

三維地質空間資訊於節能減碳之應用

Using Three-Dimensional Geological Spatial Information for Energy Saving and Carbon Reduction Project

邵國士¹

李易叡¹

Kuo-Shih SHAO¹

Yi-Rui LEE¹

¹財團法人中興工程顧問社

¹ Sinotech Engineering
Consultant, Taipei 110,
Taiwan ROC

焦中輝²

黃連通³

Chung-Hui CHIAO²

Lian-Tong HUANG³

²台灣大學地質科學研究所

² Department of Geosciences,
National Taiwan University,
Taipei 106, Taiwan ROC

洪世勳¹

鄭錦桐¹

Shih-Hsun HUNG¹

Chin-Tung CHENG¹

³台灣電力公司

³ Taiwan Power Company,
Taipei 100, Taiwan ROC

【摘要】

全球暖化與氣候變遷問題對於自然環境與人類的影響深遠，而溫室氣體之一的二氧化碳排放自然成為全球矚目的焦點，如何有效的達成CO₂減量乃是一重要課題。目前先進國家普遍認為以「深層地質封存方式」為達成CO₂減量之有效經濟方案且積極研發相關技術。爰此，台灣電力公司因考量火力電廠為我國主要CO₂排放來源之一，遂開始研究二氧化碳地質封存技術的可行性。然決定二氧化碳地質封存適合場址的首要任務乃是深層地質資料的分析；本研究以蒐集台灣麓山帶儲油氣構造及西部海域沉積盆地地質資料予以分析，數化建立各項地質資料的三維空間屬性於GIS系統，並建構二氧化碳地質封存場址之3D地質模型，並且將三維地質GIS系統及場址3D地質模型予以整合。該整合系統除了可進行CO₂封存量潛能評估、亦可作為二氧化碳封存候選場址之決策依據。

透過本研究將傳統平面地質圖資以三維化的方式呈現，其成效不僅可供專業人員以數值化的地質資訊與不同界面人員溝通；對於重要工程建設所面臨的地質問題，透過三維視覺化的處理，可將複雜的地質議題能簡易的讓社會大眾了解，增加政府與民眾的溝通效率，亦能滿足人民知的權利。故三維地質空間資訊除了可供專

業人士使用之外，對於向一般大眾說明也是一項很好的工具。

Global warming and climate change problem influences nature environment and human being very deeply. Reducing Carbon Dioxide emitted problem becomes an important issue in the world. Advanced countries consider the Carbon Dioxide Capture and Sequestration(CCS) technology is the best economically and efficiently method to reduce the CO₂ emission and research relative technologies actively. Because of above reasons, Taiwan Power Company (TPC) begins to study the CCS technologies for large emitting sources of coal fired power plants and launched a corresponding project. The first thing in this project is to analyze deep geological data for choosing a appropriate CO₂ storage site. Thus the TPC's CCS project collected and analyzed the oil-gas field geological structure data in the western foothills and the lithological formation information at the offshore sedimentary basin in west Taiwan. All the collected data are digitized to be three dimensional geological spacial information into GIS system and built the 3D geological structure model of CO₂ storage site. The 3D GIS system and geological model could be used for decision making of site selection and for estimating the CO₂ storage capacity in the rock.

The 3D geological spacial information provides a good communication interface between different engineering parts, and the 3D geological model also can be a good tool for public interpretation in complex engineering problem.

關鍵詞：GIS、地質空間資訊、三維地質模型、二氧化碳地質封存

Keywords： GIS, Geological Spacial Information, 3D Geological Model, Carbon Dioxide Geological Sequestration.

一、前言

全球暖化與氣候變遷問題對於自然環境與人類的影響深遠，而溫室氣體成分之一的二氧化碳(CO₂)排放自然成為全球矚目的焦點，如何有效的達成二氧化碳減量乃是一重要課題。根據國際能源總署統計，2004年台灣二氧化碳總排放量約佔全世界的1%，世界排名第21，每人年均排放量約11.25公噸，世界排名第18，可謂全球主要二氧化碳排放國之一；至2006年時，台灣二氧化碳總排放量為270.33百萬公噸，全球總排放量為28,003百萬公噸 (經濟部能源局，2009)。因應溫室氣體之減量，近年聯合國醞釀未來可能以碳稅或其他貿易手段來經濟制裁二氧化碳排放過高之國

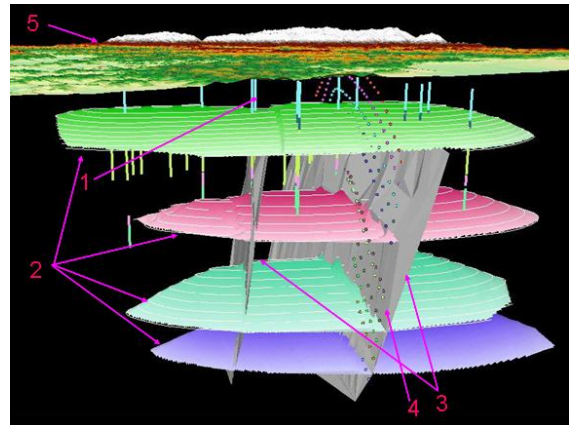
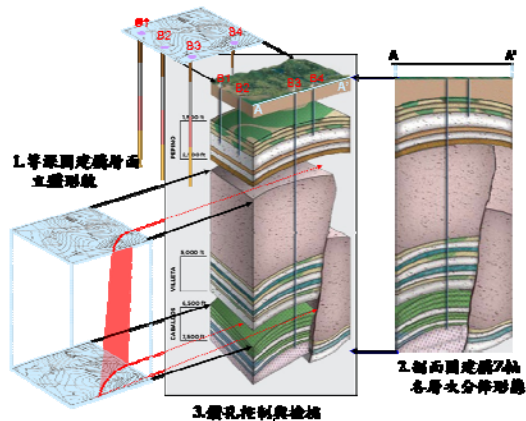
家。行政院於民國98年4月15、16日所召開之全國能源會議，針對「永續發展與能源安全」、「能源管理與效率提升」、「能源價格與市場開放」、「能源科技與產業發展」等四項核心議題進行討論，其中節能減碳成為政府施政與能源發展的重要議題。

