

題目:基隆嶼石英安山岩常壓下之實驗岩石學研究

楊智淵

指導教授:賴昱銘 博士

摘要

基隆嶼位於基隆市東北方外海，屬台灣北部火山群的一部分，此地區的火成岩體含有石英顆粒，被歸類為石英安山岩。過去研究利用火成岩年代學、火成岩岩性與地理位置的分布，將基隆嶼劃分為基隆火山群的一部分。然近期的鋯石鈾-鉛定年學及鉛同位素分析結果，卻認為基隆嶼與大屯火山群的噴發年代與同位素值更接近。

本研究期利用實驗岩石學的方法，使用高溫爐模擬基隆嶼安山岩質岩漿於一大氣壓下，不同溫度的礦物生成順序。並使用掃描式電子顯微鏡，分析不同溫度實驗下所得之樣本光片。此研究結果將與前人於基隆山之實驗岩石學結果相對比，比較同屬基隆火山群的兩個岩體之岩漿結晶分化異同。

研究動機與研究問題:

基隆嶼與基隆山在過去由岩性和岩相學推論其為基隆火山群的一部分 Chen (1999)。且噴發年代相似(Chen and Lin, 1982; 莊文星和陳汝勤, 1989; Chen et al., 1993; 李協長, 1998)。但 Chu et al. (2018)利用鋯石鈾-鉛定年法，基隆嶼和基隆山年代(Shao et al., 2014)上有區別，且鉛同位素值顯示可能是不同一個火山群。Lai et al. (2014)以實驗岩石學的方法進行了基隆山岩漿在常壓下的結晶順序探討。本研究想採取基隆嶼的樣本，磨製岩石薄片與光片，觀察其原岩的礦物組成。另一方面，進行常壓下的實驗岩石學研究，並搭配電子顯微鏡分析，探討基隆嶼與基隆山的結晶分化歷程是否相同，即暗示其岩漿活動的機制相似與否。

文獻回顧與探討:

地質背景

北部火山活動帶

台灣位於菲律賓海板塊和歐亞板塊之間，台灣的活動造山帶由北呂宋島弧和亞洲大陸弧陸碰撞後產生。北部火山活動帶包含:大屯火山群、基隆火山群、觀音山、草嶺山還有一些東北方外海的火山島嶼組成(Chen, 1997)。北部火山活動帶可能為張裂環境構造，及北部造山帶拉張崩落後的產物(Chung et al., 2001; Wang et al., 1999, 2004; Lan et al., 1996; 王國龍, 2000)。形成此處火成岩之岩漿，由上湧的軟流圈與岩石圈地函等端成分部分熔融而形成(Wang et al., 2004)。

基隆火山群

基隆火山群位於台灣東北部，屬於台灣北部火山活動帶之一部分(Chen, 1997;

Chen et al., 1999), 其以崁腳和屈尺斷層其他北部火山群作區別。基隆山火山群有五個火山體, 包含: 基隆山、武丹山、本山、草山和雞母嶺(Yen, 1949; Wang, 1953; Chen and Huh, 1982; Juang and Chen, 1989; Chen, 1999)。

在前人研究當中, 基隆火山群的火成岩被分類成石英安山岩(Dacite)或是含石英的安山岩(Quartz Andesite), 會這樣分類是由於其安山岩當中發現含有石英顆粒(Wang, 1953; Yen et al., 1979; Chen and Huh, 1982; Hwang and Meyer, 1983), 石基中的斑晶則包括: 斜長石、角閃石、黑雲母、磁鐵礦。

基隆火山群石英來源, 陳正宏(1999)提議這些石英顆粒源自於安山岩質岩漿上升過程中, 在沉積地層中捕獲的石英顆粒。鐘三雄(2000)認為, 基隆火山群安山岩是基性和酸性岩漿混合作用而成, 安山岩中的石英應該是源自於酸性岩漿。郭盈宗(2002)根據氧同位素的資料推論, 基隆山之安山岩中之石英為安山岩質岩漿所生成。賴昱銘(2004)與 Lai et al. (2014)使用高溫高壓的實驗岩石學研究, 認為基隆山的石英可自地底約 40-50 公里處形成, 並於 30-40 公里處為不穩定向, 進而形成石英的灣狀構造。

基隆火山群的生成年代, 根據 Chen and Lin(1982), 大屯火山群、基隆火山群為早更新世形成。其定年結果為 0.88-1.7 Ma。以鉀-氬定年法結果為 1.06-1.7 Ma(莊文星和陳汝勤, 1989)、以核飛跡定年法結果為 0.88-1.26 Ma(Chen et al., 1993)、以氫-氬定年法結果為 1.13-1.26 Ma(李協長, 1998)。

基隆嶼

基隆嶼位於基隆市東北方約 6 公里的海域, 該島嶼為一火山噴發形成的小島, 地形略呈東北-西南方向延伸, 長約 800 公尺, 寬約 400 公尺, 面積約 0.24 平方公里。由於基隆嶼是由安山岩質岩漿構成, 其岩漿黏滯性較大, 容易形成椎狀或是高聳陡峭地形。

基隆嶼所構成之岩體, 岩石產狀、礦物組成或是噴發時間和台灣東北角一帶之基隆火山群(基隆山、武丹山、本山、草山和雞母嶺)十分相似(陳正宏, 1990), 兩者絕大部分是由含有石英之安山岩所構成。基隆嶼石英安山岩具斑狀組織, 除石英之外, 常見斑晶包括黑雲母、斜長石、角閃石、輝石和磁鐵礦, 基質以斜長石為主(何恭算, 2009)。島上出露之岩體, 經常可發現岩體內含一些大小、顏色和岩相不同之捕獲包體。

石英顆粒在其安山岩當中普遍較基隆火山群大一些。何恭算(2009)的研究報告說明, 從石英顆粒多成圓狀, 內部常有凹陷等等, 支持陳正宏(1990)由岩相學、微量元素、鋁鉍同位素分析結果得出之石英來源。

