

臺灣推動燃煤電廠進行二氧化碳捕獲利用與封存的挑戰與因應

吳國禎^{1*} 林瑞珠² 楊秉純³

摘要

臺灣正致力於能源轉型與淨零碳排的工程，但困於地窄人稠且有高密度度及高能耗之工業部門，刻正面臨國際零碳排放及國內穩定供電的兩難。雖然政府積極推動再生能源，但受限於天然資源的關係，因此仍仰賴進口，目前燃煤發電在短、中期電力供應仍佔有一定比例；為使燃煤發電排放之二氧化碳(以下簡稱CO₂)有妥善處置方案，CO₂捕獲、利用與封存(以下簡稱CCS)成為不可或缺之技術選項，其中CO₂地質封存技術是將CO₂以超臨界狀態封存在深部地層中，從而實現永久地質封存。本文擬先評析德國、美國、日本三國的推動經驗，進而探索國內燃煤電廠推動CCS現況及面臨問題；然後再從捕獲最新技術發展與碳回收利用提出兩項技術面之建議；同時顧及臺灣推動上可能遭遇之非技術阻力，從公眾支持與配套政策方面提出具體建議。期望藉由相關分析，拋磚引玉集思廣益促使更多研究投入探討臺灣在四周環海的優勢下，透過環境評估、政策支持、最新技術、公眾溝通參與及產業資源投入下，開發適合封存場址，以作為臺灣燃煤電廠及未來發電比重增加之天然氣發電廠的CO₂去處。

關鍵詞：燃煤電廠，二氧化碳捕獲利用與封存，政策，公眾參與

1. 研究背景與臺灣推動狀況

為達成臺灣2050減碳目標¹，碳捕獲與封存(Carbon Capture and Storage, CCS)或碳捕獲、利用與封存技術(Carbon Capture, Utilization, and Storage, CCUS)²(本文以下統一簡稱為CCS)，是國際評估(Baylin-Stern and Berghout, 2021)減少火力發電廠碳排放量重要的技術手段，在臺灣

雖有反對發展CCS之意見(柯好萱，2016)，然現階段臺灣仍以火力發電為主要基載電力，而燃煤電廠佔2020年臺灣發電結構之44.95%(經濟部能源局，2021)，另依台電2020年火力發電溫室氣體排放量統計，總計排放9,267萬公噸CO₂e，其中燃煤電廠排放5,934萬公噸CO₂e，占比最高為64.0%、燃氣占33.3%及燃油占2.6%(台灣電力公司，2021)；對照2018年臺灣淨CO₂

¹ 工業技術研究院/綠能與環境研究所 業務總監

² 國立臺灣科技大學人文社會學科 特聘教授

³ 國立陽明交通大學光電學院 教授

*通訊作者，電話：035915374，E-mail: ALAN_WU@itri.org.tw

收到日期：2021年08月31日

修正日期：2021年10月12日

接受日期：2021年10月28日

¹ 我國現行溫室氣體減量及管理法(簡稱溫管法)於104年(西元2015年)7月1日由總統令公布施行)第4條明定國家溫室氣體長期減量目標為139年(西元2050年)溫室氣體排放量降為94年(西元2005年)溫室氣體排放量50%以下，並具有相關調整機制，可參酌聯合國氣候變化綱要公約與其協議或相關國際公約決議事項及國內情勢變化，作必要之調整；網址(查詢日2021/08/27)：https://ghgrule.epa.gov.tw/greenhouse/greenhouse_page/23/97。

² 為便於說明，本文有關「二氧化碳捕獲與封存」或「二氧化碳捕獲、利用與封存」，統一使用簡稱CCS，以避免讀者混淆。

排放量為26,134萬公噸CO₂e (行政院環保署, 2020a)。臺灣燃煤電廠CO₂排放量粗估占2018年臺灣淨CO₂排放量之22.7%。

除因臺灣燃煤電廠之年碳排放量高外，衡諸目前政府刻正規劃2050淨零碳排工程路徑，臺灣有六處燃煤電廠，位址集中且近海，若能以此為臺灣CCS商業規模之前導示範，則可凸顯臺灣在國際之減碳決心並從而引領產業界投入；而前述環保署2020年國家溫室氣體排放清單報告也顯示，臺灣總排放量從1990年的1.3億公噸，持續倍增至2018年的2.9億噸，而2018年臺灣人均碳排放量約是11.33公噸(行政院環保署, 2020a)。對比聯合國環境規劃署(United Nations Environment Programme, UNEP)發布《2020排放差距報告》(Emissions Gap Report 2020³)的估算，2030年各國人均碳排須小於2.1噸才能實現全球升溫幅度在1.5°C內的目標，以臺灣現況來說，相當於要減少80%之人均碳排放才能達成目標。

數項國際研究報告也指出CCS對燃煤電廠減碳之重要性；2005年政府間氣候變遷小組(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)所公布之「碳捕獲封存特別報告(IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, SRCCS⁴)」即指出CCS為因應氣候變遷最具成本效益之方式，若無此項技術，抑制全球暖化的成本將增加一倍⁵；而IPCC於2021年8月9日最新公布之氣候變遷第六次評估報告(IPCC AR6)--第一工作小組報告的最終版草案(final draft of WGI AR6)提及，除非在未來幾十年內大幅減少CO₂及其他溫室氣

體排放，否則全球暖化幅度將在21世紀超過1.5°C及2.0°C (科技部等, 2021)⁶；其次，德國看守協會(Germanwatch) (Burck *et al.*, 2020)所發布的2021氣候變遷績效指標(Climate Change Performance Index 2021, CCPI 2021)，臺灣整體國際排名倒數第五名(報告p7)；最後是國際能源總署(International Energy Agency, IEA)於2021年5月發布「全球能源部門2050年淨零碳排路徑圖」報告(Net Zero by 2050--A Roadmap for the Global Energy Sector Flagship report)指出，若全球能源要在2050年前實現淨零排放，2021年須先停止投資新的化石燃料及未設置CCS的燃煤電廠，另2030年之發達經濟體化石燃料發電均須具備CCS技術(如圖1)。

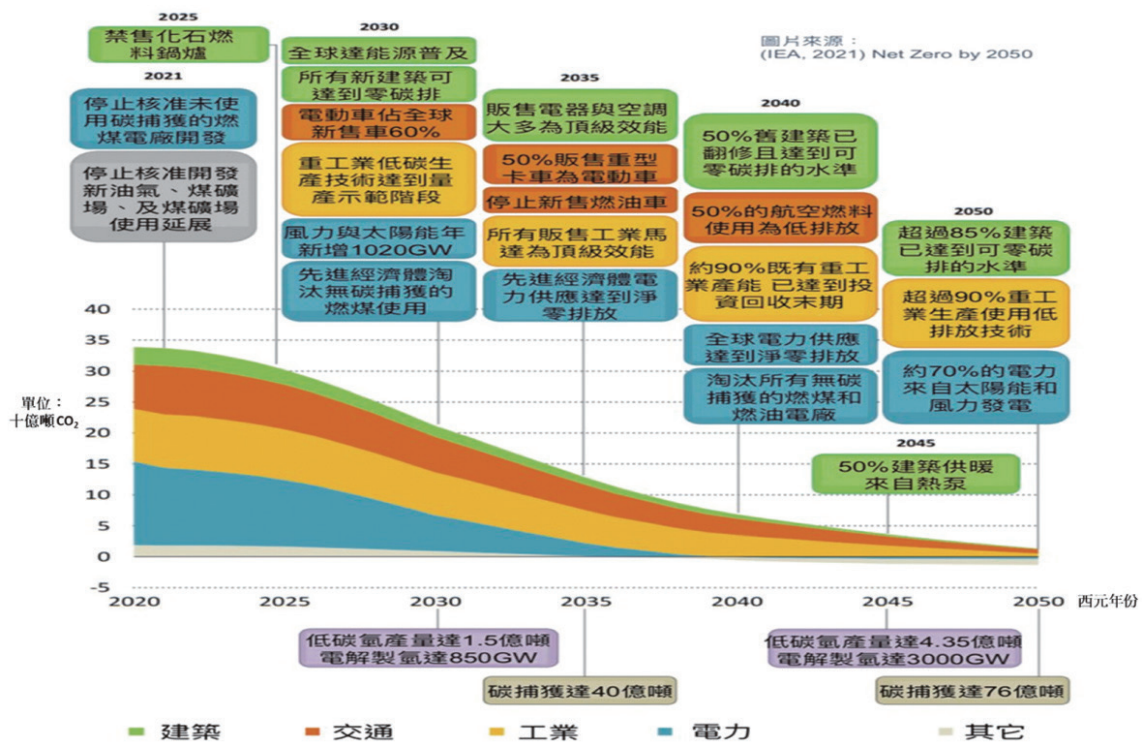
雖然燃煤電廠減碳在全球佔有重要角色，但據Pianta *et al.* (2021)以美國具人口代表性樣本研究指出：目前公眾對於CCS了解非常低，對於禁止建設新的燃煤、燃氣發電廠的政策，比對補貼CCS的政策，有更高程度的支持。另借鏡臺灣工業部門已推動之CO₂捕獲大型計畫：如2012年工業技術研究院〈簡稱工研院〉與台灣水泥股份有限公司〈簡稱台泥〉在花蓮縣和平鄉所建置之1.9 MWt鈣迴路(calcium looping)捕獲CO₂系統試驗場為例，此項技術是利用固體鈣基吸附劑捕獲CO₂的一種做法。該試驗場興建後為當時全球最大規模之CCS試驗場(柳萬霞等, 2012)，目前CO₂於水泥旋窯煙道之捕獲效率可達90%以上，總捕獲量達每小時1.0公噸，本示範案可作為臺灣燃煤電廠推動CO₂捕獲之比較案例，可提供我國燃煤電廠之相關公用及民營事業效法。

³ Figure ES.8. Per capita and absolute CO₂ consumption emissions by four global income groups for 2015, p 25, 報告下載網址(查詢日期：2021/08/27)：<https://www.unep.org/emissions-gap-report-2020>。

⁴ 2021/08/22檢索，報告下載網址(查詢日期：2021/08/27)：https://archive.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs_wholereport.pdf。

