

第三章 結果與討論

3.1 岩象學與全岩化學分析

3.1.1 岩象學觀察

採集標本外觀呈現深黑色，具有多孔性的特徵(圖 3-1)，偶而夾雜一些橄欖石斑晶、輝石及鈦鐵氧化物，基質的礦物以斜長石為主(圖 3-2)。

將採樣的標本製成薄片，在顯微鏡下加以觀察，發現薄片內橄欖石晶形完整，周圍沒有明顯的反應圈，顆粒直徑可高達 2mm(圖 3-3)，有些橄欖石中間包裹斜長石，且橄欖石的干涉色高，在交叉偏光下呈現多彩的顏色(圖 3-4)。斜長石大部分以雙晶生長，一小部分有環帶現象(zoning)(圖 3-5)。鈦鐵氧化物的顆粒較小，晶形主要呈現半自形~他形(圖 3-6)。另外輝石晶型也十分完整，呈現六角形，有一組明顯的解理，礦物邊緣有些微風化(圖 3-7)。在偏光顯微鏡下觀察全岩礦物組成，發現斜長石佔全岩比例達 45%、橄欖石佔 5%、輝石佔 1%以及鈦鐵氧化物佔 3%，氣孔孔洞約佔 20%，其他基質則為 26%(圖 3-8)。

3.1.2 全岩化學分析

利用原子吸收光譜儀(AAS PE3110)與分光光度計(UV1201)等方法，測定綠島安山岩全岩化學成分的主要元素與微量元素(表 3-1)。表中其他綠島全岩分析取自 Chen and Lin (1980)，皆屬第二期以阿眉山為噴發中心的火山岩，比對本實驗採樣地點周圍的岩性，發現岩性分析結果顯示略有差異。將鹼金屬對 SiO_2 作圖(Le Bas et al. 1986)(圖 3-9)，發現岩性範圍分佈很廣，可以從基性的玄武岩到中性的安山岩。本研究樣本落在玄武岩質安山岩(basaltic andesite)範圍內。



圖 3-1 綠島安山岩標本。新鮮外觀呈現深黑色，為多孔性。



圖 3-2 綠島安山岩光片

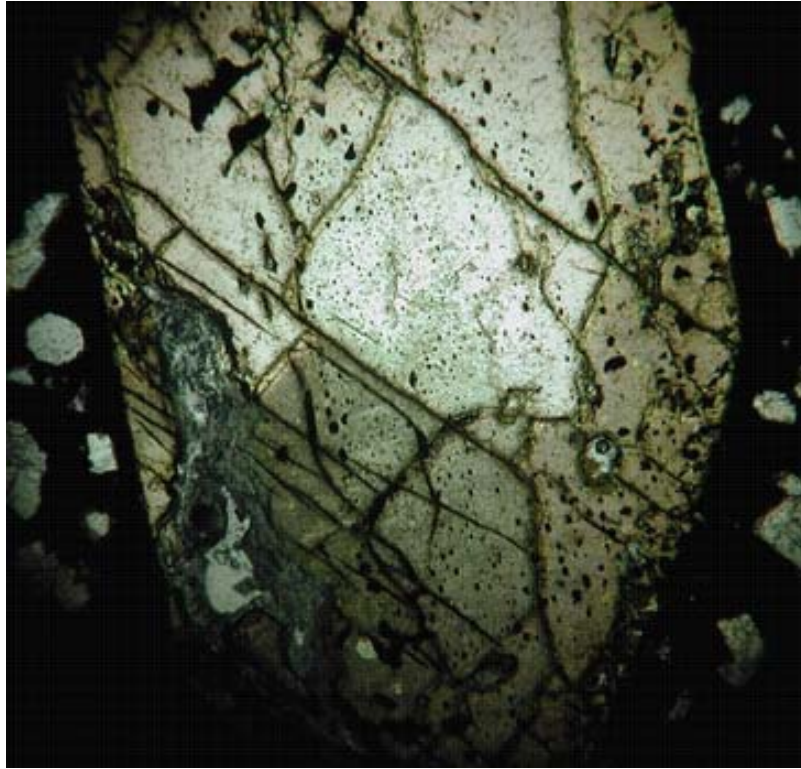


圖 3-4 照片內黑色不透光的礦物為鈦鐵氧化物 (正偏光, 倍率 50; 編號 LDS-01)。

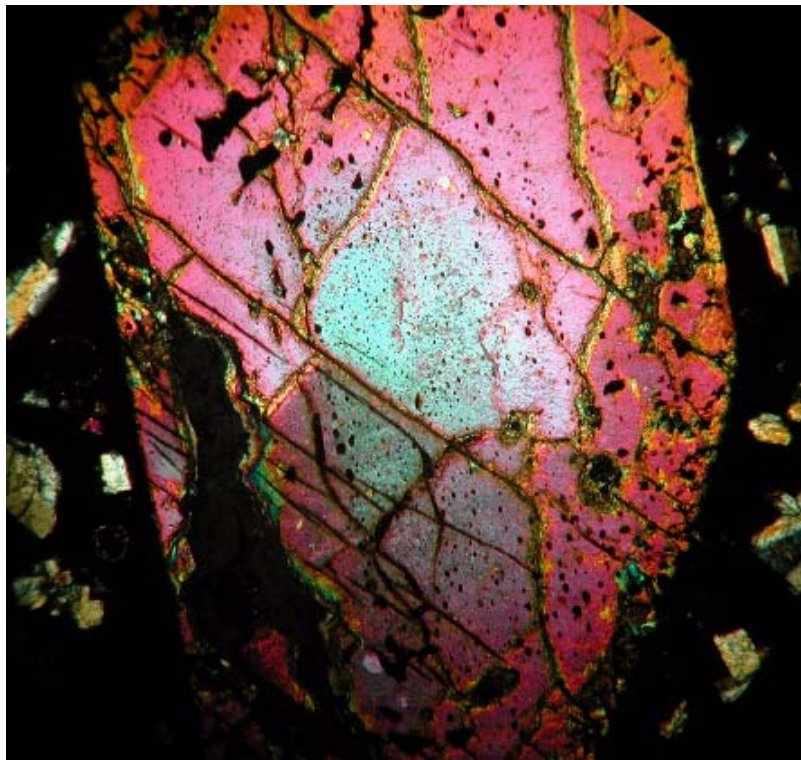


圖 3-3 綠島安山岩薄片中的橄欖石晶形完整, 周圍沒有明顯的反應邊緣。(交叉偏光, 倍率 50; 編號 LDS-01)

