

# 火山活動監測：大屯山火山群與龜山島海域火山 Monitoring Volcanoes: Tatun Volcanic Group and Kueishandao

曹恕中；謝有忠；陳棋炫

## 摘要

大屯火山群和龜山島的噴發活動已經沉寂了 1 萬年以上，但是從火山氣體及微震的特性看，此兩區域的地殼深處仍具有岩漿活動的跡象。從美國黃石公園和加州長谷的火山噴發歷史顯示，火山長時間的停歇，並不代表永遠休止，端賴岩漿庫的來源補充以及其所在位置的地質環境條件，再次活動噴發，可能需要一段很長的時間，也可以很短。

經濟部中央地質調查所推動之大台北地區的火山地質調查與監測計畫，便持續地由地質、地球化學、地球物理、數值地形測製等方面進行；基本的火山地質資料庫與長期監測資料庫正逐步建置。依據現有資料，不可否認，大屯火山群和龜山島下存在岩漿庫，然而，岩漿庫是持續增長還是衰退？它的活動機制如何？需要更長時間，收集更多的數據資料才能精確評估。

關鍵字：大屯火山群、龜山島、火山地質、火山監測

## 前言

台灣在全球性的巨觀地質環境，與鄰近國家如日本、菲律賓、印尼，甚至遠至南北美洲西側及中南美洲的美國、加拿大、墨西哥、智利等等，都屬於環太平洋「火環帶」(Circum-Pacific Ring of Fire)；之所以稱為「火環帶」，是因為這些國家都分布著十數個到上百個活火山，在人類歷史上和現代的數十年內，也不時傳出火山噴發活動引起各式災害的消息；然而，只有台灣的火山沉寂了遠超過人類歷史時間。

火山區特有的地熱活動特徵，如溫泉、硫氣孔，在大屯火山群和龜山島並沒有停歇；近年來，國內科學家投入火山氣體成份和微地震的研究發現，此等現象具有和其他國家的活火山地區一樣的特性，簡單的說，就是台灣的大屯火山群和龜山島下方地殼深處很可能存在一個仍然活動的岩漿庫，提供熱源和釋放氣體，引發群聚微地震等徵兆，因此引起學者專家開始認真考慮大屯火山群的活動性(Song *et al.*, 2000a, 2000b)。

1994 年國際火山學會基於時間經驗的法則，無法有效定義一座活火山，遂討論發展出現象定義(phenomenological definition)，即是，若能利用各種科學方法偵測出火山地區地底下仍有岩漿庫存在，就必須認定其為活火山(active volcano)(Szakacs, 1994)。如此一來，根據現象定義，台灣的大屯火山群和龜山島可以認定為活火山，因此接下來要做的是，利用科學方法模擬岩漿庫存在地殼內部的空間分佈以及地下裂隙系統，更進一步要評估它的活動性以及對四周環境的

影響程度。

經濟部中央地質調查所由 93 年度起推動「大台北地區特殊地質災害調查與監測」四年計畫，火山活動監測與火山地質調查是其中一項重要的目標。參予本計畫的團隊，除了本所之外，還包括了台灣大學地質科學系、中央研究院地球科學研究所、工研院能源資源研究所、中興測量公司、海洋大學應用地球科學研究所和台灣大學海洋研究所等單位。

隨著技術進步和理論的發展，大屯火山群和龜山島仍有許多的問題等待探討，本文將介紹兩個火山區域的研究調查，或許可為借鏡。

### 火山災害

火山一旦噴發，引起災害的地質作用可分為兩類。一為火山噴發的直接產物的運動，如高溫熱的熔岩流、碎屑岩流、火山灰等等，會直接威脅生命與建物，大氣中久留的灰燼甚至影響氣候。另一種則為火山活動引發的地質作用，如火山泥流、山崩、海嘯、地震及有害之火山氣體(CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S、SO<sub>2</sub>)。因此要進行防災減災，最基礎的工作便是地質調查，先建立過去的紀錄與歷史，再以科學儀器監測現今的各種活動現象，進而評估未來的可能活動性及影響性。美國地質調查所(USGS)的火山災害計畫(volcano hazards program)便擬定了四大主要目標：評估(assessment)、監測(monitored)、研究(research)和資訊(information) (Tilling and Bailey, 1985)。

