

以無碳電力憑證推動電力部門 淨零轉型建議

陳彥豪／台灣經濟研究院一所所長

尤晴韻／台灣經濟研究院一所副所長

陳映蓉／台灣經濟研究院一所助理研究員兼副組長

鄭允勝／台灣經濟研究院一所助理研究員

一、前言

全球受到氣候變遷影響甚劇，各國為阻止氣候變遷加劇，積極研擬減量目標，尤其為達到《巴黎協定》中將全球升溫控制在 1.5°C 以內，各國透過致力於實現淨零排放（Net Zero Emission）目標，全球目前已有超過130個國家宣布推動「淨零排放」。根據國際能源署（International Energy Agency, IEA）分析，在淨零轉型過程，電力部門是淨零轉型過程最關鍵的領域；未來30年間若要實現快速減少二氧化碳排放，需要採取一系列措施，包括避免需求、提升技術性能、增加使用再生能源或氫等替代燃料、電氣化與碳捕捉、再利用及封存（Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS）技術等[1]。

此外，第26屆聯合國氣候變遷會議（26th 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炭發電（Phase-Down of Unabated Coal Power），並淘汰無效率的化石燃料補貼，以實現2050年零碳排放目標。

而為達成2050年淨零排放，聯合國政府間氣候變化專門委員會（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC） 1.5°C 特別報告及IEA等國際組織與主要國家淨零排放評估皆指

出，欲達淨零排放，能源部門消費需大幅降低，並須透過燃料替代（電氣化或轉為無碳/低碳燃料），減少化石能源使用。因此，各國未來除了透過大規模增加再生能源使用外，也可能需要導入碳捕捉技術，以確保在淨零碳排風潮下永續成長。而根據IPCC計算，2050年後，全球每年必須捕捉與封存大約120億噸二氧化碳，相當於目前全球排放量的三分之一[2]。

依《能源統計手冊》所示，臺灣2021年發電裝置容量59,375.4千瓩，其中火力機組裝置容量為42,301.8千瓩，占總裝置容量71.2%[3]。目前國內運轉超過30年以上機組約7座，21至30年機組18座，20年內機組18座[4]。若依照IEA於2021年提出全球淨零排放路徑里程碑之建議，至2040年應淘汰所有未減排的燃煤與燃油電廠。因此，除了大規模增加再生能源使用外，未來臺灣若要建構去碳能源系統，勢必需導入碳捕捉與封存技術[5]，以達到淨零轉型。

本文將介紹淨零轉型對能源與電力部門發展影響，並分析臺灣火力電廠碳排放狀況趨勢與導入碳捕捉技術之情境，提出以無碳電力憑證（Carbon-free Power Certificate）推動電力部門淨零轉型建議供各界參考。

二、淨零轉型對能源與電力部門發展影響

根據IEA於2021年發布《2050淨零：全球能源部門路徑圖》（Net Zero by 2050 - A Roadmap for the Global Energy Sector）報告指出，電力部門是淨零轉型過程最關鍵的領域。能源部門擁有大量使用年限較長和資本密集型的資產，像是城市的基礎設施、管線、煉油廠、燃煤電廠、重工業設施、建築物 and 大型水力發電廠等，且相關技術及其經濟使用年限通常可以超過50年。目前全球無論在已開發經濟體或是新興經濟體中，電力部門溫室氣體總排放量占現有能源部門資產溫室氣體總排放量的一半以上，其中燃煤機組占約40%，其次為工業與運輸相關的既有設施排放。假設既有的能源基礎設施之運作都維持於與過去相同之方式，運轉至相同之經濟年限，預估2020年到2050年能源相關和工業部門的累積二氧化碳排放量將達到6,500億公噸。相較於可控制2100年升溫於1.5°C情境，這將造成30%額外的碳排放。由此顯示，若全球欲達到淨零排放，既有設施的翻新或退場機制亦為重要的一環。由於再生能源發電成本大幅下降，在淨零路徑中，電力發展從2020到2050年將

