

博士論文

フィリピン海南部パレスベラ海盆ゴジラメガムリオンに産する
斑れい岩類の岩石学的研究

Petrogenesis of the gabbroic rocks from the Godzilla Megamullion,
an oceanic core complex in the Parece Vela Basin, Philippine Sea

国立大学法人 横浜国立大学大学院

環境情報学府

環境生命学専攻

主査 有馬 眞 教授

山下 浩之

Hiroyuki YAMASHITA

2014 年 3 月

Petrogenesis of the gabbroic rocks from the Godzilla Megamullion, an oceanic core complex in the Parece Vela Basin, Philippine Sea

Hiroyuki YAMASHITA

Abstract

The aims of this study are to describe the petrographic, mineralogical, and geochemical characteristics of gabbroic rocks occurring in the Godzilla Megamullion located in the Parece Vela back-arc basin in the southern Philippine Sea, to discuss the petrogenesis of these gabbros, and to describe the tectonic and magmatic evolution of the Godzilla Megamullion.

An oceanic core complex (OCC), also called a megamullion, is a unique bathymetric feature characterized by an elevated dome-like structure developed at a ridge-transform intersection of an extinct slow-spreading ridge system. It is considered that OCC was formed by development of detachment faults rooted to upper mantle and OCC has attracted high attention from petrologists since lower crustal and mantle rocks are widely exposed at seabed of OCC regions. OCCs have been identified at various slow-spreading ridges and are thought to be an important feature for understanding the plate tectonic evolution of Earth's ocean floor. Recently, many OCCs have been found at the Mid Atlantic Ridge (MAR) and the Southwest Indian Ridge (SWIR). Several OCCs have also been discovered in the Parece Vela back arc basin in the southern Philippine Sea (Ohara *et al.*, 2001). In this basin, the Godzilla Megamullion, the largest OCC in the world, is located at a ridge-transform intersection of a slow-spreading ridge at 15–16.5° N, 138.5–139.5° E. It extends for 55 km along the spreading ridge and is 125 km wide perpendicular to the ridge.

This study examines the petrological and geochemical characteristics of gabbroic rocks recovered from six dredge sites during cruises KR03-01 (*R/V Kairei*; sites D06, D09, and D10) and KH07-02 (*R/V Hakuho-maru*; sites D14, D18, and D25), three ROV dive sites during cruise YK09-05 (*R/V Yokosuka* and the submersible *Shinkai 6500*; dives 6K#1140, 6K#1141, and 6K#1147), and five dive sites of cruise YK11-08 (*R/V Yokosuka*, the submersible *Shinkai 6500*, and ROV survey; dives 6K#1270, 6K#1275, 6K#1276, YKDT#115, and YKDT#116).

Compared with petrological data of rocks reported from other OCC's, such as the Kane Megamullion, the Atlantis Massif in MAR, and the Atlantis II Fracture Zone in SWIR,

the gabbroic rocks of the Godzilla Megamullion are characterized by higher abundances of amphibole and iron oxide minerals and lower modal compositions of olivine.

The studied rocks show extensive variation in whole rock composition. Low modal abundance of olivine and high abundances of amphibole and iron oxide minerals are characteristic features of the majority of the gabbroic rocks recovered during the cruises. The studied gabbroic rocks are classified into troctolite, olivine gabbro, gabbro, hornblende pyroxene gabbro, pyroxene hornblende gabbro, hornblende gabbro on the basis of the classification by Streckeisen (1976). The chemical compositions of mineral constituents in the rocks show systematic variations that are indicative of magmatic differentiation. Anorthite content in plagioclase, #Mg ($\text{Mg} / (\text{Mg} + \text{Fe})$) value in olivine and clinopyroxene decrease from less differentiated to highly siliceous evolved rocks. The whole rock compositions indicate that troctolite is the most primitive variety and that trondhjemite is the most differentiated variety in the Godzilla Megamullion.

Based on the geochemical and petrological characteristics of the gabbroic rocks, the rocks were classified into five types. Type-1 is cumulate rock characterized by highly depleted large ion lithophile (LIL) and high field strength (HFS) elements. This type includes troctolites, olivine gabbros and gabbros, and hornblende pyroxene gabbros and pyroxene hornblende gabbros. Type 2 is gabbro characterized by relatively high contents of LIL elements and SiO_2 higher than 52 wt. %. It includes pyroxene hornblende gabbros and hornblende gabbros. Type 3 is characterized by high concentrations of LIL elements and Ti and SiO_2 less than 52 wt. %. The rocks of this type are enriched in iron oxide minerals. Type 3 includes hornblende pyroxene gabbros, pyroxene hornblende gabbros, and hornblende gabbros. Type 4 rocks are characterized by relatively enriched LIL elements. They show flat MORB normalized trace elements patterns similar to those of basalt recovered from the Godzilla Megamullion. This type is fine-grained gabbroic rock, which is interpreted as a less differentiated variety and probably represents the most primitive basaltic magma composition in the studied region. Type 5 is trondhjemite.

Troctolite, olivine gabbro and gabbro were recovered only from the distal parts (WLR and ELR) of the Godzilla Megamullion. An age of ~13 Ma has been reported from this region. On the other hand, trondhjemite was recovered from the medial (WHR) and proximal (WAR) parts of the megamullion, from which ages of 11 and 8.7 Ma, respectively, have been reported. Gabbroic rocks with relatively primitive composition were recovered from the Neck Peak region, where a younger age of 8.4 Ma has been reported

The spatial and temporal distribution of gabbroic rocks in the Godzilla Megamullion suggests a higher degree of partial melting for the early stage magmatic activity at its distal part and a lower degree of partial melting for the later stage magmas developed at its proximal part.

The differentiation processes of the studied rocks were evaluated with the “MELTS” program. The processes were also tested with mass-balance calculations by employing whole rock compositions, modal mineral abundances, and chemical compositions of mineral constituents of the studied rocks. In the MELT modeling, a basaltic glass composition (YK11-08 6K#1275R07) was employed as the starting composition. The physical conditions used in the modeling were the following: fO_2 was defined by the quartz-fayalite-magnetite (QFM) buffer, pressure was 1500 bars, and temperature ranged from 1220 to 900 °C. The modeling was carried out with the starting composition and various amounts of water (0.00 to 2.0 wt. % H_2O). Mineral compositions obtained from the “MELTS” modeling were comparable to those observed in the studied gabbroic rocks.

The “MELTS” modeling suggested that the whole rock compositional variations in the gabbroic rocks are well represented by fractional crystallization processes of a primary magma comparable in composition to the olivine basalt recovered from the Godzilla Megamullion. The results suggest that the type 1 gabbros could have been generated by crystal accumulation in a primary magma with 0.02 wt. % H_2O added at a temperature of 1210 ~ 1120 °C. Residual melts derived from a primary magma with 0.5 wt. % H_2O added could have produced the type 2 gabbros at temperatures ranging up to 1140 °C. The type 3 gabbros could have been generated from residual melts derived from a primary magma with 0.02 wt. % H_2O added at temperatures ranging up to 1180 °C. The mass balance calculations suggest that the type 5 trondhjemite was generated by anatexis of a gabbroic source composition comparable to the hornblende pyroxene gabbro or pyroxene hornblende gabbro.

The modeling suggests that early stage (~13 Ma) troctolites and olivine gabbros in the WLR and ELR were formed by accumulation of early-crystallized minerals at relatively higher temperatures. It also suggests that the type 3 deformed gabbros were crystallized from residual gabbroic melts formed by crystal fractionation of a basaltic primary magma. The data indicate that the type-1 and type-3 rocks represent a large volume of basaltic magma formed by a higher degree of partial melting of source mantle. The data also suggest that the gabbroic rocks in the WHR represent early stage (11 Ma) magmatic products of the WLR and ELR. The majority of these WHR gabbros show deformed texture. The modeling also suggests that

the gabbroic rocks were derived from melts generated by a relatively lower degree of partial melting of mantle source. The gabbroic rocks with an age of ~ 8.7 Ma in the WAR have highly differentiated mineral assemblages and bulk compositions. The hornblende pyroxene gabbros in the WSR contain plagioclase crystals with relatively high anorthite content, indicative of less fractionated magmatic activity, and represent the latest magmatic activity (~ 8.4 Ma) in the Godzilla Megamullion.

目 次

Abstract	i
目次	v
I. 序論	1
1. 研究目的	1
2. パレスベラ海盆の研究史	3
3. ゴジラメガムリオンの研究史	4
1) ゴジラメガムリオンの構造地形区分	4
2) 地震波速度による構造解析	4
3) かんらん岩の岩石学的研究	4
4) 斑れい岩の岩石学的研究	5
5) 斑れい岩類の構造岩石学的研究	6
6) 斑れい岩類および玄武岩類の年代学的研究	6
4. ゴジラメガムリオンにおける調査航海概要	7
謝辞	8
II. ゴジラメガムリオンに産出する斑れい岩類の記載岩石学的研究	9
1. はじめに	9
2. ゴジラメガムリオンにおける斑れい岩類の産出状況	9
3. 斑れい岩類の分類	10
1) East Leg Ridge の斑れい岩類	10
2) West Leg Ridge の斑れい岩類	10
3) West Hipbone Rise の斑れい岩類	11
4) West Arm Rise の斑れい岩類	11
5) West Shouldr Ridge の斑れい岩類	11
6) Neck Peak の斑れい岩類	12
4. 斑れい岩類の岩石学的記載	12
1) トロクトライト	12
2) カンラン石斑れい岩	12
3) 斑れい岩	13
4) ホルンブレンド輝石斑れい岩	14

5) 輝石ホルンブレンド斑れい岩	15
6) ホルンブレンド斑れい岩	17
7) トロニエム岩	18
5. 議論	18
1) ゴジラメガムリオンにおける斑れい岩類の分布	18
2) 交代作用による角閃石の増加	19
3) 大西洋中央海嶺および南西インド洋中央海嶺のメガムリオンに 産する斑れい岩との比較	20
6. まとめ	21
III ゴジラメガムリオンに産する斑れい岩類の鉱物学的検討	23
1. はじめに	23
2. 鉱物の化学組成	23
1) 斜長石	24
2) 単斜輝石	25
3) 角閃石	27
4) カンラン石	29
3. 議論	29
1) 岩石種ごとの鉱物化学組成の相違	29
2) ゴジラメガムリオンにおける鉱物組成の変化	31
3) 大西洋中央海嶺および南西インド洋中央海嶺のメガムリオンに 産する斑れい岩との比較	33
4. まとめ	34
IV ゴジラメガムリオンに産する斑れい岩類の地球化学的検討	36
1. はじめに	36
2. 分析方法	36
3. 斑れい岩類の全岩化学組成	36
1) トロクトライト	36
2) カンラン石斑れい岩	37
3) 斑れい岩	37
4) ホルンブレンド輝石斑れい岩	38
5) 輝石ホルンブレンド斑れい岩	38

6) ホルンブレンド斑れい岩	38
7) トロニウム岩	39
4. 微量元素のスパイダーダイアグラムによる比較	39
5. ノルム組成	40
6. 地形構造区分による地球化学的特徴	41
1) WLR	41
2) ELR	41
3) WHR	41
4) WAR	41
5) WSR	42
7. 議論	42
1) 細粒な岩相の斑れい岩類の成因について	42
2) 全岩化学組成に基づく斑れい岩類の区分	43
3) 地形構造区分と全岩化学組成の関連	44
4) 全岩化学組成と鉱物組成の関係について	45
8. まとめ	46
V. 斑れい岩類の生成について	48
1. はじめに	48
2. MELTS によるシミュレーション	48
3. MELTS による計算結果	50
4. 議論	51
1) 斑れい岩類の生成	51
2) トロニウム岩の生成	53
3) 地形構造区分ごとの斑れい岩類の生成過程	54
4) MELTS によって計算された鉱物の化学組成と実測値の対比	56
5) 斜長石の比重に関する一考察	56
6) 中央海嶺における斑れい岩類の生成	57
5. まとめ	57
VI. ゴジラメガマリオンの形成発達史についての考察	60
1) Distal Part Stage (WLR・ELR ; 13 Ma) のゴジラメガマリオン	60
2) Medial Part Stage (WHR ; 11 Ma) のゴジラメガマリオン	61

3) Proximal Part Stage (WAR ; 8.7 Ma) のゴジラメガムリオン	62
4) Proximal Part Stage (WSR ; 8.4 Ma) のゴジラメガムリオン	63
5) Type-2 斑れい岩類の出現から推定されるゴジラメガムリオンの形成史	63
VII. 結論	65
引用文献	69
附編	75
図 (I 章)	77
図 (II 章)	87
図 (III 章)	111
図 (IV 章)	129
図 (V 章)	161
図 (VI 章)	187
図 (VII 章)	197
表	199

I. 序論

本論文は 2013 年度横浜国立大学大学院環境情報学府における博士論文として作成したものである。

1. 研究目的

海洋コアコンプレックス (Oceanic Core Complex ; 以後 OCC と略す) は、近年、中央海嶺に沿って確認されているドーム状の地形である (Tucholke and Lin, 1994; Cann *et al.*, 1997; Blackman *et al.*, 1998; Tucholke *et al.*, 1998 など)。OCC の特徴としては、表面に拡大軸の両側に普通に見られる玄武岩類の畝 (abyssal hill) を伴わず、拡大軸と直交する方向にコルゲーションと呼ばれる畝構造が発達するドーム状の高まりであること、一般的には拡大軸とトランスフォーム断層が直交するあたりに位置すること、マントルブーゲー異常値が大きいこと、表面から下部地殻を構成する斑れい岩やマントルを構成するかんらん岩が採集されることなどが挙げられる (Cann *et al.*, 1997; Tucholke *et al.*, 1998)。コルゲーションが発達する様子から、建築用語の「ムリオン」をあてはめて「メガムリオン」と呼ぶこともある (Tucholke *et al.*, 1998)。

OCC の成因は、低速拡大海嶺において、上部マントルまで達する低角のデタッチメント断層の発達により形成されたもので、下部地殻やマントルの岩石が採集されることから、玄武岩を産しない、すなわちマグマ活動に乏しい、あるいは非マグマ的拡大によって形成されたと解釈されてきた (Tucholke *et al.*, 1998 ; Fig. I-1)。なお、デタッチメント断層の開始点を Breakaway、終了点を Termination と呼ぶ。

OCC では、下部地殻やマントルの岩石が採集されることから、海洋リソスフェア研究のテクトニックウィンドウとして注目されてきた。最も研究されている OCC の1つが北緯 23°、西経 45°周辺に位置する、低速拡大で形成したケーン断裂帯 (ケーンメガムリオン (Kane Megamullion)) であり、詳細な海底地形調査から重力調査、ドレッジ調査などによる岩石採集 (例えば Dick *et al.*, 2008)、ODP による深海掘削 (Site 920; Karson *et al.*, 1997) がなされている。また、ケーン断裂帯のみならず、ケーンメガムリオンの北方に位置する北緯 30°10'、西経 42°8' 周辺に位置する、低速拡大で形成したアトランティス岩体 (Atlantis Massif) では IODP による深海掘削 (Site U1309 など ; Blackman *et al.*, 2006)、南西インド洋の北緯 32°43'、東経 57°16' 周辺に位置する超低速拡大で形成した南西インド洋海嶺 Atlantis II 断裂帯のアトランティスバンクでは ODP による深海掘削 (Site 735B ; Herzen *et al.*, 1991; Natland *et al.*, 2002) などの詳細な調査がなされている。

ODP もしくは IODP による掘削の結果、OCC は相当量の斑れい岩類で構成されていることが明らかになり、Ildefonse *et al.*, (2007) はアトランティス岩体の掘削結果から OCC

の中心はかんらん岩ではなく、主に斑れい岩から形成されるモデルを提唱した。このような観測事実から、Tucholke *et al.*, (1998) による、非マグマ的拡大によって OCC が形成されるモデル (Fig. I-1) は説明できなくなった。一方でデタッチメント断層が発達するには、適度なメルトが必要であるとの数値計算モデルが提案され (Buck *et al.*, 2005)、このような状況から、Tucholke *et al.* (2008) は新たに「中程度のマグマ供給」が拡大軸の片側で生じた際に、その反対側でデタッチメント断層が最も発達するというモデルを提案した。OCC は 1990 年代末頃までは稀な地形とされてきたが、近年は海底拡大系において多数見つかり、大西洋中央海嶺の北緯 12° から 35° の範囲にかけての約半分においてデタッチメント断層の活動が見られるとしている (Escartin *et al.*, 2008)。すなわち、OCC は中央海嶺における普遍的な活動とも考えられつつある。

フィリピン海においても例外ではなく、現在の地球上で最大の露出面積を誇る OCC であるゴジラメガムリオン (Godzilla Megamullion; Ohara *et al.*, 2001) をはじめ、小規模の OCC が複数存在する。

ゴジラメガムリオンにおける岩石試料採集を目的とした航海は、1995 年以降、1998 年、2003 年、2007 年、2009 年、2011 年に実施され、ドレッジ調査及び潜航調査により、かんらん岩および斑れい岩、玄武岩などの海洋底を構成する岩石が大量に採集されてきた。しかし、ゴジラメガムリオンの斑れい岩に関する研究成果はほとんど報告されていない。

著者はゴジラメガムリオンにおいて数回にわたり実施された調査航海に参加し、斑れい岩類を対象に研究を行った。主たる目的は以下の通り。

1 ゴジラメガムリオンに産する斑れい岩類の記載：

背弧海盆拡大によって形成された OCC の斑れい岩類の詳細な報告はほとんどないことから、斑れい岩類の記載岩石学的・鉱物学的、地球化学的特徴を明らかにすることは重要である。さらに中央海嶺の OCC に産する斑れい岩類との比較を行い、背弧海盆の OCC に産する斑れい岩類の特徴を明らかにする。

2 ゴジラメガムリオンに産する斑れい岩類の生成過程の解明：

ゴジラメガムリオンでは数種類の斑れい岩が確認されている。全岩化学組成と鉱物化学組成、さらに熱力学計算モデル化プログラム「MELTS」を用いてマグマの分化プロセスを推定し、その生成過程を解明する。

3 ゴジラメガムリオンの形成について：

現在、地形学的研究、年代学的研究、かんらん岩の岩石学的研究およびかんらん岩

と斑れい岩類の変形過程からゴジラメガマリオンの形成史が議論されている。斑れい岩類の成因を考慮することでゴジラメガマリオンの形成についての議論を深める。

以上の目的を明らかにするため、本論では、①ゴジラメガマリオンに産する斑れい岩類の記載岩石学的特徴を明らかにすること、②ゴジラメガマリオンに産する斑れい岩類の鉱物学的特徴を明らかにすること、③ゴジラメガマリオンに産する斑れい岩類の地球化学的特徴を明らかにすること、④斑れい岩類の生成過程を明らかにすること。以上4つの観点から研究を行い、これらの結果に基づきゴジラメガマリオンの形成モデルについての考察を行う。

2. パレスベラ海盆の研究史

フィリピン海は、古伊豆－マリアナ弧の背弧に位置しており、大きく分けて3回の背弧海盆拡大によって形成された (Fig. I-2)。すなわち、49 - 39Ma の西フィリピン海盆の拡大 (Taylor and Goodliffe, 2004)、29 - 12Ma の四国海盆からパレスベラ海盆の拡大 (Okino *et al.*, 1998, Ohara *et al.* 2003a)、6Ma- 現在にかけてのマリアナトラフの拡大である。しかし、近年のゴジラメガマリオンの研究からは、パレスベラ海盆の拡大が 7Ma 程度まで継続していたことが判明している (Tani *et al.*, 2011, 投稿準備中, Ishizuka *et al.*, 2004)。

パレスベラ海盆は、パレスベラリフト (Mrozowski and Hayes, 1979) と呼ばれる拡大軸の拡大により、2回のステージに分かれて発達したと考えられている。すなわち、29 ~ 21Ma にかけて東西方向に 8.8cm/y で高速拡大したステージと (Okino *et al.*, 1998)、19 ~ 12Ma にかけて北東－南西方向に 7cm/y で中速拡大したステージである (Ohara *et al.*, 2001) (Fig. I-3)。このパレスベラ海盆の南部 (北緯 15 ~ 16.5°、東経 138.5 ~ 139.5°付近) には、海洋コアコンプレックスのゴジラメガマリオンが発達する (小原ほか, 2001)。

パレスベラ海盆の拡大軸に相当するパレスベラリフトは、北東 - 南西方向に発達するトランスフォーム断層によってセグメント化されており、南から S1 (セグメント1の意味)、S2、S3、S4、S5、S6、S7 までが確認されている (Kasuga and Ohara, 1997; Ohara *et al.*, 2001; Okino *et al.*, 1998, 1999; Fig. I-3)。これらのセグメントのうち、S1 ~ S4 にかけての拡大軸の南側において OCC が確認されている (Ohara, 2006)。本研究の対象海域となるゴジラメガマリオンは S1 の南側に発達する。なお、大西洋中央海嶺における OCC は一般的に拡大軸とトランスフォーム断層が直交する角に形成されるが、パレスベラリフトにおいてはセグメントの全長にわたって発達することが特徴的である (小原, 2012)。

ゴジラメガマリオンの東には、高速拡大時期に形成されたかつての OCC 群と考えられているカオステレーン (Chaotic Terrain) が分布する (小原ほか, 2001; Ohara *et al.*, 2007b) (Fig. I-3)。カオステレーンは、地震波の解析からも表面近くに斑れい岩に相当すると思われる岩石が分布することが確認されている (Ohara *et al.*, 2007b)。また、その表面からはかんらん岩が採集されている (Ohara *et al.*, 2003b)。

3. ゴジラメガマリオンの研究史

1) ゴジラメガマリオンの構造地形区分

ゴジラメガマリオンは、非常に巨大で長軸 125 km、短軸 55km もの大きさがある。研究が進むにつれ、「ゴジラメガマリオン」の単一名称だけでは記載を行うことが難しくなった。そこで、ゴジラメガマリオンを構成する単位の地形 (主に高まり) について、「ゴジラ」の名称にちなんだ 14 の個別名称をつけた (Ohara and Snow, 2009; Fig. I-4)。同時に Breakaway から Termination にかけて、末端部 (distal part)、中部 (medial part)、近接部 (proximal part) の 3 つに地形区分をして記載を行うこともある。

2) 地震波速度による構造解析

地震波速度による地下構造解析は、Ohara *et al.*, (2007b) によるカオステレーンの研究成果は既に述べたが、ゴジラメガマリオン本体においても実施されている。田中ほか (2007) は、ゴジラメガマリオンの長軸方向 (SPr6) と、これに直交する 2 測線 (SPr8, SPr9) において海底地震計を設置し観測を行った。なお、SPr8 は West Arm Rise から Back Bone Rise、East Arm Rise を通る測線、SPr9 は West Leg Ridge から North Tail Rise、East Leg Ridge を通る測線に相当する。田中ほか (2007) では、地下物質に関する議論は行っていない。その後、Ohara and Snow (2009) によって、地質学的な解釈が加えられた。ゴジラメガマリオンは地質学的調査から、水平方向にわたり地殻が不均質で、かんらん岩が支配的に分布する地域と斑れい岩が支配的に分布する地域とが確認されている。地震波の結果も広範囲にわたって不均質であることを示唆しており、比較的地震波が高速な地域が proximal part にあること、このような特徴はケーンメガマリオンの観測事実とも一致するという見解が得られている (Fig. I-5)。

3) かんらん岩の岩石学的研究

かんらん岩の岩石学的研究については、Ohara *et al.* (2003a)、Snow *et al.* (投稿準備中) で報告されている。

Ohara *et al.* (2003a) はかんらん岩を F-type、P-type、D-type の 3 種類の岩相に区分した。F-type (fertile-type) はレルゾライトおよびハルツバージャイトから構成され、含まれるク

ロムスピネルの #Cr ($\text{Cr}/(\text{Cr}+\text{Al})$) は 0.17 前後であり、最も肥沃な海洋底かんらん岩の組成とほぼ一致する。後に小原 (2012) によって、F-type の大部分はレルゾライトであると再検討がなされている。P-type (Plagioclase bearing-type) は、充填組織を示す斜長石を含むハルツバージャイトで、ゴジラメガムリオンおよびパレスベラリフトにおける存在の割合が高いとされている。D-type (Dunite-type) はダナイトで構成され、ゴジラメガムリオンおよびパレスベラリフトにおける存在の割合が最も高いとされている。その成因は、F-type が部分融解度の低い残留岩としてのかんらん岩、D-type が上部マントル中のメルトの抽出チャンネル、P-type が F-type に大量のメルトが浸透的に反応して形成したものと解釈されている。小原 (2012) では、これらのデータを他の OCC と比較し、分融解度の低い F-type の存在と P-type が大量に存在することから、超低速拡大海嶺の南西インド洋海嶺 (Dick *et al.*, 2003) や冷たいマントルのドメインが想定されている赤道大西洋中央海嶺の Romanche 断裂帯 (Seyer and Bonatti, 1997) と類似することを指摘した。

Snow *et al.* (投稿準備中) は、末端部 (distal part)、中部 (medial part)、近接部 (proximal part) のそれぞれに産するかんらん岩のクロムスピネル中の #Cr と TiO_2 含有量の対比を行った。その結果、末端部 (distal part) は #Cr が高いことからマントルの部分融解度が高かったこと、中部 (medial part) では #Cr が低いことからマントルの部分融解度が小さく、より肥沃なかんらん岩が存在すること、近接部 (proximal part) では TiO_2 含有量が高いことからかんらん岩がメルトと反応していたこと (Ohara *et al.*, 2003a の P-type の生成) を指摘している。この議論から、ゴジラメガムリオンの形成が、中速拡大から低速拡大、超低速拡大に変化したと解釈した (Ohara *et al.*, 2010; Ohara *et al.*, 2011a; Snow *et al.*, 投稿準備中)。

4) 斑れい岩の岩石学的研究

斑れい岩類については、Ohara *et al.* (2003a) と山下・小原 (2011) で若干の報告がなされている。

Ohara *et al.* (2003a) はゴジラメガムリオンの East Shoulder Ridge で行ったドレッジ調査で採集された斑れい岩について、岩石記載と単斜輝石と斜長石の化学分析を行った。なお、単斜輝石についてはイオンプローブによる希土類元素の分析も行っている。記載岩石学的報告では、斑れい岩が主に単斜輝石、斜長石から構成され、まれにカンラン石を含むこと、赤茶色の角閃石が初生的および単斜輝石の周縁部に生成していることなどを報告している。単斜輝石の化学組成からは、かんらん岩の単斜輝石と比べて明らかに分化していることを指摘。斜長石の An 値は 20-50 程度であることを報告している。

山下・小原 (2011) は、本研究論文の基礎となるべき報告であり、後述する YK11-08 航海で採集した試料を除いた斑れい岩類についての報告である。山下・小原 (2011)

では、Streckeisen (1976) による斑れい岩類の分類に基づいて、トロクトライト、カンラン石斑れい岩、斑れい岩、ホルンブレンド輝石斑れい岩、輝石ホルンブレンド斑れい岩、ホルンブレンド斑れい岩とトロニウム岩に区分した。また、区分した斑れい岩ごとに鉱物の化学組成を示し、さらに採集地点ごとの斑れい岩類の割合も示し、活動の初期では初生的な斑れい岩が、後期は分化した斑れい岩が多く見られることを指摘し、このことからゴジラメガマリオン形成に伴い、斑れい岩のマグマがより分化していくと考えた。

5) 斑れい岩類の構造岩石学的研究

Harigane *et al.* (2008) では末端部 (distal part; West Leg Ridge) にて、Harigane *et al.* (2010) では近接部 (proximal part; West Arm Rise) にて、Harigane *et al.* (2011) では中部 (medial part; West Hipbone Rise) にて採集された、変形が見られる斑れい岩類について解析を行った。末端部の変形された斑れい岩類は、地殻深部の 850 °C の比較的高温下で塑性変形を受け、続いてデタッチメント断層から浸透された流体が存在する 560 °C で後退変成作用および延性剪断変形を受けたことで形成されたことを明らかにした (Fig. I-6)。中部および近接部の変形をうけた斑れい岩類も同様の成因と考えられている。

6) 斑れい岩類および玄武岩類の年代学的研究

ゴジラメガマリオンに産する斑れい岩類からジルコンの U-Pb 年代が (Tani *et al.*, 2011)、また Abyssal hill およびゴジラメガマリオン、セグメント 1 (Head Peak) から採集したアルカリ玄武岩の Ar-Ar 年代が報告されている (Ishizuka *et al.*, 2004) (Fig. I-7)。

斑れい岩およびトロニウム岩から抽出したジルコンの U-Pb 年代は、Breakaway のすぐ北側に相当する末端部 (distal part; West Leg Ridge, East Leg Ridge) の斑れい岩類で約 13 Ma、中部 (medial part; West Hipbone Rise) の斑れい岩類およびトロニウム岩で 11 Ma、Termination に近い近接部 (proximal part; West Arm Rise) のトロニウム岩で約 8.7Ma を示した (Tani *et al.*, 2011)。年代と地形 (距離) との関係から、ゴジラメガマリオンの露出速度を 2.5 cm/y とした。一方、玄武岩の Ar-Ar 年代は、Breakaway のすぐ南の abyssal hill の玄武岩が約 16 Ma、ゴジラメガマリオン内の East Arm Rise および Neck Peak の玄武岩がそれぞれ、約 10.6 Ma、8.5 Ma、セグメント 1 (Head Peak) のアルカリ玄武岩が約 4.8 Ma であった (Ishizuka *et al.*, 2004)。ゴジラメガマリオン内のジルコンの U-Pb 年代と玄武岩の Ar-Ar 年代は、年代と地形の相関が一致した。abyssal hill の玄武岩が約 16 Ma と古いのは、abyssal hill の玄武岩の形成後、Breakaway の形成後までに 2 m.y. 程度の間隙があったと解釈している (石塚・谷, 私談)。セグメント 1 (Head Peak) のアルカリ玄武岩の形成年代である約 4.8 Ma は、ゴジラメガマリオン

の形成 (12 Ma) 後に約 7 m.y. の活動のハイエイタスを経て、再び活動した火成活動と解釈した (Ishizuka *et al.*, 2004)。しかし、2011 年の YK11-08 航海で採集された West Shoulder Ridge の斑れい岩のジルコンの U-Pb 年代が 8.4 Ma であったこと (Tani *et al.*, 投稿準備中) と地形との関係から、ゴジラメガムリオンの形成の最終期には、拡大速度がさらに遅くなり、超低速拡大となって最後に 4.8 Ma にアルカリ玄武岩の活動を起こして活動を終了したと解釈されている (小原, 2012)。

4. ゴジラメガムリオンにおける調査航海概要

ゴジラメガムリオンでは、これまでに深海調査研究船「かいれい」による包括的ドレッジ調査 (KR98-01 航海および KR03-01 航海 (Ohara *et al.*, 2003b, c))、学術研究船「白鳳丸」による包括的ドレッジ調査 (KH07-2-Leg2 & Leg4 航海 (Ohara *et al.*, 2007a))、深海潜水調査船支援母船「よこすか」による有人潜水調査船「しんかい 6500」を用いた潜航調査ならびに深海曳航調査システム「よこすかディートウ」を用いた無人探査 (YK09-05 航海 (Ohara *et al.*, 2009) および YK11-08 航海 (Ohara *et al.*, 2011b)) がなされてきた (Table 1)。これらの調査を通して、ゴジラメガムリオン全体から、かんらん岩類、斑れい岩類、玄武岩類が採集された。なお、著者は前述の航海のうち、KR98-01 航海以外の調査航海に参加して試料の採集を行った。

ドレッジ調査および潜航調査を行う場合、いずれも海底地形の比較的急峻な崖をターゲットとする。ゴジラメガムリオンにおいては、パレスベラリフトのセグメント 1 とセグメント 2 を切るトランスフォーム断層に沿って、すなわち West Leg Ridge、West Hipbone Rise、West Arm Rise、West Shoulder Ridge にかけて、比較的急峻な崖が形成されているために、これらの西端において連続的な調査を行った。

ゴジラメガムリオンにおける岩石の採集状況は一樣ではなく、地形構造区分ごとに特徴が見られる。すなわち、活動初期 (distal part) の、West Leg Ridge や East Leg Ridge では、採集された斑れい岩類の割合が高く、中期 (medial part) の West Hipbone Rise や North Tail Rise ではかんらん岩類の割合が高く、後期 (proximal part) では West Arm Rise など初期でかんらん岩類の割合が高いものの、West Shoulder Ridge などの後期に向かうにつれ斑れい岩類の割合が増す傾向が見られる (Fig. I-8)。また、Backbone Rise や Neck Peak などのゴジラメガムリオンの中央部では玄武岩類の活動が多く見られる傾向がある。

謝 辞

本研究をすすめるにあたり、横浜国立大学環境情報研究院 有馬 眞教授には本項作成に至るまで、終始ご指導ならびにご援助頂いた。横浜国立大学の有馬 眞教授（主査）をはじめ、委員としてお世話になった間島隆一教授、石川正弘教授、和仁良二准教授、小原泰彦博士（海上保安庁海洋情報部）による数々のご指摘により、本論文は著しく改善された。

すべての調査航海において主席研究員として乗船し、研究面から船上生活、下船後のワークショップの開催等でお世話になった小原泰彦博士には特別にお礼を申し上げたい。また、調査航海では、東京大学大気海洋研究所の沖野郷子准教授、深田地質研究所の石井輝秋博士、ヒューストン大学の Jonathan E. Snow 博士、独立行政法人産業技術研究所の石塚 治博士、専修大学の佐藤 暢准教授、独立行政法人産業技術研究所の針金由美子博士、ウッズホール海洋研究所の Henry J. B. Dick 博士、静岡大学の道林克禎教授、ヒューストン大学の Wendy Nelson 博士をはじめ、KR03-01 航海、KH07-02 航海、YK09-05 航海、YK11-08 航海で乗船された研究者の方々、独立行政法人海洋研究開発機構（JAMSTEC）の船員の方々にはたいへんお世話になった。

ゴジラメガマリオンに関するワークショップにおいては、乗船された研究者の方々に加え、独立行政法人海洋研究開発機構の谷 健一郎博士、阿部なつ江博士、金沢大学の森下知晃教授には有益な議論をしていただいた。

本研究において 熱力学計算モデル化プログラム「MELTS」を使用するにあたり、法政大学第二中・高等学校の五十嵐聡博士にお世話になった。またモデル計算の出発物質の化学組成は、独立行政法人産業技術研究所の石塚 治博士および専修大学の佐藤 暢博士に提供していただいた。神奈川県温泉地学研究所の萬年一剛博士には、鉱物の EPMA 分析でお世話になった。

所属する神奈川県立生命の星・地球博物館の斎藤靖二館長はじめ、地球環境グループの、平田大二学芸部長、新井田秀一チームリーダー、笠間友博主任研究員、石浜佐栄子学芸員には、論文作成のための時間を融通していただいた。また、樽 創博士には、博士論文執筆についてのアドバイスを頂いた。

神奈川県立生命の星・地球博物館の地学ボランティアの、入江和夫氏、蛭子貞二氏、可知鋭治氏、児玉正彦氏、酒井明子氏、新藤誠一郎氏、富田道恵氏、中村 良氏、深澤良子氏には、試料整理、岩石薄片の作成、分析試料作成などでお世話になった。

以上の方々に深く感謝する。

II. ゴジラメガムリオンに産出する斑れい岩類の記載岩石学的研究

1. はじめに

本章では、これまでに採集した斑れい岩類について、岩石薄片の観察に基づく岩石記載を行うことを目的とした。さらに記載岩石学的結果から得られた斑れい岩類の産出状況を把握し、大西洋中央海嶺および南西インド洋中央海嶺のメガムリオンとの対比を行うことで、ゴジラメガムリオンに産出する斑れい岩類の特徴を明らかにすることを目的とした。

2. ゴジラメガムリオンにおける斑れい岩類の産出状況

ゴジラメガムリオン内における KR98-01 航海を除くトータル 39 地点のサンプリングのうち、斑れい岩類は 16 地点で採集された (Table 2, Fig. II-1)。これらのうち、比較的まとまって採集ができたのは、West Leg Ridge (KR03-01 D06, YK09-05 6K#1147)、East Leg Ridge (KH07-02 D14)、West Hipbone Rise (KH07-02 D18)、West Arm Rise (KR03-01 D09, D10, KH07-02 D25, YK09-05 6K#1140, 6K#1141)、West Shoulder Ridge (YK08-11 6K#1270, YKDT#115, YKDT#116)、Neck Peak (YK11-08 6K#1275, 6K#1276) であった。なお、North Tail Rise の KH07-02 D07 の試料は比較的小型の火山岩 (ドレライト) であったこと、West Leg Ridge の KH07-02 D17 の試料は変質の著しい珪長質岩であったことから研究の対象から外した。ドレッジ調査および深海曳航調査システム「よこすかディートゥ」を用いた調査では、比較的小容量の試料が多数採集されることが多い。この場合、調査地点に分布する岩石の構成種を知る上では重要である。小容量の試料の場合は、岩石薄片を作成して鉱物組み合わせおよび鉱物の化学組成を決定するのに用いることが多く、半分程度は全岩化学分析に耐える試料の容量がない。しんかい 6500 を用いた潜航調査では、採集される試料数は少ないが、10 kg を超える大容量の試料が採集できる。この場合、1 試料中に細粒な岩相や粗粒な岩相、もしくは優白質な岩相と優黒質な岩相など複数の岩相を有することがあり、1 試料でも岩石薄片および全岩化学組成の分析点数が複数にまたがる (あるいは枝番) ことがある。Table 2 では、各調査地点で採集された試料を、点数のみならず重量でも表現してある。

3. 斑れい岩類の分類

斑れい岩類は、Streckeisen (1976) による、斜長石－カンラン石－輝石および、斜長石－輝石－ホルンブレンドによる区分に基づき分類を行った。ゴジラメガムリオンの斑れい岩類は、後述するがカンラン石の含有量が圧倒的に低いため、斜長石－カンラン石－輝石の分類では、ほとんどが斑れい岩／ノーライト／斑れいノーライトに区分されて

しまう。そこで、斜長石－カンラン石－輝石の比率でカンラン石の含有量が 5 vol.% 以上の斑れい岩類については、斜長石－カンラン石－輝石の区分を用いて、トロクトライトとカンラン石斑れい岩に分類、それ以外の斑れい岩類について斜長石－輝石－ホルンブレンドによる区分に基づき分類を行った (Table 3, 4, 5)。以下にモード組成に基づく、ゴジラメガマリオンの斑れい岩類の分類結果を記述する。

ゴジラメガマリオンの斑れい岩類は、斜長石－カンラン石－輝石の区分によるトロクトライト (優白質トロクトライトとトロクトライト)、カンラン石斑れい岩に、斜長石－輝石－ホルンブレンドの区分による、斑れい岩 (斑れい岩と優白質斑れい岩)、ホルンブレンド輝石斑れい岩、輝石ホルンブレンド斑れい岩、ホルンブレンド斑れい岩 (ホルンブレンド斑れい岩と優白質ホルンブレンド斑れい岩) に区分した。さらに、斑れい岩類と漸移的に産出、あるいは貫入する優白質の花崗岩質岩についてはトロニウム岩として区分した。なお、ホルンブレンド輝石斑れい岩、輝石ホルンブレンド斑れい岩、ホルンブレンド斑れい岩の斜長石の An 値 ($\text{Ca}/(\text{Ca}+\text{Na})\times 100$) は 50 を下まわる。さらにモード組成で斜長石の割合がかなり高い斑れい岩類も見られ、これらは厳密に区分すると閃緑岩に区分される。しかし、本論ではあえて斑れい岩類として区分することにする。また、ホルンブレンド輝石斑れい岩、輝石ホルンブレンド斑れい岩、ホルンブレンド斑れい岩には、鉄酸化物鉱物の含有量が、ほとんど含まないものから、最大 20 vol.% 程度含むものまで連続的に産する。多量の鉄酸化物鉱物を含む斑れい岩類は、Oxide gabbro と区別されることがあるが、含有量が連続的であるためにあえて区分はせず、Oxide gabbro という用語は使用しない。なお、本論ではチタン鉄鉱と磁鉄鉱を一括して“鉄酸化物鉱物”と記述する。

1) East Leg Ridge の斑れい岩類

East Leg Ridge (ELR と略す) からは、KH07-02 D14 のみで斑れい岩類が採集された。ELR の斑れい岩類はカンラン石をほとんど含まないことから、トロクトライトおよびカンラン石斑れい岩は産出しない。Streckeisen (1976) の斜長石－輝石－ホルンブレンドに基づく分類では、斑れい岩、ホルンブレンド輝石斑れい岩、輝石ホルンブレンド斑れい岩、ホルンブレンド斑れい岩に区分された (Fig. II-2)。

2) West Leg Ridge の斑れい岩類

West Leg Ridge (WLR と略す) においては、KR03-01 D06、YK09-05 6K#1147 から斑れい岩類が採集された。調査地点および調査深度に大差がないにもかかわらず、YK09-05 6K#1147 からは比較的カンラン石を含む斑れい岩類が、KR03-01 D06 からはカンラン石をほとんど含まない斑れい岩が採集された。YK09-05 6K#1147 の斑れい岩

類は、いずれもカンラン石を含むが、その量比からトロクトライト、カンラン石斑れい岩のいずれもかに分類される (Fig. II-3)。また、Streckeisen (1976) の斜長石－輝石－ホルンブレンドに基く分類では、YK09-05 6K#1147 の斑れい岩類1点が斑れい岩に区分され、KR03-01 D06 の斑れい岩類は、ホルンブレンド輝石斑れい岩、輝石ホルンブレンド斑れい岩、ホルンブレンド斑れい岩に区分された (Fig. II-3)。YK09-05 6K#1147 で採集された試料は変形が見られなかったが、KR03-01 D06 で採集された試料は変形が著しい。

3) West Hipbone Rise の斑れい岩類

West Hipbone Rise (WHR と略す) からは、KH07-02 D18 のみで斑れい岩類が採集された。WHR の斑れい岩類はカンラン石をわずかに含み、1 点のみが斜長石－カンラン石－輝石の比率でカンラン石の含有量が 5 vol. % を越えたためにカンラン石斑れい岩に分類された (Fig. II-4)。残りの試料は、Streckeisen (1976) の斜長石－輝石－ホルンブレンドに基く分類でホルンブレンド輝石斑れい岩、輝石ホルンブレンド斑れい岩に区分された (Fig. II-4)。比較的ホルンブレンド輝石斑れい岩の割合が高いのが特徴的である。ホルンブレンド斑れい岩は確認されず、トロニウム岩が採集されている。ほぼすべての斑れい岩類が変形を受けているが、トロニウム岩には変形を受けていない試料も見られた。

4) West Arm Rise の斑れい岩類

West Arm Rise (WAR と略す) からは、KR03-01 D09, D10、KH07-02 D25、YK09-05 6K#1140, 6K#1141 で斑れい岩類が採集された。KR03-01 D10 および YK09-05 6K#1141 で採集された斑れい岩類は、カンラン石をほとんど含まず、また輝石の割合も低いことから、Streckeisen (1976) の斜長石－輝石－ホルンブレンドに基く分類では、輝石ホルンブレンド斑れい岩とホルンブレンド斑れい岩に区分された (Fig. II-5)。KR03-01 D09、KH07-02 D25、YK09-05 6K#1140 からはトロニウム岩のみが採集された。ほぼすべての斑れい岩類が変形を受けているが、トロニウム岩には変形を受けていない試料も見られた。

5) West Shouldr Ridge の斑れい岩類

West Shoulder Ridge (WSR と略す) からは、YK08-11 6K#1270, YKDT#115, YKDT#116 で斑れい岩類が採集された。WSR の斑れい岩類はカンラン石をほとんど含まないことから、トロクトライトおよびカンラン石斑れい岩は産出しない (Table 5, Fig. II-6)。Streckeisen (1976) の斜長石－輝石－ホルンブレンドに基く分類では、ホルンブレ

ンド輝石斑れい岩、輝石ホルンブレンド斑れい岩、ホルンブレンド斑れい岩に区分された (Fig. II-6)。採集された斑れい岩類には、著しい変形は見られなかった。

6) Neck Peak の斑れい岩類

Neck Peak (NP) からは、YK08-11 6K#1275, 6K#1276 であわせてわずか 4 点であるが斑れい岩類が採集された。Neck Peak の斑れい岩類はカンラン石をほとんど含まないことから、トロクトライトおよびカンラン石斑れい岩は産出しない (Table 5, Fig. II-6)。Streckeisen (1976) の斜長石－輝石－ホルンブレンドに基く分類では、斑れい岩、ホルンブレンド輝石斑れい岩に区分された (Fig. II-6)。Neck Peak の斑れい岩については、岩石学的記載のみを行い、鉱物学的、地球化学的研究は行っていない。

4. 斑れい岩類の岩石学的記載

Streckeisen (1976) に基づいて分類した斑れい岩類について、その岩石学的特徴を以下に記述する。また、斑れい岩類の構成鉱物のまとめを Fig. II-8 に示す。

1) トロクトライト

トロクトライトは breakaway の近傍の WLR (YK09-05 6K#1147) でのみ産出する。等粒状組織を呈し、斜長石、カンラン石、まれに単斜輝石や斜方輝石、角閃石から構成され、cumulate 組織が見られる (Fig. II-9)。斜長石は短柱状の自形で最大 8 mm 程度。カンラン石は最大 1 mm 程度の紡錘状の自形結晶として産する。単斜輝石は斜長石やカンラン石の粒間を埋める interstitial 組織を呈する。カンラン石はしばしば変質によりイデイングサイト化している。斜長石は非常に新鮮。変形作用はほとんど受けていない。角閃石はまれに単斜輝石の周縁部に生じる。鉄酸化物鉱物はほとんど含まない。モード組成は、斜長石が 70.1 - 85.8 vol.%、カンラン石が 14.3 - 25.5 vol.%、単斜輝石が 0 - 2.9 vol.%、斜方輝石が 0 - 0.3 vol.%、角閃石が 0 - 1.5 vol.% であった。

2) カンラン石斑れい岩

カンラン石斑れい岩は breakaway の近傍の Distal Part の WLR (YK09-05 6K#1147) と Medial Part の WHR で採集された。

WLR のカンラン石斑れい岩はトロクトライトと同じ潜航で採集された。等粒状組織を呈し、斜斜長石、カンラン石、単斜輝石、わずかに斜方輝石や鉄酸化物鉱物から構成され、cumulate 組織が見られる (Fig. II-10)。斜長石は長柱状で最大 3 mm 程度、カンラン石は紡錘状で最大 2 mm 程度、単斜輝石は最大 4 mm 程度で斜長石やカンラン石の粒間を埋める interstitial 組織を呈する。角閃石は単斜輝石の周縁部に生じる。カンラン石

はしばしば変質によりイデイングサイト化している。斜長石は新鮮。ほとんどの試料で未変形だが、1点だけ著しい変形作用をうけ、微細な斜長石やキンクバンドをもつ斜長石、porphyroclast の単斜輝石が含まれる試料が見られた。モード組成は、斜長石が 34.4 - 76.8 vol.%、カンラン石が 4.4 - 10.9 vol.%、単斜輝石が 8.4 - 59.9 vol.%、斜方輝石が 0 - 1.0 vol.%、角閃石が 0.1 - 15.4 vol.%、鉄酸化物鉱物が 0.1 - 0.6 vol.% であった。

WHR ではカンラン石斑れい岩が 1 点のみ確認された。WHR の試料は変形作用の影響が激しく、カンラン石のほとんどがイデイングサイト化していた。WHR の斑れい岩類は、カンラン石が変質により失われてしまうことでその割合が低くなることに加えて、角閃石の割合が極めて高いために、ホルンブレンド輝石斑れい岩もしくは輝石ホルンブレンド斑れい岩に分類される。その結果、カンラン石斑れい岩に区分されたのは 1 点だけであった。WHR のカンラン石斑れい岩は、最大で 8 mm 程度の比較的大きな長柱状の斜長石に加え、変形により生じた 0.2 - 0.5 mm 程度の微小な斜長石が大量にみられる。角閃石は自形もしくは単斜輝石の周縁部に生じる。モード組成は、斜長石が 52.1 vol.%、カンラン石が 4.3 vol.%、単斜輝石が 18.0 vol.%、角閃石が 18.3 vol.%、鉄酸化物鉱物が 3.6 vol.% であった。

3) 斑れい岩

斑れい岩は、breakaway に比較的近い Distal Part の ELR (KH07-02 D14) および WLR(YK09-05 6K#1147) と、NP (YK11-08 6K#1276) から採集された。

ELR の斑れい岩は、斜長石、単斜輝石、斜方輝石で構成され、まれにカンラン石や角閃石を含む。斜方輝石は含まれないこともある。組織は等粒状組織を呈し、cumulus 鉱物の自形の長柱状の斜長石を intercumulus 鉱物の単斜輝石もしくは斜方輝石が埋める (Fig. II-11)。粒径はいずれの鉱物も最大 10 mm とかなり粗粒である。新鮮で変形はほとんど受けていない。単斜輝石の周辺部は角閃石に置換されていることがある。モード組成は、斜長石が 61.1 - 75.5 vol.%、単斜輝石が 20.8 - 34.0 vol.%、斜方輝石が 0.4 - 8.3 vol.%、角閃石が 0 - 2.1 vol.%、カンラン石が 0 - 0.4 vol.%、鉄酸化物鉱物が 0 - 0.6 vol.% 程度であった。

WLR の斑れい岩は、斜長石、単斜輝石、斜方輝石、角閃石とごく少量のカンラン石で構成される。岩相は WLR の同じ潜航 (6K#1147) で採集されたトロクトライトと非常に似ているが、カンラン石の割合が少ないために斑れい岩に区分された。組織は等粒状組織を呈し、cumulus 鉱物の自形の斜長石を、intercumulus 鉱物の単斜輝石もしくは斜方輝石が埋める。鉱物の粒径は 5 mm 程度。単斜輝石の周縁部は角閃石に置換されていることがある。鉄酸化物鉱物は含まない。モード組成は、斜長石が 68.9 vol.%、単斜輝石が 22.9 vol.%、斜方輝石が 5.4 vol.%、カンラン石が 2.9 vol.% であった。

NP の斑れい岩は、斜長石、単斜輝石、単斜輝石の周縁部に生じたごく少量の角閃石および鉄酸化物鉱物で構成される。しかし、WLR や ELR の斑れい岩とは異なり cumulate 組織は見られず、変形により形成された 0.2 - 0.5 mm 程度の微小な斜長石が大量にみられる。モード組成は、斜長石が 39.8 vol.%、単斜輝石が 37.5 vol.%、角閃石が 0.9 vol.%、鉄酸化物鉱物が 7.5 vol.% であった。

4) ホルンブレンド輝石斑れい岩

ホルンブレンド輝石斑れい岩は、ELR (KH07-02 D14) と WLR(KR03-01 D6)、WHR (KH07-02 D18)、WSR (YK11-08 6K#1270, YKDT#116)、NP (YK11-08 6K#1275) で採集された。つまり、WAR 以外で採集されたことになる。いずれも斜長石、単斜輝石、角閃石、鉄酸化物鉱物から構成され、まれに斜方輝石やカンラン石を含む。ただし、採集地点によって鉱物の量比や岩相が大きく異なる。

ELR のホルンブレンド輝石斑れい岩は、斜方輝石の有無から、カンラン石－斜長石－輝石の区分 (Streckeisen, 1976) による斑れい岩と斑れいノーライトがあることになる。cumulus 鉱物の自形の斜長石を、intercumulus 鉱物の単斜輝石もしくは斜方輝石が埋める。角閃石は輝石類を置換して生じており、パーガス閃石から普通角閃石の組成と緑色で針状のアクチノ閃石とがある。モード組成は、斜長石が 46.3 - 53.0 vol.%、単斜輝石が 22.3 - 28.1 vol.%、角閃石が 11.5 - 16.6 vol.%、斜方輝石が 2.0 - 8.0 vol.%、鉄酸化物鉱物が 0.1 - 10.9 vol.% でカンラン石は含まない。大半の試料が鉄酸化物鉱物を 5 vol.% 以上含むのが特徴的である。

WLR のホルンブレンド輝石斑れい岩は、非常に細粒で平均粒径は 0.2 mm 程度、最大でも 0.5 mm 程度で、フォリエーションが発達している (Fig. II-12)。モード組成は、斜長石が 46.3vol.%、単斜輝石が 28.1 vol.%、角閃石が 11.5 vol.%、斜方輝石が 4.5 vol.%、鉄酸化物鉱物が 9.6 vol.% で、カンラン石も含まれる。この試料はホルンブレンド輝石斑れい岩よりもむしろ粗粒玄武岩に区分したほうが良いのかもしれない。

WHR のホルンブレンド輝石斑れい岩は変形作用を受けているのが特徴で、0.2 - 0.5 mm 程度の微細な斜長石が多量に見られ (Fig. II-13)、一部はマイロナイトに達する。一部に cumulate 組織が見られるが、変形により明瞭でなくなっている。自形の斜長石は最大 3 mm 程度。単斜輝石は最大 3 mm 程度で周辺部もしくはすべてが角閃石に置換されている。自形の角閃石はごくまれで、色は茶色もしくは緑色。カンラン石は変質により著しくイデイングサイト化されていることが多い。モード組成は、斜長石が 59.6 - 67.6 vol.%、単斜輝石が 11.8 - 20.6 vol.%、角閃石が 4.5 - 16.8 vol.%、斜方輝石が 0.5 - 3.5 vol.%、鉄酸化物鉱物が 0.1 - 9.9 vol.%、カンラン石が 0 - 2.5 vol.%。

WSR のホルンブレンド輝石斑れい岩は粗粒な岩相と細粒な岩相に分けられる。細粒

な岩相はフォリエーションが見られ、モード組成は斜長石が 50.1 vol.%、単斜輝石が 22.1 vol.%、角閃石が 15.1 vol.%、鉄酸化物鉱物が 12.6 vol.% であった。大量の鉄酸化物鉱物を含むことで特徴的づけられる。粗粒な岩相では cumulate 組織が見られ、多量の鉄酸化物鉱物を含む試料や、カンラン石や斜方輝石をわずかに含む試料など様々である。一部に弱い変形作用により 0.2 - 0.5 mm 程度の微細な斜長石を生じていることがある。自形の斜長石は最大 10 mm を超える。単斜輝石は最大 5 mm 程度でしばしば周辺部が角閃石に置換されている。角閃石は単斜輝石の周縁部に生じるほかに、5 mm 程度の自形結晶として産することもある。モード組成は、斜長石が 43.4 - 75.9 vol.%、単斜輝石が 11.1 - 42.2 vol.%、角閃石が 7.3 - 14.3 vol.%、斜方輝石が 0 - 1.0 vol.%、カンラン石が 0 - 0.9 vol.%、鉄酸化物鉱物が 0.6 - 6.4 vol.% であった。

NP のホルンブレンド輝石斑れい岩は長柱状の斜長石と柱状の単斜輝石の自形結晶が目立ち、単斜輝石とカンラン石をわずかに含む。斜長石は最大で 6 mm 程度で変形により生じる微小な斜長石を含まない。単斜輝石は最大で 8 mm に達する。角閃石は 1 mm 以下で単斜輝石の周縁部に生じたり、微小な半自形の結晶として産したりする。モード組成は、斜長石が 57.5 - 67.8 vol.%、単斜輝石が 20.4 - 20.9 vol.%、角閃石が 6.6 - 14.4 vol.%、斜方輝石が 0.8 - 3.5 vol.%、カンラン石が 0 - 0.3 vol.%、鉄酸化物鉱物が 3.5 - 4.4 vol.% であった。

5) 輝石ホルンブレンド斑れい岩

輝石ホルンブレンド斑れい岩は、Neck Peak 以外の調査地点で採集された。ホルンブレンド輝石斑れい岩と同様に、斜長石、角閃石、単斜輝石、鉄酸化物鉱物から構成され、斜方輝石やカンラン石を含むことがある。ただし、採集地点によって鉱物の量比や岩相が大きく異なる。特に鉄酸化物鉱物の含有量は、0 ~ 20 vol.% と顕著な違いが見られる。また、同じ採集地点でも変形の程度は様々であった。

ELR (KH07-02 D14) の輝石ホルンブレンド斑れい岩は、変形作用により、微細な斜長石やキンクバンドをもつ斜長石を生成している。斜長石は最大 2 mm 程度。単斜輝石は角閃石に置換され、場合によっては結晶全体が置換される。cumulus 鉱物の自形の斜長石の粒間を、intercumulus 鉱物の単斜輝石が埋める cumulate 組織を有することが多い。単斜輝石には、10 mm を超える porphyroclast が見られる。鉄酸化物鉱物は極めて高い (Fig. II-16)。アクセサリ鉱物の燐灰石を多く含む試料もある。モード組成は、斜長石 39.6 - 65.9 vol.%、角閃石 14.9 - 42.5 vol.%、単斜輝石 3.4 - 16.5 vol.%、斜方輝石 0.1 - 5.1 vol.%、鉄酸化物鉱物 1.4 - 14.6 vol.%、燐灰石 0 - 0.4 vol.%。また、クロムスピネルを含むことがある。

WLR (KR03-01 D6) の輝石ホルンブレンド斑れい岩は、粗粒な岩相と細粒な

岩相を有する。粗粒な岩相は、最大 8 mm の cumulus 鉱物の斜長石の自形結晶と、intercumulus 鉱物の角閃石や単斜輝石から構成されることがある (Fig. II-14)。cumulate 組織を有する場合、変形作用の影響が弱く、微細な斜長石やキンクバンドをもつ斜長石は少なめである。自形の茶色の角閃石も見られる。鉄酸化物鉱物の含有量は極めて高い。モード組成は、斜長石 43.6 - 67.5 vol.%、角閃石 12.5 - 33.0 vol.%、単斜輝石 4.3 - 11.0 vol.%、斜方輝石 0 - 2.3 vol.%、鉄酸化物鉱物 2.5 - 20.4 vol.% であった。細粒な岩相は、粗粒な輝石ホルンブレンド斑れい岩の鉱物組み合わせを有したままその粒径だけを小さくしたものと、オフティック組織を持つものがある (Fig. II-15)。いずれもモード組成は粗粒な岩相と大差はない。細粒な岩相は輝石ホルンブレンド斑れい岩よりもむしろ粗粒玄武岩に区分したほうが良いのかもしれない。

WHR (KH07-02 D18) の輝石ホルンブレンド斑れい岩は、強い変形作用を受けているのが特徴的である。鉱物組み合わせは斜長石、角閃石、単斜輝石、鉄酸化物鉱物で、まれに斜方輝石やカンラン石を含む。著しい変形を受けている試料はマイロナイトに達する (Harigane *et al.*, 2008)。斜長石は最大 5 mm 程度で、微細な斜長石は 0.1 - 0.2 mm 程度。単斜輝石は 10 mm にも達する porphyroclast が見られ、周辺部は角閃石を生じる。角閃石は単斜輝石の周辺部以外にも、茶色の自形結晶として産するがまれである。モード組成は、斜長石が 47.6 - 62.9 vol.%、角閃石が 18.6 - 38.9 vol.%、単斜輝石が 6.8 - 14.0 vol.%、斜方輝石が 0 - 1.3 vol.%、カンラン石が 0 - 0.3 vol.%、鉄酸化物鉱物が 0 - 3.6 vol.% であった。

WAR (KR03-01 D10, YK09-05 6K#1141) の輝石ホルンブレンド斑れい岩は、著しく変形を受けており、変形によるフォリエーションが発達する。斜長石、角閃石、単斜輝石、鉄酸化物鉱物から構成され、斜方輝石を含むことがある。また、アクセサリー鉱物に燐灰石を含む試料もある。斜長石は最大で 5 mm 程度で、比較的大きな結晶ではキンクバンドが見られることが多い。単斜輝石は最大で 10mm にも達する porphyroclast と、比較的小さな結晶とがある。いずれも多くの場合周辺部に角閃石が生じている (Fig. II-17)。角閃石は単斜輝石の周辺部以外にも茶色の自形結晶として産する。モード組成は、斜長石が 31.6 - 58.3 vol.%、角閃石が 22.8 - 51.3 vol.%、単斜輝石が 0 - 15.8 vol.%、斜方輝石が 0 - 7.5 vol.%、鉄酸化物鉱物が 0 - 17.1 vol.% であった。WAR の輝石ホルンブレンド斑れい岩には、弱変形を受けながらも cumulate 組織を残す試料が2点ほどあった。鉱物組み合わせは同じである。

WSR (YK11-08 6K#1270, YKDT#116) の輝石ホルンブレンド斑れい岩は、岩相変化に富み、cumulate 組織や、やや弱い変形作用の影響が見られる。cumulate 組織が見られる場合、最大 4 mm 程度の cumulus 鉱物の斜長石の粒間を、最大 10 mm 程度の intercumulus 鉱物の単斜輝石や 1 mm 程度の角閃石が埋める。単斜輝石は大部分

が角閃石に置換されていることがある。微細な斜長石はわずかに見られる。モード組成は、斜長石が 52.0 - 62.8 vol.%、角閃石が 17.4 - 27.5 vol.%、単斜輝石が 9.0 - 11.1 vol.%、斜方輝石が 0 - 0.3 vol.%、鉄酸化物鉱物が 4.6 - 12.6 vol.% であった。変形作用を蒙っている試料では、いずれも自形の 2 mm 程度の斜長石、1 mm 程度の単斜輝石、1.5 mm 程度の角閃石からなり、鉄酸化物鉱物に富み、クロムスピネルを含むこともある。モード組成は、斜長石 68.3 - 75.6 vol.%、角閃石 8.8 - 28.0 vol.%、単斜輝石 0.5 - 7.5 vol.%、鉄酸化物鉱物 8.8 - 28.0 vol.%、クロムスピネル 0 - 5.0 vol.% であった。

6) ホルンブレンド斑れい岩

ホルンブレンド斑れい岩は、ELR (KH07-02 D14) と WLR(KR03-01 D6)、WAR (YK09-05 6K#1141)、WSR (YK11-08 YKDT#115) で採集された。いずれの鉱物組み合わせも、斜長石、角閃石で、わずかに単斜輝石や斜方輝石を含む。また、鉄酸化物鉱物の含有量は採集地点によって大きく異なる。

ELR のホルンブレンド斑れい岩は、変形の程度が弱く、長柱状の最大 4 mm の自形の斜長石の粒間を、角閃石や鉄酸化物鉱物が埋める。まれに単斜輝石やクロムスピネルを産することがある。モード組成は、斜長石が 60.0 vol.%、角閃石が 29.3 vol.%、単斜輝石が 2.4 vol.%、斜方輝石が 0.4 vol.%、鉄酸化物鉱物が 4.5 vol.%、クロムスピネルが 2.9 vol.% であった。

WLR のホルンブレンド斑れい岩は、粗粒で変形の程度は低い。斜長石は最大 8 mm の短柱状の自形結晶で cumulus 鉱物として産し、その粒間を intercumulus 鉱物の角閃石や鉄酸化物鉱物が埋める。また、最大 5 mm 程度の自形の角閃石も見られる。大部分が角閃石に置換された単斜輝石のほか、燐灰石、クロムスピネルも見られる。モード組成は、斜長石が 64.1 - 70.9 vol.%、角閃石が 25.6 - 27.9 vol.%、単斜輝石が 1.0 - 1.4 vol.%、斜方輝石が 0.3 vol.%、鉄酸化物鉱物が 2.4 - 4.8 vol.% であった。

WAR のホルンブレンド斑れい岩は、著しく変形されており、変形作用により生じた 0.2 mm 程度の微細な斜長石が多く見られる (Fig. II-18)。最大 5 mm 程度の斜長石の porphyroclast が見られる。角閃石は、1.5 mm 程度の茶色の自形結晶が見られるほか、単斜輝石の周縁部や、脈状に配列する 0.2 mm 程度の微細な結晶として産する。角閃石に置換されなかった単斜輝石もわずかに見られる。鉄酸化物鉱物の含有量は試料によりまちまち。モード組成は、斜長石が 49.8 - 75.1 vol.%、角閃石が 20.6 - 46.8 vol.%、単斜輝石が 0 - 3.1 vol.%、斜方輝石が 0 - 2.9.4 vol.%、鉄酸化物鉱物が 0.5 - 6.0 vol.% であった。

WSR のホルンブレンド斑れい岩は、変形を受けており、最大で 3 mm 程度の長柱状の斜長石の間を、最大 1 mm 程度の角閃石が埋める。変形作用によって生じた微細な

斜長石は多い。モード組成は、斜長石が 67.1 vol.%、角閃石が 26.6 vol.%、鉄酸化物鉱物が 6.3 vol.% であった。

7) トロニエム岩

トロニエム岩は、WHR(KH07-02 D18)、WAR (KR03-01 D10, KH07-02 D25, YK09-05 6K#1140, 1141) で採集された。

WHR は粗粒の等粒状組織で未変形な試料と、変形作用により 0.2 mm 程度の微細な斜長石を生じている試料とがある (Fig. II-19)。変形を受けているホルンブレンド斑れい岩類に貫入する岩相や、1 mm 程度の自形の角閃石を含むこともある。また、アクセサリ鉱物に、ジルコンやスフェーンを含む。モード組成は、斜長石が 95.1 - 98.0 vol.%、角閃石が 1.1 - 4.0 vol.%、鉄酸化物鉱物が 0 - 0.9 vol.%。

WAR では比較的大量の試料が採集されている。KR03-01 D10, KH07-02 D25, YK09-05 6K#1140 については礫として回収されているので、産状が不明であるが、YK09-05 6K#1141 の試料については、輝石ホルンブレンド斑れい岩もしくはホルンブレンド斑れい岩に明瞭な境界をもって貫入する試料や (6K#1141R02)、ホルンブレンド斑れい岩と漸移的な関係にある試料とがある。斑れい岩類に貫入する試料では、最大 10 mm を超える斜長石から構成され、わずかな粒間を 0.2 mm 程度の微細な斜長石と最大 1 mm 程度の自形の角閃石が埋める。モード組成は、斜長石が 98.5 - 98.6 vol.%、角閃石が 0.4 - 0.8 vol.%、鉄酸化物鉱物が 0.6 - 1.0 vol.%。著しい変形を受けている試料は、フォリエーションが発達し、最大 5 mm 程度の斜長石の porphyroclast を 0.2 mm 程度の微細な斜長石や 1 mm 程度の角閃石が埋める。モード組成は、斜長石が 81.8 - 91.5 vol.%、角閃石が 0.6 - 15.1 vol.%、鉄酸化物鉱物が 0 - 3.3 vol.% であった。

5. 議論

1) ゴジラメガマリオンにおける斑れい岩類の分布

ゴジラメガマリオンの地形構造区分ごとに産出する斑れい岩類の点数をまとめた (Table 5)。また、この点数を基にパイチャートを作成し、各地形構造区分の斑れい岩類の点数を比較した (Fig. II-20)。なお、採集した試料の点数とパイチャートに使用した斑れい岩類の点数とが一致しないのは、しんかい 6500 を用いた潜航調査で採集された試料が 1 点の試料の中でも複数の岩相を有することがあり、それが反映されたためである。

NP を除き最も多く採集された斑れい岩類は、輝石ホルンブレンド斑れい岩であり、どの地形構造区分においても採集された。

カンラン石を含む斑れい岩類あるいは角閃石があまり見られない斑れい岩類を ‘初生的’ とするならば、トロクトライトやカンラン石斑れい岩、斑れい岩などが初生的な斑れ

い岩に相当し、これらは Distal Part の WLR や ELR でその割合が高い傾向にある。また、比較試料が 4 点しかない NP も初生的な斑れい岩で構成される。逆にトロニウム岩や輝石類をほとんど含まないホルンブレンッド斑れい岩などを‘分化している’とするならば、Proximal Part の WAR などはその典型である。つまり、ゴジラメガマリオン形成初期の WLR や ELR ではより初生的な斑れい岩類が採集され、活動後期の WAR では分化した斑れい岩類が、その中間の WHR では、中間的な斑れい岩類が見られることになる。さらに、活動の末期にかけて再び初生的な斑れい岩類が出現するようになる。

2) 交代作用による角閃石の増加

ホルンブレンッド輝石斑れい岩と輝石ホルンブレンッド斑れい岩は、ゴジラメガマリオン内で最も見られる斑れい岩類であるが、両者は漸移的な関係がある。これらの斑れい岩類の鉱物組み合わせは、斜長石、単斜輝石、角閃石を基に、斜方輝石、カンラン石、鉄酸化物鉱物となる。つまり、主な構成鉱物は斜長石、単斜輝石、角閃石であり、このうちの単斜輝石と角閃石の量比によってホルンブレンッド輝石斑れい岩と輝石ホルンブレンッド斑れい岩が区分される。単斜輝石も角閃石もいずれも初生的な鉱物であるが、角閃石については単斜輝石が置換されて生成される場合がある (Fig. II-17)。すなわち、



である。

この反応によって、角閃石の割合が増大、単斜輝石の割合が減少し、結果的にホルンブレンッド輝石斑れい岩の割合が減り、輝石ホルンブレンッド斑れい岩が増大することになる。

ゴジラメガマリオンにおいて最も多く採集された斑れい岩類は、輝石ホルンブレンッド斑れい岩であり、かつどの地形構造区分においても採集されたが、これは単斜輝石から生じた角閃石の影響が大きいと思われる。特に WAR においては、ホルンブレンッド輝石斑れい岩が見られないが、鏡下では単斜輝石が角閃石に置換されているのが多数確認されることから、原岩がホルンブレンッド輝石斑れい岩であった可能性がある。単斜輝石の一部が角閃石に置換される様子は、輝石ホルンブレンッド斑れい岩のみならず、他の斑れい岩類でも観察できるが、特に輝石ホルンブレンッド斑れい岩とホルンブレンッド輝石斑れい岩の量比には大きな影響を与えている。初生的な角閃石と後の交代作用によって生じる角閃石については、厳密には区分すべきであるがこの判断はなかなか難しい。つまり、比較的小型の単斜輝石のすべてが角閃石に置換されている場合や、単斜輝石の光学的性質を残しながら、角閃石の化学組成を有することがあるためである。このため、初生的な角閃石も、後の交代作用によって生じた角閃石もあわせて角閃石としてモード測定を実施した。

単斜輝石が角閃石に置換される反応は、トロクトライトやカンラン石斑れい岩、斑れい

岩などでも見られる反応である。しかしこれらの斑れい岩類では、初生的な角閃石はほとんど含まれず、二次的に生じる角閃石も岩石名が変わるほど多くないので特に問題はない。

Fig. II-21 は、輝石ホルンブレンド斑れい岩に含まれる角閃石に対して、単斜輝石から角閃石への置換の程度を考慮して再見積りして作成した図である。すなわち、単斜輝石の周縁部に生じている角閃石は、もとは単斜輝石であったと仮定、あるいはカウントせずに比較した。その結果、輝石ホルンブレンド斑れい岩のうち、原岩がホルンブレンド輝石斑れい岩に変更されたのは、ELR が 50%、WLR が 50%、WHR が 80%、WAR が 40%、WSR が 82%であった。結果的に、ゴジラメガマリオンにおいて最も見られる斑れい岩類がホルンブレンド輝石斑れい岩であるという結論に達する。次章の鉱物記載で詳しく述べるが、角閃石はいくつかの産状を示すことから、いくつかのステージにわたって二次的、あるいは三次的に形成された可能性があり、それぞれの成因を考慮してのモード測定は非常に難しい。

3) 大西洋中央海嶺およびインド洋中央海嶺のメガマリオンから産する斑れい岩との比較

大西洋中央海嶺のケーンメガマリオンおよび南西インド洋海嶺のアトランティスバンクに産する斑れい岩類について、産出する斑れい岩の種類を対比した (Fig. II-22)。いずれも斑れい岩類の記載方法 (岩石名) に違いがあるため、若干の手直しを加えて対比を行った。大西洋中央海嶺のケーンメガマリオンは、メガマリオン全体を統括的に全 28 回のドレッジ調査を行ったデータを用いた (Dick *et al.*, 2008)。ケーンメガマリオンは、拡大軸の鉛直方向に沿って3つの地形構造に区分されており (北から Babel and Ararat Domes、Cain and Abel Domes、Adam and Eve Domes)、それぞれの Dome において産出する斑れい岩類の割合が異なる。今回の比較ではすべてを足し合わせた結果を用いた。Dick *et al.* (2008) は、斑れい岩類をトロクトライト、カンラン石斑れい岩、Oxide gabbro、Metagabbro および Felsic vein の5つに区分している。ここで使われている Oxide gabbro はモード組成で鉄酸化物鉱物を 5 vol.% 以上含む斑れい岩類に相当する。そのため、同様の比較を行うために、ゴジラメガマリオンの斑れい岩類も鉄酸化物鉱物を 5 vol.% 以上含む斑れい岩類を Oxide gabbro として比較するために再計算した。ゴジラメガマリオンにおいて鉄酸化物鉱物を 5 vol.% 以上含む斑れい岩類は、ホルンブレンド輝石斑れい岩および輝石ホルンブレンド斑れい岩なので、その中から鉄酸化物鉱物を 5 vol.% 以上含む斑れい岩類を oxide gabbro とし、鉄酸化物鉱物が 5 vol.% 以下の斑れい岩類は、ホルンブレンド輝石斑れい岩と輝石ホルンブレンド斑れい岩をあわせて “HPG & PHG” として比較を行った。また、Metagabbro の一部にはゴジラメガマリオンにおけるホルンブレンド斑れい岩の一部が含まれる。ケーンメガマリオンとゴジラメガマリオ

ンの対比では、ケーンメガマリオンの斑れい岩類が圧倒的にカンラン石を含む斑れい岩類（トロクトライトやカンラン石斑れい岩）に富むことが特徴的である（Fig. II-22）。ゴジラメガマリオンでは、Oxide gabbro の割合が比較的高いこともあるが、ホルンブレンド輝石斑れい岩および輝石ホルンブレンド斑れい岩、Oxide gabbro に共通する、角閃石を含む斑れい岩類の割合が高いことが特徴的である。トロニエム岩に富む点も特徴である。すなわち、ケーンメガマリオンは初生的な斑れい岩類が多く、ゴジラメガマリオンはより分化した斑れい岩が多く見られることになる。

南西インド洋海嶺のアトランティスバンクについては、アトランティスバンク中央部の ODP 掘削孔 735B で掘削された斑れい岩類（Bloomer *et al.*, 1991）との対比を行った。Bloomer *et al.*（1991）では、産出する斑れい岩類を、トロクトライト、カンラン石斑れい岩、斑れい岩、斑れいノーライト、Oxide gabbro に区分し、さらにこれらの microgabbro に区分した。今回の対比では、microgabbro とはカウントせず、トロクトライト、カンラン石斑れい岩、斑れい岩、斑れいノーライト、Oxide gabbro にあわせて対比した。Bloomer *et al.*（1991）の斑れいノーライトとゴジラメガマリオンの“HPG & PHG”はほぼ同一と思われる。アトランティスバンクの斑れい岩は、ゴジラメガマリオンと比べて、カンラン石斑れい岩の割合が高いのが特徴的である。しかし、Oxide gabbro の割合も高いのも特徴的である。これらのことから、どちらがより初生的か、あるいは分化しているかを判断するのは難しい。また、アトランティスバンクの試料は掘削によって得られており、メガマリオンの鉛直方向の岩石組み合わせを見ている可能性があるので単純な比較はできない。しかし、ケーンメガマリオンよりは、初生的な斑れい岩類の割合は低く、分化した斑れい岩の割合が高いので、鉱物の化学組成や全岩化学組成を対比する上で重要である。

6. まとめ

ゴジラメガマリオンから得られた斑れい岩類の記載岩石学的検討から得られた結果は次の通りである。

- 1) ゴジラメガマリオンに産出する斑れい岩類は、Streckeisen（1976）による、斜長石－カンラン石－輝石および、斜長石－輝石－ホルンブレンドによる区分に基づき、トロクトライト、カンラン石斑れい岩、斑れい岩、ホルンブレンド輝石斑れい岩、輝石ホルンブレンド斑れい岩、ホルンブレンド斑れい岩に区分され、これに斑れい岩類と漸移的にあるいは独立して産出するトロニエム岩をあわせた7つに区分される。

最も多く見られた斑れい岩類は、輝石ホルンブレンド斑れい岩であった。しかし、輝石ホルンブレンド斑れい岩の顕微鏡観察では、単斜輝石の一部が角閃石に交代されるため、初生的な輝石ホルンブレンド斑れい岩が必ずしも多かったとは断言できず、ホルンブレンド輝石斑れい岩の割合も多かった可能性がある。

- 2) ゴジラメガマリオン内における斑れい岩類の分布には偏りが見られる。最も初生的と考えられるトロクトライトは、活動初期 (Distal Part) の WLR でのみ見られ、カンラン石斑れい岩は同じく WRL と WHR でしか見られない。より分化した斑れい岩と思われるホルンブレンド斑れい岩やトロニエム岩は、活動後期 (Proximal Part) の WAR で最も多く見られた。以上から、ゴジラメガマリオンの活動初期はより初生的な斑れい岩類が多く見られ、後期にはより分化した斑れい岩類が見られるようになる。WAR よりさらに後期では、ホルンブレンド輝石斑れい岩などのやや初生的な斑れい岩が再び見られるようになる。
- 3) ゴジラメガマリオンに見られる斑れい岩類の割合を、大西洋中央海嶺のケーンメガマリオンに産する斑れい岩類と比較すると、ケーンメガマリオンの斑れい岩類が圧倒的にカンラン石を含む斑れい岩類に富み、ゴジラメガマリオンでは角閃石を含む斑れい岩類の割合が高いことが特徴的であった。また、インド洋中央海嶺のアトランティスバンクに産する斑れい岩類との比較では、アトランティスバンクの斑れい岩が、カンラン石斑れい岩の割合が高いことに加え、一方で Oxide gabbro の割合も高いのが特徴的であった。

III. ゴジラメガムリオンに産する斑れい岩類の鉱物学的検討

1. はじめに

本章では記載岩石学的研究に基づき分類されたゴジラメガムリオン産の斑れい岩類に含まれる鉱物について、電子プローブマイクロアナライザー（EPMA）を用いて鉱物の化学分析を行い、鉱物組成の比較検討を行った。

ゴジラメガムリオンの斑れい岩類を構成する鉱物の化学組成の報告は、Ohara *et al.* (2003a) および Harigane *et al.* (2008; 2010; 2011) でなされている。Ohara *et al.* (2003a) は、ゴジラメガムリオンの活動末期（proximal part）に相当する ESR にて、ドレッジ調査で採集した斑れい岩類の単斜輝石および斜長石の化学組成を報告し、主に同じドレッジで採集されたかんらん岩類の鉱物組成との比較をおこなった。斑れい岩に含まれる単斜輝石および斜長石はいずれも分化していると結論づけている。Harigane *et al.* (2008) では WLR にて、Harigane *et al.* (2010) では WAR にて、Harigane *et al.* (2011) では WHR にてそれぞれ採集された斑れい岩類の、斜長石、単斜輝石、角閃石の鉱物組成を報告し、いずれも変成岩石学的、変形岩石学的視点から、角閃岩と斑れい岩類の成因を議論した。いくつかの試料は本研究で扱っている試料と重複する。

ゴジラメガムリオンの斑れい岩類は、Streckeisen (1976) による斜長石－カンラン石－輝石および、斜長石－輝石－ホルンブレンドによる区分に基づき7種類に分類できた。しかし同じ名称の斑れい岩であっても、産出場所ごとにモード組成や粒径、変形の程度が異なっており、多様な化学組成を持つことが予想される。本章では、斑れい岩類を構成する、斜長石、単斜輝石、カンラン石、角閃石について、岩石種および産出場所ごとに化学組成を比較し、ゴジラメガムリオンの斑れい岩類の鉱物学的特徴を明らかにする。なお、本論では oxide gabbro という用語は使用していないが、鉱物の化学組成を論じる際に、鉄酸化物鉱物を比較的多く含む岩相（5 vol.% 以上）は、鉱物の組成に違いがあらわれるので、「鉄酸化物鉱物を多く含む岩相」と区別してある。

2. 鉱物の化学組成

鉱物の分析は、神奈川県温泉地学研究所の電子プローブマイクロアナライザー（JXA-8900R）を用いた。分析条件は、加速電圧が 15kV、照射電流が 1.2×10^{-9} A、ビーム径が 5 μ m である。分析を行った元素は、SiO₂、TiO₂、Al₂O₃、Cr₂O₃、FeO、NiO、MgO、CaO、Na₂O、K₂O で、一部の鉱物については P₂O₅ も分析を行った。以下に各鉱物の特徴および化学組成をまとめる。

1) 斜長石

斜長石の産状は、最大 10 mm 程度の自形で cumulus 鉱物として産するか、あるいは最大 10 mm 程度で自形から半自形もしくは他形で、二次的に生じたと考えられる 1 mm 以下の微細な斜長石を伴って産する場合とがある。いずれの斑れい岩においても累帯構造は確認されず、結晶中での化学組成は比較的均質であった。ただし、1 枚の薄片の中で複数の斜長石の化学分析を行った際、多少の組成の異差が確認されることがある。いずれの斑れい岩類においても、斜長石の Or 値は極めて低く、最大で 2.8、ほとんどの試料で 2 を下回る。すなわち、斜長石の組成はほぼ Ab 値と An 値で表される。そのため本論では An 値に注目して記載を行うことにする。An 値は斑れい岩ごとに化学組成が大きく異なり、細粒な岩相 (fine grain type) や鉄酸化物鉱物を多く含む岩相でも違いが見られる。さらに変成作用もしくは再融解によって生じたと考えられる、1mm 以下の微細な斜長石が生じている場合はさらに組成変化が大きくなる (Table 3, 4, Fig. III-1)。

トロクトライトの斜長石の An 値は、平均で $An = 78.3$ (max. 84, min. 67) で、今回分析を行った斑れい岩類の中で最も An 値が高かった。

カンラン石斑れい岩の斜長石の An 値は、平均で $An = 59.2$ (max. 87, min. 37) であった。WLR は平均で $An = 71.3$ (max. 87, min. 57) で、比較的高いのにに対し、WHR は平均で $An = 42.0$ (max. 48, min. 37) とやや低い。WHR の斜長石の An 値が低いために、WLR と WHR をあわせたカンラン石斑れい岩全体の An 値の平均値が低くなっている。また、WHR のカンラン石斑れい岩は変形による微細な斜長石を生じているが、微細な斜長石と自形の斜長石との間に化学組成に差が見られなかった。

斑れい岩の斜長石の An 値は、平均で $An=65.9$ (max. 83, min. 44) であった。WLR は平均で $An = 76.8$ (max. 83, min. 63)、ELR は平均で $An = 62.8$ (max. 70, min. 44) であった。WLR のトロクトライト、カンラン石斑れい岩および斑れい岩はいずれも An 値が高いことが特徴的で、ゴジラメガムリオンにおける最大値であった。

ホルンブレンド輝石斑れい岩の斜長石の An 値は、平均で $An=49.6$ (max. 73, min. 21) であった。二次的に生じた微細な斜長石を産する場合、その An 値の平均は $An=43.1$ (max. 51, min. 34) とやや低い。ホルンブレンド輝石斑れい岩は、ELR、WHR、WSR で見られ、斜長石の An 値は、ELR が平均で $An = 54.9$ (max. 73, min. 39)、WHR が平均で $An = 45.9$ (max. 57, min. 21)、WSR が平均で $An = 47.5$ (max. 51, min. 46) であった。ELR では鉄酸化物鉱物を多く含む岩相が見られ、その An 値の平均は $An=45.5$ (max. 49, min. 39) であった。WSR では細粒な岩相 (fine grain type) と鉄酸化物鉱物を多く含む岩相の両方を有するホルンブレンド輝石斑れい岩も見られ、その斜長石の An 値の平均は、 $An = 28.8$ (max. 41, min. 21) で極めて低かった。

輝石ホルンブレンド斑れい岩の An 値は非常に変化に富む。輝石ホルンブレンド斑れ

い岩の斜長石の An 値は、平均で $An=36.3$ (max. 48, min. 8)、二次的に生じた微細な斜長石の An 値は 28.8 (max. 48, min. 3) であった。地形構造区分ごとの斜長石の An 値は、WLR が平均で $An = 40.0$ (max. 42, min. 38)、WHR が平均で $An = 43.0$ (max. 48, min. 33)、WAR が平均で $An = 9.8$ (max. 11, min. 8)、WSR が平均で $An = 36.8$ (max. 47, min. 24) であった。WSR 以外では、二次的に生じた微細な斜長石も見られ、その An 値の平均は、WLR が平均で $An = 40.1$ (max. 42, min. 39)、WHR が平均で $An = 37.2$ (max. 48, min. 4)、WLR が平均で $An = 7.8$ (max. 11, min. 3) であった。また、細粒な岩相 (fine grain type) を有するホルンブレンド輝石斑れい岩の斜長石の An 値は WLR が平均で $An = 55.7$ (max. 73, min. 48) であった。

鉄酸化物鉱物を多く含む輝石ホルンブレンド斑れい岩の斜長石の An 値は、平均で $An=29.6$ (max. 54, min. 8)、二次的に生じた微細な斜長石の An 値は 24.1 (max. 33, min. 8) と比較的低い。地形構造区分ごとの斜長石の An 値は、ELR が平均で $An = 35.9$ (max. 54, min. 16)、WLR が平均で $An = 30.4$ (max. 35, min. 20)、WAR が平均で $An = 21.8$ (max. 34, min. 8) で、二次的に生じた微細な斜長石の An 値は ELR が平均で $An = 20.4$ (max. 30, min. 11)、WLR が平均で $An = 28.7$ (max. 33, min. 24)、WAR が平均で $An = 13.9$ (max. 32, min. 8) であった。

ホルンブレンド斑れい岩の斜長石の An 値は平均で $An=19.8$ で、微細な斜長石の An 値の平均は $An=8.5$ (max. 51, min. 34) と極めて低い。ホルンブレンド斑れい岩は、ELR、WLR、WAR で見られ、斜長石の An 値は、ELR が平均で $An = 13.4$ (max. 21, min. 7)、WLR が平均で $An = 29.9$ (max. 34, min. 25)、WAR が平均で $An = 11.4$ (max. 16, min. 8) で、微細な斜長石の An 値は ELR が平均で $An = 9.9$ (max. 11, min. 9)、WAR が平均で $An = 7.7$ (max. 8, min. 7) であった。

トロニウム岩の斜長石の An 値は極めて低く、平均で $An = 4.7$ (max. 15, min. 3) であった。トロニウム岩は、WHR、WAR で見られ、斜長石の An 値は、WHR が平均で $An = 5.6$ (max. 15, min. 3)、WAR が平均で $An = 3.6$ (max. 4, min. 3) で、微細な斜長石の An 値は WAR が平均で $An = 3.6$ (max. 4, min. 3) であった。

2) 単斜輝石

単斜輝石も斜長石と同様にすべての地形構造区分から得られた斑れい岩類より分析値が得られた。トロクトライト、カンラン石斑れい岩および斑れい岩の単斜輝石は、斜長石やカンラン石の粒間を埋める intercumulus 鉱物として産する。ホルンブレンド輝石斑れい岩、輝石ホルンブレンド斑れい岩に産する単斜輝石は自形で、しばしば周縁部が角閃石に置換されている。以下に斑れい岩類ごとの単斜輝石の特徴をまとめる (Table 8, Fig. III-1)。なお、 $XMg = Mg/(Mg+Fe)$ である。

トロクトライトの単斜輝石の XMg は斑れい岩類中で最大であり、XMg = 0.88 (max. 0.89, min. 0.87) であった。トロクトライトの XMg の組成変化の幅は極めて小さいが、Ca 含有量には変化があるため Wo 成分が 40 ~ 48 程度の組成変化が認められた (Fig. III-2A)。

カンラン石斑れい岩の単斜輝石の XMg は平均で XMg = 0.83 (max. 0.89, min. 0.73) であった。WLR の単斜輝石の XMg は平均で 0.85 と高いが、最大 0.89、最小 0.73 と組成変化が大きい。XMg の高い単斜輝石は、トロクトライトの単斜輝石とほぼ同様の組成を有しており、Wo 成分も 32 ~ 47 と組成変化が大きい (Fig. III-2B)。XMg の低い単斜輝石 (Fs 成分が 10 以上) は、WLR の輝石ホルンブレンド斑れい岩およびホルンブレンド斑れい岩の細粒な岩相 (fine grain type) の単斜輝石の化学組成と似る。WHR の単斜輝石の XMg は平均で 0.75 とかなり低い。ただし、最大 0.76、最小 0.74 と組成変化は小さい。

斑れい岩の単斜輝石の XMg は平均で XMg = 0.85 (max. 0.89, min. 0.82) であった。WLR と ELR の単斜輝石の化学組成には大差は確認されず、WLR のほうがやや XMg が高い傾向にある。また、Wo 成分については、ELR が 42 ~ 47 と組成幅が小さいのに対し、WLR では 30 ~ 47 と組成幅が大きい (Fig. III-2C)。

ホルンブレンド輝石斑れい岩の単斜輝石の XMg は平均で XMg = 0.76 (max. 0.84, min. 0.68) であった。ホルンブレンド輝石斑れい岩は、ELR、WHR および WSR の試料のデータが得られたが、XMg の平均値は WHR がやや高く (XMg=0.80)、ELR (XMg=0.73) と WSR (XMg=0.74) がやや低い。Wo 成分は ELR が 40 ~ 44、WHR が 42 ~ 48、WSR が 42 ~ 49 と組成変化が小さい (Fig. III-2D)。鉄酸化物鉱物を多く含む岩相の輝石ホルンブレンド斑れい岩の XMg は平均で XMg = 0.70 (max. 0.73, min. 0.67) であった。細粒な岩相 (fine grain type) と鉄酸化物鉱物を多く含む岩相の両方の岩相を有する輝石ホルンブレンド斑れい岩の XMg は平均で XMg = 0.65 (max. 0.68, min. 0.64) で、粗粒なホルンブレンド輝石斑れい岩よりもやや低い。輝石ホルンブレンド斑れい岩の細粒な岩相 (fine grain type) は WLR と WSR の試料のデータが得られたが、WLR の XMg は 0.74、WSR の XMg は 0.65 と採集地間での組成変化が大きい。Wo 成分は WLR が 40 ~ 44、WSR が 43 ~ 46 と組成変化が小さい (Fig. III-2E)。

輝石ホルンブレンド斑れい岩の XMg は平均で XMg = 0.77 (max. 0.83, min. 0.73) で、ホルンブレンド輝石斑れい岩の XMg と大差がない。Wo 成分は 40 ~ 48 でこちらもホルンブレンド輝石斑れい岩と同様の値であった (Fig. III-2F)。輝石ホルンブレンド斑れい岩の細粒な岩相 (fine grain type) の XMg は平均で XMg = 0.76 (max. 0.78, min. 0.73) で、粗粒な輝石ホルンブレンド斑れい岩と同等の値をもつ。輝石ホルンブレンド斑れい岩の細粒な岩相 (fine grain type) の Wo 成分は 41 ~ 44 であった (Fig. III-2G)。鉄酸化物鉱物を多く含む輝石ホルンブレンド斑れい岩の XMg は平均で XMg = 0.49 (max.