### 火山調查與監測

火山調查與監測，可分為長期和短期兩方面(Tilling, 1989)。

長期面(long-term)的主要工作方向是「調查」火山過去的行為，其目的包括(1)確認活火山；依據前述的現象定義，確認地殼存在具有活動性的岩漿庫，(2)詳細調查火山過去的活動紀錄，並評估未來的噴發規模與型態，(3)確認未來火山活動的影響區域，建立災害分區圖(hazard zonation map)。此長期面的工作，簡而言之，就是火山地質調查和建立基本資料庫。細節部份則包括了建立火山岩層序和演化歷史、火山產物的分布與規模、探討火山產物的種類與成因以及噴發絕對年代的測定。

短期面(short-term)的主要工作方向，則是「監測」火山現在的行為。目前許多活火山地區監測的項目，包括了(1)地震、(2)地表變形、(3)地熱系統(噴氣、溫泉、溫度等)、(4)地球物理現象(如地電、重力、磁力等)。這些地質現象的變化都和地殼岩漿庫的活動有直接的關係，也就是說，火山噴發前，岩漿庫會先逐步增長或向上遷移，因而引起頻繁的微地震、地表隆升、地溫增高、噴氣之 SO<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub> 等氣體成份增加等等。所以平日長期的監測有兩個目的，一為建立「背景值」，二為監看「異常值」，並藉著分析所得的異常現象，評估火山活動的可能性。長期微震資料的紀錄與分析，也能夠模擬地殼內岩漿庫的空間分佈與可能之遷移管道(Hill and Prejean, 2005; Husen *et al.*, 2004)。

「大台北地區特殊地質災害調查與監測」計畫中的火山監測，目前先採行設置火山地區的微震監測網以及建立地熱系統的各项地球化學背景值兩個項目，待未來能證實岩漿庫活動有增強趨勢時，便會進行地表變形和其它地球物理監測。當然，火山地質調查，繪製地質圖、重建火山層序和演化歷史、建置基本岩石及地球化學資料庫是必要的基礎工作，目前已完成龜山島、大屯火山群之七星山亞群和磺嘴山亞群等區域之調查。

## 火山活動現象

### 大屯火山群和龜山島

台灣在極遠古的數千萬年前，便有類似夏威夷的火山活動；玄武岩質的火山岩分布於台灣北部的許多地層內，南部則以澎湖群島玄武岩最為著名。但是只有大屯火山群和龜山島，除了眼睛所見的廣闊的火山岩和火山地形分佈外，仍有旺盛的火山地熱活動，這表示地殼深處仍存在一個高熱源和氣體來源，在火山地熱區，高熱的岩漿庫是當然的推論。

推論岩漿庫的主要科學證據有二。一為來自於火山氣體中氦同位素比值( $^3\text{He}/^4\text{He}$ )；因為  $^3\text{He}/^4\text{He}$  值在空氣、地殼和岩漿中的值完全不同。通常岩漿的  $^3\text{He}/^4\text{He}$  值是空氣中的 8 倍至數十倍，而地殼中的值卻是空氣值的 0.1 以下。一般火山氣體的分析值，是火山氣體在地殼內部上升時，與其它成份的混合值，個別的比例可經由理論計算。

大屯火山群和龜山島火山噴氣經分析計算顯示，氦同位素有很高的比例(60-80%)是由岩漿所釋放出來，而非一般地殼或空氣中的氦同位素值；尤其以大油坑地區和龜山島的火山氣體尤其明顯，其  $^3\text{He}/^4\text{He}$  值為空氣值的 6-8 倍(楊燦堯，2000；楊燦堯等，2003；Yang *et al.*, 2005)，已經和鄰近國家日本、菲律賓現生活火山的氦同位素比值非常接近。

