

能源國家型淨煤主軸專案計畫
Clean Coal Master Project

台灣二氧化碳地質封存潛能地圖集

**Taiwan Atlas of Carbon Dioxide Geological
Storage Potential Capacity**

中華民國 103 年 3 月

作者群

中央大學

林殿順、楊健男、李科豎

財團法人中興工程顧問社

邵國士、王順民、李易叡、譚志豪、劉浙仁、俞旗文、冀樹勇

財團法人臺灣經濟研究院

左峻德、陳彥豪、鄭貞怡、馬雲亭

淨煤主軸計畫作業室

林立夫、陳慶馨、丁桓展、林孫美、劉文惠

台灣二氧化碳地質封存潛能地圖集

摘要

為配合我國節能減碳政策，如行政院「國家節能減碳總計畫」所揭示：全國二氧化碳排放減量目標，於 2020 年回到 2005 年排放量，並於 2025 年回到 2000 年排放量的水準，環保署經評估節流方案、擴大天然氣使用、發展再生能源、核能發電、提升發電效率與碳權經營等措施後，仍需要借助其他減碳手段來達成目標。若參考國際能源署(IEA)之評估成果，全球為落實京都議定書的減碳協議，二氧化碳捕獲與封存(Carbon dioxide Capture and Storage, CCS)技術於全球總減碳量中必須貢獻 14% 的減碳比例。

反觀國內的自然環境條件，台灣西部地區具有廣大的沉積盆地，其沉積層序以厚層砂岩與頁岩交替出現，可從中選出適當深度與範圍的深部鹽水層，或針對油氣田和封閉構造，進行二氧化碳地質封存作業，若參考國際間慣用的封存量評估公式進行台灣廣域的二氧化碳封存潛能評估，我國深部鹽水層具備的封存潛能約 459 億噸，油氣田與封閉構造則約可提供 28 億噸的封存量，相較於全台 2012 年總排碳量 2.5 億噸，我國封存環境可長期支撐 CCS 的發展。此外，我國主要的排碳源如火力電廠、石化廠等皆分布於西部沿海地區，可就近選擇適當的地質封存區位，減少對於二氧化碳輸送管線的依賴，有助於降低環境影響與建設成本。因此，台灣的自然環境與地理條件具有發展 CCS 的潛在優勢，可作為再生能源技術尚未成熟前的過渡性減碳措施。

本地圖集主要以上位角度提出台灣二氧化碳地質封存資源的全貌與相關資訊，可作為整體規劃 CCS 產業發展的參考，但對於個別 CCS 計畫而言，仍須依循封存場址評選的相關法規和技術導則規範，並透過場址特性調查取得完整現地參數資料，始能真正確保二氧化碳地質封存的完整性與安全。

目 錄

第一章 簡介.....	1
1.1 二氧化碳捕獲、封存與再利用技術簡介.....	1
1.2 國家節能減碳總計畫.....	2
1.3 碳封存的必要性.....	3
1.4 國內研究團隊與目標.....	7
1.5 技術導則發展.....	9
1.6 國際合作.....	10
1.7 適合碳封存之地質條件.....	11
1.8 封存潛能評估技術發展.....	14
1.9 碳封存資料庫與地理資訊系統.....	16
第二章 台灣的排碳源與地質封存環境.....	17
2.1 二氧化碳排放源.....	17
2.2 沉積盆地.....	20
第三章 台灣的封存潛能.....	23
3.1 油氣田與封閉構造.....	23
3.2 深部鹽水層.....	26
參考文獻	
附錄 二氧化碳地質封存潛能評估方法介紹	

表目錄

表 1.7-1	封存場址適宜性之關鍵指標	12
表 1.7-2	本二氧化碳地質封存條件指針	13
表 1.8-1	國內外二氧化碳封存量評估方法彙整	15
表 2.1-1	我國主要排碳源及排碳量彙整表	18
表 3.1-1	我國陸域已開採油氣田構造封存潛能	24
表 3.2-1	蒙地卡羅統計法評估全台二氧化碳封存量所用參數	29
表 3.2-2	台灣陸海域鹽水層二氧化碳地質封存量初估成果	30

圖目錄

圖 1.1-1	二氧化碳捕獲、封存與再利用	2
圖 1.2-1	國家節能減碳總計畫架構	3
圖 1.3-1	全球二氧化碳排放趨勢與各減碳方案效益探討	4
圖 1.3-2	台灣二氧化碳總排放量基線	5
圖 1.3-3	國家溫室氣體適當減緩行動減量目標與行動	6
圖 1.4-1	我國 CCS 技術發展之相關組織與架構	9
圖 1.7-1	良好之二氧化碳地質封存場址基準	12
圖 1.7-2	良好之二氧化碳地質封存場址示意圖	13
圖 1.7-3	陸域之地質封閉構造類型	14
圖 1.9-1	台灣碳封存資料庫系統架構	16
圖 2.1-1	台灣 2012 年各部門燃料燃燒 CO ₂ 排放量	17
圖 2.1-2	我國主要排碳源分布圖	19
圖 2.2-1	台灣西部平原及台灣海峽新生代沉積物厚度圖	21

圖 2.2-2	台灣西部地層及台灣海峽油氣生產層位	21
圖 3.1-1	我國陸域之油氣田與封閉構造分布圖	25
圖 3.2-1	我國深部鹽水層潛在封存範圍	27
圖 3.2-2	台灣陸海域二氧化碳封存區域估算及砂岩厚度分布圖	28

第一章 簡介

1.1 二氧化碳捕獲、封存與再利用技術簡介

二氧化碳捕獲、封存與再利用技術(Carbon Dioxide Capture, Storage and Utilization, CCS&U)技術主要是在能源或經濟生產過程中，先利用捕獲技術將化石燃料在燃燒前或燃燒後所產生的二氧化碳分離出來，經過純化後輸送至特定地點進行再利用或封存的處理過程與技術。

二氧化碳再利用的觀念其實早已存在日常生活，諸如碳酸飲料、乾冰、滅火器乃至於工業溶劑、清洗劑等應用皆是。惟目前的應用規模相對仍低，尚不足以解決龐大的減碳缺口。由於二氧化碳是熱力學上極為穩定之物質，若欲透過反應將二氧化碳大量轉化生成特定產物，勢必須額外輸入能量。以二氧化碳減量目的而言，輸入熱能或電能往往可能造成更多的二氧化碳排放。因此，若能以光能作為二氧化碳再利用反應之能量來源是最佳方式，其中以培育植物進行光合作用技術為其中重要代表，諸如綠藻養殖生質發電等應用。然而，植物光合作用轉化效率低，無法大規模應用於二氧化碳減量，仍為目前的技術瓶頸。關於二氧化碳的封存與再利用方式，請參考圖 1.1-1。

至於二氧化碳地質封存的原理則是將二氧化碳注入深度大於 800 公尺岩層，透過天然的地溫與地壓環境使二氧化碳處於超臨界流體狀態，停留於儲集層的孔隙裡，並透過構造封存、溶解封存、殘餘封存及礦化封存等機制使其永久封存於深部地層與大氣隔絕，可大規模降低二氧化碳排放量。國際間針對二氧化碳捕獲、運輸與封存等過程，在不同階段下，各技術在傳統石油工業之基礎上已有相當的發展規模及成熟度。例如提高原油採收(Enhanced Oil Recovery, EOR)、提高天然氣採收(Enhanced Gas Recovery, EGR)、提高煤層氣採收(Enhanced Coal bed Methane Recovery, ECBM)以及深部鹽水層等地質封存方式均已屬可行甚至為成熟市場的階段，故二氧化碳地質封存技術目前已是確實可行的大規模減碳方法。

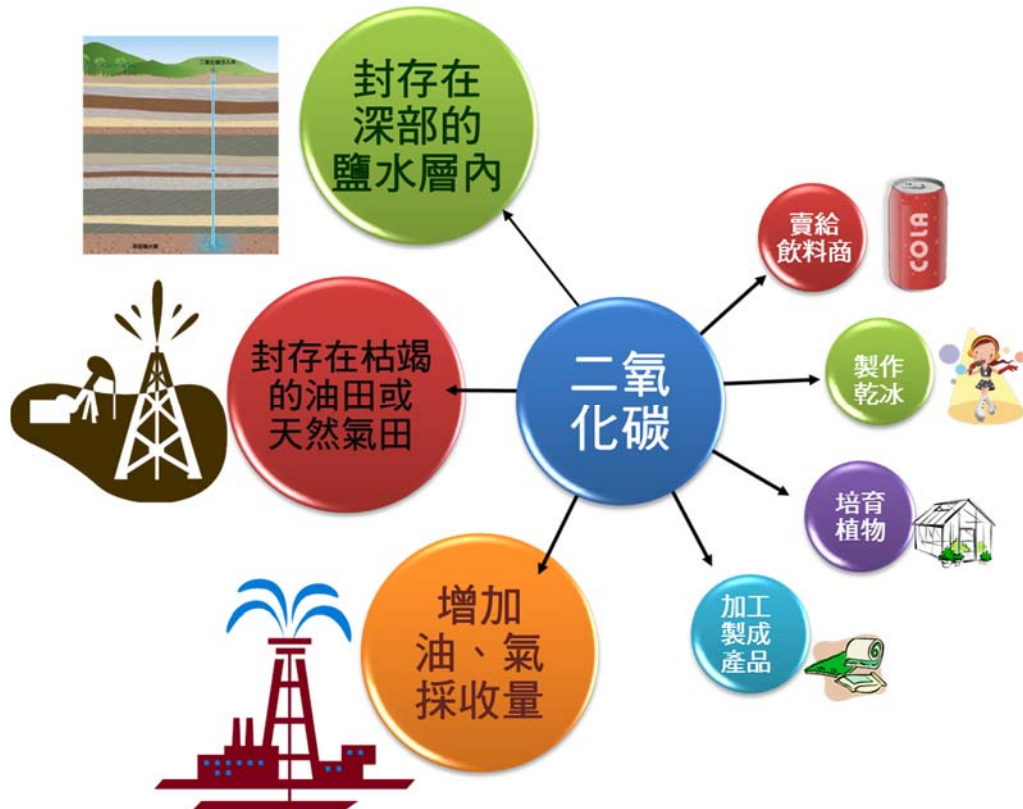


圖 1.1-1 二氧化碳捕獲、封存與再利用

1.2 國家節能減碳總計畫

隨著全球暖化問題日益嚴峻及傳統能源加速耗竭，世界主要國家多將「節能減碳」納為施政目標並全力發展低碳經濟。我國行政院特成立「行政院節能減碳推動會」綜整目前各級機關相關節能減碳計畫，規劃出我國「國家節能減碳總計畫」，訂定國家節能減碳總目標，加速落實各部門節能減碳策略措施並實踐分年目標，藉由政策全面引導低碳經濟發展，並形塑節能減碳社會。包括：

(一) 節能目標

未來 8 年每年提高能源效率 2% 以上，使能源密集度於 2015 年較 2005 年下降 20% 以上；並藉由技術突破及配套措施，2025 年下降 50% 以上。

(二) 減碳目標

全國二氧化碳排放減量，於 2020 年回到 2005 年排放量，於 2025 年回到 2000 年排放量。

「國家節能減碳總計畫」規劃了十大標竿方案，內含 35 項標竿型計畫以強化各方案的政策導向及執行主軸，如圖 1.2-1 所示。其中，由國科會負責執行推動之第七大標竿方案「擴張節能減碳科技能量」，其重點目標之一即為推動能源科技導入 CCS 技術。在此政策依據下，目前國內正積極發展二氧化碳捕獲、封存與再利用技術。