0.56, min. 0.42) と著しく低い。鉄酸化物鉱物を多く含む輝石ホルンブレンド斑れい岩は、WLR と WAR の試料のデータが得られたが、WLR が $XMg=0.47$ 、WAR が $XMg=0.65$ と組成に大きな違いが見られる。また、Wo 成分についても、WLR が 29 ～ 44、WAR が 43 ～ 47 と組成に大きな違いが見られた (Fig. III-2H)。

ホルンブレンド斑れい岩に単斜輝石が見られることは稀であるが、唯一 WLR のホルンブレンド斑れい岩からデータが得られた。ホルンブレンド斑れい岩の XMg は平均で $XMg = 0.55$ (max. 0.58, min. 0.49) と極めて低い。Wo 成分は 44 ～ 46 であった (Fig. III-2I)。

3) 角閃石

すべての地形構造区分において角閃石が確認された。また、トロクトライトを除く斑れい岩類で確認された。産状は自形、他形、微細で不明瞭な形状、輝石（単斜輝石、斜方輝石とも）の周縁部に二次的に生成、カンラン石の周縁部に生成、斜長石の包有物、針状結晶がある。さらに茶～褐色系（茶色系とする）の角閃石と緑色系の角閃石がある。これらの条件を考慮して角閃石を解析すると、産出する地形構造区分と岩石種、産状の組み合わせによって化学組成が異なり、非常に複雑である。なお、自形性が強く、劈開がしっかりとしている茶色系の角閃石を、初生的な角閃石とみなした。角閃石の分析値を Table 9 に示す。また、岩石種ごとの Si vs Na+K(A-site) プロットを Fig. III-3 に、産状ごとの Si vs Na+K(A-site) プロットを Fig. III-4 に示す。

カンラン石斑れい岩の角閃石は、単斜輝石の周縁部を置換して生成している。角閃石の組成は、WLR が普通角閃石にプロットされるのに対し、WHR は産状、色に関係なくパーガス閃石からエデン角閃石にプロットされる。 XMg の平均値は WLR が 0.78 と高く、WHR では茶色系で 0.70、緑色系で 0.60 とやや低い (Fig. III-5)。

斑れい岩も自形の角閃石は見られず、単斜輝石の周縁部を置換して生成する角閃石と針状の角閃石とが見られた。いずれもアクチノ閃石にプロットされ、 XMg の平均値は単斜輝石の周縁部に生じている角閃石で 0.89、針状結晶の角閃石で 0.74 と高めであった。

ホルンブレンド輝石斑れい岩の角閃石は、産出場所と産状によって様々な組成を有する。全体の XMg の平均値は、自形の茶色系の角閃石で 0.67、緑色系で 0.64、単斜輝石の周縁部に生じている角閃石の茶色系で 0.71、緑色系で 0.73、針状の角閃石の緑色系で 0.61 であった。ELR では、初生的な茶色系の自形の角閃石、針状の角閃石、単斜輝石の周縁部に生成する角閃石が見られた。初生的な茶色系の自形の角閃石は普通角閃石からパーガス閃石にかけて、緑色系の角閃石は普通角閃石からアクチノ閃石に区分される。 XMg の平均値はバラつきが見られ、初生的な茶色系の自形の角閃石で 0.65 ～ 0.73、緑色系で 0.55 ～ 0.65、単斜輝石の周縁部に生成する茶色系の角閃

石で 0.86、緑色系の針状の角閃石で 0.62 ~ 0.83 であった。初生的な茶色系の自形の角閃石はほとんどの試料に見られた。WHR の角閃石は、産状、色に関係なく、パーガス閃石からエデン角閃石に区分される。XMg の平均値は自形の茶色系の角閃石で 0.63 ~ 0.71、緑色系で 0.53、単斜輝石の周縁部に生成する茶色系の角閃石で 0.60 ~ 0.78、緑色系で 0.70 であった。初生的な角閃石は見当たらなかった。WSR では産状に関係なく、茶色系の角閃石がパーガス閃石に、緑色系の角閃石がエデン角閃石にプロットされる。XMg の平均値は自形の茶色系の角閃石で 0.71、緑色系で 0.60 であった。

輝石ホルンブレンド斑れい岩の角閃石の全体の XMg の平均値は、初生的な自形の茶色系の角閃石で 0.60、緑色系で 0.59、単斜輝石の周縁部に生成する角閃石の茶色系で 0.65、緑色系で 0.77、針状の角閃石の緑色系で 0.64 であった。細粒な岩相 (fine grain type) の XMg の平均値は、自形の茶色系の角閃石で 0.70、緑色系で 0.72、単斜輝石の周縁部に生じている角閃石の茶色系で 0.63 であった。鉄酸化物鉱物を多く含む岩相の XMg の平均値は、自形の茶色系の角閃石で 0.41、緑色系で 0.61、単斜輝石の周縁部に生成する角閃石の茶色系で 0.51、緑色系で 0.55、針状の角閃石の緑色系で 0.36 であった。WLR は産状と色、岩相に関係なく、普通角閃石からパーガス閃石にかけて一直線上にプロットされる。ただし、針状の結晶の角閃石はアクチノ閃石に近い組成である。XMg の平均値は自形の茶色系の角閃石で 0.61、他形の茶色系で 0.70、単斜輝石の周縁部に生成する緑色系の角閃石で 0.51、針状の角閃石の緑色系で 0.68 であった。初生的な茶色系の自形の角閃石は、比較的輝石を多く含む斑れい岩類 (もとはホルンブレンド輝石斑れい岩であった可能性が高い) で比較的多く見られ、輝石の少ない試料にはあまり見られない。鉄酸化物鉱物を多く含む岩相の XMg の平均値は、自形の茶色系の角閃石で 0.43 ~ 0.54、針状の角閃石の緑色系で 0.37 ~ 0.52 であった。ELR では鉄酸化物鉱物を多く含む岩相の角閃石が確認され、その組成は産状に関係なく普通角閃石にプロットされ、XMg の平均値は自形の緑色系の角閃石で 0.47、斜方輝石の周縁部に生成する緑色系の角閃石で 0.48 であった。初生的な茶色系の自形の角閃石は半分くらい見られた。WHR では、産状、色に関係なく、パーガス閃石からエデン角閃石にプロットされる。XMg の平均値は自形の茶色系の角閃石で 0.69、緑色系で 0.72、単斜輝石の周縁部に生成する茶色系の角閃石で 0.71、緑色系で 0.77、他形の緑色系の角閃石で 0.65 であった。初生的な茶色系の自形の角閃石はほとんど見られない。WAR は茶色系の角閃石が産状に関係なく普通角閃石とエデン角閃石の境界付近に、単斜輝石の周縁部に生成する緑色系の角閃石がエデン角閃石にプロットされる。XMg の平均値は自形の茶色系の角閃石で 0.58、緑色系で 0.67、単斜輝石の周縁部に生じる茶色系の角閃石で 0.48 ~ 0.57、緑色系で 0.55 であった。初生的な茶色系の自形の角閃石はほとんどの試料に見られた。鉄酸化物鉱物を多く含む岩相では、単斜

輝石の周縁部に生成する茶色系の角閃石がエデン角閃石に区分、自形および単斜輝石の周縁部に生じる緑色系の角閃石が普通角閃石に区分される。XMg の平均値は自形の緑色系の角閃石で 0.67、単斜輝石の周縁部に生成する茶色系の角閃石で 0.48 ~ 0.58、緑色系で 0.55 であった。WSR は茶色系、緑色系とも自形で、茶色系がパーガス閃石に、緑色系がエデン角閃石にプロットされる。XMg の平均値は自形の茶色系の角閃石で 0.59、緑色系で 0.45 であった。初生的な茶色系の自形の角閃石はほとんどの試料に見られた。

ホルンブレンド斑れい岩は、WLR、ELR および WAR で確認された。これらの試料では、自形、他形、微細結晶等の産状を示し、また色も茶色系と緑系の両方を産する。ELR と WAR のデータを示す。ELR は他形の緑系の角閃石が見られ、普通角閃石にプロットされる。XMg の平均値は 0.37 であった。WAR では、茶系の自形と微細な角閃石とがあり、自形の角閃石はエデン角閃石に、微細な角閃石は普通角閃石にプロットされる。XMg の平均値は自形の角閃石が 0.51、微細な角閃石が 0.64 であった。初生的な茶系の自形の角閃石は、ELR のホルンブレンド斑れい岩にはほとんど見られず、WAR ではほとんどの試料に見られた。

トロニウム岩は、WHR と WAR で確認された。WHR は自形の茶系および緑系で、いずれもエデン角閃石に、WAR は茶系の自形で普通角閃石にプロットされる。XMg の平均値は、WHR の自形の茶系の角閃石で 0.53、緑系で 0.50、WAR の自形の茶系の角閃石で 0.87 であった。初生的な茶系の自形の角閃石はほとんどの試料に見られた。

4) カンラン石

カンラン石は、トロクトライトおよびカンラン石斑れい岩では主成分として、斑れい岩、ホルンブレンド輝石斑れい岩、輝石ホルンブレンド斑れい岩ではまれに確認される。ホルンブレンド輝石斑れい岩および輝石ホルンブレンド斑れい岩では、ほとんどのカンラン石がイデイングサイト化している。カンラン石の分析値を Table 10 に示す。

カンラン石の Fo 値は岩石種ごとにきれいな相関が見られた (Fig. III-1)。カンラン石の Fo 値の平均値は、トロクトライトが Fo=87 (max. 88, min. 87)、カンラン石斑れい岩が Fo=85 (max. 86, min. 84; WLR)、Fo=62 (max. 63, min. 56)、斑れい岩が Fo=84 (max. 84, min. 84)、ホルンブレンド輝石斑れい岩が Fo=60 (max. 62, min. 54)、輝石ホルンブレンド斑れい岩が Fo=44、鉄酸化物鉱物を多く含む岩相の輝石ホルンブレンド斑れい岩が Fo=25 (max. 25, min. 24) であった。

3. 議論

1) 岩石種ごとの鉱物化学組成の相違

岩石種ごとに、斜長石の An 値、単斜輝石の XMg 値、カンラン石の XMg 値を対比した (Fig. III-1)。また、角閃石の XMg 値を対比した (Fig. III-5)。いずれも地形構造区分は考慮せず、単純に平均値で対比を行った。

斜長石はトロクトライトからカンラン石斑れい岩、斑れい岩、ホルンブレンド輝石斑れい岩、輝石ホルンブレンド斑れい岩、ホルンブレンド斑れい岩、トロニウム岩にかけて、連続的に低くなっていく傾向が見られる。一般的に斜長石の An 値は分化の進行によって低くなることから、最も An 値の高いトロクトライトが最も初生的で、トロニウム岩が最も分化していると言える。微細 (small or anhedral) な斜長石の An 値はいずれも自形の斜長石の An 値よりも低く、変形作用によって二次的に生じたと考えられ、Harigane et al., (2009; 2010; 2011) の結果とも調和的である。細粒な岩相 (fine grain type) を有する輝石ホルンブレンド斑れい岩の An 値は高く、ホルンブレンド輝石斑れい岩とほぼ同等の値であることから、異なる成因を考えた方が良いかもしれない。トロニウム岩の斜長石の An 値は非常に低く、ほぼアルバイトの組成と言える。

単斜輝石やカンラン石の XMg 値も斜長石と同様に、トロクトライトからカンラン石斑れい岩、斑れい岩、ホルンブレンド輝石斑れい岩、輝石ホルンブレンド斑れい岩にかけて低くなる傾向が見られた。すなわち、単斜輝石やカンラン石の XMg 値からも、斜長石と同様にトロクトライトが最も初生的で、輝石ホルンブレンド斑れい岩やホルンブレンド斑れい岩が分化していると言える。XMg 値は FeO の含有量によって左右されるため、鉄酸化物鉱物を多量に含む岩相、つまり FeO に富む岩相では単斜輝石中の FeO 含有量も高くなり、その結果 XMg 値が低くなる傾向がある。

角閃石の XMg は、自形の茶色系の角閃石では傾向が見られなかった。すなわち、大雑把にはホルンブレンド輝石斑れい岩からホルンブレンド斑れい岩にかけて XMg が低くなる傾向があるが、トロニウム岩で再び高くなる。単斜輝石の周縁部に生成する角閃石の XMg については、カンラン石斑れい岩から輝石ホルンブレンド斑れい岩にかけて低くなる傾向が見られ、単斜輝石の XMg の値と相関が見られた。

カンラン石斑れい岩	単斜輝石 XMg=0.85	角閃石 XMg=0.73
ホルンブレンド輝石斑れい岩	単斜輝石 XMg=0.76	角閃石 XMg=0.71
輝石ホルンブレンド斑れい岩	単斜輝石 XMg=0.77	角閃石 XMg=0.65

Fig. III-6 は角閃石の Ti と Al(IV) を地形構造区分ごとに比較した図である。なお、この図は斑れい岩の種類ごとに着目しており、角閃石の形態については一括している。この図からどの地形構造区分においても、茶色系の角閃石は Ti 含有量が高いことがわかる。Ernst & Lin (1998) は、実験岩石学的に角閃石の TiO_2 と Al_2O_3 含有量から温度

一圧力計を構築している。この実験では、 TiO_2 からは温度を、 Al_2O_3 からは圧力と温度を見積もっており、 TiO_2 の高い角閃石は生成温度が高いことを示唆している。岩石種や地形構造区分に関係なく、ゴジラメガマリオンの斑れい岩類中の茶色系角閃石は、緑色系の角閃石に比べて Ti 含有量が高い。つまり、茶色系角閃石はより高温で生成した、より初生的な角閃石であると言える。Ernst & Lin (1998) の角閃石温度圧力計に、初生的に形成したと思われる茶色系の角閃石の分析値をプロットし、角閃石の生成温度を見積もった (Fig. III-7)。やや圧力が高く見積もられたり、温度が低めに見積もられたりするが、概ね角閃石の生成温度は $1050 \sim 900^\circ\text{C}$ 程度、トロニウム岩では 900°C 以下であることが判明した。この条件は、今後斑れい岩類の成因を考察する上で重要な制約条件となる。

2) ゴジラメガマリオンにおける鉱物組成の変化

ゴジラメガマリオンの地形構造区分ごとに鉱物組成の変化を対比した。

初期の活動に相当する、ELR や WLR はトロクトライトやカンラン石斑れい岩、斑れい岩を産出することで特徴づけられるが、含まれる斜長石の An 値も高いことから、初期の活動ではより初生的な斑れい岩が見られることになり、II 章の結論とも整合的である (Fig. III-8)。初期の活動である WLR から、中期の WHR、後期の WAR、末期の WSR にかけて、すべての地形構造区分において産出する輝石ホルンブレンド斑れい岩の An 値を比較すると、WLR が 40.0 でやや高く、WHR の 43.0、WAR の 9.8 と徐々に低くなり、WSR の 36.8 で再び高くなる。この解釈としては、WLR の斑れい岩類を形成したマグマが最も初生的であったが、次第にマグマ量が減り、WAR で最少となるが、末期の WSR で再びマグマ量が増えたことが予測される。点数は少ないが、カンラン石斑れい岩やする輝石ホルンブレンド斑れい岩の細粒な岩相 (fine grain type) および鉄酸化物鉱物を多量に含む岩相、ホルンブレンド斑れい岩でも同様の傾向が見られる。ホルンブレンド輝石斑れい岩については地形構造区分による変化があまり見られない。また、WSR の反対に位置する ESR からは、Ohara *et al.* (2003a) が斑れい岩の鉱物組成を報告している。モード組成が報告されていないで厳密な分類ができないが、単斜輝石をそれなりに含んでいることから、ホルンブレンド輝石斑れい岩もしくは輝石ホルンブレンド斑れい岩であることが予想される。その斑れい岩類の An 値は 47.4 で、ホルンブレンド輝石斑れい岩の An 値と非常に近い値である。

単斜輝石の Wo-En-Fs 成分について比較を行った。Fs 成分に着目すると、単斜輝石はトロクトライト、カンラン石斑れい岩、斑れい岩、ホルンブレンド輝石斑れい岩、輝石ホルンブレンド斑れい岩、ホルンブレンド斑れい岩の順に Fs 成分が高くなり、特に WLR でこの傾向が顕著に見られる (Fig. III-9)。また、鉄酸化物鉱物を多量に含む岩

相に含まれる単斜輝石は、特に Fs に富む傾向が見られた。

カンラン石斑れい岩では、WLR の最も Fs 成分に富む単斜輝石と、WHR の単斜輝石の組成とが類似する (Fig. III-2B)。斑れい岩は WLR に比べ ELR の単斜輝石のほうがやや Fs 成分に富む (Fig. III-2C)。ホルンブレンド輝石斑れい岩は、ELR、WHR および WSR で比較を行った。この中で最も Fs 成分が低かったのは WHR で、次いで WSR、ELR の順となった (Fig. III-2D)。ホルンブレンド輝石斑れい岩の細粒な岩相 (fine grain type) の単斜輝石は、WLR と WSR とで大きく組成が異なった (Fig. III-2E)。輝石ホルンブレンド斑れい岩の細粒な岩相 (fine grain type) の単斜輝石の組成は、ホルンブレンド輝石斑れい岩の WLR の組成とも類似する (Fig. III-2E, G)。II 章でも述べたとおり、細粒な岩相 (fine grain type) はドレライトもしくは玄武岩質の岩石学的特徴を有するため、次章での全岩化学組成を見据えた検討が必要になるであろう。輝石ホルンブレンド斑れい岩の鉄酸化物鉱物を多量に含む岩相は、WLR と WAR で確認された。これまでは、同じ斑れい岩類を比較した場合、WLR の単斜輝石がより Fs 成分が低く、初生的であったが、鉄酸化物鉱物を多量に含む岩相の単斜輝石は著しく Fs 成分に富むことが特徴的であった (Fig. III-2H)。

Fig. III-10 は、共存する斜長石と単斜輝石について、斜長石中の An 成分と単斜輝石中の XMg 成分をプロットした図である。斜長石は An 成分が高いほど初生的で、単斜輝石は XMg 値が高いほど初生的であることから、図の右上ほど初生的で、左下に向かって分化していく傾向にある。斜長石と単斜輝石の記載で述べたとおり、最も初生的な斑れい岩類がトロクトライトで、次いでカンラン石斑れい岩、斑れい岩、ホルンブレンド輝石斑れい岩、輝石ホルンブレンド斑れい岩へと分化する様子が読み取れる。カンラン石斑れい岩は、ELR と WHR に産出したが、両者の組成は大きく異なる。同様に斑れい岩でも WLR と ELR で組成に違いが見られる。この解釈は、WLR のトロクトライト、カンラン石斑れい岩、斑れい岩はいずれも一連の成因で、若干のモード測定においてカンラン石および単斜輝石の量比が異なったために異なる分類がなされただけで、その生成条件に差がなかったことが予想される。WHR のカンラン石斑れい岩は、モード測定においてカンラン石の量比が、カンラン石を含むホルンブレンド輝石斑れい岩よりも若干高かったため (pl : ol: cpx で ol 比が 6.1%) に、カンラン石斑れい岩に分類されただけで、成因としてはホルンブレンド輝石斑れい岩と一連と考えられる。つまり、同じカンラン石斑れい岩であっても生成過程に違いがあることが予想される。

WHR において、ホルンブレンド輝石斑れい岩と輝石ホルンブレンド斑れい岩が比較的近い範囲にプロットされる理由は、角閃石の生成が関与している可能性が高い。単斜輝石の XMg は、ホルンブレンド輝石斑れい岩が 0.76、輝石ホルンブレンド斑れい岩が 0.77 でほぼ同じと言える。この 2 つの斑れい岩の違いは角閃石の量比の差で、二次的

に角閃石が生じることによって角閃石の量比が増え、結果的に輝石ホルンブレンド斑れい岩の量比が増える傾向にあると考えられる。つまりもとは同じホルンブレンド輝石斑れい岩であったが、二次的に輝石ホルンブレンド斑れい岩となったとすれば、単斜輝石の XMg 値は同じはずなので、近い領域にプロットされたと考えられる。このことから、斑れい岩の成因を考察するにあたっては、輝石ホルンブレンド斑れい岩よりもホルンブレンド輝石斑れい岩に着目すべきことが考えられる。WHR と ELR のホルンブレンド輝石斑れい岩では、WHR の単斜輝石中の XMg が高く、ELR の斜長石中の An 値がやや高い傾向にある。これは WHR のホルンブレンド輝石斑れい岩の鉄酸化物鉱物含有量が少ないこと（ELR の鉄酸化物鉱物含有量が多いこと）に関連していると考えられる。細粒な岩相（fine grain type）の輝石ホルンブレンド斑れい岩は、輝石ホルンブレンド斑れい岩やホルンブレンド輝石斑れい岩と同じか、それ以上に初生的な領域にプロットされる。

Fig. III-11 は、Fig. III-10 でプロットした試料について、次章で述べる全岩化学組成の TiO_2 含有量を考慮して再プロットした図である。全岩化学組成の TiO_2 含有量は、増大するほど分化している傾向にある。前述の WHR と ELR のホルンブレンド輝石斑れい岩に着目すると、ELR のホルンブレンド輝石斑れい岩の方が TiO_2 含有量が高いことが読みとれる。細粒な岩相（fine grain type）の輝石ホルンブレンド斑れい岩は、An 値が比較的高いにも関わらず TiO_2 含有量も高い。Fig. III-11 の TiO_2 の区分では“8”であり、その含有量は 1.0 ～ 1.5wt.% である。ゴジラメガムリオンに産する玄武岩類の TiO_2 含有量は、WHR の YK09-05 6K#1146 試料で 1.4 ～ 1.6 wt.%、Breakaway よりも南に産する玄武岩（KR03-01 D05-01；ゴジラメガムリオンの形成前）で 1.62 wt.% であり（いずれも山下（未公表））、細粒な岩相（fine grain type）の輝石ホルンブレンド斑れい岩の含有量と近い。全岩化学組成の対比において、細粒な岩相（fine grain type）の輝石ホルンブレンド斑れい岩は玄武岩類との比較を考えなければならないであろう。

3) 大西洋中央海嶺およびインド洋中央海嶺のメガムリオンから産する斑れい岩との比較

大西洋中央海嶺（MAR）のアトランティス岩体（Atlantis massif）にて掘削された IODP Leg305 U1309D の掘削深度 800 ～ 1300m から得られた斑れい岩類（Suhr *et al.*, 2008）と、南西インド洋海嶺（SWIR）のアトランティス II 断裂帯のアトランティスバンク中央部の ODP 掘削孔 735B で掘削された斑れい岩類（Ozawa *et al.*, 1991）について、産出する斑れい岩の斜長石中の An 成分と単斜輝石中の XMg 成分を対比した。

アトランティス岩体の IODP Leg305 U1309D の斑れい岩類（Suhr *et al.*, 2008）は、カンラン石に富むトロクトライト、トロクトライト、カンラン石斑れい岩、斑れい岩、カンラン石ノーライト、斑れいノーライト、oxide gabbro、microgabbro に区分されており、microgabbro を除いて An 値および XMg もこの順に低くなる傾向が指摘されている（Fig. III-12）。ゴ

ジラメガムリオンの斑れい岩類との対比では、最も初生的なトロクトライトの斜長石の An 値がゴジラメガムリオンの方が高く、カンラン石斑れい岩についても単斜輝石の XMg 値がゴジラメガムリオンの方がやや高い。An 値が高くなった原因として、水の関与が予想される。すなわち、ゴジラメガムリオンのほうがより水の関与が高かったことが予想されるが、定量的なデータはない。Fig. III-12 のカンラン石ノーライトや斑れいノーライトが、本研究の輝石ホルンブレンド斑れい岩やホルンブレンド輝石斑れい岩に相当するものと思われる。これらに関しては単斜輝石の XMg 値は大差がないものの、An 値はゴジラメガムリオンの方が圧倒的に低い。また、oxide gabbro については、ゴジラメガムリオンの方が An 値も XMg も圧倒的に低くなっている。ゴジラメガムリオンの斑れい岩類では唯一外れていた細粒な岩相 (fine grain type) を持つ輝石ホルンブレンド斑れい岩が、アトランティス岩体の斑れい岩類のトレンドと一致する。

南西インド洋海嶺のアトランティスバンク中央部の ODP 掘削孔 735B で掘削された斑れい岩類 (Ozawa *et al.*, 1991) は、トロクトライト、カンラン石斑れい岩、Fe-Ti oxide ガブロに区分されており、An 値および XMg もこの順に低くなる (Fig. III-13)。アトランティスバンクで最も初生的であるトロクトライトの An 値および XMg は、ゴジラメガムリオンのカンラン石斑れい岩と同程度であり。アトランティス岩体と同様に、ゴジラメガムリオンのトロクトライトの An 値が高いのが特徴的である。アトランティスバンクの Fe-Ti oxide gabbro は、ゴジラメガムリオンの輝石ホルンブレンド斑れい岩およびホルンブレンド輝石斑れい岩と、輝石ホルンブレンド斑れい岩の鉄酸化物鉱物に富む岩相の斑れい岩の中間的な組成であった。つまり、ゴジラメガムリオンの輝石ホルンブレンド斑れい岩の鉄酸化物鉱物に富む岩相は、最も分化している斑れい岩と考えられる。

Fig. III-12 および Fig. III-13 の A から C のトレンドは、Natland and Dick (1996) によって提案されたマグマの分化トレンドで、A から C に向かって初生であると考えられている。すなわち、ゴジラメガムリオン、アトランティスバンク、アトランティス岩体の 3 者を比較すると、ゴジラメガムリオンとアトランティスバンクの斑れい岩を形成したマグマは、より分化したマグマであり、アトランティス岩体はそれよりも初生的なマグマであると考えられる。この結果は、小原 (2012) がゴジラメガムリオンのかんらん岩が P-type と F-type を含む点で南西インド洋のかんらん岩と類似することを指摘したことと調和的である。

以上、大西洋中央海嶺のアトランティス岩体と、南西インド洋海嶺のアトランティスバンク中央部の斑れい岩類との比較をまとめると、ゴジラメガムリオンのトロクトライトは、An 値および XMg とも最も高く、最も初生的な斑れい岩であると言える。すなわち、ゴジラメガムリオンが最も初生的な斑れい岩を産したともいえる。逆に最も分化した斑れい岩類も、ゴジラメガムリオンの鉄酸化物鉱物に富む岩相の輝石ホルンブレンド斑れい岩であった。すなわち、ゴジラメガムリオンの斑れい岩は、初生的な斑れい岩から分化した斑れい岩

まで、幅広い組成を有すると言える。

4. まとめ

- 1) 斜長石はすべての斑れい岩類、すなわちトロクトライトからカンラン石斑れい岩、斑れい岩、ホルンブレンド輝石斑れい岩、輝石ホルンブレンド斑れい岩、ホルンブレンド斑れい岩、トロニウム岩において分析値が得られ、その An 値は連続的に低くなっていく傾向が見られた。このことから、トロクトライトが最も初生的で、トロニウム岩が最も分化していると言える。この傾向は、単斜輝石やカンラン石の XMg 値でも同じであった。
- 2) Ernst & Lin (1998) の角閃石温度圧力計を用いて、初生的な茶色系の角閃石の生成温度を推定した。その結果、ホルンブレンド輝石斑れい岩からホルンブレンド斑れい岩に含まれる初生的な角閃石の生成温度は 1050 ~ 900 °C 程度、トロニウム岩では 900 °C 以下であることが推定された。
- 3) ゴジラメガマリオン の地形構造区分ごとの鉱物組成の対比では、初期の活動 (distal part) に相当する ELR や WLR が斜長石の An 値や単斜輝石の XMg が高いトロクトライトやカンラン石斑れい岩、斑れい岩を産出することで特徴づけられることから、初期の活動においてより初生的な斑れい岩が見られることになり、II 章の結論とも整合的である。WLR から、WHR、WAR、WSR にかけて、産出する輝石ホルンブレンド斑れい岩の An 値を比較すると、WLR および WHR が高く、WAR に向かって徐々に低くなり、WSR で再び高くなる傾向が見られた。この解釈としては、WLR が最も初生的であったが、次第にマグマ量が減り、WAR で最少となるが、末期の WSR で再びマグマ量が増えたことが予測され、この結果は Snow et al., (投稿準備中) の結果と一致する。この傾向は、カンラン石斑れい岩やホルンブレンド斑れい岩、トロニウム岩でも見られた。ホルンブレンド輝石斑れい岩については、地形構造区分による変化がほとんどなかった。
- 4) 大西洋中央海嶺の Atlantis Massif にて掘削された IODP Leg305 U1309D の斑れい岩類と、南西インド洋海嶺のアトランティスバンク中央部の ODP 掘削孔 735B で掘削された斑れい岩類の、斜長石中の An 成分と単斜輝石中の XMg 成分を対比した。ゴジラメガマリオン の傾向は、南西インド洋海嶺のアトランティスバンクの斑れい岩類の傾向と一致し、より分化していると考えられる。また、ゴジラメガマリオン のトロクトライトは、An 値および XMg とも最も高く、最も初生的な斑れい岩であると言え、ゴジラメガマリオン が最も初生的な斑れい岩を産したとも言える。逆に最も分化した斑れい岩類も、ゴジラメガマリオン の鉄酸化物鉱物に富むな岩相の輝石ホルンブレンド斑れい岩であり、ゴジラメガマリオン の斑れい岩は、初生的な斑れい岩から分化した斑れい岩まで、幅広い組成を有すると言える。

IV. ゴジラメガムリオンに産する斑れい岩類の地球化学的検討

1. はじめに

本章では、蛍光 X 線分析による全岩化学分析の結果からゴジラメガムリオン産の斑れい岩類の地球化学的特徴を明らかにする。III 章までは、記載岩石学的、鉱物学的特徴から、ゴジラメガムリオンの斑れい岩類を 7 つに区分し記載、比較を行った。本章では、7 種類の斑れい岩類の地球化学的特徴を明らかにすること、鉱物の化学組成および組成比との関連を明らかにすること、いくつかの斑れい岩類についてはその成因までを明らかにすることを目的とする。なお、OCC における斑れい岩類の全岩化学組成による地球化学的検討の研究例は少ない。全岩化学分析を行ったとしても、例えば ODP の掘削などではコアの鉛直方向の組成の比較を行う程度で、成因の解明まで行っている論文は極めて少ない。

2. 分析方法

ゴジラメガムリオンで回収された斑れい岩類は、岩相が極めて不均質な試料や、体積が小さい試料が採集されることなどから、全岩化学分析に耐えられない試料が多く含まれる。本研究では、得られた試料から分析に耐えうる 120 点の試料について全岩化学分析を実施した。

全岩化学分析は神奈川県立生命の星・地球博物館設置の蛍光 X 線分析装置（島津製作所 XRF-1500）を使用した。分析を実施した元素は、 SiO_2 、 TiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 MnO 、 MgO 、 CaO 、 Na_2O 、 K_2O 、 P_2O_5 の主要元素が 10 元素と、Ba、Cr、Nb、Ni、Rb、Sr、V、Y、Zn、Zr の微量元素が 10 元素である。試料は、岩石の新鮮な部分を切断して乾燥させた後、鉄乳鉢で粗割して 0.5 ～ 2mm メッシュの粒子だけを取り出し、超音波洗浄機で蒸留水を用いて濁りが無くなるまで洗浄。その後、蒸留水に 1 週間程つけて塩抜きを実施し、恒温器で乾燥させた後に、メノウ乳鉢で粉碎して粉末試料を作成した。フラックスおよび主要元素の分析条件については、小出ほか（2000）に従った。

3. 斑れい岩類の全岩化学組成

斑れい岩類の全岩化学組成を Table 11 に示す。また、斑れい岩類の主要元素と微量元素のバリエーションダイアグラムに基づく地球化学的特徴を以下に記す (Fig. IV-1 ～ 5)。

1) トロクトライト

WLR に産するトロクトライトについて、6 点の分析を行った。トロクトライトの SiO_2 含有量は 46.85 - 47.68 wt. % 程度。他の斑れい岩類と比較して、高い Al_2O_3 含有量 (22.16 - 24.72 wt.%)、 MgO 含有量 (7.92 - 13.14 wt.%)、 CaO 含有量 (10.89 - 13.05 wt.%)

と、低い TiO_2 含有量 (0.06 - 0.13 wt.%)、著しく低い K_2O 含有量 (~ 0.06 wt.%) で特徴づけられる (Fig. IV-1a)。微量元素については、高い Cr 含有量 (26 - 350 ppm) と Ni 含有量 (215 - 462 ppm)、低い Nb 含有量 (1.1 - 1.4 ppm)、Rb 含有量 (3.1 - 4.2 ppm)、Zn 含有量 (13 - 32 ppm)、極めて低い Ba 含有量 (~ 0.5 ppm)、V 含有量 (9 - 25 ppm)、Y 含有量 (3.4 - 5.4 ppm)、Zr 含有量 (13 - 17 ppm) で特徴づけられる。Sr 含有量 (141 - 190 ppm) は他の斑れい岩類と大差がない (Fig. IV-1b)。MgO および Cr、Ni 含有量が著しくばらついた原因は、モード組成でカンラン石の含有量にばらつきがあることと関連があると思われる。

2) カンラン石斑れい岩

カンラン石斑れい岩は、WLR の 3 点と WHR の 1 点の分析を行った。

WLR のカンラン石斑れい岩の 3 点の主要元素の化学組成は、ばらつきが大きいのが特徴である。 SiO_2 含有量は 47.69 - 50.97 wt. % 程度であった。他の斑れい岩類と比較して高い MgO 含有量 (10.11 - 10.96 wt.%)、CaO 含有量 (11.36 - 15.19 wt.%)、 Al_2O_3 含有量 (16.61 - 22.68 wt.%) と、低い TiO_2 含有量 (0.12 - 0.33 wt.%)、 Fe_2O_3 含有量 (4.13 - 6.08 wt.%)、 K_2O 含有量 (0.03 - 0.04 wt.%) で特徴づけられる (Fig. IV-1a)。微量元素については、Cr 含有量 (284 - 1165 ppm) と Ni 含有量 (133 - 347 ppm) が極めて高く、低い Nb 含有量 (1.4 - 1.5 ppm)、Rb 含有量 (2.7 - 3.7 ppm)、V 含有量 (33 - 148 ppm)、Zn 含有量 (20 - 33 ppm) と、極めて低い Ba 含有量 (1.1 - 7.9 ppm)、Y 含有量 (5.4 - 12 ppm)、Zr 含有量 (16 - 19 ppm) で特徴づけられる。Sr 含有量 (108 - 134 ppm) は他の斑れい岩類と大差がない (Fig. IV-1b)。

WHR のカンラン石斑れい岩は、WLR のカンラン石斑れい岩と比較して、やや高い SiO_2 含有量 (52.47 wt.%)、 Na_2O 含有量 (4.23 wt.%) と K_2O 含有量 (0.14 wt.%)、およびやや低い MgO 含有量 (6.50 wt.%) で特徴づけられる。微量元素の含有量については、WLR のカンラン石斑れい岩で特徴的であった Cr と Ni 含有量が高い傾向が見られず、他の元素は大差がない。

3) 斑れい岩

斑れい岩は ELR の 4 点と WLR の 1 点の分析を行った。

WLR の斑れい岩は、WLR のカンラン石斑れい岩と地球化学的性質が類似する。すなわち、高い Al_2O_3 含有量 (17.92 wt.%)、MgO 含有量 (10.63 wt.%)、CaO 含有量 (15.68 wt.%) と、低い TiO_2 含有量 (1.13 wt.%)、著しく低い K_2O 含有量 (0.02 wt.%) で特徴づけられる (Fig. IV-1a)。また微量元素も著しく高い Cr 含有量 (761 ppm) とやや高い Ni 含有量 (200 ppm) で特徴づけられる。他の元素については、WLR のカンラン

石斑れい岩の含有量と大差がない (Fig. IV-1b)。

ELR の斑れい岩は、WLR の斑れい岩とはやや組成が異なり、WHR のカンラン石斑れい岩と地球化学的性質が似る。ELR の斑れい岩は、WLR の斑れい岩と比較してやや高い SiO_2 含有量 (51.69 - 53.37 wt.%)、 Na_2O 含有量 (2.68 - 4.14 wt.%) と、低い MgO 含有量 (4.79 - 8.67 wt.%)、 CaO 含有量 (11.58 - 14.66 wt.%) で特徴つけられる。微量元素については、他の斑れい岩類と比較して、高い Cr 含有量 (17 - 362 ppm) とやや高い Ni 含有量 (41 - 151 ppm)、低い Nb 含有量 (0.6 - 1.7 ppm)、Rb 含有量 (3.8 - 4.9 ppm)、V 含有量 (99 - 152 ppm)、Y 含有量 (9 - 13 ppm)、Zn 含有量 (19 - 55 ppm)、Zr 含有量 (15 - 23 ppm)、極めて低い Ba 含有量 (~ 14 ppm) で特徴づけられる。Sr 含有量 (122 - 217 ppm) は他の斑れい岩類と大差がない (Fig. IV-1b)。

4) ホルンブレンド輝石斑れい岩

ホルンブレンド輝石斑れい岩は、ELR の 3 点と WLR の 2 点、WHR の 10 点、WSR の 4 点について分析を行った。これらの試料は、 Al_2O_3 や FeO において、直線的にプロットされ、地形構造区分による差が見られない (Fig. IV-2a)。 TiO_2 の含有量において特徴的な違いが見られ、概ね 2 wt.% 以下と 4 wt.% 以上に分けることができる。 TiO_2 含有量が 2 wt.% 以下の ELR と WSR のホルンブレンド輝石斑れい岩は cumulate 組織が見られる。一方、 TiO_2 含有量が 4 wt.% 以上のホルンブレンド輝石斑れい岩は cumulate 組織が不鮮明な場合がある。他の特徴としては SiO_2 含有量が 50 wt.% 以上で MgO 含有量および CaO 含有量が高い点が挙げられる。微量元素は概ね他の斑れい岩類と同等の含有量であった。他の斑れい岩類と比較して、Nb、Rb および Y に関してはやや低い傾向にある (Fig. IV-2b)。WLR の細粒な岩相を持つホルンブレンド輝石斑れい岩は、Cr 含有量が極めて高いことが特徴的である。また、Ni や Zr 含有量もやや高い傾向にある。

5) 輝石ホルンブレンド斑れい岩

輝石ホルンブレンド斑れい岩は、ELR の 12 点と WLR の 9 点、WHR の 9 点、WAR の 12 点、WSR の 12 点について分析を行った。バリエーションダイアグラムでは、主要元素および微量元素とも幅広い領域にプロットされており目立った傾向が見られない (Fig. IV-3a, 3b)。ただし、細粒な岩相をもつ輝石ホルンブレンド斑れい岩の Cr (33 - 348 ppm) と Ni (35 - 180 ppm) の含有量は極めて高い。

6) ホルンブレンド斑れい岩

ホルンブレンド斑れい岩は、ELR の 3 点と WLR の 2 点、WAR の 11 点、WSR の

1 点について分析を行った。主要元素のバリエーションダイアグラムでは Al_2O_3 、 FeO 、 CaO および Na_2O において、 SiO_2 の増大に対し各試料が直線的にプロットされ、特に WAR では顕著である (Fig. IV-4a)。 TiO_2 、 MgO 、 K_2O および微量元素においては傾向が見られない (Fig. IV-3a, 3b)。

7) トロニウム岩

トロニウム岩は、WHR の 3 点と WAR の 8 点について分析を行った。 SiO_2 の含有量は、1 点が 61.1 wt% であるが他は 64 wt% を上回り、今回全岩化学分析を行った斑れい岩類の中で最も高い。主要元素は、 K_2O を除きばらつきがなく、低い TiO_2 含有量 (0.02 - 0.94 wt%)、 FeO 含有量 (0.29 - 3.18 wt%) および CaO 含有量 (0.17 - 4.39 wt%) と高い Al_2O_3 含有量 (18.07 - 22.01 wt%) と Na_2O 含有量 (8.8 - 10.92 wt%) で特徴づけられる (Fig. IV-5a)。 SiO_2 と Al_2O_3 、 Na_2O のトータルで 88 ~ 97 wt% を占めており、曹長石の化学組成に近い。微量元素は、極めて低い Cr 含有量 (0 - 17 ppm)、Ni 含有量 (2 - 44 ppm)、V 含有量 (0 - 88 ppm) で特徴づけられる (Fig. IV-5b)。

4. 微量元素のスパイダーダイアグラムによる比較

斑れい岩類の微量元素について、Pearce, (1983) による MORB で規格化し、比較を行った。斑れい岩類ごとの比較結果を以下に示す。

トロクトライト (Fig. IV-6A) : Sr と Rb については 1 よりも若干高いが、他の元素はすべて 1 よりも低く、非常に枯渇しているパターンを示す。Ba はすべての試料において、K は試料によって差が見られるが、概して含有量が極めて低い。また、HFS 元素 (Nb, P, Zr, Ti, Y) についても低い。

カンラン石斑れい岩 (Fig. IV-6B) : パターンの形状はトロクトライトと類似するが、Ba および K ともトロクトライトよりはやや高い。WLR のカンラン石斑れい岩はやや Ba が高い点を除いて、ほぼ同様なパターンを示す。WHR のカンラン石斑れい岩はすべての元素において WLR のカンラン石斑れい岩よりも高く、そのパターンの形状は WHR の SiO_2 が 50wt.% よりも高いホルンブレンド輝石斑れい岩のと類似する。

斑れい岩 (Fig. IV-6C) : パターンの形状はトロクトライトおよびカンラン石斑れい岩と類似する。すなわち、Sr と Rb については 1 よりも若干高いが、他の元素はすべて 1 よりも低く、非常に枯渇しているパターンである。特に WLR の斑れい岩は、トロクトライトと極めて類似する。ELR の斑れい岩の Ba および K の含有量は試料によって差が見られ、そのパターンの形状は WLR のカンラン石斑れい岩と類似する。

ホルンブレンド輝石斑れい岩 (Fig. IV-6D, E) : ホルンブレンド輝石斑れい岩のパターンは 3 種類に分けられる。1 つは ELR に 1 点だけ見られた Ba と K が低いパターンで、

前述のトロクトライトに代表される枯渇したパターンである。2 つ目は K を除く LIL 元素がやや高く、HFS 元素に枯渇したパターンである。このホルンブレンド輝石斑れい岩は、SiO₂ 含有量がやや高く、概ね 50 wt.% 以上含まれることでも特徴づけられる。3 つ目は K を除く LIL 元素が高く、特に Ba にピークが見られる。HFS 元素の含有量は試料によりまちまちであるが、Ti だけが顕著に高い試料である。このホルンブレンド輝石斑れい岩は、SiO₂ 含有量がやや低く概ね 50 wt.% 以下である。いずれのパターンも P の含有量は試料によってまちまちである。

ホルンブレンド輝石斑れい岩には、細粒な岩相を示す試料が含まれる (Fig. IV-6F)。後述の輝石ホルンブレンド斑れい岩とあわせて、細粒な岩相を示す試料はややフラットなパターンを持つものと (Fig. IV-6F の WLR)、LIL 元素と Ti が高いパターンを持つものとに分けられる (Fig. IV-6F の WSR)。

輝石ホルンブレンド斑れい岩 (Fig. IV-6G, H, I, J, K) : 微量元素のパターンはホルンブレンド輝石斑れい岩と同じ。すなわち、Ba と K が低く前述のトロクトライトに代表される枯渇したパターンは、ELR の 1 点が該当した (Fig. IV-6H)。残りは概ね Ti の含有量で区分ができ、Ti に富む輝石ホルンブレンド斑れい岩は、WLR の全試料 (Fig. IV-6G)、ELR の 6 試料 (Fig. IV-6H)、WHR の 3 試料 (Fig. IV-6I)、WAR の 9 試料 (Fig. IV-6J)、WSR の 10 試料 (Fig. IV-6K) が該当する。これらの試料は、SiO₂ 含有量が概ね 52 wt.% よりも低い。Ti が低い輝石ホルンブレンド斑れい岩は、ELR の 4 試料 (Fig. IV-6H)、WHR の 4 試料 (Fig. IV-6I)、WAR の 1 試料 (Fig. IV-6J)、WSR の 1 試料 (Fig. IV-6K) が該当する。これらの試料は、SiO₂ 含有量が概ね 50 wt.% よりも高いことでも特徴づけられる。

輝石ホルンブレンド斑れい岩には、細粒な岩相を示す試料が含まれる (Fig. IV-6L)。輝石ホルンブレンド斑れい岩の細粒な岩相を示す試料は、いずれもややフラットなパターンを持つことで特徴づけられる。

ホルンブレンド斑れい岩 (Fig. IV-6M) : ホルンブレンド輝石斑れい岩や輝石ホルンブレンド斑れい岩と比較して全体的に enrich している。概ね Ba にピークをもち、P の含有量は試料によってまちまち。Ti による区分は明確ではない。

トロニウム岩 (Fig. IV-6N) : Ba にピークを持つと同時に、Zr 含有量が高いために Zr のピークが顕著なことが特徴的。Ti は極めて低い。

5. ノルム組成

全岩化学組成の主要成分の結果から C. I. P. W. ノルム計算を行った (Table 11)。ノルム計算の結果は、地形構造区分ごとあるいは岩石種ごとに特徴が見られた (Fig. IV-7)。地形構造区分ごとの比較では、活動初期の WLR や ELR が、ノルム・カンラン石 (ノルム・

フォーステライト + ノルム・ファイヤライト) が計算される斑れい岩類が多く、またノルム・石英が計算される斑れい岩類も見られる。中期の WHR ではトロニウム岩の 1 点だけがノルム・石英が計算された以外は、ノルム・カンラン石が計算される斑れい岩類が多いことに加え、ノルム・ネフェリンが計算された斑れい岩類が 7 点あった。WHR の斑れい岩類は変形作用を受けているため、二次的に Na_2O 含有量が増加したことにより、ノルム・ネフェリンが計算された可能性がある。しかし、全岩化学組成では WAR や WSR の斑れい岩類に比べ CaO 含有量が高く、 Na_2O 含有量が低い二次的な作用とは考えにくい。すなわち、WHR の斑れい岩類を形成したマグマは、Si に不飽和であったと考えられる。後期の WAR では、ノルム・石英が計算される斑れい岩類が多いことが特徴的であった。末期の WSR は WHR と同様に、ノルム・カンラン石に加え、ノルム・ネフェリンが計算される割合が高い。岩石種ごとの比較では、ノルム・石英が計算された斑れい岩類は、輝石ホルンブレンド斑れい岩、ホルンブレンド斑れい岩、トロニウム岩であり、より分化した斑れい岩類であった。

6. 地形構造区分による地球化学的特徴

1) WLR

WLR の斑れい岩類は SiO_2 含有量が 53 wt.% よりも低い。 SiO_2 の増減に対する各元素の挙動は、 TiO_2 や Al_2O_3 、 FeO_t などでは $\text{SiO}_2 = 53$ wt.% 程度の位置から SiO_2 の減少に伴い、各元素が増大あるいは減少しており、不等号の “>” 型のパターンを示す (Fig. IV-8a)。 MgO や CaO 、 K_2O では一見したところ目立った傾向はなく、散在しているように見える。 Na_2O についてはやや直線的なパターンを示す。

2) ELR

ELR も基本的には WLR と似たパターンを示す (Fig. IV-8a)。すなわち、 $\text{SiO}_2 = 54$ wt.% 程度の位置から SiO_2 の減少に伴って各元素が増大あるいは減少してする “>” 型のパターンである。また、 SiO_2 含有量が 55 wt.% を越える試料が 3 点ほどあり、これらを加えた傾向を見ると、 SiO_2 の増大に沿って各元素が直線的に増減しているようにも見える。

3) WHR

WHR は SiO_2 の含有量が 52 wt.% 以下の斑れい岩類と、64 wt.% 以上のトロニウム岩で構成され、その間の組成が存在しない、いわゆるバイモーダルなパターンを示す (Fig. IV-8b)。斑れい岩類の MORB で規格化した微量元素のパターンは、 SiO_2 に富み (50 wt.% 以上) TiO_2 に乏しいパターンと、 SiO_2 が少なく (46 ~ 48 wt.% 程度) TiO_2 に富

むパターンとに分かれる。この傾向は、CaO や MgO でも表れている。

4) WAR

WAR の斑れい岩類は、輝石ホルンブレンド斑れい岩からトロニエム岩までが一直線上に並んだ直線的なトレンドを示す (Fig. IV-8b)。ただし、K₂O では顕著でない。

5) WSR

WSR は点数が少ないため、一見したところ WAR のトレンドと類似する (Fig. IV-8b)。しかし、斑れい岩類の多くは SiO₂ 含有量が 54 wt.% 以下で、各元素の含有量は WLR や ELR と類似すること、ELR と同じく数点だけが 54 wt.% を越えて直線的であることなどを考慮すると、ELR のパターンに類似するとも言える。

7. 議論

1) 細粒な岩相の斑れい岩類の成因について

細粒な岩相を有する斑れい岩類の全岩化学組成をパレスベラリフトから報告されている玄武岩類と比較・検討した (Fig. IV-9)。比較に用いた玄武岩類は次の通り。

YK09-05 6K#1146 : ゴジラメガムリオンの WHR に産する玄武岩で、一部が枕状溶岩として産する。全岩化学組成は、山下 (未公表)。

YK11-08 6K#1275 : ゴジラメガムリオンの NP から採集した新鮮なガラス。全岩化学組成は、石塚 (投稿準備中)。

KR03-01 D06-1507, 1508 : ゴジラメガムリオンの WLR に産する玄武岩である。本研究で用いている D06 の斑れい岩類と同じドレッジで採集された。全岩化学組成は、佐藤 (投稿準備中)。

KR03-01 D05-1 : ゴジラメガムリオンの Breakaway の南から採集した玄武岩。同じドレッジで採集した玄武岩より Ar-Ar 年代測定がなされており、噴出年代は 16.3±0.6 Ma と 15.1±0.6 Ma。全岩化学組成は、山下 (未公表)。

KR03-01 D04 : ゴジラメガムリオンのトランスフォーム断層を挟んだ西側、すなわち Segment 2 で形成された abyssal hill の玄武岩。全岩化学組成は、佐藤 (投稿準備中)。

KR03-01 D18 : ゴジラメガムリオンの北方に相当する、パレスベラリフト (Segment 6) の拡大軸より採集した玄武岩。全岩化学組成は、佐藤 (投稿準備中)。

MORB 組成 : 太平洋、大西洋およびインド洋に産する玄武岩およびガラスの全岩化学組成のコンパイル。データは、佐藤ほか (2008) より引用。

細粒な岩相を有する斑れい岩類は、SiO₂ 含有量の低いホルンブレンド輝石斑れい岩、

および SiO_2 含有量がやや高い (52 wt.% 以上) のホルンブレンド輝石斑れい岩 1 点 (KR03-01 D06-1506) と輝石ホルンブレンド斑れい岩 1 点 (KR03-01 D06-1402) を除き、概ねパレスベラ海盆産の玄武岩類と類似した化学組成を有する。また、MORB と比較しても、FeOt 含有量と Na_2O 含有量がやや高いこと、CaO 含有量がやや低いことを除いて、化学組成が類似する。すなわち、細粒な岩相を有する斑れい岩類の大半は、全岩化学組成が MORB もしくはパレスベラ海盆に産する玄武岩類と一致すると言える。Fig. IV-10A および 10B は、Fig. IV-6F および 6L で示した微量元素のスパイダーダイアグラムに YK09-05 6K#1146 (前述) の玄武岩のパターンを加えた図である。YK09-05 6K#1146 の微量元素のパターンは、MORB (Pearce, 1983) による規格化で、LIL 元素にやや富み、HFS 元素が 1 程度で、全体的にはやや右下がりである。Fig. IV-10A では、WLR の LIL 元素の高い方のパターンが YK09-05 6K#1146 のパターンと類似する。また Fig. IV-10B では、WLR の LIL 元素の高い 3 試料と、WSR のパターンが類似する。WHR や WAR の試料についても、K がやや低く、HFS 元素もやや低い傾向があるが、全体的にフラットであることなど類似点が多い。結果的に、 SiO_2 含有量の低いもしくは SiO_2 含有量がやや高い (52 wt.% 以上) の斑れい岩類を除く、細粒な岩相を有する斑れい岩類は玄武岩の化学組成と類似するという結論に達する。細粒な岩相を有する斑れい岩類は、玄武岩マグマがリソスフェア — 中で比較的急速に固結して形成されたと考えられる。

2) 全岩化学組成に基づく斑れい岩類の区分

Fig. IV-11 はゴジラメガムリオンの斑れい岩類の SiO_2 と FeOt をプロットした図である。ゴジラメガムリオンの斑れい岩類は、 SiO_2 が 52 - 53 wt. % を中心に、黒矢印で示した A, B, C の 3 方向に沿ってプロットされる。そこで、 $\text{SiO}_2 = 52 \text{ wt.}\%$ を中心に、 SiO_2 の減少に伴い FeOt も減少するトレンドを持つ斑れい岩類を Type-1 に、 SiO_2 の増大に伴い FeOt も減少するトレンドを持つ斑れい岩類を Type-2 に、 SiO_2 の減少に伴い FeOt が増大するトレンドを持つ斑れい岩類を Type-3 にとした。さらに 7-1) で議論した細粒な岩相を有する斑れい岩類を Type-4 に、トロニエム岩を type-5 とした。これら 5 つの Type について、微量元素の地球化学的特徴や II 章で行った記載岩石学的特徴をふまえて、斑れい岩類を 5 つの Type の特徴を明らかにした (Table 12)。なお、この傾向は FeOt のみならず、他の元素でも確認されている。以下にそれぞれの Type の特徴を記す。

Type-1 は、微量元素が MORB (Pearce, 1983) による規格化で全体的に枯渇していて特に Ba および K に乏しく、Sr や Rb が 1 程度 (Fig. IV-12)。主要元素は SiO_2 含有量が 46 - 54 wt.% 程度で、 Al_2O_3 、MgO、CaO に富み、FeO、 TiO_2 に乏しい。記載岩石学的には cumulate 組織で特徴づけられるが、変形の激しい斑れい岩類 (例えば

WHR など) は、cumulate 組織が失われていることもある。トロクトライトやカンラン石斑れい岩、斑れい岩のすべて、ホルンブレンド輝石斑れい岩、輝石ホルンブレンド斑れい岩の一部が該当する。ゴジラメガマリオンにおいては、WAR 以外の地形構造区分で採集された。トロクトライトやカンラン石斑れい岩、斑れい岩のすべて、ホルンブレンド輝石斑れい岩、輝石ホルンブレンド斑れい岩の順に LIL 元素が高くなる傾向があることから、一連の生成物である可能性がある。

Type-2 は、微量元素の MORB (Pearce, 1983) による規格化パターンでは Type-3 と似るが、最も enrich しており特に Ba が高い。主要元素は SiO_2 含有量に富み SiO_2 が 52 wt.% 以上である。Type-3 とは SiO_2 含有量が大きく異なるほか、やや低い FeOt、 TiO_2 、MgO、CaO とやや高い Al_2O_3 、明らかに高い Na_2O で特徴づけられる (Fig. IV-12)。やや分化した、輝石ホルンブレンド斑れい岩やホルンブレンド斑れい岩の一部が該当する。活動後期 (proximal part) の WAR や WSR で見られるほか、活動初期 (distal part) の ELR でも数点が見られた。

Type-3 は、微量元素の MORB (Pearce, 1983) による規格化パターンが Type-2 と似るが、顕著に Ti が高いことで特徴づけられる。P の含有量は試料によって大きく差がある。主要元素は SiO_2 含有量に乏しく SiO_2 が 52 wt.% 以下で、極めて高い TiO_2 、FeOt 含有量と、やや高い Na_2O 含有量、低い Al_2O_3 、MgO、CaO 含有量で特徴づけられる。 Na_2O 含有量はやや低い、Type-1 よりも高い (Fig. IV-12)。記載岩石学的には、鉄酸化物鉱物を多量に含み、二次的に生じたと考えられる微細な斜長石を生じていることが多い。一部には cumulate 組織が確認できる。ホルンブレンド輝石斑れい岩、輝石ホルンブレンド斑れい岩、ホルンブレンド斑れい岩の大部分が該当する。すべての地形構造区分で採集されている。

Type-4 は、微量元素の MORB (Pearce, 1983) による規格化パターンで、やや LIL 元素 (特に Ba) がやや高く HFS 元素に向かって低くなる右下がりのパターンもしくはややフラットなパターンを有する。記載岩石学的には、細粒な岩相を有する斑れい岩類であり、その成因は 7-1 で考察した。ホルンブレンド輝石斑れい岩、輝石ホルンブレンド斑れい岩の一部に見られ、WLR および WAR、WSR で採集されている。

Type-5 は、微量元素の MORB (Pearce, 1983) による規格化パターンで、Ba と Zr にピークを持つ。主要元素は SiO_2 含有量に富み SiO_2 が 60 wt.% 以上で、高い Al_2O_3 、 Na_2O 含有量と、低い TiO_2 、FeOt、MgO、CaO 含有量で特徴づけられる。記載岩石学的には、トロニウム岩に該当する。WHR および WAR で採集されている。

3) 地形構造区分と全岩化学組成の関連

前述で区分した 5 つの Type を基に、地形構造区分による地球化学的特徴 (本章第

6 節 ; Fig. IV-8a, 8b) を再検討する。最も特徴が顕著に表れた、地形構造区分ごとの SiO_2 vs FeOt を Fig. IV-13a に示す。

WLR は、Type-1、Type-3、Type-4 の斑れい岩類を産する。Type-2 の斑れい岩類は産しないことから、 $\text{SiO}_2 = 52 \text{ wt.}\%$ 程度の位置から SiO_2 含有量の減少に伴い、各元素が増大あるいは減少することで、“>”型となる。Type-1 は、 FeOt の含有量が $7 \text{ wt.}\%$ よりも低く、Type-3 は FeOt の含有量が $10 \text{ wt.}\%$ よりも高いため、両者は明確に区分できる。

ELR は、Type-1、Type-2、Type-3 の斑れい岩類を産する。 FeOt 含有量が概ね $10 \text{ wt.}\%$ 以下の Type-1、 SiO_2 含有量が $53 - 60 \text{ wt.}\%$ の範囲で SiO_2 含有量の増大に伴って FeOt 含有量が低くなる（あるいは変化しない）Type-2、 FeOt 含有量が $12 \text{ wt.}\%$ 以上で SiO_2 含有量の増大に伴って FeOt 含有量が低くなる斑れい岩類が Type-3 に明瞭に区分される。Type-3 を中心に見ると、Type-3 から Type-2 にかけて直線的なパターンと、Type-3 から Type-1 にかけて“>”型のパターンが確認できた。

WHR は、Type-1、Type-3、Type-5 の斑れい岩類を産する。それぞれの SiO_2 含有量が重ならないことから、3 つのタイプが重なることなくきれいに区分された。すなわち、Type-3 は SiO_2 含有量が低く ($46 - 50 \text{ wt.}\%$) FeOt 含有量が高く ($11 - 16 \text{ wt.}\%$)、Type-1 は SiO_2 含有量がやや高く ($50 - 53 \text{ wt.}\%$) FeOt 含有量がやや低く ($5 - 8 \text{ wt.}\%$)、Type-5 はトロニウム岩である。3 つの Type の関係は、直線的あるいは斑れい岩類とトロニウム岩のバイモーダルとも言える。

WAR は、Type-2、Type-3、Type-4、Type-5 の斑れい岩類を産する。いずれもが SiO_2 含有量で明確に区分され、ほぼ直線的にプロットされる。

WSR は、Type-1、Type-2、Type-3、Type-4 の斑れい岩類を産する。Type-1、Type-3、Type-4 が重なる部分があるが、ほぼ直線的にプロットされる。

WLR、WHR、WAR、WSR へとゴジラメガマリオンの形成史を通して Type ごとの出現を考察すると、Type-1 はより初期 (distal part) の WLR と WHR で多く見られ、また末期 (proximal part) の WSR でも出現。より SiO_2 に富む Type-2 は後期 (proximal part) の WAR や WSR で見られる。また Type-2 は WLR と同時期の ELR でも見られる。Type-3 はすべての活動を通してみることができると言える。なお、他の主要元素 TiO_2 、 Al_2O_3 、 MgO 、 CaO 、 Na_2O においてもほぼ同様の結果が得られた (元素順に Fig. IV-13b ~ f)。

4) 全岩化学組成と鉱物組成の関係について

全岩化学組成と鉱物の化学組成についての検討を行った。全岩化学組成の CaO と Al_2O_3 について、カンラン石、単斜輝石、斜長石 (曹長石と灰長石) の端成分をそれぞれプロットし、かつ鉱物の化学組成についても実測値をプロットした。Fig. IV-14a は、

トロクトライトとカンラン石斑れい岩についてプロットした図である。単斜輝石を含まないトロクトライト (YK09-05 6K#1147 R01) では、カンラン石の端成分と斜長石の実測値を結んだ線上に全岩化学組成がプロットされ、その位置も概ねカンラン石：斜長石 = 14 : 86 の位置にある。カンラン石斑れい岩では、単斜輝石が含まれるため、全岩化学組成の位置がやや単斜輝石の実測値側に移動する。YK09-05 6K#1147 R02 は角閃石の割合が極めて低いために、角閃石の影響をうけておらず、斜長石、カンラン石、単斜輝石のほぼ 3 成分で示される。一方、KH07-02 D18-053 は斜長石の An 値が低いこと、角閃石の割合も高いことから、全岩化学組成は YK09-05 6K#1147 R02 よりも、Ab 成分および角閃石成分の方向に移動する。いずれにせよ、トロクトライトおよびカンラン石斑れい岩の全岩化学組成は、斜長石、カンラン石、単斜輝石、および角閃石の、ほぼ 4 鉱物の実測値で示すことができると言える。同様に、斑れい岩 (Fig. IV-14b)、ホルンブレンド輝石斑れい岩 (Fig. IV-14c,d)、輝石ホルンブレンド斑れい岩 (Fig. IV-14e,f) では、カンラン石を除く、斜長石、単斜輝石、および角閃石の 3 鉱物の実測値で示すことができる。細粒な岩相、および鉄酸化物鉱物を多量に含む岩相でも同様の結果であった。ホルンブレンド斑れい岩の全岩化学組成も、ほぼ斜長石と角閃石の実測値で示される (Fig. IV-14g)。ただし、単斜輝石をわずかに含む KR03-01 D06-1304 では、全岩化学組成がやや単斜輝石よりにプロットされる。

トロニウム岩の斜長石の An 値は、平均で 4.7 (max. 15, min. 3; Fig. III-1) と極めて低く、全岩化学組成もほぼ同じ位置にプロットされる。すなわち、全岩化学組成が斜長石の化学組成に支配されていると言える。トロニウム岩の全岩化学組成は、CaO や Al_2O_3 以外にも斜長石 (曹長石) と極めて似ており、albitite と呼んでも良いのかもしれない。

8. まとめ

- 1) 微量元素の MORB 規格化による比較の結果を基に、記載岩石学的特徴と主要元素の特徴をふまえ、ゴジラメガマリオン斑れい岩類を 5 つのタイプに分類した。

Type-1: SiO_2 - FeOt のプロットで、 SiO_2 の増大に伴い緩やかに FeOt が増大する (Fig. IV-13a)。 SiO_2 含有量は概ね 54 wt.% 以下。 Al_2O_3 、MgO、CaO に富み、FeO、 TiO_2 に乏しい。MORB (Pearce, 1983) による微量元素の規格化のパターンでは、全体的に枯渇しており、特に Ba および K に著しく乏しく、また HFS 元素についても 1 より低い。cumulate 組織が見られ、トロクトライトやカンラン石斑れい岩や斑れい岩のすべて、ホルンブレンド輝石斑れい岩および輝石ホルンブレンド斑れい岩の一部が該当する。Type-1 はより初期の WLR と WHR で多く見られ、また末期の WSR でも出現する。

Type-2: SiO_2 - FeOt のプロットでは、 SiO_2 の増大に伴い緩やかに FeOt が減少する

(Fig. IV-13a)。SiO₂ 含有量が 52 wt.% 以上で、Type-3 と比較して SiO₂ 含有量が大きく異なるほか、やや低い FeOt、TiO₂、MgO、CaO とやや高い Al₂O₃、明らかに高い Na₂O で特徴づけられる。MORB (Pearce, 1983) による微量元素の規格化のパターンで、最も enrich しており特に Ba が高い。やや分化した、輝石ホルンブレンド斑れい岩やホルンブレンド斑れい岩の一部が該当する。Type-2 は後期の WAR や WSR で特徴的だが、初期の ELR でも見られる。

Type-3: SiO₂ - FeOt のプロットでは、SiO₂ の増大に伴い著しく FeOt が減少する (Fig. IV-13a)。SiO₂ が 52 wt.% 以下で、極めて高い TiO₂、FeOt 含有量と、やや高い Na₂O 含有量、低い Al₂O₃、MgO、CaO 含有量で特徴づけられる。また、Type-3 の MORB (Pearce, 1983) による微量元素の規格化のパターンは、全体的に enrich しており、特に Ti が高いことで特徴づけられる。鉄酸化物鉱物にも富む。ホルンブレンド輝石斑れい岩、輝石ホルンブレンド斑れい岩、ホルンブレンド斑れい岩の大部分が該当する。Type-3 の斑れい岩類はすべての地形構造区分で採集されている。

Type-4: MORB (Pearce, 1983) による微量元素の規格化のパターンで、やや LIL 元素が高く、全体的には右下がりもしくはフラットなパターンで、細粒な岩相を有する斑れい岩類に見られる。主要元素の含有量、および MORB (Pearce, 1983) による微量元素の規格化のパターンとも、パレスベラ海盆産の玄武岩と類似することから、玄武岩マグマがリソスフェア — 中で比較的急速に固結して形成された可能性が高い。

Type-5: SiO₂ 含有量が 60 wt.% 以上で、高い Al₂O₃、Na₂O 含有量と、低い TiO₂、FeOt、MgO、CaO 含有量で特徴づけられる。微量元素の MORB (Pearce, 1983) による規格化パターンでは、Ba と Zr に強いピークを持つ。記載岩石学的には、トロニウム岩に該当する。Type-5 は WHR および WAR で採集されている。

V. 斑れい岩類の生成について

1. はじめに

海洋コアコンプレックスにおける斑れい岩類は、共存する斜長石の An 値と単斜輝石の XMg 値による検討から、初生的なトロクトライトから鉄酸化物鉱物に富むいわゆる oxide gabbro までがあたかも一連の分化によって形成された生成物と見なされる。しかし、深海掘削のコアからは、oxide gabbro がトロクトライトやカンラン石斑れい岩などに、比較的シャープに接することから、oxide gabbro が貫入したと見なされる場合もある（例えば Ozawa *et al.*, 1991 の ODP Hole 735B や Grimes *et al.*, 2008 の IODP Hole U1309D など）。そのため、oxide gabbro の成因を、鉄に富む玄武岩の分化物ともみなされている（Dick *et al.*, 2000; Natland and Dick, 2002 など）。

カンラン石を多く含む初生的なトロクトライトの成因については、玄武岩質マグマの cumulate による生成物か、マントルを構成するかんらん岩からの一連の生成物かで議論がなされている（Blackman *et al.*, 2006）。しかし、掘削が行われるにつれ、トロクトライトが cumulate 組織をもつこと、300m 程度の厚さをもったマグマティックなユニットが見られること、カンラン石の XMg 値がかんらん岩中のカンラン石の値よりも低いことなどから、cumulate による生成物である可能性が示唆されている（Suhr *et al.*, 2008）。

これらの研究事例から、oxide gabbro およびトロクトライトの成因がマグマの分化物であることは疑いの余地がないが、それ以上の議論がなされていない。

本研究の地球化学的検討からゴジラメガマリオンの斑れい岩類は、5 つのタイプに区分し、Type-4 が玄武岩の組成に近い細粒な岩相を有する斑れい岩類（玄武岩）で Type-5 がトロニウム岩であることまでは明らかになったが、地球化学的検討からは、成因に関するこれ以上の議論はできなかった。

