



# 國際負碳技術發展概況

尤晴韻・陳映蓉

在世界邁向淨零排放的道路上，除電氣化、氫能與永續生質能源之外，碳捕獲、再利用與封存是唯一能夠直接減少及移除關鍵部門的二氧化碳排放，以平衡無法避免的碳排放量，這亦是淨零排放的關鍵目標。台灣未來除透過大規模增加再生能源使用外，若借鏡國際CCUS與CDR技術商業化運作實績，且逐步完善相關規範與配套措施，導入負碳技術將是達到2050年淨零排放目標之助力。

全球受到氣候變遷影響甚劇，2050年達成淨零排放(Net Zero Emission)已是國際減緩氣候變遷的共識，國際能源署(International Energy Agency, IEA)於2021年5月發布「2050淨零：全球能源部門路徑圖」(Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector)報告，針對建築、運輸、工業與電力部門分別訂定減排路徑及各階段里程碑（圖1），可有助於各國規劃淨零排放路徑與推動策略。

第26屆聯合國氣候變遷會議(26<sup>th</sup> Conference of the Parties, COP26)於2021年11月13日畫下句

點，197個國家代表談判後達成格拉斯哥氣候協議(Glasgow Climate Pact)，期至本世紀末的全球氣溫升幅應低於1.5°C，並要求各國需在2022年年底前強化2030年減排目標，加速致力於逐步減少未經溫室氣體排放處理的煤電發電，並淘汰無效率的化石燃料補貼。

此外，聯合國政府間氣候變化專門委員會(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 2021年報告指出，負碳技術(Negative Emission Technologies, NETs)相對於碳排放，是將二氧化碳從大氣中移除(Carbon Dioxide

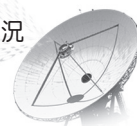
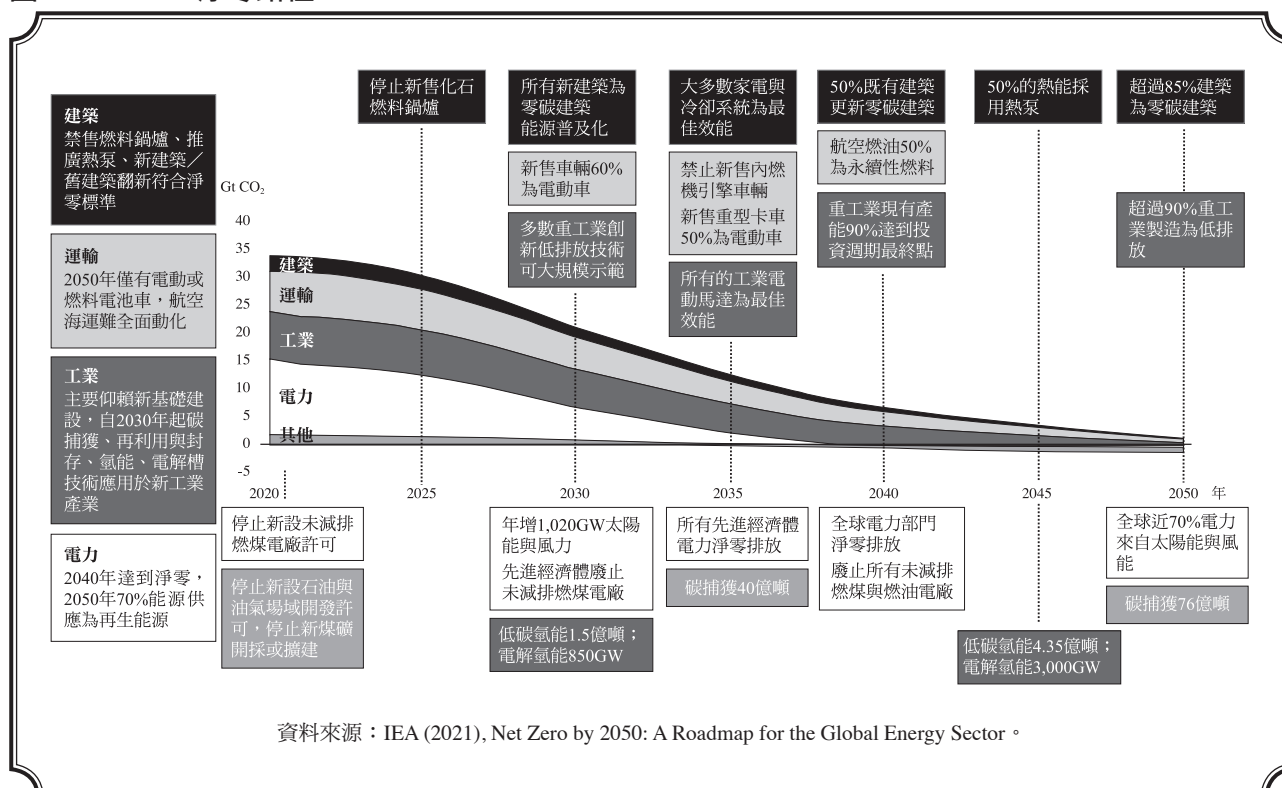


