

## 第五篇 世界櫥窗

### 第 10 章 電網級碳捕捉利用與封存現況與展望

左峻德\*、陳彥豪\*\*、尤晴韻\*\*\*、陳映蓉\*\*\*\*、陳柏誼\*\*\*\*\*

(\*台經院 副院長)(\*\*台經院一所 所長)(\*\*\*台經院一所 副所長)

(\*\*\*\*台經院一所 組長)(\*\*\*\*\*台經院一所 助理研究員)

#### 摘要

在 2021 年的第 26 屆聯合國氣候變遷會議(26th Conference of the Parties, COP26)，重申《巴黎協定》(Paris Agreement)將全球平均溫度上升幅度控制在 1.5°C 內，並達成淘汰化石燃料之共識，主要將逐步減少煤電以及低效化石燃料的補貼。各國須積極投入淨零技術以因應此一共識，而在現行電力以及清潔能源需求不斷增長之情況下，除了逐步發展再生能源外，火力發電廠導入碳捕捉利用與封存將至關重要，不僅降低電力部門的碳排放，同時穩定供電，提供有減碳需求之企業所需的低碳或無碳電力，亦能夠引領淨零過渡期，達到能源轉型目標，並向 2050 淨零排放邁進。本文探討國際淨零趨勢發展情境下，國際碳捕捉、利用與封存發展現況，以及探討電廠如何導入碳捕捉利用與封存技術，以協助電力部門達到淨零轉型目標。

**關鍵詞：**淨零過渡期，淨零轉型，能源轉型，碳捕捉利用與封存，無碳電力

#### 壹、前言

氣候變遷目前已是全球最迫切需解決的挑戰之一，並且為了有效限制氣溫的上升，而展開減少溫室氣體排放的措施。為了凝聚各國針對全球暖化議題的共識，聯合國設立之「政府間氣候變化綱要公約談判委員會」歷經多次商議後，於 1992 年通過聯合國氣候變化綱要公約(The United Nations Framework Convention on Climate Change，以下簡稱 UNFCCC)，並在巴西里約熱內盧地球高峰會開放簽署。此公約目標在於降低大氣中溫室氣體濃

度，防止氣候系統受到危險人為干擾，使生態圈適應氣候變遷，並確保糧食生產免受影響，同時促進經濟永續發展。截至目前，共有 197 個國家成為締約國。為了能夠有效落實此氣候變化綱要公約，UNFCCC 每年將召開聯合國氣候變遷會議(Conference of Parties，以下簡稱 COP)，與各國共同研議全球氣候變化之相關議題<sup>[1]</sup>。

2021 年，在英國蘇格蘭格拉斯哥舉辦的第 26 屆聯合國氣候變遷會議(26th Conference of the Parties, COP26)，主要重申《巴黎協定》(Paris Agreement)將全球平均溫度上升幅度控制在 1.5°C 內之目標，並呼籲各國為了達到此一目標，需要所有國家提出更有利的國家自主貢獻(Nationally Determined Contributions，以下簡稱 NDCs)，方能在 10 年間降低 45% 的二氧化碳排放量，於 2050 年有效達到淨零。而在此一會議亦有達成淘汰化石燃料之共識，要求各國逐步減少煤電以及低效化石燃料的補貼<sup>[2]</sup>。為了達成上述所提及之目標，各國投入多項淨零關鍵技術，其中包括碳捕捉、利用與封存(Carbon Capture, Utilization and Storage，以下簡稱 CCUS)，在 COP26 期間，舉辦多場 CCUS 相關活動，說明包括政策、商業、社會與技術等內容，使參與者認識到 CCUS 技術與其協助達成氣候目標之重要性<sup>[3]</sup>。同時，美國與中國則發表《中美應對氣候危機聯合聲明》(Joint Statement Addressing the Climate Crisis)，將針對 CCUS 以及直接空氣捕捉(Direct Air Capture，以下簡稱 DAC)等技術部署與應用進行合作<sup>[4]</sup>。

在 2022 年 COP27 的重點決議中，針對減碳手段亦強調各國須要持續減少溫室氣體的排放，並增加使用低碳排能源與再生能源，降低使用煤電與效率較低的燃料，以加速能源轉型。而低碳能源雖無明確定義，但可係指再生能源或加裝碳捕捉的燃煤電廠或天然氣電廠<sup>[5]</sup>。

之後，在 2023 年的 COP28 各國更展示堅定的減碳決心。在此大會中一致通過擺脫化石燃料的決議文件，近 200 個國家承諾「進行能源系統轉型、脫離化石燃料(Transitioning away from fossil fuels in energy systems)，並以公正、有序且公平的方式，以科學為基礎，在關鍵的未來 10 年加速行動，以利在 2050 年實現淨零排放。」，也承諾淘汰無效率的化石燃料補貼<sup>[6]</sup>。另

外，亦呼籲各國為了達到擺脫化石燃料以及 2030 年將全球再生能源產能增加兩倍之目標，需減少煤炭使用之力度，並加快 CCUS 等技術的發展，以協助難以減碳的行業<sup>[7]</sup>。

在面對全球減碳趨勢下，我國國家發展委員會於 2022 年針對 2050 年淨零碳排之目標，提出「十二項關鍵戰略」，並將 CCUS 納入關鍵戰略中，主要將協助電力業與工業等高碳排產業進行減碳<sup>[8]</sup>。有鑑於此，本文將介紹在 2050 年淨零碳排的趨勢下，全球電廠加裝 CCUS 之發展趨勢，再以引述臺灣的規劃與現況，進而說明臺灣能源轉型的過渡期優先靠 CCUS 進行減碳之必要性。

## 貳、 國際淨零減碳趨勢

近年全球暖化加劇，各國政府開始重視氣候變遷議題，紛紛提出其減碳目標與一系列政策或法案，以加強其國內減碳效益，同時致力於能源轉型與淨零碳排措施。綜觀國際淨零減碳趨勢，歐洲及美國為主要積極推動減碳措施的國家，其減碳作為舉例如下：

### (一) 歐洲

歐盟執行委員會(European Commission)於 2023 年提出《綠色新政產業計畫》(Green Deal Industrial Plan)，來鞏固與提升歐洲淨零產業競爭力，並支持氣候中和(Climate Neutrality)轉型，旨在為歐盟擴大淨零排放技術與產品之製造能力提供更有利環境。因此，在同年亦提出《淨零產業法》(Net-Zero Industry Act)以確保淨零產業之產能目標，並提供有利其快速布署之監管框架、確實簡化與快速審核通過，以及促進歐洲對達成歐盟氣候中和目標之關鍵技術與產品投資，並制定標準以支持整體歐盟單一市場之技術升級，構築一個可負擔、可靠且永續的清潔能源系統，加速氣候中和(Climate Neutrality)與綠色轉型。

