

朝向2050淨零碳排目標： 國際視野下碳捕集技術之應用範疇探討

高君銓^{1*} 林怡秀² 張仁榮³

摘要

緣由IPCC針對了溫室氣體提出了2050年時達到淨零排放(net zero emissions)的目標，二氧化碳之減排為達成零排放(zero emission)目標之主要手段。就國際能源總署指出之現況，除了既有之清潔能源的推展，如風能與太陽能等；若不加速碳捕集封存與再利用技術的產業應用，將不可能實現淨零排放之目標。碳捕集技術之應用除能夠針對燃煤與燃氣等相關發電設施外，其他排放源亦得以採用合適之碳捕集技術進行捕集。本文首先敘明彙整現今全球減碳技術之相關趨勢發展與碳捕集技術之產業分布，依據DNV規範(DNV-RP-J201)提出技術種類及相關應用範疇，提出目前技術上可能面臨之困難與挑戰，最後提及相關國際間現正發展之相關碳捕集技術案例。本文期作為臺灣各產業領域未來發展應用碳捕集封存與再利用技術之參考。

關鍵詞：碳捕集技術，碳捕集封存與再利用，淨零排放，能源轉型，淨零路徑

1. 前言

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)於《巴黎協定(Paris Agreement)》簽署三年後，針對1.5°C的目標發布了特別報告(IPCC, 2018)，明確指出了若須達到該目標，全球須達到淨零二氧化碳排放(net zero CO₂ emissions)的狀態，並研擬了近90種能夠達到目標之路徑(pathway)。相關路徑皆以能夠為「後2050 (post 2050)」達到淨負排放(net negative emissions)為主要策動方向。考慮到溫室氣體(Greenhouse gas, GHG)除了二氧化碳外，亦包含其他種類之氣體，IPCC將原淨零二氧化碳排放之目標，擴大針對了所有溫室氣體，提出了全球須於當時未來十年內達到溫室氣體減半，

並於2050年時達到淨零排放(net zero emissions)的目標。

整體達到淨零排放看似一相當合理且合乎科學邏輯的目標，但仍應檢視不同地區、國家甚至產業規模下之技術發展與政策發展程度，來制定不同之減碳目標。由於每個地區、國家或產業之溫室氣體排放基準點(baseline)不同(Hamilton *et al.*, 2021)，處理之能力與方式也會有所差異。同理，就全世界現階段減排之方法來看，不同的地區、國家或產業所面臨之挑戰也大相逕庭。依目前全球之趨勢來說，同時要求全世界所有的地區、國家或產業應達到零排放(zero emission)之目標是具有相當挑戰性、不易達成且不公平的。然而，眾所皆知的是溫室氣體當中，二氧化碳就占據了65%比例。從占

¹ 挪威商立恩威驗證股份有限公司台灣分公司 製程工程師

² 挪威商立恩威驗證股份有限公司台灣分公司 專案經理

³ 挪威商立恩威驗證股份有限公司台灣分公司 總經理

*通訊作者，電話：07-5367759，電郵：Austin.Kao@dnv.com

收到日期: 2022年08月25日

修正日期: 2022年09月28日

接受日期: 2022年10月04日

比中得以理解，對於絕大多數國家甚或我國，為達成零排放(zero emission)之目標，二氧化碳之減排將應被視為達成該目標之重要手段。

就臺灣而言，依據我國國發會針對淨零排放之能源政策規劃¹，2050淨零排放路徑中關鍵的能源結構部分，再生能源將占60%~70%，並配有氫能9%~12%。在考量能源安全之情況下，使用20%~27%的火力發電搭載碳捕集封存與再利用技術(Carbon Capture Utilization and Storage, CCUS)，達成電力供應的去碳化；並於2050淨零排放路徑中設立「燃煤/燃氣電廠依CCUS發展進程導入運用」之里程碑。

另就國際能源總署指出之現況²表明，若不加速碳捕集封存與再利用技術的產業應用，將不可能實現淨零排放；且CCUS整體容量部署需要比當前之預測值高出約50%才能實現全球淨零之目標。國際間，對於碳捕集封存與再利用技術之發展及產業應用早行之有年，具有一定的技術成熟度與多項成功大規模或全規模之運轉實績；然而，由於國內社會大眾對於該技術之認知度不高，另未完善之法規及不明朗之碳稅架構，以致我國相關技術之發展遲滯難行，難以跟上國際趨勢。

且就碳捕集封存與再利用技術而言，除了利用不同種分離技術將二氧化碳從煙氣或尾氣等混和氣體中分離之「碳捕集技術」，亦須搭配將捕集下來之二氧化碳進行封存(Storage)或再利用(Utilization)，並選擇從捕碳地點運輸(Transportation)到封存場址或是再利用地點所需搭配的運輸方式，如：槽車、船舶與管線等技術組合。該碳捕集技術所衍伸之碳捕集與封存(Carbon Capture and Storage, CCS)、碳捕集與再利用(Carbon Capture and Utilization, CCU)或集大成於一身之碳捕集封存與再利用CCUS技術，在實際運用上除須考量整體循環經濟效益，更需切合當地的風俗民情與環境限制。期

我國在發展碳捕集技術之同時，更應藉由相關國際實例，研討出一套適合我國做為跟上國際淨零排放之技術組合。

鑒於上述考量，本文將以DNV碳捕集技術標準作為主軸進行解析，彙整全球目前碳捕集技術之發展應用範疇，以作為臺灣各產業領域未來發展應用碳捕集封存與再利用技術之參考，期以提高我國各界對於碳捕集封存與再利用技術之認知，使臺灣達成全球淨零排放目標之重要性。

DNV除了以最具公信力之國際認證機構之一著名外，其為能源產業所制定之相關規範及標準亦是相當廣泛的實際應用，例如國際石油業界廣泛採用之DNV管線工程規範系列及風力發電機組之國際標準等。DNV (Det Norske Veritas)投入CCS技術工作已逾20年，並提出全球第一本有關碳捕集技術驗證程序的國際標準，更接受國際標準化組織ISO (International Organization for Standardization)邀請，協助制訂與CCS技術有關之3個標準，分別為碳捕集技術DNV-RP-J201對應ISO 27919-1、二氧化碳運輸技術DNV-RP-F104對應ISO 27913與二氧化碳封存技術DNV-RP-J203對應ISO 27914。基此，本文研究為提出最具國際級等級之標準專業論述，故引用DNV標準作為碳捕集技術相關理論支持。

2. 減碳技術發展趨勢

就全球能源需求之現況而言，真正能夠以零排放能源大規模的取代現有能源供應方式達成淨零排放之前，仍需部分仰賴化石能源。然而，以全球最終能源(final energy)的角度來看，隨著經濟的發展，能源需求必定會逐年增長。就我國而言，依據中華民國國家發展委員會於2022年3月30日所提出之「臺灣2050淨零排放路

¹ 臺灣2050淨零排放路徑及策略總說明(國家發展委員會，2022)。

² CCUS in Clean Energy Transitions, Report extract A new era for CCUS. <https://www.iea.org/reports/ccus-in-clean-energy-transitions/a-new-era-for-ccus> (IEA, 2020).

徑及策略總說明」文件報告，在同樣的淨零目標情景之下，我國與全球將由主要之化石能源消耗逐步轉型為電氣化之型態，而一致呈現整體能源消費趨緩且電力需求提升之趨勢³。

在達到淨零排放且同時維持經濟之發展下，越來越多的最終能源需求將增加，初級能源之使用量將逐年上升；其中，非再生能源之占比將逐漸被再生能源取代。雖然再生能源的占比將逐漸提高，但預估至2050年，化石能源仍將佔有50%的份額，無法完全消弭⁴。國際能源總署(IEA)曾針對全球初級能源之需求現況及未來預測進行統計⁵，相關能源結構主要變量(Main variables)為經濟增長、人口結構、政策、價格和投資等建構而出。於「持續發展情景(Sustainable Development Scenario, SDS)」— 在能夠達到巴黎協定目標並持續發展且大幅減少空氣汙染而可靠且經濟可行之現代能源供給(modern energy services)條件之下，2019年至2030年間全球之電力需求將增加近20%左右，等於增加將近4,500兆瓦·小時，其量已超越美國目前的電力需求。因此，電力在最終能源消費中的佔比將從2019年的19%上升到2030年的24%。於能源供應配比之角度來看，再生能源將於目前佔初級能源比例的15%成長至45%，

而化石能源將由目前的80%下降至50%。其中，發電和供熱產生的二氧化碳排放量將於此期間下降40%以上；然而，這些碳排的下降趨勢，係為假設已通過減少現有工廠的排放、配備碳捕集技術、發展可再生能源或核電站和發電廠，以提供足夠的容量來滿足所有電力需求增長之前提下所產生的。

以全球的角度來看，就能源供應面而言，單單以發展再生能源為目標，將無法達到2050淨零排放之理想目標，仍將有50%的化石能源須持續供應，仍將有溫室氣體持續產生。為達1.5°C及淨零二氧化碳排放之目標，採用合宜的減碳技術手段，仍為現階段全世界在努力發展再生能源之下，亦須共同發展的技術目標之一。

另就截至2021年底全球對於1.5°C之目標達成現況而言，DNV Pathway to net zero emissions⁶報告所統計之數據指出，依據DNV ETO 2021⁷所做出的分析結果，為達IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)所預測2050年達到淨零二氧化碳排放將全球平均升溫限制在1.5°C之目標，依目前全球之趨勢來看，2050年時將有22.9 GtCO₂之差距存在(如圖1)，將無法順利達成目標。此差距仍須透過更大規模的技術解決

