

磺嘴山地質概念模型建置與 地熱熱源模式評估

俞旗文* 譚志豪** 鍾明劍*** 雷世璋**** 楊智豪*****

摘要

本文說明以作者所自行研發的三維地質概念模型建置工具，針對大屯火山群與磺嘴山北側地熱開發目標案場，分別建置完成工程規劃所需之地質概念模型。利用初步模型，可對當地不同範圍尺度下的地熱熱源模式進行有效具體的評估。工程應用上，長期亦可協助對熱儲集層進行正確地開發、維護及管理，以達永續經營之目的。本文所述模型建置依應用的範圍分為「大區」與「小區」兩種尺度分別進行分析，以評估選擇區域尺度之影響。在實際開發地熱發電之前，此模型成果應視為初始架構，後續需配合新增地質資料，包括：鑽井、地物、地化等探查面向的新發現與新增資料，持續修改模型，以臻完善。磺嘴山的地熱熱源模式據初步評估，應為磺嘴火山後期岩漿的殘餘熱流，由深部火山中心向北透過新期構造裂隙，朝向地表延伸的熱流活動，並在現今四磺子坪、煨子坪一帶出現明顯地熱徵兆，包括多處溫泉、硫氣孔露頭，與分布甚廣的熱水換質區。

關鍵字：磺嘴山北側、三維地質概念模型、地熱熱源模式

一、前言

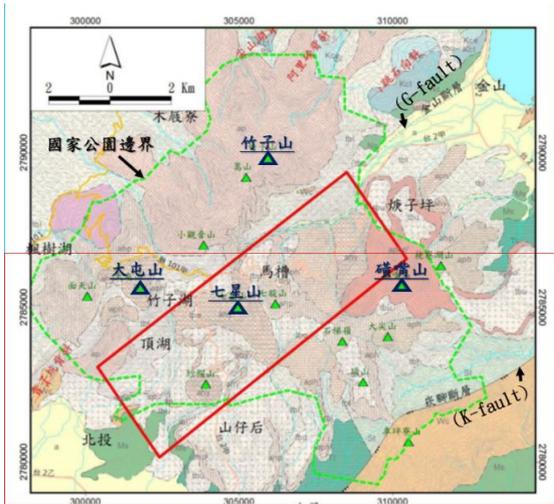
磺嘴山屬大屯火山群的後期火山。大屯火山群區內有一條長約 10 幾公里、寬約 3 公里的東北走向地熱帶，該地熱帶貫穿火山群的中部，呈現最少數十處的地熱徵兆區，以及廣泛的熱水換質區（宋聖榮，2007）。地熱活動主要以馬槽和硫磺谷地區為中心，圍繞七星山、紗帽山、磺嘴山、大尖後山等，形成一個面積分布甚廣之地熱田（圖 1）。根據早期探勘與文獻資料，大屯山區儲集層體積至少約 40 立方公里，儲集層溫度約 200 ~ 290°C，估計可發電潛能約有 514 MWe（工研院，

1994）。

大屯火山群地熱發電潛能甚高，但礙於目前國家公園法規定，國家公園範圍內地熱開發受到限制。目前僅磺嘴山北側地熱區，包括天籟社區、四磺子坪、秀峰坪、煨子坪等地，地表地熱徵兆顯著，具高度可開發潛力。目前（2018）能源局已於磺嘴山北側規劃地熱開發示範區，吸引民間投資開發地熱發電。為獎勵投資，政府同時也突破法規開創了諸多投資誘因，包括：開發規模在 10MWe 以內之投資案，可免除環境影響評估，若能成功發電併網，並可適用於躉購電價之優惠售電方案（中華民國一百零七年度再生能源電能躉

* 中興工程顧問社大地工程研究中心副主任
** 中興工程顧問社大地工程研究中心再生能源組組長
*** 中興工程顧問社大地工程研究中心資深研究員
**** 中興工程顧問社大地工程研究中心正研究員
***** 中興工程顧問社大地工程研究中心助理研究員

購費率及其計算公式)，每度電的收購價以新臺幣 5.1956 元計算。本社目前已與國內民間投資者簽署 MOU，未來共同開發國內的地熱發電；同時並陸續承接台電、地質調查所、結元科技等業主委託計畫，對政府再生能源政策之推動，將可提供一臂之力。



(底圖取自台電公司，2013)
 圖 1 大屯火山群區內面積甚廣之地熱田分布範圍

地熱開發案初期，開發區的地熱潛能估計必須透過各種尺度的地質探勘確認。地質探勘的手段包括鑽探、地球物理、地球化學等方式。地質探勘的成果可用以建置地質概念模型，俾以對地熱熱源模式進行有效具體的評估，後續工程上才能對熱儲集層進行正確地理解、開發、維護及管理，以達永續經營之目的。

二、地質概況

大屯火山群是臺灣北部最大之火山區，區內包括有四個火山亞群：七星山、大屯山、竹子山、磺嘴山等。一般而言，各亞群內均由多座圓錐形火山體及火山丘組合而成。火山口大致分布於走向為東北-西南向的崁腳逆斷層 (K-Fault) 之西北側，與相同走向的金山逆斷層 (G-Fault) 之東南側之間。兩斷層之間地塊於第四紀新期構造運動期間，伴隨沖繩海槽的生成，大地應力呈現擴張

狀態，較老之金山逆斷層現今已轉為活動性正斷層，一般已將之改稱「山腳斷層」(S-Fault)。

大屯火山群的火山活動大約開始於 2.8-2.5 百萬年，而在約八十萬年前發生最重要的火山活動，可能一直持續到約一萬年內結束，形成大屯火山群現今的地貌 (Song *et al.*, 2000a; Wang *et al.*, 1999)。火山群主體全由安山岩質為主的火山岩所組成，依其噴發型態之不同可分為凝灰角礫岩 (T)、安山岩 (A) 與玄武岩 (B)。從中央地質調查所 (簡稱 CGS) 的 LiDAR 地形研判 (2005)，大屯火山群可能共具有 43 個明顯的及推測的火山口，比之前解析度較低的研判 (陳文山等人, 2003) 的 29 個為多，目前大屯山地區許多的火山山峰尚未有正式名稱 (圖 2)。

