

学 位 論 文

蔵王火山，五色岳の噴火推移と
マグマ供給系の変遷

2018 年 12 月

山形大学理工学研究科

西 勇樹

要旨

はじめに

蔵王火山は東北日本火山フロントに位置する活火山である。約 3.5 万年前からはじまった最新期活動によって馬の背カルデラが形成され、約 2 千年前にそのカルデラ内で五色岳が形成された。蔵王火山では 2013 年以降、火山性微動、山体の隆起、活発な噴気などの噴火の前兆現象が多数観測されているため、今後の活動に注意を要する活火山の一つである。よって、近い将来発生するおそれのある噴火に備えて、過去の活動によってもたらされた噴出物の噴火履歴、マグマ供給系の変遷の理解は重要である。本論では、蔵王火山のもっとも新しい山体である五色岳の活動によってもたらされた噴出物を対象として、噴火の推移とマグマ供給系の変遷について解明することを目的とした。

対象噴出物と噴火推移について

対象噴出物は傾斜不整合などをもとに下位から、五色岳形成前の「GS 溶岩類」、五色岳形成最初期の「五色岳南部火砕岩類」、と「五色岳東部火砕岩類」五色岳成長時期の「五色岳主活動期噴出物」、と「五色岳火砕岩類 unit4」に分けられる。GS 溶岩類は流下距離約 750 m で幅およそ 20~30 m の細長い形状を示す振子滝溶岩と、水冷自破碎溶岩と凝灰角礫岩からなる五色岳南方溶岩及び火砕岩類に細分される。五色岳南部火砕岩類は主に火砕サージ堆積物から構成されており、火砕岩脈が露頭で認められる。五色岳東部火砕岩類、五色岳主活動期噴出物、と五色岳火砕岩類 unit4 はおもに成層構造の発達

した火砕サージ堆積物と降下火砕物からなる。地質学的特徴から対象噴出物の噴火様式および推移について検討すると、五色岳形成前は溶岩を流出した活動で、五色岳の形成最初期及び成長時期はマグマ水蒸気爆発を主体とする活動であったと考えられる。

○岩石学的特徴と推定されるマグマ供給系の基本構造

全ての噴出物は中間カリウム-カルクアルカリ系列に属し、蜂の巣状構造や汚濁帯を持つ斜長石、Fo₈₀前後のかんらん石、逆累帯構造をもつ直方輝石および単斜輝石斑晶を含む。さらに、斜長石と両輝石はバイモーダルな組成分布を示す。また、全岩 SiO₂ 組成変化図上で線形の組成トレンドを描く。より詳しく見ると、GS 溶岩類の SiO₂ は 57.5～58.0 wt% にまとまっている一方で、その他の噴出物の SiO₂ は 56.0～57.7 wt% である。さらに GS 溶岩類と上位の火砕岩ユニット（五色岳南部火砕岩類、五色岳東部火砕岩類、五色岳主活動期噴出物、五色岳火砕岩類 unit4）の Ti、Cr、Fe、Cr-SiO₂ と Rb-Rb/Zr の組成トレンドはそれぞれやや異なっている。

岩石学的特徴から、すべての噴出物は珪長質・苦鉄質端成分マグマの混合によって形成されたと考えられる。両端成分マグマについて SiO₂ 量・温度・圧力・含水量条件を推定したところ、珪長質端成分マグマ（Mg-poor な両輝石、An-poor な斜長石、磁鉄鉱を含む）は約 60%、980°C、1.4 kb、2.3%で、苦鉄質端成分マグマ（Fo-rich かんらん石、An-rich 斜長石を含む）は約 48%、1100°C、約 1.7 kb、約 1.7%と推定された。

○直方輝石の分類と化学組成

噴出物に含まれる直方輝石は累帯構造をもとに、homogenous-core、thin-darker-zone、broad-darker-zone、oscillatory-zoned タイプの全 4 つのタイプに分類した。homogenous-core タイプの斑晶は均質なコア(Mg#=63-69)を示す。thin-darker-zone タイプはコア(Mg#=63-66) から約 50 μm 以下の Mg-rich zone(Mg#=75)とリム(Mg#=69)を持つ。broad-darker-zone タイプはコア(Mg#=63-66) から約 100 μm 以下のリム(Mg#=69)にかけて徐々に Mg#が増加する。oscillatory-zoned タイプは Mg#-richer part(Mg#=75)と Mg#-poorer part(Mg#=65-69)が複雑に累帯し、約 50 μm 以下のリム(Mg#=69-75)を持つ。

○直方輝石の滞留時間とマグマ供給系の変遷

thin-darker-zone、broad-darker-zone タイプの代表的な直方輝石斑晶について Fe-Mg 組成プロファイルをもとに、滞留時間を推定した。その結果、thin-darker-zone タイプでは 1.5 年未満、broad-darker-zone タイプでは 2.5~150 年の結果が得られた。滞留時間の短い thin-darker-zone タイプは上位の火砕岩ユニットで多く、滞留時間の長い broad-darker-zone タイプは GS 溶岩類が多い。

○マグマ供給系の構造と変遷について

broad-darker-zone タイプについて得られた値は、先駆的な苦鉄質マグマの注入と混合マグマ層の形成が約 150 年前から開始したことを示唆する。このタイプのリムの Mg# は 69 であり、混合マグマ層はこの組成の輝石が晶出する組成であった。一方、thin-darker-zone タイプで得られた 1.5 年未満の短い滞留時間は、噴火直前の苦鉄質マグマの注入を

示すと考えられる。なお、thin-darker-zone タイプの Mg-rich zone の Mg#は~79 である。

よって、Mg-rich zone は上記混合マグマと苦鉄質マグマの混合によって形成された混合マグマよりもやや苦鉄質マグマなマグマ（高 Mg 混合マグマ）から晶出したと考えられる。thin-darker-zone タイプのリムも Mg#は 69 程度である。従って、高 Mg 混合マグマは一時的に形成され、その後混合マグマ層で均質化したと考えられる。thin-darker-zone タイプのコアは珪長質マグマで晶出した組成である (Mg# = 63-66)。よって、高 Mg 混合マグマが珪長質マグマに到達した際に、高 Mg 混合マグマが thin-darker-zone タイプのコアを取り込んだと考えられる。

GS 溶岩類では board-darker-zone タイプが多く、thin-darker-zone タイプが少ない。一方で上位の火砕岩ユニットは前者が少なく後者が多い。これは、GS 溶岩類の場合、混合マグマ層がより発達していたため、滞留時間の長い board-darker-zone タイプが富んでいたと考えられる。また、一時的に形成された高 Mg 混合マグマが上部の珪長質マグマに到達しにくかったため、thin-darker-zone タイプが少なかったと考えられる。さらに、より長時間発達していた混合マグマ層において、苦鉄質マグマ由来の揮発性成分が十分に拡散し、脱ガスした結果、溶岩の流出に至ったと考えられる。一方で、上位の火砕岩ユニットの場合、混合マグマ層が未発達であったため、滞留時間の長い board-darker-zone タイプが少なく、高 Mg 混合マグマが珪長質端成分マグマに到達しやすかったと考えられる。そのため、thin-darker-zone タイプの割合が高かったと考えられる。更に、未発達

な混合マグマ層では苦鉄質マグマ由来の揮発性成分が拡散しにくく、脱ガスする時間がほとんど無かったため、爆発的な噴火に至ったと考えられる。

対象噴出物のマグマ供給系についてまとめると、五色岳形成前の混合マグマ層は発達していたが、上位の火砕岩ユニットの混合マグマ層は未発達な状態が継続していたと考えられる。以上の結果から、現在の混合マグマ層も未発達であると考えられるため、今後も爆発的な噴火に注意を要する必要がある。

目次

1.はじめに	• • • • • 1
2.地質概要	• • • • • 3
3.調査地域の地質	• • • • • 6
4.岩石学的特徴	• • • • • 13
5.考察	• • • • • 33
6.まとめ	• • • • • 54
7.謝辞	• • • • • 56
8.参考・引用文献	• • • • • 57
9.付録	• • • • • 63

1. はじめに

蔵王火山は東北日本火山フロントに位置する活火山である。その活動は約 100 万年前から開始し、有史以降も活発に活動が続いている(伴ほか, 2015)。最新の噴火は 1894 ~97 年に五色岳の御釜火口で発生し、ラホールも発生した(伴ほか, 2015)。更に、2013 年 1 月から、本火山では火山性微動などの前兆現象が観測されていて、今後の噴火が危ぶまれている。

本火山では中長期噴火予測を目的として、これまでに数多くの地質学的、岩石学的研究が行われてきた。近年では本火山の地質学的研究(伴ほか, 2015)の発展と、本火山の最新の山体である五色岳の噴出物を対象とした地質学的・岩石学的研究(例えば、伴ほか, 2005; Miura et al., 2012; Ban et al., 2016)が行われた。その結果、五色岳形成直前に少量の溶岩が流出していたこと(伴ほか, 2015)、五色岳は約 2 千年前から活動を開始したこと(伴ほか, 2005)、五色岳を構成する五色岳火砕岩は傾斜不整合を元に複数のサブユニットからなること(伴ほか, 2005)、五色岳形成直前に振子滝溶岩と五色岳南方溶岩が流出したこと(伴ほか, 2015)、五色岳火砕岩及びその形成前後の噴出物は苦鉄質・珪長質マグマの 2 端成分マグマ混合により形成されたこと(Ban et al., 2016)が明らかになった。しかし、本火山の現在のマグマ溜まりの状態や今後の活動予測を行うためには、五色岳の開始直前から遡って、マグマ供給系の時間変化を解明することが重要である。その場合、地質学的調査から噴火履歴を復元し、噴出物の岩石学的解析が有効な手法と

なる（例えば、中川ほか，2011）。

本論では、五色岳の活動と現状を把握し中長期的な噴火予測を行うために、五色岳形成直前および形成期の噴出物について、マグマ供給系の構造と時間変遷について検討する。

2. 地質概要

蔵王火山は山形市の南東約 15 km、仙台市の南西約 40 km の奥羽脊梁山脈上に位置する（図 1a）。その北西には瀧山火山が、南には南蔵王火山（屏風岳・不忘山・帽子岳など）があり、中央部は五色岳、熊野岳、地藏岳、刈田岳がある。

蔵王火山の地質学的研究はこれまでに数多く行われてきたが、大場・今田（1989）や酒寄（1992）では、蔵王火山活動期を大きく 3~4 ステージに分けていた。さらに、伴ほか（2015）はこれらの研究を踏襲・発展させた（図 1b）。以下、伴ほか（2015）に従って地質概要を述べる。

蔵王火山の基盤岩は先第三系の花崗岩類や片麻岩、および新第三系の火山岩類からなる。これらは熊野岳北東にある名号峰（1490.9 m）を構成し、濁川の上流部や丸山沢では標高 1200~1250 m まで、一枚石沢でも 1200 m 付近まで基盤が露出し、蔵王火山の噴出物がこれらの基盤を覆う。蔵王火山の活動は約 100 万年前から始まり全部で 6 つの活動期（Stage I~VI）に分けられる（図 1b）。Stage I（ca. 1 Ma）は主に本火山の中央部に分布する。ソレイト質マグマの活動で、水冷破碎を受けた火砕岩や岩脈が確認されている。Stage II（ca. 500 ka）は北部の山体を形成する。カルクアルカリ安山岩質マグマの活動で、主に溶岩流からなる。Stage III（ca. 350~250 ka）は東西の古熊野岳と西部の中丸山火山体からなる。カルクアルカリ安山岩の溶岩流主体の活動であったが、一部に火砕流堆積物も認められている。Stage IV（ca. 250~200 ka）は南部の刈田岳を中心に東西に

分布する。主にカルクアルカリ安山岩質マグマの活動で、溶岩流主体質のマグマの活動からなる。StageV (ca. 130~40 ka) は山体北部の熊野岳～地蔵岳を構成する。カルクアルカリ安山岩質マグマからなり、溶岩流と火砕岩類からなる。約 3.5 万年前に始まった StageVI (ca. < 35 ka) の活動は、馬の背カルデラの形成に始まる。玄武岩質安山岩～安山岩質マグマの爆発的な活動で特徴づけられる。さらに火砕岩類は、駒草平火砕岩、刈田岳火砕岩、馬の背アグルチネート、五色岳火砕岩類に分類される (Ban et al., 2008)。また、五色岳東方溶岩、振り子滝溶岩、五色岳南方溶岩及び火砕岩類は最新活動期の間流出したと考えられている (伴ほか, 2015)。

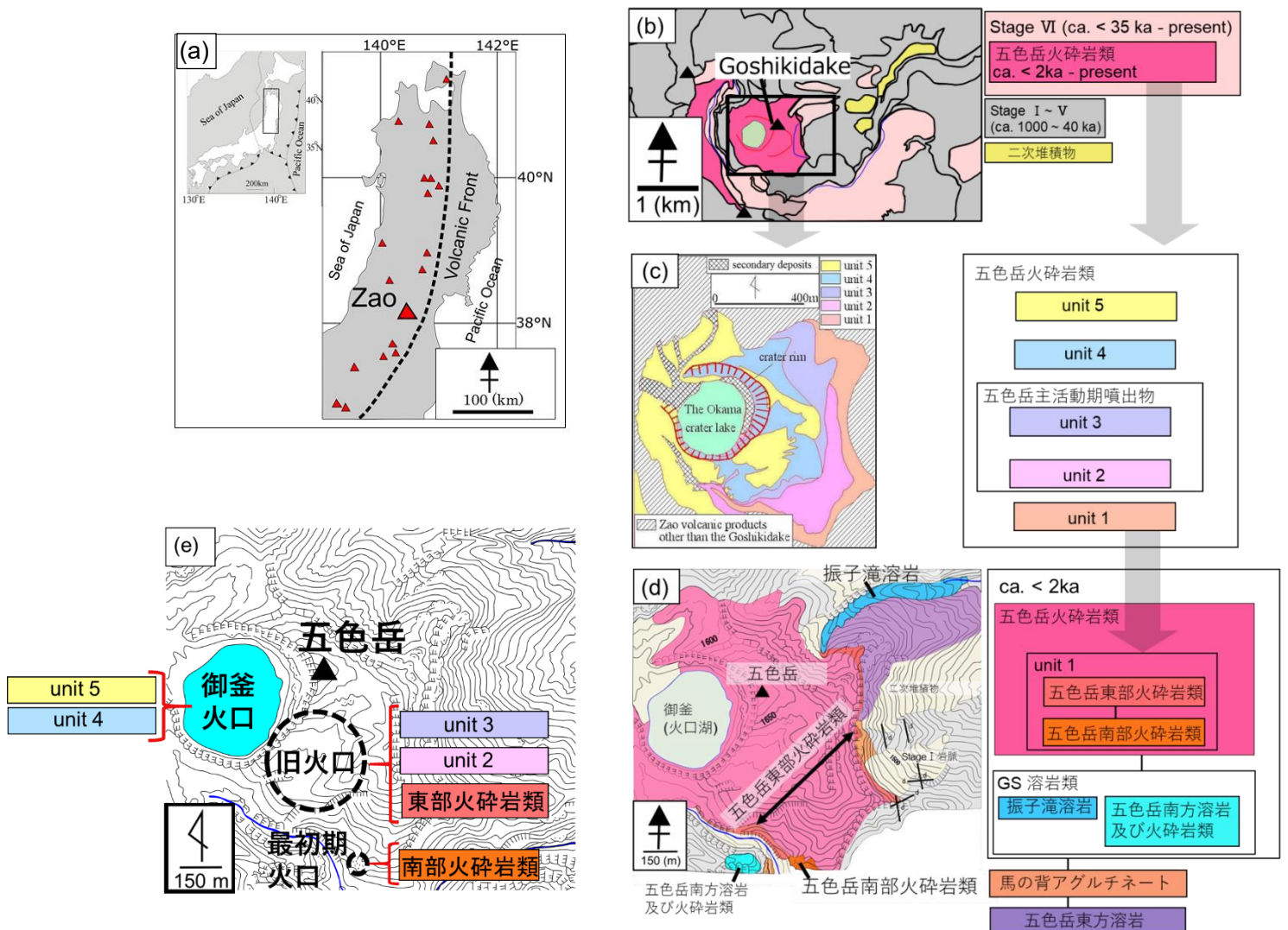


図 1 (a) 蔵王火山の位置。 (b) 蔵王火山の地質図と火山層序図 (伴 ほか, 2015)。枠で囲っている部分が本研究の調査範囲 (e) 五色岳基底部とその周辺に分布する噴出物と火山層序図。 (d) 五色岳周辺の地質 (伴ほか, 2003)。

3. 調査地域の地質

3.1. 五色岳火砕岩

五色岳周辺の調査位置を図 1cd に示す。蔵王火山の最も新しい山体である火砕丘五色岳の比高は約 110 m、底径は約 850 m である。五色岳西方に直径約 360 m の火口湖の御釜が認められる。御釜の南東部には概ね円形の旧火口が認められる (図 1e)。五色岳を構成する噴出物は主に火砕サージ堆積物からなる (伴ほか, 2005)。約 800 年前に旧火口から御釜火口へ移動したと考えられている (三浦ほか, 2005)。五色岳を構成する五色岳火砕岩類は傾斜不整合をもとに unit1-5 に細分されている (伴ほか, 2005) (図 1c)。産状から unit1-3 は御釜から南東部にある旧火口から (図 1e)、unit4 と 5 は御釜火口からもたらされたと考えられている (伴ほか, 2005) (図 1e)。unit1 は傾斜不整合をもとに五色岳東部火砕岩類と南部火砕岩類に分けられる (Nishi et al., 2019)。

3.2. 五色岳火山体基底部及びその周辺噴出物

振子滝溶岩は蔵王火山の御釜の北東部 (標高 1550 m 付近) に分布し (図 1d)、幅約 20~30 m、長さ約 750 m の細長い形状を示す (図 2abs)。上位の五色岳東部火砕岩類に直接覆われている (図 2b)。

五色岳南方溶岩及び火砕岩類は、五色岳の南の濁沢を挟んだ対岸の一部分に分布している (図 1d)。上位の五色岳火砕岩類に直接覆われている。本噴出物の下部はハイアロ

クラスタイト様の凝灰角礫岩、上部が水冷自破砕岩からなる（図 2cd）。下部の凝灰角礫岩は主に凝灰角礫岩層からなる。淘汰は悪く、約 3～50 cm の大小様々な火山を褐色～灰色の火山灰が基質として充填している。上部の水冷自破砕岩は高さ約 10 m、幅 10 m の溶岩からなる。水冷自破砕岩の節理は概ね垂直方向と、水平方向に多数延びる。枕状溶岩類似の形状を有している部分も認められる。

五色岳南部火砕岩類は五色岳の南東部に分布し、五色岳の基底部を構成する（図 1d）。最大の層厚は約 10 m である。本噴出物は上位の五色岳東部火砕岩類に不整合に覆われている。成層構造が発達し、デューン構造、クロスラミナやサグ構造が認められる（図 2ef）。南部では淘汰の悪い火山角礫岩～凝灰角礫岩からなり（図 2e）、約 300 m 東方に追跡すると希薄な凝灰岩～火山礫凝灰岩の薄層からなる（図 2f）。本質物質として冷却節理の発達した火山弾（図 2r）、その火山弾と同質のラピリを含み、火山弾はサグ構造をつくっている（図 2ef）。以上から、マグマ水蒸気爆発によってもたらされた火砕サージ堆積物と考えられる。基質は褐色～茶褐色の火山灰からなる。また、火砕サージ堆積物には火砕岩脈が認められる（図 2gh）。火砕岩脈はほぼ垂直方向に火砕物に貫入している。南部は淘汰の悪い凝灰角礫岩からなることと火砕岩脈が認められることから、五色岳南部火砕岩類の火口は五色岳の南方 500 m 付近に存在していたと考えられる（図 1e）。

五色岳東部火砕岩類は、五色岳の南部と東部に分布する。層厚は最大約 20 m である。

五色岳東部火砕岩類上位の五色岳火砕岩 unit2 に不整合に覆われている (図 1cd)。南部は主に淘汰の悪い凝灰角礫岩～火山礫凝灰岩からなる。岩相からレイヤー1～7に分けられる (図 2i-m)。レイヤー1、2の基質は主に粘土質火山灰からなり、各々の色調がやや異なっていて、変質の進んでいる火山礫が多い (図 2i)。レイヤー3、5、7は成層構造、デューン構造、斜交層理が発達し、サグ構造が認められ、本質物質として冷却節理の発達した火山弾とスコリアを含む (図 2jlr)。また、レイヤー3の基質3は灰色で、レイヤー5と7は赤褐色である。レイヤー4、6は主に降下スコリア層からなり、赤褐色～灰色の基質からなる (図 2k)。約500 m離れた東部の露頭では主に火山礫凝灰岩と凝灰岩の薄層からなり、クロスラミナやデューン構造が特徴的に認められる (図 2m)。以上から、レイヤー1と2は水蒸気爆発、レイヤー3～7はマグマ水蒸気爆発によってもたらされた火砕サージ堆積物であると考えられる。

3.3. 五色岳火砕岩類 unit 2 及び 3

五色岳火砕岩類 unit2 は五色岳山頂から南方約500 m周辺に分布し (図 1c)、最大の層厚は約20 mである。本噴出物は上位の五色岳火砕岩類 unit3 によって不整合に覆われている。噴出物は岩相からレイヤー1～4に細分される (図 2k)。レイヤー1、4は成層構造、斜交層理、サグ構造が特徴的に認められる凝灰角礫岩～火山礫凝灰岩からなり、淘汰が悪い (図 2o)。本質物質として冷却節理の発達した火山弾とスコリアを含む (図

2r)。基質は灰色～赤褐色の火山灰である。レイヤー2はアグロメレートからなり、スコリア質火山弾と火山岩塊が濃集し、淘汰が悪い(図 2n)。レイヤー3はクロスラミナが発達し、サグ構造を多数含む火山礫凝灰岩からなる(図 2n)。基質は褐色～白色の火山灰で、変質した火山礫が散在する。以上から、レイヤー1、4はマグマ水蒸気爆発、レイヤー3は水蒸気爆発によってもたらされた火砕サージ堆積物で、レイヤー2はブルカノ式噴火によってもたらされたアグロメレートであると考えられる。

五色岳火砕岩類 unit3は五色岳山頂から南方約 500 m(旧火口の南方約 100 m)で分布する(図 1c)。最大の層厚は約 20 mである。上位の五色岳火砕岩 unit4によって不整合に覆われている。本噴出物はレイヤー1～7に分けられる(図 2pq)。レイヤー1、3、5は灰色で粘土質の凝灰岩角礫岩～火山礫凝灰岩からなり、淘汰が悪い(図 2pq)。レイヤー2、4、7は成層構造と斜交層理が発達し、サグ構造も認められる凝灰岩～火山角礫岩である(図 2pq)。基質は褐色～赤褐色の火山灰からなり、火山岩塊や冷却節理の発達した火山弾が濃集する層も認められる(図 2pqr)。レイヤー6は主に～2 mの降下スコリア層からなり、スコリア質火山弾が濃集する(図 2q)。基質は同質の火山灰である。unit2及び3の多くのレイヤーは横方向に殲滅する。以上から、レイヤー2、4、7はマグマ水蒸気爆発、レイヤー1、3、5は水蒸気爆発によってもたらされた火砕サージ堆積物、レイヤー6はストロンボリ式噴火によってもたらされた降下スコリア層であると考えられる。

3.4. 五色岳火砕岩類 unit4

五色岳火砕岩類 unit4 は五色岳の上部ユニットを構成している（足立, 2013MS）。主にマグマ水蒸気爆発によってもたらされた、成層構造の発達した火砕サージ堆積物からなるが、ブルカニアン降下火砕物が挟在する（足立, 2013MS）。噴出物の層厚は約 65m である（足立, 2013MS）。足立（2013MS）は本噴出物をレイヤー1~5 に細分した。レイヤー1~5 は主にクロスラミナやサグ構造が認められる火砕サージ堆積物と降下火砕物からなり、layer4 にブルカニアン降下火砕物が認められている（足立, 2013MS）。

以上の五色岳形成直前から形成期の活動について結果をまとめると、五色岳形成直前に溶岩が流出し、五色岳形成期に入ると、マグマ水蒸気爆発を主体とした活動であったと考えられる。また、一部でブルカノ式噴火やストロンボリ式噴火が発生していたと考えられる。また、五色岳の火口の位置は五色岳南部火砕岩類から五色岳火砕岩類 unit4 にかけて、徐々に北西に移動したと考えられる。

以下本論では、“振子滝溶岩”と“五色岳南方溶岩及び火砕岩類”は GS 溶岩類、“五色岳火砕岩類 unit2”と“五色岳火砕岩類 unit3”は五色岳主活動期噴出物と称する。更に、マグマ供給系の変遷を明らかにすることを目的として、GS 溶岩類、五色岳南部火砕岩類、五色岳東部火砕岩類は Nishi et al. (2019) から、五色岳火砕岩 unit4 は足立 (2012MS) と Ban et al. (2016) から岩石学的データを引用した。

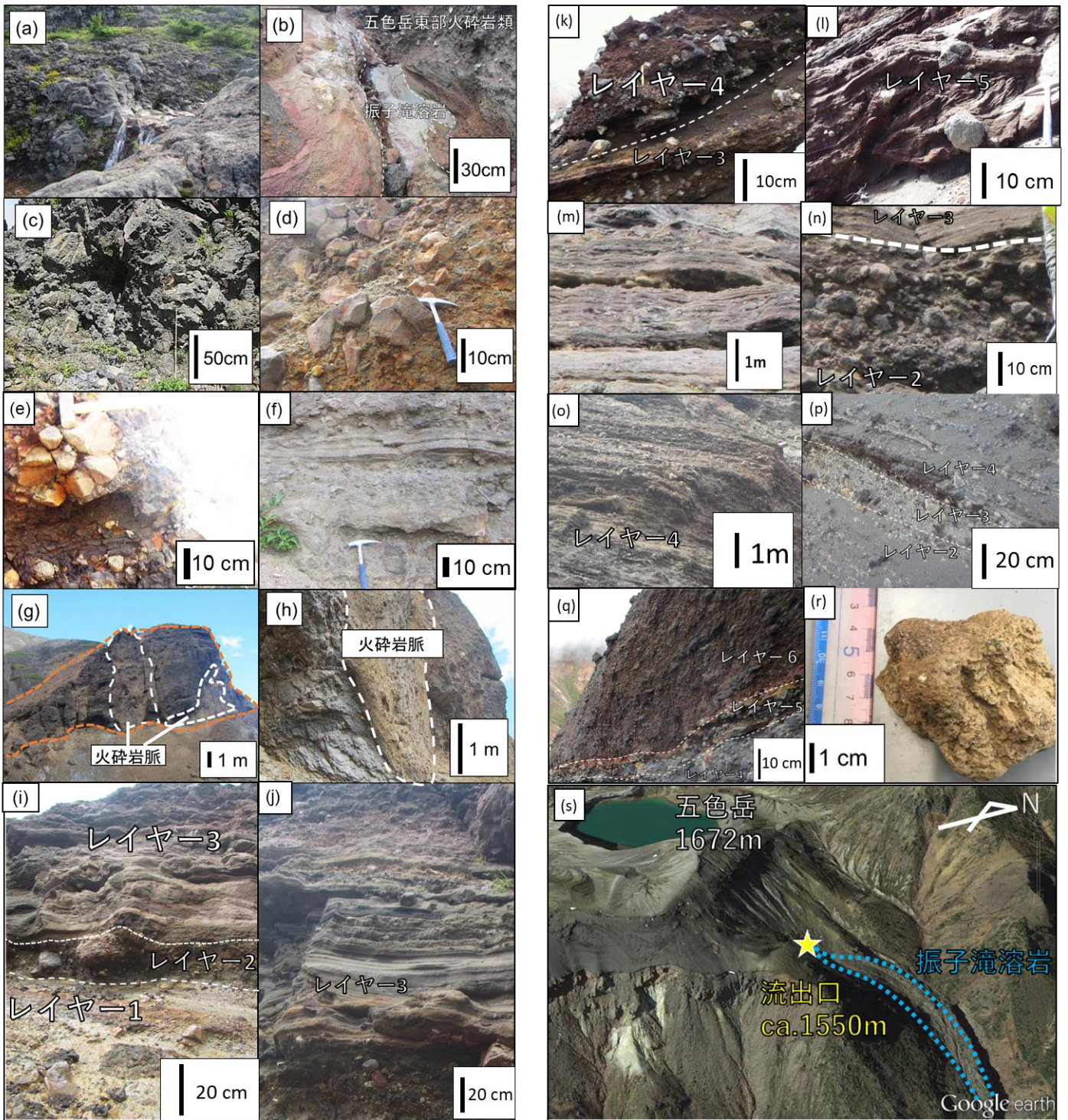


図 2 五色岳火山帯基底部及びその周辺に分布する噴出物の露頭写真。(a) 振子滝溶岩、(b) 振子滝溶岩の流出口、(c) 五色岳南方溶岩及び火砕岩類の上部、(d) 五色岳南方溶岩及び火砕岩類の下部、(e) 五色岳南部火砕岩類 (火口近傍層)、(f) 五色岳南部火砕岩類 (最初期火口から東方約 300m)、(g)、(h) 火砕岩脈、(i)、(j)、(k)、(l) 五色岳東部火砕岩類、(m) 五色岳東部火砕岩類 (旧火口から東方約 400m) (n) 五色岳火砕岩類 unit2 (o) 五色岳火砕岩類 unit2 アグロメレート、(p) 五色岳火砕岩類 unit3、(q) 五色岳火砕外岩類 unit3 (レイヤー6 は降下スコリア層)、(r) 冷却節理の発達した火山弾、(s) 五色岳の空中写真

(t)

凡例

- 凝灰岩
(粘土変質)
- 火山礫凝灰岩
- 火山礫凝灰岩
(粘土変質)
- 火山礫凝灰岩
(粘土変質)
- 凝灰角礫岩
- 火山角礫岩
- 降下スコリア層

- 火山礫
- 火山岩塊
- スコリア
- ラミナ
- クロスラミナ

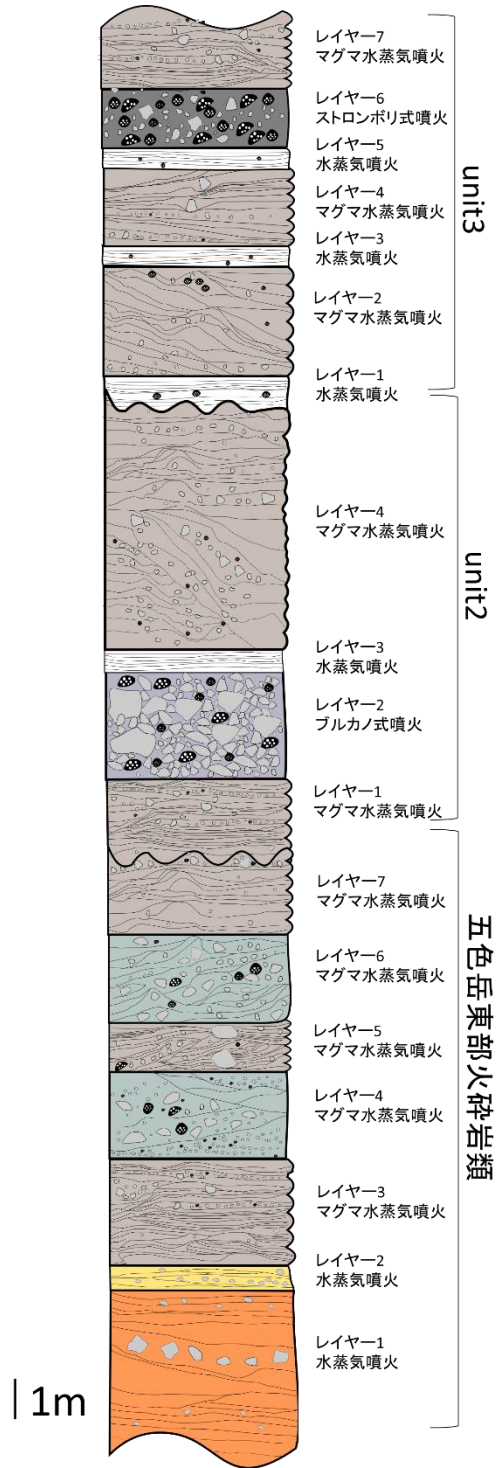


図 2 (t) 五色岳東部火砕岩類、五色岳火砕岩類 unit2、五色岳火砕外岩類 unit3 の柱状図

4. 岩石学的特徴

4.1. 岩石記載

火山弾/スコリア（五色岳南部火砕岩類から 22 試料、五色岳東部火砕岩類から 22 試料、五色岳火砕岩類 unit2 から 6 試料、五色岳火砕岩類 unit3 から 5 試料）および溶岩（振子滝溶岩から 3 試料、五色岳南方溶岩及び火砕岩類から 6 試料）採取した。代表的な薄片写真を図 3 に、鉱物の反射電子象は図 4 に示す。

岩石はいずれもかんらん石含有単斜輝石直方輝石安山岩からなる。鉱物組み合わせは斜長石、直方輝石、単斜輝石、磁鉄鉱で一部にカンラン石を含む場合がある。石基は、針状や柱状の斜長石、直方輝石、単斜輝石と磁鉄鉱の微晶とガラスを含むハイアロオフィティック組織からなる（図 3ab）。スコリア中には数センチメートル程度の気泡が認められる（図 3b）。2000 ポイントのカウントを行い、鉱物のモード組成を測定した。その結果、GS 溶岩類は斜長石 (22.6-27.4%、平均 24.7%)、直方輝石 (5.8-7.8%、平均 6.1%)、単斜輝石 (1.7-3.4%、平均 2.4%)、かんらん石 (1.0%未満)、マグネタイト (1.0%未満) で、五色岳南部火砕岩類は斜長石 (14.5-18.5%、平均 16.5%)、直方輝石 (4.0-7.3%、平均 6.1%)、単斜輝石 (1.5-3.5%、平均 3.2%)、かんらん石 (1.0%未満) およびマグネタイト (1.0%未満) で、五色岳東部火砕岩類は (16.9-20.0%、平均 19.1%)、直方輝石 (4.8-7.4%、平均 6.6%)、単斜輝石 (1.1-2.7%、平均 1.6%)、かんらん石 (1.0%未満)、磁鉄鉱 (1.0%未満)、主活動期噴出物は斜長石 (14.1-25.15%、平均 19.6%)、直方輝石 (5.0-

9.9%、平均 6.6%)、単斜輝石 (0.5-2.7%、平均 1.6%)、かんらん石 (1.0%未満)、磁鉄
鉱 (1.0%未満) であった。

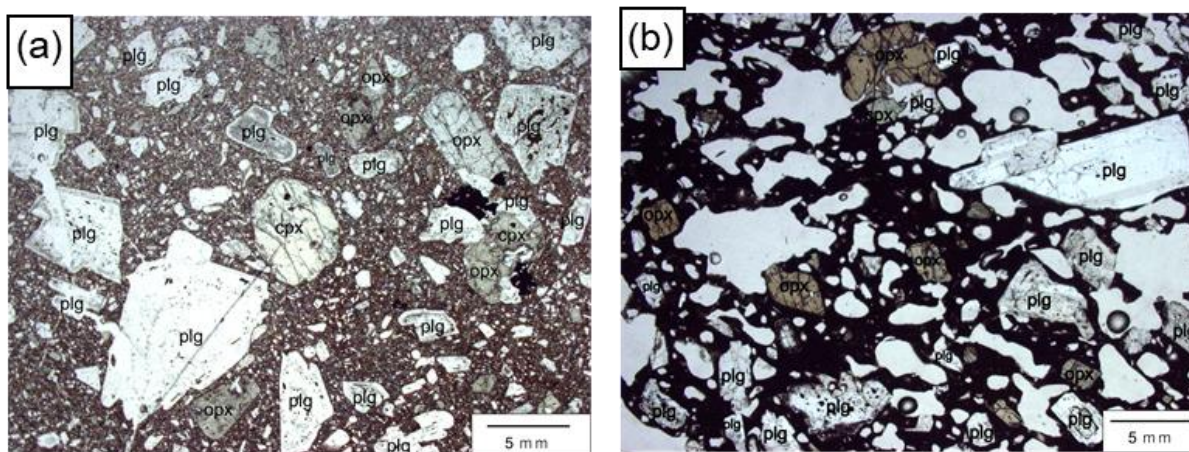


図 3 噴出物の顕微鏡写真 (Nishi et al., 2019)。(a) 振子滝溶岩 (b) 五色岳東部火砕岩
類

4.2. 鉱物化学組成

4.2.1. 分析手法

山形大学理学部の日本電子製 JXA8900M 波長分散型 EPMA を用いて、斜長石、直方輝石、単斜輝石、かんらん石の組成を測定した。分析条件は加速電圧 1.5 kV、照射電流は斜長石で 0.01 μ A、直方輝石、単斜輝石とかんらん石斑晶は 0.02 μ A、ビーム径は斜長石で 5 μ m その他は 1 μ m 以下 (最小径) とした。ピークとバックグラウンドのカウント時間はそれぞれ 10 秒と 5 秒で設定した。ただし、直方輝石の Al_2O_3 のピークとバック

クグラウンドはそれぞれ 60 秒と 30 秒に設定した。分析の補正法には Oxide ZAF 法を用いた。鉍物の測定には薄片試料を使用した。代表的な鉍物組成は表 1 に示す。

4.2.2. 斜長石

斜長石斑晶はゾーニングパターンから、oscillatory-patchy-zoned、patchy-core、homogeneous-core タイプに分けられる (図 4a-c)。oscillatory-patchy-zoned タイプの割合が最も多く (図 4a)、主にコアからリムにかけて、An [Ca/ (Ca+Na)] の高振幅低周期パターン (Vaccaro et al., 2010 など) と低振幅高周期パターンが認められる。An-poor zone の累帯が、An-poor patchy に変化したと考えられる部分も認められる。また、An-poor zone にはメルト包有物 (300 μm) が認められる。汚濁帯 (例えば Tsuchiyama, 1985) はいくつかの斑晶で見られる。このタイプの斜長石の An 量の範囲は、An₆₀₋₈₆ (An-poor zone は An₆₀₋₆₇; An-rich zone は An₆₈₋₈₆) である。組成ヒストグラム (図 5) では、An₆₅ 付近のピークが認められる。多くの斑晶には、約 10 μm 程度の薄いリムが認められる。

patchy-core タイプは An-rich core と An-poor patchy からなる (図 4b)。An-poor patchy は An-rich core (An_{>80}) 内で散在し、波動累帯構造を示す場合もある。このタイプのコアの組織は、Hmphreys et al. (2006) の patchy-core タイプと類似する。まれに An-poor patchy 内にメルトインクルージョンを含む場合がある。また、約 10 μm 程度のリムが認められる。

homogeneous-core タイプは均質な core と厚さ約 5-60 μm 程度のリムからなる (図 4c)。コアの組成は $\text{An}_{\sim 90}$ 程度で比較的一定である。リムの組成は An_{65-75} 程度であり、リムから $< 60 \mu\text{m}$ で変化する (図 4c)。

4.2.2. 輝石

直方輝石は累帯構造の特徴から、homogenous、broad-darker-zone、thin-darker-zone、complex-zoned の 4 タイプに分類できる (図 4d-g)。homogenous タイプは斑晶全体が均質な組成 ($\text{Mg}\# = 63-68$) を持つものである (図 4d)。Mg-poor な斑晶 ($\text{Mg}\# = 63-66$) は半自形であることが多く、Mg-rich なもの ($\text{Mg}\# = 67-68$) は自形であることが多い。前者は上位の火砕岩ユニットに、後者は GS 溶岩類によく認められる。

thin-darker-zone タイプの割合は上位の火砕岩ユニットに多い (図 4e)。コアの $\text{Mg}\#$ は homogenous タイプと同様で、リムは 69 程度であり、 $\sim 50 \mu\text{m}$ の部分に Mg-rich zone ($\text{Mg}\# = \sim 79$) が認められる。さらに、thin-darker-zone タイプは $\text{Mg}\#$ の組成プロファイルをもとに、2 つのサブタイプに細分類できる (図 6ab)。thin-darker-zone サブタイプ 1 は単一の Mg-rich zone を持つ (図 6a)。さらに、その $\text{Mg}\#$ と Al はコアからリムに向かってほぼ同じ組成プロファイルを持つ。thin-darker-zone サブタイプ 2 は複数の Mg-rich zone が認められる (図 6b)。さらにその最外縁部の $\text{Mg}\#$ 、 Al_2O_3 、と SiO_2 プロファイルは相関関係が認められない (図 6b)。詳しく見ると、sb3 43 (図 6b) の $\text{Mg}\#$ と SiO_2 含有量は、

12~10 μm では低く、外側 (8~4 μm では) に向かって増加する。一方、 Al_2O_3 は 12~4 μm の部分でほぼ同じである。より詳しくみると、8 μm での Al_2O_3 は、10~12 μm のもよりわずかに高い。斑晶のコアの Mg# は 63-68 であり、ピークは 65-66 である (図 5)。

broad-darker-zone タイプの割合は GS 溶岩類に多い。コアの Mg# は homogenous タイプと同じで、リムの Mg# は 69 程度である。リムから内側~100 μm の部分でなだらかな逆累帯を示す。一部の結晶は、コアの外側に Mg# のピークを持つ (図 6cd)。そのピークの値は、最大 Mg# = 75 である。broad-darker-zone タイプは Al_2O_3 プロファイルをもとに、2 つのサブタイプに分類できる。サブタイプ 1 は、コアの外側に単一の Al_2O_3 ピークをもち、外側部分から最縁部までの Al_2O_3 はほぼ一定である (図 6cde)。サブタイプ 2 は、コアの外側に Al_2O_3 の 2 つのピークもつ (図 6f)。

リム内の thin-darker-zone と board-darker-zone タイプはほぼ同じ組成である (ca. Mg# = 67-69)。また、sb1 41、sb3 51、sb3 42 のリムの SiO_2 含有量 (付録図 1) は、 Al_2O_3 含有量と逆相関を示す。リムのカチオン (3.98~4.01) はほぼストイキオメトリーである。

oscillatory-zoned タイプは Mg-richer/poorer part (Mg# = 75/65-69) が反復累帯し、リムの Mg# は 69 程度である (図 4g)。また、リム付近に Mg-rich-zone が認められる。

単斜輝石は homogenous、broad-darker-zone、oscillatory-zoned の 3 タイプに分類できる (図 4h-j)。単斜輝石の組織の特徴は直方輝石のものと類似するが、組成はやや異なる。homogenous タイプは上位の火砕岩ユニットで ca. Mg# = 68、GS 溶岩類で ca. Mg# = 69-

70 である。board-darker-zone および oscillatory-zoned タイプのコアの Mg#は ca. Mg# = 64-68 (図 4ij) である。board-darker-zone タイプのリムの Mg#は ca. Mg#=71 で、oscillatory zoned タイプの Mg#-richer と Mg#-poorer part の Mg#は、それぞれ 69-72 及び 64-68 である。

4.2.3. かんらん石

かんらん石は Fo-rich core と Fo-poor core タイプに分けられる。Fo-rich core タイプのコアは比較的均質で (ca. Fo₇₈₋₈₂) である。コアからリム (ca. Fo₆₆₋₇₂) に向かってなだらかな正累帯を示す (図 4k、5 および 7)。

Fo-poor core タイプは非常に珍しい。コアの Fo 量 (約 Fo₆₆₋₇₄) は均質である。(図 4l および 5)。このタイプは直方輝石 (ca. Mg#=69、~50 μm) の反応縁をもつ。(図 4l)。

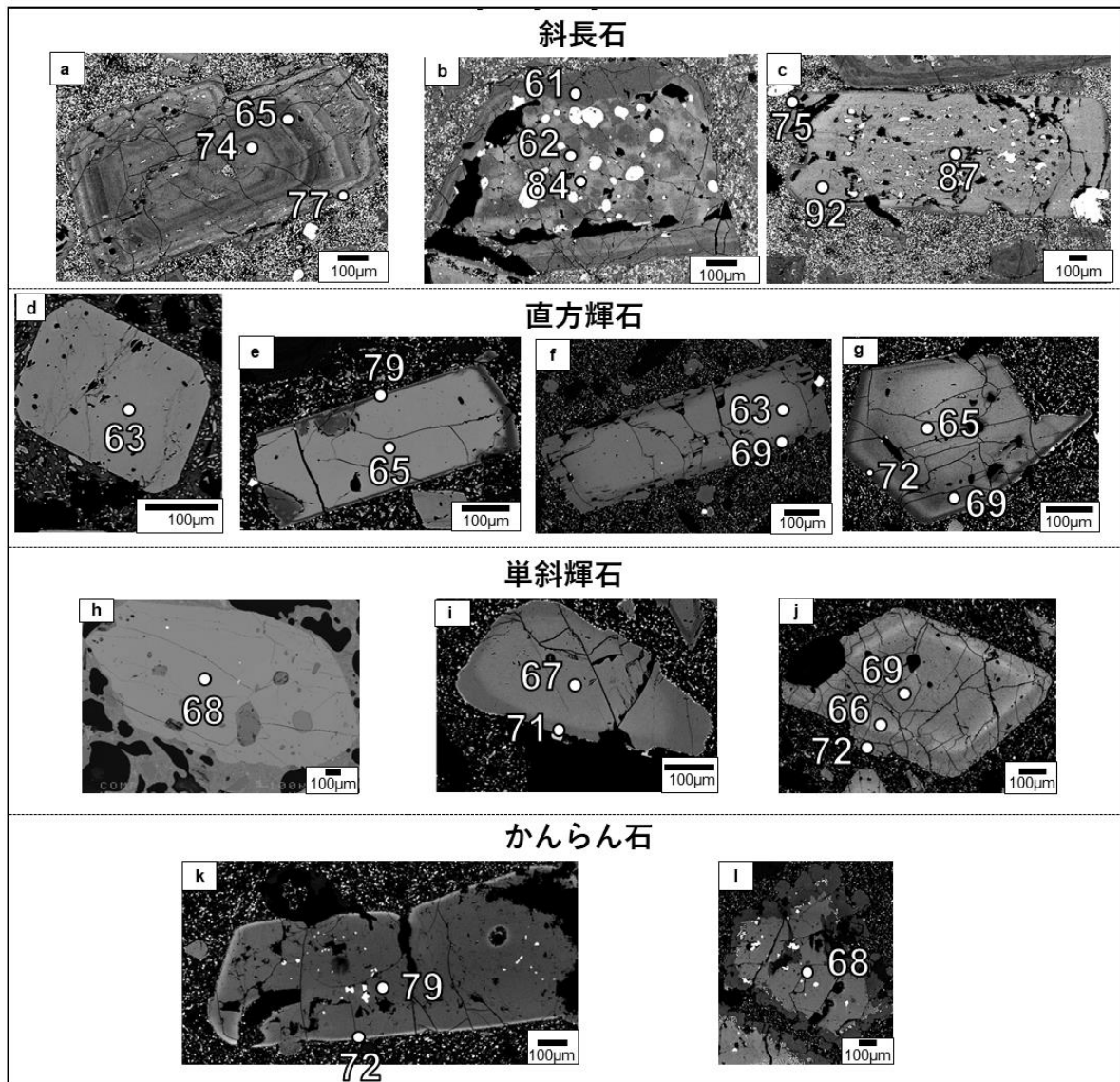


図 4 斑晶の反射電子象 (Nishi et al.,2019)。(a) oscillatory-patchy-zoned タイプ斜長石、(b) patchy-core タイプ斜長石、(c) homogeneous-core タイプ斜長石、(d) homogeneous タイプ直方輝石、(e) thin-darker-zone タイプ直方輝石、(f) broad-darker-zone タイプ直方輝石、(g) oscillatory-zoned タイプ直方輝石、(h) homogeneous タイプ単斜輝石、(i) broad-darker-zone タイプ単斜輝石、(j) oscillatory-zoned タイプ単斜輝石、(k) Fo-rich タイプかんらん石、(l) Fo-poor タイプかんらん石。

表 1 代表的な鉱物化学組成 (Nishi et al., 2019)

斜長石

sample no.	type	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO ^t	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total (wt%)	An (%)	
1-1	An-rich	49.13	31.54	0.67	0.08	15.58	2.58	0.07	99.65	77	
1-1	An-poor	53.11	28.80	0.89	0.09	12.62	3.87	0.16	99.52	64	
1-6	An-rich	49.81	30.33	0.73	0.09	14.64	2.59	0.10	98.29	75	
1-6	An-poor	51.64	28.91	0.69	0.10	13.12	3.47	0.17	98.10	67	
1-7	An-rich	48.25	31.95	0.78	0.06	15.18	2.09	0.06	98.38	80	
1-7	An-poor	53.79	28.31	0.83	0.12	11.92	3.85	0.22	99.03	62	
2-1	An-rich	49.18	31.16	0.84	0.07	15.29	2.54	0.10	99.18	76	
2-1	An-poor	52.64	28.92	0.63	0.09	12.81	3.93	0.13	99.16	64	
2-4	An-rich	48.86	30.99	0.95	0.09	14.83	2.50	0.12	98.35	76	
2-4	An-poor	52.05	28.55	0.85	0.11	12.80	3.70	0.16	98.22	65	
2-5	An-rich	47.47	31.71	0.89	0.08	15.85	2.29	0.08	98.35	79	
2-5	oscillatory- patchy-zoned	An-poor	52.38	28.77	0.83	0.10	12.81	3.59	0.16	98.63	66
2-8	An-rich	49.64	30.42	0.87	0.09	14.59	2.65	0.07	98.33	75	
2-8	An-poor	52.39	28.92	0.85	0.11	13.00	3.76	0.13	99.16	65	
3-1	An-rich	51.05	30.89	0.79	0.11	14.97	2.50	0.17	100.48	76	
3-1	An-poor	53.90	28.49	0.73	0.11	12.54	3.88	0.21	99.85	63	
3-5	An-rich	48.43	31.78	0.77	0.06	16.14	2.00	0.06	99.23	81	
3-5	An-poor	53.03	28.97	0.79	0.11	12.69	3.73	0.19	99.50	65	
3-17	An-rich	49.82	30.91	0.88	0.07	15.09	2.49	0.11	99.36	77	
3-17	An-poor	53.13	28.93	0.70	0.09	12.32	3.41	0.21	98.78	66	
4-2	An-rich	51.42	29.39	0.97	0.11	13.92	3.19	0.2	99.2	70	
4-2	An-poor	53.53	28.15	0.91	0.09	12.59	3.78	0.16	99.21	64	
4-14	An-rich	50.23	30.68	0.74	0.07	14.91	2.81	0.17	99.61	74	
4-14	An-poor	52.45	28.56	0.94	0.09	12.91	3.65	0.2	98.8	65	
1-2	An-rich	47.27	32.78	0.62	0.07	16.99	1.66	0.07	99.48	85	
1-2	An-poor	53.48	29.21	0.84	0.10	13.06	3.48	0.19	100.37	67	
3-2	patchy-core	An-rich	47.27	32.78	0.62	0.07	16.99	1.66	0.07	99.48	85
3-2	An-poor	53.48	29.21	0.84	0.10	13.06	3.48	0.19	100.37	67	
4-27	An-rich	48.31	31.80	0.78	0.08	15.88	1.97	0.07	98.89	81	
4-27	An-poor	54.51	27.91	0.80	0.10	11.86	4.03	0.17	99.39	61	
1-46	core	47.46	33.75	0.74	0.07	17.06	1.46	0.00	100.55	87	
1-46	rim	50.99	29.85	1.15	0.09	13.62	2.97	0.25	98.93	71	
1-47	core	46.76	33.87	0.56	0.07	18.49	1.00	0.01	100.76	91	
1-47	homogeneous- core	rim	50.79	31.09	0.92	0.16	14.11	3.65	0.14	100.43	68
2-66	core	47.62	34.02	0.58	0.05	17.82	1.09	0.03	100.77	89	
2-66	rim	53.21	29.90	0.92	0.10	15.13	2.59	0.10	100.94	76	
3-25	core	45.90	34.12	0.55	0.08	17.93	0.97	0.00	99.55	91	
3-25	rim	52.22	29.33	0.97	0.12	13.60	2.83	0.14	99.21	72	

斜長石の An-rich-part と An-poor part はそれぞれ An-rich, An-poor と表記する。

FeO^t は FeO として計算した

表 1 (続き)

直方輝石

sample no.	type		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Total (wt%)	Mg#
4-1		core	53.17	0.40	1.12	20.15	0.47	22.68	1.97	99.96	67
4-4	homogeneous	core	52.59	0.27	1.17	21.19	0.43	22.60	1.88	100.13	66
4-10		core	52.54	0.32	1.00	21.01	0.38	22.24	2.03	99.52	65
1-1		core	52.65	0.34	1.04	21.71	0.48	22.76	2.03	101.01	65
1-1		rim	52.93	0.30	1.02	18.88	0.55	24.38	1.84	99.90	70
2-1	broad-darker-zone	core	51.77	0.32	0.96	21.59	0.39	21.85	1.80	98.68	64
2-1		rim	53.45	0.35	1.21	19.16	0.51	23.87	1.85	100.40	69
3-1		core	52.65	0.26	1.00	21.53	0.42	22.04	1.94	99.84	65
3-1		rim	53.21	0.30	0.95	19.57	0.37	23.92	1.90	100.22	69
2-30		core	52.28	0.35	1.01	23.02	0.57	21.72	2.02	100.97	63
2-30		Mg-rich	53.32	0.23	2.44	14.88	0.25	27.20	2.07	100.39	77
2-30	thin-darker-zone	rim	52.57	0.39	1.43	19.95	0.49	23.43	2.22	100.48	68
3-50		core	53.36	0.30	0.91	21.08	0.55	22.77	1.96	100.92	66
3-50		Mg-rich	54.09	0.21	1.98	16.08	0.36	26.04	1.84	100.59	74
3-50		rim	53.24	0.33	1.56	18.66	0.36	24.04	2.03	100.22	70
3-11		Mg-richer	53.44	0.23	0.96	17.35	0.40	24.44	2.03	98.85	72
3-11		Mg-poorer	53.04	0.29	1.20	18.91	0.47	24.09	1.90	99.90	69
3-11	oscillatory -zoned	rim	52.49	0.32	1.32	19.32	0.55	23.71	1.97	99.68	69
2-60		Mg-richer	54.50	0.24	0.90	16.83	0.35	26.89	1.94	101.65	74
2-60		Mg-poorer	52.82	0.34	2.56	18.87	0.46	23.43	2.58	101.06	69
2-60		rim	53.17	0.33	1.70	18.98	0.46	24.02	2.08	100.74	69

直方輝石の Mg-rich zone、Mg-richer zone、と Mg-poorer part はそれぞれ Mg-rich、Mg-richer、Mg-poorer と表記した。

単斜輝石

sample no.	type		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Total (wt%)	Mg#
4-1		core	51.91	0.55	1.99	11.49	0.31	14.87	18.10	99.22	70
4-6	homogeneous	core	52.34	0.48	1.88	12.18	0.37	14.80	18.39	100.44	68
4-7		core	52.09	0.52	1.86	12.36	0.28	14.49	17.87	99.47	68
1-8		core	53.00	0.53	1.87	12.73	0.26	14.30	18.88	101.57	67
1-8		rim	53.89	0.58	2.06	11.03	0.34	14.92	19.14	101.96	71
1-5	broad-darker- zone	core	52.18	0.50	1.90	12.40	0.31	14.09	18.59	99.97	67
1-5		rim	52.71	0.42	1.68	11.08	0.21	14.78	18.93	99.81	70
2-1		core	51.79	0.61	1.97	12.28	0.29	14.29	17.94	99.17	67
2-1		rim	52.33	0.60	2.12	11.14	0.39	14.99	18.69	100.26	71
2-4		core	51.76	0.59	1.89	12.39	0.39	14.29	18.90	100.21	67
2-4		rim	51.28	0.57	2.14	10.95	0.25	14.95	18.87	99.01	71
1-2		Mg-rich	54.63	0.50	2.00	10.74	0.37	14.03	17.95	100.22	70
1-2		Mg-poor	53.68	0.50	1.58	13.06	0.31	13.25	17.71	100.09	64
1-2	oscillatory -zoned	rim	54.72	0.41	1.87	10.84	0.29	14.32	18.52	100.97	68
1-7		Mg-rich	52.62	0.51	1.99	11.02	0.30	14.79	18.53	99.76	71
1-7		Mg-poor	53.99	0.60	1.54	12.77	0.34	14.40	18.32	101.96	67
1-7		rim	52.02	0.52	1.77	11.12	0.31	14.10	18.47	98.31	69

単斜輝石の Mg-richer zone、と Mg-poorer part はそれぞれ Mg-richer、Mg-poorer と表記した。

かんらん石

sample no.	type		SiO ₂	FeO	MnO	MgO	CaO	Ni	Total (wt%)	Fo (%)
1-1		core	39.59	19.77	0.25	42.18	0.15	0.14	102.08	79
1-1	Fo-rich	rim	39.33	25.52	0.49	37.37	0.17	0.09	102.97	72
4-1		core	39.20	20.12	0.34	41.74	0.18	0.11	101.69	79
4-1		rim	39.11	27.51	0.40	32.14	0.66	0.06	99.88	68
1-7		core	38.55	27.12	0.46	35.68	0.15	0.11	102.07	70
1-8	Fo-poor	core	38.04	29.20	0.56	34.57	0.13	0.10	102.61	68
4-2		core	38.95	28.82	0.21	31.34	0.21	0.15	99.68	66

4.3. 全岩化学組成

4.3.1. 分析手法

本噴出物の溶岩、火山弾およびスコリアについて、それらの全岩化学組成を測定した。

試料作製の手順と測定方法は Yamada et al. (1995)を参考に以下の手順で行った。

(i) 各サンプルをハンマーで粗割りし、直径 1 cm 程度の岩片を 10 g 程集める。その際、変質部分を取り除いておく。(ii) 粗割りしたサンプルを超音波洗浄機で洗浄し、120 °C のオーブンで約 2 時間乾燥させる。(iii) 乾燥させたサンプルを鉄鉢で直径 2 mm 以下に砕き、Restch 製遠心回転ボールミル S100 (直径 2 cm のメノウボール 12 個使用) で約 20 分間粉碎し、岩石粉末にする。(iv) 各サンプルの岩石粉末を 2 ± 0.0005 g、融剤 (ジョンソン・マッセイ製スペクトロフラックス 100B) を $3.6\times$ サンプル数秤量し、オーブン (110 °C) で 12 時間以上乾燥させる。融剤については、その後 250 °C で約 3 時間さらに乾燥させ、吸着水を揮発させる。(v) 乾燥させたサンプル 1.8 ± 0.0005 g、融剤 3.6 ± 0.0005 g をそれぞれ秤量し、混合・攪拌させ、サンプル : 融剤 = 1 : 2 にする。これを白金坩堝に入れ、微量の剥離剤 (Merck 社製 LiI) を加え、高周波溶融装置 (東京科学製 BEAD SAMPLER NT-2120S 型) を用いて 1200 °C で 10 分間溶融させ、ガラスビードを作成する。(vi) 作成した各ガラスビードを、山形大学理学部にあるリガク製 RIX1500 蛍光 X 線分析装置を用いて、主成分元素 (Si、Ti、Na、Ca、K、Mg、Fe、Al、Mn、と P)、微量元素 (Ba、Sr、Cr、Ni、V、Rb、Zr、Nb、と Y) を測定した。

一次 X 線源には Rh ターゲット X 線管球を装着し、管電圧 50 kV-管電流 50 mA に設定した。主成分元素は検量線法、微量元素はバックグラウンド散乱補正を用いた検量線法により測定した。

検量線作成には地質調査所の標準試料火成岩シリーズを用いた。主要元素の Fe_2O_3 は FeO^t として計算し、主成分元素の組成値は各元素の合計が 100 wt.% になるように再計算した。

4.3.2. 全岩化学組成結果

XRF の結果を図 8 及び表 2 に示す。全ての岩石はカルクアルカリ玄武岩質安山岩からなり、全ての噴出物は類似する変化傾向を示す。例えば、 MgO 、 CaO 、 FeO^t 、 Al_2O_3 、 Cr 、 Ni 、 Sr の含有量は、 SiO_2 含量の増加に伴い減少するが、 K_2O 、 TiO_2 、 Na_2O 、 Y 、 Rb 、 Ba 、 Zr 含量は増加する。

全岩 SiO_2 は GS 溶岩類から五色岳主活動期噴出物にかけてやや苦鉄質組成に、五色岳火砕岩 unit4 でやや珪長質組成に変化している。各ユニットの SiO_2 についてより詳しくみると、GS 溶岩類では 57.6-58.0 wt%、五色岳南部火砕岩類では 56.3-57.6 wt%、五色岳東部火砕岩類では 56.2-57.5 wt%、五色岳主活動期噴出物では 56.1-57.2 wt%、五色岳火砕岩 unit4 では 57.2-57.7 wt% であり、各々のユニットでの組成幅は GS 溶岩類と五色岳火砕岩類 unit4 を除いてやや大きい。より詳しく見てみると、各ユニットの組成トレ

ドは五色岳東部火砕岩類と五色岳主活動期噴出物で類似し、そのほかのユニットはやや異なっている（図 8）。各ユニットの組成トレンドの類似と相違は TiO_2 、 MgO 、 FeO^t 、 K_2O 及び、 Cr 、 Ba 対 SiO_2 図および Rb/Zr-Rb 図（図 8 および付録図 2）で認められる。

