

CCUS 技術在加拿大 石油產業之應用

2022 年 9 月

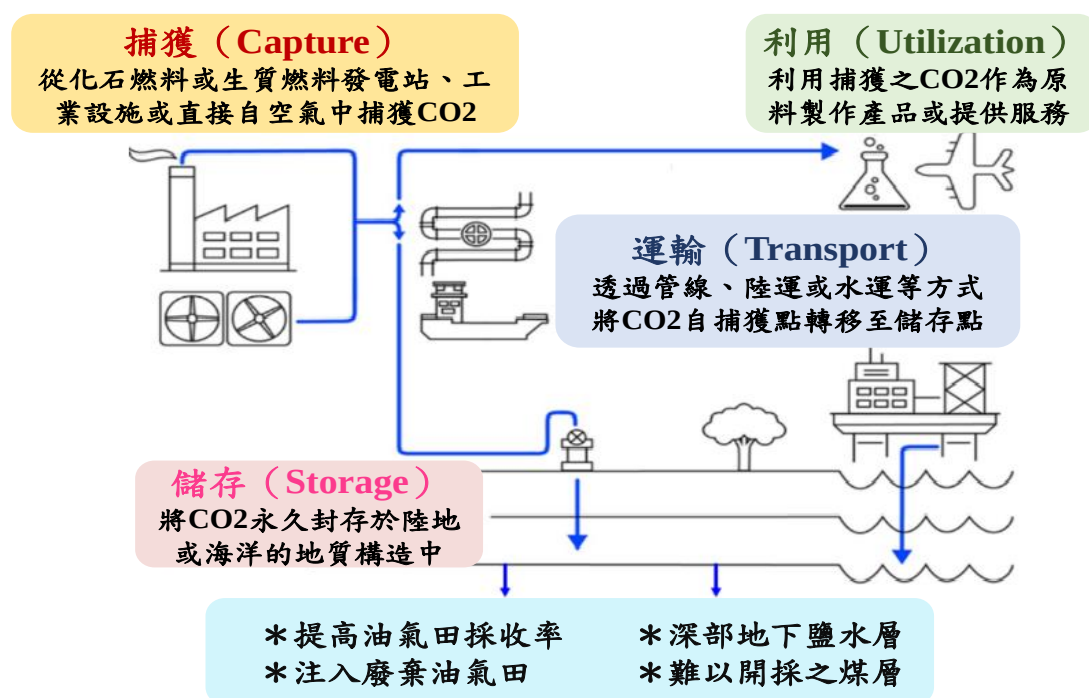
2022Q4 知識物件—評析

財團法人台灣綜合研究院 | TAIWAN RESEARCH INSTITUTE

國際能源總署 (International Energy Agency; IEA) 於 2020 年 10 月發布之「Special Report on Carbon Capture Utilisation and Storage/CCUS in clean energy transition」報告表示，唯有廣泛應用碳捕獲、再利用與封存 (Carbon Capture, Utilization and Storage; CCUS) 技術，才能達到深度減排目標以緩解氣候變化的不利影響。根據多項研究和試驗專案證明，CCUS 技術在幫助重工業和化石燃料產業減少二氧化碳 (CO₂) 排放方面潛力龐大，再加上目前全球既存的 21 個 CCUS 應用設施中，加拿大更囊括其中 7 個，顯見該國在全球 CCUS 技術開發之領導地位，因此本篇文章特別整理加拿大的應用案例，以增進對 CCUS 技術如何應用於石油業的了解。

一、CCUS 技術概述

CCUS 技術的發展是為了解決工業產品生產或化石燃料轉化為能源過程中所產生的 CO₂ 排放問題，透過多種技術捕獲 CO₂，再將其以高壓方式轉化為液態並透過管線或陸、海運方式運輸，繼而進行再利用或封存等處置 (如圖 1)。



資料來源：IEA (2020), Energy Technology Perspectives, Special Report on Carbon Capture Utilisation and Storage/CCUS in Clean Energy Transition.

