

化石燃料電廠淨零轉型策略芻議

Net Zero Transformation Strategies for Fossil-fueled Power Plants

左峻德*
Tso, Chunto

陳彥豪*
Chen, Yen-Haw

尤晴韻*
Yu, Ching-Yun

陳映蓉*
Chen, Ying-Jung

鄭允勝*
Cheng, Yeum-Sheng

摘要

IEA淨零路徑圖建議2040年前應淘汰未實施減排措施之燃煤電廠。電力部門擁有大量使用年限長且資本密集之資產，臺灣現有火力機組占總裝置容量70.1%，需採取減排措施。CCUS為電力部門淨零轉型有效手段，可提升既有資產效能，亦有助於快速擴大產製低碳氫能。篩選2040年與2050年時經濟壽命期間內之燃煤燃氣機組，分階段導入碳捕捉技術，估計至2050年CCS技術捕捉4.4億噸、DACCS與BECCS捕捉1,437萬噸，可望促成電力部門達至淨零。透過無碳電力憑證機制，可將導入CCUS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。淨零轉型過程中，需採用包括財政在內之各種政策促成CCUS相關市場，達成化石燃料電廠淨零轉型。同時搭配鼓勵氫能與生質燃料生產、各行業共用二氧化碳輸送與封存基礎設施；並以國家隊規格結合國內外企業實力，促成產業樞紐升級。

Abstract

IEA recommends phasing out all unabated power plants by 2040. Fossil-fueled power plants account for 70.1% of the total installed generation capacities in Taiwan. CCUS is an effective means to achieve net-zero transformation of the power sector by improving the performance of existing assets and expanding the production of low-carbon hydrogen. As the estimates of this study shows, CCUS may make a significant contribution to net zero emissions (NZE) of the power sector in Taiwan; besides, a mechanism titled carbon-free power certificate mechanism may convert the GHG reductions outside the value chain of power plants into GHG reductions within the value chain. Along the way to NZE, various policies, such as follows, need to be adopted to facilitate CCUS related markets: fiscal measures, sharing CO₂ transmission and storage infrastructure among industries, and get together domestic and foreign enterprises to realize industrial transformation/upgrading.

關鍵詞(Key Words)：淨零排放(Net Zero Emissions)、碳捕捉、再利用及封存(Carbon Capture, Utilization and Storage)、負碳技術(Negative Emission Technologies)、二氧化碳從大氣中去除(Carbon Dioxide Removal)、均化發電成本(Levelized Cost of Electricity)、無碳電力憑證(Carbon Free Power Certificates)。

*財團法人台灣經濟研究院

壹、前言

為阻止氣候變遷加劇，各國積極研擬減量目標，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目標(Net Zero Emission)。此根據國際能源署(International Energy Agency，以下簡稱 IEA)分析，在淨零轉型過程，電力是改變最大的領域；若要在未來 30 年間快速地減少二氧化碳排放，相較現有手段，需要更廣泛的政策方法與技術。支援全球能源系統去碳的支柱包含能源效率、行為改變、電氣化、再生能源、氫能及氫基燃料、生質能與碳捕捉、再利用及封存(Carbon Capture, Utilization and Storage，以下簡稱 CCUS)。

臺灣現有發電裝置容量 60,332 千瓩，其中火力機組占總裝置容量 70.1%，裝置容量為 42,302 千瓩，分別來自於台電公司 26,341 千瓩、民營電廠 8,753 千瓩與自用發電設備 7,207 千瓩。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。依照 IEA 路徑圖建議，至 2040 年應淘汰未實施減少排放之燃煤電廠。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，以達到淨零轉型。

本研究將介紹 CCUS 技術、淨零轉型對能源與電力部門發展影響，分析台電火力電廠碳排放狀況趨勢與導入碳捕捉技術情境，提出淨零電廠協助企業淨零轉型的作法建議，供各界參考。

貳、淨零轉型與負碳技術發展介紹

依據聯合國政府間氣候變化專門委員會(Intergovernmental Panel on Climate Change，以下簡稱 IPCC)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去除(Carbon Dioxide Removal，以下簡稱 CDR)的過程，有助於將溫度升幅限制在 1.5°C 內。目前多數實現巴黎協定目標途徑，都需在本世紀下半葉大規模部署負排放技術。根據 IPCC 計算，2050 年後，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。

負碳技術主要發展約可分為生產製程之 CCUS、由大氣中之直接碳移除(Carbon Direct Removal，以下簡稱 CDR)或相關處理、及環境系統可吸儲之碳匯(Carbon Sink)等主要技術領域。

一、生產製程之碳捕捉、再利用及封存(CCUS)

IEA 於 2020 年發布能源技術展望報告提出，在世界邁向淨零的道路上，CCUS 將是關鍵技術之一。淨零能源系統要求在生產與使用能源的方式發生深刻的轉變，只有透過一系列廣泛且合適的技術才能實現。除電氣化、氫能與永續的生質能源之外，CCUS 將發揮重要作用，此技術是唯一能夠直接減少與消除關鍵部門的二氧化碳排放，以平衡無法避免的排放量，這即是淨零排放的關鍵目標。IEA 指出 CCUS 透過以下幾種方式對於潔淨能源轉型做出貢獻^[1]：

- (一)解決現有能源基礎設施的排放問題：CCUS 可以對現有電廠與工廠進行調整與精進。若未採措施予以調整，全球現有電廠與工廠未來 50 年間排放二氧化碳可達 6,000 億噸，相當於目前年排放量近 17 倍。
- (二)解決一些最具挑戰性的排放方法：目前重工業占全球二氧化碳排放量近 20%，CCUS 技術是唯一可從水泥生產中大幅減少排放二氧化碳的解決方案。在許多地

區，CCUS 是抑制鋼鐵與化學製品生產中最經濟有效的方法。捕捉的二氧化碳是來自二氧化碳與氫的合成燃料供應鏈的關鍵部份，這是用於長途運輸(尤其是航空運輸)的少數幾種低碳選擇之一。