該法案主要推動的技術包括：(1)太陽光電與太陽熱能；(2)陸上與海上再生能源；(3)電池/儲能技術；(4)熱泵與地熱；(5)電解槽與燃料電

池；(6)永續沼氣與生物甲烷；(7)二氧化碳捕捉與封存(Carbon Capture and Storage，以下簡稱 CCS)以及(8)電網技術。

此法案之目標在於 2030 年前，歐盟相關技術之製造產能，必須達到歐盟整體能源裝置年度需求量 40%以上。其中為了促進與實現 CCS 計畫，並增加碳封存地點之可用性，也設定到 2030 年封存量須達到每年 5,000 萬噸之目標<sup>[9]</sup>。

## (二)美國

美國總統拜登於 2021 年簽屬一項行政命令，投資美國清潔能源產業與製造業，以減少聯邦政府業務的相關排放，並創造乾淨且健康的社區。主要包括五大目標：(1)2030 年實現 100%無碳電力(Carbon Pollution-Free Electricity)，其中至少一半將是當地供應的清潔能源，以滿足全天候 24 小時 7 天之需求，並於 2035 年實現無碳污染的電力部門；(2)到 2035 年實現 100%零排放汽車(Zero-Emission Vehicle)的採購；(3)到 2045 年實現淨零排放建築；(4)到 2050 年實現聯邦採購的淨零排放；以及(5)到 2050 年實現聯邦整體營運的淨零排放，包括到 2030 年實現 65%的減排<sup>[10]</sup>。

為了確保 2035 年實現無碳污染的電力部門，2023 年拜登於「主要經濟體能源與氣候論壇」(Major Economies Forum on Energy and Climate, MEF)提出能源去碳措施，並設定 2030 年零排放汽車及國際航運去碳目標<sup>[11]</sup>，主要將減少電力與運輸業的排放，以及擴大清潔能源規模。

為因應上述之措施，美國國家環境保護署(United States Environmental Protection Agency, EPA)於同年(2023 年)針對燃煤與天然氣發電廠提出新的碳污染標準，旨在減少有害空氣污染，並保護民眾健康。燃煤與天然氣發電廠將透過加裝 CCS、混氫燃燒以及採用高效能發電技術等進行減碳，同時滿足不斷增長的清潔能源需求<sup>[12]</sup>。

另外，在再生能源擴大布署後，燃煤與天然氣發電廠將不再做為基本負載發電，而是做為調峰使用，以平衡再生能源的不穩定性<sup>[13]</sup>。

## 一、淨零過渡期之碳捕捉、利用與封存協助電力部門淨零轉型

現今電力需求不斷增長，全球電力業必須大幅降低碳排放，方能實現與能源相關的永續發展以及《巴黎協定》之目標。

國際能源總署(International Energy Agency，以下簡稱 IEA)於 2020 年提出之《CCUS 在低碳電力系統中的角色》<sup>[14]</sup>(The role of CCUS in low-carbon power systems)技術報告指出，CCUS 技術一直被認為是支持全球電力系統轉型所需的最低成本技術，其對電力系統轉型具有三大貢獻：

- **解決現有工廠排放問題：**短中長期，透過碳捕捉技術解決化石燃料發電廠的排放問題，並降低電力系統改造的成本。化石燃料電廠加裝 CCUS 在亞洲地區尤其重要，主因在於亞洲的化石燃料電廠仍較年輕，透過 CCUS 使電廠能夠持續運作，增加應用的靈活性，使業者的投資得以回收。
- **穩定電力：**CCUS 技術能夠協助電網實現電力安全目標。目前許多地區的電力仰賴變動性高之再生能源，因此對於電網穩定之需求亦同時增加，而配備 CCUS 的發電廠能夠有效提供穩定電力，促進電網平衡。
- **實現負排放：**CCUS 技術能夠與生質能進行整合，實現生質能發電的負排放，更透過所產生的碳權，抵銷其他難以減排部門的殘餘排放，從而降低能源部門去碳的成本。

在 IEA 的永續發展情境(Sustainable Development Scenario)中，為了實現全球能源系統之轉型，電廠加裝 CCUS 技術所提供的可調度低碳能源，將發揮重要作用。到 2040 年，裝置 CCUS 的電廠發電容量將達到 315 百萬瓩(GW)，相當於未來 20 年，每年平均增加 15 百萬瓩(GW)的 CCUS 能力，包括現有電廠的改造與新建設施。同時如圖 1 所示，到 2030 年，配備 CCUS 的發電廠將產生 470 百萬兆瓦時(TWh)的電力，其中燃煤為 246 百萬兆瓦時(TWh)，天然氣為 220 百萬兆瓦時(TWh)，共占全球發電量的

1.5%。而到 2040 年，將上升至 1,900 百萬兆瓦時(TWh)的電力，其中燃煤為 994 百萬兆瓦時(TWh)，天然氣為 915 百萬兆瓦時(TWh)，共占全球發電量的 5%。

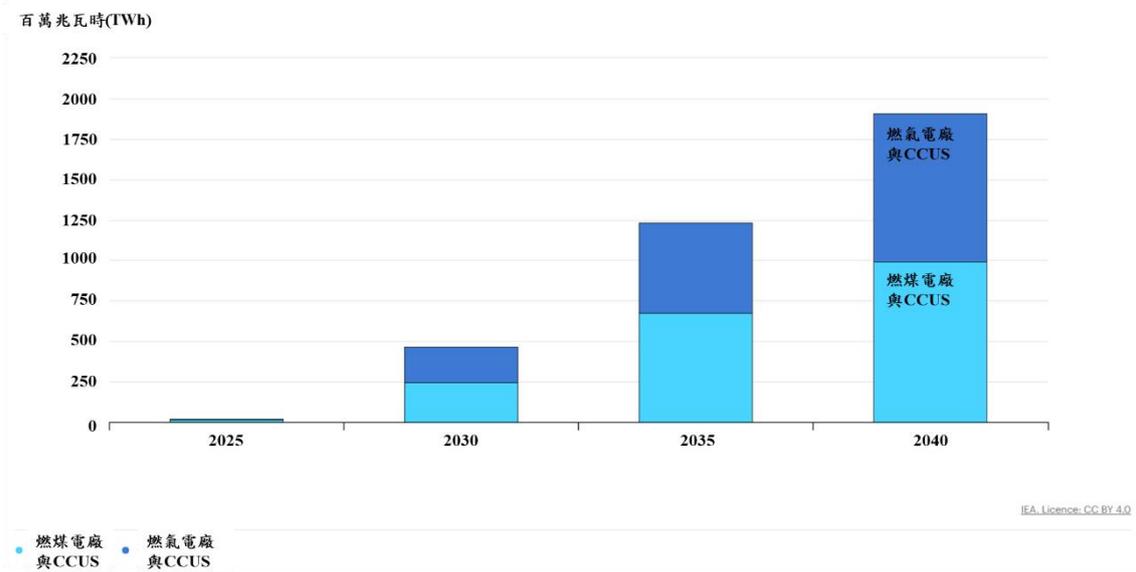


圖 1 IEA 永續發展情境之 CCUS 發電量

資料來源：IEA (2020), The role of CCUS in low-carbon power systems.