本章では、これまでの研究成果によって得られた斑れい岩類の、記載岩石学的、鉱物学的、地球化学的特徴をふまえて、熱力学的モデル計算プログラム「MELTS」を用いて、斑れい岩類の生成過程について考察した。また、トロニウム岩については、マスバランス計算による生成過程の解明も試みた。

2. MELTS によるシミュレーション

MELTS は熱力学計算に基づく結晶分化作用モデル化プログラムである（Ghiorso *et al.*, 2002; Gualda *et al.*, 2012 など）。パラメーターとして、出発物質の全岩化学組成、温度、圧力、酸素分圧、含水量を入力し、計算を実施させることで、各温度圧力条件下で晶出する鉱物の量比及びその化学組成、残液の量比や化学組成、物性値が計算される。パラメーターの設定によって結果が大きく異なるため、様々なパラメーターを試行錯誤し

て計算を実施した。計算の結果、各温度における鉱物と残液の量比が得られるので、残液と各晶出鉱物の量比、および残液を外した晶出鉱物だけの量比を比較して、最適な条件を探した。以下にパラメーターを記す。

・ **出発物質** 出発物質には、ゴジラメガマリオンに産する以下の火山岩類を選んだ。すなわち、NP に産するガラス (YK11-08 6K#1275 R07)、WHR に枕状溶岩として産する玄武岩 (YK09-05 6K#1146 R06)、WLR の玄武岩 (KR03-01 D06-1508)、breakaway の南の abyssal hill の玄武岩 (KR03-01 D05-1) である。これら出発物質の全岩化学組成の対比は、Fig. IV-9 で使用したデータと同じである。KR03-01 D05-1 は SiO_2 含有量がやや高く、C. I. P. W. ノルム計算でノルム・石英が計算されるシリカに過飽和な玄武岩である。この玄武岩を出発物質に用いて計算を行うとカンラン石が晶出せず、晶出鉱物が斜長石：単斜輝石 = 1：1 に近い組成となり、ゴジラメガマリオンに産する斑れい岩類の鉱物組み合わせとはあまりにもかけ離れたため出発物質から外した (Fig. V-1)。このことから、シリカに過飽和な玄武岩では出発物質には向かないことが判明した。残りの3点はすべて C. I. P. W. ノルム計算でノルム・カンラン石 (フォルスデライト + ファイヤライト) が計算される、カンラン石玄武岩である。YK09-05 6K#1146 R06 は、残りの2点と比較して FeO に富み、MgO に乏しく、やや分化している傾向が見られたので、こちらも出発物質から外した。最終的に、最も均質で新鮮なガラス組成の YK11-08 6K#1275R07 を中心に、YK11-08 6K#1275R07 よりもやや MgO 含有量や $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe})$ 比が高い KR03-01 D06-1508 を用いることとした。YK11-08 6K#1275R07 と KR03-01 D06-1508 の全岩化学組成を Table 13 に示す。

・ **温度条件** 温度は全岩化学組成を入力した際に、自動的にリキダスが計算されるため、上限はリキダスとなる。下限は含水条件により異なるが、概ね 900°C を目安にした。温度幅は 10°C に設定した。

・ **圧力条件** 斑れい岩の固結圧力は、Herzberg (2004) によって、 $0.2\pm0.1\text{ GPa}$ に集中するとの報告がある。また、海洋コアコンプレックスの断面モデル (例えば Escartin & Canales, 2011) では、海底下 $3\text{ km} = 0.1\text{ GPa}$ 程度にマグマだまりを推定している。一般的に海洋コアコンプレックスは大水深に分布することが多く、パレスベラ海盆においてもリフト部付近は $5,000\text{ m}$ を越える。そのため、水深の圧力 $5000\text{ m}=0.05\text{ GPa}$ を考慮し、 0.15 GPa を中心に計算を行うこととした。なお、MELTS では圧力の単位が “bar” なので、今後は 1500 bar と表す。試験的に、 500 bar から 3000 bar まで圧力を変えて計算を行ったが、この程度の圧力幅では鉱物の晶出や残液の化学組成にさほど影響は与えなかった。

・ **酸素分圧** 酸素分圧は主に、出発物質の FeO の状態に影響する。すなわち、FeO と Fe_2O_3 の量比が決定される。出発物質に YK09-05 6K#1146 R06 を用いて、圧力は

1000 bar、無水の条件下で、酸素分圧を変えて晶出する鉱物の組み合わせを検証した。MELTS にはデフォルトで、HM buffer、NNO buffer、QFM buffer、C-COH buffer が設定されており、それぞれの条件で試行した (Fig. V-2)。その結果、HM buffer ではカンラン石が出現しないこと、C-COH buffer では残液が出現しなくなるまでカンラン石が大量に出現することなどから、ゴジラメガムリオンに産する斑れい岩類の鉱物組み合わせとは一致しない。NNO buffer と QFM buffer が観測値と類似するが、QFM buffer の場合、1120 °C 程度から鉄酸化物鉱物を出現させることから、ゴジラメガムリオンに産する斑れい岩類に近いと判断し、QFM buffer で計算を行うこととした。

・ **含水量** 含水量の見積もりは難しく、微量な違いで計算が大きく変わってしまう。含水量については、無水、+0.02 wt.%、+0.05 wt.%、+0.1 wt.%、+0.2 wt.%、+0.5 wt.%、+1.0 wt.%、+2.0 wt.% で計算を行った (Fig. V-3)。水を 1.0 wt. % 以上含む場合、より早期から斜方輝石が晶出し、かつその割合が極めて高くなるので、水は 0.5 wt.% 以下で計算を行うこととした。すべての結果を斑れい岩類の全岩化学組成の実測値と比較、検討した結果、最終的に、無水、+0.02 wt.% および +0.5 wt.% の 3 つの条件が比較的一致したため、本論ではこれらの結果を基に議論を行う。

3. MELTS による計算結果

出発物質を YK11-08 6K#1275R07、圧力を 1500 bar、酸素分圧を QFM に設定し、含水量を無水、+0.02 wt.%、+0.5 wt.% のそれぞれの条件下で求められた残液および固相の化学組成を Table 14 に示す。なお、固相の化学組成 (Calculated crystal accumulation composition) は、出現する鉱物の化学組成と体積率から計算している。また、各々の条件下で出現した鉱物の化学組成を Table 15, 16, 17 に示す。さらに MELTS によって計算された、各条件下での残液と各晶出鉱物の量比、および残液を外した晶出鉱物だけの量比を Fig. V-4 に示す。

無水の条件下では、リキダスの 1221 °C から 1131 °C まで計算を行った。1121 °C 以下では、残液の化学組成が $\text{SiO}_2 < 38 \text{ wt. \%}$ 以下となったために計算を中止した。残液を外した晶出鉱物の量比は、1211 ~ 1201 °C 程度でトロクトライトの鉱物組成比と一致、それ以下の温度ではカンラン石斑れい岩の鉱物組成比と一致した。 H_2O を 0.02 wt. % 加えた計算では、リキダスの温度は無水と変わらず。晶出する鉱物組み合わせや組成比もほぼ変わらない。しかし、残液の SiO_2 含有量は 1121 °C まで単調に減少するが、1111 °C を下回ると増加に変化し、その後は著しく増大する。 H_2O を 0.5 wt. % 加えた計算では、リキダスの温度が 1214 °C と若干低くなる。残液の量が比較的多く、晶出する鉱物量もやや少なめ。カンラン石がやや低温域まで多量に晶出するため、鉱物組成比は実際のゴジラメガムリオンの観測値とはやや外れる。

Fig. V-5 は MELTS の計算結果が最も顕著に示された SiO_2 - FeOt のプロットである。 H_2O を 0.02 wt.% 加えた条件（実線）では、結晶の晶出により形成される固相（Crystal accumulation：青線）と、残液（Residual melt：黒線）に沿って分化が進行する。固相では、 1221°C でリキダスを下回り、カンラン石が晶出する。この時の残液（Residual melt）の化学組成は、出発物質とほとんど差がない。温度の低下に伴い、 1210°C で斜長石が、 1200°C で単斜輝石が晶出する。その後、 1140°C 程度でチタン鉄鉱を晶出する。 1100°C を下回ると残液がほぼなくなりすべて固結し、出発物質の化学組成となる。 SiO_2 含有量に着目すると、固相は 1180°C を過ぎたところで出発物質の含有量よりも高くなる。逆に残液の組成は 1180°C を境に SiO_2 含有量が著しく減少する。この温度条件では FeOt は固相に入らないために残液に濃集し、その割合が増していく。

H_2O を 0.5 wt.% 加えた条件（点線）では、結晶の晶出により形成される固相（Crystal accumulation：青点線）と、残液（Residual melt：黒実線）に沿って分化が進行する。温度条件は H_2O を 0.02 wt.% 加えた条件よりもやや低めで分化が起こる。 H_2O を 0.5 wt.% 加えた条件の固相は、 H_2O を 0.02 wt.% 加えた条件よりも FeOt に富むが、分化の傾向は同じである。ただし残液は、 SiO_2 含有量が 53 wt.% 程度を境に単調に減少する傾向にある。これは 1100°C で斜方輝石が、 1090°C で鉄酸化物鉱物（主にチタン鉄鉱）が residual melt から晶出するため、相対的に FeO が減るためである（Fig. V-5）。

4. 議論

1) 斑れい岩類の生成

MELTS によって計算された残液および固相の化学組成とゴジラメガムリオンに産する斑れい岩類の実測値との比較を行う。Fig. V-6 は、MELTS の計算結果に IV 章の 7-2 で区分した全岩化学組成の Type を加えた図である。ここでも最も典型的な FeOt を例に説明する。 H_2O を 0.02 wt.% 加えた固相（crystal accumulation：青太点線）の化学組成は、温度の低下に伴い SiO_2 含有量が増大し、Type-1 の組成の範囲を通過する。 1210°C での晶出鉱物はカンラン石と斜長石、 1200°C では単斜輝石が晶出する。すなわち、 1210°C での鉱物組み合わせはトロクトライトに、 $1200 \sim 1180^\circ\text{C}$ はカンラン石斑れい岩に、 $1180 \sim 1110^\circ\text{C}$ が斑れい岩もしくはホルンブレンド輝石斑れい岩に相当する。概ね Type-1 の形成の温度は $1210 \sim 1110^\circ\text{C}$ 程度である。Type-1 は記載岩石学的に cumulate 組織を有することで特徴づけられ、MELTS で固相と化学組成が一致することとも調和的である。 FeOt 以外の元素においても、固相の化学組成が Type-1 を経由しながら組成が変化しているのが確認できる。Type-1 は、無水から +0.02 wt.% 程度 H_2O を加えた玄武岩類の crystal accumulation で形成されると考えられる。しかし、現実的には

初生的な角閃石を含む斑れい岩が見られることから無水の条件は、考えにくいであろう。

Type-3 は鉄酸化物鉱物を多量に含むことで特徴づけられる。METLS の計算結果による H_2O を 0.02 wt.% 加えた時の残液の化学組成は、ほぼ Type-3 の範囲に収まっている。FeO に着目すると、無水から H_2O を 0.02 wt.% 加えた場合は、温度の低下と共に SiO_2 が減少し FeO が増大する傾向にある。Type-3 を構成する斑れい岩類は、一見まばらにプロットされているように見えるが、 TiO_2 と Na_2O を除いてリキダスから 1180 °C 程度の間の組成をもたない。すなわち、比較的高温では Type-3 マグマが生成しないことを意味する。Type-3 は記載岩石学的に鉄酸化物鉱物を多量に含むことに加え角閃石を多く含むことでも特徴づけられる。しかし、角閃石の晶出温度は、最大でも 1050 °C 程度なので、今回の計算の条件下での晶出は難しい。そこで、1180 - 1120 °C で生成した分化したマグマを分離して、少し温度を下げた条件での固結を検討した。トロクトライトやカンラン石斑れい岩などに、oxide gabbro が比較的シャープに接すること（例えば Ozawa *et al.*, 1991 の ODP Hole 735B や Grimes *et al.*, 2008 の IODP Hole U1309D など）は、分離した分化したマグマが、先に貫入していた岩体と接することで説明できる。Fig. V-7 は 1180 - 1120 °C までの温度範囲の分化したマグマを、観測値の斜長石と角閃石、単斜輝石、カンラン石を使ってマスバランス計算した結果である（チタン鉄鉱および磁鉄鉱は端成分を使用した）。1180 °C の条件下では、10 vol.% 程度のカンラン石が計算されたため、カンラン石斑れい岩に区分、1170 - 1150 °C の範囲ではホルンブレンド輝石斑れい岩が、1140 - 1120 °C では輝石ホルンブレンド斑れい岩が計算された。いずれも 5 vol.% 以上の鉄酸化物鉱物が計算され、いわゆる oxide gabbro が産出する結果になる。また、この結果は、ゴジラメガマリオンにおける斑れい岩類の鉱物組み合わせとも調和的である。

Type-2 は SiO_2 が 52 wt.% 程度から、 SiO_2 の増大に伴い FeO が減少する傾向にある。この傾向は、 H_2O を 0.5 wt.% 加えた計算結果と一致した。すなわち、含水量によって、およそ SiO_2 が 53 wt.% 程度を境に、マグマの組成をコントロールすることができる結果になった。

以上のことから、無水から 0.02 wt.% 程度 H_2O を含むカンラン石玄武岩組成を出発物質に、Crystal accumulation で Type-1 形成、分化した残液を分離、冷却することで Type-3 の斑れい岩類を生成し、また、0.5 wt.% 程度 H_2O を含むカンラン石玄武岩組成を出発物質に、分化した残液を分離、冷却することで SiO_2 に富む Type-2 の斑れい岩類の生成を説明ができる。すなわち、カンラン石玄武岩マグマを出発物質に、含水量を変化させるだけで、初生的なトロクトライトから分化したホルンブレンド斑れい岩（あるいは鉄酸化物鉱物に富む斑れい岩）の生成過程を説明できることになる。

ただし、METLS の計算結果からは、 SiO_2 が 60 wt.% 以上含む分化した残液は生成さ

れなかった。このことは、トロニウム岩を著しく分化した残液から生成することができないことを意味しており、別の成因を考える必要がある。

2) トロニウム岩の生成

トロニウム岩の成因については、いくつかの議論がなされている。すなわち、MORB が結晶分化により極度に分化した生成物（例えば Coleman and Donato, 1979）、分化したソレイト質マグマの不混和作用（Natland *et al.*, 1991）、含水系の斑れい岩類の再溶融（Koepke *et al.*, 2004, 2007）などである。MORB が結晶分化により極度に分化した生成物と考える説は、斑れい岩が変形されているのに対し珪長質岩が変形されていないことを説明するために、斑れい岩の形成後、珪長質岩が形成する前の条件下で変形が起こったとの考えからもサポートされる（Cann *et al.*, 1997）。H₂O を 0.5 wt.% 加えた計算において、残液の組成は常に SiO₂ 含有量が増加する傾向にあったが、最大でも 57 wt. % であり、トロニウム岩の組成までは達しないことが判明した (Fig. V-7)。そのため、本研究の結果からは、「MORB が結晶分化により極度に分化した生成物」という見解は得られない。YK09-05 6K#1141R11 と 6K#1141R13 の試料には、輝石ホルンブレンド斑れい岩と同時にトロニウム岩が採取されている。両者の関係は、トロニウム岩の貫入のようにも、またミキシングのようにも見える (Fig. V-8B)。全岩化学分析の結果、優黒質の輝石ホルンブレンド斑れい岩およびホルンブレンド斑れい岩の Nb-Zr 比はほぼ一定であるのに対し、トロニウム岩の Nb-Zr 比は優位に高く、一連の生成物ではないことが判明した。Fig. V-8C からは、両者は貫入関係であると言ってよいであろう。また、WHR の試料には、輝石ホルンブレンド斑れい岩は著しい変形作用を受けているのに対し、トロニウム岩はほとんど変形を受けていない試料が見られる。このような試料もトロニウム岩の貫入を示唆するである。ゴジラメガマリオンのテクトニックセッティングを考慮した場合、本地域が拡大系で、少なからずともメルトが存在することから熱源が十分にあること、角閃石を含むことから含水系の斑れい岩類は十分に存在していること、以上から再溶融説（Koepke *et al.*, 2004, 2007）が最も適切と思われる。そこで、角閃石を含む斑れい岩の再溶融によるトロニウム岩の生成を検討した。

Fig. V-9 は WHR における、ホルンブレンド輝石斑れい岩の再溶融によるトロニウム岩の生成を計算した結果である。YK11-08 6K#1275R07 に H₂O を 0.02 wt.% 含む初生マグマを出発物質に、MELTS によって計算された 1171 °C で生じた分化した残液（ホルンブレンド輝石斑れい岩）を再融解させた結果である。マスバランス計算の結果、再溶融により 34 vol.% のトロニウム岩を形成した。溶け残りはカンラン石 3 vol.%、斜長石 18 vol. %、角閃石 15 vol. %、単斜輝石 23 vol. %、鉄酸化物鉱物 7 vol. % となる。なお、計算に使用した鉱物の化学組成は、カンラン石、単斜輝石、斜長石は MELTS による

計算値を、角閃石は輝石ホルンブレンド斑れい岩 (D18-052) の実測値を、磁鉄鉱とチタン鉄鉱は端成分を用いた。

同様に WAR における計算も試みた (Fig. V-10)。Fig. V-10 では、MELTS によって計算された 1171 °C と 1151 °C で生じた分化した残液の 2 つで計算を行った。計算に使用した鉱物の化学組成は、WHR と同様であるが、角閃石の化学組成だけ D10-102 を用いた。マスバランス計算の結果、1171 °C では再溶融により 38 vol.% のトロニウム岩を形成した。溶け残りはカンラン石 0.2 vol.%、斜長石 14 vol. %、角閃石 14 vol. %、単斜輝石 27 vol. %、鉄酸化物鉱物 8 vol. % となる。また、1151 °C では、再溶融により 37 vol.% のトロニウム岩を形成した。溶け残りはカンラン石 0.2 vol.%、斜長石 14 vol. %、角閃石 14 vol. %、単斜輝石 24 vol. %、鉄酸化物鉱物 12 vol. % となる。

以上のことから、ゴジラメガマリオンのトロニウム岩は、角閃石を含む斑れい岩類の再溶融によって形成される可能性が示唆され、Koepke *et al.*, (2004), (2007) のモデルを支持する結果となった。

3) 地形構造区分ごとの斑れい岩類の生成過程

本節では、地形構造区分ごとの斑れい岩類の生成過程について、MELTS の結果から形成温度の推定を行う。地形区分ごとの斑れい岩類の形成条件を Table 18 に示す。

WLR は初生的なトロクトライトやカンラン石斑れい岩を産出することで特徴づけられる。最も初生的なトロクトライトは、YK11-08 6K#1275R07 に H₂O を 0.02 wt.% 加えた組成において、1210 °C で晶出するカンラン石と斜長石の *crystal accumulation* で形成される (Fig. V-11)。続いて温度低下に伴い 1200 - 1180 °C で単斜輝石が晶出し、相対的にカンラン石の体積が減り、カンラン石斑れい岩および斑れい岩が *crystal accumulation* として形成する。いずれも Type-1 に該当する斑れい岩類である。一方で 1170 °C 以下の残液は、その後に初生的な角閃石から見積もった 1050 - 900 °C 程度で固結し、輝石ホルンブレンド斑れい岩、ホルンブレンド斑れい岩となる。出発物質の周辺にプロットされる細粒な岩相を持つ斑れい岩類は、IV 章の 7-1 で議論した通り、玄武岩マグマがあまり分化することなく比較的急速に固結したと考えられる。

ELR もほぼ生成過程は同様だが、WLR と比較して温度がやや低めである (Fig. V-12)。YK11-08 6K#1275R07 に H₂O を 0.02 wt.% 加えた組成において、1180 - 1140 °C で Type-1 の斑れい岩が、1140 - 1120 °C でホルンブレンド輝石斑れい岩や輝石ホルンブレンド斑れい岩が *crystal accumulation* として形成する。1160 - 1120 °C にかけての残液は 1050 - 900 °C 程度で固結し、ホルンブレンド輝石斑れい岩および輝石ホルンブレンド斑れい岩、ホルンブレンド斑れい岩となる。SiO₂ 含有量に富む Type-2 は、H₂O がやや多く含まれる (+0.5 wt. %) 玄武岩の分化によって形成されたと考えられ、1070 -

1010 °C の残液が分離して固結したと考えられる。この温度であれば、初生的な角閃石を晶出させることも可能である。生成の温度が低いことに加え、Type-2 が出現すること、斜長石の An 値が高かったことから、水の関与が考えられる。

WHR の Type-1 は、MELTS の計算結果から若干外れる (Fig. V-13)。Type-1 はカンラン石斑れい岩、ホルンブレンド輝石斑れい岩、輝石ホルンブレンド斑れい岩から構成されるが、全岩化学組成には顕著な違いが見られず、それぞれの形成温度を見積もるのは難しい。その原因として、WHR の斑れい岩類は変形が著しいことがあげられる。WHR の Type-1 は WLR の Type-1 の形成温度よりもやや低く、1160 -1120 °C 程度で crystal accumulation として形成したと考えられる。Type-3 は、1150 - 1130 °C での分化したマグマが、その後冷却・固結し、ホルンブレンド輝石斑れい岩もしくは輝石ホルンブレンド斑れい岩として形成された。ただし、WHR は含水系よりもむしろ無水の方が計算にあうこと、FeO がやや計算とあわない点が気になる。WHR は C. I. P.W. ノルム計算でネフェリンが計算されることが多いため、出発物質や MELTS 計算の条件を少し変えなければならぬのかもしれない。トロニエム岩については、Fig. V-9 で述べたとおり再溶融によって形成させればよい。

WAR は輝石ホルンブレンド斑れい岩とホルンブレンド斑れい岩が Type-2 と Type-3 に該当した (Fig. V-14)。Type-3 は H₂O を 0.02 wt.% 加えた条件において 1180 °C 以下の残液が、その後冷却・固結したと考えられる。輝石ホルンブレンド斑れい岩とホルンブレンド斑れい岩とも全岩化学組成に違いはなく、両者を識別して形成温度を見積もるのは難しい。Type-2 は H₂O を 0.5 wt.% 加えた条件において 1140 °C 以下の残液が、その後冷却・固結し、輝石ホルンブレンド斑れい岩を形成。さらに 1060 °C 以下の残液が固結し、ホルンブレンド斑れい岩を形成したと考えられる。トロニエム岩については、Fig. V-10 で述べたとおり再溶融によって形成させればよい。

WSR は、Type-1 が 1 点のみ存在したが、MELTS の計算結果からはやや外れており、その組成は初生マグマの組成に近い。従って、かなり低温 (1120 °C 程度) で形成した可能性がある。Type-3 の斑れい岩類に関しては、これまでと同様に H₂O を 0.02 wt.% 加えた条件の 1170 °C 以下の残液が、その後冷却・固結し、ホルンブレンド輝石斑れい岩および輝石ホルンブレンド斑れい岩となった (Fig. V-15)。また、Type-2 の斑れい岩類は、H₂O を 0.5 wt. % 加えた条件で 1090 °C 以下の残液が、その後冷却・固結したと考えられる。ただし、WAR や ELR と同様に、角閃石の固結温度まで達しているために、さほど冷却は必要ないであろう。

MELTS による各元素の計算結果を、ゴジラメガマリオンの地形構造区分ごとに対比した図を、Fig. V-16 (TiO₂)、V-17 (Al₂O₃)、V-18 (FeO)、V-19 (MgO)、V-20 (CaO)、V-21 (Na₂O) に示す。

4) MELTS によって計算された鉱物の化学組成と実測値の対比

MELTS によって計算された鉱物の化学組成と、実測値の化学組成の関連を検証した。Fig. V-22 の図中の数字は、MELTS によって計算されたカンラン石の XMg、単斜輝石の XMg、斜長石の An 値である。この計算値とトロクトライト、カンラン石斑れい岩、斑れい岩、ホルンブレンド輝石斑れい岩に含まれるそれぞれの分析値を対比した。

トロクトライトでは、斜長石の実測値の平均が An=80 に対し、計算値は An=69 なのでかなり低めであるが、平均値の中には納まっている。なお、H₂O を 0.5 wt.% 加えた計算でも、斜長石の An 値は 74 程度であったので、今回の条件で、An = 80 をつくるのは難しいかもしれない。カンラン石は、実測値の平均が XMg=0.87 に対し、計算値は XMg=0.85 でかなり近い値 - となっている。

カンラン石斑れい岩は、斜長石の実測値の平均が An=71 に対し、計算値が An=60 - 67 なのでトロクトライトほどの差はなく、また平均値の範囲には納まる。単斜輝石は実測値の平均が XMg=0.85 に対し、計算値は XMg=0.80 - 0.83 でかなり近く、組成幅の範囲に納まる。カンラン石は、実測値の平均が XMg=0.85 に対し、計算値は XMg=0.81 - 0.84 とトロクトライト同様かなり近い値となっている。

斑れい岩は、斜長石の実測値の平均が An=66 に対し、計算値が An=52 - 57 でやや低めではあるが組成幅の範囲には納まっている。単斜輝石は、XMg=0.85 に対し計算値は XMg=0.76 - 0.79 で、組成幅の範囲に納まらなかった。カンラン石は実測値の平均が XMg=0.84 に対し、計算値が XMg=0.77 - 0.80 でやや低めであった。

ホルンブレンド輝石斑れい岩は、斜長石の実測値の平均が An=50 に対し、計算値が An=50 - 54 でほぼ一致する。単斜輝石は、実測値の平均が XMg=0.76 に対し、計算値は XMg=0.76 - 0.79 でほぼ一致。カンラン石は、実測値の平均が XMg=0.60 に対し、計算値は XMg=0.77 - 0.80 でかなり高めであった。ただし、ホルンブレンド輝石斑れい岩のカンラン石は変質されていることを考慮しなければならない。

以上をまとめると、MELTS によって計算された鉱物の化学組成は、実測値とほぼ一致していると言える。

5) 斜長石の比重に関する一考察

Fig. V-23 は MELTS によって計算された鉱物の比重と残液の比重を対比した図である。H₂O を 0.02 wt.% 加えた計算では、cumulate の比重が常に残液よりも大きいことが読み取れる。しかし斜長石に着目すると、1200 °C 程度では比重差がほとんどないものの、1150 °C あたりでは有意に残液の比重が高くなる。すなわち、この条件では晶出した斜長石が沈まずに浮き上がることを意味する。特に 1140 - 1130 °C 周辺では比重差が最も

大きくなり、この時の An 値が 50 程度となっている。また、この時に形成される斑れい岩類は、ホルンブレンド輝石斑れい岩から輝石ホルンブレンド斑れい岩である。もちろん摩擦や粘性の問題も考慮しなければならないが、最大で 1170 °C 程度で晶出した斜長石は沈下せず、残液中に留まってしまい、その結果ホルンブレンド輝石斑れい岩から輝石ホルンブレンド斑れい岩の An 値は、比較的初期に晶出した An=54 程度から末期に晶出した An=45 程度まで幅広い組成を有することが予想される。しかし、H₂O を 0.5 wt.% 加えた計算では、残液の比重が常に軽く同じ結果にならない。すなわち、微妙に H₂O 含有量を変化させることで、残液の比重がコントロールされる。

6) 中央海嶺における斑れい岩類の生成

MELTS の計算結果を、大西洋中央海嶺のケーンメガマリオン (Ager *et al.*, 1997, Casey *et al.*, 1997) および南西インド洋中央海嶺のアトランティスバンク (Niu *et al.*, 2002, Snow, 2002) に産する斑れい岩類の全岩化学組成と比較した (Fig. V-24)。今回 MELTS の計算で用いた出発物質 (YK11-08 6K#1275R07) は、ゴジラムリオンの玄武岩であるが、その全岩化学組成は MORB の全岩化学組成に近い (Fig. IV-9)、MELTS の計算によって生成された斑れい岩類の組成とは大差がないものと思われる。大西洋中央海嶺のケーンメガマリオンおよび南西インド洋中央海嶺のアトランティスバンクの斑れい岩類は、ゴジラムリオンの斑れい岩類と比較して、初生的なトロクトライトやカンラン石斑れい岩の割合が高いことで特徴づけられた (Fig. II-22)。すなわち、ゴジラメガマリオンでは Type-1 に区分された斑れい岩類が多く見られる傾向にある。MELTS の結果と比較した結果、大西洋中央海嶺のケーンメガマリオンおよび南西インド洋中央海嶺のアトランティスバンクの斑れい岩類とも、ゴジラメガマリオンにおける Type-1、すなわち H₂O を 0.02 wt.% 加えた時の crystal accumulation で形成される斑れい岩類と極めて一致する。H₂O を 0.02 wt.%、および H₂O を 0.5 wt.% 加えた時の残液に相当する斑れい岩類についても、点数は少ないものの一致する。以上のことから、MORB の分化プロセスによって、初生的な斑れい岩から分化した斑れい岩を、また含水量を変化させることで SiO₂ に富む斑れい岩までが生成されることが明らかになった。今回の MELTS の計算結果によるマグマの分化プロセスの解明は、ゴジラメガマリオンだけに適応されるのではなく、中央海嶺のメガマリオンに産する斑れい岩類に一般的に適応されるものと考えられる。

5. まとめ

- 1) MELTS によって計算された残液および固相の化学組成とゴジラメガマリオンに産する斑れい岩類の実測値との対比を行った。その結果、記載岩石学的に cumulate 組織

を有する Type-1 の斑れい岩類は、 H_2O を 0.02 wt. % 加えた玄武岩類を出発物質に、Type-1 の斑れい岩類が 1210 - 1110 °C 程度で形成したことが判明した。

Type-3 は H_2O を 0.02 wt. % 加えた玄武岩を出発物質に、1180 °C 以下で生成する分化したマグマ（残液）で形成すると考えられ、記載岩石学的に鉄酸化物鉱物を多量に含むことも整合的である。ただし、角閃石の晶出温度を考慮すると、残液が直接固結したのではなく、cumulate から分離・固結して形成したと思われる。

Type-2 は H_2O を 0.5 wt. % 加えた玄武岩類を出発物質に、概ね 1090 °C 以下で生成する分化したマグマ（残液）で形成すると考えられ、温度条件的には角閃石の晶出温度に近いと、さほど冷却せずに固結した可能性もある。

- 2) トロニウム岩はホルンブレンド輝石斑れい岩を再溶融させることで生成することがマスバランス計算から示唆された。マスバランス計算の結果、 H_2O を 0.02 wt. % 加えた玄武岩の 1170 °C における残液を固結し、ホルンブレンド輝石斑れい岩を形成。さらにこの斑れい岩を再溶融させることで、30 - 34 vol.% のトロニウム岩を形成させることが可能であることが判明した。このモデルは、角閃石を含む斑れい岩類の再溶融によってトロニウム岩が形成する、Koepke *et al.*, (2004), (2007) のモデルと整合的であった。
- 3) 地形構造区分ごとの斑れい岩類の生成過程を解明した。

WLR のトロクトライトは、YK11-08 6K#1275R07 に H_2O を 0.02 wt.% 加えた組成において、1210 °C で晶出するカンラン石と斜長石の crystal accumulation で形成される。温度低下に伴い 1200 - 1180 °C でカンラン石斑れい岩や斑れい岩が crystal accumulation として形成する。1170 °C 以下の残液は cumulate と分離して、その後初生的な角閃石から見積もった 1050 - 900 °C 程度で冷却・固結し、輝石ホルンブレンド斑れい岩およびホルンブレンド斑れい岩を形成。

ELR も同様だがやや斑れい岩が形成した温度がやや低め。また、一部は H_2O を 0.5 wt.% 加えた組成から形成された可能性がある。形成温度は斑れい岩が 1180 - 1140 °C、ホルンブレンド輝石斑れい岩および輝石ホルンブレンド斑れい岩が 1140 - 1120 °C でいずれも crystal accumulation として形成する。 H_2O を 0.02 wt.% 加えた組成の残液は 1160 - 1120 °C で、 H_2O を 0.5 wt.% 加えた組成の残液は 1070 - 1010 °C で cumulate と分離して、冷却・固結し、ホルンブレンド輝石斑れい岩および輝石ホルンブレンド斑れい岩、ホルンブレンド斑れい岩を形成する。

WHR ではさらに斑れい岩類の形成温度が低くなり、カンラン石斑れい岩、ホルンブレンド輝石斑れい岩および輝石ホルンブレンド斑れい岩が 1160 - 1120 °C で crystal accumulation として形成。1150 - 1130 °C での分化したマグマが cumulate と分離して、その後冷却・固結したと考えられるが、後の変形作用の影響が大きい可能性がある。

WAR は、H₂O を 0.02 wt.% 加えた組成の残液は 1180 °C 以下で、H₂O を 0.5 wt.% 加えた組成の残液は 1140 °C 以下で cumulate と分離して、冷却・固結し、輝石ホルンブレンド斑れい岩、ホルンブレンド斑れい岩となる。

WSR は、H₂O を 0.02 wt.% 加えた組成の 1120 °C の crystal accumulation で輝石ホルンブレンド斑れい岩を形成。ただし、MELTS の計算結果と若干のずれがある。H₂O を 0.02 wt.% 加えた組成の残液は 1170 °C 以下で、H₂O を 0.5 wt.% 加えた組成の残液は 1090 °C 以下で cumulate と分離して、冷却・固結し、ホルンブレンド輝石斑れい岩および輝石ホルンブレンド斑れい岩を形成する。

- 4) MELTS によって計算された鉱物の化学組成と、実測値の化学組成の関連を検証したところ、一部計算値と実測値が一致しない鉱物があったが、大半は一致しており、整合的であった。
- 5) MORB の分化プロセスから、初生的な斑れい岩から分化した斑れい岩を、また含水量を変化させることで SiO₂ に富む斑れい岩が生成されることを明らかにし、この傾向が大西洋中央海嶺および南西インド洋中央海嶺のメガマリオンに産する斑れい岩類にも適応されることが判明した。

VI. ゴジラメガムリオンの形成発達史についての考察

本章では斑れい岩類の生成条件を基に、先行研究の成果を踏まえてゴジラメガムリオンの形成過程を考察する。全体のまとめの図を Fig. VI-1 に示す。

1) Distal Part Stage (WLR・ELR ; 13 Ma) のゴジラメガムリオン

斑れい岩類の形成温度は、WLR のトロクトライトが 1210 °C で、カンラン石斑れい岩および斑れい岩が 1200 - 1180 °C の crystal accumulation で形成しており、また、ELR においても斑れい岩が 1180 - 1140 °C で、ホルンブレンド輝石斑れい岩および輝石ホルンブレンド斑れい岩が 1140 - 1120 °C の crystal accumulation で形成しており、いずれもゴジラメガムリオン内における斑れい岩類の形成温度としては最も高い (Table 18)。WLR および ELR では、産出する斑れい岩類の組み合わせ (Fig. II-20) や、カンラン石斑れい岩やホルンブレンド輝石斑れい岩、輝石ホルンブレンド斑れい岩中の斜長石の #An も高い (Fig. III-8)。これらは WLR と ELR の斑れい岩類がゴジラメガムリオンにおいて最も初生的な斑れい岩を産したことを示唆した。この結果は、末端部 (distal part) のかんらん岩のクロムスピネル中の #Cr が高いことからマンタルの部分融解度が高かったことが指摘され (Snow *et al.* 投稿準備中)、ゴジラメガムリオンの形成初期が中速拡大環境で形成されたこと (Ohara *et al.*, 2010; Ohara *et al.*, 2011a; Snow *et al.* 投稿準備中) と調和的である。Fig. VI-2 -3 は、それぞれ WLR と ELR における斑れい岩類の形成モデルを示したものである。

本研究のモデルでは、WLR では 1170 - 1120 °C で、ELR では 1160 - 1120 °C、あるいは H₂O を 0.5 wt.% 加えた条件では 1070 - 1010 °C における残液 (residual melt) が、冷却・固結モデルを考えており、その固結温度は角閃石から 900 - 1050 °C 程度を見積もった。この段階で固結した斑れい岩は未変形であるため、後の変形作用を考慮しなければならない。Harigane *et al.* (2008, 2010, 2011) は、850 °C の比較的高温下で塑性変形を、続いてデタッチメント断層から浸透された流体が存在する 560 °C で後退変成作用および延性剪断変形を受けたことで形成されたモデルを示している。このモデルを考慮すれば、残液が 900 °C で固結した後に、Harigane *et al.* (2008, 2010, 2011) のモデルを適応すればつじつまがあう。また、本論の II 章の 5-2) で述べたとおり、Harigane *et al.* (2008, 2010, 2011) のモデルによる変成、変形により角閃石が増加することで、ホルンブレンド輝石斑れい岩は輝石ホルンブレンド斑れい岩に、輝石ホルンブレンド斑れい岩はホルンブレンド斑れい岩に変わること、見かけ上の量比が変わってしまうこととも調和的であろう。

問題点として、WLR および ELR の crystal accumulation で形成された斑れい岩類が

変形を受けていない点が挙げられる。デタッチメント断層に伴う変形帯の幅は、変形を受けて形成されたマイロナイト中の斜長石の粒径と OCC の拡大速度から見積もられており、大西洋中央海嶺のアトランティス岩体で 100 m 程度 (Karson *et al.*, 2006)、ゴジラメガムリオンでもせいぜい 100m 程度であるとされている (Michibayashi *et al.* 投稿準備中)。もしも変形帯の幅が 100 m だとしたら、crystal accumulation で形成された斑れい岩類を変形させないためには、マグマだまりのサイズを大きくする必要がある。ゴジラメガムリオンの斑れい岩類の記載岩石学的特徴が類似する、南西インド洋の Atlantis II の掘削 (ODP Site 735B) では、斑れい岩類の岩相変化のオーダーが数百メートル単位で確認されている (Natland and Dick, 2002)。南西インド洋の Atlantis II と同様のオーダーのマグマだまりがゴジラメガムリオンの WLR と ELR のステージに存在するならば、crystal accumulation で形成された斑れい岩類が変形を受けていないことが説明できる。

以上のデータをまとめると、このステージは、マンツルの融解度も高く、比較的高温で大量のメルトが存在し、斑れい岩体のサイズも比較的大きかったことが予想される。

1つの問題として、WLR で見られる斑れい岩類を生成したマグマは H₂O が 0.02 wt.% の関与で説明されたのに対し、ほぼ同時期に生成した ELR の斑れい岩類を生成したマグマは H₂O が 0.02 wt.% と 0.05 wt.% の両方の関与が見られた点があげられる (Fig. V-16, 17, 18, 19, 20, VI-2, 3)。すなわち ELR では Type-2 の斑れい岩類が出現する点である。WLR の斑れい岩類は、KR03-01 D06、YK09-05 6k#1147 であり、ELR は KH07-02 D14 の試料であった。いずれも Breakaway の近傍であるが、KR03-01 D06 および YK09-05 6k#1147 はトランスフォーム断層から約 10 km 程度離れた位置にあるのに対し、KH07-02 D14 はほぼトランスフォーム断層沿いに位置する (Fig. II-1)。KH07-02 D14 の斑れい岩を生成したマグマの一部は、トランスフォーム断層によって水が供給された可能性が考えられる。

2) Medial Part Stage (WHR ; 11 Ma) のゴジラメガムリオン

このステージの斑れい岩類は、type-1 のカンラン石斑れい岩およびホルンブレンド輝石斑れい岩、輝石ホルンブレンド斑れい岩が 1160 - 1120 °C で、1150 - 1130 °C における残液 (分化したメルト) が、900 - 1050 °C 程度で冷却・固結することで type-3 のホルンブレンド輝石斑れい岩および輝石ホルンブレンド斑れい岩が形成される (Fig. VI-4)。このステージで特筆すべきは、Distal Part Stage に比べて、産出する斑れい岩類の形成温度が圧倒的に低い点にある。また、記載岩石学的には、WHR の斑れい岩がほとんど変形作用を受けていたこと、単斜輝石の周縁部に見られる角閃石を除いたモード組成の見積もりでは、80% 近い輝石ホルンブレンド斑れい岩がホルンブレンド輝石斑れい岩であったこと (Fig. II-21)、すなわち変形・変成により著しく角閃石の量が増えたこ

とが挙げられる。これらはマグマだまりのサイズが小さかったことを考えれば説明ができる。この結果は、このステージのかんらん岩のクロムスピネル中の #Cr が小さく、マントルの部分融解度が低かったこと (Snow *et al.* 投稿準備中) と調和的である。部分融解度が低くなった理由は、拡大速度の低下とトランスフォームサンドイッチ効果による温度の低下が考えられているが (Ohara *et al.*, 2006; Snow *et al.* 投稿準備中)、本研究の結果はこの仮説を裏付けるものとなった。

Medial Part Stage ステージでは、トロニウム岩を産することでも特徴づけられる。本論ではトロニウム岩の成因を、ホルンブレンド輝石斑れい岩の再溶融によるものと結論した。本論の計算では、トロニウム岩メルトの生成温度までは決定できなかったが、Koepke *et al.*, (2004) の高温高压実験の結果から生成温度を 900 - 940 °C (含水条件) に見積もっている。この見積もりは、本研究においてトロニウム岩の角閃石の生成温度が 900 °C 以下であると結論付けていることと矛盾しない。また、この温度であれば、斑れい類を形成した玄武岩マグマの温度よりも圧倒的に低く、再溶融を起こすには十分であろう。ただし、斑れい岩類とトロニウム岩の形成の時期はほとんど差がなく、ほぼ誤差の範囲である (Tani *et al.*, 2011)。このことは、マントルの部分融解度が低かったとはいえ、適度にマグマが供給され続けたことを示唆するものであろう。

3) Proximal Part Stage (WAR ; 8.7 Ma) のゴジラメガムリオン

このステージの斑れい岩類は、type-1 の crystal accumulation で生成した斑れい岩がほとんど見られない点が特徴的である。残液のマグマの温度は、H₂O を 0.02 wt.% 加えた条件で 1180 °C 以下、0.5 wt.% 加えた条件で 1140 °C 以下と見積もっている (Fig. VI-5)。このステージは、斑れい岩類を形成したマグマの温度が低めであることや、記載岩石学的に変形を受けていたこと、変形・変成により角閃石の量比が増えたことなど Medial Part Stage と共通点が多い。しかし、斑れい岩類の組み合わせや鉱物の化学組成からは、Medial Part Stage よりもさらに分化が進行し、マグマ量が少なかったことが予想される。また、このステージの特徴として、分化した斑れい岩の成因に、含水量 (0.5 wt.%) が高い初生マグマが関与した点が挙げられる。

Ohara *et al.* (2006) および Snow *et al.* (投稿準備中) では、このステージにおいて、Medial Part Stage から引き続く拡大速度の低下とトランスフォームサンドイッチ効果による温度の低下によりリソスフェアが厚くなり、深部で発生したメルトがリソスフェア中にトラップされたために、斜長石かんらん岩を形成したとしているが、本結果からはこの説をサポートするまでの根拠には至らない。ただし、Snow *et al.* (投稿準備中) は、クロムスピネル中の TiO₂ 含有量が高いことから、メルトがかんらん岩中にトラップされていたことを示唆している。WAR に産出する斑れい岩類のほとんどは、FeO や TiO₂ に富む type-3 の斑

れい岩類なので、メルトとの反応でかんらん岩中のクロムスピネル中の TiO_2 含有量を増大させる根拠となる。Ohara *et al.* (2003a) では ESR から採集したかんらん岩の鉱物組成を報告しているが、残念ながら斜長石については変質が激しいために報告されていない。WAR における斜長石の An 値の最大は 34 程度なので、この値を基に比較的新鮮なカンラン石に含まれる斜長石との比較が必要であろう。トロニウム岩の成因については、Medial Part の Stage と同じで、ホルンブレンド輝石斑れい岩もしくは輝石ホルンブレンド斑れい岩の一部が再溶融して形成されたと考えられる。

4) Proximal Part Stage (WSR ; 8.4 Ma) のゴジラメガムリオン

WSR はかんらん岩のデータや変形のデータが揃っていないので本論がオリジナルとなる。斑れい岩類の形成温度は、Type-3 の残液から形成されるホルンブレンド輝石斑れい岩および輝石ホルンブレンド斑れい岩が H_2O を 0.02 wt.% 含む場合で 1180°C 以下、0.5 wt.% 含む場合で最大 1090°C であった (Fig. VI-6)。WAR に引き続き、含水量 (0.5 wt. %) が高い初生マグマが関与した点も特徴である。一方で、Type-1 の crystal accumulation の斑れい岩類を産すること、Type-3 の斑れい岩類を形成した残液の温度が WAR に比べて高いこと、斑れい岩類の斜長石の An 値が Medial Part Stage の WHR とほぼ同じであり高くなっていることなどから、再びマグマ量が増えてきた可能性が考えられる。また、斑れい岩類の割合についても、ホルンブレンド輝石斑れい岩が多く見られることから、WLR や ELR に次いで初生的であったと考えられる。

WSR よりも新しい活動である NP の斑れい岩類は、4 点しか採集されていないが、その割合は斑れい岩 : ホルンブレンド輝石斑れい岩が 1 : 4 で、WSR よりも初生的な斑れい岩が採集されている。以上のことから、Proximal Part Stage において、まず WAR (8.7 Ma) では極めてメルト量が少なくなるが、その後の WSR (8.4 Ma) では再びマグマ量が多なり WAR に比べて初生的な斑れい岩の割合が高くなる。さらに NP ではマグマ量が増え WSR よりも初生的な斑れい岩の割合が高くなる。すなわちゴジラメガムリオンは、メルトが欠乏して終焉を迎えるのではなく、最後になって火成活動が活発化して終焉を迎えたことが予想される。

5) Type-2 斑れい岩類の出現から推定されるゴジラメガムリオンの形成史

WLR から WHR、WAR、WSR にかけて、ゴジラメガムリオンの西側に沿って斑れい岩類のタイプごとの産出状況に着目すると、WAR 以降で Type-2 の斑れい岩類が出現することが特徴として挙げられる。Type-2 の斑れい岩類は、 H_2O を 0.5 wt.% 含むマグマから生成した斑れい岩類なので、供給源となった初生マグマに水を加える必要がある。ただし、11 Ma の WHR までは初生マグマに顕著に水の関与が認められないので、

11 Ma 以降、8.7 Ma 以前に何かイベントを考える必要がある。

Fig. VI-7 は Ohara & Snow (2009) の地震波による地殻断面モデルを基に、ゴジラメガムリオンの形成史を再検討した図である。注目すべきは、WHR の直後に 7 km/s 層が急角度をもって深くなる構造が確認される点である。7 km/s 層の急傾斜が 11 Ma まで活動していたデタッチメント断層であると仮定すれば、このデタッチメント断層を使って水をマントル中に供給することは可能である。すなわち、11 Ma までは abyssal hill の形成に引き続き、H₂O に乏しいマグマ活動 (0.02 wt.% 程度水が関与) が継続し、Type-1 や Type-3 の斑れい岩類を生成した (Fig. VI-7A)。11 Ma 以降、デタッチメント断層の位置が移動し、北側 (つまり Fig. VI-7B の右側) に新たなデタッチメント断層が形成される。この時に供給されるマグマは、その前のステージで活動していたデタッチメント断層によって供給されていた水が加わることによって、より水が関与した Type-2 の斑れい岩を生成することができたと考えられる。

斑れい岩類の結果からは、ゴジラメガムリオンを形成したデタッチメント断層が2回にわたって活動したことが示唆される。今後詳細な海底地形の観察や地震波による構造解析を踏まえて検討を行う必要がある。

VII. 結 論

本論文では、ゴジラメガマリオンに産出する斑れい岩の記載岩石学的、鉱物学的、地球化学的特徴を明らかにし、さらに中央海嶺の OCC に産する斑れい岩類との比較を通してゴジラメガマリオンのそれぞれの特徴を明らかにすること。さらに、全岩化学組成と鉱物化学組成およびシミュレーションによってマグマの分化プロセスを推定しその成因を解明すること。ゴジラメガマリオンのこれまでの研究成果と斑れい岩類の成因を考慮することでゴジラメガマリオンの形成についての議論を深めること。以上の目的を明らかにするため、①ゴジラメガマリオンに産する斑れい岩類の記載岩石学的特徴の解明、②ゴジラメガマリオンに産する斑れい岩類の鉱物学的特徴の解明、③ゴジラメガマリオンに産する斑れい岩類の地球化学的特徴の解明、④斑れい岩類の生成過程の解明、⑤ゴジラメガマリオンの形成史の解明、以上 5 つの章立てから議論を行った。

結論は以下のとおり。

(1) ゴジラメガマリオンに産出する斑れい岩類は、Streckeisen (1976) による、斑れい岩類の分類に基づき、トロクトライト、カンラン石斑れい岩、斑れい岩、ホルンブレンド輝石斑れい岩、輝石ホルンブレンド斑れい岩、ホルンブレンド斑れい岩に区分され、さらに斑れい岩類と漸移的にあるいは貫入関係で産出するトロニウム岩をあわせた 7 つに区分された。最も点数が多かった斑れい岩類は、輝石ホルンブレンド斑れい岩であった。しかし後の変成作用で単斜輝石の周縁部もしくはすべてが角閃石に転移していることを考慮し、この種の角閃石を外してカウントすると、最も多い斑れい岩類はホルンブレンド輝石斑れい岩であった。これらの斑れい岩類に含まれる斜長石の An 値は、トロクトライトからカンラン石斑れい岩、斑れい岩、ホルンブレンド輝石斑れい岩、輝石ホルンブレンド斑れい岩、ホルンブレンド斑れい岩、トロニウム岩にかけて連続的に低くなる傾向にある。同様に単斜輝石やカンラン石の XMg 値も連続的に低くなる傾向が見られた。以上からゴジラメガマリオンの斑れい岩類はこの順番に初生的であると言える。

さらに、斑れい岩類の地球化学的特徴と記載岩石学的特徴を踏まえて、ゴジラメガマリオンの斑れい岩類は 5 つのタイプに区分される。

Type-1: SiO_2 -FeOt のプロットで、 SiO_2 の増大に伴い緩やかに FeOt が増大する。 SiO_2 含有量は概ね 54 wt.% 以下で Al_2O_3 、MgO、CaO に富み、FeO、 TiO_2 に乏しい。MORB (Pearce, 1983) による微量元素の規格化のパターンでは、全体的に枯渇しており、特に Ba および K に著しく乏しく、また HFS 元素についても 1 より低い。cumulate 組織が見られ、トロクトライトやカンラン石斑れい岩、斑れい岩のすべて、ホルンブレンド輝石斑れい岩および輝石ホルンブレンド斑れい岩の一部が該当する。Type-1 はより初期の

WLR と WHR で多く見られ、また末期の WSR でも出現する。

Type-2: SiO_2 -FeOt のプロットでは、 SiO_2 の増大に伴い緩やかに FeOt が減少する。 SiO_2 含有量が 52 wt.% 以上で、Type-3 と比較して SiO_2 含有量が大きく異なるほか、やや低い FeOt、 TiO_2 、MgO、CaO とやや高い Al_2O_3 、明らかに高い Na_2O で特徴づけられる。MORB (Pearce, 1983) による微量元素の規格化のパターンで、最も enrich しており特に Ba が高い。やや分化した、輝石ホルンブレンド斑れい岩やホルンブレンド斑れい岩の一部が該当する。Type-2 は後期の WAR や WSR で特徴的だが、初期の ELR でも見られる。

Type-3: SiO_2 -FeOt のプロットでは、 SiO_2 の増大に伴い著しく FeOt が減少する。 SiO_2 が 52 wt.% 以下で、極めて高い TiO_2 、FeOt 含有量と、やや高い Na_2O 含有量、低い Al_2O_3 、MgO、CaO 含有量で特徴づけられる。MORB (Pearce, 1983) による微量元素の規格化のパターンで、全体的に enrich しており、特に Ti が高いことで特徴づけられる。鉄酸化物鉱物に富む。ホルンブレンド輝石斑れい岩、輝石ホルンブレンド斑れい岩、ホルンブレンド斑れい岩の大部分が該当する。すべての地形構造区分で採集されている。

Type-4: MORB (Pearce, 1983) による微量元素の規格化のパターンで、やや LIL 元素が高く、全体的には右下がりもしくはフラットなパターンで、細粒な岩相を有する斑れい岩類に見られる。主要元素の含有量、および MORB (Pearce, 1983) による微量元素の規格化のパターンとも、パレスベラ海盆産の玄武岩と類似することから、玄武岩マグマがリソスフェア — 中で比較的急速に固結して形成された可能性が高い。

Type-5: SiO_2 含有量が 60 wt.% 以上で、高い Al_2O_3 、 Na_2O 含有量と、低い TiO_2 、FeOt、MgO、CaO 含有量で特徴づけられる。微量元素の MORB (Pearce, 1983) による規格化パターンでは、Ba と Zr に強いピークを持つ。記載岩石学的には、トロニエム岩に該当する。WHR および WAR で採集されている。

斑れい岩類の分布状況はゴジラメガムリオン内でも偏りが見られ、最も初生的なトロクトライトは、活動初期 (Distal Part) の WLR でのみ見られ、より分化したホルンブレンド斑れい岩やトロニエム岩は、活動後期 (Proximal Part) の WAR で最も多く見られた。ただし、最末期の WSR では再びホルンブレンド輝石斑れい岩などのやや初生的な斑れい岩類を産した。この特徴は、鉱物組成にも反映され、特に斜長石の An 値は、WLR が最も高く、WHR、WAR と徐々に低くなり、WSR で再び高くなる傾向が見られた。この解釈としては、WLR が最も初生的でマンタルの融解度も高く多量のマグマを産したが、次第にマグマ量が減り WAR で最少となるが、末期の WSR で再びマグマ量が増えたことが予測された。

(2) ゴジラメガムリオンの斑れい岩類の割合を、大西洋中央海嶺のケーネメガムリオンに

産する斑れい岩類と比較した。ゴジラメガマリオンの斑れい岩類は圧倒的にカンラン石を含む斑れい岩類に乏しく、また角閃石を含む斑れい岩類の割合が高いことが特徴づけられる。すなわち、ケーンメガマリオンに産する斑れい岩類の方が初生的で、ゴジラゴジラメガマリオンに産する斑れい岩類の方がより分化していると考えられる。また、南西インド洋中央海嶺のアトランティスバンクに産する斑れい岩類との比較も行った。ゴジラメガマリオンはカンラン石斑れい岩の割合が圧倒的に低い、その一方で Oxide gabbro の割合が同じくらい高いことも判明した。斜長石中の An 成分と単斜輝石中の XMg 成分を、大西洋中央海嶺のアトランティス岩体にて掘削された IODP Leg305 U1309D の斑れい岩類と、南西インド洋海嶺のアトランティスバンク中央部の ODP 掘削孔 735B で掘削された斑れい岩類とを対比した結果、ゴジラメガマリオンは、南西インド洋海嶺のアトランティスバンクの斑れい岩類の傾向と一致し、より分化したマグマから形成されたと考えられる。

(3) 出発物質に玄武岩組成を用いて、熱力学計算に基づく結晶分化作用モデル化プログラム“MELTS”によって計算された残液および固相の化学組成とゴジラメガマリオンに産する斑れい岩類の実測値との対比を行った。MELTS の計算結果の概要を Fig. VII-1 に示す。Type-1 の斑れい岩類は、 H_2O を 0.02 wt. % 加えた初生マグマ (YK11-08 6K#1275R07) を出発物質に、Type-1 の斑れい岩類が $1210 \sim 1120^\circ\text{C}$ 程度の crystal accumulation で形成、Type-3 は 1180°C 以下の FeO や TiO_2 に富んだ分化したマグマ (残液 ; residual melt) から形成したと結論付けた。Type-3 の固結温度は、初生的な茶色の角閃石に含まれる Al_2O_3 - TiO_2 含有量から $1050\text{-}900^\circ\text{C}$ 程度と見積もった。また、 SiO_2 に富む Type-2 の斑れい岩類は、 H_2O を 0.5 wt.% 加えた初生マグマが 1140°C 以下で分化したマグマ (残液 ; residual melt) から形成したと結論付けた。すなわち、玄武岩マグマ組成を出発物質に含水量を変化させることで、固相に初生的なトロクトライトからカンラン石斑れい岩、斑れい岩を形成させ、残液で分化した角閃石や鉄酸化物鉱物を含む斑れい岩類が形成されることが判明した。

トロニウム岩は、 H_2O を 0.02 wt. % 加えた時の 1170°C 残液 (residual melt = ホルンブレンド輝石斑れい岩に相当) を再熔融させることで生成されることがマスバランス計算から示唆された。MELTS によって計算された鉱物の化学組成と、実測値の化学組成の関連を検証したところ、大半は一致しており整合的であった。

MELTS による計算結果を、大西洋中央海嶺のケーンメガマリオンおよび南西インド洋海嶺のアトランティスバンクに産する斑れい岩類と比較した。その結果、これらの斑れい岩類の分化プロセスと MELTS の結果はほぼ一致した。すなわち、MORB の分化プロセスから、初生的な斑れい岩から分化した斑れい岩を、また含水量を変化させることで

SiO₂ に富む斑れい岩が生成されることを明らかにし、この傾向が大西洋中央海嶺および南西インド洋中央海嶺のメガマリオンに産する斑れい岩類にも適応されることが判明した。

(4) 以上の結果を踏まえて、ゴジラメガマリオンの成因の解明に関する考察を行った。

Distal Part Stage (WLR・ELR ; 13 Ma) : ①ゴジラメガマリオン内における斑れい岩類の形成温度としては最も高いこと、②記載岩石学的、鉱物学的にも初生的な斑れい岩類を産すること、③変形を受けている岩石が比較的分化したマグマ (残液 ; residual melt) から形成した斑れい岩類に集中しており、逆に cumulate の斑れい岩は変形を受けていないことからマグマだまりのサイズが大きかったことが想定されること、以上からマントルの部分融解度が高くメルト量が多かったことを示唆される。このことは、変形岩石学的研究、かんらん岩の鉱物学的研究成果を支持する結果となった。

Medial Part Stage (WHR ; 11 Ma) : ① Distal Part の Stage に比べて、斑れい岩類の形成温度が低いこと、②記載岩石学的には斑れい岩がほとんど変形作用を受けていたことからマグマだまりのサイズが小さかったことが想定されること、以上からこのステージはメルト量が少なかったと考えられる。この結果もかんらん岩の鉱物学的研究成果から従来言われていることを支持する結果となった。

Proximal Part Stage (WAR ; 8.7 Ma) : ①斑れい岩類を形成したマグマの温度や、変形の程度、変形・変成により角閃石の量比が増えている点など Medial Part Stage と共通点が多い。しかし、斑れい岩類の組み合わせや鉱物の化学組成からは Medial Part Stage よりもさらに分化が進行し、マグマ量も少なかったと予想される。

Proximal Part Stage (WSR ; 8.4 Ma) : ①形成温度は Medial Part Stage の WHR や Proximal Part Stage と同程度であること、② WSR の斑れい岩類の斜長石の An 値は、Medial Part Stage の WHR とほぼ同じであること、③斑れい岩類の割合は、やや初生的なホルンブレンド輝石斑れい岩が多いこと、以上から WAR よりも火成活動が活発化してことが予想される。さらに、その直後の活動である NP の斑れい岩類は、より初生的な斑れい岩の割合が増えること判明している。

以上から、ゴジラメガマリオンは、メルト量が徐々に欠乏して終焉を迎えるのではなく、最後になって火成活動が活発化して終焉を迎えたと考えられる。

引用文献

- Agar, S. M. J. F. Casey and P. D. Kempton, 1997. Textural, geochemical, and isotopic variations in gabbroic shear zones from the MARK area. *Proceeding of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 153, 99-121.
- Blackman, D. K., J. R. Cann, B. Janssen and D. K. Smith, 1998. Origin of extensional core complexes: evidence from the Mid-Atlantic Ridge at Atlantic Fracture Zone. *Journal of Geophysical Research*, 103, 21315-21333.
- Blackman, D. K., B. Ildefonse, B. E. Jhon, Y. Ohara, D. J. Miller, C. J. MacLeod and the Expedition 304/305 Scientists, 2006. Oceanic core complex formation, Atlantis Massif. *Proceeding of the Integrated Ocean Drilling Program, vol 304-305 Expedition Reports*, doi: 10.1204/iodp.proc.304305. 2006.
- Bloomer, S. H., P. S. Meyer, H. J. B. Dick, K. Ozawa and J. H. Natland, 1991. Textural and mineralogical variations in gabbroic rocks from Hole 735B. *Proceeding of the Oceanic Drilling Program, Scientific Results*, 118, 21-39.
- Buck, W. R., L. L. Lavie and A. N. B. Poliakov, 2005. Modes of faulting at mid-ocean ridge. *Nature*, 434, 719-723.
- Cann, J. R., D. K. Blackman, D. K. Smith, E. McAllister, B. Janssen, S. Mello, E. Avgerinos, A. R. Pascoe and J. Escartin, 1997. Corrugated slip surfaces formed at ridge-transform intersections on the Mid-Atlantic Ridge. *Nature*, 385, 329-332.
- Casey, J. F., 1997. Composition of major- and trace element geochemistry of abyssal peridotites and mafic plutonic rocks with basalts from the MARK region of Mid-Atlantic Ridge. *Proceeding of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 153, 181-241.
- Coleman, R. G. and M. M. Donato, 1979. Oceanic plagiogranite revisited in Trondhjemite, Dacite and Related Rocks, pp. 149-167, Elsevier, Amsterdam.
- Dick, H. J. B., J. H. Natland, J. C. Alt, W. Bach, D. Bideau, J. S. Gee, S. Haggas, J. G. H. Hertogen, G. Hirth, P. M. Holm, B. Ildefonse, G. J. Iturrino, B. E. John, D. S. Kelley, E. Kikawa, A. Kingdon, P. J. Leroux, J. Maeda, P. S. Meyer, D. J. Miller, H. R. Naslund, Y. L. Niu, P. T. Robinson, J. Snow, R. A. Stephan, P. W. Trimby, H. U. Worm and A. Yoshinobu, 2000. A long in situ section of the lower ocean crust: results of ODP Leg 176 drilling at the Southwest Indian Ridge. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 179, 31-51.
- Dick, H. J. B., M. A. Tivey and B. E. Tucholke, 2008. Plutonic foundation of a slow-spreading ridge segment: Oceanic core complex at Kane Megamullion, 23°30'N, 45°

- 20'W. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 9 (5), Q05014, doi: 10. 1029/ 2007 GC 001645.
- Ernst, W. G. and J. Liu, 1998. Experimental phase-equilibrium study of Al- and Ti- contents of calcic amphibole in MORB – A semiquantitative thermobarometer. *American Mineralogist*, 83, 952-969.
- Escartin J. and J. P. Canales, 2011. Chapman Conference on Detachments in Oceanic lithosphere: Deformation, Magmatism, Fluid Flow and Ecosystems (Conference report). *EOS*, 92, doi: 10. 1029/ 2011EO040003.
- Escurtin, J., D. K. Smith, J. Cann, H. Schouten, C. H. Langmuir and S. Escrig, 2008. Central role of detachment faults in accretion of slow-spreading oceanic lithosphere. *Nature*, 455, 790-794.
- Ghiorso, M. S., M. M. Hirschmann, P. W. Reiners and V. C. Kress, 2002. The pMELTS: An revision of MELTS aimed at improving calculation of phase relations and major element partitioning involved in partial melting of the mantle at pressures up to 3 GPa. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 3(5), doi: 10.1029/2001GC000217, 2002
- Grimes, C. B., E. J. Barbara and J. C. Michael, 2008. Protracted construction of gabbroic crust at a slow spreading ridge: Constraints from 206Pb/238U zircon age from Atlantis Massif and IODP Hole U1309D (30°N, MAR). *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 9(8), doi: 10.1029/2008GC002063, 2008
- Gualda, G. A. R., M. S. Ghiorso, R. V. Lemons and T. L. Carley, 2012. Rhyolite - MELTS: a Modified Calibration of MELTS Optimized for Silica-rich, Fluid-bearing Magmatic Systems, *Journal of Petrology*, 53, 875-890.
- Harigane Y., K. Michibayashi and Y. Ohara, 2008. Shearing within lower crust during progressive retrogression: Structural analysis of gabbroic rocks from the Godzilla Mullion, an oceanic core complex in the Parece Vela backarc basin. *Tectonophysics*, 475, 183-196.
- Harigane Y., K. Michibayashi and Y. Ohara, 2010. Amphibolitization within the lower crust in the termination area of the Gogzilla Megamullion, an oceanic core complex in the Parece Vela Basin. *Island Arc*, 19(4), doi:10. 1111/j. 1440-1738. 2010. 00741.x.
- Harigane Y., K. Michibayashi and Y. Ohara, 2011. Deformation and hydrothermal metamorphism of gabbroic rocks within the Godzilla MegaMullion, Parece Vela Basin, Philippine Sea. *Lithos*, 124, 185-199.
- Herzen, R. P. V., J. Fox, A. Palmer-Julson and P. T. Robinson (Eds.), 1991. Fracture zone drilling in the Southwest Indian Ridge. *Proceeding of the Ocean Drilling Program*,

Scientific Results, 118. pp.597.

Herzberg, C., 2004. Partial crystallization of Mid-Ocean Ridge basalts in the crust and mantle.

Journal of Petrology, 45 (12), 2389-2405.

Ildefonse, B., D. K. Blackman, B. E. Jhon, Y. Ohara, D. J. Miller, C. J. MacLeod and Integrated Ocean Drilling Program Expeditions 304/305 Science Party, 2007. Oceanic core complexes and crustal accretion at slow-spreading ridges. *Geology*, 35, 623-626.

Ishizuka, O., Y. Ohara, H. Sato and K. Okino, 2004. "Rejuvenated" volcanism in the Parece Vela backarc basin: its timing and chemical characteristics. Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 1st Annual Meeting, Singapore, Abstract 57-OSE-A1500.

Karson, J. A., M. Cannat, D. J. Miller and D. Elthon (Eds), 1997. Sites 920-924, Mid- Atlantic Ridge. *Proceeding of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 153. pp.576.

Karson, J. A., G. L. Früh-Green, D. S. Kelley, E. A. Williams, D. R. Yoerger and M. Jakuba, 2006. Detachment shear zone of the Atlantis Massif core complex, Mid-Atlantic Ridge, 30°N, *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 7, Q06016, doi: 10. 1029/2005GC001109.

Kasuga, S. and Y. Ohara, 1997. A new model of back-arc spreading in the Parece Vela Basin, northwest Pacific margin. *Island Arc*, 6, 316-326.

Koepke, J., S. T. Feig, J. Snow and M. Freise, 2004. Petrogenesis of oceanic plagiogranites by partial melting of gabbros: an experimental study. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 146, 414-432.

Koepke, J., J. Berndt, S. T. Feig and F. Holtz, 2007. The formation of SiO₂-rich melts within the deep oceanic crust by hydrous partial melting of gabbros. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 153, 67-84, Doi: 10.1007/s00410-006-0135-y.

Ildefonse, B., D. K. Blackman, B. E. John, Y. Ohara, D. J. Miller, C. J. MacLeod and Integrated Ocean Drilling Program Expeditions 304/305 Science Party, 2007. Oceanic core complex and crustal accretion at slow-spreading ridges. *Geology*, 35, 623-626.

小出良幸・山下浩之・川手新一・平田大二, 2000. 蛍光 X 線分析装置による岩石主要元素の分析精度の検証. 神奈川県立博物館研究報告自然科学, 29, 107-125.

Leake, B. L., 1978. Nomenclature of amphiboles. *American Mineralogist*, 63, 1023-1052.

Mrozowski, C. L. and D. Hayes, 1979. The evolution of the Parece Vela Basin, eastern Philippine Sea. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 46, 49-67.

Natland, J. H. and H. J. B. Dick, 1996. Melt migration through high-level gabbroic cumulates of the East Pacific Rise at Hess Deep: Inferences from rock textures and mineral compositions. *Proceeding of the Oceanic Drilling Program, Scientific Results*, 147,

21-58.

- Natland, J. H. and H. J. B. Dick, 2002. Stratigraphy and composition of gabbros drilled in Ocean Drilling Program Hole 735B, Southwest Indian Ridge: A synthesis of geochemical data, *Proceeding of the Oceanic Drilling Program, Scientific Results*, 176, 1-69.
- Natland, J. H., H. J. B. Dick, D. j. Miller and R. P. V. Herzen (Eds.), 2002. Return to Hole 735B. *Proceeding of the Oceanic Drilling Program, Scientific Results*, 176.
- Natland, J. H., P. S. Meyer, H. J. B. Dick and S. H. Bloomer, 1991. Magmatic oxides and sulfides in gabbroic rocks from Hole 735B and later development of the liquid line of descent, *Proceeding of the Oceanic Drilling Program, Scientific Results*, 118, 75-111.
- Niu, Y., T. Gilmore, S. Mackie, A. Greig and W. Bach, 2002. 8. Mineral chemistry, whole-rock compositions, and petrogenesis of Leg 176 gabbros: data and discussion. *Proceeding of the Oceanic Drilling Program, Scientific Results*, 176.
- Ohara, Y., 2006. Mantle process beneath Philippine Sea back-arc spreading ridges: a synthesis of peridotite petrology and tectonics. *Island Arc*, 15, 119-129.
- 小原泰彦, 2012. 背弧海盆における海洋コアコンプレックスの発達: 最近のゴジラメガムリオン研究から分かってきたこと. *岩石鉱物科学*, 41, 139-202.
- Ohara, Y., K. Fujioka, T. Ishii and H. Yurimoto, 2003a. Peridotite and gabbros from the Parece Vela backarc basin: Unique tectonic window in an extinct backarc spreading ridge. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 4(7), doi: 10. 1029/ 2002GC000469.
- Ohara, Y., K. Okino and the KR03-01 Scientific Party, 2003c. Cruise Report (R/V Kairei KR03-01 cruise) Tectonic and lithospheric composition of the Parece Vela Basin. 192pp., Japan Marine Science and Technology Center, Yokosuka, Japan.
- Ohara, Y., O. Ishizuka and the KH07-02 Scientific Party, 2007a. Cruise Report (R/V Hakuho KH07-02 Leg-2 and Leg-4 cruise) Oceanic core complexes in the Parece Vela Basin as window for probing structure and composition of fast/intermediate spreading backarc basin lithosphere: an IODP site survey. 405pp., Japan Marine Science and Technology Center, Yokosuka, Japan.
- Ohara, Y., K. Okino and J. Kasahara, 2007b. Seismic study on oceanic core complexes in the Parece Vela backarc basin. *Island Arc*, 16, 348-360.
- Ohara, Y., K. Okino, J. E. Snow and KR03-01 cruise, 2003b. Preliminary report of Kairei KR03-01 cruise: amagmatic tectonics and lithospheric composition of the Parece Vela Basin. *InterRidge News*, 12, 1, 27-29.
- Ohara, Y. and J.E. Snow, 2009. Godzilla Mullion: current understanding on the nature of the

world's largest oceanic core complex, *Eos Transactions AGU*, 90 (52), Fall Meeting Supplement, Abstract T33D-06.

Ohara, Y., J. E. Snow and the YK09-05 Scientific Party, 2009. Cruise Report (R/V Yokosuka YK09-05 cruise) Composition and structure of an oceanic core complex: a dive study of Godzilla Mullion. 253pp., Japan Marine Science and Technology Center, Yokosuka, Japan.

Ohara, Y., J. E. Snow, O. Ishizuka and K. Tani, 2010, Godzilla Mullion developed in a slow-spreading environment: new age and petrologic data constrains. AGU Chapman Conference on detachment in oceanic lithosphere: deformation, magmatism, fluid flow, and ecosystems, Cyprus, poster I-16.

Ohara, Y., J. E. Snow, K. Michibayashi, H. J. B. Dick, Y. Harigane, K. Tani, H. Yamashita, O. Ishizuka, M. Loocke, T. Ishii and K. Okino, 2011a. Geology of dying backarc spreading segment: results of high-density samplings of Godzilla Megamullion. 2011 Fall Meeting, AGU, San Francisco, USA, Abstract T31D-07.

Ohara, Y., J. E. Snow and the YK11-08 Scientific Party, 2011b. Cruise Report (R/V Yokosuka YK11-08 cruise) Tectonics of a dying backarc basin as revealed by a dive study of the Godzilla Megamullion. 260pp., Japan Marine Science and Technology Center, Yokosuka, Japan.

小原泰彦・吉田剛・加藤幸弘・春日茂, 2001. パレスベラ海盆の特異な地形. 水路部研究報告, 37, 9-18.

Ohara, Y., T. Yoshida, Y. Kato and S. Kasuga, 2001. Giant Megamullion in the Parece Vela Backarc Basin. *Marine Geophysical Researches*, 22, 47-61.

Okino, K., S. Kasuga and Y. Ohara, 1998. A new scenario of the Parece Vela Basin genesis. *Marine Geophysical Research*, 20, 21-40.

Okino, K., Y. Ohara, S. Kasuga and Y. Kato, 1999. The Philippine Sea: New survey results reveal the structure and the history of the marginal basins. *Geophysical Research Letters*, 26, 15, 2287-2290.

Ozawa, K., P. S. Meyer and S. H. Bloomer, 1991. Mineralogy and textures of iron-titanium oxide gabbros and associated olivine gabbros from Hole 735B. *Proceeding of the Oceanic Drilling Program, Scientific Results*, 118, 41-73.

Pearce, J. A., 1983. Continental basalts and mantle xenolith (Shiva geology series; Hawkesworth, C. J. and M. J. Norry, Eds.), 230-249, Shiva Pub.

Sandwell, D. T. and W. H. F. Smith, 1997. Marine gravity anomaly from Geosat and ERS 1 satellite altimetry. *Journal of Geophysical Research*, 102, 10039-10054.

佐藤暢・熊谷英憲・根尾夏紀・中村謙太郎, 2008. 中央海嶺玄武岩の化学組成の多様

- 性とその成因 . 地学雑誌 , 117, 1, 124-145.
- Seyler, M., and E. Bonatti, 1997. Regional-scale melt-rock interaction in lherzolitic mantle in the Romanche Fracture Zone (Atlantic Ocean). *Earth Planet. Sci. Lett.*, 146, 273-287.
- Snow, J. E., 2002. Major and trace element evolution of Hole 735B gabbros. *Proceeding of the Oceanic Drilling Program, Scientific Results*, 176.
- Streckeisen, A., 1976. To each plutonic rock its proper name. *Earth Science Review*, 12, 1-12.
- Stern, R. J., S. H. Bloomer, F. Martinez, T. Yamazaki and T. Mark Harrison, 1996. The composition of back-arc basin lower crust and upper mantle in the Mariana Trough: A first report. *The Island Arc*, 5, 354-372.
- Suhr, G., E. Hellebrand, K. Johnson and D. Brunelli, 2008. Stacked gabbro units and intervening mantle: A detailed look at a section of IODP Leg 305, Hole U1309D. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 9(10), doi: 10.1029/2008GC002012.
- Spear, F., 1981, An experimental study of hornblende stability and compositional variability in amphibole. *American Jour. Sci.*, 281, 697-734.
- 田中喜年・小澤誠志・宮寄進・阿部則之・丸山章子・杉村哲也・小山あずさ・浜本文隆 , 2007. パレスベラ海盆メガマリオン域における精密地殻構造調査～ 2005 年度第 9-11 次大陸棚調査 (SPr6, SPr8 及び SPr9 測線) ～ . 海洋情報部技報 , 25, 13-22.
- Tani, K., D. J. Dunkley and Y. Ohara, 2011. Termination of backarc spreading: Zircon dating of a giant oceanic core complex. *Geology*, 39(1), 47-50.
- Taylor, B. and A. M. Goodliffe, 2004. The West Philippine Basin and the initiation of subduction, revisited. *Geophysical Research Letters*, 31(12). DOI: 10.1029/2004GL020136
- Tucholky, B. E., M. D. Behn, W. R. Buck and J. Lin, 2008. Role of melt supply in oceanic detachment faulting and foliation of megamullions. *Geology*, 36, 455-458.
- Tucholky, B. E. and J. Lin, 1994 A geological model for the structure of ridge segments in slow spreading ocean crust. *Journal of Geophysical Research*, 99, 11937-11958.
- Tucholky, B. E., J. Lin and M. Kleinrock, 1998. Megamullion and mullion structure defining oceanic metamorphic core complex on the Mid-Atlantic Ridge. *Journal of Geophysical Research*, 103(B5), 9857-9866.
- 山下浩之・小原泰彦 , 2011. ゴジラメガマリオンから採集された斑れい岩類の岩石学的特徴 . 日本地球惑星科学連合 2011 年大会予稿集 , 幕張メッセ国際会議場 .
- Yamazaki, T., N. Seama, K. Okino, K. Kitada, M. Joshima, H. Oda and J. Naka, 2003. Spreading process of the northern Mariana Trough: Rifting-spreading transition at 22°N. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 4(9), doi: 10.1029/2002GC000492.

APPENDIX

APPENDIX 1 Figures (chapter I).

APPENDIX 2 Figures (chapter II).

APPENDIX 3 Figures (chapter III).

APPENDIX 4 Figures (chapter IV).

APPENDIX 5 Figures (chapter V).

APPENDIX 6 Figures (chapter VI).

APPENDIX 7 Figures (chapter VII).

APPENDIX 8 Tables.

APPENDIX 1 Figures (chapter I)

Fig. I-1. Schematic illustration of the development of a megamullion (Tucholke et al., 1998)

Fig. I-2. Satellite-derived free-air gravity field showing the tectonic features of the Philippine Sea (after Sandwell and Smith, 1997; Ohara et al., 2003a).

Fig. I-3. Bathymetric map of the western Parece Vela Basin (PVB).

Fig. I-4. Bathymetric map of the Godzilla Megamullion and structural image of the Godzilla Megamullion showing the 14 individual names for the specific components of the megamullion and the conjugate crust (Ohara and Snow, 2009).

Fig. I-5. P-wave velocity model deduced from seismic refraction survey (SPr6) (Ohara & Snow, 2009).

Fig. I-6. Schematic model of the progressive development of shear zone in the Godzilla Megamullion (Harigane et al., 2008).

Fig. I-7. Bathymetric map of the Godzilla Megamullion with obtained zircon U-Pb ages and basalt Ar-Ar ages, and age versus distance plot for dated samples from the Godzilla Megamullion.

Fig. I-8. Pie chart showing the igneous oceanic crust and mantle lithologies of the Godzilla Megamullion (Ohara et al., 2011).