圖 1 CCUS 運作流程

根據國際能源總署 (IEA) 2022 年發布的「2021 年全球能源回顧 (Global Energy Review 2021)」報告表示，2021 年全球碳排放量已來到 363 億噸，且之後每年碳排放量將續創新高，若欲有效降低碳排放量，各國須更積極增加投資環保設施與加速發展 CCUS 等減碳技術。舉例來說，加裝 CCUS 設備可使燃煤發電及工業活動有效減少 CO₂ 排放，若在化石燃料製氫過程中融入 CCUS 技術，亦有助於減少其生產過程中的碳排放量，以下簡要說明 CCUS 的核心技術。

(一)碳捕獲 (Carbon Capture)

據二氧化碳合作研究中心 (CO₂ Cooperative Research Centres; CO₂CRC) 之定義，碳捕獲技術係透過各種方法，將 CO₂ 自工業活動或生產能源時所排放的廢氣中分離出來，再透過濃縮或壓縮等特殊處理方式進行收集，避免 CO₂ 直接逸散至大氣中的技術。碳捕獲技術能有效去除 90% 以上因能源使用而產生之 CO₂，其中又可分為燃燒前捕獲、燃燒後捕獲及富氧燃燒等技術

1. 燃燒前捕獲

燃燒前捕獲技術係指在化石燃料燃燒前，先將燃料轉換成含有化學能的氣體，再將其中的 CO₂ 與其餘氣體分離，以達到在燃料利用前分離 CO₂ 之效果，其典型代表為整體煤氣化聯合循環發電 (Integrated Gasification Combined Cycle; IGCC)¹ 技術，燃燒前捕獲技術的主要優勢為在同等 CO₂ 捕獲比例 (90%) 下，其能量損失低於燃燒後捕獲且用水量較少，又因合成氣處於相對高壓狀態，故可用更有效的分離方法 (如物理吸收等) 來捕捉 CO₂ 並降低能量耗損。整體而言，燃燒前捕獲技術的運作因能量轉換效率高，產物乾淨且低汙染，係目前碳捕獲技術主流發展趨勢。

2. 燃燒後捕獲

燃燒後捕獲技術係指化石燃料經燃燒後，將所產生煙氣中的 CO₂ 加以分離及壓縮，大致可分為燃燒發電、捕獲及壓縮 3 個階段。以燃煤發電之碳捕獲過程為例，透過燃燒化石燃料將水加熱氣化成水蒸氣後，再將蒸汽導入渦輪機推動葉

¹ IGCC 透過將化石燃料進行氣化並與空氣所分離的氧氣或水蒸氣反應，產生以一氧化碳和氫氣為主的合成氣 (包含氫氣、一氧化碳、CO₂、水蒸氣等)，再經由水煤氣轉化反應，使一氧化碳轉化為 CO₂，再利用物理或化學方法 (如吸收法、吸附法、薄膜分離法)，將 CO₂ 與氫氣分離，其中氫氣送入循環系統發電或作為工業原料使用，CO₂ 則封存。

片運轉，進而帶動發電機產生電力，而燃料燃燒所產生的煙氣²則經過脫硫、脫硝³處理後，再進行碳捕獲，其捕獲方式大致又可分為吸收法、吸附法及薄膜分離法等，但現行製程仍以吸收法為主。吸收法可分為物理吸收法和化學吸收法，物理吸收法使用有機或無機液體做為吸收劑，利用溶解度隨溫度與壓力變化的原理吸收 CO₂；化學吸收法則是使用化學吸收劑包括鹼性、胺類、醇胺類、離子液體等水溶液與 CO₂ 產生化學反應進行捕獲，再加熱進行逆反應以再生吸收劑。

