



二氧化碳地質封存： 我國減碳機會與挑戰

林殿順* / 國立中央大學地球科學學系 教授、國立中央大學碳封存及地熱研究中心 主任

徐偉啾 / 國立中央大學地球科學學系 博士班研究生

林哲銓 / 國立中央大學碳封存及地熱研究中心 博士後研究員

蔡宜伶 / 國立中央大學地球科學學系 專任研究助理

楊雅梅 / 工業技術研究院綠能與環境研究所 研究員

陳新翰 / 工業技術研究院綠能與環境研究所 副研究員

我國響應全球期望於本世紀末將全球暖化溫度控制在 1.5°C 之內，為共同承擔全球目標，將「2050 淨零排放」入「氣候變遷因應法」。在政府所提的十二項關鍵戰略中，二氧化碳捕捉利用及封存 (CCUS) 技術，擔負關鍵減碳與負碳角色。政府規劃於 2030 年與 2050 年時，年度碳捕捉利用及封存目標，分別為 1.76 ~ 4.60 百萬噸與 40.2 百萬噸。我國在此巨大的利用碳封存技術減碳的需求下，是否有足夠的地下封存空間，以及在開展與佈建碳封存場初期，我國可能遇到那些挑戰與機會。本文綜合討論主要二氧化碳排放源與排放量地理位置分布、我國碳封存潛能、政府目前實施 CCUS 之規劃。最後提出若大規模實施碳封存可能遇到的挑戰與面對此挑戰的應對方法。

本文根據地質與體積法評估我國陸海域、盆地尺度鹽水層碳封存總量概估為 390 億噸，加上前人研究所得的陸上構造封存量 28 億噸，共約 418 億噸，遠超過政府規劃至 2050 年封存約 5 億噸之封存量。若考慮二氧化碳主要排放源與良好封存潛能區之匹配，以濱海區與近岸之鹽水層封存為首選。考慮地質條件則以桃園陸海域、台中彰化雲林陸海域等台西盆地範圍為最佳封存區域；嘉義以南至高雄之濱海區陸海域（台南盆地），因前期少有碳封存研究，且有較多斷層，封存潛能尚待詳細評估。

我國具有巨大的碳封存潛能，唯目前我國 CCUS 技術仍遭遇多項挑戰，如政府利用 CCUS 減碳的決心與企圖心不足、碳封存法規仍在制訂中、技術仍在發展階段、經濟成本高昂、民眾仍有疑慮等。建議政府展現利用 CCUS 減碳之企圖心與決心；儘快完善碳封存法規；鏈結國際充實我國碳封存場址之調查、二氧化碳灌注與監測與維運技術；財務補助 CCUS 計畫；建置國家碳封存試驗場與教育館，成為技術驗證與民眾溝通場域，加強社會與利害關係人溝通，提高社會對 CCUS 接收度。

關鍵字：2050 淨零排放、二氧化碳捕捉利用及封存

前言

2021 年第 26 屆聯合國氣候變遷會議 (26th Conference of the Parties, COP 26) 與會國家達成「格拉斯哥氣候協議」，期望於本世紀末將全球暖化溫度控制

在 1.5°C 之內，各國因此陸續提出「2050 淨零排放」的淨零時程與策略。「2050 淨零排放」已成國際趨勢，為共同承擔全球目標，我國亦將「2050 淨零排放」入法，並於氣候變遷因應法，制定碳封存管理辦法。二氧化碳排放主要來自於化石能源（煤、石油、天然氣等）之使用，為減少化石能源使用，必需提高替代能源及再生能

* 通訊作者，andrewl@ncu.edu.tw

源之發電占比。然而，於替代能源與再生能源無法完全取代化石能源之前，值此能源轉型之際，化石燃料的使用仍是必要之惡。

IPCC [1] 闡明二氧化碳捕捉利用及封存 (Carbon Capture, Use and Sequestration, CCUS) 技術是減少大規模化石能源和工業排放二氧化碳的重要選擇。國際能源總署 (International Energy Agency, IEA) 2021 年提出「全球能源部門 2050 淨零排放路徑」報告指出，全球能源系統去碳的關鍵支柱為能源效率、行為改變、電氣化、再生能源、氫能、生質能源以及 CCUS (如圖 1 上圖)。以 CCS 為發展基礎的生質能碳捕存 (BECCS) 及直接空氣碳捕存 (DACCS)，更是提供負碳排機會。