(三)具經濟效益的低碳氫生產方法：CCUS 可以支持快速擴大低碳氫生產的規模，以滿足交通、工業與建築領域目前的新應用與未來的需求。

(四)從大氣中移除碳：對於無法避免或無法直接減少的二氧化碳排放，CCUS 為移除碳排放與提供零淨能源系統奠定重要的技術基礎。

二、由大氣中之直接碳移除(CDR)或相關處理

二氧化碳直接移除(CDR)是指將二氧化碳從大氣中移除的程序，與碳排(Carbon Emission)相反，移除的作法或技術通常也被

描述為負排放(Negative Emission)。如果移除的氣體不限於二氧化碳，而是移除溫室氣體，例如甲烷(CH₄)、一氧化二氮(N₂O)、臭氧(O₃)等，更可廣泛地稱為溫室氣體移除(Greenhouse Gas Removal)。碳移除方法可以包括基於自然的解決方案，增強的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，指重新利用以前沒有森林的土地來改變土地使用)和重新造林(Reforestation，或稱跡地造林，指重新建立過去沒有森林的土地)。增強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、或精細的礦物矽酸鹽岩石)和海洋施肥，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(參表 1)。

表 1 主要除碳方法與技術

方法	應用類型	現階段類別	除碳潛力(GtCO ₂)*	CO ₂ 捕捉成本 (USD/tCO ₂)
生質能碳捕捉及儲存(BECCS)	技術	示範	100-1,170	15-85
直接空氣捕捉及儲存(DACCS)	技術	示範	108-1,000	135-345
增強礦物的風化	增強自然過程	基礎研究	100-367	50-200
土地管理與生物炭生產	增強自然過程	早期採用	78-1,468	30-120
海洋施肥/鹼化	增強自然過程	基礎研究	55-1,027	-
造林/再造林	自然方式	早期採用**	80-260	5-50

註：*除碳潛力指累計至 2100 年。碳清除潛力之估算不計入。

**造林/重新造林雖為一種既定做法，但在碳清除的背景下仍處於早期採用階段。

資料來源：IEA (2020)

目前 CDR 可分為兩大類：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捉 CO₂ 將其封存在地下層等其他地方。所有各種 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，而有些方法尚居於較概念性階段，尚未進行驗證或大規模試驗。現有許多 CDR 技術，所能達成負碳排的潛力各不相同，所需的成本以及影響亦不同。IEA 對碳

移除的描述，可顯示其潛力角色與政策效益：

- (一)碳移除技術具有抵消難以減排的行業的殘餘排放的潛力，從而實現整個能源行業的淨零排放。
- (二)最遲自 20 世紀末起，碳移除通常也被視為產生淨負排放的一種方式，以抵消地球溫室效應問題被關注前期的過剩排放。但也因此 IEA 提醒，勿將碳移除技術理解為現今減少排放量的替代方法或可以延遲採取行動的原因。
- (三)從政策的角度來看，碳移除技術還可作為一種對沖手段，以抵消或緩解整個能源領域其他二氧化碳減排技術的開發和部署過程中出現延遲甚至失敗的風險，畢竟技術開發和部署的進程經常並不是線性發展，且往往存在不可預期的延遲因素在內。

直接空氣碳捕捉及儲存(Direct Air Capture with Carbon Storage，以下簡稱 DACCS)和生質能碳捕捉及儲存(Bioenergy with Carbon Capture And Storage，以下簡稱 BECCS)是當今主要的碳移除技術解決方案，是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^[2]。直接空氣捕捉技術直接從大氣中捕捉二氧化碳，以進行永久封存；或用於例如食品加工或生產合成烴燃料，這種途徑則最終再釋放二氧化碳。BECCS 涉及從生質物轉化為能量，或係於生產材料的過程中捕捉及永久封存二氧化碳。既有例子包括生質物發電廠，用於造紙的紙漿廠，用於水泥生產的窯爐，以及產製生物燃料的工廠。

參、淨零轉型對能源與電力部門發展影響

根據國際能源署(IEA)分析，在淨零轉型

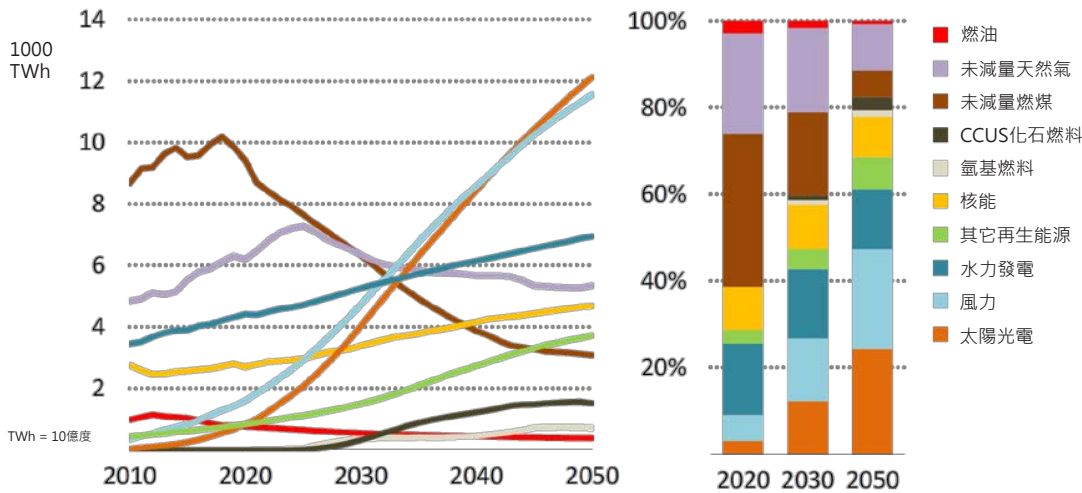
過程電力是改變最大的領域。能源部門擁有大量使用年限長和資本密集資產，例如城市基礎建設、管線、煉油廠、燃煤電廠、重工業設施、建築物和大型水力發電廠等，其技術和經濟使用年限通常可超過 50 年。全球電力部門既有資產的溫室氣體排放約占整體排放的 50%，其中四成來自於燃煤電廠。如果這些能源基礎設施都維持原方式運作，2020 年到 2050 年累積排放量將達到 6,500 億公噸，超過全球升溫維持於 1.5°C 剩餘碳預算的 30%。再生能源發電成本持續下降，使得電力發展從 2020 到 2050 年更具優勢，整體電力需求將增加 80%，占最終能源消費需求比例倍速成長。然而，儘管再生能源大幅成長，燃煤對於經濟持續發展、面對地緣政治風險或是對於不使用核能之經濟體而言，在其電力來源組成中仍持續扮演一定的角色。