吸附法可區分為物理吸附法及化學吸附法，物理吸附法是利用 CO₂ 與吸附劑間的吸引力進行碳捕獲，通常適合在高壓低溫下操作；化學吸附法則是在固體基材上引入可與 CO₂ 反應的鹼性物質，例如在中孔徑的固體基材內架接胺類，使其可吸附 CO₂；薄膜分離法係指讓煙氣通過薄膜，選擇性地將 CO₂ 與其他氣體分離。此法需在高壓下（17 ~ 35atm）進行，主要優點是操作簡單，但缺點是薄膜耐久性差，且分離效率低，惟目前因科技進步已使回收效率大幅改善，未來有機會取代吸收法成為燃燒後捕獲之主流應用方式。

3.富氧燃燒

富氧燃燒係指將空氣送入分離系統去除絕大部分氮氣，並獲得富氧⁴，再將其與化石燃料送入鍋爐內燃燒，由於化石燃料係在高氧低氮環境下燃燒，故產生的煙氣雜質少且以 CO₂ 與水為主，將可大幅減少氮氧化物（NO_x）等污染氣體並提高燃燒效率，也就是減少燃燒時的熱量散失與大幅減少煙氣量。富氧燃燒具有能源利用率較高、產物乾淨及煙氣處理量較少等優點，但受限於傳統製氧方式之能源成本較高，且需針對富氧燃燒製作高耐熱儀器，目前尚未大規模商業運轉。

(二)碳利用 (Carbon Utilization)

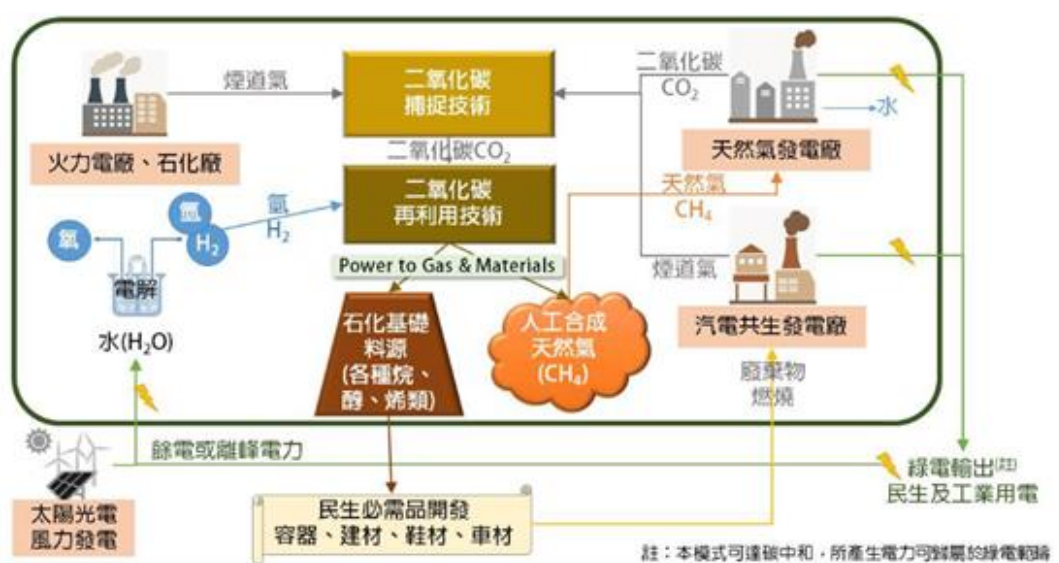
碳利用技術可分為直接利用及轉化利用，直接利用如培育微藻以進行固碳、淨化水質以及從中萃取生質能源（如生質柴油）之前驅物等；轉化利用則是將捕獲的 CO₂ 與氫或含氫物利用化學反應轉化成化學品及燃料，例如甲烷、甲醇、尿素、水楊酸、一氧化碳及水泥替代物等。目前各先進國家皆致力開發碳利用技術，如荷蘭廢棄物再生能源公司（AVR Afvalverwerking）在其 Duiven 工廠建造大規模的 CO₂ 捕獲系統，並將捕獲的 CO₂ 運至國內的溫室園藝區；日本東芝公

