

地熱運用對大屯火山群火山活動的 影響評估

Evaluation of Impacts on Volcanic Activity in the Tatun Volcano Group by Geothermal Developments

陽明山國家公園管理處委託報告

中華民國 109 年 12 月

(本報告內容純係作者研究小組之觀點，不應引申為本機關之意見)

案號：1080717

地熱運用對大屯火山群火山活動的
影響評估

**Evaluation of Impacts on Volcanic
Activity in the Tatun Volcano Group
by Geothermal Developments**

成果報告

受委託單位：中華民國地球物理學會

研究主持人：宋聖榮

協同主持人：盧乙嘉

研究助理：邱玉嵐

研究期程：中華民國108年12月至109年12月

研究經費：新臺幣108萬元整

陽明山國家公園管理處委託報告

中華民國 109 年 12 月

（本報告內容純係作者研究小組之觀點，不應引申為本機關之意見）

目次

計畫摘要	9
Abstract	10
第一章、計畫緣起和前人研究.....	11
第二章、研究方法.....	21
1. 資料蒐集	21
2. 野外火山和地熱調查	21
3. 地熱潛能的估算	21
4. 利用 Play Fairway Analysis 研究地熱可開發區	36
5. 利用特極頻大地電磁法估計大屯火山群熱流輸出量	38
第三章、大屯火山群晚期的火山活動特徵.....	40
1. 火山活動的分類	40
2. 大屯火山群後期的噴發	47
3. 蒸氣型噴發	59
第四章、大屯火山群的地熱熱能釋放.....	65
1. 極低頻大地電磁法(VLF-MT)的調查結果	65
2. 電性構造與岩漿溢氣的關係	68
3. 電導率區域大小與熱輸出的關係	69
第五章、大屯火山群的地熱潛能.....	71
1. 60-70 年代地熱評估結果	71
2. 區域潛能評估	72
第六章、陽明山國家公園內地熱開發優先順序區	99
1. 簡介	99

2. 數位分析圖層類別	101
3. 圖層加疊綜合分析	108
第七章、國家公園與地熱電廠	117
1. 共存共榮典範-位於國家公園內的地熱電廠	117
2. 欣欣向榮的地熱概念園區-位於國家公園周邊的地熱電廠	124
3. 兩相權衡孰輕孰重？魚與熊掌不可得兼	126
4. 結語	128
第八章、結論與建議	130
1. 結論	130
2. 建議	132
參考文獻	136
1. 中文參考文獻	136
2. 英文參考文獻	137
3. 日文參考文獻	141
3. 國家公園與地熱電廠參考資料與網站	142
附錄一、評選會議審查意見回覆	145
附錄二、期中會議審查意見回覆	148
附錄三、期末會議審查意見回覆	153

圖目錄

圖 1-1、火山噴發前岩漿活動可能的前兆(Tilling, 1989)。	12
圖 1-2、Th-Ra 放射衰變成長曲線顯示紗帽山熔岩丘的形成年代為 $1,376 \pm 11$ yrs (Zellmer et al., 2015)。	13
圖 1-3、大屯火山群火山氣體 $N_2/100-10^*He-Ar$ 投影圖(楊燦堯等人, 2003; Lee et al., 2005)。	14
圖 1-4、大屯火山群火山氣體 $^{20}Ne/^4He$ 和 $[^3He/^4He]/R_{air}$ 投影圖(楊燦堯等人, 2003; Lee et al., 2005)。	15
圖 1-5、大屯火山群地區的溫泉和熱水換質分布。	15
圖 1-6、岩漿從在岩漿庫儲存到地面發生火山噴發的示意圖(Cassidy et al., 2018)。	18
圖 2-1、熱攫取因子與有效孔隙率呈線性關係 (Muffler, 1977)。	29
圖 2-2、熱攫取因子與儲集層溫度及孔隙率有關 (Muffler, 1977)。	30
圖 2-3、不同裂隙間距下的熱攫取因子曲線圖 (Williams, 2007)。	32
圖 2-4、井間裂隙呈現優勢水流路徑示意圖 (Williams, 2007)。	33
圖 2-5、併合蒙地卡羅法的計算流程示意圖 (Williams et al., 2008)。	35
圖 2-6、Play Fairway Analysis 圖層疊加示意圖(修改自 Fraser, 2010)。	37
圖 2-7、圖層分析流程(陳彥如, 2017)。	38
圖 2-8、MT 探勘原理。	39
圖 3-1、火山噴發作用示意圖。	42
圖 3-2、實驗室內模擬岩漿和水接觸後的火山噴發驗。	42
圖 3-3、區域性噴發--大陸東北吉林省境內的龍崗火山群。	44

圖 3-4、火山的噴發類型。.....	44
圖 3-5、硫氣孔或噴氣孔周圍有美麗的樹枝狀或針狀的硫磺結晶。.....	48
圖 3-6、安山岩上特殊的顏色或層層換質的洋蔥狀構造。.....	48
圖 3-7、受熱水換質的矽化產物和黏土礦物。.....	49
圖 3-8、紗帽山東南側湖泊堆積物的火山泥流和碎屑堆積物(Belousova et al., 2010)。	50
圖 3-9、以火山岩屑顆粒為主的湖泊堆積物(Belousova et al., 2010)。.....	51
圖 3-10、七星山土壤之組成礦物 ($> 125 \mu\text{m}$)，包含相當多的石英顆粒(林毓潔, 2013)..	52
圖 3-11、單晶質石英，含貝殼狀斷口(林毓潔, 2013)。.....	53
圖 3-12、單晶質石英，含平滑之破裂面(林毓潔, 2013)。.....	53
圖 3-13、多晶質石英，表面有生長紋構造(林毓潔, 2013)。.....	53
圖 3-14、石英顆粒的 EDS 偵測能譜，主要含矽(Si)和氧(O)的成分(林毓潔, 2013)。 ...	54
圖 3-15、蒸氣式噴發之模式（修改自 Sheridan and Wohletz，1983）(林毓潔, 2013)。 ...	54
圖 3-16、七星山地區 LiDAR 的日照陰影圖顯示火山爆裂口的分布(廖陳侃，2017)。 ...	55
圖 3-17、七星山東側張裂帶的火山爆裂口分布圖(廖陳侃，2017)。.....	56
圖 3-18、七星山西側下半部張裂帶的火山爆裂口分布圖(廖陳侃，2017)。.....	57
圖 3-19、七星山西側上半部張裂帶的火山爆裂口分布圖(廖陳侃，2017)。.....	58
圖 3-20、紐西蘭 Tarawera Rift 蒸氣噴發所形成的張裂帶和爆裂口。.....	59
圖 3-21、2014 年日本御嶽火山蒸氣型爆發事件的模式圖(Sano et al., 2015)	60
圖 3-22、第一型的蒸氣噴發模式(Stix and de Moor, 2018)。.....	61
圖 3-23、第二型的蒸氣噴發模式(Stix and de Moor, 2018)。.....	62
圖 3-24、大屯火山群地下微震分布(Pu et al., 2020)。.....	63

圖 4-1、大屯火山群詳細的電阻率分布圖(Komore et al., 2017)。	65
圖 4-2、大屯火山群全區的特極頻大地電磁法量測結果(Kagiyama et al., 2012)。	66
圖 4-3、七星山火山體周遭的極低頻大地電磁法量測結果(Kagiyama et al., 2012)。	67
圖 4-4、岩漿溢氣與導電率的構造關係(Kagiyama et al., 2012)。	68
圖 4-5、電導率與火山口位置變化圖(Kagiyama et al., 2012)。	69
圖 4-6、電導率值大於 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 的分布面積與熱流溢出速率的關係。	70
圖 5-1、大屯山井位資料來源及座標分布(曾衡之，2014)。	74
圖 5-2、大屯火山區地表熱流之等值圖(曾衡之，2014)。	78
圖 5-3、地下熱液流動路徑(曾衡之，2014)。	80
圖 5-4、儲集層面積劃定示意圖(曾衡之，2014)。	81
圖 5-5、儲集層厚度劃定示意圖(曾衡之，2014)。	81
圖 5-6、運用體積法及蒙地卡羅模擬之淺層地熱開發潛能(曾衡之，2014)。	84
圖 5-7、體積法變數參數之敏感度分析(曾衡之，2014)。	85
圖 5-8、推斷地下深處之溫度等值圖(曾衡之，2014)。	86
圖 5-9、E103 號井與 E208 號井所在位置。	88
圖 5-10、四口生產井之井口壓力對流量作圖。	88
圖 5-11、E208 號井單閃機組 T-S diagram。	89
圖 5-12、E208 號井雙閃機組 T-S diagram。	89
圖 5-13、E208 號井之比功率輸出圖。	90
圖 5-14、E208 號井之單閃、雙閃電力輸出。	90
圖 5-15、E103 號井單閃機組 T-S diagram。	92

圖 5-16、E103 號井雙閃機組 T-S diagram。	92
圖 5-17、E103 號井之比功率輸出圖。	93
圖 5-18、E103 號井之單閃、雙閃電力輸出。	93
圖 5-19、E103 號井之儲集層生產力指數衰減曲線。	96
圖 5-20、不同時間與幫浦深度下的預期流量曲線。	97
圖 5-21、E103 號井雙循環機組 P-h diagram。	97
圖 5-22、E103 號井雙循環機組 T-S diagram。	98
圖 5-23、E103 號井雙循環機組之水與異丁烷熱交換線。	98
圖 6-1、大屯火山區噴氣孔地熱區位置圖。	100
圖 6-2、熱源及裂隙潛能圖層疊加結果。摘自陳彥如碩士論文，2017。	102
圖 6-3、經色彩判視後重新數位成 4 級化之地熱潛能圖。	102
圖 6-4、陽明山國家公園內現有土地利用型態及資源特性之分區圖。	104
圖 6-5、臺灣北部陽明山國家公園(黑色邊界)內山崩與地滑地質敏感區。	106
圖 6-6、陽明山國家公園內地質災害敏感度分析結果。	107
圖 6-7、陽明山國家公園內地熱開發可行性分布圖。	109
圖 6-8、陽明山國家公園內馬槽地區具地熱活動潛能且適宜鑽井可行性分布圖。	111
圖 6-9、陽明山國家公園內七星山及北麓的地熱潛能與土地分區加疊圖。	112
圖 6-10、陽明山國家公園西南角具有地熱活動潛能且適宜鑽井之分布圖。	113
圖 6-11、陽明山國家公園西南角範圍內的地熱潛能與土地分區加疊圖。	114
圖 6-12、陽明山國家公園 104 年山崩地滑地質敏感疊加圖示。	115
圖 6-13、馬槽土地利用、山崩地滑地質敏感區、環境地質災害敏感區套疊	116
圖 7-1、2015 年三月日本興建中的地熱電廠(資源エネルギー庁)。	119

圖 7-2、地獄之門國家公園內的斑馬與地熱回注井管線(Yee, 2018) 。	121
圖 7-3、墨西哥的地熱電廠(Juan,2003) 。	122
圖 7-4、印尼古南薩拉克地熱電廠網站入口。	123
圖 7-5、義大利托斯卡尼的地熱電廠位置(Manzella et al., 2009) 。	125
圖 7-6、紐西蘭北島 Craters of Moon 蒸氣田。	127



表目錄

表 3-1、岩漿噴發種類及特徵.....	40
表 5-1、瑞士 Motor-Columbus 公司潛能評估整理。	71
表 5-2、大屯火山區鑽井資訊與點位分布。	72
表 5-3、大屯火山區之溫泉分布。	75
表 5-4、七星山東側深井之二氧化矽濃度值及溫度推算。	75
表 5-5、岩心孔隙率測試的平均結果及描述。	76
表 5-6、典型各溫度下的熱電轉換效率 (Tester et al., 2006) 。	82
表 5-7、3 至 6 公里之深層地熱資源分布情況。	83
表 5-8、E103 號井之儲集層模擬與井壁模擬參數。	94
表 5-9、異丁烷之節點分析與比功率輸出。	95
表 5-10、熱液之節點分析與淨電力輸出。	96
表 7-1、世界上位在國家公園的地熱電廠。	129
表 7-2、世界上不同國家對國家公園內地熱開發電廠的策略.....	129

計畫摘要

火山噴發活動為地下岩漿上湧到地表或大量熱釋放加熱地下水、累積氣體壓力克服上覆岩層應力所產生的行為。大屯火山群從過去的地質、地球物理和地球化學的研究成果，以及依據活火山經驗定義或現象定義已被認定為一座活火山，故科技部在大屯火山群設立『大屯火山觀測所(TVO)』，以及內政部立法訂定『火山災害防救業務計畫』，都是為了因應大屯火山群未來可能的噴發活動和伴隨所產生的災害。陽明山國家公園位於已被認定為活火山的大屯火山群內，且從過去前人的研究顯示大屯火山群後期噴發主要是以蒸氣噴發為主，園區內也擁有豐富的地熱資源，故藉由地熱的運用減緩岩漿熱源累積到噴發壓力所需的時間，以時間換取世界對火山預測和防範災害技術的發展以減低火山可能的危害，並開發地熱發電的再生能源以減低臺灣地區溫室氣體的排放貢獻心力。另外，藉由整合地質、地球物理和地球化學的資料，推估大屯火山群的淺層地熱可開發量約有425MW、深層地熱潛能約有1.2GW。進一步利用有利探勘標的法獲得陽明山國家範圍內最佳地熱開發區位於馬槽地區。

關鍵詞：地熱能、火山活動、大屯火山群、陽明山國家公園、地熱開發

ABSTRACT

Volcanism is caused by the magma rising up to the surface or the groundwater heated as steams by the magmatic heat to accumulate underneath the volcano, then overcome the loading pressure to explosion. Based on the geological, geophysical and geochemical data, the Tatun Volcano Group (TVO) has been identified as an active volcano in terms of empirical and phenomological definitions. Therefore, the Ministry of Science and Technology (MOST) built up the Taiwan Volcano Observatory at Tatun (TVO) and volcanic hazards have been included into the national system of disaster reduction. The Yingmingshan National Park is located in the TVG, which was characterized by the phreatic eruptions in late stage. Meanwhile, it has also abundant geothermal energy. It has considered to play a role to explode and develop the geothermal energy, that is not only to contribute the green energy for reducing the emissions of greenhouse gases, but also to extract the heat for delaying the gas pressure to reaching critical condition of explosion. The time got from this activity can allow us to develop the new technology for volcanic monitoring and mitigation, and reducing possible volcanic hazards. In addition, combining the geological, geophysical and geochemical information got the geothermal reserves being 425 MW in shallower reservoir and the deep potentials being 1.2GW in the deep. Meanwhile, the best feasible geothermal site is located in the Matsu area of Yangmingshan National Park.

Keywords: Geothermal energy 、 Volcanic activity 、 Tatun Volcano Group 、
Yangmingshan National Park 、 Geothermal development

第一章、計畫緣起和前人研究

火山災害是僅次於地震和洪水對人類社會威脅最大的自然災害，翻開過去火山災害史，人類傷亡和財產損失不計其數。研究火山的目的，除了瞭解火山形成的機制和噴發行為外；更是希望藉由對火山的瞭解預測火山噴發並降低火山噴發所造成的災害。

1991 年位於日本九州的雲仙火山(Unzon Volcano)的噴發，造成包括兩位著名的火山學家、多名記者及約 30 名一般民眾的死亡(Yanagi et al., 1992)；同年位於菲律賓賓呂宋島中部的皮納吐波火山(Pinatubo Volcano)的噴發，雖未造成大量人員傷亡，但其破壞鄰近的建築物，造成大量的財產損失(Janda et al., 1996)。同樣位於環太平洋火山弧的臺灣有大屯火山群、北方四島、龜山島、以及北方的海底火山(Tsai et al., 2017)，這些區域的火山是否為活火山？未來還會不會噴發？尤其鄰近人口數超過七百萬人的臺北都會區之大屯火山群，過去曾經有火山泥流覆蓋在臺北盆地西北部的紀錄(Song et al., 1995, 2000a, 2007)，大屯火山是不是活火山、會不會再噴發？是一個令我們不得不注意的問題。

一座火山是否為活火山，是依據國際火山學會對於活火山的定義(Szakacs, 1994)：時間和經驗定義來認定。時間定義為用科學的方法確認一座火山在 10,000 年內曾經噴發過，則認定為活火山。但時間的定義太過於簡單，有些火山在最近的 10,000 年來曾噴發過，但因快速的風化侵蝕而無法辨認出過去的噴發記錄。例如菲律賓皮納吐波火山於 1991 年噴發出大量的火山灰和火山碎屑，為上個世紀地球上最大的一次火山噴發，但因其位處熱帶多颱風的區域，每年大量的暴雨沖刷，已把疏鬆的火山灰和火山碎屑流堆積物侵蝕殆盡，現在幾乎看不到當年噴發的痕跡。所以用 10,000 年來定義一座火山是否為活火山，仍然有其先天上不足的地方。

西元 1994 年的國際火山學會又討論出另一套定義：火山噴發需其地底下有岩漿庫，若能利用科學監測，如地震、地表變形、高熱流量和火山氣體等(圖 1-1)，偵測出火山地底下仍有岩漿庫存在，就可以認定其為活火山，這種定義稱為活火山的現象定義(Szakacs, 1994)。

火山噴發前的可能前兆圖

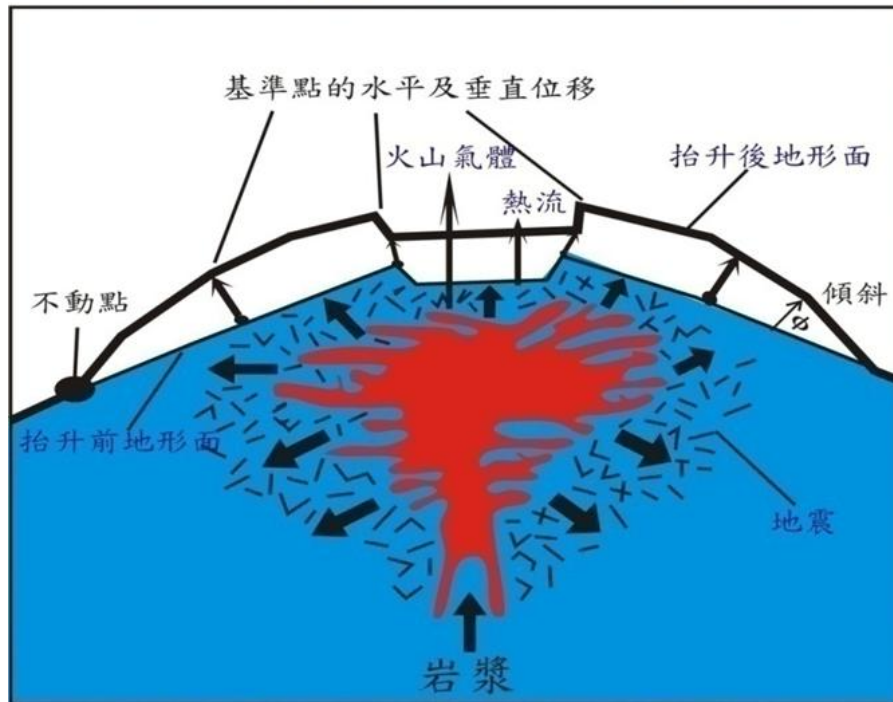


圖 1-1、火山噴發前岩漿活動可能的前兆(Tilling, 1989)。

從火山岩定年資料來推斷，大屯火山最後噴發停止的年代約為 3.8 萬年左右，但由於定年方法誤差、新鮮岩石材料的取得等局限性，以及由大屯火山群的地形來判斷，此年代可能應該還要再更年輕。臺北盆地的鑽井在松山層發現火山灰，而松山層的年代年輕於 20,000 年，故推測大屯火山群的火山活動時間可能年輕於 20,000 年 (Chen and Lin., 2002; 陳中華和林朝宗，2006)。Belousov et al.(2010) 紗帽山附近古湖泊的火山灰，獲得年代介於 11.6~19.5 千年前，甚至年代可年輕至 5.5 千年前左右。另外，Zellmer 等人利用鈾-鈷-釷定年法測定紗帽山熔岩穹窿的年代年輕於 1,370 年(圖 1-2) (Zellmer et al., 2015)。但因古湖泊的火山灰可能是風化侵蝕而來，並不是直接火山噴發的產物，故有人質疑所獲得的年代可能是碎屑性火山物質沉積的年代，並不代表真正火山噴發的年代。而利用鈾-鈷-釷定年法測定的年代只有一個，代表性可能不夠，需有更多的樣本從事定年工作。

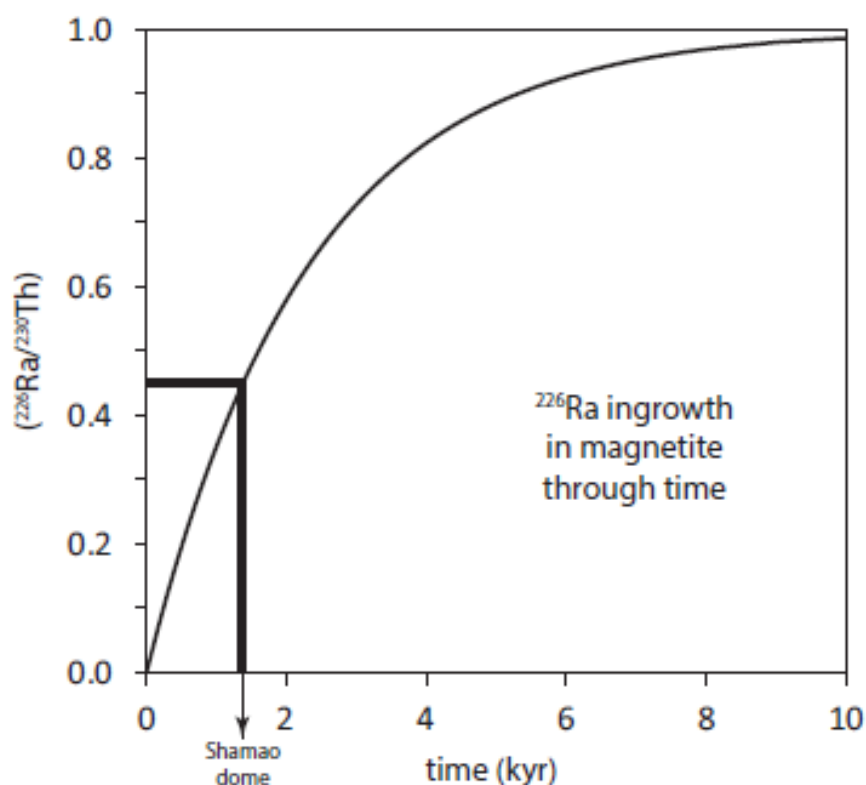


圖 1-2、Th-Ra 放射衰變成長曲線顯示紗帽山熔岩丘的形成年代為 $1,376 \pm 11$ yrs (Zellmer et al., 2015)。

從 LiDAR 影像科發現有兩條穿過七星山火山的張裂帶，各條中間最少有數個火山爆裂口，保存相當良好，顯示大屯火山群最後噴發的年代應該相當年輕。過去曾有學者在鴨池鑽探岩心取樣分析沉積物中的孢子和花粉，以研究臺灣過去的環境和氣候變遷，結果在 33 公分碰到硬的基盤岩，且此深度的 C-14 年代為距今約 1265 年(Chen et al., 2009)，顯示此一火山爆裂口的形成時間可能比此一年代稍早一些。

Song et al. (2000b)整理大屯火山地區的定年結果以及岩漿活動徵兆，依據國際火山學會對於活火山的定義(Szakacs, 1994): 時間和經驗定義，認定大屯火山群為活火山。大屯火山群噴氣口的火山氣體，其主要的氣體成分，以小油坑為例: 93.10% 為水蒸氣，其餘為 CO_2 (3.26%)、 H_2S (3.14%)、 SO_2 (0.02%)等。與平均火山氣體成分相比較(H_2O : 70.75%、 CO_2 : 14.07%、 N_2 : 5.45%、 SO_2 : 6.40%、 SO_3 : 3.14%、 H_2S : 0.33%、 S_2 : 0.10%、Ar: 0.18%、Cl: 0.05%)， H_2O 和 H_2S 偏高，而 CO_2 、

N_2 、 SO_2 、 SO_3 等偏低，可能是有大量的外界水和氣體進入的影響(楊燦堯等人，2003; Lee et al., 2005)。He- N_2 -Ar 作圖顯示(圖 1-3)，大多數氣體樣品來源主要是聚合板塊氣體和空氣或是地下水混染，這顯示大屯火山地區的氣體來源和北臺灣的隱沒作用有密切關聯。另外，大屯火山群噴氣口的 He 同位素的分析研究 (Yang et al., 1999)，發現大屯火山群噴氣口中的 He 同位素，有 60%是來自於岩漿的氣體，40%是來自於大氣中的 He 氣體，此結果顯示大屯火山群底下可能還有岩漿庫存在著(圖 1-4)。大屯火山群地區的溫泉和熱水換質遍佈(圖 1-5)，已知的溫泉最少有 16 處，且溫泉在地表的溫度可達 $100^{\circ}C$ 左右。在 60 年代，中油為了探勘地熱資源，在大磺嘴、馬槽等地，鑽了不少的深井。其中，在馬槽 E208 井鑽至地底下約 1,700 多公尺處的溫度可達攝氏 293。雖未有原地熱流量的測量，但由地底下溫度的測量及遍佈高溫的溫泉，顯示大屯火山群的熱流量應該相當高。綜合前述的經驗定義和微震分佈、氦同位素、噴氣口的火山氣體、及地下溫度的測量及遍佈高溫的溫泉等之現象定義，大屯火山群地底下應還有岩漿庫的存在(Song et al., 2000b)。

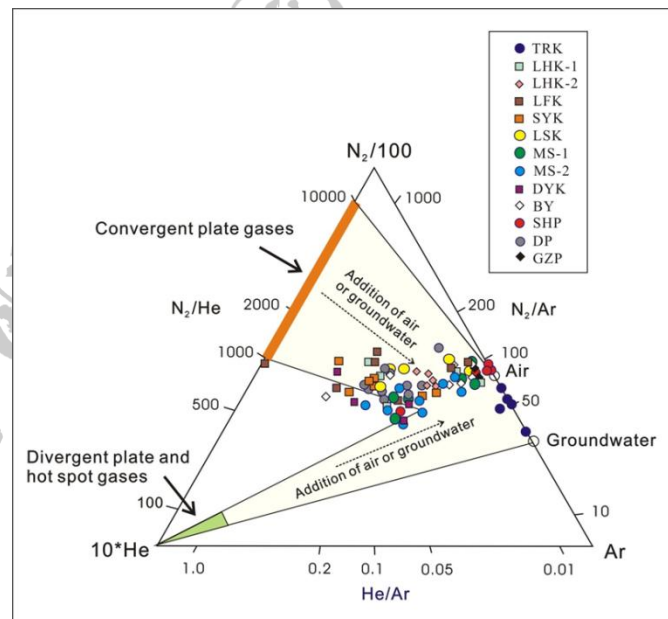


圖 1-3、大屯火山群火山氣體 $N_2/100$ - 10^*He -Ar 投影圖(楊燦堯等人，2003; Lee et al., 2005)。

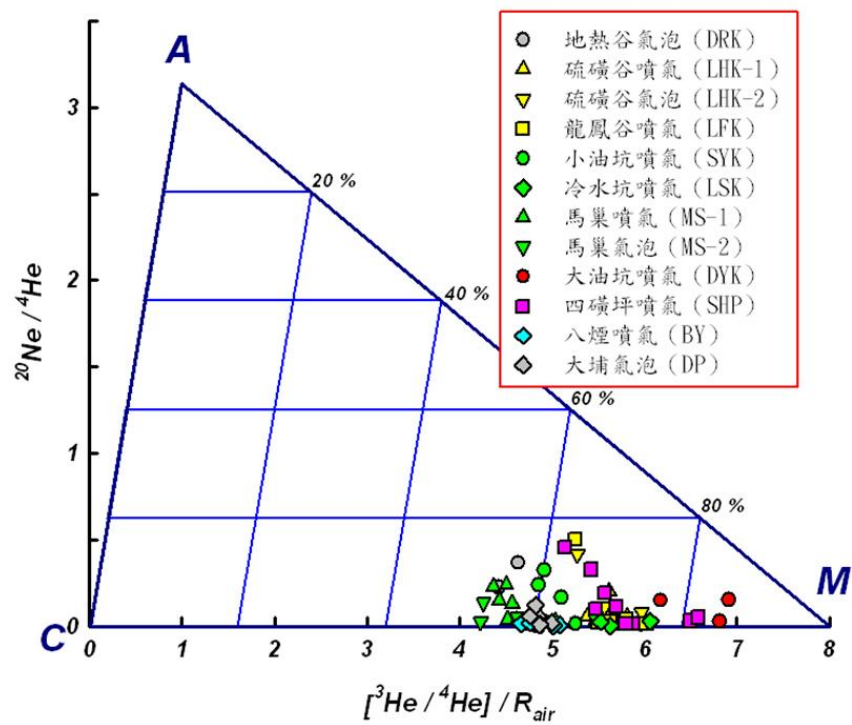


圖 1-4、大屯火山群火山氣體 $^{20}\text{Ne}/^4\text{He}$ 和 $[\text{}^3\text{He}/^4\text{He}]/R_{\text{air}}$ 投影圖(楊燦堯等人，2003; Lee et al., 2005)。

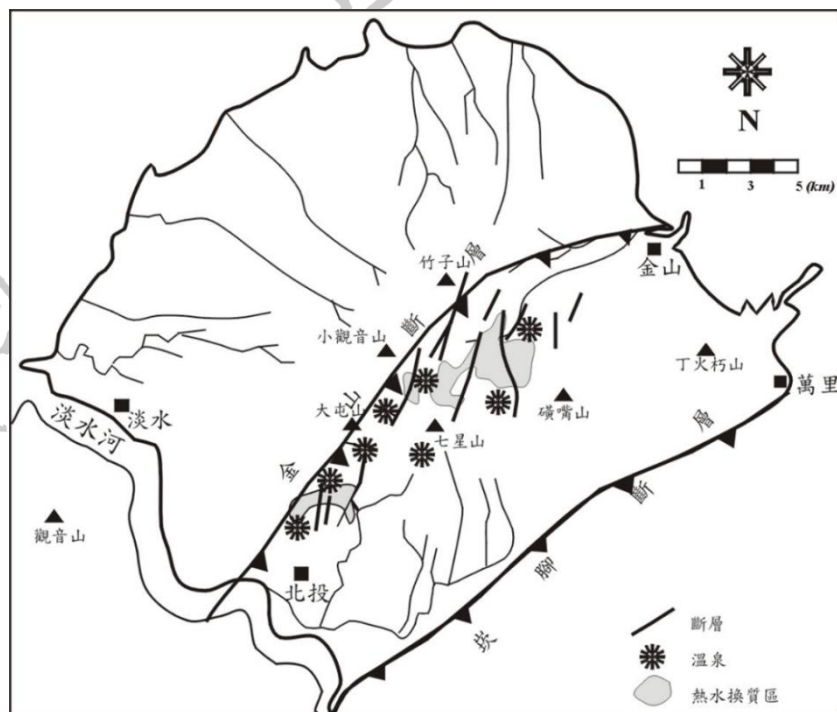


圖 1-5、大屯火山群地區的溫泉和熱水換質分布。

臺灣北部地區的臨時微震觀測網觀測結果顯示，大屯火山群附近有相當多的微震發生，尤其集中在馬槽地區底下，其地震規模常小於 3.0 (Yeh and Chen, 1991; Lin et al., 2005a&2005b)。但 1986 年，在陽明山竹子湖地區，曾經發生過規模超過 5.0 以上的地震，不僅將陽明山原有的花鐘震垮；地震過後不久，馬槽地區發生了大規模的山崩，形成火山泥流，沖垮舊馬槽橋，這也可能與火山地震有關。這幾年來在大屯火山群佈置微震網，偵測到相當多的微震發生，包括由構造破裂所引起的火山構造地震、與火山地區岩漿或熱水活動有關的群震現象、以及只有在活火山地區或是火山活動發生前才有的特殊長週期地震訊號等 (Lin et al., 2005a, 2005b; Konstantinou et al., 2007)，地震觀測都顯示大屯火山群地底下可能有活躍的岩漿庫存在。Lin et al. (2016)利用地震波的反演，顯示在現今金山和大埔地下約 20 公里處存在高 V_p/V_s 的區域，可能地下存在一活躍的岩漿庫存在。

火山噴發活動與岩漿的形成關係密切。當地球內部深處獲得熱源的供應，或是有液體加入降低岩石的熔點，使得岩石開始發生部份融熔，產生岩漿，此時未分離的岩漿和未融熔的岩石組成似糊狀的物質；當融熔的程度超過 6% 以後，岩漿開始與未融熔的岩石分離。由於岩漿的比重較鄰近的岩石輕而往上升，上升的方式有三種：頂蝕作用、衝頂作用和岩脈作用。頂蝕作用有如開隧道般前進，是將其上方的岩石慢慢融熔後上升，此一上升方式需要大量源源不斷的熱量供應，才可能上升至地表發生火山活動。一般而言，地球內部的岩漿不可能供應如此大的熱量，故此頂蝕作用只發生於局部地區。衝頂作用則像煮開水般，鍋底被加熱後形成氣泡往上移動，地球內部的岩漿其本身較周圍的岩石輕，藉著浮力而往上衝，是較有機會上到地表發生火山噴發。但岩漿的比重一般還是會比上部地殼或沉積岩重，僅靠本身浮力還是無法到達地表的。岩脈作用則是沿著岩石的裂縫往上移動，是較容易上升到地表發生火山活動的一種作用。當岩漿上升到與其比重相似的岩石附近，即會滯留，而底下新產生的岩漿仍不斷的往上升，於是在停留處形成岩漿庫。若此時有裂隙直通到地球表面時，岩漿會直接噴至地表形成火山，此階段所產生的岩石較基性，接近玄武岩，氣體的成分較低，故噴發的行為較溫和，以產生熔岩流為主(圖 1-6)，美國夏威夷群島的火山和冰島大部分的火山，就是屬於此類型的火山噴發。

若無裂隙通到地表，岩漿則滯留在地底下岩漿庫內，並受到周圍岩石較低溫度的影響，開始冷卻結晶出含鐵鎂質較高的礦物，如橄欖石、輝石和磁鐵礦等，使得岩漿成分產生變化，形成較酸性的岩漿(二氧化矽的含量較高，鐵鎂質含量較低)。滯留在岩漿庫的時間越久，則噴發後所產生的岩石越酸性，接近安山岩和流紋岩，氣體成分的比例也隨著岩漿演化而增加，故常常產生較劇烈的噴發行為，以產生火山碎屑岩為主。此種岩漿噴發大都發生在隱沒帶火山島弧、大陸邊緣或大陸內部較酸性岩漿的噴發，如美國西部華盛頓州的聖海倫斯火山(Mt. St. Helens)在 1980 年的噴發、菲律賓皮納吐波火山 (Mt. Pinatubo) 在 1991 年的噴發、以及大陸東北長白山的天池火山，都是屬於岩漿演化較久，噴發較劇烈的火山。

在自然界中，當岩漿從地底深處上升至地表的過程中，可能會與地下水或地表水發生作用，而產生不同的火山噴發作用。若岩漿上升至地表，都未與地下水或地表水發生作用而直接噴發，稱之為岩漿噴發作用；若與地下水或地表水發生作用一起噴發，稱之為岩漿蒸氣噴發作用；若只加熱地下水或地表水，使之快速變成蒸氣而發生噴發作用，稱之為蒸氣噴發作用。

岩漿噴發作用的主要機制，是當有一定量的岩漿在上升，累積於火山底下某一深度，形成了一個淺的岩漿庫。由於岩漿所處的深度變淺，壓力減低，或是岩漿庫上覆岩層被破壞，外壓迅速下降，使得原先溶解於岩漿中的氣體成分會離溶而出，產生氣相和液相分離，氣體累積於岩漿庫或岩漿上升管道的上方。當岩漿內的氣體壓力累積到超過上覆岩層所能容忍的靜壓力時，氣體就會釋放而出，破壞岩層發生劇烈的噴發，形成氣體加碎屑物組成的噴發柱(圖 1-6)。

岩漿蒸氣噴發作用是指岩漿進入飽含地下水的岩層或上覆的冰層、熔岩流進入湖泊或河流、地表水遇到岩漿等，液態水會迅速被汽化，壓力增加超過上覆岩層或周遭環境所能承受的壓力時，就會發生劇烈的爆發。在爆發的產物中若未含岩漿成分，稱之為蒸氣噴發作用；反之，則稱之為岩漿蒸氣噴發作用。岩漿蒸氣噴發的劇烈程度，主要受控於岩漿和水的比例。也就是說，岩漿中的熱傳遞給水的效率，使水能完全轉變為水蒸氣，體積或壓力增加的效率。從實驗室內模擬岩漿和水接觸後，火山噴發的實驗，顯示當岩漿和水的比例介於 3—0.3 之間，熱傳

遞效率最好，火山的爆發能力最高。比例小於 0.3 時，水雖然完全氣化為水蒸氣，但累積的壓力無法超過上覆岩層的靜壓力，所以無法發生爆發作用。比例大於 0.3 時，岩漿中的熱完全傳遞給水，但無法氣化水為水蒸氣，只是把水的溫度升高，所以此時所發生的火山噴發，只是溫和的岩漿溢出，形成枕狀熔岩，而無法發生劇烈的爆發作用。

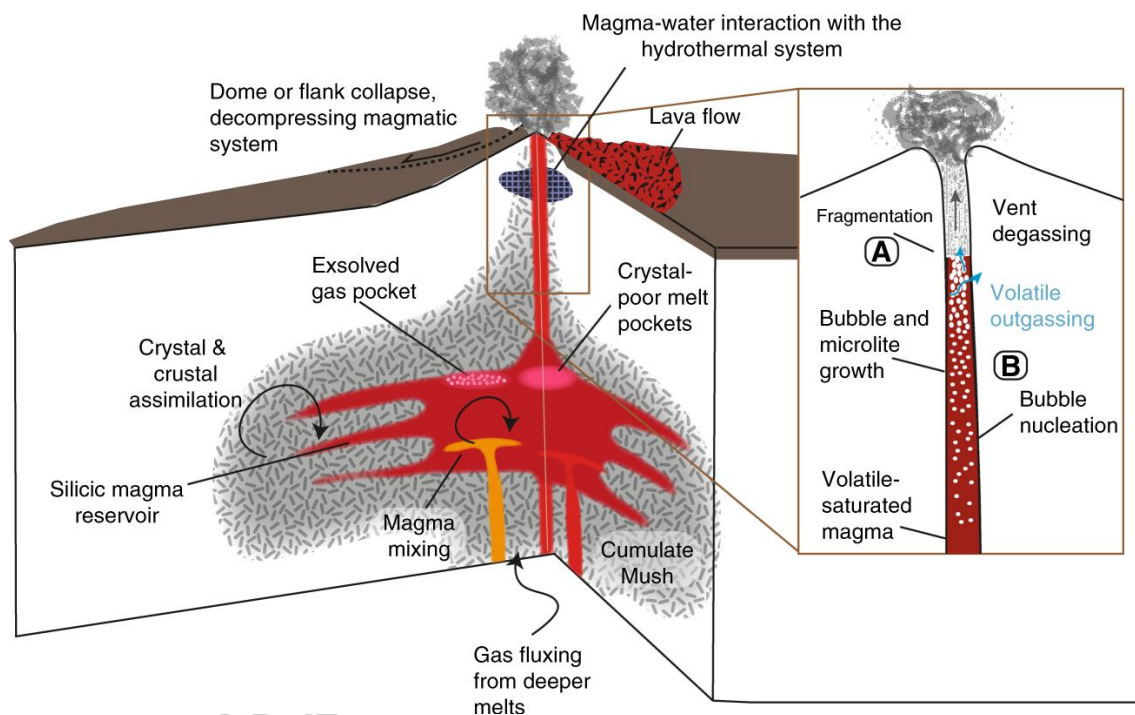


圖 1-6、岩漿從在岩漿庫儲存到地面發生火山噴發的示意圖(Cassidy et al., 2018)。

綜合上述的描述顯示火山的噴發主要受控於地下深處岩漿上升所引發火山氣體的離溶累積，或是來自地下深處熱供應加熱地下水成蒸氣的累積，累積的壓力克服上覆岩層壓力而發生噴發(Cas and Wright, 1987)。大屯火山群後期的噴發主要是以蒸氣噴發為主並伴有熔岩丘的形成。蒸氣噴發的主要氣體來源為來自地下深處的岩漿熱上升加熱地下水所形成，其噴發的時間與熱上升加熱地下水累積氣體壓力有很大的關係。以目前人類的科技和能力是無法阻止岩漿或熱的上升所引發的火山噴發，但能藉由抽取地熱(或熱水)以降低氣體的壓力累積、延遲(或延長)達

到爆發臨界點所需累積的氣體壓力，以增取時間來發展相關監測和預測火山活動的方法，減低因大屯火山群火山活動對於臺北盆地和火山周遭地區的危害。

關於大屯火山群的地熱研究，陳肇夏曾進行全區地熱發電潛能評估，也是最早的評估文獻(Chen,1970)，其整理國外 7 個地熱田的單位面積所產電能下限($2,240 \text{ kW/km}^2$)，再與估計蘊藏在溫泉區底下的儲集層面積 36 km^2 相乘，得到約 80 MW 的下限值。另外再引用理論認為發電潛能約為地表自然熱散失的 4–10 倍，則根據其估計自然熱散失為 $12.3 \times 10^6 \text{ cal/s}$ (相當於 51 MW)，乘以 4 倍得到約 200 MW 的上限值。這樣的估計充滿不確定且缺乏嚴謹理論支持。1972 年經濟部礦研所委託瑞士 Motor-Columbus 公司地熱專家 Banwell 先生進行大屯火山群發電潛能評估，估計大屯火山群地區有 10 萬至 50 萬千瓦的地熱潛能(Banwell, 1961, 1963)。根據工研院 1995 年的調查，此區的淺層地熱潛能是 85 MWe ，若將深層地熱納入計算，發電潛能超過 500 MWe 大屯山為火山岩地區。根據上述調查與探勘資料，大屯火山區內較具開發希望的地區位於七星山至磺嘴山間長約 10 公里寬約 3 公里之範圍，假設平均溫度 245°C ，儲集體積 40 Km^3 ，儲集潛能約 $24.3 \times 10^{18} \text{ J}$ (焦耳)，可產潛能約 $6.10 \times 10^{18} \text{ J}$ (儲集潛能的 25%)，初步評估發電潛能為 500 MW (礦研所，1969、1970、1971、1973)。曾衡之(2014)利用體積法和蒙地卡羅法估計大屯火山群的地熱蘊藏量為 425 MW 。

大屯火山群深層地熱的蘊藏量，張竝瑜(2012)利用過去的探勘資料和最新的熱流量，估計大屯火山群地熱區的範圍約有 88 km^2 、地下 4,000 公尺以內之地熱原始蘊藏發電容量約有 $2,886 \text{ MWe}$ 。考慮大屯火山區位於國家公園內法令的限制，其在國家公園內和國家公園外的潛在發電容量，分別為 $1,405 \text{ MWe}$ 和 $1,481 \text{ MWe}$ ，可合法開採百分比為 51.32%。另外，曾衡之(2014)也利用體積法和蒙地卡羅法估計陽明山範圍內群的深層地熱蘊藏量約為 $1,193 \text{ MW}$ 。

綜合前人的研究顯示大屯火山群地區是臺灣地熱蘊藏最為豐富的地區。地熱能源不僅為環保永續的綠色能源，其發電由於不受天候影響，運轉率高(通常高於 90%以上)又可作為基載電力。因此世界各國不論是位於板塊邊界地熱富集區之國家，如美國、紐西蘭、日本、冰島、菲律賓和印尼等，或是地熱資源較不豐富的

國家，如法國、德國、澳洲和韓國等，都積極的投入地熱能源之探勘與開發。另外，地熱對於天災的忍受度高，以日本 311 地震為例，在日本東北的 9 座地熱電廠絲毫沒有受到影響，以致在 311 過後，日本政府開放國家公園可開發地熱，並視地熱是解決能源問題的良方之一而大力投資。臺灣擁有這麼好的天然資源，尤其是陽明山國家公園所在地的大屯火山群，更應珍惜老天爺的恩賜。此一地熱開發不僅可提供乾淨的能源和穩定的電力，還可減緩大屯火山群高溫熱水和氣體的累積，超過岩層上覆的壓力達噴發的臨界條件，爭取更多時間以發展監測和預測的科技，減低大屯火山活動對周遭環境的衝擊。故本計畫主要的主要目的是研究大屯火山群過去火山的活動性、火山的特徵、估計岩漿熱和蒸氣壓力的累積、熱能釋放與火山活動的關係，進一步評估陽明山國家公園地熱潛能和規劃未來園區內地熱詳細探勘和開發的策略。

第二章、研究方法

本研究計畫主要是評估大屯火山群地熱抽取以減低或延長地下深處火山氣體或水蒸氣累積達到臨界點而發生噴發的研究，故首先須確認大屯火山群為一座活火山，然後進一步了解大屯火山群過去噴發的行為和以何種噴發活動為主，然後評估地熱抽取和利用對於其活動的影響，最後評估陽明山國家公園內地熱潛能和規劃未來園區內地熱詳細探勘和開發的策略。所採用的研究方法和步驟描述如下：

1. 資料蒐集

- A. 蒐集大屯火山群的定年和觀測資料。
- B. 蒐集大屯火山群與地熱有關之地質、地球物理、地球化學和水文資料。
- C. 蒐集大屯火山群過去的地熱研究相關資料。
- D. 蒐集陽明山國家公園內土地使用分區現況。

2. 野外火山和地熱調查

- A. 火山野外調查以判定何種噴發方式。
- B. 利用野外火山地熱調查工作，觀察並紀錄地熱徵兆，如噴氣孔、硫氣孔、溫泉和熱水換質區等的分布，然後結合地熱潛能區和土地使用分區，以判定未來最適當和排定地熱開發區的優先順序。

3. 地熱潛能的估算

美國地質調查所(USGS)於 1975 年發表首篇全國性的地熱潛能評估報告，報告中運用儲熱(Stored heat)的概念，作為地熱利用潛能與比較的計算基礎(White and Williams, 1975)。而後 Muffler and Cataldi (1978)整理了四種衡量地熱資源的方法：

(1)地表熱流法(Surface heat flux)。

(2)體積法(Volume method or Stored heat method)。

(3)平面裂隙模型(Planar fracture)。

(4)岩漿熱平衡(Magmatic heat budget)。

因為其餘方法在使用上較侷限，或僅為半定量，使得體積法廣受採用。因此這套由 Cataldi et al. (1978)、Muffler and Guffanti (1979)、Nathenson (1975)、Renner et al. (1975)、White and Williams (1975)和 Muffler and Cataldi (1978)所發展的體積法就成為地熱資源估計的標準方法。

其後不僅美國地質調查所，甚至民間地熱公司如 GeothermEX Inc.及麻省理工學院等皆是以修訂的體積法進行地熱潛能評估。

公式整理如下：

$$q_R = \rho C \cdot a \cdot d \cdot (T - T_{ref}) \quad (3.1)$$

上式(3.1)中 q_R 為地下總儲熱、 ρ 為密度、 C 為比熱、 a 為儲集層面積、 d 為儲集層厚度、 T 為儲集層平均溫度、 T_{ref} 為參考溫度。Garg and Combs (2010a)認為 T_{ref} 應帶入發電機組之分離溫度，本研究帶入更精確的回注水溫。而(3.1)中的 ρC 為：

$$\rho C = C_v = \rho_r C_r (1 - \phi) + \rho_f C_f \phi \quad (3.2)$$

密度與比熱的乘積即為體積比熱(C_v ， $J/m^3/^\circ C$)、 ϕ 為孔隙率、 ρ_r 與 ρ_f 分別為岩石與流體密度、 C_r 與 C_f 則分別為岩石與流體比熱。此式相當於考慮整體儲集層，包含流體及岩石部分的體積比熱。

$$q_R \cdot R_g = q_{wh} \quad (3.3)$$

將式(3.1)計算所得之儲熱 q_R 乘以熱攫取因子(R_g ，recovery factor)，則為井口所能攫取之總熱能(q_{wh})。

$$q_{wh} = m_{wh} \cdot (h_{wh} - h_{ref}) \quad (3.4)$$

井口所得流體之熱焓(h_{wh} , kJ/kg)與參考溫度下的液體熱焓(h_{ref})相減，即為每公斤流體經一次發電循環所消耗的熱能。將井口攫取之總熱能 q_{wh} 除之則可得井口總流體產量(m_{wh} , kg/s)。

