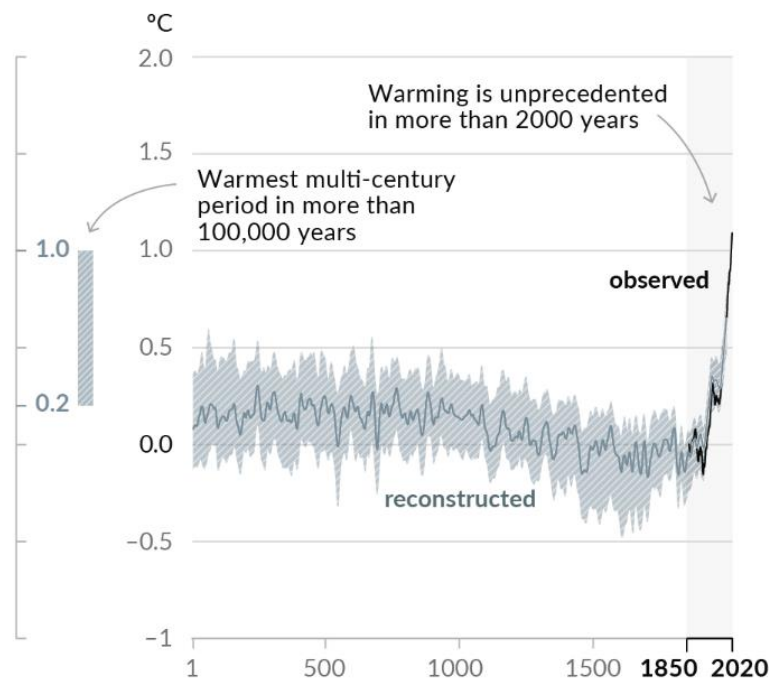


附錄

附錄 1A	全球需要控制增溫幅度在 1.5°C 以內
附錄 1B	全球推動 Net Zero 之走勢
附錄 1C	臺灣溫室氣體排放相關指標數據
附錄 2A	國際能源趨勢
附錄 2B	我國能源部門減碳的挑戰
附錄 2C	太陽光電模組裝設面積分析
附錄 2D	太陽光電轉換效率
附錄 2E	臺灣地熱發電開發現況
附錄 2F	進口綠氫發電潛力估算
附錄 2G	有關燃氣與燃氫發電效率
附錄 2H	天然氣無氧裂解產氫發電潛力估算
附錄 2I	海水水力發電案例
附錄 2J	各種儲能技術適合之應用場域
附錄 2K	儲能系統潛在需求
附錄 3A	藍碳碳匯潛在面積
附錄 3B	藍碳碳匯之單位面積固碳量研究數據
附錄 3C	其他負碳排創新技術
附錄 4A	鋼鐵業製程與碳排比例
附錄 4B	我國水泥業現有減碳投入項目
附錄 4C	石化產業鏈
附錄 5A	農業部門全球減碳趨勢
附錄 5B	廢棄物部門全球減碳趨勢

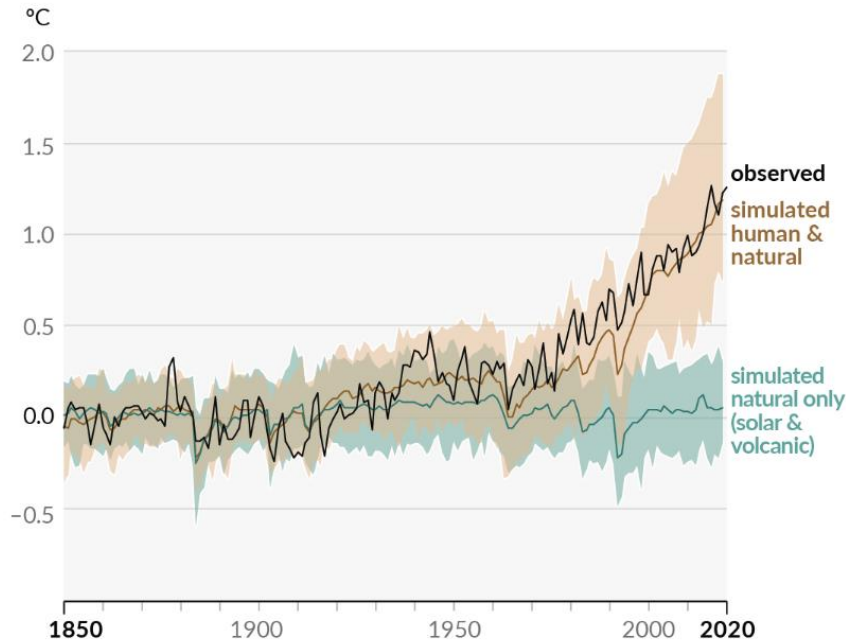
附錄 1A 全球需要控制增溫幅度在 1.5°C 以內

根據 IPCC 最新於 2021 年出版的第六次評估報告——第一工作小組(AR6 WG I)，人類影響已明確造成地球上大氣、海洋、陸地的暖化，而暖化的速度更是過去 2000 年以來未見的，地球系統（包含大氣層、海洋、冰凍圈、生物圈）也因而發生廣泛且迅速的變化，主因即是人類自工業革命開始持續排放的溫室氣體，造成大氣溫室氣體濃度持續上升，加劇溫室效應，使全球平均溫度上升(圖 1A.1) (IPCC，2021)⁸⁷³。



(a) 全球地表溫度變化（十年平均） 灰色為重建資料(reconstructed)(1 年至 2000 年)，黑色為觀測資料(1850 年至 2020 年)

⁸⁷³ IPCC (2021) Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.

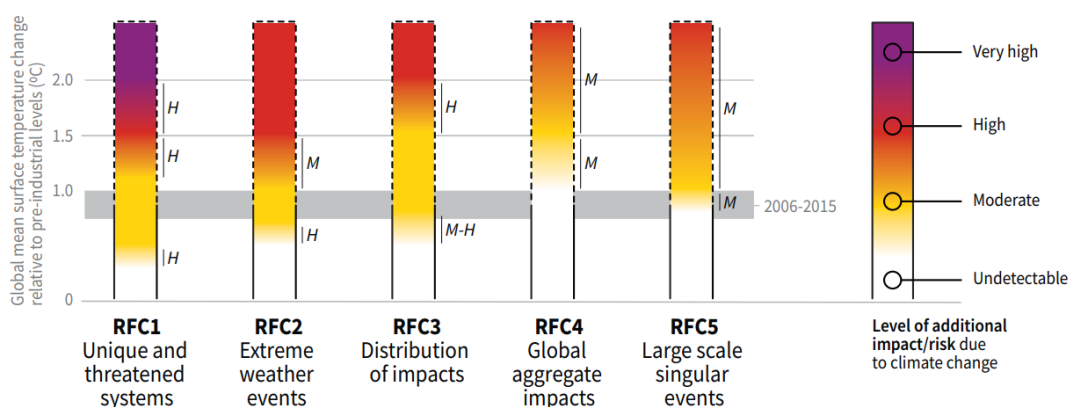


(b) 全球地表溫度變化（年度平均）(1850 年至 2020 年)黑色為觀測資料，棕色為採用人為及自然因子(human & natural factors)的模擬資料，綠色為僅採用自然因子(only natural factors)的模擬資料

圖 1A.1 全球地表溫度變化（1850 年迄今）

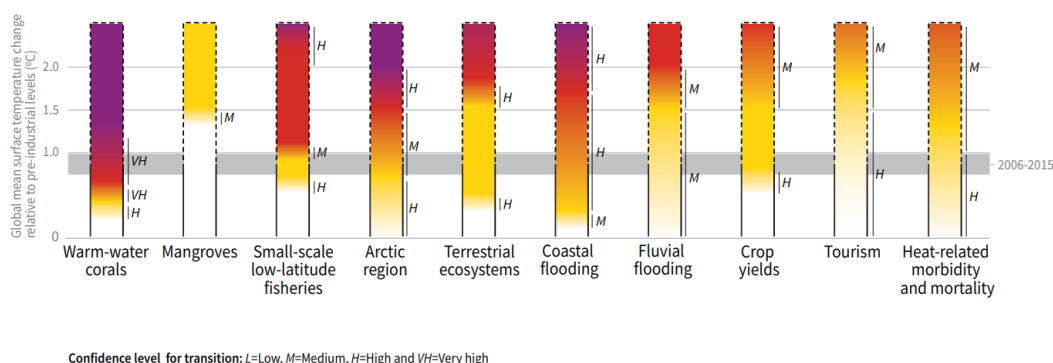
隨著全球平均溫度逐漸上升，不僅近十年是最溫暖的十年，溫度更是屢破歷史紀錄，隨之帶來許多衝擊，包括：極地融冰、海平面上升、極端事件（如極端降雨淹水、乾旱、熱浪、野火等）等，這些衝擊更反過來影響我們的經濟與社會系統的運作，例如：災害衝擊、農業生產、健康等等。因此，為避免許多難以回復、災難性的氣候衝擊（例如：許多獨特且受威脅的系統，珊瑚系統、北極地區等）（圖 1A.2）。科學家 2018 年透過 IPCC 的特別報告，示警人類需控制全球升溫在 1.5°C 以內（相較於工業革命前）才能明確的減緩這些衝擊，而欲達到此目標，全世界各國應在約 2050 年期間達到淨零排放(Net Zero)的目標，意即在 2050 年時，全球年二氧化碳(CO₂)排放量將至少等於或小於二氧化碳吸收量；在 2050 年之後，更應該進一步朝向淨負排放的目標(Net Negative)，意即全球年二氧化碳排放量要小於二氧化碳吸收量（圖 1A.3）。

Impacts and risks associated with the Reasons for Concern (RFCs)



(a) 與五大關注理由(the Reasons for Concern, RFCs)相關之衝擊與風險

Impacts and risks for selected natural, managed and human systems

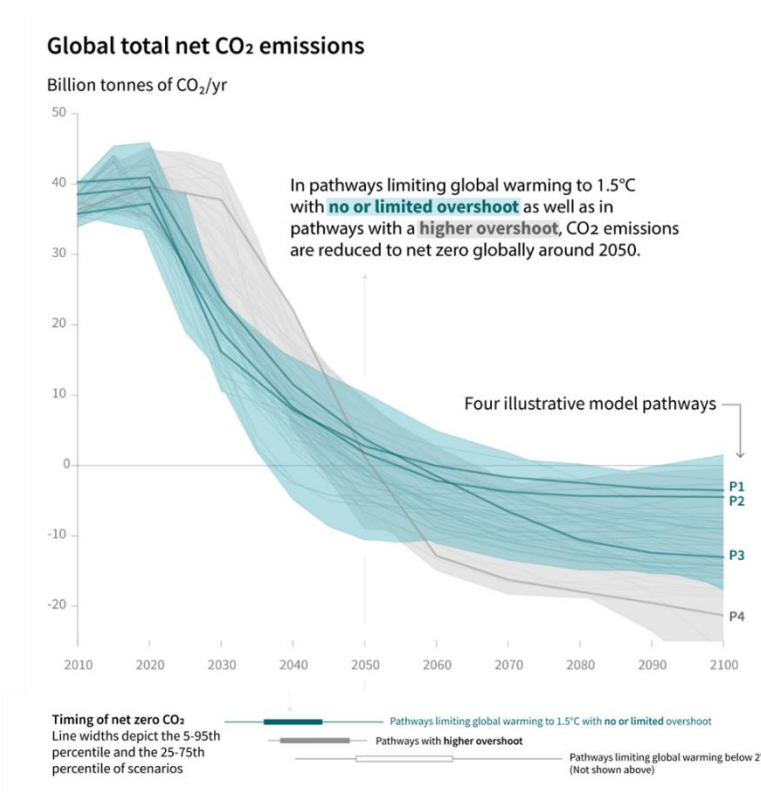


(b) 與自然、管理型及人類系統相關之衝擊與風險

上圖揭示不同暖化程度對於人類、經濟及生態系統之跨部門及跨區域衝擊及風險，其中紫色表示非常高(very high)風險，具嚴重的衝擊/風險且存在著顯著的不可逆性或持續存在氣候相關危害，加上因危害的性質或衝擊/風險而使調適能力有限；紅色為高度(high)風險，代表嚴重且廣泛的衝擊/風險；黃色為中度(moderate)風險，代表衝擊/風險為可偵測的，且至少在中度信心程度下可歸因於氣候變遷；白色為無法檢測的(undetectable)，代表沒有衝擊是可偵測且可歸因於氣候變遷。

圖 1A.2 暖化對各系統之衝擊與風險⁸⁷⁴

⁸⁷⁴ IPCC (2018) Summary for Policymakers. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. In Press.

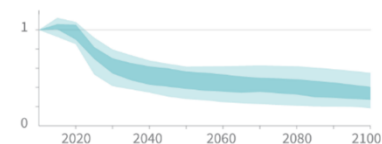


- (a) 升溫限於 1.5°C 且無過衝(no overshoot)或有限過衝(limited overshoot, <0.1°C) (藍色) 及較高過衝(higher overshoot) (灰色) 的路徑下之全球人為二氧化碳淨排放量，陰影部分顯示該份 IPCC 報告所分析路徑的全部範圍

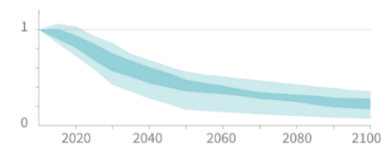
Non-CO₂ emissions relative to 2010

Emissions of non-CO₂ forcers are also reduced or limited in pathways limiting global warming to 1.5°C with **no or limited overshoot**, but they do not reach zero globally.

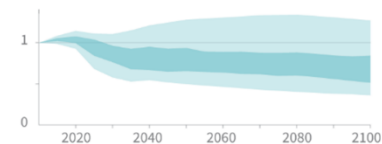
Methane emissions



Black carbon emissions



Nitrous oxide emissions



- (b) 甲烷、黑碳、氧化亞氮等非二氧化碳相對於 2010 年之排放路徑

圖 1A.3 全球溫室氣體排放模擬⁸⁷⁵

⁸⁷⁵ 同前揭註 874。

在此目標下，IPCC 更表示在 2030 年以前溫室氣體排放量需要巨幅降低，全球二氧化碳淨排放量需降至 2010 年排放量之 45% (IPCC, 2018)⁸⁷⁶。這是科學家首次透過氣候模式模擬以及累積碳排放之碳預算(Carbon Budget)的概念，將溫度與累積溫室氣體排放量做連結，考量過去排放量，若要控制升溫在 1.5°C 以內，得到未來還可以排放多少量，藉此明確地量化減碳的責任與目標年，此資訊也使各界了解 2050 淨零排放的重要性，也紛紛強化推動減碳力道。

⁸⁷⁶ 同前揭註 874。

附錄 1B 全球推動 Net Zero 之走勢

● 聯合國推動 Net Zero 之力量

氣候變遷是全球共同面臨的困境，其龐大而複雜之程度遠超於人類已知歷史中所處理過的難題，並非單一國家可以對抗或解決，因此聯合國責無旁貸地開始帶頭對抗氣候變遷的挑戰。自 1992 年通過「聯合國氣候變化綱要公約(UNFCCC)」開始，便致力於連結全世界各國政府，目前有近 200 個締約國，每年均會召開締約方大會，透過多年的辯論與協商，也有幾次重要里程碑與相關氣候協定的簽署，儘管早期明訂了減碳目標、時間表及各項合作減碳機制，卻因為沒有具體的法律約束力，使得三十多年以來減碳成效不佳(Box 1B.1)。雖然近兩年許多國家皆已承諾會朝向 2050 年 Net Zero 的目標邁進，但在 2021 年聯合國氣候變化綱要公約第 26 次締約方大會(COP 26)中，各國政府設定的氣候目標仍未與控制溫升 1.5°C 的 Net Zero 目標一致，2030 年排放減半之目標亦尚未有共識，但在這個全球氛圍下，許多產業與非政府組織的倡議及行動都已積極開始行動。

Box 1B.1 聯合國推動氣候變遷減緩過程重要里程碑

「聯合國氣候變化綱要公約」(UNFCCC)將締約方分為三類：附件一成員（主要是指已工業化和正在朝市場經濟過渡的國家）、附件二成員（主要是經濟合作與發展組織 OECD 成員）以及非附件一成員（主要為發展中國家）。因歷史排放量的不同，以及現況發展經濟的公平性，UNFCCC 早期對於不同類型之成員國有不同的減碳責任。幾次會議重要里程碑如下：

- 1997 年於日本京都舉行的第 3 次締約方會議(COP 3)時通過「京都議定書(Kyoto Protocol)」，針對包括二氧化碳(CO₂)在內等六種溫室氣體，定出具體減量目標；主要減碳責任落在附件一成員。
- 2015 年第 21 屆締約方會議(COP 21)所通過的「巴黎協定(Paris Agreement)」，將目標設定在 2100 年之前（也就是本世紀末），相較於前工業革命時代，控制地球氣溫的升幅在最多 2°C 內的範圍，最好至 1.5°C 內的目標；此外，將減碳義務擴及中國與印度；同時也提出各國以每五年為一週期，訂定自己的減排目標－國家自定預期貢獻(Intended Nationally Determined Contribution, INDC)，並於每 5 至 7 年檢討調整。
- 2021 年在英國格拉斯哥舉辦之 2021 年聯合國氣候變化綱要公約第 26 次締約方大會(COP26)原定要檢視各國 INDC，希望能達到 Net Zero 目標，最終，

各國政府之氣候目標與行動卻仍不足達到目標。惟過程中，許多具有共識的國家仍簽署幾項重要承諾，包括：逐步減少煤炭(Phase down unabated coal)、全球甲烷承諾減少甲烷排放、森林與土地利用宣言終止毀林、零碳車承諾、淨零金融聯盟等等。

● 各國政府推動 Net Zero 之力量（含歐盟）

根據非營利組織 Energy and Climate Intelligence Unit 統計⁸⁷⁷，截至 2022 年 3 月為止，已有 137 個國家響應承諾淨零排放，這些國家涵蓋了 88%全球排放量、90%全球 GDP，以及 85%全球人口，惟這些承諾目前推動程度不一，多數國家目標年設定在 2050 年，例如：歐盟、日本、韓國以及美國；有少部分國家目標年設定在更早的時間點，譬如瑞典設定在 2045 年，芬蘭設定在 2035 年，但也有國家設定在更晚的時間點，例如：中國設定在 2060 年，印度設定在 2070 年。至於進程，許多國家已將 Net Zero 目標立法，多數國家則尚在討論中（圖 1B.1⁸⁷⁸）。

其中，歐盟已於 2020 年 9 月通過《歐盟氣候法(European Climate Law)》，規範其會員國都必須遵守在 2050 年達成淨零排放，而在 2030 年前減少溫室氣體排放量至 1990 年排放量之 55%的中程目標。此外，歐盟自 2007 年開始便以貿易手段實施多項環保管制規範，例如：廢棄電機電子設備指令(WEEE)、耗能產品或能源相關產品指令（EuP 或 ErP）等，這些過往的貿易措施成功地引導供應鏈及廠商朝綠色永續的方向轉型。也因如此，歐盟預計於 2023 年啟動碳邊境調整機制(Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM)，2027 年開始針對高碳排產品徵收碳邊境稅，此稅之徵收對於出口產品至歐盟的廠商帶來極大的壓力。

⁸⁷⁷ Energy and Climate Intelligence Unit. Net Zero Scorecard. <https://eciu.net/netzerotracker>

⁸⁷⁸ National Public Utilities Council (2021) <https://www.visualcapitalist.com/wp-content/uploads/2021/06/Race-to-Net-Zero-Carbon-Neutral-Goals-by-Country-Full-Size.html>