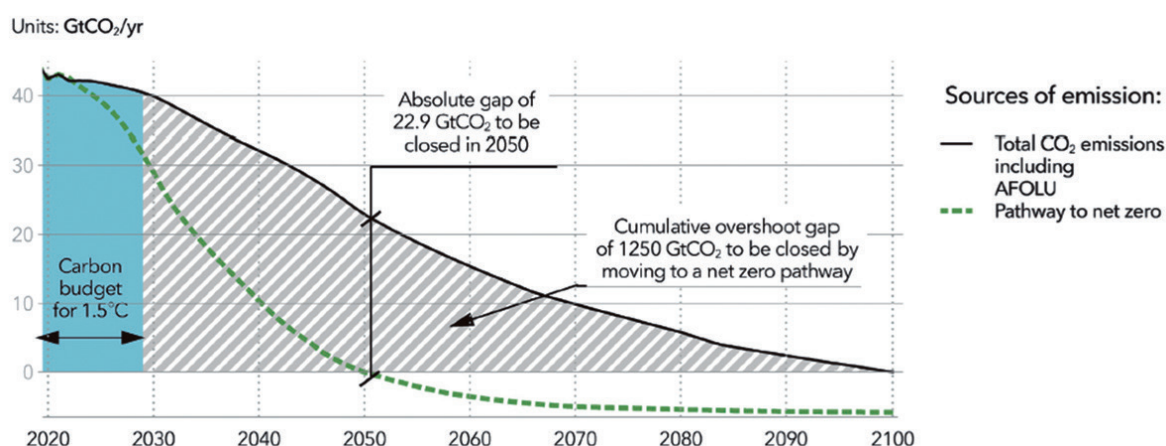


圖1 碳排與碳預算(Carbon budgets) (DNV, 2021a)

³ 臺灣2050淨零排放路徑及策略總說明(國家發展委員會，2022)。

⁴ Pathway to net zero emissions (DNV, 2021a).

⁵ World Energy Outlook 2020 (IEA, 2020b).

⁶ Pathway to net zero emissions (DNV, 2021a).

⁷ Energy transition outlook 2021 (DNV, 2021b).

方案(如碳捕集封存及再利用、氫氣、再生能源、儲能及電網)、相關能源、產業及氣候政策之推動來補足，以達到2050淨零二氧化碳排放(Zero CO₂ emission)之目標。

由此可知，碳捕集技術封存及再利用技術之發展意義，於國際間皆已被視為不可忽視之一部分，對於同在地球上生存的一份子，對於相關減碳作為我國必須積極參與，並共同承擔起此目標之責任。

為了與全球共同承擔減碳目標，於面臨跨世代、跨領域與跨國際轉型工程之情況下，我國相關轉型策略也同步持續推動，期為逐步實現2050淨零排放之永續社會。依據國家發展委員會所提出之資料顯示，燃煤/燃氣電廠將依碳捕集與封存(CCS)技術之發展進程於2040導入運用，2050之目標考量顧及能源安全之下，總能源使用20%~27%之火力發電搭載碳捕集及封存技術，總能源其餘占比約60%~70%為再生能源，9%~12%氫能，以達到整體電力供應去碳化之目標，詳如圖2。

依中華民國國家溫室氣體排放清冊報告(2021年版)⁸，我國二氧化碳排放源大致可分為

能源部門、工業製程及產品使用部門、農業部門和廢棄物部門。自1990年截止至2019年，二氧化碳排放量已由124,078千噸二氧化碳當量，增加為273,515千噸二氧化碳當量，增加約120%，佔國內溫室氣體總排放量約95%。能源部門包含固定式與移動式的能源活動，產生二氧化碳之方式包含來自燃料燃燒及逸散，約258,719千噸二氧化碳當量，約佔94.59%。有關國內工業製程及產品使用部門各排放源包含礦業(非金屬製程)、化學工業和金屬製程等，約14,553千噸二氧化碳當量，約佔5.32%。相關農業部門二氧化碳排放範疇則包含尿素施用於土壤後水解作用所產生之二氧化碳，約29千噸二氧化碳當量，約佔0.01%。廢棄物部門範疇則包含廢棄物之焚化與露天燃燒等，約214千噸二氧化碳當量，約佔0.08%，詳如圖3。

碳捕集技術之應用除能夠針對燃煤與燃氣等相關發電設施燃燒燃料所產生之二氧化碳進行捕集之外，其他排放源之二氧化碳亦得以採用合適之碳捕集技術進行捕集，依目前國際間各國淨零排放政策之明朗化，針對其餘相關排放源之碳捕集技術亦將逐漸成熟且擴大規模實

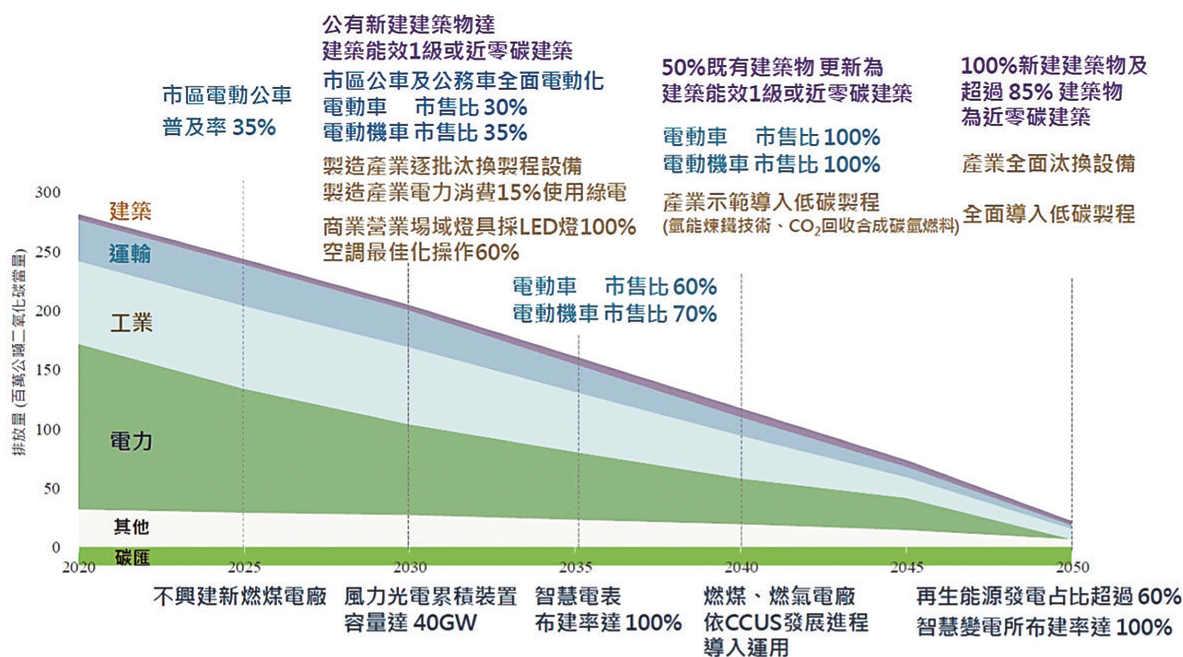


圖2 臺灣淨零轉型路徑規劃之階段里程碑(國家發展委員會，2022)

⁸ 中華民國國家溫室氣體排放清冊報告(行政院環境保護署，2021)。

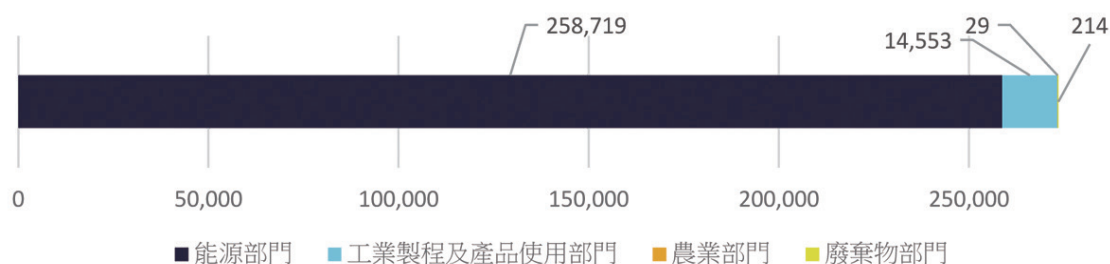


圖3 臺灣各部門二氧化碳排放量(千噸二氧化碳當量)

施。本文後續內容將針對國際間相關碳捕集技術之應用彙整介紹，說明碳捕集封存及再利用技術廣泛之應用範圍，以增進國內大眾對於碳捕集技術之認識。

3. 碳捕集技術產業分佈

世界各國對於碳捕集封存及再利用技術之使用早已行之有年且穩定發展及擴大中，特別是在已開發國家及相關油氣發展蓬勃之國家。對於我國發電設施結合碳捕集及封存技術，已然成為必要發展之趨勢，而針對其餘排放源之碳捕集封存及再利用技術，亦須同步進行，方可達到淨零二氧化碳排放(Zero CO₂ emission)之目標。