圖1 IEA 2050淨零路徑



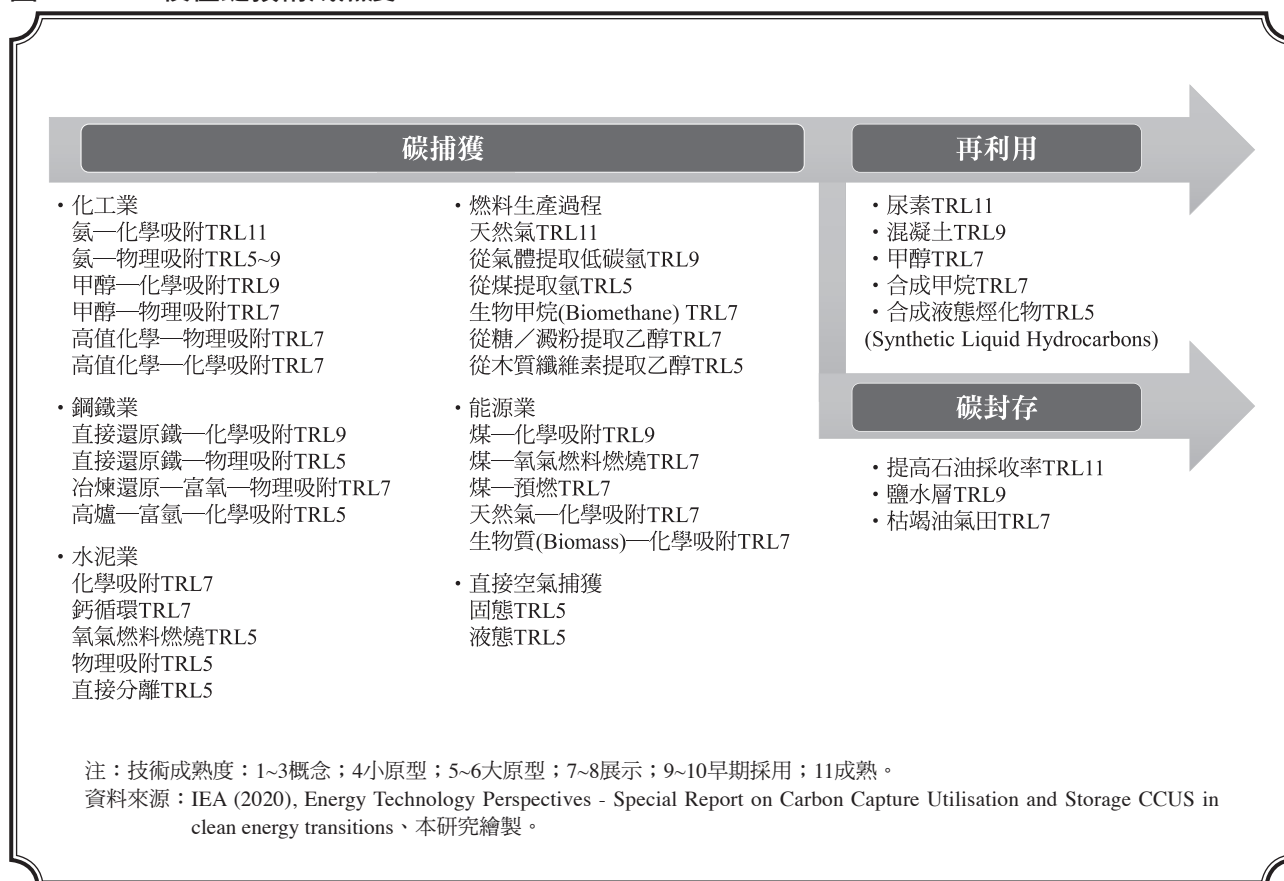
Removal, CDR)過程，有助於將溫度升幅限制在1.5°C內。本文將介紹國際目前碳捕獲、再利用與封存(Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS)，以及由大氣中之直接碳移除(CDR)技術發展概況，作為台灣導入負碳技術之參考。

