



台灣中油 ESG 工程實踐— 地熱電廠及碳封存工程案例

台灣中油公司總工程師室總工程師 / 何至欽
台灣中油公司總工程師室工程規劃組組長 / 楊智欽
台灣中油公司總工程師室工程規劃組工程師 / 唐瑋

關鍵字：淨零排放、地熱發電、碳封存、減碳工法、能源轉型、工程 ESG

摘要

因應全球氣候變遷與 2050 淨零排放目標，台灣中油公司積極投入綠色能源開發與負碳技術應用，致力於建構多元能源轉型。已投入兩項具體工程成果：其一為「宜蘭土場地熱發電設置統包工程」，為全台首座具規模之中溫模組化雙循環（ORC）地熱電廠；其二為「鐵砧山碳封存地面設施統包工程」，為台灣首座具備注入、監測與封存全系統的示範基地。本文就兩案理論基礎、工程設計、與施工面策略加以說明，並進一步探討減碳工法、與材料替代等措施之實施成效。初步評估地熱電廠每年可穩定提供超過 25.7 百萬度發電量；鐵砧山碳封存量預計可於三年間灌注純度 99% 以上之液態二氧化碳達 30 萬

噸。兩項 ESG 工程兼具能源自主、減碳之穩定性與制度示範價值，為台灣社會邁向淨零排放的重要實踐案例。

一、前言

淨零碳排時代的企業責任

台灣中油自 1946 年成立，至今已逾 79 年，除肩負國營事業穩定油氣價格等責任外，亦戮力充分供應國內所需油氣生產，並致力環境品質的提升，善盡企業社會責任。近年來順應全球經濟環境之變遷及因應 2050 年淨零碳排國家目標，並配合政府能源政策，本公司現已規劃優油、減碳、潔能三大主軸進行轉型 [1]，依循三大主軸進行研發



規劃，持續掌握低碳趨勢，期盼能成為邁入石化高值化及綠色能源產業的開發樞紐（如圖 1）。現階段本公司 ESG 工程以「地熱發電」及「碳封存」為主要項目。地熱發電以每年穩定發電超過 25.7 百萬度電為目標；而「負碳技術」則是本公司率先在石化業界實踐，持續進行多項碳捕捉與碳封存實績，包含永和山碳封存試驗與鐵砧山 CCS 跨部會工程計畫。本公司透過 ESG 工程展現減碳決心，承擔淨零碳排時代的企業責任。

二、地熱發電工程

地球內部蘊藏大量熱能，尤其在特定地質構造區域（如火山帶、斷層帶）更容易累積，這些能量儲存在「地熱儲集層」中，地熱發電的原理為利用地底的熱能來發電，這些地熱能持續供應，不需燃料，每年可減少數萬公噸二氧化碳碳排放，因此具有高穩定性、減少碳排之優點。地熱發電透過鑽井開發地底熱源，抽取高溫地熱流體（熱水或蒸氣），經熱交換驅動



圖 1 台灣中油低碳綠能轉型策略



渦輪機產生電力，後續透過冷卻再處理回注至地下，此一循環可持續運作，是目前全球積極推動的重要再生能源之一。

中油公司擁有全臺地熱探勘最核心技術之專業團隊，自 1964 年開始探勘大屯山地熱能，1976 年進入宜蘭地區探勘地熱能，1981 ~ 1995 年更派出鑽井隊協助日本九州地熱探井鑽探。近年隨著政府加速推動「再生能源發展條例」與「2050 淨零排放政策」，本公司積極回應，重啟地熱業務，擴大投入工程技術與試驗場址，優選地熱資源豐富之宜蘭地熱區作為首要探勘區域。

宜蘭縣土場地熱發電設置統包工程

(一) 工程規劃設計及特點

1. 場址條件

本公司近年自 2019 年持續完成宜蘭仁澤及土場地熱探井鑽探工程 [2]，一般地溫梯度平均每 100 公尺深度上升約 2.5 至 3.0°C，但依據土場 8、14 和 15 號井及鄰近早期工業技

術研究院鑽探之淺井資料，土場地熱區井深 160 ~ 180 公尺之地熱儲量即可達到一般深度約 200 ~ 600 之地熱儲集岩，顯示淺部地熱梯度高達每 100 公尺 25 ~ 30°C。惟土場 6 號及 9 號井淺部並未鑽遇此地熱儲集岩，故推測淺部地熱儲集岩範圍面積約 6 ~ 8 平方公里。整合 11 口探井資料、地表地質及地球物理測勘等資料分析，土場地熱區地熱概念模型為具有一深切的斷層，使地下深處地熱水可上湧至淺部，並藉由淺部透水斷層系統使熱水向西北山側延伸而形成淺層層狀地熱儲集岩，成為良好地熱探勘標的。除高溫外，地熱生產能力（水量）亦會直接影響地熱發電廠之規模。其中土場 15 號於 2020 開鑽，其井深 1,500 公尺、井口溫度約 141°C，經長期噴流試驗，顯示該井可穩定每小時自噴 74 噸水量，具長期支持地熱發電廠運轉之能力。依本公司探採研究所採用地球化學氫氧同位素分析，發現土場地熱區所生產之地熱水係由高山天水藉由裂隙，下滲至深處經深循環加熱後上湧至淺部而成。綜合上述因素，土場地熱區具高溫、水量大且可長期供應熱水能力，因而選址做為本公司「宜蘭縣土場地熱發電設置統包工程」主要場域。

表 1 仁澤 – 土場地區中油公司井深資料

井名	開鑽日期	井深 (m)	最高測溫	試汽	現況
土場 8 號井	1976.02.19	1,503	169.2°C	間歇自噴	停用
土場 9 號井	1978.05.28	2,000	143.9°C	間歇自噴	廢井
土場 14 號井	2020.02.28	2,000	150.7°C	間歇自噴	土場地熱發電機組使用
土場 15 號井	2020.07.27	1,485	166°C	連續生產	
土場 16 號井	2022.01.14	1,014	150°C	連續生產	
土場 17 號井	2022.06.06	823	140.4°C	連續生產	
土場 18 號井	2022.08.17	774	140°C	連續生產	土場地熱發電機組使用
土場 19 號井	2023.03.31	2,300	169°C	間歇自噴	
仁澤 1 號井	1983.04.17	2,200	214.7°C	連續生產	休憩使用
仁澤 2 號井	1984.08.02	2,277	219.5°C	連續生產	溫泉使用
仁澤 3 號井	2018.11.02	1,475	180.4°C	連續生產	仁澤地熱發電機組使用
仁澤 4 號井	2019.03.21	1,500	199.5°C	連續生產	



2. 有機朗肯循環式 (Organic Rankine Cycle, ORC)