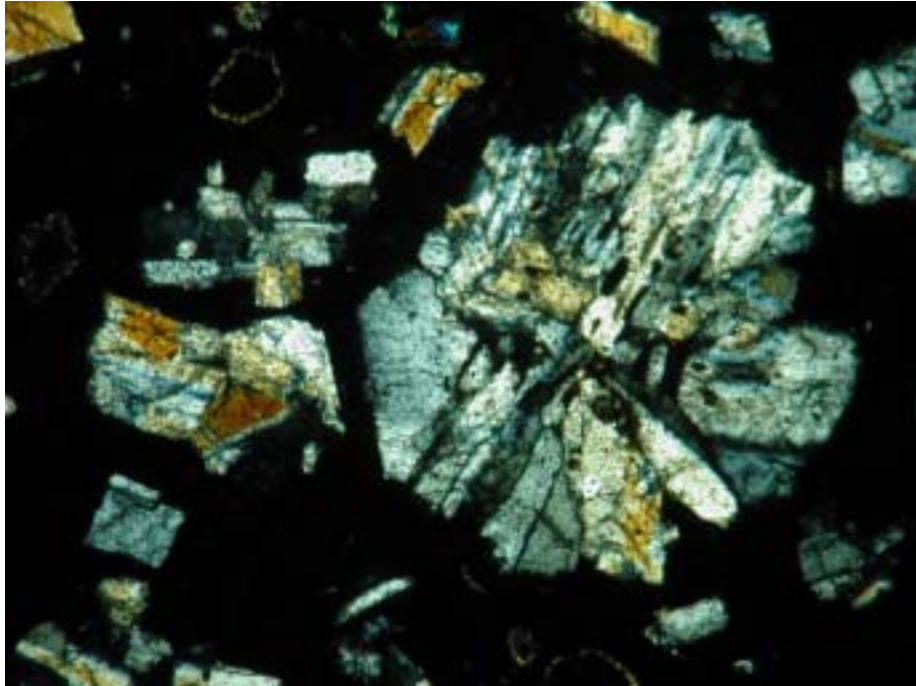


圖 3-5 斜長石大多以雙晶方式呈現，另外部分長石有環帶的現象(zoning)(交叉偏光，倍率 50；LDS-01)。

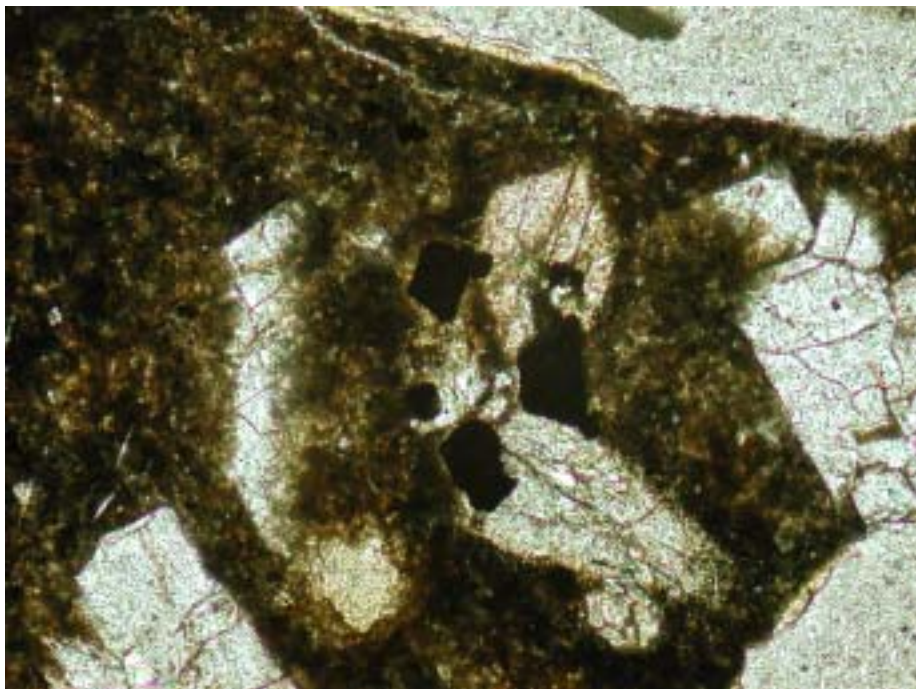


圖 3-6 鈦鐵氧化物晶形呈現半自形~他形，不透光 (正偏光，倍率 100；LDS-02)。

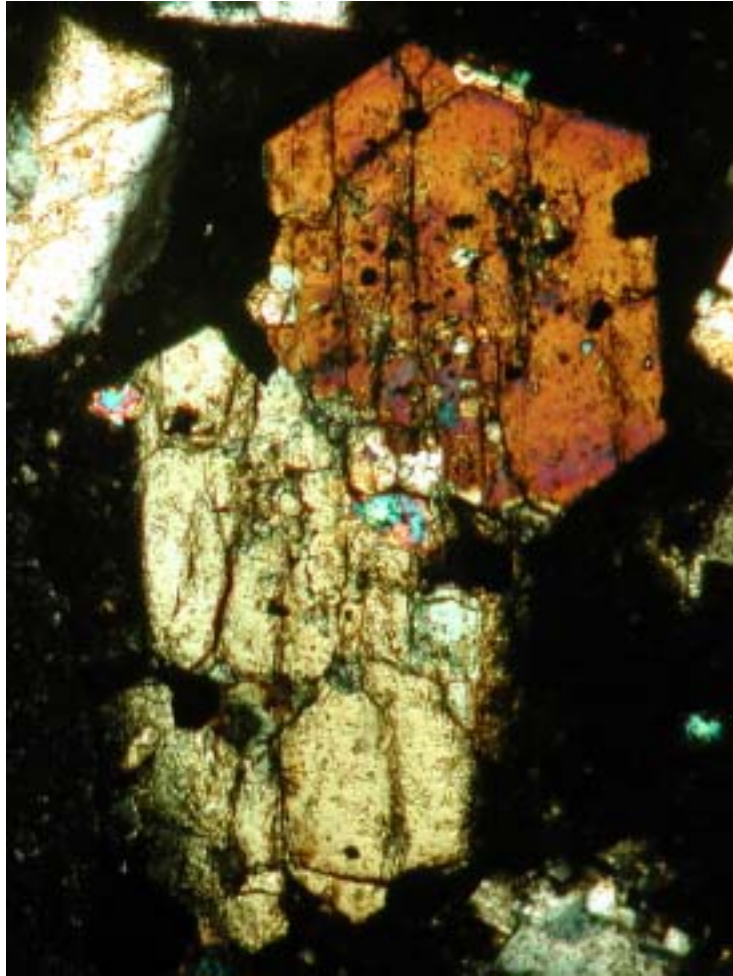


圖 3-7 輝石的晶形也十分完整，有些微風化的現象（交叉偏光，倍率 50；LDS-02）。

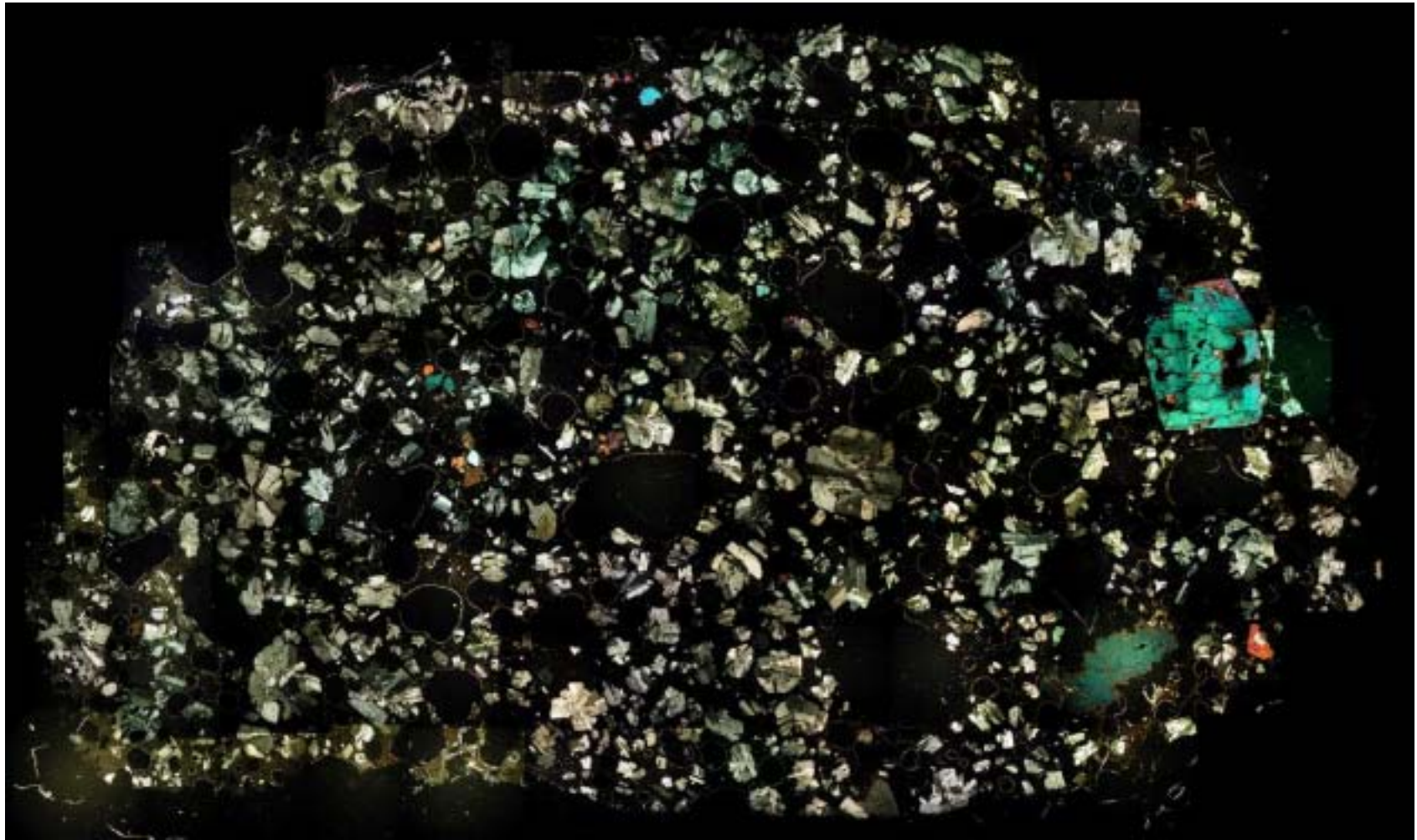


圖 3-8 編號 LDS-03 薄片，有橄欖石、輝石、斜長石及氧化物 (交叉偏光，倍率 8)。

表 3-1 綠島安山岩全岩化學成分表

Sample	本實驗		Chen and Lin (1980)			
	29	30	31	32	33	
Wt (%)						
SiO ₂	54.92	57.30	59.30	49.30	47.20	49.40
Al ₂ O ₃	18.49	16.35	14.50	16.90	14.90	15.25
ΣFeO	6.19	6.80	6.40	8.85	8.15	8.00
MgO	3.39	4.88	6.20	5.32	6.76	4.89
CaO	9.06	9.00	8.30	14.30	16.60	18.60
Na ₂ O	2.54	3.11	2.95	2.44	2.34	2.00
K ₂ O	0.81	1.12	0.40	0.46	0.22	0.23
TiO ₂	0.74	0.66	0.75	0.70	0.78	0.77
MnO	0.10	0.10	0.09	0.10	0.11	0.11
P ₂ O ₅	0.17	-	-	-	-	-
L.O.I	3.28	1.03	1.12	2.51	2.53	1.01
Total	99.69	100.35	100.01	100.88	99.59	100.26
CIPW Norm						
%An	63.04	50.96	50.18	63.95	78.25	76.29
Q	9.91	6.83	12.18	-	-	-
Il	1.41	1.25	1.42	1.33	1.48	1.46
Or	4.79	6.62	2.36	2.72	1.3	1.36
Ab	21.49	26.32	24.96	19.05	8.2	9.93
An	36.66	27.34	25.14	33.8	29.5	31.95
Di	5.98	14.29	13.11	30.88	43.45	50.1
Hy	15.78	16.67	19.71	-	-	-
Ol	-	-	-	9.73	6.84	0.66
Ap	0.39	-	-	-	-	-
Ne	-	-	-	0.86	6.28	3.79

1. ΣFeO 表示全鐵的含量
2. L. O. I.表示 Loss on ignition (燒失量)

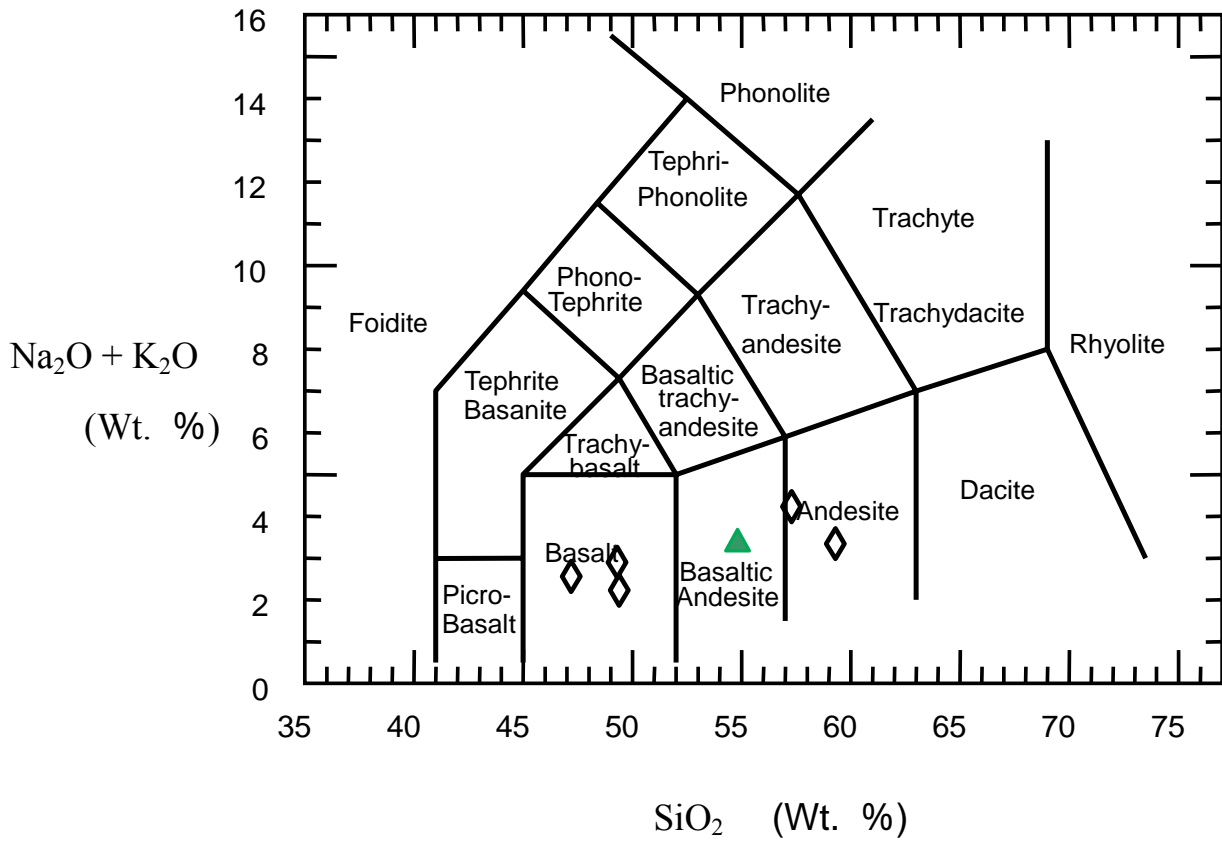


圖 3-9 依據 Le Bas et al.(1986), 全岩化學成分中 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 對 SiO_2 做圖(▲代表本研究; ◆代表 Chen and Lin, 1980)。雖然皆為第二期的噴發，但岩性範圍分布很廣，可以從基性的玄武岩到中性的安山岩。意味著同時期噴發的岩漿，岩性差異相當大，可能是結晶分化的結果或者是受到圍岩的混染所造成的。

3.2 實驗岩石學之研究

3.2.1 熱電偶之溫度校正

熱電偶之溫度校正實驗結果列如表 3-2，用透輝石標準液相溫度做為熱電偶的溫度校正，透輝石的液相溫度大家公認為 1395.3 (Biggar, 1972)，圖 3-10 為實驗合成的透輝石結晶。本實驗所使用之熱電偶測得透輝石液相溫度為 1399。所以熱電偶所測得的溫度都要減 4。

3.2.2 結晶順序與融熔區間

一大氣壓下實驗結果列如表 3-3，綠島安山岩質岩漿在一大氣壓下的結晶順序與溫度為：最先在 1351 晶出斜長石相，約在 1258 晶出鈦鐵氧化物相，至 1247 出現尖晶石相，最後約 1172 斜輝石相晶出(圖 3-11)。因此，本實驗在一大氣壓下的液相線溫度約在 1351，固相線溫度略低於 1164，融熔區間約為 190。

3.2.3 掃描式電子影像分析結果

一大氣壓下實驗結晶出的礦物相，藉由掃描式電子顯微鏡取得反射電子影像圖(BEI)，經由不同種類的礦物相會產生灰階的色差，作為初步不同礦物相的辨識。依照溫度由高至低排列，選擇不同的相加以分析，分述如下：圖 3-12 為溫度 1359 下的光片，只發現單一玻璃相存在；圖 3-13 為溫度 1339 下的光片，出現兩種灰階分別是玻璃與斜長石，晶出的斜長石呈現半自形到他形的結晶顆粒；圖 3-14 為溫度 1256 下的光片，其中的三種灰階分別是玻璃、斜長石與鈦鐵氧化物，鈦鐵氧化物相很多聚集成叢晶；圖 3-15 為溫度 1244 下的光片，其中的 4 種灰階分別是玻璃、斜長石、鈦鐵氧化物與尖晶石類，晶出的尖晶石類呈現半自形結晶顆粒，且四周皆為鈦鐵氧化物；

表 3-2 熱電偶以透輝石液相溫度為校正之實驗結果。

Run No.	Temp. ()	Duration (hrs:mins)	Phase(s)
DI-34	1435	2 : 00	透明(Glass)
DI-35	1413	1 : 30	透明(Glass)
DI-38	1404	1 : 05	透明(Glass)
DI-42	1400	0 : 45	透明(Glass)
DI-41	1398	0 : 40	乳白色(結晶)
DI-40	1395	0 : 50	乳白色(結晶)
DI-36	1393	0 : 47	乳白色(結晶)
DI-39	1381	2 : 10	乳白色(結晶)

