

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。

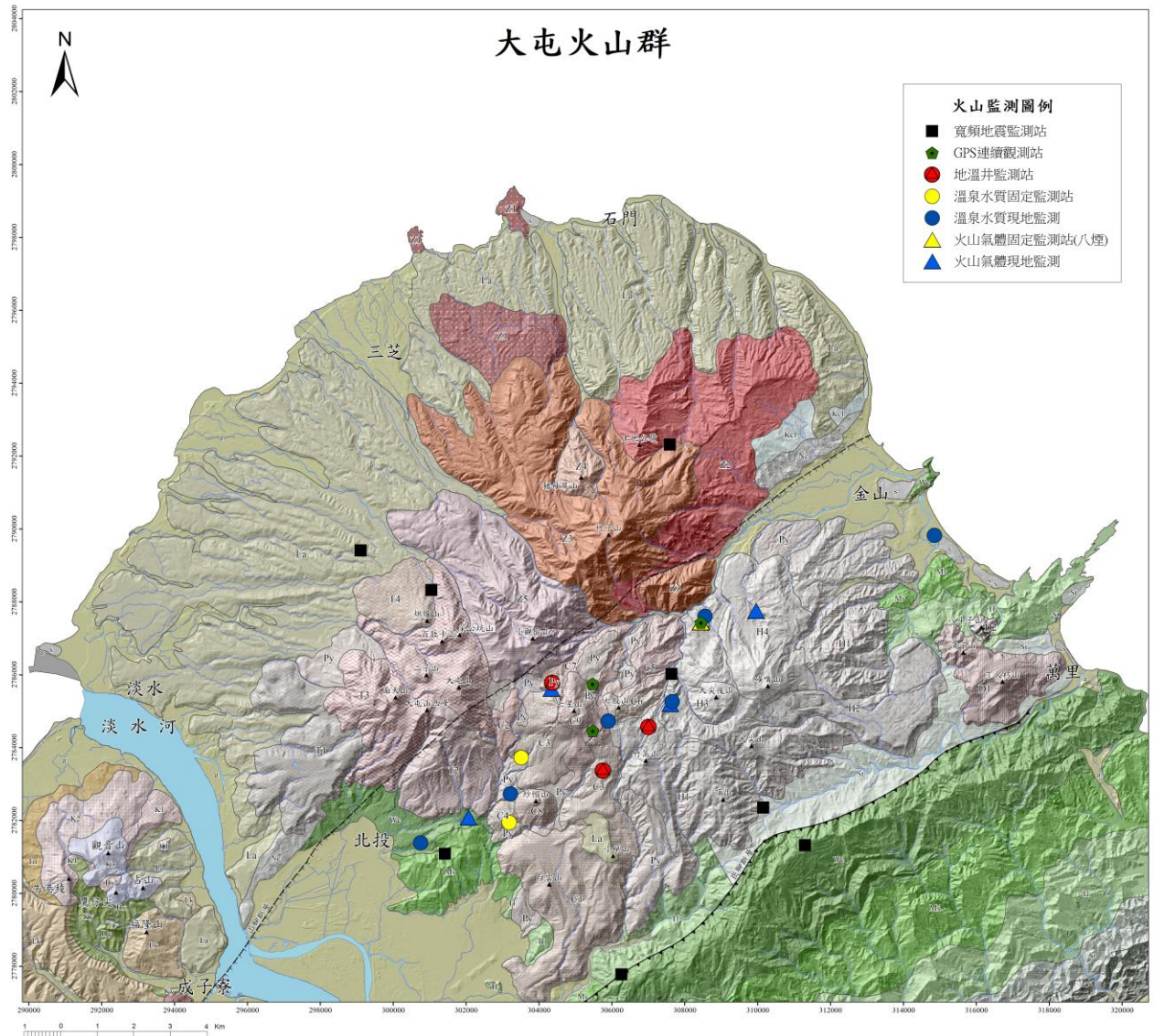


圖 1 本所於大屯火山群所建置的火山觀測站網。

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