

IEA 全球能源部門 2050 淨零排放路徑

(Net Zero by 2050 A Roadmap for the Global Energy Sector)

2021 年 5 月 18 日

本報告提出了全球至 2050 達到淨零排放的發展路徑，此路徑旨在極大化技術可行性、成本效益與社會接受度，不大量依賴負排放技術，同時確保經濟成長與能源供應穩定。本報告以全球尺度探討淨零排放路徑，考量不同發展程度的經濟體應達到淨零目標的時程差異，並將如生質能料源潛力、影響碳捕存發展因素與行為改變對減碳等議題的不確定性納入考量。透過上述分析，提供各國政府重要的決策參考與建議，以期透過決策者的力量促進全球淨零排放的達成。

- 一、**2050 年達到淨零排放取決於 2030 年以前立即且大幅的潔淨技術進展**：報告中提出的淨零排放路徑，預估至 2030 年全球經濟較現況成長達 40%，然而能源使用將下降 7%，透過大幅的能源效率改善，年均能源密集度下降幅度達 4%，為過去 20 年平均的 3 倍。除了二氧化碳以外，透過所有可行減量技術的佈建，未來 10 年能源供應的甲烷排放將下降 75%。由於再生能源發電成本大幅下降，在淨零路徑中，至 2030 年太陽光電每年新增量達 630GW、風力達 390GW，相當於 2020 年甫創下的全球再生能源新增量的 4 倍。此外，水力與核能亦將在淨零轉型路上扮演重要的基礎。供給端去碳化亦使電氣化成為最重要的減碳措施，電動車銷售占比將由 2020 年的 5% 提升到 2030 年的 60%。
- 二、**2050 年達到淨零排放需在潔淨技術創新上取得重大的進展**：除了快速佈建可行技術外，在 10 年內致力於技術創新研發，確保這些技術可即時進入市場，對於達到 2050 淨零排放相當關鍵。至 2030 年，減量貢獻大多來自於已知可行技術，但是到 2050 年，幾乎一半的減量貢獻將來自於目前還在示範或原型階段的技術，包括重工業、長途運輸方面的低碳技術。其中，先進電池、電解製氫與直接空氣捕捉二氧化碳等三個領域的技術，對於全球 2030 至 2050 年的減碳相當關鍵。未來 10 年的創新不僅需要研發與示範，更需要大規模的基礎設施佈建，以促進低碳技術的推展擴散，包括碳捕存之二氧化碳輸送管線、氫能輸儲基礎設施等。
- 三、**沒有公民的支持與參與，無法達到淨零轉型**：IEA 估計淨零路徑中至少 55% 的減碳貢獻與消費者選擇有關，包括電動車購買、建築翻修導入節能技術、

熱泵裝設等；而行為改變(如私人運具轉為大眾運輸)亦貢獻約 4% 整體減量。此外，公正轉型是淨零路徑實現中重要的概念，這包括確保所有人都可獲得潔淨的現代能源。至 2030 年，每年需花費 400 億美元，以提供電力給目前尚無法使用電力的 7.85 億人口，並提供目前尚缺乏潔淨烹調方式的 26 億人口，這些花費約占能源部門年均投資的 1%。而在能源普及度提升的同時，也造成新興與發展中經濟體的家戶能源支出占可支配所得比例增加。因此透過政策工具(稅賦減免、貸款與補助等)確保人民可負擔是相當重要的。公正轉型亦需體現在就業，在淨零排放情境下，至 2030 年可創造 1400 萬個潔淨能源相關工作機會，然其技能需求亦有別於傳統能源工作，此外亦有 500 萬個傳統能源相關的勞工將面臨失業，需仰賴政策導入減少衝擊。

四、能源部門將以再生能源為主：淨零排放路徑中，在人口增加 20 億、經濟相較目前翻倍的情況下，透過物質效率、能源效率與行為改變，使 2050 年能源使用仍將較現況下降 8%。至 2050 年，2/3 的能源來自再生能源，其中以太陽光電為最，約占總能源使用的 1/5。化石燃料則由現在的 4/5 占比下降至 1/5，主要應用於產品製程、裝設 CCUS 系統的場域與難以減量的部門。在電氣化趨勢下，2050 年電力消費將較現況增加 2.5 倍，其中 90% 電力來自於再生能源，太陽光電與風力發電約占 70%，其餘大部分是來自核電。

五、達到淨零轉型的階段性部門目標：因應淨零目標，IEA 提出各部門階段性須達成的關鍵里程碑，提供決策者目標研擬的參考。這些目標包括 CCUS 與氫能應用場域的階段性擴增、政策禁售燃油車時程、航空與船運導入替代潔淨燃料比例、建築使用熱泵與零碳建築規範時程等。本報告以全球為尺度，共訂定超過 400 項部門與技術別的淨零發展里程碑，作為各國訂定長程政策推動架構擬定的參考，讓利害關係人與公民及早因應淨零轉型帶來各面向的巨大變革。全球淨零排放路徑下，各部門的關鍵里程碑如圖 1 所示。

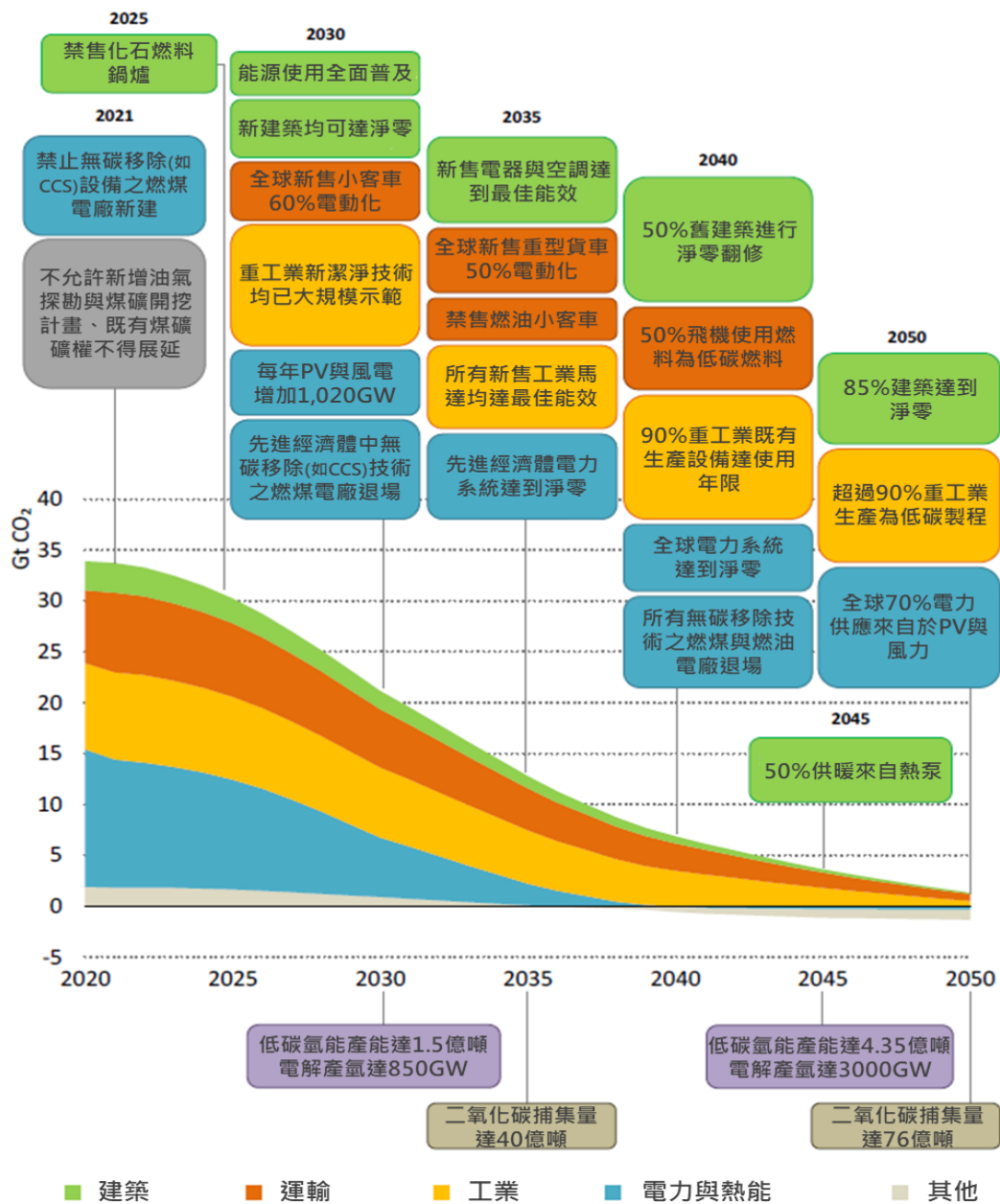


圖 1、全球淨零排放路徑里程碑

六、淨零路徑下，化石燃料需求銳減：無碳移除技術的煤炭需求至 2050 年將較現況減少 90%，僅占全球能源使用的 1%，天然氣與燃油的需求也將分別下降 55% 和 75%。除了已規劃的礦場外，未來不會再有新的油氣田探勘、煤礦開挖與礦權展延。而在大幅度的燃料轉換趨勢下，相關基礎設施的布建更加重要。全球電網布建投資成本將由目前的 2600 億美元增加到 2030 年的 8200 億美元；電動車公用充電樁的數量也將由目前的 100 萬座增加至 2030

年的 4000 萬座，電動車電池產量將由 160GWh 增加到 2030 年的 6600GWh。而因應氫能供應鏈與負碳技術所需的氫氣與二氧化碳傳輸管線設施，年投資額亦預計由目前的 10 億美元增加到 2030 年的 400 億美元。整體潔淨能源投資金額將大幅成長，尤其在發電、基礎設施與終端使用的部分。

七、潔淨能源投資大幅帶動全球經濟成長：IEA 與國際貨幣基金組織(International Monetary Fund)聯合研究指出，到 2030 年，年度能源投資金額將到達 5 兆美元，這樣的投資將帶動上百萬個工作機會(包括能效、工程、製造與營建業)，帶動全球 GDP 年均成長率再增加 0.4%，2030 年全球 GDP 總值將較現行趨勢(BAU)要增加 4%。政府需要確保公共投資策略可捲動大量私部門的投資挹注，抵銷化石燃料需求下降造成的負面經濟衝擊，而創新潔淨能源產業的推動，也是各國在彌補淨零轉型下受影響產業損失的重要策略。除了經濟效益，淨零轉型帶動的空氣品質改善，全球每年可避免 200 萬人的死亡，而淨零路徑下的能源普及，對開發中國家社會福祉與生產力亦將有極大的提升。

八、淨零轉型將產生新的能源安全問題：石油與天然氣需求持續下降，導致這些能源供應益發集中在部分生產者，且石油與天然氣生產之主要經濟體，預計 2030 年時人均收入將下降 75%。儘管傳統的能源供應需求減少，但石油與天然氣的專業知識對於氫能、CCUS 與離岸風力等技術的發展很有幫助，會是促進傳統能源經濟體轉型的利基。此外淨零轉型亦將大幅增加部分關鍵礦產資源(如銅、鈷，錳和各種稀土金屬)，一方面將帶動相關礦物的開採產業，另一方面亦衍生新的能源安全問題，包括重要礦物資源的成本波動、蘊藏量限制對能源的影響等。此外，快速的電氣化趨勢與高再生能源占比，在傳統火力彈性機組持續減少的情況下，需要其他彈性資源，如儲能、需量反應、低碳彈性機組搭配智慧電網來確保供電穩定，同時電網智慧化衍生的資安問題應該被重視。

九、國際合作是達到全球淨零排放的關鍵：淨零轉型仰賴利害關係人的合作，政府透過長期減碳政策框架釋出訊號，提供消費者進行購買選擇與投資者進行投資決策的依據。淨零轉型也仰賴跨部會的合作，不僅止於能源或環境部門，應將減碳規劃整合至國家金融、勞工、稅賦、運輸、工業等之政策制定。淨零排放更是仰賴各國政府間的合作，尤其在創新和投資方面。IEA 亦將提供支援，協助各國政府規劃國家和地區的淨零排放路徑圖，並協助計畫的落實，促進國際合作以加速全球轉型。

附件、報告各章節重點分析

一、已宣佈之淨零承諾與能源部門

去年，全球承諾達到淨零排放的國家數快速增加，承諾淨零的國家碳排放量加總已涵蓋全球 70% 的 GDP 和碳排放量。然而不到 1/4 的承諾納入國內立法，而具有明確措施或政策去支持淨零承諾按時達成的更在少數。本章首先探討各國既定政策情境(Stated Policies Scenario, STEPS)下的能源使用與碳排放趨勢，此外亦以宣告承諾情境(Announced Pledges Case, APC)探討當宣布淨零目標的國家均如期達成情況下，全球碳排放與能源使用的變化情形。

(一) 各國的減量目標與淨零宣示

根據巴黎協定，簽署協議之國家需定期向 UNFCCC 提交國家自主貢獻(Nationally Determined Contributions, NDCs)並每五年定期更新。第一輪提交 NDC 的國家共 191 個，占全球碳排放量超過 90%；第二輪至目前為止提交的 80 個國家中，多數國家提出相較第一輪更為嚴格的減量目標，或更大範圍的減量目標的(增加目標部門或氣體)。此外，已有 27 個國家與歐盟向 UNFCCC 提交長期低碳排放發展策略(Long-term low greenhouse gas emission development strategies, LEDS)，部分國家將淨零排放承諾納入其中。整體而言，截至 2021 年 4 月 23 日，向 UNFCCC 更新其 NDC 目標的國家碳排放占全球約 40%，而宣誓淨零排放的國家碳排放已占全球約 70%。(圖 3)。在宣布淨零目標的 44 個國家與歐盟中，有 10 個國家將實現淨零納入法定義務、8 個國家正在研擬入法、其餘國家在官方政策文件中提出(圖 3)。