碳捕獲技術包括化學吸收、物理吸收、薄膜、富氧燃燒、鈣迴路、化學循環等；二氧化碳再利用的產品主要分為燃料、化學品及建築材料等；而二氧化碳封存量，絕大部分位於陸上深層鹽水層與耗竭的油氣層中。

## 碳捕獲、再利用及封存技術

國際能源署於2020年發布能源技術展望報告(Energy Technology Perspectives)已提出在世界邁向淨零(Net-Zero)排放的道路上，除電氣化、氫能與永續生質能源之外，CCUS是唯一能夠直接減少與移除關鍵部門的二氧化碳排放，以平衡無法避免的碳排放量，這也是淨零排放的關鍵目標。IEA的報告亦指出CCUS對於潔淨能源轉型之貢獻包含：(1)處理現有能源基礎設施（如發電廠與工廠）的碳排放；(2)解決水泥、鋼鐵與化學製品生產碳排放方法；(3)支持具經濟效益的低碳氫生產；(4)從大氣中移除無法避

圖2 CCUS價值鏈技術成熟度



免或無法直接減少的二氧化碳。

由碳捕獲、再利用與碳封存的價值鏈中來看（圖2），各項目技術成熟度(Technology Readiness Level, TRL)皆在5以上，早在1996年已首次將二氧化碳注入地下，當時捕獲260多百萬噸的人為二氧化碳排放量，並封存用於提高油氣田採收率(Enhanced Oil Recovery, EOR)或鹽水層。至2020年，全球有26個運作的CCUS設施，二氧化碳捕獲與封存能力維持每年40百萬噸左右。以下將分別就碳捕獲、再利用與碳封

存介紹重點技術發展概況。

### （一）碳捕獲

碳捕獲是屬於工業程序之一，從工業程序的煙道氣中分離或捕獲二氧化碳技術已經商業化數十年，不同產業別或不同場域適合的碳捕獲技術取決於許多因素，包含碳捕獲場域初始與最終產出的二氧化碳濃度、壓力與溫度、氣流組成與流速、與原始基礎設備整合以及碳捕獲成本等。針對碳捕獲各項技術國際現況說明如下。



## 1.化學吸收

化學吸收法是目前最廣泛使用的碳捕獲方法，目前全球有22個封存場址，都是利用化學吸收捕獲二氧化碳。該技術是使用醇胺類吸收劑，與煙道氣中之二氧化碳反應而將其捕獲，TRL約為9~11，有許多小型和大型發電專案皆利用化學吸收進行碳捕獲，例如：加拿大Boundary Dam與美國的Petra Nova、加拿大殼牌石油公司Shell Quest計畫、日本COURSE50鋼鐵生產、美國Enid化肥廠、沙烏地阿拉伯Uthmaniyah二氧化碳——EOR示範計畫結合工業生產、挪威的水泥生產、挪威與荷蘭的廢棄物轉化為能源，以及英國著名的Drax計畫，為全球首例生質能發電廠碳捕獲示範，供應英國約6%電力，由1號到4號機組全燒生質物裝置容量2.6 GW，以化學吸收法每日生質物碳捕獲一噸。