。

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。

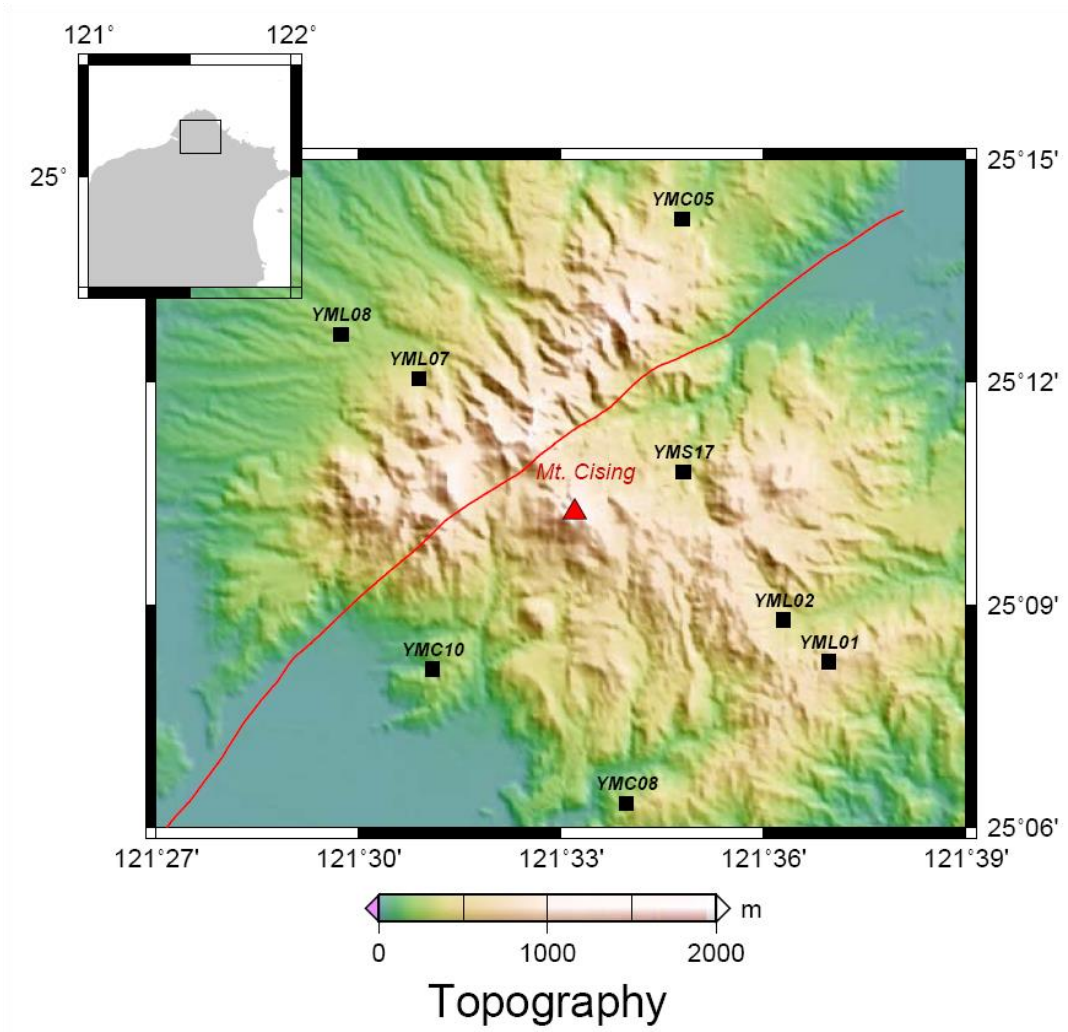


圖 2、大屯火山區域寬頻地震測站分佈圖。