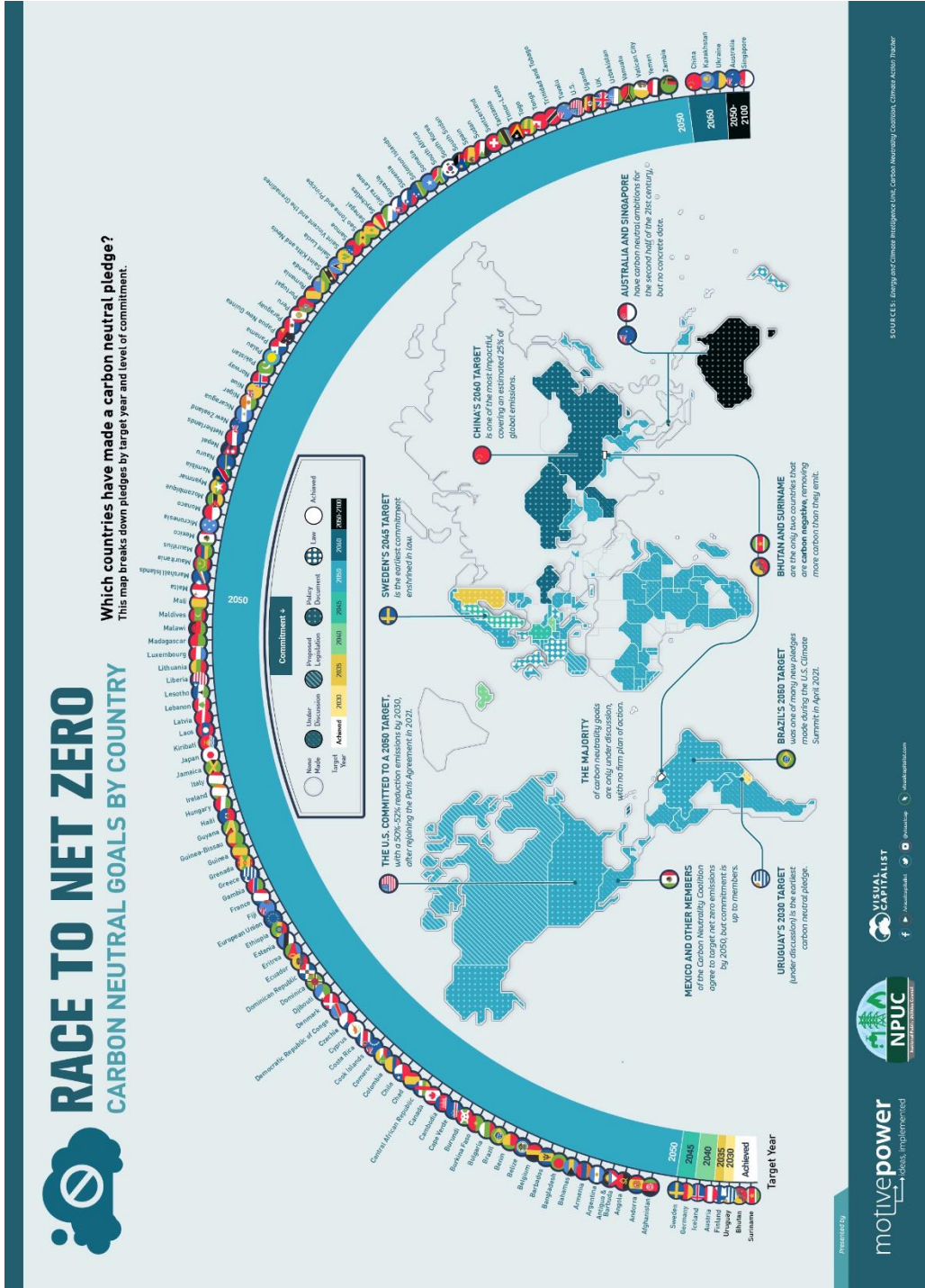


圖 1B.1 承諾 Net Zero 之各國推動進程

● 產業界推動 Net Zero 之力量

為促使全球企業加速進行淨零轉型，氣候組織(The Climate Group)與碳揭露計畫(Carbon Disclosure Project, CDP)主導一項全球再生能源倡議—RE 100，加入 RE100 的企業必須公開承諾在 2020 年至 2050 年達成 100%使用再生能源的短期中期及長期時程，並逐年提出相關減碳規劃，如透過綠能投資自發自用、購買再生能源憑證(Renewable Energy Certificates, RECs)、簽訂綠能購售合約(Power Purchase Agreement, PPA)等手段，達成綠能使用目標。截至 2022 年 3 月為止，RE100 會員已達 359 家公司⁸⁷⁹。其中包括：Apple、Google、Microsoft、Panasonic 等大型國際企業，這些企業不僅自身承諾達到 RE100，更開始要求其上游供應廠商逐步採取相關作為，這對我國廠商帶來極大壓力。也因如此，臺灣許多企業也積極參與 RE100，目前已有 16 家會員，包括：台灣積體電路製造公司、台達電子工業公司、葡萄王生技公司、歐萊德國際公司、大江生醫公司等等⁸⁸⁰。當這些品牌大廠帶頭開始使用綠電的同時，一方面可以觀察到整體產業供應鏈皆動了起來，另一方面可以發現這些廠商大量的綠電需求已開始正面刺激綠電交易市場。

此外，因氣候變遷牽涉許多實體風險與轉型風險，為了使投資人、貸款人和保險公司了解各企業的氣候風險，G20 之國際金融穩定委員會(Financial Stability Board, FSB)於 2015 年組成氣候相關財務揭露專案小組(Task Force on Climate-related Financial Disclosures, TCFD)，並已發布自願性氣候相關財務資訊揭露建議，目的在協助投資者與決策者了解組織重大風險，並可更準確評估氣候相關之風險與機會，截至 2022 年 3 月為止，全球已有 3,100 間企業支持 TCFD⁸⁸¹。當金融單位以金融工具要求企業揭露氣候相關財務資訊的同時，也促使了目前許多企業不得不正視 TCFD，開始評估自身風險，並逐步揭露之。

⁸⁷⁹ RE 100. <https://www.there100.org/>

⁸⁸⁰ 臺灣總部會員共計 16 家，依加入順序為：大江生醫公司(TCI)、科毅研究開發公司(Tridle)、歐萊德國際公司(Hair O'Right)、葡萄王生技公司(Grape King)、台灣積體電路製造公司(TSMC)、菁華工業公司(Kingwhale)、台達電子工業公司(Delta Electronics)、佐研院(Jolab)、宏碁公司(Acer)、聯華電子公司(UMC)、金元福包裝企業公司(KYF)、華碩電腦公司(ASUS)、美律實業公司(Merry)、臺灣大哥大公司(Taiwan Mobile)、友達光電公司(AUO)、元太科技工業公司(E Ink)。

⁸⁸¹ TCFD. <https://www.fsb-tcfd.org/>

● 民間推動 Net Zero 之力量

除了上述政府及產業界的努力之外，民間更有多股力量推動 Net Zero，可區分為行動倡議與響應，以及人民團體運動及訴訟。前者為某一單位提出的理念或行動之倡議，但獲得民間支持與響應，例如：RE 100（如前述）；EV 100 訴求企業在 2030 年實現百分百之電動運具；國際環保組織(350.org)訴求結束化石燃料的使用；聯合國氣候變遷組織發起之 Race to Zero 運動促使各界參與淨零競爭；國際學界及資訊媒體 TED 共同發起之 Countdown 倡議，以專家學者短講的方式，以多媒體的方式推廣氣候變遷之重要議題；比爾蓋茲(Bill Gates)於 2021 年出版新書「如何避免氣候災難」，提出兼顧經濟成長與零碳創新的可行計畫，尤其是未來 10 年應增加投入創新能源與氣候技術之研發等等。

後者主要由民間提出目標並訴諸街頭運動或訴訟行動，例如：瑞典氣候少女 Greta Thunberg 因不滿政府對氣候變遷不積極作為，發起「為氣候罷課」的行動，2019 年全球有超過 700 萬人響應，訴求各國政府提出更積極的氣候政策。至於氣候訴訟方面，2012 年荷蘭律師 Roger Cox 提出以法律訴訟作為氣候變遷之行動。2013 年荷蘭環保組織對政府提訴，指其「未採取充分措施，減少造成危險氣候變遷的溫室氣體排放」，2018 年荷蘭政府上訴失敗，必須加強抑制溫室氣體排放。根據美國哥倫比亞大學 Sabin 氣候變遷法律中心統計，全球 30 多個國家或地區已經有逾 1,700 件氣候訴訟案例，透過法律途徑，公民與民間團體促使政府立即採取氣候行動已經是全球趨勢。我國環保團體亦十分活躍，藉由行動倡議、連署、街頭運動等方式對政府施加壓力，例如：串聯各界各團體連署修法等。

由此可見，目前民間推動 Net Zero 的力量十分多元，當氣候變遷衝擊影響或是淨零轉型影響越來越多人民權益的時候，在民主社會的臺灣，可以預期未來民間集結的力量將更為強大，雖然政府是被監督或敦促的角色，但政府應可善用民間力量，透過加強跨界溝通、資訊認知以及公民參與的方式，預先建立流暢之雙向資訊管道，一方面減少推動政策時可能造成紛爭的社會成本，另一方面將社會力量轉為轉型動力。

● 學研界推動 Net Zero 力量

最後即是學研界透過提供科學證據與研究推動 Net Zero，除了 IPCC 之氣候科學評估報告之外，許多研究人員或智庫亦提出相關報告及政策建議。美國國家科學院(National Academies of Sciences)於 2021 年出版「加速美國能源系統減碳計畫(Accelerating Decarbonization of the U.S. Energy System)」⁸⁸²，針對 2050 年美國能源系統淨零排放，提出五大科技目標與四大社會經濟目標之關鍵行動，以及整體系統及個別部門之政策建議（圖 1B.2）。此報告不僅提出當前十年對於創新技術之投入、基礎建設之布建至關重要，更將淨零轉型扣合社會與經濟面向，強調政府須正視轉型的公平性，以及轉型的經濟商機。

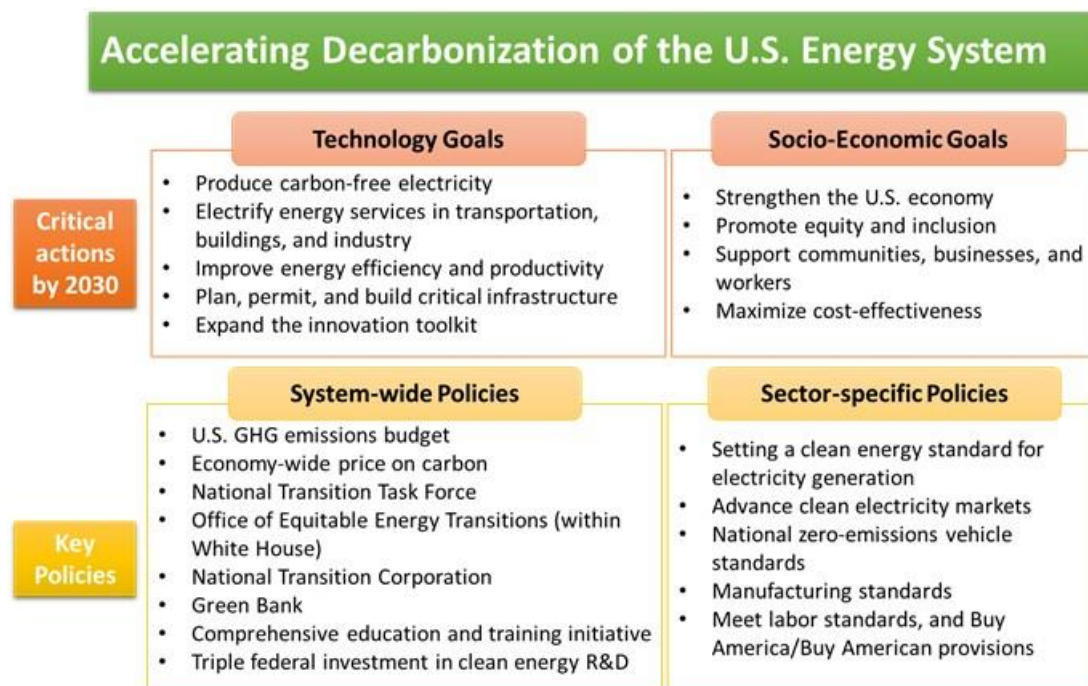


圖 1B.2 美國國家科學院「加速美國能源系統減碳計畫」報告重點

同樣在 2021 年，諾貝爾基金會(Nobel Foundation)、美國國家科學院(NAS)，以及德國波茨坦氣候影響研究所(Potsdam Institute for Climate Impact Research)共

⁸⁸² National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine 2021. Accelerating Decarbonization of the U.S. Energy System. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/25932>.

同舉辦 2021 年諾貝爾獎峰會(Nobel Prize Summit)線上會議，主題為「我們的星球，我們的未來(Our Planet, Our Future)」，會議邀集歷年諾貝爾獎得主、科學家、政策制定者、產業領袖、青年領袖等，一同探討在接下來的十年，全人類該成就哪些事情，才能將世界導入較永續的路徑？會議後並發布「我們的星球，我們的未來——一份緊急行動的呼籲」聲明，大力疾呼目前人類需面對、也應立即採取行動之其中一項重要挑戰，即為氣候變遷與淨零轉型。

由這些行動可以看出全球研究人員對於 Net Zero 議題已逐步走出學術的象牙塔，希望提供專業知識給政策制定者與社會大眾，協助建立大眾對於 Net Zero 議題之重要性，凝聚社會共識，加速淨零轉型之行動。

附錄 1C 臺灣溫室氣體排放相關指標數據 FACT SHEET

排碳面向 ⁸⁸³					
項目	分類/細項	統計年	值	單位	備註
總溫室氣體排放量 (行政院環境保護署國家溫室氣體排放清冊) (不包括 LULUCF)	總計	2019	287	百萬公噸二氧化碳當量 Mton CO ₂ eq	各部門占比： ● 能源 90.94% ● 工業 6.9% ● 農業 1.04% ● 廢棄物 1.04%
	能源部門		261		
	工業製程及產品使用部門		20		
	農業部門		3		
	廢棄物部門		3		
其他重要指標	電力排放係數	2019	0.509	公斤 CO ₂ eq/每度電 kg CO ₂ eq/kWh	
	碳排放密集度	2019	0.01352	公斤 CO ₂ /元 kg CO ₂ /NTD	以新臺幣計、燃料燃燒二氧化碳
	人均碳排放量	2019	10.96	公噸 CO ₂ /人	燃料燃燒二氧化碳

社會經濟土地面向 ^{884, 885}					
項目	分類/細項	統計年	值	單位	備註
基本資料	土地總面積	2020	3,619,707	公頃	包括山坡、平原、高山
	平原面積	2020	934,411	公頃	包含平原、盆地、沖積扇、部分台地
	人口	2020	23,582,179	人	
	GDP	2020	19,794,055	新臺幣百萬元	

⁸⁸³ 行政院環境保護署(2021) 我國國家溫室氣體排放清冊報告。
https://unfccc.saveoursky.org.tw/nir/tw_nir_2021.php 經濟部能源局(2022)《能源統計月報》。
<https://www.esist.org.tw/publication/monthly>

⁸⁸⁴ 行政院主計總處(2021) 中華民國統計資訊網。
<https://statdb.dgbas.gov.tw/pxweb/Dialog/Saveshow.asp>

⁸⁸⁵ 內政部戶政司(2021) 統計資料查詢。 <https://www.ris.gov.tw/app/portal/346>

電力面向⁸⁸⁶

項目	分類/細項	統計年	值	單位	值	單位	備註
發電量	總計	2019	274,189	百萬度 GWh	2,742	億度 100 GWh	各類能源占比： ● 火力 81.48% ● 核能 11.79% ● 再生能源 5.56% ● 抽蓄水力 1.17%
	燃煤		126,407		1,264		
	燃油		5,850		58		
	燃氣		91,145		911		
	核能		32,323		323		
	抽蓄水力		3,208		32		
	慣常水力		5,545		55		
	地熱		0.76		0.008		
	太陽光電		4,016		40		
	風力		1,892		19		
	生質能		166		2		
	廢棄物		3,635		36		
裝置容量	總計	2019	56,136	千瓩 MW	56	百萬瓩 GW	各類能源占比： ● 火力 74.58% ● 核能 6.9% ● 再生能源 13.89% ● 抽蓄水力 4.64%
	燃煤		21,008		21		
	燃油		3,072		3		
	燃氣		17,786		18		
	核能		3,872		4		
	抽蓄水力		2,602		3		
	慣常水力		2,093		2		
	地熱		0.3		0.0003		
	太陽光電		4,150		4		
	風力		845		0.8		
	生質能		77		0.08		
	廢棄物		632		0.6		
電力消費	總計	2019	265,720	百萬度 GWh	2,657	億度 100 GWh	各部門占比： ● 能源 7.4% ● 工業 55.6% ● 運輸 0.6% ● 農業 1.1% ● 服務 17.6% ● 住宅 17.8%
	能源部門		19,575		196		
	工業		147,675		1,477		
	運輸		1,580		16		
	農業		3,045		30		
	服務業		46,668		467		
	住宅		47,178		472		

⁸⁸⁶ 經濟部能源局(2021) 能源統計資料查詢系統。http://www.esist.org.tw/database

再生能源面向 ⁸⁸⁷							
項目	分類/細項	統計年	值	單位	值	單位	備註
發電量	總計	2019	15,255	百萬度 GWh	153	億度 100 GWh	各再生能源占比：
	慣常水力		5,545		55		● 慣常水力 36.35%
	地熱		0.76		0.008		● 地熱 0.005%
	太陽光電		4,016		40		● 太陽光電 26.33%
	風力		1,892		19		● 風力 12.4%
	生質能		166		2		● 生質能 1.09%
	廢棄物能		3,635		36		● 廢棄物能 23.83%
裝置 容量	總計	2019	7,796	千瓩 MW	8	百萬瓩 GW	各再生能源占比：
	慣常水力		2,092		2		● 慣常水力 26.84%
	地熱		0.3		0.0003		● 地熱 0.004%
	太陽光電		4,150		4		● 太陽光電 53.23%
	風力		845		0.8		● 風力 10.84%
	生質能		77		0.08		● 生質能 0.98%
	廢棄物能		632		0.6		● 廢棄物能 8.11%

⁸⁸⁷ 同前揭註 886。

能源面向 ⁸⁸⁸					
項目	分類/細項	統計年	值	單位	備註
能源 總供給	總計	2019	148,401,586	公秉油 當量 KLOE	各能源類占比： ● 煤 29.85% ● 石油 46.91% ● 自產天然氣 0.1% ● 進口天然氣 14.87% ● 生質能廢棄物 1.14% ● 核能 6.31% ● 水力 0.36% ● 地熱 0.005% ● 太陽光電 0.26% ● 風力 0.12% ● 太陽熱能 0.07%
	煤及煤產品		44,303,792		
	原油及石油產品		69,622,636		
	自產天然氣		148,642		
	進口液化天然氣		22,073,410		
	生質能及廢棄物		1,696,500		
	核能		9,359,429		
	水力		529,836		
	地熱		723		
	太陽光電		383,746		
	風力		180,813		
	太陽熱能		101,058		
能源消費	總計	2019	85,009,791	公秉油 當量 KLOE	各部門占比： ● 能源 8.79% ● 工業 31.55% ● 運輸 15.77% ● 農業 0.98% ● 服務業 6.81% ● 住宅 7.73% ● 非能源消費 28.37%
	能源部門		7,469,203		
	工業		26,819,239		
	運輸		13,410,052		
	農業		833,643		
	服務業		5,790,800		
	住宅		6,570,657		
	非能源消費		24,116,197		
其他 重要指標	用電密集度	2019	13.83	度/千元	
	能源密集度	2019	4.42	公升油 當量/千元	國內能源消費/實質 GDP
	再生能源發電/ 總發電量	2019	5.56	%	
	再生能源供給/ 初級能源供給	2019	2.38	%	
	太陽能裝置容量 密度	2019	0.12	MW/km ²	

⁸⁸⁸ 經濟部能源局(2021) 能源統計月報。https://www.esist.org.tw/publication/monthly
經濟部能源局(2021) 能源統計資料查詢系統。http://www.esist.org.tw/database

單位換算表		
項目	單位符號	換算
發電/裝置 容量	瓩 kW	1 百萬瓩(GW) = 1,000,000 瓩(kW) ; 1 千瓩(MW) = 1,000 瓩(kW)
	千瓩 MW	
	百萬瓩 GW	
	度 kWh	1 百萬度(GWh) = 1,000 千度(MWh) = 1,000,000 度(kWh) 1 十億度(TWh) = 1,000 百萬度(GWh)
	千度 MWh	
	百萬度 GWh	
	億度 100 GWh	
	十億度 TWh	
能源	公斤油當量 KGOE	1 公斤油當量(KGOE) = 10,000 千卡(Kcal) ;
	公升油當量 LOE	1 公升油當量(LOE) = 9,000 千卡(Kcal) = 0.9 公斤油當量(KGOE);
	公秉油當量 KLOE	1 公秉油當量(KLOE) = 1,000 公升油當量(LOE) = 0.9 公噸油當量(TOE) ;
	公噸油當量 TOE	1 公噸油當量(TOE) = 1,000 公斤油當量(KGOE) = 10^7 千卡(Kcal)
	百萬公噸油當量 MTOE	
	公秉 kl	1 公秉(kl) = 1,000 公升(l) = 6.29 桶 (油) barrels
	公升 l	1 公升(l) = 1,000 立方公分(cm^3)
	公噸 t	1 公噸(ton) = 1,000 公斤(kg)
面積	平方公尺	1 平方公尺 = 0.3025 坪 = 0.01 公畝 = 0.000103 甲 = 0.0001 公頃 = 0.000001 平方公里
	坪	1 坪 = 0.03306 公畝 = 0.00034 甲 = 0.00033 公頃 = 0.000003 平方公里
	公畝	1 公畝 = 0.01031 甲 = 0.01 公頃 = 0.0001 平方公里
	甲	1 甲 = 0.96992 公頃 = 0.0097 平方公里
	公頃	1 公頃 = 0.01 平方公里
	平方公里	1 平方公里 = 100 公頃 = 103.102 甲 = 10,000 公畝 = 302,500 坪 = 1,000,000 平方公尺

能源統計常用熱值					
項目	兆焦耳 (TJ)	千兆卡 (Gcal)	百萬公噸油當量 (Mtoe)	百萬英熱單位 (MBtu)	百萬度 (GWh)
兆焦耳(TJ)	1	2.388×10^2	2.388×10^{-5}	9.478×10^2	2.778×10^{-1}
千兆卡(Gcal)	4.187×10^{-3}	1	1.000×10^{-7}	3.968	1.163×10^{-3}
百萬公噸油當量 (Mtoe)	4.187×10^4	1.000×10^7	1	3.968×10^7	1.163×10^4
百萬英熱單位(MBtu)	1.055×10^{-3}	2.520×10^{-1}	2.520×10^{-8}	1	2.931×10^{-4}
百萬度(GWh)	3.600	8.598×10^2	8.598×10^{-5}	3.412×10^3	1

附錄 2A 國際能源趨勢

目前全球溫室氣體排放量中，約 3/4 來自能源部門⁸⁸⁹，顯示自工業革命開始，人類以化石燃料為主、過量排放溫室氣體的能源結構是造成全球平均溫度逐漸升高的最大原因。而我國能源部門占總溫室氣體排放量之 90%，這也代表著能源部門減碳對於達到淨零排放目標不僅至關重要，更是責無旁貸。國際能源總署(IEA)針對 2050 淨零排放情境，推估未來 30 年全球的能源供給與需求，在能源供給方面，總能源供給有減少的趨勢，其中，傳統化石燃料的占比（如：石油、煤炭、天然氣）初期緩慢減少，2030 年後才顯著減少；再生能源占比將大幅增加；化石燃料搭配碳捕獲、再利用與封存技術(CCUS)占比則在 2030 年之後才逐漸成長(圖 2A.1)。在能源需求與消費方面，電力消費占比大幅增加，由 2020 年的 20.0%成長至 2050 年的 49.1%（近半數）。以煤炭為主的固態燃料及以石油為主的液態燃料未來則顯著減少；氣態燃料雖然沒有明顯減少，但在 2030 年後天然氣占比逐漸減少，氫氣占比提高。

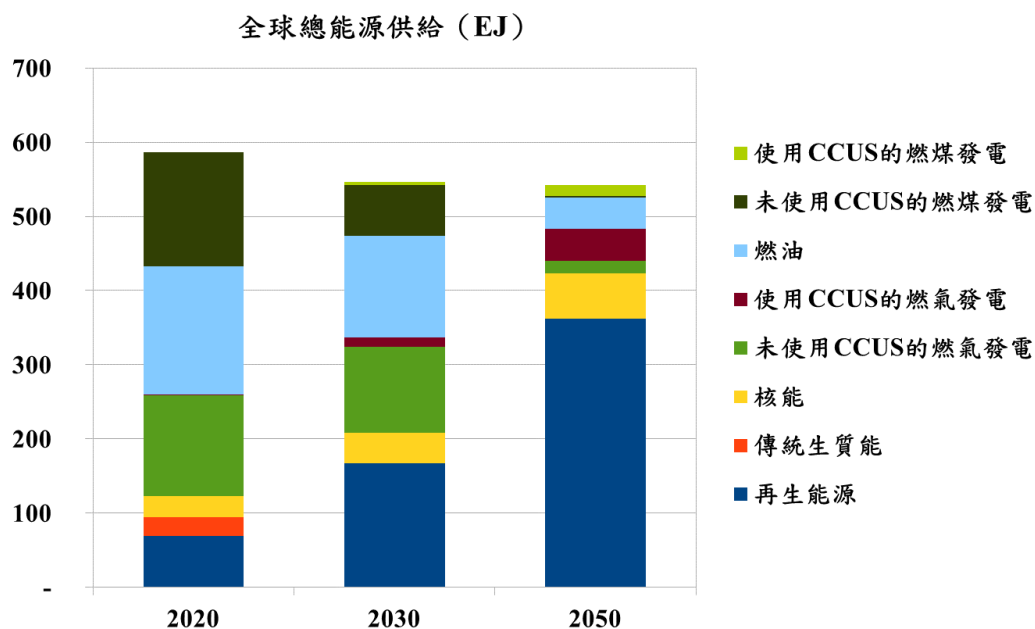


圖 2A.1 淨零排放情境下全球能源供給趨勢—燃料別

註：1 EJ（艾焦耳）= 10^{18} J，相當於 277,800GWh（百萬度）

⁸⁸⁹ IEA. (2021). Net Zero by 2050. A roadmap for the global energy sector.