基隆嶼的定年, 根據鉀-氬定年的結果為 1.02 ± 0.05 Ma(莊文星和陳汝勤, 1989)、根據核飛跡定年法的結果為 0.28-0.37 Ma(Chen et al., 1993)、根據鉛石鈾-鉛定年法的結果為 0.41 Ma(Chu et al., 2018)。

研究方法及步驟:

A. 岩象學研究:

將野外採回之安山岩，利用鋸片切割機切除岩石標本表面風化的部分，再用肉眼觀察樣本的顏色以及組成礦物之種類、顆粒大小與相互生長關係。切割過後的樣本取其內部較新鮮的部分，接著用鋸片切割機切成可以拿來做岩石薄片的大小(約玻璃片大小 4.5cm x 2.5cm)，在貼上玻璃片之前，用 100、600、1000 金鋼砂將要貼在玻璃片上的面拋光，使其更加平坦，並放進烘箱當中烘乾(110°C)約 24 小時，好讓岩石樣本更加穩定的貼合在玻璃片上。隨後用 AB 膠(樹脂：硬化劑 = 4:1)將其貼在玻璃片上，等待一至二天，接著使用精密切割機、金鋼砂來完成最後的研磨，並以德國蔡司(Zeiss) 公司所生產，型號為 Axioplan 7082 的透射、反射兩用偏光顯微鏡，對岩石及礦物組成做觀察及鑑定。利用偏光顯微鏡觀察完畢後，利用掃描式電子顯微鏡(SEM)針對礦物做進一步的鑑定，以補足偏光顯微鏡之觀察不足。最後利用能量分散光譜儀(EDS)做礦物化學組成分析。

B. 實驗岩石學研究:

本研究以基隆嶼石英安山岩為實驗樣本，實驗時所選取的壓力為一大氣壓，溫度範圍包含石英安山岩的整個熔融區間。以下分別是實驗樣本的製備、一大氣壓實驗方法和過程。(圖 1.)

B-1. 樣品製備:

首先利用鋸片切割機切除岩石樣本風化部分，再將樣本以碎石機壓碎後，置入球磨機進行研磨，並以手工繼續研磨制約 200 篩目(Mesh)。將磨好之岩石粉末放入烘箱(110°C)中備用。

B-2. 一大氣壓下之實驗:

將研磨好之岩石粉末置於高溫爐中進行反應，使樣品在所設定的目標溫度下反應完成之後，以水驟冷，將此溫度的礦物相保留下來；而岩漿部分則形成玻璃質。以下為一大氣壓下高溫實驗之流程:

1. 剪裁一適當大小的白金箔(10mm x 15mm)，將其折成囊袋，隨後將岩石粉末填充到袋中，製成白金囊包。
2. 將製作好之白金囊包以白金絲懸掛於穿有兩條白金線之氧化鋁管的下方。
3. 將高溫爐升溫至實驗目標溫度，待高溫爐顯示溫度穩定後，以 R 型熱電偶測量溫度，所得即為實驗前實測溫度，並紀錄高溫爐顯示溫度及實測溫度。
4. 將白金囊包放入高溫爐中進行反應，此時應注意白金囊包是否在高溫爐管壁正中間，以免樣本外漏污染管壁。
5. 待反應達所需的實驗時間後，利用釋電器放電將細白金絲熔斷，使白金囊包直接落入水中驟冷。

6. 再以 R 型熱電偶測量爐中溫度，所得為實驗後實測溫度。將實驗前、後所得之實測溫度平均，即為實驗溫度。
7. 將反應後的白金囊包以 AB(樹脂：硬化劑=12：5)膠進行灌膠，並將其以砂紙和鑽石膏進行拋光製成光片。
8. 先利用反射式顯微鏡(SEM)，對拋光後的樣本進行礦物相的初步鑑定，再利用能量分散光譜儀(EDS)進行各個礦物相及玻璃相的成分半定量分析。

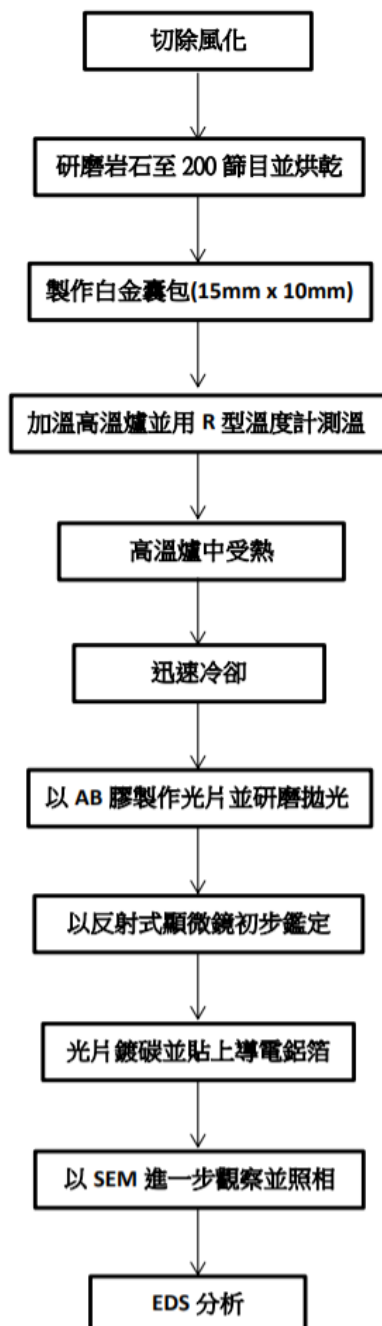


圖 1. 實驗流程圖

C. 掃描式電子顯微鏡(Scanning Electron Microscope, SEM)和能量分

散光譜儀(Energy Dispersive Spectrometer, EDS)分析

將先前完成之岩石薄片和拋光完成的的光片，鍍上碳之後，利用掃描式電子顯微鏡，對原岩樣本和不同溫度實驗形成的礦物相和殘餘熔體，進行分析，再利用掃描式電子顯微鏡得到之電子影像圖做分析。最後利用分散光譜儀針對所選取的相，做化學組成分析，可依據元素種類和強度來判別其為何種礦物。