² 主要為氮氣及 CO₂，並含有部分氮氧化物(NO_x)、硫氧化物(SO_x)。

³ 脫硝係指將從燃燒過程產生的煙氣中去除氮氧化物(NO_x)的處理方法。

⁴ 指含氧量大於 21%的氣體，極限為純氧氣，普遍為含氧量 95%以上的氣體。

司 2016 年完成佐賀市垃圾焚燒電廠的碳捕獲設施，其捕獲的 CO_2 主要用作藻類培養。我國在第二期能源國家型科技計畫中所發展的「Power to Gas & Materials」（圖 2）技術同樣也是以轉化方式再利用 CO_2 的應用，經濟部目前另推動由煙氣中捕獲 CO_2 進行再利用技術的開發與設備建置，並在台中火力發電廠、長春石化大發廠、台塑仁武廠等大型排碳場域進行驗證，預期未來將捕獲的 CO_2 與氫氣反應轉變成為穩定、易儲存之能源物料（如甲烷、甲醇），藉由建構碳循環體系可大幅降低化石天然氣進口需求與相對應之碳排放量。



資料來源：財團法人國家實驗研究院科技政策研究與資訊中心。

圖 2 二氧化碳轉化綠電及石化基礎料源架構

(三)碳封存 (Carbon Storage)

碳封存的主要目的係將 CO_2 長期儲存在與大氣隔離的安全環境下，主要技術包括礦化封存、生物封存、海洋封存及地質封存等，目前在實際應用上仍以地質封存為主流，以下分別說明。

1.礦化封存

礦化封存係利用金屬氧化物與 CO_2 產生化學反應，形成固態碳酸鹽及其他副產品，其可分為乾式反應⁵及濕式反應⁶，此類封存方法雖然在封存安全性上有

⁵ 乾式礦化封存係指在特定溫度與壓力下，氣態的 CO_2 直接與所需的固態原料進行化學反應生成固態碳酸鹽類。

⁶ 濕式礦化封存係指將原料及 CO_2 溶解於溶液中，再由鹼土金屬離子與碳酸離子反應，形成碳酸鹽沉澱物後，再透過分離程序分離出固態碳酸鹽。

極大的優勢，但在原料開採、礦化反應速率、操作成本、所需能量成本、後續產物的運輸、儲存、或是否能再次利用等問題上，仍存在許多技術障礙，故目前尚未能普及化。

2. 生物封存

生物封存係利用植物或藻類等生物配合土壤、水體及光合作用等進行自然吸收 CO₂ 之封存方式，目前主要研究趨勢為培養微細藻類固定 CO₂ 與再資源化，以及加速海洋植物與浮游生物之繁衍以利吸收 CO₂，如綠化造林及藻類養殖皆可視為生物封存，但此類封存方式目前仍因操作技術及占用土地面積廣大等問題而有待改善。

3. 海洋封存

海洋封存係將 CO₂ 以氣態、液態、固態或是水合物型態經由管線或船舶運輸直接注入至少距離海平面 1,500 公尺以下的海洋斜溫層，因斜溫層具有阻隔上下水體垂直接混合之特性，可降低所封存之 CO₂ 再釋放回大氣層之速率。海洋封存概念雖歷經 30 多年理論發展、實驗室試驗、模式模擬及小規模現場測試等研究，但迄今尚未有大規模海洋封存實例，且其對於海洋生態之影響未知而難以被國際公約(如倫敦公約)接受，故目前海洋封存仍非碳封存技術之最佳選擇。

4. 地質封存

地質封存主要可分為油氣田構造封存、煤層封存、以及深部鹽水層封存 3 種，這 3 種封存方式皆為將超臨界狀態⁷的 CO₂ 注入到深度超過 800 公尺的地層中⁸。由於超臨界 CO₂ 具備低黏滯性與高滲透性，故可利用較低之壓力將 CO₂ 灌入地層孔隙中，且超臨界 CO₂ 密度較氣態高故亦能大幅提升 CO₂ 封存量。地質封存在技術及成本面皆較其他封存方式具備可行性，故目前國際慣用之碳封存方式以地質封存為主。

