

第三章 碳匯、零碳與負碳科技

本章小節

3.1 前言

3.2 自然碳匯

3.3 傳統 CCUS

3.4 生質碳匯與生物製程轉化利用

3.5 小結

3.1 前言

即使我國創造大量零碳電力、其他部門電氣化策略來降低溫室氣體排放量，仍有部分排放源無法以零碳電力替代（如：製程需有高溫鍋爐之產業）。為達成我國 2050 淨零排放目標，仍須要針對化石燃料發電設施與工廠設施等大型排放源之煙道氣應用碳捕獲、封存與再利用技術(CCUS)使現有的排放極小化。而過往排放累積於大氣中的二氧化碳(CO₂)，則須要透過可從空氣中直接去除二氧化碳的「負排放技術」(又稱負碳科技)(Negative Emission Technologies, NETs)，將二氧化碳自大氣中移除，透過封存至地質和陸地海洋生態系統中來抵銷³⁵³，以協助達成我國 2050 淨零排放甚至淨負排放的效益。

上述這類型的科技大致可歸為三大類，分別為天然解決方案（如自然碳匯，包括陸域與水域光合作用之生質碳匯等）、技術解決方案（如傳統碳捕獲、封存及再利用技術），與複合解決方案（以人為技術增強自然過程如加速風化等），各有其優缺點與挑戰。天然解決方案，如自然碳匯，在碳封存成本上較具優勢，但是須要透過積極經營與投入研究以評估可以新增的固碳潛能；技術解決方案則是因為在相關裝置系統的運作上仍有一定能耗，因此有須要與其他綠能選項之減碳應用進行競合之評估，確保技術在系統運作可達成減碳效益。

增強自然過程主要為透過人為干預，如增加矽酸鹽類礦物與水、二氧化碳的反應面積以加速風化作用（磨碎）達到負排放等，雖然是以自然為本的作法，但須配合長期的驗證與監控來確保負碳排的可行性。不過，現階段增強自然過程作法會對自然環境與生態系統所帶來的衝擊與影響尚未明瞭，因此，仍有待逐一克服環評、成本及法規等問題及挑戰。本章著重在天然解決方案、技術解決方案，以及複合解決方案三大方向之可能性以及具潛力之新興技術的評估與探討。

³⁵³ Haszeldine, R. S., Flude, S., Johnson, G. & Scott, V. (2018) Negative emissions technologies and carbon capture and storage to achieve the Paris Agreement commitments. <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsta.2016.0447>

3.2 自然碳匯

摘要

自然碳匯可在氣候變遷減緩中扮演以自然為本的解決方案角色，且具潛在多元環境與社會經濟效益，加上自然碳匯目前相較於 CCUS 技術或是其他負碳排技術而言，在碳封存成本上較具優勢，故須要考量透過「自然碳匯極大化」來協助我國達到淨零排放目標，以降低我國轉型時依賴無碳能源之壓力。綜合我國各種狀況，建議下列做法：

1. 增加森林碳匯，包括增加林地面積（海岸林、淺山、退農還林）、加強並積極經營我國人造森林（國有林、私有林）、提高國產木材產量（固碳於木材）。
2. 積極經營我國人造森林：以增加單位面積生物量為主要作法，進行計畫性疏伐（固碳於木材中）復舊造林及撫育。
3. 啟動研究新興自然碳匯（農作物碳匯、土壤碳匯、藍碳碳匯等）量化評估方法、碳移除量潛能等，方法成熟後再據以估算各式新興自然碳匯容量。

3.2.1 前言

自然碳匯(carbon sink)為可以吸收碳的森林或是其他生態系統，可將碳從大氣中移除以抵銷二氧化碳(CO₂)的排放³⁵⁴，如圖 3.2.1 所示，包括：海洋（藍碳、濕地、海草床）、森林（農業作物、土壤、樹木）、地層等。聯合國環境規劃署認為碳匯可在氣候變遷減緩中扮演以自然為本的解決方案(nature-based solutions)角色³⁵⁵，除可用於吸收或儲存大氣中之二氧化碳外，還具有潛在的多元環境與社會經濟效益，包括生物多樣性的保護、維持氣候穩定性、土壤健康與水品質、降低極端氣候風險、提供糧食與能源以及文化服務與健康安全等。此外，這些以自然

³⁵⁴ European Environment Agency (2022) Term-carbon sink.

<https://www.eea.europa.eu/help/glossary/eea-glossary/carbon-sink>

³⁵⁵ UNEP (2021) Nature-based solutions for climate change mitigation. UN Environment Programme.

<https://wedocs.unep.org/xmlui/bitstream/handle/20.500.11822/37318/NBSCCM.pdf>

為本的解決方案目前相較於 CCUS 技術或是其他負碳排技術而言，在碳封存成本上有相當的優勢，以森林碳匯而言，成本多半在 100 美元/tCO₂eq 以下³⁵⁶，因此若從成本效益進行考量，以增加碳匯方式協助我國達到淨零排放目標是須要優先評估的方向之一。



圖 3.2.1 碳匯範疇（海洋、森林、人為技術）³⁵⁷

以我國現況而言，森林部分碳匯已進行量化統計，並納入溫室氣體排放清冊之農業、林業和其他土地利用(AFOLU)之統計資料，其他類型碳匯則因無可滿足方法學所需之調查數據或尚在評估量化方法學而未納入統計中。2019 年我國林地總面積共 2.1 百萬公頃，碳匯（土地利用、土地利用變化及林業部門）單年之碳移除量為 21.4 MtCO₂eq³⁵⁸，如圖 3.2.2 所示，約占 7.5%總溫室氣體排放量。自 1990 年至今變化不大，絕大多數來自原有林地，僅少數新增之移除量源自新植造林。

³⁵⁶ UNECE (2021) UNECE technology brief - Carbon capture, use and storage.

https://unece.org/sites/default/files/2021-03/CCUS%20brochure_EN_final.pdf

³⁵⁷ ACCIONA (2021) What are carbon sinks? https://www.activesustainability.com/climate-change/carbon-sinks-what-are/?_adin=02021864894

³⁵⁸ 行政院環境保護署(2021) 2021 年國家溫室氣體排放清冊報告。

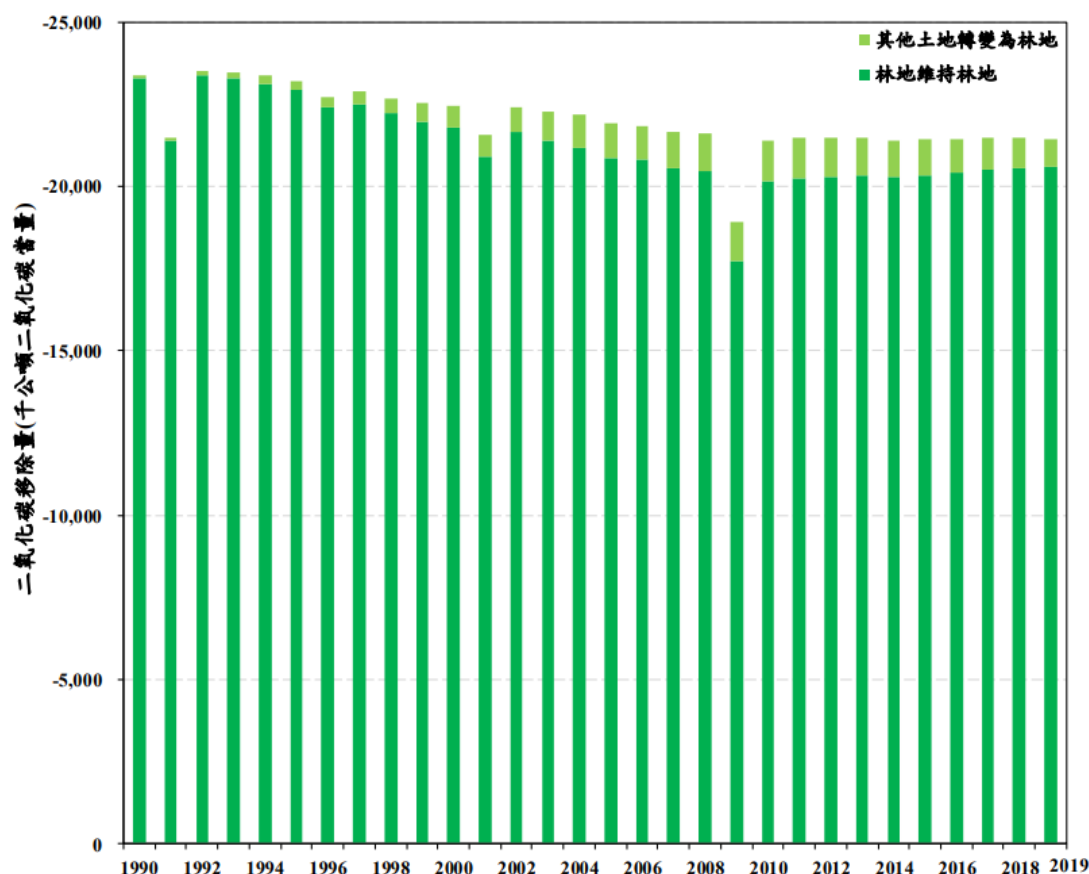


圖 3.2.2 我國自然碳匯溫室氣體移除量現況（森林）³⁵⁹

3.2.2 國際趨勢

自然碳匯範疇雖涵蓋森林、土地農作、濕地及海洋等，但現階段國際在溫室氣體計算上仍以陸域碳匯為主³⁶⁰。聯合國氣候變化綱要公約(UNFCCC)附件一之 43 國溫室氣體排放清冊資料中^{361,362}，2010 年至 2018 年土地利用、土地利用變化及林業部門(Land Use, Land-Use Change and Forestry, LULUCF)每年的碳移除約在 1.8~2 Gt CO₂eq，約可移除此 43 國每年總溫室氣體排放的 10%（圖 3.2.3）。若

³⁵⁹ 同前揭註 358。

³⁶⁰ 聯合國政府間氣候變化專門委員會(IPCC) 所訂定的 2006 年國家溫室氣體盤查指南，農業、林業與其他土地利用(Agriculture Forestry and Other Land Use, AFOLU)項目中，包含林地、農地、草地、濕地、定居與其他土地。

³⁶¹ UNFCCC (2020) Greenhouse Gas Inventory Data - Detailed data by Party.
https://di.unfccc.int/detailed_data_by_party.

