

國立台灣師範大學地球科學研究所

碩士論文

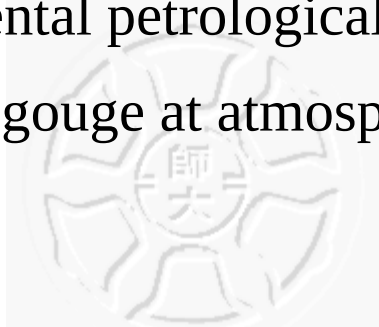
Department of Earth Science

National Taiwan Normal University

Master Thesis

一大氣壓下觸口斷層泥之實驗岩石學研究

An experimental petrological study of the
Chukou Fault gouge at atmospheric pressure



研究生：吳宗穎

指導教授：劉 德 慶 博士

葉 恩 肇 博士

中華民國 101 年 6 月

摘要

滑移弱化模型中斷層錯動產生了許多種能量例如：破裂能，輻射能以及摩擦熱能，而摩擦熱能為主要之能量。斷層作用產生的摩擦熱讓岩石在高溫環境下發生超糜嶺岩化或超壓碎岩化與部分熔融，因而生成假玄武玻璃岩。

集集地震發生後為了觀測全台活動斷層，中央地質調查所於 2000 年在嘉義縣福建坪長成橋附近設置觸口斷層的觀測井，總深度約 300 公尺，並鑽取岩心作為研究，且在 161 公尺深的剪切帶底部，除了發現斷層角礫岩外，還有疑似為假玄武岩玻璃的物質。

本研究為了瞭解假玄武玻璃岩物質之物理化學性質特性，以深度位於 159 公尺之灰色泥岩和 161 公尺的黑色緻密岩石為實驗樣品，藉由一大氣壓無水的實驗岩石學探討此區泥岩初熔溫度，利用電子顯微鏡觀察泥岩的變化，及 X 光粉末繞射分析原始岩心粉末和 900°C、800°C、700°C 熱處理之粉末，並與九份二山地滑發生的假玄武玻璃岩比較，估計觸口斷層剪切帶可能產生的溫度。

關鍵詞：假玄武玻璃岩、觸口斷層、實驗岩石學

目錄

摘要	I
目錄	II
圖目錄	IV
表目錄	VI
第一章 緒論	1
1-1 前言	1
1-2 研究目的	2
1-3 地質背景	3
1-3-1 觸口斷層簡介	3
1-3-2 地層簡介	3
1-3-3 福建坪鑽井	5
第二章 研究方法	9
2-1 岩心觀察研究	9
2-2 全岩化學分析	9
2-2-1 製作實驗樣本粉末	9
2-2-2 燒失量的測定	10
2-2-3 X 光螢光分析方法	10
2-3 X 光粉末繞射分析	11
2-4 一大氣壓下之實驗岩石學方法	12
2-4-1 一大氣壓下高溫實驗的程序	12
2-5 掃描式電子顯微鏡分析	14
第三章 結果與討論	18
3-1 岩心與全岩化學分析	18
3-1-1 岩心與薄片觀察	18
3-1-2 全岩化學分析	18
3-2 XRD 粉末分析	24
3-2-1 159C 岩心樣品	24
3-2-2 159C 之 700°C、800°C、900°C、950°C 熱處理樣品	25
3-2-3 161B 岩心樣品	25
3-2-4 161B 之 900°C、950°C 熱處理樣品	26

3-3 實驗岩石學研究.....	29
3-3-1 掃描式電子顯微鏡影像.....	29
3-3-2 各礦物 EDS 光譜.....	41
3-3-3 實驗岩石學研究結果.....	44
3-4 假玄武玻璃岩形成溫度.....	46
第四章 結論	47
誌謝	48
參考文獻	49

圖目錄

圖 1-1 斷層滑移弱化模型	2
圖 1-2 中油公司 1986 年繪製 10 萬分之一嘉義地質圖	4
圖 1-3 地調所 2007 年繪製 2 萬 5 千分之一活動斷層圖	6
圖 1-4 柱狀剖面圖	7
圖 1-5 156 公尺到 164 公尺岩心照片及實驗樣品深度標記.....	8
圖 1-6 福建坪鑽井示意圖	8
圖 2-1 白金囊包的製作流程	13
圖 2-2 白金囊包的懸掛示意圖	13
圖 2-3 一大氣壓實驗及驟冷裝置示意圖	15
圖 2-4 中研院 JSM - 6360/LV SEM - EDS	17
圖 3-1A 岩心 159C 段之灰色泥質岩	19
圖 3-1B 161B 段岩心碎塊.....	19
圖 3-2A 159C 的薄片.....	20
圖 3-2B 161B 的薄片.....	21
圖 3-3 $\text{FeO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ 相平衡系統	23
圖 3-4 159C 岩心粉末 XRD 結果.....	24
圖 3-5 159C 之 700°C、800°C、900°C、950°C 岩心粉末 XRD 結果	25
圖 3-6 161B 岩心粉末 XRD 結果.....	26
圖 3-7 161B 之 900°C、950°C 岩心粉末 XRD 結果	26
圖 3-8 159C-900°C 與 161B 岩心粉末 XRD 結果	27
圖 3-9 九份二山假玄武玻璃岩含量 XRD 分析結果	28
圖 3-10 實驗 1400°C 反射光顯微鏡影像	31
圖 3-11 實驗 159-1300°C 反射電子影像圖(BEI)	32
圖 3-12 實驗 159-1200°C 反射電子影像圖(BEI)	32
圖 3-13 實驗 159-1125°C 反射電子影像圖(BEI)	33
圖 3-14 實驗 159-1030°C 反射電子影像圖(BEI)	33
圖 3-15 實驗 159-950°C 反射電子影像圖(BEI)	34
圖 3-16 實驗 159-830°C 反射電子影像圖(BEI)	34
圖 3-17 實驗 161-1300°C 反射電子影像圖(BEI)	37
圖 3-18 實驗 161-1200°C 反射電子影像圖(BEI)	37
圖 3-19 實驗 161-1125°C 反射電子影像圖(BEI)	38
圖 3-20 實驗 161-1030°C 反射電子影像圖(BEI)	38
圖 3-21 實驗 161-950°C 反射電子影像圖(BEI)	39
圖 3-22 實驗 161-830°C 反射電子影像圖(BEI)	39
圖 3-23 159C 岩心光片的反射電子影像圖(BEI).....	40

圖 3-24 161B 岩心光片的反射電子影像圖(BEI).....	40
圖 3-25A 玻璃相的能量分散光譜(159C、1300°C).....	41
圖 3-25B 玻璃相的能量分散光譜(161B、1300°C).....	42
圖 3-26 尖晶石相的能量分散光譜(159C、1100°C).....	42
圖 3-27 斜長石相的能量分散光譜(161B、1030°C).....	42
圖 3-28 氧化物的能量分散光譜(161B、1200°C).....	43
圖 3-29 伊萊石相的能量分散光譜(161B、950°C).....	43
圖 3-30 高嶺石相的能量分散光譜(159C、830°C).....	43
圖 3-31 一大氣壓下 159C 泥岩礦物的穩定範圍.....	45
圖 3-32 一大氣壓下 161B 岩心礦物的穩定範圍.....	45
圖 3-33 九份二山假玄武玻璃岩.....	46

表目錄

表 3-1 觸口斷層鑽井岩心 159C 與 161B 段全岩化學成分	22
表 3-2 一大氣壓高溫實驗	30
表 3-3 一大氣壓高溫實驗結果	44

第一章 緒論

1-1 前言

假玄武玻璃岩(Pseudotachylite)最早是由 Shand(1916)提出，描述位於南非 Vredefort 花岡岩體內非火山作用形成類似玻璃玄武岩(tachylite)的暗色隱晶質岩脈。

屬於斷層岩類的假玄武玻璃岩在(Jackson, 1997)地質詞彙中的定義：因斷層的壓縮與剪切作用而發生超糜嶺岩化，超壓碎岩化(Wenk, 1978)或部分熔融(Philpotts, 1964; Sibson, 1975)而產生的緻密岩石。近年來研究發現聖海倫火山在 2004-2008 噴發期間，高黏滯性的岩漿高溫擠壓到裂隙中與圍岩接觸摩擦也可產生的假玄武玻璃岩(Kendrick et al., 2012)。前人認為假玄武玻璃岩的發現，可視為斷層帶曾經有大地震發生的直接證據，因此假玄武玻璃岩是一種地震化石(林, 2008)。

假玄武玻璃岩的生成條件受限於斷層所提供的溫度與壓力，依據滑移弱化模型(slip-weakening model)的地震能量示意圖(圖 1-1)所示地震斷層所釋放的能量包含破裂能(E_G)、輻射能(E_R)和摩擦熱能(E_H)三種(Chester et al., 2005)，其中摩擦熱能為主要的地震能量。Maglouthlin & Spray(1992)認為地震規模需大於 6 以上，才能產生足夠的摩擦熱能，使岩石部分熔融產生假玄武玻璃岩。

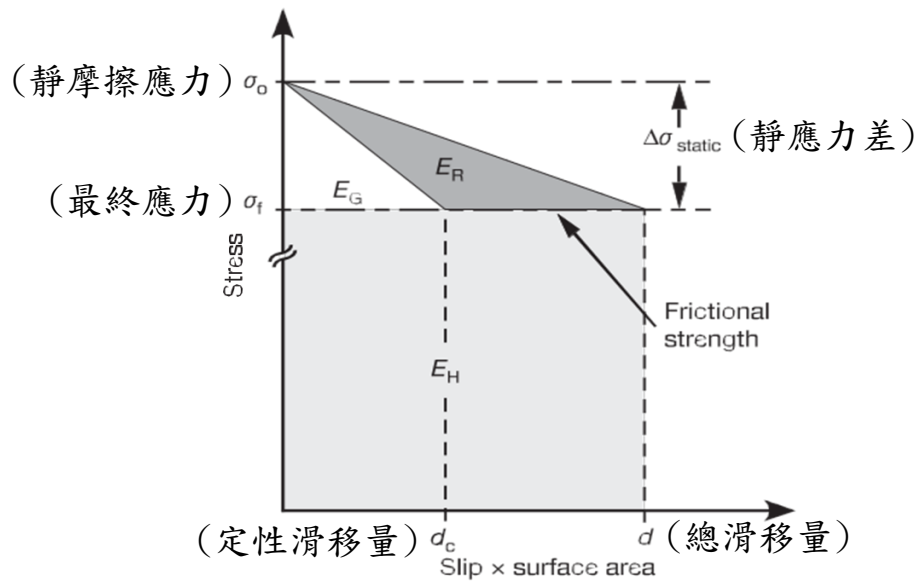


圖 1-1 斷層滑移弱化模型 (Chester et al., 2005)

(E_G) 破裂能，(E_R) 輻射能，(E_H) 摩擦熱能

1-2 研究目的

中央地質調查所 2000 年在嘉義縣福建坪鑽井安置井下應變儀並鑽取觸口斷層岩心，在 161 公尺深的剪切帶底部，發現斷層角礫岩以及疑似為假玄武玻璃岩的物質，為了估計斷層剪切帶的溫度因此選擇 159 公尺與 161 公尺之岩心為對照組作研究。

以高溫實驗岩石學方法，探討一大氣壓下假玄武玻璃岩形成的溫度，利用 SEM-EDS 觀察實驗的相變和分析化學成分，及 XRD 分析岩心粉末。

然而斷層帶中岩石因摩擦熔融，產生假玄武玻璃岩，屬於非化學平衡的過程(劉建民等, 2001)，故本研究由實驗岩石學方法以相平衡方式觀察，會與自然界會有所差異，因此實驗加熱時間遠大於斷層作用的時間，則可能會低估斷層提升的溫度。

1-3 地質背景

1-3-1 觸口斷層簡介

觸口斷層位於嘉南西部麓山帶，南北延伸約 28 公里，依其位態與特性分成南北兩段，從嘉義縣竹崎鄉至觸口村為北段，南段從嘉義縣觸口村至台南縣白河鎮(吉田要, 1931) 如圖 1-2。

根據 2007 年臺灣西南部的活動斷層調查報告，地調所評估觸口斷層的斷層帶寬度可能超過 100 公尺，斷層帶內有許多滑動面，同時其岩層有褶皺變形現象。1999 年至 2005 年間觸口斷層兩側層位落差的分析顯示，斷層上下盤的水平位移變化量約 18 公厘/年。根據地殼變形監測結果，觸口斷層兩側的位移量變動量相當大，暫列為第一類活動斷層。

1-3-2 地層簡介

依據中油公司嘉義地質圖(圖 1-2)的地層命名，以八掌溪為界，劃分為二大系統，以北為阿里山地區，以南為關子嶺地區，觸口斷層沿線出露上盤地層以桂竹林層、南莊層、南港層為主；下盤地層為沖積層、台地堆積層、頭嵙山層、六重溪層、澧水溪層、烏嘴層與中崙層。

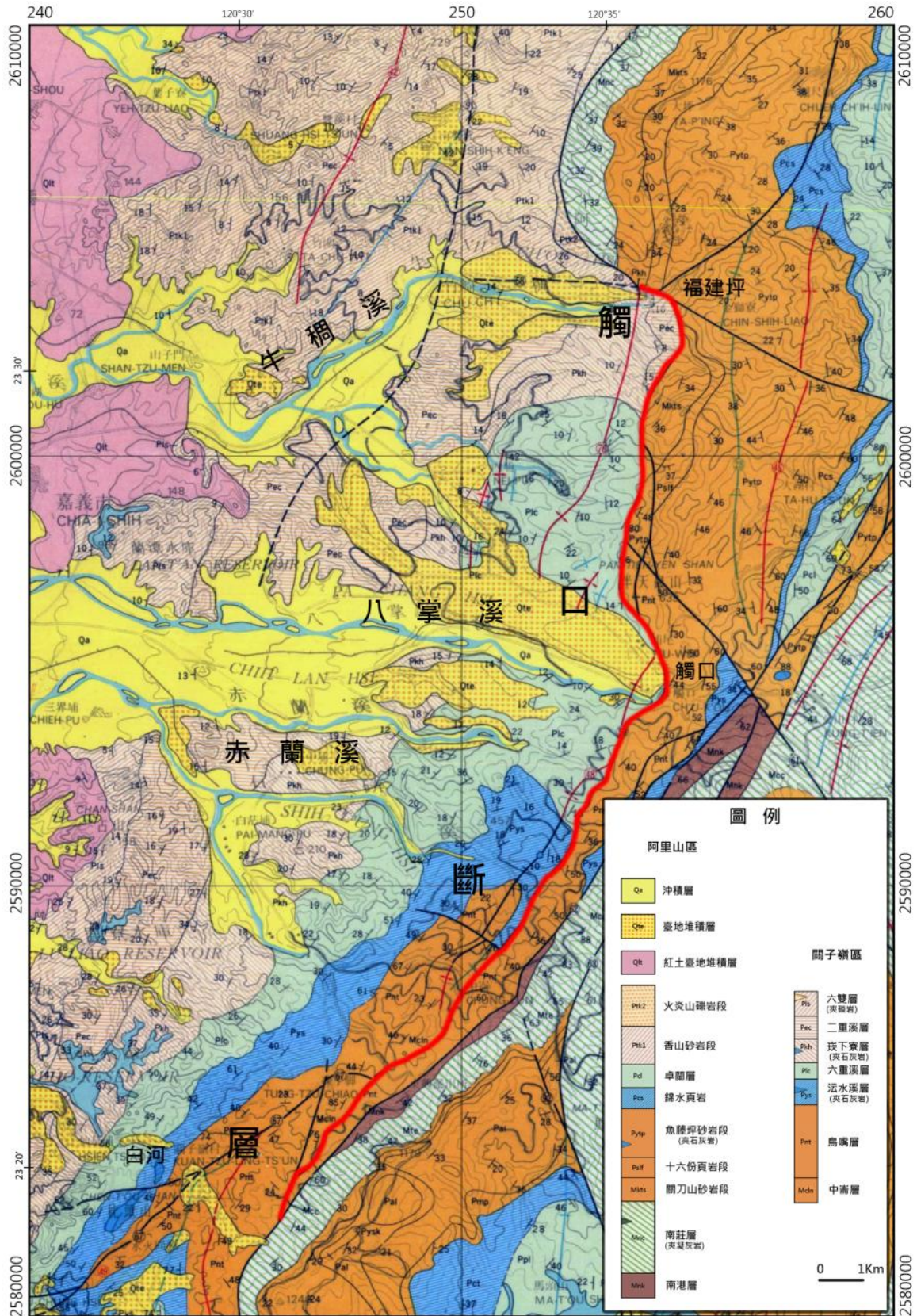


圖 1-2 修改自中油公司 1986 年繪製 10 萬分之一嘉義地質圖
紅色線為觸口斷層，區域地層以八掌溪為界，北為阿里山區，南為關子嶺區。

1-3-3 福建坪鑽井

本研究之岩心來自觸口斷層北段福建坪鑽井(圖 1-3)，由中央地質調查所於 2000 年在嘉義縣竹崎鄉福建坪長成橋附近取樣，鑽探方式為直井，鑽井深度為 300 公尺，取樣方式採用旋鑽。

根據此地調所岩心觀察紀錄可知，在 4 公尺以上為表層土石層，於 6.8 公尺後岩石屬於桂竹林層，在 161.5 公尺為剪切帶底部，162 公尺下出現位態傾斜的砂岩層(圖 1-4)。尤其在 160 公尺到 161.5 公尺之間剪動現象最強烈，可見斷層角礫岩和疑似為假玄武玻璃岩的物質(圖 1-5)。由岩心鑽探得知地下斷層剪切帶底部位置距與之前調查結果確定的地表地形之斷層線位置，可推得斷層角度約 43 度(圖 1-6)。

鑽取的岩心主要以砂岩、頁岩和泥岩所組成，與桂竹林層相符；而桂竹林層由上而下可分為 3 段，下段關刀山砂岩主要為塊狀或厚層細粒泥質砂岩；中段十六份頁岩主要為青灰色至黑色砂質頁岩與頁岩；上段大窩砂岩(魚藤坪砂岩)為厚層細粒砂岩與頁岩。由岩心中所含黑色砂質頁岩與黑色頁岩經比對後，可知井下斷層錯動帶位於桂竹林層中段十六份頁岩與下段關刀山砂岩之間。