石油業從 1970 年代便開始利用強化採油技術 (Enhanced Oil Recovery; EOR)⁹以提高油氣產量，超臨界 CO₂ 即為 EOR 中用來增加油氣產量的驅油劑，

⁷ 通常純物質具備氣、固、液三相，而所謂的超臨界狀態係指當流體溫度及壓力達到某一特定點時，氣、液兩相密度趨於相同而合併為一均勻相的狀態。

⁸ 由於深度超過 800 公尺的地層壓力接近 CO₂ 臨界壓力，因此可作為儲存 CO₂ 的合適地點。

⁹ EOR 係指為提高老舊油田產油量而向油藏注入水、化學品或氣體以改善油藏流體的物理或化學特性，進而提高油田驅油效率的採油方法，亦稱為提高石油採收率技術

由於成熟油田之地質構造足夠封閉，因此可成為絕佳的碳封存場所；煤層封存則係利用煤層對 CO₂ 有良好的吸附能力，加上煤層常與砂岩互層(Interbedding)，亦相當適合作為儲存 CO₂ 的地層；深部鹽水層封存概念是指當超臨界 CO₂ 注入地層的孔隙中時，原本孔隙中的鹽水受到擠壓而向外移動，擠壓出來的空間便可容納 CO₂。

二、加拿大石油業應用 CCUS 概況

加拿大為全球主要產油國之一，其最早運用 CCUS 技術之目的係注入 CO₂ 使老舊油田恢復產量，然而隨著全球環保意識漸增，國際上要求石油業在營利之餘更須負擔環境責任。由於油氣出口為加拿大主要財政命脈，如何在不影響收入情況下又兼顧二氧化碳減排成為加拿大政府施政重要課題，在政府引導下，目前加拿大境內有多項 CCUS 示範計畫，以下針對石油業相關計畫說明。

(一) Weyburn 油田 EOR 計畫

Weyburn 油田位於美國 North Dakota 州和加拿大 Saskatchewan 省邊界，由加拿大 EnCana 石油公司負責經營。Weyburn 油田探勘活動始於 1954 年，估計蘊藏量約 14 億桶，1964 年展開量產之初，年均產量可達約 4.7 萬桶/日，但到了 1988 年產量已下滑至不足 1 萬桶/日。所幸因 Weyburn 油田之地質條件、油藏特性及既有地面設備與水沖操作 (Water Flooding) 使其具備注氣驅油之理想條件，當 CO₂ 在高壓狀態下與油接觸可令原油相對變輕且膨脹，使其較易流至生產井，因此 IEA、加拿大 Saskatchewan 省資源局、EnCana 石油公司及美國能源業者提出了將美國 North Dakota 州 Beulah 煤炭氣化廠¹⁰所排放的 CO₂，透過長約 330 公里的管線輸送至 Weyburn 油田，注入深度達 1,400 公尺、厚度達 300 公尺的碳酸鹽儲油層中，利用 EOR 技術來改善 Weyburn 油田老化問題的合作計畫。該計畫自 2000 年 9 月正式展開，估計每年約可注入 1,500 萬噸 CO₂，注氣後產量可提升至每年約 3 萬桶/日，預計至少可增加 1.55 億桶原油產量，並封存 3,000 萬噸 CO₂。

¹⁰ 該電廠主要利用煤氣化聯合循環發電技術 (IGCC) 進行發電，CO₂ 為其副產品，其原先將 CO₂ 直接排放到大氣中，與 Weyburn 油田合作利用 CO₂ 後，便將 CO₂ 由美國 Beulah 輸送到 Weyburn 油田，再於高壓狀態下打入地層中。原先合約簽訂每日輸送量為 9,500 萬立方公尺，因 CO₂ 提高石油採收率效果良好，2005 年後將合約量提高至每日 1 億 2,500 萬立方公尺。