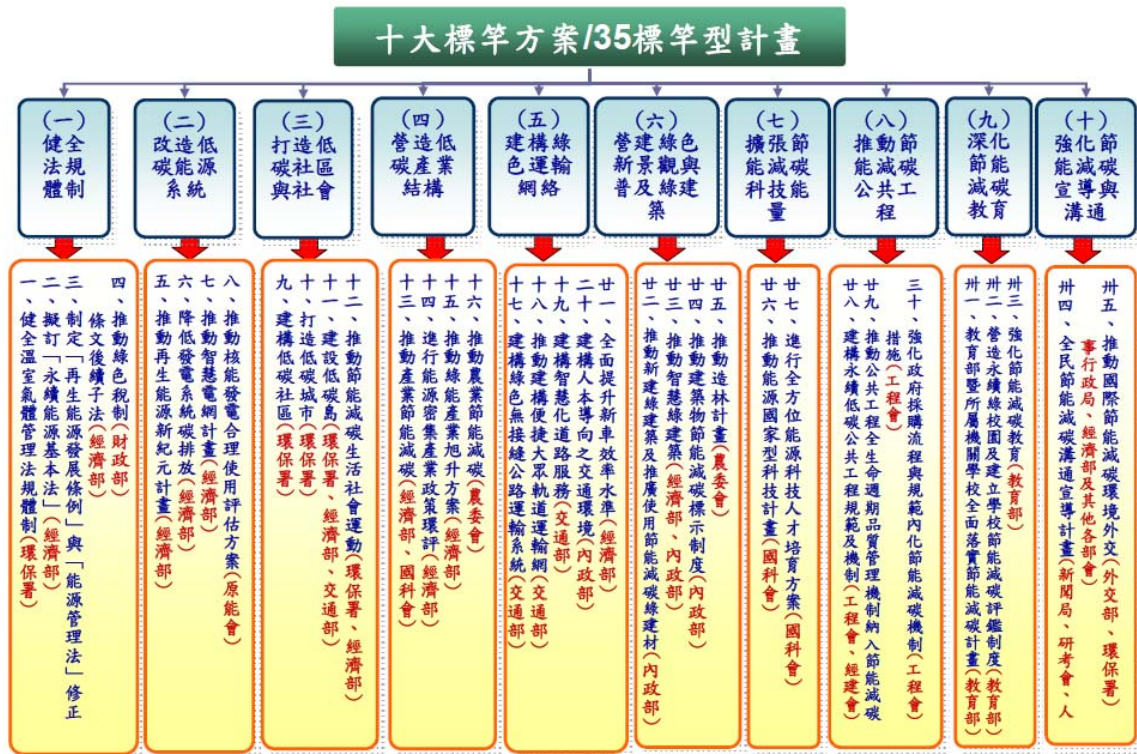


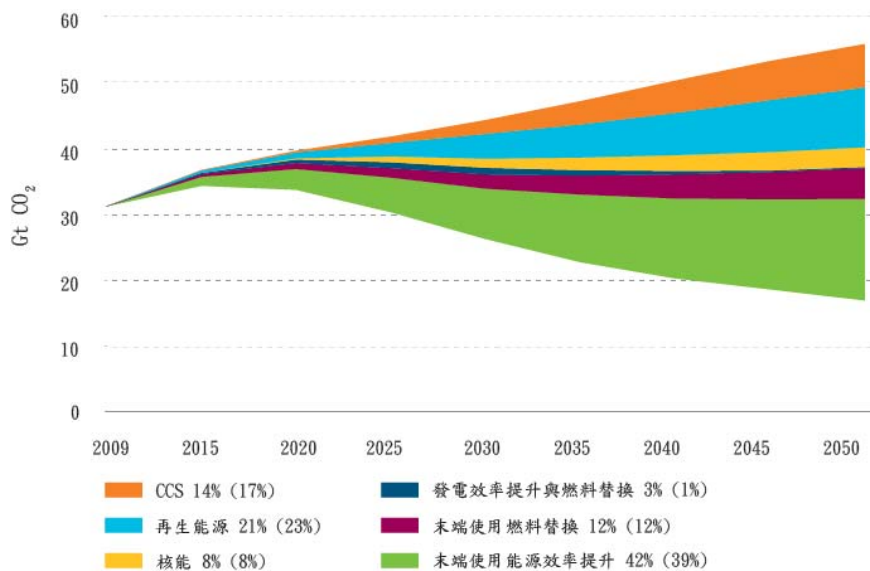
圖 1.2-1 國家節能減碳總計畫架構

1.3 碳封存的必要性

溫室效應與全球暖化密不可分，而二氧化碳是造成溫室效應最主要的氣體之一，其含量約佔溫室氣體比例之 55%。全球暖化之不利效應已於世界各地顯現，熱浪、酷寒、強降雨及乾旱等氣候極端異常現象陸續產生，造成生態平衡破壞、災害規模擴大且發生頻率增高。為因應全球氣候異常所帶來之災害，世界各國紛紛研擬溫室氣體減量目標。台灣雖非聯合國氣候變化綱要公約締約會員國，但預期將是公約後續階段的下一波管制對象。面臨此一國際趨勢，我國必須更積極投入減碳才能符合國際間對共同投入溫室氣體減量、對抗全球氣候變遷之期望，也可避免後續所可能衍生的經貿制裁。

依據 IEA 能源技術展望(2012)評估結果，目前較可行的減碳方案預期可於 2050 年將全球二氧化碳排放量由基線情境(Baseline scenario)的 570 億噸降至 180 億噸。另明確指出各種減碳方案中，以二氧化碳捕獲與封存(CCS)為單一技術方案中減碳貢獻最高者，可達 14%，如圖 1.3-1 所示。雖然預期減碳後全球二氧化碳排放量可降至 2005 年排放量的一半，但仍不足以長期穩定的控制全球均溫增幅低於 2°C。因此即使減碳技術已確實可行，亦需要採行更積極的政策行動及投入更多的經費資源方能實現。

此外，2011 年日本福島核災後，全球對於核能安全信心重創，國際間核能發電計畫普遍受阻，既有核電廠存廢爭論再起。日本在福島核災後全國 54 座核子反應爐紛紛停機進行定期檢查，一度幾乎進入無核電時代；德國則已宣布將於 2022 年全面廢止核電；我國亦為加速落實非核家園政策而有核一、核二、核三廠將不再延役的穩健減核政策主張，此舉必將造成原本核能對減碳之貢獻形成缺口。此外，目前國際原油價格持續攀高，布蘭特原油價格在每桶 100 元美金附近盤旋已久，而我國液化天然氣仰賴進口，採購成本仍偏高，故預期未來煤炭的使用勢必持續成長。

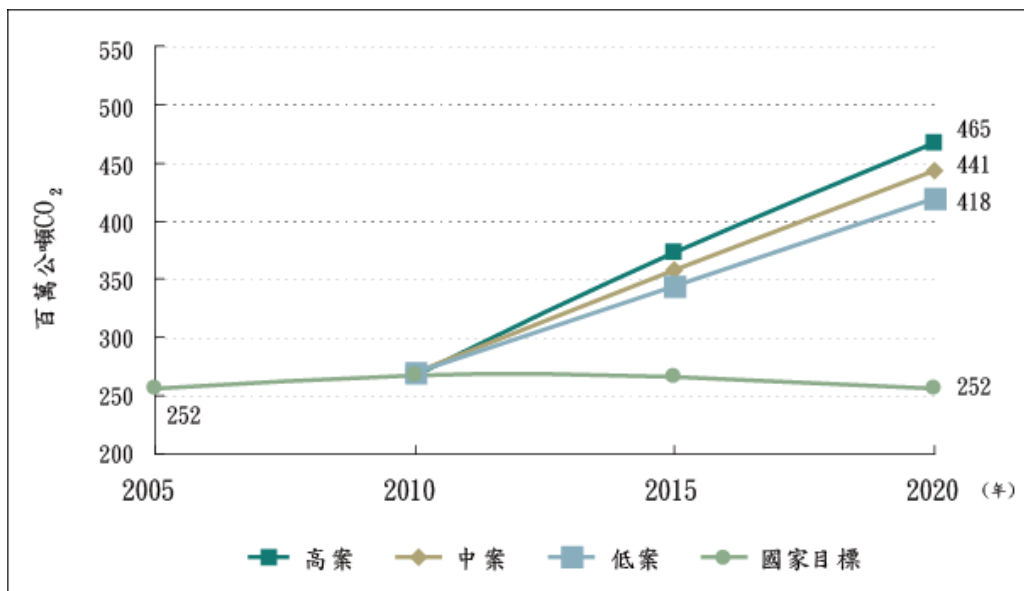


資料來源：IEA 2012。
註：百分比表示累積至2050的減碳貢獻度；而括號內的百分比則代表2050當年的減碳貢獻度。

(IEA能源技術展望，2012)

圖 1.3-1 全球二氧化碳排放趨勢與各減碳方案效益探討

行政院為推動節能減碳，於 97 年 6 月 5 日核定「永續能源政策綱領」，同年 9 月 4 日通過「永續能源政策綱領－節能減碳行動方案」。續於 98 年底成立「行政院節能減碳推動會」，並通過《國家節能減碳總計畫》及其十大標竿方案、35 項標竿型計畫，據以推動我國節能減碳方案。根據《國家節能減碳總計畫》訂定之減碳目標：「全國二氧化碳排放減量，於 2020 年回到 2005 年排放量，於 2025 年回到 2000 年排放量」。我國環保署自 2009 年 12 月丹麥哥本哈根會議後，邀集產官學研代表及我國溫室氣體排放量模擬計算相關智庫團隊，召開八場次「我國溫室氣體基線排放量討論會議」，就模擬我國 2020 年二氧化碳基線(Business as Usual, BAU)排放量及採行措施的量化減量貢獻進行分析與研商。若以財團法人工業技術研究院 MARKAL 模型(MARKet Allocation Model)，配合清華大學及相關部會假設條件，視低、中、高經濟成長率不同，計算我國 2020 年燃料燃燒二氧化碳基線排放量，將介於 418~465 百萬公噸之間(詳圖 1.3-2)，若於 2020 年要回到 2005 年排放量，我國的減碳需求介於 166~213 百萬公噸之間。



(行政院環保署，2011)

圖 1.3-2 台灣二氧化碳總排放量基線

為達成減碳目標，環保署匯集行政院各相關部會減量措施，若能落實永續能源政策綱領之「能源密集度每年下降 2%」預期成效時，於節流項目將貢獻

減量 74 百萬噸，再加上天然氣、再生能源、核能發電、發電效率提升與碳權經營等減碳手段後，於 2020 年可將總排放量降低至 305 百萬噸，距離減碳目標的 252 百萬噸，仍需要借助其他減碳措施來達成(詳圖 1.3-3)，目前「其他措施」占總減碳量約 25%，若考量 IEA 的評估成果(詳圖 1.3-1)，CCS 應納入我國減碳的重要考慮選項中。