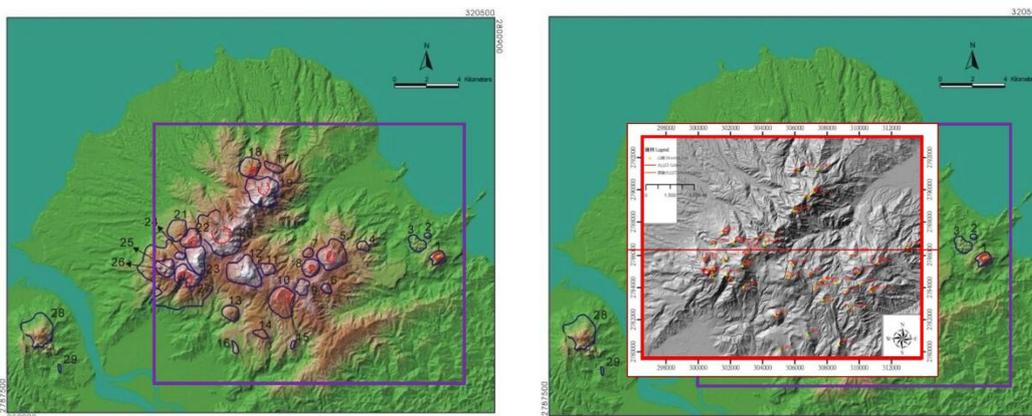
圖 3 所示為現今磺嘴山主體火山錐由北側南望的地形地貌照片，火山北側仍明顯可見後期火山活動的熱液換質帶活動，伴隨有許多地熱徵兆，包括硫氣孔、高溫熱泉的露頭，照片右邊為著名的紗帽山。

三、地質模型建置方法

(一) 模型尺度

本文所述地熱開發案目標區位於磺嘴山北側，地質概念模型的建置的範圍初步係以圖 4 所示區塊為界。模型建置的範圍分為「大區」與「小區」兩種尺度進行分析，以評估選擇區域尺度之影響。部分地表小厚度的地表沖積層，不在本文模型考慮範圍。兩模型範圍的上部邊界均為海拔 1,000 公尺；模型下部邊界均為海面下 1,000 公尺。

大區模型面積約 18.6×15.6 平方公里，進入模型的地層包括第三紀漸新世五指山層 (Wc)，第三紀中新世的木山層 (Ms)、大寮層 (T1)、石底層 (St)、南港層 (Nk)、南莊層 (Nc) 和桂竹林層 (Kcl) 等；模型並涵蓋兩組主要斷層，包括 K-Fault 與 S-Fault；上覆火山地層包括磺嘴山亞群內的主要火山，包括磺嘴山、大尖後山等。



(a) 有 29 處，陳文山等人 (2003) (b) 有 43 處，中央地質調查所 (2005)

圖 2 大屯火山群推測的火山口位置圖 (紫色框取區為本文大區模型範圍)



圖 3 磺嘴山主體火山錐由北側南望的地形地貌照片



(底圖取自地調所已出版 1/50000 地質圖幅)

圖 4 模型建置分為「大區」與「小區」兩種尺度

小區模型面積約 2.62×2.76 平方公里，由於面積小，進入模型的地層僅五指山層 (Wc)；上覆火山地層以磺嘴火山為主。目標區地表均為磺嘴火山事件後之火山岩所覆蓋。於小區模型的建置上，由於尺度較小，地質分層較為單調，其建置重點必須強調地質構造包括斷層、斷裂面等地熱熱流可能的移棲通道。

(二) 模型建置工具

模型建置工具使用 Visual Basic 6 程式語言撰寫核心程式，並自行撰寫工具模組與整合界面程式。工具模組的開發，主要依指定地區範圍 (內

定使用 TWD97 座標系統)，輸入、建置、編修模型數位地形面 (.dtm)，數位地形面用以代表各種地質分界面，如層面、不整合面、斷層、斷裂面等。整合程式的開發，則依已知地質歷史，處理輸出多組數位地形面之組合，並依需求選擇輸出模式，包括方塊圖、剖面圖、柵狀圖模式，輸出模型成果檔。對於地熱系統的各類調查成果，包括鑽井、地物探查平面與剖面影像圖、溫度分布等空間資訊，均可內嵌於模型成果檔；模型成果檔為 VRML2 虛擬實境格式檔 (.wrl)，可透過安裝 Plug-in 工具程式，直接在個人電腦進行單機或網路上進行線上展示。由於版權因素，本文仍使用民國 75 年版農航所 40 公尺解析度的 DEM 圖資（採 TWD67 座標系統），因此需利用下式轉為 TWD97 座標系統。

- ◆ TWD67 橫座標 = TWD97 橫座標 - 828 公尺
- ◆ TWD67 縱座標 = TWD97 縱座標 + 207 公尺

本文相關工具模組與整合界面程式輸入與輸出格式規劃，因限於篇幅，僅能如以下重點條列說明：

- ◆ 工具模組
 - 指定地區範圍 (TWD97) *
 - 產生地表數位地形面 (.dtm)
 - 網格式 (XY 點數、格寬)
 - 精度 2~40 公尺 (本社使用農航所 40 公尺解析度 / TWD67)
 - 產生地質分界面 (.dtm)
 - 規則 (平面)
 - [RUN_露頭點位態]
 - [RUN_三點法位態]
 - [RUN_...]
 - 不規則 (多點 Kriging)
- ◆ 整合建置輸入模型檔 (.xxx)
 - 定義模型上下界 (z_top、z_bot)
 - 定義[組合式]地形面/地質分界面