其二的證據來自於微震紀錄；長期以來，大屯火山群附近有相當多的微震(規模 $<3.0$ )發生，尤其集中在馬槽地區(葉義雄、陳光榮，1991)。自 2003 年起，大屯火山群之七星山地區設置了微震站網，持續紀錄與分析地震紀錄。結果發現，這些密集的微地震在記錄儀上所表現的波形和頻率等訊號，和一般斷層作用引起的地震訊號有很大的差異，反而與許多活火山地區的「火山地震」訊號具有相同的特性，諸如群震(swarm)、長週期振動(long-period)、長時微振動(tremor)等等(Lin *et al.*, 2005a,b)。根據研究，這些訊號和液態岩漿在上升管道和高熱地下水在裂隙中循環移動有關(Chouet, 1996)。

大屯火山群及龜山島在地表上雖然尚未發現抬升變形跡象，但是由高解析度空載光達數值地形模型(LiDAR DTM)顯示下，火山口(crater)、火山錐(cone)、熔岩流平台等火山地形都完整清晰地表現(圖一、二)，可見是相當年輕的火山群和火山島，噴發活動停歇不久。此外，在龜山島東側海域，靠著高頻聲納探測，發

現海床上至少有 12 處熱液噴泉以及數個火山錐體(圖三)，表示龜山島並不孤獨，海域可能也醞釀著火山活動。

#### 美國黃石國家公園(Yellowstone Park)

美國黃石國家公園的地熱活動，以溫泉與間歇噴泉(geyser)聞名於全世界。它主要的三次大規模爆發活動(caldera-forming eruption)發生於 200 萬、130 萬和 60 萬年前；16 萬年前至 7 萬年前，在破火山口中，熔岩流又陸續噴發，覆蓋了整個公園區域，接著黃石公園火山噴發活動也沉寂了 7 萬年之久(Fournier, 1989)。然而，除了地熱現象外，火山氣體中  $^3\text{He}/^4\text{He}$  值高達空氣的十幾倍，表示存在來自深部地函的岩漿(Kharaka and Thordsen, 2000)。此外，每年公園區內 1000~3000 個微震，提供豐富的紀錄，進行地震定位、震波速度計算( $V_p/V_s$ )和震波全像攝影分析(tomography)等分析，便可模擬低速區域和推測岩漿庫位置(圖四)，更證明了岩漿庫的存在與可能的活動型態(Husen *et al.*, 2004)。

#### 美國加州長谷火山區(Long Valley)

長谷破火山口(Long Valley caldera)和 Mono-Inyo 火山口鏈(Mono-Inyo Craters Chain)形成美國加州東側一個大規模的火山系統。長谷破火山口是一個長短軸各約 30 公里及 15 公里的橢圓凹陷(elliptical depression)，於 76 萬年前的劇烈噴發後形成，之後大約以 20 萬年的間隔，分別於 50 萬、30 萬及 10 萬年前在破火山口內陸續有較小規模的噴發活動。在破火山口其西側的 Mammoth Mt.則是在 22 萬至 5 萬年前噴發形成。此後，本區域的噴發活動轉移至長谷破火山口西側，自 Mammoth Mt.向北延伸的 Mono-Inyo 火山口鏈。這個火山口鏈噴發起於 4 萬年前，在最近的 5 千年內，約以 250 至 700 年間隔陸續有噴發活動，是相當年輕的一系列火山(Hill *et al.*, 2002)。

就長谷破火山口本身而言，火山活動停歇了約 10 萬年之久，然而在此地區，地熱能量驅動溫泉、噴氣孔以及 3 個地熱發電廠，地震也經常發生；但是自 1978 年起，群震現象增強，並伴隨幾個規模 6 的強震，破火山口中央並產生隆起變形，表示岩漿向上移動，美國地質調查所因而從 1982 年開始強化此區域的監測。

### 討 論

本文提出美國的兩個例子，除了它們的種種現象指出地下岩漿庫仍然存在之外，最主要的事實是，黃石公園破火山口區和長谷破火山口區都有一段非常長的停歇時間。台灣最年輕的火山活動記錄是宜蘭平原外的龜山島，大約在 1 萬年左右(Chen *et al.*, 2001)；其次是台灣島最北端的大屯火山群，活動的高峰大約為 80 至 20 萬年前(曹恕中, 1994)。此外，由台北盆地火山泥流堆積物層序和岩石的定年研究，大屯火山群的兩次密集大規模噴發活動的間隔，可能為大約 20 萬年(Tsao *et al.*, 2001)。但是由於年代分析技術和標本品質的限制，20 萬年前停止的