本研究採用中央研究院地球科學所的 SEM-EDS 儀進行分析，其型號為 JSM-6360/LV，由 JEOL 公司所製造。分析時之加速電壓(Accelerated voltage)為 15 千伏(kV)，電流為 0.18 奈安培(nA)，電子束擴散範圍直徑為 30 毫米(mm)，Z 軸高度距離(WD)為 10 毫米(mm)，分析準確度為 $\pm 6\%$ 。

以下為 SEM-EDS 儀器之操作步驟

- 以吹球清潔拋光過後之光片表面，再以酒精擦拭，確認光片表面光滑平整之後，放入偏光顯微鏡找出觀察目標位置，將其標記下來。
- 將光片進行鍍碳(carbon coating)，使影像解析度增加，讓判別色階差異時，更為清晰。
- 將鍍碳且清理過之光片，放上載台，貼上導電鋁箔，待樣本室真空解除，即可進入樣本室，進行分析。
- 將樣本室抽真空至壓力 25(Pa)，並調整電流和電壓至適當大小。
- 畫面出現後，找到欲觀察之位置，調整焦距、亮度、對比後，進行拍照。
- 切換至 EDS 觀察視窗。
- 在 SEM 之影像上點選欲分析之位置，開始作 EDS 分析。

結果與討論

本研究結果，根據方法可以分成兩個部分：

A. 岩象學研究

在偏光顯微鏡觀察下，基隆嶼石英安山岩最主要的斑晶為斜長石，其餘則為角閃石、輝石、石英和氧化物。斜長石具有典型的聚片雙晶(圖 A-3)，且中心可觀察到經過置換的痕跡。石英在薄片觀察下多呈現圓形(圖 A-4)，少數為灣狀或是其他形狀，且有大量的細小礦物顆粒環繞在其周圍。角閃石在開偏光(open nicols)觀察下，應具多色性；在正交偏光(crossed nicols)觀察下，應具干涉色，但在此薄片觀察當中，角閃石呈現全消光，推測其經過大量的置換。

SEM 分析岩石薄片，利用背向散射電子(BSE)，區分出不同種礦物，比對偏光顯微鏡之觀察結果，再搭配 EDS 分析礦物化學組成，更進一步確認所觀察之礦物。在 SEM 影像當中，可以更容易觀察到斜長石、角閃石經過置換的痕跡(圖 A-5)。石英周圍的細小顆粒經過 EDS 分析化學組成後(圖 A-7 至 A-12)，判定為斜輝石、石英等等火成岩礦物，進而推測石英應由岩漿結晶生成。