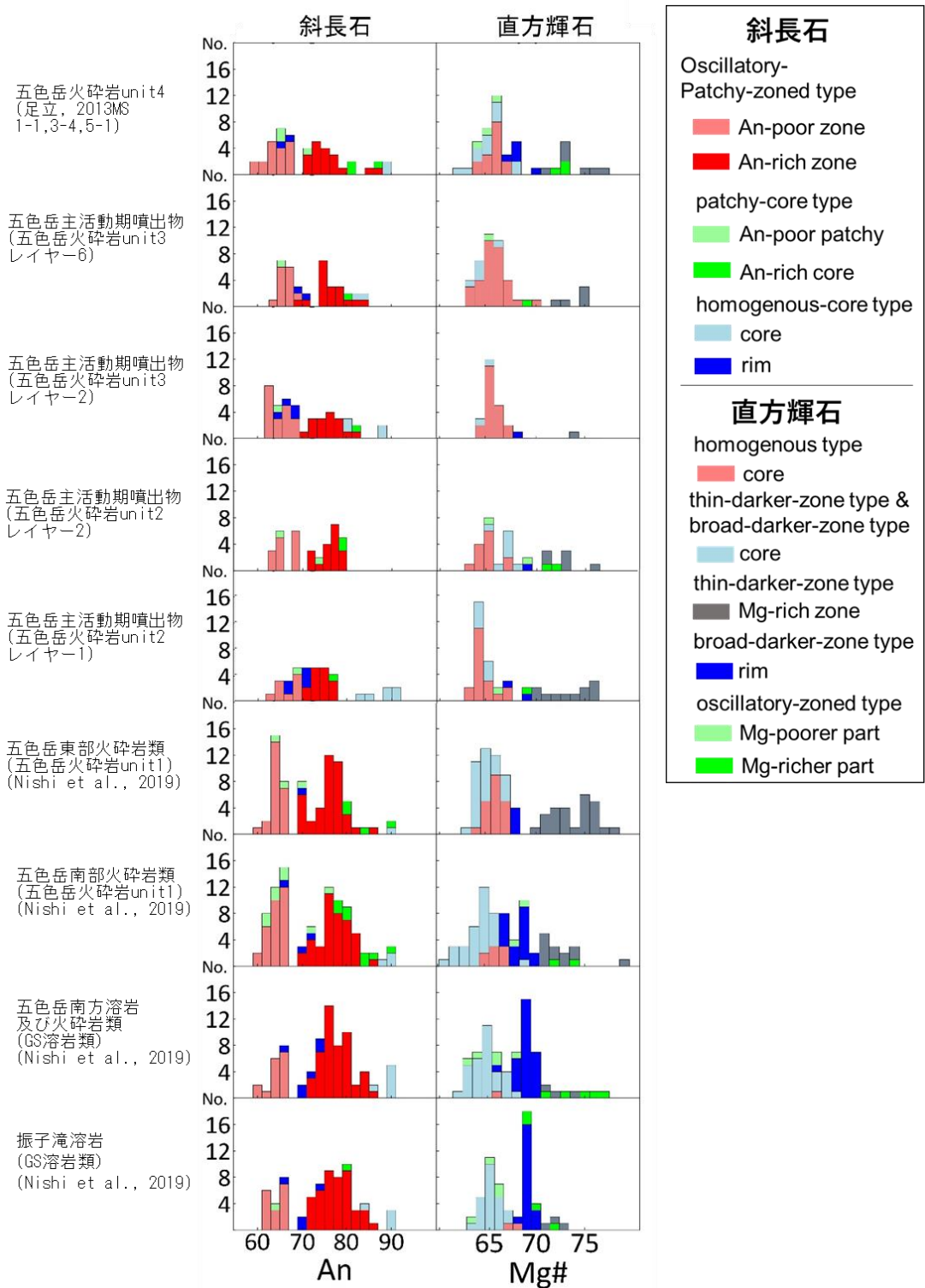


図5 斜長石と直方輝石の組成のヒストグラム (Nishi et al.,2019 から加筆・修正した)。

An = 100 × [Ca / (Ca + Na)] (%); Mg# = 100 × [Mg / (Fe + Mg)] (%) で算出した。

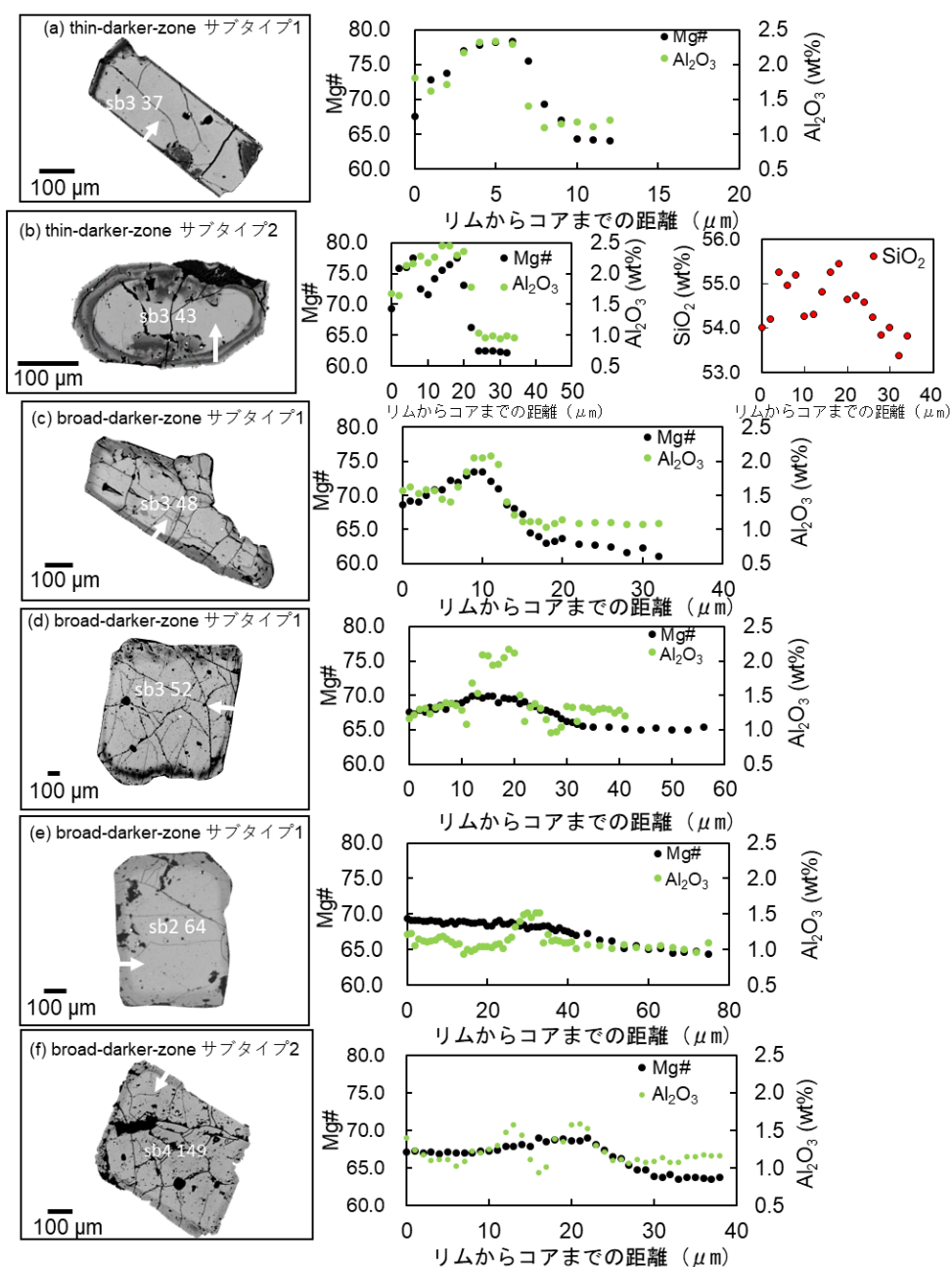


図 6 各タイプの輝石の反射電子象とゾーニングプロファイル (Nishi et al.,2019 から加筆修正した) 白矢印は分析箇所を示す。(a) thin-darker-zone サブタイプ 1、(b) thin-darker-zone サブタイプ 2、(c) - (e) The broad-darker-zone サブタイプ 1、(f) broad-darker-zone サブタイプ 2

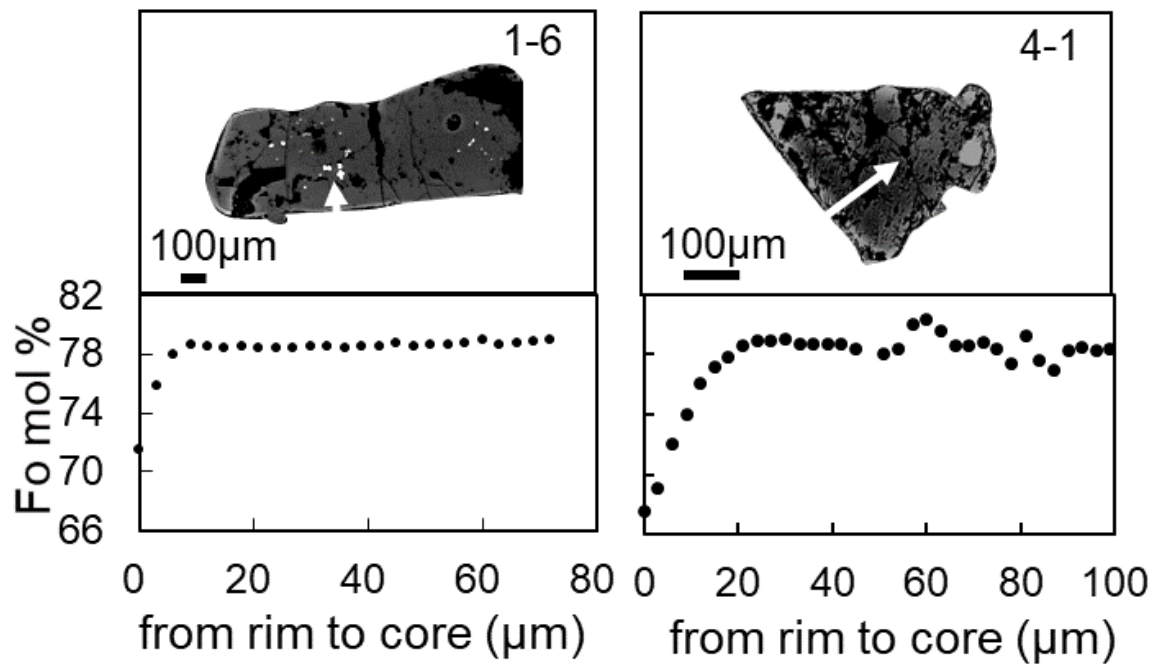


図7 かんらん石の組成プロファイル (Nishi et al., 2019)。

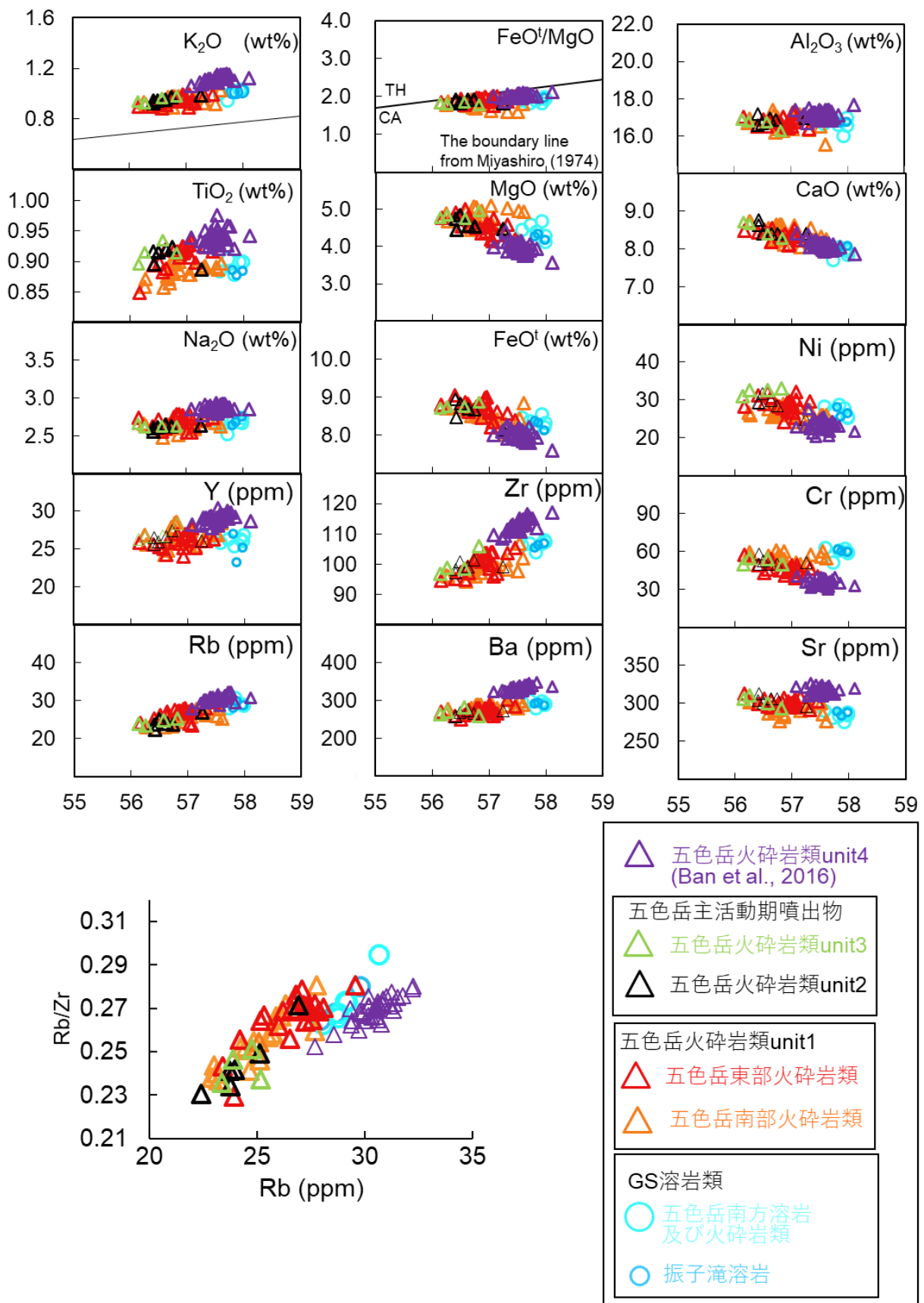


図8 各噴出物の全岩化学組成 (Nishi et al., 2019 から加筆・修正した)。

表 2 全岩化学組成の結果 (Nishi et al., 2019 から加筆・修正した)

主要元素 (wt%)

unit	sample no.	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO ^t	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Total (wt%)
振子滝溶岩	1308280801	57.97	0.88	16.73	8.12	0.14	4.17	8.08	2.75	1.02	0.12	99.98
	1308280802	57.87	0.88	16.70	8.33	0.14	4.34	7.94	2.68	1.01	0.11	99.99
	1310180101	57.62	0.85	16.56	8.51	0.14	4.21	7.88	2.75	1.12	0.11	99.74
GS 溶岩類 五色岳南方溶岩 および火砕岩類	1309190101	57.20	0.89	16.73	8.09	0.14	4.08	7.75	2.63	1.02	0.13	98.65
	1309190102	56.82	0.89	16.73	8.23	0.13	4.51	7.59	2.48	0.93	0.13	98.44
	1309190103	57.04	0.88	16.48	8.38	0.14	4.41	7.97	2.64	1.00	0.13	99.06
	1309210101	57.72	0.90	16.47	8.27	0.14	4.28	7.91	2.73	1.06	0.11	99.58
	1309210102	57.61	0.90	15.89	8.51	0.15	4.66	7.94	2.67	1.06	0.11	99.49
	1309210103	57.77	0.88	16.59	8.25	0.14	4.39	8.04	2.70	1.06	0.12	99.94
	12100901	56.94	0.89	16.22	7.97	0.15	5.00	8.49	2.68	0.95	0.09	99.37
12100902	57.20	0.89	16.44	7.91	0.15	4.93	8.28	2.66	0.95	0.09	99.50	
12102801	57.17	0.89	16.94	8.27	0.14	4.30	8.32	2.72	0.93	0.12	99.79	
12102802	56.29	0.87	16.68	8.69	0.15	4.74	8.36	2.58	0.90	0.11	99.36	
五色岳南部火砕岩類	12102803	56.62	0.87	16.25	8.15	0.15	5.07	8.55	2.63	0.89	0.10	99.28
12102804	56.53	0.88	16.29	8.51	0.15	5.04	8.54	2.65	0.89	0.11	99.59	
12102805	56.85	0.87	17.18	8.21	0.11	4.47	8.00	2.69	0.95	0.11	99.45	
1410050301	56.43	0.88	16.95	8.30	0.15	4.48	7.94	2.56	0.94	0.13	98.75	
1410050302	56.64	0.87	16.74	8.42	0.15	4.53	8.26	2.62	0.91	0.12	99.26	
五色岳東部火砕岩類	1310040101	56.90	0.90	17.14	8.31	0.14	4.13	8.31	2.78	0.99	0.11	99.72
	1310040103	56.83	0.91	17.03	8.44	0.15	4.36	8.39	2.78	0.94	0.11	99.93
	1310040106	56.47	0.92	16.70	8.59	0.15	4.68	8.53	2.64	0.91	0.12	99.70
	1310040107	57.04	0.93	16.54	8.63	0.15	4.59	8.42	2.68	0.95	0.12	100.05
	1310040108	56.86	0.92	16.48	8.84	0.15	4.53	8.29	2.73	0.96	0.11	99.88
	1310040109	56.88	0.92	16.39	8.98	0.15	4.60	8.11	2.75	0.98	0.11	99.87
	1310040110	56.30	0.90	16.83	8.72	0.15	4.52	8.47	2.71	0.92	0.12	99.63
	1310040111	56.77	0.92	16.72	8.56	0.14	4.57	8.32	2.54	0.94	0.12	99.59
	1310040112	56.65	0.91	16.57	8.93	0.15	4.50	8.06	2.68	0.94	0.12	99.50
	1310180102	56.03	0.85	16.99	8.77	0.15	4.77	8.47	2.73	0.90	0.12	99.77
	1310180104	56.82	0.92	16.63	8.79	0.15	4.50	8.32	2.78	0.96	0.11	99.98
	1310180105	56.80	0.89	16.88	8.57	0.14	4.29	8.18	2.61	0.92	0.12	99.40
	1310180106	56.49	0.89	16.81	8.79	0.15	4.80	8.17	2.60	0.94	0.12	99.75
1310180107	56.26	0.91	16.48	8.61	0.14	4.36	8.20	2.74	0.98	0.12	98.82	
1310180108	56.23	0.89	16.44	9.02	0.15	4.90	8.42	2.62	0.90	0.12	99.69	
1310180111	57.36	0.92	16.39	8.58	0.15	4.60	8.25	2.72	0.98	0.12	100.07	
1310180201	57.43	0.92	16.87	8.38	0.14	4.20	8.16	2.74	0.99	0.12	99.95	
1310180202	56.63	0.92	16.70	8.73	0.15	4.48	8.31	2.74	0.96	0.13	99.74	
1409280501	56.38	0.89	16.83	8.20	0.15	4.83	7.92	2.49	0.83	0.12	98.63	
1409280601	56.54	0.92	17.10	8.13	0.14	4.15	8.45	2.70	0.88	0.13	99.13	
1409300103	56.47	0.92	16.57	8.25	0.15	4.71	8.29	2.52	0.93	0.12	98.93	
1409300201	56.49	0.92	16.89	7.77	0.14	4.66	8.35	2.57	0.84	0.11	98.75	

FeO^t total iron calculated as FeO

表 2 続き

unit	sample no.	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO [†]	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Total (wt%)
	1609100401 unit2	56.06	0.91	16.66	8.12	0.14	4.17	8.08	2.75	1.02	0.12	99.98
	1609100402	56.84	0.88	16.84	8.33	0.14	4.34	7.94	2.68	1.01	0.11	99.99
五色岳	1609100403	56.14	0.91	16.78	8.51	0.14	4.21	7.88	2.75	1.12	0.11	99.74
火砕岩 unit2	1609100404	55.72	0.88	16.99	8.09	0.14	4.08	7.75	2.63	1.02	0.13	98.65
	1609100405	56.08	0.91	16.56	8.23	0.13	4.51	7.59	2.48	0.93	0.13	98.44
	1609100406	55.69	0.90	16.37	8.38	0.14	4.41	7.97	2.64	1.00	0.13	99.06
	160910unit3-1	56.38	0.91	16.15	8.27	0.14	4.28	7.91	2.73	1.06	0.11	99.58
五色岳	160910unit3-2	55.65	0.89	16.74	8.51	0.15	4.66	7.94	2.67	1.06	0.11	99.49
火砕岩 unit3	20160910unit3-3	55.85	0.92	16.53	8.25	0.14	4.39	8.04	2.70	1.06	0.12	99.94
	20160910unit3-4	55.93	0.91	16.67	7.97	0.15	5.00	8.49	2.68	0.95	0.09	99.37

FeO[†] total iron calculated as FeO

表 2 続き

微量元素 (ppm)

unit	sample no.	Ba	Cr	Nb	Ni	Rb	Sr	V	Y	Zn	Zr	
GS 溶岩類	振子滝溶岩	1308280801	286	59	3.0	26	29	289	214	25	71	107
		1308280802	290	62	3.4	28	28	289	208	27	75	105
		1310180101	293	60	3.3	26	30	283	220	23	72	106
		1309190101	289	60	3.4	25	29	288	205	26	75	108
		1309190102	301	51	3.1	27	28	282	226	26	81	107
	五色岳南方溶岩 および火砕岩類	1309190103	296	63	3.3	28	29	290	207	26	76	106
		1309210101	290	59	3.1	26	29	285	218	27	76	107
		1309210102	298	62	3.3	28	29	276	220	26	77	107
		1309210103	280	61	3.7	29	31	283	215	25	74	104
五色岳南部火砕岩類		12100901	285	57	2.8	27	26	296	217	27	83	98
		12100902	280	56	3.0	26	26	300	217	27	81	98
		12102801	283	51	3.0	27	23	301	229	27	85	102
		12102802	274	54	3.3	26	26	294	232	25	77	97
		12102803	292	48	3.3	26	27	295	225	26	85	100
		12102804	283	57	3.1	28	24	296	231	28	80	96
		12102805	280	57	3.5	28	24	296	234	26	80	96
		1410050301	279	50	2.9	26	28	291	230	25	83	99
		1410050302	281	51	3.1	24	26	298	230	27	82	100
五色岳東部火砕岩類		1310040101	277	39	3.2	25	28	306	206	27	71	104
		1310040103	263	41	3.2	24	27	307	212	26	74	101
		1310040106	275	50	3.1	31	27	304	226	26	72	97
		1310040107	276	47	3.4	29	27	297	237	27	74	100
		1310040108	272	44	3.1	27	28	297	218	27	75	102
		1310040109	277	46	3.5	29	28	296	221	27	74	104
		1310040110	250	43	3.3	29	26	306	215	25	74	98
		1310040111	288	49	3.4	29	27	301	228	27	71	99
		1310040112	279	44	3.2	30	27	303	230	24	76	104
		1310180102	271	58	3.5	28	24	313	223	26	76	95
		1310180104	280	45	3.3	28	27	302	221	27	74	101
		1310180105	266	44	3.3	28	27	308	216	25	71	97
		1310180106	271	54	3.8	30	26	295	235	24	73	99
		1310180107	270	45	3.3	27	27	297	211	25	73	103
		1310180108	259	49	2.8	31	25	299	225	26	76	95
		1310180111	303	46	3.2	30	28	292	230	26	74	104
		1310180201	285	40	3.7	24	30	303	217	26	71	105
		1310180202	279	45	3.2	28	27	300	218	26	73	102
		1409280501	262	46	3.2	32	25	296	228	25	77	95
		1409280601	279	41	3.3	27	24	302	237	26	64	104
	1409300103	267	46	3.4	30	27	295	213	26	81	100	
	1409300201	258	49	3.4	32	23	302	221	28	81	96	

表 2 続き

	sample no.	Ba	Cr	Nb	Ni	Rb	Sr	V	Y	Zn	Zr
五色岳	1609100401 unit2	266	50	3.4	34	24	314	234	27	80	101
火砕岩	1609100402	272	51	3.4	30	27	303	230	26	93	99
uni2	1609100403	273	50	3.2	35	24	313	232	27	76	99
	1609100404	257	50	3.3	35	22	320	217	26	72	97
	1609100405	268	52	2.8	37	25	308	235	26	85	101
	1609100406	260	58	3.0	35	24	310	231	27	73	98
五色岳	160910unit3-1	260	50	3.3	39	25	301	224	28	90	106
火砕岩	160910unit3-2	264	50	3.1	37	24	314	231	26	78	97
unit3	20160910unit3-3	281	54	3.0	38	25	307	231	27	79	99
	20160910unit3-4	270	55	3.3	38	23	317	225	27	78	99

5. 考察

5.1. 苦鉄質・珪長質マグマの混合の証拠

足立 (2013MS)、Ban et al. (2016)、と Nishi et al. (2019) は、斑晶に溶融組織が認められること (斜長石の汚濁帯、および Mg-poor homogenous タイプの輝石の半自形)、全ての噴出物に非平衡な斑晶組み合わせが存在すること (例えば、An-poor 斜長石と Mg#-poor 輝石 対 An-rich 斜長石)、斑晶の累帯構造が認められること (例えば thin-darker-zone、board-darker-zone、oscillatory-zoned タイプの存在)、および全岩試料の主要元素と微量元素の SiO_2 図の線形トレンドを示すことから、五色岳火砕岩類は苦鉄質マグマおよび珪長質マグマ混合によって形成されたことを指摘した。

Nishi et al. (2019) は、かんらん石-直方輝石とかんらん石-単斜輝石の Fe-Mg 交換平衡 (Matsui and Nishizawa, 1974; Obata et al., 1974) にもとづいて、かんらん石と輝石は組成のバリエーションから計 3 つのグループに分類した。(1) Felsic end-member group は、Mg#-poor な直方輝石 (ca. Mg# = 63-66 の homogenous、thin-darker-zone、board-darker-zone タイプのコア、oscillatory zoned タイプの Mg-poorer part) および Mg#-poor な単斜輝石 (ca. Mg# = 64-68; homogenous タイプ、oscillatory zoned タイプの Mg-poorer part) を含む。このグループは珪長質端成分マグマに由来すると考えられる。(2) mafic end-member group は、Fo-rich core タイプのかんらん石 (ca. Fo₇₈₋₈₂; core) が含まれる。このグループ

は苦鉄質端成分マグマに由来すると考えられる。なお、Fo-poor core タイプのかんらん石 (ca.Fo₆₆₋₇₄;コア) はこのグループに含まれる可能性が高い。組成から判断すると、Fo-poor タイプはマグマ混合によって、より珩長質組成に変化した苦鉄質マグマ内で晶出したと考えられる。(3) Mixed group は中間的な Mg#の輝石 (ca. Mg#= 69 ; homogenous core タイプ、約 Mg# = 67-79 ; board-darker-zone および thin-darker-zone タイプのリム、thin-darker-zone タイプの Mg-rich zone、oscillatory zoned タイプの Mg-richer part)、Fo-rich core タイプのかんらん石のリム (ca.Fo₆₆₋₇₂) が含まれる。このグループの斑晶は珩長質マグマと苦鉄質マグマが混合して形成された混合マグマ内で晶出したと考えられる。

また、斜長石斑晶も同様に組織および鉱物組成をもとに、felsic end-member、mafic end-member、mixed-group に分けられる。An-poor 斜長石 (ca. An₆₅; oscillatory zoned の An-poor zone) は、felsic end-member group に分けられる。An-rich 斜長石 (ca. An_{~90} の homogenous core と An_{~80} の patchy core) は mafic end-member に分けられる。中間組成を持つ斜長石 (ca. An_{~72}; oscillatory-patchy-zoned タイプと斜長石のリム) は mixed-group に分けられる。

全ての噴出物は二端成分マグマ混合によって形成されたと考えられるが、SiO₂ハーカ一図で各ユニットの組成トレンドはやや異なっている (図 8)。これらは、各ユニットにおける二端成分マグマの組成がやや異なっていたことを示唆する。

5.2. 珪長質端成分マグマの岩石学的研究特徴

MELTS プログラム (Gualda et al., 2012) を用いて、五色岳主活動期噴出物の珪長質端成分マグマの T-P-H₂O 条件を推定した。さらに、Nishi et al. (2019) は GS 溶岩類、五色岳南部火砕岩類、五色岳東部火砕岩類について、Ban et al. (2016) は五色岳火砕岩類 unit4 の珪長質端成分マグマの T-P-H₂O 条件を推定したので、本研究結果と比較検討した。

珪長質端成分マグマの推定方法について、以下に詳しく記す。(i) 珪長質端成分マグマの SiO₂ の最大は Ni、Cr-SiO₂ 図における化学組成トレンド(全岩化学組成の回帰直線)の X 切片から推定した。その場合、五色岳東部火砕岩類 (Nishi et al., 2019) と同じ組成トレンドを使用した。その結果、推定される SiO₂ 量は約 60.0-61.0 wt%であった (付録図 2)。さらに、珪長質端成分マグマの SiO₂ 量は、全岩 SiO₂ 含有量 (SiO₂ = 56.0-58.0 wt%) よりも高くなければならない。従って、珪長質端部のマグマの SiO₂ 含量は、58.0-61.0 wt% に制約される。(ii) 各ユニットの珪長質マグマの全岩組成データセット (SiO₂ = 58.5、59.0、59.5、60.0、60.5、61.0) を検討した。SiO₂ 以外の主要元素の組成はハーカー図 (図 8) の回帰直線から読みとった (表 3)。(iii) データセットを Rhyolite-MELTS プログラムに入力し、T-P-H₂O 条件の化学組成を有する鉱物組み合わせおよびモード組成を得た。なお、Rhyolite-MELTS プログラムの計算条件として Ban et al. (2008) を参考に、酸素分圧は NNO とした。(iv) 計算結果を実際の鉱物組成とモード組成とを比較し (表 4)、SiO₂-T-P-H₂O 条件の最適範囲を推定した。

GS 溶岩類の $\text{SiO}_2\text{-T-P-H}_2\text{O}$ 条件は、60.0-61.0 wt%、ca. 970-990°C、1.6 kbar および 1.8-2.2 wt%、五色岳南部火砕岩類の 60.0-60.5 wt%、ca. 968-990°C、1.6-2.0 kbar および 1.8-2.2 wt%、五色岳東部火砕岩類は、60.0 wt%、ca. 990°C、1.6 kbar および 1.8 wt%、五色岳主活動期噴出物は、60.0-61.0 wt%、ca. 951-984°C、1.2-1.8 kbar および 1.8-2.4 wt%、五色岳火砕岩類 unit4 は 60.0 wt%、ca. 955-970°C、1.3-1.5 kbar および 1.7-1.8 wt%であった。全岩科学組成から推定される各ユニットの珪長質端成分マグマの MgO 、 FeO^{\dagger} 、 TiO_2 、Cr 含量はやや異なるが（図 8 および付録図 2）、 SiO_2 含量および T-P- H_2O 含量は類似する。

表 3 Rhyolite-MELTS プログラムに入力した端成分マグマのデータ

(Nishi et al., 2019 から加筆・修正した)

		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO [†]	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	total
GS 溶岩類	苦鉄質マグマ	48.00	0.65	18.00	11.80	0.21	7.20	10.00	2.20	0.40	0.12	99.08
		48.50	0.66	17.94	11.63	0.21	7.06	9.90	2.22	0.44	0.12	99.14
		49.00	0.68	17.88	11.45	0.20	6.92	9.79	2.23	0.47	0.12	99.21
		49.50	0.69	17.83	11.28	0.20	6.78	9.69	2.25	0.51	0.12	99.27
		50.00	0.70	17.77	11.10	0.20	6.63	9.58	2.27	0.54	0.12	99.33
		50.50	0.72	17.71	10.93	0.19	6.49	9.48	2.28	0.58	0.12	99.39
		51.00	0.73	17.65	10.75	0.19	6.35	9.38	2.30	0.62	0.12	99.46
	珪長質マグマ	51.50	0.74	17.59	10.58	0.19	6.21	9.27	2.32	0.65	0.12	99.52
		52.00	0.76	17.53	10.40	0.18	6.07	9.17	2.33	0.69	0.12	99.58
		58.50	0.93	16.78	8.13	0.14	4.23	7.81	2.55	1.15	0.12	100.33
		59.00	0.94	16.72	7.95	0.14	4.08	7.71	2.57	1.19	0.12	100.41
		59.50	0.96	16.66	7.78	0.13	3.94	7.60	2.58	1.22	0.12	100.50
		60.00	0.97	16.60	7.60	0.13	3.80	7.50	2.60	1.26	0.12	100.58
		60.50	0.98	16.54	7.43	0.13	3.66	7.40	2.62	1.30	0.12	100.66
五色岳南部 火砕岩類	61.00	1.00	16.48	7.25	0.12	3.52	7.29	2.63	1.33	0.12	100.75	
	苦鉄質マグマ	48.00	0.58	18.30	11.20	0.19	7.80	10.70	2.00	0.30	0.12	99.19
		48.50	0.60	18.23	11.03	0.19	7.66	10.58	2.03	0.34	0.12	99.28
		49.00	0.61	18.15	10.87	0.19	7.52	10.46	2.06	0.38	0.12	99.36
		49.50	0.63	18.08	10.70	0.18	7.37	10.34	2.09	0.42	0.12	99.43
		50.00	0.64	18.00	10.54	0.18	7.23	10.22	2.12	0.45	0.12	99.5
		50.50	0.66	17.93	10.37	0.18	7.09	10.10	2.15	0.49	0.12	99.59
		51.00	0.67	17.85	10.21	0.18	6.95	9.98	2.18	0.53	0.12	99.67
	珪長質マグマ	51.50	0.69	17.78	10.04	0.17	6.81	9.85	2.20	0.57	0.12	99.73
		52.00	0.70	17.70	9.88	0.17	6.66	9.73	2.23	0.61	0.12	99.8
		58.50	0.95	16.73	7.86	0.14	4.38	8.16	2.61	1.11	0.12	100.56
		59.00	0.96	16.65	7.71	0.14	4.25	8.04	2.64	1.14	0.12	100.65
		59.50	0.97	16.58	7.55	0.13	4.13	7.92	2.67	1.18	0.12	100.75
		60.00	0.98	16.50	7.40	0.13	4.00	7.80	2.70	1.22	0.12	100.85
60.50		0.99	16.43	7.25	0.13	3.88	7.68	2.73	1.26	0.12	100.97	
五色岳東部火砕岩類 五色岳主活動期噴出物	61.00	1.00	16.35	7.09	0.13	3.75	7.56	2.76	1.30	0.12	101.06	
	苦鉄質マグマ	48.00	0.65	18.30	11.50	0.19	7.40	10.70	2.00	0.30	0.12	99.16
		48.50	0.66	18.23	11.33	0.19	7.27	10.58	2.03	0.34	0.12	99.24
		49.00	0.68	18.15	11.17	0.19	7.13	10.46	2.06	0.38	0.12	99.33
		49.50	0.69	18.08	11.00	0.18	7.00	10.34	2.09	0.42	0.12	99.41
		50.00	0.70	18.00	10.84	0.18	6.86	10.22	2.12	0.45	0.12	99.49
		50.50	0.72	17.93	10.67	0.18	6.73	10.10	2.15	0.49	0.12	99.58
		51.00	0.73	17.85	10.51	0.18	6.59	9.98	2.18	0.53	0.12	99.66
	珪長質マグマ	51.50	0.74	17.78	10.34	0.17	6.46	9.85	2.20	0.57	0.12	99.74
		52.00	0.76	17.70	10.18	0.17	6.32	9.73	2.23	0.61	0.12	99.82
		58.50	0.95	16.73	7.86	0.14	4.38	8.16	2.61	1.11	0.12	100.56
		59.00	0.96	16.65	7.71	0.14	4.25	8.04	2.64	1.14	0.12	100.65
		59.50	0.97	16.58	7.55	0.13	4.13	7.92	2.67	1.18	0.12	100.75
		60.00	0.98	16.50	7.40	0.13	4.00	7.80	2.70	1.22	0.12	100.85
60.50		0.99	16.43	7.25	0.13	3.88	7.68	2.73	1.26	0.12	100.97	
61.00	1.00	16.35	7.09	0.13	3.75	7.56	2.76	1.30	0.12	101.06		

FeO[†] total iron calculated as FeO

表 4 各ユニットのモード組成と鉱物化学組成 (Nishi et al., 2019 から加筆・修正した)

	珪長質マグマの鉱物組成とモード組成			
	五色岳南部火砕岩類	五色岳東部火砕岩類	五色岳主活動期噴出物	GS 溶岩類
plagioclase	An ₆₅ (14.5–18.5%)	An ₆₅ (16.9–20.0%)	An ₆₅ (14.1–25.2%)	An ₆₅ (16.2–27.4%)
orthopyroxene	Mg# = 66 (4.9–7.3%)	Mg# = 66 (4.8– 11.2%)	Mg# = 66 (5.0 –9.2%)	Mg# = 65 (5.8– 7.8%)
clinopyroxene	Mg# = 68 (>1.5%)	Mg# = 68 (>1.2%)	Mg# = 68 (>2.7%)	Mg# = 67 (>1.7%)

(※Rhyolite-MELTS を使用する際に、珪長質端成分マグマの制約条件として使用した)

5.3. 苦鉄質端成分マグマの熱力学的モデリング

MELTS プログラム (Gualda et al., 2012) を用いて、五色岳主活動期噴出物の苦鉄質端成分マグマの T-P-H₂O 条件を推定した。さらに、Nishi et al. (2019) は GS 溶岩類、五色岳南部火砕岩類、五色岳東部火砕岩類について、Ban et al. (2016) は五色岳火砕岩類 unit4 の苦鉄質端成分マグマの T-P-H₂O 条件を推定したので、本研究結果と比較検討した。なお、苦鉄端成分マグマの推定には Nishi et al. (2019) の五色岳東部火砕岩類と同じ組成トレンドを使用した。

苦鉄質端成分マグマの推定方法について、以下に詳しく記す。(i) Ba、Zr-SiO₂ 図における組成トレンド (回帰直線) の X 切片は、約 47.0-48.0 wt% である (付録図 2)。したがって、苦鉄質端成分マグマの SiO₂ 量は >47.0-48.0 wt% と推定される。さらに、苦鉄質端成分マグマの SiO₂ 量は全岩 SiO₂ 量 (SiO₂ = 56.0-58.0 wt%) よりも低くなければならない。したがって、苦鉄質端成分マグマの SiO₂ 含量は、47.0-56.0 wt% に制約される。

(ii) 苦鉄質端成分マグマの全岩組成データ・セット ($\text{SiO}_2 = 48.0, 48.5, 49.0, 49.5, 50.0, 50.5, 51.0, 51.5, 52.0$; 図 8、表 3) を組成トレンドから検討した。(iii) 推定される苦鉄質端成分マグマの鉱物組み合わせ及びその組成は斜長石 (ca. $\text{An}_{\sim 90}$) + オリーブ (ca. Fo_{80}) からなり、MELTS プログラム (Gualda et al., 2012) により推定される T-P- H_2O 条件は、GS 溶岩類で 48.0-49.0 wt%、ca. 1,135-1,158°C、 < 2.2 kbar および 1.2-1.6 wt%、五色岳南部火砕岩類で 48.0-50.0 wt%、1,113-1,160°C、2.2 kbar 未満、1.2-2.2 wt%、五色岳東部火砕岩類で 48.0-50.5 wt%、1,115-1,170°C、2.4 kbar 未満、1.0-2.2 wt%、五色岳主活動期噴出物で 48.0-49.0 wt%、1,104-1,158°C、2.0 kbar 未満、1.2-2.4 wt%、五色岳火砕岩 unit4 で、50.5 wt%、 > 1.5 kbar である。

全岩化学組成から推定される各ユニットの苦鉄質端成分マグマの MgO 、 FeO^t 、 TiO_2 、Cr 含量は異なるが (図 8 および付録図 2)、 SiO_2 含量および T-P- H_2O 含量は類似する。

5.4. 混合マグマ

5.4.1. 混合マグマの形成ダイナミクスと多様性

岩石学的な特徴から検討したマグマ供給系を図 9 に示す。蔵王火山の場合、珪長質端成分マグマは苦鉄質端成分マグマの注入によって再活性化したと考えられる (Humphreys et al., 2006 ; Tomiya et al., 2013)。

二端成分が混合することで形成された混合マグマは、二端成分マグマの境界で形成されたと考えられている (Tomiya et al., 2013)。斜長石、直方輝石、単斜輝石、かんらん石のリムの組成は ca. An₇₂、Mg# = 67-69、Mg# = 69-71 および Fo₆₈ である。これらは、噴火に至る前に混合マグマ (主混合マグマ) で生成されたと考えられる (図 9)。一方で、直方輝石の thin-darker-zone タイプの Mg-rich zone の Mg# は ~75 であり、主混合マグマと苦鉄質端成分マグマの中間的な組成のマグマ (高 Mg 混合マグマ) から晶出したと考えられる。さらに、thin-darker-zone タイプのリムも Mg# = 69 程度であるので (図 6a)、高 Mg 混合マグマは一時的に形成されたと考えられる。thin-darker-zone タイプのコアは珪長質端成分マグマで晶出した組成のため、高 Mg 混合マグマが珪長質端成分マグマに到達した際に、高 Mg 混合マグマが thin-darker-zone タイプのコアを取りこんだと考えられる (図 9)。さらに、thin-darker-zone サブタイプ 2 は苦鉄質マグマの注入頻度が高かったことと (図 6b) (Petrone et al., 2018)、内部の Mg#ピーク (図 6cd) は、以前の苦鉄質マグマの注入を示唆する。

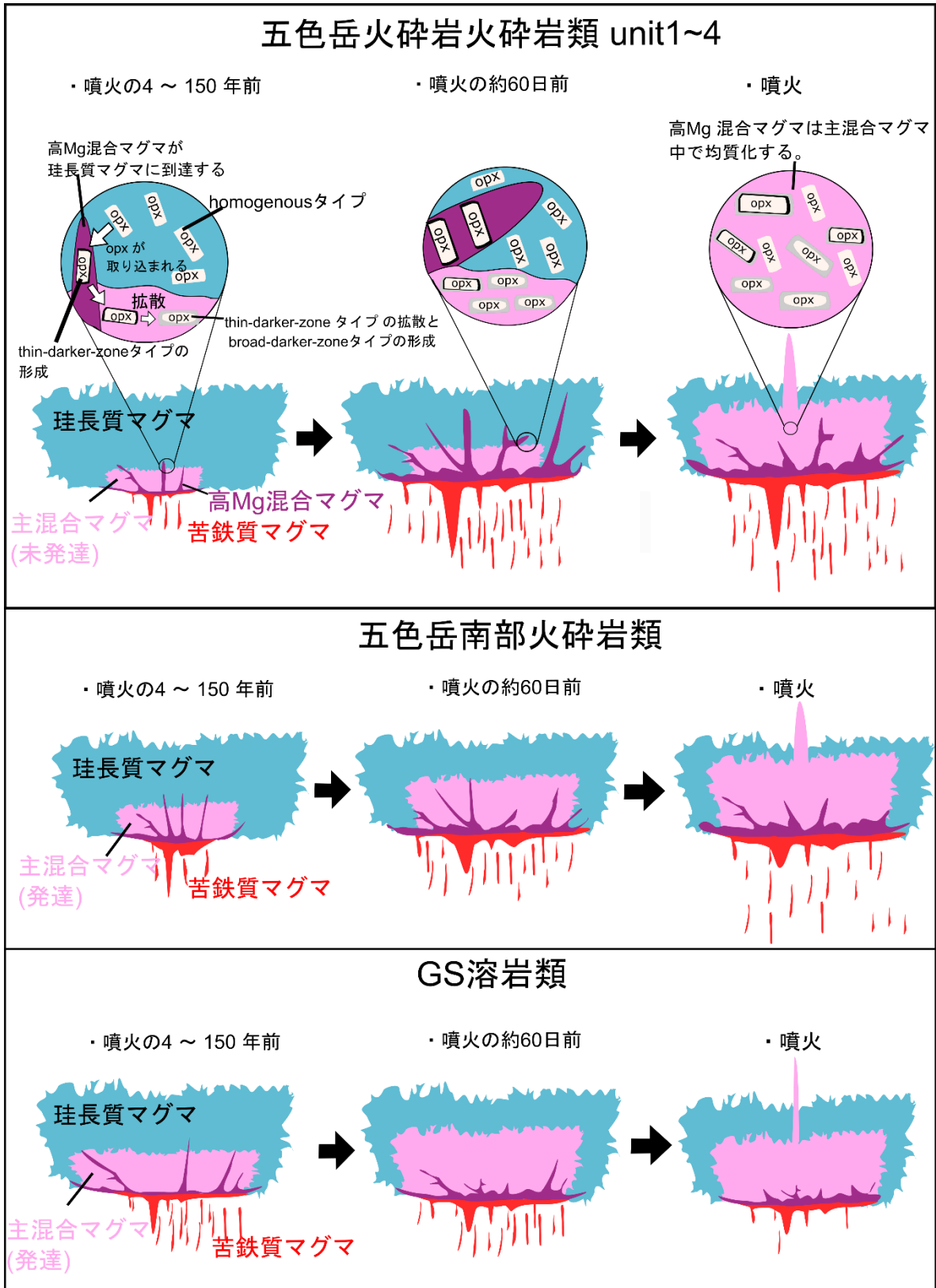


図9 各噴出物におけるマグマ供給系の概念図 (Nishi et al. 2019 から加筆・修正した)。

5.4.2. 斜長石の組織的多様性とマグマダイナミクス

斜長石の波動累帯構造に関する研究はこれまでに数多く行われてきた (Pearce and Kolisnik, 1990; Pearce, 1994; Singer et al., 1995; Viccaro et al., 2010; Renjith, 2014)。これら研究によると、斜長石の高振幅・低周期の波動累帯構造 (An-rich zone と An-poor zone の An の差が $> \sim 10$ の時) や直方輝石の oscillatory zoned タイプはマグマ溜まり内の H₂O の不均質性やカイネティックな効果で形成されないと考えられている (Viccaro et al., 2010 など)。従って、斜長石や輝石の波動累帯は、苦鉄質マグマの注入および不均質なマグマ溜まり内の対流によって形成された可能性が高い。

Humphreys et al. (2006) によると、patchy-core タイプの組織および組成は、An-rich な斜長石が H₂O に不飽和なマグマを上昇する時に部分的に溶解し、その後 An-poor 斜長石が晶出することで形成されたと考えられている (Humphreys et al., 2006)。An-rich core は An_{80~90} であるため、苦鉄質マグマや高 Mg 混合マグマから晶出したと考えられる。その後、苦鉄質マグマまたは高 Mg 混合マグマが上昇すると、一部の An-rich core が溶解し、An-poor patchy を晶出したと考えられる (Humphreys et al., 2006)。また、oscillatory-patchy zoned タイプの不連続な An-poor zone は、複数回の苦鉄質マグマの注入と不均質な混合マグマの対流によって、結晶化・溶解を繰り返すことによって形成されたと考えられる (Landi et al., 2004)。

5.5. 直方輝石の滞留時間の推定

5.5.1. thin-darker-zone タイプの滞留時間

直方輝石の thin-darker-zone タイプは (1) homogenous core タイプが高 Mg 混合マグマによって取り込まれることで Mg-rich zone ($Mg\# = \sim 79$) を形成し、(2) 均質化した主混合マグマで $Mg\# = 67-69$ のリムが形成され、(3) Mg-Fe の拡散が起こることで形成されたと考えられる (図 9)。測定された直方輝石の $Mg\#$ プロファイルは、成長および拡散によって形成される。しかしながら、 Al_2O_3 プロファイルは、拡散係数が非常に小さいため、成長のみを反映すると考えられる。そこで、 Al_2O_3 プロファイルにもとづいて、 $Mg\#$ の初期プロファイル (図 10ab および付録 1 に赤い点線) を推定した。しかしながら、例外的なゾーニングパターンを示す斑晶が認められた。例えば、異方的なゾーニングパターンを示しめず (付録図 1, sb1 110, sb2 67, sb3 38) 場合がある。これらの異方性は、未知のプロセス (例えば、不均質な加熱など) が直方輝石で発生した可能性が高い。また、thin-darker-zone サブタイプ 2 の外側の Mg-rich zone の $Mg\#$ と Al_2O_3 プロファイルはやや異なる (図 6b)。 Al_2O_3 、 SiO_2 および $Mg\#$ の含有量プロファイルをもとにより詳しく見ると、リムから $8\sim 4\ \mu m$ は高 Mg 混合マグマ中で結晶化し、 $12\sim 10\ \mu m$ は急成長であったと考えられる (図 6b)。また、sb1 41、sb3 o51、および sb3 42 (付録図 1) のリムにおける Al_2O_3 の急上昇は、急成長である可能性が高い。これらの例外的な斑晶の滞留時間の推定は行わなかった。

滞留時間を計算するうえで温度は Brey and Köhler 1990 の両輝石温度計を用いて推定した。なお、主混合マグマの温度の推定には両輝石の board-darker-zone タイプのリムの組成（直方輝石、Mg# = 67-69；単斜輝石、Mg# = 69-71）を使用した。推定された温度は五色岳南部火砕岩類で ca. 1018±9°C (n=33)。五色岳東部火砕岩類で ca. 1018±11°C (n=41)、GS 溶岩類で ca. 1019±11°C (n=39) である。また、酸素分圧は Ban et al. (2008) を参考に NNO とした。拡散プロファイルの推定には、Prone et al. (2016) が Crank (1975) の式 (2.14) を改訂したものを引用した。

$$y = y_0 + \left(\frac{C_0}{2}\right) \times \operatorname{erf}\left[\frac{x-x_0}{\sqrt{4Dt}}\right] \quad (1)$$

y は距離 x(m) における Mg# の濃度 (%), C₀ はプロファイル中の Mg# の最大と最小の差、D は拡散係数 (m²S⁻¹)、t は時間 (s)、y₀ は変曲点 x₀(m) における Mg#、erf は誤差関数を示す (Petrone et al., 2016)。拡散係数は Dohmen et al., (2014) から以下の式を引用した。

$$D_{Fe-Mg} = 1.12 \times 10^{-6} (f_{O_2})^{0.053 \pm 0.027} \exp[-308 \pm 23[kJ/mol]/(RT)] \quad (2)$$

f_{O₂} は酸素分圧 (Pa)、R はガス定数 (J · mol⁻¹ · K⁻¹)、T は絶対温度 (K) を示す。

Dohmen et al. (2014) によると、直方輝石の (001) の Mg-Fe の拡散速度は (100) または (010) と比較して約 3.5 倍速い。また、Allan et al. (2013) と Cooper et al. (2017) は、直方輝石の (001) の Mg# 含有量は結晶成長に強く依存する可能性を指摘した。したがって、本研究では誤差をできるだけ小さくするため、ゾーニングプロファイルは可

能な限り(001)を垂直に測定した。

推定される拡散係数および拡散プロファイルの最も大きな誤差要因は温度である (Costa et al., 2008)。本論で推定された主混合マグマの温度誤差は $\pm 10^{\circ}\text{C}$ である。この場合、50%未満の計算誤差が生じると考えられる。また、我々は Allan et al. (2013) と Cooper et al. (2017)によると、拡散プロファイルの形状や長さによる誤差は $\pm 3\%$ と見積もられている。本研究でもこの誤差を適応する。

ゾーニングプロファイルと計算された拡散プロファイルを比較し、thin-darker-zone タイプの滞留時間を推定した。その結果、サブタイプ 1 は約 60-260 日未満で、サブタイプ 2 は約 1.5 年未満の滞留時間が得られた (図 10ab および表 5)。thin-darker-zone タイプの 1.5 年未満の時間スケールは、噴火の直前まで苦鉄質マグマの注入が継続していたことを示唆する。

thin-darker-zone サブタイプ 1 (図 10a) のピーク Mg#値と Al 値との間に正の相関が認められる (図 11)。図 11 では、Mg-Fe 拡散の影響をできるだけ排除するために、より短い滞留時間 (約 260 日) を示す斑晶を使用した。

5.5.2. board-darker-zone タイプの滞留時間

直方輝石の Mg#と Al_2O_3 のプロファイルから、(1) broad-darker-zone タイプのコアは珪長質端成分マグマで形成され、(2) 高 Mg 混合マグマによって取り込まれ、(3) Mg#

と Al_2O_3 のピークが形成され、(4) その後、主混合マグマから結晶化した比較的広い平坦部分 ($\text{Mg}\# = 67-69$) が形成され (図 6c-f)、(5) Mg-Fe の拡散が開始したと考えられる (図 11)。なお、サブタイプ 1 が再度、高 Mg 混合マグマに取り込まれた場合、サブタイプ 2 が形成されると考えられる。

board-darker-zone タイプの滞留時間を推定するため、thin-darker-zone タイプと同じ温度酸素分圧条件 (約 $1020 \pm 10^\circ\text{C}$ 、 NNO) を使用した。

サブタイプ 1 の拡散プロファイルは Al_2O_3 プロファイル (図 10c-e および付録図 1 に赤および灰色の点線) にもとづいて推定した。 $\text{Mg}\#$ の元のピーク値は、図 11 の回帰直線を用いて推定した。Petroni et al. (2016) が Crank (1975) の式 (2.15) を改訂したものを引用した。

$$y = y_0 + \left(\frac{C_0}{2}\right) \times \left[\text{erf} \frac{h-(x-x_0)}{\sqrt{4Dt}} + \text{erf} \frac{h+(x-x_0)}{\sqrt{4Dt}} \right] \quad (3)$$

y は距離 $x(\text{m})$ における $\text{Mg}\#$ の濃度 (%)、 C_0 はプロファイル中の $\text{Mg}\#$ の最大と最小の差、 D は拡散係数 (m^2S^{-1})、 t は時間 (s)、 y_0 は有限リザーバーの中央点 x_0 (m) における $\text{Mg}\#$ 、距離 h は有限リザーバーの半分の厚さ、 erf は誤差関数を示すを示す (Petroni et al., 2016)。拡散係数は Dohmen et al., (2014) から (式 2) を引用した。

サブタイプ 2 は (図 6f)、外部の Al-rich ゾーンの初期プロファイルを推定するのが困難であるため、サブタイプ 1 の拡散プロファイルを計算した。

五色岳南部火砕岩類の滞留時間は 6.0~150 年、五色岳主活動期噴出物は 2.5~60 年、

GS 溶岩類は 4.5～150 年と推定される（図 10c-e および表 5）。推定された 2.5～150 年の滞留時間は先駆的な苦鉄質マグマの注入を示唆する。

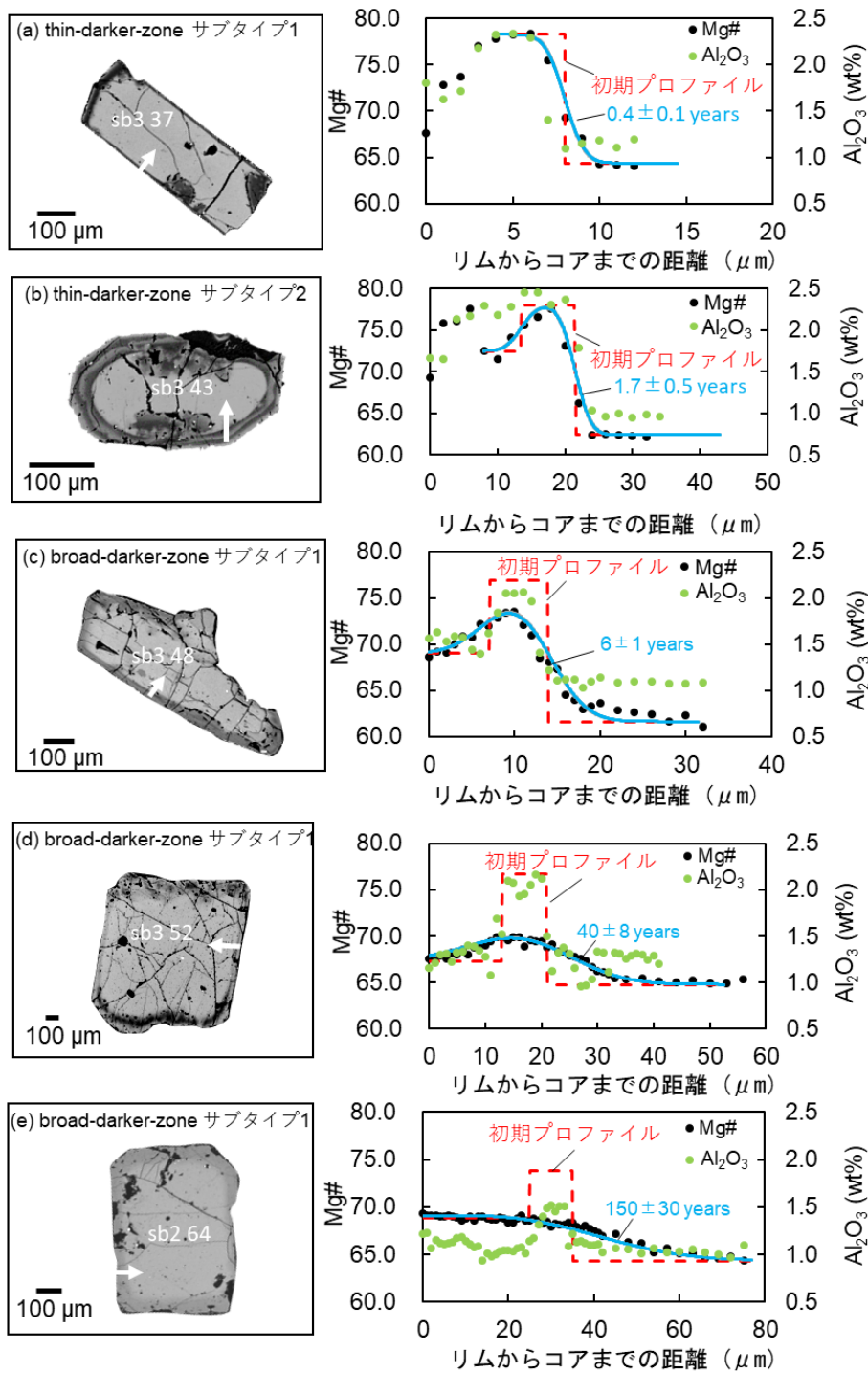


図 10 thin-darker-zone タイプと board-darker-zone タイプの推定される初期プロファイルと拡散プロファイル (Nishi et al. 2019 から加筆・修正した)。図上の年数は推定される滞留時間を示す。(a) thin-darker-zone サブタイプ 1、(b) thin-darker-zone サブタイプ 2、(c) - (e) broad-darker-zone サブタイプ 1

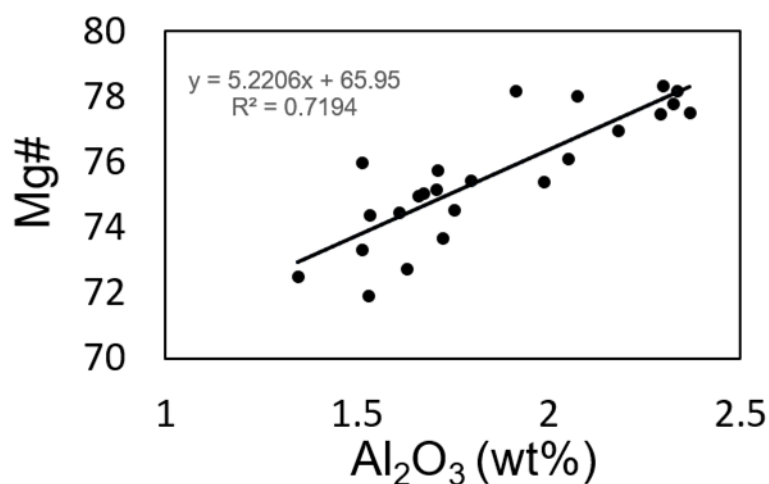


図 11 thin-darker-zone タイプの Mg-rich zone の Mg# と Al₂O₃ の相関関係 (Nishi et al. 2019)。

表 5 推定される直方輝石の滞留時間のまとめ (Nishi et al. 2019)

ユニット	サンプル	滞留時間 (年)	誤差 (±)	タイプ
GS 溶岩類	sb1 114	0.2	0.05	thin-darker-zone subtype-1
	sb1 115	0.1	0.02	thin-darker-zone subtype-1
	sb1 41	120	20	broad-darker-zone subtype-1
	sb1 113	25	6	broad-darker-zone subtype-1
	sb2 64	150	30	broad-darker-zone subtype-1
	sb2 66	7	2	broad-darker-zone subtype-1
	sb2 69	24	6	broad-darker-zone subtype-1
	sb2 86	8	2	broad-darker-zone subtype-1
五色岳南部 火砕岩類	sb3 37	0.4	0.1	thin-darker-zone subtype-1
	sb3 80	0.1	0.02	thin-darker-zone subtype-1
	sb3 100	0.3	0.1	thin-darker-zone subtype-1
	sb3 43	1.7	0.5	thin-darker-zone subtype-2
	sb3 51	1.5	0.3	thin-darker-zone subtype-2
	sb3 42	10	2	broad-darker-zone subtype-1
	sb3 47	100	20	broad-darker-zone subtype-1
	sb3 48	6	1	broad-darker-zone subtype-1
	sb3 49	150	30	broad-darker-zone subtype-1
	sb3 52	40	8	broad-darker-zone subtype-1
五色岳東部 火砕岩類	sb4 134	0.4	0.1	thin-darker-zone subtype-1
	sb4 142	0.5	0.2	thin-darker-zone subtype-1
	sb4 146	0.4	0.2	thin-darker-zone subtype-1
	sb4 147	0.7	0.2	thin-darker-zone subtype-1
	sb4 96	45	15	broad-darker-zone subtype-1
	sb4 114	2.8	0.7	broad-darker-zone subtype-1
	sb4 132	2.5	0.7	broad-darker-zone subtype-1
	sb4 133	2.5	0.9	broad-darker-zone subtype-1
	sb4 135	60	12	broad-darker-zone subtype-1

5.6. マグマ供給系の構造と時間変化

岩石学的特徴から、全ての噴出物は苦鉄質マグマと珪長質マグマとの混合によって形成されたと考えられる。また、推定される両端成分の T-P-H₂O 条件は類似する。GS 溶岩類 (SiO₂ = 57.5-58.0 wt%) と五色岳火砕岩 unit4 (SiO₂ = 57.2-57.7 wt%) の全岩 SiO₂ 含量は、五色岳南部火砕岩類および五色岳主活動期噴出物 (SiO₂ = 56.3-57.6 wt%) よりもやや高い。一方、GS 溶岩類では滞留時間の長い **broad-darker-zone** タイプの直方輝石が多いのに対し、上位の火砕岩類ユニットでは滞留時間の短い **thin-darker-zone** タイプが多い (表 6)。

GS 溶岩類の **board-darker-zone** タイプの滞留時間は他のユニットとより長い (表 6)。よって、主混合マグマ形成のタイムスケールは上位の火砕岩ユニットのそれよりも長い。したがって、より多くの苦鉄質マグマの注入によって、GS 溶岩類の混合マグマ層は発達したと考えられる (図 9)。また、GS 溶岩類と五色岳火砕岩類 unit4 の全岩 SiO₂ 含量は若干高い。これはより珪長質端成分マグマの寄与を受けたためと考えられる。一方、GS 溶岩類の **thin-darker-zone** タイプが上位の火砕岩ユニットと比べて少ないことは、苦鉄質マグマが主混合マグマ層を通過しにくかったことを示唆する (図 9)。

上位の火砕岩ユニットでは、**board-darker-zone** タイプの割合が低い (表 6)。よって、主混合マグマ形成のタイムスケールが GS 溶岩類のものよりも短かったことを示唆する。従って、その主混合マグマは、GS 溶岩類のものとは比べて未発達であったと考えら

れる（図 9）。また、上位の火砕岩ユニットの **thin-darker-zone** タイプの割合は溶岩ユニット比べて高い。これは、噴火直前の注入された苦鉄質マグマが主混合マグマ層を通過しやすかったことを示唆する（図 9）。しかしながら、上位の火砕岩ユニットの中で五色岳南部火砕岩類の **broad-darker zoned** タイプの割合はほかのユニットと比べてやや高い（表 6）。よって、五色岳南部火砕岩類の混合マグマの発達度合いはほかの火砕岩ユニットと比べてやや高かった可能性が高い（図 9）。

5.7. 五色岳形成直前から五色岳形成期にかけての活動様式の変化とマグマ供給系の関連

上述したように、五色岳の形成直前には溶岩が流出し、形成期には爆発的な噴火が頻発している。ここでは、各ユニットにおける岩石学的特徴の変化とマグマ供給系の関連性について議論する。GS 溶岩類以降の **broad-darker-zone** タイプの割合の時間変化をみると、全体的に減少していることが分かる（表 6）。これは、溶岩ユニットから五色岳形成期にかけて、混合マグマ層がより未発達な状態に変化したことを示唆する。しかしながら、上位の火砕岩ユニットの **broad-darker-zone** タイプの割合は単調ではなく、五色岳南部火砕岩類から五色岳火砕岩類 **unit4** にかけて複雑に増減する（表 6）。よって、上位の火砕岩ユニットの混合マグマの発達度合いは未発達であったものの、各ユニット間におけるマグマの発達度合いはやや異なっていたと考えられる。

GS 溶岩類の場合、発達した主混合マグマ層であったと考えられる。従って、苦鉄質マグマによってもたらされた揮発性物質は、主要な混合マグマ内で容易に拡散し、マグマ供給システムの外部に放出され、溶岩流出が起こったと考えられる。一方で、上位の火砕岩ユニットの場合、揮発性物質が未発達な混合マグマで十分に拡散できず、放出するための時間が短かったため、爆発的な噴火が継続していたと考えられる。

以上の考察から、五色岳形成期以降は未発達な混合マグマが現在も継続していると考えられる。よって、今後も蔵王火山の爆発的な噴火に注意を払う必要があると考えられる。更に、本火山で 2013 年から火山性地震が観測されている (Ban et al., 2016)。岩石学的検討から、珪長質マグマは地下 5 km 付近 (1.2~2.0 kb) に存在していると考えられるため、深度 3~5 km 付近の地震はマグマ供給系の活動と関連している可能性が高い。

表 6 各ユニットにおける直方輝石の各タイプの割合 (Nishi et al., 2019 から加筆・修正した)。

	homogenous	thin-darker-zone	broad-darker-zone	oscillatory zoned
五色岳火砕岩類 unit4	55.1%	28.6%	10.2%	6.1%
五色岳主活動期噴出物 (五色岳火砕岩類 unit 3 レイヤー6)	65.1%	23.0%	0.0%	11.9%
五色岳主活動期噴出物 (五色岳火砕岩類 unit 3 レイヤー2)	77.1%	18.3%	4.6%	0.00%
五色岳主活動期噴出物 (五色岳火砕岩類 unit 2 レイヤー2)	55.6%	22.2%	14.8%	7.4%
五色岳主活動期噴出物 (五色岳火砕岩類 unit 2 レイヤー1)	57.6%	33.3%	6.1%	3.0%
五色岳東部火砕岩類 (五色岳火砕岩類 unit1)	52.0%	40.0%	8.0%	0.0%
五色岳南部火砕岩類 (五色岳火砕岩類 unit1)	30.0%	20.0%	20.0%	5.0%
GS 溶岩類 五色岳南方溶岩 および火砕岩類	8.1%	2.7%	75.7%	13.5%
振子滝溶岩	10.3%	6.9%	69.0%	13.8%

6. まとめ

本研究では、蔵王火山の最新期の代表的な噴出物の地質学的岩石学的検討を行った。対象噴出物は GS 溶岩類と上位の火砕岩ユニット（五色岳南部火砕岩類、五色岳東部火砕岩類、五色岳主活動期噴出物、五色岳火砕岩類 unit4）に分けられる。五色岳形成直前に溶岩が流出し、山体形成後は主にマグマ水蒸気爆発を主体とした活動に変化したと考えられる。岩石学的検討から、浅部珪長質マグマ溜まり（深さ～5km）に苦鉄質マグマが注入することによって噴火を引き起こしたことを示唆する。珪長質および苦鉄質マグマの T-P-H₂O 条件は全ての対象噴出物で類似する。直方輝石は約 1 年未満～150 年の滞留時間を示すことから、苦鉄質マグマは珪長質マグマに繰り返し注入していたと考えられる。上位の火砕岩ユニットでは、滞留時間 1.5 年未満を示す thin-darker-zone タイプが多いが、GS 溶岩類では少ない。また、GS 溶岩類の全岩 SiO₂ 含量が高く、board-darker-zone タイプの直方輝石が多い。これは GS 溶岩類の主混合マグマ層が、上位の火砕岩ユニットよりも発達していたことを示唆する。一方で、上位の火砕岩ユニットのマグマ溜まりの構造は約 2 千年間大きな変化が認められない。GS 溶岩類の場合、溶岩苦鉄質マグマに含まれる揮発性物質は、主混合マグマ内で容易に拡散し、発達した混合マグマ層中に放出され、溶岩流出をもたらしたと考えられる。上位の火砕岩ユニットでは、未発達な混合マグマであったため揮発性物質が十分に拡散できず、脱ガスするための時間が短かったため爆発的な噴火が発生したと考えられる。五色岳形成期以降は未発達な混合

マグマが継続していると考えられるため、今後も蔵王火山の爆発的な噴火が発生する可能性が高い。

謝辞

本論文では、研究手法から野外調査、地質図作成、岩石試料の化学分析、論文の推敲に至るまで、山形大学理学部理学科の伴雅雄教授、中島和夫教授、門叶冬樹教授に終始ご指導とご助言をいただいた。また先輩の武部未来博士や後輩の皆さんにも議論の際に有益なご意見をいただいた。更に、サラマンカ大学のAntonio M. Álvarez-Valero教授、産業技術総合研究所の及川輝樹博士、山崎誠子博士には、論文の作成、野外調査、岩石試料の化学分析において大変お世話になった。以上の協力していただいた方々に深く感謝するとともに、心より御礼を申し上げます。

引用・参考文献

足立辰也, 2013MS. 蔵王火山・五色岳の過去 800 年間のマグマ供給系の進化. 山形大学 理学部修士論文.