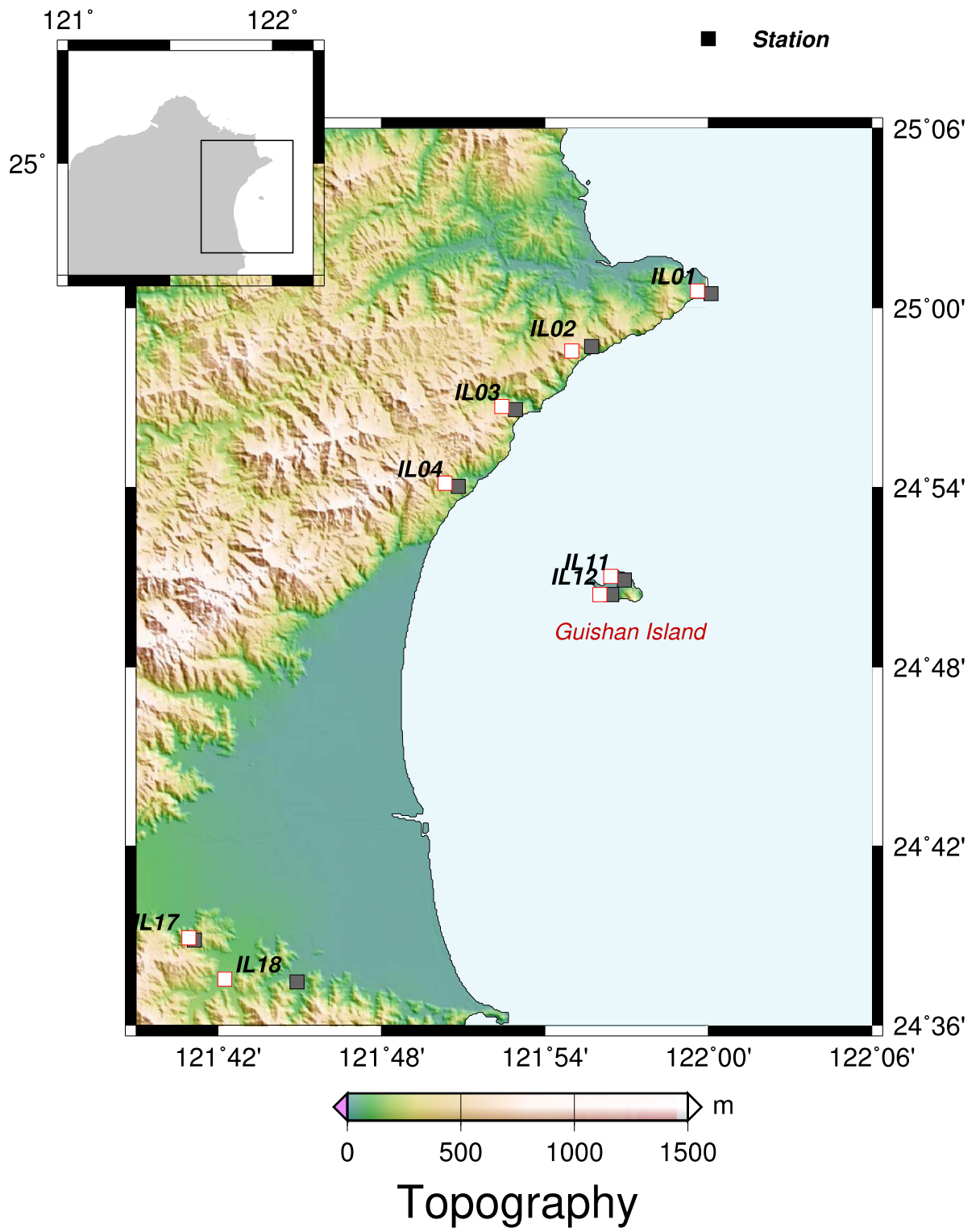


圖 3、宜蘭區域寬頻地震測站分佈圖。

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。

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。