依據 IEA 就全球已經承諾淨零的發展情境分析，全球電力發電量將從 2020 年 268,000 億度增加至 2050 年之 500,000 億度，增加部份全來自於低污染能源。再生能源將引領未來能源供應發展，占整體能源供應組合從 2020 年的 12%增加到 2050 年的 35%。其中 50%的再生能源成長來自於太陽能與風能，另外的 30%則來自於搭配 CCUS 的生質能源。若核能在整體能源組合中比例不變，2050 年全球將快速減少 50%燃煤使用量，主因於燃煤電廠的用途改變、更新或除役。在未來的 10 至 15 年，已開發經濟體將會逐步淘汰未減量的燃煤電廠(Unabated coal-fired plant)。圖 1 是極大化再生能源發展達到 70%總發電量狀況下 2050 全球淨零轉型承諾下發電組合。

依據 IEA 分析，若要在未來 30 年間快速地減少二氧化碳排放，相較現有手段，需要更廣泛的政策方法與技術。支援全球能源系統去碳的支柱包含能源效率、行為改變、電

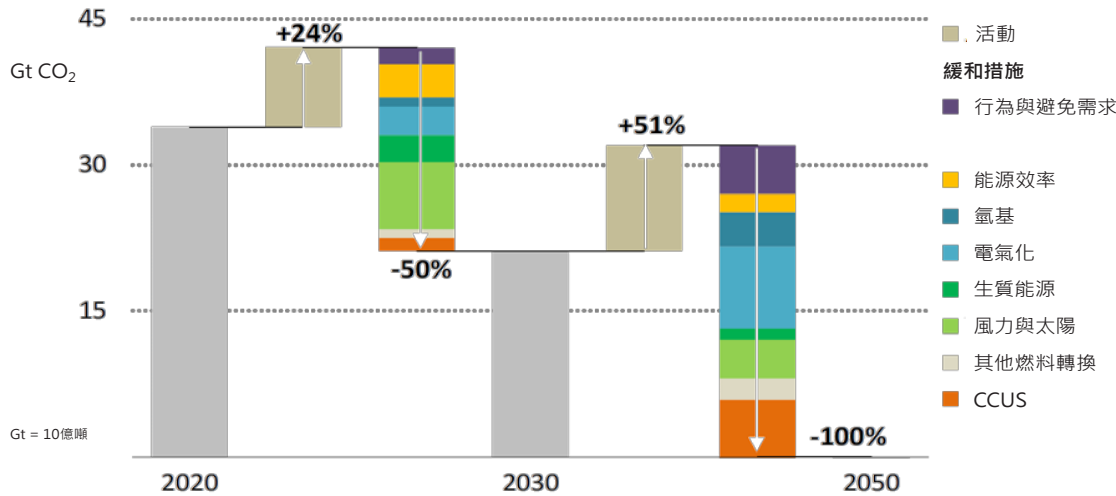
氣化、再生能源、氫能及氫基燃料、生質能與碳捕捉、再利用及封存(CCUS)。太陽、風

力與能源效率可貢獻至 2030 年一半的減量，之後電氣化、CCUS 和氫將擴大貢獻度(圖 2)。



資料來源：IEA

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

肆、碳捕捉、再利用及封存(CCUS)與淨零轉型

CCUS 為電力部門淨零轉型有效處理溫室氣體排放手段之一，不但可用於處理既有資產排放，也可為快速擴大產製低碳氫能提供具成本有效性的產生方式。而 BECCS 與 DACCS 技術則可用於落實移除大氣中的二氧化碳。

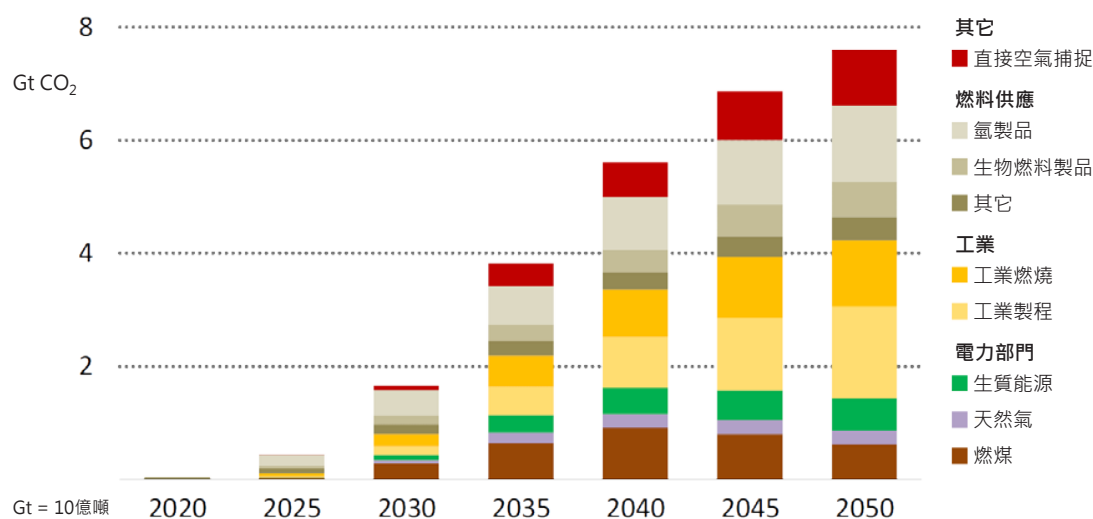
在淨零轉型過程中，需採用各種政策措

施建立市場促進 CCUS 的投資，與鼓勵氫能製造與生質燃料生產、工業樞紐維運、更新既設燃煤電廠等共用二氧化碳輸送與封存基礎設施。未來 5 年，現有專案捕捉規模將從現有 4,000 萬噸二氧化碳微幅上升。爾後的 25 年將因為政策行動產生效果而快速擴大捕捉規模。IEA 預計在 2030 年全球每年將可捕捉 16 億噸二氧化碳，到 2050 年進一步擴大到 76 億噸。所捕捉的二氧化碳預計會有 95%