⁵ 另外，IPCC國家溫室氣體清單指南第2卷能源第5章(IPCC, 2006；2019 IPCC改進版，IPCC於2019/05/13更新溫室氣體清單方法)，其清單方法與IPCC二氧化碳捕獲和封存特別報告(IPCC, SRCCS 2005)一致；參閱Blackford *et al.* (2021), Efficient marine environmental characterisation to support monitoring of geological CO₂ storage, International Journal of Greenhouse Gas Control, Volume 109, July 2021, 103388 (IPCC, 2019)。

⁶ 相關報告之摘錄可參閱科技部、中央研究院環境變遷研究中心、交通部中央氣象局、臺灣師範大學地球科學系、國家災害防救科技中心2021.8.10聯合發布，IPCC氣候變遷第六次評估報告之科學重點摘錄與臺灣氣候變遷評析更新報告，下載網址(查詢日期：2021/08/27)：<https://www.most.gov.tw/most/attachments/8bffc553-a616-447b-845e-975cec30f3ea>。

圖1 淨零碳排路徑上的關鍵里程碑⁷ (IEA, 2021)

而在地質封存發展上，台電及中油等國營事業已累積五十年的地質探勘經驗，如中油公司利用苗栗鐵砧山作為天然氣儲氣井，另外經濟部在2010年成立之「CCS研發聯盟」研擬之CCS技術發展路徑將火力發電廠列為首要實施對象。且建議尋找合適的地下構造，評估封存的潛能，進行相關研究。中油公司曾在2011年與石油技術服務公司斯蘭普吉(Schlumberger)公司合作，透過探勘舊油氣田與生產累積之鑽井資料，評估與規劃利用耗竭油氣田灌注CO₂可行性；台電推動中部濱海地區的封存潛能評估與場址評選工作，以先導試驗來驗證目標封存地層的可注性與地質安全性。原規劃在彰工火力電廠的預定地，進行先導試驗少量CO₂注入計畫，以便量測、監測技術實施，並進行驗證。並用於評估臺西盆地南側內的鹽水層進行地質封存之合適性。按科技部能源型國家計畫

初步推估顯示(馬瑋謙，2018)：海域方面，西部濱海岩層做為封存地層，厚度高達5,000公尺以上，臺灣西北部至中部沿海，有459億噸的封存潛能；陸域方面，中油的資料顯示：14處油氣構造若改用為CO₂封存地點，預估有28億公噸的CO₂封存量。

除參考國際CCS研究進展(如：IPCC, IEA, OECD iLibrary等)與國內案例比較外，本文亦以期刊資料庫 (Science Direct)所刊載或發布之最新政策研究、示範場址、技術觀點與比較數據，作為掌握國際研究動態、挖掘政策推動障礙或關鍵議題及提出適切之解決方案，除蒐集30餘篇國際期刊進行資料梳理彙整，並以第二節所聚焦三個國家之範例，作為發展評析。另外，就臺灣現況部分亦援用政府立法訊息以及科技媒體報導做為資料參考來源。

本文之撰寫，主要係以我國CO₂捕獲、利

⁷ Net Zero by 2050--A Roadmap for the Global Energy Sector, International Energy Agency, IEA, Revised version, July 2021 (3rd revision), p20, 參見網址(查詢日期：2021/08/27)：https://iea.blob.core.windows.net/assets/beceb956-0dcf-4d73-89fe-1310e3046d68/NetZeroBy2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector_CORR.pdf；另中文圖片引用陳奕仲，全球2050能源淨零排放路徑，告訴我們什麼？2021/06/23，環境資訊中心，網址(查詢日期：2021/08/27)：<https://e-info.org.tw/node/231489>。

用與封存之推動經驗為例，借鏡美國、德國以及日本之推動策略，以供我國後續推動燃煤電廠進行CCS之參考。具體而言，以CCS之技術發展而言，近年來雖有所突破，然有成本效益之考量；以封存場址而言，則存有潛在環境傷害與社會溝通之挑戰。準此，以德國為例，除需有完善的法制基礎外，尚需有相應的科學驗證資料，以進行公眾溝通；再者，以美國之經驗而言，除了公眾溝通之外，更提供相應的經濟誘因(如，稅賦優惠或參與碳交易)，均有利於CCS計畫之成功；此外，以日本經驗為例，除有設有環評規範外，就相關案場進行監控，以避免民眾之疑慮。

2. 國際間重要發展與借鏡

參考國際能源總署(IEA)觀察CCS之發展過程及各國不同條件之報告，為解決臺灣燃煤電廠排碳問題，促進CCS商業規模化，本文擬以三個國家：德國、美國與日本為主要評析對象。選擇德國經驗主要係該國有歐盟首座CCS封存示範計畫，訂有相關示範應用法規，對CO₂利用有相對完整的產業規劃；選擇美國主要借鏡其政府CCS長期策略與近海CO₂管線之布建經驗；借鏡日本則因面對之能源困境相近，其實驗場址亦有受地震衝擊之監測資料及就CCS有較新之環境影響評估研究資料可參考，以下將分別進行說明評析。

2.1 德國

德國有四個以碳封存為目標的項目，但只有一個是將CO₂真正注入地下。即在柏林以西40公里的Ketzin試驗場，為歐盟第一個CCS封存示範計畫。從2008年到2013年向650公尺深

處岩層注入67,271噸CO₂，但到2017年因居民抗議而關閉。另德國於2012年4月13日通過了CO₂捕獲、運輸與永久封存技術示範與應用法規⁸，依該法規，主要管制對象為測試示範廠，透過相關技術評估過程，德國各州可以指定哪些地區允許封存及哪些地區不適合封存，以加強民眾對CCS的接受度。但在法規規範之申請截止(2016年)前沒有任何申請。因此，目前德國無CO₂封存項目。德國國家工程院(Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V., 簡稱Acatech)表示，德國公眾反對主要集中在碳封存上，而非捕獲和運輸，人們害怕“被描述為無法控制的封存風險”(Wettengel, 2020)，並反對在燃煤電廠中的應用計畫。

另外，為確保政府2030年後的溫室氣體減量目標得以落實，德國首部關於國家的「氣候行動法」正式於2019年12月18日通過。該法案(闕棟鴻，2020)將以巴黎協定為目標，將全球暖化限制在2°C以下，並致力達成1.5°C更積極的目標，同時在本世紀中(2050)達到溫室氣體中和；另也將溫室氣體減量目標入法：如有必要履行歐洲或國際義務，可提高減量目標，但不得調降。然依2018年經濟合作及發展組織(Organization for Economic Cooperation and Development, OECD)對德國的評估認為，2020年溫室氣體排放僅能減少約32%，確定無法達成原規劃2020年須減量40%目標；其中主因包含煤電降幅緩慢：儘管再生能源占比大幅提高已促使電力部門排放量下降，但燃煤發電仍是最大的碳排放源。

面臨CO₂封存的公眾疑慮與燃煤電廠高碳排放之雙重夾擊，德國Schmid and Hahn (2021)亦有研究轉向到CO₂捕獲利用(以下簡稱CCU)，評估到2030年德國55個CCU途徑，包括直接利用

⁸ 參見行政院環保署國家溫室氣體登錄平台各國法規概述，網址(查詢日期：2021/08/27)：<https://ghgregistry.epa.gov.tw/ccsproject/ccs9.aspx>，法規主要內容包括：1. 將封存限制在示範用途：只有當封存設施在2016年底前提交申請，才能夠得到許可，而且每個設備的年度封存量不能超過300萬噸，每年全國的二氧化碳封存總量不能超過800萬噸。2. 示範封存設施許可：需預先調查並結合環境影響評估來履行批准程序。充份結合最先進的科學技術採取預防措施來防止對人類和環境的負面影響。3. 保護其他用途：CCS計畫需確保給予地下的其他用途，例如地熱能源和能源封存的充分的保護。確保CCS不會對地下其他用途產生不利影響等。法規原文可參閱網址：<https://www.gesetze-im-internet.de/kspg/BJNR172610012.html> (查詢日期：2021/08/27)。

CO₂進行生質物種植或透過物理技術將其轉化為能源載體、化學品和無機碳酸鹽。對在技術上可用再生能源替代化石能源的每一種商品或生產過程，收集德國特定生產數據並結合其相應的CO₂轉化係數。確定每個途徑CO₂消耗的理論潛力，匯集成CO₂總理論需求，結果顯示到2030年的每年CO₂理論需求量約為 234-423 Mt之CO₂；其中將CO₂轉換為能源載體之最大潛力佔總潛力的75-80%，其次是大宗化學品和礦物碳酸鹽，占比別為8-13%和5-13% (如表1)。此項評估可為德國捕獲後CO₂利用，提供另一種重要策略思考。

從德國經驗看出，在無完整充分之科學驗證資料佐證下，德國地方政府與民眾對CO₂捕獲之封存採取保留態度，因此未來後續要推

動相關CO₂封存計畫，除法規制度建構之完整性外，也應推動相關科技研究，確認CO₂封存之科學驗證可行數據後再以公正客觀之方式傳達與公眾，同時也可朝向再利用進行探討及推動。此項就科學驗證所得之數據，進行公眾宣導以強化公眾對CCS技術認知之經驗，可作為臺灣推動參考。

2.2 美國

為避免劇烈氣候及實現美國總統拜登 (Joe Biden) 推動的2050淨零碳排放氣候政策目標，2021年6月30日白宮環境品質諮詢委員會 (Council on Environmental Quality, CEQ) 向國會提交了一份碳捕獲、利用和封存 (Carbon Capture, Utilization, and Sequestration report)

表1 德國預估2030年作為能源載體的CO₂消耗潛力[CO₂ kt/年] (Schmid and Hahn, 2021)

| 範圍 | CL-A (當前水平假設法：假設未來10年內產量沒有重大變化) | | AAGR-A (平均年增長率假設法：考量最近產量變化) | |
|---|------------------------------------|---------|--------------------------------|---------|
| | 最小值 | 最大值 | 最小值 | 最大值 |
| 途徑 | | | | |
| 合成柴油 Synthetic Diesel | 82,074 | 132,108 | 78,338 | 126,094 |
| 合成汽油 Synthetic Gasoline | 51,021 | 82,124 | 40,160 | 64,642 |
| 合成熱油(輕質) Synthetic Heating Oil (Light) | 26,704 | 42,983 | 18,171 | 29,248 |
| 合成揮發油 Synthetic Naphtha | 21,498 | 34,603 | 19,493 | 31,377 |
| 合成煤油 Synthetic Kerosene | 13,285 | 21,384 | 16,557 | 26,650 |
| 合成甲烷 Synthetic Methane | 12,392 | 12,437 | 4,100 | 4,115 |
| 合成甲醇 Synthetic Methanol | 1,243 | 2,103 | 851 | 1,441 |
| 二甲醚 Dimethylether | 870 | 1,061 | 1,438 | 1,754 |
| 合成乙醇 Synthetic Ethanol | 729 | 729 | 1,772 | 1,772 |
| 甲酸 Formic Acid | 203 | 381 | 227 | 425 |
| CO ₂ 總消耗量 | 210,018 | 329,912 | 181,108 | 287,519 |