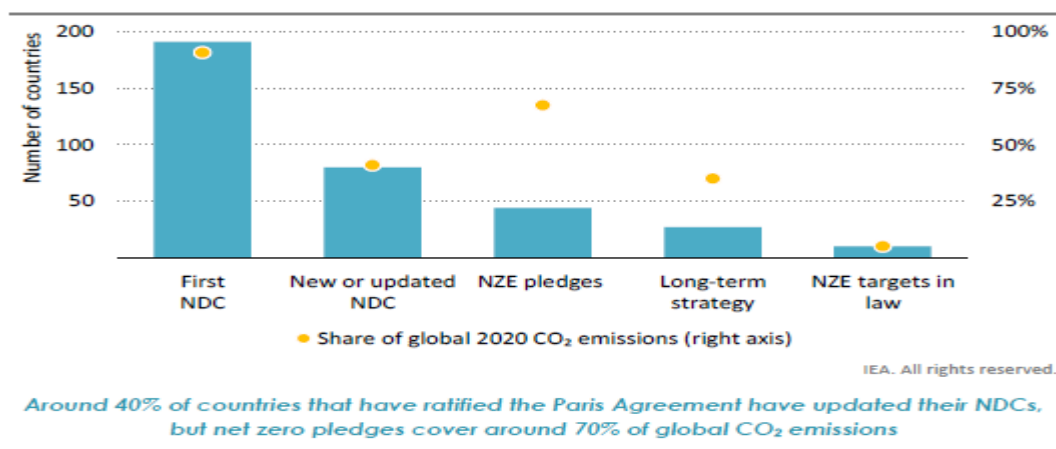
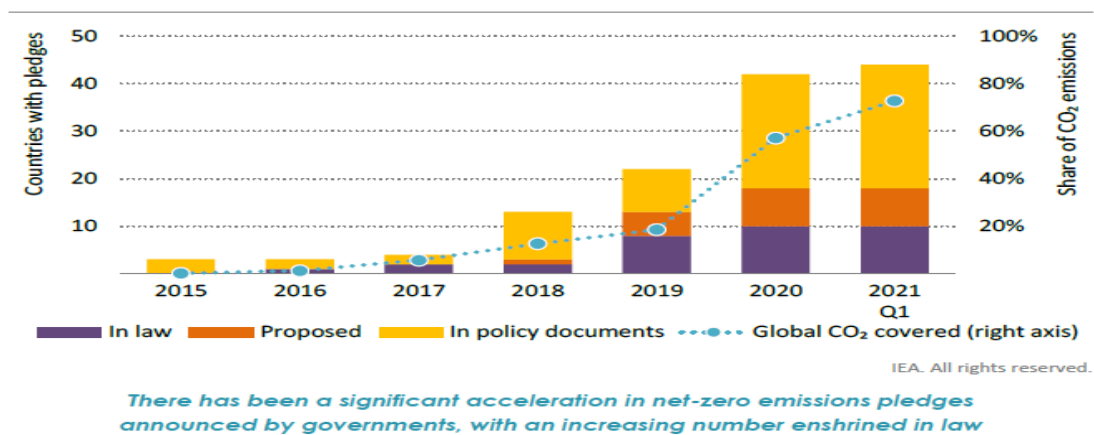


圖 2、NDC、淨零宣示、長期策略等研提國家數與總排放占比



Notes: In law = a net zero pledge has been approved by parliament and is legally binding. Proposed = a net zero pledge has been proposed to parliament to be voted into law. In policy document = a net zero pledge has been proposed but does not have legally binding status.

圖 3、零碳承諾宣布之國家數與總排放占比

IEA 檢視目前各國淨零承諾內容，發現在承諾時程與範疇皆存在差異，主要差異包括：

1. 溫室氣體界定範圍：各國設定淨零排放涵蓋氣體範疇有差異。例如，紐西蘭的淨零承諾不包含生物衍生甲烷，對生物衍生甲烷另訂獨立減量目標。
2. 部門規範範疇：部分部門或活動未被納入淨零排放規範。例如，荷蘭僅將電力部門納入淨零目標，以及法國、葡萄牙、瑞典等國家則將國際航空與運輸排除於淨零規範之外。
3. 二氧化碳移除 (carbon dioxide removal, CDR) 技術應用：各國採用 CDR 尺度措施不一。碳移除技術包含造林、土壤固碳、直接空氣捕捉並封存、生質能搭配碳捕存等。例如，烏拉圭納入碳匯達到淨零排放，而瑞士則使用 CDR 技術來平衡碳排放量。
4. 國際排放交易：部分國家透過碳交易方式來轉換碳信用額度以達到所設定的淨零目標，有些國家則不將國際排放交易納入淨零承諾的達成手段。
5. 淨零時程落差：多數國家淨零目標設定在 2050 年達成(占全球碳排放量 35%)，而芬蘭則設定在 2035 年、奧地利與冰島設定在 2040 年、瑞典為 2045 年、中國及烏克蘭則設定在 2050 年之後。

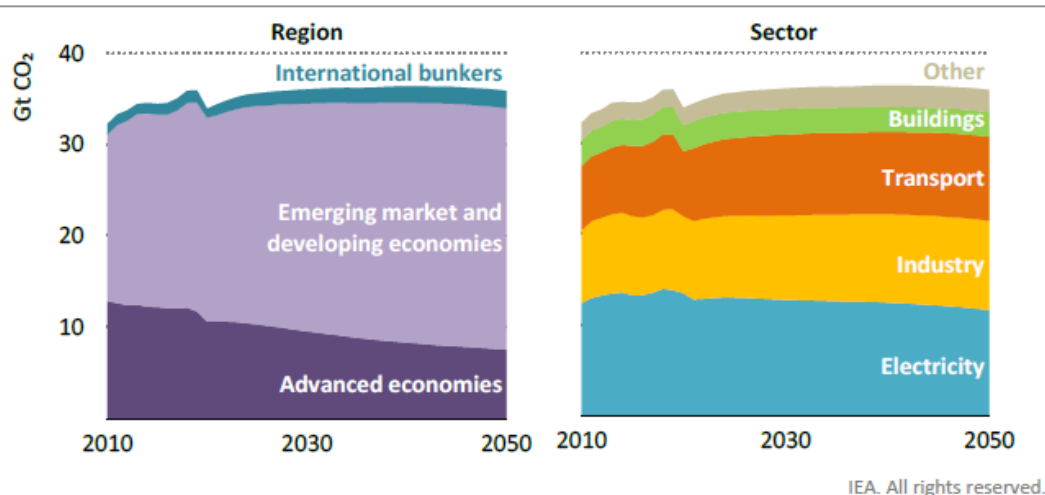
(二)企業對淨零排放趨勢的回應

自 2021 年 2 月，全球約有 110 個高耗能或是生產高耗能產品的公司宣布淨零目標，約有 60-70% 全球空調設備、車輛、電力與水泥等高耗能產品是由宣布淨零排放目標的公司所生產。淨零排放在各部門與領域的涵蓋範圍越來越廣，全球科技領域中 60% 的營收來自於宣布淨零排放的公司，在航空、運輸、物流與營建業務亦有相當程度的淨零排放公司占比。

多數公司根據溫室氣體議定書(GHG Protocol)做排放估算與淨零宣示。然而，如同國家淨零承諾一樣，各公司在認定排放範圍與時程上皆有相當的差異。而宣布淨零排放的公司中，有 40% 尚未闡明實現淨零排放的策略，而剩餘具有詳細淨零策略規劃的公司中，提及的減量措施主要包括直接減量、使用負碳技術、以及購買碳權。其中對公司而言，購買碳權對於難以減量的製程具成本效益，然而在淨零排放的趨勢下，碳排放額度的供給亦將逐漸受限，且碳權交易的措施更可能使公司投資在節能措施的意願降低。

(三)既有政策情境(STEPS)的能源與碳排放趨勢

STEPS 情境下，全球能源需求與碳排放均預期將快速由 COVID-19 造成的下降趨勢中反彈回升，全球碳排放量將由 2020 年的 340 億噸增加到 2030 年的 360 億噸，並維持相似水準到 2050 年，這樣的排放水準將造成 2100 年地表升溫達 2.7°C。由 STEPS 排放結構可知，已發展經濟體由於減碳技術導入與燃料轉換等措施，至 2050 年碳排放相較 2020 下降約 1/3，反觀新興與發展中經濟體，隨著人口、經濟成長、都市化趨勢與基礎建設的大量佈建，到 2045 年左右碳排放將較現況成長 20%，而後才微幅下降。

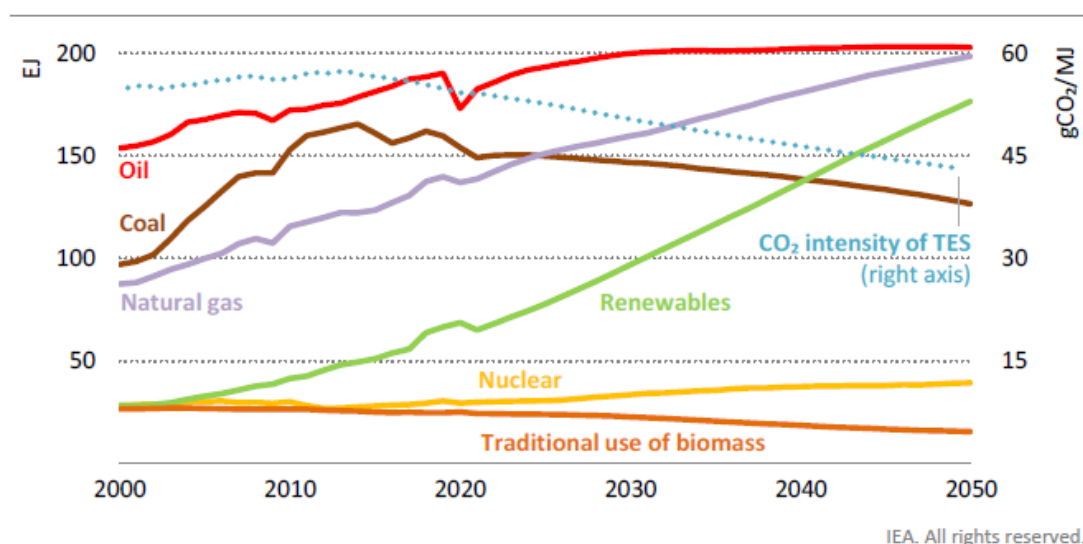


Global CO₂ emissions rebound quickly after 2020 and then plateau, with declines in advanced economies offset by increases elsewhere

Note: Other = agriculture and own use in the energy sector.

圖 4、STEPS 情境下全球碳排趨勢

STEPS 情境下，全球總能源供給在 2020 至 2050 年間成長 30%(考量能源密集度每年下降 2.2%情形下)。在此期間，已開發經濟體的經濟活動雖提升 75%，但能源需求反而下降 5%；新興與發展中經濟體能源消費則成長了 50%。STEPS 情境下，在新興與發展中經濟體到 2050 年仍然有 7.5 億人口沒有電可以使用，15 億人口仍仰賴傳統生質能烹調。在能源結構上，30 年間發生大幅的變化，煤炭使用在 2014 年達峰值後，至 2050 年相較現況下降 15%，燃油、天然氣在疫情低峰反彈後，維持成長趨勢，再生能源顯著成長，而核能使用在 2020 至 2030 年間亦成長 15%，主要來自於中國的機組新建。



Coal use declines, oil plateaus and renewables and natural gas grow substantially to 2050

Note: EJ = exajoule; MJ = megajoule; TES = total energy supply.