更具優勢，屆時將導致整體電力需求增加80%，占最終能源消費需求比例急遽成長。然而，儘管再生能源大幅成長，對於經濟持續發展、面對地緣政治風險或是對於不使用核能之經濟體而言，燃煤在其電力來源組成中仍持續扮演一定角色。

在IEA的宣告承諾情境（Announced Pledges Case, APC）中，在未來的30年中，全球能源供給量約成長15%，相當於從2020年26,800 Terawatt-hours（TWh）增加至2050年的50,000TWh。全球能源供應之增加，主要來自於再生能源，其整體能源供應組合占比從2020年的12%提升至2050年的35%；其中太陽光電與風能又占再生能源電力供應約一半，另外尚有30%來自於生質能搭配

CCUS。IEA同時述及，若核能在整體能源組合中比例不變情況下，由於燃煤電廠之用途改變、更新或除役等因素，2050年全球將快速減少50%燃煤使用量。並且在未來10至15年間，已開發之經濟體將會逐步淘汰未減量的燃煤電廠（Unabated Coal-Fired Plant）。圖1是再生能源發展極大化、達到70%總發電量狀況下，2050全球淨零轉型承諾下發電組合[1]。

依據IEA之2050淨零情境（Net-Zero Emissions by 2050 Scenario, NZE）分析，未來30年間若要使二氧化碳排放量快速減少，除卻現有手段，還需投入更廣泛之政策方法與技術等關鍵行動方案。支援全球能源系統去碳之支柱包含能源效率、行為改變、電氣化、再生能源、氫

