

以地質封存方式降低我國火力 電廠二氧化碳排放量之可能性探討

焦中輝／國立台灣大學地質科學系博士生、台灣電力公司電源開發處工程地質組組長

黃連通／台灣電力公司電源開發處工程地質組課長

邵國士／中興工程顧問社大地工程研究中心副研究員

李易叡／中興工程顧問社大地工程研究中心助理研究員

俞旗文／中興工程顧問社大地工程研究中心副經理

冀樹勇／中興工程顧問社大地工程研究中心經理

為因應全球氣候變遷議題並落實政府節能減碳政策，台灣電力公司分別於 97、99 年度辦理「二氧化碳地下封存地質資料庫建置與候選場址評選計畫」及「二氧化碳地質封存試驗場址調查規劃與研究」等兩項計畫，作為台電公司力行減碳技術研發之第一階段工作，以因應未來我國基載火力電廠可能面臨之碳排放及高額碳稅問題。

對燃煤火力電廠大量碳排放進行二氧化碳捕獲與地質封存 (Carbon dioxide capture and sequestration, CCS)，為現階段先進國家提出解決火力電廠二氧化碳過量排放的重要對策之一 [1]。對台電公司而言，身為國內最大二氧化碳排放源，其壓力不言而喻。故採行 CCS 技術處理碳排放問題，乃為我國尚未找到足夠替代能源前，因應未來國際間課徵碳稅考量下的有效具體對策。

基於時效、經濟與安全兼顧的考量，地質封存必須先從國境內區域尺度開始，探討具最大可行性的優選場址所在，再集中資源針對優選目標場址進行高精度之場址調查研究工作，最後進行目標場址之封存條件、封存量、可行性、風險等評估。台電公司已於 97、98 年計畫完成適合燃煤火力電廠之 CCS 優選場址之篩選工作 [2]，爾後於 99 年度計畫完成目標場址之地質封存條件與封存量評估 [3]，本文乃就這些成果統整說明之。

二氧化碳地質封存基本條件

適合二氧化碳地質封存的地質條件包括構造封閉、地層岩性封閉與煤層封閉。其中地層岩性封閉需有上部不透水層的隔絕效果，再配合廣闊側向延展的儲集地層形成封閉效果，如沉積盆地之深層鹽水層，此類封存構造通常具有較大封存量，本計畫目標場址之台西盆地即屬於此類。

Stefan Bachu (2006) [4] 曾為加拿大亞伯達省制定以深層鹽水層構造作為二氧化碳地質封存場址之篩選原則，可作為我國之參考標準，篩選原則如下：

地質特性

- (1) 適合的沉積岩厚度：必須有足夠厚度且高孔隙率之封存地層，以便有足夠孔隙空間封存大量二氧化碳。
- (2) 具圍束作用的蓋岩：利用大地之圍束力使蓋岩層中可能的裂隙閉合，以達封存效果。大地應力若為張應力區則易產生張力裂縫，形成二氧化碳滲漏管道。
- (3) 受構造運動影響少：相對少量的斷層、破碎與褶皺作用。
- (4) 具相襯的沉積層序：儲集層頂部應有封閉性良好的蓋岩層，而儲集層內最好有砂頁岩互層之次層，如此可提高封阻效率。
- (5) 緩慢固結岩化作用：由於岩化作用會填塞減低孔隙率與滲透率，因此場址地層應具較低的岩化作用，如中新世～上新式或更新世地層。

水動力與地溫機制

- (1) 封存地層深度應有利於超臨界二氧化碳狀態的壓力與地溫條件。
- (2) 封存地層應為有利於超臨界二氧化碳狀態之流體系統，即深度、區域尺度、流向等均適合於二氧化碳地質封存之成熟穩定型盆地。

我國目標場址～台西盆地之地質封存條件

台西盆地位於新竹－台中間海域，為孫習之 (Sun, 1981) [5] 所命名，係指古第三紀時竹苗外海，被澎湖隆起、南日島脊、觀音隆起所包圍的沉積盆地，如圖 1 所示。