圖 5、STEPS 情境下各類能源需求變化趨勢

STEPS 情境下，各部門能源消費皆為成長趨勢，漲幅最大的包含電力與天然氣。全球電力需求至 2050 年相較 2020 年將成長 80%，其中 85% 的成長量來自於新興與發展中經濟體。發電結構上，燃煤在新興與發展中經濟體至 2050 年仍舊維持一定比例，而已開發經濟體至 2050 年燃煤發電量已相當少，兩經濟體在發電結構的共同趨勢是再生能源占比均大幅提升。

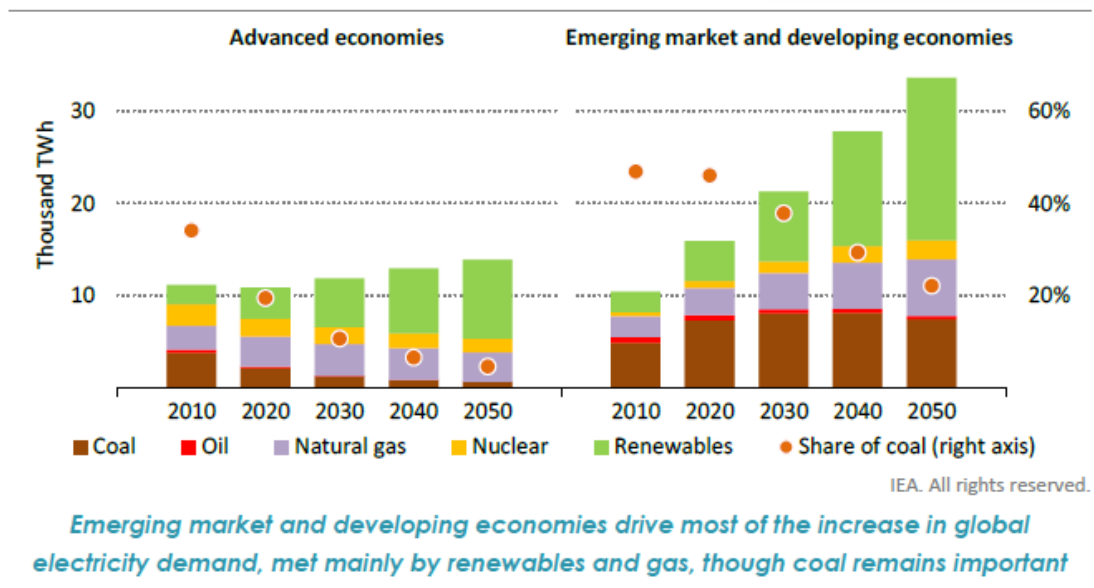


圖 6、STEPS 情境下各類電力結構變化趨勢

既有能源相關設施的排放在 STEPS 情境占了相當比例，尤其是電力設施，其使用年限通常較長，無論在已開發經濟體或是新興經濟體，既有電廠排放量約均為既有能源設施總排放量的一半，而燃煤機組就占了 40%，其次為工業與運輸既有設施的排放。若既有設施依照原本的使用方式使用屆壽齡，預估相較於可控制 2100 年升溫於 1.5°C 情境，將造成 30% 額外的碳排放，顯示欲達到淨零排放，既有設施的翻新或退場機制亦為重要的一環。

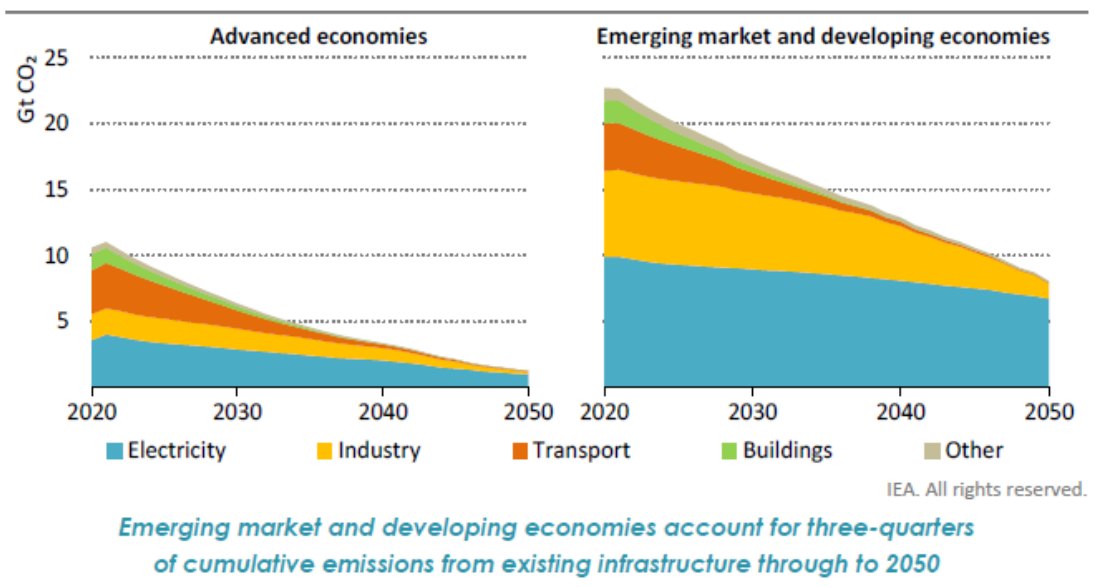


圖 7、既存能源設施碳排放情形

(四)宣告承諾情境(APC)

APC 情境納入所有淨零排放承諾的目標，目的在探討當各國均達成其承諾目標時，全球離淨零排放還有多遠，以及探討達到淨零排放，全球能源系統所需轉型的程度。各國的淨零排放路徑，由 IEA 諮詢研究各國淨零排放路徑的專家學者後，參考其情境設定，再進行全球的模擬而得。

在 APC 情境下，至 2030 年全球碳排放將由 2020 年的 360 億噸下降 10% 至 300 億噸，到 2050 年下降至 220 億噸，相當於較現況下降 35%，且較 STEPS 情境 2050 年排放量減少 140 億噸，減量貢獻最大的是中國。若此趨勢維持，到 2100 年全球表面升溫約為 2.1°C。由 APC 情境可知，單靠目前淨零宣示國家的減排努力，距離全球達到淨零排放仍有一段差距。

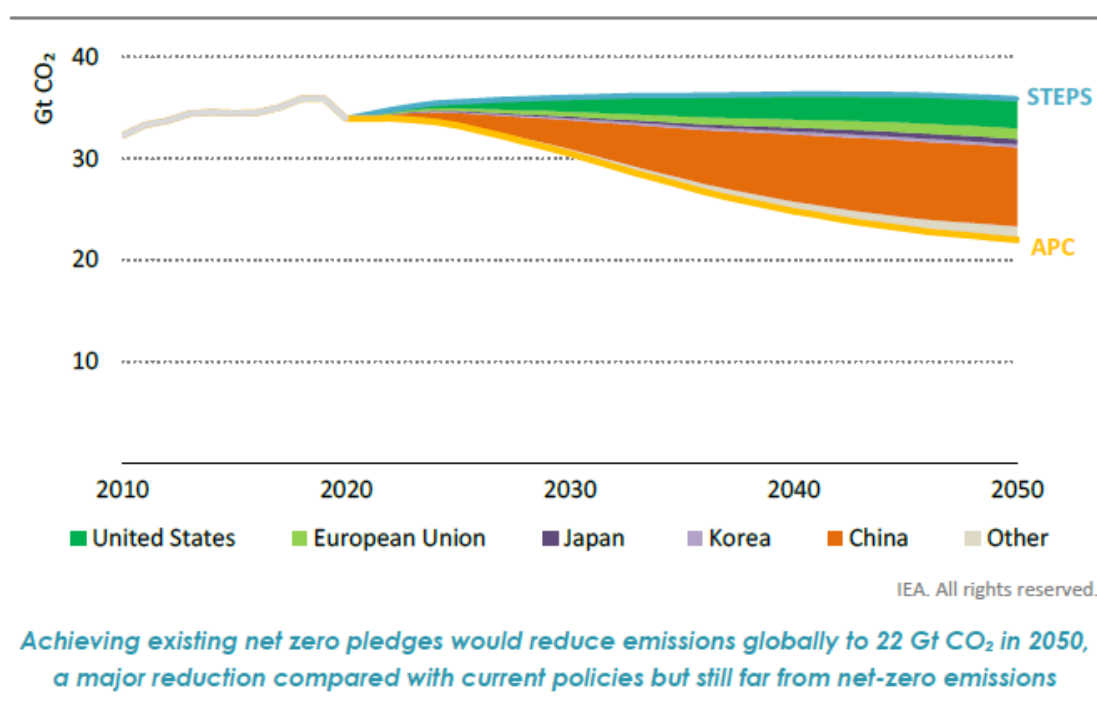
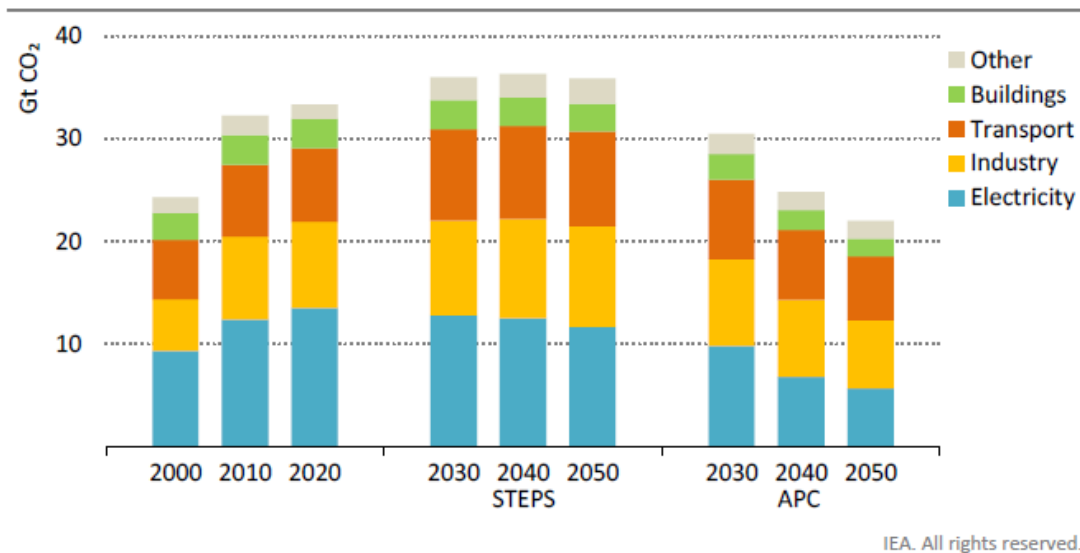


圖 8、STEPS 與 APC 情境下全球碳排放趨勢

分析 APC 情境下各部門碳排放量變化趨勢，可知電力部門於 2020 至 2050 年間排放下降幅度達 60% 最大 (STEPS 降幅約 15%)，然而電力需求在此期間成長約翻倍，顯示電力部門去碳化效果。運輸與工業部門在各情境的排放量減幅相對較小，也顯示了部分重工業、長程負重運輸、航空與船運等減排的困難度。

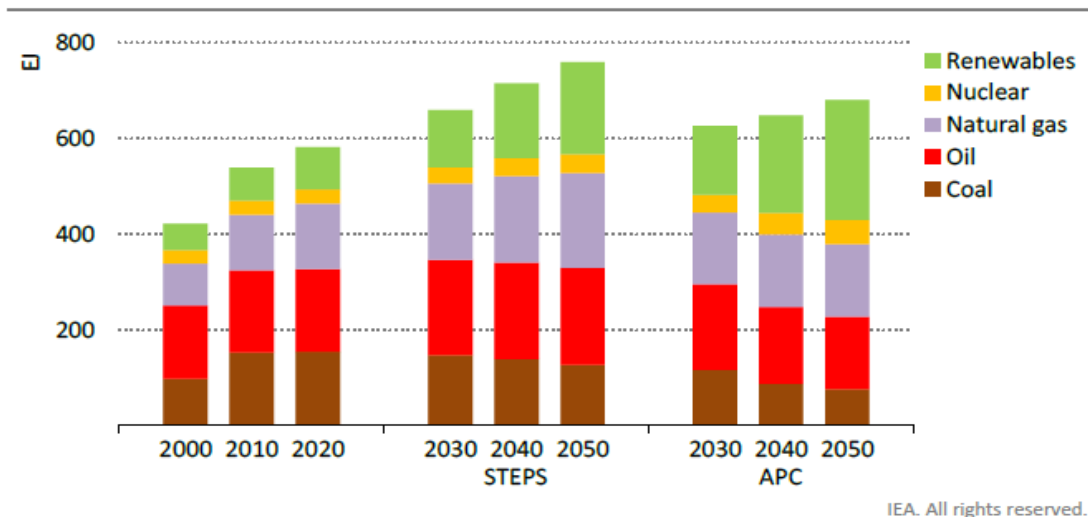


Announced net zero pledges would cut emissions in 2050 by 60% in the electricity sector, 40% in buildings, 25% in industry and just over 10% in transport

圖 9、STEPS 與 APC 情境下全球部門別碳排放趨勢

在 APC 情境中，能源供給量於 2020 至 2050 年成長 15%(STEPS 情境成長約 1/3)，能源密集度下降幅度每年 2.6%(STEPS 情境每年 2.2%)，能源供給的增加主要由於新興與開發中經濟體因應人口與經濟成長，致使能源需求增加而導致。APC 情境中，全球能源供應增加主要來自於再生能源，其能源占比由 2020 年 12% 提升至 2050 年的 35%(STEPS 情境為 25%)。PV 和風力貢獻了 50% 的增量、生質能則貢獻了 30%。生質能在工業、發電、運輸部門的使用成長為現況的 2~4 倍，其中生質能搭配碳捕存與再利用，可達到負排碳的效果。而核能仍占整體能源供應一定比例，相較 2020 年成長 1/4(STEPS 情境成長 15%)。