地熱發電技術主要依據地層條件與流體溫度不同，可分為三種形式 [3]：

乾蒸氣式 (Dry Steam Plant)：直接利用地底天然乾蒸氣驅動渦輪機，效率高但條件稀有。

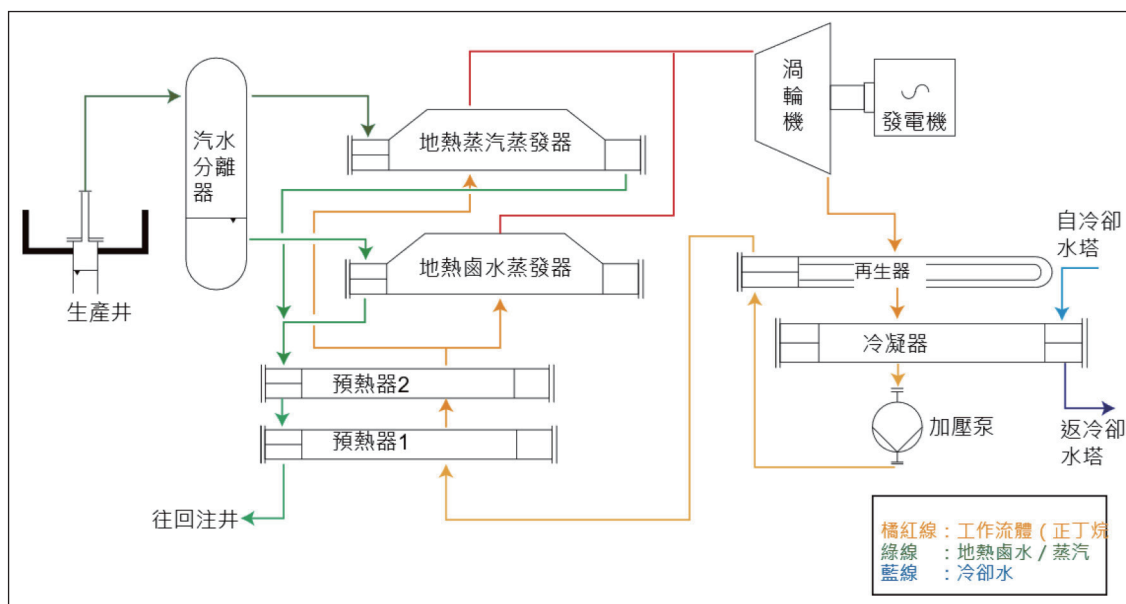
閃蒸式 (Flash Steam Plant)：適用於熱水溫度在 180°C 以上的場域。高壓熱水因減壓而氣化產生蒸汽，進而推動渦輪。可分為單閃與雙閃系統，後者能提高 15% ~ 25% 的能量轉換效率。

雙循環系統 (Binary Cycle System)：當地熱流體溫度介於 $100 \sim 200^{\circ}\text{C}$ (甚至更低) 時，使用低沸點的有機工質 (如異丁烷、戊烷) 與地熱流體進行熱交換，再以蒸發的工作氣體推動渦輪。這種系統封閉且無污染，特別

適合台灣多為中低溫熱源的地熱條件。而本案採用之有機朗肯循環式 (Organic Rankine Cycle, ORC) 即是雙循環系統的一種 [4]，ORC 系統主要由四大元件組成：泵浦、蒸發器、渦輪、冷凝器。最大的特色在於工作流體的選擇是相當多樣化的，可根據不同工作場所選擇其相應適合的工作流體。而本案採用低沸點的正丁烷作為工作流體，能更有效地利用中低溫熱源 (一般 $< 200^{\circ}\text{C}$ ，可適用於地熱、工業餘熱與太陽能集熱等)。本系統具設備模組化、建置靈活之優點，已成為本公司目前地熱發電應用之主力設備。

3. 製程概要

本案發電機組利用有機工作流體於熱交換器中吸收地熱流體的熱能，使工作流體汽化後推動渦輪機，將熱能轉換為機械能，再透過磁電交互效應轉換為電能輸出 (如圖 2)。





本案工程範圍區分為生產區（含第一產區及第二產區）、發電機組區及冷卻水塔（如圖3）。

第一生產區由土場14、15、16號井提供

地熱水，由井口進入汽水分離器分成鹵水與蒸氣，鹵水藉由泵浦推送至鹵水蒸發器，蒸氣直接送往蒸氣蒸發器，讓工作流體熱交換發電。發電後的地熱尾水送回尾水池沉澱後再回注（如圖4）。