以適合二氧化碳地質封存的地層深度分布，於台西盆地內所設定的目標地層為頭料山層、卓蘭層、錦水頁岩及桂竹林層，這些地層均形成於前陸盆地時期（約 6.5 百萬年前～至今）。

根據對台西盆地的地層岩性分布、地質構造及深層鹽水層等地質封存基本條件之了解，設定台西盆地之二氧化碳地質封存條件與範圍。

台西盆地適合二氧化碳封存的範圍

■ 台西盆地封存場址之北邊界：

由海域震測資料顯示台西盆地含巨厚沉積層，但在適合於二氧化碳封存深度之地層（如中新世晚期至上新世早期地層），台西盆地北部普遍存在正斷層構造，而靠近海岸線部分則為逆斷層，且近期活動徵兆明顯，地體活躍度高，此不符合二氧化碳地質封存的基本條件。故設定台西盆地封存之北邊界為台中大甲鎮以南的區域。

■ 台西盆地封存場址之西邊界：

根據林殿順 (2001) 所描繪之前陸盆地底部等深度分布，定出台西盆地之西邊界位於於前陸盆地底部等深度線為零之處；再疊加錦水頁岩厚度分布，研判錦水頁岩在台西盆地西邊尖滅之處，如此定出封存範圍之西邊界。

■ 台西盆地封存場址之南邊界：

根據林國安等 (1998) [6] 研究資料顯示，台西盆地南半部，中新世以後斷層構造少且延伸不長，地層亦相當平緩，地層位態大約向東北微傾 (N15°W/5.5°E)，研判此應北港高區阻隔來自東南方

之地殼擠壓應力，形成高區後側之屏蔽效應有關，故此區之地體構造穩定、大地應力屬壓應力狀態、斷層分布少且位置較深，故以北港高區作為台西盆地可封存區域之南邊界。對應 Bachu (2006) 所提出的區域尺度封存場址篩選原則，本區亦滿足二氧化碳地質封存之盆地條件。

■ 台西盆地封存場址之東邊界：

台西盆地東邊以彰化斷層為界，根據經濟部中央地質調查所於 2010 年公告之全台活動斷層分布圖，彰化斷層已更新為第一類活動斷層。為避免二氧化碳封存時由斷層面滲漏至地表，或是因斷層活動促使二氧化碳沿著破裂面逸散等因素，因此將台西盆地封存範圍的東邊界設定在距離彰化斷層 2~5 公里處。