報告⁹，該報告根據2020年12月《基於創新技術大量利用碳排放法案》(Utilizing Significant Emissions with Innovative Technologies Act, USE IT Act)授權制定。報告提及2019年美國有5,200英里的CO₂專用管道並注入5,200萬噸的CO₂進行地下油氣增產；但美國若要實現其氣候目標，未來十年應增加十倍CCS部署。而報告也提供現有許可部署CCS所要求之清單，同時也概述美國如何以有益於所有社區的方式加速碳捕獲技術和計畫的框架。其次，美國 Sustainable Development Solutions Network USA 針對六項包括電力、交通運輸、建築、工業生產、土地利用及材料等碳排放部門(幾佔美國全部CO₂排放)於2020/10/27提出America's Zero Carbon Action Plan (ZCAP¹⁰)，其中四項策略之一即為CCS；2050美國若要達成碳中和，在CCS部分預估2040年需每年封存超過240百

萬噸¹¹ CO₂ (240 Mt-CO₂)、2050年需每年封存超過500百萬噸CO₂ (500 Mt-CO₂)。另外依據2021年美國能源情報署(U.S. Energy Information Administration, EIA)¹²預估：

- (1) 2021和2022年美國天然氣發電占比為36%，低於2020年的39%，主因係天然氣價格上漲；
- (2) 煤炭發電占比從2020年的20%上升至今(2021)年的24%，但2022將降至22%；
- (3) 太陽能 and 風能發電占比將從2020年的11%上升到2022年的15%；
- (4) 西部極端乾旱條件使水力發電占比從2020年的8%下降到2021年的6%和2022年的7%。
- (5) 預計與能源相關之CO₂排放總量在2021年為48億公噸，到2022年增加到49億公噸。(如圖2)

目前美國最大的燃煤電廠CO₂捕獲計畫

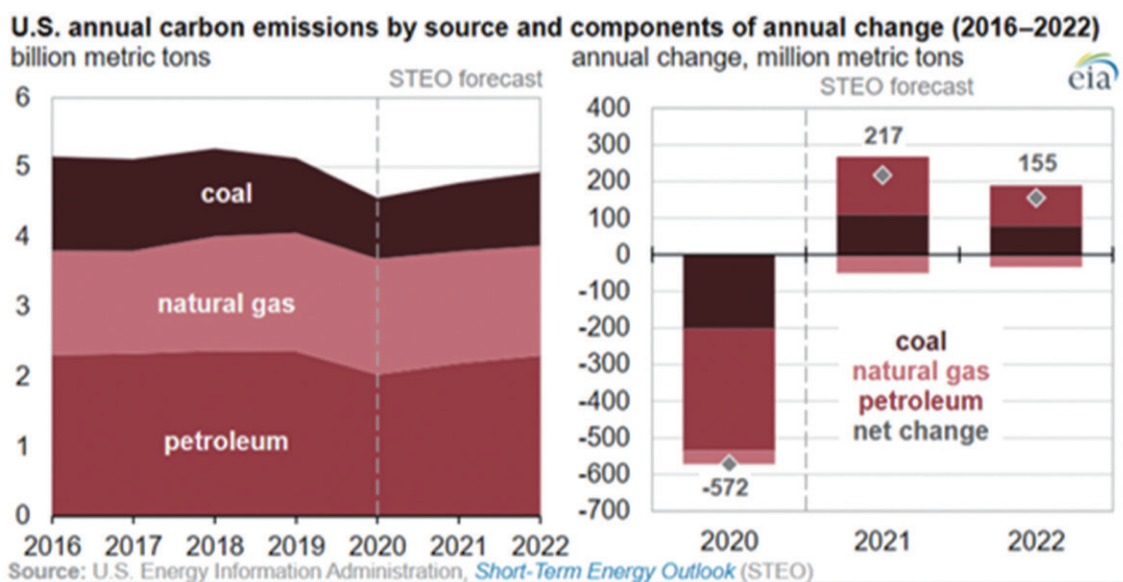


圖2 以來源成分區份美國2016-2022年碳排放量(U.S. Energy Information Administration, 2021)

⁹ 參閱美國白宮官方新聞，2021/06/30，網址(查詢日期：2021/08/27)：<https://www.whitehouse.gov/ceq/news-updates/2021/06/30/council-on-environmental-quality-delivers-report-to-congress-on-steps-to-advance-responsible-orderly-and-efficient-development-of-carbon-capture-utilization-and-sequestration/>。

¹⁰ Published by the Sustainable Development Solutions Network (SDSN) 2020., 報告下載網址(查詢日期：2021/08/27)：<https://www.unsdsn.org/Zero-Carbon-Action-Plan>。

¹¹ 參閱America's Zero Carbon Action Plan (ZCAP), p63, Table 2.1. Key benchmarks by decade and sector for achieving carbon neutrality in the United States by 2050, with quantitative indicators。

¹² Short-Term Energy Outlook (2021/07/07), U.S. Energy Information Administration, 網址(查詢日期：2021/08/27)：<https://www.eia.gov/outlooks/steo/report/>。

(Petra Nova¹³)，採用燃燒後捕獲技術，從2016年12月啟動並建造了一條80英里長的管道輸送捕獲的CO₂，該設施從處理後的煙氣中捕獲了92.4%的CO₂，用於增加West Ranch油田的產量。在前十個月內，捕獲超過1百萬噸CO₂，並將石油產量提高了1,300%。隨著技術的成熟，該計畫展示令人印象深刻的具體指標包括：

- (1) 240 MWe商業規模，每天可捕獲 5,200 短噸（一短噸等於907.18公斤）CO₂；
- (2) 在第3階段以100%的運行能力捕獲3,831,818短噸CO₂，達到每天5,200短噸的設計值；
- (3) 經由德州經濟地質局(the Bureau of Economic Geology (UT-Austin))確認99.08%的捕獲CO₂被封存，達成美國能源部99%的預設目標。

2017年Petra Nova項目(與JX Nippon合作)獲得Power Engineering頒發年度最佳計畫和

年度燃煤計畫之認可。但因受石油需求減緩及經濟衰退影響，2020年5月計畫擱置。而為進一步探討美國CCS計畫成敗關鍵，試從《Environmental Research Letters》一項最新研究(Dindi *et al.*, 2021)挖掘美國CO₂捕獲與封存計畫的商業化成敗因素，如表2所示：

另研究人員(Abdulla *et al.*, 2020)針對美國39個CCS相關計畫進行分析後發現，激勵措施和收益、信譽、資本投入成本和技術成熟度是最重要的屬性之一，由於CCS項目需要大量的前期資金，因此政策設計對於幫助CCS行業商業化至關重要。故美國於2018年擴大了第45Q稅收抵免(section 45Q of the U.S. Internal Revenue Code-- Credit for carbon oxide sequestration¹⁴，以下簡稱第45Q)，公司若在儲集層(Reservoir)中封存CO₂，將可替公司提供

表2 美國CO₂捕獲與封存計畫的商業化成敗因素(本研究整理)

| 類別 | 項目屬性 | 假設性陳述 |
|----------|-------------------------|---|
| 工程經濟學 | 廠址 | 位於棕地(棄置而可被重複使用的工業商用土地)需要較少的場址準備、較少的新基礎設施開發，並減少監管負擔。 |
| | 捕獲技術成熟度 | 部署已經大規模展示的技術可以降低技術、系統整合和計畫執行的風險。 |
| | 資金成本 | 更便宜的項目更容易融資，總體風險更小。 |
| 財務信用 | 就業影響 | 通過就業改善當地或區域經濟的項目更有可能形成有利於他們的聯盟。 |
| | 收益可信度 | 可證明之可靠收入來源或減少不確定性項目，更有可能成功。 |
| | 激勵措施可信度 | 確保更多成本占比計畫更有可能成功，無條件和預先激勵措施更可信。 |
| 地方政治特色 | 靠近人口區程度 | 在人口稀少的地區進行的項目更有可能成功，因為它們侵犯了較少的人和有組織的利益。 |
| | 機構設置 | 計畫在支持化石基礎設施和政策一貫性的司法管轄區上，易於應用政策和監管架構方面受益。 |
| | CO ₂ 處理的成本負擔 | 需要較少繁重的捕獲、封存、監控和驗證安排的計畫風險較小。 |
| 更廣泛的政治特色 | 監管挑戰 | 未遭法規刁難也無監管延誤的計畫更有可能成功。 |
| | 公眾反對 | 環境或民間社會團體支持的計劃更有可能成功。 |
| | 行業之利害關係人反對 | 產業集中化的利害關係人與開發商在戰略上保持一致的方向更有可能成功。 |

¹³ 作為美國政府清潔煤電計畫的一部分，美國能源部投入近2億美金，參考網址(查詢日期：2021/08/27)：<https://www.nrg.com/case-studies/petra-nova.html>。

¹⁴ 參見Cornell Law School- the Legal Information Institute(LII). The LII is an independently-funded project of the Cornell Law School., 網址(查詢日期：2021/08/27)：<https://www.law.cornell.edu/uscode/text/26/45Q>。

具保證的收益來源。而第45Q的碳稅收抵免條款，對於於EOR (Enhanced Oil Recovery，提高石油採收)或CCU之抵稅額為每一公噸10美元，地質封存則是每一公噸20美元，預估到2026年將分別提高至每噸35美元和50美元。2021年7月1日，美國國稅局(IRS)發布了《2021-13號稅收裁定》¹⁵(簡稱稅收裁定)，解決了1986年《國內稅收法》第45Q對安裝CO₂分離設備的甲醇工廠，其所捕獲CO₂的應用。具體而言，稅收裁定提供三個重要指導：(1) 是否出於第45Q的目的將具有雙重用途財產適當地視為碳捕獲設備；(2) 要求取得第45Q提供的抵稅額度所需的碳捕獲設備的持有程度；(3) 為確定第45Q規定的信用資格和適當比率而確定的啟用日期。