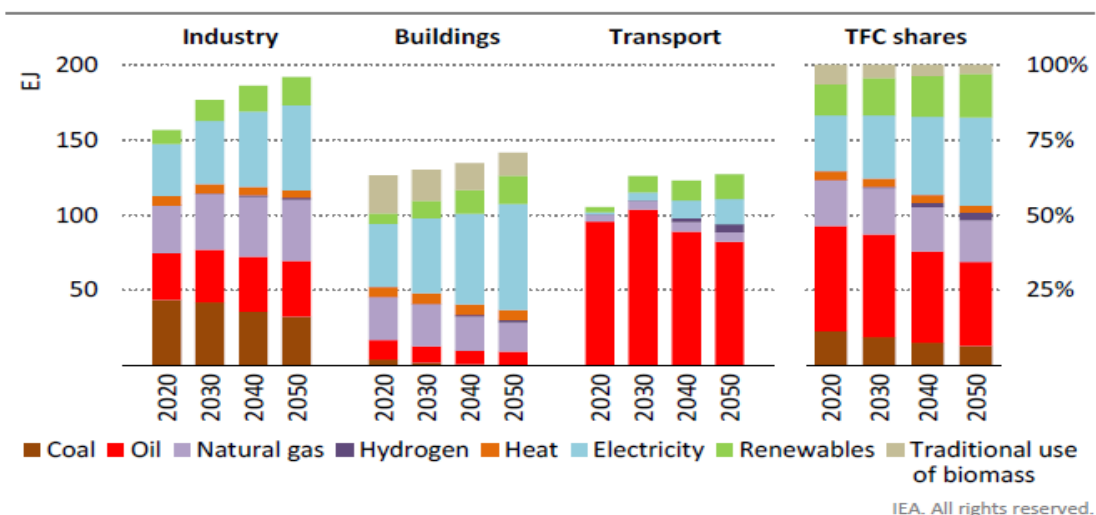
化石燃料供應量部分，煤炭需求的下降主因在燃煤發電的下降，在已開發經濟體中，未來 10-15 年間，無碳移除(如 CCS)相關設施的燃煤電廠將逐步退場，而中國於 2020 至 2050 年間，燃煤發電量將大幅下降 85%。此外，全球工業煤炭使用於 2020 至 2050 年間將下降 25%(STEPS 情境下降 5%)。燃油因運具電動化趨勢，供應呈現下降情形，天然氣則有微幅增加，到後期再趨於平穩。



Announced net zero pledges lift renewables in the APC from 12% of total energy supply in 2020 to 35% in 2050, mainly at the expense of coal and oil

圖 10、STEPS 與 APC 情境下全球能源供應趨勢

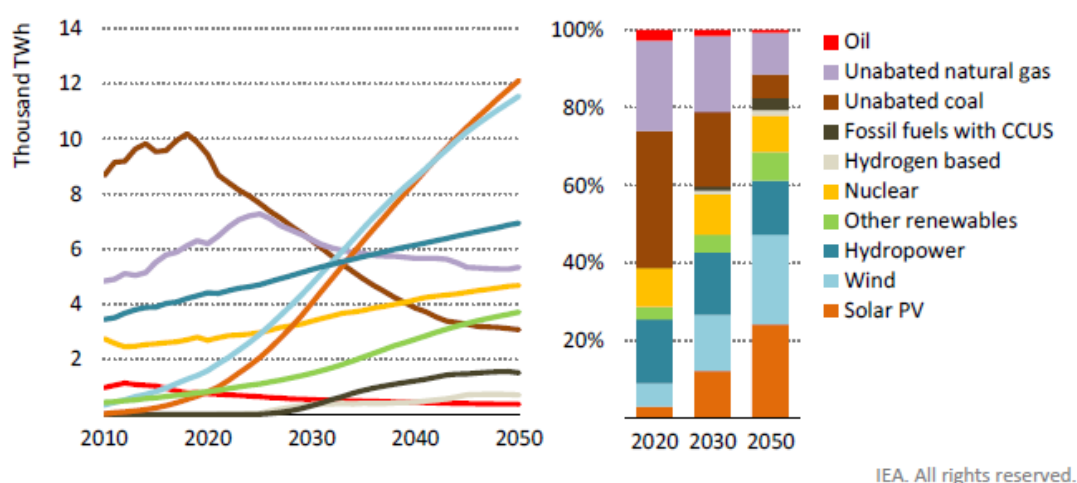
APC 情境下，全球最終能源消費於 2020 至 2050 年期間成長 20%(STEPS 為 35%)，其中，排放減量最大的部門是運輸部門，歸功於運具電動化的規劃(電動車能源效率是一般燃油車的三倍)。在非電力的能源消費方面，生質能與氫能的需求持續增加，生質能以生質甲烷摻配於天然氣管線與運輸用油為最主要使應用方向；氫能在 APC 情境扮演更重要的角色，2050 年全球氫能消費達 15 EJ，占全球總能源消費約 3%，其中 2/3 應用於運輸。



Announced net zero pledges lead to a shift away from fossil fuels globally to electricity, renewables and hydrogen. Electricity's share rises from 20% to 30% in 2050

圖 11、STEPS 與 APC 情境下全球能源消費趨勢

在 APC 情境下，全球電力供給於 2050 年將較現況翻倍，將由 2020 年的 26,800TWh 增加到 2050 年的 50,000TWh，比 STEPS 情境要高出 4,000TWh。再生能源占比由 2020 年 29% 增加到 2050 年的 70% (STEPS 情境為 55%)，其中 PV 與風力將占整體電力供給的一半，水力則為第三大再生能源。核能的裝置量持續增加，其發電占比約維持現況水平 10%，燃氣發電呈現先升後降，燃煤發電則由 2020 年的 35% 下降到 2050 年的 10%，剩餘的機組原則上均須具有 CCUS。氫與氨預估將在 2030 年進入市場作為發電資源，主要結合火力發電使用。此外，因應高再生能源占比趨勢，全球電池總容量於 2050 年將高達 1,600GW (相較 STEPS 情境多出 70%)。



Renewables reach new heights in the APC, rising from just under 30% of electricity supply in 2020 to nearly 70% in 2050, while coal-fired generation steadily declines

Note: Other renewables = geothermal, solar thermal and marine.

圖 12、APC 情境下全球發電結構趨勢

二、2050 全球淨零排放路徑

總計目前承諾淨零排放國家其排放量約占目前全球經濟活動與 CO₂ 排放的 70%。倘若這些國家都能實現其淨零目標，雖使邁向全球達成淨零的差距變小了，但同時也表示仍有 220 億噸的碳排放是需要努力才能達成全球淨零。本章主要是在說明 2050 達成淨零下能源部門轉型分析相關的關鍵假設、市場狀態、能源使用趨勢與投資等。

(一) 情境設計

1. 情境意涵

NZE 情境 (Net-Zero Emissions by 2050 Scenario) 目的在提出各部門在哪些重要時間、及須採行的關鍵淨零策略為何，以使全球能源相關與工業製程排放達到淨零，且盡可能減少能源部門的甲烷排放。因此，NZE 情境可使全球有 50% 機率將溫升限制在 1.5°C 內，情境是基於 IEA 對技術發展可能性與展望的認知、行為改變潛力，並考量各國國情的公平性與平衡。此外，亦納入現階段能源基礎設施實際狀況，包括各類能源供應、發電方式與終端使用部門。NZE 目標是確保到 2030 年與能源有關的和工業製程中的 CO₂ 排放與 1.5°C 情景一致。

2. 評估工具

IEA 2050 淨零評估主要是利用 WEO 與 ETP 模型，並將結果與國際應用系統分析研究所(IIASA)的 GAINS 模型(Greenhouse Gas - Air Pollution Interactions and Synergies Model)、GLOBIOM 模型(Global Biosphere Management Model)結合，以評估溫室氣體與空污排放協同效益與對健康的影響，及土地利用與生質能需求對淨零影響。同時也與國際貨幣基金組織 IMF 的 GIMF 模型(Global Integrated Monetary and Fiscal Model)鏈結，評估技術投資對全球 GDP 影響。

3. 關鍵假設

(1) 人口與 GDP

NZE 情境假設未來全球人口和經濟將大幅增長。2020 年全球人口約為 78 億，預計至 2030 年將增加 7.5 億，至 2050 年將增加近 20 億人口，與聯合國預測的中位數一致 (UNDESA, 2019)。幾乎所有的人口增長來自新興市場與開發中國家，其中僅非洲人口就增加 11 億多。在 GDP 方面，IEA 假設全球經濟將從 Covid-19 影響中迅速復甦，2021 年將恢復至疫情發生前的水平，2022 年起 GDP 成長趨勢約為年均成長 3%，與 IMF 預估一致。故至 2030 年全球經濟將比 2020 年增加約 45%，至 2050 年將成長兩倍以上。

(2) 能源價格

未來能源價格預測具高度不確定性。在 IEA 情境能源價格設計是為了維持供需平衡。NZE 情境中因石油與天然氣需求迅速下降，意即未來不需要化石燃料勘探，也不需要新的油氣田(已批准開發的油田除外)與新的煤礦。導致化石燃料價格近

年來大幅下降，至 2030 年，石油價格將跌至約 35 美元/桶，隨後在 2050 年緩慢下降至 25 美元/桶。此外，隨著能源轉型，全球將有更多燃料貿易發生，如氫能與生質能，而這些燃料商品價格將各個區域的國內生產或進口邊際成本決定。

(3) CO₂ 價格

在 NZE 情境假設所有區域都實施碳價，其假設近期所有已開發國家將在發電業、工業與能源生產行業實施碳價，至 2030 年平均提昇至每噸二氧化碳 130 美元，至 2050 年提升至 250 美元/噸二氧化碳。其他主要國家，包括中國、巴西、俄羅斯及南非，則假設碳價至 2050 年將提升為 200 美元/噸二氧化碳。此外，假設新興國家與開發中國家碳價將低於其他區域。

表 1、NZE 情境各區域碳價設定

Table 2.2 ▶ CO₂ prices for electricity, industry and energy production in the NZE

USD (2019) per tonne of CO ₂	2025	2030	2040	2050
Advanced economies	75	130	205	250
Selected emerging market and developing economies*	45	90	160	200
Other emerging market and developing economies	3	15	35	55

* Includes China, Russia, Brazil and South Africa.

4. 情境設計原則

NZE 情境設計三個關鍵原則：(1)所有的技術與減碳選項的採用，是由成本、技術成熟度、政策偏好，以及和廣泛社會目標、市場與國家條件間潛在權衡關係決定；(2)世界各國以有效互利方式，共同合作朝淨零目標前進；(3)能源部門採漸進式轉型，意即過程始終確保燃料與電力供應安全，且盡可能減少閒置資產，並避免能源市場波動。

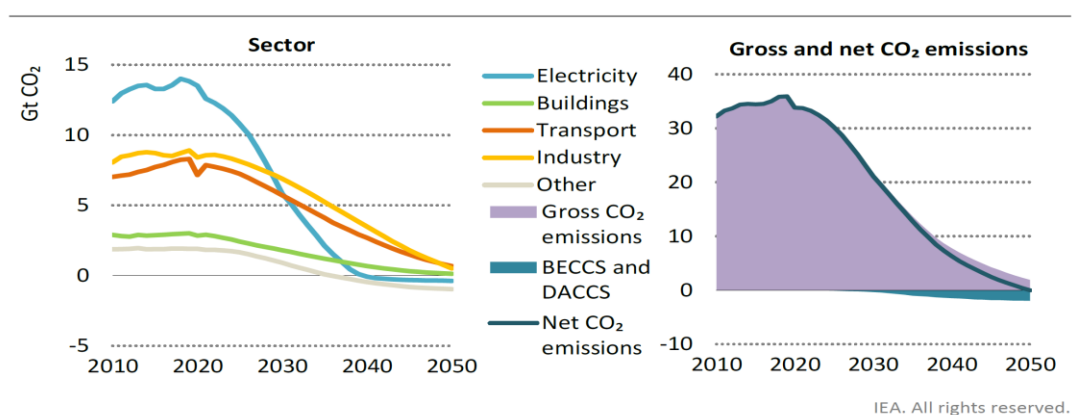
(二) 全球碳排放趨勢

NZE 情境全球能源相關與工業製程排放至 2030 年將降至約 21 Gt (210 億噸)，至 2050 年將降至淨零。其中，已開發國家整體 CO₂ 排放量至 2045 年可接近淨零，至 2050 年可自大氣移除 CO₂ 排放約為 0.2 Gt(負碳)。而在一些新興市場與開發中國家也將在 2050 年前降至淨零，但仍約有 0.2 Gt 的排放，其剛好抵消已開發國家的負碳，因此全球將可實現二氧化碳淨零排放目標。至 2040 年代初期，包括已開發國家、新興市場、發展中國家等區域人均排放量均可降至每人 0.5 噸 CO₂。

在 NZE 情境，2020 年至 2050 年全球能源相關與工業製程 CO₂ 排放累計超過 460 Gt(4600 億噸)，其中電力部門是減碳貢獻最大，也是減碳最快的部門，其至 2030 年排放量下降近 60%，主要是燃煤電廠大幅減量所致，且至 2040 年將成為小的淨負排放源。在建築部門，預估 2020 年至 2030 年排放量減少 40%，主要是因為不再使用化石燃料鍋爐，且對既有建築進行改造提高能源效率。同期，工業與運輸排放量均下降約 20%，但隨著低排放燃料與其他減碳措施規模擴大，其在 2030 年後的減碳步伐會逐漸加快。但因航空與重工業等領域較難完全消除碳排放，故至 2050 年這兩個部門仍殘留少量的排放需藉由 BECCS 和 DACCS 移除。

NZE 情境規劃所有新資產與基礎設施都盡可能具永續性與效率，此佔 2050 年總減量貢獻的 50%，另外減少既有基礎設施排放佔 2050 年減量 35%，行為改變與避免需求，包括材料效率提高、運輸模式改變等，提供剩餘的 15% 的減量。

Figure 2.3 ▶ Global net-CO₂ emissions by sector, and gross and net CO₂ emissions in the NZE



Emissions from electricity fall fastest, with declines in industry and transport accelerating in the 2030s. Around 1.9 Gt CO₂ are removed in 2050 via BECCS and DACCS.