經各項地質條件所設定之台西盆地封存場址北、西、南、東邊界條件結果如圖 2 所示。

台西盆地封存地層參數設定

從二氧化碳地質封存的角度來看，與封存量最直接相關的地質參數為封存地層孔隙率。本段說明台西盆地目標地層之孔隙率設定方式，以供封存量評估之參考。



圖 1 台西盆地與台灣西部沉積盆地構造之關係

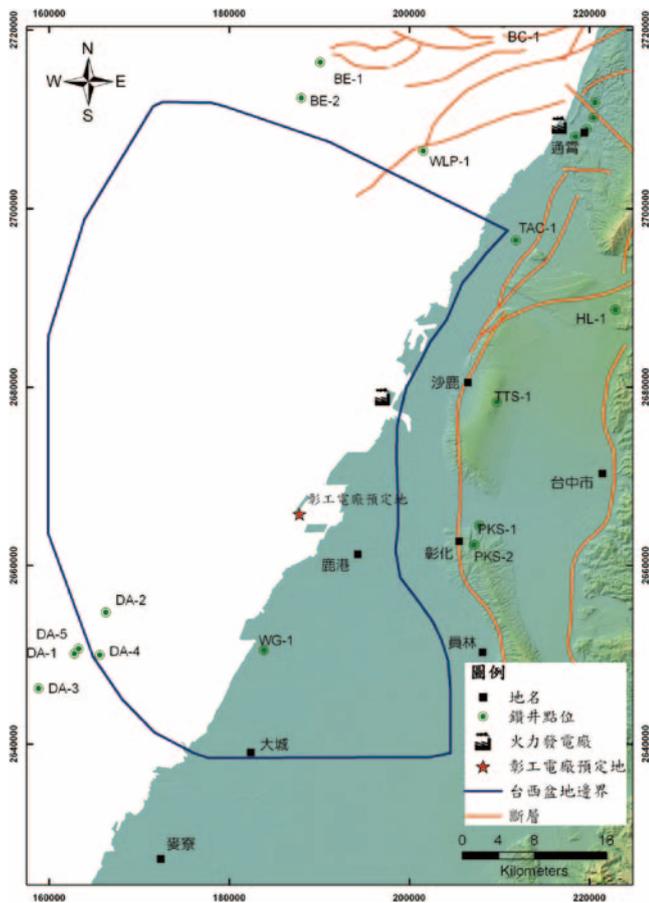
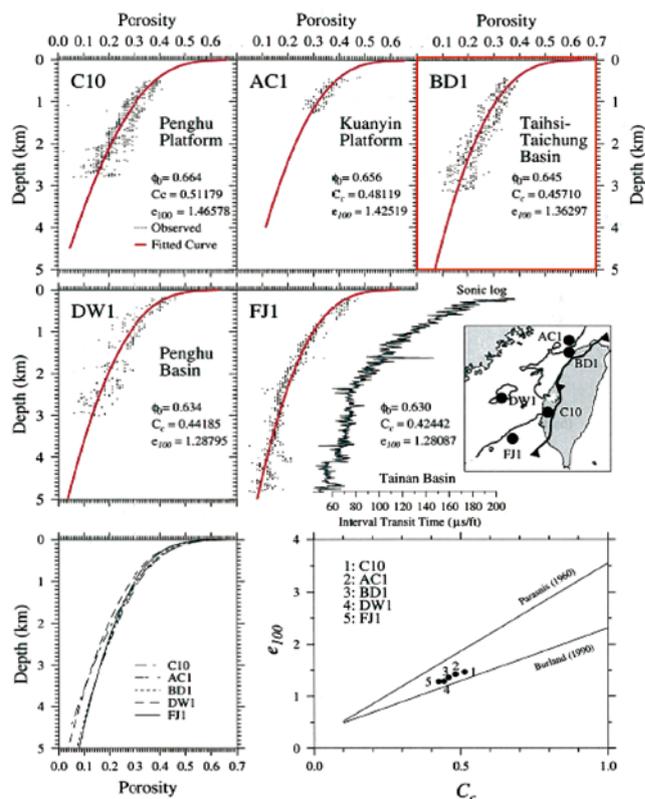


圖 2 台西盆地封存場址之北、西、南、東邊界

我國對於深層地層（超過 1,000 公尺）之孔隙率資料多源自於台灣中油公司的深層鑽井資料。然而中油公司基於油氣探勘之因素，大多針對中新世更深的地層進行孔隙率相關試驗；但對於適合二氧化碳地質封存的淺層地層系統，如卓蘭層、錦水頁岩、桂竹林層等，其孔隙率資料相對較稀少。本研究參考林殿順（2001）[7] 所歸納之台灣西部前陸盆地地層孔隙率隨深度變化趨勢，統計孔隙率與深度之迴歸關係，分析結果顯示地層孔隙率隨深度增加而減少。圖 3 為林殿順（2001）所歸納之台灣西部五個沉積盆地構造區之地層深度與孔隙率關係，其中 BD1 區可作為目標場址之孔隙率參考。大致上孔隙率隨深度增加而呈指數率減少之趨勢，此趨勢不隨沉積環境而改變。綜整台西盆地之各目標地層孔隙率歸納如下：

- 頭嵙山層：孔隙率為 32% ~ 35%。
- 卓蘭層：孔隙率為 32%。
- 錦水頁岩：孔隙率為 8% ~ 17.54%。
- 桂竹林層：若扣除孔隙率較低的十六份頁岩段，則桂竹林層砂岩段的孔隙率為 15.11% ~ 23.53%。



註： ϕ_0 為初始孔隙率， C_c 為壓密係數， e_{100} 為空隙比。
圖 3 台灣西部五個構造盆地之新生代沉積層孔隙率與深度關係曲線（摘自 Lin, 2001）[7]