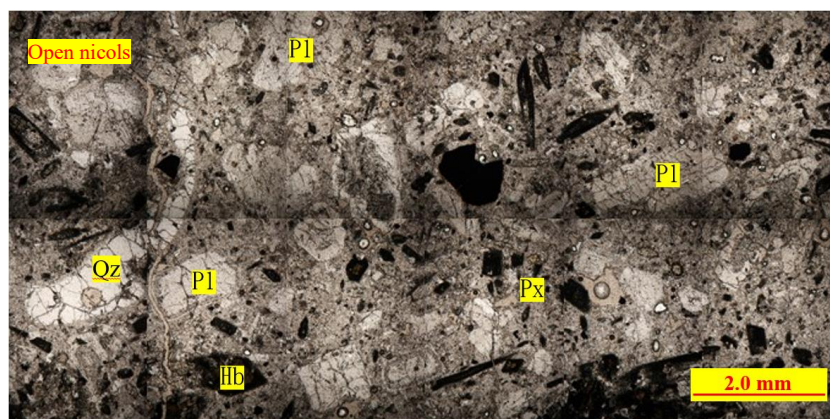


圖 A-1. 基隆嶼石英安山岩之薄片照片

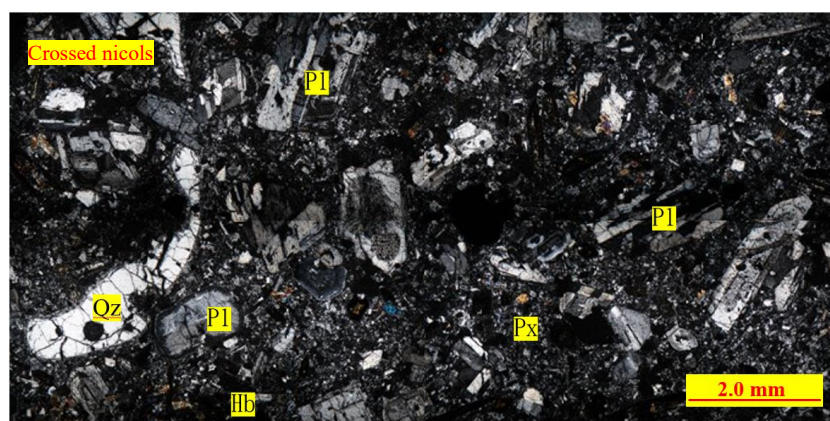


圖 A-2. 基隆嶼石英安山岩之薄片照片。



圖 A-3. 基隆嶼石英安山岩斜長石、輝石之薄片照片。

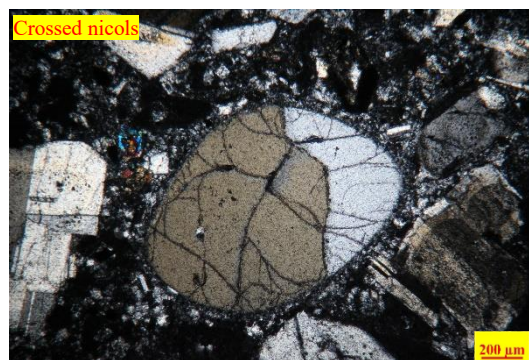


圖 A-4. 基隆嶼石英安山岩石英之薄片照片。

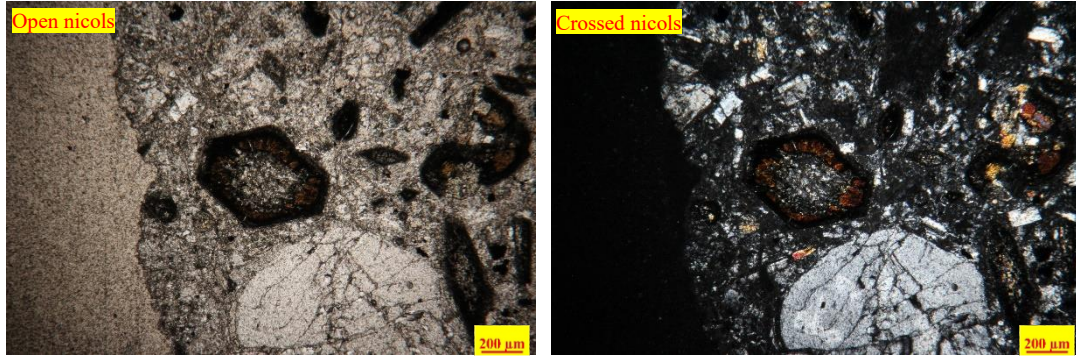


圖 A-5. 基隆嶼石英安山岩角閃石之薄片照片。

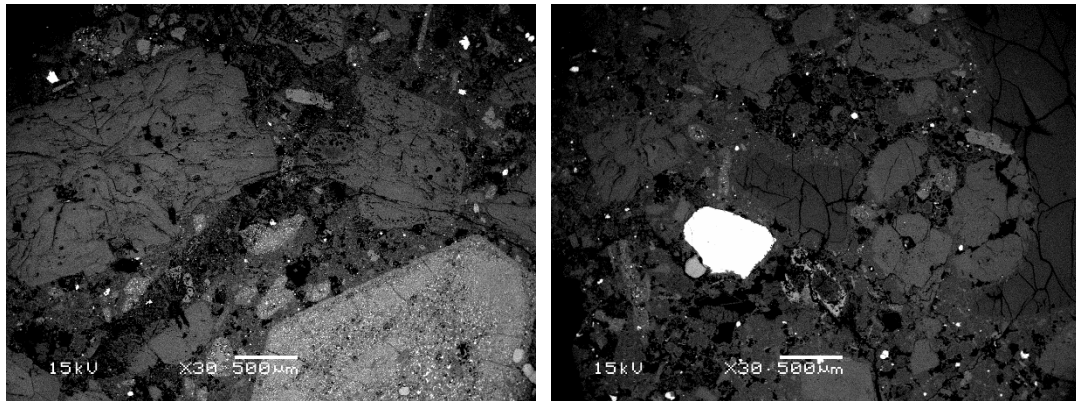


圖 A-5. 基隆嶼石英安山岩薄片之 SEM 照片，可觀察礦物經過置換。

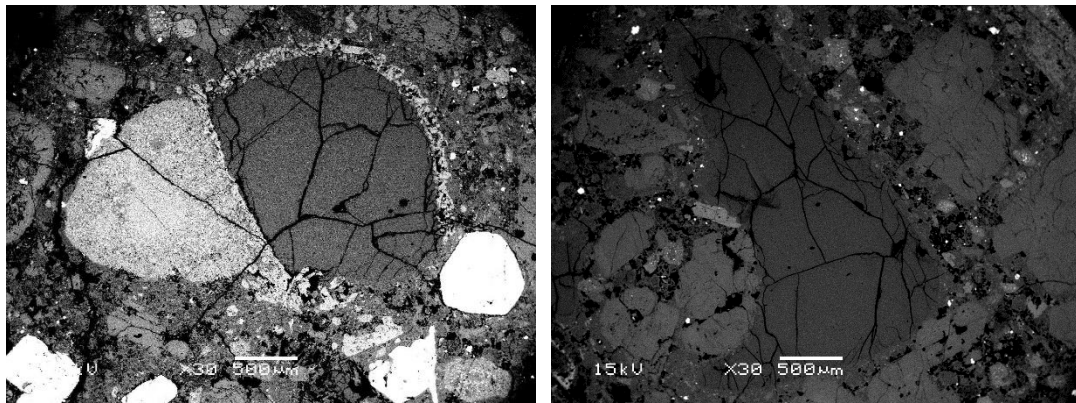


圖 A-6. 基隆嶼石英安山岩薄片之 SEM 照片，石英周圍的細小顆粒。

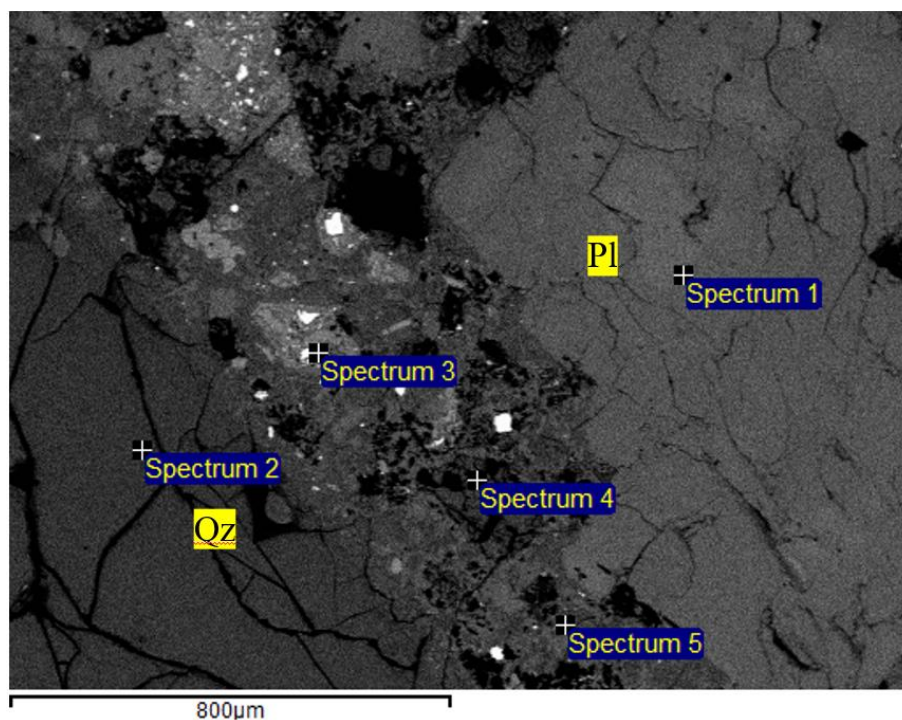


圖 A-7. 基隆嶼石英安山岩薄片之 EDS 分析照片，石英周圍的細小顆粒。

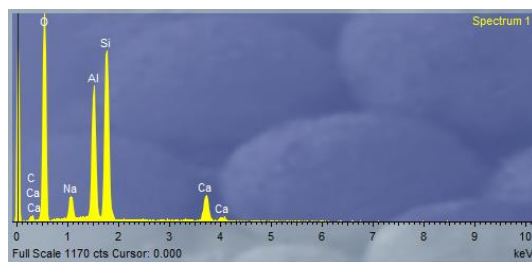


圖 A-8. EDS 光譜，斜長石。

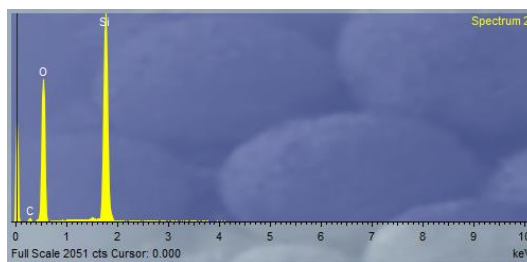


圖 A-9. EDS 光譜，石英。

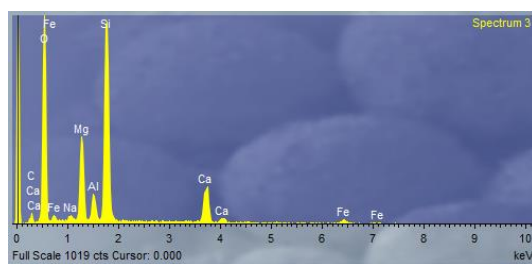


圖 A-10. EDS 光譜，斜輝石。

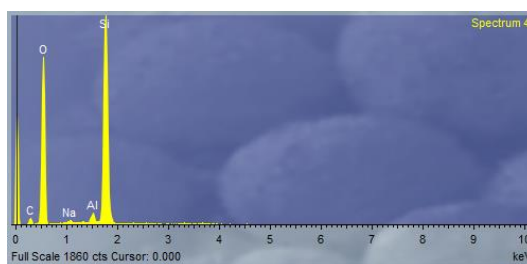


圖 A-11. EDS 光譜，石英。

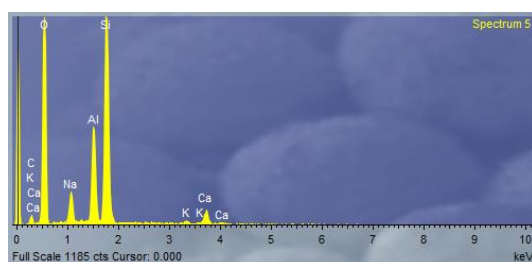


圖 A-12. EDS 光譜，斜輝石。

B. 實驗岩石學研究

本方法一共分成 10 次實驗(表 B-1)，溫度區間由 1300°C 至 1080°C。編號 1 至編號 6 為主要設定之實驗，編號 7 至編號 10 為比較實驗，特別是編號 7 和編號 8，我們根據 SEM 影像推測，這兩次實驗沒有完全熔融，不符合當初實驗的設計，也因此，我們改良實驗流程。當要進行較低溫實驗時(溫度低於 1200°C)，我們會先將樣本升至全熔溫度，待樣本全熔後，在降至目標溫度進行實驗。