Notes: Other = agriculture, fuel production, transformation and related process emissions, and direct air capture. BECCS = bioenergy with carbon capture and storage; DACCS = direct air capture with carbon capture and storage. BECCS and DACCS includes CO₂ emissions captured and permanently stored.

資料來源：IEA(2021)

圖 13、NZE 情境各部門 CO₂ 排放減量

(三) 總能源供給與最終能源消費

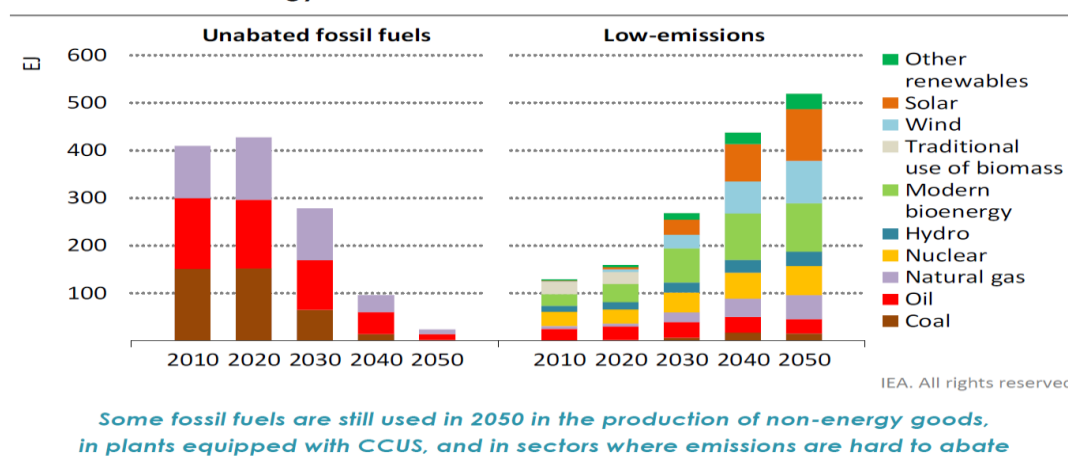
1. 總能源供給

儘管全球人口與經濟顯著增加，但因能源密集度下降(單位 GDP 能源消費量)，預估 2030 年總能源供給量較 2020 年降低 7%，2020 至 2030 年能源密集度年下降 4%。此主要是由於電氣化，並推動所有能源與材料效率提昇、行為改變減少能源服務需求，及改變傳統生質物使用。2030 年後持續電氣化可進一步降低能源密集度，但由於 2030 年前已最大程度提高能效，故 2030 年後能源提昇機會有限，此外由於新燃料生產增加，如先進生質能、氫與合成燃料，亦推動源使用，所以 2030 年至 2050 年能源密集度下降速度降至每年 2.7%。因此，隨著經濟與人口的持續增長，2030 年至 2040 年總能源供給量微幅下降，但至 2050 年則持平。

NZE 情境 2050 年能源結構較目前明顯不同，更為多元。2020 年石油占總供給的 30%、煤炭占 26%、天然氣占 23%。至 2050 年，再生能源提供 2/3 能源使用，其中生質源、風能、太陽能、水力發電及地熱能占 2/3。此外，核能也大幅增加，至 2020 年至 2050 年幾乎增加一倍。

在 NZE 情竟，化石燃料使用已大幅減少，其在能源總供給占比由 2020 年的 80% 下降至 2050 年的 20%，這些僅存的化石燃料主要是用於含碳產品的生產(如塑膠)、或加裝碳捕獲設施及缺乏低排放技術產業使用。2020 至 2050 年煤炭使用年均下降 7%、石油需求年均下降超過 4%、天然氣使用年均下降低於 3%。

Figure 2.6 ▶ Total energy supply of unabated fossil fuels and low-emissions energy sources in the NZE



Note: Low-emissions includes the use of fossil fuels with CCUS and in non-energy uses.

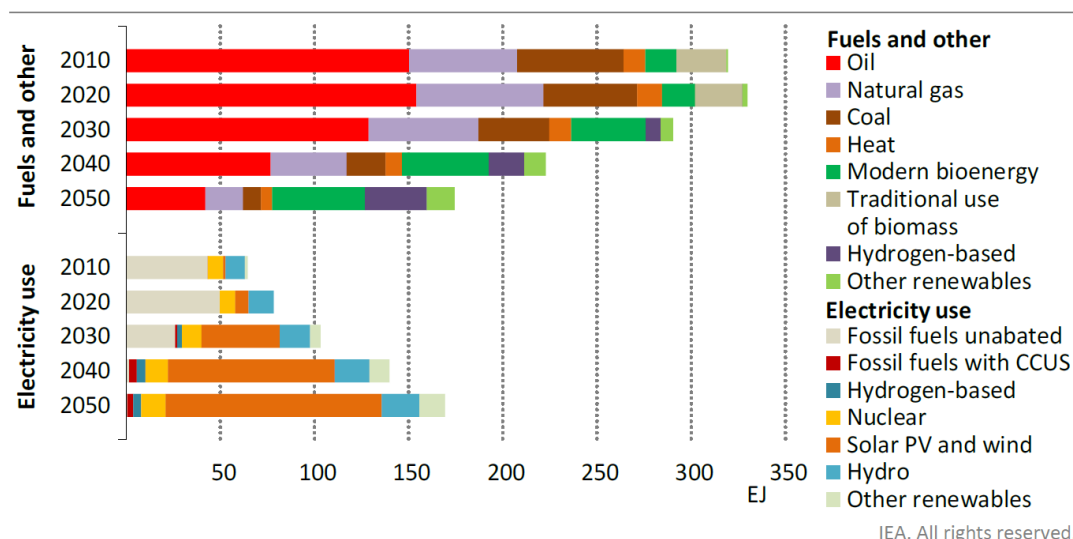
圖 14、NZE 情境全球低碳能源與化石燃料供給

2. 最終能源消費

NZE 情境下，2025 至 2050 年能源消費平均每年下降近 1%。節能措施與電氣化是能源消費下降的兩個主要因素，其也如行為改變與材料效率也具有一定作用。其中，由於終端能源消費電需求增加，且氫能生產用電需求，電力占全球最終

能源消費由 2020 年的 20%躍升至 2030 年的 26%，並在 2050 年提高至約 50%。此外，由於建築與工業直接使用再生能源及低排放燃料，如生質能與氫相關燃料，至 2050 年占最終能源消費 28%，其餘則為化石燃料，但其中大部分用於非排放製程或已加裝 CCUS 的設備。

Figure 2.9 ▶ Global total final consumption by fuel in the NZE



The share of electricity in final energy use jumps from 20% in 2020 to 50% in 2050

Note: Hydrogen-based includes hydrogen, ammonia and synthetic fuels.

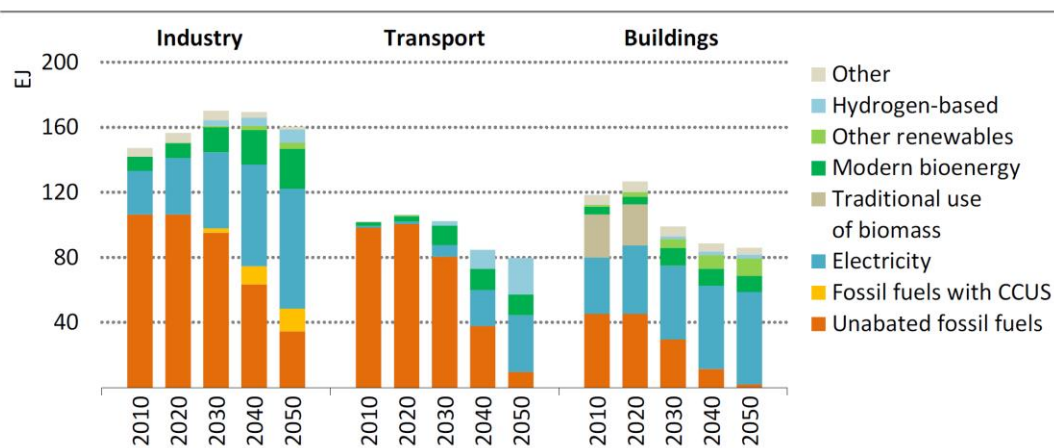
資料來源：IEA(2021)

圖 15、NZE 情境全球最終能源消費(燃料別)

至 2030 年，NZE 情境下工業部門主要減量是藉由提高能源與材料效率、熱能電氣化，以及將燃料轉換為太陽熱能、地熱與生質能。其後，CCUS 與氫能在 CO₂ 減量逐漸重要，特別是在鋼鐵、水泥與石化等重工業。預估 2020 至 2050 年工業用電將增加一倍以上，至 2050 年將占工業總能源需求的 45%。工業對氫氣需求由目前低於 1 Mt 增長至 2050 年的 40Mt；2050 年具 CCUS 的化石燃料約占工業能源需求 10%。在運輸部門，石油產品 2020 年占能源使用超過 90%。但在 NZE 情境全球石油使用將快速轉變，在公路運輸電力將成為主要能源，至 2050 年占能源使用量超過 60%，而氫與氫合成燃料占比仍小，主要是用在長途重型貨車。在航運業，提高能效可顯著減少能源需求(尤其是至 2030 年)，同時先進生質能與氫合成燃料(如氨)正逐漸取代石油。在航空業，合成液體燃料與先進生質能迅速增加，其在航空總能源需求占比由現今幾乎為零增加至 2050 年的近 80%。總體而言，至 2040 年代初，電力將成為全球運輸部門主要燃料，至 2050 年力占部門能源消費 45%(而 2020 年為 1.5%)。氫與氫合成燃料占約 30%(2020 年幾乎為零)，

而生質能則占 15%(20 年約為 4%)。在建築部門，包括供暖在內的終端使用設備電氣化，導致電力需求在 2020 至 2050 年間增加約 35%，至 2050 年電力占建築部門能源消費總量 2/3。

Figure 2.10 ▶ Global final energy consumption by sector and fuel in the NZE



IEA. All rights reserved.

There is a wholesale shift away from unabated fossil fuel use to electricity, renewables, hydrogen and hydrogen-based fuels, modern bioenergy and CCUS in end-use sectors

Note: Hydrogen-based includes hydrogen, ammonia and synthetic fuels.

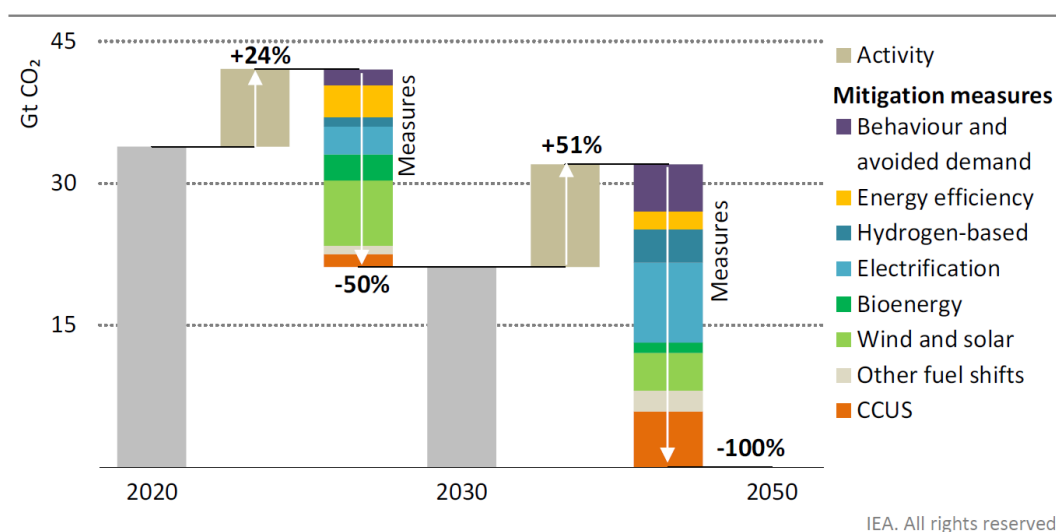
資料來源：IEA(2021)

圖 16、NZE 情境全球最終能源消費(部門別)

(四) 去碳關鍵策略

NZE 淨零排放路徑提出未來三十年需要達到的 400 多項里程碑，以達 2050 淨零目標。這些關鍵行動方案包括大規模部署再生能源、提高能源效率、電氣化將取代過往化石燃料設備、提高生質燃料應用、發展碳捕存與再利用技術(CCUS)、發展氫能或氫能為主的燃料。另外，還包括使用行為改變，IEA 指出要實現如此規模與速度的轉型，若沒有公民持續支持與參與是無法達成的。

Figure 2.12 ▸ Emissions reductions by mitigation measure in the NZE, 2020-2050



Solar, wind and energy efficiency deliver around half of emissions reductions to 2030 in the NZE, while electrification, CCUS and hydrogen ramp up thereafter

Notes: Activity = energy service demand changes from economic and population growth. Behaviour = energy service demand changes from user decisions, e.g. changing heating temperatures. Avoided demand = energy service demand changes from technology developments, e.g. digitalisation. Other fuel shifts = switching from coal and oil to natural gas, nuclear, hydropower, geothermal, concentrating solar power or marine.