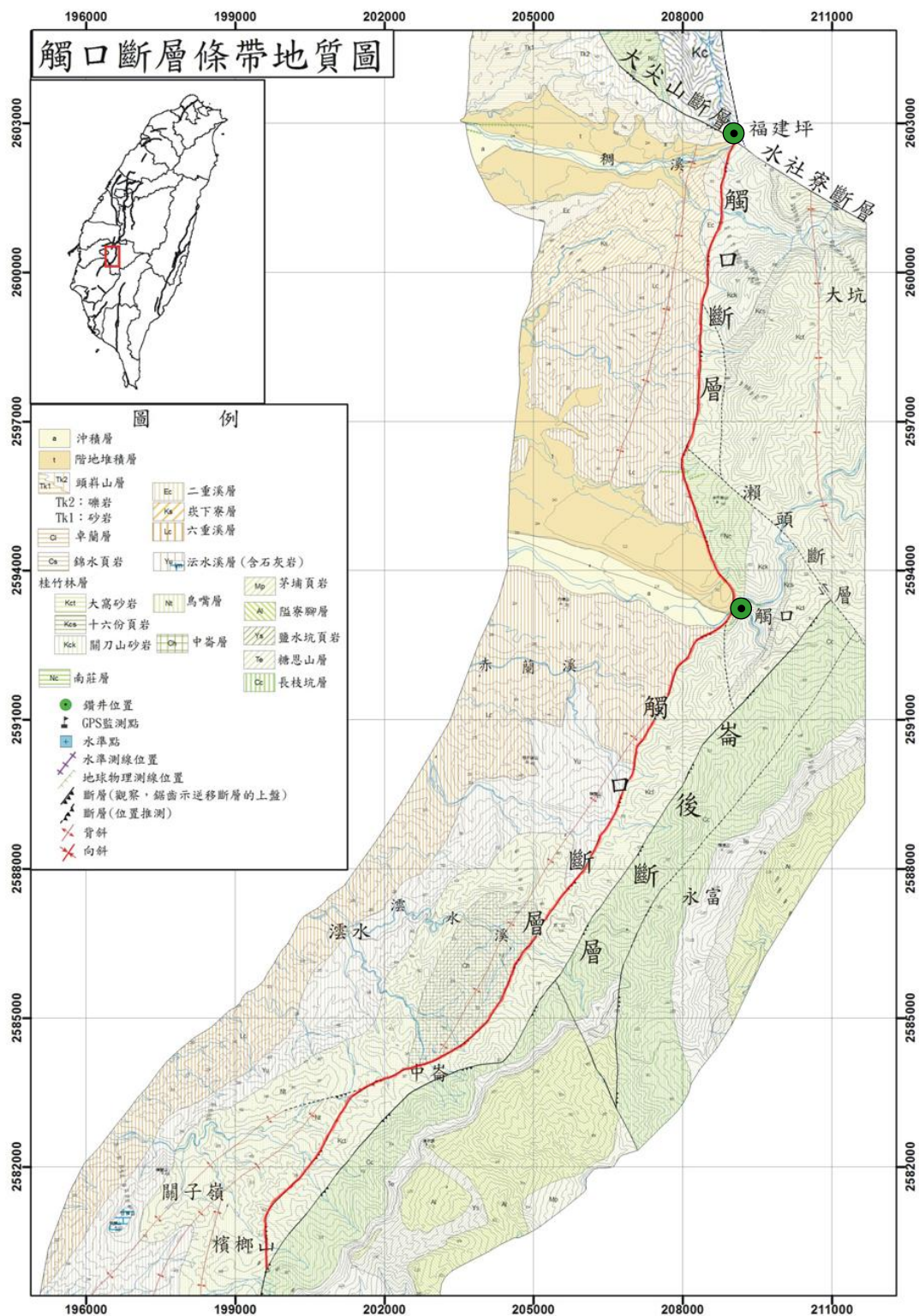


圖 1-3 修改自地調所 2007 年繪製 2 萬 5 千分之一活動斷層圖

● 是斷層觀測井的位置，分別為福建坪鑽井與觸口鑽井。

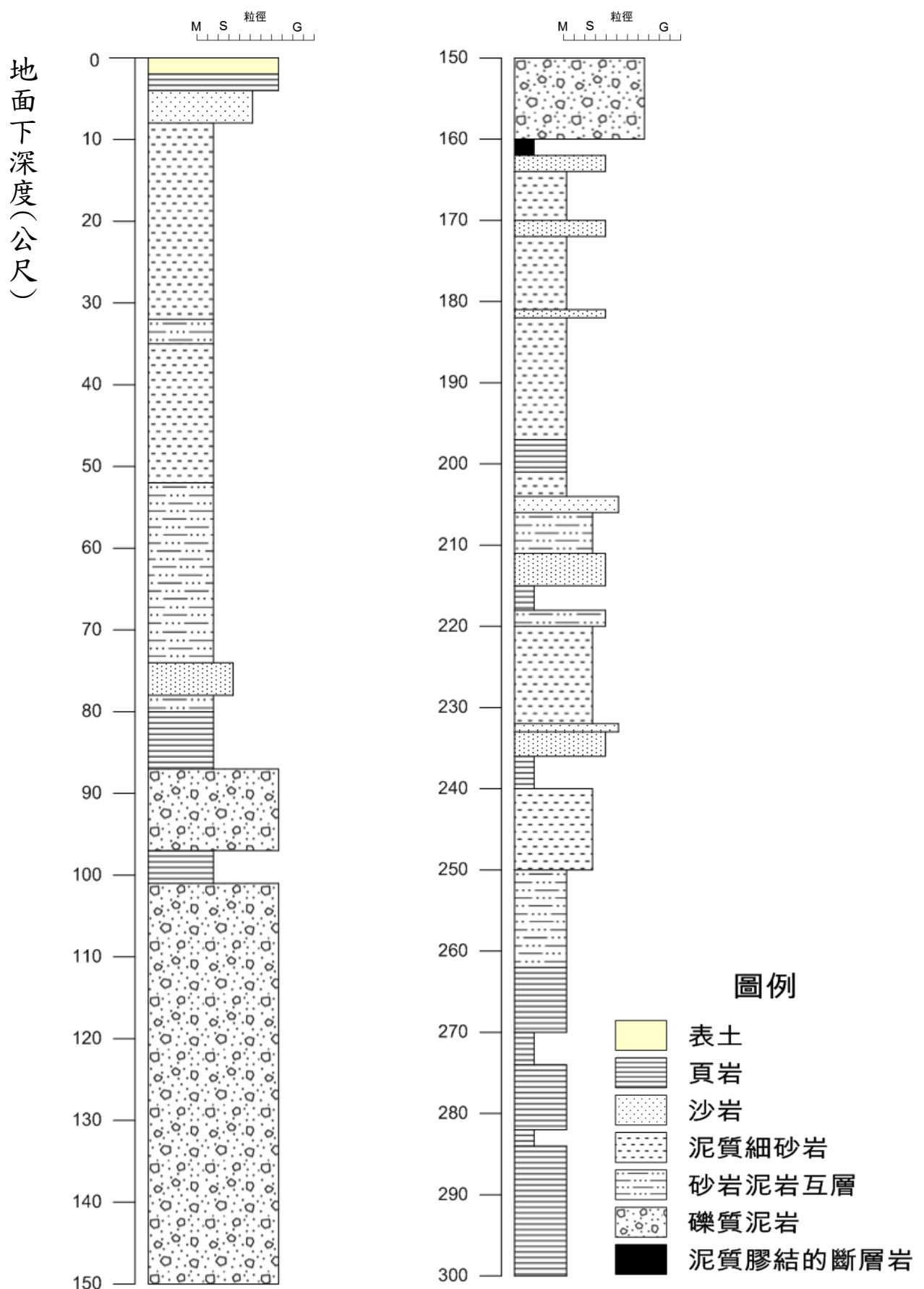


圖 1-4 根據地調所岩心觀察紀錄修改繪製柱狀剖面圖
 4 公尺以上為表層土石層，162 公尺以上為剪切帶，以下出現位
 態傾斜水平的砂岩層。

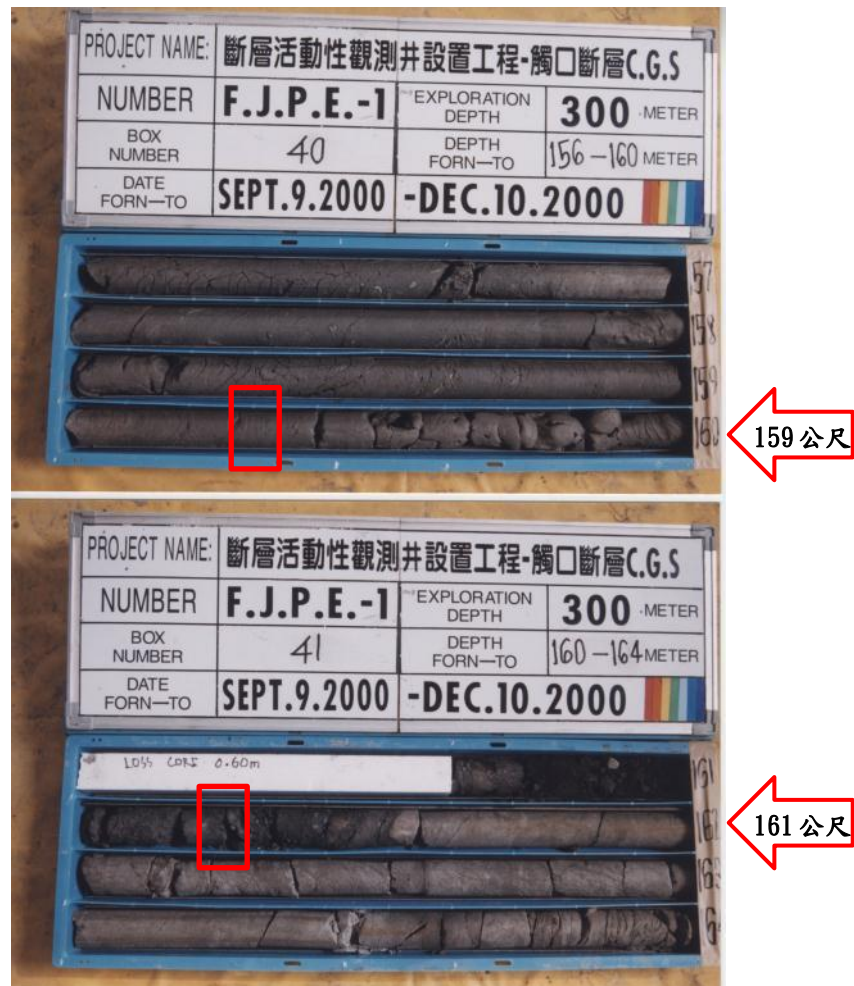


圖 1-5 156 公尺到 164 公尺岩心照片及實驗樣品深度標記
160 公尺到 161.5 公尺剪動現象最強烈，而 162 公尺之下為砂岩層。

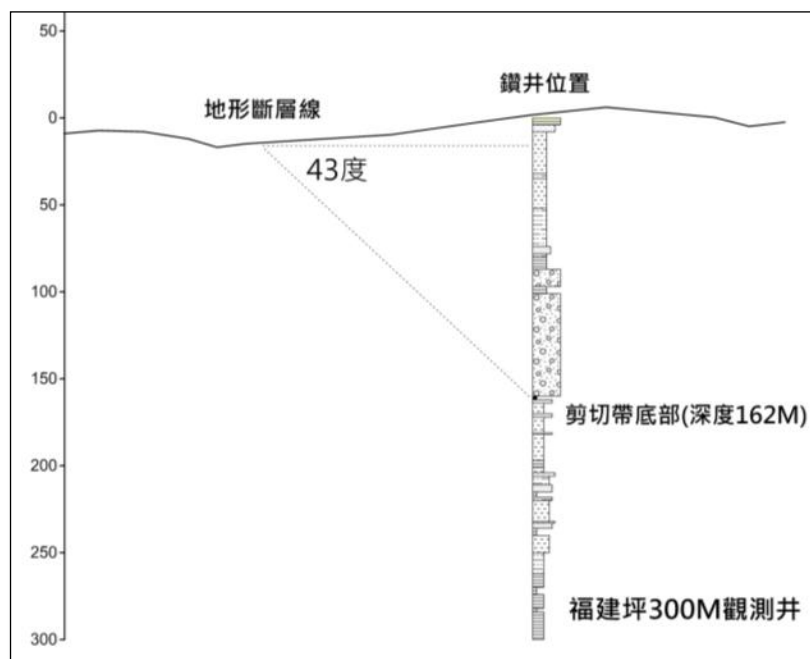


圖 1-6 福建坪鑽井示意圖
由地表的地形斷層線與地下斷層剪切帶底部推得斷層角度約 43 度

第二章 研究方法

本研究之主要研究方法有岩心觀察、全岩化學分析、實驗岩石學方法和掃描式電子顯微鏡分析、X 光粉末繞射分析，其方法詳述如下：

2-1 岩心觀察研究

首先根據中央地質調查所的鑽井報告，從觸口斷層岩心中挑選剪切帶 161 公尺深之黑色緻密的破碎岩心，以及位於 159 公尺深之完整連續的灰色泥質岩心，再利用德國蔡司（Zeiss）公司所生產，型號為 Axioplan 7082 的透射、反射兩用偏光顯微鏡，對岩心薄片的組織及礦物組成做觀察，最後選擇 159C 及 161B 兩段岩心作為實驗樣本。實驗的光片樣本亦是用此顯微鏡進行初步的觀察和鑑定。

2-2 全岩化學分析

2-2-1 製作實驗樣本粉末

先將岩心樣本表面膠封部分切除不用，再將樣本敲碎後，置入球磨機進行初步研磨，然後將岩石粉末取出，並以瑪瑙鉢以手工繼續磨至約 200 篩目(mesh)以下，最後將磨好之岩石粉末，放入乾燥箱中備用。在每次實驗之前先將岩石粉末均勻混合後，才取岩石粉末進行實驗。

2-2-2 燒失量的測定

1. 取一坩鍋並將其洗淨後，放入 110°C 之烤箱內，烘烤 24 小時，以去除水份。接著，將其放入乾燥箱中，冷卻至室溫（約 30 分鐘）。
2. 使用微量天秤，精秤坩鍋重量 A 至小數點以下第三位。
3. 精秤岩石粉末 2.000 克，將其倒入秤過的坩鍋中，精秤總重 B 至小數點以下第三位，並使 $B = A + 2.000 \pm 0.002$ 克。
4. 將步驟 3. 之岩石粉末與坩鍋一同放入 900°C 的烤箱中，烘烤 24 小時，然後取出放入乾燥箱冷卻（約 30 分鐘）。再精秤其重量 C 至小數點以下第三位，此為燒失後總重量。
5. 計算燒失量：燒失量（Loss on Ignition, L.O.I.）= $[(B - C) / 2.000] \times 100\%$

2-2-3 X 光螢光分析方法

本次實驗之樣本分析是利用台大地質系之 Rigaku RIX-2000 X 光螢光分析儀(X-ray Fluorescence Spectrometer, XRF)，針對十個主要元素（Si, Ti, Al, Mn, Fe, Mg, Ca, Na, K 及 P）進行分析，分析精確度為±5%，其樣本製備過程如下（楊等，1996）：

1. 先將岩石粉末及助熔劑（無水四硼酸鋰，anhydrous $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ）置於 110°C 之烤箱中烘乾 24 小時，以去除粉末上之吸附水。取出後，

- 置入乾燥箱中冷卻，方可使用。
2. 精秤岩石粉末 $0.4000 \pm 0.0001\text{g}$ 與助熔劑 $4.0000 \pm 0.0005\text{g}$ ，將二者均勻混合後，置入白金坩堝中。
 3. 將步驟 2 之含試料白金坩堝，放入全自動高週波玻璃餅製備機中，製成玻璃餅。
 - 4 最後，以 X 光螢光分析儀對玻璃餅試樣分析化學成分。

2-3 X 光粉末繞射分析

本次實驗之樣本是委託台北科技大學材資所分析，採用 Rigaku Geigerflex, Japan X 光粉末繞射儀(X-Ray Diffraction, XRD)，針對礦物粉末進行分析固體物質之結晶構造，其操作過程如下：

1. 先將作壓片之器具用酒精擦拭，取適量粉末樣品置於壓片容器中。
2. 用玻璃片把樣品表面壓平，刮除周圍多餘粉末。重複此動作多次，直到樣品不落下，即完成壓片。
3. 接著進行試片的放置後，將電壓和電流分別漸漸加至 35kv 和 15mA 後，設定掃描度數 $3^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 之間，速度為 $1^{\circ}/\text{分}$ 。
4. 開始 X-ray 繞射分析樣品。

2-4 一大氣壓下之實驗岩石學方法

本研究以觸口斷層 161 公尺深與 159 公尺深之岩心粉末做為實驗樣本，進行一大氣壓下高溫實驗，實驗溫度設定範圍為 600°C 至 1400°C 共 23 組實驗，藉由不同溫度下樣品熔融情況，模擬假玄武玻璃岩的形成。再利用掃描式電子顯微鏡(Scanning Electron Microscope, SEM)，對各溫度環境下所生成的礦物相做分析。

2-4-1 一大氣壓下高溫實驗的程序

1. 裁剪大小約 10mm × 18mm 的白金片，並將其折成袋狀。接下來把製備完成的岩心粉末填入袋中，製成白金囊包(圖 2-1)。
2. 將製作好的白金囊包，以細白金絲懸掛在穿有兩條粗白金線的氧化鋁管下方(圖 2-2)。
3. 設定高溫爐溫度至實驗所需溫度，等高溫爐顯示溫度穩定後，以熱電偶測量溫度，其數值則為實驗前的實測溫度，並紀錄高溫爐顯示之溫度和實測溫度。

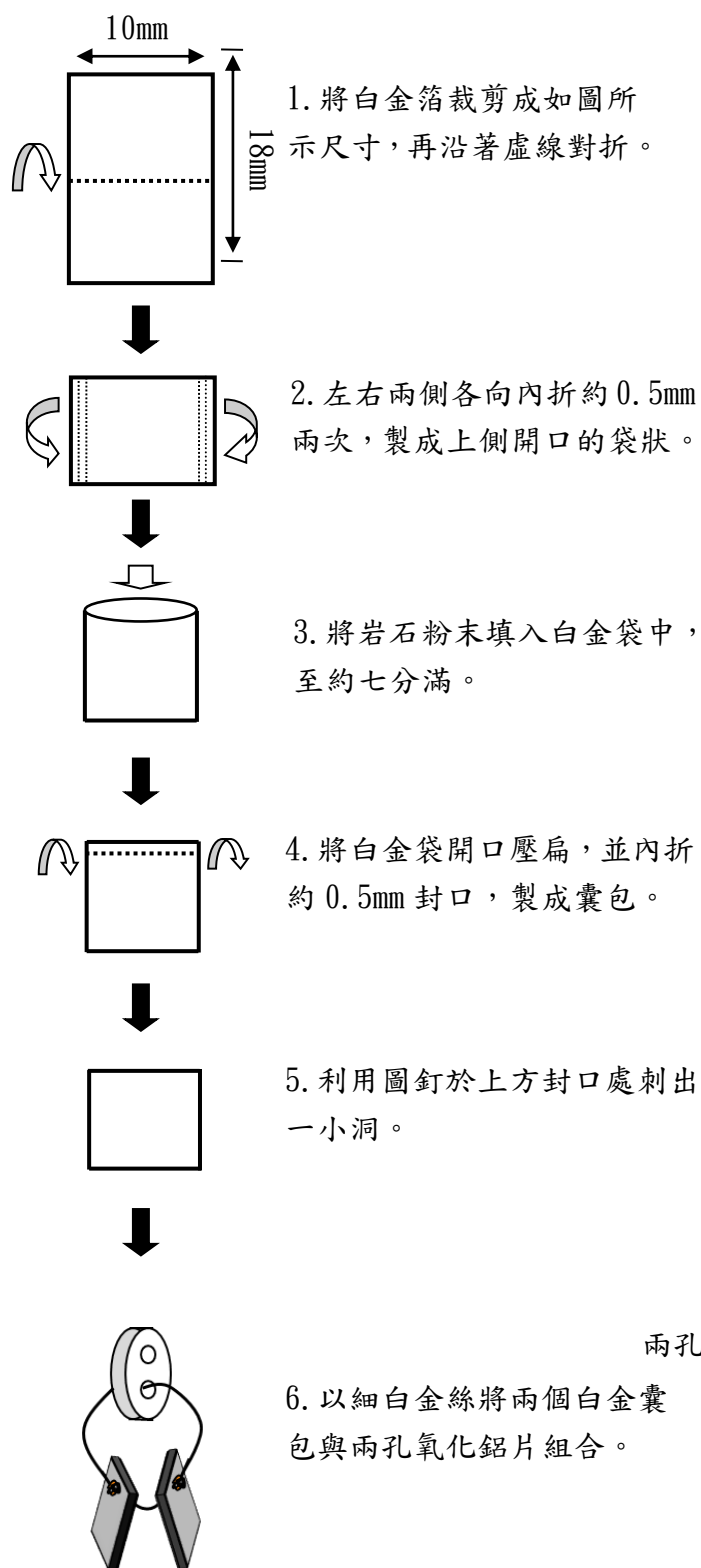


圖 2-1 白金囊包的製作流程

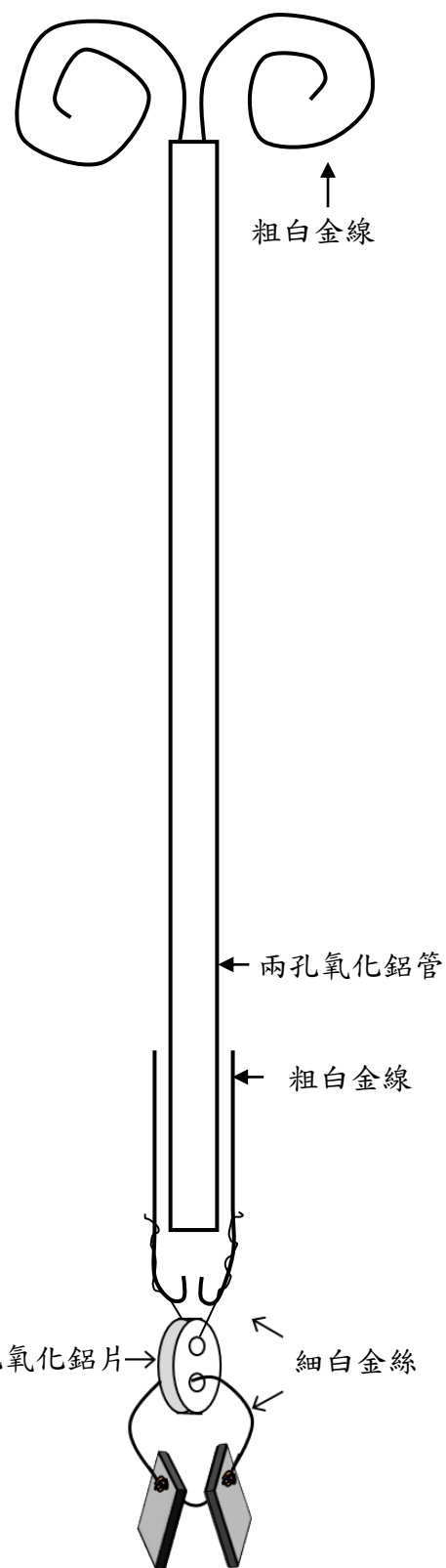


圖 2-2 白金囊包的懸掛示意圖

4. 將步驟 2 (圖 2-2)之組合，置入高溫爐中進行反應。
5. 待反應達到所需的實驗時間後，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，保留反應時的相(圖 2-3)。
6. 將高溫爐中的氧化鋁管移除，再以熱電偶測量爐中溫度，所得為實驗後實測溫度。以實驗後所得之實測溫度為實驗溫度。
7. 將反應後所得之白金囊包灌 AB 膠後，用砂紙(600 Grit)研磨至樣品露出，再使用熱固型環氧樹脂二次灌膠填充孔隙，避免樣品脫落，最後用中研院地科所的 VibroMet 2 震盪拋光機，以 0.3um 氧化鋁拋光 24 小時以上，完成光片。
8. 先利用反射式顯微鏡，對拋光後的光片樣本進行礦物相的初步鑑定，再利用掃描式電子顯微鏡，對各個礦物及玻璃相的成分做分析。