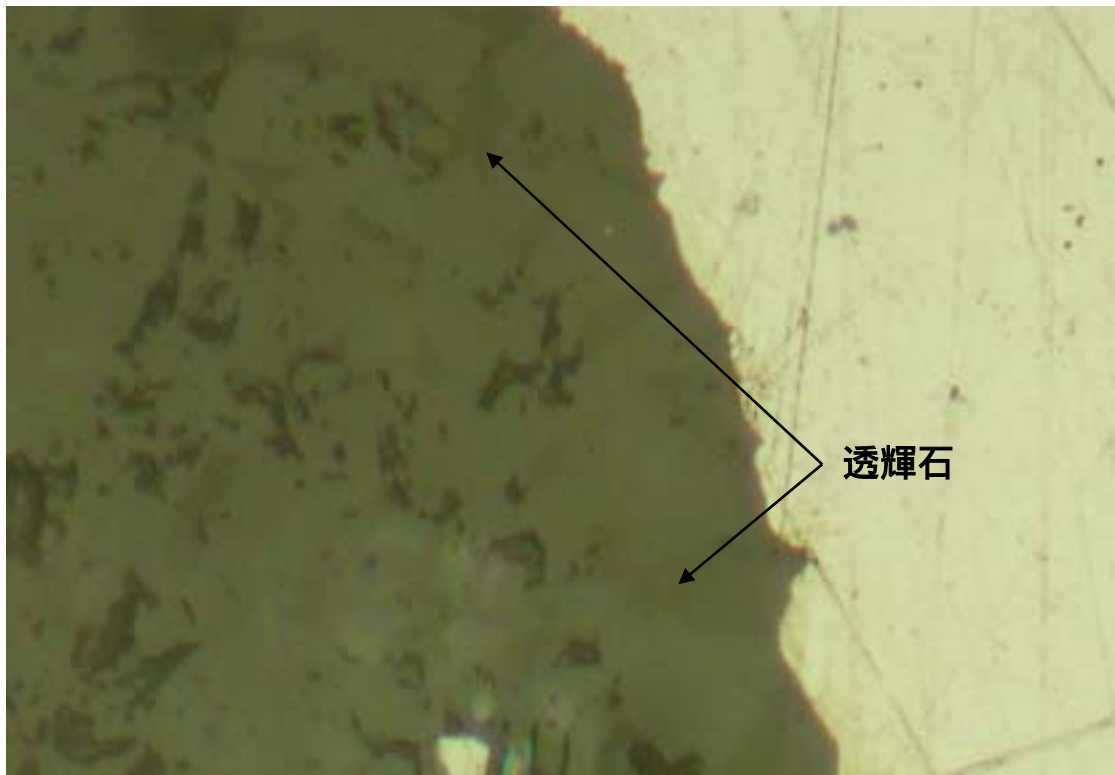


圖 3-10 光片中顏色較深的為透輝石。

表 3-3 一大氣壓下高溫實驗之結果

Run No.	Temp. ()	Duration (hrs:mins)	Phase(s)*
LD-40	1359	22 : 40	G1
LD-43	1355	22 : 00	G1
LD-38	1348	25 : 30	G1 + Pl
LD-39	1339	19 : 00	G1 + Pl
LD-26	1315	3 : 05	G1 + Pl
LD-11	1294	3 : 00	G1 + Pl
LD-12	1284	2 : 50	G1 + Pl
LD-02	1264	2 : 25	G1 + Pl
LD-44	1260	45 : 20	G1 + Pl
LD-14	1256	3 : 40	G1 + Pl + Ox
LD-48	1250	14 : 20	G1 + Pl + Ox
LD-07	1244	2 : 25	G1 + Pl + Ox + Sp
LD-22	1239	3 : 25	G1 + Pl + Ox + Sp
LD-15	1234	2 : 25	G1 + Pl + Ox + Sp
LD-24	1229	2 : 10	G1 + Pl + Ox + Sp
LD-03	1224	2 : 38	G1 + Pl + Ox + Sp
LD-23	1219	2 : 10	G1 + Pl + Ox + Sp
LD-16	1214	3 : 05	G1 + Pl + Ox + Sp
LD-25	1209	22 : 30	G1 + Pl + Ox + Sp
LD-08	1202	2 : 40	G1 + Pl + Ox + Sp
LD-27	1199	22 : 10	G1 + Pl + Ox + Sp
LD-17	1194	2 : 20	G1 + Pl + Ox + Sp
LD-28	1189	23 : 25	G1 + Pl + Ox + Sp
LD-04	1184	2 : 18	G1 + Pl + Ox + Sp
LD-29	1179	24 : 35	G1 + Pl + Ox + Sp
LD-18	1174	2 : 00	G1 + Pl + Ox + Sp
LD-30	1169	22 : 10	G1 + Pl + Ox + Sp + Cpx
LD-10	1164	2 : 15	G1 + Pl + Ox + Sp + Cpx

* G1 : Glass ; Ox : Fe -Ti Oxides ; Pl : Plagioclase ;
Sp : Spinel series ; Cpx : Clinopyroxene

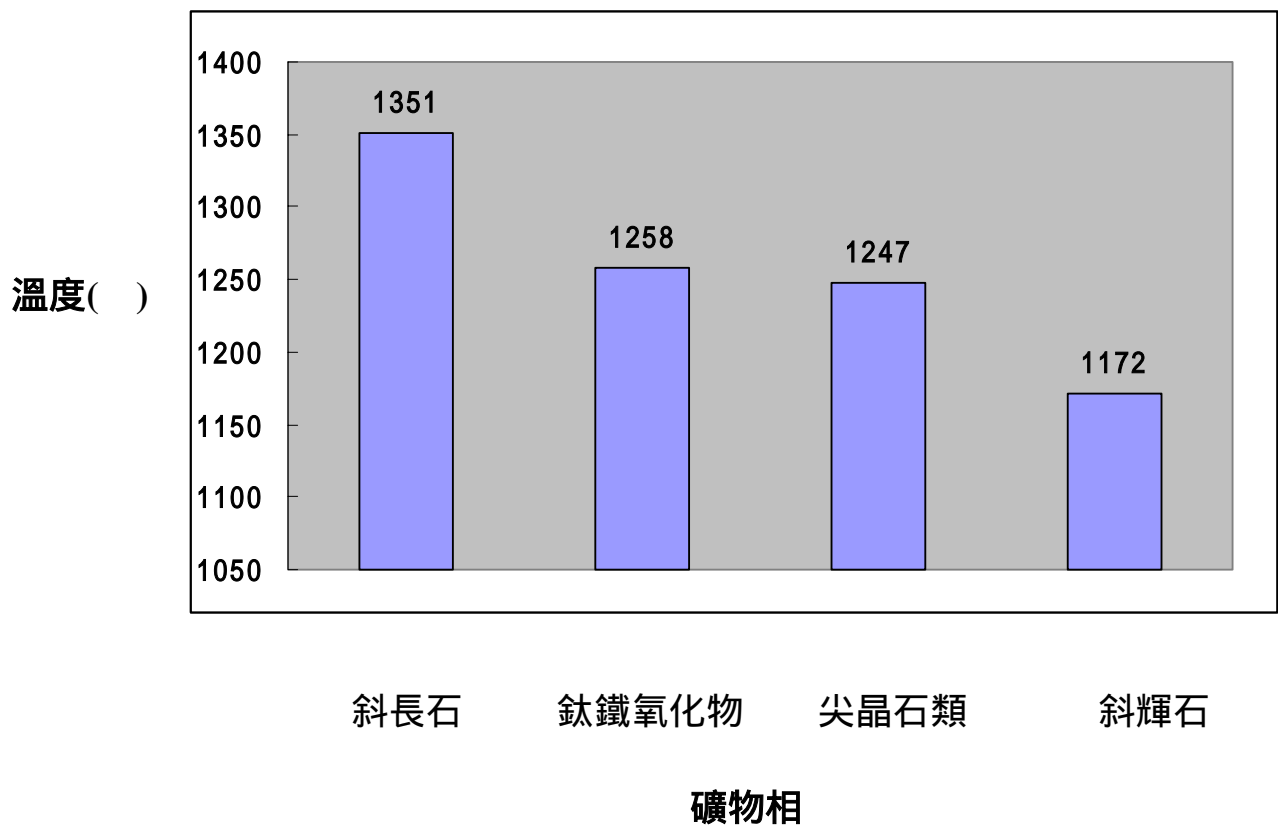


圖 3-11 綠島安山岩一大氣壓下合成之礦物結晶順序

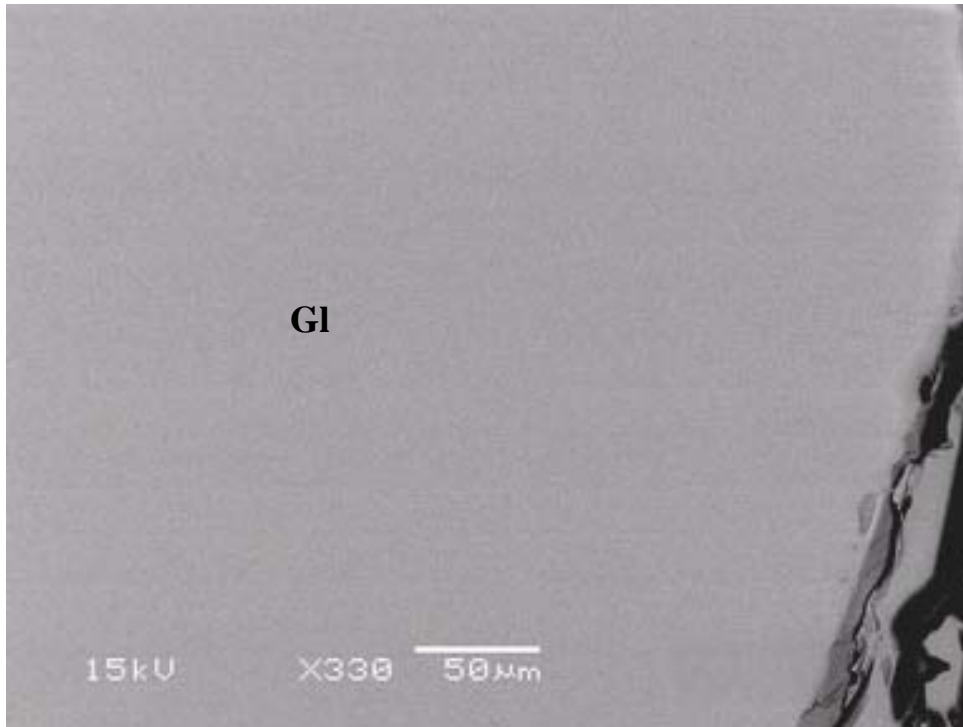


圖 3-12 實驗 LD-40 (1359)反射電子影像圖(BEI) ,
G1 代表玻璃。放大倍率為 330 倍。

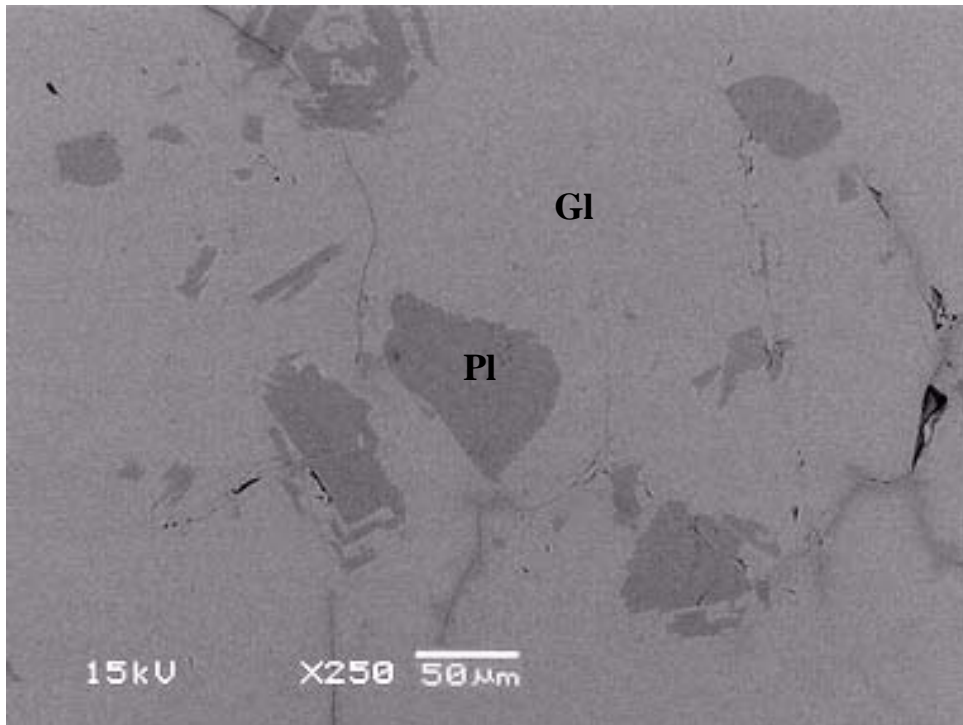


圖 3-13 實驗 LD-39 (1339)反射電子影像圖(BEI) , G1 代
表玻璃 , P1 代表斜長石。放大倍率為 250 倍。

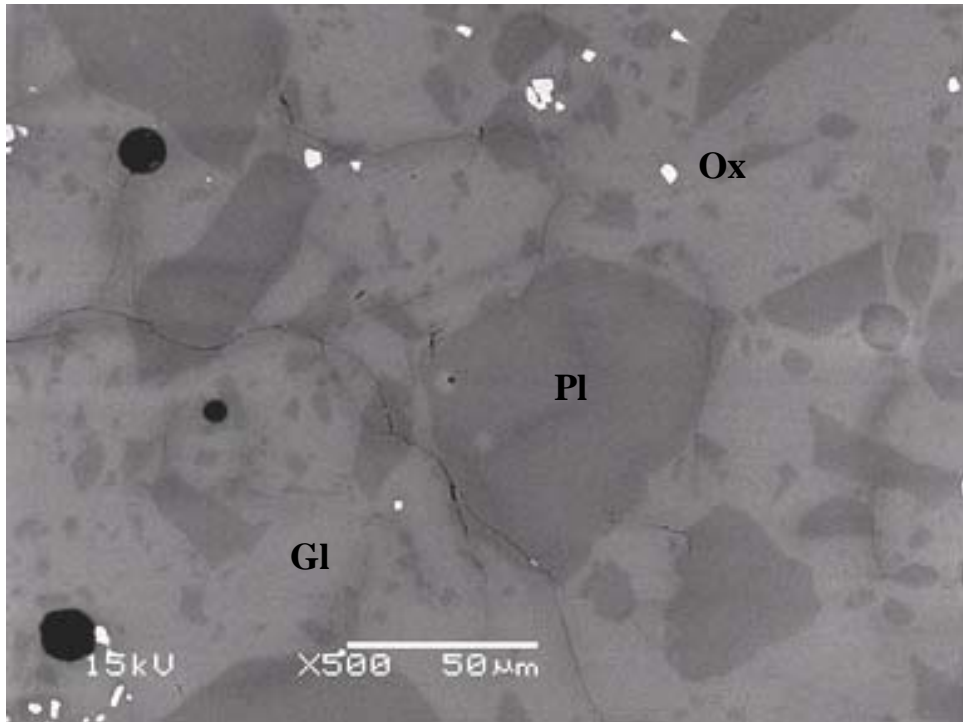


圖 3-14 實驗 LD-14 (1256)反射電子影像圖(BEI) , Gl 代表玻璃 , Pl 代表斜長石 , Ox 代表鈦鐵氧化物。放大倍率為 500 倍。