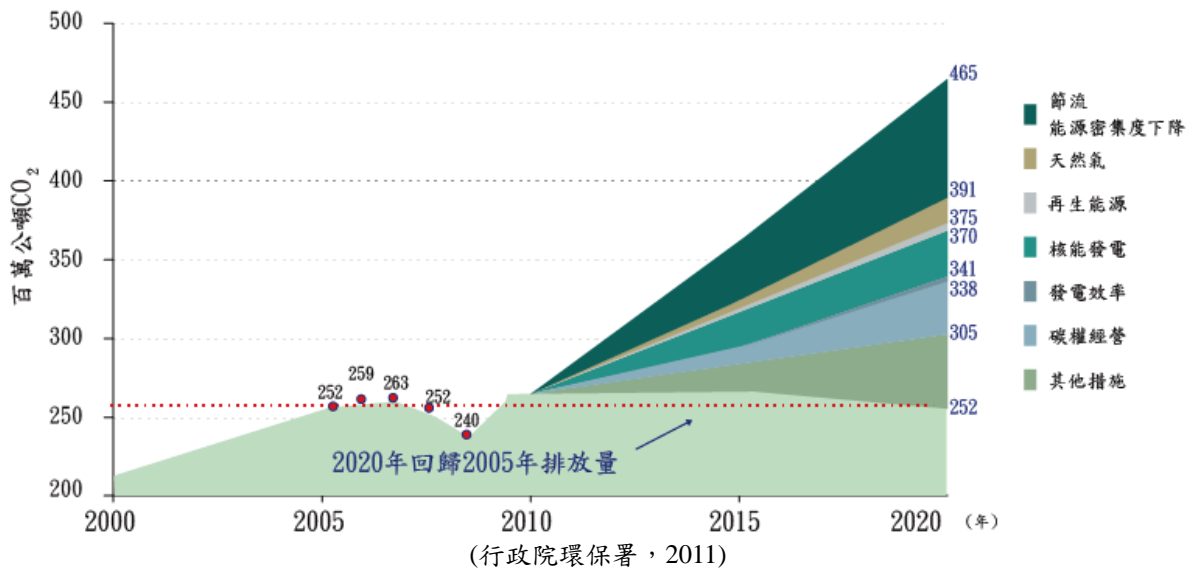


圖 1.3-3 國家溫室氣體適當減緩行動減量目標與行動

綜觀國內減碳技術現況，再生能源之太陽能及風能的推廣利用除穩定性受限，無法作為基載能源外，相關儲能技術亦仍待突破；至於地熱發電、潮汐發電之實務應用研究目前仍在進行；天然氣水合物開採技術仍有待突破；而提高能源利用效率等技術亦仍處研發萌芽階段，短期內均恐無法補足減碳缺口。此外，2011 年日本福島核災後，核能是否繼續沿用已成為爭議話題。國際間德國已宣布將於 2022 年廢止核電；我國亦有穩健減核政策主張，加上目前國際原油價格居高不下、我國液化天然氣採購成本仍偏高等條件下，須另覓穩定且有效的減碳方案。

我國具有得天獨厚的地理位置與地質條件，根據學者估計，台灣西部近岸 50 公里範圍之深部鹽水層封存潛能初估可達 459 億噸(林殿順, 2013)，若以特定封存場址保守觀之，則全台海域、陸域潛在封存場址之總封存量初估亦可達 200 億噸。若以商轉規模平均每年封存 1.0 億噸概估，則封存年限可達 200 年，

若能適當開發，已遠超過我國至 2200 年之減碳需求，若能適當規劃運用，可迅速補足我國減碳缺口。

二氧化碳地質封存技術可提供較穩定的潔淨化石能源，且該技術業已由聯合國氣候變遷綱要公約 (UNFCCC) 於 2011 年第 17 次締約國大會 (COP17/CMP.7) 納入清潔發展機制 (CDM)，代表該技術之成效與安全性已獲國際多數國家認可，為兼具安全與減碳應用價值之重要技術。

1.4 國內研究團隊與目標

目前國內已有相關單位已針對 CCS 展開先期基礎研究，包括經濟部 CCS 研發聯盟、CCS 策略聯盟及國科會「能源國家型科技計畫—淨煤、捕碳與儲碳主軸專案計畫」(以下簡稱淨煤主軸計畫)。組織架構如圖 1.4-1 所示。其中，經濟部 CCS 研發聯盟主要成員包括：經濟部、能源局、中央地質調查所、台電公司、台灣中油公司、中鋼公司等單位。初期規劃於 2012~2014 年建立小規模 CCS 示範試驗場，建立 1 噸/小時的燃燒後 CO₂ 捕獲先導型試驗廠、每年 0.1~1 萬噸注儲封存試驗場；於 2016~2018 年建立中尺度 CCS 示範試驗場，建立 10 噸/小時的燃燒後 CO₂ 捕獲試驗廠、每年 1~10 萬噸封存試驗場；於 2020~2021 年完成一座全載商轉火力發電機組 CO₂ 捕獲之規劃並建立大尺度地質封存場(每年 10~100 萬噸)；最終於 2025 年起逐步達成大規模 CCS 商轉。

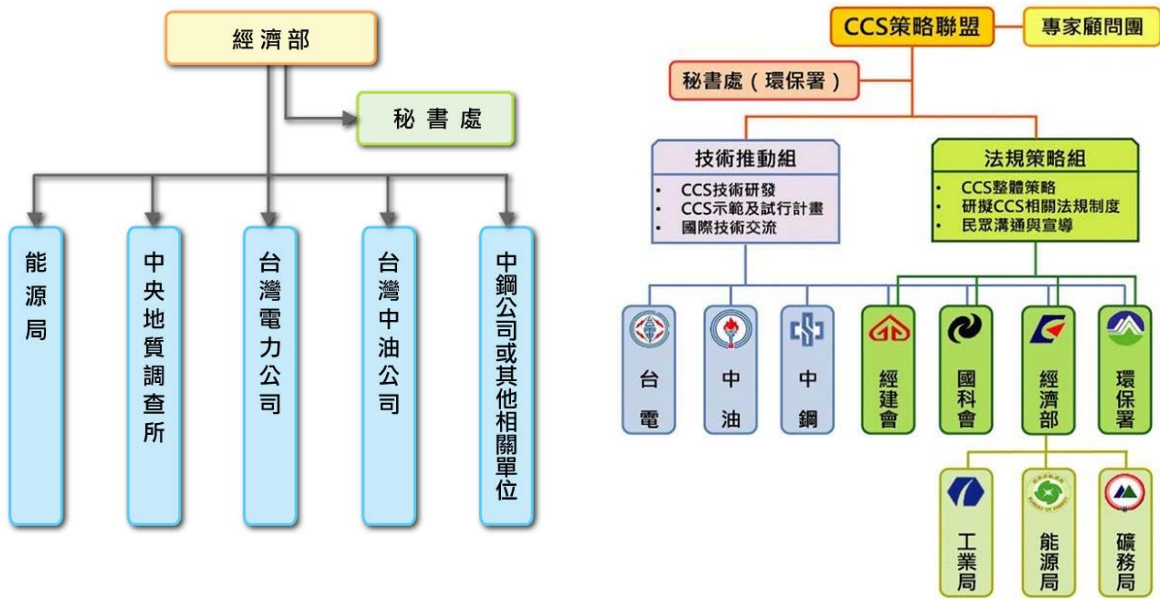
目前能源局委託工業技術研究院進行二氧化碳捕獲示範廠的建置，同時針對地質封存技術進行研發，包括封存潛能與場址評估技術及監測評估技術。地質封存示範計畫則由台電及中油負責，台電主要目標為鹽水層封存，而中油主要目標則為構造封存。

環保署 CCS 策略聯盟由產官學研各界共同組成，主要成員包括：經建會、國科會、能源局、工業局、礦務局、台灣公司、中油公司及中鋼公司等。初期規劃於 2015 年開始執行 1 萬噸封存量的小規模試行計畫開始，逐步擴大示範計畫，最終期望於 2020 年達成商業運轉目標。CCS 策略聯盟著重在 CCS 相關政策法規的研擬及公眾宣導方面。

國科會淨煤主軸計畫由產官學研共同組成，發展策略以「技術產業化」為中心思想，結合產、學、研各界資源，由國科會主導共同規劃二氧化碳捕獲與

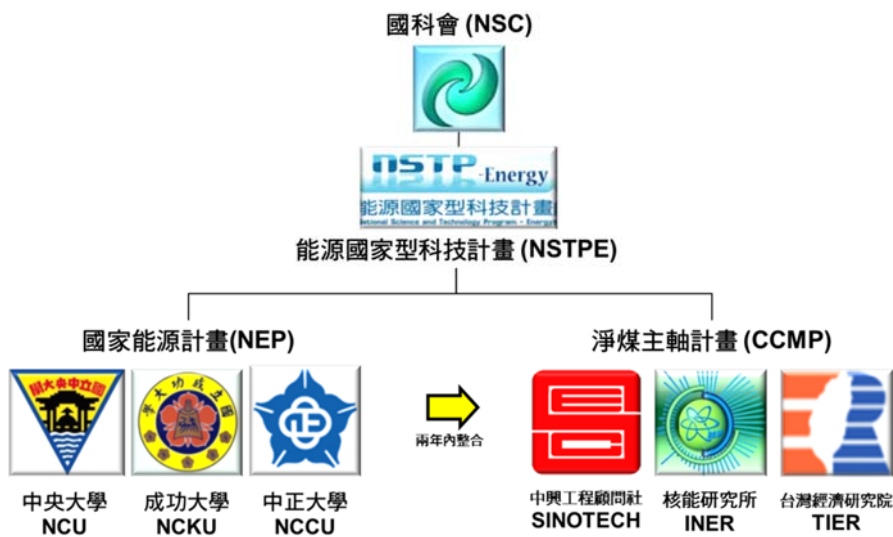
封存及再利用(CCS&U)之技術規範及產業化策略，並分別考量未來碳交易價格為中案(30 美元/噸 CO₂)與高案(60 美元/噸 CO₂)之情境下，篩選中期(2020 年後)與長期(2040 年後)具有成本競爭力的 CCS 技術。短期藉助產業引進大型發電系統之機會，建立淨煤系統設計能力，並發展二氧化碳捕獲、封存監測、風險評估之關鍵技術，進而啟動國內 CCS 示範計畫，同時籌組 CCS 產業聚落聯誼會，透過產、學、研之合作力量，推動政府將 CCS 納入減碳及低碳之相關政策，並在行政院層級下成立 CCS 任務小組，協助示範計畫的推動執行。中期則推動「高效率分散型發電系統」之先導試驗，落實技術擴散至產業之規劃，篩選「二氧化碳大規模再利用」在我國較具可行性之技術及推動先導試驗。長期則佈局「零排放高效率分散型發電系統」核心技術、加強微藻固碳、海洋擴散與封存之基礎研究、探討我國二氧化碳大規模再利用之可行性、結合產業界，建置「零排放高效率分散型發電系統」及「二氧化碳大規模再利用」之示範設施。

目前國內的 CCS 計畫仍處於起步階段，尚未有任何示範計畫運轉，惟中油與台電等公司正積極嘗試發展 CO₂ 地質封存場址，分別於苗栗永和山已開採油氣田和彰化彰濱工業區進行 CO₂ 封存的先期研究與地質探勘等工作，其中中油公司乃以購買 CO₂ 的方式，於永和山進行少量的灌注試驗，用以取得儲存層的特性條件並作為 CO₂ 移棲模擬研究所需的輸入參數；而台電公司現階段以中臺灣桂竹林錦水系統為目標，刻正於彰濱工業區內進行深鑽調查，預計鑽探深度為 3,000 m，調查成果可提供地質構造的詳細垂直分層資訊，以及各分層的物化性質，增進對於地質封存系統的了解。



(a) 經濟部 CCS 研發聯盟

(b) 環保署 CCS 策略聯盟



(c) 國科會能源國家型淨煤主軸計畫

圖 1.4-1 我國 CCS 技術發展之相關組織與架構

1.5 技術導則發展

國科會淨煤主軸計畫為發展國內二氧化碳封存技術，同時確保二氧化碳封存安全，遂參考歐盟指令集(EU Directives)、加拿大標準(CSA Z741)、挪威船級社(Det Norske Veritas)CCS 導則，針對開發二氧化碳封存場址的完整生命週期，制定適用於國內的封存場址評選、監測(量測)與驗證、風險評估、安全