這代表著未來能源消費型態將以電力替代化石燃料，電力需求也將持續成長（圖 2A.2）。由於我國工業化程度高及冬季熱能需求少，故電力消費占比將可望更高。此外，在淨零排放情境下，全球二氧化碳(CO₂)總排放量逐漸減少，尤其是電力部門，電力部門排放由 2020 年的 12.3 Gt 二氧化碳（約占 36.3%）降至 2050 年的負值（圖 2A.3），顯示「創造無碳或去碳電力」是全球能源部門減碳的首要策略。

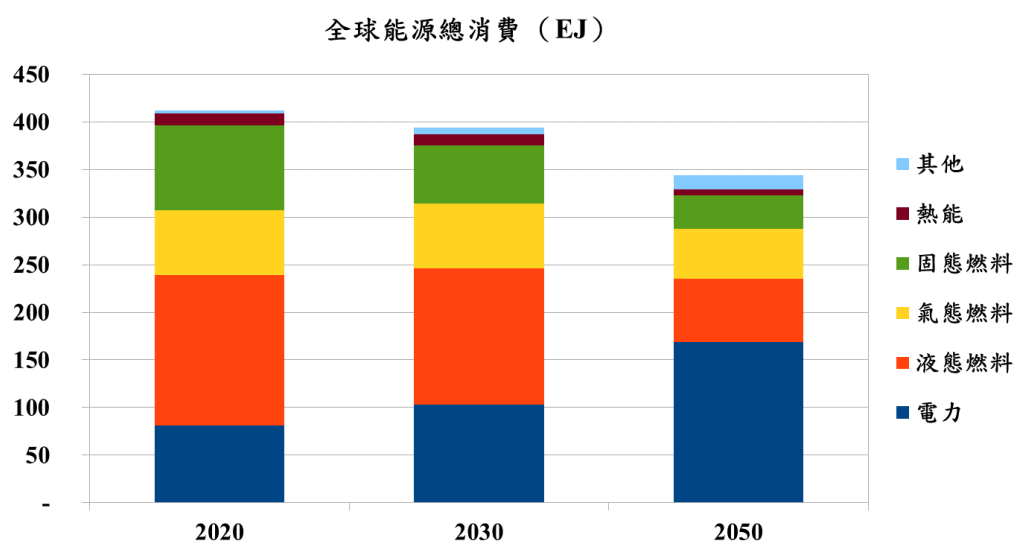


圖 2A.2 淨零排放情境下全球能源消費趨勢—燃料別

註：1 EJ（艾焦耳）=10¹⁸J，相當於 277,800 GWh（百萬度）

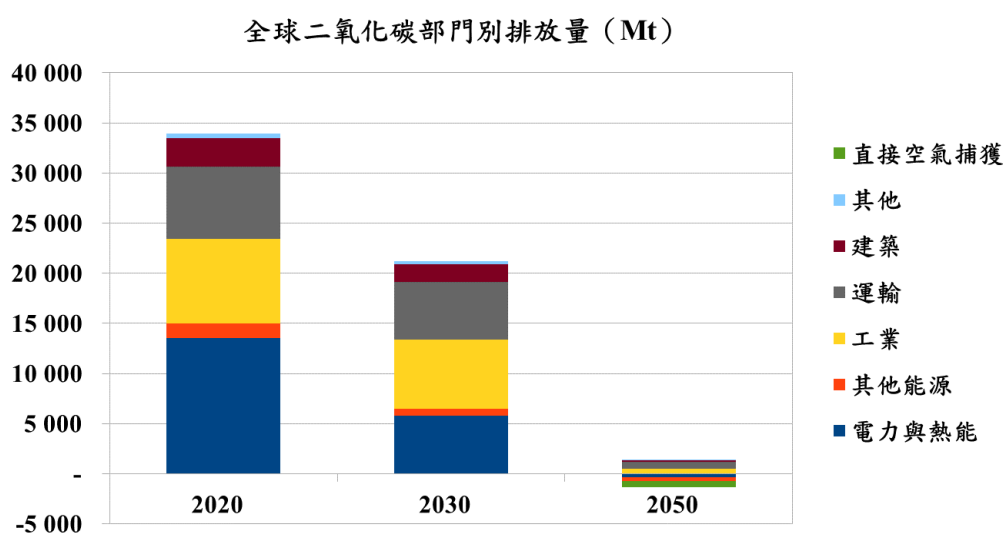


圖 2A.3 淨零排放情境下全球二氧化碳排放趨勢—部門別

註：1 Mt（百萬噸）=10⁶ ton；1 Gt=10⁹ ton；1 Mt=0.001 Gt

進一步分析電力結構，可以發現全球 2050 年發電量將較 2020 年成長 2.7 倍，達到 71,164 TWh，但全球 2050 年電力裝置容量卻較 2020 年成長 4.3 倍，達到 33,415 GW（圖 2A.4；圖 2A.5），其中差異的主要原因便是再生能源的間歇性特性。由未來發電量與裝置容量的結構，可以得知目前國際上的幾項推動趨勢與重要里程碑，分析如下：

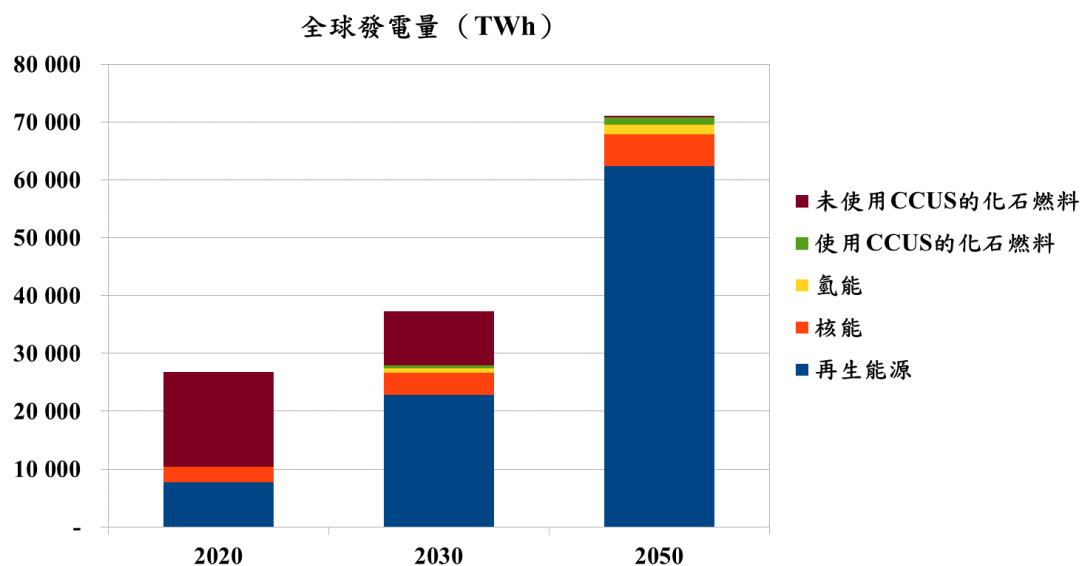


圖 2A.4 淨零排放情境下全球發電量—燃料別

註：10 億度(TWh) = 10^9 kWh

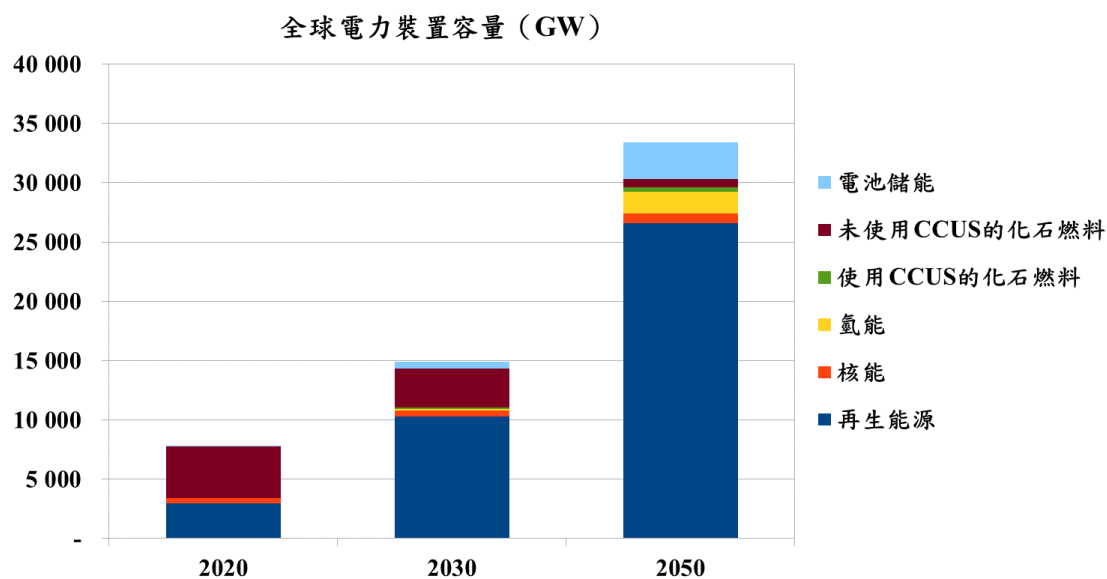


圖 2A.5 淨零排放情境下全球電力裝置容量—燃料別

● Phase out 化石燃料發電—逐步淘汰燃煤及燃油發電，燃氣發電為過渡選項

2020 年全球發電共排放 12.3 Gt 二氧化碳，其中 9.1 Gt (74%) 來自燃煤發電，2.7 Gt (22%) 來自燃氣發電，以及 0.6 Gt (4%) 來自燃油發電，顯示燃煤發電為目前主要發電能源，也是最大宗的排放源，但此情況隨著淨零排放的趨勢逐漸改變。因應此目標，歐洲和美國等先進經濟體正逐步以天然氣和再生能源取代燃煤發電，雖然中國、東南亞等地之燃煤發電仍持續成長，但成長速度亦已逐步放緩，這使得全球燃煤發電占比有下降、燃氣發電占比有上升的趨勢⁸⁹⁰。

IEA 推估在淨零排放情境下，全球燃煤發電及燃油發電占比將大幅降低，在 2030 年燃煤削減 70%，燃油削減 76%，其中，先進經濟體應可在 2030 年左右先行淘汰燃煤電廠，同時也預估在 2040 年左右，所有傳統燃煤及燃油發電將會被淘汰，許多國家均已有明確時程淘汰燃煤發電，例如：德國、日本、西班牙、加拿大、英國等^{891,892,893}。而天然氣預計將作為淨零轉型之過渡發電燃料，在 2020 年至 2030 年期間代替燃煤和燃油發電能源，也因如此，在 2030 年左右，傳統燃氣發電量將達到巔峰，而後便逐步降低，至 2040 年左右將削減 90% (圖 2A.6)。

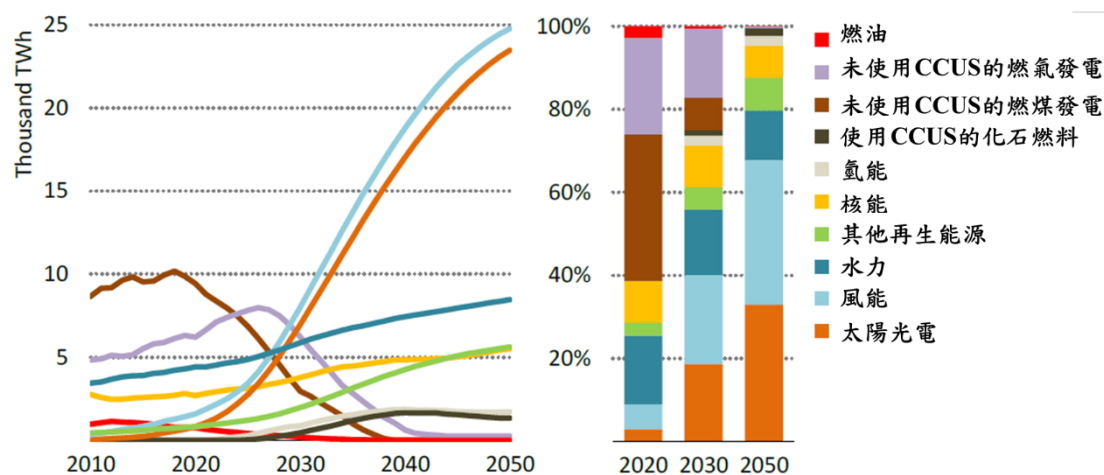


圖 2A.6 淨零排放情境下全球發電趨勢—燃料別

⁸⁹⁰ IEA (2019), Coal 2019, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/coal-2019>.

⁸⁹¹ Europe Beyond Coal (2021) Overview: National coal phase-out announcements in Europe.

⁸⁹² Government of Canada (2021) Coal phase-out: the Powering Past Coal Alliance. <https://www.canada.ca/en/services/environment/weather/climatechange/canada-international-action/coal-phase-out.html#shr-pg0>

⁸⁹³ 經濟產業省(2020) 梶山經濟産業大臣の閣議後記者会見の概要. <https://www.nippon.com/en/in-depth/d00621/>

● Pump up 再生能源發電—風電光電為未來發電主力，其他再生能源多元輔助

為了推動「創造無碳與去碳電力」的策略，除了淘汰燃煤與燃油發電機組之外，更重要的是需要加速發展再生能源。IEA 推估，在淨零排放情境下，全球再生能源發電占比在 2030 年需超過 60%，在 2050 年達到 90%。尤其是太陽光電和風力發電，因其技術已相對成熟且已具商業化規模，故能在短期內大量布建發展。2020 年雖受疫情影響，但全球光電與風電之發電量在許多國家政策支持之下，仍持續成長。其中，風電為成長最多、最快的再生能源，主要原因為渦輪機技術的進步，使得風機容量提升、發電量提升、發電成本下降^{894,895}。這代表著全球再生能源未來因技術進步、成本持續下降和政策支持將維持成長趨勢。

目前全球光電(不計聚光太陽熱能發電, Concentrated Solar Power, 簡稱 CSP)和風電之裝置容量在 2050 年預計將可達到 14,458 GW、8,265 GW，約占全球電力裝置容量之 68%；光電可提供 23,469 TWh (234,690 億度)、風電可提供 24,785 TWh (247,850 億度)的發電量，同樣約占全球發電量之 68%，此發電量幾乎等同於 2020 年全球總發電量之 90%，代表著光電與風電的發電潛能已幾乎足以支應全球電力需求，因此，快速布建此二再生能源是降低電力部門碳排量的關鍵策略(圖 2A.7；圖 2A.8)。

除此之外，國際上亦同時投入其他再生能源作為多元輔助，例如：技術已成熟、可直接開發應用、相對穩定供水的水力發電、生質能發電；以及技術還待研發、不確定較高的地熱、海洋能等能源選項。IEA 推估，在淨零排放情境下，水力發電緩慢成長，到 2050 年預計可成長 1.9 倍，達到 8,461 TWh 的發電量，約占全球發電量之 11.9%；生質能發電成長較快(在專用工廠生產並以生物甲烷形式透過天然氣管線輸送)，預計到 2050 年可成長 4.6 倍，達到 3,279 TWh 的發電量，約占全球發電量之 4.6%，若能維持穩定的水資源與料源，水力發電及生質能發電(合併占 16.5%全球發電量)將是可提供穩定電力、不可或缺的能源選項。

另外，地熱能與海洋能雖然目前發電量占比相對少，但隨著技術進步，IEA 推

⁸⁹⁴ IEA (2020b), Renewables 2020, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/renewables-2020>

⁸⁹⁵ 大幅提升風場發電量，10MW 以上巨型離岸風機將成趨勢。
<https://technews.tw/2019/01/18/huge-new-wind-turbines-are-the-future/>

估在 2030 年之後成長較為顯著，地熱能到 2050 年預計可以達到 821 TWh(8,210 億度)的發電量；海洋能到 2050 年預計可以達到 132 TWh (1,320 億度)的發電量，兩者合併雖然僅占 1.3%全球發電量，但此二者資源豐富，2050 年後可能可扮演更重要的角色。特別是臺灣更是地熱能及海洋能蘊藏量豐富，當可在國內自產能源中扮演重要角色。

