

本文章已註冊DOI數位物件識別碼

▶ 台西盆地南段晚中新世至更新世沉積地層作為碳地質封存層之探討研究

Carbon Dioxide Sequestration Assessment of Late Miocene to Pleistocene Sedimentary Strata in the Southern Flank of the Tai-hsi Basin

doi:10.30069/MM.201103.0010

鑛冶：中國鑛冶工程學會會刊, (213), 2011

作者/Author：焦中輝(C. H. Chiao);林俊余(J. Y. Lin);俞旗文(C. W. Yu);盧佳遇(C. Y. Lu)

頁數/Page：109-128

出版日期/Publication Date：2011/03

引用本篇文獻時，請提供DOI資訊，並透過DOI永久網址取得最正確的書目資訊。

To cite this Article, please include the DOI name in your reference data.

請使用本篇文獻DOI永久網址進行連結:

To link to this Article:

<http://dx.doi.org/10.30069/MM.201103.0010>



DOI Enhanced

DOI是數位物件識別碼（Digital Object Identifier, DOI）的簡稱，是這篇文章在網路上的唯一識別碼，用於永久連結及引用該篇文章。

若想得知更多DOI使用資訊，

請參考 <http://doi.airiti.com>

For more information,

Please see: <http://doi.airiti.com>

請往下捲動至下一頁，開始閱讀本篇文獻

PLEASE SCROLL DOWN FOR ARTICLE



台西盆地南段晚中新世至更新世沉積地層 作為碳地質封存層之探討研究*

Carbon Dioxide Sequestration Assessment of Late Miocene to Pleistocene
Sedimentary Strata in the Southern Flank of the Tai-hsi Basin*

焦中輝^{1,3} ■ 林俊余⁴ ■ 俞旗文⁵ ■ 盧佳遇²
C.H. Chiao^{1,3} J.Y. Lin⁴ C.W. Yu⁵ C.Y. Lu²

台灣電力公司為推動進行台西盆地CO₂地質封存、先導試驗場址地層深鑽與CO₂注入之計畫可行性研究，需先評估確認在場址地表下可能的儲集層、蓋層及上覆相關地層及其岩石特性。經參考前人對台西盆地地層剖面歷來研究調查成果，及注入超臨界相態二氧化碳於合適的地下深度範圍，本研究團隊初步擬定了盆地內晚中新世至更新世沉積地層，作為CO₂地表下封存層之可行性目標地層，並進行進一步分層探討。目標地層主要包括台灣中部地區桂竹林層、錦水頁岩、卓蘭層與頭嵛山層等四個地層。

透過諸多地表露頭剖面、附近地質鑽井與車籠埔斷層深鑽井TCDP-A等文獻蒐集資料，經整合分析研究區域內其岩性與沉積環境特性，將目標地層分為六種具代表性岩性單位，進行儲集層、蓋層與阻滯層之分層判別。並將分層判別結果，進一步結合附近鑽井地質資料及井測結果的對比，完成研究區域內二維、三維地質剖面分層判釋與模型建構。

本研究並以場址三維地質模型建構成果，結合數值分析，考慮了13層影響CO₂向上移動的分層，配合各層不同孔隙率與滲透率推估參數，以探討阻滯層的存在對移棲結果進行探討。最後，並對未來大規模注入的情境進行模擬，以探討類似地層結構下，以10孔併行注入，年封存CO₂量達一千萬公噸之可行性。

關鍵詞：台西盆地、地質封存、儲集層、蓋層、阻滯層、數值模擬

Taiwan Power Company is exploring the feasibility of carbon dioxide geo-sequestration. A site screening project identified a deep saline aquifer in the Tai-Hsi Basin as a potential candidate.

An extensive literal review and analysis of available geological data indicated that some Miocene to Pleistocene rock Formations including KT, CS, CL, and TK Formations are suitable for the geo-sequestration.

We divided the suitable formations into six major lithologic units and further subdivided them into three types of sequestration units including reservoir, cap rock, and retardation layer, based on their sedimentary environment and physical properties.

A sophisticate geologic model is thus established and thereby, a numerical simulation model is used to simulate the CO₂ geo-sequestration.

The numerical simulation considered 13 layers of sequestration related units each with different porosity and permeability. Results show that the existence of retardation layers can significantly hinder the upward migration of the injected plume. Results also showed that 50 years after injection and 30 years after closure of the injection wells, all injected plumes are safely contained within the sequestering layers. Our simulation results also showed the feasibility of a 10-injection-well sequestration scheme that could contain 10 million tons of CO₂ per year.

Key words: Tai-hsi Basin, Geological sequestration, Reservoir, Cap rock, Retardation layer, Numerical simulation

* 為九十九年十月七日中國鑛冶工程學會九十九年年會宣讀之論文

Paper presented at 2010 CIMME Annual Convention, October 7, 2010, Tainan.

國立台灣大學地質科學研究所¹ 博士班研究生² 教授

台灣電力公司電源開發處³ 組長⁴ 地質師

中興顧問社大地工程研究中心⁵ 副經理

一、前言

依據國際能源總署 (International Energy Agency, IEA) 出版之 2008 年世界能源展望 (World Energy Outlook, WEO) 報告⁽¹⁾ 敘述, 為了限制全球溫度平均增加超過工業發展前水準 2.4°C, 大氣中溫室氣體濃度須維持在 450ppm 左右。另依據該署出版之 2008 年能源技術展望報告^(2,3) (Energy Technology Perspectives, ETP) 推估, 於 2050 年全球 CO₂ 排放量將大幅提昇至 2005 年全球 CO₂ 排放量的 1.3 倍, 並在其提出之 CO₂ 減量諸項情境中 CO₂ 捕捉和封存 (Carbon dioxide Capture and Storage, CCS) 技術約佔 19%, 詳如圖 -1 所示。

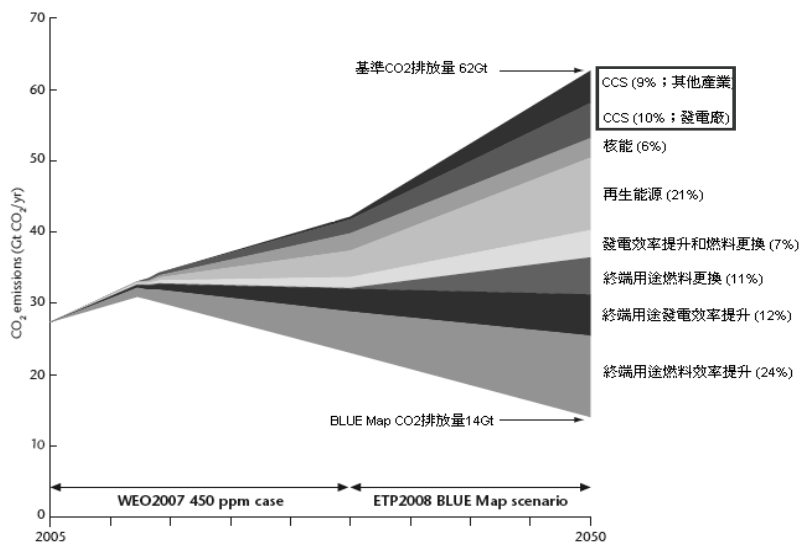


圖-1 CO₂排放量成長預測和相關CO₂減量因應對策 (修改自藍啟仁等, 2010)

有關我國國家減碳目標, 總統宣布將 2010 年訂為「節能減碳年」, 正是我國以全球最新觀點, 檢視目前因應氣候變遷相關策略, 啟動適合我國情需求之溫室氣體國家適當減緩行動 (Nationally Appropriate Mitigation Actions, NAMAs); 行政院環境保護署推動 NAMAs⁽⁴⁾, 完成我國 2020 年燃料燃燒 CO₂ 排放基線預測 (Business as Usual, BAU 高、中、低案), 將介於 4.20~4.67 億噸之間, 其情境可參見圖 -2 所示。另行政院宣示全國短程 CO₂ 減量目標於 2020 年回到 2005 年排放量 2.57 億噸。上述兩者差距 2.1 億噸為行政院訂出之 2020 年減碳目標。因此, CCS 技術未來將扮演填補減碳目標缺口之可能空間。

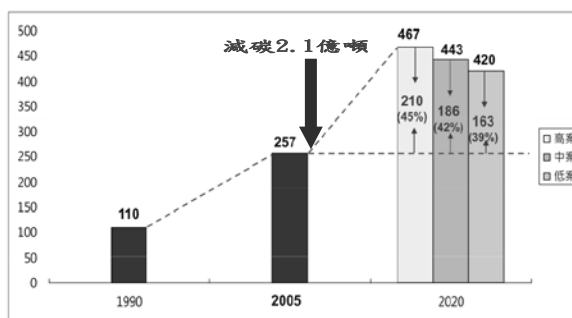


圖-2 2020年二氧化碳排放減碳量示意圖 (修改自行政院環境保護署, 99年7月23日)

為因應全球氣候變遷議題並落實政府減碳政策, 台灣電力公司目前正推動 CCS 技術以減少燃煤火力電廠 CO₂ 排放問題。於 2008 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」，作為台電力行減碳技術研發之第一階段工作，並根據各場址地質特性與條件，於 2009 年度評選出台西盆地南側為優選封存場址⁽⁵⁾，其大致位置如圖 -3 所示。鄰近該場址之盆地深層鹽水層 (Deep saline aquifer)，其 CO₂ 封存 經初步估算約為 45.18 億噸，如圖 -4 所示，符合台電需求。另考量此台電彰濱電廠預定地距台中火力電廠（國內 CO₂ 最大排放源）較近，且鄰近台西盆地海域，經評估後將其擇定為先導試驗場址，並於 2010 年度台電公司進一步辦理「地質封存試驗場址調查規劃與研究」。