火山噴發活動只是地質學家保守的推論，更年輕的噴發紀錄可能有，也可能沒有。近年來，有學者在台北盆地第四紀沉積物發現疑似火山灰物質(Chen and Lin, 2002; 陳中華和林朝宗, 2006)，更指出大屯火山的最後一次活動時間，可能比目前所知還要近期。大台北地區火山調查監測計畫正積極地重建火山層序以及採集更多的樣本進行定年分析。

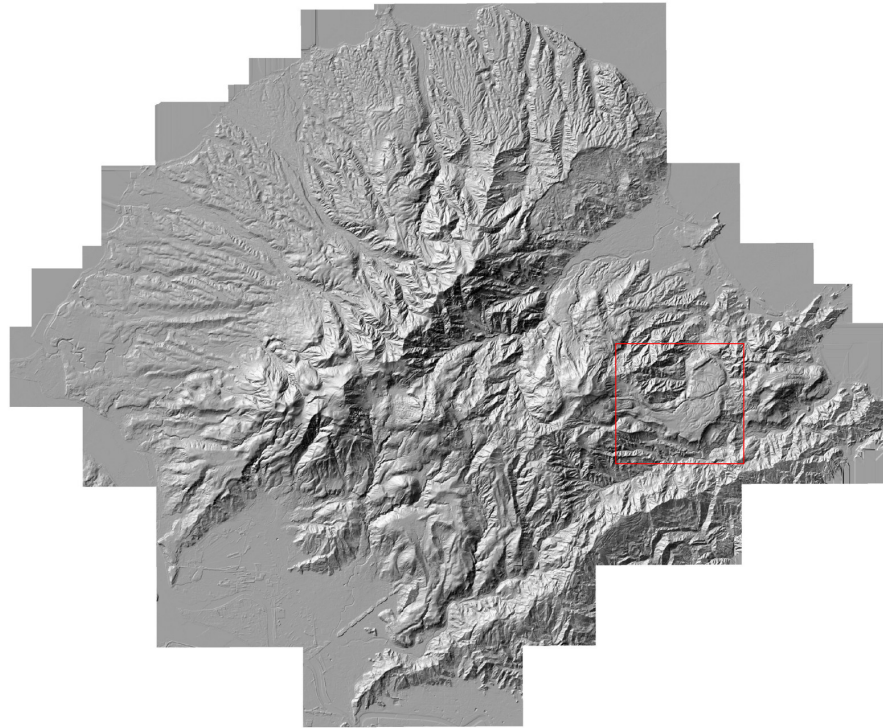
總之，火山長時間的停止活動，並不一定代表火山停止活動，地函高熱的熔融岩石匯集於地殼形成岩漿庫，一段密集噴發消耗後，造成地表陷落而成大規模破火山口或陷落火山口。此後，若是大地構造環境條件適當，岩漿會重新生成匯集。由高解析度的 LiDAR DTM 解析火山地形，大屯火山群東側的磺嘴山地區，似乎也有破火山口的環狀特徵，包圍著較後期噴發形成的磺嘴山和大尖後山兩座火山(圖一)；大屯火山群下的岩漿庫可能一度掏空，而現在正處於再生補充階段。

雖然，大屯火山群和龜山島的岩漿活動跡象並不如其他的火山地區一般地明顯，但是馬國鳳等人(Ma, 1996)利用 seismic tomography 方法研究，發現台灣北部在地下 15 公里左右可能有一低速異常帶，可能代表岩漿的存在。台灣北部的大地應力，目前正處於張裂狀態，鄰近地質環境又有隱沒與碰撞作用交會，大地構造比起其他地區複雜，因此，地下岩漿庫的消長，仍需收集更多的基本調查資料才能達到較精確的分析和評估。