2-5 掃描式電子顯微鏡分析

將本研究之岩心光片與各實驗溫度下之光片鍍碳後，藉由掃描式電子顯微鏡(SEM)取得反射電子影像圖(Backscattered Electron Image)，利用不同種類的礦物相會產生不同的灰階色差，作為初步分辨礦物相與玻璃相的依據。其中包括取得每個溫度下的反射電子影像圖，來觀察和決定想要分析的範圍，以能量分散光譜儀(Energy Dispersive Spectrometer)針對所選取的礦物，作化學成分分析。

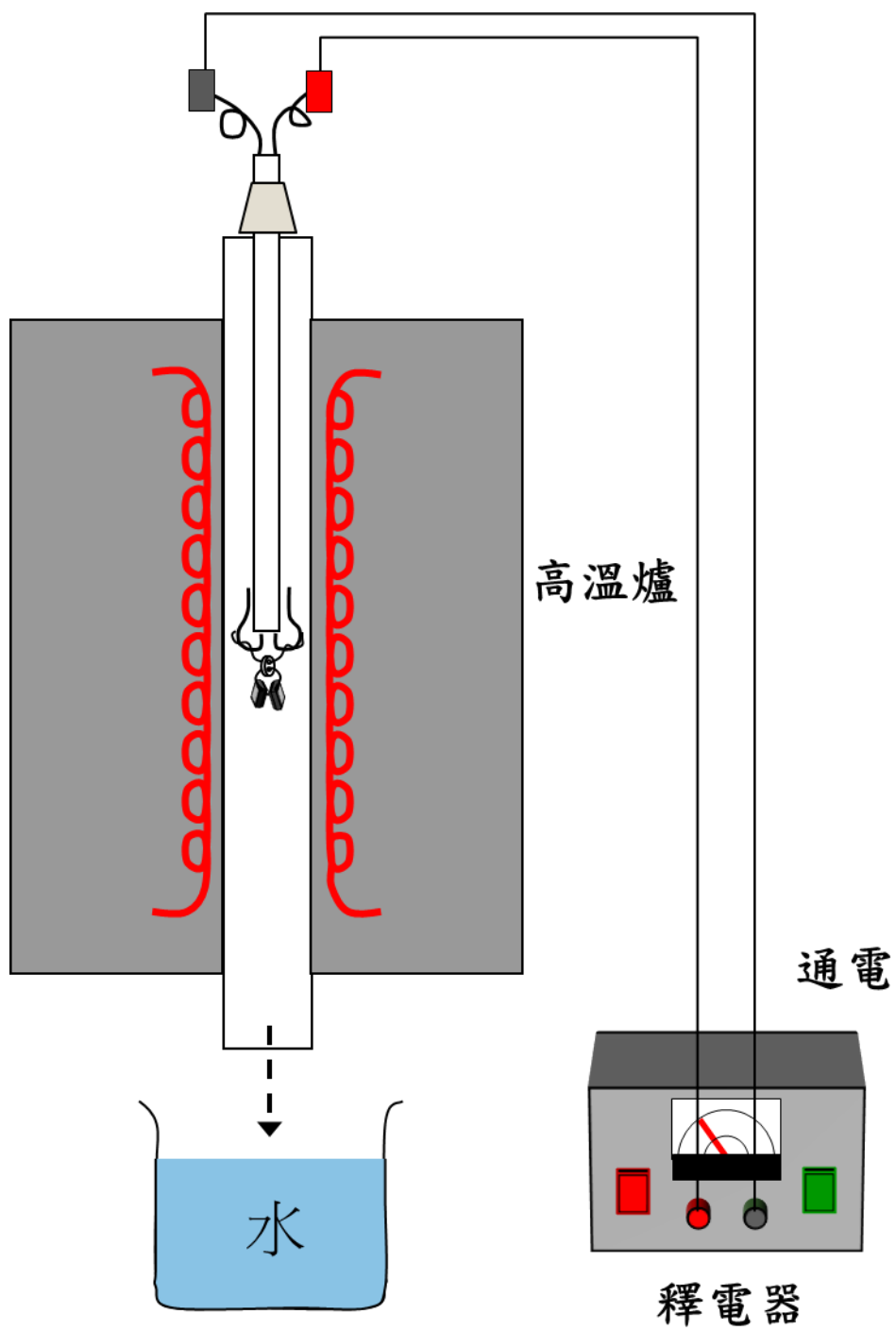
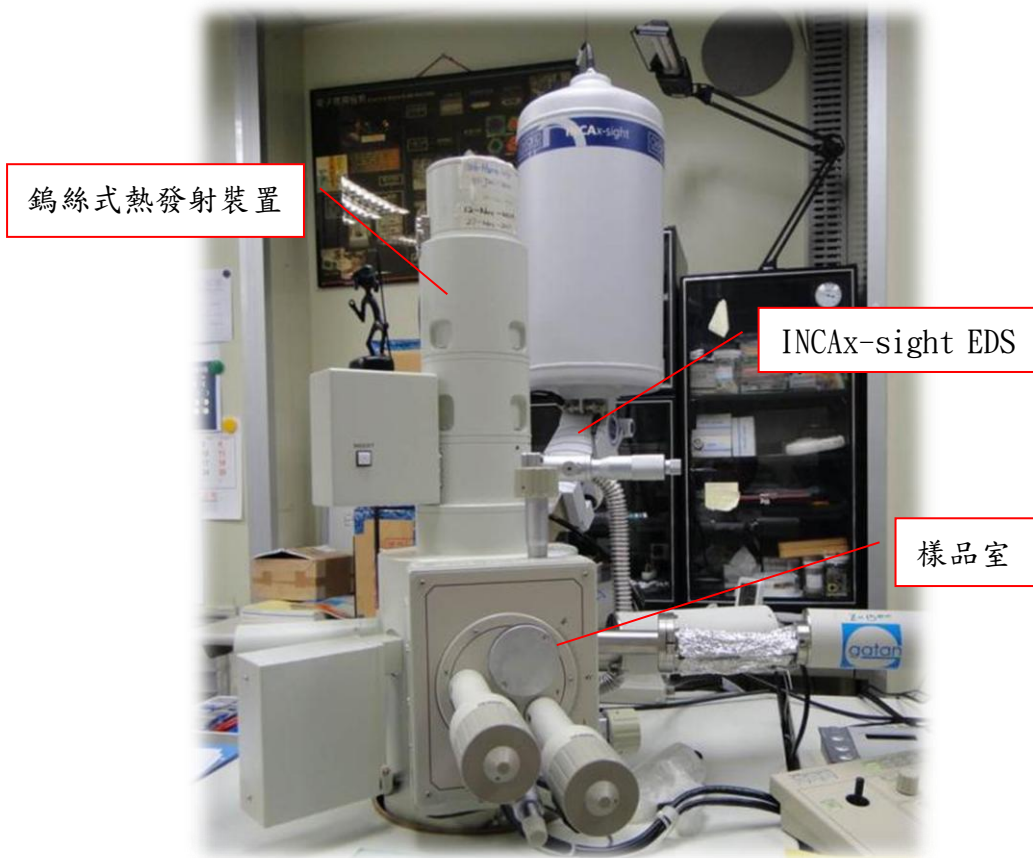


圖 2-3 一大氣壓實驗及驟冷裝置示意圖

本研究是透過中央研究院地球科學所提供的 SEM-EDS 儀進行分析，其型號為 JSM-6360/LV(圖 2-4)，分析時使用之加速電壓(Accelerated voltage)為 20 千伏 (kV)，電流為 0.18 奈安培 (nA)，分析點的直徑約 10 微米 (um)，分析精確度為 $\pm 6\%$ 。

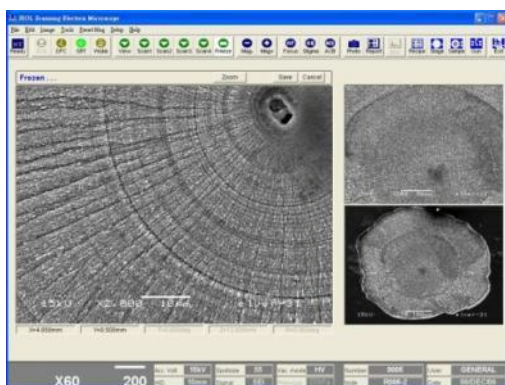
SEM-EDS 儀的操作步驟如下：

1. 將製備好的光片表面徹底清潔，放入反射式偏光顯微鏡下觀察表面是否完成拋光，並找出要觀察的位置。
2. 將製備好的光片加上導電鋁箔後，放入 SEM，抽真空至壓力低於 25 Pa，調整電壓電流至適當大小。
3. 待畫面出現標本後，先放大畫面來對焦，接下來調整亮度與對比，以方便區分不同礦物種類，將 BEI 影像拍下紀錄。
4. 將所拍攝之 SEM 影像切換至 EDS 觀察視窗，並將 SEM-EDS 儀通入液態氮降溫。
5. 在 SEM 拍攝的影像上選取欲作 EDS 分析之相，並進行 EDS 分析。
6. 取得光譜與平均成份後，藉由元素的種類及強度來判斷礦物化學成分。

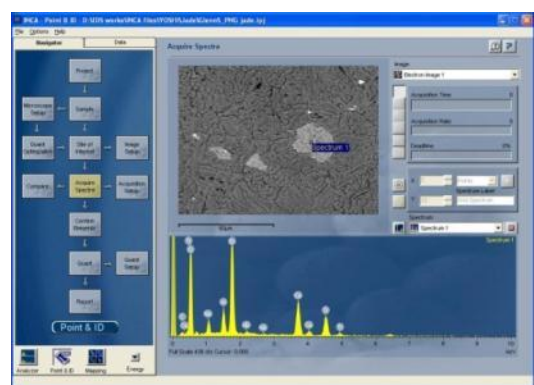


SEM 影像工作站主機

EDS 工作站主機



反射電子影像(BEI)



能量分散光譜

圖 2-4 中研院 JSM - 6360/LV SEM - EDS

第三章 結果與討論

3-1 岩心與全岩化學分析

3-1-1 岩心與薄片觀察

位於鑽井 159 公尺深為完整連續的灰色泥質岩，取 C 段切除外部膠封部位後作為實驗樣品(圖 3-1A)，而位於 161 公尺深為黑色緻密的破碎岩石，則取 B 段清除表面膠封後作為實驗樣品(圖 3-1B)。

從地調所製作的岩心薄片中找到與實驗樣品同深度者，在顯微鏡下觀察，發現 159C 主要由石英、長石、不透光礦物顆粒及少量的片狀礦物與黏土為主的基質膠結而成，粒徑最大約 0.2 mm(圖 3-2)。而 161B 主要由小於 0.01 mm 的礦物顆粒組成，因此無法從顯微鏡下判別，少部分為 0.05 mm 的長石或石英顆粒，基質在交叉偏光下幾乎呈現全消光(圖 3-3)，有待 XRD 粉末分析以及 SEM 觀察岩心光片是否為玻璃基質。

3-1-2 全岩化學分析

本實驗採用 159C 與 161B 段之岩心粉末，以 X 螢光分析法(X.R.F)分析全岩化學成分，並相互比較(表 3-1)，其中 161B 含較高的 SiO_2 ；而 Al_2O_3 、 FeO 、 K_2O 比 159C 低，其餘成分相似，重量百分比差距約為 1%。

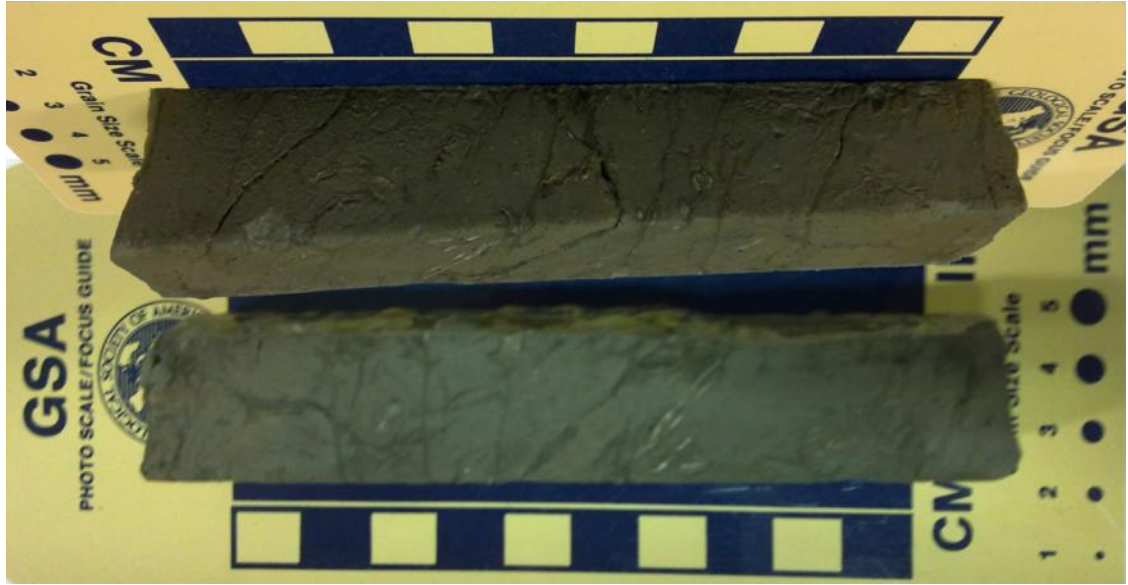


圖 3-1A 岩心 159C 段之灰色泥質岩
切除膠封部分的中心切塊

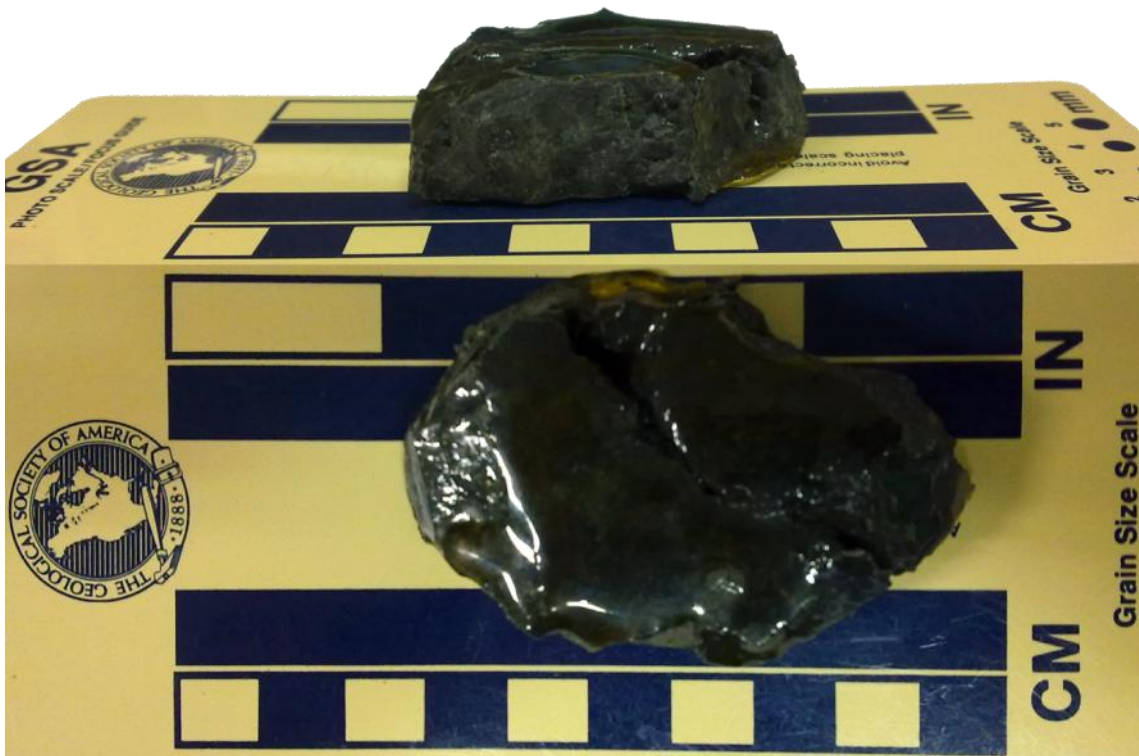


圖 3-1B 161B 段岩心碎塊
為黑色緻密岩石

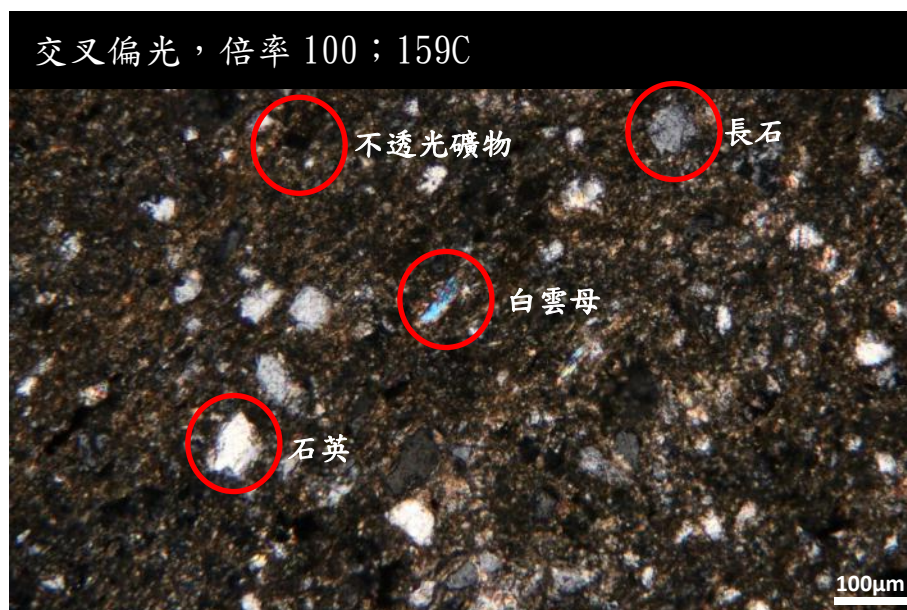
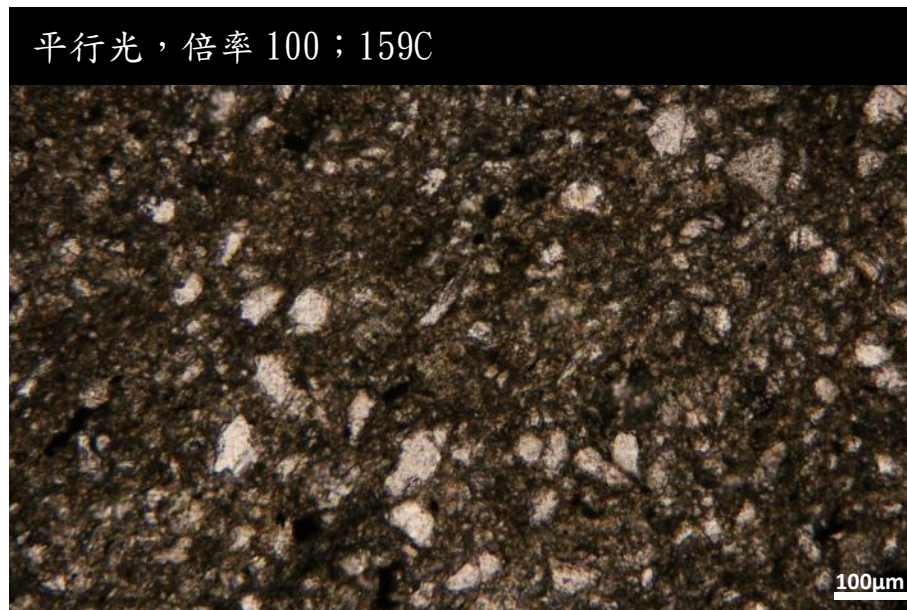