本文主要為配合台西盆地 CO₂ 封存計畫及彰工電廠預定地先導試驗場址之可行性研究，進行在其地表下作為注入 CO₂ 可能的儲集層、蓋層及上覆相關地層之探討研究。

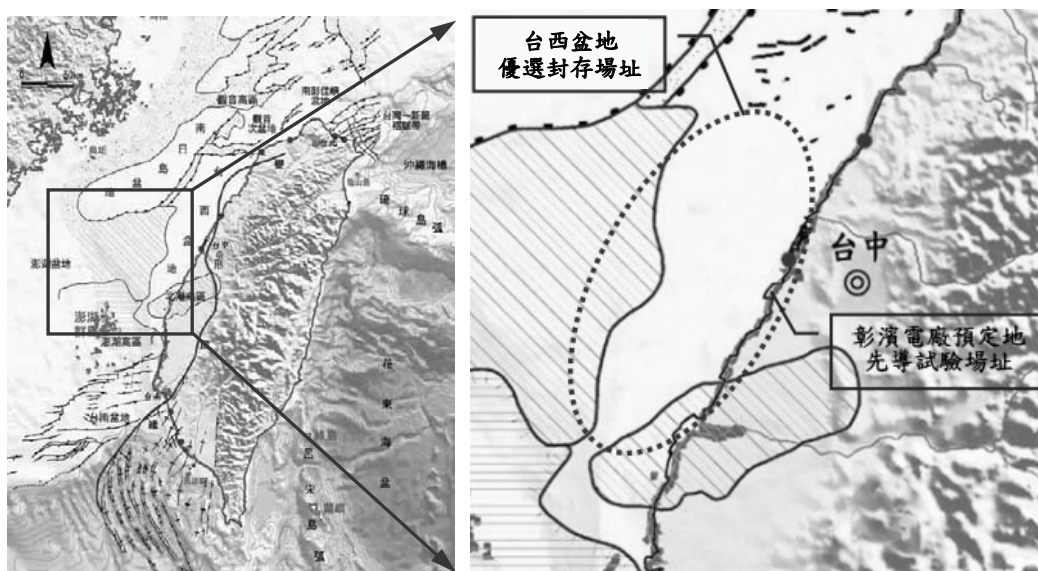


圖-3 台西盆地南側優選CO₂封存場址與先導試驗場址位置示意圖

柱竹林層	研判最小值	研判最可能值	研判最大值
砂岩含量	0.693	0.789	0.792
孔隙率	0.059	0.119	0.235
二氧化碳狀態密度(kg/m ³)	100.000	365.000	500.000
封存層體積(m ³)/1000	3333.000	4166.000	4999.000
封存效率	0.100	0.300	0.600
合計(億噸)	1.356	42.775	279.480
總計(億噸)	1.356	42.775	279.480
蒙地卡羅法觀測最大值(億噸)		154.925	
蒙地卡羅法觀測最小值(億噸)		5.637	
蒙地卡羅法觀測中值(億噸)		41.597	
蒙地卡羅法觀測平均值(億噸)		45.180	
10th percentile(億噸)		21.680	
90th percentile(億噸)		73.587	
研判最可能值(億噸)		42.775	
達到最可能值機率		52.26%	
達到最可能值10%範圍機率		60.16%	

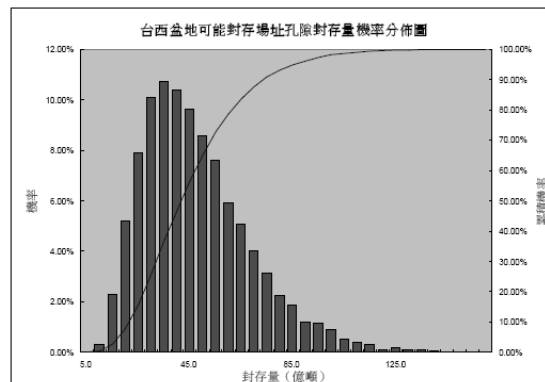


圖-4 台西盆地南側CO₂封存場址可能封存 機率分佈圖

二、封存場址區域地質探討

本研究參考台西盆地地層剖面⁽⁶⁾及 CO₂ 超臨界灌注深度範圍⁽⁷⁾，初步擬定了盆地內晚期中新世至更新世沉積地層作為 CO₂ 封存之儲集層、蓋層及上覆地層，並蒐集台灣中部地區桂竹

林層、錦水頁岩、卓蘭層及頭崙山層等四個地層相關之諸多地表露頭剖面、附近地質鑽井及與井測曲線⁽⁹⁾，及車籠埔斷層深鑽井(TCDP-A)一孔⁽¹⁰⁾等資料，以進行進一步探討研究。

研究區域主要以彰濱先導試驗場址為中心，北至 PST3 鑽井與明德水庫剖面連線，南抵 JC1 鑽井，東側含明德水庫、出磺坑、大甲及草湖溪四個剖面，西側至 BE1 與 WG1 鑽井連線，研究區域與參考鑽井位置，詳如圖-5 所示。

台灣恰位於呂宋島弧與歐亞板塊的碰撞構造活動劇之造山帶上⁽¹¹⁾。板塊的碰撞作用(弧-陸碰撞、陸-陸碰撞)導致造山帶朝西跨騎在大陸邊緣上，大陸邊緣受到造山帶荷重下壓，於台灣島西側形成周緣前陸盆地(Peripheral Foreland Basin)^(12,13)。

台灣前陸盆地發育在被动大陸邊緣上⁽¹⁴⁾，在北港高區以北，完整的地層層序由下而上分別包括：

- (1) 晚中新世桂竹林層、(2) 上新世錦水頁岩，乃至(3) 更新世卓蘭層與頭崙山層⁽¹⁵⁾，其地層對比情況，參見圖-6。目標研究區域，包括了台西盆地海域與本研究陸域範圍，均屬前述台灣前陸盆地的中段至南段部分。

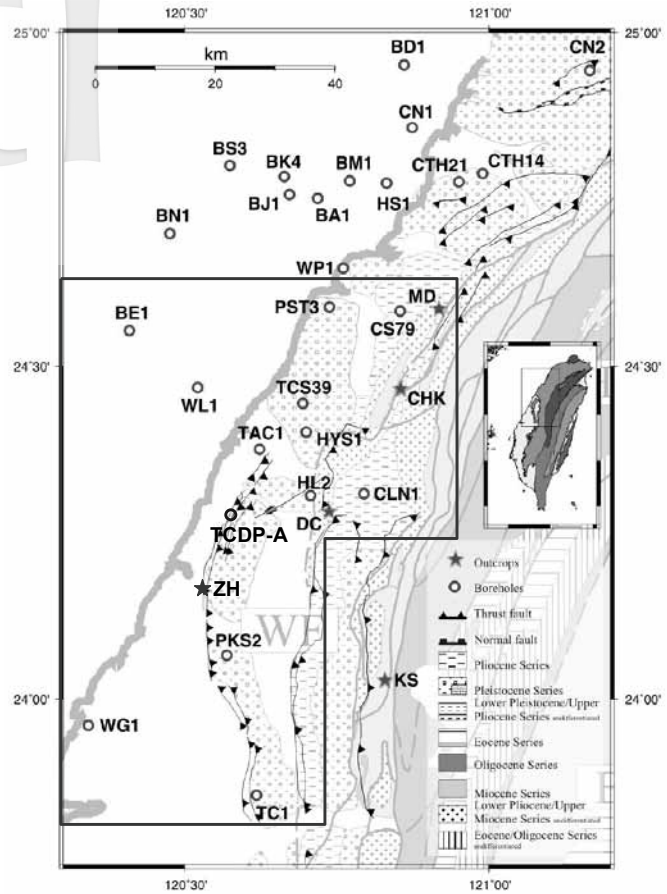


圖-5 本研究區域(多邊形紅色框)示意圖

修改自江紹平(2007)，何春蓀(1986)鑽井以紅色圓圈標示；剖面位置以紅色星星標示。其英文縮寫代表意義如下：MD=明德水庫剖面；CHK=出磺坑剖面；DC=大甲溪剖面；ZH=草湖溪剖面

三、研究方法

參考世界先進國家進行 CO₂ 地質封存計畫，例如在挪威 Sleipner 地區海床下 The Utsira 砂岩鹽水層中注入 CO₂。於 1994 年尚未灌注 CO₂ 前進行地球物理探查工作，在該砂岩層頂部發現兩層頁岩；於 1996 年灌注 CO₂ 後進行第二次地球物理探查工作，在該砂岩層中卻發現九層頁岩⁽¹⁷⁾。本研究認為一般 CO₂ 封存岩層建構分為儲集層及蓋層，可能無法反應出灌注 CO₂ 於地層中實際狀況。因此，在儲集層中可再分出阻滯層；在蓋層中可再分出儲集層。

本研究參考各地表露頭剖面之岩性、沈積構造、生物擾動指數、岩相、沉積相及層序地層，在分析 頭剖面後，分為六種具代表性岩相單位，包括：(1) 砂岩、(2) 泥質砂岩、(3) 砂泥(頁)岩互層、(4) 砂質泥(頁)岩、(5) 泥(頁)岩及，(6) 砂、泥(頁)岩與礫岩，並透過岩

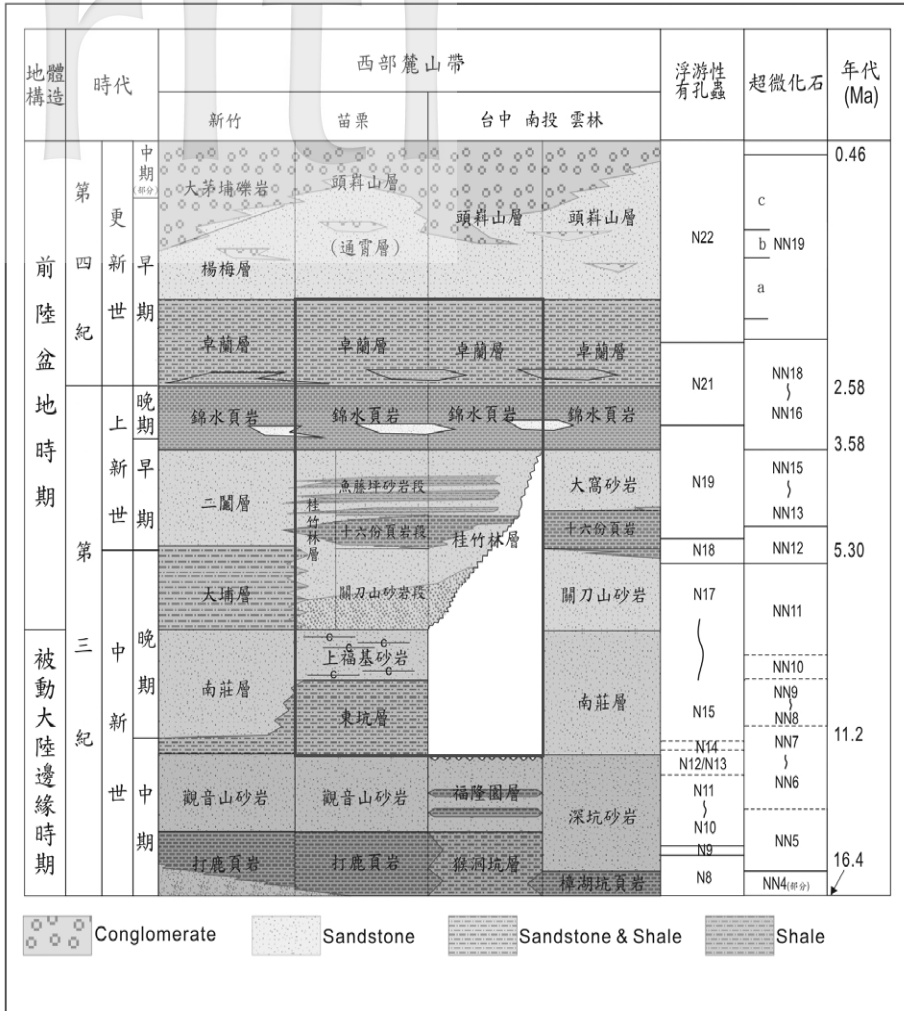


圖-6 前陸盆地地層對比圖

修改自陳華玟 (2009) (16)、江紹平 (2007) 謝凱旋與黃敦友 (2003)