參考NETL (National Energy Technology Laboratory)所建置之碳捕集及封存數據庫(CCS Database)⁹，其彙整了目前公開之世界各地相關各式行業、公共團體及政府開發之碳捕集與封存專案，該資料庫所建置之相關封存(storage)分類不僅侷限於純粹將二氧化碳灌注至枯竭油氣構造(depleted gas reservoirs)或深部鹽水層(deep saline aquifer)之實際案例，亦將提升石油產量(Enhanced Oil Recovery, EOR)技術囊括入內。截至2018年4月為止，該數據庫係已包含至少299項運轉中、計畫中或已終止之碳捕集與封存專案，包含有76項碳捕集之專案、76項碳封存專案與147項碳捕集及封存之專案，詳如圖4。另，依據GCCSI (Global CCS Institute)最新

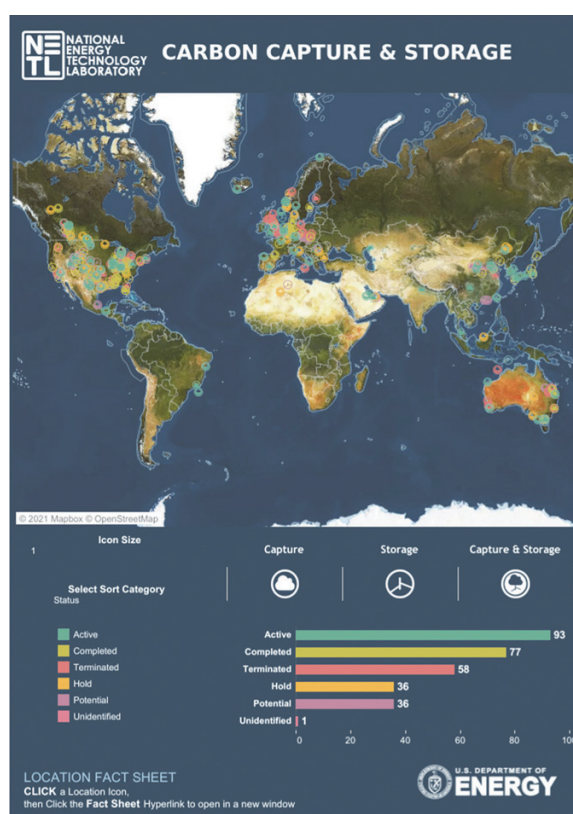


圖4 NETL互動式數據庫

公布之2021年報告¹⁰顯示，全球碳捕集之總捕集量(total capacity)連續四年持續增長。其報告指出，全球商轉規模之碳捕集廠截至目前(2022年7月)為止，其公開可被調查到的約有135項專案，其中約有27項已全面運轉、4項於興建中、102項開發中與另外2個暫停運轉中。此外，另有717項新的CCS專案於2021年被提出。全球總碳捕集量(total capacity)截至2021年9月止，已從2020年的每年73百萬噸(Mtpa)增加到了每年111百萬噸(Mtpa)詳如圖5。

⁹ NETL CARBON CAPTURE AND STORAGE DATABASE. <https://netl.doe.gov/coal/carbon-storage/worldwide-ccs-database>.

¹⁰ Global status of CCS 2021 (GCCSI, 2021).

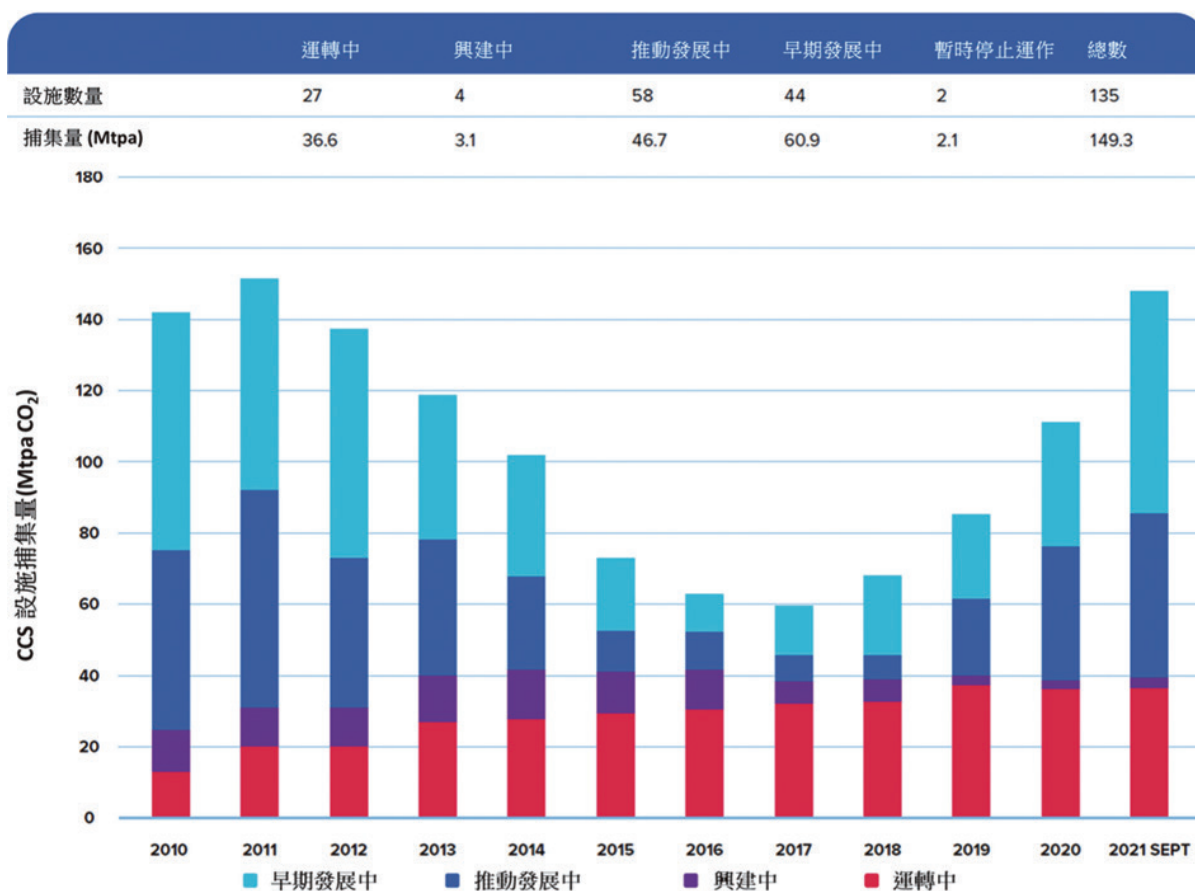


圖5 商轉型CCS設施統計數據(GCCSI, 2021)

近年來，碳捕集封存及再利用技術廣受國際關注，碳捕集技術之應用範圍也呈現多樣化，相關發電(power generation)、LNG (Liquefied Natural Gas)、水泥、鋼鐵、廢棄物轉化為能源(waste-to-energy)、直接從空氣中捕集(Direct Air Capture, DAC)及產氫(hydrogen production)等廣泛的領域皆有相關案例，且為達1.5°C之目標及2050之目標，在各國相繼推動相關減碳技術發展之條件之下，相關成功商轉之碳捕集封存及再利用技術案例亦逐年增加。

相關碳捕集技術案例應用類別依據GCCSI 2021年報告(GCCSI, 2021)所彙整之比例數據如圖6所示，應用於電力之碳捕集技術技術占最大宗約有27%，接下來是化學製程相關之乙醇生產及天然氣處理相關，占比分別約為17%及13%。

4. 碳捕集技術之種類及應用

根據DNV規範DNV-RP-J201¹¹，以化石燃料(fossil fuels)發電製程(power generation processes)為例，依其二氧化碳捕集概念及捕集方式，主要可分類為以下三種方式：燃燒後捕集(Post-combustion capture)、燃燒前捕集(Pre-combustion capture)與富氧燃燒(Oxy-fuel combustion capture)。上述三種方案之簡單示意圖，詳如圖7。然就此三種方案於實際方面之應用，其並不局限於發電製程，以下將就這幾種方案種類初步介紹：

基本上，不管是何煙氣(Flue gas)/尾氣(Tail gas)來源設施或設備(燃煤/燃氣鍋爐、裂解爐及一般鍋爐等)，產生二氧化碳之主因還是由於燃燒了化石燃料，在燃燒化石燃料之後的

¹¹ DNV-RP-J201: Qualification procedures for carbon dioxide capture technology (DNV, 2019a).