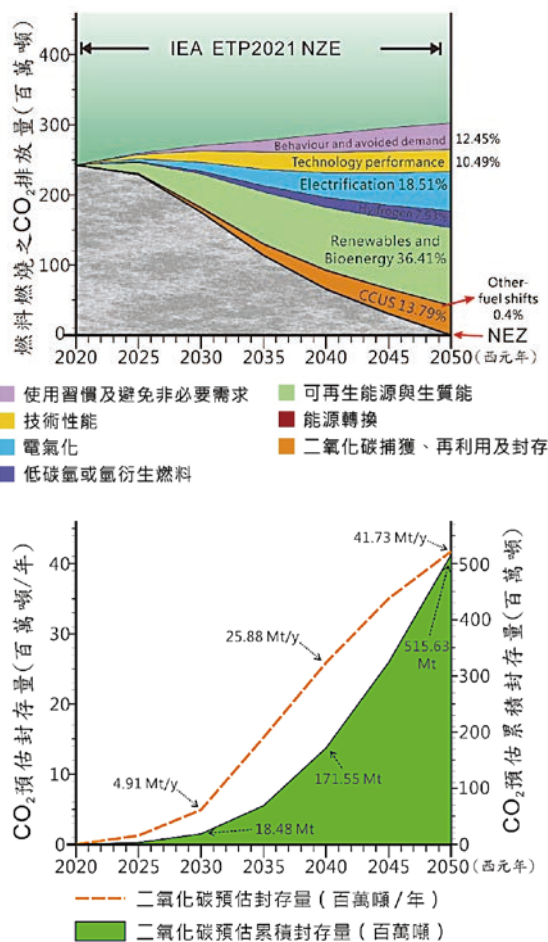


圖 1 (上圖) 我國 2020 ~ 2050 預估年排碳量及以國際能源總署所預期的減碳技術方法，達到 2050 淨零碳排之減碳情境。(下圖) 根據上圖情境，利用 CCUS 占 13.79% 減碳貢獻，估計自 2020 至 2050 每年之二氧化碳捕捉再利用及封存量 (橘色虛線) 以及二氧化碳封存累積總量 (綠色區塊)。本估計顯示，於 2050 年時，每年需封存 41.73 百萬噸，此估計值與國發會等 [4] 所預估，於同年我國需年封存 40.2 百萬噸相當。本估計也闡明，我國至少需有 515.63 百萬噸的二氧化碳封存空間，方能達到利用 CCUS 減碳，達到 2050 淨零碳排需求。

聯合國歐洲經濟委員會之 CCUS 技術簡報 [2]，指出大部分的碳捕捉技術屬於開發與示範階段的 Technology Readiness Level (TRL) 1 ~ 6 (9 為最成熟)，但胺吸收及薄膜碳捕捉等技術則達 TRL9 成熟布建階段；而油氣田及鹽水層地質封存則達 TRL8 的布建階段。如此的評估也反映於暨存且未來將大量布建的全球 CCUS 設施。根據 Global CCS Institute [3] 報導，目前全球商轉中的碳捕存場共有 29 座，共年封存約 41 百萬噸二氧化碳。其中二氧化碳捕捉來源及場址數，由多到少，分別為天然氣處理 (13 座)、化工 / 煉油 (6)、肥料 (4)、氫氣 (2)、發電廠 (2)、鋼鐵廠 (1)、合成氣等 (1)；碳封存方式及場址數量分別為強化採油 (22)、鹽水層封存 (6)、多樣處置 (1)。全球正在規劃中，預計於 2030 商轉的碳捕存場共約 103 座，其中二氧化碳捕捉來源及場址數，由多到少，分別為化工 / 煉油 (45)、發電廠 (25)、氫氣 (13)、天然氣處理 (5)、肥料 / 水泥 / 焚化廠 (3)、其他 (6)。碳封存方式及場址數量分別為強化採油 (6)、鹽水層封存 (84)、多樣處置 (1)、評估中 (12)。可見有更多的化工 / 煉油廠、發電廠及氫氣廠進行碳捕捉，而鹽水層封存變成碳封存的主流選項。

根據國發會等 [4] 之規劃，預計我國在 2050 年時，再生能源發電量占比需達 60 ~ 70%，在無法去碳的電力 (如化石能源、(灰藍) 氫能) 與非電力 (產業住商與運輸部門) 所產生的二氧化碳，於 2050 年時仍達到每年排放約 40.2 百萬噸。若要達到 2050 淨零排放，必須使用國發會等 [4] 所制定的「十二項關鍵戰略」之一的 CCUS 技術，將此年排放於 2050 年，約達 40.2 百萬噸的二氧化碳進行捕捉利用及封存才能達到目標，完成淨零最後一哩路。

若以 IEA [5] 之 CCUS 於能源系統各減碳方法中的減碳貢獻比例 (即 13.79%)，搭配我國至 2050 年之預計年排碳量，計算我國利用 CCUS 減碳所需的二氧化碳封存量。計算結果如圖 1 下圖所示，圖 1 顯示台灣 2020 ~ 2050 年減碳情境 (上圖) 暨預估二氧化碳封存量 (下圖)。圖中顯示於 2030 年時，我國需每年封存 4.91 百萬噸；於 2050 年時，需年封存 41.73 百萬噸。此兩估計值，與國發會等 [4] 發布的 2030 與 2050 碳封存目標，分別為 1.76 ~ 4.60 百萬噸與 40.2 百萬噸，非常接近。圖 1 也顯示若以此估計，我國至 2050 年時，地下岩層需至少需有安全封存 5.15 億噸之二氧化碳之能力。

本文將先討論我國二氧化碳主要排放源及排放量的地理分布，回顧我國二氧化碳地質封存之前期研究，討論台灣地質及我國二氧化碳地質封存潛能，最後並討論我國進行大規模二氧化碳地質封存之機會與挑戰。

我國主要二氧化碳排放源分布與排放量

根據環境保護署^[6]之「國家溫室氣體排放清冊報告」顯示我國於2005年之二氧化碳排放量為266.46百萬噸二氧化碳當量，於2021年為283.114百萬噸二氧化碳當量，碳排放量成長約6.25%，平均成長率約為0.38%，其中能源部門及工業製程及產品使用部門就佔了99.8%的排放量，例如發電廠、石化廠、鋼鐵廠等。

圖2至圖4為根據環境部「事業溫室氣體排放量資訊平台」2021年資料所繪製之圖表。圖2為年排放量大於一百萬噸之排放源列表，台灣於2021年排放量大於一百萬噸廠址有29處。這些大型排放源所累積的排放量總和約為202.35百萬噸，佔了2021年總碳排放量的71.5%。其中前五大的年排放源分別為台中火力發電廠(27.43百萬噸)、麥寮石化廠(26.48百萬噸)、中鋼小港廠(20.88百萬噸)、興達發電廠(16.23百萬噸)