而美國迄今為止，仍將CO₂售予石油和天然氣公司為主要投資回收手段，主要方式是將CO₂注入油田以提高開採率，此稱提高石油採收(Enhanced Oil Recovery, EOR)。除向石油和天然氣公司銷售外，CO₂非屬高價商品，因此沒有政策補貼或碳稅機制之狀況下，幾乎沒有可行的商業案例來維持CCS行業所必需的規模；此外，研究(Sobhani, 2021)針對美國減少化學品、金屬、礦產以及紙漿和造紙的四個工業部門的碳排放，確認至關重要的三項關鍵技術：碳捕獲、電氣化以及零碳氫氣。研究發現，這些技術的可行性將受到當地特徵的影響，例如低成本零碳電力、碳封存資源和支持性基礎設施的可用性。該研究提出一個成功關鍵：豐富的碳封存資源和墨西哥灣沿岸CO₂管道，使碳捕獲和封存成為該地區工業設施的可行技術，

而豐富且低成本的再生電力可促進生產過程電氣化或產製零碳氫氣，可減少中西區工業設施的排放。前述脫碳策略亦須配合聯邦和州政府強有力的環境政策的支持方能盡全功。Waxman *et al.* (2021)研究也估算海灣地區建置新的CCS工業設施預期成本，雖然捕獲成本是最大成分，但研究也顯現2026年聯邦第45Q的CCS稅收激勵措施(如表3)，將促進每年8,650萬噸CO₂的捕獲和封存。而利用管道網路規模經濟更可實現巨大減排潛力(高達1.06億噸)。

從美國研究與個案經驗可知，在封存場域豐沛之美國，除公眾認知是需要透過積極溝通促進外，稅制上之財政誘因以及CO₂運輸管線之監管周延性與配置便利性也是CCS計畫成功要素之一，而區域碳市場拍賣機制更展現以市場經濟手段促進減碳之典範。這也提供了臺灣在政策研議及公眾溝通的參考。臺灣燃煤電廠雖無法將捕獲後CO₂用以做為油氣增產之途，但美國政府就CCS所增加研究、開發、示範和部署支持；加強第45Q對CCS的稅收激勵，促使其核准之信用額度更易用於難以脫碳之工業、直接空氣捕獲和現有電廠改造；推進能效技術和潔淨電力標準；確保健全有效的監管制度；確保CCS技術能以社區觀點為基礎，實現預期氣候、公共衛生和經濟目標等各項技術與非技術措施，都可作為臺灣政府的參考，尤其多數燃煤電廠屬於國營事業轄管，為緩解地方對燃煤電廠之敵意與誤解(陳耀東，2020)，推動CCS已是政府刻不容緩及積極邁向2050淨零碳排之首要工作目標。

表3 美國第45Q稅務抵免之CO₂補貼價格(美元/噸CO₂)--美國財政部(本研究整理)

| 年度 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 | 2025 | 2026 |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 地質封存 | 25.70 | 28.74 | 31.77 | 34.81 | 37.85 | 40.89 | 43.92 | 46.96 | 50.00 |
| EOR/CCU | 15.29 | 17.76 | 20.22 | 22.68 | 25.15 | 27.61 | 30.07 | 32.54 | 35.00 |

註：EOR (Enhanced Oil Recovery，提高石油採收)

¹⁵ Elizabeth L. McGinley, Don J. Lonczak, Michael A. Recchia, IRS Provides Welcome Guidance on Code Section 45Q Credits in Revenue Ruling 2021-13, 2021/07/07 Updates, <https://bracewell.com/insights/irs-provides-welcome-guidance-code-section-45q-credits-revenue-ruling-2021-13> (查詢日期：2021/08/27)。

2.3 日本

作為全球第五大碳排放者，日本面臨著來自美國拜登政府所推動的減碳50%目標壓力，日本首相菅義偉於2021年4月宣誓新的2030年減碳目標，相較於2013年至少減碳46%，而相關具體措施則依日本經產省2020年12月25日公布的碳中和目標工程表「綠色成長戰略」¹⁶；另日本經產省先前於2019年6月7日發布碳循環(carbon recycling)技術路線圖(林祥輝，2019)，用以加速CCS的實用化。除捕獲及封存技術外，CO₂利用技術又分為CO₂的直接利用和轉成化學品、燃料、礦物等技術，並設定出2030年和2050年以後成本目標；相關路徑圖(如圖3)於2021年7月進行修訂，結論提及幾項重點：

(1) 低價且不含CO₂的氫氣在許多技術發展中都很重要；

(2) 將穩定物質CO₂轉為有用物質需耗大量能源，因此利用零碳電力來源對碳回收技術很重要；

(3) 生命週期評估對碳回收技術的評估很重要，將進行分析和驗證，並做好標準化工作；

(4) 單獨回收CO₂也會降低成本。

在CCS示範驗證計畫上，日本經產省自2012年起，在「CO₂減排技術的實證試驗項目」中，於北海道苫小牧市進行碳捕獲與封存(CCS)的測試驗證(朱皓菱，2020)，並委託新能源與產業技術發展組織(New Energy and Industrial Technology Development Organization, NEDO)與日本CCS研究公司(JCCS)執行。該計畫迄今已進行九年多，Tanase *et al.* (2021)研究指出注入的CO₂未產生滲入海洋的跡象，而2018年北海道東部6.6地震矩規模(Moment magnitude, MW)對封存的CO₂沒有影響；即使

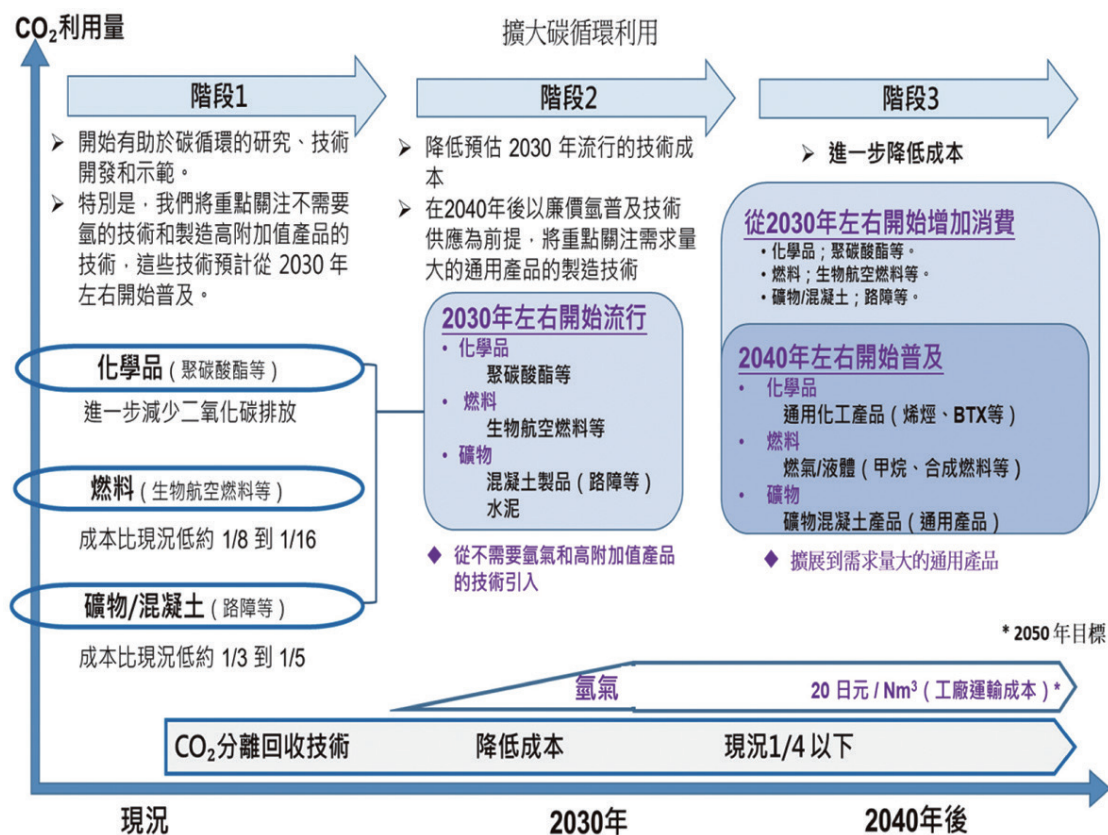


圖3 擴大碳循環利用(日本經產省，2021)

¹⁶ 日本將2030減碳目標提高兩倍，2021/06/30，新聞動態碳議題，經濟部工業局產業永續發展整合資訊網，網址(查詢日期：2021/08/27)：<https://proj.ftis.org.tw/isdn/Message/MessageView/1507?mid=123&page=1>。

相關示範實驗證實CCS之安全性與可靠性，然國際能源總署(IEA, 2007)認為CCS部署可能對經濟、社會和環境產生直接/或間接以及短、中、長期/永久影響；因此，有必要對每項CCS計畫進行如環境影響評估審查，以確認可能衍生之任何重大環境問題。政策環評(Rehhausen, 2019)¹⁷是一種類似的環境影響評估結構化方法，但會考量實施多個項目的政策和監管決策。因此，在建構CCS時，政策環評與環境影響評估都是重要的過程；Yanagi *et al.* (2019)以日本現行CCS法律是否涵蓋環境影響評估(Environmental Impact Assessment, EIA)及政策環境評估(Strategic Environmental Assessment, SEA)進行(如表4)進行分析研究，評估內容包含：減緩氣候變遷目標、營運操作流程、生命週期系統、長期管理及公眾接受度。

上述研究也指出日本在《海洋污染和海上災害預防法¹⁸》下的CCS法律並非全面架構。特別是還未制定長期管理規定，現行法規架構未採行環境影響評估和政策環評，其立法闕漏包含：未考慮關閉場址和/或安全和長期責任、現有環評法被排除及未指定專責監督審查機構等，因此相關疏漏是目前日本相關研究希望能盡速解決之議題。