項目	數量
發電	66
乙醇生產	42
天然氣處理	31
N/A	17
氫氣生產	17
多樣	14
化學品生產	11
肥料生產	9
水泥生產	8
廢棄物焚燒	5
煉油	5
鋼鐵生產	4
評估中	2
發電及煉製	2
發電及氫氣生產	2
甲醇生產	2
工業應用	2
煤液化	2
生質能	2
合成天然氣	1
肥料生產及發電	1
乙醇生產及肥料生產	1
空氣直接捕集	1
總數	247

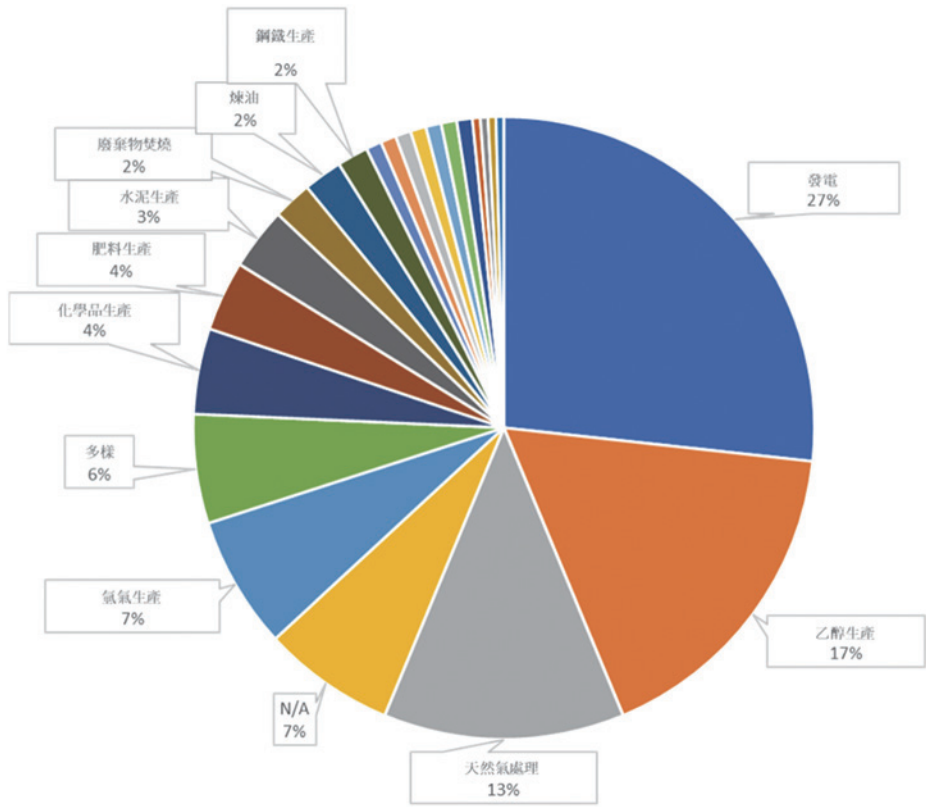


圖6 CCS設施應用圓餅圖

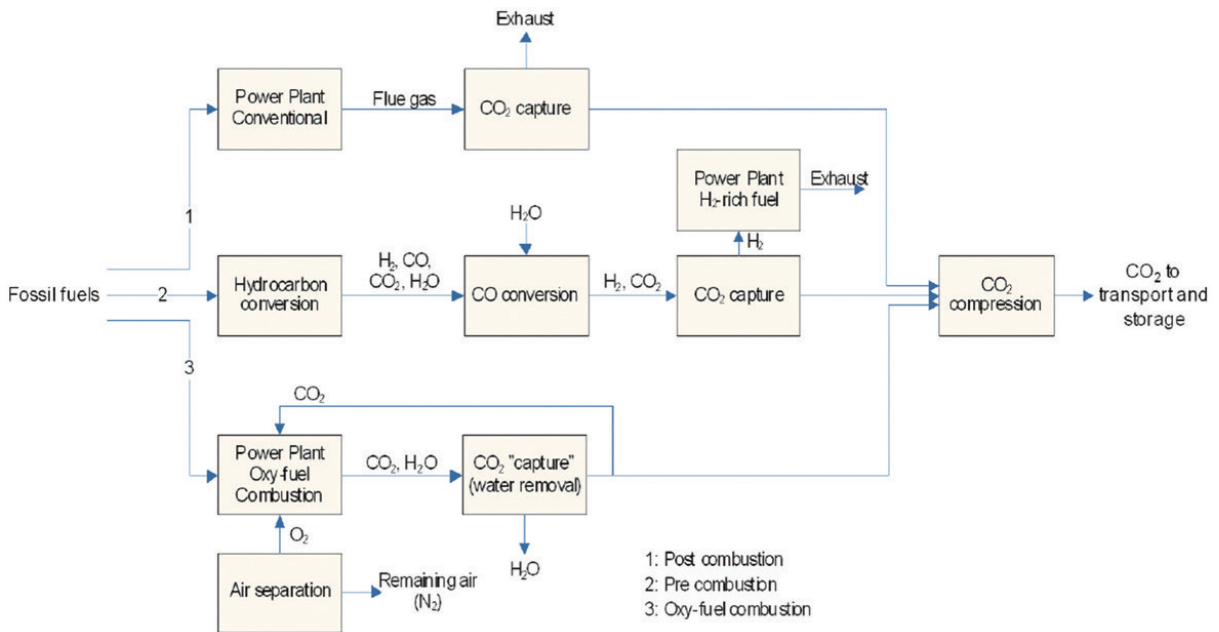


圖7 二氧化碳捕集方案之簡單示意圖(DNV, 2019)

過程當中，相關產生之煙氣/尾氣之成分又會因為不同製程及處理模式，而導致差異，相關成分包含如二氧化碳濃度、硫氧化物(SOx)、氮氧化物(NOx)及部分粉塵甚至有機物質等。

就將二氧化碳從原煙氣/尾氣分離出來之概念上來說，如前述所示，大致上可以分為燃燒後捕集(Post-combustion capture)、燃燒前捕集(Pre-combustion capture)與富氧燃燒(Oxy-fuel

combustion capture)三種。

第一條路徑為燃燒後捕集(Post-combustion capture)，化石燃料經由燃燒轉化(Conventional)之後，所產生之煙氣將含有大量二氧化碳及其他燃燒後產生的各式物質，煙氣再排放至大氣前，經由二氧化碳捕集技術進行二氧化碳之分離。該技術為目前世界上商轉規模之燃煤電廠皆使用之二氧化碳捕集技術方案^{12, 13}，使用燃燒後捕集化學吸收法之醇胺類溶劑進行大量捕集。

圖7第二條路徑則為燃燒前捕集(Pre-combustion capture)之流程示意，化石燃料在燃燒前，會先經過如烴類轉化(Hydrocarbon conversion)之過程，將化石燃料轉化為氫氣、一氧化碳、二氧化碳及水，後續一氧化碳再和水反應後產生二氧化碳，再經由二氧化碳捕集技術進行分離。通常應用於燃煤氣化循環式發電廠(Subraveti *et al.*, 2019)或蒸氣甲烷重組(Steam Methane Reformer, SMR)製程(Oh *et al.*, 2022)中。

第三條路徑為富氧燃燒(Oxy-fuel combustion capture)，在純氧中的環境裡燃燒，其所產生的廢氣成分將會非常單純，僅存在有二氧化碳和水蒸氣。水蒸氣可採用降溫使其凝結等方式使其排除，而二氧化碳則直接進行後續處理。基本上，只要針對鍋爐進行合適改造，一般製程皆可採用此種方法，如發電機組(Gładysz *et al.*, 2018)、水泥廠(Gerbelová *et al.*, 2017)等。

上述三種方式捕集下來的二氧化碳將視其後續運輸(Transportation)、封存(Storage)、再利用(Utilization)進行壓縮或其他處理。舉例來說，二氧化碳若為後續供應至相關食品業者，則需額外加設相關提高二氧化碳純度及潔淨度之純化設備等。另若考量後續運輸之形式，則須考量設置相關壓縮液化設施等。

相關碳捕集技術方案之可應用範圍雖為廣泛，但實質上的運作仍需考量技術本身效能、能耗問題、原機組效率與產能影響…等多項條件。是否為該排放源所適合之碳捕集技術，其仍應透過相關研究或技術評估，才在達成二氧化碳減量之前提下完成。

接續上述三種碳捕集技術方案，相關分離二氧化碳技術之方法則可以利用相關物理或化學方法來進行二氧化碳分離，此類型之碳捕集製程主要可分為溶劑吸收法(Absorption by solvents)、吸附劑脫附法(Adsorption by sorbents)、薄膜法(Membranes)與低溫法(Cryogenic separation)，詳如圖8。除了上述四種分離技術外，還可按照其具體技術更加細分為多類二氧化碳分離技術¹⁴(Metz *et al.*, 2005; Bailey and Feron, 2005; Eide and Bailey, 2005)，和其他新興技術如化學迴路燃燒(Chemical looping combustion)等，詳如表1。

各項碳捕集技術除應用於石化燃料發電製程之外，亦可應用於其他產業如鋼鐵、水泥生產等以及化石燃料生產和轉化等，目前市面上可取得的成熟碳捕集技術，其主要所需的技術概念、化工製程或部件，皆為市場或商業上一般化工製程所普遍應用的，其主要功能應無差別。差異在於一般化工製程與部件之設計目的，並非適用於捕集二氧化碳之條件或規模，成為成熟的碳捕集技術仍需要長時間針對相關製程整合(integrate)、最佳化(optimize)以及規模放大(scale up)等技術層面進行研發。

每一種碳捕集技術應用之類型選擇，主要取決於欲分離二氧化碳之氣體混合物(如煙氣等)組成、溫度、壓力、二氧化碳濃度及二氧化碳之去除量而定，目前公認最成熟先進的碳捕集技術為二氧化碳分壓低時得使用之化學吸收法(即為燃燒後捕集)。不同方法與製程類型之適用性分類，詳如表2碳捕集技術工具表所示。

¹² Petra Nova - W.A. Parish Project. <https://www.energy.gov/fecm/petra-nova-wa-parish-project>.

¹³ Boundary Dam Carbon Capture Project. <https://www.saskpower.com/Our-Power-Future/Infrastructure-Projects/Carbon-Capture-and-Storage/Boundary-Dam-Carbon-Capture-Project>.

¹⁴ The final report from Working Group I Power Plant and Carbon Dioxide Capture (ZEP, 2006).