資料來源：IEA(2021)

圖 17、NZE 情境下 2020-2050 減量措施減碳貢獻

1. 能源效率

提高能效盡可能減少能源需求在 NZE 情境至關重要，其在遏制 2030 年前能源需求與排放扮演最關鍵的角色，但 2030 年後儘管能源效率進一步提高，其對減碳貢獻卻下降。

在建築部門，多數改善措施在減碳同時也可減少財務支出。在 NZE 情境，建築能效迅速改善將主要來自大規模的改建計畫，預估在已開發國家，至 2050 年每年約有 2.5%既有住宅建築物翻新，以符合零碳建築標準(目前翻新率不到至 1%)。在新興市場與開發中國家，至 2050 年，建築改建比例更高，每年翻新率約為 2%。至 2050 年絕大多數既有住宅建築物將被改造為零碳建築，至 2030 年所有地區都將推行能源相關建築法規，以確保幾乎所有新建物符合零碳建築。在運輸部門，將推行嚴格的燃油經濟性標準，確保至 2035 年起不再銷售新的內燃機(ICE)車，促使更快的轉向高效率的電動汽車，估計至 2030 年，電動汽車將占路上所有汽車的 20%，至 2040 年占 60%(目前為 1%)。在工業部門，多數製造業既有設備能源效率已經相當高，但仍有提高的機會。在 NZE 情境，可安裝能源管理系統、採用效率最佳設備及利用製程措施(如廢熱回收)，可在 2030 前發揮最大經濟潛力。

2030 年後，由於工業減碳技術較傳統技術需要更多能源，因此效率改善減緩。例如使用 CCUS 增加捕獲設備的能源消耗，且電解製氫比主要製程需更多的能源。

表 2、NZE 情境全球能源效率關鍵 Milestones

Table 2.3 ▶ Key global milestones for energy efficiency in the NZE

Sector	2020	2030	2050
Total energy supply	2010-20	2020-30	2030-50
Annual energy intensity improvement (MJ per USD GDP)	-1.6%	-4.2%	-2.7%
Industry			
Energy intensity of direct reduced iron from natural gas (GJ per tonne)	12	11	10
Process energy intensity of primary chemicals (GJ per tonne)	17	16	15
Transport			
Average fuel consumption of ICE heavy trucks fleet (index 2020=100)	100	81	63
Buildings			
Share of zero-carbon-ready buildings in total stock	<1%	25%	>85%
New buildings: heating & cooling energy consumption (index 2020=100)	100	50	20
Appliances: unit energy consumption (index 2020=100)	100	75	60

Notes: ICE = internal combustion engine; zero-carbon-ready buildings = see description in section 3.7.

2. 行為改變

IEA 指出要實現如此規模與速度的轉型，若沒有公民持續支持與參與是無法實現 NZE 情境中所提出的能源部門全面轉型。NZE 情境減碳量約有近 40% 歸因於採用低碳技術，其需要大量政策支持與投資，公民或消費者等直接參與的部分很少。然若要進一步減少 55% 排放量，就需要結合低碳技術推動及公民和消費者的積極參與，如安裝太陽能熱水器或購買電動汽車。最終 8% 減碳量是源於行為改變與材料效率提高，從而減少能源需求，例如減少商業目的的飛行。

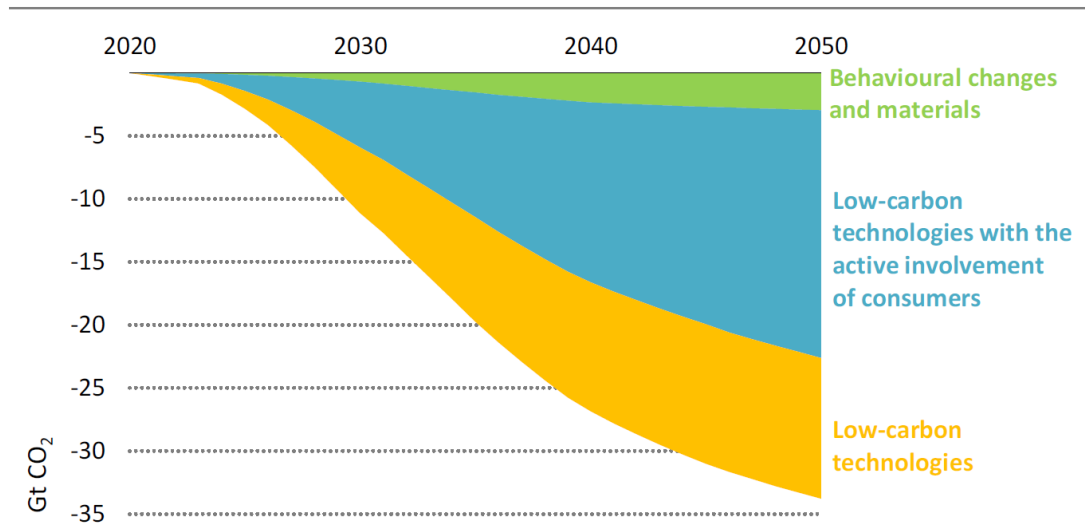
在 NZE 情境中，行為改變是指改變消費者過往一直以來或重複性的行為，這些變化會影響能源服務需求或與能源相關活動的能源密集度。NZE 情境能源服務需求減少也可能源於技術進步，但這些不計入行為改變，如數位化發展與智能家電市場占比提升。

NZE 情境包括三種主要的行為改變類型，可藉由多種政府干預措施推動。

- 減少過多或浪費的能源使用：如透過降低室內溫度設置，或設定高速公路時速限制為每小時 100 公里。
- 改變運輸模式：如市區運輸轉為騎自行車、步行或搭乘公共汽車，以高鐵代替部分跨區航空需求。

- 提高材料效率：提高回收率，改善建築營造或車輛設計等，以減少材料需求。

Figure 2.14 ▶ Role of technology and behavioural change in emissions reductions in the NZE



IEA. All rights reserved.

Around 8% of emissions reductions stem from behavioural changes and materials efficiency

Notes: Low-carbon technologies include low-carbon electricity generation, low-carbon gases in end-uses and biofuels. Low-carbon technologies with the active involvement of citizens includes fuel switching, electrification and efficiency gains in end-uses. Behavioural changes and materials efficiency includes transport mode switching, curbing excessive or wasteful energy use, and materials efficiency measures.

資料來源：IEA(2021)

圖 18、NZE 情境低碳技術與行為改變減量貢獻

行為改變在 NZE 情境可減少至 2050 年間能源相關活動約 10-15%，至 2050 年將減少全球總能源需求 37 EJ 以上。在 CO₂ 排放，至 2030 年可減少約 1.7 Gt 排放，其中 45% 來自交通運輸，主要是逐步淘汰都市內汽車使用及提高燃油經濟性。另，由於材料效率提高與回收利用增加，工業可減少 40% 排放量的發生，其中最大的影響來自減少廢物，及改善建築設計與建築營造。至 2030 年，其餘減少的排放來自建築部門行為改變，如調整供暖與供冷溫度。

表 3、NZE 情境全球行為改變關鍵 Milestones

Table 2.4 ▶ Key global milestones for behavioural change in the NZE

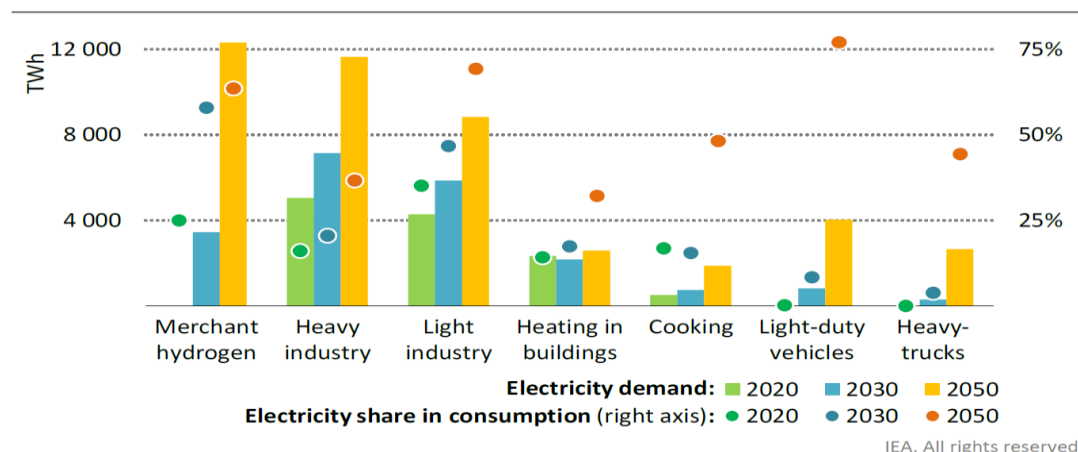
Sector	Year	Milestone
Industry	2020	• Global average plastics collection rate = 17%.
	2030	• Global average plastics collection rate = 27%. • Lightweighting reduces the weight of an average passenger car by 10%.
	2050	• Global average plastics collection rate = 54%. • Efficiency of fertiliser use improved by 10%.
Transport	2030	• Eco-driving and motorway speed limits of 100 km/h introduced. • Use of ICE cars phased out in large cities.
	2050	• Regional flights are shifted to high-speed rail where feasible. • Business and long-haul leisure air travel does not exceed 2019 levels.
Buildings	2030	• Space heating temperatures moderated to 19-20 °C on average. • Space cooling temperatures moderated to 24-25°C on average. • Excessive hot-water temperatures reduced.
	2050	• Use of energy-intensive materials per unit of floor area decreases by 30%. • Building lifetime extended by 20% on average.

Note: Eco-driving involves pre-emptive stopping and starting; ICE = internal combustion engine.

3. 電氣化

在 NZE 情境中，直接使用低排放電力替代化石燃料是減碳最重要的策略之一，約占 2050 年減碳量 20%。2020 至 2050 年，全球電力需求將增加一倍以上，終端使用部門用電量增加最多的為工業部門，主要是由於中低溫熱的電力需求及二次廢鋼生產。

Figure 2.16 ▶ Global electricity demand and share of electricity in energy consumption in selected applications in the NZE



Global electricity demand more than doubles in the period to 2050, with the largest rises to produce hydrogen and in industry

Notes: Merchant hydrogen = hydrogen produced by one company to sell to others. Light-duty vehicles = passenger cars and vans. Heavy trucks = medium-freight trucks and heavy-freight trucks.

圖 19、NZE 情境全球主要應用設備電力消費占比趨勢

在運輸部門，NZE 情境電力占比從 2020 年不到 2%，增加至 2050 年的 45%左右。至 2030 年，全球乘用車總銷售量 60%以上為電動汽車(2020 年占總銷售量的 5%)，

至 2050 年，全球車隊幾乎全部電氣化(其餘為氫動力汽車)。未來 10 年，全球電動乘用車銷售將比過去 10 年內燃引擎車銷售高出二十倍以上。貨車電氣化速度較慢，尤其是長途貨運，因它需要更高密度的電池，及新的大功率充電基礎設施。儘管如此，2030 年電動貨車仍占全球重型貨車總銷售量 25%左右，至 2050 年則占將近 2/3。航運與航空電氣局限性更大，惟有當電池能量密度大幅度提高後才有機會。在 NZE 情境，至 2050 年，運輸用電池需求將達至 14 TWh 左右，是 2020 年的 90 倍。而電池需求增加將造成對關鍵礦物質需求的增加。

在建築部門，因 NZE 情境大力提高電器、供冷、照明與建築外殼效率，緩解電力需求。但隨著供暖設備廣泛電氣化，建築部門電力需求仍將穩定增加，至 2050 年將達占建築總能源消費的 66%。除最終能源消費部門電力使用增加外，用於製氫的電力使用也大幅增加。NZE 情境下，2050 年電解製氫的電力需求約為 12000 TWh，超過目前中美兩國電力需求合計。

表 4、 NZE 情境全球電氣化關鍵 Milestones

Table 2.5 ▶ Key global milestones for electrification in the NZE

Sector	2020	2030	2050
Share of electricity in total final consumption	20%	26%	49%
Industry			
Share of steel production using electric arc furnace	24%	37%	53%
Electricity share of light industry	43%	53%	76%
Transport			
Share of electric vehicles in stock: cars	1%	20%	86%
two/three-wheelers	26%	54%	100%
bus	2%	23%	79%
vans	0%	22%	84%
heavy trucks	0%	8%	59%
Annual battery demand for electric vehicles (TWh)	0.16	6.6	14
Buildings			
Heat pumps installed (millions)	180	600	1 800
Share of heat pumps in energy demand for heating	7%	20%	55%
Million people without access to electricity	786	0	0

