源使用」及在「溫室氣體排放」類別中的績效分數一窺究竟。CCPI 的建構邏輯及指標架構分別如圖 8-1 及表 8-1 所示。



資料來源：CCPI (2022)。

圖 8-1、CCPI 建構邏輯

CCPI 四個主要的評估面向的內涵分述如下：

(1) 溫室氣體排放：

以該國人均溫室氣體排放量的當前水準和過去趨勢、當前人均溫室氣體排放量相較於基準值 2°C 的水準，及該國 2030 年減排目標相較於基準值 2°C 等四項指標衡量，透過人均溫室氣體排放量的當前水準瞭解各個國家溫室氣排放的情況。從公平的角度而言，用與已開發國家相同的標準來衡量轉型期國家的氣候保護績效並不恰當，因此需要搭配觀察近五年發展情況，因為近期的排放發展數據對氣候政策相對敏感，是衡量國家績效的重要指標。至於當前人均溫室氣體排放量和 2030 年減排目標相較於基準值 2°C 的差距指標，則能提供對於達成 2050 年淨零排放目標的可能性提供判斷依據。

(2) 再生能源：

為降低二氧化碳濃度，擴大再生能源和減少化石燃料燃燒至關重要，以再生能源取代化石燃料是實現經濟體系轉型的最重要策略之一。計算再生能源時，不含用於產熱的住宅生質能，以防止各國擴大使用無法持續的傳統生質能。此外，指標分母所用之初級能源供給(TPES)排除了非能源使用，對於擁有化工產業的國家(多為外貿導向國家)較為公平。

表 8-1、CCPI 之評估架構

CCPI 2024			CCPI 2018			CCPI 2014		
指標		權重	指標		權重	指標		權重
溫室氣體排放	人均溫室氣體排放量-當前水準	10%	人均溫室氣體排放量-當前水準	10%	排放水準	人均初級能源供應	7.50%	
	人均溫室氣體排放量-過去趨勢	10%	人均溫室氣體排放量-當前趨勢(不含 LULUCF)	10%		人均二氧化碳排放	7.50%	
	當前人均溫室氣體排放量-相較於基準值攝氏 2 度	10%	人均溫室氣體排放量-相較於基準值攝氏 2 度	10%		目標與表現比較	10%	
	2030 年減排目標-相較於基準值攝氏 2 度	10%	2030 年減排目標-相較於基準值攝氏 2 度	10%		人均森林砍伐排放	5%	
再生能源	再生能源占 TPES 的比重-當前水準	5%	再生能源占 TPES 的比重-當前水準(含水力)	5%	排放發展	來自電力和熱生產的二氧化碳排放	10%	
	再生能源發展趨勢	5%	再生能源發展趨勢-當前趨勢(不含水力)	5%		來自製造業和工業的二氧化碳排放	8%	
	再生能源占 TPES 的比重-相較於基準值攝氏 2 度	5%	再生能源的份額(TPES)-相較於基準值攝氏 2 度(不含水力)	5%		來自道路交通的二氧化碳排放	4%	
	再生能源 2030 目標-相較於基準值攝氏 2 度	5%	再生能源 2030 目標-相較於基準值攝氏 2 度(含水力)	5%		來自住宅用途和建築的二氧化碳排放	4%	
能源使用	人均 TPES-當前水準	5%	人均 TPES-當前水準	5%	再生能源	來自航空的二氧化碳排放	4%	
	人均 TPES-過去趨勢	5%	人均 TPES-過去趨勢	5%		再生能源在總初級能源供應中的份額	2%	
	人均 TPES-相較於基準值攝氏 2 度	5%	人均 TPES-相較於基準值攝氏 2 度	5%		再生能源供應的發展	8%	
	2030 年人均 TPES 目標-相較於基準值攝氏 2 度	5%	2030 年人均 TPES 目標-相較於基準值攝氏 2 度	5%		效率水準	5%	
氣候政策	國家氣候政策	10%	國家氣候政策	10%	效率	效率趨勢	5%	
	國際氣候政策	10%	國際氣候政策	10%		政策	國際氣候政策	10%
							國家氣候政策	10%

資料來源：本研究整理。

其次，當前水準發展與 2°C 路徑未計入水力發電⁸⁰，但是當前水準發展與 2030 年目標的相容性有計入水力發電。重點關注「新」再生能源，故較投入太陽能、風能和地熱的國家會取得較佳績效。因 CCPI 齊頭式設定 2050 年達到 100% 再生能源的目標，故以當前再生能源占 TPES 的比重相較於基準值 2°C 的差距指標，來觀察一國推展再生能源的情況⁸¹。

(3) 能源使用：

能源效率的提升也是淨零排放的重要面向，但實務上，能源效率的衡量相當複雜，目前沒有可一次比較所有國家的全面、可信且準確的資料來源。因此，CCPI 在人均 TPES-相較於基準值 2°C 的差距指標裡，選擇以「2050 年人均能源使用量與目前全球平均值相同」的基準，即人均一次能源供應總量 80 吉焦耳，來衡量一國在能源使用面向的表現。

(4) 氣候政策：

考量政府為減少溫室氣體排放而採取的措施通常需要一段時間才能顯示出其對排放、能源使用和再生能源類別的影響，且像 IEA、PRIMAP 等公開資料有兩年的延遲，所以「氣候政策」指標的數據基礎大多是來自被評估國家內，來自非政府組織的專家所提供的「問卷」結果⁸²。各國的專家意見徵詢名單詳見德國看守協會，例如在 CCPI 2023 中，總計有 60 個國家加歐盟的 450 位專家參與。

⁸⁰ 再生能源供應的最大貢獻者之一是水力發電。然而，許多大型水力發電項目被認為是不永續的。大型水力發電計畫往往對當地社區、河流流域的野生動物和植被產生深遠的負面影響，有時甚至會在集水區特別淺的地方產生額外的溫室氣體排放。這對 CCPI 帶來了雙重挑戰。首先，那些已經透過再生能源（通常是陳舊且可能不永續的水力發電）來滿足大部分能源需求的國家，很難像一個再生能源供應接近零的國家，可以輕鬆地相對提高其產量。相反，如果一個國家已經透過再生能源供應滿足了近 100% 的需求，同時提高了效率，那再生能源供應總量甚至可能會下降。在此極端情況下，一個國家在再生能源類別中的 CCPI 分數將非常低，卻又同時展現氣候變遷績效典範。其次，如果 CCPI 完全納入大型水力發電，那麼當再生能源供應增量完全由此類項目驅動時，它將在一定程度上獎勵開發不永續的水壩項目。CCPI 的作者並不認為這種方法是充分的氣候保護。因此，在 CCPI 中採取折衷方式，在四個指標中的其中兩個不考慮水力發電。然而，不具永續性和違反人權的議題也會出現在其他再生能源技術上，例如需要土地資源的生質能就和糧食生產間產生衝突，陸域風力也有相似的情況。CCPI 會持續關注這類事情的發展，以期能在未來的 CCPI 中更適切地給予排序。

⁸¹ CCPI 評估一個國家 2030 年再生能源目標相較 2050 達到 100% 再生能源之差距，但要做此比較時面臨一個挑戰，即各國提出再生能源目標時沒有一致的規則，例如某一些國家只有地方層級的目標，有一些則為國家層級目標，有一些則是以裝置容量而非以再生能源占 TPES 比重為目標。為了讓各國的再生能源目標都以占 TPES 比重進行衡量，CCPI 進行下列處理：(1) 若該國的目標為再生能源占 TPES 比重則直接使用該數據；(2) 若以裝置容量為目標者，以 WEO 數據將裝置容量數值轉換為發電量。無該國資料者則以平均值作為轉換比率。再進而計算出再生能源發電量占 TPES 比重。(3) 若該國設定的目標年不是 2030 年，以內插法計算之。

⁸² 問卷中，專家們對本國政府最重要措施給予「評級」（由弱至強分為五個等級）。問卷問項涵蓋推廣再生能源、提高能源效率及其他減少電力和熱力生產部門、製造業和建築業、交通和住宅部門溫室氣體排放的措施。專家們亦評估本國國家自主貢獻(NDC)目標和 2°C 目標路徑的差異，及目前的實際進展。另外，在 UNFCCC 會議和其他國際會議上的表現、多邊協定等也在評估範疇。最後，一國氣候政策的評估還包括透過支持和保護森林生態系統生物多樣性以及國家泥炭地保護來減少森林砍伐和破壞等面向。

藉由上述方式能瞭解一國在國內和國際氣候政策的努力和推動情況。至於某些國家在缺乏獨立專家的情況(例如沒有民間組織或研究機構),這些國家的國家政策被簡單地評為平均分數。

3. 評估方法和資料來源

CCPI⁸³的評估方法係以 0 為最小,最高可達 100 分,在一項指標中表現最好的國家(在該指標中)可獲得滿分。但需要注意的是,100 分是理論值,對於每一個指標及總體得分來說,這仍然僅代表相對表現,並不一定展現最優的氣候保護努力。根據各指標得分的加權平均值計算公式如下:

$$CCPI = \sum_{i=1}^n w_i X_i$$

其中, $X_i = 100 \times \frac{Value-min}{Max-min}$, 為標準化指標; w_i 為 X_i 的權重, $\sum_{i=1}^n w_i = 1$ 且 $0 \leq w_i \leq 1$; $i = 1 \dots n$ 為指標數量(目前為 14 個)。

各國在保護氣候的努力差異只能從所取得的分數中呈現,而無法從排名本身看出,例如 2019 與 2023 年 CCPI 排名最高的國家分別是瑞典與丹麥,但兩國在該年的所有指標都不是最佳。因此,一個國家的劣勢或不足之處只能透過單獨的類別和指標來識別。

表 8-2、CCPI 之資料來源

項目	資料來源
能源消費量	取自 IEA
二氧化碳排放量	取自 PRIMAP 資料庫,但因 PRIMAP 資料庫不含 LULUCF 排放量,因而亦參採 FAO 的報告和數據
減量目標	取自各國 NDC,但因為不存在制定 NDC 的明確指導方針和架構,各國的部分目標必須內插/外推至 2030 年,以確保可比性
氣候政策	基於該國民間社會的國家氣候和能源專家每年更新的調查

資料來源: CCPI(2019)⁸⁴、CCPI(2022)⁸⁵、本研究整理。

⁸³ 有幾個面向限制不同年度間 CCPI 結果的比較性。首先,由於部分資料來源為 IEA 和 PRIMAP 等不同資料庫,若資料庫改用不同方法編算資料,會造成 CCPI 使用的數值也改變,因而在各年度間的數據會有所不同;其次,氣候政策是基於專家調查,CCPI 的專家資料庫可能因專家異動(例如離開原工作職位)而造成政策判斷出現差異,雖致力於增加專家數目減少此一問題,但仍無法避免。第三,CCPI 2017 在方法上做了修正以配合《巴黎協定》,指標及其權重有所改變,進一步擴展評估國家在 2030 年目標指標與 2°C 路徑的差異,同時也將原本關注二氧化碳相關的排放擴大為和溫室氣體有關的排放。

⁸⁴ Germanwatch (2019), "The Climate Change Performance Index 2017: Results," <https://ccpi.org/download/the-climate-change-performance-index-2017/>.