性分類，進行 CO₂ 封存之儲集層、蓋層及阻滯層等分層判別，其初步結果詳如表 -1 所示。

表 -1 係本研究初次編製地表露頭剖面及岩心物理特性作為 CO₂ 封存分層判別表，由於參考資料仍屬有限，未來尚待更多的資料與驗證，以進行動態修訂。表中所指沈積環境，係岩性單位由離岸遠而近，分成五個沉積相，包括 (1) 遠濱相、(2) 濱面相、(3) 陸海交界相、(4) 三角洲體系、(5) 曲流河等，其沉積相與沈積環境所在地理位置示意圖，詳如圖 -7 所示。

另將各地表露頭地層柱，結合附近諸鑽井地質剖面及井測曲線 (Well logging data) 進行對比以完成二維地質剖面分層判釋，並繪製岩層及 CO₂ 封存之儲集層、蓋層及阻滯層等分層剖面圖。此等分析目的在進行研究區域地層沉積環境判釋，並配合參考各岩層等厚線圖，建構計畫場址三維地質模型以進行數值模擬，探討諸地層作為 CO₂ 封存之儲集層、蓋層具體的可行性。本研究方法以簡單的流程圖示意，如圖 -8。

表-1 地表霧頭剖面／岩心物理特性作為CO₂封存分層判別表

岩性名稱	砂岩含量百分比 (%)	沉積物粒徑	厚度 (T,m)	沉積環境	蓋岩層 (Cap Rock)	儲集層 (Reservoir)	阻滯層 (Retardation layer)
砂岩	100	極細砂~粗砂	T ≥ 10	下濱面-上濱面/堰洲島相/ 內遠濱-外遠濱(含暴風浪)		√	
泥質砂岩	80	極細砂~細砂	T ≥ 10	下濱面-上濱面/堰洲島相/ 內遠濱-外遠濱(含暴風浪)		√	
砂、 泥(頁)岩 互層	50	泥~極細砂	T ≥ 100	外遠濱-中遠濱-內遠濱	√		
		極細砂~中細砂	T ≥ 10	下濱面-上濱面/堰洲島相/ 內遠濱-外遠濱(含暴風浪)		√	
		泥~極細砂	100 > T ≥ 10	外遠濱-中遠濱-內遠濱/ 曲流河-沼澤相-潟湖相			√
砂質 泥(頁)岩	20	泥~極細砂	T ≥ 100	外遠濱-中遠濱-內遠濱	√		
		泥~極細砂	100 > T ≥ 10	外遠濱-中遠濱-內遠濱/ 曲流河-沼澤相-潟湖相			√
泥(頁)岩	0	泥	T ≥ 100	外遠濱-中遠濱-內遠濱	√		
			100 > T ≥ 10				
砂岩、 泥(頁)岩 與礫岩	20~50	泥~極細砂	100 > T ≥ 10	外遠濱-中遠濱-內遠濱/ 曲流河-沼澤相-潟湖相			√
			T ≥ 50				
	80	中細砂~礫		濱面相前/三角洲-三角洲前緣- 三角洲平原/瓣狀河		√	

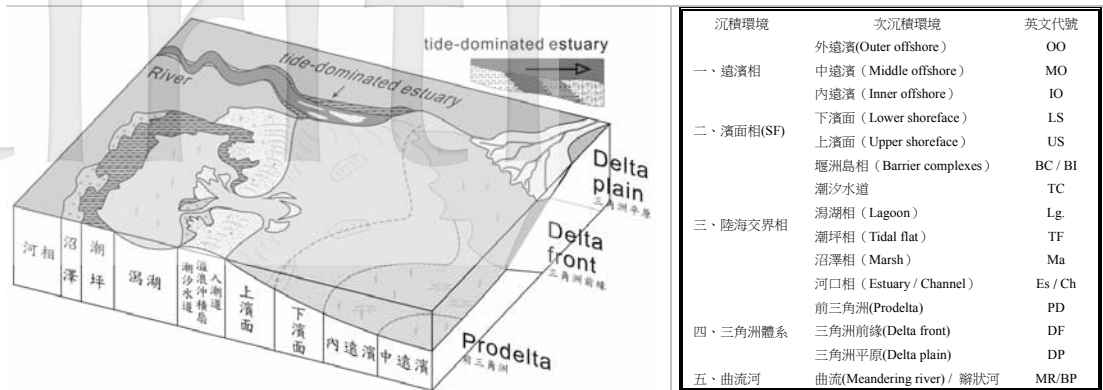


圖-7 沉積環境示意圖 (摘自江紹平, 2007)

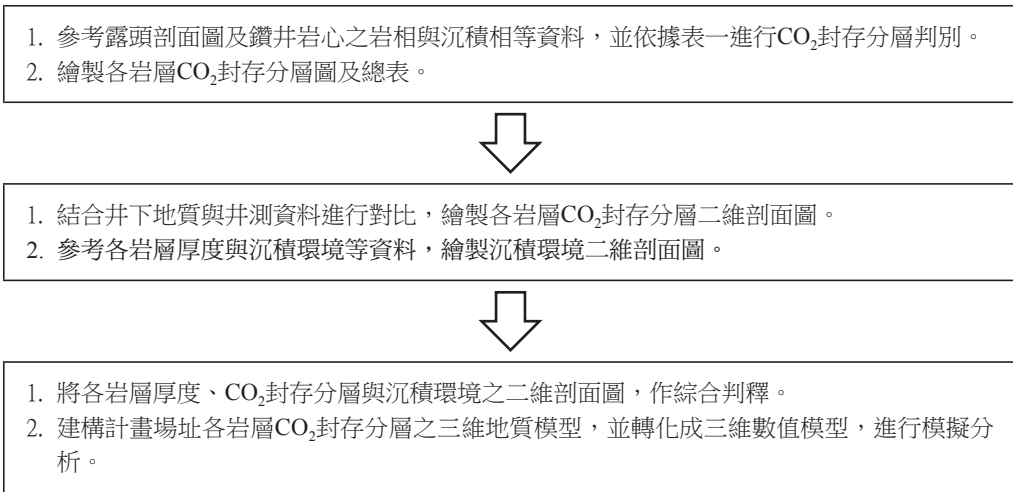


圖-8 研究方法與流程示意圖

四、蓋層、儲集層與阻滯層建構

為達建構各岩層 CO₂ 封存分層之目的，本研究中初步可將研究區域各目標指準地層評估劃分為「儲集層」、「蓋層」與「阻滯層」等三種分層。分層建構係用上節所述之研究方法與流程，依序可分為以下四大部分來說明：

(一) 各岩層 CO₂ 封存分層建構

台灣中部地區晚中新世「桂竹林層」由下而上可劃分為 (1) 關刀山砂岩段、(2) 十六份頁岩段，與 (3) 魚藤坪砂岩段等三個岩段。該等岩段 CO₂ 封存分層建構主要依據明德水庫、出磺坑、大甲等三個地表露頭剖面圖；上新世「錦水頁岩」，至更新世「卓蘭層」與「頭料山層」，主要係參考草湖溪地表露頭剖面圖，以及車籠埔斷層深鑽井 TCDP-A 等資料。據剖面圖所記載資料，將若干主要分層建構控制參數，包括 (1) 擾動指數、(2) 岩性、(3) 岩石地層分類、(4) 目視厚度、(5) 砂岩含量百分比，與 (6) 沉積環境判釋成果，進行綜合對比研判後，進行分層建構。

以明德水庫地表露頭剖面圖(如圖-9所示)為例,近600公尺剖面長度中,除十六份頁岩段約30公尺剖面長度外,包括其上部的魚藤坪砂岩段,下部的關刀山砂岩段與上福基砂岩段,均適合成為「儲集層」,但其間有若干厚度約為10~35公尺的「阻滯層」間歇性地存在,將可能阻滯影響注入CO₂向上移動的速度。

以草湖溪地表露頭剖面圖(如圖-10所示)為例,於剖面指標220~1198公尺之間,近1000公尺的卓蘭層剖面長度中,上部(剖面指標485~1198公尺)近700公尺均為適合成為「儲集層」的地層,下部(剖面指標220~485公尺)近300公尺應可適合成為「蓋層」的候選地層;此外,於候選的「儲集層」內,其間同樣有若干厚度約為12~34公尺不等的「阻滯層」存在。

圖-11所示係以車籠埔斷層深鑽井—TCDP-A探井所取得井柱圖為例進行研判,井深標示1300公尺以內,約有287公尺井柱長為錦水頁岩,此段應可適合成為「蓋層」的候選地層。1300公尺以下,約有85公尺井柱長的魚藤坪砂岩段,則為適合成為「儲集層」的地層。值得注意的是,適合成為「蓋層」的錦水頁岩,其間可能存在有若干厚度約為11~24公尺不等的「儲集層」存在,其岩性較具砂岩特性,可能影響「蓋層」的封閉性。