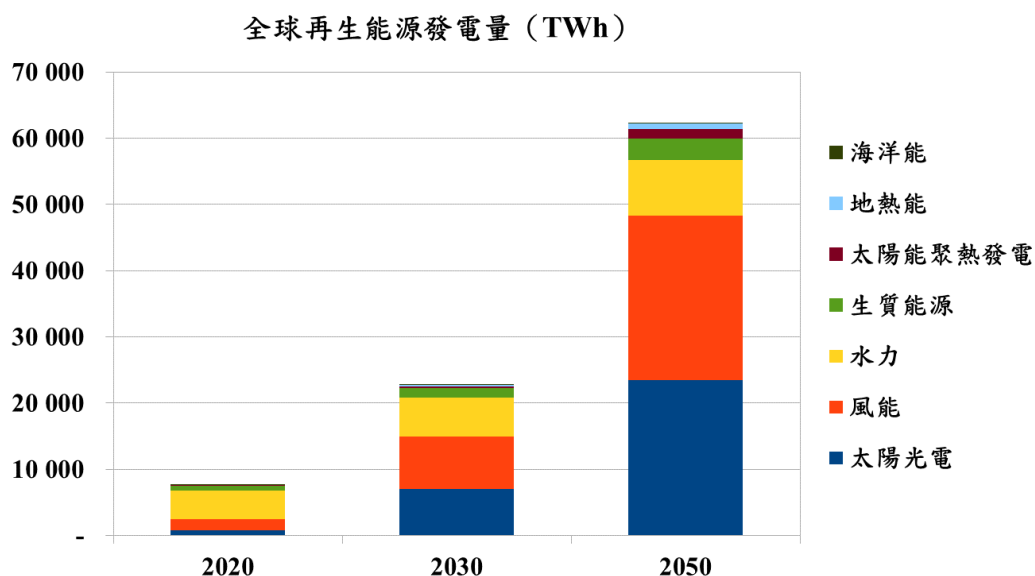


圖 2A.7 淨零排放情境下全球再生能源發電量—能源別

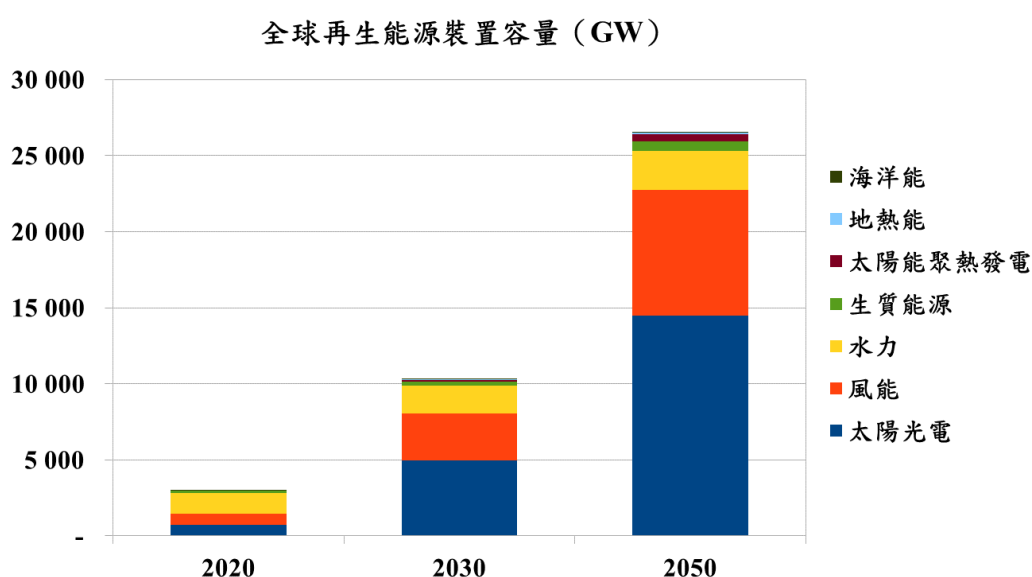


圖 2A.8 淨零排放情境下全球再生能源電力裝置容量—能源別

● Pioneer 開發低碳氫能，進可發電發熱，退可儲能之多元應用

氫能燃燒除了提供熱能之外，僅生成水，故通常被視為是一項潔淨能源選項，但目前製氫技術多使用電解水產氫，過程中將使用大量電力，因此若要產製「低碳氫能」，首要任務即是擁有大量再生能源電力（綠電），方能產製「綠氫」；其他製氫技術在過程中仍會排碳，只是較化石燃料燃燒相對少碳排，故稱為低碳氫，這些技術包含：運用天然氣蒸汽重組(Steam Reforming)的灰氫、運用傳統化石燃料搭配碳捕獲及封存技術(CCUS)的藍氫、運用氣化技術的褐氫、以及創新無氧裂解技術(Pyrolysis)的青綠氫。值得注意的是，不論是大量再生能源還是其他低碳製氫技術，目前皆預估將在 2030 年後才可能大規模商業運轉，即便如此，氫能仍被視為 2050 年達到淨零排放關鍵選項。

IEA 預估 2050 年氫基燃料(Hydrogen-based Fuel)⁸⁹⁶發電量可達 1,713 TWh (17,130 億度)，約占全球發電量 2.4%，為積極開發氫能，許多國家對氫能技術的投資持續增加中，在氫能政策上也已表示將優先發展低碳氫，如歐盟、德國、美國及中國⁸⁹⁷。IEA 也設定了明確里程碑，預計在 2030 年設置 850 GW 電解槽，產製 150 Mt 低碳氫氣；2050 年設置 3,000 GW 電解槽，產製 435 Mt 低碳氫氣。

氫目前主要用於工業上的煉油、製氨與製甲醇等，但在能源轉型的趨勢下，氫能將扮演替代化石燃料的關鍵角色，也因如此，低碳氫能在全球的需求將可望增長，這也為許多國家提供了出口再生能源的新機會，例如擁有豐富再生能源的智利和澳洲皆已宣告未來將成為綠氫出口國，而許多國家也已開始研擬未來進口綠氫的策略。

除了發電的用途之外，氫能亦有其他的能源應用方式，例如：氫能可做為儲能選項，在不同運輸載具（尤其是長程運輸載具，如：長程貨車、列車、船舶）使用氫燃料電池；氫能亦可在工業部門（尤其是重工業）中供高溫熱或作為還原劑，如鋼鐵業之高爐可使用氫氣替代。此多元應用的特性更使得氫能的開發更具效益，惟須克服氫能燃燒（如鍋爐）、運輸、儲存等技術缺口。

⁸⁹⁶ 氫基燃料(Hydrogen-based Fuels)包含氫能、氨、合成燃料。

⁸⁹⁷ IEA (2020c), Hydrogen, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/hydrogen>

● 其他重點趨勢

(1) 僅存的化石燃料發電廠必需搭配碳捕獲、再利用與封存裝置(CCUS)

雖然未來再生能源為主要的發電來源，但仍保留部分化石燃料發電裝置，惟這些裝置必須搭配碳捕獲、再利用與封存裝置(Carbon Capture, Utilization, and Storage, CCUS)，以減少碳排放，產製去碳電力。CCUS 技術應用在電力部分仍在商業化的早期階段，目前全球有兩個商業電廠配備 CCUS⁸⁹⁸，每年可捕獲 2.4 Mt 的二氧化碳，其餘 24 個 CCUS 電力計畫則仍在開發階段⁸⁹⁹。此外，配備 CCUS 的發電廠亦可作為工業區核心，捕獲的大量二氧化碳亦可作為其他工業共享之原料，如英國 Drax 生質能源發電廠支持 Humber 區域的淨零碳工業區發展⁹⁰⁰【有關 CCUS 技術可詳見第三章負碳科技與第六章突破性新科技】。

(2) 核能選項呈現各國分歧的趨勢，需仰賴創新技術以解決現況問題

核能雖非再生能源，但被視為低碳發電能源。近年來核能產業發展緩慢，許多國家因安全考量、老舊核電廠維護需求而停止運轉，如日本、歐美；部分開發中國家，如中國、印度仍有新增核電廠的計畫。IEA 預估在淨零排放情境下，核能發電微幅成長，在 2050 年約有 5,497 TWh（54,970 億度）的發電量，約占全球發電量之 7.7%。此數值有很大的不確定性，原因便是目前各國的核能政策呈現分歧的狀態。例如法國和日本的淨零排放策略中，核能仍會扮演重要角色，用以取代退役的化石燃料發電廠；比利時、瑞士則傾向逐步停用核能⁹⁰¹。此外，最近受到矚目的第四代核能技術，目的即在改善現有核能的問題，這些創新核能技術有望在 2030 年之後開始商轉【有關創新核技術可詳見第六章突破性新科技】。

⁸⁹⁸ 加拿大薩斯喀徹溫省(Saskatchewan)的 Boundary Dam CCUS 的與美國德州的 Petra Nova projectC。

⁸⁹⁹ CCUS 技術可應用於多種產業，如水泥、鋼鐵、天然氣等。本章則以說明 CCUS 在電力部門的應用為主。根據 Global CCS Institute's CO₂RE 統計，直至目前 2021 年，全球商業規模的 CCUS 設施（含建置中及已運轉，不計算示範設施）共有 148 個，其中用於電力部門的 CCUS 計畫有 26 個，2 個在運轉中（即註 898）。最早使用 CCUS 的商業電廠為加拿大 Boundary Dam CCUS，2014 年開始運轉。

⁹⁰⁰ IEA (2020d), CCUS in Power, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/ccus-in-power>

⁹⁰¹ IEA (2020e), Nuclear Power, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/nuclear-power>

(3) 其他替代燃料—無法電氣化的排放源，可使用低碳生質燃料替代

國際間除了上述電力相關之重要趨勢之外，對於部分無法使用電力的排放源，例如：部分重工業對高溫熱能及原料的需求、長程運輸等，可藉由使用低碳燃料（包括液態生質燃料、生物甲烷、氫基燃料）來替代現有化石燃料（圖 2A.9）。目前，低碳燃料約提供 1% 全球能源需求（多數為供電與供暖），但 IEA 預估在 2050 年可提升至 20%。其中，液態生質燃料加上氫基燃料到 2050 年時共可提供 42% 全球運輸所需能源⁹⁰²；而目前幾乎尚未供應之低碳燃氣如生物甲烷、合成甲烷和氫氣，則是預估在 2050 年可透過供氣網(gas grid)滿足 35% 燃氣需求。

現階段的液態生質燃料大部分由傳統作物如甘蔗、玉米、大豆所生產，若未來要擴大使用生質燃料，需要更先進的液態生質燃料生產技術，透過將廢棄物或木質作物等轉化為燃料以減少對糧食生產的衝擊。雖然上述轉化技術仍在開發階段，日本、美國、英國已有相關推動計畫，IEA 因此預估可以在未來 10 年內市場化。在航空部分需注意的是，在淨零排放的目標下，永續航空燃油(Sustainable Aviation Fuel)的使用將會逐漸增加，到 2050 年約有 45% 使用航空替代燃油(Biojet Kerosene)，30% 使用合成氫基燃油(Synthetic Hydrogen-based Fuels)。

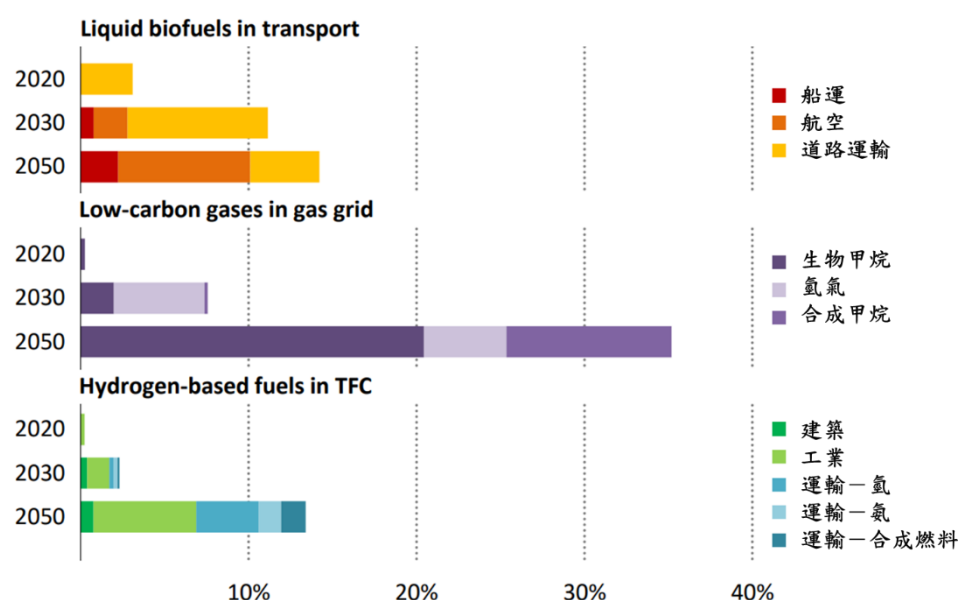


圖 2A.9 2020 年至 2050 年全球低碳燃料在各部門的供應比例

⁹⁰² 液態生質燃料 14%，氫與氫衍生的燃料 28%，共 42%。

附錄 2B 我國能源部門減碳的挑戰

根據經濟部能源局資料⁹⁰³，2019 年我國能源總供給達 1 億 4,840 萬公秉油當量(Kiloliter of Oil Equivalent, KLOE)，總消費統計量為 8,491 萬公秉油當量。另一方面，2019 年我國能源總消費中，工業部門能源消費占比居冠，高達 31.5%，其次為非能源消費（如焦炭、柏油、石油腦、液化石油氣等）28.4%、運輸部門 15.8%、能源部門自用 8.8%、住宅部門 7.7%、服務業部門 6.8%，以及農業部門 1.0%。值得注意的是，能源需求主要兩項消費型態為石油（石油產品及運輸燃油）及電力（主為燃煤及燃氣發電），顯示我國的能源需求與化石燃料高度連結，這也是碳排居高不下主因。

我國能源供給多依賴進口，2019 年高達 97.9%，其中極大比例仍為化石燃料，這樣的高依賴性除了不利我國能源自主之外，若要大幅度替換這些進口化石燃料，更需要先解決兩項問題：可以滿足這些能源需求的替代能源為何？這些替代能源是否能維持我國的能源安全與供應穩定？

首先，由能源需求與消費面來看，受國際上電氣化的趨勢（如：運具電動化）之影響，運輸燃油需求未來將大幅減少，將以電力方式替代。再者，下游許多部門皆是以電力的型態消費，但其碳排放量高度受到上游高碳排電力的影響。以工業部門為例，其能源消費占比為各消費部門之冠，主要多為用電需求，再加上我國為出口導向的經濟體，使得工業用電需求占比極高。隨著國際有關百分之百再生能源(RE 100)⁹⁰⁴、淨零碳供應鏈、碳邊境稅等倡議逐漸實施，我國工業部門與產業將可能受極大的影響⁹⁰⁵。解決之道應提升無碳或去碳電力供給的比重，方能有效降低因能源消費所產生的高碳排問題，並避免產業受到過大的負面衝擊影響。

進一步分析我國電力供給結構，以發電裝置容量來看，根據經濟部能源局資料⁹⁰⁶，2019 年我國發電裝置容量達 55,914.9 千瓩(MW)，以燃煤發電為主，占比

⁹⁰³ 經濟部能源局(2020)。108 年能源統計手冊

⁹⁰⁴ 實現全球 100%綠電革命。<https://www.re100.org.tw/>

⁹⁰⁵ 歐盟碳關稅，衝擊全球產業。<https://ec.ltn.com.tw/article/breakingnews/3530772>

⁹⁰⁶ 經濟部能源局(2020)。108 年能源統計年報

達 37.6%，其次為燃氣發電 31.4%、再生能源發電 13.9%、核能發電 6.9%、燃油發電 5.5%與抽蓄水力發電 4.7%。其中，再生能源裝置容量組成中，以太陽光電 53.3%為大宗，其次為慣常水力發電 26.8%、風力發電 10.8%、廢棄物能發電 8.1%，以及生質能發電 1%（圖 2B.1）。若以發電量來看，2019 年我國發電量達 2,740 億度，燃煤發電為主要來源，占比高達 46.1%，其次為燃氣發電 33.3%、核能發電 11.8%、再生能源 5.6%、燃油發電 2.1%，以及抽蓄水力發電 1.2%。再生能源發電中，慣常水力占 36.4%為最多，其次為太陽光電 26.3%、廢棄物能發電 23.8%、風力發電 12.4%，與生質能發電 1.1%（圖 2B.1）。

由此數據可知，我國發電高度仰賴化石燃料，這也使得我國電力排碳係數十分高，亦即單位發電量之溫室氣體排放量。根據經濟部能源局每年估算及公布之電力排碳係數⁹⁰⁷，我國電力排碳係數曾於 2017 年達高峰 0.554 kgCO₂eq/度，爾後逐年下滑，2018、2019、2020 年分別為 0.533、0.509、0.502 kgCO₂eq/度。為降低我國電力部門排放量，我國已制定電力排碳係數階段管制目標，希望透過提高再生能源發電占比或其他去碳技術，逐步降低我國電力排放係數。這也是我國能源轉型規劃方向「減煤、增氣、展綠、非核」的其中一項重要政策方向——展綠：積極推廣再生能源發電。目前我國已訂定 2025 年再生能源發電占比目標為 20%⁹⁰⁸，其中，以太陽光電及風力發電設置為主力，預計太陽光電裝置容量將達 20 GW，離岸風力裝置容量則達 5.7 GW 以上。惟此時程此目標距離 2050 淨零排放的目標仍有一定的落差，若跟隨國際趨勢，更積極地推進淨零排放目標，在落實方面仍存有巨大的挑戰。

⁹⁰⁷ 經濟部能源局，108 年度電力排碳係數，

https://www.moeaboe.gov.tw/ECW/populace/content/wHandMenuFile.ashx?file_id=7249

⁹⁰⁸ 經濟部，推動能源轉型「展綠、增氣、減煤、非核」，

https://www.moea.gov.tw/MNS/populace/Policy/Policy.aspx?menu_id=32800&policy_id=9

發電裝置容量 (2019年)

發電量 (2019年)

總裝置容量：55,914.9千瓩 (MW)

年總發電量為274,058.7百萬度 (GWh)

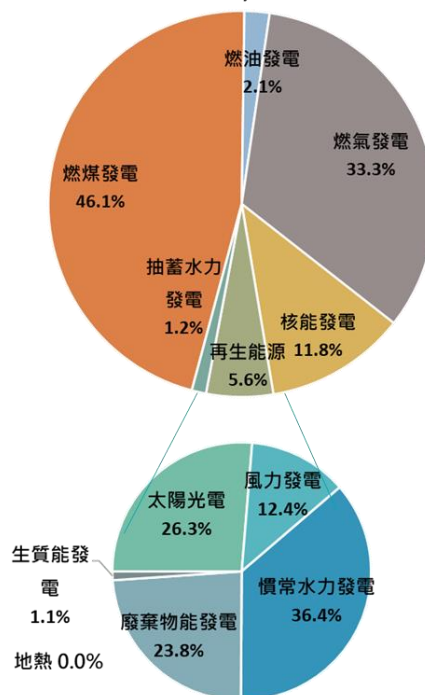
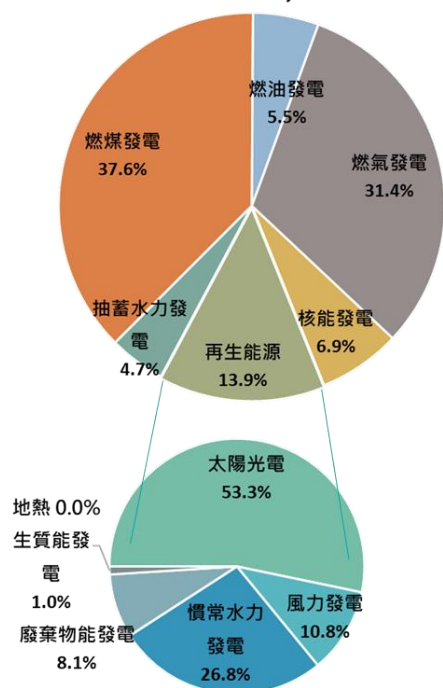


圖 2B.1 2019 年我國發電裝置容量及發電量

附錄 2C 太陽光電模組裝設面積分析

依經濟部能源局估算，1 kW 地面型太陽光電所需裝設面積為 15 平方公尺：實際上，若太陽能板的轉換效率為 100%，則 1 平方公尺的太陽能板可產生 1 kW 的電能，但考慮到大多數太陽能板都是固定安裝，並不能依據太陽位置隨時保持與陽光呈垂直入射的狀態，因此電能的轉換就會呈現峰值；此外，因為各種廠牌及採用不同技術的太陽能板轉換效率皆有差異，雖然根據美國能源部國家再生能源研究室的數據，單晶矽太陽能板的轉化率達 26.1%至 27.6%，但實際參考經濟部能源局登錄的太陽光電模組產品可得知，商用規格的太陽能板平均轉化效率約在 20%至 22%左右，因此透過總輸出功率公式：

$$E = A \times r \times H \times PR$$

E = 能量(kWh)

A = 太陽能板總面積(m²)

r = 太陽能板轉換效率(%)

H = 太陽能板上的年平均太陽輻射(kWh/m² · y) (不包含陰影)

P R = 損失係數 (範圍介於 0.5~0.9，默認值=0.75)

其中損失係數包含逆變器損耗(4~10%)、溫度耗損(5~20%)、直/交流電耗損(2~6%)、弱輻射下的損失(3~7%)、灰塵或雪造成的損失(2%)。

在計算最大裝設容量則將H假設為太陽能板平鋪且垂直於太陽光線，此時可達表面最大太陽輻照度約 1 kW/m²，因此透過公式可得知，在最大太陽輻照度下，透過市售的太陽能光電模組取得 1 kW 能量，需要裝設 6.67 平方公尺的太陽能板，但這只是將所有太陽能板緊密平鋪於平面上所需的面積，在現實中，除了裝設於斜板屋頂的太陽能板外，大多數太陽能板在裝設時都需要預留行與列間的空間，其理由有二：(1)由於太陽運行軌跡問題，為了能夠取得更大的照射強度，因此大多數太陽能板皆會設計成傾斜狀，也因如此，不同列的太陽能板將會有蔽影問題，此問題影響極大，甚至造成太陽能板效率降低 80%，(2)落塵與鳥糞覆蓋在

太陽能板上也會導致太陽能板效率降低，為了能定時且方便清潔太陽能板上的灰塵，甚至能夠安全地進行任何故障的排除和維護的功能，因此需要預留空間。

根據國立台灣科技大學研究團隊的估算⁹⁰⁹，預留空間受到太陽能板傾斜角度與陽光照射角度相關，而我國因緯度關係，因此在太陽能模組裝設時大多為模組傾斜角 23.5° ，若考慮冬至所產生的陰影長度最大(L_2)，而此時陽光照射到太陽能板的入射角度為 55° ，組列總高度為 h ，因此最大陰影長度 $L_2 = 1.43h$ ，其中 $h = L_0 \sin(23.5^\circ)$ ，因此 $L_2 = 0.5577 L_0$ ，再加上既有裝設長度 L_1 ，最終總長度為 $(L_1 + L_2) = 1.47 L_0$ ，因太陽能板寬度固定，因此需要總面積則較原有增加 1.47 倍(圖 2C.1)。這也代表目前若以轉化率 20%至 22%的商用太陽能板而言，裝置容量 1 kW 設置所需要的裝置面積為 9.8 平方公尺。以此換算，1 MW 需要的裝置面積約為 1 公頃(1 hectare = 10,000 m²)，而 1 GW 需要的裝置面積約為 1 千公頃。