## 2.物理吸收

物理吸收法是透過吸附、吸收、低溫分離或脫水和壓縮方式捕獲碳，此技術可利用固體表面（例如活性碳、氧化鋁、金屬氧化物或沸石等），或是液體溶劑（例如Selexol或Retisol），透過吸附劑捕獲碳後，碳會藉由升高溫度或壓力得以釋放。物理吸收法目前主要用於天然氣加工以及乙醇、甲醇與氫氣的生產，美國有九家大型工廠正在營運（TRL為9），包含：德州的Century工廠與Terrell天然氣加工廠、北達科他州的Great Plains合成燃料工廠、懷俄明州的Lost Cabin天然氣工廠與Shute Creek天然氣加工廠、伊利諾州工業碳捕獲與封

存專案，以及堪薩斯州Coffeyville氣化廠等。

## 3.薄膜

薄膜分離是以具有高二氧化碳選擇性的聚合物或無機裝置，使二氧化碳能夠通過，但阻擋氣流中其他氣體的屏障。在天然氣加工中，此技術TRL為6~7。目前巴西Petrobras是唯一現有的以薄膜分離碳的大型碳捕獲工廠，且從合成氣和沼氣中去除二氧化碳的薄膜已商業化。美國國家碳捕獲中心(National Carbon Capture Center, NCCC)與天然氣技術研究所、能源部國家能源技術實驗室與研究中心以及法國液空集團(Air Liquide)等合作夥伴合作，已在美國測試用於二氧化碳分離的薄膜技術。

## 4.富氧燃燒

使用含氧燃料分離或近純氧燃燒燃料技術進行碳捕獲，由於燃燒後的煙氣幾乎完全由二氧化碳與水蒸氣組成，因此可以透過脫水技術輕鬆去除後者，以獲得高純度二氧化碳。通常氧氣是透過高能耗的低溫空氣分離產生，因此降低該步驟和整個含氧燃料過程的能耗是降低碳捕獲成本的關鍵因素。此技術目前處於大型試驗計畫(Pilot Plant)或示範計畫(Demonstration)階段，TRL為5~7。澳洲Callide專案與西班牙的Compostilla的煤發電專案已經完成富氧氣燃燒燃料後捕獲所排放二氧化碳；義大利的Heidelberg Cement Colleferro工廠、奧地利的Lafarge Holcim的Retznei工廠以及德國皆有投入富氧燃燒碳捕獲技術。

## 5.鈣迴路

鈣迴路技術主要使用兩個主反應爐在高溫

下捕獲二氧化碳，在第一個反應爐中，以石灰做吸附劑，從氣流中捕獲二氧化碳，形成碳酸鈣，再將其輸送到第二個反應爐進行再生，生成石灰與純二氧化碳，並將石灰循環回第一反應爐，TRL介於5~6。國際上已經在燃煤流化床燃燒器與水泥生產中進行測試，且大部分為試驗工廠規模，例如歐洲專案正於鋼鐵業與水泥業開發鈣迴路碳捕獲技術。

## 6.化學循環

化學循環技術是以類似的兩反應爐，在第一個反應爐中，以金屬小顆粒（例如鐵或錳）用於結合空氣中的氧氣以形成金屬氧化物，再將其傳輸到第二個反應爐中，與燃料反應產生能量並濃縮二氧化碳，再生金屬的還原形式，最後再將金屬循環回到第一反應爐。目前國際上有多個學術界、研究機構與電力部門等單位已經開發出化學循環技術，約有35個示範專案，TRL為4~6。

### （二）再利用

IEA 2020年報告指出全球每年約230百萬噸的二氧化碳再利用，最大再利用行業為化肥產業，每年以125百萬噸的二氧化碳作為尿素生產原料，其次為石油與天然氣產業，每年再用量約為70~80百萬噸，二氧化碳其他商業用途則包括食品與飲料生產、冷卻、水處理與溫室用於刺激植物生長等。依IEA 2020年報告將二氧化碳的產品主要分為燃料、化學品及建築材料等三類，說明如下。