式(3.1)–(3.4)即藉由評估地下總儲熱及井口所能攫取的比例，換算可供多少公斤的流體進行發電循環。而接下來的式子則是應用熱動力學分析計算蒸氣品質、渦輪效能、利用效率(utilization efficiency)。

$$E = m_{wh} \cdot x \cdot w_{tb} / F / L \quad (3.5)$$

上式(3.5)中 x 為蒸氣品質(汽液分離後之蒸氣比例)、 w_{tb} 為推動渦輪的每公斤蒸氣所能產生的電能。 F 為電廠運轉因子，是評估電廠在一年中運轉的時間比例、 L 為電廠營運期，通常設定為30年。 E 即為所求輸出容量，單位為MW。

$$e = h_{wh} - h_o - T_o (S_{wh} - S_o) \quad (3.6)$$

$$\eta = E / e \quad (3.7)$$

最後要評估電廠利用效率(η)時，是將實際發電容量(E)除以最大可用能(e , exergy)。最大可用能的參數有井口所得流體之熱焓(h_{wh})及熱熵(S_{wh})、環境溫度下的飽和流體熱焓(h_o)及熱熵(S_o)、環境溫度(T_o)。

隨著地物、地化探勘的進行，以及實地鑽井、注水實驗等不同階段工作的實施，所獲得的資料就可用來帶入體積法中的參數，獲得更精確可信的結果。茲將各參數定義及所需資料分述如下。

3.1 孔隙率與體積比熱

比熱之單位為 $\frac{J}{kg \cdot ^\circ C}$ ，乘上密度後即可得體積比熱 $\frac{J}{m^3 \cdot ^\circ C}$ 。計算單位體積內，岩石與流體分別貢獻的體積比熱，即為式3.2.1所求。

$$\rho C = C_v = \rho_r C_r (1 - \phi) + \rho_f C_f \phi \quad (3.2.1)$$

而欲知岩石、流體貢獻比例就必須代入孔隙率。孔隙率的測定一般採用飽和法，將取芯的岩石樣品置於某種已知密度的溶液中，在真空下使溶液飽和充填岩石孔隙，然後取出稱其重量，將此重量減去岩石乾重即得充填的溶液重，除以溶液密度即為溶液充填體積(孔隙體積)，最後除以岩石全體積即為孔隙率。

$$\phi = \frac{(W_s - W_d) / \rho_s}{V} \quad (3.8)$$

$$V = (W_s - W_l) / \rho_s \quad (3.9)$$

ϕ 為孔隙率、 W_s 飽含溶液的岩石重量、 W_d 岩石乾重、 ρ_s 溶液密度、 V 岩石全體積。

而岩石全體積可由飽含溶液的岩石重量減去溶液中岩石重量(W_l)，相當於所受浮力，再除以溶液密度求得。

用上述方式求得的是岩石樣品的原生孔隙率，可視為孔隙率的保守下限值。由於裂隙在熱液系統中常扮演主控角色，因此必須考量深部可能有良好次生孔隙率的情況，可利用地電阻資料反推計算。

根據亞基定律(Archies law)：

$$\begin{aligned} R_o / R_w &= \phi^{-n} \\ \phi &= \sqrt[n]{R_o / R_w} \end{aligned} \quad (3.10)$$

R_o 含水岩層的電阻率、 R_w 流體之電阻率、 ϕ 為孔隙率、 n 為岩層膠結係數，值在 1.3–2.2 間，膠結越好值越大。流體之電阻率可由熱水所含化學成分換算氯化鈉濃度，配合溫度推算之。礦岩所(1972)利用 E205 號井水樣資料換算氯化鈉濃度 16,800 ppm、設定溫度 250 度，對表知 R_w 為 0.05 Ωm 。且設定五指山層 n 值為 2，推算孔隙率結果。

至於流體密度及比熱可對。

整理而言影響體積比熱最大的因子是孔隙率，不過對於發電潛能計算結果來說，體積比熱是影響非常小的項目(Cataldi et al., 1978)。

3.2 儲集層面積與厚度

尚未進行鑽探前的評估方法為探詢地表徵兆，包括溫泉、噴泉、噴氣孔、熱液換質帶等，不過近地表如果有不透水的蓋層，或地下水面遠低於地表時，這種方式會往往低估(White and Williams, 1975)。因此有時亦會採用低電阻帶、低速帶等地球物理資料來粗估儲集層體積(Garg and Combs, 2010a)。

當有實際鑽井資料時，依據國外經驗建議(GeothermEx, 1992; Olson, 1993a, b)，劃定儲集層面積、厚度應符合幾項規則：

- (1) 深度 1,300 m 時至少達到攝氏 180 度。
- (2) 底下岩層具高孔隙率或高滲透度的儲集層。
- (3) 最大鑽深 3,000 m。

3,000 m 鑽深限制是考慮深部岩層的滲透率會急遽衰減以及經濟因素(Cataldi et al., 1978)。沿著符合條件(1)(2)的鑽井點位作為邊界，可圈出核心潛能區，相當於最小可能面積。

根據鑽井資料與前人資料顯示，大屯火山區安山岩熔岩大多緻密且無滲透性，並非良好儲集層。而五指山層根據目前岩性特徵、厚度、範圍延伸來看條件優良，且大磺嘴和金山溫泉區已證明五指山層是含水層，大屯火山區溫泉分布亦與五指山層分布一致，因此視為大屯火山區儲集層(Chen, 1970)。

3.3 平均溫度

欲得知地下儲集層平均溫度，最可信的數據為鑽井直接量測，不過實際上鑽井常常沒有貫穿儲集層，或無 3,000 m 深鑽井。在這樣的情況下，替代的方法為觀察熱液換質礦物及其結晶形貌，夾擠出溫度範圍，例如看到矽華(Sinter)代表儲集

層溫度高於 175 °C(Garg and Combs, 2010a)；或者研究礦物中的液包體均溶溫度；或是廣受採用的地質溫度計推測地層溫度。

地質溫度計是對溫泉、噴氣孔、間歇泉、鑽井的水或蒸氣內的特定化學成分做分析，來推算地下溫度。常用的地質溫度計有：

A. 二氧化矽溫度計(Fournier and Potter, 1982; Fournier, 1977; Fournier, 1991; Giggenbach, 1991)。

B. 鈉鉀溫度計(Fournier, 1979; Giggenbach, 1988; Truesdell, 1976)。

C. 鈉鉀鈣溫度計(Fournier and Truesdell, 1973)。

D. 鈉鉀鈣鎂溫度計(Fournier and Potter, 1978; Giggenbach, 1988)。

使用地質溫度計的先決條件為：

- (1) 水與圍岩(礦物)的交互作用隨溫度變化而有反應。
- (2) 儲集層的岩層中有足夠的適當礦物，使水與其能達到平衡。
- (3) 水與圍岩在儲集層溫度之下，已達化學平衡。
- (4) 當水從深部上升至地表的過程中，成分改變甚小，沒有新的平衡反應。
- (5) 當水從深部上升至地表的過程中，沒有與其他來源的水發生混合。

前人研究指出大屯火山區利用具汽化現象之二氧化矽地質溫度公式結果較佳，誤差百分比介於-7.7%至 6%之間(李京霖, 2006)，因此本研究將採二氧化矽溫度計推估儲集層平衡溫度。

低於攝氏 180 度時，溶解矽的可能來源礦物有玉髓和石英，越低溫則溶解度由玉髓主控，反之則為石英主控，Giggenbach (1991)提出適用於兩者過渡帶間(20°C –210°C)的計算式。至於單純石英主控的更高溫部分可採用 Fournier (1977)提出的公式。

當熱水具汽化現象(Steam loss)時：

$$T_{SiO_2} = \frac{1522}{5.75 - \log(SiO_2)} - 273.15 \quad (3.11)$$

不具汽化現象時：

$$T_{SiO_2} = \frac{1309}{5.19 - \log(SiO_2)} - 273.15 \quad (3.12)$$

其中 T_{SiO_2} 為二氧化矽地質溫度(°C)， SiO_2 為水樣中二氧化矽濃度(ppm)。

因為根據前人研究，推測此區可能含兩層水層，如果取溫泉、噴氣孔樣品資料做計算，可能其是與上部水層平衡，不能反應深部含水層情況，因此本研究傾向於使用深井水樣資料，如 E205 號井、E208 號井。

3.4 熱攫取因子(RECOVERY FACTOR)

估計儲集層所蘊藏的儲熱，其可在地表攫取到的比例：

$$R_g = q_{wh} / q_R \quad (3.13)$$

是地熱潛能評估中最困難、也最複雜的參數。

3.4.1 早期評估方法

早期推導 R_g 的理論模型如下(Cataldi et al., 1978; Muffler and Cataldi, 1978)：

- (1) 水的粒間流。
- (2) 水的裂隙流。
- (3) 粒間蒸發。
- (4) 蒸氣主控儲集層的汽化。

其中 USGS Circular 726、790 所採用的(1)及(4)較重要，各適用於熱液主控、蒸氣主控系統，分述如下：

➤ 水的顆粒間流

Nathenson (1975)提出顆粒間流模型，分析冷水流經多孔介質的熱交換過程。模型中假設孔隙中的液態水受到來自儲集層的熱傳導所加熱，而成較低密度的水上升流出，同時新的冷水藉由注水或自然補給流入儲集層。因為流出跟補給平衡，孔隙水不會因儲集層壓力降而沸騰變成蒸氣，離開儲集層的流體為液體相。其模擬結果顯示，當冷水通過理想熱水儲集層—多孔(porous)且具滲透性、有效孔隙率 20%—進行熱交換，直到冷卻前緣突破至生產井時，儲集層約 50%的熱能可被攫取至地表，此過程亦稱 sweep process。

然而真實儲集層有很大部分並非多孔且具滲透性，所以 50%過於高估，White and Williams (1975)認為只有約一半的儲集層體積是多孔且具滲透性的，因此 Rg 減半為 25%。此一數值為 USGS 的 1975、1979 全國評估報告所採用。Muffler and Cataldi (1978)認為此 Rg 值已包含了流體在井內上升到地表過程中的摩擦熱損失，且熱水主控儲集層才適用此模式。因此 Rg 可視為有效孔隙率的線性函數，不受溫度影響(圖 2-1)

Sanyal et al. (2004)整理分析了 37 個分布於加州、內華達州、猶他州的熱水主控地熱田，發現地表自然熱散失值與發電容量間有線性比例關係，將這比例關係、熱流值、溫度梯度代換進體積法公式中，發現 USGS 對於熱液系統採用固定 Rg 值 25%過高，建議非沉積岩的儲集層應採用 5%–20%，沉積岩層則採用 10%–20%，範圍內可能機率相同，為矩形機率分布。

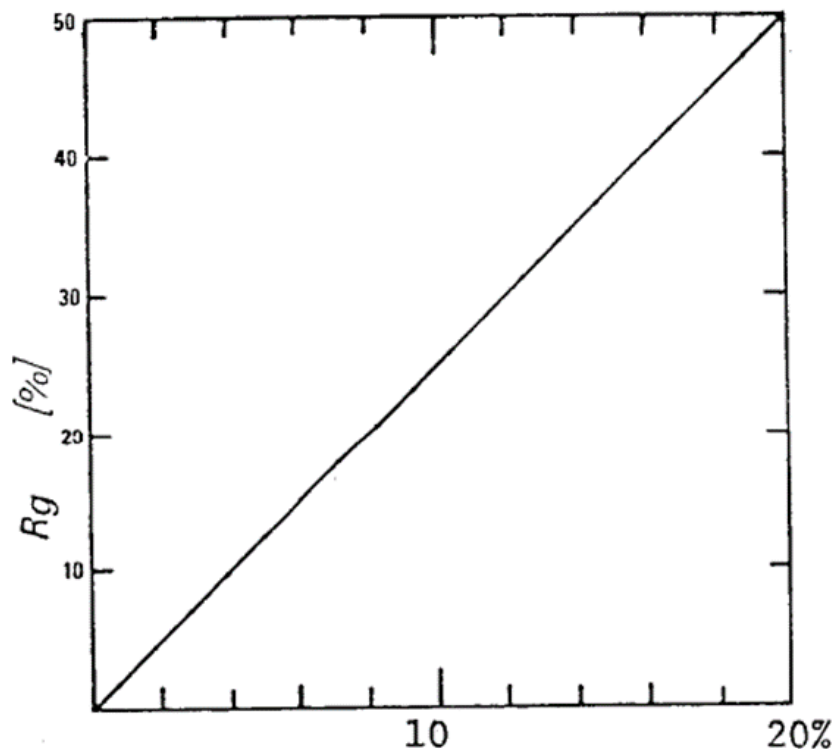


圖 2-1、熱攫取因子與有效孔隙率呈線性關係 (Muffler, 1977)。

➤ 蒸氣主控儲集層的汽化

此模型考慮儲集層初始為水氣二相混合所充填，主要的裂隙充滿蒸氣。生產時僅產蒸氣，水則停留在小孔隙內不向上移動。蒸氣占主要體積且主控儲集層的流體壓力。Nathenson (1975)提出的粒間蒸發模型曲線也可用在蒸氣主控，只需將圖中的 ϕ (有效孔隙率) 改視為儲集層中的水佔整個儲集層的體積比例 ($\phi \times$ 飽和度)。

Muffler and Guffanti (1979)應用此模型在 The Geysers 蒸氣地熱田，他們設儲集層平均溫度 240°C ，水所佔體積為 5%，而這些原本存在儲集層中的液體都汽化成蒸氣。且假設只有 50%的體積是多孔且具滲透性，則算出理想 $R_g=9.3\%$ (圖 2-2)。

注意此理論中 $\phi \times$ 飽和度的值越高則 R_g 越高，但儲集層溫度升高 R_g 反而下降。

公式來源整理如下：

根據式(3.13)，欲求 R_g 需要知道 q_{wh} 、 q_R ，前者似式(3.4)後者似式(3.1)，只是其 h_{ref} 、 T_{ref} 是取攝氏 15 度及其飽和水的熱焓。而式(3.4)的 m_{wh} 為：

$$m_{wh} = v \cdot 0.5 \cdot \phi \cdot x \cdot \rho_f \quad (3.14)$$

$$\phi \cdot x = 5\% \quad (3.15)$$

v 為儲集層體積、 ϕ 為有效孔隙率、 x 為飽和度、 ρ_f 為純水密度，假設只有 50%的體積是多孔且具滲透性。

帶入井口蒸氣熱焓 $2810 \frac{kJ}{kg}$ ，則 The geyser 之 $q_{wh} = 9.3 \times 10^{18} J$ 、 $q_R = 99.8 \times 10^{18} J$ 得 R_g 為 9.3%。

Williams (2004)用此公式與 The Geysers 的發電生產歷史進行比較，認為蒸氣主控儲集層確實適用此算法，不過精準地界定儲集層的大小及幾何範圍很重要，會嚴重影響 $\phi \cdot x$ 估算，進而影響 m_{wh} 和 R_g 的計算結果。

雖然相對單純簡易，不過此算法僅考慮原始蘊藏於孔隙中的流體，並無考慮回注與自然補給，且本研究不認為大屯火山群是蒸氣主控地熱田，因此捨棄此模型。

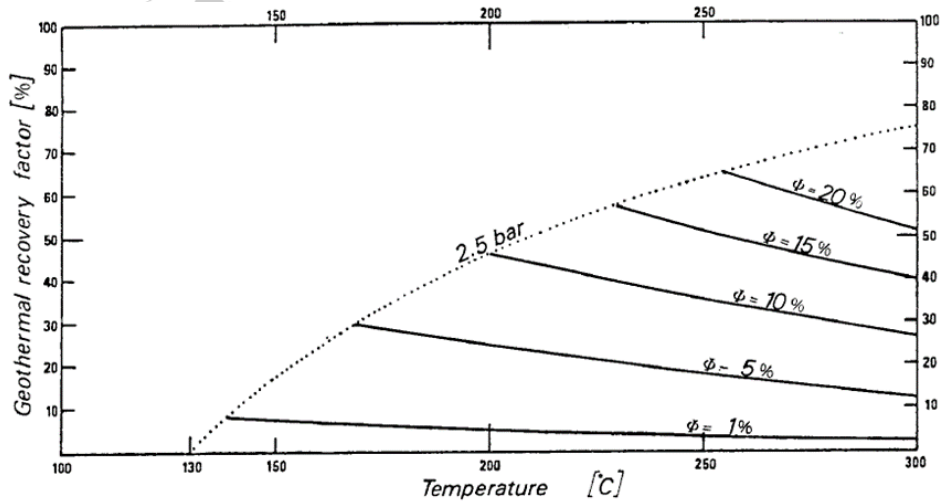


圖 2-2、熱攫取因子與儲集層溫度及孔隙率有關 (Muffler, 1977)。

3.4.2 後期評估方法

直到近年諸多經驗顯示，大部分地熱儲集層是受控於裂隙滲透率(fracture permeability)，與早期模擬所假設的均勻多孔滲透性儲集層大為不同，高滲透率僅集中在這些裂隙，基質部分滲透率極低(Williams, 2004,2007；Williams et al., 2007,2008b)。Bodvarsson and Tsang (1982)首先提出具有「等裂隙間距的平面裂隙儲集層」，在不同生產速率、裂隙間距下，冷卻前緣的移動速率模型。Williams (2007)指出，利用此模型可預期當裂隙間距小於 30 m 時，冷卻前緣的移動趨於穩定，達到均勻「掃出」岩石熱能的狀態，表現會接近均質多孔儲集層。他將間距 30 m 時的 R_g 標準化為 25%，做出裂隙間距與 R_g 的關係曲線(圖 2-3)。觀察圖中可發現隨著裂隙間距增大，岩層中越高比例的熱能尚未均勻被冷水帶出，冷卻前緣即已突破至生產井，使得 R_g 下降。

然而此模型未考慮裂隙儲集層的重要特徵——根據示蹤劑試驗的平均滯留時間分析(Temporal moment or Mean residence time analysis)和生產性裂隙的流速紀錄，發現生產井與注水井間的裂隙，其滲透率及路徑長有很大差異。以 Beowawe 和 Dixie Valley 兩個地熱田為例(圖 2-4)，Beowawe 約 50%的熱液來自最具生產力的 10%滲透性裂隙；Dixie Valley 約 35%的熱液來自最具生產力的 10%滲透性裂隙。相反的，均質裂隙模型的水流特性則呈等量分布(Equal distribution)。

於是 Williams (2007)建議利用 Watanabe and Takahashi (1995)提出的自相似分布(Self-similar distribution)模型來表現實際裂隙流的特徵(滲透率非均質)，並計算對應的 R_g 。

與生產井相交的裂隙，其滲透率自相似分布可表達為：

$$N_k = C_k k^{-d_k} \quad (3.16)$$

k 為參考滲透率、 N_k 代表與井相交，且滲透率大於等於 k 的裂隙數目、 C_k 是常數、 d_k 是碎形維度。

給定不同的碎形維度下，即可知滲透率分布與對應裂隙數目的關係，將之代入 Bodvarsson and Tsang (1982) 的模型，即可知不同碎形維度、裂隙間距下所對應的 R_g 值(圖 2-3)(Williams, 2008b)。

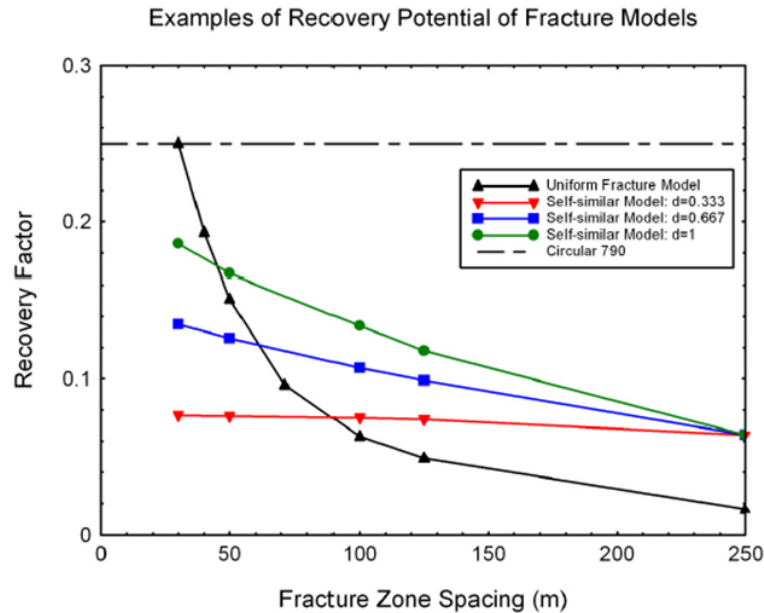


圖 2-3、不同裂隙間距下的熱攫取因子曲線圖 (Williams, 2007)。

黑線為滲透率均勻分布的裂隙模型，在裂隙間距小於 30 m 時 R_g 標準化為 0.25。彩色線為不同碎形維度的裂隙特性模擬結果。

而 Williams (2007)、Williams et al. (2007) 比較自相似模型與實際地熱儲集層的表現，圖 2-4 是三種不同碎形維度下的自相似模型、均質裂隙模型與 Beowawe 及 Dixie Valley 地熱田的實際表現，可以發現 Dixie Valley 的水流分布與 $d_k = 1$ 的模型分布一致，Beowawe 與 $d_k = 0.667$ 一致。Beowawe 的 d_k 值較低代表少數裂隙為優勢水流路徑。此結果顯示裂隙滲透率的自相似模型能夠良好反映儲集層的行為。

對於尚未進行示蹤劑試驗的地熱系統，Williams et al. (2008) 總結建議裂隙主控儲集層的 R_g 可採用 8%–20%；若儲集層主要為沉積物構成(Sediment-hosted)，則 R_g 值採用 10%–25%， R_g 在範圍內任意值的機率相等，具有矩形機率分布。

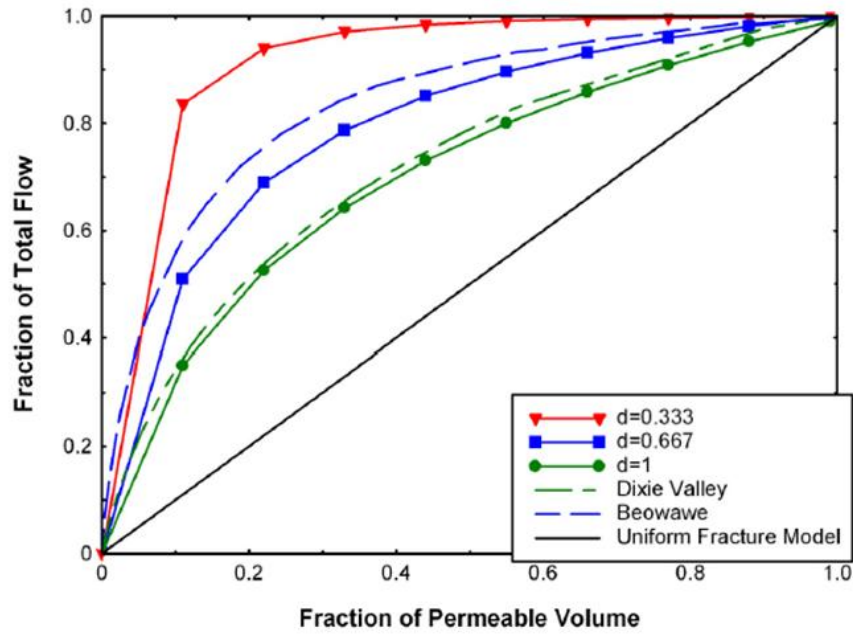


圖 2-4、井間裂隙呈現優勢水流路徑示意圖 (Williams, 2007)

綠色、藍色虛線為地熱田實際數據，可明顯看到水流集中在少數裂隙的情形。碎片維度 1 者較接近水文特性均勻分布的裂隙模型(黑色實線)。

從早期的多孔均質儲集層生產模型，到近年來認知的裂隙主控生產模型，已建立相當可信，能與生產經驗相符合的模擬結果。可惜大屯火山區尚未進行注水試驗或示蹤劑測試的階段，無法更精確的評估 R_g 值，考量五指山層雖為沉積岩，但亦呈現明顯的裂隙主控特性，因此本研究採用 10%–20% 的 R_g 值，機率密度函數採用矩形分布。

3.5 效率計算與固定參數

在比較一口生產井或地熱電廠的效率時，大多討論利用效率(Utilization efficiency)或稱第二定律效率(Second law efficiency)，其定義為實際電力輸出除以流體的最大可用能(i.e. Availability, Available work or Exergy)。見式(3.17)及式(3.18)：

$$e = h_{wh} - h_o - T_o (S_{wh} - S_o) \quad (3.17)$$

$$\eta = E / e \quad (3.18)$$

最大可用能是假設所有過程皆可逆的條件下，一開放、穩定態的熱液流系統，其初始狀態相對參考狀態(reference state)的最大做功能力。忽略流體沿井壁上升時的動能、位能損失，則井口初始狀態視為等同於儲集層溫度下的飽和液體。參考狀態通常設為環境溫度(平均氣溫)下的飽和液體。

而因為實際推動渦輪的過程不是可逆絕熱(等熵)，因此利用效率(η)就是評估與理想表現差距的參數，也是尋找一口生產井最佳設計時的重要參數。

儲集層溫度大於攝氏 175 度的閃發式電廠利用效率多在 40%左右，攝氏 175 度以下使用雙循環式的電廠的利用效率則呈線性衰退(Muffler and Guffanti, 1979; Sanyal et al., 2004; Williams et al., 2008)。

固定參數方面，地熱電廠的電廠運轉因子取 95%(GeothermEx, 1992; Klein et al., 2004)，一般規劃運轉 30 年，設為電廠壽命。

3.6 蒙地卡羅模擬

蒙特卡羅方法又稱統計模擬法、隨機取樣技術，是一種利用亂數取樣 (Random Sampling) 和統計來獲得數值解的方法。由於上述可變參數(Variable Parameter)各有其機率密度函數，想得到所求發電潛能的機率密度函數(解析解)非常困難，但利用蒙地卡羅方法可獲得近似解。步驟如下：

- 1、對每一項參數，輸入最小、最大和最可能估計數據，並為其選擇合適的機率分布模型。若僅輸入最小、最大值者為矩形機率分布；三項數值皆有者為三角機率分布。
- 2、根據各參數機率分布模型寫出對應的函數，並實行大量的隨機取樣。
- 3、對隨機取樣出的數據進行必要的數學計算，求出大量的數據結果。
- 4、對求出的結果進行統計學處理，求出平均值、眾數、標準差等。

5、對求出的結果繪製機率分佈曲線和累積機率曲線。

美國地質調查所、GeothermEX 公司亦採取此方式評估地熱發電潛能(Klein et al., 2004; Muffler and Guffanti, 1979; Sanyal and Sarmiento, 2005)，流程示意圖可見(圖 2-5)。

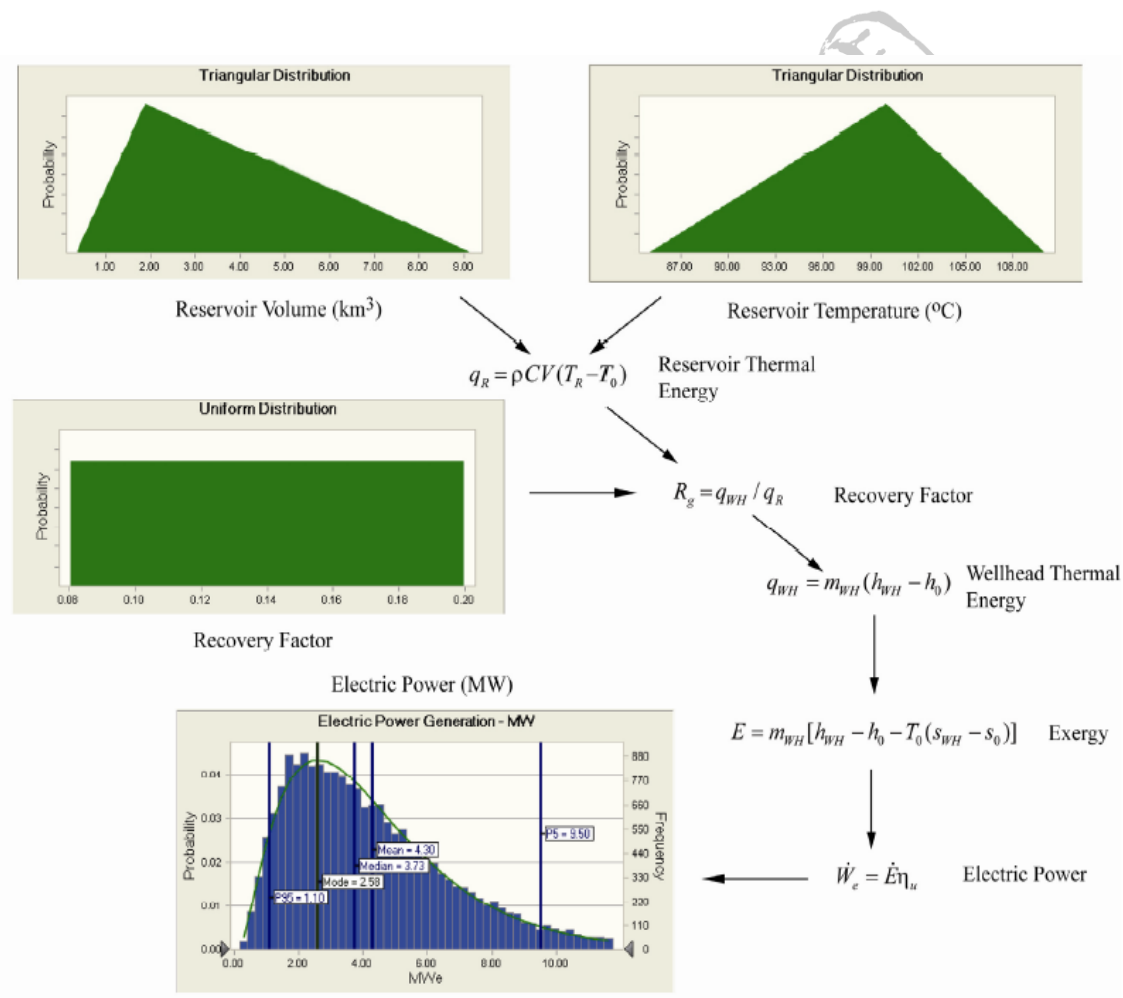


圖 2-5、併合蒙地卡羅法的計算流程示意圖 (Williams et al., 2008)。

注意本研究在最後熱電轉換的計算上，採用單閃發電的情境試算，而非將最大可用能乘上 40% 利用效率的概略計算。不過整體計算流程大致相同。

4. 利用 PLAY FAIRWAY ANALYSIS 研究地熱可開發區

Play Fairway Analysis 廣泛使用在石油探勘上(Nash and Bennett, 2015)，以石油探勘為例，石油形成的三個要素分別為儲集層、蓋層及生油源，這三個要素便為探勘的主要目標，故此分析法藉由所有相關、可信、可得之資料來評估這三項要素存在與否及其有效程度，並將分析結果繪製成風險區位圖來評估油田之開採可能率，其目的便是為了降低探勘時的風險及不確定性。因此，欲將此分析邏輯運用地熱探勘上，藉由前人研究資料來評估地熱形成要素的分佈狀況，篩選大屯火山群具地熱開發之潛能區位。

地熱資源的形成需要具備三個要素：熱源、裂隙、流體，蒐集過去地質調查、地球化學及地球物理探勘資料來了解熱源位置，以及何處有斷層產生裂隙促使流體下滲被加熱形成熱水，將資料結果繪製成圖層並且分級給定分數疊加起來後，便能從分數高低來相對量化大屯火山群地熱開發風險最低的位置(圖 2-6)，做為地熱開發潛能區位。

資料分析步驟如圖 2-7。根據前人研究結果，將兩個要素中的因子各自繪製成圖層後，將每個因子圖層分成五個等級，從具有高度地熱潛能排至低度地熱潛能，若為軟體內外插出來之數值結果，便利用幾何間隔法分為五個等級；若為多邊形資料或線性資料，便從繪製之圖形至其影響範圍分為五個等級。幾何間隔法的原理為，使每個類別中的元素數的平方和為最小，來確保每個類別的範圍及包含的值的數量大致相同，並且有相當一致的間隔變化。此方法為多種分類法的折衷方法，對於欲突顯中間值變化及兩端極值變化能達到良好分類效果，由於溫度資料中有少數組極值數據，若以常用的相等間隔法做分類，便會導致某些類別中的數據量相當少，使之類別不具代表性。接著對大屯火山地區地圖製作長寬相同之網格，每個網格的大小為 200 公尺×200 公尺，將每個因子圖層的每個等級與其相對應之網格選取起來，並給予對應的分數，最具有地熱潛能的等級給予 4 分，依序減少至最不具地熱潛能的等級為 0 分。將熱源及裂隙要素的所有因子疊加時，由於各個因子有其不同的重要性，故疊加的權重也會不相同，而權重比例的決定

後面章節會再加以說明。

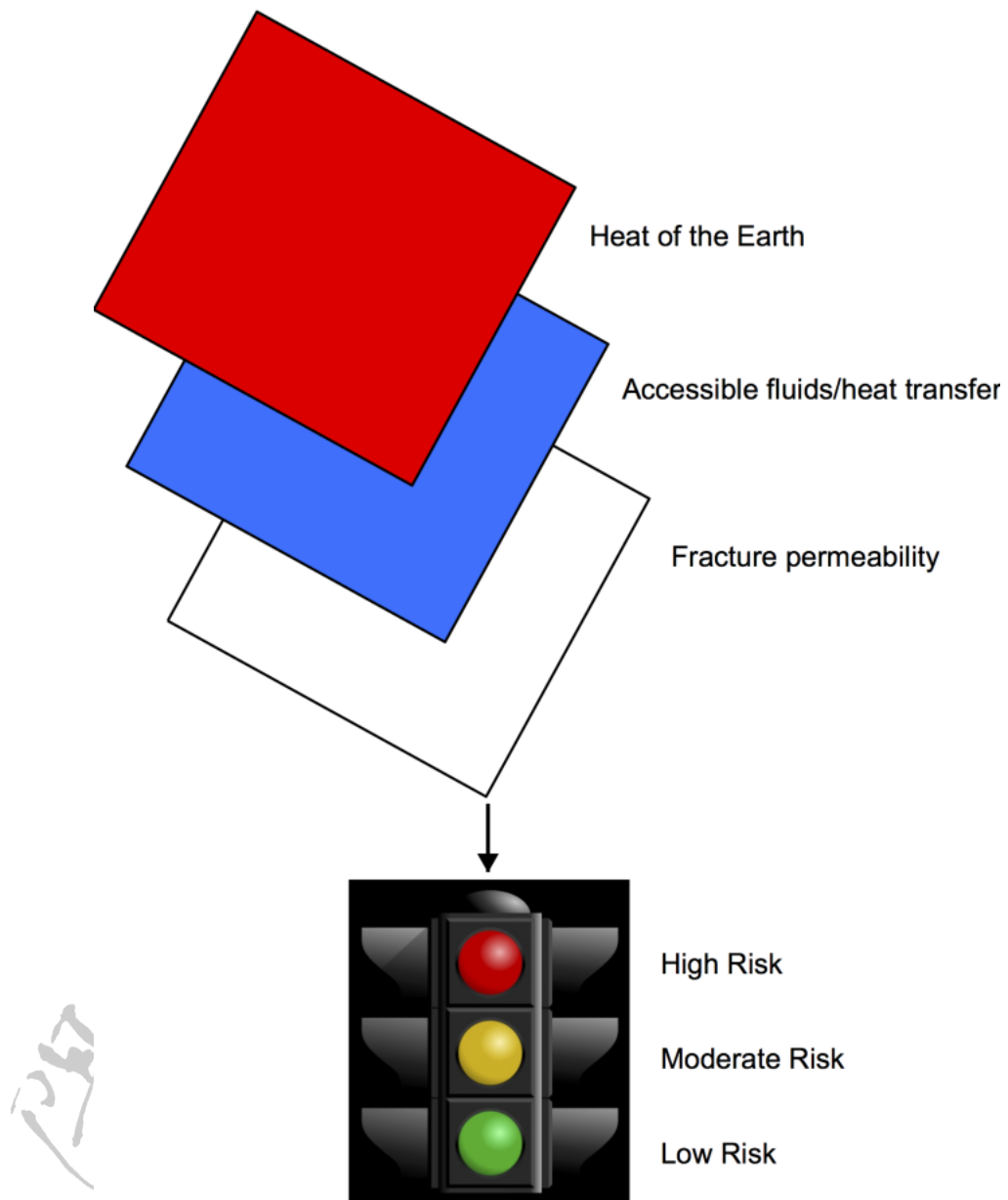


圖 2-6、Play Fairway Analysis 圖層疊加示意圖(修改自 Fraser, 2010)。

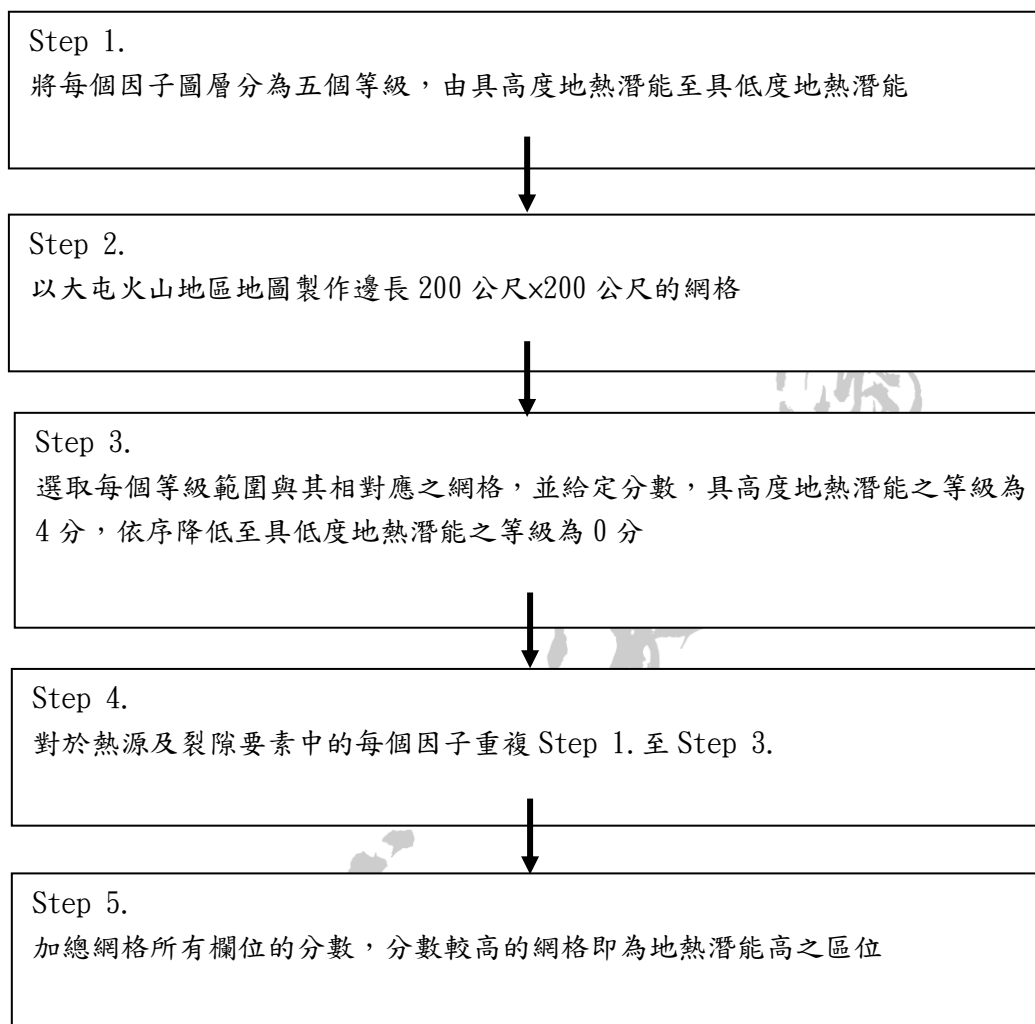


圖 2-7、圖層分析流程(陳彥如，2017)。

5. 利用極低頻大地電磁法估計大屯火山群熱流輸出量

日本京都大學 Kagiya 教授曾利用 VLF-MT(Very Low-frequency Magnetotellurics)的調查研究，計算日本火山的岩漿產生量和地熱輸出量，故本計畫擬用同樣的方法來計算大屯火山區部分區域已有之 VLF-MT 的資料，估計這些區域火山的地熱輸出量。

所謂的極低頻大地電磁法為一種大地電磁探勘法，利用世界各地軍用特低頻率電台(約 15 kHz~30kHz)所發出的訊號當作場源，然後利用大地電磁儀器接收訊號和處理，即可完成探勘推斷一區域的地下電性構造。

所謂 MT (Cagniard, 1953) 是一種深部探查電阻率的地球物理方法(圖 2-8)，利用量測各地軍用特低頻率所產生之電磁場，來計算深部岩層之電阻率，由於 MT 是超低頻之區域性電磁場，故較之其它任何地球物理方法更容易連續測獲深部資料。電磁場來自電離層(低至 0.001 Hz)或人造的頻率(高至 30 kHz)，測探範圍從數公尺至 20 公里，此外尚有側向之解析度高和不受地形之影響等優點。

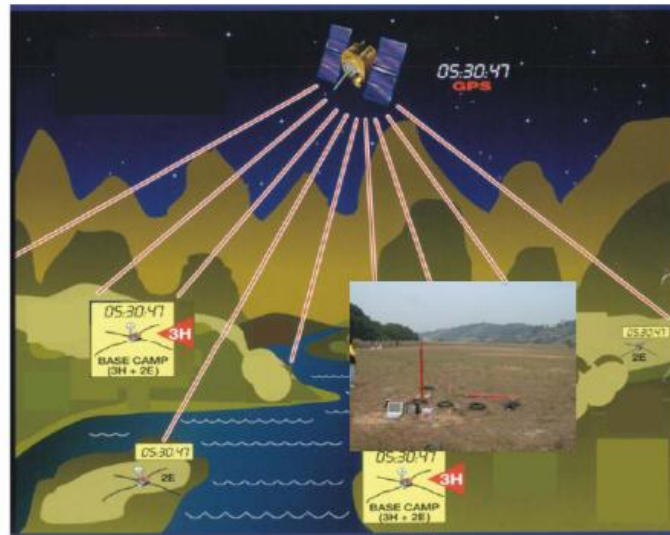


圖 2-8、MT 探勘原理

MT 探勘原理為經由地表所配置之電場接收器，記錄到不同頻率的電磁場(電場與磁場比值反應電阻率)，可以推算出地下由淺至深之電阻值分布。MT 波源的可為電離層、閃電或人造的頻率。

第三章、大屯火山群晚期的火山活動特徵

火山噴發是一種非常壯觀的自然現象，它可以用各種不同的方式噴發，例如以猛烈的方式噴發，稱之為爆發作用(explosion)，或以溫和的方式流出岩漿，稱之為噴溢作用(effusion)，而岩漿的性質和火山噴發當時的條件，則決定了火山噴發的形式，其所形成的產物也不相同（表 3-1）。

表 3-1、岩漿噴發種類及特徵

岩漿成因的火山噴發種類分類					
類型	岩漿成分	主要產物	熔岩特性	造成災害	實例
寧靜式噴發	玄武岩質	熔岩為主，少量氣體與碎屑	基性，黏度小，溫度高	熔岩流，災害較小	夏威夷火山
由於黏滯性小，氣體易散失，故不易爆發，而以溢流方式噴發					
爆裂性噴發	安山岩、流紋岩質	少量熔岩，大量蒸氣、火山碎屑物，火山灰	較酸性，黏度大，不易流動	火山灰形成火山泥流、火山灰或碎屑堆積、火山雲、瓦斯氣體中毒	菲律賓皮納吐坡火山
中酸性黏滯性大，流動不易，內部氣體無法獲得有效的散失，致使壓力增大。當到達無法負荷時，便會以「爆發」方式噴發					

1. 火山活動的分類

1.1 依岩漿有無噴出地表

在自然界中，當岩漿從地底深處上升至地表的過程中，可能會與地下水或地表水發生作用，而產生不同的火山噴發作用。若岩漿上升至地表，都未與地下水或

地表水發生作用而直接噴發，稱之為岩漿噴發作用（magmatic eruption）；若與地下水或地表水發生作用一起噴發，稱之為岩漿蒸氣噴發作用（phreatomagmatic eruption）；若只加熱地下水或地表水，使之快速變成蒸氣而發生噴發作用，稱之為蒸氣噴發作用（phreatic eruption）（Sheridan and Wohletz, 1981）。

岩漿噴發作用的主要機制，是當有一定量的岩漿在上升，累積於火山底下某一深度，形成了一個淺的岩漿庫。由於岩漿所處的深度變淺，壓力減低，或是岩漿庫上覆岩層被破壞，外壓迅速下降，使得原先溶解於岩漿中的氣體成分會離溶而出，產生氣相和液相分離，氣體累積於岩漿庫或岩漿上升管道的上方。當岩漿內的氣體壓力累積到超過上覆岩層所能容忍的靜壓力時，氣體就會釋放而出，破壞岩層發生劇烈的噴發，形成氣體加碎屑物組成的噴發柱（圖 3-1）。

岩漿蒸氣噴發作用是指岩漿進入飽含地下水的岩層或上覆的冰層、熔岩流進入湖泊或河流、地表水遇到岩漿等，液態水會迅速被汽化，壓力增加超過上覆岩層或周遭環境所能承受的壓力時，就會發生劇烈的爆發。在爆發的產物中若未含有新鮮岩漿的成分，稱之為蒸氣噴發作用；反之，則稱之為岩漿蒸氣噴發作用。岩漿蒸氣噴發的劇烈程度，主要受控於岩漿和水的比例。也就是說，岩漿中的熱傳遞給水的效率，使水能完全轉變為水蒸氣，體積或壓力增加的效率。圖 3-2 為實驗室內模擬岩漿和水接觸後，火山噴發的實驗，顯示當岩漿和水的比例介於 3—0.3 之間，熱傳遞效率最好，火山的爆發能力最高。比例小於 0.3 時，水雖然完全氣化為水蒸氣，但累積的壓力無法超過上覆岩層的靜壓力，所以無法發生爆發作用。比例大於 0.3 時，岩漿中的熱完全傳遞給水，但無法氣化水為水蒸氣，只是把水的溫度升高，所以此時所發生的火山噴發，只是溫和的岩漿溢出，形成枕狀熔岩，而無法發生劇烈的爆發作用。