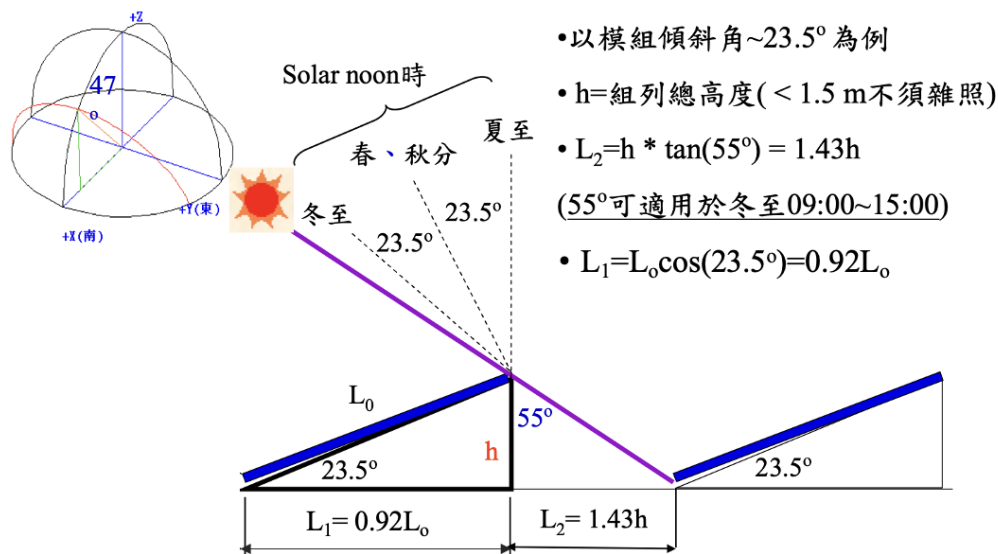


圖 2C.1 太陽能板裝置面積示意

⁹⁰⁹ 太陽能節能建築設計與施工，取自 http://web.ntust.edu.tw/~young/solar_building_design.pdf

附錄 2D 太陽光電轉換效率

太陽能轉化技術主要透過光伏效應(photovoltaic effect)將吸收的太陽光轉化為直流電能，相關技術非常多。太陽光電技術的主要定義為以電子元件吸收太陽光的光能後，激發電子—電洞對(electron-hole pair)，並在內電場的效用下，產生電流將光能直接轉換為直流電能的技術。如果是利用物質吸收太陽光能量，轉化為其他能量後，如熱能，再轉為電能的技術則不歸於太陽光電。因此太陽光電技術中使用的吸收光能材料定為半導體材料，一般而言，太陽光電技術依其使用的半導體材料可分為三個種類：

第一類太陽光電技術是以結晶矽為主的太陽光電材料，因為其在地殼中為含量次高的元素（約 26.3%）且取得容易，現今市面上太陽能電池仍以矽材料為主流，矽也是半導體產業電子元件裡面的主材料，亦是目前人類研究最詳細的半導體材料。世界上第一個矽基太陽光電元件是 1954 年由 D. M. Chapin 等三人在貝爾實驗室發表⁹¹⁰，在文章中作者們就提出三項因素：反射、電阻、複合使元件的效率小於一上限值。在 1961 年，W. Shockley 與 H. Queisser 等人根據平衡原理在只考慮理想情況下（唯一的電子—電洞對複合機制為輻射複合），可計算單一 p-n 接面矽基元件的效率極限為 33%⁹¹¹。圖 2D.1 為各種不同能代的半導體依該理論所計算出的轉換效率最高值⁹¹²。

由美國能源部國家再生能源研究室(National Renewable Energy Laboratory)所繪製與整理之太陽光電技術道路圖中（圖 2D.2）⁹¹³可看出，目前多晶矽轉換效率約在 23.3%左右，而單晶矽可高達 26.1%~27.6%，而矽異質接面(Heterojunction with intrinsic Thin layer, HJT)太陽能電池之轉化率可達 26.7%。如果要得到轉換效率超過 30%的元件，必須要採用不同材料及採用多接面(multi-junction)的結構，

⁹¹⁰ D. M. Chapin, C. S. Fuller, and G. L. Pearson. (1954). A New Silicon p-n Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power. *Journal of Applied Physics* 25, 676

⁹¹¹ W. Shockley, and H. Queisser. (1961). Detailed Balance Limit of Efficiency of pn Junction Solar Cells. *Journal of Applied Physics* 32, 510

⁹¹² Z. Li, T. Ma, H. Yang, L. Lu, R. Wang. Transparent and Colored Solar Photovoltaics for Building Integrations. *Solar RRL* · January 2021 DOI: 10.1002/solr.202000614

⁹¹³ NREL (2022). Best Research-Cell Efficiency Chart. <https://www.nrel.gov/pv/assets/pdfs/best-research-cell-efficiencies-rev220630.pdf>

方可達成。現階段矽基太陽光電主流技術可以分成單晶、多晶或單晶/非晶混合型等技術，而結晶矽材料產品占有超過八成以上市場。在 p 型(p-type)矽晶太陽能電池背鈍化製程發展日益成熟後，目前全球絕大多數的矽晶電池皆採用此一製程，但在效率達到 22%後，效率提升的空間已有限，面臨資本及技術投入邊際效益率遞減問題。

使用 n-type 矽晶可能成為下一個效率提升的方法。n-type 矽晶材料具有下列優於 p-type 的特性：

- 較長的載子生命週期(carrier lifetime)；
- 對金屬雜質容忍度較高；
- 硼含量極低，可從本質上消除因硼氧對(Boron-oxygen Pair)而發生的光致衰退，因此使用 n-type 矽晶材料也成為下一階段提升矽晶太陽能電池效率的首選。

商業大量生產 n-type 矽晶太陽能電池仍需克服幾項主要挑戰：

- n-type 單晶矽生產中磷析出及磷原子在矽基材中分布的控制；
- 在 n-type 基板上摻雜硼的高溫製程；
- 目前最受矚目的異質接面電池（HJT 電池）需要增加薄膜沉積機臺，而其製程條件也複雜而難以控制；
- 由於 HJT 電池低溫製程的特性，需要搭配適宜的低溫模組封裝製程，不能採取現行技術。隨著綠色能源市場不斷擴大，對效率和品質的要求越來越高，單晶 n 型(n-type)太陽能電池由於本身的條件優勢，必然會成為未來幾年高效電池產業化的關鍵。

第二類太陽光電技術包括薄膜技術與多接面型，薄膜技術包括各式的化合物半導體如 III-V 族的砷化鎵(GaAs)、II-VI 族碲化鎘(CdTe)、I-II-VI 族銅銦鎵硒(CIGS)及非晶矽。對比第一代矽材料，第二代太陽光電技術採用直接能隙半導體，具有優異的吸光特性，只需要數 μm 的厚度，就可吸收相當於 200~300 μm 單晶

矽所吸收的陽光。其中砷化鎵元件光電轉換效率非常高，在標準單一太陽光照度下，其轉換效率可達 29.1%。但砷化鎵元件對於製造時的雜質容許度低，目前多以有機金屬化學氣相沈積技術(MOCVD)方法製造，製造成本約為單晶矽元件的百倍以上⁹¹⁴，因此其主要運用在太空及聚光型。碲化鎢及銅銦鎵硒元件對雜質容許度高，其製造成本低，目前多用於地面型發電站，碲化鎢及銅銦鎵硒元件最高轉換效率分別 25.5%及 23.4%。非晶矽薄膜太陽能電池因其轉換效率低(14%)，已鮮少用於大型發電的應用。

多接面型太陽光電元件是利用多種不同能隙的半導體材料堆疊，因此又稱為堆疊型(Tandem)太陽光電元件，此種類型的電光元件在各太陽光譜波長中，皆可有最佳的光譜響應吸收，以提升轉換效率。目前最普遍的多接面型太陽能電池，是以 III-V 族半導體為主，以 MOCVD 在鍍基版上的製造 InGaP 及 InGaAs 磊晶片。元件中存在著 InGaP 接面、InGaAs 接面及 Ge 接面，每一個接面做為光電轉換，均可是唯一獨立太陽能光電元件轉換，各接面之間以穿隧材料層做為串接相鄰接面電子或電洞導通之用。因為每一個接面使用的材料不同，因此各接面負責吸收的光譜區段也不同。目前該型式元件，於標準單一太陽照度下，最高可達 39.2%的效率，但同樣因 MOCVD 製程及鍍基版生產成本高，主要用於太空工業。該元件亦多用於聚光型太陽能電池，於標準 143 倍太陽照度下，最高可達 47.1%的效率，聚光型太陽能電池雖可利用透鏡組降低單位元件價格，但如何降低整體系統價格為其大量商業化的最大挑戰，日後該技術如要普及於大型地面太陽能發電應用，需要研究如何降低 MOCVD 設備及製造成本以及尋找更適合及低成本的基板。除上述 III-V 族的成熟技術外，尚有利用單晶矽為底部接面元件而在其上堆疊不同型態太陽能電池以形成雙接面太陽能電池的新興技術。目前以鈣鈦礦堆疊單晶矽雙接面太陽能電池效率最高，可達 29.1%。

第三類太陽光電技術主要是嘗試使用非矽材料的使用，常見的技術包括有機太陽能電池(Organic Photovoltaic, OPV)、量子點與鈣鈦礦型太陽能電池等。在轉

⁹¹⁴ Kelsey A. W. Horowitz, Michael Woodhouse, Hohyun Lee, and Greg P. Smestad (2015). A bottom-up cost analysis of a high concentration PV module. AIP Conference Proceedings 1679, 100001 (2015); <https://doi.org/10.1063/1.4931548>

化率上因相關技術均處於技術發展初期，因此在成本與效益比尚且無法與前兩代抗衡，在轉化效率上，有機太陽能電池為 17.5%、量子點太陽能電池則為 16.6%，而鈣鈦礦太陽能電池則是此代光電技術中轉換效率最好的一種，可達 25.5%。雖然鈣鈦礦太陽能電池的光電轉換效率增加速率是所有技術中最快的，但是對鈣鈦礦的穩定性及耐候性的疑慮，仍然是此項技術在商業大量量產最大的阻礙。此外，高效能鈣鈦礦太陽能電池目前含有相當比例的鉛元素，而鉛對於地球環境與生物系統是極大的危害，因此開發研究無鉛的鈣鈦礦材料必為此領域的主流⁹¹⁵。

鈣鈦礦具有製程單純，可調控能階之優點。鈣鈦礦與矽太陽能電池可組成堆疊型多介面裝置而達全光譜利用，目前最佳轉換率已近 30%。若投入資源研發新材料及大規模製程，應可在十年左右達到效能 33% 以上之太陽能板。除了開創新產業，提高競爭力外，又可降低土地需求。

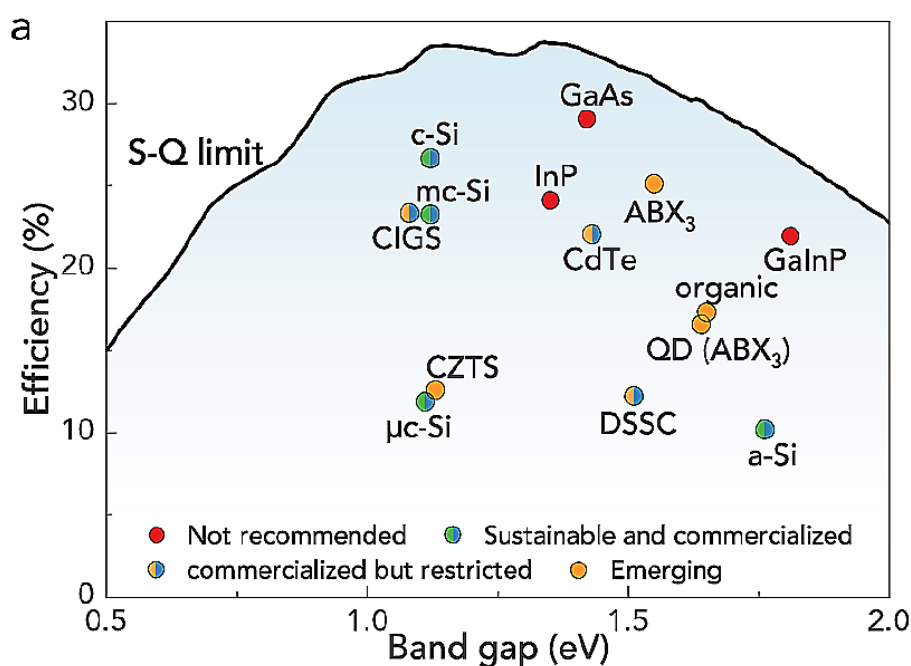


圖 2D.1 半導體理論轉換效率最高值

⁹¹⁵ Christoph Messmer et al. (2021). The race for the best silicon bottom cell: Efficiency and cost evaluation of perovskite-silicon tandem solar cells. Prog Photovolt Res Appl. 2021;29:744–759.



圖 2D.2 美國能源部國家再生能源研究室之太陽光電技術道路圖

附錄 2E 臺灣地熱發電開發現況

表 2E.1 臺灣地熱發電開發現況^{916,917}

商轉年	地點	廠商	開發方式	現況	裝置容量 (MW)
2018	臺東卑南	泓泉溫泉渡假村/ 開山安葆能源服務公司	自地自建	使用中	0.030
2019	宜蘭清水	結元科技	BOT + ROT 先導計畫	列入台灣電力公司 系統各機組發電量	0.300
2020	臺東知本	丫一丫旺溫泉度 假村	自地自建	部分使用中	0.010
2021	宜蘭清水	宜元	BOT + ROT 第一期	測試中	1.000
2021	臺東金崙	全陽地熱	租地自建	潛水電泵安裝規劃	0.500
2022	新北大屯*	萬里仙境	自地自建	申辦鑽井工程展延	0.500
2022	臺東綠島	台灣電力公司	試驗計畫	結案報告審查	0.200
2022	臺東金峰	八方能源集團	租地自建	提送事業計畫	9.981
2022	花蓮瑞穗	Baseload Power Taiwan (外資) ⁹¹⁸	租地自建	斜鑽開鑽	2.400
2022	宜蘭仁澤	台灣中油公司/台 灣電力公司	國有地租用	統包招標公告	2.000
2022	新北大屯*	地平洋資源開發	租地自建	申辦簡易水保計畫	1.000
2022	臺東紅葉	龍門翠谷溫泉會 館	租地自建	取得鑽探許可	0.499
2023	臺東金崙*	宏崙電能	租地自建	第二口井鑽鑿	1.000
2023	臺東金崙*	太乙電能	租地自建	第二口井鑽鑿	1.000
2023	新北大屯*	結元科技	招商/示範獎 勵	修正開發計畫書	1.000
2023	臺東紅葉*	威聯	租地自建	回覆籌設審查意見	1.000
2023	宜蘭土場	台灣中油公司/台 灣電力公司	國有地租用	15 號井井下取樣	3.000
2023	臺東金崙	八方能源集團	租地自建	取得電業籌設許可	9.990
合計					35.410

* 示範獎勵案

⁹¹⁶ 經濟部能源局(2022) 110-112 年預定完成地熱案場。

⁹¹⁷ 劉光瑩(2021)《獨家專訪》比爾蓋茲零碳推手，為何看上花蓮？天下雜誌。資料取自 <https://www.cw.com.tw/article/5114618?template=transformers>

⁹¹⁸ 劉光瑩(2021)《獨家直擊》臺灣地小人稠的痛點，為何被比爾蓋茲、貝佐斯投資的公司看上？天下雜誌。 <https://www.cw.com.tw/article/5114679>

附錄 2F 進口綠氫發電潛力估算

綠氫的跨境運輸模式，目前發展中有液化氫、甲基環己烷以及氨等各種模式，本估算以液化氫做為基礎，暫未計入輸儲過程之相關能量損耗。按照日本文獻與國際能源總署文獻參數，每艘氫能船可載運液化氫 10,840 噸，體積 160,000 立方公尺^{919,920,921}。10,840 噸相當於 1,084 萬公斤，氫熱值 120 MJ/kg，總熱能為 13 億 MJ，換算為 3.6 億 kWh，氫於燃氫渦輪發電效率為 60%，則單艘氫能船可發電 2.17 億 kWh（度）。若設定工作天 250 天，每天兩艘氫能船，則共可發電 **1,084 億度**。另若以 2017 年實際運送天然氣來臺計 265 船次（艘）之較保守計算，可發電 575 億度。故進口綠氫發電潛力估計為 575~1,084 億度。以發電廠容量因數 (capacity factor) 設定為 0.8 回推所需裝置容量為 8.2~15.5 GW。

表 2F.1 進口綠氫發電潛力估算

單艘船可載氫重量	10,840	噸
單艘船可載氫重量	10,840,000	公斤
氫總熱值（氫熱值 120MJ/kg）	1,300,800,000	MJ
1 kWh = 3.6 MJ	361,333,333.3	kWh
氫進行渦輪機發電效率 60%	216,800,000	kWh
每艘船單趟可發電度數	2.168	億度
A.250 天，每日 2 艘	1,084	億度
B.一年 265 艘	575	億度

⁹¹⁹ Kawasaki (2021) Kawasaki develops cargo containment system for large liquefied hydrogen carrier with world's highest carrying capacity—AiP obtained from ClassNK.

https://global.kawasaki.com/en/corp/newsroom/news/detail/?f=20210506_9983

⁹²⁰ Kamiya, S., Nishimura, M., & Harada, E. (2015) Study on introduction of CO₂ free energy to Japan with liquid hydrogen. Physics Procedia, 67, 11-19. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.06.004>

⁹²¹ IEA (2019) IEA G20 hydrogen report : Assumptions. https://iea.blob.core.windows.net/assets/29b027e5-fefc-47df-aed0-456b1bb38844/IEA-The-Future-of-Hydrogen-Assumptions-Annex_CORR.pdf

附錄 2G 有關燃氣與燃氫發電效率

以理論上考量，燃氫渦輪機之發電效率會比燃氣渦輪機為高。但是燃燒全氫會讓火焰溫度變高，故對應之渦輪機需要特殊材料，目前各廠商都尚未開發完成燃燒全氫的渦輪機，目前僅能以混燒為主。替代性的做法為加入稀釋氣體，讓溫度降低到現有渦輪機材料可以容忍的範圍，但又會使燃氫的效率降低。此外，為了控制 NO_x 污染物，也需要改變與空氣的混合方式或使用不同的燃燒技術，使氮氣減少於高溫區滯留，或加入水氣，但也會影響熱效率，所以整體效率都會稍微降低，降低的程度則與所使用的燃燒型式有很大關聯。因此，雖然理論上全氫燃燒之效率會較天然氣高一些，但 NO_x 也會太高，並需要確保控制在現有渦輪機材質能忍受的溫度下去燃燒，透過改變燃料與空氣的混合方式，或改變燃燒器來減少高溫區與氮接觸等方式，以降低 NO_x 產生量並使效率不要下降太多。目前各個渦輪機廠商的開發目標，設定為未來燃燒全氫的複循環渦輪（combined cycle turbine，包括 gas turbine 與 steam turbine）可與燃燒天然氣的效率相近^{922,923}。

⁹²² ETN GLOBAL (2020) Hydrogen gas turbines. <https://etn.global/wp-content/uploads/2020/01/ETN-Hydrogen-Gas-Turbines-report.pdf>

⁹²³ Chiesa, P., Lozza, G. & Mazzocchi, L. (2005) Using hydrogen as gas turbine fuel. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power-transactions of The Asme - J ENG GAS TURB POWER-T ASME. 127. 10.1115/1.1787513. https://www.researchgate.net/publication/239399848_Using_Hydrogen_as_Gas_Turbine_Fuel

附錄 2H 天然氣無氧裂解產氫發電潛力估算

2021 年我國天然氣進口 1,944 萬噸。假設在 2050 年使用 2021 年進口天然氣量之 2 倍在去碳燃氫發電上，可供無氧裂解產氫的天然氣量為 3,888 萬噸⁹²⁴。

因為一摩爾(mole)天然氣無氧裂解產氫需要 76 kJ 的能量，故理論值計算，如果投入一度綠電(1 kWh, 3600 kJ)，在 100%效率下，可分解 $3600 \div 76 = 47.3$ mole (0.757 kg) 甲烷(CH₄)，並得到 47.3 mole(0.568 kg)的碳跟 94.6 mole(0.189 kg)的氫。

如果無氧裂解效率達 80%，實際將其中 80%即 37.9 mole (0.6 kg)天然氣無氧裂解（20%未被裂解天然氣部分重新循環再次進行無氧裂解），可產生 37.9 mole (0.455 kg)的碳跟 75.8 mole (0.151 kg)的氫。所得的氫用於燃燒發電，假設發電效率 60%，氫熱值（高）為 142 MJ/kg，1 kWh=3.6 MJ，則 0.151 kg 的氫可發電為 $0.151 \times 142 \div 3.6 \times 60\% = 3.6$ kWh。減去投入 1 kWh 的綠電，淨電力產出為 2.6 kWh。故 0.6 kg 天然氣投入，可以得到 2.6 kWh 淨電力下，3,888 萬噸天然氣可得到的淨電力為 **1,685** 億度；以發電廠容量因數(capacity factor)設定為 0.8 回推所需裝置容量，為 24 GW（若容量因數 0.6 則裝置容量為 32 GW）。

如果無氧裂解效率僅達 60%，只會實際將其中 60%即 28.4 mole (0.454 kg)天然氣無氧裂解（40%未被裂解天然氣部分重新循環再次進行無氧裂解），可產生 28.4 mole (0.341 kg)的碳跟 56.8 mole (0.114 kg)的氫。所得的氫用於燃燒發電，假設發電效率 60%，則 0.114 kg 的氫可發電為 $0.114 \times 142 \div 3.6 \times 60\% = 2.7$ kWh。減去投入 1 kWh 的綠電，淨電力產出為 1.7 kWh。故 0.454 kg 甲烷投入，可以得到 1.7 kWh 淨電力下，3,888 萬噸天然氣可以得到的淨電力為 **1,456** 億度；以發電廠容量因子(capacity factor)設定為 0.8 回推所需裝置容量，為 20.8 GW（若容量因