二氧化碳年排放量大於一百萬噸之排放源			
排名	排放源	公司	排放量 (百萬噸)
1	台中發電廠	台灣電力股份有限公司	27.43
2	麥寮石化廠	台塑石化股份有限公司	26.48
3	中鋼小港廠	中國鋼鐵股份有限公司	20.88
4	興達發電廠	台灣電力股份有限公司	16.23
5	林口發電廠	台灣電力股份有限公司	14.67
6	大林發電廠	台灣電力股份有限公司	13.06
7	大潭發電廠	台灣電力股份有限公司	10.97
8	通霄發電廠	台灣電力股份有限公司	9.98
9	中龍鋼鐵龍井廠	中國鋼鐵股份有限公司	9.45
10	麥寮汽電廠	台灣塑膠工業股份有限公司	8.88
11	和平發電廠	和平電力股份有限公司	7.53
12	台泥和平廠	台灣水泥股份有限公司	3.66
13	南部發電廠	台灣電力股份有限公司	3.16
14	亞泥花蓮廠	亞洲水泥股份有限公司	2.91
15	大林煉油廠	台灣中油股份有限公司	2.60
16	台塑仁武廠	台灣塑膠工業股份有限公司	2.53
17	協和發電廠	台灣電力股份有限公司	2.45
18	台化鐵新港廠	台灣化學纖維股份有限公司	2.21
19	森霸電力	森霸電力公司	2.12
20	林園石化廠	台灣中油股份有限公司	2.11
21	華亞汽電廠	華亞汽電股份有限公司	2.08
22	長生電力	長生電力股份有限公司	1.85
23	統國煉油廠	台灣中油股份有限公司	1.60
24	嘉惠電力	嘉惠電力股份有限公司	1.58
25	長春石化苗粟廠	長春石油化學股份有限公司	1.40
26	台化鐵龍德廠	台灣化學纖維股份有限公司	1.31
27	台化鐵海豐場	台灣化學纖維股份有限公司	1.27
28	台泥蘇澳廠	台灣水泥股份有限公司	1.13
29	星能電力	星能電力股份有限公司	1.01

資料來源：環境部事業溫室氣體排放量資訊平台 2021年

圖2 我國二氧化碳年排放量大於一百萬噸之排放廠、所屬企業、2021年之年排放量(單位為百萬噸)。

資料來源為環境部事業溫室氣體排放資訊平台(2021年)^[7]

及林口發電廠(14.67百萬噸)，並將這些排放源用藍圈白字標記於圖3上。圖3展示了台灣主要的排放源、地質分區和活動斷層分布，根據排放量大小，分別以紅色(>10百萬噸)、橘色(>5百萬噸)及綠色(>1百萬噸)表示。排放量大於10百萬噸有7個廠址，介於5~



圖3 台灣陸地地質圖、活動斷層(紅色線段)及海域水深圖。活動斷層分布根據林啟文等^[8]，圖中顯示二氧化碳主要排放源及2021年之年度排放量(排放量依據環境部事業溫室氣體排放資訊平台資料^[7]，單位：百萬噸Mt)。陸上與海域封閉構造以白色橢圓形表示，其圖說見圖之右下方。圖左上方表列呂明達等人^[9]所計算之14個陸上封閉構造名稱及封存量(單位：百萬噸Mt)。

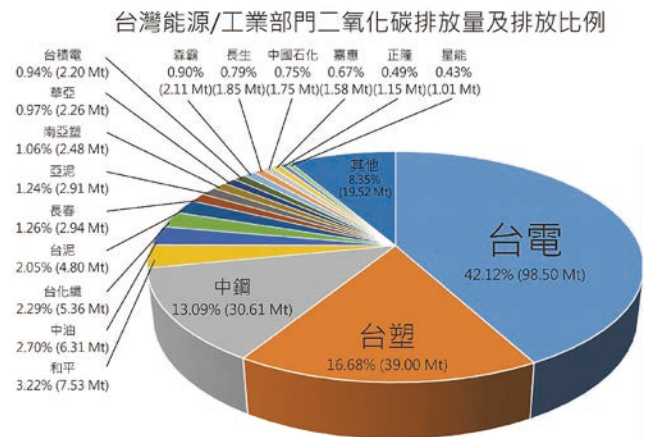


圖4 我國2021年各企業二氧化碳排放量及所占總排碳量之比例。資料來源為環境部事業溫室氣體排放資訊平台(2021年)^[7]

10 百萬噸有 4 個廠址，介於 1 ~ 5 百萬噸有 18 個廠址。可看出大部分的排放源皆位於台灣西半部沿海區域，其中又集中於桃園、台中、雲林及高雄四處。圖 4 展示了各企業於總排放量之佔比，總排放量僅包含環境部有統計之公司，共 233.87 百萬噸，其中佔比前五名依序為台電 (42.12%)、台塑 (16.68%)、中鋼 (13.09%)、和平 (3.22%) 及中油 (2.70%)。

我國地質條件

台灣海域及陸域具有厚達約 10 公里的新生代沉積岩層 (圖 5) [10,11]。此巨厚的沉積層序經常以厚層砂岩與頁岩交替出現，其中，具高孔隙率的砂岩層可成為 CO₂ 的潛在儲集層；而其上覆的頁岩層可成為蓋岩層，具有將 CO₂ 封存於地下並防止溢散至地表的功能。根據潛在二氧化碳儲集層與蓋層組合，可將台灣西部陸海域二氧化碳儲集系統，由淺至深分為 4 個系統 (圖 6)：(1) R1 系統：下部卓蘭層；(2) R2 系統：錦水頁岩 (蓋層) – 桂竹林層、南莊層、觀音山砂岩 (儲集層)；(3) R3 系統：打鹿頁岩 (蓋層) – 北寮層、石底層 (儲集層)；(4) R4 系統：碧靈頁岩 (蓋層) – 木山層、五指山層 (儲集層)。