- 定義[組合式]斷層區塊上下界
- 座標資訊標示 (鑽孔、火山口、等高線、剖面線、多邊形、行政區等...)
- ◆ 三維地質模型輸出
 - 3-D 方塊圖 (.bmp、.wrl)
 - 3-D 剖面圖 (.bmp、.wrl)
 - 3-D 柵狀圖 (.bmp、.wrl)
- ◆ 虛擬實境展示 (VRML2 版 .wrl)

四、地質模型建置成果

(一)「大區」尺度模型

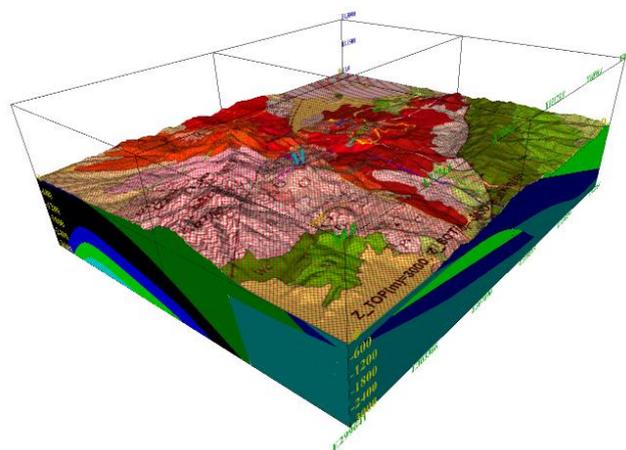
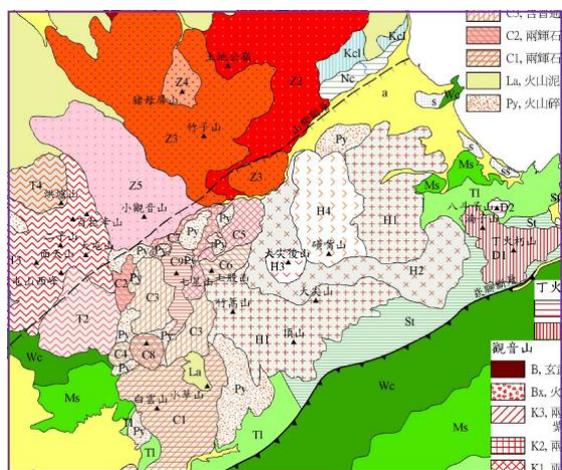
「大區」尺度模型平面範圍如圖 5(a) 所示，範圍內 DTM 網格式 (X × Y) 點數為 369 × 311；格寬 (X & Y) 為 50.47 公尺 & 50.25 公尺，地表為區域地質示意圖 (引用地調所未出版資料)。模型涵蓋 27 (X1~X27) 個地質單元。主要包括金山斷層 (G-Fault) 與東南側約略平行的崁腳斷層 (K-Fault)、大屯火山群的磺嘴山、大尖後山、以及大屯火山群的底部岩層，包括五指山層 (Wc)、木山層 (Ms)、大寮層 (Tl)、石底層 (St)、南港層 (Nk)、南莊層 (Nc) 和桂竹林層 (Kcl) 等。模型的建置基本上需依據臺灣北部第三紀已有的歷史地質事件順序 (Episodes)，加以重建。最新期沿金山斷層 (G-Fault) 平行發育山腳斷層 (S-Fault)，也在模型考慮之列。

對應本文圖 5(a) 地質平面範圍，所建置之模型外觀立體成果圖 (方塊圖) 如圖 5(b) 所示。方塊圖亦為一般 3-D 展示之基本型示。模型亦可選擇柵狀圖、剖面圖模式，依指定之模型之座標位置，由立體模型切出進行輸出或立體展示，可方便應用於工程規劃設計階段的地質研判，如圖 6 所示，本文以兩處東西向柵狀線位置 (柵狀線位置-1、2) 與乙處南北向柵狀線位置 (柵狀線位置-3) 進行示範展示。

圖 7 所示則為本文剖面圖輸出模型，圖 7 (a) 顯示剖面線所在位置 (西北-東南向)；圖 7 (b) 則為所切出的剖面圖。圖 8 所示為所切出的立體剖面圖與工研院報告 (2014~2017) 的既有成果比較。由於目前並無實際地質剖面可資比對，工研院報告的手繪剖面圖成果，暫作為本文剖面圖建置的比照對象。

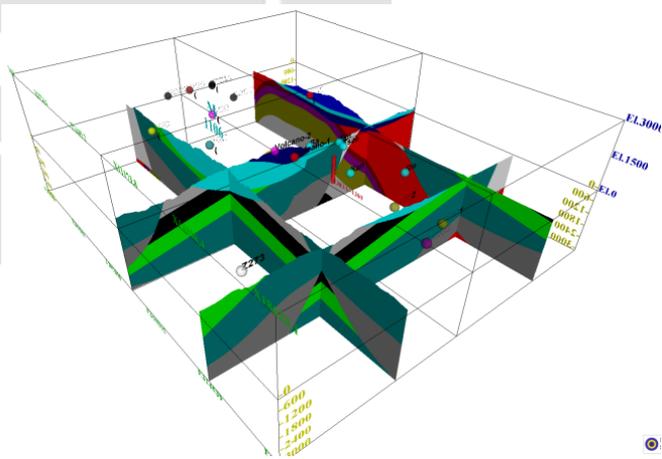
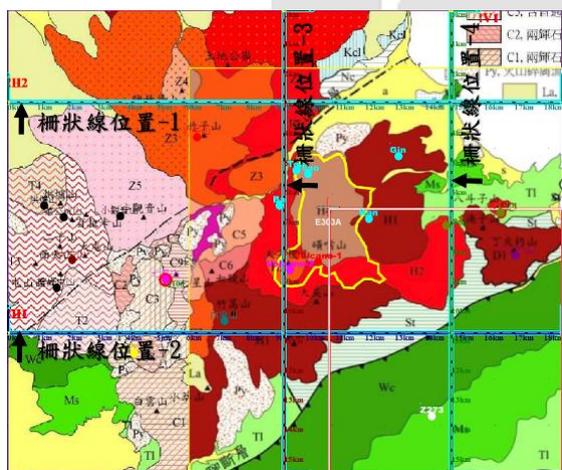
就地熱資源工程開發而言，大區模型的建置僅能提供粗略的地質精度資訊，主要協助判斷資