⁸⁵ Germanwatch (2022), "The Climate Change Performance Index: Background and Methodology," <https://ccpi.org/wp-content/uploads/CCPI-2023-Background-and-Methodology-1.pdf>.

(二) 永續貿易指數(Sustainable Trade Index, STI)

1. 目的

STI 是由洛桑管理學院與韓禮士基金會共同發布，指標編製和發布目的在於衡量經濟體透過全球貿易和投資實現永續成長的相對能力。由於國際貿易是經濟成長的基礎，但是商品和服務的跨境流通可能產生負面影響，例如干擾勞動力市場、加速環境惡化並加劇社會的不平等，因而需要推動相對應的政策來降低有關的風險和衝擊，讓貿易更具永續性。藉著編製與發布 STI 能讓各界能展開有意義的討論，有利於政策制定者、業務執行者及公民社會的領導者在管理和推動國際貿易時全面地考慮各種因素。

洛桑管理學院與韓禮士基金會將永續貿易定義為「以支持經濟成長、環境保護和強化社會資本等三大國家和全球長期目標的方式」。亦希望能透過 STI 指標對外說明，雖然貿易是經濟發展不可或缺的一部分，但若無法負責任地管理環境、不努力開發社會資本，就沒辦法實現永續的國際貿易體系。

2. 評估面向

STI 在 2016 年首次對外宣布後，原本為 2 年發布一次，但自 2022 年起改為每年發布。主要從經濟面、社會面和環境面作為衡量面向，且為均等權重，並在各面向中列出多項子指標進行評估，各子指標歷經多次調整，於最新的 2024 年報告中，評比國家數總計 30 個(含台灣)，指標架構如表 8-3 所示，相較 2023 年新增加全民健康覆蓋指數。

表 8-3、STI 之評估架構

經濟面(16個子指標)		社會面(11個子指標)		環境面(10個子指標)	
消費者物價指數	國內私部門授信佔 GDP 比重	吉尼係數	政府對人口販運的反應	空氣污染(PM 2.5 水準)	再生能源占總能源需求比重
人均實際 GDP 增長率	外貿和支付風險	教育程度	現代奴隸制風險商品貿易	森林砍伐(國家森林覆蓋率)	貿易中的環境標準
勞動力增長率	貿易成本	勞動標準(勞動權、性平權)	社會流動性指數	廢水處理百分比	排放轉移
外國直接投資·淨流入佔 GDP 比重	貨幣政策干預度	政治穩定與治安	出生時預期壽命	能源密集度	貿易中自然資源的比例
固定資本形成毛額佔 GDP 比重	出口集中度	強迫勞工或童工生產的商品	經濟發展不均衡度	生態足跡	碳定價及人均碳排放量
關稅和非關稅壁壘	商品和服務出口總額		全民健康覆蓋指數		
貿易自由化程度	技術創新				
匯率穩定性	技術基礎設施				

資料來源：本研究整理。

STI 旨在測量一個國家在參與國際貿易的過程中，支持國內外經濟長期增長、環境保護和強化社會資本的能力，在 2024 年的報告裡，分別從經濟、社會與環境等，擇取 16 個子指標、11 個子指標和 10 個子指標進行評估，相較 2023 年新增加全民健康覆蓋指數。

(1) 經濟面：

衡量一個經濟體透過國際貿易確保和促進經濟成長的能力。在這一類別

中，經濟體所獲得的分數顯示貿易體系與經濟成長之間的關聯。其中一些指標衡量貿易基礎設施的品質，而另一些指標則衡量國際貿易的便利程度，例如經常帳可兌換性、匯率穩定性以及與跨境交易相關的貿易成本。另外，透過評估一經濟體的雙邊貿易目的地及其出口按部門的集中程度來衡量多樣性，因為出口市場和產品多樣化的經濟體更有能力吸收外部經濟衝擊。

(2) 社會面：

社會因子對於一個經濟體的長期國際貿易能力至關重要。根據鼓勵和支持人力資本發展的環境來進行衡量，例如教育程度和勞工標準。社會面還涵蓋影響民眾對貿易擴張支持的因素，例如收入不平等、政治穩定、強迫勞動和童工生產的商品及政府對人口販運的反應。

(3) 環境面：

衡量一個經濟體的貿易支持永續資源的程度。這些因素包括衡量貿易中不可再生自然資源，以及因經濟成長和參與全球貿易體系而產生的外部性管理。雖然一個經濟體參與全球貿易體系的能力取決於經濟發展，但實現永續貿易需要審慎管理自然資源並限制經濟體經濟中的外部性，以促進其整體環境資本。

3. 評估方法和資料來源

STI 為每個指標擇定一個參考年(Reference Year)。一般是用前一年資料，但某些數據可能會因資料的可取得性選擇其他年份。假使沒有參考年數據，則進一步檢查參考年的前五年，選擇與參考年最接近年份的數值，若仍沒有適宜資料，就會將該指標歸類為不可用，並將欄位留空，也不對該指標進行排名。在數值的處理上，則依循下列步驟：

- (1) 確認離群值：若一經濟體的某項數值在四倍標準差⁸⁶之外，則視為離群值。
- (2) 資料常態性：當偵測到某個指標的為離群值時，會將該數值取對數，再將該對數值取代排名計算中的原始值，從而縮小離群值與樣本中其他經濟體之間的差距。
- (3) 使用最小最大值法(Min-max Method)將指標標準化為0(最差)至100(最佳)的尺度範圍⁸⁷，以利於比較。假使某一指標是越高(低)表現越好，且該經濟體的數值最高(低)，則給予100，反之則給0。

⁸⁶ 因為資料的變異性小，使用三倍標準差的門檻值將導致大量指標被標記為離群值。透過將門檻延長至四倍，降低發生這種情況的可能性。

⁸⁷ Hinrich Foundation and IMD (2020), "Sustainable Trade Index 2020," <https://www.hinrichfoundation.com/research/project/sustainable-trade-index/>.

(4) 各項子指標藉由標準化調整後，再透過均等權重計算出各面向數值，此作法可最大限度地減少指標分佈不均勻的影響，確保可比較性。

編製 STI 的資料來源均由公開資訊取得，例如經濟面指標取自 IMF、全球三大信評機構、World Bank、UNCTAD、WTO；社會面指標取自 World Bank、Global State of Democracy Indices、US Bureau of International Labor Affairs。環境面指標取自 OECD、IEA、Global Footprint Network、UNCTAD 等。台灣資料來源則主要為行政院主計總處，如表 8-4 所示。

表 8-4、STI 之資料來源

項目	資料來源
經濟面	IMF、信評機構(S&P、Moody's、Fitch)、國際透明組織(Transparency International)、World Bank、UNCTAD、WTO、UNESCO, WIPO、COMTRADE、NSF、ITU (via World Bank)、Ookla、M-Labs、The Bandwidth Place、台灣：主計總處
社會面	World Bank、台灣：家庭收支調查、Hong Kong, SAR: Census and Statistics Department、New Zealand:OECD、HDR、THES、Global State of Democracy Indices、Political Stability and Absence of Violence、US Bureau of International Labor Affairs(ILAB)、US Department of State、Global Slavery Index、Comtrade + Global、Slavery list、WEF、UN HDR、The Fund for Peace - Fragile States Index
環境面	OECD、台灣：環境部、Hong Kong, SAR: Environmental Protection Department、Yale Environmental Performance Index、UN SDG Indicators Database, Taiwan: The Statistical Yearbook of Construction and Planning Agency, Ministry of the Interior、IEA、UN Treaty Collection、Taiwan: Management Regulations for the Import and Export of Industrial Waste、Global Footprint Network、UNCTAD、World Bank、EDGAR、Global Carbon Project

資料來源：本研究整理。

(三) 環境績效指標(Environmental Performance Index, EPI)

1. 目的

EPI 是由耶魯大學發布，考量制定環境政策是一項艱鉅任務，面對因果複雜性、不完整的數據和諸多不確定性，決策者必須解決廣泛的污染控制和自然資源管理挑戰，因此需要更好的量測和數據作為堅實的分析基礎，讓政府能夠解釋低於標準的績效、協助確定優先事項，更好地將有限財政資源配置於適合的環境保護項目，以利進行後續政策應用。

EPI 的編製和發布目的在於瞭解一國在改善環境健康、保護生態系統活力和減緩氣候變遷方面的進展，著重在(1)減少環境對人類健康的壓力；(2)促進生態系統活力和健全的自然資源管理，希冀藉由量化指標的呈現，進行跨國比較，從中發現與自己表現相近的國家、位居全球領導地位的國家和落後國家，從中確定最佳實務和成功的政策典範⁸⁸。

⁸⁸ Yale Center For Environmental Law And Policy, 2006 Environmental Performance Index (EPI). <https://epi.yale.edu/>

EPI 每兩年發布一次，在 2006 年首次宣布後，歷經多次改版，例如 2006 年版裡，環境健康和生態系統活力使用六個政策類別，包含環境健康、空氣品質、水資源、生產性自然資源、生物多樣性和棲息地以及永續能源，再細分成 16 個指標來衡量，評比國家數為 133 個(含台灣)；2008 年的政策類別維持六個，但分析指標則擴增至 25 個、國家數增加為 149 個⁸⁹。在 2024 年報告中⁹⁰，基於追蹤聯合國永續發展目標、2015 年《巴黎氣候變遷協議》的氣候緩解目標，及昆明-蒙特利爾全球生物多樣性架構的生物多樣性保護目標，最新的 EPI 包含三個主要政策目標及 11 個評比面向，指標架構體系如表 8-5 所示。

表 8-5、EPI 之評估架構

政策目標	問題類別	權重	指標	權重
氣候變遷 (30%)	氣候變遷 減緩	100%	2050 年預計溫室氣體排放量	3%
			2050 年預計溫室氣體排放量相對碳預算	2%
			二氧化碳增長率	25%
			二氧化碳趨勢相對於碳預算配額	2%
			甲烷增長率	10%
			氧化亞氮增長率	3%
			氟化氣體增長率	7%
			黑碳增長率	5%
			以 GHG 密集度調整之 GHG 成長趨勢	20%
			以人均 GHG 排放量調整之 GHG 成長趨勢	20%
			土地利用、土地覆蓋變化和林業產生的淨碳通量	3%
環境健康 (25%)	空氣品質	68%	PM2.5 暴露	38%
			家庭固體燃料	38%
			臭氧暴露	9%
			氮氧化物暴露	6%
			二氧化硫暴露	3%
			一氧化碳暴露	3%
			揮發性有機化合物暴露	3%
	衛生與飲 用水	20%	不安全的飲用水	60%
			不安全的衛生設施	40%
	重金屬	8%	鉛暴露	100%
	廢棄物 管理	4%	人均固體廢棄物產生量	40%
			固體廢棄物回收率	20%
			能源及原物料廢棄物回收率	40%

[//doi.org/10.7927/H44M92GX](https://doi.org/10.7927/H44M92GX).