圖-9、圖-10、圖-11中沉積環境判釋成果所示英文代號所代表意義,詳如圖-7所示。表-2所示為台灣中部地區,晚中新世至更新世間的沉積地層,作為二氧化碳地質封存目標岩層分層建構的成果。經地表露頭剖面圖及車籠埔斷層深鑽井的地質分析,本研究大致可建構各目標岩層於CO₂封存的功能性分層中,所扮演的角色。

(二) 各岩層CO₂封存分層與井測資料二維剖面判釋

本研究區域晚期中新世至更新世沉積地層,經各目標地層CO₂封存分層建構分析,能滿足作為儲集層之地層應為桂竹林層。其上方具有厚且延伸性良好蓋層條件的,僅有錦水頁岩與卓蘭層中段。依據明德水庫、出磺坑、大甲等三個地表露頭剖面圖與附近鑽井井測資料,包括自然電位(SP)、伽瑪射線(GR),與電阻(Resistivity)等電測曲線,進行綜合判釋後,可將桂竹林層與錦水頁岩對比繪製成作為CO₂封存分層的主要目標地層。

如圖-12所示為例,顯示某研究區內儲集層、蓋層及阻滯層分層對比成果圖。此成果圖係綜合台灣西部麓山帶3頭剖面與6口鄰近鑽井之地質資料所得。其中係以桂竹林層作為主要的「儲集層」所在地層,錦水頁岩則作為主要的「蓋層」所在地層;「儲集層」所在地層當中,則存在若干「阻滯層」。

(三) 各岩層厚度與沉積環境二維剖面判釋

本研究依據明德水庫、出磺坑、大甲溪等地表露頭剖面圖及車籠埔斷層深鑽井TCDP-A等資料,整合繪製出桂竹林層頂部同高程之各岩段厚度變化與沉積環境剖面分析圖,詳如圖-13所示。

依此剖面分析圖,顯示出各岩段沉積環境之分布,茲分別說明如下:

■關刀山砂岩段下部在出磺坑剖面與明德水庫剖面之沉積環境為受潮汐作用影響的河口相,而在大甲溪剖面為堰洲島與潟湖相,其餘部分為上濱面至中遠濱相;

■十六份頁岩段屬於內遠濱相至外遠濱相;

■魚藤坪砂岩段,在車籠埔斷層深鑽井為濱面至中遠濱相,在大甲溪剖面為堰洲島與潟湖相,其餘部分為潮汐主導之三角洲至上濱面相。

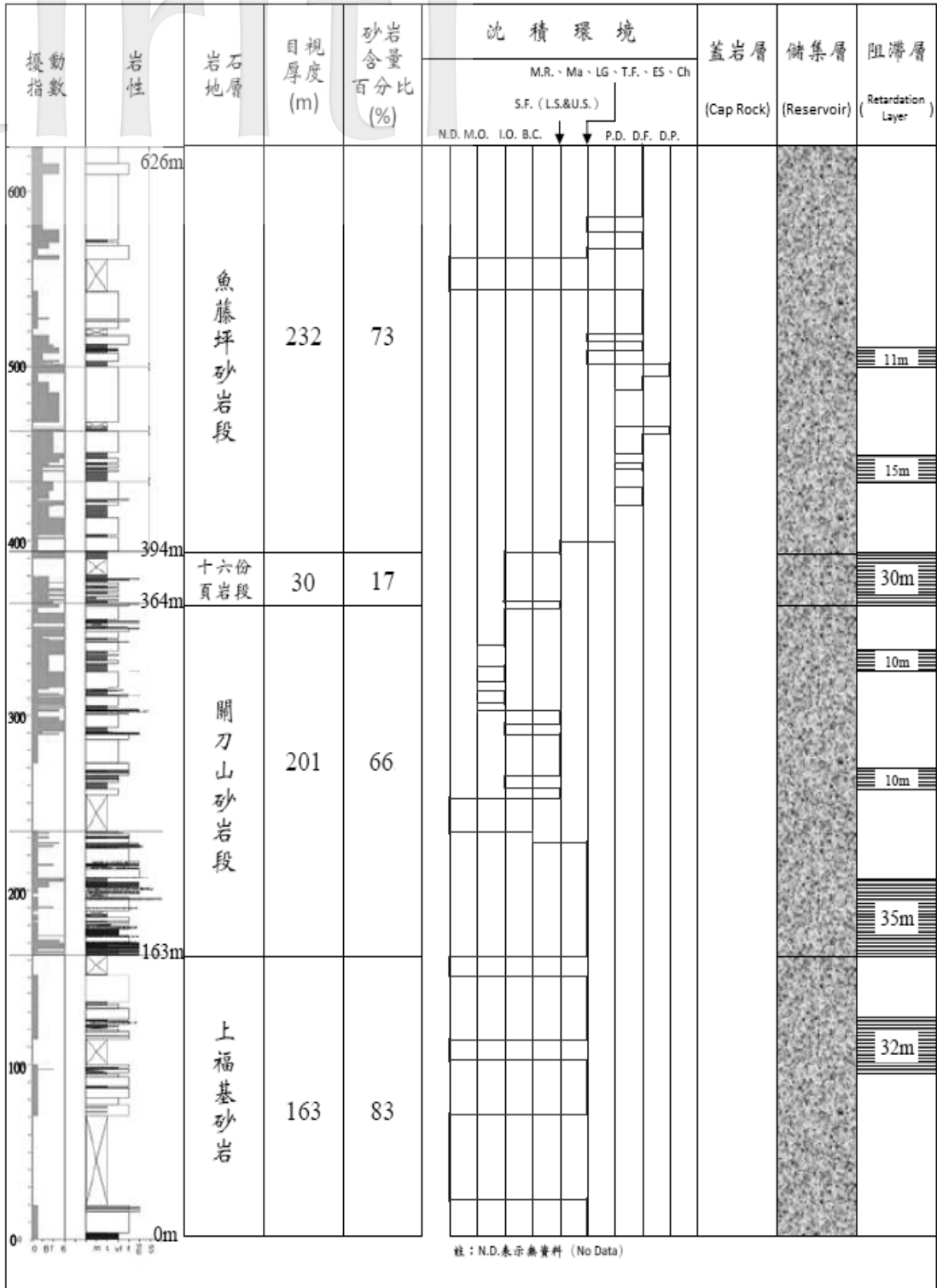


圖-9 明德水庫地表露頭岩層特性、沉積環境及作為CO₂封存分層一覽表
(修改自江紹平, 2007)

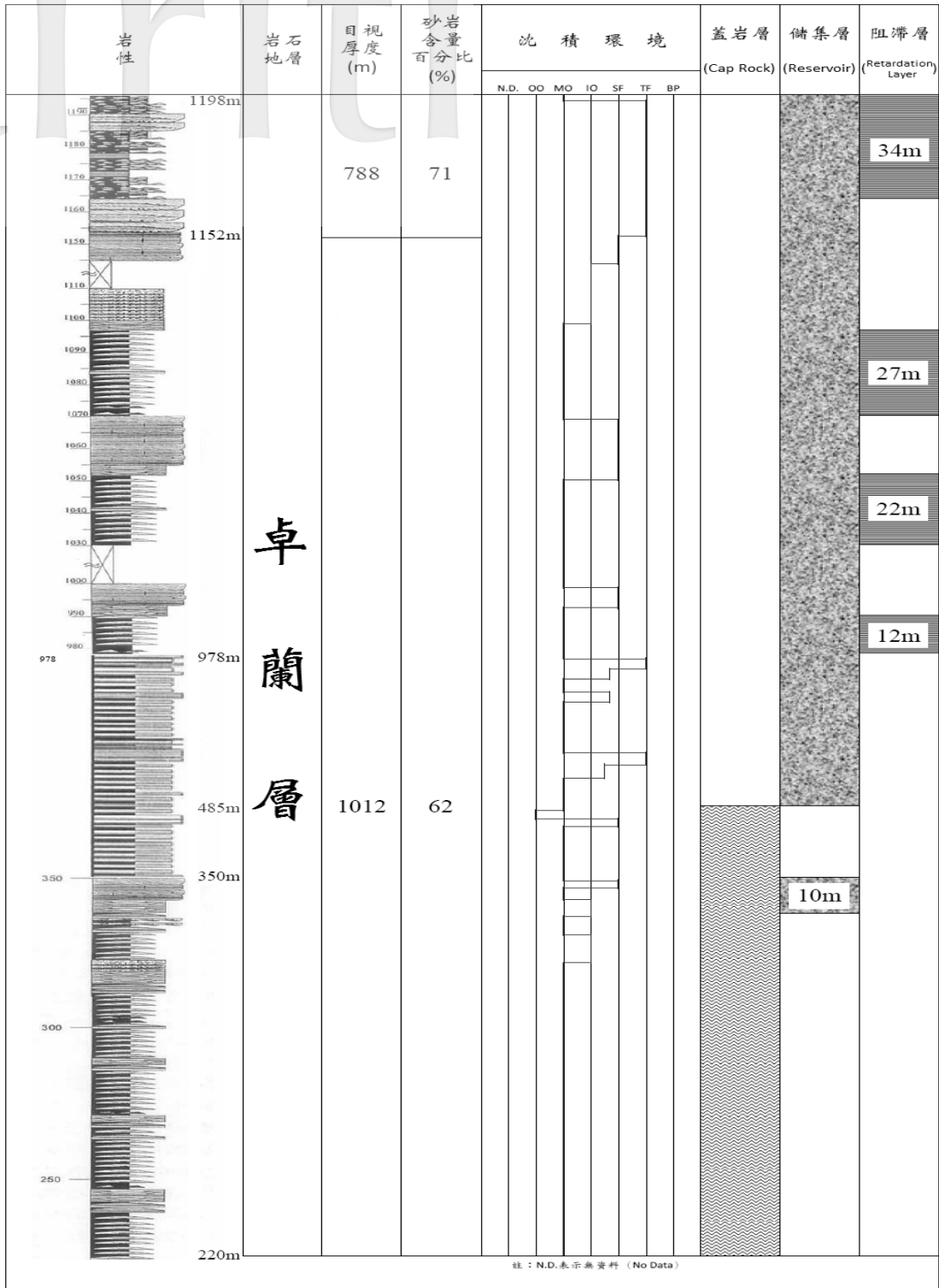


圖-10 草湖溪地表露頭岩層特性、沉積環境及作為CO₂封存分層一覽表
(修改自楊志成, 1997)