在法規層面來看，日本並沒有CCS的專法¹⁹，因此適用上會依照各流程而適用不同法律²⁰。例如CO₂分離和回收設備將會適用《高壓氣體安全法》和《勞動安全衛生法》，而CO₂的海底封存則適用《海洋污染和海上災害預防法》。另一方面，由於目前仍然沒有碳封存井的相關安全與施作標準，故準用《礦業法》與《礦山安全法》。從日本經驗可知，雖有完

表4 日本學者所提CCS的SEA和EIA基本理論架構(本研究整理)

| 關鍵因素 | 環境影響評估 | 政策環境評估 |
|------|---------------------------------|--|
| 目標 | 審查CCS開發提案並提供建議 | 積極主動提供CCS發展建議 |
| 重點 | 評估擬議的CCS計畫對環境的影響 | 從經濟、環境和社會方面評估CCS政策效果、計畫和更廣泛之環境、需求及機會的CCS開發計畫。 |
| 區域 | 解決特定的CCS提案 | 衡量CCS開發範圍、區域或工業部門 |
| 評估程序 | 界定開始和結束 | 在正確時間提供資訊的持續過程 |
| 影響範圍 | 評估項目的直接影響和收益 | 檢查累積的CCS影響並確定對永續發展的影響和問題 |
| 環境保護 | 考量減少CCS衝擊和可能的CO ₂ 洩漏 | 持續被選定的環境品質水準 |
| 資訊水平 | 關注計畫的現場狀態和特定細節 | <ul style="list-style-type: none"> ● 廣泛焦點和低層次細節，以提供願景和整體架構 ● 提供對CCS累積全球影響的評論 |
| 結果 | 檢查個別CCS提案的具體環境影響 | 建議一個架構，根據該架構可檢驗CCS的影響和效益 |

¹⁷ 有關政策環評(Strategic Environmental Assessment SEA)之介紹，參閱Anke Rehhausen, The art of underperforming SEA -- Symptomatic narratives from Germany, Environmental Impact Assessment Review, Volume 78, September 2019, 106280；值得一提，本文認為德國的SEA實踐受到專家規劃和依法行政傳統的影響，相當程度上違反了國際SEA最佳實踐原則。

¹⁸ 海洋污染等及び海上災害の防止に関する法律，昭和四十五年法律第三十六号，第3條6之4款將二氧化碳定為污染物質，網址(查詢日期：2021/08/27)：https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=345AC0000000136_20201001_501AC0000000018。

¹⁹ Ministry of Economy, Trade and Industry (METI), New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO), Japan CCS Co., Ltd. (JCCS), 2020/05, Report of Tomakomai CCS Demonstration Project at 300 thousand tonnes cumulative injection (“Summary Report”) - Overview -, p13-15 (Compliance with laws and regulations & Issues).

²⁰ CO₂を回収して埋める「CCS」、実証試験を経て、いよいよ実現も間近に(後編)，經濟産業省資源エネルギー庁，網址(查詢日期：2021/08/27)：https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/ccs_tomakomai.html。

整之國家減碳與碳利用路徑規劃，然對於環境影響評估與政策環評與現有管制CO₂封存之法令，缺乏進一步整合，而該國研究者已率先意識相關問題(如缺乏長期監測義務、缺乏場地關閉規定、缺乏就違規行為之處罰與執行機制，以及對嚴重情況如CO₂洩漏的定義不明確)之重要並參考國際案例提出解決方案。日本在推動苫小牧示範驗證計畫所建立的各項評估標準或管制重點，對臺灣未來在推動CO₂封存上有重大啟發。此外日本在CO₂捕獲及再利用方面之規劃和投入，亦是我國CCS相關產業與科研單位可參考及布局之處。

3. 臺灣燃煤電廠推動CCS之挑戰與因應策略

承前所述，由於燃煤電廠占臺灣年總碳排放將近四分之一，而據Paltsev *et al.* (2021)最新研究亦指出：當工業CCS不可用時，與其他實現減碳政策之成本相比，2075年和2100年之全球減碳成本將分別高出12%和71%。面對減碳壓力與挑戰，其因應策略應一方面擴大實施現有國際CCS已商業化技術，從排放源進行煙道氣碳捕獲設施的建立。另一方面，CCS法規與監管措施的配套(包括環評與民眾接受度)應是政府要加強推動之處(張培仁等，2021)。

對於捕獲的碳後續適當封存地點的地質的調查方面，我國從2009年開始進行區域性CO₂地質封存評估，若單以臺灣西部平原區及海域的深部鹽水層封存研究顯示，臺灣西部沿海地區具有CO₂封存潛量為459億噸，並以海岸線至25公里的167億噸為最具封存潛能之區域。而據台電2009-2014年間之調查，在臺西盆地南段中新世至更新世沉積地層，在以彰濱工業區為中心，半徑30公里的範圍內，其中深度約1,500~3,000公尺區間內的砂岩富集地層，評估其CO₂

有效封存量可達137億噸，足供台電燃煤電廠長期使用(俞旗文與黃鐘，2017)。而此一封存地點因距離排放來源近，CO₂運輸成本低，而更具經濟效益。

而觀察國外案例及臺灣已建立之CO₂捕獲示範廠與平台(邱凡坪，2020)，可知目前相關案例之捕獲型式皆以燃燒後捕獲為主，然台電燃煤電廠尚未開展大規模商業化CCS之建設規劃，僅工業部門有幾個案推動包括：

- (1) 台灣水泥公司在花蓮建立的鈣迴路捕獲CO₂示範廠，主要是以天然石灰石所含碳酸鈣(CaCO₃)先經過高溫攝氏850度鍛燒產生石灰(CaO)；石灰再與工業排氣(例如電業、水泥業、鋼鐵業)中CO₂反應生成碳酸鈣，再送入鍛燒爐鍛燒將捕獲CO₂釋放，經由收集及壓縮後提供進行封存與再利用，經實驗證明，捕獲CO₂效率可達90%以上(徐恆文等，2014)；
- (2) 台塑麥寮的化學吸收法及吸附法示範平台²¹，由國立清華大學提供技術指導及相關支援，設置於公用三廠，利用化學吸收法結合超重力旋轉床技術達到捕獲每日1噸CO₂；
- (3) 中鋼化學吸收法及吸附法捕獲示範廠，以醇胺水溶液及氨水為吸收液之化學吸收技術，因再生能耗低、氨水可能由煤化學工場自製、且符合中鋼氣源組成特性與應用廢熱資源潛力高，每日可捕獲0.1噸(4公斤/h)的CO₂，旋轉床體積只需固定床的1/3(談駿嵩，2021)。

而CO₂再利用方面，臺灣於2020年9月所核定之經濟部碳循環關鍵技術開發計畫(前瞻基礎建設計畫—綠能建設)中提及：全球各國管控碳排放的方式主要包括：課徵碳稅、降低石化燃料補貼、提高石油燃料權利金、CO₂排放收費及碳定價等做法。CO₂雖然是溫室效應的主要氣體，但也是可替代石化原料的新碳源；我

²¹ 2016台塑石化股份有限公司企業社會責任報告書-2.3.2產學合作，P53，台塑石化與國立清華大學執行「每日捕獲1噸等級示範計畫」採產學合作模式辦理，2015年11月14日碳捕獲硬體系統完成施工建置，投資金額為3,580萬，統計2016年操作情形，每日碳捕獲量平均為1.26噸。

國產業界的汽電共生裝置與發電廠的煙道氣所排放的大量 CO_2 氣體，如果可以透過吸收製程將其捕獲下來，再透過觸媒轉化製程，將 CO_2 碳源合成化學品再利用(如圖4)；例如：開發烯烴類化合物與高值機能性中間體與聚合物，作為燃料與一般化學品應用，除了可降低產業對原油與關鍵化學材料進口依賴，並可引領我國化工石化產業往綠色碳源循環應用發展，同時貢獻減碳。此項計畫亦可表明我國已對 CO_2 利用投入研發資源並就CCS有更完整之國家策略思考。

過往臺灣推動燃煤電廠之碳封存經驗中，主要的技術挑戰在於，為讓 CO_2 能長時間安全的被封存，需有完整監測系統，隨時監控 CO_2 於地層變動情形，監測項目含大氣與地下水 CO_2 濃度、土壤 CO_2 通量、灌注井濃度及壓力、微震與地震等。而台電原規劃於2028完成每年一百萬噸(1 Mt)之 CO_2 捕獲及封存驗證，然以台電之推動規劃(圖5及圖6)，要達成2050之淨零碳排恐緩不濟急；另受限於陸域封存場址容易引發民眾抗爭，深部鹽水層(Deep saline aquifer)封存則成為臺灣較佳之碳封存模式。

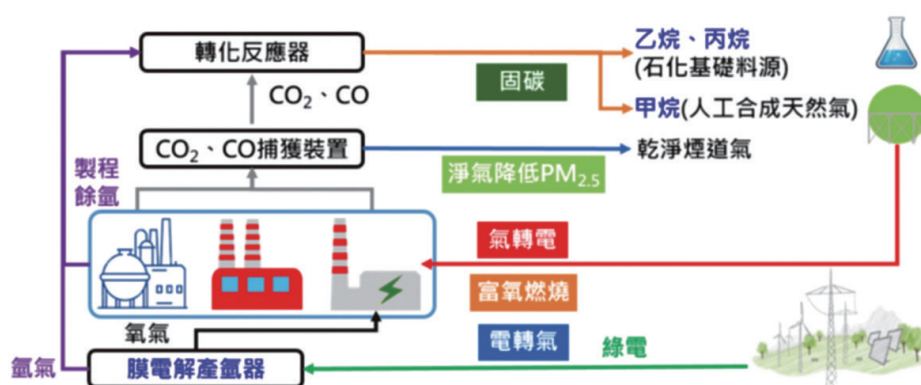


圖4 跨產業整合碳循環路徑(經濟部，2020)



圖5 台電之捕集技術推動(台電綠網，圖頂數字為民國年度)



圖6 台電之封存技術推動(台電綠網，圖頂數字為民國年度)

²² 台電綠網，碳捕集、再利用與封存技術—台電的推動歷程，網址(查詢日期：2021/08/27)：https://greennet.taipower.com.tw/Page_CCUS_action.aspx。