³⁶² UNFCCC 公約附件一成員 43 國以 OECD 已開發與發展中經濟體為主，
<https://unfccc.int/parties-observers>

計入海洋碳匯的部分，全球碳預算計畫(Global Carbon Budget Project)以全球海洋生物地質化學和動態植被模型推算，2010 年至 2019 年之間全球每年陸地與海洋碳匯總計最高可達 19~23 Gt CO₂³⁶³。

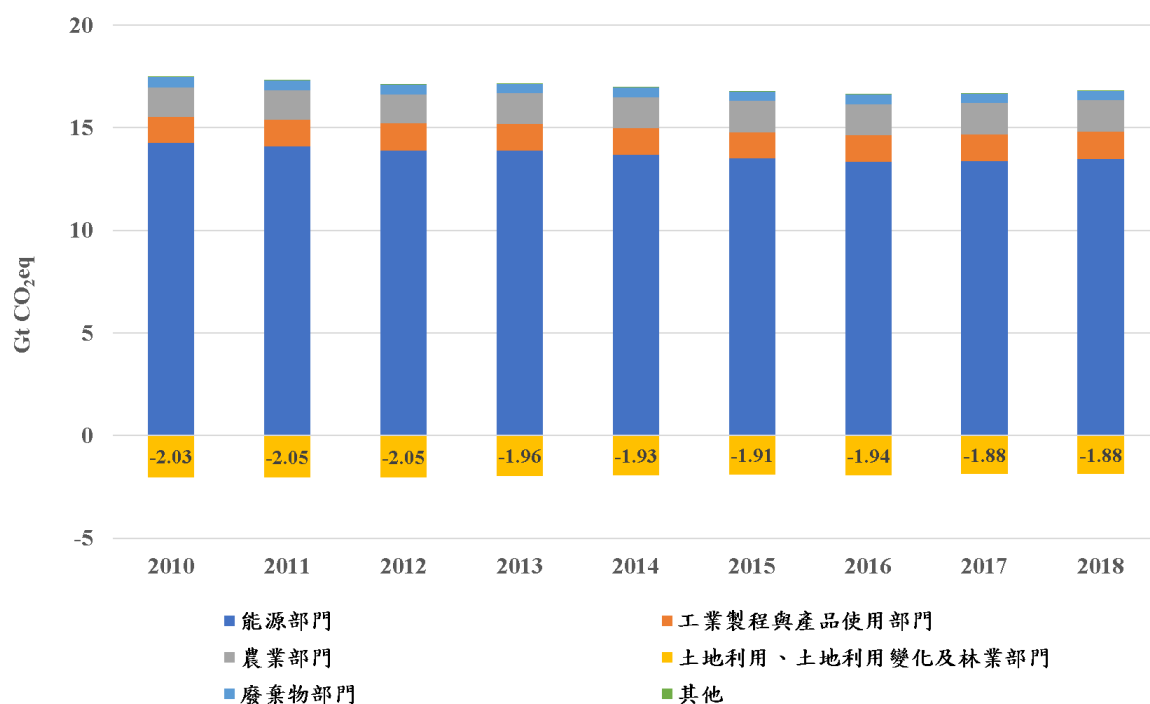


圖 3.2.3 2010 年至 2018 年 UNFCCC 公約附件一國家各部門溫室氣體排放與移除³⁶⁴

1. 陸域碳匯：森林、土壤農作、濕地

近年來因減碳和淨零排放的需求，國際上開始重視陸域碳匯的強化、管理與相關制度。2021 年 11 月召開的聯合國氣候變化綱要公約第 26 次締約方大會(COP 26)，141 國簽署格拉斯哥領袖森林與土地利用宣言(Glasgow Leaders' Declaration on Forest and Land Use)，承諾減少森林流失與土地退化，而歐盟和美國皆於同年提出關於土地利用及森林碳匯的規範或行動草案^{365,366}。金融與碳權方面，新加坡於 2021 年成立氣候影響力交易所(Climate Impact X, CIX)，提供企業投資自然為

³⁶³ Pierre Friedlingstein et al. (2020) Global Carbon Budget 2020. Earth Syst. Sci. Data, 12, 3269–3340. <https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020>

³⁶⁴ 同前揭註 362。

³⁶⁵ European Commission (2021) Land use and forestry regulation for 2021-2030.

³⁶⁶ U.S. Department of State (2021) Plan to Conserve Global Forests: Critical Carbon Sinks.

本的碳權(nature-based solutions carbon credit)管道³⁶⁷；而國際碳驗證標準機構 VERRA 的報告中，AFOLU 類的認證碳單位(Verified Carbon Units, VCUs)占比有上升趨勢，截至 2021 年 10 月為止有超過半數認證的 VCUs 為 AFOLU 相關³⁶⁸，顯示國際上對於陸域碳匯重視的升高。

2. 海洋與沿海生態系碳匯（紅樹林、鹽沼、海草床）

海洋及沿海生態系的碳匯係稱藍碳碳匯(blue carbon)目前尚在研究階段，國際上還尚未有一致的潛能評估方法³⁶⁹。由保護國際組織(Conservation International, CI)、聯合國教育、科學及文化組織政府間海洋學委員會(Intergovernmental Oceanographic Commission of the United Nations Educational, Scientific, and Cultural Organization, IOC-UNESCO)及國際自然保護聯盟(International Union for Conservation of Nature, IUCN)合作成立的國際藍碳倡議(The Blue Carbon Initiative)指出³⁷⁰，若藍碳要能夠被納入國際或國家政策框架，須明確證明其移除碳量能被量化並足以對氣候產生影響，且能夠被有效管理，藍碳的氣候調節價值才有可能被進一步認可。除了標準化評估計算，國際上目前對藍碳討論研究，集中在其生態系流失可能導致的溫室氣體排放，尤其在沿海生態系方面，以及如何有效減緩、復育藍碳生態系^{371,372}。

³⁶⁷ 環境資訊中心(2021) 新加坡將設以自然為本的碳權交易市場聚焦東南亞生態復育。<https://e-info.org.tw/node/231675>

³⁶⁸ DATA AND INSIGHTS-VCS Quarterly Update (2021) <https://verra.org/datainsights/data-and-insights-october-2021/>

³⁶⁹ 國際藍碳倡議組織曾就全球尺度的海岸藍碳計算評估發表指引手冊，嘗試提供標準化藍碳的碳通量和儲存量，但因受到部分區域數據缺乏、人為活動影響評估不足及海岸侵蝕等問題所限制，準確度尚有提升的空間。Howard, J. et al. (2019) Coastal Blue Carbon: Methods for assessing carbon stocks and emissions factors in mangroves, tidal salt marshes, and seagrass meadows. Conservation International, Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, International Union for Conservation of Nature. Arlington, Virginia, USA.

³⁷⁰ Isensee, K. et al. (2019) Blue carbon: Science developments of relevance to the UNFCCC.

³⁷¹ L, Donato DC, Murray BC, Crooks S, Jenkins WA, et al. (2012) Estimating Global “Blue Carbon” Emissions from Conversion and Degradation of Vegetated Coastal Ecosystems. PLOS ONE 7 (9): e43542. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0043542>

³⁷² Murray, B. C., Pendleton, L., Jenkins, W. A., Sifleet, S. (2011) Green Payments for Blue Carbon: Economic Incentives for Protecting Threatened Coastal Habitats. Nicholas Institute Report. NI R 11-04

3.2.3 我國碳匯潛能

1. 森林碳匯

森林是陸域生態系中主要的生態系統，可從空氣中吸收二氧化碳，並轉化為有機碳儲存在植物體內。因此，植樹造林與森林經營是減緩氣候變遷最具效益的方法³⁷³。「森林碳匯」是指森林吸收二氧化碳的能力，即指從空氣中清除二氧化碳的過程、活動、機制，所以森林碳匯一般是指單位時間內（如一年內）森林吸收二氧化碳的總量。我國在森林碳匯的推估上，主要依聯合國政府間氣候變化專門委員會(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)於 2006 年公布的國家溫室氣體清冊指南(2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories)所建議的計算方式，將所有森林面積納入估算，包含原有林地、新增植林及因災害減少的林地面積。因此，可從行政院農業委員會林務局第三次與第四次全國森林資源調查成果統計中，獲得林木蓄積的年生長量及森林面積增加的數據，再乘上活動係數即可得到森林碳匯數據。此外，由前述森林碳匯的推算過程亦可得知，林業部門所移除的溫室氣體是以二氧化碳為主要標的。

前言提及之《2021 年我國國家溫室氣體排放清冊報告》第六章「土地利用、土地利用變化及林業部門」中所估算的臺灣林業部門年碳移除量可知，2019 年我國林業部門碳移除量約為 21.4 MtCO₂eq/year (21,440 千公噸 CO₂eq)，且其中「林地維持林地」碳移除量占 96.1%，「其他土地轉變為林地」碳移除量占 3.9%（參見表 3.2.1 所示）。依清冊歷年推估結果，我國林業部門的碳移除量自 1990 年至 2019 年間約在 18.9~23.5 MtCO₂eq/year 範圍，整體而言僅略有增減，但趨近於穩定³⁷⁴。主要由於臺灣區域計畫法、森林法對林業用地變更與森林伐採等有所規範，且自 1992 年起亦實施禁伐天然林政策，因此林地變更為其他使用的情況極少（參見圖 3.2.2 我國自然碳匯溫室氣體移除量現況所示）。再者，2019 年我國「林地維持林地」的面積為 2,119,110 公頃，則依我國 2015 年「第四次全國