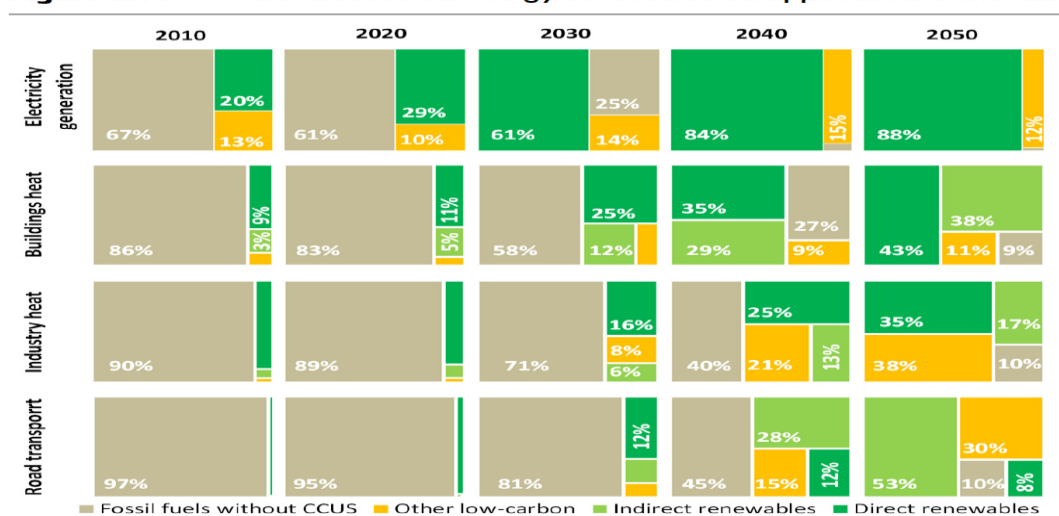
4. 再生能源

再生能源是減少電力排放的關鍵。過去幾十年是以水力發電為主，但至 2030 年，風力和太陽能發展使再生能源發電量增加三倍，至 2050 年再生能源發電將增加八倍以上。全球再生能源占總發電比例由 2020 年 29%，至 2030 年增加為 60% 以上，至 2050 年則提高近 90%。為實現這一目標，至 2020 年至 2050 年，風力和太陽能的年裝置量增加是過去三年平均的五倍。此外，將不可調度再生能源與

其他再生能源發電、儲能及電網強化結合，對供電安全至關重要。在 NZE 情境，2050 年全球不可調度再生能源主要包括水力發電(占發電量 12%)、生質能(5%)、集中式太陽能發電(2%)和地熱(1%)。

再生能源在減少建築物、工業與運輸排放也具有重要作用。再生能源可透過電力或區域供暖等作為間接使用，或可直接用於供熱上。在運輸部門，再生能源發電作為電動車電力來源，可減少排放，此外液態生質能與生質甲烷等燃料使用，可直接減少排放。在建築部門，再生能源主要用熱水與供暖，再生能源直接用於供暖，占全球供暖需求從 2020 年的 10% 增加至 2050 年 40%，其中約 3/4 增加為太陽能與地熱。盡可能結合再生能源進行深度改造與能源相關建築規範，至 2050 年，幾乎所有具有屋頂空間與足夠光照的建築物都將配備太陽能熱水器。在工業部門，生質能為主要直接應用於中低溫需求的再生能源，太陽熱能與地熱亦可產生低溫熱能，提供非能源密集型產業或及重工業輔助設備或下游製程使用。至 2030 年，生質能、太陽熱能與地熱能合計提供工業部門約 15% 熱需求，較 2010 年增加一倍，至 2050 年將提昇至 40%。

Figure 2.18 ▶ Fuel shares in total energy use in selected applications in the NZE



IEA. All rights reserved.

Renewables are central to emissions reductions in electricity, and they make major contributions to cut emissions in buildings, industry and transport both directly and indirectly

Notes: Indirect renewables = use of electricity and district heat produced by renewables. Other low-carbon = nuclear power, facilities equipped with CCUS, and low-carbon hydrogen and hydrogen-based fuels.

資料來源：IEA(2021)

圖 20、NZE 情境關鍵應用去碳能源與化石燃料占比變化

表 5、NZE 情境再生能源關鍵 Milestones

Table 2.6 ▶ Key deployment milestones for renewables

Sector	2020	2030	2050
Electricity sector			
Renewables share in generation	29%	61%	88%
Annual capacity additions (GW): Total solar PV	134	630	630
Total wind	114	390	350
– of which: Offshore wind	5	80	70
Dispatchable renewables	31	120	90
End-uses sectors			
Renewable share in TFC	5%	12%	19%
Households with rooftop solar PV (million)	25	100	240
Share of solar thermal and geothermal in buildings	2%	5%	12%
Share of solar thermal and geothermal in industry final consumption	0%	1%	2%

Note: TFC = total final consumption.

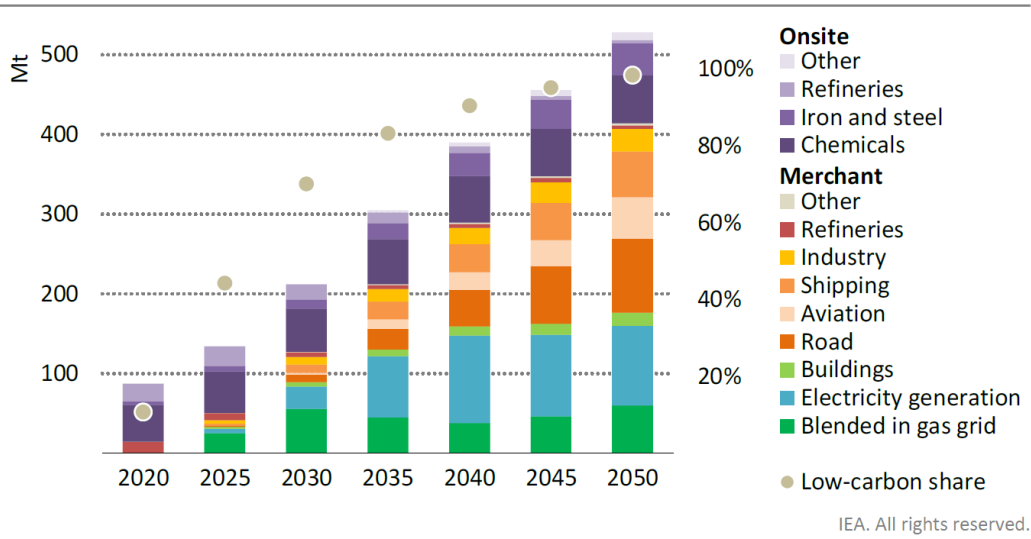
5. 氫能

NZE 情境，最初氫能應用重點是將化石能源移轉為低碳氫能，故無需建立新輸配基礎設施，包括工業用、煉油廠與發電廠使用氫氣，及將氫氣混入天然氣中提供給終端用戶。全球氫氣使用將從 2020 年的不至 90 Mt 擴大至 2030 年的 200 Mt 以上；低碳氫的比例從 2020 年的 10% 提高至 2030 年的 70%。至 2030 年，全球低碳氫生產約有一半來自電解，其餘來自煤炭+CCUS 與燃氣+CCUS，但該比例在不同地區之間存有很大差異。氫氣可在天然氣網絡中與天然氣混合，按體積計算，至 2030 年的全球摻配氣體中含 15% 的氫氣，可減少 6% 天然氣 CO₂ 排放量。

2030 年後，低碳氫在 NZE 情境應用迅速擴大。在電力部門，氫與氫合成燃料為電力系統靈活性提供重要的低碳來源，主要是藉由改建既有燃氣電廠，使其可與氫共同混燒，及對燃煤發電廠改建與氫混燒。儘管至 2050 年，氫與氫合成燃料發電僅占總發電量 2%，但其需要龐大的氫氣，故使電力部門成為氫氣需求的主要來源。在運輸部門，NZE 情境氫氣將占貨車 2050 年燃料使用量 1/3 左右，合成燃料占航運總能源消費 60%。

2050 年低碳氫使用量約 30% 為氫合成燃料，其中包括氨、合成液體與氣體。至 2050 年，產氫占總生產量的 60%。鑑於目前電解產能不足，在 NZE 情境中電解槽生產是一項關鍵的挑戰，同時還要確保有足夠的發電能力。隨著 NZE 情境的發展，全球氫氣貿易不斷發展，預估將有大量的氫能出口是從燃氣及再生能源資源豐富的地區，如中東、中美洲、南美洲與澳大利亞，出口至亞洲與和歐洲。

Figure 2.19 ▶ Global hydrogen and hydrogen-based fuel use in the NZE



The initial focus for hydrogen is to convert existing uses to low-carbon hydrogen; hydrogen and hydrogen-based fuels then expand across all end-uses

Note: Includes hydrogen and hydrogen contained in ammonia and synthetic fuels.

資料來源：IEA(2021)

圖 21、NZE 情境關全球氫能及氫能相關燃料使用情形

表 6、NZE 情境氫能關鍵 Milestones

Table 2.7 ▶ Key deployment milestones for hydrogen and hydrogen-based fuels

Sector	2020	2030	2050
Total production hydrogen-based fuels (Mt)	87	212	528
Low-carbon hydrogen production	9	150	520
<i>share of fossil-based with CCUS</i>	<i>95%</i>	<i>46%</i>	<i>38%</i>
<i>share of electrolysis-based</i>	<i>5%</i>	<i>54%</i>	<i>62%</i>
Merchant production	15	127	414
Onsite production	73	85	114
Total consumption hydrogen-based fuels (Mt)	87	212	528
Electricity	0	52	102
of which hydrogen	0	43	88
of which ammonia	0	8	13
Refineries	36	25	8
Buildings and agriculture	0	17	23
Transport	0	25	207
of which hydrogen	0	11	106
of which ammonia	0	5	56
of which synthetic fuels	0	8	44
Industry	51	93	187

Note: Hydrogen-based fuels are reported in million tonnes of hydrogen required to produce them.

6. 生質能

2020 年全球生質能需求約 65 EJ，其中約 90%為固態生質燃料，而其中約 40%固態生質燃料應用於傳統烹調，其不具永續性外，效率低且造成嚴重污染。因此，在 NZE 情境，以此方式使用的固態生質燃料將降至零，實現聯合國可持續發展目標 7，至 2050 年所有生質能為永續性生質燃料，且 NZE 情境中生質能總使用量遠低於全球永續生質能潛力預估數，從而避免對生物多樣性、淡水系統，以及糧食價格與供應造成負面影響的風險。

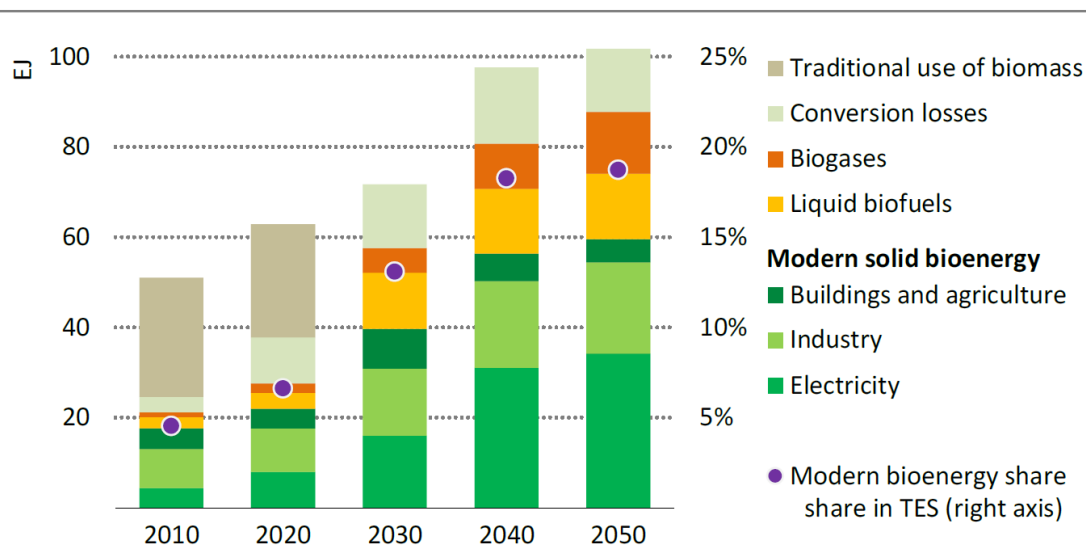
至 2050 年，現代固態生質能使用平均每年將增加長約 3%。在電力部門，生質能發電量占總發電量 5%，此外生質能提供約 50%區域供熱。在工業部門，固態生質能可提供高溫熱量，可與煤炭混燒以降低既有發電設備排放，其在造紙與水泥生產需求最高，至 2050 年生質能將提供造紙業 60%能源需求與水泥生產 30%的能源需求。在建築部門，現代固態生質能將用於烹調取代傳統生質能，且在已開發國家，生質能也越來越多地用於空調及熱水。

生質氣與生質甲烷需求增長，其中生質氣主要應用在鄉村地區作為再生能源及潔淨烹調，而生質甲烷則主要是與天然氣網絡摻配，至 2050 年，許多地區平均摻配率將提高至 80%以上，生物甲烷總使用量一半用於工業部門，替代天然氣作為加熱用。至 2050 年，建築與運輸業分別占生質甲烷消費量約 20%。

生質能主要優勢之一是可利用既有的基礎設施，如生質甲烷可使用既有的天然氣管線與終端設備，而液態生質能可使用現有的石油輸配網絡，並僅需小幅改製的車輛。NZE 情境中，液態生質能至 2030 年主要用於公路運輸，2030 年後因運輸電氣化，液態生質能使用將轉移至航運與航空。至 2050 年，液態生質能使用量幾乎一半用於航空，其中生質煤油約占航空總能源使用量的 45%。

碳捕集與封存 (BECCS) 的生質能在 NZE 情境中扮演著至關重要的角色，可用於移消除難以完全消除的部門排放。至 2050 年，具 CCUS 設備將使用約 10%的生質能，而使用 BECCS 則可捕獲約 1.3 Gt 二氧化碳，其中有 45%捕獲於生質能生產，40%捕獲於電力部門，其餘捕獲於重工業中，尤其是水泥生產。

Figure 2.20 ▶ Total bioenergy supply in the NZE



IEA. All rights reserved.

