

火山災害潛勢評估及觀測技術強化 (1/4)

Potential Assessment and Observation Technology Enhancement of Volcanic Hazards (1/4)

主管單位：經濟部中央地質調查所

林正洪¹ 陳建志² 馬士元³ 鄭鼎耀⁴ 洪國騰⁵ 李柏村⁵ 陸挽中⁵
Lin, Cheng-Horng¹ Chen, Chien-Chih² Maa, Shyh-Yuan² Cheng, Ding-Yao⁴
Hong, Guo-Teng⁵ Lee, Po-Tsun⁵ Lu, Wan-Chung⁵

¹中央研究院地球科學研究所 ²國立中央大學地球科學系 ³社銘傳大學都市
計畫與防災學系 ⁴社團法人臺灣防災產業協會 ⁵經濟部中央地質調查所

摘要

本計畫投入臺灣北部火山活動徵兆監測工作，以瞭解臺灣北部大屯火山群及龜山島火山岩漿庫或熱液活動，作為火山災害潛勢評估及火山防救災政策制定依據。內容包括火山微震、地球化學、地表變形監測、大地自然電位觀測及地球物理探測等。綜合 109 年各項監測資料，與往年相較，大屯火山區與龜山島之火山活動仍處於穩定狀態。此外，109 年完成之龜山島火山災害潛勢圖資，可供各機關火山災害防救計畫後續運用。2019 年大屯火山群震事件對應士林測站的自然電位功率譜變化，顯示群震前自然電位功率譜強度有下降趨勢，可能反映地下流體系統的改變。當流體湧時，抬升壓力使應力往淺層集中，低電阻率構造往上發展，造成自然電位功率譜強度下降，此觀測成果有助於發展地下熱液或岩漿庫的監測系統。

關鍵詞：臺灣北部、火山監測、火山地質、火山災害

Abstract

The project aims to operate the monitoring networks toward active volcanoes in northern Taiwan for better evaluating possible volcanic hazards. Seismic and geochemical monitoring, ground deformation measurement, real-time image monitoring, self-potential observation and aero-magnetic survey have been applied as routinely monitoring methods within these volcanoes. In summary, the Tatun Volcano Group and the Turtle Island are in a stable state at present. Besides, the volcanic hazard maps of Turtle Island proposed in 2020 will be utilized in hazard mitigation plans for authorities needs. Furthermore, changes in the self-potential data and seismicity may correspond to the movements of underground fluids so we may develop a monitoring system toward hydrothermal fluids or magma chambers in the future.

Keywords : Northern Taiwan; Volcanic Monitoring; Volcanology; Volcanic Hazard

一、前言

本項調查之執行策略包含持續性之火山活動觀測資料收集與測站維護，新型觀測技術方法之開發調查及研究，並導入災害潛勢評估工作。前期計畫已在臺灣北部火山地區建立了火山活動觀測站網，包括溫泉水質、火山氣體、地下溫度觀測站以及地表變形衛星連續追蹤站等。本計畫將持續進行觀測資料收集，並加設火山影像觀測及地球化學觀測站，增加測點密度，同時強化資料即時傳輸能力，掌握火山活動徵兆變化。

臺灣北部火山微震觀測利用目前設置於地表的地震儀持續周及火山微震訊號，並適度增加或調整觀測站之個數，可全面性同時監測大屯火山地區及宜蘭龜山島等兩處火山地區微震及火山活動地動訊號，偵測可能之火山微地動(Volcanic tremors)，試圖辨識火山主要活動位置與深度，並接收地震網外之區域地震，期望能清楚判釋火山地區底下可能主要岩漿活動之位置，同時利用震波層析成像之方法，嘗試獲得更仔細之速度構造模式。期望對火山可能岩漿之存在形貌或其活動行為可有進一步瞭解，達到多重學術與防災之目的。

根據鄰近國家的經驗，火山在噴發之前會造成明顯的地表變形現象，本計畫將引入火山地區地表變形觀測工作，彙整地表衛星連續追蹤站網的資料，適時加設觀測站，並利用永久性散射體雷達差分干涉(PSInSAR)技術、次聲波與井下傾斜計配合火山地區精密水準測量綜合瞭解火山地區地表變形的趨勢，並作為火山活動的評估依據。在災害潛勢評估調查方面，本計畫將進行火山地質調查與歷史災害資料蒐集，彙整現有的火山災害潛勢調查成果，分析致災因子並評估火山災害可能影響範圍，並分年繪製出版火山災害潛勢圖。

整體計畫將逐年建置更新火山活動徵兆以及災害潛勢相關資料庫，並透過資料公開平台提供災防管理單位以及民眾查閱，達到資料公開的政策目標，並協助災害防救計畫研擬執行。同時，定期辦理火山活動與災害評估說明會，向民眾及各級政府宣導火山觀測成果以及資料查詢方式，滿足民眾知的權利，並提升對自家周遭環境的認知。本計畫主要工作項目包括：(1)持續建置火山氣體、溫泉水質、地溫及微震活動等即時監測站，掌握火山活動現況，評估火山活動狀態。(2)臺灣北部火山地區地表變形觀測，利用永久散射體差分干涉法影像分析、次聲波與井下傾斜計配合衛星連續追蹤站以及水準測量了解火山地區地表變形情形。(3)火山災害潛勢研判分析及火山災害潛勢圖資更新，結合多種地球物理探測技術精進火山地區地下構造調查成果，配合過往火山活動影響範圍分布調查資料研判火山災害可能影響範圍與災害潛勢。(4)更新地球化學分析設備及新建火山氣體站、地震站，提高火山活動徵兆值變化判釋精度及分析效率。(5)持續更新及公開火山活動觀測資料，提供火山觀測資訊，並推動火山防災知識教育推廣。

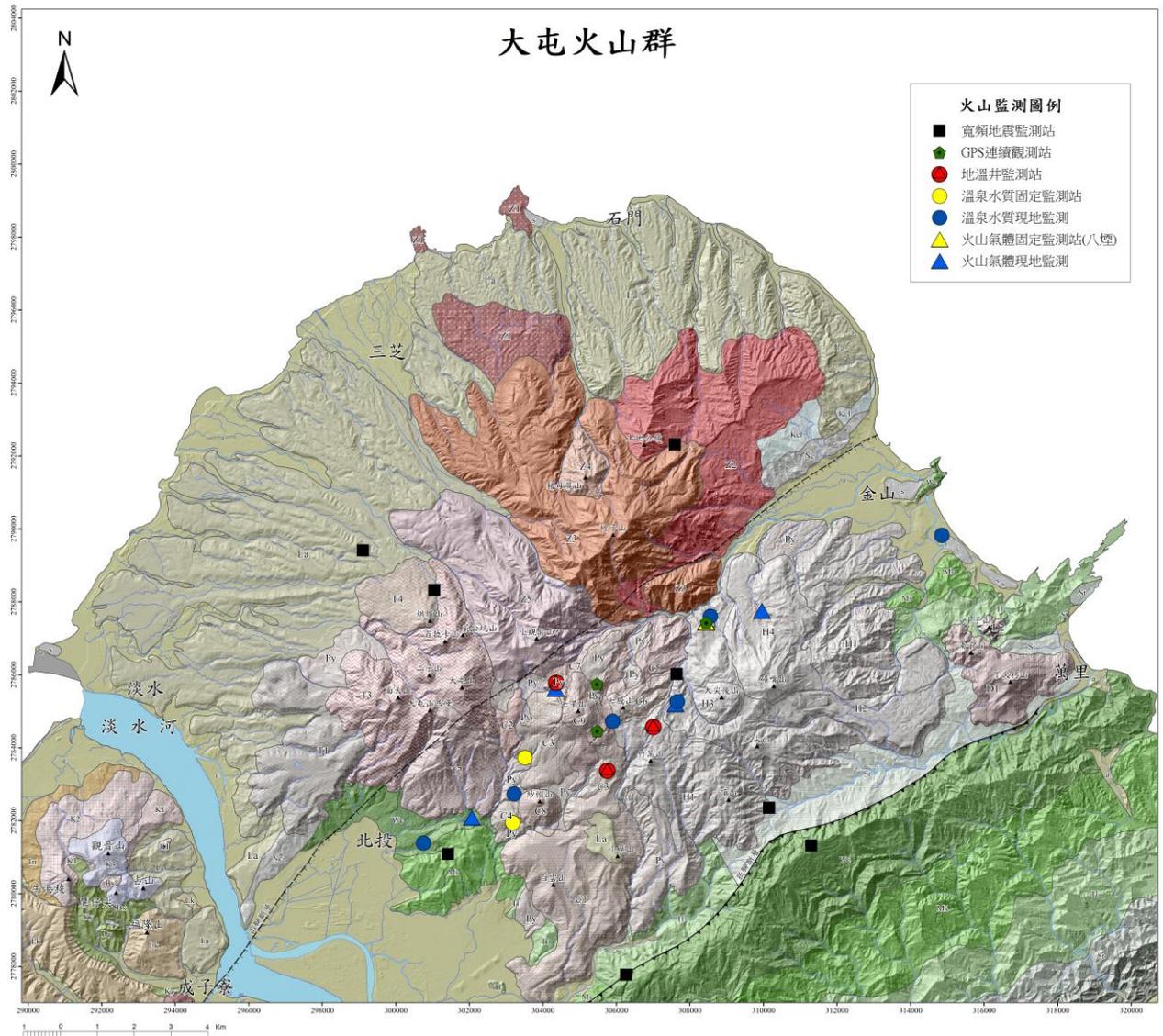


圖 1 本所於大屯火山群所建置的火山觀測站網。

二、臺灣北部火山地區地震、地球化學與地表變形監測

本所與大屯火山觀測站合作進行大屯火山與宜蘭龜山島地區之火山活動徵兆觀測，其中包括地震活動、火山氣體與溫泉水質收集分析、地表變形觀測與分析，以及地震、GPS、火山土壤氣體與溫泉水質監測站運作維護。

本計畫之測震網採用高解析度的數位式地震記錄器，並以高效能、PC-Based 的資料擷取系統作分析研究。本計畫所架設的臨時地震觀測網皆為寬頻測站，採用寬頻段的三向量速度型感應器，能記錄大地震及鄰近區域的微小震動，野外測站使用儀器包含同時具備感應器及紀錄器功能的 Galrup(6TD)及日本東京測震公司發展之地震記錄器搭配感應器等，將感震器的地動信號詳實記錄並數位化儲存，存放資料的記憶體是硬碟，其容量高達 20 Gigabyte。硬碟優點在於連續資料的資料量龐大，高容量硬碟可減少前往蒐集資料的次數。觀測微小地震是本監測網的主要任