運轉等作業導則，主要目標為提供開發單位一致的作業準繩，確保健康、安全與環境等風險符合場址運轉要求。

於場址評選方面，主要考量國內的地質環境條件，提出需要進行場址特性評估的項目，以及為確保封存安全所需進行的評估工作，其中包含資料蒐集與調查、風險評估與不確定性分析、選擇基準與選擇計畫的建立、和二氧化碳移棲模擬等工作。選擇適當的封存場址可以有效降低風險，增加安全灌注作業的可操作範圍，為二氧化碳封存場址生命週期中最重要的一環。於安全監測方面，將說明監測計畫的架構以及建立程序，主要活動包括：確認監測目標、篩選可行技術、研擬監測計畫、核實與文件登載。監測的目的除確保封存完整性外，亦可用以提升模式模擬預測能力，而有關封存量的量測與核實，亦為碳權交易的基礎工作。於風險評估方面，乃針對人體健康、設施安全與環境生態進行二氧化碳影響的機率與後果分析，主要作業流程包含風險辨識、風險分析與風險評量等程序，依據潛在的風險情境提出量化的風險評估結果，並比較可接受風險基準，以決定該風險是否須進一步處置。而於安全運轉方面，主要針對二氧化碳特性，提出風險管理、井體設施、管線系統所需之注意事項，涵蓋範圍包括設計、建造、運轉與維護等計畫階段，並針對場址關閉與關場後的長期監管工作，研提建議的作法。

目前技術導則仍在修訂階段，導則草案完成後將進行第三方公正單位的專業審查，藉以增加導則的可證與信心，後續將提供環保署參考使用，以作好技術安全管制的準備。

1.6 國際合作

我國為發展淨煤技術，持續與美國能源部(DOE)所轄之國家實驗室 NETL(National Energy Technology Laboratory)尋求技術合作，NETL 具有二氧化碳地質封存場址特性評估、監測與風險評估等多重能量，與美國區域夥伴聯盟(Regional Carbon Sequestration Partnership)亦有密切合作關係。2012 年經濟部能源局、工研院與美國能源部 NETL 相關人員密切洽談後達成共識，將以注儲及封存監測(Monitoring)、場址特性評估(Site Characterization)以及風險評估(Risk Assessment)三大主軸方向推動合作。2013 年由我國駐美國台北經濟文

化代表處(Taipei Economic and Cultural Representative Office in the United States)與美國在台協會(American Institute in Taiwan)在「淨煤與先進電力系統技術合作協定」(Clean Coal and Advanced Power Systems Technologies)框架下，正式簽訂「第一號協定執行安排」(Implementing Arrangement #1)，預計於 2014 年開始展開實質合作，初期合作方式包括互訪考察及人員訓練，並規劃邀請經濟部 CCS 研發聯盟成員共同組團赴美進行大規模 CCS 示範計畫考察。透過台美國際合作，可望將美方深耕已久的地質封存技術及經驗引入國內，除了厚植技術能量之外，亦可確保技術與國際接軌，期能提昇本土技術可靠度及民眾接受度，並能開啟後續擴大與美國區域夥伴聯盟的長期合作管道。

此外，淨煤主軸計畫為發展風險評估技術，乃與挪威船級社(Det Norske Veritas, DNV)合作，規劃一處示範計畫場址，DNV 為一獨立自主之基金會，其目標在於保障海上或近岸之生命、財產和環境安全，屬國際級從事分級、認證與風險管理之專業機構。與 DNV 合作規劃過程中乃以本土參數為主，不足處則參考國際相關案例，以商轉級的作業條件與需求，完成封存場址灌注系統與井體設施的配置與作業流程圖。主軸計畫則依據預擬的示範計畫場址，完成健康、安全與環境之二氧化碳洩漏風險評估，評估成果報告將送交挪威船級社審核，藉由審核與修定程序逐步完備二氧化碳地質封存的風險分析技術與流程，最終核定報告將出版後作為國內進行 CCS 風險評估工作的重要參考，而所建立之量化風險數據將提供予民眾磋商使用並作為教育宣導的素材。

1.7 適合碳封存之地質條件

根據政府間氣候變遷會議(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)之建議，一般而言，若規劃以地質構造作為媒介進行二氧化碳封存，良好之封存地層所需具備的條件包含：適合的沉積岩厚度、具圍束作用的蓋層、受構造運動影響少、具相襯之地層層序、緩慢固結岩化作用等(圖 1.7-1)。另外，目前國際間普遍使用之二氧化碳地質封存場址蓋層與儲集層之特性條件，係採用 Chadwick et al(2007)所提出之二氧化碳地質封存場址適宜性關鍵指標(表 1.7-1)及日本 RITE 機構所建議之適合日本進行二氧化碳地質封存之基本條件(表 1.7-2 所示)，以上述條件為基礎，IPCC 建議可進行二氧化碳封存之良

好封存場址包括：已開採之油氣田(地質封閉構造)、未具經濟價值之煤層、深部鹽水層等(圖 1.7-2)。以台灣地區而言，煤層普遍厚度較薄，因此不具二氧化碳封存價值，陸域之地質封閉構造及海域之深部鹽水層為較適合進行二氧化碳封存之模式。

二氧化碳地質封存場址選則基準-地質條件

二氧化碳封存場址地質特性



IPCC建議封存模式

- 已開採之油氣田
- 未具經濟價值之煤層
- 深部鹽水層

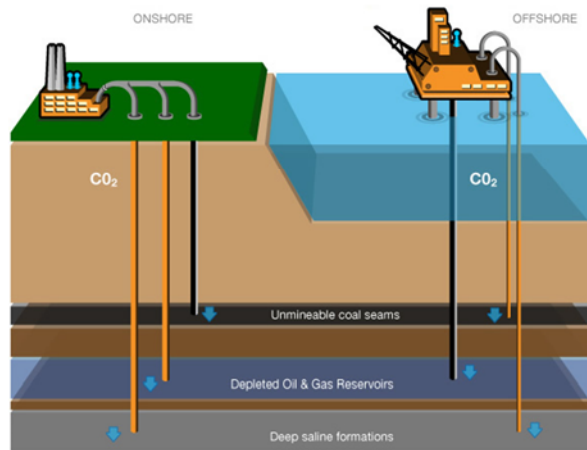


圖 1.7-1 良好之二氧化碳地質封存場址基準

表 1.7-1 封存場址適宜性之關鍵指標

(修改自 Chadwick et al., 2007)

蓋層特性		
評估項目	有利指標	不利指標
側向連續性	地層均勻，無斷層	側向變異性與斷層
厚度	> 100m	< 20m
儲集層特性		
評估項目	有利指標	不利指標
深度 D	1,000 m < D < 2,500 m	D < 800m 或 D > 2,500m
儲存層淨厚度	> 50 m	< 20m
孔隙率	> 20%	< 10%
滲透係數	> 500 mD	< 200 mD
鹽度	> 100 g/l	< 30 g/l

表 1.7-2 本二氧化碳地質封存條件指針

(修改自RITE報告，2003)

類別	岩石種類	孔隙率		滲透率	
蓋層	泥岩、頁岩	5% 以下		0.1 md 以下	
儲集層	砂岩、礫岩、 碳酸岩	優	20% 以上	優	100 md 以上
		良	15~20%	良	10~100 md
		可	10~15%	可	1~10 md
		差	5~10%	差	0.1~1 md
		不可	5% 以下	不可	0.1 md 以下

CARBON CAPTURE AND STORAGE (CCS)

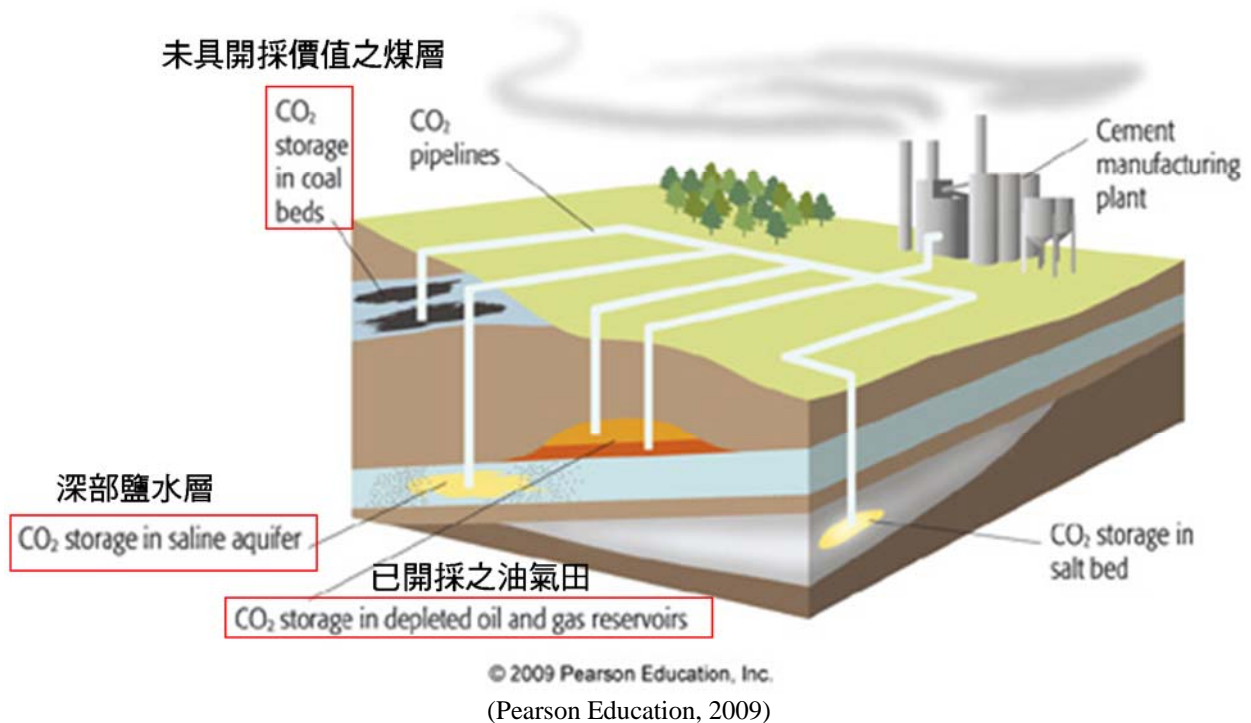
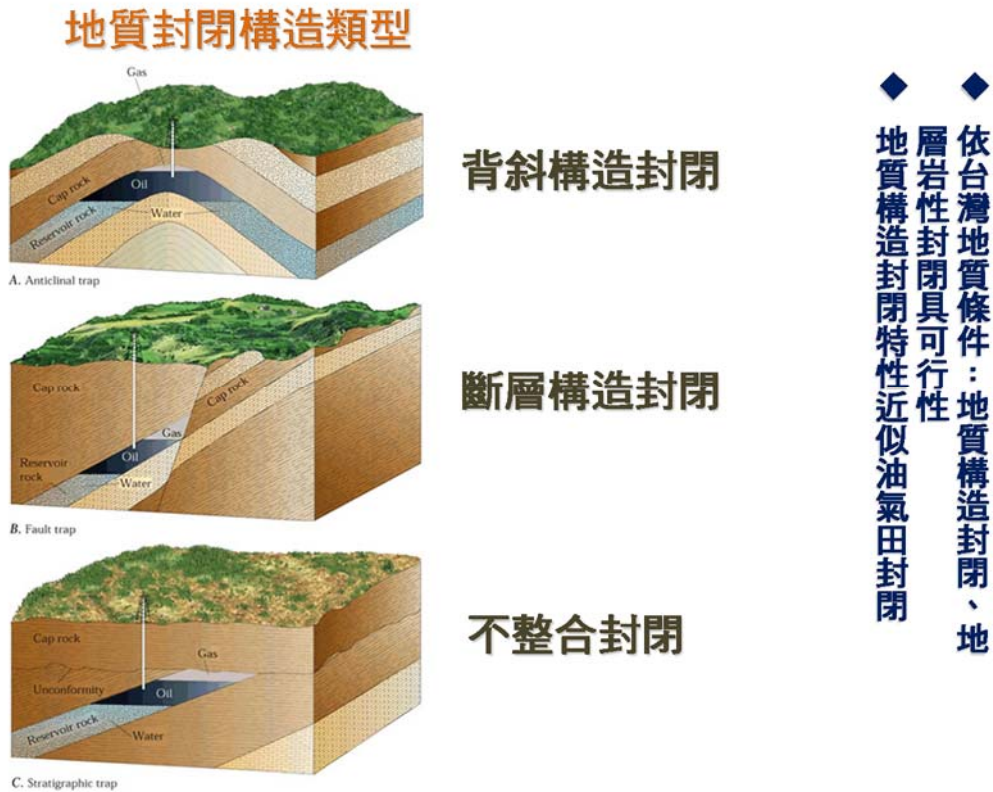