圖 3-2A 159C 的薄片
包含礦物如：石英、長石、不透光礦物與雲母礦物和黏土等。

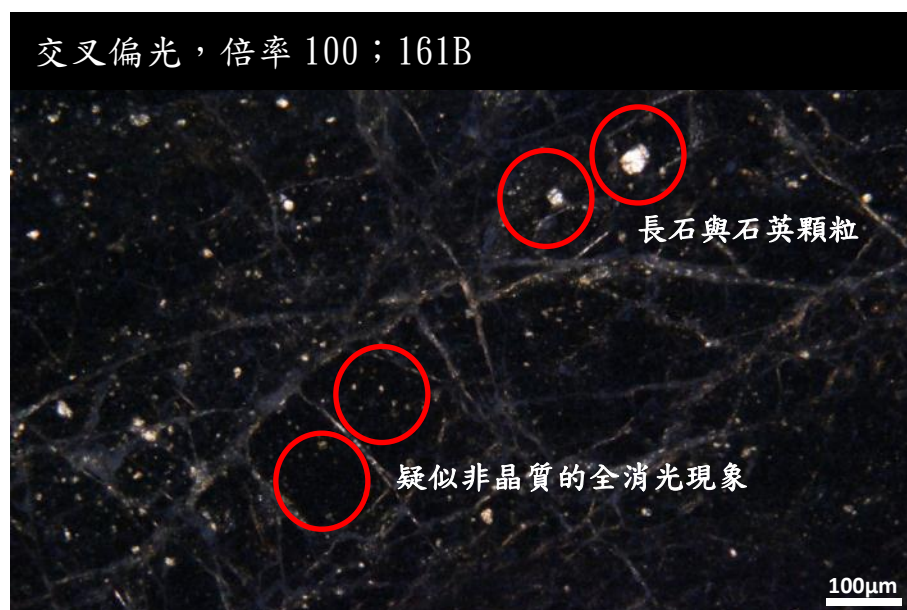
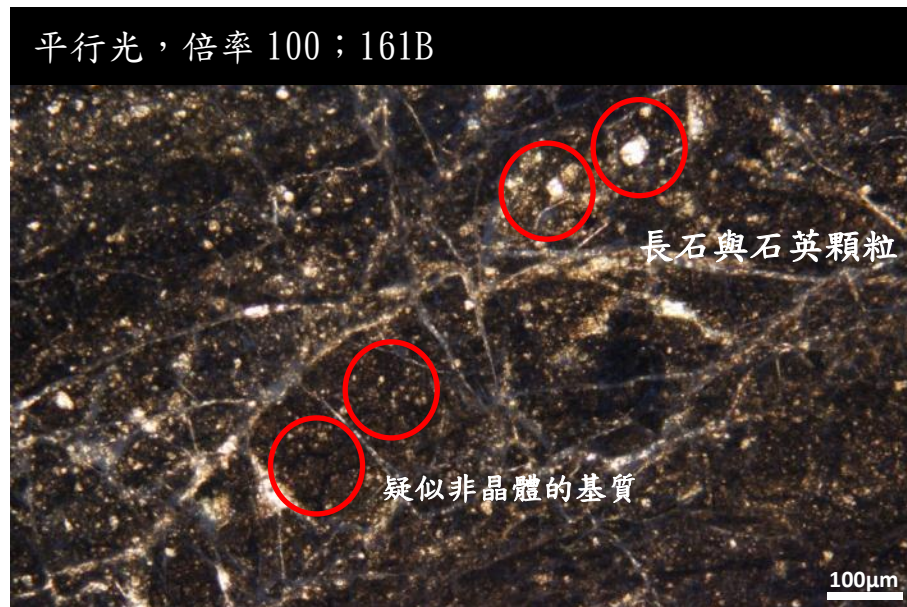


圖 3-2B 161B 的薄片
在偏光顯微鏡下只能辨識出一些長石、石英顆粒。
以及部分在交叉偏光下全消光的基質

表 3-1 觸口斷層鑽井岩心 159C 與 161B 段全岩化學成分

Sample No.	159C	161B
Wt(%)		
SiO ₂	63.70	70.83
TiO ₂	0.91	0.68
Al ₂ O ₃	15.43	11.28
ΣFeO	6.49	4.97
MnO	0.07	0.05
MgO	2.11	1.62
CaO	2.27	1.40
Na ₂ O	0.86	1.39
K ₂ O	2.81	1.14
P ₂ O ₅	0.17	0.11
L. O. I. *	5.63	6.26
Total	100.45	99.73

* L. O. I. = Loss on ignition

將 XRF 分析結果投影至 $\text{FeO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ 的相平衡系統中(圖 3-3)推計全岩熔融溫度約在 1590°C 左右，固相溫度為 1083°C ，若把其餘成分投影後則全熔溫度與固相溫度會降低，有待後面實驗岩石學結果估算。

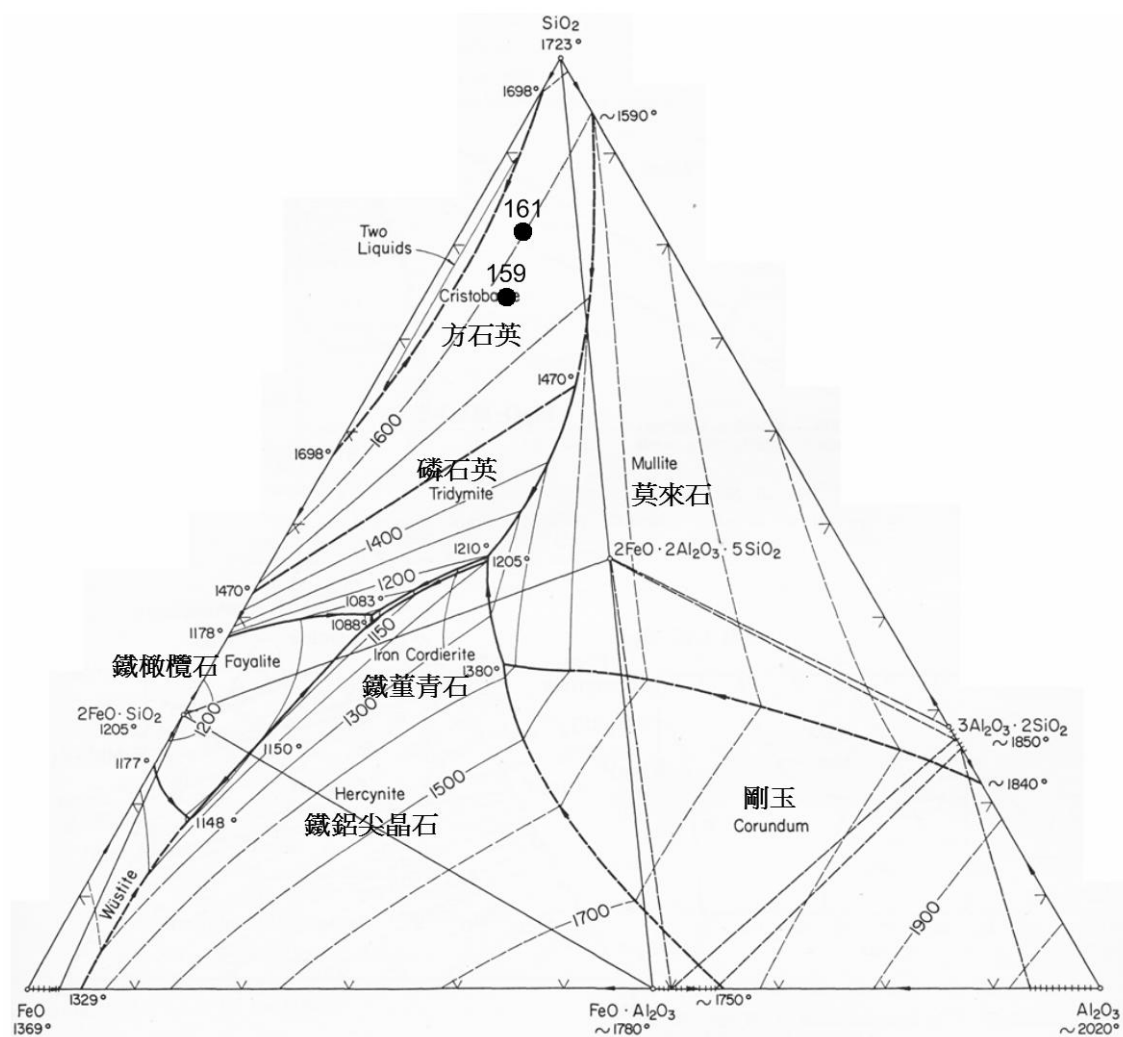


圖 3-3 $\text{FeO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ 相平衡系統(E. F. Osborn et al., 1960)

3-2 XRD 粉末分析

XRD 設定掃描度數在 $3^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 之間。樣品為 159C 與 161B 岩心粉末與以 950°C 、 900°C 、 800°C 、 700°C 加熱 24 小時後的 159C 岩心粉末以及加熱 950°C 、 900°C 的 161B 岩心粉末，由 Jade6.5 軟體依 JCPDS(2004) 出版的礦物粉末繞射資料庫比對，並以石英峰校正後，得知主要的組成礦物為石英、長石以及高嶺石、伊萊石等黏土礦物。

3-2-1 159C 岩心樣品

此樣本原始岩心為灰色泥質岩，遇水即軟化，部分可與鹽酸反應含少量碳酸鹽類但不含化石(岩心紀錄, 2001)。XRD 分析結果(圖 3-4)，主要礦物為石英與長石，且含有較多的黏土礦物，如：高嶺石和伊萊石。

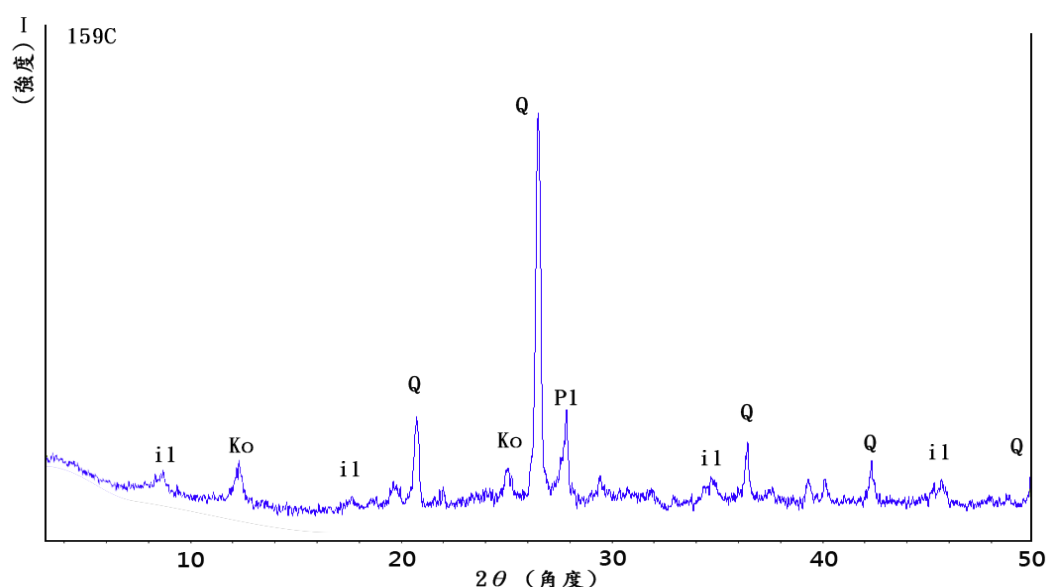


圖 3-4 159C 岩心粉末 XRD 結果

il：伊萊石，Ko：高嶺石，Q：石英，Pl：長石

3-2-2 159C 之 700℃、800℃、900℃、950℃ 熱處理樣品

岩心粉末經過 700℃、800℃、900℃、950℃ 加熱 24 小時後，950℃ 的粉末有燒結現象而 700℃、800℃、900℃ 沒有。從各溫度的 XRD 分析結果(圖 3-5) 可以發現，主要礦物是石英與長石，另外高嶺石與伊萊石的峰值明顯下降許多。

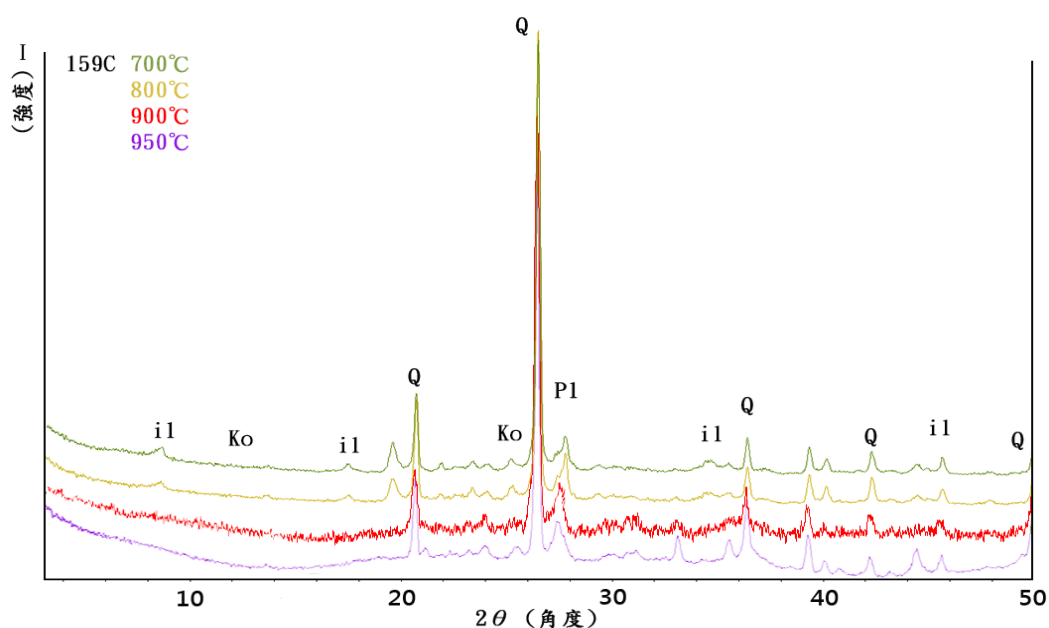


圖 3-5 159C 之 700℃、800℃、900℃、950℃ 岩心粉末 XRD 結果
il：伊萊石，Ko：高嶺石，Q：石英，Pl：長石

3-2-3 161B 岩心樣品

此樣本原始岩心為黑色緻密的岩石碎塊，斷口銳利，遇水不會軟化。岩性較堅硬，岩石顆粒細小肉眼無法分辨，部分具有細微的方解石脈，但不含化石(岩心紀錄, 2001)。從 XRD 分析結果(圖 3-6)得知，主要礦物為石英與長石，以及少量的黏土礦物，如：伊萊石。

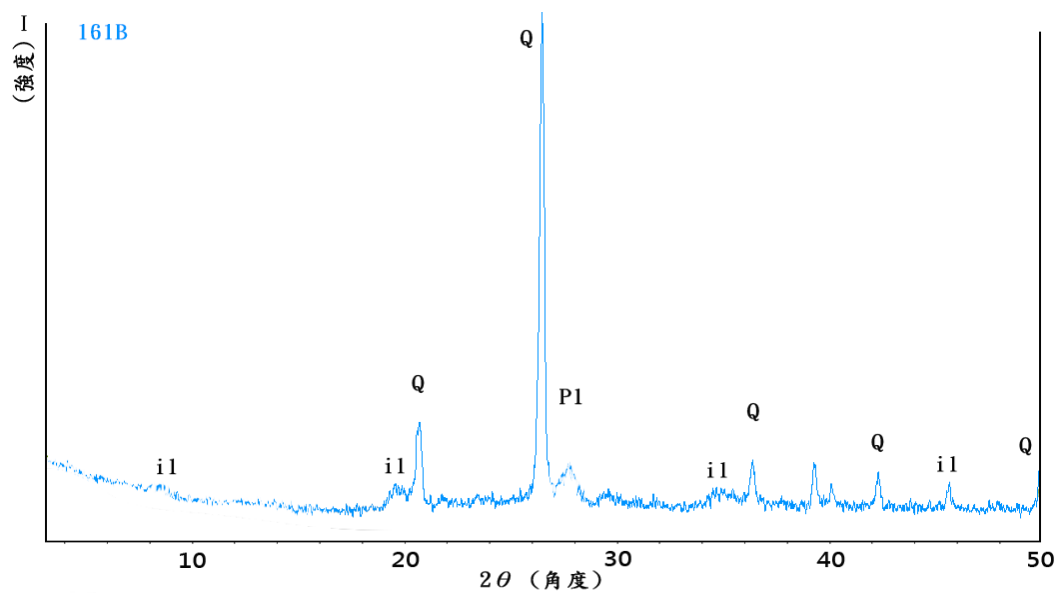


圖 3-6 161B 岩心粉末 XRD 結果
Q：石英，Pl：長石，il：伊萊石

3-2-4 161B 之 900°C、950°C 熱處理樣品

經過 24 小時加熱後，950°C 粉末產生燒結而 900°C 沒有，大致上與未加熱前無太大差異，僅有伊萊石峰值較為不明顯，如圖(3-7)。

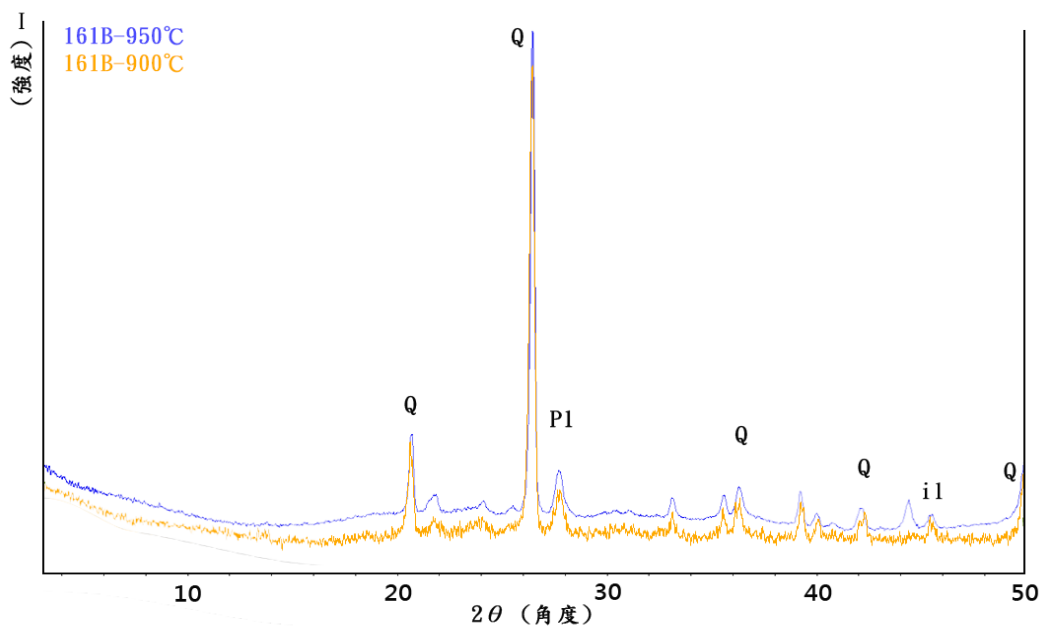


圖 3-7 161B 之 900°C、950°C 岩心粉末 XRD 結果
Q：石英，Pl：長石，il：伊萊石

比較數組樣品發現 159C-900°C 熱處理後的岩心粉末，與 161B 原始岩心粉末 XRD 的分析結果較相似(圖 3-8)，推測斷層錯動時，159 公尺的岩石摩擦熱能(E_H)的加溫作用下，使岩石中的伊萊石與高嶺石減少形成類似 161 公尺的礦物群，估計當時環境溫度略低於 900°C。