#### 參考文獻

- 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)，第 65 頁。
- 曹恕中 (1994) 更新世大屯火山群鉀氬年代分析：經濟部中央地質調查所彙刊，第九號，137-154 頁。
- 葉義雄、陳光榮 (1991) 金山斷層之調查研究—微震觀測。行政院國科會防災科技報告，79-55 號，共 41 頁
- 楊燦堯 (2000) 陽明山國家公園大屯火山群噴氣之氦同位素比值研究。國家公園學報，10(1), 73-94 頁。
- 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。
- 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, Y.G., Wu, W.S., Chen, C.H., and Liu, T.K. (2001) A date for volcanic eruption inferred from a siltstone xenolith. *Quaternary Science Reviews*, 20, 869-873
- Chouet, B.A. (1996) Long-period volcano seismicity: its source and use in eruption forecasting. *Nature*, 280, 309-316.
- Fournier, R.O. (1989) Geochemistry and dynamics of the Yellowstone National Park hydrothermal system. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 17, 13-53.

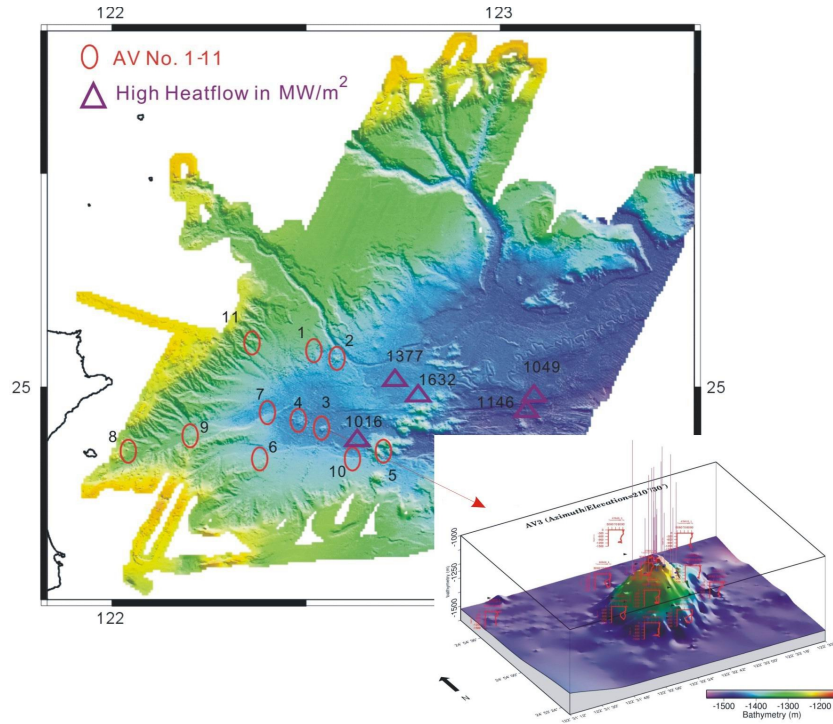
- Hill et al. (2002) Response plan for volcanic hazards in the Long Valley caldera and Mono Craters area, California. *United States Geological Survey Bulletin*, 2185.
- Hill, D.P. and Prejean, S. (2005) Magmatic unrest beneath Mammoth Mountain, California. *J. Volcano. Geotherm. Res.*, 146, 257-283.
- Husen, S., Smith, R. B., and Waite, G. P. (2004) Evidence for gas and magmatic sources beneath the Yellowstone volcanic field from seismic tomographic imaging. *J. Volcano. Geotherm. Res.*, 131, 397-410.
- Kharaka, Y.K., Sorey, M.L., Thordsen, J.J. (2000) Large-scale hydrothermal fluid discharges in the Norris-mammoth corridor, Yellowstone National Park, USA. *J. Geochemical Exploration*, 69/70, 201-205.
- Lin, C.H., K. I. Konstantinou, W.T. Liang, H.C. Pu, Y.M. Lin, S.H. You and Y.P. Huang, 2005a, Preliminary analysis of tectonic earthquakes and volcanoseismic signals recorded at the Tatun volcanic group, northern Taiwan. *Geophysical Research Letters*, Vol. 32, No.10, L10313.
- Lin, C.H. K. I. Konstantinou, H.C. Pu, C.C. Hsu, Y.M. Lin, S.H. You and Y.P. Huang, 2005b, Preliminary results of seismic monitoring at Tatun volcanic area of northern Taiwan, *Terr. Atm. Ocean.*, Vol. 16, No. 3, 563-577.
- Ma, K.F., Wang, J.H. and Zhao, D. (1996) Three-dimensional seismic velocity structure of the crust and uppermost mantle beneath Taiwan: *J. Physics Earth*, 44, 85-105.
- 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
- Szakacs, M. (1994) Redefining active volcanoes: a discussion. *Bull Volcano*. 56, 321-325.
- Tilling, R.I., editor (1989) *Volcanic hazards*: Short course in Geology, Vol. 1, 28<sup>th</sup> International Geological Congress, Washington, D.C., 123P.
- Tilling, R.I. and Bailey, R.A. (1985) Volcano hazards program in the United States. *J. Geodynamics*, 3, 425-446.
- Tsao, S., Song, S.R., Lee, C.Y. (2001) Geological implications of lahar deposits in the Taipei Basin. *Western Pacific Earth Sciences.*, 1(2), 199-212.
- Yang, T.F., Lan, T.F., Lee, H.F., Fu, C.C., Chuang, P.C., Lo, C.H., Chen, C.H., Chen, C.T.A. and Lee, C.S. (2005) Gas compositions and helium isotopic ratios of fluid samples around Kueishantao, NE offshore Taiwan and its tectonic implications. *Geochemical Journal*, 39, 469-480.