⁹²⁴ 目前臺灣進口天然氣在使用用途，約有 80%用在發電上，其他 20%分別用在工業與其他部門上，參考經濟部能源局能源統計專區(2022)能源平衡表（公秉油當量單位）。https://www.esist.org.tw/publication/monthly_detail?Id=34490dec067。本建議書估算 2050 年去碳燃氫發電潛力，係直接參考 2021 年進口天然氣重量，並設定其 2 倍重量（3,888 萬噸）應用於去碳燃氫發電，並未納入估計 2050 年工業與家庭部門額外之天然氣需求。此外，在淨零排放目標下之能源使用趨勢，工業與家庭部門隨著未來燃氫發熱與電氣化技術逐漸成熟，將天然氣直接作為能源使用之需求將會逐漸降低，並可能被燃氫發熱與電氣化等途徑逐漸取代。

數 0.6 則裝置容量為 27.7 GW)。

另參考美國 Monolith material 公司在內布拉斯加州 Olive Creek I (OC1)之設施規劃，每年該設備之氫能產量可達 5 kt⁹²⁵，相當於 5×10^6 kg，以前述 0.151 kg 的氫可以發電之淨電力產出為 2.6 kWh 下，換算該設施每年產氫 5×10^6 kg 共可發電 0.86 億度。假設我國 2035 年以前可建置同類型天然氣無氧裂解設施規模達 25~60 座，以 2020 年天然氣發電量為 998 億度為基礎，約可取代該年 2~5%之天然氣發電量。

⁹²⁵ ARPA-E (2021) Monolith materials : taking methane pyrolysis from concept to industrial plant.
https://arpa-e.energy.gov/sites/default/files/2021-01/08%20OK%20-Monolith_ARPAE_MethanePyrolysis2021_v3.pdf

附錄 2I 海水水力發電案例

日本沖繩抽蓄式海水水力發電廠（以下簡稱沖繩電廠，參見圖 2I.1）借助抽蓄式水力發電的概念，運用非用電高峰期間的電能，將海水抽到島上的高處以抬高水位，之後在用電高峰期將海水排出，即可利用水位位能來發電。沖繩電廠為全球第一座抽蓄式海水水力發電廠，設計緣由是因沖繩的電力來源以火力發電為主，用電高低峰差距十分明顯，為避免非用電高峰期間發出的電能閒置，故將其用來抽蓄海水提升位能，以配合在用電高峰期發電，如此將可發揮調節運轉的功能⁹²⁶。

沖繩電廠裝置容量為 30 MW，且為了能善用取之不盡的海水，在選址上就近蓋在海邊，所以水路隧道長度比一般水力電廠較短、抽蓄速度快且發電效率更好（參見圖 2I.2）。另一方面，考量海水具有鹽分，因此沖繩電廠輸水用的壓力鋼管及上池(upper reservoir)結構體都需用抗腐蝕性材質，也需要解決海洋生物附著等問題。1999 年沖繩電廠啟用後，其上池因地質與氣候等因素，逐漸發生海水滲透的問題，造成周圍土地受到不同程度的鹽化，影響當地動植物生態。沖繩電廠共運轉了 17 年，於 2016 年因營運虧損以及不易維運等原因而關廠，至今尚未有其他國家再興建抽蓄式海水水力發電廠^{927,928,929}。

台灣電力公司曾於沖繩電廠興建時進行海水抽蓄發電技術的探討⁹³⁰，之後於 2005 年規劃在宜蘭南澳溪出海口附近的一處台地興建海水發電廠⁹³¹，希望藉由抽蓄東岸海水至陸地發電，估計該廠裝置容量可達 1 GW 且年發電可達 12 億度

⁹²⁶ Tetsuo Fujihara, Haruo Imano, Katsuhiko Oshima (1998) Development of pump turbine for seawater pumped storage power plant. Hitachi Review Vol. 47 (1998), No. 5.
https://www.hitachi.com/rev/1998/revoct98/r4_108.pdf

⁹²⁷ International Water Power (2000) Japanese pumped storage embraces the ocean waves. International Water Power & Dam Construction.
<https://www.waterpowermagazine.com/features/featurejapanese-pumped-storage-embraces-the-ocean-waves/>

⁹²⁸ 澁谷容子、石村陽介(2010) 沖繩やんばる海水揚水発電所. 土木学会誌(JSCE Magazine, in Japanese) vol.95 no.3. <http://www.jsce.or.jp/journal/student/nihonichi/201003.pdf>

⁹²⁹ Okina wanderer (2016) Experimental power plant in Kunigami dismantled. Okina wanderer.
<https://www.okinawanderer.com/2016/07/experimental-power-plant-in-kunigami-dismantled/>

⁹³⁰ 詹宏祺(1991) 海水抽蓄發電技術。台電工程月刊，第 520 期，頁 91-94。

⁹³¹ 蘋果新聞網(2005) 台電擬建海水發電廠。蘋果新聞網。
<https://tw.appledaily.com/headline/20050904/5DDQJBKFIM2YNVWGKHAJTSGIDM/>

以上。但是，環保團體擔憂此種大量且長期抽取含鹽分的海水到陸地儲存的作法，恐危害當地動植物生態，再加上逾新臺幣 300 億元的龐大興建成本，因此台灣電力公司公司已表示會再審慎評估海水發電廠的開發需求。



圖 2I.1 日本沖繩抽蓄式海水水力發電廠（鳥瞰圖）⁹³²

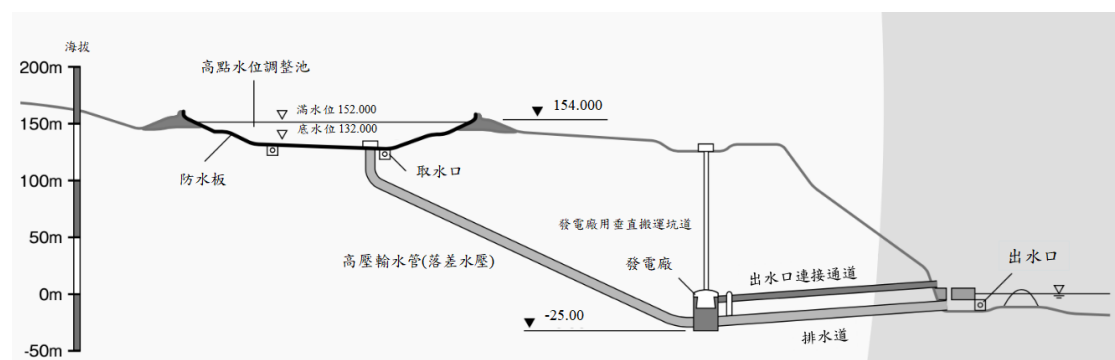


圖 2I.2 日本沖繩抽蓄式海水水力發電廠（剖面圖）⁹³³

⁹³² 同前揭註 926。

⁹³³ 同前揭註 928。

附錄 2J 各種儲能技術適合之應用場域

不同儲能技術可以提供的系統額定功率規模與額定功能放電時間有所差異，因而也會影響電池可以適用的場域（圖 2J.1）。重力/機械技術項下的抽蓄水力儲能跟壓縮空氣儲能（非屬電池），其特性上可以達到的系統額定功率規模較大，約在 100 MW 至幾 GW 範圍，且在額定功率下的放電時間可以達到數小時以上或更久，因此適合作為大容量電源管理之用。臺灣比較熟知的電化學技術如先進鉛酸電池、鋰離子電池與液流電池等，其系統額定功率則為中等，多半在 100 kW 到 100 MW 左右的範圍，適合作為支援輸配電網負載移轉之用，但其下個別技術之額定功率放電時間仍有差異，如先進鉛酸電池與鋰電池放電時間是以分鐘到小時等級範圍，液流電池則是放電可以達數小時以上。而其他技術如大功率超級電容（高能量超級電容）之系統額定功率僅在 10 kW 左右，放電時間則是在分鐘等級的範圍。氫能/燃料電池的系統額定功率範圍廣，從 1 kW 甚至到 100 MW 以上都有可能，放電時間則受燃料供給的限制，可達小時甚至日、月或年以上。

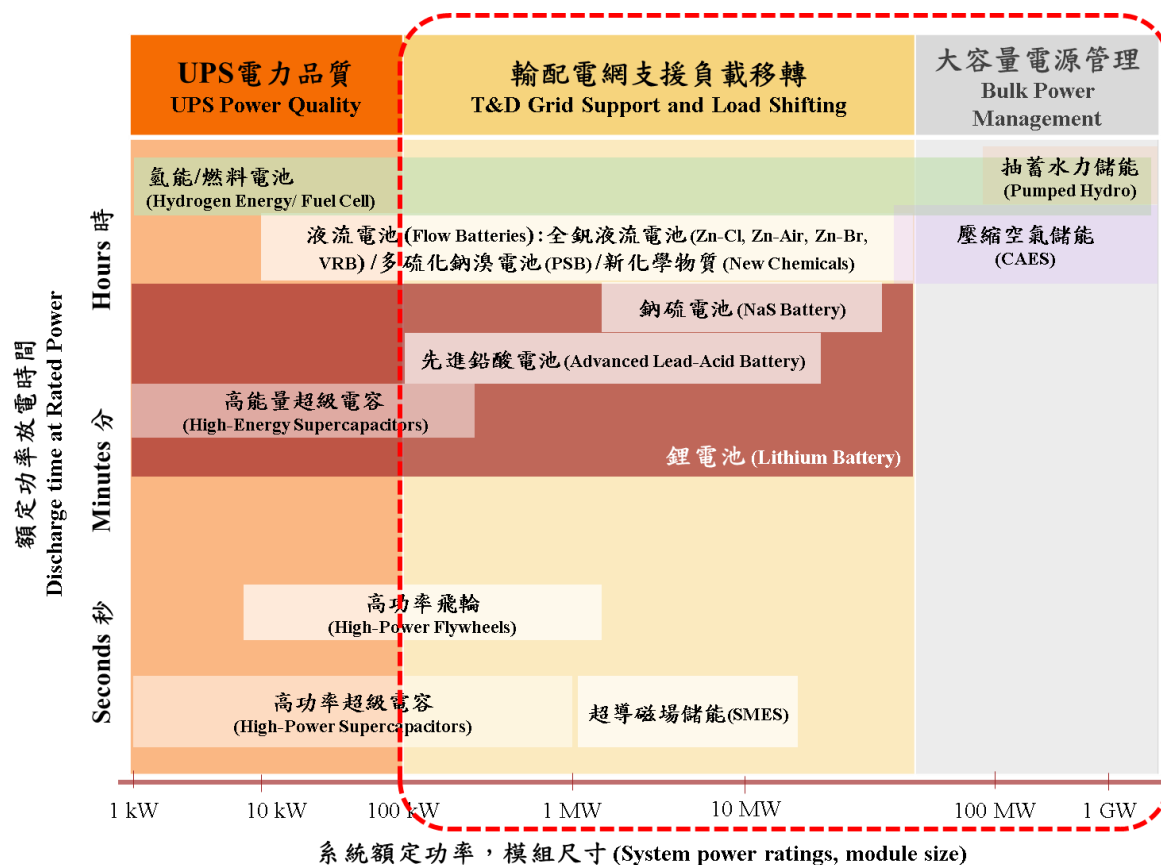


圖 2J.1 各種儲能技術適合之應用場域^{934,935,936}

⁹³⁴ Asian Development Bank (2018) Handbook on battery energy storage system. <https://www.adb.org/sites/default/files/publication/479891/handbook-battery-energy-storage-system.pdf>

⁹³⁵ Cigolotti, V., Genovese, M. & Fragiaco, P. (2021) Comprehensive review on fuel cell technology for stationary applications as sustainable and efficient poly-generation energy systems. Energies 14, 4963. <https://doi.org/10.3390/en14164963>

⁹³⁶ Canadian Energy Research Institute (2019) Electricity storage systems: Applications and business cases. <https://ceri.ca/files/publications/427>

附錄 2K 儲能系統潛在需求

本建議書於此計算之儲能需求，主要考量我國再生能源的主力為風力發電與太陽光電，其供電方式具有間歇性的特質，為維持供電穩定性，需善用定置式儲能系統，以達再生能源削峰填谷的功能需求，並不包含因為其他考量需要設置之儲能系統需求，如備用電力。

1. 儲能需求推估—根據台灣電力公司綜合研究所之研究方法估算

本建議書參考台灣電力公司綜合研究所的研究方法估算我國儲能的潛在需求⁹³⁷。本建議書進行估算的基本假設如下：

- (1) 再生能源來源選項，主要以設定之風能和太陽能發電時之變動性考慮為主，暫未納入其他新興高變動性再生能源科技；
- (2) 台灣電力公司綜合研究所參考彰濱風場之電力變動量為 15~26%；另台灣電力公司綜合研究所根據過往台灣電力公司照度資料，太陽能廠之變動量為 10% 為基準預估；
- (3) 估算需求時，並未減去水力抽蓄可以調度之空間+480 MW~180 MW（與 1 GW 變動相差甚遠，且氣候變遷乾旱趨勢下可使用儲能空間具有不確定性）；
- (4) 不劃分於不同區域計算儲能，而是以再生能源總量進行估算，且無計入餘電在電網之傳送損失與充入儲能系統損失；
- (5) 假設太陽能與風能同時發生最大變動，故儲能系統需要滿足此最大變動量。

⁹³⁷ 林建宏、林吉祥、林勉海、楊亞叡(2017) 考慮再生能源成長之儲能式系統研究。
[https://tpri.taipower.com.tw/Publications/2.專題報告\(Reports/Papers\)/2.研究論文發表/RP/2017.12/考慮再生能源成長之儲能式系統研究-電力室-林建宏等.pdf](https://tpri.taipower.com.tw/Publications/2.專題報告(Reports/Papers)/2.研究論文發表/RP/2017.12/考慮再生能源成長之儲能式系統研究-電力室-林建宏等.pdf)

儲能潛在需求估算公式如下：

$$\text{儲能需求(GW)} = \text{太陽光電裝置容量} \times 10\% + \text{風力發電裝置量} \times 26\%$$

以上述算式，參考 2.12 節中 2050 年太陽能裝置容量(平均值)為 51.24 GW⁹³⁸、風力裝置容量(含陸域與離岸) 48.20 GW⁹³⁹時，推估需要 17.65 GW 的儲能容量方能避免棄風棄光，完整進行削峰填谷的調節。

同樣以上述方式估算 2030 年的儲能需求，依照目前政策目標，2025 年太陽能達 20 GW，每年增加 1 GW，2030 年應為 25 GW；風力發電 2025 年達 6.9 GW，每年增加 1.5 GW，至 2030 年共 14.4 GW，依此計算出 2030 政策目標下對應的儲能需求為 6.24 GW。如表 2K.1 所示。

表 2K.1 2030 與 2050 年儲能需求預估

時程	2030	2050
儲能需求推估	6.24 GW	17.65 GW

2050 年所需儲能需求 17.65 GW，如果減去抽蓄水力最大 2.26 GW，則尚有 15.39 GW 的儲能空間。此儲能需求若未以其他途徑進行調節（如透過智慧電網之跨區調控、氫能儲能），而是全部透過目前特斯拉電網級儲能系統⁹⁴⁰進行所需布建面積之估算，以單組電池之長度與寬度 7.26 公尺與 1.65 公尺（286 英吋與 65 英吋），需要面積為 12 平方公尺，一套 10 組（共 7.7 MW）（未加計間隔）所需面積為 120 平方公尺。若額外納入間隔，一套假設所需面積變為 5 倍為 600 平方公尺。故若要滿足 15.39 GW (15,390 MW)，儲能系統需要 1,999 套（15,390 MW / 7.7 MW），總面積需要 1,199,400 平方公尺（約為 1.20 平方公里），約等於 4.62 座大安森林公園⁹⁴¹。

⁹³⁸ $(43.95 \text{ GW} + 67.2 \text{ GW}) / 2 = 55.6 \text{ GW}$

⁹³⁹ $(1.2 \text{ GW} + 3.8 \text{ GW} + 43.2 \text{ GW} + 48.2 \text{ GW}) / 2 = 48.2 \text{ GW}$

⁹⁴⁰ Megapack Tesla Product Details. <https://www.tesla.com/megapack/design>

⁹⁴¹ 大安森林公園面積為 26 公頃=0.26 平方公里

而 2050 年我國運輸載具若完全達到電動化，電池的儲能能量亦會有相當規模，以 Tesla Model 3 Long Range Dual Motor 之電動車電池為例，其單輛電池為 75 kWh⁹⁴²，若我國現有 833 萬輛汽車（2021 年）⁹⁴³在 2050 年完全電動化，等同具有 625 GWh 的電池電量（相當於 62.5 GW 裝置容量儲能 10 小時，未考量能源轉換損失），不過仍需透過引入適當的商業模式，才能做為儲能調度工具以穩定電網。

2. 儲能需求推估－檢視歐盟各國不同變動性再生能源占比下儲能系統裝置容量與儲能量之潛在需求

歐洲能源儲存協會蒐集歐盟會員國針對儲能需求進行的預估^{944,945}，並定位出各會員國在不同變動性再生能源占比下，所需要的儲能裝置容量，其研究結果如圖 2K.1 所示。各個國家/地區的儲能需求有所差異，主要與國家規模及當時假設可供替代的其他彈性選項以及建模估算方式有關。大致而言，隨著變動性再生能源占比的增加（風能、太陽能等）會增加對儲能裝置容量(GW)的需求。根據該研究成果整理，可看到如英國、德國在變動性再生能源占比為 45%上下的儲能需求評估案例，儲存裝置需求多在 15~25 GW 範圍。就本建議書目前估計太陽能與風能在 2050 年的占比約在 40%上下，該等數據或可做為我國儲能系統需求的參考基礎。

⁹⁴² EV database (2022) <https://ev-database.org/>

⁹⁴³ 交通部統計查詢網(2022) 機動車輛登記數。
<https://stat.motc.gov.tw/mocdb/stmain.jsp?sys=100&funid=a3301>

⁹⁴⁴ EASE (2018) EASE study on energy storage demand. https://ease-storage.eu/wp-content/uploads/2018/06/2018.06_EASE_Study_on_Storage_Demand.pdf

⁹⁴⁵ 主要是來自於 Horizon 2020 資助 StoRE 計畫的發表文獻。

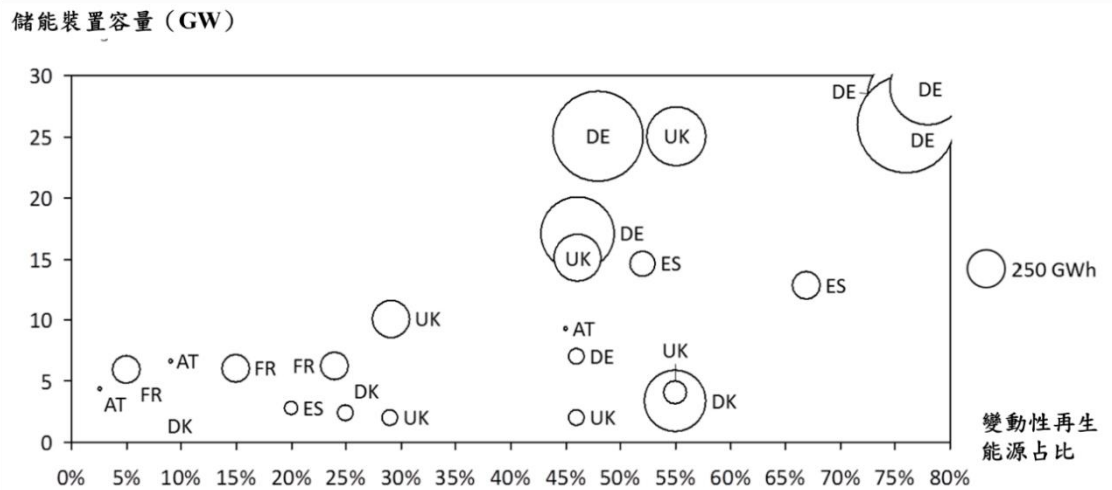


圖 2K.1 不同變動性再生能源占比下（橫軸），歐盟會員國對於儲能裝置容量以及儲能量的需求推估【裝置容量 GW（縱軸）、儲電量（GWh）（泡泡大小）】

附錄 3A 藍碳匯潛在面積

臺灣的藍碳匯共分為濕地（包含鹽沼(salt marshes)與紅樹林(mangroves)）與海草床。以濕地而言，目前屬於國家重要濕地（2020 年）共有 42,699 公頃。其中，國際級（核定）占 8.3%、國家級（核定）占 89.8%，以及地方級（核定）占 1.9%⁹⁴⁶。而全國 18 處非國家重要濕地，目前已更新 12 處，如表 3A.1 所示，總面積共有 21,290 公頃。

表 3A.1 非國家重要濕地（更新的 12 處）⁹⁴⁷

編號	地點	面積（公頃）
1	內寮濕地	0.15
2	彰和濕地	6.70
3	塭仔底濕地公園	1.60
4	彰化海岸濕地	21,152.00
5	學甲濕地	20.00
6	中都濕地公園	12.60
7	知本濕地	20.00
8	內惟埤濕地	3.00
9	樣仔林埤濕地	3.70
10	大鵬灣人工濕地	55.60
11	新良人工濕地	14.00
12	洋子厝人工濕地	0.70
總計		21,290.05