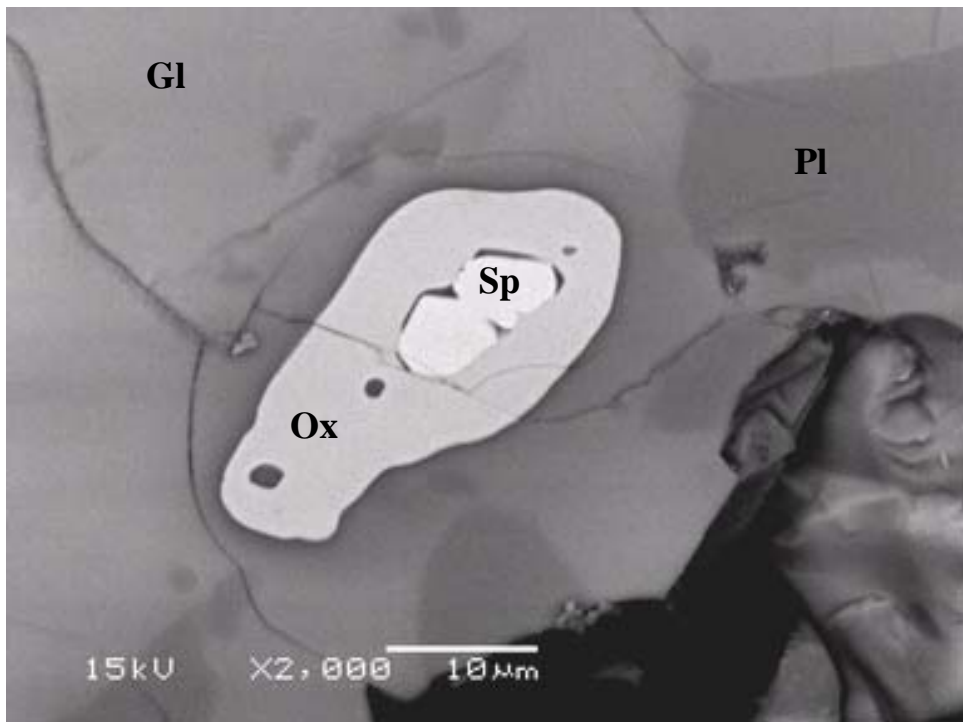


圖 3-15 實驗 LD-14 (1244)反射電子影像圖(BEI) , Gl 代表玻璃 , Pl 代表斜長石 , Ox 代表鈦鐵氧化物 , Sp 代表尖晶石類。放大倍率為 2000 倍。

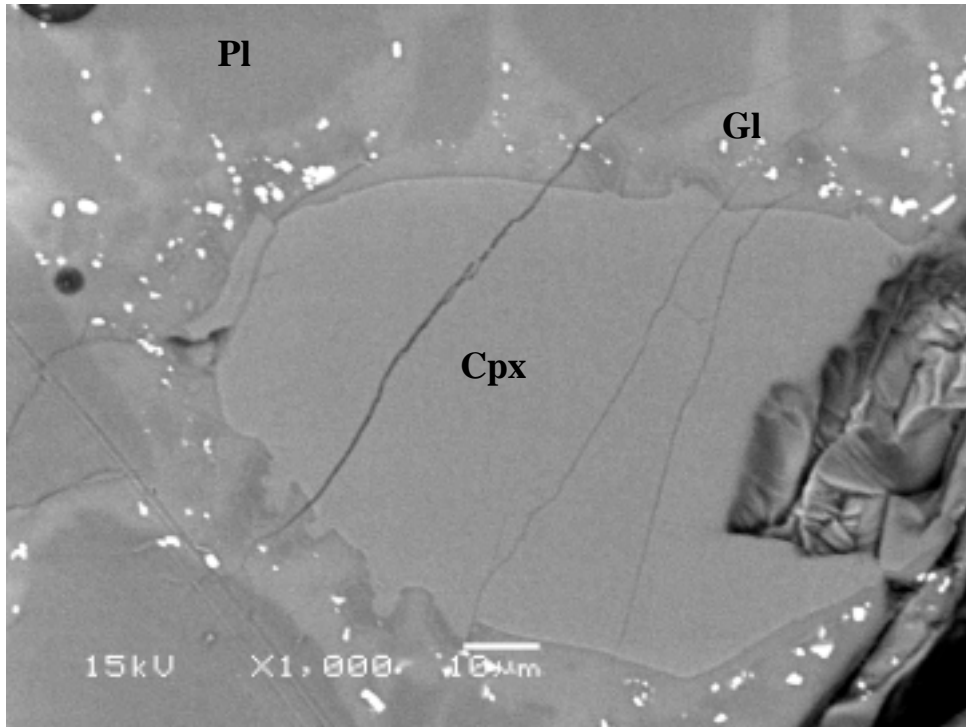


圖 3-16 實驗 LD-10 (1164)反射電子影像圖(BEI) , Gl 代表玻璃 , Pl 代表斜長石 , Cpx 代表斜輝石。放大倍率為 1000 倍。

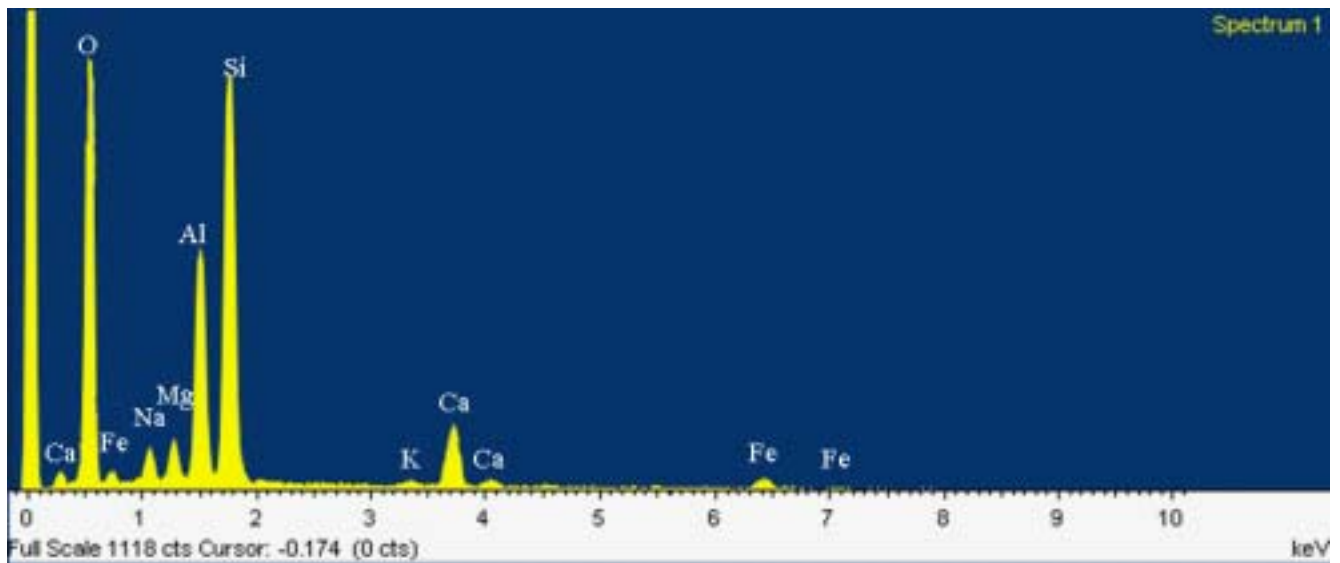


圖 3-17 玻璃相的代表性光譜分析，分析自 LD-40 (1359)。主要元素以矽、氧、鋁、鎂、鈣、鈉為主要成分。

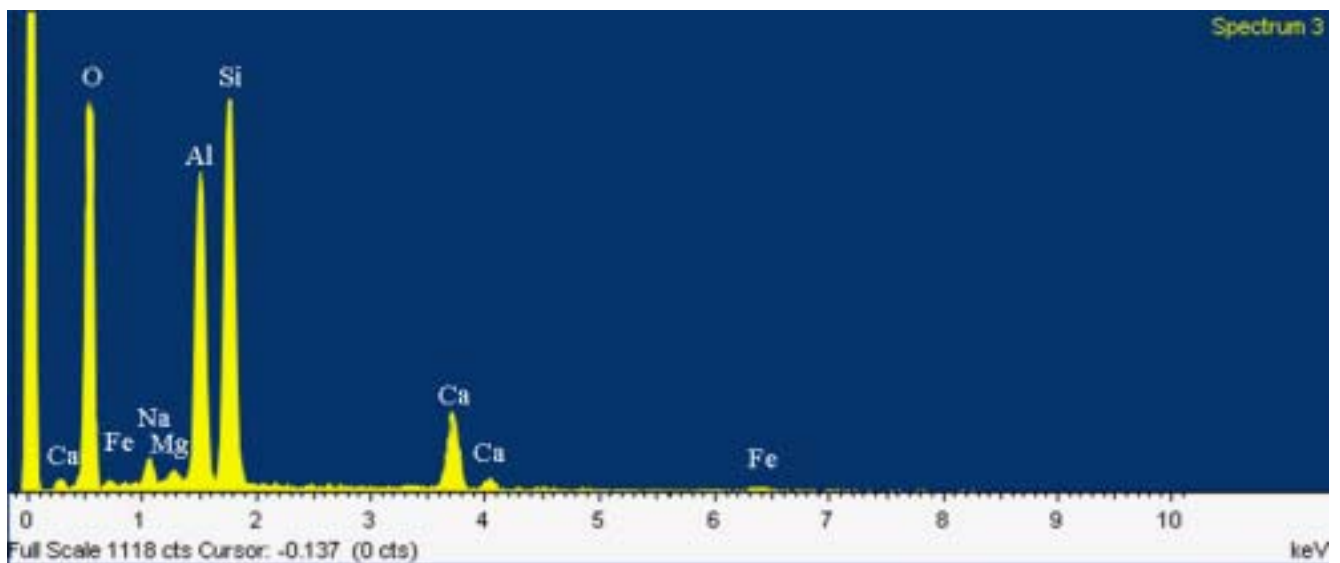


圖 3-18 斜長石相的代表性光譜分析圖，分析自 LD-07 (1244)。主要元素以 矽、氧、鋁、鈣、鈉、鎂為主，其中矽、氧、鎂含量降低，而鋁含量較玻璃高出許多。