<https://www.iea.org/reports/the-role-of-ccus-in-low-carbon-power-systems/how-carbon-capture-technologies-support-the-power-transition>

## 參、 碳捕捉、利用與封存發展現況

CCUS 技術目前已是各國推動淨零政策的減碳措施之一，全球碳捕捉與封存研究所(Global CCS Institute，以下簡稱 GCCSI)在其例行報告《2023 全球 CCS 概況(Global Status of CCS 2023)》中指出，從 2017 年開始，全球的 CCS 設施捕捉容量便呈現穩定的上升趨勢<sup>[15]</sup>，如圖 2 所示。

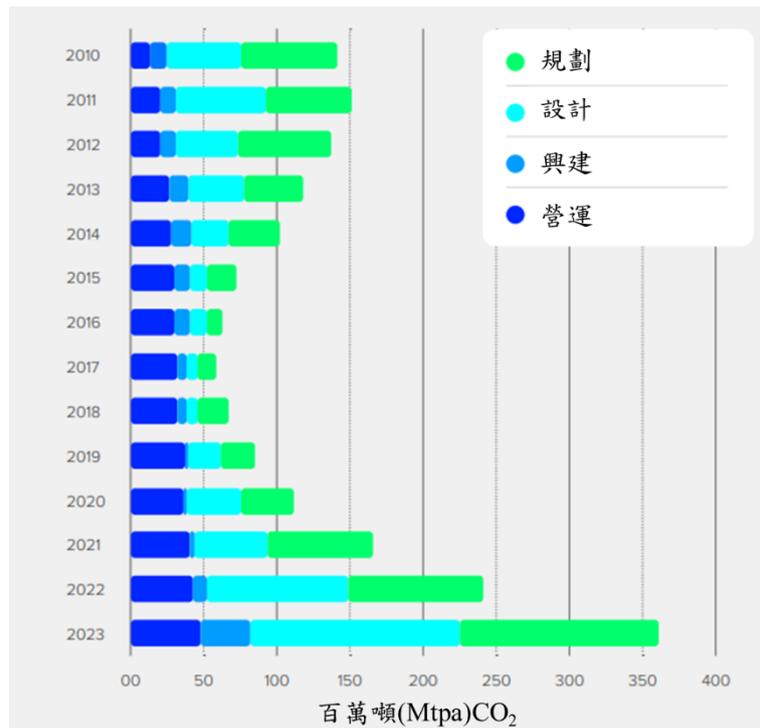


圖 2 全球 CCS 案場發展趨勢

資料來源：GCCSI (2023), Global Status of CCS 2023.

<https://www.globalccsinstitute.com/resources/publications-reports-research/global-status-of-ccs-2023-executive-summary/>

同時根據 GCCSI 統計，截至 2023 年，全球 CCS 計畫已達到 392 個，如圖 3 所示，其中營運中有 41 個、興建中 26 個、設計中 121 個以及規劃中 204 個，總捕捉量將可達 361 百萬噸(Mtpa)。同時與 2022 年的 194 個 CCS 計畫數量進行比較，亦有顯著的上升。

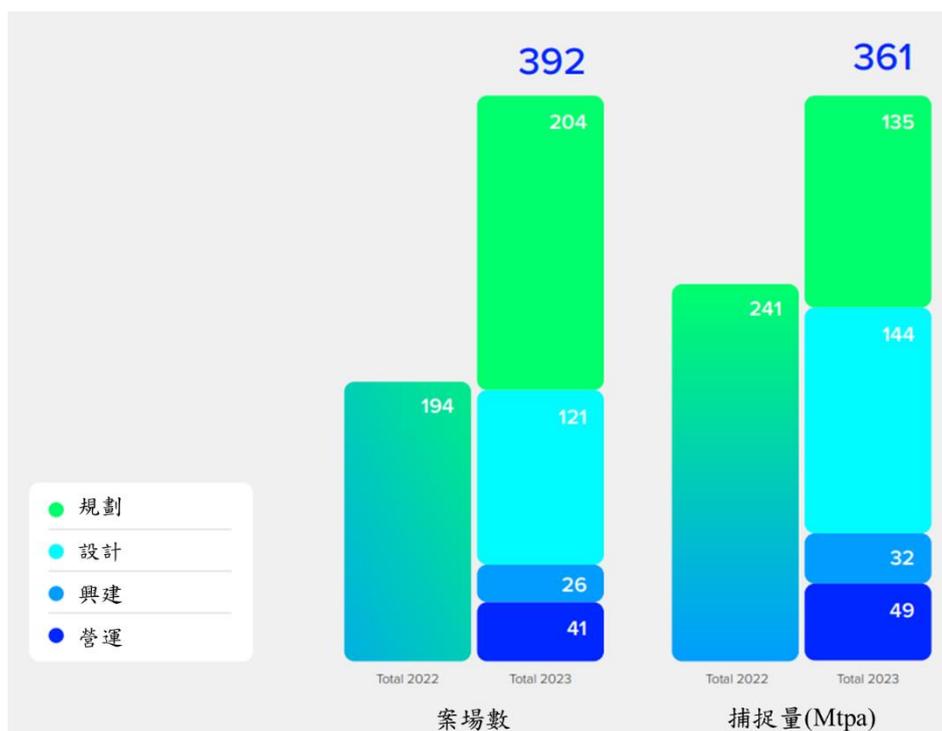


圖 3 全球 CCS 案場數與總捕捉量

資料來源：GCCSI (2023), Global Status of CCS 2023.