源蘊藏的地理分布與資源成因，以及分析可能地熱目標儲集層的分布體積，從而進行理論潛能量體的快速評估。在火山地熱地區，模型地質所形成的概念模式，重點在於展現火山地質演化歷史，並據以評估地熱的溫度分區、熱流的移棲機制、以及熱儲層與蓋層類型等。一般而言，模型尺度愈大，其涉及地層愈趨複雜，模型建置困難度愈高。



(a) 地質平面範圍 (b) 立體地質圖 (方塊圖)
(圖 5 (a) 底圖對應地調所 2005 臺北圖幅，未出版)

圖 5 「大區」尺度模型外觀成果 (方塊圖)



(a) 平面範圍 (b) 立體地質圖 (柵狀圖)
(圖 6 (a) 底圖左側對應地調所 2005 臺北圖幅)

圖 6 「大區」尺度模型外觀成果 (柵狀圖)

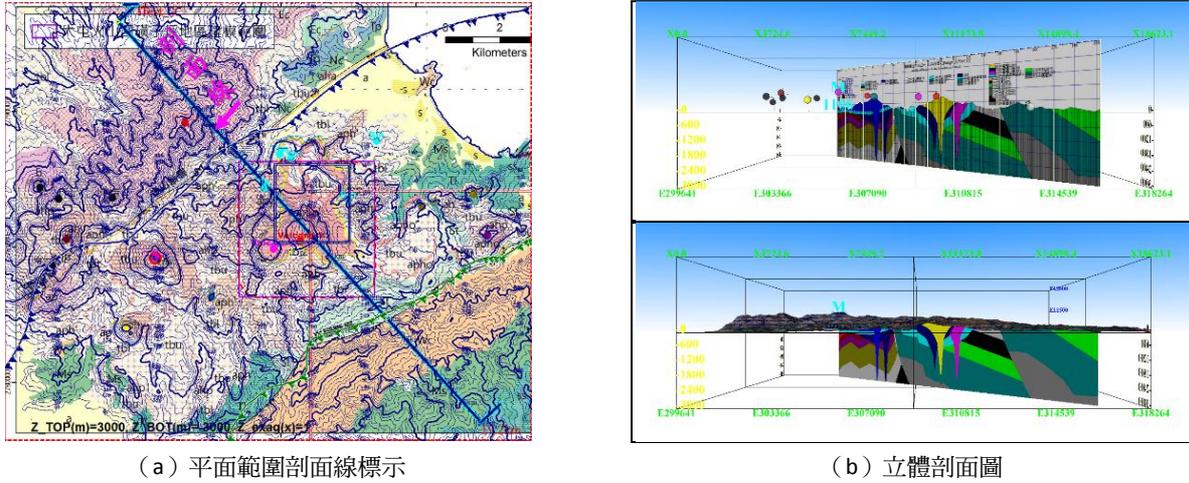


圖 7 「大區」尺度模型外觀成果 (剖面圖)

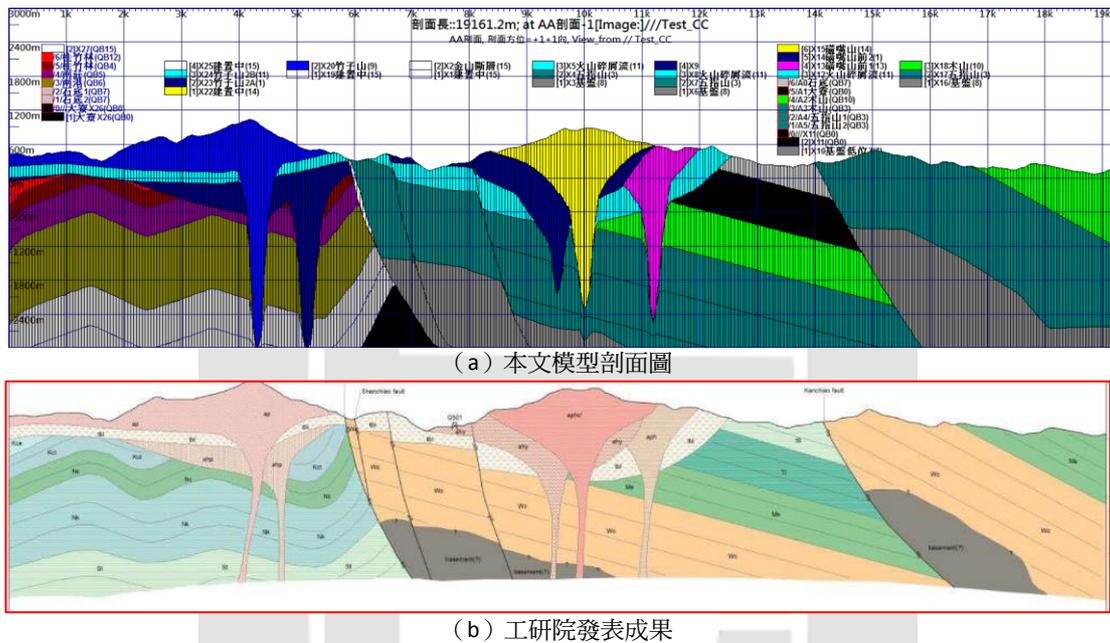


圖 8 本文模型剖面圖與工研院既有成果比較 (大區尺度模型)