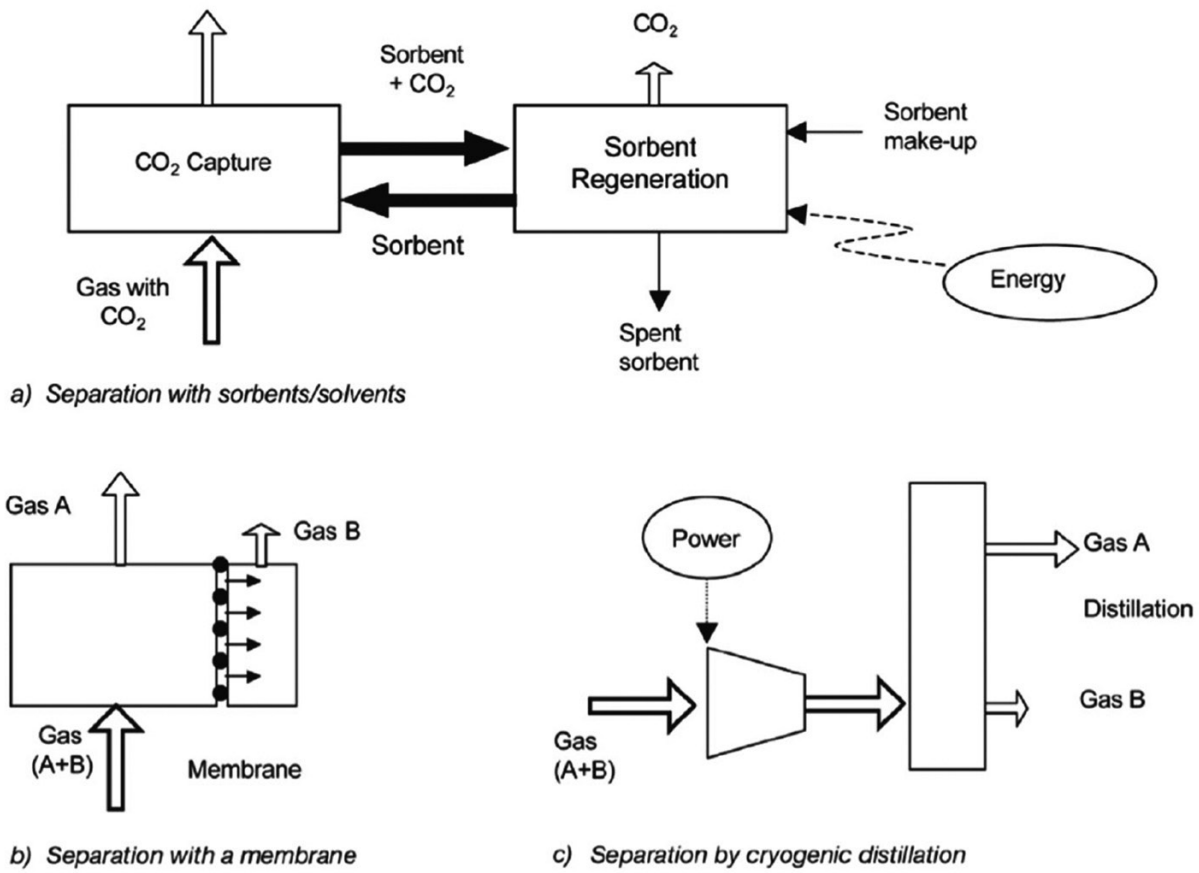


圖8 碳捕集製程類型(Metz et al., 2005) a)利用吸附劑/溶劑分離 b)利用薄膜分離 c)利用低溫蒸餾分離

表1 碳捕集製程類型及具體技術種類¹⁵

製程類型	具體技術
吸收法 (Absorption)	化學吸收(Chemical absorption) (醇胺amine，立體障礙胺 hindered amine 及無機物inorganic)
	物理吸收(Physical absorption)
吸附法 (Adsorption)	變壓吸附(Pressure swing adsorption)
	變溫吸附(Temperature swing adsorption)
	電流擺動吸附(Electric swing adsorption)
	真空吸附(Vacuum swing adsorption)
薄膜法 (Membranes)	氣體吸收薄膜(Gas absorption membranes)
	氣體分離薄膜(Gas separation membranes)
	薄膜反應器/重組器(Membrane reactors/reformers)
低溫法 (Cryogenics)	壓縮及製冷(Compression and refrigeration)
新興技術 (Emerging technologies)	化學迴路燃燒(Chemical looping combustion)；酶基系統(enzyme-based systems)；固體吸附劑(solid sorbents)

¹⁵ DNV-RP-J201: Qualification procedures for carbon dioxide capture technology (DNV, 2019).

表2 碳捕集技術工具表¹⁶

捕集路徑	燃燒後		燃燒前		富氧燃燒	
	CO ₂ /N ₂		CO ₂ /N ₂		CO ₂ /N ₂	
捕集技術	目前	未來	目前	未來	目前	未來
溶劑 (吸收法)	化學溶劑	溶劑改良 新型接觸設備 製程改良	物理溶劑 化學溶劑	溶劑改良 新型接觸設備 製程改良	無	仿生溶劑 (Biomimetic solvents)
固體吸附劑 (吸附法)	沸石 活性炭	碳酸鹽類 碳基吸附劑	沸石 活性炭	碳酸鋁 水滑石 矽酸鹽類	沸石 活性炭	鈣鈦礦 (Perovskites)
薄膜法	聚合物	陶瓷薄膜 促進傳輸 (Facilitated transport) 碳薄膜 薄膜接觸器 (Contactors)	聚合物	陶瓷薄膜 鈹膜 薄膜反應器 (Reactors) 薄膜接觸器 (Contactors)	聚合物	離子交換膜 促進傳輸 (Facilitated transport)
低溫法	液化	混合製(生)成	液化	混合製(生)成	蒸餾	蒸餾改良
新興技術 (生物技術)		藻類生產		高壓應用		仿生方法 (Biomimetic approaches)
能量轉化 (Energy conversion)		新興電力循環	燃氫	燃燒機(Burner) 設計改良	大氣中氧 氣、二氧化 碳、水分等 燃燒	燃燒機(Burner) 設計改良

除針對各種組合進行分類外，亦將目前及未來預期之研發目標彙整展現。

以目前最為大宗之燃燒後捕集化學溶劑吸收法為例，目前只要使用醇胺類溶劑作為捕集媒介，目前專利或專有技術皆以溶劑及製程改良為主，已使燃燒後捕集化學溶劑吸收法達到能耗低、低汙染、高效率之碳捕集技術。

一般而言，得以稱之為大規模工業化(large-scale industrial)或商轉規模(commercial scale)之成熟的碳捕集技術，除了捕集量體之規模外，由於煙氣的產生為連續式的，碳捕集製程亦須具有能夠配合煙氣的產生，長時間不間斷之捕集能力。故，長期的測試，除能確保其該技術

能連續性的捕集大量二氧化碳，相關成本效益、可靠度、安全性與可達之環保規格，皆屬成熟碳捕集技術所需具備的基本要件。

5. 碳捕集技術挑戰與不確定性

碳捕集技術發展至今，已有相關成熟的技術可供市場使用，達到分離二氧化碳的主要目的。然而，面對能源或其他不同領域之產業日新月異，碳捕集技術亦有其明確或具有不確定性之發展方向與改善空間，本節將彙整上述三種不同碳捕集技術路徑類型目前已發現或可預料中的挑戰及其不確定性。

¹⁶ DNV-RP-J201: Qualification procedures for carbon dioxide capture technology (DNV, 2019).

不管是燃燒後、燃燒前或者是富氧燃燒捕集，三者最被關注面臨到的挑戰即為能耗上的問題，依據不同的技術發展方向，技術中能耗需求重點亦有所不同。對於燃燒後捕集技術來講，相對於其他技術而言，若選擇使用吸收劑作為分離二氧化碳的媒介，吸收劑的再生(adsorbent regeneration)為重點能耗部分；對於燃燒前捕集技術，二氧化碳的分離以及為使原始燃料氣體除去當中的雜質、汙染物等其可能影響/阻礙二氧化碳分離物質所做之燃料氣體的處理(fuel gas processing)，為相對其他技術來說之能耗關注區塊；富氧燃燒捕集技術的耗能部分則為氧氣的生產/製造過程。除了上述有關捕集主要製程或過程外，對於須將捕集下來的氣態二氧化碳進一步壓縮為液態或超臨界流體狀態以供後續應用或運輸時所產生之能耗，亦為這三種碳捕集技術路徑類型共同所面臨的挑戰。

對於能耗而言，電力供應或額外燃料燃燒供給熱能所需量問題，將延伸成額外碳排的疑慮，以碳足跡的概念來說，大量的電力供應或者是燃料的燃燒，都將導致更多的溫室氣體產生。僅關注在使用碳捕集技術之排放源上的話，看起來確實是將二氧化碳進行分離並捕集起來；然而，若將整體能源價值鏈囊括在內，考慮到過程中二氧化碳的產生，數值上的碳捕集量將不會那樣的完美。在未來，若能將再生能源應用於CCS技術上，就整體能源價值鏈循環經濟角度來看，減碳的問題得以被完善的解決。除了能源部門外之工業製程或其他仍須碳捕集技術輔助之產業，將得以採用真正零碳排之碳捕集技術。

在技術發展的過程當中，對於該技術所能處理量體的規模，亦為重要的研發重點及挑戰之一。相關製程技術在規模放大中，除了製程設備體積大小改變外，相關效能等亦將隨之改變，大規模的大型設備所需之技術、研發及最