<https://www.globalccsinstitute.com/resources/publications-reports-research/global-status-of-ccs-2023-executive-summary/>

在 GCCSI 《2022 全球 CCS 概況》報告中亦指出，美國為主要積極推動 CCS 計畫的國家，在 2022 年的 194 個案場中，81 個源自於美國，領先全球，其中亦有 34 個係 2021 年後新增。而其他主要推動 CCS 的國家包括：加拿大、英國、挪威、澳洲、荷蘭以及冰島等。

雖然全球已開始重視 CCS 技術，但目前營運中的案例，主要仍以提高原油採收率(Enhanced Oil Recovery，以下簡稱 EOR)為主，較少進行地質封存。EOR 雖然能有效提高收益，但亦容易受全球石油價格影響，同時較無顯著的減碳效益。因此，為了有效達到淨零目標，未來各國推動的 CCS 計畫主要皆進行地質封存，且主要投入的產業包括：天然氣處理、化工、煉油、肥料、發電、鋼鐵、水泥、氫氣以及合成氣等高碳排產業。另外，在發電廠加裝 CCS 的案例方面，目前營運中的僅有 2 個，但處於興建、設計與規劃階段之案例已增加至 35 個，顯示此為未來的發展趨勢之一。

此外，為了有效推動 CCS 計畫布署與發展，必須依靠成熟之碳捕捉與封存技術。根據 GCCSI 於 2021 年提出的《CCS 技術準備和成本》(Technology Readiness And Costs of CCS)報告中，便已有盤點目前碳捕捉技術，包括：液態溶劑(Liquid Solvent)、固體吸附劑(Solid Adsorbent)、薄膜(Membrane)、固態迴路(Solid-looping)以及固有 CO<sub>2</sub> 捕捉(Inherent CO<sub>2</sub> Capture)之發展以及技術成熟度(Technology Readiness Level，以下簡稱 TRL)。其中以液態溶劑、固體吸附劑以及薄膜技術之 TRL 較高，並運用於實際案例中，以下將詳細說明<sup>[16]</sup>。

### (一)液態溶劑

- 胺類溶劑(Traditional Amine Solvents)：TRL 9，主要廣泛應用於化肥、純鹼、天然氣加工廠等產業。而運用此技術之相關 CCUS 計畫包括挪威 Sleipner 與 Snøhvit 的碳封存計畫，以及加拿大的 Boundary Dam 示範計畫。
- 物理吸收劑(Physical solvent (Selexol、Rectisol))：TRL 9，主要廣泛應用於天然氣加工、煤氣化廠等產業。而運用此技術之相關 CCUS 計畫包括美國的 Val Verde、Shute Creek、Century Plant、Coffeyville 等計畫。上述之計畫皆將捕捉之二氧化碳用於 EOR。
- 改良碳酸鉀法(Benfield process and variants)：TRL 9，主要應用於化肥廠，而運用此技術之相關 CCUS 計畫，例如：美國 Enid Fertilizer 之 EOR 計畫。
- 立體障礙醇胺(Sterically Hindered Amine)：TRL 9，主要應用於此技術供應商三菱重工業株式會社的合作計畫，例如：美國的 Petro Nova 示範計畫。

### (二)固體吸附劑

- 變壓吸附/真空變壓吸附(Pressure Swing Adsorption/Vacuum Swing Adsorption)：TRL 9，主要係由技術供應商三福氣體公司

(Air Products)應用於美國的 Port Arthur 計畫，並將純化後的二氧化碳用於 EOR。

### (三) 薄膜

- 氣體分離薄膜(Gas Separation Membranes)：TRL 9，主要應用於巴西石油公司的 EOR 計畫。

在封存技術方面，目前全球主要發展之 4 項碳封存技術，包括：EOR、鹽水層封存(Storage in Saline Formations)、枯竭油氣田封存(Storage in Depleted Oil and Gas Fields)，以及非常規封存(Unconventional Storage)。其中 TRL 較高的技術為 EOR 以及鹽水層封存，已達到 TRL 9。EOR 技術亦已經實施超過 50 年，且應用於許多案例中。而鹽水層封存，則為目前全球主要進行地質封存之技術，並已藉由挪威 Sleipner 計畫驗證其可行性。另外，枯竭油氣田封存技術亦在示範階段，TRL 為 5-8，未來將逐步朝商業化發展。

二氧化碳除了進行封存外，亦能夠進行再利用，以達到減碳效益。根據聯合國歐洲經濟委員會(United Nations Economic Commission for Europe, UNECE)於 2021 年提出之《技術簡介-碳捕捉、利用與封存》(Technology Brief-Carbon Capture, Use and Storage (CCUS))報告中，亦有說明目前碳再利用的主要產品、價格、市場需求以及減碳潛力，並指出粒料與混凝土的市場需求量較多<sup>[17]</sup>。詳如下表 1：

表 1 全球碳再利用市場發展

產品	價格(\$/噸)	市場需求量 (百萬噸/年)	減碳潛力 (二氧化碳總量/噸)
粒料(Aggregate)	10	55,000	0.25
混凝土(Concrete)	100	20,000	0.025

產品	價格(\$/噸)	市場需求量 (百萬噸/年)	減碳潛力 (二氧化碳總量/噸)
甲醇(Methanol)	350	140	1.37
乙醇(Ethanol)	475	100	1.91
碳酸鈉(Sodium Carbonate)	150	60	0.42
碳酸鈣(Calcium Carbonate)	200	10	0.44
聚合物(Polymers)	1,900	24	0.08

資料來源：UNECE (2021), Technology Brief- Carbon Capture, Use and Storage (CCUS).  
[https://unece.org/sites/default/files/2021-03/CCUS%20brochure\\_EN\\_final.pdf](https://unece.org/sites/default/files/2021-03/CCUS%20brochure_EN_final.pdf)

## 一、電廠導入碳捕捉、利用與封存之案例與後端應用

如前揭淨零過渡期之碳捕捉、利用與封存協助電力部門淨零轉型所述，為了實現能源轉型，並提供穩定低碳電力，電廠導入 CCS 將是必要之措施。以下將詳細介紹目前國際上已實施 CCS 技術之電廠案例，包括加拿大 Boundary Dam 電廠、美國 Petra Nova 電廠以及英國 Drax 電廠。

### (一)加拿大 Boundary Dam 電廠

Boundary Dam 是一座總裝置容量 824 百萬瓦(MW)的燃煤電廠，如圖 4 所示，位於加拿大薩斯喀徹溫省(Saskatchewan)<sup>[18]</sup>，於 2014 年開始導入 CCS 技術，為世界上第一個整合商轉燃煤發電廠的大型二氧化碳地質封存計畫，Boundary Dam 燃煤電廠共有 6 組機組，主要將老舊的 3 號機組(Boundary Dam 3)進行改建，包括鍋爐改建與汽機更換，其原總裝置容量(Gross)為 139 百萬瓦(MW)，經改造後升級至 160 百萬瓦(MW)，但由於更新後的機組需支援二氧化碳捕捉設施<sup>[19]</sup>，部分能量會挪用至捕捉製程中，因此改造後的新機組之裝置容量為 110 百萬瓦(MW)。另外，已將 1、2 號機組退役，而 4-6 號機組維持現狀。