務，為避免在監測的過程中漏失任何有用的資訊，連續記錄方式就成為較佳的選擇。具有 24 位元的解析度，取樣率最高可達 100 次/秒。

地震測站維護部分，共計維護大屯火山區域及龜山島各八處寬頻地震測站的運轉，包含定期派員至現地下載原始紀錄資料，資料格式轉換外，並不定期巡視檢查並排除各項現地、儀器狀況、即時訊號接收等問題。所維護的地震站分別為 YML01(國軍墓)、YML02(萬里)、YML07(土地公廟)、YML09(北新庄)、YMC05(倒照湖)、YMC08(明溪街)、YMC10(北投溫泉)、YMS17(磺溪頭)，IL01(三貂角)、IL02(大里)、IL03(大溪)、IL04(頭城)、IL17(三星)、IL18(冬山)及龜山島 IL11、IL12 兩處，測站分佈如圖 2、圖 3。

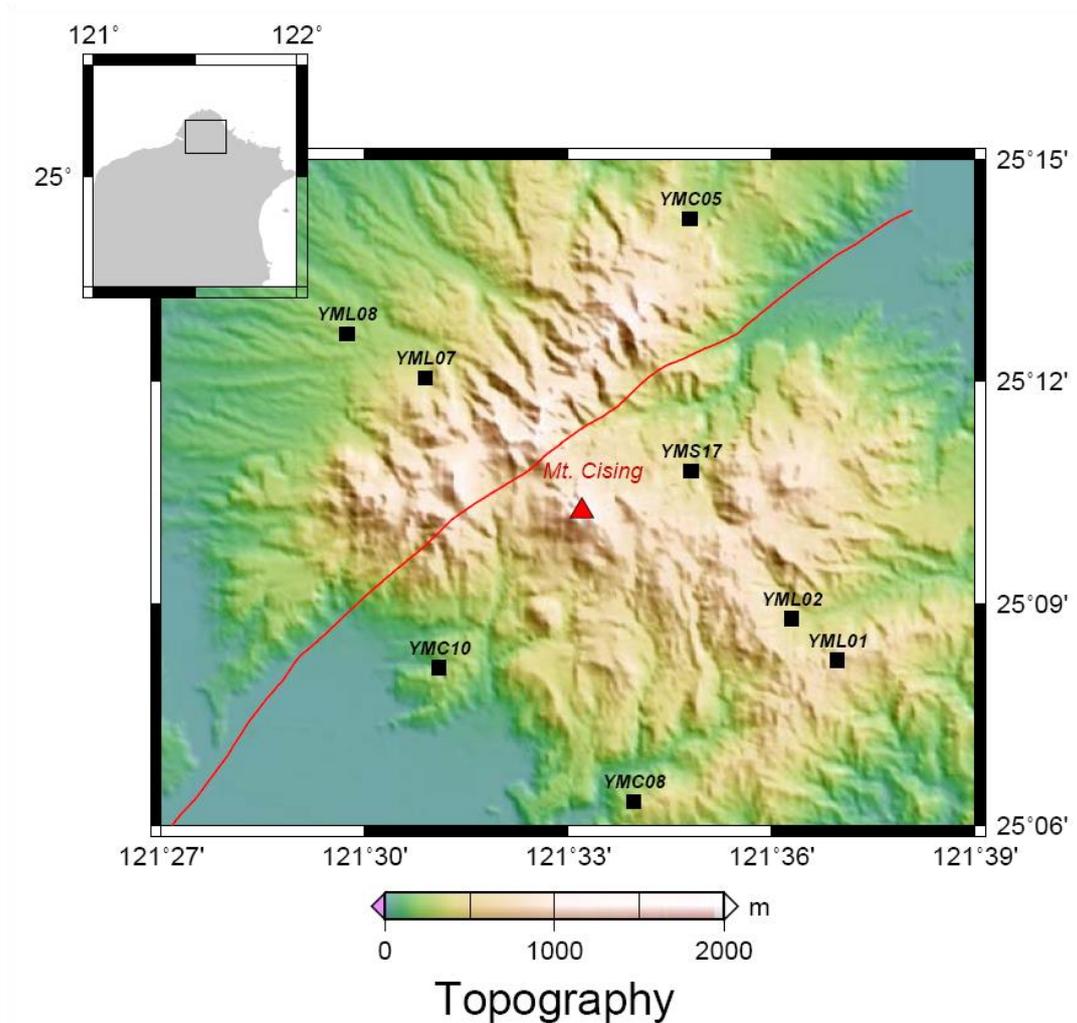


圖 2、大屯火山區域寬頻地震測站分佈圖。

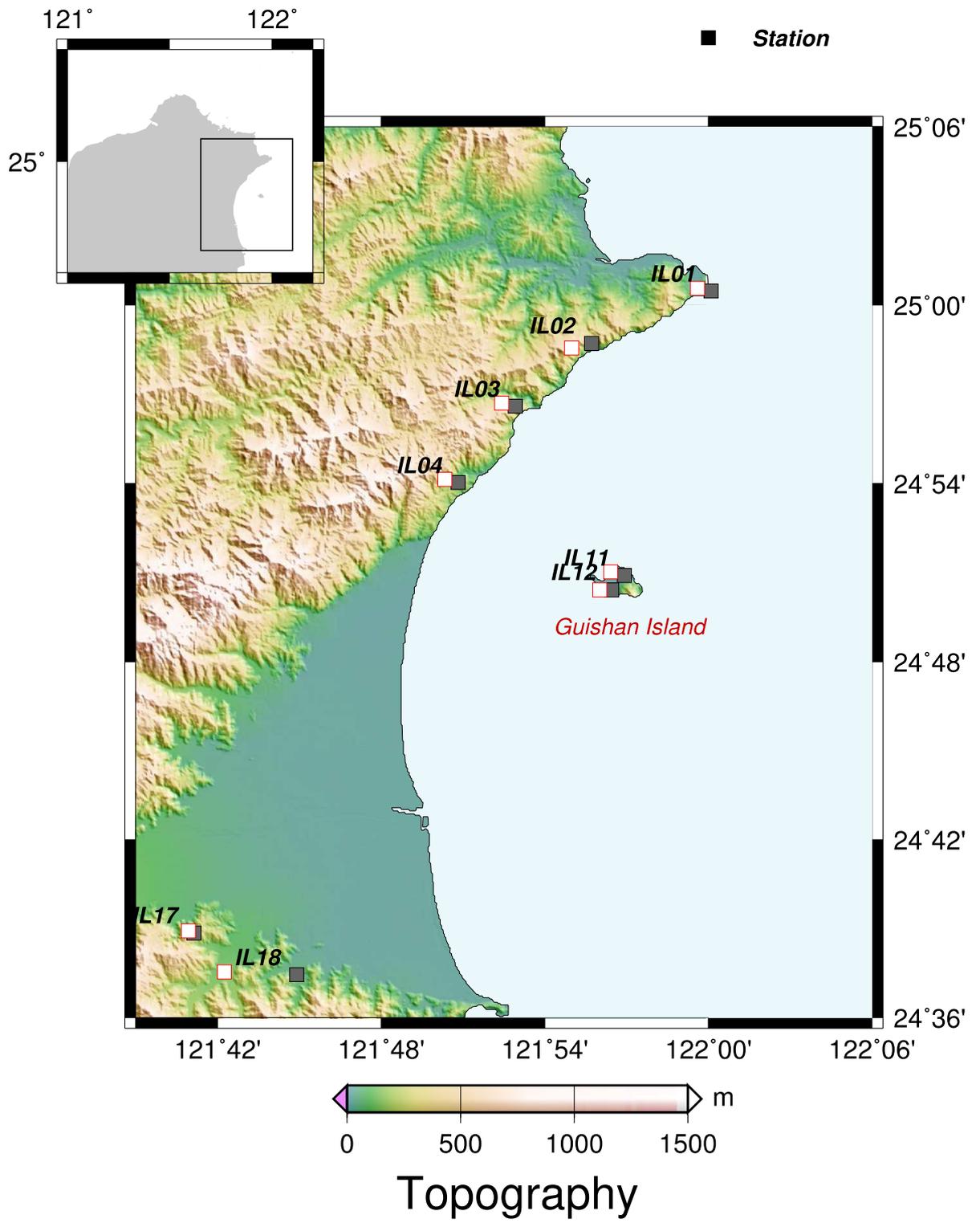


圖 3、宜蘭區域寬頻地震測站分佈圖。

大屯火山區寬頻地震網 2020 年間偵測到微震數量約 4550 個，較前一年度活躍（圖 4），尤其上半年發生多起較大規模地震，微震數量佔全年度四分之三。例如 1 月八煙地震序列，微震達 658 起，以及 5 月八煙磺嘴山地震序列，達 825 起，可視為短期區域應力變化，7 月至 12 月地震活動度趨緩。本年度宜蘭、龜山島所偵測之微震數量約 2,844 個，總數與近兩年地震數量相近，但下半年發生次數較多，仍須持續觀測後續地震活動情況。

值得注意的是，八煙-磺嘴山、大油坑及七星山等三個區域地震活動度明顯隨時間變化，大致為：(1)八煙磺嘴山地區 1 月地震活動度明顯增加後，2 月至 3 月該區域地震數量皆急劇下降，而至 5 月及 6 月又為另一時期活動高峰。(2)大油坑擎天崗區域，1 月至 5 月在該區域地震數量皆達 100 起，為相對活躍的區域，至 6 月開始地震活動度持續下降，至 10 月才又增加。(3)七星山區域，2 月地震活動度較高，8 月開始活動度下降，至 10 月達到低值。而七星山南側區域自 7 月開始零星微震發生後，8 月地震活動度增加，而至 9 月僅剩少數微震事件發生於該區域。

龜山島地區每月平均微震數量約 240 起，但每月活動性變化明顯，1 月份時地震數量達 460 起，為宜蘭地區過去兩年峰值的兩倍，顯示該時期活動度增高，而 2 月地震活動持續下降至 5 月，7 月至 9 月地震活動又上升。該變化情形主要反映龜山島的地震活動度。宜蘭地區及宜蘭區域微震主要集中在龜山島鄰近區域，與該區域的背景地震活動度相似。本年度宜蘭、龜山島所偵測之微震數量，與該區域近兩年地震數量相近，但震央分佈明顯較 2019 年集中，特別在龜山島東側，特別是 6 月至 11 月時期該集中分佈特徵非常顯著。

2020 年大屯火山區溫泉水陰、陽離子濃度與其他水質監測值主要落於整體平均值正負 1 個標準差範圍內，水質狀況穩定。同時，火山氣體之噴氣孔溫度、氦同位素比值及二氧化碳濃度等指標維持穩定，火山氣體分析結果顯示大多數標本落在過去經驗的預期範圍內，顯示目前逸氣系統穩定（圖 5）。地溫監測結果則顯示各監測井溫度變化平穩，全年溫差均與往年監測結果一致。整體而言大屯火山區與龜山島之火山活動仍處於穩定狀態。