圖 3-1、火山噴發作用示意圖。

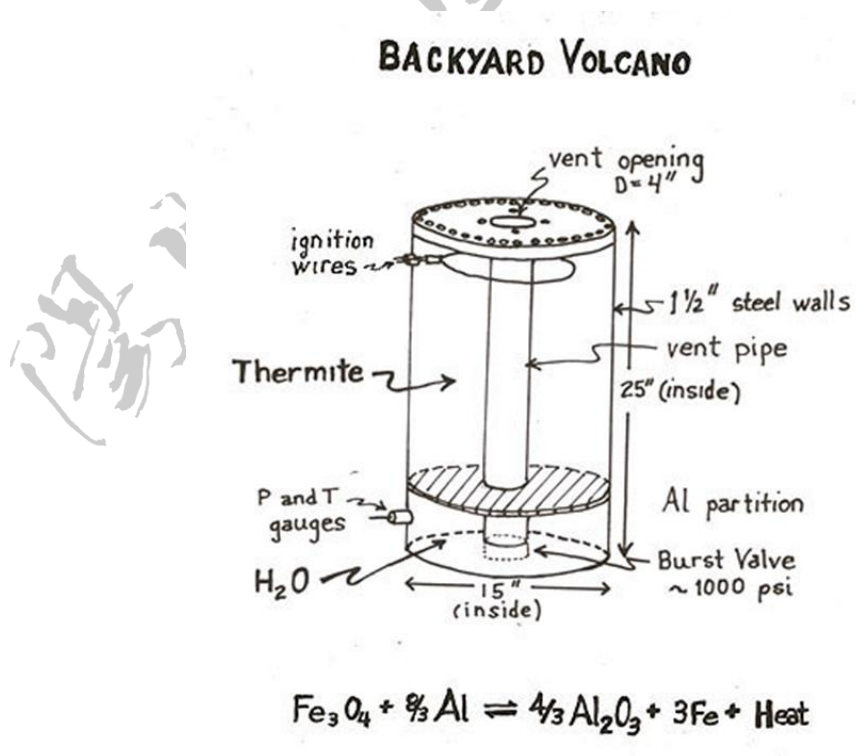


圖 3-2、實驗室內模擬岩漿和水接觸後的火山噴發驗。

1.2 依噴發作用在空間上的分布

(1) 中心式噴發

在火山噴發的行為中，岩漿或火山碎屑物集中由一火山口噴出，此種噴發方式稱之為中心式噴發，絕大部分的火山活動都是屬於此種噴發方式，尤其是島弧的劇烈火山活動，如 1980 年的美國西部聖海倫斯火山、和 1991 年菲律賓的皮那吐波火山，都屬於此種噴發，故常可見到一座一座的火山平行於板塊隱沒的海溝排列，甚為壯觀。在臺灣最典型的此種噴發方式是北部的大屯火山群、東部海岸山脈的火山和龜山島。

(2) 裂隙式噴發

火山的噴發不是集中由單一的火山口噴出，而是沿著一條裂隙噴出，岩漿或火山碎屑物質沿著裂隙噴出並不均勻，噴出較多的地方常行成一座小火山，而某些地方則沒有岩漿物質噴出，則只有裂縫存在，或是以岩脈方式保留下來。此一噴發方式，常發生在張裂的火山活動，如非洲東非大裂谷、冰島和夏威夷火山，都常發生此種噴發方式。在台灣最典型的此種噴發方式是板塊內部、以張裂火山活動為主的澎湖火山。

(3) 區域性噴發

火山噴發過程中的岩漿或火山碎屑物，並不是從單一火山口噴出，也不是由一條裂隙噴出，而是在一廣大的區域範圍內，有很多火山同時噴出，或是每一座火山只活動一次就停止，下次火山噴發則在附近變換火山口噴出火山物質。最為典型的例子是大陸東北吉林省境內的龍崗火山群(樊祺誠等人, 2002)，其在 1600 平方公尺的範圍內總共有 160 幾座的火山，大部分的火山都只噴發一次，相當低矮，形成各種火山噴發口、噴發口湖、熔岩錐或火山渣錐等火山地形(圖 3-3)。

1.3 依火山噴發劇烈程度

近代火山學研究顯示，每個火山的噴發形式和強度常常是不相同的，但為了對火山噴發的特性及其噴發強度的了解，常以某一主要的噴發形式做為其噴發類型

的分類名稱。以下是依據火山噴發強度及特性，把火山的噴發類型劃分為：夏威夷式(Hawaiian type)、史坦坡利式(Strombolian type)、福爾坎寧式(Vulcanian type)、維蘇威式(Vesuvian type)、培雷式(Peléan type)、普林尼式(Plinian type)等六種(圖 3-4)，每一種噴發特性的描述如下。



圖 3-3、區域性噴發--大陸東北吉林省境內的龍崗火山群。

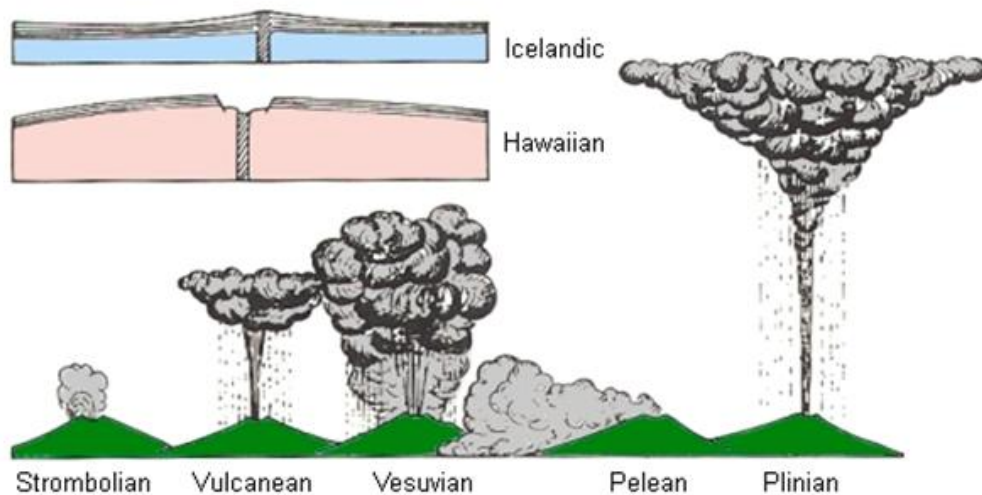


圖 3-4、火山的噴發類型。

(1) 夏威夷式

以夏威夷火山為代表，1942 年夏威夷的末納洛亞 (Mauna Loa) 火山的爆發為此種火山類型的範例。火山的噴發物為大量黏滯性小的基性熔岩流，以玄武岩岩漿為主，熔岩自火山口溢流而出，沿火山裂縫或斜坡向下漫流，爆發性的活動較少，形成熔岩平台，冷凝成火山熔岩流。此類火山往往形成盾狀火山，火山錐寬闊而平坦。據麥克唐納(G.A. Macdonald)的描述，該火山的噴發，分三階段：

第一階段：熾熱熔岩噴出期——第一階段共持續數小時，熔岩流堆積形成薄層的熔岩流或低丘。

第二階段：熔岩漫流期——本期火山口中仍陸續有熔岩流出，使熔岩層及低丘繼續加厚。

第三階段：噴氣期——火山已成強弩之末，只有氣體出現，數量亦銳減。

(2) 斯坦坡利式

這類型的火山是以位於義大利西西里島北邊的黎巴里群島 (Aeolian Islands) 的斯沖坡利火山 (Stromboli) 為典型代表。該火山的噴發自有史以來一直未曾停止。此類型火山為中等黏滯性岩漿的噴溢作用，屬於較低能力的噴發，噴發高度一般小於數百公尺，噴出物以基性到中性的火山彈、火山渣為主，常形成火山渣錐。因其噴發常會在空中形成黑煙狀雲霧，且經常有熾熱火焰噴出，所以又有「海上燈塔」的別稱。

(3) 伏爾坎寧式

伏爾坎寧也是義大利黎巴里群島火山之一，但它噴發的方式與斯沖坡利式火山噴發不同。因其岩漿以中性的安山岩到酸性的流紋岩為主，岩漿的黏滯性較大，所產生的火山爆發程度也較高，一般而言，其噴發的高度在一公里以上。因其噴發物質的黏滯性大，一旦接觸空氣，容易凝結成固體，因此在兩次噴發之間，噴出的岩漿早已凝結成硬殼，當第二次噴發時又將凝成熔岩的外殼衝裂成碎片，大量火山灰伴隨著大量氣體向上衝出，在空中形成黑色蕈狀雲，這種烏雲在白天亦甚黑暗，表示雲中物質並未白熱化，故缺乏亮光。

(4) 維蘇威式

以義大利維蘇威火山的噴發為代表，其噴發以火山灰為主，大量的火山灰夾雜著大塊的岩礫和氣體，向火山的側翼噴出，形成高溫和高速的火山碎屑流往低地流動，掩埋火山周遭地區，將造成巨大的傷亡。如西元 79 年維蘇威火山的爆發，噴出大量的火山碎屑流，瞬間掩埋了整個龐貝城，龐貝城便在厚層的火山灰底下，靜靜地渡過了大約 1500 年左右，於十七世紀才被人發現，同時也造成超過了 20000 個人的傷亡。而分布在火山周圍鬆散的火山灰，也有可能被大雨沖刷形成火山泥流，往河谷下游流去，這也是火山周遭致命的災害之一。

(5) 培雷式

培雷火山位於小安地列斯群島 (Lesser Antilles) 的馬諦尼克島 (Martinique)，其在 1902 年 5 月 8 日發生劇烈的噴發，形成猛烈的火山碎屑流，淹沒整個聖比荷市 (St. Pierre)，造成約 29,000 人的傷亡，是火山噴發造成死傷人數最多的一次，所以用此火山代表此類型的噴發。本式火山所噴出的岩漿，以酸性的流紋岩為主，噴發相當地猛烈，所形成的噴發柱烏雲最為濃厚，噴發高度可達數公里。因其岩漿的黏滯性較大，噴發出極度灼熱細灰和較粗的岩石碎片及浮石，混合著熾熱的氣體，合成一種乳汁狀的物質，猛烈地向上衝去，形成白熱光芒的雲，此即著名的皮連雲，也叫做火山雲或火雲 (Nuee ardente)。雲中的物質極不穩定，黏性亦大，等到積聚到一定的厚度，上浮力無法繼續支持它們在空中漂浮時，就會因重力的作用，以極大速度向下崩落，形成高溫的火山碎屑流，往火山四周快速地流竄，任何生物觸及均將死亡。

(6) 普林尼式

這一型的火山，噴發最為強烈，為紀念因觀察維蘇威火山爆發遇難的義大利火山學家暨博物學家普林尼而命名的。此類型火山噴發的岩漿主要以黏滯性高的酸性流紋岩為主，形成以火山灰浮石的噴發柱，高度在 20 到 40 公里之間，最高可達 55 公里的高空。噴發出的細粒火山灰和氣體，在高空上形成蕈狀雲的外貌，類似核子彈爆發。因此類型的噴發高度最高，噴發出的火山物質以浮石顆粒為主，

所以火山灰的分布最為廣泛。過去的火山噴發紀錄中，距離火山中心 3000 公里外的區域，還有火山灰的發現。

2. 大屯火山群後期的噴發

2.1 爆裂口的噴發產物

在大屯火山群中，地表出露多個火山爆裂口，如硫磺谷、龍鳳谷、小油坑、大油坑、向天池和磺嘴池，以及穿過七星山體東西兩條張裂帶中的爆裂口等，這些爆裂口大都位於山頂且地形保持相當完整，顯示可能屬於大屯火山群較年輕噴發所形成的。其中，硫磺谷地形保持完整且坐落在爆裂口中的堆積物產狀也可直接觀察，以判定其噴發機制和堆積過程。

硫磺谷，舊稱大磺嘴，是一東西向延伸的谷地，長約 700 公尺，可能是沿著穿過臺北盆地西緣和大屯火山群中央部分的山腳正斷層之分布。硫磺谷的東端隔一狹窄鞍部與更東側的雙重溪溫泉區和東北側的龍鳳谷相鄰，東南側是一陡立峻峭的山壁，山壁上出露的岩層為五指山和木山層的石英砂岩，部分砂岩被熱水換質作用影響，原有的石英顆粒已變質成麟石英(tridymite)或方石英(cristobolite)。

谷地內為數條小斷層所貫穿，這些斷層與大屯火山區的溫泉活動有直接的關係。谷地內的熱液活動範圍約達 1,200 平方公尺，區內岩石受熱液換質作用局部形成矽化的岩石；硫氣孔或噴氣孔周圍有美麗的樹枝狀或針狀的硫磺結晶(圖 3-5)，是硫化氫和二氧化硫化合或昇華作用所形成的。安山岩上特殊的顏色或層層換質的洋蔥狀構造(圖 3-6)，則是因酸性熱液或酸性蒸氣與固體安山岩長期作用的結果。除了岩石成分被換質改變，噴氣孔附近高溫、強酸的硫氣同時使得附近岩石易於腐蝕崩塌。另外，常見的岩石還有褐鐵礦、矽化岩、黃鐵礦、白土礦等沉澱生成。



圖 3-5、硫氣孔或噴氣孔周圍有美麗的樹枝狀或針狀的硫磺結晶。



圖 3-6、安山岩上特殊的顏色或層層換質的洋蔥狀構造。

硫磺谷內有個凸狀小山包，堆積的火山爆發的產物，包括有角礫狀的灰黑色泥岩和頁岩塊、石英顆粒、受熱水換質的石英岩塊和矽化產物，以及由黏土礦物的顆粒所組成（圖 3-7），並無新鮮或風化的安山岩塊存在其中，岩體呈塊狀無層理，表面受硫化氫或二氧化硫的氣體作用成灰黑色的硫化物。從這些產狀如呈角礫狀無層理和沒有任何沉積構造的特徵，可以推論這些岩塊鮮少受到水力的搬運磨損作用，可能是直接由爆破作用所形成之碎屑顆粒堆積在爆裂口內的產物；且其中又沒有新鮮的火山玻璃、浮石和火山岩，表示堆積在硫磺谷內的爆發產物與岩漿的噴發無關，可能不是岩漿直接噴發的產物。整合這些觀察和證據指向硫磺谷的火山爆裂口可能是由蒸氣噴發作用所形成的。



圖 3-7、受熱水換質的矽化產物和黏土礦物。

2.2 年輕的火山碎屑堆積物

中央地質調查所在臺北盆地的鑽井中可發現單一岩性(monomict)的角礫岩，可能是由熔岩穹丘(lava dome)崩塌形成火山碎屑流堆積物所形成的，很可能直接由火山噴發的產物，推測年代可能年輕於 10 萬年(Tsai et al., 2001)。陳和林(Chen and Lin, 2002) 於臺北盆地鑽井中的松山層中發現細顆粒蒙脫石(montmorillonite)組成的黏土層，可能是火山玻璃後受換質作用影響所形成的，故推斷這些存在於臺北盆地下的黏土層是火山噴發直接沉積下來的。其層位在松山層底部，推測年代可能

年輕於 2 萬年(陳中華和林朝宗, 2006)。後續的研究利用與火山灰同一層找到的炭灰(charcoal ash)做 AMS 碳十四定年, 得到的年代也是在 2 萬年左右(Chen et al., 2010)。

Belousov et al.(2010)在紗帽山東南側附近溪谷發現兩處可能代表古湖泊環境的層狀沉積物, 可能是火山噴發過程中所形成的堰塞湖。在露頭剖面可辨識出至少四層火山灰和數層火山泥流和碎屑堆積物等(圖 3-8)。由泥層中的有機物之碳十四定年所夾的火山灰沉積年代約落在 6,000~17,000BP。其結論認為大屯火山群數座火山在 13,000~23,000BP 仍有火山噴發活動。在夾於湖泊沉積物中的火山灰層, 主要組成角礫狀的安山岩屑(圖 3-9), 並未發現有新鮮的火山玻璃或浮石顆粒, 故判定這些火山灰層可能是蒸氣噴發所形成的, 並推測最年輕的一次噴發是發生在七星山 6,000BP 的蒸氣噴發事件。

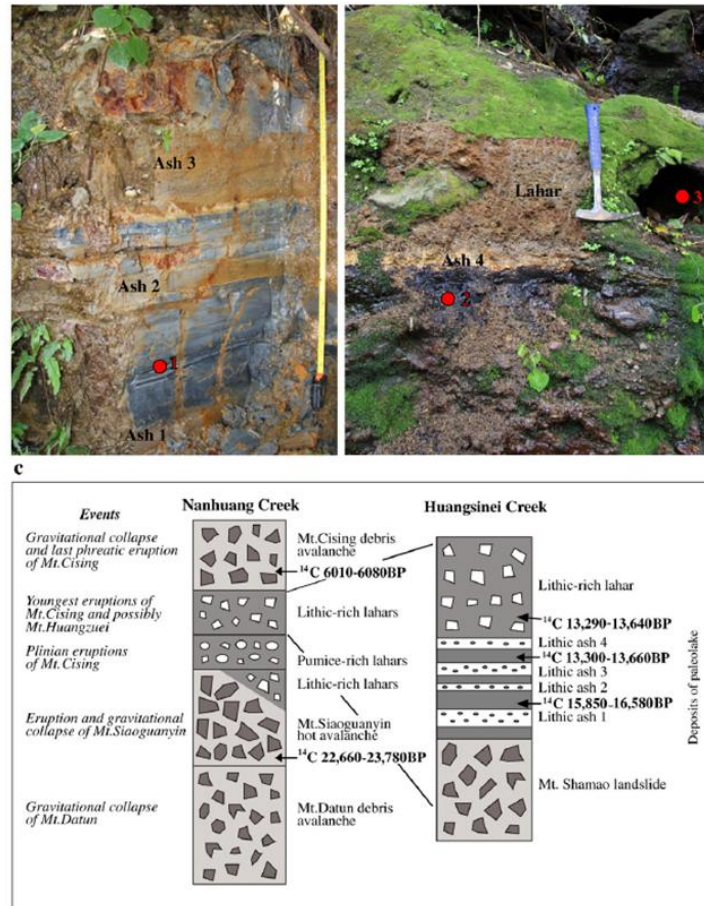


圖 3-8、出露於紗帽山東南側湖泊堆積物的火山泥流和碎屑堆積物(Belousova et al., 2010)。

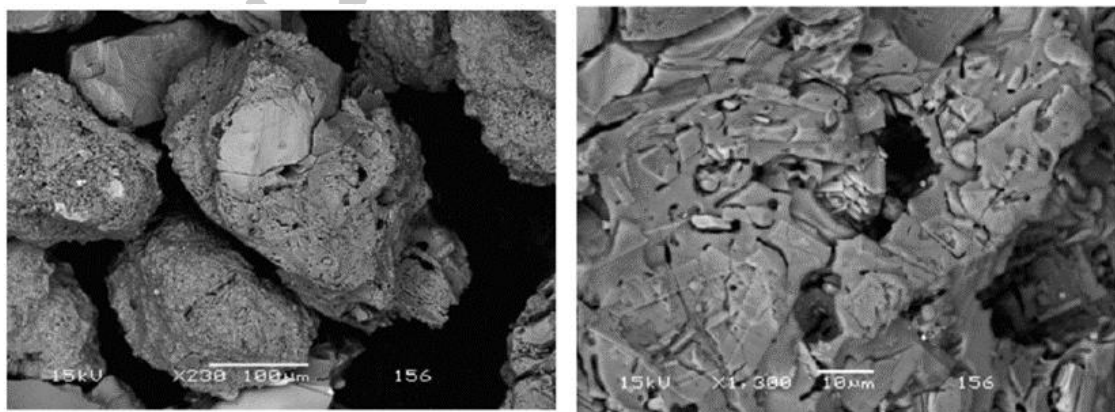


圖 3-9、以火山岩屑顆粒為主的湖泊堆積物(Belousova et al., 2010)。

2.3 土壤之石英顆粒來源

土壤是地球表面由疏鬆和已風化岩石構成的外膜，且是一獨立、自然和演化的個體，也是一自然個體(natural body)，由礦物質和有機質的固體、水和氣體所組成，其發生於地表，並佔有一定的空間範圍，具有可從母質區分開來的化育層特徵(Brady and Weil, 2008)。從此段描述可簡單的陳述土壤是在原地風化母岩後化育而成的產物，其組成成分與底下母岩息息相關。

林毓潔(2013)分析大屯火山群山頂的土壤樣本，利用實體顯微鏡觀察土壤樣本發現，土壤之組成礦物中除了含有輝石、角閃石、斜長石、鐵礦類之外，還有大量的石英顆粒被發現 (圖 3-10)，比例很高約占 30 % 以上。另外，在同一土壤樣本中，也含有兩種風化程度不同之岩屑：(1)灰色較為新鮮之岩屑，與(2)高度風化後呈現淡褐色之岩屑。就土壤化育而言，其母岩應受到同樣之風化作用所影響，所以呈現出來之風化程度理應相同。那麼很顯然地，這兩種風化程度不同之岩屑，並非來自於同一母岩風化所形成。然而在竹子山地區之土壤樣本中發現，部分岩屑含有白色之石英顆粒，而風化較嚴重之岩屑，表面則殘存礦物之外型。

大屯火山群表層土壤中之石英，進一步以掃描式電子顯微鏡 (SEM) 觀察其表面特徵構造，透過能量分散式光譜儀 (EDS) 分析其化學組成成份為矽與氧，然而自然界中共有八種二氧化矽之同質異形體(polymorphism)，如 α 石英 (α quartz)、 β 石英 (β quartz)、方矽石 (cristobalite)、鱗石英 (tridymite)、柯矽石 (coesite)、重矽石 (stishovite)、焦石英 (lechatelierite) 以及蛋白石 (opal)。



圖 3-10、七星山土壤之組成礦物 ($> 125 \mu\text{m}$)，包含相當多的石英顆粒(林毓潔, 2013)。

，利用 X-ray 粉末繞射儀分析其礦物相，配合固態離子源質譜儀 (TIMS) 分析其鋁同位素值，可了解石英顆粒的來源和成因。分析結果顯示石英外形可以區分成兩大類，單晶質石英與多晶質石英兩種；單晶質石英則又可細分為含破裂構造之貝殼狀斷口 (圖 3-11) 與平滑之破裂面 (圖 3-12)，以及未受到應力破壞之完整石英表面附著含矽、鋁、鉀之無晶形礦物；絕大部分多晶質石英只有部分表面會露出石英的集合體 (圖 3-13)，少部分保留低溫石英 (α quartz) 之六角長柱狀與水平生長紋之形態。這些顆粒利用 EDS 分析其化學組成成份為矽與氧 (圖 3-14) 為主，顯現其是典型的石英礦物。同時 XRD 的分析也顯示其為低溫石英。鋁同位素分析結果顯示其值介於 0.709747 ~ 0.714995 之間，與大屯火山群安山岩的鋁同位素比值 0.704280 至 0.704690 有明顯的不同，與臺灣北部第三紀沉積岩的石英顆粒相似，此一分析結果顯示土壤中的石英顆粒可能來自於地下深處的沉積基盤岩。

從上述土壤樣本中的石英顆粒分布，因大屯火山群的安山岩成分不含石英晶體，又由鋁同位素分析發現石英礦物可能來自於地底下基盤的沉積岩，故推論石英是經由蒸氣爆發的機制從地底下帶至地表、堆積而後風化成土壤。因此，大屯火山群在晚期可能是以火山蒸氣噴發作用為主(圖 3-15)(林毓潔，2013)。

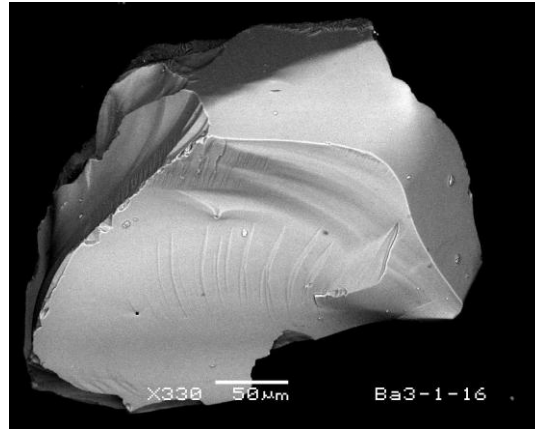


圖 3-11、單晶質石英，含貝殼狀斷口(林毓潔, 2013)。

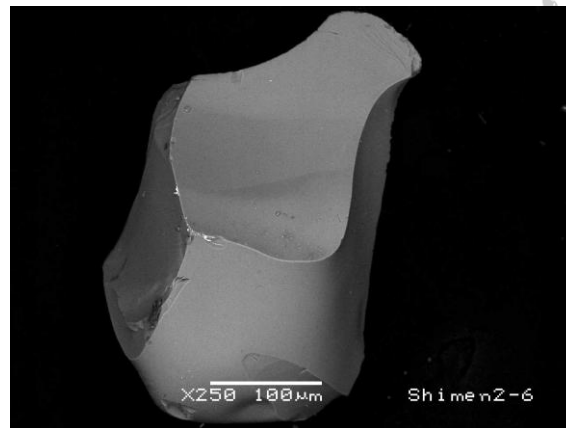


圖 3-12、單晶質石英，含平滑之破裂面(林毓潔, 2013)。

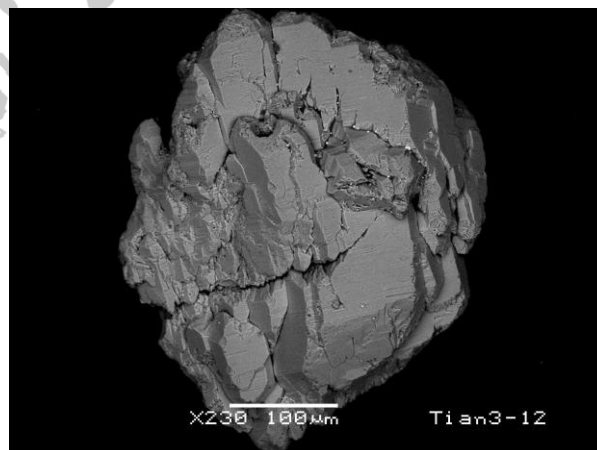


圖 3-13、多晶質石英，表面有生長紋構造(林毓潔, 2013)。

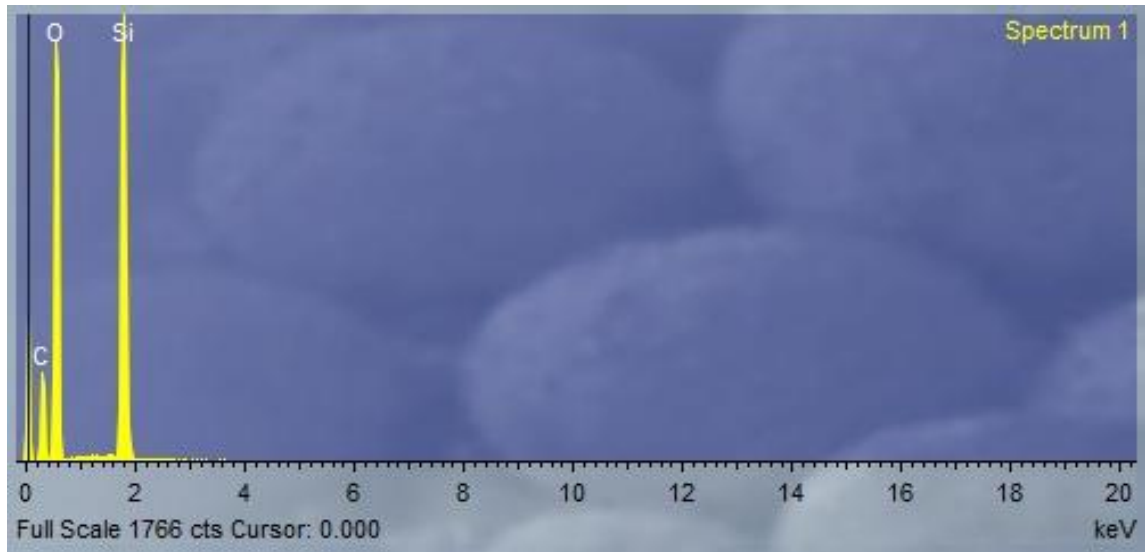


圖 3-14、石英顆粒的 EDS 偵測能譜，主要含矽(Si)和氧(O)的成分(林毓潔, 2013)。

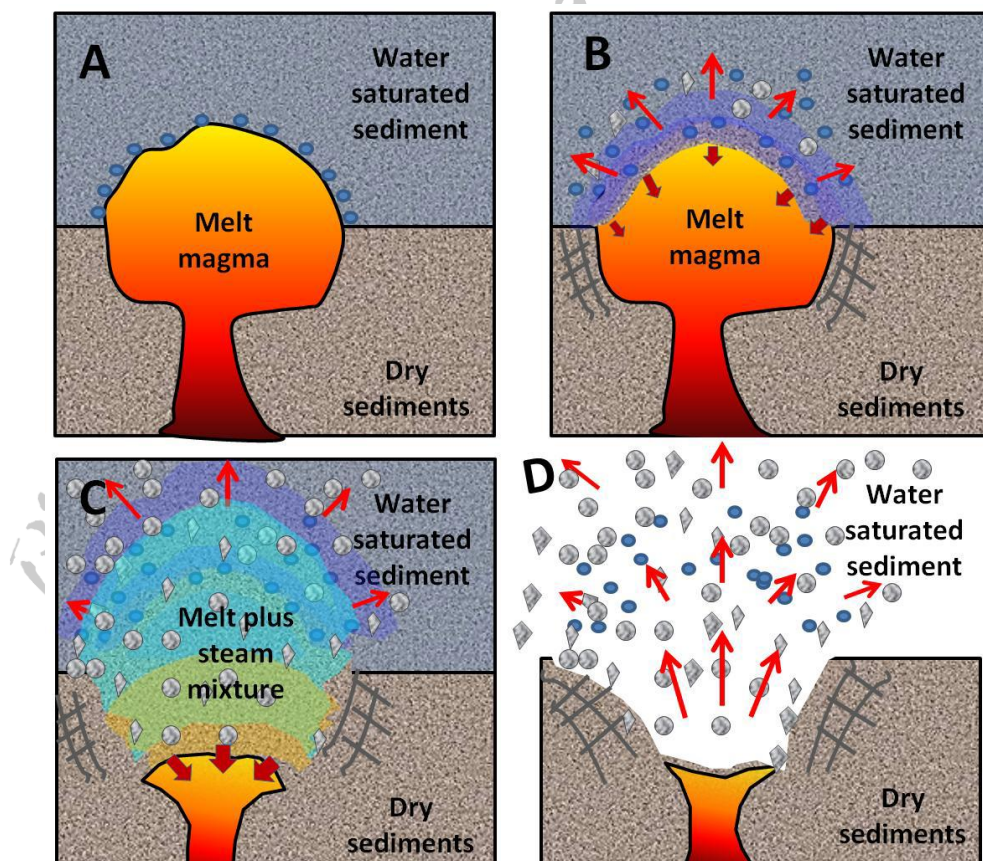


圖 3-15、蒸氣式噴發之模式(修改自 Sheridan and Wohletz, 1983)(林毓潔, 2013)。

2.4 張裂帶火山爆裂口

廖陳侃(2017)利用 LiDAR 的日照陰影圖(Hillshade)，分析七星山地區的兩大張裂帶(圖 3-16)。張裂帶的邊界以坡度為主，標準訂為坡度大於 30° ，並搭配坡向(Aспект)、多種光源的日照陰影圖(Hillshade)和等高線(contour)修正不合理的範圍。下面介紹各判釋出的張裂口：

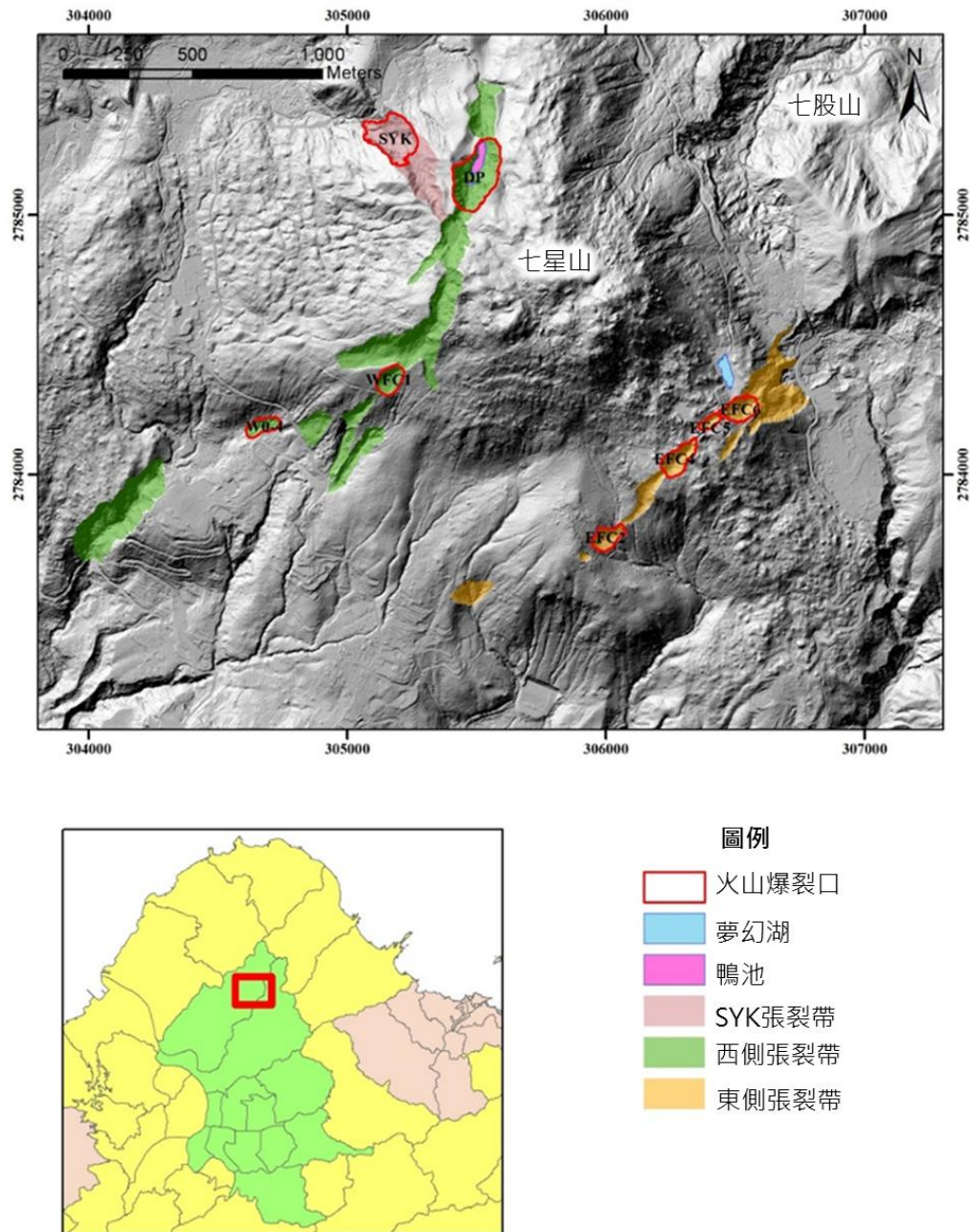


圖 3-16、七星山地區 LiDAR 的日照陰影圖顯示火山爆裂口的分布(廖陳侃, 2017)。

(1) 東側張裂帶

根據廖陳侃(2017)的研究顯示：東側張裂帶共包括有7個可能的爆裂口(圖 3-17)，編號為 E0、EFC1 至 EFC6 等。E0 為中山樓上游溫泉露頭暨熱水換質區，以航照圖為輔大致圈繪一個範圍，包括三個小陷落，其中的兩條有溪溝通過。

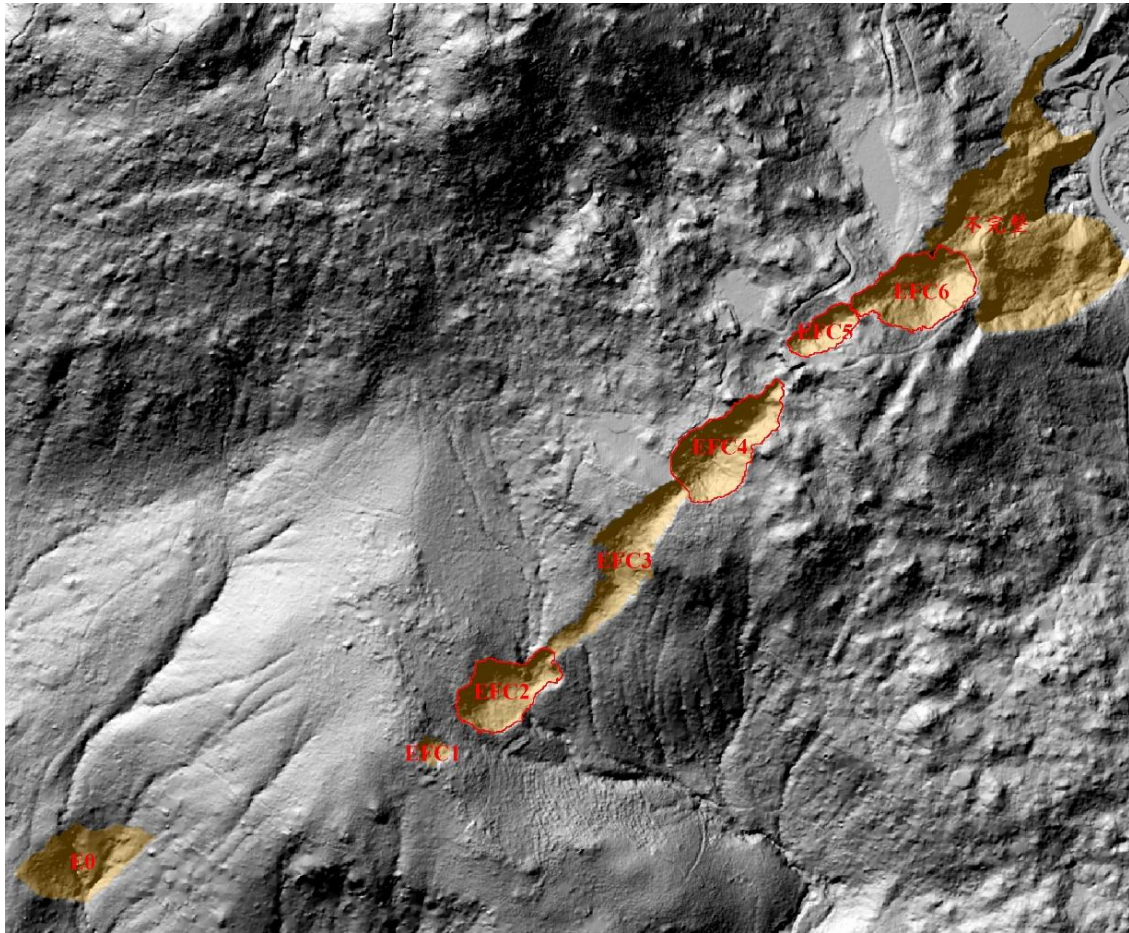


圖 3-17、七星山東側張裂帶的火山爆裂口分布圖(廖陳侃，2017)。

(2) 西側張裂帶下半部

廖陳侃(2017)的分析結果顯示西側張裂帶下半部有幾個明顯地形陷落區域(圖 3-18)，W0-1 為一溪流通過，無活動徵兆，或許只是被溪水深切的裂隙。W0-2 為竹子湖溫泉露頭所在之處，有熱水換質現象和硫結晶出現，也有一溪流通過，可能因此加深高低落差。W0-3 可能為爆裂過的區域，因為在地形上比周圍缺少一部

分應有的體積，又可能因為被陽金公路截切過而造成部分判釋上的困難，有待後續確認。W0-4 有明顯的陷落和崖壁，中間被溪水切過，有熱液換質區和溫泉出露，但此爆裂口的上下延伸關係不明確，仍有待後續進一步確認。綜合地形分析結果，西側張裂帶下部目前看來為許多裂隙分枝，但會被溪流侵蝕所影響，外形圈繪可能不是很好的判斷依據，有賴其他方法支持這樣的判釋。

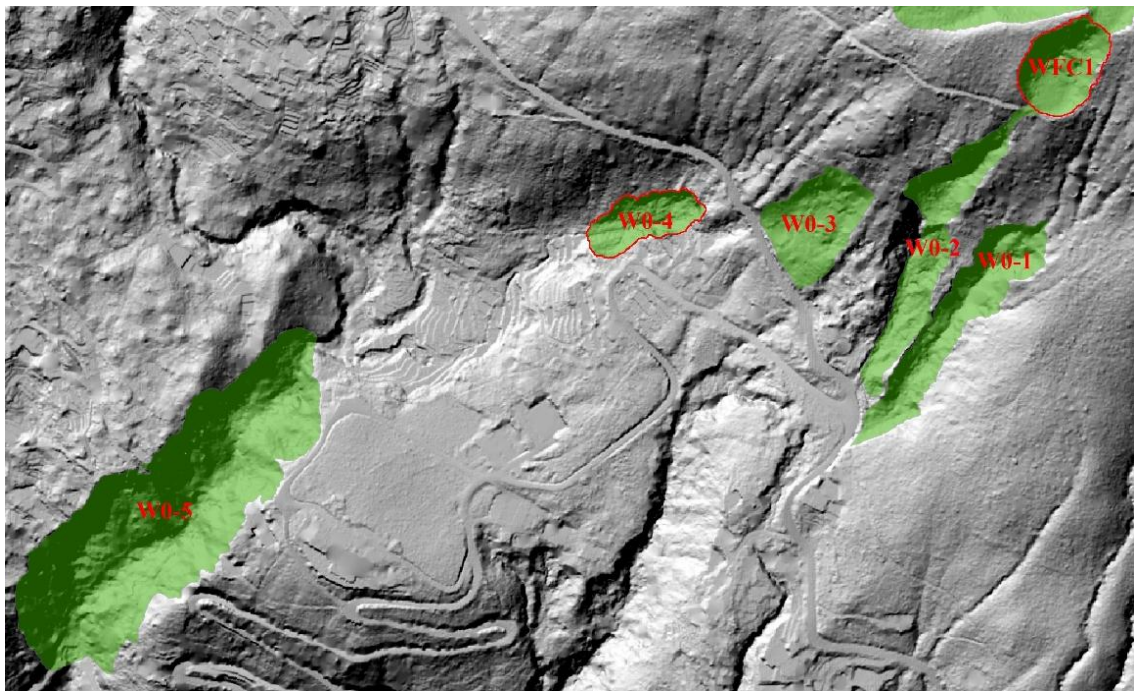


圖 3-18、七星山西側下半部張裂帶的火山爆裂口分布圖(廖陳侃，2017)。

(3)西側張裂帶上半部

廖陳侃(2017) 的分析結果顯示西側張裂帶上部的張裂區域較寬較明顯(圖 3-19)，但也因此難以劃分各個獨立的爆裂口，故僅呈現有明顯封閉區域的兩處：金露天宮爆裂口和七星池(鴨池)爆裂口。金露天宮建築所在的爆裂口因三面封閉且中央平坦，有一天然小池塘，估計沉積物可能快要填滿原本爆裂口該有的凹陷地形。西南方有一開口向下連接下部的爆裂口，因具有較完整的橢圓外形，故認為其相對噴發年代較年輕。七星池爆裂口是將七星池的三個池水區域周遭的封閉地

形圈繪出來的。因四面封閉，中央平坦的區域蓄水成池，有下池、中池、上池之分。

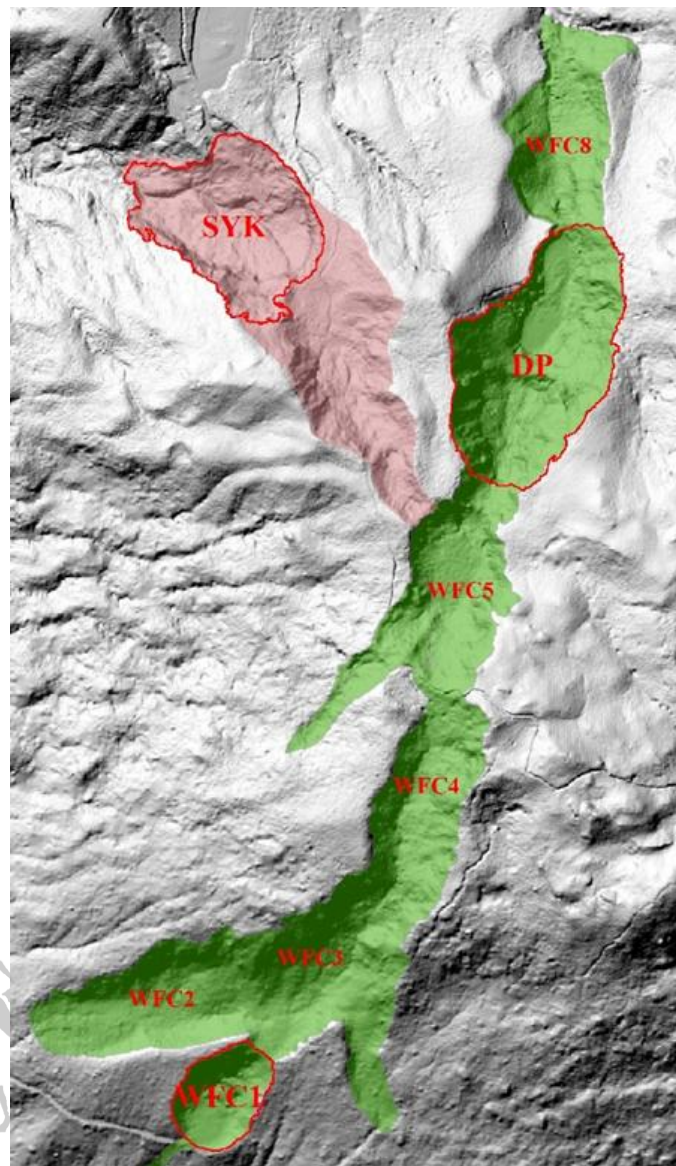


圖 3-19、七星山西側上半部張裂帶的火山爆裂口分布圖(廖陳侃，2017)。

綜合上述七星山兩側的火山爆裂口之產狀和地形特徵，以及初步的堆積物之觀察研究，顯示這些爆裂口可能是蒸氣噴發所形成的火山口地形，如紐西蘭 Tarawera Rift 1886 年的噴發，形成一長約 17 公里的一系列火山爆裂口(圖 3-20)。



圖 3-20、紐西蘭 Tarawera Rift 1886 年蒸氣噴發所形成的張裂帶和爆裂口。

3. 蒸氣型噴發

3.1 蒸氣型噴發的機制

蒸氣型噴發(phreatic eruption)是火山噴發的一種，其作用只牽涉火山氣體和地表水的噴出，未有岩漿物質噴出地表。2014 年日本御嶽火山(Ontake Volcano) 在 9 月 27 日 11 時 52 分（日本時間）發生火山蒸氣型爆發事件(Kaneko et al., 2014)，至 10 月 8 日為止已造成 55 人死亡，是日本自雲仙岳(Unzen Volcano)1991 年熔岩崩塌以來首起致命的火山噴發。Sano et al. (2015)提出此次蒸氣型火山噴發的機制，顯示當岩漿侵入地下深處解壓造成火山氣體的上升，侵入地下熱水系統慢慢累積

氣體壓力於火山管道，直到壓力超過上覆岩石所能承受的應力而發生蒸氣爆發作用(圖 3-21)。

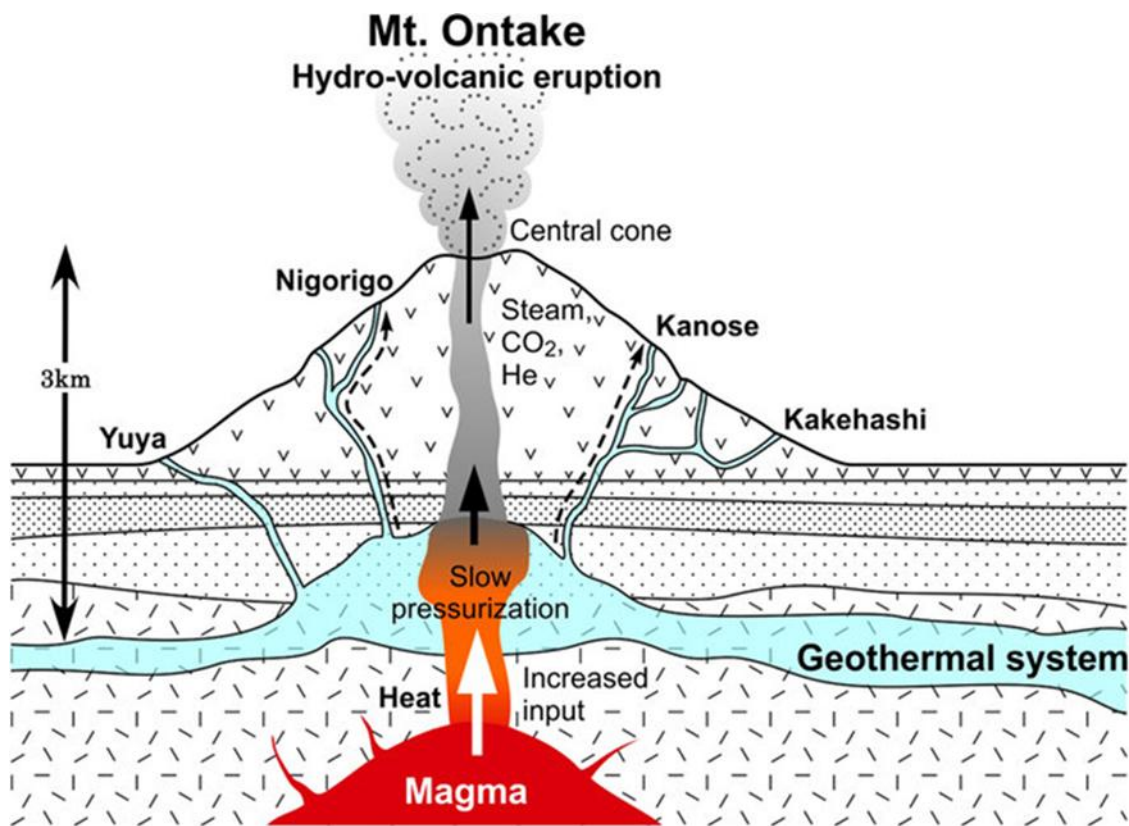


圖 3-21、2014 年日本御嶽火山發生蒸氣型爆發事件的模式圖(Sano et al., 2015)。

Stix and de Moor (2018)研究蒸氣型火山噴發，歸納此型火山噴發主要可分為兩大類：第一類為岩漿侵入火山地下深處，高溫解壓的火山氣體從岩漿離溶上升侵入具有黏土(矽質)覆蓋層(clay cap)的火山地熱系統累積氣體壓力，當累積的壓力超過上覆岩石的強度就發生蒸氣型噴發(圖 3-22)。第二類為岩漿侵入火山地下深處，岩漿體結晶釋放出大量高溫的火山氣體侵入火山口湖底部，導致湖底受壓水層的氣化累積增加氣體壓力而噴發(圖 3-23)。