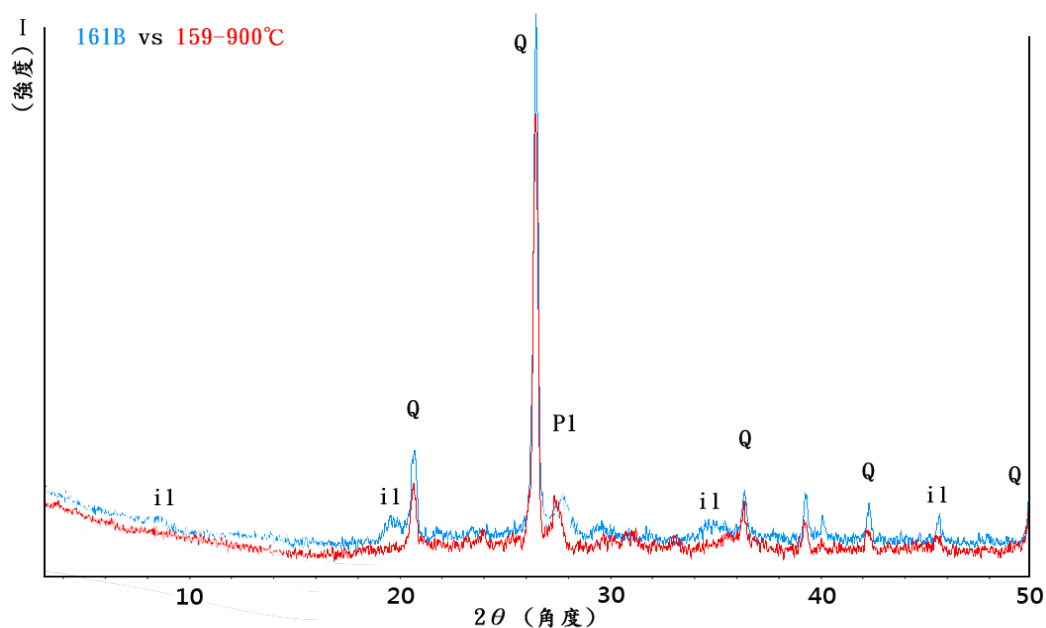


圖 3-8 159C-900°C 與 161B 岩心粉末 XRD 結果
Q：石英，Pl：長石，il：伊萊石

根據前人在 921 集集地震的研究報告指出，當時南投九份二山發生嚴重地滑，形成堰塞湖。在此區發現由沉積岩因地滑所形成的假玄武玻璃岩，Lin (2001) 進行該區的研究分析，利用圍岩混合定量火山玻璃(100 wt.%、50 wt.%、25 wt.%)進行 XRD 分析(圖 3-9)，對比後估計出假玄武玻璃岩含量，其中掃描度數值(2θ)在 15 度至 40 度之間的寬廣峰形，代表含有玻璃物質或非晶質存在(Lin, 1994)。將本實驗 159C、161B 原始粉末與 159C、161B 的 950°C 熱處理粉末之 XRD 結果與九份二山樣品(圖

3-9)比較，以 159C 原始岩心對比 Wall Rock 校正強度後，原始岩心並沒有發現寬廣峰形在(2θ) 15 度至 40 度之間，而加熱 950°C 的岩心粉末則略有隆起。推斷在 159C、161B 原始岩心中，沒有玻璃質或非晶質存在，而加熱 950°C 後的岩心粉末約含 15%至 20%的玻璃質或非晶質。

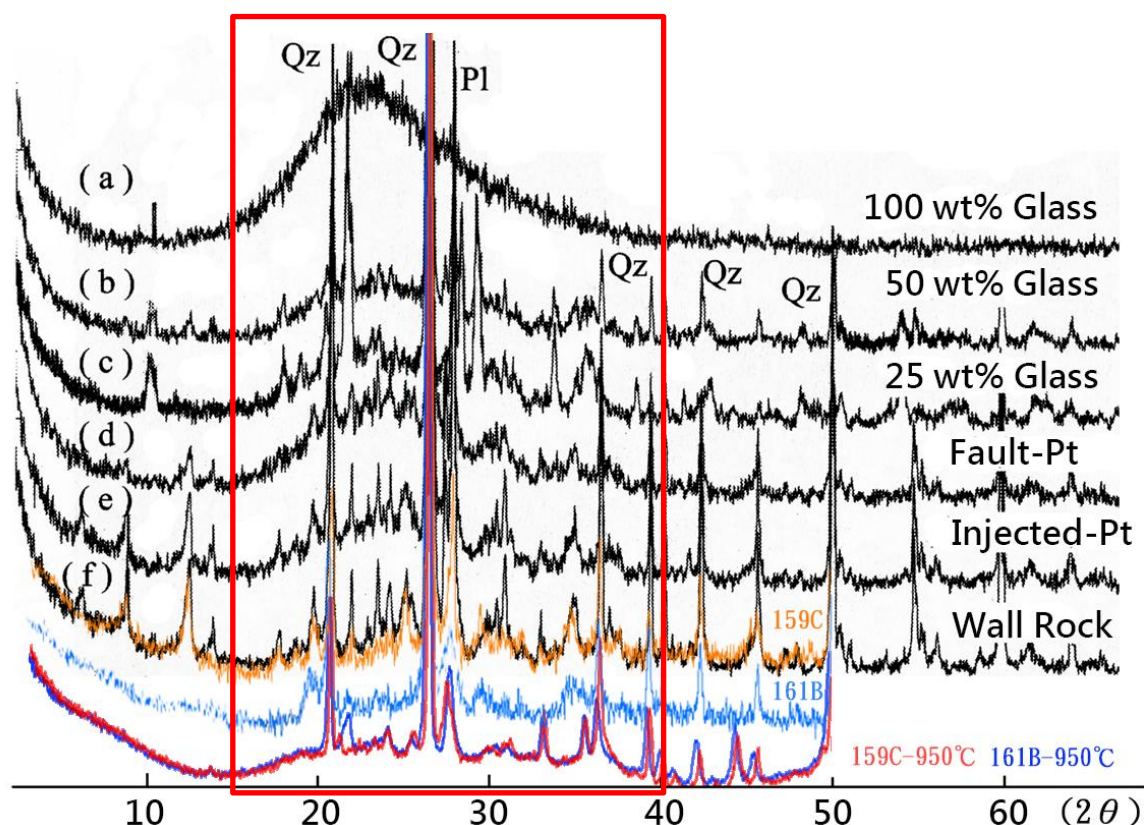


圖 3-9 九份二山假玄武玻璃岩含量 XRD 分析結果(Lin et al., 2001)

Qz：石英，Pl：長石，wt%：重量百分比，Fault-Pt：斷層帶的假玄武玻璃岩，Injected-Pt：侵入岩脈的假玄武玻璃岩，(e)(d)估算出來假玄武玻璃岩含量約 40~50%。本實驗樣品原始粉末不含玻璃質或非晶質而加熱 950°C 後約含 15%至 20%。

3-3 實驗岩石學研究

一大氣壓下之高溫實驗結果如表 3-2 所列。共 23 組實驗，反應時間最短為 20 小時，最長達 74 小時又 30 分鐘。初步用反射光顯微鏡確認樣品是否達到熔融產生燒結(sintering)，以及礦物相是否有所不同，在 1400°C(圖 3-10)時樣品全融並無其他礦物而在 1300°C 開始有石英與氧化物出現，進而挑選出樣品由掃描式電子顯微鏡及能量光譜分析。

3-3-1 掃描式電子顯微鏡影像

將實驗光片所觀察到之礦物，透過掃描式電子顯微鏡(SEM)取得反射電子影像圖(BEI)，藉由不同礦物相所產生不同顏色的灰階色差，作為判別不同種礦物相的依據。分析步驟為依各個不同實驗溫度，由高至低依序排列，進而選擇不同色階的礦物相加以分析。其結果分述如下：

159C 樣品

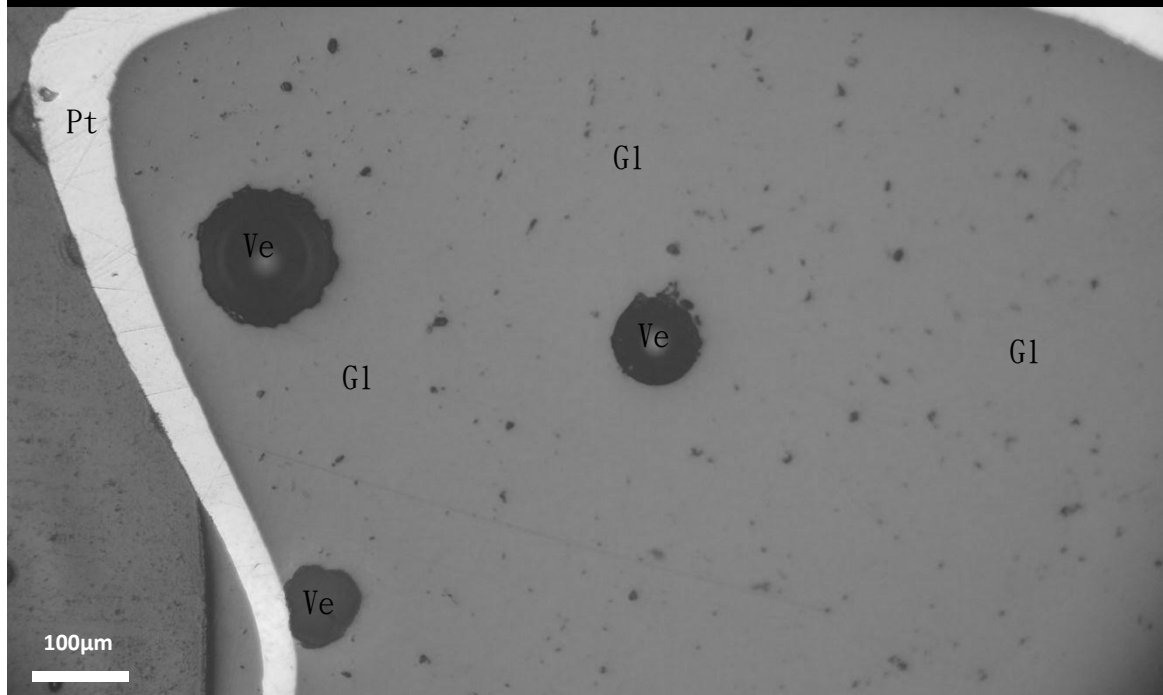
在實驗溫度 1300°C 下之反射電子影像圖(BEI)(圖 3-11)，發現樣品未完全熔融，除玻璃(Gl)外，尚有石英(Qz)和氧化物(Ox)；而在 1200°C 下之反射電子影像圖(BEI)(圖 3-12)，除了玻璃，石英，氧化物之外，出現了另一種與玻璃不同的灰階，為堇青石(Cd)。生成的堇青石(Cd)多呈半自形；圖 3-13 為實驗溫度 1125°C 下之反射電子影像圖(BEI)，圖中礦物，分別為石英(Qz)、斜長石(P1)及氧化物(Ox)，玻璃(Gl)含量不高

表 3-2 一大氣壓高溫實驗

Run No.	Temp(°C)	Time(hr)	Feature
*23	1400 °C	24 hr	G1
16	1300 °C	24 hr	G1+Qz+Ox
17	1275 °C	24 hr	sintering
14	1250 °C	24 hr	sintering
22	1225 °C	24.5 hr	sintering
13	1200 °C	23.5 hr	G1+Qz+Ox+Cd
*18	1175 °C	23.5 hr	sintering
12	1150 °C	23.5 hr	sintering
21	1125 °C	23.5 hr	G1+Qz+Ox+Pl
11	1100 °C	23.5 hr	sintering
*10	1090 °C	24 hr	sintering
*9	1060 °C	24 hr	sintering
19	1030 °C	24 hr	G1+Qz+Ox+Gt+Pl+Kf+il
15	1000 °C	68.5 hr	sintering
*8	980 °C	27.5 hr	sintering
20	950 °C	74.5 hr	G1+Qz+Ox+Gt+Pl+Kf+il
7	900 °C	24 hr	non-melting
6	830 °C	24 hr	Qz+Ox+Gt+Pl+Kf+il+Cl
*5	785 °C	24 hr	non-melting
4	740 °C	24 hr	non-melting
*3	685 °C	48 hr	non-melting
2	630 °C	65 hr	non-melting
*1	600 °C	20 hr	non-melting

*標記項目無 SEM-EDS 分析

159C-1400°C，倍率 100；反射光



161B-1400°C，倍率 100；反射光

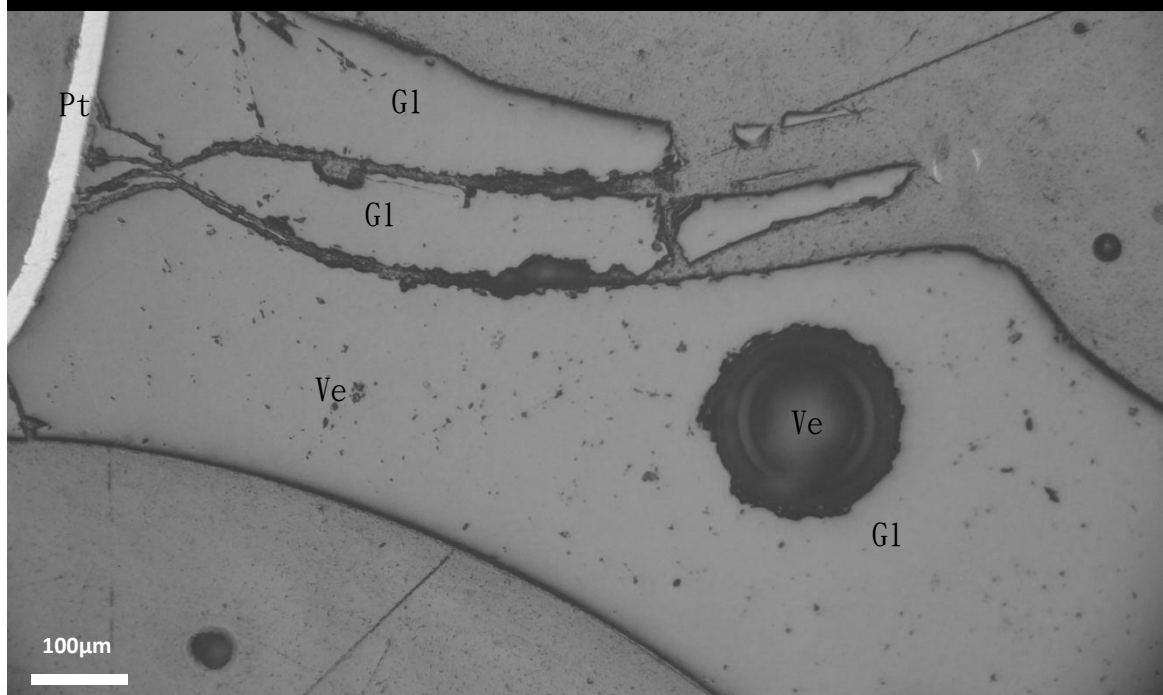


圖 3-10 實驗 1400°C 反射光顯微鏡影像

G1：玻璃，Ve：氣孔，Pt：白金(囊包)

1400°C 樣品中僅見均勻的玻璃質以及表面上大大小小的氣孔坑洞。

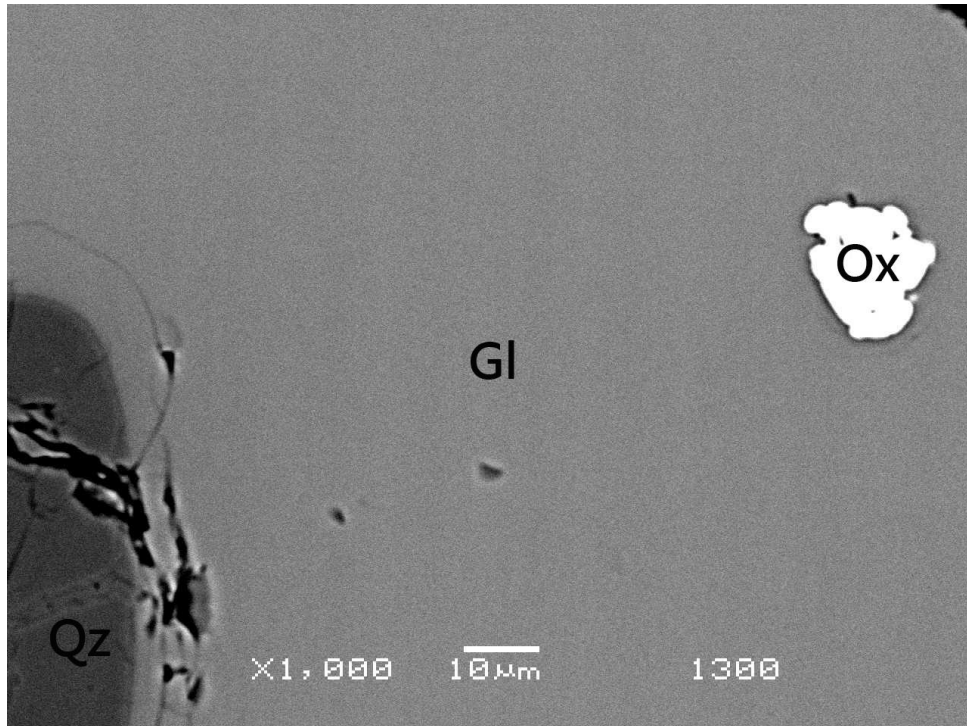


圖 3-11 實驗 159-1300°C 反射電子影像圖(BEI)
Qz：石英，Gl：玻璃，Ox：氧化物。放大倍率為 1000 倍

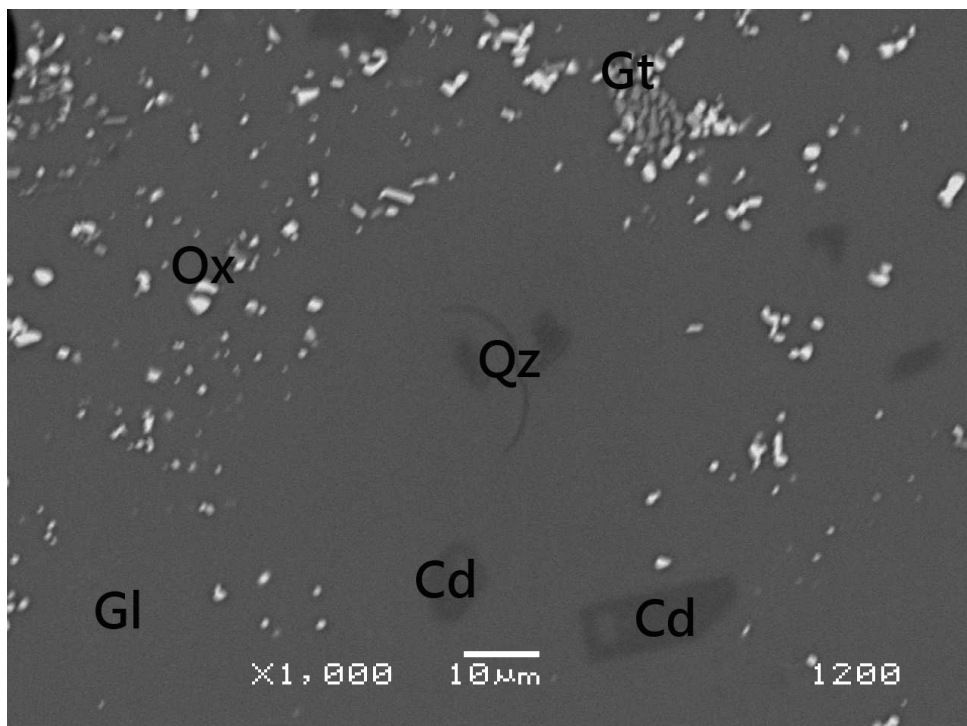


圖 3-12 實驗 159-1200°C 反射電子影像圖(BEI)
Qz：石英，Gl：玻璃，Ox：氧化物，Cd：堇青石，Gt：石榴子石。
放大倍率為 1000 倍