Modern bioenergy use rises to 100 EJ in 2050, meeting almost 20% of total energy needs. Global demand in 2050 is well below the assessed sustainable potential

Notes: TES = Total energy supply. Conversion losses occur during the production of biofuels and biogases.

資料來源：IEA(2021)

圖 22、NZE 情境關生質能供給情形

表 7、NZE 情境生質能關鍵 Milestones

Table 2.8 ▶ Key deployment milestones for bioenergy

	2020	2030	2050
Total energy supply (EJ)	63	72	102
Share of advanced biomass feedstock	27%	85%	97%
Modern gaseous bioenergy (EJ)	2.1	5.4	13.7
Biomethane	0.3	2.3	8.3
Modern liquid bioenergy (mboe/d)	1.6	6.0	7.0
Advanced biofuels	0.1	2.7	6.2
Modern solid bioenergy (EJ)	32	54	74
Traditional use of solid biomass (EJ)	25	0	0
Million people using traditional biomass for cooking	2 340	0	0

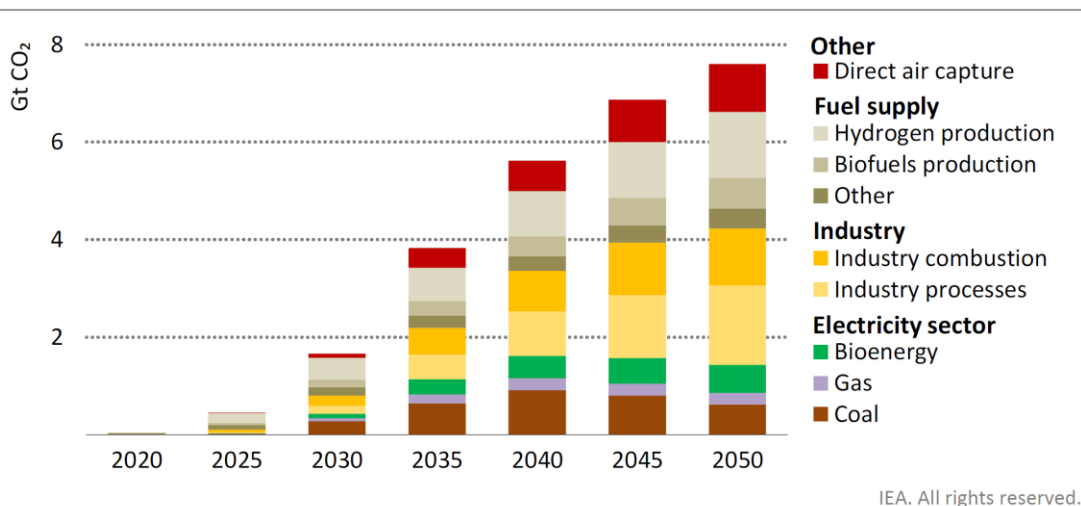
Notes: mboe/d = million barrels of oil equivalent per day. Bioenergy from forest plantings is considered advanced when forests are sustainably managed (see section 2.7.2).

7. 碳捕存與再利用(CCUS)

CCUS 藉由以下方式可促使轉型至淨零，包括針對既有設備排放與最具減碳挑戰部門提供解決方案，提供經濟效益使低碳氫能生產規模化，及透過 BECCS 與 DACCS 自大氣中去除 CO₂。

NZE 情境中，工業部門能源相關與工業製程排放占 2050 年二氧化碳總捕獲量的 40%。CCUS 對水泥生產尤為重要。儘管 NZE 情境努力提高水泥生產效率，但 CCUS 對限制水泥生產過程中產生的製程排放仍然是至關重要。電力部門占 2050 年二氧化碳總捕獲量近 20% (其中約 45%來自燃煤電廠、40%來自生質能電廠、15%來自燃氣電廠)。加裝 CCUS 的發電廠在 2050 年僅占總發電量的 3%，但二氧化碳捕獲量相對較大。在新興市場與開發中國家，由於近期大量建置許多燃煤發電廠，因此若在有封存場址，電廠改造將具有重要影響。而在已開發國家，CCUS 燃氣電廠則相對重要，預估至 2030 年約有 50GW 燃煤電廠(占當時總裝置量 4%)與 30GW 燃氣電廠(占總裝置量 1%)加裝 CCUS，至 2050 年燃煤電廠將增加至 220GW(約占總裝置量 50%)，燃氣電廠增加至 170GW(占總裝置量 7%)。此外，2050 年 CO₂ 捕獲量的 30%是源自於燃料轉化，包括氫能與生質能生產，及煉油，最後剩餘 10%則來自於 DAC。

Figure 2.21 ▶ Global CO₂ capture by source in the NZE



By 2050, 7.6 Gt of CO₂ is captured per year from a diverse range of sources. A total of 2.4 Gt CO₂ is captured from bioenergy use and DAC, of which 1.9 Gt CO₂ is permanently stored.

資料來源：IEA(2021)

圖 23、NZE 情境關碳捕獲來源

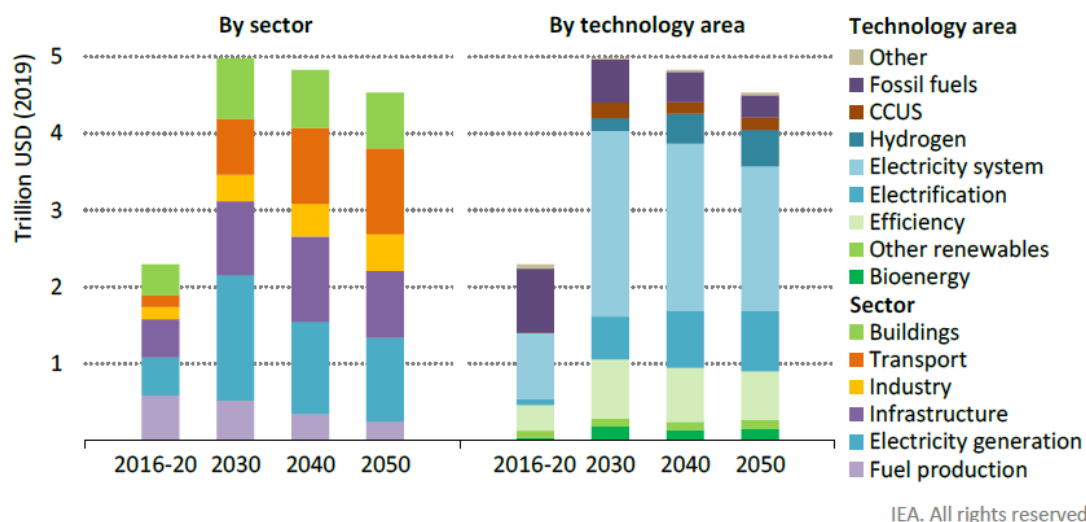
表 8、NZE 情境碳捕存與再利用(CCUS)關鍵 Milestones

Table 2.9 ▶ Key global milestones for CCUS

	2020	2030	2050
Total CO₂ captured (Mt CO₂)	40	1 670	7 600
CO₂ captured from fossil fuels and processes	39	1 325	5 245
Power	3	340	860
Industry	3	360	2 620
Merchant hydrogen production	3	455	1 355
Non-biofuels production	30	170	410
CO₂ captured from bioenergy	1	255	1 380
Power	0	90	570
Industry	0	15	180
Biofuels production	1	150	625
Direct air capture	0	90	985
Removal	0	70	630

(五)投資

要在 2050 年實現淨零排放，需要對全球能源系統進行根本性改造，需要大幅增加投資。NZE 情境能源部門每年投資金額從過去平均 2 億美元提高到 2030 年的 5 兆美元，2050 年的 4.5 兆美元。投資占全球 GDP 比例從目前的 2.5% 增加至 2030 年的 4.5%，到 2050 年則降回 2.5%。



資料來源：IEA(2021), NET ZERO BY 2050 A ROADMAP FOR THE GLOBAL ENERGY SECTOR.

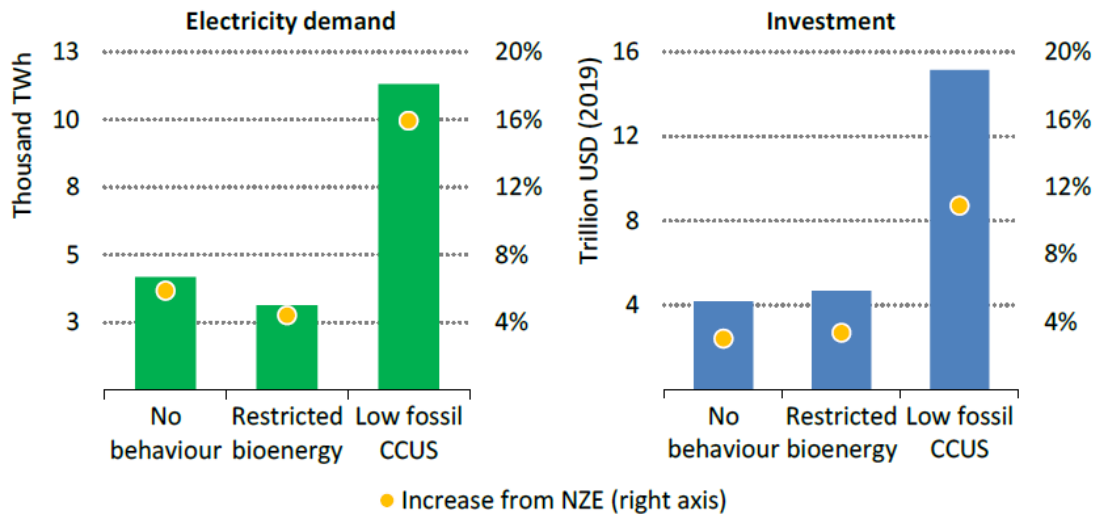
圖 24、NZE 情境年度平均投資額

每年的電力投資從過去五年的 5 千億美元增加到 2030 年的 1.6 兆美元，之後由於再生能源技術的成本持續下降而減少。核電投資也增加，2050 年約是目前的兩倍。而燃料供給從過去十年平均的 5750 億美元下降至 2030 年的 3150 億美元，到 2050 年更降至 1100 億美元。化石燃料投資額占整體能源部門比例從目前 25% 到 2050 年只剩 7%，這是由於氫能與相關燃料和生質能等低排放燃料供給所增加投資所抵消，這些燃料投資額在 2050 年約 1400 億美元。NZE 情境對於運輸投資明顯增加，從目前的 1500 億美元到 2050 年的 11000 億美元，這主要是由於電動汽車與傳統燃油汽車的成本差異，但已經將電池成本下降趨勢考慮進去。

以技術別看，電氣化是 NZE 情境重點，除了增加對發電端的投資外，對電網擴充的投資也大大增加。從近期平均約 2600 億美元，增加至 2030 年的 8000 億美元，之後維持此金額到 2050 年。面對不斷增長的電力需求以及變動性電力在電力結構中所佔的比例越來越大，需要投資來確保電力安全。最終使用端電氣化方面的投資也大量增加，其中包括在 EV 電池，熱泵和工業設備電氣化上的支出。2030 年後由於運輸部門大量使用氫能導致投資也大幅增加，包括生產、加氫站和用戶設備在內的氫能相關投資到 2030 年將達到 1650 億美元，到 2050 年將超過 4700 億美元。對 CCUS 的投資也有增加，到 2050 年將超過 1600 億美元，而在設備效率提昇到 2050 年超過 6400 億美元，主要用於建築改造和高效率電器。

(六)不確定性關鍵因素

淨零排放路徑仍有很多不確定性，原因有很多，包括無法確定經濟狀況將如何變化，哪種政策會最有效，人們和企業對於市場和政策訊息如何反應，技術及其成本在能源部門會怎麼變化。因此，NZE 情境只是到 2050 年實現淨零排放的一種可能途徑。本節重點在於如果行為改變、生質能及化石燃料的 CCUS 與 NZE 情境假設不同，將產生什麼影響。



資料來源：IEA(2021), NET ZERO BY 2050 A ROADMAP FOR THE GLOBAL ENERGY SECTOR.

圖 25、不確定因素下造成 2050 年電力需求與 2021 至 2050 年投資需求之變化

行為面改變對於減少運輸、建築和工業中的能源需求非常重要。如果無法達成 NZE 情境中所設定的行為面改變，則到 2050 年排放將增加 2.6 Gt。若要抵銷這些多出來的排放，則必須透過使用更多的低碳電力和氫能，所需額外的支出將達到 4 兆美元。到 2020 年到 2050 年，NZE 情境的生質能使用量將增長 60%，造成土地使用量將增長約 25%。但 NZE 情境下 2050 年的生質能使用量遠低於目前估計的最大潛力，但這估計數據存在高度不確定性。如果生質能所使用的土地面積維持在目前水準，到 2050 年生質能的使用約減少 10%，將需要額外多花 4.5 兆美元才可實現淨零排放。如果未能達成 NZE 情境下化石燃料 CCUS 的設定量，則需要在風力、太陽能 and 電解槽產能方面追加約 15 兆美元的投資，才能實現相同的減量。還可能會嚴重延遲 BECCS 和 DACCS 的進度，如果無法大規模部署 BECCS 和 DACCS，那麼要在 2050 年之前實現淨零排放將非常困難。