利用氣體成分 N₂-He-Ar 三角圖顯示，比起 2019 年有氦氣增加的現象，2020 年分析結果顯示大多數標本落在過去經驗的預期範圍內，顯示目前逸氣系統穩定，但是 11 月和 12 月有明顯地偏移，幾個地方還有明顯的地下水訊號。另外由 CO₂-HCl-Stotal 三角圖來看，2020 年的分析結果仍然有少許像 2019 年 HCl 增加的現象，不過大多數的標本較去年而言比較集中在熱液區域，然而八煙和大油坑仍然顯示 HCl 變化較劇烈。同樣的在 11 月和 12 月時顯示有強烈的熱液訊號加入系統，不過同時地震事件似乎並沒有明顯增加或減少。本年度年初上半年地震活動相當活躍，不過目前噴氣口氣體變化並沒有明顯異常，仍持續注意觀察中。

2020

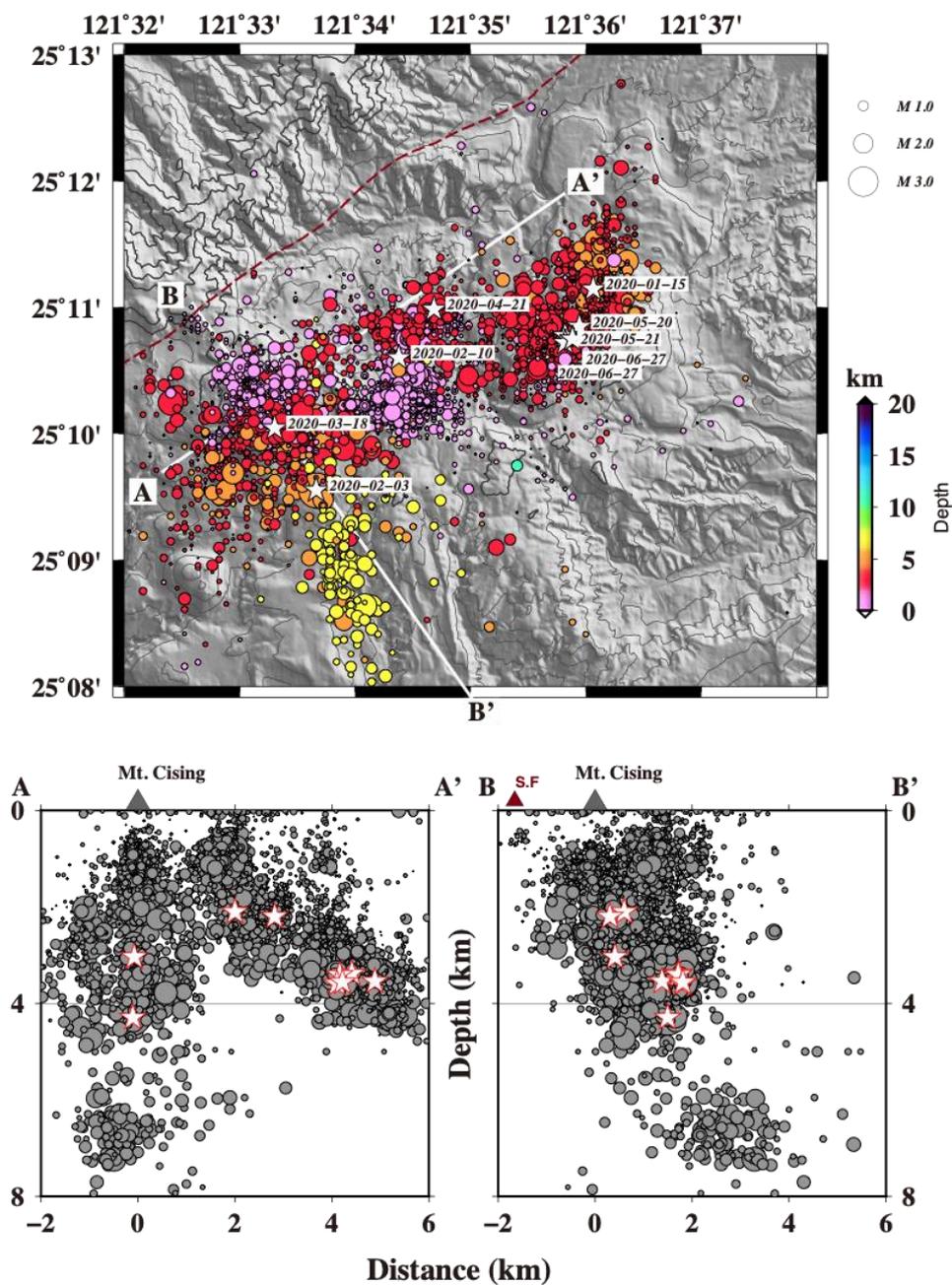


圖4 大屯火山區 2020 年地震活動分布，圓圈代表震源（大小表示規模，顏色表示深度），灰三角為七星山。AA' 為東北—西南向剖面，BB' 為西北—東南向剖面。（單位：公里）

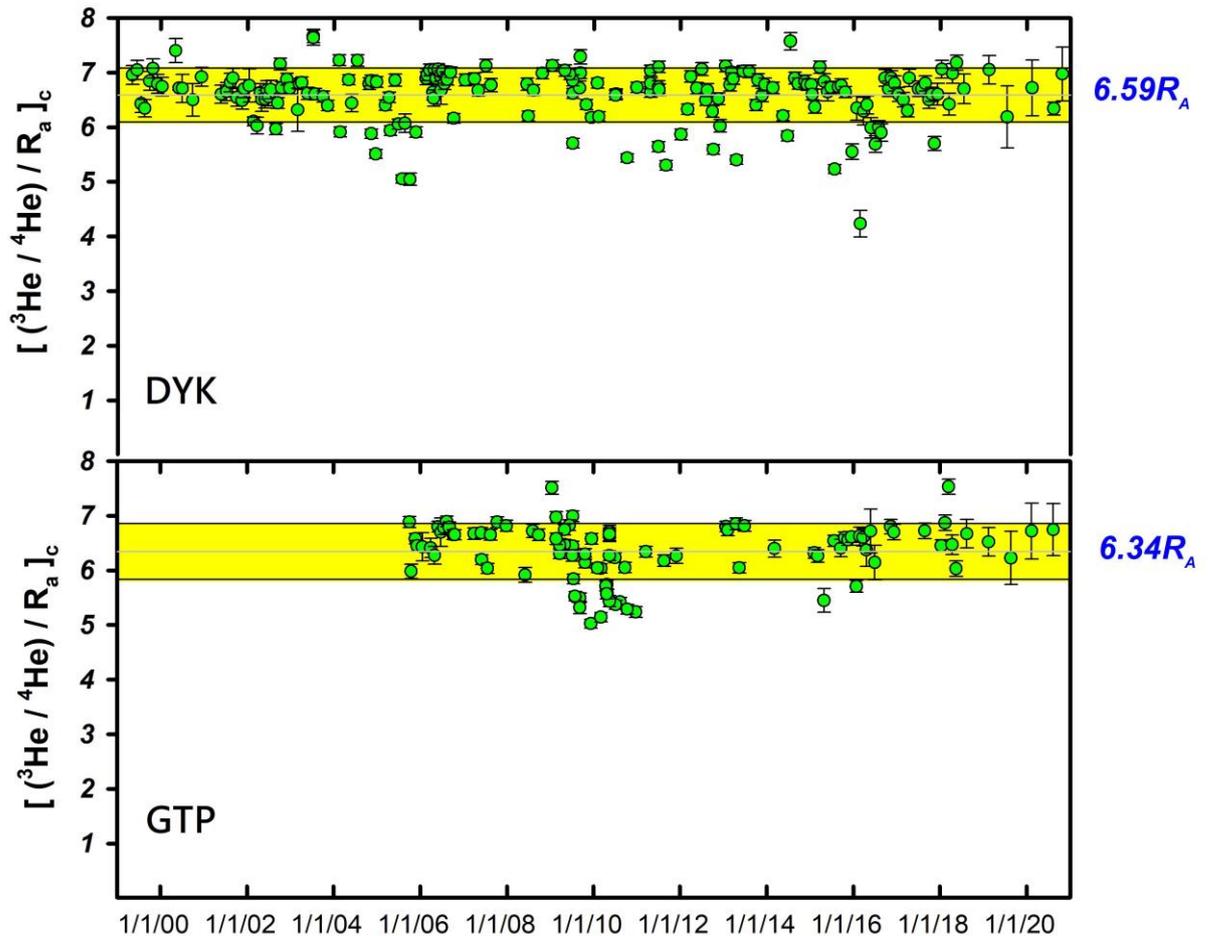


圖 5 2020 年大屯火山區大油坑 DYK、煥子坪 GTP 火山氣體氦同位素值 RA，值越大，代表氣體的岩漿組成比例越高。

分析 2013 年至 2020 年 06 月北部地區 GPS 速度場結果發現，以 YM03 為參考點，整體水平位移速度值介於 0.8 mm/yr 至 4.8 mm/yr，以七星山與中湖地區有最大的水平位移。垂直速度方面大部分測站以些微抬升為主要運動方向，其中又以位於大油坑地區的 YM09 測站則有較明顯之抬升，抬升速率約為 4.3 mm/yr，此較大之抬升速率為受到 2020 年後半年抬升與前期不同所影響，真正原因為何還需要多累積一段時間或是其他資料比對；而位於七星山 GS93 測站則是下陷為主的運動行為，下陷速率約為 1.7 mm/yr。

本研究同時結合地調所與中研院之 GPS 站網，將測站區分為橫越七星山地區與磺嘴山地區之 GPS 基線連續變化。橫越七星山地區基線分析初步結果顯示，以七星山南邊的 GS93 測站為參考點，基線編號 3，4 及 5 於分析時間段 (2017/01~2020/10) 利用簡單線性回歸均呈現斜率為正，其斜率值分別為 -1.0，0.1 及 2.6 mm/yr。表示此區域變形行為主要以七星山西側有較明顯的變形行為，西北方的 YM07 與 GS93 之間為壓縮行為，而南方的 YM02 與 GS93 則是伸張行為，位於七星山東北方的 YM06 與 GS93 之間則無明顯相對伸張或壓縮；外圍基線對(編號 1 和 2 斜率分別為 0.5 及 0.1) 同樣無明顯相對伸張或壓縮，2020 年新增測站 YMN2 與

YM07 或 GS93 之間的基線改變則因為時間太短，另 GS93 於 2020 年後段有一明顯跳動，因此對於此區域之基線分析建議需要再累積長一點時間方可確定其彼此運動方向。

而橫越磺嘴山地區基線分析初步結果則顯示，若以磺嘴山西北方的 GS95 測站為參考點，由於 GS95 測站於 2018 年 4 月後才有資料，且近期接收資料不穩定，對於基線計算較不可信。因此另改選鄰近的中研院測站 YMN4 為參考點，線編號 6 及 7 於分析時間段(2017/01~2020/10)利用簡單線性回歸其斜率值分別為-0.1 及 2.2 mm/yr。表示 YM09 與 YMN4 之間無明顯伸張或是壓縮行為，而 YM03 與 YMN4 之間則為伸張行為。由於考慮到垂直向變形可能會造成較大的誤差，擬於後續年度報告時將水平與高程方向分開討論，以釐清七星山與磺嘴山地區之變形行為。