由實驗得知，常壓下基隆嶼石英安山岩礦物相結晶順序為：在溫度 1300°C，岩石粉末全熔之玻璃質。至 1260°C，斜長石和鈦-鐵氧化物晶出。至 1160°C，鈦-鐵氧化物轉變為鐵氧化物。由此估計，基隆嶼石英安山之液相溫度約為 1280°C。根據比較實驗的結果，我們發現當溫度低於 1160°C 時，鈦-鐵氧化物會轉變成鐵氧化物。我們認為，鈦-鐵氧化物轉變成鐵氧化物是因為在氧氣充足的環境下，氧化鐵較氧化鈦容易生成。

在與前人研究結果(表 B-3)比對發現，在溫度高於 1160°C 時，本研究結果和前人之研究結果相同。當溫度低於 1160°C 時，在前人的實驗結果當中有出現石英、輝石等礦物，而本研究還是只有出現斜長石、玻璃、氧化物。

所有實驗結果幾乎相同，未來需要進行更加低溫的實驗來進行進一步的研究。

Number	Temperature	Duration time	Phases
1	1300°C	6 h	Gl
2	1260°C	6 h	Gl, Ti-Fe Ox,(Pl)
3	1200°C	1300 for 10 h and switch to 1200 for 24 h; 34 h	Gl, Fe Ox, Pl
4	1160°C	1300 for 10 h and switch to 1160 for 48 h; 58 h	Gl, Fe Ox, Pl
5	1120°C	1300 for 10 h and switch to 1120 for 73 h; 83 h	Gl, Fe Ox, Pl
6	1080°C	1300 for 10 h and switch to 1080 for 68 h; 78 h	Gl, Fe Ox, Pl
7	1200°C	10 h(failed)	Gl, Ti-Fe Ox,(Pl)
8	1160°C	24 h(failed)	Gl, Ti-Fe Ox, Pl
9	1160°C	1300 for 6 h and switch to 1160 for 12 h; 18 h	Gl, Ti-Fe Ox, Fe Ox, Pl
10	1160°C	1300 for 10 h and switch to 1160 for 24 h; 34 h	Gl, Fe Ox, (Pl)