³⁷³ 陳忠義、林亨勳、王經文、王亞男(2017) 植林減碳—淺談森林的碳吸存。自然保育季刊 No.99。 https://www.tesri.gov.tw/A15_1/download1/30141/3

³⁷⁴ 施雅惠、林旻頤、陳琦玲(2021) 臺灣農業減碳作為與碳交易機制之探討。符合環境永續之作物友善管理研討會專刊 (2021 年) p74-87。

森林資源調查報告」(含事業區內及事業區外)的土地利用圖為森林基線面積，並將林地崩塌面積予以扣除，不列入林木生長面積(請見表 3.2.2 所示)。2019 年「其他土地轉變為林地」的面積為 508 公頃(請見表 3.2.3 所示)，但是經過 20 年的過渡期後，此部份面積之後會改納入林地維持林地的面積一起估算，如 1990 年的造林面積，至 2011 年時則加總至林地維持林地的面積中。

表 3.2.1 1990 年與 2019 年我國林業部門碳移除量³⁷⁵

單位：千公噸二氧化碳當量(Mt CO₂eq)

年份	林地維持林地		其他土地轉變為林地	總二氧化碳 移除量 ΔCO_2	不確定性(%)
	生物量碳移除量 (ΔCO_{2G})	生物量碳排放量 (ΔCO_{2L})	生物量碳移除量 (ΔCO_{2G})		
1990	-23,902.42	607.25	-90.75	-23,385.92	7.57
2019	-20,710.34	115.73	-845.17	-21,439.78	8.84

表 3.2.2 1990 年與 2019 年林地維持林地面積³⁷⁶

單位：公頃

林型 年份	天然針 葉林	天然 針闊葉 混淆林	天然 闊葉林	人工 針葉林	人工針 闊葉混 淆林	人工 闊葉林	木竹 混淆林	竹林	總計
1990	220,100	286,376	975,800	218,400	37,287	144,600	67,537	152,300	2,102,400
2019	202,647	116,131	1,312,722	93,232	52,335	115,442	114,127	112,474	2,119,110

表 3.2.3 1990 年與 2019 年土地轉變為林地面積³⁷⁷

單位：公頃

年份	針葉林		針闊葉混淆林		闊葉林		竹林	合計
	林業統計 面積	總面積	林業統計 面積	總面積	林業統計 面積	總面積	林業統計 面積	
1990	959	959	67	67	2,696	2,696	161	3,883
2019	102	102	0	0	406	406	0	508

³⁷⁵ 行政院環境保護署(2021) 2021 年我國國家溫室氣體排放清冊報告。

³⁷⁶ 同前揭註 375。

³⁷⁷ 同前揭註 375。

為達 2050 淨零排放，國立臺灣大學研究團隊提出我國森林碳匯潛力路徑分析³⁷⁸，就是否已納入國家清冊兩大部份，分別估算我國林業部門碳匯潛能如後。在「國家清冊計算範圍森林碳匯潛力」下，以加強森林經營行為，進行計畫性疏伐（固碳於木材中），再植林吸收碳，期可大幅度增加碳匯，另外則是將林地農作區域逐漸轉換成造林地，因此可分為路徑一至三如下：

(1) 路徑一：加強國有林經營碳匯潛力（包括竹林）

(2) 路徑二：加強私有林經營碳匯潛力（包括竹林）

(3) 路徑三：林地農作區域退農還林碳匯潛力

另外，在「未納入國家清冊計算範圍森林碳匯潛力」，擬加入新植造林、全國行道樹、校園與公園樹木以及私有住宅樹木等潛在碳匯，同時亦嘗試充分循環利用進口木質林產品，使二氧化碳長期保存在林產品中以增加碳匯量，因此再劃分出路徑四至六如下：

(4) 路徑四：新植造林碳匯潛力（每年新植 700 公頃），如海岸林

(5) 路徑五：都市林碳匯潛力（路樹、校園、公園等）

(6) 路徑六：充分循環利用進口林產品碳匯潛力（每年進口 600 萬 m³ 木質林產品）

經由上述六大路徑估算，合計約可達 5.1~8.2 MtCO₂eq/year，相較現行我國國家溫室氣體排放清冊報告對林業部門的碳匯潛力估計，可增加 23.7~38.1%（六大路徑之碳匯潛能估計值，請參見圖 3.2.4 所示）。

³⁷⁸ 邱祈榮(2021) 2050 淨零排放森林碳匯潛力路徑分析。

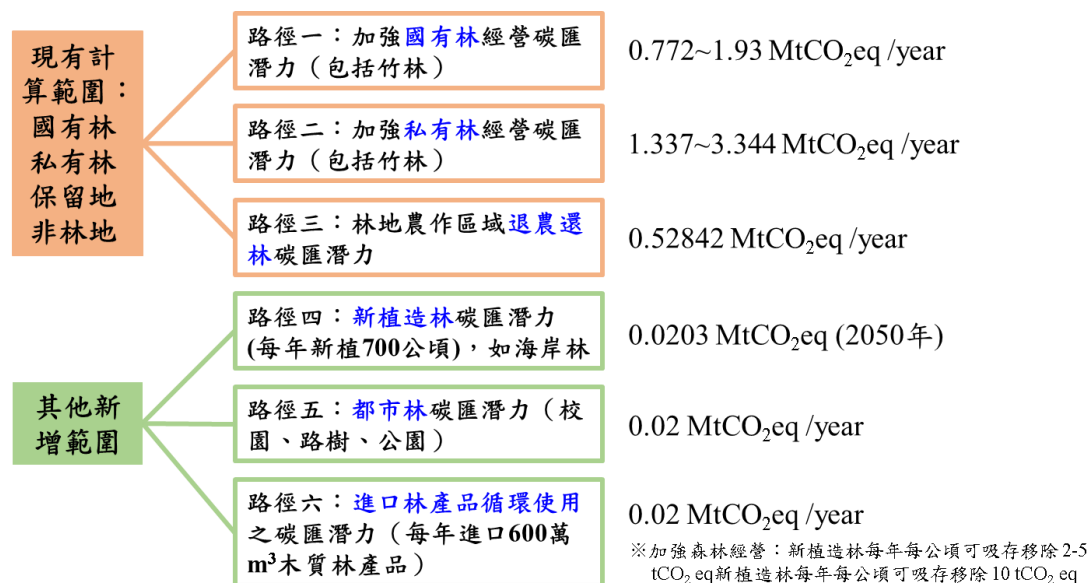


圖 3.2.4 2050 淨零排放森林碳匯潛力路徑分析³⁷⁹

2. 農業/作物/土壤碳匯

臺灣 2020 年農耕土地面積為 79.0 萬公頃³⁸⁰。對照 2004 年中解析度成像分光輻射計(moderate resolution imaging spectroradiometer, MODIS)資料³⁸¹，除去林地外，具碳匯作用的土地面積，包括農田面積 30.02 萬公頃、農田/天然植被混合地 36.15 萬公頃、草地 1.34 萬公頃、草原 3.66 萬公頃，加總為 71.17 萬公頃；故以 2020 年的 79.0 萬公頃來推估非林地且具碳匯作用的土地面積是合理的。農田或草地的淨初級生產量(net primary productivity)³⁸²，平均約在 3 公噸碳/（公頃·年）³⁸³；換算之下，臺灣農耕土地 79.0 萬公頃每年碳匯量約為 237 萬公噸碳(868.5 萬公噸 CO₂)。但須要注意的是，作物的淨初級生產量大部分被食用³⁸⁴，且農田是有碳排放的，碳排放部分另外在 5.4 節農業與廢棄物部門討論，因此農田為碳

³⁷⁹ 同前揭註 378。

³⁸⁰ 行政院全球資訊網(2022) 農業經營現況。

<https://www.ey.gov.tw/state/CD050F4E4007084B/0ededcaf-8d80-428e-96b7-7c24feb4ca0d>

³⁸¹ 胡靜予(2010) 應用 MODIS 影像數據估測台灣陸域初級生產量。

<https://hdl.handle.net/11296/tby776>

³⁸² 在一定面積及時間內，植物吸放二氧化碳的淨增加生物碳量。

³⁸³ National Library of Medicine. (2010) Spatial and seasonal characterization of net primary productivity and climate variables in southeastern China using MODIS data.

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2852544>

³⁸⁴ Naser, H.M. et al. (2019) Carbon Sequestration and Contribution of CO₂, CH₄ and N₂O Fluxes to Global Warming Potential from Paddy-Fallow Fields on Mineral Soil Beneath Peat in Central Hokkaido, Japan. <https://www.mdpi.com/2077-0472/10/1/6/htm>

匯亦或是碳源尚待研究。此外，近年針對土壤碳匯亦有「千分之四」之倡議，意即若每年可以增加千分之四的碳蓄積量於土壤表層 40 公分中，就能平衡每年因人類活動增加至大氣中的二氧化碳量，惟此倡議仍待進一步研究評估可行性及淨碳吸存量。

3. 藍碳碳匯（海草床、濕地）

(1) 以全球藍碳碳匯潛能估計我國藍碳碳匯潛力

基於標竿全球藍碳碳匯潛能依據，再依照臺灣每年碳排占全球之比例，來估算臺灣可獲得之藍碳碳匯潛力。根據 IPCC (2019)之變動氣候下之海洋與冰層特別報告³⁸⁵，認為恢復沿海植被生態系統，例如紅樹林(mangroves)、潮汐沼澤(tidal marshes)和海草床(seagrass meadows)（即沿海藍碳生態系統），可以透過增加碳吸存和儲存來緩解氣候變化，並為目前年度全球排放量的 0.5%左右（中等信度）。以 2020 年全球的二氧化碳排放量達到 34 Gt（340 億公噸）³⁸⁶，全球藍碳碳匯潛能可以達到一年 0.17 Gt（1.7 億公噸）。臺灣每年碳排(0.3 Gt)³⁸⁷占全球(34 Gt)之 0.88%，以此設定為臺灣藍碳碳匯潛能占全球比率下，初步估計臺灣的藍碳碳匯潛能最高約 1.5 MtCO₂eq/年（150 萬噸/年）。

(2) 我國藍碳碳匯潛能相關研究

內政部營建署城鄉發展分署過往陸續補助有關濕地碳匯調查計畫^{388,389}，除透過研究修正濕地碳匯功能調查標準作業程序，亦挑選自然重要濕地進行碳匯功能實地測量，並蒐整國內濕地碳匯研究，以建立濕地碳匯分布地理資訊圖資，期

³⁸⁵ IPCC (2019) Summary for policymakers. In: IPCC special report on the ocean and cryosphere in a changing climate [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. In press.