三、臺灣北部火山地區大地自然電位觀測

臺灣北部之大屯火山群 (Tatun Volcano Group, TVG) 緊鄰於臺北盆地以北 (圖 1a)，且至少由 20 個第四紀火山組成 (Wang and Chen, 1990)。Belousov 等人 (2010) 使用放射性碳定年法分析大屯火山群的火山碎屑沉積物，研究結果指出七星山、小觀音山、磺嘴山岩漿噴發 (Magmatic Eruption) 約在一萬三千年到二萬三千年前發生，而七星山在六千年前發生過蒸汽噴發 (Phreatic Eruption)。此外，Zellmer 等人 (2015) 分析大屯火山群岩石和礦物的放射性同位素 (U-Th-Ra)，研究成果指出大屯火山群最後一次噴發可能小於 1370 年前。其他許多的研究報告也同樣顯示大屯山底下存在著岩漿庫且火山熱液活動可能尚未完全停息 (Konstantinou et al., 2007; Lin et al., 2005a, 2005b, 2018; Lin and Pu, 2016; Murase et al., 2014; Song et al., 2000; Yang, 2000)。只要有岩漿庫存在，我們就無法排除未來噴發的可能。因此，利用多種觀測方法即時監測大屯火山群的火山熱液活動至關重要。

2011 年，臺灣大屯火山觀測站 (Taiwan Volcano Observatory, TVO) 在臺北士林陽明山區成立 (<http://tvo.earth.sinica.edu.tw>)，該機構已對大屯火山群的活動進行多種參量的長期連續監測，包含微震活動、地球化學、地下溫度和地表變形等監測項目。然而，大屯火山群的諸多連續監測工作中，缺乏電磁相關的連續監測系統與長期觀測資料，僅有零星的短期任務導向型之電磁法探勘調查於陽明山區進行，如 Komori 等人 (2014, 2017) 橫跨數天到數週的聲頻大地電磁法 (Audio Magnetotelluric Method) 或特低頻大地電磁法 (Very Low Frequency Magnetotelluric Method) 的研究或是 Dobson 等人 (2018) 使用三維大地電磁法反演該區的地下電阻率結構。

電磁探勘方法，特別是地電場 (GEOELECTRIC FIELD) 的觀測，對孔隙介質中的流體流動、地下水不同濃度的電解質、地熱區的熱液活動、土石壩的滲漏等過程有著高度的敏感反應 (Revil and Jardani, 2013)。地電場是反應地球內部天然的「電位差」，主要是太陽活動造成大氣層中的磁變化在地球內部所產生的感應電場以及地殼中的某些物理、化學作用引起的電場。前者常稱作大地電場 (Telluric Field)，後者則是自然電位 (Self Potential)。本計畫目的主要是探討地殼中的某些物理、化學

作用引起的電場，故之後大多使用自然電位的說法。

自然電位主要來自兩種過程：第一種是由流動電位（Streaming Potential）所產生，產生之原因是由於水或電解質在孔隙介質中的流動；其二為電化學電位（Electrochemical Potential）所產生，主要是由地下水中所含有不同濃度之電解質擴散所造成。因此，自然電位法是屬於被動式量測技術，意味著其並不透過主動產生擾動源，純粹量測自然界已存在之電學特性。此外，自然電位法是屬於低頻的電磁探勘方法，低頻的電磁波衰減程度較小，所以可探測的範圍較廣。在火山地熱區，自然電位法已有諸多應用，探討地下熱液的運動或地熱區的分布(Aizawa et al., 2005; Finizola et al., 2002, 2004; Hase et al., 2005; Hashimoto and Tanaka, 1995; Michel and Zlotnicki, 1998)。這些研究表明，在火山地區連續監測紀錄自然電位和電阻率等電學量的變化，可以揭示火山熱液活動的動態過程，這是一次性調查的物球物理探勘工作中，所無法達到的重要目標，也正是我們積極推動自然電位及電阻率連續監測的重要緣由。

近年來，科學家已經研究證實臺灣北部大屯山底下存在著岩漿庫。只要有岩漿庫存在，我們就無法排除未來噴發的可能。因此，利用地球物理、地球化學、微震活動等方法監測火山活動是必要的。藉由密切的連續觀測可以即時掌握地下熱液的活動情況，進而有機會成功預警火山噴發。本計畫的目標為發展地電場方法於大屯火山群之連續觀測、資料處理與分析流程。藉由連續觀測大屯火山地區的自然電位變化，可延伸應用於觀測地下熱液的長期流動變化，以瞭解火山熱液系統之活動性。更進一步地，我們有機會將自然電位資料結合微地震、地球化學、地溫和地表變形等現地觀測資料，發展未來火山預警系統之重要指標。

期中成果為完成士林地電站 2018 年全年以及 2020 年 1 月至 6 月自然電位資料的初步分析，並完成磺嘴山地電場觀測站的建置。而期末成果則進一步分析士林地電站 2019 年全年以及 2020 年 7 月至 11 月的自然電位資料。本計畫中，我們首先檢視原始資料的紀錄品質與完整性，例如：數值是否異常、不合理以及資料遺漏比例。之後，我們使用 Welch 方法計算每日自然電位的平均功率譜，得到 2018 年 1 月至 2020 年 11 月的時頻圖。接著，本計畫探討雨量、氣溫與磁暴對自然電位的影響。排除上述的外在因素後，剩下的效應則極有可能來自於地下。因此，研究自然電位與地震之間的關聯性才有機會實現。

本計畫觀測大屯火山地區的自然電位長期變化(圖 6)，作為監測火山地區地下熱液活動之標的，以瞭解火山熱液系統之活動性。並嘗試以自然電位資料對比微震觀測紀錄，從中探討不同類型火山活動訊號之關聯性，藉此評估發展火山預警指標之可能性。

本計畫比較 2019 年大屯火山地區發生的 5 次群震事件與其對應時段的自然電位功率譜。以 2019 年 1 月 28 日開始的群震為例，此期間地震發生率上升，從原來的每日 3 次到每日 34 次，且地震主要分布深度從原本的 10 至 20 公里上升至 5 公里內(中央氣象局資料)，或從每日 6 次增加到每日 308 次(大屯火山觀測站資料)。此外，在群震之前，自然電位功率譜的強度有下降趨勢(圖 7)。此種變化可能對應

到地下流體系統的改變。當地下流體向上湧升時，抬升的壓力讓應力分布往淺層集中；此外，流體上升意味著低電阻率構造往上發展，進而造成自然電位功率譜強度下降。在未來若能搭配地下溫度或地球長波輻射（Outgoing Longwave Radiation, OLR）等其他地球物理觀測資料，可能有益於發展地下熱液或岩漿庫的監測系統。