台灣電力公司肩負我國電源供應之重要責任，所擁有的火力發電廠除了可提供穩定的電力來源，亦是國內主要二氧化碳排放來源之一。為落實政府節能減碳之政策目標，以避免未來受國際課徵碳稅、經濟制裁而影響經濟發展，故必須對二氧化碳之減排採取必要的因應措施。對燃煤火力電廠的大量碳排放進行二氧化碳的捕獲及封存(Carbon Dioxide Capture and Sequestration, CCS)是目前先進國家普遍認為可有效達成二氧化碳減量之經濟方案，相關技術的研究十分積極。爰此，台電公司於97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」，作為力行減碳技術研發之第一階段工作。該計畫以台灣麓山帶西部之油氣構造及深層含鹽水層沉積盆地為主要目標，蒐集各項深層地質資料予以分析解釋，運用GIS系統將各項地質資料整合成三維地質空間資訊及建置場址地質資料庫，並建構候選場址之三維地質模型，以進行封存潛能評估及場址適合性之篩選依據，全面性且逐步地建立我國二氧化碳地質封存之關鍵技術，以因應未來可能面臨之火力電廠減碳問題。

本文將介紹三維地質空間資訊的應用現況、二氧化碳地質封存之基本概念，並說明台電計畫以三維地質空間資訊應用於二氧化碳地質封存評估工作之成果，最後對三維地質空間資訊之未來發展與應用作一總結與建議。

二、三維地質空間資訊應用現況

三維GIS在地理資訊領域已行之有年，各項技術的發展均已達到一定水準，然以三維GIS空間資訊概念運用於地質科學及工程領域卻是近年來才逐漸被相關從業人員所熟悉。「三維地質空間資訊」顧名思義即是將屬於地下空間分布的地質資料以三維化處理及展現，其概念如圖1所示，圖1(a)表示將各式平面型地質資料，如地質鑽孔資料、地層深度分布資料、斷層構造剖面資料等，經空間屬性的給定即可構成三維地質模型；圖1(b)則為各式三維地質空間資訊之整合成果展現。



(a)平面型地質資料建構三維地質模型之概念

(b)各式三維地質空間資訊之整合成果

1.鑽井資料、2.地層面資料、3.斷層面資料、4.地質剖面資料、5.地表DEM資料

圖1 三維地質空間資訊及三維地質模型概念圖

本節簡介三維地質空間資訊於地質科學與地下工程領域之應用現況：

(一)石油工業

石油及採礦工業因探勘油氣田及礦床之技術需求，已應用電腦科技將大量的地質探勘資料以三維化、數值化的方式呈現與分析，可說是發展三維地質空間資訊及地質模型之先驅。以石油工業為例，透過海域及陸上地球物理探勘資料及鑽井資料，累積了大量的地質探勘數據，必須將各種地質資料予以整合，以利工程師判斷地下儲油氣構造所在位置，並進行最佳的探油經濟模式分析。圖2為石油工業應用三維地質資料及地質模型輔助油氣移棲分析之概念。

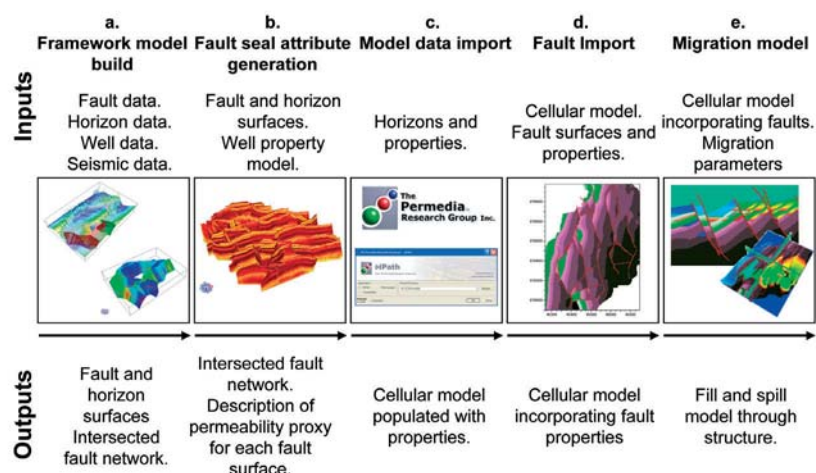


圖2 石油工業應用三維地質資料及地質模型輔助油氣移棲分析之概念

(二) 污染物地下深層處置

瑞典核燃料及廢料管理公司(SKB)為了評估核廢料在瑞典境內地質處置的可行性所建立的地下硬岩實驗室，乃在Äspö小島之火成岩體開鑿各式調查坑道以瞭解核廢料地下處置場周圍的地質構造形貌。該計畫為了處理累積多年的大量調查數據，乃自行發展三維地質資料庫系統，稱之為Rock Visualization System(簡稱RVS)。該系統將各類地質資料運用Microsoft Access、開發物件模組(Objects)建置於GIS系統，並與MicroStation繪圖軟體整合而具有3D建模的功能。此外，為了便於與民意監督單位及大眾溝通，亦將地質與工程資料以三度空間視覺化的方式展現。圖3為RVS系統之工作環境畫面及功能展示，圖4為運用RVS系統配合鑽井、剪裂帶等地質調查資料進行核廢料處置場隧道結構幾何設計之案例。