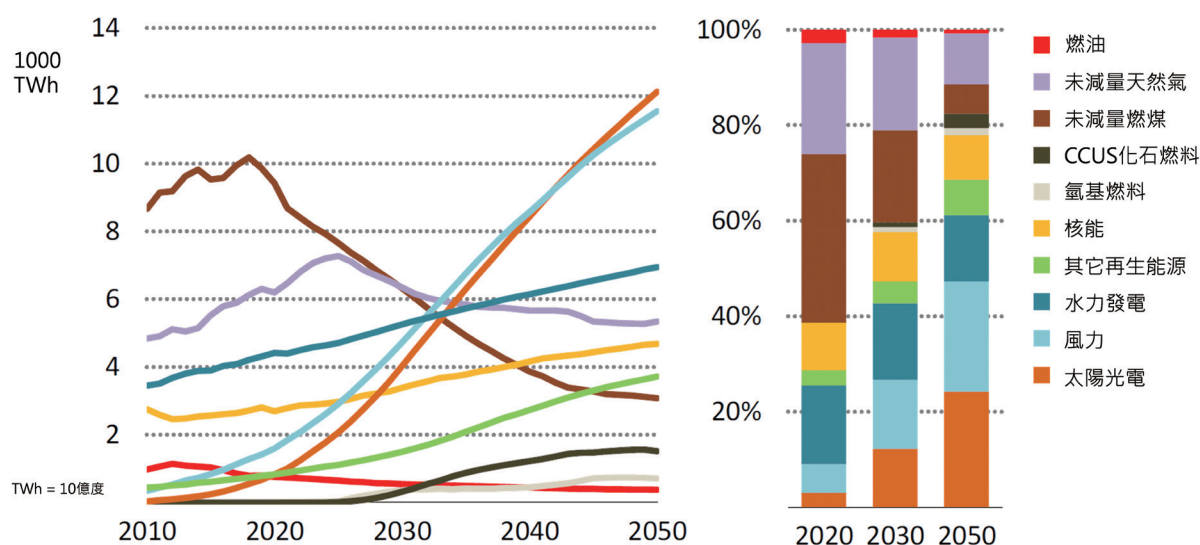


圖1 2050 全球淨零轉型承諾下發電組合（資料來源：IEA）

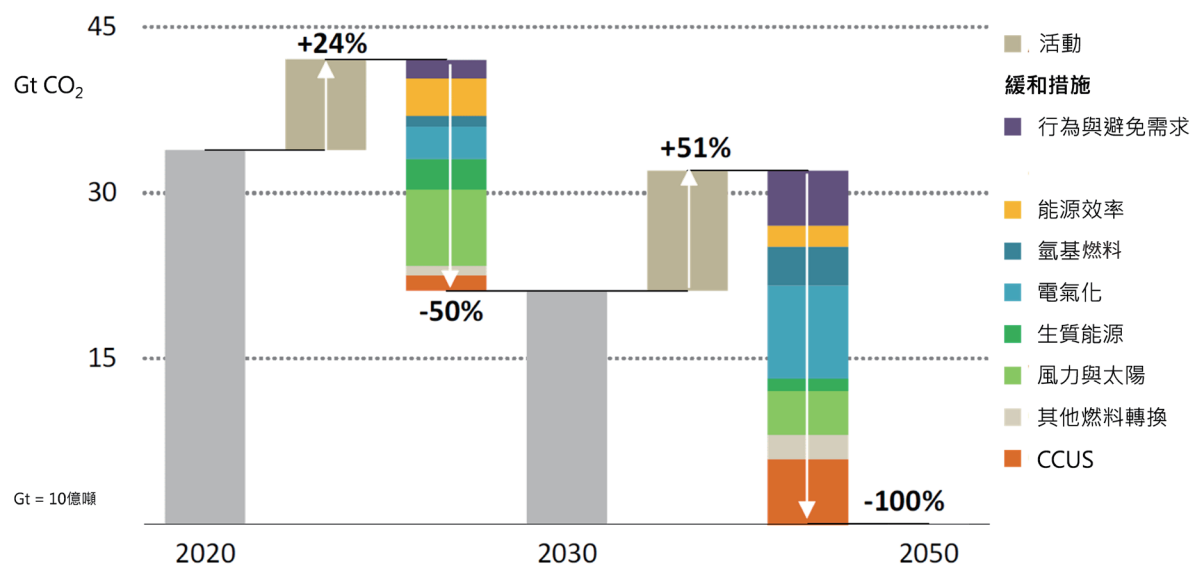


圖2 2020-2050 淨零緩和措施減量（資料來源：IEA）

和氫基燃料、生質能源和CCUS等。太陽、風力與能源效率可貢獻至2030年二氧化碳應減數量的一半；而後，電氣化、CCUS及氫將擴大貢獻度（如圖2）[1]。

三、臺灣火力發電廠導入碳捕捉技術情境

臺灣具有天然的二氧化碳地質封存資源優勢。以海域而論，依歷年學者之研究，至少包括桃園-新竹海域盆地、台西盆地、雲林嘉義外濱3處海域。依據中興工程顧問社[6]評估台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公里內，深度1,500至3,000公尺間的砂岩富集地層，評估其有效封存潛能共137.3億噸。另外，冀樹勇

等[7]研究桃園新竹海域盆地預估封存量為57.99億噸；雲林-嘉義海域地層之深層資料較為有限，以林殿順（2011）[8]海岸線外0~50公里範圍內砂岩層理論封存量，初估約有31億噸。上述三海域合計可達226.29億噸，亦即臺灣實施地質封存具有極為充裕之天然條件。

另一方面，由於二氧化碳再利用仍有排放，為評估火力電廠迄2050年需捕捉之二氧化碳數量，以碳捕捉與封存（Carbon Capture and Storage, CCS）為主。就現有以及已規劃新設機組之運轉年限概估，至2050年尚未除役之燃煤機組為林口（1、2、3號機組）、大林（1、2號機組），依其裝置容量估計年度二氧化碳排放量約2,046萬公噸。同樣地，至2050年尚未除役的燃氣機組為大