#### 1.燃料

二氧化碳中的碳可用於將氫轉化為合成燃料

料，與氣態或液態化石燃料一樣易於處理與使用的狀態。在可獲得低成本再生能源與二氧化碳的情況下，這種燃料的生產模式具經濟成本可負擔性。目前營運中的最大工廠是位於冰島的George Olah工廠，每年使用再生電力產生的氫氣，將約5,600噸二氧化碳轉化為甲醇。

#### 2.化學品

在需要碳才能提供其結構與性能的化學品生產中，二氧化碳中的碳可以用作化石燃料的替代品，包括聚合物與主要化學物質（例如乙烯和甲醇），它們是生產一系列最終用途化學物質的基礎。德國的Covestro工廠年產約5,000噸聚合物，二氧化碳最多可替代該過程中20%的化石原料使用。

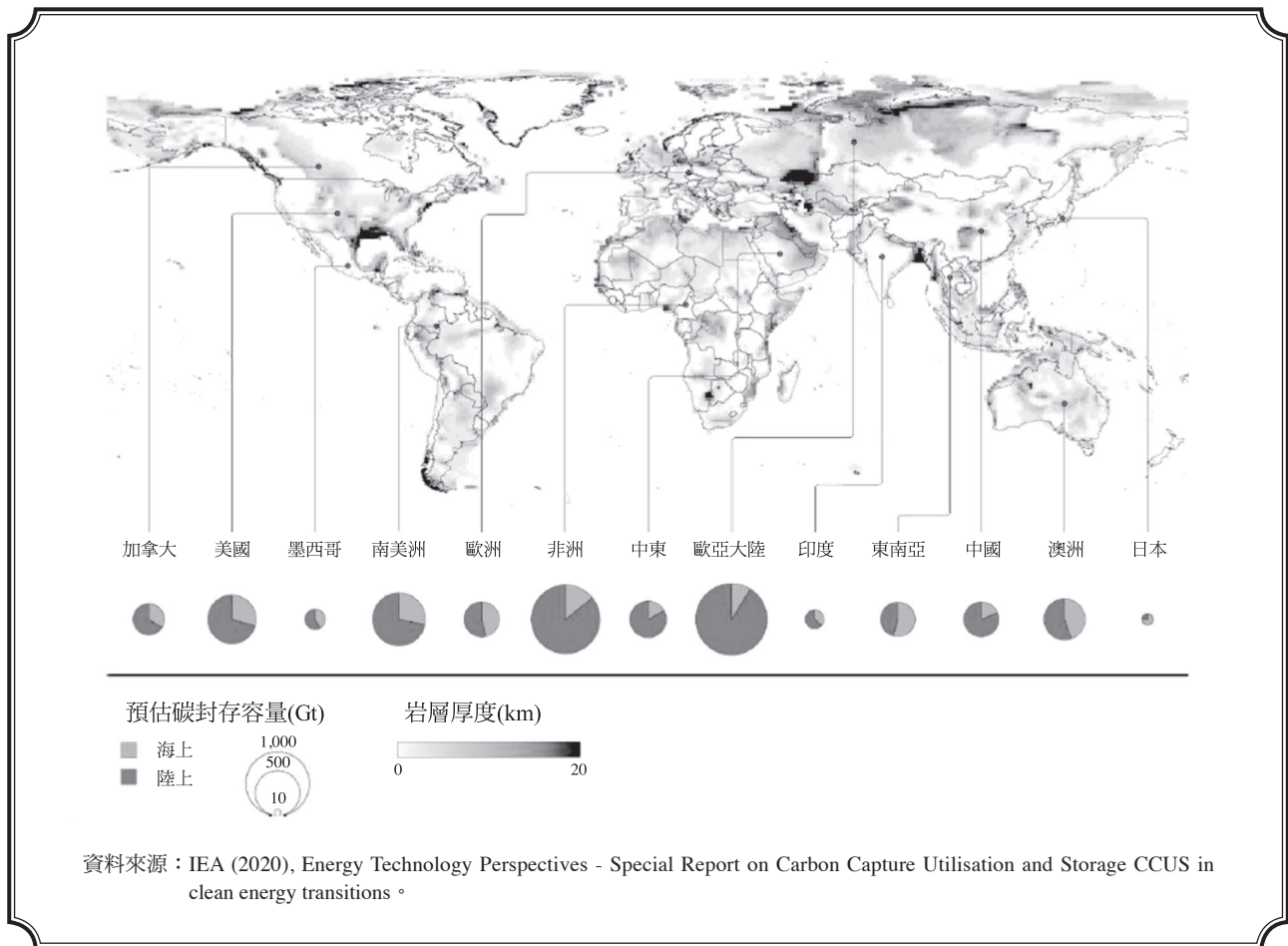
#### 3.建築材料

二氧化碳亦可用於建築材料的生產中，以代替混凝土中的水，該技術稱為固化二氧化碳，或用作其成分（如水泥和建築骨架）的原料。二氧化碳與礦物質反應形成碳酸鹽，碳酸鹽是構成混凝土的碳的形式，這種轉化途徑通常不像燃料和化學物質，會有高耗能缺點，並且涉及材料中二氧化碳的永久儲存優勢。目前已有商業應用案例，例如北美的CarbonCure與Solidia公司皆有商業化二氧化碳固化技術。另外，英國公司Carbon 8為使用二氧化碳將廢料轉化為建築材料的公司之一。

然而，由於二氧化碳再利用仍有許多技術屬於初期開發階段，成本可能比傳統低碳的替代產品高得多，難以評估再利用產品相關產值，預計短期內二氧化碳再利用的產品市場仍然很



圖3 世界各地區預估二氧化碳儲存量



小，但從長期來看，確實有成長的潛力。

### （三）碳封存

碳封存是將捕獲的二氧化碳灌注到由不透水的岩石層覆蓋的多孔岩石深層地下密閉空間或岩層中的孔隙，進而封存與儲存二氧化碳，而蓋岩層扮演制止二氧化碳向上移棲的功能，可阻止二氧化碳洩漏至大氣中。目前碳封存的技術中，以深層的鹽水層與耗竭油氣層封存為最大碳封存容量。