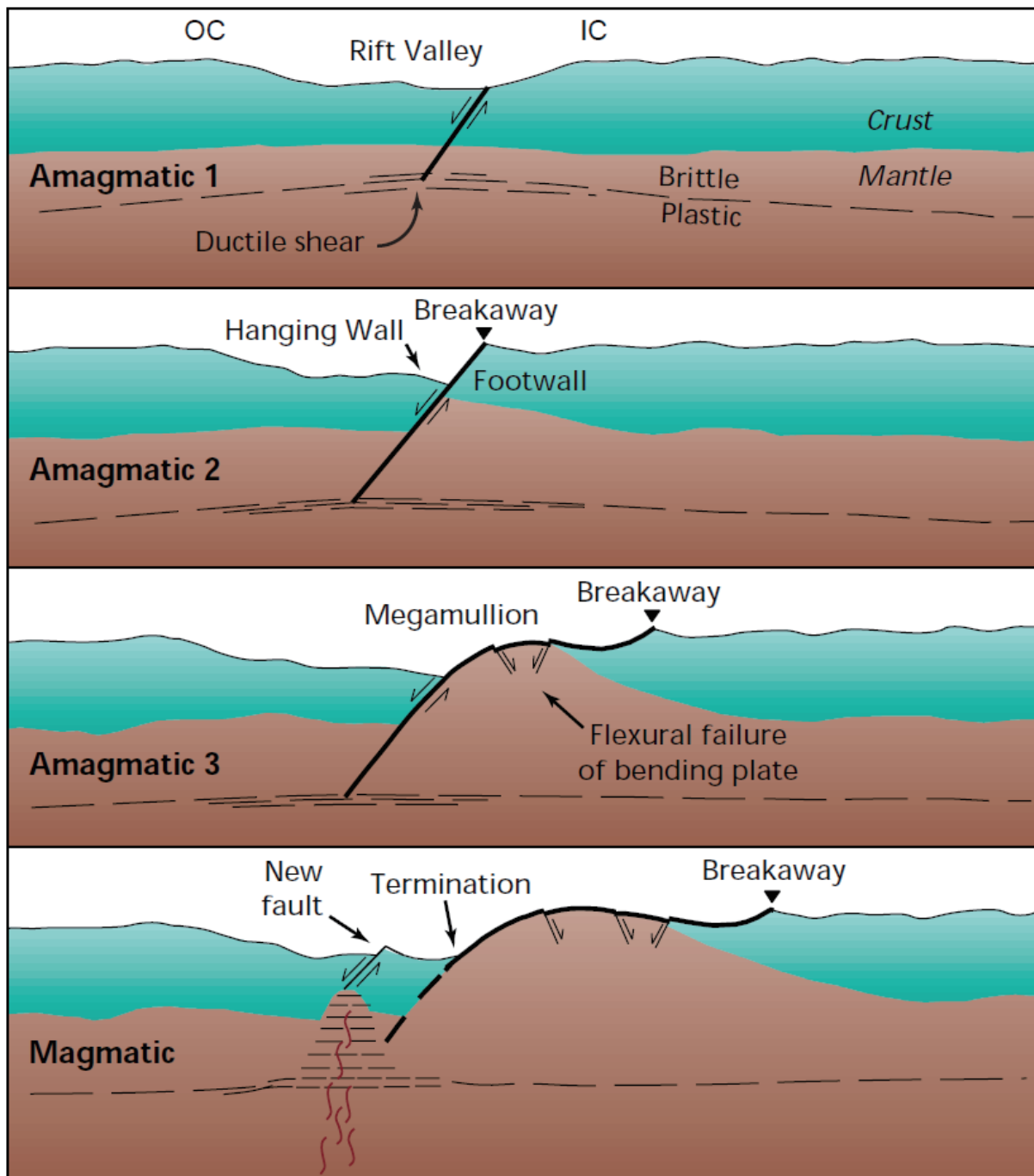


Fig. I-1. Schematic illustration of the development of a megamullion (Tucholke et al., 1998) .

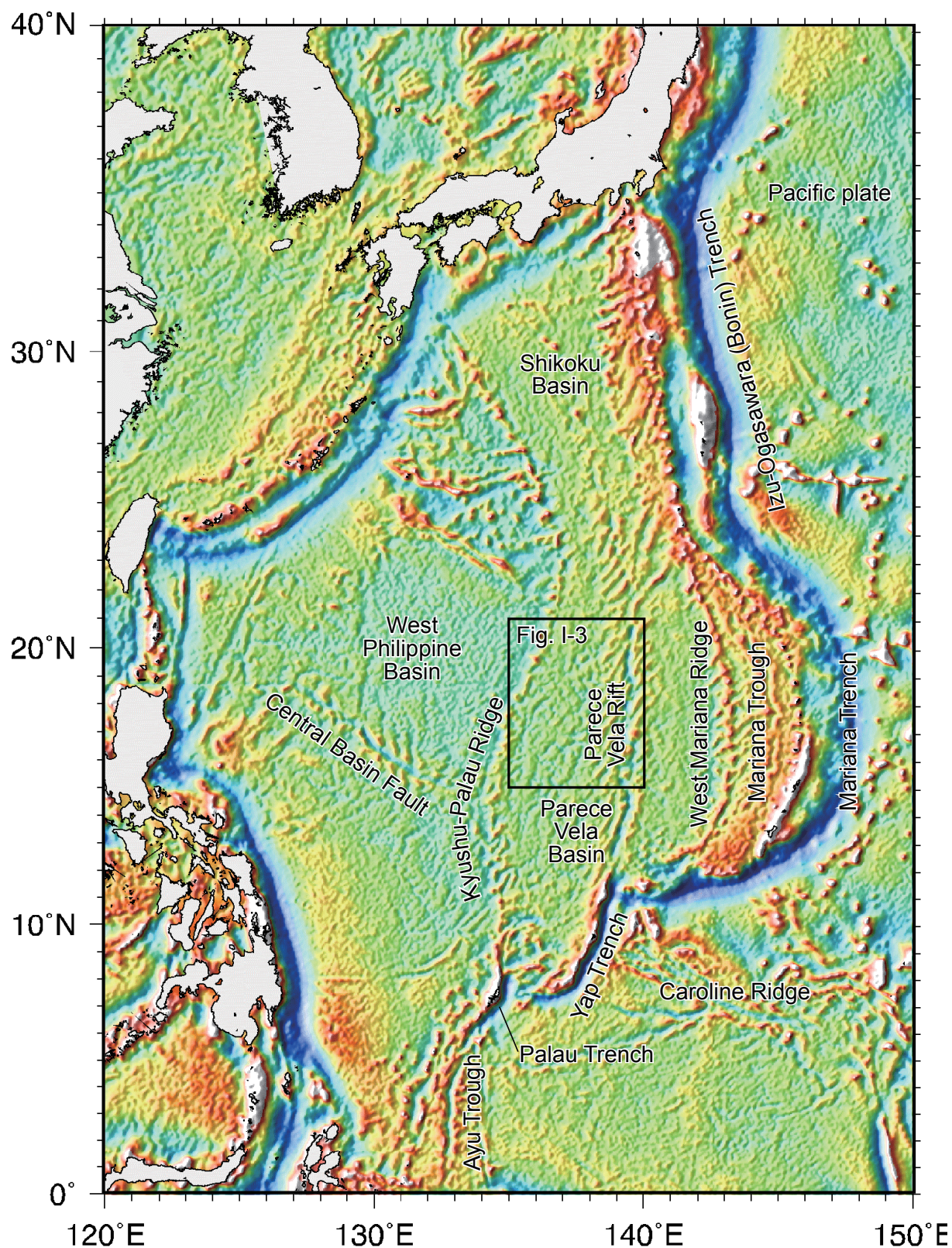
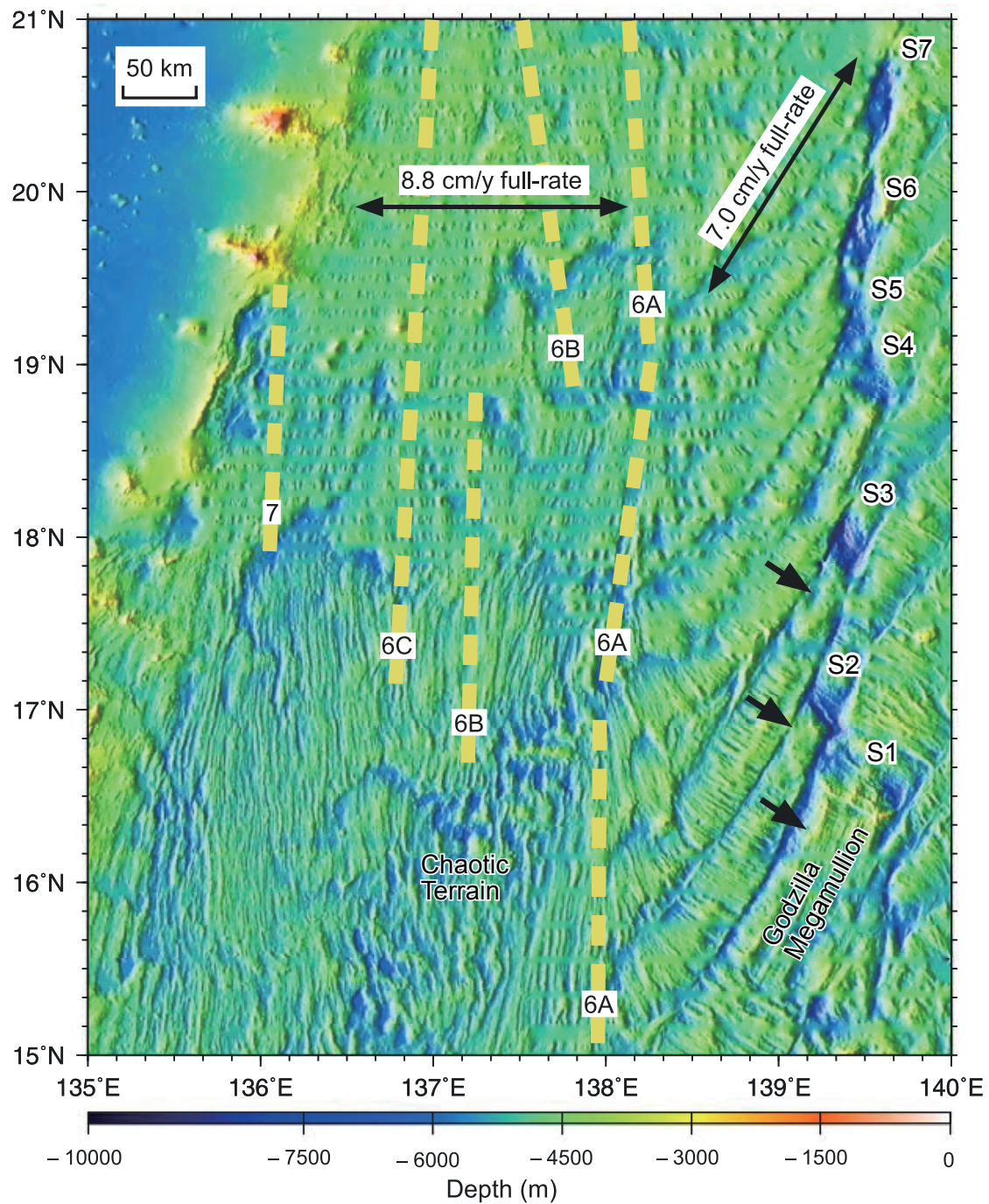


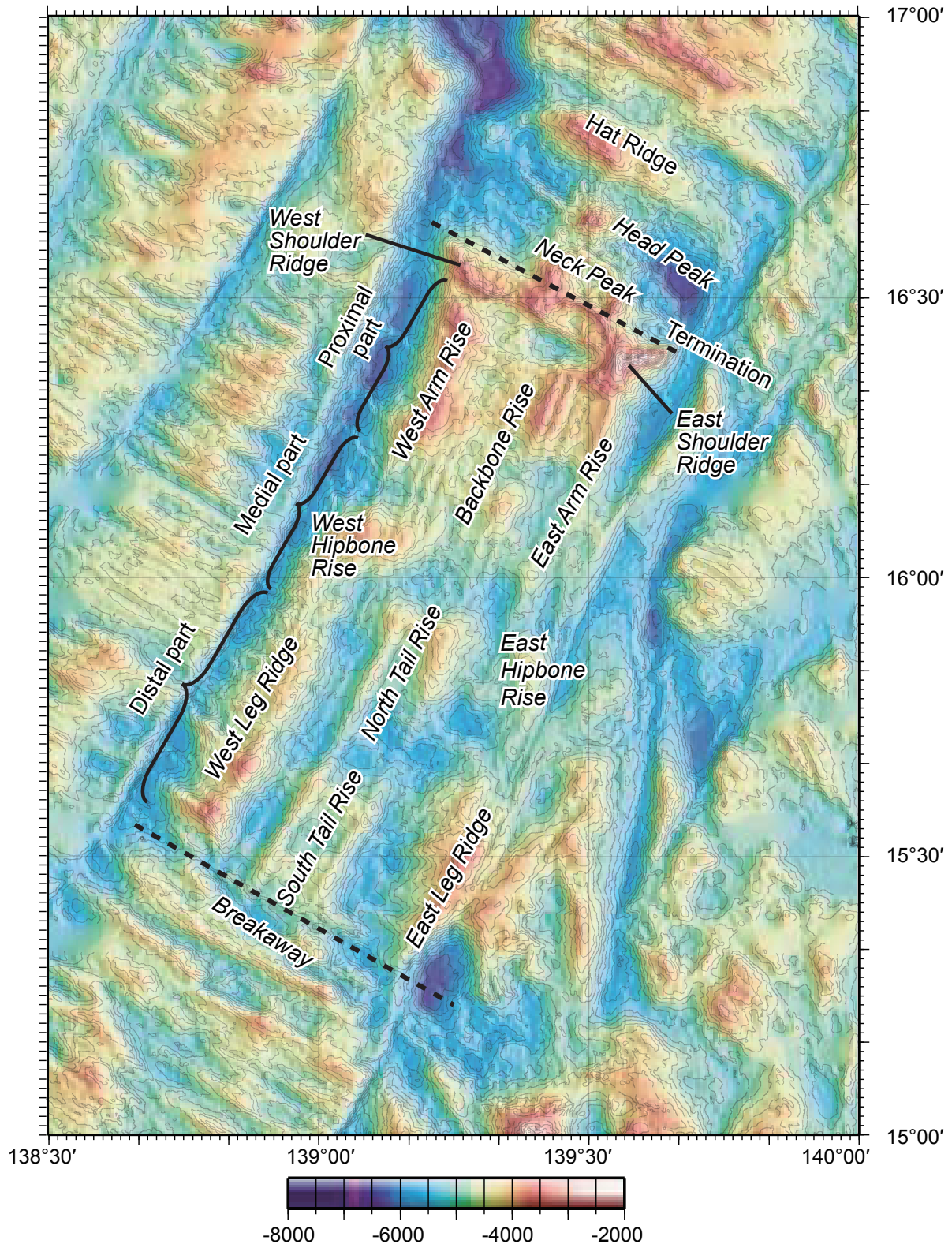
Fig. I-2. Satellite altimetry map showing the tectonic feature of Philippine Sea (after Sandwell and Smith, 1997; Ohara *et al.*, 2003a). Rectangle indicates the location Fig. I-3.

Fig. I-3. Bathymetric map of the western Parece Vela Basin (PVB). Dotted yellow lines (6A,



6B, 6C, 7) represent geomagnetic isochrones for the first stage of PVB spreading (Okino *et al.*, 1998). The first-stage full spreading rate is 8.8 cm/y (Okino *et al.*, 1998), and second-stage full rate is 7.0 cm/y (Ohara *et al.*, 2001). S1-S7: extinct spreading segments defined Ohara *et al.* (2001)..

Fig. I-4. Bathymetric map of the Godzilla Megamullion and structural image of the



Godzilla Megamullion showing the 14 individual names for the specific components of the megamullion and the conjugate crust (Ohara and Snow, 2009). The locations of the breakaway, distal, medial, and proximal parts, and termination are indicated schematically.

Fig. I-7. Left: Bathymetric map of the Godzilla Megamullion with obtained zircon U-Pb

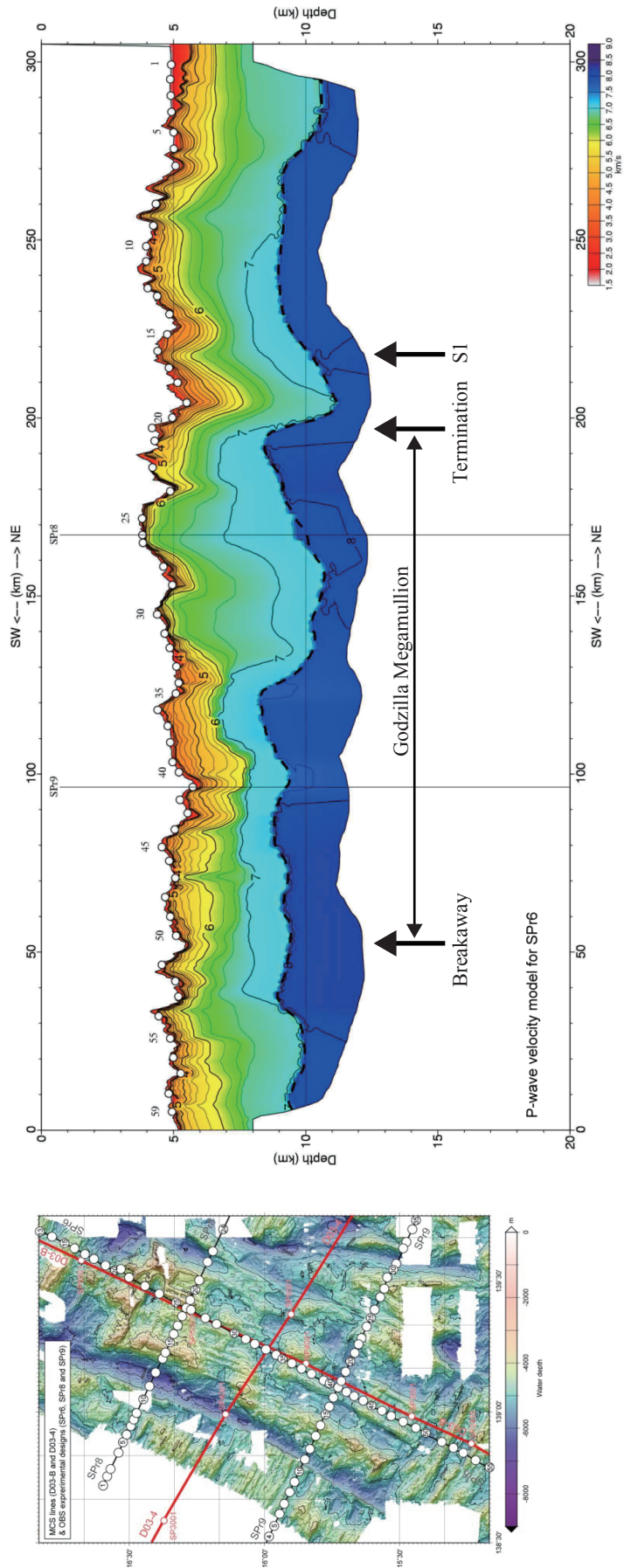


Fig. I-5. P-wave velocity model deduced from seismic refraction survey (SPR6) (Ohara & Snow, 2009). Left side map shows the experimental area. White solid circles indicate OBS positions.

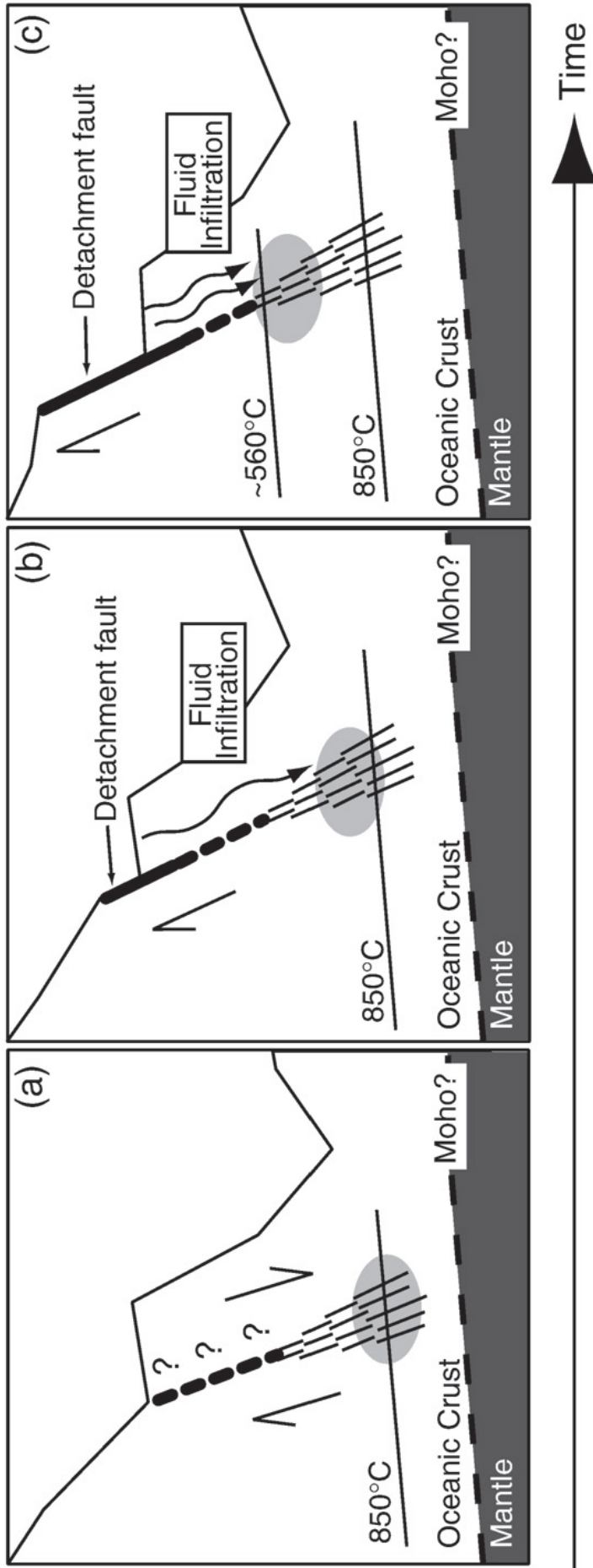
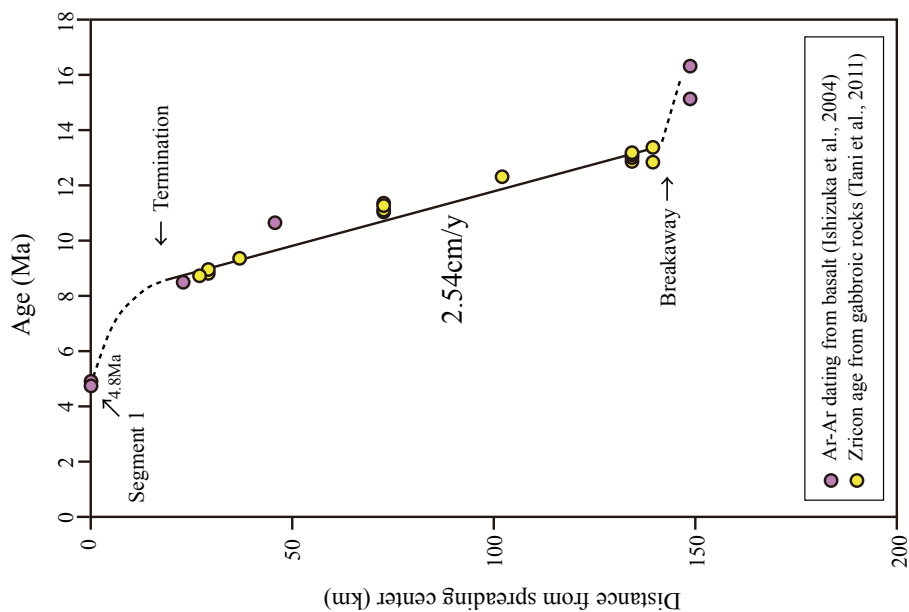
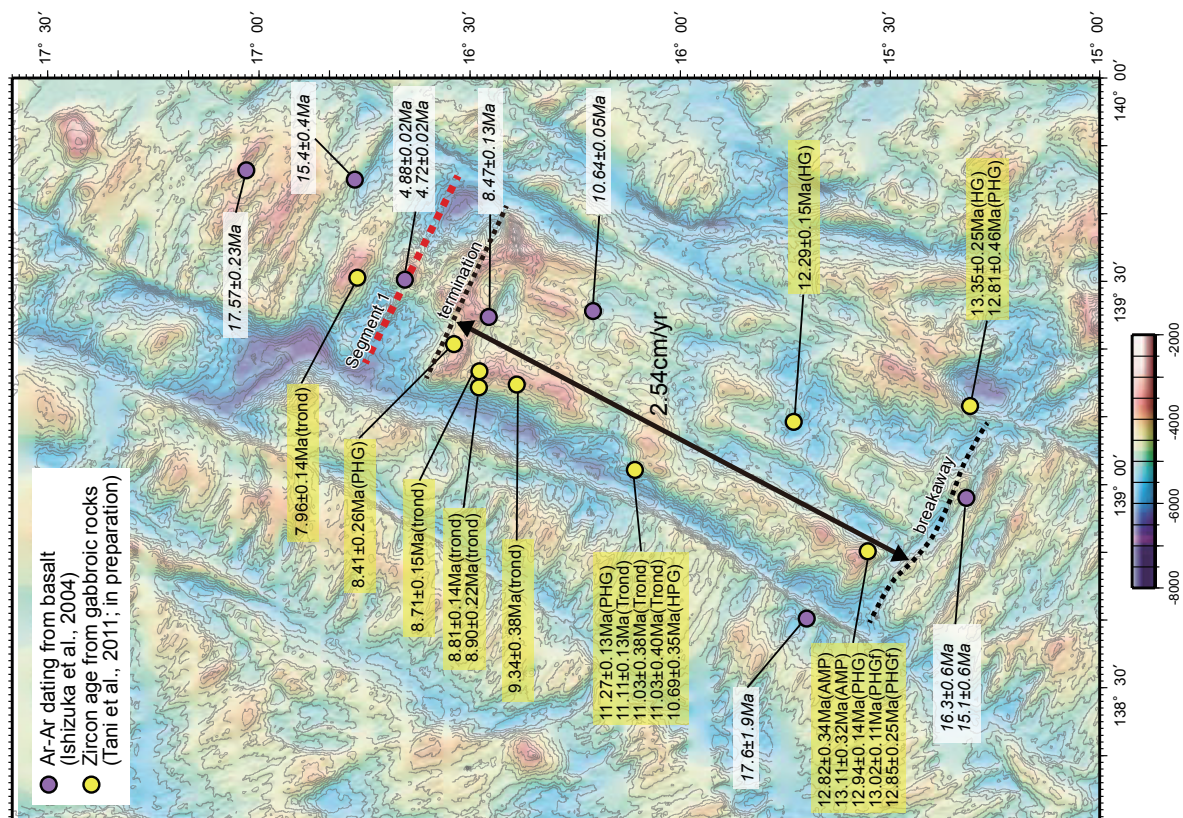


Fig. I-6. Schematic model of the progressive development of shear zone in the Godzilla Megamullion (Harigane *et al.*, 2008). a: An Fe-Ti oxide gabbro body was initially sheared at temperatures above 850 °C under hydrous conditions and subsequently subjected to alteration at around 650 °C, resulting in the formation of the coarse-type samples in the high-temperature shear zones. These samples could represent the primary shear zone associated with the detachment fault developed within the megamullion. b: The shear zone subsequently developed under hydrous conditions and decreasing temperature, possibly associated with uplift of the gabbro body, resulting in the formation of the medium-type samples in a progressively narrower mylonitic zone. c: The shear zone was further influenced by hydrothermal alteration under retrogressive conditions and temperatures as low as 560 °C during uplift of the gabbro body, resulting in the amphibolitization event in the fine-type samples.



ages and basalt Ar-Ar ages. Yellow circles indicate $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages from magmatic zircon (Tani *et al.*, 2011). Purple circles indicate Ar-Ar ages from basalt (Ishizuka *et al.*, 2004). Right: Age versus distance plot for dated samples from the Godzilla Megamullion. The slip rate for the megamullion detachment fault is ~ 2.5 cm/y (Tani *et al.*, 2011).



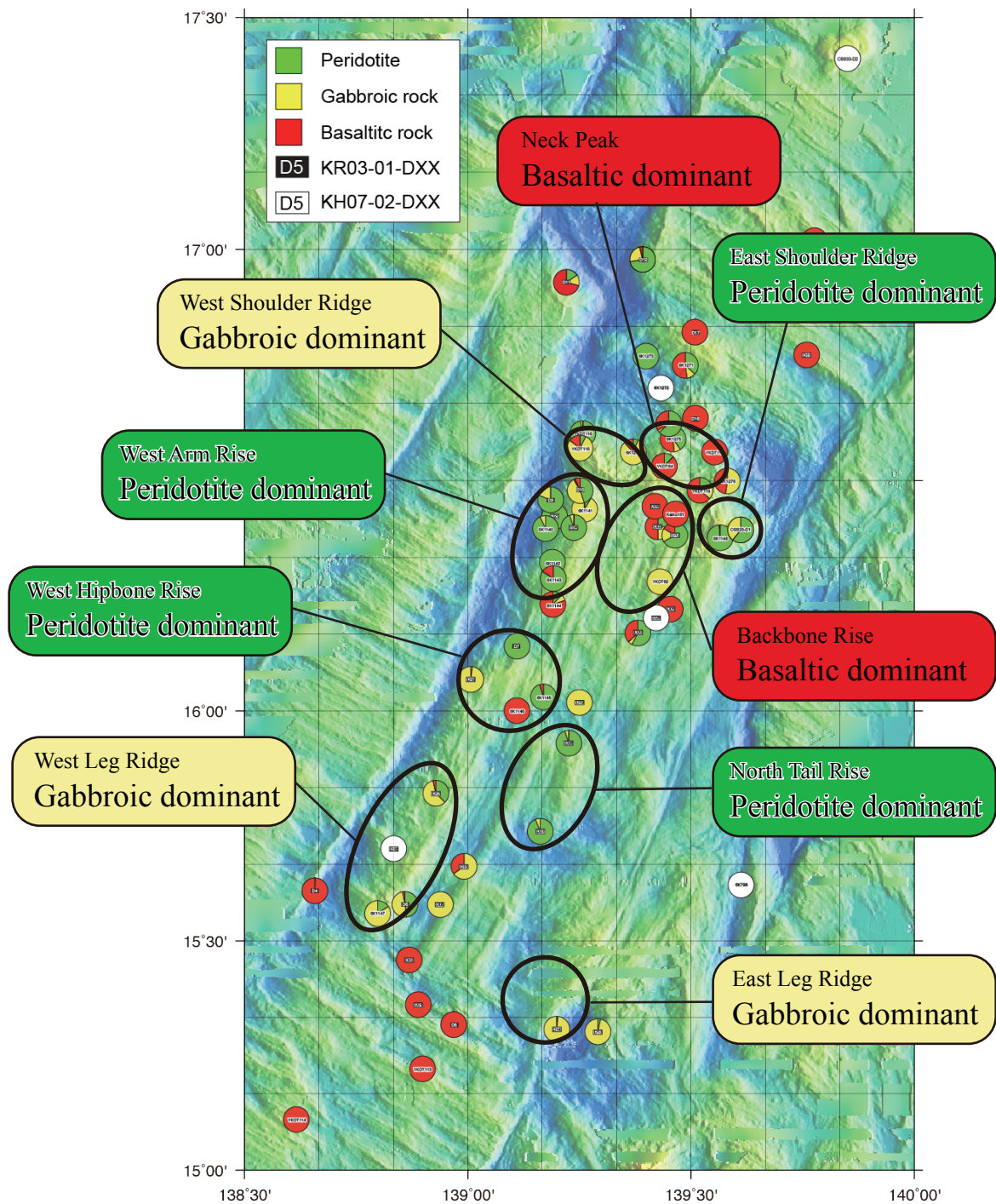


Fig. I-8. Pie chart showing the igneous oceanic crust and mantle lithologies of the Godzilla Megamullion (Ohara *et al.*, 2011).

APPENDIX 2 Figures (chapter II)

- Fig. II-1. Bathymetric map of the Godzilla Megamullion, showing the dredge and *Shinkai 6500* dive sites conducted during cruises KR03-01, KH07-02, YK09-05 and YK11-08.
- Fig. II-2. Classification of the gabbroic rocks recovered from the East Leg Ridge.
- Fig. II-3. Classification of the gabbroic rocks recovered from the West Leg Ridge.
- Fig. II-4. Classification of the gabbroic rocks recovered from the West Hipbone Rise.
- Fig. II-5. Classification of the gabbroic rocks recovered from the West Arm Rise.
- Fig. II-6. Classification of the gabbroic rocks recovered from the West Shoulder Ridge .
- Fig. II-7. Classification of the gabbroic rocks recovered from the Neck Peak.
- Fig. II-8. Representative petrographic characteristics of the gabbroic rocks recovered from the Godzilla Megamullion.
- Fig. II-9. Photomicrographs of petrographic thin sections of troctolite (YK09-05 6K#1147R01).
- Fig. II-10. Photomicrographs of petrographic thin sections of olivine gabbro (YK09-05 6K#1147R02).
- Fig. II-11. Photomicrographs of petrographic thin sections of gabbro (KH07-02 D14-033).
- Fig. II-12. Photomicrographs of petrographic thin sections of fine grain hornblende pyroxene gabbro (KR03-01 D06-1001f).
- Fig. II-13. Photomicrographs of petrographic thin sections of hornblende pyroxene gabbro (KH07-02 D18-058).
- Fig. II-14. Photomicrographs of petrographic thin sections of pyroxene hornblende gabbro (KR03-01 D06-1202).
- Fig. II-15. Photomicrographs of petrographic thin sections of fine grain pyroxene hornblende gabbro (KR03-01 D06-1401).
- Fig. II-16. Photomicrographs of petrographic thin sections of oxide mineral rich pyroxene hornblende gabbro (KH07-02 D14-017).
- Fig. II-17. Photomicrographs of petrographic thin sections of pyroxene hornblende gabbro (KR03-01 D10-102), crossed polarizers.
- Fig. II-18. Photomicrographs of petrographic thin sections of hornblende gabbro (YK09-05 6K#1141R18).
- Fig. II-19. Photomicrographs of petrographic thin sections of trondhjemite (KH07-02 D18-015).
- Fig. II-20. Lithological proportions of gabbroic rocks from the Godzilla Megamullion.
- Fig. II-21. Lithological proportions of gabbroic rocks except for the secondary amphibole.
- Fig. II-22. Comparison of the lithological proportions of gabbroic rocks between the Godzilla Megamullion and other megamullions in mid-ocean ridges.

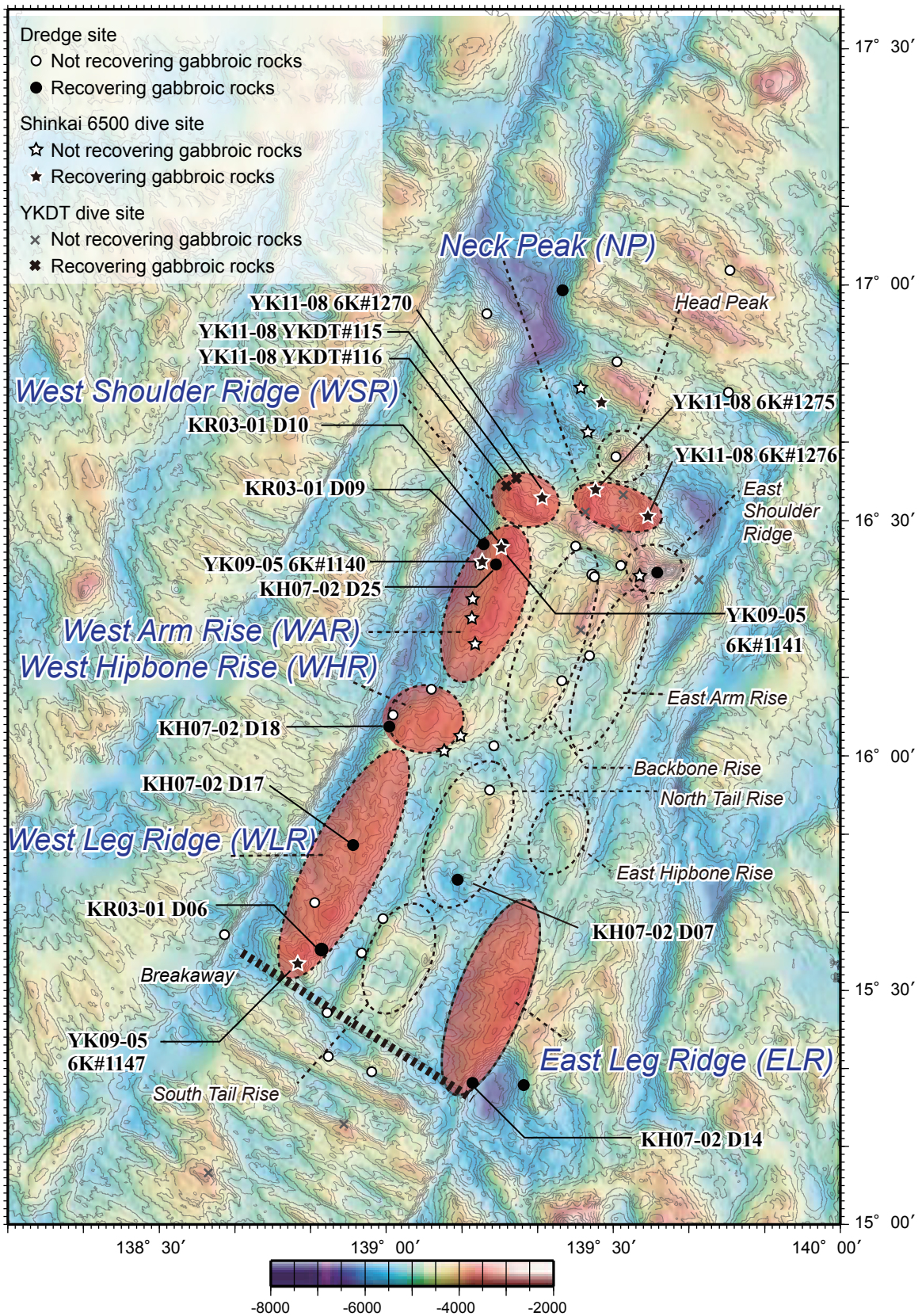


Fig. II-1. Bathymetric map of the Godzilla Megamullion, showing the dredge and *Shinkai* 6500 dive sites conducted during cruises KR03-01, KH07-02, YK09-05 and YK11-08.

East Leg Ridge

● KH07-02 D14

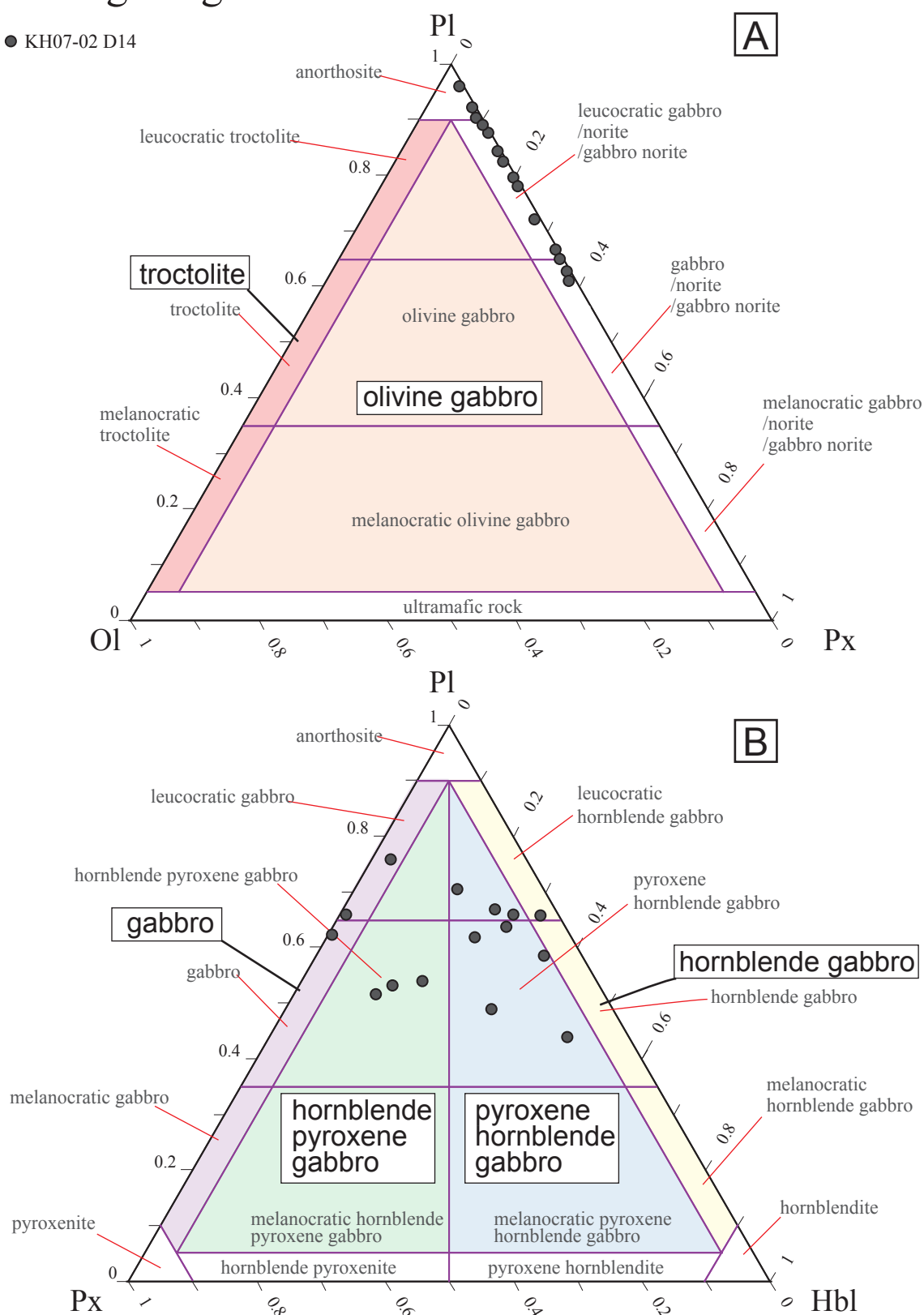


Fig. II-2. Classification of the gabbroic rocks recovered from the East Leg Ridge. A) Olivine-plagioclase-pyroxene systematics (Streckeisen, 1976). B) Pyroxene-plagioclase-hornblende systematics (Streckeisen, 1976). Pl: plagioclase, Px: pyroxene, Hbl: hornblende, Ol: olivine.

West Leg Ridge

● KR03-01 D6

○ YK09-05 6K#1147

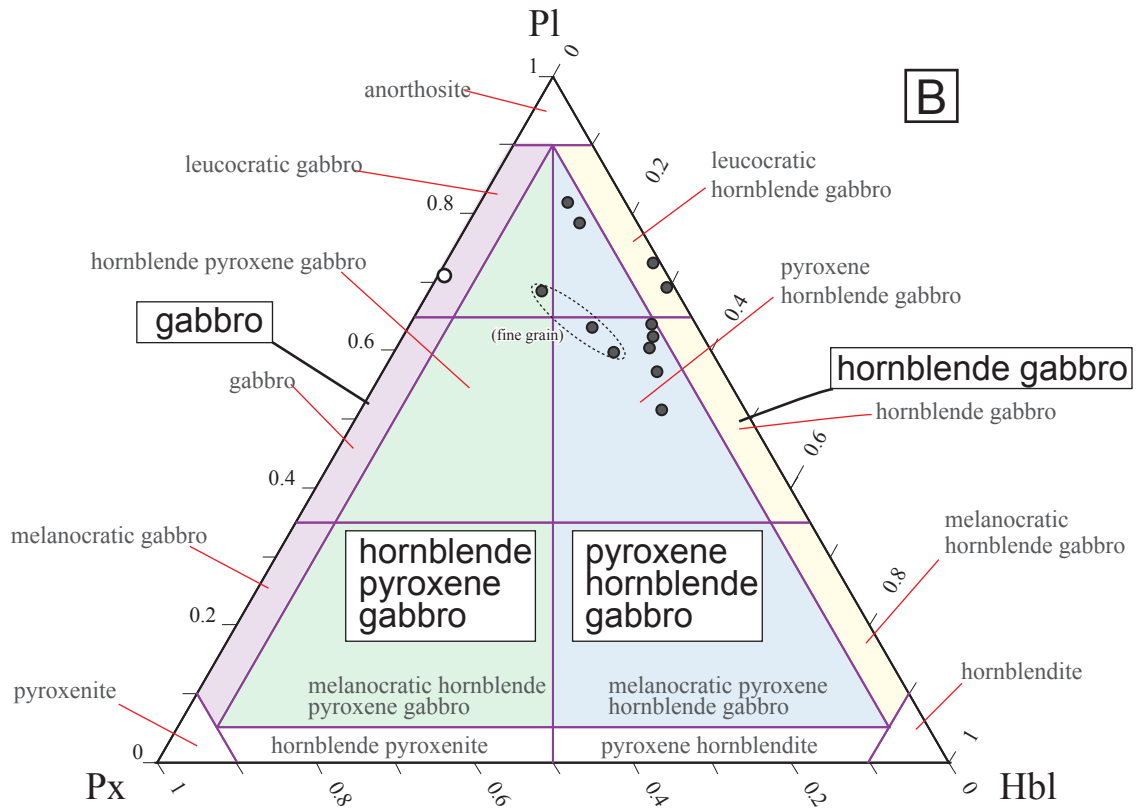
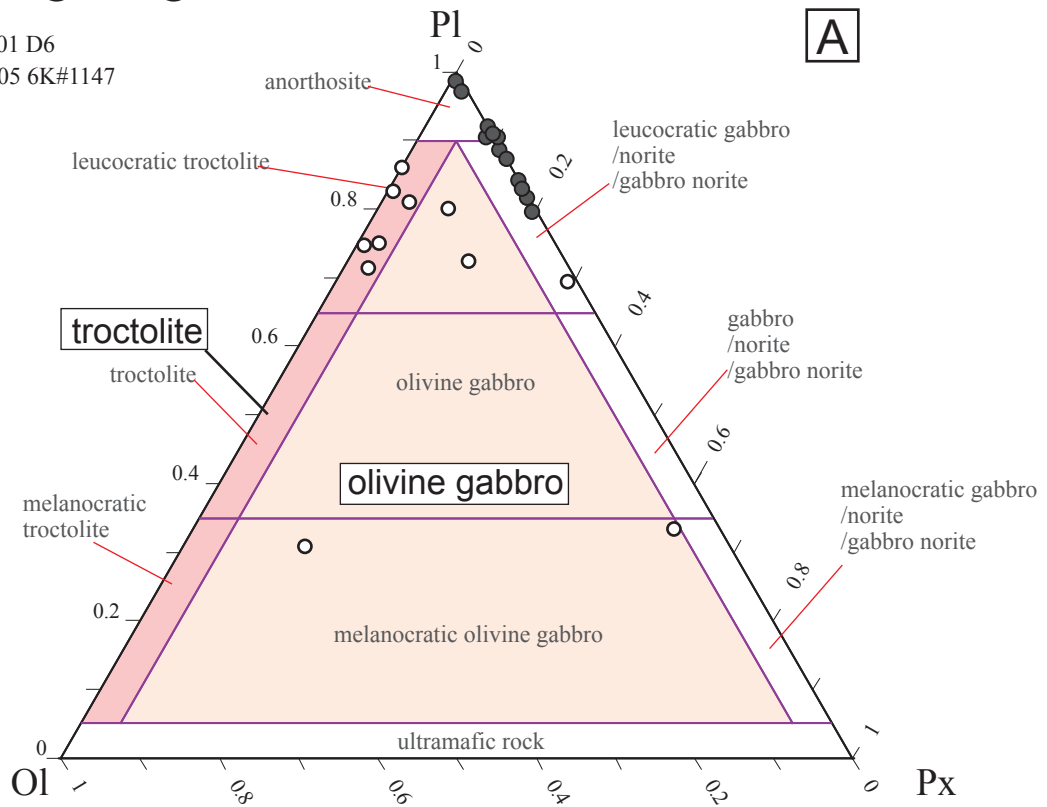


Fig. II-3. Classification of the gabbroic rocks recovered from the West Leg Ridge. A) Olivine-plagioclase-pyroxene systematics (Streckeisen, 1976). B) Pyroxene-plagioclase-hornblende systematics (Streckeisen, 1976). Pl: plagioclase, Px: pyroxene, Hbl: hornblende, Ol: olivine.

West Hipbone Rise

● KH07-02 D18

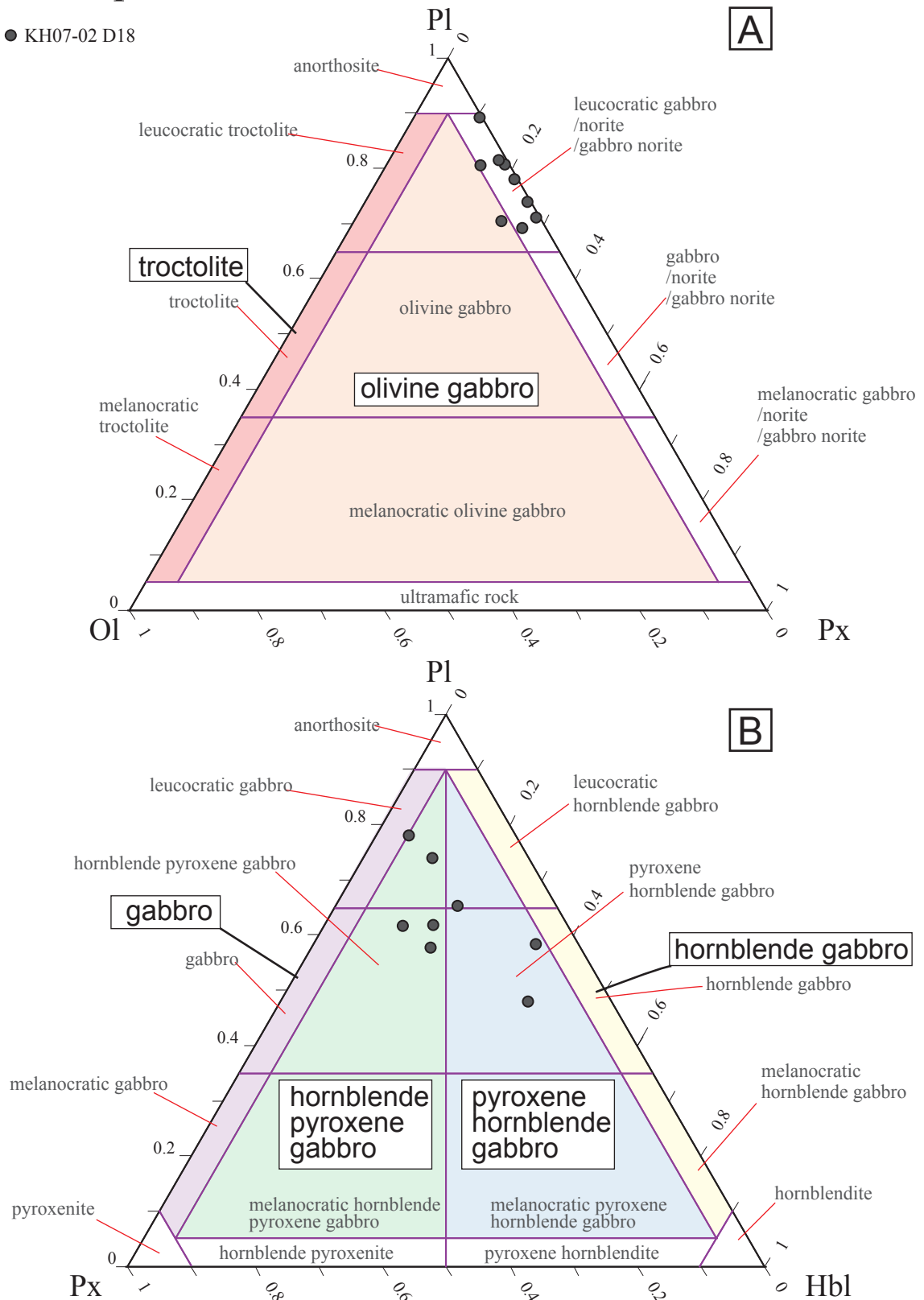


Fig. II-4. Classification of the gabbroic rocks recovered from the West Hipbone Rise. A) Olivine-plagioclase-pyroxene systematics (Streckeisen, 1976). B) Pyroxene-plagioclase-hornblende systematics (Streckeisen, 1976). Pl: plagioclase, Px: pyroxene, Hbl: hornblende, Ol: olivine.

West Arm Rise

● KR03-01 D10

○ YK09-05 6K#1141

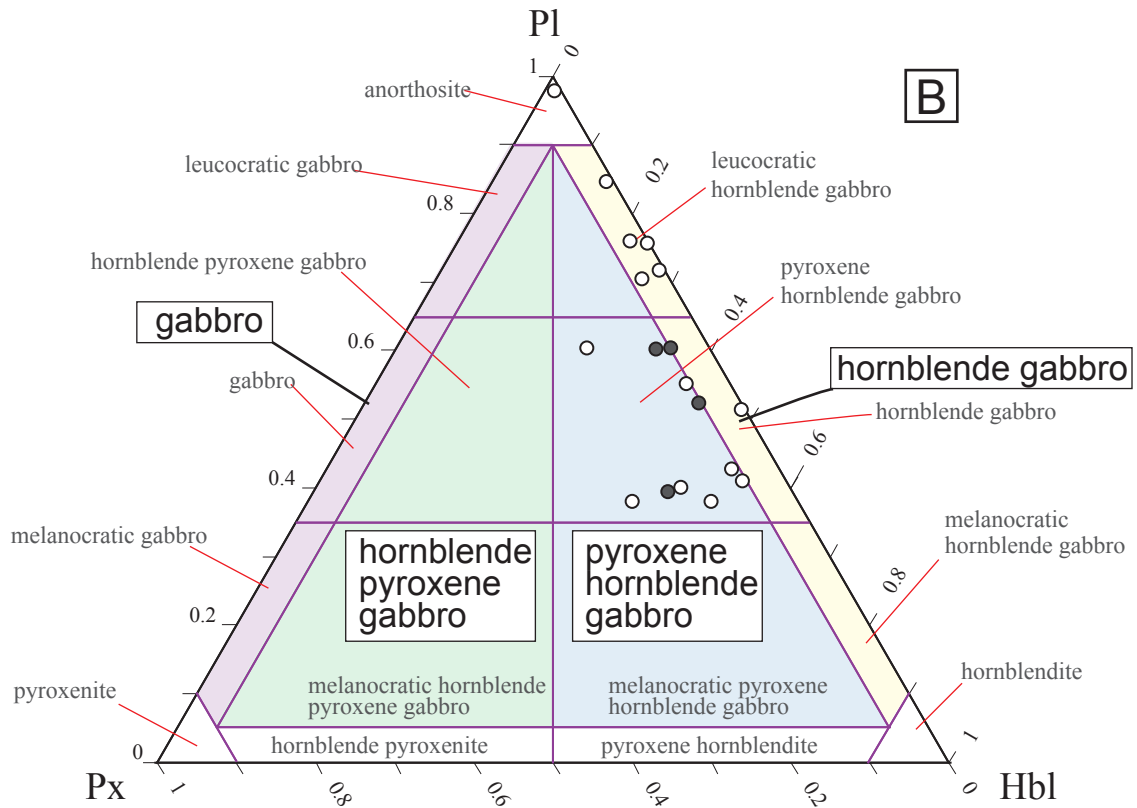
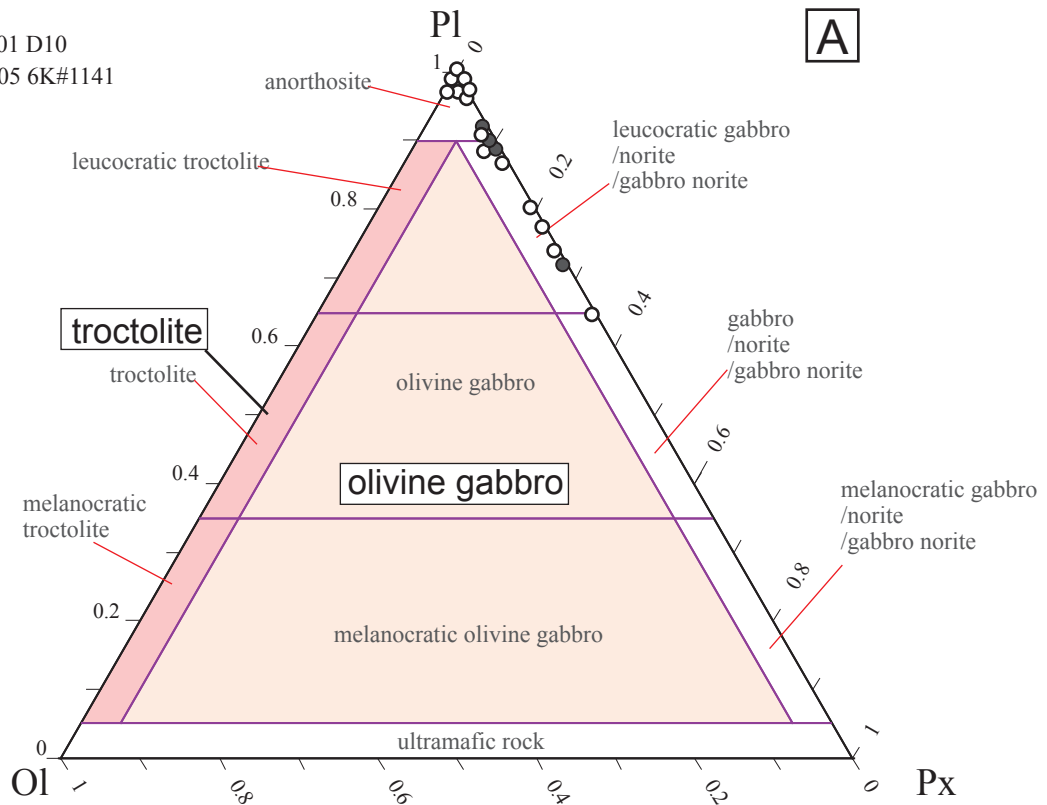


Fig. II-5. Classification of the gabbroic rocks recovered from the West Arm Rise. A) Olivine-plagioclase-pyroxene systematics (Streckeisen, 1976). B) Pyroxene-plagioclase-hornblende systematics (Streckeisen, 1976). Pl: plagioclase, Px: pyroxene, Hbl: hornblende, Ol: olivine.

West Shoulder Ridge

- YK11-08 6K#1270
- ☆ YK11-08 YKDT#115
- YK11-08 YKDT#116

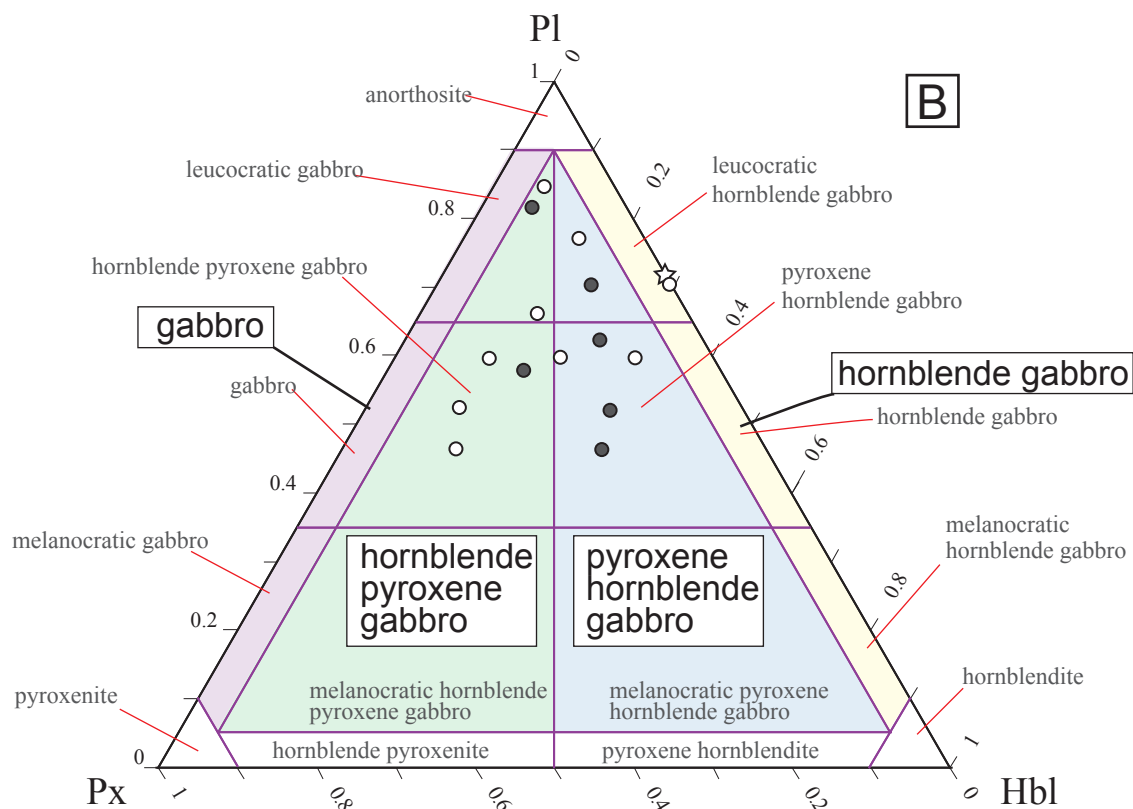
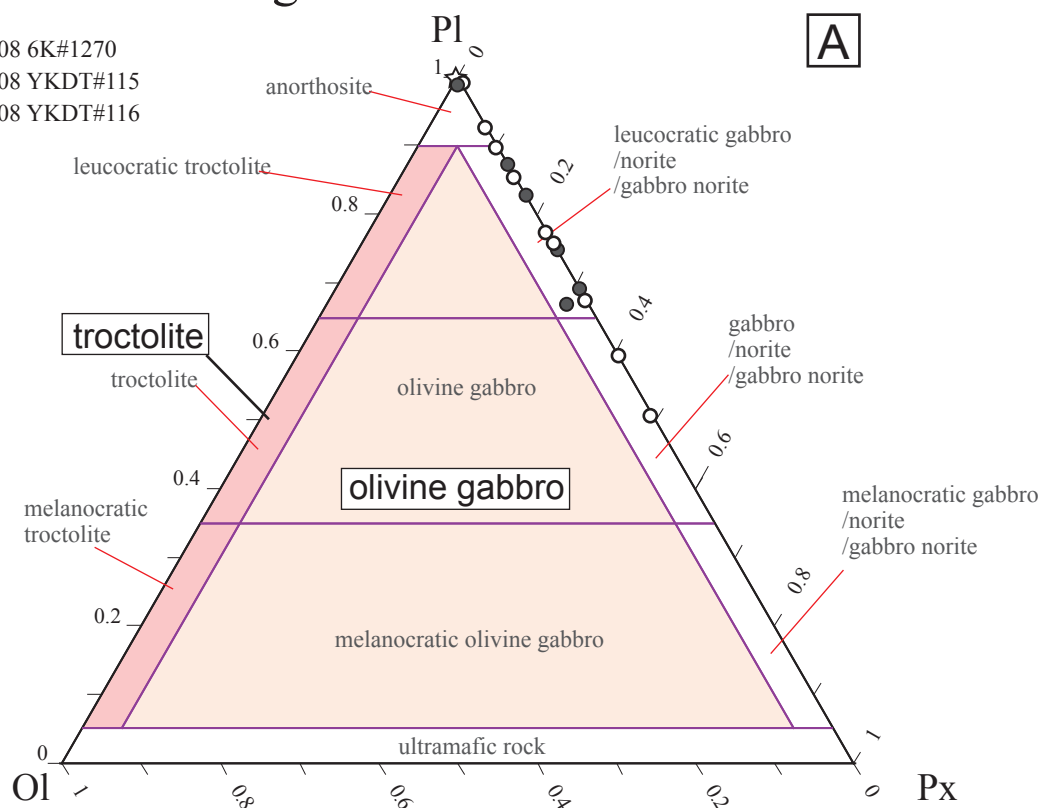


Fig. II-6. Classification of the gabbroic rocks recovered from the West Shoulder Ridge . A) Olivine-plagioclase-pyroxene systematics (Streckeisen, 1976). B) Pyroxene-plagioclase-hornblende systematics (Streckeisen, 1976). Pl: plagioclase, Px: pyroxene, Hbl: hornblende, Ol: olivine.

Neck Peak

- YK11-08 6K#1275
- YK11-08 6K#1276

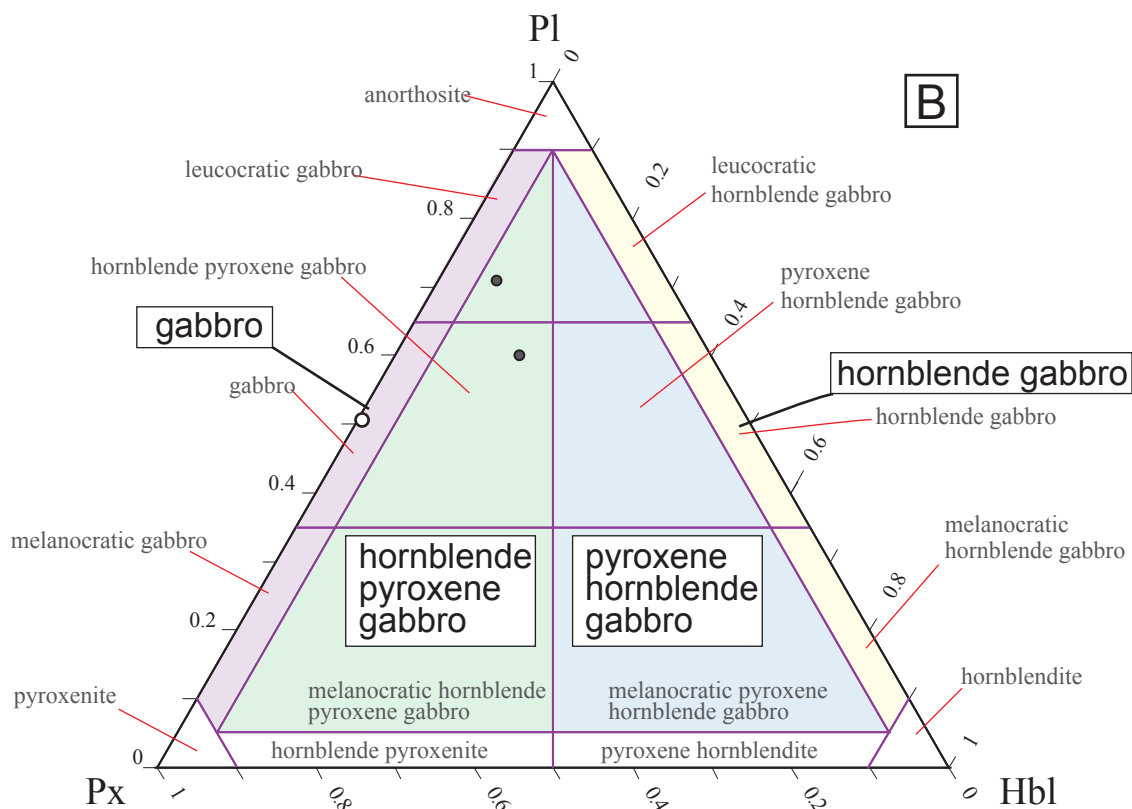
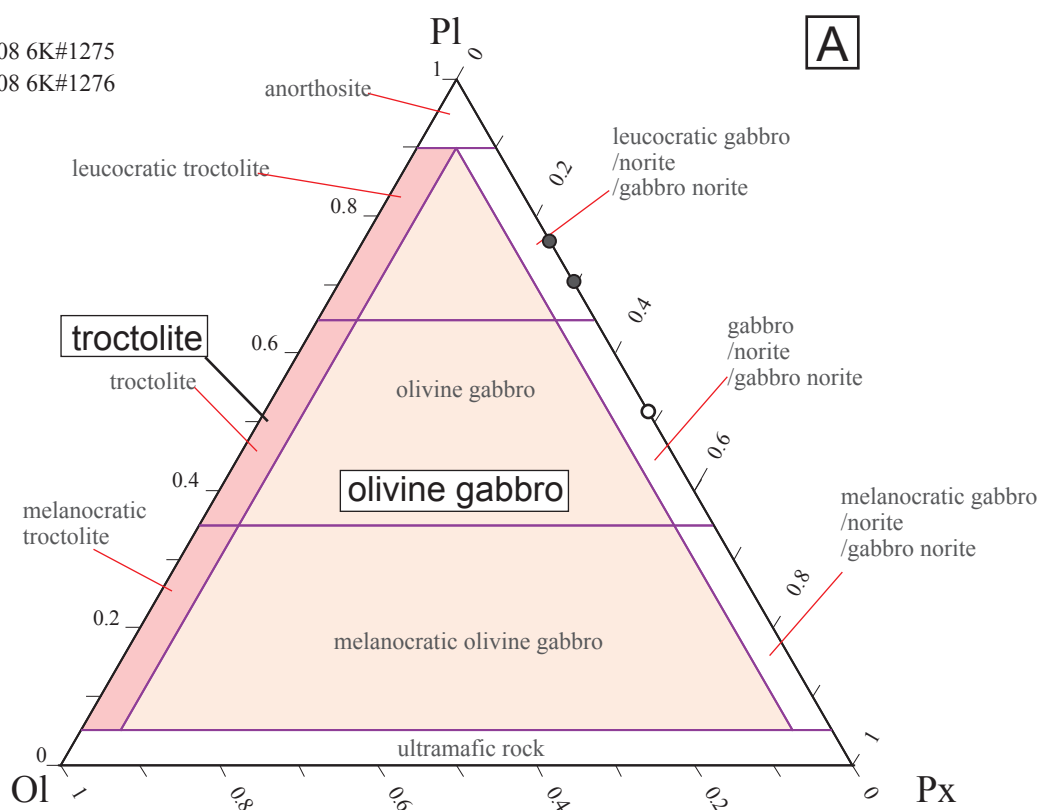


Fig. II-7. Classification of the gabbroic rocks recovered from the Neck Peak. A) Olivine-plagioclase-pyroxene systematics (Streckeisen, 1976). B) Pyroxene-plagioclase-hornblende systematics (Streckeisen, 1976). Pl: plagioclase, Px: pyroxene, Hbl: hornblende, Ol: olivine.

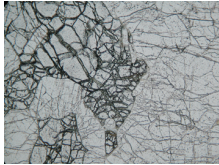
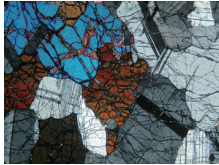
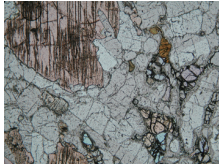
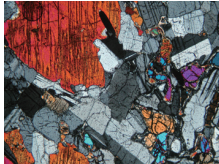

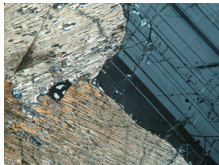
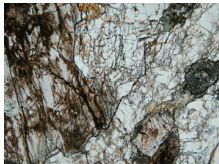
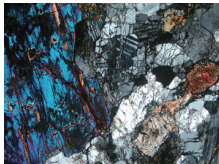
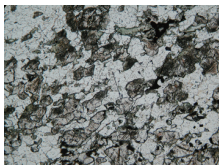

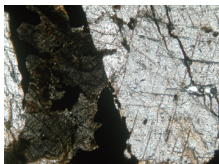
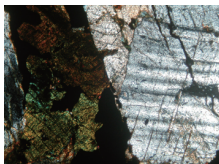
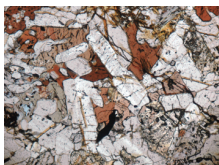
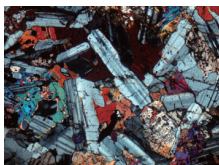
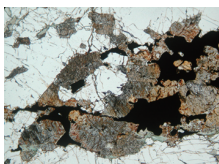
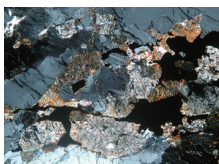
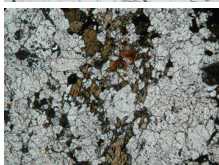
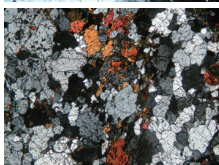
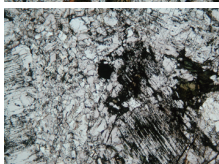
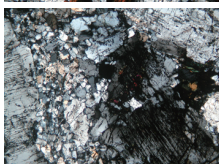
Rock type	Thin section		Mineral Assembly
	(open polar)	(cross polar)	
Troctolite Thin section: YK09-05 6K#114R01 (WLR)			Plagioclase + Olivine ± Clinopyroxene ± Orthopyroxene ± Amphibole
Olivine Gabbro Thin section: YK09-05 6K#114R02 (WLR)			Plagioclase + Olivine + Clinopyroxene ± Orthopyroxene ± Amphibole ± Oxide mineral
Gabbro Thin section: KH07-02 D14-033 (ELR)			Plagioclase + Clinopyroxene ± Orthopyroxene ± Olivine ± Amphibole ± Oxide mineral
Hornblende Pyroxene Gabbro Thin section: KH07-02 D18-058 (WHR)			Plagioclase + Clinopyroxene + Amphibole + Oxide mineral ± Orthopyroxene ± Olivine
Hornblende Pyroxene Gabbro (fine grain type) Thin section: KR03-01 D06-1001f (WLR)			Plagioclase + Clinopyroxene + Amphibole + Oxide mineral ± Orthopyroxene ± Olivine
Pyroxene Hornblende Gabbro Thin section: KR03-01 D06-1202 (WLR)			Plagioclase + Amphibole + Clinopyroxene + Oxide mineral ± Orthopyroxene ± Olivine
Pyroxene Hornblende Gabbro (fine grain type) Thin section: KR03-01 D06-1401 (WLR)			Plagioclase + Amphibole + Clinopyroxene + Oxide mineral ± Orthopyroxene ± Olivine
Pyroxene Hornblende Gabbro (oxide mineral rich type) Thin section: KH07-02 D14-017 (ELR)			Plagioclase + Amphibole + Clinopyroxene + Oxide mineral ± Orthopyroxene ± Olivine
Hornblende Gabbro Thin section: YK09-05 6K#1141R18 (WAR)			Plagioclase + Amphibole + Oxide mineral ± Clinopyroxene ± Orthopyroxene
Trondhjemite Thin section: KH07-02 D18-015 (WHR)			Plagioclase + Amphibole ± Oxide mineral

Fig. II-8. Representative petrographic characteristics of the gabbroic rocks recovered from the Godzilla Megamullion.

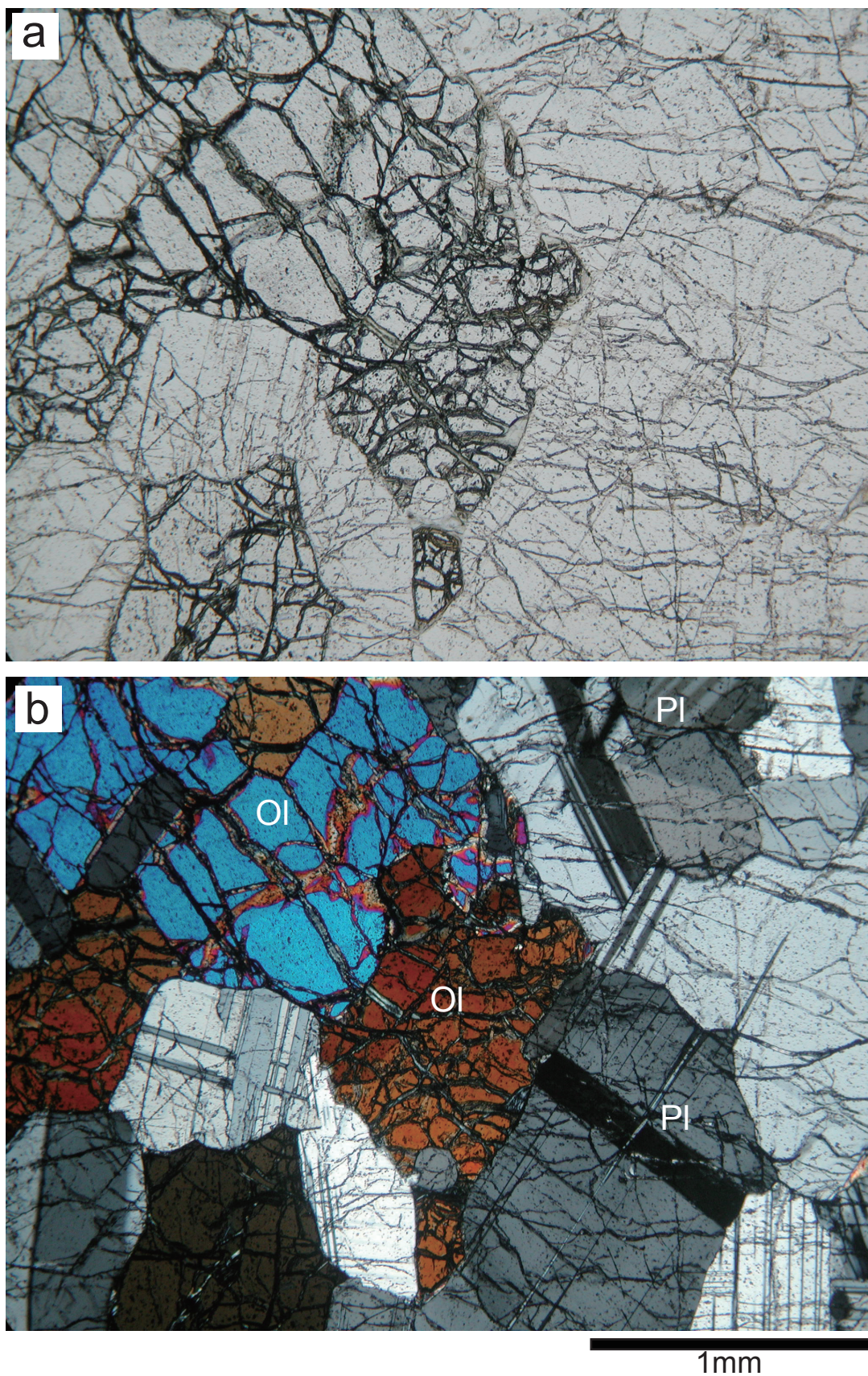


Fig. II-9. Photomicrographs of petrographic thin sections of troctolite (YK09-05 6K#1147R01). Pl: plagioclase, Ol: olivine. a: plane-polarized light, b: crossed polars.