綜合前述國家重要濕地與非國家重要濕地面積，濕地總面積共為 63,989 公頃。另參考國立中興大學研究團隊對臺灣濕地碳收支研究⁹⁴⁸，濕地中我國鹽沼面積估計為 30 公頃，紅樹林面積有 681 公頃，另我國海草床面積估計有 5,456 公頃，其中最大面積來自屬於高雄市的東沙環礁，共有 5,420 公頃。

有關濕地面積（內含鹽沼與紅樹林面積）以及排除鹽沼與紅樹林面積之濕地

⁹⁴⁶ 內政部營建署(2021)。國家重要濕地保育計畫網頁。https://wetland-

tw.tcd.gov.tw/tw/ChartsContent.php?ID=20&secureChk=4678008501c6a6318c39859decca9aaf

⁹⁴⁷ 內政部營建署城鄉發展分署國家重要濕地保育計畫網頁(2019)。非國家重要濕地保育之執行。https://wetland-tw.tcd.gov.tw/upload/file/20190522151004267.pdf

⁹⁴⁸ 林幸助(2021)。行政院淨零排放路徑農林碳匯工作圈－臺灣濕地碳收支簡報（資料未公開）。

面積整理如表 3A.2 所示。

表 3A.2 藍碳匯面積彙總

類別	面積（公頃）
國家重要濕地（截止 2020 年底） ⁹⁴⁹	42,699
非國家重要濕地（12 處） ⁹⁵⁰	21,290
濕地（含鹽沼與紅樹林面積）（小計）	63,989
海草床（含東沙） ⁹⁵¹	5,456

⁹⁴⁹ 相較 2020 年，2011 年時，國家重要濕地面積為 56,865 公頃。

⁹⁵⁰ 全國 18 處非國家重要濕地，目前已更新 12 處。

⁹⁵¹ 同前揭註 948。

附錄 3B 藍碳碳匯之單位面積固碳量研究數據

濕地與鹽沼之單位面積碳固定量，從國立中興大學 2017 年至 2018 年度重要濕地碳匯調查計畫案成果報告書提供之碳匯分布地理資訊圖資顯示⁹⁵²，臺灣西南沿海為碳匯熱點，但亦提及各重要濕地碳匯實地監測數據仍有諸多缺失仍需透過研究進行填補。此外，就該報告收集既有研究產出之碳匯資訊，多數位點之二氧化碳(CO₂)通量呈現碳排放，僅有少數位點為碳吸收，其中，吸收通量最大之編號 TWn0083 淡水河臺北港北堤為 9.59 tC/ha/year (相當於 35.2 tCO₂eq/ha/year)，然若希望將現有碳排放之天然濕地全部轉型成具有碳匯功能，恐產生大幅改變生態之疑慮，比較可行的方式是從增加可以吸收碳的人工濕地著手，但需要進一步透過更精準的研究評估可能新增的面積。

在紅樹林之單位面積碳固定量，以 2021 年臺灣濕地碳收支簡報⁹⁵³有關臺灣沿海濕地碳吸收量比較中，臺灣紅樹林的碳攝取速率為 1,086~2,764 gCm⁻²yr⁻¹，換算單位後為 10.86~27.6 tC/ha/year (相當於 39.82~101.2 tCO₂eq/ha/year)。

海草床(Lagoon)的部分，同樣參考上述簡報資料，臺灣海草床的碳攝取速率為 1,453 gCm⁻²yr⁻¹ (包括葉片與地下部分)，換算單位後為 14.5 tC/ha/year (相當於 53.2 tCO₂eq/ha/year)。

⁹⁵² 林幸助、陳琦玲、陳添水、李世博、宋明儒、林蔚任、陳渭中、陳佳宜、陳彥匡、張恩澤(2018)「106-107 年度重要濕地碳匯調查計畫」案成果報告書。國立中興大學執行。內政部營建署城鄉發展分署。<https://wetland-tw.tcd.gov.tw/upload/file/20190521161653265.pdf>

⁹⁵³ 林幸助(2021) 行政院淨零排放路徑農林碳匯工作圈－臺灣濕地碳收支簡報簡報 (資料未公開)。

附錄 3C 其他負碳排創新技術

本附錄將補充一些國際上已知天然的解決方案與增強自然過程措施，包括鹼處理海洋或雲、海洋施肥、直接將二氧化碳(CO₂)注入海洋深層、加速風化、生質建築與生物炭。

1. 以鹼處理海洋或雲(Cloud or ocean treatment with alkali)

當二氧化碳溶解在水中時會產生碳酸，可從空氣中去除二氧化碳，再藉由加入鹼性物質來增強反應，因此科學家建議在雲中添加強鹼產生鹼雨⁹⁵⁴，此外，也建議將大量的石灰(CaO)添加到海洋中，不僅增加海洋吸收二氧化碳的能力，同時也可部分抵消海洋酸化，但石灰需要分散在廣闊的區域以避免飽和。而同樣來自前述科學家的估算，全球的二氧化碳排放量可以藉由向地球表面 0.4%的雲層中噴灑 5,600 萬噸氫氧化鉀來抵消，而從大氣中去除 10 億噸二氧化碳需要大約 25 億噸石灰石。

目前已有澳洲聯邦科學與工業研究組織(CSIRO)模擬在大堡礁沿岸施放鹼化劑（碳酸鈣、氫氧化鈣、橄欖石、磷灰石等）可達成的除碳效果⁹⁵⁵，該模型結果顯示可改善珊瑚礁酸化，並在海洋中封存 35,000 萬噸二氧化碳。但是，因海洋環境與生態複雜，大規模地向雲層或海洋中添加鹼性物質所產生的影響難以確定，因此落實推動可能尚有阻力。

2. 海洋鹼化 (Ocean Alkalinization)/海洋施肥(Ocean fertilization)

由於海洋植物在進行光合作用時會吸收二氧化碳，科學家推估以人為提高微小植物光合作用的速率，將可以加速大氣中二氧化碳的去除並減緩氣候變遷。所以科學家建議可將營養鐵注入海洋⁹⁵⁶，提升浮游植物的光合作用速率，加速從海水表層中去除二氧化碳，使更多的二氧化碳可從與海水接觸的空氣中進入。當浮

⁹⁵⁴ Carbon Brief (2016) Explainer: 10 ways ‘negative emissions’ could slow climate change. Carbon Brief. <https://www.carbonbrief.org/explainer-10-ways-negative-emissions-could-slow-climate-change>

⁹⁵⁵ Mongin, M., Baird, M. E., Lenton A., Neill, C., Akl, J. (2021) Environ. Res. Lett. 16 064068. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ac002d>

⁹⁵⁶ 同前揭註 954。

游植物死亡後沉到海底，便可將碳鎖在沉積物中達數百或數千年之久。另外，相關研究亦提出以氮給海洋施肥，或將富含養份的深水注入營養枯竭的表層海洋中，將可刺激植物生長，達到前述類似的作用。如同前一項「以鹼處理海洋或雲」技術可能造成的影響，此項大規模海洋施肥方案，不論是成本考量、各國意願以及可能對海洋生態帶來的衝擊等問題仍然存在。

3. 直接將二氧化碳注入海洋深層(Ocean direct injection)

在海洋吸收二氧化碳的機制上⁹⁵⁷，除了前述浮游植物在透光層中行光合作用的生物機制外，另外則是因二氧化碳氣體的溶解度會與溫度成反比，所以在高緯度海域的海水因其溫度低可溶入較多的二氧化碳，然後高二氧化碳濃度冷海水因密度較高會下沉，便可將富含二氧化碳的表層海水輸送至深海中儲存。因此，科學家建議⁹⁵⁸利用前述溫鹽環流的特性，將二氧化碳直接注入海洋深層進行封存應是可行的，但是如何監控和驗證儲存的安全性與有效性，以及是否可負擔該營運成本，都成為此項負碳排技術備受爭議的焦點。

另一方面，為保育海洋生態並避免不當的使用造成環境污染，聯合國 1972 年制定「防止傾倒廢物等物質污染海洋公約」(簡稱「倫敦公約」)⁹⁵⁹，以管制世界各國對海上廢棄物的傾倒(海拋作業)。之後於 1996 年訂定「倫敦公約 1996 年議定書」，該議定書採正面表列，允許 7 大項物質可從事海拋外，其他廢棄物不得進行海拋處理。因此，不論是向海洋中添加鹼性物質、營養鐵等，或是本項直接將二氧化碳注入海洋深層等作法，均會面臨該如何對可能造成的影響作出事前的評估，以回應上述公約之預警原則的精神。

⁹⁵⁷ 周文臣(2015)《科學月刊》逐漸酸化的海洋。泛科學。<https://pansci.asia/archives/90334>

⁹⁵⁸ Haszeldine, R. S., Flude, S., Johnson G., & Scott V. (2018) Negative emissions technologies and carbon capture and storage to achieve the Paris Agreement commitments, Volume 376 Issue 2119. <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsta.2016.0447>

⁹⁵⁹ 環境資訊中心(2006) 因應倫敦公約 行政院環境保護署修訂海拋廢棄物分類規定。<https://e-info.org.tw/node/16001>

4. 加速風化(enhanced weathering)

由於花崗岩和玄武岩等天然矽酸鹽岩可吸收大氣和海洋中的二氧化碳合成白堊岩和石灰石等碳酸鹽岩，研究報告⁹⁶⁰指出，透過增加矽酸鹽類礦物與水、二氧化碳的反應面積來加速風化作用（磨碎），達到負排放，且有改善土壤性質之潛在效益。

此項技術目前多為小規模試驗，其中美國加州 Working Lands Innovation Center 的 50 英畝為目前最大規模 ERW (Enhanced silicate rock weathering)計畫⁹⁶¹，主要是以細粉狀的矽酸鹽岩石（Basalt，玄武岩）作為土壤改良劑，也就是將粉碎後的岩石粉末撒在大片農田上，利用土壤中的微生物來加速化學反應。而透過向土壤中添加礦物質的作法同時可以提高土壤中的養分，對農作物生長與產量亦會有助益。本實驗似對土壤碳匯的增加有其效益，但仍需較長觀察時間來了解其確實效益。

5. 生質建築(Building with biomass)

植物基材料(plant-based materials)可用於建築，並在建築物固碳在建材中，有利於減少碳的逸散。常見的植物基材料如木材和竹子可用在建物的結構，大麻和羊毛可用在絕緣，以及大麻與石灰混合製成的生物複合材料(hemp-lime)可用於牆壁。如能改用前述植物基材料，相較以往的建築材料如鋼材與混凝土等而言，其碳密集度是下降的，且有利於碳的儲存。再加上作為建材的替代品時，可協助維持建物內部溫濕度均勻，並使建築物更加透氣。當建築壽命結束或需翻修時，因建料本身來自於生物，可充分回收利用，如做為田間作物的覆蓋物，幫助抑制雜草生長與減緩水分蒸發，等到腐爛分解後可再作為肥料，省去處理及掩埋廢棄建材等問題⁹⁶²。近來建築師開始採用天然的建築材料，但是，若想引入天然建材作

⁹⁶⁰ Beerling, D.J., Kantzas, E.P., Lomas, M.R. et al. (2020) Potential for large-scale CO₂ removal via enhanced rock weathering with croplands. *Nature* 583, 242–248. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2448-9>

⁹⁶¹ Cosier, S. (2021) How Adding Rock Dust to Soil Could Help Get Carbon into the Ground. *Yale Environment*. <https://e360.yale.edu/features/how-adding-rock-dust-to-soil-can-help-get-carbon-into-the-ground>

⁹⁶² 農業科技決策資訊平台(2019) 超越傳統混凝土的生物建材。 <https://agritech->

為常用的建材，其收益未能完整評估導致缺乏足夠的投資，再者，如何認證建材的天然成份以及導入建築使用的相關專業知識仍待增進，使得大規模部署仍是障礙⁹⁶³。

另外，參採木材的分解研究可知，埋在 43 公分以下的木材受到土壤厚度保護，其腐爛的速度慢，細菌僅促成表層木材的損失(<0.5 mm)，所以採用嵌入木材的混凝土建造護岸或防波堤，亦是善用天然建材的案例⁹⁶⁴。

6. 生物炭(Biochar)

生物炭泛指將有機物（如木材、農作物廢料和糞便）在不完全燃燒的情況，經無氧裂解(Pyrolysis)產生乾餾液、焦油等液體，與 CO 等氣體，而剩餘的炭化固體即為生物炭⁹⁶⁵。就農民而言，生物炭是一種處理農業廢棄物的便捷方式，當生物炭被埋入土壤，其穩定的特殊結構在數百甚至數千年內都不易被分解而釋出碳元素，不僅可封存碳也可將其添加到土壤中提高其肥力、保水力、透氣性及改善（提高）土壤的 pH 值，同時也可增強作物對營養可利用性，進而提高作物的產量。如亞馬遜地區的黑土(Terra Preta)為著名的例子，該區於土壤中使用生物炭的歷史，最早可追溯到兩千年之前，與相鄰區域的土壤相比，這些黑土有機碳儲量高，在上面種植的作物明顯具有較高的產量，由此可看出生物炭帶來的益處⁹⁶⁶。近來亦有研究發現，生物炭具有每年封存多達 48 億噸二氧化碳當量的潛力，且比許多負碳排技術的缺點更少，對土地和水的需求有限。但是，生物炭會促使土壤的顏色更黑，進而降低土壤的反射率，代表土地會吸收更多的太陽能並將更快地提高土壤的溫度，對於地區的微氣候而言，長期恐將造成影響⁹⁶⁷。

foresight.atr.org.tw/article/contents/1704

⁹⁶³ 同前揭註 954。

⁹⁶⁴ National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2019) Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda. Washington, DC: The National Academies Press. doi: <https://doi.org/10.17226/25259>.

⁹⁶⁵ 台灣農業科技資源運籌管理學會(2019) 看好「黑金產業」林試所打算推生物炭標章、建立分級認證機制。環境資訊中心。<https://e-info.org.tw/node/222186>

⁹⁶⁶ 台灣農業科技資源運籌管理學會(2017) 生物炭產業國際趨勢報告。
<http://araget.atr.org.tw/uploads/ckfinder/files/生物炭產業國際趨勢報告.pdf>

⁹⁶⁷ 同前揭註 954。

為了可更加明瞭生物炭在土壤中的反應機制，已有更多的研究針對生物炭的屬性和土壤類型（如 pH 值的不同）、環境條件（淹水或非淹水土壤）以及管理系統（好氧與厭氧途徑）間的交互作用進行探討⁹⁶⁸，近來亦有相關文獻指出生物炭的添加將可協助厭氧醱酵等優點⁹⁶⁹。整體而言，希望可找出有助於從大氣中清除二氧化碳 以及增加植物碳吸收的條件，同時原本在水稻種植等農作過程中，會有 CH₄ 等溫室氣體排放的情形，也期待透過生物炭的使用減少排放。

表 3C.1 其他負碳排創新技術說明與所遭遇的挑戰⁹⁷⁰

項目	說明	挑戰
鹼處理海洋或雲 (Cloud or ocean treatment with alkali)	二氧化碳不溶於水，向海洋或雲加鹼促進反應，前者增加海洋吸收 二氧化碳能力，部分抵消酸化；後者產生鹼雨，將二氧化碳從大氣沖走	1. 石灰石量大 2. 環境不確定性影響
海洋施肥 (Ocean fertilization)	海洋（鐵）施肥，增加浮游植物對碳吸收，隨著海洋表面二氧化碳被浮游植物吸收去除，更多二氧化碳可從上方空氣中進入。當植物死亡會沉入海底，將碳鎖定在沉積物中數百或數千年	1. 海洋施肥規模及成本龐大 2. 國際法監管
加速風化 (enhanced weathering)	礦物碳化，大規模開採、研磨和散布岩石，加速岩石吸收二氧化碳的自然過程	1. 早期研發示範階段 2. 環境生態負面衝擊
生質建築 (Building with biomass)	生質基礎材料可用於建築、儲碳，如：木材和竹子用做結構元件，麻和羊毛用做絕緣材料，麻石灰做牆壁，替代傳統建築材料（如鋼筋混凝土）	缺乏投資、認證和專業知識
生物炭 (Biochar)	係透過燃燒生質能，同時切斷氧氣供應之熱解過程而產生，用於添加至土壤內封存碳	土壤變暗，反射率降低，土地將吸收太陽能變暖

⁹⁶⁸ 同前揭註 964。

⁹⁶⁹ Osman, A. I., Fawzy, S., Farghali, M., El-Azazy, M., Elgarahy, A. M., Fahim, R. A., Maksoud, M. I. A. A., Ajlan, A. A., Yousry, M., Saleem, Y., & Rooney, D. W. (2022) Biochar for agronomy, animal farming, anaerobic digestion, composting, water treatment, soil remediation, construction, energy storage, and carbon sequestration: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 20(4), 2385–2485. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01424-x>

⁹⁷⁰ 同前揭註 954。

附錄 4A 鋼鐵業製程與碳排比例

鋼鐵業的製程依使用的原料與生產設備可分為二大類型，分述如下，亦請參見圖 4A.1 所示：

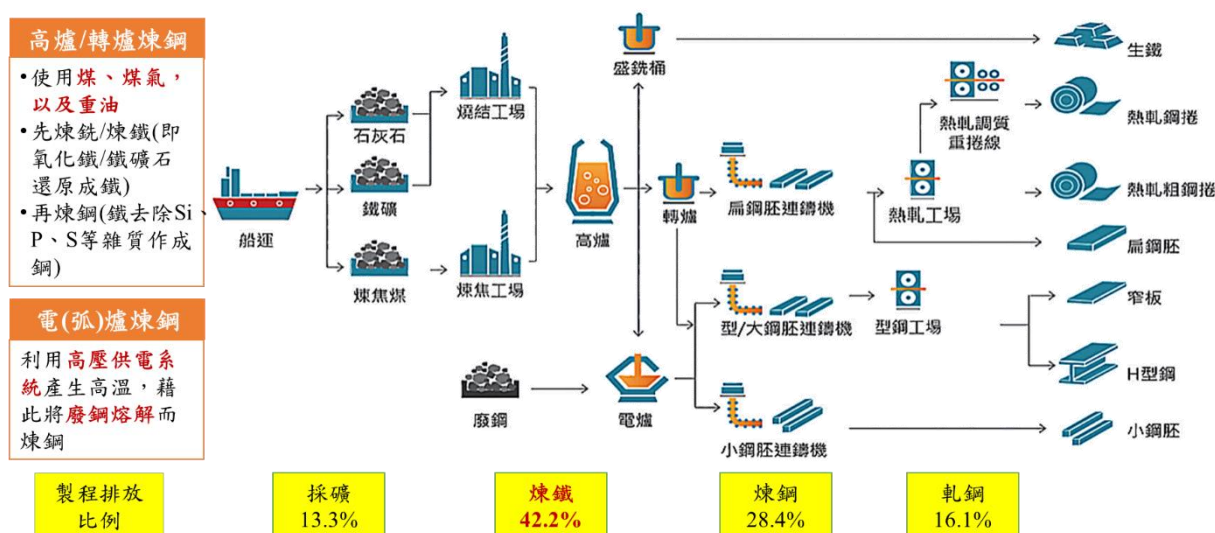


圖 4A.1 鋼鐵業製程與碳排比例⁹⁷¹

1. 由高爐與轉爐煉鋼：以鐵礦石與焦煤（又稱冶金煤）為原料，先在高爐中將氧化鐵型態的鐵礦石還原成生鐵，此階段稱為「煉鐵」，接續再以轉爐或平爐等設備進行精煉，即為「煉鋼」。從鐵礦石原料開採到煉鐵、煉鋼的製程也稱為「一貫作業煉鋼」，以煤、煤氣與重油為主要的能源使用類型，而在高爐冶煉過程中產生的爐石稱為高爐石，經水淬研磨成粉可以作為混凝土重要的礦物摻料，用以提升混凝土強度及耐久性。另外，在轉爐精煉過程所產生的爐石即為轉爐石，經加工後可作為地盤改良、道路鋪面以及填築材料等，另外，有少部分可作為受鹽害的土地的土壤改良劑與石灰質肥料，或是活性化轉爐石後作為廢水處理等用途⁹⁷²。

⁹⁷¹ Wang, P., Ryberg, M., Yang, Y. et al. (2021) Efficiency stagnation in global steel production urges joint supply- and demand-side mitigation efforts. Nat Commun 12, 2066. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22245-6>

⁹⁷² 中聯資源公司(2021) 轉爐石特性。中聯資源公司官方網站。 <https://www.chc.com.tw/source.html>

2. 由電（弧）爐煉鋼：以廢鋼料、海綿鐵(sponge iron)、熱鐵塊(Hot Briquetted Iron, HBI)等為原料的電（弧）爐煉鋼，是利用高壓供電系統產生高溫，藉此將廢鋼熔解而煉鋼，所以採用電力為主要能源使用⁹⁷³。電（弧）爐煉鋼過程中產生的電爐石，包含氧化渣與還原渣，其成分較複雜且性質易變異，皆屬於事業廢棄物，其再利用管理必須符合「經濟部事業廢棄物再利用種類及管理方式」項下「電弧爐煉鋼爐渣（石）」之規定辦理。此外，電（弧）爐高溫熔煉製程排放的氣體及懸浮微粒，含有戴奧辛及鋅、鉛等重金屬，為有害事業廢棄物⁹⁷⁴，因此，其集塵灰須依有害事業廢棄物之相關辦法特別處理之。

⁹⁷³ IRENA (2020) Reaching zero with renewables.