國際上目前對於二氧化碳地質封存場址之蓋層與儲集層特性的認可條件整理如表 1 [8]，與我國地質條件類似的日本也研究歸納出適合該國的地質封存基本條件（如表 2）[9]。我國可循此規則，作為篩選適當蓋層與儲集層之參考。以台西盆地目標場址為例，建議之儲集層為桂竹林層砂岩段，其平均孔隙率約在 15 ~ 23% 之間，符合國際與日本制定的一般標準，亦符合澳洲 CO2CRC 計畫 [10] 所歸納之適當蓋岩層與儲集層岩石孔隙率與滲透率關係經驗值（如圖 4）。另作為目標蓋層的錦水頁岩，平均孔隙率約為 8 ~ 17%，雖然超過日本所制定的標準值，但由於錦水頁岩層的側向延伸性良好、厚度大、無斷層切穿，且頁岩在地層中為層狀交叉分布，預期將大幅提高封存場址之整體封阻效果。

表 1 封存場址適宜性之關鍵地質條件指標
（修改自 Chadwick et al., 2007）

	儲集層特性	
	有利指標	不利指標
深度	> 1000 m 且 < 2500 m	< 800 m 或 > 2500 m
儲集層淨厚度	> 50 m	< 20 m
孔隙率	> 20%	< 10%
滲透係數	> 500 mD	< 200 mD
鹽度	> 100 g/l	< 30 g/l
蓋層特性		
	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	> 100 m	< 20 m

表 2 日本二氧化碳地質封存條件指針
(修改自 RITE 平成 15 年報告)

蓋層	岩石種類	孔隙率		滲透率	
	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

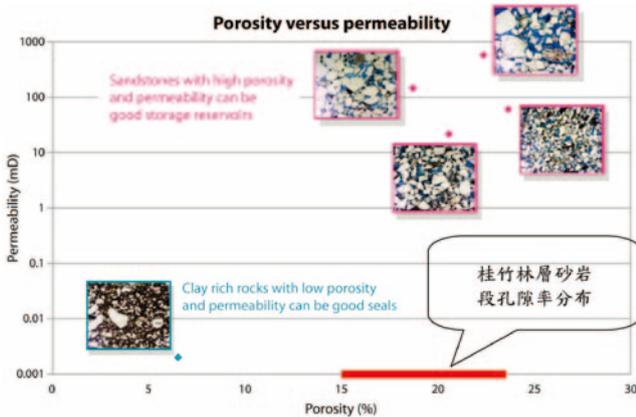


圖 4 適當蓋層與儲集層孔隙率、滲透性經驗值
(摘自 CO2CRC 計畫網站資料, 2010)

台西盆地場址封存量評估

封存量評估方式

對於場址封存量評估方式，國際間已有諸多單位提出其評估法，如美國能源部 (USDOE-2006)、防止氣候變遷之國際地質封存領導者論壇組織 (CSLF-2007)、澳洲 (CO2CRC-2008)、美國地質調查所 (USGS-2009)、國際能源總署 IEA/EERC-2009 以及日本 RITE 等。各式評估法之基本原則不外乎考慮：儲集層體積、地層孔隙率、超臨界二氧化碳流體密度性質、地層可儲存效率等因子，然後予以乘積，即可得場址之封存量。經評估，適合我國狀況的評估法為美國能源部、CSLF 及日本 RITE 等三種，簡述如下：

■ 美國能源部 (USDOE) 評估法 [11]：

不考慮地層水中 CO₂ 之溶解性條件，其評估公式為：

$$G_{CO_2} = A t \times h g \times \phi_{tot} \times \rho \times E \quad (1)$$

A t：封存構造面積

hg：儲集層之有效層厚度

ϕ_{tot} ：孔隙率

ρ ：二氧化碳密度

E：封存效率因子，本參數反應岩石中可填滿 CO₂ 之總孔隙體積比例。

■ CSLF 評估法 [11]：

Carbon Sequestration Leadership Forum (CSLF) 是一國際性的全球氣候變遷研究組織，成立於 2003 年，關注在改進二氧化碳地質封存長期安全與經濟可行議題的發展。該團隊投注資源來研究發展 CO₂ 地質封存技術，並進行地質封存潛能評估供其國家參考。根據該單位於 2008 年之 Phase III Report [11]，提出沉積盆地含鹽水層有效封存量評估公式如式 2 表示。

$$M_{CO_2e} = C \times (A \times h \times \phi \times (\rho_s X_s^{CO_2} - \rho_o X_o^{CO_2})) \quad (2)$$