將永久封存在地質中，另外的 5%則會使用於製造合成燃料。調查結果，顯示全球地質封存二氧化碳容量潛能遠大於封存未來數十年所捕捉二氧化碳規模。2050 年透過直接空氣碳捕捉或生質能源與碳捕捉，總共從大氣中捕捉 24 億噸二氧化碳，其中 19 億噸二氧化碳永久封存，5 億噸二氧化碳用於提供合成燃料，特別是用於航空運輸^[3]。

到 2050 年，電力部門二氧化碳捕捉量為整體捕捉量的 20%(其中約 45%來自燃煤電

廠，40%來自生質能電廠，15%來自燃氣電廠)。到 2050 年，配備 CCUS 的發電廠發電量僅占總發電量的 3%，但捕捉的二氧化碳量相對較大。由於新興與發展中經濟體仍會持續建置相對大量的燃煤電廠，若當地有二氧化碳封存潛能，電廠翻新將扮演一定的角色。對於已開發經濟體，配置 CCUS 的燃氣電廠則更重要，可在天然氣費用較低區域及對既有電網提供相對低成本的可調度電力(圖 3)。



資料來源：IEA

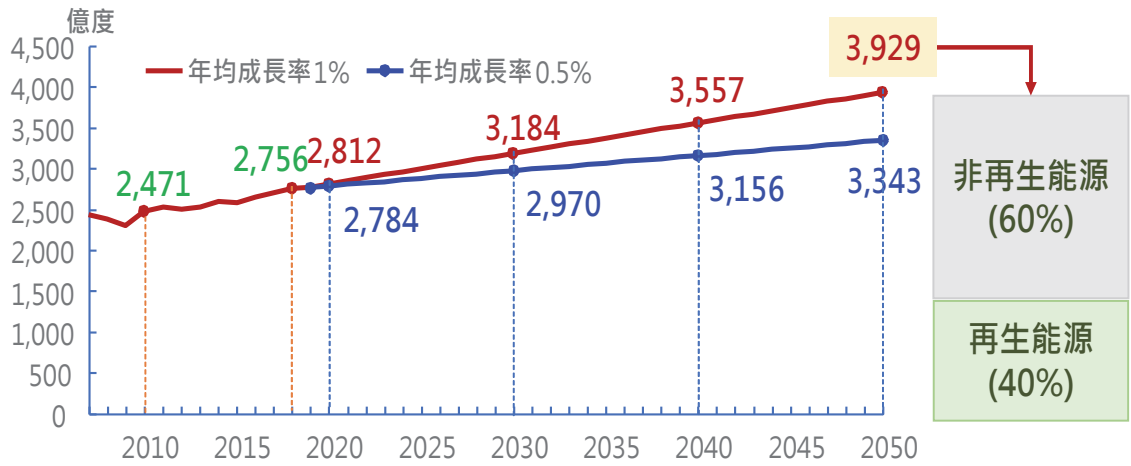
圖 3 淨零轉型全球不同來源別二氧化碳捕捉量

伍、化石燃料現況與淨零挑戰

分析臺灣 2010-2020 年電力需求成長趨勢，假設臺灣電力長期需求年均成長率介於 0.5%-1%之間，則總發電量將從 2018 年的 2,756 億度持續成長，2050 年將介於 3,343 至 3,929 億度之間(圖 4)。臺灣推行非核家園，新設燃煤電廠不易，若臺灣持續朝向廢核減煤方向發展，所有核能電廠依年限除役，不再新設燃煤機組，以現有再生能源技術及天然氣機組滿足供電需求，隨再生能源與天然

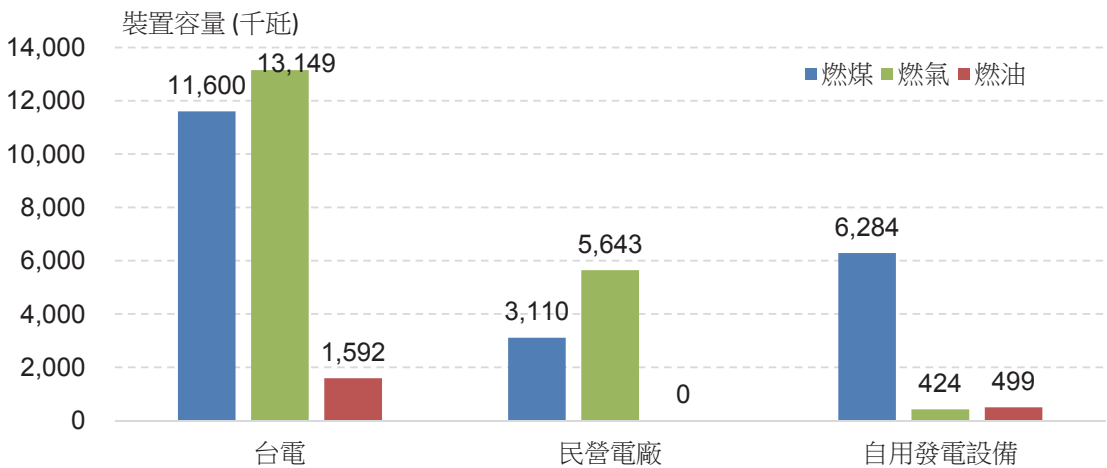
氣發電持續開發，發電量配比將達到再生能源 35-40%、煤 5%、天然氣 55-60%。

根據經濟部能源局發電裝置容量統計^[4]，臺灣現有發電裝置容量 60,332 千瓩，其中火力機組占總裝置容量 70.1%，裝置容量為 42,302 千瓩，分別來自於台電公司 26,341 千瓩、民營電廠 8,753 千瓩與自用發電設備 7,207 千瓩。台電燃氣機組裝置容量 13,149 千瓩，約占台電火力發電容量之半(49.9%)，燃煤裝置容量為 11,600 千瓩，燃油為 1,592 千瓩。民營電廠火力機組裝置容量 5,643 千瓩，燃煤裝置容量 3,110 千瓩(圖 5)。