(二) 「小區」尺度模型

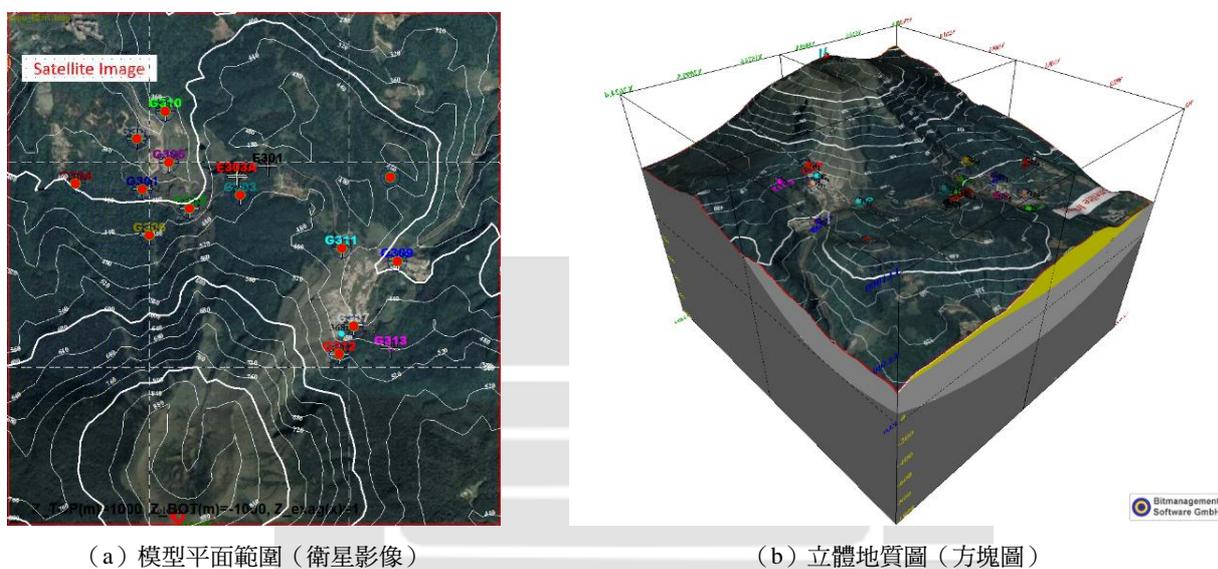
對地熱開發案目標區而言，小區模型方能提供足夠精度的資訊，透過更為細緻的補充調查（鑽井、地物、地化），找出主要地質構造的分布位置與位態（走向、傾角），包括斷層帶、斷裂面等地熱熱流可能的移棲通道，從而建立工程規劃所需的地質概念模式。隨著累積的資料，地質概念模式亦必須不斷地更新。

本文使用「小區」尺度模型平面範圍如圖 9 (a) 所示。範圍內 DTM 網格式 (X × Y) 點數為 52 × 55；格寬 (X & Y) 為 50.47 公尺 & 50.25 公尺。圖 9 (b) 所示為模型外觀之立體成果圖（方塊圖）。此模型的地層僅有三層，由上到下包括：(1) 磺嘴山後期火山層（黃色）、(2) 磺嘴山前期火山層（淡灰色），與 (3) 下部五指山層（深灰色）。其分層 DTM 檔基本上沿用「大區」尺度模型，從中取出局部對應座標範圍。

「小區」模型尺度下，選擇剖面圖、柵狀圖模式，依指定之模型之座標位置，由立體模型切出進行輸出或立體展示。由於精度較高，「小區」尺度的模型於工程規劃設計階段，比較「大區」尺度的模型，更具工程實用性。剖面圖如成果圖 10 (a) 與 (b) 所示。本文以乙處南北向剖面線位置進行示範展示。圖 10 (a) 中兩處矩形區塊分別標示四磺坪（硫磺子坪）與煥子坪地熱徵兆區