由於煤炭仍為世界上使用最廣泛的能源，約占全球電力的 40%，同時薩斯喀徹溫省有大量煤炭，因此電廠以燃煤發電為主。為因應國內的減碳措施，Boundary Dam 電廠的營運商 SaskPower 亦積極增加天然氣、水力、風力與太陽能的使用，但這些能源無法一夕之間取代所有燃煤發電，因此燃煤電廠導入 CCS 技術將能夠在持續增加再生能源布署之情況下，為客戶提供穩定且負擔得起的電力<sup>[20]</sup>。

Boundary Dam CCS 計畫最初的總成本為 15 億美金(約新台幣 480 億元)，其中 8 億(約新台幣 256 億元)用於 CCS 設施，而 5 億(約新台幣 160 億元)用於改造成本。加拿大政府亦支持該計畫，為其提供 2.4 億美金(約新台幣 76.8 億元)的補助金。該電廠主要使用殼牌(Shell plc)提供的胺類溶劑碳捕捉技術，捕捉煙道氣中的二氧化碳，捕捉成本為每噸 105 美金(約新台幣 3,360 元)，從 2014 年開始營運至 2023 年，已經捕捉 5,376,837 噸的二氧化碳<sup>[21]</sup>，並將其中 90%的二氧化碳藉由管線輸送至 Weyburn 附近由 Cenovus Energy 營運的強化石油回收區進行 EOR，而其餘 10%二氧化碳將運輸到電廠三公里外 Aquistore 研究計畫的注入井，注入地下 3,200 公尺的 Deadwood 鹽水層進行封存，並由石油技術研究中心(Petroleum Technology Research Centre, PTRC)管理<sup>[22]</sup>。截至 2023 年，Aquistore 研究計畫已達到 50 萬噸的封存量<sup>[23]</sup>。

此外，Boundary Dam 的三號機組原設計其碳捕捉率為 90%、年捕捉量目標為 1 百萬噸(Mt)，但因相關問題包含：(1)CCS 設備的可用性；(2)吸收劑胺(Amine)的衰退、可用性與價錢；(3)二氧化碳銷量契約的問題；以及(4)低品質的褐煤(Lignite Coal)等外加挑戰，最終使得 Boundary Dam 的三號機組實際捕捉率為 70%、年捕捉量約為 800,000 噸<sup>[24]</sup>。

另外，Boundary Dam CCS 計畫亦將捕捉的二氧化硫轉化為硫酸，並販售予工業廠商。同時將煤炭燃燒後的副產品飛灰(Fly ash)用於混凝土之相關產品，以增加收益<sup>[25]</sup>。



圖 4 加拿大 Boundary Dam 電廠

資料來源：International CCS Knowledge Centre (2023), Carbon capture on BD3 - successful by design. <https://ccsknowledge.com/blog/carbon-capture-on-bd3---successful-by-design>

## (二)美國 Petra Nova 電廠

Petra Nova 為位於德州湯普森鎮，世界最大燃煤電廠碳捕捉示範場，如圖 5 所示，主要由美國 NRG 能源公司(NRG Energy)以及日本 JX 石油天然氣探勘公司(JX Nippon Oil & Gas Exploration)共同開發，並使用三菱重工業株式會社與關西電力公司共同開發之醇胺二氧化碳捕捉技術(KM CDR Process)，捕捉 NRG 能源公司的 W.A.Parish 燃煤電廠 8 號機組(240(MWe)所產煙道氣中的二氧化碳，每天約可捕捉 4,776 公噸。該系統包括煙道氣冷卻器(Flue-Gas Cooler)、吸收塔(Absorber)、再生塔(Regenerator)、二氧化碳壓縮設備(CO<sub>2</sub> Compression Unit)等設施，使捕捉效率達 90%<sup>[26]</sup>。所捕捉之二氧化碳經壓縮並運用一條 81 英里(約 130 公里)的管線運輸至德州傑克遜縣 West Ranch 油田進行 EOR 與封存。

此計畫總投資為 10 億美元，資金來源包括美國能源部的 1.95 億美元補助金、融資 2.5 億美元以及贊助商的投資。其中約 60%應用於碳捕捉與發電設施以及相關資本支出，而剩餘的投資款項則用於前期營運

與管理成本、二氧化碳管線以及 West Ranch 油田改善工程等。該計畫主要分為三個階段，第一階段為專案定義/前端工程與設計(Front End Engineering Design, FEED)；第二階段為詳細工程、採購與建置；第三階段為示範與監測。2016 年該計畫結束第二階段，開始進行商業營運以及為期三年的示範期，從 2017 年至 2019 年，主要目標在於展示 CCS 先進技術以及監測注入 West Ranch 油田的二氧化碳，以展示監測、驗證和計量(Monitoring Verification and Accounting, MVA)技術。截至第三期結束，Petra Nova 已捕捉 3,542,537 公噸之二氧化碳，並運用 EOR 技術，產出 420 萬桶石油，每天約 6,000 桶<sup>[27]</sup>。

另外，Petra Nova 於 2013 年安裝奇異公司(General Electric Company, GE)的 GE 7EA 燃氣渦輪引擎(Combustion Turbine Generator，以下簡稱 CTG)，以協助德州電力可靠性委員會(The Electric Reliability Council of Texas, ERCOT)的尖峰市場需求，並於 2016 年轉為汽電共生設施，以滿足碳捕捉過程的蒸汽需求，同時導入熱回收鍋爐(Heat Recovery Steam Generator，以下簡稱 HRSG)等設施。在碳捕捉過程中，每小時需要使用多達 500,000 磅的蒸汽，其中絕大多數的蒸汽主要來自於汽電共生設施，藉由 CTG 的廢熱產製蒸汽，其餘蒸汽則透過導管燃燒器(Duct Burners)產生。同時將天然氣輸送至 HRSG 進行燃燒，以提供額外所需之熱能。

加裝汽電共生設施之目標，不僅協助證實碳捕捉的可行性，同時不對燃煤主機造成寄生效應，亦不對當地電價產生負面影響，並能夠使用更乾淨的燃料，改善整體碳足跡。如果直接從燃煤主機獲取蒸汽與電力，可能產生大量的碳足跡。但仍有相關缺點需克服，亦即在沒有燃煤主機的備用供應情況下，汽電共生設施的停機將導致碳捕捉設施的停機，在示範期的三年中，該設施導致碳捕捉設施之停機時間達 88 天<sup>[27]</sup>。