⁸⁹ Yale Center For Environmental Law And Policy, 2008 Environmental Performance Index (EPI). <https://doi.org/10.7927/H4HT2M77>.

⁹⁰ Block, S., Emerson, J. W., Esty, D. C., de Sherbinin, A., Wendling, Z. A., et al. (2024). 2024 Environmental Performance Index. New Haven, CT: Yale Center for Environmental Law & Policy. epi.yale.edu.

政策目標	問題類別	權重	指標	權重
生態活力 45%	生物多樣性與棲息地	56%	海洋生物多樣性重點保護區	12%
			海洋和沿海棲息地保護	12%
			海洋保護嚴謹度	2%
			保護區代表性指數	12%
			物種保護指數	16%
			陸地生物聚落保護	10%
			陸地生物多樣性重點保護區	10%
			保護區有效性	2%
			保護區中農田與建築面積占比	2%
			紅皮書名錄指數	12%
			物種棲息地指數	8%
			生物氣候生態性韌性指數	2%
			森林	11%
	完整森林景觀損失率	30%		
	持久樹木覆蓋率	25%		
	淨樹木覆蓋率	10%		
	森林景觀完整指數	5%		
	漁業	4%	魚類存量狀況	15%
			海洋食物鏈指數	5%
			拖網捕魚量	60%
			捕獲魚的棄置比率	20%
	空氣污染	13%	二氧化硫增長率	42%
			氮氧化物增長率	42%
			農田的臭氧濃度	8%
			生物多樣性關鍵領域	8%
	農業	7%	相對作物產量	40%
			永續氮管理指數	40%
			磷過剩指標	5%
農藥污染風險			15%	
水資源	11%	人均廢水產生量	10%	
		廢水收集率	40%	
		廢水處理率	40%	
		廢水再利用率	10%	

資料來源：Block, S., Emerson, J. W., Esty, D. C., de Sherbinin, A., Wendling, Z. A., et al. (2024). 2024 Environmental Performance Index. New Haven, CT: Yale Center for Environmental Law & Policy. epi.yale.edu，本研究整理。

其中，「氣候變遷」追蹤各國氣候污染物的排放情況，評比對減緩氣候變遷的努力；「環境健康」衡量環境污染對人類福祉的影響，涵蓋空氣品質、衛生和飲用水、重金屬和廢棄物管理等；「生態系統活力」評估自然資源利用的永續性和自然生態系統的保護，包括生物多樣性與棲息地、森林、空氣污染、農業、漁業和水資源等六個類別。再從上述三大面向細分出 58 項指標，比 2022 年的 40 項指標大幅增加⁹¹。

不同年度間的指標權重則略有不同。由於環境健康數值的標準差(18.8)高於氣候變遷(12.2)和生態系統活力(13.2)，如果為每個政策目標分配總權重的三分之一，環境健康將對總體得分產生巨大影響。為解決此問題，2024 年 EPI 為環境健康、氣候變遷和生態系統活力分別設定 25%、30%及 45%的權重。

2. 評估面向

- (1) 氣候變遷減緩：氣候變遷造成野火、熱浪和乾旱等事件不斷增加，海洋酸化和海洋熱浪使珊瑚礁等寶貴的生態系統承受巨大壓力，嚴重衝擊生物多樣性，加上海平面上升威脅著沿海和低窪社區，日益嚴重的乾旱使數百萬人面臨水和糧食不安全的問題，因而透過指標評估 180 個國家在緩解氣候變遷的有效性。
- (2) 空氣品質：空氣污染仍是對公共衛生最嚴重的環境威脅，其與肺部和心血管疾病等嚴重的健康併發症有關。儘管空氣污染對公共衛生很重要，但要準確量化其影響的規模，及其對各國環境政策的反應仍具有挑戰性。指標中納入此面向的目的在於提供有關最新全球空氣品質趨勢和各國空氣品質管理績效的全面見解，進而幫助政策制定者做出明智決策並制定有效的空氣污染控制政策。
- (3) 衛生和飲用水：缺乏安全飲用水和衛生設施，加劇健康和生活條件的不平等。指標為各國提供資訊，以便更好地了解其衛生和水基礎設施是否充分保護其民眾健康。
- (4) 重金屬：砷、鎘、鉻、鉛和汞均對人體有害，但受限於資料，EPI 重點關注鉛暴露對公共衛生的影響，作為重金屬污染的代表性標準。
- (5) 廢棄物管理：全球三分之一的廢棄物被丟棄在露天垃圾場，四分之一放置於簡陋垃圾掩埋場中，造成疾病傳播及龐大的社會成本。各國數據雖不完善，EPI 仍基於公開數據，嘗試提供各國在循環經濟方面之進展。
- (6) 生物多樣性與棲息地：生物多樣性的喪失已成為最不可逆轉的問題之一，保護生物多樣性可增強生態系對人為干擾和氣候變遷的恢復能力。

⁹¹ Wolf, M. J., J. W. Emerson, D. C. Etsy, A. de Sherbinin, Z. A. Wendling, et al. 2022. Environmental Performance Index 2022. New Haven, CT: Yale Center for Environmental Law and Policy. <https://epi.yale.edu/downloads/epi2022report06062022.pdf>.

- (7) 森林：人類對森林的砍伐是碳排放的主要來源與生物多樣性喪失的關鍵。指標納入有關森林損失、淨覆蓋變化和完整性的數據，了解各國為制止和扭轉森林砍伐所做的努力。
- (8) 空氣污染：空氣污染對生物多樣性和生態系統構成威脅，像二氧化硫和氮氧化物是酸雨的前驅物，酸雨會改變土壤化學性質從而損害森林健康；臭氧會抑制植物的光合作用活動，影響自然生態系的功能和農地生產力。因此，EPI 追蹤酸雨前驅排放成長率、衡量各國農地和關鍵生物多樣性區域臭氧暴露情況。
- (9) 農業：隨著全球人口增長和收入提升，2050 年對食品、飼料和生物燃料的需求預計將增加 50%。然而，鑑於氣候和生物多樣性危機，難以將更多的自然生態系轉變為農田和牧場，且過度使用磷肥也會污染地表水，同樣威脅生態系和人類健康。為衡量在可持續集約化農業方面的進展，EPI 對各國農業生產力、農藥和化肥的過度使用進行評分。
- (10) 漁業：野生漁業開發造成大規模生態退化，將物種推向滅絕的邊緣，並污染全球海洋。EPI 描繪各國漁業可持續性的整體情況，量化有害和浪費捕撈方式的普遍程度，並評估魚群的健康狀況。
- (11) 水資源：水對於維持生命和生態系統活力至關重要，在氣候變遷、人口和農業生產預期成長的情況下，未來水資源短缺可能進一步惡化，突顯擴大基礎設施、廢水再利用的急迫性。

3. 評估方法和資料來源

EPI 原則為數據驅動、方法嚴謹、可重複且易於理解的指標，透過公開資料，同時委請歐盟委員會聯合研究中心(European Commission Joint Research Centre, JRC)對 EPI 進行第三方審核。納入 EPI 的指標均追蹤一特定的永續性問題，讓 EPI 政策制定者能追蹤隨時間經過下，國家層面的環境表現。指標的選取原則⁹²：

- (1) 相關性：衡量與大多數國家相關的環境問題。
- (2) 績效導向：衡量政策介入可改善的環境問題。
- (3) 著重結果：衡量現實世界的環境結果，而非政策制定者的意圖、承諾、法規或其他政策投入。
- (4) 既定方法：應使用經同儕審查或國際科學組織認可的方法。
- (5) 驗證結果：應由第三方組織獨立驗證，或應透過易於審計的透明報告系

⁹² 實務上 EPI 通常依賴不符合某些標準的資料集，原因有二。首先，環境問題對於評估環境績效雖然重要，但採用的指標可能數據不完善，是故，指標雖會向政策制定者呈現，惟通常在 EPI 的權重較低。其次，在衡量新出現的環境問題時，衡量方法可能尚未完全建立，全球報告體系也可能不存在，所以可能會仰賴示範指標引起人們對此議題的關注，並尋求國際科學界和政策制定界的回饋進行修正。

統提交，即 EPI 不直接接受來自政府的數據。

- (6) 空間完整性：資料應適用大多數國家，並使用各地一致的方法得出的。
- (7) 時間完整性：應在跨越數年時間內具可用性，以追蹤隨時間經過的變化。
- (8) 更新度：數據應盡可能更新至近期，以反映當前的環境績效狀況。
- (9) 開放資料：資料應公開供大眾免費存取。

EPI 將複雜的環境數據簡化為直接指標，以評估永續發展進展。這些指標對每個國家/地區進行評分，範圍從 0(最差表現)到 100(最佳表現)。由於各國土地面積、經濟和人口規模差異很大，為進行公平比較，EPI 將數據以比例、比率和人均單位進行衡量，而非原始單位。例如，將溫室氣體排放總量除以各國人口來比較人均排放量，也用同樣的方法比較各國廢水和固體廢棄物的產生情況。

在標準化方法上，EPI 採距離到目標法(Distance-to-target)，各國分數反映它們與最佳和最差表現目標的接近程度，公式為： $\text{標準化值} = \frac{X-W}{B-W} \times 100$ 。其中，X 表示一國數值；W 為最差績效目標值；B 為最佳績效目標值。如果一國表現大於 B 或小於 W，則會將其分數限制為 100 或 0。在為每個指標設定最佳和最差績效目標方面，則根據以下優先順序：(1) 國際協議、條約或機構中設定的績效目標⁹³；(2) 基於專家建議的績效目標；(3) 基於國家/地區分數百分位數的績效目標。然而，國際協議和專家很少設定最差績效標準，故 EPI 通常仰賴百分位數來確定最差績效目標，在設定基於百分位數的目標時，會使用每個指標的所有可用年份和國家的數據來計算百分位數⁹⁴。