表 B-1. 基隆嶼石英安山岩實驗岩石學

Gl: 玻璃; Pl: 斜長石; Ti-Fe Ox: 鈦-鐵氧化物; Fe Ox: 鐵氧化物

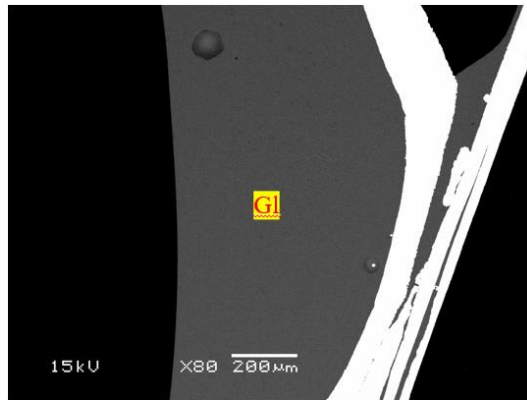


圖 B-1. No.1 1300°C 之 SEM 照片，在此照片中，只觀察到一個玻璃相，代表在此溫度下岩石粉末全熔。

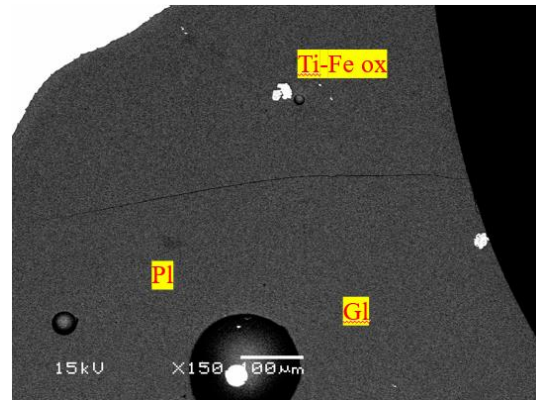


圖 B-2. No.2 1260°C 之 SEM 照片，從這溫度開始，開始晶出三種不同之礦物。

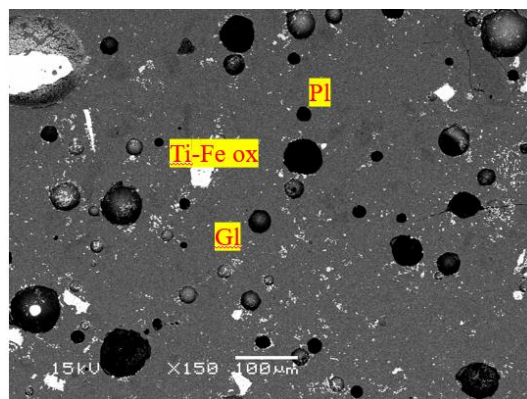


圖 B-3. No.7 1200°C 之 SEM 照片，在此照片當中，可以輕易觀察到三種不同礦物相，但有大量白點出現在基質當中，推測其沒有完全熔融。

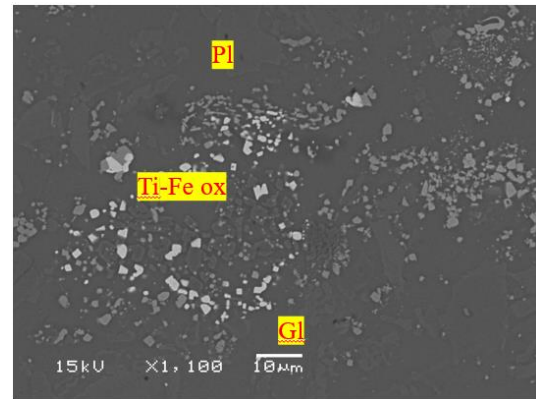


圖 B-4. No.8 1160°C 之 SEM 照片，在此照片當中，可以輕易觀察到三種不同礦物相，但有大量類似粉末形狀之物體，推測其沒有完全熔融。

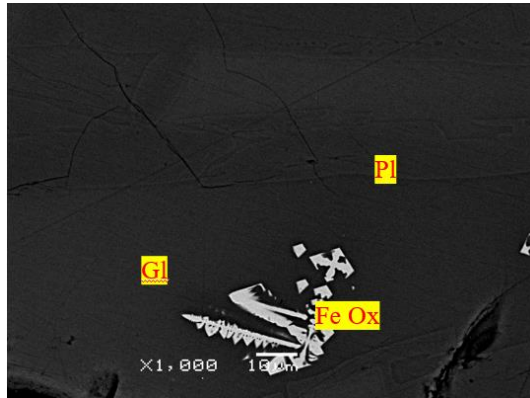


圖 B-5. No.3 1200°C 之 SEM 照片，利用調整過之實驗方法得出的結果可以觀察到三種不同的礦物相，且沒有類似粉末之白點。

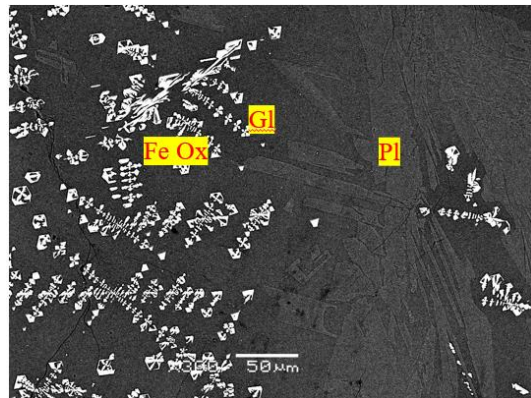


圖 B-6. No.4 1160°C 之 SEM 照片，利用調整過之實驗方法得出的結果可以清楚觀察到三種不同的礦物相，且沒有類似粉末之白點。

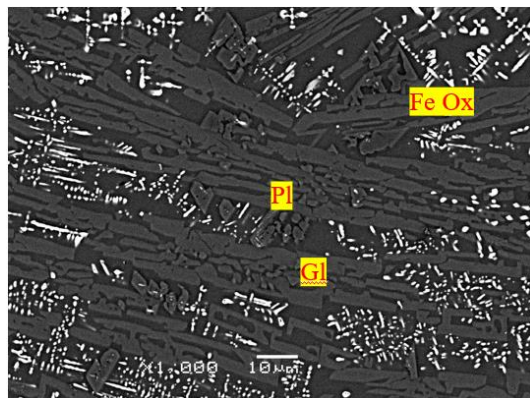


圖 B-7. No.3 1120°C 之 SEM 照片，利用調整過之實驗方法得出的結果在此溫度下，可以發現斜長石成為主要斑晶，氧化物和玻璃越來越少，顯示此溫度之實驗結果更接近原岩。

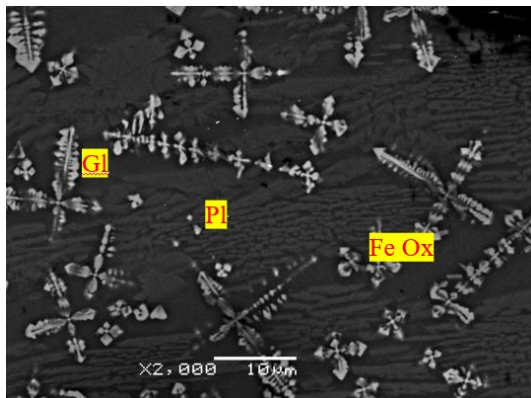


圖 B-8. No.8 1080°C 之 SEM 照片，利用調整過之實驗方法得出的結果在此溫度下，可以發現斜長石成為主要斑晶，氧化物和玻璃越來越少，顯示此溫度之實驗結果更接近原岩。

Number	Temperature	Duration time	Phases
1	1300°C	6 h	Gl
2	1260°C	6 h	Gl, Ti-Fe Ox, (Pl)
3	1200°C	1300 for 10 h and switch to 1200 for 24 h; 34 h	Gl, Fe Ox, Pl
4	1160°C	1300 for 10 h and switch to 1160 for 48 h; 58 h	Gl, Fe Ox, Pl