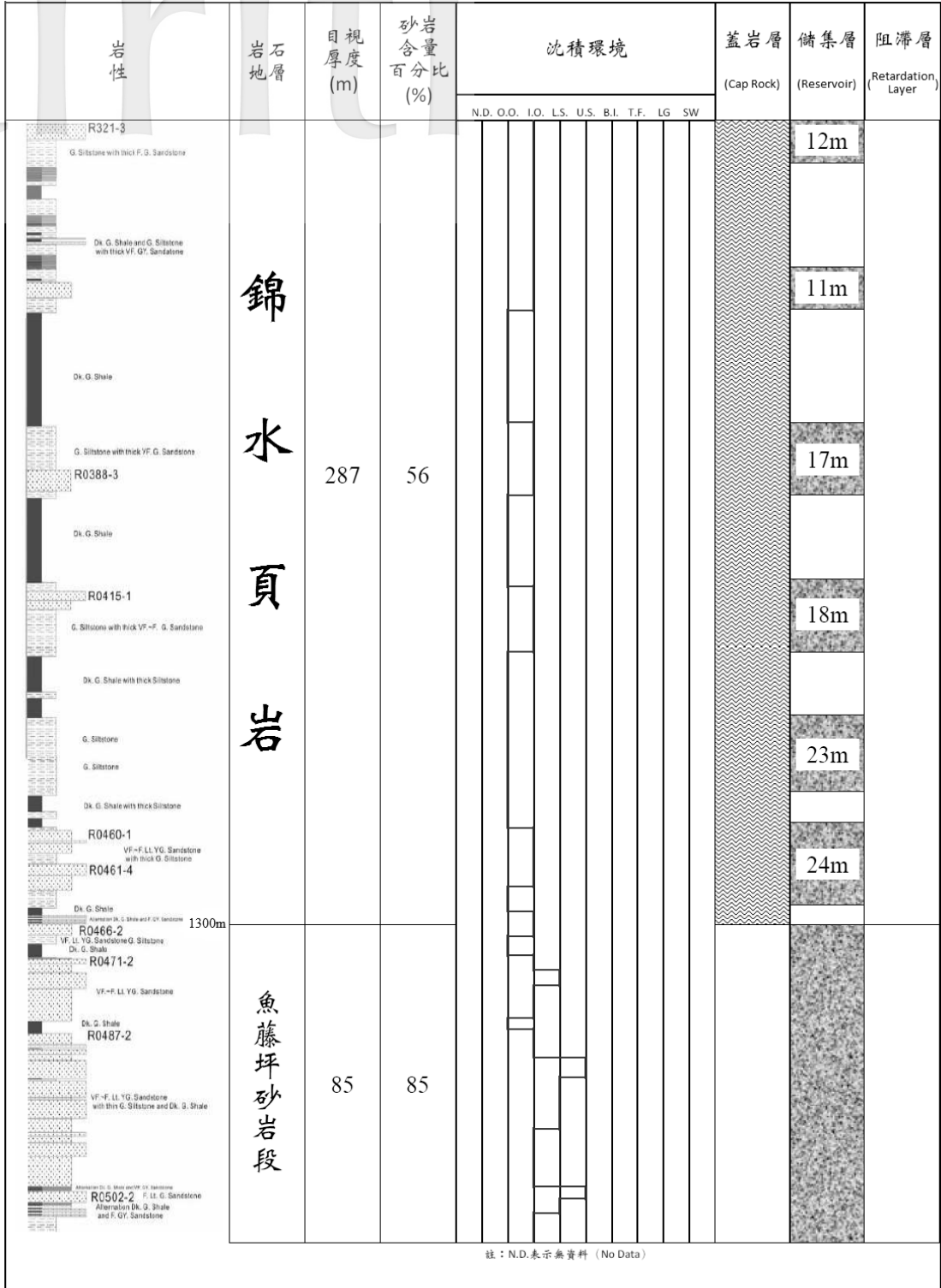


圖-11 車籠埔斷層深鑽井-TCDP-A岩層特性、沉積環境及作為CO₂封存分層一覽表 (修改自王順民, 2006)

表-2 台灣中部晚期中新世至更新世沉積地層作為二氧化碳地質封存建構一覽總表

地質年代	岩石地層	目視厚度 (m)					砂岩含量百分比 (%)					沉積環境					蓋岩層 (m)					儲集層 (m)					阻滯層 (m)									
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5					
第四紀	更新世	1460					79					三角洲平原與前緣										1415														
	早期	788 500					71 75					潮下帶或潮坪					0					754 330					45									
第四紀	更新世	1012					62 62					中-內遠濱相					320 162					631 280					34 170									
	早期	140 287					15 56					內遠濱相					120 166					20 121					61 71									
第三紀	上新世	73					85					內遠濱相					206 250 82					35					85					38				
	早期	魚藤坪砂岩段	232	270			73	86	70			85	潮之三角導洲至上海濱面				中遠濱-濱面					82					26 20 0					26				
第三紀	早期	桂竹林層	30	32	11		46	17	10	5		66	內-中遠濱相				外遠濱-中遠濱					20					30 32 11									
	早期	十頁岩段											上濱面至中遠濱				中遠濱-上濱面					89					279 20					10				
第三紀	中中新世	關刀山砂岩段	109	153	95		74	81	88			92	上濱面至中遠濱				中遠濱-上濱面					57 13					35 30									
	晚中新世	關刀山砂岩段											受潮影響之河口相																							

圖例： 1 明德水庫剖面 2 出磺坑剖面 3 大甲溪剖面 4 草湖溪剖面 5 車籠埔TDCP-A鑽井

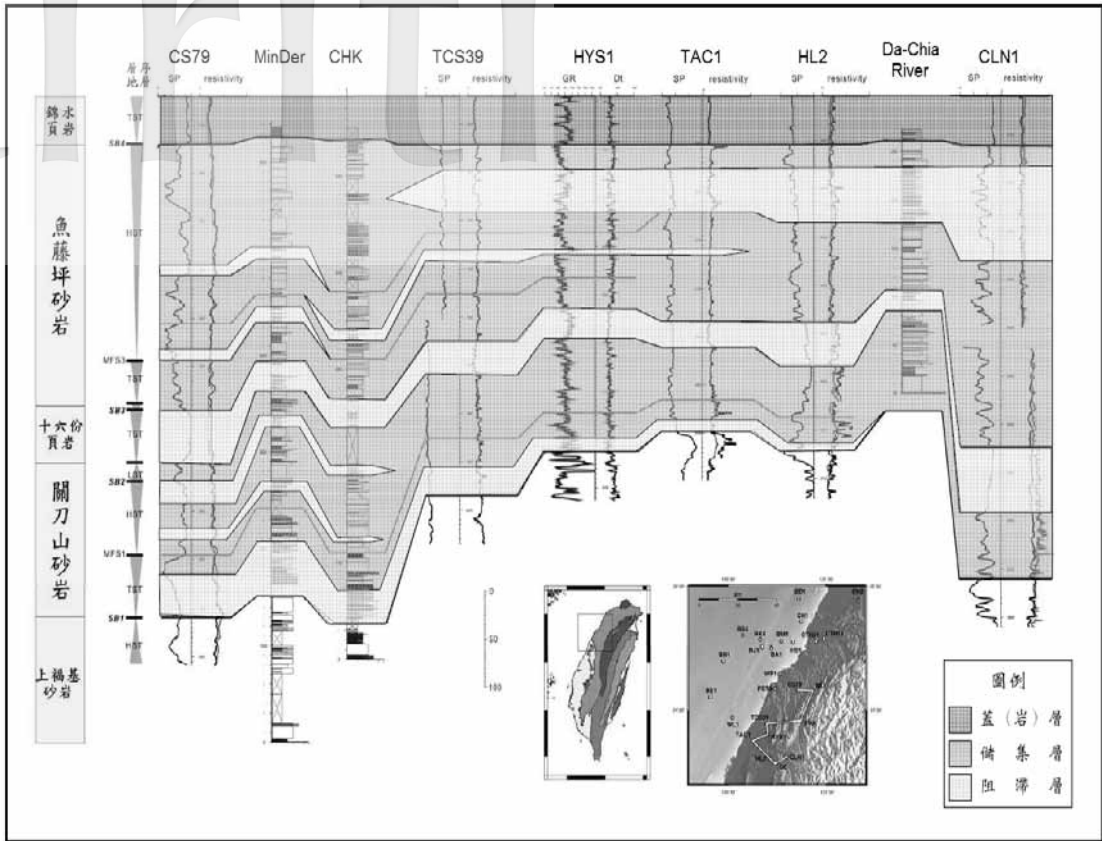


圖-12 台灣西部麓山帶3 頭剖面與6口鄰近鑽井之儲集層、蓋層及阻滯層分層對比圖
(修改自江紹平, 2007)