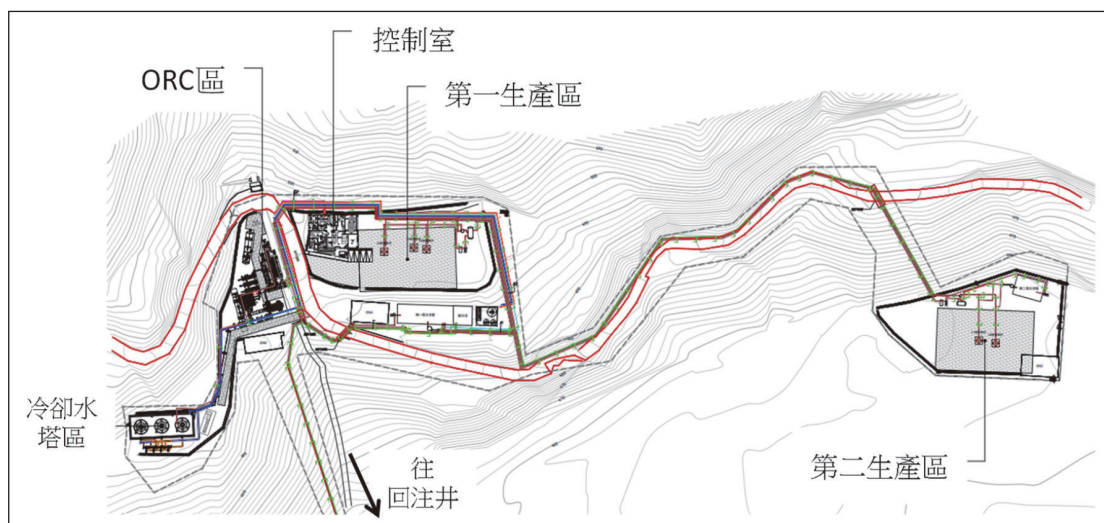


圖3 工程平面配置

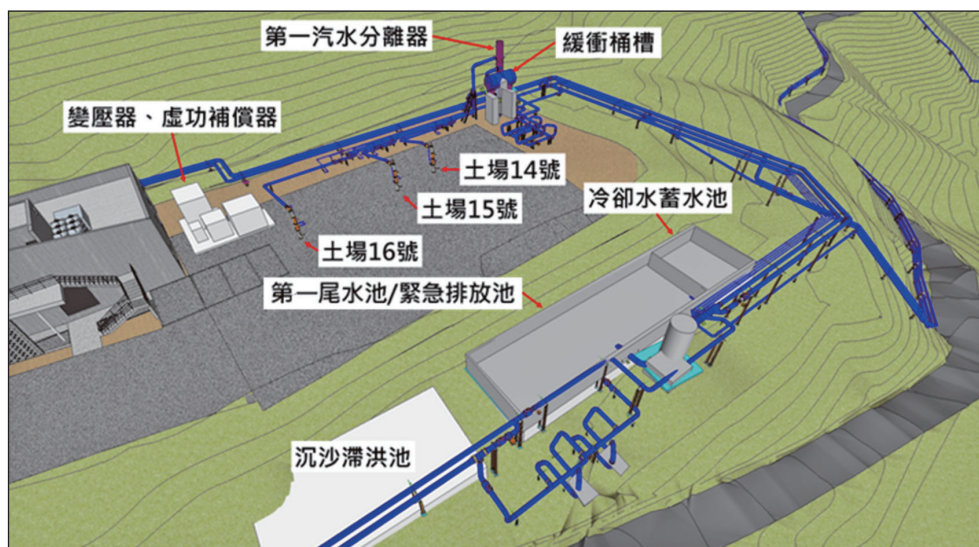


圖4 第一生產區



第二生產區，由土場 17、18 號井提供地熱流體，汽水分離後分送至 ORC 區，方式與一井區相同。北側設置第二尾水池做為緊急排放池，並且設置泵浦將尾水送往第一尾水池再回注。並改裝現有的鑽井用水池作為尾水池及冷卻水蓄水池（如圖 5）。

發電機組利用地熱發電之詳細過程如下（發電流程詳圖 2）：地熱井自生產區抽取的地熱流體為雙相（氣液混合）流體，經由井口閥控制後導入汽水分離器，將其分離為氣態與液態兩部分。氣態熱源與液態熱源個別進入 ORC 系統的蒸氣蒸發器和鹵水蒸發器，與低沸點的工作流體進行熱交換，使工作流體汽化，推動渦輪機做功以產生電力。熱交換後的氣態地熱流體經冷卻後凝結為液態，並與熱交換後的液態熱源送至兩座預熱器，這些含餘熱的地熱水進一步提供工作流體預

熱。當地熱流體熱能無法再有效利用時，將流入尾水池沉澱並自然結垢，經過簡單處理後透過回注井重新注入地層，以維持地熱資源可持續利用；而被汽化的工作流體在驅動渦輪機做功後，進入再生器與冷凝後之低溫工作流體進行熱交換，提高系統效率。接著進入冷凝器，經冷卻水降溫使其凝結為液態，冷凝後的工作流體透過泵浦加壓，重新進入再生器、預熱器與蒸發器，繼續下一循環（如圖 6）。

（二）場域鑽井及工程施工困難與改善方案

本案因場域地質結構複雜遭遇鑽探問題[5]，TS-19 井鑽過程發現岩層硬度高、孔隙不穩，進而造成多次卡鑽與套管困難。因應此情形本公司適時調整鑽探策略，一方面即時監測泵壓變化，當泵壓異常起伏立即停止