全世界在碳封存的總體技術儲存容量尚不確定，尤其是對於仍需要進行更多實地探勘的區域，但這些區域的規模可能是很大的鹽水層，目前預估全球總碳封存容量約在80,000億噸至550,000億噸之間。不同地區的儲存可用性差異很大，目前以俄羅斯、北美和非洲的碳封存可用容量最大（圖3），且據預估，澳洲也有相當大的碳封存容量潛力。

IEA 2020年報告中預估的二氧化碳封存量，

絕大部分位於陸上深層鹽水層與耗竭的油氣層中。其中，陸上區域的碳封存量估計為60,000億噸至420,000億噸之間，海上區域的預估碳封存量，若僅考慮沿岸300公里以內、水深小於300公尺，且位於北極與南極洲以外的區域，則約20,000億噸至130,000億噸之間。

CDR分為兩大類：一是強化從大氣中碳移除的現有自然程序，另一是使用化學程序；直接空氣碳捕獲封存與生質能碳捕獲封存是當今能源部門邁向淨零排放過程中，具備碳移除最大貢獻能力的兩大途徑。

### 由大氣中之直接碳移除

CDR是指將二氧化碳從大氣中移除的程序，與碳排(Carbon Emission)相反，移除的做法或技術通常也被描述為負碳(Negative Emission)。碳移除方法可以包括基於自然的解決方案、強化自然過程或技術解決方案。基於自然的解決方案如造林(Afforestation，或稱荒地造林)與重新造林(Reforestation，或稱跡地造林)。強化自然過程包括增加土地利用的土地管理方法、透過現代耕作方法(如利用添加生物炭)與海洋施肥，將土壤中的碳含量增加，以及向海洋中添加養分以提高其吸收二氧化碳的能力。

目前CDR分為兩大類：一是強化從大氣中碳移除的現有自然程序，例如透過增加樹木、土壤或其他碳匯的吸收量；另一是使用化學程序，例如從大氣中直接捕獲二氧化碳將其儲存

在地下層等地方。各種CDR方法發展階段差異極大，有些已是成熟的農業或商業技術，而有些方法尚處於概念階段，未進行驗證或大規模試驗。直接空氣碳捕獲封存(Direct Air Capture with Carbon Storage, DACCS)與生質能碳捕獲封存(Bio-Energy with Carbon Capture and Storage, BECCS)是當今主要的碳移除技術解決方案，是能源部門向淨零排放過程中，具備碳移除最大貢獻能力的兩大途徑。