資料來源：本研究

圖 4 2050 低碳能源配比發展情境設定



資料來源：經濟部能源局

圖 5 台電與民營電廠火力發電裝置容量

台電燃煤與燃氣電廠整體平均運轉年數 21.1 年^[5]，其中燃氣機組 19.9 年，燃煤機組 22.7 年。民營電廠 26 機組運轉年數在 11 至 30 年之間，平均運轉年數 19.5 年，其中燃氣機組 19.0 年，燃煤機組 21.8 年。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(表 2)。另有長期

電源規劃新設機組 13 座，其中燃煤機組 2 座，燃氣機組 11 座。考量國內電廠通常運轉約 40 年以上除役，若未來未再規劃設置火力發電機組，至 2040 年約有 25 座既設機組與 13 座新設機組持續運作(燃氣 24 座，燃煤 14 座)。至 2050 年約有 9 座既設機組與 13 座新設機組持續運作(燃氣 15 座，燃煤 7 座)。

表 2 台電與民營電廠燃煤與燃氣機組運轉年數

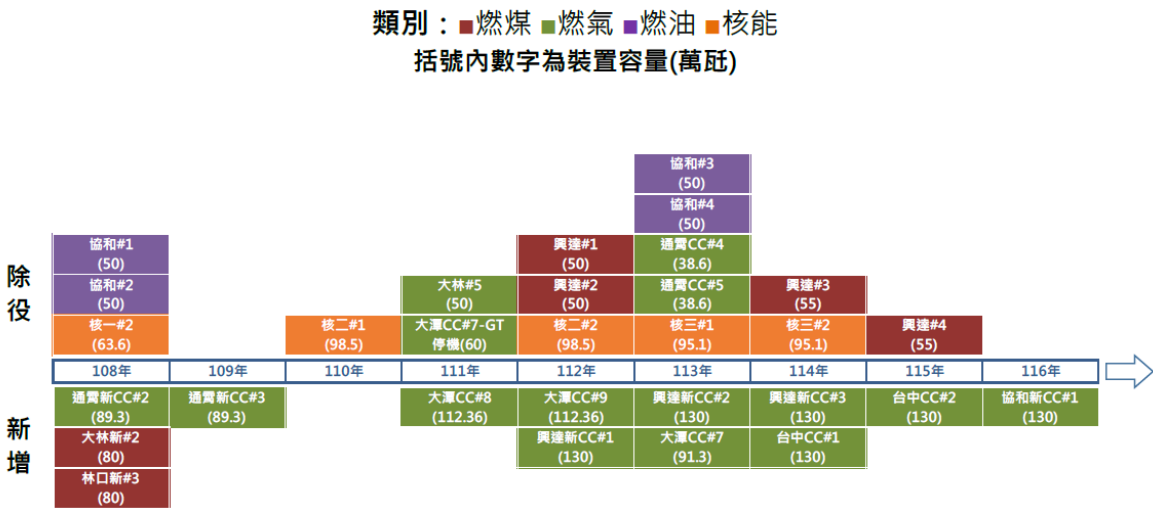
電廠別 運轉年數	台電電廠			民營電廠			總計
		燃氣	燃煤		燃氣	燃煤	
總 計	43	24	19	26	21	5	69
10 年或以下	9	4	5	0	0	0	9
11 至 20 年	9	7	2	14	12	2	23
21 至 30 年	18	12	6	12	9	3	30
31 至 40 年	6	0	6	0	0	0	6
40 年以上	1	1	0	0	0	0	1
平均運轉年數(年)	21.1	19.9	22.7	19.5	19.0	21.8	20.5

資料來源：經濟部能源局與台電公司，本研究整理。

配合政府能源政策及考量現今內外環境條件，台電公司最新長期電源開發方案(圖 6)，2021 年至 2027 年預計除役的火力及核能機組裝置容量達 8,244 千瓩；規劃新增火力機組裝置容量約 10,360.2 萬瓩，計有大潭(#7、#8、#9)、興達更新(#1、#2、#3)、台中(#1、#2)及協和新電廠(#1)等計畫。預計 110 年至 116 年新設 13 座火力機組，其中 2 座為燃煤機組，11 座為燃氣機組。

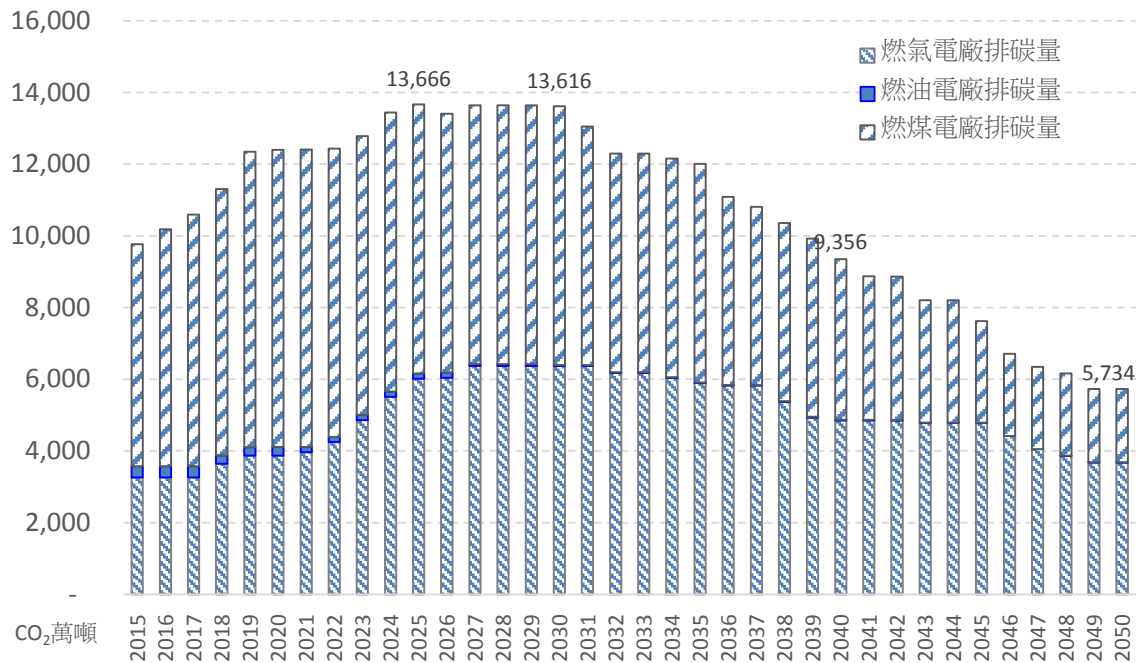
若以燃油機組單位排碳量 535(g CO₂/kWh)，每 MW 裝置容量發電各為 1.77 百萬度數；燃