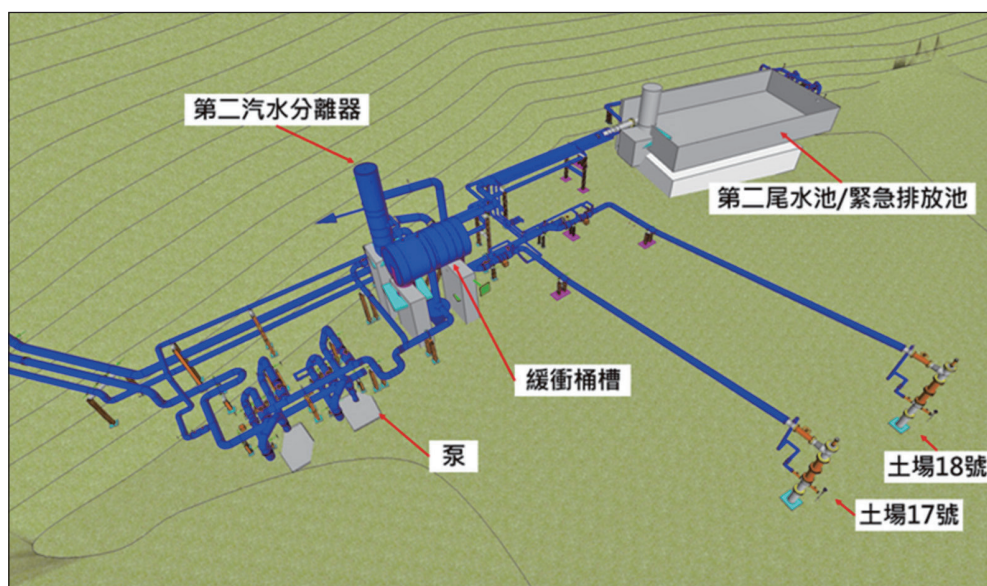


圖 5 第二生產區

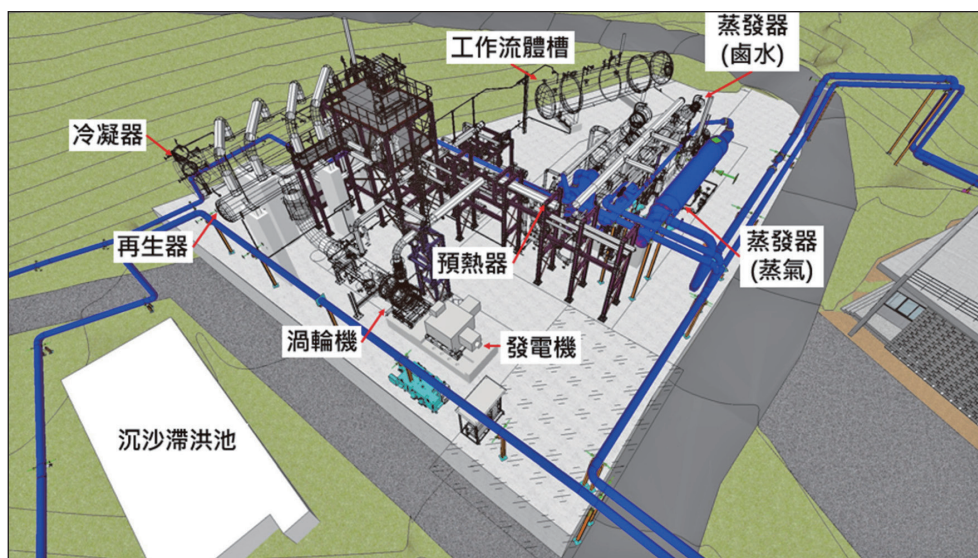


圖 6 發電機組區

作業，檢查泥泵及地面管線是否有異，倘查無異常則逐支檢查起鑽機之具管串是否發生蝕孔，如有蝕孔則立即更換，避免管串蝕孔於鑽進中因泥漿流動及鑽屑沖刷而導致管串斷損，減少費時打撈斷管情況；另一方面優化泥漿設計與鑽井參數，彈性調整套管程序與使用井下震擊工具，以提高鑽井效率。並使用地質電測資料研判地層走向及井孔尺寸變化，調整適當之管串並配合井孔穩定器及匙孔修孔器，於鑽進時同步改善井孔情況，並每 48 小時執行短程抽刷，以確保井孔狀況良好。透過以上改進策略，土場 19 號井已於 2024 年 3 月成功鑽達目標深度 2,300 公尺。

山區交通與工區受限：工地位處山區，腹地狹小，道路蜿蜒陡峭，重型設備進出不易。改善對策包括預鑄構件場外製作後分批運輸，並規劃現場分段吊掛與分層安裝作業，以減少空間需求與交錯作業干擾。

颱風與河道沖毀導致工期延宕：2023 至 2024 年間颱風（如瑪娃、杜蘇芮、小犬、凱米颱風）頻繁，致使聯外便道多次沖毀，材料與人員進場中斷。對策包括加派人力、假日與夜間施工並行、提前備妥便道修復所需機具及材料、增加旱季集中施工等，確保進度符合工程里程碑。

(三) 預計完成時間

土場地熱設置工程先後遭受颱風中斷、河道毀損、設備延遲運送與腹地不足等，預計最快可於 2025 年第三季完成整體試運轉，啟動全台首座中溫模組化雙循環地熱電廠的商轉營運，未來年發電量預估可達 2,570 萬度（以裝置量 4,000 瓩計算），CO₂ 年減碳量約 1 萬 3,000 公噸（以取代燃氣發電為計算依據）。預定時程及完成項目如表 2。



表 2 2025 年重要里程碑

預定時程	備註
2025 年 2 月 ~4 月	發電設備安裝、管線系統整合、控制系統設定
2025 年 5 月	單機測試與回注系統驗證
2025 年 6 月 ~7 月	系統整體試運轉，取得電業籌設及操作許可
2025 年第三季	預定啟動發電並進入商轉階段

四、碳捕捉與碳封存工程

碳補存 (Carbon Capture and Storage, CCS) 為當今國際間最具潛力的負碳排技術之一，此技術不僅被聯合國政府間氣候變化專門委員會 (IPCC) 所認可，亦被全球視為實現淨零碳排目標的重要技術，而台灣政府為推動碳捕捉、利用及封存 (CCUS) 技術，已召集多部會協同合作，共同推動「碳捕存跨部會試驗計畫」。

本技術基本概念是將工業製程中排放的大量二氧化碳 (二氧化碳) 歷經捕捉、壓縮、運輸，注入地下 800 ~ 3,000 公尺的多孔隙岩層中，長期儲存於穩定的地質結構 (如鹽水層、耗竭氣田)。此技術關鍵在於封存的二氧化碳處於超臨界態 (高壓、高密度、高流動性)，可有效避免逸散，因此該技術具有永續性、穩定性、不逸散的封存效果，並達到「取碳於地、還碳於地」的循環理念。

封存場址需具備三大條件：良好的儲集層、多孔隙性、高蓋層密封性；並透過 3D/4D 反射震測、壓力／溫度監測、地表環境觀測等技術，確保封存安全無虞。地質封存主要發生於深層鹽水層或耗竭油氣藏中，封存深度通常超過 800 公尺，以確保地層壓

力與溫度條件可使二氧化碳達到超臨界態，有利於提升封存效率與穩定性。

封存後的二氧化碳主要透過以下四種機制逐步穩定於地層中：

1. 構造封存：二氧化碳聚集於地質構造高處，由上方緻密泥岩蓋層封閉，最初期關鍵封存方式。
2. 殘餘氣封存：二氧化碳於地層微孔隙中因毛細作用被束縛，無法流動，提供中期穩定性。
3. 溶解封存：二氧化碳溶於地層鹽水中，形成碳酸根等離子，提升封存安全性。
4. 礦化封存：二氧化碳與地層中礦物反應形成穩定碳酸鹽礦物，提供長期封存保障。

其中，前三者為主要控制機制，礦化作用因需數千年才能顯著產生，雖安全性高，但在中短期內占比低。

(一) 本公司碳捕捉實績與工程

本公司為推動二氧化碳捕捉封存再利用路徑，在煉油廠內建置「二氧化碳捕捉與轉化甲醇」試驗設施，結合「二氧化碳捕捉」和「轉化再利用」二大系統，以建構完整的



碳循環經濟模式（圖 7）。「二氧化碳捕捉及轉化甲醇」試驗設施係利用化學吸收法，以胺液吸收劑捕捉工廠製程尾氣中的二氧化碳，再與煉廠自產氫氣反應轉化為甲醇產品。本技術為低耗能創新製程技術，捕捉氫氣工場尾氣中的二氧化碳，再生能耗低（ ≤ 3.0

GJ/ton CO_2 ），並結合高效能二氧化碳轉化甲醇觸媒及製程技術，將二氧化碳轉變為低碳足跡甲醇，至於甲醇將可作為乙烯、丙烯或醋酸等重要化學品之原料。本項技術能進一步推動以二氧化碳取代石油料源，讓國內石化產業建立起低碳的塑料產業鏈。