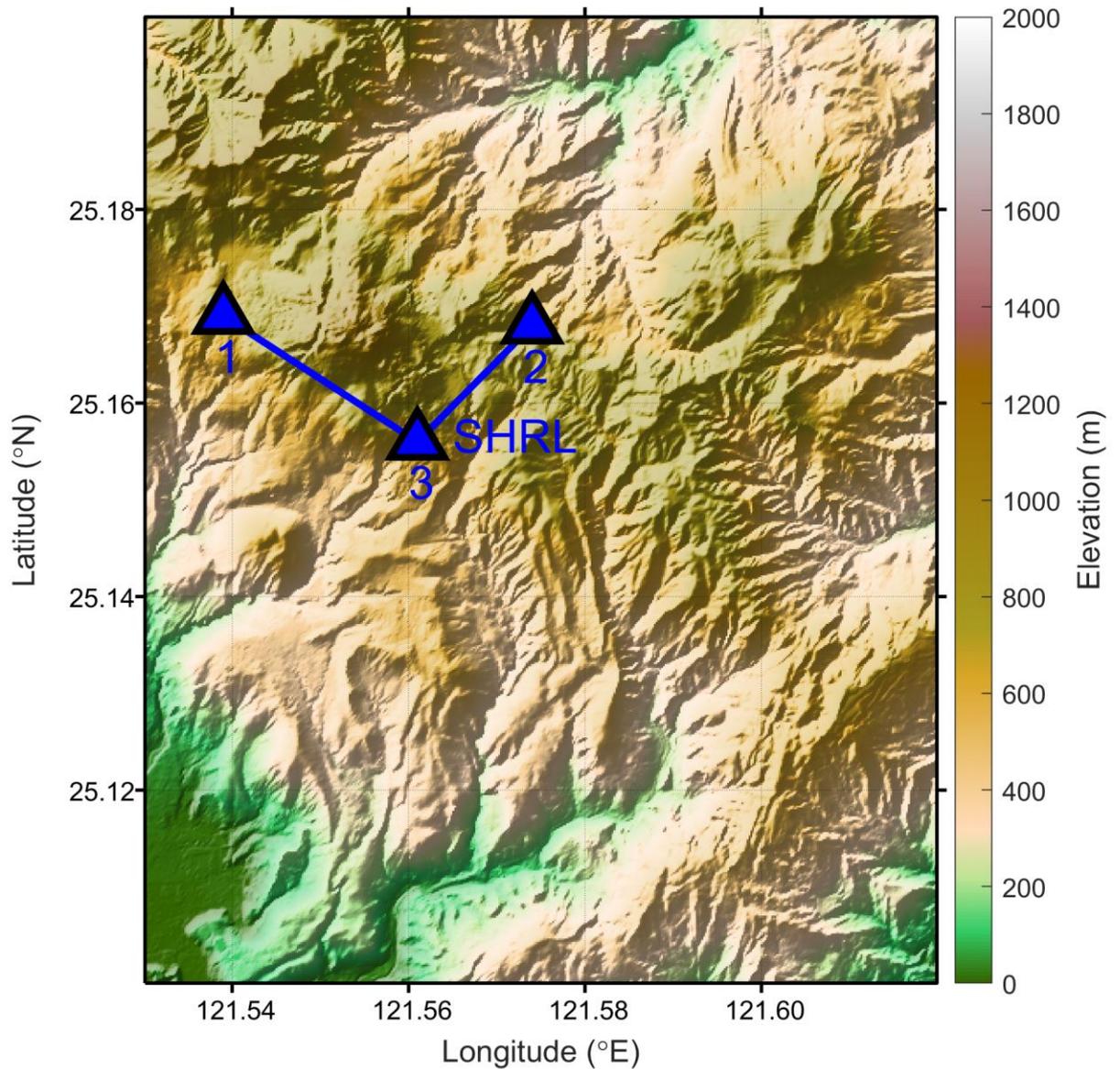


圖 6 大屯火山區大地自然電位連續觀測站(中央氣象局士林測站)配置分布圖。1、3 為非極化電極，2 為資料記錄器站房。

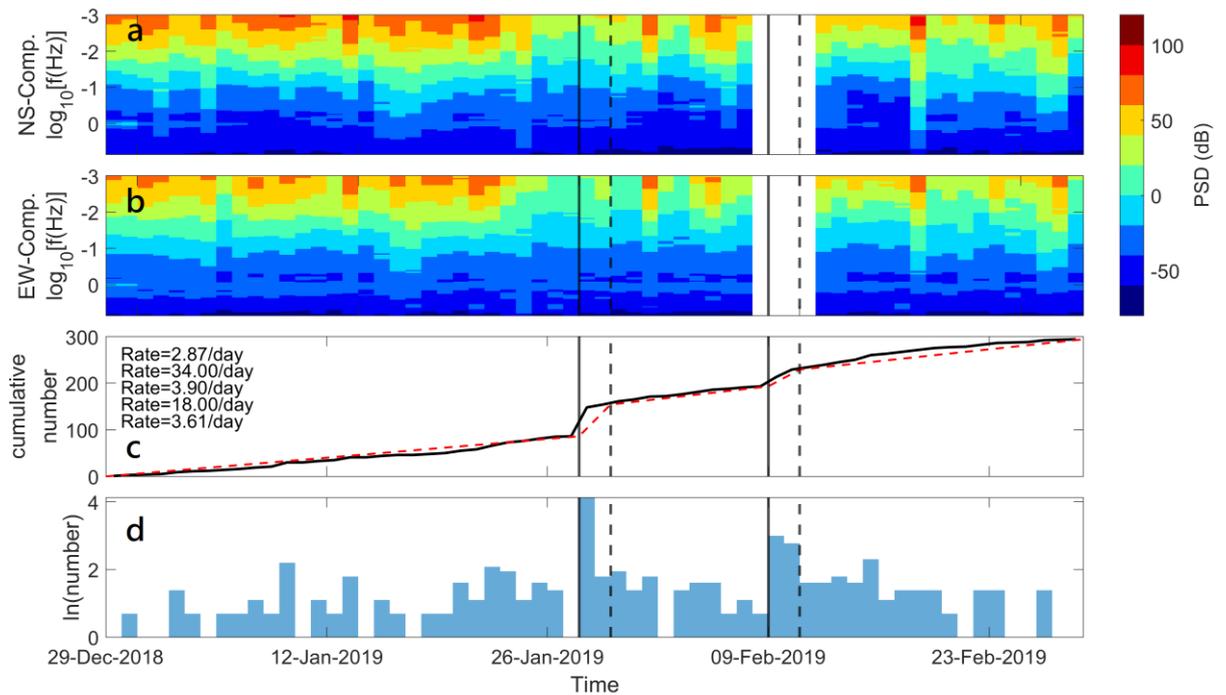


圖 7 2020 年 (a) 南北方向與 (b) 東西方向自然電位功率譜：(c) 中央氣象局目錄的累計地震數目時序圖。(d) 中央氣象局目錄的每日地震個數。時間軸為 2019 年 1 月 28-29 日群震前後 30 天，共有兩次群震事件 E1 與 E2。各子圖中實虛直線表示群震開始和結束，並以此切分不同階段。圖 (c) 左上方文字表示各階段每日平均地震數，紅色虛線是以每日平均地震數為斜率所繪製之直線。

四、臺灣大屯火山地區精密水準測量

火山活動或瀕臨噴發時，近地表處常因為岩漿庫體積變化或流體遷移而有規模不等的徵兆，反映於局部地形上，因此，針對火山地區地表變形行為進行長期監測(圖 8)，是最為直接的觀察手段，並能進一步研判其災害潛勢與影響範圍。

本所規劃之精密水準測量案，計畫範圍為大屯火山地區，測量路線環繞陽金公路、七星山登山步道、中湖戰備道等，行經小油坑、七星山、冷水坑、擎天崗、大油坑、八煙等(圖 9)。本年度於此區已完成 34 處施測點位埋設，經 2 個月的點位自然沉降，待其穩定後之數值，可運用於地表變形長期觀測。另 12 處為本所、內政部、陽明山國家公園管理處於 108 年度以前設立，合計 46 處精密水準點位。另外，於小油坑地區，針對其噴氣孔進行 3 次地面光達(LiDAR)與地基合成孔徑雷達

(GBSAR) 地表遙測工作。然而，本案為新興計畫，首度嘗試聯合精密水準測量與遙測技術，仍有待產出更多數據，藉以評估火山地區地表變形監測技術之可行性。本案結合地面近距離觀察與空中廣域觀察，分析聯比數據與整合補充資訊，期望未來對於大屯火山地區活動提供更多參據。本年度完成火山地區精密水準測量測線的建置，將於後續年度每年定期進行精密水準測量工作，提供大屯火山地區地表垂直變形測量數據，配合其他方式的火山活動觀測成果共同研判火山活動狀態。



圖 8 精密水準測量野外作業。



圖 9 本年度精密水準測量施測路線圖。

五、臺灣北部火山地區火山災害潛勢資料蒐集與調查分析

本工作以 4 年為期，進行臺灣北部火山地區火山災害潛勢資料蒐集與調查分析工作，範圍包括臺灣北部大屯火山地區、龜山島及宜蘭地區與臺灣北部海域火山。本年度蒐集臺灣北部地區過往發生火山噴發歷史紀錄、國內外災害潛勢資料與火山災害評估模式，評估分析龜山島及宜蘭地區可能發生的火山災害種類以及影響範圍模擬，建立火山災害潛勢圖資。

蒐集日本、美國、菲律賓、印尼、紐西蘭及義大利等國家的火山災害評估及災害潛勢地圖，彙整出各國主要的作法皆是根據過往歷史噴發紀錄，進行模擬分析，評估火山噴發之方式及可能影響之範圍，但對民眾科普而言，僅需清楚明瞭、淺顯易懂的告知火山噴發產物可能影響之範圍，說明可能會面臨之災害類型、如何避難或其他作為。

周全的防災地圖是所有火山防災工作的關鍵基礎，希望藉由對火山的積極瞭解，能評估火山的各種致災因子並降低其所造成的災害。若能事先擬定嚴謹的應變疏散機制，亦將有助於爭取火山噴發前的緊急應變時間，並藉由中央與地方相互合作，以建立資訊分享、訊息發布及緊急通報機制，加強災害教育宣導且定期實施大型聯合防災演練，可減少導致民眾生命財產蒙受損失之災害，以提升全民之災害應變能力。

Molist (2017) 提到火山風險的評估很複雜，因為包含了幾種不同的危險自然現象，儘管火山發生頻率比其他自然災害少，但會對人口、經濟及環境造成嚴重的負面影響，可能需要經過漫長的復原時間，不管是生理、心理或是經濟等，因此整體火山風險降低計畫應包括幾個基本計畫：(1) 提高對過程及潛在影響的知識科學計畫（即危害評估）；(2) 監測火山當前活動狀態；(3) 制定教育計畫，教育民眾有關可能危害他們的潛在危害與風險；(4) 設計應變計畫與應變策略的管理程序。

要評估和管理火山風險，首先要先評估火山災害，即確認火山過去的行為，並藉此推斷火山爆發中的行為，故火山危害評估之目的主要是預測下一次噴發的性質，透過這些資訊來降低危險區域的發展，並確定火山噴發時的安全區域及疏散路線來降低火山災害風險，火山災害評估除了可以為火山噴發期間的決策提供幫助外，亦可為民眾教育及火山災害訊息提供指南，讓民眾瞭解其面臨的火山危害。

根據過去火山噴發地質資料判斷龜山島若發生火山噴發，可能會產生火山熔岩流、火山碎屑流及火山灰落，而龜山島沿海岸峭壁陡峭，再加上龜首部份受到熱液換質作用影響，可能會有地質敏感脆弱的問題。若遇上極端強降雨可能會因為火山噴發產物之堆積結合雨量，形成火山泥石流。地質敏感脆弱之問題亦有可能因為岩層本身風化因素或地震造成塊體崩落，除了塊體崩落造成的落石危害外，大量塊體滑入海中亦有可能導致海嘯發生，對宜蘭地區的影響不容小覷。

以地球物理而言，其致災因子即為火山爆發，並產生後續的火山爆發產物，而龜山島本身為火山島，沿海山壁地形陡峭，可能會有地質敏感之問題，故透過無人機進行拍攝，輔助建構龜首區域之正射影像、地形、三維模型輔助判別地形與地質特徵，進一步探討龜山島及模擬西南岸崩塌、龜首火山噴發影響等，並透過空拍機

檢視海岸線側面狀況，建構環景影像、正射影像、地表地形 (DSM) 及三維模型保存紀錄，以供後續比對參考。並利用 2020 年 11 月 26 日空拍成果製作成正射影像套疊 2016 年度福衛判釋龜山島崩塌地圖，可以發現目前龜山島龜首的部分及南側的地方因地震、風化等因素已多次發生崩落情形。龜山島四面環海，火山爆發可能會間接引發海嘯，或是強降雨讓脆弱火成岩體鬆動滑落等，但最主要的還是若島上或龜山島周圍有遊客的話可能會讓危害變成災害。

本研究透過資料蒐集分析以及現地調查與數值模擬繪製出災害潛勢地圖(圖 10)，並提供軍事隧道為最佳避難場所之建議。另輔以 UAV 進行龜首空拍作業，除拍攝照片及影像外，同時透過 UAV 拍攝照片結合新興技術，建置正射影像、地表地形、三維模型及環景影像，完整記錄相關地質與地形特徵，搭配資料庫儲存及本計畫建置之三維圖台輔助展示三維樣貌，透過雲端開放圖資成果檔案及 API 提供主管機關瀏覽，強化本計畫之資料應用價值。

本計畫經相關實地調查及 UAV 輔助勘查判釋與資料產製，同時參考他國案例模擬龜山島火山災害潛勢評估，其模擬結果符合龜山島若發生火山噴發，則全島皆會受到火山災害之影響，僅龜尾部分稍微倖免。考量登島旅客活動範圍多以龜尾區域為主，倘若火山不幸噴發，建議先以現有建物進行避難掩蔽，例如遊客中心、營區、廟宇或校舍，若有時間餘裕，再前往最佳避難處（軍事坑道）躲藏，等待臺灣本島馳援。經評估，軍事坑道不僅能提供較為完善之避難功能，同時也靠近南岸碼頭，在撤離時也較為方便。

龜山島就目前短期火山活動監測狀態來說，並無立即性噴發之危險。臺灣歷史上並無火山噴發紀錄，故無法像日本、美國、菲律賓等火山活動活躍的國家一樣，可依循歷史噴發紀錄做災害潛勢的資料預測及分析。為擬定可施行的災害應變作為，本研究以地調所 (2005) 火山地質圖為參考依循，初步判斷若龜山島再次噴發之最壞災害情境想定之影響範圍為龜山島全島。依此作為假設前提，本研究透過史密森尼學會 (Smithsonian Institution) 的全球火山計畫搜尋面積與龜山島相似的火山島，並且參考和臺灣一樣同處環太平洋火弧帶的日本火山作為想定標的，例如西之島 (Nishinoshima)，面積約 2.89 平方公里，最高海拔 143 公尺、硫磺鳥島 (Io-Torishima)，面積約 2.5 平方公里，最高海拔 212 公尺，另外青島 (Aogashima) 的面積雖然為 5.96 平方公里，約為龜山島的兩倍左右，但其海拔 423 公尺及人口條件相似，故仍將其納入參考之火山。