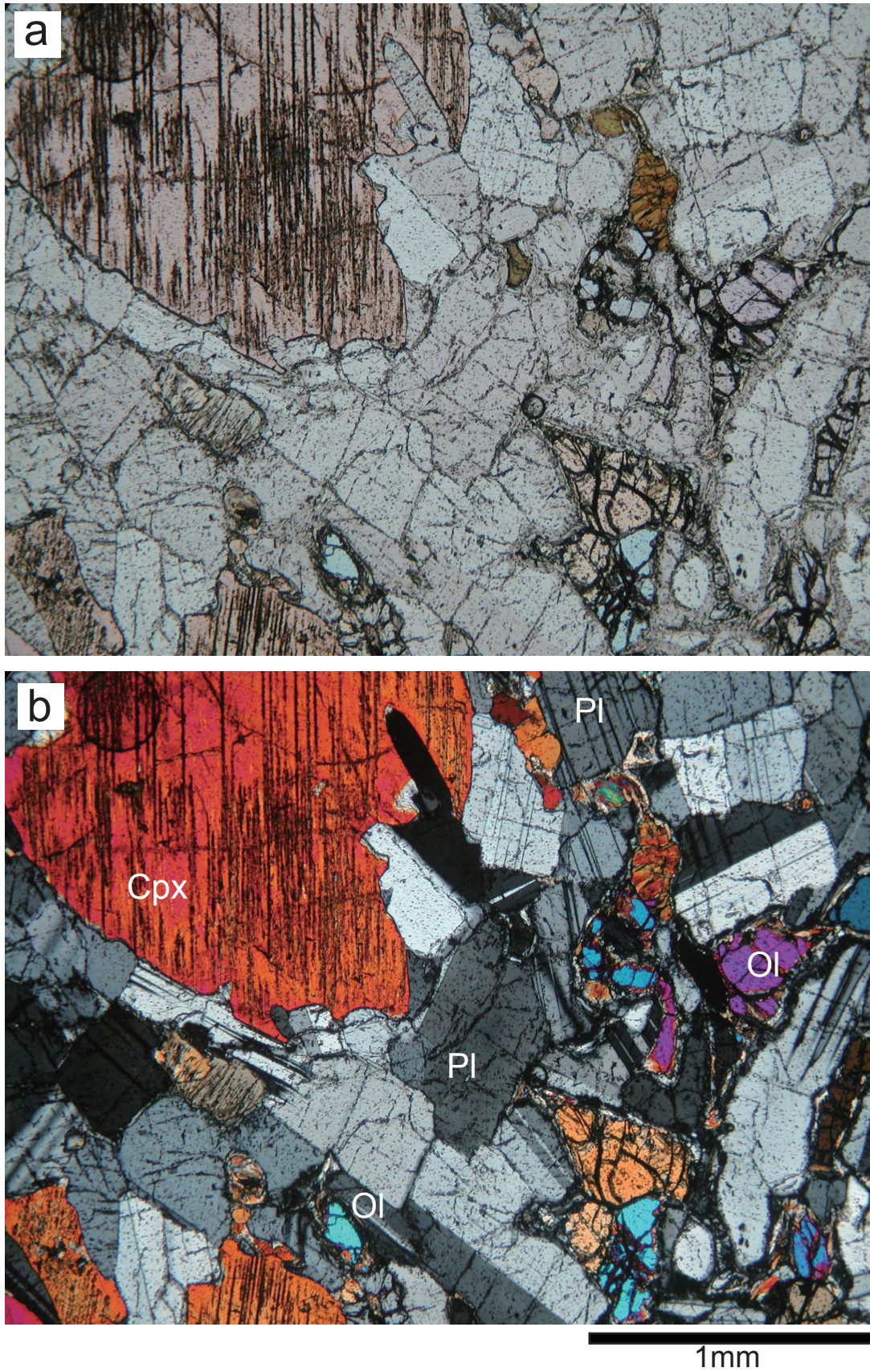


Fig. II-10. Photomicrographs of petrographic thin sections of olivine gabbro (YK09-05 6K#1147R02). Pl: plagioclase, Ol: olivine, Cpx: clinopyroxene. a: plane-polarized light, b: crossed polars.

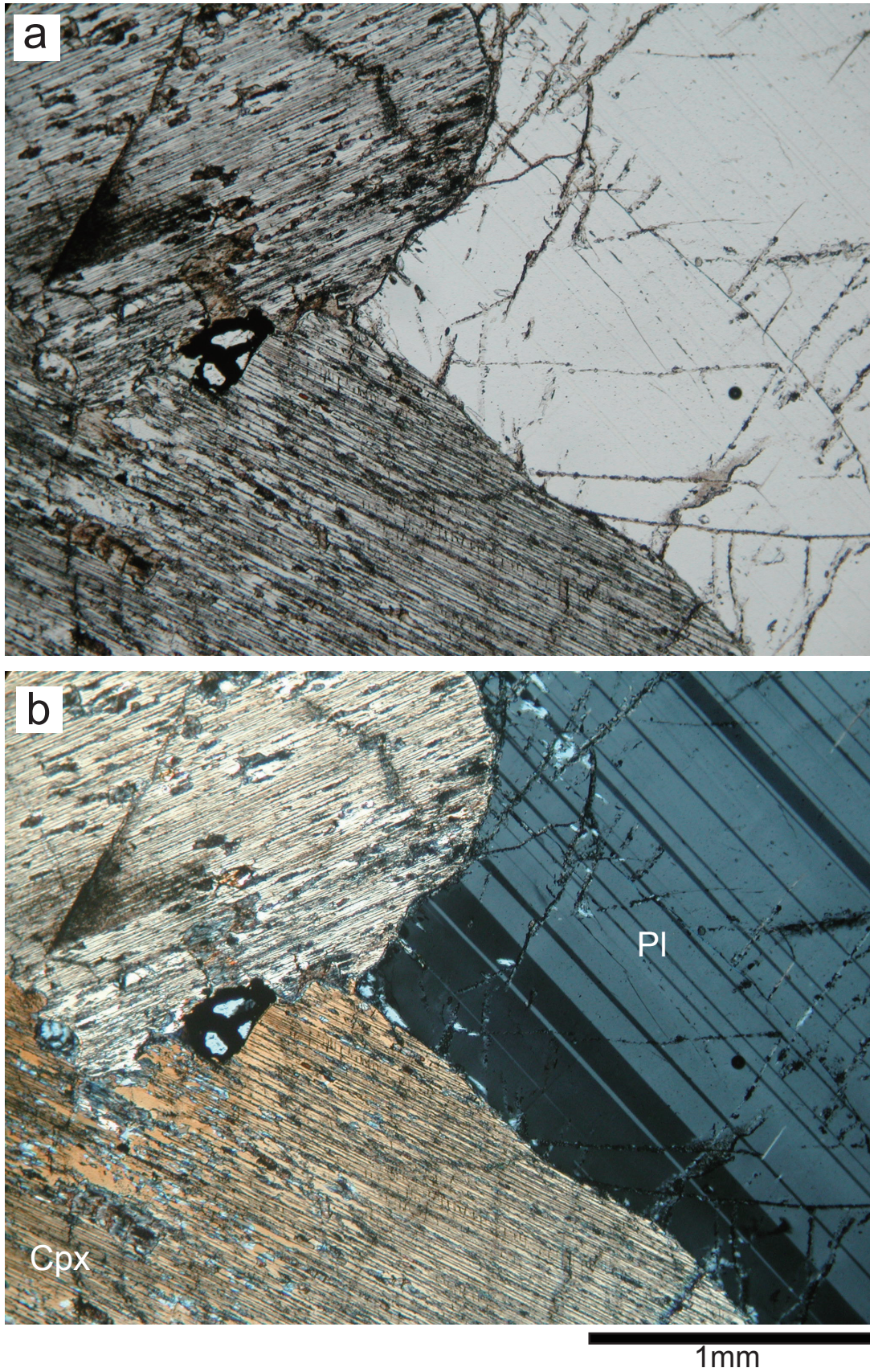


Fig. II-11. Photomicrographs of petrographic thin sections of gabbro (KH07-02 D14-033). Pl: plagioclase, Cpx: clinopyroxene. a: plane-polarized light, b: crossed polars.

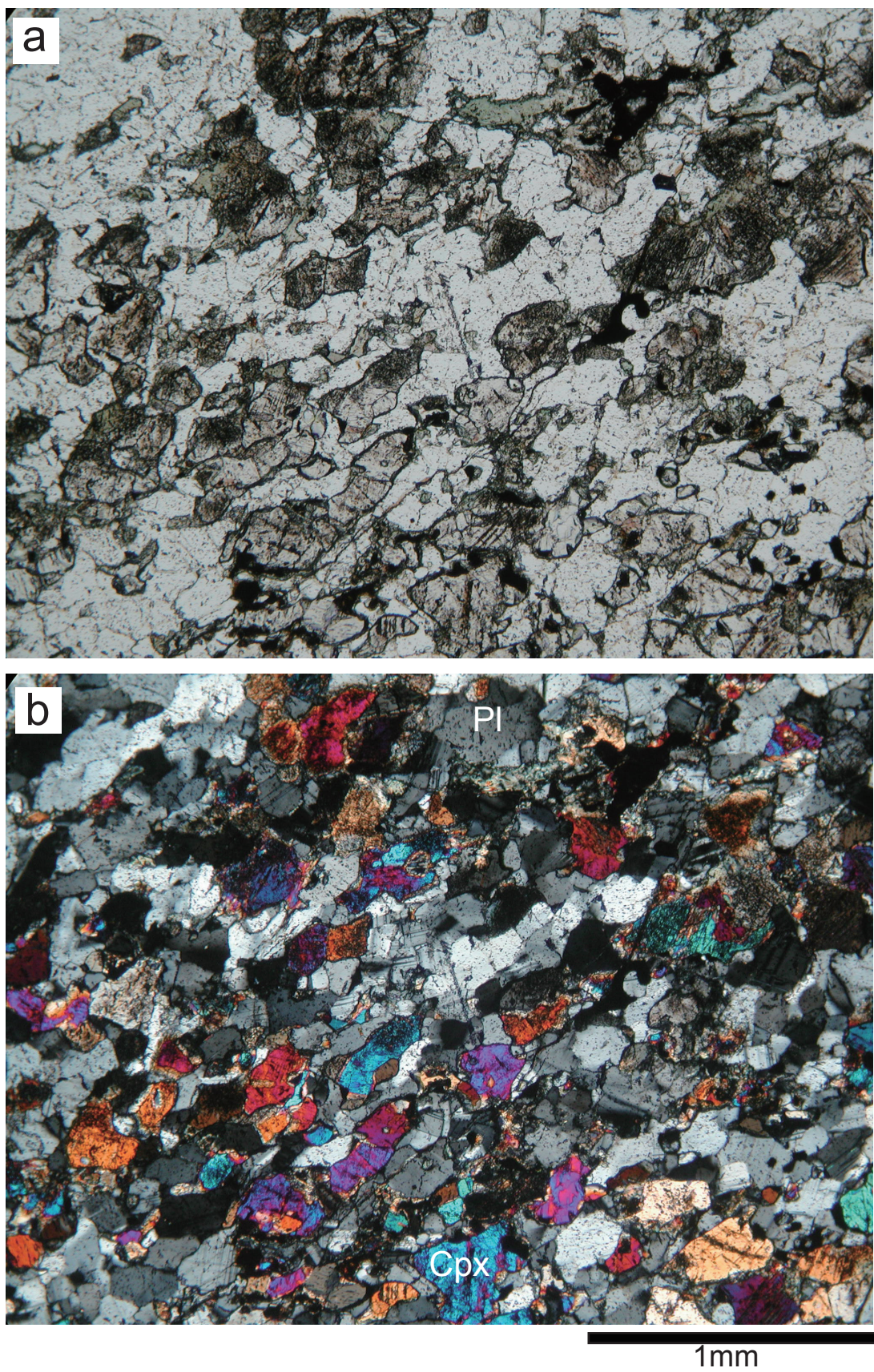


Fig. II-12. Photomicrographs of petrographic thin sections of fine grain hornblende pyroxene gabbro (KR03-01 D06-1001f). Pl: plagioclase, Cpx: clinopyroxene. a: plane-polarized light, b: crossed polars.

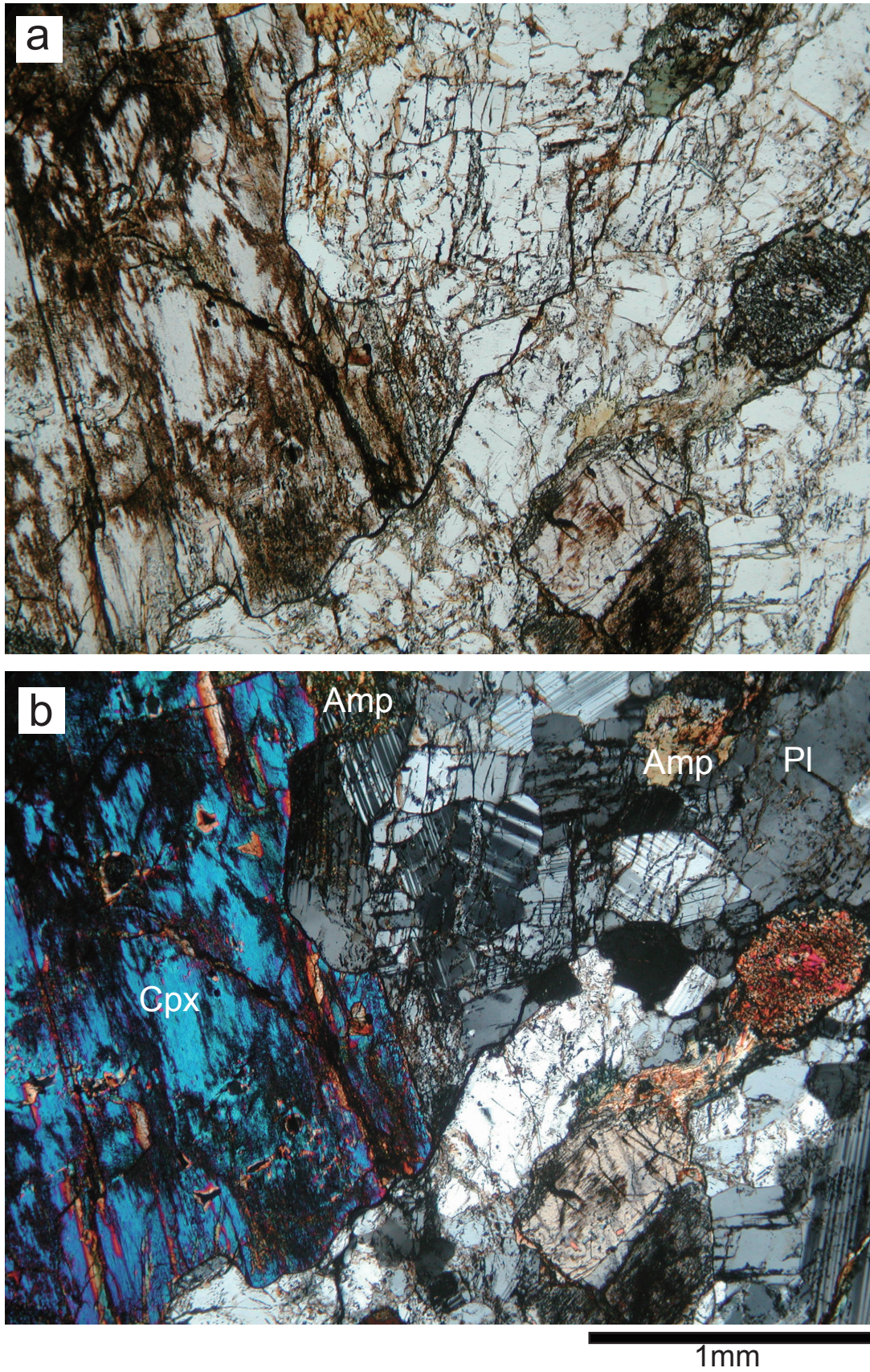


Fig. II-13. Photomicrographs of petrographic thin sections of hornblende pyroxene gabbro (KH07-02 D18-058). This sample was slightly deformed. Pl: plagioclase, Cpx: clinopyroxene, Amp: amphibole. a: plane-polarized light, b: crossed polars.

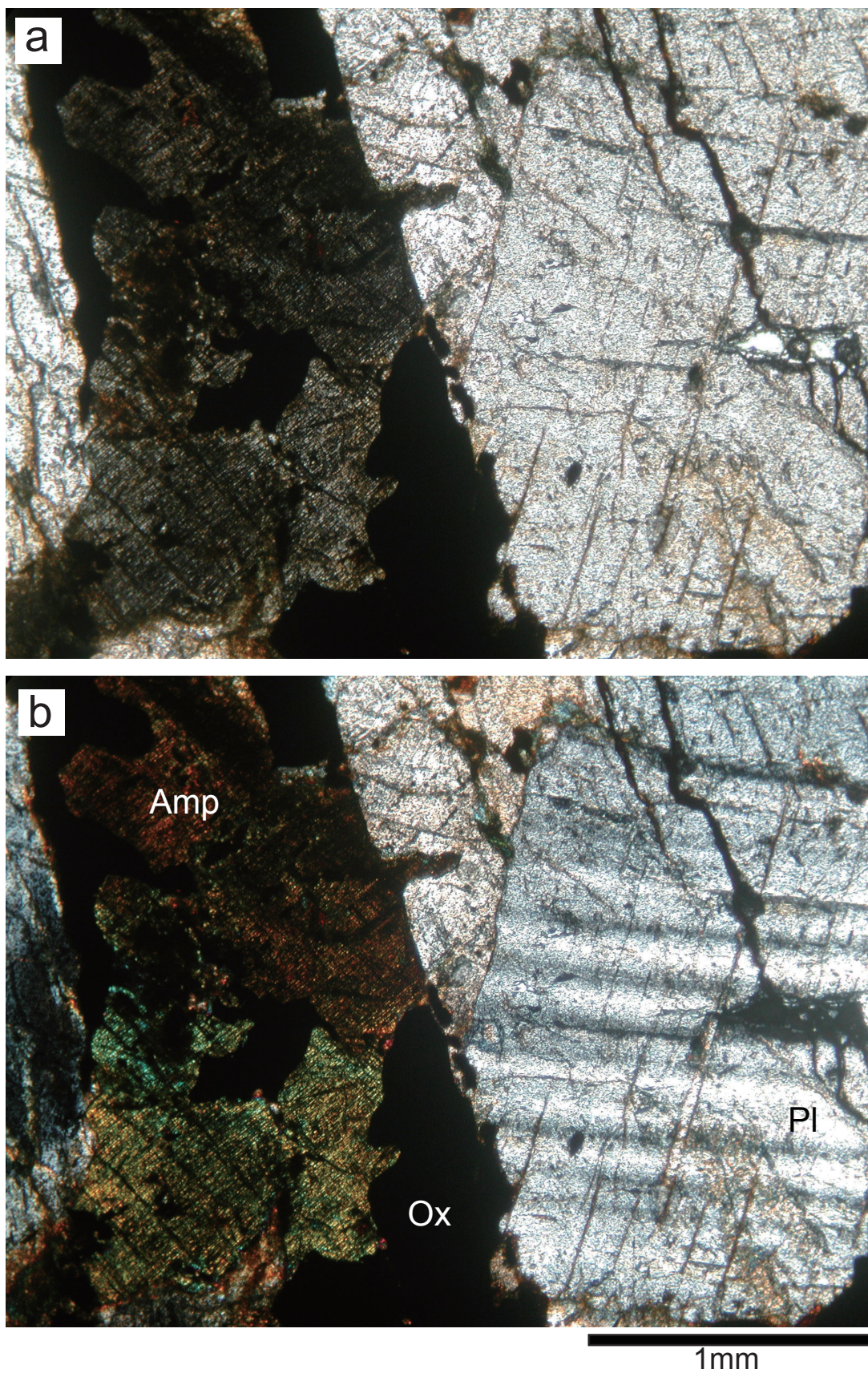


Fig. II-14. Photomicrographs of petrographic thin sections of pyroxene hornblende gabbro (KR03-01 D06-1202). Pl: plagioclase, Amp: amphibole, Ox: oxide mineral. a: plane-polarized light, b: crossed polars.

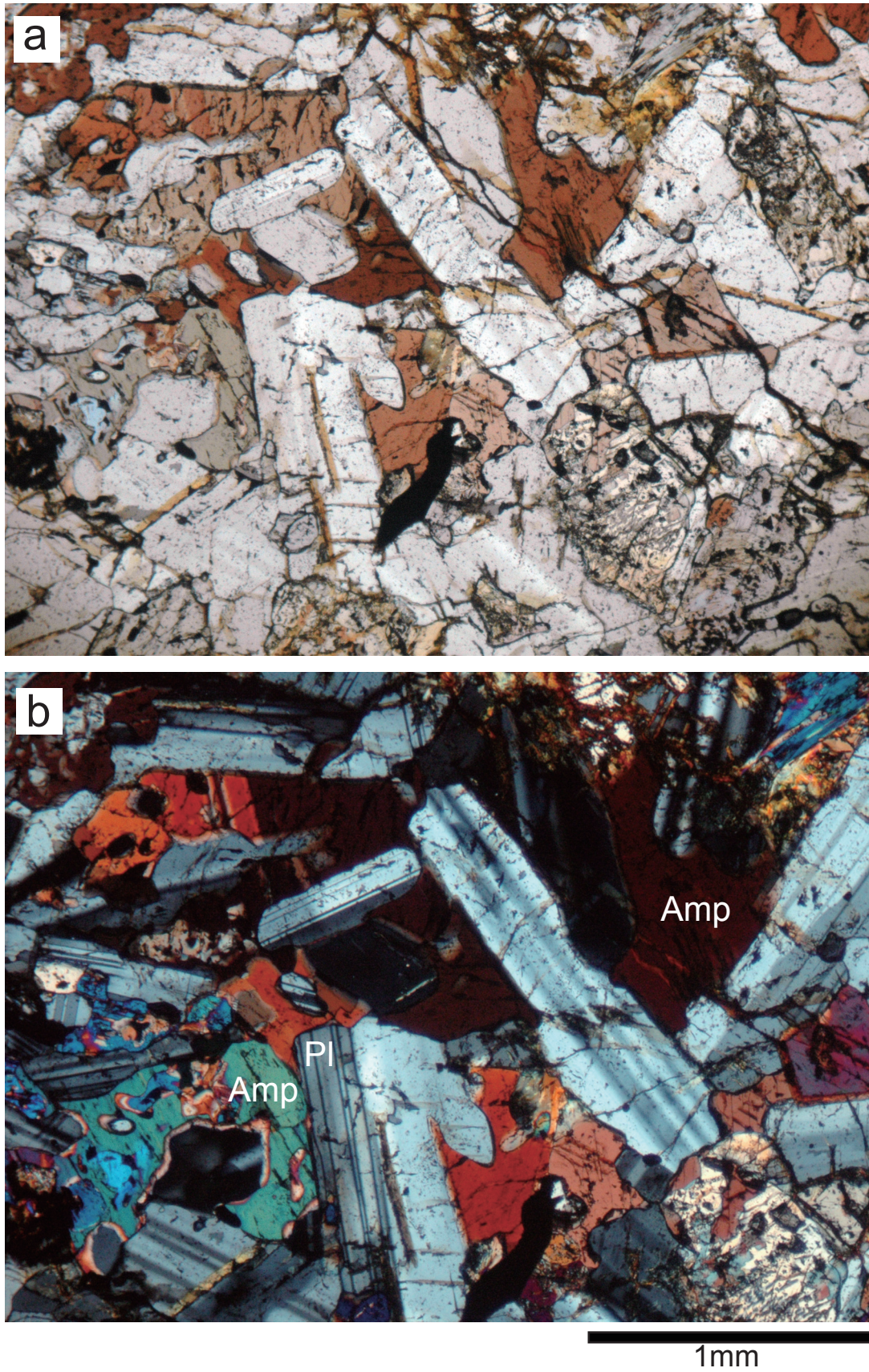


Fig. II-15. Photomicrographs of petrographic thin sections of fine grain pyroxene hornblende gabbro (KR03-01 D06-1401). Pl: plagioclase, Amp: amphibole. a: plane-polarized light, b: crossed polars.

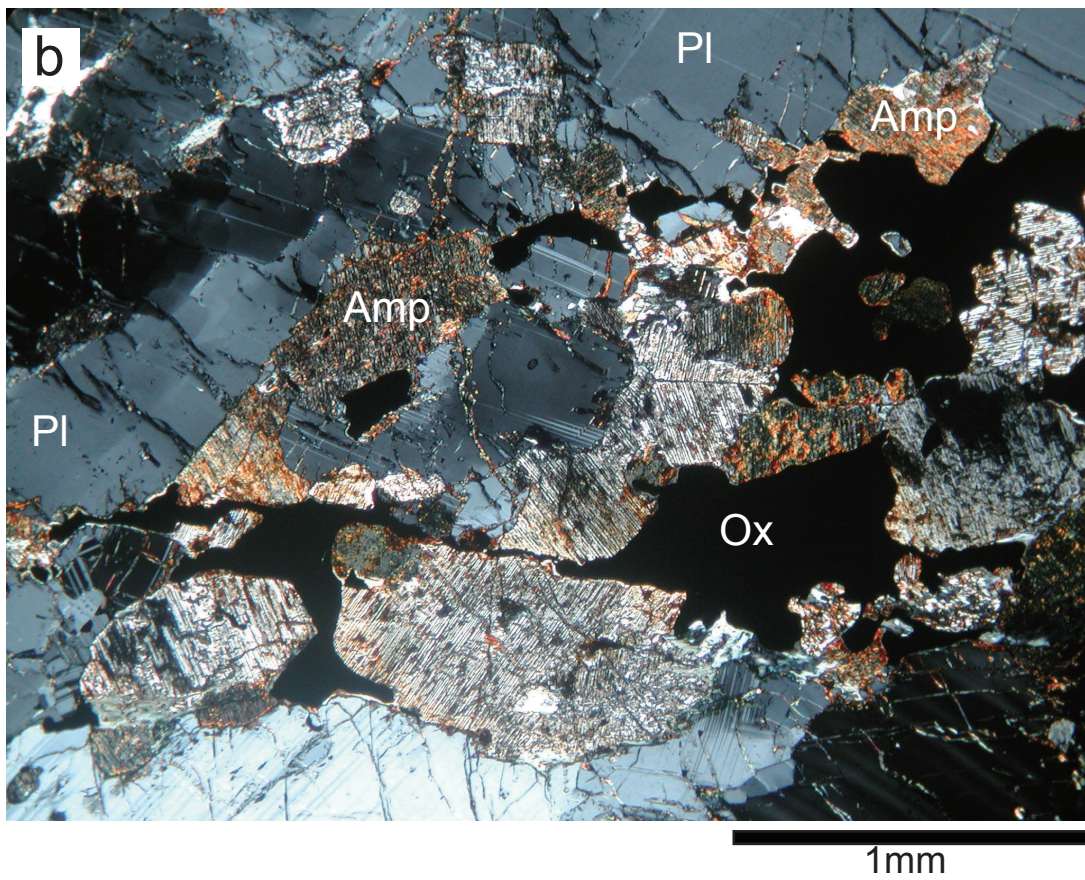
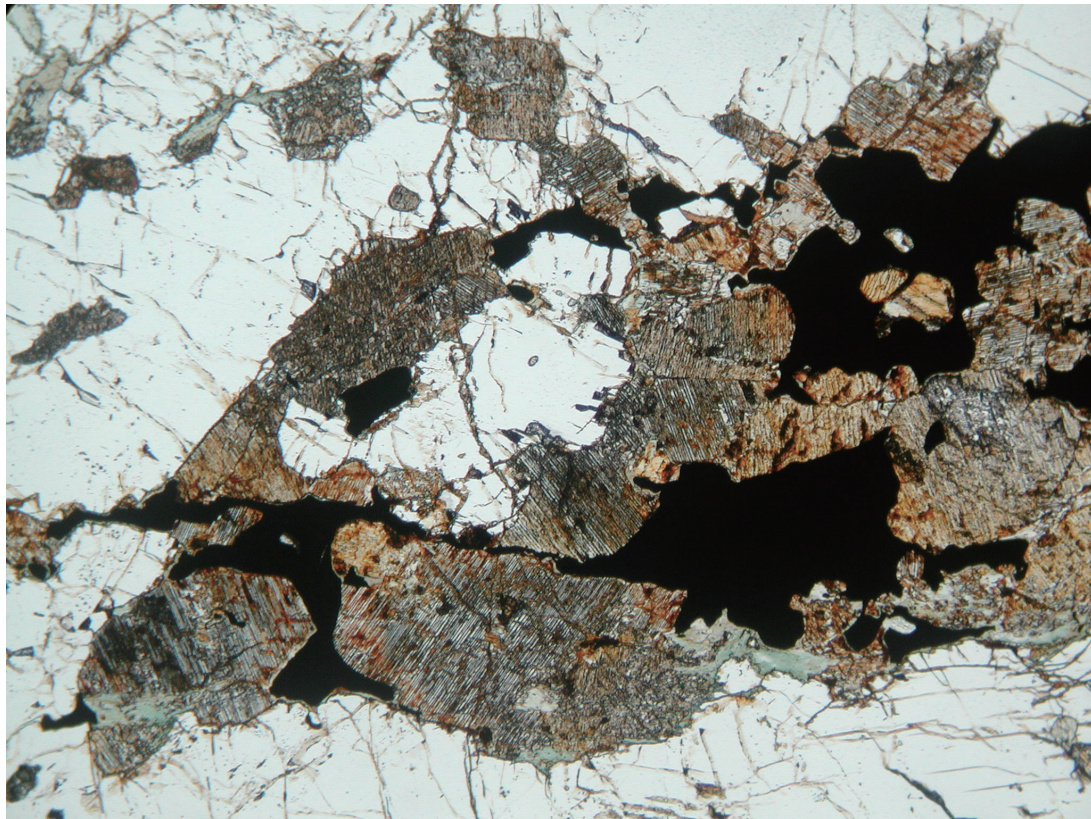


Fig. II-16. Photomicrographs of petrographic thin sections of oxide mineral rich pyroxene hornblende gabbro (KH07-02 D14-017). Pl: plagioclase, Amp: amphibole, Ox: oxide mineral. a: plane-polarized light, b: crossed polars.

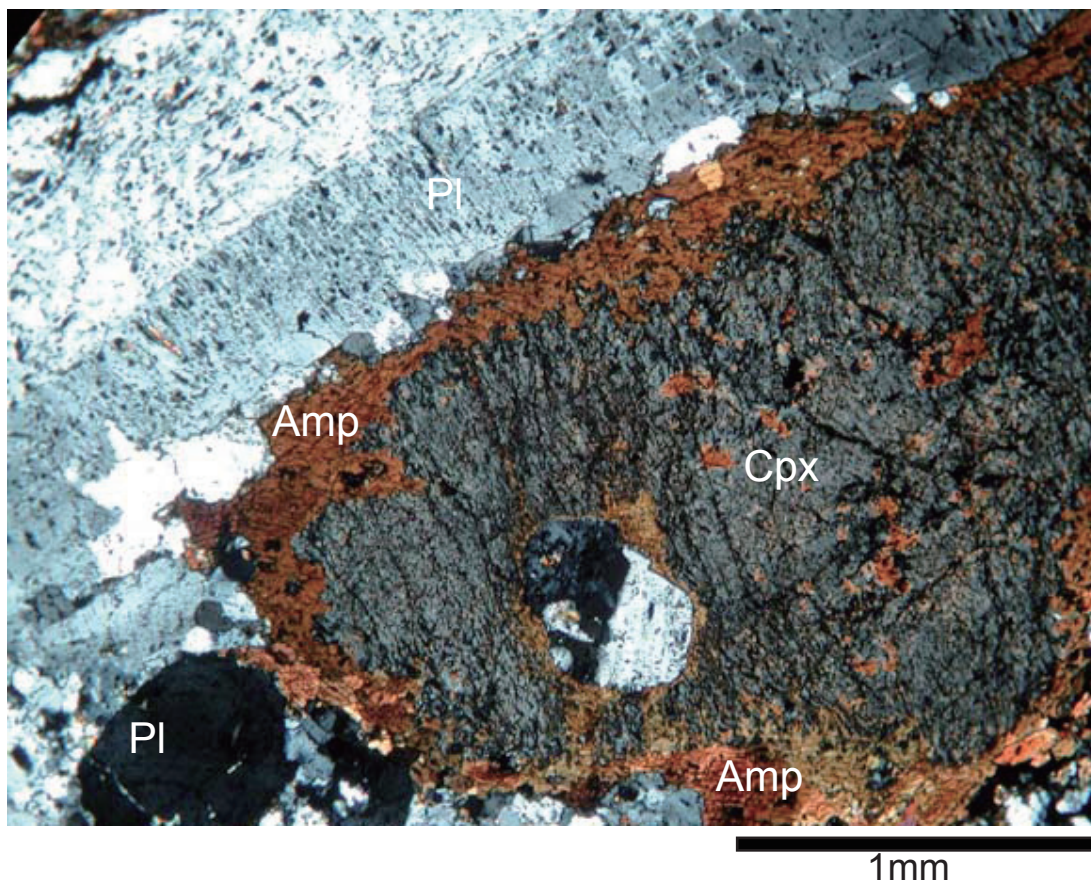


Fig. II-17. Photomicrographs of petrographic thin sections of pyroxene hornblende gabbro (KR03-01 D10-102), crossed polarizers. Brown hornblendes occur at the clinopyroxene rim. Pl: plagioclase, Amp: amphibole, Ox: oxide mineral.

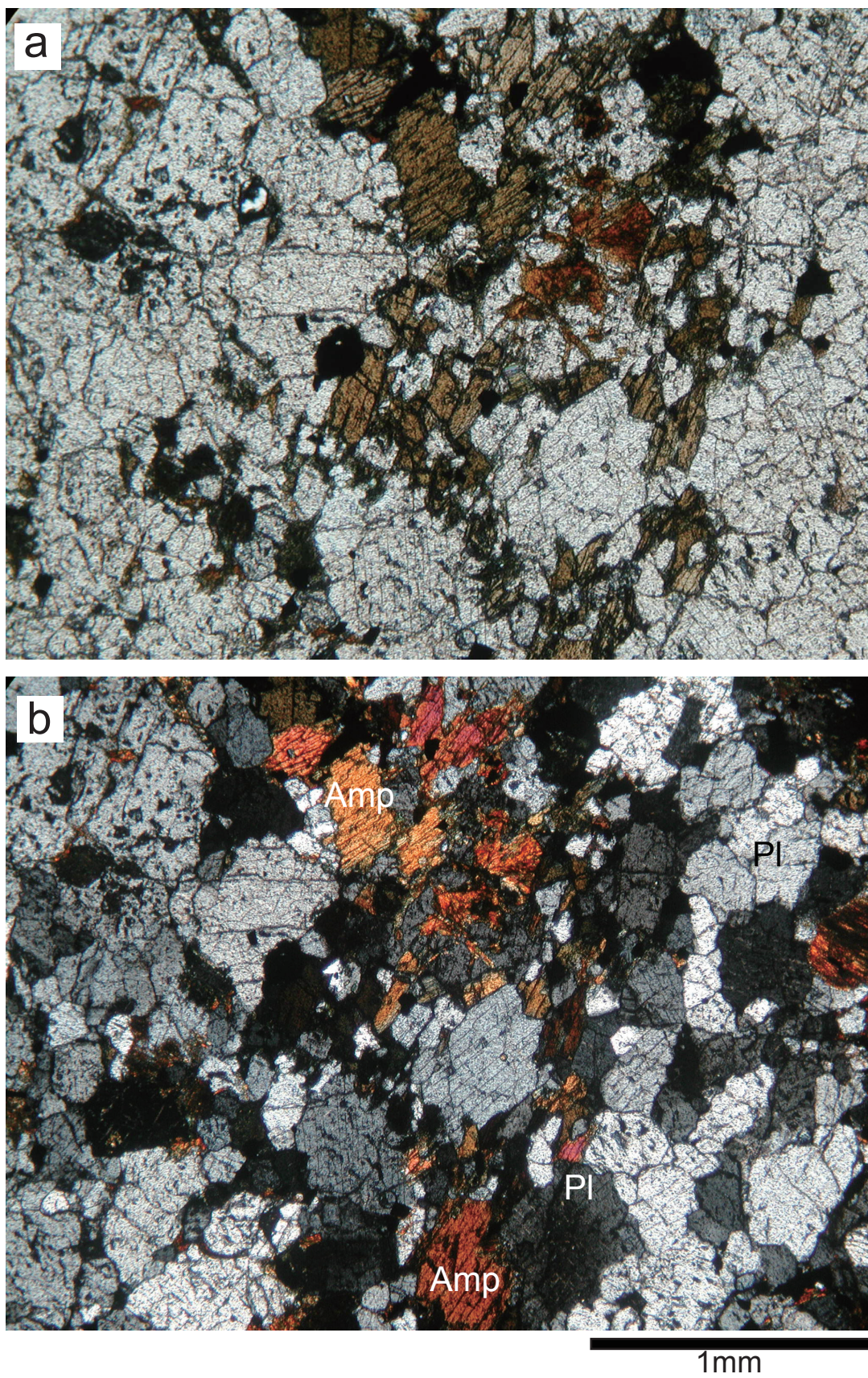


Fig. II-18. Photomicrographs of petrographic thin sections of hornblende gabbro (YK09-05 6K#1141R18). Pl: plagioclase, Amp: amphibole, Ox: oxide mineral. a: plane-polarized light, b: crossed polars.

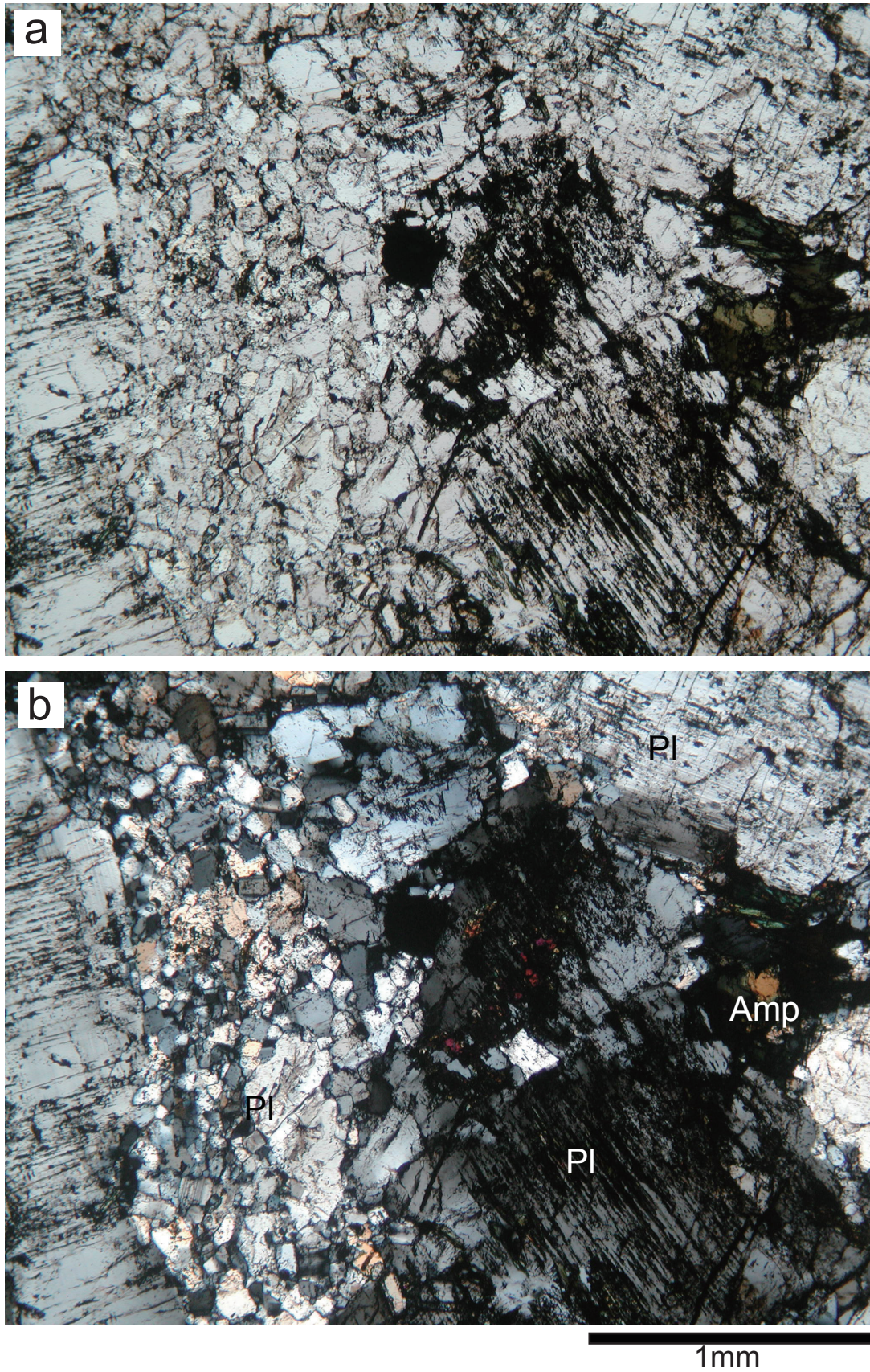


Fig. II-19. Photomicrographs of petrographic thin sections of trondhjemite (KH07-02 D18-015). This sample was slightly deformed. Pl: plagioclase, Amp: amphibole, Ox: oxide mineral. a: plane-polarized light, b: crossed polars.

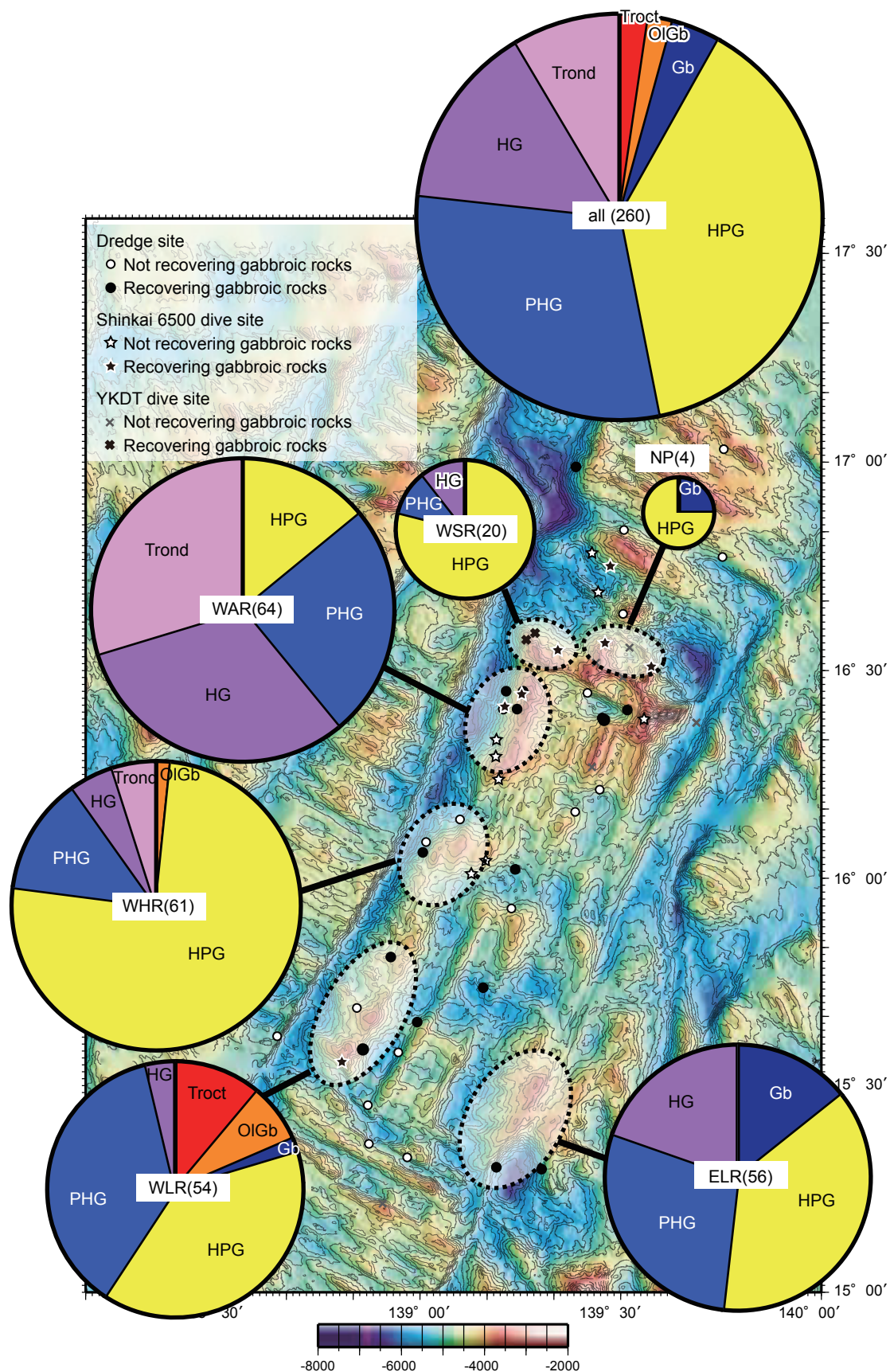


Fig. II-21. Lithological proportions of gabbroic rocks except for the secondary amphibole. The size of the circle is proportional to the number of samples. Troct: troctolite, OIGb: olivine gabbro, Gb: gabbro, HPG: hornblende pyroxene gabbro, PHG: pyroxene hornblende gabbro, HG: hornblende gabbro, Trond: trondhjemite.

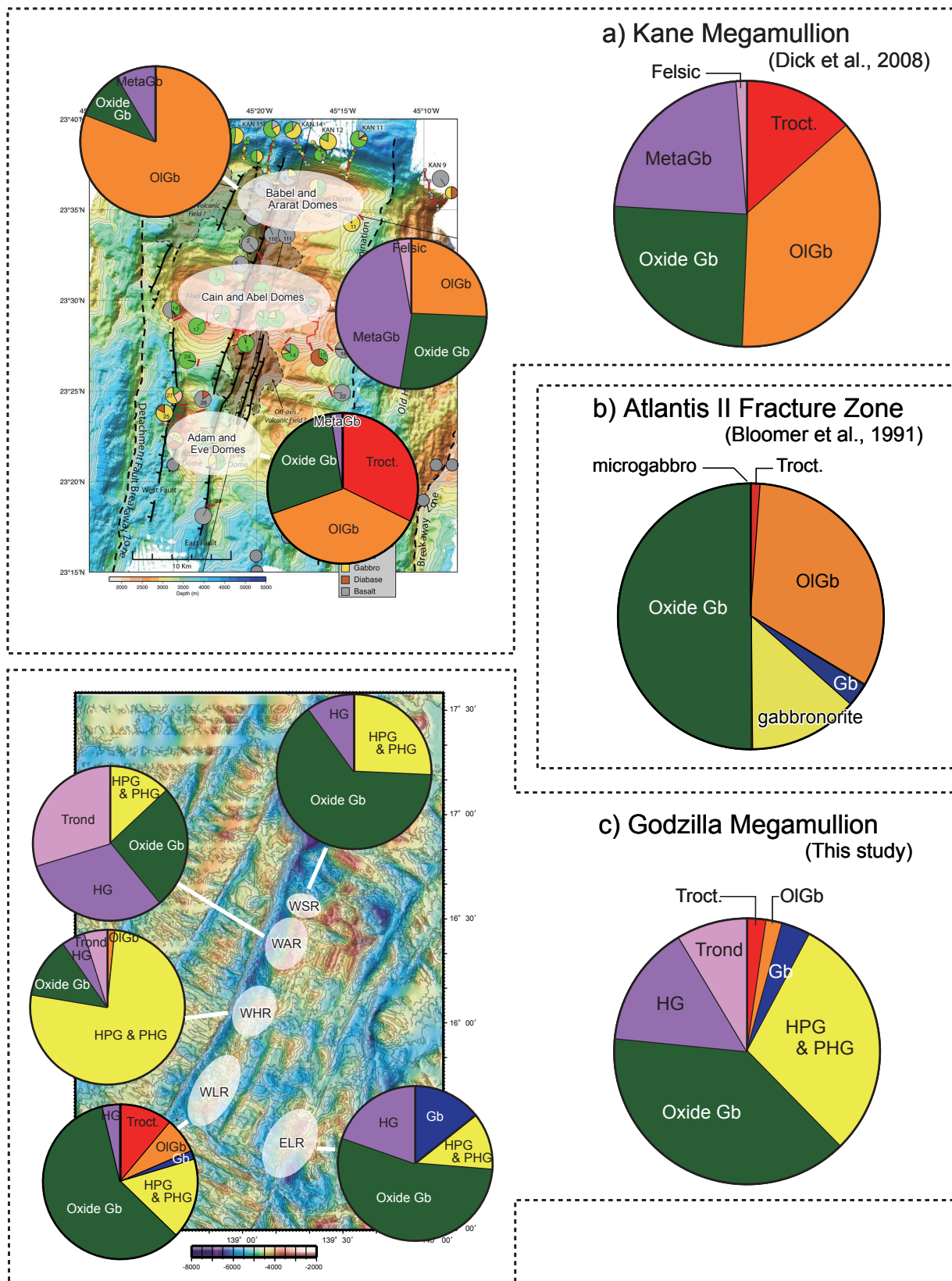


Fig. II-22. Comparison of the lithological proportions of gabbroic rocks between the Godzillas Megamullion and other megamullions in mid-ocean ridges. a: Kane Megamullion (Dick *et al.*, 2008), b: Atlantis II Fracture zone (Bloomer *et al.*, 1991). Oxide gabbro has Fe-Ti oxide minerals higher than 5 vol. %.Oxide gabbro including Fe-Ti oxide minerals above 5 vol. %.

APPENDIX 3 Figures (chapter III)

- Fig. III-1. Range of anorthite content ($An = (Ca/(Ca+Na) \times 100)$) of plagioclase and magnesium number ($XMg = Mg/(Mg+Fe)$) of clinopyroxene and olivine of gabbroic rocks.
- Fig. III-2. Clinopyroxene compositions projected into the pyroxene quadrilateral for comparison among gabbroic classifications.
- Fig. III-3. Chemical composition of amphibole within topography and gabbroic classification (nomenclature after Leake, 1978).
- Fig. III-4. Chemical composition of amphibole within topography and amphibole morphology (nomenclature after Leake, 1978).
- Fig. III-5. Range of magnesium number ($XMg = Mg/(Mg+Fe)$) of amphibole of gabbroic rocks.
- Fig. III-6. Plot of Ti versus Al (IV) for amphibole.
- Fig. III-7. Isopleths of Al_2O_3 and TiO_2 in weight percent for estimate of amphibole generation temperature and pressure (Ernst and Liu, 1998).
- Fig. III-8. Range of anorthite content ($An = Ca/(Ca+Na) \times 100$) of euhedral plagioclase for comparison between the topography and gabbroic classification.
- Fig. III-9. Clinopyroxene compositions projected into the pyroxene quadrilateral for comparison between topography.
- Fig. III-10. Comparison between magnesium number of clinopyroxene and anorthite content of euhedral plagioclase in gabbroic rocks of the Godzilla Megamullion.
- Fig. III-11. Comparison between magnesium number of clinopyroxene and anorthite content of euhedral plagioclase in gabbroic rocks of the Godzilla Megamullion, in light of the TiO_2 contents in bulk composition of gabbroic rocks.
- Fig. III-12. Comparison between magnesium number of clinopyroxene and anorthite content of euhedral plagioclase in gabbroic rocks of the Godzilla Megamullion, with fields for gabbros for IODP Leg 305 Hole U1309D in the Atlantis Massif of MAR (Suhr *et al.*, 2008).
- Fig. III-13. Comparison between magnesium number of clinopyroxene and anorthite content of euhedral plagioclase in gabbroic rocks of the Godzilla Megamullion, with fields for gabbros for ODP Leg 118 Hole 735B in the Atlantis II Fracture Zone of SWIR (Ozawa *et al.*, 1991).

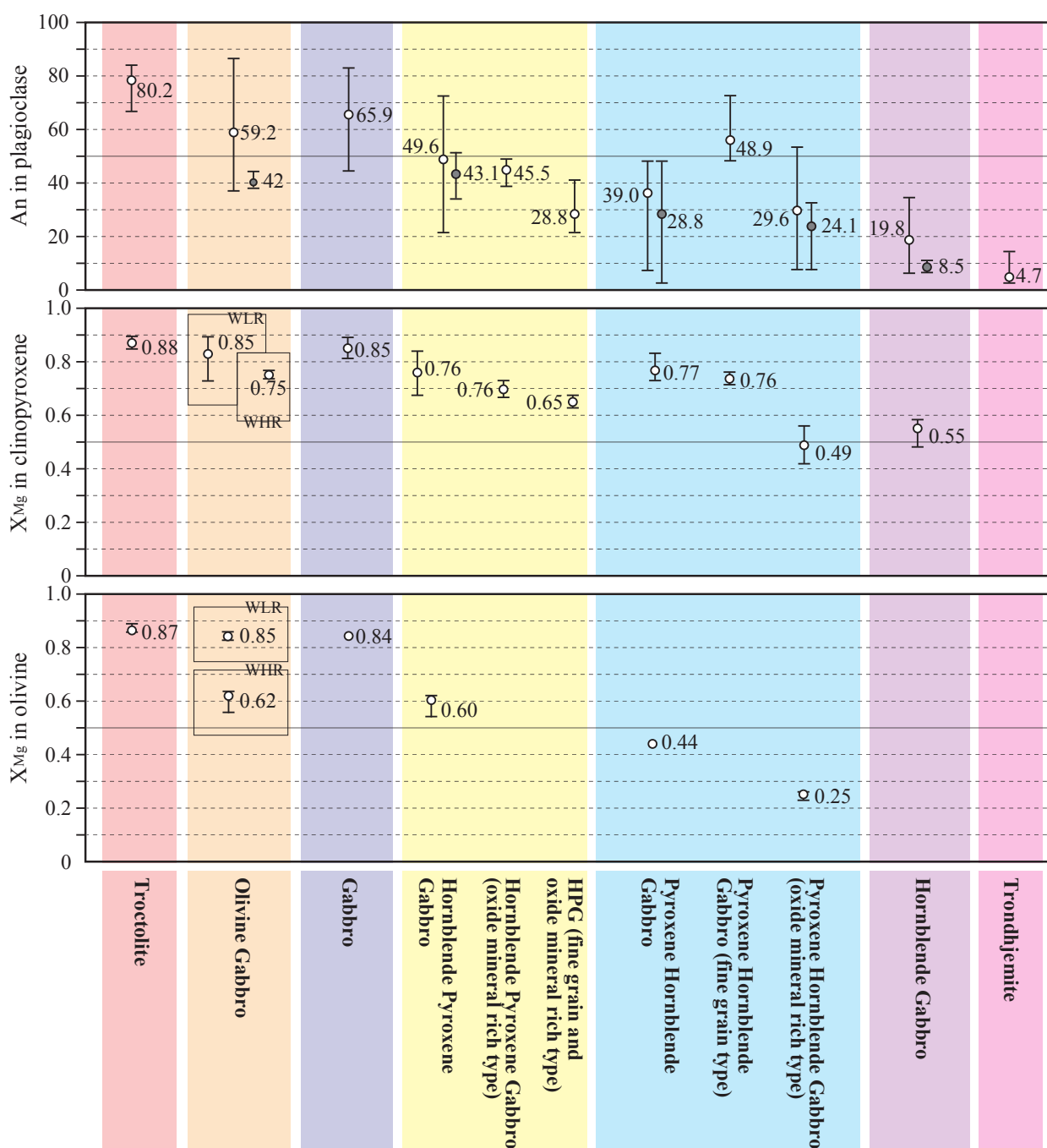
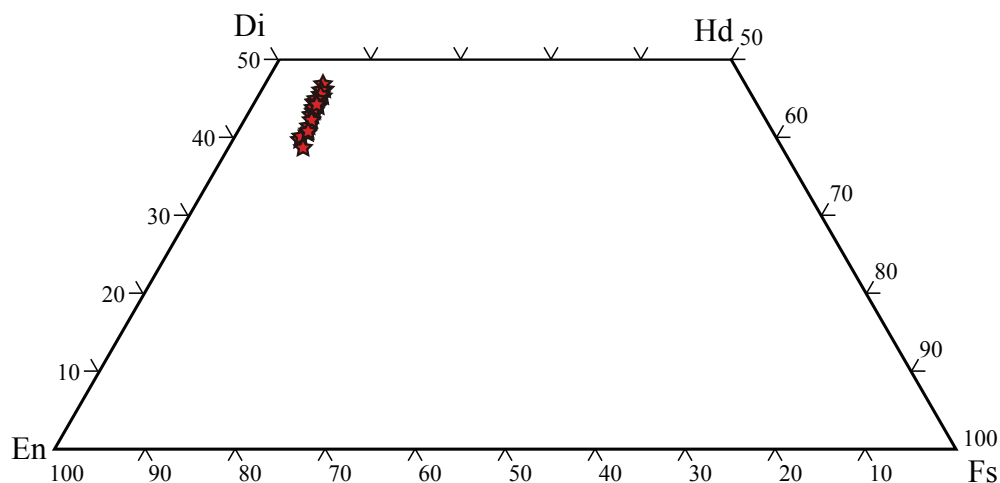
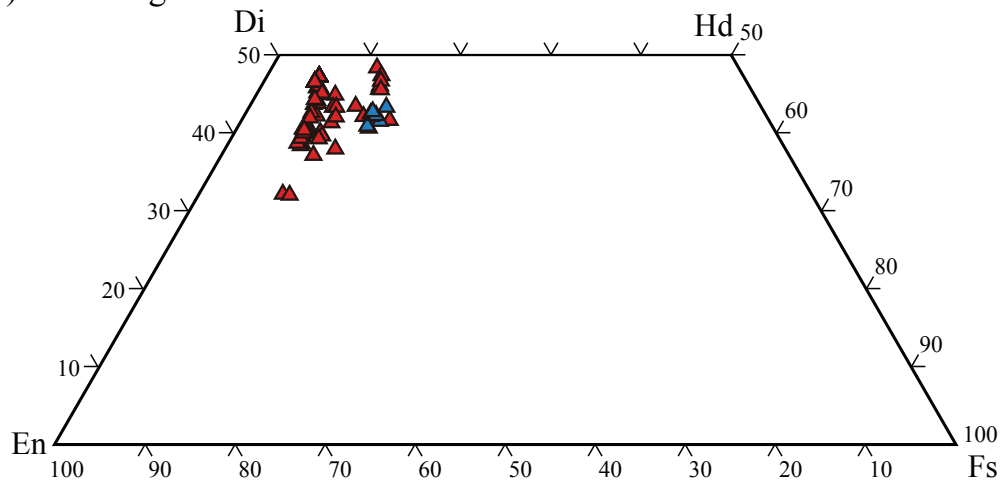


Fig. III-1. Range of anorthite content ($An = (Ca/(Ca+Na) \times 100)$) of plagioclase and magnesium number ($XMg = Mg/(Mg+Fe)$) of clinopyroxene and olivine of gabbroic rocks. Open circles and numbers show average composition of euhedral minerals; solid circles and numbers show average composition of small or anhedral plagioclase.

A) Troctolite



B) Olivine gabbro



C) Gabbro

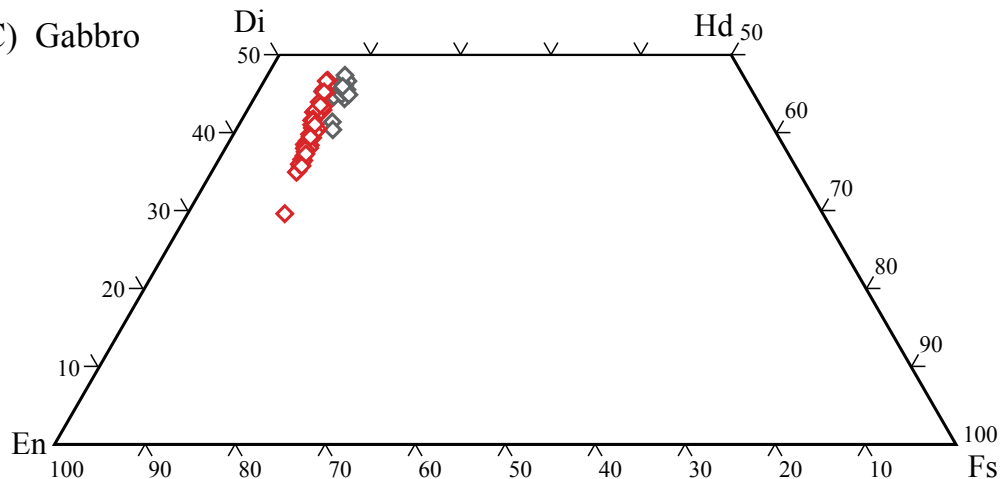
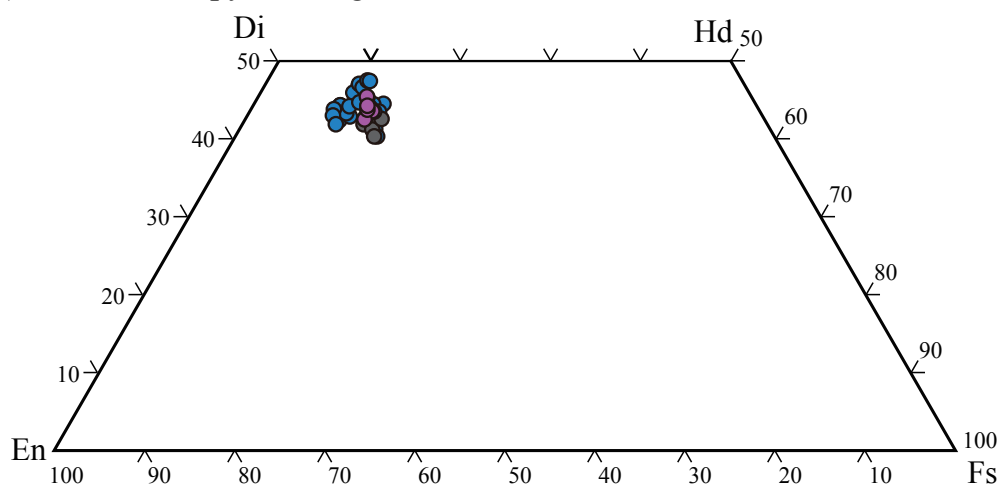
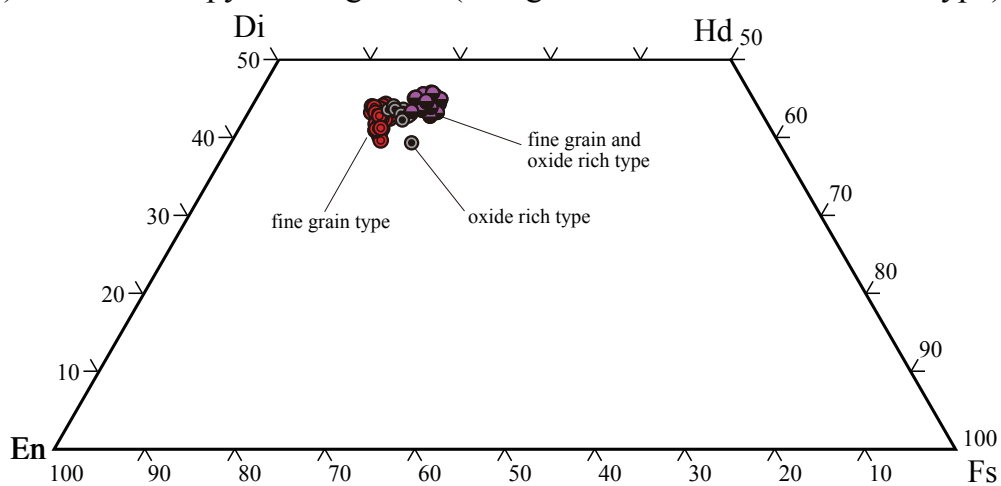


Fig. III-2. Clinopyroxene compositions projected into the pyroxene quadrilateral for comparison among gabbroic classifications. A: troctolite, B: olivine gabbro, C: gabbro, D: hornblende pyroxene gabbro, E: hornblende pyroxene gabbro (fine-grained and oxide-mineral rich type), F: pyroxene hornblende gabbro, G: pyroxene-hornblende gabbro (fine grained type), H: pyroxene hornblende gabbro (oxide-mineral rich type), I: hornblende gabbro. Di: diopside, Hd: hedenbergite, En: enstatite, Fs: ferrosilite. Red color: WLR, gray color: ELR, blue color: WHR, green color: WAR, purple color: WSR.

D) Hornblende pyroxene gabbro



E) Hornblende pyroxene gabbro (fine grain and oxide mineral rich type)



F) Pyroxene hornblende gabbro

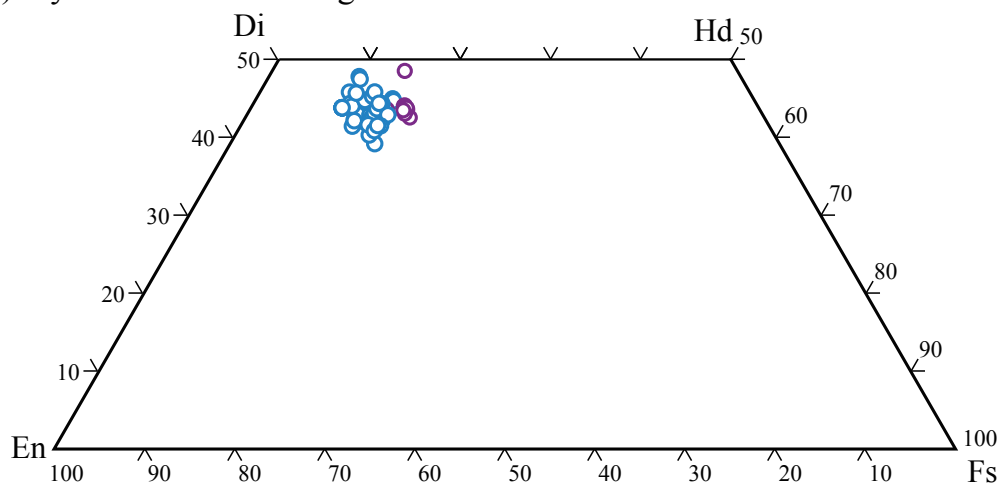
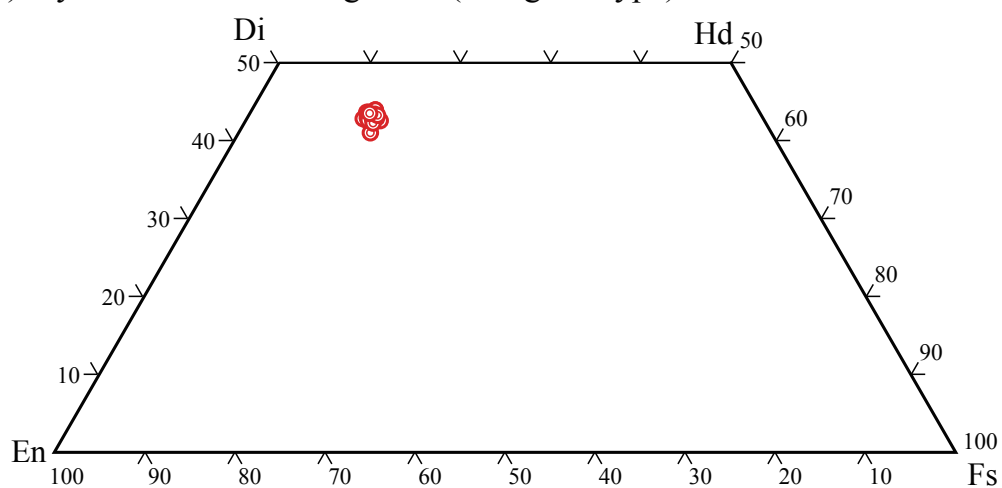
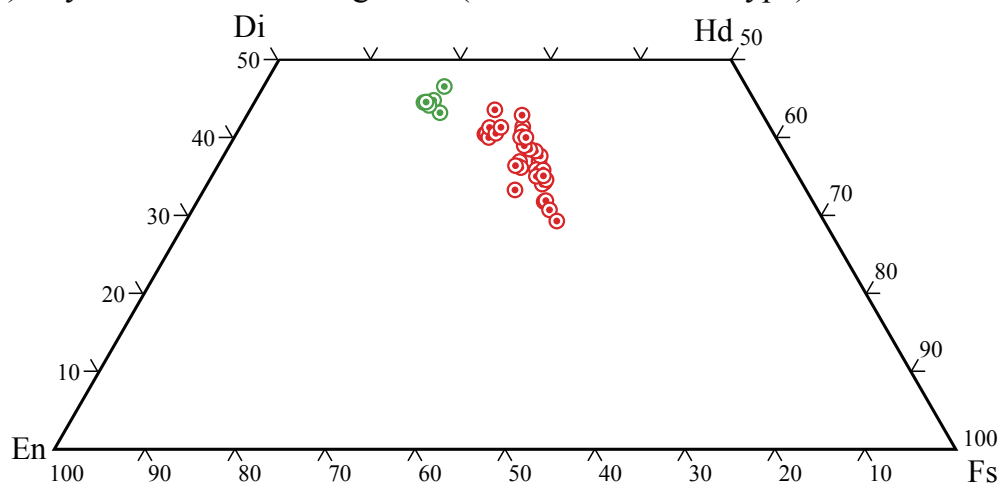


Fig. III-2. continued.

G) Pyroxene hornblende gabbro (fine grain type)



H) Pyroxene hornblende gabbro (oxide mineral rich type)



I) Hornblende gabbro

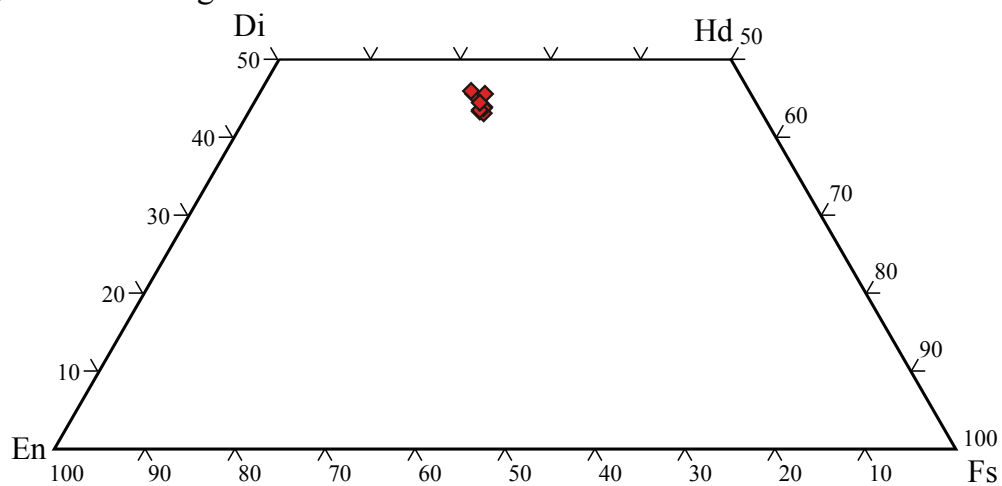


Fig. III-2. continued.

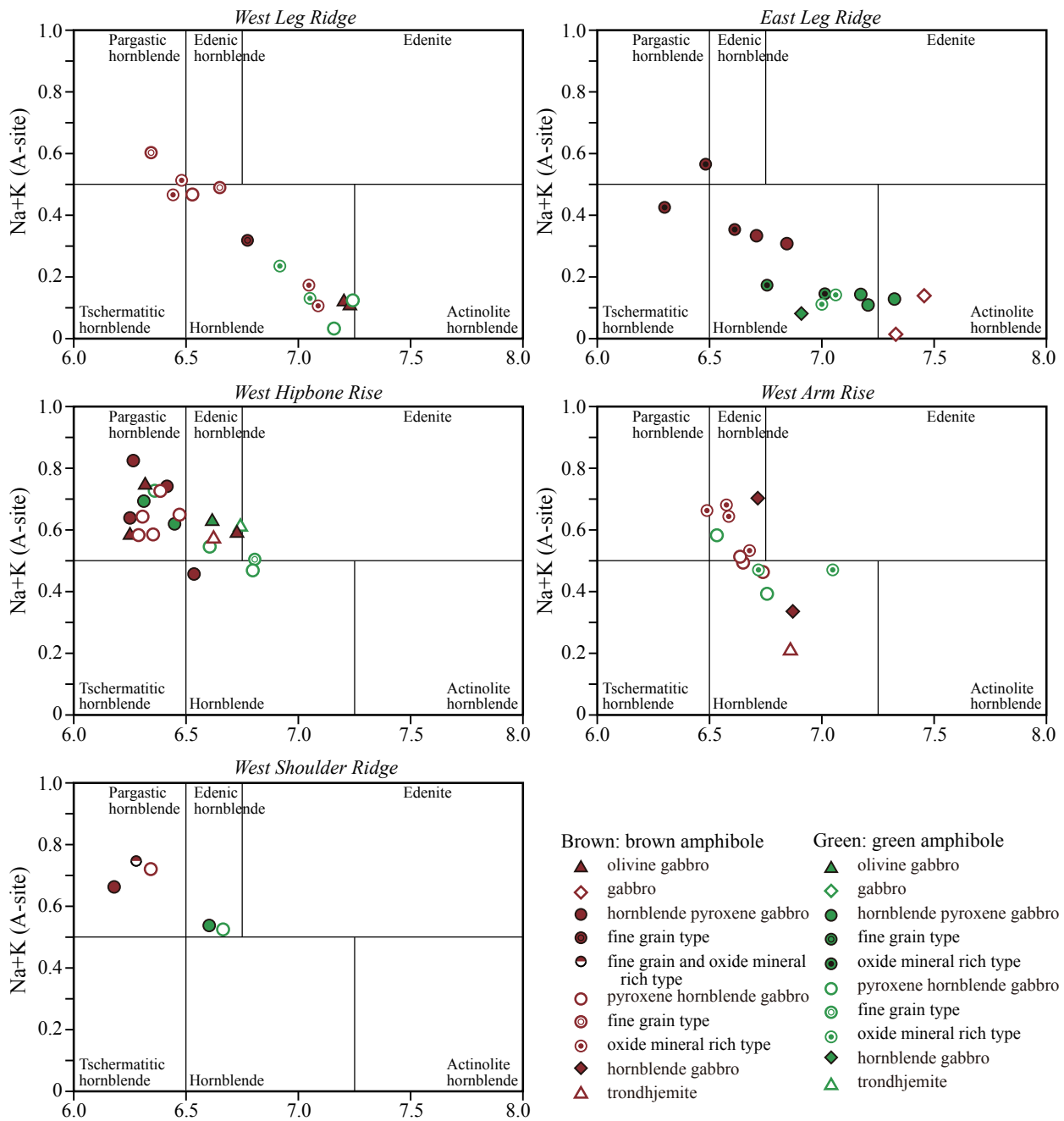


Fig. III-3. Chemical composition of amphibole within topography and gabbroic classification (nomenclature after Leake, 1978). Plotted data are average compositions.

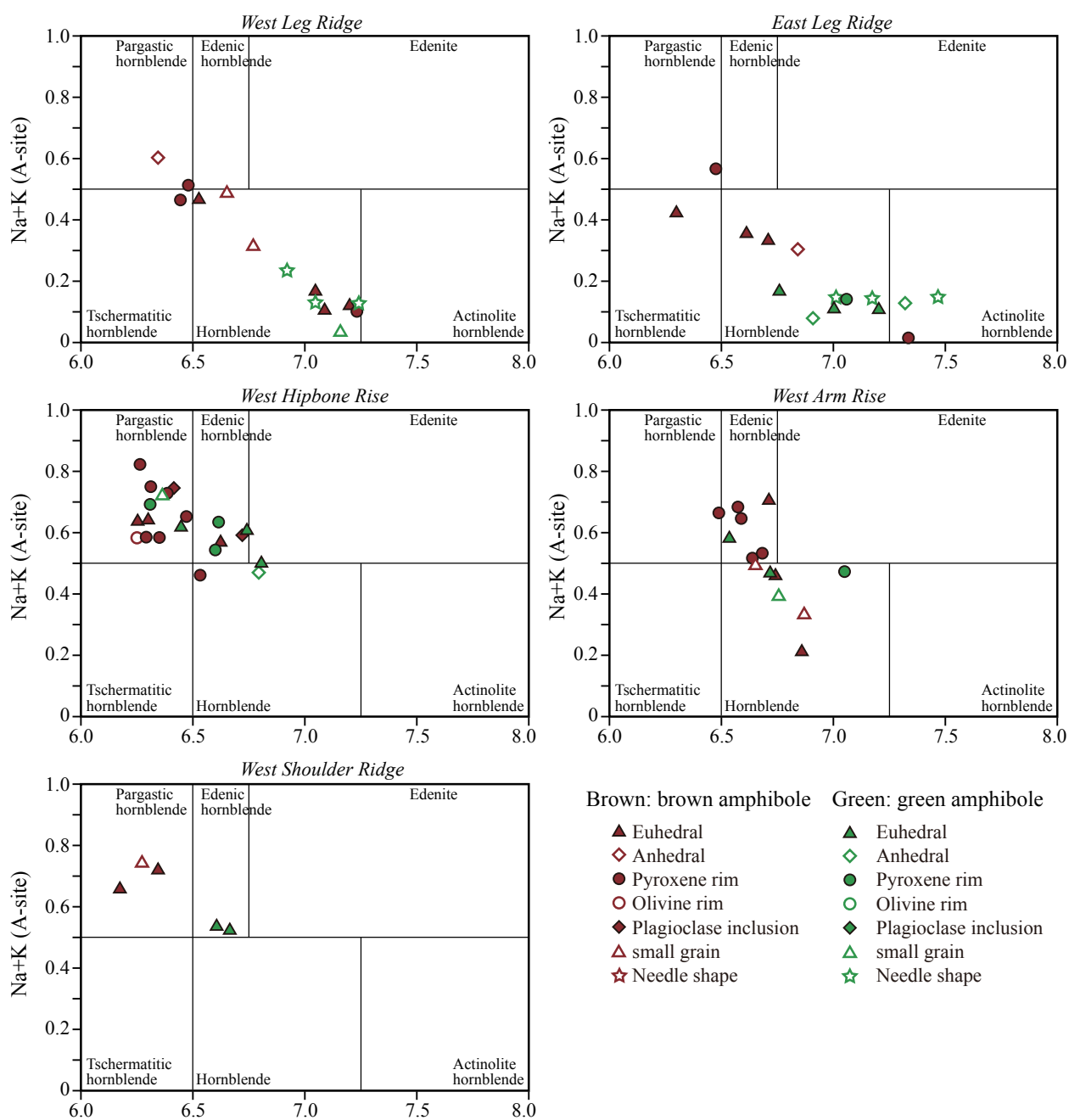


Fig. III-4. Chemical composition of amphibole within topography and amphibole morphology (nomenclature after Leake, 1978). Plots data used average compositions.