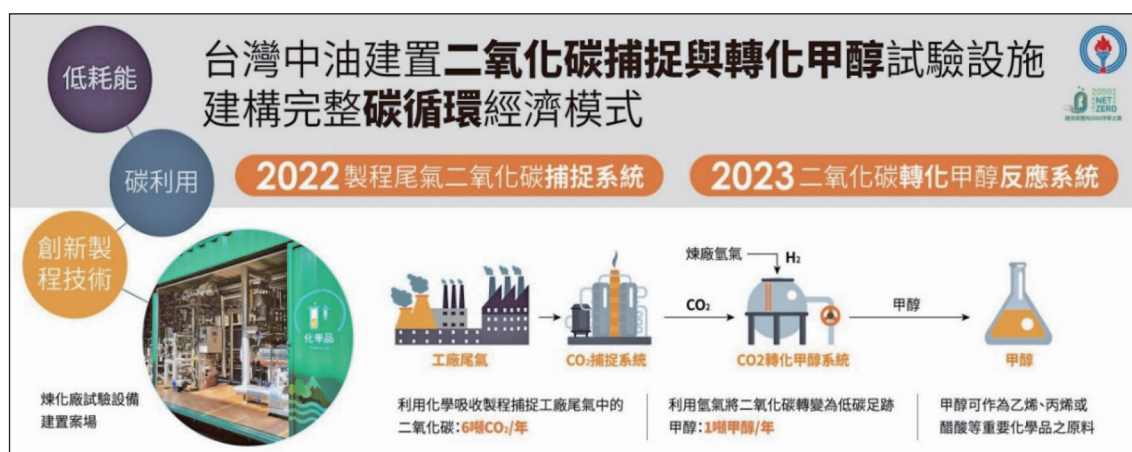


圖 7 台灣中油「二氧化碳捕捉與轉化甲醇」

(二) 本公司碳封存實績與工程

永和山先導試驗（已完成）

中油公司於 2012 年啟動全國首座地質碳封存試驗場域，位於苗栗永和山氣田。此計畫於 2013 年完成地面設備建置及試注作業，透過舊油氣儲集層實地驗證二氧化碳地質封存的技術可行性與環境監測能力。該試驗成功為台灣後續推動 CCS 提供基礎數據與實務經驗，也讓本公司累積關鍵探採工程與場址經營技術，為臺灣碳封存之路開啟新頁。

鐵砧山碳封存地面設施統包工程（進行中）

(一) 工程規劃設計及特點

1. 場址條件

中油公司選定位於苗栗縣通霄鎮之鐵砧山場址，作為「碳捕存跨部會試驗計畫」的核心場域，推動「鐵砧山碳封存地面設施統包工程」。鐵砧山構造為台灣中部陸域大型背斜構造，擁有三十年以上天然氣注儲經驗，已證實具備高度地質穩定性與封存安全性。主要封存層為 1,150 ~ 1,680 公尺深之桂竹林層砂岩（圖 8），平均孔隙率約 9.6%、滲透

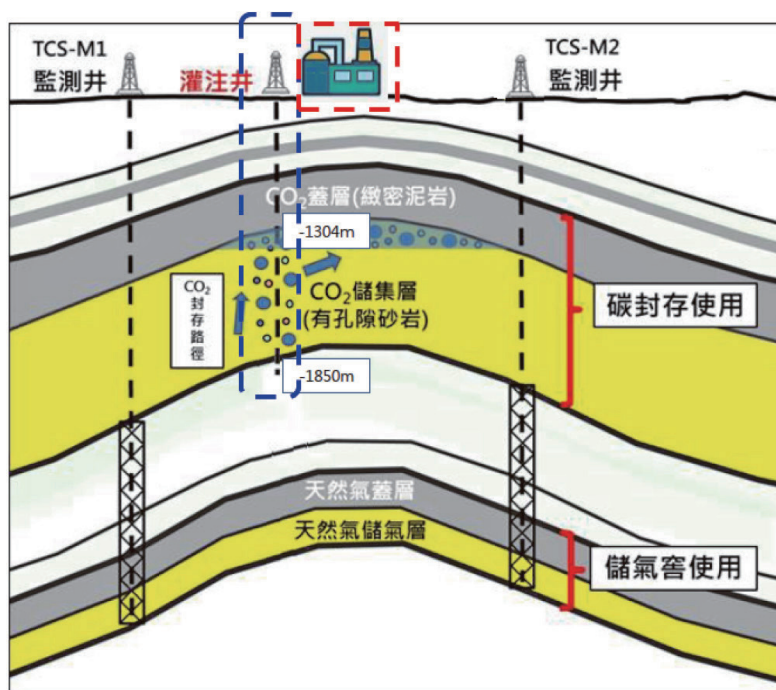


圖 8 「鐵砧山碳封存地面設施統包工程」示意圖

率最高可達 590 毫達西 (md)、地層壓力達 1928 絕對壓力 (psia)、溫度約 57.5°C，根據二氧化碳三相圖，該條件下二氧化碳為超臨界流體，有利於灌注與封存穩定性。

2. 製程概要 [7]

本次計畫選定此構造高區 4.2 平方公里範圍為注儲區，預計新鑽 1 口灌注井 (TCS-II)，搭配修復 2 口舊井 (TCS-2 與 TCS-37) 作為監測井使用。灌注規模預定 2025 年至 2027 年，每年灌注 10 萬噸二氧化碳，三年總量達 30 萬噸。二氧化碳來源由鄰近大型排碳設施捕捉後液化，以槽車運輸至場址，壓力設定為 22 kgf/cm²g 以下，溫度約為 -20°C，二氧化碳純度為 99% 以上，進入

卸收島後暫存於儲存槽，再進入灌注泵，預計加壓至約 92 kgf/cm²g，溫度約 -20°C，計量及加熱後再灌注至井中 (圖 9)，進入到地下後依據地層情況升溫，以隨時保持超臨界狀態灌注於鹽水層。

3. 井下設備規格

本計畫灌注井之完井工程，主要井內設備概述如下 (如圖 10)：

(1) 井口裝置 (Wellhead, 包含 Christmas Tree & Tubing Head & Casing Head)