C：封存參數，為考慮 CO₂ 在地層內之擴展性與溶解度之參數，與時間相關，可用數值模擬結果以方程式表示，或是以單一數值表示。

A、h：分別為含水封存層面積與厚度。

ϕ ：封存地層孔隙率。

ρ_s 、 ρ_o ：分別為初始狀態及飽和狀態之地層水密度。

$X_o^{CO_2}$ ：初始狀態地層水 CO₂ 含量比例。

$X_s^{CO_2}$ ：飽和狀態地層水 CO₂ 含量比例，與含水層之壓力、溫度、塩度有關。

■ 日本 RITE 評估法 [9]：

$$C = E f \times A \times h \times \phi \times S g / B g \times \rho \quad (3)$$

E f：排掃效率

A：封存構造面積

h：儲集層之有效層厚度

ϕ ：孔隙率

S g：超臨界狀態二氧化碳飽和度

B g：二氧化碳容積係數

ρ ：二氧化碳密度

由 1 ~ 3 之評估法，可知二氧化碳封存量估算方法依不同尺度考量而不同。考量現階段對於台西盆地場址地質資料了解的精細度，並考慮儲集層砂岩含量比率、場址地溫梯度、超臨界狀態二氧化碳密度值、深層鹽水層封存效率等因素，提出場址封存量評估公式如式 4 所示：

$$\text{封存量} = (\text{儲集層體積} \times \text{砂岩佔儲集層比例} \times \text{砂岩孔隙率} \times \text{二氧化碳狀態密度} \times \text{封存效率} \times S g) \quad (4)$$

台西盆地場址封存量評估

在進行場址封存量評估之前，以台西盆地場址三維地質模型為基礎，運用 TOUGH-2 軟體進行二氧化碳移棲模擬。模擬結果顯示移棲範圍與地層幾何條件及分析參數有關，故進行場址封存量評估時，將統合台西盆地之地層深度分布、斷層構造分布、移棲範圍模擬結果與超臨界狀態二氧化碳密度特性等因素，綜合評估台西盆地場址之有效封存量，評估流程概念如圖 5 所示。

執行上以公式 4 為基準，並根據台西盆地可封存的地質條件與範圍，運用 GIS 系統與三維地質模型等工具，提出「GIS 單元網格法」進行台西盆地封存場址之盆地尺度封存量評估。各封存量參數計算程序如下：

■ 封存單元體積計算

以 GIS 將儲集地層區分為 $1,000 \times 1,000$ m 的單元網格，每個網格都有對應之深度、厚度、溫度及孔隙率資訊。運用 GIS 之空間分析功能，便可求得每個單元網格之封存量，最後將各網格之封存量加總後即為台西盆地之封存量。

進行場址體積計算前，先根據前述之台西盆地北、西、南、東地質邊界，設定計算條件（情境一）為 (1) 自彰化斷層往西退縮 2 公里為有效封存範圍之東邊界，(2) 錦水頁岩蓋層厚度至少為 30 公尺所涵蓋的範圍作為台西盆地場址之有效封存區域。經計算，台西盆地有效封存範圍共有 2,589 個單元網格，總體積為 $3.5033 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 。

■ 儲集地層砂岩含量比例推估

參考莊恭周 (1998) [12]、張錫齡 (Chang, S. L. 1968) [13]、周瑞燉 (Chou, J. T. 1970) [14] 等人對台灣中北部地區之中新世以後地層岩性之研究，歸納出台西盆地桂竹林層內之砂岩含量百分比約為 78.9%，並以此代入封存量評估公式進行計算。

■ 目標地層之地溫分布

根據黃立勝 (1990) [15] 之研究，台西盆地目標地層區域的地溫梯度約為 $2^\circ\text{C} / 100 \text{ m}$ (即 $20^\circ\text{C} / 1 \text{ km}$)。本研究將每個單元網格的儲集地層深度進行平均後，假設台西盆地地表溫度為 20°C ，可計算出台西盆地每個網格之地溫分布。