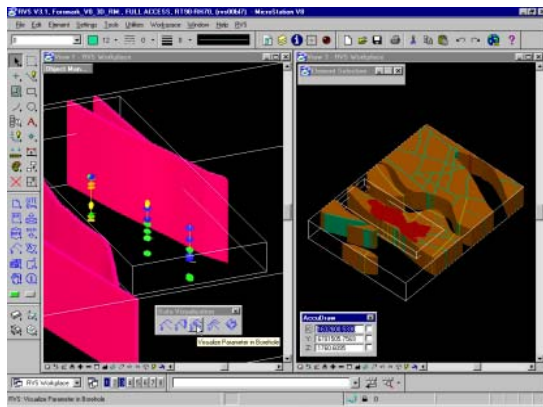


圖3 瑞典RVS系統工作環境畫面

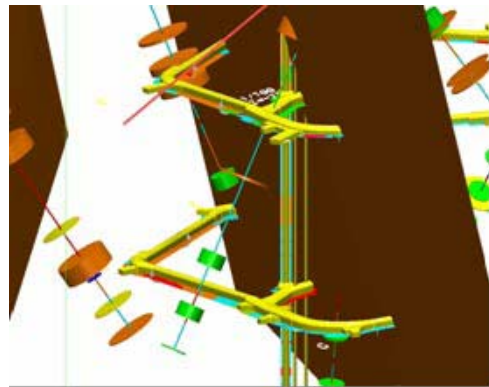


圖4 RVS配合地質調查資料進行核廢料處置場隧道結構幾何設計

(三) 孕震區構造研究

美國SCEC「Community Fault Model」根據地質文獻及地球物理探勘結果於南加州地區建立活動斷層之三維斷層幾何模型(如圖5)，透過活動斷層三維模型及地震目錄空間資料之整合有助於區分與斷層活動相關的地震區域，圖6為將震源及活動斷層幾何型貌套繪於3D GIS之展示情形。根據斷層三維模型可用來區分震源塊體區域(block region)，並以塊體區域進行物理模擬，從能量在塊體上之累積(塊體變形)來推估塊體邊界(活動斷層)之滑移虧損及可能發生之地震規模。

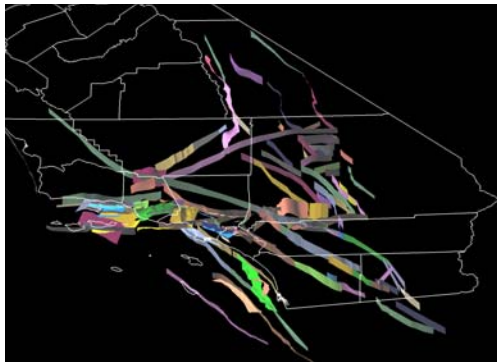


圖5 南加州之三維斷層模型

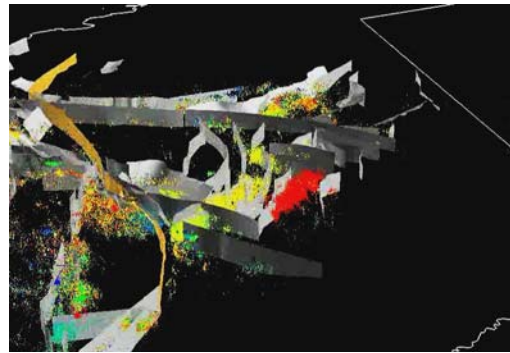
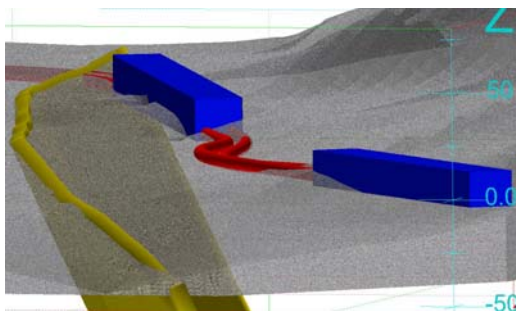


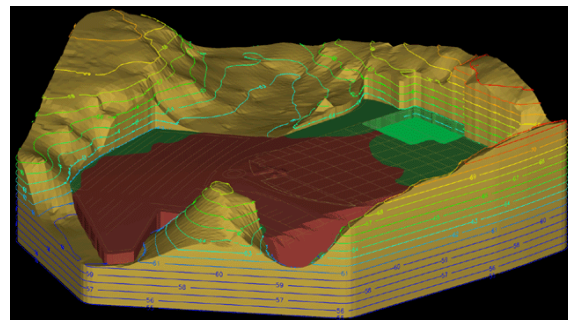
圖6 南加州之活動斷層三維模型與區域震源疊合

(四)土木工程

三維地質空間資訊可配合三維地質建模及工程繪圖軟體以輔助工程分析之用，圖7(a)顯示運用三維地質資料可將地下管道與斷層之空間關係清楚顯示，以協助工程師對地質狀況預先研判。圖7(b)則為地形資料、場址預定開挖高程資料，配合三維地質模型可協助工程師研判不同開挖深度可能遭遇的地質狀況，以納入設計概念及施工工法之選擇。



(a)三維地質空間資訊輔助地下管道工程與地質構造分析



(b)場址開挖地質條件分析

圖7 三維地質空間資訊配合地下工程分析

三、節能減碳之有效方式—CO₂地質封存

大氣中因人類所產生的二氧化碳其中有一部分乃源自於燃煤或燃氣等化石燃料火力發電，然而以現今的電力能源科技發展，短期內要全面取代化石燃料發電以降低二氧化碳排放尚屬不可能。故世界上之先進國家一方面積極研發新一代的能源科技，另一方面亦研究如何在使用化石燃料提供穩定電力的前提下，亦可降低二氧化碳之排放。目前所提出的方法即是將燃煤或燃氣發電所產生的大量二氧化碳「捕

獲」起來，同時設法「封存」於適當地點，整體過程稱之為二氧化碳的捕獲與封存 (Carbon Dioxide Capture and Sequestration, CCS)，執行面包含二氧化碳之捕獲、運輸、封存等三項領域，概念如圖8所示。