根據日本國土交通省氣象廳資料顯示，在過去 1 萬年間的噴發事件，西之島並沒有記載 VEI 紀錄，而硫磺鳥島在過去的記載中曾被紀錄到 VEI=2，青島在過去的記載中有發生過 VEI=3 和 VEI=4 規模的噴發，另外被 IAVCEI 選出的日本兩座十年火山 - 櫻島及雲仙岳，櫻島傳說在 1.3 萬年前曾發生過 VEI=6 規模的火山爆發，但根據日本氣象廳歷史以來的火山活動，櫻島的 VEI 幾乎落在 4，而雲仙火山同樣落在 VEI=3 或 4，故從面積方面，如西之島、硫磺鳥島，或是根據日本十年火山 - 櫻島、雲仙岳等，有紀錄的 VEI 都不超過 4，故設定龜山島的 VEI 值最高不超過 4，並進行火山碎屑流的潛勢模擬評估。

透過 GSJ Volcanic Hazards Assessment Support System 進行火山碎屑流潛勢模擬，該網站模擬方式需確定火山口，即噴發口依經緯度設定模擬之。宋聖榮(2007)認為龜山島火山口應在龜甲 401 高地處及龜首海底這兩處，惟因海底噴發造成的危害較小，故本研究以龜甲火山口噴發作為預設火山口來模擬，輸入摩擦係數 (H/L) 最大值與最小值，以及設定噴煙柱高度，即可進行模擬估算。

H/L 值會隨著塌陷的規模和性質變化，其值代表流動性，通常火山碎屑流的規模越大，則 H/L 值會越小，根據寶田晉治等人 (1993) 的研究，已知正常規模的斜坡崩塌 H/L 值通常約為 0.5 至 1，火山體崩塌產生的碎屑雪崩則降至 0.1 至 0.2，而碎屑流的值通常為 0.3 至 0.4，故本研究在 H/L 值的參數設定則根據寶田晉治等人 (1993)，最大值為 0.4，最小值為 0.3。其在不同 VEI 熱柱高度的設定下，考量到災害管理應以能成功疏散之訓練為主，在 VEI=0 時設定兩種高度參數，分別為 20 公尺及 50 公尺；在 VEI=1 時，根據 VEI 熱柱高度設定高度為 100 公尺；在 VEI=2 時，根據 VEI 熱柱高度設定高度為 1,000 公尺；VEI=3 時，高度設定 3 公里；VEI=4 時，高度設定 10 公里。本研究模擬龜山島碎屑流的潛勢範圍，當 $H/L > 4$ (紅色區塊) 則為該高度條件下，至少可能影響到的範圍，當 $H/L = 0.32-0.3$ (紫色區塊) 則為該高度條件下，最嚴重之可能影響範圍。根據模擬結果，當 VEI=3 或 4 時，其火山碎屑流可能影響到臺灣本島沿海區域。因此，假設龜山島無預警噴發，除了遊客受困在島上需及時掩蔽外，可能也要面臨臺灣本島援助延遲抵達之窘況，此外臺灣本島可能受影響之地區，如新北貢寮、宜蘭平原等也需進行疏散避難(如圖 11)。透過前述之日本火山之類比，本研究認為龜山島最嚴重之災害想定為 VEI=4，但以龜山島能夠進行防災應變作為而言，建議之將火山噴發級別擬定為 VEI=2，以利演練操作。

根據地質資料彙整與現地調查，並參考其他國家與龜山島規模類似火山噴發案例，設定不同的噴發規模與天氣因素等情境，模擬評估龜山島火山災害潛勢。其模擬結果顯示若龜山島發生火山噴發，可能會產生火山熔岩流、火山碎屑流及火山灰落，亦可能造成大量塊體滑入海中導致海嘯發生。其中火山熔岩流、碎屑流影響範圍主要在龜山島地區，火山灰及海嘯則可能對龜山島全境與臺灣本島宜蘭縣部分地區造成影響。各項火山災害潛勢圖資將透過現有資料公開平台公布，並提供中央及地方災防機關作為火山災害防救計畫規劃執行參考。

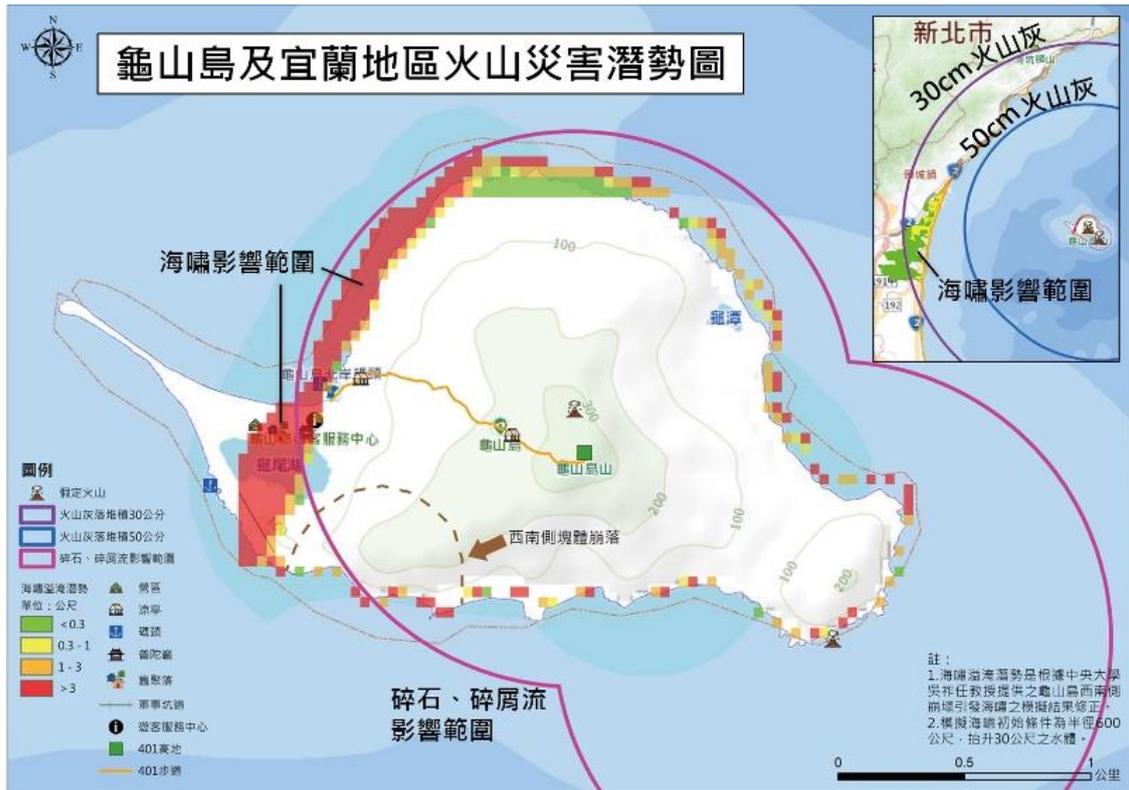


圖 10 龜山島及宜蘭地區火山災害潛勢圖。

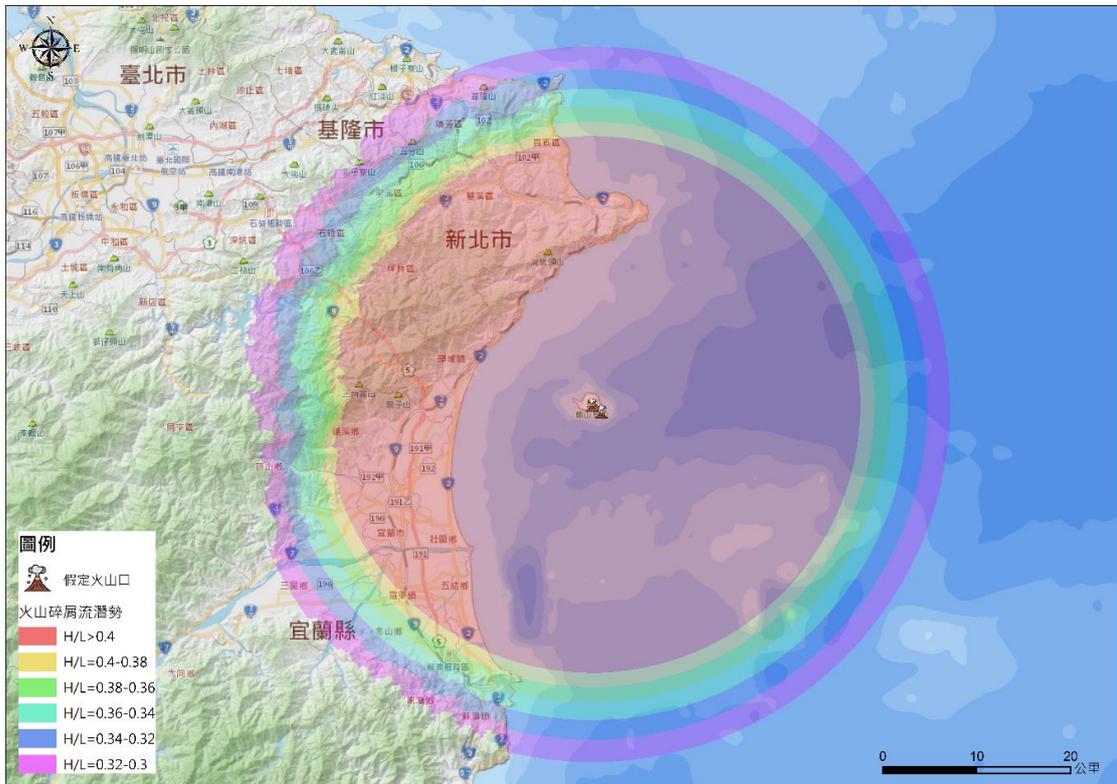


圖 11 龜山島 VEI=4 時火山碎屑流潛勢圖_高度設定 10,000 公尺

六、火山活動觀測系統建置

本所自民國 93 年以來進行火山研究與觀測，累積火山活動徵兆背景資料。為使資料活化資料應用面，本年度建置火山活動觀測資訊系統，集合統整火山觀測資料，並建立資料管理及視覺化展示的公開平台。系統主要分為四大項目，分別為系統入口網站、雲端火山觀測資料庫、雲端圖資展示平臺以及後臺管理系統。

入口網頁共有七個分類並分別建置相關文章及內容。雲端圖資展示平台建置基本圖臺功能、圖層套疊功能、資料展示功能，可以時序性火山觀測站資料，並提供火山微震資料展示。目前系統內資料包含影像類資料約 2 萬多張、連續時序監測資料 151 萬筆、及空間類歷史火山微震資料 1 萬 3 千多筆，皆經過正規化處理後儲存，除影像類保存原始檔案於資料夾中，其餘皆納進雲端火山觀測資料庫中。系統管理單位人員可經由後臺管理系統來管理系統使用者、查看網站使用紀錄，以及增修系統入口網站之公告資訊、推廣科普知識內容、修改資料權限設定等；對於民眾、學校或研究人員，則可透過系統入口網站查詢火山觀測相關知識、查看最新消息，並獲取相關研究成果。