氣機組單位排碳量 440(g CO₂/kWh)，每 MW 裝置容量發電為 5.73 百萬度數；燃煤機組單位排碳量 832(g CO₂/kWh)，每 MW 裝置容量發電為 6.15 百萬度數推算，則 2021 年電力業的溫室氣體排放約 12,408 萬噸。現有既設與電源開發規劃火力機組，若不採取減量措施，二氧化碳排放將持續增加，在 2025 年達到高峰，總排放量 13,666 萬噸。2030 年總排放量為 13,616 萬噸。隨著部份火力機組達運轉年限除役，2040 年排放量降為 9,356 萬噸，2050 年為 5,734 萬噸(圖 7)。



資料來源：台電公司

圖 6 台電公司長期電源開發規劃



資料來源：本研究

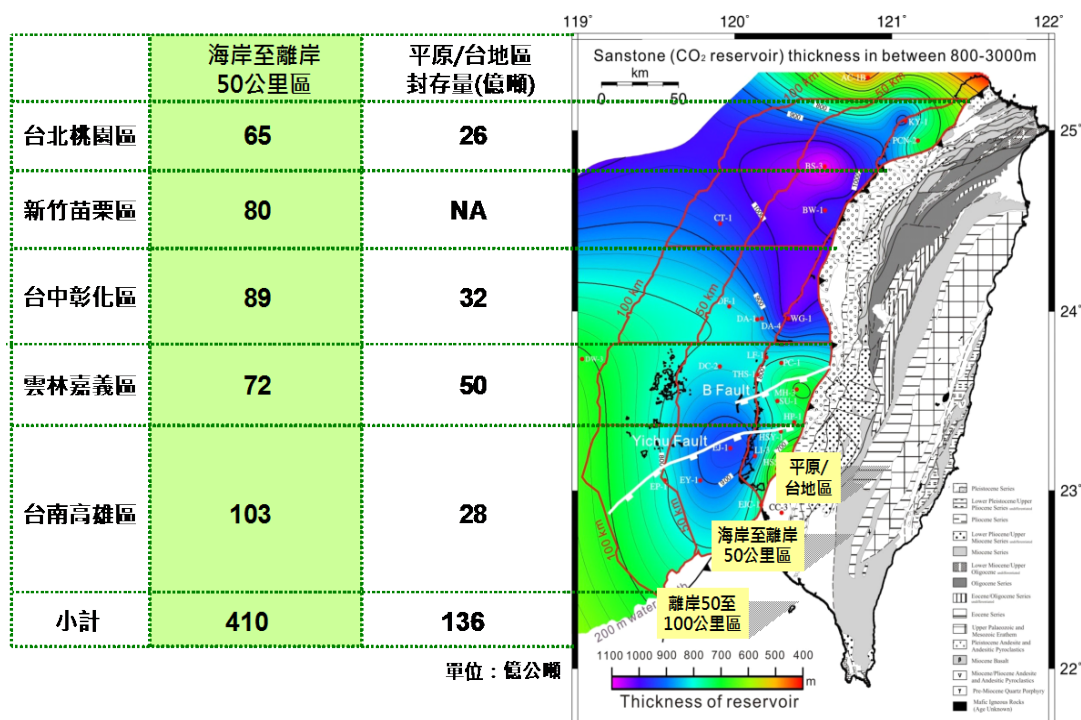
圖 7 台電火力電廠碳排放狀況趨勢

從前述分析可知，自 2040 年後若不採取減量措施，火力電廠仍有一定之排放量 9,356 萬噸，約來自 24 座燃氣機組(其中新設機組 11 座，既設機組 13 座)與 14 座燃煤機組(其中新設機組 2 座，既設機組 12 座)；2050 年後，仍有排放量 5,734 萬噸，約來自 13 座燃氣機組(其中新設機組 11 座，既設機組 2 座)與 3 座燃煤機組(其中新設機組 2 座，既設機組 1 座)。依照 IEA 路徑圖建議，至 2040 年應淘汰未實施減少排放之燃煤電廠，則 2040 年未達運轉年限之燃煤電廠，勢必需導入碳捕捉與封存技術。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，也需要導入負碳技術，以達到淨零轉型目標。

陸、臺灣火力發電廠導入碳捕捉技術情境

臺灣適合二氧化碳封存的地質環境主要有陸域油氣田構造與西部海濱深部鹽水層構造。中央大學林殿順教授於 2011 年已研究臺灣西部濱海區域內可能之封存層與蓋層分布，分析結果顯示臺灣海陸域擁有最大 574 億噸二氧化碳封存潛能，保守估計約有 164 億噸二氧化碳封存量^[6-8](圖 8)。



資料來源：Andrew Tien-Shun Lin, 2010^[9]

圖 8 臺灣西部鹽水層二氧化碳封存潛能

依據現有或未來新設機組之運轉年限分析，至 2050 年尚未除役的燃煤機組為林口(#1、#2、#3)、大林(#1、#2)，年度排放量約 2,046 萬公噸。至 2050 年尚未除役的燃氣機組為大潭(#7、#8、#9)、通霄(#1、#2、#3)、興達(#1、#2、#3)、台中(#1、#2)、協和(#1)，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)，年度排放量約 2.1 萬公噸。塔山發電廠位於金門離島，考量電廠規模與當地地質條件，相關排放量可能採用 DACCS 或 BECCS 負碳技術移除。2050 年大型燃煤與燃氣機組總排放量約 5,508 萬公噸，若碳捕捉技術可以捕捉 90% 的排碳，則需封存 4,957 萬公噸二氧化碳，其餘的 10%，約 552.9 萬公噸則可採 DACCS 或 BECCS 負碳技術移除。基於上述條件與配套措施，我國火力電廠可依如下情境導入碳捕捉技術：