EPI 的資料取自各個不同單位的公開數據，例如氣候變遷類指標的資料大多取自波茨坦氣候影響研究中心(Potsdam Institute for Climate Impact Research)；環境健康類的數據主要來自健康指標和評估研究所(Institute for Health Metrics and Evaluation)，生態系統活力則因指標較多，如表 8-6 所示。

表 8-6、EPI 之資料來源

項目	資料來源
氣候變遷	Potsdam Institute for Climate Impact Research, Mullion Group, Community Emissions Data Systems 等
環境健康	Institute for Health Metrics and Evaluation, Chen et al.
生態系統活力	World Database on Protected Areas, Flanders Marine Institute Maritime Boundaries Geodatabase, World EEZ, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Community Emissions Data Systems, Mullion Group, Potsdam Institute for Climate Impact Research, Sea Around Us, UNSD, OECD, Eurostat

資料來源：本研究整理。

⁹³ 如愛知生物多樣性目標(Aichi Biodiversity Targets)，2020 年至少 17%的陸地、內陸水域和 10%沿海和海洋區域受到有效管理。故生態系統活力指標的陸地生物聚落保護，其最佳值為 17%、最差值為 0%。

⁹⁴ 舉例而言，在健康環境中的家庭固體燃料、臭氧暴露和氮氧化物暴露等指標，是以第 5 百分位之數值為最佳、第 99 百分位之數值為最差。

(四) 能源轉型指標(Energy Transition Index, ETI)

1. 目的

ETI 由世界經濟論壇發布，原稱「能源建構績效指標(Energy Architecture Performance Index, EAPI)」。2014 年首次對外宣布後，歷經多次改版。有感於當今的能源系統所面臨的挑戰，無法單由政府、行業、公司或其他機構來解決，且有效的能源轉型需要更廣泛的專業知識以及資源，故 2018 年將 EAPI 改編為能源轉型指標(Energy Transition Index, ETI)，ETI 的編製目的在於依據各國過去各衡量指標之變化情形，分析各國能源轉型當前的困境，並給予未來發展建議。

2. 評估面向

2018 年 ETI 在評比面向包含系統表現及轉型準備程度，在權重上分別為 50% 與 50%，評比國家數為 114 個(不含台灣)⁹⁵；2023 年版的評比國家數為 120 個(不含台灣)，面向包含系統表現及轉型準備程度，權重分別為 60% 與 40%，在各面向下尚有各項指標。其中，系統表現是基於能源系統根據能源三角原則⁹⁶的實現程度來衡量當前績效，一個國家能源轉型的目標應該是同時實現這三個優先事項，從而保持平衡。再者，一國能源轉型的進展取決於能否創造良好的環境，故轉型準備程度包括政治承諾、靈活的監管結構、穩定的商業環境、投資和創新激勵、消費者意識和新技术的採用⁹⁷。2024 年的報告⁹⁸則大致維持 2023 年的分析架構，但在永續性中的溫室氣體減緩指標改為低碳化能源，總共有 46 項指標衡量各國的能源轉型進程，如表 8-7 所示，詳細的 2024 年的衡量指標則如表 8-8 所示。

表 8-7、ETI 之評估架構

		ETI 2023(2024)		ETI 2018	
		構面及指標		構面	
系統表現 (60%)	公平性(33%)	能源可及性	系統表現 (50%)	經濟發展與成長(33%)	
		能源可負擔性		環境永續(33%)	
		經濟發展		能源安全與取得(33%)	
	安全性(33%)	供應安全		管理及政治承諾(1/6)	
		韌性		機構與治理(1/6)	
		可靠性		資本與投資(1/6)	
永續性(33%)	能源效率	轉型準備程度 (50%)	基礎設施和創新的商業環境(1/6)		
	溫室氣體減緩 (低碳化能源)		人力資本和消費者參與(1/6)		
	潔淨能源		能源系統結構(1/6)		
轉型準備程度 (40%)	法規架構與投資(50%)		法規和政治承諾		
			財務和投資		
			教育和人力資本		
	促成因素(enabling factor)(50%)	創新			
		基礎設施			

資料來源：本研究整理。

⁹⁵ WEF (2018), "Fostering Effective Energy Transition 2018," <https://www.weforum.org/publications/fostering-effective-energy-transition/>.

⁹⁶ 即促進支持包容性經濟發展和成長、安全可靠的能源取得以及環境永續性的能源系統。

⁹⁷ WEF (2023), "Fostering Effective Energy Transition 2023," <https://www.weforum.org/publications/fostering-effective-energy-transition-2023/>.

⁹⁸ WEF (2024), "Fostering Effective Energy Transition 2024," <https://www.weforum.org/publications/fostering-effective-energy-transition-2024/>.

表 8-8、ETI 之衡量指標(2024 年)

構面		衡量指標
公平性 (33%)	能源可及性	城市人口中有電力供應的比例
		鄉村人口中有電力供應的比例
		使用清潔燃料烹飪和取暖的人口比例
	能源可負擔性	家庭電價(稅後)
		工業電價
		批發天然氣價格
	經濟發展	能源補貼占 GDP 百分比
		淨燃料進口占 GDP 的百分比
		低碳技術的比較利益
安全性 (33%)	供應安全	進口來源的多元化
		總初級能源供應的多元化
		淨能源進口占能源使用的百分比
	韌性	電力生產的多樣性
		電力系統的靈活性
		天然氣供應的韌性
	可靠性	系統平均中斷持續時間指數
		系統平均中斷頻率指數
		電力輸、配損耗(線損率)
永續性 (33%)	能源效率	能源密集度
		人均能源消費量
	低碳化能源	人均二氧化碳排放量
		總初級能源供應的二氧化碳強度
	潔淨能源	生產過程中的甲烷排放量
	最終能源消耗中潔淨能源的比例	
法規架構 與投資 (50%)	法規和政治承諾	RISE 能源獲取分數
		RISE 能源效率分數
		RISE 再生能源分數
		RISE 潔淨烹飪分數
		國家淨零承諾
		政策穩定性
		碳定價分數
	財務和投資	信用評級
		國內私部門信貸佔 GDP 百分比
		外人直接投資(FDI)的限制性
		法律規則
		流向發展中國家的國際金融流動
		再生能源投資佔 GDP 的百分比
促成因素 (enabling factor) (50%)	基礎設施	再生能源裝置容量設置量
		交通基礎設施品質
		數位基礎設施準備度排名
	創新	創新商業環境
		公共研發支出佔 GDP 比例
		環境相關技術的發展佔所有技術的百分比
	教育和人力資本	低碳產業的就業機會
		教育品質
		全球人才競爭力指數

資料來源：WEF(2024)、本研究整理。

能源是經濟和人類活動的驅動力，獲得可靠和安全的能源供應是良好能源系統的關鍵要素。能源供應的安全性和可靠性需要靈活且有彈性的基礎設施、多元化的供應基礎以及應對地緣政治、技術、金融風險的治理和緊急機制。鑑於能源與經濟發展和成長密切相關，各國需要謹慎對待安全性和可靠性，同時保持可負擔性，以確保其公民能夠獲得公共服務、產業能夠保持競爭力。強力的能源系統也有助於經濟產出和就業，並產生財政收入。

因此，2024年版的ETI在「系統表現」上，分成公平性、安全性以及永續性三個面向，權重各占三分之一，說明如下：

- (1) 公平性：在於確保所有人都能公平分配、獲得和負擔得起能源，並共同努力與從永續發展中獲益，以促進公平的經濟成長和提高生活水平。
- (2) 安全性：在於透過能源結構、能源貿易夥伴和發電來源這三個面向的多元化來確保供應安全，且除了電網的可靠性之外，天然氣供應和電力系統的韌性也有助於能源安全。
- (3) 永續性：納入需求面和供應面指標，減少能源供應中的二氧化碳和甲烷密集度、提高能源效率，透過降低人均能源和排放足跡促進負責任的消費，並提高潔淨能源在最終能源消費中的份額。

其次，針對國家提高能源系統績效行動能否成功，取決於一系列廣泛的因素，因而「轉型準備程度」是指一國在政治、經濟和社會上，允許向更安全、可靠、包容和永續的能源系統轉型的準備度。一個國家為轉型做好準備的程度基於現有能源基礎設施的完備度、長期政治承諾的可信度及為能源轉型提供支持的資金可及性。監管架構需要平衡提供確定性的需求，同時展現靈活性，以便在有效地整合新技術和商業模式。此外，能源轉型也仰賴有效的市場設計、投資吸引力、夥伴關係及創新環境，更重要的是，消費者行為將決定對未來能源系統的接受程度。

3. 評估方法和資料來源

ETI各項衡量指標之單位不同，故採最小最大值法(Min-max Method)，將原始資料進行標準化。若原始數據為數字越大越好者，則標準化公式： $\frac{Value-Min}{Max-Min}$ ；若原始數據為數字越小越好者，則標準化公式： $\frac{Max-Value}{Max-Min}$ 。各指標的標準化數值乘以其權重再加總後，即可獲得該國之該指標分數，惟若指標資料數據出現 n/a 時，會將其權數攤提至該所屬分類之其他細指標。

資料主要取自世界銀行(World Bank)、國際天然氣聯盟(International Gas Union, IGU)、國際貨幣基金(International Monetary Fund, IMF)、聯合國統計司、IEA、國際再生能源總署(International Renewable Energy Agency, IRENA)等國際組織，如表 8-9 所示。從國際機構蒐集，較能讓資料來源完善且具備可信度，同時可被公眾取得及具透明性，亦因國際機構在資源充足下會定期更新有關資訊，能

夠在長期下持續追蹤和衡量各國的概況。

表 8-9、ETI 之資料來源

指標名稱	資料來源
住宅電力價格	World Bank
工業電力價格	World Bank
天然氣批發價格	IGU
能源補貼占 GDP 比重	IMF
能源密集度	IEA
人均二氧化碳量	IEA
每單位初級能源總供給之二氧化碳量	IEA
電氣化比率	World Bank
潔淨烹飪燃料取得比率	聯合國統計司
能源淨進口占能源使用比重	IEA
進口來源國的多樣程度	IEA
初級能源總供給的多樣程度	IEA
電力供給品質	World Bank
政策穩定性	WEF
RISE 能源效率分數	World Bank
RISE 再生能源分數	World Bank
RISE 能源取得分數	World Bank
法律規則	World Bank
透明度	國際透明組織
信用評等	S&P、Fitch、Moody's
信貸可及程度	World Bank
對能源效率之投資	IEA
再生能源裝置容量設置量	IRENA、EIA
交通基礎設施的品質	WEF
技術的可用性	WEF
創新的商業環境	WEF
低碳行業的就業機會	IRENA
教育品質	WEF