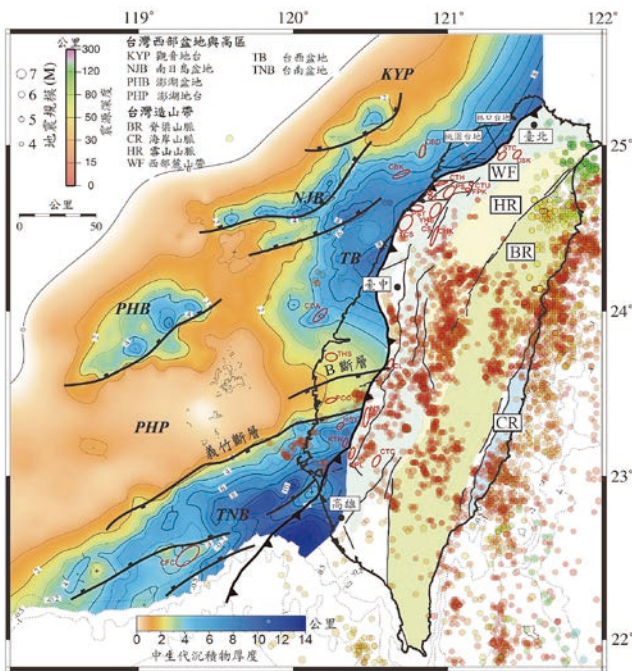


圖 5 我國地質分區及平原區與台灣海峽之新生代沉積層厚度 (單位公里)。紅色橢圓顯示台灣中油公司曾經鑽井之構造。圖中顯示 1970 ~ 2010 規模大於 4 之地震震源分布，顏色表示震源深度、圓圈大小代表地震規模。英文縮寫代號見圖左上角說明。

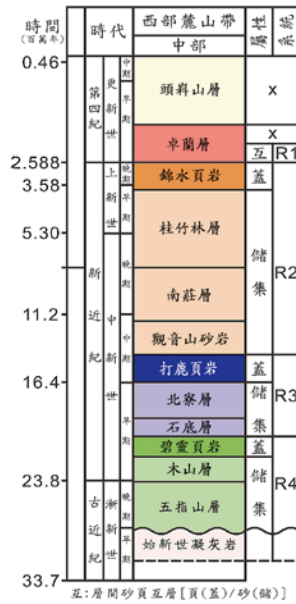


圖 6 台灣西部陸海域漸新世至第四紀地層以及二氧化碳儲集系統，由淺至深分別為 R1、R2、R3、R4 等碳封存系統。

前人研究指出我國至少有四種二氧化碳地質封存模式 [12]，分別為 (A) 陸上封閉構造、(B) 濱海開放鹽水層、(C) 海域開放鹽水層、(D) 海域封閉構造等。其中，濱海開放鹽水層因封存量、靠近主要二氧化碳排放源、地震風險較低、預期灌注之二氧化碳主要往海峽方向移棲 (往西移棲，因地層往東傾斜)，而成為我國碳封存首選場址。

我國初期二氧化碳地質封存場址研究，有能源局委託工研院的碳封存研究 [13-15]。該研究整理台灣由北至南、陸域及海域之地質構造與地層，提出潛在二氧化碳地質封存區域與封存型態。約於同時，台灣電力公司也委託中興工程顧問社，研究台灣碳封存潛能研究，研究重點區域為台中彰化濱海區 [16,17]。國科會能源國家型計劃第一期「二氧化碳捕捉與封存」的研究結果，也顯示我國具有巨量的二氧化碳地質封存潛能 [18-20]。

呂明達等人 [9] 分析台灣陸域構造，指出其可封存 28 億噸二氧化碳；林殿順等人 [10] 分析台灣西部平原區及台灣海峽的鹽水層估計可封存約 459 億噸二氧化碳，遠大於利用 IEA [5] 模型推估台灣 2021 ~ 2050 年之累積封存量僅 5.15 億噸，因此，我國利用鹽水層封存二氧化碳之潛能不容小覷。國科會能源國家型計劃第二期計畫 NEP-II [21-24]，曾於六輕麥寮廠、彰濱工業區、台中電廠等陸海域進行反射震波測勘，配合台灣中油鑽井資料，顯示上述三區陸海域之深鹽水層皆可封存大量二氧化碳。台灣電力公司於 2012 ~ 2013 年在彰化濱海的彰濱工業區鑽鑿一口 3,000 公尺深的地質井 [25]，並根據分析之資料，將該區之地層區分為

三組二氧化碳封存系統，由淺至深分別為卓蘭層下部系統 (R1)、錦水頁岩-桂竹林層-觀音山砂岩 (R2) 與打鹿層頁岩-北寮層 (R3)，預估可封存 138 億噸二氧化碳。

我國前期研究指出台灣具有巨量的碳封存潛能。可進行碳封存的場址分布於西部麓山帶、西部平原區及台灣海峽。西部麓山帶之碳封存構造，主要為枯竭油氣田或是封閉構造；平原區及台灣海峽主要碳封存構造為深部鹽水層或是封閉構造。圖 7 顯示我國陸海域油氣構造之油氣儲集地層與蓋層，顯示此類儲集層與蓋層組合也適用於二氧化碳地質封存。

二氧化碳地質封存量概估

本文中之二氧化碳地質封存量的評估，可分為兩類，第一類為陸域構造封存，這類的封存量取決於封閉構造的大小；第二類為陸海域深部鹽水層封存，深部鹽水層的分布範圍，及其所涵蓋的面積相比於構造封存會較大，其二氧化碳封存量也較大。圖 3 與圖 5 展示台灣陸海域油氣田及封閉構造位置，不論是封閉構造或是廢棄油氣田，皆為封存二氧化碳的潛在場址。呂明達等人 [9] 評估陸上 14 個封閉構造 (圖 3 左上角插圖之黃色不規則圈合為評估之構造) 之二氧化碳封存量，其碳封存量評估之關係式如下：

$$\text{封存潛能} = \text{構造面積} \times \text{儲集層淨厚度} \times \text{孔隙率} \times \text{氣體體積因子} \times \text{掃排效率} \times \text{CO}_2 \text{飽和度} \quad (1)$$