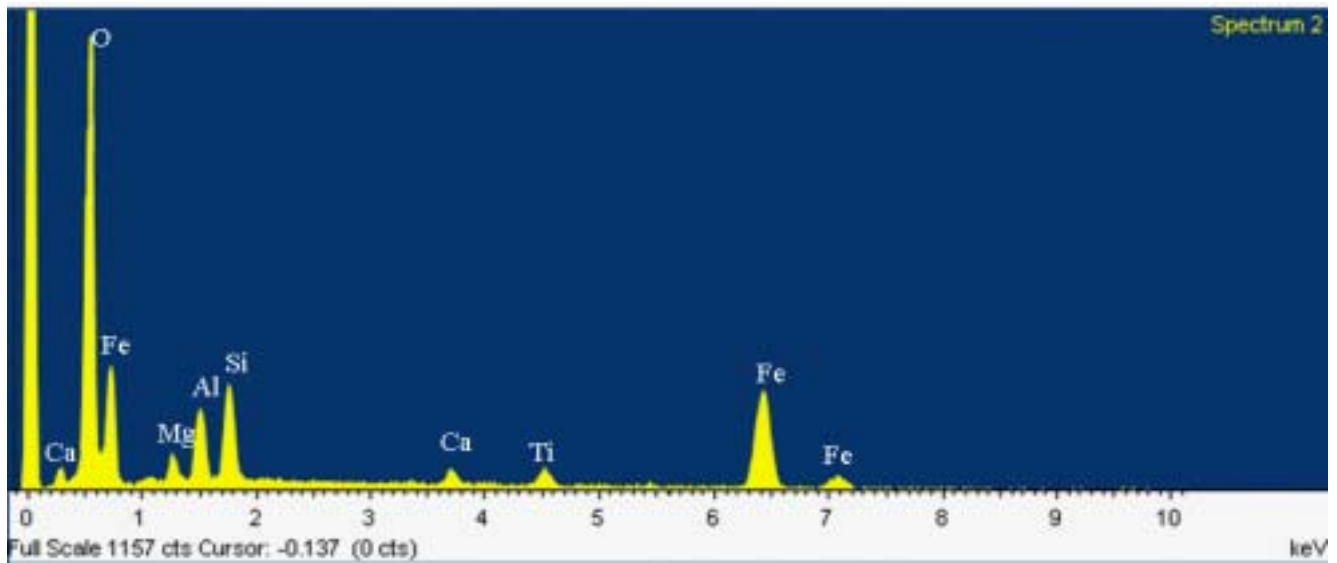


圖 3-19 鈦鐵氧化物相的代表性光譜分析圖，分析自 LD-14 (1256)。
 主要元素以氧、鈦、鐵為主。

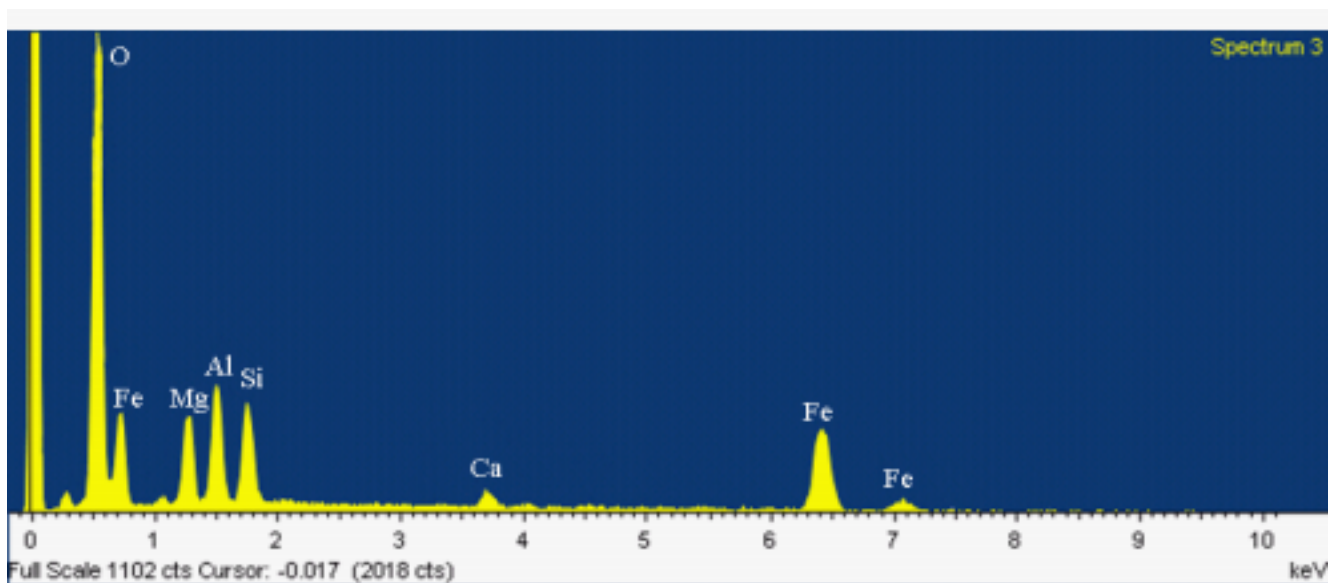


圖 3-20 尖晶石類相的代表性光譜分析圖，分析自 LD-07 (1244)。
 主要元素以氧、鋁、鐵、鎂為主與氧化物有明顯的差異。

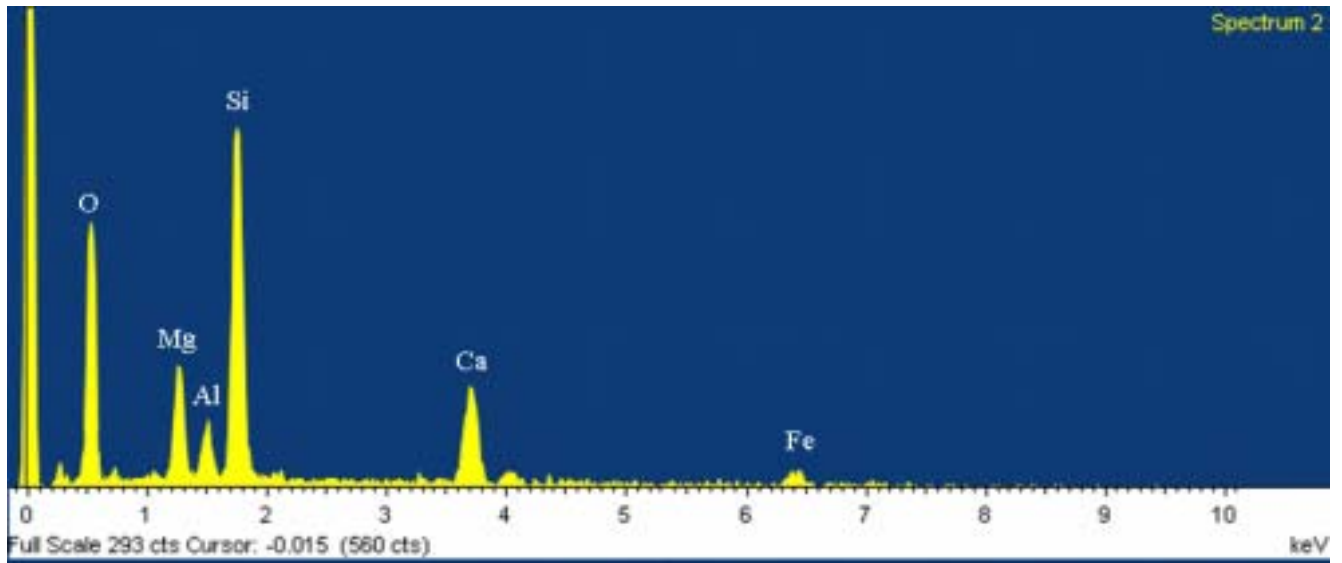


圖 3-21 斜輝石相的代表性光譜分析圖，分析自 LD-10 (1164)。主要元素以矽、氧、鎂、鈣、鐵、鋁、鐵為主。

圖 3-16 為溫度 1164 °C 下的光片，其中的 3 種灰階分別是玻璃、斜長石、斜輝石。一大氣壓下由高溫至低溫礦物結晶順序為：斜長石、鈦鐵氧化物、尖晶石類、斜輝石。

3.2.4 EDS 光譜圖分析結果

選取不同的礦物相，利用能量分散式光譜儀(EDS)分析，藉由各種礦物所含的元素量不同，得以辨別出不同種類的礦物。將分析出來的光譜圖疊加在一起互相比較，發現玻璃相(圖 3-17)的主要元素以矽、氧、鋁、鎂、鈣、鈉為標的；斜長石相(圖 3-18)的主要元素以矽、氧、鋁、鈣、鈉、鎂為主，其中矽、氧、鎂含量降低，而鋁含量較玻璃高出許多。鈦鐵氧化物(圖 3-19)的主要元素以氧、鈦、鐵為主。尖晶石類(圖 3-20)的主要元素以氧、鋁、鐵、鎂為主。斜輝石相(圖 3-21)的主要元素以矽、氧、鎂、鈣、鐵、鋁、鐵為主。

3.2.5 礦物化學

在不同的溫度條件下，礦物晶出的順序與岩漿演化過程有著極大的關連性，首先進行晶出礦物的化學成分分析與探討，針對斜長石、氧化物與尖晶石，了解在不同溫度下礦物成分的變化趨勢，以及殘餘岩漿的成分演變探討。依照結晶先後順序排列如下：

3.2.5.1 斜長石

一大氣壓下高溫實驗所晶出的斜長石，存在的溫度範圍很廣，屬於高溫下首先晶出的礦物。利用能量分散光譜 (EDS) 進行化學分析後(表 3-4)，顯示成份為 An 68 ~ 79 隨著溫度的降低 An 呈現減少的趨勢，而 Ab 增加(圖 3-22)，主要落在倍長石 (Bytownite, An 90 ~ 70) 的範圍內，Or 值很低小於 5。實驗中高溫所晶出的斜長石成份一部份涵蓋原岩的斜長石 (圖 3-23)。

表 3-4 合成之綠島安山岩斜長石化學成份表

Run No.	LD-39	LD-01	LD-12	LD-07	LD-03
Temp.()	1339	1306	1284	1244	1224
Avg. of	3	4	4	4	4
Wt. (%)					
SiO ₂	50.80(0.37) *	50.63(0.35)	49.30(0.25)	50.50(0.32)	49.60(0.32)
TiO ₂	0.38(0.14)	0.29(0.18)	0.14(0.13)	0.11(0.01)	0.26(0.10)
Al ₂ O ₃	32.24(0.26)	32.00(0.20)	31.24(0.14)	30.67(0.24)	31.48(0.22)
FeO	2.00(0.08)	2.39(0.16)	2.71(0.30)	2.16(0.22)	1.89(0.13)
MnO	0.16(0.19)	0.12(0.16)	0.06(0.07)	0.05(0.03)	0.00(0.08)
MgO	0.66(0.12)	0.70(0.07)	0.86(0.06)	0.73(0.19)	0.49(0.18)
CaO	16.29(0.23)	16.01(0.26)	15.52(0.18)	15.29(0.29)	15.83(0.22)
Na ₂ O	2.23(0.05)	2.11(0.18)	2.22(0.14)	2.39(0.16)	2.24(0.17)
K ₂ O	0.29(0.06)	0.29(0.06)	0.21(0.04)	0.22(0.09)	0.28(0.11)
P ₂ O ₅	0.00(0.00)	0.05(0.12)	0.20(0.09)	0.00(0.09)	0.00(0.00)
Cr ₂ O ₃	0.00(0.00)	0.00(0.00)	0.00(0.08)	0.00(0.07)	0.09(0.05)
Total	105.06	104.59	102.45	102.12	102.16
Cations per 8 Oxygens					
Si	2.236	2.229	2.170	2.223	2.183
Ti	0.013	0.010	0.005	0.004	0.008
Al	1.673	1.660	1.620	1.591	1.633
Cr	0.000	0.000	0.000	0.001	0.002
Fe	0.074	0.088	0.100	0.079	0.069
Mn	0.006	0.004	0.002	0.002	0.002
Mg	0.043	0.046	0.056	0.048	0.032
Ni	0.000	0.000	0.001	0.000	0.005
Ca	0.768	0.755	0.732	0.721	0.746
Na	0.190	0.180	0.189	0.204	0.191
K	0.016	0.016	0.012	0.012	0.016
Total	5.019	4.988	4.887	4.884	4.887
An	79	79	78	78	78
Ab	19	19	20	20	20
Or	2	2	1	1	2

* 括號內之數字為標準差

表 3-4(續) 合成之綠島安山岩斜長石化學成份表

Run No.	LD-25	LD-27	LD-29	LD-10
Temp.()	1209	1199	1179	1164
Avg. of	3	2	3	2
Wt. (%)				
SiO ₂	49.70(0.40)*	50.20(0.34)	49.62(0.28)	51.10(0.39)
TiO ₂	0.10(0.17)	0.18(0.01)	0.15(0.03)	0.54(0.13)
Al ₂ O ₃	31.82(0.19)	31.14(0.17)	28.83(0.17)	23.3(0.14)
FeO	1.98(0.10)	2.00(0.24)	2.59(0.23)	4.14(0.17)
MnO	0.02(0.01)	0.04(0.08)	0.00(0.11)	0.24(0.02)
MgO	0.75(0.09)	0.64(0.23)	0.93(0.02)	2.76(0.12)
CaO	16.18(0.13)	15.83(0.14)	13.42(0.23)	12.16(0.16)
Na ₂ O	2.45(0.17)	2.69(0.20)	2.73(0.14)	2.68(0.13)
K ₂ O	0.19(0.06)	0.26(0.02)	0.29(0.07)	0.72(0.12)
P ₂ O ₅	0.00(0.00)	0.01(0.04)	0.40(0.24)	0.74(0.07)
Cr ₂ O ₃	0.01(0.00)	0.22(0.02)	0.10(0.04)	0.00(0.04)
Total	103.20	103.22	99.06	98.36
Cations per 8 Oxygens				
Si	2.187	2.224	2.184	2.249
Ti	0.003	0.006	0.005	0.018
Al	1.651	1.615	1.495	1.209
Cr	0.000	0.004	0.020	0.000
Fe	0.073	0.074	0.095	0.152
Mn	0.001	0.001	0.000	0.009
Mg	0.049	0.042	0.061	0.181
Ni	0.010	0.000	0.00	0.001
Ca	0.7673	0.746	0.633	0.573
Na	0.209	0.230	0.233	0.229
K	0.011	0.015	0.016	0.040
Total	4.957	4.957	4.787	4.661
An	78	75	72	68
Ab	21	23	26	27
Or	1	1	2	5

* 括號內之數字為標準差

表 3-5 合成之綠島安山岩鈦鐵氧化物化學成份表

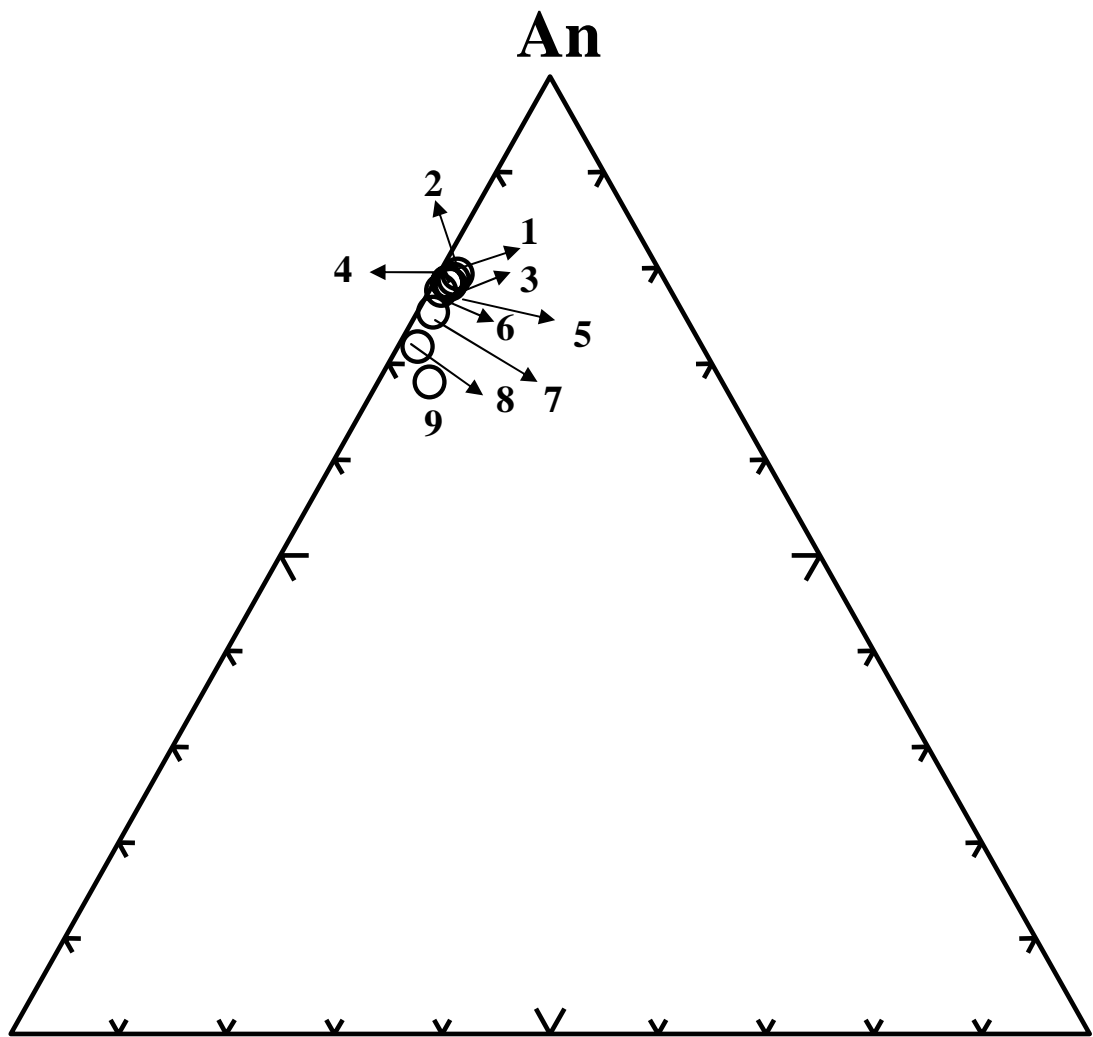
Run No.	LD-14	LD-22	LD-17	LD-29
Temp.()	1256	1239	1194	1179
Avg. of	2	6	4	2
Wt. (%)				
SiO ₂	9.78 (0.34) *	9.67(0.28)	10.53(0.22)	13.49(0.31)
TiO ₂	5.97(0.11)	6.41(0.24)	6.64(0.19)	7.02(0.23)
Al ₂ O ₃	7.19(0.10)	7.59(0.10)	6.93(0.02)	8.13(0.22)
FeO	54.57(0.86)	63.72(0.49)	55.96(0.54)	63.86(0.67)
MnO	0.00(0.01)	0.00 (000)	0.00(0.11)	0.55(0.20)
MgO	2.92(0.13)	2.98(0.02)	2.89(0.10)	3.31(0.09)
CaO	1.21(0.15)	1.87(0.12)	2.39(0.14)	2.71(0.08)
Na ₂ O	0.00(0.02)	0.00(0.02)	0.93(0.09)	1.06(0.13)
K ₂ O	0.00(0.01)	0.00(0.02)	0.20(0.07)	0.20(0.10)
Cr ₂ O ₃	0.01(0.06)	0.00(0.00)	0.07 (0.03)	0.00(0.00)
NiO	0.00(0.00)	0.00(0.00)	0.42(0.22)	0.02(0.00)
Total	81.65	92.24	86.96	100.35
Cations per 8 Oxygens				
Si	0.428	0.376	0.434	0.470
Ti	0.197	0.199	0.205	0.184
Al	0.370	0.348	0.336	0.334
Cr	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe	2.000	2.074	1.930	1.861
Mn	0.000	0.000	0.000	0.016
Mg	0.190	0.173	0.178	0.172
Ni	0.000	0.000	0.000	0.001
Ca	0.056	0.078	0.105	0.101
Na	0.000	0.000	0.059	0.072
K	0.000	0.000	0.000	0.009
Total	3.241	3.248	3.247	3.219