資料來源：梁啟源(2017)、梁啟源(2019)、本研究整理。

(五) 淨零排放經濟指數(Net Zero Economy Index, NZEI)

1. 目的

NZEI 是由資誠聯合會計師事務所發布，指標的編製和發布目的在於追蹤全球能源相關領域的去碳化⁹⁹，透過計算不同國家的碳密集度(t-CO₂/百萬美元 GDP)及未來所需的碳密集度變化率，將 2100 年限制在 1.5°C~2°C 的升溫範圍內¹⁰⁰。

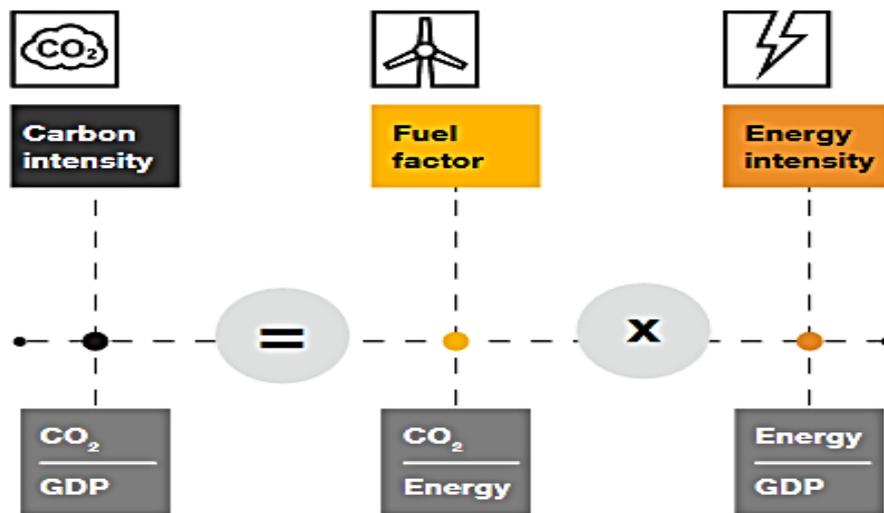
⁹⁹ 不包括農業、林業和其他土地利用(AFOLU)排放和非二氧化碳排放。

¹⁰⁰ PwC (2021), "Net Zero Economy Index 2021," <https://www.pwc.com/vc/en/publicaciones/assets/net-zero>

NZEI 著重於 G20 國家，並進一步將 G20 國家分為 G7 經濟體(美國、日本、德國、英國、法國、義大利、加拿大)、E7 經濟體(涵蓋巴西、俄羅斯、印度和中國等金砖四國與印尼、墨西哥和土耳其)，及其他 G20 經濟體(澳洲、韓國、歐盟、南非、沙烏地阿拉伯、阿根廷)等三個群體分別探討，但是並不包含台灣。

2. 評估方法和資料來源

淨零排放經濟指數在 2021 年首次對外宣布後，迄今方法論並未改變和調整，指標的評比面向包含碳密集度、燃料因子及能源密集度等三項指標，如圖 8-2 所示，並說明各指標意涵如後。



資料來源：PwC(2023)。

圖 8-2、NZEI 架構

- (1) 碳密集度：使用 IPCC 碳預算來計算未來需要減少多少排放量，並將其除以 GDP 的預期成長量。用意在於觀察必須減少的排放量才能維持預期的 GDP 成長，從而了解將排放與經濟成長脫鉤所需的努力。
- (2) 燃料因子：用於衡量消耗每單位能源所排放的 CO₂，亦即能源消耗的綠色程度。顯示一個國家的能源結構轉向再生能源的情況，並且可以反映遠離排放量最高的化石燃料(例如煤炭)之趨勢。消耗再生能源的排放量可以忽略不計或為零，從而燃料排放係數降低到零。
- (3) 能源密集度：衡量單位 GDP 所消耗的能源，代表產生一單位 GDP 所需要的能源消費量。

計算淨零排放經濟指數所需之能源消費量、CO₂ 排放量和 GDP 的數據來源，彙整於表 8-10 中。其中，能源消費量取自 BP 公眾有限公司(BP plc，前稱英國石油)之《世界能源統計回顧》。該資料庫紀錄每個國家各種燃料類型的能源消耗以及基於石油、天然氣和煤炭消耗的 CO₂ 排放量。不過石化業的石油產品和天然氣

使用，或用於道路建設瀝青生產的石油，不包括在分析中。CO₂排放量則是使用 IPCC 估算的化石燃料碳預算資料(取自 IPCC 關於全球暖化 1.5°C 的特別報告，SR15)來估算與能源相關的 CO₂ 排放量。GDP 的歷史資料取自世界銀行；長期 GDP 預測資料則取自經濟合作暨發展組織(Organisation for Economic Cooperation and Development, OECD)的兩個資料庫。第一個資料庫涵蓋 2022 年和 2023 年，考慮 COVID-19 等當前世界事件的影響，更新時點為 2022 年 6 月。第二個資料庫包含 2024-2060 年的預測數據，於 2021 年 10 月更新。全球 2061-2100 年的 GDP 預估值則由資誠聯合會計師事務所更新。

表 8-10、NZEI 之資料來源

項目	資料來源
能源消費量	取自 BP 公眾有限公司(BP plc, 前稱英國石油)之《世界能源統計回顧》、能源研究院《世界能源統計年鑒》
二氧化碳排放量	透過使用能源消耗量數據並應用 IPCC 排放因子清單中的預設二氧化碳、燃燒排放因子進行計算，且不包含非燃燒活動
GDP	歷史數據參考世界銀行。長期 GDP 預測資料則取自 OECD 以及資誠聯合會計師事務所

資料來源：PwC(2024)、本研究整理。

(六) 小結

表 8-11 整理了前述五個指標在預期使用者、發布頻率、評比項目、評估方法和資料來源等面向的異同後，可以發現：

1. 多數指標設定的使用對象為政策制定者，讓政府相關單位能持續追蹤一個國家邁向淨零的進展，以及相對其他國家的成效，透過跨國比較瞭解自己國家所處的狀態，進而從中調整。
2. 多數指標採一年一次的頻率發布，僅 EPI 為兩年一次。由於各指標在建構時大多會考量以公開數據為基礎，方有利於定期編製和發布結果，進而提供各國參考，在更新頻率上也會受限於所參採的資料來源。
3. 就各指標選取的衡量面向與指標項目言，CCPI 採用 14 個指標，大部分著重在衡量一國環境面情況，少部分用於探討一國能源耗用狀態；STI 考慮 72 個指標，大致衡量一國在經濟發展、環境氣候和社會面的表現，作為永續貿易的支持基礎；EPI 雖有 58 個指標，但僅著重環境面成效，目的在深入地觀察一國在氣候變遷、環境健康與生態活力的努力。ETI 則以能源三角搭配社經制度之原則，分別從能源、產業、環境氣候和社會等面向的 46 個指標，衡量一國的能源轉型表現；NZEI 則簡要地以碳密集度為核心，分析一國距離 2050 淨零目標的碳密集度差距。
4. 在指標權重方面，除了 STI 和 NZEI 採均等權重外，其餘三項指標則是在分析面向和子指標中設計不同權重，但其中僅有 EPI 解釋了設計不同

表 8-11、各淨零排放評比指標之綜整比較

		CCPI	STI	EPI	ETI	淨零排放指數
預期使用者		政策制定者 民間團體	政策制定者	政策制定者	政策制定者 投資者	政策制定者
評比國家數		63 (含台灣)+EU	30 (含台灣)	180 (含台灣)	120 (不含台灣)	20 (不含台灣)
發布頻率		每年一次	每年一次	每兩年一次	每年一次	每年一次
衡量 面向	能源面	V			V	
	產業面(經濟發展)		V		V	V
	生活面(環境/氣候)	V	V	V	V	V
	社會面		V		V	
指標數 (報告年份)		14 (2024 年)	72 (2024 年)	58 (2024 年)	46 (2024 年)	3 (2024 年)
指標權重		不同指標 有不同權重	均等權重	不同指標 有不同權重	不同指標 有不同權重	均等權重
指標標準化方法		最小最大值法	最小最大值法	距離到目標法	最小最大值法	不須標準化
指標經第三方審核		無	無	有，JRC	無	無
是否提供原始資料		可申請但需付費	有，免費	有，免費	無	有，免費

資料來源：本研究整理。

權重的原因。

5. 由於各淨零排放評比指標涵蓋的指標數目不同，指標中的衡量單位也不一樣，為了能具比較性，多數指標均將數值予以標準化，且大多為「最小最大值法」，僅 EPI 採用「距離到目標法」。
6. 在資料公開程度和第三方驗證方面，STI、EPI 和 NZEI 有公開原始資料可供驗證及後續使用；CCPI 則基於資料處理需投入人力和時間，因而在非商業用途部分可申請資料但需付費；至於 ETI 則未公布原始資料。另外，在本文分析的五項指標中，僅 EPI 有委請 JRC 進行第三方審核，可有效提高指標的可信度。
7. 在編製指標的資料來源方面，基於能定期更新、長期追蹤、公開透明、具可及性、相關性、可比較性等原因，大多取自國際機構(如 IEA、World Bank)發布的歷史資料進行編算，僅 CCPI 採用問卷調查資訊。

三、主要國家淨零排放評比實績與可達成性

本節依據前述五項指標，彙整美國、歐盟(或德、法)、英國、日本、韓國、中國與台灣在各指標之淨零轉型整體表現，如表 8-12 所示，並說明如後。

由前述整理可知，CCPI 和 EPI 側重於衡量一國在環境面向的績效表現。其中，CCPI 又以評估一國的過去發展趨勢，及相對未來、淨零目標下的差距給予評級；EPI 則儘可能參考歷史數據，深入探討各國在不同環境指標下的表現。值得注意的是，CCPI 考量較多政策型目標，而非以歷史資料呈現一國的真實表現，也因採用問卷方式調查非政府組織專家對該國政策的主觀性判斷，在受訪者數量有限下難以兼顧客觀性，使結果有所偏差。至於 STI 與 ETI 除了考慮環境面外，也納入經濟面、社會面等在淨零轉型過程應留意的面向；NZEI 著重於衡量一國的去碳化效率。

表 8-12、各國於各指標中的排名和相對位置-總指標

各國於指標中之排名					
國家	CCPI	PwC	STI	EPI	ETI
美國	57	11	10	34	19
歐盟	16	3			
德國	14	4		3	11
法國	37	1		13	5
英國	20	2	2	5	13
中國大陸	51	19	16	154	17
日本	58	8	5	27	26
韓國	64	16	6	57	23
台灣	61	7	9	59	
評比總國家數	63	20	30	180	120
報告發布年	2024	2024	2024	2024	2024