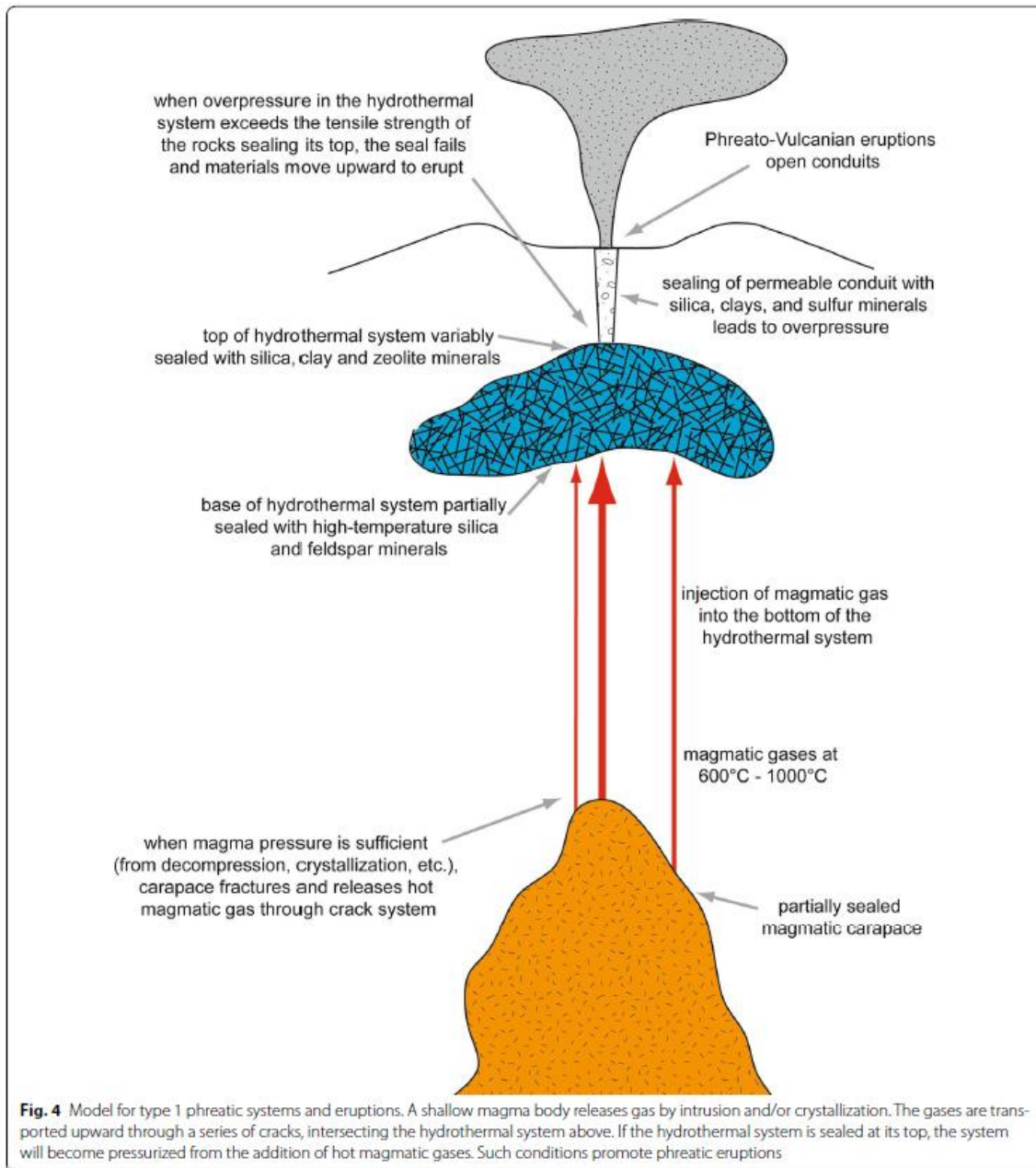


圖 3-22、第一類型的蒸氣噴發模式(Stix and de Moor, 2018)。

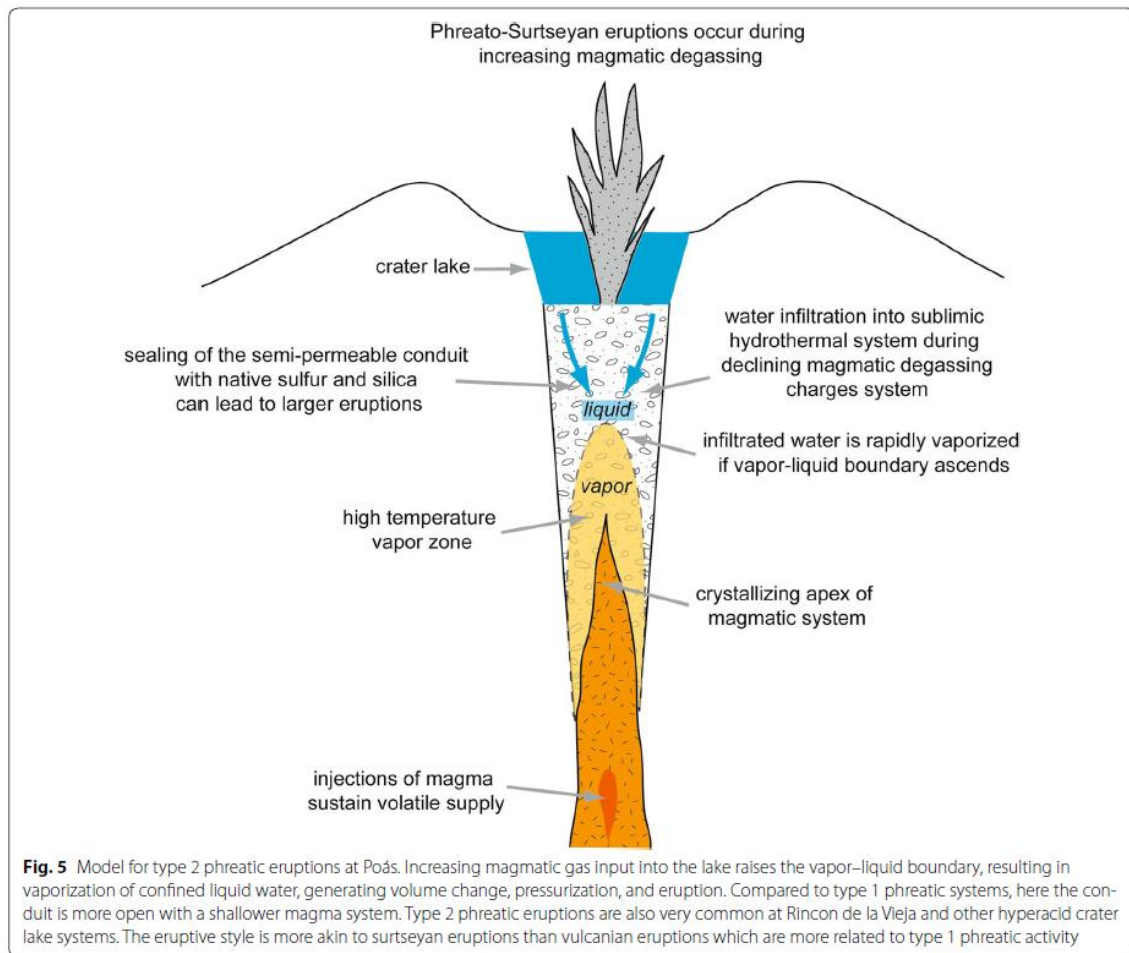


圖 3-23、第二類型的蒸氣噴發模式(Stix and de Moor, 2018)。

比較上述兩種類型的蒸氣噴發與和日本御嶽火山 2014 年的蒸氣噴發，顯示發生蒸氣型噴發作用的條件包括有：(1)深部岩漿侵入提供熱源並解壓釋放大量的火山流體(氣體)上升進入火山底部的熱水儲集層；(2)熱水儲集層上方具有不透氣層的熱水換質黏土(矽質)覆蓋層可累積氣體壓力；(3)累積的氣體達到飽和、壓力超過上覆岩體的強度。

野外調查和分析大屯火山群的地質特性和噴發產物，顯示大屯火山群的蒸氣噴發類型與第一類型的噴發模式相似；也就是說，大屯火山群發生蒸氣噴發的條件，是地下有岩漿侵入釋放高溫的火山流體進入火山體地下淺處具有黏土蓋層的熱水儲集層系統，增加氣體的累積達飽和後噴發形成一系列的爆裂火山口和產物。

3.2 蒸氣型噴發的防範策略

要防範一座火山發生蒸氣型噴發災害，就必須從了解蒸氣型噴發的機制著手，進而建立監測和防災的工作事項。如上所述，發生蒸氣型噴發的條件包括火山流體的上升、不透氣水的黏土質(砂質)蓋層、以及累積氣體壓力達飽和。

大屯火山群的火山流體作用相當旺盛(Pu et al, 2020)，最近的研究顯示在大油坑和七星山底下1-2公里處有旺盛的火山流體作用，造成大量的微震沿著通道發生(圖3-24)，此顯示大屯火山群不僅是一座活火山，在地下深處可能有岩漿的供應，同時在淺處也可能有大量的火山流體上升、累積氣體壓力達飽和發生火山蒸氣型的噴發作用，不可不防。

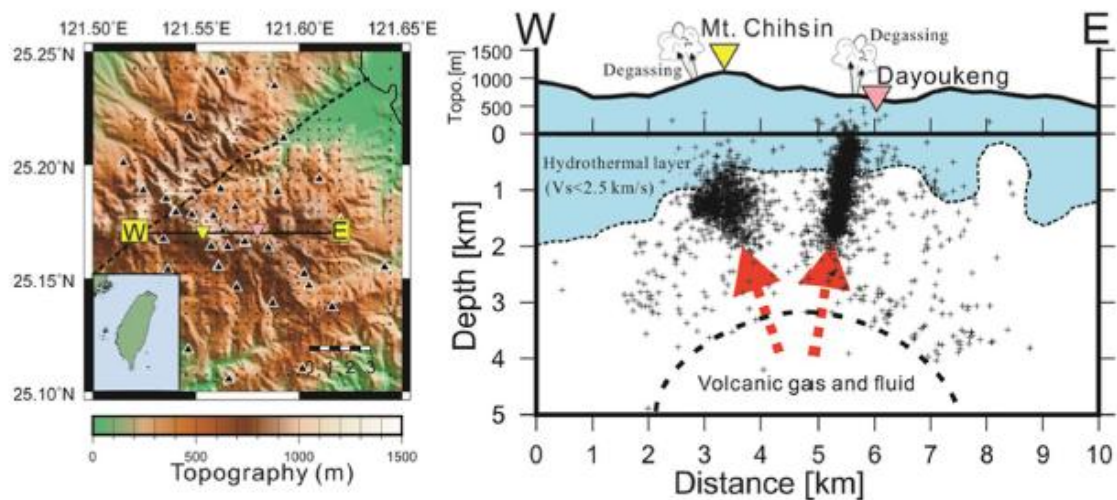


圖 3-24、大屯火山群地底下微震的分布(Pu et al, 2020)。

一座活火山發生火山噴發和附屬的各種地質作用，是一種自然的力量和現象，非人力所能消除的。另外，以目前的科技亦不能控管和掌握，了解其何時發生?噴發規模大小為何等?但也不能束手旁觀任其發生，造成不可預期的災害。

如前段所述，大屯火山群後期的噴發主要是以蒸氣型噴發為主，會發生此種噴發行爲是火山氣體累積在地底具有不透氣層黏土蓋層的儲集層中，當其累積達到飽和後、壓力大於岩石強度就會發生此類型的噴發作用。以現今的科技無法避免此一作用的發生，但可藉由火山熱能的抽取利用，減緩火山流體和熱能的累積速率達飽和程度，以換取更多的時間，等待世界火山科學界發展更進步和有效的監測和預防方法，以減低大屯火山噴發對臺北周遭的危害。



第四章、大屯火山群的地熱熱能釋放

1. 極低頻大地電磁法(VLF-MT)的調查結果

日本地質調查所團隊的研究人員，曾在大屯火山群利用極低頻大地電磁法研究大屯火山群地底下的電性構造，了解地底下岩性電阻率的分布以推斷熱液儲集層的位置和地熱能釋出量(Komori et al., 2014; 2017)。從其研究可看出大屯火山群有幾個低電阻率(resistivity)的地區，分別為北投、小油坑、馬槽和大油坑等地區(圖 4-1)，其測量值分別為幾個 Ωm 到約 $100\Omega\text{m}$ 。

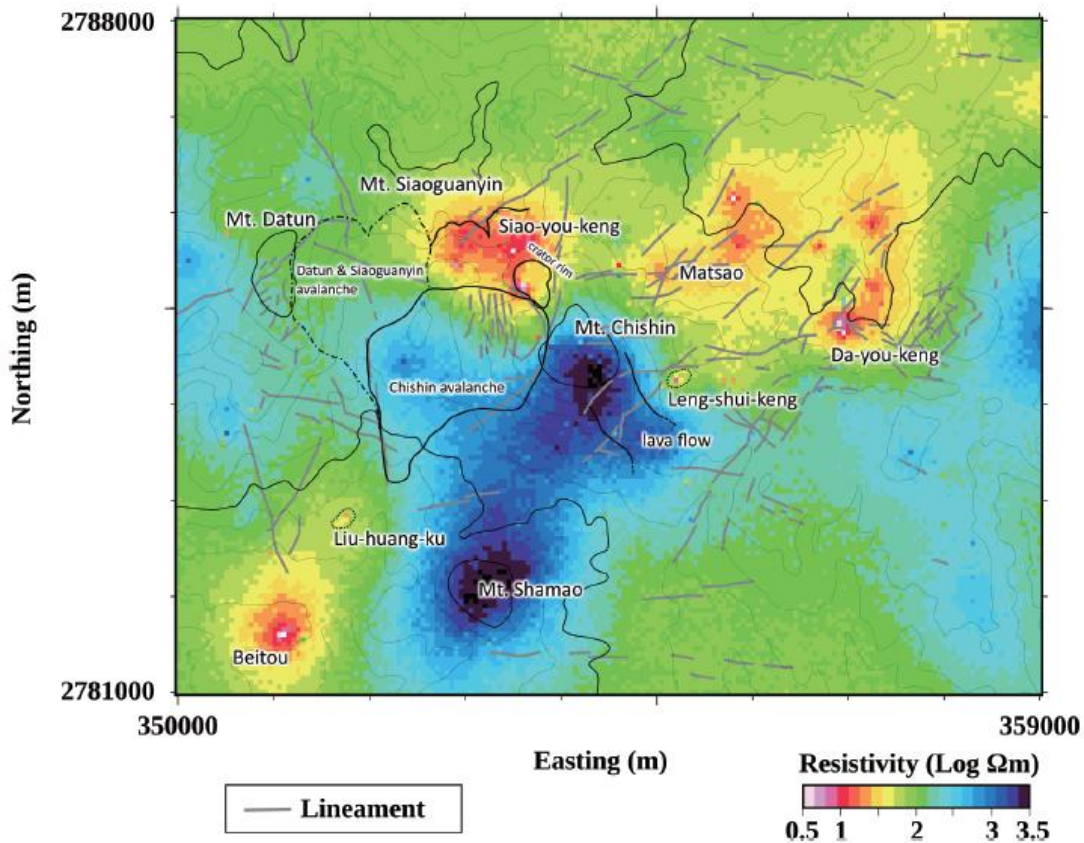


圖 4-1、大屯火山群詳細的電阻率分布圖(Komori et al., 2017)。

另外，日本京都大學的研究人員也利用特極低頻大地電磁法研究大屯火山群地底下的電性構造。為了與日本火山的研究結果相比較，其電性數值是用導電率 (conductivity) 來表示，獲得大屯火山群的測量結果如圖 4-2 和圖 4-3。

兩個研究群所用的單位有所不同，日本地質調查所團隊呈現的研究成果是用電阻率，而京都大學所用的則是用導電率，兩者互為倒數。也就是說地下岩層中高的電阻率意謂為低的導電率，可能為孔隙度低、流體含量或離子濃度低或不含黏土礦物。反之，地下岩層中低的電阻率意謂為高的導電率，可能為孔隙度高、流體含量或離子濃度高或富含黏土礦物。

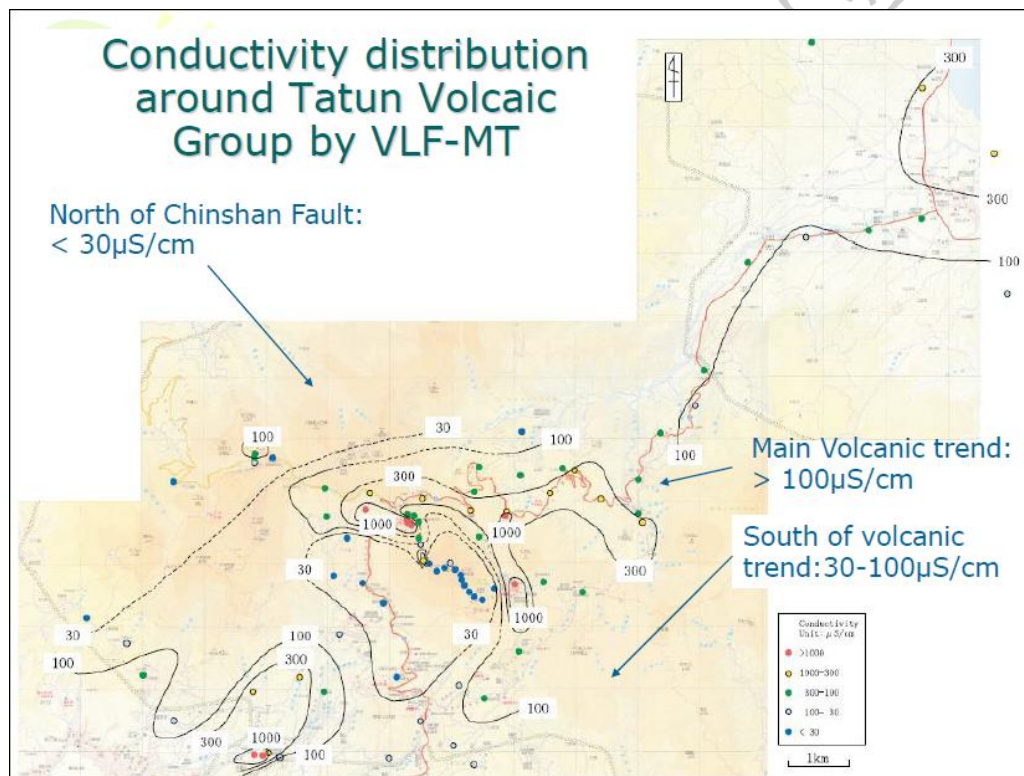


圖 4-2、大屯火山群全區的極低頻大地電磁法量測結果(Kagiyama et al., 2012)。



圖 4-3、七星山火山體周遭的極低頻大地電磁法量測結果(Kagiyama et al., 2012)。

圖 4-2 為大屯火山群全區的極低頻大地電磁法量測結果，顯示高導電率區主要分布在七星山火山體周圍，其數值可高達 1,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ，主要火山體的趨勢數值為大於 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ；在火山體南部趨勢值約為 30-100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ；而在金山斷層以北的區域其值則是小於 30 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。

圖 4-3 則是七星山火山體周遭的極低頻大地電磁法量測結果，可看導電率值高於 1,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 主要分布在小油坑、冷水坑和馬槽等地區。七星山主要火山體大部分小於 30 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ，顯示地下岩體可能是由新鮮的安山熔岩流所構成；而較高的導電率值(100~300 $\mu\text{S}/\text{cm}$)則是分布在七星山體北麓的區域，顯示此區域的地下岩體可能已受到熱液換質的影響。並進一步計算整個大屯火山群火山群地表導電率大於 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 的面積大小約為 4 平方公里(4 km^2)。

2. 電性構造與岩漿溢氣的關係

圖 4-4 為圍繞岩漿上升管道、火山爆裂口和岩漿溢氣與導電率的構造關係示意圖。岩漿上升溢氣，火山氣體溶解入地下水層，增加溫度和離子溶解度，形成低電阻率含水層帶(高導電率帶)，然後隨著遠離火山口位置岩層電阻率上升(導電率下降)(圖 4-5)。

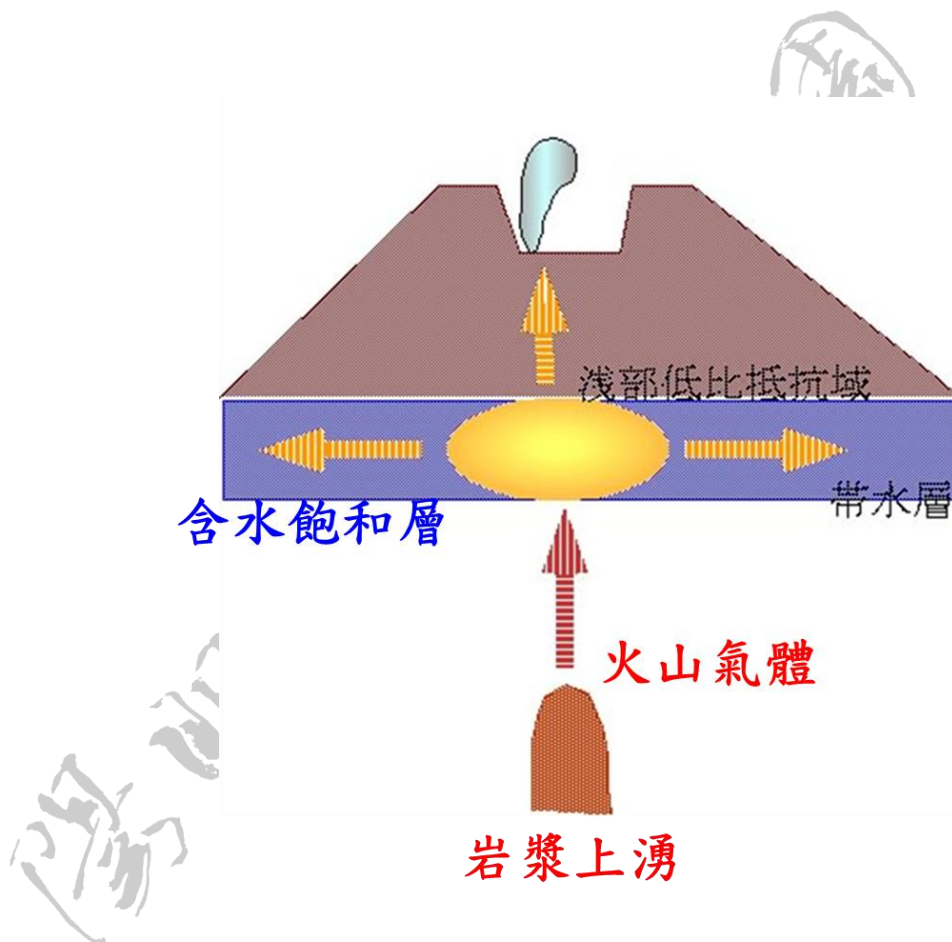


圖 4-4、岩漿溢氣與導電率的構造關係(Kagiyama et al., 2012)。

電氣伝導度と距離の関係

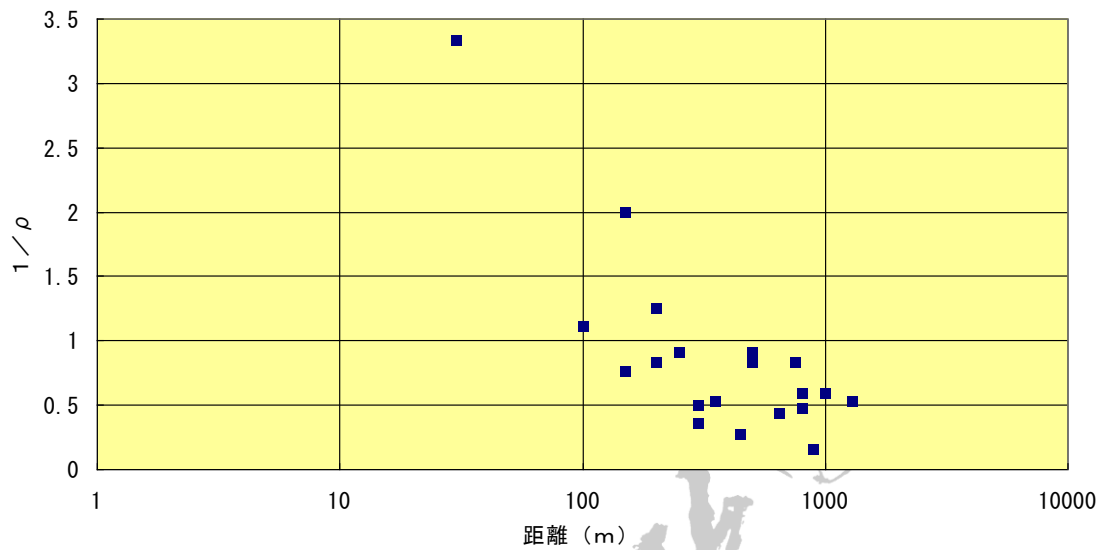


圖 4-5、電導率與火山口位置變化圖(Kagiyama et al., 2012)。

3. 電導率區域大小與熱輸出的關係

Kagiyama 等人(Kagiyama et al., 2012)研究統計日本火山(包括阿蘇火山、別府地區火山、霧島火山、伽藍火山、由布火山等)，地表地熱熱流溢出速率與區域電導率大於 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 的關係(圖 4-6)，發現兩者呈現近直線的關係。大屯火山群利用極低頻大地電磁法繪製電導率值在地表的分布圖，可估出在大屯火山群其電導率值大於 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 的區域面積約為 4 平方公里，然後投影入圖 4-6 中，發現大屯火山群的地熱溢出量與別府地區火山的面積相似，都約為 4 km^2 的大小，對應其地熱熱流輸出量約為 320MW，換算約為每年 $3 \times 10^6 \text{ m}^3$ 岩漿冷卻熱散失量。

Area size of conductive region (>300 μ S/cm) vs. heat discharge rate

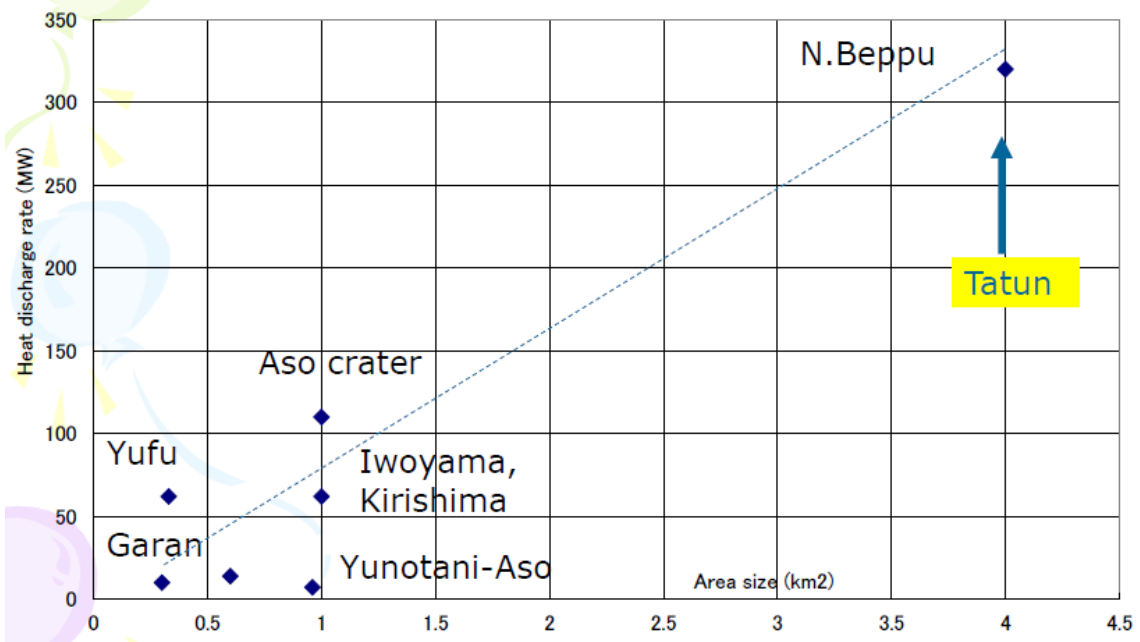


圖 4-6、電導率值大於 300 μ S/cm 的分布面積與熱流溢出速率的關係。

第五章、大屯火山群的地熱潛能

1、60-70 年代地熱評估結果

Chen (1970)曾進行全區地熱發電潛能評估，也是最早的評估文獻，其整理國外 7 個地熱田的單位面積所產電能下限($2,240 \text{ kW/km}^2$)，再與估計蘊藏在溫泉區底下的儲集層面積 36 km^2 相乘，得到約 80 MW 的下限值。另外再引用理論認為發電潛能約為地表自然熱散失的 4–10 倍，則根據其估計自然熱散失為 $12.3 \times 10^6 \text{ cal/s}$ (相當於 51 MW)，乘以 4 倍得到約 200 MW 的上限值。這樣的估計充滿不確定且缺乏嚴謹理論支持。

之後經濟部礦研所委託瑞士 Motor-Columbus 公司地熱專家 Banwell 先生進行大屯火山群發電潛能評估，其估計方法的來源(Banwell, 1961, 1963)有幾項誤差：

- (1) 其假設每段深度的溫度剛好落在沸點，也就是該靜水壓下的飽和溫度。據此設定儲集層溫度後，去推算熱水系統的深度，視地表到此深度為儲集層厚度。此方法算得的儲集層深度過淺，而厚度又過薄。
- (2) 其所計算的理想熱機表現，驗算後發現略低於卡諾熱機效率，且其考慮地下熱攫取因子與實際熱機效率後，帶入的參數為 25%，以現今文獻來看明顯高估。
- (3) 地層孔隙率取 20%明顯高估。溫度、面積等參數亦缺乏現地資料的約束。其估計結果如表 5-1，同樣充滿不確定性(Banwell, 1973)。

表 5-1、瑞士 Motor-Columbus 公司潛能評估整理。

	面積(km^2)	溫度($^{\circ}\text{C}$)與厚度	發電潛能(30 年)	備註
低電阻	5	275(厚 600m)	83MW	七星山至大磺嘴
低電阻	10	同上	166MW	上述範圍為大油坑及其北邊
低重力	16.2	同上	266MWY	取低於 35mg
溫泉區	36	265(厚 500m)	466MWY	同 Chen(1970)之面積

2. 區域潛能評估

曾衡之(2014)彙整具有岩性與溫度資料的鑽井點位見表 5-2，分布地圖見圖 5-1，大致分布於行義路、七星山、八煙至金山沖積平原。標示「O」者表該井有紀錄資料；岩性資料特別標示「△」者表鑽遇五指山砂岩。

表 5-2、大屯火山區鑽井資訊與點位分布。

井名	地點	經度	緯度	海拔	井深	岩性	溫度	來源
G1	硫磺谷	121.5236	25.1428	173	84.1		0	a
G2	行義路	121.5284	25.1447	213	52.48	△	0	a
G3	硫磺谷	121.5188	25.14387	126	122.5		0	a
G4	行義路	121.5308	25.14117	164	59.35		0	a
G5	硫磺谷	121.5124	25.14342	91	110		0	a
G6	行義路	121.5292	25.14511	218	125.08	△	0	a
G7	硫磺谷	121.5228	25.14828	232	51.1		0	a
G8	行義路	121.532	25.13798	158	87.4		0	a
G9	新北投	121.5073	25.14365	70	60		0	a
G10	硫磺谷	121.5279	25.14831	280	47.12		0	a
G11	新北投	121.5095	25.13771	56	100		0	a
G12	行義路	121.5348	25.14157	241	63.1	0	0	a
G13	硫磺谷	121.5213	25.14612	193	100		0	a
G14	行義路	121.5313	25.14336	250	132.05	0	0	a
G15	硫磺谷	121.5155	25.13926	158	82		0	a
G16	行義路	121.5298	25.14113	154	160		0	a
G17	行義路	121.5279	25.14344	188	147.53	△	0	a
G18	行義路	121.5305	25.14274	189	159.42		0	a
G19	行義路	121.5297	25.14556	222	99.62	△	0	a
G20	行義路	121.5316	25.13932	181	135.2		0	a
G21	行義路	121.5287	25.13887	162	105.14		0	a
G22	行義路	121.5308	25.14742	240	127	△	0	a
G23	行義路	121.5265	25.14097	237	130.7		0	a
G24	行義路	121.533	25.14056	213	113.95		0	a
G25	硫磺谷	121.5159	25.14237	108	113.8		0	a

G26	行義路	121.5319	25.14886	251	124		0	a
G27	硫磺谷	121.5227	25.14427	153	95.41		0	a
G28	硫磺谷	121.524	25.14655	204	128.1	△	0	a
G29	硫磺谷	121.5171	25.1448	133	102.54		0	a
E101	行義路	121.5301	25.14404	182	519.5	△	0	a
E102	行義路	121.5322	25.14235	249	629	△	0	a
E103	硫磺谷	121.5267	25.14494	195	1000	△	0	a
G201	馬槽	121.5617	25.17819	610	155.86	0	0	a
G202	馬槽	121.5628	25.17762	585	150.6	0	0	a
G203	馬槽	121.5592	25.17489	725	84.73	0	0	a
G204	馬槽	121.5612	25.18055	610	151.66	0	0	a
G205	馬槽	121.5591	25.17635	720	122.97	0	0	a
G206	馬槽	121.5614	25.17586	635	34.75	0	0	a
G207	馬槽	121.5602	25.17169	808	147.56	0	0	a
G208	馬槽	121.5621	25.17568	670	145.7	0	0	a
G209	馬槽	121.5583	25.17803	685	124.5	0	0	a
G210	冷水坑	121.5614	25.16868	810	153.66	0	0	a
G211	馬槽	121.5612	25.17285	727	52.75	0	0	a
G212	馬槽	121.5569	25.1759	787	153.6	0	0	a
G213	馬槽	121.563	25.17106	790	150.66	0	0	a
G214	馬槽	121.5591	25.17235	833	134.98	0	0	a
G401	大埔村	121.6464	25.2127	11	101.73	△	0	a
G501	八煙	121.5908	25.18939	304	621.4	0	0	a
E201	馬槽	121.5593	25.17269	810	572	0	0	a
E202	馬槽	121.558	25.17595	770	441	0	0	a
E203	馬槽	121.5602	25.17148	805	1005	0	0	a
E204	冷水坑	121.5618	25.16839	795	577	0	0	a
E205	冷水坑	121.5618	25.16959	795	1500	0	0	a
E206	馬槽	121.5625	25.17248	790	301.5	0	0	a
E207	馬槽	121.559	25.18148	672	768	0	0	a
E208	馬槽	121.5593	25.17267	810	1510	△	0	a

E209	E202 旁	121.5582	25.17597	758	500	0	0	a
E210	馬槽	121.5628	25.17883	595	600	0	0	a
E211	馬槽	121.5594	25.17616	725	361.2	0	0	a
E212	冷水坑	121.5631	25.1673	748	665	0	0	a
E213	冷水坑	121.5693	25.16722	774	603	0	0	a
E214	冷水坑	121.5655	25.16701	731	502.5	0	0	a
E301	煥子坪區	121.6092	25.1933	478	474.85	0	0	a
E601	山豬湖	121.5597	25.1577	650	757.5	0	0	a
M1	擎天崗	121.5738	25.16646	750	480	0	0	d
M2	竹子湖	121.5335	25.17766	690	200	0	0	d
M3	菁山	121.5613	25.1557	605	200	0	0	d
04CSN111	三界橋	121.6208	25.2284	10	642	△		c
NSH	南勢湖山	121.6153	25.2053	291	870	△		c
SHP-1T	秀礮坪	121.5995	25.19832	323	2025	△	0	b
CPC-CSN-1T	金山	121.6524	25.21301	6.82	2001.8	△	0	b
CPC-MT-1T	馬槽	121.5635	25.16659	729.6	1717	△	0	b
CPC-MT-2T	馬槽	121.5621	25.15609	615.1	1605	△	0	b
CTK	擎天崗	121.5737	25.16642	750	495.7	0	0	d
6 號井	金山	121.6369	25.22891	4	400	△		c
7 號井	金山	121.6349	25.23383	4	376	△		c

*a 礦岩所(1969, 1970, 1971, 1973)、工研院礦研所(1977);*b 中油內部報告(1980, 1981, 1984, 1987);*c 中央地調所(2007, 2010);

*d Chiang et al.(2011)、廣錕工程顧問(2006)

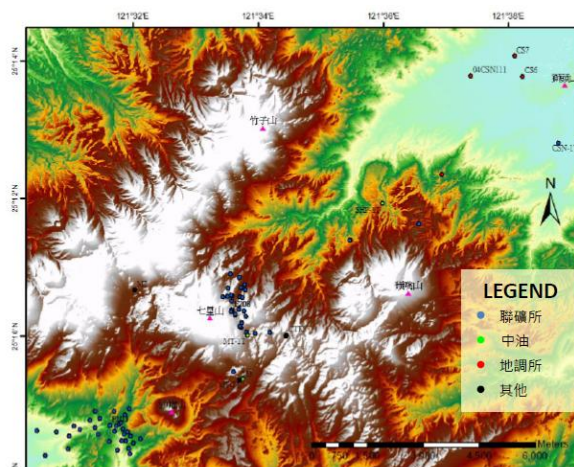


圖 5-1、大屯火山井位資料來源及座標分布(曾衡之，2014)。

將各井岩性資料、溫度資料匯入至 Golden Software 公司之 Voxler 3D 繪圖軟體，即可創建三維模型。而在繪製地表熱流圖、深部溫度等值圖時所需要的溫度梯度資料，原則上擷取井溫剖面平緩增加，斜率穩定的線段，以避免受淺層地下水干擾而低估。地表溫泉分布取自宋聖榮(2005)，座標及高程資訊及熱水二氧化矽濃度如表 5-3、表 5-4 所示

表 5-3、大屯火山區之溫泉分布。

溫泉名	經度	緯度	高程(m)
硫磺谷	121.5236	25.1436	138
行義路	121.5294	25.14081	115
龍鳳谷	121.5278	25.14461	143
雙重溪	121.5296	25.1441	168
頂北投	121.5312	25.14622	195
鼎筆橋	121.5357	25.15584	310
湖山	121.5357	25.14995	290
小隱潭	121.5388	25.15621	362
陽明路	121.5491	25.14802	388
中山樓	121.55	25.15938	433
陽明山	121.5418	25.16058	490
竹子湖	121.5453	25.16431	621
胡宗南墓	121.5431	25.165	607
冷水坑	121.5626	25.16786	745
小油坑	121.5477	25.17518	800
後山	121.5532	25.18381	556
馬槽	121.5623	25.17675	520

七股	121.565	25.17884	500
翠林橋	121.5677	25.18305	476
大油坑	121.5799	25.17217	448
磺溪	121.5771	25.17415	423
下七股	121.5806	25.18214	362
八煙	121.5887	25.19347	241
四磺坪	121.6035	25.19542	366
庚子坪	121.6133	25.1871	462

表 5-4、七星山東側深井之二氧化矽濃度值及溫度推算。

Well ID	Sampling date	SiO ₂ (ppm)	T _{SiO₂} (steam loss)	T _{SiO₂} (no steam loss)
E205	1970.12.16	830	264.5	-
E205	1970.12.21	760	257.3	-
E205	1970.12.24	730	254.1	-
E205	1970.12.26	782	259.6	-
E205	1970.12.29	836	265.1	-
E205	1972.5.17	960	-	319.8
E205	1972.5.17	680	-	282.1
E208	1972.1.20	1180	295.2	-
E208	1972.1.28	2168	357.4	-

根據表 5-4 所推算之儲集層平衡溫度，代入體積法中的溫度參數時，所採用的最小值為攝氏 250 度、最可能值攝氏 260 度、最大值攝氏 280 度。

孔隙率資料來自礦岩所(1970)，根據岩心測試結果(表 5-5)，五指山層原生孔隙率約在 4%-9%之間，組成顆粒越大者孔隙率亦愈大。礦岩所(1971)藉由深部電阻資料反推孔隙率，認為再考慮裂隙造成的次生孔隙率，則可達 10%。由表中(表 5-5)可知，不論五指山砂岩或安山岩，基質(matrix)本身幾無滲透率，因此流體傳輸主要還是依靠連通裂隙。

表 5-5、岩心孔隙率測試的平均結果及描述。

五指山砂岩		
孔隙率	滲透度(md)	描述
4.19	0.00	強烈矽化
5.93	0.61	細粒，矽化，孔隙中堵塞換質礦物及硫磺
8.23	1.13	中粒，矽化，孔隙中堵塞換質礦物及硫磺
8.84	3.38	粗粒，矽化，孔隙中堵塞換質礦物及硫磺

安山岩		
孔隙率	滲透度(md)	描述
4.63	0.00	輕微換質
5.87	0.03	中度換質
7.14	0.13	強烈換質，換質礦物堵塞小裂隙
23.19	4.38	強烈換質，可見細小孔隙

礦岩所(1971)針對岩心的密度測定結果，顯示五指山砂岩的乾密度為 2.25~2.5 g/cm³。而砂岩之比熱值算式為 $C_p = 0.108T^{0.155} \times 4.184$ (Somerton, 1992)，代入儲集層平均溫攝氏 250 度後，將乾密度與比熱值相乘即可得體積比熱。本研究對於五指山砂岩之體積比熱採用 2475 kJ/kg/K 的定值。

熱液水位深度方面，硫磺谷之大地電磁測點顯示 300 m 開始為低阻區(陳洲生, 2008)，Chen (1970)繪製的大磺嘴地區剖面圖則顯示地下水面在 150-200 m 深，因

此本研究在針對 E103 做單井情境分析時便取 250 m 為熱液水位深度，以計算井底靜水壓力。

Chen (1970)曾指出大屯火山區地表自然熱散失值為 $4.42 \times 10^{10} \text{ cal/h} = 51.4 \text{ MW}$

但由於其文章內並無詳述算法與範圍。因此，本研究直接使用此值作為熱流法的計算基礎前，亦繪製地表熱流圖以作檢驗。Chiang et al. (2011)指出大屯火山區淺部安山岩熱傳導係數約為 1.6 W/m/K ，配合各井之淺部溫度梯度，便可計算熱流值，再使用克利金法(kriging)內插，繪製成地表熱流等值圖(圖 5-2)。

剔除西北、東南側缺乏實際資料的外插面積後，將熱流值分別與各等值線間所占面積相乘，即可得傳導熱散失值 8.82 MW 。另外孟昭彝等(1965)指出，北投區、陽明山區、金山區之溫泉水每日所帶出的熱能為：

$$76731.7 \times 10^7 \text{ cal/day} = 37.16 \text{ MW}$$

對流熱散失與傳導熱散失相加結果與 Chen (1970)之估計數值十分接近，驗證其數值的可信。

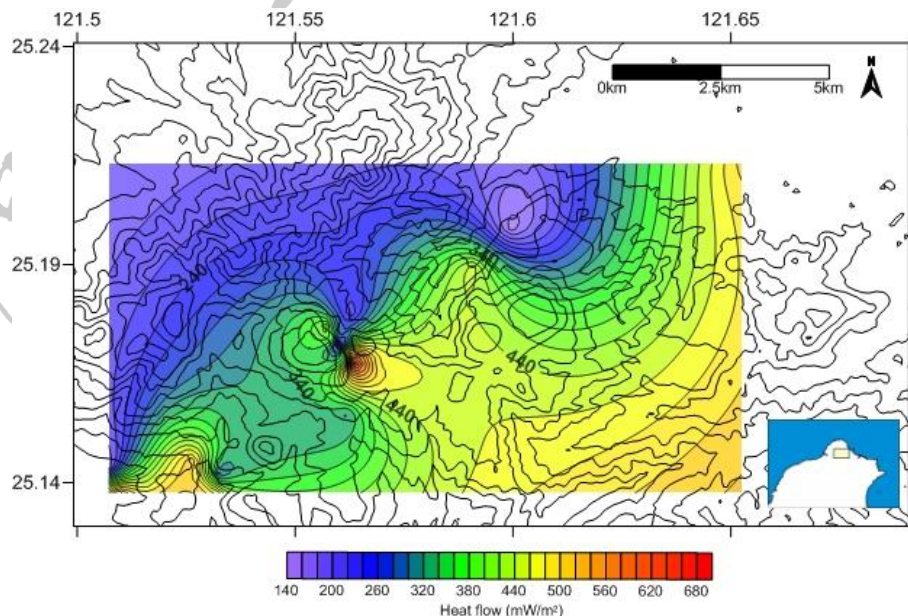


圖 5-2、大屯火山區地表熱流之等值圖(曾衡之，2014)。

純水及異丁烷之熱力學性質來自於 NIST 撰寫之 Refprop 軟體及其 excel 內嵌程式。大多數情況輸入壓力、溫度、熱焓、熱熵其中兩個數值，即可回傳另外兩者數值。有時雙循環機組的渦輪等熵出口熱焓(h_{2s})在輸入壓力、熱熵後並未收斂(有兩個可能解)，若欲此狀況則改用內插方式計算：

$$h_{2s} = h_g + (h_g - h_3) \times \left(\frac{s_{2s} - s_g}{s_g - s_3} \right)$$

閃發式機組之渦輪出口溫度(蒸氣冷凝溫度)皆設為攝氏 50 度，所有機組之渦輪等熵效率皆設為 85%，而雙循環機組內的出水幫浦(feed pump)的等熵效率設為 75%(DiPippo, 2012)。

2.1 淺層地熱

2.1.1、體積法

五項變數的設置，孔隙率、溫度已表列(表 5-4、表 5-5)，熱攫取因子參考前人文獻(Cataldi et al., 1978; Muffler and Cataldi, 1978)。這裡只針對儲集層面積、厚度的劃定做討論。

根據尚未進行鑽探前的評估方法為探詢地表徵兆，包括溫泉、噴泉、噴氣孔、熱液換質帶等，不過近地表如果有不透水的蓋層，或地下水面遠低於地表時，這種方式會往往低估(White and Williams, 1975)。因此有時亦會採用低電阻帶、低速帶等地球物理資料來粗估儲集層體積(Garg and Combs, 2010a)。