³⁸⁶ 行政院環境保護署(2020) 2020 年全球碳排放減 7%創紀錄「歸功」新冠疫情。
https://ghgregistry.epa.gov.tw/ghg_rwd/Main/Information/Information_3_detail?r_id=3058

³⁸⁷ 可參考 1.2.1 提供零碳電力為我國減碳主要挑戰中我國溫室氣體排放數據。

³⁸⁸ 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>

³⁸⁹ 內政部營建署城鄉發展分署(2011) 國家重要濕地碳匯功能調查計畫總結報告書。高苑科技大學與嘉南藥理大學執行。<https://wetland-tw.tcd.gov.tw/upload/file/20190522110235955.pdf>

以做為政府未來維護管理之重要科學依據。然受限於目前量化評估方法尚未完善、投入研究人力與資源有限，故尚未產生可供完整參考之碳移除量潛能資料，此部分有待未來更多研究資源投入以完善評估方法與數據。此外，濕地亦有排放另一溫室氣體甲烷的可能，也必須納入整體的評估。

本建議書則先綜整我國藍碳碳匯潛在面積與不同類型碳匯單位面積固碳量，研究數據如附錄 3A 及附錄 3B。

(3) 珊瑚礁生態系對於藍碳碳匯潛在的輔助效益

珊瑚礁也是我國海域重要沿岸生態系統之一³⁹⁰。但因珊瑚礁本身的固碳能力不高，並會在合成碳酸鈣的過程中釋放二氧化碳，故國際對於珊瑚礁是否可納入藍碳範疇仍有科學上的爭論，如 Ware 等人³⁹¹估算珊瑚礁鈣化過程中每年珊瑚礁釋放 0.02~0.08 Gt C 變成二氧化碳。儘管如此，仍須要注意珊瑚礁所支持的多樣性生物系統或具有間接協助固碳之效益。以加勒比海西南部之聖安德烈斯島一篇論文研究成果顯示³⁹²，熱帶氣候下，海草床通常與珊瑚礁相連接。珊瑚礁的屏障功能，可透過消散波浪、促進沉積物堆積並避免侵蝕，進而增強海草床藍色碳匯的能力，但由於白化和其他壓力因素造成的珊瑚礁結構喪失可能會導致鄰近海草床的藍碳儲存能力降低。該研究以連接海草床和珊瑚礁間梯度的藍碳來檢驗假設，發現波浪暴露較少的位點（有礁石屏障），相較暴露較多（無礁石屏障）的位點具有更高的沉積物有機碳儲量。因此，未來在投入估計藍碳碳匯之碳移除量與潛能之研究，可併同檢視我國珊瑚礁在支持藍碳碳匯可能扮演的角色。

³⁹⁰ 林幸助(2020)。氣候變遷下藍碳戰略。科技大觀園。
<https://scitechvista.nat.gov.tw/Article/c000009/detail?ID=6cb9c91e-8b10-4830-8683-7ad15cdc57a7>

³⁹¹ Ware, J. R., Smith, S. V. & Reaka-Kudla, M. L. (1992) Coral reefs: sources or sinks of atmospheric CO₂?. *Coral Reefs* 11, 127-130. <https://doi.org/10.1007/BF00255465>

³⁹² Guerra-Vargas, L. A., Gillis, L. G., Mancera-Pineda, J. E. (2020) Stronger together: Do coral reefs enhance seagrass meadows “blue carbon” potential? *Frontiers in Marine Science*.
<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmars.2020.00628/full>

3.2.4 政策建議

「負碳技術及碳匯極大化」是我國達到淨零排放目標的基本，可降低我國轉型於無碳能源之壓力，故研提政策建議如下：

1. 增加森林碳匯，包括增加林地面積（海岸林、淺山、退農還林）、加強並積極經營我國人造森林（國有林、私有林）、提高國產木材產量（固碳於木材），期在 2050 年以前加速推動前述措施以達成增加碳匯的目標，各項措施內容分述如後

A. 增加林地面積：即增加森林的覆蓋範圍，如納入海岸林營造、國有林造林及平地/山坡地造林，並考慮將林地農作使用面積，逐漸轉換成造林地；另在平地的部份，可納入全國行道樹、校園與公園樹木以及私有住宅樹木的碳匯潛力。

B. 加強並積極經營我國人造森林：以增加單位面積生物量為主要作法，含復舊造林、撫育及疏伐。並可透過林相改造方式，基於未來的氣候型態與生存環境等條件，辨識現有的物種或基因型的適應程度及引入有望適應未來的物種或基因型，長期性進行森林組成或結構的評估，以大幅度地增加碳儲量為目標，採取對應的調整與改變。

C. 提高國產木材產量：由於森林過了快速成長期後的固碳能力便會趨緩，因此須適時進行疏伐來更新森林來提高固碳效能。但疏伐後的林木亦須要善加應用，故可將木材作為家具等產品，使其長期固碳於木材中，或用做生質燃料。但目前我國製材廠多使用進口木材，對於增加我國森林碳匯並無助益，且會增加運輸過程產生的碳足跡。因此，應策略性提高國產木材產量並規劃產銷的出海口以帶動森林的更新汰舊，進而維持我國林地的碳匯能力。除此之外，對已進口的林產品應充份循環利用，不僅可延長其固碳的時間也同時減少後續的進口量，達到善用進口林產品的碳匯潛力。

2. 啟動研究新興自然碳匯（農作物碳匯、土壤碳匯、藍碳碳匯等）量化評估方法、碳移除量潛能等（2030 年以前加速投入）。方法成熟後再據以估算各式自然碳

匯容量（2030 年以後逐步應用）

除了較為成熟的森林碳匯部分外，農作物碳匯、土壤碳匯、藍碳碳匯等也是未來可以思考增加的區塊。如在農業/作物/土壤碳匯上，值得積極投入研發的項目包括：高效率肥料、生物肥料、降低土壤暴露時間之耕作方法與低碳排作物。例如若能使用高效率肥料，減少氮肥、增加生物炭使用，將堆肥在作為肥料使用之前先行沼氣利用，則可增加農田碳匯效果。減少或不翻耕，如使用覆蓋作物滾壓機，可降低土壤中生物炭的逸散。作物本身的碳排與碳匯方面，以水稻為例，其碳匯的效果很大一部分被水中微生物的甲烷排放抵銷。所以水位管理、將作物改為抗旱稻，可提升碳匯的效果。

在土壤碳匯評估方法學方面，由於植物的生態系統複雜，同樣以水稻為例，植物雖然會行光合作用固碳，但水稻田還要考慮不同品種的固碳效果、水位高低、水中微生物呼吸與甲烷排碳量、不同土質的固碳效果等；由於濕地亦會產生甲烷，濕地是淨碳匯或淨碳排同樣具有爭議。若沒有精確的評估方法，很難知道真實的情況。如不知道真實情況，更難說服農民改變農作習慣；政府可鼓勵食用低碳排的食物，基於可靠的實驗結果，讓農民親自體驗、對照不同的農作方法，才能將高碳匯農法有效地推廣。

在藍碳碳匯部分，國際上尚未有一致的潛能評估方法，因此也須先對其量化評估方法、碳移除量潛能等進行研究並同步培養相關調查研究人才，且併同檢視我國珊瑚礁在支持藍碳碳匯可能扮演的角色。以便實際評估應用藍碳作為我國自然碳匯增量手段的可行性。

3.3 傳統 CCUS（二氧化碳捕獲、再利用與封存技術）

摘要

目前的二氧化碳捕獲、再利用與封存技術，可從煙道氣中回收二氧化碳。若發展成熟，可以減少發電及大多數產業部門的直接排放。二氧化碳捕獲技術已發展多年，但再利用技術仍在起步階段。封存技術僅有注入油井一項行之有年，然我國並無大規模已確認的場域以供封存，故此問題仍須利用探勘技術來解決。直接從大氣中去除二氧化碳(Direct Air Capture, DAC)的技術更具挑戰性、除生物方法（微藻養殖）外，目前僅有少數國外試驗工廠在進行測試。此外，相關裝置系統的運作，仍有一定能耗，除成本因素外，應該考量運作所需電力來源（綠能或化石燃料）之碳排，確保系統運作之碳捕獲量高於裝置能耗之碳排，使整體能夠達成淨零/淨負排放。故綜合我國各種狀況，建議推動下列作為：

1. 強化 CCUS 技術與其他綠能選項減碳應用競合之評估，確保技術在系統運作可達成淨零/淨負排放效益。
2. 推動直接空氣捕獲(DAC)技術的發展，包括以生物及化學方法捕獲二氧化碳。