⁹⁷⁴ 同前揭註 972。

附錄 4B 我國水泥業現有減碳投入項目

根據台灣區水泥工業同業公會統計，我國在 2020 年共計生產水泥 1,179 萬公噸，當年的水泥消耗量為 1,211 萬公噸，而我國從全球各地進口水泥約 249 萬公噸，出口水泥共約 223 萬公噸，主要出口國家為美國（60 萬公噸）、馬來西亞（41 萬公噸）與菲律賓（40 萬公噸）。我國水泥業在 2019 年的碳排放量總計 9.3 百萬噸（2019 年碳排放量約 2.25 公噸），占我國碳排放量約 3.3%。為達成 2050 淨零排放的目標，我國的水泥業減碳策略有以下幾點：

1. 提升熱能與能源效率

水泥廠區可進行製程上的優化，可導入國際級的管理系統，如 ISO 50001 能源管理系統、ISO 14001 環境管理系統及 ISO 14064-1 溫室氣體盤查，以提升能源使用效率及降低溫室氣體排放。以亞洲水泥公司花蓮廠為例，透過預熱機風道改善工程，提高燃燒效率，每年可節省 5,000 公噸煤炭使用，相當於降低 12,000 公噸溫室氣體之排放。另外，透過更新旋窯的馬達與控制系統，可達薄料快燒的效果，每年可節省煤炭 3,500 公噸，相當於降低 8,000 公噸的溫室氣體排放。另外，為有效利用水泥旋窯製程所排放的熱能，水泥廠應設置餘熱發電系統，並且引進創新技術以提高熱能回收效率。以台灣水泥公司為例，設置單窯低溫餘熱發電，每噸熟料的淨發電量可由 13 度增加至 29 度，2020 年的餘熱發電量可達 119,024 萬度，約可減少 6 萬公噸二氧化碳(CO₂)的排放。最後，水泥業中的電力占水泥製程能源使用的 3~4%，可規劃在廠區建置再生能源（太陽能、風能、地熱能與生質能等）與儲能系統，以減少外部燃煤發電的使用。以台灣水泥公司為例，2020 年已運轉的綠能發電容量為 80 MW，發電量超過 1.29 億度電，約可減少 65,815 公噸二氧化碳，其目標在 2030 年可建置 500 MW 的再生能源電廠，可減少 35%的外部用電。

2. 使用替代燃料與廢棄物

水泥業者應減少水泥製程中所需煤炭使用量，並且開發碳含量較低且具有熱值的替代燃料，如煤灰、廢木材、固體回收燃料及農業廢棄物。

3. 替代原料與新型水泥

我國天然資源缺乏，應該減少石灰石、黏土及低鹼砂等天然原物料的使用，透過水泥窯燒製程可達 1,500 度高溫的特性，與國內晶圓廠、鋼鐵廠等業者協同合作處理產業廢棄物，將廢棄物資源化再利用，同時替代水泥製程所需的原料。國內重點事業廢棄物中的煤灰、水淬高爐石、電弧爐煉鋼爐渣等可做為水泥與混凝土產品的材料添加物。另外，可透過開發新型的水泥配方減少熟料的使用作為減碳的手段，如 LC3 水泥、替代膠結材等。

4. 大規模的碳捕捉、再利用與封存

經濟部能源局自 2006 年即長期推動二氧化碳捕獲與封存的技術研發，鈣迴路二氧化碳捕獲技術是以價格低廉的石灰石為吸附劑原料，煅燒後的石灰有極高的吸附容量（786 公克/公斤），是良好的碳捕捉吸附劑。工業技術研究院與台灣水泥公司目前預計將 1.9 MW 級的鈣迴路試驗場擴大至 10 MW 級新世代鈣迴路示範場，目標在 2030 年二氧化碳捕獲量可達 10 萬公噸/年，2050 年可達 160 萬噸/年。另外，藉由鈣迴路二氧化碳捕獲技術可延伸應用於微藻固碳再利用，可直接從水泥製程的煙道氣中直接培養微藻以固定二氧化碳，減少二氧化碳的排放量，而微藻中含有豐富的酯類，可作為生產綠色能源生質柴油的資源。國內水泥業者已建立實驗工廠培養微藻，例如雨生紅球藻，從藻體中萃取蝦紅素生產經濟價值較高的保健食品及保養品。

附錄 4C 石化產業鏈

石化產業範疇參考國際廣義石化產業鏈，包括油氣開採業（目前我國境內幾乎沒有）、煉製加工業、化學原料與化學製品業以及化工製品業⁹⁷⁵。我國主要是在上游進口原油後，透過「煉油廠」生產石油腦（Naphtha，亦稱做輕油）作為原料，生產乙烯、丙烯或是芳香烴等大宗石化原料；這些原料後續在中游透過化學原料與化學製品業者，以各種化學反應例如氯化、氧化、與聚合等，再製成塑橡膠原料（如聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)、聚氯乙烯(PVC)或是一些中間化學產品）；到了下游則是利用中游產製出的塑橡膠原料，進一步透過加工，例如射出成型、加壓成型等，製成塑膠製品、包裝容器、紡織品等一般常見產品，或是提供用於運輸工具或是電子產品其他產業。對應目前經濟產業分類而言，則會涉及「製造業」下的石油及煤製品製造業、中游的化學原材料、肥料、氮化合物、塑橡膠原料及人造纖維製造業，以及下游的紡織業、其他化學製品製造業、橡膠製品製造業、塑膠製品製造業等⁹⁷⁶。

⁹⁷⁵ World Resources Institute (2015) 石化行業溫室氣體排放資料管理及核查關鍵技術研究。
<https://wri.org.cn/research/study-key-technologies-greenhouse-gas-emissions-data-management-and-verification>

⁹⁷⁶ 經濟部工業局(2019) 石化業低碳技術製程彙編。
<https://ghg.tgpf.org.tw/Resources/ResourcesLectureNums?id=e3dd18bc7b6e484582b765233cf2e2b8>

廣義石化產業鏈組成

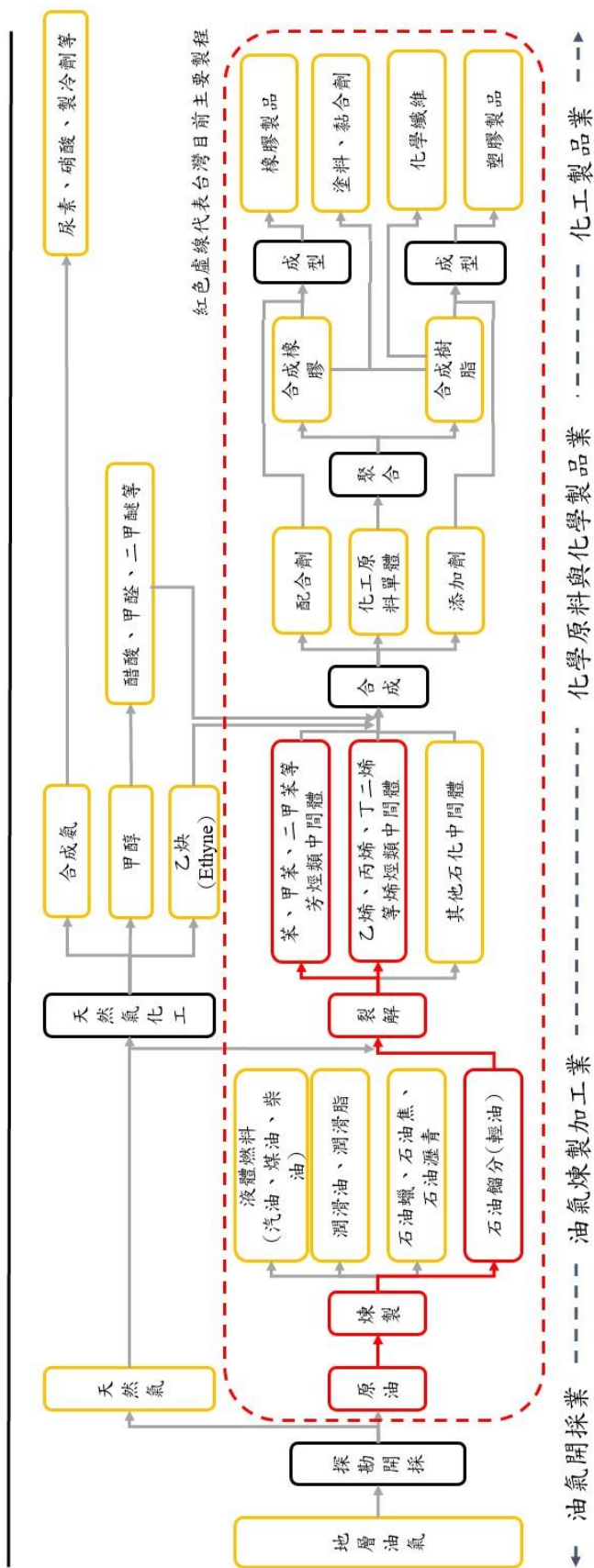


圖 4C.1 石化產業鏈之範疇與排放比例

附錄 5A 農業部門全球減碳趨勢

關於農業部門的全球減碳措施，分就歐盟的碳農業倡議，以及美國的碳銀行與再生農業分述如下。

歐盟以「綠色政綱」為基礎，鼓勵農業和林業部門採取氣候友好行動(climate-friendly practices)，因此，歐盟委員會(The European Commission)於 2021 年啟動碳農業倡議(carbon farming initiative)⁹⁷⁷，將發展新的綠色商業模式及制定監管框架，建立完善透明的碳核算方式，以估計碳清除量，再輔以監測和驗證等機制，以確立碳清除的確實性。碳農業將為參與者提供收益及參與誘因，藉由氣候友好行動進行碳的清除和儲存，從而創造新的收入來源，以調整因應氣候變化可能帶來的影響。同年，歐盟委員會公布碳農業技術手冊^{978,979}，幫助公私部門啟動碳農業計畫，也研提關於碳清除和碳農業認證的《回復永續碳循環》(restoring sustainable carbon cycles)路徑規劃，藉以蒐集利害關係人的意見，作為制定後續方案計畫的參採資訊。

美國食物與農業氣候聯盟(Food and Agriculture Climate Alliance, FACA)於 2020 年 2 月成立後，研提了超過 40 項針對氣候變遷的政策建議⁹⁸⁰，其中為使生產者有誘因採取降低碳排放的農作管理方式，提出了稅收抵免、一次性的獎勵金等措施。另一方面，該聯盟建議聯邦政府亦應投入相當的科學研發預算，來協助州政府及生產者提升農業減排的技術能力。此外，美國參議院於 2021 年通過《成長中的氣候解方法案》(Growing Climate Solutions Act)，這項立法將幫助農林漁牧生產者了解與進入碳交易的市場，使其同時兼顧環境保護並提高生產收入。該法案也規劃建立農業生產者與專家之間的聯繫網絡，並成立諮詢委員會為美國農

⁹⁷⁷ EU (2021) Operationalising an EU carbon farming initiative. <https://www.agroecology-europe.org/wp-content/uploads/2021/05/Executive-Summary-on-EU-Commission-report-on-Carbon-Farming.pdf>

⁹⁷⁸ Directorate-General for Climate Action, European Commission (2021) Commission sets the carbon farming initiative in motion. European Commission website. https://ec.europa.eu/clima/news-your-voice/news/commission-sets-carbon-farming-initiative-motion-2021-04-27_en

⁹⁷⁹ Climate Action (2021) Carbon farming. European Commission website. https://ec.europa.eu/clima/eu-action/forests-and-agriculture/carbon-farming_en

⁹⁸⁰ 林竣達(2020) 新共識！美國農業展開的一連串氣候行動。台達電子文教基金會。
<https://www.delta-foundation.org.tw/blogdetail/3100>

業部提供意見，期確保該計畫的有效性並維持為農業生產者服務的原意⁹⁸¹。另一方面，美國總統拜登(Joe Biden)也宣示，將推行再生農業(regenerative agriculture)，透過補貼農民種植覆蓋作物、鼓勵植樹、降低水土流失和遏止肥料的過度使用等措施，讓農民成為氣候危機的解方之一⁹⁸²。

整體看來，為降低農業部門溫室氣體的排放，改採微生物肥料、生物炭等，注重改善土壤物理性質、土壤生物相，以及增加肥料有效性、維持農田土壤永續利用等友善土地的農法，已是各國逐漸關注並採行的作法⁹⁸³。另外，透過由農產零售業者、食品業者等購買農地吸收二氧化碳(CO₂)產生的碳權形成農業碳權市場機制的同時，農民亦可得到販售農產品之外的收入，如拜耳(Bayer)、嘉吉(Cargill)、Nutrien 等企業⁹⁸⁴，在鼓勵採用對氣候友善的耕作方式之餘，並推動以農業碳權來抵銷生產、運送與販售時產生的溫室氣體。此外，為減少肥料的使用，透過無人機、感測器與人工智慧等技術相互搭配，不僅可精準用藥，也可有效提升農作物產量⁹⁸⁵。

另一方面，參採智庫研究報告對農業部門減排措施的評估⁹⁸⁶，如推動提升電動農機設備的使用、促進動物腸道健康、培育甲烷產量較少的動物品種、基因改良、開發新飼料與擴大沼氣使用等措施，推估至 2050 年，農業部門的碳排量有望減少 20~25%。各項措施在減排成本的估算與比較，請參見圖 5A.1 所示，其中以更換為零排放的電動農機設備需額外付出的減排成本最少，也就是只要換購設備即可減排，相較其他措施而言相對確有其誘因。

⁹⁸¹ United States Senate (2021) Growing Climate Solutions Act Passes U.S. Senate. United States Senate Committee on Agriculture, Nutrition, and Forestry. <https://www.agriculture.senate.gov/newsroom/dem/press/release/growing-climate-solutions-act-passes-us-senate>

⁹⁸² 黃思敏(2021) 2050 農業淨零策略將公布 農委會擬試辦農業碳交易 農民減碳貢獻價值化。環境資訊中心。<https://e-info.org.tw/node/232037>

⁹⁸³ 陳盈蓁、徐仲禹、倪禮豐(2018) 淺談生物炭於農業之應用。花蓮區農業專訊第 106 期。https://www.hdares.gov.tw/upload/hdares/files/web_structure/12695/04.pdf

⁹⁸⁴ 陳苓(2021) 沾光減碳熱！農地成「碳匯」，農人賣碳權大賺外快（轉載至 MoneyDJ 新聞）。科技新報。<https://technews.tw/?p=686180>

⁹⁸⁵ 羅良慧(2020) 無人載具噴藥 省時精進降風險。國家實驗研究院科技政策研究與資訊中心科技產業資訊室。<https://iknow.stpi.narl.org.tw/Post/Read.aspx?PostID=16440>

⁹⁸⁶ McKinsey (2020) Feeding the world sustainably. <https://www.mckinsey.com/business-functions/sustainability/our-insights/feeding-the-world-sustainably>

● 能源 ● 作物 ● 稻米 ● 動物蛋白

溫室氣體 (GHG) 減排的推估成本
\$ per metric ton (Mt) of carbon-dioxide equivalent (CO₂e)

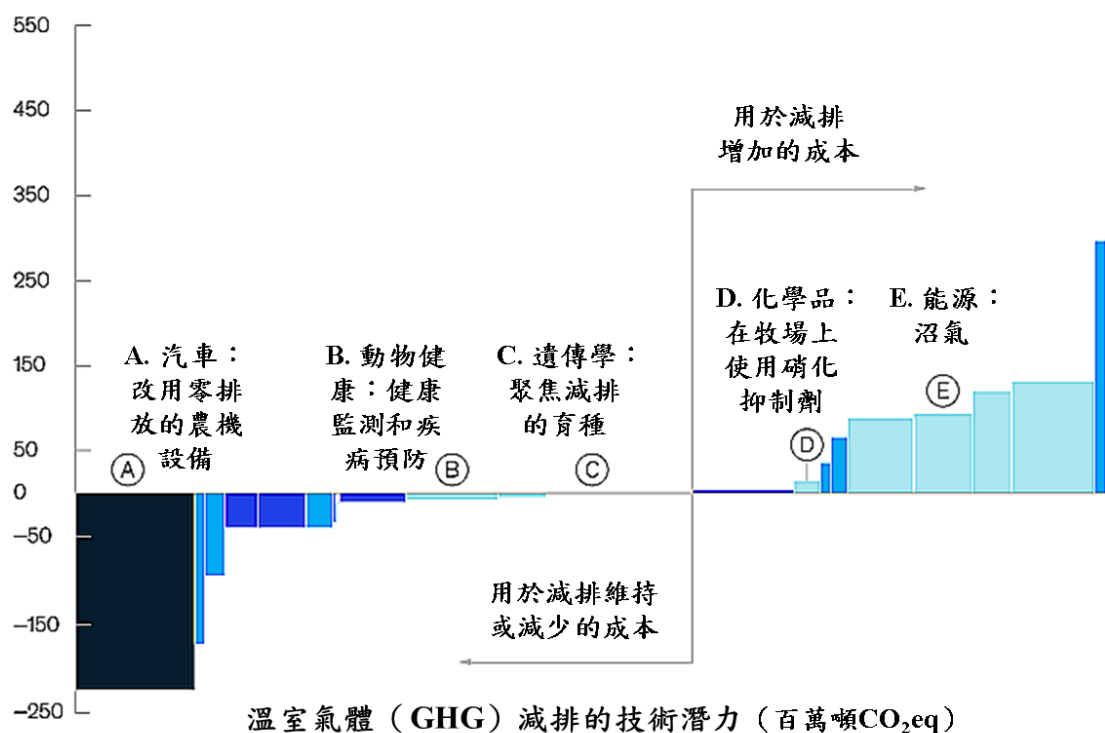


圖 5A.1 農業部門減排措施的成本估算⁹⁸⁷

⁹⁸⁷ 同前揭註 986。

附錄 5B 廢棄物部門全球減碳趨勢

廢棄物部門方面，在國際能源總署(IEA)的淨零碳規劃中⁹⁸⁸，從有機廢棄物（IEA 將範圍定義在都市、食物、農業、產業的有機廢棄物）與林木業殘枝所產生的能量會逐年提升，相對於生質能總量的占比，在 2030 年達到第一，並且第一名的地位到 2050 年都維持不變（遠高於短期木本作物、林業收穫等）。若能投資建構完整的廢棄物收集與分類系統，2050 年時全球可從有機廢棄物獲得 125,000 億度的能量（主要是生質燃氣與先進液態燃料的型式），並從林木業殘枝得到額外的 55,556 億度。為達到上述 2050 年目標，IEA 建議各國政府盡早就有機廢棄物與林木業殘枝等來源數量與基礎設施進行規劃，最好在 2025 年時就將支持手段準備完成。支持手段如(1)制定低排放燃料標準，以作為產業利用廢棄物的誘因；(2)國際間的知識共享，以加速廢棄物能源化產業生態系的形成。

廢棄物部門依排放源之排放量排序之減碳選項如下：排放量最高的污水處理方面，以常見的前厭氧旋轉木馬氧化渠法(pre-anaerobic carrousel oxidation ditch)、前缺氧之厭氧/缺氧/好氧法(pre-anoxic anaerobic-anoxic-oxic, A-A/A/O)、缺氧/厭氧/好氧法(reverse anaerobic-anoxic-oxic, r-A/A/O)為例，r-A/A/O 不論是甲烷或氧化亞氮的排放量都遠低於另外兩者⁹⁸⁹；所以在排放減量方面，污水處理技術還有很多不同的流程、順序可以嘗試。污水處理還可利用上流式厭氧污泥床(upflow anaerobic sludge blanket, UASB)、厭氧流體化床(anaerobic fluidized bed reactor, FBR)等反應器來取得濃度較高的甲烷⁹⁹⁰。

掩埋場可加強管理溫室氣體逸散的途徑⁹⁹¹，如(1)既有開放管道（人孔）、(2)

⁹⁸⁸ IEA (2021) Global Energy Review 2021, IEA, Paris. <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2021>

⁹⁸⁹ Ren, Y. G., Wang, J. H., Li, H. F., Zhang, J., Qi, P. Y., & Hu, Z. (2013) Nitrous oxide and methane emissions from different treatment processes in full-scale municipal wastewater treatment plants. *Environmental technology*, 34(21), 2917-2927.

⁹⁹⁰ Mullai, P., Vishali, S., Yogeswari, M. K., López, M. E., & Rene, E. R. (2020) Methane production and recovery from wastewater. In *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering* (pp. 17-36). Elsevier.

⁹⁹¹ Mohsen, R. A., Abbassi, B., & Zytner, R. (2020) Investigation of fugitive methane and gas collection efficiency in Halton landfill in Ontario, Canada. *Environmental monitoring and assessment*, 192(6), 1-12.

失效或漏氣的氣體收集系統、(3)下雨淹水流失、(4)垃圾滲出水(leachate)水位過高、(5)抽氣真空度不足等。堆肥與就地翻耕掩埋部分，可以控制溼度、碳/氮比、pH 值、或添加添加劑，可減少溫室氣體的產生，例如添加沸石(zeolite)或生物炭可降低甲烷與氧化亞氮的排放⁹⁹²，實際操作可將相關研究成果作為減碳選項進行測試。用電造成的排放方面，要求廢棄物產生部門以廢棄物生質能自給自足，為督促其降低排放的有效策略。焚化方面，可利用無氧裂解技術，將大部分碳元素以生物炭、生質燃油(bio-oil)的形式，與用於發電的重組合成氣分離開來，以降低溫室氣體的排放⁹⁹³。

⁹⁹² Cao, Y., Wang, X., Bai, Z., Chadwick, D., Misselbrook, T., Sommer, S. G., ... & Ma, L. (2019) Mitigation of ammonia, nitrous oxide and methane emissions during solid waste composting with different additives: a meta-analysis. *Journal of Cleaner Production*, 235, 626-635.

⁹⁹³ Mukherjee, C., Denney, J., Mbonimpa, E. G., Slagley, J., & Bhowmik, R. (2020) A review on municipal solid waste-to-energy trends in the USA. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 119, 109512.