5	1120°C	1300 for 10 h and switch to 1120 for 73 h; 83 h	Gl, Fe Ox, Pl
6	1080°C	1300 for 10 h and switch to 1080 for 68 h; 78 h	Gl, Fe Ox, Pl

表 B-2. 基隆嶼石英安山岩實驗岩石學之主要實驗表

Melting experiments at atmospheric pressure of the Chilungshan andesite.

Run no.	Temp. (°C)	Duration (h: min)	Phase (s) ^c
025	1286	19:27	Gl
043	1283	23:58	Gl + Pl
016	1278	17:02	Gl + Pl
009	1270	05:00	Gl + Pl
010	1263	16:58	Gl + Pl + Ox
033	1231	07:06	Gl + Pl + Ox
034 ^a	1231	68:03	Gl + Pl + Ox
L101	1197	19:50	Gl + Pl + Ox
022	1193	22:37	Gl + Pl + Ox
041	1178	25:45	Gl + Pl + Ox
040 ^b	1178	28:31	Gl + Pl + Ox
L104	1170	16:03	Gl + Pl + Ox + Qz + Opx
L103	1162	05:50	Gl + Pl + Ox + Qz + Opx + Cpx
004	1148	05:30	Gl + Pl + Ox + Qz + Cpx
042	1134	46:11	Gl + Pl + Ox + Qz + Cpx
024	1129	22:30	Gl + Pl + Ox + Qz + Cpx
027	1094	23:38	Gl + Pl + Ox + Qz + Cpx

表 B-3. 基隆山石英安山岩實驗岩石學 (Lai et al., 2014)

結論

1. 在薄片觀察當中，最主要的斑晶為斜長石，其餘為角閃石、輝石、石英和氧化物。石英周圍有大量細小顆粒，EDS 分析結果為火成岩類之細小斑晶，推測石英應由岩漿結晶。除此之外，可以發現角閃石、斜長石中心有經過置換。
2. 實驗得知，常壓下基隆嶼石英安山岩礦物相結晶順序為：在溫度 1300°C，岩石粉末全熔之玻璃質。至 1260°C，斜長石和鈦-鐵氧化物晶出。至 1160°C，鈦-鐵氧化物轉變為鐵氧化物。
3. 由比較實驗，獲得兩個結果：
 - a. 持溫時間越長，晶出之礦物之成分、形狀會更接近原岩。
 - b. 較低溫的實驗會容易出現沒有完全融熔的現象，需要先升溫使粉末全熔後，