當有實際鑽井資料時，依據國外經驗建議(GeothermEx, 1992; Olson, 1993a, b)，劃定儲集層面積、厚度應符合幾項規則：

- (1) 深度 1,300 m 時至少達到攝氏 180 度。
- (2) 底下岩層具高孔隙率或高滲透度的儲集層。
- (3) 最大鑽深 3,000 m。

3,000 m 鑽深限制是考慮深部岩層的滲透率會急遽衰減以及經濟因素(Cataldi et al., 1978)。沿著符合條件(1)(2)的鑽井點位作為邊界，可圈出核心潛能區，相當於最小可能面積。

曾衡之(2014)根據鑽井資料與前人資料顯示，大屯火山區安山岩熔岩大多緻密且無滲透性，並非良好儲集層。而五指山層根據目前岩性特徵、厚度、範圍延伸來看條件優良，且大磺嘴和金山溫泉區已證明五指山層是含水層，大屯火山區溫泉分布亦與五指山層分布一致，因此視為大屯火山區儲集層(Chen, 1970)。沿著符合條件的鑽井邊界作圈劃，即可視為最小面積範圍；而從低電阻分布有往北延伸的趨勢，認為此區若有鑽井應也能符合條件，所以將範圍往北延伸，圈劃出最可能面積範圍；而最大面積範圍則稍微往硫磺谷西側推展，東側則包含兩道推測的水流路徑範圍(圖 5-3)(詳見曾衡之(2014))，圈劃結果見(圖 5-4)。

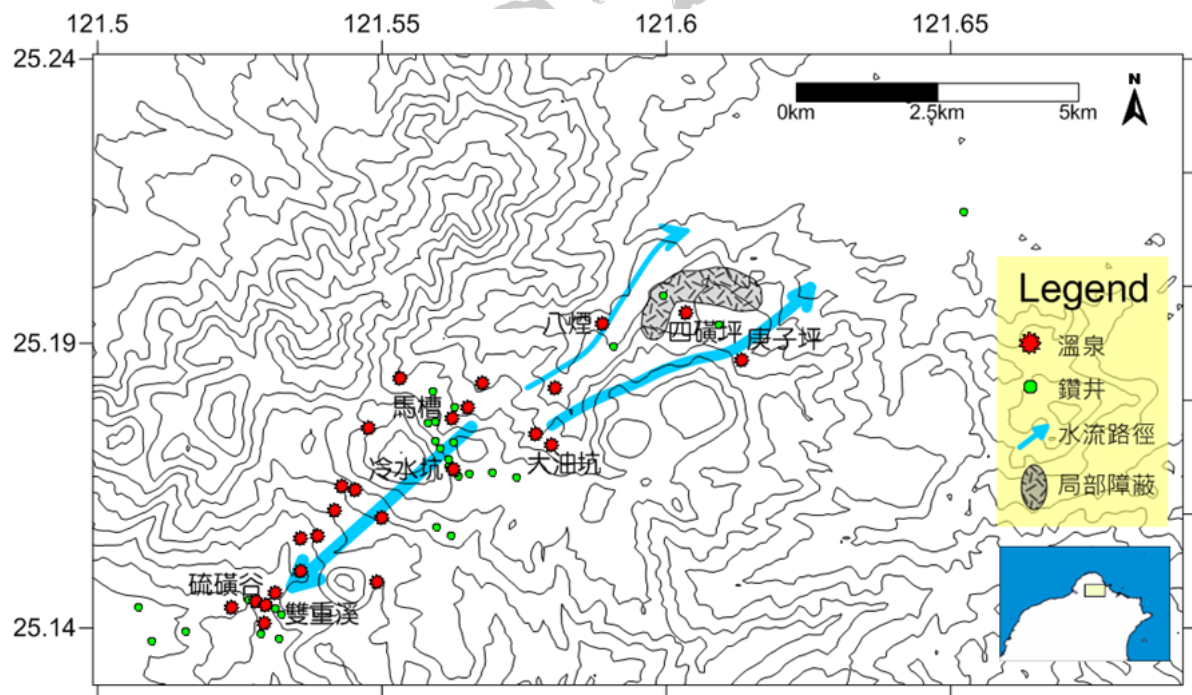


圖 5-3、地下熱液流動路徑(曾衡之，2014)。

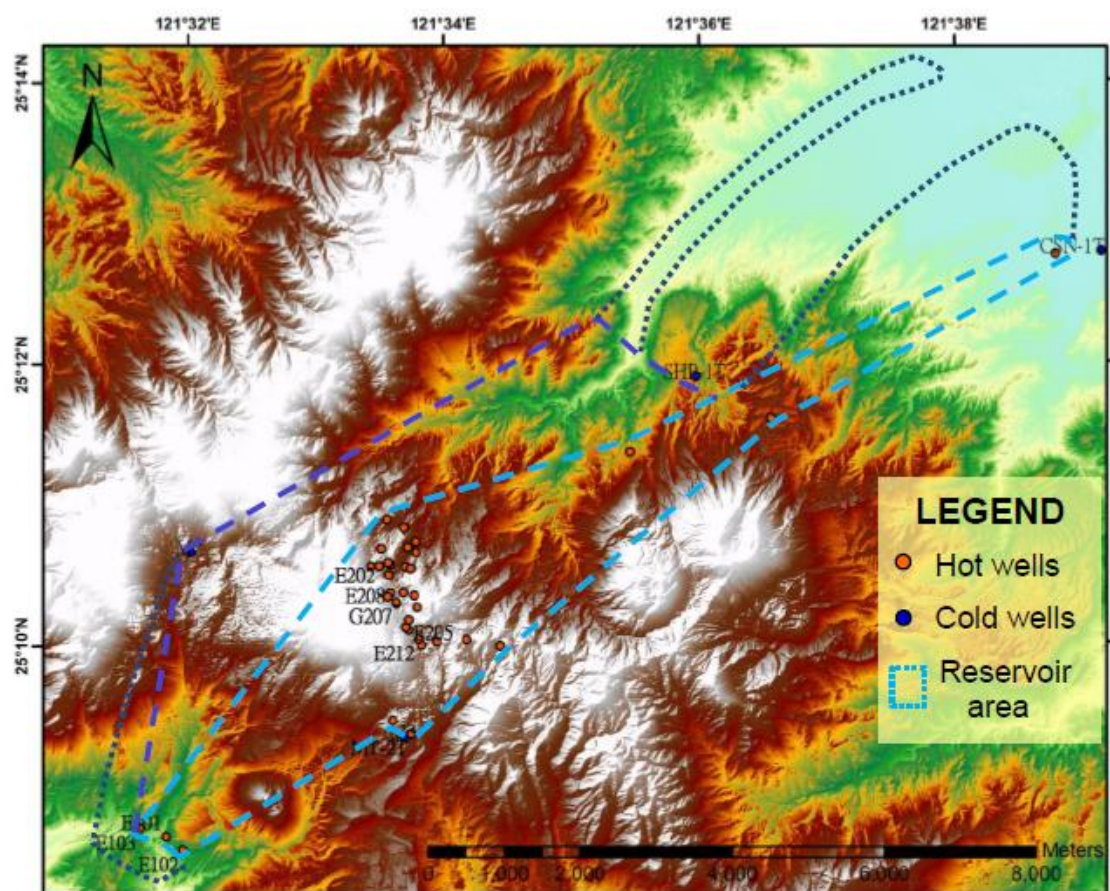


圖 5-4、儲集層面積劃定示意圖(曾衡之，2014)。

而儲集層厚度部分，接近熱源處鑽深 1,300 m 內要達 180°C 以上雖非難事，但五指山層卻在更深處；反之，東西兩側能在淺處鑽抵儲集層，180°C 等溫面卻在更下方(圖 5-5)，考量這兩個因素，本研究取最可能儲集層厚度 1,400 m，最小及最大厚度分別增減 200 m。

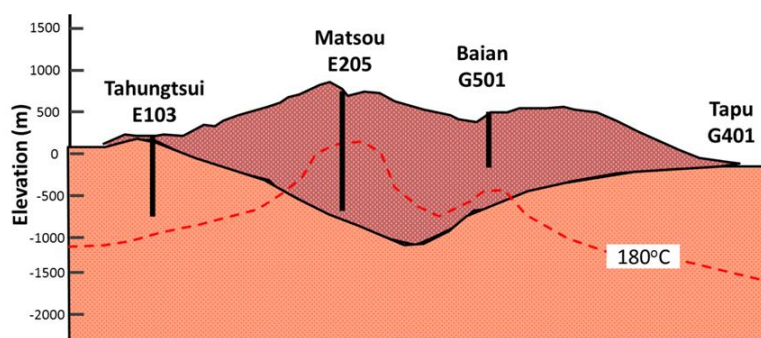


圖 5-5、儲集層厚度劃定示意圖(曾衡之，2014)。

曾衡之(2014)併合蒙地卡羅模擬的結果顯示(圖 5-6)，如以 30 年為營運期，大屯火山區淺層地熱的發電潛能平均為 425 MW，50% 累積機率(中位數)亦在 417 MW 以上。此體積法計算值可視為淺層地熱的發電潛能上限。代表如維持 425 MJ/s 的輸出功率，經過 30 年後儲集層平均溫度將降至回注水溫，此時地熱田就必須停止開發。另外，體積法是將儲集層視為孤立系統(Isolated system)，意即完全不與外界交換能量或質量，實際上地熱田應為開放系統(Open system)(Wisian et al., 2001)，有研究指出在儲集層體積越小的情況下，數十年的營運期中，來自區域熱流與低滲透性圍岩的自然熱補給可達井口攫取總熱的 10%(Muffler and Cataldi, 1978)。因此實際容量可能比 425 MW 更加樂觀。

從敏感度分析中也可以發現熱攫取因子(recovery factor)與儲集層面積是影響潛能計算結果的主要變數，相關係數分別為 0.54、0.34(圖 5-7)。因此，建議大屯火山區須進行示蹤劑試驗以了解裂隙連通情形、延伸方向，獲得較佳的生產-注入井配置方案，以提升熱攫取因子。

2.1.2 熱流法

驗證 Chen (1970)所估計大屯火山區自然熱散失值 51.4 MW 尚稱合理，因此即以此值乘以 40 倍比例關係。而若平均儲集層溫度 250°C 則此溫度下熱電轉換效率約 16%(表 5-6)，則：

$$51.4 \text{ MW} * 16\% * 40 = 329 \text{ MW}$$

此熱流法計算值可視為淺層地熱的發電潛能下限。

表 5-6、典型各溫度下的熱電轉換效率 (Tester et al., 2006)。

Temperature, °C	Cycle Thermal Efficiency η_{th} %
150	11
200	14
250	16
300	18
350	22

2.2 深層地熱

曾衡之(2014)利用 Blackwell et al. (2006)之公式推導井下溫度至 3.5km/4.5km/5.5km 深，所繪製的等值圖見(圖 5-8)，則 3 km 至 6 km 止，每公里深度對應的發電潛能見(表 5-7)，代表大屯火山區如進行深層地熱開發，能再額外產生 1.2 GW 供給 30 年的電能。

表 5-7、3 至 6 公里之深層地熱資源分布情況。

Depth of slice, km	Power available for slice, MW	Amount at 240-280°C, MW	Amount at 280-320°C, MW	Amount at 320-360°C, MW	Amount over 360°C, MW
3 to 4	269.66	131.2	74.0	51.2	13.3
4 to 5	390.41	192.4	98.0	68.1	32.0
5 to 6	533.21	239.9	144.5	81.9	66.9
Total	1193.29				

注意此節所計算淺層、深層地熱發電潛能，是以新北投、硫磺谷經七星山至金山平原之東北走向條帶，即鑽井涵蓋之範圍做評估，實際上在東南方鑽井範圍外之地溫梯度不明而未考慮，萬里的局部地熱資源亦未包含，因此實際的發電潛能可能更高。另外，以現今發電技術而論，90°C 以上便可運用雙循環機組發電，但本研究考量經濟性因素，淺層地熱仍取 1,300 m 須達 180°C 的條件來劃定潛能區，因達到此條件的區域通常是有熱液流經的區域，較符合傳統淺層地熱的開發要件——熱源、裂隙通路與水。

SUMMARY OF INPUT PARAMETERS

Variable Parameters		Minumum	Most Likely	Maximum
Reservoir Area	km ²	17.8	30.4	40
Reservoir Thickness	m	1200	1400	1600
Rock Porosity		0.05		0.1
Reservoir Temperature	°C	250	260	280
Recovery Factor		0.1		0.2

Fixed Parameters

Seperator Temperature	145	°C
Rock Volumetric Heat Capacity	2475	kJ/m ³ °C
Fluid Volumetric Heat Capacity	3958	kJ/m ³ °C
Condenser Temperature	50	°C
Dead-state Temperature	20	°C
Plant Capacity Factor	0.95	
Power Plant Life	30	years

Results

Statistics			
	MW	MW/ km ²	Utilization Fac.
Mean	425	14.45	36.16%
Std. Deviation	88		0.28%
Minimum(90% prob.)	292		35.72%
Median (50% prob.)	417		36.15%
Most-likely (Modal)	375-400		

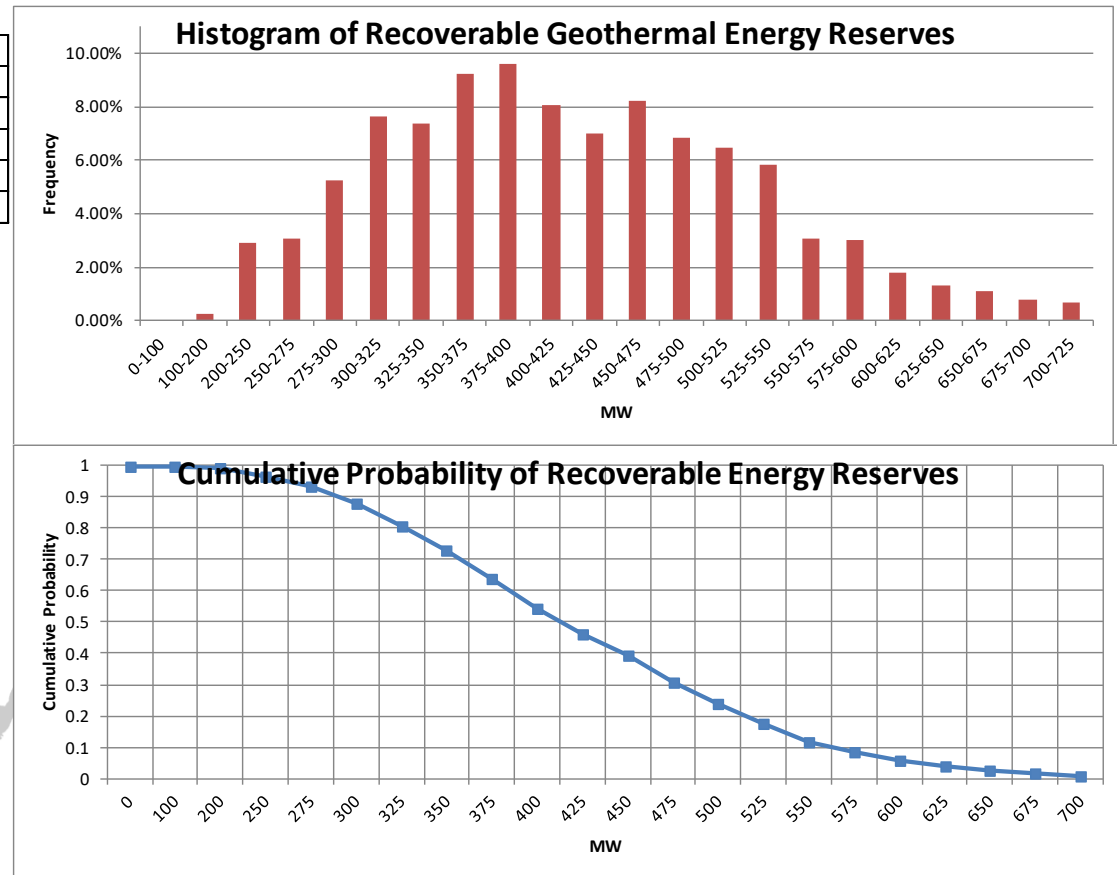


圖 5-6、運用體積法及蒙地卡羅模擬之淺層地熱開發潛能(曾衡之，2014)。

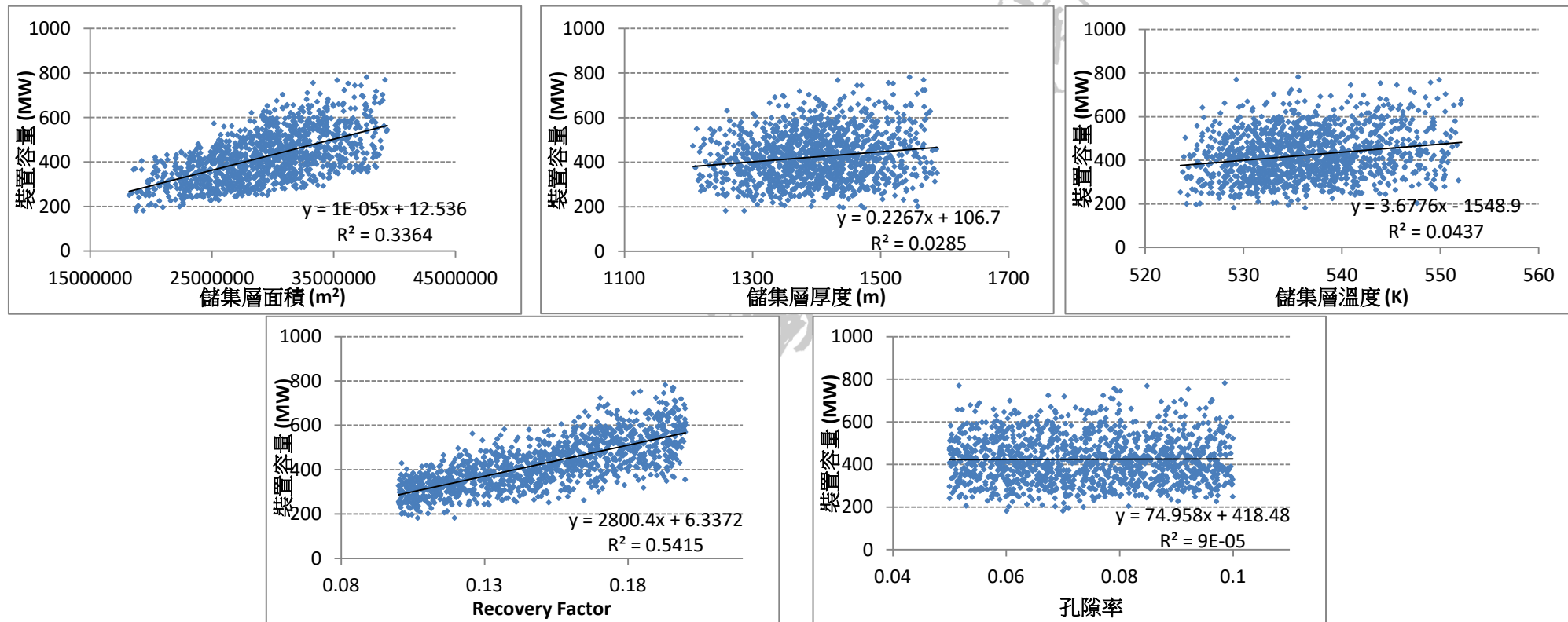


圖 5-7、體積法變數參數之敏感度分析(曾衡之，2014)。

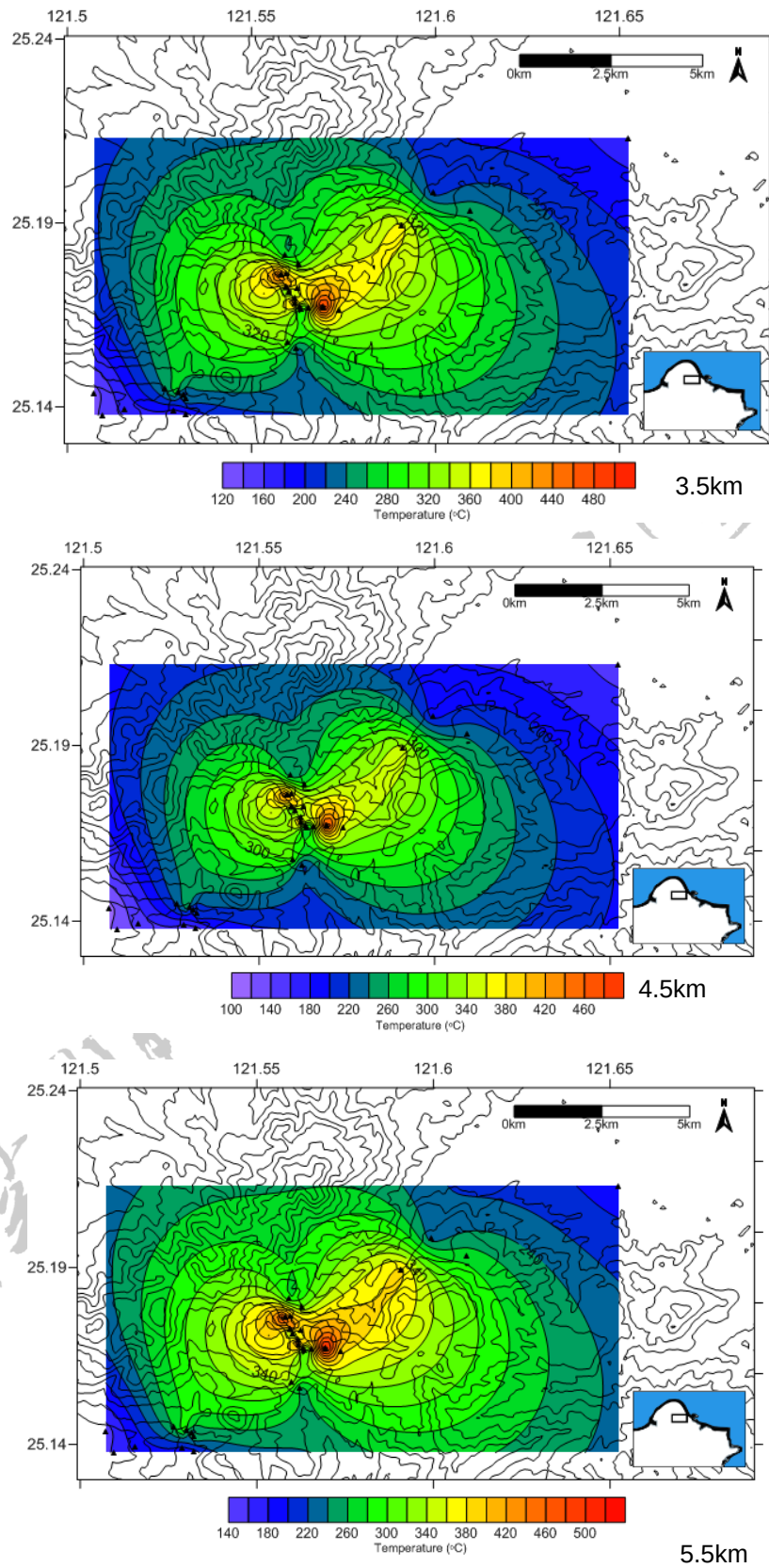


圖 5-8、推斷地下深處之溫度等值圖(曾衡之，2014)。

2.3 單井情境分析

建置地下模型後，往後開發便有幾項考慮——如欲選擇靠近熱源所在處進行鑽井，確實可獲得較高溫的地熱資源，但想要鑽抵有熱液分布的儲集層(五指山砂岩)，卻要付出較高的成本，因其下陷最深。另外，使用不同的發電機組可獲得多少電力，也是很重要的因素。

本計畫選取兩口具有溫度、流量資料，且都有鑽抵五指山層的井位，分別是 E208 號井與 E103 號井(圖 5-9)，前者位於七星山右側，深度 1,500 m，井底溫度攝氏 290 度；後者位在硫磺谷，深度 1,000 m，井底溫度 170°C。

E208

此井熱液溫度極高(290°C)，過去資料顯示在 4.446 bar-a 的井口壓力下獲得 9.13 kg/s 的產量(圖 5-10)，將此壓力下的飽和溫度約 148°C 視為分離溫度，設定渦輪出口冷凝溫度 50°C，可繪製單閃發模組溫度-熱熵圖(T-S diagram) (圖 5-11)；而同樣條件下，雙閃發模組設定二次分離溫度 96°C 可得最佳化表現，見溫度熱熵圖(圖 5-12)。

雖然 E208 號井沒有連續的井口壓力(分離壓力)與流量關係測試，但在模擬不同分離壓力下，每單位流量(kg/s)的熱液預期可獲得電力輸出(即比功率輸出，specific power output，單位 kW/(kg/s)) (圖 5-13)，由於 E208 號井熱液溫度極高，不論使用單閃發或雙閃發都有很好的效率表現，在分離溫度(T_2)為 148°C 下，分別為 137.28 kW/(kg/s)和 154.38 kW/(kg/s)，利用效率分別為 37.48%和 42.14%。

再與該分離壓力下的井口流量 9.13 kg/s 相乘，即可得電力輸出 1,253 kW 和 1,409 kW(圖 5-14)，運用雙閃發式模組可使功率提升 12.45%。

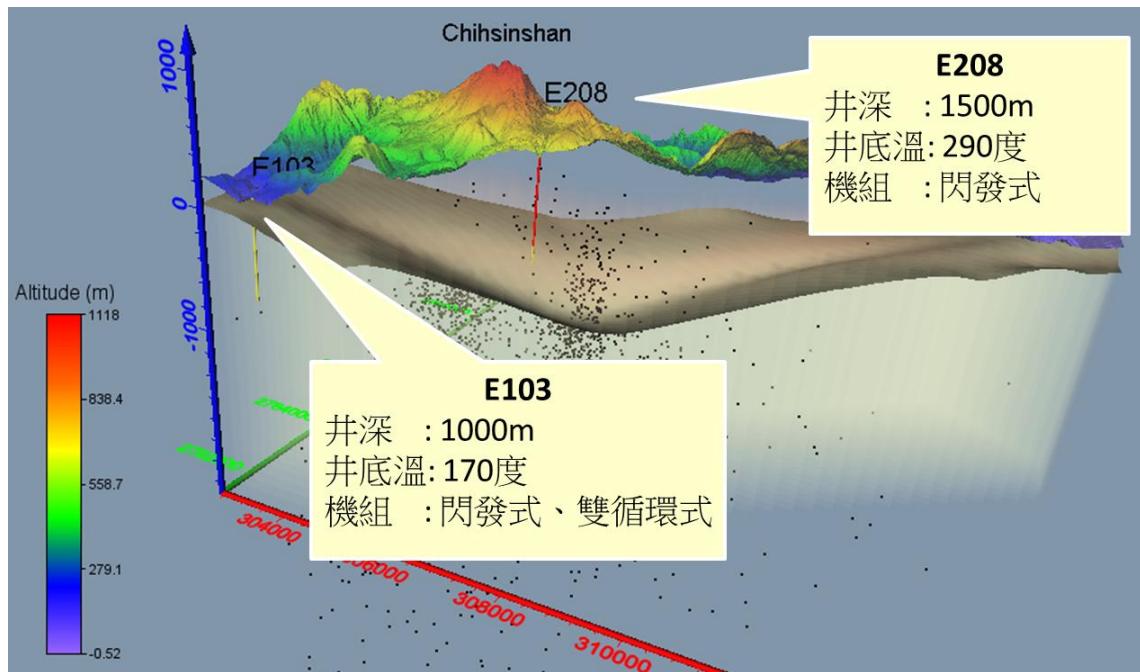


圖 5-9、E103 號井與 E208 號井所在位置。

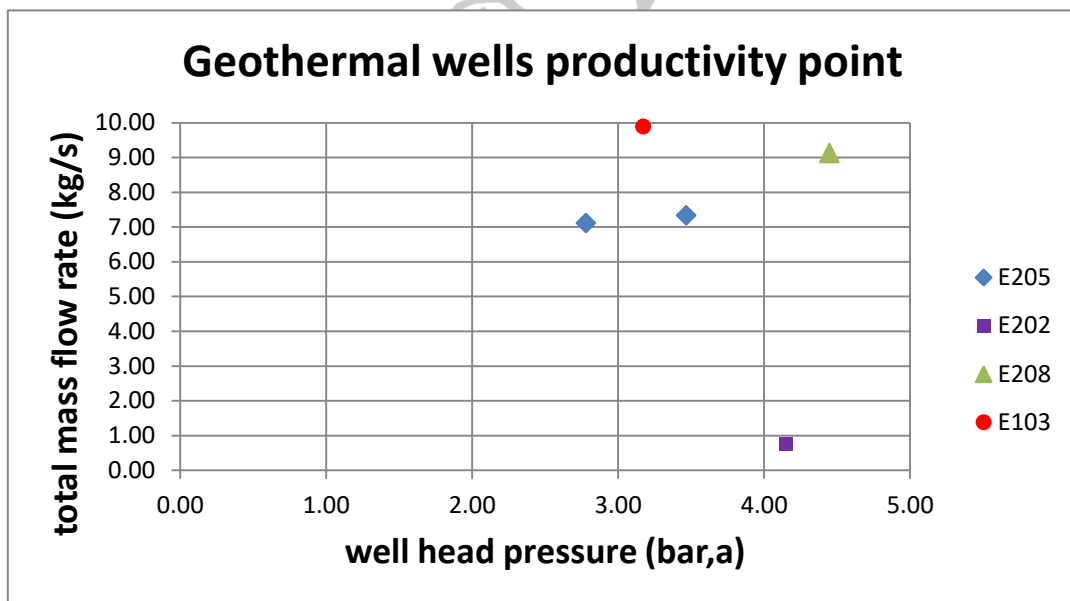


圖 5-10、四口生產井之井口壓力對流量作圖(曾衡之，2014)。

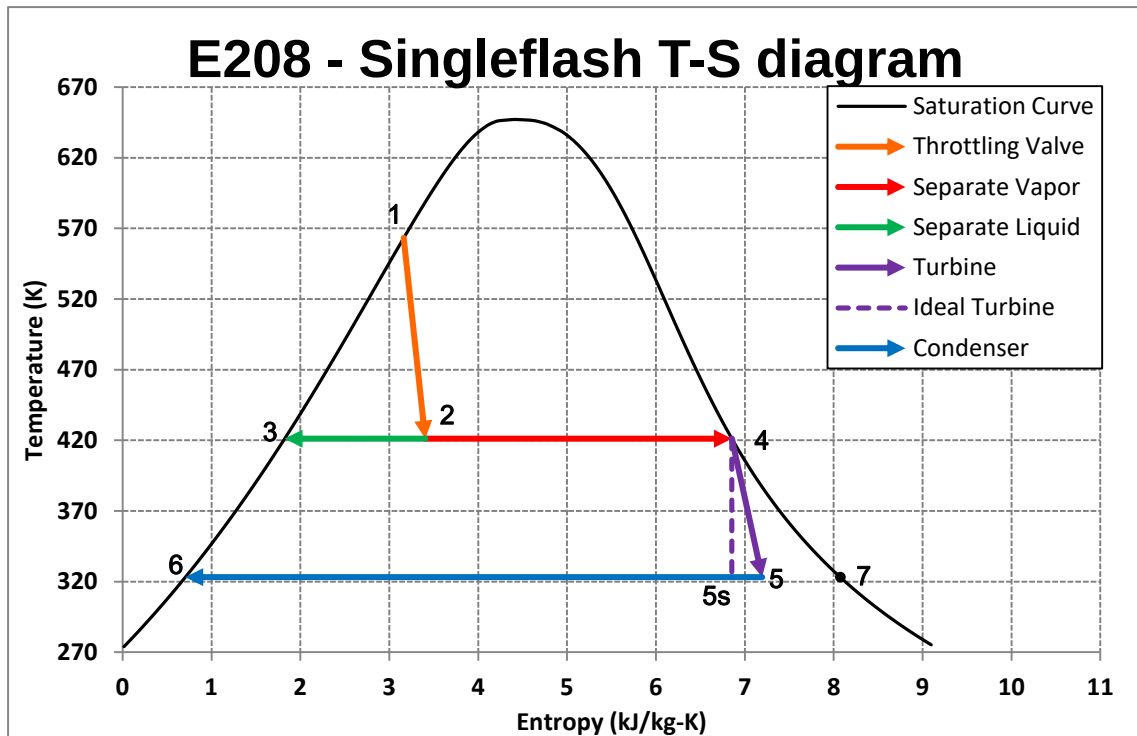


圖 5-11、E208 號井單閃機組 T-S diagram(曾衡之，2014)。

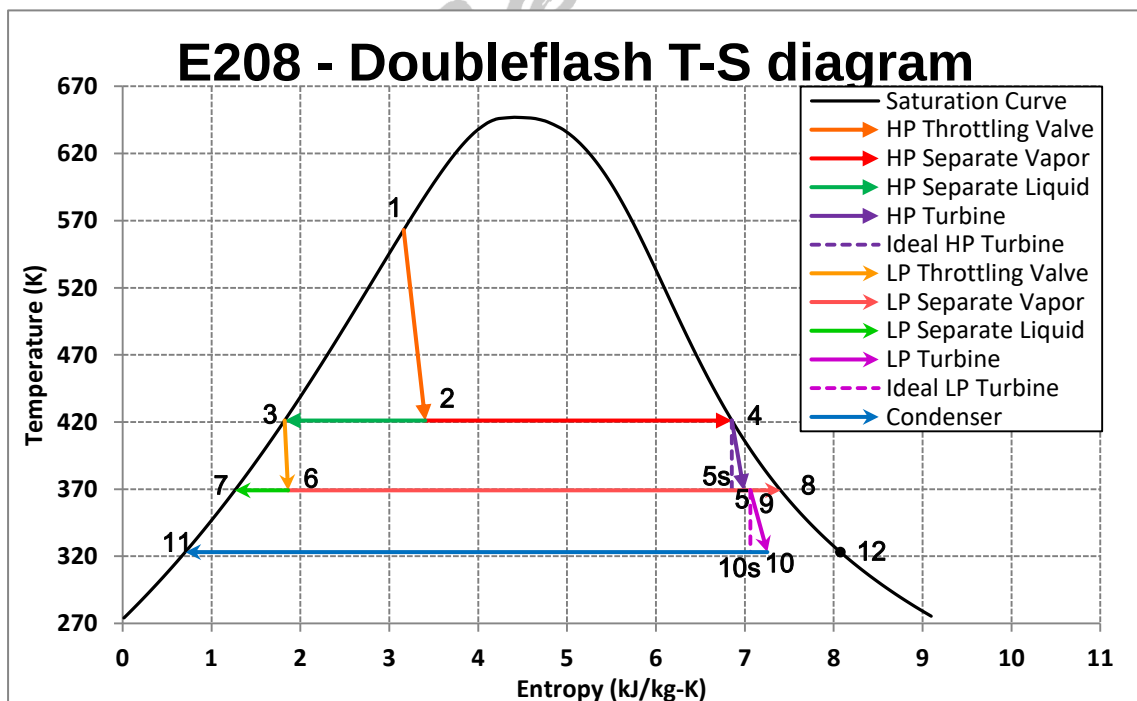


圖 5-12、E208 號井雙閃機組 T-S diagram(曾衡之，2014)。

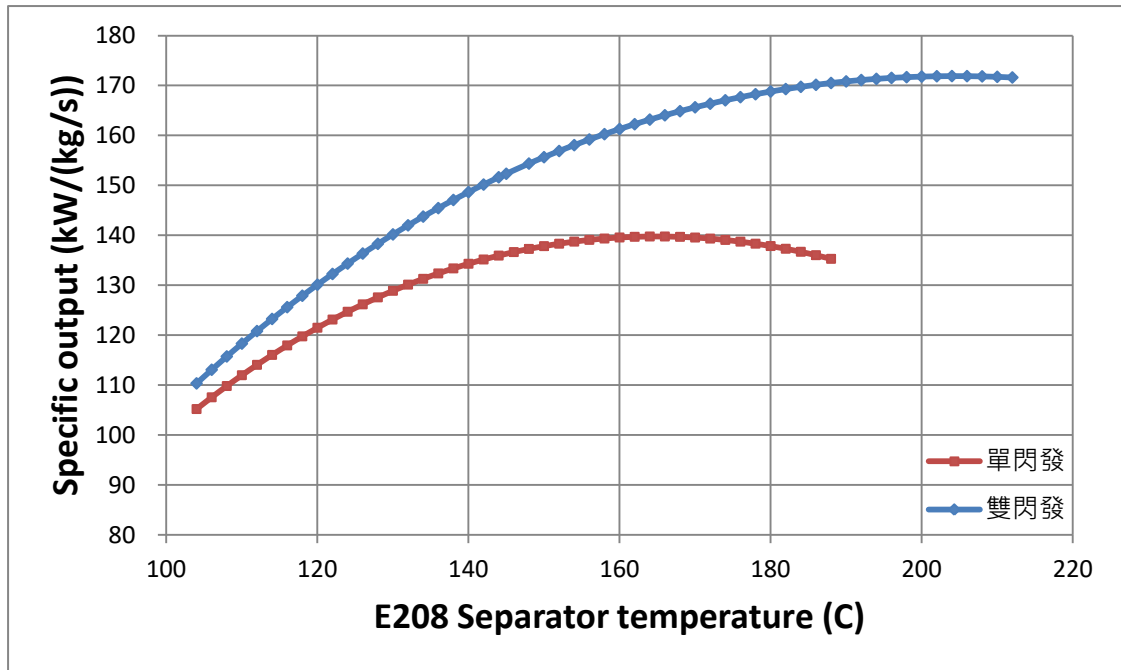


圖 5-13、E208 號井之比功率輸出圖(曾衡之，2014)。

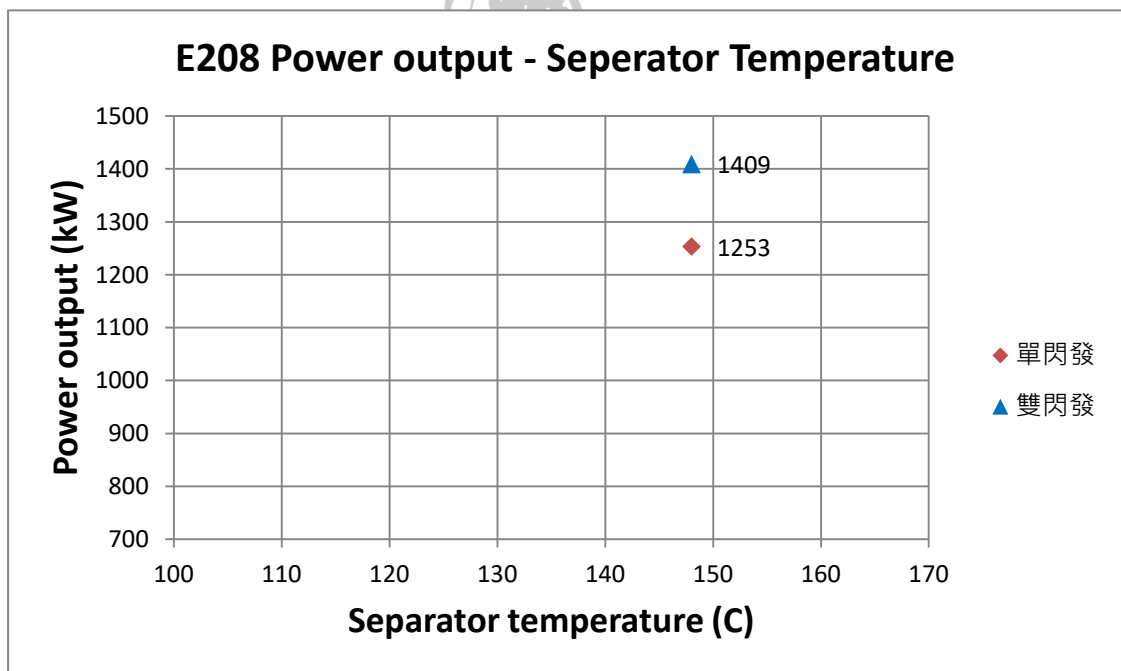


圖 5-14、E208 號井之單閃、雙閃電力輸出(曾衡之，2014)。

E103

閃發式

此井熱液溫度雖然相對低很多(170°C)，可是五指山層甚淺，易於鑽抵。過去資料顯示在 3.17 bar-a 的井口壓力下獲得 9.89 kg/s 的產量(圖 5-15)，將此壓力下的飽和溫度約 135°C 視為分離溫度，設定渦輪出口冷凝溫度 50°C，可繪製單閃發模組溫度-熱熵圖(T-S diagram) (圖 5-16)；而同樣條件下，雙閃發模組設定二次分離溫度 90°C 可得最佳化表現，其溫度-熱熵圖見(圖 5-16)。

E103 號井也沒有連續的井口壓力(分離壓力)與流量關係測試，模擬不同分離壓力下的比功率輸出見(圖 5-17)，由於熱液溫度遠遜於 E208 號井，單閃發或雙閃發機組表現也較差，在分離溫度(T_2)為 135°C 下，僅為 27.62 kW/(kg/s)和 44.49 kW/(kg/s)，利用效率分別為 22.36%和 36%。

再與該分離壓力下的井口流量 9.89 kg/s 相乘，即可得電力輸出 273 kW 和 440 kW(圖 5-18)，運用雙閃發式模組可使功率提升 61.04%。雖然明顯可以看到閃發式機組的電力輸出遠小於 E208 號井，不過 E103 號井的溫度可適用雙循環式機組，以下進行討論。

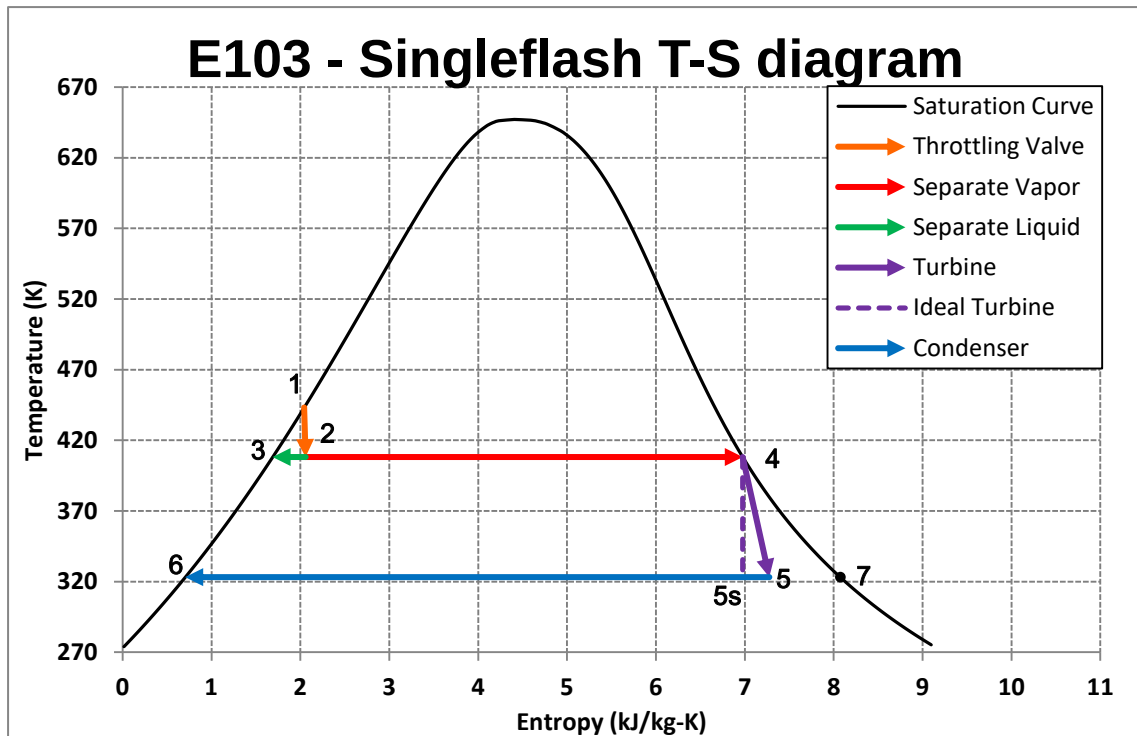


圖 5-15、E103 號井單閃機組 T-S diagram(曾衡之，2014)。

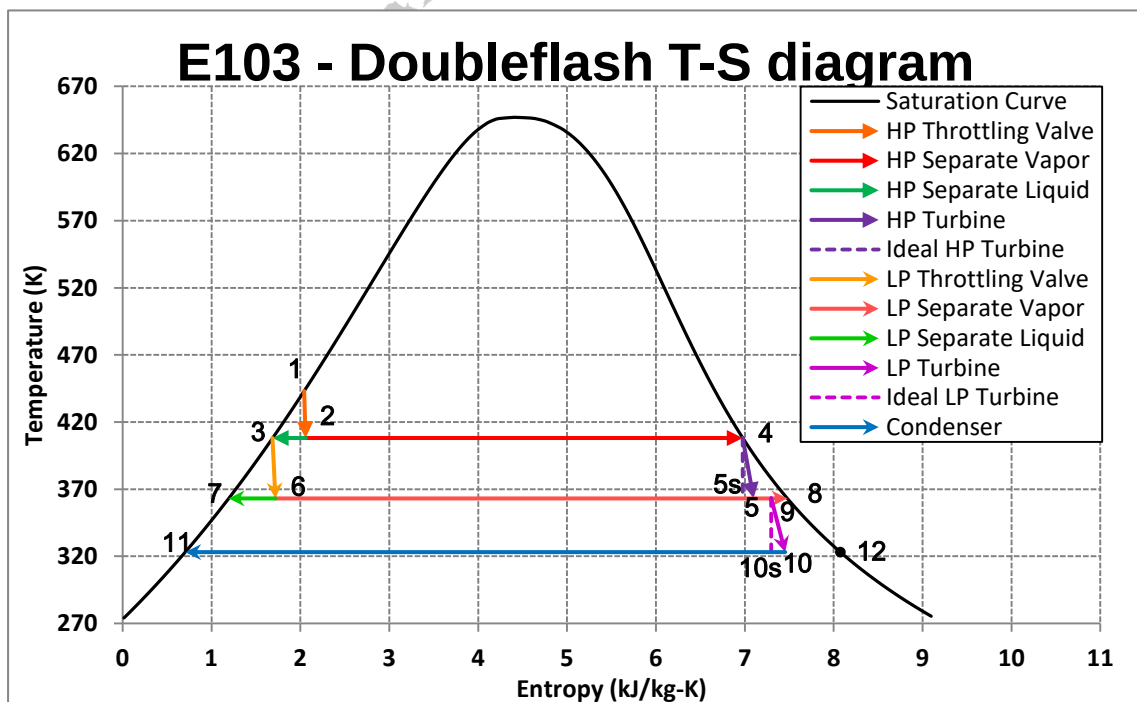


圖 5-16、E103 號井雙閃機組 T-S diagram(曾衡之，2014)。

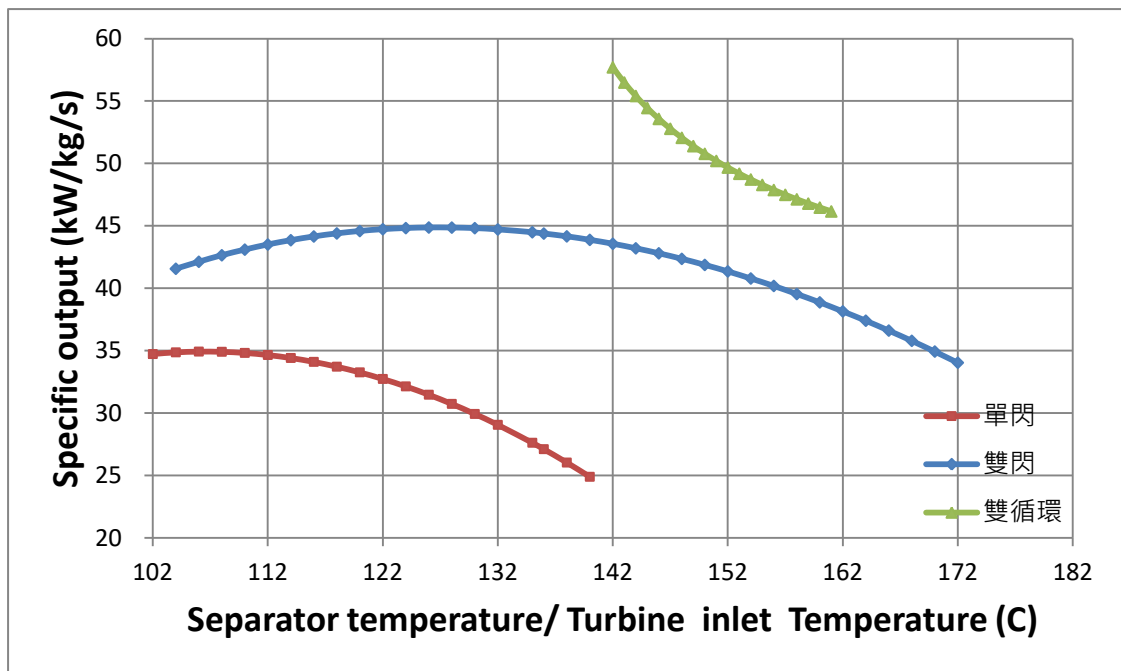


圖 5-17、E103 號井之比功率輸出圖(曾衡之，2014)。

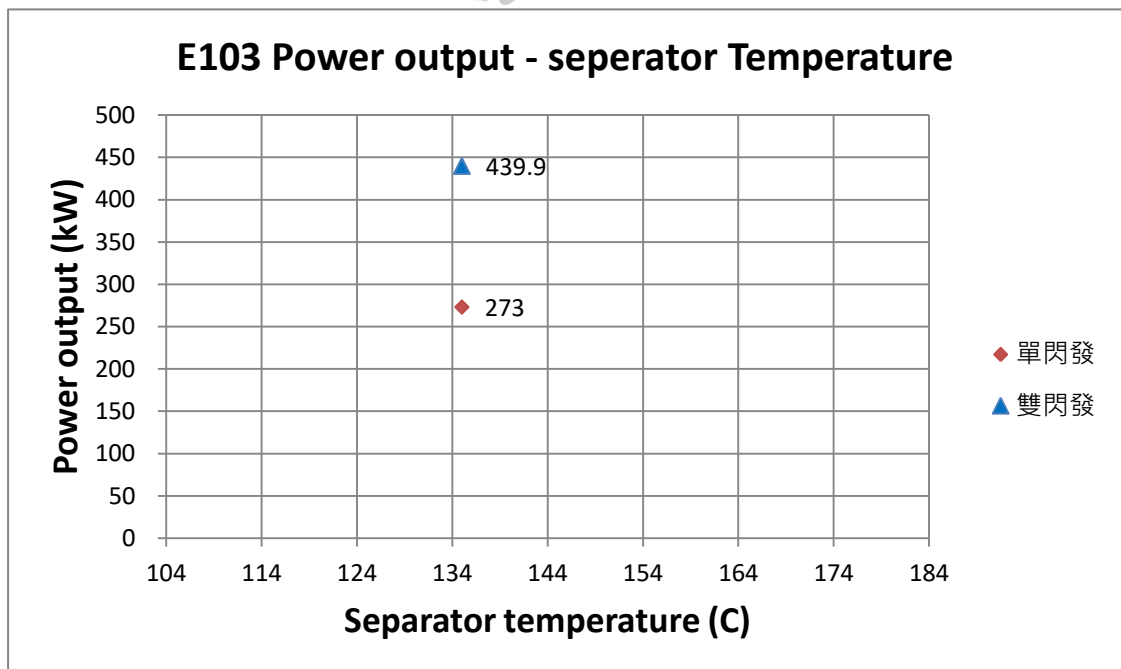


圖 5-18、E103 號井之單閃、雙閃電力輸出(曾衡之，2014)。

雙循環式

分析此發電方式分為儲集層模擬與熱力學兩部分，儲集層模擬參數設定如下

(表 5-8)：

表 5-8 E103 號井之儲集層模擬與井壁模擬參數。

總井數量/間距	單井
儲集層溫度	170 °C
儲集層壓力(靜水壓力)	67.2 bar@1000 m
非溶解氣體分壓	0
幫浦吸入壓力	3.75 bar
壓力安全邊際	0.68 bar
相對粗糙度	0.018 cm
套管直徑	6.5 inches
幫浦出口壓力	8.21 bar
幫浦效率	0.75
馬達效率	0.88
總壓縮係數(岩石與水)	0.000133 bar ⁻¹
流體性質(黏滯係數/密度/飽和壓)	170 °C 時之純水
儲集層流動係數	10 darcy-m
儲集層儲存係數	150 m
膚表因子	0