系統定期收集來自觀測站的原始資料，以正規化格式存入資料庫，方便調取；對於系統管理單位人員，可經由後臺管理系統來管理系統使用者、查看網站使用紀錄，以及增修系統入口網站之公告資訊、推廣科普知識內容、修改資料權限設定等；對於民眾、學校或研究人員，則可透過系統入口網站查詢火山觀測相關知識、查看最新消息、獲取相關研究成果等，若需要即時查詢取用觀測站資料，不須經由繁雜的行政程序，可直接由入口網站進入雲端圖資展示平臺，於地圖上點選查看觀測站資料，亦可經由展示平臺介面篩選資料範圍，展示平臺接收來自雲端資料庫的資料(如圖 12)，並以動態式圖表繪製數據，使用者可快速了解數據表達的資訊，提高訊息傳遞效率與政府施政滿意度。

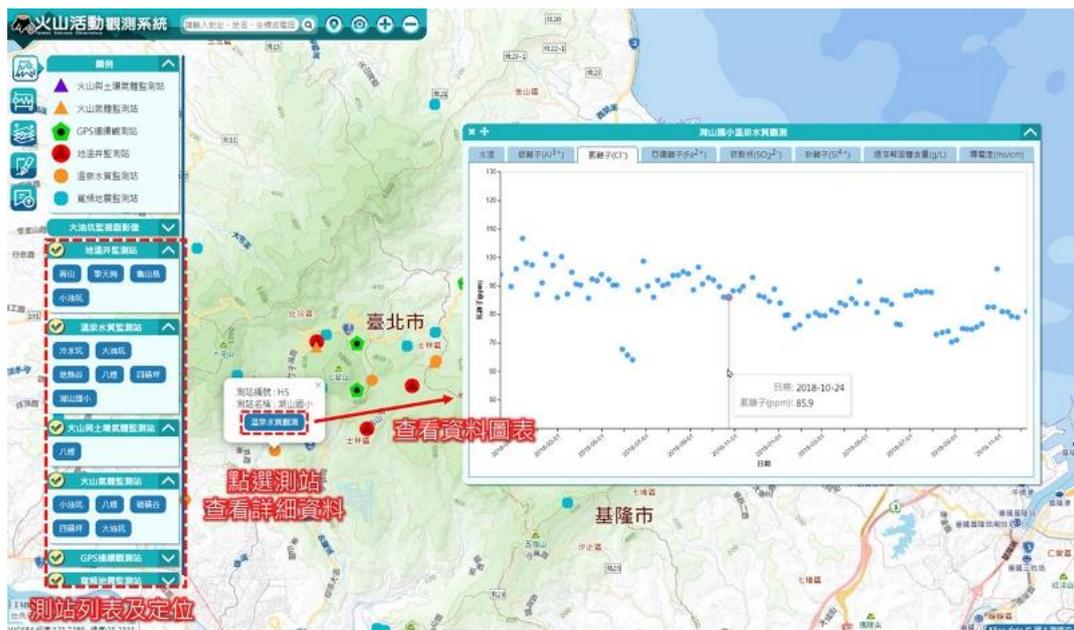


圖 12 火山觀測系統資料查詢與圖臺展示畫面。

七、結論與建議

在學術成就方面，本計畫研究成果於 2020 年發表國外期刊 2 篇、國內期刊 1 篇，國內研討會 10 篇，其中一篇國外期刊載於 Scientific Reports (3.998)，一篇載於 Journal of Volcanology and Geothermal Research (2.827)，對於大屯火山地區的地下地質構造形貌與火山通道有新的發現。大屯火山地區的微震分布呈垂直線性排列，可能與岩漿或熱液通道有關。本計畫的研究成果有助於未來對於鄰近地區及相關領域的進一步研究。

本計畫所引進的新型探測技術，可協助研判火山活動的規模以及岩漿庫可能的位置，配合本所長期針對火山進行的連續監測資料，包含火山地區地溫、火山氣體、溫泉水等變化建立火山異常活動指標，持續更新評估地質災害特性之北臺灣火山及斷層環境資料庫，發布各項調查監測數據，作為社會大眾及政府決策者之交流共享平台。

本所長年累積各項火山觀測資料的背景值，在火山活動有疑似異常的通報或報導時，可根據近期觀測資料以及現場人員調查研判火山活動是否異常活躍。109 年 7 月份報載中研院研究指出大屯火山發現岩漿可能通道，本所立即發布新聞稿說明大屯火山的活動觀測現況與災害潛勢圖資更新工作進度，有效降低民眾的疑慮。11 月 20 日，本所辦理地質開放日，向民眾說明火山地質與火山活動觀測現況。12 月 10 日本所參加內政部火山災害跨部會災害防救研商會議，說明火山災害潛勢圖更新狀況，協助災害防救業務計畫以及地區災害防救計畫修訂。(圖 13)。



圖 13 更新火山災害潛勢圖資料，協助災防法規以及地區災防計畫研擬執行。

本計畫執行基本的設備、理論、技術等已有相當良好之基礎，將持續收集紀錄各項科學數據，建立基本地質資料庫，並運用統計分析解析監測數據，地質環境因

子之趨勢和關聯性，以建立預測和評估模式；此外除了實際的監測調查外，應以學術理論應用於監測技術，發展火山活動監測之高精度與高準確度之理論與技術，及時更新數據資料及訊息，提供各界查詢，為防災減災策略及實施計畫之依據。預計於未來持續對於火山地區進行調查與觀測計畫，除維護及擴充現有監測設備外，另外參考更多國際火山地區調查研究策略及方法，提升現有的監測技術及工作成效。以期我國在完成初期火山環境背景資訊了解後，能夠繼續深入探討可能岩漿庫存在位置及活動型態，對於火山活動的特性能更進一步掌握，以確保國人生命財產之安全。

國內的火山在歷史上雖無噴發紀錄，但仍具活動特性。根據國外火山觀測的技術與經驗，設置多種的火山活動觀測站，藉由不同面向的調查觀測方法，瞭解火山活動的動態。本所將持續進行火山觀測工作，並引進遙感探測技術、大地自然電位連續觀測技術，同時增進野外觀測站的自動化與資料回傳技術，讓火山活動觀測資料能更即時傳遞，增進資料的品質與數量。

因應災害防救法將火山項目列為法定災害項目之一，本所未來將依法持續維持火山觀測能量，研判火山災害潛勢區域、建立相關圖資並公開火山災害潛勢資料，以利各級政府及相關公共事業機關(構)於推動火山災害防救措施及設置重要設施時，能據以考量各區域之災害潛勢，有效降低災害發生之損失與傷亡。本所將進行臺灣北部火山地區火山災害潛勢資料蒐集與調查分析工作，瞭解灣北部地區火山活動可能造成之災害種類及影響範圍，並加強災害教育宣導，提升全民災害應變能力。同時，加強與中央及地方政府、學研與災防單位密切交流合作，分享資訊。

八、參考文獻

1. 丁禕 (2016)。反思龜山島火山引發海嘯災害可能性—以日本雲仙岳為鑑。中興工程：132 期，49 - 55。
2. 內政部營建署陽明山國家公園管理處 (1987)。陽明山國家公園馬槽橋災變及其鄰近地區之環境地質研究報告。
3. 內政部營建署陽明山國家公園管理處 (1994)。陽明山國家公園內古火山環境及噴發史的研究報告。
4. 內政部營建署陽明山國家公園管理處 (2007)。火山監測與應變體系建置模式之先期研究報告。
5. 火山災害防救業務計畫 (2020)。中央災害防救會報。
6. 王价巨主編 (2017)。災害管理：13 堂專業的必修課程。臺北市：五南，初版。
7. 地質遺跡地質敏感區劃定計畫書 H0010 龜山島火山碎屑堆積層 (2015)。經濟部。
8. 何孝恆 (2001)。台灣北部地區大屯火山群火山噴氣來源之探討。國立臺灣大學地質科學研究所碩士論文，台北市。取自 <https://hdl.handle.net/11296/243x6m>
9. 何春蓀 (1969)。臺灣北部公館凝灰岩之地層研究。臺灣省地質調查所彙刊，20，5-13。

10. 何春蓀 (1986)。臺灣地質概論—臺灣地質圖說明書。增訂第二版，經濟部中央地質調查所。共 163 頁。
11. 吳政忠 (2008)。應用 PUFF 數值模式於台灣與鄰近地區火山灰傳送及沉降分布之研究。臺北市立教育大學自然科學系碩士班碩士論文，臺北市。取自 <https://hdl.handle.net/11296/gqwbpr>
12. 宋聖榮 (2004)。澎湖的火山故事。澎湖研究第三屆學術研討會論文集。澎湖縣文化局。
13. 宋聖榮 (2006)。臺灣的火山。臺北縣：遠足文化。
14. 宋聖榮 (2007)。東北角的火山島—龜山島。地質，26-3，37-48。
15. 李寄嶼 (1994)。澎湖地區玄武岩類與福建地區基性脈岩之定年學與地球化學研究兼論中生代晚期以來中國東南地函之演化。國立臺灣大學地質學研究所博士論文，台北市。取自 <https://hdl.handle.net/11296/9k33x5>
16. 林朝榮 (1967)。臺灣外島之地下資源。臺灣銀行季刊，18-4，257-268。
17. 邵文佑 (2015)。利用鋯石鈾鉛定年與鉛同位素組成探討台灣東部火成岩之岩石成因。國立臺灣大學地質科學研究所博士論文，台北市。取自 <https://hdl.handle.net/11296/5rbz4g>
18. 胡明城、魯福，1993，現代大地測量學，上冊；測繪出版社。
19. 莊文星、陳汝勤 (2008)。北臺灣火山地形多樣性之探討。經濟部中央地質調查所彙刊，21，107-142。
20. 莊文星、陳汝勤、姜國彰 (2005)。臺灣東部海岸山脈蘭嶼及綠島火山頸柱狀節理之地質與地形景觀探討。經濟部中央地質調查所彙刊，18，107-148。
21. 許民陽、王郁軒 (2018)。火山：探訪地球之窗。臺北市：臺北市立大學，初版。
22. 陳中華、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 95 年度學術研討會論文集 (摘要)。65。
23. 陳正宏 (1990)。臺灣地質系列第 1 號：臺灣之火成岩。臺北縣：經濟部中央地質調查所。
24. 陳建元、李依容 (2013)。大屯火山噴發後泥流影響範圍模擬。地質。經濟部中央地質調查所。32-3，80-83。
25. 陳棋炫。以國際經驗探討我國火山調查及防災策略 (簡報)。經濟部中央地質調查所。
26. 陳進源 (2017)。富士山火山疏散避難機制介紹。消防月刊。2017.10，17-24。
27. 陳福隆 (2015)。眾望所「龜」—探討龜山島之生態旅遊策略。佛光大學管理學系碩士論文，宜蘭縣。取自 <https://hdl.handle.net/11296/t6498m>
28. 陳慧鵬 (2014)。多期空載光達資料於龜山島地形變遷之研究。明新科技大學土木工程與環境資源管理系碩士班碩士論文，新竹縣。取自 <https://hdl.handle.net/11296/sd5p27>
29. 陽明山國家公園管理處 (2008)。大屯火山群地底岩漿庫之調查與監測—土壤氣體之觀測調查研究報告