Allan, A.S.R., Morgan, D.J., Wilson, C.J.N., Millet, M.A., 2013. From mush to eruption in centuries: Assembly of the super-sized Oruanui magma body. *Contrib. to Mineral. Petrol.* 166, 143–164. <https://doi.org/10.1007/s00410-013-0869-2>

伴 雅雄・及川輝樹・山崎誠子, 2015. 「蔵王火山地質図」火山地質図 No.18. 産業技術総合研究所

Ban, M., Sagawa, H., Miura, K., Hirotsu, S., 2008. Evidence for a short-lived stratified magma chamber: petrology of the Z-To5 tephra layer (*c.* 5.8 ka) at Zao volcano, NE Japan. *Geol. Soc. London, Spec. Publ.* 304, 149–168. <https://doi.org/10.1144/SP304.8>

伴 雅雄・佐川日和・三浦光太郎・田中勇三, 2005. 蔵王火山の防災マップ. 月刊地球, 27, 317-320.

Ban, M., Takebe, Y., Adachi, T., Matsui, R., Nishi, Y., 2016. Eruption Histories of Zao and Azuma Volcanoes and Their Magma Feeding Systems for Recent Activities, *Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo*, 91, 25–39.

- Brey, G.P., Köhler, T., 1990. Geothermobarometry in four-phase lherzolites II. new thermobarometers, and practical assessment of existing thermobarometers. *J. Petrol.* 31, 1353–1378.
- Costa, F., Dohmen, R., Chakraborty, S., 2008. Time Scales of Magmatic Processes from Modeling the Zoning Patterns of Crystals. *Rev. Mineral. Geochemistry* 69, 545–594. <https://doi.org/10.2138/rmg.2008.69.14>
- Cooper, G.F., Morgan, D.J., Wilson, C.J.N., 2017. Rapid assembly and rejuvenation of a large silicic magmatic system: Insights from mineral diffusive profiles in the Kidnappers and Rocky Hill deposits, New Zealand. *Earth Planet. Sci. Lett.* 473, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.05.036>
- Crank, J., 1975. *The Mathematics of Diffusion*. Oxford University Press, Oxford.
- Dohmen, R., Ter Heege, J.H., Becker, H.W., Chakraborty, S., 2016. Fe-Mg interdiffusion in orthopyroxene. *Am. Mineral.* 101, 2210–2221. <https://doi.org/10.2138/am-2016-5815>
- Gill, J.B., 1981. *Orogenic Andesites and Plate Tectonics*, Springer-Verlag. pp. 390. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-68012-0>
- Gualda, G.A.R., Ghiorso, M.S., Lemons, R. V., Carley, T.L., 2012. Rhyolite-MELTS: A modified calibration of MELTS optimized for silica-rich, fluid-bearing magmatic systems. *J. Petrol.* 53, 875–890. <https://doi.org/10.1093/petrology/egr080>

- Humphreys, M.C.S., Blundy, J.D., Sparks, R.S.J., 2006. Magma evolution and open-system processes at Shiveluch Volcano: Insights from phenocryst zoning. *J. Petrol.* 47, 2303–2334. <https://doi.org/10.1093/petrology/egl045>
- Landi, P., Me, N., Bertagnini, A., Rosi, M., 2004. Dynamics of magma mixing and degassing recorded in plagioclase at Stromboli (Aeolian Archipelago , Italy) 213–227. <https://doi.org/10.1007/s00410-004-0555-5>
- Matsui, Y. and Nishizawa, O., 1974. Iron (II)-magnesium exchange equilibrium between olivine and calcium-free pyroxene over a temperature range 800 °C to 1300 °C. *Bull. Soc. Fr. Mineral. Cristallogr.* 97, 122–130.
- Miura, K., Ban, M. and Yagi, K. 2008. The tephra layers distributed around the eastern foot of the Zao volcano Ages and volumes of the Za–To 1 to 4 tephra. *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, 53, 151–157.
- Miyashiro, A., 1974. Volcanic rock series in island arcs and active continental margins. *Am. J. Sci.* 274, 321–355.
- Morgan, D.J., Blake, S., Rogers, N.W., DeVivo, B., Rolandi, G., Macdonald, R., Hawkesworth, C.J., 2004. Time scales of crystal residence and magma chamber volume from modelling of diffusion profiles in phenocrysts: Vesuvius 1944. *Earth Planet. Sci. Lett.* 222, 933–946. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2004.03.030>

中川光弘・松本亜希子・宮坂瑞穂・富樫泰子・井口正人, 2011. 桜島火山の噴火活動様式とマグマ供給系の 20 世紀からの変化とその意義. 「地震及び火山噴火予知 観測研究計画」 「桜島火山における多項目観測に基づく火山噴火準備過程解明のための研究 (代表 井口正人)」平成 22 年度成果報告書, 85-94.

Nishi, Y., Ban, M., Takebe, M., Álvarez-valero, A.M., Oikawa, T., Yamasaki, S., 2019. Structure of the shallow magma chamber of the active volcano Mt . Zao , NE Japan : Implications for its eruptive time scales. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 371, 137–161.
<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2019.01.003>

Obata, M., Banno, S., and Mori, T., 1974. The iron-magnesium partitioning between naturally occurring coexisting olivine and Ca-rich clinopyroxene: An application of the sample mixture model to olivine solid solution. *Bull. Soc. Fr. Mineral. Cristallogr.* 97, 101–107.

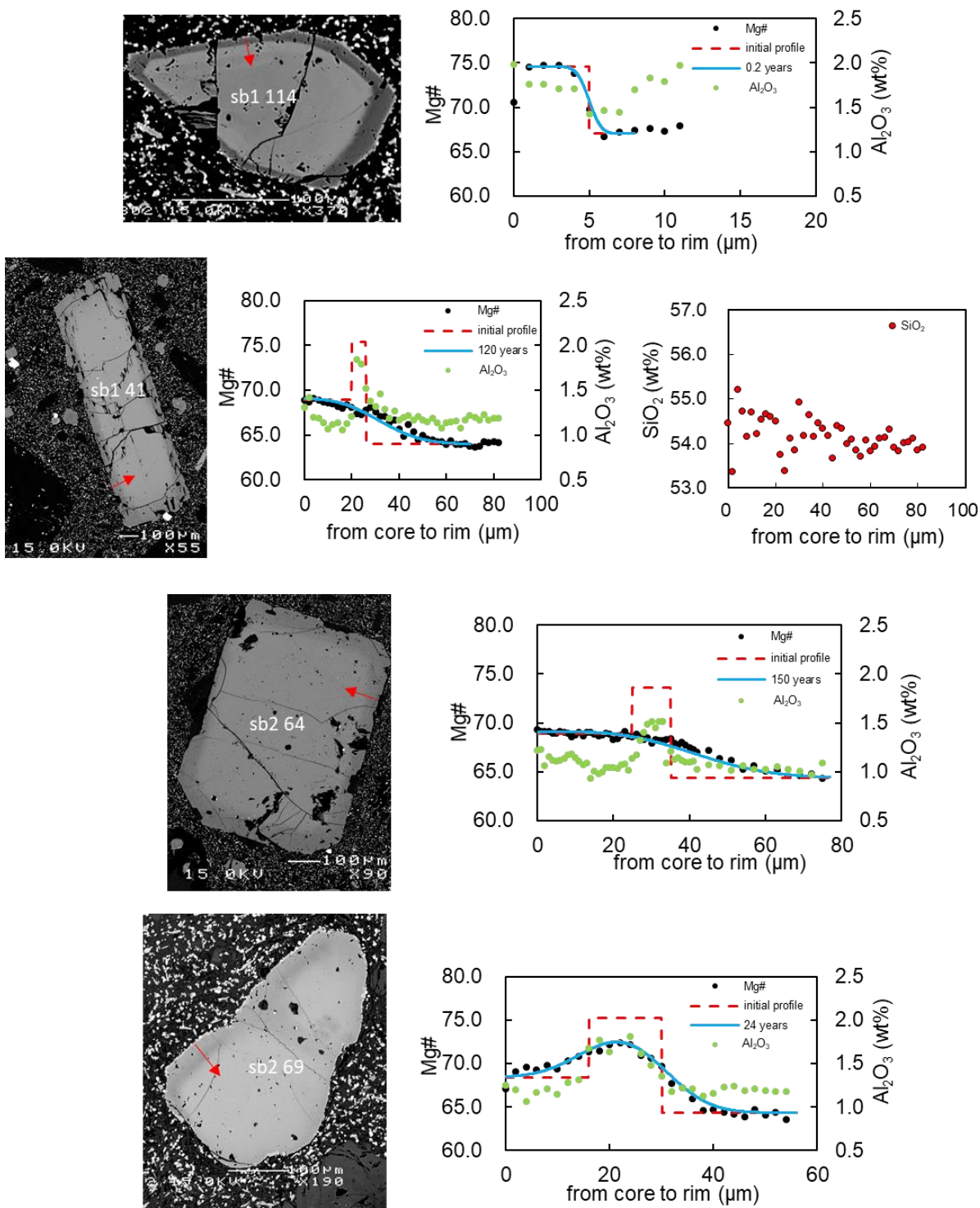
大場与志男・今田 正, 1989 中央蔵王火山の地質と岩石. 山形大学 紀要 (自然科学), 12, 199–210.

Pearce, T.H., 1994. Recent work on oscillatory zoning in plagioclase. In: Parson, I. (Ed.), *Feldspar and Their Relations*. Kluwer, Dordrecht, pp. 313–349.

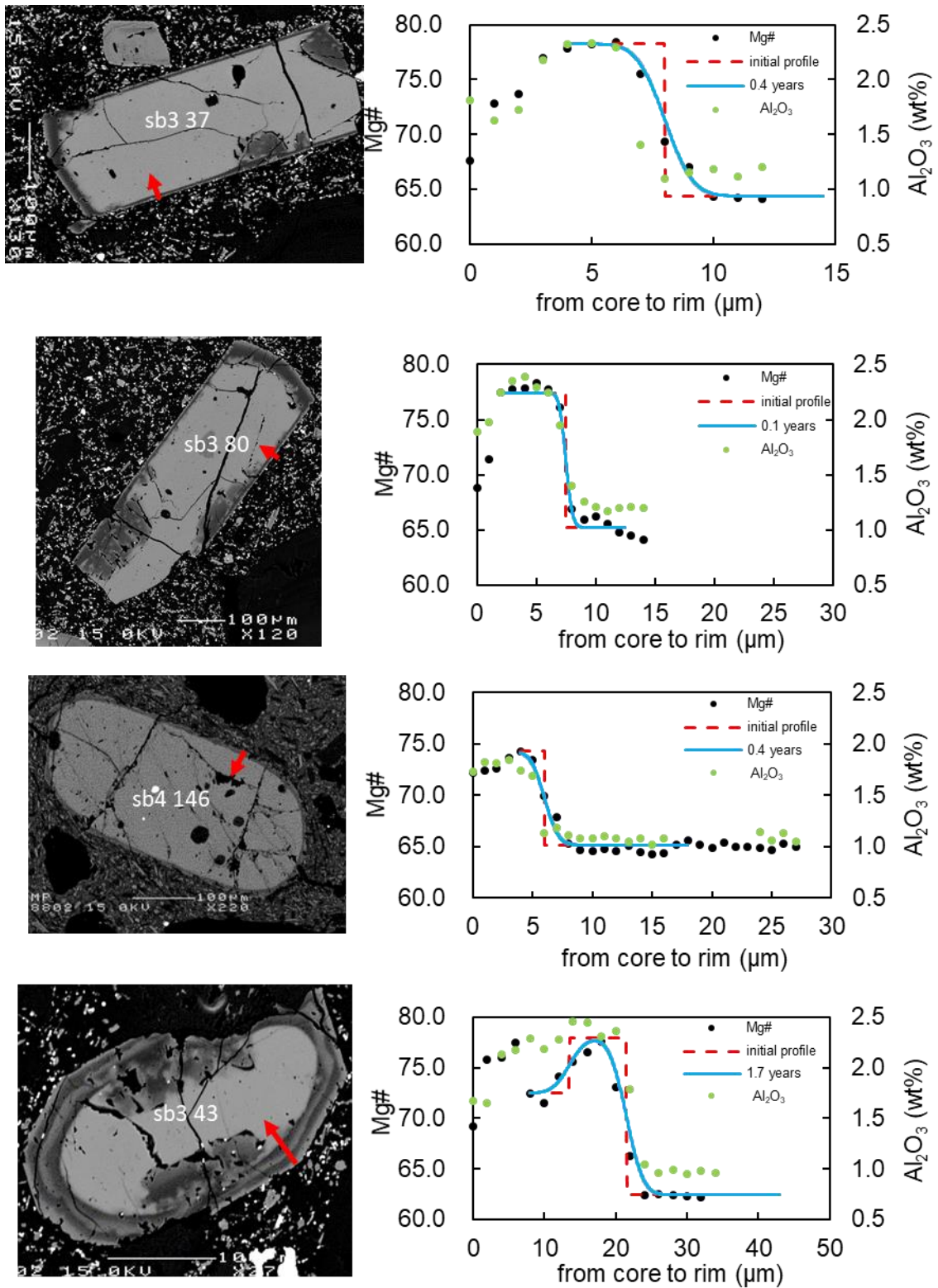
Pearce, T.H., Kolisnik, A.M., 1990. Observations of plagioclase zoning using interference imaging. *Earth Sci. Rev.* 29, 9–26.

- Petrone, C.M., Braschi, E., Francalanci, L., Casalini, M., Tommasini, S., 2018. Rapid mixing and short storage timescale in the magma dynamics of a steady-state volcano. *Earth Planet. Sci. Lett.* 492, 206–221. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.03.055>
- Renjith, M.L., 2014. Geoscience Frontiers Micro-textures in plagioclase from 1994 e 1995 eruption , Barren Island Volcano : Evidence of dynamic magma plumbing system in the Andaman subduction zone. *Geosci. Front.* 5, 113–126. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2013.03.006>
- 酒寄淳史, 1992 蔵王火山の地質と岩石. *岩鉱*, 87, 433–444.
- Singer, B.S., Dungan, M.A., Layne, G.D., 1995. Textures and Sr , Ba , Mg , Fe , K , and Ti compositional profiles in volcanic plagioclase : Clues to the dynamics of calc-alkaline magma chambers 80, 776–798.
- Tomiya, A., Miyagi, I., Saito, G., Geshi, N., 2013. Short time scales of magma-mixing processes prior to the 2011 eruption of Shinmoedake volcano, Kirishima volcanic group, Japan. *Bull. Volcanol.* 75, 1–19. <https://doi.org/10.1007/s00445-013-0750-1>
- Tsuchiyama, A., 1985. Dissolution kinetics of plagioclase in the melt of the system diopside-albite-anorthite, and origin of dusty plagioclase in andesites. *Contrib. to Mineral. Petrol.* 89, 1–16. <https://doi.org/10.1007/BF01177585>

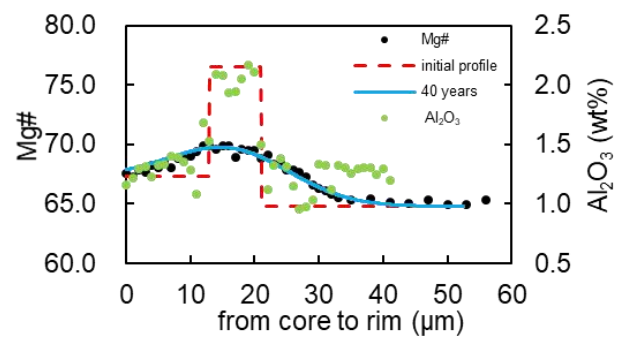
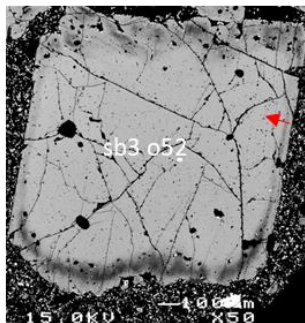
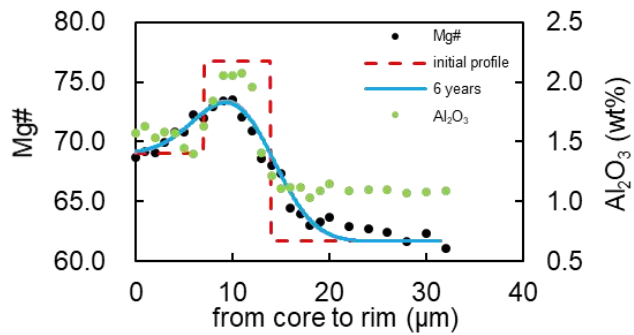
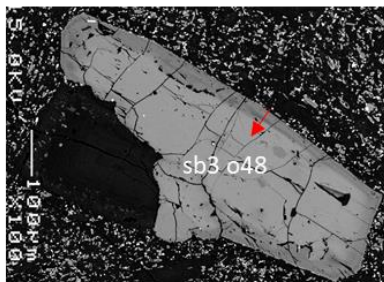
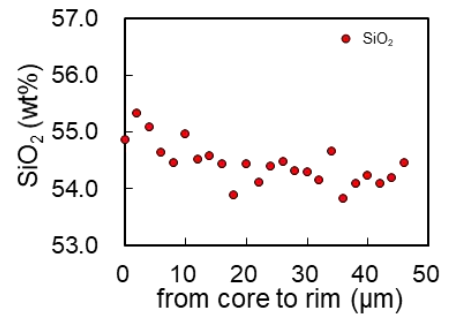
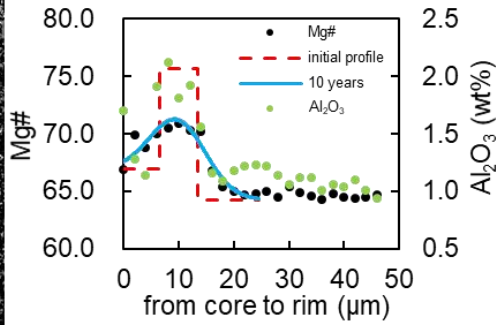
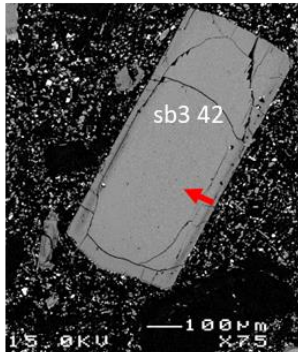
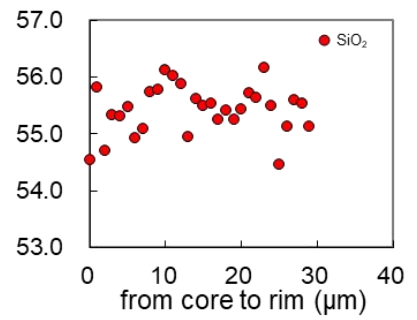
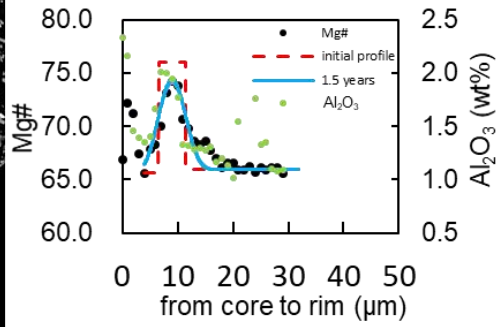
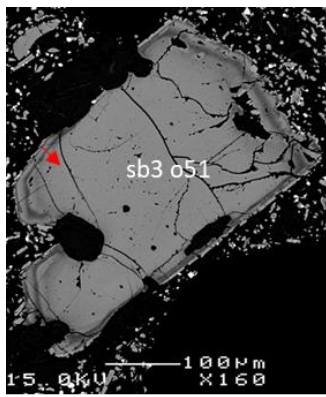
- Viccaro, M., Giacomoni, P.P., Ferlito, C., Cristofolini, R., 2010. Dynamics of magma supply at Mt. Etna volcano (Southern Italy) as revealed by textural and compositional features of plagioclase phenocrysts. *Lithos* 116, 77–91. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.12.012>
- Yamada, Y., Kohno, H., and Murata, M., 1995. A low dilution fusion method for major and trace element analysis of geological samples. *Advan. X-ray Anal.* 26, 33–44.



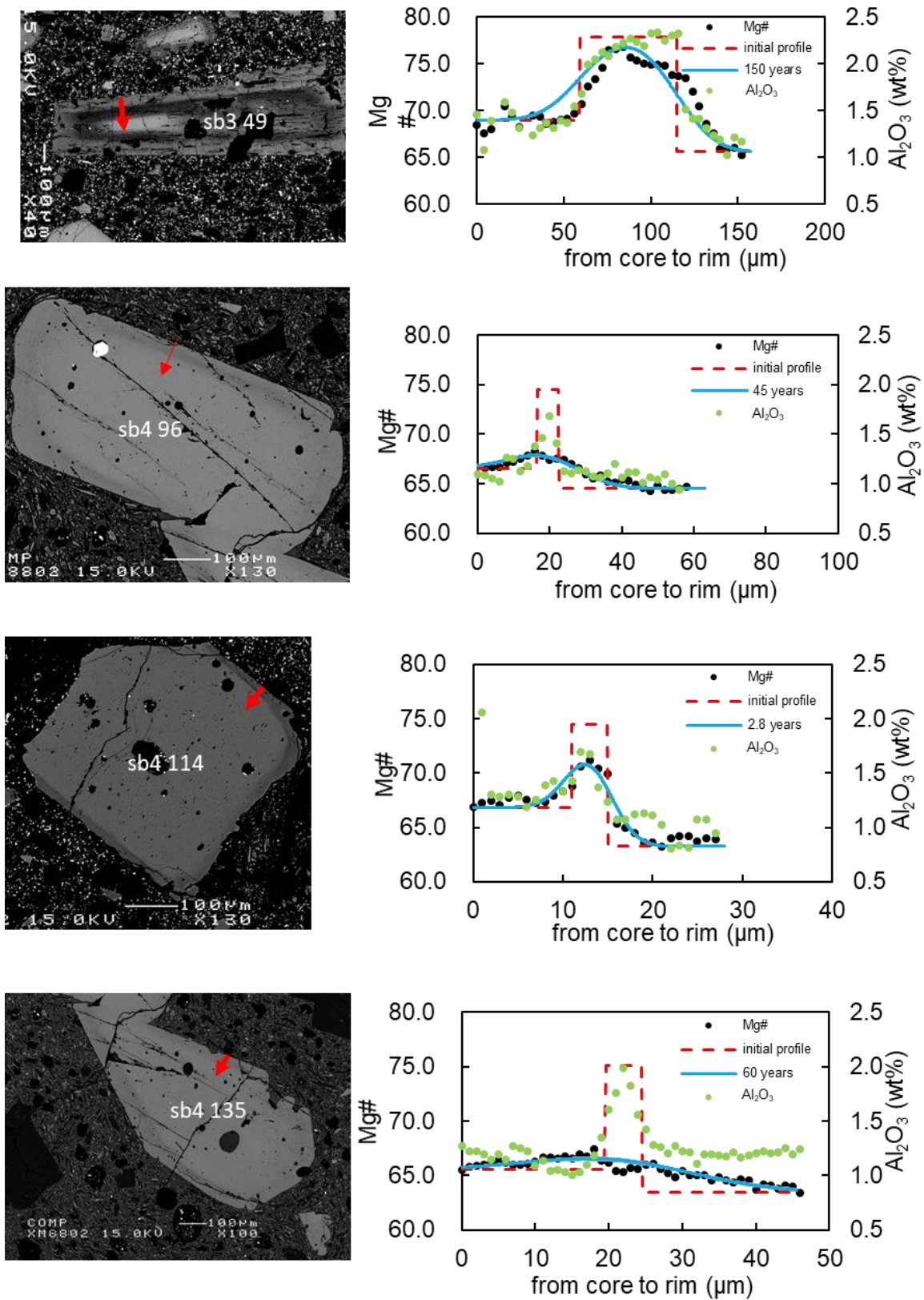
付録図 1 thin-darker-zone タイプと board-darker-zone タイプの組成プロファイルと推定される滞留時間 (Nishi et al. 2019)。



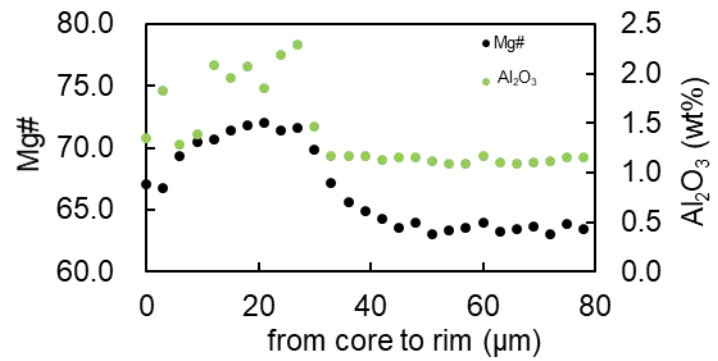
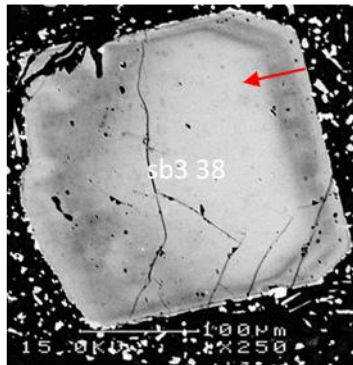
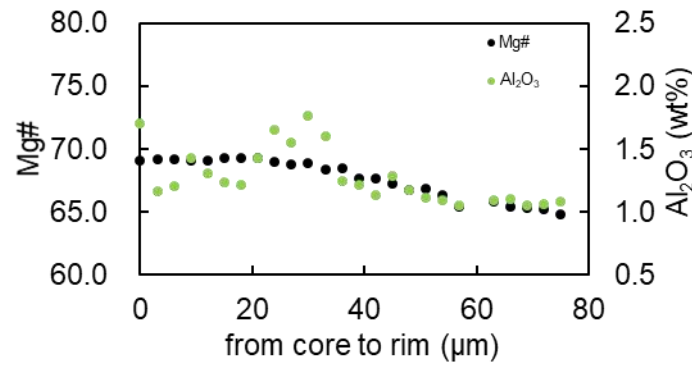
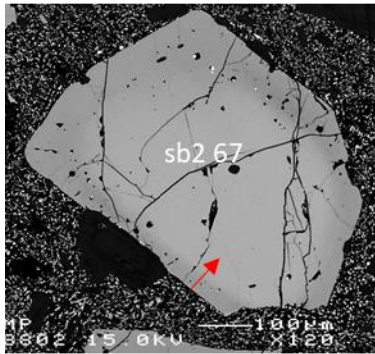
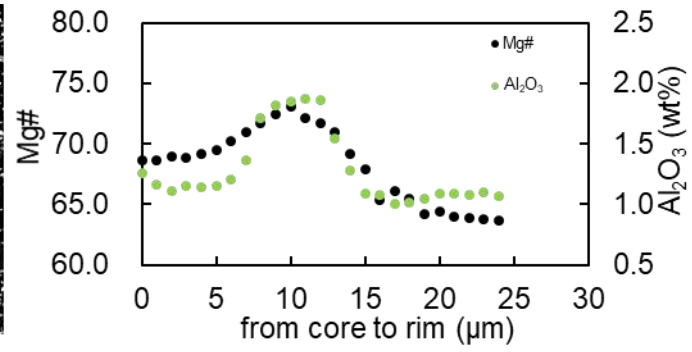
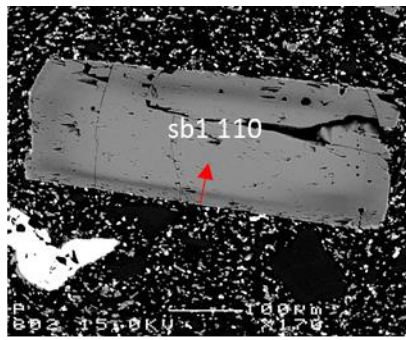
付録図 1 thin-darker-zone タイプと board-darker-zone タイプの組成プロファイルと推定される滞留時間 (Nishi et al. 2019)。



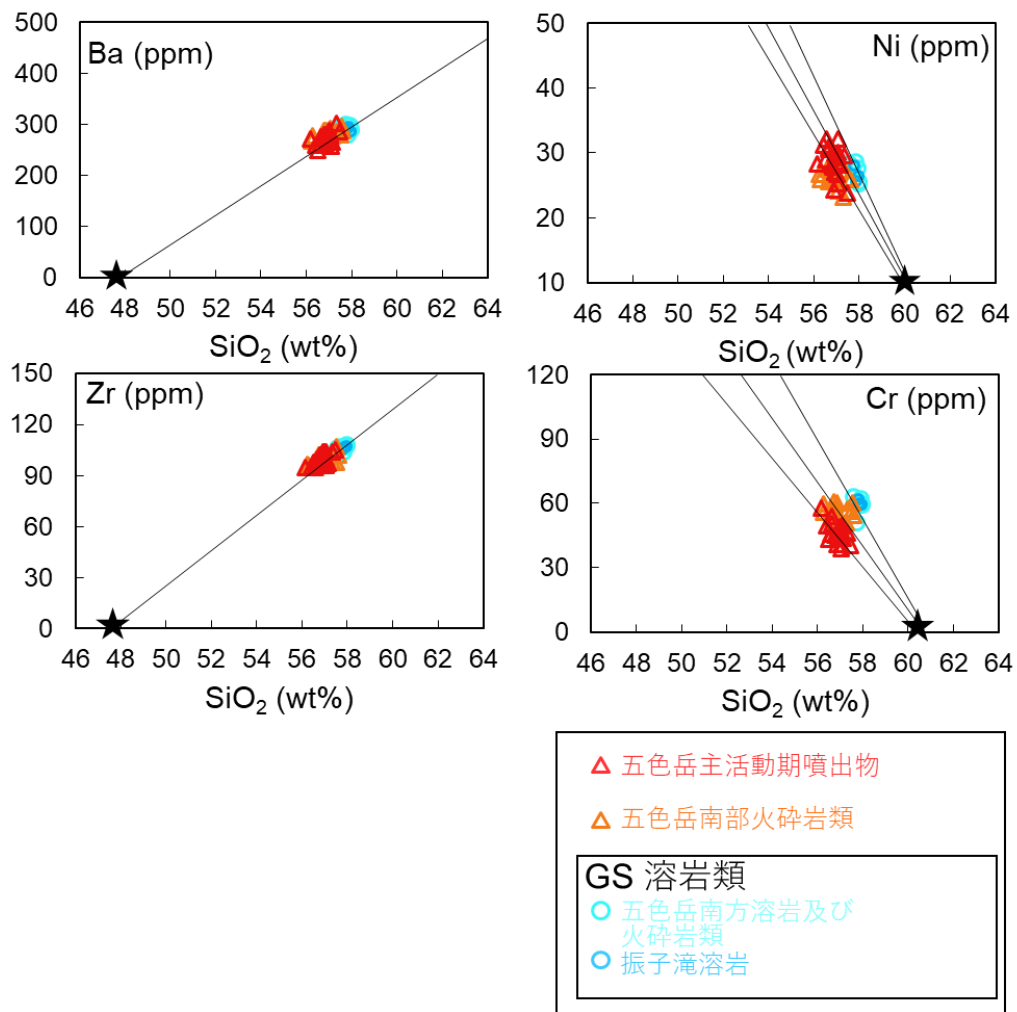
付録図 1 thin-darker-zone タイプと board-darker-zone タイプの組成プロファイルと推定される滞留時間 (Nishi et al. 2019)。



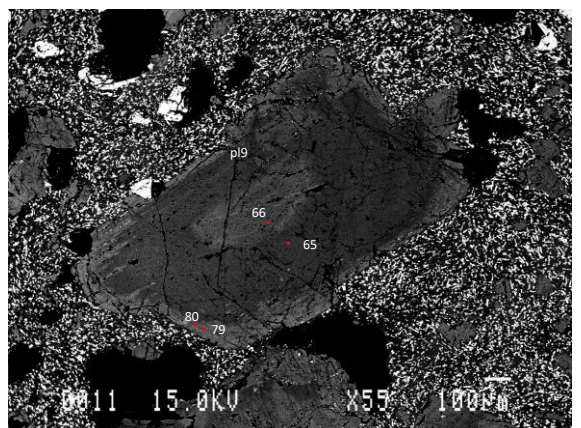
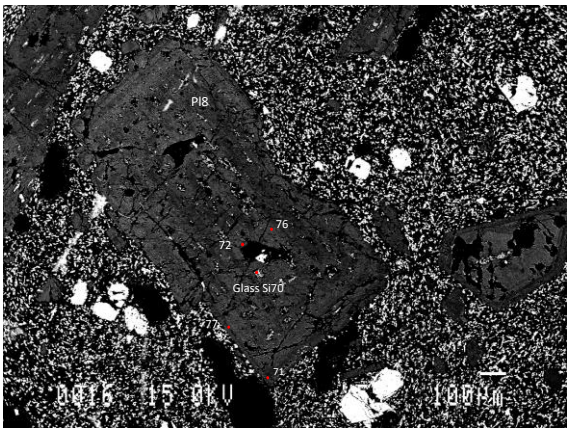
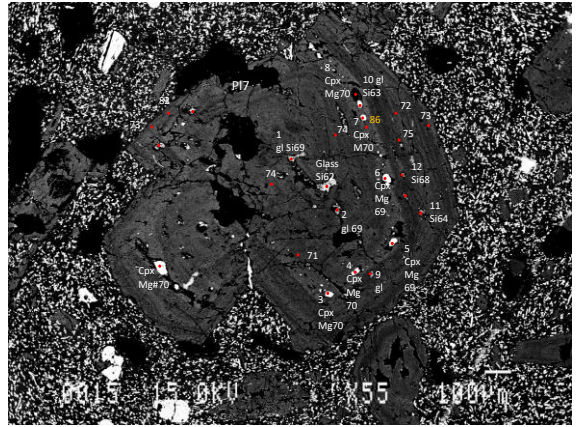
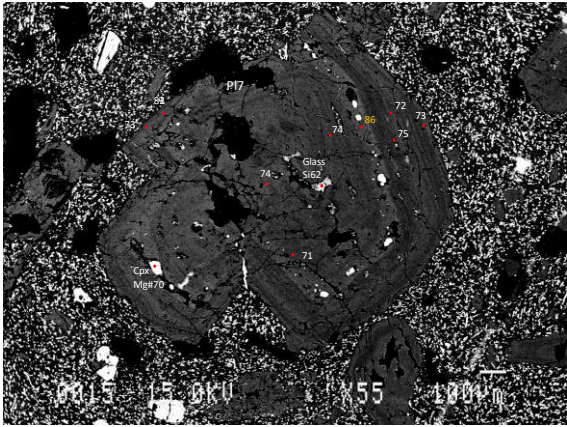
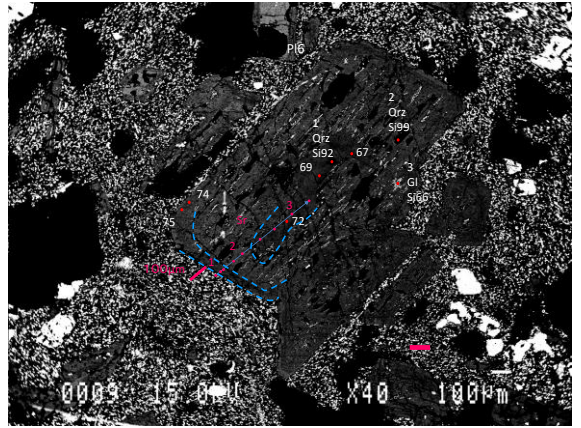
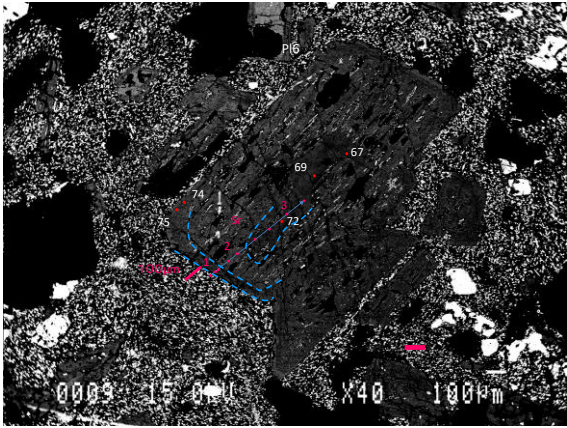
付録図 1 thin-darker-zone タイプと board-darker-zone タイプの組成プロファイルと推定される滞留時間 (Nishi et al. 2019)。

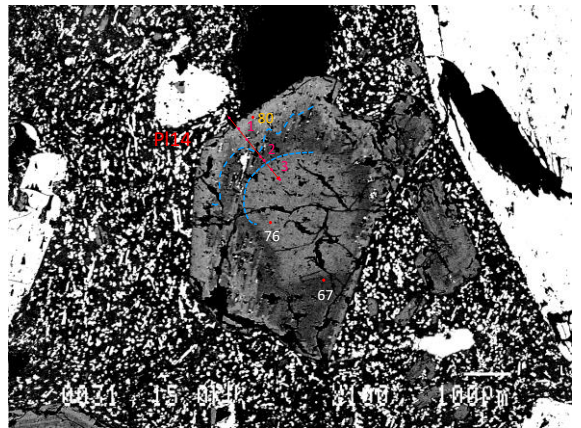
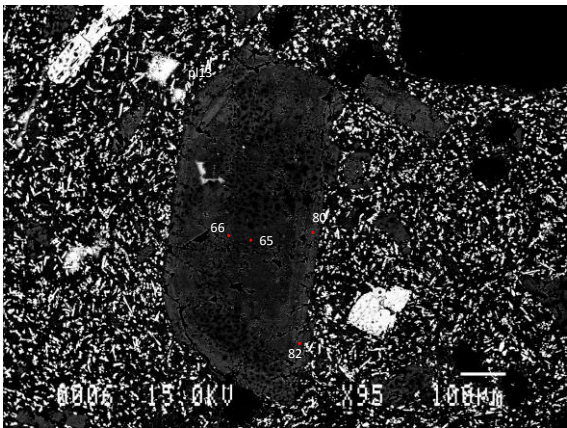
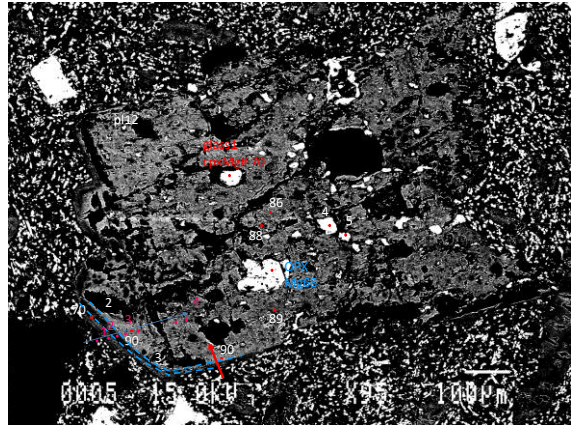
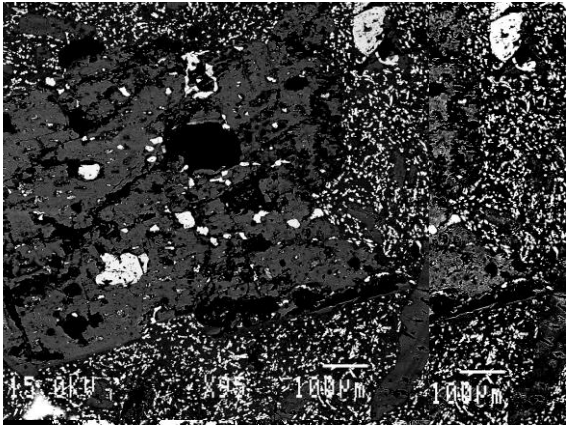
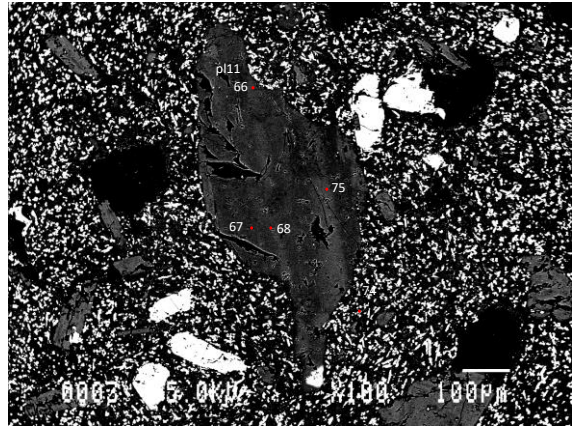
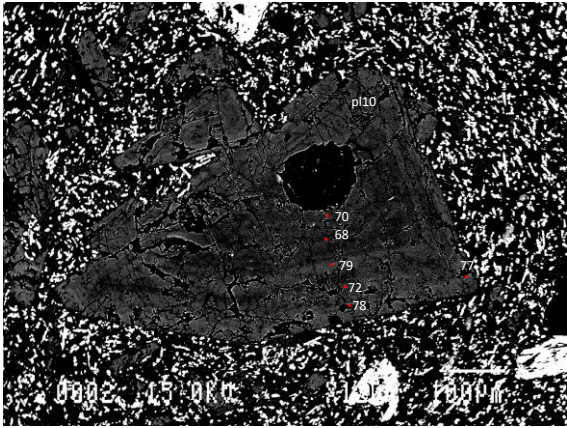


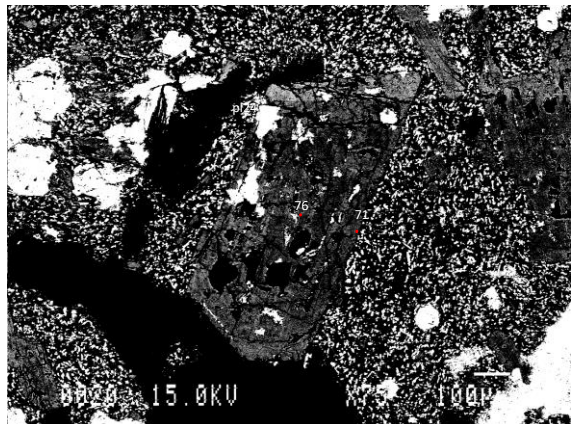
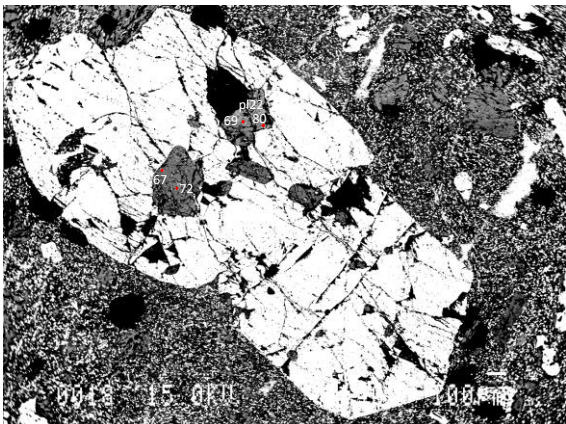
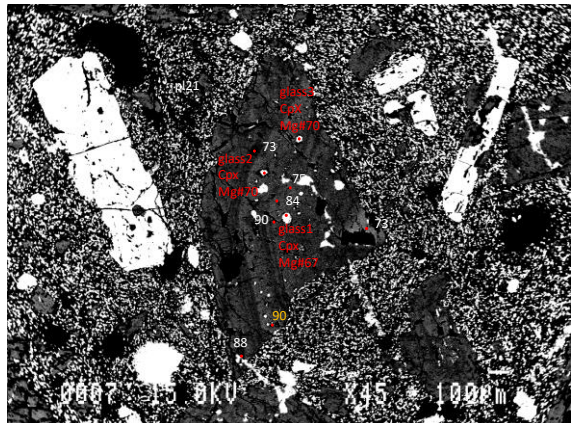
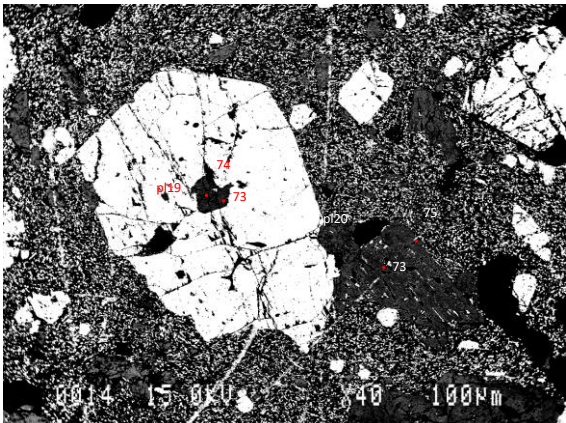
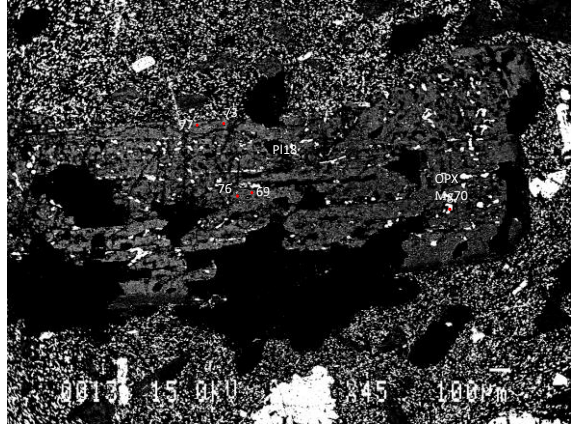
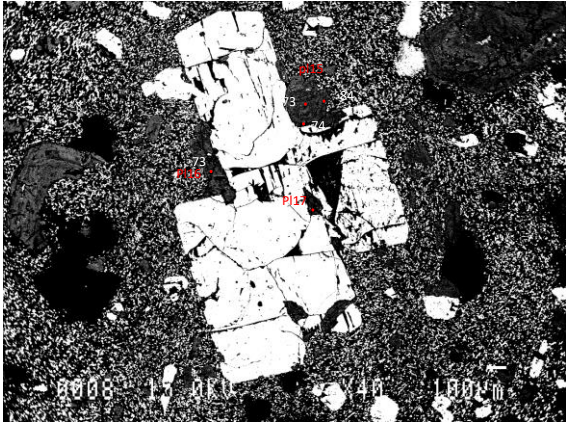
付録図 1 thin-darker-zone タイプと board-darker-zone タイプの組成プロファイルと推定される滞留時間 (Nishi et al. 2019)。

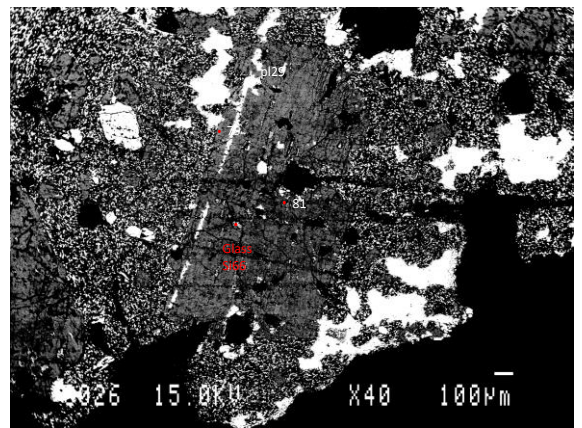
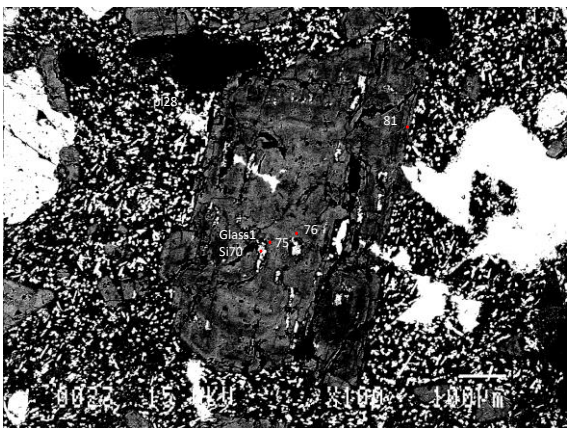
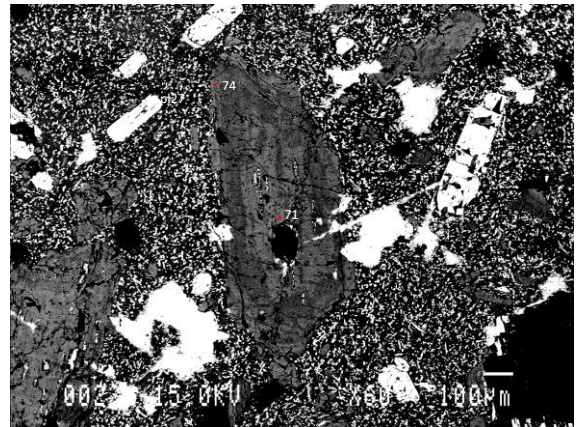
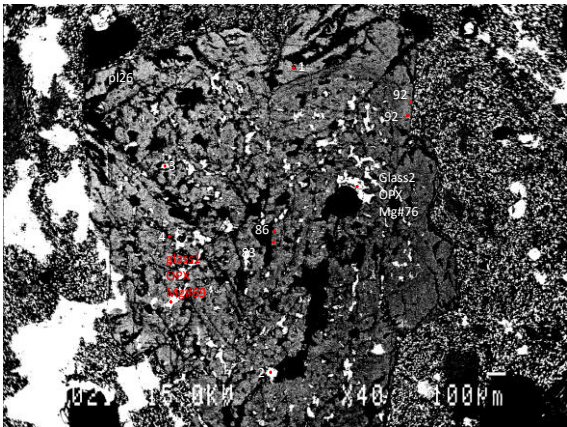
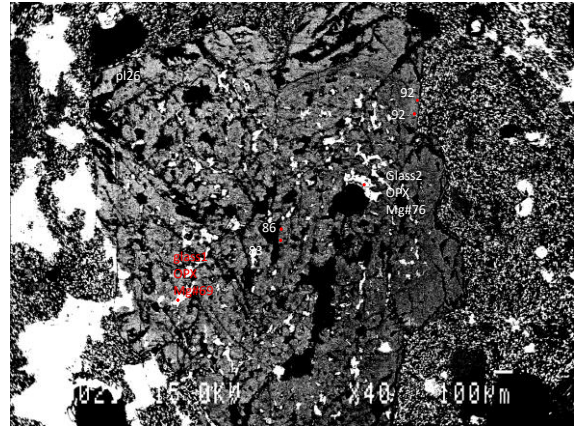
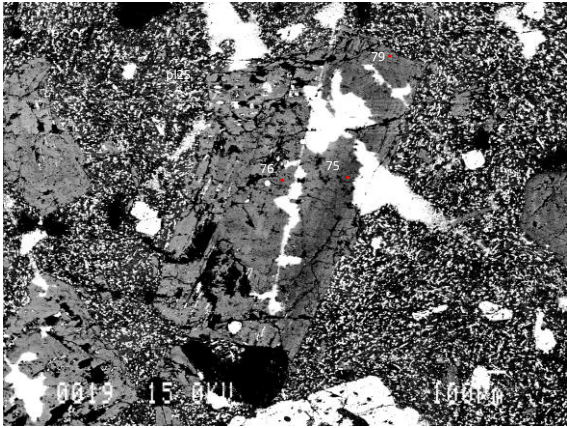