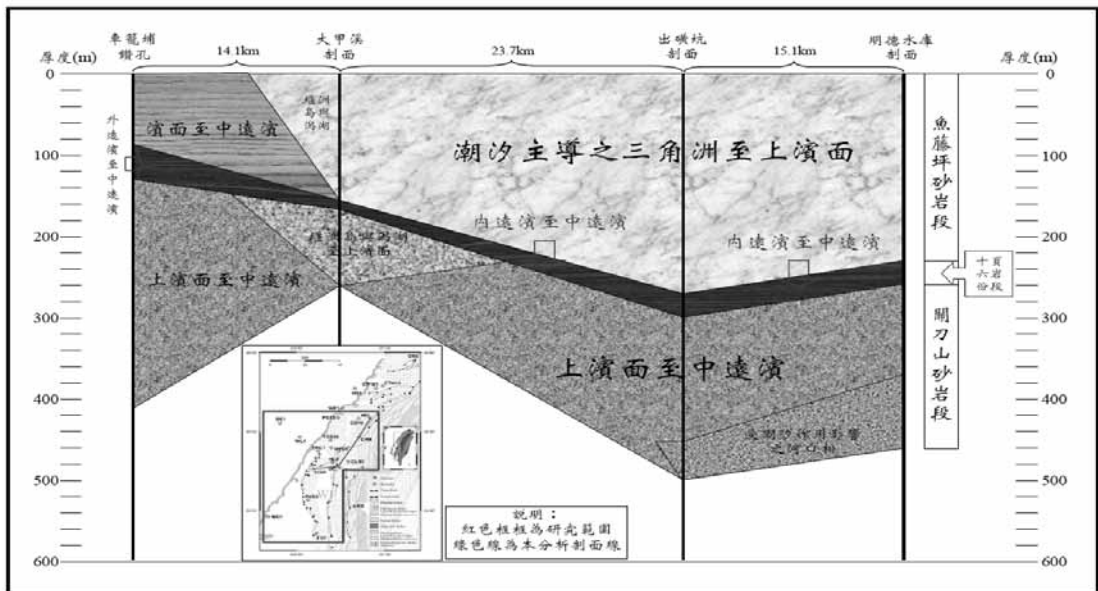


圖-13 台灣中部地區桂竹林層厚度變化與沈積環境分析示意圖

另錦水頁岩、卓蘭層與頭嵛山層，經由草湖溪地表露頭剖面圖可劃分為四種沉積相，分別說明如下：

- 錦水頁岩為外遠濱相；
- 卓蘭層中下部為中—內遠濱相；
- 卓蘭層上部為三角洲前緣的潮下帶或潮坪環境；
- 頭嵛山層為三角洲平原與前緣環境。

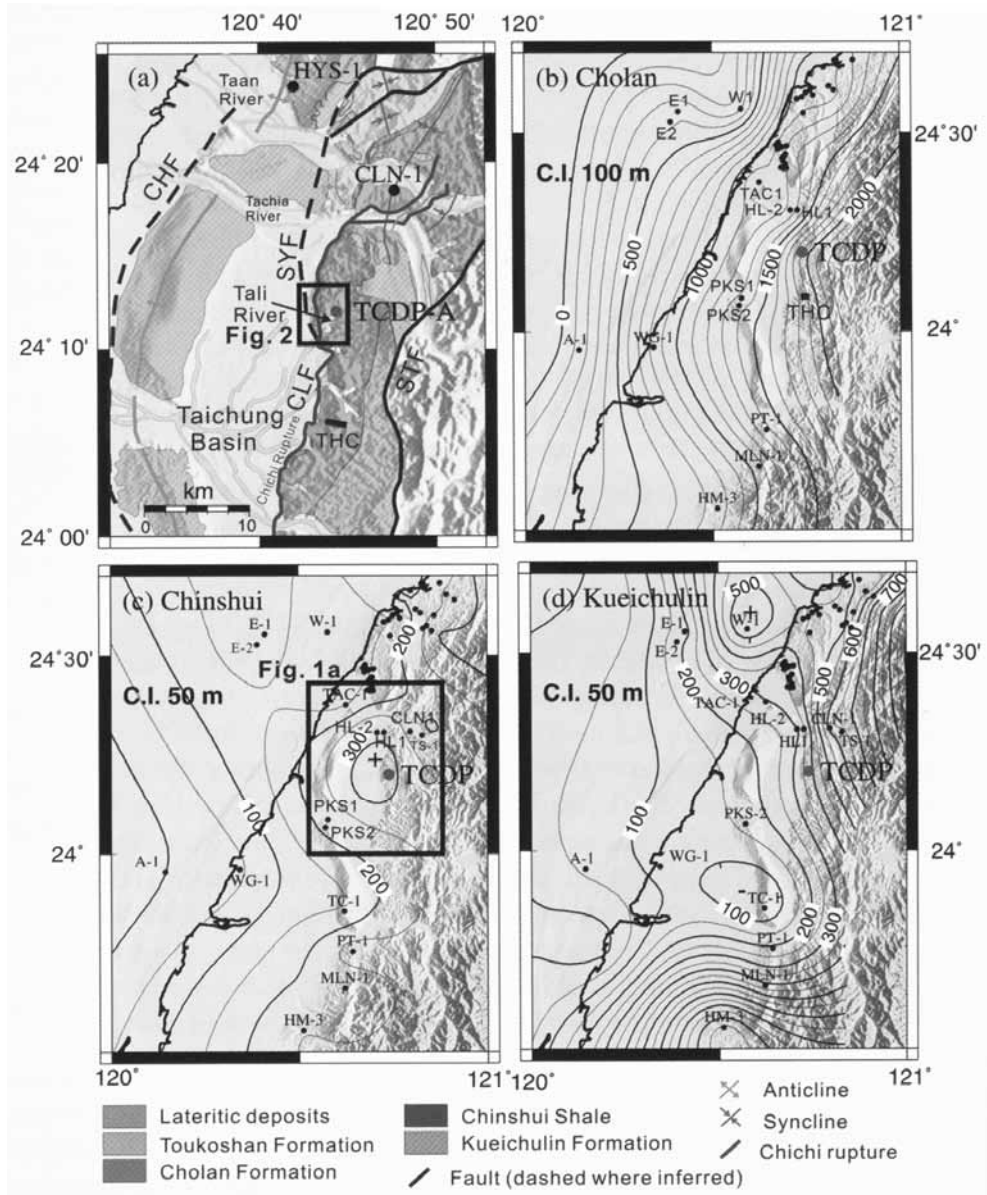


圖-14 台灣中部目標地層等厚圖資料
 (a)研究地區、(b)卓蘭層等厚圖、(c)錦水頁岩等厚圖、(d)桂竹林層等厚圖
 (摘自林殿順, 2007)

(四) 各岩層厚度、分層與沈積環境綜合判釋及三維地質模型建置

如圖 -14 所示為林殿順 (2007) 以中油的地質探勘資料為主，整理所得台灣中部桂竹林層、錦水頁岩及卓蘭層等三地層的等厚圖成果。依據本文上述三項整合分析資料並參考結合各岩層等厚圖，並加以綜合判釋，可將本研究鎖定之台灣中部地區目標地層桂竹林層 (晚期中新世) 建構為 CO₂ 封存之儲集層；錦水頁岩 (上新世) 與卓蘭層 (更新世) 中部建構為蓋層；卓蘭層下部、上部及頭崙山層 (更新世) 分別為儲集層。但卓蘭層上部及頭崙山層缺少蓋層，推估其厚度在 1000m 以上，應可作為防止 CO₂ 逸出良好的緩衝帶。

表 -3 所示為自桂竹林層、錦水頁岩，與卓蘭層等序列地層作為二氧化碳地質封存功能性分層的建構成果，依功能性共區分為 13 層。茲說明如下：

- 桂竹林層：各岩段由下而上順序區分為 7 層，關刀山砂岩段有數條阻滯層呈尖滅狀、延展性不佳，不予分層，視為單一儲集層；十六分頁岩為單一延展性良好的阻滯層；魚藤坪砂岩段有 1~3 條延展性良好的阻滯層，取平均值 2 條作分層，而將魚藤坪砂岩段區分為 2 條阻滯層及 3 條儲集層，共計 5 層。
- 錦水頁岩：為一延展性良好的蓋層，中間夾有一薄層儲集層，區分為 3 層。
- 卓蘭層：區分為 3 層，下部有數條厚薄不一的阻滯層，延展情況不明，不予分層，視為單一儲集層；中部為單一延展性良好的蓋層。卓蘭層上部與頭崙山層之砂岩顆粒變粗分別視為單一儲集層。

表-3 目標地層作為二氧化碳地質封存功能性分層建構成果

目標地層	岩段	功能性分層	儲集層/蓋層/阻滯層	注入井下頂部深度推估 (m)	推估孔隙率 (%)	推估滲透率 (mD) m ²
卓蘭層		(1)上部「儲集層」	高滲透性砂岩	1242	25	(10 ⁶) 10 ⁻⁹
		(2)中部「蓋層」	單一延展性良好的蓋層	1562	10	(10 ²) 10 ⁻¹³
		(3)下部「儲集層」	中低滲透性砂岩為主	2054	15	(10 ⁴) 10 ⁻¹¹
錦水頁岩		(4)上部「蓋層」	單一延展性良好的蓋層	2160	7	(10 ¹) 10 ⁻¹⁴
		(5)中部「儲集層」	低滲透砂岩為主	2177	12	(10 ³) 10 ⁻¹²
		(6)下部「蓋層」	單一延展性良好的蓋層	2201	7	(10 ¹) 10 ⁻¹⁴
桂竹林層	魚藤坪砂岩段	(7)上部「儲集層」	低滲透砂岩為主	2217	12	(10 ³) 10 ⁻¹²
		(8)上部「阻滯層」	延展性良好的阻滯層	2280	7	(10 ¹) 10 ⁻¹⁴
		(9)中部「儲集層」	低滲透砂岩為主	2300	12	(10 ³) 10 ⁻¹²
		(10)下部「阻滯層」	延展性良好的阻滯層	2316	7	(10 ¹) 10 ⁻¹⁴
		(11)下部「儲集層」	低滲透砂岩為主	2343	12	(10 ³) 10 ⁻¹²
	十六分頁岩	(12)「阻滯層」	單一延展性良好的阻滯層	2367	7	(10 ¹) 10 ⁻¹⁴
	關刀山砂岩段	(13)「儲集層」	有數條阻滯層呈尖滅狀、延展性不佳，不予分層，視為單一儲集層	2391 (底部 2484)	20	(10 ⁵) 10 ⁻¹⁰

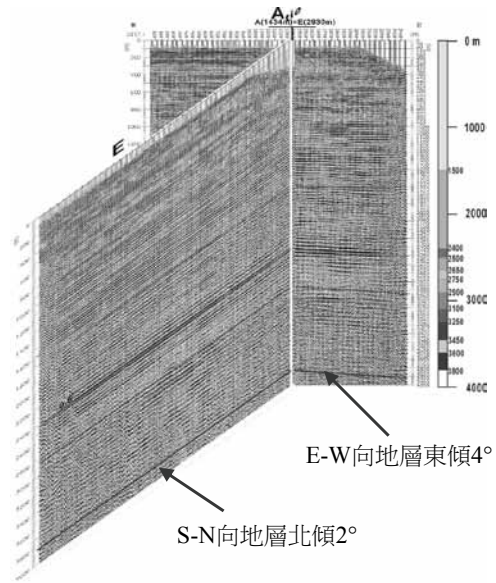
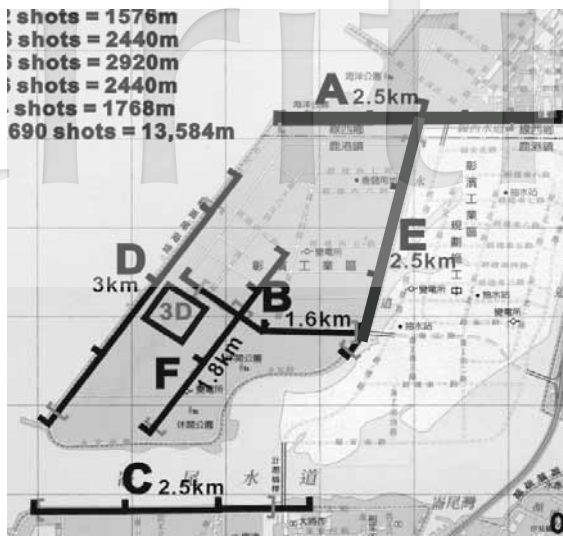