此外，因受到全球經濟衰退的影響、石油需求與價格低迷，以及新冠病毒的流行，Petra Nova 已於 2020 年 5 月關閉，以降低衝擊，並將

在經濟狀況改善後重新營運<sup>[28]</sup>。嗣後，Petra Nova 於 2023 年 9 月 5 日重新啟動<sup>[29]</sup>。



圖 5 Petra Nova 計畫

資料來源：陳書璿(2023)。【全文】找學研大咖合作 台排碳大戶搶碳捕捉商機。

<https://www.mirrormedia.mg/story/20211216ind001>

### (三)英國 Drax 電廠

英國能源公司「德拉克斯集團」(Drax Group)在英國北約克郡的 Drax 發電廠(如圖 6 所示)實施兩項生質能結合碳捕捉與封存(Bio-Energy Carbon Capture and Storage, 以下簡稱 BECCS)計畫，並規劃於 2027 年實現商業化規模的碳捕捉。目前此一發電廠之發電量占英國電力供給的 6%，並已將其中四個發電機組從燃煤轉換為燃燒再生燃料，目前主要應用木質顆粒製成的生質物進行燃燒發電，同時於 2021 年停止剩餘兩個燃煤機組的營運。

該計畫將在兩台 660 百萬瓦(MWe)的生質物發電機組加裝碳捕捉設施，預計將可從煙氣中捕捉 95%的二氧化碳<sup>[30]</sup>。該電廠的首個二氧化碳捕捉計畫於 2019 年開始營運，主要使用英國 C-Capture 公司開發的溶劑(Solvent)類型捕捉技術，每天可捕捉約一噸的二氧化碳。第二個計畫於 2020 年啟動，主要運用三菱重工業株式會社與關西電力公司共同開發的「Advanced KM CDR Process」醇胺碳捕捉技術，此一技術所使用的「KS-21」胺吸收液，相較前一代「KM CDR Process」技術所使用的「KS-1」胺吸收液，成本更低且節能效果更佳<sup>[31]</sup>，每天約可捕捉 300 公斤的二氧化碳，以測試生質物煙道氣與碳捕捉的應用。捕捉後之二氧化碳除了進行地質封存外，亦將二氧化碳販售給其他合作廠商進行再利用(例如：製成魚類與家禽飼料等)<sup>[32]</sup>。

Drax 商業規模 BECCS 計畫，將成為英國政府所推動之零碳亨伯 CCUS 集群(Zero Carbon Humber CCUS)計畫的一部份。該計畫旨在減少工業集群的二氧化碳排放、低碳氫生產以及負碳電力等目標，從此工業集群中所捕捉的二氧化碳，將利用管線運輸至 100 公里外的北海封存場址進行封存<sup>[33]</sup>。該計畫每年可去除高達 800 萬噸的二氧化碳。



圖 6 Drax 發電廠

資料來源：Edie Newsroom (2019), Drax begins capturing biomass carbon emissions in 'world first'. <https://www.edie.net/drax-begins-capturing-biomass-carbon-emissions-in-world-first/>

## 二、臺灣火力電廠導入碳捕捉、利用與封存之情境

針對全球的淨零減碳以及 CCUS 發展趨勢，臺灣於 2022 年由國家發展委員會公布我國「2050 淨零排放路徑及策略總說明」，並針對能源、產業、生活與社會等領域規劃四大轉型策略，其中 CCUS 為主要的發展技術之一，目標減碳量達 4,000 萬噸以上<sup>[34]</sup>。更於同年(2022)年底公布淨零轉型之 12 項關鍵戰略，其中「臺灣 2050 淨零轉型「碳捕捉利用與封存」關鍵戰略行動計畫」說明 2030 年 CCUS 的積極貢獻度約為 400 萬噸，若加強碳循環利用及產業應用，約可再貢獻 60 萬噸。因此，預期 2030 年 CCUS 減碳效益目標樂觀值提高至 460 萬噸<sup>[8]</sup>。

台電公司為因應國家淨零政策，將於其電廠加裝 CCUS 以進行減碳。目前計畫將於台中發電廠內建置「減碳技術園區」，並發展 CCUS 技術。台電公司的 CCS 規劃期程主要可分為三階段，第一階段：2021 年至 2025 年，臺中火力發電廠之 9 號與 10 號機組以及碳封存驗證場域完成環差與可行性研究。第二階段：2026 年至 2035 年，建置碳捕捉先導測試場，以及完成碳封存驗證場域之灌注作業，並開始針對燃氣機組進行機組改裝與 CCS 建置。第三階段：2036 年至 2050 年，燃氣機組完成 CCS 建置並運轉<sup>[35]</sup>。CCUS 作為電力業減碳技術，短期可延續燃煤電廠之使用，長期則成為燃氣機組的必備裝置，同時降低能源轉型路徑上的風險。

為了發展 CCUS，台電公司早於 2008 年便已開始投入碳捕捉技術之研發，包括：溶劑吸收與固態吸附等技術，並於 2019 年開始將研究成果應用於實際煙氣的捕捉試驗，不僅達到長期運轉，其捕捉到的二氧化碳濃度可達 99.9%。而在碳封存部分，台電公司過去曾於 2011 年進行地質封存調查計畫，確認台西盆地深部鹽水層之封存可行性與潛能，總封存潛能估計達 137.3 億噸<sup>[36]</sup>。

「減碳技術園區」在 2021 年取得環境部核可後，便於 2022 年開始建置，此園區將建置小規模碳捕捉試驗廠，如圖 7 所示。主要將電廠排放的燃燒尾氣，透過管線引入試驗設備，並運用沸石吸附或是液體吸收兩種方式進行碳捕捉，每天將可捕捉約 6 噸的二氧化碳，其捕捉成本為每噸新台幣 2,000 元<sup>[37]</sup>，並初步選定臺中火力發電廠 9 號與 10 號機組進行試驗，目標年碳捕捉量達 2000 噸<sup>[38]</sup>。同時預計於試驗完成後，進行碳封存試驗，將建置碳封存試驗場址，以小規模注儲進行試驗，預計封存於臺中外海的鹽水層中，屆時將驗證監測系統與風險評估方式，亦就試驗結果評估擴展大規模碳封存之可行性，以利未來達成商業模式發展<sup>[39]</sup>。另外，園區亦有建立植物工廠，將二氧化碳利用於高價作物栽培<sup>[40]</sup>。



圖 7 台電碳捕捉封存試驗區

資料來源：劉光瑩(2023)。「碳捕捉」是什麼?發電減碳新技術 台電如何「捕」CO<sub>2</sub>、要封存在哪裡? <https://csr.cw.com.tw/article/43269>

雖然目前台電公司積極發展 CCUS 技術與試驗，但仍面臨成本高、土地面積受限以及法規尚未完善等問題。未來仍需依靠技術突破以及與政府單位合作，共同擬定明確之法規標準，以協助 CCUS 在臺發展。