評估結果顯示陸域封閉構造之二氧化碳封存總量可達 28.29 億噸 (圖 3 左上方列出各構造封存量)，可見陸域構造封存具有相當的潛力。

本文所使用的深部鹽水層封存量之評估方法有兩類，第一類為使用美國 National Energy Technology Laboratory (NETL) 所開發的二氧化碳封存量估算軟體 CO₂-SCREEN，該軟體所使用評估方式為美國能源部所提供的 USDOE 法 [26]。第二種為使用蒙地卡羅統計法，使用的評估方式亦是使用 USDOE 法。USDOE 法計算所使用的關係式如下：

$$GCO_2 = A \times h_g \times \phi \times \rho \times E_{\text{saline}} \quad (2)$$

其中 A 為封存構造面積 (m²)；h_g 為儲集層厚度 (m)；φ 為儲集層孔隙率；ρ 為二氧化碳密度；E_{saline} 為封存量效率因子，指的是岩石孔隙中可填滿二氧化碳的比例。

圖 8 為本文評估結果，以 20 公里 × 20 公里之方格，顯示台灣深部鹽水層各區塊之二氧化碳封存量分布 (單位為百萬噸)，該評估結果也曾報導於呂慶慧等人 [27]。評估區域分為北部桃竹苗區、中部中彰雲區、南部嘉南區，根據數字及色塊顏色來表示封存量大小，顏色偏向深色表示該區域之封存量較高，顏色偏向淺色表示該區域的封存量較低，其中封存量高潛能區用粉紫色圈合標示。封存量評估所涵蓋的深度範圍為 800 公尺至 3,000 公尺深，其包含的封存系統分別為 R2、R3 及 R4 系統。中彰雲區因為收集的資料及參數較為齊全，所以使用 CO₂-SCREEN 來評估；桃竹苗區及嘉南區域則沿用林殿順等人 [11] 之參數，但做更細部的區域計算並調整儲集層厚度，這兩區則使用蒙地卡羅統計法評估。桃竹苗區的封存量概估總和約為 12,188 百萬噸 (約 122

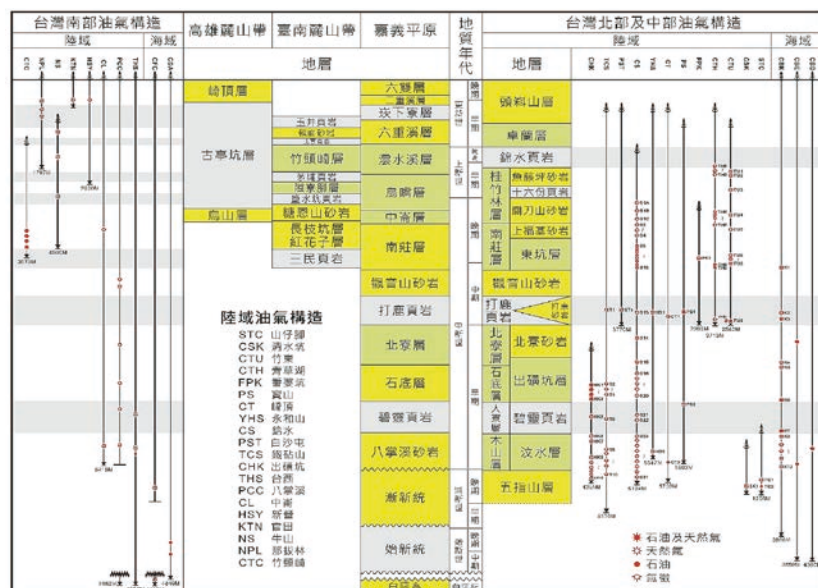


圖 7 我國陸海域鑽井，於各封閉構造所鑽遇之含油氣地層。顯示台灣新生代地層，由淺到深有多重蓋層與儲集層組合，此類組合也適合應用於二氧化碳地質封存。

台灣深部鹽水層封存量評估、地質區及活動斷層分布

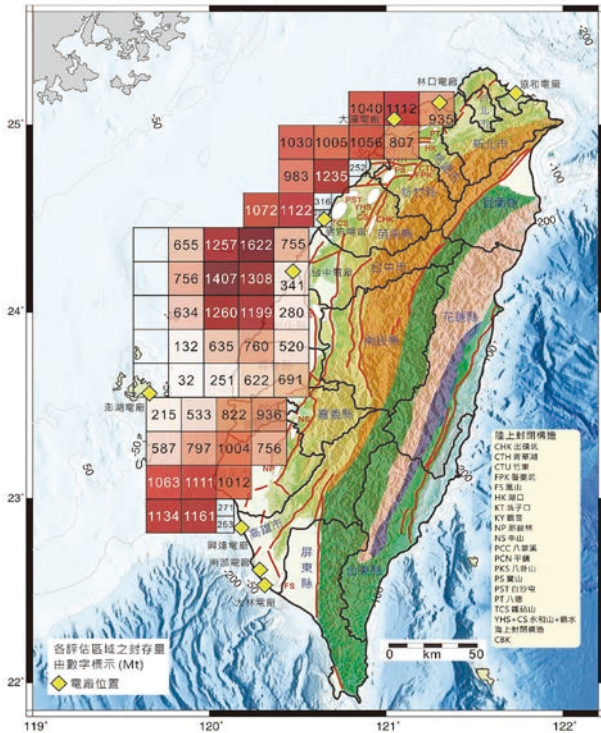


圖 8 本研究所計算之我國深部鹽水層之二氧化碳封存量（單位：百萬噸）。每個方格為 20 公里 × 20 公里。方格顏色深淺代表封存量大小。該評估結果也曾報導於呂慶慧等人 [27]