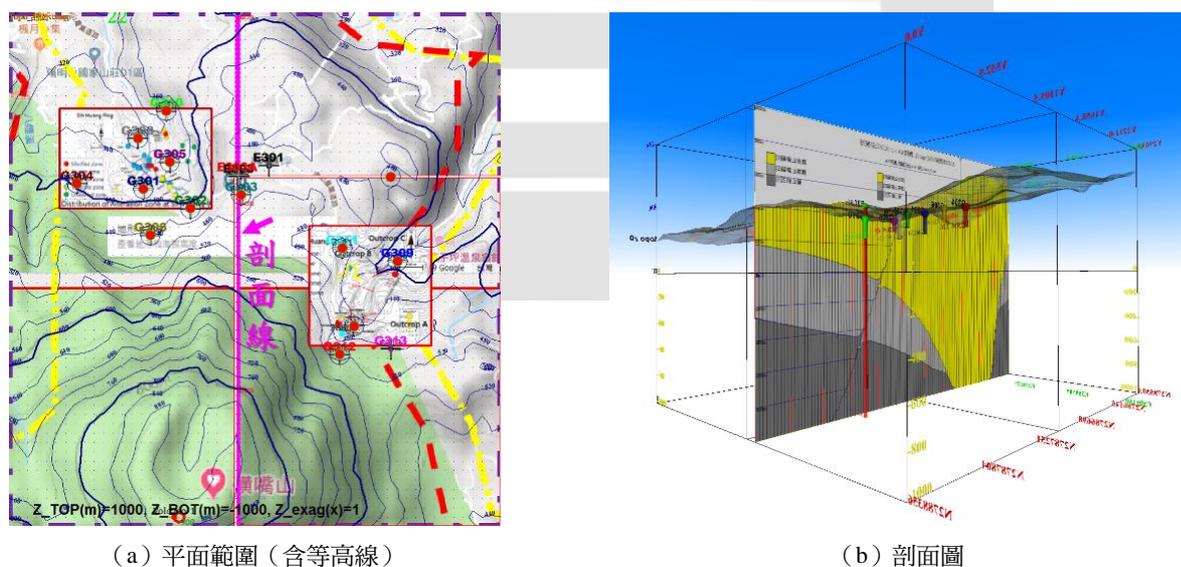
大致位置。

圖 11 所示則為本文「小區」模型尺度所切出的地質柵狀方塊圖，可將模型東南角隅移除，可顯示某鑽孔所在位置的兩方向的地質立面，切面高程為地表下 500 公尺，鑽孔位置與切面高程均可由使用者自訂，以符合工程應用所需。類似圖 10、圖 11 結合既有鑽孔資訊，可作為進一步鑽孔佈設時，研擬鑽孔孔位與鑽孔方向的重要參考。



(a) 模型平面範圍（衛星影像） (b) 立體地質圖（方塊圖）

圖 9 「小區」尺度模型外觀成果（方塊圖）



(a) 平面範圍（含等高線） (b) 剖面圖

圖 10 「小區」尺度立體模型成果（剖面圖）

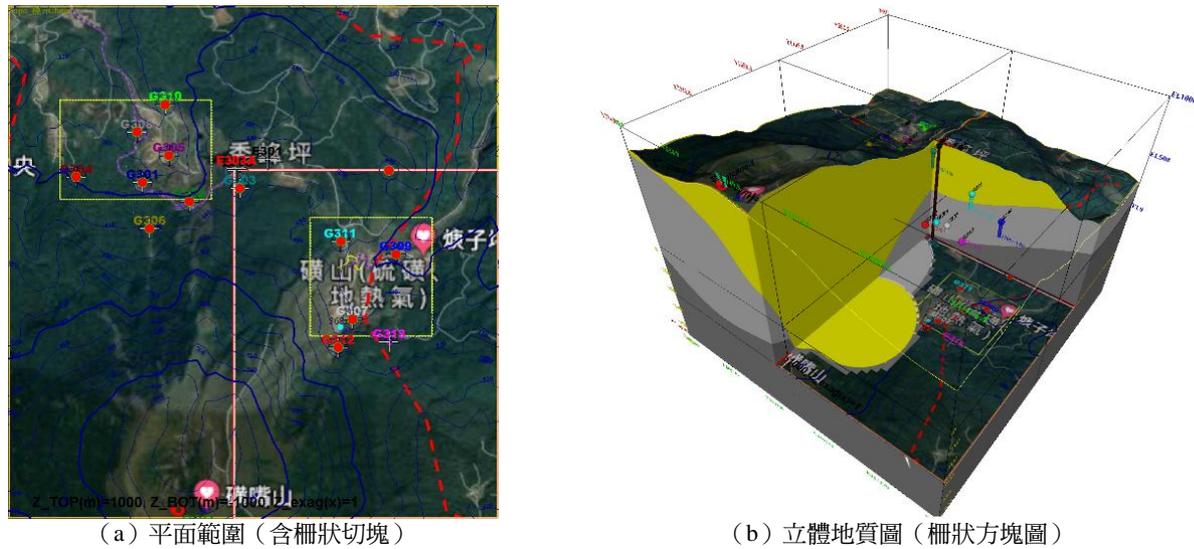


圖 11 「小區」尺度立體模型成果(柵狀圖)

五、地熱熱源模式評估

磺嘴火山亞群可辨識出火山口噴發出的熔岩流以帶狀、舌狀和環狀分布於火山周圍的低地，因噴發時間先後和流動距離的遠近不同，而形成不同的熔岩階(台)地。這些台地包括有四磺坪、秀峰坪、煨子坪、芎蕉坪、大坪、鹿窟坪、富士坪等。一般而言，遠離火山口保存下來的熔岩階地較老，而越近火山口的熔岩階地形成的年代則較輕。四磺坪、煨子坪一帶地表，出現比較明顯地熱徵兆(Geothermal Manifestations)，包括磺嘴火山北側範圍甚廣的熱水換質區、多處硫氣孔與高溫熱泉的露頭。這些地熱徵兆的出現，咸信與本區斷裂面的結構，有密切關係。過去文獻指出：由大磺嘴至四磺坪一帶的水平地電阻探測結果判斷 10 ohm-m 以下之低電阻帶大致自大磺嘴延伸經小油坑至四磺坪，地熱潛能地熱區中心大致在七星山至四磺坪一帶。三維電阻率分布亦顯示 500 公尺深的電阻率分布顯示大磺嘴、馬槽、四磺坪及金山等四處之深部可能相連通；1,000 公尺深的電阻率結果更顯示廣泛的低電阻在深部連成一體。然而，這些訊息雖對本區地熱熱源模式提供了區域性地球物理特性的線索，但對於工程的開發規劃與關鍵鑽探井位的選定，這些探查成

果尚無法提供足夠精度的必要資訊。

本文經 LiDAR 影像併同現勘後，先經初步評估研判本區可能有兩組主要斷裂面(F1、F2)，其走向位態分別呈北偏西(F1)、北偏東(F2)，如圖 12 所示。斷裂面之位態資訊，如表 1 所示。從地質角度與地緣關係看，本文所設定斷裂面 F1 與四磺坪(硫磺子坪)地熱徵兆區有關；斷裂面 F2 則與煨子坪地熱徵兆區有關。後續則需辦理精度更高的地下探查手段，確認為主控斷裂面的確切位置與真實位態。

假定斷裂面 F1 與 F2 分別為兩規則平面，因此由表一中假設的典型位態，可透過指定 F1 與 F2 的地表出露位置(TWD97 座標與地表高程)，進而求得其相交位置，兩種情境(Case-A 與 Case-B)分別如圖 13 (a) 與 (b) 所示。