2020

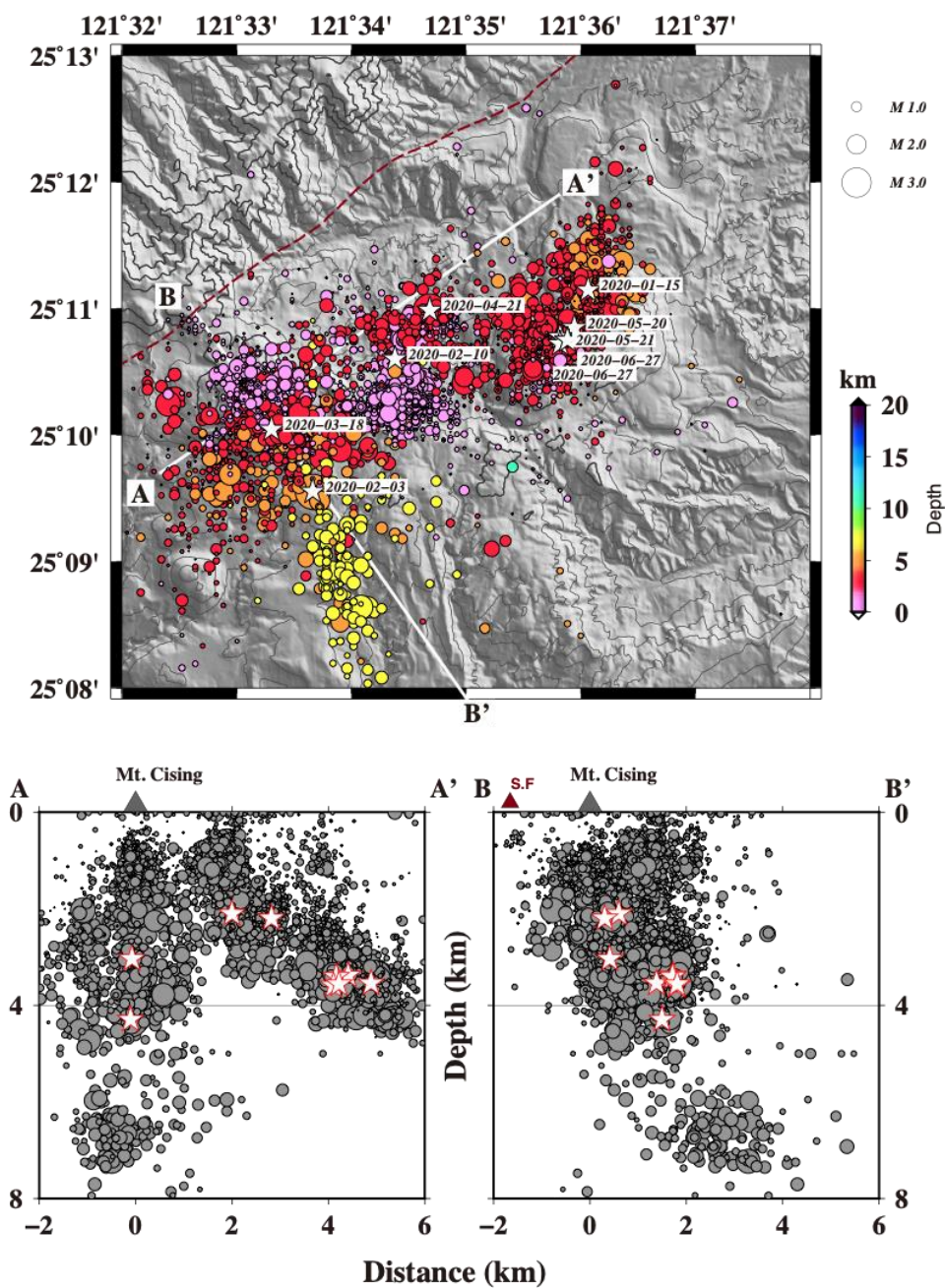


圖 4 大屯火山區 2020 年地震活動分布，圓圈代表震源（大小表示規模，顏色表示深度），灰三角為七星山。AA' 為東北—西南向剖面，BB' 為西北—東南向剖面。（單位：公里）