億噸)；中彰雲區的封存量概估總和約為 15,135 百萬噸 (約 151 億噸)；嘉南區的封存量概估總和約為 11,655 百萬噸 (約 117 億噸)。三個區域的深部鹽水層封存量總計高達 390 億噸，如此可觀的封存量也證明了，台灣的深部鹽水層具有非常良好的碳封存潛能。本文所估計的碳封存總量 (390 億噸) 少於林殿順等人 [11] 所估計的 459 億噸封存量，可能有兩種原因：

1. 桃竹苗區與嘉南區的參數基本上是沿用舊有資料，但是計算的面積及儲集層厚度因重新設計範圍而有差異。相較先前研究所使用之不規則的整區面積及粗略的儲集層厚度分布，本文的面積參數比較小且多格，儲集層厚度分度也較精準且收斂，在計算上誤差會比較小，所評估出的封存量也會較精確。
2. 中彰雲區的參數則有使用震測及井測資料，除了與桃竹苗區與嘉南區一樣使用較小的面積多格計算，使所使用的參數相比於先前研究更為精確，包含儲集層厚度、孔隙率、溫度及壓力等，配合使用 CO₂-SCREEN 來評估，其計算所得出的封存量也更為精確。

深部鹽水層及構造封存在台灣的封存量合計約為 418 億噸，這是台灣在碳封存上一個相當良好的條件，更是一個可以大量減少碳排放的方式之一。

碳封存挑戰

如前述，根據國發會規劃，我國在 2050 年時，每年二氧化碳地質封存灌注量約 40.2 百萬噸。若以年灌注 1 百萬噸的封存場址來計算，我國在 2050 年時至少需建置約 40 個碳封存場址。在此巨量的碳封存需求下，我國實施 CCUS，目前面臨政治、經濟、技術、法規制度等方面的挑戰及環境和社會文化障礙。啟用政策工具、更多的公眾支持和技術創新等條件可以減少這些障礙。以下討論我國大規模實施碳封存的挑戰與機會。

明確的國家 2025 ~ 2050 碳封存規劃及利用 CCUS 減碳企圖心

國發會等 [4] 規劃「碳捕捉利用及封存」關鍵戰略由國科會、經濟部、環境部共同主辦。其中，國科會負責 CCUS 技術部分，經濟部負責碳利用及封存示範，環境部負責碳封存法規部分。上述三單位也提出「臺灣 2050 淨零轉型「碳捕捉利用及封存」關鍵戰略行動計畫」 [27]。政府也制定 2030 短期目標為年封存 1.76 ~ 4.60 百萬噸 (基線目標 1.74 ~ 1.79 百萬噸；積極目標 4.60 百萬噸，國科會等 [28])。各單位也依分工，積極進行碳捕存研發與規劃。目前，台電與台灣中油各分別規劃建置每年封存 2,000 噸 (台灣電力股份有限公司 [29]) 以及三年封存 30 萬噸 (台灣中油公司 [30]) 之碳封存試驗場，示範驗證碳封存灌注與監測技術。待封存試驗成功後，再推廣辦理。目前規劃的碳封存進程，過於保守，應很難達到 2030 年封存 1.76 ~ 4.60 百萬噸的短期目標。

雖然 IEA [5] 推估「製程技術性能改進」與「再生能源」為前期 (2020 年至 2040 年) 主要減碳貢獻度的關鍵技術；CCUS 技術與氫能應用則為後期 (2040 年至 2050 年) 減碳的技術。但一個碳封存場之建置需要民眾能接受，並至少費時 6 ~ 8 年以上的時間。再者，我國尚無封存場址，影響廠商提升碳捕捉規模意願。建議政府提出自 2025 年至 2050 年每年的碳封存灌注目標、潛在封存場址群規劃暨達到此目標的詳細路徑圖；加速碳封存的進程、儘早建立具規模的碳封存場，展現利用如國發會等 [4] 所規劃的利用 CCUS 減碳的企圖心與決心。

企業施行 CCUS 的經濟誘因

在經濟部分，目前二氧化碳捕捉與封存成本過高，對企業而言沒有經濟誘因。建議政府仿效歐美等先進國家，施行財稅誘因，輔導並鼓勵企業利用碳捕存減碳。如：(1) 政府補助碳捕存設施建置；(2) 針對投資碳捕存

計畫的企業，政府減免碳費與營業稅徵收；(3) 政府制定碳權方法學，使二氧化碳地質封存經過認證，企業可取得碳權；(4) 封存的二氧化碳可抵所得稅額（如美國降低通貨膨脹法案的第 45Q 條聯邦公司法）；(5) 國內金融單位將投資碳捕存公司，提昇永續分類評比分數。

碳封存技術發展與國際鏈結

如前述，台灣主要碳封存方式有陸域及海域之構造封存（如枯竭的油氣田）及鹽水層封存。國科會等^[28]規劃先投入濱海至海域鹽水層封存場址開發，因此區鄰近大型二氧化碳排放源（圖 3）且濱海區遠離人口密集區，海域開發也之環境議題較少。另外，國科會等^[28]也強調建立本土地質封存評估、安全監測、風險評估及場址運維技術，引進國外海事工程技術等。

碳封存場址評估部分，在場址調查評估期間，需收集大量地下地質（如鑽井）與地球物理（如反射震測）資料；於碳封存灌注與監測期間，需要大量設備與經費挹注。建議政府投入充足經費與人力，購置足夠的儀器設備，以利進行碳封存地下地質特性分析以及碳封存監測與安全評估。進行碳封存場址調查，建議先進行地表下地質條件評估，再進行地表環境分析（如排放源位置、保護區等）。地表下評估主要為探明二氧化碳封存容量與合理的注入率、二氧化碳被穩定有效封存的能力、二氧化碳封存層與蓋層壓力、潛在斷層或裂隙的空間分布、場址及附近之地震與斷層活動性及二氧化碳注入時是否會誘發地震或斷層錯動、二氧化碳儲集層的水力動力系統、封存場址於二氧化碳注入期間與灌注後之監測潛力、遺留井對封存有效性的影響程度等。