二氧化碳封存技術可分為礦化封存、海洋封存、地質封存法三種，目前最被國際間認同且經濟可行的即是「地質封存法」。其原理為透過地下鑽井，將捕獲經分離純化的超臨界狀態二氧化碳加壓灌注於具有封閉構造蓋層(cap rock)的地下舊油田或天然氣田、廢棄煤層，或是具滲透性的深層含鹽水層(saline formation)中，地質封存概念如圖9所示，目前國際趨勢是以既有油氣構造或深層含鹽水地層為主要評選場址。由於地質封存法適當地點的選擇為因地制宜，只要是符合蓋層與儲集層系統的地質條件均可做為二氧化碳地質封存的場址，故欲發展地質封存的國家首先必須了解適合封存場址的地質條件，再逐步研發各項地質封存技術，方能完整地進行二氧化碳地質封存計畫。

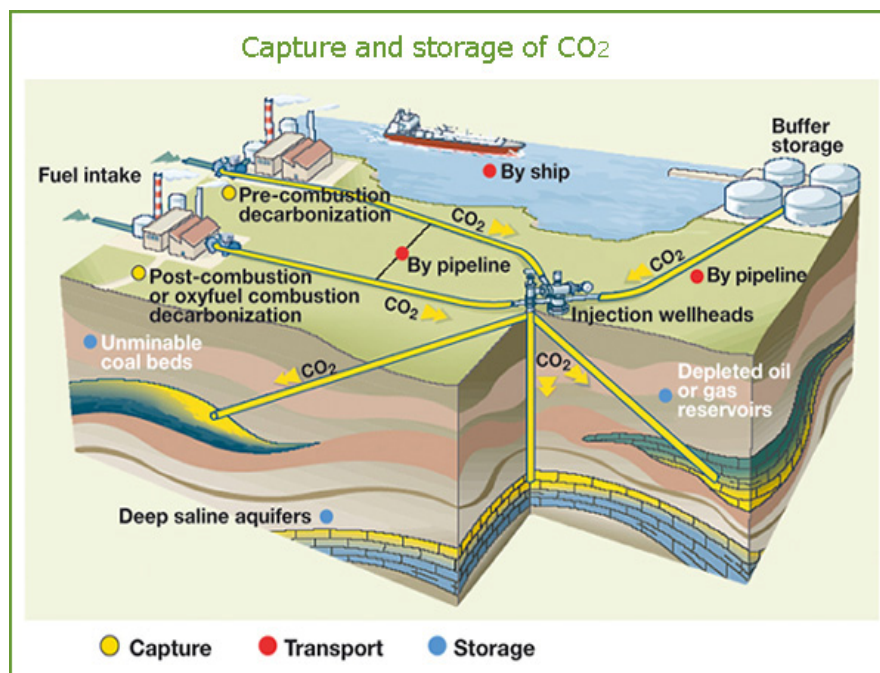


圖8 二氧化碳之捕獲、運輸、封存整體概念(取自IPCC)

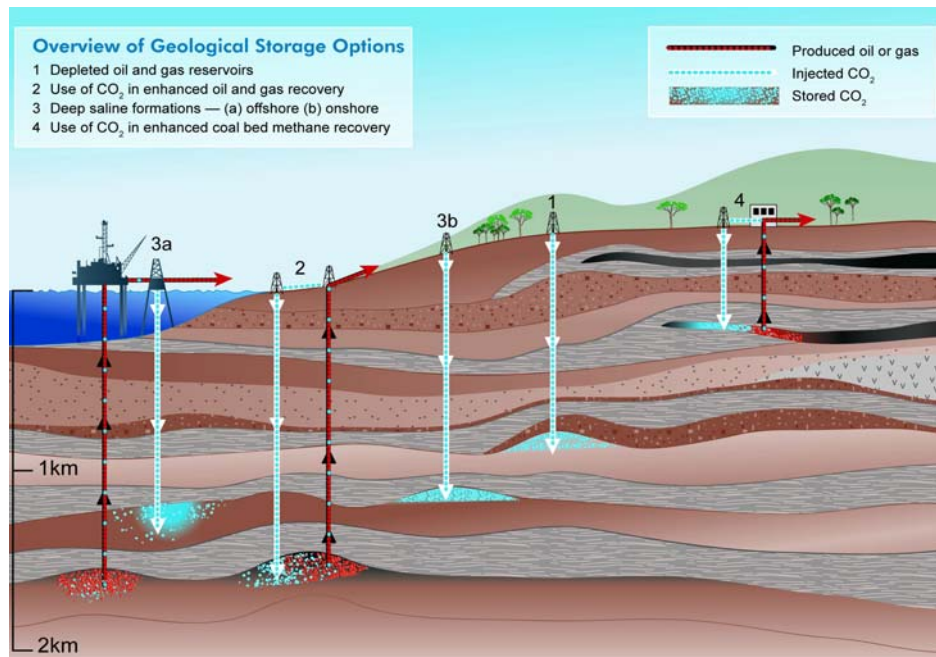


圖9 地質封存法示意圖 (資料來源：IPCC,2005特別報告)

(1.為舊油氣田封存, 2.為利用CO₂強化油氣回收, 3.為深層鹽水層(a)外海(b)陸地, 4.為利用CO₂強化煤層甲烷氣回收。)

四、三維地質空間資訊於CO₂地質封存之應用

如前述二氧化碳地質封存之概念介紹，台灣電力公司為及早因應節能減碳之議題，遂於民國97年起開始進行二氧化碳地質封存技術之研究，即「二氧化碳地下封存地質資料庫建置與候選場址評選計畫」。在第一階段研究成果中，三維地質空間資訊與GIS系統整合、封存場址三維地質模型等技術在該計畫中扮演重要角色，本節將三維地質空間資訊於二氧化碳地質封存應用之成果概況說明如下：