## 肆、無碳電力協助企業進行轉型

根據前述「貳、國際淨零減碳趨勢」已瞭解無碳電力為國際發展趨勢之一。然而電廠加裝 CCUS 亦面臨初期設備建置成本較高之問題，同時因缺乏明確的商業模式，導致無法得到銀行貸款的資金支持。另一方面，企業也面臨各種減碳政策之壓力，例如：100% Renewable Energy (RE 100)、碳揭露計畫(Carbon Disclosure Project, CDP)、碳邊境調整機制(Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM)、清潔競爭法案(Clean Competition Act, CCA)，以及蘋果及 Google 公司之供應鏈減碳要求等。在企業無法僅依靠提高能源效率，使自主達到淨零，亦仍需要藉由整體運用再生能源或無碳電力以達成淨零碳排。

針對上述之問題，台灣經濟研究院於 2022 年提出無碳電力憑證(Carbon-Free Electricity Certificate, CFEC)概念。如圖 8 所示，無碳電力憑證概念類似於我國的再生能源憑證(Taiwan Renewable Energy Certificate, T-REC)，為一能源屬性憑證，主要將火力電廠導入 CCUS 技術所發出之電力視為無碳電力，並藉由第三方公正單位查證後，核發無碳電力憑證。在缺乏再生能源的情況下，電廠不僅可透過與企業簽訂「企業能源採購協議」(Corporate Power Purchase Agreement，以下簡稱 CPPA)，將無碳電力販售予企業以取得獲利，亦能夠協助企業達到 24/7 全時使用無碳能源(Carbon-free Energy, CFE)之目標，滿足國際企業之供應鏈減碳要求以及降低產品出口之碳費壓力。同時，電廠可透過此商業模式以及與企業簽訂之 CPPA 作為還款依據，向銀行進行融資貸款，或使政府更有餘裕地提供補助與資金支持，以解決初期電廠設置 CCUS 設備之大量資金壓力，加速電廠的能源轉型<sup>[41]</sup>。



圖 8、無碳電力憑證促進淨零正向循環經濟

資料來源：經濟部標準檢驗局(2022)。以無碳電力憑證推動電力部門淨零轉型建議。

<https://www.bsmi.gov.tw/wSite/public/Data/f1658990359851.pdf>

## 伍、 結論與建議

淨零減碳已是全球的共識與目標，尤其電力部門的完全去碳是達到淨零的重要基礎。而在現行各產業及部門皆朝向電動化與電氣化邁進之情況下，未來不僅將增加用電需求，同時亦需要更多再生能源或低碳能源，以協助各產業真正達到淨零。雖然現階段再生能源在全球已有一定程度的發展，但仍不足以提供全人類足夠之用電，且亦有不穩定性之問題。因此，火力發電加裝 CCUS，將能夠提供低碳或無碳能源，以穩定供電，同時達到減碳效益。另外，亦可於生質能發電導入 CCUS 技術，以實現負排放之目標。

全球目前積極投入 CCUS 發展，且已有相當成熟之技術以及案例，並已有導入火力發電。臺灣雖已有逐步跟進國際之腳步，提出臺灣 2050 淨零轉型「碳捕捉利用及封存」關鍵戰略行動計畫，並由台電公司建置「減碳技術園區」，發展 CCUS 技術，以協助電廠減碳，但現階段臺灣仍處於發展中階段，且未有執行大型 CCUS 計畫之經驗，因此未來台電在開發「減碳技術園區」時，亦可以借鏡國際技術以及案例經驗，增加我國發展 CCUS 的可行性，同時研議未來的商業模式。另，建立無碳電力憑證(CFEC)解決電力業者導入 CCUS 技術與設施之初期成本壓力，亦提供減碳需求產業使用無碳電力之證明，以降低企業受國際淨零減碳政策的影響，同時提升其投資

CCUS 技術之意願，不僅加速電廠能源轉型，亦使臺灣在淨零發展的道路上不落人後。

## 陸、 參考文獻

- [1] 鄭宇茹(2021)。什麼是 COP26、聯合國氣候峰會？一次搞懂 COP、NDC、IPCC、UNFCCC、巴黎協定與永續金融。  
<https://csr.cw.com.tw/article/42200>
- [2] United Nations (2021), COP26: Together for our planet.  
<https://www.un.org/en/climatechange/cop26>
- [3] Dr Hydra Rodrigues (2021), COP26: Small Steps Forward for Green Technologies, Finds IDTechEx. <https://www.idtechex.com/de/research-article/cop26-small-steps-forward-for-green-technologies-finds-idtechex/25242>
- [4] U.S. Department of State (2021), U.S.-China Joint Glasgow Declaration on Enhancing Climate Action in the 2020s. <https://www.state.gov/u-s-china-joint-glasgow-declaration-on-enhancing-climate-action-in-the-2020s/>
- [5] 陸孝立(2022)。COP27 氣候峰會六大關鍵重點。  
<https://www2.deloitte.com/tw/tc/pages/risk/articles/risk-newsletter202212-2.html>
- [6] 易淳敏(2023)。《COP28 決議解析》「終結化石燃料」寫入正式決議！台灣能源轉型挺得住？  
<https://esg.gvm.com.tw/article/40676>
- [7] Valerie Volcovici, Gloria Dickie and William James (2023), Nations strike deal at COP28 to transition away from fossil fuels.  
<https://www.reuters.com/business/environment/countries-push-cop28-deal-fossil-fuels-talks-spill-into-overtime-2023-12-12/>
- [8] 國家發展委員會(2022)。臺灣 2050 淨零轉型「碳捕捉利用及封存」關鍵戰略行動計畫(核定本)。

- [9] European Commission (2023), The Net-Zero Industry Act: Accelerating the transition to climate neutrality. [https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/sustainability/net-zero-industry-act\\_en](https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/sustainability/net-zero-industry-act_en)
- [10] The White House (2021), FACT SHEET: President Biden Signs Executive Order Catalyzing America’s Clean Energy Economy Through Federal Sustainability. <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2021/12/08/fact-sheet-president-biden-signs-executive-order-catalyzing-americas-clean-energy-economy-through-federal-sustainability/>
- [11] The White House (2023), FACT SHEET: President Biden to Catalyze Global Climate Action through the Major Economies Forum on Energy and Climate. <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2023/04/20/fact-sheet-president-biden-to-catalyze-global-climate-action-through-the-major-economies-forum-on-energy-and-climate/>
- [12] United States Environmental Protection Agency (2023), EPA Proposes New Carbon Pollution Standards for Fossil Fuel-Fired Power Plants to Tackle the Climate Crisis and Protect Public Health. <https://www.epa.gov/newsreleases/epa-proposes-new-carbon-pollution-standards-fossil-fuel-fired-power-plants-tackle>
- [13] Valerie Volcovici (2023), Biden EPA to issue power plant rules that lean on carbon capture. <https://www.reuters.com/business/sustainable-business/biden-epa-issue-power-plant-rules-that-lean-carbon-capture-2023-04-23/>
- [14] IEA (2020), The role of CCUS in low-carbon power systems. <https://www.iea.org/reports/the-role-of-ccus-in-low-carbon-power-systems/how-carbon-capture-technologies-support-the-power-transition>