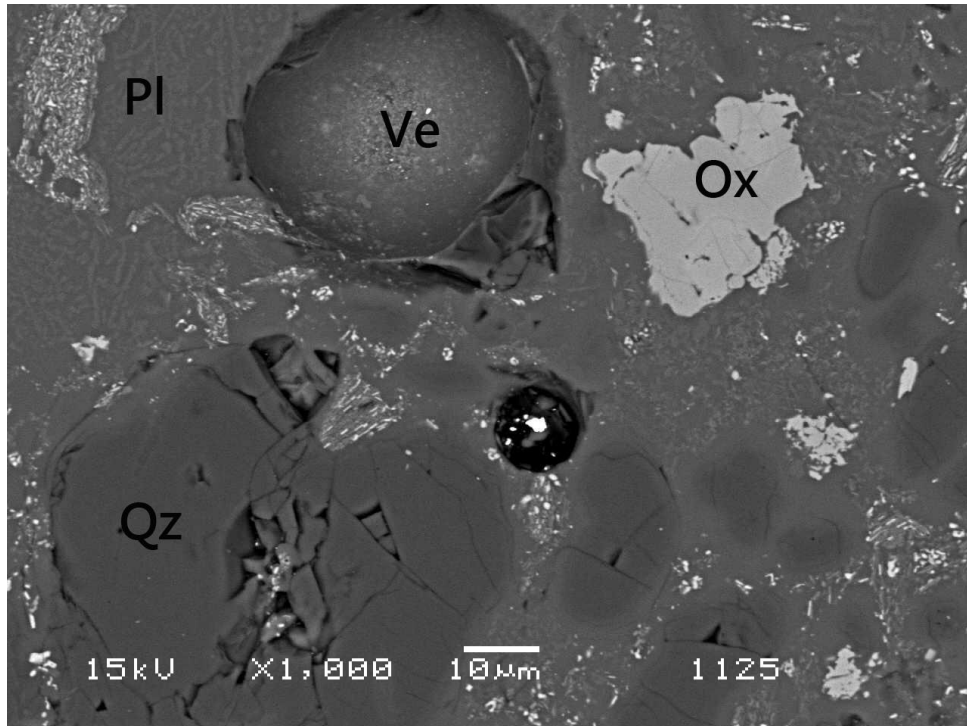


圖 3-13 實驗 159-1125°C 反射電子影像圖(BEI)
Qz：石英，Pl：斜長石，Ox：氧化物，Ve：氣孔。
放大倍率為 1000 倍

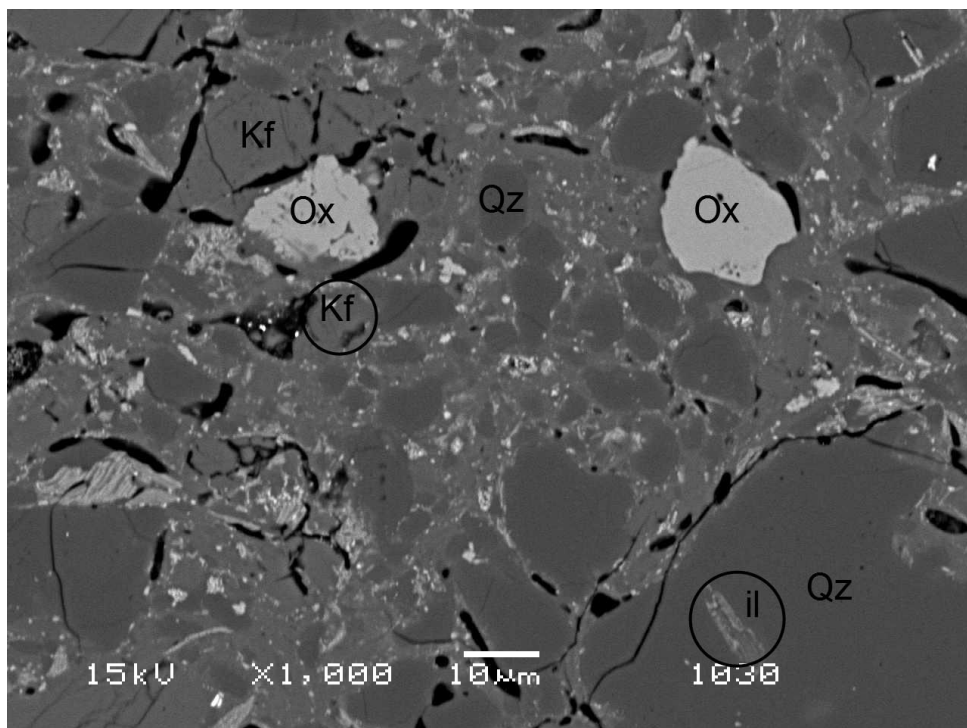


圖 3-14 實驗 159-1030°C 反射電子影像圖(BEI)
Qz：石英，Ox：氧化物，il：伊萊石，Kf：鉀長石。
放大倍率為 1000 倍

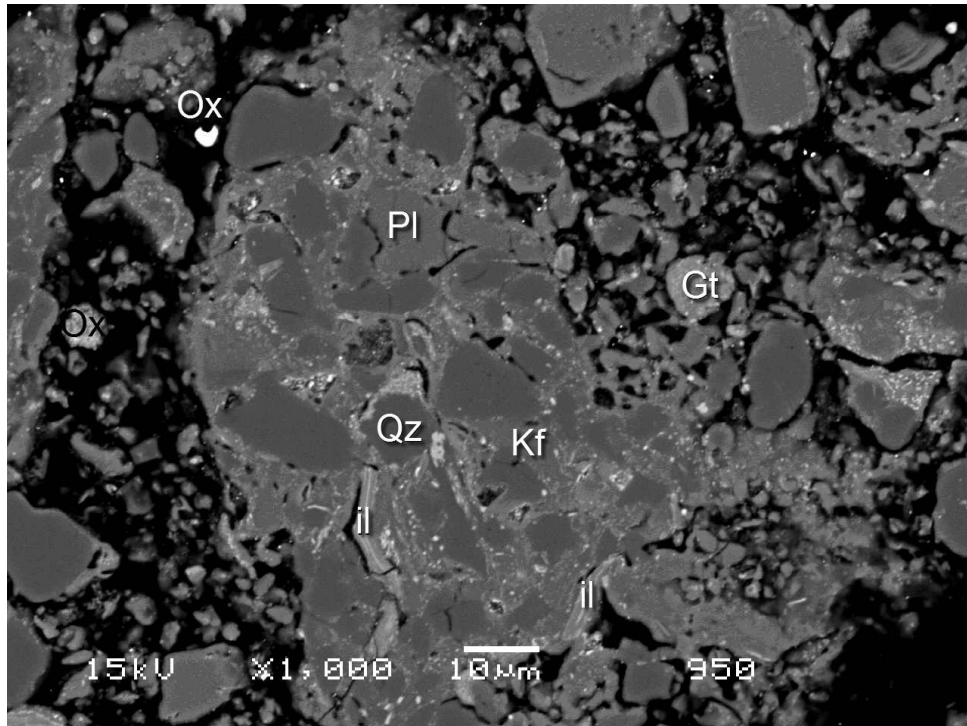


圖 3-15 實驗 159-950°C 反射電子影像圖(BEI)
 Qz：石英，Ox：氧化物，Pl：斜長石，il：伊萊石，Kf：鉀長石
 Gt：石榴子石。放大倍率為 1000 倍

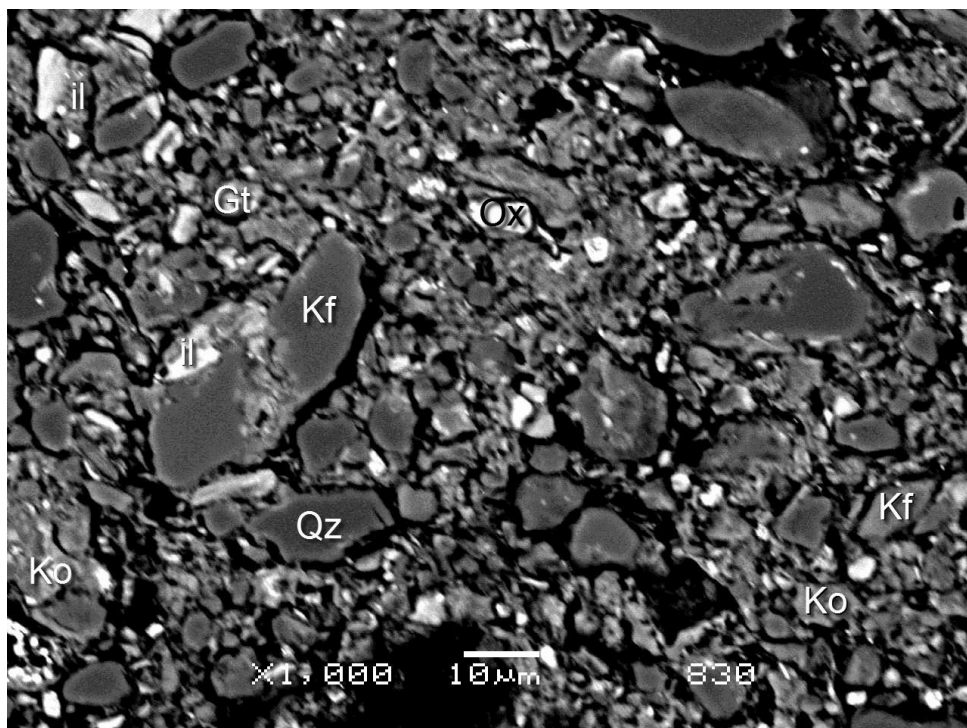


圖 3-16 實驗 159-830°C 反射電子影像圖(BEI)
 Qz：石英，Ox：氧化物，il：伊萊石，Ko：高嶺石，Kf：鉀長石
 Gt：石榴子石。放大倍率為 1000 倍

僅存於礦物之間。斜長石(P1)成針狀組織而氧化物(Ox)多半為半自形至他形，部分的氧化物(Ox)則有叢晶的現象；圖 3-14 為實驗溫度 1030°C 下之反射電子影像圖(BEI)，礦物有石英(Qz)、鉀長石(Kf)、氧化物(Ox)及綠泥石(C1)。而玻璃(G1)比例則銳減。圖 3-15 為實驗溫度 950°C 下之反射電子影像圖(BEI)，礦物間因熔融而燒結一起，但難以察覺玻璃(G1)，具有石英 (Qz)、斜長石(P1)、鉀長石(Kf)、伊萊石(il)、石榴子石(Gt)。圖 3-16 為實驗溫度 830°C 下之反射電子影像圖(BEI)，礦物之間的黑色交結物為環氧塑脂，未有熔融反應，具有石英(Qz)、氧化物(Ox)、伊萊石(il)、高嶺石(Ko)、鉀長石(Kf)、石榴子石(Gt)等礦物。

161B 樣品

實驗溫度 1300°C 下之反射電子影像圖(BEI)(圖 3-17)，同 159C 未完全熔融，除玻璃(G1)尚有石英(Qz)和氧化物(Ox)；而在 1200°C 下之反射電子影像圖(BEI)(圖 3-18)，礦物相有玻璃(G1)，石英(Qz)，氧化物(Ox)；圖 3-19 為實驗溫度 1125°C 下之反射電子影像圖(BEI)，圖中礦物，分別為石英(Qz)、斜長石(P1)及氧化物(Ox)，亦發現堇青石(Cd)，生成的堇青石(Cd)多呈半自形，玻璃(G1)含量不高僅存於礦物之間；圖 3-20 為實驗溫度 1030°C 下之反射電子影像圖(BEI)，礦物有石英(Qz)、斜長石(P1)、氧化物(Ox)及石榴子石(Gt)，而玻璃(G1)比例則銳減。圖 3-21 為實驗溫度 950°C 下之反射電子影像圖(BEI)，礦物間因熔融而燒結一起，

但難以察覺玻璃(Gl)，具有石英 (Qz)、斜長石(P1)、氧化物(Ox)、氣孔(Ve)，氣孔亦為熔融發生的有力證據。圖 3-22 為實驗溫度 830°C 下之反射電子影像圖(BEI)，礦物之間的黑色交結物為環氧塑脂，未有熔融反應，具有石英 (Qz)、氧化物(Ox)、鉀長石(Kf)、伊萊石(il)。

在實驗中大部分的礦物呈半自形至他形。且因實驗溫度越低，玻璃(Gl)比例愈來愈小，溫度至 950°C 之下，則沒有玻璃(Gl)產生。

岩心光片 159C(圖 3-23)與 161B(圖 3-24)可以發現 159C 粒徑較粗變化大，而 161B 粒徑細小介於 10~50um 之間，且沒有在 159C 與 161B 光片中發現燒結現象或是玻璃物質。主要礦物為石英、長石、氧化物、石榴子石、黃鐵礦、伊萊石、碳酸鹽類、與綠泥石等礦物。