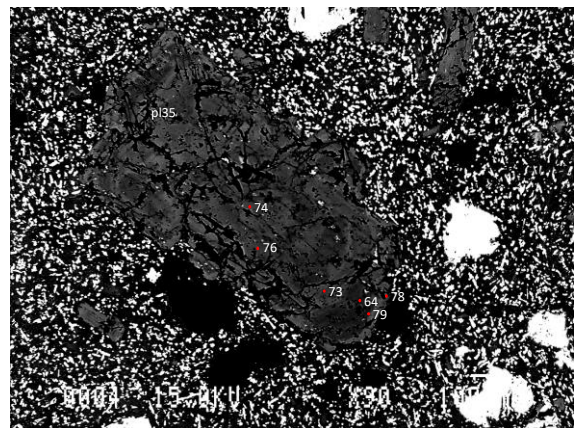
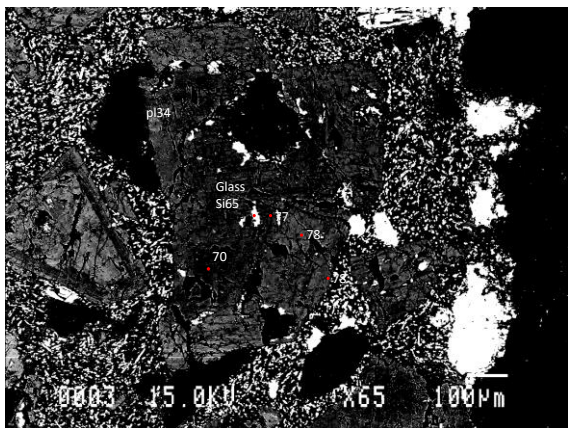
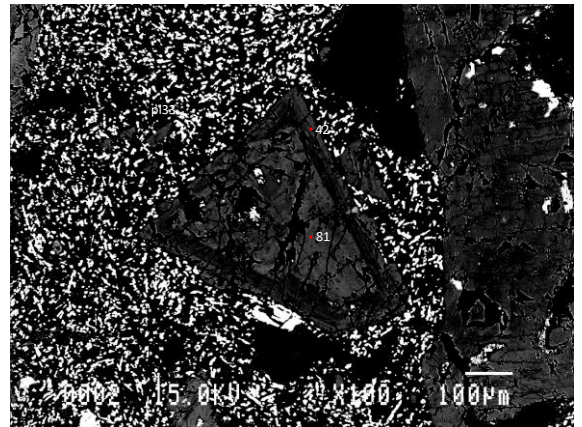
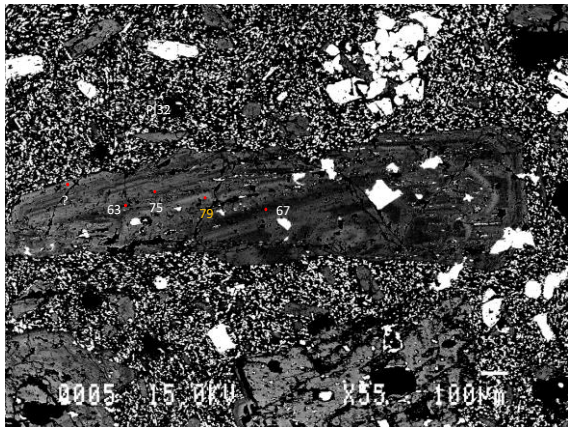
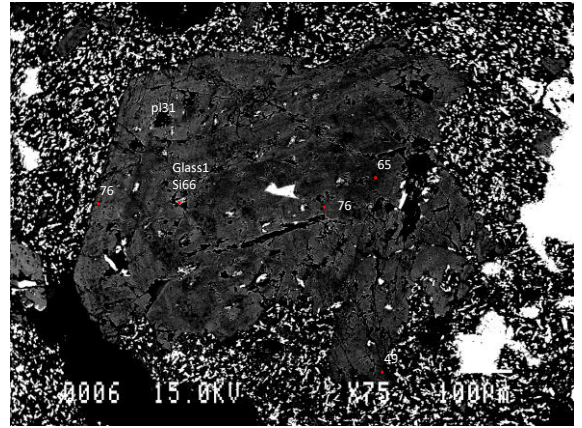
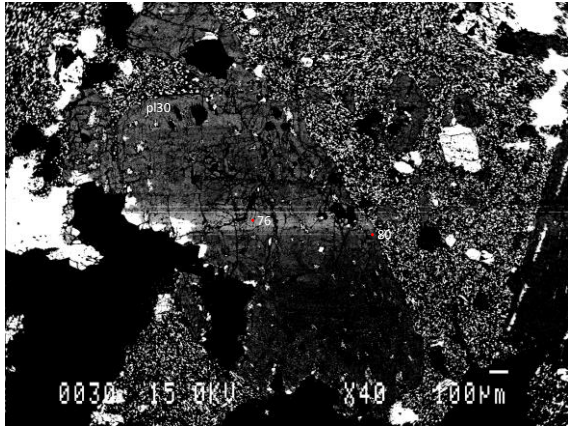
付録図2 各噴出物の Ni、Cr、Ba、と Zr vs. SiO₂ ハーカー図と組成トレンド (Nishi et al. 2019)。

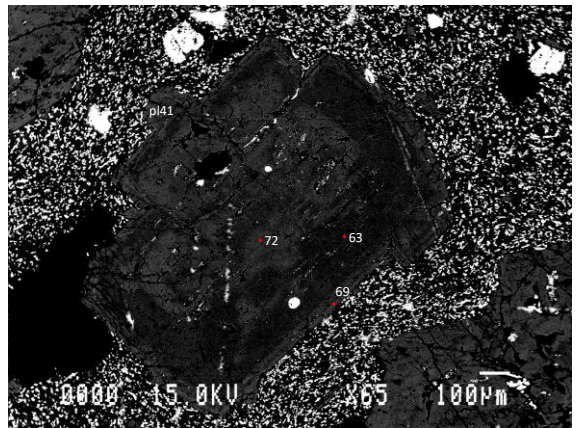
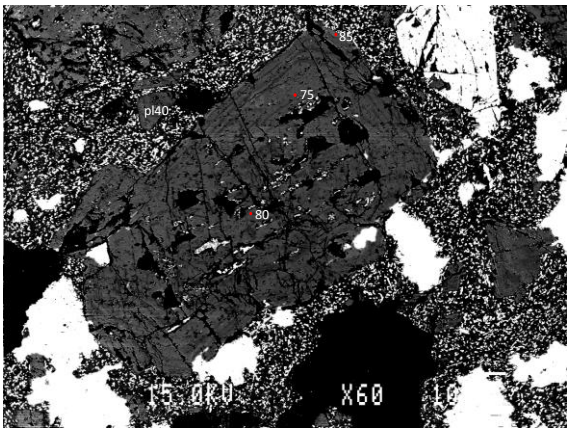
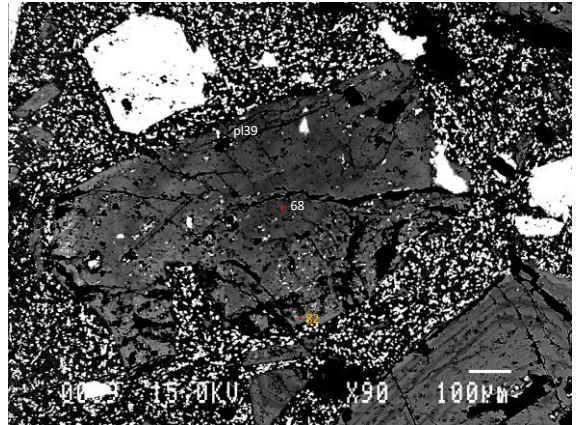
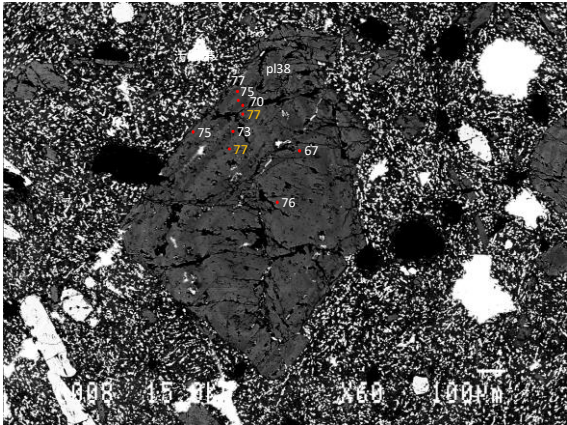
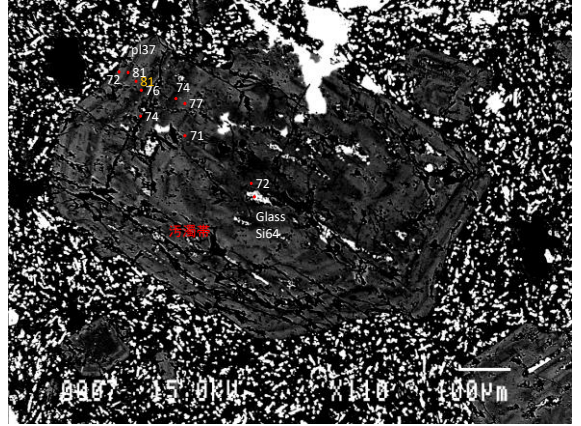
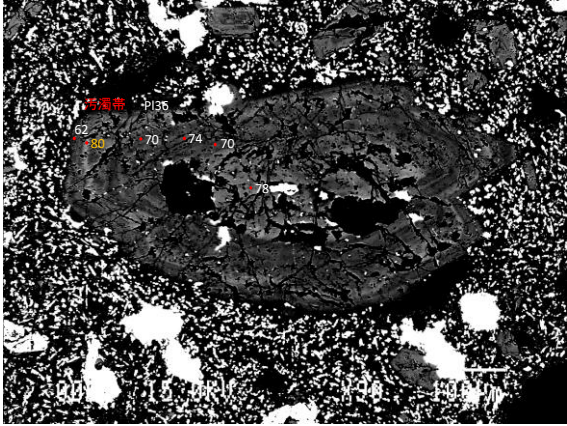


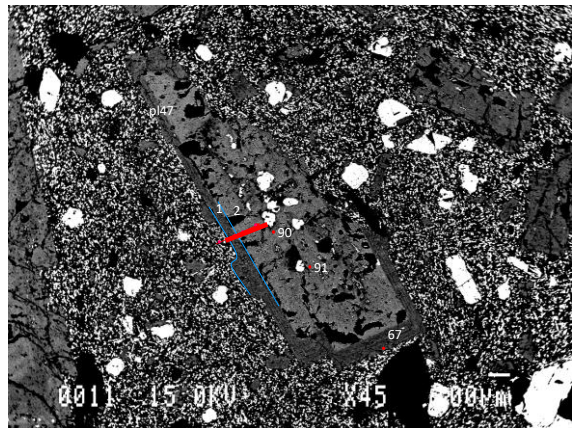
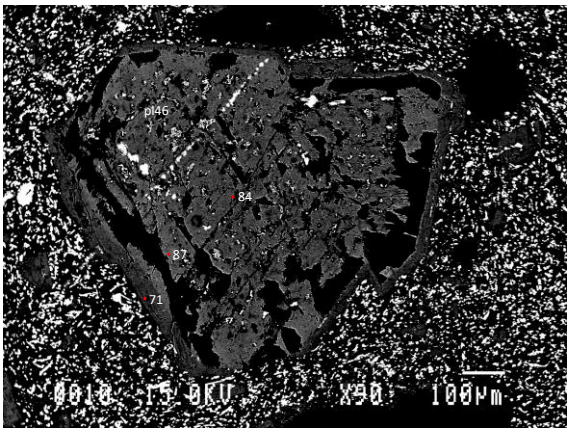
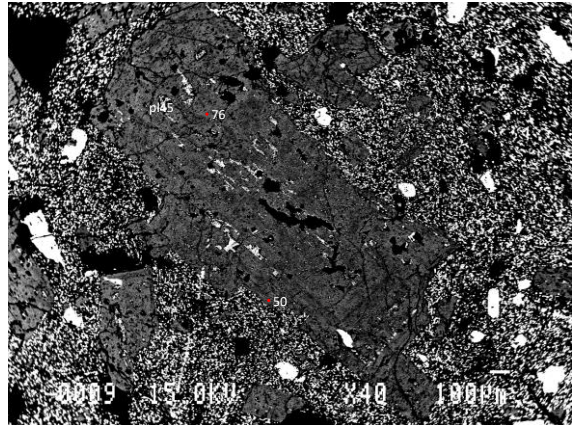
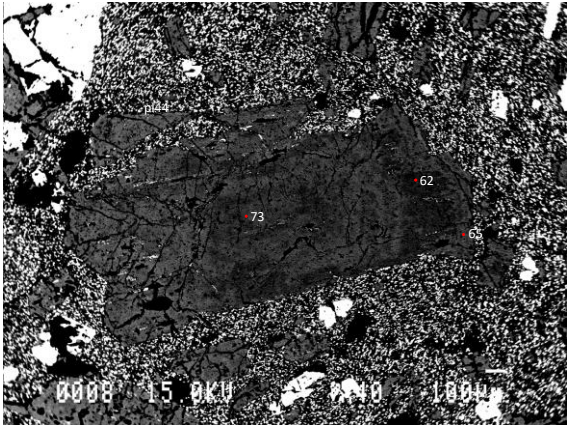
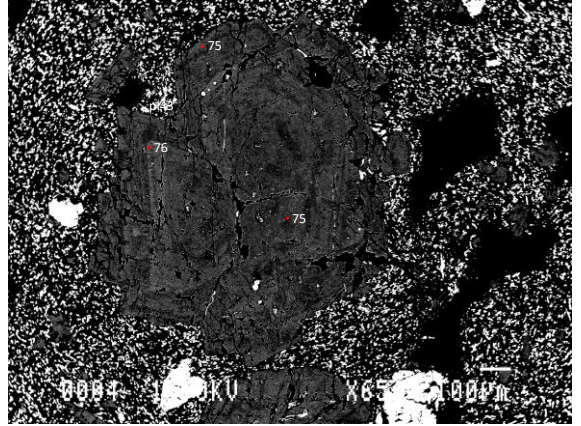
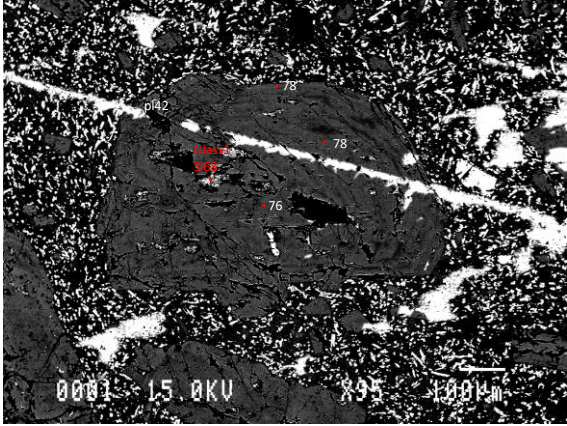


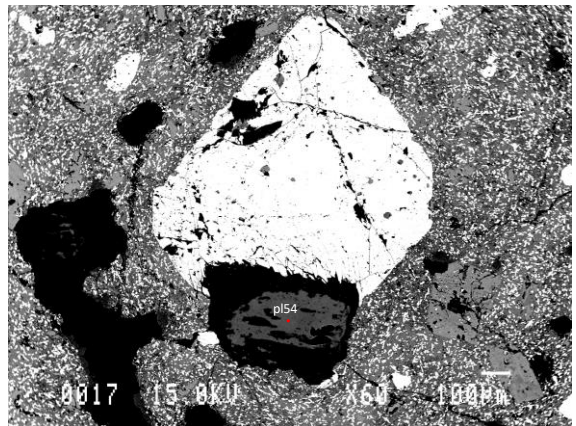
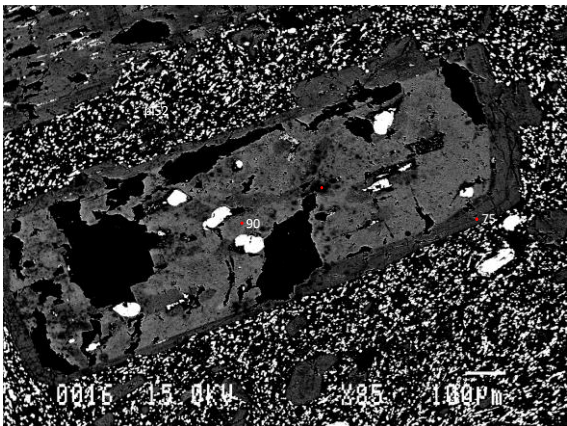
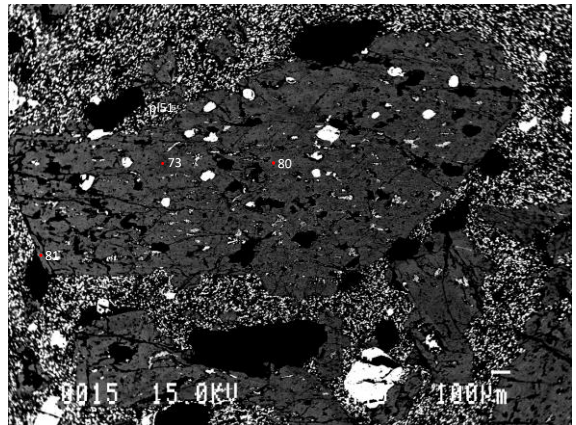
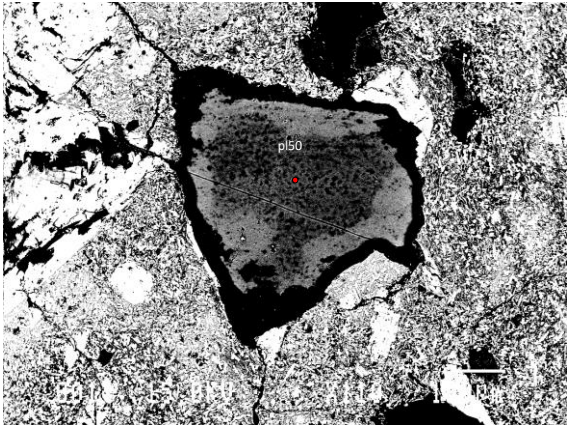
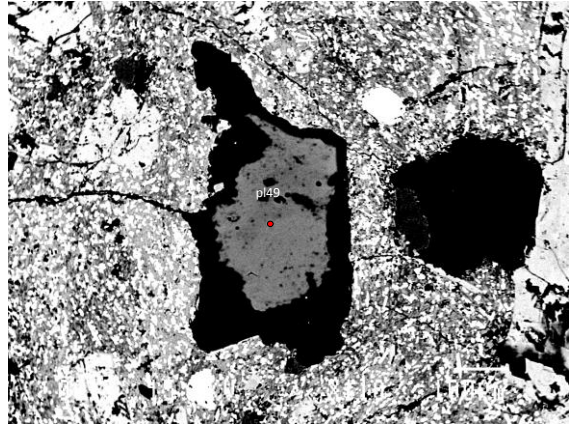
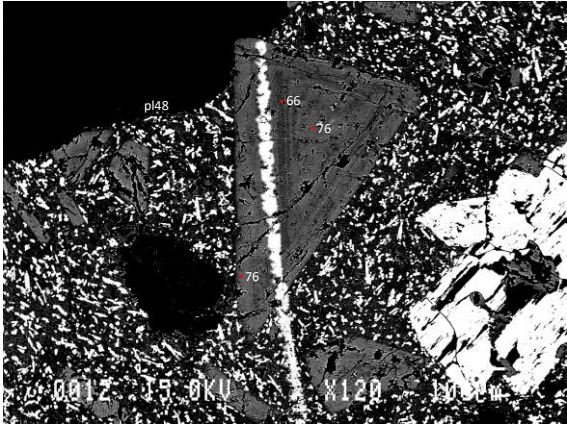


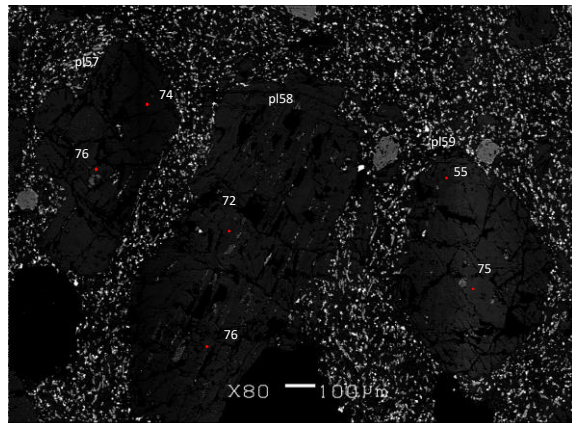
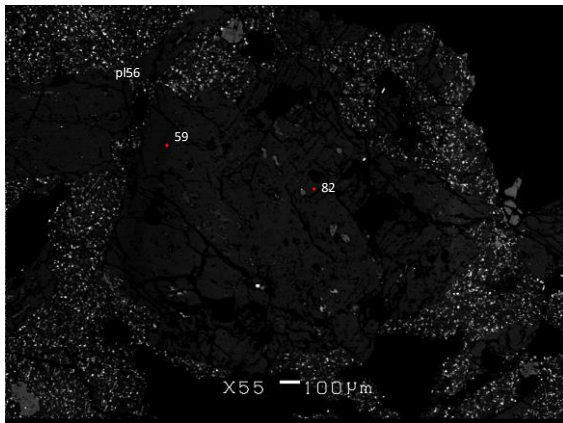
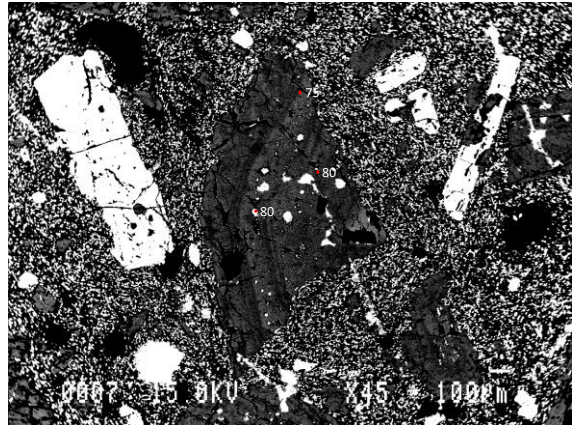
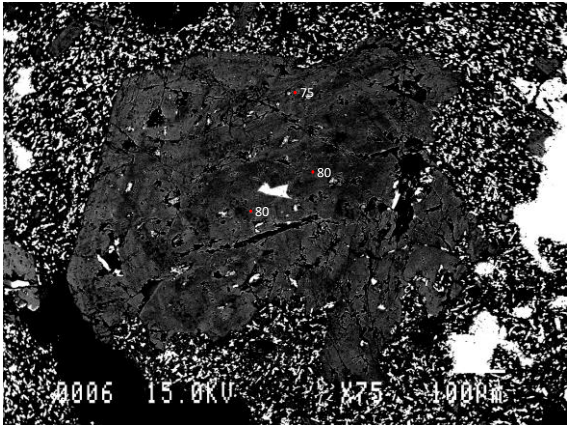
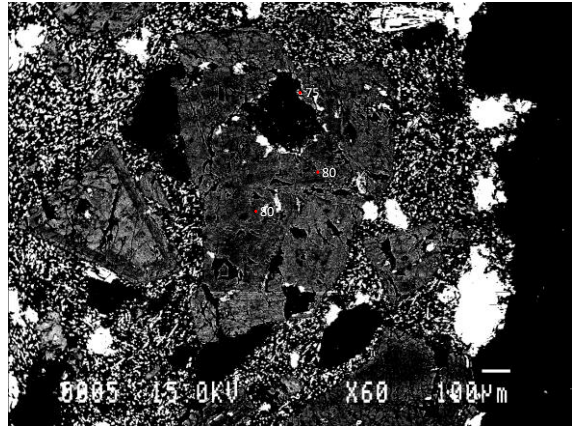
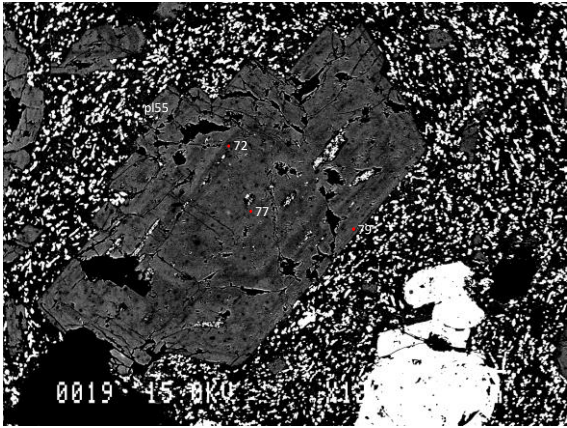




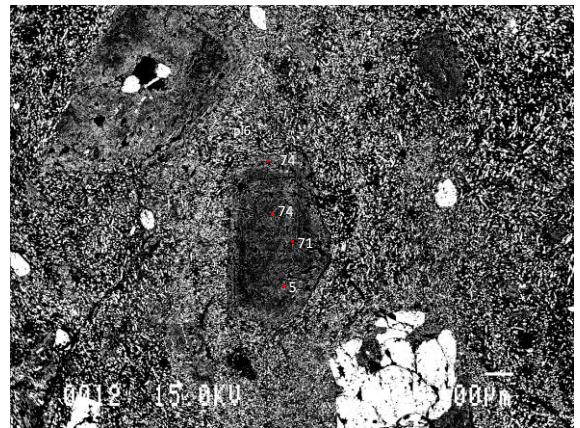
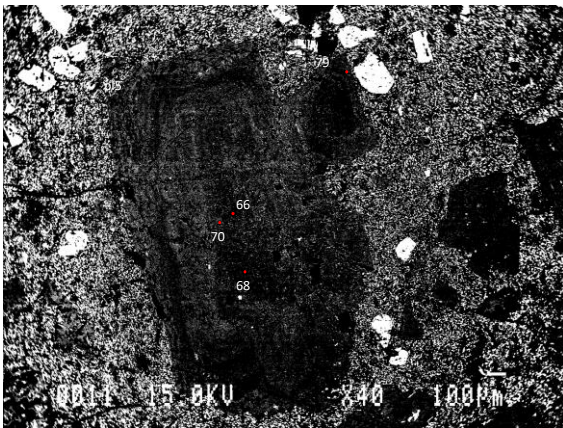
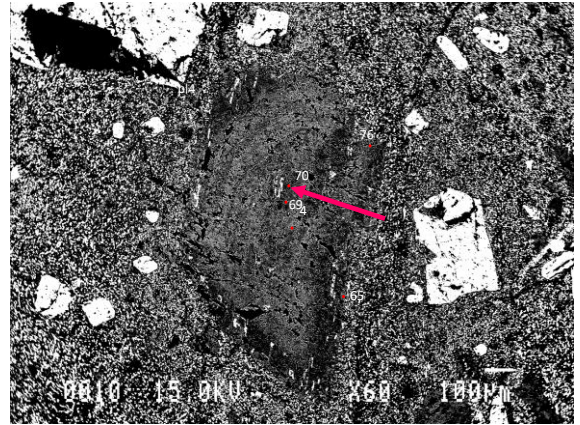
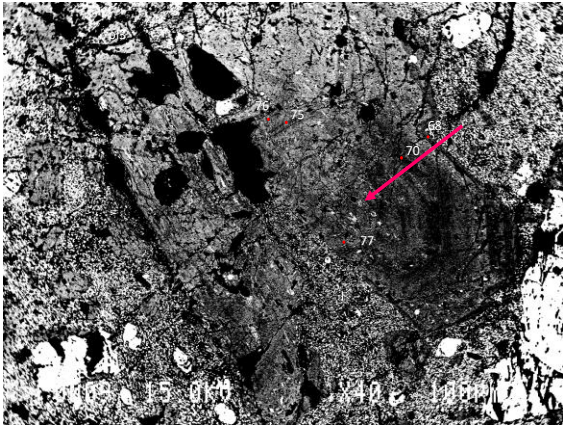
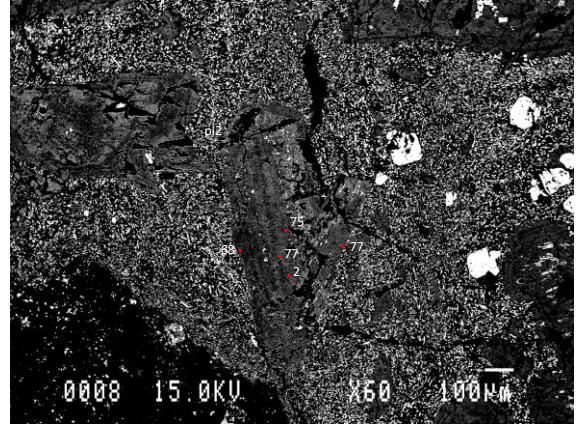
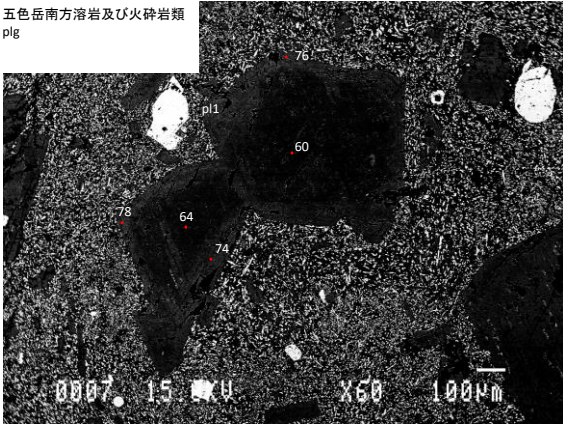


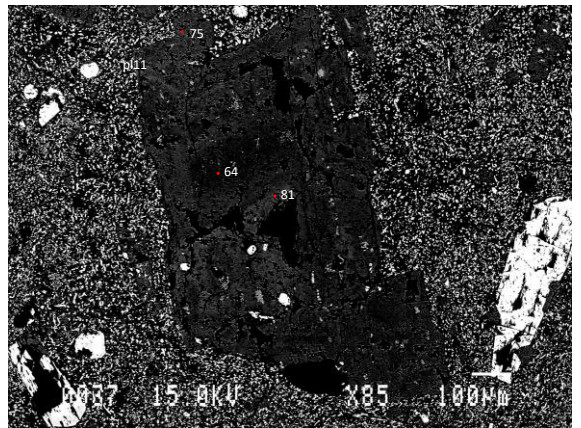
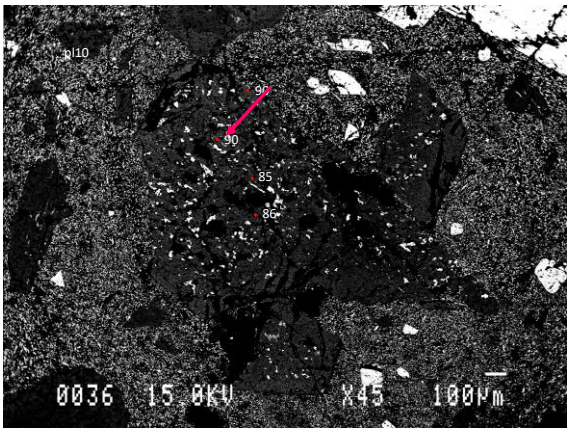
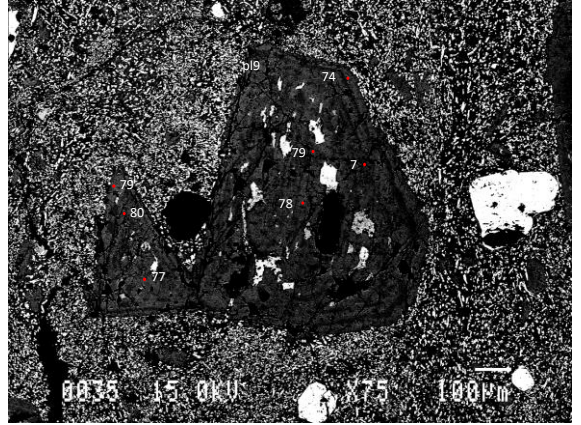
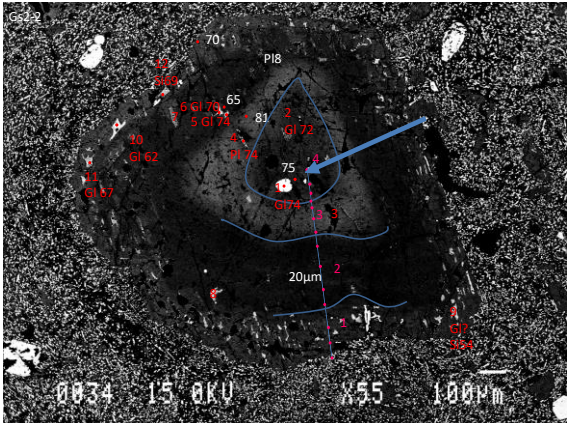
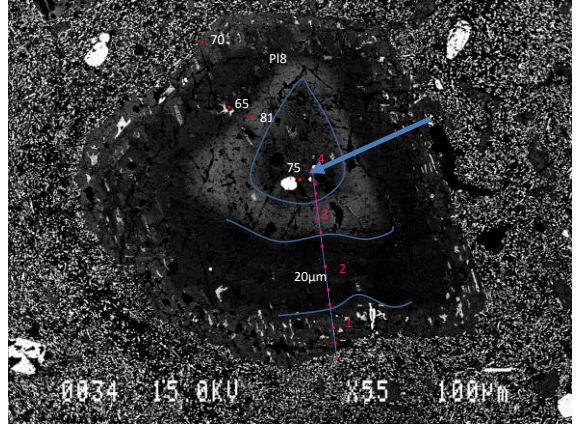
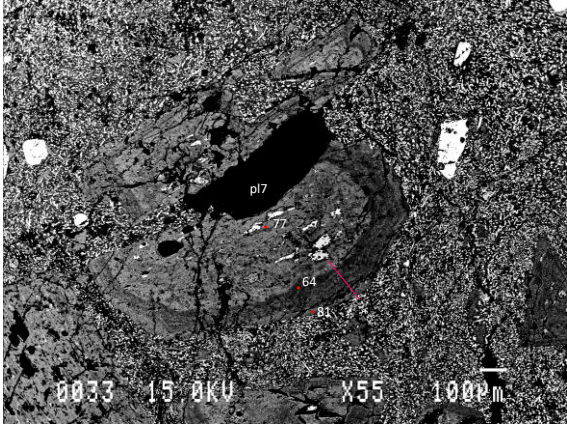


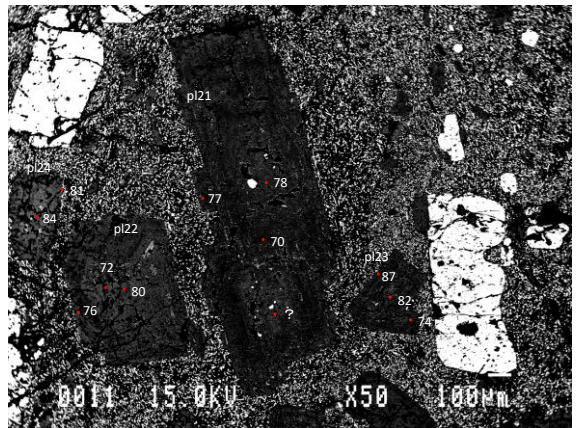
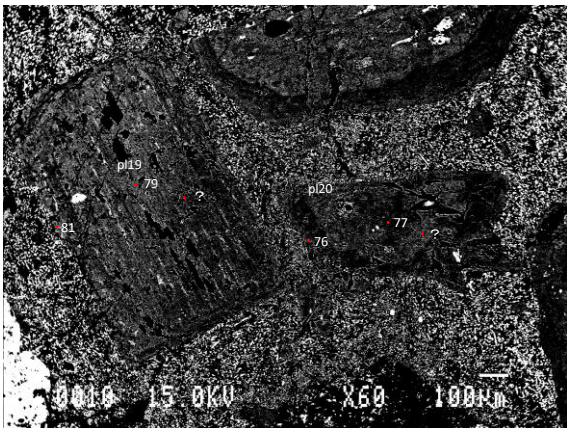
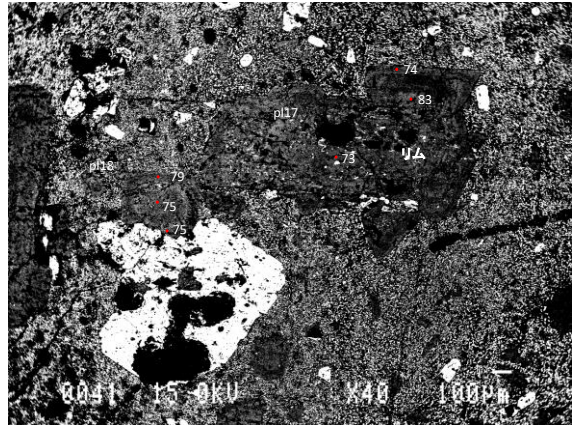
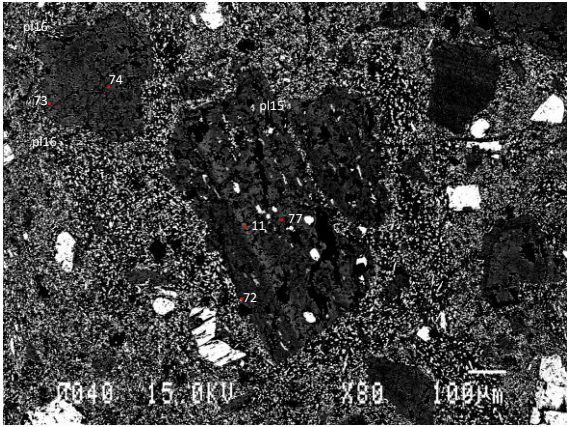
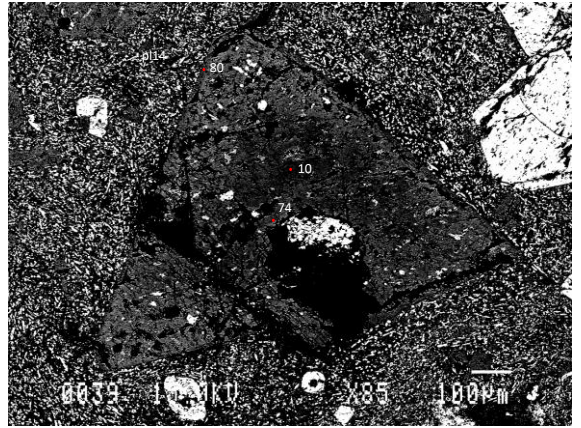
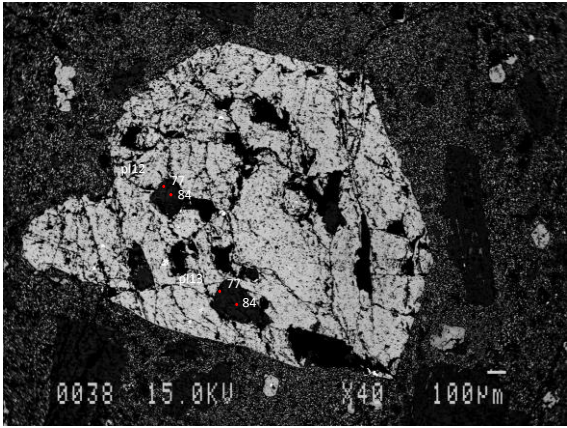


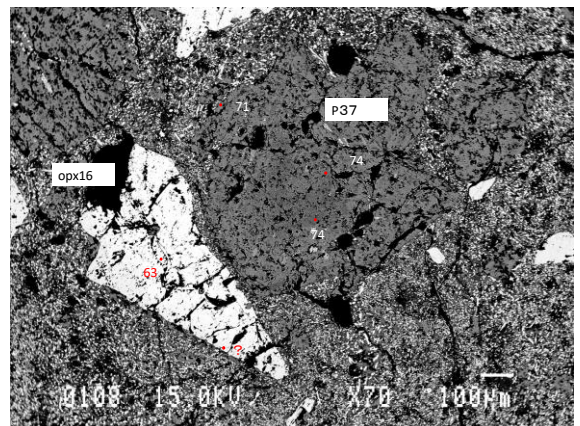
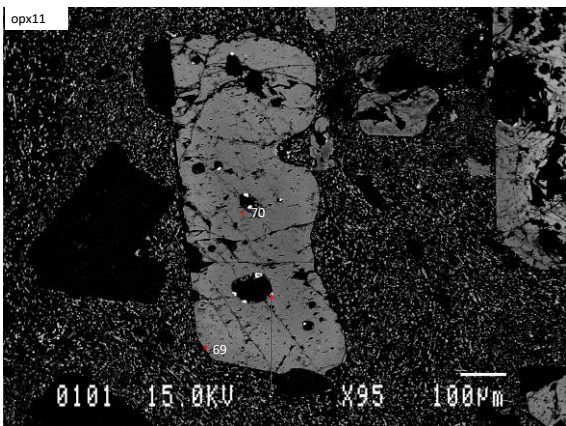
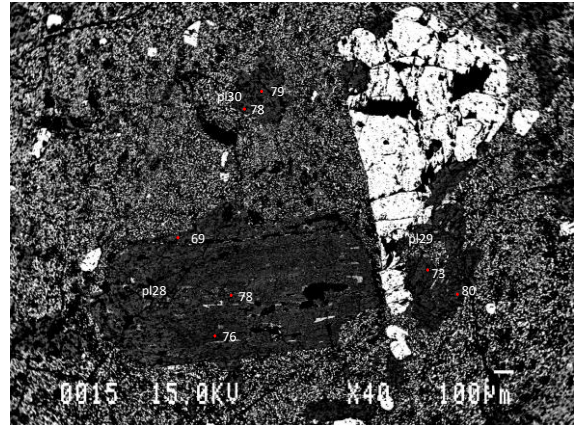
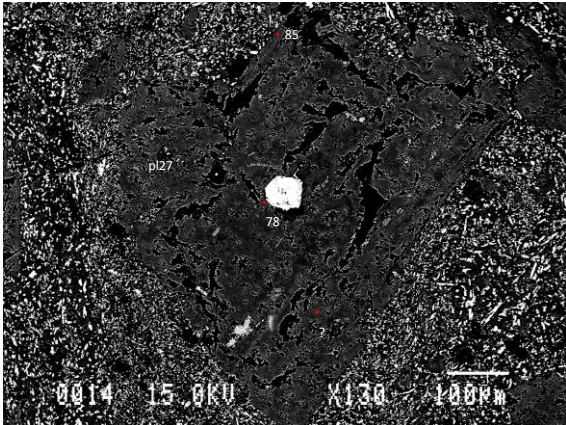
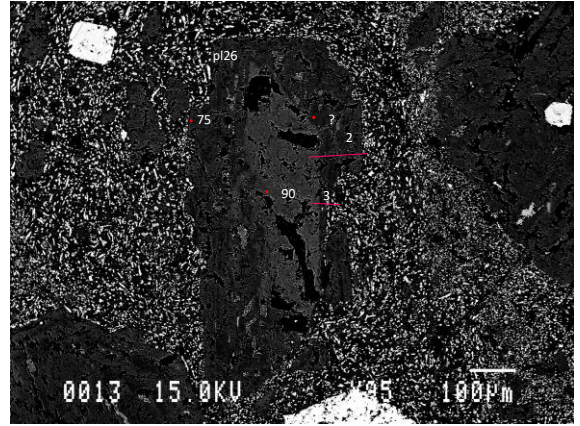
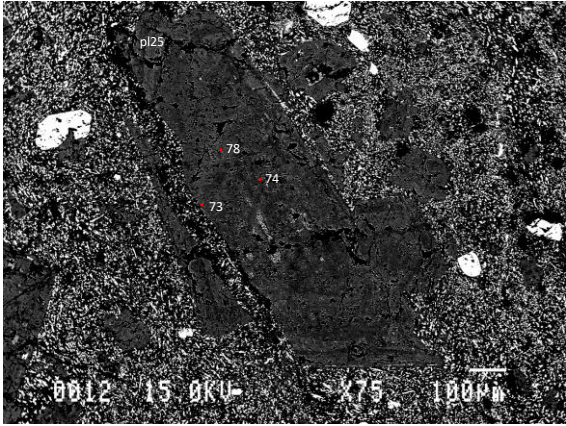


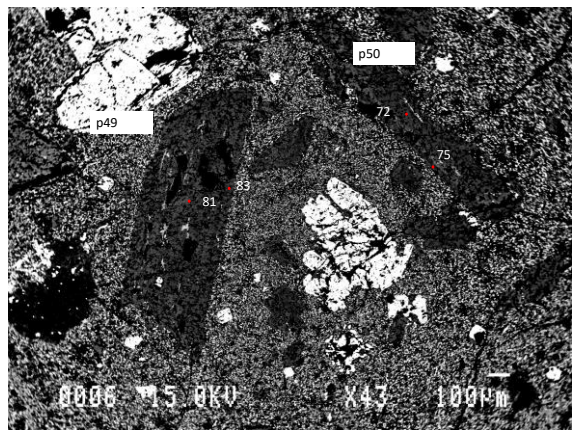
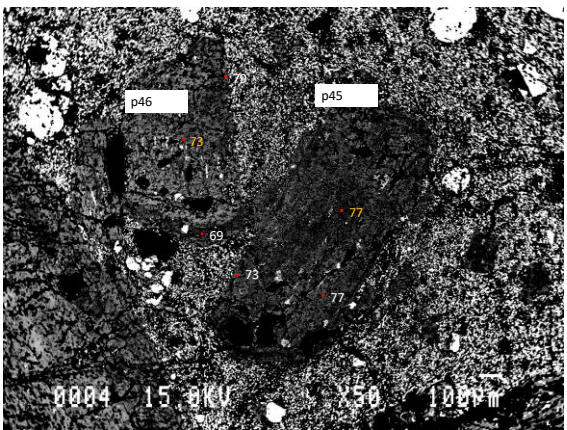
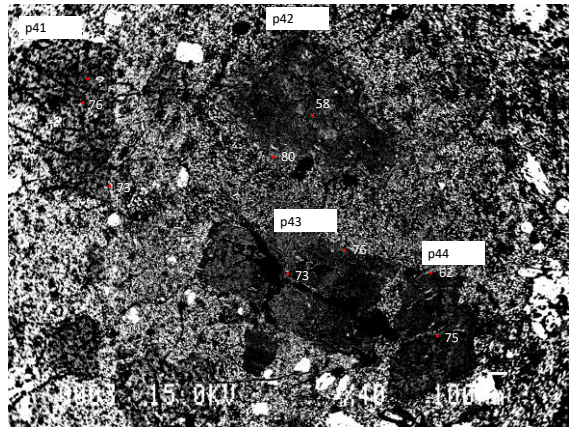
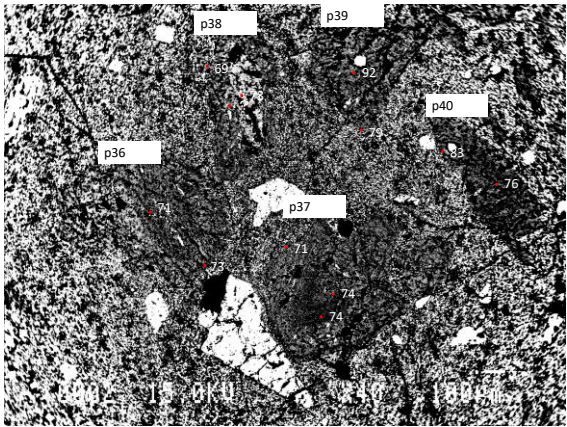
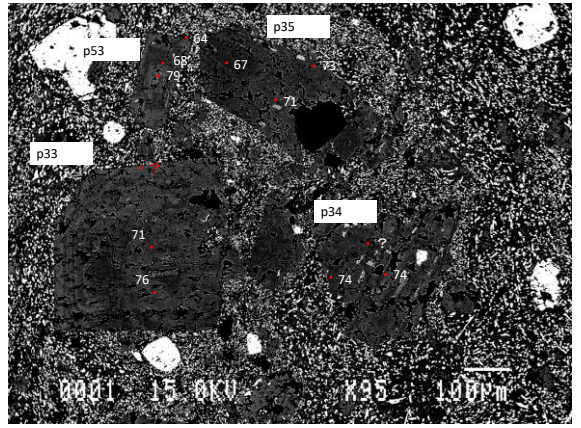
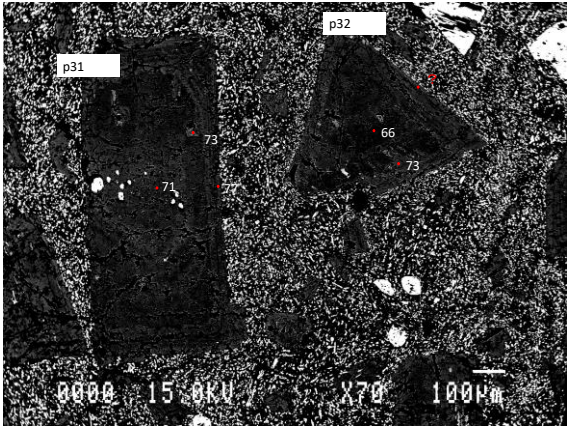
五色岳南方溶岩及び火砕岩類
plg

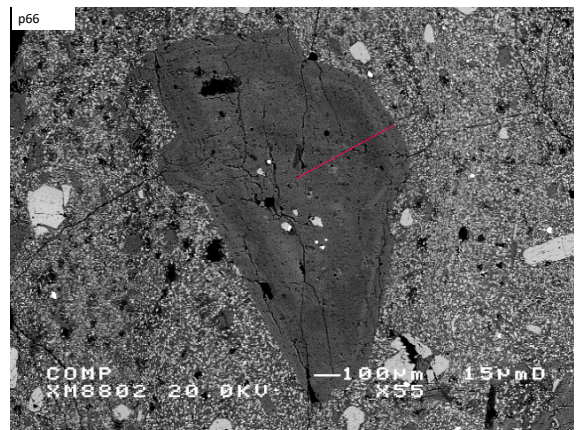
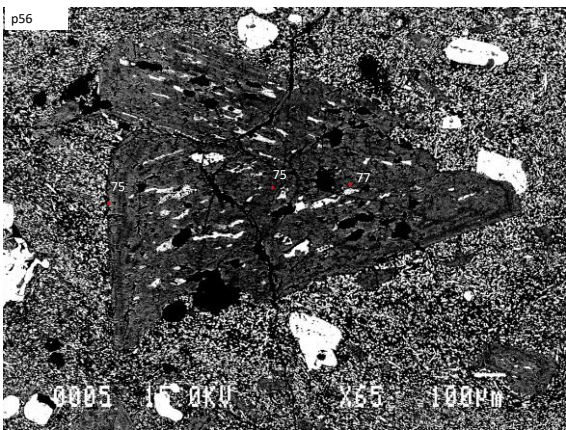
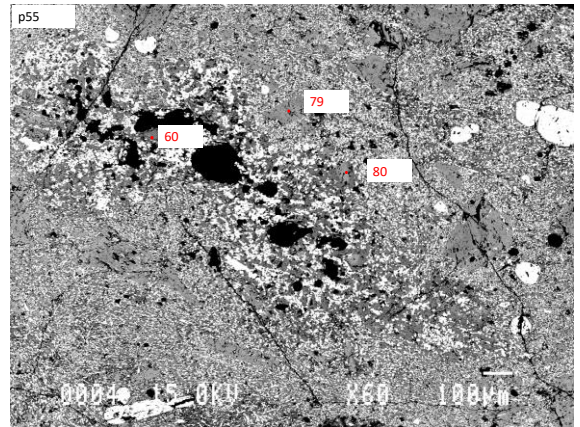
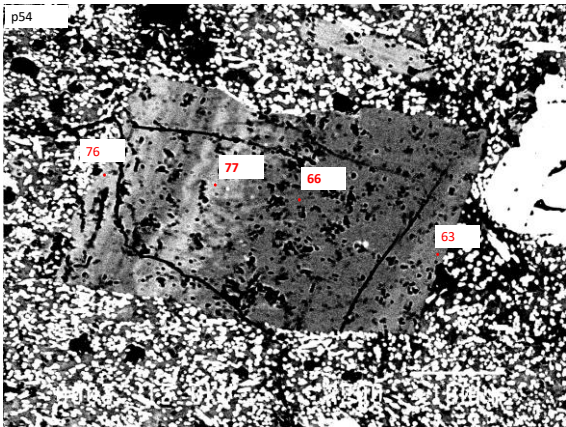
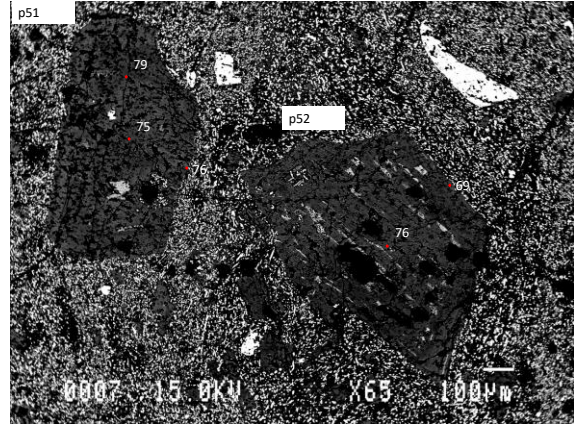
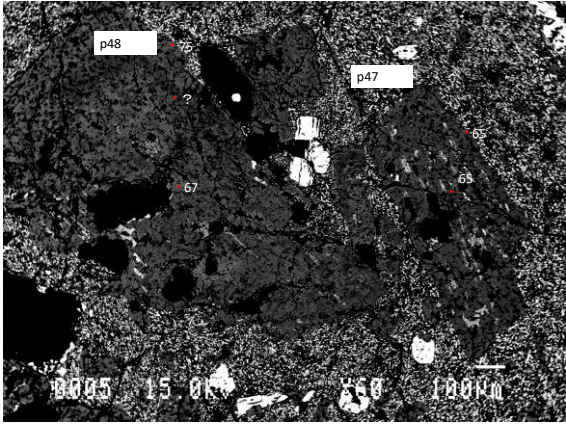


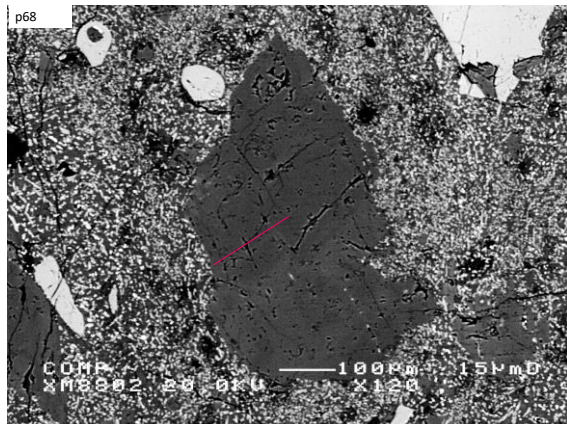
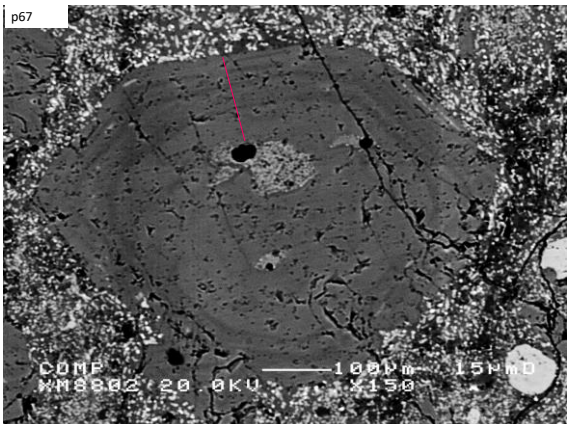


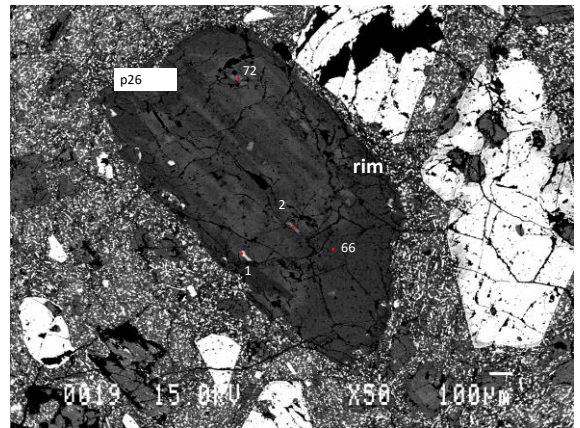
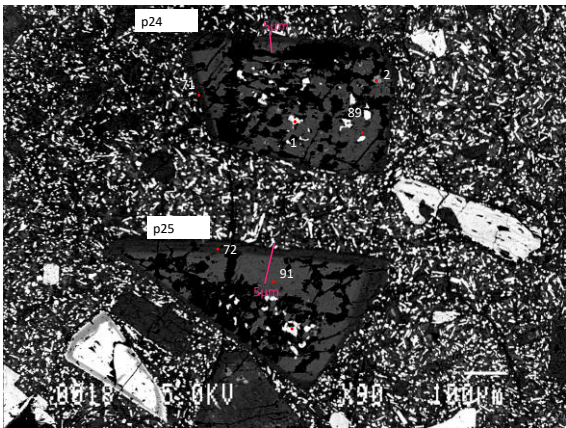
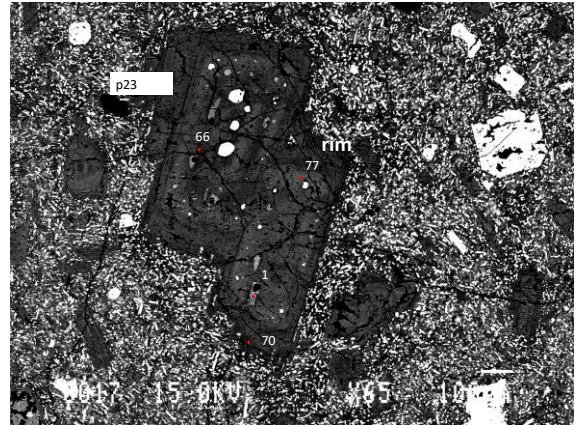
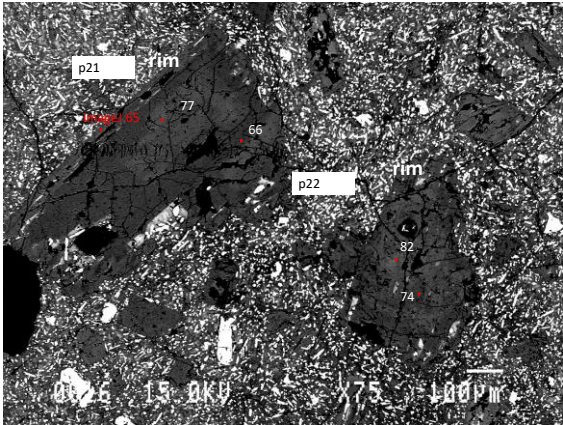
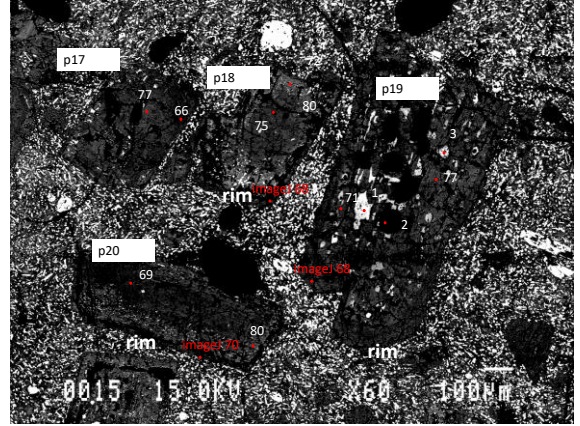
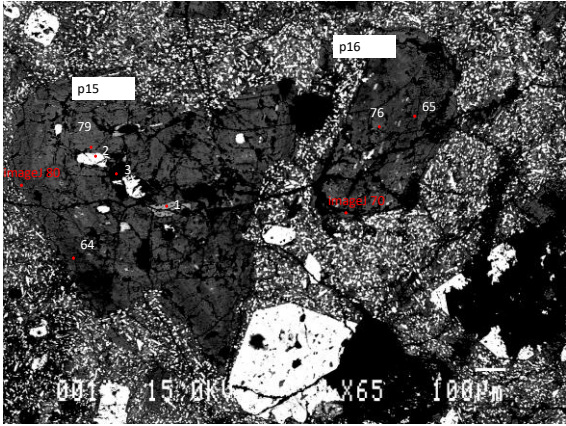


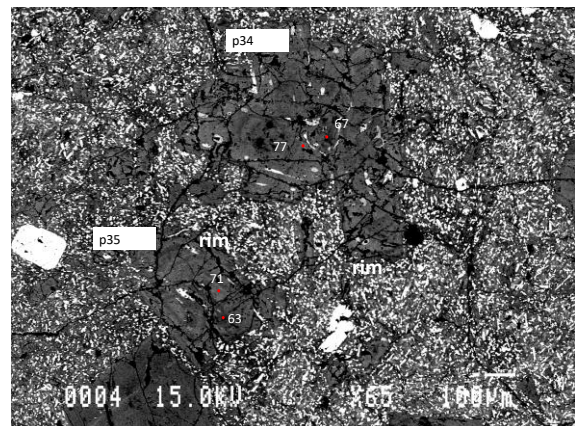
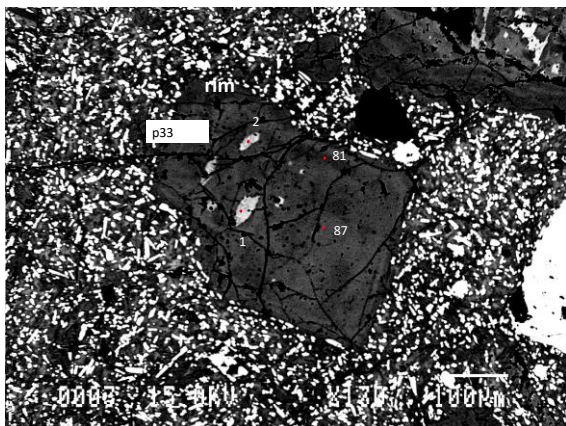
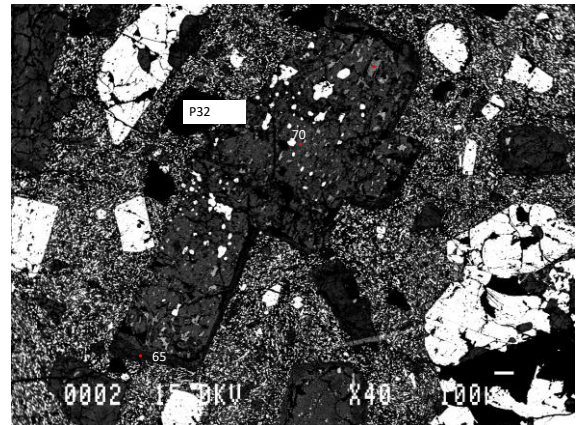
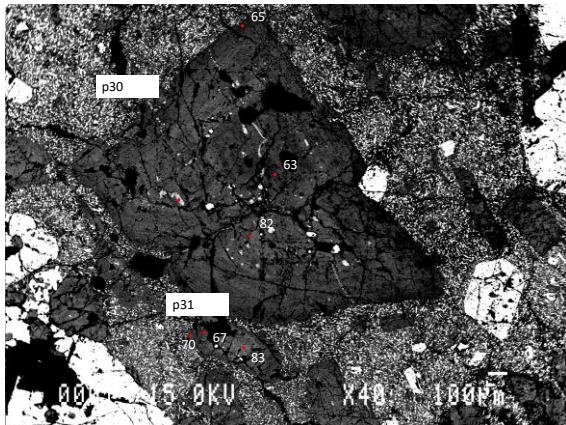
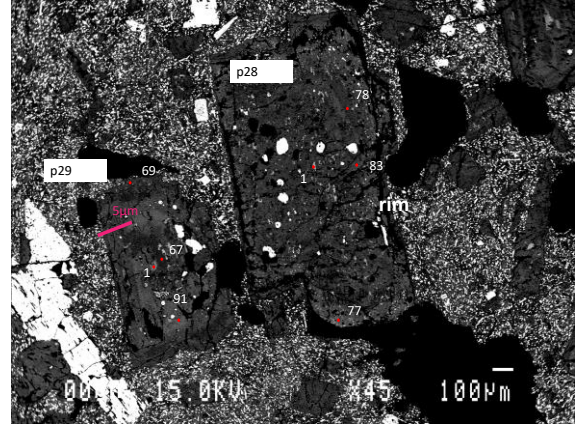
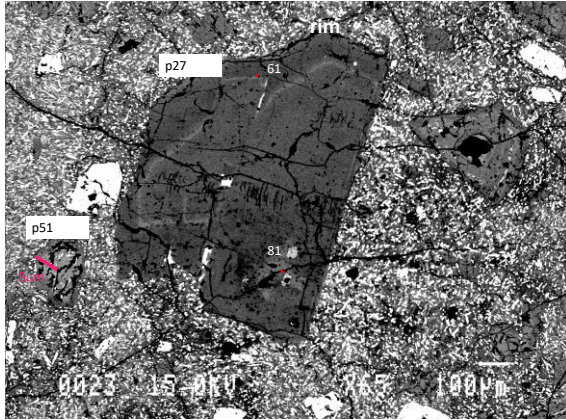