* 括號內之數字為標準差

表 3-6 合成之綠島安山岩尖晶石化學成份表

Run No.	LD-07	LD-03	LD-25	LD-27
Temp.()	1244	1224	1209	1199
Avg. of	2	2	5	3
Wt. (%)				
SiO ₂	12.86(0.19)*	13.28(0.13)	13.93 (0.09)	11.81(0.10)
TiO ₂	3.76(0.15)	0.98(0.08)	0.82(0.11)	3.34(0.06)
Al ₂ O ₃	9.41(0.16)	13.09(0.03)	13.04(0.12)	9.88(0.11)
FeO	60.82(0.27)	59.16(0.22)	54.83(0.23)	56.02(0.16)
MnO	0.43(0.00)	0.18(0.25)	0.61(0.11)	0.22(0.17)
MgO	8.83(0.29)	11.24(0.02)	12.30(0.13)	12.86(0.19)
CaO	2.67(0.13)	2.64(0.21)	3.04(0.19)	2.48(0.20)
Na ₂ O	0.81(0.00)	1.01(0.11)	0.93(0.09)	0.80(0.11)
K ₂ O	0.00(0.00)	0.24(0.01)	0.20(0.07)	0.34(0.04)
Cr ₂ O ₃	0.10(0.06)	0.00(0.01)	0.07(0.05)	0.17(0.04)
NiO	0.00(0.01)	0.48(0.14)	0.42(0.11)	0.25(0.10)
Total	99.69	102.30	100.18	98.18
Cations per 8 Oxygens				
Si	0.442	0.436	0.458	0.406
Ti	0.097	0.024	0.020	0.086
Al	0.380	0.506	0.506	0.400
Cr	0.003	0.000	0.002	0.005
Fe	1.751	1.623	1.509	1.610
Mn	0.012	0.005	0.017	0.007
Mg	0.453	0.550	0.604	0.659
Ni	0.000	0.013	0.011	0.007
Ca	0.098	0.093	0.107	0.091
Na	0.054	0.064	0.059	0.053
K	0.000	0.010	0.008	0.015
Total	3.290	3.324	3.301	3.339

* 括號內之數字為標準差



Ab

1 : 1339 ; 2 : 1306 ; 3 : 1284 ; 4 : 1244 ; 5 : 1224
 6 : 1209 ; 7 : 1199 ; 8 : 1179 ; 9 : 1164

圖 3-22 合成之斜長石成分分佈圖；

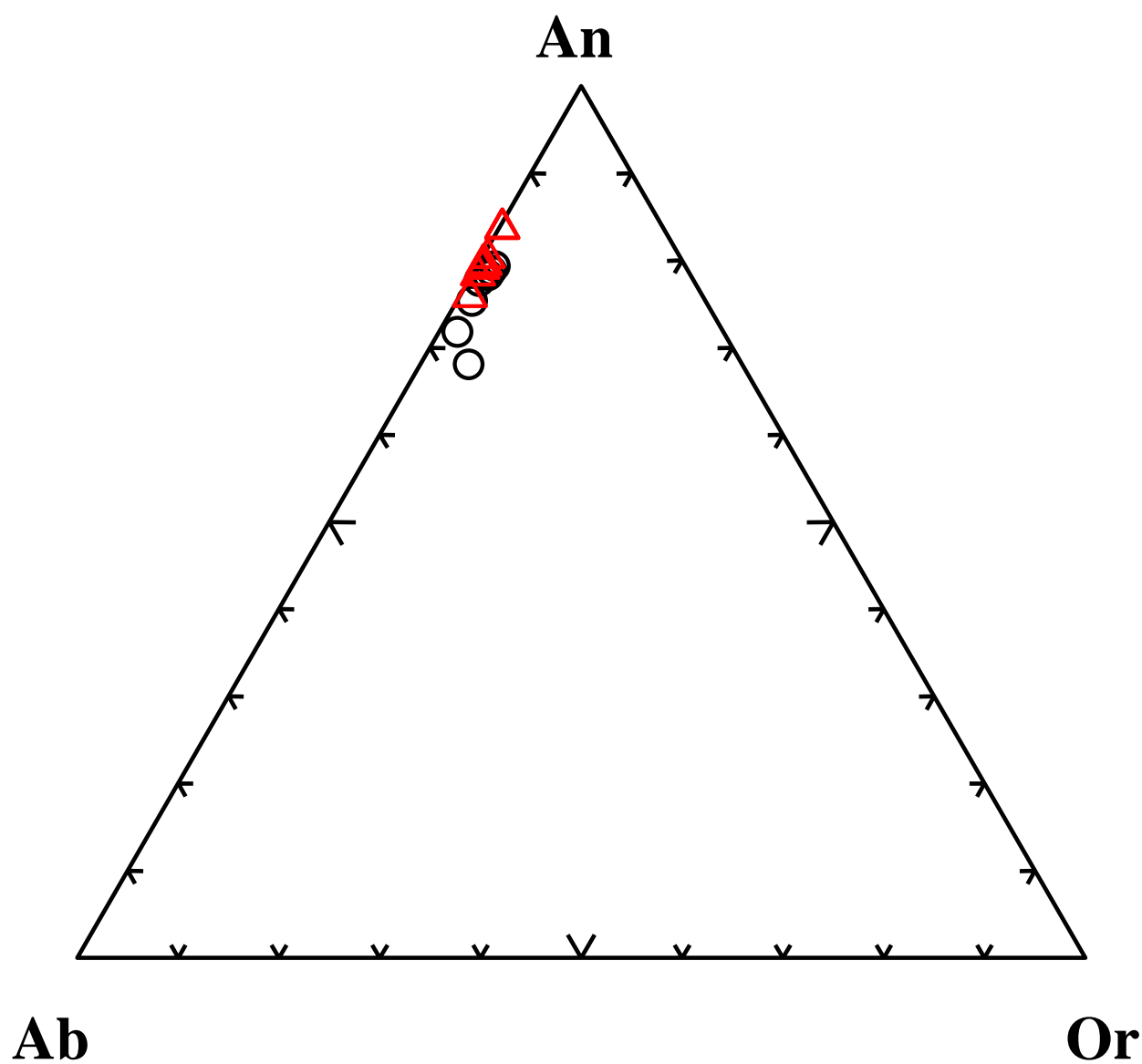


圖 3-23 為實驗之合成斜長石， 為原岩之斜長石成分，
原岩斜長石成分與實驗初期結晶的斜長石成份相近。

表 3-7 合成之綠島安山岩斜輝石化學成份表

Run No.	LD-30	LD-10
Temp.()	1169	1164
Avg. of	3	5
Wt(%)		
SiO ₂	51.09(0.53)*	50.50(0.24)
TiO ₂	0.45(0.03)	0.54(0.05)
Al ₂ O ₃	6.79(0.23)	6.46(0.21)
FeO	9.43(0.04)	8.12(0.07)
MnO	0.54(0.06)	0.00(0.02)
MgO	12.89(0.11)	13.22(0.09)
CaO	17.36(0.07)	20.69(0.12)
Na ₂ O	0.59(0.02)	0.53(0.01)
K ₂ O	0.31(0.02)	0.02(0.00)
P ₂ O ₅	0.00(0.00)	0.00(0.00)
Cr ₂ O ₃	0.07(0.01)	0.10(0.01)
Total	99.82	100.18
Cations per 6 Oxygens		
Si	1.892	1.865
Ti	0.013	0.015
Al	0.296	0.281
Cr	0.000	0.000
Fe	0.292	0.251
Mn	0.017	0.000
Mg	0.711	0.728
Ni	0.010	0.000
Ca	0.689	0.819
Na	0.042	0.038
K	0.015	0.001
Total	3.977	3.998
Wo	41	46
Fs	17	14
En	42	40

* 括號內之數字為標準差

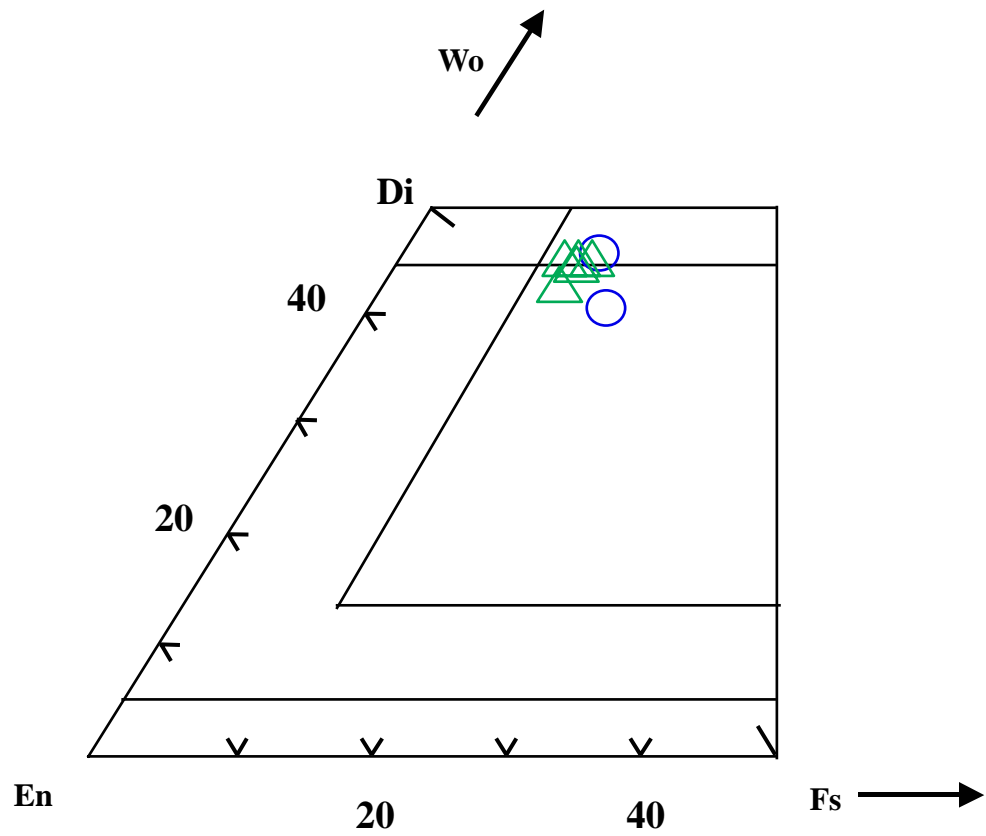


圖 3-24 輝石成分圖(Wo-En-Fs)。 為實驗之合成斜輝石，
為原岩之斜輝石成分。

3.2.5.2 鈦鐵氧化物

一大氣壓下高溫實驗所晶出的鈦鐵氧化物，氧化鈦值 5.97 ~ 7.02 之間。鈦鐵氧化物內的氧化鈦含量隨著溫度的降低皆有增加的趨勢，氧化鎂的值則介於 2.89 ~ 3.31 之間 (表 3-5)。

3.2.5.3 尖晶石

一大氣壓下高溫實驗所晶出的尖晶石，氧化鎂的值介於 8.83 ~ 12.86 之間，含量較上述的氧化物高出許多。隨著溫度的降低氧化鐵呈現減少的趨勢，而氧化鎂則隨著溫度降低而有增加的趨勢(表 3-6)。

3.2.5.4 橄欖石

一大氣壓下高溫實驗中未觀察到有橄欖石晶出，將殘餘岩漿依據 CIPW 計算，得知橄欖石(OI)為 0%，所以岩漿演化過程中橄欖石不易晶出。

3.2.5.4 輝石

一大氣壓下高溫實驗中觀察到有斜輝石晶出，主要落在次輝石與普通輝石的範圍內(表 3-7)，與原岩內斜輝石的成分相近(圖 3-24)。

3.3 綠島安山岩質岩漿之演化

3.3.1 安山岩質岩漿之演化

一大氣壓下實驗結果之玻璃化學成分列如表 3-8，將殘餘岩漿的

表 3-8 一大氣壓下玻璃成份表(Wt. %)