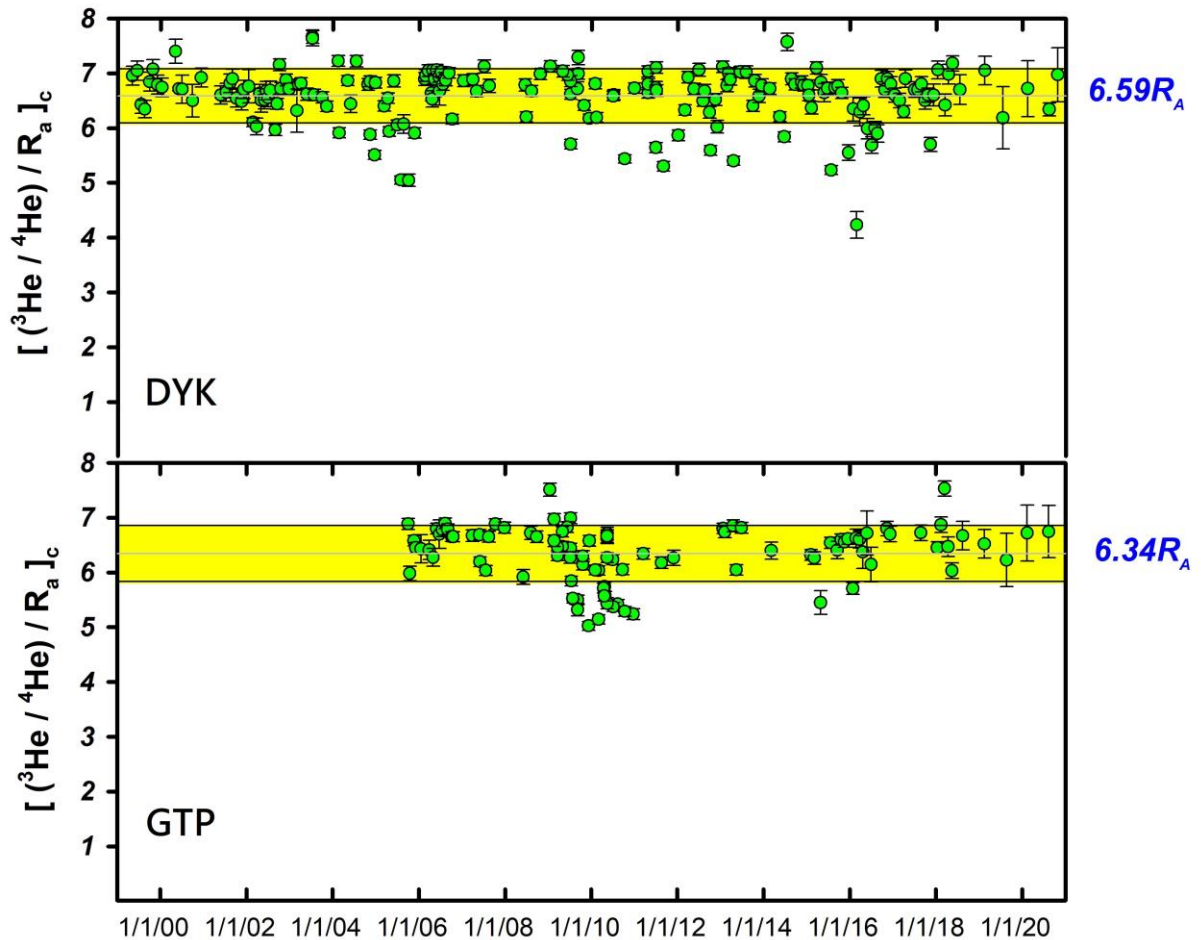


圖 5 2020 年大屯火山區大油坑 DYK、煥子坪 GTP 火山氣體氦同位素值 R_A ，值越大，代表氣體的岩漿組成比例越高。

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

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。

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及電阻率連續監測的重要緣由。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。