3.3.1 前言

CCUS 技術為二氧化碳捕獲、再利用與封存技術(Carbon capture, utilisation and storage)，在技術價值鏈上可以區分為捕獲(capture)、運輸(transport)、儲存(storage)與利用(use)等不同階段。傳統的 CCUS 技術主要是從大型排放源（煙道氣）捕獲二氧化碳，例如使用化石燃料或生物質作為燃料的發電或工業設施，此外，近年也開發出可以直接從大氣中捕獲二氧化碳之直接空氣捕獲技術(DAC)³⁹³。如果捕獲的二氧化碳不直接使用，則可進一步透過壓縮後，以管線、船舶、鐵路或卡車方式進行運輸，以進行一系列的應用，或注入深層地質構造中（包括枯竭

³⁹³ IEA (2021) About CCUS. <https://www.iea.org/reports/about-ccus>

的油氣田或鹽水層等)，將捕獲的二氧化碳進行永久儲存（圖 3.3.1）。

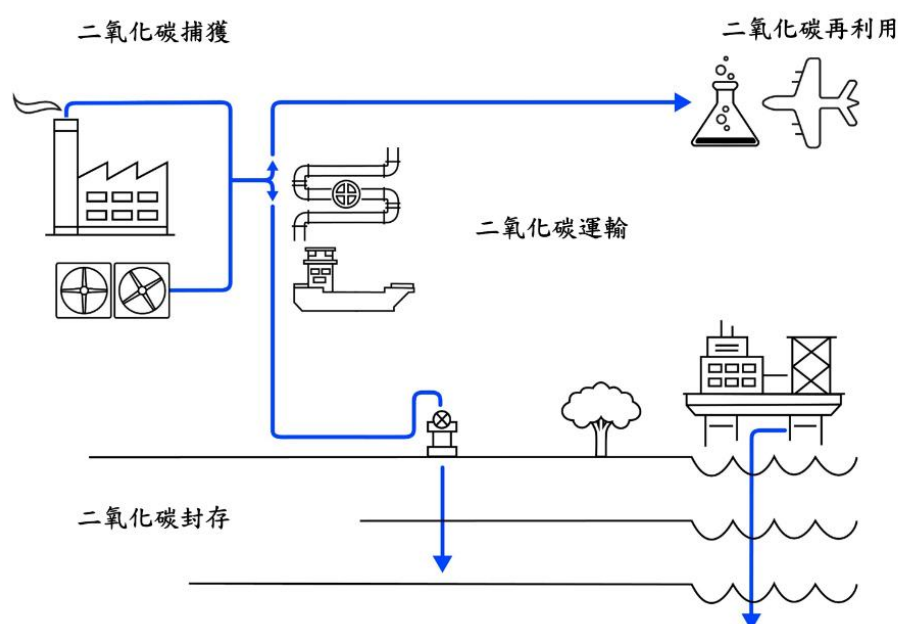


圖 3.3.1 CCUS 之技術範疇³⁹⁴

CCUS 發展數十年，已應用於某些領域，早期是以天然氣加工或化肥生產等領域為主，成本相對較低（約 15 USD/tCO₂eq），2000 年開始生產長途運輸（尤其是航空）合成燃料，但仍屬早期試驗性質。現階段在關鍵領域發展仍遲滯（水泥、鋼鐵及石化等減碳技術選擇有限之高碳排產業），僅處於發展早期階段（圖 3.3.2）。

³⁹⁴ 同前揭註 393。

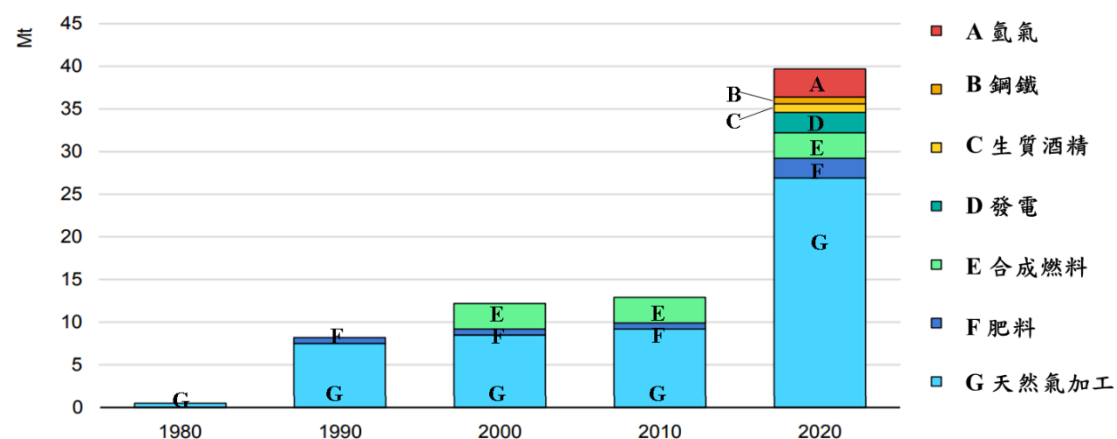


圖 3.3.2 目前全球 CCUS 設施捕獲二氧化碳來源³⁹⁵

CCUS 為全球對於 2050 年實現淨零排放所努力的一項重要技術。該技術可以減少大多數產業部門的直接排放，不管是用於既有產業和能源設施的改造上，或是直接納入新設施的發展。非傳統從化石燃料與製程捕獲之 CCUS 技術（詳見 3.4 生質碳匯與生物製程轉化利用與 6.2 直接空氣捕獲技術）亦可以直接從大氣中去除二氧化碳（如利用生質能達到二氧化碳捕獲與封存，以及直接從大氣中捕獲二氧化碳），提供大規模從氣候系統深度去除二氧化碳的可能性³⁹⁶。國際能源總署(IEA)的報告預估各類 CCUS 技術於 2050 Net Zero 之貢獻，到 2030 年可捕獲 1.67 GtCO₂eq，到了 2050 年則可上升至 7.6 GtCO₂eq，占 2050 年總體排放(30.2 GtCO₂eq)之 25%。其中，從化石燃料與製程捕獲 5.25 GtCO₂eq，從生質能捕獲 1.38 GtCO₂eq，而透過直接空氣捕獲 0.99 GtCO₂eq³⁹⁷。

³⁹⁵ IEA (2020) Energy technology perspectives, CCUS in clean energy transitions. https://iea.blob.core.windows.net/assets/181b48b4-323f-454d-96fb-0bb1889d96a9/CCUS_in_clean_energy_transitions.pdf

³⁹⁶ IEA (2020) Energy technology perspectives 2020: Special report on carbon capture utilisation and storage. <https://webstore.iea.org/download/direct/4191>.

³⁹⁷ IEA (2021) Net zero by 2050 : a roadmap for the global energy sector. https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/NetZeroBy2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector_CORR.pdf

3.3.2 國際趨勢與技術發展現況

1. 二氧化碳捕獲技術

現有二氧化碳捕獲技術發展相當多元，包括化學吸收、物理吸附、富氧分離、薄膜分離、鈣迴路、化學迴路法等³⁹⁸，新興的直接空氣捕獲技術請見 6.2 直接空氣捕獲技術，各技術的原理及技術現況與成熟度簡要整理如圖 3.3.3。可發現許多技術項目如化學吸收、物理吸附已達可商轉階段，富氧分離、薄膜分離、鈣迴路、化學迴路與直接分離則是在先導計畫或展示階段/前商業化階段(約 TRL 4~7)。直接空氣捕獲技術則是落差較大，不同地區或是技術成熟度差異大，從 TRL 3~9 都有。不過，即使許多技術已達商轉階段，但這些技術均須耗能運作，因此，在選擇適合的技術時，仍須考量併入整體系統進行運作時，能量來源的排碳量多寡，方能使系統運作能夠達成淨零/淨負排放的目標。

CO ₂ 捕獲技術	原理	技術現況與成熟度
化學吸收 (chemical absorption)	化學吸收劑(如乙醇胺化合物)與CO₂反應	已商轉 (TRL 9~11)
物理吸附 (physical adsorption)	利用CO₂與吸附劑間的吸引力	已商轉 (TRL 9~11)
富氧分離 (oxy-fuel separation)	以接近純氧燃燒並進行碳捕捉	大型原型/展示前階段 (TRL 5~7)
薄膜分離 (membrane separation)	聚合性或無機薄膜選擇性讓CO₂通過	僅天然氣加工應用達展示階段 (TRL 6~7)
鈣迴路 (Calcium looping)	氧化鈣(可再生)與CO₂結合產生碳酸鈣	先導計畫/前商業化階段 (TRL 5~6)
化學迴路 (chemical looping)	氧化金屬微粒(可還原再生)與燃料反應生成高濃度CO₂	先導計畫 (TRL 4~6)
直接分離 (direct separation)	使用特殊的煅燒爐間接加熱石灰石捕捉水泥生產碳排	先導計畫 (TRL 6)
直接空氣捕獲 (direct air capture)	直接從空氣而非特定排放源捕捉二氧化碳	先導計畫或商業化 (TRL 3~9) (不同地區成熟度具差異)

圖 3.3.3 現有二氧化碳捕獲技術類別、原理與技術發展現況^{399,400}

註：技術成熟度主要依照 IEA 分類

³⁹⁸ 同前揭註 393。

³⁹⁹ 同前揭註 393。

⁴⁰⁰ 同前揭註 395。

除了技術的成熟性以外，CCUS 在捕獲的成本上，也會因為二氧化碳濃度的高低而產生差異。一般而言，如果是工廠排放尾氣具有高濃度二氧化碳，例如天然氣加工製程，則碳捕獲成本較低(25 USD/tCO₂eq)，但如果是低濃度二氧化碳的捕獲，則捕獲成本較高，例如電力與水泥業的碳捕獲在 50 USD/tCO₂eq 以上，直接空氣捕獲則可到 300 USD/tCO₂eq 以上（圖 3.3.4）。