圖 1.7-2 良好之二氧化碳地質封存場址示意圖

陸域之地質封閉構造則可細分為背斜構造封閉、斷層構造封閉、不整合封閉等(圖 1.7-3)，主要由低孔隙率、低滲透率之蓋層搭配高孔隙、高滲透率之儲集層所共同形成的封閉構造，油氣田封存構造即為其一。台灣陸域油氣構造多分布在西部麓山帶，因為舊油氣田經過多年的探勘、開發及生產，已累積相當完整的地質、構造形貌、儲氣層及蓋層特性等資料，可行性及安全性均高，惟其封存量較海域深部鹽水層小，且地理位置與國內主要排碳源如：火力電廠、煉油廠或石化廠等多有段距離，後續運輸成本恐較高。至於海域深部鹽水層，

若存在蓋層的隔絕效果，再配合足夠的側向延展範圍及其他因素所形成的封閉效果，則具有較大的封存潛力，惟需要投入較多的資源進行地質特性調查與可行性評估。



(<http://www.oil-gas-news.com/mod/article/pic/>)

圖 1.7-3 陸域之地質封閉構造類型

1.8 封存潛能評估技術發展

我國具有優良的地質條件可封存二氧化碳，評估其封存量為執行二氧化碳地質封存計畫之重要步驟。針對前述的二氧化碳封存機制(即構造封存、水力封存、殘餘氣封存、溶解封存、礦化封存等)，我們可據以評估二氧化碳儲集層之封存潛能。這些封存機制中，於灌注期間(如灌注 20 年)礦化封存與溶解封存所能貢獻的比例較低，又二氧化碳灌注至地層中所引起之化學反應複雜，因此於計算封存量時一般皆忽略此兩機制(Goodman, 2011)，而只考慮物理相關數據。

一般而言國際間計算二氧化碳封存量多使用體積法，表 1.8-1 所示為國際間與國內常用之二氧化碳封存量評估公式，各封存量評估方式雖針對各封存特性(如封存尺度、機制等)有不同考量，但基本原則為計算岩層孔隙中所能封

存之二氧化碳，並考慮儲集層體積、岩層孔隙率、超臨界二氧化碳各種物化特性(如超臨界二氧化碳之密度、飽和度、於鹽水中溶解度等)與地層封存因子，如以下公式所示：

$$\text{二氧化碳封存量} = \text{儲集層體積} \times \text{岩層孔隙率} \times \text{二氧化碳物化特性} \times \text{封存效率}$$

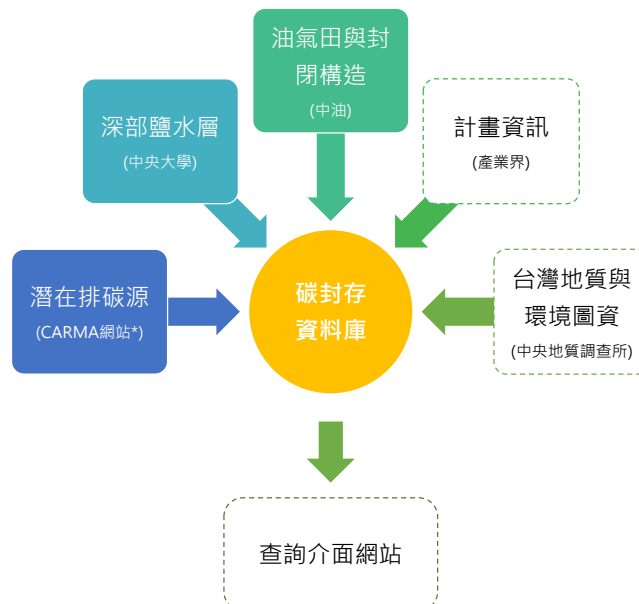
表 1.8-1 國內外二氧化碳封存量評估方法彙整

(林殿順，2013)

評估方法	計算公式
美國能源部 DOE	$GCO_2 = A \times hg \times \phi \times \rho \times E$ A: 封存構造面積；hg：儲集層有效厚度； ϕ ：孔隙率； ρ ：二氧化碳密度；E：封存效率因子，及岩石孔隙中可填滿二氧化碳之比例
澳洲評估法 CGSS	$mCO_2 = RV \times \phi \times Sg \times \delta(CO_2)$ RV $\times\phi$ ：儲集層孔隙體積；Sg：超臨界二氧化碳飽和度； $\delta(CO_2)$ ：二氧化碳密度
CSLF 評估法	$MCO_2 = C \times [A \times h \times \phi \times (\rho_s XCO_2(s) - \rho_0 XCO_2(0))]$ C：封存參數，為二氧化碳於地層內擴展性與溶解度之參數；A：封存構造面積；h：儲集層有效厚度； ϕ ：孔隙率； ρ_s 、 ρ_0 ：初始及飽和狀態地層水密度； $XCO_2(0)$ ：灌注前地層水二氧化碳比例； $XCO_2(s)$ ：飽和狀態地層水二氧化碳含量比例
日本 RITE 評估法	$C = Ef \times A \times h \times \phi \times Sg / Bg \times \rho$ Ef：掃排效率；A：封存構造面積；h：儲集層有效厚度；Sg：超臨界二氧化碳飽和度；Bg：二氧化碳容積係數； ρ ：二氧化碳密度
台灣中油公司評估法	封存潛能=構造面積 × 貯留層厚度 × 孔隙率 × 氣體體積因子 × 掃排效率 × CO ₂ 飽和度
台電公司評估法	封存量=貯留層體積 × 砂岩佔貯留層比例 × 砂岩孔隙率 × 二氧化碳狀態密度 × 封存效率 × Sg
日本 Tanaka et al. 評估法	$MCO_2 = Ef \times a \times h \times \phi \times RsCO_2$ Ef：掃排效率；A: 封存構造面積；h：儲集層有效厚度； ϕ ：孔隙率；RsCO ₂ ：二氧化碳溶解度
日本 Xiaochun et al. 評估法	$S = A \times h \times \eta \times \phi \times Ef \times R \times \rho$ A: 封存構造面積；h：儲集層有效厚度； ϕ ：孔隙率；Ef：掃排效率；R：二氧化碳溶解度； ρ ：二氧化碳密度
加拿大 Shafeen et.al. 評估法	Storage capacity= $Ef \times A \times h \times \phi \times [Sg/Bg(CO_2) + (1-Sg) \times Rs(CO_2)]$ Ef：掃排效率；A: 封存構造面積；h：儲集層有效厚度； ϕ ：孔隙率；RsCO ₂ ：二氧化碳溶解度；Sg：超臨界二氧化碳飽和度；Bg：二氧化碳容積係數；

1.9 碳封存資料庫與地理資訊系統

台灣二氧化碳靜態排放源、沉積盆地(油氣田與封閉構造、深部鹽水層)等點位與範圍分布資訊皆是透過地理資訊系統儲存與展示，目前排碳源的資料來源為 CARMA 網站，油氣田與封閉構造乃引用中油公司資料，深部鹽水層厚度與分布資訊則由中央大學提供，其中關於二氧化碳靜態排放源的部分，俟未來環保署提出相關法規要求業界申報排碳量後，再將資料來源由原 CARMA 網站替換為環保署的二氧化碳盤查資料庫。另為使碳封存資料庫可提供更完整資訊，未來將引入產業界 CCS 計畫資料以及中央地質調查所的地質與環境圖資，並建立查詢介面網站，讓一般民眾可以自由瀏覽，而資料庫的系統概念架構如圖 1.9-1 所示。



(註*：未來將直接引用環保署CO₂排放源資料)

圖 1.9-1 台灣碳封存資料庫系統架構

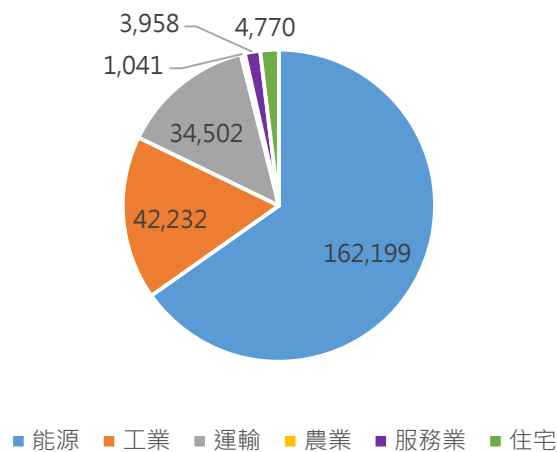
碳封存資料庫的功能除具有宣導教育意義外，亦可作為台灣 CCS 整體規劃的重要參考，透過排碳源與地質封存系統的地理圖資，可勾勒出二氧化碳輸送共同管線的配置架構，有助於降低整體 CCS 計畫費用，縮短輸送管線總里程，而伴隨之管線設施風險亦會同時降低。

第二章 台灣的排碳源與地質封存環境

2.1 二氧化碳排放源

根據我國經濟部能源局(2013)統計資料顯示，2012 年全國二氧化碳排放總量為 248.70 百萬噸，其中二氧化碳總排放量之 65.22% 來自能源部門、16.98% 來自工業部門、13.87% 來自運輸部門，能源及工業部門倚重煤炭的使用，運輸部門使用大量石油而衍生二氧化碳排放的嚴重問題。CCS 可以應用的對象為量大且集中的靜態排放源，如能源部門的燃煤或燃氣電廠、工業部門的石化或煉鋼廠等，可於發電或工業製程中進行二氧化碳捕獲。若以火力電廠為例，目前國際上常用的捕獲技術包括燃燒後捕獲、燃燒前捕獲、富氧燃燒等技術，這些技術的選擇主要由發電機組型式決定。

2012年二氧化碳排放量(千公噸)



(單位：千公噸CO₂，資料來源：經濟部能源局，2013年6月)