潭（7、8、9號機組）、通霄（1、2、3號機組）、興達（1、2、3號機組）、台中（1、2號機組）、協和（1號機組），年度排放量約3,462萬公噸。至2050年尚未除役的燃油機組為塔山（9、10號機組），年度排放量約2.1萬公噸。其中塔山電廠位於金門離島，考量電廠規模與當地地質條件，比起CCS，其採直接空氣捕捉與碳儲存（Direct Air Carbon Capture Storage, DACCS）或生質能碳捕捉儲存（Bio-Energy Carbon Capture Storage, BECCS）等負碳技術移除較適宜。2050年大型燃煤與燃氣機組總排放量約5,508萬公噸，若CCS捕捉率90%估計，需封存4,957萬公噸二氧化碳，其餘10%（550.8萬公噸）以及塔山2.1萬公噸，即552.9萬公噸則可採DACCS或BECCS負碳技術移除。

根據上述條件與措施，我國火力電廠可依如下情境導入碳捕捉技術：

1. 2025年至2030年間，配合中部管線與封存場址完善，以中部火力電廠優先導入CCS技術，再擴大地緣至苗栗之電廠。
2. 2030年後，南部電廠所需之管線與封存場址空間應逐步完備，逐年於高雄各火力機組導入CCS技術。
3. 2040年後，配合北部電廠所需之管線與封存場址空間完備，桃園至基隆之火力電廠逐步導入。
4. 原則上，二氧化碳移除（Carbon Dioxide Removal, CDR）技術預計在2030年開始導入，逐年擴大，俾於2050年達到淨零之目標。

若依上述情境導入碳捕捉技術，2030年估計可封存295萬公噸，2040年

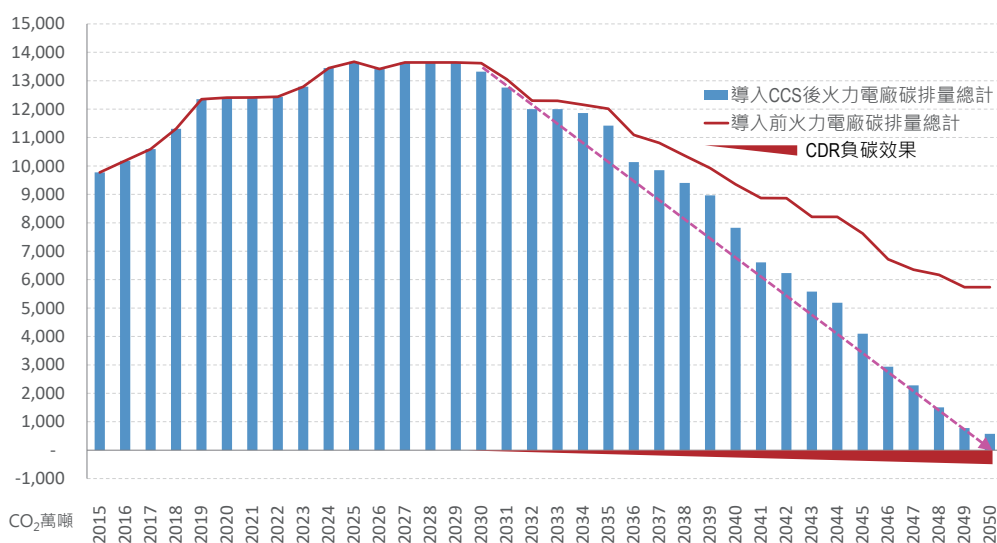


圖3 導入碳捕捉後火力電廠碳排放狀況（資料來源：本研究）

封存1,529萬公噸，2050年封存5,159萬公噸。電力部門到2050年CCS需捕捉4.4億噸、DACCS/BECCS需捕捉1,437萬噸（如圖3），達成火力電廠之淨零排放。

四、導入碳捕捉之市場性與成本經濟性

參考美國國家能源技術實驗室（National Energy Technology Laboratory, NETL）出版之基線研究（Baseline Studies）對於電廠均化發電成本（Levelized Cost of Electricity）估算指引（如Cost and Performance Baseline for Fossil Energy Plants系列等）[9][10][11]，