- [15] GCCSI (2023), Global Status of CCS 2023.  
<https://www.globalccsinstitute.com/resources/publications-reports-research/global-status-of-ccs-2023-executive-summary/>
- [16] GCCSI (2021), Technology Readiness And Costs of CCS.
- [17] UNECE (2021), Technology Brief- Carbon Capture, Use and Storage (CCUS). [https://unece.org/sites/default/files/2021-03/CCUS%20brochure\\_EN\\_final.pdf](https://unece.org/sites/default/files/2021-03/CCUS%20brochure_EN_final.pdf)
- [18] GlobalData (2023), Power plant profile: Boundary Dam Power Station, Canada. <https://www.power-technology.com/data-insights/power-plant-profile-boundary-dam-power-station-canada/?cf-view>
- [19] 黃鐘(2017)。二氧化碳捕集與封存工程概述及台西盆地二氧化碳深部地質封存規劃簡介。  
<http://www.cie.org.tw/cms/UpLoad/files/%E6%9C%80%E6%96%B0%E6%B6%88%E6%81%AF/20170725%E9%BB%83%E9%90%98%E5%8D%9A%E5%A3%AB%E4%B8%BB%E8%AC%9B%E4%BA%8C%E6%B0%A7%E5%8C%96%E7%A2%B3%E6%8D%95%E9%9B%86%E8%88%87%E5%B0%81%E5%AD%98%E6%A6%82%E8%BF%B0.pdf>
- [20] SaskPower (2023), Boundary Dam Carbon Capture Project.  
<https://www.saskpower.com/Our-Power-Future/Infrastructure-Projects/Carbon-Capture-and-Storage/Boundary-Dam-Carbon-Capture-Project>
- [21] SaskPower (2023), BD3 Status Update: Q2 2023.  
<https://www.saskpower.com/about-us/our-company/blog/2023/bd3-status-update-q2-2023>
- [22] MIT Carbon Capture & Sequestration Technologies (2016), Boundary Dam Fact Sheet: Carbon Dioxide Capture and Storage Project.  
[https://sequestration.mit.edu/tools/projects/boundary\\_dam.html](https://sequestration.mit.edu/tools/projects/boundary_dam.html)

- [23] PTRC (2023), Aquistore Project Reachs +500,000 tonnes of CO<sub>2</sub> Stored. <https://ptrc.ca/media/whats-new/aquistore-co2-storage-project-reached-+500000-tonnes-stored>
- [24] 財團法人台灣經濟研究院(2023)。財團法人台灣經濟研究院出國報告-加拿大 CCS 參訪。
- [25] Gail Reitenbach (2015), SaskPower's Boundary Dam Carbon Capture Project Wins POWER's Highest Award. <https://www.powermag.com/saskpowers-boundary-dam-carbon-capture-project-wins-powers-highest-award/>
- [26] Mitsubishi Heavy Industries (2018), The Petra Nova Carbon Capture Project. [https://www.mhi.com/products/pdf/prd\\_outline\\_pnc\\_eor\\_201803.pdf](https://www.mhi.com/products/pdf/prd_outline_pnc_eor_201803.pdf)
- [27] DOE、NETL (2020), Final Scientific/Technical Report Petra Nova.
- [28] Carlos Anchondo and Edward Klump (2020), Petra Nova is closed: What it means for carbon capture. <https://www.eenews.net/articles/petra-nova-is-closed-what-it-means-for-carbon-capture/>
- [29] Sonal Patel (2023), Petra Nova, Pioneering Power Plant Carbon Capture Unit, Is Up and Running Again, says JX Nippon. <https://www.powermag.com/petra-nova-pioneering-power-plant-carbon-capture-unit-is-up-and-running-again-says-jx-nippon/>
- [30] Drax (2023), Combating Climate Change. <https://beccs-drax.com/our-application/>
- [31] 經濟部國際貿易局(2021)。三菱重工研發可回收 99.8%之二氧化碳排放量之新技術。  
<https://info.taiwantrade.com/biznews/%E4%B8%89%E8%8F%B1%E9%87%8D%E5%B7%A5%E7%A0%94%E7%99%BC%E5%8F%AF%E5%9B>

[%9E%E6%94%B699-8-%E4%B9%8B%E4%BA%8C%E6%B0%A7%E5%8C%96%E7%A2%B3%E6%8E%92%E6%94%BE%E9%87%8F%E4%B9%8B%E6%96%B0%E6%8A%80%E8%A1%93-2419237.html](#)

- [32] Drax (2023), BECCS and negative emissions. <https://www.drax.com/about-us/our-projects/bioenergy-carbon-capture-use-and-storage-beccs/>
- [33] IEA (2021), Drax BECCS. <https://www.iea.org/reports/ccus-around-the-world-in-2021/drax-beccs>
- [34] 國家發展委員會(2022)。臺灣 2050 淨零排放路徑及策略總說明。
- [35] 鍾年勉(2023)。台電公司推動碳捕捉電廠之發展願景與展望。
- [36] 台電綠網(2023)。碳捕集、再利用及封存。  
[https://greennet.taipower.com.tw/sustainable/ccus\\_plan](https://greennet.taipower.com.tw/sustainable/ccus_plan)
- [37] 劉光瑩(2023)。「碳捕捉」是什麼?發電減碳新技術 台電如何「捕」CO<sub>2</sub>、要封存在哪裡? <https://csr.cw.com.tw/article/43269>
- [38] 曾智怡(2023)。台電中油領軍試驗碳捕捉與封存為碳權交易暖身。  
<https://money.udn.com/money/story/5612/7349912>
- [39] 台電股份有限公司(2023)。台中發電廠第九、十號機發電計畫環境影響說明書第六次變更內容對照表(設置二氧化碳封存試驗場址)(定稿本)。
- [40] 楊明偉(2019)。台電公司二氧化碳捕集與再利用研發現況。  
<https://speakerdeck.com/learnenergy/tai-dian-gong-si-er-yang-hua-tan-bu-ji-yu-zai-li-yong-yan-fa-xian-kuang-yang-ming-wei-zu-chang>
- [41] 經濟部標準檢驗局(2022)。以無碳電力憑證推動電力部門淨零轉型建議。  
<https://www.bsmi.gov.tw/wSite/public/Data/fl658990359851.pdf>