井口裝置包含油管掛、套管掛、閘門、法蘭、頂部、雙關斷針閥、壓力表、螺帽及螺栓等零件均須設計為可承受二氧

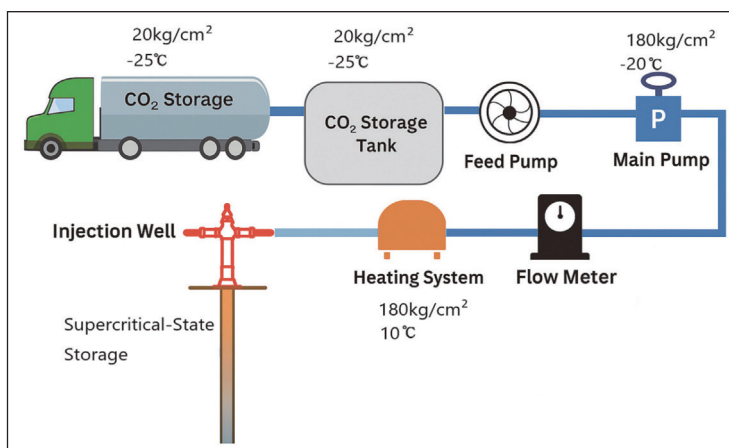


圖 9 碳封存流程圖

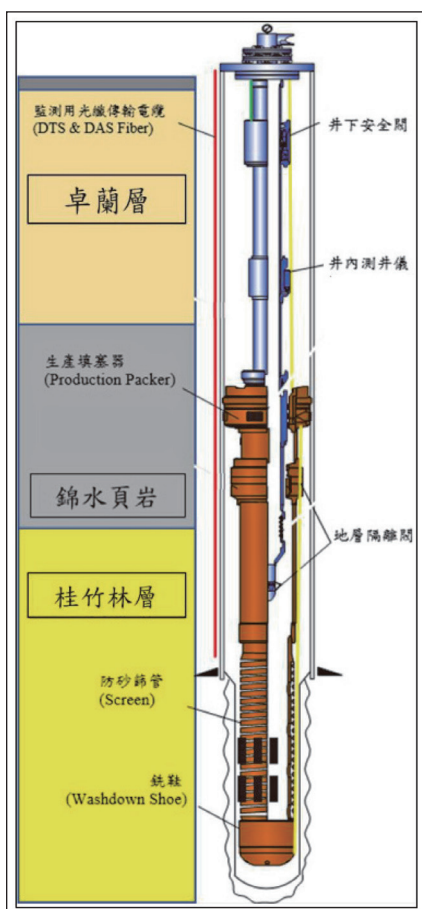


圖 10 井下設備

化碳酸蝕及灌注時產生之低溫，並提供井底監測儀器電纜或光纖端口供控制線通過。

(2) 油管 (Tubing)

油管預計採用 13Cr 材質為原則，如因灌注二氧化碳作業期間造成井程頂部產生低溫，則可於油管掛至井下安全閥 (SSSV, Sub-surface Safety Valve) 之間使用 Super 13Cr (S13Cr) 油管，SSSV 以下可使用 13Cr 油管。

(3) 井下安全閥及控制系統 SSSV & SSSV Control Line (包 含 Control Line protectors) 井下安全閥 (SSSV) 在發生緊急情況時可關閉生產管道。安全閥是緊急關斷 (ESD, Emergency Shutdown) 系統的一部分，設備設計為緊急情況時維持安全狀態。當控制線液壓保持時閥門為開啟狀態，控制線無液壓時將使閥門關閉。1/4 吋控制線用於維持 SSSV 的液壓，會與完井管串同時牽引至地面，並透過保護器固定在油管上 (如圖 11)。

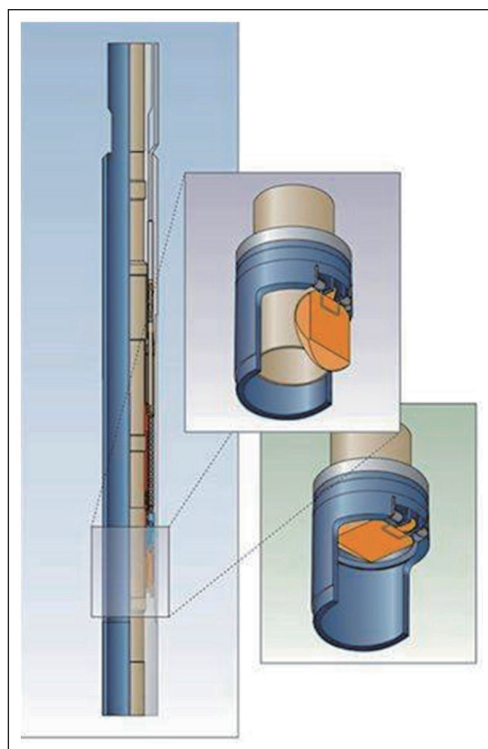


圖 11 井下安全閥示意圖

(4) 永久式井下壓力溫度計 PDG (Permanent Downhole Gauge)、分佈式溫度傳感器 DTS (Distributed Temperature Sensing) 和聲學傳感器 DAS (Distributed Acoustic Sensing) 一般二氧化碳灌注井下監測包含永久式井下壓力和溫度計 (PDG)、分佈式溫度傳感器 (DTS) 和聲學傳感器 (DAS)，以監測二氧化碳動態與移棲行為，及早發現是否產生灌注問題。PDG 將安裝於井內，用以監測關鍵位置的壓力和溫度。DTS 由井內提供從地面到靠近生產填塞器整個路徑的溫度分佈，DTS 有助於了解瞬態條件下井內二氧化碳之動態及有助於監測管串洩漏之定位，亦可幫助識別氣液界面的位置。井內儀器

及傳感器會連接到電纜或光纖上，並與油管串一起延伸至地面，連接處以保護器固定在油管上，出地面後電纜或光纖再由井口連接至地面上之控制室。

(5) 生產填塞器 (Production Packer)

生產填塞器有兩種主要功能，有效密封套管內上下壓力差與在各種操作條件下將油管錨固至套管上，防止井內流體與填塞器以上部分套管相互作用，從而保護套管。生產填塞器本體由 13Cr 鋼材製成，另由 HNBR (Hydrogenated Nitrile Butadiene Rubber) 組成特殊橡膠密封元件，以滿足擠注二氧化碳時溫度極端變化，約 -50°C 至 165°C 之使用需求。

(6) 地層隔離閥 FIV (Formation isolation valve)

FIV 閥門主要功能為允許使用較輕的非水基環孔流體通過，提供屏障保護地層和昂貴的防砂系統免受完井和修井作業期間完井液造成的損害。

(7) 防砂篩管 (Screens)

防砂篩管由 13Cr 鋼材製成，可避免灌注時地層顆粒造成管串阻塞。

4. 鑽井工程設計說明

檢視各項條件及地質模擬綜合評判，初步評估以定向鑽井方式，往灌注構造良好砂岩及相對低處方向鑽鑿井程，井程傾角控制在 $15^{\circ} \sim 20^{\circ}$ ，以避免套管水泥封固品質不佳衍生後續工程問題發生，並於下完套管水泥，於次期鑽進 3 至 30 公尺間如鑽遇砂岩層時，進行滲漏試驗，本次鑽井工程以定向井為前提設計 (如圖 12)：



第一期設置 26 吋導管先以 17-1/2 吋鑽頭鑽進至 335 公尺電測，下 13-3/8 吋套管，水泥全封。第二期以 12-1/4 吋鑽頭自 335 公尺鑽進至 685 公尺後，開始以定向鑽進至 1,285 公尺（以不鑽穿錦水頁岩為原則）後電測，下 9-5/8 吋套管，水泥全封。第三期續以 8-1/2 吋鑽頭定向鑽進至 1,835 公尺（以鑽穿桂竹林層超過 50 公尺為原則）後電測，下 7 吋套管後水泥全封。穿孔區間試電測結果決定，泥漿比重 1.05 ~ 1.20。