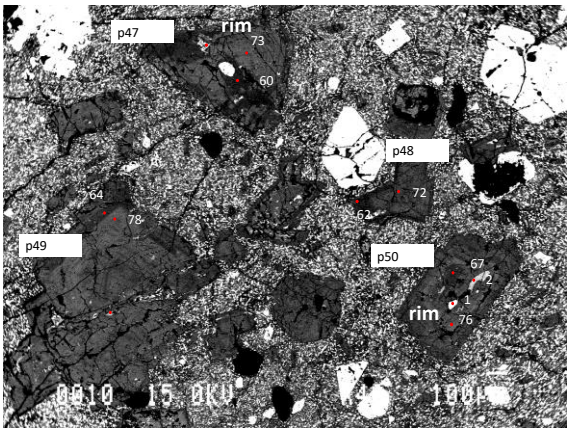
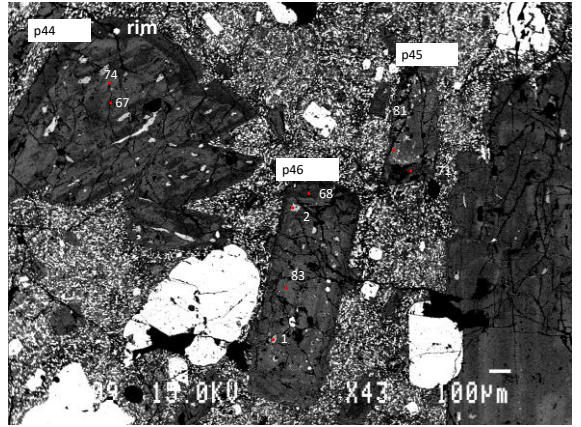
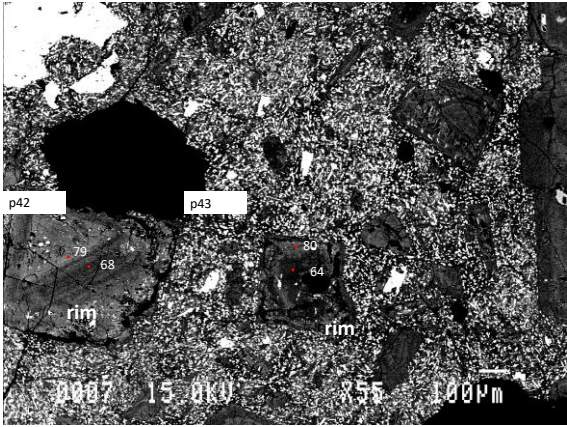
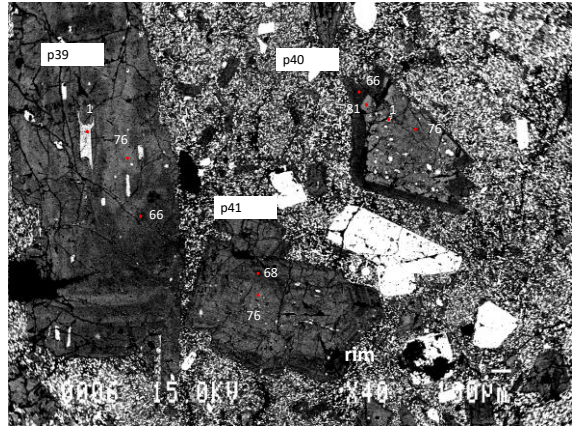
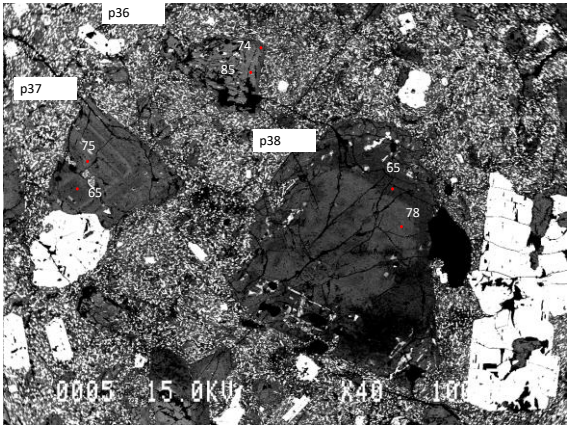


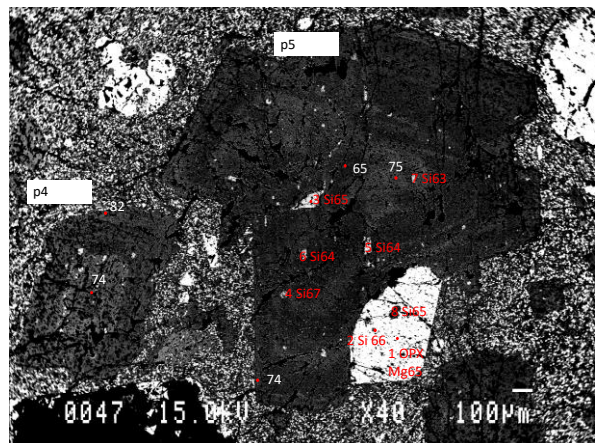
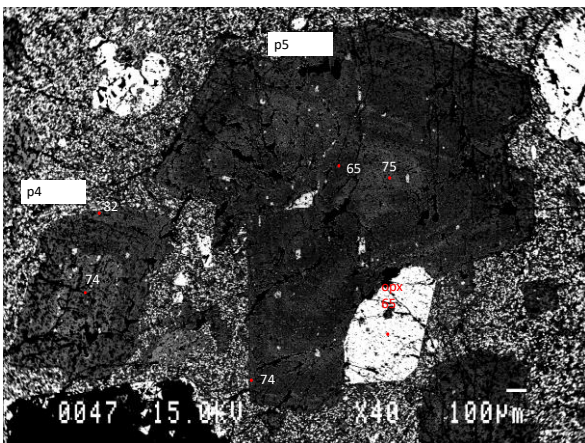
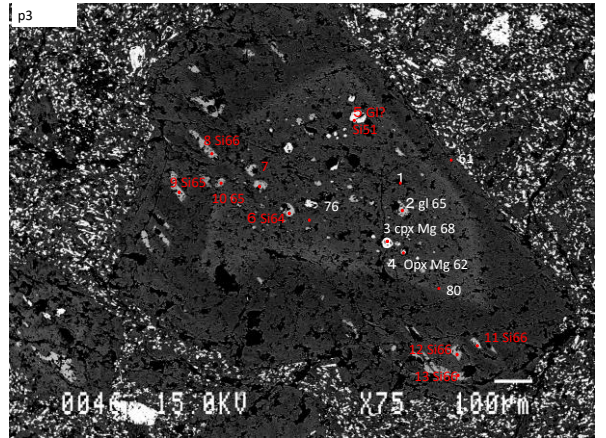
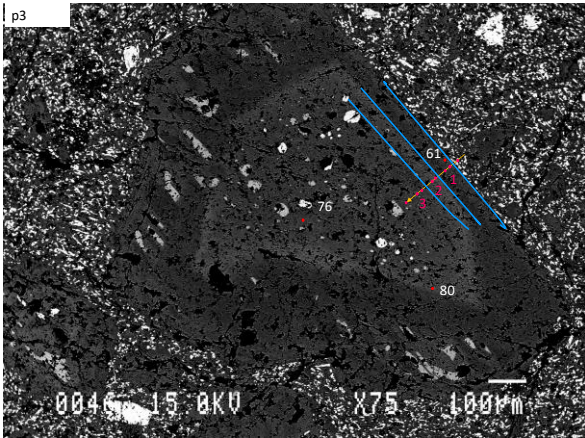
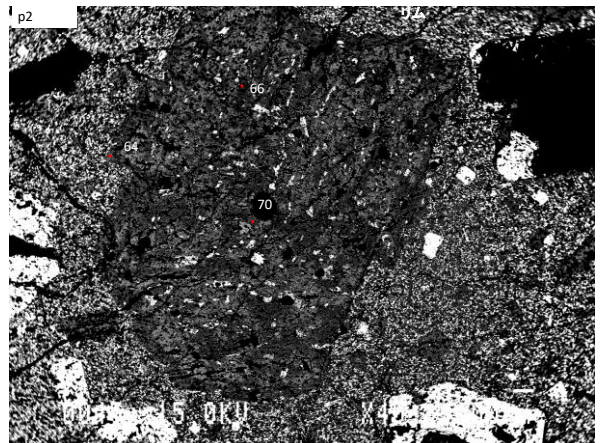
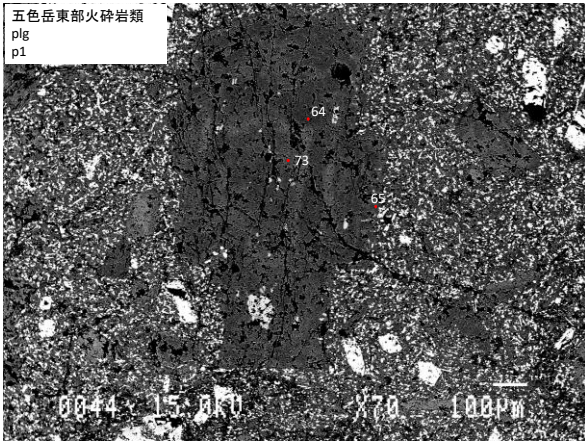


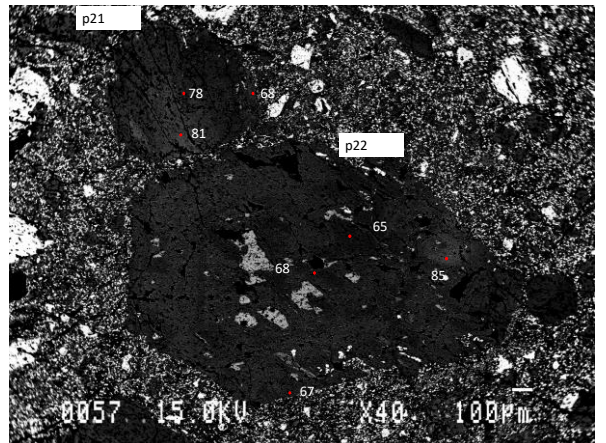
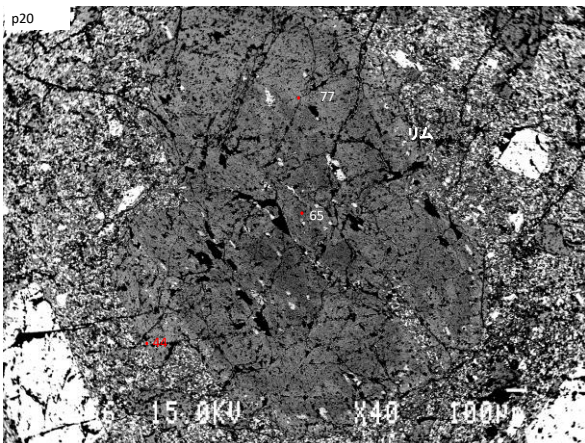
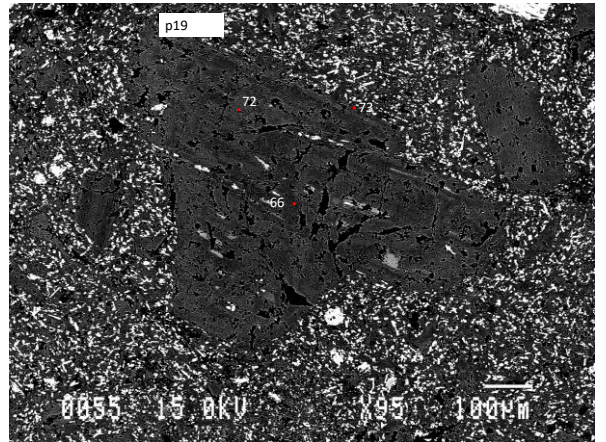
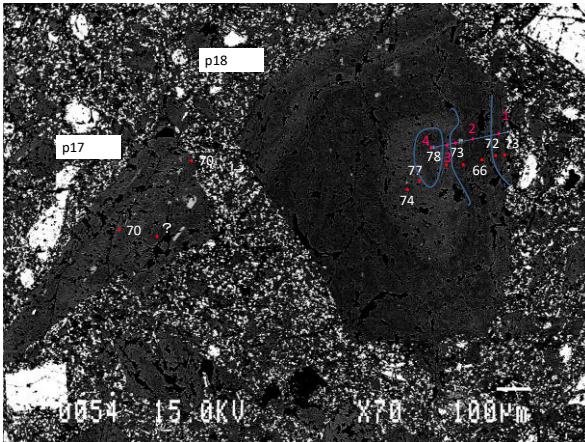
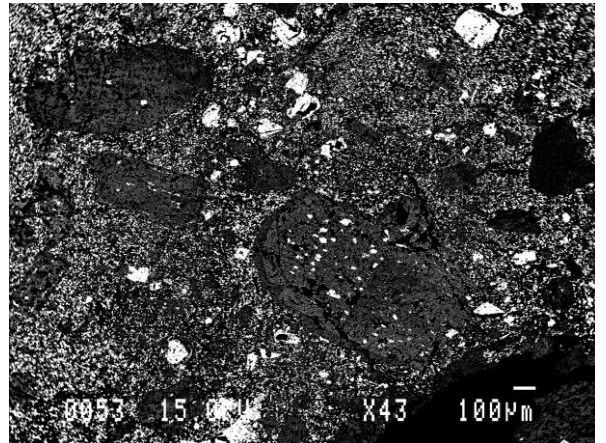
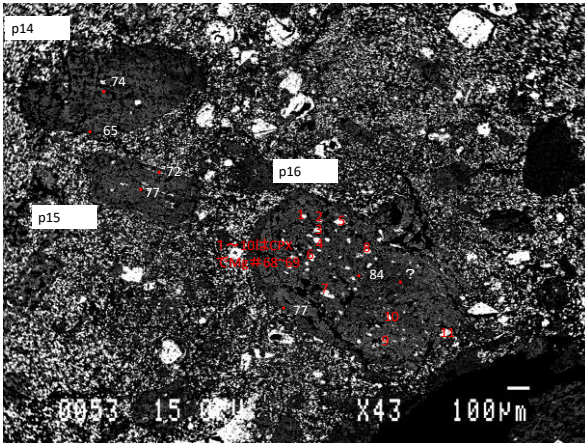


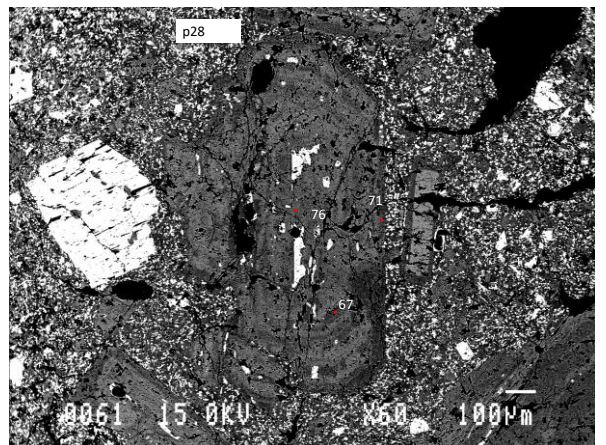
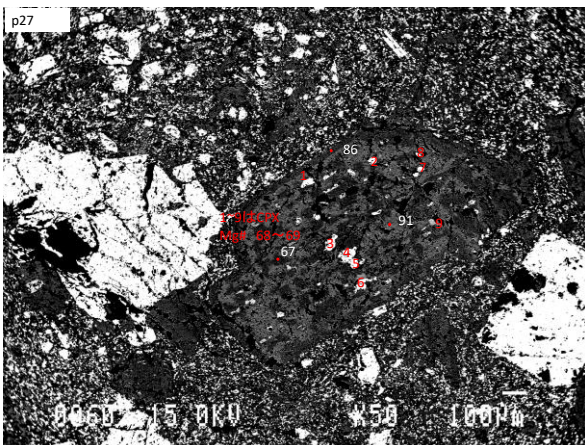
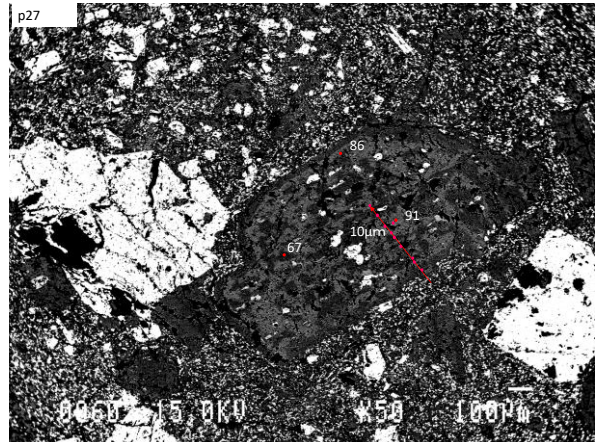
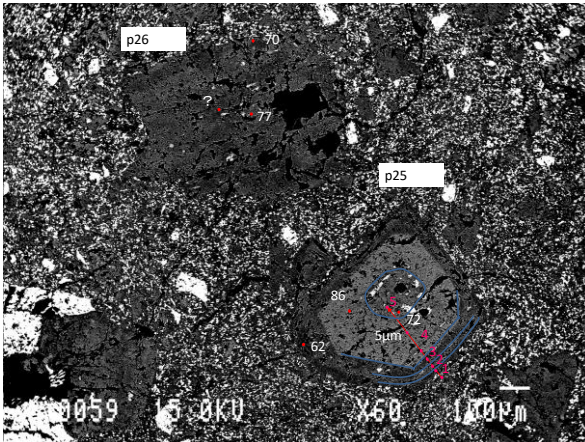
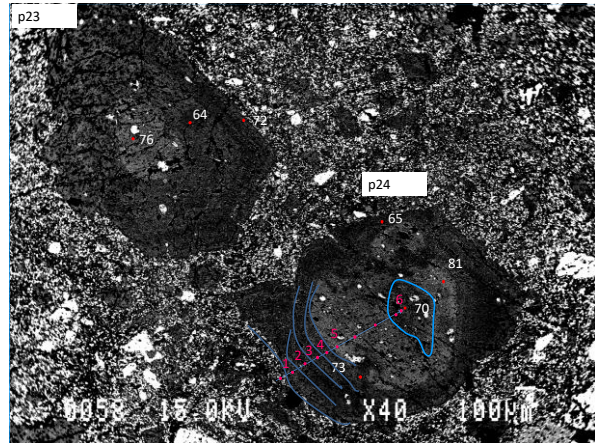
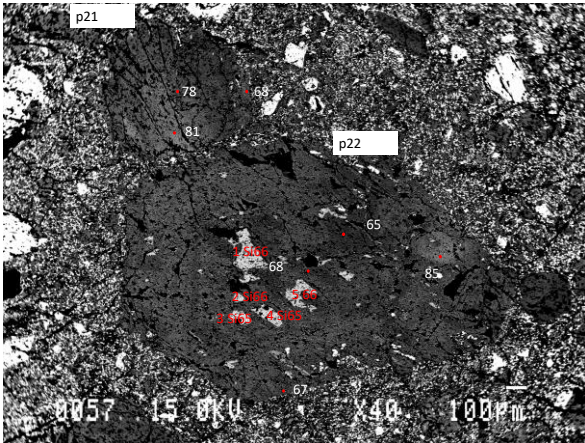


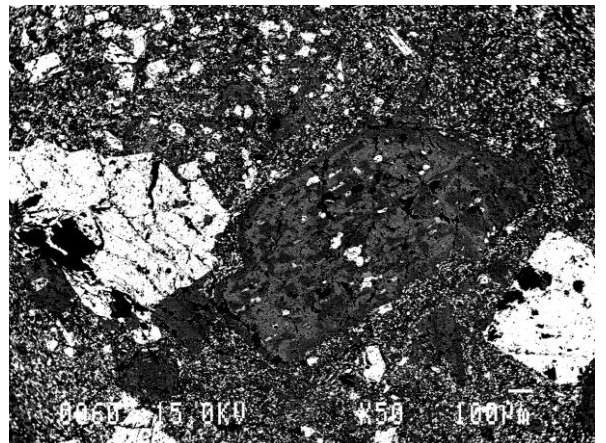
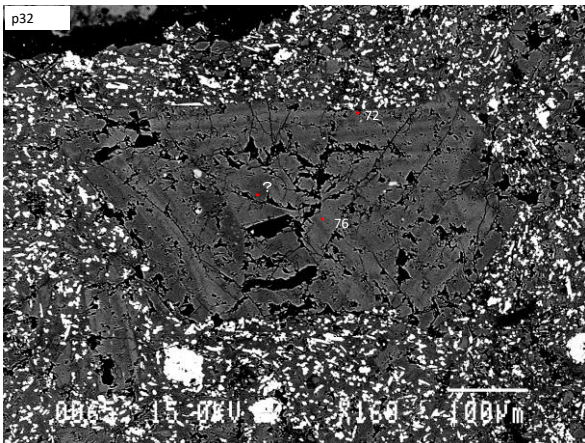
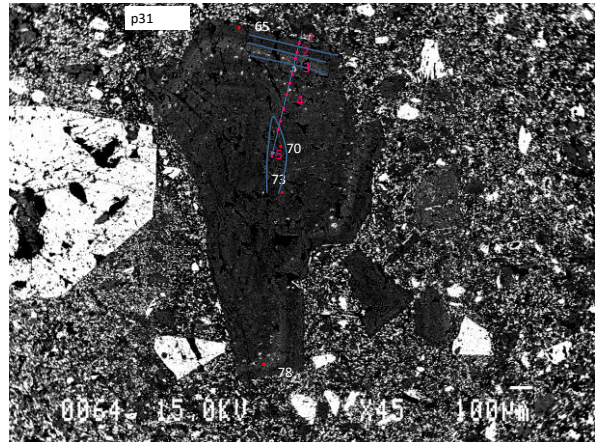
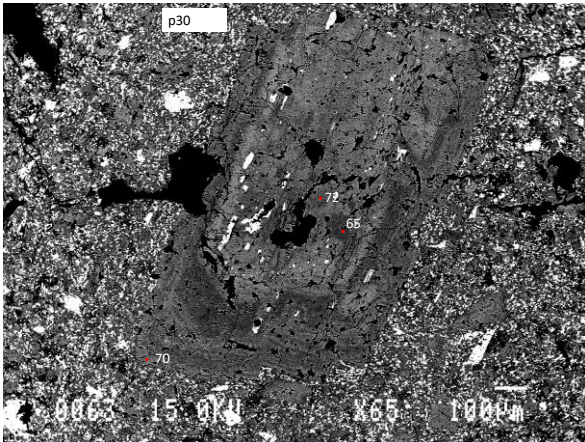
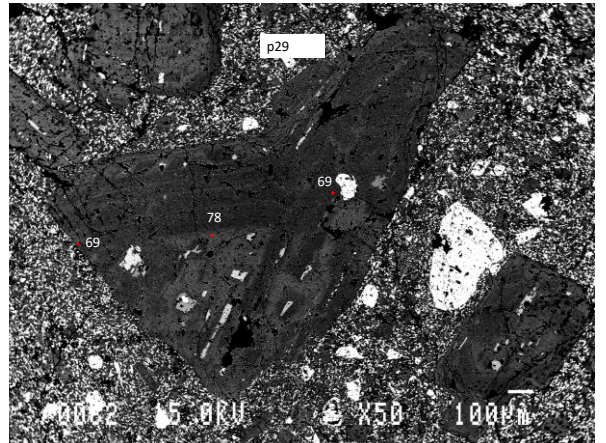
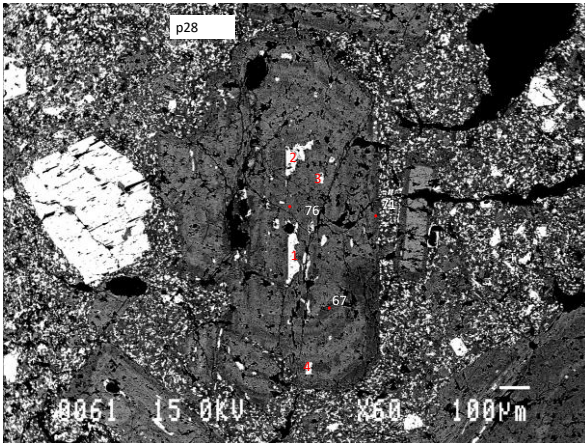


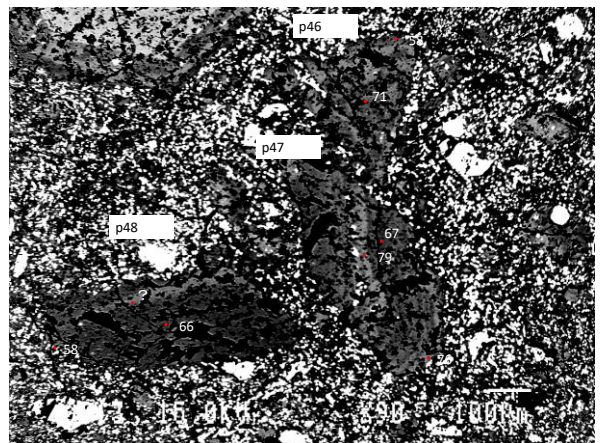
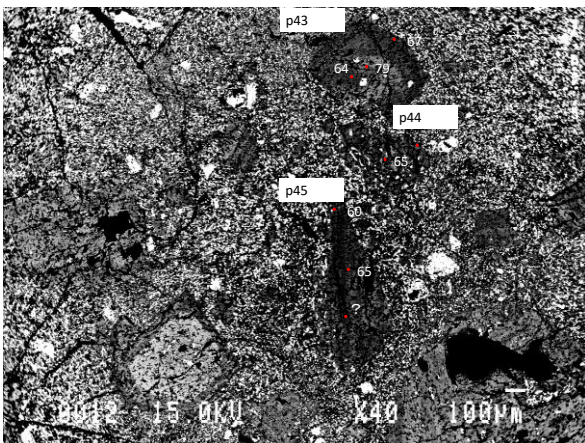
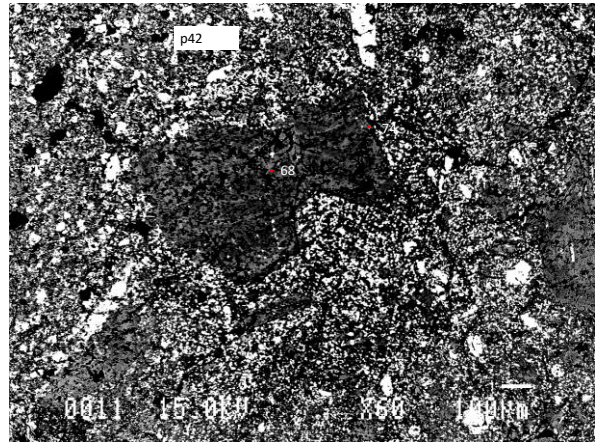
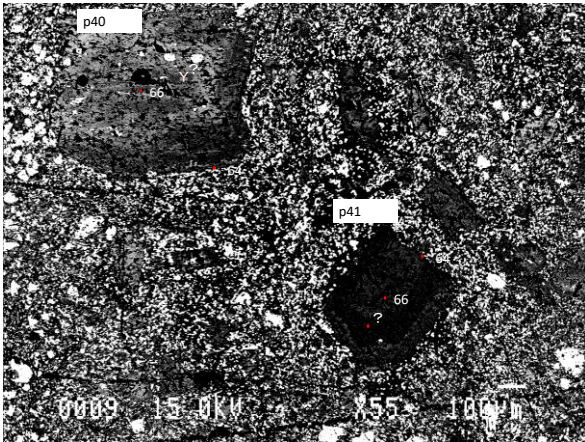
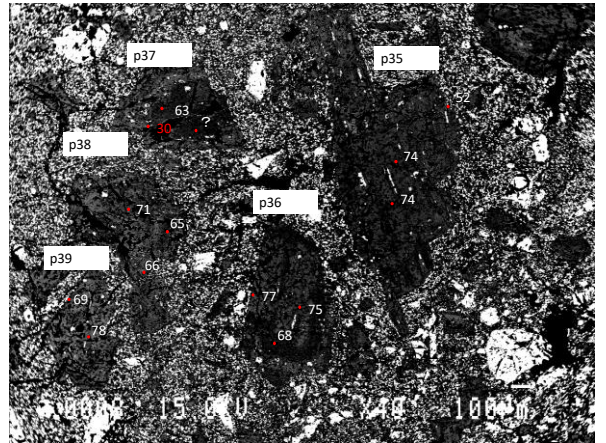
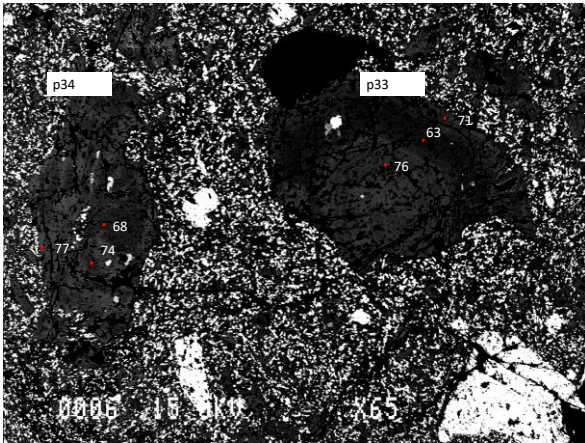


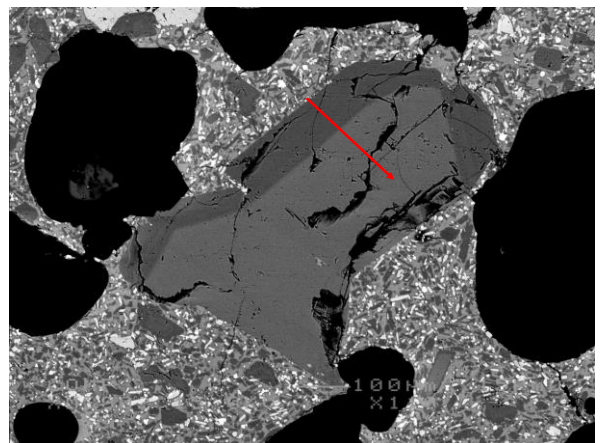
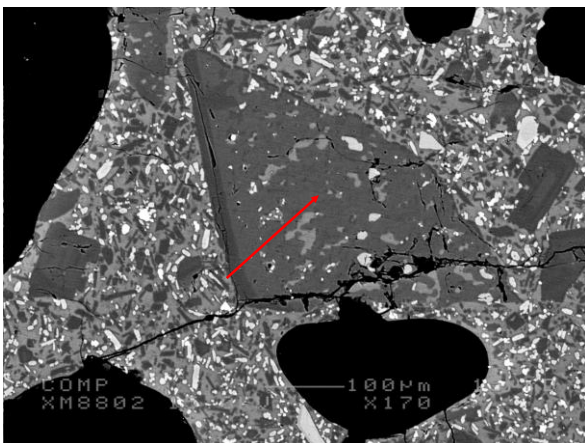
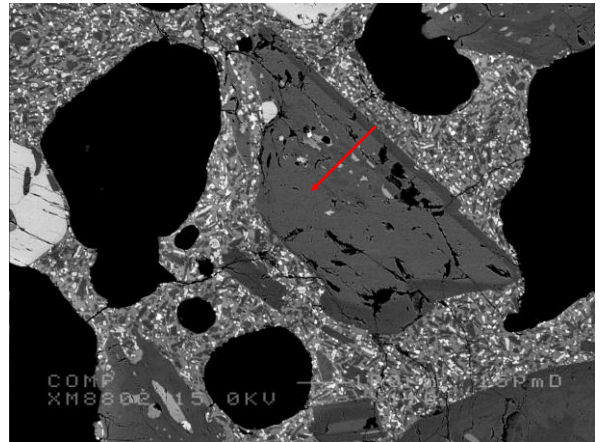
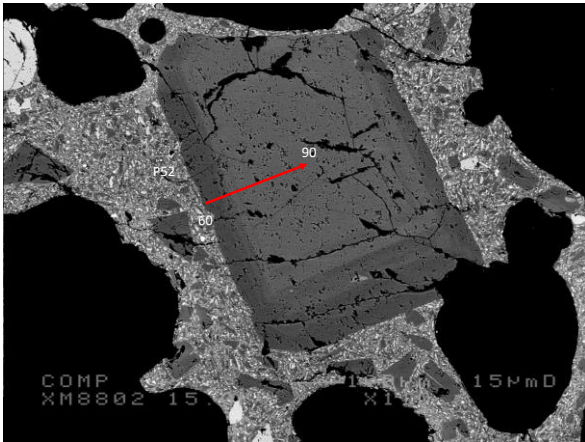
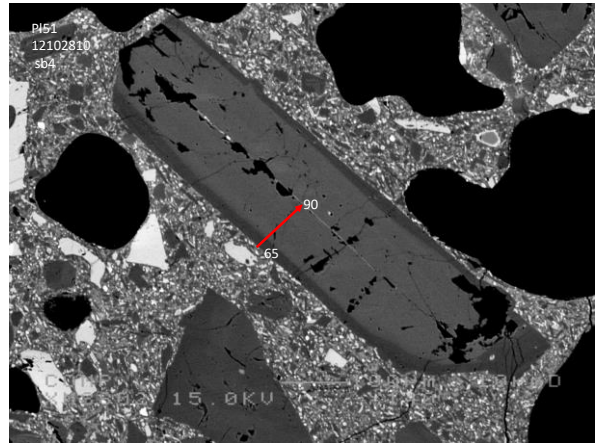
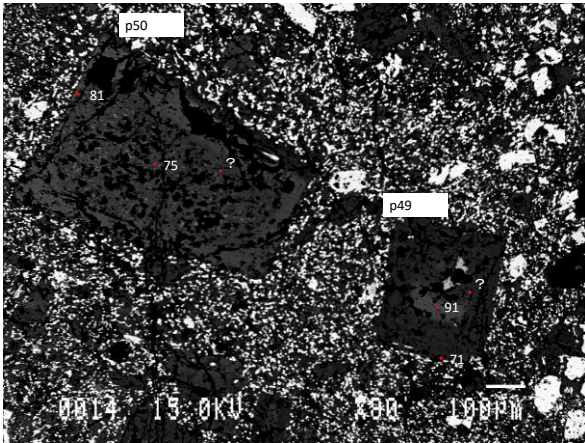


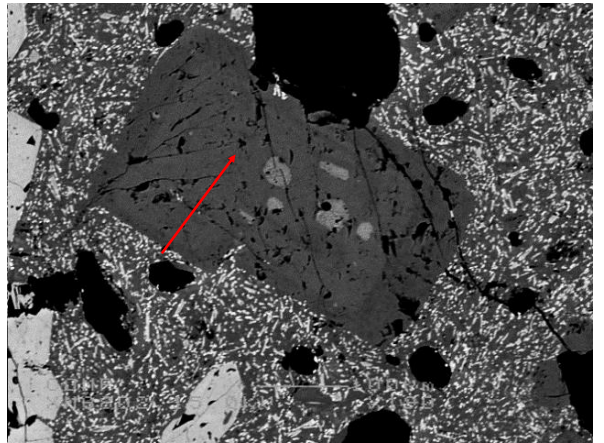
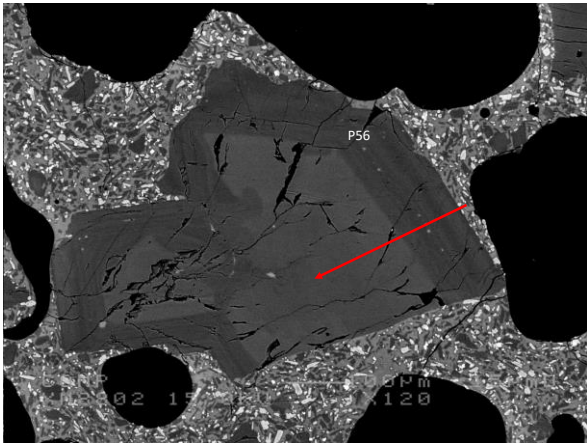


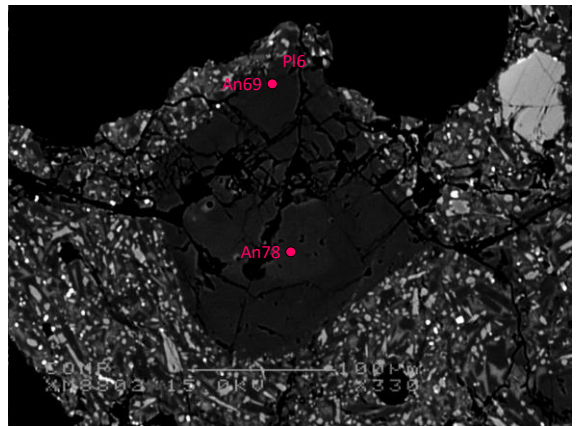
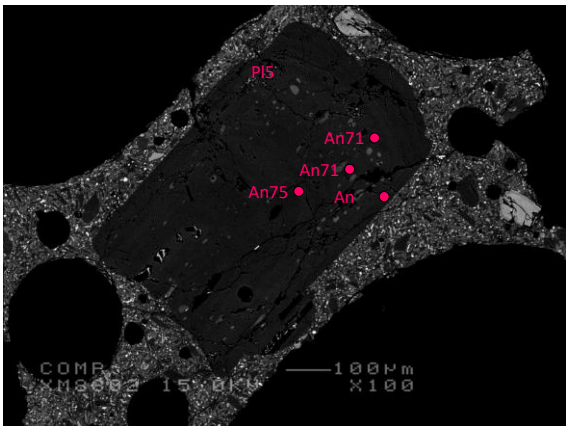
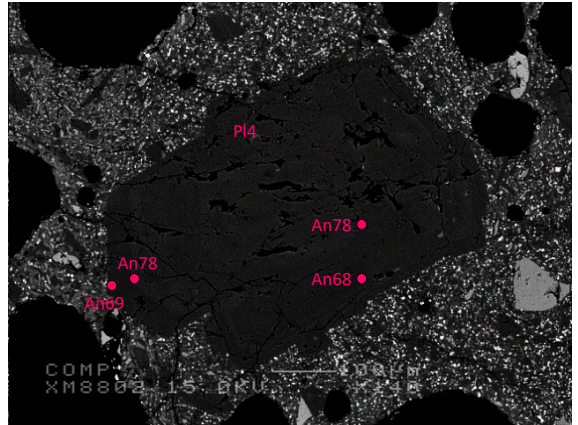
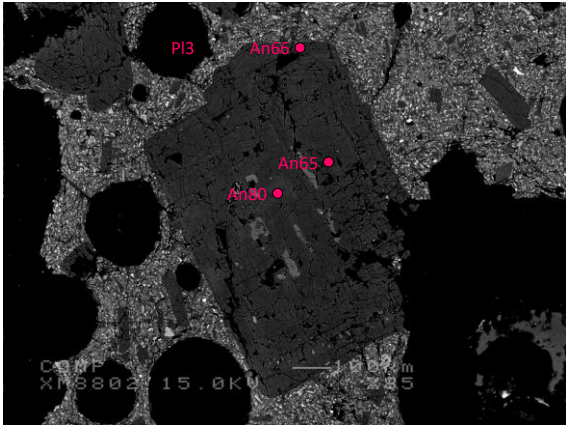
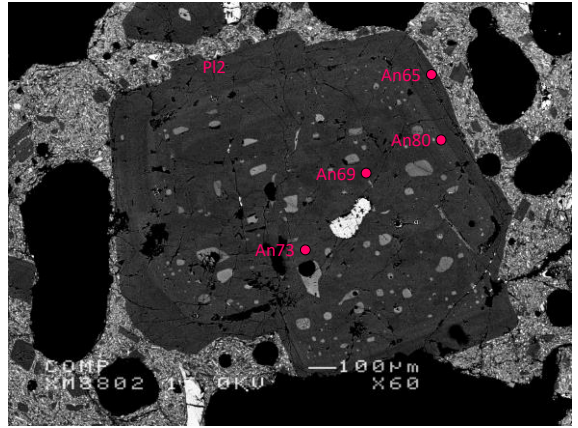
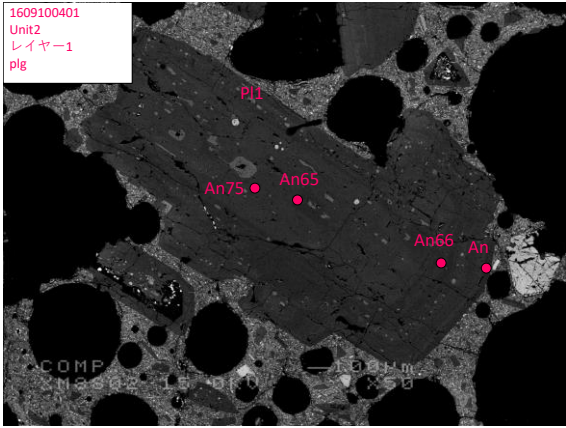


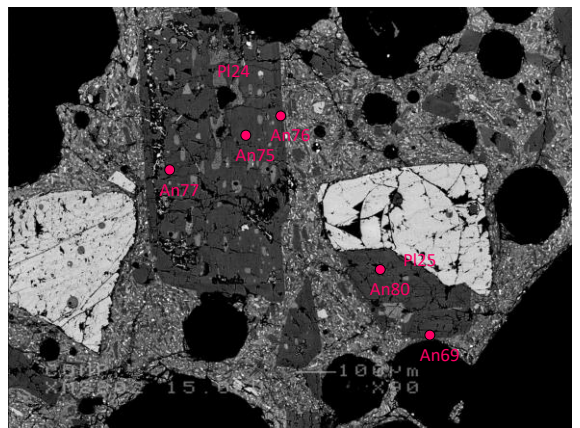
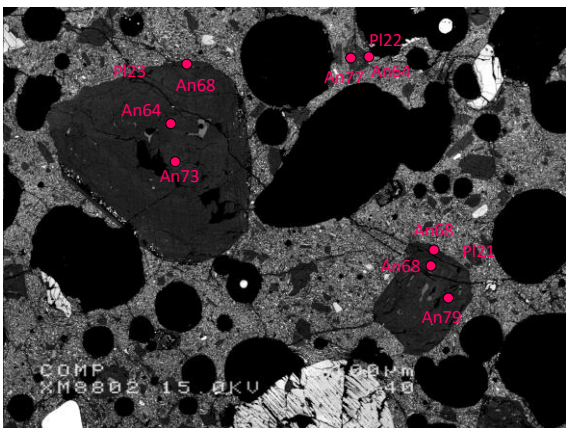
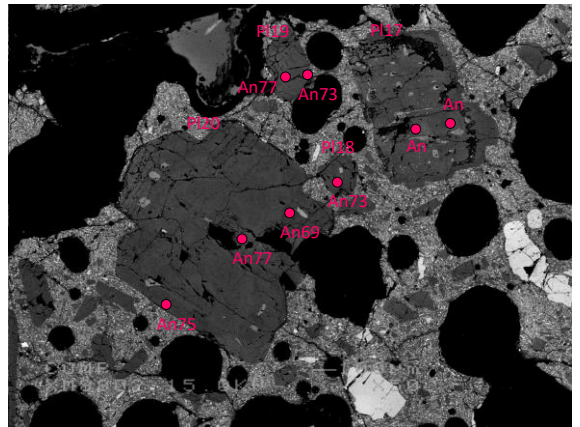
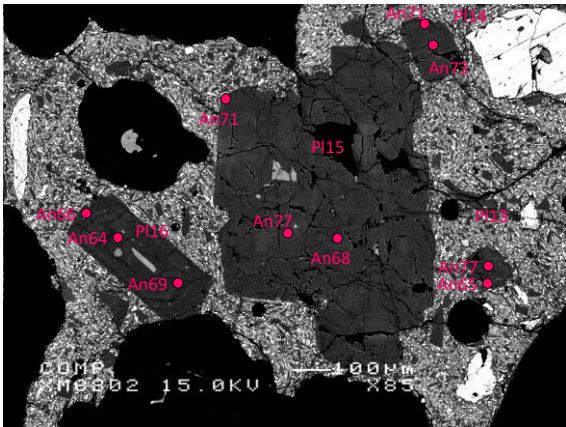
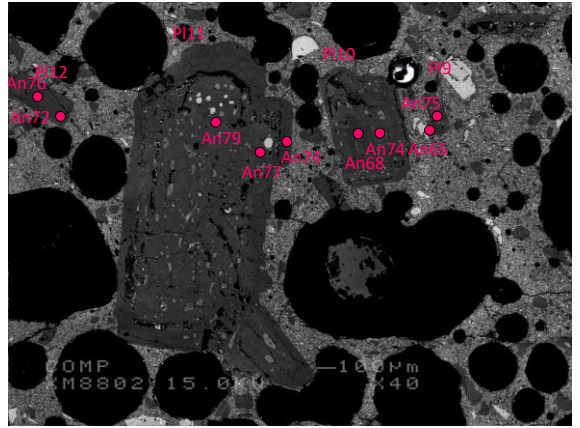
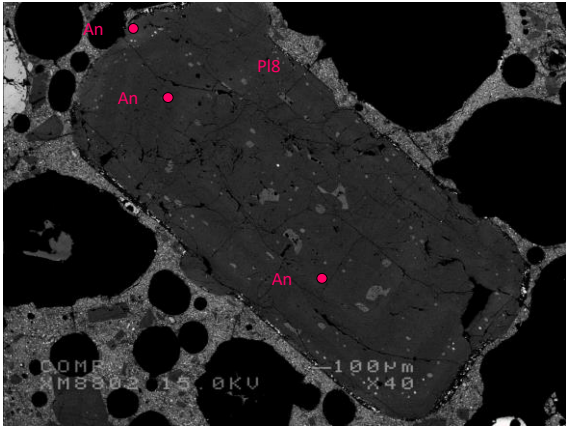




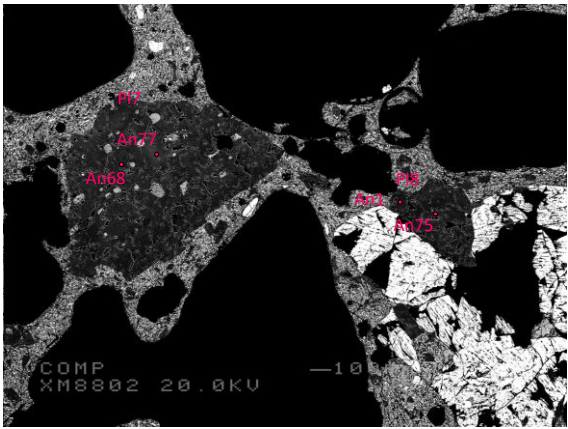
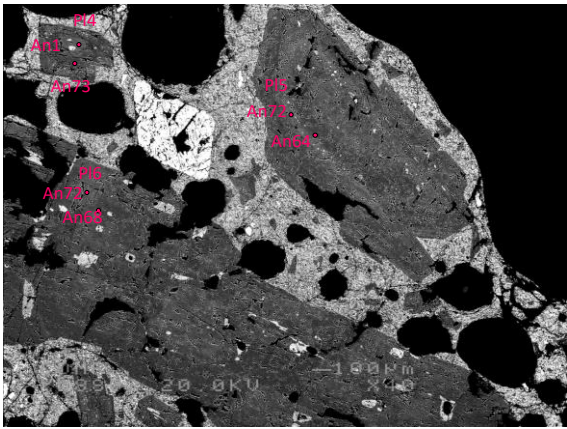
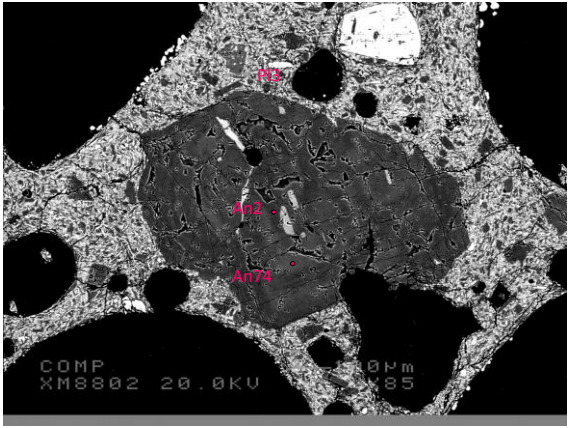
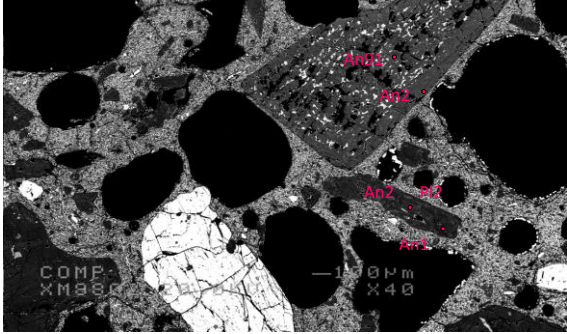




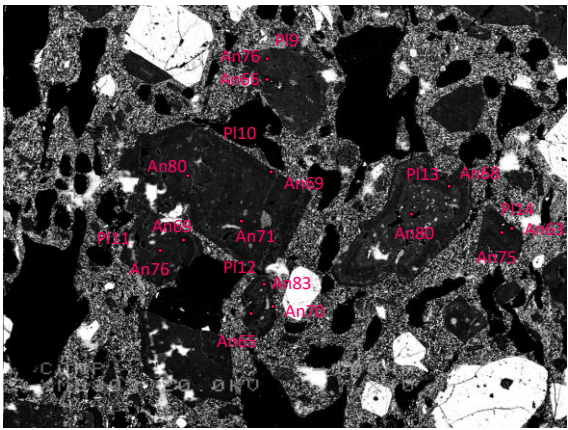
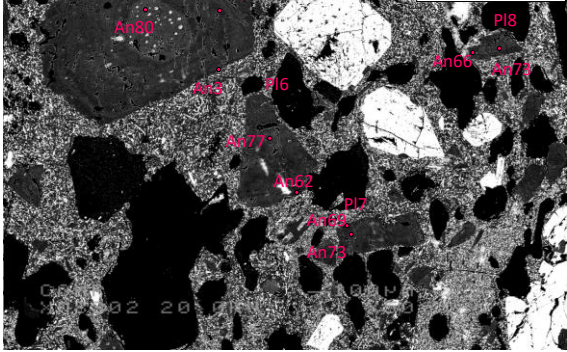


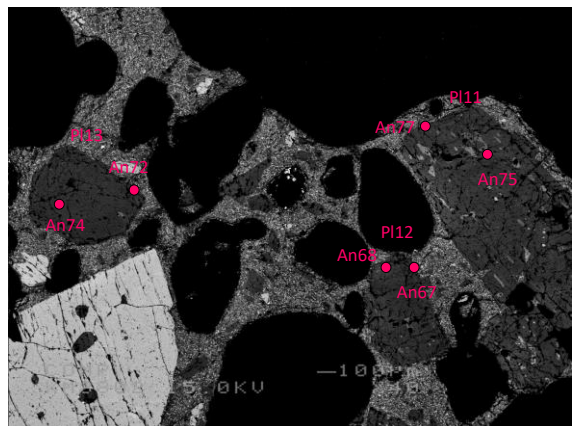
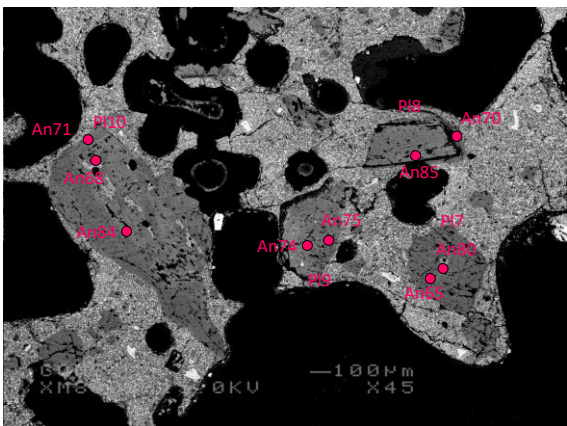
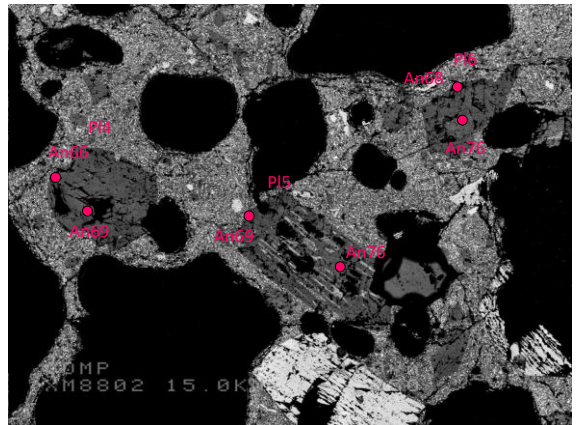
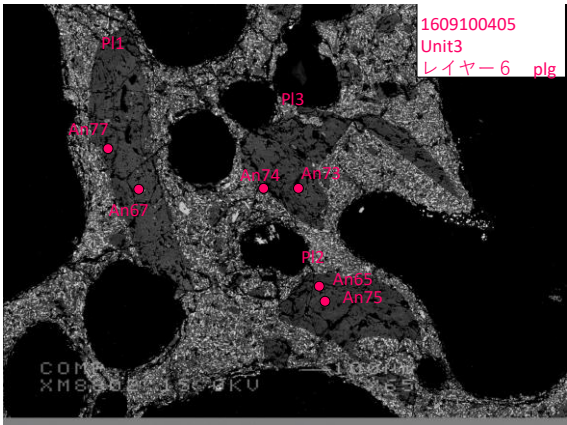
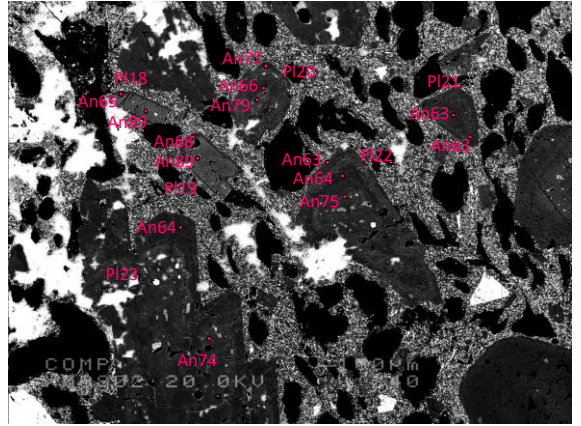
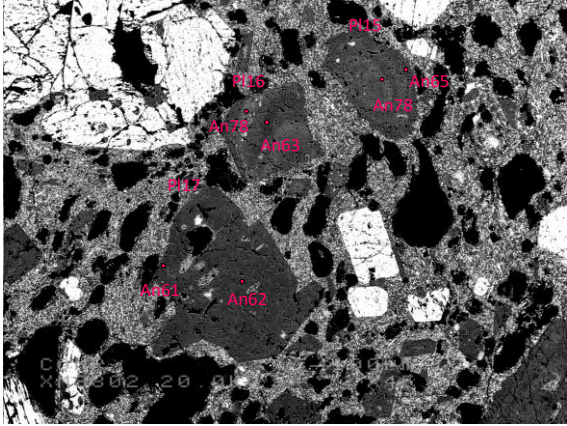


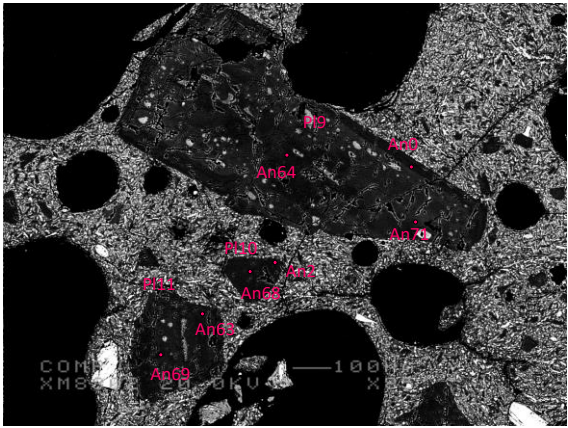
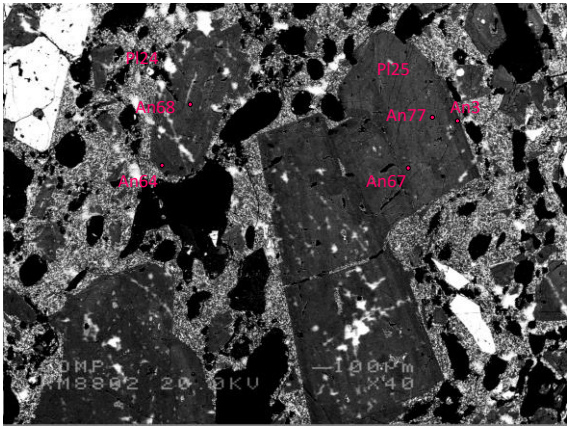
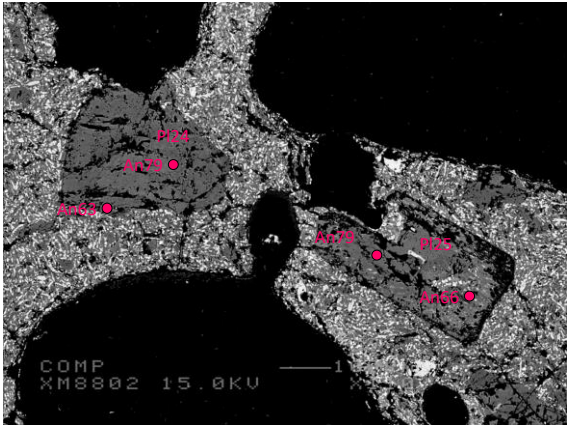
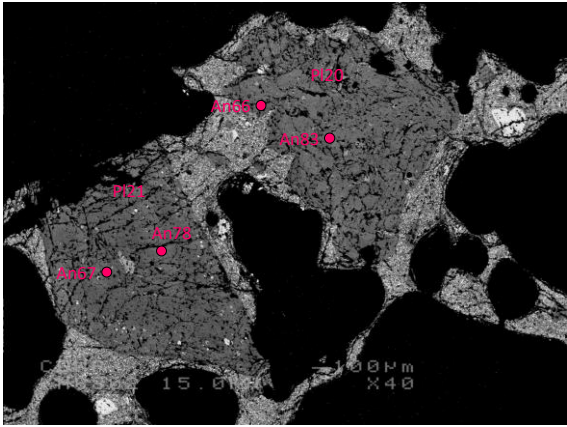
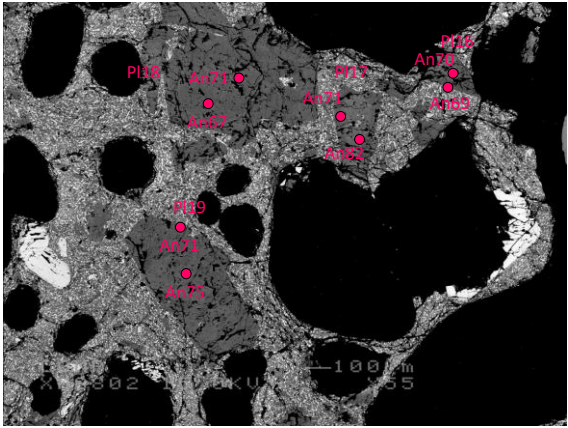
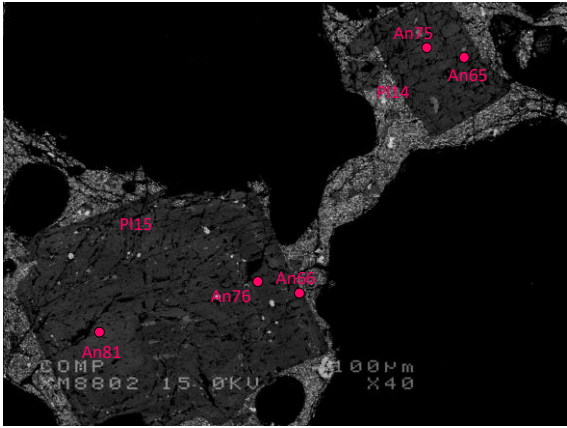
1609100404
Unit2
レイヤー 2
pl