圖-15 彰工預定地封存試驗場址交叉震測剖面反射層視傾角示意圖

於 2010 年台電進行彰工預定地「地質封存試驗場址調查規劃與研究」，由場址地表反射震測測得部份成果，詳如圖 -15 所示。經地層對比解釋，地表下岩層位態走向約為南北向，視傾角約呈 2° 北傾。由王功一號井至彰濱電廠預定地相距約 15km，如按上述岩層視傾角 2° 計算，其兩地地層層位落差約為 524m。依此推估，桂竹林層底部位於王功一號井地表下 1971m 處⁽¹⁸⁾，故延伸至彰濱試驗場址地表下之估算深度約為 2500m 左右。

茲參考台西盆地場址三維地質模型之各地層面頂部的數值地形資料⁽⁵⁾，再併入上述各目標地層厚度，並配合桂竹林層底部估算深度 2500m 將分層建構成果向下作平移調整，即可建置完成含分層建構成果的更新三維地質模型。

五、三維數值模型建置與初步數值模擬分析

本研究將上述台西盆地場址三維地質更新模型轉化成數值模型後，作為建置數值分析所需之網格系統，單一網格形狀採用矩形模式，其分析總網格數初步達 43,200 個。為減少電腦模擬分析運算時間，本次模擬區域僅採用該數值模型東側區域，佔總面積約 1/3 範圍，其網格數下降為大約 25,000 個。此範圍足以包含彰濱先導試驗場址鑽井於注入 CO₂ 後影響範圍，參見如圖 -16 所示。

依各分層厚度與注入井距離於垂直及水平方向，劃分成間距不等之疏密網格，以求可適度真切反應注入井附近之壓力變化與地層孔隙間 CO₂ 飽和度變化狀況。

所有地層分層分析使用輸入參數，係經參考台灣西部區域可能封存層之孔隙率統計表⁽⁵⁾及適當蓋層與儲集層岩石孔隙率、滲透率一般經驗值關係表⁽¹⁹⁾作適當擷取及調整，其結果參見表 -4 所示。蓋層及阻滯層輸入採用之孔隙率大約為 7~11%；儲集層輸入孔隙率大約介於 12~25%；其中以關刀山砂岩 (20%) 與卓蘭層上部 (25%) 為孔隙最大的儲集層層位。滲透率參數方面，蓋層及阻滯層輸入滲透率大約為 10~100 mD(10⁻¹⁴~10⁻¹³ m²)，儲集層輸入滲透率大約為

$10^3 \sim 10^6 \text{ mD} (10^{-12} \sim 10^{-9} \text{ m}^2)$ 。

模擬分析時注入井參數設定如表 -4 所示。本研究分析情境旨在試探性模擬阻滯層於封存目標地層中可能的阻滯行為，因此蓋層及阻滯層均採用較高滲透率 (分類屬半滲透材料或 Semi-pervious 材料) 進行輸入，因此可歸類為保守模擬分析。

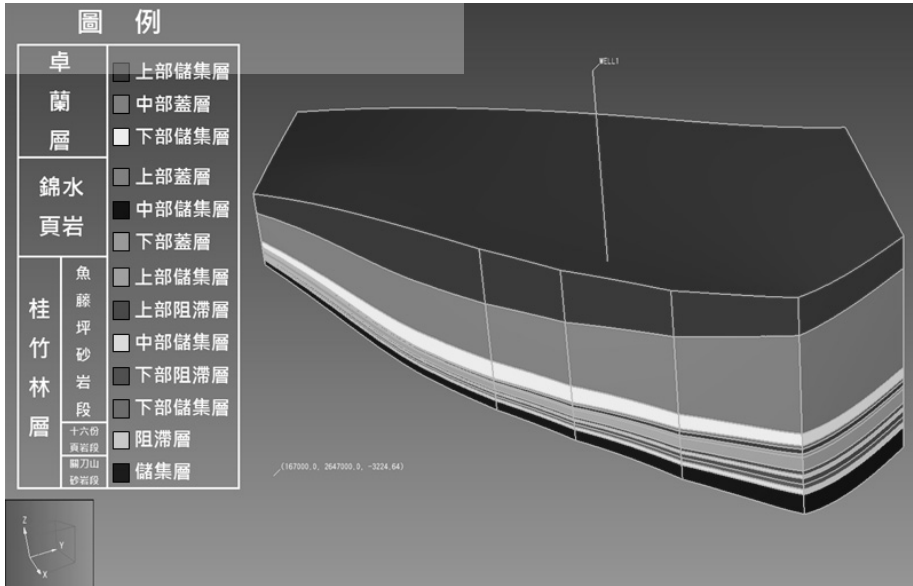


圖-16 台西盆地東側三維地質更新模型之各地層分層示意圖

表-4 台西盆地做為二氧化碳地質封存鑽井使用參數一覽表

先導試驗場址鑽井各項參數設定值	
座標 (TWD97)	E187834 / N2665393
井深 (地表下)	-2480m
*注入範圍 (地表下)	-2420m ~ -2430m
注入速率	1M-ton/yr (31.6 kg/sec)
注入時間	30 yrs
注入監測時間	50 yrs

註：*注入範圍10m以紅色線段標示於圖-17與圖-18 (a)注入井下方部位。

於上述假定輸入參數條件下，本研究初步模擬結果，於 E-W 及 S-N 向兩相交剖面上，觀察注入井自 CO₂ 注入後 (7 年、20 年、30 年) 至停止灌注 20 年 (累積 50 年) 後監測期間，於台西盆地深部鹽水層內的移棲狀況，及 CO₂ 飽和度變化趨勢，詳如圖 -17 所示。

分析成果顯示：

- 於注入初期 (約 10 天至 60 天)，注入 CO₂ 向關刀山砂岩段儲集層內滲入及擴散情形；並於關刀山砂岩儲集層內，注入團流 (Injected plume) 呈現增厚並開始上浮之現象；
- 於注入 2 年後，CO₂ 已移棲至十六分頁岩阻滯層底部，並因浮力作用向岩層傾角上方擴

散；於注入後 2~3.5 年間，CO₂ 移棲至魚藤坪砂岩段下部儲集層內及下部阻滯層底部，並向岩層傾角上方擴散；於注入後 4~6 年間，CO₂ 移棲至魚藤坪砂岩段中部儲集層內及上部阻滯層底部，並向岩層傾角上方擴散；於注入 7 年後，CO₂ 移棲至魚藤坪砂岩段上部儲集層內及錦水頁岩下部蓋層底部，並向岩層傾角上方擴散；

■於注入 8 年後，CO₂ 移棲至錦水頁岩中部儲集層內及錦水頁岩上部蓋層底部，並繼續向岩層傾角上方擴散；於注入後 8~14 年間，CO₂ 逐漸移棲至卓蘭層下部儲集層、中部蓋層及上部儲集層；於注入後 14~30 年間，CO₂ 已到達卓蘭層上部高程約 -1442m 處。

由於卓蘭層岩層結構較疏鬆，岩層中含有頁岩層，惟孔隙率較大而阻滯效果不佳。因此，在本層 CO₂ 分布呈柱狀而向兩側移棲之趨勢未若有蓋層者明顯，如圖 -18(a)，由停止灌注後並監測至 50 年時之 CO₂ 濃度分布狀況，顯示 CO₂ 只至移棲卓蘭層上部，約在地表下 -1402m 處，距離卓蘭層頂部高程 (-1242m) 仍約有 160m 之距離，顯示 50 年後 CO₂ 並未穿透卓蘭層，本地層之封存系統仍處於 CO₂ 超臨界穩定狀態 (-800m 以下)。