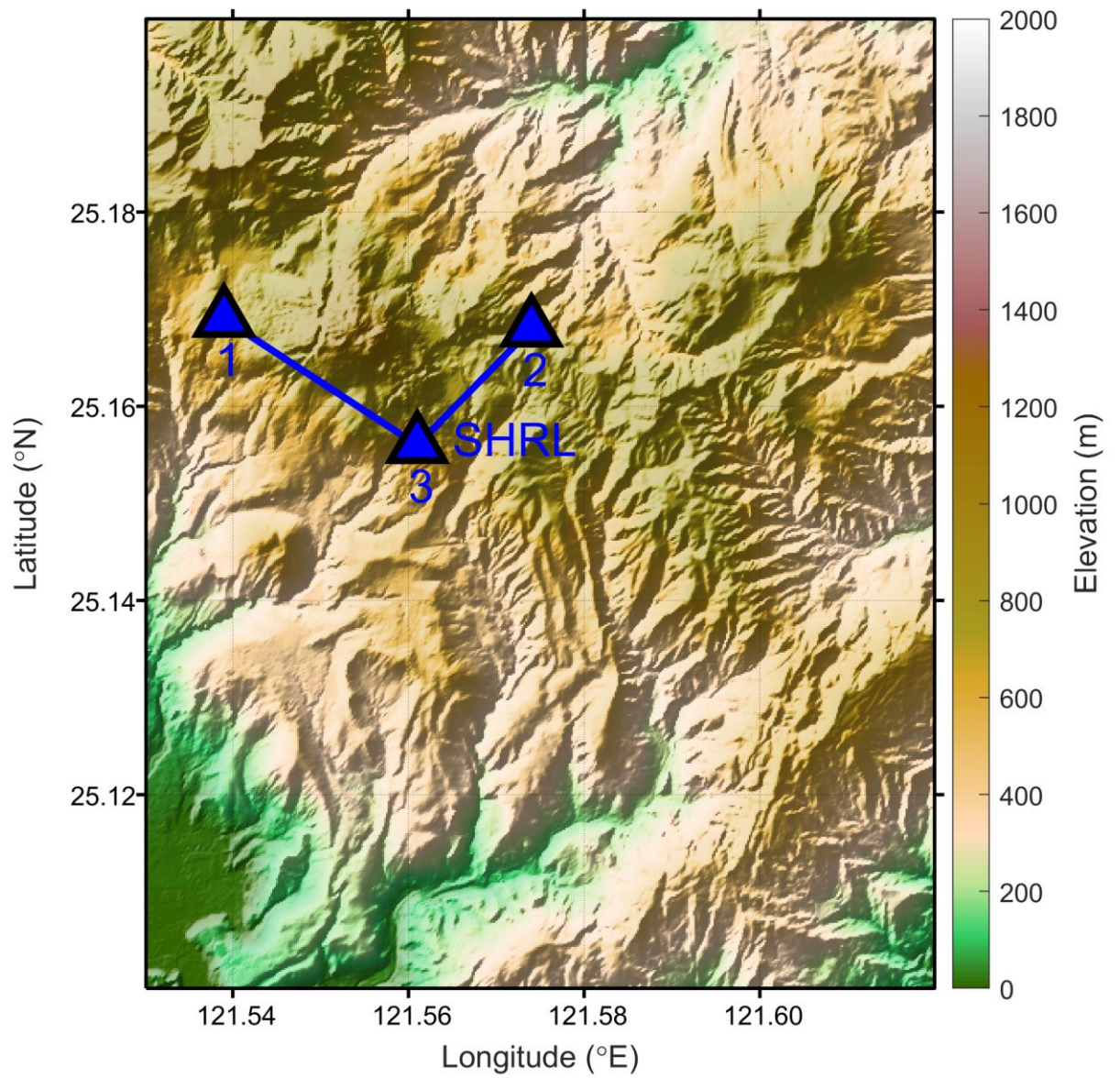


圖 6 大屯火山區大地自然電位連續觀測站(中央氣象局士林測站)配置分布圖。1、3 為非極化電極，2 為資料記錄器站房。

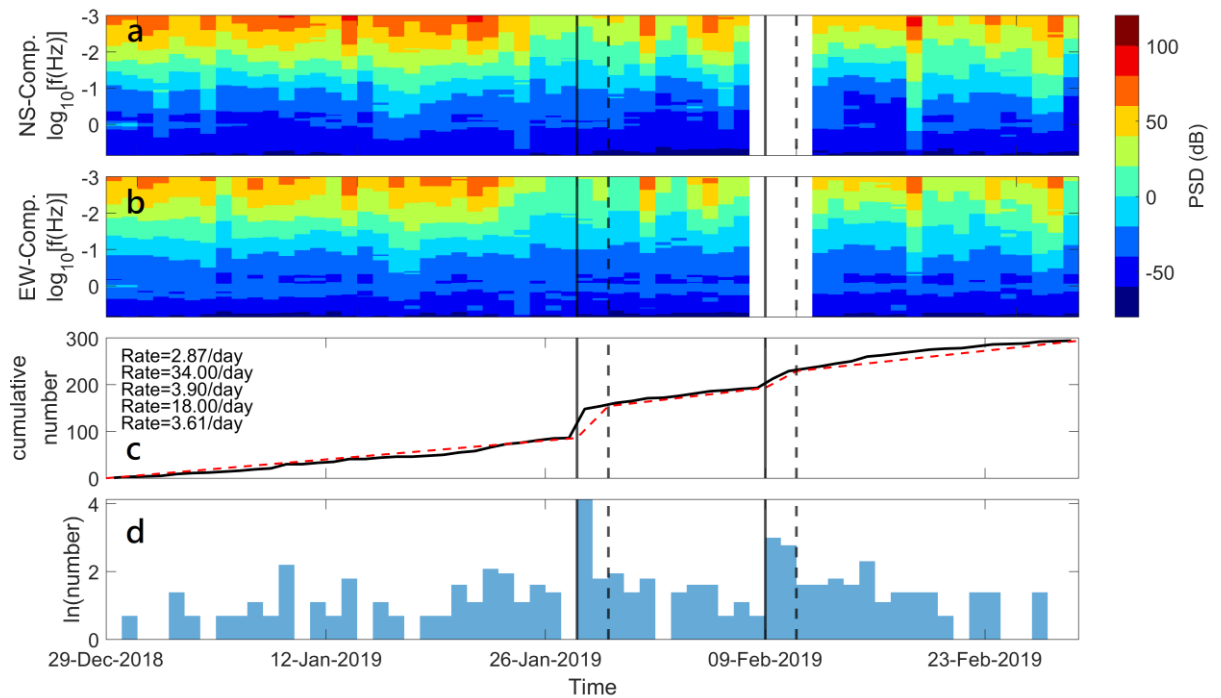


圖 7 2020 年 (a) 南北方向與 (b) 東西方向自然電位功率譜：(c) 中央氣象局目錄的累計地震數目時序圖。(d) 中央氣象局目錄的每日地震個數。時間軸為 2019 年 1 月 28-29 日群震前後 30 天，共有兩次群震事件 E1 與 E2。各子圖中實虛直線表示群震開始和結束，並以此切分不同階段。圖 (c) 左上方文字表示各階段每日平均地震數，紅色虛線是以每日平均地震數為斜率所繪製之直線。

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。

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。

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。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)。透過與日本火山之類比，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。