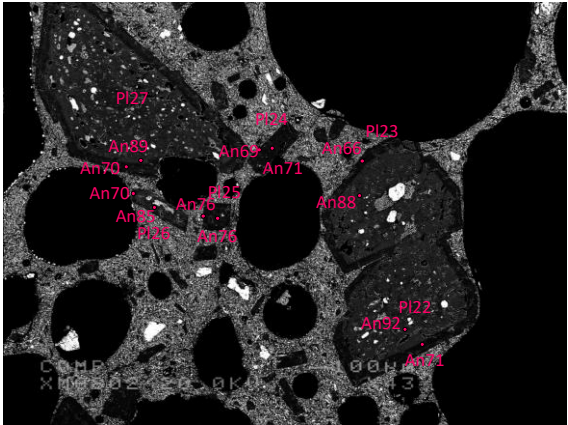
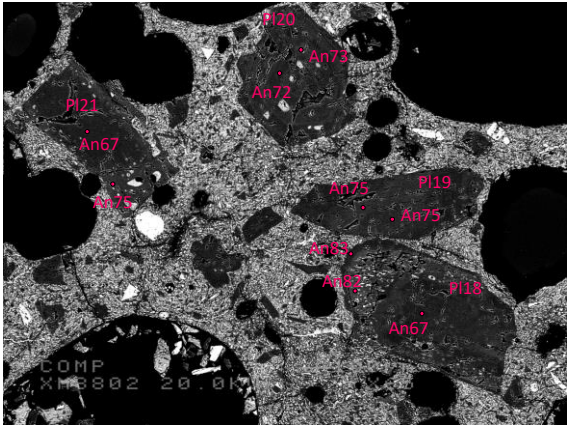
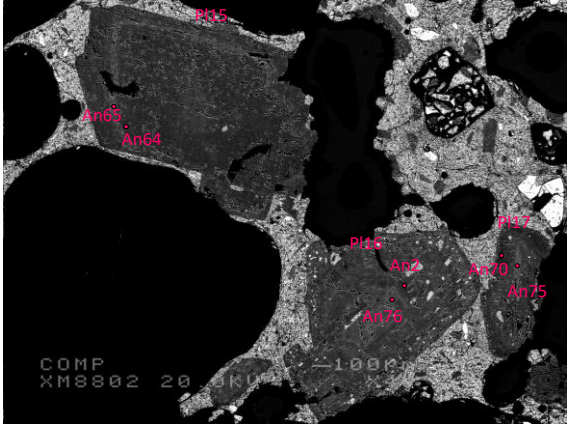
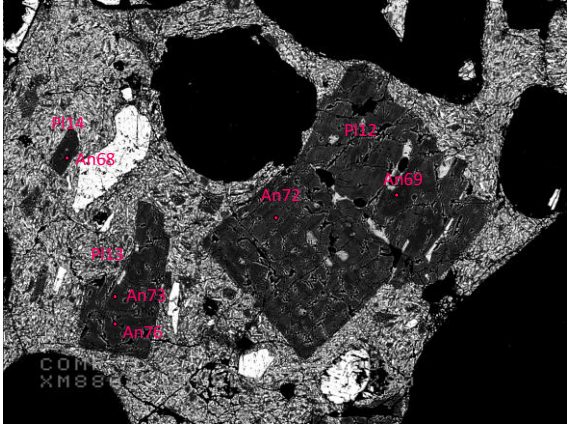


160910
unit3-2
レイヤー 2 plg

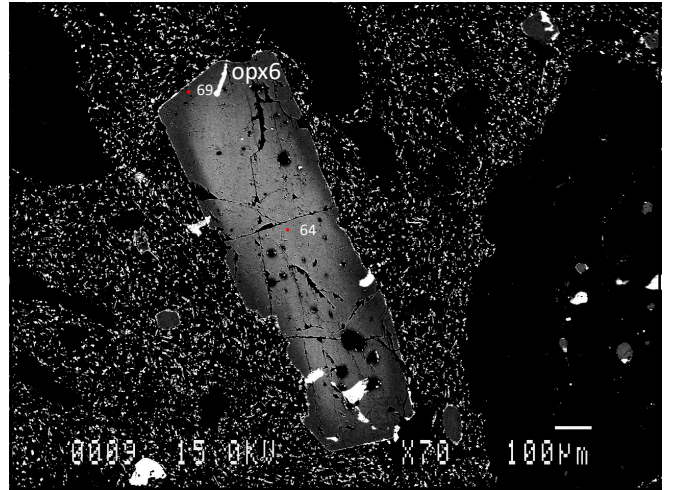
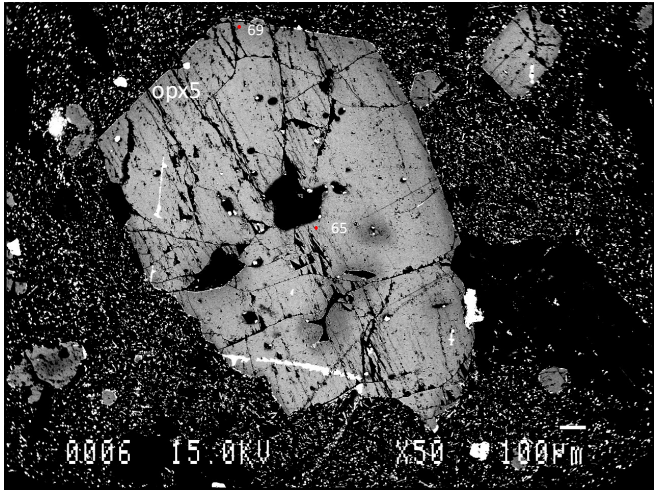
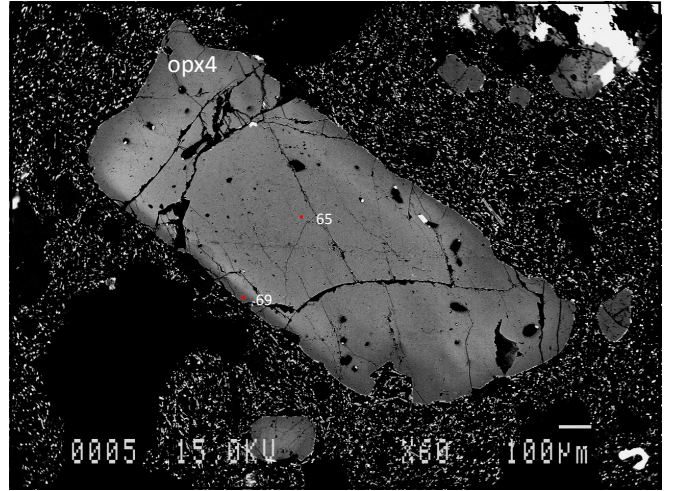
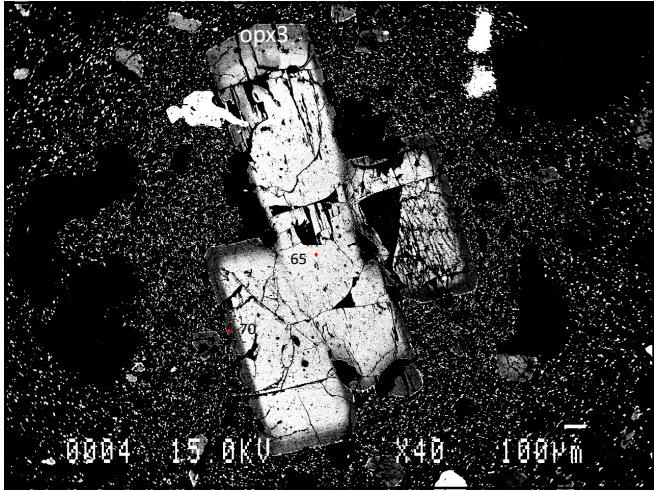
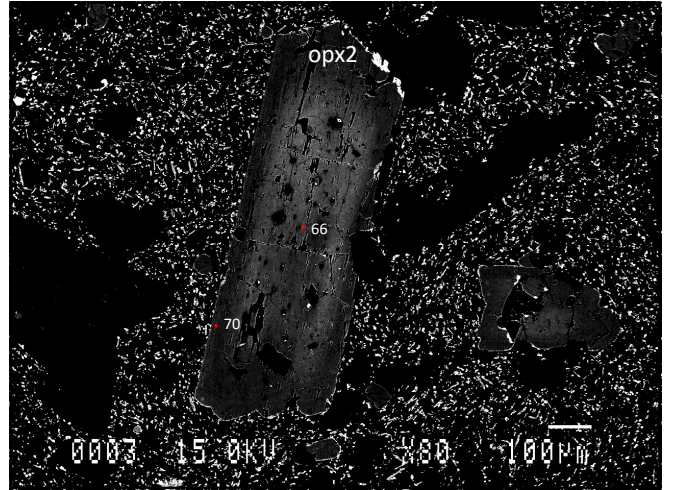
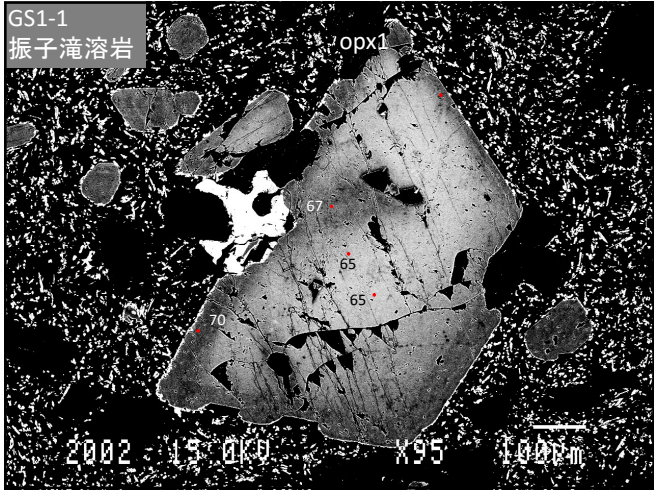


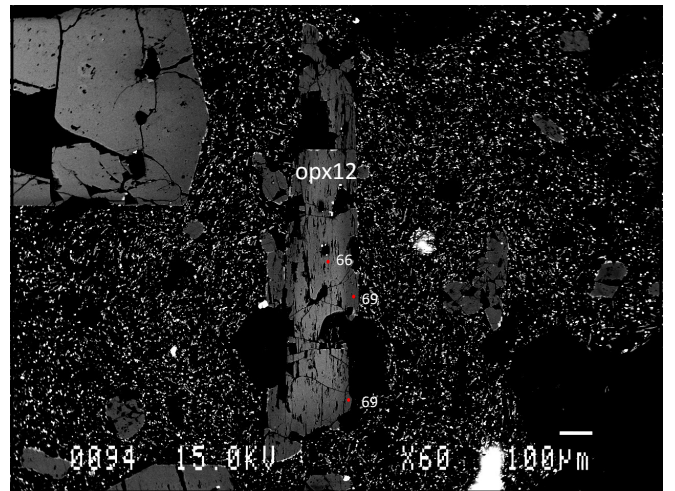
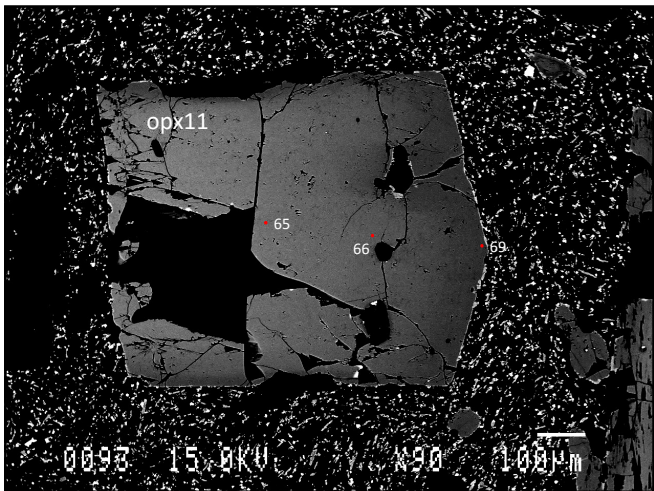
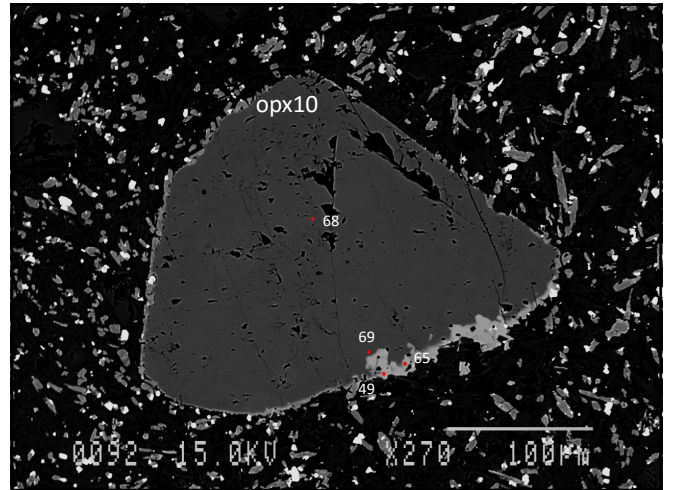
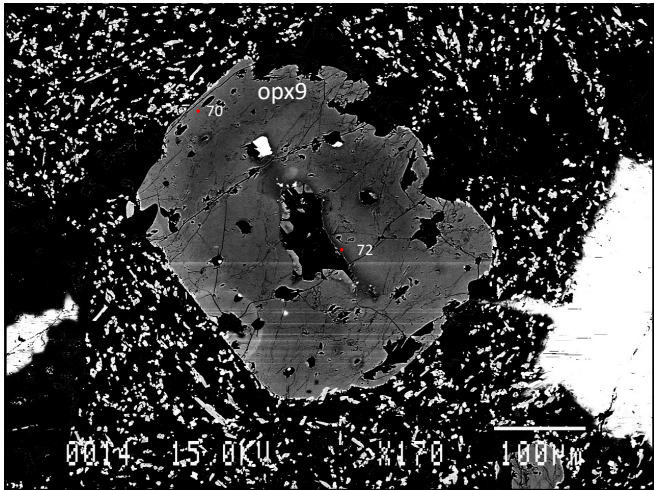
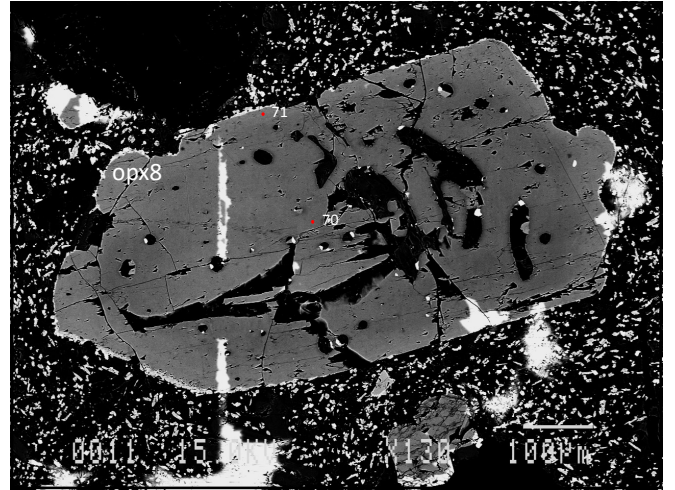
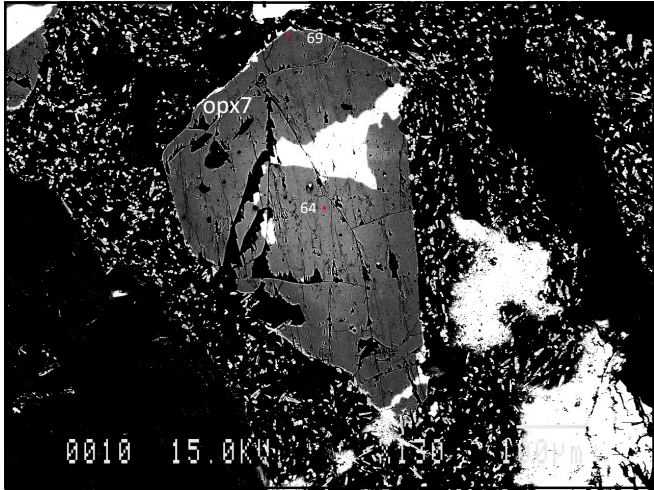


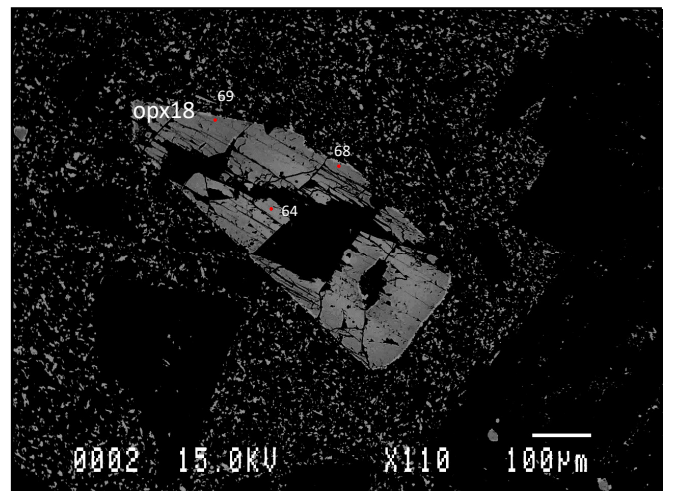
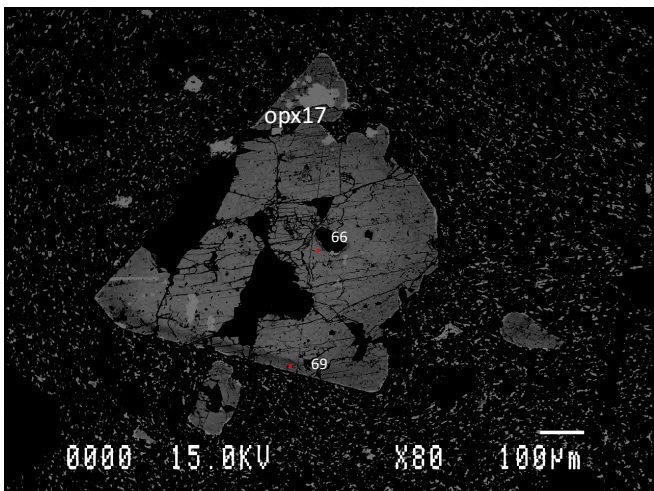
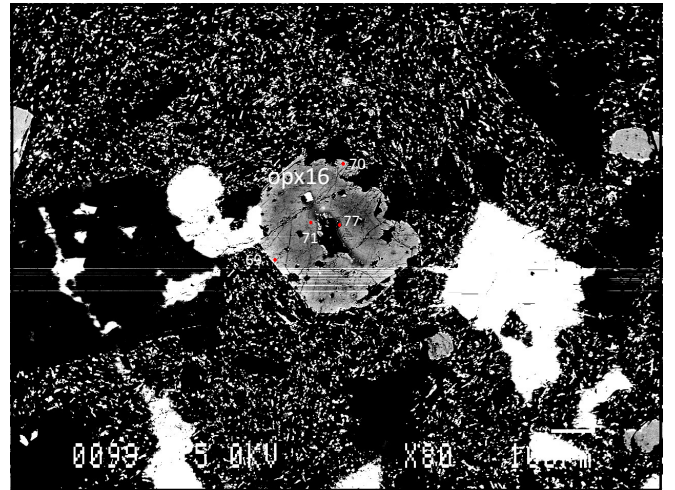
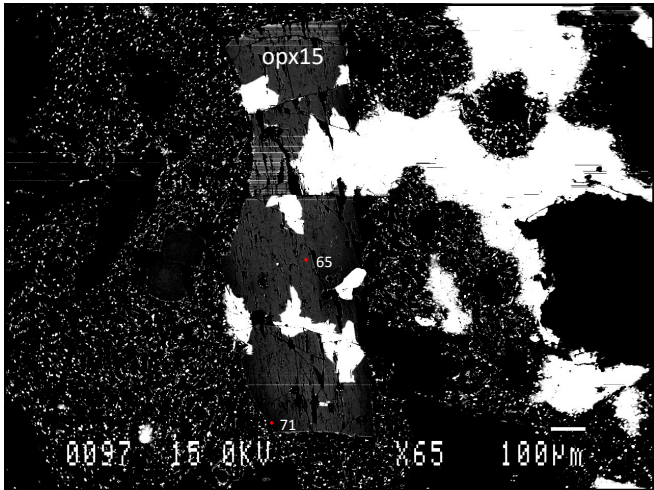
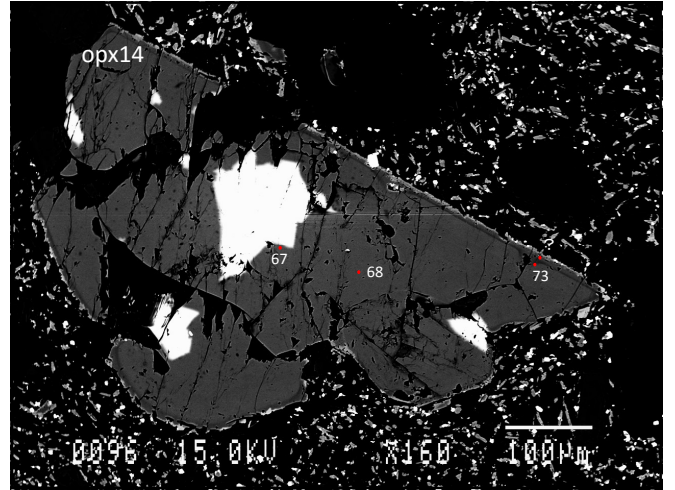
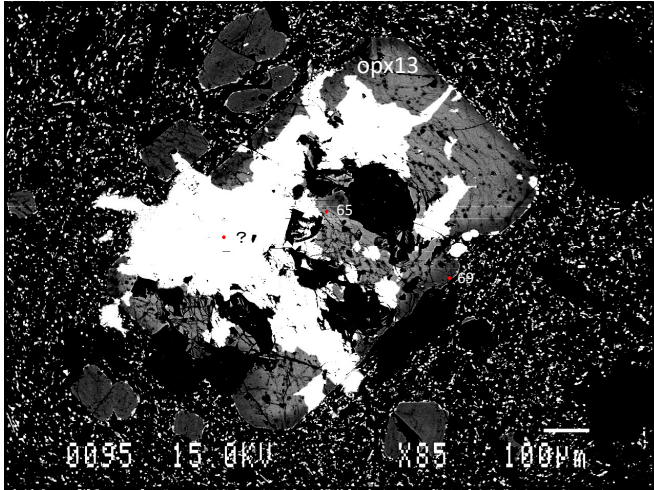


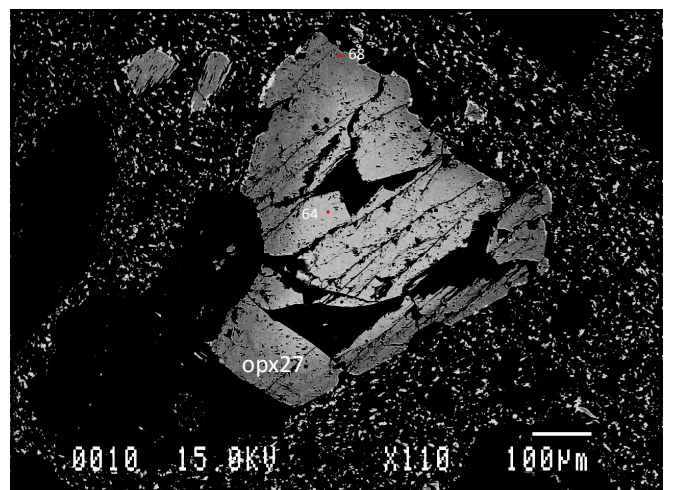
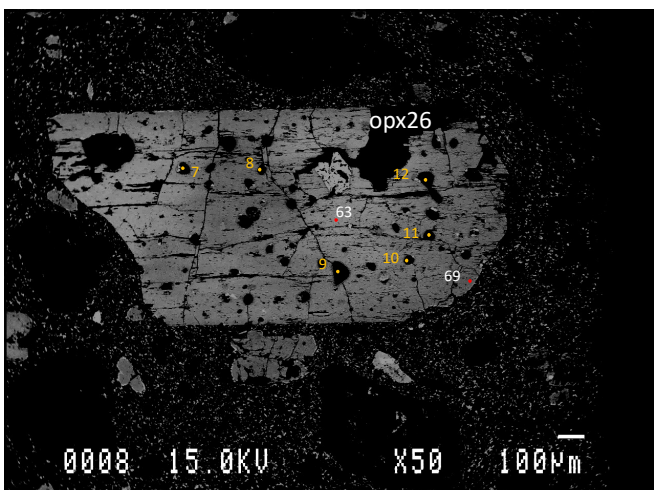
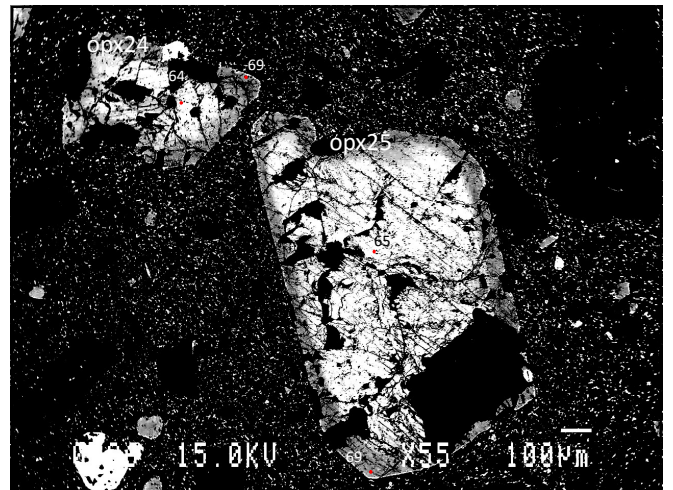
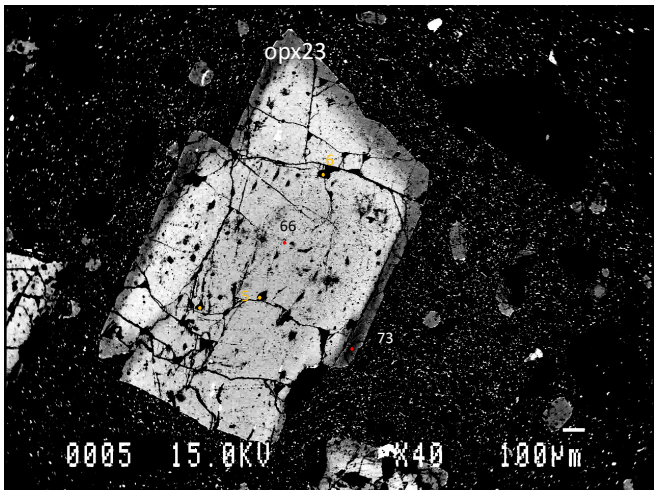
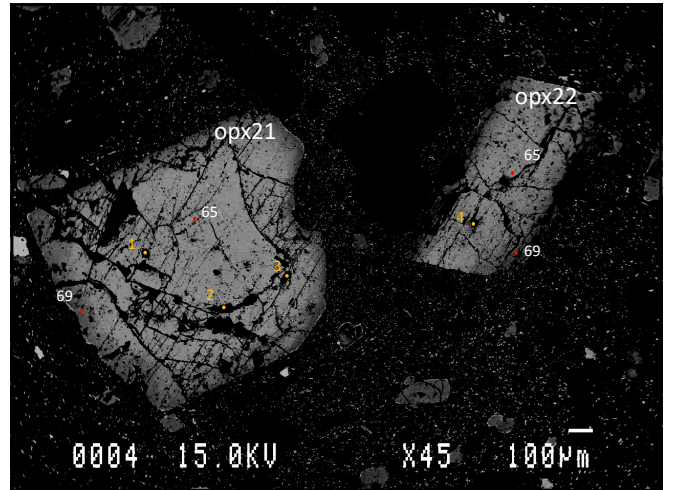
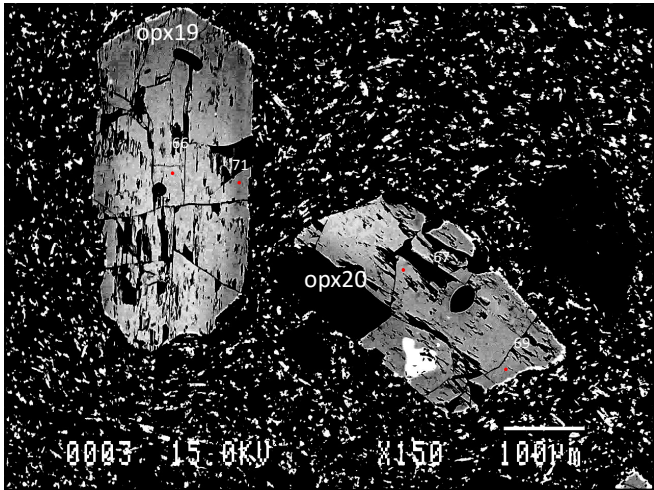


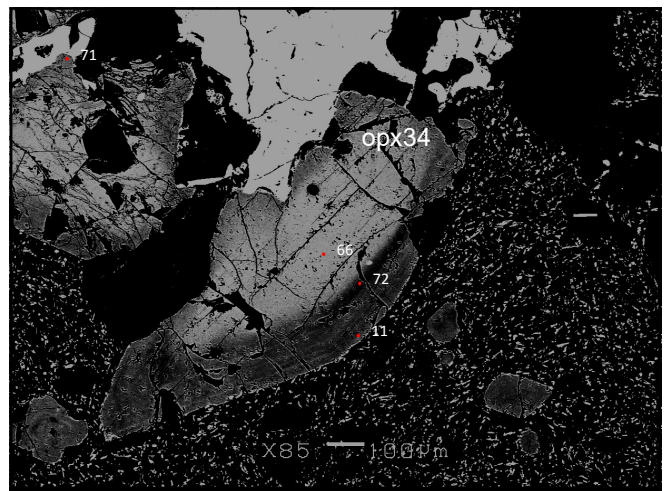
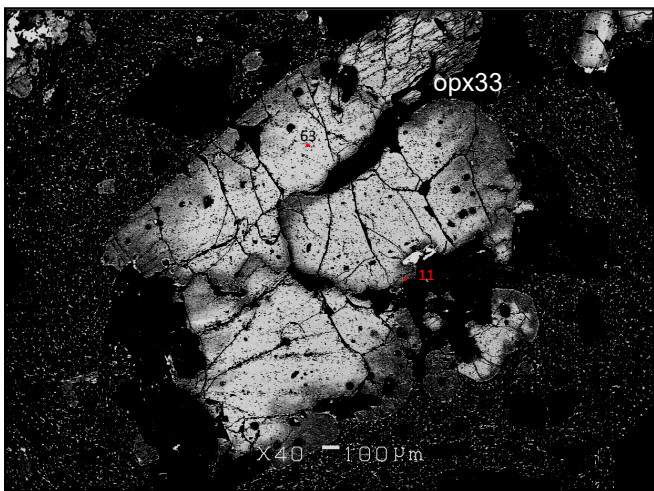
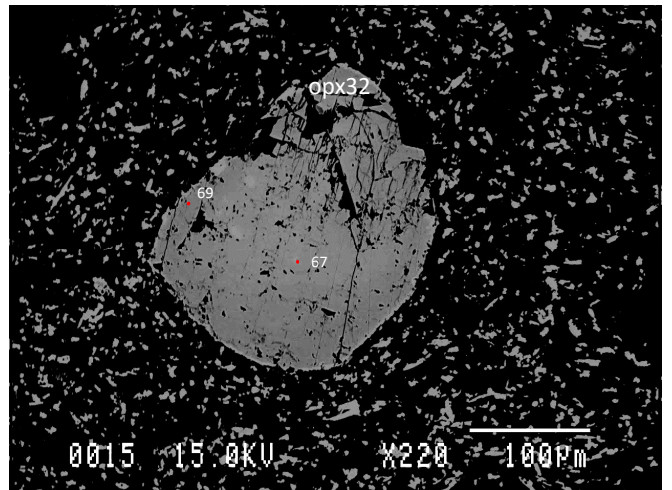
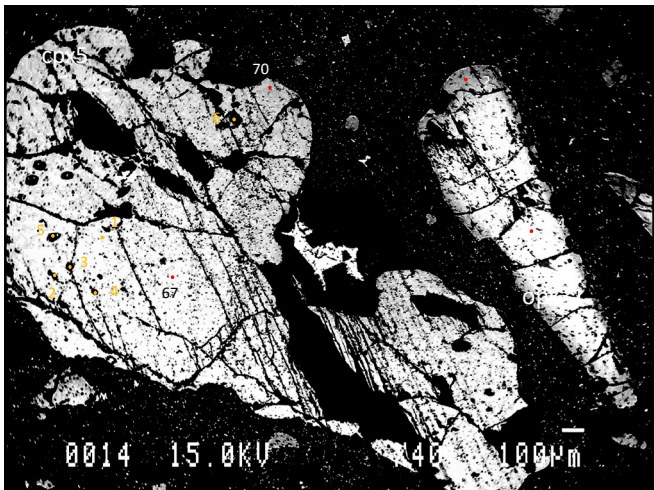
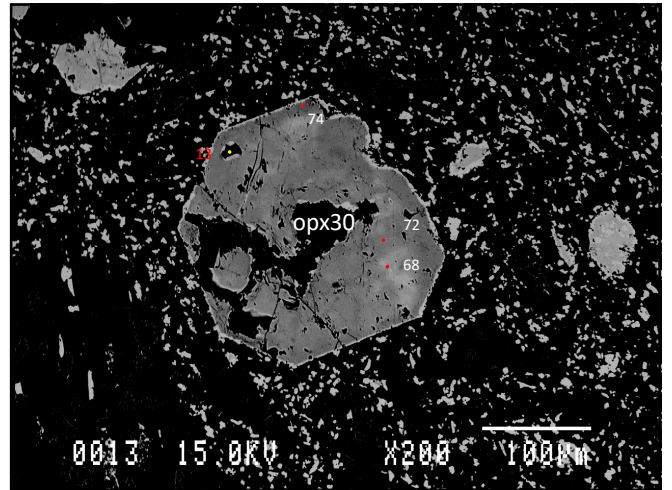
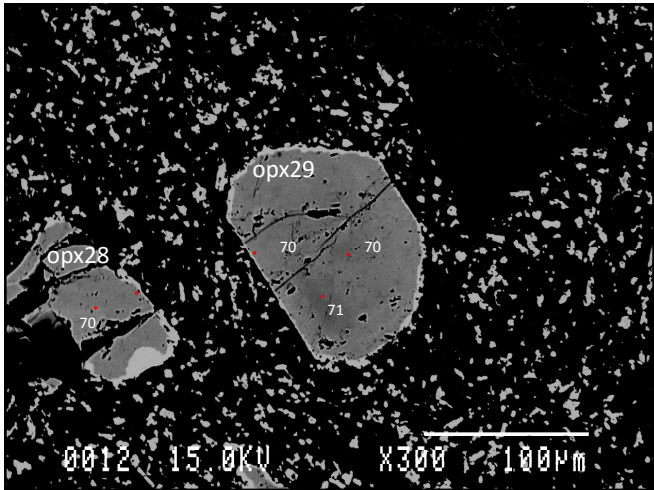
GS1-1
振子滝溶岩

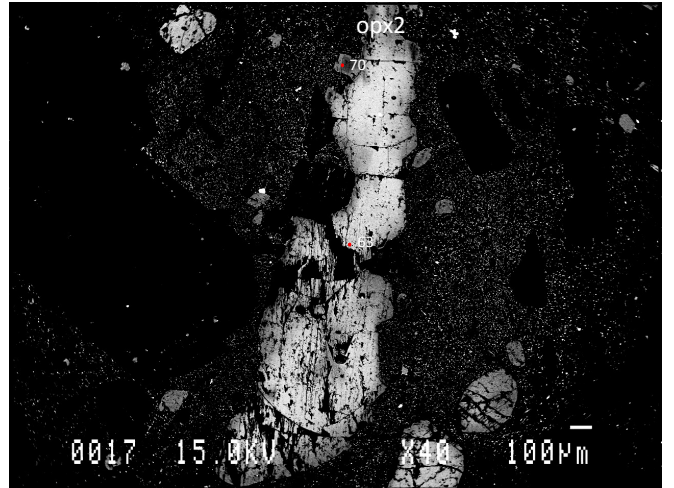
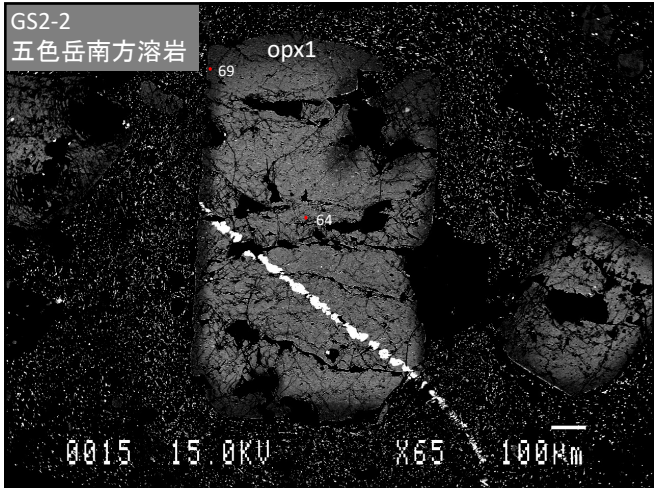
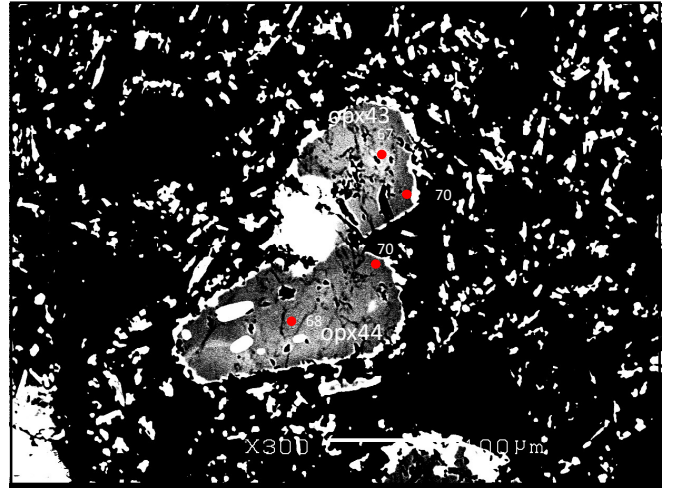
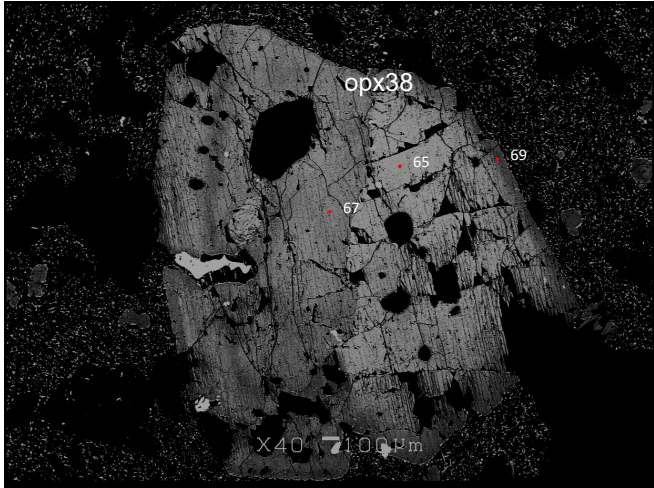
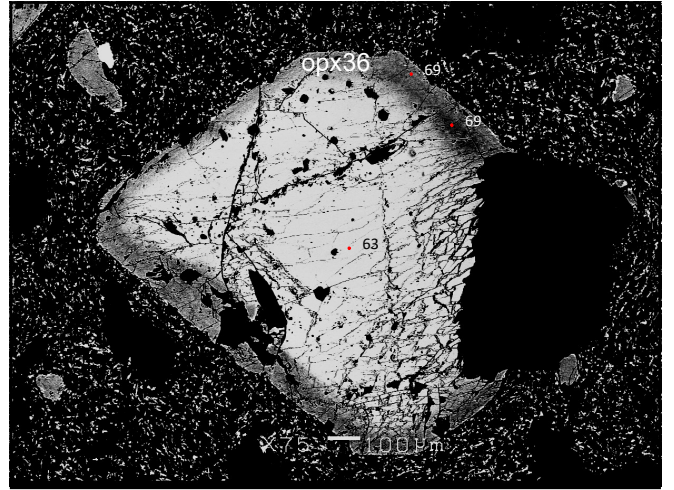
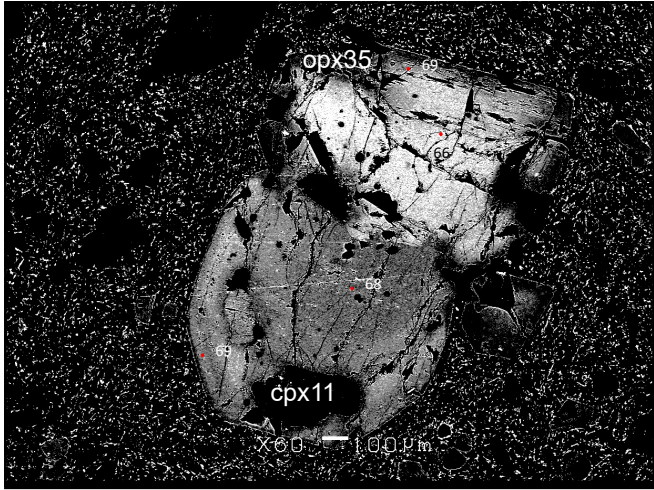


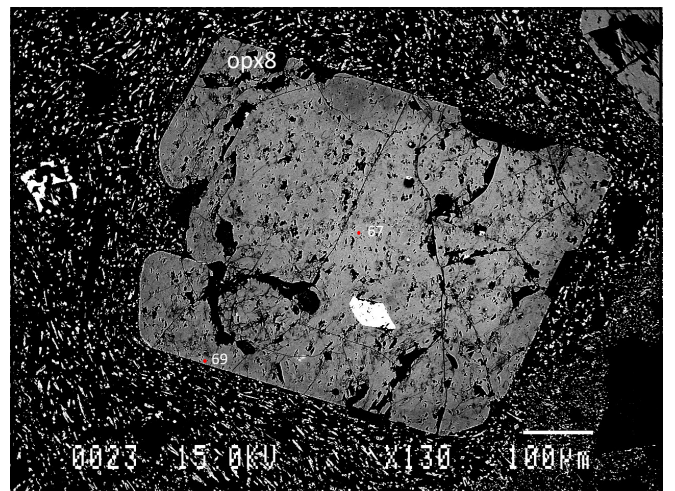
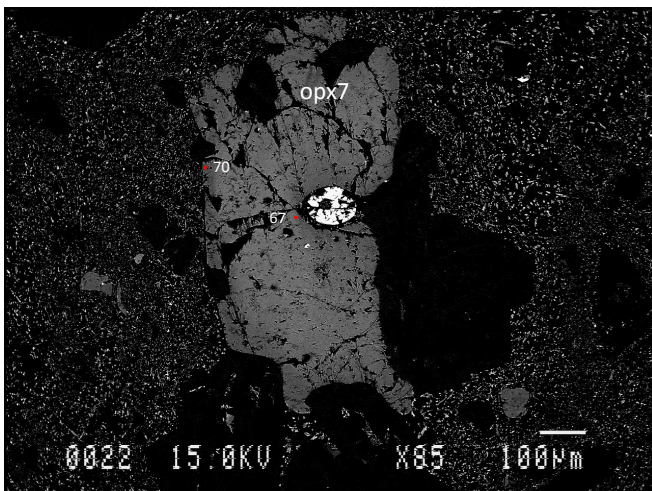
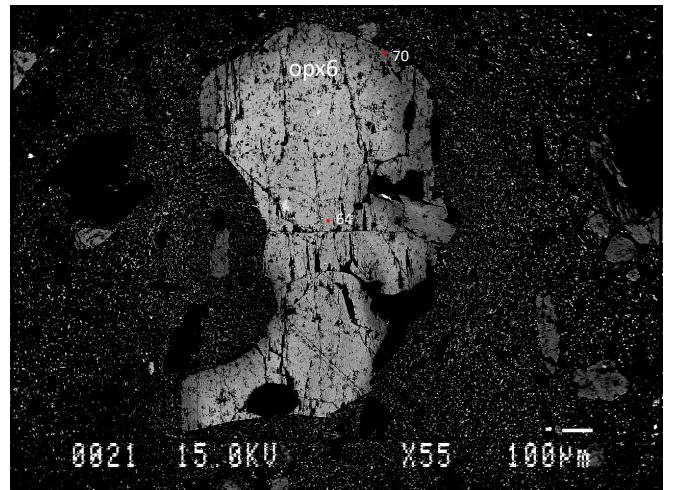
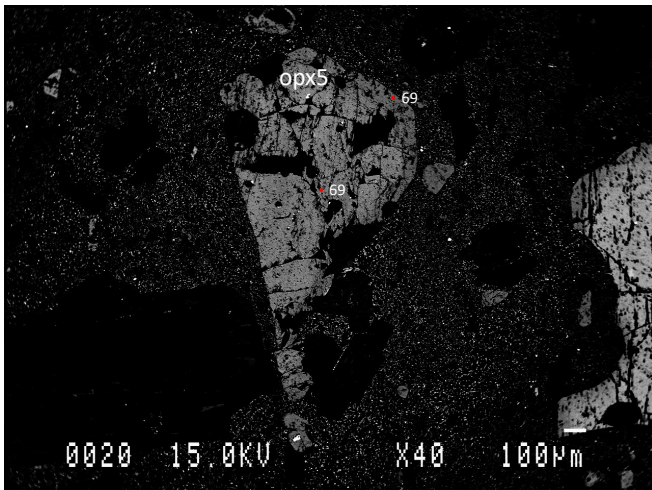
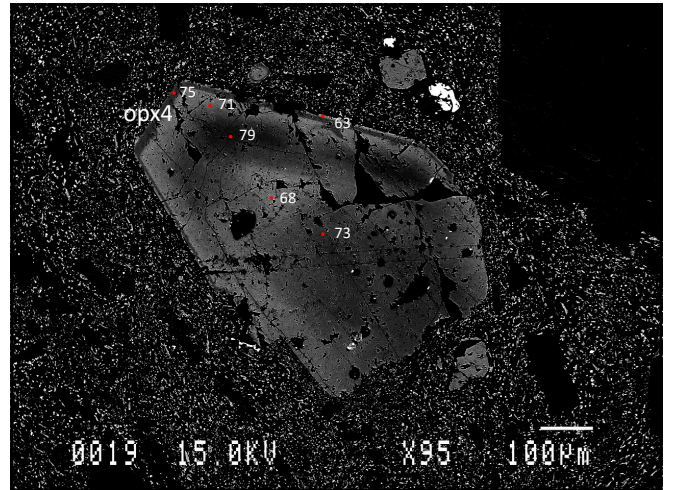
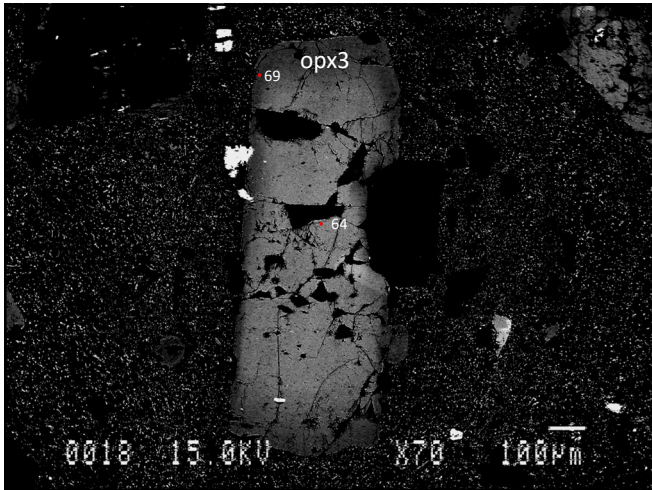


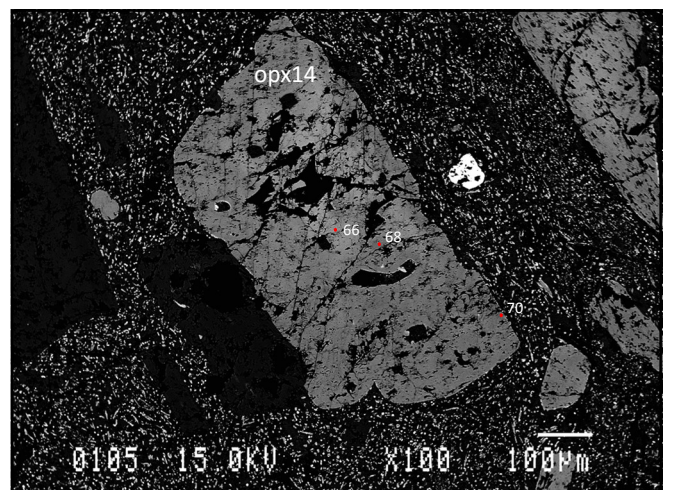
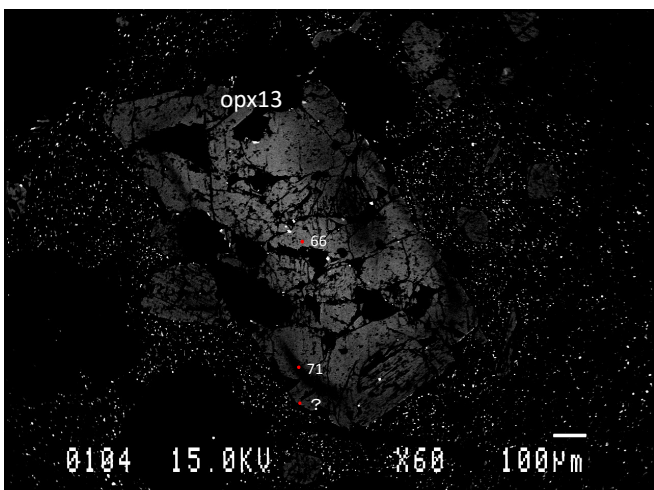
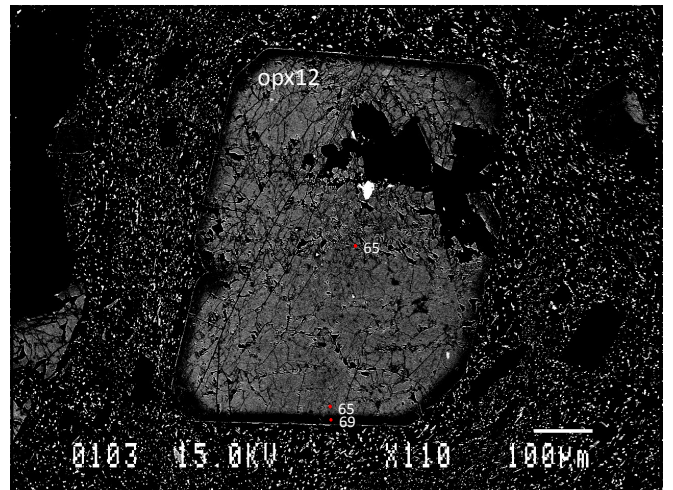
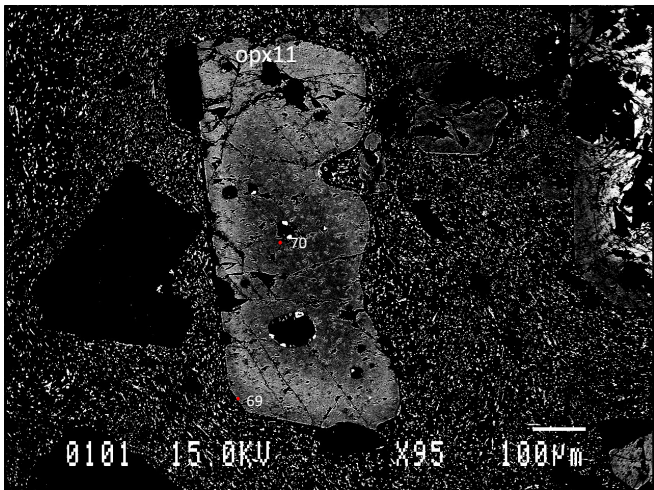
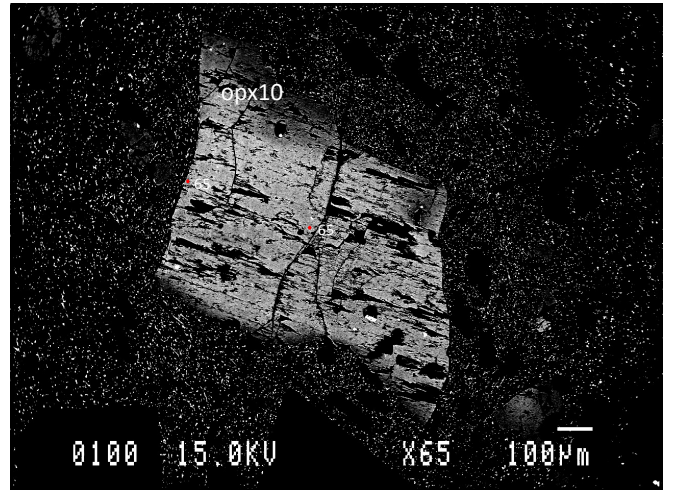
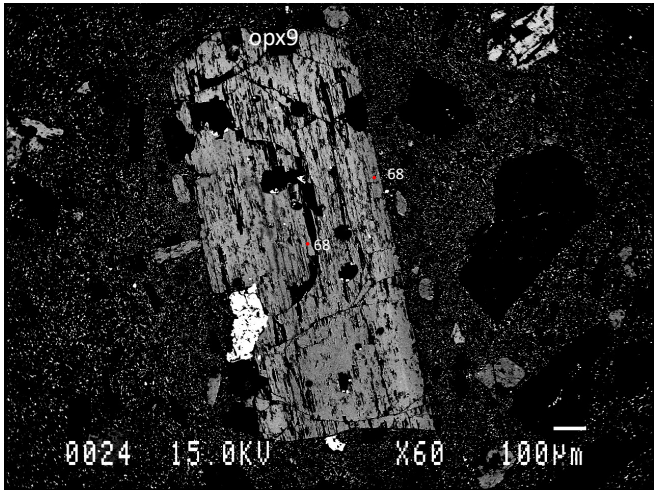


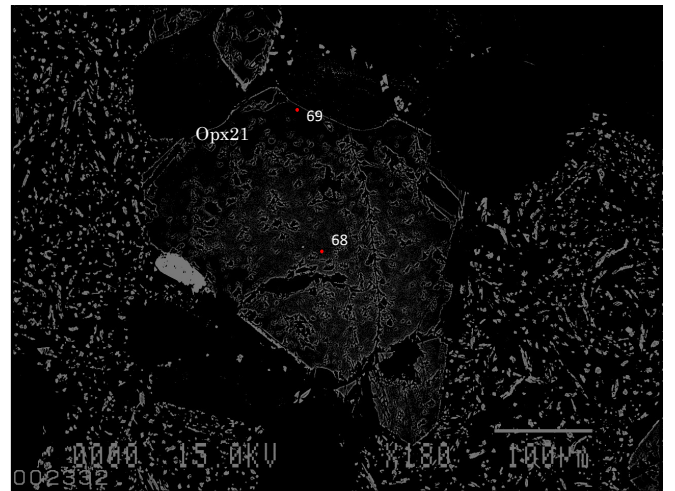
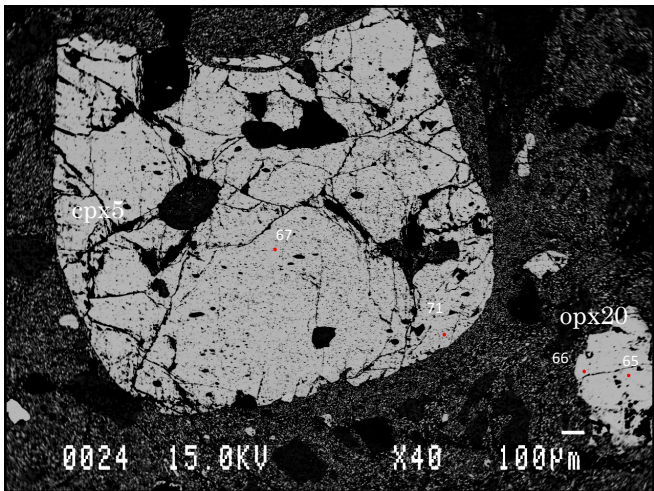
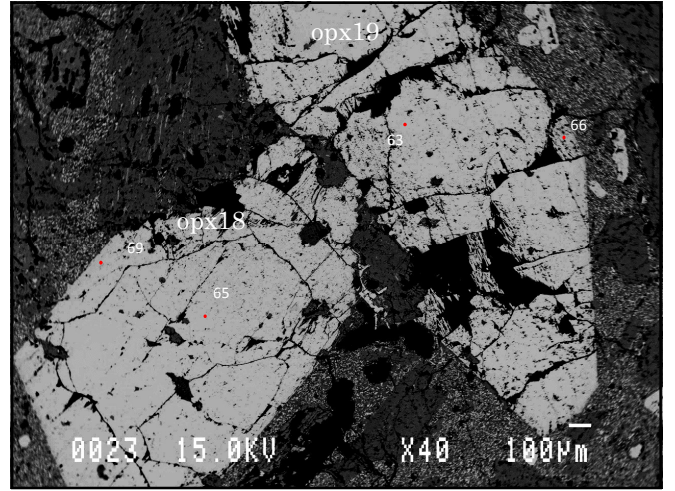
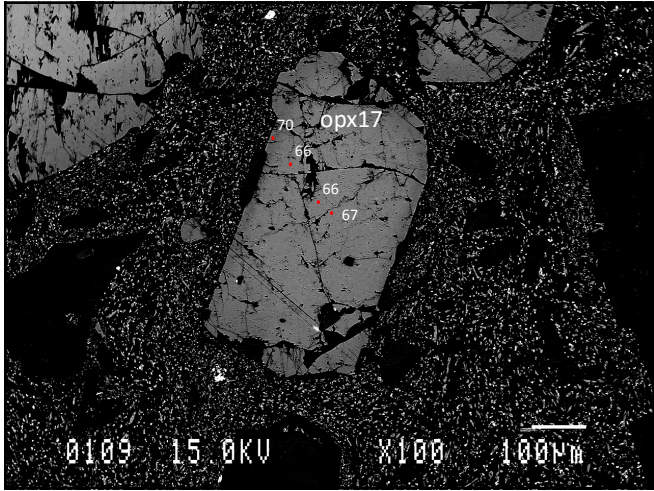
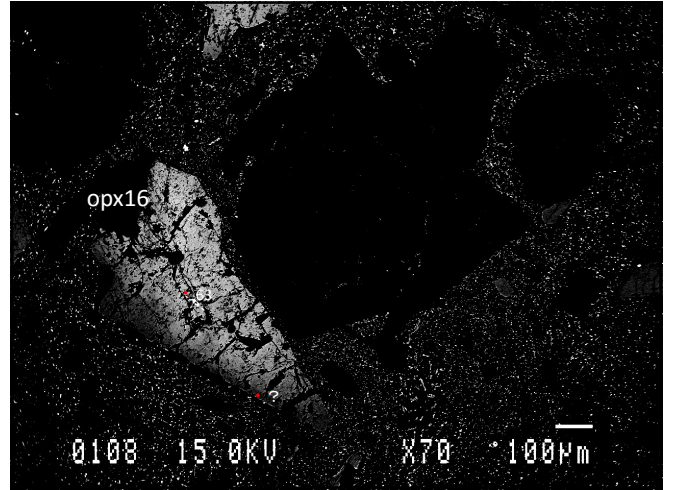
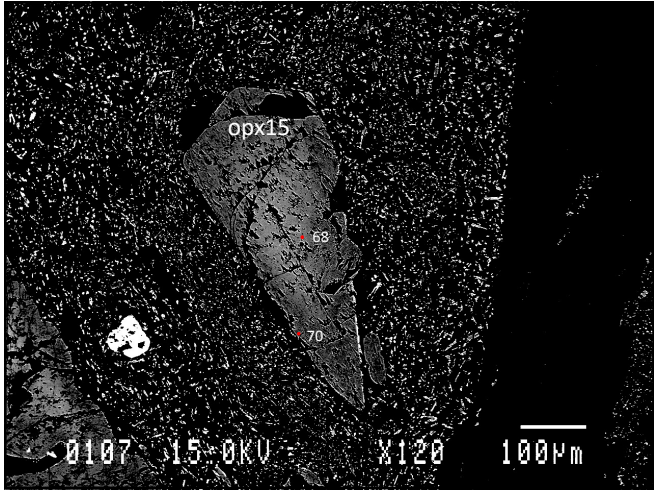