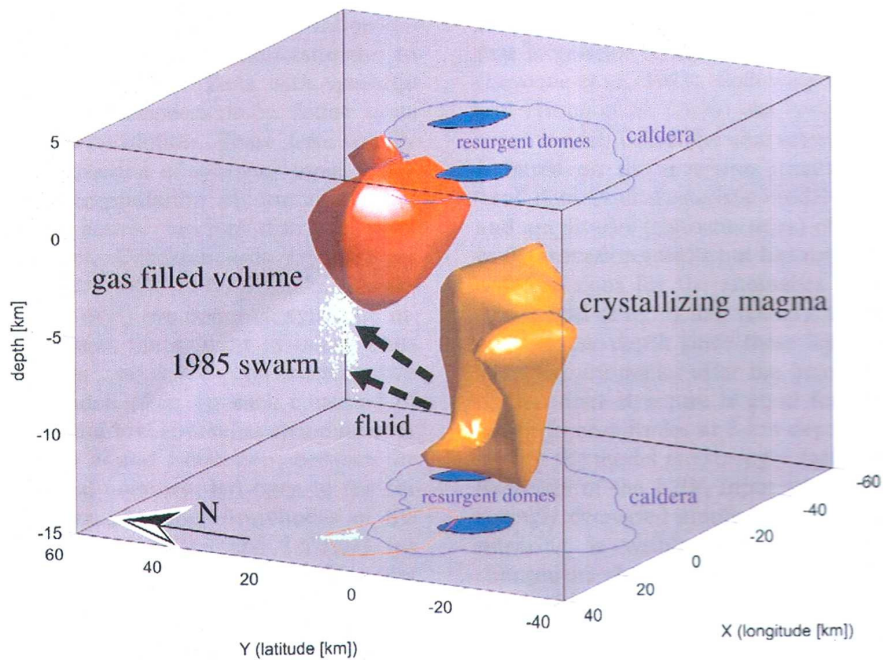
圖一：大屯火山群 LiDAR DTM，精確地去除地表植被和建物，呈現完整的火山地形，如火山錐、火山口及熔岩流平台。右側方框之實景照片為圖二。



圖二：萬里大坪熔岩流平台(空拍)及鑽井點位，熔岩流之源頭為磺嘴山(上方黃線交會處)。位於圖一中右側方框內呈舌狀之地形。(詹瑜璋攝)



圖三：台灣東北海域海底火山及熱液噴泉分佈圖。右下圖為三號火山之3D 立體圖，圖中向上之線條為熱液噴發高度。



圖四：黃石公園下方地殼之低速帶 3D 模擬影像。右下橘黃色範圍為岩漿庫，左上紅色體則為氣體富集區域，箭頭表示流體遷移方式導致群震現象(白色點代表震源位置)。取自 Husen *et al.*(2004)