Run No.	LD-40	LD-39	LD-01	LD-12	LD-07
Temp.()	1359	1339	1306	1284	1244
Avg. of	4	3	3	5	4
Wt. (%)					
SiO ₂	52.24(0.38)*	51.70 (0.23)	52.10(0.33)	51.60(0.37)	52.40(0.31)
TiO ₂	0.49(0.01)	0.99(0.23)	0.84(0.05)	1.01(0.28)	0.82(0.12)
Al ₂ O ₃	23.19(0.42)	21.95(0.38)	21.02(0.37)	20.09(0.19)	18.59(0.17)
FeO	6.01(0.18)	6.27(0.20)	7.50(0.09)	7.20(0.29)	7.98(0.20)
MnO	0.17(0.04)	0.00(0.00)	0.11(0.04)	0.08(0.03)	0.26(0.01)
MgO	3.42(0.20)	3.55(0.09)	4.00(0.11)	4.22(0.24)	4.68(0.17)
CaO	11.55(0.15)	11.14(0.25)	10.50(0.26)	10.34(0.13)	9.68(0.14)
Na ₂ O	2.91(0.06)	2.78(0.22)	2.95(0.19)	3.08(0.11)	2.91(0.13)
K ₂ O	0.66(0.16)	0.85(0.17)	0.84(0.05)	0.82(0.07)	0.96(0.02)
P ₂ O ₅	0.53(0.19)	0.67(0.27)	0.77(0.15)	0.49(0.24)	0.32(0.05)
Cr ₂ O ₃	0.18 (0.06)	0.00(0.00)	0.00(0.00)	0.07(0.02)	0.00(0.00)
Total	101.34	99.90	100.64	99.01	98.59
C.I.P.W. Norm					
%An	66.22	65.62	62.52	59.68	58.58
Q	0.91	1.80	0.88	0.24	1.11
Il	0.93	1.88	1.60	1.92	1.56
Or	3.90	5.02	4.96	4.85	5.67
Ab	24.62	23.52	24.96	26.06	24.62
An	48.26	44.90	41.63	38.57	34.83
Di	4.64	4.97	4.53	7.91	9.24
Hy	16.59	16.25	20.29	18.22	20.84
Ol	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ap	1.23	1.55	1.78	1.14	0.74
Cm	0.27	0.00	0.00	0.10	0.00
Mg#	50	50	49	51	51

* 括號內之數字為標準差

* $Mg\# = Mg / (Mg + Fe) \times 100$

表 3-8(續) 一大氣壓下玻璃成份表(Wt. %)

Run No.	LD-03	LD-25	LD-27	LD-29	LD-10
Temp.()	1224	1209	1199	1179	1164
Avg. of	2	4	5	3	4
Wt. (%)					
SiO ₂	52.40(0.37)*	53.80(0.48)	54.80(0.48)	53.23(0.51)	52.20(0.19)
TiO ₂	1.24 (0.24)	1.09(0.08)	0.78(0.13)	0.71(0.06)	0.91(0.11)
Al ₂ O ₃	18.42(0.08)	17.46(0.30)	17.39(0.34)	21.37(0.34)	20.24(0.42)
FeO	7.90(0.27)	6.99(0.26)	6.81(0.28)	4.78(0.14)	6.67(0.24)
MnO	0.26(0.23)	0.18(0.08)	0.11(0.01)	0.11(0.04)	0.16(0.02)
MgO	4.71(0.10)	4.71(0.42)	4.11(0.23)	3.49(0.00)	3.79(0.35)
CaO	9.14(0.20)	9.13(0.22)	8.99(0.25)	11.15(0.42)	10.72(0.37)
Na ₂ O	3.16(0.27)	3.31(0.17)	3.16(0.11)	2.95(0.23)	2.52(0.43)
K ₂ O	1.07(0.01)	1.08(0.08)	1.14(0.25)	0.82(0.14)	0.75(0.07)
P ₂ O ₅	0.67(0.12)	0.88(0.07)	1.05(0.11)	0.54(0.12)	0.30(0.08)
Cr ₂ O ₃	0.13(0.05)	0.05(0.08)	0.12(0.10)	0.00(0.07)	0.06(0.01)
Total	99.09	98.68	98.46	99.15	98.32
C.I.P.W. Norm					
%An	55.18	51.38	52.79	63.08	66.17
Q	1.10	3.30	6.17	3.75	3.95
Il	2.36	2.07	1.48	1.35	1.73
Or	6.32	6.38	6.74	4.85	4.43
Ab	26.74	28.01	26.74	24.96	21.32
An	32.92	29.59	29.90	42.65	41.70
Di	6.68	8.22	6.51	7.54	7.92
Hy	21.24	18.99	18.32	12.78	16.49
Ol	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ap	1.55	2.04	2.43	1.25	0.70
Cm	0.19	0.07	0.18	0.00	0.09
Mg#	52	55	52	57	50

* 括號內之數字為標準差

* $Mg\# = Mg / (Mg + Fe) \times 100$

Oxides (Wt.%)