再降至目標溫度進行實驗。

- c. 鈦-鐵氧化物轉變成鐵氧化物是因為在氧氣充足的環境下，氧化鐵較氧化鈦容易生成

參考文獻

1. Chen, C. H., 1978. Petrochemsitry and origin of Pleistocene volcano rocks from northern Taiwan. *Bull. Volcano*, 41, p.513-528.
2. Chen, C. H., 1997. Extensional collapse of the northern Taiwan mountain belt, *Comment. Geology*, 25, p.855-856.
3. Chen, C. H., 1999. Petrogenesis of the Chilung Volcano Group andesites in northern Taiwan: mixing with shallow sediments and amphibole-rich nodules in the andesitic melts. *J. Geol. Soc. China* 36 (2), p. 157-174.
4. Chen, J. C. and Huh, C. A., 1982. Geochemistry of dacites from Chinkuashih area, northern Taiwan. *Proc. Geol. Soc. China*, 25, p. 67-80.
5. Chen, J. C. and Lin, F. J., 1982. Chemical characteristics of andesites from Taiwan. *ActaOceanographicaTaiwanica*, 13, p. 1-11.
6. Chen, C. H., Mertzman, S. A., and Shen, J.J., 1999. An unusual late Cenozoic volcano zone in northern Taiwan behind the southern Okinawa Trough. *Jour. Geol. Soc. China*, 42, p. 593-612.
7. Chen, C. H., Tan, L. P., Tien, R. L., Chung, S. H., and Liu, T. K., 1993. Fission track dating igneous rocks and silicified sandstones from the Chilung Volcano Group, northern Taiwan: implication of mineralization events of the Chinkuashih gold-copper deposits. *Jour. Geol. Soc. China*, 36, p. 157-174.
8. Chu, M. F., Lai, Y. M., Li, Q., Chen, W. S., Song, S. R., Lee, H. Y., Lin, T. H., 2018. Magmatic pulses of the Tatun Volcano Group, northern Taiwan, revised: Constraints from zircon U-Pb ages and Hf isotopes. *J. Asian Earth Sci.*, 167, p. 209-217.
9. Chung, S. L., Wang, K. L., Crawford. A. J., Kamenetsky, V. S., Chen, C. H., Lan, C. Y., Chen, C. H., 2001. High-Mg potassic rocks from Taiwan: implications for the genesis of orogenic potassic lavas. *Lithos*, 59, p. 153-170.
10. Hwang, J. Y. and Meyer, H. O. A., 1983. Dacite-andesite of the Chinkuashih region, northern Taiwan. *Proc. Geol. Soc. China*, 25, p. 67-81.
11. Juang, W. S., Chen, J. C., 1989. Geochronology and geochemistry of volcanic rocks in northern Taiwan. *Bulletin of the Central Geological Survey* 5, p. 31-66 (in Chinese with English abstract).
12. Lai, Y. M., Chu, M. F., Chung, S. L., Chen, W. S., Song, S. R., Lee, H. Y., Hung, C. H., 2014a. Zircon U-Pb age and Hf isotope studies of the volcanic rocks from the Northern Taiwan Volcanic Zone (NTVZ). 2014 Annual meeting of Geological

Society Located in Taipei (abstract).

13. Lai, Y. M., Kiu, T. C., Chen, Y. M., Iizuka, Y., 2014. Melting and crystallization of andesite from Chilungshan, North Taiwan: An experimental Petrological study at atmospheric pressure. *Quat. Int.* 349, p. 221-231.
14. Lan, C. Y., Chen, C. H., Chung, S. L., Lee, T., Wang, C. M., and Yui, T. F., 1996. The crustal evolution of continental Taiwan. *J. of Geol. Soc. of China*, 39, p. 337-353.
15. Shao, W.-Y., S.-L. Chung, and W.-S. Chen, 2014. Zircon U-Pb age determination of volcanic eruptions in Lutaio and Lanyu in the Northern Luzon magmatic arc. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 25, p. 149-187,
16. Wan, Y., 1953. Geology of the Chinkuashih and Chiufen districts, Taipeihshien, Taiwan. *Acta Geol. Taiwan*, 5, p. 47-64.
17. Wang, K.-L., Chung, S.-L., Chen, C.-H., Shinjo, R., Yang, T.F., Chen, C.-H., 1999. Postcollisional magmatism around northern Taiwan and its relation with opening of the Okinawa Trough. *Tectonophysics*, 308, p. 363–376.
18. Wang, K.-L., Chung, S.-L., O'Reilly, S.Y., Sun, S.-S., Shinjo, R., Chen, C.-H., 2004. Geochemical constraints for the genesis of post-collisional magmatism and the geodynamic evolution of the northern Taiwan region. *J. Petrol.*, 45 (5), p. 975–1011.
19. Yen, T. P., 1949. A note on the geology of the islets off Chilung with a petrographic description of volcano rocks. *Formosan Sci.*, 3 (1), p. 22-29.
20. Yen, T. P., Tzon, Y. H., and Wu, S, W 1979. Geology of the Chilung Volcano Group district, northern Taiwan. *Proc. Geol. Soc. China*, 22, p. 94-104.
21. 王國龍(2000) 台灣北部及外海晚上新世-第四季火山岩的地球化學特性與岩石成因，國立台灣大學地質研究所博士論文，共 169 頁。
22. 李寄嶠、蔡榮號、何孝恆、楊燦堯、鍾孫霖、陳正宏(1997) 應用 X 光螢光分析儀從事研石樣本之定量分析 (I) 主要元素。中國地質學會八十六年年會手冊及論文摘要，第 418-420 頁。
23. 李協長(1998) 金瓜石地區岩漿與礦化作用之定年學研究及大地構造運動之隱示。國立台灣大學地質研究所碩士論文，共 61 頁。
24. 何恭算、王士偉、戴昌鳳(2009) 彭佳嶼、棉花嶼、花瓶嶼及基隆嶼之力質與地形資源。國家公園學報 2009 年第 19 卷，第 4 期，第 46-64 頁。
25. 林國文(2012) 綠島安山岩之實驗岩石學研究。國立臺灣師範大學地球科學研究所碩士論文，共 78 頁。
26. 莊文星、陳汝勤(1989) 台灣北部安山岩之定年與地球化學研究。經濟部中央地質調查所彙刊，第五號，第 31-66 頁。
27. 陳正宏(1990) 台灣之火成岩。經濟部中央地質調查所，共 137 頁。
28. 郭盈宗(2002) 基隆火山群安山岩中斑晶礦物之氧同位素研究。國立台灣師範

大學地球科學研究所碩士論文，共 51 頁。

29. 黃鑑水、劉恒吉(1988) 台灣地質圖說明書，第五號，雙溪幅。經濟部中央地質調查所出版，共 51 頁。
30. 賴昱銘(2004) 基隆山安山岩之實驗岩石學研究及其石英成因之探討。國立臺灣師範大學地球科學研究所碩士論文，共 98 頁。
31. 鐘三雄(2000) 和美地區安山岩體中擄獲岩的岩象學與礦物化學初步研究。經濟部編印，共 53 頁。