以現今鑽井技術而言，膚表因子要達負值並非難事(Sanyal, 2005)，但本研究基於模擬的不確定性仍取較保守的 0 值。流動係數也取熱液系統的下緣(Sanayal, 2007)。

儲集層模擬結果見(圖 5-19)，其顯示儲集層之生產力指數(PI, Productivity Index)隨時間逐漸衰減的情形。配合井下幫浦的模擬(圖 5-20)則顯示，如將幫浦設置深度由一開始的 650 m，逐年加深至極限深度 700 m，則在 20 年內可穩定維持 73 kg/s 的流量，相較其自流井狀況(9.89 kg/s)有顯著的提升。

有了流量資料後，接著就是模擬每單位流量的 170 °C 熱液去與異丁烷(isobutene)熱交換後，能產生多少電能。最佳化結果顯示在接近異丁烷的臨界壓力(3.647 MPa)下會有較佳的表現，因此本研究設定渦輪入口壓力(P_1)為 3.6 MPa，過熱蒸氣為 142 °C(T_1)，可繪製雙循環模組壓力-熱焓圖(P-h diagram) (圖 5-21)及溫度-熱熵圖(T-s diagram) (圖 5-22)，亦可觀察兩流體熱交換情形(圖 5-23)。

模擬不同過熱蒸氣溫度(T_1)下的比功率輸出見(圖 5-17)，可以發現雙循環機組有比閃發式機組優異許多的性能表現，在渦輪入口溫度(T_1)為 142 °C 下，每單位流量的異丁烷能產生的電能為 48.5 kW/(kg/s)，換算每單位熱液能產生的電能為 57.7 kW/(kg/s)。再與井下幫浦預期產量 73 kg/s 相乘，扣除井下幫浦的耗能 754 kW，即可得淨電力輸出 3,458 kW，兩循環之節點分析如下表 5-9 和表 5-10。

表 5-9 異丁烷之節點分析與比功率輸出。

W.F= isobutane : work & heat per kg/s of isobutane flowing in the cycle							
nt	np	P_1	T_1	P-cond.	T-cond.	h_1	s_1
%	%	MPa	C	MPa	C	kJ/kg	kJ/kg.K
85%	75%	3.6	142	0.6846	50	724.98	2.4496
h_{2s}	s_{2s}	h_2	h_g	s_g	h_3	s_3	T_5
kJ/kg	kJ/kg.K	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg.K	kJ/kg	kJ/kg.K	C
659.11	2.4496	668.99	621.45	2.3331	322.98	1.4095	134.01
h_4	h_{4s}	h_5	w-Turbine	w-Pump	w-net	q-in	ther.eff.
kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kW/(kg/s)	kW/(kg/s)	kW/(kg/s)	kW/(kg/s)	%
330.47	328.59	614.11	55.99	7.49	48.50	394.51	12.29%

表 5-10 熱液之節點分析與淨電力輸出

Heat source :		Water		
P_A	T_A	h_A	s_A	net ouput
MPa	C	kJ/kg	kJ/kg.K	kW
1.3	170	719.36	2.0410	3458.0
T_o	h_o	S_o	d-pump	mass flow rate
C	kJ/kg	kJ/kg.K	kW	kg/s
25	104.83	0.3672	754.1	73.00
Pinch poi.	T_C	T_D	h_D	utili. Effi.
C	C	C	kJ/kg	%
5	139.0	59.7	250.03	49.96%

總結上述分析獲得以下結論：

- (1)如未來開發選擇較靠近熱源處，則以 E208 號井為例，利用單閃發式和雙閃發式機組預期能產生 1,253 kW 和 1,409 kW 的電力輸出。
- (2)如未來開發選擇遠離熱源但五指山層甚淺處，則以 E103 號井為例，利用單閃發式和雙閃發式機組僅能產生 273 kW 和 440 kW 的電力輸出；但是運用井下幫浦與雙循環機組，不僅有更好的發電效率、也能大幅提升井口流量，使得淨電力輸出預期有 3,458 kW 的優異結果。

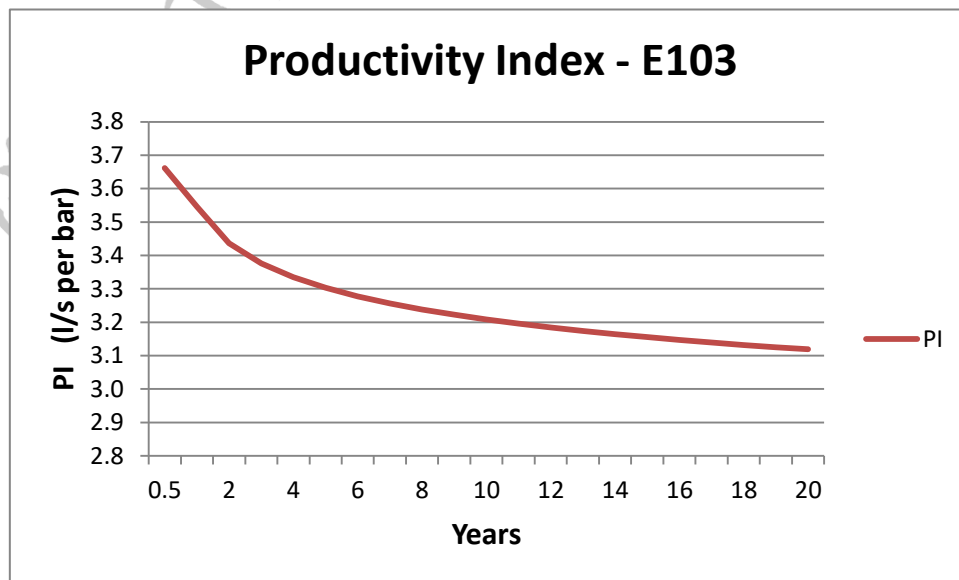


圖 5-19、E103 號井之儲集層生產力指數衰減曲線(曾衡之，2014)。

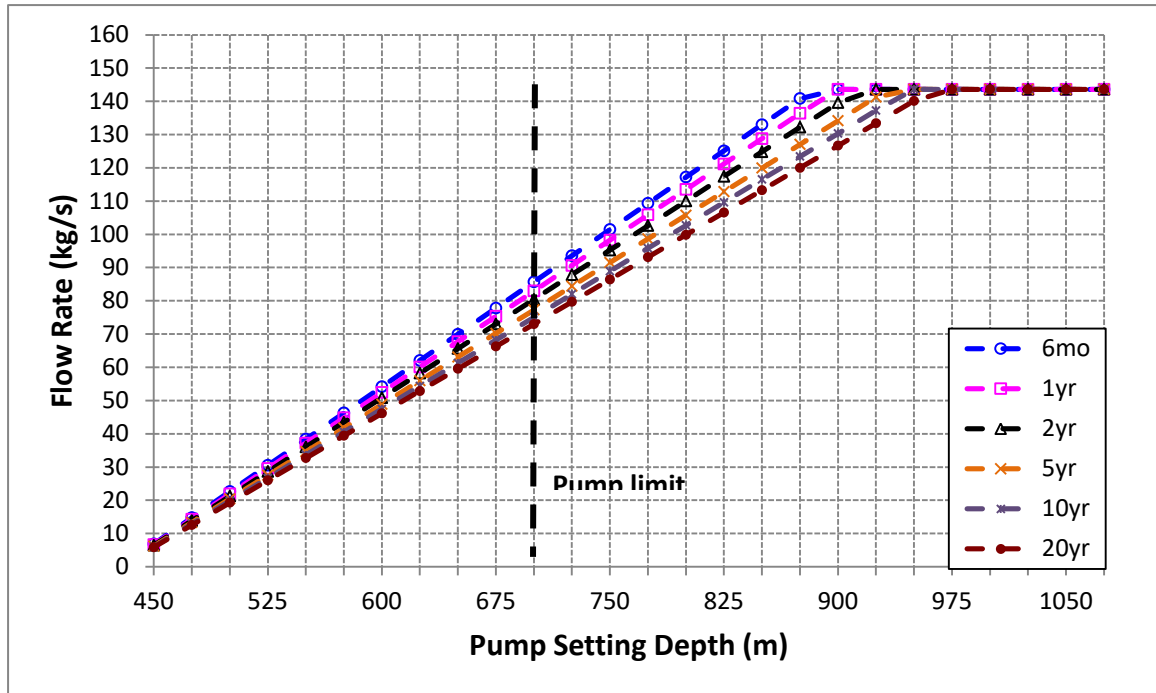


圖 5-20、不同時間與幫浦深度下的預期流量曲線(曾衡之，2014)。

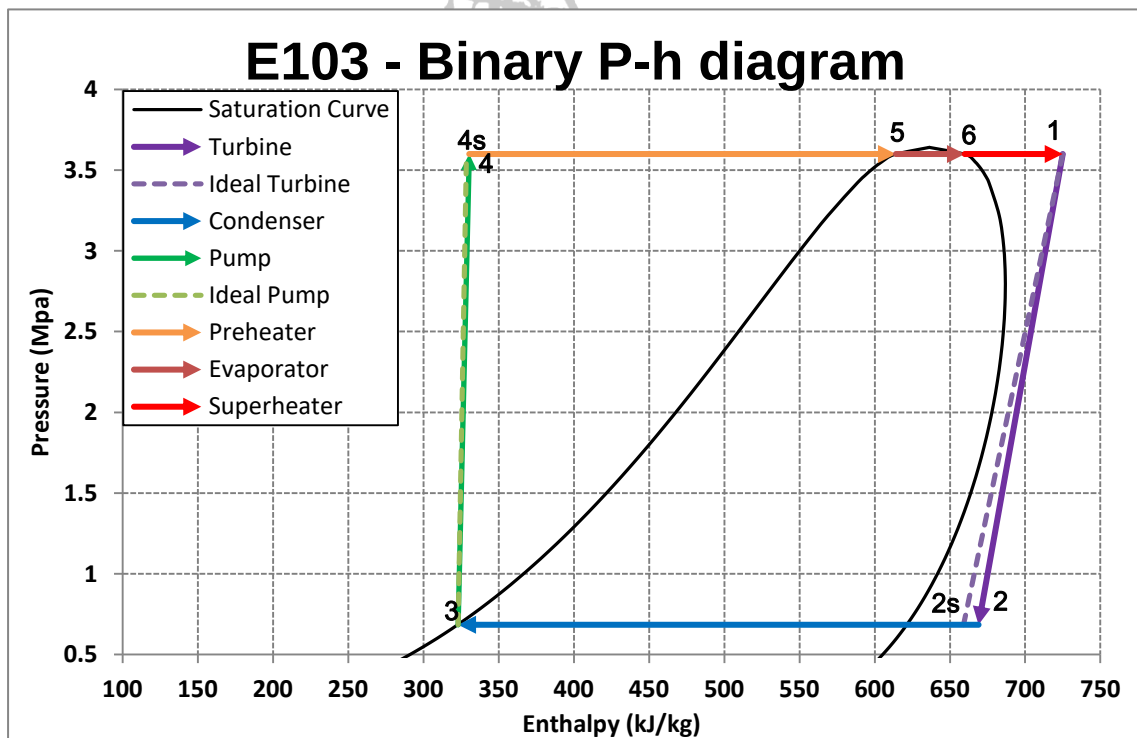


圖 5-21、E103 號井雙循環機組 P-h diagram(曾衡之，2014)。

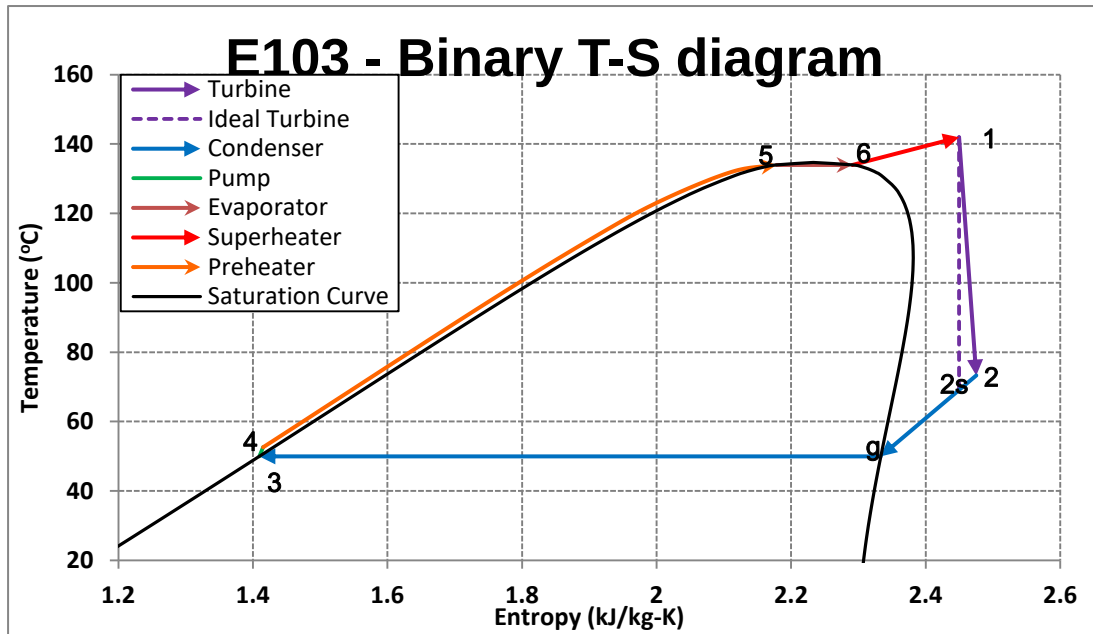


圖 5-22、E103 號井雙循環機組 T-S diagram(曾衡之，2014)。

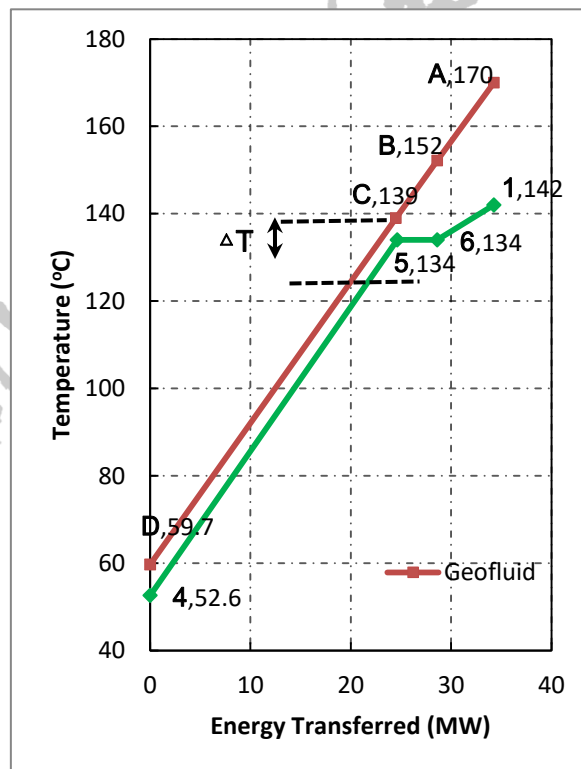


圖 5-23、E103 號井雙循環機組之水與異丁烷熱交換線。兩者溫差最小處發生在預熱器(preheater)中，即水之點 C 與異丁烷之點 5 間，此溫差稱為夾點溫度(ΔT_p , pinch point temperature)，設定為攝氏 5 度。熱液共傳輸 34.3 MW

的熱功率(曾衡之，2014)。

第六章、陽明山國家公園內地熱開發優先順序區

1. 簡介

臺灣地區位於歐亞板塊與菲律賓海板塊相互碰撞的板塊邊緣，處於環太平洋島弧帶，火山與地震活動頻繁，從務實的角度而言，地質災害的相關研究是不可或缺的，由了解地質環境開始，到監控變異的大小與預防災害的發生，都是至關重要的。在臺灣地區的地熱分布來源主要可分為兩大類：一為傳統的火山地區因火山岩漿活動所產生的熱源對鄰近圍岩與其中所含之液體加熱而成，特點是溫度高，範圍集中；一為山脈變質岩地區因快速造山運動將原先深埋地底的岩層中所含的熱在尚未完全散失之前就已抬升接近地表，使得在抬升中被擠壓變質的岩層，特點是溫度偏中低溫，分布範圍廣。而大屯火山區的地熱來源明顯的是受火山岩漿活動的影響。

對於大屯火山群的研究，不論是在岩性的分布，噴發的年代，或地形地貌上的分類等，都已行之有年(圖 6-1)。根據火山熔岩流及火山碎屑岩的年代差異與位置，可分為六個火山亞群，均覆蓋在出露的第三紀沉積岩上，包含五指山層、木山層、大寮層、石底層，分布的位置大致介於兩條主要斷層，山腳斷層和崁腳斷層之間。金山斷層和崁腳斷層為第三紀晚期或第四紀早期，東北西南走向，往東南方傾斜的逆斷層，而山腳斷層則應該是由弧後張裂帶的影響而沿著金山斷層斷面誘發的正斷層系統。

另外，由於國家公園內各類土地使用規範的劃分，對於使用研究儀器的種類及架設都有不同的限制。為了不違反既定的規範，在計畫階段即將此限制事先加入考量，不但能避免日後執行上不必要的困擾，也可降低對於原本設計地監測點

位的臨時更動。其次，國家公園內地理俊秀，地形起伏多變，有特殊的地質景觀，也孕育了多元的自然生態，但地表也因特殊的地理地質環境，造成風化作用的盛行，增加了保育的困難。因此在嘗試規劃有限度的地熱開發計畫時，不僅為了成本因素，更是為了環境保育的努力，必須加入地表環境地質敏感度的考量。此一同時著眼於人文環境法規、建築施工安全、自然災害保育上的多重因子可行性的研究，足以加強整體計畫的完整性與執行效率，減少對於有限資源的浪費。



圖 6-1、大屯火山區噴氣孔地熱區位置圖。地熱徵兆出露點：1.新北投（地熱谷），2.大磺嘴（硫磺谷、龍鳳谷、紗帽谷），3.大莊（磺溪嶺），4.陽明山（中山樓），5.竹子湖（冷水坑），6.小油坑，7.馬槽—七谷，8.大油坑，9.八煙（三重橋），10.死磺子坪，11.煥子坪，12.金山，13.大埔（參考國立自然科學博物館網頁）。

傳統的有利探勘標的法多半使用存在於地質環境上的不同因子作為要素的選項，但臺灣因地狹人稠，土地的使用取得不易，特別在國家公園的範圍內更是牽涉到法規的問題。為了要使分析研究更具有務實的價值，對相關的產業發展更

有實際效益，本研究特別加入人文因子的選項，與地質條件一併探討，尋求最佳探勘地點。陳彥如在 2017 年的碩士論文中，曾使用 PFA 法則來探討大屯火山群區域的地熱潛能分布。本研究將其成果作為地質環境因子的選項，另採用陽明山國家公園的土地使用分區規範，山崩與地滑地質敏感區，及坡地與一般環境地質災害資料等，作為人文因子的選項，相互疊加後，由地質與人文兩大選項的混和結果來討論在陽明山國家公園區域內最適宜作為探測火山地熱活動監測的點位位置分布，並提出本文認為最適宜作為地熱開發的三處首選，以供日後參考。

2. 數位分析圖層類別

2.1 大屯火山群地熱潛能分析（地質條件）

地熱資源的形成，在地質環境上的要素可歸納為熱源，裂隙，與流體三大項。首先要有熱源可以加熱周圍的物質，要有可含熱的流體作為攜帶熱量的媒介，最後要有如斷層帶等產生張裂環境的條件，一來流體可以從外界不斷補充進到儲集庫，得到加熱的機會，二來也可以上升到距離地表較近的暫存區，成為探勘開發計畫的標的點。

因為臺灣的亞熱帶氣候提供了充沛的降雨，充足的地表水往下滲流成為地下水，不會造成顯著的地區性差異分布，流體這個要素可以忽略不予考量。經過蒐集彙整前人資料後，具有適當並可使用的數據，屬於熱源部分的有地溫梯度，地表溫泉溫度，氦同位素比值，熱水換質帶及空中磁測所判釋出的火成岩體分布資料；屬於裂隙部分的可用資料有山腳斷層位置，微斷層分布，及遙測影像中的線性構造資料。

根據上述可用之地質相關數據，輸入 ArcGIS 軟體平台，每種數據製作一圖層，並採用網格法將研究區域劃分為大小相等的單位網格，作為最小區域單位

(200 公尺見方)。使用適當的運算法則將點或線的數據轉換成涵蓋研究區域的面資料，每個圖層依據各個網格所代表的地熱潛能以漸變彩色圖顯示 (圖 6-2)。本研究將圖 6-2 加以修改，數位化後由色彩判釋法切割成 4 個等級(綠，淺綠，橘，及紅)，分別給予 1 至 4 的數值 (代表地熱潛能依次漸強)，套入 50 公尺見方的網格圖，用 IDW 還原成圖層的結果呈現 (圖 6-3)。

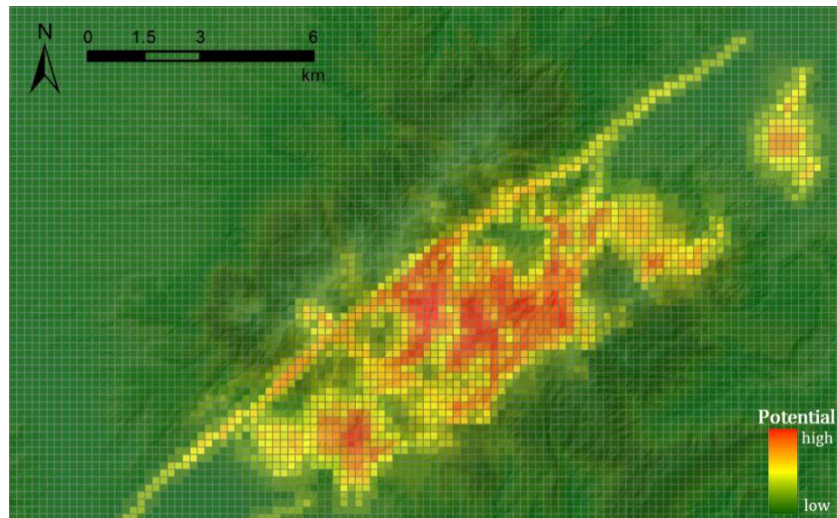


圖 6-2、熱源及裂隙潛能圖層疊加結果。(陳彥如，2017)。

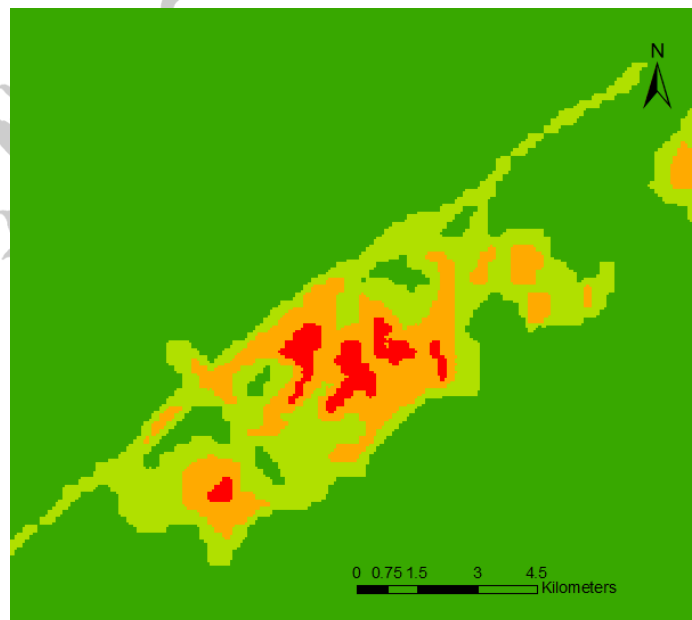


圖 6-3、經色彩判釋後重新數位成 4 級化之地熱潛能圖。

紅色區域為地熱潛能高區，有硫磺谷，小油坑，馬槽，冷水坑，大油坑等著名點位。

2.2 陽明山國家公園土地分區（人文環境保育規範）

國家公園法於民國 99 年修正，第六條，國家公園的選定基準乃因為該地區具有(一)特殊景觀，或重要生態系統、生物多樣性棲地，足以代表國家自然遺產者；(二)重要之文化資產及史蹟，其自然及人文環境富有文化教育意義，足以培育國民情操，需由國家長期保存者；(三)天然育樂資源，風貌特異，足以陶冶國民性情，供遊憩觀賞者。第八條，地區畫分用詞，包含(六)一般管制區：指國家公園區域內不屬於其他任何分區之土地及水域，包括既有小村落，並准許原土地、水域利用型態之地區；(七)遊憩區：指適合各種野外育樂活動，並准許興建適當育樂設施及有限度資源利用行為之地區；(八)史蹟保存區：指為保存重要歷史建築、紀念地、聚落、古蹟、遺址、文化景觀、古物而劃定及原住民族認定為祖墳地、祭祀地、發源地、舊社地、歷史遺跡、古蹟等祖傳地，並依其生活文化慣俗進行管制之地區；(九)特別景觀區：指無法以人力再造之特殊自然地理景觀，而嚴格限制開發行為之地區；(十)生態保護區：指為保存生物多樣性或供研究生態而應嚴格保護之天然生物社會及其生育環境之地區。

在不同的區域類別中，以生態保護區(淺綠)、特別景觀區(深綠)及史蹟保存區(淡棕)的規範較為嚴謹，一般管制區(黃色)及遊憩區(紅色)的規範則較為彈性。生態保護區大致座落在國家公園中間的地形高處，有兩大塊，在北側的大屯山、小觀音山到竹子山一線和東側的磺嘴山、大尖後山地區；外圍多屬於特別景觀區；再外圍為一般管制區，多半位於陽明山國家公園周邊的外圍部分及河谷民宅聚集的所在；史蹟保存區僅限於一處位於擎天崗以北，陽金公路以南，約 500 公尺見

方的區塊，以金包里大道為主幹，為以前運魚貨、硫磺等的商業通道；遊憩區則以小範圍的區塊散布在各處(圖 6-4)。

依據此法，評估在陽明山國家公園內從事研究計畫時，根據土地區分規範，允許使用該區土地的可行性程度多寡，作為人文選項的探討因子。將國家公園內依土地使用法則的嚴謹程度，區分為兩個等級。在 50 公尺見方的網格圖上，將史蹟保存區，生態保護區，特別景觀區等三個土地使用法規較嚴謹的區域，賦予分數值 0，代表不適合開發區域；遊憩區和一般管制區，等兩個土地使用法規較寬鬆的區域，賦予分數值為 4，代表適合開發區域。採用 0 和 4 乃因正規化的方式，可和地質環境因子圖層相互加疊。

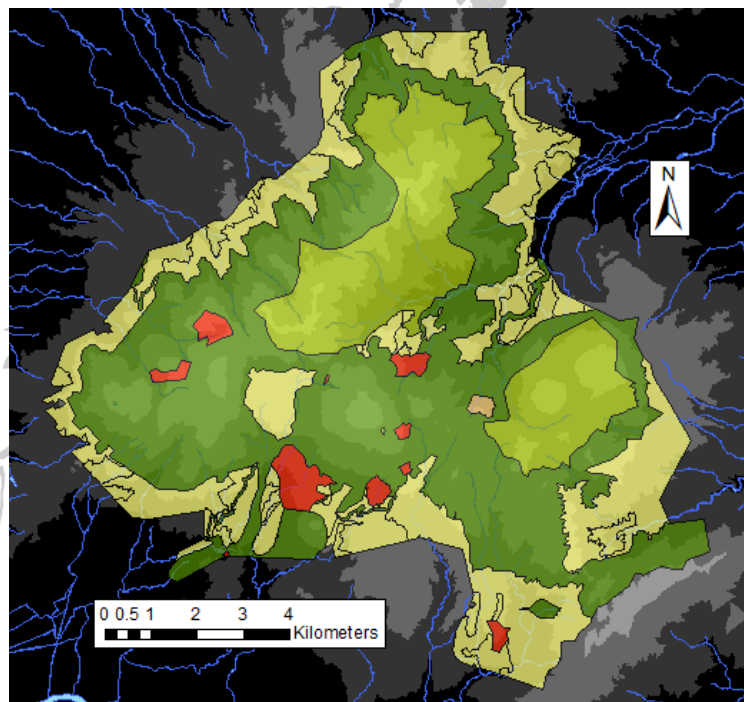


圖 6-4、陽明山國家公園內現有土地利用型態及資源特性之分區圖

括弧內數字為權重值。淺黃(4)=一般管制區，紅(4)=遊憩區，深綠(0)=特別景觀區，淺綠(0)=生態保護區，淺棕(0)=史蹟保存區。背景為灰階等高地形圖。

2.3 環境地質災害潛勢（人文環境災害敏感）

由於地表地形的起伏，氣候降雨，自然地震及人為工程的影響，經過常年的物理化學風化作用，自然會有發生地質災害的潛在可能性，雖然陽明山國家公園的地質材料主要為質地較堅硬地安山岩質火山岩，但是由特殊外營力造成的事件，諸如山崩，落石，土石流，軟弱岩層/不連續面的滑動等地質災害仍時有所聞。例如在民國 89/90 年連續發生颱風帶來豪雨級短期集中的豐沛雨量，就對園區造成不少災害。這一類潛在性的地表破壞也會對於地熱開發計畫造成影響，從鑽井位置的選擇，廠址的設置，管線的佈置與埋設，以及日後的維護保養等，都會產生不同的成本考量。也特別因為此開發計畫位處於國家公園範圍，對於可能的未來環境破壞更是敏感，在計畫階段就應盡力做好防範，預防日後可避免的無價環境傷害與有價財物損失。

2.4 山崩與地滑地質敏感區

首先，經濟部中央地質調查所根據在民國 100 年通過之地質法第 5 條，逐步劃定全臺灣的地質敏感區。地質敏感區的劃分在此定義為(1)有山崩與地滑的歷史發生事實以及(2)有山崩與地滑的潛在發生可能（具有順向坡的條件）。本文參考在 104 年公布的”臺北市山崩與地滑地質敏感區”數位圖幅，涵蓋本文研究區域範圍中最新的地質災害相關資訊，以作為影響陽明山國家公園內地熱開發可行性分析的一項重要人文環境指標，分析地表自然地質災害的潛能分布，標示其分布範圍，使得在規劃設計地熱開發地點時可以避免與之重疊（圖 6-5）。

由圖可知，敏感區的畫分多半坐落在坡度較陡或是地熱地表徵兆明顯的區域，由於高溫影響風化作用的加速進行，造成地表岩石結構的弱化，在豪大雨的不佳

天候條件下，極易於受到破壞。敏感區的劃分多座落於園區中央及西側和南側，北側和東側較少。

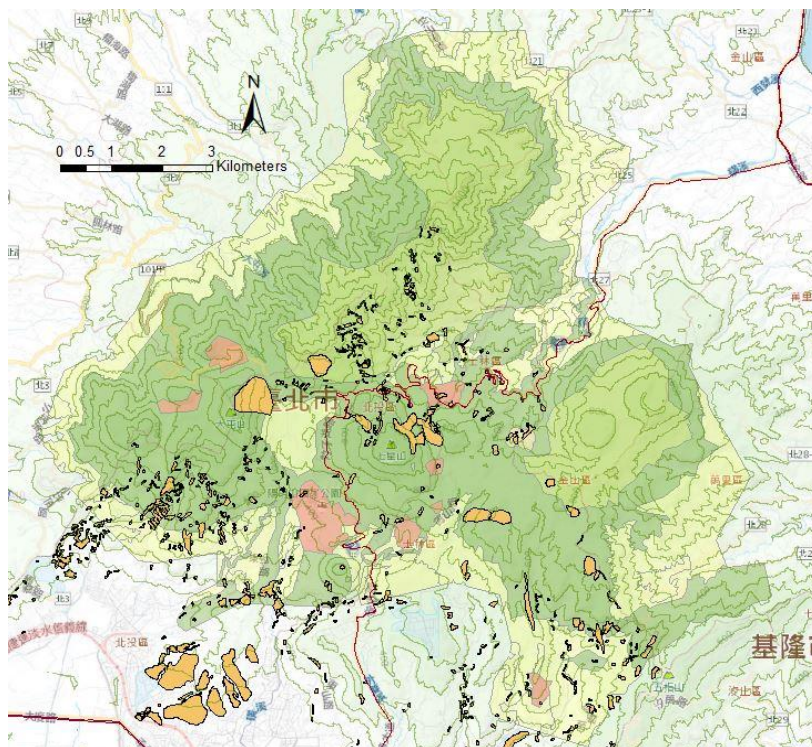


圖 6-5、陽明山國家公園內山崩與地滑地質敏感區

陽明山國家公園(黑色邊界)內山崩與地滑地質敏感區(土黃色區塊)，紅色線條為陽金公路。淡色底圖為國家公園土地利用分區，背景為綠色灰階為 100 公尺等高地形圖。較大塊的區域在大屯山東坡；竹子湖以北之小觀音山南麓；七星山西北側小油坑；七星山與七股山之間山谷至馬槽橋的磺溪上游；竹嵩山東西兩側坡地；硫磺谷一帶。

2.5 環境地質災害資料

早在將近 20 年前，因民國 87 年 921 大地震後，受劇烈震動後的岩盤層面在遭受颱風豪雨的劇烈環境破壞下易於弱化致災，民國 92 年臺大陳宏宇教授等在”建置陽明山國家公園地質災害資料庫”的研究中就依據各種的地質災害指標，針對陽明山國家公園進行詳細的調查紀錄，根據綜合分析研究提出可能的預防與

偵測辦法，並指出當時在國家公園區內屬於地質敏感度較高的區域多半位於陽投公路沿線的山坡，園區南側沉積岩/火成岩的交界處，及馬槽附近溪谷，較易發生山崩、土石流、地層滑動等地質災害。其中的環境地質敏感分析評估乃依據各類地質災害、地形坡度、土壤厚度、不連續面分布、地質構造延伸，和地質材料強度等不同地質條件因子，使用套疊的方式加以分析，劃分成有五個不同等級的範圍，最後依各類強度綜合評估後的區域分布製成數位圖層（圖 6-6）。

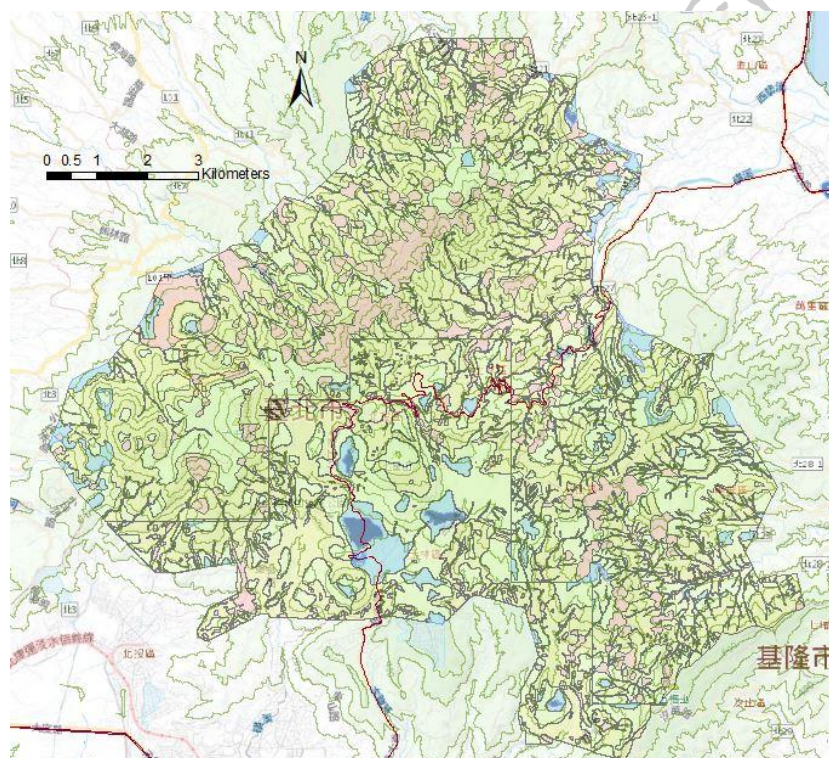


圖 6-6、陽明山國家公園內地質災害敏感度分析結果

紅色線條為陽金公路。背景綠色灰階為 100 公尺等高地形圖。地質災害敏感度分五級，粉紅為最高，淺黃為高，淺綠為中，海藍為低，深藍為最低。

此圖層中所顯示的地質災害敏感度，由粉紅色（敏感度：最高），依序下降，淺黃色（敏感度：高），淺綠色（敏感度：中），海藍色（敏感度：低），和深藍色（敏感度：最低），其中藍色的兩級屬於地質災害敏感度相對穩定的區域，在適當的規劃設計之下，是屬於可以有限度的開發地區，適宜做為地熱開發廠址區域，作為地熱開發可行性評估分析的一項要素。由圖中可見，屬於敏感度較低

兩級（海藍與深藍色部分）的分布，在七星山南麓有數個較大的區塊多半位在陽金公路沿線較為平坦的地區，還有不少零星散布於國家公園的周邊。另外七星山北麓的陽金公路沿線也有幾個局部小區域也屬於敏感度低的地點，包括位在高地熱潛能指標以及較低土地管制的遊憩區的馬槽地區。

3. 圖層加疊綜合分析

3.1 結合地熱潛能分布與陽明山國家公園土地使用分區兩大圖示

大屯火山群地熱潛能分布圖與陽明山國家公園土地使用分區圖均涵蓋臺灣北部臺北盆地以北的地區，範圍雖然不盡相同，但有一大塊相互重疊的區域，也就是位於陽明山國家公園內部的大屯山與磺嘴山(山腳斷層與崁腳斷層)之間的半地塹。此一區域位於國家公園的內部並且具有許多象徵著地熱活動的地表徵兆，諸如溫泉，噴氣孔，硫磺氣孔，還有因熱水換質作用產生的地表岩石風化現象。

底圖套用由 20mLiDAR 圖像產製的 200 公尺間距六層灰階等高線圖，最淺的白色區域為 1,000~1200 公尺高程，最深的黑色區域為 200 公尺以下。以便展現地形起伏與重要山頭溪谷等明顯地標。

本研究區域乃以陽明山國家公園的區域範疇為準，視為人文因子，以土地規範是否利於探勘活動來區分的方式為指標；而研究內容則以大屯火山群地熱潛能分布為重，作為地質指標，兩者採取 1：1 的疊加方式。其中地熱潛能圖的不確定性較高，解析度較差，而國家公園土地使用分區的界線較為準確，暫以二分法分隔為適合與不適合兩等級。因此在疊加時，每一網格中，地熱潛能的可能值為 0~4(漸強)，土地使用分區的可能值為 0 或 4，直接相加後的每一網格的可能值為

0/4/5/6/7/8，分五類(0/4 合併為一類)後由彩色圖層(藍-綠-黃-橘-紅)表示，結果如圖 6-7。

結果與討論-1：

使用有利探勘標的分析法將地熱潛能與土地使用限制兩大因子的空間分布以統計定量的方式及適當的權重加疊整合後，用 200 公尺等高線間隔作為底圖的最後成像顯示於圖 6-7，加上重要山頭名稱及著名點位標示，以便由地形與明顯地標作為地理位置判釋的參考。如圖 6-7 所標示，有 1.大屯山、2.小觀音山、3.竹子山、4.七星山、5.紗帽山、6.大尖後山、7.磺嘴山等。另有一些相關景點也標示在圖 6-7 中，以方便圖中某區塊的相對位置，如 8.竹子湖、9.小油坑、10. 大油坑等。

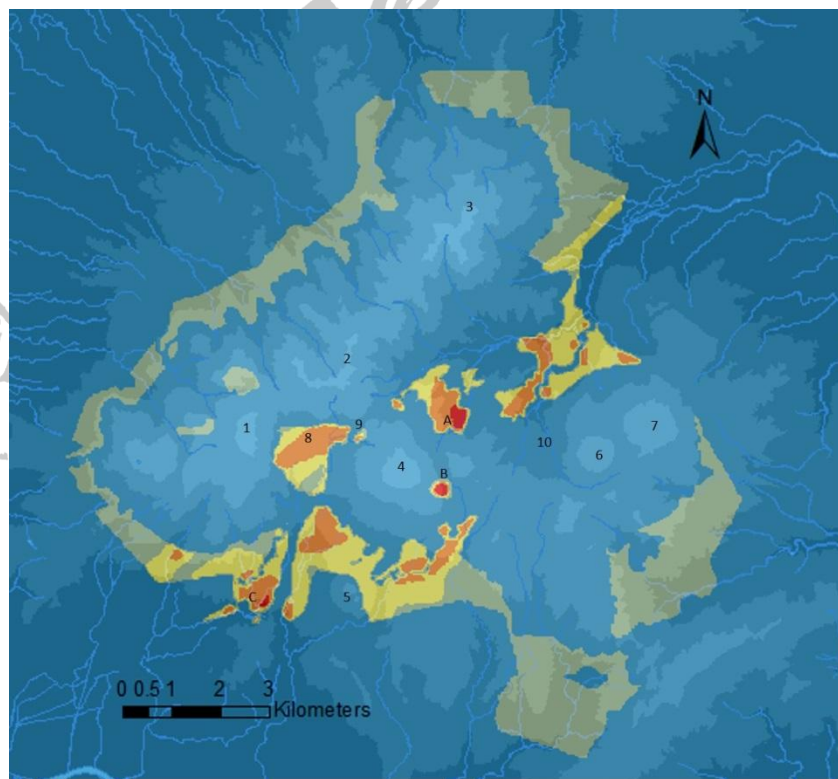


圖 6-7、陽明山國家公園範圍內的地熱開發可行性分布圖

陽明山國家公園範圍內的地熱開發可行性分布圖顯示具有地熱活動潛能且適宜作鑽井分析或進一步開發工作可行性的分布。灰色外沿為陽明山國家公園範圍。紅色區域最為適合進一步鑽井分析，其次為橘色區域，再其次為黃色區域。1.大屯山. 2.小觀音山. 3.竹子山. 4.七星山. 5.紗帽山. 6.大尖後山. 7.磺嘴山. 8.竹子湖. 9.小油坑. 10.大油坑。三處在國家公園內最適宜地熱潛能開發的地區分別為 A.馬槽、B.冷水坑、C.硫磺谷等。

經由簡易的有利探勘標的分析法所獲得的最終圖像，顯示了作為進一步研究火山活動所需的鑽井或監控儀器架設考量的地區可行性分布狀況。由圖所示，紅色區域為最適宜的地區，其次為橘色部分，再其次為淺黃色區塊，最後為淡綠與淡藍部分。約略呈東北西南走向的紅橘黃綠色帶之外側即為地熱潛能數據以外的區域，多呈現藍色灰階的地形底圖，圖中央大致沿等高線 600 公尺以上的部分基本上即為陽明山國家公園的範圍。

眾所周知的馬槽、冷水坑、硫磺谷等三處點位，在本研究結果所呈現的圖 6-7 中顯示為紅色區塊，是為在人文與地質雙重考量下所得的最適宜開發調查地熱的地點。這三點不僅原本就具有較高的地熱潛能，並且位於陽明山國家公園內的遊憩區或一般管制區，屬於較適合做進一步開發調查的地點，有此結果並不令人意外。由此圖可知，使用有利探勘標的法可以將所需要考慮的影響因子，特別是有足夠有效數據的人文因子，融入原本地質層面的潛在分布，而得到一全新角度的判讀，實為一有效的分析工具。

結果與討論-2：

根據地調所溫泉露頭資源網及陳彥如(2017)的資料顯示，大屯火山區的平均流體酸鹼值約為 2.5~3.5，A 點的馬槽地區與 B 點的冷水坑流體酸鹼值約為 5~6，偏於弱酸性。C 點的硫磺谷流體酸鹼值落在 1.5~3，偏酸性。本研究區域的酸性流體富含具腐蝕性的氯離子與硫酸根，對金屬的腐蝕性強，大大增加設備材料成