佳化能力亦為目前碳捕集技術發展重點。如何在維持優良效能的前提之下，製程技術之相關能耗、安全及環保亦可達到良好的程度為目前市面上成熟碳捕集技術之必要條件。

若以個別技術路徑類型來說，燃燒後捕集技術——顧名思義就是處理相關製程中燃燒後所產生之煙氣/尾氣(flue gas/tail gas)，由於煙氣/尾氣中含有影響碳捕集效能之不純物質，故須針對煙氣/尾氣之種類及成分等，進行合適煙氣/尾氣之處理/淨化設備，例如脫硫(desulphurization)或洗滌塔(Scrubber)等。另外，關於使用溶劑吸收法製程中溶劑降解(degradation)之問題，除了降解產物可能依溶劑類型不同而有複雜的變化，產生相關安全及環保等不確定問題等，降解產物可能產生的腐蝕問題亦是工程設計的挑戰之一。^{17, 18} (Islam *et al.*, 2010)

燃燒前捕集技術系指藉由高壓蒸汽將烴類(hydrocarbon)轉化為氣態組成之煤氣化(coal gasification)技術，例如碳基(carbon-based)燃料轉化為清潔的氫基(hydrogen-based)燃料之作法，相關研究(Gnanapragasam *et al.*, 2010；Bottino *et al.*, 2006)皆已證明燃氣渦輪發電機組改用富氫燃料(hydrogen-rich fuel)之措施能夠有效減少有害物的排放且與燃燒後捕集技術相比成本相對較低(Rao and Phadke, 2017)，但在轉化燃料相關製程中顯示出無法避免的能耗問題。但若能夠針對熱力學效率問題進行研究與改良，相關實際操作之案例顯示，搭配著氫能源發展，燃燒前捕集技術方面具有著能夠進階優化的巨大潛能(Petrakopoulou, 2012)。主要可應用於燃煤整體煤氣化聯合循環發電系統(Integrated Gasification Combined Cycle, IGCC) (Metz *et al.*, 2005)，但目前於發電廠應用之實例則非常稀少。

富氧燃燒捕集技術則是較偏向發電機渦輪之改造利用，利用含有高濃度氧氣的空氣與燃

¹⁷ Emissions of substances other than CO₂ From power plants with CCS (IEA, 2012).

¹⁸ Evaluation of reclaimer sludge disposal from post-combustion CO₂ capture (IEA, 2014).

料(煤或天然氣)於燃燒器(combustor)中進行燃燒，氧氣與燃料將化學反應生成二氧化碳與水蒸氣流體，該流體則可進一步推動發電機的渦輪。相較於另外兩種技術，原理上看起來與不額外產生二氧化碳之理念背道而馳，但經過富氧燃燒後的所產生的二氧化碳比起原燃料燃燒之尾氣，已經可達碳捕集目標，其不須額外將二氧化碳與其他非二氧化碳之物質分離即可進行捕集作業。然而，相較於燃燒後捕集技術，該方法較大規模的示範案例實績較少，因高純度二氧化碳流體，將導致製程設備需特別考量抗腐蝕能力之設計；有關流體的熱力學性質亦須特別研究。

燃燒前捕集與富氧燃燒捕集技術，兩者與燃燒後捕集技術之間不同的共通點在於，因燃料的性質有所改變而須進一步針對原製程後續部件進行合適性的改造/改良，改造/改良後的原製程部件將很難再次適用於未處理過的燃燒流體，故處理燃料之前端製程程序若失效或停機，將造成後續製程皆須一併停擺。而後者則配置於燃燒後製程程序之後，對於原燃燒製程程序影響較小，若碳捕集製程失效或停機，將不影響原製程的運作。

除了上述各捕集技術相關的挑戰與困難外，任何捕集後之二氧化碳處置方式亦為碳捕集技術所須面對的課題。捕集下來的二氧化碳還須考慮到相關運輸、封存或再利用配置型式，不管是何種型式的運輸、封存或再利用型式，考量到相關經濟成本及效率問題，大多數都會採用將氣態二氧化碳壓縮成液態或超臨界流體的方式進行，二氧化碳壓縮程序對於碳捕集製程技術整體來說，無非為產生更多的能耗因素之一。

對於目前正處於碳捕集技術發展非常前端時期的臺灣而言，對於相關技術的選擇、引進及研發等，都可能遭遇到上述的各項困難；然

而，目前針對臺灣發展碳捕集技術之現況，不管是國內自行研發之碳捕集技術，或是引進外國具成熟資歷之專利技術而言，在發展/擴大碳捕集技術之前，對於捕集下來的二氧化碳去處——封存或再利用，應為目前首要關注之挑戰，且為必要克服之重點課題之一。若捕集量體大過於二氧化碳封存或再利用之消耗量能，持續產生的二氧化碳將產生去化困難等問題，最終結果除了無法達成淨零排放等目標外，還可能產生更多的污染。

國際間誘以碳捕集技術得以發展成熟之原因，除了各國為了達成《巴黎協定(Paris Agreement)》之約定外，不外乎更加與發展此技術之相關經濟效益有關。新技術發展之經濟效益，不僅僅與成本有著直接關係，就碳捕集技術而言，主要與國家本身或國與國之間的政策有著重大相關性。部分國家發展碳捕集與封存技術之同時，搭配提高原油採收率(EOR)技術，成功直接的大幅降低了成本、提高了利潤，進而充分地提高了發展碳捕集技術之動力及效率。然而，就無法執行EOR技術之國家，相關經濟政策則成為影響技術發展之重要關鍵。上述經濟政策係指為目前多數人所關注之「碳稅(Carbon tax)」、「碳權(Carbon credit)」與「碳交易(Carbon trade)」等碳定價機制議題。

就我國目前之相關政策規劃，依據2021年底所提出之《溫室氣體減量與管理法》¹⁹修正草案，其欲將其法案修正為《溫室氣體減量與管理法》，將國家長期減量目標強化相關行政管制及徵收碳費(Carbon fee)專款等修法方向來看，我國相關減碳政策似乎已逐漸明朗。然而，就截止至2022年8月為止之相關資訊看來，我國碳費之定價似乎仍不及國際間所建議之費率²⁰。如同綠色和平東亞分部於2021年文章²¹中所提到的，使碳費有效的關鍵在於確保其脫碳/

¹⁹溫室氣體減量及管理法(行政院環境保護署，2015)。

²⁰我們與碳費的距離：碳定價多少才合理？<https://e-info.org.tw/node/234045> (環境資訊中心，2022)。

²¹「有效碳定價」解盲(綠色和平組織東亞辦公室，2021)。

減碳之誘因足夠強烈，其須具有夠高的費率。碳費雖然可成為減碳技術發展之推手，但若由於低於其他國家之碳費費率，將可能導致相關企業無法從中獲得足夠利益，實際導入碳捕集技術後是否能夠產生真正效益，將成為廠商決定是否投入相關發展之顧忌，是否能夠消除目前發展減碳技術存有之困難及不確定性仍有進一步討論的空間。

6. 碳捕集技術國際案例

有關燃煤煙氣進行碳捕集之發展，早在七零年代，就有實際技術應用於工廠之先例。1978年，當時的北美化學公司(North American Chemical)於Searles Valley Minerals化學工廠建立了一套每日捕集量近800噸之醇胺類溶劑吸收法製程，用於捕集燃煤鍋爐煙氣中的二氧化碳(Herzog, 2018)。截至目前為止，該工廠仍在持續運營，並持續針對醇胺類溶劑吸收法製程進行多方面改良，例如建立新的溶劑及其回收系統——delta Reclaimer等，相關研究指出新溶劑與該系統大量的減少了廢棄物產生之數量(Elmoudir *et al.*, 2014)。由此證明，碳捕集技術其實並非一項新發明，早在人們開始重視碳捕集技術用於緩解氣候變遷問題前就已存在。

由於碳捕集製程具有顯著的規模經濟(Economies of scale)特性，平均碳捕集成本隨著生產規模擴大而下降，對於大型且固定的排放源最具效益。所以可以看到為什麼發展階段中的碳捕集技術在國際案例間都與煤炭有關係，但隨各國逐漸對於減碳目標的重視與相關政策陸續的制定，對於單體看起來經濟效益較低的產業排放源，也陸續開始被重視，除了電力部門之外的工業製程亦受到更多關注。長遠看來，若再生能源發展成熟，可完全取代燃料燃燒能源情境之下，在能源發電方面，貌似將不需碳捕集技術的支援；然而，在其他產/工業

方面，燃燒燃料仍是必要的情境，碳捕集技術將是目前達到緩解氣候變遷問題的唯一可行選擇。

在其他產/工業方面，製程程序中所產生的煙氣或尾氣，皆具有不同程度濃度之二氧化碳被排放於大氣之中，包含如化肥廠之氨生產、煉油廠之氫氣生產及天然氣淨化製程等。綜整能源發電與其他產/工業來說，二氧化碳的濃度範圍大約為3%–20%左右，最低濃度來自於天然氣發電廠，而水泥廠則為最高濃度之代表。由此可知，若須達到淨零碳排的目標，碳捕集技術之發展，應將視野放寬至各產業。

節選歷年全球運轉過/中實例，針對燃煤煙氣之碳捕集技術案例彙整其相關資訊如表3所示，相關資訊包含專案名稱、地點、碳捕集技術路徑及類型、捕集/封存量及單位與專案起始之年份，以技術路徑及起始年份排序。表3所列燃煤煙氣之碳捕集技術案例，應用範圍包含能源發電方面之電廠，亦包含煤氣化工廠或IGCC等。

除了上述案例外，更有其他技術包含如加拿大Quest CCS設施，其採用Shell公司燃燒後捕集溶劑吸收法技術每年持續捕獲和封存約1.1公噸的二氧化碳。自2015年8月啟動以來，Quest CCS設施已捕集來自加拿大Scotford Upgrader三個氫氣製造裝置產生的二氧化碳，並封存超過100萬噸(Mt)至深層鹽水層中。以及依據Plaza *et al.* (2020)研究所提及之我國工研院(Industrial Technology Research Institute, ITRI)和台泥實際應用於和平水泥廠之「鈣迴路(Calcium-Looping)捕獲二氧化碳技術」，以及義大利CLEANKER專案與西班牙CEMCAP專案等，依據歐盟委員會(European Commission)網站資料顯示，鈣循環(CaL)是水泥廠二氧化碳捕集最有前途的技術之一²²。

引述上述具發展歷史之相關案例後，再依據GCCSI 2022年²³針對CCS技術發展現況，彙

²² CLEAN clinker production by Calcium looping process. <https://cordis.europa.eu/project/id/764816>.