- 一、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。
- 二、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。
- 三、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。
- 四、原則上，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(圖 9)，達成火力電廠之淨零排放。

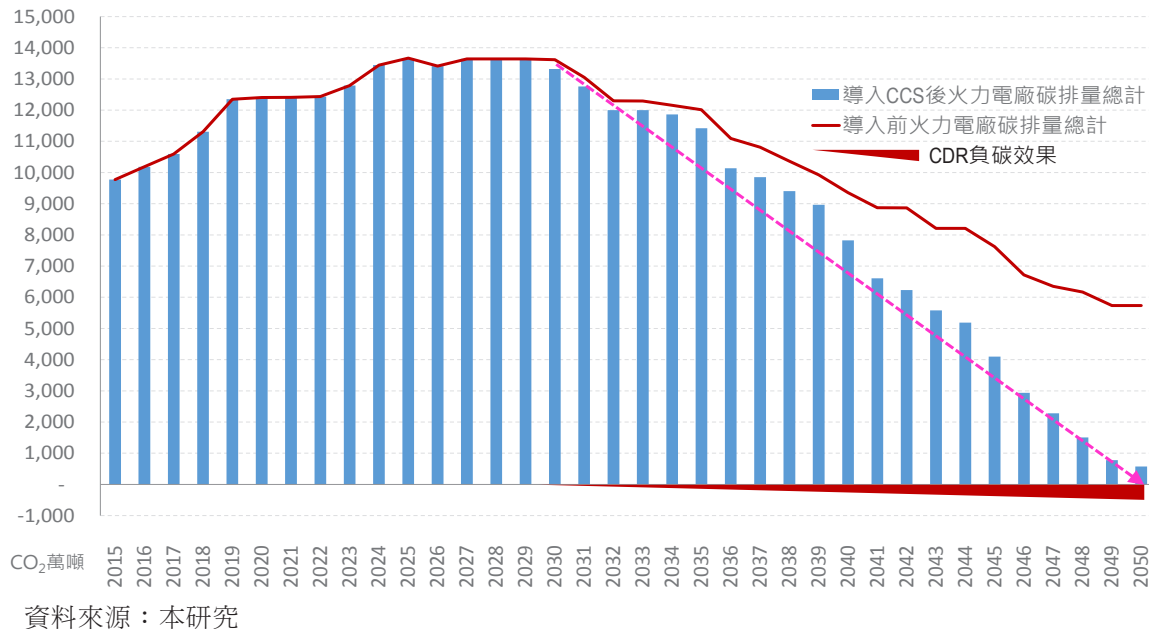


圖 9 導入碳捕捉後火力電廠碳排放狀況

柒、淨零電廠協助企業淨零轉型的作法建議

2021 年世界地球日蔡總統宣布 2050 淨零轉型是全世界目標，也是臺灣的目標，同時國內企業例如：台達電、中美晶、鴻海、華航等也紛紛做出實踐碳中和的承諾以呼應政府政策，透過付出實際行動為地球貢獻一份心力，顯現臺灣企業對於永續發展的重視。根據溫室氣體盤查議定書(GHG Protocol)^[9]對於應用於描繪直接與間接排放源所引入的範疇(Scope)定義，生產企業所外購並且使用的電力、熱能、蒸氣及冷房(統稱為電力)之設備所產生的溫室氣體歸屬於範疇二(Scope 2)溫室氣體排放。能源屬性憑證是代表相關能源產生的某些資訊(或屬性)的契約工具，但是不代表能源本身。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。

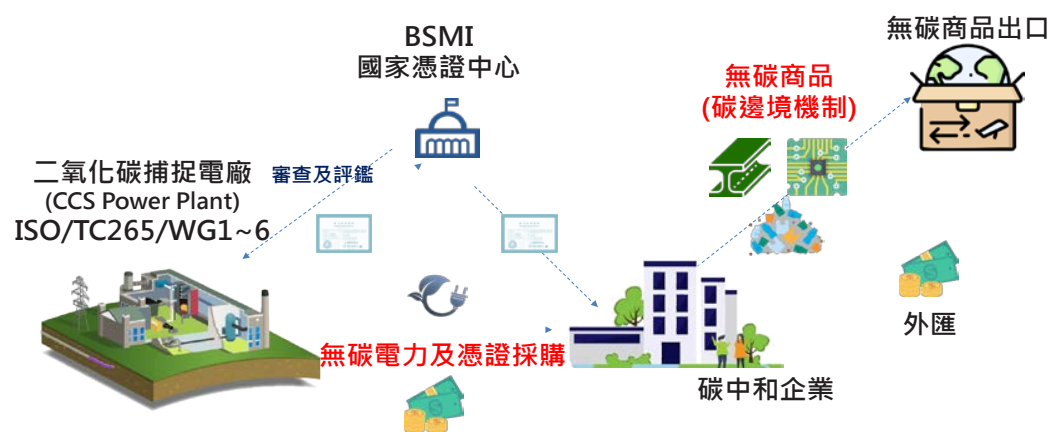
因應國家能源轉型與企業淨零轉型對再生能源採購需求，經濟部標準檢驗局於 2017

年公布施行《自願性再生能源憑證實施辦法》建立臺灣再生能源憑證制度。再生能源憑證代表再生能源發電對有利於環境屬性的產權，係電力消費者具體化再生電力使用宣告的必要工具。企業目前可透過取得再生能源憑證(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。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，則電廠所產生的電力可視為無碳電力。透過無碳電力憑證機制，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，未來若歐盟碳邊境調整機制規範對象擴及至複雜商品或間接排放，無碳電力憑證應可用於減少生產過程使用電力所導致的隱含排放，促進淨零正向循環經濟(圖 10)。