(一) 三維地質空間資訊與GIS系統整合

「二氧化碳地下封存地質資料庫建置與候選場址評選計畫」將各地下封存場址的地層深度分佈、鑽孔資料、構造空間位態等資訊予以數化並建置於SQL Server資料庫，經由GIS相關軟體ArcSDE展示於ArcGIS平台，再透過三維地質視覺化展示工具MVS(Mining Visualization System)來建構三維地質模型，依序說明如下：

1. 系統規劃

三維地質空間資訊GIS系統採用Client-Server分散式架構，於計劃內部網路規劃一台伺服器及工作站，伺服器為資料伺服器 (DB Server)，主要功能為管理及儲存地質資料庫，採用MS-SQL 2005資料庫伺服器平臺及空間資料庫引擎 (ArcSDE)。

工作站(Client端)則為使用者操作平台，作為使用者與伺服器間之橋梁(連結ArcSDE及MS-SQL 2005)，裝有ESRI ArcGIS地理資訊系統，以利使用者操作各式圖層之套疊，並可查詢封存場址之地質資料，GIS系統平台架構如圖10所示。

2. 圖資存放架構

地質資料GIS系統內包含了數種不同的地質圖資，依資料類型分為台電圖資、背景圖資、地質圖資、評選場址數化圖資及三維地質圖資等五類，如圖11所示。

3. 系統展示

本系統採用ArcGIS作為展示的介面，將各式圖資作妥善的順序安排。計畫中亦使用Visual Basic程式語言開發COM物件，可控制ArcGIS圖層的開關，使用者僅需在ArcGIS平台框選範圍，本物件即會讀取範圍內之地質構造圖層並透過MVS(Mining Visualization System)軟體動態產生三維地質模型，以將三維地質模型與GIS系統作緊密之結合，如此可提供二氧化碳封存場址評選工作有效且親善的輔助平台工具(如圖12)。