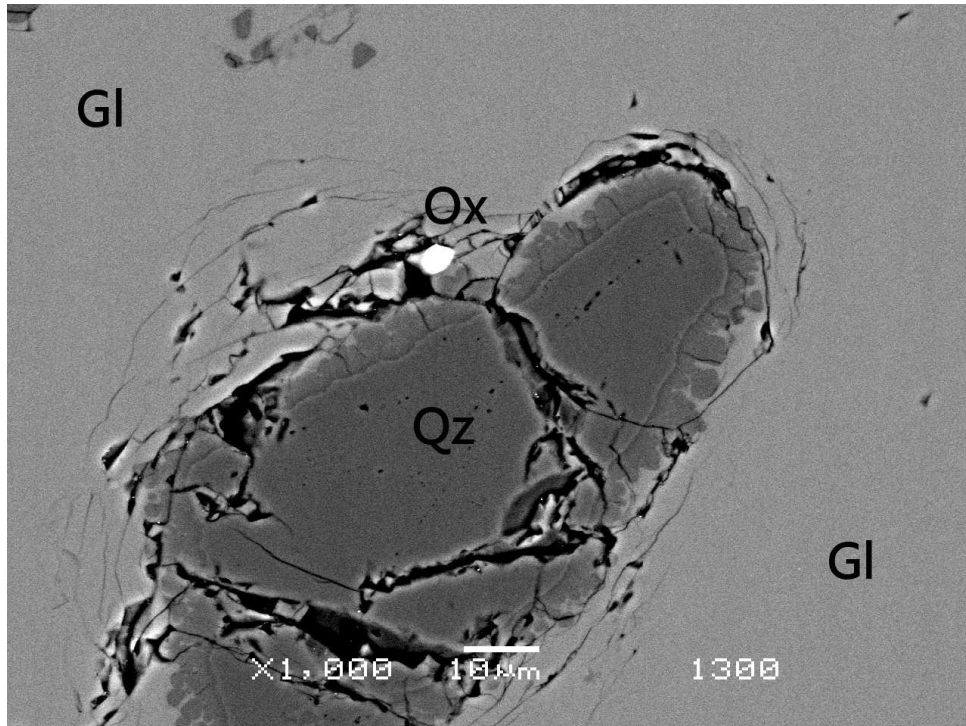


圖 3-17 實驗 161-1300°C 反射電子影像圖(BEI)
Qz：石英，Gl：玻璃，Ox：氧化物。放大倍率為 1000 倍

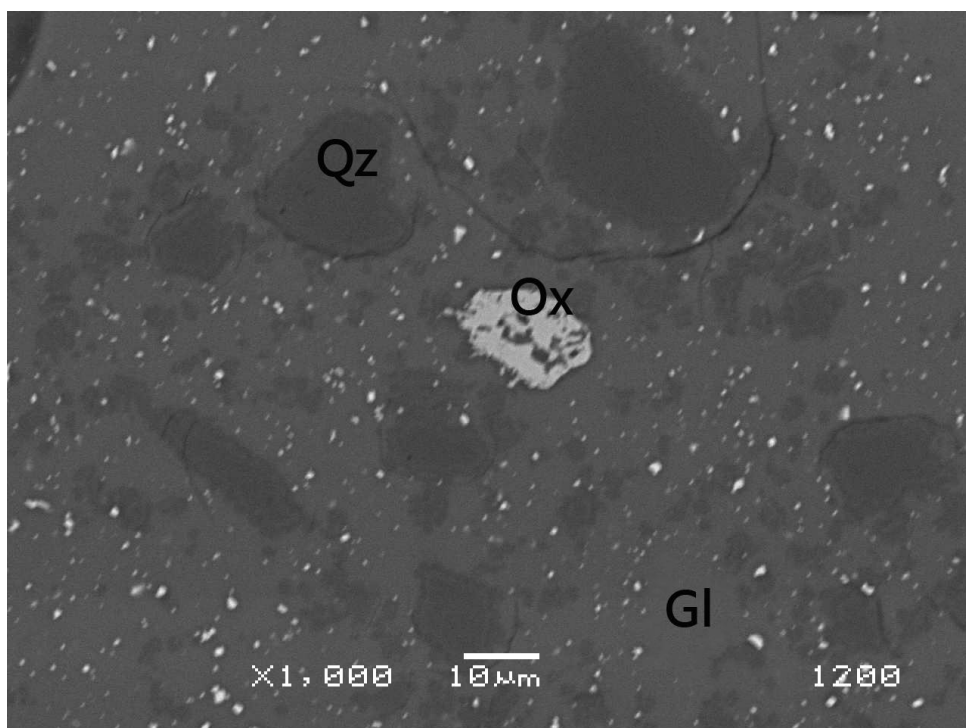


圖 3-18 實驗 161-1200°C 反射電子影像圖(BEI)
Qz：石英，Gl：玻璃，Ox：氧化物。
放大倍率為 1000 倍

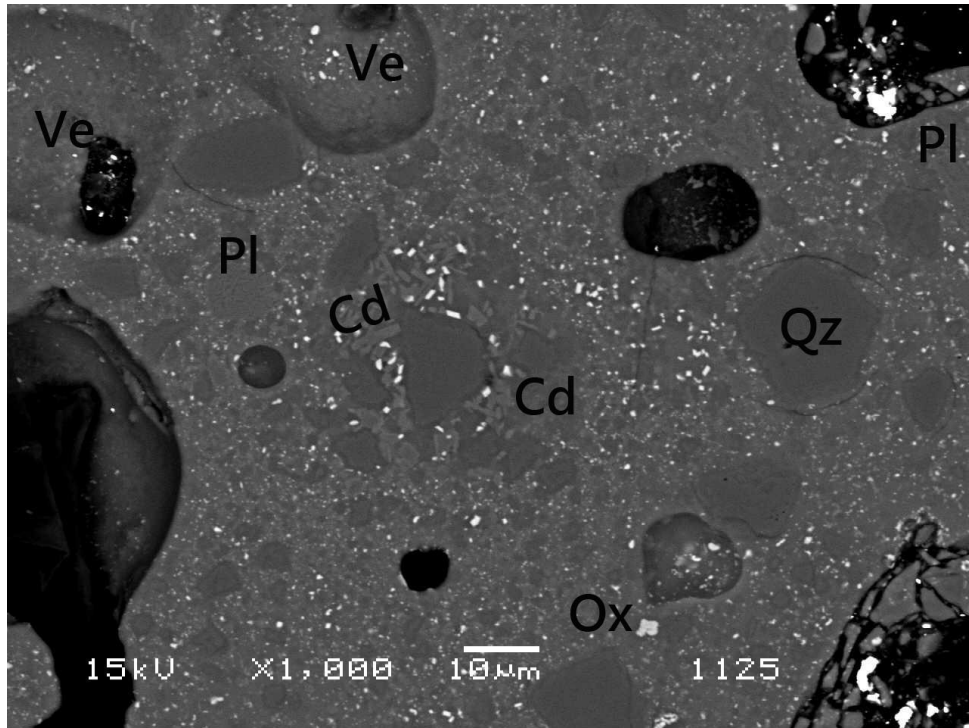


圖 3-19 實驗 161-1125°C 反射電子影像圖(BEI)
Qz：石英，Pl：斜長石，Cd：堇青石，Ox：氧化物，Ve：氣孔。
放大倍率為 1000 倍

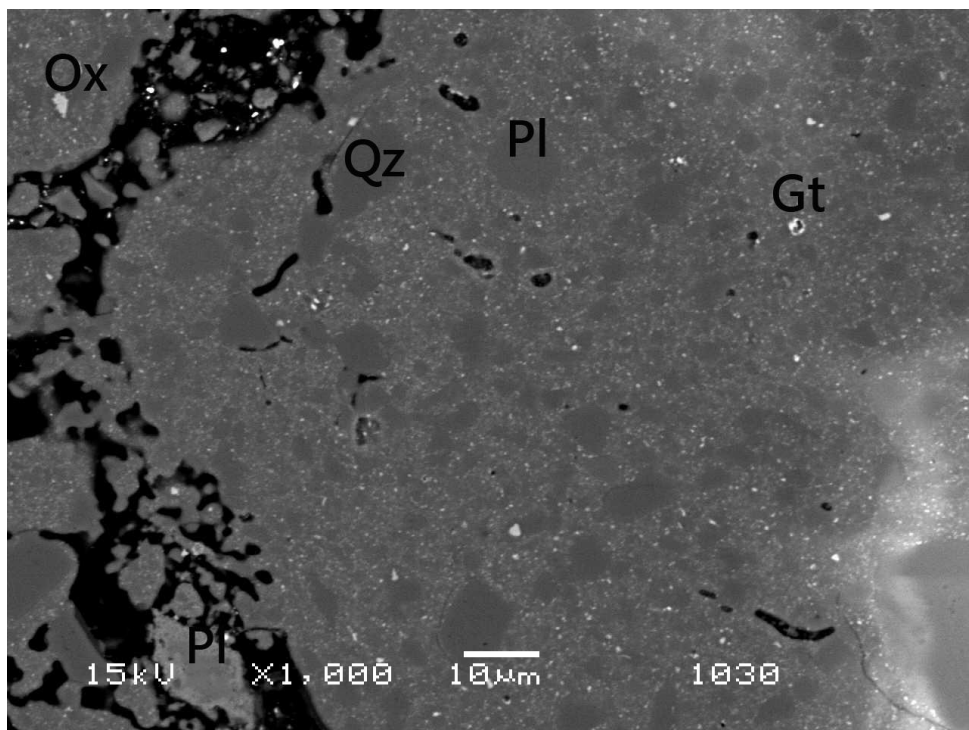


圖 3-20 實驗 161-1030°C 反射電子影像圖(BEI)
Qz：石英，Ox：氧化物，Pl：斜長石，Gt：石榴子石。
放大倍率為 1000 倍

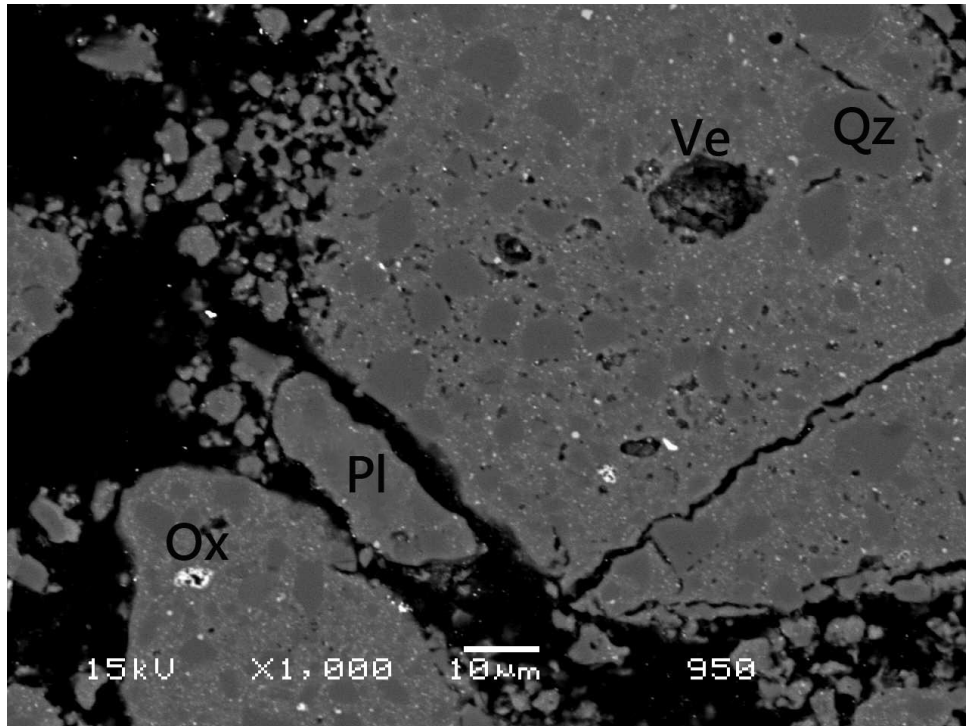


圖 3-21 實驗 161-950°C 反射電子影像圖(BEI)
Qz：石英，Pl：斜長石，Ox：氧化物，Ve：氣孔。
放大倍率為 1000 倍

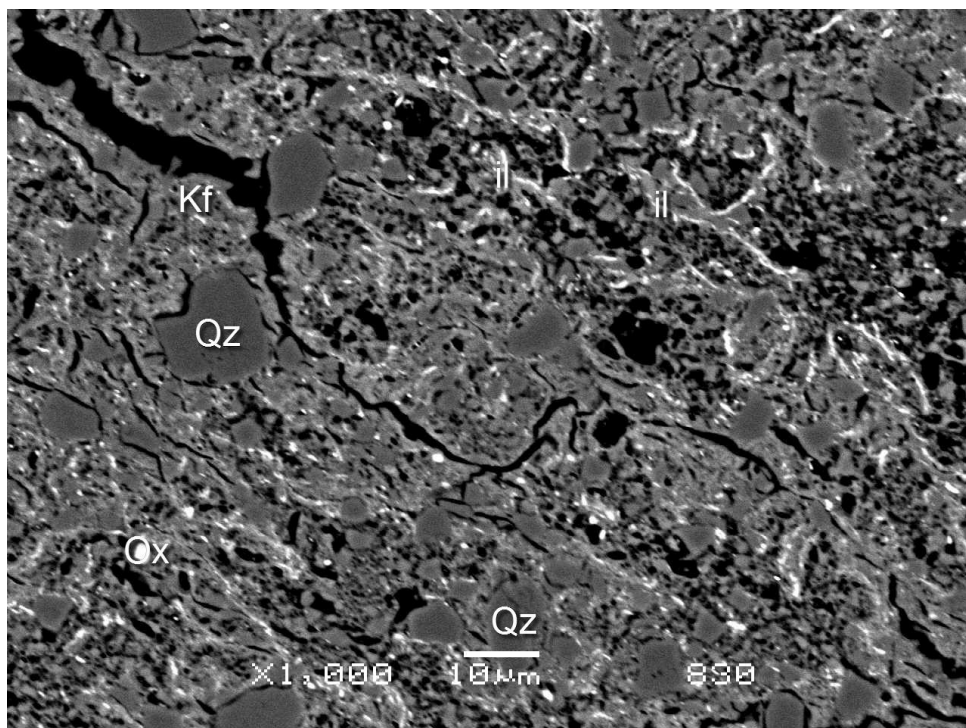


圖 3-22 實驗 161-830°C 反射電子影像圖(BEI)
Qz：石英，Ox：氧化物，Kf：鉀長石，il：伊萊石。
放大倍率為 1000 倍

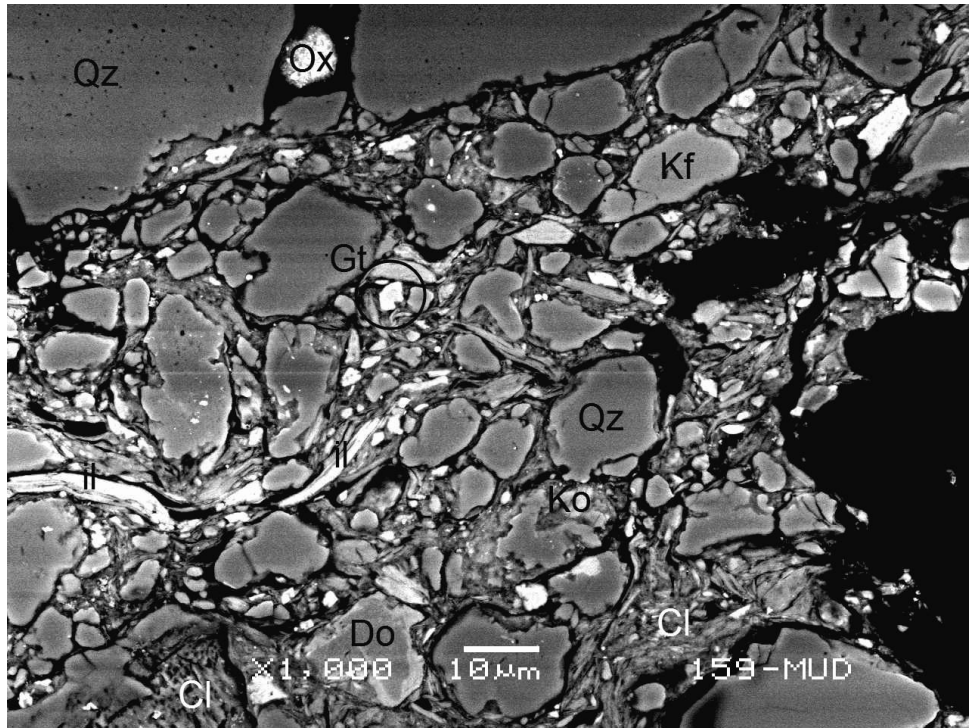


圖 3-23 159C 岩心光片的反射電子影像圖(BEI)
礦物粒徑差異大，含鉀長石(Kf)，石英(Qz)、氧化物(Ox)、伊萊石(il)、
石榴子石(Gt)、高嶺石(Ko)、綠泥石(Cl)、白雲石(Do)等
放大倍率為 1000 倍

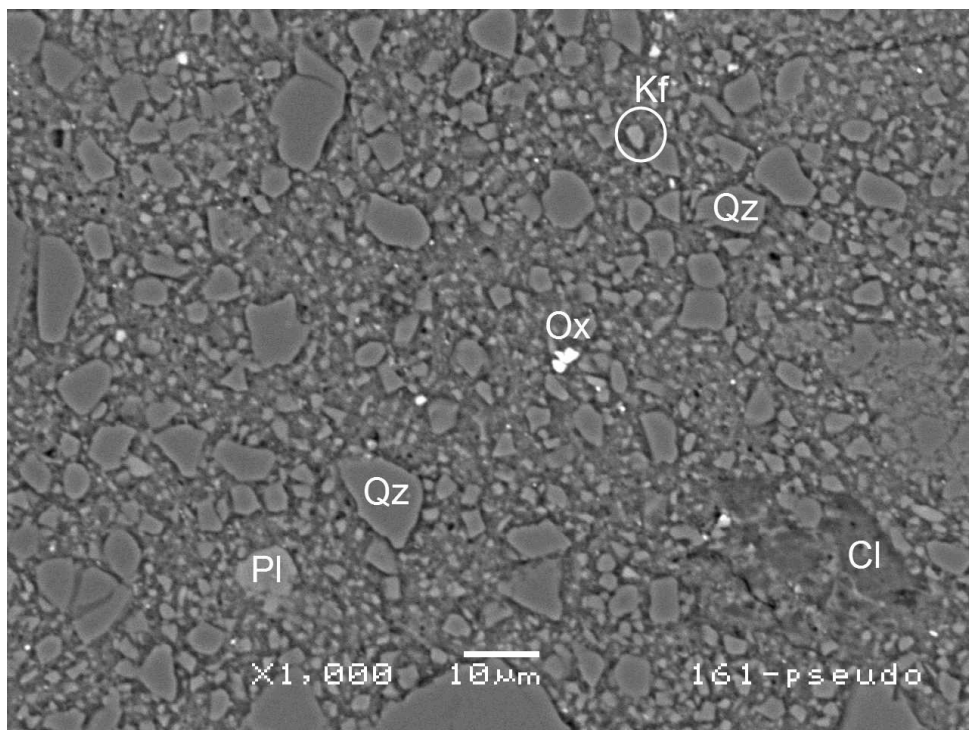


圖 3-24 161B 岩心光片的反射電子影像圖(BEI)
礦物粒徑差異小，含長石，石英(Qz)、氧化物(Ox)、綠泥石(Cl)
放大倍率為 1000 倍

3-3-2 各礦物 EDS 光譜

玻璃與礦物的分析，藉由能量分散光譜儀（EDS）進行，利用各個不同相之間彼此具有相異的元素種類、含量及強度，以分辨出不同類型的相。將各個不同實驗溫度的礦物相光譜互相比較後得知：玻璃（G1）（圖 3-25A-B）的主要元素以 Si、O、Al、Mg、Ca、Na、K 為主；尖晶石（Sp）（圖 3-26）的主要元素以 O、Al、Mg、Fe 為主；斜長石（Pl）（圖 3-27）的主要元素以 Si、O、Al、Na、Ca、K 為主。氧化物（Ox）則以 O、Ti、Fe 為主（圖 3-28）比起其它相，具有較突出的 Ti 元素峰值，且 Fe、Ti 含量明顯比其它相高出甚多。伊萊石（il）（圖 3-29）的主要元素以 Si、O、Al、Mg、Fe、Na、K 為主。高嶺石（Ko）（圖 3-30）與伊萊石（il）的主要元素相似。但最大的差別在於伊萊石（il）的 Si 含量較高，而 Al 含量而較高嶺石（Ko）低。

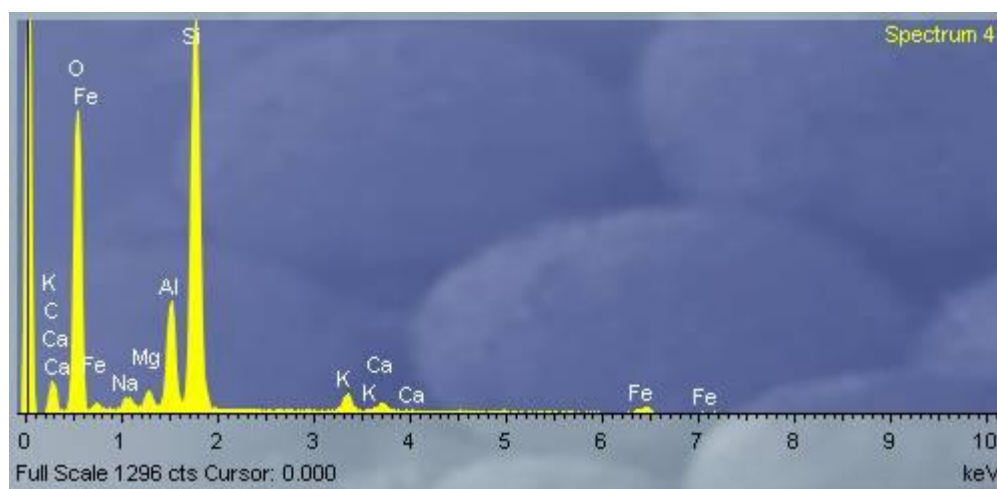


圖 3-25A 玻璃相的能量分散光譜(159C、1300°C)

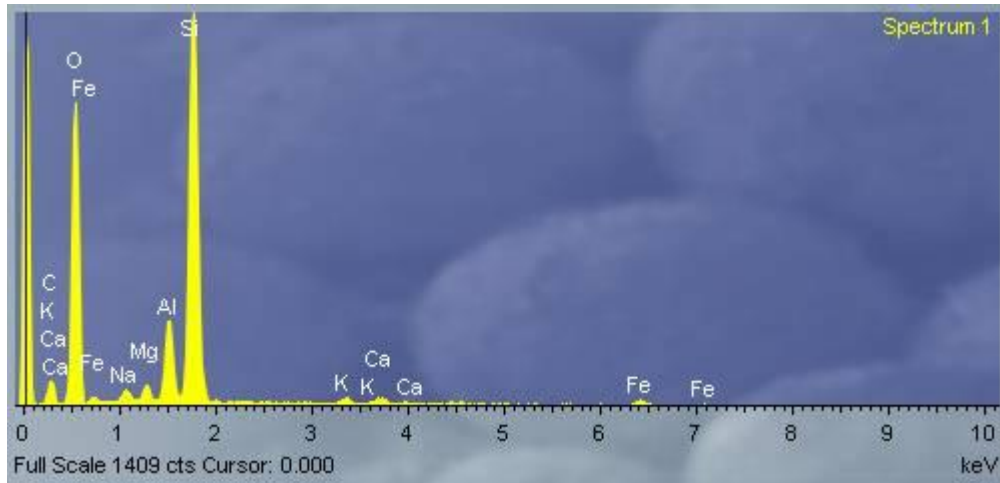


圖 3-25B 玻璃相的能量分散光譜(161B、1300°C)

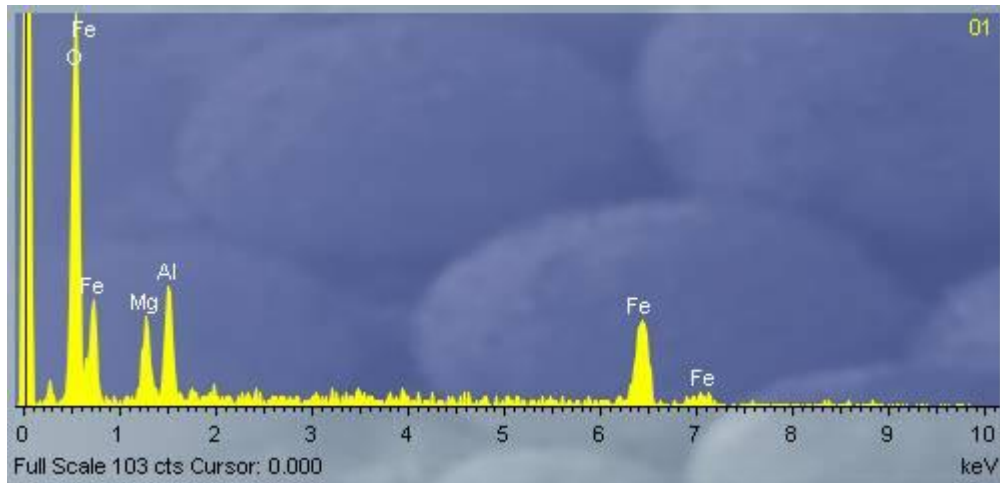


圖 3-26 尖晶石相的能量分散光譜(159C、1100°C)

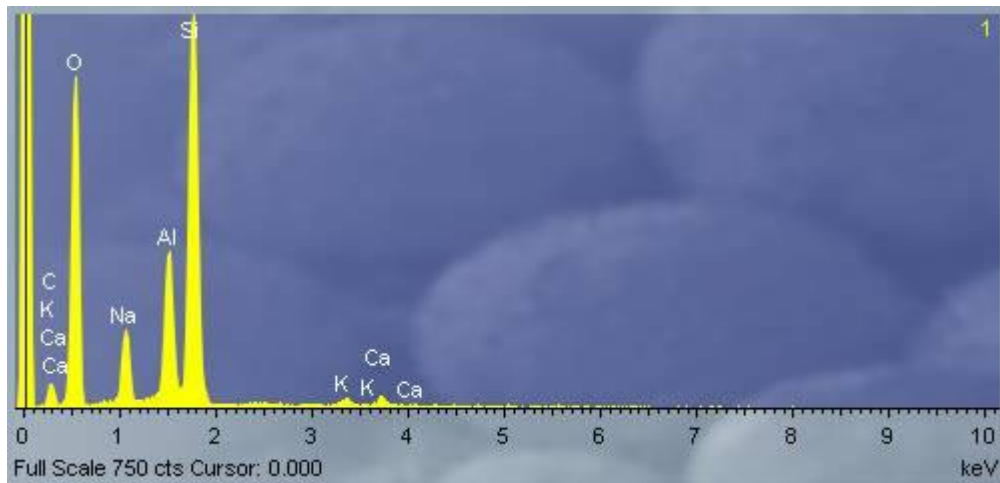


圖 3-27 斜長石相的能量分散光譜(161B、1030°C)

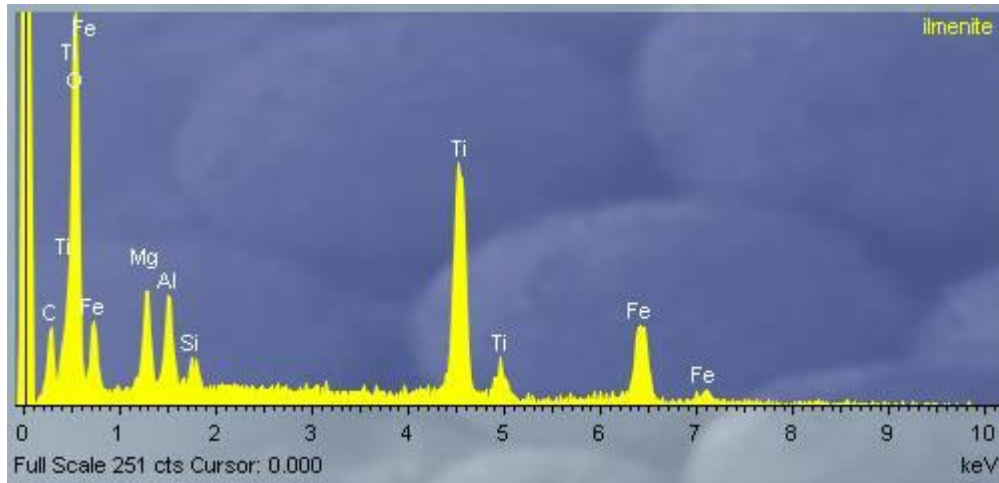


圖 3-28 氧化物的能量分散光譜(161B、1200°C)