3.1 成本效益與政策誘因

為加速臺灣燃煤電廠及整體火力電廠之CO₂捕獲應用，除利用擴大實施現有國際CCS已商業化的成熟技術，以因應降低成本之需求外，亦可借鏡國際科研方面的投入，來進一步提升CCS的經濟效益與循環應用，試舉以下兩例國際研究動態為例：

- (1) 具低排放低成本CCS燃煤燃氣發電之Allam-Fetvedt迴路技術(簡稱A-L迴路)²³；A-L迴路是一種創新天然氣(或合成氣)發電技術，本身具有碳捕獲能力，使用氧氣作為助燃燃料，並使用CO₂作為工作流體。也就是說，該技術本身具備碳捕獲、壓縮、脫水以及消除氮氧化物和硫氧化物的能力，發電可捕獲97%的CO₂並可直接進入管道運輸，無需添加捕獲設備(惟其製造氧氣所增加之耗能，亦須納入技術評估)。目前在國內除渦輪機和燃燒室外，世界CCS機構之2020全球CCS報告(The Global CSS Institute, The Global Status of CCS Report 2020)中並提及幾乎所有的A-L迴路零件都可在現行市場購置，因此可以投入系統整合開始小規模的測試驗證；
- (2) 利用粉煤灰進行CO₂礦化(Dindi *et al.*, 2019)，減少能源消耗並降低封存成本；粉煤灰在CO₂的利用中的應用包括粉煤灰磚的生產，其中粉煤灰在成型前首先被碳酸化以降低其氧化鈣(CaO)含量，已被證明可提高灰磚性能。反應包括將CO₂氫化成化學品，例如甲醇或甲酸或碳氫燃料，因此粉煤灰是CCS價值鏈中的一種有價值的材料，可將其用於減少CO₂排放及作為捕獲CO₂所需材料。而此材料也在波蘭(Uljasz-Bocheńczyk *et al.*, 2015)使用多年，主要用於採礦、建築材料和道路建設上。

另以兩項經濟分析來說明相關成本風險對

於CCS推動影響，藉以評估財政誘因之設計因子；d'Amore *et al.* (2021)以多梯混合整數線性規劃模型(A multi-echelon mixed integer linear programming model)，對歐洲工業碳捕獲和封存供應鏈研究發現，各國去除50%工業CO₂的排放成本為60.5歐元/噸，如果禁止陸上封存，則高達81.4歐元/噸，而針對CO₂捕獲封存與利用的技術風險評估，參考以美國俄亥俄州枯竭油田三個潛在CCS項目的風險評估，Duguid *et al.* (2021)使用具有特徵、事件和過程 (Features, Events, and Processes, FEP) 的領結法(Bowtie Method)來識別和評估注儲井的長期潛在風險：包括查找和修復CO₂洩漏、環境修復、CO₂注儲中斷、補救損害和法律責任費用。每個油田的風險估計在1,300萬至6,300萬美元之間。前述研究同時支持一項重要觀點，碳稅或碳定價政策可對商業化CCS提供更新技術之更高誘因(Waxman *et al.*, 2021)，同時可促進洩漏防治技術或海事管線產業之升級或加值。

基於臺灣大部分燃煤電廠之公營性質，CO₂捕獲工程的放大驗證，需編列國家研發預算支應，面對國會與審計單位之預算監督，如何強化放大驗證之經濟效益並避免相關國家賠償之衍生風險，前述研究可作為參考；另透過產業聯盟及結合國家中長期之政策法規(如：碳交易或碳稅)，結合新興CO₂再利用之市場、產業及技術來投入CO₂捕獲廠之放大商轉，應有助於開創我國碳捕獲及碳利用產業技術提升與產業鏈垂直整合(Baylin-Stern and Berghout, 2021)。而研發投入之前期評估也須植根於國家之財政誘因設計下，以產業創新條例(民國108年7月24日修正)第9之1條第一項為例：為促進國營事業從事創新或研究發展，國營事業編列研究發展預算應達其總支出預算之一定比例；其連續二年未達一定比例者，由中央主管機關會商該國營事業主管機關，建立檢討及調

²³ The Global CSS Institute, The Global Status of CCS Report 2020--5.4 CCS IN THE POWER SECTOR, p62-63，報告中資訊更新至2020/11，報告下載網址(查詢日期：2021/08/27)：<https://www.globalccsinstitute.com/resources/global-status-report/>。

適機制。此法規已提供台電燃煤電廠編列CCS研究發展預算之法源，然台電公司2020年編列35億5,682萬6千元研發預算²⁴，立法院(張峻萍，2020)²⁵就其CO₂排放強度方面，在比較電力公司中，僅低於韓電、南非電力及德國萊茵集團，高於法國電力、日本東京電力、美國南方電力、日本關西電力、義大利電力、魁北克電力及日本中部電力，台電公司則表示將持續創造綠能友善環境，協助民間申設再生能源，且持續追蹤國際淨煤技術。前述說明可看出外在驅力²⁶對於驅動台電進行CCS之商業規模研究仍有不足，如何強化在此議題之研發動能，除抵稅外之財政誘因，是否有更靈活之監管措施，也是下一節討論重點。

3.2 潛在環境傷害與公眾支持

對於擴大燃煤電廠CCS之商業規模化推動，除研發動能與財政誘因(Baylin-Stern and Berghout, 2021)不足外，前述三國經驗亦表明公眾對捕獲後之CO₂封存接受度²⁷及監測成本亦是影響主因。封存場址遴選過程，經常遭逢社會與民眾質疑。一方面，環保團體質疑CCS是否可能會污染環境，將CO₂注入地底是否可能重新散逸至大氣，同時注入CO₂是否衝擊週邊環境，像是地下水或地下敏感區域。另一方面，民眾對於CCS技術仍然較為生疏，擔憂生活環境污染，將CCS封存場址視為嫌惡設施，鄰避效應(NIMBY; not in my back yard)讓場址

鄰近的民眾，提高疑慮而可能採取抗爭手段，試圖阻撓場址設置，遑論後續將捕獲的CO₂運輸後封存該地。因此，社會溝通特別是CCS封存場址居民的意願則影響甚鉅(Themann and Brunnengräber, 2021)²⁸。現階段臺灣民眾對於地質封存的認知與接受度有待提昇，CO₂封存後需要進行精密有效的監測來實證其安全性，所以前述德國經驗中，德國政府除研究更多碳封存技術外，亦透過社會對話程序，提高公民對於碳封存共識與接受度。另外CCS監測時間必須拉長至少數十年，後續成本也需要被考量，因此日本經驗中提及之CCS場址長期管理責任也是環境影響評估中應重視之課題；為提升民眾接受度，必須透過注儲前導試驗，引進國外經驗(如日本北海道苫小牧)，同時建立本土的監測、模擬與風險評估能量，來實證地質封存的安全性。而在無封存的情況下所捕獲的大量CO₂，短期去處可能是與液氨合成尿素，因此設廠需考慮與液氨等化合物容易結合之場域及運輸方式。

為有效推動CCS作為減碳手段，以彈性監管作為有效氣候政策組合的一部分亦值探究，彈性監管有四個考量因素：可預測性、政策互動、權益衝擊及替代性信貸衍生機制；根據Rhodes *et al.* (2021)研究彈性法規(flexible regulations)指出，隨著司法管轄區尋求加強其氣候政策組合，彈性監管²⁹可以提供一種相對具有成本效益、得到廣泛支持和補充工具來

²⁴ 另經濟部於2121/08/17公告「國營事業編列研究發展支出占總預算比例」修正草案中，考量各國營事業產業特性及規模差異，訂定各國營事業所屬產業中華民國一百一十二年目標比例將電業類提升至0.7% (2020年為0.67%)，公告文號：經授工字第 11020428752號，資料來源：行政院公報第27卷154期。

²⁵ 具體數據可參附表8：國營事業效能落後他國(同業)情形。

²⁶ 驅力(Drive)係指當個人有所需求時，不論這需求是次級需求或原級需求，都會盡可能採取行動，設法減輕需求的焦慮感，以滿足其需要。這種迫使個體採取行動的力量，就叫做驅力。參閱魏麗敏，2000/12，國家教育研究院教育大辭書，網址(查詢日期：2021/08/27)：<https://terms.naer.edu.tw/detail/1315620/>。

²⁷ 如蘋果日報2013/06/25曾以「台電中油硬幹10萬噸CO₂埋地底 恐誘發地震」為題進行報導，當時引發不少爭議。網址：<https://tw.appledaily.com/headline/20130625/7B66FB6JQ7BKFFK7LLC>NNAL3S4/> (查詢日期：2021/08/27)。

²⁸ 信任似乎也是接受的一個重要因素。德國在討論CCS的過程中，獨立專家和環保組織比私人公司、行業或在某些情況下之政府機構，取得更多公眾之信任；參見Dörte Themann and Achim Brunnengräber, 2021/03/09, Using socio-technical analogues as an additional experience horizon for nuclear waste management A comparison of wind farms, fracking, carbon capture and storage (CCS) with a deep-geological nuclear waste disposal (DGD), Utilities Policy, Volume 70, June 2021, 101181。

²⁹ 係指未定義強制性可交易性能標準及實現該標準的具體合規途徑，允許參與者未合規或過度合規，只要所有受監管實體達到總體標準即可。如CES (Clean Electricity Standards潔淨電力標準)要求一定比例的無排碳發電具有類似的信用交易機制。此意味高碳發電商須改變其發電組合，如從再生(或零排放)發電商購入合規信用額度，從而有效地從高碳發電轉至低碳發電。資料來源如前註。相關內容詳前註Rhodes *et al.* (2021)。

實現深度減排，只要政策設計良好並考慮到相互作用和公平影響。與強制性(命令和控制)法規不同，彈性法規不需要特定於技術的合規途徑，允許信用交易降低成本並激勵創新。雖然碳定價政策，例如碳稅，被廣泛認為是最具經濟效益的溫室氣體減量政策，但由於成本高昂和公眾負面看法，它們面臨著強烈的阻力依據；OECD發布之Effective Carbon Rates 2021的執行摘要³⁰也顯示國際碳價進展緩慢：

- (1) 2018年約60%的能源使用碳排放量仍未完全定價。
- (2) 44個經濟與合作組織國家和G20國家沒有達到2018年目標(將所有排放定價至少為每噸CO₂為60歐元，即CPS 60)的五分之一。
- (3) 不到四分之一的國家達到了60歐元基準的一半以上，而2018年只有三個國家達到該基準的三分之二以上。