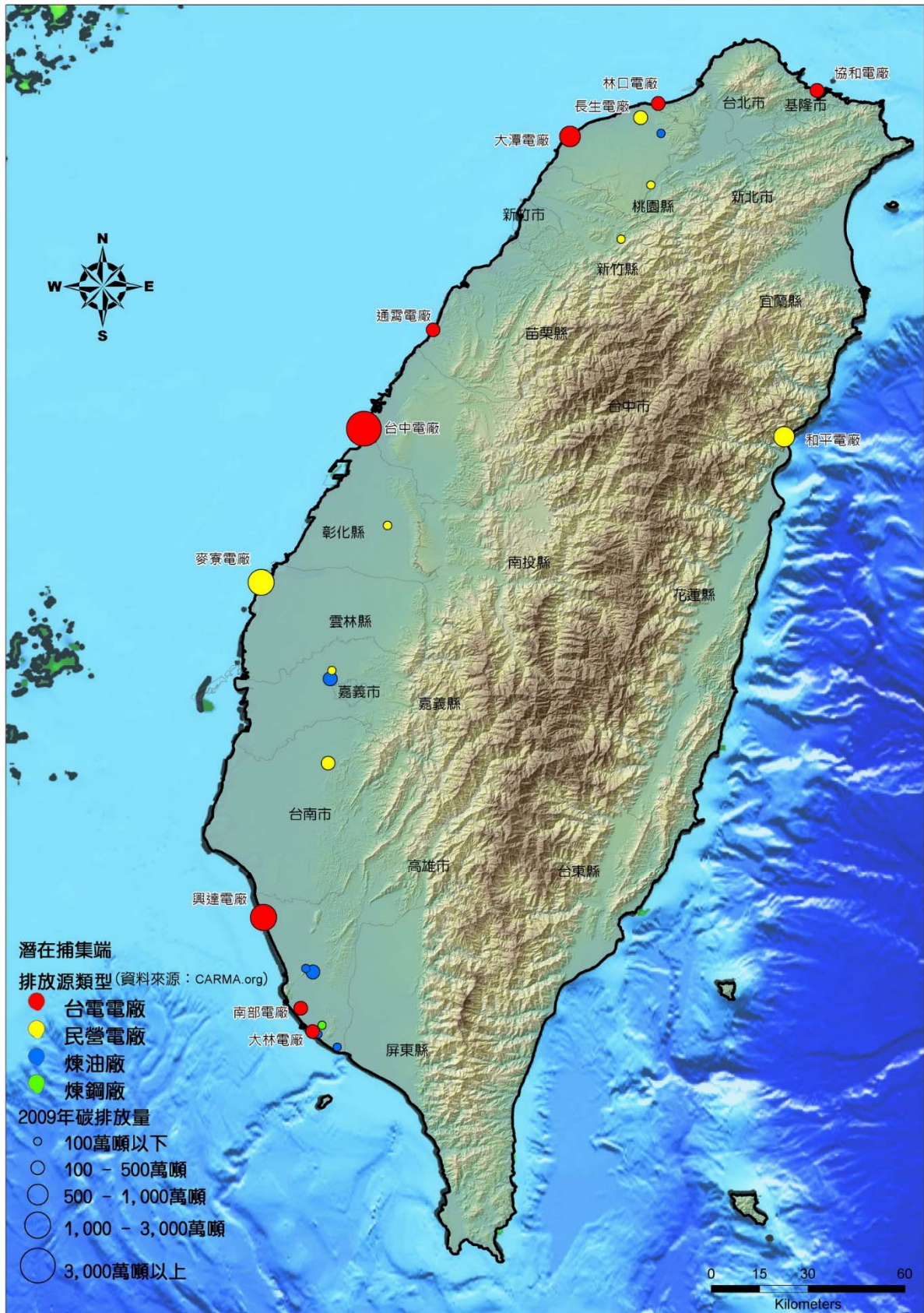
圖 2.1-1 台灣 2012 年各部門燃料燃燒 CO₂ 排放量

依據碳監測行動(Carbon Monitoring for Action, CARMA)網站 2009 年的統計資料，整理其中台灣主要的二氧化碳排放源，顯示我國主要靜態排放源為電廠與石化廠，其中台中電廠的 CO₂ 年排放量為 3,634 萬噸，為佔據世界排放量排名第 1 位的電廠，而麥寮電廠的年排放量為 2,530 萬噸，排名為第 8，但我國年排放量世界排名為第 13 位(CARMA, 2009)，顯示我國排放量雖多，但排放源較為集中，故發展 CCS 計畫時可減少對於輸送管線的依賴，有助於降低

二氧化碳運輸成本。目前我國的主要靜態排碳源與排碳量詳表 2.1-1，其分布位置則可參考圖 2.1-2。

表 2.1-1 我國主要排碳源及排碳量彙整表
(CARMA, 2009)

分類	名稱	CO ₂ 年排放量(萬噸)
台電電廠	台中電廠	3634
	興達電廠	1825
	林口電廠	351
	通霄電廠	209
	大林電廠	192
	協和電廠	170
	大潭電廠	717
	南部電廠	119
民營電廠	麥寮電廠	2530
	和平電廠	775
	華亞氣電	256
	長生電廠	110
	森霸電廠	135
	嘉惠電廠	82
	新桃電廠	65
	國光電廠	49
	星元電廠	70
石化廠	台塑六輕麥寮廠	537
	台塑新港石化廠	310
	台塑六輕海豐廠	286
	台塑仁武石化廠	273
	中油高雄煉油廠	18
	中油林園石化廠	17
	中油桃園煉油廠	15
中油大林煉油廠	4	



(CARMA, 2009)

圖 2.1-2 我國主要排碳源分布圖

2.2 沉積盆地

台灣西部海域及陸域具有廣大的沉積盆地，具有進行二氧化碳地質封存的優勢條件。此厚達 10 公里的沉積層序常以厚層砂岩與頁岩交替出現(Lin et al., 2003)，其中，高孔隙率的砂岩層可成為二氧化碳的潛在儲集層用以儲存二氧化碳；上覆的厚層頁岩可成為蓋層，具有將二氧化碳阻絕於地下並防止逸散至地表之功能。

亞太經合會(APEC)自 2003 年起開始調查亞洲地區具備二氧化碳封存潛能地區，即指出台灣西部巨厚的新生代沉積盆地(圖 2.2-1)極具二氧化碳封存潛能，在這些沉積盆地中，具有多種二氧化碳地質封存系統，包括已開採之油氣田、陸域封閉構造及深部鹽水層等。由於台灣造山帶的荷重，使得台灣西部與台灣海峽地殼以及沉積岩層往造山帶方向加深，預期若將二氧化碳灌注於往東傾斜的深部鹽水層，二氧化碳將於地底下往西(往海峽方向)移棲，可減少二氧化碳之洩漏風險，並降低其可能產生之環境問題與疑慮。圖 2.2-2 顯示台灣海峽、平原區及麓山帶之岩石地層單位及主要油氣蘊藏層位，圖中可知油氣主要蘊藏於桂竹林層、南莊層、觀音山砂岩、打鹿頁岩中的厚砂層(打鹿砂)、石底層、木山層與八掌溪砂岩等砂岩層中，且皆有上覆的厚層蓋層如錦水頁岩、打鹿頁岩與碧靈頁岩等作為廣泛的區域性蓋層。以上多個儲集層與蓋層的配對，顯示台灣西部由淺至深有多個二氧化碳潛在封存系統。

根據研究，台灣西部沉積盆地內的多套儲集層與蓋層配對，深度多位於 800~3000 公尺間，在此深度之間，其地層內溫度、壓力條件良好，灌注於其間的二氧化碳將轉化為超臨界狀態，對於封存的效率有極大的提升。

第三章 台灣的封存潛能

3.1 油氣田與封閉構造

台灣中油公司呂明達等人(2008)，考量可能形成二氧化碳地質封存之蓋層深度及厚度、蓋層延伸性、可用於二氧化碳封存之地層孔隙率及滲透率等，利用既有之地質資料及井測資料，將台灣陸域較具規模之油氣與封閉構造，包括：八德、平鎮、坑子口、湖口-楊梅、竹東、寶山、出磺坑、錦水、青草湖-崎頂、鐵砧山、白沙屯、永青山、八卦山、牛山共 14 處構造(圖 3.1-1)，進行二氧化碳地質封存之地層條件適用性探討。研究結果顯示，台灣西部麓山帶之桂竹林層以下的中新世地層，有多層厚層頁岩與砂岩之組合，皆可成為良好的二氧化碳儲集層及蓋層，具有豐富之封存潛能。

林殿順(2011)考量適合二氧化碳地質封存的深度、蓋層延伸性、儲集層厚度、注儲技術與經濟成本等條件，提出以錦水頁岩(蓋層)、桂竹林層(儲集層)之地層系統為二氧化碳地質封存的目標地層。然而根據 Chadwick et al.(2007)之封存條件適宜性關鍵指標，適合二氧化碳地質封存的地層深度多建議在 1,000 m 至 2,500 m 之間，以符合超臨界二氧化碳的物理特性及灌注壓力的經濟效益，在此原則下，各封存系統大多以錦水頁岩為蓋層、桂竹林層為儲集層來進行二氧化碳封存潛能評估作業。

亦呂明達等人(2008)，比較 Michelle Bentham (2006)在英國北海及 Takashi Ohsumi (2006)於日本之封存潛能評估結果，基於保守原則，遂採用 Takashi 之評估方式，評估公式如下。

$$\text{封存潛能} = \text{構造面積} \times \text{儲集層厚度} \times \text{孔隙率} \times \text{氣體體積因子} \times \text{排掃效率}(0.5) \\ \times \text{CO}_2 \text{ 飽和度}(0.5)$$

經利用上述公式分析台灣陸域較具規模之油氣田與封閉構造，所得之二氧化碳地質封存潛能詳表 3.1-1。研究結果顯示陸域 14 處構造之總封存潛能約 1.5 兆立方公尺，相當於可封存二氧化碳約 28 億噸，各封存構造之地理位置分布詳圖 3.1-1 所示。

表 3.1-1 我國陸域已開採油氣田構造封存潛能

(呂明達等人, 2008)

構造名稱	面積 (km ²)	淨厚度 (m)	孔隙率 (%)	氣體體 積因子	排掃 效率	CO ₂ 飽和度	封存潛能 (億 m ³)	封存潛能 (億噸)
八德	21.6	120	17.5	178	0.5	0.5	201.63	0.37
平鎮	24	275	22.4	175	0.5	0.5	646.80	1.18
坑子口	6.4	250	15	150	0.5	0.5	90.00	0.16
湖口-楊梅	128	337	15	141	0.5	0.5	2280.82	4.15
竹東	19.2	298	22.5	151	0.5	0.5	485.98	0.88
寶山	44.8	245	23.6	152	0.5	0.5	984.33	1.79
出磺坑	120	255	9.2	162	0.5	0.5	1142.97	2.08
錦水	72	730	15.2	126	0.5	0.5	2516.57	4.58
青草湖-崎頂	96	253	10.3	190	0.5	0.5	1188.29	2.16
鐵砧山	72	255	22.4	171	0.5	0.5	1758.15	3.20
白沙屯	9.6	240	10	177	0.5	0.5	101.95	0.19
永如山	14.4	240	10	162	0.5	0.5	139.97	0.25
八卦山	403	75	19	277	0.5	0.5	3981.70	7.24
牛山	19.2	45	20	95	0.5	0.5	41.04	0.07
總計							15560.20	28.29