用以估計合乎臺灣情境（例如燃料成本等等應有差異）之碳捕捉火力電廠均化成本，可求得具有碳捕捉之燃煤電廠之每度發電成本約新臺幣（以下單位同）3.06元，較未導入碳捕捉燃煤電廠之每度發電成本1.95元高出約56.9%，具有碳捕捉燃氣電廠之每度均化發電成本約3.50元，較未導入碳捕捉燃氣電廠之每度發電成本2.64元高出約32.6%（表1）。參考目前再生能源躉購費率，除了陸域風電30瓩以上者費率2.0883至2.1223元較低外，陸域風電1至30瓩則為7.4110元，離岸風電為3.4001元至5.1356元，太陽光電3.8680元至5.8952元[12]，均較導

表1 臺灣導入碳捕捉火力電廠均化發電成本估算參數

參數別	電廠別		燃氣電廠	
	燃煤電廠		燃氣電廠	
	無碳捕捉 (0 %)	碳捕捉率 (90 %)	無碳捕捉 (0 %)	碳捕捉率 (90 %)
淨發電量 (MWe)	1,200	1,200	2,880	2,880
經濟年限 (T)	40年		40年	
折現率 (r)	2 %			
容量因子 (CF)	0.85			
可用率 (U)	0.9489	0.8385	0.9811	0.9362
燃料價格	65.47美元／公噸		13.0229元／m ³	
熱效率	0.3904	0.3024	0.5019	0.4429
每年時數	8,760			
每度發電成本 (新臺幣元/度)	1.95	3.06	2.64	3.50
捕捉成本 (新臺幣元/噸)	-	1,235	-	2,467

資料來源：NETL（2019）、NETL（2020）、NETL（2021），本研究整理計算。

入碳捕捉之燃煤或燃氣電廠每度發電成本為高。另一方面，若就實際綠電交易價格，則可能更為蓬勃。整體而言，導入碳捕捉與封存技術電廠所產生電力，仍應比起再生能源電力猶有競爭力。惟應留意：所謂均化發電成本主要用於同時不同技術經濟之比較，乃屬於工程經濟評估結果，與躉售費率或任何實務交易之費率並不同，不逕作絕對之比較。

本研究亦計算碳捕捉成本，燃煤電廠為1,235元/噸，燃氣電廠為2,467元/噸，以1美元兌新臺幣29.7元換算，相當於41.6美元/噸或83.1美元/噸。對照IEA估計主要經濟體碳捕捉成本100.0美元/噸[1]，臺灣投入碳捕捉應具有相當之經濟性。

此說明無論就市場性或成本經濟性而言，導入碳捕捉技術誠為臺灣火力機組值得採行之解決方案。

五、無碳電力憑證協助企業淨零轉型

溫室氣體盤查為企業淨零轉型與掌握溫室氣體議題之首要工作，根據溫室氣體盤查議定書（Greenhouse Gas Protocol, GHG Protocol）對於排放源範疇（Scope）之規範，其中範疇一為來自於

組織所擁有或控制之直接溫室氣體排放源；範疇二為來自於輸入電力、熱或蒸汽之能源間接溫室氣體排放源；範疇三為由組織活動產生之溫室氣體排放，非屬於能源間接溫室氣體排放源，係指來自於其他組織所擁有或控制之溫室氣體排放源。若企業採取市場基準（Market-based）方式計算範疇二溫室氣體排放量時，可使用「能源屬性憑證」計算能源溫室氣體排放量，其中能源屬性憑證即是代表相關能源產生的某些資訊（或屬性）的契約工具，並非代表能源本身。