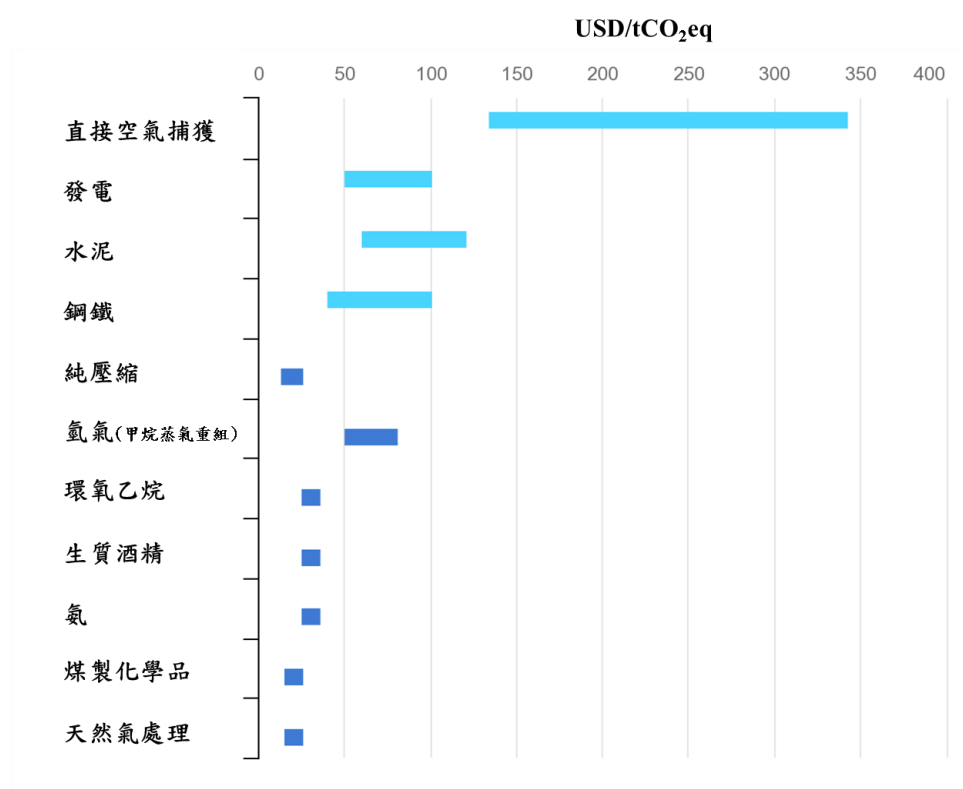


圖 3.3.4 不同技術與應用之二氧化碳捕獲成本⁴⁰¹

2. 二氧化碳運輸技術

二氧化碳運輸技術大致可以分為管線運輸、船舶運輸與卡車/鐵路運輸等。管線運輸來說成本最便宜，可以運送的量也較多，但仍須視距離和體積而定。而降低二氧化碳運輸成本可以透過匯集運輸和儲存需求開發規模經濟，如發展共享基礎設施產業群聚。或是重新利用現有的石油和天然氣管道基礎設施，亦有助於

⁴⁰¹ IEA (2021) Is carbon capture too expensive? <https://www.iea.org/commentaries/is-carbon-capture-too-expensive>

降低成本⁴⁰²。

3. 二氧化碳再利用技術

二氧化碳再利用主要可區分為直接利用與轉化利用兩類。可直接利用的量非常少，包括提供溫室使用、工業用的乾冰與電子級二氧化碳等；轉化利用則是讓二氧化碳與氫或帶氫之物質反應，轉化成化學品或能源產品。化學品如肥料（尿素）、（聚）碳酸酯、醋酸、水泥替代物，以及轉化為能源產品，如甲醇、二甲醚、碳酸二甲酯等^{403,404}。

以全球化學產品轉化利用之潛力來看，尿素、水泥替代物具有億噸及規模；甲醇則有千萬噸級；二甲醚(DME)、聚碳酸酯具有百萬噸級；碳酸二甲酯(DMC)則為十萬噸級⁴⁰⁵。以新近中國鋼鐵公司與石化廠推動鋼化聯產，希望從中國鋼鐵公司的轉爐氣或是高爐氣中捕獲一氧化碳(CO)或是二氧化碳，並透過石化廠協助與氫或帶氫之物質反應，製成甲醇、醋酸與甲烷等產品，最終希望可擴大至「商業應用」等級⁴⁰⁶。這類產品量雖大，但仍不足以解決我國碳排的問題，仍須搭配封存技術。

4. 二氧化碳封存技術

現有二氧化碳封存技術可以大致分為地質封存、礦化封存與生質能碳捕獲與封存(Bioenergy with Carbon Capture and Storage, BECCS)。國內相關研究曾經評估過我國地質封存相關之潛能量可到 953 億噸(95.3 Gt)（表 3.3.1），初估封存量潛能雖大，但數值之不確定性亦高，且須考量執行封存所需之成本與風險。我國非大陸型國家，陸域封存容量較有限，最有可能先從臺灣本島陸域中，過去四、五十年經過開採並已耗竭之油氣儲集層著手，因為在地質構造及地層流體物理化

⁴⁰² 同前揭註 395。

⁴⁰³ Srivastav, P., Schenkel, M., Rehman Mir, G. U., Berg, T. & Staats, M. (2021) Carbon capture, storage, and utilisation: Decarbonisation pathways for Singapore's Energy and Chemicals Sectors. Navigant Netherlands B.V. <https://www.nccs.gov.sg/singapores-climate-action/low-carbon-tech/>

⁴⁰⁴ 行政院國家科學委員會(2013) 第二期能源國家型科技計畫總體規劃報告書（核定版）。

⁴⁰⁵ 同前揭註 404。

⁴⁰⁶ 中國鋼鐵公司(2021) 專題：力拼減碳，中鋼推動鋼化聯產。
https://www.csc.com.tw/CSC/hr/csr/env/env_fea.htm

學性質具備較豐富的研究資料，不用特別再投入探勘研究就能直接運用於二氧化碳封存⁴⁰⁷，雖然可供封存潛能難以與海域封存相比，但開發成本低、具有優勢，短中期即可用於協助能源產業加速減排。而若要在濱海或近岸另尋合適場址進行封存，則須要設立工廠以斜井方式進行鑽探⁴⁰⁸，但挑戰為須解決民眾對於環境影響之疑慮；如果要採取海域封存（如鹽水層封存）選項，則會產生至外海探查的需求，開發風險更加提高，一方面我國缺乏相關海上探勘經驗，再者探勘成本也會大幅增加。

此外，封存場址與分布各處之排放源亦具有一定距離，若我國決定發展封存，恐須考量如何將各地排放源捕獲後二氧化碳順利運輸至封存場址，如擬透過卡車運輸恐產生更多運輸排放且成本高昂，若透過管線方式，就須要將陸地/海上管線之設置成本、土地產權協調與民眾接受度等納入考量。至於礦化封存，則尚待評估臺灣可能場域及潛能，可參考後面篇幅所述之創新案例作法。有關生質能碳捕獲與封存部分，則是反應效率仍須提高。

表 3.3.1 國內地質封存初步評估封存量（總體）⁴⁰⁹

評估單位	台灣電力公司	台灣中油公司	國立中央大學	工業技術研究院
評估範圍	台西盆地	陸域 14 個油氣構造	1. 臺北桃園區 2. 新竹苗栗區 3. 臺中彰化區 4. 雲林嘉義區 5. 高雄臺南區之濱海開放鹽水層	臺灣西部海域之前陸盆地，範圍涵蓋桃園縣至彰化縣濱海區域
推估封存量(Gt)	3.70	2.83	13.60~95.30	9.00~68.00

此外，因地質碳封存仍須探勘合適地質結構，與地熱探勘類似。若就投資地

⁴⁰⁷ 李元亨(2017) 二氧化碳地質封存（一）：地質封存。

<https://scitechvista.nat.gov.tw/Article/C000003/detail?ID=0bba508f-329c-4788-951a-f17a793f4d3b>

⁴⁰⁸ 根據科學發展(2017) 文章解釋，一般油氣鑽井工程鑽井依據井孔軌跡（井程）可概分為直井、水平井及定向井 3 大類型。定向井或是水平井主要是因為受到地面環境條件限制，或受到地下地質條件限制，所採用的鑽井方式。其中定向井為具有特定角度的斜井。

⁴⁰⁹ 同前揭註 404。

熱探勘與應用碳捕獲與封存於化石燃料發電可產生之效益進行比較，最大差別在於地熱屬於基載綠電，且為國際知名再生能源倡議計畫 RE100 所認可的再生能源類別⁴¹⁰，可以對我國核心產業如半導體產業維持供應鏈競爭力提供直接的助益，此為其一；另外，在陸域進行地熱發電探勘相較海域封存探勘，風險與成本皆可大幅降低，且在未來碳定價之助攻下，地熱探勘勢必會變得更具有成本優勢，此為其二。

5. 創新案例—礦化封存

在二氧化碳封存的創新案例上，可以注意的是 2007 年冰島 CarbFix 計畫協助 Hellisheidi 地熱電廠利用玄武岩進行碳封存的案例。該案例為將二氧化碳、地熱水等混合物灌入與地下 400~500 公尺深的玄武岩礦物質接觸，透過地熱弱酸水溶解玄武岩(basalt)中鈣與鎂離子，並讓其與二氧化碳反應轉換成安定的白色石灰岩固體而安全儲存在玄武岩地層中。該技術的特點是封存速度快，不到兩年就固化 95%，挑戰則為用水量大，封存 1 公噸的二氧化碳約需 25 公噸水^{411,412,413,414}。

3.3.3 政策建議

1. 強化 CCUS 技術與其他綠能選項減碳應用競合之評估，確保技術在系統運作可達成淨零/淨負排放效益。

CCUS 裝置的運作、運輸及封存，仍有一定能耗，除成本因素外，應該一併

⁴¹⁰ RE100 Climate Group (2021) RE100 technical criteria.
<https://www.there100.org/sites/re100/files/2021-08/RE100%20Technical%20Criteria%20Aug%202021.pdf>

⁴¹¹ 林立虹(2016) 二氧化碳封存的終極選擇—玄武岩？
https://www.gst.org.tw/cht/fridgeo_detail.php?serial=11

⁴¹² Matter, J.M., Stute, M., Snæbjörnsdóttir, S. O., Oelkers, E.H., Gislason, S.R., Aradóttir, E.S., Sigfusson, B., Gunnarsson, I., Sigurdardóttir, H., Gunnlaugsson, E., Axelsson, G., Alfredsson, H.A., Wolff-Boenisch, D., Mesfin, K., Fernandez de la Reguera Taya, D., Hall, J., Dideriksen, K. & Broecker, W.S. (2016) Rapid carbon mineralization for permanent disposal of anthropogenic carbon dioxide emissions. *Science*. 10; 352(6291):1312-4. doi: 10.1126/science.aad8132. PMID: 27284192.