由於地質封存風險相關之國際標準已建立，並且各國開發商轉案例也已有實場應用，建議本土方法學以國際標準為方法學之基礎與原則，參考國際場址開發與管理之作法，根據本土環境的需求進行適合各個場址的風險評估，並同時建立監測計畫與溝通諮詢管道，定期滾動式修正風險管理計畫。

我國並無實際碳封存場址之灌注監測實例，未來應如國科會等^[28]所建議的，鏈結國際機構及企業，提升我國 CCUS 研發能量與培育國際人才；鏈結國外技術及經驗，評估引介來臺合作示範驗證。

CCUS 社會溝通及國家級碳封存試驗場暨教育館建置

於 2012 ~ 2013 年，台灣中油公司曾於枯竭的苗栗

永如山天然氣田，灌注 300 公噸二氧化碳於 3,200 公尺深的打鹿砂層中，進行枯竭氣田天然氣增產（CO₂-EGR）及二氧化碳地質封存試驗計畫，後因媒體負面報導及民眾疑慮，導致試驗計畫終止。此例顯明在進行碳封存之前，取得公眾信任是當務之急。建議未來任何碳封存場址之開發，應進行公眾參與碳捕存溝通，透過公眾參與及協商意見回饋，增進利害關係人了解碳捕存議題，並期以獲得支持。有效傳達正確資訊利害關係人，同時持續取得問題方向，進而引導後續政策與主管機關工作推動方向。

為確保封存於地下的二氧化碳能安全、長期的駐留於地下並與大氣隔離，也不影響環境。需有完整的封存場址安全及風險評估、輸送管線安全評估、二氧化碳注儲的量測、監測與驗證等。雖然國外多有相應的法規以及商轉成功的碳封存場址可供參考。前述的場址評估與技術的建立，需要透過本土試驗計畫，以驗證封存的安全性及技術可行性。建議由環境部主導，經濟部、國科會參與，邀請地方政府與企業，鏈結國際機構與企業，建置國家級碳封存試驗場暨教育館。此封存試驗場暨教育館可驗證碳封存灌注與監測等各項技術及安全性，成為碳封存法規制定之參考，也可成為民眾及社會溝通場域。透過碳捕存教育館的設置，增進社會及利害關係人了解碳捕存議題，化解民眾疑慮。

結論

本文討論二氧化碳地質封存在我國邁向「2050 淨零排放」的關鍵角色以及在布建 CCUS 過程中可能面對的挑戰與機會。根據國發會等^[4]之規劃，預計我國在 2050 年時，再生能源發電量占比需達 60% ~ 70%，在無法去碳的電力與非電力所產生的二氧化碳，於 2050 年時仍達到每年排放約 40.2 百萬噸。若要達到 2050 淨零排放，必須使用 CCUS 技術，將此年排放約 40.2 百萬噸的二氧化碳進行捕捉利用及封存才能達到目標，完成淨零最後一哩路。

我國盆地尺度之二氧化碳地質封存量可達約 418 億噸，遠超過政府規劃至 2050 年時，至少須封存約 5 億噸之封存量。若考慮碳封存場址鄰近二氧化碳主要排放源及較穩定之地質區，以桃園、台中彰化雲林等區之濱海區與近岸之鹽水層封存為首選。

然而，在我國在初期布建 CCUS 減碳之際，仍然面對政府利用 CCUS 技術減碳之企圖心與決心不足、技術

成熟度不足、經濟成本過高以及社會接受度有待提升等挑戰。對於以上挑戰，本文提出下列建議：

1. 政府利用 CCUS 技術減碳決心與企圖心不足：政府應提出明確的國家 2025 ~ 2050 碳封存規劃及相關配套措施，展現利用 CCUS 減碳企圖心。
2. 碳封存技術發展與國際鏈結：我國並無實際碳封存場址之灌注監測實例，未來應如國科會等^[4]所建議，鏈結國際機構及企業，提升我國 CCUS 研發能量與培育國際人才；鏈結國外技術及經驗，評估引入來臺合作示範驗證。
3. 經濟誘因輔導企業進行 CCUS：政府可施行財稅誘因，輔導並鼓勵企業利用碳捕存減碳。
4. 國家級碳封存試驗場暨教育館建置：國家級封存試驗場暨教育館可驗證碳封存灌注與監測等各項技術及安全性，鏈結國際，成為碳封存法規制定之參考，也可成為民眾及社會溝通場域。