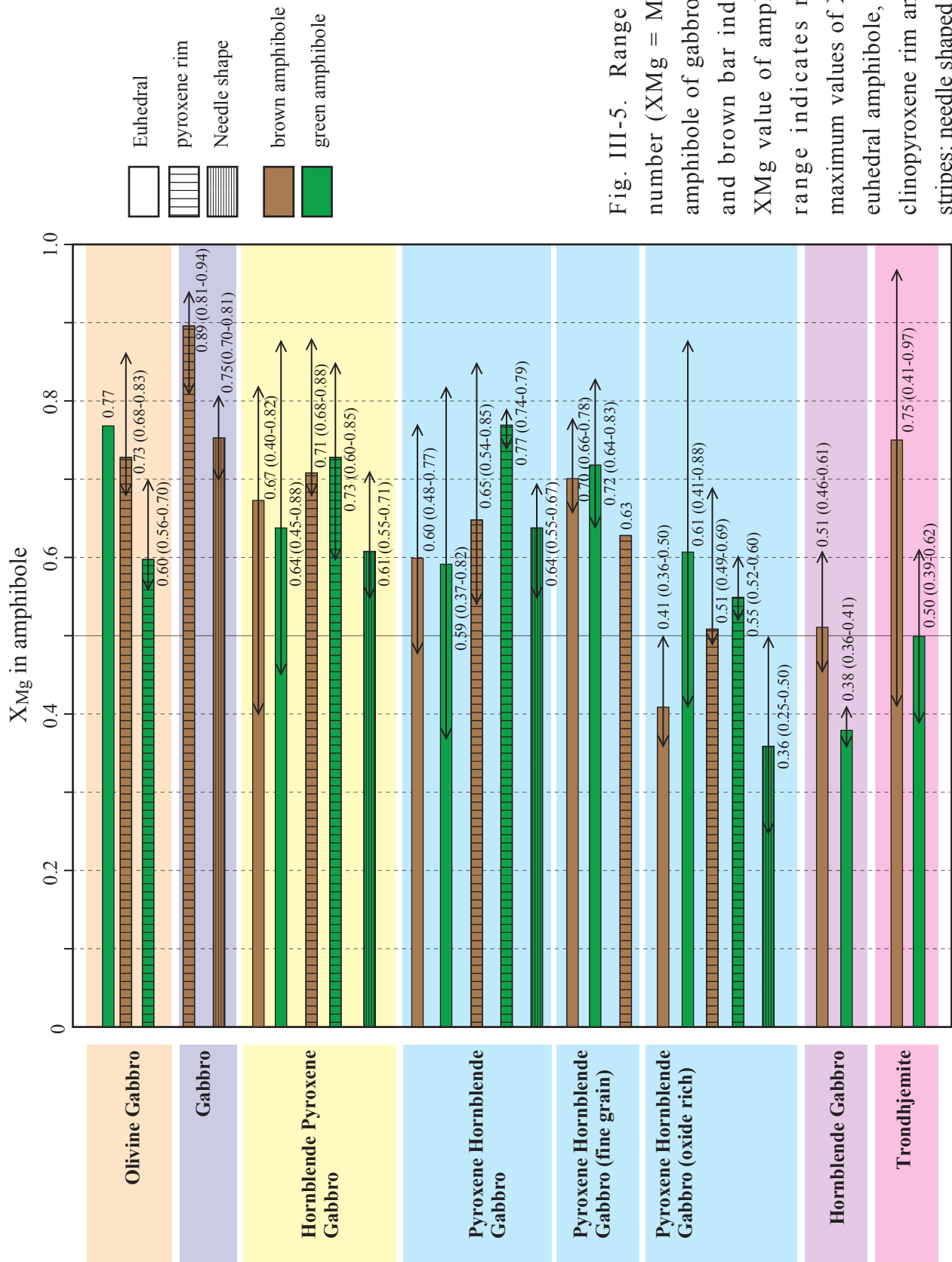


Fig. III-5. Range of magnesium number ($X_{Mg} = Mg/(Mg+Fe)$) of amphibole of gabbroic rocks. Green and brown bar indicates average X_{Mg} value of amphiboles. Arrow range indicates minimum and maximum values of X_{Mg} . Solid bar: euhedral amphibole, vertical stripes: clinopyroxene rim amphibole, lateral stripes: needle shaped amphibole.

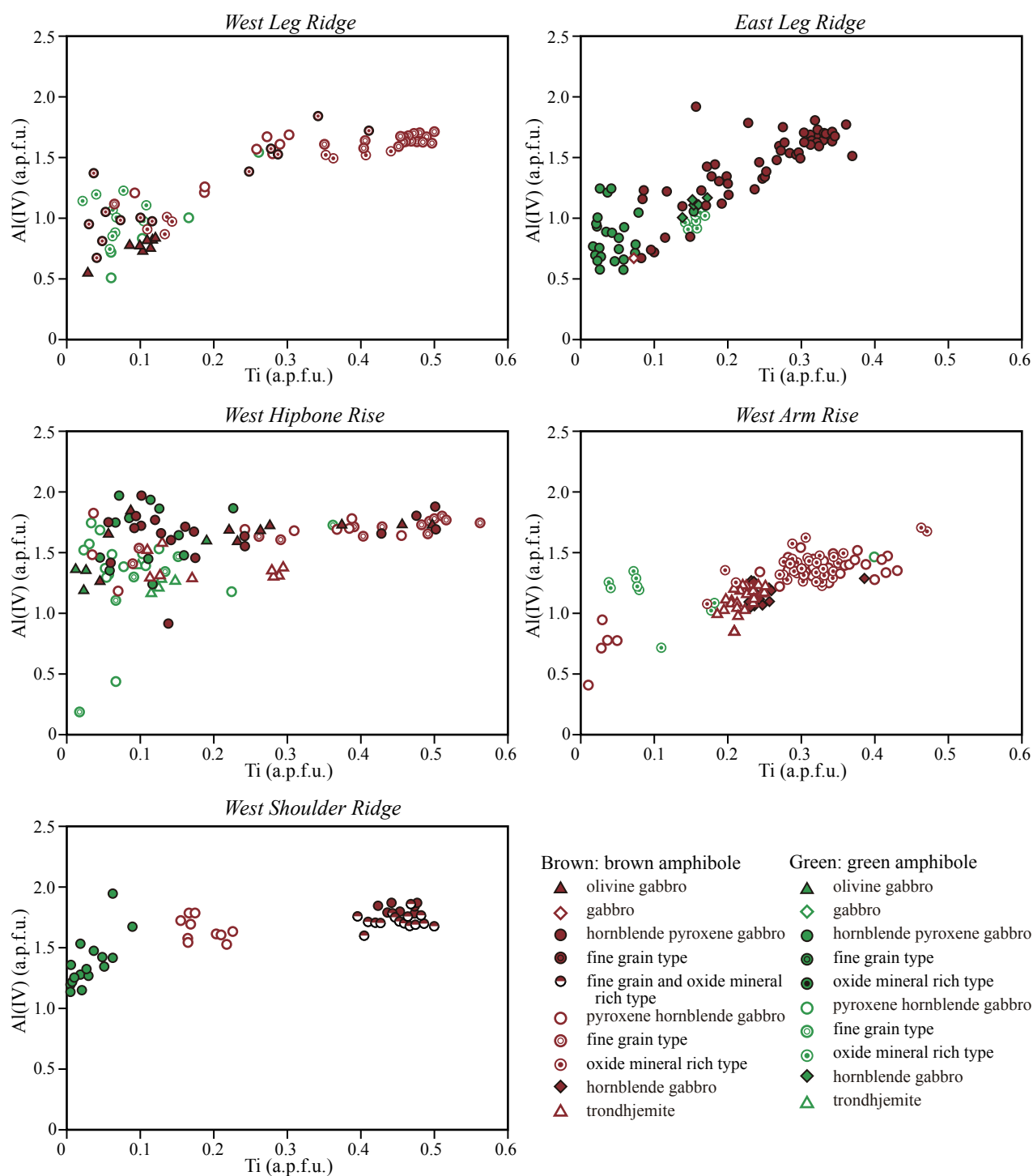


Fig. III-6. Plot of Ti versus Al (IV) for amphibole. Brown amphiboles tend to high Ti contents.

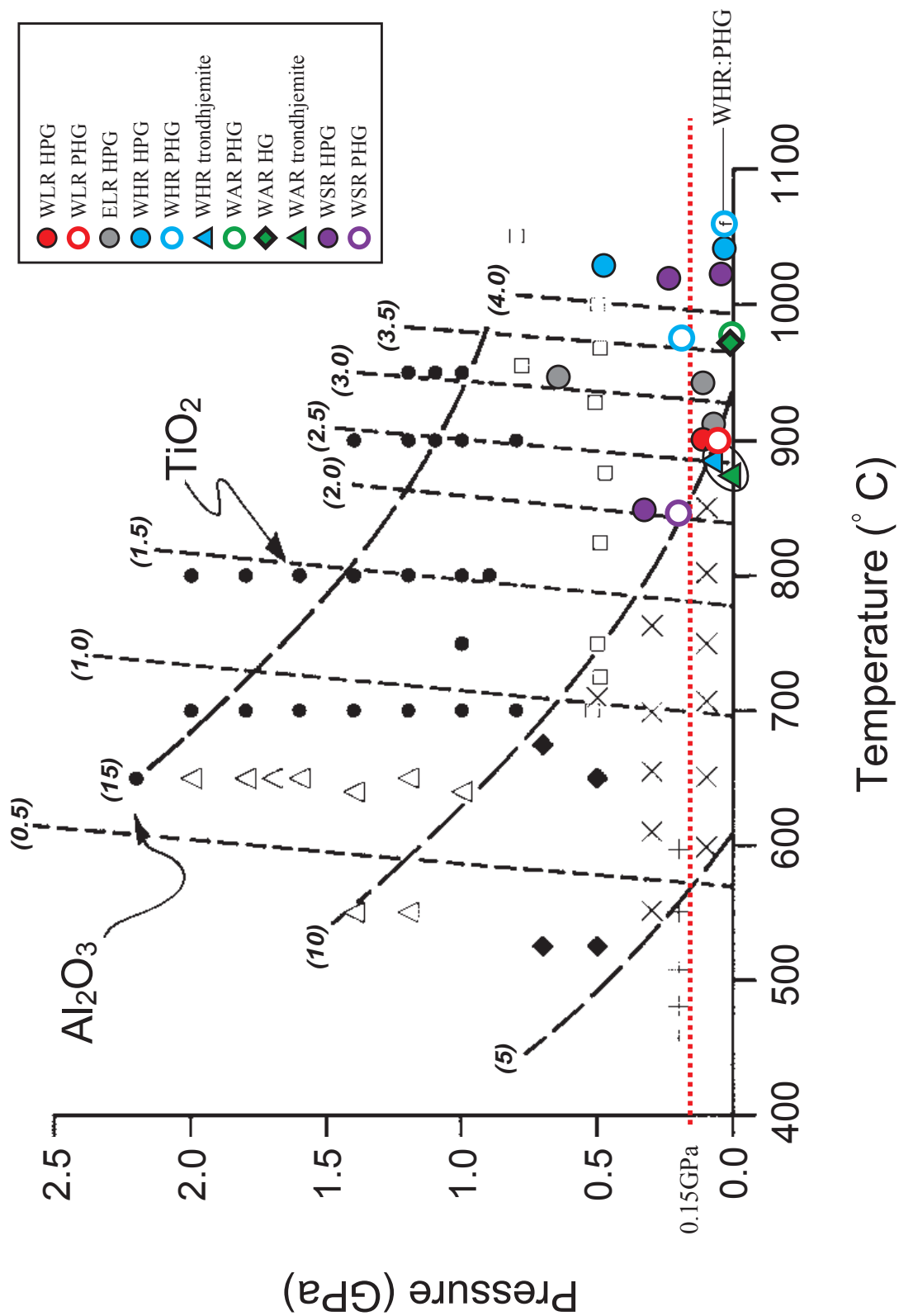


Fig. III-7. Isopleths of Al_2O_3 and TiO_2 in weight percent for estimate of amphibole generation temperature and pressure (Ernst and Liu, 1998). Red dotted line shows 1500 bars.

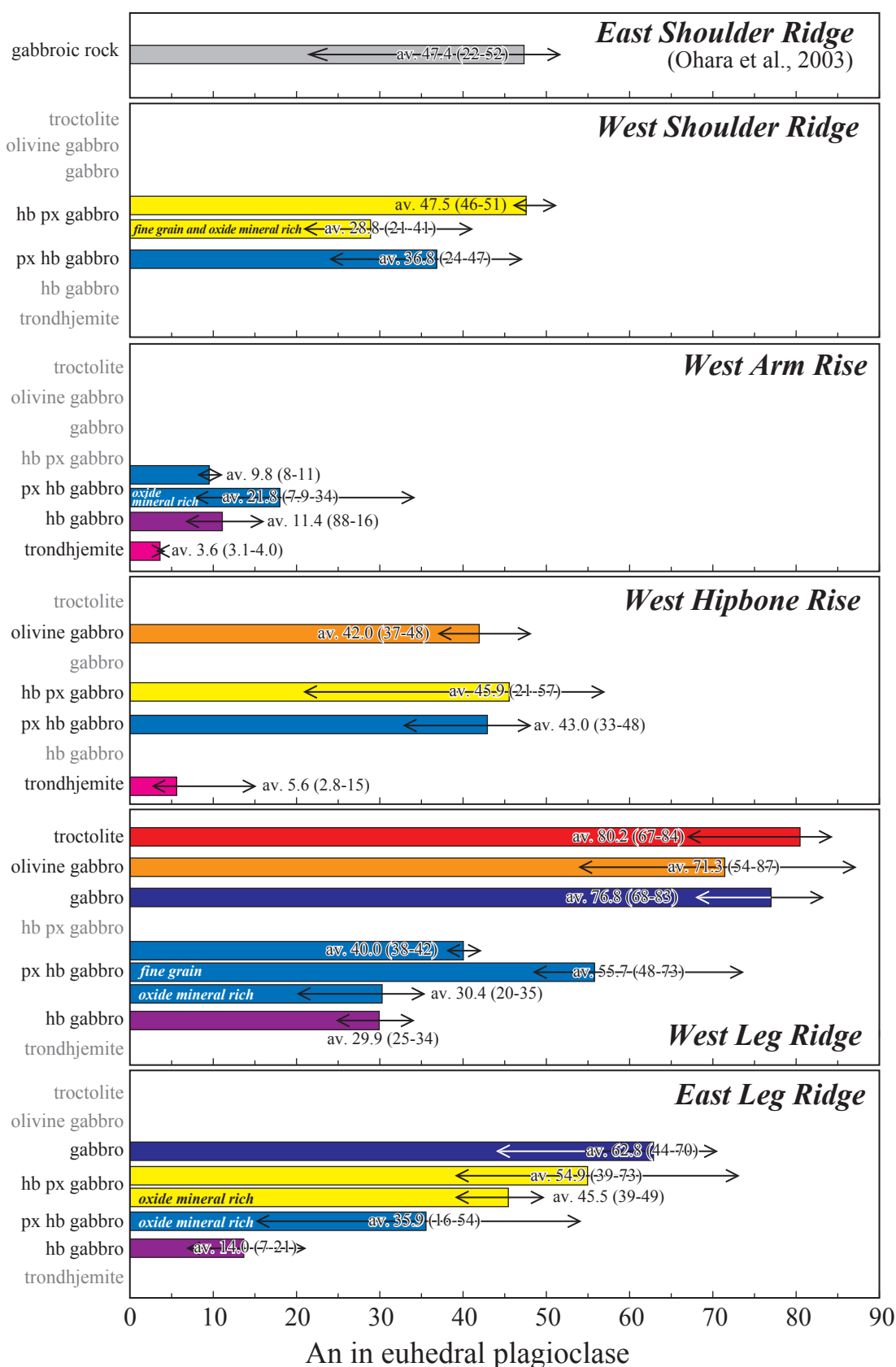
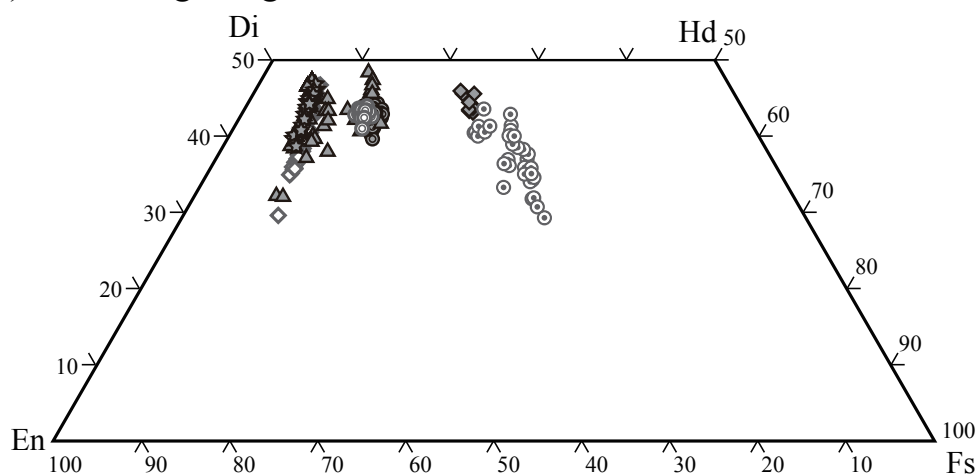


Fig. III-8. Range of anorthite content ($An = Ca / (Ca + Na) \times 100$) of euhedral plagioclase for comparison between the topography and gabbroic classification. Color bars indicate average composition. Arrow range indicates minimum and maximum values of An.

A) West Leg Ridge



B) East Leg Ridge

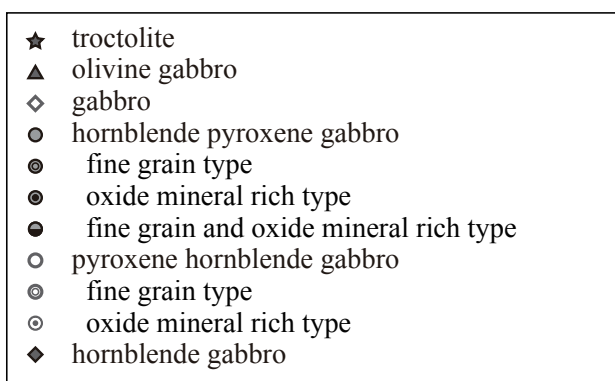
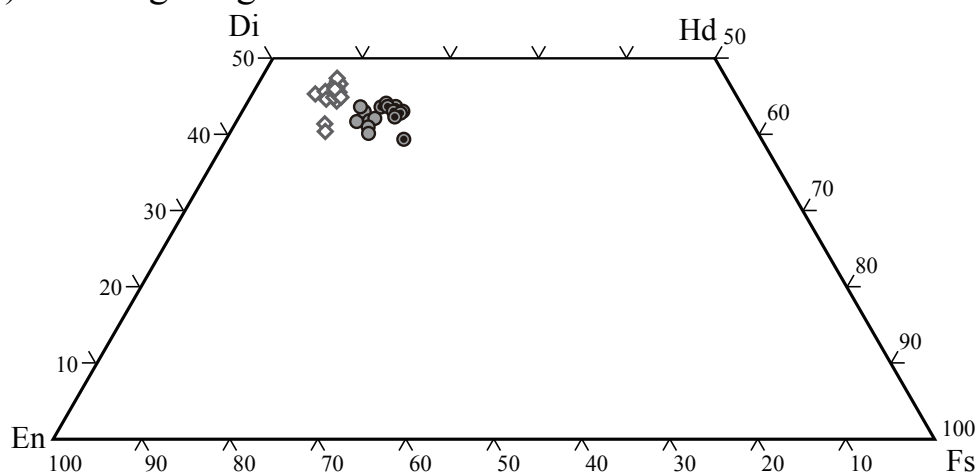
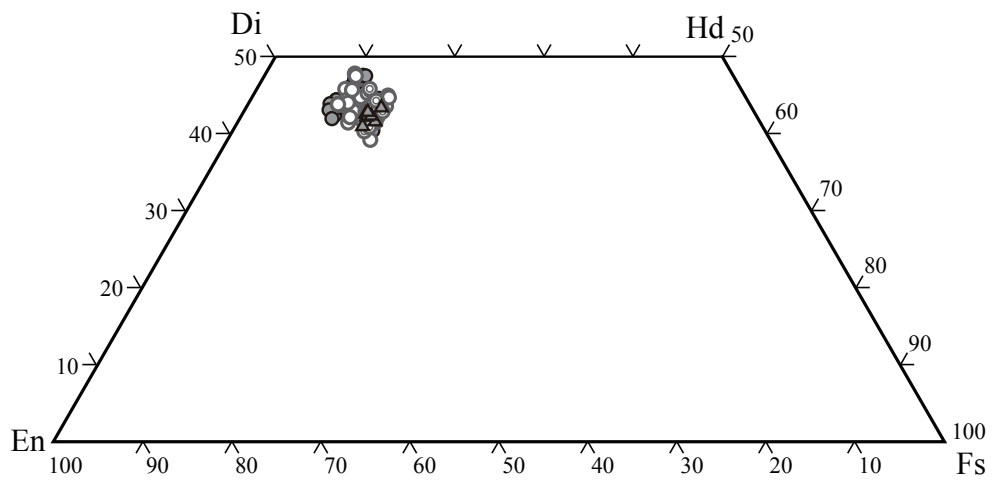
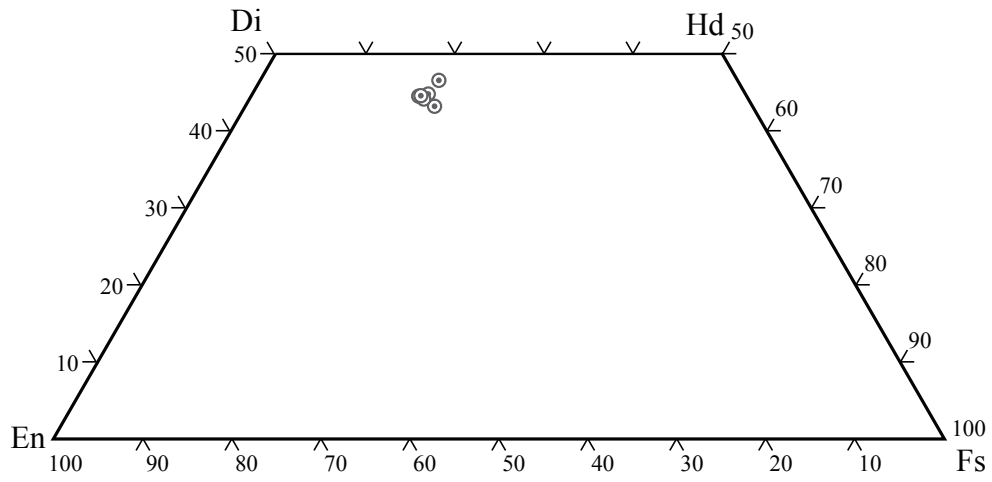


Fig. III-9. Clinopyroxene compositions projected into the pyroxene quadrilateral for comparison between topography. Di, diopside; Hd, hedenbergite; En, enstatite; Fs, ferrosilite. A, West Leg Ridge; B, East Leg Ridge; C, West Hipbone Rise; D, West Arm Rise; E, West Shoulder Ridge.

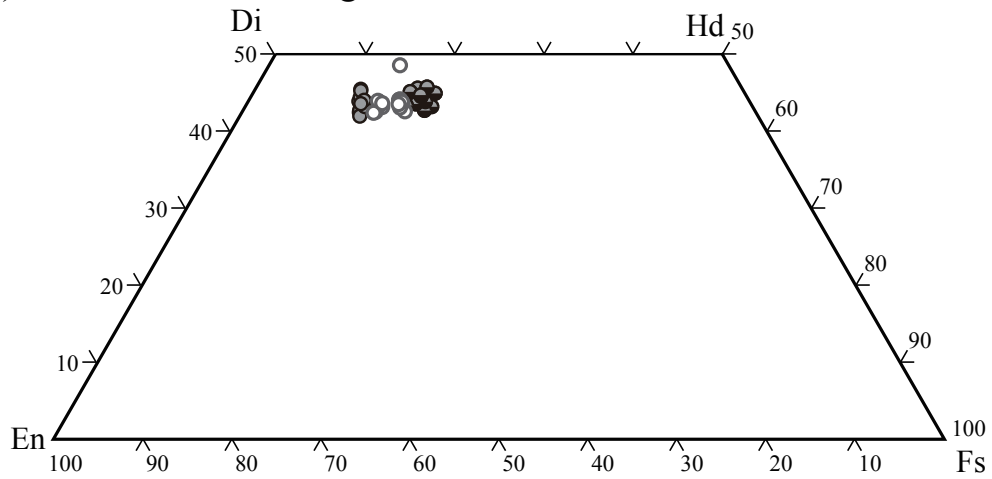
C) West Hipbone Rise



D) West Arm Rise



E) West Shoulder Ridge



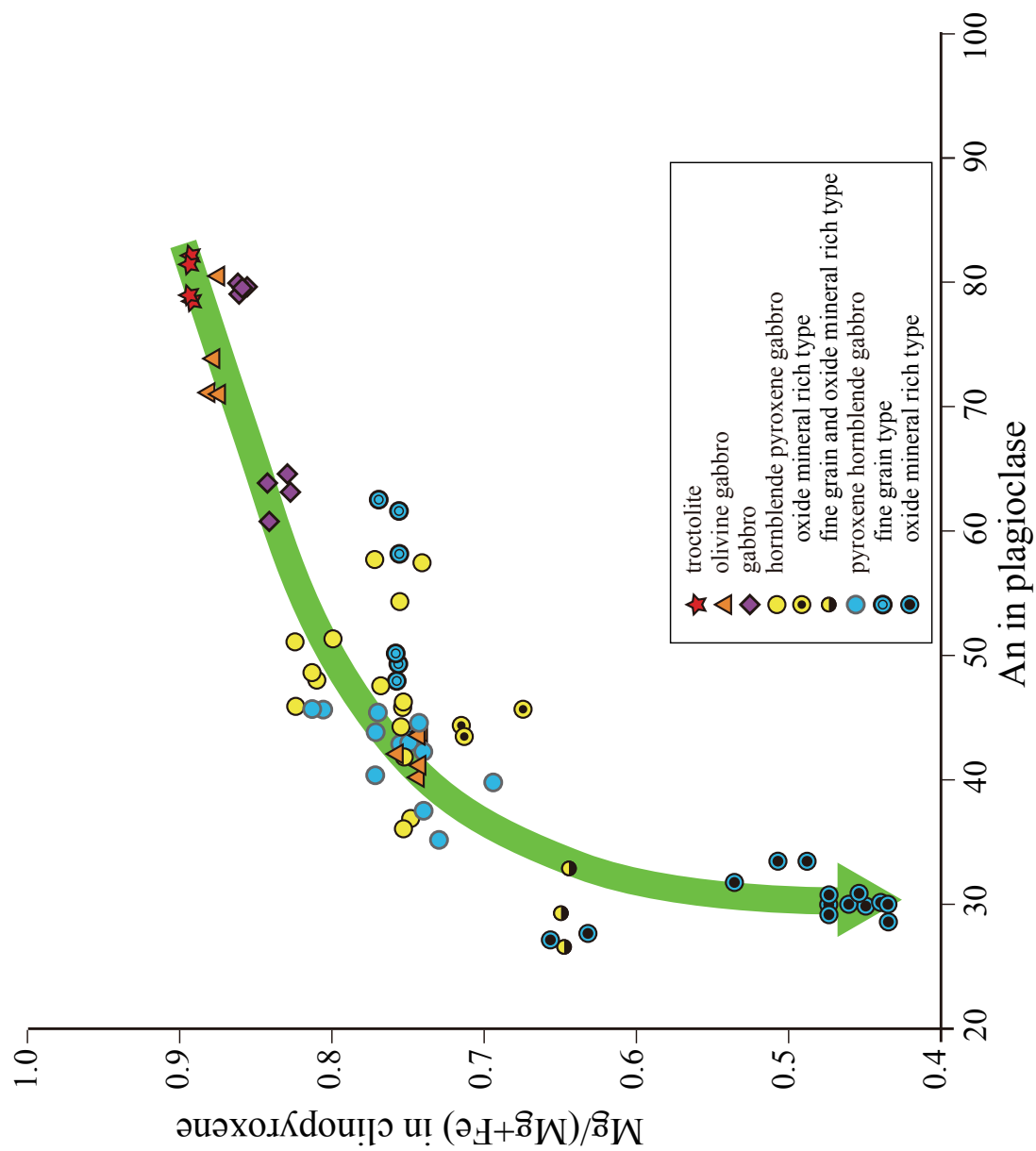


Fig. III-10. Comparison between magnesium number of clinopyroxene and anorthite content of euhedral plagioclase in gabbroic rocks of the Godzilla Megamullion. Green arrow indicates differentiation trend.

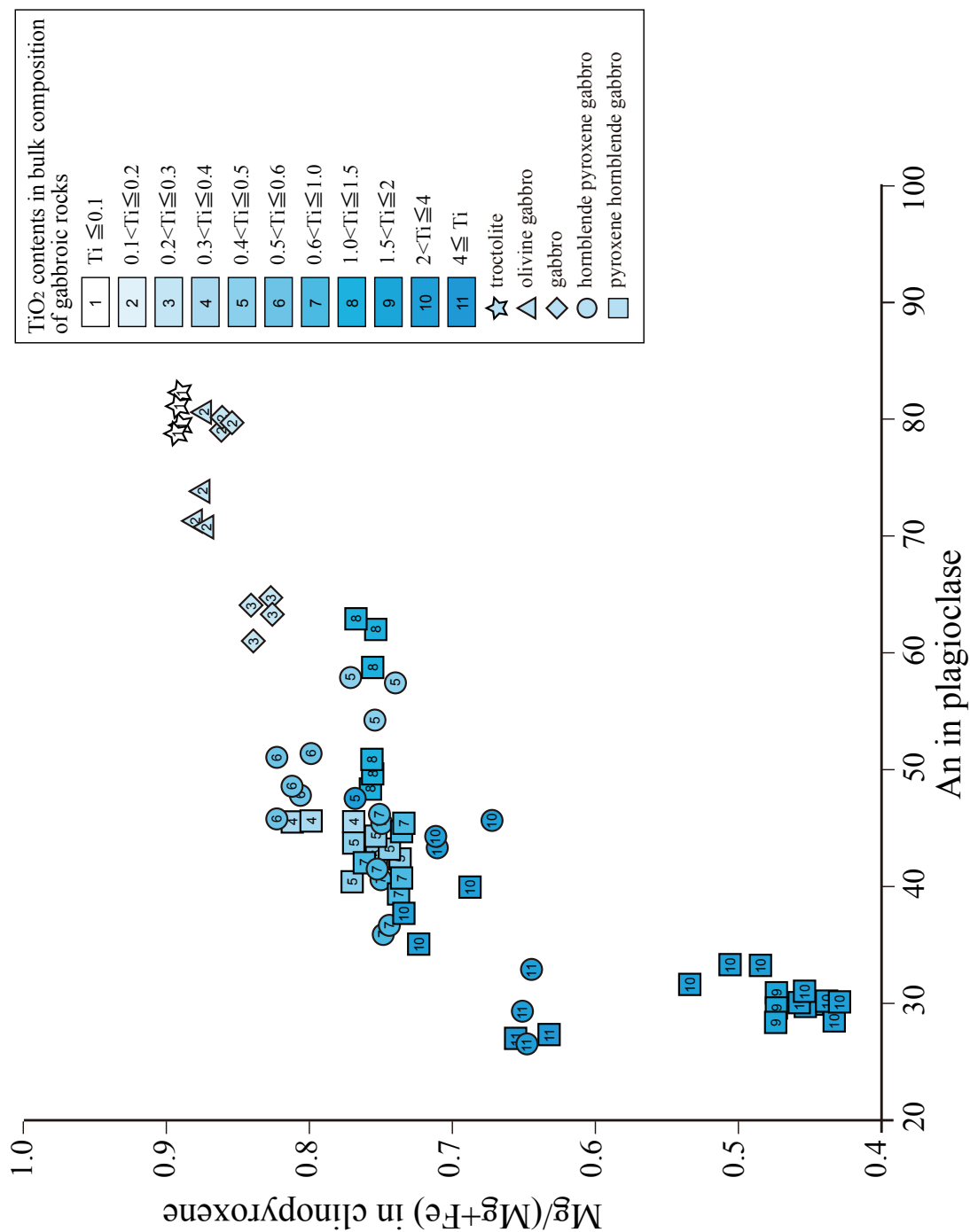


Fig. III-11. Comparison between magnesium number of clinopyroxene and anorthite content of euhedral plagioclase in gabbroic rocks of the Godzilla Megamullion, in light of the TiO₂ contents in bulk composition of gabbroic rocks.

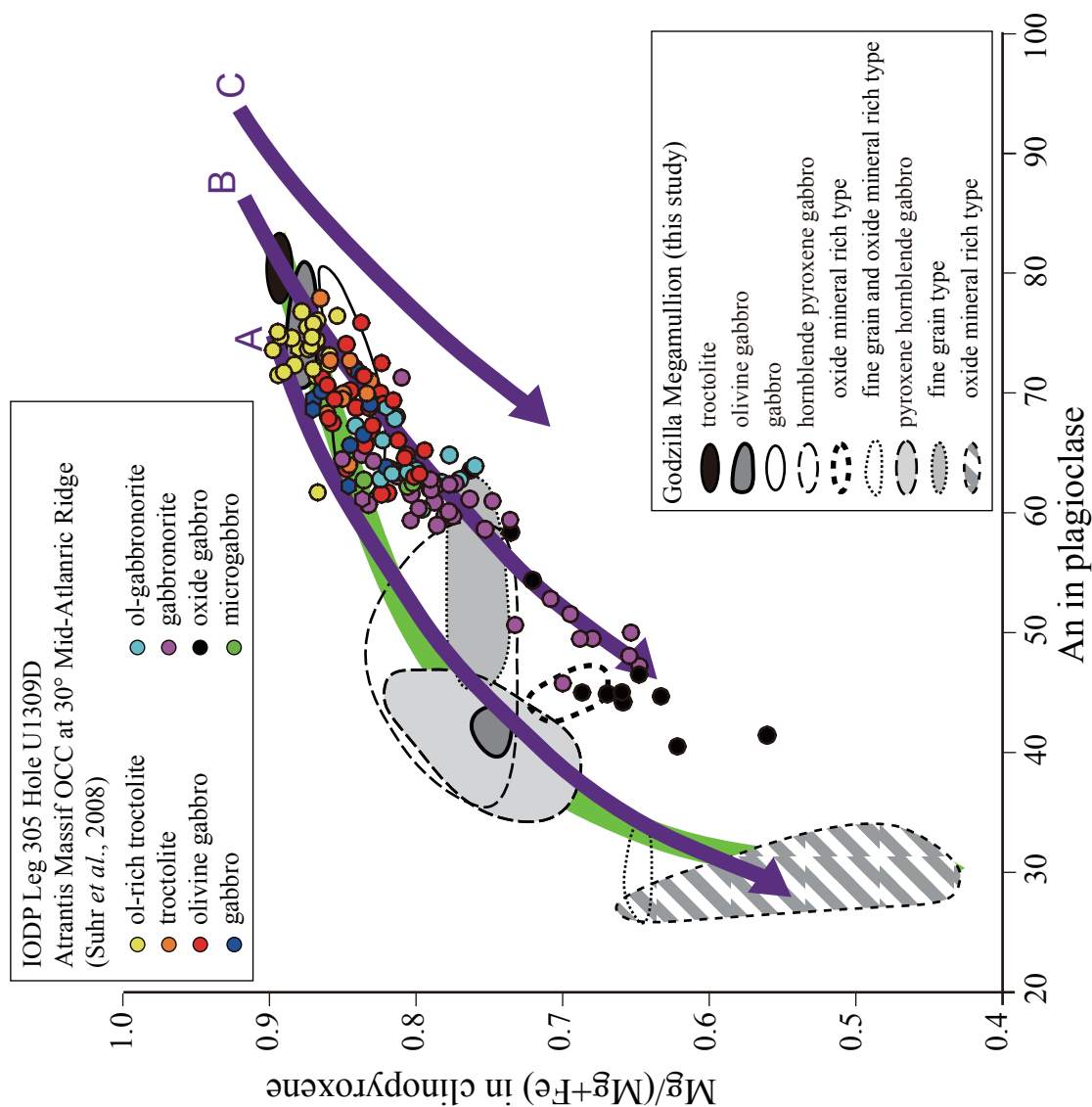


Fig. III-12. Comparison between magnesium number of clinopyroxene and anorthite content of euhedral plagioclase in gabbroic rocks of the Godzilla Megamullion, with fields for gabbros for IODP Leg 305 Hole U1309D in the Atlantis Massif of MAR (Suhr *et al.*, 2008). Green arrow indicates differentiation trend of Godzilla Megamullion. Purple arrow (A, B, C) indicates hypothetical trends for precipitates of the differentiation products of (from A to C) successively more refractory primary melts (Natland and Dick, 1996).

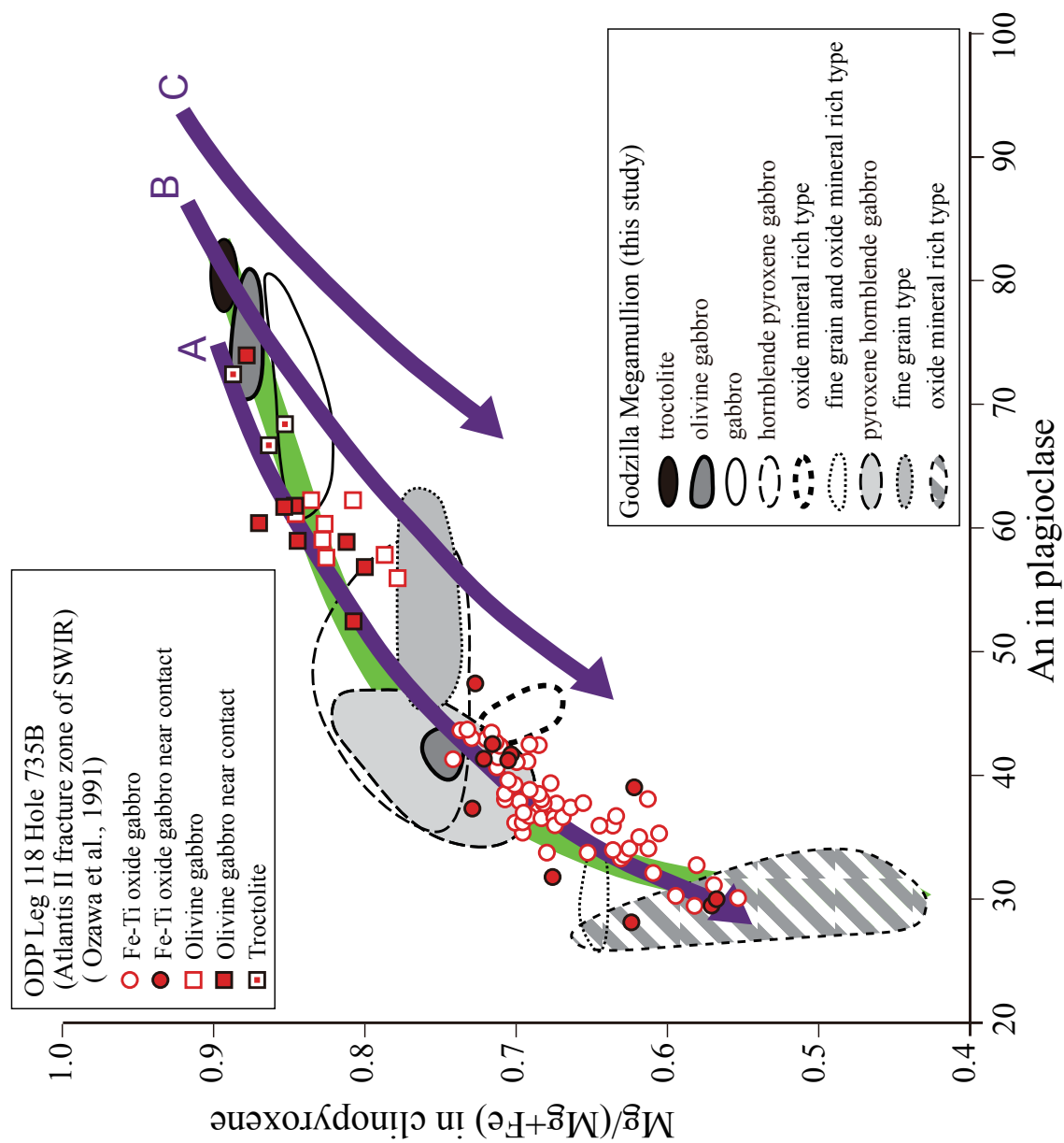


Fig. III-13. Comparison between magnesium number of clinopyroxene and anorthite content of euhedral plagioclase in gabbroic rocks of the Godzilla Megamullion, with fields for gabbros for ODP Leg 118 Hole 735B in the Atlantis II Fracture Zone of SWIR (Ozawa *et al.*, 1991). Green arrow indicates differentiation trend of Godzilla Megamullion. Blue arrow (A, B, C) show hypothetical trends for precipitates of the differentiation products of (from A to C) successively more refractory primary melts (Natland and Dick, 1996).

APPENDIX 4 Figures (chapter IV)

- Fig. IV-1a. Variation diagram of major elements for troctolite, olivine gabbro and gabbro.
- Fig. IV-1b. Variation diagram of selected trace elements for troctolite, olivine gabbro and gabbro.
- Fig. IV-2a. Variation diagram of major elements for hornblende pyroxene gabbro.
- Fig. IV-2b. Variation diagram of selected trace elements for hornblende pyroxene gabbro.
- Fig. IV-3a. Variation diagram of major elements for pyroxene hornblende gabbro.
- Fig. IV-3b. Variation diagram of selected trace elements for pyroxene hornblende gabbro.
- Fig. IV-4a. Variation diagram of major elements for hornblende gabbro.
- Fig. IV-4b. Variation diagram of selected trace elements for hornblende gabbro.
- Fig. IV-5a. Variation diagram of major elements for trondhjemite.
- Fig. IV-5b. Variation diagram of selected trace elements for trondhjemite.
- Fig. IV-6. Mid-ocean ridge basalt (MORB) normalized trace element plots (Pearce, 1983) for the Godzilla Megamullion gabbroic rocks.
- Fig. IV-7. Age versus volume of calculated CIPW norm minerals plot.
- Fig. IV-8a. Variation diagram of major elements for West leg Ridge and East Leg Ridge.
- Fig. IV-8b. Variation diagram of major elements for West Hipbone Rise, West Arm Rise and West Shoulder Ridg).
- Fig IV-9. Variation diagram of major elements, selected trace elements and magnesium number ($\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}) \times 100$) for fine grained hornblende pyroxene gabbro and pyroxene hornblende gabbro of the Godzilla Megamullion, with fields for basalt composition from the Parece Vela Basin and MORB.
- Fig. IV-10. Mid-ocean ridge basalt (MORB) normalized trace element plots (Pearce, 1983) for the Godzilla Megamullion fine grained type gabbro.
- Fig. IV-11. SiO_2 versus total FeO plot for roughly distinguishing trends of the Godzilla Megamullion gabbroic rocks.
- Fig. IV-12. Mid-ocean ridge basalt (MORB)-normalized trace element plots (Pearce, 1983) for five classified types of Godzilla Megamullion gabbroic rocks.
- Fig. IV-13a. SiO_2 versus total FeO plot of gabbroic rocks of the Godzilla Megamullion for comparison between the topography and classified types.
- Fig. IV-13b. SiO_2 versus TiO_2 plot of gabbroic rocks of the Godzilla Megamullion for comparison between the topography and classified types.
- Fig. IV-13c. SiO_2 versus Al_2O_3 plot of gabbroic rocks of the Godzilla Megamullion for comparison between the topography and classified types.
- Fig. IV-13d. SiO_2 versus MgO plot of gabbroic rocks of the Godzilla Megamullion for comparison between the topography and classified types.
- Fig. IV-13e. SiO_2 versus CaO plot of gabbroic rocks of the Godzilla Megamullion for comparison between the topography and classified types.
- Fig. IV-13f. SiO_2 versus Na_2O plot of gabbroic rocks of the Godzilla Megamullion for comparison between the topography and classified types.
- Fig. IV-14. Relationship of bulk composition and analyzed mineral compositions by CaO versus Al_2O_3 plot.

Troctolite, Olivine gabbro, Gabbro

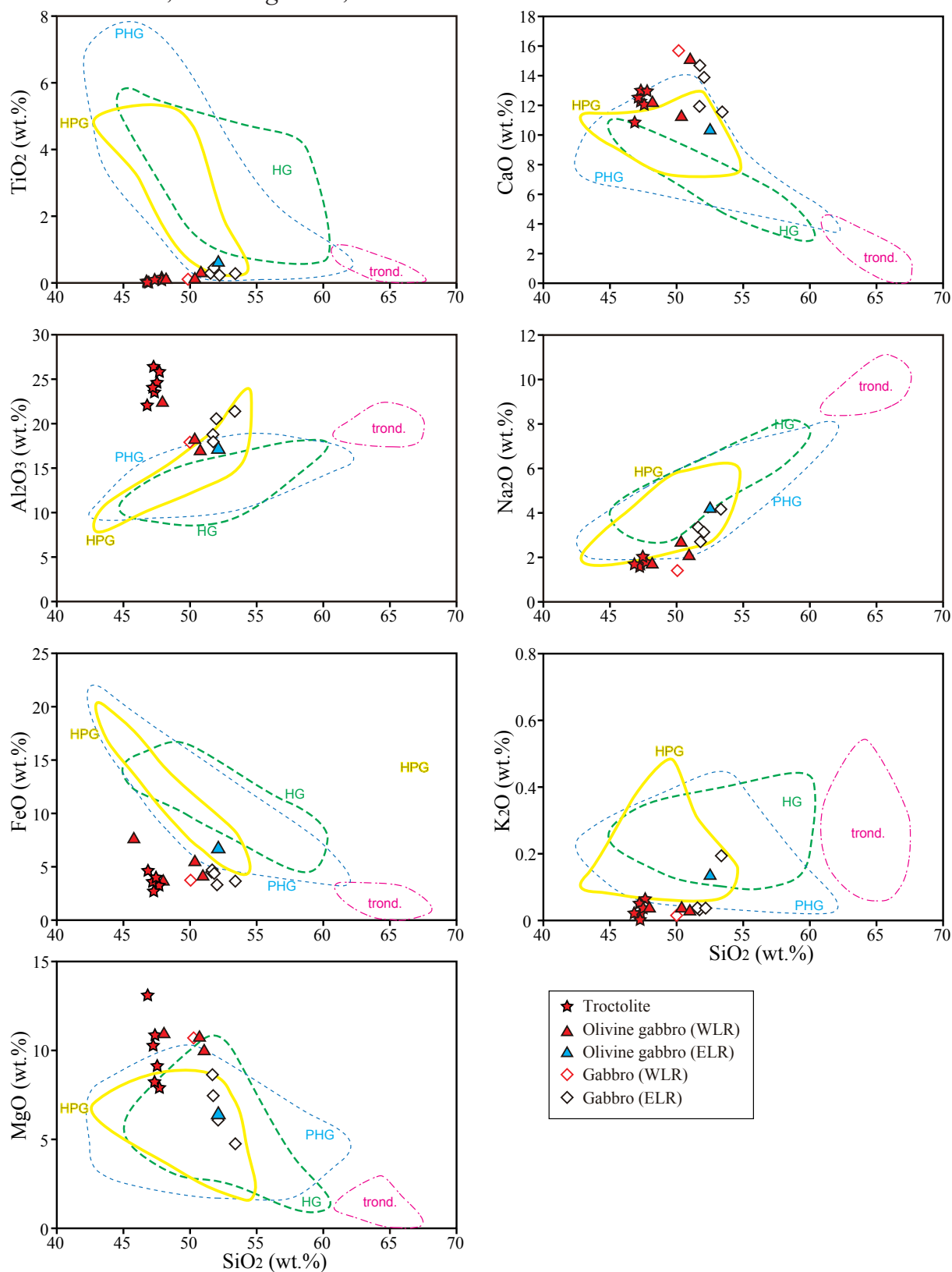


Fig. IV-1a. Variation diagram of major elements for troctolite, olivine gabbro and gabbro. HPG: hornblende pyroxene gabbro, PHG: pyroxene hornblende gabbro, HG, hornblende gabbro, Trond.: trondjemite. FeO as total FeO.

Troctolite, Olivine gabbro, Gabbro

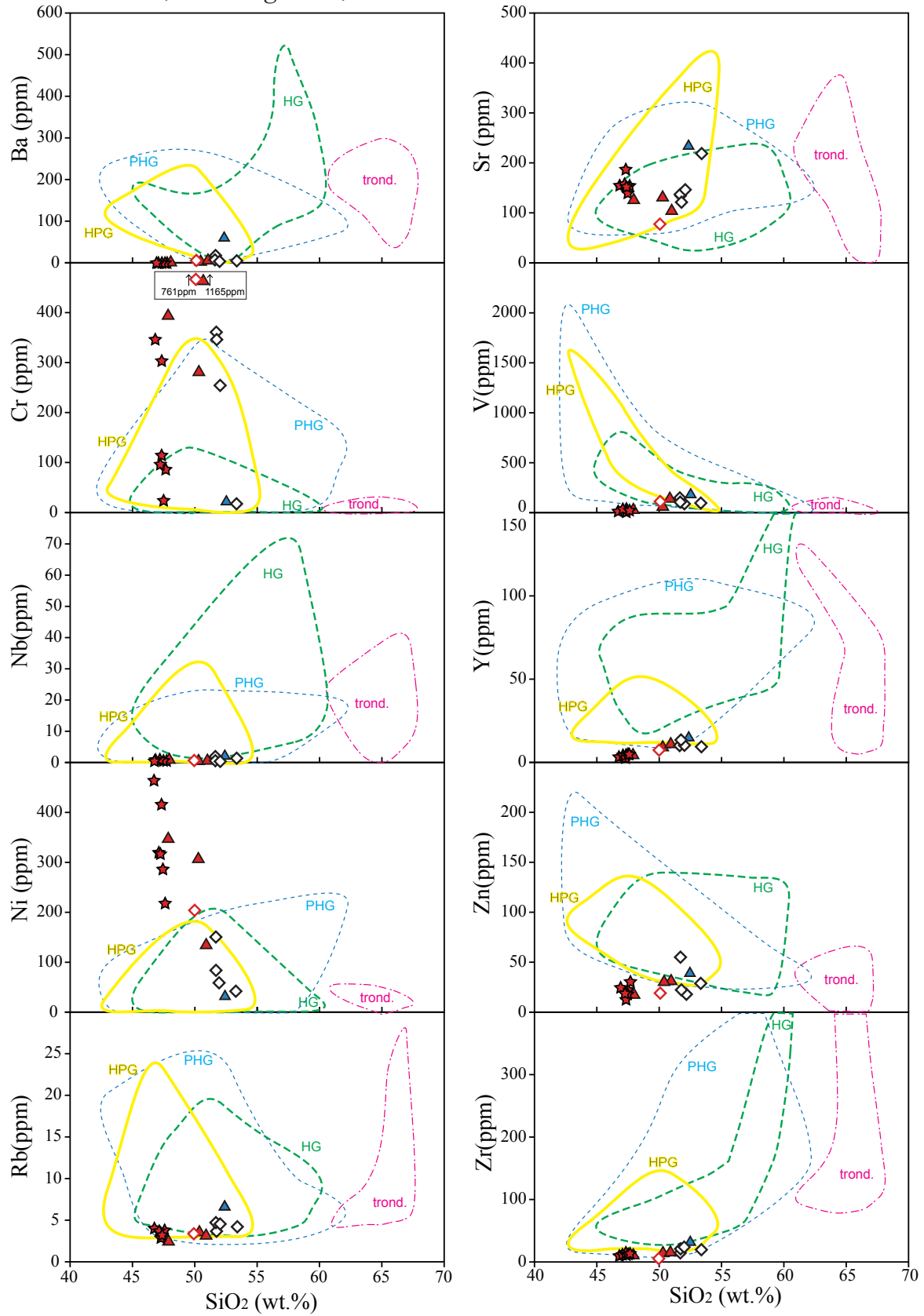


Fig. IV-1b. Variation diagram of selected trace elements for troctolite, olivine gabbro and gabbro. HPG: hornblende pyroxene gabbro, PHG: pyroxene hornblende gabbro, HG, hornblende gabbro, trond.: trondhjemite.

Hornblende pyroxene gabbro

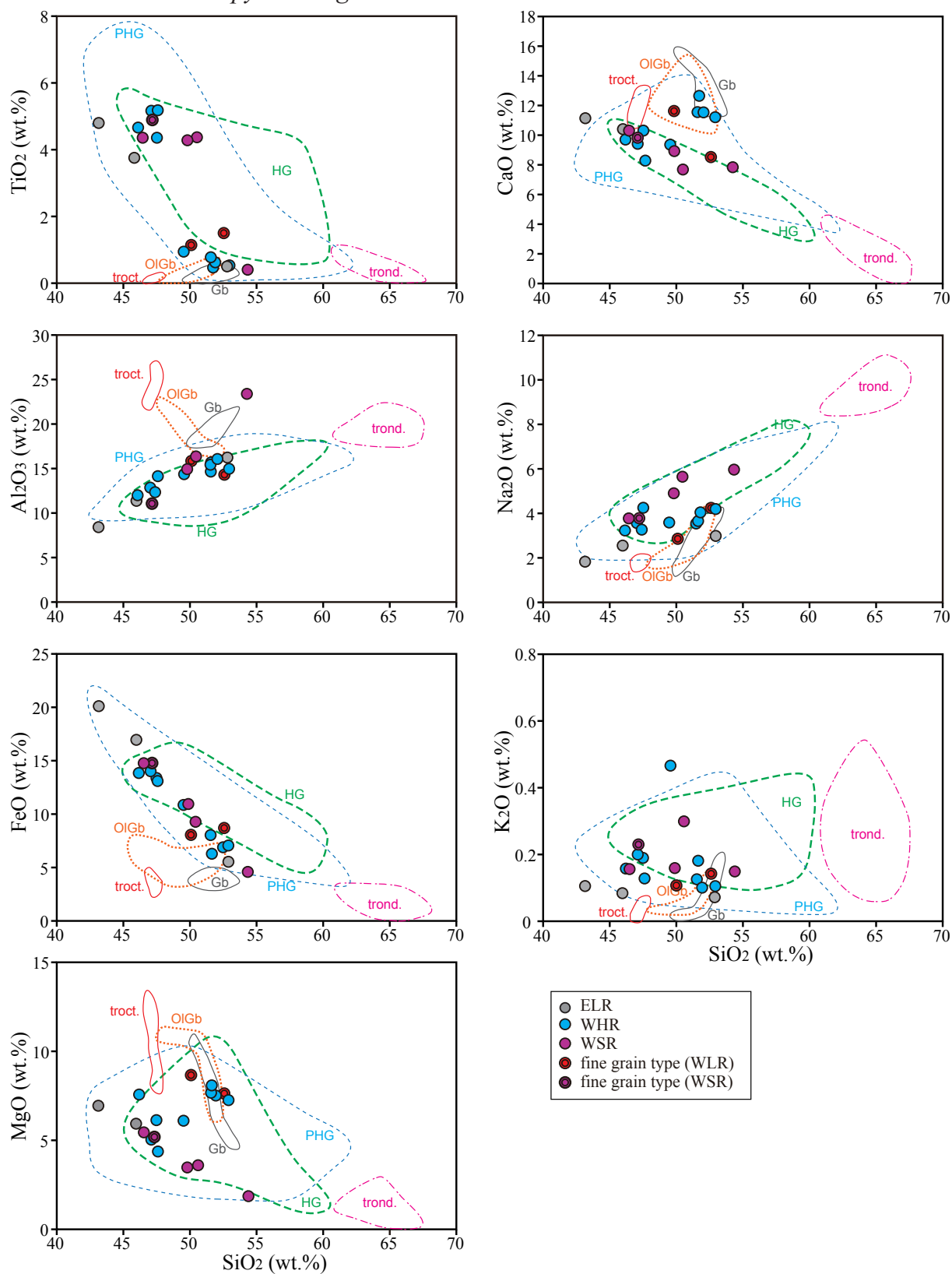


Fig. IV-2a. Variation diagram of major elements for hornblende pyroxene gabbro. Troct.: troctolite, OlGb: olivine gabbro, Gb: gabbro, PHG: pyroxene hornblende gabbro, HG: hornblende gabbro, Trond.: trondhjemite. FeO as total FeO.

Hornblende pyroxene gabbro

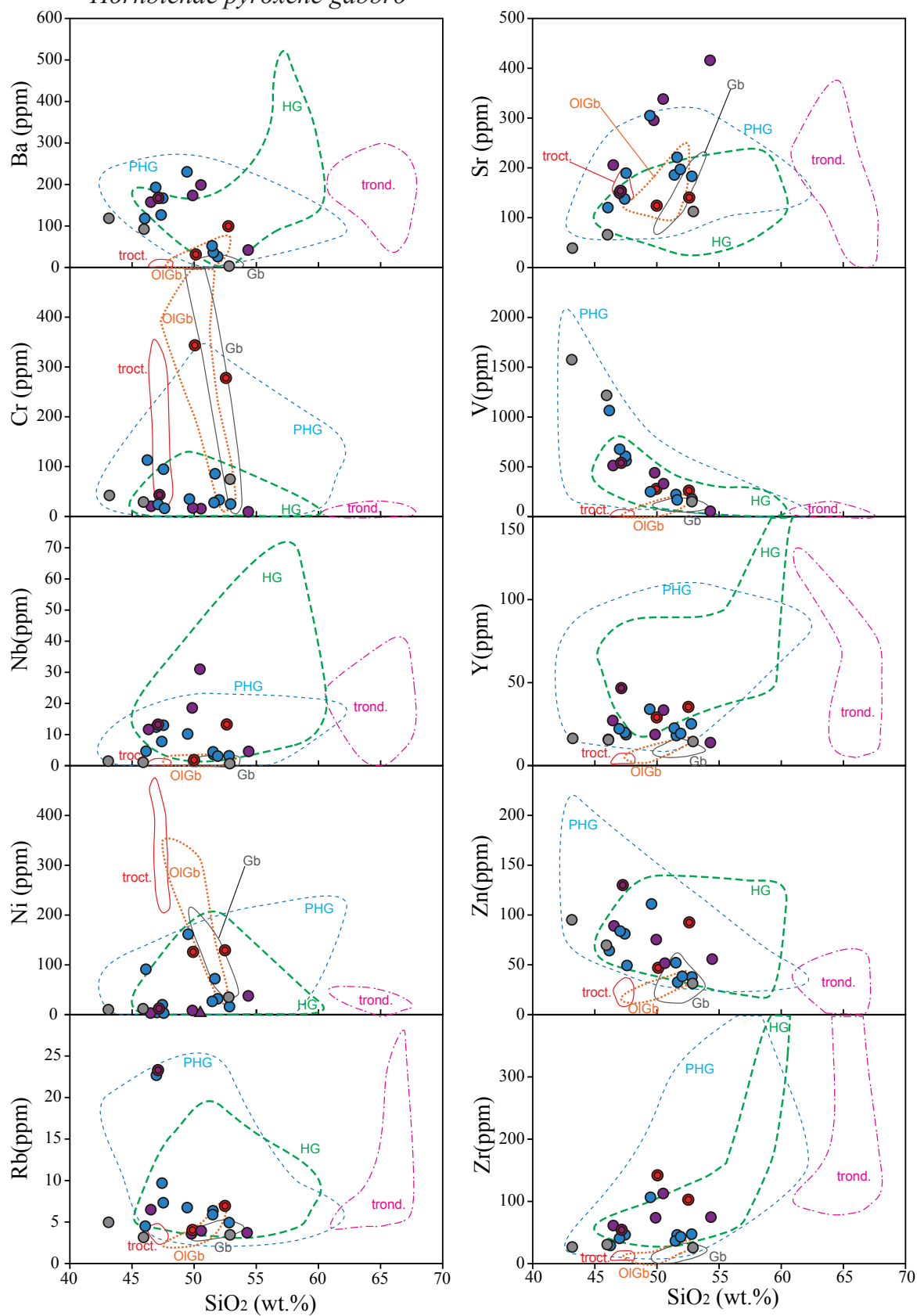


Fig. IV-2b. Variation diagram of selected trace elements for hornblende pyroxene gabbro. Troct.: troctolite, OIGb: olivine gabbro, Gb: gabbro, PHG: pyroxene hornblende gabbro, HG: hornblende gabbro, trond.: trondhjemite.

Pyroxene hornblende gabbro

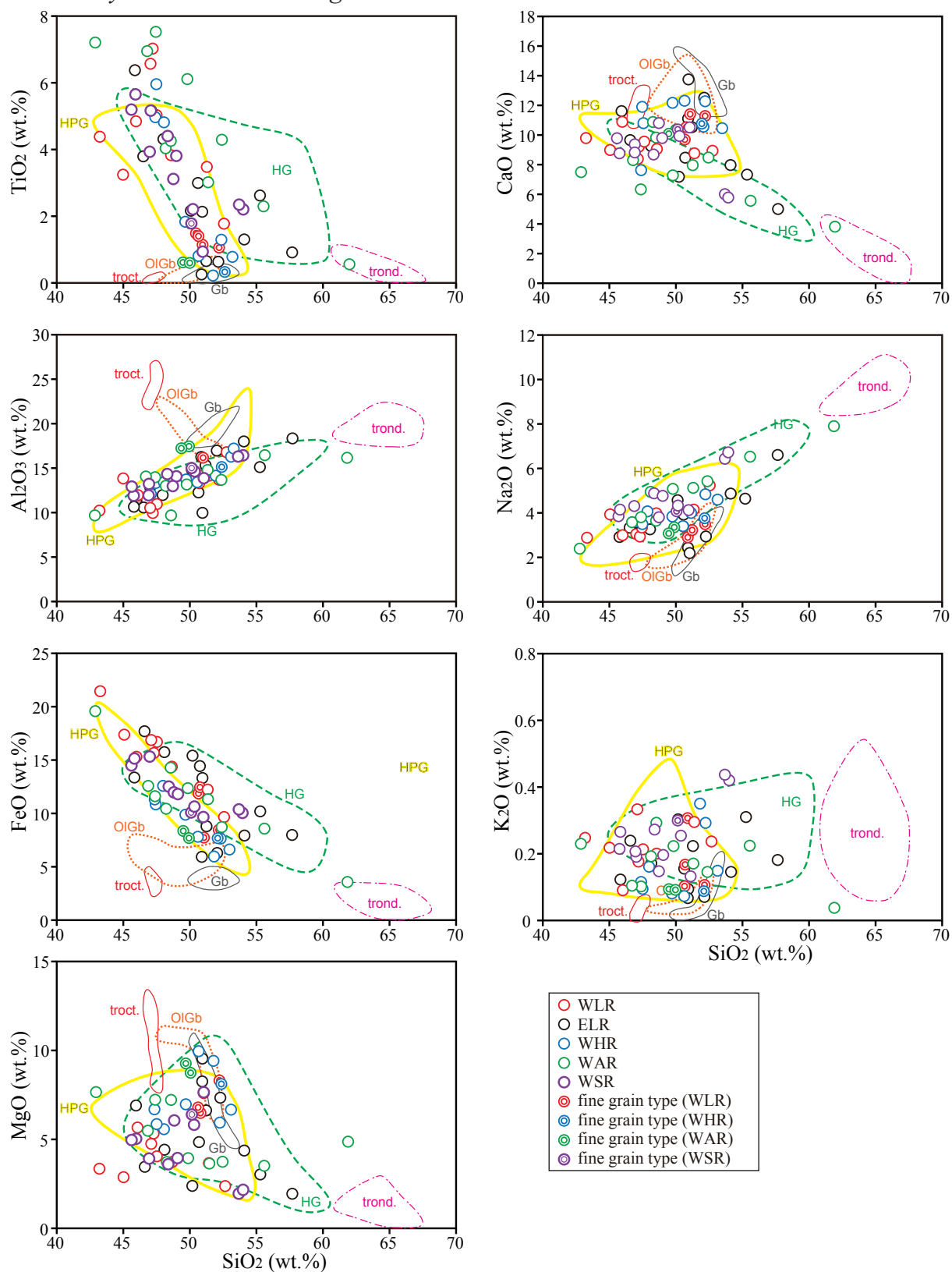


Fig. IV-3a. Variation diagram of major elements for pyroxene hornblende gabbro. Troct.: troctolite, OIGb: olivine gabbro, Gb: gabbro, HPG: hornblende pyroxene gabbro, HG, hornblende gabbro, Trond.: trondhjemite. FeO as total FeO.

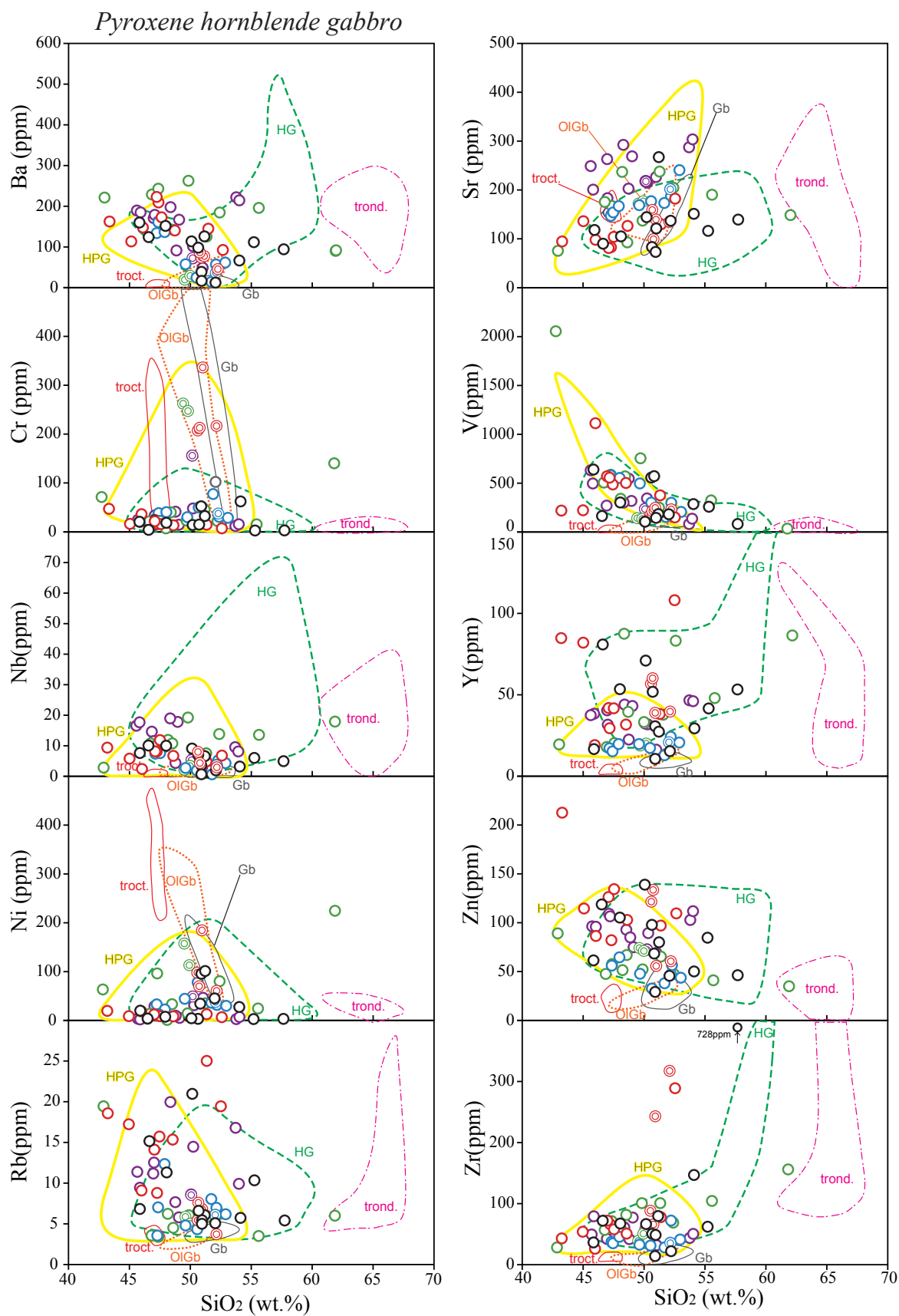


Fig. IV-3b. Variation diagram of selected trace elements for pyroxene hornblende gabbro. Troct.: troctolite, OlGb: olivine gabbro, Gb: gabbro, HPG: hornblende pyroxene gabbro, HG, hornblende gabbro, Trond.: trondhjemite.

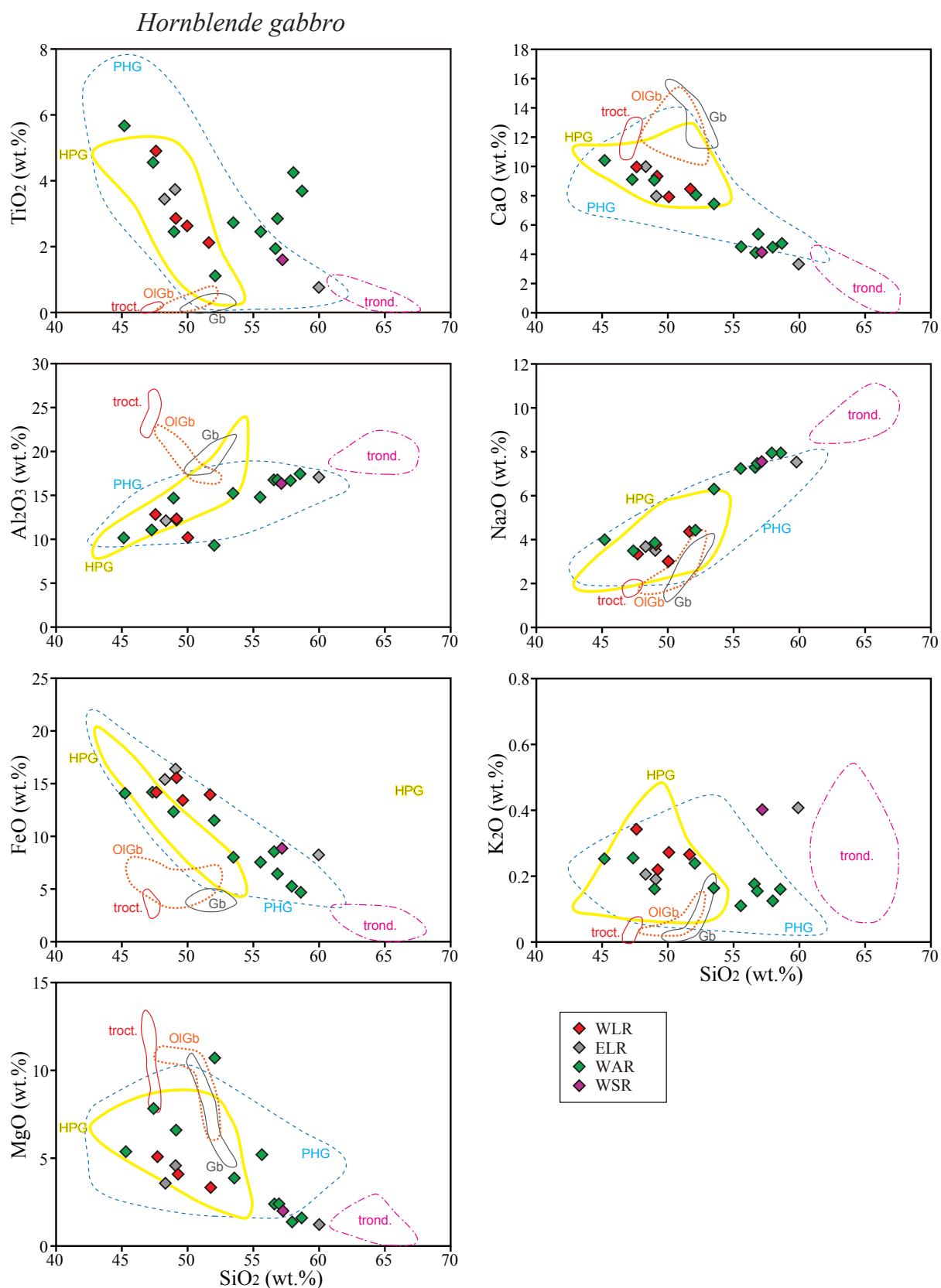


Fig. IV-4a. Variation diagram of major elements for hornblende gabbro. Troct.: troctolite, OlGb: olivine gabbro, Gb: gabbro, HPG: hornblende pyroxene gabbro, PHG: pyroxene hornblende gabbro, Trond.: trondhjemite. FeO as total FeO.

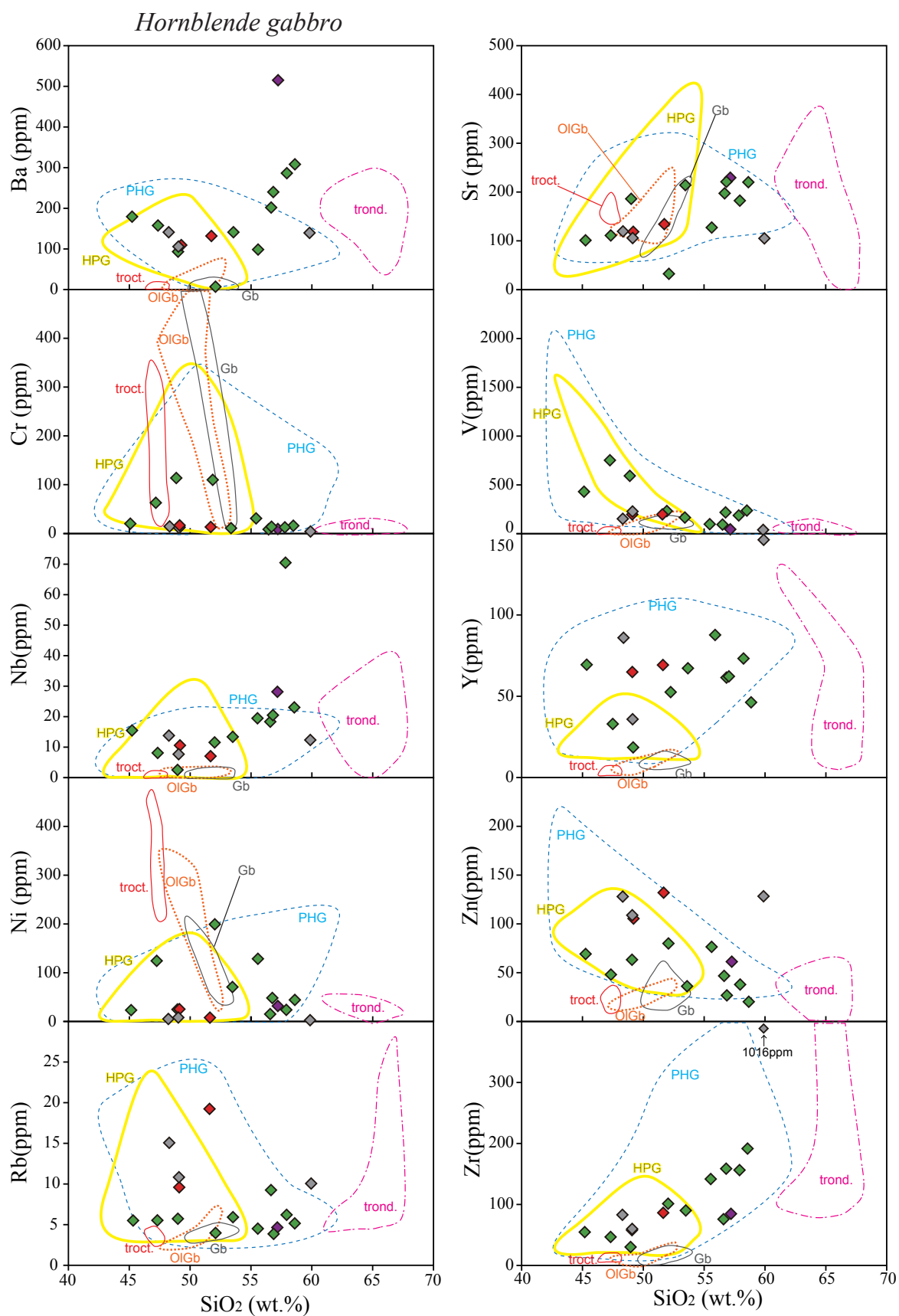


Fig. IV-4b. Variation diagram of selected trace elements for hornblende gabbro. Troct.: troctolite, OlGb: olivine gabbro, Gb: gabbro, HPG: hornblende pyroxene gabbro, PHG: pyroxene hornblende gabbro, Trond.: trondhjemite.

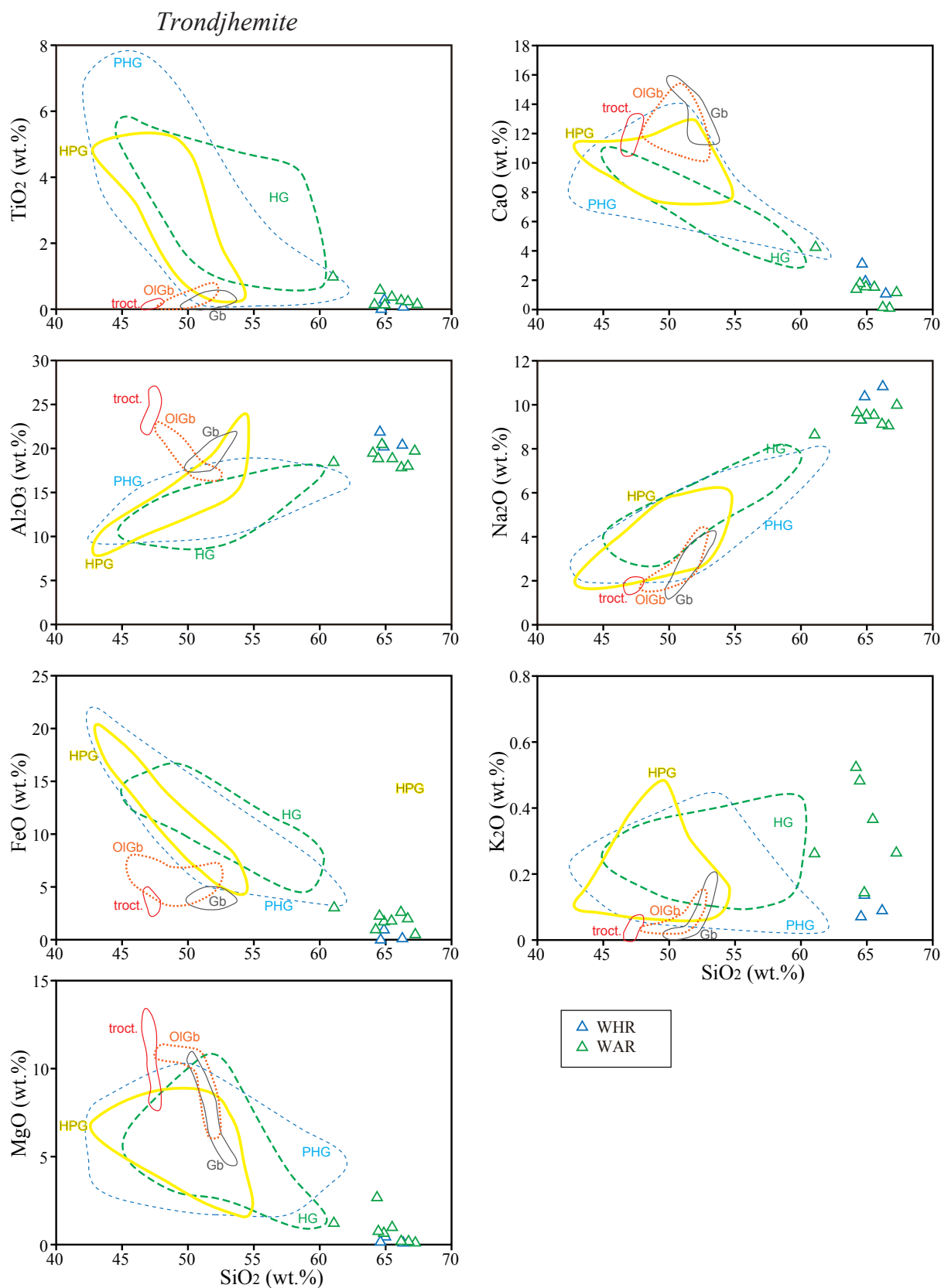


Fig. IV-5a. Variation diagram of major elements for trondjemite. Troct.: troctolite, OIGb: olivine gabbro, Gb: gabbro, HPG: hornblende pyroxene gabbro, PHG: pyroxene hornblende gabbro, HG: hornblende gabbro. FeO as total FeO.