(二) OPTI 改質廠

由於加拿大以生產重油、油沙及瀝青等重質原油為主，其產品特性為高黏度與高密度，且 API 值相對低，故須透過改質 (Upgrader) 技術將重質原油改質成 API 較高之輕質原油 (合成原油) 或基礎油 (Base oil)¹¹方可進行管線運輸或提升原油品質。加拿大油砂生產商 OPTI (OPTI Canada Inc.) 於 Alberta 省 Athabasca 區之 OPTI 改質廠原本係利用傳統焦化 (Coking) 與加氫裂解 (Hydrocracking) 製程進行改質，而為響應加拿大政府推行 CCUS 政策，OPTI 改質廠擴增 OrCrude 工場、加氫裂解工場及氣化工場。OrCrude 工場以傳統的蒸餾、萃取、熱裂技術為基礎，改良原先的改質製程並結合碳捕獲技術，升級後製程與焦化技術相近，但卻具備將 CO₂ 進行分離之優點；瀝青投入 OrCrude 工場後可產製基礎油及瀝青烯 (Asphaltene)，基礎油轉往加氫裂解工場製成輕油，瀝青烯則送往氣化工場產出氫氣、電、煙氣，煙氣則透過碳捕獲技術將 CO₂ 捕獲後進行封存。OPTI 改質廠於 2012 年擴改建完成並投用，其每日基礎油產量約為 5.85 萬桶。

(三) Shell Quest 計畫

加拿大殼牌石油公司 (Shell Canada)、加拿大雪佛龍石油公司 (Chevron Canada Limited) 以及馬拉松石油公司 (Marathon Oil Sands) 共同於 2012 年 9 月提出 Shell Quest 計畫，此為全球第 1 個商業化的碳捕獲及碳封存計畫，主要目的係減少油砂開採所產生的 CO₂，該計畫預計花費 15 年將 Alberta 省 Edmonton 地區的 Shell Scotford 改質廠之 3 座氫氣工場 (蒸氣重組) 所產出的 CO₂ 以胺液吸收法捕獲，並封存於該改質廠鄰近深達 2,300 公尺的基線寒武紀沙岩地層 (Basal Cambrian Sands) 中，再透過精密的監測系統管控其 CO₂ 逸散狀況，確保 CO₂ 確實封存於地下岩層中。該計畫自 2015 年正式營運，每年平均約可捕獲至少 100 萬噸溫室氣體。

(四) ACTL CO₂ 運輸管線

Alberta Carbon Trunk Line (ACTL) 是由 Enhance 能源公司與 Wolf Midstream 公司合作建置的一條長約 240 公里的 CO₂ 運輸管線，係目前全球最

¹¹ 基礎油 (base stock, base oil) 指組成潤滑油、潤滑脂成品的液態成份。基礎油可以是煉油廠的分餾產品 (沸點高於燃料用重油、低於瀝青)，也可以透過合成方式製造，前者一般稱為礦物油，後者一般統稱合成油。

大規模之 CO₂ 輸送管線，該管線自 2000 年開始規劃及建設，並於 2020 年 6 月正式完工啟用，總投資金額約 12 億美元，每年可輸送 1,460 萬噸 CO₂，該管線係從加拿大 Alberta 省西部工業中心將經捕獲及處理過後之 CO₂ 運輸至 Alberta 省中南部的 Leduc 油田及 Clive Nisku 水庫進行 CO₂ 驅油或地質封存，預計封存量可達 2 至 30 億噸，並額外開採超過 10 億桶原油。