⁴¹³ Zalzal, K. S. (2017) Burying the sky: Turning carbon dioxide into rock.
<https://www.earthmagazine.org/article/burying-sky-turning-carbon-dioxide-rock/>

⁴¹⁴ 蕭國鑫(2016) 玄武岩地層可迅速固定二氧化碳，提供全球碳捕集和封存技術解決方案。
https://km.twenergy.org.tw/Data/db_more?id=1255

考量 CCUS 運作所需電力來源（綠能或化石燃料）之碳排，確保碳捕獲量高於 CCUS 裝置能耗之碳排。即便 CCUS 運作能耗來自綠能，尚須考量同等綠能應用於其他途徑之減碳效益何者為佳。如同樣電力下，直接以綠能發電取代燃煤發電，相較燃煤發電額外裝設 CCUS 裝置可能具有更佳減排效益。但若為間歇性綠電過多無法馬上消耗之情境下，為避免產生棄風棄光，則可考量應用於 CCUS 運作，或透過儲能系統進行調節。

2. 推動直接空氣捕獲(DAC)技術的發展，包括以生物及化學方法捕獲二氧化碳。

目前國際部分直接空氣捕獲（化學法）已逐漸達到在無政府補貼或碳稅收抵免下仍可獲利，或是無須使用能源密集型設備將空氣吸入系統即可進行二氧化碳有效捕獲，對於顯著降低地球大氣中二氧化碳含量具有助益，然我國相關研究能量仍不足，故須透過國際合作與技術交流方式來推動空氣直接捕獲技術的發展，詳見 6.2 直接空氣捕獲一節。

而透過生物光合作用以光能還原二氧化碳，例如自然碳匯與藍碳等負碳生質等，相較於傳統 CCUS 技術或是其他負碳排技術而言，在碳封存成本上較具優勢，故亦建議透過生物方法捕獲二氧化碳來協助我國達到淨零排放目標，內容詳見 3.2 節。而利用生物法捕獲的二氧化碳，亦能進一步透過近年興起之代謝工程及合成生物學技術，再轉化成各種代謝產物或是多種化學原料或塑膠單體而產生經濟利用效益，可詳見 3.4 節生質碳匯與生物製程轉化利用以及 6.3 節生物及化學法二氧化碳利用技術之分析。

3.4 生質碳匯與生物製程轉化利用

摘要

光合作用為目前唯一可大規模自空氣中固碳之途徑，而生質原料則是從大氣中以光合作用固碳而成之料源，可視為直接大氣捕碳的一種有效產物。故可以善用閒置土地與水域空間，透過陸域光/水域光合作用產生之生質碳匯，再透過無氧裂解(pyrolysis)氣化成氫及固態生物炭。氫可發電，貢獻於基載電力，固態生物炭可封存，貢獻於碳匯，達成生質能碳捕獲與封存(BioEnergy with Carbon Capture and Storage, BECCS)；生質原料除傳統化學轉化製程，亦可透過生物製程轉化成能源產品及化學原料以取代化石油製品。故本節政策建議如下：

1. 投入陸域/水域光合作用生質碳匯（無氧裂解產氫固碳技術）之研究，並善用閒置土地與水域，運用生質能碳捕獲與封存協助達成淨零/淨負排放。
2. 轉利用生質原料及開發生物製程(bio-based processing)，以促成生物經濟(bio-economy)的發展，取代高碳排石油及傳統化工製程，以生產化學品及能源產品。此類技術目前仍無法與石化產品競爭，須以碳價反應真實成本方可獲利。

3.4.1 前言

生質原料是從大氣中以光合作用固碳而成之料源，利用自然界之光合作用大規模自空氣中固碳，而可視為直接大氣捕碳的一種有效方式。即使最終再度燃燒產生二氧化碳(CO₂)，亦為碳中和(carbon neutral)之循環。傳統上以生質原料直接燃燒作為熱能，但易造成空污，近期製成生質酒精混入汽油做為汽機車燃料，可減少石油的使用。未來可以善用閒置土地與水域空間，透過陸域光合作用或是水域光合作用產生生質碳匯，再將該等生質透過無氧裂解氣化成氫及固態生物炭。氫可發電，貢獻於基載電力，固態生物炭則可封存，貢獻於碳匯。此為生質能碳捕獲與封存之範例，也稱之為負碳技術。生質原料除傳統化學轉化製程，亦可透過生物製程轉化成替代石化油品（如航空航海用燃油）及化學原料以取代化石油

製品。本節針對相關生質生產、製程轉化與終端應用進行細部分析。



圖 3.4.1 生質碳匯與製程轉化利用價值鏈⁴¹⁵

3.4.2 陸域光合作用生質碳匯（狼尾草+無氧裂解）

就地球陸域碳循環而言，每年陸地植物透過光合作用自大氣中吸收 123 Gt C（1,230 億噸碳當量），但因植物的呼吸作用中有 60 Gt C 很快就會再度釋放至大氣中，此外，每年亦約有 60Gt C 會透過土壤微生物呼吸作用與分解作用而釋放至大氣，使陸域碳循環達到趨近動態平衡。然而受到人類活動影響（主要是化石燃料消費、產業排放與土地利用等改變），每年排放量增加 9 Gt C（等同 33 Gt CO₂），而干擾了此種動態平衡。因此，若要重新實現碳循環之平衡，一則可從降低人類活動產生的排放著手（如透過零碳電力、產業減碳等），此外亦可透過利用生質碳匯之途徑^{416,417}。而若欲自大氣固碳，陸域部分可運用之生質類型可參考 2.7 節生質能所述之來源，特別是於不適於耕作土地上種植短期收成之生質作物（如狼尾草）為具有潛力的方向。此外，由於合成生物學的進步，近年來科學家證明可以用生物科技提升光合作用效率、抗逆境特性以增加植物在單位面積上的年產量，並減少水、化學肥料、農藥之使用。此類技術若應用在能源作物（如

⁴¹⁵ 本建議書自行繪製。

⁴¹⁶ Jansson, C., Wullschleger, S. D., Kalluri, U. C. & Tuskan, G. A. (2010) Phytosequestration: Carbon biosequestration by plants and the prospects of genetic engineering, *BioScience*, 60(9):685–696, <https://doi.org/10.1525/bio.2010.60.9.6>

⁴¹⁷ 楊秋忠(2021) 【投書】土壤碳儲存：全世界都在關注氣候問題，它就是地球碳中和的救星！獨立評論@天下。 <https://opinion.cw.com.tw/blog/profile/52/article/11587>

狼尾草)，則可增加生質原料之年產量。

在狼尾草的利用上，若透過傳統固態生質利用方式以焚化爐進行發電，發電潛能 46.5 億度，可將之消化的發電裝置容量約需 1.0 GW(以發電效率 30%估算)⁴¹⁸ (詳見 2.7 節生質能)。但如果將所種植狼尾草改為透過無氧裂解技術處理，則可以讓傳統的固態生質利用方式，從碳中和進一步成為負碳。但在轉化率、氫氣利用、能源效率、生物炭分離等細部技術都還不夠成熟，故須要政府長期支持投入研發 (詳見 2.7 節生質能 Box 2.7.2)。此外，於 2.7 節生質能提到每平方公尺能產生的能量，種植生質遠小於太陽光電，但得以有效維持土壤之可耕性，故以生物技術提升種植能源作物的土地利用效率也是政府須要關注的。未來國際將限制石化原料的開採，為了國家物資不虞匱乏與戰略考量，以生物技術透過生質原料生產化學原料亦是國家科技發展須要特別著重的方向。

3.4.3 水域光合作用生質碳匯 (藍碳/藻類+無氧裂解)

除了陸域光合作用生質碳匯外，水域光合作用生質碳匯亦為負碳科技之潛力選項。例如以藻類而言，是水域生質原料之一，由於其獨特的特性，被認為是最有前途的生物燃料來源之一。它們會積累可轉化為生物燃料之脂質(lipids)，快速增殖，具有從大氣中封存二氧化碳的能力，且生長不須要用到農地或淡水，無高耗水量問題，相較陸域光合作用的生質碳匯，不會產生跟農地競爭之優點，且完整生物體都可用於轉換生物燃料。若以廢水處理過程伴隨藻類養殖也是一種提供永續再生生質的途徑，不用提供藻類養殖所需的大量淡水而可省水，是一種環境友善的過程⁴¹⁹。若使用畜牧廢水進行養殖，亦可有效降低廢水中之化學需氧量(COD)而達到水質淨化目的⁴²⁰。