各國於指標中排名之相對位置(百分位)					
國家	CCPI	PwC	STI	EPI	ETI
美國	85	55	33	19	16
歐盟	24	15			-
德國	21	20		2	9
法國	55	5		7	4
英國	30	10	7	3	11
中國大陸	76	95	53	86	14
日本	87	40	17	15	22
韓國	96	80	20	32	19
台灣	91	35	30	33	

註：
 1.相對位置=各國排名除以評比總國家數
 2.數值越低(高)表示相對其他國家越佳(差)

資料來源：本研究整理。

若就 CCPI 和 EPI 的整體評估結果而言，歐洲國家的績效普遍相對美國及亞洲國家為佳，像德國、法國和英國在 2024 年 CCPI 的名次分別為第 14 名、第 37 名與第 20 名，相對位置則為百分之 21、百分之 55 和百分之 30；美、日、韓、台、中的名次則為第 57 名、第 58 名、第 64 名、第 61 名及第 51 名，相對位置是百分之 85、百分之 87、百分之 96、百分之 91 及百分之 76。不過若觀察 2024 年 EPI 的結果，會發現雖然歐洲國家的排名和相對位置依然是維持在前段班，但是美、日、韓、台、中在受評比國家的相對位置則大有不同，分別為百分之 10、百分之 15、百分之 32、百分之 33 及百分之 86。若進一步將前述五項指標中與環境、氣候相關的子指標進行比對，可觀察到環境層面確實為美國及日、韓、台、中在淨零轉型中較脆弱的環節，如表 8-13 所示。

舉例而言，從 STI 總指標排名與環境面指標的排名可知，美、韓、台、中在環境面排名中均較落後；若從 EPI 的氣候變遷面而言，亦可發現美、韓、台、中等國在氣候變遷績效表現(見表 8-13)亦均落後於總指標(見表 8-12)，顯示出這幾個國家在氣候面向仍有強化空間。不過值得注意的是，這些國家在環境健康面向的排序則優於總指標，顯示了這些國家在整體環境保護上的努力成果。

表 8-13、各國於各指標中的排名和相對位置-環境面

各國於指標中之排名					各國於指標中排名之相對位置(百分位)				
國家	CCPI	STI (環境面)	EPI (氣候變遷)	EPI (環境健康)	國家	CCPI	STI (環境面)	EPI (氣候變遷)	EPI (環境健康)
美國	57	16	42	17	美國	85	53	23	9
歐盟	16				歐盟	24	-	-	-
德國	14		7	14	德國	21	-	4	8
法國	37		11	19	法國	55	-	6	11
英國	20	2	4	8	英國	30	7	2	4
中國大陸	51	20	107	136	中國大陸	76	67	59	76
日本	58	4	13	28	日本	87	13	7	16
韓國	64	15	58	45	韓國	96	50	32	25
台灣	61	17	49	68	台灣	91	57	27	38
評比總國家數	63	30	180	180	註： 1.相對位置=各國排名除以評比總國家數 2.數值越低(高)表示相對其他國家越佳(差)				
報告發布年	2024	2024	2024	2024					

資料來源：本研究整理。

其次，STI、ETI 和 NZEI 均考慮一國經濟或社會在邁向淨零目標的重要性，使得美、日、韓、台、中的排名，就和 CCPI、EPI 明顯不同。不論是以永續貿易觀點評比各國的 STI，或是依循能源三角搭配社經制度結構原則的 ETI，美、日、韓、台均能獲得相較其他各國而言排名位於中上的位置。

例如以 2024 年的 STI 評估結果來說，美、日、韓、台、中的名次分別為第 10 名、第 5 名、第 6 名、第 9 名及第 16 名，相對位置是百分之 33、百分之 17、百分之 20、百分之 30 及百分之 53。這個結果顯示美、日、韓、台、中等以經濟發展為重心的國家，在經濟面、社會制度面的成果較豐碩，其實也是在未來進行淨零轉型的一種優勢。

將焦點放回台灣，台灣在 CCPI 的評比結果明顯異於其他四項指標，其原因自於台灣在 CCPI 的溫室氣體排放相關指標表現，如「人均排放(用能量)」、「人均排放(用能量)的增速」及「與未來減量目標的差異」，均相當不理想。但我國是以出口為導向的經濟體，許多在國內產生的溫室氣體或能源消費量並非僅為滿足國民的需要，而是服務全球民眾、產業，將所有責任歸於台灣並不客觀。其次，台灣因為地理條件之故，缺乏足夠的土地、水資源，難以大量且快速的發展再生能源，若僅以再生能源占初級能源供應比重及其增速，做為是否接近淨零目標的評比，亦有失偏頗。

為探討一國邁向淨零的努力，仍應儘可能列入適宜項目，方能全面性做出判斷。例如 STI、EPI 這類指標，除了考量了溫室氣體排放之外，還將其他與環保、淨零轉型有關因素納入考量。例如能源密集度、廢棄物回收與管理、生態多樣性...等，都是台灣致力發展且成效良好的領域。藉由廣納各種子指標，可避免單一子指標權重過高造成分析有所偏差的情況。另外，由於各指標均透過子指標加權計算再予以排名，故排名較佳的國家也有可能在某些指標反而相對落後。所以需要進一步觀察各個子指標內涵，才能判讀每個國家邁向淨零轉型的可達程度。

另一個值得注意的是，由於各指標有其特性，政府部門宜就各項數據綜合理解當中的內涵，確認我國在單一指標中的長期發展趨勢，及相對其他國家的排序，從中探尋精進及提升的方向，不需要對特定單一指標予以過度解讀及重視，應擇取相對客觀、全面和完整的指標，維持我國優勢與改善劣勢，藉以逐步提升淨零排放的實際表現。

綜上所述，吾人可知歐洲國家在邁向淨零轉型時，就環境、氣候方面的相關作法及成果，確實有值得其他國家參採之處。然而，在不同的指標架構下，美、日、韓、台、中的績效表現卻有著截然不同的結果。雖然美、日、韓、台、中大致上在氣候面向均有改善空間，但若從經濟、社會等面向觀察，可發現較穩定的能源系統、成本的可負擔性和產業、民生對電力的可及性，及相關政策架構與商業環境等條件，其實都有良好的績效表現，有助於逐步實現長期的淨零目標。

參考文獻

1. Block, S., Emerson, J. W., Esty, D. C., de Sherbinin, A., Wendling, Z. A., et al. (2024). 2024 Environmental Performance Index. New Haven, CT: Yale Center for Environmental Law & Policy. epi.yale.edu.
2. Germanwatch (2007, 2016, 2019, 2022, 2023), “The Climate Change Performance Index: Results,”Germany: Germanwatch.
3. Germanwatch (2022), “The Climate Change Performance Index: Background and Methodology,”Germany: Germanwatch, <https://ccpi.org/wp-content/uploads/CCPI-2023-Background-and-Methodology-1.pdf>.
4. Hinrich Foundation and IMD (2020, 2023, 2024), “Sustainable Trade Index,” Asia: Hinrich Foundation, <https://www.hinrichfoundation.com/research/project/sustainable-trade-index/>.
5. PwC (2021, 2023, 2024), “Net Zero Economy Index,” <https://www.pwc.co.uk/sustainability-climate-change/pdf/net-zero-economy-index-2024.pdf> .
6. WEF (2018, 2023, 2024), “Fostering Effective Energy Transition,” <https://www.weforum.org/publications/fostering-effective-energy-transition/>.
7. Wolf, M. J., J. W. Emerson, D. C. Etsy, A. de Sherbinin, Z. A. Wendling, et al. 2022. Environmental Performance Index 2022. New Haven, CT: Yale Center for Environmental Law and Policy. <https://epi.yale.edu/downloads/epi2022report06062022.pdf>.
8. Yale Center for Environmental Law and Policy - Yale University, Center for International Earth Science Information Network - Columbia University, World Economic Forum, and Joint Research Centre - European Commission. 2008 Environmental Performance Index. Palisades, New York: NASA Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC). <https://doi.org/10.7927/H4HT2M77>.
9. 梁啟源(2017),「台灣能源績效評比與系統脆弱度」,中技社委託研究。
10. 梁啟源(2019),「台灣能源安全與能源轉型指標」,台達電文教基金會委託研究。

附件、CCPI之評級標準

(一) 溫室氣體排放

	人均溫室氣體排放量	人均溫室氣體排放量 過去五年趨勢	當前人均溫室氣體排 放相較於基準值 2°C	2030 年減排目標相較 於基準值 2°C
非常好	低於 2.5 噸	排放量降幅至少為 20%		低於 1 噸
好	2.5 噸至 5.5 噸	排放量降幅達 7%	差值高於 3 噸/人	0 至 1 噸
中等	5.5 噸至 8 噸	排放量未成長		1 噸至 2 噸
差	8 噸至 11 噸	排放量成長		2 噸至 4 噸
非常差	超過 11 噸	排放量成長高於 5%	排放量高於減排路徑	4 噸以上

(二) 再生能源

	再生能源 占 TPES 比重	再生能源占 TPES 比 重過去五年趨勢	再生能源占 TPES 比 重相較於基準值 2°C	再生能源 2030 目標相 較於基準值 2°C
非常好	高於 35%	成長超過 75%	高於基準值	高於基準值
好	20%至 35%	增加超過 30%	低於基準值 10%	低於基準值 10%
中等	10%至 20%	增加 15%至 30%	低於基準值 10%至 15%	低於基準值 10%至 30%
差	5%至 10%	增加 5%至 15%	低於基準值 15%至 17.5%	低於基準值 30%至 40%
非常差	5%以下	負成長	低於基準值 17.5%以 上	低於基準值 40%以上

(三) 能源使用及氣候政策

	過去五年 能源使用量	人均 TPES 相較於 基準值 2°C	2030 年人均 TPES 目 標相較於基準值 2°C	氣候政策
非常好	減少 15%	低於路徑目標超過 30%	比基準值高 30%	4.5 分以上
好	減少 5%至 15%	低於路徑目標超過 0%至 30%	比基準值高 10%至 30%	3.5 分至 4.5 分
中等	未成長	高於 0%至 10%	0%至 10%	2.5 分至 3.5 分
差	增加為 5%至 10%	10%至 30%	低於 0%至 40%	1.5 分至 2.5 分
非常差	增加超過 10%	超過 30%	低於超過 40%	低於 1.5 分