二氧化碳封存場址之三維地質空間資訊與GIS系統及三維地質模型整合架構如圖13所示。

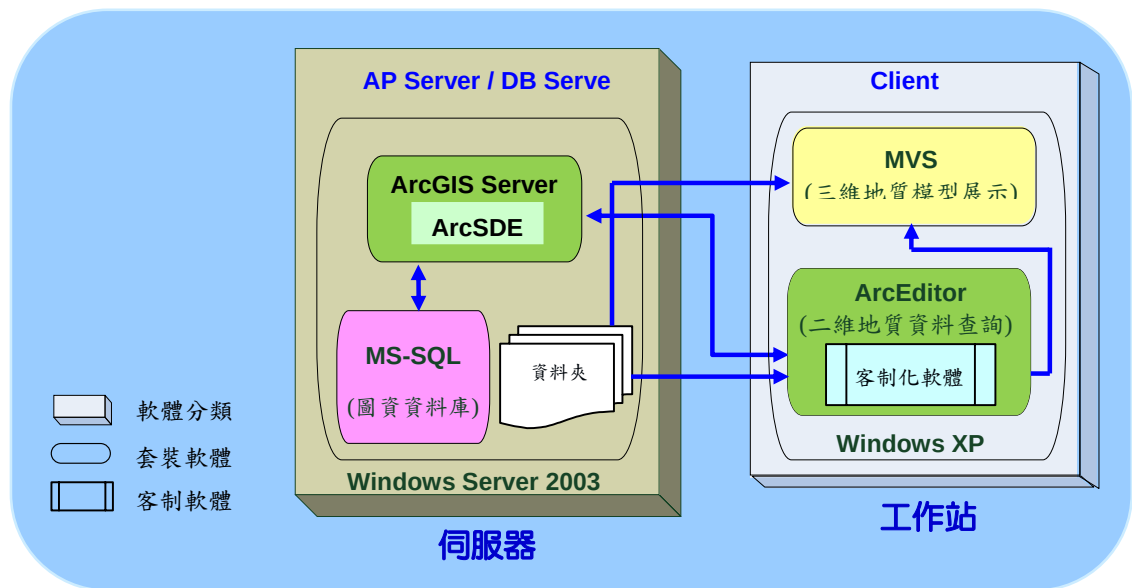


圖10 三維地質空間資訊系統平台架構圖

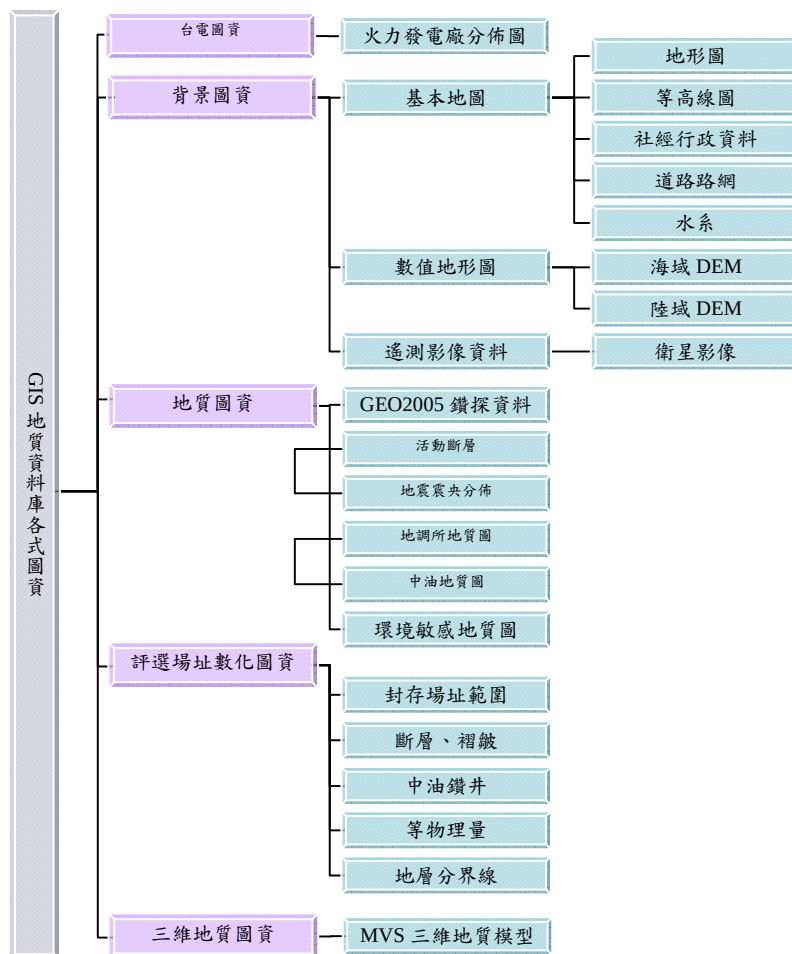


圖11 GIS地質資料庫各式圖資存放架構

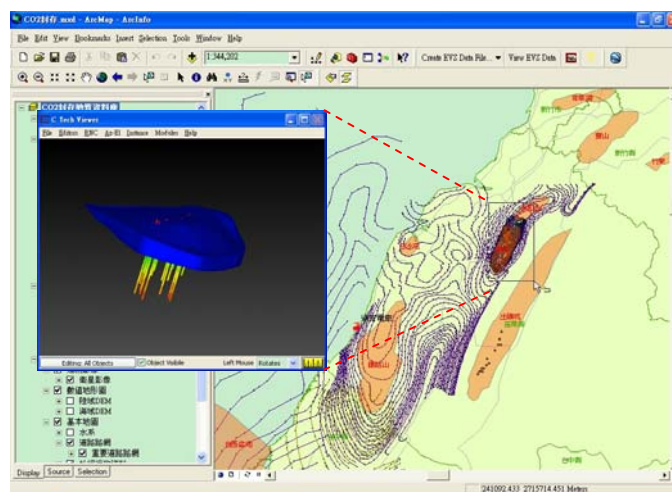


圖12 框選範圍產生3D地質模組

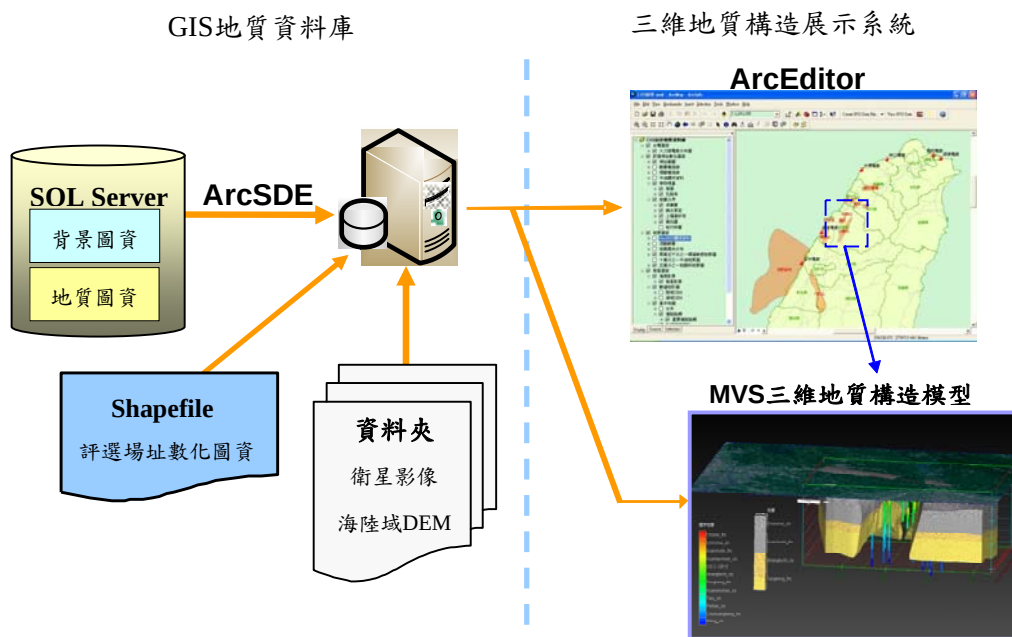


圖13 三維地質模型與GIS系統整合平台

(二) 封存場址三維地質模型

本研究運用MVS(Mining Visualization System)軟體作為三維地質模型展示介面，並與地質資料GIS系統相結合，建立更親善的使用者操作平台，如此更可發揮三維地質空間資訊於二氧化碳地質封存場址評估之功效。

MVS是一套真實三維(true 3D)視覺化展示工具，可滿足地質學、地球化學、環境學、探礦工程、海洋學、甚至是考古學等不同領域的需求。透過MVS可達到(1)真三維(True 3D)視覺化分析及顯示；(2)三維斷層圖塊產生；(3)三維地質資料空間克利金(Kriging)統計分析等功能。

經由分析各封存場址之地層深度分布，整合鑽井、斷層、褶皺等三維地質空間資訊，並套疊衛星影像及地表數值高程(DEM)等資料，可建構二氧化碳封存場址的三維地質模型。圖14、15、16分別為錦水、出磺坑、八卦山等三處台灣西部麓山帶油氣構造之MVS三維地質模型；圖17為台灣西部海域台西盆地之三維地質構造形貌，海域之深層含鹽水層沉積盆地因離既有火力電廠近、運輸距離短、地質條件較穩定、範圍面積廣封存量、遠離人口密集地區等優勢，故為二氧化碳地質封存場址之優選目標之一。透過三維地質模型可清楚地呈現各目標封存場址之地下構造形貌，了解蓋層及儲集地層的分布與厚度，可進一步協助計算場址之封存量評估，提供正確的資訊輔助場址決策之用。