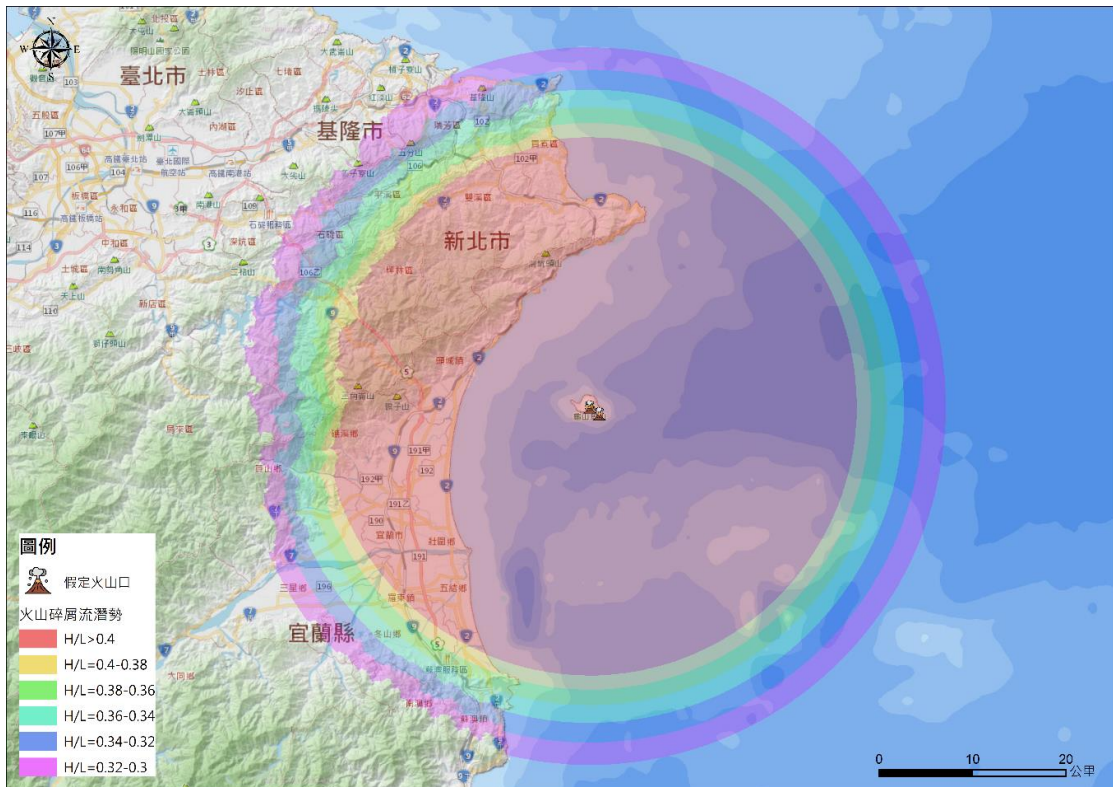


圖 11 龜山島 VEI=4 時火山碎屑流潛勢圖_高度設定 10,000 公尺

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。雲端圖資展示平臺建置基本圖臺功能、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。

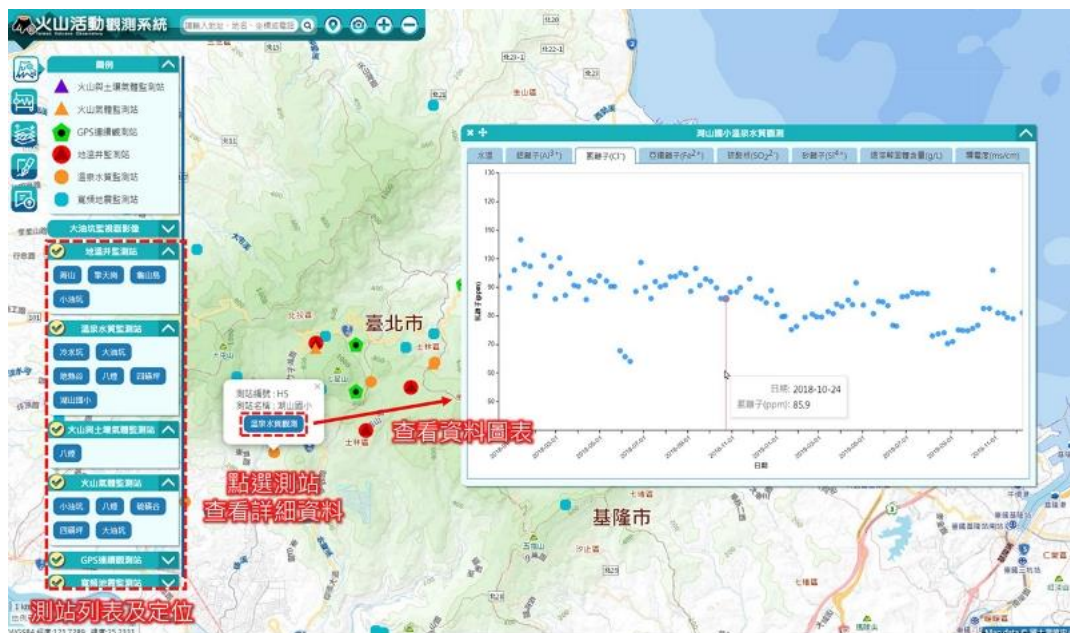


圖 12 火山觀測系統資料查詢與圖臺展示畫面。

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。

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輯。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)。大屯火山噴發後泥石流影響範圍模擬。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.