30. 曾清涼、楊名、劉啟清，2003，一等二級水準網測量督導查核工作總報告書；內政部。
31. 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
32. 經濟部中央地質調查所（2004）。大台北地區地質災害調查與監測－地質和地球化學調查與監測（1/4）。
33. 經濟部中央地質調查所（2005）。大臺北地區特殊地質災害調查與監測：地質和地球化學調查與監測（2/4）。
34. 經濟部中央地質調查所（2006）。大臺北地區特殊地質災害調查與監測：地質和地球化學調查與監測（3/4）。
35. 經濟部中央地質調查所（2007）。大臺北地區特殊地質災害調查與監測：地質和地球化學調查與監測（4/4）。
36. 經濟部中央地質調查所（2009）。大臺北地區特殊地質災害調查與監測第二期：火山地質與火山活動調查與監測（1/4）。
37. 經濟部中央地質調查所（2009）。大臺北地區特殊地質災害調查與監測第二期：火山地質與火山活動調查與監測（2/4）。
38. 經濟部中央地質調查所（2010）。大臺北地區特殊地質災害調查與監測第二期：火山地質與火山活動調查與監測（3/4）。
39. 經濟部中央地質調查所（2011）。大臺北地區特殊地質災害調查與監測（二）火山地質與火山活動調查與監測四年總結報告。
40. 經濟部中央地質調查所（2011）。大臺北地區特殊地質災害調查與監測第二期：火山地質與火山活動調查與監測（4/4）。
41. 經濟部中央地質調查所（2015）。台灣北部火山活動觀測研究-台灣北部火山活動地區密集陣列觀測研究（4/4）。
42. 經濟部中央地質調查所（2016）。大屯火山地區岩石定年研究（1/2）報告。
43. 劉聰桂主編（2018）。普通地質學（上）（下）。臺北市：國立臺灣大學。
44. 鄭世楠（2019）。臺灣歷史海嘯與災害。108年海洋防災演習種子教師研習營（簡報）。
45. 鄭世楠（2020）。基隆歷史災害：1867年古海嘯回顧及海嘯防災宣導。基隆市文化局「109年館舍人員暨導覽志工研習」（簡報）。
46. 鄭程輔（2016）。大臺北火山防災策略擬定之探討-以日本火山防災機制為借鏡。銘傳大學都市規劃與防災學系碩士班碩士論文，台北市。取自 <https://hdl.handle.net/11296/4f7cuw>
47. Aizawa, K., Yoshimura, R., Oshiman, N., Yamazaki, K., Uto, T., Ogawa, Y., et al. (2005). Hydrothermal system beneath Mt. Fuji volcano inferred from magnetotellurics and electric self-potential. *Earth and Planetary Science Letters*, 235(1–2), 343–355.
48. Belousov, A., Belousova, M., Chen, C.-H., & Zellmer, G. F. (2010). Deposits, character and timing of recent eruptions and gravitational collapses in Tatun Volcanic Group,

- Northern Taiwan: Hazard-related issues. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 191(3), 205–221. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2010.02.001>.
49. Alberico I, Lirer L, Petrosino P, Scandone R. (2008) Volcanic hazard and risk assessment from pyroclastic flows at Ischia Island (southern Italy). *J Volcanol Geotherm Res.* 2008;171:118 – 36.
 50. Allen and Smith (1994) . Eruption styles and volcanic hazard in the Auckland Volcanic Field, New Zealand. *Geosci. Repts. Shizuoka Univ.*, 20 (Mar., 1994) , 5-14
 51. Ang, P. S., Bebbington, M. S., Lindsay, J. M., and Jenkins, S. F. (2020) . From eruption scenarios to probabilistic volcanic hazard analysis: An example of the Auckland Volcanic Field, New Zealand. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 106871.
 52. Angelier, J. (1986). Geodynamics of the Eurasian-Philippine sea plate boundary; preface. *Tectonophysics*, 125, (1-3), IX-X.
 53. Belousov, A., Belousova, M., Chen, C.H. and Zellmer, G. (2010) . Deposits, character and timing of recent eruptions and gravitational collapses in Tatun Volcanic Group, Northern Taiwan: hazard-related issues. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 191, 205-221.
 54. de Vita, S., Sansivero, F., Orsi, G., Marotta, E., and Piochi, M. (2010) . Volcanological and structural evolution of the Ischia resurgent caldera (Italy) over the past 10 ky. *Geol. Soc. Am. Spec. Pap*, 464, 193-239.
 55. Dobson, P., Gasperikova, E., Spycher, N., Lindsey, N. J., Guo, T. R., Chen, W. S., et al. (2018). Conceptual model of the Tatun geothermal system, Taiwan. *Geothermics*, 74, 273–297. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2018.01.001>.
 56. Eftaxias, K., Kaporis, P., Polygiannakis, J., Peratzakis, A., Kopanas, J., Antonopoulos, G., & Rigas, D. (2003). Experience of short term earthquake precursors with VLF? VHF electromagnetic emissions.
 57. Finizola, A., Sortino, F., Lénat, J.-F., & Valenza, M. (2002). Fluid circulation at Stromboli volcano (Aeolian Islands, Italy) from self-potential and CO₂ surveys. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 116(1–2), 1–18.
 58. INGV-DPC-V3. Ricerche sui vulcani attivi, precursori, scenari, pericolosità e rischio, UR Orsi (Campi Flegrei and Ischia). Roma: Internal Report, INGV; 2005-2007.
 59. Kukkamaki, T. J., 1980, Error Affecting Leveling, NAD Symposium, Ottawa, CIS, p.1-10.
 60. Kukkamaki, T. J., 1983, Uber Die Nivellitische Refraktion, Finn. Geod. Inst., Helsinki, Finland, No. 25, 48 pages.
 61. 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. <https://doi.org/10.1038/srep39500>

62. Lin, C. H., & Pu, H. C. (2016). Very-long-period seismic signals at the Tatun volcano group, northern Taiwan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 328, 230–236.
63. 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, northern Taiwan. *Geophysical Research Letters*, 32(10).
64. Lin, C. H., Konstantinou, K. I., Liang, W. T., Pu, H. C., Lin, Y. M., You, S. H., & Huang, Y. P. (2005b). Preliminary analysis of volcanoseismic signals recorded at the Tatun Volcano Group, northern Taiwan. *Geophysical Research Letters*, 32(10).
<https://doi.org/10.1029/2005GL022861>.
65. Lin, C.-R., Kuo, B.-Y., Liang, W.-T., Chi, W.-C., Huang, Y.-C., Collins, J., & Wang, C.-Y. (2010). Ambient Noise and Teleseismic Signals Recorded by Ocean-Bottom Seismometers Offshore Eastern Taiwan. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 21(5), 743–755.
66. Lin, C. H., Lai, Y. C., Shih, M. H., Lin, C. J., Ku, J. S., & Pu, H. C. (2018). Extremely Similar Volcano Sounds from Two Separated Fumaroles at the Tatun Volcano Group in Taiwan. *Seismological Research Letters*, 89(6), 2347–2353.
67. Lindsay, J. M. (2010). Volcanoes in the big smoke: a review of hazard and risk in the Auckland Volcanic Field. In *Geologically Active. Delegate Papers of the 11th Congress of the International Association for Engineering Geology and the Environment (IAEG)*.
68. Miller, C. D., Mullineaux, D. R. & Crandell, D. R. (1981) . Hazards assessments at Mount St. Helens. Lipman, P. W. & Mullineaux, D. R. (Eds.) , U.S. Geological Survey Professional Paper , 1250, p. 789-802.
69. Molist, J. M. (2017) .Assessing Volcanic Hazard: A Review. *Oxford Handbooks Online*. Retrieved 29 Jul. 2020, from
<https://www.oxfordhandbooks.com/view/10.1093/oxfordhb/9780190699420.001.0001/oxfordhb-9780190699420-e-32>.
70. Murase, M., Ono, K., Ito, T., Miyajima, R., Mori, H., Aoyama, H., & Takeda, T., 2007, Time-dependent model for volume changes in pressure sources at Asama volcano, central Japan due to vertical deformations detected by precise leveling during 1902–2005. *Journal of volcanology and geothermal research*, 164(1-2), 54-75.
71. Murase, M., Ishikawa, K., Lin, C., Lin, J., Pu, H., Kimata, F., Miyajima, R., Nakamichi, H. and Suzuki, A., 2007, Estimated pressure source and vertical deformation in Tatun volcano group, Taiwan, detected by precise leveling in June 2006-August 2007. In *AGU Fall Meeting 2007*, abstract V11C-0740.
72. Myers, B. M., and Brantley, S. R. (1995) . Hazardous phenomena at volcanoes (No. 95-231) . US Geological Survey.
73. Pu, H.-C., Lin, C.-H., Huang, Y.-C., Chang, L.-C., Lee, H.-F., Leu, P.-L., et al. (2014). The Volcanic Earthquake Swarm of October 20, 2009 in the Tatun Area of Northern

Taiwan. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 25(5), 625.

[https://doi.org/10.3319/TAO.2014.04.11.02\(T\)](https://doi.org/10.3319/TAO.2014.04.11.02(T)).

74. Pu, H.-C., Lin, C.-H., Hsu, Y.-J., Lai, Y.-C., Shih, M.-H., Murase, M., & Chang, L.-C. (2020). Volcano-hydrothermal inflation revealed through spatial variation in stress field in Tatun Volcano Group, Northern Taiwan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 390, 106712. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2019.106712>.
75. Sbrana A, Toccaceli RM (2011). Carta Geologica della Regione Campania - Foglio 464 - Isola di Ischia, Progetto GARG Regione Campania - Assessorato Difesa del Suolo, Litografia Artistica Cartografica, Firenze. 216 pp + 1 carta: 10.000.
76. Shin, T.-C., Chang, C.-H., Pu, H.-C., Lin, H.-W., & Leu, P.-L. (2013). The Geophysical Database Management System in Taiwan. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 24(1), 11–18.
77. Song, S. R., Yang, T. F., Yeh, Y. H., Tsao, S., & Lo, H. J. (2000). The Tatun volcano group is active or extinct? *Jour. Geol. Soc. China*, (43), 521–534.
78. Sugiura, M. (1964). Hourly values of equatorial Dst for IGY. *Annals of the International Geophysical Year*, 35, 9–45.