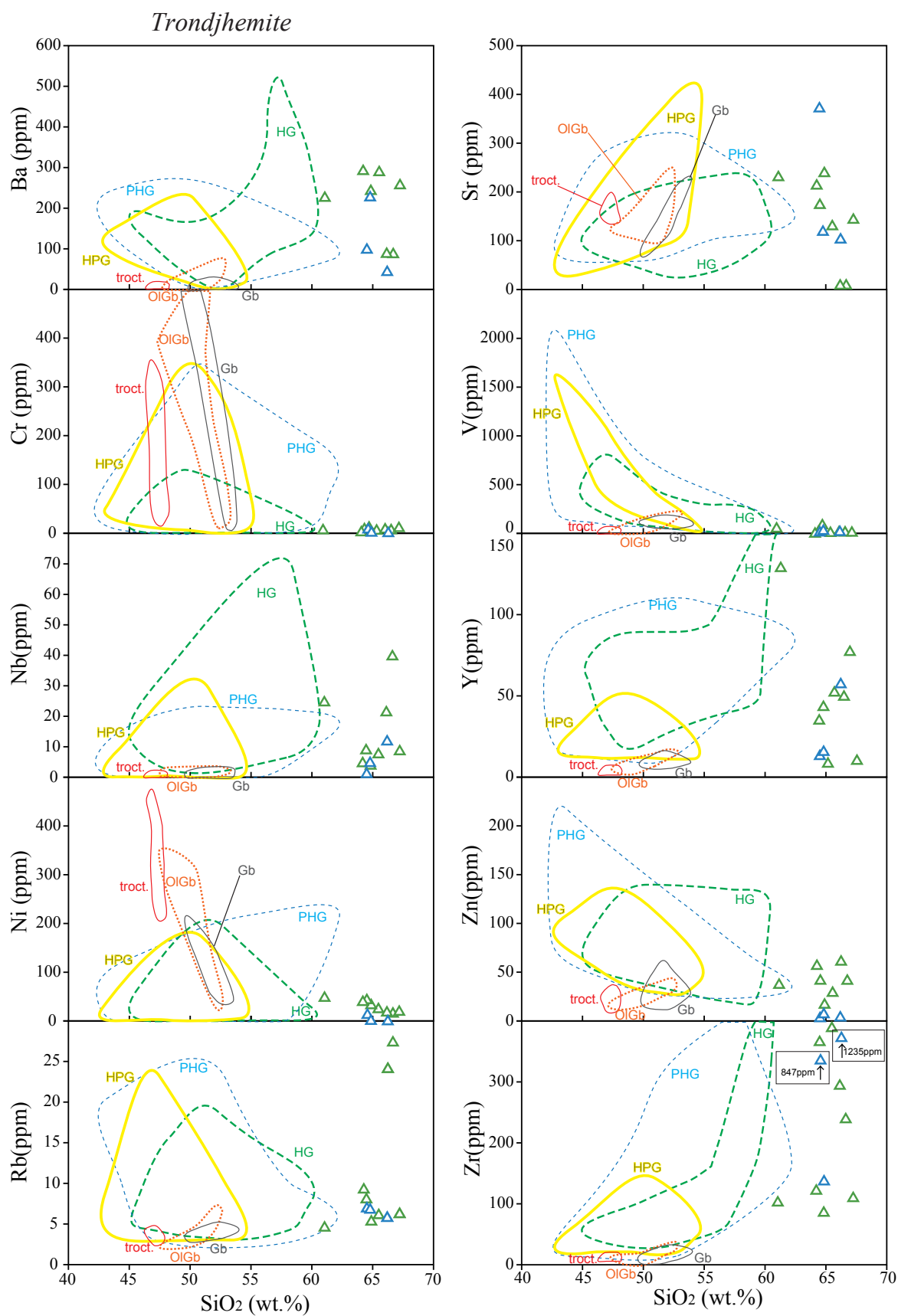


Fig. IV-5b. Variation diagram of selected trace elements for trondhjemite. Troct.: troctolite, OIGb: olivine gabbro, Gb: gabbro, HPG: hornblende pyroxene gabbro, PHG: pyroxene hornblende gabbro, HG: hornblende gabbro.

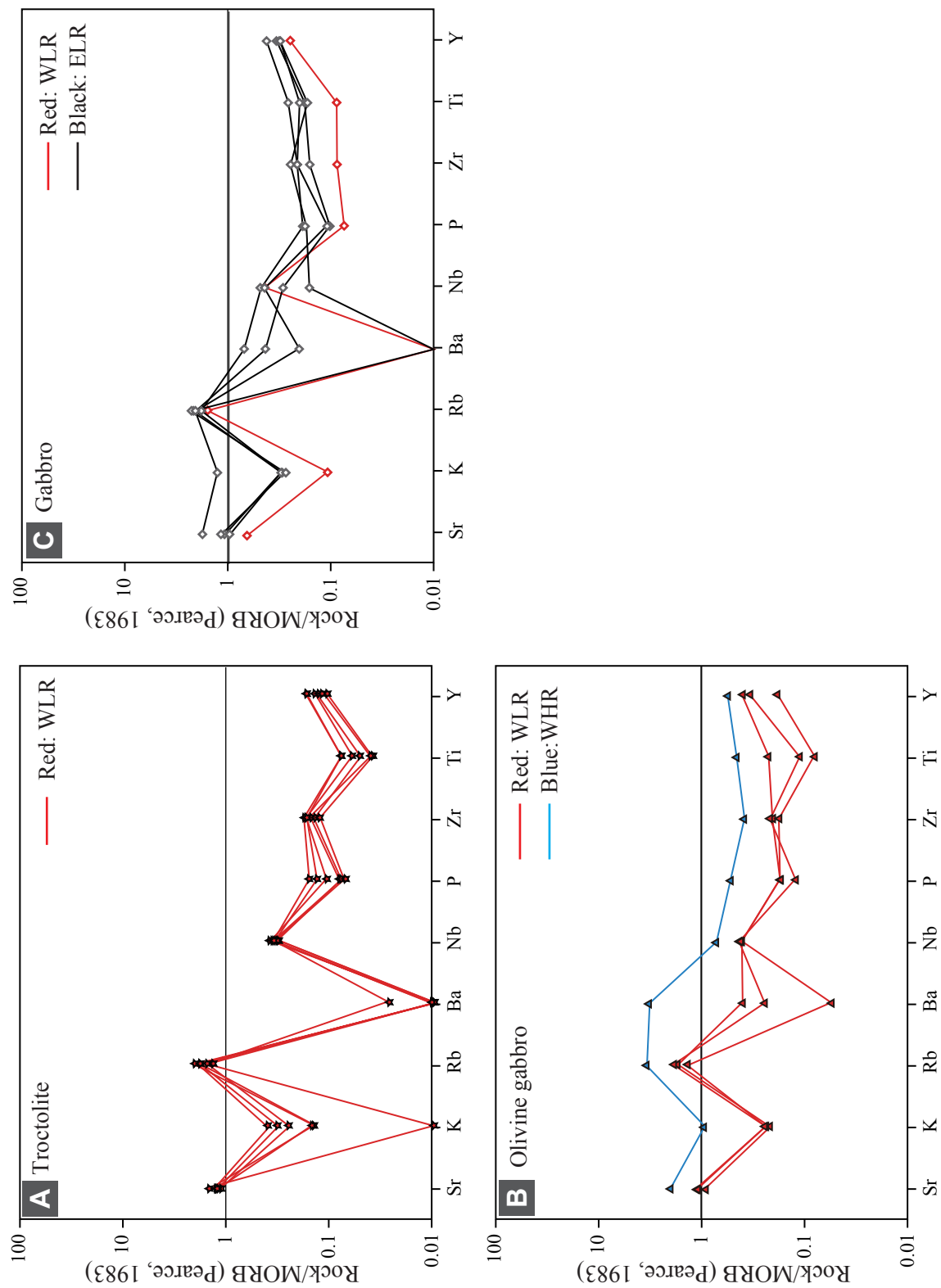


Fig. IV-6. Mid-ocean ridge basalt (MORB) normalized trace element plots (Pearce, 1983) for the Godzilla Megamullion gabbroic rocks. A: troctolite, B: olivine gabbro, C: gabbro.

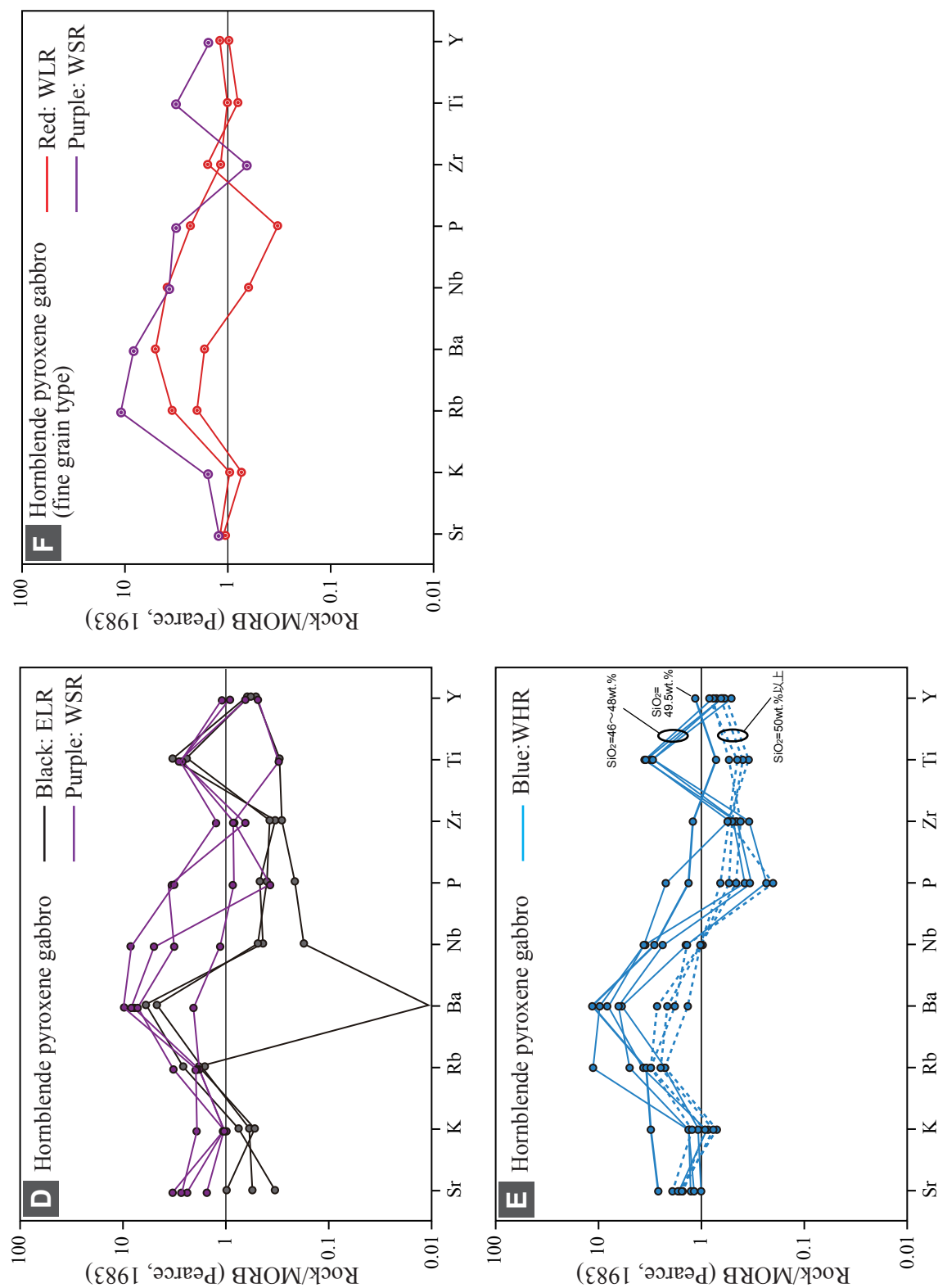


Fig. IV-6. continued. D: hornblende pyroxene gabbro (ELR and WSR), E: hornblende pyroxene gabbro (WHR), F: hornblende pyroxene gabbro (fine grain type).

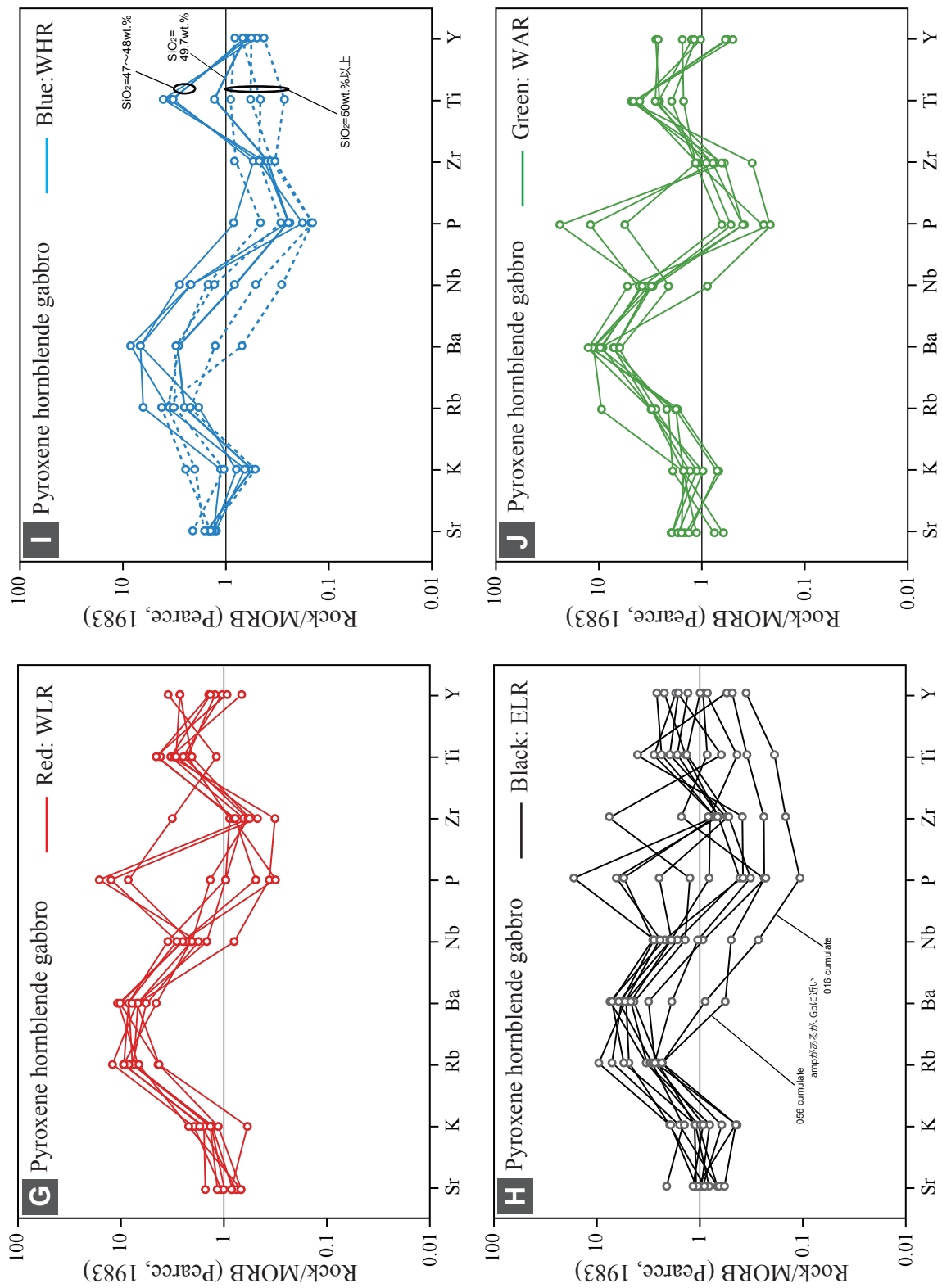


Fig. IV-6. continued. G: pyroxene hornblende gabbro (WLR), H: pyroxene hornblende gabbro (ELR), I: pyroxene hornblende gabbro (WHR), J: pyroxene hornblende gabbro (WAR).

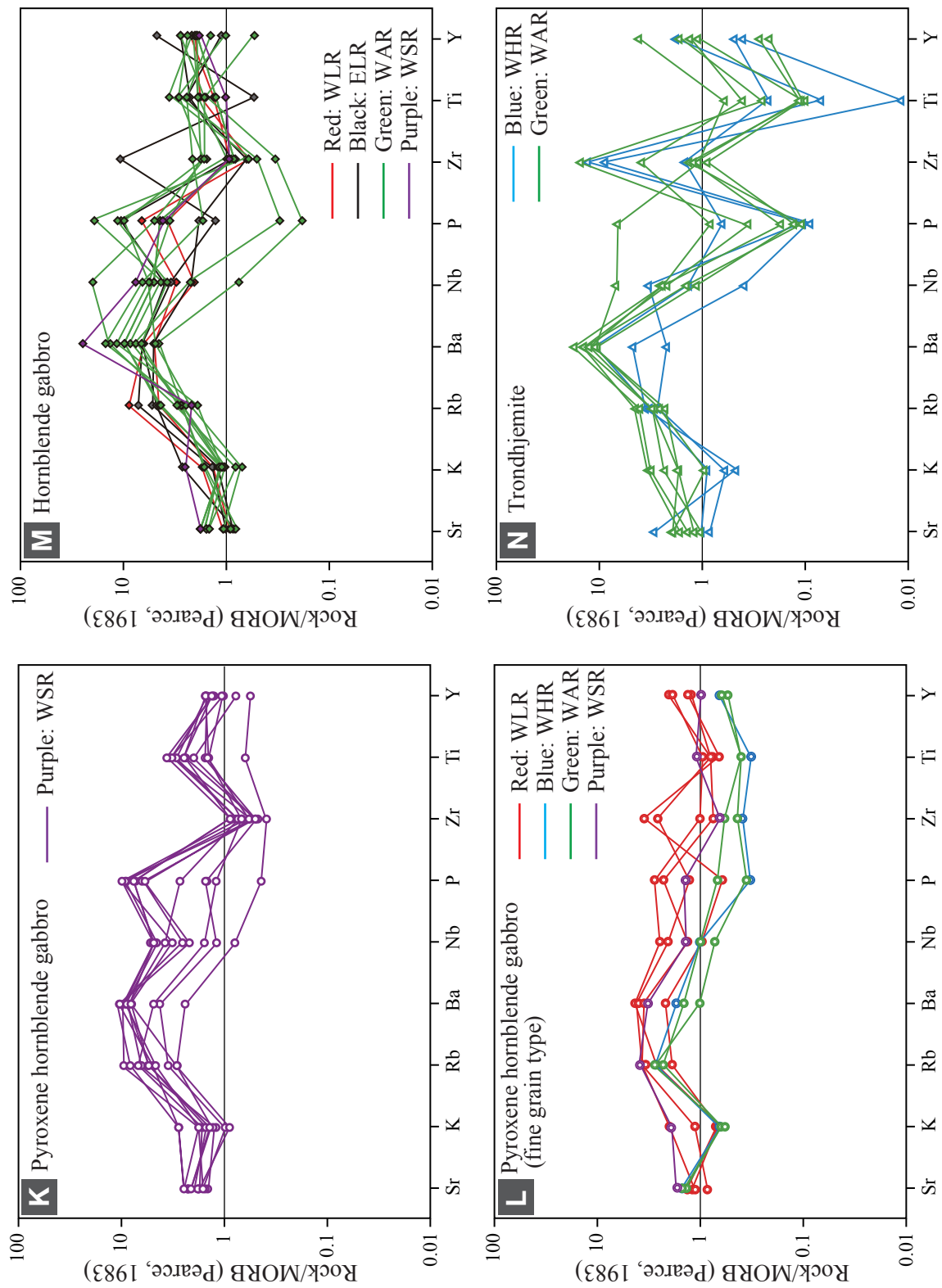


Fig. IV-6. continued. K: pyroxene hornblende gabbro (WSR), L: pyroxene hornblende gabbro (fine grain type), M: hornblende gabbro, N: trondhjemite.

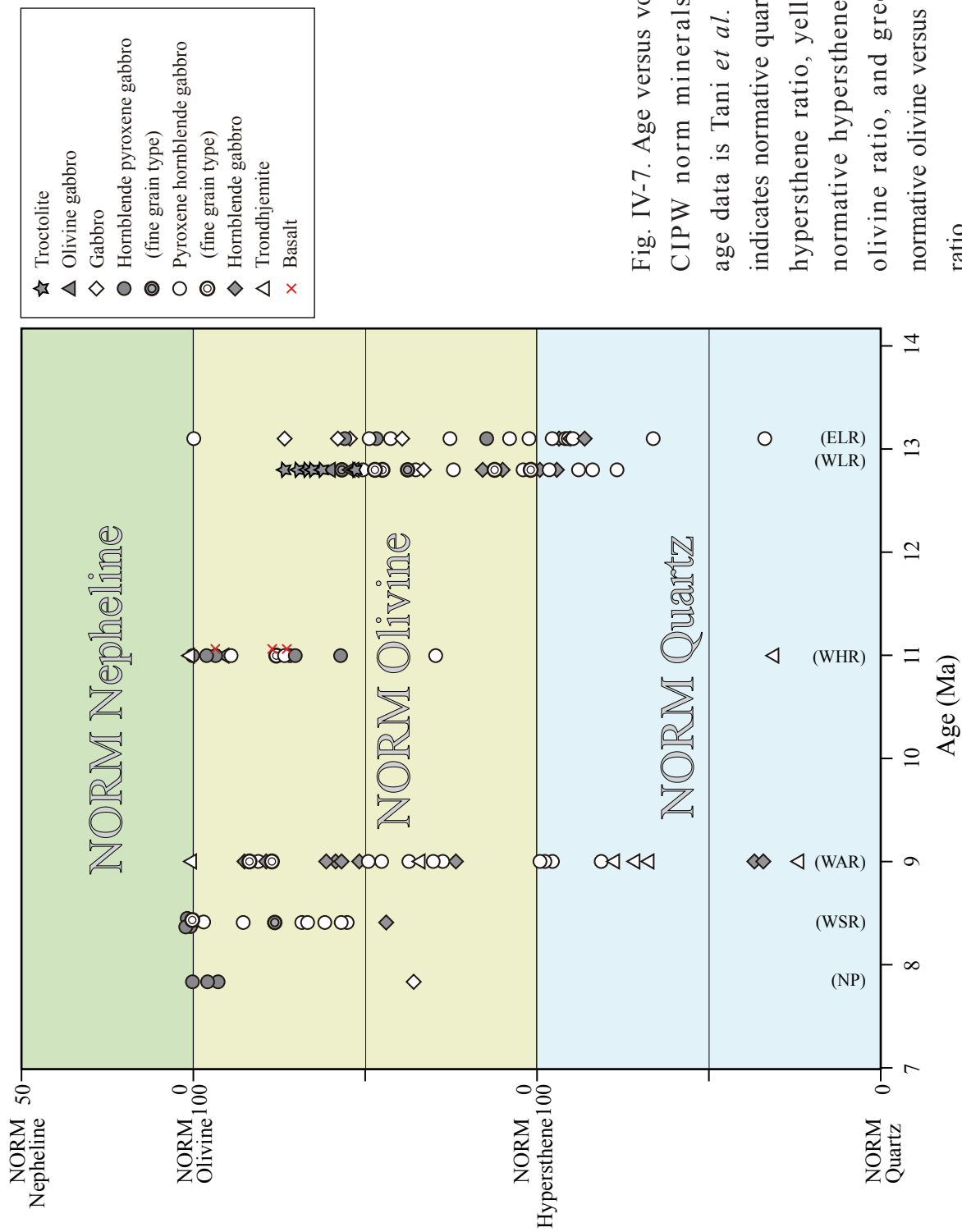


Fig. IV-7. Age versus volume of calculated CIPW norm minerals plot. Source of age data is Tani *et al.* (2011). Blue zone indicates normative quartz versus normative hypersthene ratio, yellow zone indicates normative hypersthene versus normative olivine ratio, and green zone indicates normative olivine versus normative nepheline ratio.

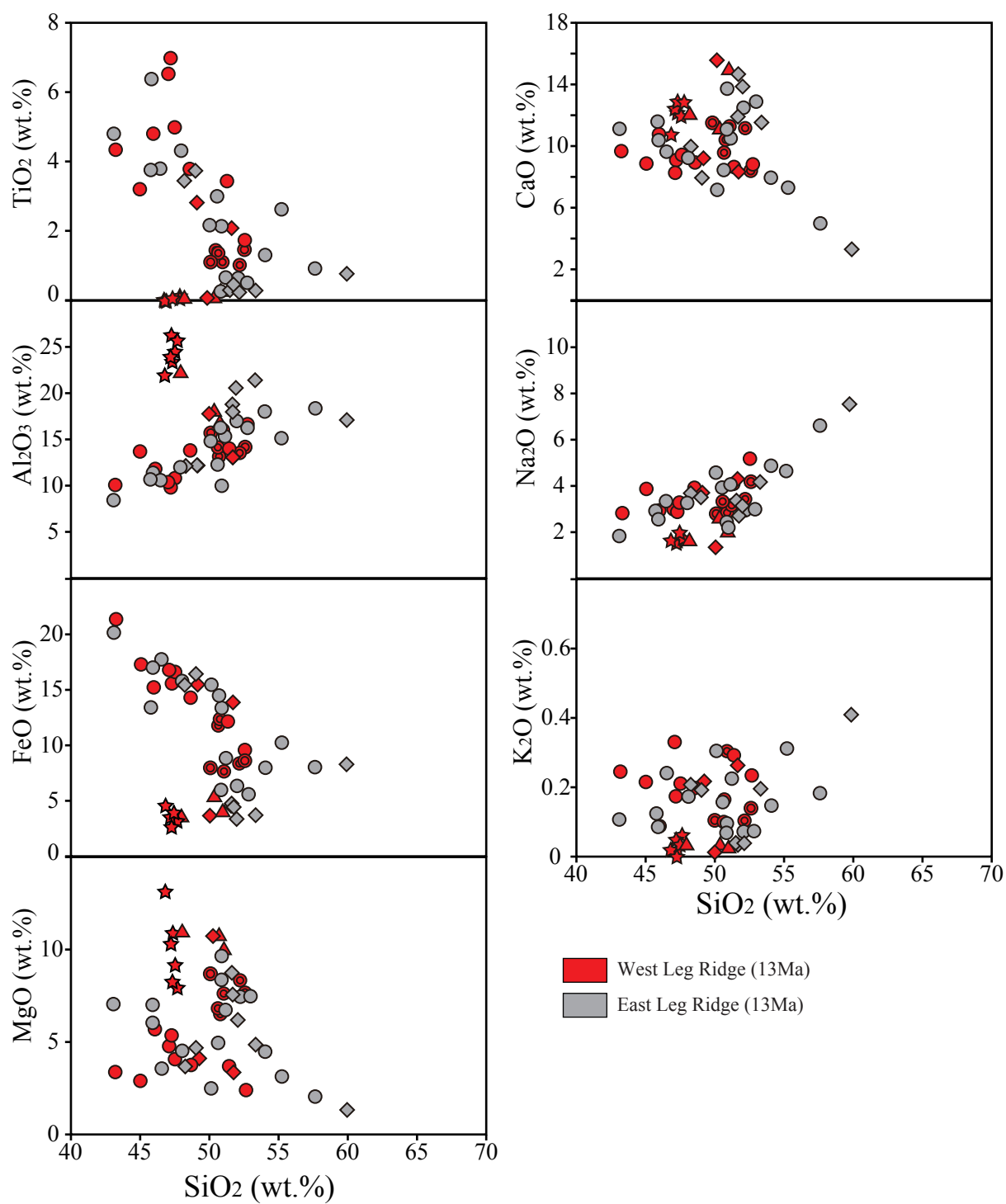


Fig. IV-8a. Variation diagram of major elements for West leg Ridge (red symbol) and East Leg Ridge (gray symbol). FeO as total FeO.

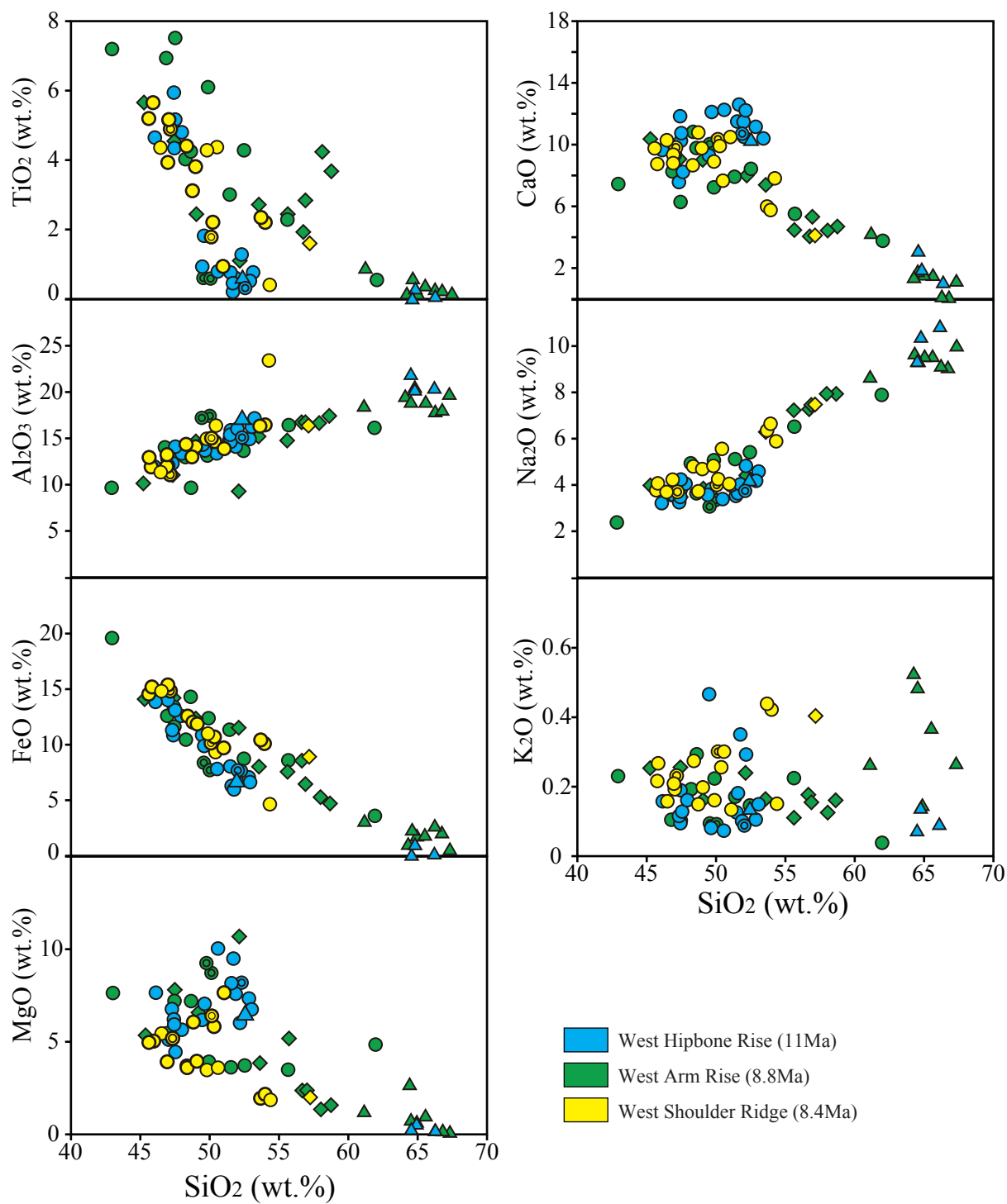


Fig. IV-8b. Variation diagram of major elements for West Hipbone Rise (blue symbol), West Arm Rise (green symbol) and West Shoulder Ridge (yellow symbol). FeO as total FeO.

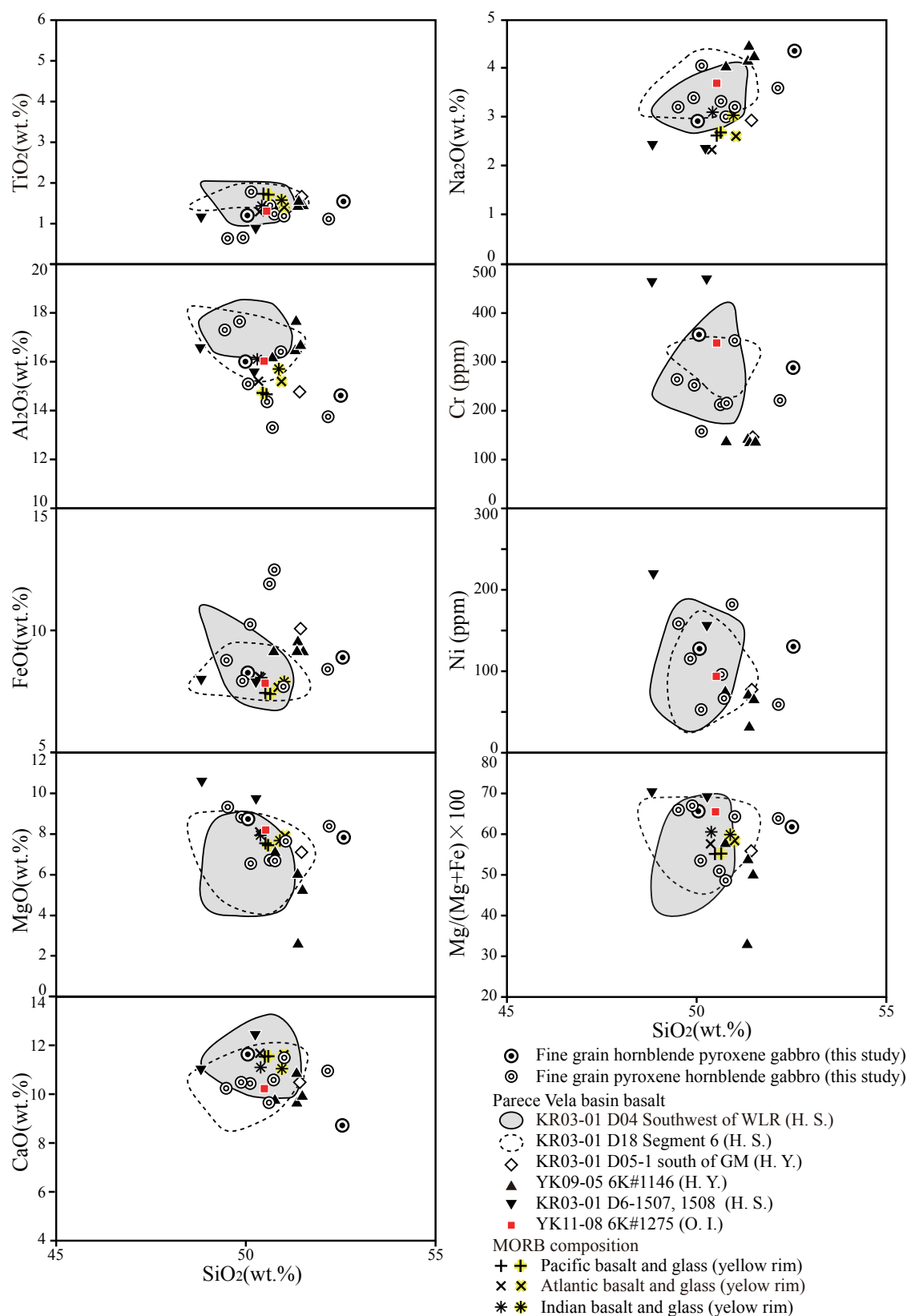


Fig IV-9. Variation diagram of major elements, selected trace elements and magnesium number ($Mg/(Mg+Fe) \times 100$) for fine grained hornblende pyroxene gabbro and pyroxene hornblende gabbro of the Godzilla Megamullion, with fields for basalt composition from the Parece Vela Basin and MORB. Data sources are samples KR03-01 D04, D18, and D6 (H. Sato, in preparation); YK11-08 6K#1275R07 (Osamu Ishizuka, in preparation); and KR03-01 D05-1 and YK09-05 6K#1146 (H. Yamashita, unpublished data). MORB compositions from Sato *et al.*, (2008).

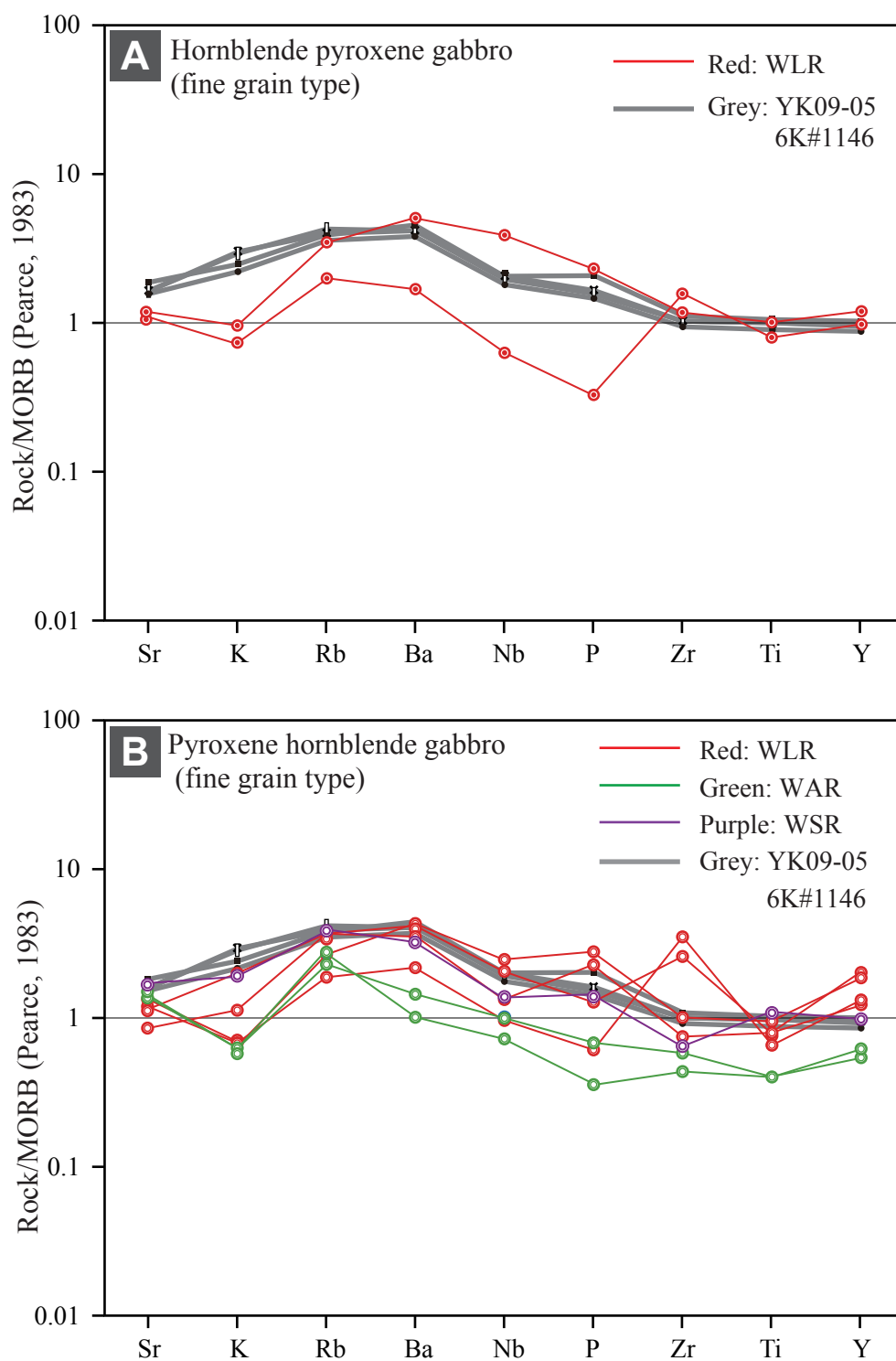


Fig. IV-10. Mid-ocean ridge basalt (MORB) normalized trace element plots (Pearce, 1983) for the Godzilla Megamullion fine grained type gabbro. A: fine grained hornblende pyroxene gabbro, B: fine grained pyroxene hornblende gabbro. Gray lines indicate basaltic compositions (YK09-05 6K#1146; Yamashita, unpublished data).

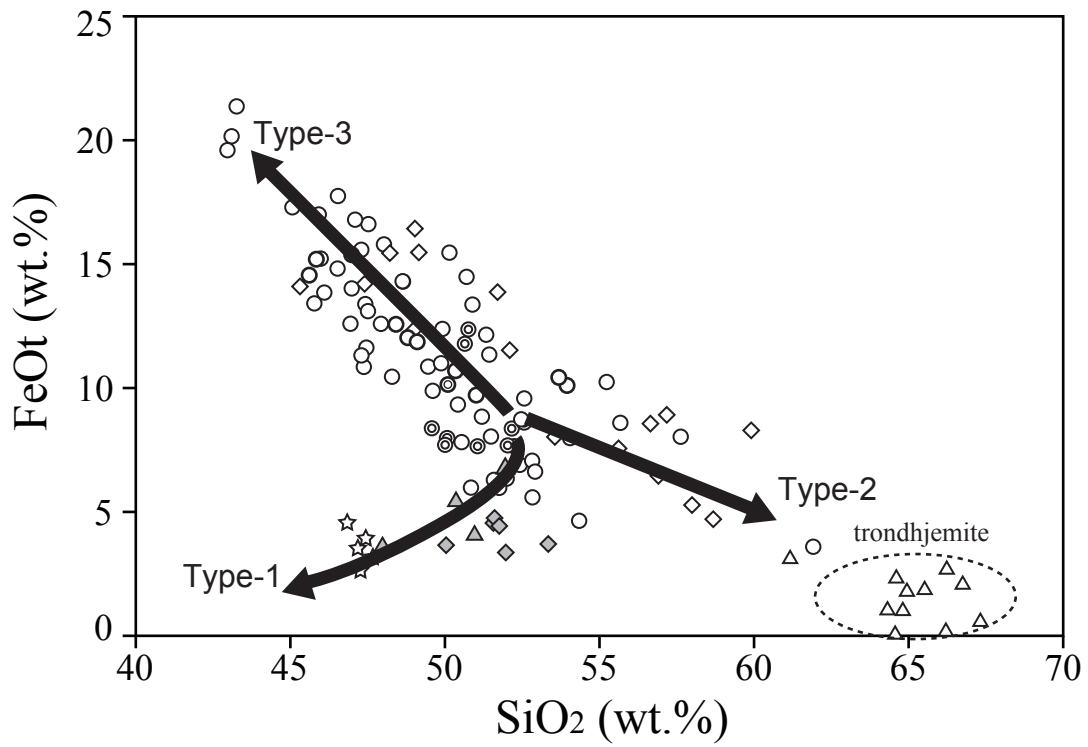


Fig. IV-11. SiO₂ versus total FeO plot for roughly distinguishing trends of the Godzilla Megamullion gabbroic rocks. Three black arrows go to three directions each around SiO₂ = 52 wt. %. Dashed line shows trondjemite. Small circle, diamond, star, double circle, and triangle indicate Godzilla Megamullion gabbroic rocks.

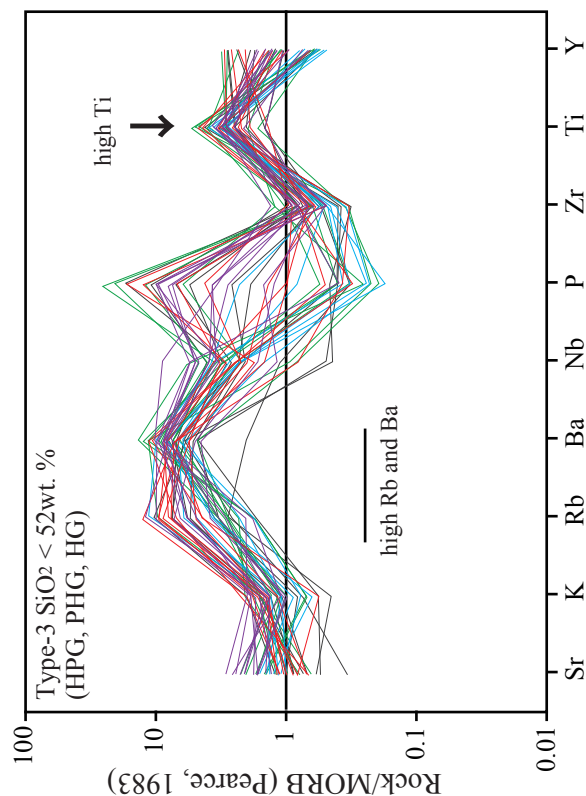
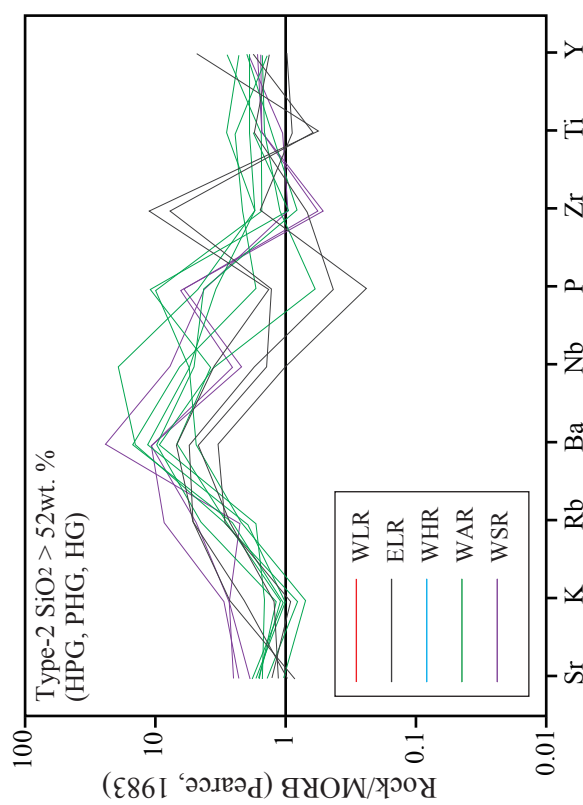
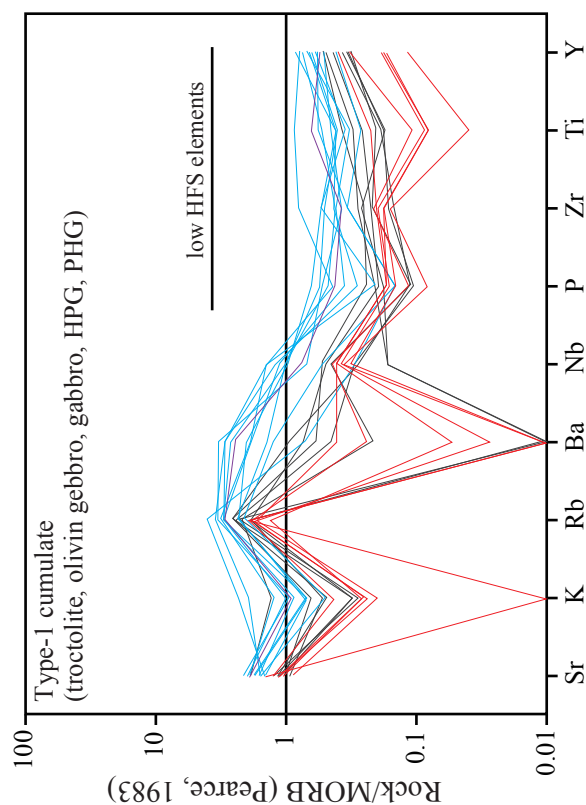


Fig. IV-12. Mid-ocean ridge basalt (MORB)-normalized trace element plots (Pearce, 1983) for five classified types of Godzilla Megamullion gabbroic rocks. Type 1 is cumulate rock characterized by highly depleted large-ion lithophile (LIL) and high field strength (HFS) elements. Type 2 is gabbro characterized by relatively high contents of LIL elements and SiO₂ higher than 52 wt. %. Type 3 is characterized by high concentrations of LIL elements and Ti and SiO₂ less than 52 wt. %. The rocks of this type are enriched in iron-oxide minerals. Type 4 is fine-grained type (shown in Fig. IV-10). Type 5 is trondhjemite (shown in Fig. IV-6M, N, and Table 12).

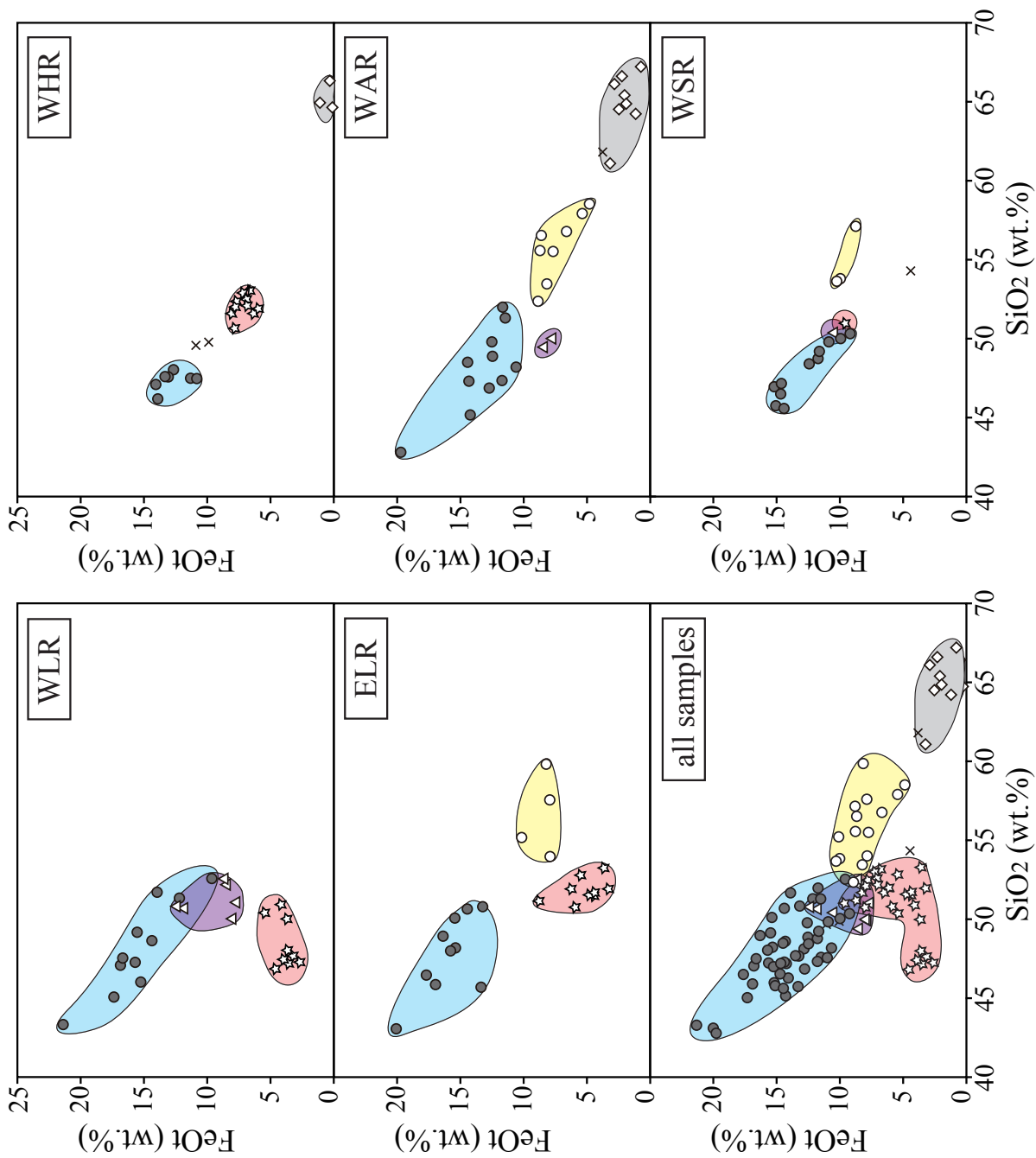


Fig. IV-13a. SiO₂ versus total FeO plot of gabbroic rocks of the Godzilla Megamullion for comparison between the topography and classified types.

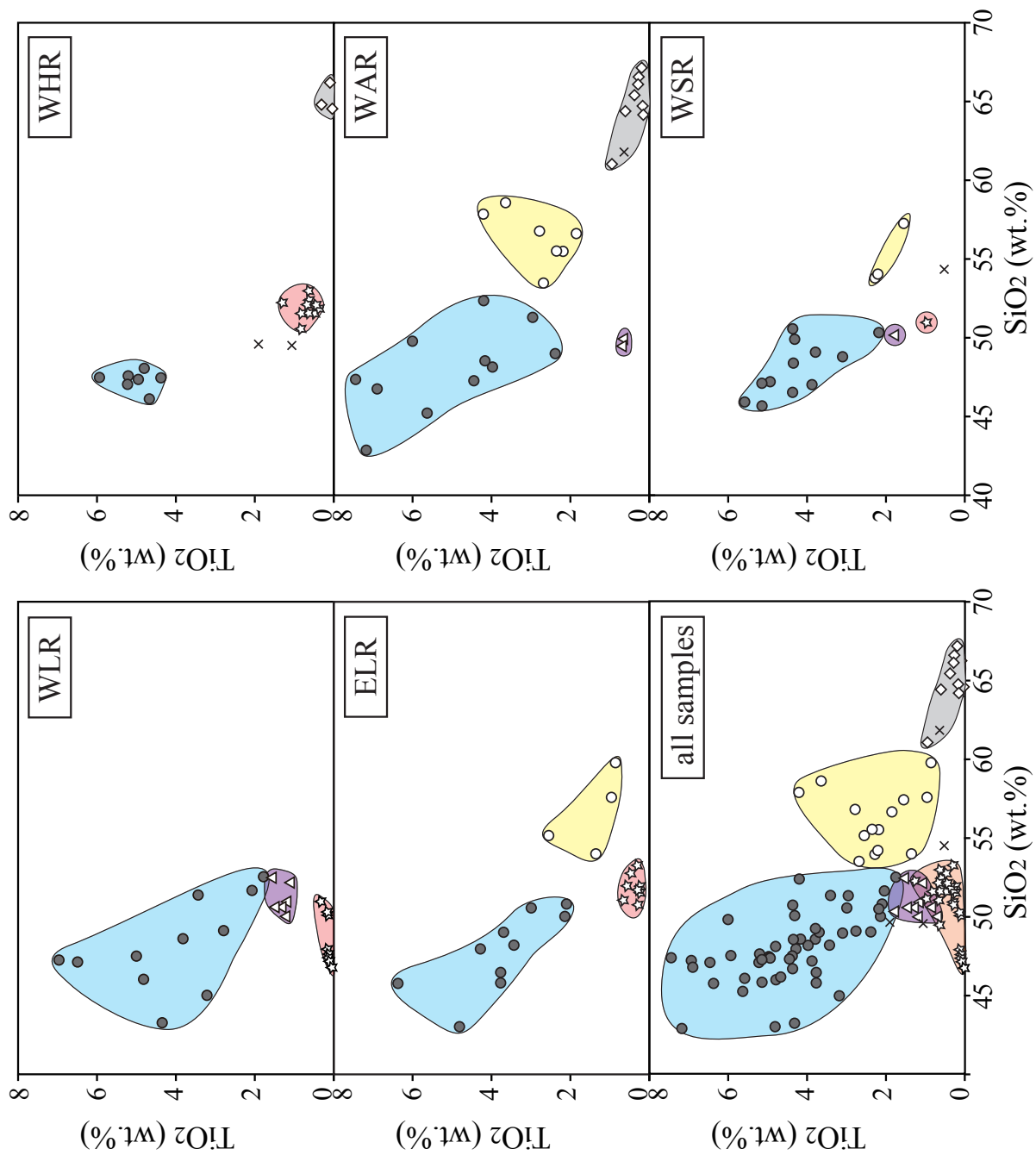


Fig. IV-13b. SiO_2 versus TiO_2 plot of gabbroic rocks of the Godzilla Megamullion for comparison between the topography and classified types.

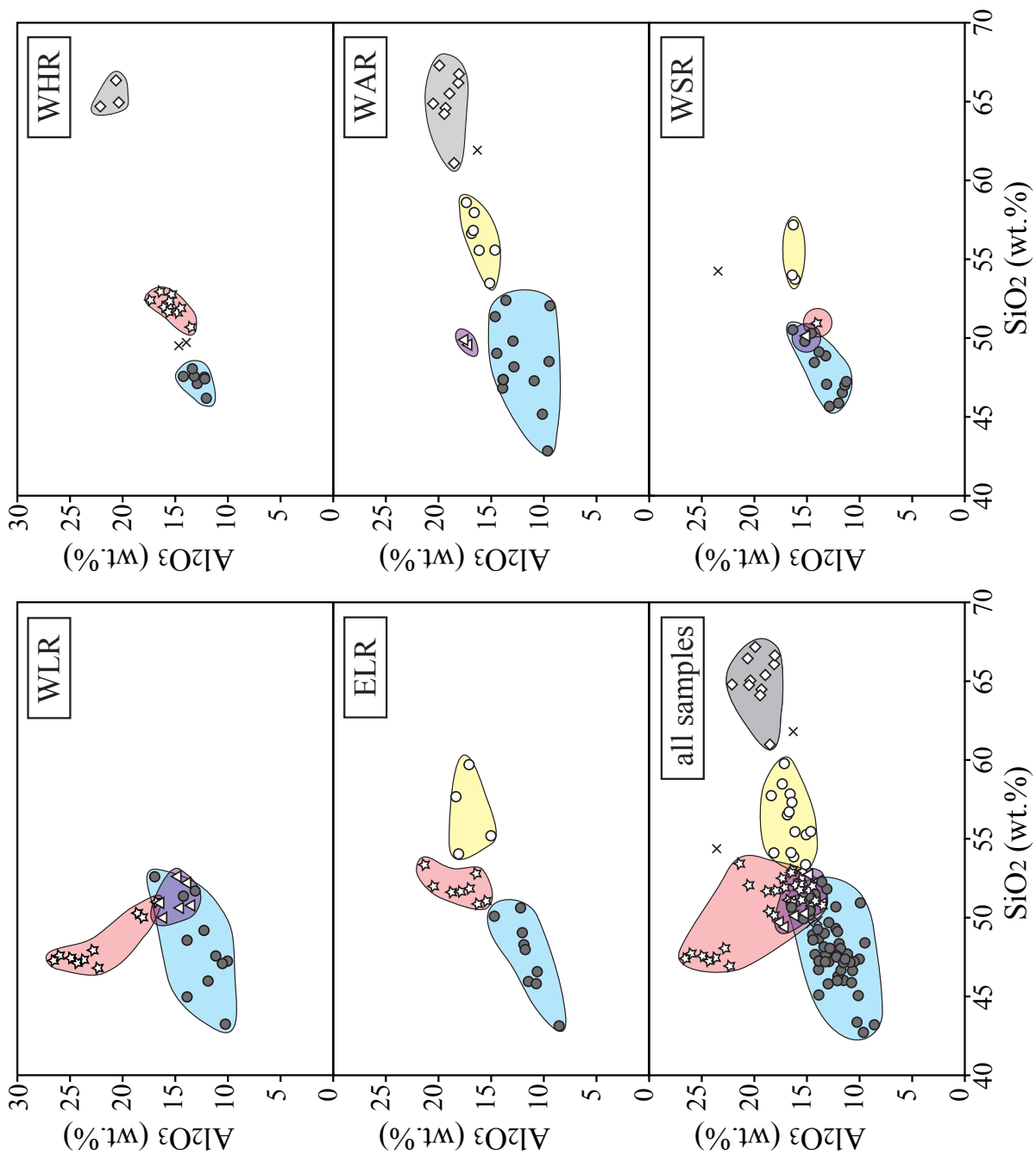


Fig. IV-13c. SiO_2 versus Al_2O_3 plot of gabbroic rocks of the Godzilla Megamullion for comparison between the topography and classified types.

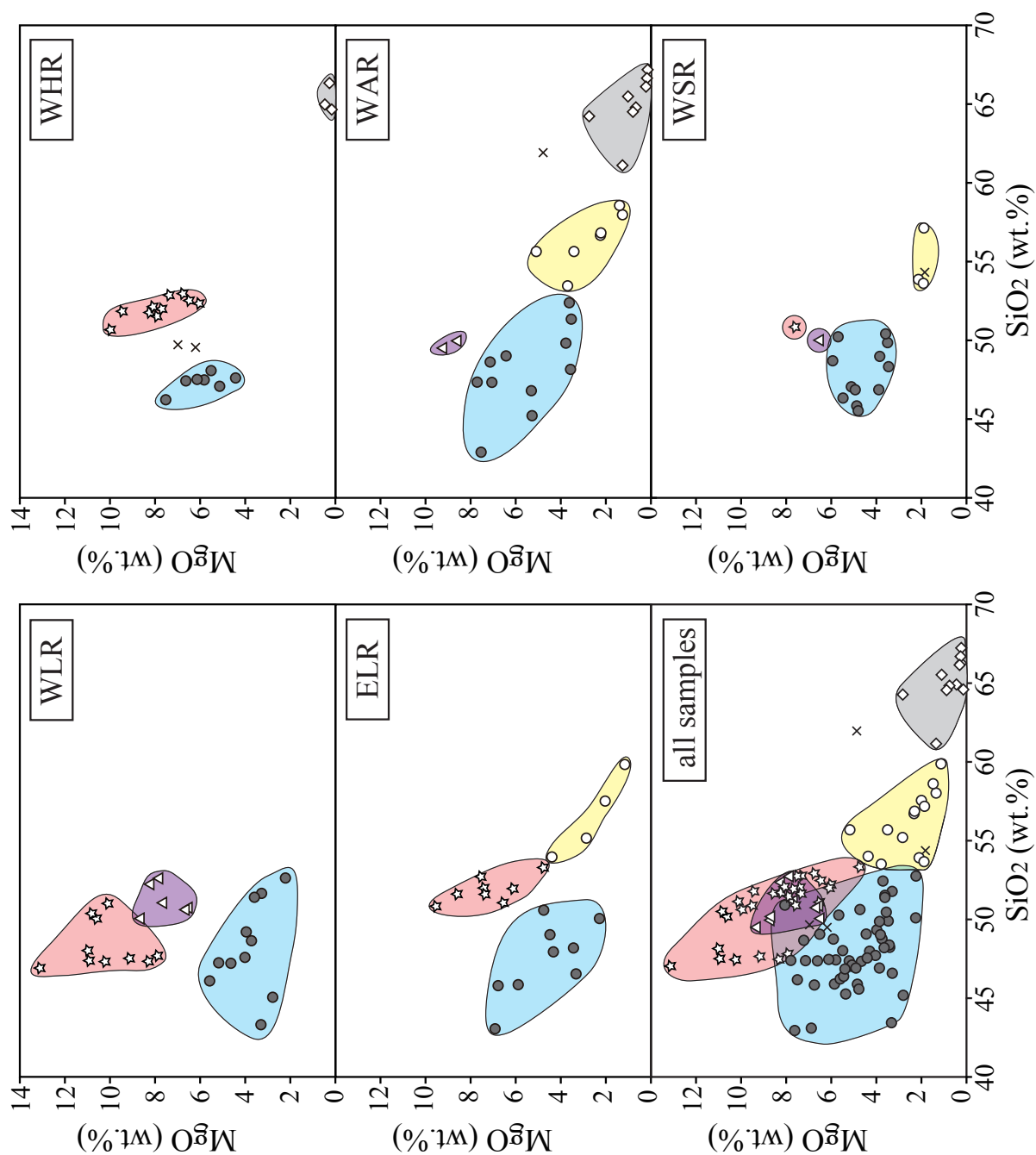


Fig. IV-13d. SiO₂ versus MgO plot of gabbroic rocks of the Godzilla Megamullion for comparison between the topography and classified types.

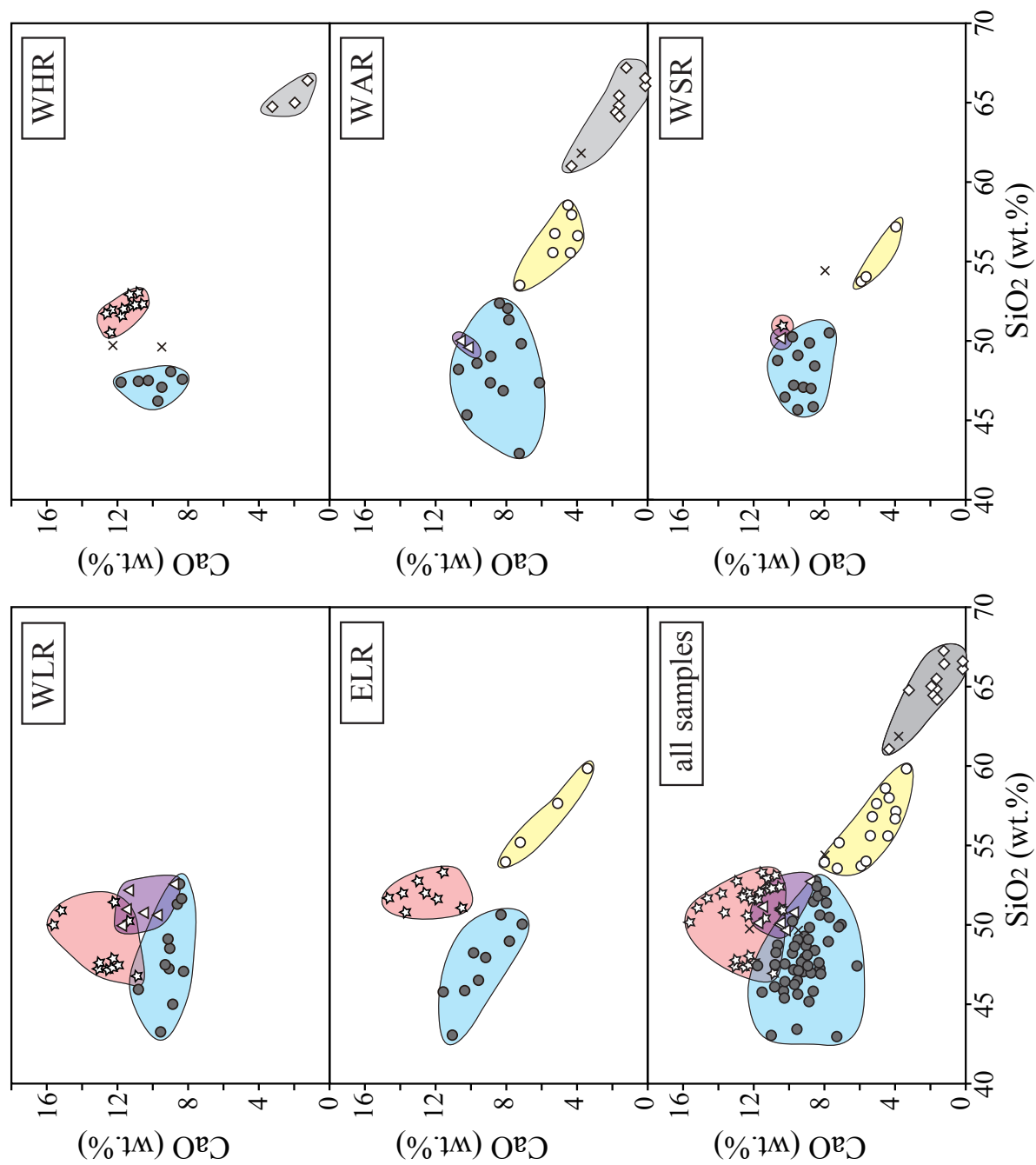


Fig. IV-13e. SiO₂ versus CaO plot of gabbroic rocks of the Godzilla Megamullion for comparison between the topography and classified types.

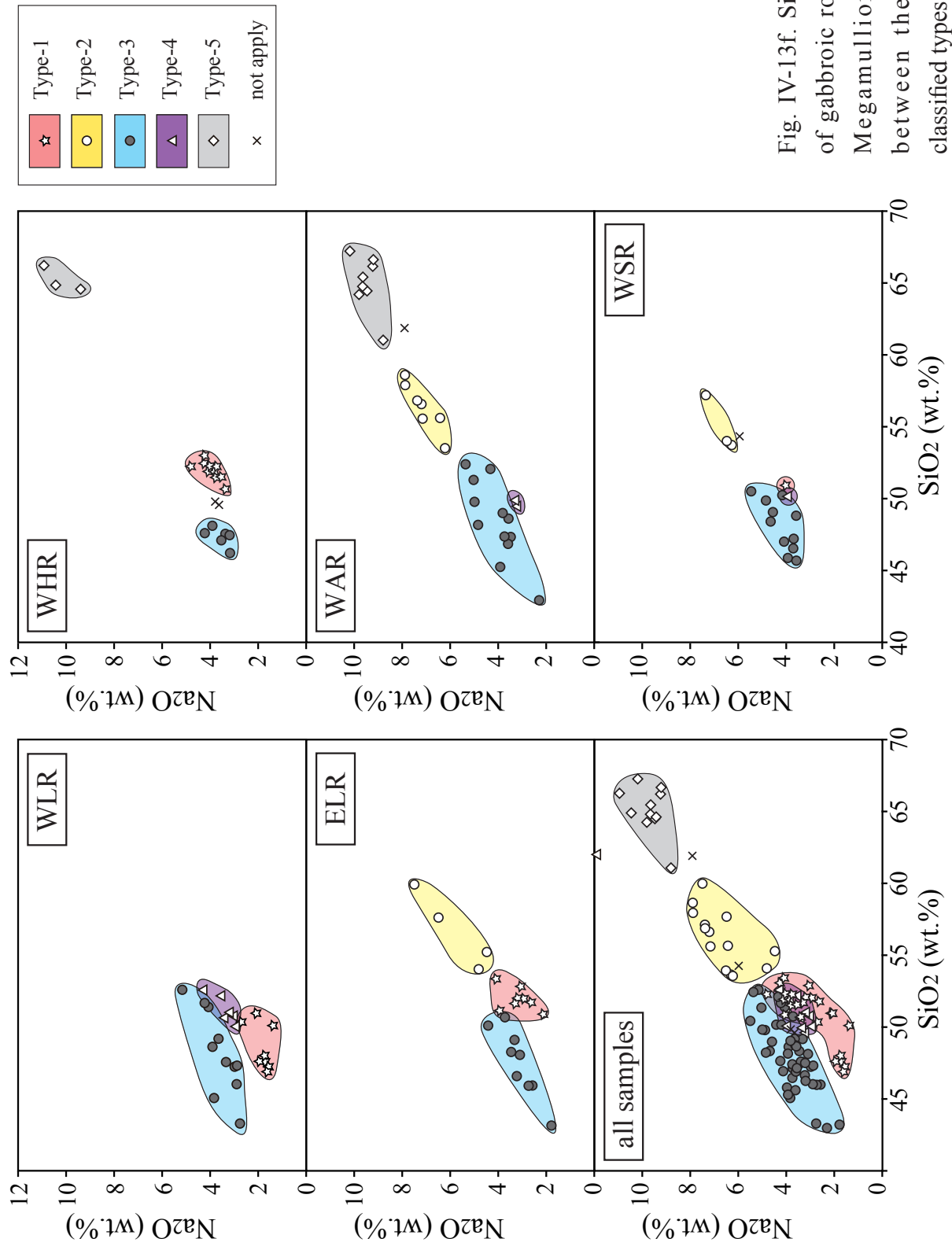


Fig. IV-13f. SiO_2 versus Na_2O plot of gabbroic rocks of the Godzilla Megamullion for comparison between the topography and classified types.

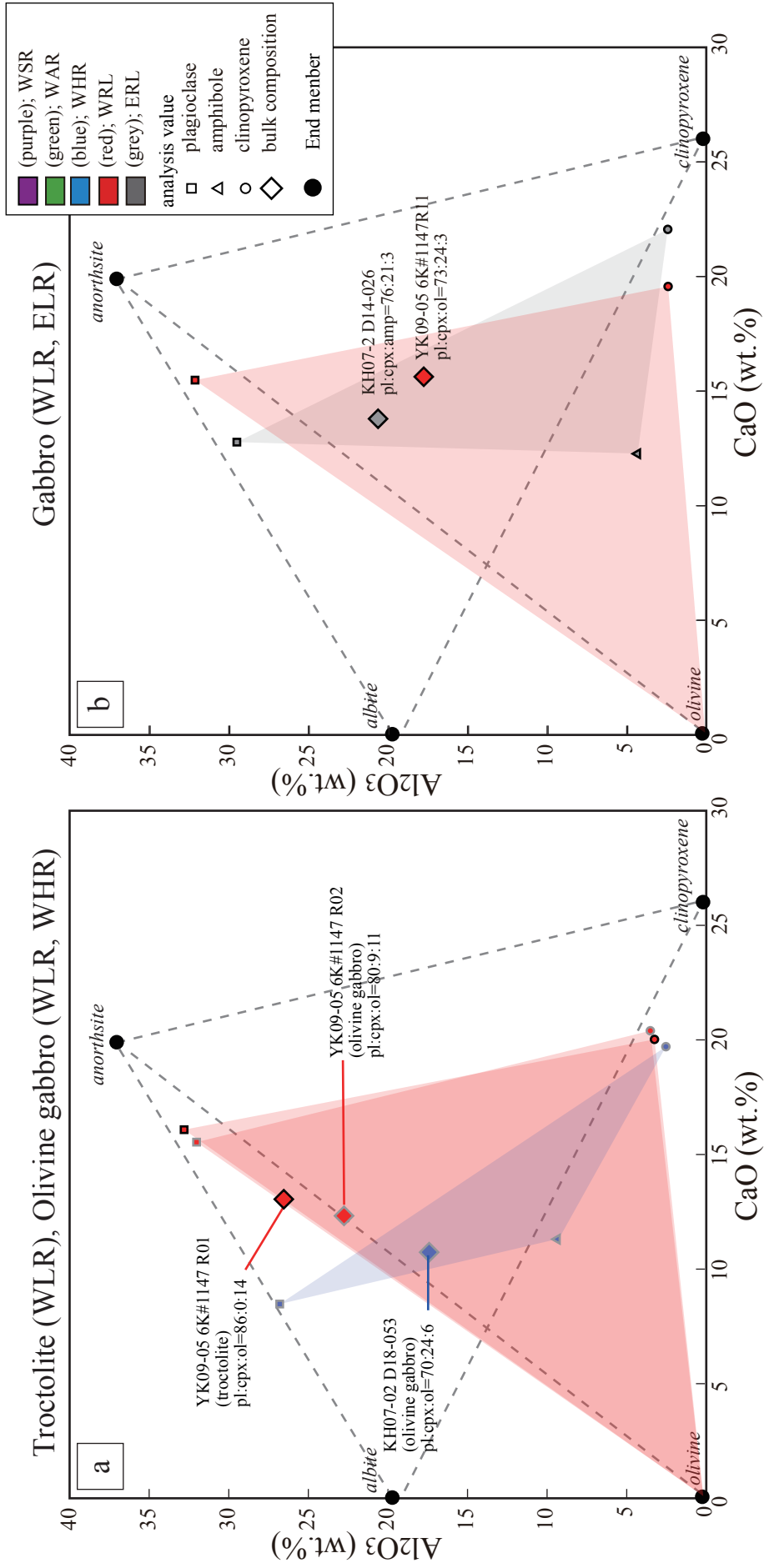


Fig. IV-14. Relationship of bulk composition and analyzed mineral compositions by CaO versus Al₂O₃ plot. Large black circles show end members of olivine, clinopyroxene, anorthite, and albite. Large diamond shows bulk composition of gabbroic rocks. Small symbols show analysis data as square: plagioclase, triangle: amphibole, circle: clinopyroxene. Text in figure means sample number and modal composition. Bulk composition of gabbroic rocks is controlled by mineral compositions and modal compositions. a: troctolite and olivine gabbro, b: gabbro.

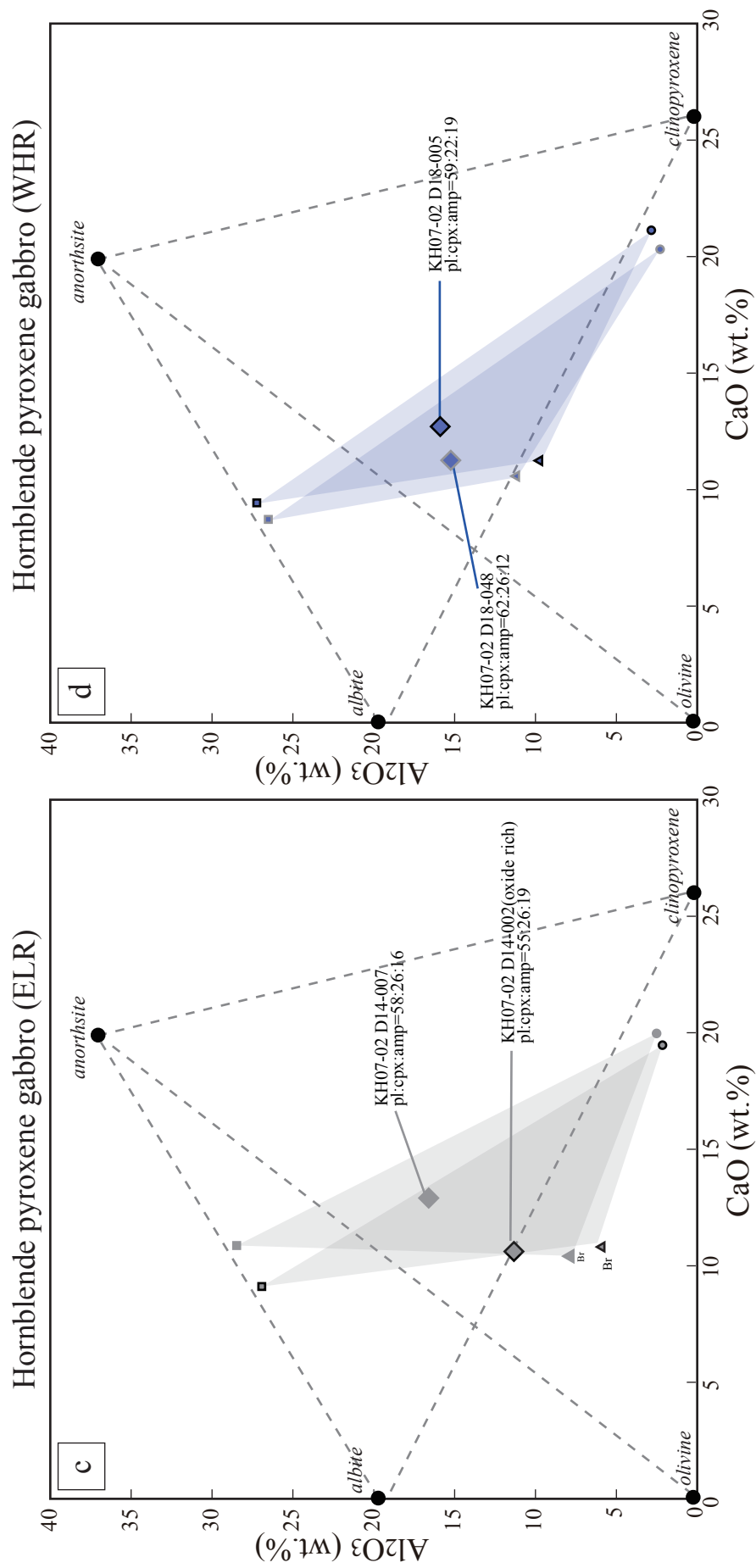


Fig. IV-14. continued. c: hornblende pyroxene gabbro (ELR), d: hornblende pyroxene gabbro (WHR).