²³ State of the art: CCS technologies 2022 (GCCSI, 2022).

表3 燃煤之碳捕集技術案例彙整表

編號	專案名稱	地點	技術路徑	技術類型	捕集/封存量*	單位**	專案起始年份
1	Ordos Basin Project	China	Pre	Unknown	9,590.00	MTPD	2008
2	Tampa Electric - Scale-Up of High-Temperature Syngas Cleanup Technology	US	Pre	MDEA Gas Separation Process	748.02	MTPD	2009
3	HRL IDGCC Project	Australia	Pre	Unknown	40.00	% R	2010
4	Great Lakes Energy Research Park	US	Pre	ConocoPhillips E-Gas Gasification	90.00	% R	2015
5	Puertollano Plant	Spain	Pre	Pressurized Entrained Flow (Preiflo)	100.00	MTPD	2018
6	Searles Valley Minerals	US	Post	Amines	739.80	MTPD	1976
7	TEPCO Yokosuka	Japan	Post	Solvents	90.00	% R	1997
8	AES Warrior Run	US	Post	Ethanol-Amino Solvent	96.00	% R	2000
9	Matsushima Coal Plant Capture Project	Japan	Post	Amines	10.00	MTPD	2006
10	CS Energy Calide Oxyfuels Project	Australia	Post	Oxy-Fuel Combustion	82.20	MTPD	2006
11	SECARB Development Phase - Citronelle Project	US	Post	Amines	114,104.00	MTT	2007
12	CASTOR CO2 from Capture to Storage	Denmark	Post	Amines	22.00	MTPD	2008
13	CATO2 CO2 Catcher	Netherlands	Post	Amines	6.00	MTPD	2008
14	CSIRO Transportable Capture Unit Loy Yang (Victoria)	Australia	Post	Solvents	2.74	MTPD	2008
15	CSIRO Transportable Capture Unit Tarong (Queensland)	Australia	Post	Amines	4.11	MTPD	2009
16	RWE/BASF/Linde CO2 Capture Project Niederaussem	Germany	Post	Amines	2,000.00	MTT	2009
17	Sigma Power Ariake Mikawa	Japan	Post	Amines	10.00	MTPD	2009
18	Great River Energy	US	Post	Amines	80.00	% R	2009
19	NRG Powerton Station	US	Post	Amines	Unknown	Un	2009
20	H3 Capture Project - CO2GRC	Australia	Post	Solvents	-	MTPD	2009
21	E.ON Staudinger - Grosskrotzenburg Germany	Germany	Post	Solvents	90.00	% R	2009
22	Infermountain Power Agency	US	Post	Unknown	Un	Un	2009
23	E.ON Pilot Plant in Heyden, Germany	Germany	Post	Amines	90.00	% R	2010
24	Enel Brindisi CCS Project	Italy	Post	Amines	21.92	MTPD	2010
25	Eni and Enel CCS Project	Italy	Post	Amines	21.92	MTPD	2010
26	Slipstream Development and Testing of Siemens POSTCAP Capture and Separation Technology	US	Post	Aqueous Amino Acid Salt-Based Solvent	50.00	MTPD	2010
27	Evaluation of Solid Sorbents as a Retrofit Technology for CO2 Capture	US	Post	Solid Sorbent	25.00	MTPD	2010
28	W. A. Parish Post-Combustion CO2 Capture and Sequestration Project	US	Post	Solvents	3,836.00	MTPD	2010
29	Scottish and Southern Energy - West Yorkshire	England	Post	Amines	100.00	MTPD	2011
30	RWE nPower - Aberthaw Capture Project in UK	UK	Post	Cansolv Technologies' Capture Technology	50.00	MTPD	2011
31	Prairie State Energy Campus	US	Post	Unknown	15.00	% R	2012
32	Tarong Plant Algae Oil Project	Australia	Post	Bio CCS Algal Synthesizer	1.92	MTPD	2013
33	Boundary Dam Integrated CCS Project	Canada	Post	Amines	2,740.00	MTPD	2014
34	EW Brown Generating Station	US	Post	Solvents	Un	Un	2014
35	Sinopec Shengli Power Plant CCS Project	China	Post	Amines	2,740.00	MTPD	2018
36	Korea CCS1	South Korea	Post	Amines	2,740.00	MTPD	2018
37	Large Pilot Testing of Linde/BASF Advanced Post-Combustion CO2 Capture Technology at a Coal-Fired Power Plant	US	Post	Linde-BASF Solvent System	Unknown	Un	2018
38	Large Pilot Testing of the MTR Membrane Post-Combustion CO2 Capture Process	US	Post	MTR Polaris™ Membrane System	Unknown	Un	2018
39	UKy-CAER Heat-Integrated Transformative CO2 Capture Process for Pulverized Coal Power Plants	US	Post	UKy-CAER Heat-Integrated Transformative CO2 Capture Process	Unknown	Un	2018
40	ION Engineering Commercial Carbon Capture Design & Costing (C3DC)	US	Post	ION's Solvent CO2 Capture Technology	Un	Un	2018
41	Initial Engineering, Testing, and Design of a Commercial-Scale, Post-Combustion CO2 Capture System on an Existing Coal-Fired Generating Unit	US	Post	MHI KM CDR Process™ Using the KS-1™ Solvent	Un	Un	2018
42	Initial Engineering Design of a Post-Combustion CO2 Capture System for Duke Energy's East Bend Station Using Membrane-Based Technology	US	Post	MTR Polaris™ Membrane System	Un	Un	2018
43	OXYCFB300 Compositilla Project	Spain	Oxy	Oxy-Fuel Combustion	100,000.00	MTT	2009

*依據各專案公開數據之差異，部分專案僅能取得封存之量體。
 **MTPD = Metric Tons Per Day, MTT = Metric Tons Total, % R = % Reduction, Un = Unknown

整目前世界上各技術廠商之相關專有/專利技術來看，來自世界各地之技術廠商皆已逐漸將其技術發展近成熟，且大多數皆具有專利，並針對不同的排放源發展出各自適合之技術。

以Air Liquid公司來說，該報告中列舉出，其至少已擁有5項適用各於不同領域之碳捕集技術。包含如適用於氫氣製程的Cryocap™ H₂技術，藉由變壓吸附(Pressure swing adsorption, PSA)方式從蒸汽甲烷重整(Steam Methane Reforming, SMR)、自熱轉化(Autothermal Reforming, ATR)或部分氧化(Partial Oxidation, POX)製程製氫過程中捕集產生的二氧化碳。藉由加壓冷卻等方式純化二氧化碳，過程中未被冷凝的部分氫氣或二氧化碳殘餘氣體會被送回至製氫製程之燃燒器(burner)循環利用。目前該技術之碳捕集規模可達300TPD – 5,000TPD，於2012年至2020年間，以於歐洲各地，如法國與比利時等，完成建設及前端工程設計FEED (Front End engineering)等工作。

除了適用於氫氣製程的碳捕集技術外，更有針對二氧化碳濃度較高之煙氣來源如工業煙氣、水泥和石灰生產、煉油廠及燃煤電廠等之Cryocap™ FG技術。其除了能夠進行二氧化碳捕集外，更宣稱能夠減少煙氣中NO_x的排放量。主要技術原理係結合了吸附與低溫法之概念，煙氣首要會先經過壓縮系統，壓縮乾燥後會送至變壓吸附PSA (Pressure Swing Adsorption)。PSA將預濃縮煙氣中的二氧化碳，過後再經過低溫製程，通過部分冷凝與蒸餾的過程得到純化的二氧化碳。該技術目前碳捕集規模可達300TPD – 10,000TPD，主要可應用於二氧化碳濃度大於15%的煙氣，於2020年以來，係以完成2,000TPD – 10,000TPD之實際案例。

Air Liquid公司除上述兩種製程外，針對富氧燃燒方法研發出了Cryocap™ Oxy技術、適用於鐵與鋼鐵製造廠之Cryocap™ Steel技術以

及燃燒前處理天然氣之Cryocap™ NG技術等。Cryocap™這些技術主要依靠電力運行，蒸汽的使用量極少，幾乎可忽略不計，其通過減少間接二氧化碳排放以及高二氧化碳捕集率之特性，最大限度避免了二氧化碳的產生。

再以Aker Carbon capture公司(以下簡稱Aker公司)來說，其碳捕集專利製程技術ACC™自2005年研究開發起，2009年開始商業化。標榜其ACC™專有溶劑與製程為成本效益高且對環境影響小的專利技術。該溶劑經過一系列於能耗、耐用度、毒性、原料兼容性以及健康安全環保性能方面進行測試比較，足證其為一種節能溶劑(energy efficient solvents)，且沒有負面環境影響或職業危害等。以完善解決的ACC™專有製程中胺類物質或其他降解物質之逸散/排放。