本，而偏中性的流體可減低鑽井管路材質的損耗與維護成本，也漸低開發與營運風險。由此而言，三點中則以 A 點馬槽地區和 B 點冷水坑區為較適合的選項。

若從發展潛力與腹地而言，依據地熱潛能和國家公園土地分區所製作的適宜地熱開發分布圖(圖 6-7)來看，針對適宜性最佳且範圍較廣的 A，用一萬五千分之一的比例尺聚焦至馬槽地區(圖 6-8)，紅色的彎曲線條是作為位置參考用的省道(陽金公路)。深紅色的部分基本上就是馬槽地區，不僅位於高地熱潛能區及法規最有可能鬆綁的遊憩區，在地勢上也屬於相對平坦的區域，省 2 甲的陽金公路、馬槽橋和縣道級的竹子湖路貫穿大屯火山區，加上緊鄰於左側的橘色區塊(適宜性次佳的地段)，共有約 1 平方公里的完整範圍可供考量，極有利於地熱開發的規劃。為陽明山國家公園內在未來地熱開發計畫中，可行性最高的地點。

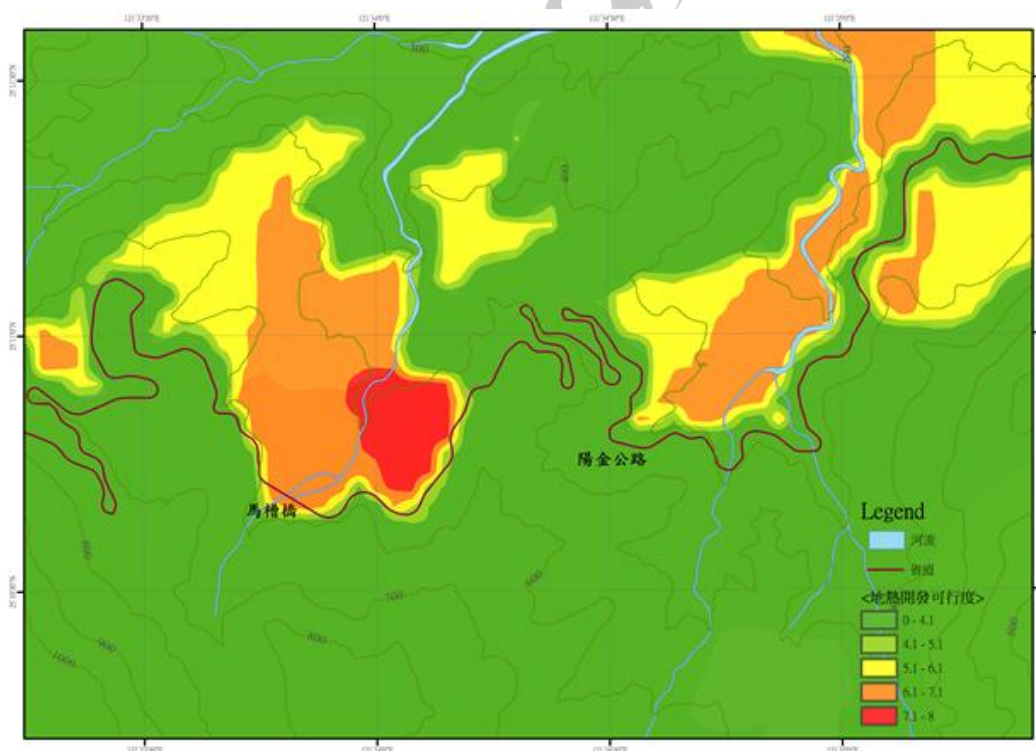


圖 6-8、陽明山國家公園範圍內馬槽地區具有地熱活動潛能且適宜鑽井分析之可行性分布圖。依地熱開發可行度(地熱潛能+土地分區相等權重加成)而言，紅色區域最為適合進一步鑽井分析，其次為橘色區域，再其次為黃色區域。。

為了能更詳細的分析陽明山國家公園內的地熱開發可行性分布圖(圖 6-7)，本研究把區域拉近到七星山的東麓及北麓附近的一片具有高地熱潛能的地區。使用在有利探勘標的法將地熱與人文兩大因子合併加權處理之前，直接把地熱潛能分布圖及土地分區圖用半透明的方式來直接加疊，來比較其分布概況，如下圖(圖 6-9)所示。

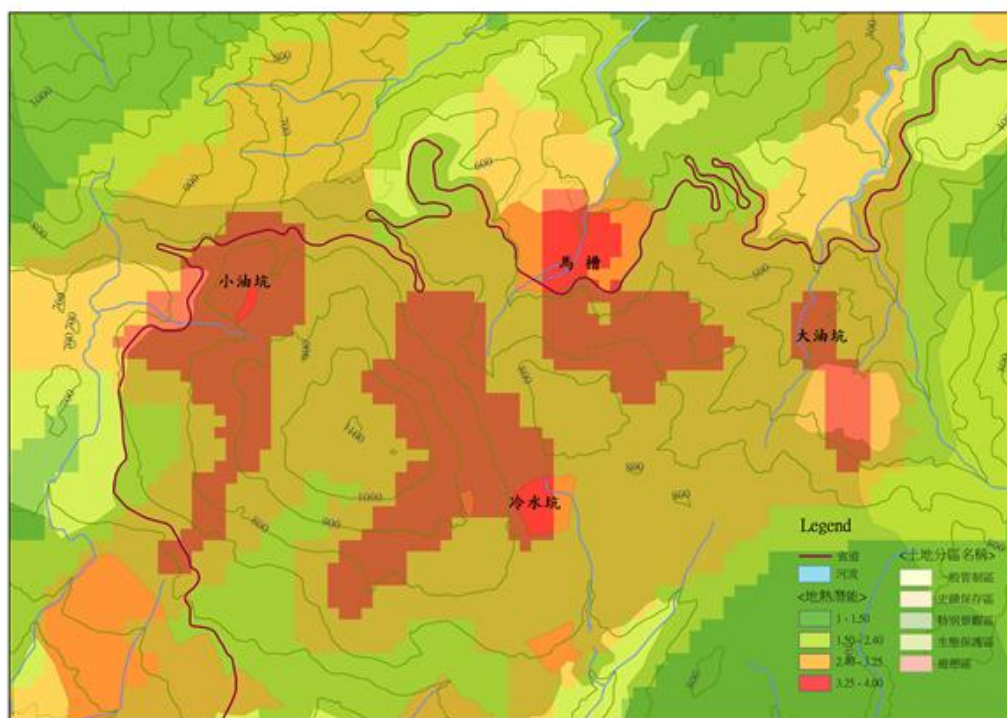


圖 6-9、陽明山國家公園內七星山及北麓的地熱潛能與土地分區兩半透明圖層直接加疊分析圖。位於地熱潛能高區的馬槽，大油坑，冷水坑，及小油坑四個地區如圖所示。藍色線為河流；紅色線為省道(陽金公路)。單依地熱潛能而言，紅色區域最為適合近一步鑽井分析，其次為橘色區域，再其次為黃色區域。

其中顯示小方塊菱角，解析度較低，暗紅色系的為地熱潛能圖層(由紅到黃表示地熱潛能由高到低)；解析度較佳，色調較鮮明，顯示邊框，紅黃綠色系的為土地分區圖層(由紅到綠表示法規嚴謹度降低)；底圖則為淡綠色系的等高線圖。從圖中可以清楚看見四個暗紅色區塊，皆為地熱潛能的高區。A 點為馬槽橋遊憩區的位置所在，位於圖中央偏東的地熱高區以及鮮紅色的馬槽溫泉遊憩區，在前

面已經說明此區即為最具潛力的地熱開發區。B 點為在最東邊的地熱高區，也就是大油坑，因為緊鄰南邊的金包里古道的史蹟保存區，不適宜做其他目的的土地利用。另外，C 點也位於中央偏西(七星山東麓)的地熱高區，也是冷水坑遊憩區，可惜遊憩區範圍較小，但仍可作為下一階段的地熱開發目標。至於 D 點小油坑的位置，屬於遊憩區的範圍狹小，四周均屬特別景觀區，不適宜做地熱開發規劃。

在陽明山國家公園的西南角，在硫磺谷磺港溪/龍鳳谷磺溪一帶，另有一地熱潛能高區，磺港溪下游外接著名的北投溫泉區。這一帶也分布著一般管制區和零星的遊憩區，頗適合地熱開發的規劃。從較大比例尺的地熱開發可行性分析圖(圖 6-10)中可見，1 為紗帽山，2 為文化大學，3 為行義路上惇敘高工，A 為硫磺谷，B 為龍鳳谷。類似的區域範圍亦可從圖 6-11 的半透明地熱潛能圖層及土地分區圖層加疊中一窺端倪。

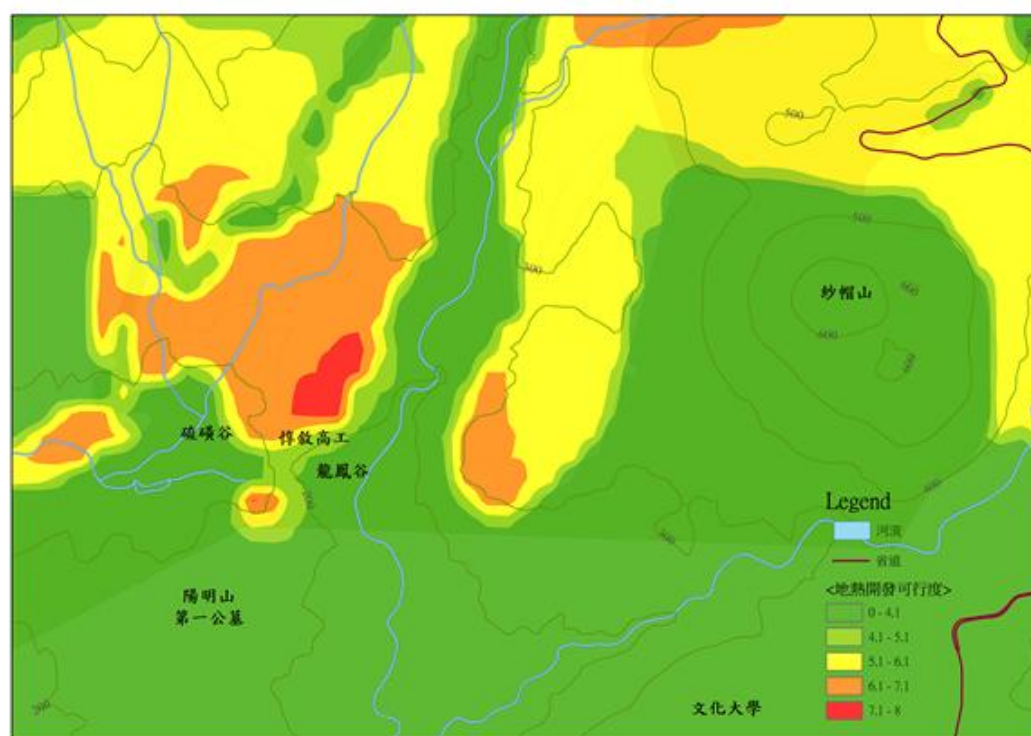


圖 6-10、陽明山國家公園西南角範圍內具有地熱活動潛能且適宜鑽井分析之可行性分布圖。紅色區域最為適合進一步鑽井分析，其次為橘色區域，再其次

為黃色區域。鄰近紅色區域的顯著地標有硫磺谷，龍鳳谷，惇敘高工，其他如紗帽山，文化大學，陽明山第一公墓等，如圖所示。

3.2 地質坡地災害敏感度調查綜合結果圖示

本研究從過去的不同地質災害相關調查中採取兩筆適用的圖資，一為資料較新的山崩與地滑地質敏感區公告，一為較早期的環境地質災害敏感度調查分析報告。首先將較舊的資料所使用的 TWD67 座標系統轉換為 921 大地震之後重新更新，目前通用的 TWD97 座標系統。再將兩筆圖層（圖 6-5，圖 6-6）相互疊加來做比對分析，由於山崩與地滑地質敏感區（圖 6-5）極少在國家公園的北側、西北側、東側出現，為了放大相關區域，疊圖時就著重在與地熱和災害敏感區相關的區域（圖 6-12）。

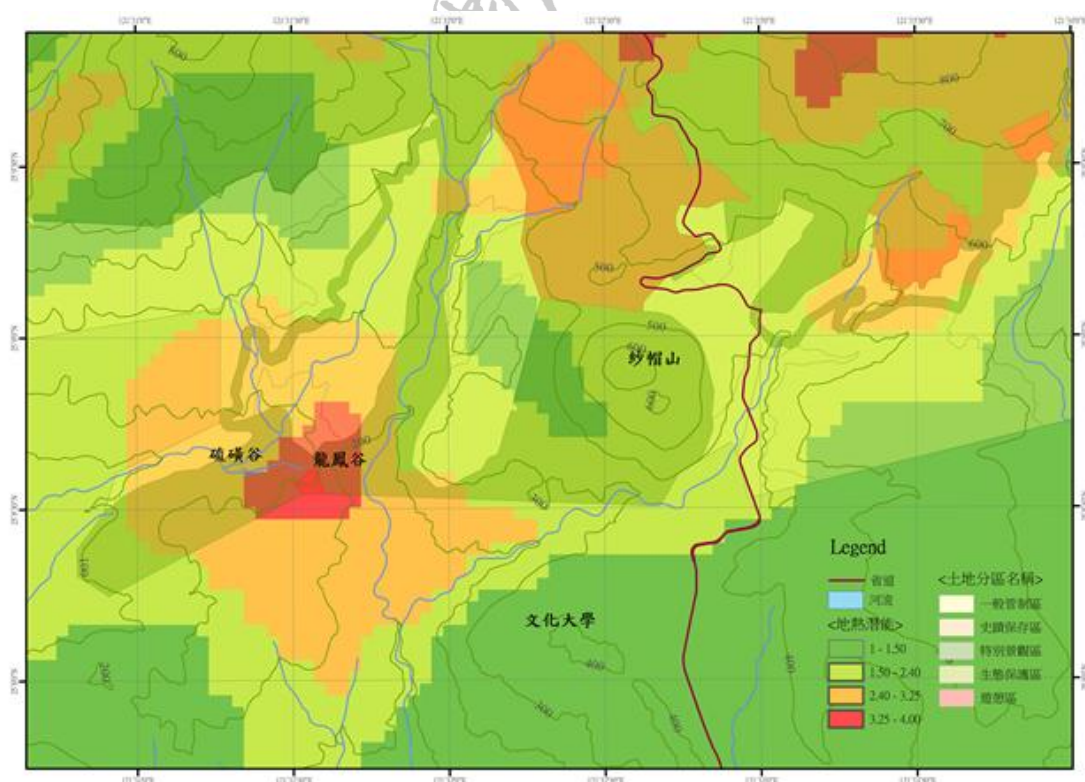


圖 6-11、陽明山國家公園西南角範圍內的地熱潛能與土地分區兩半透明圖層直接加疊圖。重要地景紗帽山，文化大學，磺溪的龍鳳谷，及磺港溪的硫磺谷(往下游約一公里即為著名的北投地熱谷)的位置如圖所示。

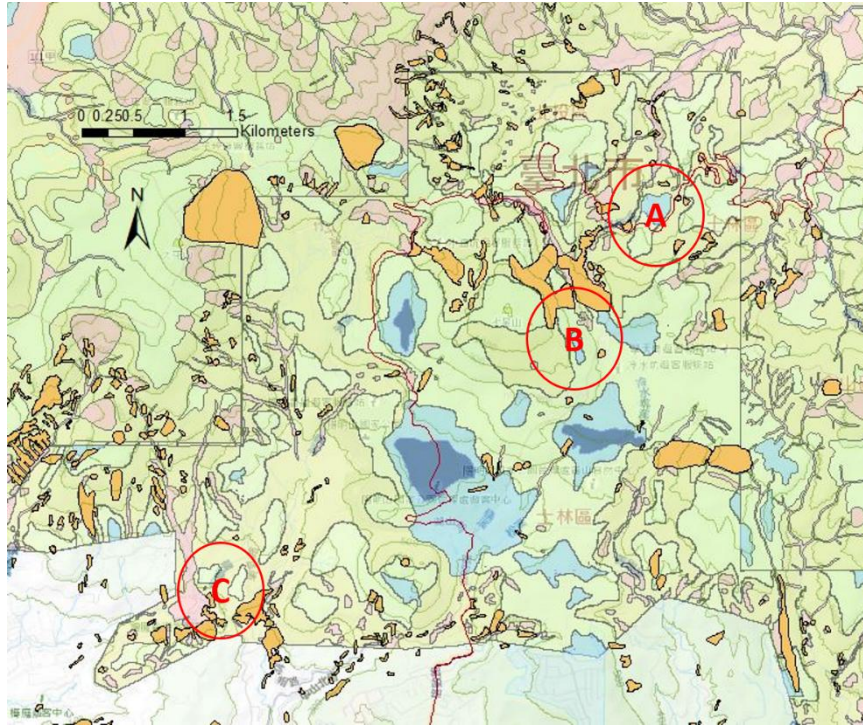


圖 6-12、陽明山國家公園 104 年山崩地滑地質敏感區（土黃色區塊）與 92 年環境地質災害敏感分級（粉紅-淺黃-淺綠-海藍-深藍之淡色彩圖）疊加圖示。A/B/C 紅色圓圈為圖 4-1 地熱開發可行性圖示之三大最佳可行點位。

由圖可見，A 點的馬槽地區有藍色區塊且沒有土黃色區塊，表示該區域沒有山崩地滑地質敏感區，且有地質災害敏感度較低的地區。B 點的冷水坑附近地區有少部分藍色區塊且有部分土黃色區塊，表示該區域有山崩地滑地質敏感區，而地質災害敏感度較低的地區較少且零星。C 點的硫磺谷附近地區沒有藍色區塊且有部分土黃色區塊，表示該區域有山崩地滑地質敏感區，而且沒有地質災害敏感度較低的地區。因此加上地質災害敏感度的考量，A 點的馬槽區為本研究中最理想的地熱開發區，既處於地熱潛能的高區，又位在土地規劃的遊憩區，而且地質災害敏感度又較低。

3.3 地質條件/土地利用分區/坡地災害敏感三層綜合圖示

圖 6-13 合併地質條件與土地利用分區結合圖與坡地地質災害敏感圖層，以半透明疊圖的不失真方式，來顯示 A 點馬槽地區約兩公里見方範圍中各類指標的高低度。(1)地熱與土地利用可行性圖示（無邊淡彩色紅綠色系底圖，紅色為佳），(2)山崩地滑地質敏感公告區（有邊淡土黃色圖），(3)環境地質災害敏感度報告（有邊淡彩色粉-綠-藍色系，藍色為佳）。紅色線條為陽金公路。由圖 6-13 可看出在馬槽地區的中央偏東，位於陽金公路往北轉彎的西北側和南北走向的馬槽溪東側，有一塊藍色低地質災害敏感區，不但顯示在地形與災害潛勢上的優勢，也位於地熱開發可行性圖示中的最高區。

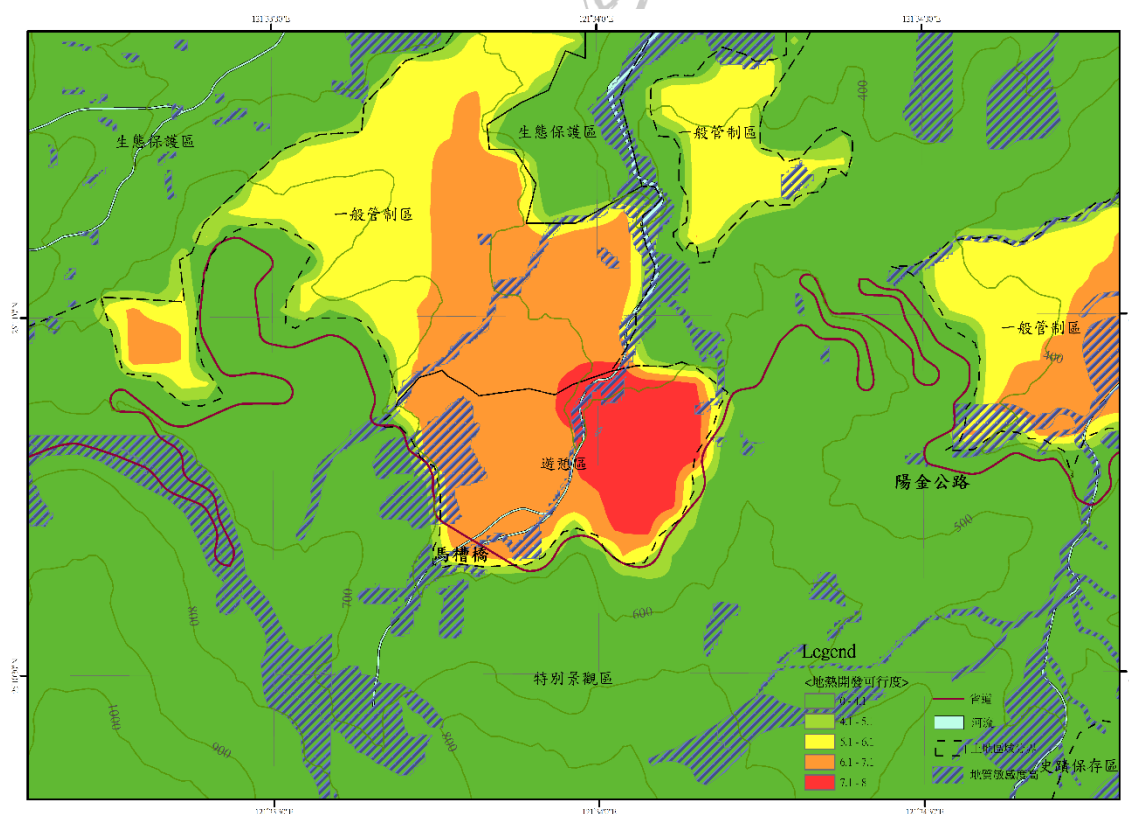


圖 6-13、馬槽地熱與土地利用、山崩地滑地質敏感區、環境地質災害敏感區套疊圖陽明山國家公園內的馬槽地區結合(1)地熱與土地利用可行性圖（無邊淡彩色紅綠色系）(2)山崩地滑地質敏感公告區（有邊淡土黃色），(3)環境地質災害敏感度報告（有邊淡彩色粉-綠-藍色系）三種圖資的套疊圖示。紅色線條為陽金公路。

謝安石書

第七章、國家公園與地熱電廠

國家公園設立的主要評選依據之一是：「具有特殊景觀，或重要生態系統、生物多樣性棲地，足以代表國家自然遺產者」。縱觀全世界地熱潛能豐富的地區往往位於目前仍然活躍的火山區，這些地區由於熱液活動旺盛，造成絢麗多彩的泉華、壯麗的間歇噴泉景觀、宛若幻境的蒸氣渺渺、甚至嶙峋雄偉的火山體，以及棲息於上的珍稀動植物，使得高地熱潛能區往往與國家公園重疊。

全世界有 24 個國家擁有地熱電廠，地熱發電是攫取來自地心深處源源不絕的熱能，加上可以當作基載電力，也就是除了定期檢修的時間外，可以不受天候影響，一天 24 小時一年 365 天源源不絕產生電力，因此被視為是取代石化燃料、環保永續的減碳良方。然而倘若地熱開發區與國家公園劃定區重疊，能否使地熱電廠對環境的影響減到最小，讓電廠和原有的地貌和生態共存共榮？達到保育與減碳並重的環境永續使命？抑或需在自然保育與地熱開發間權衡？以下茲就國家公園的地熱發電開發為主題，蒐集世界各國對此議題的看法與採取的做法進行分類、剖析與介紹。

1. 共存共榮典範-位於國家公園內的地熱電廠

➤ 日本

日本的第一座地熱發電廠即建在國家公園內：1966 年岩手縣的十和田八幡平國立公園興建日本第一座地熱電廠：松川地熱發電所。爾後幾座地熱電廠皆坐落於國家公園：阿蘇九重國立公園的大岳地熱電廠(1967)、十和田八幡平國立公園的大沼地熱電廠(1974)、栗駒國定公園的鬼首地熱電廠(1975)、阿蘇九重國立公園的八丁原地熱電廠(1976)、十和田八幡平國立公園的葛根田地熱電廠(1978)。其中 1976 年營運至今的八丁原地熱電廠是全日本裝置容量最高的地熱電廠：由於地形的限制，30 口深度從 760 m 至 3000 m 不等的生產井大多集中在海拔 1100

公尺大約 1 km^2 的小區域內，每小時產生約 890 噸蒸汽並由附近的大竹發電廠進行遠程控制。裝置容量由當初的 55MWe 擴充到今天 112MWe、年發電量達 785 GWh，發電後的尾水則為附近社區供暖。由於電廠周圍生態環境依然蓬勃發展，可說是位在國家公園內的地熱發電廠的典範。然而隨著核能發電的蓬勃發展以及地熱開發需要較長的探勘時間，加上地熱區往往與溫泉觀光區重疊，1974 年起，政府原則禁止在國家公園內開發新的地熱電廠，並終止地熱發電的補貼(但已進行探勘開發者不在此限)(環自企，1974)。許多火山區因被指定為國家公園而無法開發，地熱開發因此踟躕不前。

1994 年《聯合國氣候變化綱要公約》正式生效，鑒於對再生能源的需求，加上衡量地熱發電對環境影響有限，日本環境廳自然保護局在歷經 20 年地禁令後再度放國家公園普通地區的地熱開發(環境廳，1994)。於是坐落於栗駒國定公園內的上の岱地熱發電所(1994)、秋田縣十和田八幡平國立公園邊緣的澄川地熱發電所(1995)、只見柳津國立自然公園內的柳津西山地熱發電所(1995)、阿蘇九重國立公園內的九重觀光旅館(1998)、富士箱根伊豆國立公園內的八丈島地熱發電所(1999)、霧島屋久國立公園內的大霧地熱發電所及霧島國際飯店(2010)，相繼在法規開放後加入發電行列。

2011 年的 3 月 11 日，日本宮城外海發生芮氏規模 9 的大地震引發海嘯，福島核電廠被波及發生事故，當時東北的 11 座地熱電廠安然無損，在災後成為重要的供電來源，在廢核的聲浪下，地熱發電再次被重視。

日本的國家公園，是由環境部長根據《自然公園法》指定並由所在縣管理。考慮到自然環境和土地使用情況，將國家公園分類為第一類至第三類特殊保護區、以及普通區。環境部於 2012 年放寬了對國家公園的規定並實施國家電價併網計畫。因為建立小地熱電廠的時間會是大地熱電廠時間的一半，為了讓地熱發電的進程能夠加快，所以政府提高對小型地熱電廠購電的躉購費率，每度電可達大型

地熱電廠的 1.5 倍，加上不需要做繁冗的環境影響評估，使得規模低於 7.5MW 的小型地熱電廠建案如雨後春筍般冒出(圖 7-1)。目前已運轉中的地熱發電廠包含：磐梯朝日國立公園內的土湯溫泉發電(2012)、阿寒摩周國立公園內的摩周湖溫泉(2013)、支笏洞爺國立公園內的洞爺湖溫泉 KH-1(2017)...等。



圖 7-1、2015 年三月日本興建中的地熱電廠(資源エネルギー庁)

其中位於福島磐梯朝日國立公園內的土湯溫泉度假村是個非常成功的案例。2012 年開始地熱發電的土湯溫泉度假村是 311 地震後第一家成立於國家公園內的小型地熱電廠：在 311 後土湯溫泉區榮景不再，面臨沒有遊客的窘況。業者於是引進小型的雙循環地熱發電系統，地熱的躉購電價成為「土湯溫泉重建振興委員會」的基金，地熱發電凝聚了社區的向心力。發電後的尾水則支援養蝦產業，遊客在此可以享受泡湯、釣蝦、享用鮮蝦大餐等服務。土湯溫泉度假村成功吸引日本各地的遊客，證明地熱發電廠可以與溫泉產業共存，且不會對自然美景和生態造成負面影響。這個快速建立的小型地熱電廠更提高了日本各溫泉區業者建立地熱電廠的投資意願。

2015 年日本環境部通知全國有關部門和地方政府《國家/國家公園地熱能處理》的修訂版，放寬第二三類特別用地在經過評估後可鑽斜井至第一類用地之下。並放寬發電設備的建物高度限制，由原本硬性規定地不得高於 13 米修改為較為柔性的搭配周圍環境視覺景觀做調整。2018 年日本內閣批准「第 5 次エネルギー基本計画」將 2030 年再生能源佔日本總電力供應比例提高到 24%，其中地熱佔有關鍵的地位。國家公園內的地熱電廠應盡最大的努力減少對自然環境的衝擊而地熱開發公司、地方政府、當地居民、自然保護組織、溫泉業者都是參與其中的關鍵，須建立有制度且良好的溝通管道。

➤ 肯亞

肯亞是非洲最早開始使用地熱發電的國家。儘管非洲佔世界 16% 的人口，但卻僅消耗全球 3.3% 的能源。肯亞只有 40% 的人口有穩定的電能供給，但相較於非洲大陸其餘地區僅 25% 人口有電可用，這比例已經算高了。肯亞的電力供給有 47% 來自位於地獄之門國家公園(Hell's Gate National Park)內的地熱電廠(其餘大部分來自水力發電佔約 35%)，這座國家公園坐落於東非大裂谷，是世界上最大的大裂谷，全長約 3,700 英里，寬 30 至 40 英里，裂谷也貫穿坦桑尼亞、烏干達、阿爾比亞和其他國家。

地獄之門國家公園內有將近 300 口地熱井，發電量 699MW，初期靠世界銀行融資與聯合國開發計畫署指導，因政局不穩而中斷，爾後由日本開發署 JICA 貸款 4 億美元協助探開與開發建廠，預計發電量將再增加 140 MW。地熱發電的尾水仿照冰島的藍湖成立觀光水療中心。餘熱也供給奈瓦沙湖附近的溫室花卉供暖之用。這些溫室每年可以銷售 3.8 億個花梗，甚至還種植了「沒有 24 小時加

熱就無法存活的各式玫瑰。地熱供暖與傳統電力相比，節省下來的費用可讓當地花卉僱員的工資是競爭對手的兩倍以上。

肯亞地獄之門國家公園的地熱開發將野生動物的遷徙和行為列為首要考量(圖 7-2)。某些區域即使有巨大地熱潛力，若會損害保育的動植物也不可在國家公園進行鑽探。甚至號稱此處伸縮縫的熱水輸送管線「連長頸鹿通過也不會撞到頭」。



圖 7-2、地獄之門國家公園內的斑馬與地熱回注井管線(Yee, 2018)

➤ 墨西哥

Las Tres Vírgenes 地熱電廠位於墨西哥最大的野生動植物保護區(圖 7-3)：勒比安卡尼國家公園內(El Vizcaíno Biosphere Reserve)，珍稀動物有瀕臨滅絕的半島叉角羚，近海則是灰鯨生產育幼地區。Las Tres Vírgenes 地熱電廠 1982 年開始探勘，2001 年開始發電，最初有兩口生產井至 2009 年增加為三口，年度總發電量可達 39.6GWh，值得一提的是，由於地處偏遠輸電不易，此地熱電廠貢獻當地超過 65% 的電力，減少大量的能源在運輸過程中的耗損，而半島叉角羚也在「

北美野羊基金會」長期關注保育狀況下數量回升。由於當地的地熱水鹽度極高，因此強調將抽取上來的水全數回注。鑒於 Las Tres Vírgenes 地熱電廠的雙贏，墨西哥政府在《 2007-2012 年國家發展計劃》指出環境永續性是墨西哥的重要公共政策。再生能源可以減少對化石燃料的依賴，減少溫室氣體的排放，並增加經濟活動的附加值。地熱是墨西哥重要且具有巨大潛力的再生能源，應充分利用以應對全球暖化的挑戰。

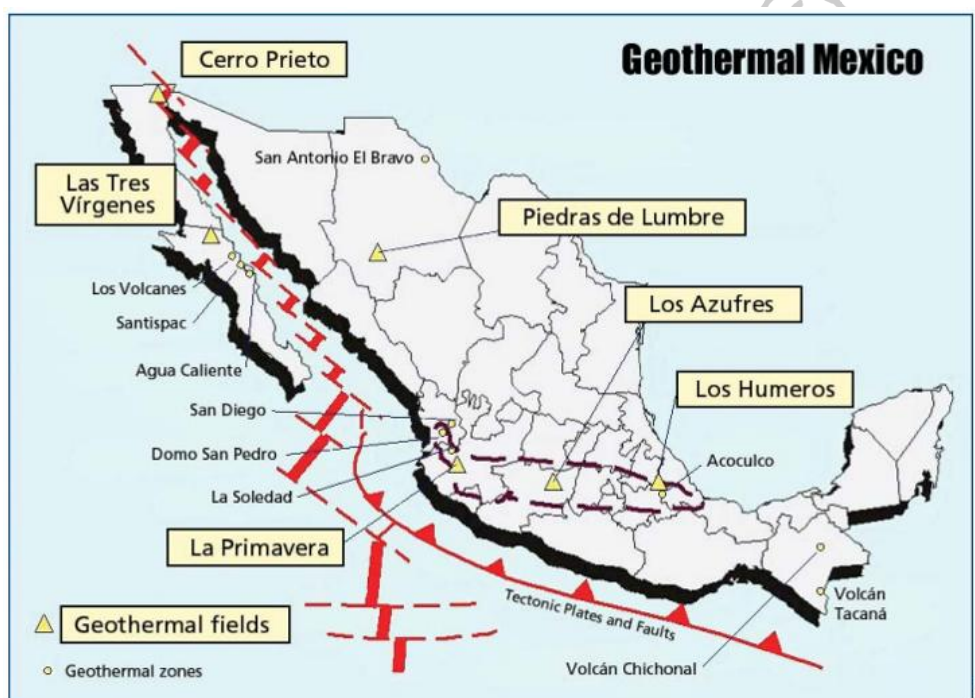


圖 7-3、墨西哥的地熱電廠(Juan,2003)

➤ 印尼

印尼有 150 多座活火山，世界上 40% 的地熱儲量位於印尼，但僅 6% 已開發。其中最重要的原因是，在 2014 年之前，地熱勘探一直被列為採礦活動，由於國家公園禁止任何形式的採礦活動，但印尼 80% 的地熱都位在國家公園或自然保護區內，這使得地熱開發幾乎是不可能的事情。

2014 年印尼政府頒布了最新的地熱法（2014 年第 21 號），新法不再將地熱活動列為採礦活動，此變革讓國家公園可有限度的接受地熱開發。新法明定持有地熱開發許可證的廠商須強制性將部分躉購電費盈餘支付給地熱田所在的地方政府。位於印尼西爪哇的哈利蒙薩拉克(Halimun-Salak)國家公園是珍稀的保育類動物西爪哇長臂猿、爪哇豹、爪哇鷹的家。古南薩拉克(Gunung Salak)地熱電廠(圖 7-4)的設計考量熱帶雨林的野生動物，使其不僅每年為當地電網提供 213,959 MWh 的電力更和自然和諧共存。該地熱電廠不僅減少碳排，亦訓練生態導覽志工、以回饋金支持當地教育計劃、為失業的社區成員提供職業培訓課程、升級道路和橋樑來改善當地的交通基礎設施。



圖 7-4、印尼古南薩拉克地熱電廠網站入口

2. 欣欣向榮的地熱概念園區-位於國家公園周邊的地熱電廠

➤ 哥斯大黎加

哥斯達黎加由於多雨和多火山的自然條件，使用再生能源的比例高。2017 年再生能源佔總發電比例達到 98%，其中 80% 來自水力發電，15% 來自地熱。2015 年甚至有 75 天完全使用再生能源，堪稱減碳的模範國家。

哥斯大黎加估計擁有至少 865 MW 的地熱資源。對於哥斯大黎加來說，地熱發電的主要障礙也是地熱田大多位於國家公園和保護區內，過去哥斯達黎加法律禁止在國家公園內開發地熱資源以保護土地。直到 2006 年法令鬆綁，國家公園內可有限度的地熱探勘、可做好環境影響評估後進行定向鑽井、開發過程中須確保環境影響降至最低。如果任何一個階段發生污染，都可廢止地熱開發許可，而開發公司沒有上訴權。此外，國家公園內的地熱電廠需支付環保費（佔電廠盈餘的 0.1%）為國家公園提供財政援助。費用可以現金或建築材料的形式支付，以改善公園內的設施。法案中也建議實施定向鑽探，減少鑽探所需的場地、減少對環境的影響。

哥斯達黎加的瓜納卡斯特火山群是該國具有最大地熱潛能的地方。該區域的火山包括 Miravalles、Rincón de la Vieja 和 Tenorio。目前總裝置容量為 360 MW 其中最著名的是 Pailas 地熱發電廠位於 Rincón de la Vieja 國家公園外，成立於 2011 年，總發電量為 55MW。

中美洲的其他國家如尼加拉瓜，也從 2006 年開始能在保護區中勘探和開發地熱資源。在勘探階段，特許權持有人有義務向尼加拉瓜能源研究所提供有關環境許可證的法律證明並將環境許可證估計值的百分之三支付給環境自然資源部，作為專門用於監督和研究的資金。

➤ 泰國

泰國清邁的芳(Fang)地熱電廠位在 Doi Pha Hom Pok 國家公園邊陲，採用 Ormat 0.3 MW 發電機，所有的生產井皆小於 417 米，進水溫度 130 °C，發電後的尾水全部回注。附近還有物理治療的蒸沐療養園區、溫泉煮食休閒園區，地熱能並用於乾燥農作物，例如洋蔥，大蒜，龍眼和辣椒。

➤ 義大利

意大利托斯卡尼的 Larderello 是世界上第一個利用地熱能發電的地方，該廠建於 1913 年，直到今天仍在運轉且規模越來越大，因此地熱能源一直是意大利的驕傲。義大利目前有 33 個地熱發電廠，總發電量為 772MW，其中大多位在比薩的托斯卡尼(圖 7-5)。而 Monterotondo Mmo Biancane 正是因地熱而生的地熱自然公園

早在 19 世紀初，人們從此處的硫酸鹽泉中提煉硼酸，地熱公園內有壯麗的噴泉和各式各樣的地熱地質景觀提供遊客休閒與教育用途。

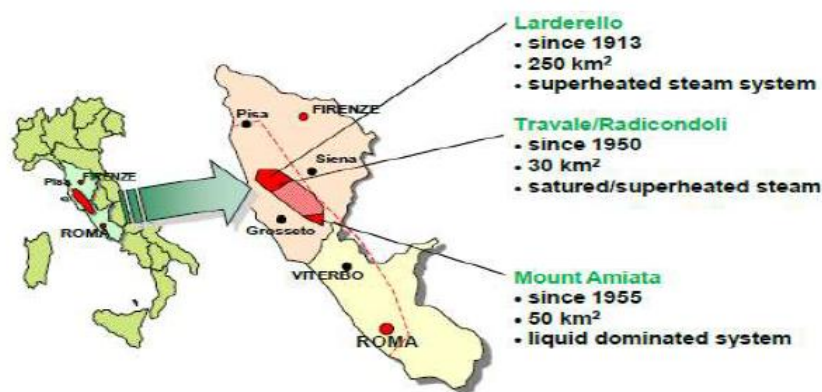


圖 7-5、義大利托斯卡尼的地熱電廠位置(Manzella et al., 2009)

3. 兩相權衡孰輕孰重？魚與熊掌不可得兼

➤ 菲律賓

菲律賓的地熱發展起步的很早。1967 年菲律賓國會認識到地熱發展的潛力和重要性，頒布了第 5092 號共和國法，也稱為《地熱法》。目前菲律賓有四座地熱電廠位在國家公園內，其中兩座位在棉蘭老島阿波山國家公園內，另外兩座在肯尼(Kanlaon)國家公園。

原本棉蘭老島是以水力發電為主，但由於水資源日益珍稀，於是在 1977 年 52MW 的地熱電廠在此興建，後續又興建了 54MW 的地熱電廠，電廠以 BOT 方式進行投資，私人公司的資本回收期僅為十年。菲律賓政府在 2004 年將阿波火山劃分為保護區(54,975 公頃)與兩個緩衝區(分別為 2,572 公頃和 6,506 公頃)，緩衝區可用其他用途。

阿波火山由於區域內涵蓋熱帶雨林、丘陵、高山。也是陸地上生物多樣性最高的地方，2009 年被聯合國教科文組織列入世界遺產。然而 2015 年，由於經歷了伐木，開發和偷獵等劇烈的變化，因此從聯合國教科文組織清單中刪除。阿波火山的悲劇若怪罪到地熱開發上的確是欠缺公允，因為地熱電廠早在 1977 年被聯合國教科文組織列入世界遺產前就開始發展，後續國家公園管理鬆散可能要負更大的責任。

坎恩山是菲律賓中部的最高峰，也是菲律賓六座最活躍的火山的其中一座。坎恩山國家公園的熱帶雨林中有許多瀕臨滅絕的動植物，其中黃背太陽鳥僅在菲律賓中部發現，國家公園的管理權責分屬四個城兩個鎮共同管理。國家公園內的 Northern Negros 地熱電廠(整個開發區約 4650 公頃，其中 1850 公頃位於坎恩山國家公園)，運行初期為 80MW 的發電量。2010 年當地的環保團體控告地熱電廠排放含餘熱及強酸的廢水進入 Okoy 河，導致河流生態不復可見。某些地方出現

地層下陷、湧水不再，某些地方卻冒出熱水。由於發電量下降，已於 2013 年關廠。

➤ 紐西蘭

紐西蘭懷拉基（Wairakei）曾經是世界上間歇泉的第三大集中地(圖 7-6)，泉區最多曾經有 70 處間歇噴泉以及 240 個溫泉。但是電廠興建後僅剩下 55 個。附近的 Whakarewarewa 在 1970 年代面臨類似的困境，當時旅遊業蓬勃發展，附近的酒店開始抽取熱水進行洗浴和取暖，導致天然水位下降，間歇泉活動減少。因此，市議會立法限制可取水量，最終才讓水位漸漸回復。紐西蘭現在全部地熱電廠皆並不位在國家公園或自然保護區內。



圖 7-6、紐西蘭北島 Craters of Moon 蒸氣田

➤ 美國

鑒於紐西蘭懷拉基的例子，美國在 1970 年代施行《地熱蒸汽法》，禁止在國家公園內建地熱電廠、1988 年《地熱蒸汽法修正案-公法 100-443》如果地熱開發會對確定的熱特徵產生不利影響，則禁止在黃石公園附近已知地熱資源區及 16 個指定的國家公園服務中心(National Park Service, NPS)之外進行地熱租賃。

2017 年美國國家航空暨太空總署的噴射推進實驗室著眼於黃石公園有 5GW 的發電潛能，並希望地熱開發能加速地下岩漿冷卻，讓超級火山大爆發的時間延後，提出地熱開發計畫，然而擔憂如果生產井鑽得不夠深會影響黃石公園內大大

小小的間歇泉(如著名的老忠實泉)的噴發、也擔心溫泉的水位下降，鑽太深又怕岩漿庫找到洩壓的出口反而提前噴發，此計畫到目前為止已查不到後續消息。

➤ 冰島

冰島由於位在大陸板塊的張裂帶，因此火山林立、擁有豐富的地熱資源。地熱電廠選址時會避開間歇泉的水循環系統，因此能兼顧觀光與永續能源。冰島沒有地熱電廠位在國家公園或自然保留區內。

➤ 土耳其

截至 2018 年，土耳其的裝機容量為 1,350 MW，僅次於美國、印尼和菲律賓，位居世界第四，然而土耳其對於國家公園和自然保護區內開發地熱的態度仍然非常保守，地熱電廠特許區不可坐落於任何保護區、國家公園、自然紀念物專區、野生動物保護區、生物遺傳保護區，生物圈保護區、文化和歷史遺址特區區、特殊環境保護區和旅遊景點和中心。

4. 結語

綜觀全世界位於國家公園且營運成功的地熱電廠(表 7-1)，可以發現這些國家皆有完善且明確的「國家公園地熱開發」規範，許多國家將廣闊的國家公園依照保育的重要程度不同做土地分級，敏感區限制開發、緩衝區則允許開發。為了讓地表的影響可以降到最小，盡可能在有限的土地使用斜井達到目標區，減少大規模的土地開發。依照國家公園保育的目的因地制宜的做環境影響評估：如肯亞地獄之門國家公園考量的是草原動物大遷徙、印尼、菲律賓、哥斯大黎加考量的是熱帶雨林生態系統、墨西哥的勒比安卡尼國家公園則考量半島沙漠生態維護。這些環境影響評估關係到建廠後評估環境衝擊及電廠回饋金應用的方向、甚至電廠的設計要如何融入自然景觀亦以環評為依據。此外國家公園主管機關、地熱開

發公司、地方政府、當地居民、自然保護組織、溫泉業者都是參與其中的關鍵，
須建立有制度且良好的溝通管道。

表 7-1、世界上位在國家公園的地熱電廠

國家	地熱電廠名稱	裝置容量	開始運轉時間	國家公園名稱
日本	松川	23,500kW	1966	十和田八幡平國立公園
日本	大岳	12,500kW	1967	阿蘇九重國立公園
日本	八丁原	55,000kW	1977	阿蘇九重國立公園
		55,000kW	1990	
		2,000 kW	2006	
日本	大沼	9,500kW	1974	十和田八幡平國立公園
日本	鬼首	15,000kW	1975	栗駒國定公園
日本	葛根田	50,000kW	1978	十和田八幡平國立公園
		30,000kW	1996	
日本	秋田県湯沢市	28,800kW	1994	栗駒國定公園
日本	秋田県鹿角町	50,000kW	1995	十和田八幡平國立公園
日本	福島県柳津町	65,000kW	1995	只見柳津國立自然公園
日本	鹿児島県霧島市	30,000kW	1996	霧島屋久國立公園
日本	大分県九重町	990kW	1998	阿蘇九重國立公園
日本	東京都八丈島	3,300kW	1999	富士箱根伊豆國立公園
日本	鹿児島県牧園町	100kW	2010	霧島屋久國立公園
日本	土湯溫泉	440kW	2012	磐梯朝日國立公園
日本	摩周湖溫泉	100kW	2013	阿寒摩周國立公園
日本	洞爺湖溫泉KH-1	50kW	2017	支笏洞爺國立公園
肯亞	Olkaria	699,000kW	1985	地獄之門國家公園
墨西哥	Las Tres Virgenes	10,000kW	2001	勒比安卡尼國家公園
印尼	Gunung Salak	60,000kW	1994	哈利蒙薩拉克國家公園
菲律賓	Mt. Apo	106,000kW	1987	阿波山國家公園
哥斯大黎加	Pailas	55,000kW	2011	Rincón de la Vieja
泰國	Fang	300kW	1989	Doi Pha Hom Pok
義大利	Larderello	500,000kW	1913	Monterotondo Mmo Biancane

表 7-2、世界上不同國家對國家公園內地熱開發電廠的策略

國家	允許在公園內	允許在公園邊緣	不允許在公園內
日本	V	V	
肯亞	V	V	
墨西哥	V	V	
印尼	V	V	
菲律賓	V	V	
哥斯大黎加		V	
泰國		V	
義大利		V	
紐西蘭			V
美國			V
冰島			V
土耳其			V

第八章、結論與建議

一、結論

1. 從爆裂口的噴發產物、年輕的火山碎屑堆積物、土壤之石英顆粒來源和張裂帶火山爆裂口的證據，顯示大屯火山群後期的噴發是以蒸氣噴發為主。
2. 七星山兩側的火山爆裂口之產狀和地形特徵，以及初步的堆積物之觀察研究，顯示這些爆裂口可能是蒸氣噴發所形成的火山口地形。
3. 發生蒸氣型噴發的條件包括火山流體的上升、不透氣水的黏土質(矽質)蓋層、以及累積氣體壓力達飽和超過上覆岩石的強度。
4. 蒸氣型火山噴發有兩大類：第一類為岩漿侵入解壓的火山氣體侵入具有黏土(矽質)覆蓋層(clay cap)的火山地熱系統累積氣體壓力而發生；第二類為岩漿侵入火山地下深處，岩漿結晶釋放出大量高溫的火山氣體侵入火山口湖底部，導致湖底受壓水層的氣化累積增加氣體壓力而噴發。
5. 極低頻大地電磁法的調查結果，顯示大屯火山群低電阻率的分布，分別為北投、小油坑、馬槽和大油坑等地區。
6. 導電率值高於 $1,000 \mu\text{S}/\text{cm}$ 主要分布在小油坑、冷水坑和馬槽等地區。進一步利用大於 $300 \mu\text{S}/\text{cm}$ 的區域面積分布約為 4 平方公里，估計地熱熱流輸出量約為 320 MWe，換算約為每年 $3 \times 10^6 \text{ m}^3$ 岩漿冷卻熱散失量。
7. 應用體積法計算淺層地熱發電潛能上限，顯示大屯火山區潛能平均值為 425 MWe 可供應 30 年；應用熱流法計算保守下限，則顯示大屯火山區發電潛能在 329 MWe 以上。