均化發電成本主要用於同時間不同技術經濟之比較，例如燃煤與燃氣發電之比較、有否導入碳捕捉技術之比較。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^[10-14]，應用於估計臺灣碳捕捉火力電廠之均化成本。顯示具有碳捕捉之燃煤電廠之每度發電成本約 3.06 元，較未導入碳捕捉燃煤電廠之每度發電成本高出約 56.9%，具有碳捕捉燃氣電廠之每度發電成本約 3.50 元

(表 3)。儘管均化成本與再生能源費率計算有所差異，不逕作絕對之比較，然參考目前陸上風力發電價格約每度新台幣 3.6~4.1 元、水力發電每度新台幣 3.4~4.2 元、太陽光發電每度新台幣 4.8~5.5 元、離岸風力發電價格約每度超過新台幣 3.5 元，導入碳捕捉與封存技術電廠所產生電力，相較於再生能源電力應具有市場競爭力。



資料來源：本研究

圖 10 無碳電力憑證促進淨零正向循環經濟

表 3 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 (元/度)	1.95	3.06	2.64	3.50

資料來源：NETL、台電，本研究整理。

捌、結論與建議

2050 淨零碳排是聯合國氣候變遷第二十六次峰會的重要決議事項，臺灣也在 2021 年 4 月 22 日世界地球日由蔡英文總統宣示我國 2050 淨零排放目標，並預計在 2022 年 3 月底規劃出淨零排放路徑。我國 2020 年能源部門、運輸部門與工業部門三個主要部門合計二氧化碳排放量超過全國 96% 排放量。如果能夠經濟有效地減少三大部門的二氧化碳排放，國家淨零排放的目標方能達成。在國際能源總署建議 400 多項減排路徑中，最直接有效的策略應是能源部門以及鋼鐵、石化、水泥等工業部門採取的 CCUS 技術。這項技術實施的主要條件需要有安全封存場域、碳捕捉與輸存的技術、健全的財務規劃。臺灣西部海域鹽水層二氧化碳封存量估計約在 164 億噸至 574 億噸間，將可封存目前排放量 50 年至 250 年。燃煤及燃氣電廠的二氧化碳捕捉技術國內尚未完全成熟，仍需自美國（譬如：Exxon Mobil），日本（譬如：三菱重工）或德國（譬如：西門子）引進，國內台電、中油、中鋼、台塑等大型排放源企業應組成臺灣國家隊，落實技術深根，培養專業人才，加速進行各項減排工程。

最後在健全財務規劃方面，可參考美國 2020 Future Act 稅法 45Q 提供 CCUS 財政誘因，稅負抵減額度 50 美元（每公噸封存 CO₂），並明訂落日實施期限，以加速大型固定排放源企業在 2035 年前配置 CCUS。另外，政府應儘快推動 CCUS 的無碳電力憑證制度，並爭取日、韓、美、加等國之合作，形成無碳電力憑證國際化，並藉以爭取半導體、面板、鋼鐵、石化、水泥、造紙等大電力用戶主動投入

CCUS 的早期推動計畫，減輕高排放企業配備 CCUS 設備之大量資金投入之壓力，促成產業樞紐之升級。

玖、參考文獻

- [1] IEA, “Energy Technology Perspectives - Special Report on Carbon Capture Utilisation and Storage -- CCUS in clean energy transitions,” 2020, pp.13-14.
- [2] 尤晴韻、陳映蓉，「國際負碳技術發展趨勢」，台灣經濟研究月刊，第 45 卷，第 1 期，第 110-117 頁，2022 年 1 月。
- [3] IEA, “Net Zero by 2050 A Roadmap for the Global Energy Sector, 3rd revision,” 2021, pp.79-81.
- [4] 經濟部，「能源統計-電力供給」，111 年 3 月 9 日更新，111 年 3 月，<https://www.esist.org.tw/database>.
- [5] 台灣電力公司，「全國各火力發電廠簡介」，110 年 5 月 28 日更新，111 年 2 月，<https://www.taipower.com.tw/tc/page.aspx?mid=202&cid=130&cchk=f8fb50ec-6465-4637-a2d6-97c05646ada6#b03>.
- [6] 林殿順、吳榮章，「台灣鹽水層二氧化碳地質封存量評估」，台灣二氧化碳地質封存研究計畫，2011 年。
- [7] 林立夫、左峻德、陳彥豪、張懷文、馬雲亭、陳慶馨、江列光、劉文惠，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，台北 ISBN: 978-986-03-2471-6，2012 年。
- [8] 冀樹勇、邵國士、李易叡、譚志豪、俞旗文，「台灣二氧化碳地質封存潛能評估」，能源國家型淨煤主軸專案計畫，台北，2012 年。
- [9] Andrew Tien-Shun Lin, “Current Status and Perspectives of Taiwan CO₂ Geosequestration,” Proceeding of International Workshop on Carbon Dioxide Geographic Sequestration, 2010.

- [10] WRI, The Greenhouse Gas Protocol, Revision Edition ISBN 1-56973-568-9, 2004.
- [11] DOE/NETL, “Life Cycle Analysis: Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC) Power Plant, rev.2,” 2013.
- [12] NETL, “Cost and Performance Baseline for Fossil Energy Plants vol 1: Bituminous Coal (PC) and Natural Gas to Electricity, rev4,” 2019.
- [13] IEA and NEA, “Projected Costs of Generating Electricity,” 2020.
- [14] NETL, “Cost Estimation Methodology for NETL Assessments of Power Plant Performance,” 2021.

台電工程月刊 891 期專輯徵稿啟事

- 本刊預定於 111 年 11 月發行以「邁向 2050 淨零排放之電網穩定因應措施」為主題之專輯與讀者分享，歡迎有相關論著者踴躍投稿（截稿日為 111 年 8 月 15 日），每篇以 2 萬字（含圖、表）為原則。
- 稿件之撰寫格式、投稿方式及稿酬等悉依本刊原訂標準。
- 投稿相關事宜，若有任何疑問，請與我們聯絡，謝謝您！

☎ (02)2360-1095

✉ u223798@taipower.com.tw