因此，僅有少數國家制定嚴格碳價來實現《巴黎協定》的脫碳目標；而臺灣環保署2020年雖開始著手進行修法工作，重點包括強化氣候治理、提升管理效能、增加收費機制(林素惠，2021)及氣候變遷調適等。2020年下半年也分別與電力、鋼鐵、煉油、石化、水泥、造紙、電子業召開9場會議，邀請民間團體進行數場座談會，徵詢各界意見。2020年也與國際知名氣候政策研究智庫—倫敦政經學院格蘭瑟姆氣候變遷與環境研究所合作，探討臺灣碳定價制度設計(行政院環保署，2020b)³¹。種種努力似乎仍屬意見徵詢而無明確進展。

綜合以上資料，面臨日益倍增之減碳壓力，如能設計彈性監管的配套機制，例如以我國高度整合之電子業與化工業其強大產業鏈整合能量，由台電提出需求，透過研發聯盟或委

託研究，邀集台塑集團或台積電等大型能耗產業規劃建構CO₂捕獲平台，或協助台電或民營燃煤電廠建置大型CO₂捕獲工廠，並設計捕獲CO₂之碳權分配機制，將可解燃煤電廠減碳之燃眉之急，從而累積產業之減碳額度，進一步實行國際貿易或碳關稅抵減，達成供應端與需求端減碳雙贏之局面。

4. 結論與建議

由於臺灣以出口為導向且是國際重要供應鏈，以2021年上半年為例，對美國出口約295億美元，占總出口值2,069億美元之14.26%；對歐洲出口額約173億美元，占8.36% (李震宇與張麗娟，2021)。面對歐美開徵邊境碳關稅的時刻，更直接衝擊對外貿易(Taxation and Customs Union / European Commission, 2021)³²。我國既以出口為導向且具有高氣候貿易脆弱性，調整產業因應與布局已刻不容緩。因此為避免我國出口產業之電力來源因燃煤電廠高碳排而受管制，透過研發示範、稅制激勵及公眾溝通等三大方向推動燃煤電廠進行CO₂捕獲、利用與封存，是我國進入2050淨零排放必須勇往前進之途徑。

面對2050淨零碳排的壓力，兼顧國內非核家園政策，雖已加速再生能源推動，但在維持我國經濟成長之電力緩步成長及穩定電力供應的兩大需求下，火力發電仍是我國短中期供電結構中不可或缺之一環，因此燃煤電廠之CCS雖在國內推動上，可能要面對環境承受不確定性及公眾(環保團體)質疑；但以臺灣在CCS科研成果及近海鹽水層地質封存CO₂的優越條件，配合國內產業完整供應鏈，除思考擴大既

³⁰ OECD, 2021. Effective Carbon Rates 2021, <https://www.oecd.org/tax/tax-policy/effective-carbon-rates-2021-brochure.pdf> (查詢日期：2021/08/27)。

³¹ 行政院環境保護署環管處，2021/01/17，碳定價是國際趨勢 環保署尋求共識 持續徵詢各界意見中，國際環保與合作新聞，網址(查詢日期：2021/08/27)：<https://enews.epa.gov.tw/Page/3B3C62C78849F32F/5e8b9f8c-5832-493b-bb58-1b5a8f2a7705>，而相關報告亦提出臺灣的主要排放源，尤其是電力部門，需被涵蓋於碳定價中。對於台電等垂直整合之公用事業，必須特別考慮管制的不同選項。

³² 歐洲議會於今(2021)年7月14日通過「碳邊境調整機制」(Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM)，將針對鋼鐵、鋁、水泥、化肥和電力等產品進口徵收碳稅，以避免氣候政策弱國產品衍生“碳洩漏”(Carbon leakage)。美國也正在評估實施邊境調整稅(Border Adjustment Tax)之可行性作為應對氣候變化的手段。

有成果(如工研院與台泥示範案)外，下列幾項技術及政策法規亦值深思：

- (1) 在國內周邊產業可配合下，引進國外最新技術(如A-L迴路技術)，就國內環境條件進行CO₂捕獲之系統整合及小型示範驗證，提升擴大商業規模之技術可行性，同時亦藉由新技術驗證示範凸顯臺灣積極減碳之國家政策實踐。
- (2) 就國內火力發電廠所產生粉煤灰，投入碳循環利用，以低成本模式將CO₂氫化成有利用價值的化學品。並仿效德、美、日等國建構長期CO₂回收利用之技術發展圖與產業(如綠建築)利用規劃。
- (3) 借鏡德國、美國以及日本等先進國家CCS之推動經驗及政策途徑，強化我國燃煤電廠進行CCS之研發投入、搭配彈性監管機制、完善公眾溝通與科學驗證。
- (4) 以燃煤電廠規模持續縮減之中期規劃說服公眾或環保團體，透過示範園區與環境教育平台說明國際技術發展與相關風險抑制方案，並避免公眾誤解推動CCS係為後續擴張燃煤電廠規模之替代方案。
- (5) 針對深部鹽水層封存應透過資料收集消除各界對引發地震的疑慮，如日本苫小牧 CCS 示範計畫通過監測系統獲得基線數據，進行5年微震、自然地震和海洋環境之監測。
- (6) 仿效核廢料處置，定期發布CCS技術及世界各國封存場址選擇與興建近況報告等國內外最新公開資訊，促進公眾與環保團體了解相關燃煤電廠CCS規劃進度，以公開透明之科學證據說服公眾接受CCS作為燃煤電廠減碳之必要手段(Themann and Brunnengräber, 2021)。
- (7) 擴大實施現有國際CCS已商業化技術，台電應召集相關產業界協商具體因應之道。而政府則應加強提供產業足夠經濟誘因，合宜法規政策配套(包括環評、民眾接受度)；目前已在臺灣進行多年示範之化學吸收法，可能是短期內臺灣燃煤電廠2030前最適合之

CO₂捕獲技術；而深部鹽水層之CO₂封存也應開展示範驗證計畫，並建立相關CO₂監測洩漏之系統，始能有效完成我國燃煤電廠之減碳工作。

參考文獻

- 台灣電力公司，2021。火力電廠環境保護之溫室氣體，網址(查詢日期：2021/08/27)：
<https://www.taipower.com.tw/tc/page.aspx?mid=216&cid=170&cchk=9a9fd7a6-235b-44dc-855d-57dcf7291b4a>。
- 行政院環保署，2020a。我國國家溫室氣體排放清冊報告，2020/10。(註：該清冊統計之最新年度為2018年，至本文完成前尚無該清冊更新資訊，網址(查詢日期：2021/08/27)：https://unfccc.saveoursky.org.tw/nir/2020nir/uploads/00_nir_full.pdf。
- 行政院環保署，2020b。臺灣碳定價之選項-給臺灣環境保護署之研究報告執行摘要，2020年12月。網址(查詢日期：2021/08/27)：<https://enews.epa.gov.tw/DisplayFile.aspx?FileID=3B2E3FFF2ACE0E80>。
- 朱皓菱，2020。日本經產省於北海道苫小牧市進行大規模CCS實證試驗，達成累計注入30萬噸二氧化碳之目標，2020/5/15。能源知識庫網址(查詢日期：2021/08/27)：https://km.twenergy.org.tw/Data/db_more?id=3803。
- 李震宇與張麗娟，2021。民國110年上半年我國進出口貿易概況，2021/07/16，財政部統計處，網址(查詢日期：2021/08/27)：
<https://service.mof.gov.tw/public/Data/statistic/bulletin/110/110%E5%B9%B4%E4%B8%8A%E5%8D%8A%E5%B9%B4%E6%88%91%E5%9C%8B%E9%80%B2%E5%87%BA%E5%8F%A3%E6%A6%82%E6%B3%81.pdf>。

- 林素惠，2021。國際開徵碳關稅對我國產業影響之研析，2021/05/11，立法院議題研析，網址(查詢日期：2021/08/27)：<https://www.ly.gov.tw/Pages/Detail.aspx?nodeid=6590&pid=209309>。
- 林祥輝，2019。日本政府發布「碳循環技術路線圖」提出將CO₂分離回收，轉換成化學品、燃料和礦物等，並設定2030年和2050年以後各種製造技術的目標，能源知識庫即時資訊，2019/06/07。參閱網址(查詢日期：2021/08/27)：https://km.twenergy.org.tw/Data/db_more?id=3654。
- 邱凡坪，2020。國際碳捕獲、再利用與封存技術發展概況，經濟部溫室氣體減量管理推動辦公室109年5月專題。
- 柯妤萱，2016。碳捕獲與封存是氣候變遷解藥嗎？環境資訊中心，網址(查詢日期：2021/08/27)：<https://e-info.org.tw/node/117381#4>。
- 政府間氣候變化專門委員會(IPCC)，2019。更新溫室氣體清單方法，IPCC新聞通稿，2019/05/13，網址(查詢日期：2021/08/27)：<https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/05/2019Refinement-PR-zh.pdf>。
- 科技部，中央研究院環境變遷研究中心，交通部中央氣象局，臺灣師範大學地球科學系及國家災害防救科技中心(聯合發布單位)，2021。IPCC氣候變遷第六次評估報告之科學重點摘錄與臺灣氣候變遷評析更新報告，2021/08/10。
- 俞旗文與黃鐘，2017。臺灣地區二氧化碳深部鹽水層地質封存機會與挑戰，2017/06，地工技術第152期。
- 柳萬霞、徐恆文、黃欽銘、陳威丞與歐陽湘，2012。燃燒後捕獲二氧化碳技術-鈣迴路捕獲CO₂技術國際現況與國內發展介紹，工業污染防治第121期，P71-P86，2012/03。
- 徐恆文，陳威丞，張名惠與周揚震，2014。鈣迴路捕獲二氧化碳技術，《臺灣能源期刊》，2014年3月，1卷2期，頁145-155。
- 馬瑋謙，2018。臺灣二氧化碳地質封存之發展趨勢，2018/03/05，網址(查詢日期：2021/08/27)：<https://scitechvista.nat.gov.tw/Article/c000003/detail?ID=243dcf93-a5c5-4e9d-b287-812ae8a13693>。
- 陳耀東，2020。淺談中火燃煤許可證案之若干法律爭議，立法院議題研析，2020/03/04，編號：R00922。
- 張培仁，胡毓忠與黃郁棻，2021。建立及強化能源國家型科技計畫績效之管理機制及能源技術議題探索模式(第3年)，2020/03/31，科技部補助專題研究計畫成果報告期末報告。
- 張峻萍，2020。國營事業研究發展支出預算編列與執行管控之研析，立法院專題研究，編號：109117。
- 經濟部，2020。碳循環關鍵技術開發計畫，前瞻基礎建設計畫－綠能建設，民國109年9月核定本，計畫全程期限：民國110年01月至民國114年08月。
- 經濟部能源局，2021。能源統計月報，拾、電力10-5發電結構(一)，2021/08/16更新。網址(查詢日期：2021/08/27)：https://www.moeaboe.gov.tw/ECW/populace/web_book/WebReports.aspx?book=M_CH&menuid=142。
- 談駿嵩，2021。二氧化碳捕獲封存及再利用，2021/03/12，臺灣碳捕存再利用協會。
- 關棟鴻，2020。德國通過氣候行動法，保證國家將落實2030溫室氣體減量目標，2020/03/20，能源知識庫即時資訊，網址(查詢日期：2021/08/27)：<https://km.twenergy.org.tw/Data/share?I6PtMGXVxIrwEsVmAzleGA==>。
- Abdulla, Ahmed, Ryan Hanna, Kristen R Schell, Oytun Babacan and David G Victor, 2020. Explaining successful and failed investments