5. 多層次監測與風險控管

本計畫設置完整的封存安全管理系統，從槽車灌注前、後皆規劃監測作業，包含土

壤、大氣及地下水之環境監測、地表震測、地震監測及井下監測設備，以獲取環境背景基線及長期監測數據，確保場址安全性：

井下監測：佈設壓力、溫度、微震感測器，掌握灌注層動態。

地表震測：採時移三維震波測勘技術（Time-lapse 3D Seismic survey）觀察二氧化碳移棲與分布變化。

環境監測：涵蓋空氣、土壤、地下水等二氧化碳濃度背景基線監控。

緊急應變計畫：建立包括風險辨識、通報流程、實兵演練等應變制度。

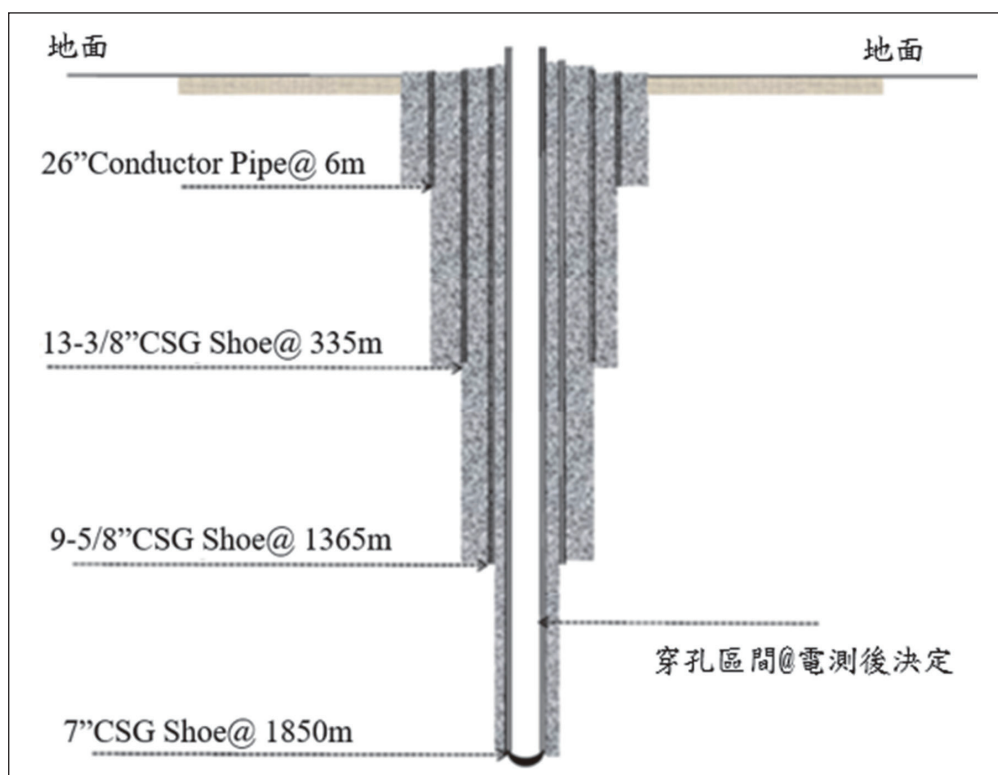


圖 12 鐵砧山地區 CCS 灌注井井內剖面圖



除設置監測設備，灌注程序採低流量連續注入方式，避免劇烈壓力變化，降低誘發微震與穿層風險。

鐵砧山 CCS 計畫之地質建模、鑽井設計、灌注模擬、風險分析皆由本公司自主完成，並應用多年來於油氣探採所累積之 700 口井與 2,000 條震測線資料。透過此案，不僅建立台灣自主碳封存技術體系，也培育出實務工程團隊與地質專業能力，未來可進一步推廣至濱海與海域大型封存場域應用

(二) 工程遭遇困難及改善方案

本施工主要遭遇困難為工區空間受限與施工介面衝突，鑽井區域與地面設施施作區重疊，若鑽井進度延遲將連動影響設施建置。而工區面積有限，現場無法同時堆置大型設備與土方材料。改善對策包含在設計階段即採「避讓設計」，將主要設備佈置於非鑽井干擾區域，並採分區施工與交錯時程，減少工序干擾。工程設計上將管線增加隔斷法蘭，確保可分階段施作。另採預鑄工法進行

管墩、隔音牆、設備基礎之製作，在場外預鑄後直接吊裝，提升效率與安全性，並將管線與基礎最大化採用預製（比例約達 70%），大幅減少現場人力與銲接作業。

(三) 節能減碳施工法

本案設計、設備採購、施工工法皆有考慮如何降低碳排，以達成節能減碳之目的。例如優先選用低排放、高效能的施工機具及施工辦法，施工過程中的碳排放控制與環境保護措施如下：

1. 冷凍機與冷凍儲槽內部冷卻管設計

當冷凍儲槽受到日曬影響時，槽內液態二氧化碳會因溫度上升發生相變化，部分氣化為氣態。當儲槽壓力達到設定值時，冷凍機自動啟動，將氣態二氧化碳冷凝回液態，防止槽內壓力過高，將氣態二氧化碳經由卸壓閥直接排放至大氣的問題。

2. 選用夾套式熱交換器，本方案較傳統水浴式方案，可減少約 25% 耗電量(如圖 13)。

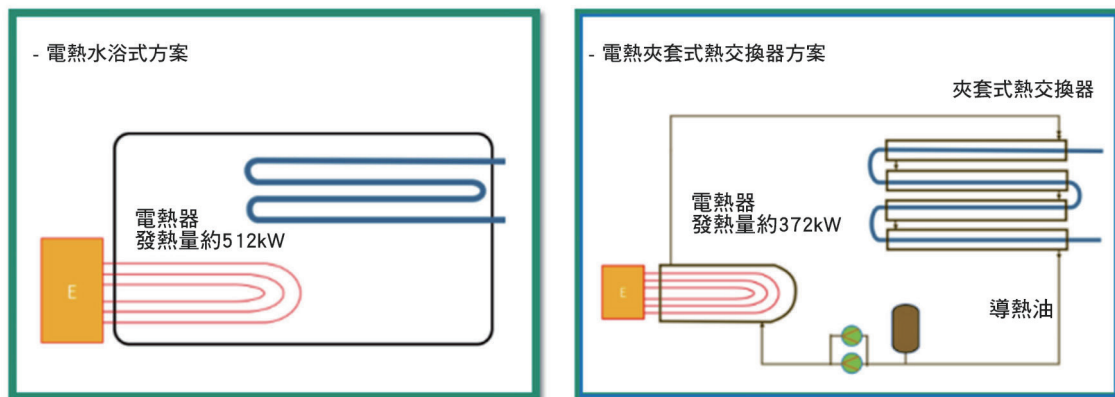


圖 13 熱交換器方案比較



3. 混凝土配比調整及採用預鑄工法

為降低碳排放，本案在符合契約與法規要求下，以綠色材料飛灰、爐石調整混凝土配比（碳排放量 (Kg CO₂e /T) I 型卜作嵐水泥為 981；高爐石粉為 48.4），經多次試拌試驗合格，進行混凝土基礎、牆體澆置。本案混凝土用量約 1,200m³，依據減少的水泥量換算，共減少約 110 噸之碳排放量。結構基礎預鑄設計（管墩、泵基礎等），減少現場作業與資源浪費，施工階段共減碳約 25.4 噸 CO₂e。