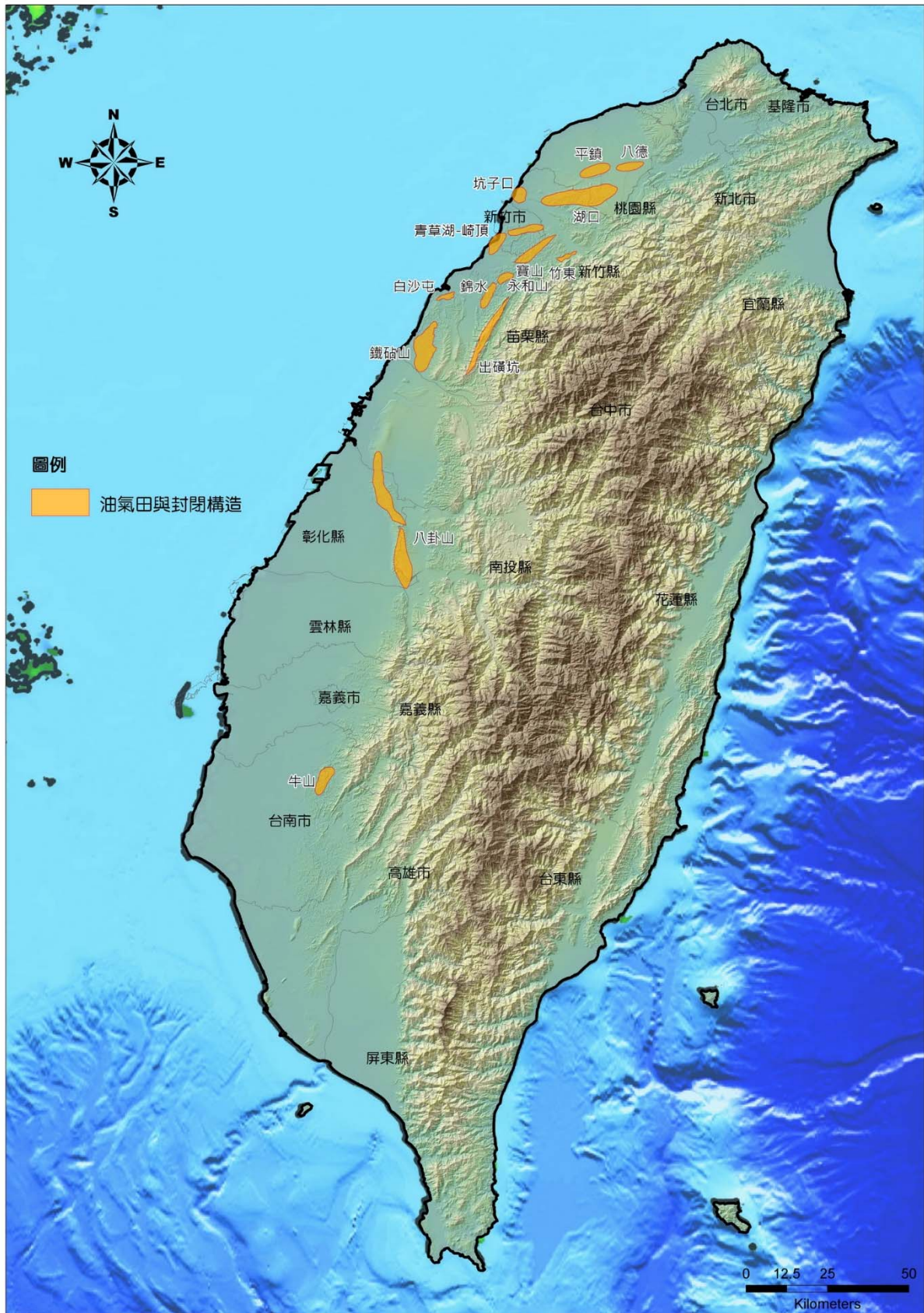


圖 3.1-1 我國陸域之油氣田與封閉構造分布圖

3.2 深部鹽水層

於各種二氧化碳地質封存的形式中，深部鹽水層具有最大的封存潛能，這種不需構造封閉，藉由水力機制結合各種物化封存機制的方式，相當適合台灣的地質狀況。尤其我國多數火力電廠、化工廠及鋼鐵廠等二氧化碳主要排放源，大都位於台灣西部濱海地區。在主要二氧化碳排放源處，尋找封存量、地質條件優良的深部鹽水層封存場址，將是我國實施二氧化碳地質封存的重要手段。為將二氧化碳儲存於深部鹽水層中，一般封存深度會超過 800 公尺，讓二氧化碳可達到維持超臨界流體相態的條件，但深度不宜過深，以免大幅增加鑽井成本，從而導致封存計畫不具經濟可行性，故選擇台灣西部地層深度介於 800 公尺至 3000 公尺的砂岩層作為封存二氧化碳的目標地層，其範圍如圖 3.2-1 所示。

利用美國能源局之二氧化碳鹽水層封存量評估公式(DOE, 2008; Goodman et al., 2011)，計算台灣西部平原及台灣海峽二氧化碳封存量。所使用參數如表 3.2-1，封存因子採用美國能源局(DOE, 2008)提出之鹽水層封存因子參數數值。二氧化碳封存量估算範圍(圖 3.1-1)自變形前緣以西至海岸線外 50 公里處，並加以分區計算；由北至南分為台北-桃園、新竹-苗栗、台中-彰化、雲林-嘉義、台南等五區，每區再細分為變形前緣以西至海岸線之平原區、海岸線至海岸線外 25 公里及 25 公里至 50 公里等三區。儲集層厚度則利用台灣中油公司陸海域 30 餘口鑽井資料得到，選擇台灣西部地層深度介於 800 公尺至 3000 公尺砂岩層作為封存二氧化碳的目標地層。關於岩層孔隙率參數與二氧化碳密度估計方面，乃利用 Lin et al. (2003)之台灣各沉積盆地深度對應孔隙率分布曲線，定義不同區域與不同深度的岩層孔隙率數值；而二氧化碳密度隨深度變化曲線則引自 Lin (2008)之研究。

計算結果顯示台灣西部沿海地區最有可能(most likely)二氧化碳封存量為 459 億噸(表 3.2-2)，若考量海陸域鑽井成本並避開人口活動範圍，則以海岸線至離岸 25 公里區域的 168 億噸最具開發潛能。