■ 儲集地層孔隙率推估

參考圖 3 林殿順所歸納之台灣西部沉積盆地 (BD1

區) 地層深度與孔隙率之迴歸曲線，可推求場址儲集地層之孔隙率分布情形，孔隙率分布範圍從 12% ~ 32%。

■ 二氧化碳狀態密度推估

由於台西盆地地溫梯度約為 $20^\circ\text{C} / 1 \text{ km}$ ，適用冷盆地之二氧化碳狀態密度曲線 (如圖 6)；故可對比二氧化碳之密度大約為 $704 \sim 782 \text{ kg/m}^3$ 。

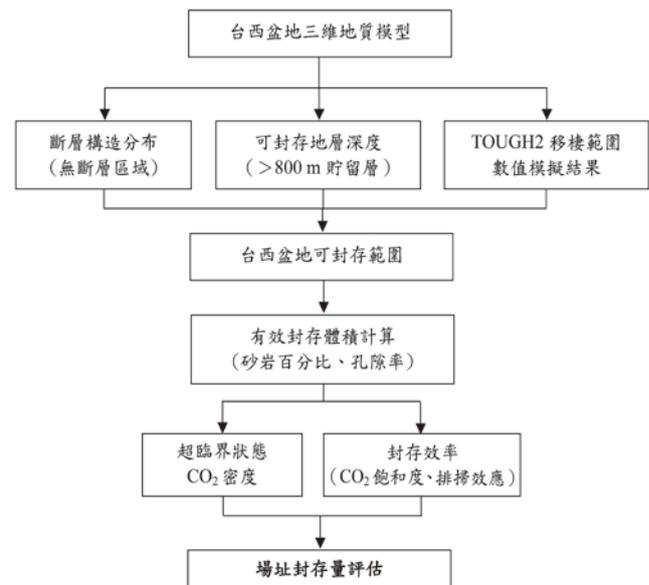


圖 5 封存量評估概念流程

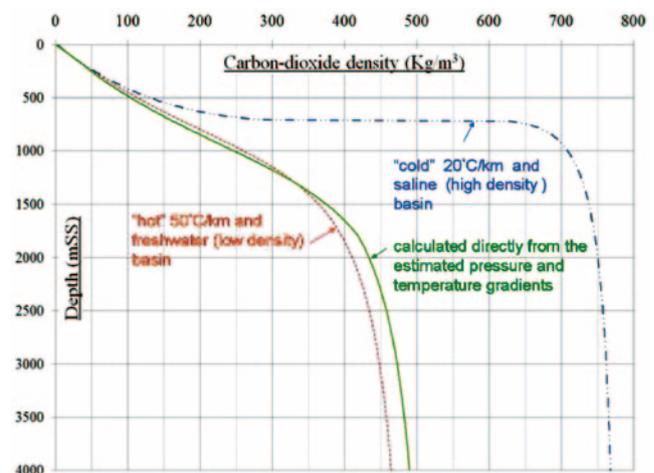


圖 6 二氧化碳密度與深度分布關係

■ 場址封存效率

參考國外經驗案例，台西盆地深層鹽水層之場址封存效率可設定為 0.25。

■ 氣體飽和度 (Sg)

參考國外經驗案例，台西盆地深層鹽水層之氣體飽和度可設定為 0.5。

■ 封存量計算

綜合第 1 ~ 第 7 項之參數，運用 GIS 之空間運算功能，將總數為 2,589 個單元網格之封存量評估因子予以乘積且加總之，即獲得台西盆地場址之總有效封存量約為 60.633 億噸，單元網格之封存量分布如圖 7 所示。

上述案例（情境一）有效封存範圍之北、西、南邊界係由深井探查或其他相關研究成果推估，其變異性不大；若保守起見，將場址東邊界改為距離彰化斷層 5 公里（情境二）時，則儲集層體積減為 320.48 km³，封存量亦減至 56.7 億噸。