⁴¹⁸ 粗估熱值 9000 MJ/t、發電效率 30%換算： $1.2409 \times 10^9 \text{ t} \times 9000 \text{ MJ/t} \times 0.2778 \text{ kWh/MJ} \times 30\% = 9.31 \times 10^9 \text{ kWh}$ 。以電廠一年有 200 天運轉換算： $9.31 \times 10^9 \text{ kWh} / 200 \text{ 天} / (24 \text{ h/天}) = 1.94 \text{ GW}$

⁴¹⁹ e Silva, F. V. & Monteggia, L. O. (2015) Pyrolysis of algal biomass obtained from high-rate algae ponds applied to wastewater treatment. Front. Energy Res. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2015.00031>

⁴²⁰ 陳采郁、林志生(2013) 利用畜牧廢水進行微藻養殖以提升微藻生物質及油脂產量。 <https://ir.nctu.edu.tw/handle/11536/75288>

然而，針對海洋及沿海生態系的碳匯（藍碳碳匯, blue carbon）潛能尚在研究階段，包括濕地（包含鹽沼(salt marshes)與紅樹林(mangroves)）與海草床，希望透過其從大氣中捕獲二氧化碳，並將其儲存在葉子、莖和土壤中，因而儲存在沿海或海洋生態系統中。且如 3.2 節自然碳匯一節所提，國際上還未有一致的潛能評估方法⁴²¹。因此，若藍碳要能夠被納入國際或國家政策框架，須明確證明其移除碳量能被量化並足以對氣候產生影響，且能夠被有效管理，藍碳的氣候調節價值才有可能被進一步認可。

目前評估海洋相關負排放技術潛力之研究提出，如果考慮到面積、水和養分需求，初步結論認為大型藻類（海藻）的 BECCS 可能是比陸域木質生質能源作物為更好的長期選擇，因為可達到更高的生產力、不須使用淡水以及若能開發出高效的養分回收系統下，可有較低養分需求。然而，短期內可行性不高，主要是因此種方法仍未得到大規模的驗證，可能需要十年或更長時間研究來證明其潛能、成本效益和安全性等。其成本效益（根據單一研究估計）初估很高，以海洋生物質為燃料的 BECCS，去除成本為 26 USD/t CO₂eq。

此外，將這些藻類用於生產長壽命產品像是塑膠，可以替代傳統石化製程生產產品的碳排放。而若透過如無氧裂解方式對於水域光合作用生質碳匯進行處理，一方面產氫可以用於燃燒發電，所產生的固態生物碳亦可當作生物炭使用促進碳固存，且可同時用於提高土壤肥力⁴²²。

3.4.4 生物製程轉化利用為能源及化學品(Bioenergy and biochemicals)

石化產業現有生產過程主要依賴原油為原料，再往下游產製輕油、生產大宗石化原料與最終製成塑膠製品。碳源雖然被留在製品中，但製造過程中常需高溫高壓的反應條件，且產品消費使用後進行焚燒時，仍會有大量碳排釋放到空氣中，

⁴²¹ 同前揭註 369。

⁴²² Gattuso, J. P., Williamson, P., Duarte, C. M. & Magnan, A. K. (2021) The potential for ocean-based climate action: negative emissions technologies and beyond.
<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fclim.2020.575716/full>

故須要有低碳或無碳的原材料替代傳統石化原材料來源，方能對於降低碳排有所助益⁴²³。

為解決上述問題，透過生物光合作用以光能還原二氧化碳，轉化為生質原料後，再利用生物製程取代高碳排之石油及傳統化工製程以生產大宗化學品及航空燃油為國際趨勢。此領域雖已在學界研發多年但仍需數年持續投資，但我國業界尚待起步。過去國外成功的案例包括 1,3-PDO、1,4-BDO、lactic acid、ethylene、PLA、1-Butanol、isobutanol、succinic acid 等。近年進一步開發 terephthalic acid、ethylene glycol、diacids、diamines 等塑膠單體並製成生物基質塑膠(bio-based plastics)^{424,425,426,427,428}。

最初生質原料以糖為主，研發以糖為原料生產各項化學品之生物製程，後可再則開發以纖維素為原料取代糖之技術，未來生質原料可進口、生物製程可輸出，此外，以甲烷（天然氣及掩埋產氣之主成份）或甲醇為原料，並開發生物製程將甲烷或甲醇轉化為其他化工原料亦是值得努力之方向⁴²⁹。

過去生物製程主要應用在生產食品添加劑（如：味精）、飼料（如：胺基酸）及抗生素為主。近年由於代謝工程及合成生物學的進展，已能以基因編輯技術將微生物改造成可生產各種化學品之細胞工廠。此類技術國內已有良好基礎，並在數項領先世界，惟研發仍限於學研界。國內化工業界，普遍缺乏生技方面的基礎，且國內生技人才也多投入醫藥研發；若欲解決石化業高碳排之問題，國內產官學研各界須合力發展特定化學品之生物製程，以代謝工程及合成生物學技術，取代

⁴²³ 請參見 4.4 石化業文稿內容。

⁴²⁴ Atsumi, S., Hanai, T. & Liao, J.C. (2008) Non-Fermentative Pathways for Synthesis of Branched-Chain Higher Alcohols as Biofuels, *Nature*, 451:86-89

⁴²⁵ Atsumi, S., Higashide, W. & Liao, J.C. (2009) Direct recycling of carbon dioxide to isobutyraldehyde using photosynthesis, *Nature Biotechnol*, 27, 1177-1180. <https://doi.org/10.1038/nbt.1586>

⁴²⁶ Lan, E.I. & Liao, J.C. (2011) Metabolic engineering of cyanobacteria for 1-butanol production from carbon dioxide. *Metab Eng*. 13(4):353-63.

⁴²⁷ Felnagle, E.A.; Chaubey, A., Noey, E. L., Houk, K. N. & Liao J.C. (2012) Engineering synthetic recursive pathways to generate non-natural small molecules. *Nature Chem Biol*. 8(6):518-26

⁴²⁸ Yu, H., Li, X., Duchoud, F., Chuang, D. S. & Liao J.C. (2018) Augmenting the Calvin–Benson–Bassham cycle by a synthetic malyl-CoA-glycerate carbon fixation pathway. *Nat Commun* 9, 2008. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04417-z>

⁴²⁹ Chen, F.Y-H., Jung, H. W., Tsuei, C.Y. & Liao, J.C. (2020) Converting *Escherichia coli* to a synthetic methylotroph growing solely on methanol. *Cell*, 182, 933-946. doi: 10.1016/j.cell.2020.07.010

傳統化工製程及石化原料。整體而言，我國短期仍可以高單價之食品添加劑，染料、香料等為研發目標，雖量小不足以減碳至淨零排放，卻可孕育工業生技，接力來達成 2050 淨零排放目標。

3.4.5 政策建議

1. 投入陸域/水域光合作用生質碳匯（透過無氧裂解產氫固碳技術）之研究，並善用閒置土地與水域，運用生質能碳捕獲與封存(BioEnergy with Carbon Capture and Storage, BECCS)協助達成淨零/淨負排放

光合作用為目前唯一可大規模自空氣中固碳之途徑，應善用閒置土地與水域空間，透過陸域/水域光合作用生產生質，並將其透過無氧裂解氣化成氫及固態生物炭，氫可發電貢獻於基載電力，固態生物炭可封存貢獻於碳匯。因此，可在產生生質能源的同時進行碳捕獲封存，這個方法也可以透過生質連續生長固碳，與後續減碳應用的循環過程，來協助達成淨零/淨負排放效益。

2. 轉利用生質原料及開發生物製程(bio-based processing)，以促成生物經濟(bio-economy)的發展，取代高碳排石油及傳統化工製程，以生產化學品及能源產品

石化產業現有生產過程與產品消費使用仍會有大量碳排釋放到空氣中，因此須要有低碳或無碳的原材料替代傳統石化原材料來源，方能對於降低碳排有所助益。若轉利用生質原料與昇發生物製程，如新興之代謝工程及合成生物學技術，取代高碳排之石油及傳統化工製程以生產化學品及能源，應可達到大幅減碳的目的。

3.5 小結

我國零碳電力布建仍須相當時程方能大幅提升，且部分產業製程較難依靠零碳電力來降低碳排。為達成我國 2050 淨零排放目標，仍須要針對化石燃料發電設施與工廠設施等大型排放源之煙道氣應用碳捕獲、封存與再利用技術使現有的排放極小化，並透過可從空氣中直接去除二氧化碳的「負排放技術」（又稱負碳科技），將二氧化碳自大氣中移除，以協助達成我國 2050 淨零排放甚至淨負排放的效益。

本章從三大策略來探討具有潛力可以投入的科技面向，包括天然解決方案、技術解決方案與天然解決方案複合新技術解決方案，其他負碳技術請見附錄 3C。

以**天然解決方案**而言，因自然碳匯因在氣候變遷減緩中扮演以自然為本的解決方案角色，成本較低且具潛在多元環境與社會經濟效益，故建議要透過增加森林碳匯、積極經營我國人造森林，與啟動研究新興自然碳匯（農作物碳匯、土壤碳匯、藍碳碳匯等）量化評估方法、碳移除量潛能並估算各式自然碳匯容量為主要推動方向。

以**技術解決方案**【如碳捕獲、封存及再利用(CCUS)】而言，本建議書建議強化 CCUS 技術與其他綠能選項減碳應用競合之評估，確保技術在系統運作可達成淨負碳排最佳效益。此外，亦要推動直接空氣捕獲(DAC)技術的發展（詳見 6.2 節），包括以生物及化學方法捕獲二氧化碳。

以**複合解決方案**而言，則是建議投入陸域/水域光合作用生質碳匯（透過無氧裂解產氫固碳技術）之研究，並善用閒置土地與水域，運用生質能碳捕獲與封存(BECCS)協助達成負碳排放，並可搭配轉利用生質原料及研發生物製程，以促成生物經濟的發展，取代高碳排之石油及傳統化工製程，生產化學品及能源產品。