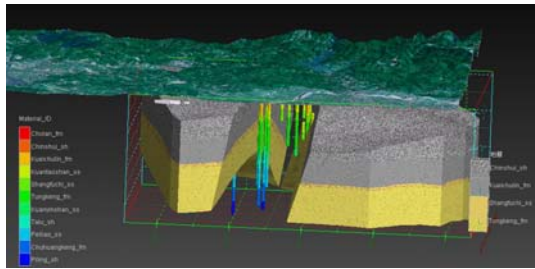


圖14 錦水構造之三維地質模型

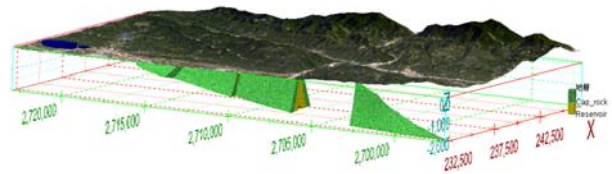


圖15 出磺坑構造之三維地質模型

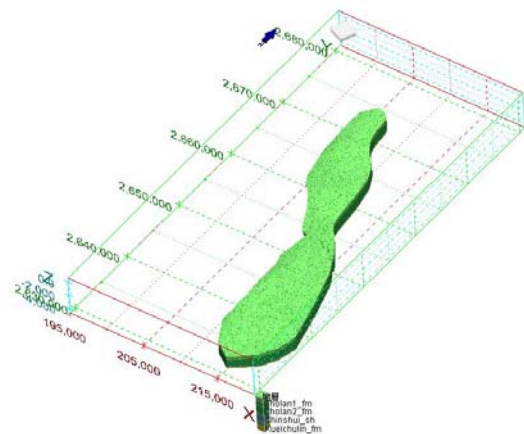


圖16 八卦山構造之三維地質模型

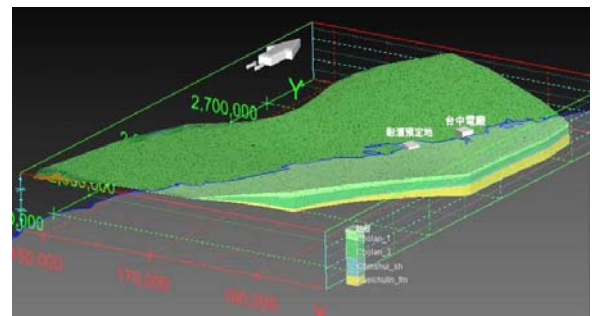


圖17 台西盆地構造之三維地質模型

(三)場址封存量及封存條件評估

三維地質模型除了可協助了解場址清楚的地下構造形貌之外，亦可進一步針對特定深度之地層進行量體計算，再搭配岩石物理特性及地溫梯度等數據，即可計算目標地層的二氧化碳封存量，以供場址封存量評估之用。茲舉錦水構造為說明案例：

錦水構造適合的蓋岩層可選擇低孔隙率且緻密之錦水頁岩、並搭配桂竹林層中的頁岩夾層，而形成蓋岩層系統。至於二氧化碳儲集層則選擇南莊層中的上福基砂岩及東坑層(如圖18)，圖19為錦水構造之三維地質剖面。該構造封存深度由於受場址東側仁隆向斜之限制，封存深度底限約在E.L.-2500公尺。場址因東西向正斷層而將儲集地層分割成三個儲集地塊，經MVS體積分析模組進行儲集量體評估結果顯示，本構造目標地層之封存體積約346億立方公尺。考慮該區域之地溫梯度、封存深度與地層壓力之關係，亦考慮儲集層之孔隙率、砂岩百分比、以及注儲折減係數等參數予以乘積，初步估算錦水構造可封存的二氧化碳量約10.65億噸。

其他各目標場址經由三維地質模型輔助封存量分析即可進行各候選場址之封存特性比較(如表1)，如此可供決策者訂定場址選則策略之參考依據。

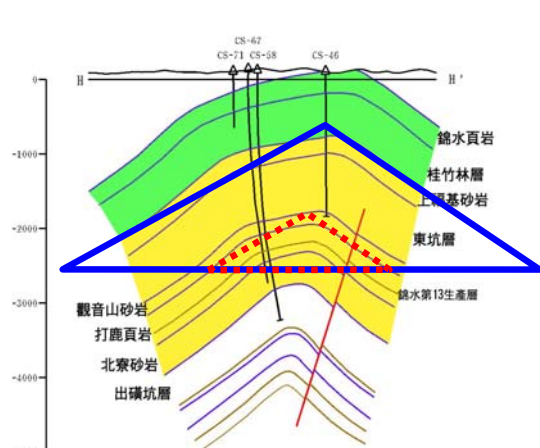


圖18 錦水構造適合封存地層之選擇

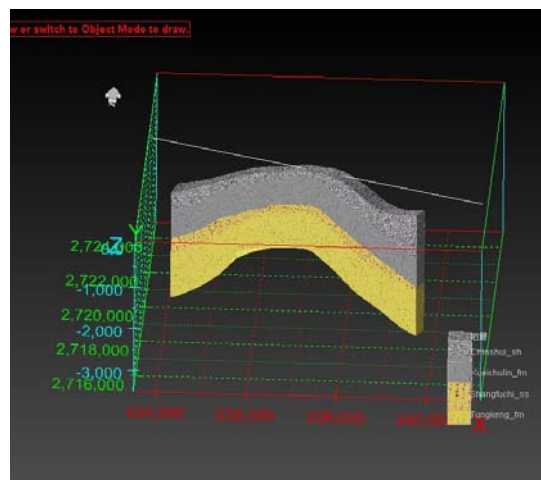


圖19 錦水構造三維地質剖面

表1 各地質構造之場址封存特性比較

	候選封存場址			
封存場址名稱	錦水構造	出磺坑構造	八卦山構造	台西盆地構造
地質構造名稱	錦水背斜	出磺坑背斜	八卦山背斜	台西盆地微傾斜地層
封存範圍面積 (km ²)	15.12	75.82	234.88	2305.73
估計封存體積 (億 m ³)	346.263	153.619	287.12	4166
估計封存量(億噸)	10.65	2.247	6.9	14.563~45.18
建議蓋岩層	錦水頁岩、桂竹林層	打鹿頁岩、北寮層上部、出磺坑產油層	卓蘭層上部頁岩、錦水頁岩	錦水頁岩
建議封存地層	南莊層	北寮層、出磺坑層	卓蘭層下部、桂竹林層	桂竹林層