目前使用 ACTL 運輸 CO₂ 的業者為 Sturgeon 煉油廠及 Redwater 化肥廠，Sturgeon 煉油廠將瀝青烯投入氣化工場轉製為合成氣，從氣體中捕獲 CO₂ 並將其液化處理再進行輸送。據 Sturgeon 煉油廠 2021 年發布之「可持續能源生產報告 (The Sturgeon Refinery' s Approach to Sustainable Energy Production 2021)」指出，Sturgeon 煉油廠自 2017 年設施投產以來，每日約可處理 7.9 萬桶油砂，每年捕獲 130 萬噸 CO₂，該廠計畫未來尚有二階段之擴建計畫，預計完工後將可使每年 CO₂ 捕獲量更進一步提升至 360 萬噸以上；而 Redwater 化肥廠則是將從日常排放之廢氣分離出 CO₂ 並將其冷卻、壓縮、脫水及液化處理後進行輸送，每日運輸量約 1,400 噸。依據 Wolf Midstream 公司 2022 年 3 月 31 日發布新聞稿表示，Wolf Midstream、Whitecap Resources、First Nation Capital Investment Partnership 及 Heart Lake First Nation 能源公司將與加拿大政府合作，計畫在 Saskatchewan 省開發碳封存中心並與 ACTL 連結，該中心將在 2024 年完工並投用，預計每年碳封存量最高可達 300 萬噸。

三、結語

近年各國積極採行減碳作為，CCUS 技術日漸受到重視，據 Wood Mackenzie 能源顧問公司 2021 年之「Canadian Carbon Capture Credentials」表示，由於加拿大 Alberta 省擁有豐厚石油和天然氣資源、Saskatchewan 省則使用煤電，得以吸引大量碳捕獲技術投資，使加拿大成為全球 CCUS 領域的領導者；儘管該國 CO₂ 排放量僅占全球之 1.9%，但既存 CCUS 設施的 CO₂ 封存能力卻占全球總封存能力的 14%，在技術發展及投資方面均處於全球領先地位。

目前加拿大計有 4 個大型 CCUS 計畫與石油業息息相關，分別為 Weyburn 油田 EOR 計畫、Shell Quest 計畫、OPTI 改質廠及 ACTL 管線，其中 Weyburn 油田 EOR 計畫、Shell Quest 計畫係採碳利用及封存技術，將經捕獲並液化處理過的 CO₂ 注入老舊油田使其原油產量得以恢復；OPTI 改質廠則改良舊有製程並結合碳捕獲技術，使其可在煉油過程中捕獲 CO₂ 以進行封存或再利用，達成

煉油減排效果；ACTL 則是全世界最大的 CO₂ 專用運輸管線，每年可輸送 1,460 萬噸 CO₂，足以讓加拿大建造多個 CCS 設施，故 Wood Mackenzie 2021 年報告亦指出，在具備強大 CO₂ 運輸能力下，目前加拿大還有 13 個 CCS 計畫正在研擬規劃中，若未來所有計畫都得以推行，推估加拿大 CO₂ 封存總容量將增加 500% 以上，每年約可封存 1 億 1,500 萬噸 CO₂，預期加拿大於 CCUS 領域仍將維持其領先地位，可作為其他國家效仿對象。

參考資料

台灣電力公司綜合研究所，2021 年，「二氧化碳捕集再利用與封存國際發展現況」。

中國大陸生態環境部環境規劃院，2021 年，「中國二氧化碳利用與封存(CCUS) 年度報告 (2021)」

王淑麗、洪正宗、吳柏裕，2010 年，「二氧化碳捕捉技術於煉油廠及油砂產業的應用」，石油季刊，第 46 卷，第 1 期，頁 45-54。

邱凡坪，2020 年，「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專題報告。

IEA, (2021), Assessing the effects of economic recoveries on global energy demand and CO₂ emissions in 2021.

IEA, (2020), Energy Technology Perspectives, Special Report on Carbon Capture Utilisation and Storage/CCUS in clean energy transition.

IEA,(2020),Special Report on Carbon Capture Utilisation and Storage/CCUS in clean energy transition.

IPCC,(2018), Intergovernmental Panel for Climate Change: Special report on Emission Platform: Global Warming of 1.5°C.

IPCC,(2014), AR5 Synthesis Report: Climate Change 2014.

Wood Mackenzie, (2021), Canadian carbon capture credentials.

Nnaziri Ihejirika, (2021), The Role of CCUS in Accelerating Canada's Transition to Net-Zero.

Susan Cole,Sarah Itani, (2013), The Alberta Carbon Trunk Line and Benefit of CO₂.