第九章、結論與建議

顧洋¹⁰¹、劉致峻¹⁰²

為減緩氣候變遷對全人類的影響，全球需致力將平均氣溫相較工業革命前的升幅盡力控制在 1.5°C 以內。然而，近年全球減碳的努力雖然小有成果，但相對於預定的減碳進程與欲減少的升溫幅度，各國的努力仍有所不足；加上近年全球地緣政治環境也發生了重大變化，特別是俄烏戰爭造成各國對於其能源自主性的擔憂，高昂的能源價格也造成經濟民生的沉重負擔，在能源安全-淨零排放-可負擔性的「三難選擇」中，許多國家不得不增加化石燃料消費，讓全球的總溫室氣體排放量不減反增，在 2023 年達到歷史最高紀錄，沒能讓溫室氣體的排放拐點如預期般出現。因此，諸多機構紛紛呼籲重新修正邁向淨零排放的具體路徑，以更務實的態度來應對本世紀人類面臨的最大挑戰。

我國政府已宣布以 2050 年達到淨零排放作為國家轉型目標，並發布「台灣 2050 淨零排放路徑及策略總說明」，闡明至 2050 年淨零之發展軌跡與行動路徑，並接續端出諸多政策，來呼應全球淨零排放的急迫趨勢，展現承擔更多的國際減碳責任的決心，以期能成為全球淨零排放的楷模。不過值得注意的是，台灣自有能源稟賦相對匱乏，長久以來為了支持經濟發展與社會民生，需要進口大量能源。儘管近年政府投入大量財源在再生能源建設，能源自主程度仍難以顯著提升。此外，台灣面對人口稠密、土地稀缺、孤立電網、再生能源發電不穩定、儲能與 CCUS 技術昂貴、各類型能源設施的鄰避現象，以及海峽可能面臨封鎖的國安風險等挑戰，相關淨零排放目標與路徑的制定，與政策與配套措施的設計，應審慎權衡成本效益、保持兼容各個選項的彈性，才能兼顧國民福祉與氣候責任。

考量各國國情、政治環境、地理空間、能資源稟賦、經濟發展程度與產業型態的顯著差異，本專題報告選取美國、歐盟、英國、日本、韓國與中國等主要國家，針對其整體政策、電力、產業、住商、運輸與農業等各部門之淨零政策目標、路徑規劃、法規政策與配套措施，進行廣泛且深入之比較分析。另外，也挑選出多家國際機構所建立的淨零排放評比機制，探討其核心邏輯與關鍵議題，從中梳理出一套有效治理氣候變遷難題的路徑，最後嘗試提出台灣達成淨零排放的政策建議，提供主管機關參考。

再次感謝參與本議題研討的諸多學者專家的深入研究與比較分析，本專題報告的研究發現可簡述如下：

¹⁰¹ 台灣科技大學化學工程系講座教授。

¹⁰² 財團法人中技社資源暨環境研究中心研究員。

一、研究發現

美國之減碳進展與變數：美國的溫室氣體淨排放量自 2000 年達到峰值後，隨著煤炭逐步轉換為天然氣發電，呈現持續下降的趨勢。由於奉行市場經濟，聯邦政府角色體現在對前瞻能源技術的研發投資，透過規模效應與學習效應降低技術成本，推動關鍵無碳技術的市場擴展。此外，各州及其地方政府透過個別措施，結合非政府組織的積極響應，形成良性循環。拜登上任後，顯著加強淨零排放的相關作為。一方面，重新加入《巴黎協定》，積極參與國際多邊氣候談判與合作行動；另一方面，通過強化國內淨零政策與法規，以《通膨削減法案》提供對再生能源與零排放車輛的高額補貼，並對電廠排放、燃料經濟性及家電效率設置更為嚴格的標準。然而，未來川普重新執政，將對美國的氣候政策帶來不確定性。其第一任期內曾採取多項政策行動，包括減少產業管制、支持傳統化石能源發展，以及削減對某些淨零產業(如電動車)的補貼，這些舉措或將對美國未來的淨零政策方向產生影響。

歐盟之氣候治理與挑戰：作為全球氣候變遷政策的先驅，歐盟憑藉完整的治理框架應對氣候挑戰，透過執行委員會、議會與理事會的共同決策，為成員國提供指引。雖然歐盟的作法與美國大相逕庭，其成效卻堪稱卓著。近三十年來，歐盟溫室氣體排放量持續減少。儘管新冠疫情與俄烏戰爭一度干擾其邁向淨零的進程，但這些事件也促使歐盟加速能源效率提升與再生能源部署的步伐。歐盟目前整體溫室氣體淨排放量的下降幅度尚稱符合 2030 年減碳 55% 的目標。然而，建築、運輸與農業部門的進展相對緩慢，需投入更多資源方能實現 2050 年氣候中和目標。值得注意的是，歐盟是本專題報告分析的國家中，唯一針對農業部門進行「減量責任分配」的地區，並透過「土地利用、土地利用變化與林業規則(LULUCF)」，致力提升自然碳匯的貢獻。整體而言，歐盟的氣候政策經歷跨成員國與跨機構談判的多層次制定過程。近年來，氣候變遷議題在歐盟內部日益被視為一種意識形態問題，歐盟議會內的意見分歧有增無減。在成員國不同的政治、經濟與環境條件下，如何有效落實歐盟的氣候政策將是一項重大挑戰。

英國之系統性治理框架：英國自 1990 年代後期起積極參與國際減碳公約，其溫室氣體淨排放量自 2000 年達到峰值後迅速下降，展現其作為全球氣候變遷政策倡導者的努力。這一成效得益於英國政府設定積極的減碳目標、完備的立法及一系列政策措施。例如，英國在 2008 年將溫室氣體減量目標納入法律，並於 2019 年承諾在 2050 年前實現淨零排放，成為全球首個立法承諾的主要經濟體。即使於 2020 年 1 月正式脫離歐盟，英國仍穩步推進淨零進程。例如，以 UK-ETS(英國碳交易系統)取代 EU-ETS(歐盟碳交易系統)，並於 2021 年推出《淨零策略：重建更環保未來》，制定了涵蓋電力、產業、建築和運輸等多領域的脫碳政策。此外，2023 年的《能源法》強調市場改革、低碳技術(氫能、CCS 與核電)發展、加速再生能源部署、提升建築效率，以及確保天然氣供應等多方面行動。整體而言，英

國的淨零路徑採取系統性方法，以《氣候變遷法》提供明確的治理框架，透過「碳預算」進行路徑規劃與績效評估，結合多元政策配套與資金投入，致力於在 2050 年前實現淨零排放，同時兼顧經濟發展與社會公平。

日本強調自主行動與能源多元化：自《京都議定書》通過以來，日本逐步發展其氣候變遷相關法規與政策，並探索出一條有別於歐美國家的獨特路徑。目前，日本以 1998 年制定的《地球暖化對策推進法》作為法源依據，並於 2021 年將 2050 年碳中和目標納入法律。同年修訂的《地球暖化對策計畫》進一步設定了 2030 年減少 46% 及 2050 年達成 100% 減排的具體目標。該策略涵蓋工業、服務業、住宅、運輸及能源轉換等部門，聚焦於能源效率提升、再生能源推廣以及創新技術應用。日本注重公私合作，結合產業發展與淨零目標，推動企業自主減碳、強化建築節能標準及普及新能源車輛。此外，電力部門脫碳化是日本政策的另一核心。基於對高進口能源依賴與獨立電網特性的考量，日本在追求淨零的同時，平衡經濟發展與進口能源成本，近年逐步向核電重啟的方向調整。未來，日本的發電結構將以再生能源為主、核能為輔，並大力投入氫能技術的研發與推廣。此外，日本在政策工具上也有所創新。例如，2013 年推行的日本減量額度(J-Credit) 及 2023 年試行並計劃於 2026 年全面實施的 GX-ETS，為全社會的低碳轉型提供了清晰的制度框架，勾勒出實現 2050 年淨零目標的具體路徑。

韓國重視核能但面臨變局：韓國的氣候變遷政策起步於 2010 年頒布的《低碳綠色成長基本法》，並於 2015 年啟動排放交易制度(K-ETS)，成為東亞首個實行全國性強制碳交易制度的國家。2021 年通過的《應對氣候危機的碳中和綠色成長基本法》為韓國推動淨零提供了法源依據，法案中設定 2030 年較 2018 年減碳 40% 及 2050 年實現碳中和的目標。《2050 碳中和推進戰略》作為淨零排放的藍圖，涵蓋能源轉型、產業創新、社會參與與國際合作等領域。在各部門淨零策略中，韓國計劃透過核能與再生能源使用，推動產業低碳化，提升建築能源效率，普及電動及氫能零碳車輛，同時透過技術創新與財政補貼等配套措施，實現推進 2050 年碳中和目標。然而，在尹錫悅執政期間，受俄烏戰爭影響，能源安全的重要性顯著提升，政策調整後，2030 年再生能源發電比例從 30.6% 下調至 21.6%，而核電比例則從 23.9% 上調至 31.8%。因此，韓國成為本專題報告分析的國家中，對核能依賴程度最高的國家。值得關注的是，韓國總統任期為五年，下一次大選原定於 2027 年。然而，在截稿後，韓國發生了重大政治危機，現任總統因遭國會彈劾而停職，並可能面臨起訴。這一情況凸顯了國家的淨零政策如何受到政治、經濟與國家安全因素的深刻影響。

中國之碳達峰與一條鞭政策：中國自《十二五》(2011-2015)首次將氣候變遷納入國家發展規劃，並於 2015 年《巴黎協定》中提出 2030 年達到二氧化碳排放峰值的目標，這一承諾成為中國氣候政策的重要轉折點。2020 年 9 月，中國進一步承諾於 2030 年實現碳達峰，並於 2060 年前實現碳中和。根據《十四五》(2021-

2025)，2025 年被視為為 2030 年碳達峰鋪路的關鍵起點。以「1+N」政策體系為核心，涵蓋能源(電力)、產業、建築與交通運輸等多個領域，重點聚焦於能源結構轉型、節能增效、產業升級、綠色建築與交通，以及循環經濟發展。中國在擁有充沛能源稟賦的同時，仍為全球最大的能源進口國，故致力於提升燃煤電廠效率及機組改造，並逐步建立能吸納再生能源的電網能力。隨著技術進步及成本下降，長期目標是以新型再生能源(如太陽能 and 風能)及核電填補能源供需缺口。整體而言，相較於其他國家，中國採用由上而下的一條鞭方式，透過「行政政策」而非正式「法律」來落實淨零排放目標。鑒於中國的政治體系特點，其未來淨零排放路徑將更易受到國內經濟發展、社會民生需求及國際貿易環境的影響。