#### (一) 直接空氣碳捕獲封存

DACCS技術直接從大氣中捕獲二氧化碳以進行永久儲存，或用於食品加工或生產合成燃料。選址靈活性是DAC的優勢之一，DAC工廠可以設置於需要二氧化碳作為原料的工廠旁邊，或者位於地質封存場所的頂部，以減少運送二氧化碳的需求。DAC設施亦可以與配備CCUS的發電廠或工廠共置一處，即可就近使用現有的二氧化碳運送基礎設施。

然而，與其他二氧化碳來源相較，DAC主要缺點是環境空氣中的二氧化碳濃度明顯為低，例如工業或發電廠的煙道或集氣之間，二氧化碳很容易達到15%以上，但大氣中的二氧化碳濃度僅有約380 ppm，因此DAC不僅耗能高且價格昂貴。

目前，加拿大、歐洲和美國共有15家DAC工廠在營運，大多屬於小型示範工廠，其二氧化碳用於化學與燃料生產、飲料碳酸化或用於溫室，尚未進行於地質封存。而瑞士有兩家營運工廠將二氧化碳出售給溫室與飲料碳酸化。冰島只有一家試驗工廠，該工廠從空氣中



捕獲二氧化碳，並將其與從地熱流體中捕獲的二氧化碳混合，然後再注入地下玄武岩地層進行礦化，即轉化為礦物。另外，北美Carbon Engineering與西方石油公司合作，目前正在設計捕獲能力為每年100萬噸二氧化碳的DAC設備，主要用於EOR。

## （二）生質能碳捕獲封存

BECCS涉及從生質物轉化為能量，或係於生產材料的過程中捕獲與儲存二氧化碳，原則上，如果將生質物加工成燃料再燃燒，則該技術途徑可被視為碳中和；如果將燃燒過程中釋放的部分或全部二氧化碳捕獲並永久儲存，則屬於是負碳的。BECCS運作於基於生質物的發電廠、用於造紙的紙漿廠，用於水泥生產的窯爐以及生產生質燃料的工廠等，其技術成熟度取決於具體應用。最先進的BECCS專案是從乙醇生產或基於生質物的發電中捕獲二氧化碳，而BECCS的工業應用僅處於原型階段。目前全球有十多個設施從生物能源生產中捕獲二氧化碳。

## 結論

全球各國陸續提出2050淨零排放目標，蔡總統於2021年4月22日世界地球日宣示台灣2050年淨零轉型，由國家發展委員會跨部會籌組「淨零排放路徑專案工作組」與成立去碳能源、產業及能源效率、綠運輸及運具電氣化、負碳技術與治理等五大工作圈，評估及規劃台灣在2050年達到淨零排放目標的可能路徑。

為加速我國減碳作為與強化氣候變遷調適，

環保署於2021年10月提出預告修正《溫室氣體減量及管理法》為「氣候變遷因應法」，明訂國家溫室氣體長期減量目標為2050年溫室氣體淨零排放。未來除透過大規模增加再生能源使用外，若借鏡國際CCUS與CDR技術商業化運作實績，且逐步完善相關規範與配套措施，導入負碳技術亦可是達到2050年淨零排放目標之助力。■

（作者為台灣經濟研究院研究一所副所長、助理研究員）

## ■ 參考文獻

- 1.科技部(2021)，「綠能科技聯合研發計畫之推動與策略研究計畫」，台灣經濟研究院執行。
- 2.環保署(2021)，「溫室氣體減量及管理法修正草案總說明」。
- 3.IEA (2020), Energy Technology Perspectives - Special Report on Carbon Capture Utilisation and Storage CCUS in clean energy transitions.
- 4.IEA (2021), Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector.
- 5.IPCC (2021), Special Report: Global Warming of 1.5°C.