我國具有巨量的碳封存潛能，在政府適當地規劃與推動下，應可布建大量 CCUS 場址，安全地封存二氧化碳，利用 CCUS 技術達到國發會等^[4]所訂下的減碳目標。

參考文獻

1. IPCC (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee, H., Romero, J. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 184pp, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.
2. UNECE (2021). *Technology Brief: Carbon Capture, Use and Storage (CCUS)*. 27pp.
3. Global CCS Institute (2021). *Global Status of CCS 2021*, 79pp.
4. 國家發展委員會、行政院環境保護署、經濟部、科技部、交通部、內政部、行政院農業委員會、金融監督管理委員會 (2022)，臺灣 2050 淨零排放路徑及策略總說明，共 80 頁。
5. IEA (2021). *Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector*. International Energy Agency, 222pp.
6. 環境保護署 (2023)，中華民國國家溫室氣體排放清冊報告，行政院環境保護署，共 273 頁。
7. 境部事業溫室氣體排放量資訊平台 (2021) URL: https://ghgregistry.moenv.gov.tw/epa_ghg/Accession/PublicInformation.aspx
8. 林啟文、張徽正、盧詩丁、石同生、黃文正 (2000)，臺灣活動斷層概論，五十萬分之一臺灣活動斷層分布圖說明書，第二版。經濟部中央地質調查所特刊，第 13 號，共 122 頁。
9. 呂明達、宣大衡、黃雲津、范政暉 (2008)，台灣陸上二氧化碳地質封存潛能評估，礦冶，第 52 卷，第 3 期，第 154-161 頁。
10. Lin, A.T., Watts, A.B., and Hesselbo, S.P. (2003). "Cenozoic stratigraphy and subsidence history of the South China Sea margin in the Taiwan region." *Basin Research*, 15(4), 453-478.
11. 林殿順、楊健男、李科賢、譚志豪、劉浙仁、邵國士、王順民、李易叡、俞旗文、冀樹勇、左峻德、陳彥豪、鄭貞怡、馬雲亭、林立夫、陳慶馨、丁桓展、劉文惠 (2014)，台灣二氧化碳地質封存地質圖集，能源國家型科技計畫淨煤捕碳與儲碳主軸專案計畫，行政院國家科學委員會，共 36 頁。

12. 林殿順 (2010)，「台灣二氧化碳地質封存潛能及安全性」，經濟前瞻，第 132 期，第 93-97 頁。
13. 林殿順、陳洲生、董家鈞 (2007)，台灣沉積岩層地質封存潛能資料研析與評估，工業技術研究院經濟部能源科技研究發展計畫分包研究期末報告，共 76 頁。
14. 林殿順、陳州生、董家鈞 (2008)，台灣西南部沉積岩層資料蒐集分析，工業技術研究院經濟部能源科技研究發展計畫分包研究期末報告，共 82 頁。
15. 林殿順、陳州生、董家鈞 (2009)，二氧化碳地質封存場址特性調查技術建立與試作，工業技術研究院經濟部能源科技研究發展計畫分包研究期末報告，共 118 頁。
16. 財團法人中興工程顧問社 (2009)，二氧化碳地下封存地質資料庫建置與候選場址評選計畫，台灣電力公司委託研究期末報告 (採購案號：PDD-EGS-970303)。
17. 財團法人中興工程顧問社 (2011)，二氧化碳地質封存試驗場址調查規劃與研究，台灣電力公司委託研究期末報告採購案號：R0159900001，共 299 頁。
18. 許樹坤、林殿順、王乾盈、董家鈞、楊耿明、林再興、黃蕙珠 (2010)，台灣二氧化碳地質封存研究 (I)，國家科學委員會專題研究計畫期末報告，共 130 頁。
19. 許樹坤、林殿順、王乾盈、李明旭、楊耿明、林再興、黃蕙珠、洪日豪 (2011)，台灣二氧化碳地質封存研究 (II)，國家科學委員會專題研究計畫期中報告，共 24 頁。
20. 許樹坤、林殿順、王乾盈、李明旭、楊耿明、林再興、黃蕙珠、洪日豪 (2012)，台灣二氧化碳地質封存研究 (III)，國家科學委員會專題研究計畫期末報告，共 90 頁。
21. 林殿順、田永銘、王乾盈、林慶偉、楊耿明、簡錦樹、洪日豪、劉台生、謝秉志、林靜怡、黃蕙珠、林再興、倪春發 (2013)，台灣二氧化碳地質封存研究暨先導試驗場建置及整合技術開發 (I)，科技部專題研究計畫期末報告，共 183 頁。
22. 楊耿明、簡錦樹、謝秉志、饒瑞鈞、洪日豪、林殿順、王乾盈、倪春發 (2014)，台灣中北部沿海地區 CO₂ 封存技術及注儲先導試驗，科技部專題研究計畫期末報告，共 202 頁。
23. 林殿順、王乾盈、許樹坤、倪春發、饒瑞鈞、謝秉志、楊耿明 (2016)，台灣中部陸海域之二氧化碳地質封存潛在場址調查及碳封存發展規劃 (I)，科技部專題研究計畫期末報告，共 229 頁。
24. 林殿順、王乾盈、許樹坤、倪春發、饒瑞鈞、謝秉志、楊耿明 (2017)，台灣中部陸海域之二氧化碳地質封存潛在場址調查及碳封存發展規劃 (I)，科技部專題研究計畫期末報告，共 229 頁。
25. 財團法人中興工程顧問社 (2014)，二氧化碳地質封存先導試驗場址地質調查及技術研發 (一) 完成報告，台灣電力公司委託研究期末報告採購案號：R0150000001，共 558 頁。
26. Goodman, A., Hakala, A., Bromhal, G., Deel, D., Rodosta, T., Frailey, S., Small, M., Allen, D., Romanov, V., Fazio, J., Huerta, N., McIntyre, D., Kutchko, B., and Guthrie, G. (2011). "U.S. DOE methodology for the development of geologic storage potential for carbon dioxide at the national and regional scale." *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 5, 952-965.
27. 呂慶慧、陳俊佑、李伯亨、楊雅梅、鄭如琇、潘冠倫、彭毓之、張嘉元、張家瑄 (2023)，碳捕存技術 (CCS) 地質封存潛能評估及環境建構完成報告，台灣電力股份有限公司 111 年度研究計畫期末報告 (TPC-546-2517-1009)，共 325 頁。
28. 國科會、經濟部、環保署 (2023)，臺灣 2050 淨零轉型「碳捕捉利用及封存」關鍵戰略行動計畫，共 22 頁。
29. 台灣電力股份有限公司 (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) (修訂本)，共 190 頁。
30. 台灣中油公司 (2023)，鐵砧山地區天然氣注、產氣井開發計畫環境影響說明書第四次變更內容對照表，共 89 頁。