各類評估指標的脈絡與應用：除了對主要國家的比較分析外，本專題報告選取了五項知名指標，包括德國看守協會的《氣候變遷績效指標(CCPI)》、洛桑管理學院與韓禮士基金會的《永續貿易指數(STI)》、耶魯大學的《環境績效指標(EPI)》、世界經濟論壇的《能源轉型指標(ETI)》以及資誠聯合會計師事務所的《淨零排放經濟指數(NZEI)》。透過分析其編制背景與用途，協助正確解讀並掌握淨零轉型的方向。其中，CCPI 和 EPI 主要聚焦於環境績效的衡量。相較於 EPI 注重歷史數據的採用，CCPI 更多地考量政策目標，並採用非政府組織(NGO)的問卷調查，進行主觀性評估。然而，由於受訪國家眾多，其樣本代表性可能有所不足。STI 與 ETI 則不僅評估環境面，還涵蓋經濟與社會面，反映淨零轉型過程中應關注的多元面向；而 NZEI 則專注於評估一國的去碳化效率。綜上所述，不同指標下的國家績效表現可能差異顯著。探討一國邁向淨零的努力，需綜合考量多維度指標，才能全面判斷其實際表現。即便短期內在氣候政策方面有所不足，結合經濟、社會等面向的分析，仍可發現穩定能源系統、可負擔成本、產業與民生用電的可及性，以及商業環境的完善等因素，均有助於長期實現淨零目標。以台灣為例，在能源效率、廢棄物回收與管理及生態多樣性等領域表現相對優異。因此，各界應針對各指標的內涵，確認相關領域的發展軌跡，結合與其他國家的比較排序，探尋改善與精進方向。避免對特定指標的過度解讀，才能全面權衡政策優先性，進一步維持台灣的優勢、改善劣勢，並穩步提升實現淨零排放的實際成效。

科學化評估與政策討論有助社會共識形塑：各國在邁向淨零排放願景時，普遍設有明確的階段性目標(如 2030 年)，並據此設計相應政策。至於 2050 年的淨零排放目標，由於受技術發展及多種不確定因素影響，故各國參考權威機構的預測，設定不同情境進行模擬分析。政策設計時，則綜合考量其地理環境、資源稟賦、減碳成本、經濟發展水平、物價水準、能源安全及社會共識等多重因素，並以科學量化方法對目標進行權衡。此外，各國均認識到淨零排放目標的實現需要全社會的共同參與，而完整的可行性評估與政策討論過程，有助於形成社會共識，是推動淨零目標達成的關鍵。相較於其他國家，我國對可行的短中長期減碳路徑，缺乏廣泛、公開與透明的討論，難以為全國及各部門設定階段性、具體且可管控的目標，不利於後續的追蹤、檢討與調整。即使進行了相關評估，也多僅作為主

管機關內部參考之用。這種保守作法不利於社會共識的形成，實屬可惜。例如，在國發會發布「台灣 2050 淨零排放路徑及策略總說明」與「十二項關鍵戰略」前後，缺乏事前的可行性評估及事後的政策公共討論，導致整體決策過程略顯草率。這種情況難以有效協助決策者在淨零、安全與可負擔等多重目標間進行權衡，也無法提供充分證據說服社會各界，共同推動淨零排放的行動。

二、初步建議

本專題報告對台灣淨零排放路徑與政策規劃有以下幾點建議：

1. 國家整體角度的建議

- (1) **加強中央與地方協調與合作**：以近期政府推動的深度節能政策為例，目前僅中央主管機關（能源署）設有常駐編制負責推動，地方政府則缺乏相應支持，其他部會亦無專責單位，導致各自為政，缺乏共同行動的整合性。
- (2) **完善國內碳定價機制**：台灣已成立碳權交易所，負責國內碳權交易、國際碳權買賣及碳諮詢與教育等，但目前仍處於萌芽階段。與其他國家的 ETS 制度相比，其市場流動性尚顯不足，難以有效引導資源向低碳領域流動。
- (3) **制定部門別轉型路徑**：應協助各部門明確其責任與機會，並透過跨部門的多元情境模擬，促進政策討論與策略選擇，解決淨零目標與該部門其他政策目標之間的扞格，進一步提高政策執行的可行性與協同性。

2. 電力部門的建議

我國與其他國家均以發電配比作為規劃淨零排放路徑的起點，故建議：

- (1) **規劃應考慮限制條件**：路徑規劃需充分考量台灣的能源稟賦、技術發展前景及自然環境限制，通過跨部會協調形成共通情境，並設計多元目標，以勾勒轉型路徑的範圍，供決策者進行權衡。
- (2) **評估過程透明且客觀**：相關技術參數應以國內外權威機構的數據為依據，以增加評估的可信度，並利於學術研究。評估結果需接受各界質疑與檢視，有助於促進社會共識並導引政策方向。
- (3) **長期路徑滾動調整**：長期規劃應基於合理假設，鑑別潛在風險與範疇，並隨技術進步與成本變化進行滾動調整，以更符合實際需求與條件。
- (4) **設立可管制的階段性目標**：應建立清晰的階段性目標，協助對轉型路徑進行持續追蹤及政策檢討與調整，確保淨零目標的有效落實。

3. 產業部門的建議

各國在產業部門減碳路徑上，根據其競爭優勢聚焦於特定產業。參考國際作法，有以下幾點借鑒：

- (1) **產業目標與路徑**：如歐盟的《淨零產業法案》和日本的《GX 實現基本方針》，均制定了明確的產業轉型目標與路徑，並配套完善的監管與激勵機制，吸引企業提前投入淨零技術的導入與應用。
- (2) **減碳規劃科學化**：由於產業部門涉及眾多減碳技術，制定個別減碳階段性目標較具挑戰性。採用科學模型進行產業部門淨零推演，將有助於評估相關策略對低碳投資與技術研發的推動成效。
- (3) **技術應用與發展**：在能源效率提升、電氣化、再生能源與 CCUS 等通用策略基礎上，進一步強化數位科技的應用，例如智慧製造、數位孿生與人工智慧等，以提升能源效率、優化生產流程，並促進循環經濟的發展。

4. 住商部門的建議

- (1) **建築能效之規範與評估**：將建築能效評估系統(BERS)納入我國建築技術規則；規範一定規模的新建建築須達特定能效等級，並強制公用建築揭示能效等級，設置罰則以確保執行力；研究建築能效評估與建物所有權範圍的調和，提高能效標示導入不動產交易與房屋租賃市場的可行性；建構全國性建物能效揭露網站，通過表彰與同儕比較促進自發性行動。
- (2) **金融與補助措施之激勵**：對不同能效等級的既有建築，提供差異化的貸款額度與利息補貼，以促進節能更新；對一定規模且承諾達特定能效等級的新建建築，提供低利貸款支持；為達到特定能效等級的建築提供再生能源設施(含儲能)補助，並依建築規模設定每案補助上限；為建築設計業提供補助或設計酬金獎勵，激勵創新。
- (3) **節能改造與技術支持**：建立 ESCOs 媒合平台，通過節能績效保證提升既有商業建築的能效；提供建築節能診斷服務的費用補助；為能效等級較低的建築提供可行的改善建議及實施順序，確保節能改造能落實執行。
- (4) **示範案例推廣**：建立示範案例或場域，推廣淨零碳建築的應用，透過實例驗證及宣傳，提升市場接受度與應用範圍。

5. 運輸部門的建議

透過政策鼓勵技術應用與社會參與，推進運輸部門淨零排放，建議如下：

- (1) **制定嚴格的車輛效能標準**：提供經濟激勵，推動運具電動化與無碳化發展。
- (2) **鼓勵運輸業者自主減碳**：鼓勵業者自主碳盤查，設定減碳目標，並導入綠色管理系統。
- (3) **促進用路人行為改變**：通過教育宣導、完善公共運輸基礎設施與提升服務質量，減少私人運具使用率。
- (4) **推動低碳交通區**：建立限制高排碳車輛通行的交通區域，中央與地方協力

修訂相關法規及自治條例，根據地方特點劃定低碳交通區範圍並制定實施細則。

6. 農業部門的建議

國內以四大主軸作為農業部門淨零推動方向，建議如下：

- (1) **減碳**：協助農戶提升知識與技能，縮小技術落差；建立數據整合與共享機制，推動精準農業發展，降低單位農產的碳排放量。
 - (2) **增匯**：透過細緻的國土規劃，解決植樹造林與糧食安全間的衝突；完善碳匯計算標準，確保碳匯交易的公平性與透明度；強化碳匯的持續管理，確保長期效益；提升獎勵措施力度，以增加參與人數。
 - (3) **循環**：完善農業廢棄物循環利用的市場機制；加強區域農業廢棄物回收利用的基礎設施建設；協助個體農戶克服將農業廢棄物轉化為生物能源的技術門檻。
 - (4) **綠趨勢**：強化消費教育，提高消費者對綠色農產品的認可度，促進市場需求與生態永續的良性循環。
7. 綜觀各國實際表現，台灣在大多數國際淨零排放指標的評比中，均達及格或更好水準。因此，政府若能以**主動提供公開且具可比較性的資訊**，取代對個別團體訴求的被動式回應，將更有助於促進政策共識的形成。

國家圖書館出版品預行編目(CIP)資料

主要國家淨零排放路徑之比較分析 / 顧洋, 謝志強, 賴靜仙, 黃國倉, 黃釋緯, 許聖民, 潘述元, 鄭睿合, 劉致峻作. -- 臺北市 : 財團法人中技社, 民 113.12

242 面 ; 21 X 29.7 公分. -- (專題報告 ; 2024-16)

ISBN 978-626-98882-9-0 (平裝)

1. CST: 碳排放 2. CST: 公共政策 3. CST: 比較研究

445.92

113020538

版權聲明©財團法人中技社

本手冊用於教育或非營利目的時，得在未取得原版權所有人允許下複製全部或部分內容，唯須註明出處。財團法人中技社感謝您提供給我們任何以本手冊做為資料來源出版的相關出版品。

未取得財團法人中技社書面同意，禁止使用或轉售本手冊於其他商業用途。

免責聲明

本出版品所提及的實體名稱和資料之表示，並不代表財團法人中技社的觀點：包括不同國家、領土、城市或區域的法律地位及其地位的權威性，以及國與國之間邊界和臨界的界定。此外，文中觀點與所提及的貿易名稱或商業程序，並不代表財團法人中技社的觀點或政策。



財團
法人 **中技社**

CTCI FOUNDATION

106 台北市敦化南路2段97號8樓

Tel : 02-2704-9805~7 Fax : 02-2705-5044

<http://www.ctci.org.tw>