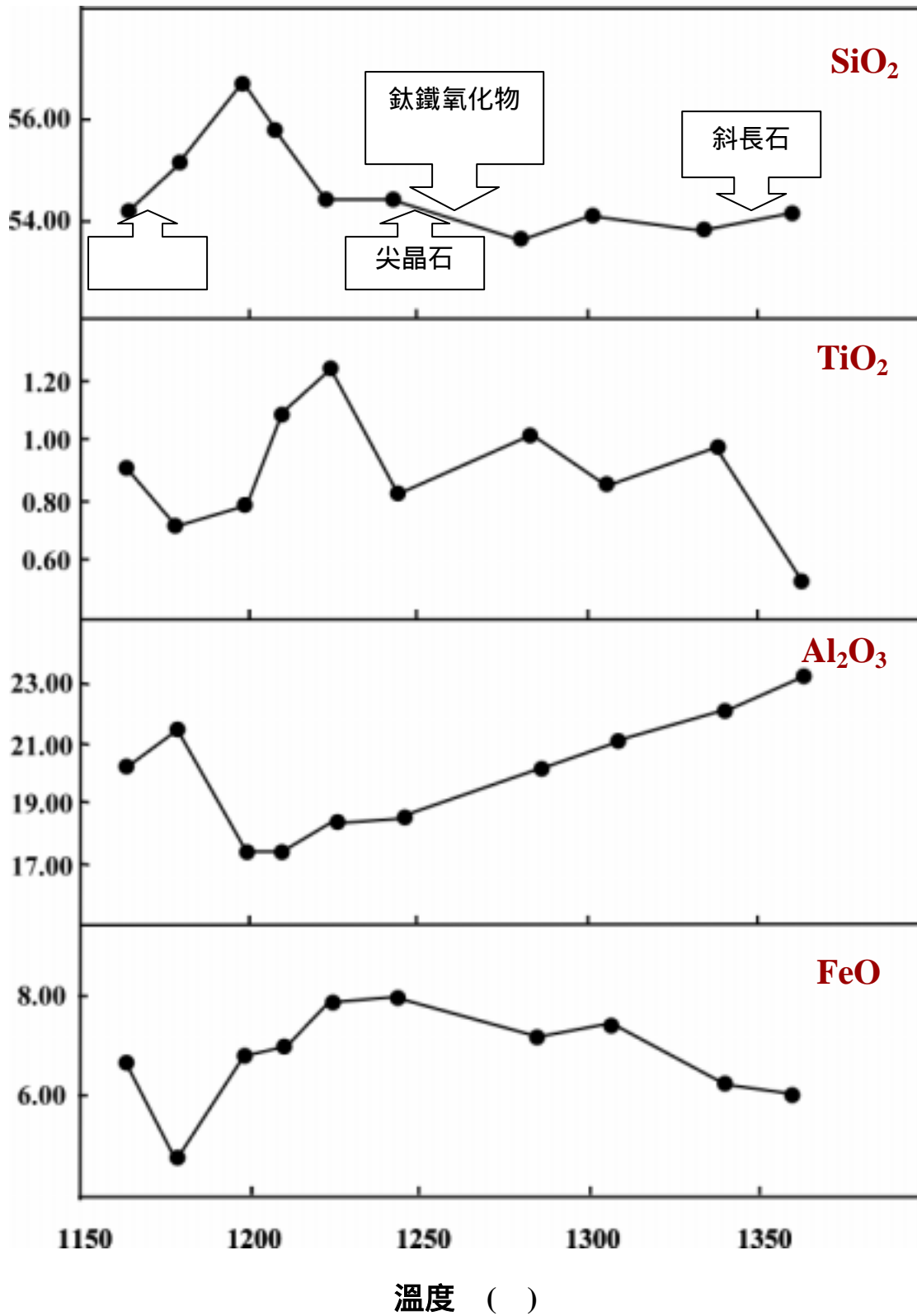


圖 3-25 一大氣壓下玻璃成分隨溫度的變化趨勢

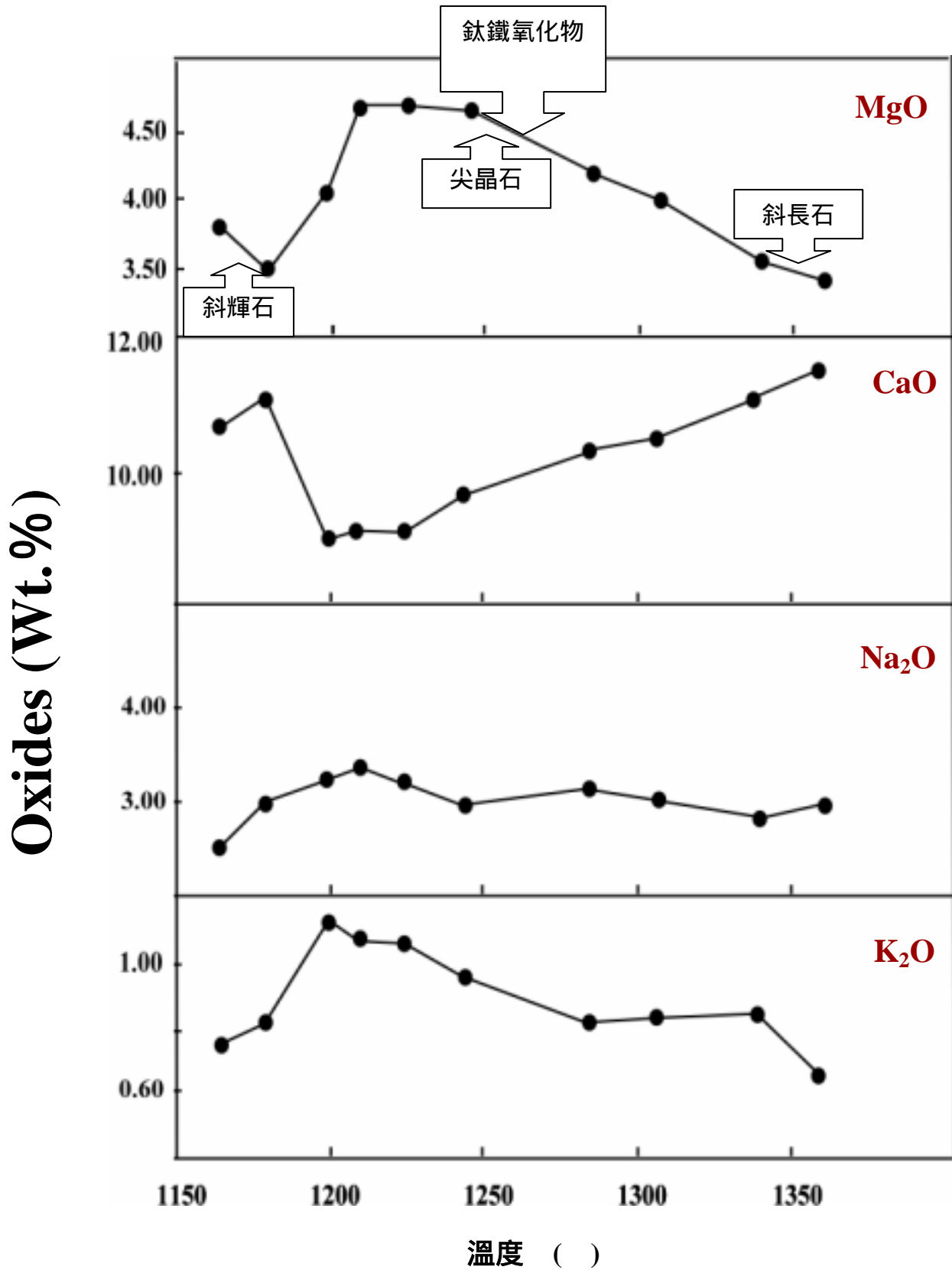


圖 3-25 (續) 一大氣壓下玻璃成分隨溫度的變化

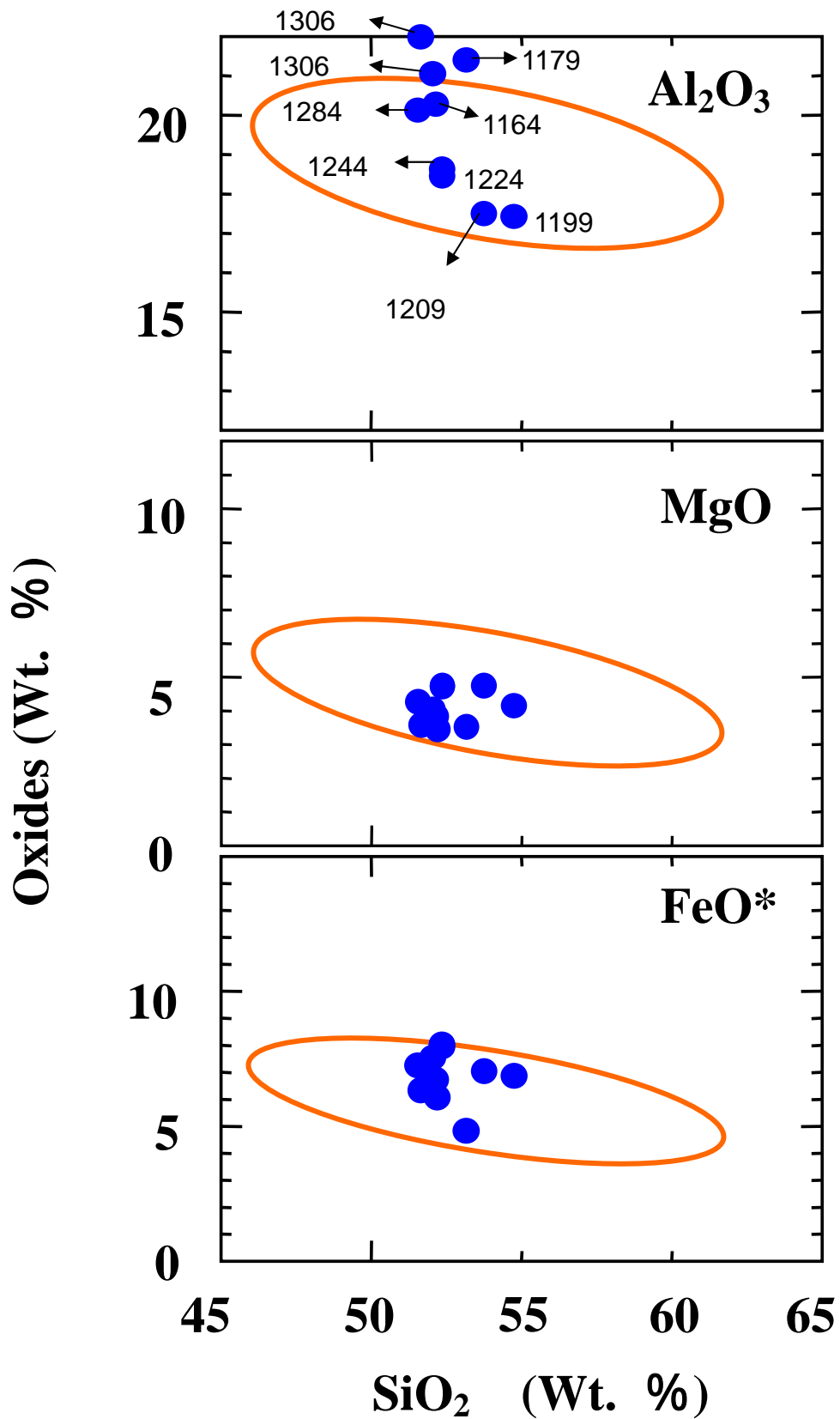


圖 3-26 一大氣壓下實驗之殘餘岩漿成份。大圓圈代表綠島火山岩之成分分布範圍(取自 Chen and Lin , 1980)； 本實驗結果。

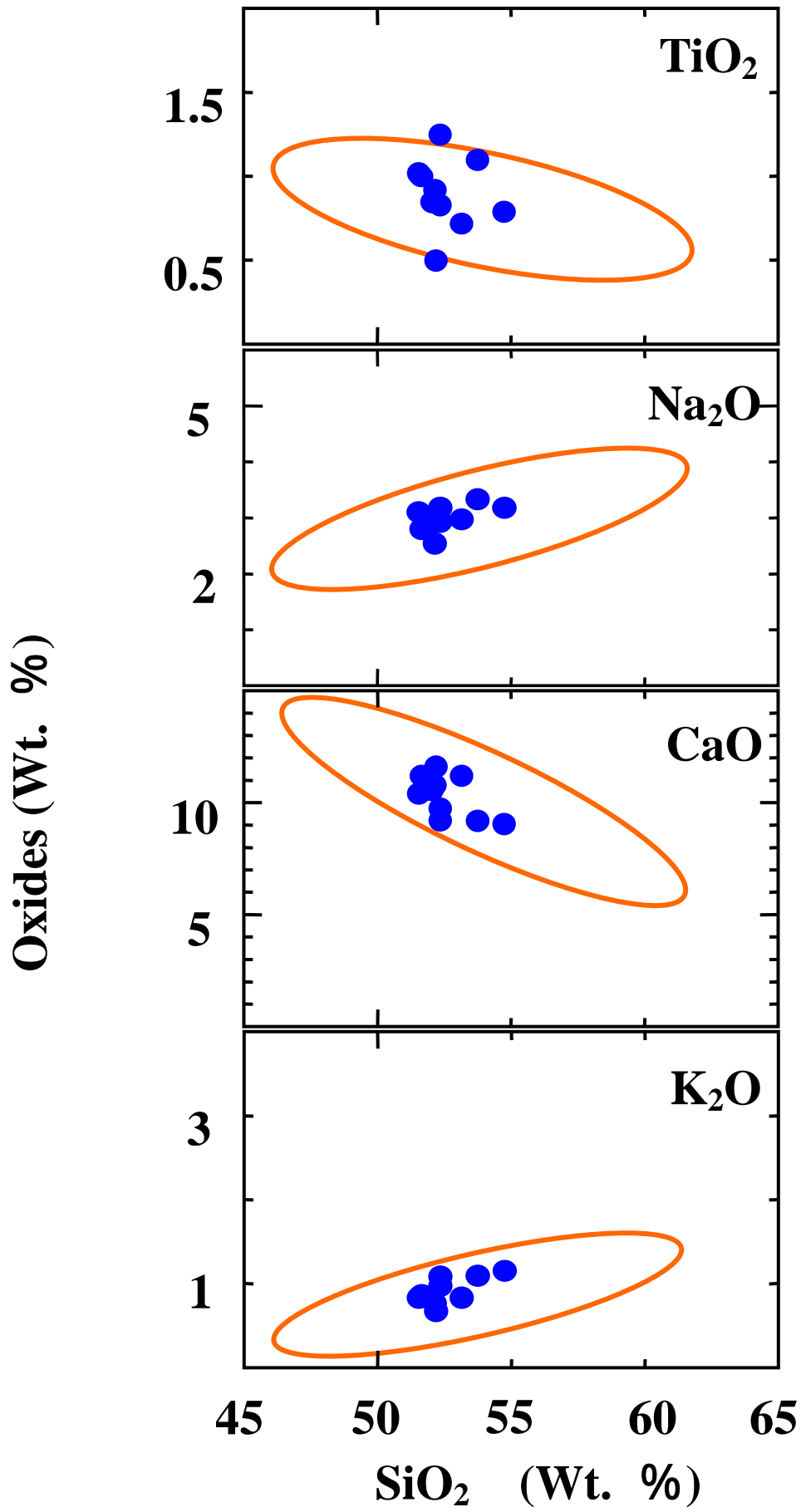


圖 3-26(續) 一大氣壓下實驗之殘餘岩漿成份之哈克圖

各種氧化物成分對溫度作圖(圖 3-25), 得知隨著溫度的降低, 氧化矽、氧化鈉、氧化鉀含量有上升的趨勢; 相對的氧化鋁、氧化鈣隨著溫度降低而有下降的趨勢。在 1354 當斜長石晶出, 大量的消耗岩漿中的鈣、鋁元素, 造成殘餘岩漿中的氧化鈣、氧化鋁含量降低, 相對的岩漿中氧化鈉及氧化鉀含量上升。氧化鈦、氧化鐵在 1359 ~ 1247 有升高的趨勢, 然而溫度持續降低超過 1248 則含量開始有減少的趨勢, 因為在 1258 、 1248 分別有鈦鐵氧化物與尖晶石礦物的晶出, 這兩者皆在結晶過程中會抓取岩漿中的鈦元素、鐵元素, 使得這些元素在岩漿中的含量減少。氧化鎂含量在 1259 ~ 1248 隨溫度降低而升高, 由於尖晶石的晶出會消耗掉一部份的鎂元素, 導致 1248 之後氧化鎂含量呈現緩降的趨勢。

3.3.2 哈克圖

氧化矽的含量是結晶分化中重要的參考指標, 一般而言, 當溫度逐漸降低, 而岩漿中的 SiO_2 值會有上升的趨勢。殘餘岩漿中的各氧化物會隨著不同礦物相的晶出而有所改變。在一大氣壓下殘餘岩漿中隨著 SiO_2 值上升, K_2O 與 Na_2O 往增加的趨勢演化, 而 CaO 與 Al_2O_3 則朝向減少的趨勢演化(圖 3-26)。以整體而言, 本實驗所做得結果大部分與綠島火成岩(Chen and Lin, 1980)結晶分化趨勢吻合, 且實驗分析數據皆落在綠島結晶分化範圍中間的部份, 故表示實驗的結果模擬出綠島岩漿結晶分化的中段, 可推論綠島岩漿可藉由結晶分化所生成。Bowen (1928) 所提出如果早期晶出的礦物, 不與殘餘岩漿繼續進行反應。剩餘的岩漿持續進行這種作用, 可以使早期玄武岩質岩漿, 因結晶分化的結果, 有逐漸往酸性的熔體演化的趨勢。本實驗的結果也是趨向酸性(SiO_2 增加)的方向演化。

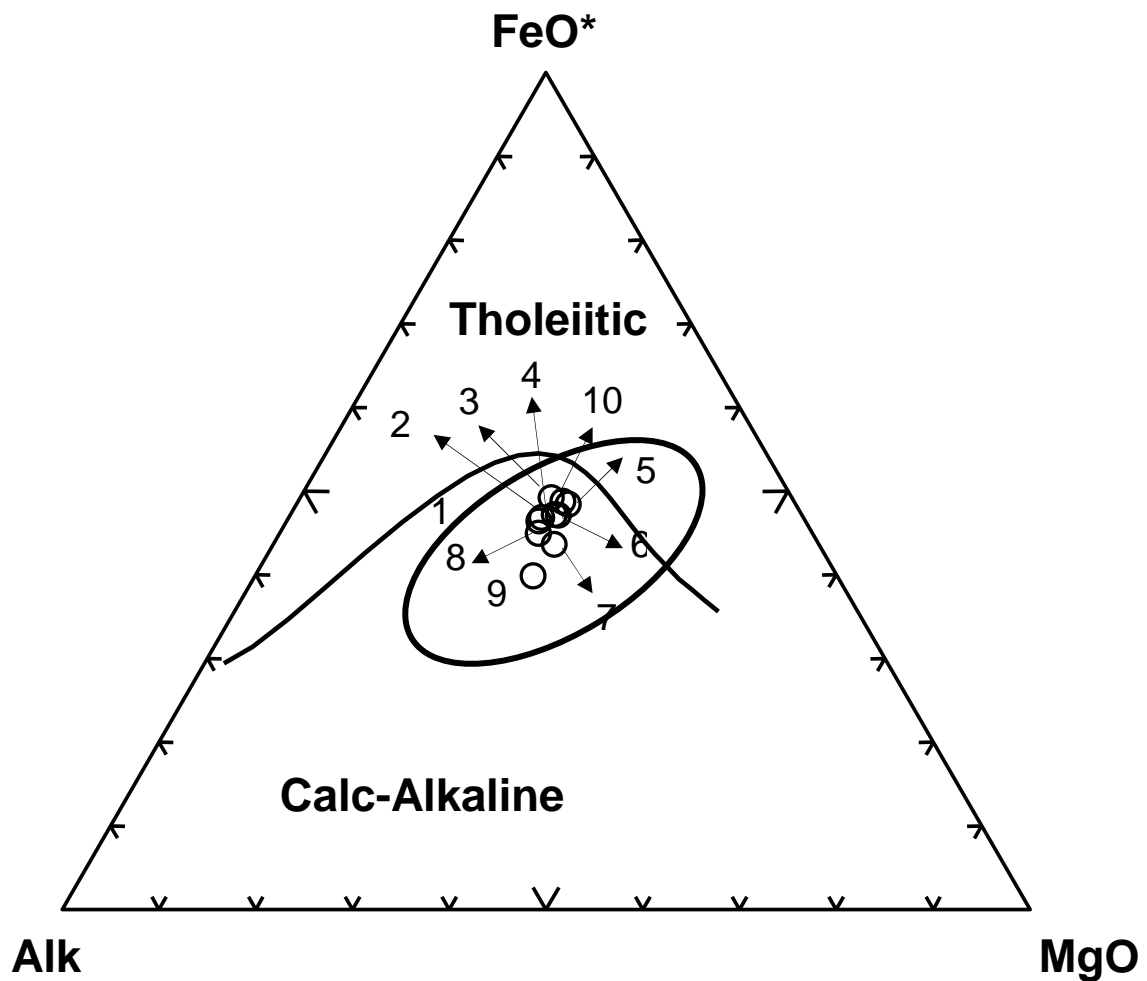


圖 3-27 一大氣壓下殘餘岩漿成分之 AFM 圖。綠島地區火山岩主要分佈在鈣鹼岩系列，只有一小部份在矽質玄武岩系列，圖中綠島的變化有明顯的結晶分化趨勢。本實驗主要分佈在岩漿中段的位置。大範圍為 Chen and Lin (1980)，為實驗的殘餘岩漿成分 (邊界依據 Macdonald and Katsura, 1964)。

1 : 1359 ; 2 : 1339 ; 3 : 1306 ; 4 : 1284 ; 5 : 1244 ;
 6 : 1224 ; 7 : 1209 ; 8 : 1199 ; 9 : 1179 ; 10 : 1164 。

3.3.3 鹼金屬-全鐵量-氧化鎂 (AFM 圖)

根據 Chen and Lin (1980) 對綠島的火山岩分析結果,發現綠島的演化趨勢為一系列帶狀分佈,有顯著的結晶分化趨勢,岩性分佈以鈣鹼岩系列為主(圖 3-27)。一般而言,會利用 AFM 圖來探討與島弧相關的火成岩演化。本實驗隨著溫度的降低,早期沒有明顯的結晶分化趨勢,直到鈦鐵氧化物與尖晶石的晶出後,殘餘岩漿則有向鹼金屬富集的趨勢。