4. 採用高效能 LED 燈具，每年可節電約 39.58 千度，每年減碳約 20.145 公噸 CO₂e。

（四）本案工程排程及里程碑

鐵砧山碳封存試驗計畫為全國首座完整碳封存地面示範工廠，具備「設計－採購－建造－試車－操作驗證」完整統包工程生命週期，其工程期程安排如表 3：

本案於設計與建造階段即精準規劃工期節點與關鍵路徑，透過模組化預鑄、數位系

統監控、交錯時程管理等方式，有效克服人力與場域挑戰，截至目前進度穩定超前，預期可如期於 2025 年第三季啟動注入作業，實現國內首宗碳封存操作驗證目標。

五、結論

面對全球氣候變遷壓力與臺灣 2050 淨零排放目標的挑戰，中油公司積極推動地熱發電與碳封存兩項能源轉型技術，透過實際工程成果落實企業減碳承諾，創造多元經濟與環境效益，積極建構全面的工程 ESG 策略，確保專案從規劃到營運皆符合高標準。

環境（E）方面，中油從設計源頭考量，地熱 ORC 系統選用低沸點流體，碳封存則透過精確鑽井確保二氧化碳穩定封存。施工中，積極導入節能減碳工法，如使用高效能 LED 燈具、優化混凝土配比減少水泥用量，並採用預鑄工法降低現場廢棄物與碳足跡，這些都體現了對生態環境的重視。

社會（S）層面，這些工程為苗栗、宜蘭等地創造了在地就業機會，促進區域經濟。中油透過與地方政府及社區的積極溝通，確

表 3 工程排程及里程碑

項目	預定時程	備註
設計階段	2024 年 7 月起至 2024 年 12 月	含 BIM 建模、施工圖、管線配置規劃
採購階段	2024 年 10 月起至 2025 年 3 月	關鍵設備如泵浦、加熱器、槽車系統
建造階段	2024 年 12 月起至 2025 年 6 月	包含土木、機電、儀控等系統建置
單機測試	2025 年 5 月至 2025 年 6 月	包括二氧化碳儲槽、泵組、管線、變壓器等
系統整合測試	預計 2025 年 7 月起 (含試車階段)	配合取得丙類危險工作許可後進料運轉
正式操作驗證期	2025 年第三季至 2027 年底 (預計)	每年封存 10 萬噸，3 年共 30 萬噸二氧化碳



保專案符合在地需求，提升社區對再生能源的認同。同時，將 ESG 標準納入供應鏈評估，選擇環保且符合勞動法規的合作夥伴，擴大社會影響力。此外，透過高難度工程也培養了大量專業人才，為台灣能源轉型奠定堅實的人力基礎。

公司治理（G）方面，中油展現了嚴謹的風險管理與技術透明化。鐵砧山碳封存計畫的多層次監測系統和自主地質模擬，確保了封存安全性。面對挑戰，中油展現了高度應變與持續改進的精神，並透過與政府、學術界及其他企業的開放合作，符合現代公司治理原則，為台灣的淨零目標提供了堅實的技術與信任基礎。

在地熱發電方面，土場 15 號井鑽探成功顯示該區具備穩定中溫地熱資源條件，現正建置模組化 ORC 地熱電廠，每年穩定發電可超過 25.7 百萬度電，減少二氧化碳排放約 1 萬 3,000 公噸，不僅可支援偏鄉社區能源自主，也為本公司建立再生能源電力來源。

在碳封存方面，鐵砧山 CCS 跨部會試驗場址規劃每年封存二氧化碳達 10 萬噸，三年總量可達 30 萬噸，經由完整監測系統與數值模擬確認封存安全性與穩定性，展現台灣自主封存技術的成熟與可靠度。此場址亦具示範價值，為未來推動大型濱海或海域碳封存奠定基礎，推動國家 CCUS 產業鏈整合。

結合兩項技術成果，台灣中油公司成功建立「再生能源發電＋負碳技術封存」雙軌策略，除在源頭減碳，也在末端封存碳排，

推動完整低碳能源政策，不僅符合國際減碳潮流，更展現本公司能源技術轉型的前瞻性與責任感。

中油公司深知作為國家重要能源企業，其轉型不僅關乎自身永續發展，更肩負引領產業鏈綠色轉型的社會責任。因此，將環境（Environmental）、社會（Social）與公司治理（Governance）的理念深度融入各項工程專案中，是中油實現淨零目標的核心戰略。這兩項指標性的工程，不僅是技術層面的突破，更是中油在環境保護、社會福祉及健全公司治理方面的具體承諾與實踐，旨在為台灣的能源永續發展樹立新的典範。

參考文獻

1. 台灣中油全球資訊網 - 綠色轉型及創新研發，<https://www.cpc.com.tw/csr/cp.aspx?n=3014>
2. 重啟地熱探勘建置土場發電廠，探採事業部測勘處，2022 年 10 月。
3. 淺談地熱發電與花蓮地區地熱資源探勘實例簡介，楊智豪，大地技師大地期刊第 25 期，2022 年 10 月。
4. 有機朗肯循環於台灣能源的應用與發展，林志宏助理教授，國立勤益科技大學冷凍空調與能源系。
5. 宜蘭土場地熱能發電機組，興辦事業計畫變更，台灣中油股份有限公司 2024 年 11 月。
6. 台灣中油建置「二氧化碳捕捉與轉化甲醇」試驗設施 已完成製程尾氣之二氧化碳捕捉系統，台灣中油全球資訊網 - 新聞稿，2022 年 12 月 29 日。
7. 鐵砧山碳捕存（CCS）跨部會試驗計畫推動規劃報告，台灣中油公司探採事業部，2024 年 11 月。
8. 宜蘭縣土場地熱發電設置統包工程查核簡報，探採事業部，2025 年 1 月。