- in U.S. carbon capture and storage using empirical and expert assessments, *Environmental. Research. Letters.* 16 (2021).
- Baylin-Stern, Adam and Niels Berghout, 2021. International Energy Agency (IEA), Is carbon capture too expensive? 2021/02/17. (Data Retrieved on 2021/08/27): <https://www.iea.org/commentaries/is-carbon-capture-too-expensive>.
- Blackford, Jerry, Katherine Romanak and Veerle A. I. Huvenne, 2021. Efficient marine environmental characterisation to support monitoring of geological CO₂ storage, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, Volume 109, July 2021, 103388.
- Burck, Jan, Ursula Hagen, Niklas Höhne, Leonardo Nascimento and Christoph Bals, 2020. Germanwatch – Climate Change Performance Index 2021, CCPI 2021, Publication Date: 2020/12/07(Monday) (Data Retrieved on 2021/08/27): <https://ccpi.org/download/the-climate-change-performance-index-2021/>.
- d' Amore, Federico, Matteo Carmelo Romano and Fabrizio Bezzo, 2021. Optimal design of European supply chains for carbon capture and storage from industrial emission sources including pipe and ship, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, Volume 109, July 2021, 103372.
- Dindi, Abdallah, Dang Viet Quang, Lourdes F. Vega, Enas Nashef, R. M. Mohamma and Abu-Zahra, 2019. Applications of fly ash for CO₂ capture, utilization, and storage, *Journal of CO₂ Utilization*, Volume 29, January 2019, Pages 82-102, Available online 2018/12/04.
- Duguid, Andrew, Justin Glier, Michael Heinrichs, Jared Hawkins, Rick Peterson and Srikanta Mishra, 2021. Practical leakage risk assessment for CO₂ assisted enhanced oil recovery and geologic storage in Ohio's depleted oil fields, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, Volume 109, July 2021, 103338.
- IEA (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY), 2021. Global Energy Review 2021, 2021/04/ 20.
- IEA (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY), 2007. World large-scale CCUS facilities operating and in development, 2010-2020, Last updated 2020/09/23, <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/world-large-scale-ccus-facilities-operating-and-in-development-2010-2020>.
- McGinley, Elizabeth L., Don J. Lonczak and Michael A. Recchia, 2021. IRS Provides Welcome Guidance on Code Section 45Q Credits in Revenue Ruling 2021-13, 2021/07/07, Updates, <https://bracewell.com/insights/irs-provides-welcome-guidance-code-section-45q-credits-revenue-ruling-2021-13>.
- OECD, 2021. Effective Carbon Rates, <https://www.oecd.org/tax/tax-policy/effective-carbon-rates-2021-brochure.pdf>.
- Paltsev, Sergey, Jennifer Morris, Haroon Kheshgi and Howard Herzog, 2021. Hard-to-Abate Sectors: The role of industrial carbon capture and storage (CCS) in emission mitigation, *Applied Energy*, Volume 300, 15 October 2021, 117322.
- Pianta, Silvia, Adrian Rinscheid and Elke U. Weber, 2021. Carbon Capture and Storage in the United States: Perceptions, preferences, and lessons for policy, *Energy Policy*, Volume 151, April 2021, 112149.
- Rehhausen, Anke, 2019. The art of underperforming SEA -- Symptomatic narratives from Germany, 2019. *Environmental Impact Assessment Review*, Volume 78, September 2019, 106280.

- Rhodes, Ekaterina, William A. Scott and Mark Jaccard, 2021. Designing flexible regulations to mitigate climate change: A cross-country comparative policy analysis, *Energy Policy*, Volume 156, September 2021, 112419.
- Schmid, Christopher and Alena Hahn, 2021. Potential CO₂ utilisation in Germany: An analysis of theoretical CO₂ demand by 2030, *Journal of CO₂ Utilization*, Volume 50, August 2021, 101580, Available online 2021/06/02.
- Sobhani, Nader, 2021. DECARBONIZING THE U.S. INDUSTRIAL SECTOR-Regional, economic, and technical realities, 2021/04/15, Climate Policy Associate/ Niskanen Center, <https://www.niskanencenter.org/decarbonizing-the-u-s-industrial-sector-regional-economic-and-technical-realities/> (Date retrieved on 2021/08/27).
- Tanase, Daiji, Hideo Saito, Ryuji Niirō, Takayasu Honda, Akira Mori, Yasushi Wada, Kazuhiro Higuchi and Jiro Tanaka, 2021. Progress of CO₂ injection and monitoring of the Tomakomai CCS Demonstration Project, 2021/04/01, 15th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, GHGT-15, 15th-18th March 2021, Abu Dhabi, UAE.
- Taxation and Customs Union/ European Commission, 2021. Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM, 2021/07/14, https://ec.europa.eu/taxation_customs/green-taxation-0/carbon-border-adjustment-mechanism_en.
- Themann, Dörte and Achim Brunnengräber, 2021. Using socio-technical analogues as an additional experience horizon for nuclear waste management A comparison of wind farms, fracking, carbon capture and storage (CCS) with a deep-geological nuclear waste disposal (DGD), *Utilities Policy*, Volume 70, June 2021, 101181.
- U.S. Energy Information Administration, 2021. Short-Term Energy Outlook (STEO) , (2021/07/07), <https://www.eia.gov/outlooks/steo/report/>.
- Uliasz-Bocheńczyk, A., M. Mazurkiewicz and E. Mokrzycki, 2015. Fly ash from energy production – A waste, byproduct and raw material. *Gospod. Surowcami Miner./Miner. Resour. Manag.* 31.
- Waxman, Andrew R., Sean Corcoran, Andrew Robison, Benjamin D. Leibowicz and Sheila Olmstead, 2021. Leveraging scale economies and policy incentives: Carbon capture, utilization & storage in Gulf clusters, *Energy Policy*, Volume 156, September 2021, 112452. Available online 2021/07/14.
- Wettengel, Julian, 2020. Quest for climate neutrality puts CCS back on the table in Germany, *Journalism for the energy transition*, <https://www.cleanenergywire.org/factsheets/quest-climate-neutrality-puts-ccs-back-table-germany> (Data retrieved on 2021/08/27).
- Yanagi, Kenichiro, Akihiro Nakamura and Eiji Komatsu, 2019. The importance of designing a comprehensive Strategic Environmental Assessment (SEA) & Environmental Impact Assessment (EIA) for carbon capture and storage in Japan, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, Volume 91, December 2019, 102823, Available online 2019/09/11.
- 日本産経省，2021。カーボンリサイクル技術ロードマップ《碳循環技術路徑圖》，令和元年6月（令和3年7月改訂，2021/07），經濟産業省協力府省--内閣府，文部科学省，環境省，<https://www.meti.go.jp/press/2021/07/20210726007/20210726007.pdf>。

Challenges and Responses of Taiwan's Promoting Coal-fired Power Plants to Carbon Capture, Utilization, and Storage

Kuo-Chen Wu^{1*} Jui-Chu Lin² Bing-Chwen Yang³

ABSTRACT

Taiwan is committed to energy transition and international zero carbon emission initiatives. However, given Taiwan's narrow area and high population density and rising energy consumption, Taiwan is now caught in a dilemma between carbon emission compliance and the stability of power supply. Although the government is actively promoting renewable energy, however, the shortage of natural resources, the import energy still play a big role in Taiwan's power system. The coal-fired power plants will contribute most of the power supply in the near future. Given such conditions, carbon capture, utilization, and storage (CCUS) techniques remain as an integral part of addressing environmental concerns. Of such techniques, CO₂ geological storage exists as a technique focused upon the transformation and storage of CO₂ at a supercritical state in the underground storage space. This article will focus on the respective implementation of CCS technology and promotion strategy in Germany, United States, and Japan, whilst attempting to capture Taiwan's own roadblocks in promoting CCS for our thermal power plant. In order to overcome those problems, two technical suggestions are proposed based on the plausibility of circular economy and the possibility of carbon utilization within the capability of our industry. In order to minimize the non-technical resistance, specific policy suggestions are explored and made in accordance with public support and existing policies. We hope that through relevant analysis, the paper could be utilized to encourage further discussion on CCS technologies and policy in Taiwan from different view points, such as environment evaluation, natural resource, etc. to utilize the advantage of being surrounded by the sea and possible storage site in the seashore area. It can reduce our pressure for the development of thermal power plant and meet the goal for 2050 net zero carbon emission.

Keywords: Coal-fired Power Plants, Carbon Capture, Utilization, and Storage, Policy, Public Engagement.

¹Business Director, Green Energy and Environment Research Laboratories, Industrial Technology Research Institute.

²Distinguished Professor, Department of Humanities and Social Sciences, National Taiwan University of Science and Technology.

³Professor, College of Photonics, National Yang Ming Chiao Tung University.

* Corresponding Author, Phone: +886-3-5915374, E-mail: ALAN_WU@itri.org.tw

Received Date: August 31, 2021

Revised Date: October 12, 2021

Accepted Date: October 28, 2021