五、結論與建議

(一)結論

1. 本計畫已規劃出一套親善可行的三維地質空間資訊展示系統，可讓決策者綜觀封存場址之整體地質構造形貌、所在位置、交通與地理環境條件等，亦可對個別場址進行資料查詢及三維地質模型的展示，對於二氧化碳地質封存場址的評選工作提供一效率化的資訊平台。

2. 將傳統平面型地質圖資加以立體化、視覺化、數量化處理成三維地質空間資訊有以下優點：(1)方便專業工程人員能快速有效地研判地質資料，並可將地質資訊明確地以數值化展現，增進不同界面之溝通，以利工程決策之用。(2)對於重要工程建設所面臨的地質問題，透過三維視覺化的處理，可將複雜的地質議題能簡易的讓社會大眾了解，增進政府與民眾的溝通效率，亦能滿足人民知的權利。
3. MVS是一套功能強大的三維展示工具，可展示True-3D的地質模型，運用其體積分析功能，可迅速地評估二氧化碳封存目標場址之儲集量體。

(二)建議

1. 因地質資料具有三維空間特性，為了便於資料的保存、展示、查詢、分析研究、流通等功能，未來「地質法」若通過，後續各項地質調查成果均將朝向GIS化、數量化、3D立體視覺化、Web網路化等方向發展，故三維地質空間資訊對相關專業工程人員來說是一值得推廣的觀念。

六、參考文獻

- (1) 二氧化碳監控行動網，<http://carma.org/>
- (2) 石油地質淺說，石油知識叢書
- (3) 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
- (4) 地質法草案總說明，經濟部中央地質調查所網站資料，<http://www.moeacgs.gov.tw>
- (5) 林祥偉、孫志鴻、許巖璨，2002，「ArcView 8.X 進階篇」，崧旭資訊股份有限公司
- (6) 邵國士、陳晟、李易叡、洪世勳、陳建宏、鄭錦桐、俞旗文、侯秉承、焦中輝、黃連通，2009，台灣麓山帶油氣構造作為二氧化碳地質封存場之可行性探討-以錦水油氣構造為例，九十八年地質年會論文集
- (7) 范振暉、宣大衡，2006，以地下封存方式進行二氧化碳減量之可行性探討，第二屆資源工程研討會論文集，頁278-283
- (8) 周次雄、郭政隆、林麗華、沈俊卿，1985，台灣西北部中新統油氣儲集之地球化學研究，探採研究彙報，第8期，中國石油股份有限公司探採研究所，頁146-161
- (9) 洪世勳、李易叡、邵國士、鄭錦桐、冀樹勇，2009，MVS結合GIS系統於三維地質展示之應用-以二氧化碳地下封存場址為例，98年電子計算機於土木水利工程應用研討會論文集
- (10) 俞旗文，2008，二氧化碳捕獲與封存，水利土木科技資訊季刊，第41期，頁27-32

- (11) 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，中國石油學會與中國石油公司，頁187-210
- (12) 經濟部能源局，2009，能源報導，5月號
- (13) 經濟部能源局，能源報導網站，<http://www.tier.org.tw/energymonthly/>
- (14) Chadwick, A et al., 2007, Best practice for the storage of CO2 in saline aquifers, CO2STORE_BPM_final_rev1.
- (15) Curtis, P., Elfström, M., and Markström, I., 2005, Rock Visualization System Technical Description (RVS v.3.8), SKB-R-05-49, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- (16) ESRI程式資源網站，<http://arcscripsts.esri.com/>
- (17) Frank F. W. Huang, 1987, Wrench Faults in Western Taiwan and Oil-Gas Accumulation, Chinese Petroleum Institute in cooperation with Chinese Petroleum Corporation, No.23, pp.47-64
- (18) IPCC, 2005, 二氧化碳捕獲和封存—決策者摘要和技術摘要
- (19) IPCC, 2005, Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate change [Metz. B., O. Davidson, H. C. de Coninck, M. Loos, and L.A. Meyer(eds.)].Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY. USA, pp.442
- (20) MVS官方網站，<http://www.ctech.com/index.php>
- (21) M. Y. Kuan, 1971, Advanced Study on the Subsurface Geology of the Chinshui Gas Field, Miaoli, Taiwan, Taiwan Petroleum Exploration Division, Chinese Petroleum Corporation, in cooperation with the Chinese Petroleum Institute, No.8, pp.47-64
- (22) P Curtis, M Elfström, I Markström, 2004, Rock Visualization System Technical description (RVS v.3.5), SKB-R-04-55, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- (23) Shaw, John. Plesch, Andreas. Planansky, George. Community Fault Model last updated 1/4/04, Harvard College Geology Department, <http://structure.harvard.edu/cfm>
- (24) SKB, 2003, Geological Site Descriptive Model—a Stratigy for the Model Development during Site Investigations, SKB Rapport R-03-07, Svensk Kärnbränslehantering AB, Sweden.
- (25) Steve Dee, Brett Freeman, Graham Yielding, Alan Roberts, and Peter Bretan, 2005, Best practice in structural geological analysis, Petroleum Geology, Vol. 23, April, pp.49-54
- (26) Takashi Ohsumi, 2006, Research and Development on Aquifer Storage of Carbon Dioxide in Japan, RITE (Research Institute of Innovative Technology for the Earth)