因應國際供應鏈鼓勵使用再生能源趨勢，愈來愈多企業宣示100%或一定比例使用再生能源，面對在臺企業對於再生能源採購需求，經濟部標準檢驗局2017年成立國家再生能源憑證中心，公布施行《自願性再生能源憑證實施辦法》建立臺灣再生能源憑證（Taiwan Renewable Energy Certificate, T-REC）制度，透過第三方公正單位查證再生能源設備及發電量查證後，核發再生能源憑證。2020年《自願性再生能源憑證實施辦法》更名為《再生能源憑證實施辦法》，並建立官方綠電交易與憑證買賣方媒合平臺。

T-REC即是能源屬性憑證一種，註記再生能源發電有利於環境屬性之產

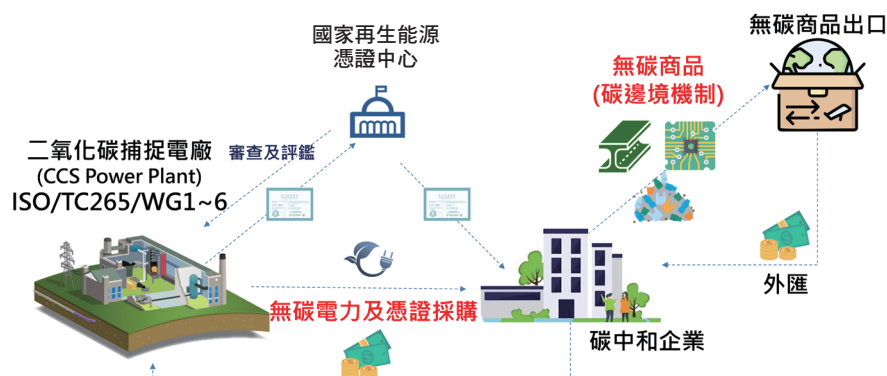


圖4 無碳電力憑證促進淨零正向循環經濟（資料來源：本研究）

權，係電力消費者將再生能源電力使用宣告予以具體化之必要工具。目前企業可透過取得T-REC宣告使用再生能源，應用於國家溫室氣體盤查或者自願性科學基礎減碳目標（Science Based Targets, SBT），抵扣範疇二的溫室氣體排放量。

有鑑於再生能源憑證實際運作機制，當消費者之電力來源為火力電廠時，火力電廠導入碳捕捉與封存技術後，若可有效去除化石能源燃燒所造成溫室氣體排放量，則電廠所產生的電力可視為無碳電力（Carbon-free Power）。未來若歐盟碳邊境調整機制（Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM）規範對象擴及至複雜商品或間接排放，建立無碳電力憑證機制可將導入碳捕捉與封存技術電廠價值鏈外溫室氣體減量轉換成價值鏈內溫室氣體減量，促進淨零正向循環經濟（如圖4）。T-REC所累

積之經驗亦顯示，以用戶自願購買為基礎之綠色電力市場實為市場交易機制之關鍵，相較於碳費、碳稅等以主導方式以期引領淨零目標，憑證所具之驅動力自具優勢。無碳電力憑證為未來更具前景之能源屬性憑證，此外，以憑證促成碳權利市場化，可使得政府部門更有餘裕地完善淨零相關財政政策，包括租稅獎勵、補貼、優惠貸款或綠色融資等。不只可支應淨零對於產業韌性與重新布局所需之量能，也同樣包括透過財政手段鼓勵與減輕企業與各界負擔；例如美國之45Q稅法[13][14]，以租稅抵減方式促進增加CCUS之設備資材投入，使得技術設備價格降低，形成正向循環，紓解各界去碳轉型緩慢問題，並加速產業淨零歷程。

六、結論

近年來，多數先進國家已陸續設

定2050年淨零轉型目標，蔡英文總統於2021年4月22日世界地球日宣示臺灣2050年淨零轉型，同年8月30日環保署修正《溫室氣體減量及管理法》為《氣候變遷因應法》，明定國家溫室氣體長期減量目標為2050年溫室氣體淨零排放，此修正草案已於2022年4月21日通過。為達企業永續經營，國內大型企業例如：台積電、台達電、中美晶、鴻海、華航等陸續設定2050碳中和目標以呼應政府政策，可見臺灣企業落實永續發展之重視。