就本區地熱熱源模式評估而言，圖 14 所示則為兩組主要斷裂面相交位置，非常有可能為地熱熱流可能的移棲通道。Case-A 情境下，F1、F2 相交軸往東北傾沒(圖 14 所示右側紅色點群)，顯示與磺嘴火山(圖 14 所示灰色漏斗狀體)無直接關聯，此與一般認知此區熱源來自磺嘴山下，差異甚大。表 1 所示 Case-B 情況下，F1、F2 相交軸往磺嘴火山下部傾沒(圖 13 所示左側紅色點群)，與磺嘴火山下部為熱源供應情境較吻合。

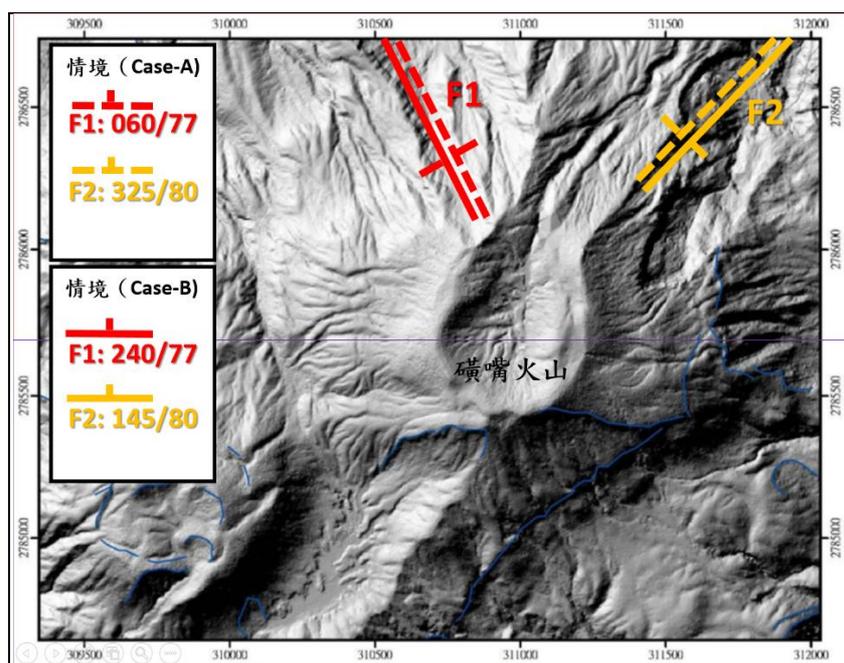


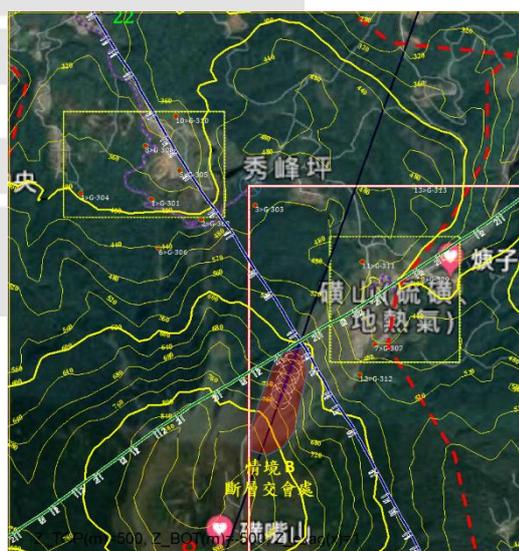
圖 12 研判橫嘴火山區可能兩組主要斷裂面 (F1、F2) 走向位態判釋

表 1 主要斷裂面 (F1、F2) 之位態資訊

斷裂面情境 (簡稱)	斷裂面平面位態 I (傾向/傾角)	斷裂面平面位態 II (走向、傾角)
F1-Case-A	060/77	北偏西 60 度、77 度往東北傾
F2-Case-A	325/80	北偏東 35 度、80 度往西北傾
F1-Case-B	240/77	北偏西 60 度、77 度往西南傾
F2-Case-B	145/70	北偏東 35 度、80 度往東南傾



(a) 斷裂面情境 Case-A



(b) 斷裂面情境 Case-B

圖 13 「小區」尺度模型地熱熱源模式評估

圖 15 所示為「小區」尺度模型下，地熱熱源模式評估與鑽孔孔位研擬的概念圖。假定沿 F1、F2 相交軸，往西南傾沒至磺嘴火山下部（表 1 所示 Case-B 情況），若相交軸為熱源上升的主要空間通道，亦即本區熱源可能經由斷裂面交會處位置向上移動至地表，並在通道附近產生廣泛分布的熱水換質帶。若圖 15 (a) 顯示切過 F1、F2 相

交軸的剖面線位置，經模型分析後所呈現的地質剖面圖如圖 15 (b) 所示。剖面圖內圓點狀為相交軸投影位置，亦即熱源可能移動軌跡。通過地質剖面圖附近則以實心點（藍色）表示。利用該圖可作為研擬鑽孔孔位與鑽孔方向的重要參考。圖 15 (b) 所示鑽孔孔位對某熱源移動軌跡點（#3 實心點）佈設鑽孔，其參考直線距離約為 398 公尺。