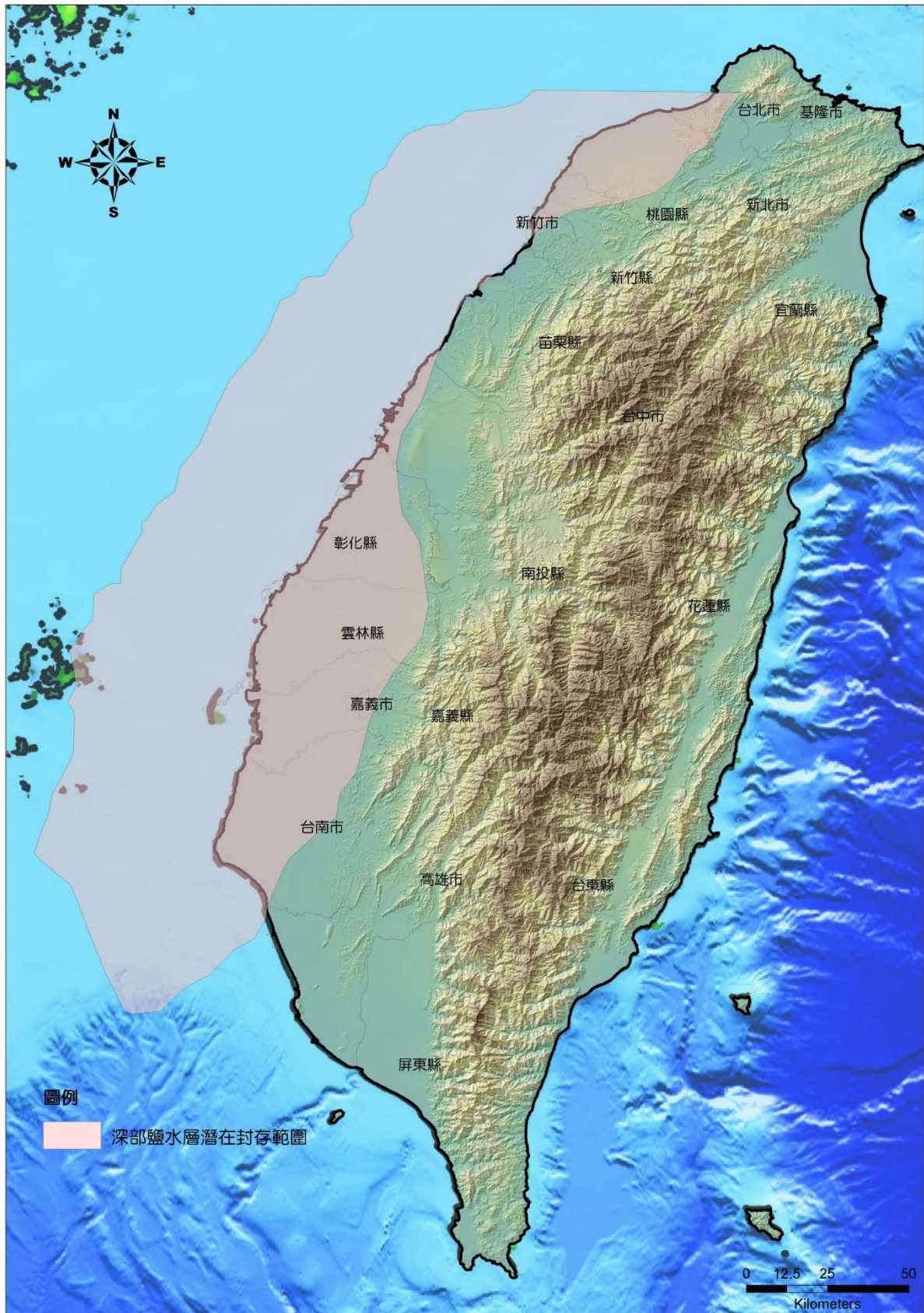


圖 3.2-1 我國深部鹽水層潛在封存範圍

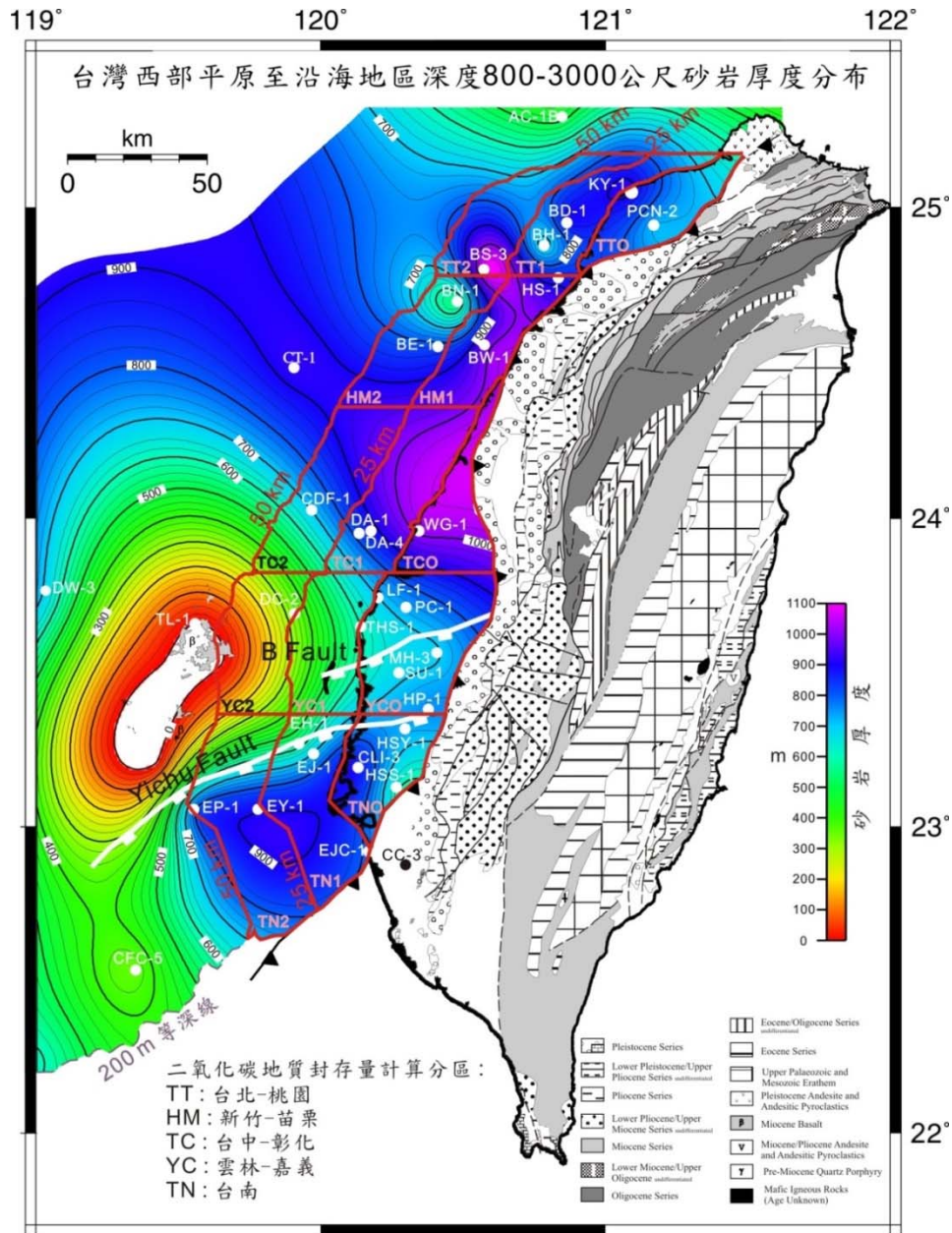


圖 3.2-2 台灣陸海域二氧化碳封存區域估算及砂岩厚度分布圖

表 3.2-1 蒙地卡羅統計法評估全台二氧化碳封存量所用參數

封存區		台北-桃園			新竹-苗栗		
分區	陸域平原區	海岸線外 (0-25 km)	海岸線外 (25-50 km)	陸域平原區	海岸線外 (0-25 km)	海岸線外 (25-50 km)	
面積 (km ²)		1022	1091	1145		1162	1226
封存層厚度 (公尺)	Min	600	700	700		700	575
	Likest	750	850	850		950	850
	Max	900	900	1050		1025	1050
E 封存因子	P15	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
	P50	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
	P85	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
φ 岩層有效孔隙率	P15	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22
	P50	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
	P85	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26
ρ 二氧化碳密度	P15	418	418	418	418	418	418
	P50	460	460	460	460	460	460
	P85	500	500	500	500	500	500

表 3.2-1 蒙地卡羅統計法評估全台二氧化碳封存量所用參數(續)

封存區		台中-彰化			雲林-嘉義			台南		
分區	陸域平原區	海岸線外 (0-25 km)	海岸線外 (25-50 km)	陸域平原區	海岸線外 (0-25 km)	海岸線外 (25-50 km)	陸域平原區	海岸線外 (0-25 km)	海岸線外 (25-50 km)	
面積 (km ²)		1011	1488	1536	1978	1281	1327	1085	1573	2007
封存層厚度 (公尺)	Min	880	600	300	600	300	0	600	500	200
	Likest	1000	950	750	725	500	200	775	850	800
	Max	1050	1050	975	925	700	500	875	900	900
E 封存因子	P15	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
	P50	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
	P85	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
φ 岩層有效孔隙率	P15	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22
	P50	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
	P85	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26
ρ 二氧化碳密度	P15	418	418	418	418	418	418	418	418	418
	P50	460	460	460	460	460	460	460	460	460
	P85	500	500	500	500	500	500	500	500	500

表 3.2-2 台灣陸海域鹽水層二氧化碳地質封存量初估成果

區域	陸域平原區	海岸線外 0-25 km	海岸線外 25-50 km	封存量 (億噸)
台北桃園	25	30	33	88
新竹苗栗		34	34	68
台中彰化	37	43	34	114
嘉義雲林	49	21	10	80
台南	27	40	42	109
	138	168	153	459

參考文獻

1. 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., 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.
2. Chadwick, A et al., (2007), Best Practice for the Storage of CO₂ in Saline Aquifers, CO₂STORE_BPM_final_rev1.
3. International Energy Agency (2012), Energy Technology Perspectives 2012.
4. IPCC (2005) Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, Technical Report, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Prepared by Working Group III, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
5. Lin, A. T., Watts, A. B., Hesselbo, S. P. (2003), Cenozoic stratigraphy and subsidence history of South China Sea margin in the Taiwan region. *Basin Research*, 15, 453-478
6. Lin, C.K. (2008) Algorithm for determining optimum sequestration depth of CO₂ trapped by residual gas and solubility trapping mechanisms in a deep saline formation. *Geofluids*, 8, 333–343
7. Michelle Bentham(2006), An Assessment of Carbon Sequestration Potential in the UK-Southern North Sea Case Study, Tyndall Centre Working Paper No.85.
8. Pennstate College of Earth and Mineral Sciences 網站 <https://www.e-education.psu.edu/meteo469/node/223>
9. Takashi, Ohsumi(2006), Research and Development on Aquifer Storage of Carbon Dioxide in Japan, RITE(Research Institute of Innovative Technology for the Earth) International Workshop on CO₂ Geological Storage, Japan '06.
10. US Department of Energy D.O.E (2008) Methodology for Development of Geologic Storage Estimates for Carbon Dioxide.

11. 日本(財)地球環境產業技術研究機構(RITE),平成 15 年報告,第 362 頁。
12. 行政院環保署(2011),「2011 中華民國第二版國家通訊(摘要)」。
13. 行政院環保署「推動台灣參與氣候變化綱要公約」網站,
<http://unfccc.epa.gov.tw/unfccc/>。
14. 呂明達,宣大衡,黃雲津,范振暉(2008),「臺灣陸上二氧化碳地質封存潛能推估」,?冶,第五十二卷,第三期,第 154-161 頁。
15. 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,93-97 頁。
16. 林殿順(2011),「臺灣二氧化碳地質封存研究-子計畫一:濱海區封存潛能之研究」,國科會專題研究計畫,計畫編號 NSC100-3113-E-008-002。
17. 財團法人中興工程顧問社(2012),「台灣二氧化碳地質封存潛能評估」,能源國家型淨煤主軸專案計畫。
18. 網站 OIL-GAS-NEWS.COM (<http://www.oil-gas-news.com>)
19. 聯合國,「氣候變化框架公約」,CMP1-7。
20. 行政院節能減碳推動會秘書處(2010),「國家節能減碳總計畫」。

附錄 二氧化碳地質封存潛能評估方法介紹

對於場址封存量評估方式，國際間已有諸多單位提出評估方法，如美國能源部(US DOE)、碳封存領袖論壇(CSLF)、澳洲溫室氣體技術合作研究中心(CO2CRC)及日本地球環境產業技術研究機構(RITE)等(如表 1.8-1 所示)。可進行二氧化碳封存之地層為孔隙率高、可滲透且具良好灌注性之沉積岩層。本文提到之封存量評估方式不包含經濟或法規等的限制，僅就物理性質之控制條件來評估潛在之封存量。

一般而言國際間計算二氧化碳封存量多使用體積法，各封存量評估方式雖然依不同尺度、機制而有不同的算法，但基本原則為計算岩層孔隙中所能封存之二氧化碳，並考慮儲集層體積、岩層孔隙率、超臨界二氧化碳各種物化特性(如超臨界二氧化碳之密度、飽和度、於鹽水中溶解度等)與地層封存因子，即可得儲集層之封存量，封存量評估方式可歸納為以下基本公式：

$$\text{封存量} = (\text{儲集層體積} \times \text{岩層孔隙率} \times \text{二氧化碳物化特性} \times \text{封存效率})$$

各項參數說明如下：

- A. 儲集層體積：為目標區域面積與目標儲集層厚度之乘積，針對欲調查之封存區域，利用地球物理方式與鑽井，得知區域地下地質構造，計算可能封存二氧化碳之空間範圍。
- B. 岩層孔隙率：孔隙率為岩層中孔隙所佔岩石之百分比，亦即代表岩層中二氧化碳所能填充之空間，為評估二氧化碳封存條件之重要參數。
- C. 二氧化碳物化特性：由於二氧化碳灌注至地層中將以超臨界流體相態儲存(灌注深度超過 800 公尺時)，因此必須了解二氧化碳於超臨界流體相態時的物化特性，其中包括超臨界二氧化碳飽和度、密度、溶解度等，目前國內外已有不少學者研究，如 Bachu (2003)、林鎮國(2008)等人，針對二氧化碳於不同溫度、壓力條件下之封存特性詳加描述，提供封存量計算時之基礎數據。
- D. 封存效率：代表二氧化碳能填充於岩層孔隙中之比例，主要考慮掃排效率(為岩體孔隙中，二氧化碳可經過孔隙之百分比)、儲集層地質異質性、灌注井灌注方式、岩層孔隙率與滲透率、灌注後二氧化碳與地層水密度差以及各微觀尺度因子等參數。

於國內既有研究方面，台灣中油公司根據多年油氣田之分析開採經驗，推估若以油氣田作為二氧化碳地質封存場址時，其封存量評估方式如下：

$$\text{封存潛能} = \text{構造面積} \times \text{儲集層厚度} \times \text{孔隙率} \times \text{氣體體積因子} \times \text{排掃效率} \times \text{CO}_2 \text{飽和度} \quad (\text{呂明達等, 2008})$$

其中，排掃效率取 0.5、二氧化碳飽和度取 0.5。算式中「構造面積×儲集層厚度」相當於前述「儲集層體積」，「孔隙率」相當於前述「岩層孔隙率」，「氣體體積因子」則相當於「二氧化碳物化特性」，至於「排掃效率×CO₂飽和度」則相當於「封存效率」。

台電公司曾考量各封存場址地質資料的精確程度，參考台灣中油公司評估法，於可封存體積項下另考慮儲集層砂岩含量比率，以排除儲集層中所夾無封存效果的頁岩；亦於計算時，考慮地溫梯度與封存深度所造成的特定狀態二氧化碳密度值，以改進封存量評估公式如下：

$$\text{封存量} = (\text{儲集層體積} \times \text{砂岩佔儲集層比例} \times \text{砂岩孔隙率} \times \text{二氧化碳狀態密度} \times \text{封存效率} \times S_g)$$

其中， S_g 為二氧化碳飽和度並參考中油公式取 0.5。

另本文深部鹽水層之封存量評估，係利用美國能源局之二氧化碳封存評估公式(DOE, 2008; Goodman et al., 2011)，搭配蒙地卡羅法，計算台灣西部平原及台灣海峽二氧化碳封存量，封存量評估公式如下：

$$\text{封存量} = \text{面積} \times \text{儲集層厚度} \times \text{有效孔隙率} \times \text{二氧化碳狀態密度} \times \text{封存效率因子}$$

美國能源局(DOE)自 2006 年提出二氧化碳封存量計算公式之後，每年仍持續研究各項複雜參數(Goodman et. al, 2011)，並模擬各種可能灌注案例，調整如灌注井型態、灌注點周圍圍岩壓力、岩層滲透率與孔隙率等參數，用以提升封存效率因子參數之正確性，而蒙地卡羅法為科學界對於未知數據做加總計算時常用之方法，利用已知的地質相關參數，對每一個參數給予統計學上最符合之分布型態，再以隨機取樣並經多次反覆運算，尋找其出現機率最大之數值，運算次數越多，其統計結果會越接近理論值。運用於台灣深部鹽水層封存量評估時，封存因子係採用美國能源局(US DOE, 2008)提出鹽水層封存因子之參數數值，其中 P15 數值為 0.01、P80 為 0.04，並給予自然分布。

本文封存量評估之目的主要是呈現二氧化碳封存場址之一般地理分布，是從物理特性上評估沉積盆地地層可以獲得之二氧化碳封存量體積，尚未考慮灌注效率、法規、經濟效益或是地下資源競合等因素。