由於風力與太陽能不同時間發電（包含季節與日夜）差異性大，且具不確定性，將使電力系統的淨負載曲線有更多變化。隨著擴大再生能源搭配儲能系統規模，以及精進智慧電網技術，可以逐步提高再生能源占比，以追求淨零轉型。為能確保我國供電穩定安全，推動火力電廠導入碳捕捉技術作為其他零碳電力備援，有助於協助國家淨零轉型下追求經濟永續發展。若能同步推動導入碳捕捉與封存火力電廠與建立無碳電力憑證制度，將可提供碳中和企業採購無碳電力及憑證機會，協助強化出口產品降低碳含量因應措施與淨零轉型。此外，為鼓勵國產負碳技術研發，並迅速落實產業化推動，建議政府應提供企業

採取CCUS設備的財政誘因（例如：美國45Q稅法）、相關補貼以及綠色融資等，使其技術成本降低，以加速我國大型固定排放源配置CCUS設備。

七、參考文獻

1. Net Zero by 2050 - A Roadmap for the Global Energy Sector, Rev. 4, 2021, IEA. 13-20, 39-41, 45-46, 115-116, 141-143. 2022/3/28檢索，取自 https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/NetZeroBy2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector_CORR.pdf
2. European Academies Science Advisory Council (EASAC)，2018，Negative emission technologies: What role in meeting Paris Agreement targets? EASAC policy report 35.，2022/3/28檢索，取自 https://unfccc.int/sites/default/files/resource/28_EASAC%20Report%20on%20Negative%20Emission%20Technologies.pdf
3. 能源統計手冊，2022，經濟部能源局，臺北，ISSN :1726-3743，58-60。
4. 台灣電力公司，全國各火力發電廠

- 簡介，110/5/28更新，111/2/13檢
索，取自<https://www.taipower.com.tw/tc/page.aspx?mid=202&cid=130&cchk=f8fb50ec-6465-4637-a2d6-97c05646ada6#b03>
5. 林立夫、左峻德、陳彥豪、張懷文、馬雲亭、陳慶馨、江列光、劉文惠，101，台灣發展碳捕獲與封存技術藍圖與產業聚落發展策略芻議，行政院原子能委員會核能研究所，臺灣，ISBN: 978-986-03-2471-6，65-66。
 6. 財團法人中興工程顧問社，103，二氧化碳地質封存先導試驗場址地質調查及技術研發（一），經濟部國營事業委員會，臺北，268-276。
 7. 冀樹勇、邵國士、李易叡、譚志豪、俞旗文，101，台灣二氧化碳地質封存潛能評估，行政院原子能委員會核能研究所，臺灣，ISBN: 978-986-03-2472-3，25、57-58。
 8. 林殿順，100，台灣二氧化碳地質封存研究-子計畫一：濱海區封存潛能之研究，國科會專題研究計畫，臺北。
 9. Cost and Performance Baseline for Fossil Energy Plants Vol 1: Bituminous Coal (PC) and Natural Gas to Electricity, Rev4., 2019, NETL.
 10. Cost and Performance Baseline for Fossil Energy Plants Supplement: Sensitivity to CO₂ Capture Rate in Coal-fired Power Plants, 2020, NETL.
 11. Cost Estimation Methodology for NETL Assessments of Power Plant Performance, 2021, NETL.
 12. 經濟部，111年度再生能源電能躉購費率，111/1/28更新，111/5/19檢索，取自https://www.moea.gov.tw/MNS/populace/news/News.aspx?kind=1&menu_id=40&news_id=98715
 13. Code of Federal Regulations (CFR), Title 26 U.S. Code § 45Q - Credit for Carbon Oxide Sequestration, 2021.
 14. Carbon Storage Requirements in the 45Q Tax Credit, Congress Report 2021, Congress Research Service, 2022/3/28檢索，取自<https://crsreports.congress.gov/product/pdf/IF/IF11639/5>