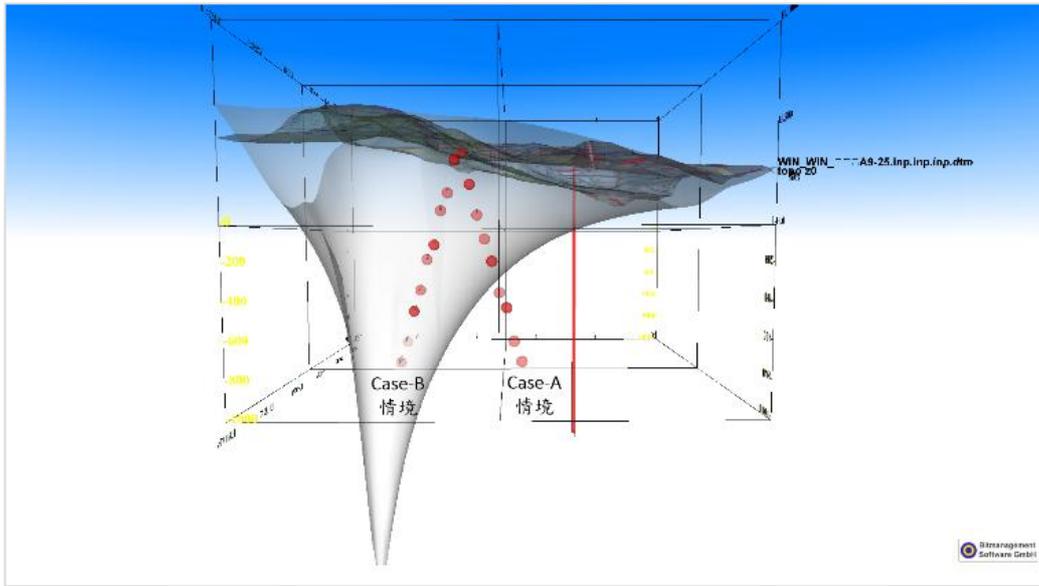
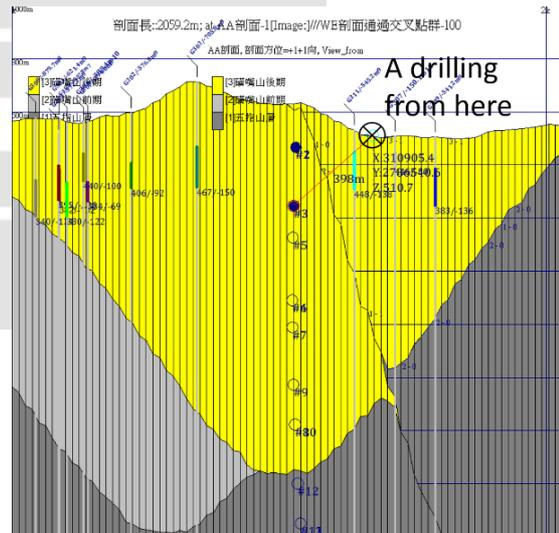


圖 14 「小區」尺度模型地熱熱源模式評估，斷裂面交會處位置以點狀表示



(a) Case-B 剖面線位置



(b) Case-B 剖面孔位研擬

圖 15 「小區」尺度模型地熱熱源模式評估與鑽孔孔位研擬

六、結論與建議

地熱發電為政府再生能源政策項目之一，本社目前已與國內民間投資者簽署 MOU，未來共同開發地熱發電，可提供政府鼓勵再生能源發展之助力。本文說明了利用作者所自行研發的三維地質概念模型建置工具，針對目標案場所建置完成之地質概念模型，可對當地不同範圍尺度下的地熱熱源模式進行有效評估。工程上，亦可協助對熱儲集層進行正確地開發、維護及管理，以達永續經營之目的。

模型建置的範圍分為「大區」與「小區」兩種尺度進行分析，以評估選擇區域尺度之影響。在實際開發地熱發電之前，此模型成果應視為初始架構，後續需配合新增地質資料，包括：鑽井、地物、地化等探查面向的新發現，持續修改模型，以臻完善。

參考文獻

工業技術研究院 (1994) 臺灣地熱探勘資料彙編，經濟部能源委員會
陳文山、楊志成、楊小青、劉進金 (2003) 從火山地形探

討大屯火山群的地層層序與構造，經濟部中央地質調查所彙刊，第 16 期，第 1-25 頁
經濟部中央地質調查所 (2005) 大台北地區特殊地質災害調查與監測－高精度空載雷射掃描 (LIDAR) 地形測製與構造地形分析 (1/3)，九十四年度委辦計畫成果報告書
經濟部中央地質調查所 (2005) 臺灣地質圖說明書-第 4 號臺北圖幅
宋聖榮 (2007) 臺灣第四紀火山活動，經濟部中央地質調查所特刊，第 18 號，第 112-142 頁
楊善智、曾義星 (2008) 數值高程模型之品質評估，航測及遙測學刊，第十三卷，第三期，第 195-206 頁
環境與發展基金會、工業技術研究院 (2013) 臺灣地熱發電潛能廠址研究計畫期末報告，台灣電力股份有限公司再生能源處
工業技術研究院 (2014~2017) 高效能地熱發電技術研究計畫，研究機構能源科技專案 103~106 年度執行報告，經濟部能源局
中華民國地球物理學會 (宋聖榮、李元希、李柏村) (2016-2017) 大屯火山地區岩石定年研究期末成果報告 (1/2~2/2)，經濟部中央地質調查所
Wang, K. L., S. L. Chung, C. H. Chen, R. Shinjo, T. F. Yang, and C. H. Chen (1999) Post-Collisional Magmatism Around Northern Taiwan and Its Relation with Opening of The Okinawa Trough, Tectonophysics, 308, 363-376, doi: 10.1016/S0040-1951 (99) 00111-0
Song, S.R., Tsao, S. and Lo, H. J. (2000) Characteristics of the Tatun Volcanic Eruptions, North Taiwan: Implications For A Cauldron Formation And Volcanic Evolution, J. Geol. Soc. China, 43, pp.361-378

應用程式

公開發售

結合 ETABS 之位移法耐震性能設計及評析程式

售價：新臺幣 9,190 元/套(含報告)

訂購電話：(02)8791-9198 轉 467

傳 真：(02)8791-2198

E-MAIL：louise@sinotech.org.tw