經由 TOUGH-2 模擬二氧化碳可移棲範圍，將封存邊界設定在彰濱電廠預定地半徑 30 公里內（情境三），則儲集層體積減為 233.13 km³，封存量亦大幅縮減至 39.9 億噸。

若再考慮灌注效率，將封存深度設定在 3,000 公尺以內（情境四），則儲集層體積將減為 212.66 km³，封存量減為 37.1 億噸。

表 3 為四種情境下之封存量估算結果，可知台西盆地場址封存潛能之上、下界。未來將逐年提升封存參數之準確性，以滿足商業運轉所需之封存量評估精度。

地質封存方式可行

依照 Stefan Bachu 對含鹽水層盆地構造所定義的封存場址地質條件，台西盆地具有寬廣低滲透性的頁岩蓋層、高孔隙率的厚層砂岩儲集層、目標地層內少有斷層切穿、地震及地體活動度低、壓應力狀態之大地應力條件、冷地溫盆地利於超臨界二氧化碳灌注與封存等有利條件。

考量地質封存條件因素，設定台西盆地場址可封存範圍之北、西、南、東邊界。依不同封存情境條件（情境一 ~ 情境四），預估可封存體積約 350.33 km³ ~ 212.66 km³，蓋層為錦水頁岩、目標封存層為桂竹林層，設定封存深度為地表面下 800 m ~ 3,000 m。

以美國 DOE 封存量評估法為基礎，搭配台西盆地場址三維地質模型，以 GIS 單元網格法進行台西盆地場址之封存量計算，依不同封存情境，評估場址封存量之上界約 60 億噸、下界約 37 億噸。

現階段我國對封存場址所掌握的地質資料精度，所估計之封存量屬於有效封存量（Effective Capacity），未來將逐年提升封存參數之精度，以達商業運轉的最終目標。

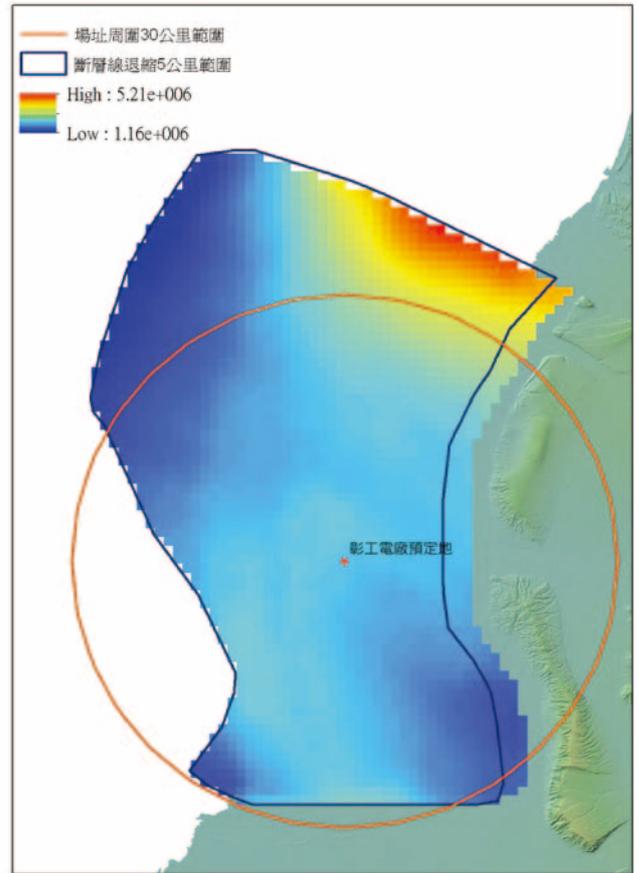


圖 7 封存情境一之單元網格封存量分布圖
(網格封存量單位：噸)

表 3 各封存條件情境之封存量結果比較

桂竹林層	情境一	情境二	情境三	情境四
砂岩含量	0.789	0.789	0.789	0.789
孔隙率	0.12 ~ 0.32	0.16 ~ 0.33	0.15 ~ 0.32	0.17 ~ 0.32
二氧化碳狀態密度 (kg/m ³)	704 ~ 782	706 ~ 768	716 ~ 768	716 ~ 766
貯留層體積 (km ³)	350.33	320.48	233.13	212.66
封存效率	0.25	0.25	0.25	0.25
Sg	0.5	0.5	0.5	0.5
封存量 (億噸)	60.6	56.7	39.9	37.1

情境一：封存範圍東邊界距離彰化斷層 2 km。
 情境二：封存範圍東邊界距離彰化斷層 5 km。
 情境三：情境二且封存範圍在彰濱場址半徑 30 km 內。
 情境四：情境三且封存底部深度限制在 3,000 m 內。

參考文獻

1. 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.