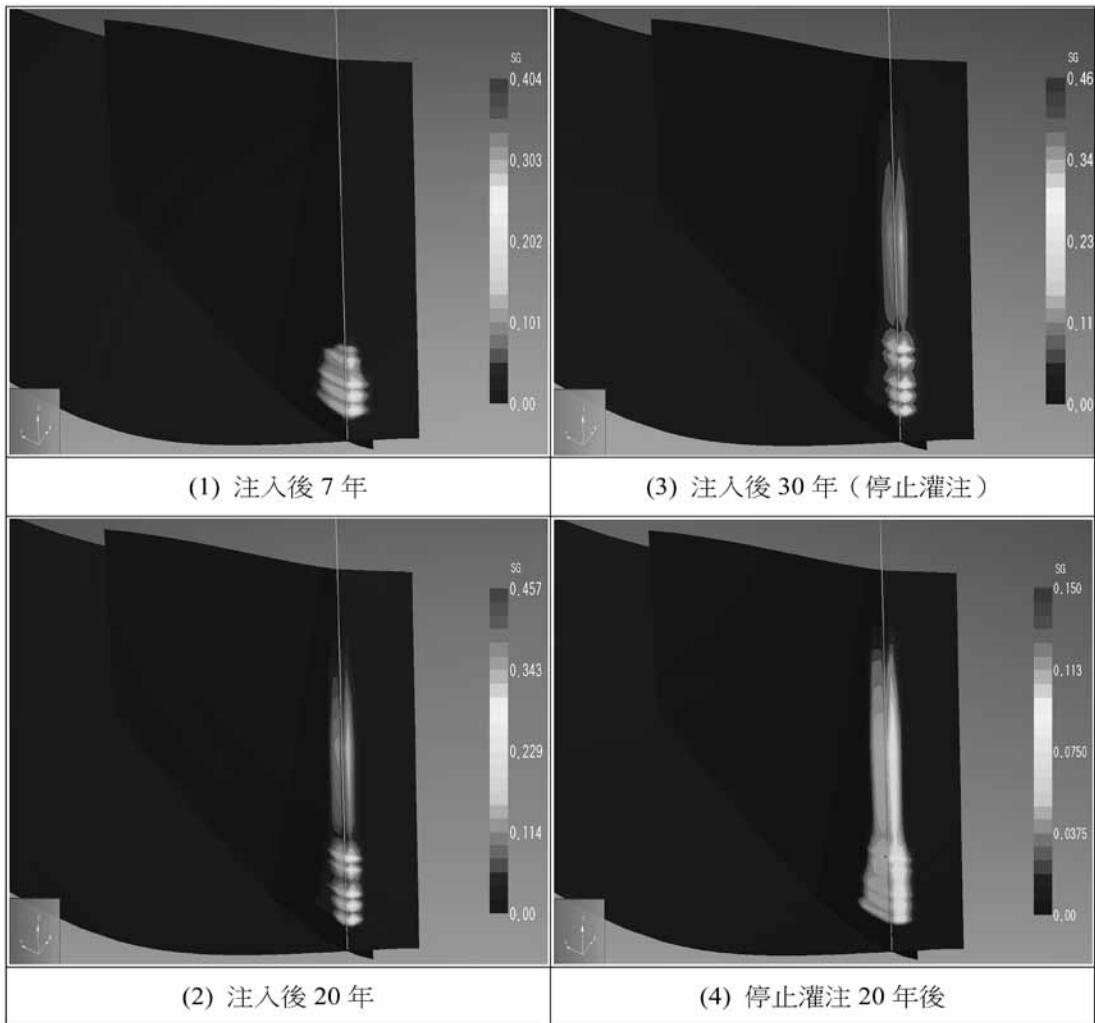


圖-17 注入CO₂後之地層移棲與飽和度變化示意圖

將本研究區可封存面積範圍與上述定點注入 CO₂ 擴散移棲預測範圍（100 萬噸 CO₂/年、注入 30 年、監測至 50 年、面積約 3km×2km）作比較，顯示在該區域內，即沿岸至近海一帶，在各鑽井於灌注後 CO₂ 移棲行為互不影響之前提下，估計至少可佈置十口鑽井，理想上每年即可封存 CO₂ 約一千萬噸，鑽井配置概念，參見如圖 -18(b)。

考量 2007 年台電前八大火力發電廠年排放 CO₂ 總量約為 67.8 百萬噸⁽²⁰⁾；於 2025 年後 CO₂ 地質封存技術如能到商業化規模，上述台西盆地場址東側部分，將足以成 2008 年 ETP 推估 CO₂ 減量諸項情境中，發電廠部分之 CCS 技術約佔 10% 的目標。如要成發電廠及其他產業部分之 CCS 技術約佔 19% 的目標，未來尚需進行詳細的地質探查研究評估，以確定台西盆地場址具有此潛在 CO₂ 封存能力。

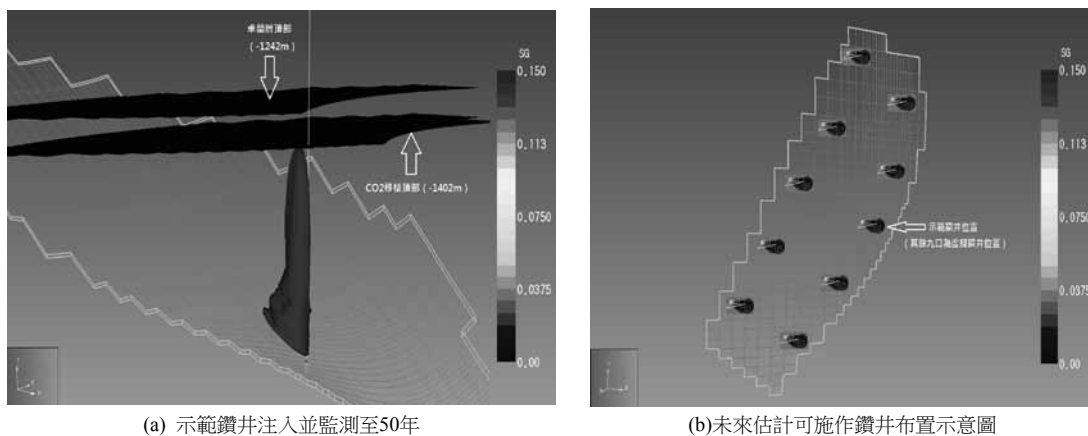


圖-18 移棲模擬示意圖

六、結論與建議

本研究中，透過所蒐集地表露頭剖面圖及深鑽井資料，將各目標地層依據 CO₂ 封存分層判別表，進一步劃分出儲集層、蓋層與阻滯層之一維柱狀圖及建構分層總表；並進一步在研究區域東西向及南北向之地層二維剖面中，對比出儲集層、蓋層及阻滯層之分布情況。其成果可資深部鹽水層後續封存移棲數值模擬分析之應用。本研究主要結論與建議事項，簡述如下：

1. 在台西盆地場址三維地質模型中，將桂竹林層建構為 CO₂ 封存之目標儲集層，內夾有若干厚度較小的阻滯層；錦水頁岩與卓蘭層中部建構為蓋層；卓蘭層下部、上部及頭料山層亦為可能儲集層。但卓蘭層上部及頭料山層缺少蓋層，推估其厚度在 1000m 以上，應可作為防止 CO₂ 逸出良好的緩衝帶。
2. 本研究模擬鑽井注入範圍位於地表高程 -2420m~-2430m，在關刀山砂岩段儲集層內。其下至高程 -3000m 間之地層，可能存在孔隙率及滲透率良好的砂岩儲集層，雖可考量作為注入層，惟經本研究模擬顯示，注入之 CO₂ 可能因缺少蓋層及受浮力作用，其注入之團流會向上移棲至關刀山砂岩段內，而無法長期貯留於關刀山砂岩段下方之砂岩層（上福基砂岩或南莊層）內。
3. 本研究將台西盆地場址「三維地質更新模型」轉化成「數值模型」，進行初步模擬，所得

結果顯示，於每年注入 100 萬噸，注入 30 年及監測至 50 年後，CO₂ 團流由桂竹林層上浮移棲經錦水頁岩至卓蘭層，惟未穿透卓蘭層，本地層之封存系統仍處於 CO₂ 超臨界穩定狀態（-800m 以下）。

4. 本研究分析情境，旨在試探性模擬於封存目標地層中，阻滯層可能的阻滯行為，採較為保守的模擬分析參數。未來將配合台電進行彰濱地質封存試驗場址深井鑽探，於取得地表下各地層深度、岩性及各類參數後，將作進一步模擬分析，期能與場址實際情況相吻合。

誌謝

本文撰寫期間，承蒙台灣大學地質科學系鄧屬予教授不吝給予多方指導，台灣電力公司電源開發處前副處長楊勳得博士、黃連通課長提供卓見，以及綜合研究所藍啟仁、陳景林兩位博士參與論文研討並給予寶貴建議，謹申謝忱。此外，財團法人中興顧問社大地工程研究中心葛文忠高級研究員對反射震測解釋的協助，鄭錦桐博士、邵國士研究員提供 GIS 資料庫的支援，雷世璋研究員提供數值模擬方面的經驗諮詢，另中華電信黃志鵬工程師協助校稿，在此一併申謝。

參考文獻

- (1) <http://www.worldenergyoutlook.org/2008.asp>
- (2) International Energy Agency (2008), Energy Technology Perspectives, Paris.
- (3) 藍啟仁、陳景林、曹志明、張庚甲、楊明偉、焦中輝、黃連通、林俊余 (2010) 台電公司推動二氧化碳捕捉和封存技術的規劃架構。台電工程月刊，第 747 期，117-124 頁。
- (4) 行政院環境保護署 (2010) 我國溫室氣體適當減緩行動 (NAMAs) 成果展現暨後續規劃重點簡報。
- (5) 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期末報告。中興工程顧問公司。
- (6) Sun, S. C. (1985) The Cenozoic tectonic evolution of offshore Taiwan: Energy, v. 10, p. 421-432.
- (7) Michael, K., Golab, A., Shulakova, V., Ennis-King, J., Allinson, G., Sharma, S., and Aiken, T (2010) Geological storage of CO₂ in saline aquifers--A review of the experience from existing storage operations: International Journal of Greenhouse Gas Control.
- (8) 楊志成 (1997) 台灣中部地區錦水頁岩卓蘭層與頭嵙山層的沈積環境研究。國立台灣大學地質科學研究所碩士論文。
- (9) 江紹平 (2007) 台灣中部早期前陸盆地的地層紀錄。國立中央大學地球物理研究所碩士論文。
- (10) 王順民 (2006) 台灣車籠埔斷層鑽井計畫岩心的岩性地層及沈積相研究。國立中央大學地球物理研究所碩士論文。
- (11) Teng, L. S. (1987) Stratigraphic records of the late Cenozoic Penglai orogeny of Taiwan. *Acta Geologica Taiwanica*, 25, 205-224.
- (12) Dickinson, W.R. (1974) Plate tectonics and sedimentation. In: Tectonics and Sedimentation (Ed. W.R. Dickinson). Spec. Publ. Soc. econ. Paleont. Miner., Tulsa, 22, pp. 1-27.
- (13) Stockmal, G. S., and Beaumont, C. (1986) Geodynamic models of convergent margin tectonics: transition from rifted margin to overthrust belt and consequences for foreland-basin development. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 70, 2, 181-190.
- (14) Teng, L. S. (1990) Geotectonic evolution of late Cenozoic arc-continent collision in Taiwan, *Tectonophysics*, 183, 57-76.
- (15) 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, 453-478.
- (16) 陳華玟 (2009)，地質年代區分表中「第四紀」的定位及其底限問題之探討，2009 年會第四紀地層研討會，中華民國地質學會網站資料。
- (17) Hermanrud, C., Andresen, T., Eiken, O., Hansen, H., Janbu, A., Lippard, J., Bolås, H.N., Simmenes, T.H., Teige, G.M.G., and Østmo, S., 2009, Storage of CO₂ in saline aquifers-Lessons learned from 10 years of injection into the Utsira Formation in the Sleipner area: Energy Procedia, v. 1, p. 1997-2004
- (18) 胡錦城 (2008) 臺灣中部大肚山 - 八卦山背斜之深部構造與油氣潛能。探採研究彙報，第 8 期，第 76-91 頁。
- (19) http://www.co2crc.com.au/images/imageLibrary/stor_diag/porosity_v_permeability.jpg
- (20) <http://carma.org/dig/show/country+187+plant>

*