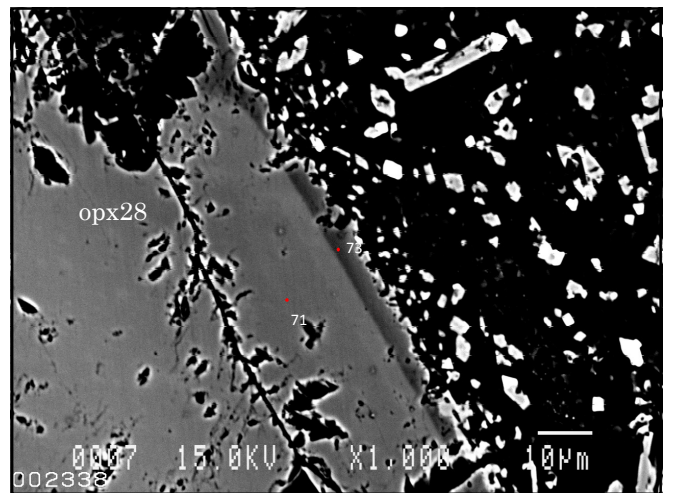
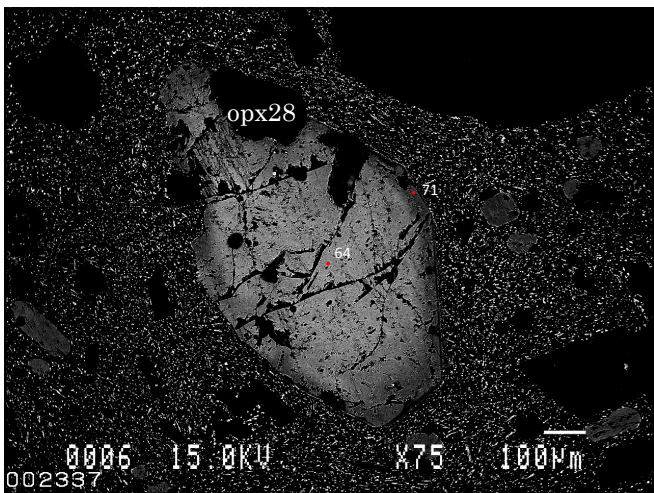
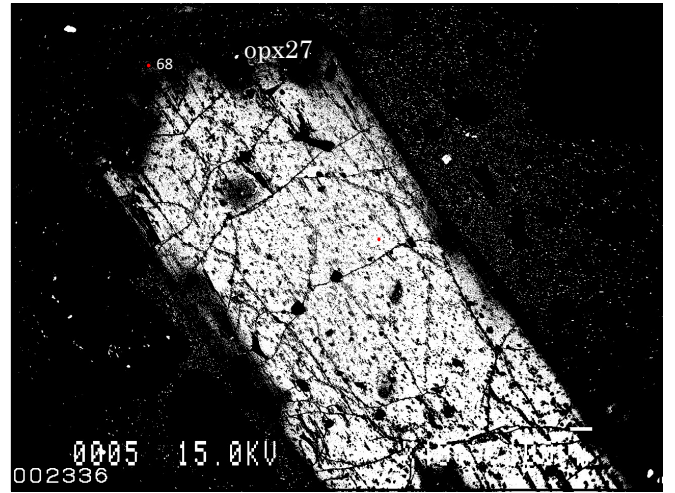
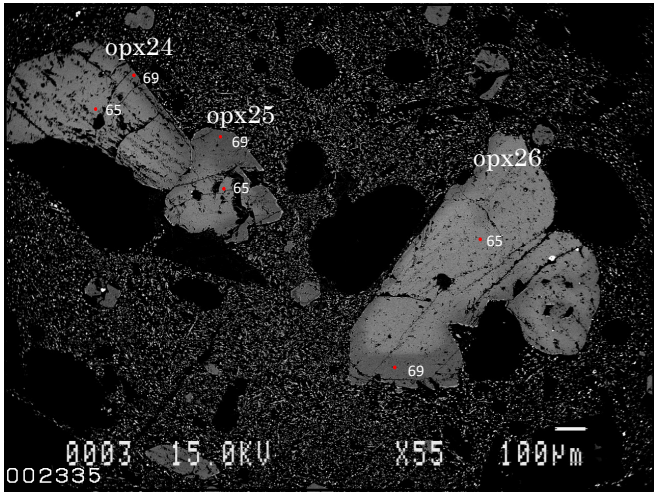
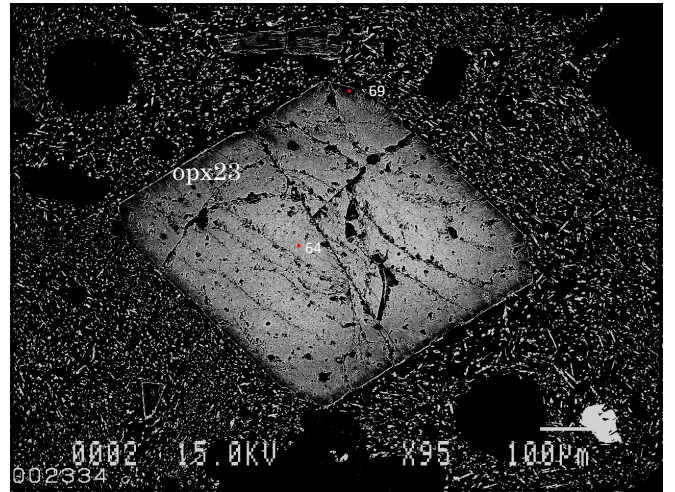
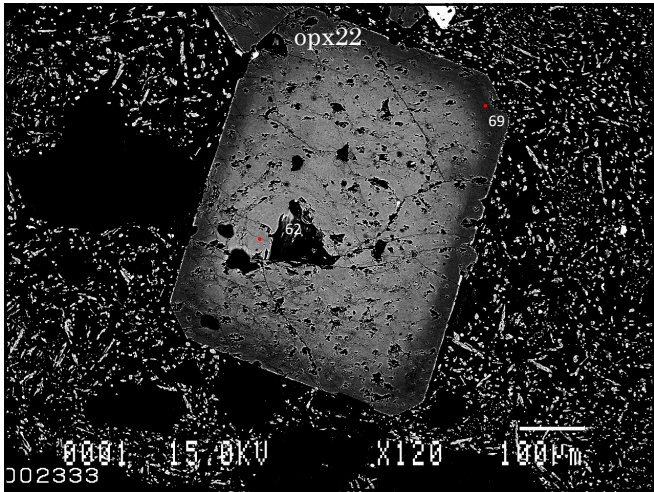


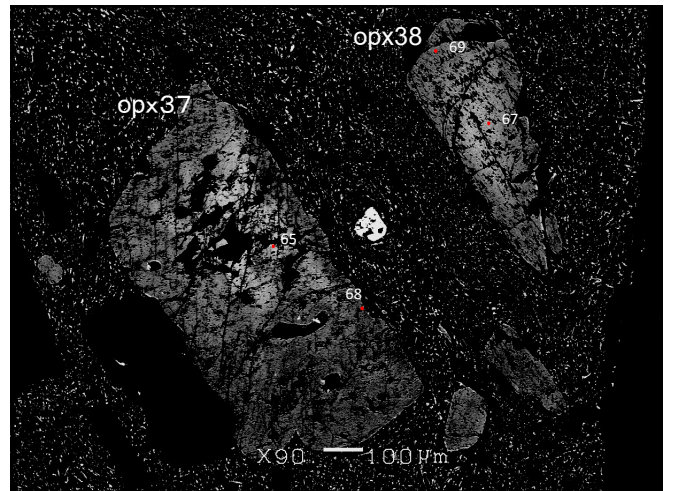
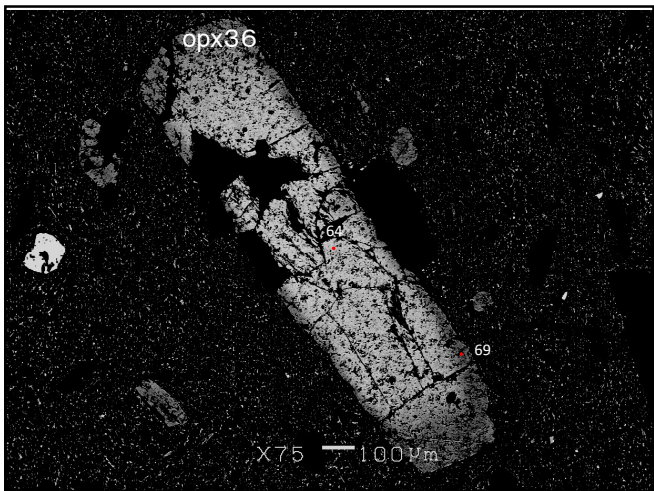
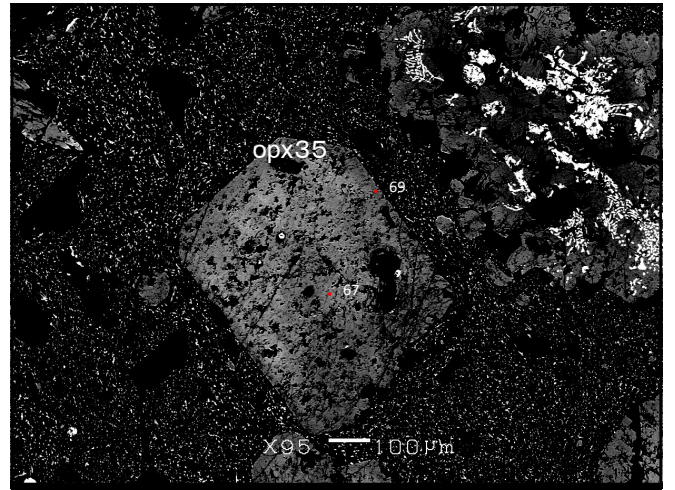
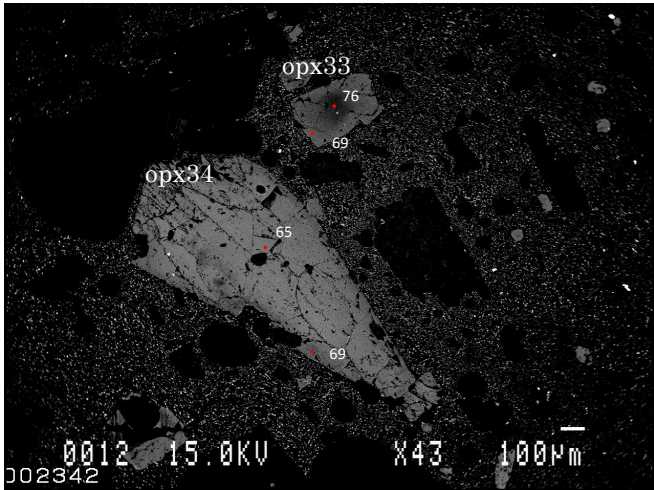
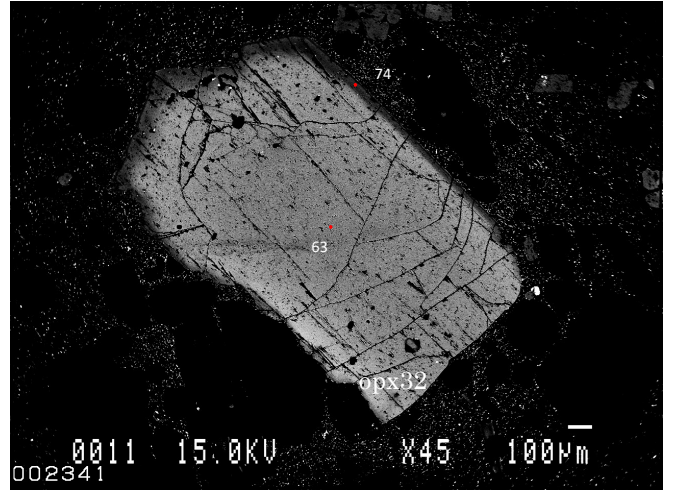
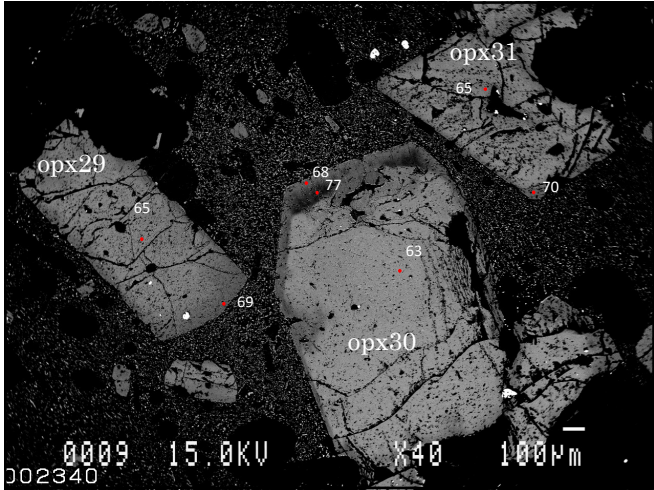


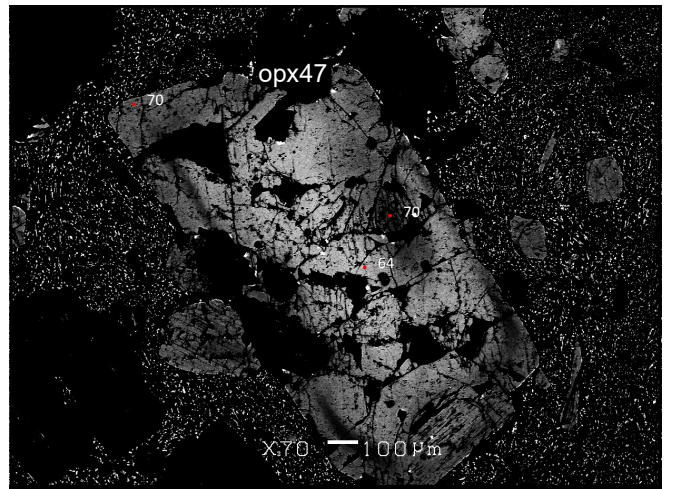
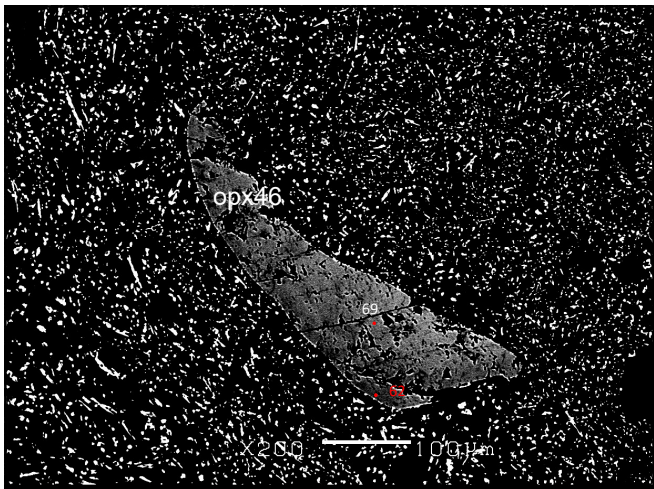
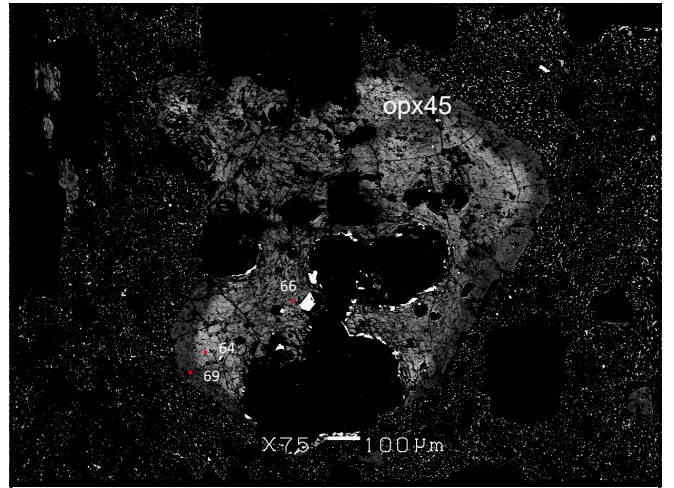
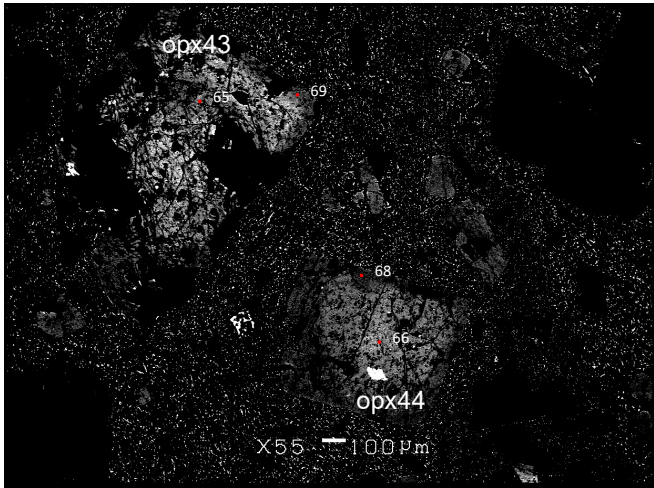
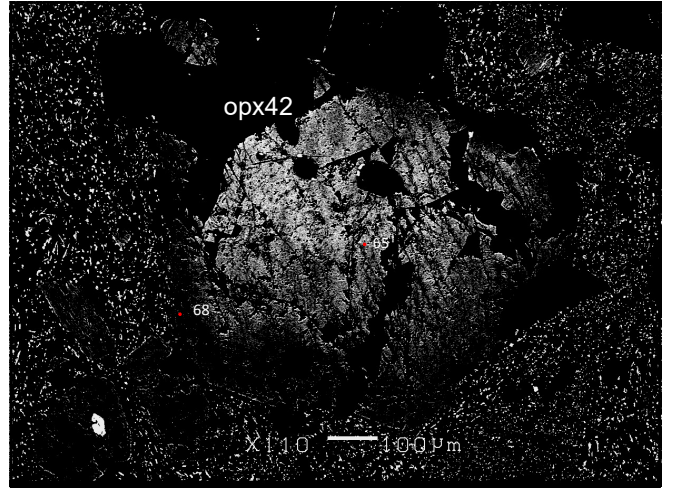
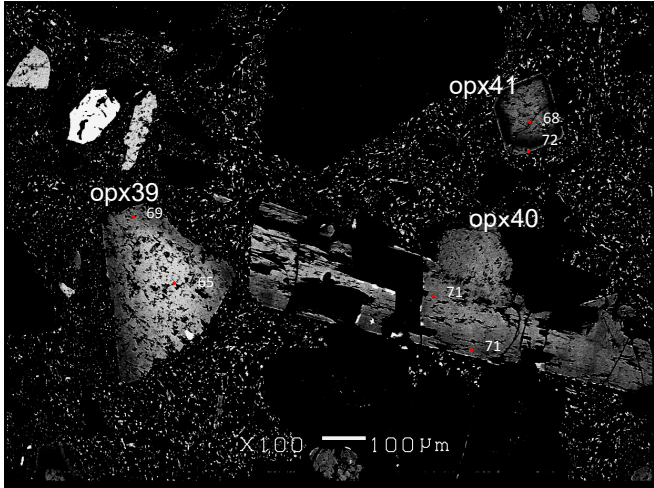


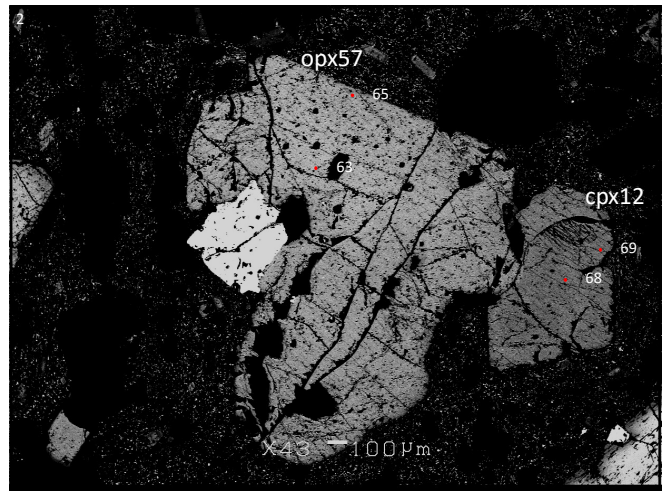
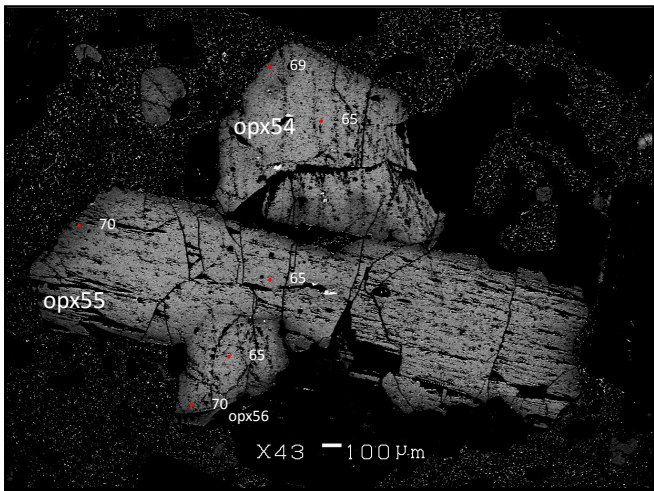
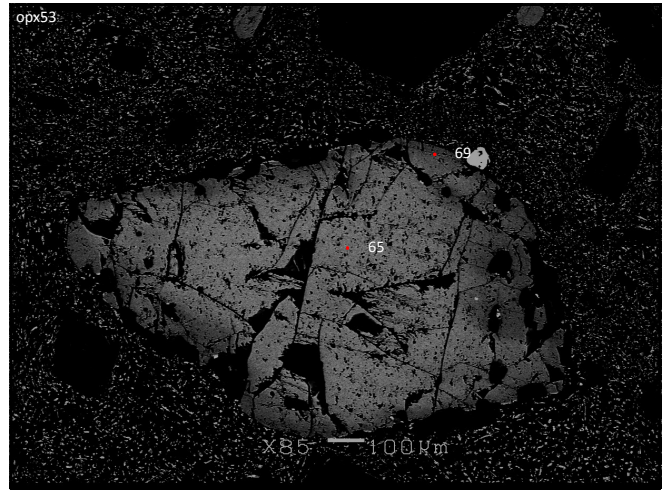
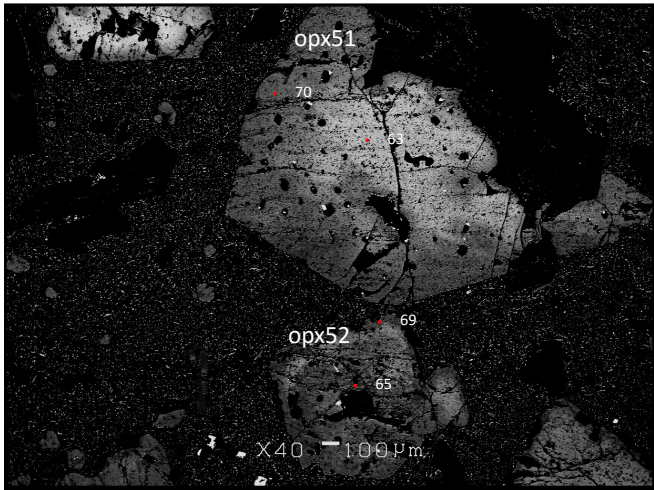
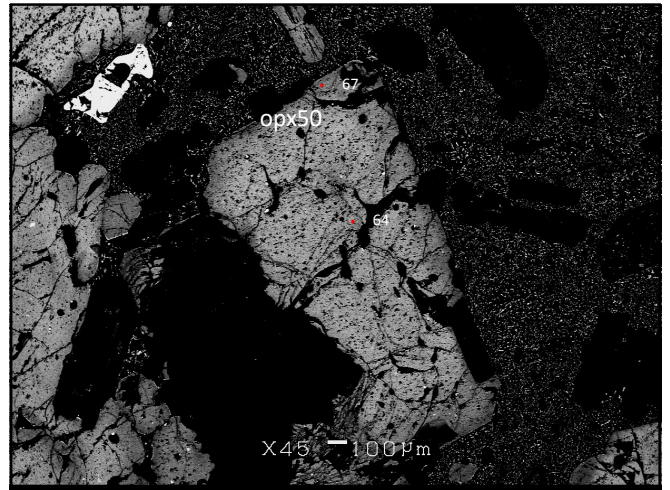
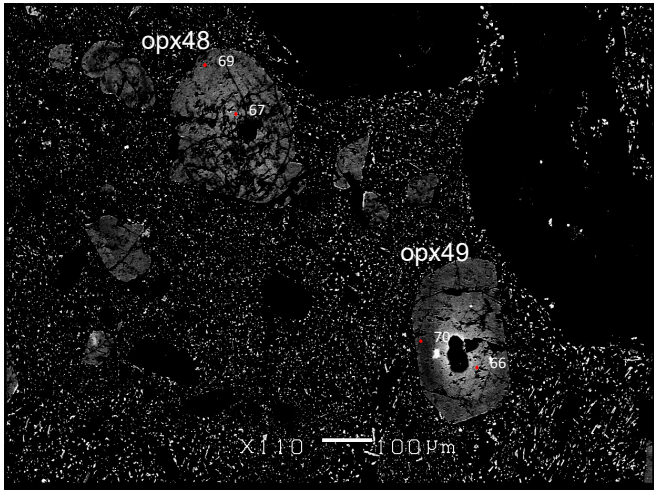




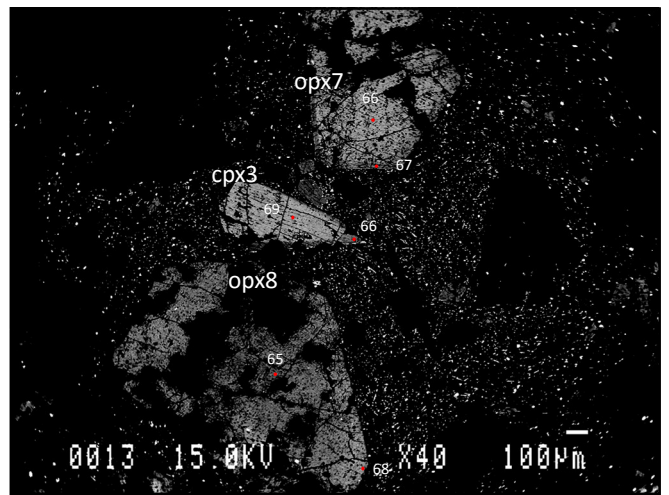
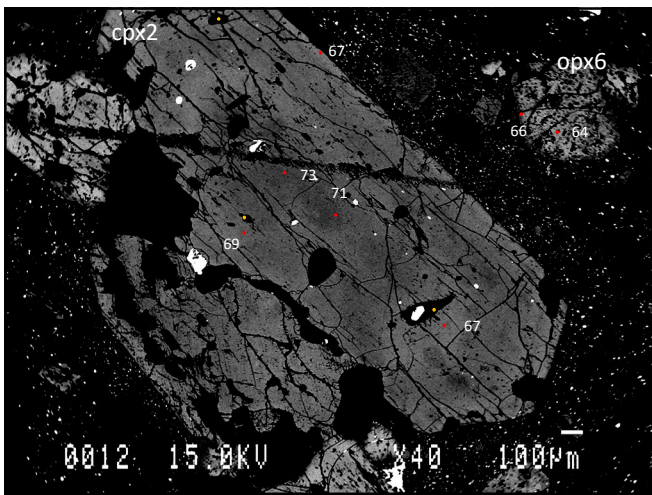
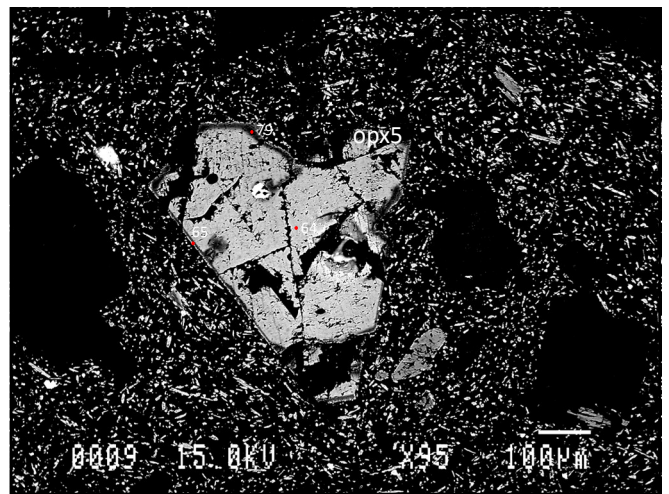
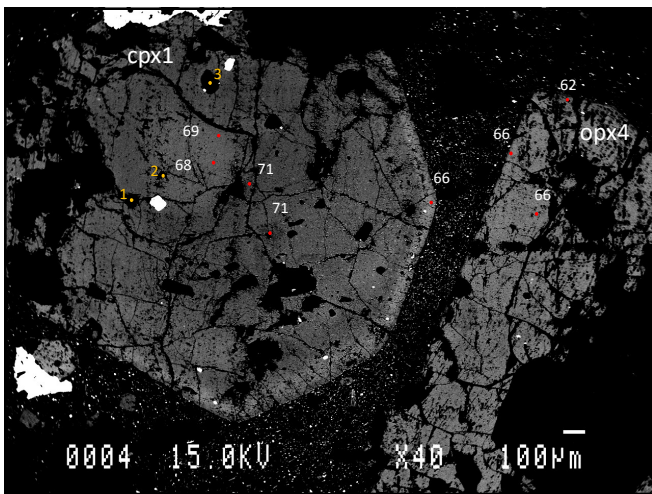
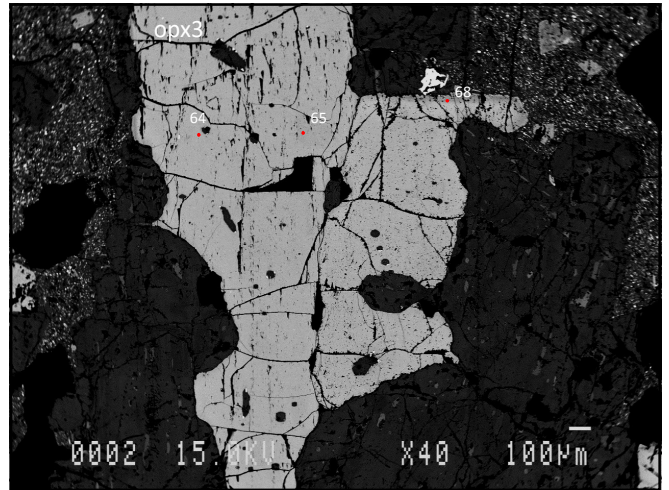
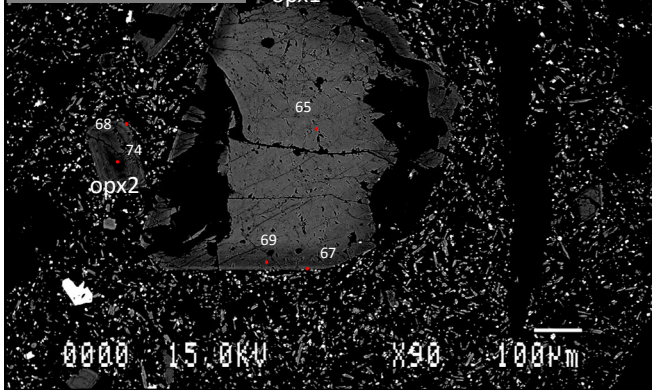


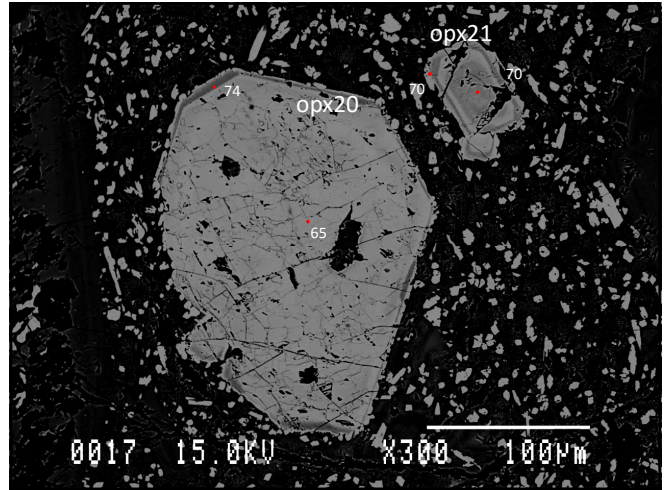
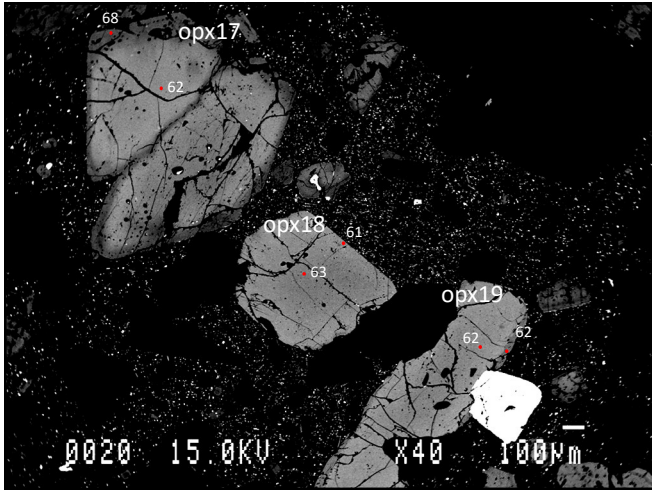
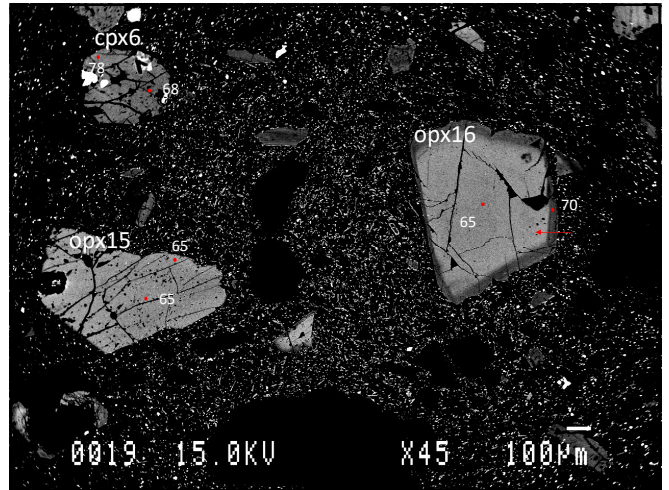
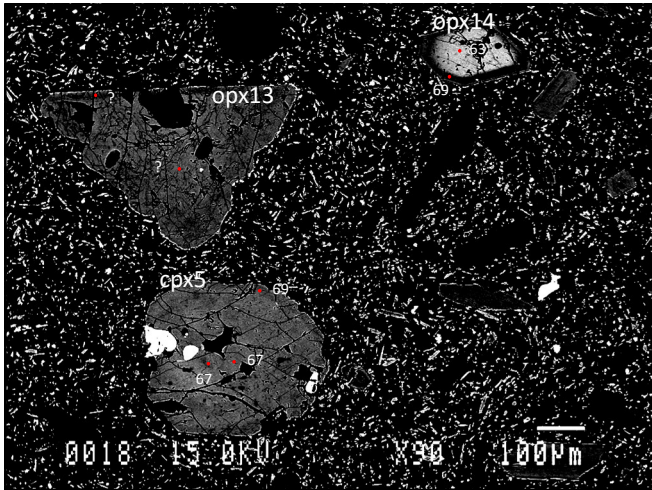
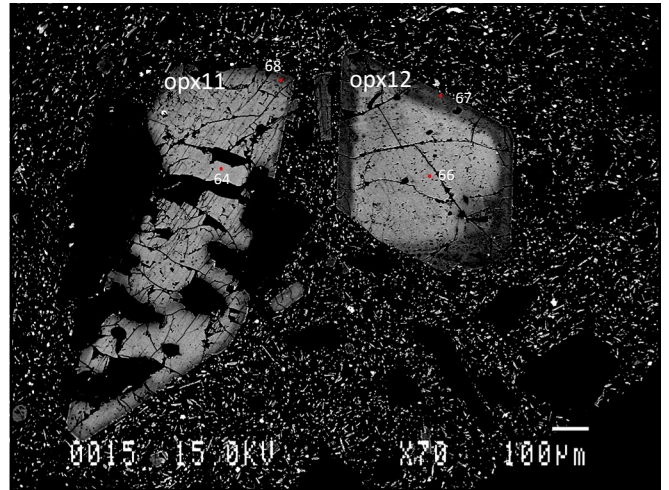
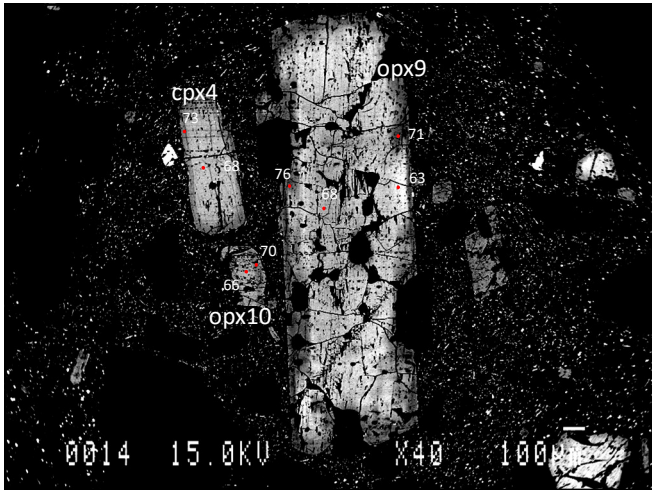


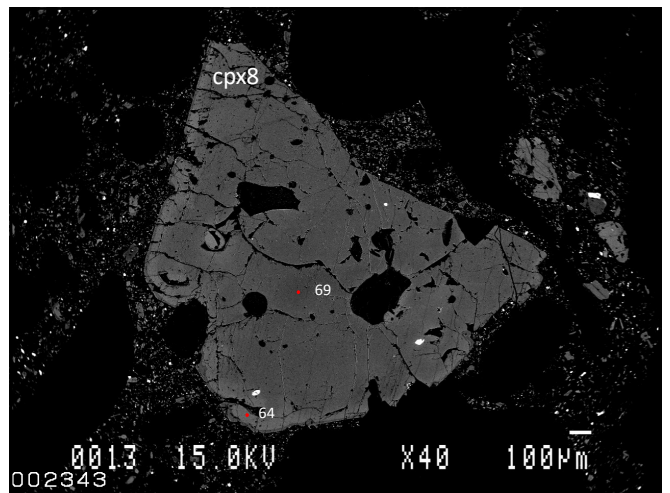
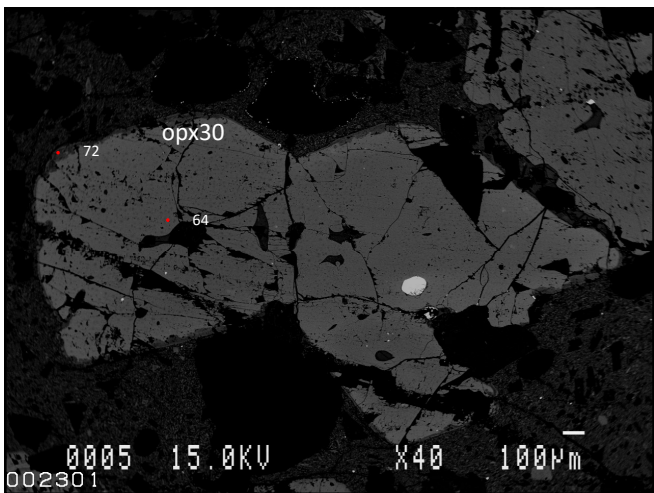
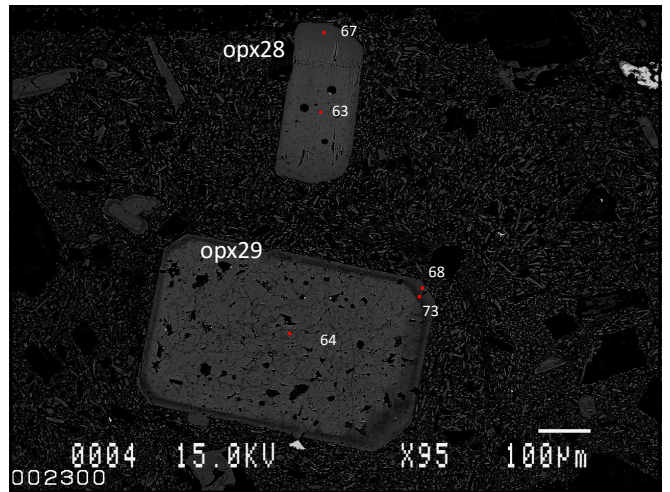
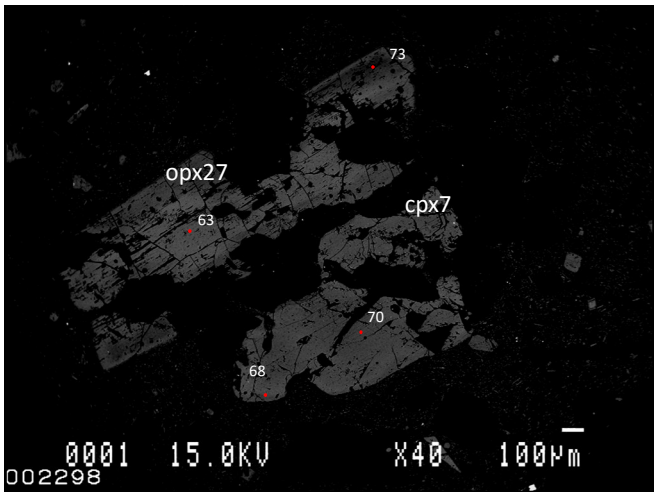
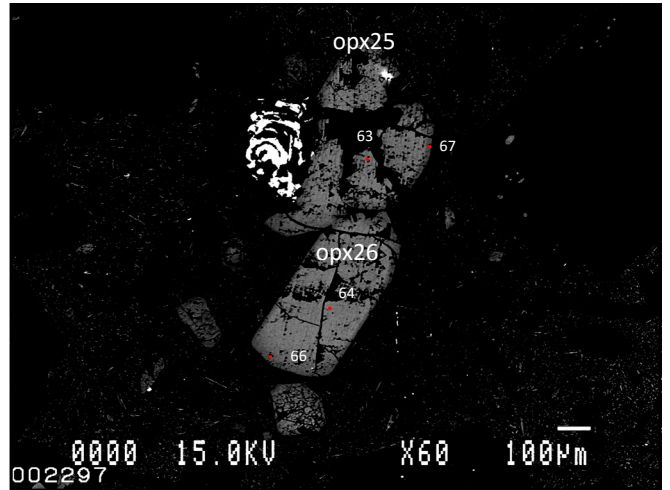
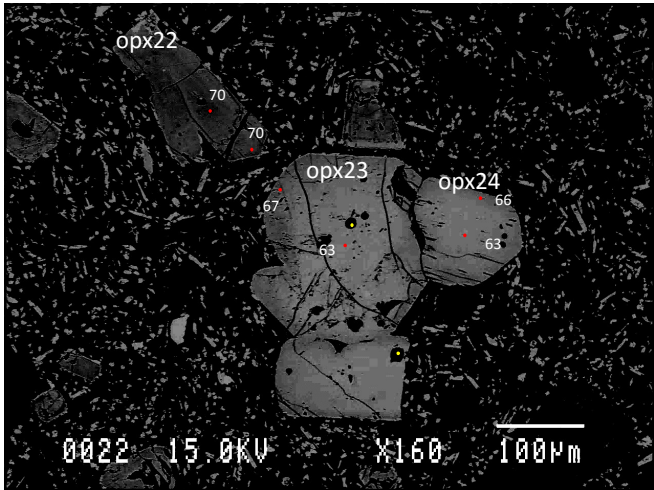


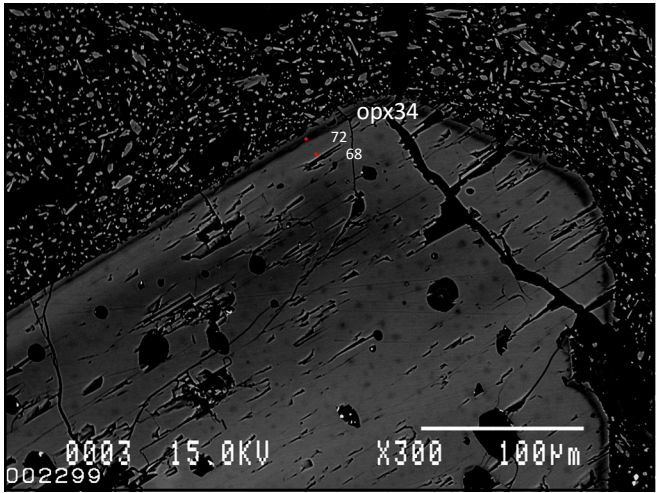
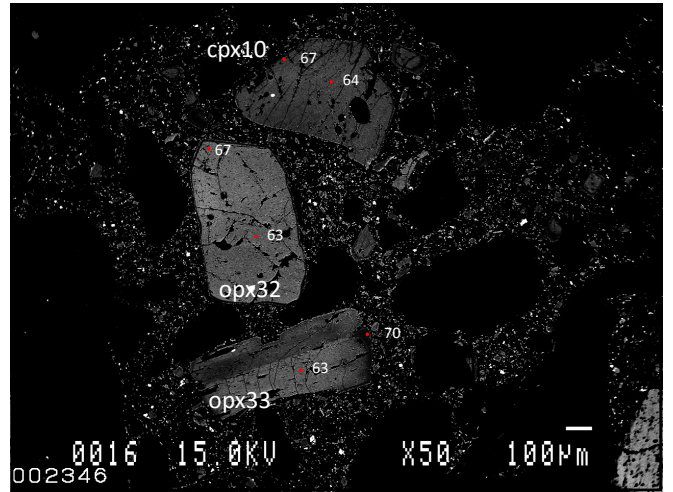
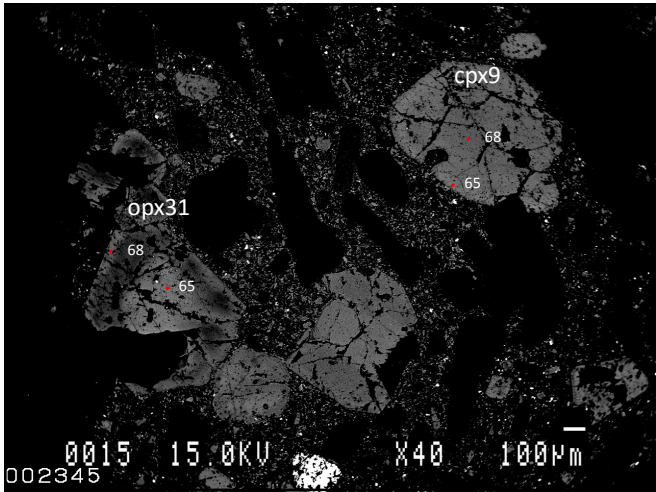


五色岳南部火砕岩類
火道角礫岩に伴う
火砕サージ堆積物

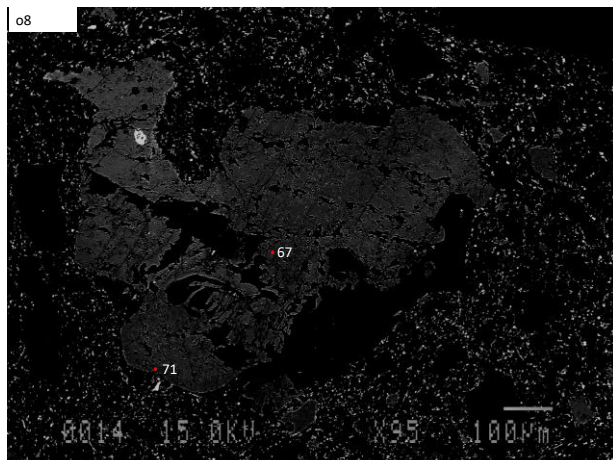
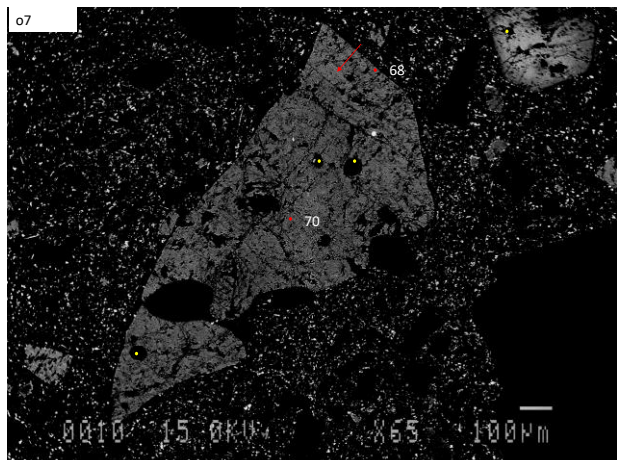
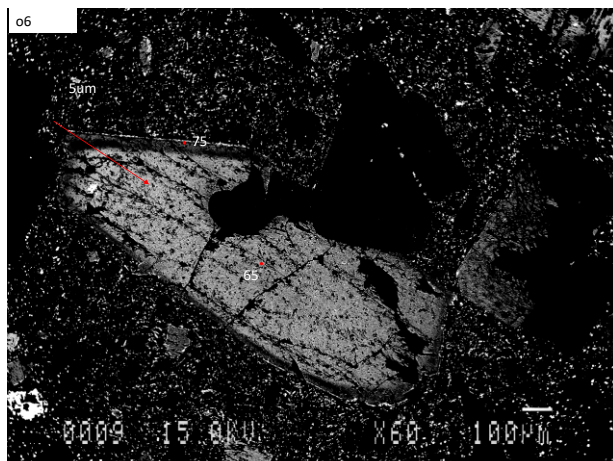
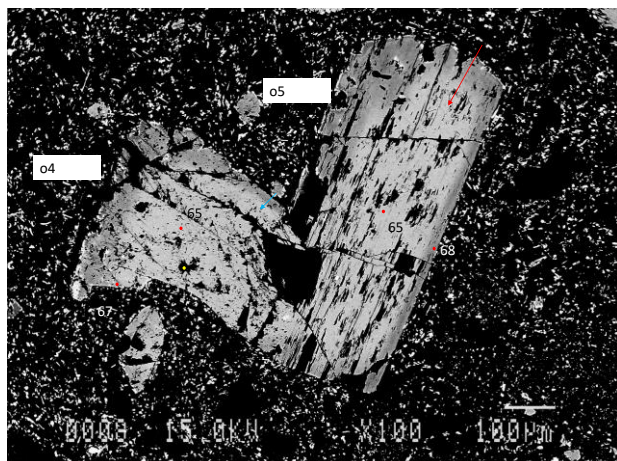
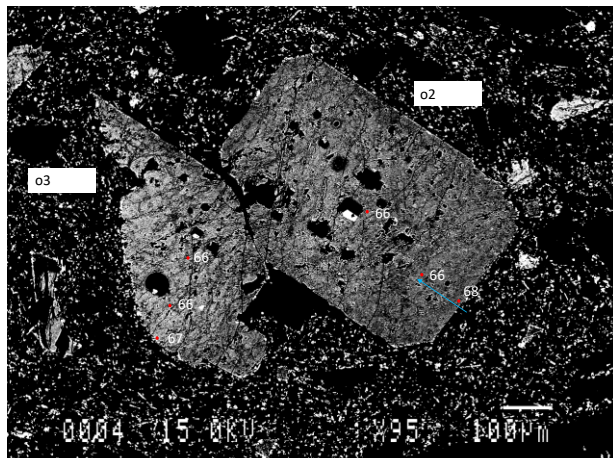
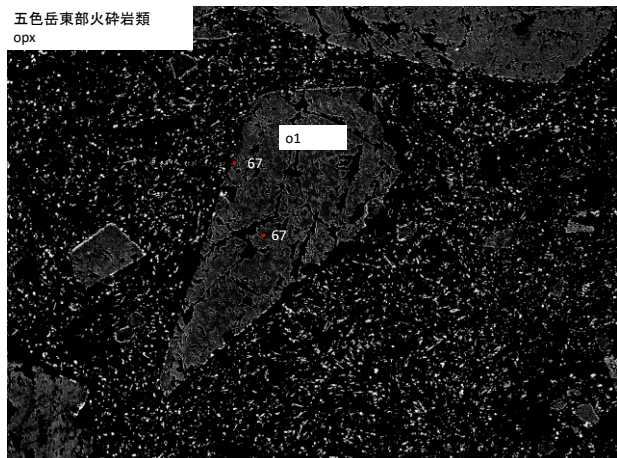


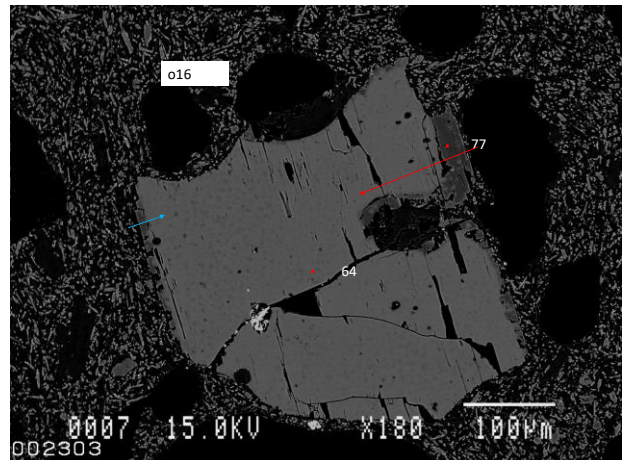
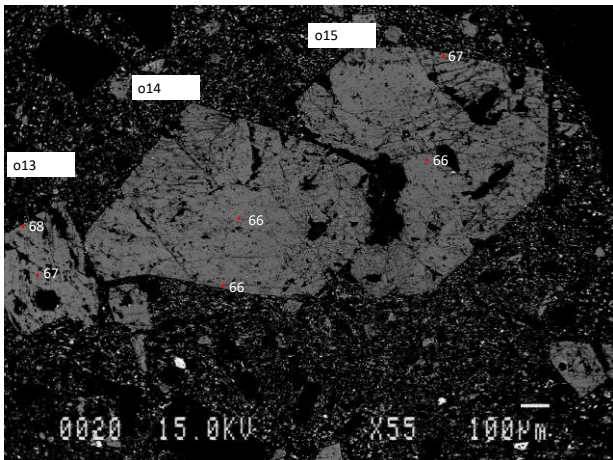
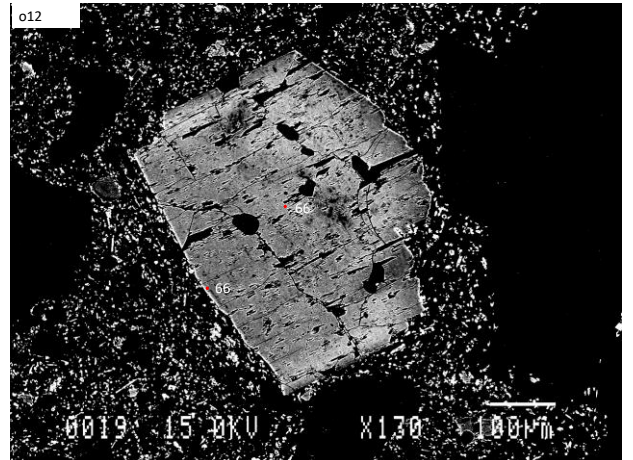
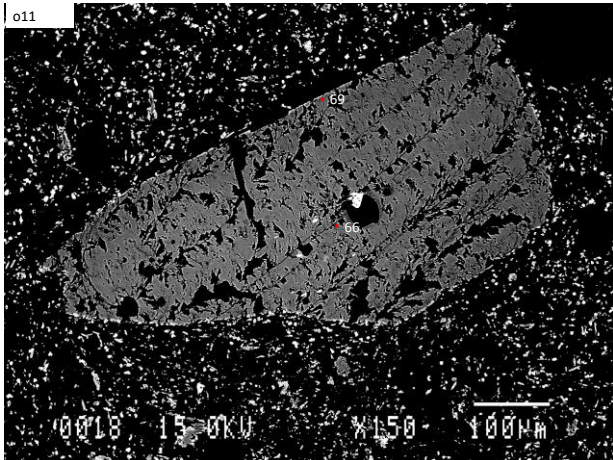
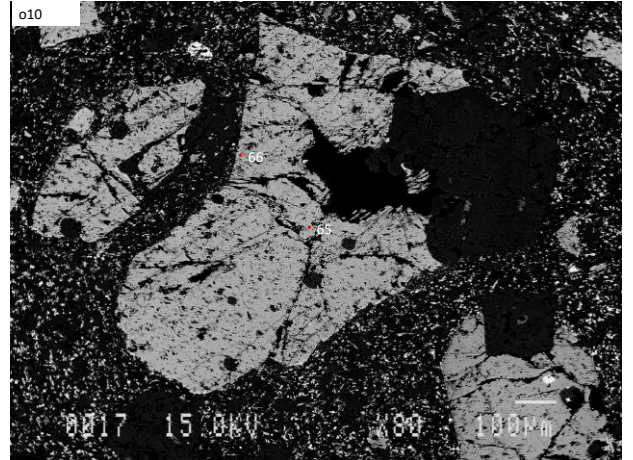
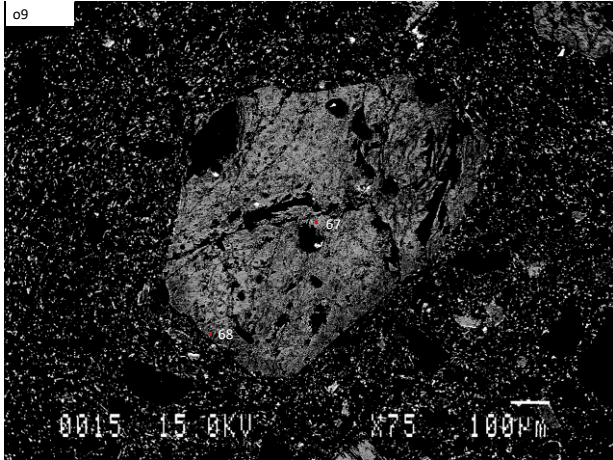


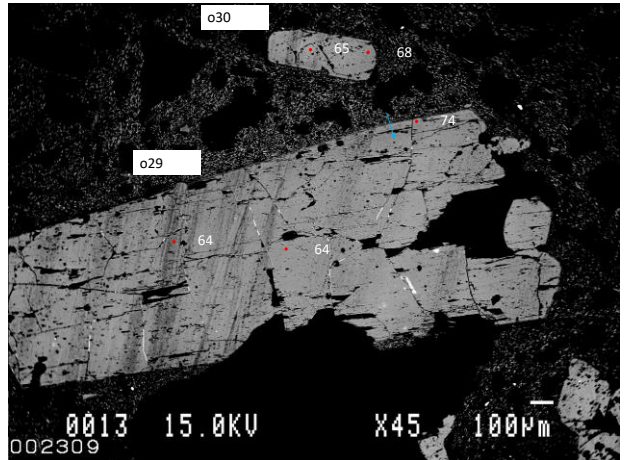
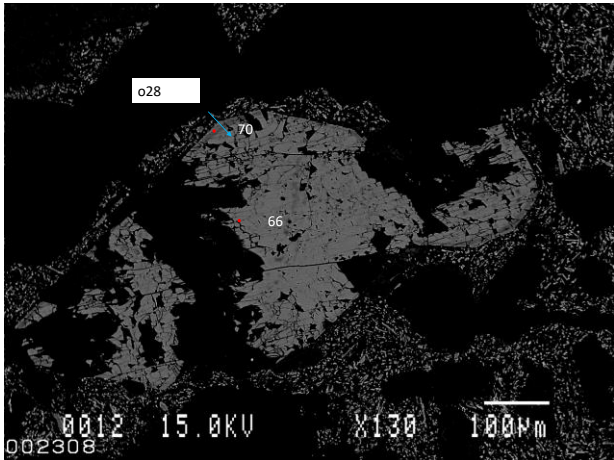
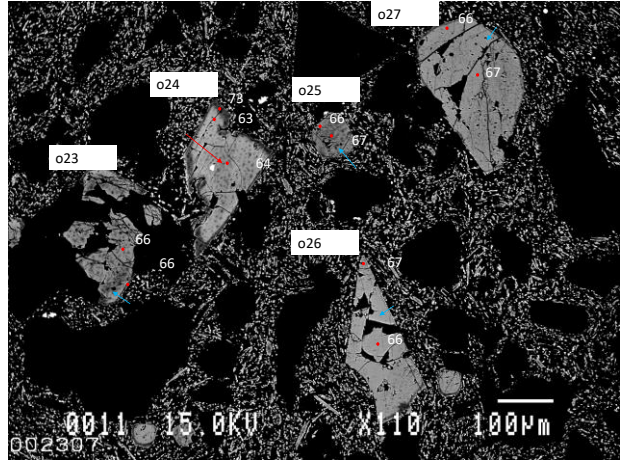
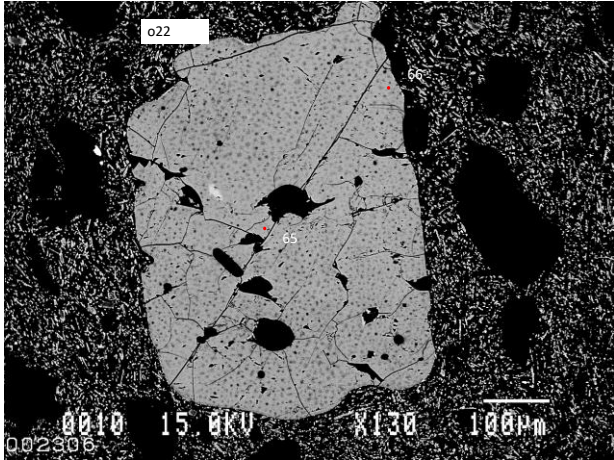
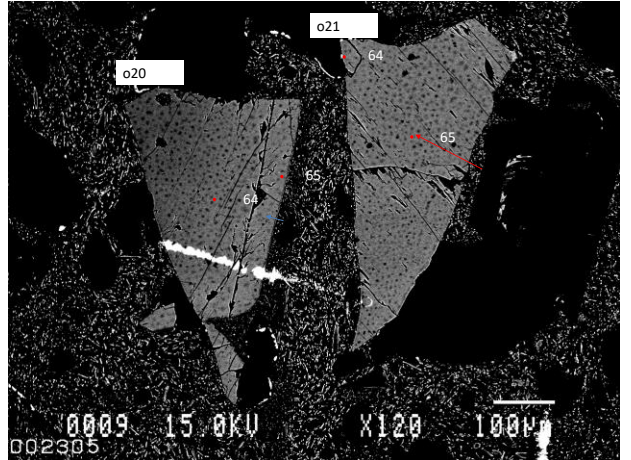
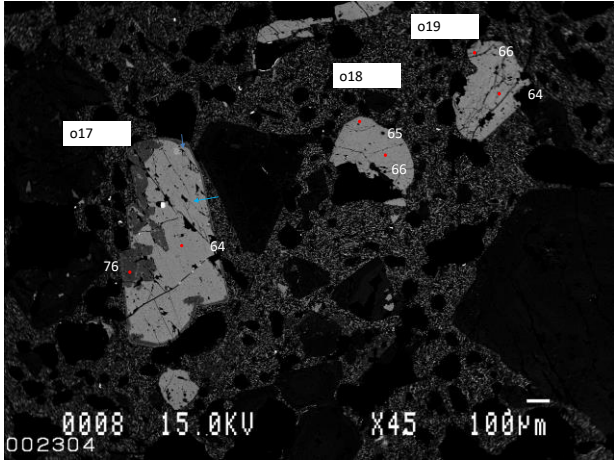