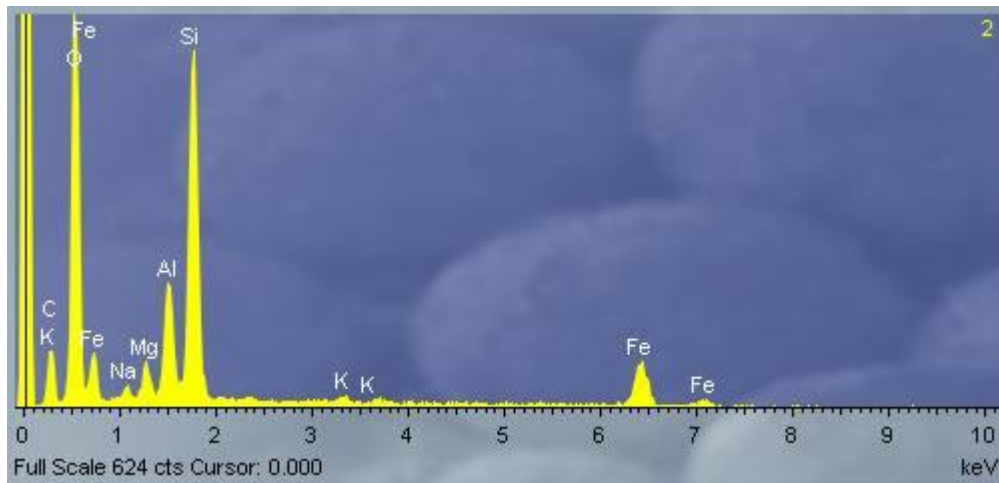


圖 3-29 伊萊石相的能量分散光譜(161B、950°C)

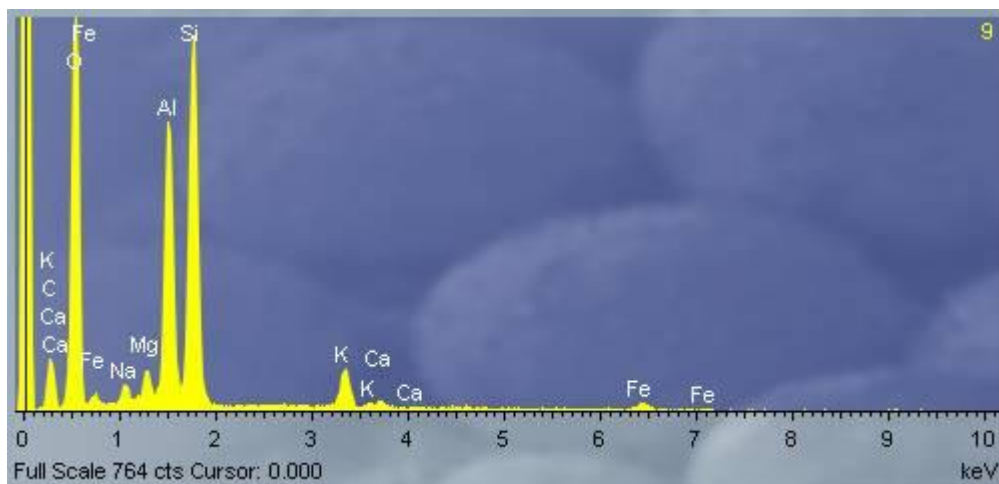


圖 3-30 高嶺石相的能量分散光譜(159C、830°C)

3-3-3 實驗岩石學研究結果

由 SEM 與 EDS 分析結果彙整成表 3-2，岩心粉末的初熔溫度約為 925℃，當溫度高於 1030℃後伊萊石分解消失，繼續升溫至 1150℃後長石分解消失，尖晶石礦物於溫度超過 1250℃以上分解，至 1300℃僅存石英與氧化物（圖 3-31 和 3-32）。

表 3-3 一大氣壓高溫實驗結果

Run No.	Temperature (°C)	Duration (Hr)	159C Phase(s)	161B Phase(s)
23	1400°C	24 hr	gl	gl
16	1300°C	24 hr	gl+Qz+Ox	gl+Qz+Ox
17	1275°C	24 hr	gl+Qz+Ox	gl+Qz+Ox
14	1250°C	24 hr	gl+Qz+Ox+Sp	gl+Qz+Ox+Sp
22	1225°C	24.5 hr	gl+Qz+Ox+Sp+Cd	gl+Qz+Ox+Sp
13	1200°C	23.5 hr	gl+Qz+Ox+Sp+Gt+Cd	gl+Qz+Ox+Sp
12	1150°C	23.5 hr	gl+Qz+Ox+Sp+Gt+Cd	gl+Qz+Ox+Sp
21	1125°C	23.5 hr	gl+Qz+Ox+Sp+Gt+Cd+Pl	gl+Qz+Ox+Sp+Gt+Cd+Pl
11	1100°C	23.5 hr	gl+Qz+Ox+Gt+Sp+Cd+Pl+Kf	gl+Qz+Ox+Gt+Sp+Cd+Pl+Kf
19	1030°C	24 hr	gl+Qz+Ox+Gt+Pl+Kf+il	gl+Qz+Ox+Gt+Pl+Kf+il
15	1000°C	68.5 hr	gl+Qz+Ox+Gt+Pl+Kf+il	gl+Qz+Ox+Gt+Pl+Kf+il
20	950°C	74.5 hr	gl+Qz+Ox+Gt+Pl+Kf+il	gl+Qz+Ox+Gt+Pl+Kf+il
7	900°C	24 hr	Qz+Ox+Gt+Ap+Pl+Kf+il+Ko	Qz+Ox+Gt+Ap+Pl+Kf+il
6	830°C	24 hr	Qz+Ox+Gt+Ap+Pl+Kf+il+Ko	Qz+Ox+Gt+Ap+Pl+Kf+il+Ko
4	740°C	24 hr	Qz+Ox+Gt+Ap+Pl+Kf+il+Cl+Ko	Qz+Ox+Gt+Ap+Pl+Kf+il+Cl+Ko
2	630°C	65 hr	Qz+Ox+Gt+Ap+Pl+Kf+il+Cl+Ko	Qz+Ox+Gt+Ap+Pl+Kf+il+Cl+Ko

gl:glass , Qz:quartz , Ox:Fe-Ti oxides , Sp:spinel , Gt:garnet , Cd:Cordierite
Pl: plagioclase , Kf: K-feldspar , Cl:chlorite , Ap:apatite , il:illite , Ko:kaolinite

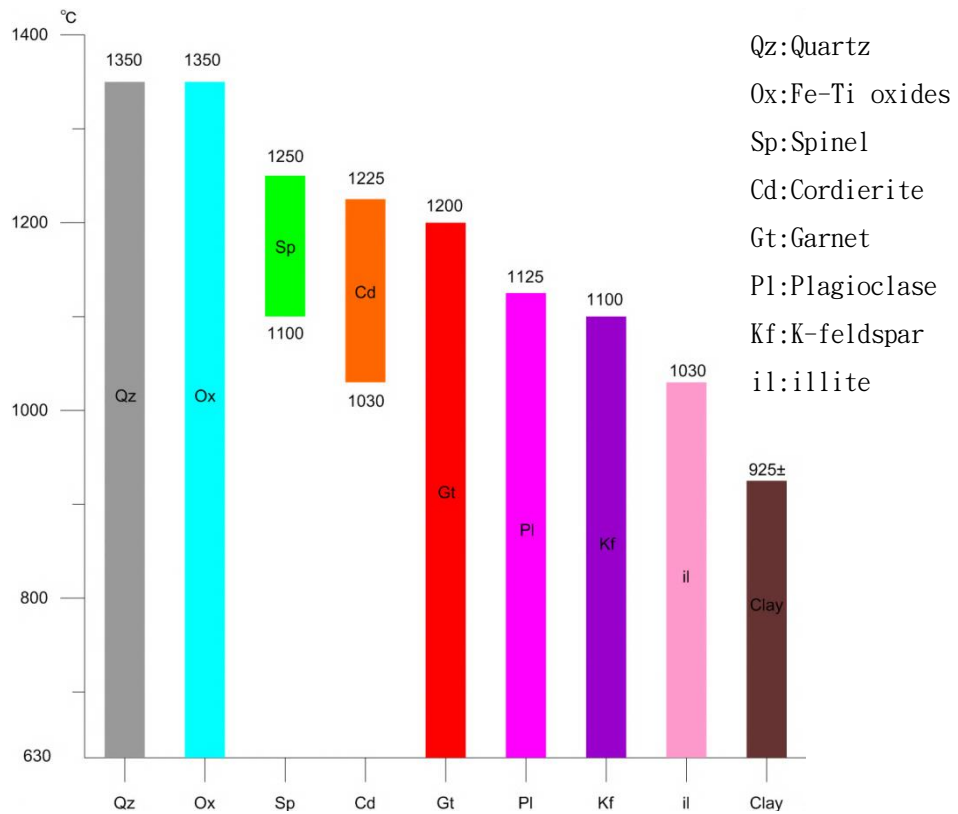


圖 3-31 一大氣壓下 159C 泥岩礦物的穩定範圍

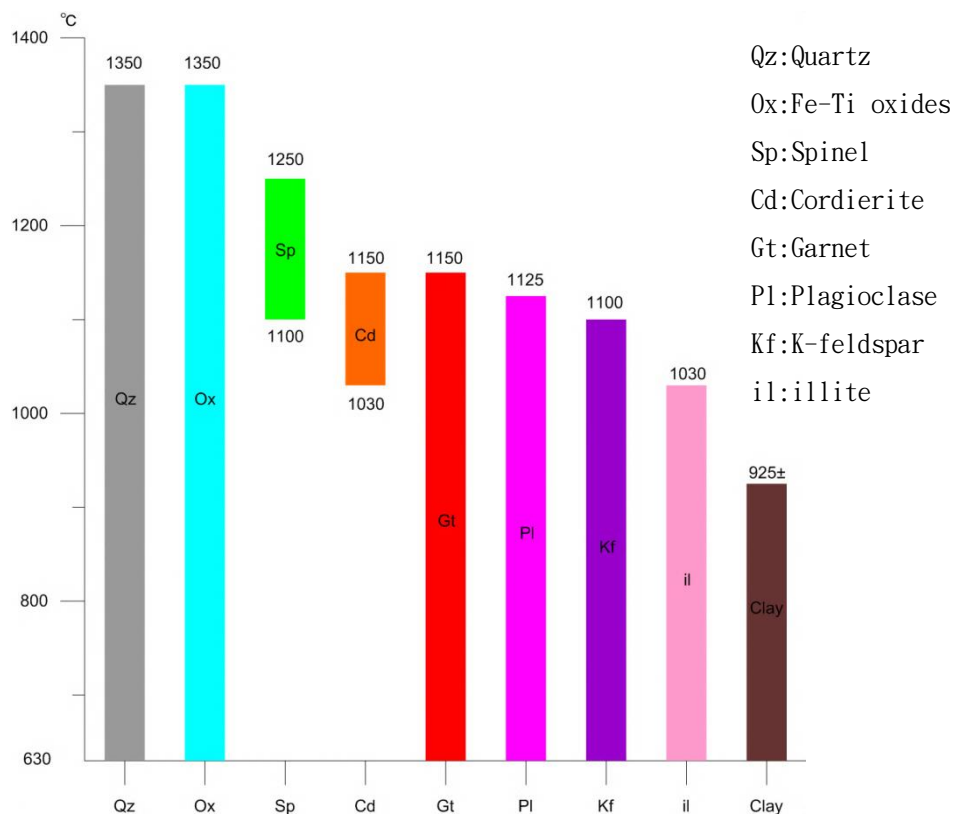


圖 3-32 一大氣壓下 161B 岩心礦物的穩定範圍

3-4 假玄武玻璃岩形成溫度

天然假玄武玻璃岩在沉積岩並不多見，在九份二山地滑的研究中 Lin 等人(2001)發現沉積岩產生的假玄武玻璃岩(圖 3-33)，由長石及石英碎屑與黃褐色之玻璃基質所組成，且具有大量氣孔構造，估計玻璃生成溫度介於 1100~1600°C 之間。

由本實驗結果得知，泥岩中的長石類礦物在 1150°C 溫度環境中已不存在，若假玄武玻璃岩的生成溫度過高，則碎屑物中將難以發現長石，由九份二山假玄武玻璃岩的 XRD 分析 (圖 3-9)可知此假玄武玻璃岩中包含石英、長石與玻璃質。經礦物相比對後與本實驗中 1125°C 的相似，生成溫度應在 1125°C 至 1150°C 之間，但是本研究為平衡實驗，因此會低估實際的溫度。

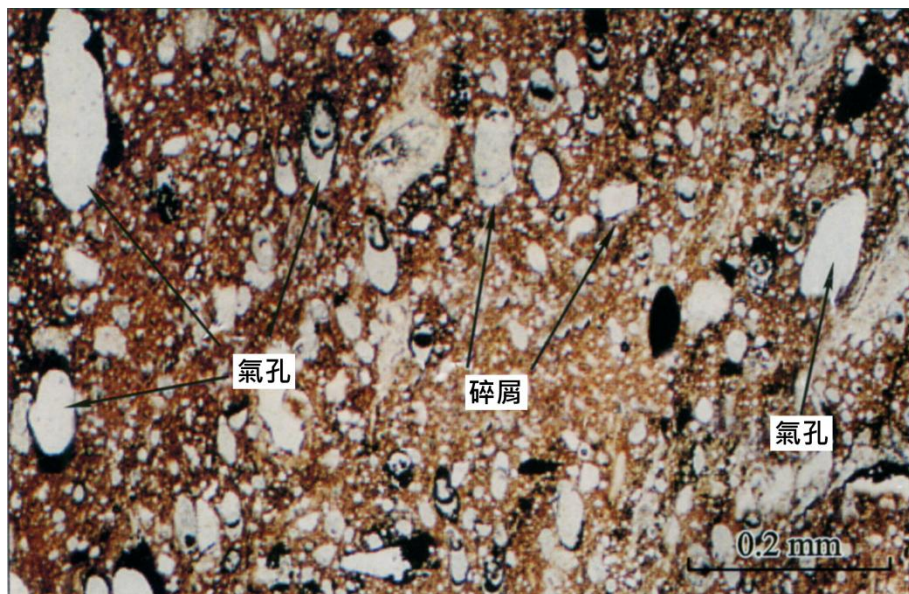


圖 3-33 九份二山假玄武玻璃岩(Lin 等人, 2001)

第四章 結論

由一大氣壓下實驗結果得知 900°C 時尚未產生熔融，而 950°C 時可以發現礦物間因熔融燒結在一起，故此區泥岩的初熔溫度為 925°C。

岩心的化學成分差異，由 XRF 分析可知 161C 相對 159B 較低的 Al、Fe、Mg、K，而 XRD 分析結果驗證 161B 相對 159C 所含高嶺石、伊萊石等黏土礦物較少。

台灣車籠埔斷層帶富含黏土之斷層泥與同震升溫研究(Kuo et al., 2011)亦發現主要斷層滑動帶中綠泥石、高嶺石與伊萊石含量較低，且可能會因假玄武玻璃岩蝕變後含有有較高的膨潤土。

由 XRD 結果得知斷層剪切帶底部 161B 的岩心中並沒有發現由假玄武玻璃岩蝕變後產生的膨潤土亦或玻璃物質存在，僅只有高嶺石與伊萊石等黏土礦物減少的現象，從 161B 與 159C-900°C 的 XRD 結果發現兩者的礦物相幾乎一樣，推測當時斷層作用產生的摩擦熱，可使圍岩達到將近 900°C 的溫度。

根據實驗岩石學研究結果顯示，泥岩中的長石在溫度超在 1150°C 時分解消失，表示台灣集集地震時，九份二山地滑產生的假玄武玻璃岩生成溫度估計約在 1125°C 至 1150°C 之間，但是本研究為平衡實驗持溫時間較長，可能會低估自然界的實際溫度。

誌謝

本篇論文能夠圓滿完成，首先要感謝指導老師劉德慶博士與葉恩肇博士在研究所課程的指導及實驗上的協助與建議，老師們在生活中為學處事的討論和啟發，其敬業的研究精神與嚴謹的態度實為我學習的榜樣。

感謝中研院飯塚義之博士在掃描式電子顯微鏡分析上的指導與協助，同時也感謝其助理雅婷的幫忙，才能讓分析工作能順利完成。也要感謝台大地質系李寄嶠技正在全岩化學分析上的幫助。特別感謝北科材資所余炳盛老師和焦志平同學在 XRD 分析上給予極大的協助。

感謝周倣祖博士、郭力維博士對於本論文的指正，以及口試時給予的諸多意見讓我受益良多，感謝老師們不辭辛勞，風雨中抽空前來指導，特此對兩位老師表達誠摯的謝意。

感謝研究室夥伴們，尤其感謝哲維、彥棠兩位學長在實驗操作的指導，以及邱瑜、國文和韻婕在實驗及學業上的討論與協助，謝謝你們。

最後，更要謝謝我的家人和朋友在這兩年來的鼓勵與支持，讓我在遇到困難與挫折的時候能重新得到力量，有你們一直在身邊我才能順利完成學業，謝謝你們。

參考文獻

中文文獻

中油公司臺探總處 (1986) 十萬分之一地質圖-嘉義圖幅，中國石油公司出版。

中央地質調查所(2001)福建坪鑽井岩心紀錄。

中央地質調查所(2004)活動斷層調查報告-前期計畫成果-斷層各論-觸口斷層。

中央地質調查所(2007)觸口斷層 2 萬 5000 分之一的活動斷層圖。

中央地質調查所(2007)台灣西南部活動斷層調查簡報。

經濟部中央地質調查所特刊 17 號(2007)觸口斷層，81-93 頁。

林愛明(2008)地震化石：假熔岩的形成與保存。北京高等教育出版社發行。

李寄嶠、蔡榮浩、何孝恆、楊燦堯、鐘孫霖、陳正宏 (1997) 應用 X 螢光分析儀從事岩石樣本之定量分析 (I) 主要元素。中國地質學會八十六年年會暨學術研討會論文摘要，418-420 頁。

郭力維(2003)苗栗麓山帶斷層岩石之研究。國立台灣大學地質學研究所碩士論文，共 72 頁。

黃慧君(2003)苗栗汶水地區第三紀沈積岩層面之黑色發亮物質研究。國立中央大學應用地質研究所碩士論文，共 65 頁。

劉建民、董樹文(2001)假玄武玻璃的研究進展與現狀。地質評論 第 47 卷 第 1 期
2001 年 1 月，64-69 頁。

英文文獻

- Chester, J. S., Chester, F. M. and Kronenberg, A. K. (2005) Fracture surface energy of the Punchbowl fault, San Andreas system. *Nature* 437, 133-136
- E. F. Osborn and A. Muan, Revised and redrawn "Phase Equilibrium Diagrams of Oxide Systems", Plate 9, American Ceramic Society and Edward Orton, Jr., Ceramic Foundation, 1960.
- Jackson J A. (1997) Glossary of geology. American Geological Institute. Alexandria Virginia.
- J. Kendrick, Y. Lavallée, A. Ferk, D. Perugini, R. Leonhardt, D.B. Dingwell, (2012) Extreme frictional processes in the volcanic conduit of Mount St. Helens (USA) during the 2004–2008 eruption: *Journal of Structural Geology*, 38 (2012), p. 61-76
- Kuo, L.W., Song, S.R., Huang, L., Yeh, E.C., and Chen, H.F., (2011) Temperature estimates of coseismic heating in clay-rich fault gouges, the Chelungpu fault zones, Taiwan: *Tectonophysics*, 502, (2011), p. 315-327.
- Lin, A. (1994) Glassy pseudotachylite veins from Fuyun fault zone, northwest China: *Journal of Structural Geology*, v.16, no.1, p.71-83.
- Lin, A., Chen, A., Liao, C. F., Lee, C. T., Lin, C. C., Lin, P. S., Wen, S. C., Ouchi, T., (2001) Frictional fusion due to coseismic landsliding during the 1999 Chi-Chi (Taiwan) ML 7.3 earthquake. *Geophysical research letters*, v.28, p.4011-4014.
- Maglouthlin, J. F., Spray, J. G., (1992) Frictional melting processes and products in geological materials: introduction and discussion: *Tectonophysics*, v.204, p.197-204.
- Philpotts, A. R., (1964) Origin of pseudotachylites: *Am. J. Sci.*, v. 262, p.1008-1035.
- Shand, S. J. (1916) The pseudotachylite of Parijs (Orange Free State) and its relation to "trap-shotten gneiss" and "flinty crush-rock": *The quarterly Journal of the Geological Society of London*, v.72, p.198-221.

- Sibson, R. H.,(1975)Generation of pseudotachylyte by ancient seismic faulting:Geophys. J. R. astr. Soc., 43, p. 775-794.
- Spray, J.G.,(1992) A physical basis for the frictional melting of some rock-forming minerals:Tectonophysics,v204 spec,p.205-221.
- Wenk, H. R., (1978) Are pseudotachylite products of fracture or fusion:Geology, v. 6, p.507-511.