2. 台灣電力公司 (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, 案號: PDD-EGS-970303
3. 台灣電力公司 (2010), 二氧化碳地質封存試驗場址調查規劃與研究, 案號: R0159900001
4. Bachu, S., (2006), Site Selection for CO₂ Capture and Geological Storage (CCGS). Alberta Geological Survey and Alberta Energy and Utilities Board, Presentation material.
5. Sun, S. C., (1981), The Tertiary Basin of Offshore Taiwan, Proc. Sec. ASCOPE Conf. Exhib., Manila, Philippines, pp. 126-135.
6. 林國安、李明光、查美志 (1988), 鹿港區陸海域先中新世地層震測構造解釋, 中國石油公司探採研究彙報第 11 期, 第 98-124 頁。
7. Lin, A. T., (2001), Cenozoic Stratigraphy and Tectonic Development of the West Taiwan Basins, Ph.D. thesis, Univ. of Oxford, Oxford, UK, pp. 246.
8. Chadwick, A et al., (2007), Best Practice for the Storage of CO₂ in Saline Aquifers, CO2STORE_BPM_final_rev1.
9. 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。
10. CO2CRC 計畫網站資料, 2010。
11. Barbara N. McKee, (2008), Task Force for Review and Identification of Standards for CO₂ Storage Capacity Estimation Phase III Final Report, CSLF-T-2008-04.
12. 莊恭周, 周定芳 (1998), 竹苗地區石底層與木山層之儲集岩研究, 台灣石油地質第 32 期, pp. 187-210.
13. Chang, S. L., Stanley (張錫齡), 1968, Regional Stratigraphic Study of the Lower Miocene Formations in Northern Taiwan. Petroleum Geology of Taiwan, No. 6, pp. 45-70.
14. Chou, J. T. (周瑞燉), 1970A, A Stratigraphic and Sedimentary Analysis of the Miocene in Northern Taiwan. Petroleum Geology of Taiwan, No. 7, pp. 145-189.
15. 黃立勝 (1990), 臺灣西部晚新生代沈積盆地之地下溫度及地溫梯度之研究, 經濟部中央地質調查所彙刊, 第 6 號, 第 117-144 頁。

土木水利雙月刊

向您約稿

本刊出版有關土木水利工程之報導及論文, 以知識性、報導性、及聯誼性為主要取向, 為一綜合性刊物, 內容分工程論著、技術報導、工程講座、特介、工程新知報導及其他各類報導性文章及專欄, 歡迎賜稿, 來稿請 email:ciche@ciche.org.tw 及寄台北市仁愛路二段 1 號 4 樓 (郵遞區號 100), 中國土木水利工程學會編輯出版委員會會刊編輯小組收, 刊登後將贈送每位作者一本雜誌, 不再另致稿酬; 歡迎以英文撰寫之國內外工程報導之文章, 相關注意事項如後:

1. 工程新知及技術報導, 行文宜簡潔。
2. 技術研究為工程實務之研究心得, 工程講座為對某一問題廣泛而深入之論述與探討。工程報導為新知介紹及國內外工程之報導。
3. 本刊並歡迎對已刊登文章之討論及來函。
4. 工程論著及技術研究類文章, 由本刊委請專家 1 ~ 2 人審查, 來文請寄原稿, 請以電腦撰寫並寄行政服務電子郵件信箱或附磁片。
5. 文章應力求精簡, 並附圖表照片, 所有圖表及照片務求清晰, 且應附簡短說明, 並均請註明製圖者及攝影者, 請勿任意由網站下載圖片, 以釐清版權問題。