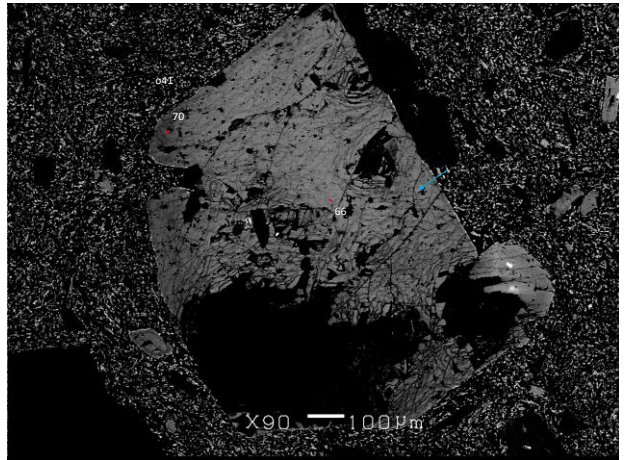
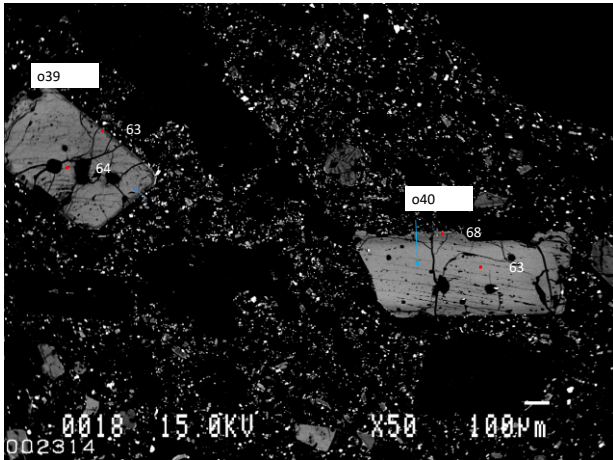
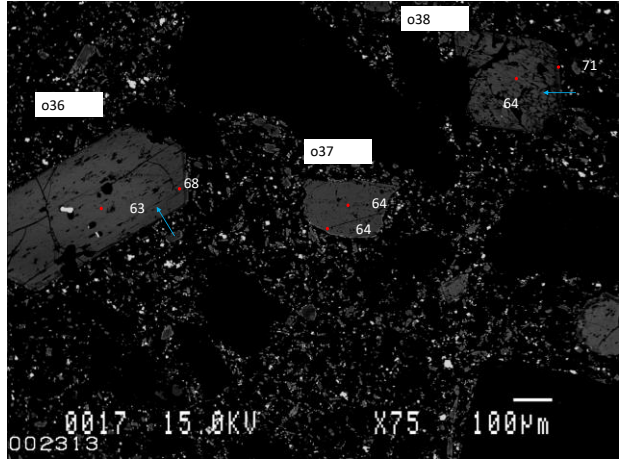
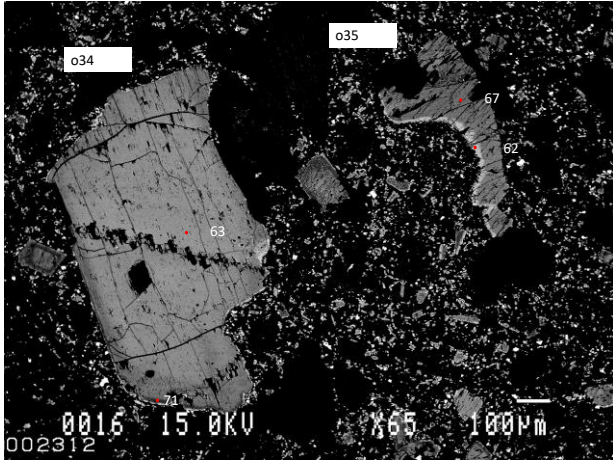
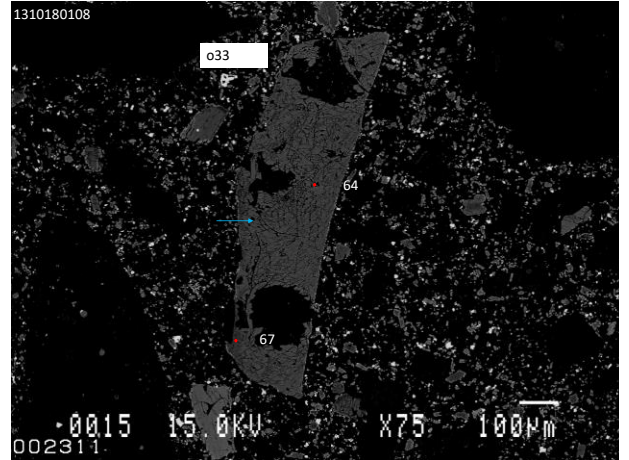
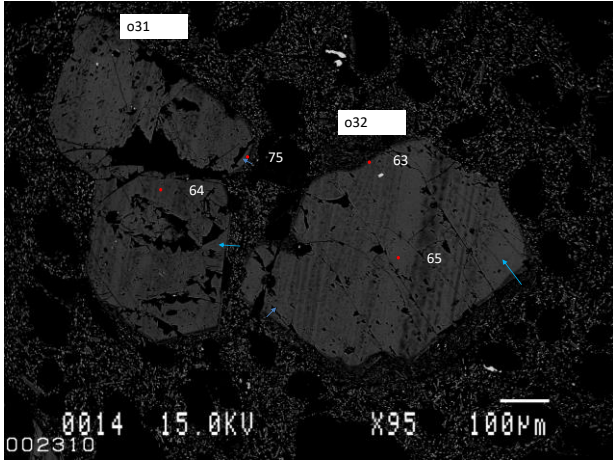


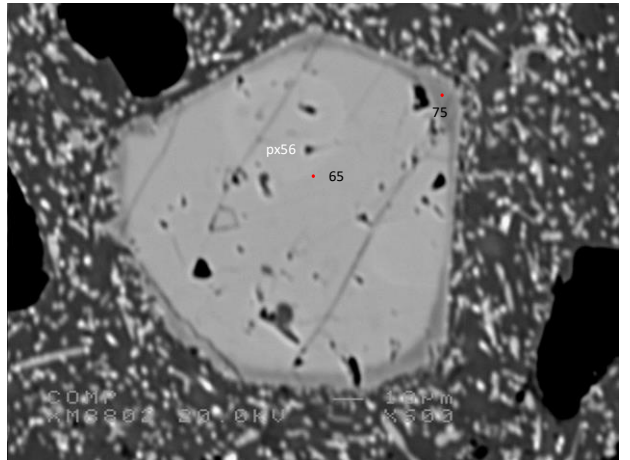
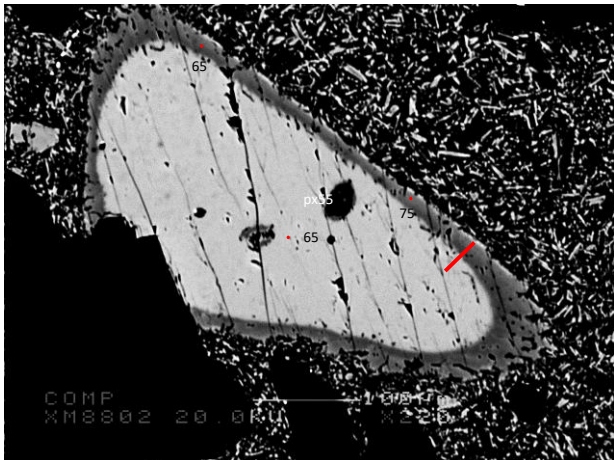
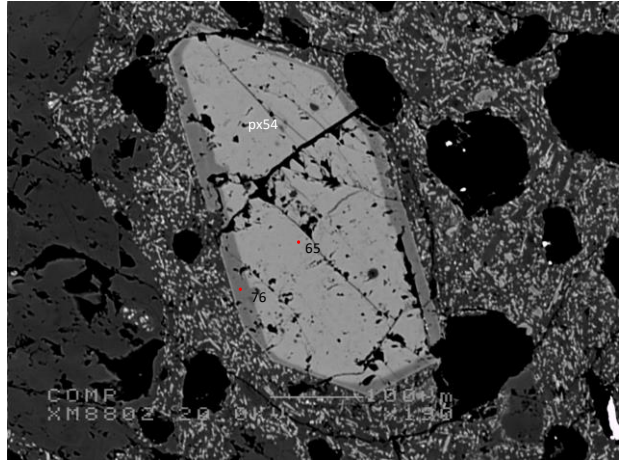
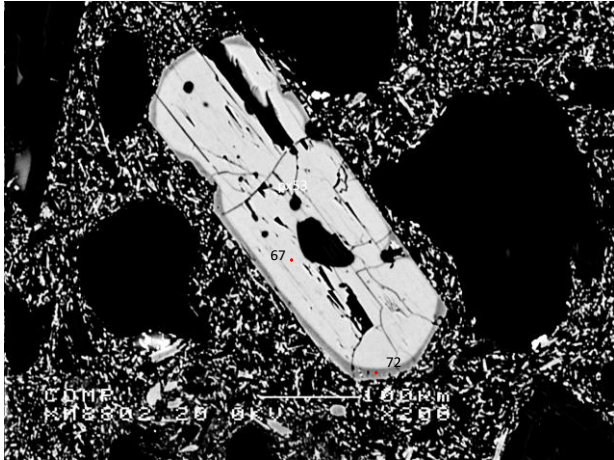
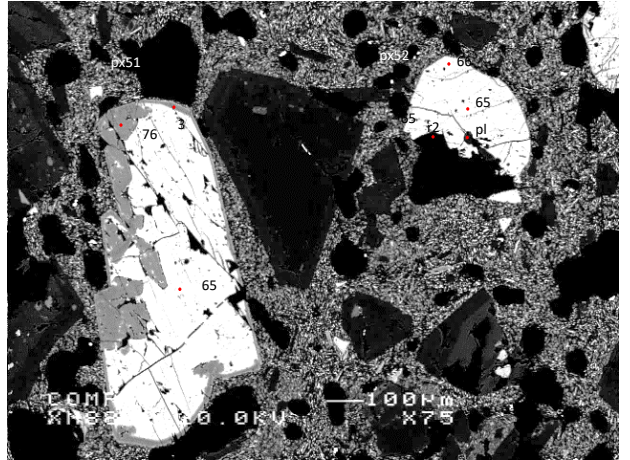
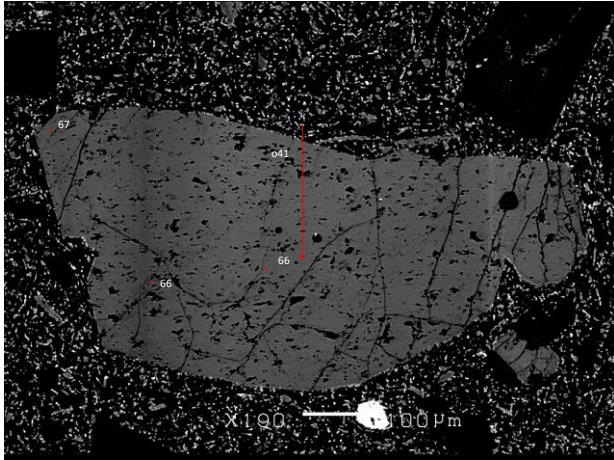
五色岳東部火砕岩類
opx

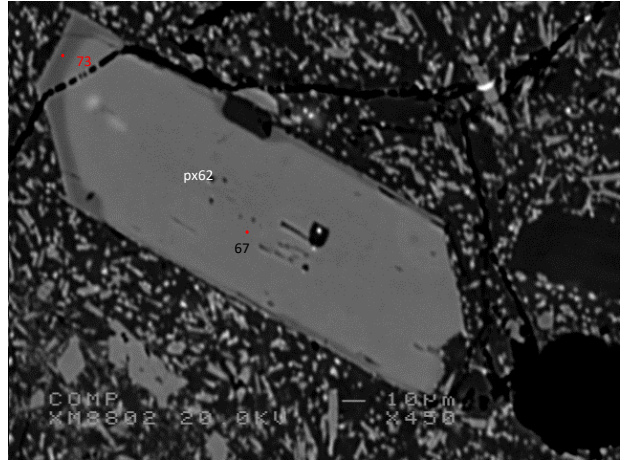
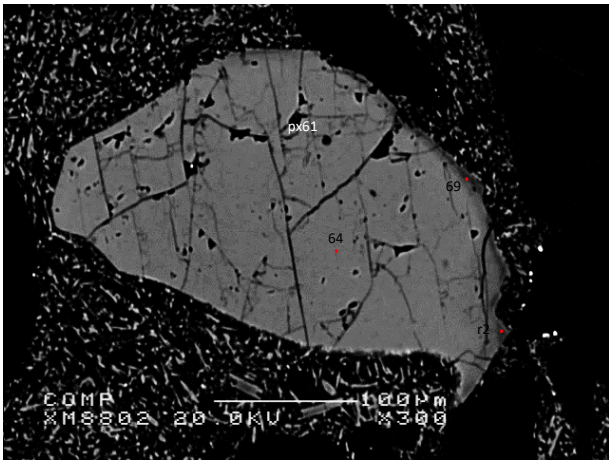
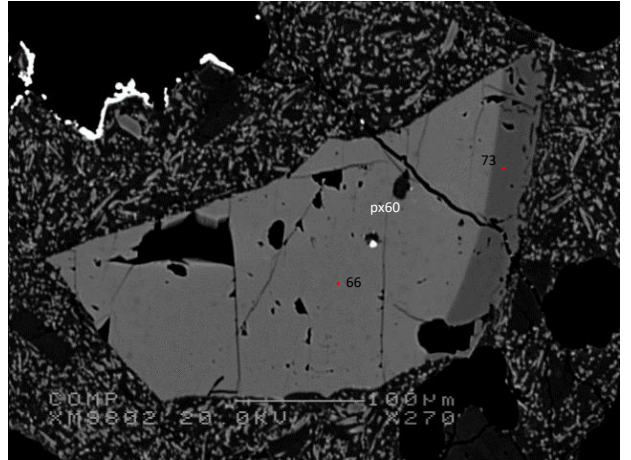
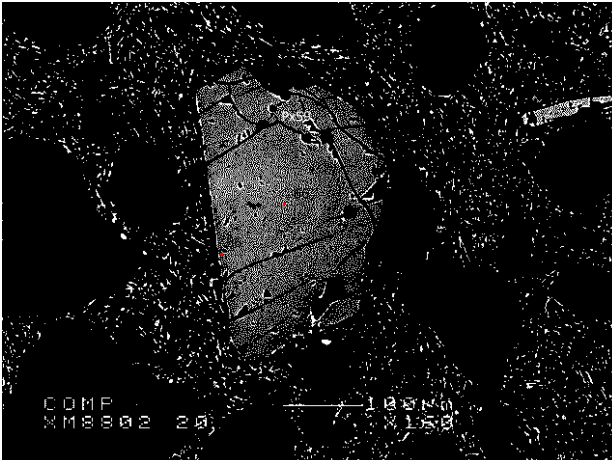
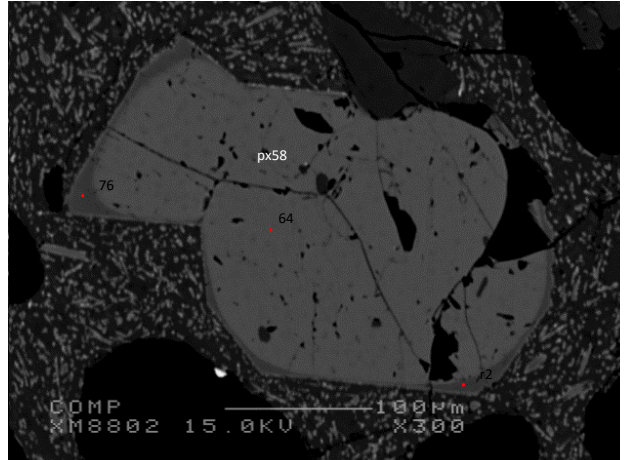


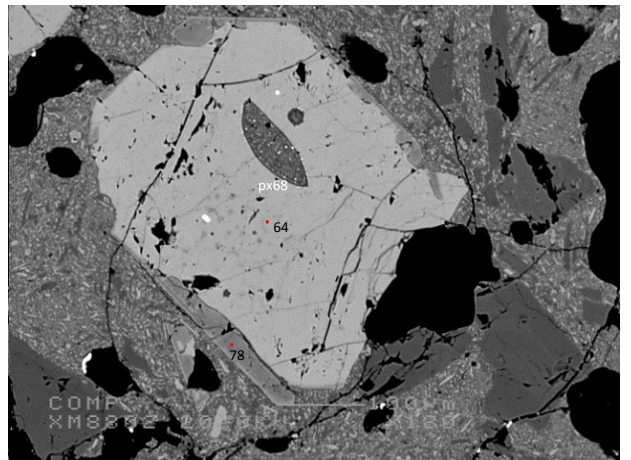
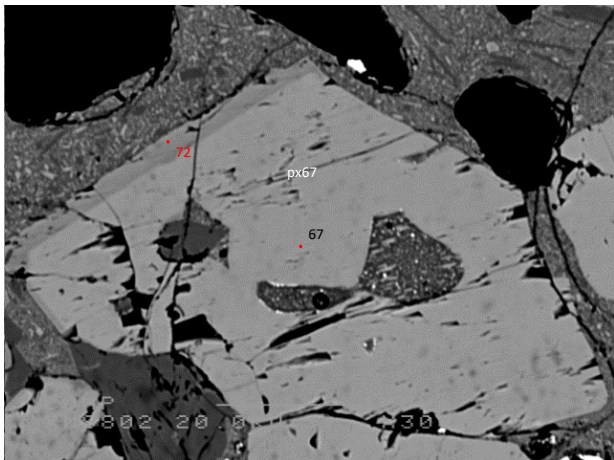
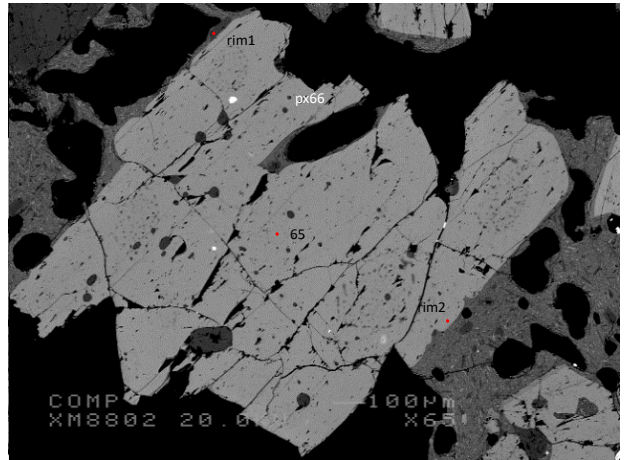
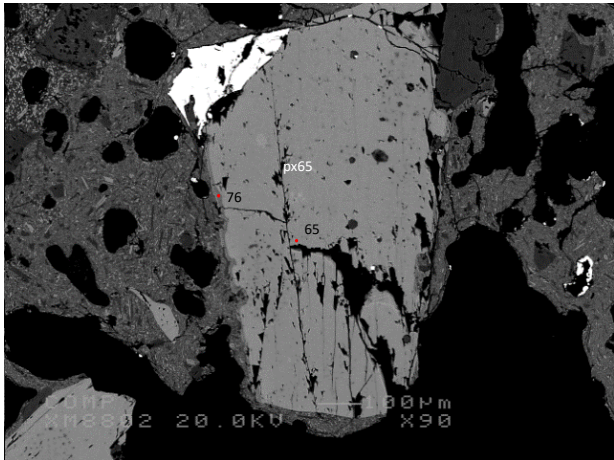
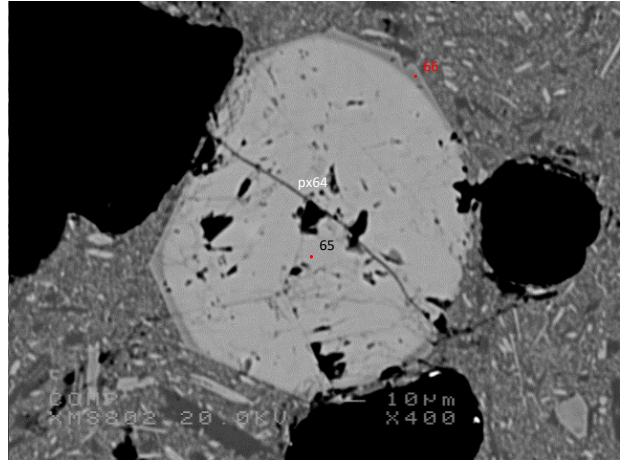
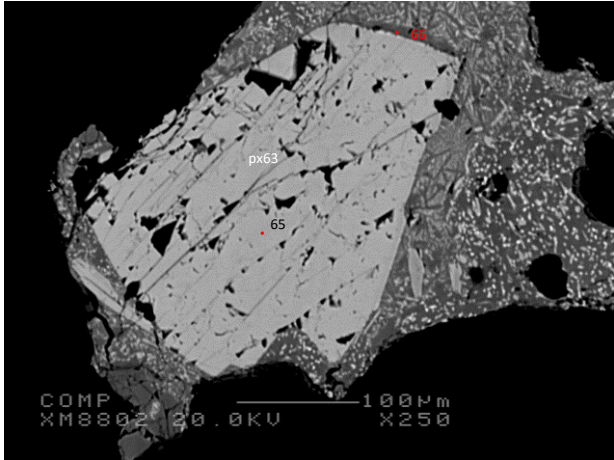


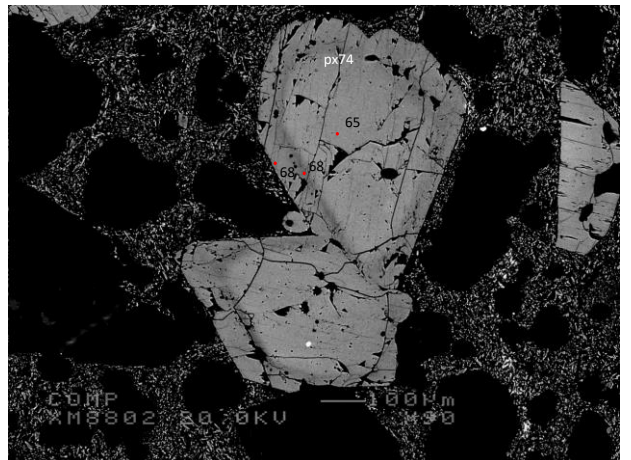
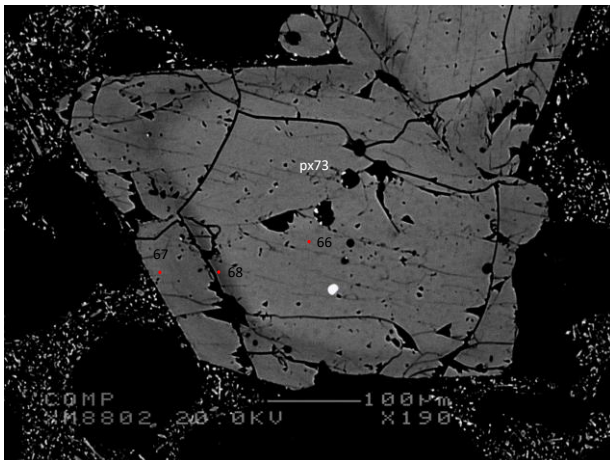
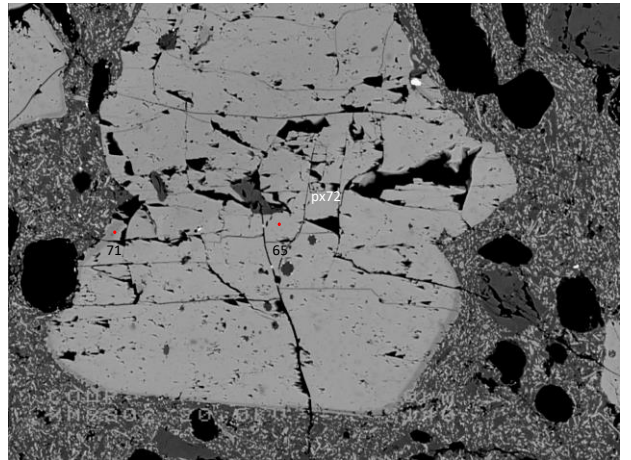
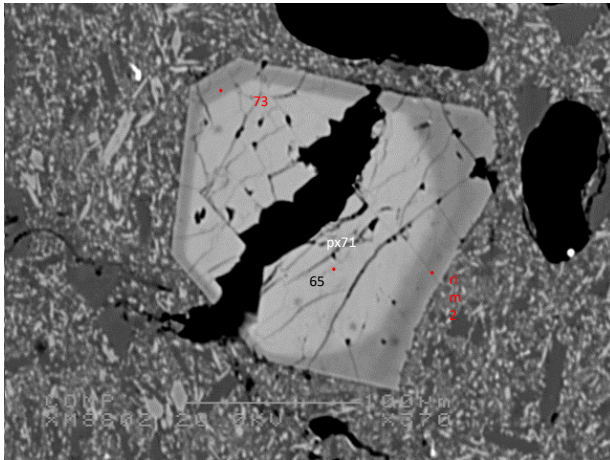
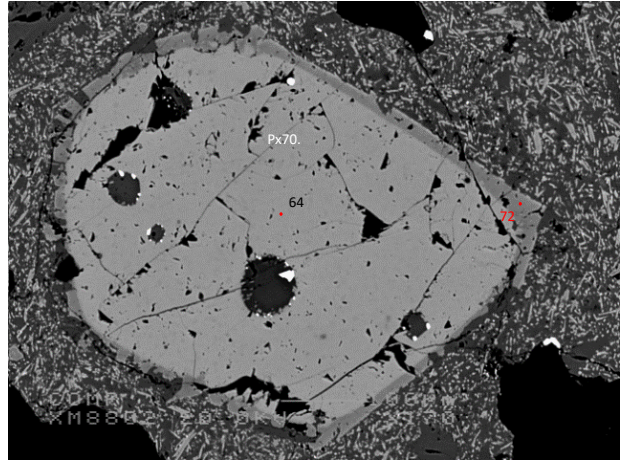
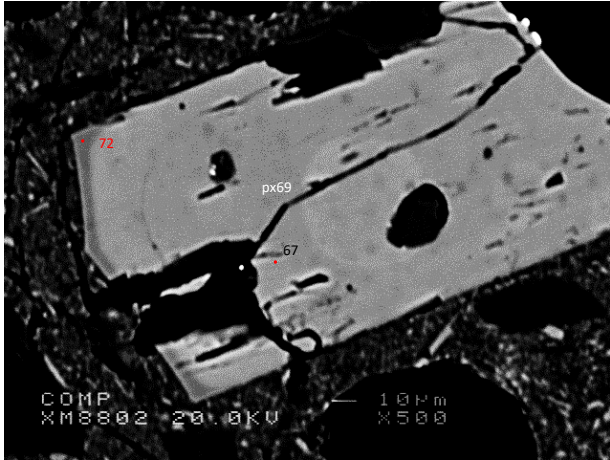


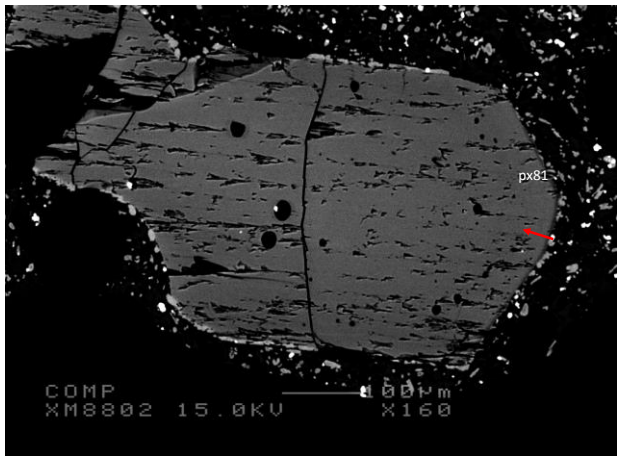
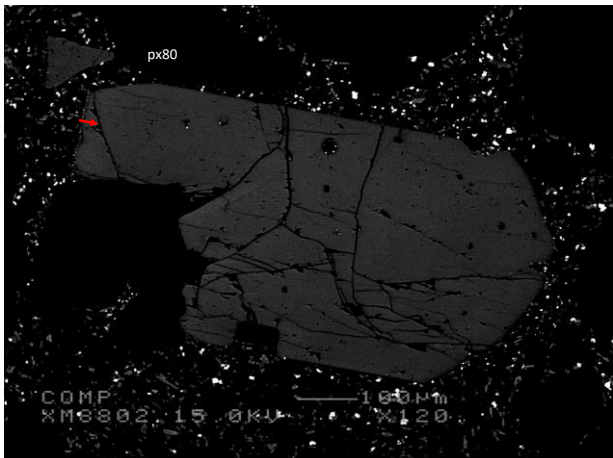
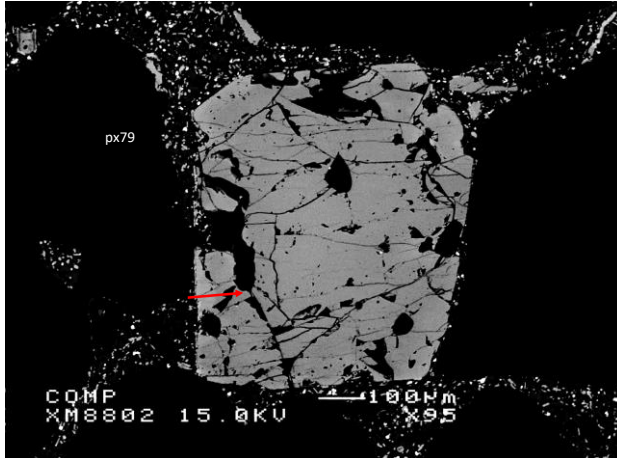
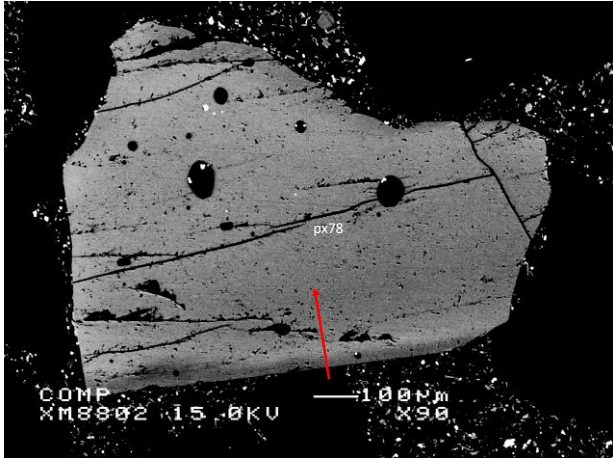
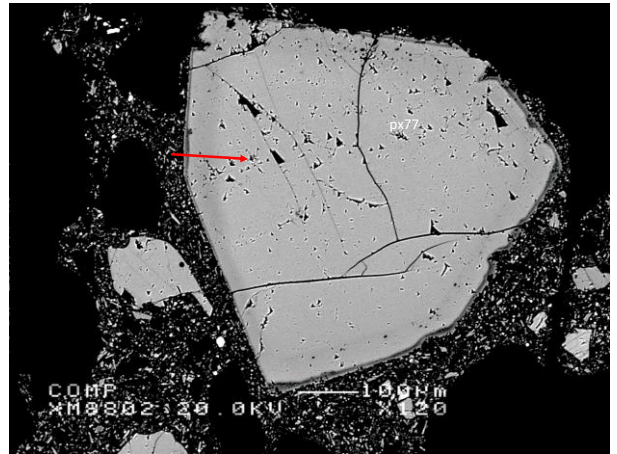
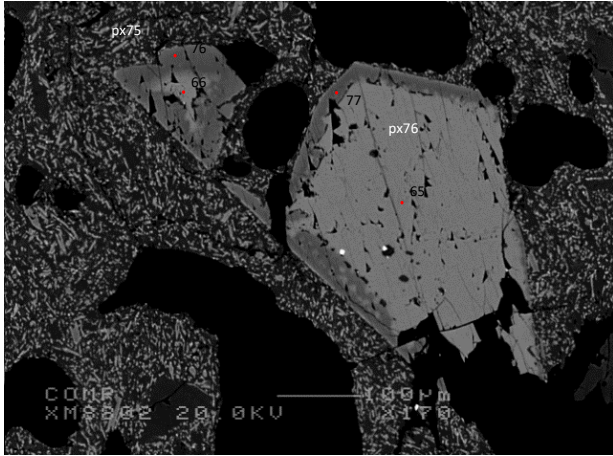


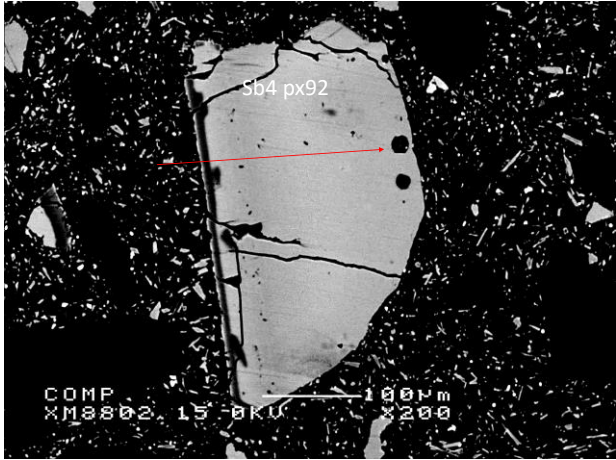
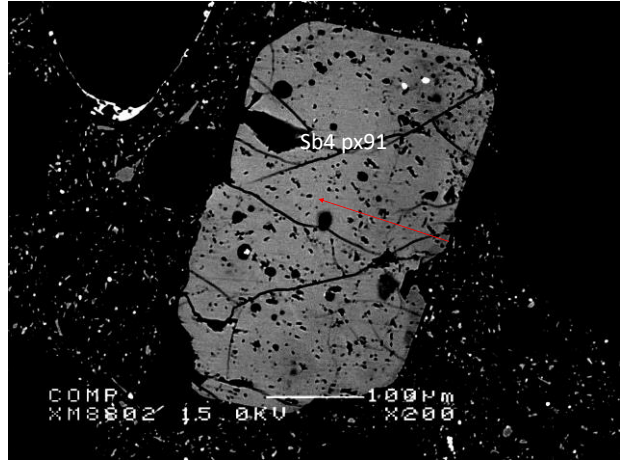
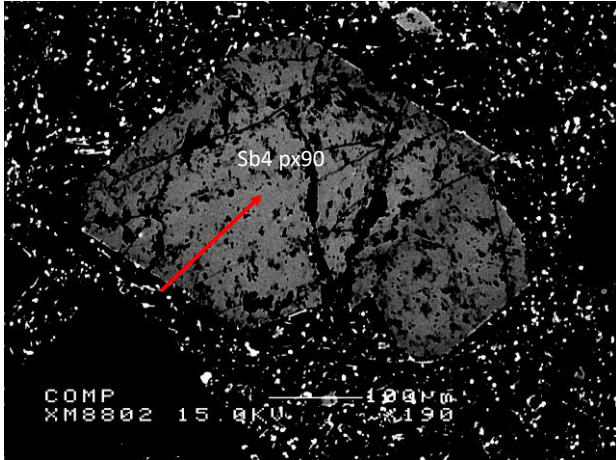




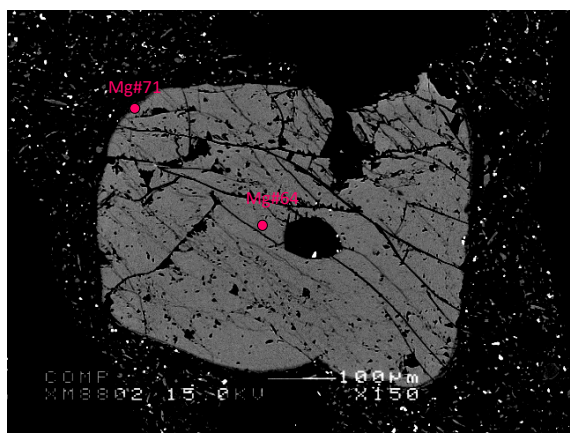
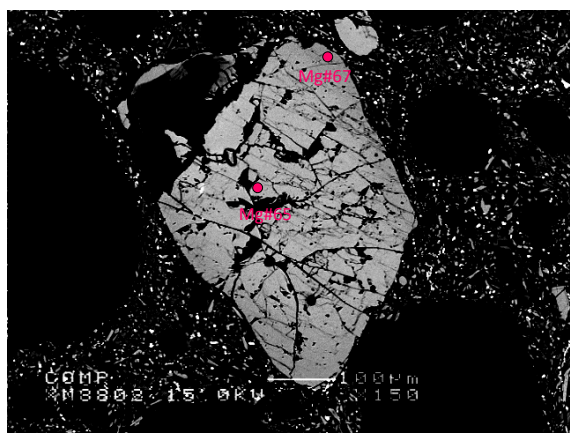
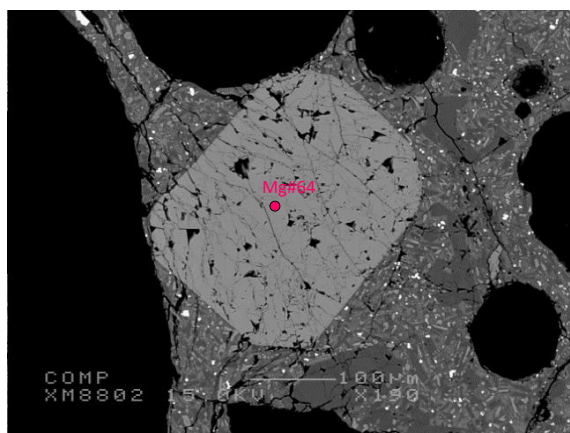
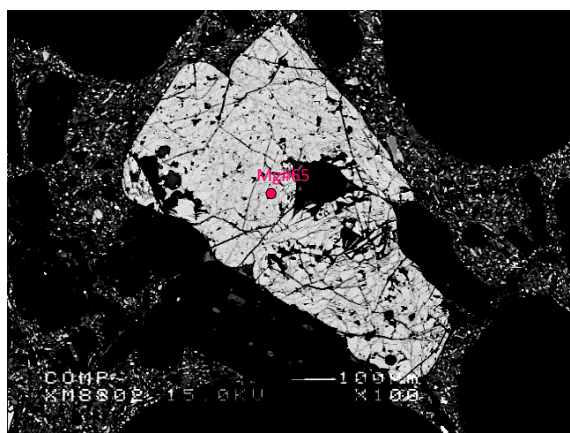
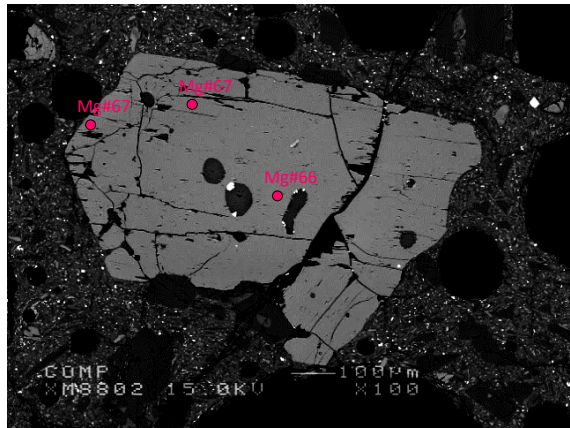
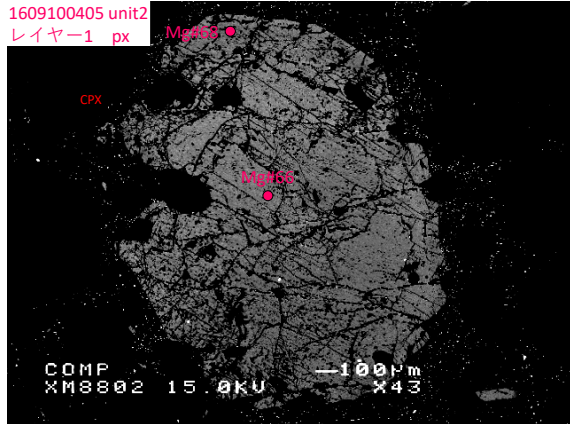


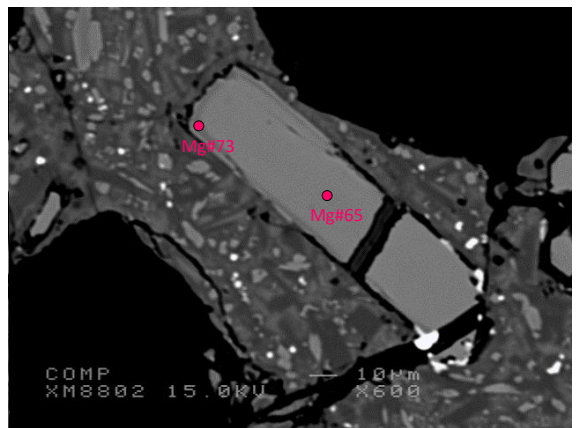
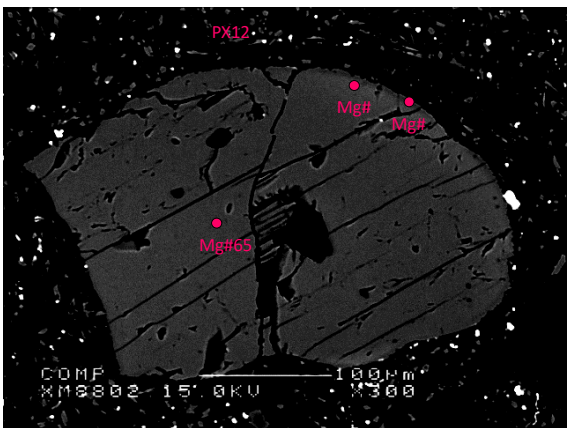
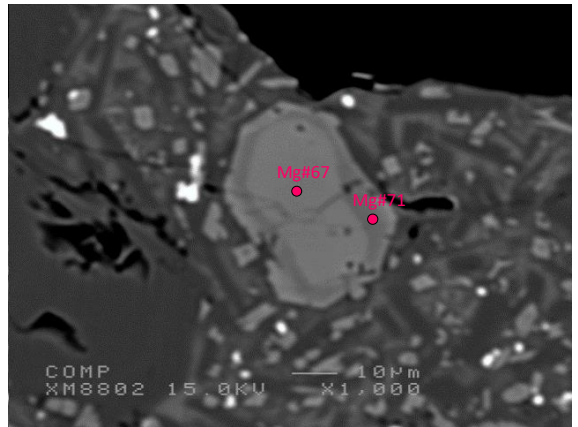
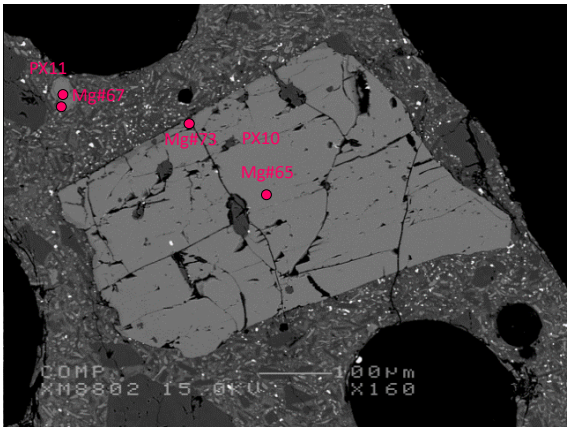
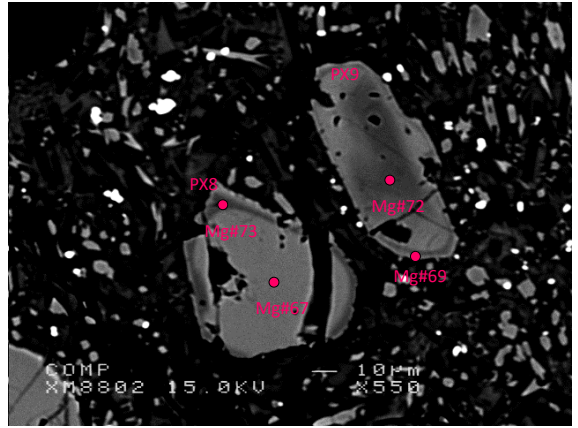
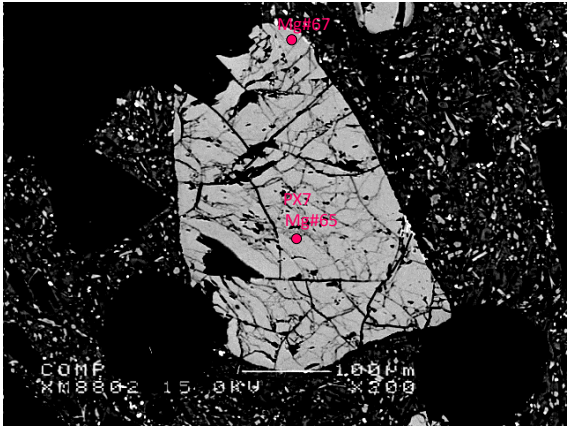


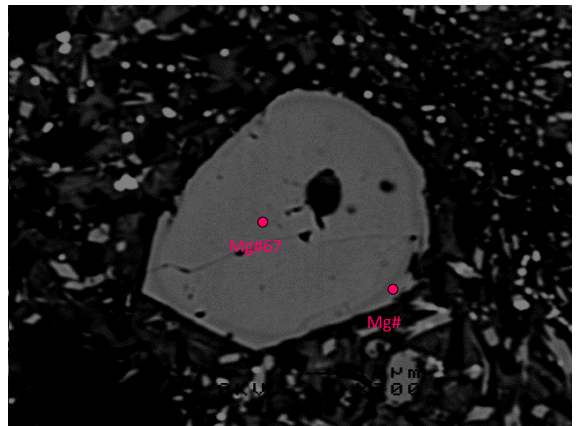
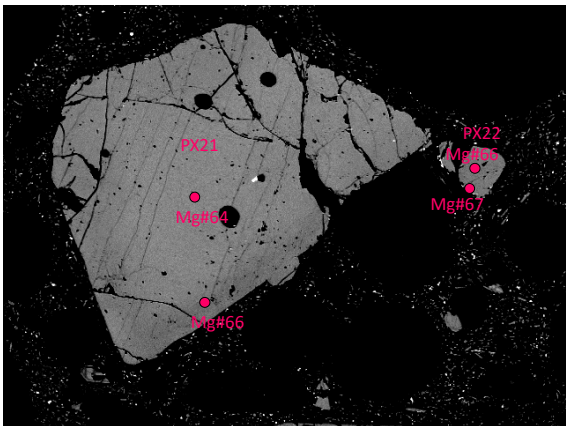
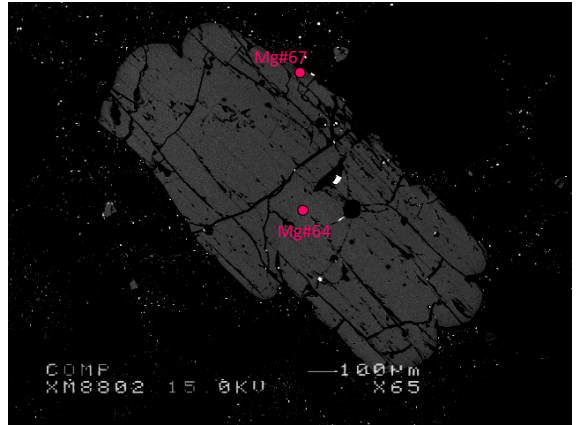
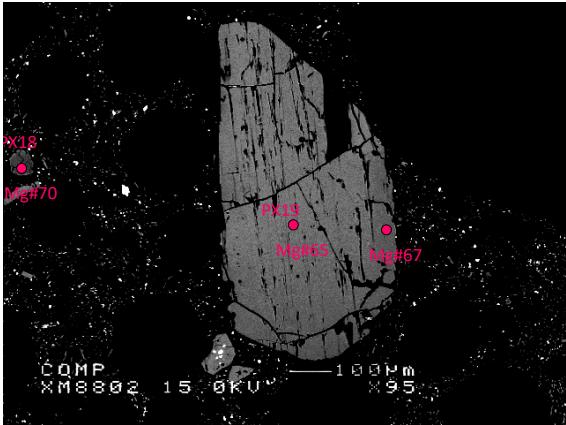
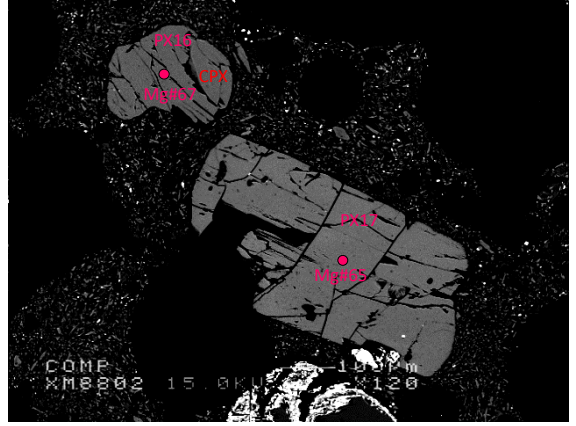
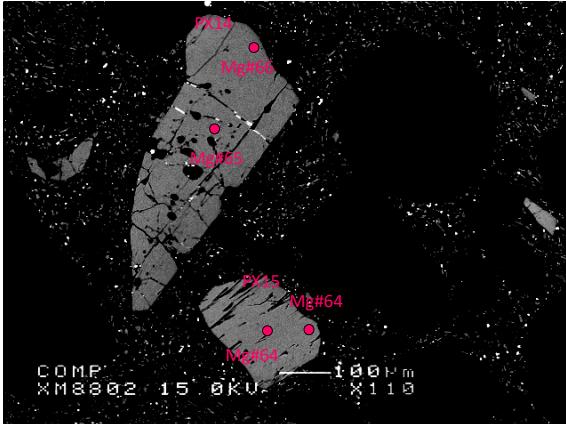


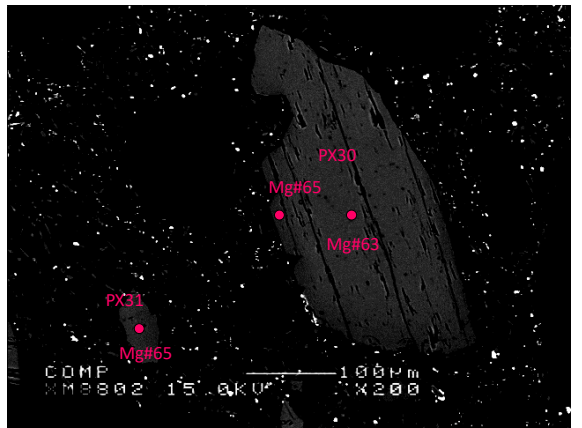
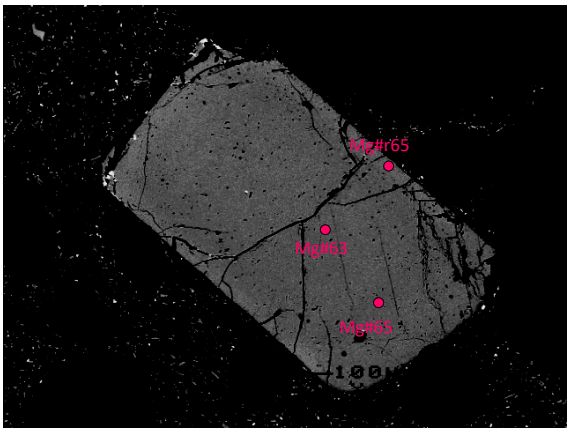
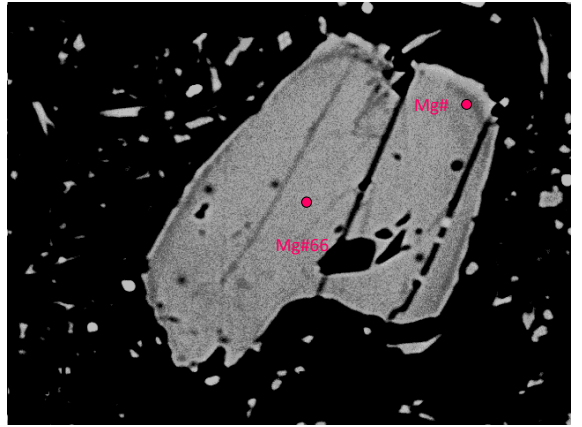
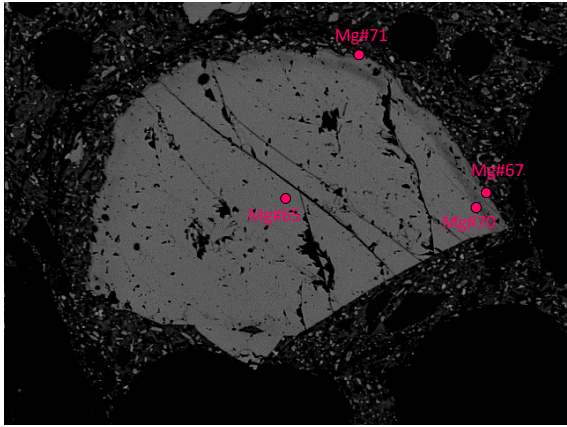
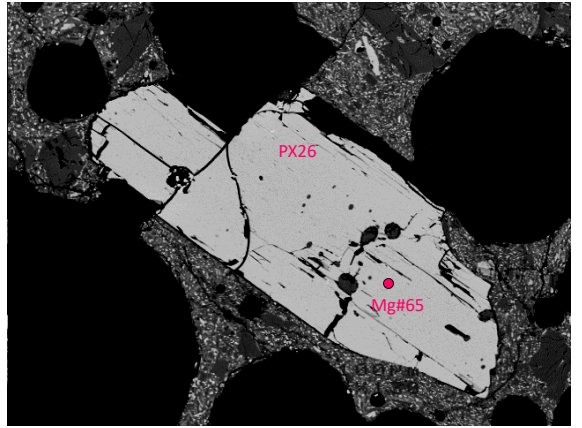
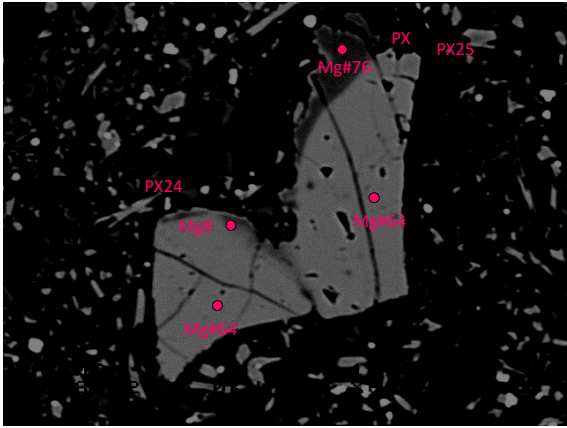


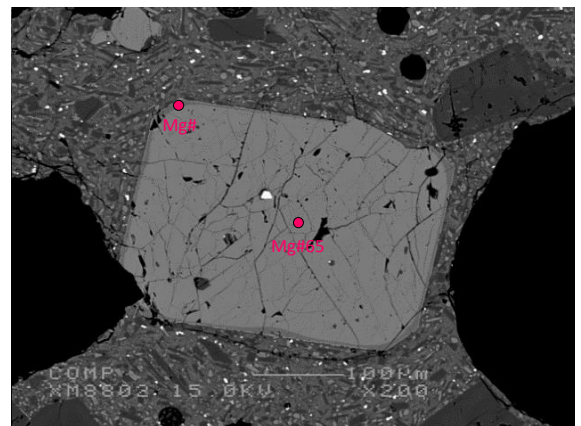
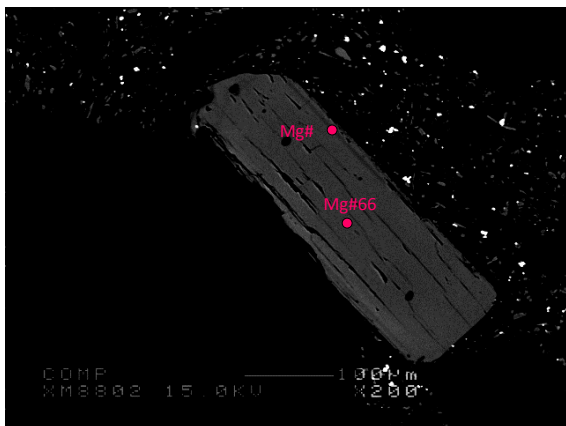
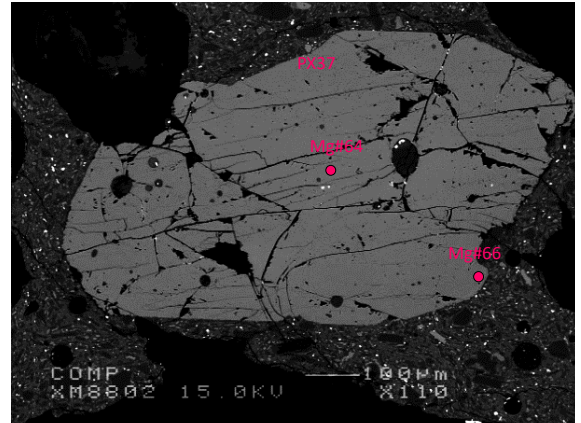
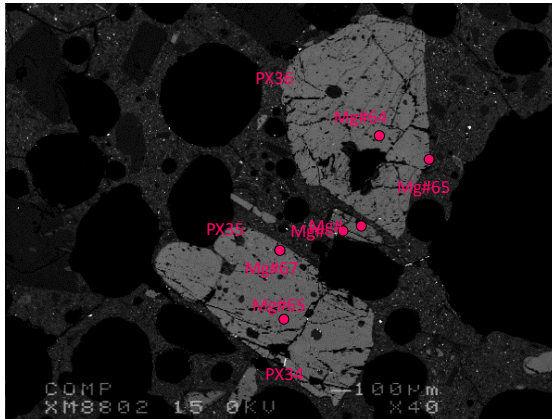
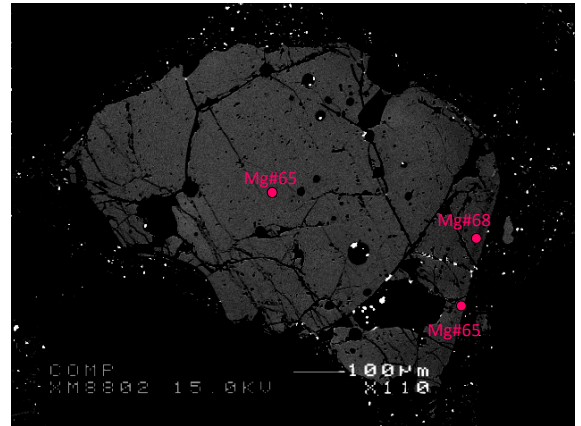
1609100405 unit2
レイヤー1 px











1609100404
Unit2
レイヤー2
px