8. 如大屯火山區開發 3 至 6 公里之深層地熱，則可額外再供應 1.2 GWe 的發電容量。
9. 併合淺層地熱與深層地熱，大屯火山區之地熱發電潛能估計超過 1.6 GWe，極具開發作為基載電力的誘因。
10. 單井情境分析顯示如未來開發選擇較靠近熱源處(E208 號井)，利用單閃發式和雙閃發式機組預期能產生 1,253 kW 和 1,409 kW 的電力輸出。
11. 如未來開發選擇遠離熱源但五指山層甚淺處(E103 號井)，利用單閃發式和雙閃發式機組僅能產生 273 kW 和 440 kW 的電力輸出；但是運用井下幫浦與雙循環機組，不僅有更好的發電效率、也能大幅提升井口流量，使得淨電力輸出預期有 3,458 kW 的優異結果。
12. 利用 Play Fairway Analysis 法分析結果顯示，大屯火山群較適宜從事地熱探勘及開發的位置為馬槽地區、冷水坑地區和硫磺谷地區等 3 處。
13. 根據地熱地質條件與國家公園土地分區所結合的地熱潛能可行性分析圖示，再利用地表地質災害敏感分析報告所製成之環境地質災害敏感度圖，顯示馬槽地區是本研究認為在陽明山國家公園內，最有潛力也最適宜的地熱開發地點。
14. 日本、肯亞、墨西哥、印尼、哥斯大黎加、泰國、義大利等國在國家公園內或周邊開發地熱電廠，若有嚴謹的調查與規劃，開發過程或電廠建立後，並未造成環境或生態的破壞，甚至能達到保育和綠能雙贏的成果。
15. 分析世界其他國家在國家公園營運成功的地熱電廠，可以發現這些國家皆有完善且明確的「國家公園地熱開發」規範，許多國家將廣闊的國家公園依照保育的重要程度不同做土地分級，敏感區限制開發、緩衝區則允許開發。

二、建議

1、短期可行建議

(1)、調查大屯火山群陽明山國家公園內過去曾經發生蒸氣噴發的地點

主辦單位：陽明山國家公園管理處

協辦單位：中央地質調查所

預估時程：3 年內

調查大屯火山群陽明山國家公園內過去曾經發生蒸氣噴發的地點、推斷熱液上湧通道和熱源，作為防範未來蒸氣噴發可能造成的危險和災害，並作為火山熱能的抽取利用以減低火山流體和熱能累積速率達飽和程度的地點。

(2)、調查蒸氣噴發可能發生的地點

主辦單位：陽明山國家公園管理處

協辦單位：中央地質調查所

預估時程：3 年內

調查陽明山國家公園內熱水換質地區和斷層裂隙的分布，以及地下熱水儲集層的深度，作為推測未來蒸氣噴發可能發生的地點。

(3)、評估地熱電廠對國家公園的環境衝擊和影響。

主辦單位：陽明山國家公園管理處

協辦單位：無

預估時程：3 年

參考世界各國在國家公園內設立地熱發電廠的案例，評估若是在陽明山國家公園內設立地熱電廠對國家公園的環境衝擊和影響。

2、中期可行建議

(1)、參考國外案例

主辦單位：陽明山國家公園管理處

協辦單位：無

預估時程：3 年

建議陽明山國家公園管理處派人至國外參訪在國家公園內設有地熱電廠的國家，了解其設立過程、相關規範和如何管理等。

(2)、設立大屯火山群內蒸氣噴發可能的地點設立監測站

主辦單位：陽明山國家公園管理處

協辦單位：財團法人國家實驗研究院國家地震工程研究中心大屯火山觀測站

預估時程：3 年

建議在大屯火山群內蒸氣噴發可能的地點設立監測站。

(3)、建立蒸氣噴發的預警機制和防災體系

主辦單位：陽明山國家公園管理處

協辦單位：中央氣象局、內政部消防署、臺北市政府、新北市政府

預估時程：3 年

建議在相關單為建立蒸氣噴發的預警機制和防災體系。

(4)、研擬地熱相關法令

主辦單位：內政部營建署

協辦單位：中央地質調查所、水利署、原民會、礦物局、臺北市政府、新北市政府

預估時程：2 年

修改相關法令(如國家公園法)或制定地熱專法或專章，研擬制定在國家公園探勘和開發地熱的相關法令。

3、長期可行建議

(1)、蒐集各界的意見

主辦單位：陽明山國家公園管理處

協辦單位：地熱開發公司、地方政府、當地居民、自然保護組織、溫泉業者

預估時程：持續進行

各界都應參與國家公園內的地熱規劃與開發，建立有制度和良好的溝通管道。由陽明山國家公園陽管處廣邀各界來參與討論，蒐集各界的意見。

(2)、定期進行逃生演練

主辦單位：內政部消防署

協辦單位：臺北市政府、新北市政府、陽明山國家公園管理處

預估時程：每 5 年

定期舉辦蒸氣噴發可能造成災害的撤退和逃生演練。洽請內政部消防署來施行。

(3)、地熱利用減緩火山熱能累積

主辦單位：科技部

協辦單位：臺北市政府、新北市政府、陽明山國家公園管理處

預估時程：每 5 年

藉由火山熱能的抽取利用，減緩火山流體和熱能的累積速率達飽和程度，以爭取更多的時間發展對火山預測和防範災害技術。由科技部來資助。

參考文獻

1. 中文參考文獻

- 礦研所 (1969) 大屯火山群地熱探勘工作報告之一，經濟部聯合礦業研究所，報告 90 號。
- 礦研所 (1970) 大屯火山群地熱探勘工作報告之二，經濟部聯合礦業研究所，報告 102 號。
- 礦研所 (1971) 大屯火山群地熱探勘工作報告之三，經濟部聯合礦業研究所，報告 111 號。
- 礦研所 (1973) 大屯火山群地熱探勘工作報告之四，經濟部聯合礦業研究所，報告 126 號。
- 楊燦堯、何孝恆、謝佩珊、劉念宗、陳于高、陳正宏 (2003) 大屯火山群火山氣體成份與來源之探討。國家公園學報，13(1), 127-156 頁。
- 樊祺誠、隋建立、劉若新、魏海泉、李大明、孫謙、李霓(2002) 吉林龍崗第四紀火山活動分期。岩石學報第 18 期，495-500 頁。
- 李京霖(2006) 陽明山馬槽地區溫泉資源調查分析之研究，國立成功大學資源工程研究所碩士論文，共 106 頁。
- 陳中華和林朝宗 (2006) 從台北盆地中初生火山灰來推斷大屯火山群近期噴發，中國地質學會九十五年會暨學術研討會論文集，第 65 頁。
- 陳洲生, (2008) 大屯火山群地底岩漿庫之調查與監測—大地電磁法之觀測調查，陽明山國家公園管理處委託調查報告。
- 張竝瑜(2012) 宜蘭清水地熱能源研究：探勘技術平台的建立與深層地熱(3/3) 101 年度國科會期末報告。
- 林毓潔(2013) 大屯火山群土壤之石英來源：國立臺灣大學理學院地質科學研究所碩士論文，83 頁。
- 曾衡之(2014) 大屯火山群之地下三維模型及地熱發電潛能：國立臺灣大學理學院地質科學研究所碩士論文，103 頁。
- 陳彥如 (2017) 以 Play Fairway Analysis 評估大屯火山群地熱潛能區位：國立臺灣大學理學院地質科學研究所碩士論文，77 頁。
- 廖陳侃(2017) 大屯火山群七星山地區年輕爆裂口之研究：國立臺灣大學理學院地質科學研究所碩士論文，279 頁。

2. 英文參考文獻

- Banwell, C., (1961) Geothermal drillholes-physical investigations: Proc. UN Conf. New Sources of Energy, Rome.
- Banwell, C., (1963) Thermal energy from the Earth's crust: Introduction and part 1: New Zealand Journal of Geology and Geophysics, v. 6, p. 52-69.
- Belousov A., Belousova M. and Chen C. H., (2010) Deposits, character and timing of recent eruption and gravitational collapses in Tatun Volcanic Group, northern Taiwan: hazard-related issues. Journal of Volcanology and Geothermal Research 191, 205-221.
- Bödvarsson, G. S., and C. F. Tsang, (1982), Injection and thermal breakthrough in fractured geothermal reservoirs: Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978–2012), v. 87, p. 1031-1048.
- Cagniard, L., (1953) Basic Theory of the Manneto-telluric Method of Geophysical Prospecting. Geophysics 18, 497-724.
- Cas, R.A.F. and Wright, J.V. (1987) Volcanic Successions: Modern and Ancient. Allen and Unwin, London. <http://dx.doi.org/10.1007/978-94-009-3167-1>.
- Cassidy, M., Manga, M., Cashman, K. and Bachmann, O. (2018) Controls on explosive-effusive volcanic eruption styles. Nature Communication 9, DOI: 10.1038/s41467-018-05293-3.
- Cataldi, R., A. Lazzarotto, P. Muffler, P. Squarci, and G. Stefani, (1978) Assessment of geothermal potential of central and southern Tuscany: Geothermics, v. 7, p. 91-131
- Chen, C. H., (1970) Geology and geothermal power potential of the Tatun volcanic region: Geothermics, v. 2, Part 2, p. 1134-1143.
- Chen, C-H. and Lin, S.B. (2002) Eruptions younger than 20Ka of the Tatun Volcano Group as viewed from the sediments of the Sungshan Formation in Taipei Basin. Western Pacific Earth Sciences, 2, 191-204.
- Chen, C.-T., Lee, J.-C., Chan, Y.-C., Lu, C.-Y., (2010) Growth normal faulting at the western edge of the metropolitan Taipei Basin since the last glacial maximum, northern taiwan. Terr. Atmos. Ocean. Sci. 21, 409–428.
- Chen, S.H., Wu, J.T., Yang, T.N., Chuang, P.P., Huang, S.Y. and Wang, Y.S. (2009) Late Holocene paleoenvironmental changes in subtropical Taiwan inferred from pollen and diatoms in lake sediments. Paleolimnol 41:315–327.
- DiPippo, R., (2012) Geothermal power plants: principles, applications, case studies and environmental impact, Butterworth-Heinemann
- Forson, C., Czajkowski, J.L., Norman, D.K., Swyer, M.W., Cladouhos, T.T., and Davatzes, N. (2016) Summary of phase I and plans for phase 2 of the

- Washington State geothermal play-fairway analysis. GRC Transactions, 40, 541-550.
- Fournier, R. O., (1977) Chemical geothermometers and mixing models for geothermal systems: *Geothermics*, v. 5, p. 41-50.
- Fournier, R., (1979) A revised equation for the Na/K geothermometer: *Geothermal Resources Council Transactions*, v. 3, p. 221-224.
- Fournier, R. O., (1991) Water geothermometers applied to geothermal energy: Application of Geochemistry in Geothermal Reservoir Development, Ed Franco D'Amore. Unitar/UNDP, p. 37-69.
- Fournier, R., and R. Potter, (1982) Revised and expanded silica (quartz) geothermometer: *Bull., Geotherm. Resour. Counc.*(Davis, Calif.);(United States), v. 11.
- Fournier, R., and A. Truesdell, (1973) An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural wates: *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 37, p. 1255-1275.
- Fraser, A.J. (2010) A regional overview of the exploration potential of the Middle East: a case study in the application of play fairway risk mapping techniques. Geological Society, London, Petroleum Geology Conference series, 7, 791-800, 1 January 2010, <https://doi.org/10.1144/0070791>
- Garg, S. K., and J. Combs, (2010a) Appropriate use of USGS volumetric “heat in place” method and Monte Carlo calculations: Proceedings 34th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford university, Stanford, California, USA
- GeothermEx, I., (1992) Annual Report: Geothermal Resources Assessment: Report for State of Hawaii Department of Business Economic Development and Tourism.
- Giggenbach, W. F., (1988) Geothermal solute equilibria. derivation of Na-K-Mg-Ca geoindicators: *Geochimica et cosmochimica acta*, v. 52, p. 2749-2765.
- Janda, R.H., Daag, A.S., Delos Reyes, P.J., Newhall, C.G., Pierson, T.C., Punongbayan, R.S., Rodolfo, K.S., Solidum, R.U. and Umbal, J.V. (1996) Assessment and response to lahar hazard around Mount Pinatubo, 1991 to 1993: in *Fire and Mud*, Newhall, C.G. and Punongbayan, R.S. (eds) , 107-140, U. Washington Press.
- Klein, C., J. Lovekin, and S. Sanyal, (2004) New geothermal site identification and qualification: GeothermEx Inc. report.
- Komori, S., Utsuqi, M., Kagiya, T., et al. (2014). Hydrothermal system in the Tatun volcano group, northern Taiwan, inferred from crustal resistivity structures by audio-magnetotellurics. *Progress in Earth and Planetary Science*, 1, 20.

- Komori¹, S., Utsugi, M., Kagiya, T., Yoshikawa, S., Chen, C.H. and Chao, B. (2017) Resistivity mapping in the Tatun Volcano Group, Northern Taiwan, revealed by VLF-MT surveys: *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 28, 833-842.
- Konstantinou, K.I., Lin, C.H., Liang, W.T., (2007) Seismicity characteristics of a potentially active Quaternary volcano: The Tatun Volcano Group, northern Taiwan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 160, 300-318.
- Lee, H.F., Yang, T.F., Lan, T.F., Song, S.R. and Tsao, S. (2005) Fumarolic gas composition of the Tatun Volcano Group, northern Taiwan. *Terrrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences* 16, 843-864.
- Lin, C.H. (2016) Evidence for a magma reservoir beneath the Taipei metropolis of Taiwan from both S-wave shadows and P-wave delays. *Scientific Reports* 6, 39500; doi: 10.1038/srep39500
- Lin, C.H., Konstantinou, K.I., Liang, W.T., Pu, H.C., Lin, Y.M., You, S.H., Huang, Y.P., (2005a): Preliminary analysis of volcanoseismic signals recorded at the Tatun Volcano Group, *Research Letters* 32, L10313. doi:10.1029/2005GL022861.
- Lin, C.H., Konstantinou, K.I., Pu, H.C., Hsu, C.C., Lin, Y.M., You, S.H., Huang, Y.P., (2005b): Preliminary results of seismic monitoring at Tatun volcanic area of northern Taiwan: *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences* no16, 563-577.
- Muffler, L., (1977) (1978) USGS Geothermal Resource Assessment, US Geological Survey, Menlo Park, CA.
- Muffler, P., and R. Cataldi, (1978) Methods for regional assessment of geothermal resources: *Geothermics*, v. 7, p. 53-89.
- Muffler, L. J. P., and M. Guffanti, (1979) Assessment of geothermal resources of the United States--1978, US Geological Survey.
- Nash, G.D. and C R. Bennett (2015) Adaptation of a Petroleum Exploration Tool to Geothermal Exploration: Preliminary Play Fairway Model of Tularosa Basin, New Mexico, and Texas. *GRC Transactions*, Vol. 39, 2015. 743-750.
- Nathenson, M., (1975) Physical factors determining the fraction of stored energy recoverable from hydrothermal convection systems and conduction-dominated areas, Geological Survey, Menlo Park, Calif.(USA)
- Olson, H., (1993a) Geothermal reservoir assessment based on slim hole drilling. Volume 1, Analytical Method: Final report, Electric Power Research Inst., Palo Alto, CA (US); Hawaii Natural Energy Inst., Honolulu, HI (US); GeothermEx, Inc., Richmond, CA (US).
- Olson, H., (1993b) Geothermal reservoir assessment based on slim hole drilling. Volume 2: Application in Hawaii: Final report, Electric Power Research Inst., Palo Alto, CA (US); Hawaii Natural Energy Inst., Honolulu, HI (US); GeothermEx, Inc., Richmond, CA (US).

- Renner, J., D. White, and D. Williams, (1975) Hydrothermal convection systems: Assessment of geothermal resources of the United States—1975: US Geological Survey Circular, v. 726, p. 5-57
- Sanyal, S., C. Klein, J. Lovekin, and R. Henneberger, (2004) National assessment of US geothermal resources-a perspective: Geothermal Resources Council Transactions, v. 28, p. 29
- Sanyal, S. K., and Z. Sarmiento, (2005) Booking geothermal energy reserves: Geothermal Resources Council Transactions, v. 29, p. 467-474
- Sheridan, M.F. and Wohletz, K.H. (1981) Hydrovolcanic explosions: the Systematics of water pyroclast equilibration: *Science* 212. 1387-1389.
- Song, S.R. and Lo, H.J. (1995) The source and origin of the volcaniclastics in Linkou Formation of Northern Taiwan. *Journal of Geological. Society of China* 38, 287-314.
- Song, S.R., Tsao, S. and Lo, H.J. (2000a) Characteristics of the Tatun Volcanic eruptions, north Taiwan: implications for a cauldron formation and volcanic evolution: *J. Geol. Soc. China*, 43, 361-378.
- Song, S.R., Yang, T.Y., Yeh, Y.H., Tsao, S., Lo, H.J. (2000b) The Tatun Volcano Group is active or extinct ? *J. Geol. Soc. China*, 43, 521-534.
- Song, S.R., Chen, T.M., Tsao, S., Chen, H.F., and Liu, H.C. (2007) Lahars in and around the Taipei Basin: Implications for the activity of Shanchiao Fault: *Journal of Asian Earth Sciences* 31, 277-286.
- Szakacs, M. (1994) Redefining active volcanoes: a discussion. *Bull Volcano.* 56, 321-325.
- Tester, J. W., B. J. Anderson, A. Batchelor, D. Blackwell, R. DiPippo, E. Drake, J. Garnish, B. Livesay, M. Moore, and K. Nichols, (2006), *The future of geothermal energy: Massachusetts Institute of Technology*, v. 358
- Tilling, R.I. (1989) Volcanic hazards: Short course in Geology, volume 1, 28th International Geological Congress, Washington, D.C., 123P.
- Truesdell, A., (1976) Summary of section III geochemical techniques in exploration: Proceedings of the 2nd UN Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources.
- Tsai, C.H., Hsu, S.K., Lin, S.S., Yang, T.F., Wang, S.Y., Doo, W.B., Lee, H.F., Lan, T.F., Huang, J.C. and Liang, C.W. (2017) The Keelung Submarine Volcano in the near-shore area of northern Taiwan and its tectonic implication: *Journal of Asian Earth Sciences*, 149, 86-92.
- White, D. E., and D. L. Williams, (1975) Assessment of geothermal resources of the United States--1975, Geological Survey Circular, Arlington, VA.

- Williams, C. F., (2004) Development of revised techniques for assessing geothermal resources: Proceedings, 29th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, 7p
- Williams, C. F., (2007) Updated methods for estimating recovery factors for geothermal resources: Proceedings, Thirty-Second Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford University.
- Williams, C. F., M. J. Reed, S. P. J. Galanis, and J. DeAngelo, (2007) The USGS national resource assessment-An update: Geothermal Resources Council Transactions, v. 31, p. 99-104.
- Williams, C. F., M. J. Reed, and R. H. Mariner, (2008) A review of methods applied by the US Geological Survey in the assessment of identified geothermal resources: US Geological Survey Open-File Report, v. 1296, p. 27.
- Wisian, K. W., D. D. Blackwell, and M. Richards, (2001) Correlation of surface heat loss and total energy production for geothermal systems: Geothermal Resources Council Transactions, p. 331-336
- Yanagi, T., Okada, H. and Ohta, K. (1992) Unzen Volcano- the 1990-1992 eruption: The Nishinippon and Kyushu University Press, 137p.
- Yang, T.F., Sano, Y., and Song, S.R. (1999) $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratio of fumaroles and bubbling gases of hot springs in Tatun volcano Group, North Taiwan, *Il Nuovo Cimento* 22c, 281-286. Yeh and Chen, 1991
- Yeh, Y.H. and Chen, K.J. (1991) The study of Chinshan fault – microseismic observation: Report to Hazard Mitigation of National Science Council, p41. (in Chinese) Zellmer GF, Rubin KH, Miller CA, Shellnutt JG, Belousov A, Belousova M (2015) U-Th isotope constraints on the petrogenetic processes and ages of young effusive eruptions from Tatun Volcano Group, northern Taiwan. In: Carrichi L, Blundy JG (eds) Chemical, physical and temporal evolution of magmatic systems. Geological Society Special Publication 422, 175-188.

3. 日文参考文献

- 環自企。1974。昭和 49 年 9 月 17 日環自企第 469 号環境庁自然保護局企画調整課長通知。
- 環境廳。1994。國立・國定公園内における地熱発電について。平成 6 年通知。平成 6 年 2 月 3 日環自計第 24 号・環自國第 81 号環境庁自然保護局計画・國立公園課長通知。

4. 國家公園與地熱電廠參考資料與網站

➤ 日本

Unlocking Geothermal Potential in Japan Through Small-scale Generation, 23 July 2018, International Renewable Energy Agency
<https://www.irena.org/newsroom/articles/2009/Apr/Unlocking-geothermal-potential-in-Japan-through-small-scale-generation>

国立・国定公園での地熱発電開発促進に向けた環境保全手法の評価を実施，2019 年 9 月 2 日，石塚博昭，国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構，
https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101186.html

地熱発電で 2 つの規制緩和、国立・国定公園内で開発促進 (1/2) ，2015 年 10 月 06 日，石田雅也，スマートジャパン
<https://www.itmedia.co.jp/smartjapan/articles/1510/06/news022.html>

地熱発電：世界 3 位の資源量は 4000 万世帯分、6 割が開発可能，2014 年 04 月 03 日，石田雅也，スマートジャパン

➤ 肯亞

Geothermal Energy Grows in Kenya, Feb. 23, 2018, Amy Yee, The New York Times
<https://www.nytimes.com/2018/02/23/business/geothermal-energy-grows-in-kenya.html>

➤ 墨西哥

El Vizcaíno Biosphere Reserve, Wikipedia, the free encyclopedia,
https://en.wikipedia.org/wiki/El_Vizca%C3%ADno_Biosphere_Reserve

José Luis Quijano-León and Luis C.A. Gutiérrez-Negrín, Comisión Federal de Electricidad, Morelia (2003) 30 Years of Geothermal-Electric Generation in Mexico México, GRC BULLETIN.

Magaly F.-A. and Luis C.A. G.-N. (2011) Geothermal activity and development in Mexico, Short Course on Geothermal Drilling, Resource Development and Power

Plants”, organized by UNU-GTP and LaGeo, in Santa Tecla, El Salvador, January 16-22, 2011.

➤ 印尼

Project Spotlight: Gunung Salak Geothermal Energy, Indonesia, 30 May 2018, Fitri Wulandari and Gabriella Warden, Corporate Climate Action, <https://www.southpole.com/blog/project-spotlight-gunung-salak-geothermal-energy-indonesia>

Gunung Salak, South Pole

<https://www.southpole.com/projects/geothermal-energy-creates-new-jobs>

➤ 哥斯大黎加與瓜地馬拉

Paul Moya and José Antonio Rodríguez (2007) Environmental law and regulations in Central America, Short Course on Geothermal Development in Central America – Resource Assessment and Environmental Management, organized by UNU-GTP and LaGeo, in San Salvador, El Salvador, 25 November – 1 December, 2007.

➤ 泰國

Wood, S.H., Kaewsomwang, P. & Singharajwarapan, F.S. (2018) Geologic framework of the Fang Hot Springs area with emphasis on structure, hydrology, and geothermal development, Chiang Mai Province, northern Thailand. Geotherm Energy 6, 3

<https://doi.org/10.1186/s40517-017-0087-7>

➤ 義大利

Presente e potenzialità della geotermia italiana, 4 novembre 2016, Redazione, GeotermiaNews.it

<https://www.cosvig.it/presente-e-potenzialita-della-geotermia-italiana/>

Manzella A. Serra, D., Cesari G., Bargiacchi, E., Cei M., Cerutti. P., Conti, P., Giudetti, G., Lupi, M., Vaccaro1, M. (2019) Geothermal Energy Use, Country Update for Italy, European Geothermal Congress 2019 Den Haag, The Netherlands, 11-14 June 2019.

➤ 菲律賓

Leonardo M. Ote and Agnes C. de Jesus (1997) Mt. Apo geothermal project: a learning experience in sustainable development, (PNRI-F(ES)--98008). Philippines

➤ 美國

Geothermal—Legal Instruments, Geologic Resource Laws, Regulations, and Policies
<https://www.nps.gov/articles/geothermal-legal-instruments.htm>

Yellowstone Supervolcano Could Be an Energy Source. But Should It? ,August 8, 2018,
Shannon Hall, National Geographic
<https://www.nationalgeographic.com/science/2018/08/news-yellowstone-supervolcano-geothermal-energy-debate-iceland-hawaii/>

NASA's ambitious plan to save Earth from a supervolcano, 7th August 2017, BBC News
<https://www.bbc.com/future/article/20170817-nasas-ambitious-plan-to-save-earth-from-a-supervolcano>

附錄一、評選會議審查意見回覆

委員一	
1. 本研究案針對七星山東、西側可能的爆裂口之形成年代與機制進行研究，服務建議書目標明確，方法科學合乎邏輯。	1. 謝謝委員的肯定
2. 由於爆裂口的構造與幾何分析相當重要，建議能就大屯火山區過去之地物探測資料進行整理與分析，並列入研究報告中。	2. 謝謝委員的提醒，遵從委員的建議盡量收集本研究區域的地球物理資料，並統合整理併入報告中。
3. 建議服務團隊能提出較明確的交付項目，例如數位的 3DLiDAR 點雲資料及分析，或是無人機的正射影像。	3. 謝謝委員的提醒，遵從委員的建議。
4. 碳十四定年易受汙染，建議同時進行碳十三環境同位素分析，以提供比對資料。	4. 謝謝委員的建議，若分析費用不高、經費允許下將從事此一工作。
5. 建議服務建議書中部分為原理方法，請加以補充，另外簡寫部分(Ex：Itrax、XRD、SEM-EDX)請附中文翻譯。	5. 謝謝委員的提醒，遵從委員的建議，在未來的報告中將納入此項建議。
委員二	
1. 本研究以根據地形研究及鑽採樣品分析，綜合研判大屯火山的形成年代及噴發形式等，投標團隊在此領域具有豐富的實際經驗，工作設計構想完善。	1. 謝謝委員的肯定
2. 研究計畫提列七星山東、西側分析執行，建議有預備計畫，在取得第一年研究成果時必要情況下，據以修改第二年計畫。	2. 謝謝委員的提醒，遵從委員的建議。
3. 碳 14 定年對 rework 的有機碳如何區分？	3. 研究區域位於七星山山頂處，周圍未有沉積岩層的出露，理論上應無

	有機碳 rework 的問題。另外，若經費允許下可分析有機碳的 C-13 同位素加以區分。
4. 建議審慎選擇採樣點，以取得重要及可靠的資料。	
委員三	
1. 計畫主持人對本案有充分了解，應有能力完成區域研究。	1. 謝謝委員的支持與肯定。
2. 大屯火山區歷年來已有甚多地熱資源調查研究，受限於本案時間有限，建議主持人本計畫應充分收集既有資料，審慎評估解析。	2. 本案調查時間有限因此需透過現有資料進行收集分析，尋找對於此區域有興趣各單位一同參予探勘，並考慮國家公園立場可允許規模下進行探討。另外，中央地調所目前正著手進建立官方地熱資料庫，在陽管處同意下本團隊將配合中央地調所提供地熱相關成果資料。
委員四	
1. 關於合理釋出地熱是否有助於火山環境的穩定，為本案急切需獲得的地熱資源合理利用的論述支持，國際上是否有相關論述？本研究是否是透過 VLF-MT 的調查計算取得數據上的支持？	1. 國際上對於火山地熱資源討論很少，乃因熱源變化複雜尚未公開討論，且公布或影響周圍居民社會經濟穩定性。另外，VLF-MT 的調查計算，MT 主要知道地底下 Conductivity(導電度) 代表熱能儲存，以水熱能儲存就能計算其範圍，以對照方式得熱產生率，如大屯火山群是以熱累積方式產生 hydrothermal activity(熱液活動) 蒸氣噴發可藉與日本地熱活動經驗比較以估算每年熱產生率，並以時間爭取未來技術開發可能而先執行本計畫。
2. 關於經費編列，參訪費用包含國內外地熱公司訪問及參加會議，預計	2. 關於參訪費用內容說明，因地熱開發目前在國際會議算熱門議題，

如何規劃?	國內較少，因此藉本案計畫人員參加地熱國際會議或到日本九州參訪地熱廠皆可協助蒐集資料，藉會議討論獲取相關概念以對於本計畫有所助益，另助理工作內容為蒐集資料、文書往來例行性工作爰未列經費表內容。
3. 針對研究團隊主要工作人員的組成與專長，請補充說明。	3.本研究團隊主要有三人：主持人宋聖榮(專長在火山學研究、地熱探勘規劃和評估等)；協同主持人盧乙嘉博士(其博士論文為清水地熱區的特性、地球化學和成因)；研究助理邱玉嵐小姐已有十幾年的助理行政工作經驗，在本計畫中幫助計畫協調和相關行政工作。

附錄二、期中會議審查意見回覆

林殿順教授	
1. 關於裂隙與爆裂口的空間分布,可否進一步討論更大範圍的分布並討論其成因。	1. 謝謝委員的建議。裂隙、火山體和火山口等分布和成因,前人已有報告或文章發表,如詹瑜璋等人(2005)利用LiDAR影像研究大屯火山群的斷層和裂隙分布;陳文山等人(2003)也利用LiDAR影像研究大屯火山群的火山地形,委員若有興趣可參考之,此處就不重複呈現。另外,中央地調所委託工研院材化所的團隊,正在蒐集相關資料建立數據庫對外公開。
2. 可否納入能源局大屯火山地熱模型探討?	2. 謝謝委員的建議。能源局大屯火山地熱模型是委託工研院綠能所建立的,而綠能所又委託美國勞斯倫斯國家實驗室的Prof. Patrick Dobson(2018)。但依此模型進行的硫磺子坪鑽探結果甚不理想,主要原因是其解析度不足所致。另外,此一模型對於估計陽明山國家公園範圍內的地熱儲存量也難以達到實際成效,故就沒有納入討論。
翁榮南教授	
1. 本期中報告收集整理本研究區及國外相關資料,針對火山年代、噴發模式及地熱潛能開發作整合精闢分析,成果豐碩值得肯定。	1. 謝謝委員的肯定。
2. 陽明山大屯火山區應是國內最具規模的地熱區,未來若要開發地熱,應附大量地熱資料,建議下半期應有規劃。	2. 謝謝委員的提醒。目前中央地調所委託工研院材化所的團隊,正在蒐集相關資料建立地熱數據庫對外公開,應會符合委員所關心的議題。

3. 報告提到的深層淺層地熱,兩者對減緩火山活動效益之比較?	3. 謝謝委員的意見。因大規模深層地熱的開發技術還未成熟,需要未來的驗證。而淺層地熱開發技術已成熟,較容易評估。請見報告第四章和第五章。
4.有些圖編號有誤,請改正。	4. 謝謝委員的提醒,已修正。
郭欽慧教授	
1. 計畫內容紮實,資料收集完整,分析步驟合理,推論結果可信度高。	1.謝謝委員的支持與肯定。
2. 體積估算法是目前最有效估算方式,其中 recovery factor (熱 攫取因子)的判定可能造成極大差異,報告中可加強解釋其選擇標準。	2. 謝謝委員的提醒,同意委員的見解,我們有做體積法各種參數的敏感度分析,詳細見第五章。
3. 承上,此選擇是否會造成估算之 capacity 的誤差?	3. 謝謝委員的意見。從世界其他地熱國家的體積估計潛能和裝置容量的經驗,確實有蠻大的誤差,故世界銀行委託 WGC 的工作團隊,對於如何發展出較精確評估地熱區的裝置容量方法進行研議。
4. 運用開發地熱對環境可能的影響?	4. 謝謝委員的意見。地熱開發多多少少都會對環境造成影響,但是可容忍的,故立法院已通過裝置容量小於 10MW 的地熱電廠不用做環境影響評估。
主席	
1. 地熱運用釋出對減緩火山活動應有一套假說。	1. 謝謝處長的意見。本報告已建立蒸氣噴發的噴發機制和形成條件『是地下有岩漿侵入釋放高溫的火山流體進入火山體地下淺處具有黏土蓋層的熱水儲集層系統,增加氣體的累積達飽和後噴發形成一系列的爆裂火山

	口和產物』，並進一步提出蒸氣型噴發的防範策略(見第三章、59-64 頁)。
2. 地熱運用是否會影響溫泉出水量?	2. 謝謝處長的意見。地熱抽取確實會影響地表溫泉水的自然湧出量。日本溫泉擁有者原先憂慮地熱開發會對溫泉湧出量造成影響，故相當反對地熱電廠的開發建造。但後來了解地熱只取熱不取水，且地熱發電的尾水除了回注外，還可穩定的供應溫泉使用，創造雙贏的局面，所以後來不僅不反對，也十分的贊成地熱的開發利用。
陳彥伯主任	
1. 地熱發電輸電路建設如何降低環境衝擊之國外案例	1. 謝謝主任的意見。國外地熱絕大部份不是利用現有電網(紐西蘭、日本)，就是輸電電網建造在地廣人稀處(美國)，對於環境的影響甚小。台灣北部有較大容量的輸電電網(高壓電網)，且未來地熱發電的裝置容量也不會太高，應不會有新的輸電電網的建造。
2. 地熱電廠電磁輻射為何	2. 謝謝主任的意見。就我所知在地熱電廠是否會發生電磁輻射，並未有相關文獻的探討，原因是即使會因渦輪機運轉發電產生電磁輻射，其程度也不大，何況絕大部分的地熱發電機的規模都不大。本人曾經參觀過數座運轉中的地熱電廠，也參觀過渦輪發電機，未有電磁輻射的警告標示。
華予菁課長	
1. 應補充地熱運用釋能減壓延緩火山噴發的假說	1. 謝謝華課長的意見。此問題與處長的意見相似，回覆請見上述處長的回覆內容。

2. 2017 年美國國家航空暨太空總署在實驗室著眼黃石公園 5 GWe 開發潛能,但擔心鑽太淺可能影響間歇泉,鑽太深則擔心火山提前噴發。導致計畫延滯,本計畫希望透過地熱發電相關文獻探討,供本處未來政策經營管理參考	2. 謝謝華課長的意見。地熱開發區與國家公園劃定區重疊,能否使地熱電廠對環境的影響減到最小,讓電廠和原有的地貌和生態共存共榮?達到保育與減碳並重的環境永續使命?抑或需在自然保育與地熱開發間權衡?各國的考慮因素不同,都與政府的政策和決策有關。只要政策訂定後都可擬定完善的經營管理計畫。
3. 報告中提及各國之地熱運用內容應以表格呈現。	3. 謝謝華課長的建議,遵從課長的建議在第七章呈現。
張順發秘書	
1. 為何陽明山熱源主要分布在竹子山磺嘴山之間,反而金山斷層及崁腳斷層未見?有何特殊地質構造?	1.謝謝張秘書的意見。基本上大屯火山群的地熱分布是在金山(山腳)斷層和崁腳斷層之間,長約 18 公里寬約 3 公里的區域內。此處為正斷層系統,地底下的熱液容易沿著正斷層所造成的裂隙系統上湧,形成淺處的地熱系統。
2. 報告書圖 56 僅就熱源套上分區圖,建議加上環境敏感圖層,俾利「未來精準探勘減少人力量能消耗	2. 謝謝張秘書的建議。本期末報告就是遵從秘書的建議,把不同的分區圖層:包括熱源、裂隙、環境敏感圖和國家公園的土地分區圖套疊在一起,獲得最佳的地熱開發區。
3. 結論應對地熱益處、生態衝擊及景觀影響作闡述	3. 謝謝張秘書的意見。地熱益處主要為能源自主、綠能和再生能源等。但對生態衝擊和景觀影響牽涉太廣,本執行計畫難以做詳細闡述,請見諒。
楊金臻副處長	
1. 圖 56 結果為易懂之評估,報告書 88 頁	1.謝謝楊副處長的意見。本期末報告已重

將各分區作 1-5 分級,然紅、黃可能位於特別景觀區,權值需再討論,因依陽明山國家公園保護利用管制原則,特別景觀區利用有其難度。其他圖 53 或報告書 P84 小油坑、硫磺谷、馬槽,其中大油坑為史蹟保存區。	從評估撰述,把環境敏感區和管理處的土地使用分區圖層套疊,獲得最佳地熱開發地區。詳見第六章的描述。
2. 紐西蘭、美國論述較接近臺灣現況,紐西蘭開發會影響溫泉遊憩,因此立法排除國家公園,此為反向論述,目前園區外天籟為使用乾蒸氣加地表水之人工溫泉,型態不完全一致	2. 謝謝楊副處長的意見。國家公園內地熱是否開發應是政策的決策問題,如日本早期不允許在國家公園內開發地熱,但 2011 年的地震和海嘯引發核意外事件後,已逐步評估開放。
3. 報告中提到 1300 多年前的火山噴發文獻為何?	3.引用文獻為: Zellmer GF, Rubin KH, Miller CA, Shellnutt JG, Belousov A, Belousova M (2015) U-Th isotope constraints on the petrogenetic processes and ages of young effusive eruptions from Tatun Volcano Group, northern Taiwan. In: Carrichi L, Blundy JG (eds) Chemical, physical and temporal evolution of magmatic systems. Geological Society Special Publication 422, 175-188.

附錄三、期末會議審查意見回覆

林殿順教授	
1. 在爆裂口下方是否都有微震分布，如硫磺谷、龍鳳谷下方是否有微震？	1. 謝謝委員的意見。爆裂口正下方淺處並未特別微震的分布。另外，硫磺谷和龍鳳谷下方有零星的微震發生，是否與爆裂口的成因有關需更多觀察證據佐證。
2. 利用 play fairway analysis 方式，研究地熱探勘好景區是非常好的方式，地熱潛能為何以馬槽最佳？硫磺谷不適合？	2. 謝謝委員的意見。馬槽和硫磺谷的地熱潛能都很好，但考慮陽明山國家公園的土地分區和地質災害潛勢圖，還是以馬槽為最佳。
張竝瑜教授	
1. 報告書 p24 Archie's 請修正，"比電阻"應為電阻率，單位($\Omega\cdot m$)	2. 謝謝委員的提醒。已修改(p.24)。
2. 報告書 p 39"特"低頻大地電磁法應為"極"低頻，大地電磁原理的說明有誤，請更正，其設定似僅 VLF 法，請釐清改正。	2. 謝謝委員的提醒。已修改(p.39)。
3. 報告書 p65 請說明是何深度或頻率所得資料，地名請用中文，p66 及 p67 兩圖範圍重疊，可用單一圖幅放大表示，p69 3*106m3。	3. 是用 VLF 頻率所量測,而是整體的 MT 量測的結果,並沒有限定深度)詳細請參閱 Komore et. al.2017 的文章。因是引用自 Komore et. al.的文章，為尊重原作者，故保留原圖為佳。圖 4-2 和圖 4-3 的範圍不同，雖有重疊但還是宜分開為佳，讓讀者更容易閱讀看清處(p.65-67)。
4. 報告書 p80 圖 5-3 地下熱液流動路徑，請於文中敘述其重要性及地質與開發意義。	4. 本圖是採自曾衡之(2014)的論文，本報告只取其精要概述，呈現地下熱液可能的流動方向和路徑，不宜引用太多文字，若有興趣者請參閱曾衡之論文(p.80)。

5. 報告書 p91 圖例與圖中標示不一致，圖中有兩 13 個圈畫範圍，然文中僅提及一次，請釐清並更正。另圖 5-5 地層模型忽略正斷層的火山底部模型，請檢視所引用模型是否正確？是否需更正？	5. P91 是”運用體積法及蒙地卡羅模擬之淺層地熱開發潛能”，並無委員所問之圖例與圖中標示不同的問題(p.91)。 圖 5-5 只是示意圖且地層模型之正斷層並不是火山底部模型的重點，且易造成讀者的混淆，故無須更正(p.81)。
6. 報告書 p86 圖中請標示資料點位置。	6. 謝謝委員的提醒。圖右下角有資料點位置(p.86)。
7. 報告書 p117 第七章的標題與本研究之目的似無太直接相關，若為國家公園開發或未來規劃做資料收集，請依各國法令作分析比較，或是對火山活動的影響分析。	7.第七章原本不是此一計畫的工作項目。只是收集資料供陽明山國家公園管理處參考。各國地熱相關法令的分析比較工作量大，不在本計畫的工作範圍內且不是短時間可完成。另外，對火山活動的影響分析無相關資料可參考(p.117-129)。
8. 報告書 p127 美國開發案例中，地熱蒸氣法的”豎立”，請斟酌改用詞，另 NPS 單元及 NASA 請書寫全名	謝謝委員的提醒。已修改為”施行”。 NPS 和 NASA 已改寫為全名(p.127)。
9. 報告書 P130 第 8 點...3*106m3，第 9 點...MWe(文中均用 MW)	謝謝委員的提醒。已修改(p.130)。
10. 參考文獻請注意格式不一的問題，請適度修正。	謝謝委員的提醒。已修改(p.134-140)。
11. 請於結論中加入分析對火山活動影響的相關分析比較。(如其他國家在開發過程並未造成相關環境破壞或誘發地震或水資源)	謝謝委員的建議。已增加於結論第 14 點(p.132)。
郭欽慧教授	
1. 大屯火山的地熱潛力一直是臺灣能源發展重要據點，本計畫執行有其必要	1. 謝謝委員肯定。

性。	
2. 本計畫係利用地熱運用對大屯火山活動影響，計畫執行已有豐富資料，唯對區域火山活動影響討論可更具體，如對水資源、地震活動等。	2. 國外在火山區域的地熱開發中，並未有因地熱開發對火山造成影響的報導或研究結果，顯示可能地熱開發對火山活動並無影響火影響可忽略”。至於對水資源而言，因地熱是採自深處的熱水，對於淺處水資源的影響，並未有相關文獻的報導。對於地震活動雖有些影響，但規模都很小可忽略，除非是深層地熱開發的水力破壞。
3. 計畫結論以馬槽為主要開發目標但其它地區硫磺谷等為何不是第一選擇，取捨標準可更具體。	3. 謝謝委員的意見。馬槽和硫磺谷的地熱潛能都很好，但考慮陽明山國家公園的土地分區和地質災害潛勢圖，還是以馬槽為最佳(p.131)。
4. 第六章圖建議加圖例。	4. 謝謝委員的提醒。已修改(p.111~p.116)。
5. 報告書 p70 圖 4-6 關係稍弱，有否其他方式可佐證？因為只有 Bepu(別府)，一點建立之關係，應該在有其它模式支撐此結論，或是 Bepu(別府)有其特殊代表性。	5. 同意委員的看法，但世界的資料確實有限，且別府是日本最像台灣大屯火山群，屬於熱水作用強烈的火山區，故採用此一模式來估計大屯火山區的熱流量(p.70)。
6. 報告書 p119，補充圖例區色塊。	6. p.119 為直接引用日本的資料” 2015 年三月日本興建中的地熱電廠”，色塊已有日文說明”凡例”。
翁榮南教授	
甲、本研究根據既有資料，合理期程，評估推測地熱潛能，並提出開發優先順序，也提出國外國家公園案例，提供主管單位擬訂政策參考。	1. 謝謝委員肯定。
2. 蒸氣爆發的時間，地點是否可以預	2. 蒸氣爆發的地點若研究清楚過去曾經發

測，大屯火山群那些地方較可能發生。	生蒸氣噴發的地點、推斷熱液上湧通道和熱源，以及熱水換質地帶和斷層裂隙的分布，似乎較可能預測。而時間的預測則較困難，目前世界火山學界已對此一問題加強研究(p.132)。
3. 所提出的地熱潛能運用是否可以有效延緩火山蒸氣噴發活動，值得進一步研究。	3. 謝謝委員的建議。
主席	
1. 地熱運用釋出對減緩火山活動應有一套假說。	1. 謝謝處長的意見。本報告已建立蒸氣噴發的噴發機制和形成條件『是地下有岩漿侵入釋放高溫的火山流體進入火山體地下淺處具有黏土蓋層的熱水儲集層系統，增加氣體的累積達飽和後噴發形成一系列的爆裂火山口和產物』，並進一步提出蒸氣型噴發的防範策略(見第三章、59-64 頁)。
2. 地熱運用是否會影響溫泉出水量？	2. 謝謝處長的意見。地熱抽取確實會影響地表溫泉水的自然湧出量。日本溫泉擁有者原先憂慮地熱開發會對溫泉湧出量造成影響，故相當反對地熱電廠的開發建造。但後來了解地熱只取熱不取水，且地熱發電的尾水除了回注外，還可穩定的供應溫泉使用，創造雙贏的局面，所以後來不僅不反對，也十分的贊成地熱的開發利用。
陳彥伯主任	
1. 依據國家公園法第 20 條：國家公園遊憩區劃設目的主要供遊憩使用尚未考量地熱發展，特別景觀區及生態保護區內之水資源及礦物之開發，應經國家公	1. 同意陳主任的意見，我國是法治國家，一切都需依法行政，於建議中提及”修改相關法令(如國家公園法)或制定地熱專法或專章，研擬制定在國家公園探勘

園計劃委員會審議後，由內政部呈請行政院核准。若地熱是國家重要層面也是法需修訂的部分。	和開發地熱的相關法令”(p.133)。
華予菁課長	
1. 研究限制的部分請團隊補充至結論與建議章節，是否有建議後續研究可累積資料。	1. 謝謝華課長的意見，已補充於第八章建議一節(p.132)。
2. 地熱運用及開發是否對火山地景造成影響，也應提出討論。	2. 國外在火山區域的地熱開發中，並未有因地熱開發對火山造成影響的報導或研究結果，顯示可能地熱開發對火山活動並無影響火影響可忽略”。對火山地景的影響則視建廠位置和規模大小，這可由主管機關利用環境影響評估加以規範。故建議立法和從事環境影響評估的研究工作(p.132-133)。
3. 建議內容就短中長期格式敘述加上涉及主協辦機關。	3. 謝謝華課長的建議，遵從課長的建議在第八章呈現(p.132-133)。
張順發秘書	
1. 本案地熱範圍分為大屯火山群範圍、陽明山範圍、地熱徵兆區範圍、評估範圍應進行釐整以說明地熱在本園區內重要性及國家公園內運用理由。	1. 基本上目前資料對於大屯火山群範圍、陽明山範圍、地熱徵兆區範圍、評估範圍很難區分，只能整體的去從事地熱運用評估。若需區分只能參考經濟部能源局所公告的分為國家公園內和國家公園外。
2. 報告書圖 6-13 敘述馬槽地區有明確範圍？僅有色塊應以圖例以顯現實際可能範圍區域及地熱潛藏量以利後續評估。	2. 謝謝張秘書的意見，已修正圖 6-13 並加入分區和地質敏感區的範圍，以及圖例(p. 116)。

3. 結論架構首先敘明蒸氣噴發及危險性，接下來敘述如何降低其危險及綠色能源應用，再以各方式套疊評估其潛藏量，最後為地熱運用可行性及其影響，以此方式進行整合分類比條列式更易理解。	3. 謝謝張秘書的意見，已修正(p.130-131)。
陳宏豪技士：	
1. 摘要應將整體成果納入。	1. 謝謝陳技士的建議，已修正(p.9-10)。
2. 地熱分布資料是否有圖層檔案俾利匯入本處資料庫。	2.沒問題，相關圖層檔可提供。