ACC™捕集技術截至目前為止，已於美國、德國、蘇格蘭、瑞典、波蘭和挪威等地之燃煤、燃氣電廠、水泥廠、焚化爐與製氫廠進行了相關測試與驗證。基於廣泛的試驗，ACC™捕集技術更通過了DNV GL公司(2021年正式更名為DNV)依據DNV-RP-A203²⁴新技術鑑定程序及DNV-RP-J201²⁵二氧化碳捕集技術鑑定程序之鑑定。

除了上述Air Liquid及Aker公司外，GCCSI 2022年報告中亦將其餘14家致力於發展碳捕集技術之公司羅列其中，包含如眾所皆知的Shell公司、Carbon Clean、Air products、Axens與C-capture等公司；然而，市面上除了報告中所提及的，亦有其他具有同等實力之技術公司，如Toshiba、Fluor、Baker Hughes與KANFA等，相關實例資訊皆可於公開網站或相關期刊論文中獲得。就整體碳捕集技術鏈而言，還包含了運輸(Transportation)及封存(Storage)等相關衍生技術，若須達到碳捕集技術完整的狀態，勢必同時考量上述兩項之技術可行性及發展性。

²⁴ DNV-RP-A203: Technology qualification (DNV, 2019b).

²⁵ DNV-RP-J201: Qualification procedures for carbon dioxide capture technology (DNV, 2019a).

7. 結論與建議

為朝向2050淨零碳排目標，達到趨緩地球溫室效應之願景，以目前國際間相關減碳策略之相關布局，將難以達成，碳捕集技術的加入勢必為影響總體減碳目標之重要手段之一。就上述相關文獻及實際案例之證明，國際間相關碳捕集技術之發展，早具成熟之發展狀態，並成功的在各項不同領域中有實際應用案例。就我國而言，若要與國際同步達到淨零碳排的目標，碳捕集技術之發展應加速進行，並將該技術擴展至各產業，以達到環境保護和經濟成長所需之平衡。

為達此目標，政府相關政策的推廣，是否能夠和其他國家相同有效地推動，即為相當重要的關鍵點；然而，除了政府單位，產業界與學界甚或民眾的支持，亦將為發展碳捕集技術必不可缺的一部分。

參考文獻

- 行政院環境保護署，2015。溫室氣體減量及管理法。
- 行政院環境保護署，2021。中華民國國家溫室氣體排放清冊報告。
- 國家發展委員會，2022。臺灣2050淨零排放路徑及策略總說明。
- 綠色和平組織東亞辦公室，2021。「有效碳定價」解盲。
- 環境資訊中心，2022。我們與碳費的距離：碳定價多少才合理？<https://e-info.org.tw/node/234045>。
- Bailey, D. W. and P. H. M. Feron, 2005. Post-combustion Decarbonisation Processes, *Oil & Gas Science and Technology*, 60(3), pp. 461-474.
- Bottino, A., G. Capannelli, A. Comite, R. Firpo, R. Di Felice and P. Pinacci, 2006. Steam reforming of methane in equilibrium membrane reactors for integration in power cycles, *Catalysis Today*, 118(1), pp. 214-222.
- DNV, 2019a. DNV-RP-J201: Qualification procedures for carbon dioxide capture technology.
- DNV, 2019b. DNV-RP-A203: Technology qualification.
- DNV, 2021a. Pathway to net zero emissions.
- DNV, 2021b. Energy transition outlook 2021.
- Eide, L. I. and D. W. Bailey, 2005. Precombustion Decarbonisation Processes, *Oil & Gas Science and Technology*, 60(3), pp. 475-484.
- Elmoudir, W., J. Fairchild and A. Aboudheir, 2014. HTC Solvent Reclaimer System at Searles Valley Minerals Facility in Trona, California, *Energy Procedia* 63(2), pp. 6156-6165.
- GCCSI, 2021. Global status of CCS 2021.
- GCCSI, 2022. State of the art: CCS technologies 2022.
- Gerbelová, H., M. van der Spek and W. Schakel, 2017. Feasibility Assessment of CO₂ Capture Retrofitted to an Existing Cement Plant: Post-combustion vs. Oxy-fuel Combustion Technology, *Energy Procedia* 114, pp. 6141-6149.
- Gładysz, P., W. Stanek, L. Czarnowska, S. Słdek and A. Szlęk, 2018., 2018. Thermo-ecological evaluation of an integrated MILD oxy-fuel combustion power plant with CO₂ capture, utilisation, and storage – A case study in Poland, *Energy*, 144, pp. 379-392.
- Gnanapragasam, N. V., B. V. Reddy and M. A. Rosen, 2010. Hydrogen production from coal gasification for effective downstream CO₂ capture, *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(10), pp. 4933-4943.
- Herzog, H. J., 2018. Carbon Capture. The MIT Press Essential Knowledge series.
- Hamilton, I., H. Kennard, A. McGushin, L.

- Höglund-Isaksson, G. Kiesewetter, M. Lott, J. Milner, P. Purohit, P. Rafaj, R. Sharma, M. Springmann, J. Woodcock and N. Watts, 2021. The public health implications of the Paris Agreement: a modelling study, *The Lancet Planetary Health*, 5(2), pp. e74-e83.
- IEA, 2012. Emissions of substances other than CO₂ From power plants with CCS.
- IEA, 2014. Evaluation of reclaimer sludge disposal from post-combustion CO₂ capture.
- IEA, 2020. CCUS in Clean Energy Transitions, Report extract A new era for CCUS. <https://www.iea.org/reports/ccus-in-clean-energy-transitions/a-new-era-for-ccus>.
- IEA, 2020. World Energy Outlook 2020.
- IPCC, 2018. SPECIAL REPORT Global Warming of 1.5 °C.
- Islam, M. S., R. Yusoff and B. S. Ali, 2010. Degradation studies of amines and alkanolamines during CO₂ absorption and stripping system, *Engineering e-Transaction*, 5(2), pp. 97-109.
- Metz, B., O. Davidson, H. d. Coninck, M. Loos and L. Meyer, 2005. IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage.
- NETL CARBON CAPTURE AND STORAGE DATABASE. <https://netl.doe.gov/coal/carbon-storage/worldwide-ccs-database> (Accessed: March 2022).
- Oh, H.-T., J. Kum, J. Park, N. D. Vo, J. H. Kang and C.H. Lee, 2022. Pre-combustion CO₂ capture using amine-based absorption process for blue H₂ production from steam methane reformer, *Energy Conversion and Management*, 262, pp. 115632.
- Petrakopoulou, F., 2012. Production of hydrogen-rich fuels for pre-combustion carbon capture in power plants: A thermodynamic assessment, *International Journal of Hydrogen Energy*, 37, pp. 7554-7564.
- Plaza, M. G., S. Martínez and F. Rubiera, 2020. CO₂ Capture, Use, and Storage in the Cement Industry: State of the Art and Expectations, *Energies*, 13(21). DOI: 10.3390/en13215692.
- Subraveti, S. G., K. N. Pai, A. K. Rajagopalan, N. S. Wilkins, A. Rajendran, A. Jayaraman and A. Gokhan, 2019. Cycle design and optimization of pressure swing adsorption cycles for pre-combustion CO₂ capture, *Applied Energy*, 254, pp. 113624.
- Rao, A. B. and P. C. Phadke, 2017. CO₂ Capture and Storage in Coal Gasification Project, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 13-14.
- ZEP, 2006. The final report from Working Group 1 Power Plant and Carbon Dioxide Capture.

Towards the 2050 Net Zero Carbon Emissions: Discussion on the Application scope of Carbon Capture Technology from an International perspective

Chun-Chuan Kao^{1*} I-Hsiu Lin² Ren-Rong Chang³

ABSTRACT

The target of 2050 Net Zero Emissions proposed by IPPC focuses on greenhouse gases, the CO₂ emission reduction would be the main means of achieving Zero Emissions. Based on the current situation shown by the International Energy Agency, apart from the promotion of existing clean energy, for instance, wind power or solar power and so on; the Net Zero Emissions would not be realized if the implementation of Carbon Capture, Storage, and Utilization technology does not speed up. Besides focusing on coal-fired and gas-fired power facilities, the application of Carbon capture technology could also be used in other industries with a suitable carbon capture technology. At the beginning of this study, the global carbon capture technology development trend and the industrial distribution have been collected. The technology type and application industries have been proposed based on the DNV Recommended Practices (DNV-RP-J201). Furthermore, the possible challenges and difficulties of carbon capture technology have been evaluated. Finally, some important carbon capture cases worldwide have been summarized. This study is expected to be a reference for the future development of Carbon Capture, Storage, and Utilization technology in various industrial fields in Taiwan.

Keywords: Carbon capture technology, Carbon Capture, Storage and Utilization, Net Zero Emissions, Energy Transition, Pathway to Net Zero.

¹Process Engineer, Energy Systems APAC, DNV AS, Taiwan Branch.

²Project Manager, Energy Systems APAC, DNV AS, Taiwan Branch.

³Head of Taiwan Operation, Energy Systems APAC, DNV AS, Taiwan Branch.

*Corresponding Author, Phone: +886-7-536 7759, E-mail: Austin.Kao@dnv.com

Received Date: August 03, 2022

Revised Date: October 20, 2022

Accepted Date: October 25, 2022