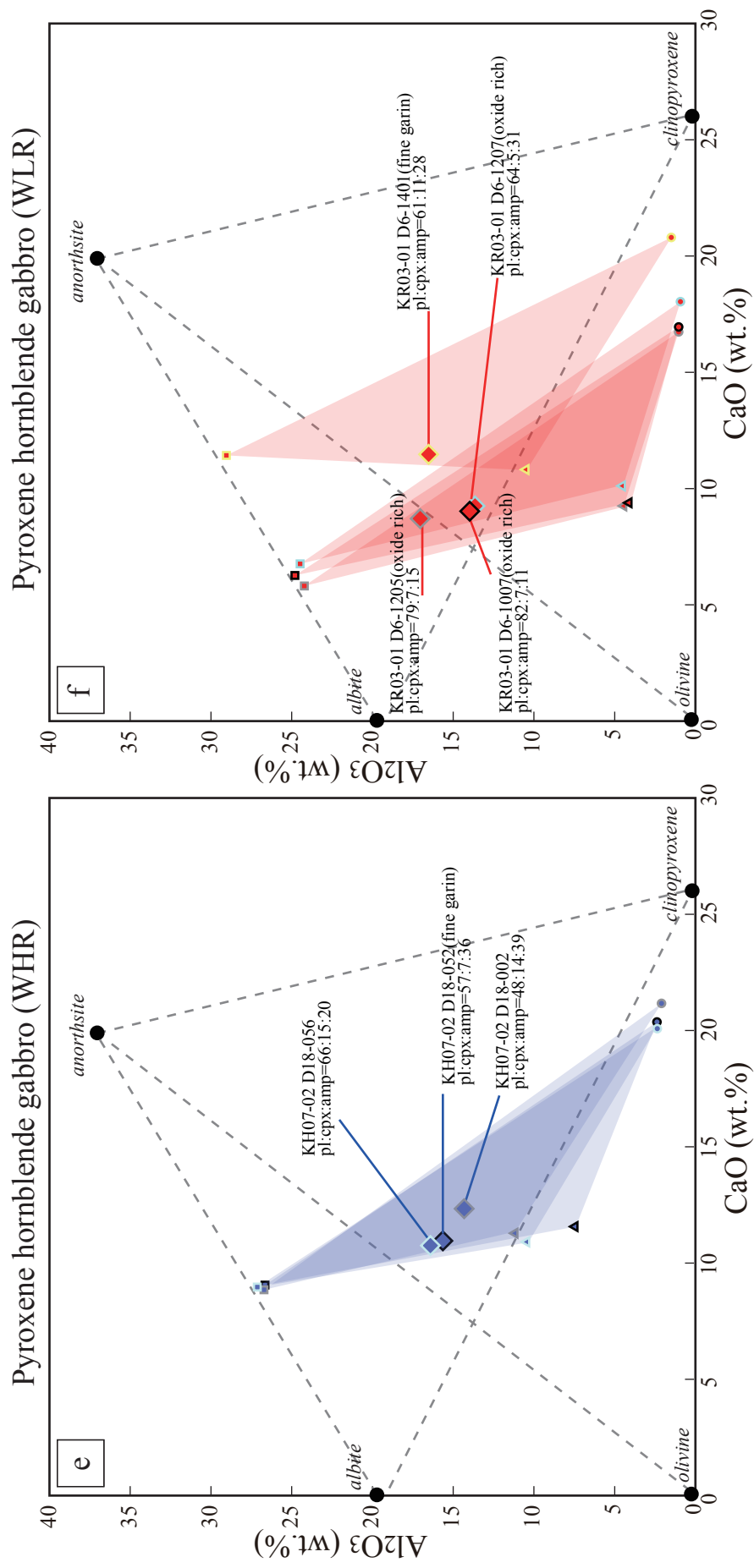


Fig. IV-14. continued. e: pyroxene hornblende gabbro (WGR), f: pyroxene hornblende gabbro (WLR).

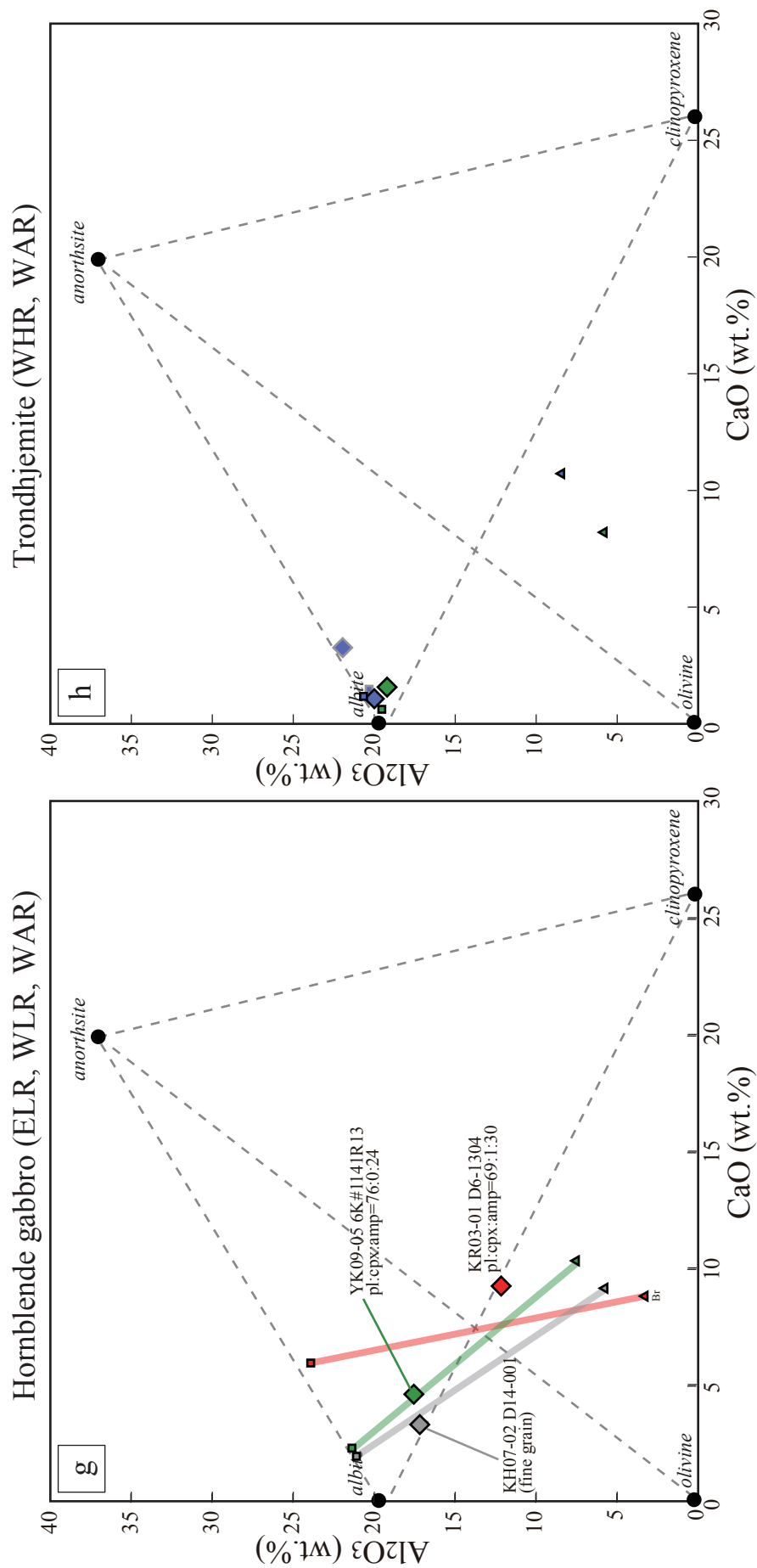


Fig. IV-14. continued. g: hornblende gabbro, h: trondhjemite.

APPENDIX 5 Figures (chapter V)

- Fig. V-1. Volume fraction of phases in the MELTS calculation results at 1000 bars, QFM buffer, dry condition, and various starting materials.
- Fig. V-2. Volume fraction of phases in the MELTS calculation results at 1000 bars, dry, and various fO_2 conditions.
- Fig. V-3. Volume fraction of phases in the MELTS calculation results at 1500 bars, QFM buffer, and various H_2O contents.
- Fig. V-4. The best results of volume fraction of phases in the MELTS calculation results at 1500 bars and QFM buffer.
- Fig. V-5. Result of MELTS calculation for example SiO_2 versus $FeOt$ plot at 1500 bars and QFM buffer.
- Fig. V-6. Harker diagrams of the calculated residual melt and crystal accumulation compositions comparing classified types (Fig IV-13a–f).
- Fig. V-7. Volume fraction of phases in the MELTS calculation, mass balance calculation, and residual melt mineral assemblage.
- Fig. V-8. Pyroxene hornblende gabbro, hornblende gabbro and trondhjemite intrusion of West Arm Rise, and comparison by Nb – Zr plots.
- Fig. V-9. Harker diagrams of bulk compositions of gabbroic rocks from WHR and massbalance calculation result.
- Fig. V-10. Harker diagrams of bulk compositions of gabbroic rocks from WAR and massbalance calculation result.
- Fig. V-11. Harker diagrams of the calculated residual melt and crystal accumulation compositions in comparison with WLR gabbroic rocks.
- Fig. V-12. Harker diagrams of the calculated residual melt and crystal accumulation compositions in comparison with ELR gabbroic rocks.
- Fig. V-13. Harker diagrams of the calculated residual melt and crystal accumulation compositions in comparison with WHR gabbroic rocks.
- Fig. V-14. Harker diagrams of the calculated residual melt and crystal accumulation compositions in comparison with WAR gabbroic rocks.
- Fig. V-15. Harker diagrams of the calculated residual melt and crystal accumulation compositions in comparison with WSR gabbroic rocks.
- Fig. V-16. SiO_2 versus TiO_2 plot of the calculated residual melt and crystal accumulation compositions in comparison with the topography.
- Fig. V-17. SiO_2 versus Al_2O_3 plot of the calculated residual melt and crystal accumulation compositions in comparison with the topography.
- Fig. V-18. SiO_2 versus $FeOt$ plot of the calculated residual melt and crystal accumulation compositions in comparison with the topography.

- Fig. V-19. SiO₂ versus MgO plot of the calculated residual melt and crystal accumulation compositions in comparison with the topography.
- Fig. V-20. SiO₂ versus CaO plot of the calculated residual melt and crystal accumulation compositions in comparison with the topography.
- Fig. V-21. SiO₂ versus Na₂O plot of the calculated residual melt and crystal accumulation compositions in comparison with the topography.
- Fig. V-22. Temperature versus calculated and observed mineral compositions.
- Fig. V-23. Temperature versus density plots by MELTS calculation results at 1500 bars, QFM buffer, and 0.02 wt. % or 0.5 wt. % H₂O added.

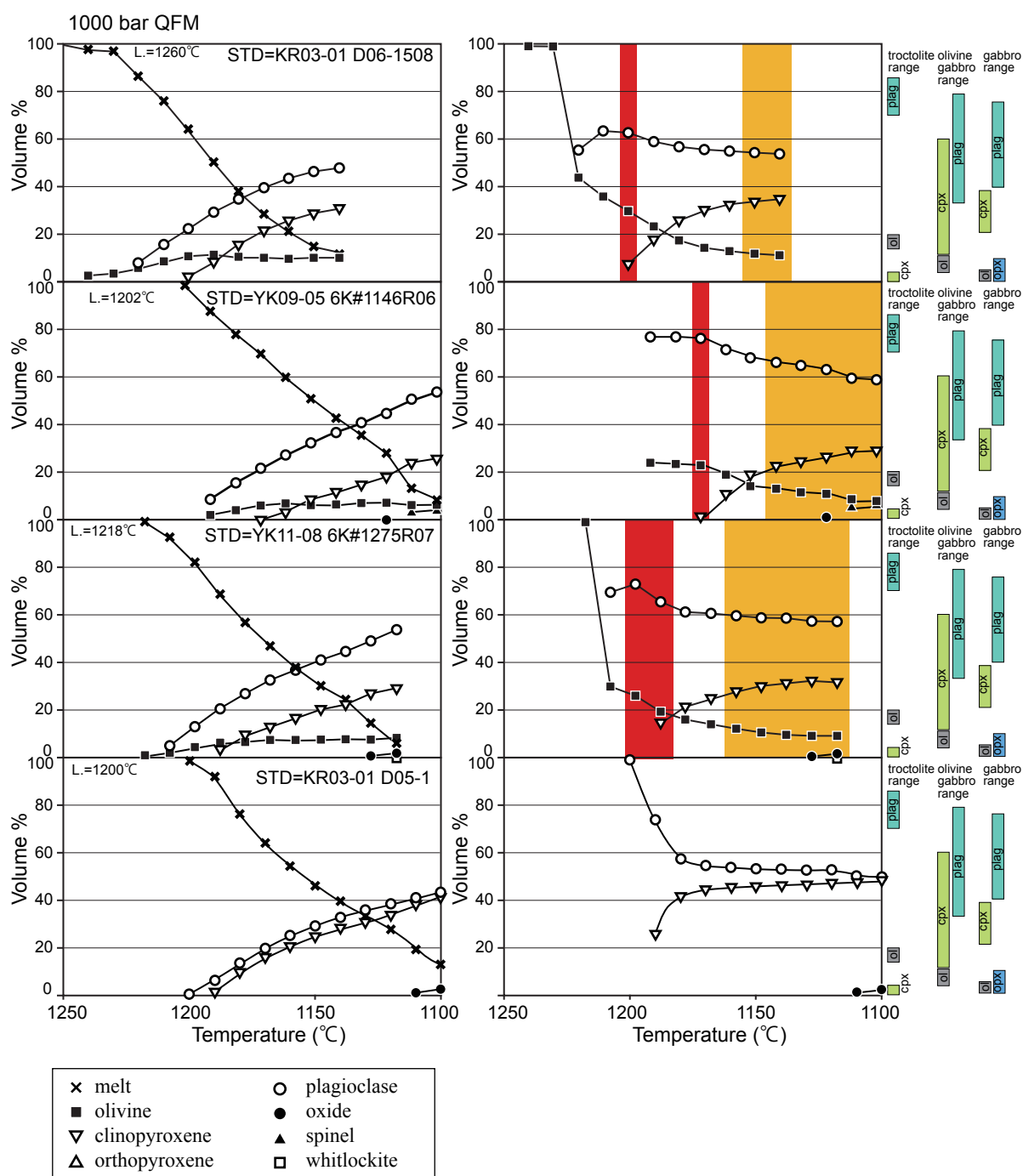


Fig. V-1. Volume fraction of phases in the MELTS calculation results at 1000 bars, QFM buffer, dry condition, and various starting materials. Left side was calculated by including residual melt volume. Right side was calculated without residual melt volume. KR03-01 D06-1508 is fine basalt at WLR (Sato., in preparation). YK09-05 6K#1146R06 is olivine pillow basalt at WHR (Yamashita, unpublished data). YK11-08 6K#1275R07 is fresh glass at NP (Ishizuka, in preparation). KR03-01 D05-1 is quartz tholeiite aphyric basalt at abyssal hill south of breakaway (Yamashita, unpublished data). Red and orange ranges in the figure indicate troctolite mineral assembly and olivine gabbro mineral assembly, respectively, by MELTS calculation. Right-side color bars indicate mineral assemblages of gabbroic rocks by observation. 'L.': liquid temperature.

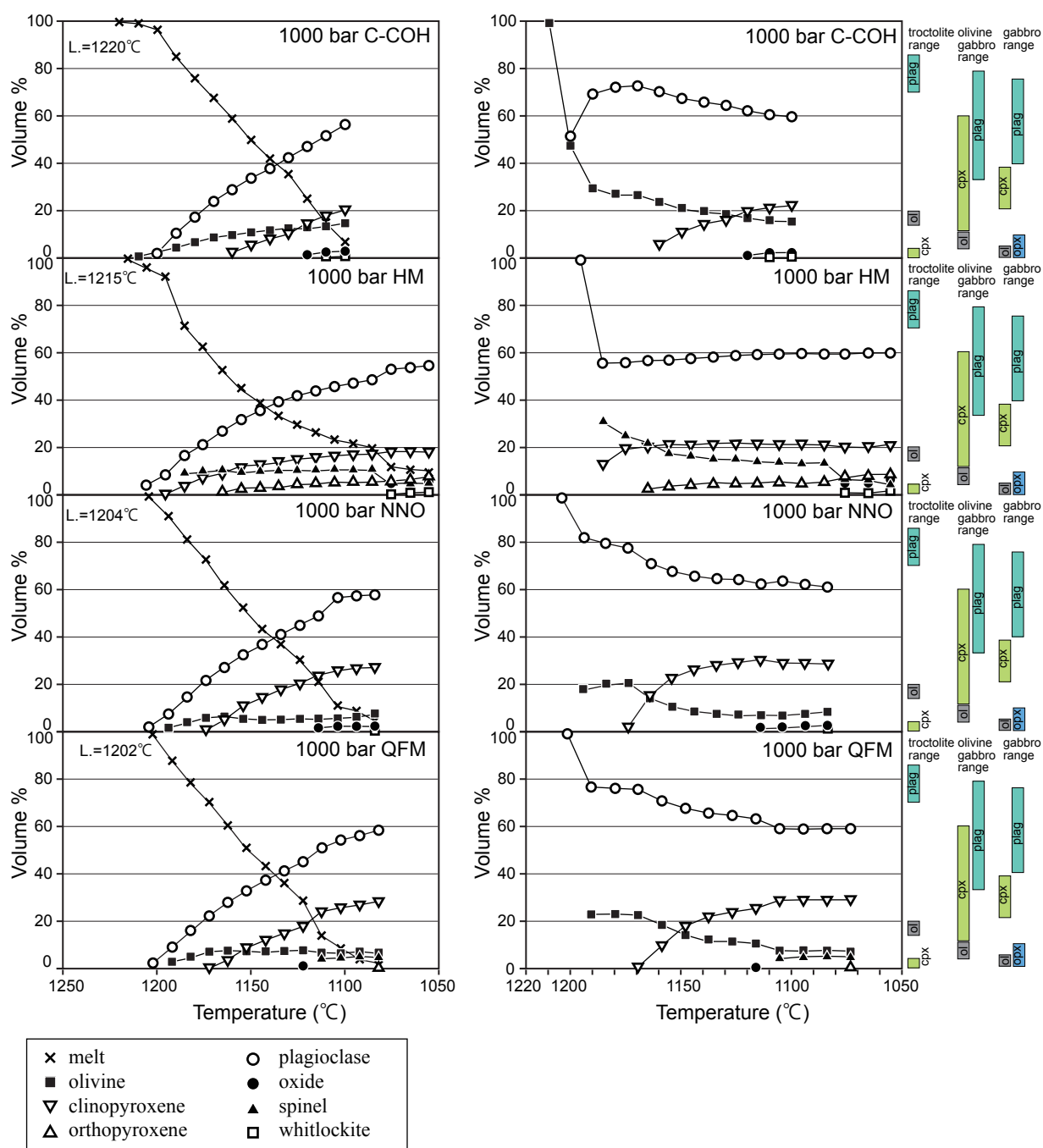


Fig. V-2. Volume fraction of phases in the MELTS calculation results at 1000 bars, dry, and various fO_2 conditions. Left side was calculated by including residual melt volume. Right side was calculated without residual melt volume. Starting material is YK09-05 6K#1146R06 (Yamashita, unpublished data). Right-side color bars indicate mineral assemblages of gabbroic rocks by observation. 'L.': liquid temperature.

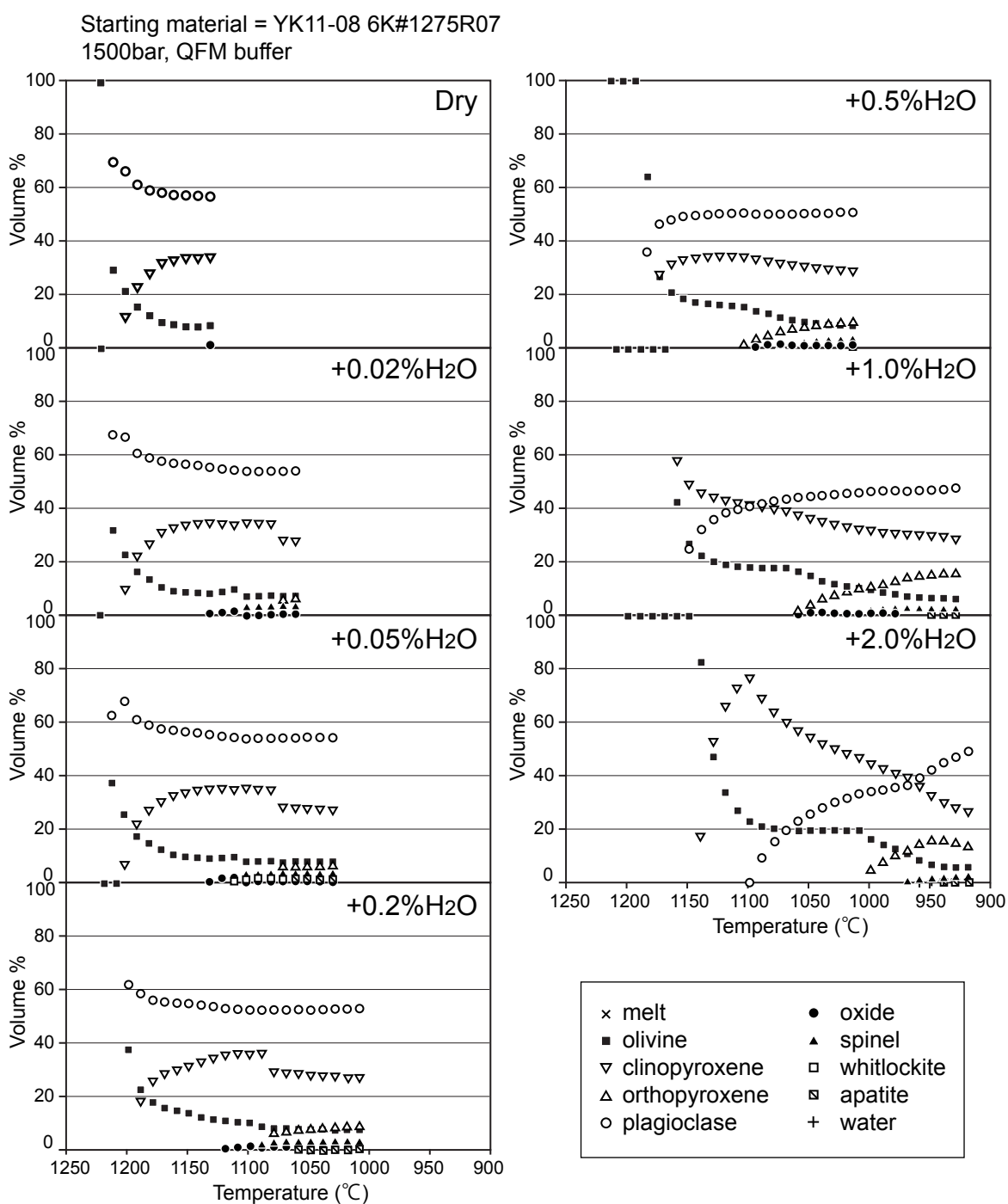


Fig. V-3. Volume fraction of phases in the MELTS calculation results at 1500 bars, QFM buffer, and various H₂O contents. Starting material is YK11-08 6K#1275R07 (Ishizuka, in preparation).

STM=YK11-08 6K#1275R07, 1500bar, QFM buffer

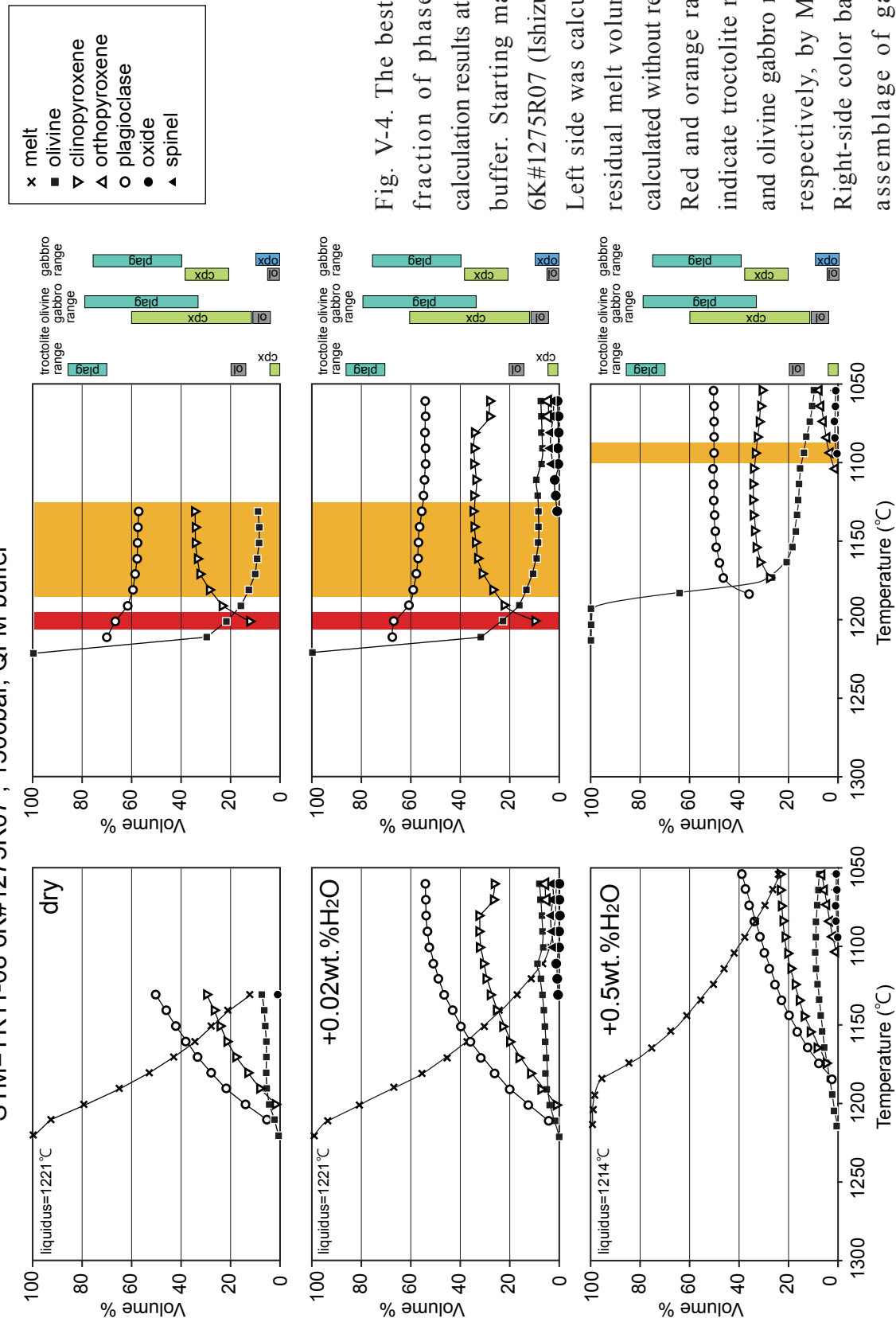


Fig. V-4. The best results of volume fraction of phases in the MELTS calculation results at 1500 bars and QFM buffer. Starting material is YK11-08 6K#1275R07 (Ishizuka, in preparation). Left side was calculated by including residual melt volume. Right side was calculated without residual melt volume. Red and orange ranges in the figure indicate troctolite mineral assemblage and olivine gabbro mineral assemblage, respectively, by MELTS calculation. Right-side color bars indicate mineral assemblage of gabbroic rocks by observation. 'L.': liquid temperature.

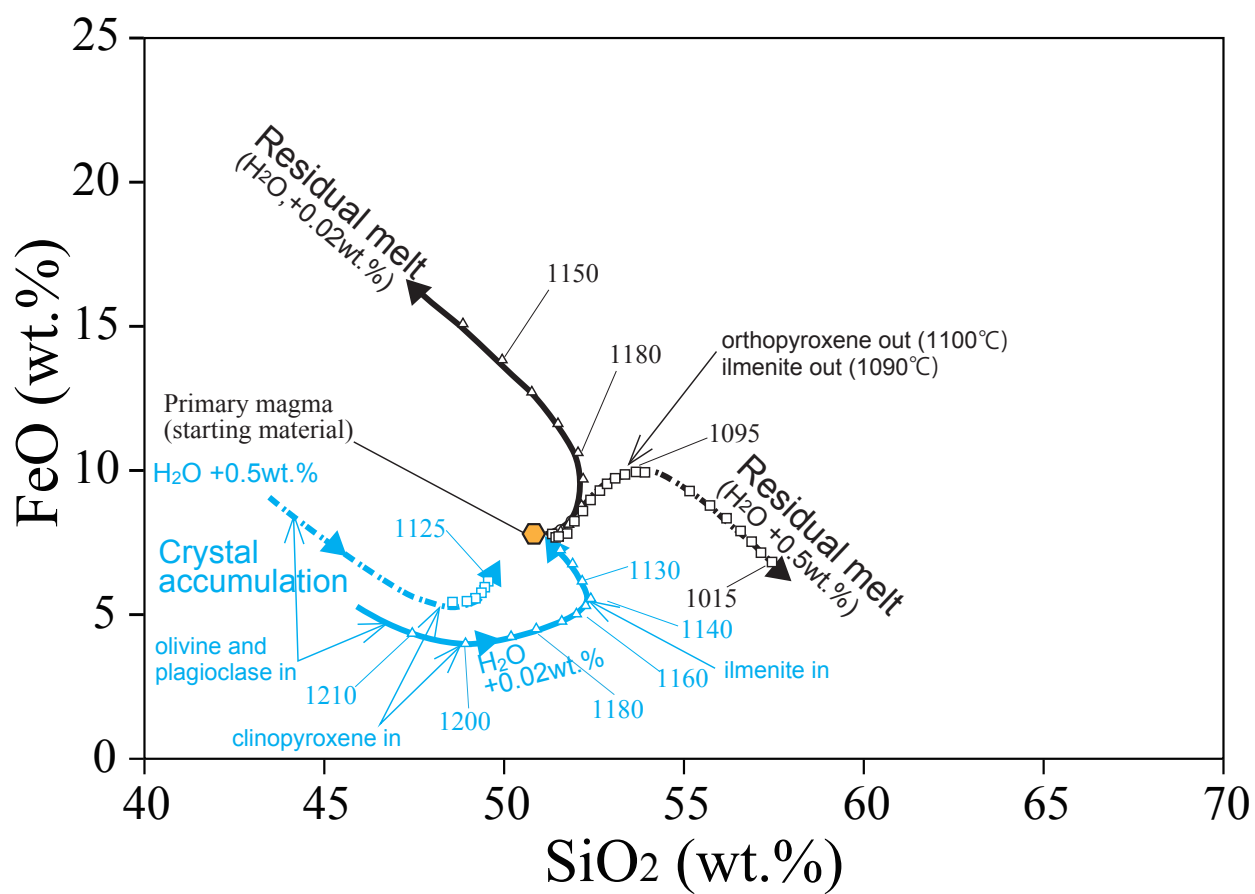


Fig. V-5. Result of MELTS calculation for example SiO₂ versus FeO plot at 1500 bars and QFM buffer. Starting material is YK11-08 6K#1275R07 (Ishizuka, in preparation). Small numbers in figure indicate temperature by MELTS calculation.

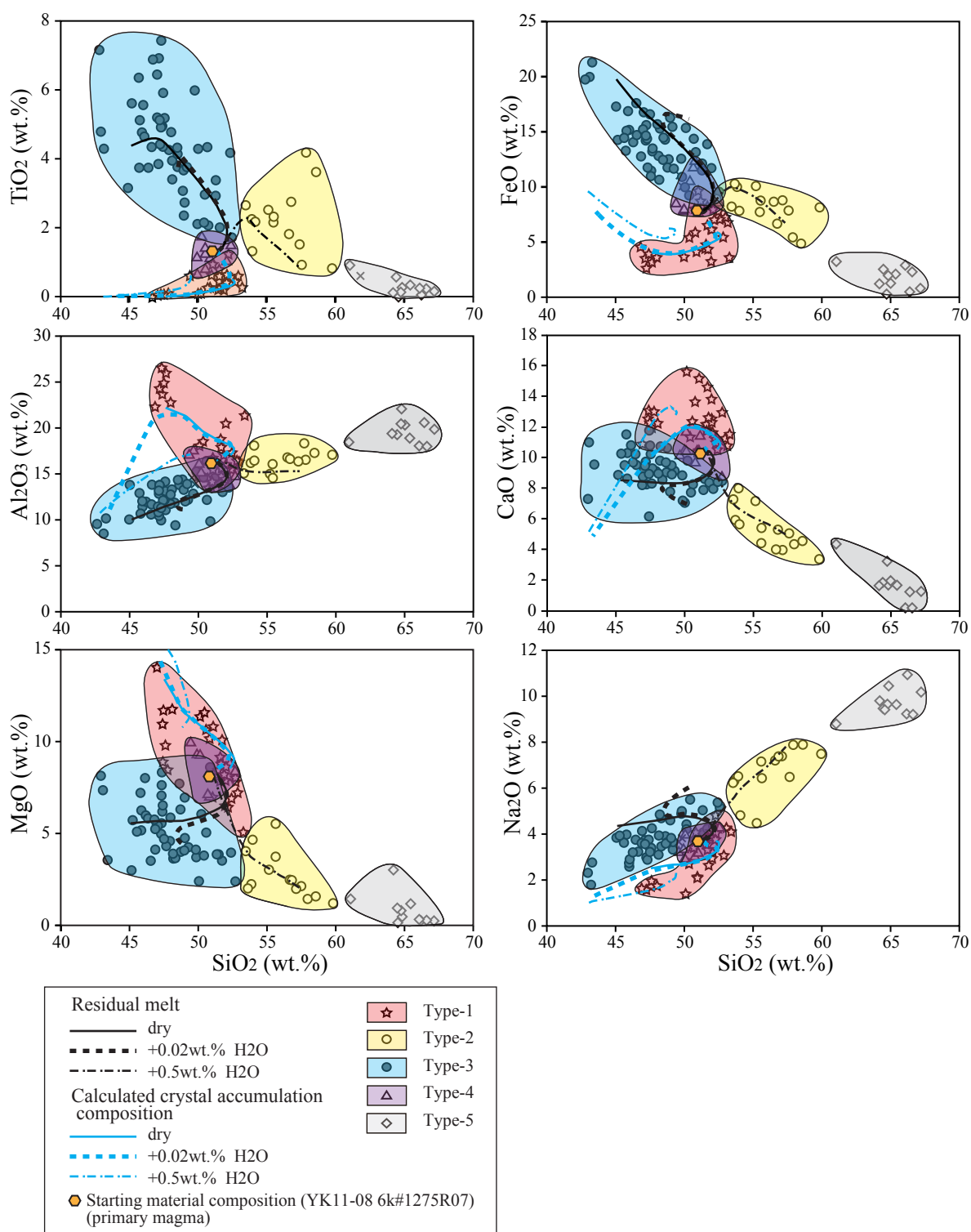


Fig. V-6. Harker diagrams of the calculated residual melt and crystal accumulation compositions comparing classified types (Fig IV-13a–f).

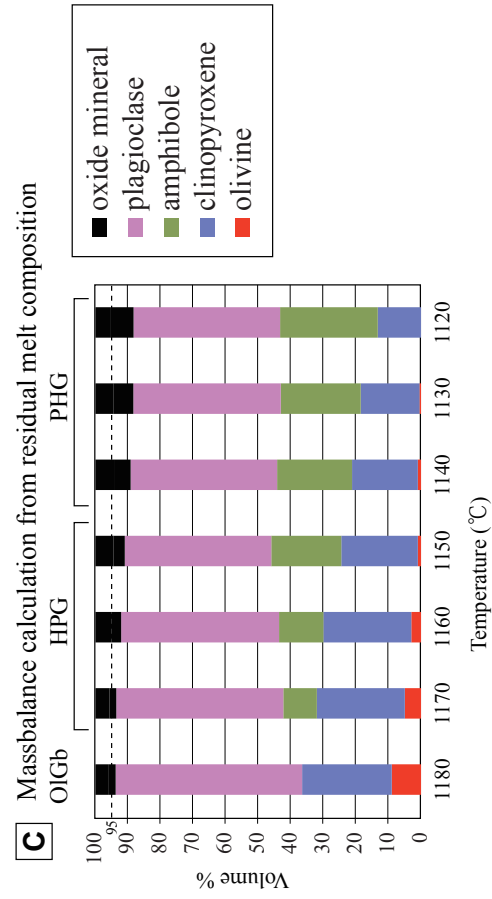
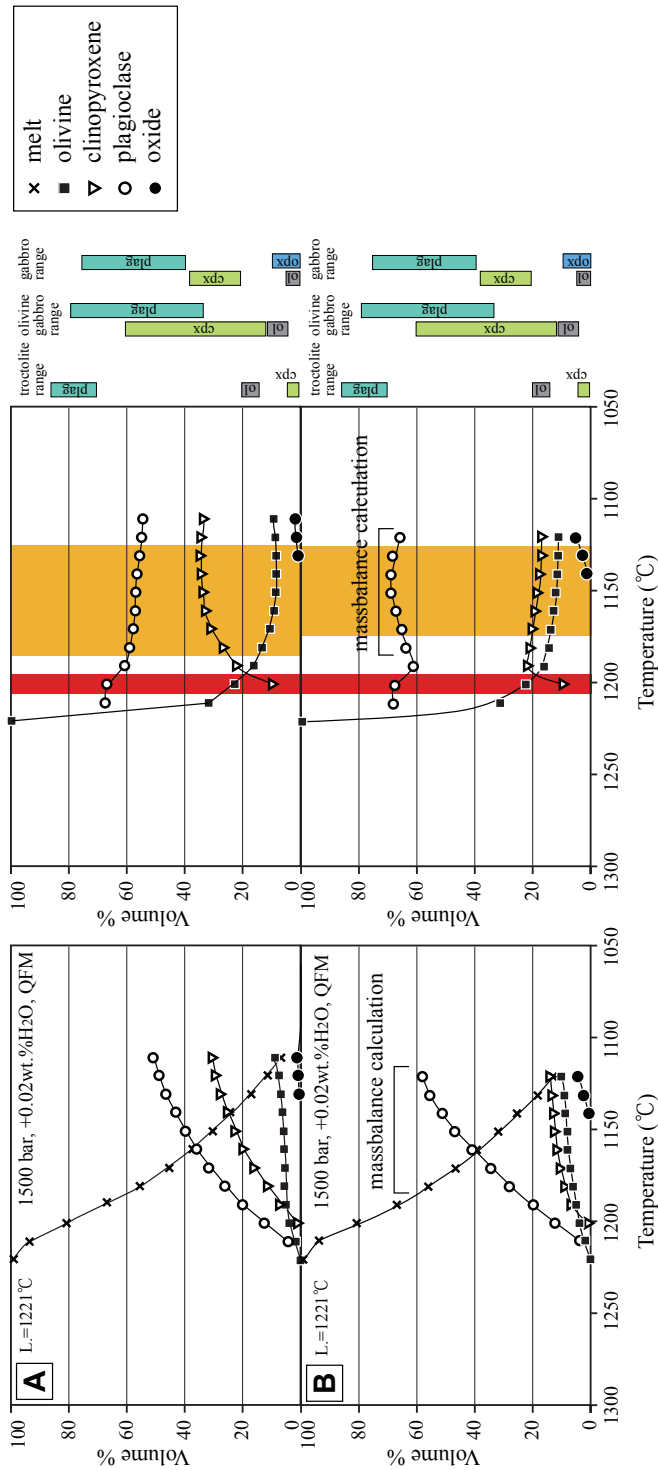


Fig. V-7. Volume fraction of phases in the MELTS calculation, mass balance calculation, and residual melt mineral assemblage. Starting material is YK11-08 6K#1275R07 (Ishizuka, in preparation) and conditions are 1500 bars, QFM buffer, and 0.02 wt. % H₂O added. A: calculated by MELTS results. Red and orange ranges in the figure indicate troctolite mineral assemblage and olivine gabbro mineral assemblage, respectively. Right-side color bars indicate mineral assemblage of gabbroic rocks by observation. 'L.' : liquid temperature, B: calculated by mass balance calculation using observed mineral compositions, C: Mineral assemblage at 1050 to 900 °C derived from the residual melt of 1180 to 1120 °C using mass balance calculations.

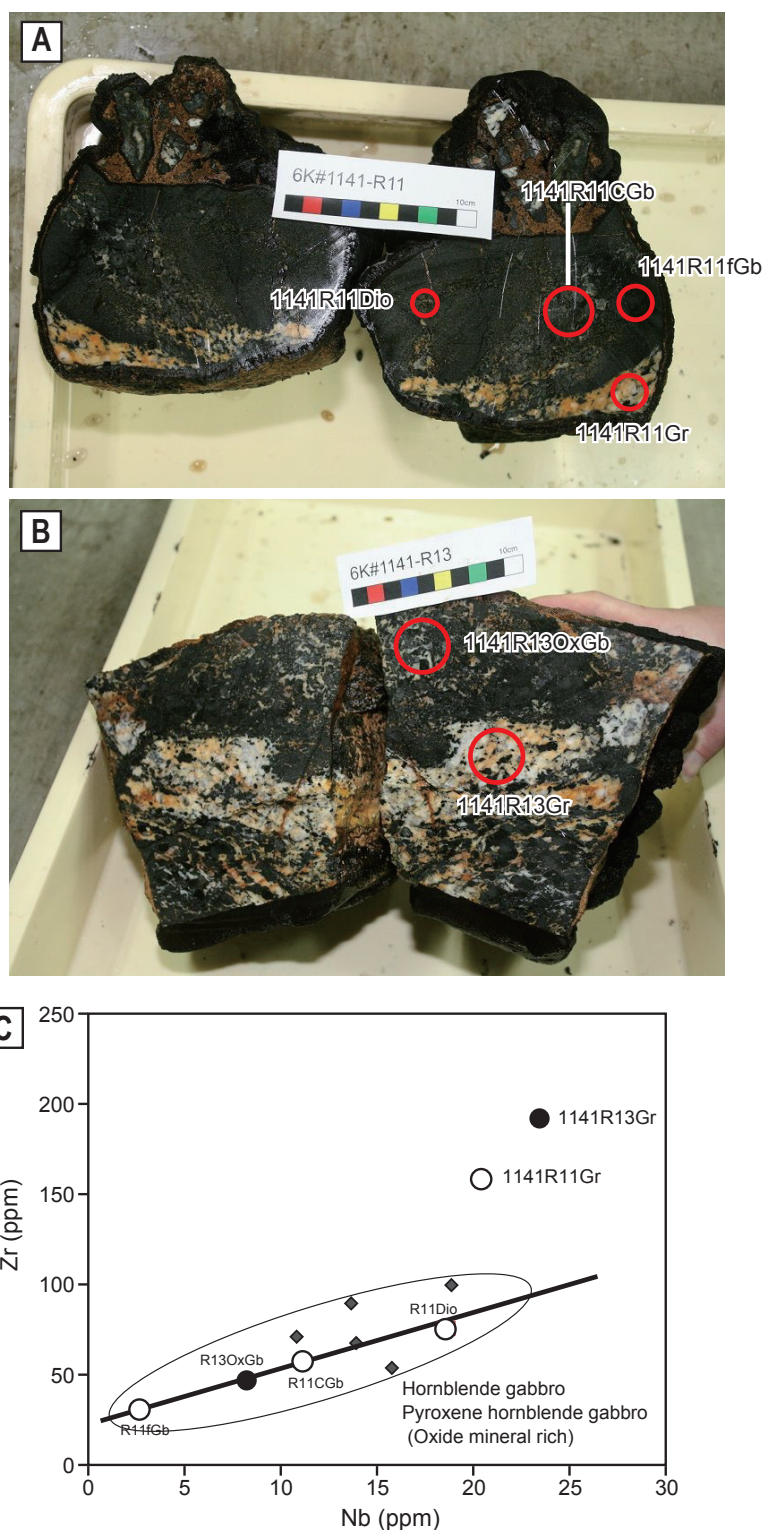


Fig. V-8. Pyroxene hornblende gabbro, hornblende gabbro and trondhjemite intrusion of West Arm Rise, and comparison by Nb – Zr plots. A: Four rock phases including samples of diorite (1141R11Dio), fine grained gabbro (1141R11fGb), coarse grained gabbro (1141R11CGb), and trondhjemite (1141R11Gr) (YK09-05 6K#1141R11), B: Two rock phases including samples of oxide mineral rich coarse grained gabbro (1141R13OxGb) and trondhjemite (1141R13Gr) (YK09-05 6K#1141R13), C: Nb versus Zr plot of gabbroic rocks of WAR. Small solid diamond indicates pyroxene-hornblende gabbro or hornblende gabbro at WAR.

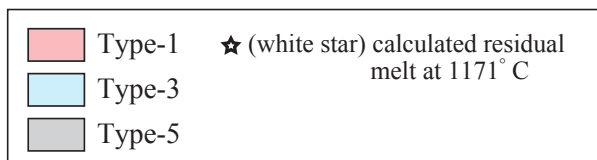
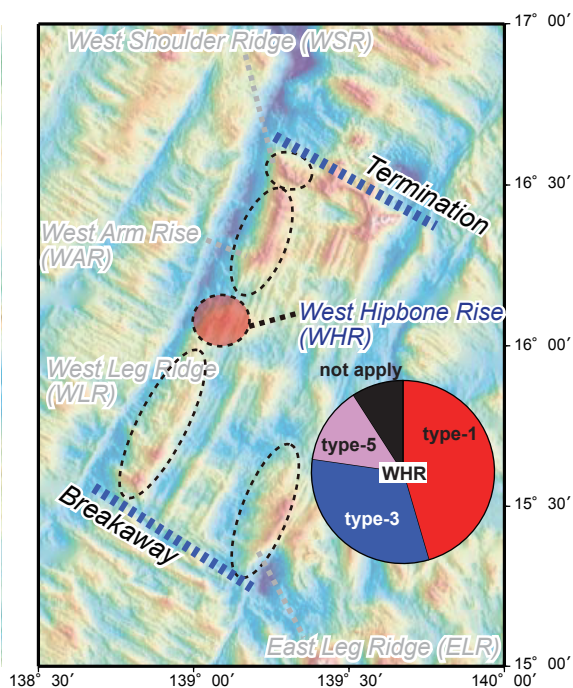
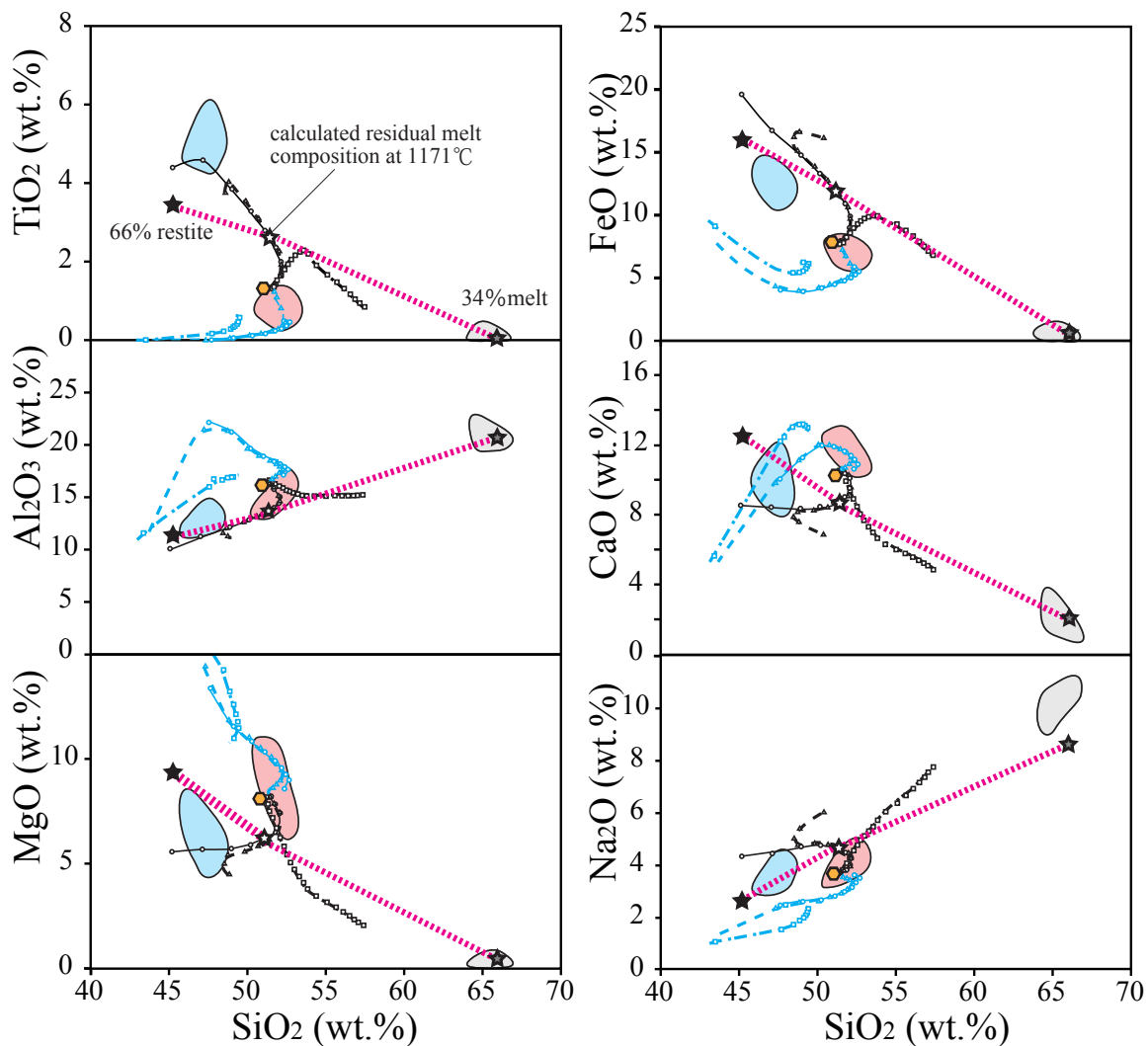


Fig. V-9. Harker diagrams of bulk compositions of gabbroic rocks from WHR and massbalance calculation result. Open star indicates starting material composition (residual melt composition with 0.02 wt. % H_2O added at 1171 °C). Gray star indicates calculated melt composition, such as trondhjemite composition by massbalance calculation. Solid star indicates restite composition. Left-side figure shows index map and ratio of classified types of WHR.

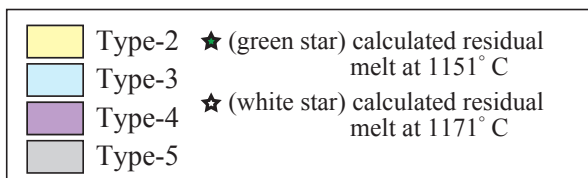
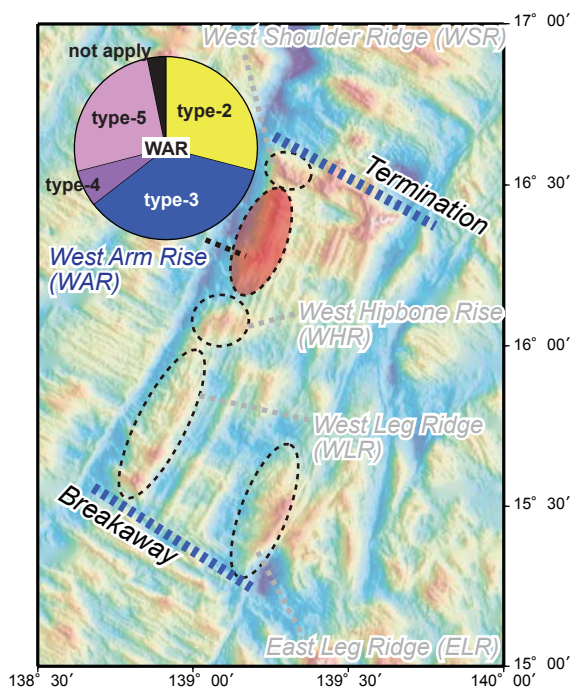
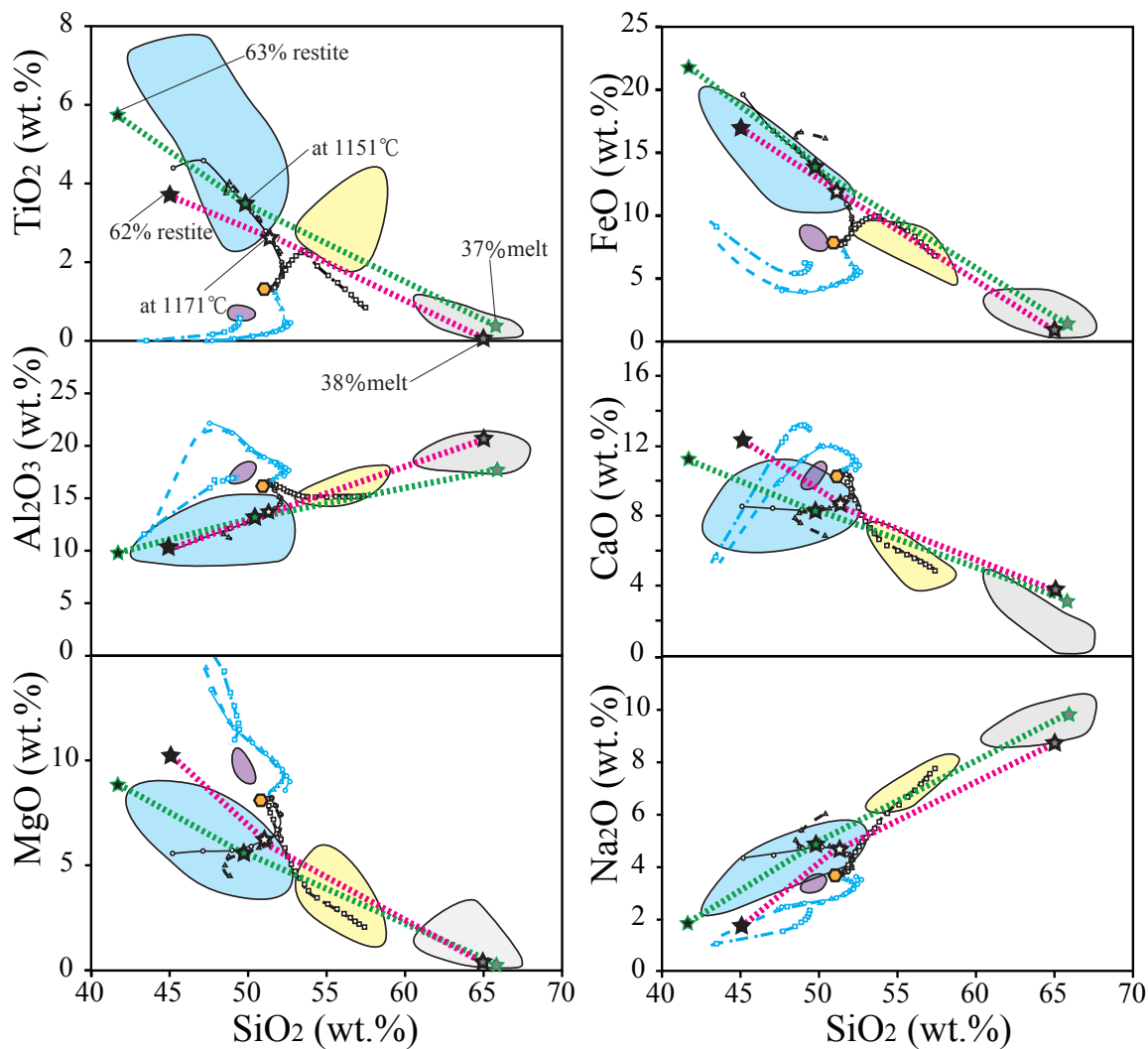


Fig. V-10. Harker diagrams of bulk compositions of gabbroic rocks from WAR and massbalance calculation result. Open star indicates starting material composition (residual melt composition with 0.02 wt. % H_2O added at 1171 °C and 1151 °C). Gray star indicates calculated melt composition such as trondhjemite composition by massbalance calculation. Solid star indicates restite composition. Left-side figure shows index map and ratio of classified types of WAR.

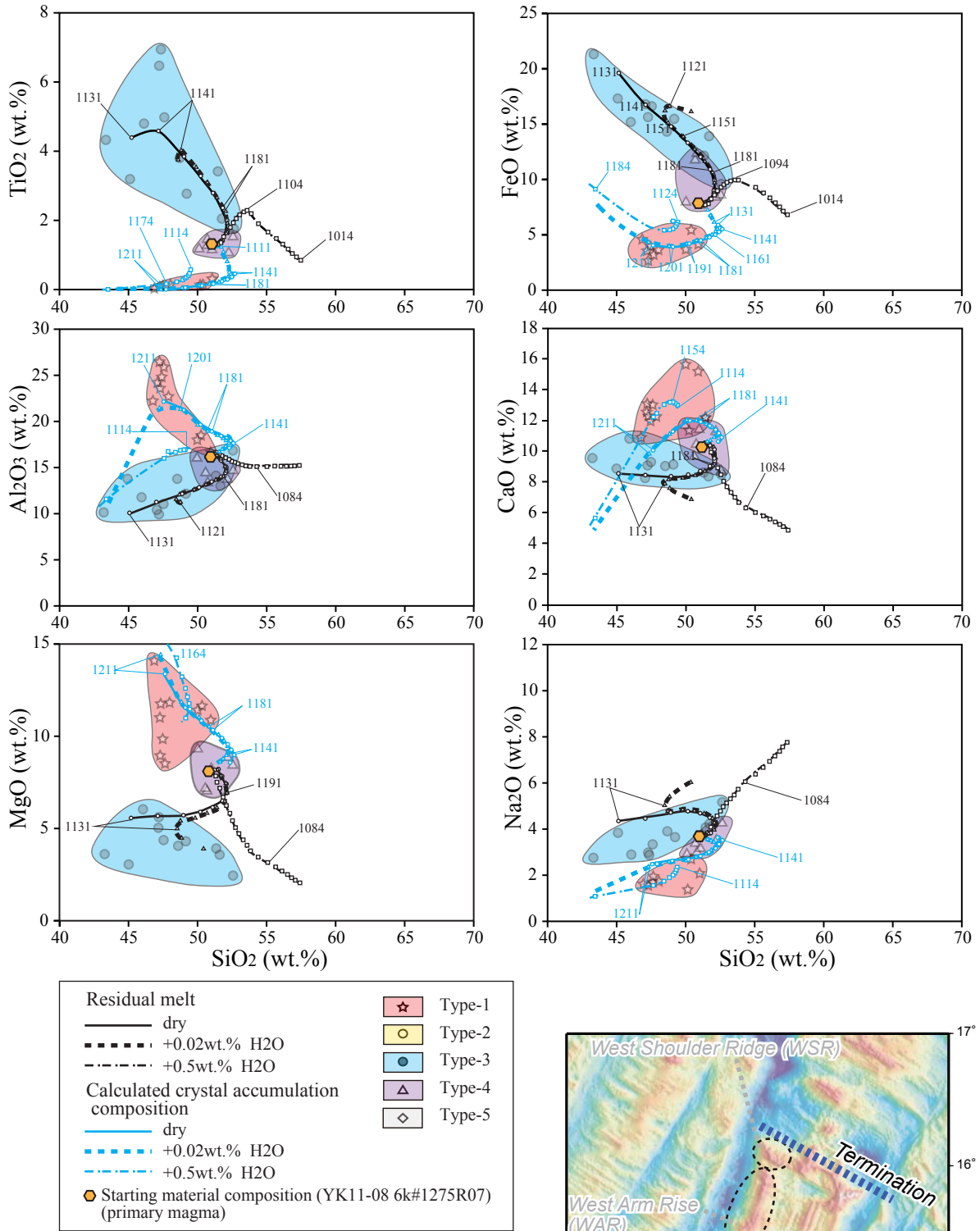


Fig. V-11. Harker diagrams of the calculated residual melt and crystal accumulation compositions in comparison with WLR gabbroic rocks. Calculation conditions are 1500 bars, QFM buffer, and dry to 0.02 wt. %, 0.5 wt. % H₂O added. Starting material is YK11-08 6K#1275R07 glass. Small numbers in figure indicate temperature by MELTS calculation. Right-side figure shows index map and ratio of classified types of WLR.

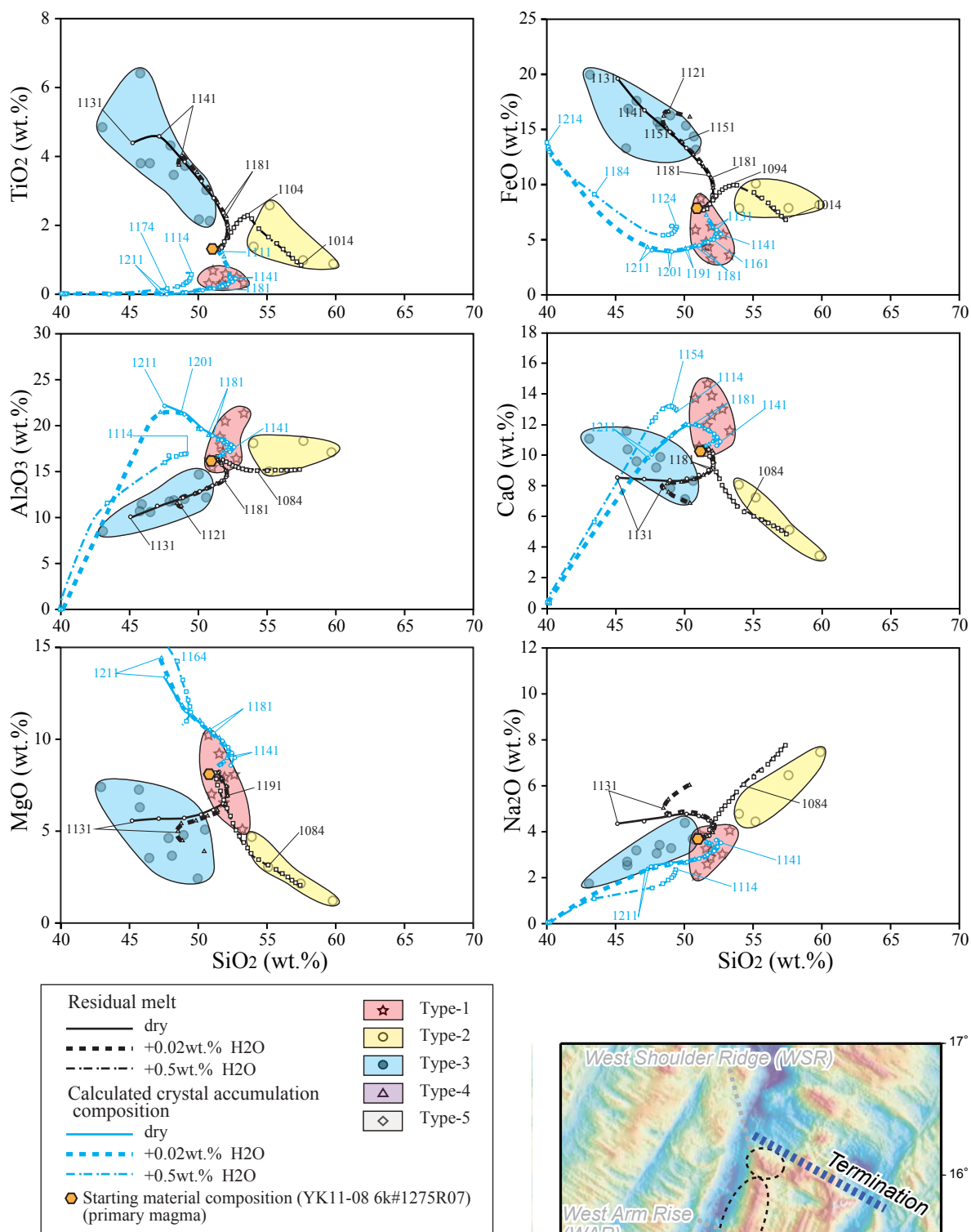
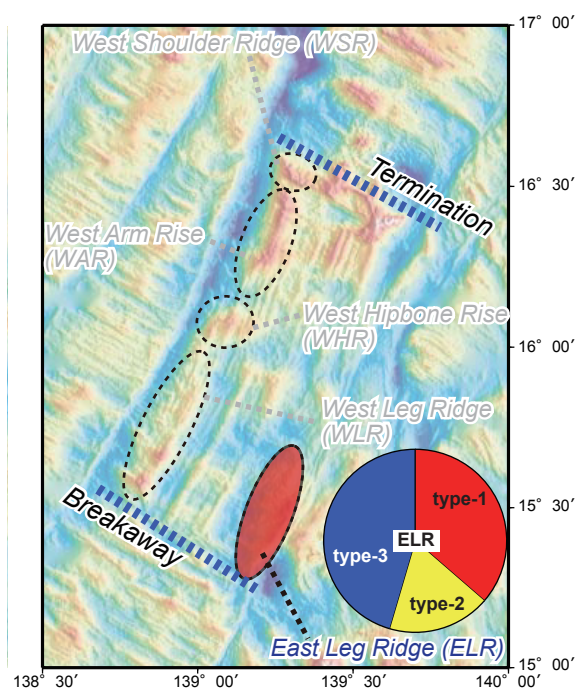


Fig. V-12. Harker diagrams of the calculated residual melt and crystal accumulation compositions in comparison with ELR gabbroic rocks. Calculation conditions are 1500 bars, QFM buffer and dry to 0.02 wt. %, 0.5 wt. % H₂O added. Starting material is YK11-08 6K#1275R07 glass. Small numbers in figure indicate temperature by MELTS calculation. Right-side figure shows index map and ratio of classified types of ELR.



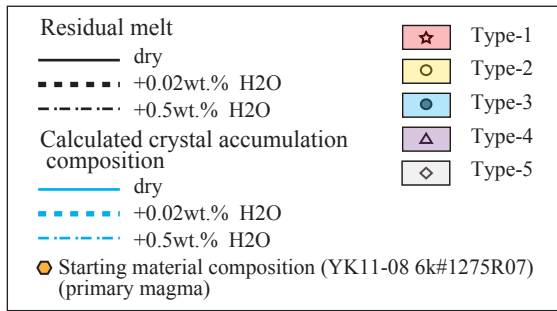
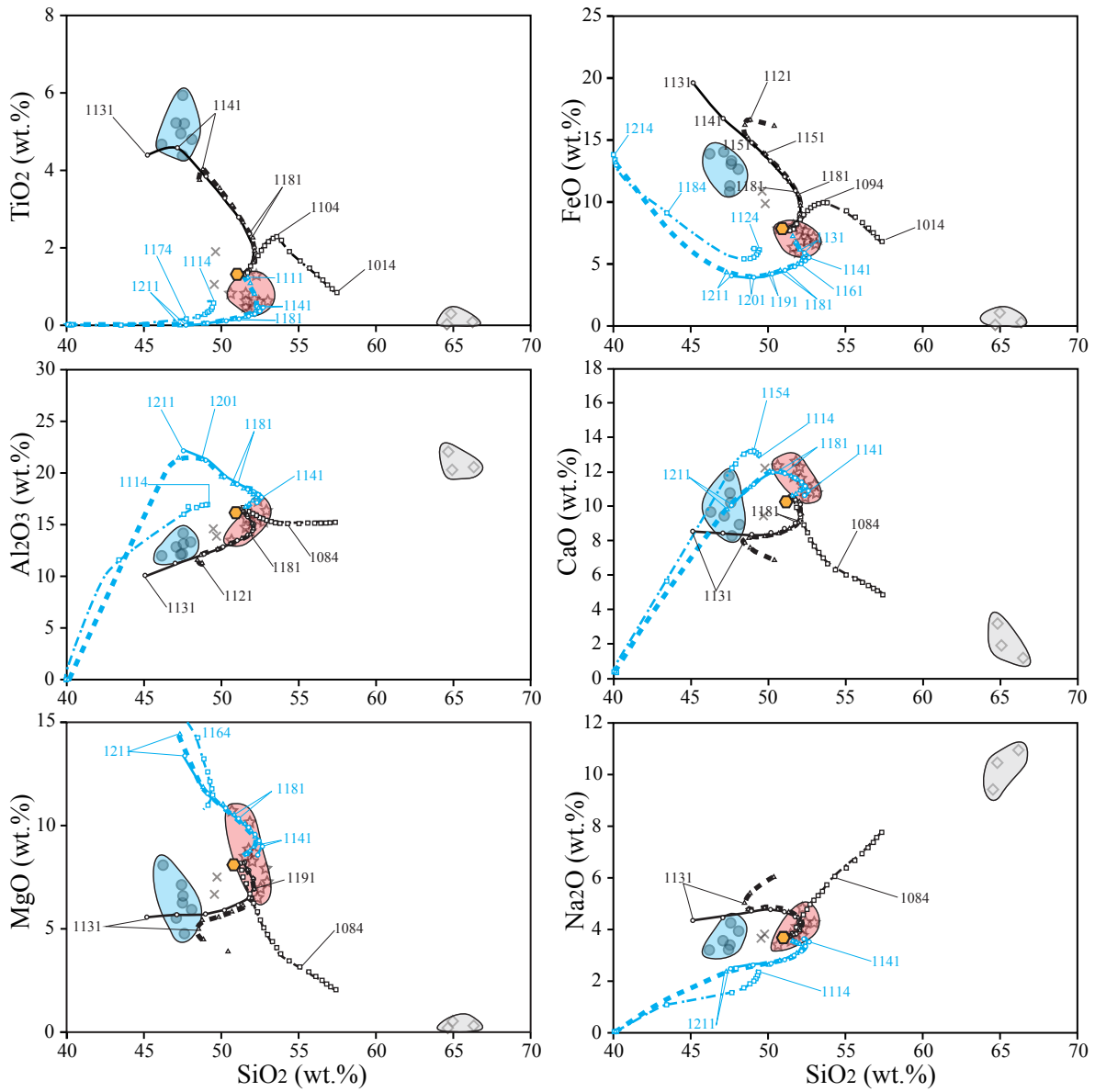
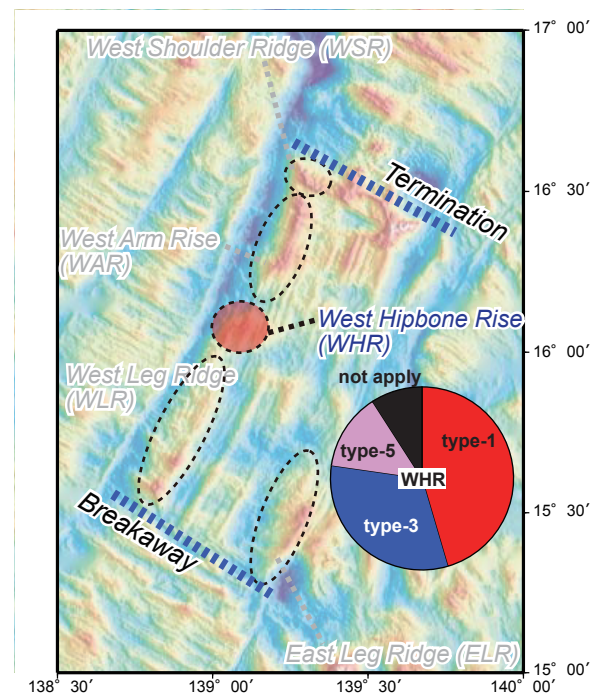


Fig. V-13. Harker diagrams of the calculated residual melt and crystal accumulation compositions in comparison with WHR gabbroic rocks. Calculation conditions are 1500 bars, QFM buffer and dry to 0.02 wt. %, 0.5 wt. % H₂O added. Starting material is YK11-08 6K#1275R07 glass. Small numbers in figure indicate temperature by MELTS calculation. Right-side figure shows index map and ratio of classified types of WHR.



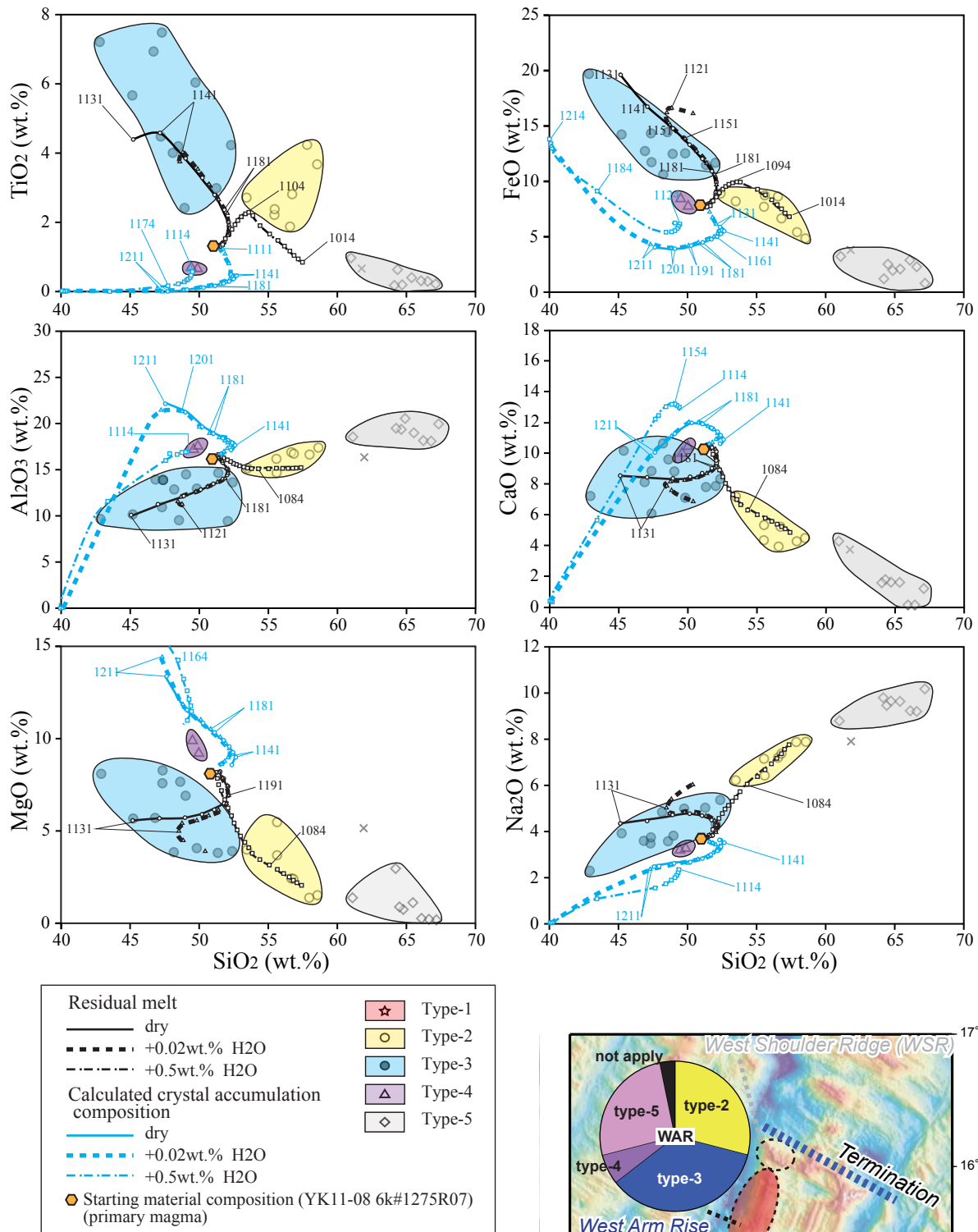


Fig. V-14. Harker diagrams of the calculated residual melt and crystal accumulation compositions in comparison with WAR gabbroic rocks. Calculation conditions are 1500 bars, QFM buffer and dry to 0.02 wt. %, 0.5 wt. % H₂O added. Starting material is YK11-08 6K#1275R07 glass. Small numbers in figure indicate temperature by MELTS calculation. Right-side figure shows index map and ratio of classified types of WAR.

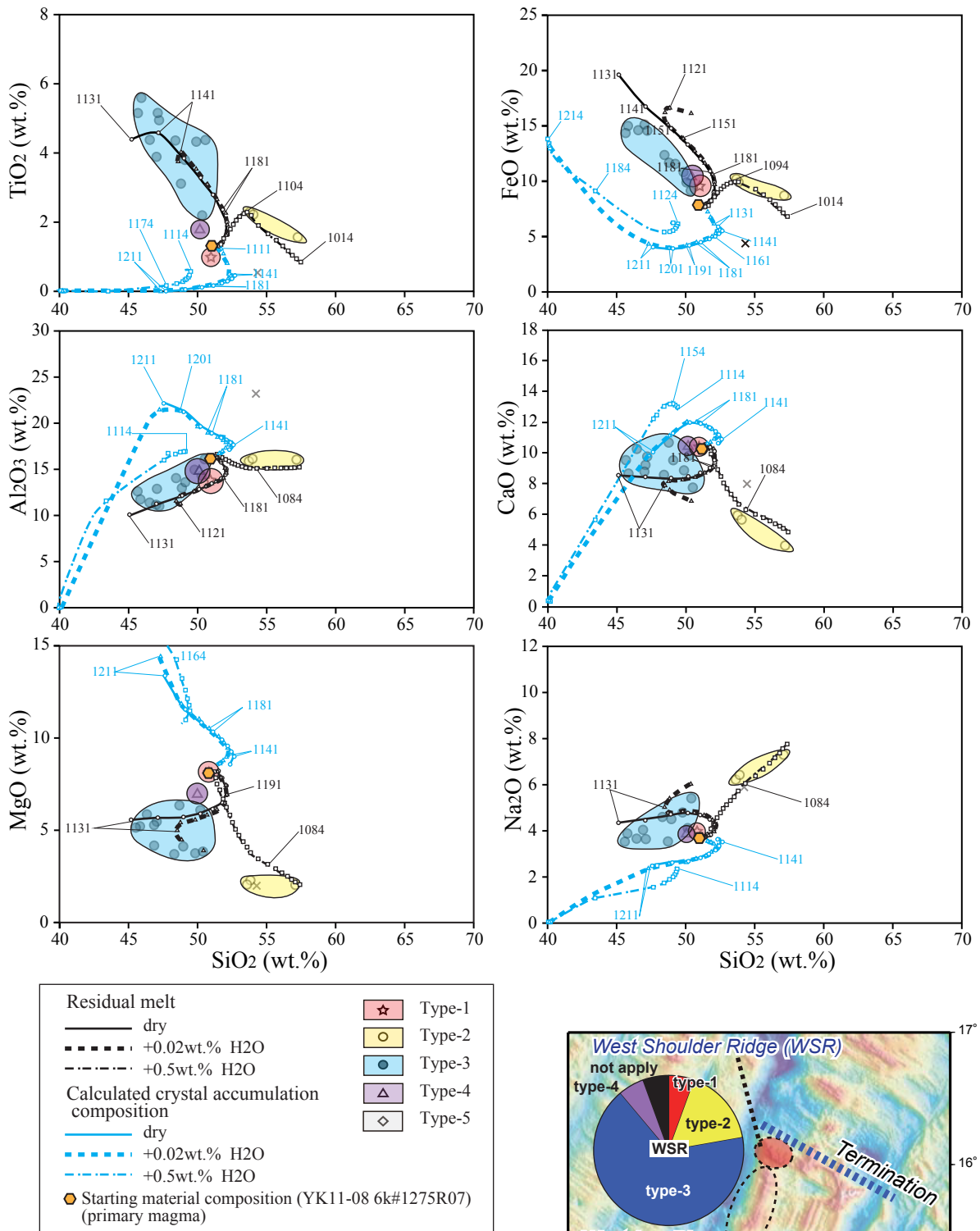
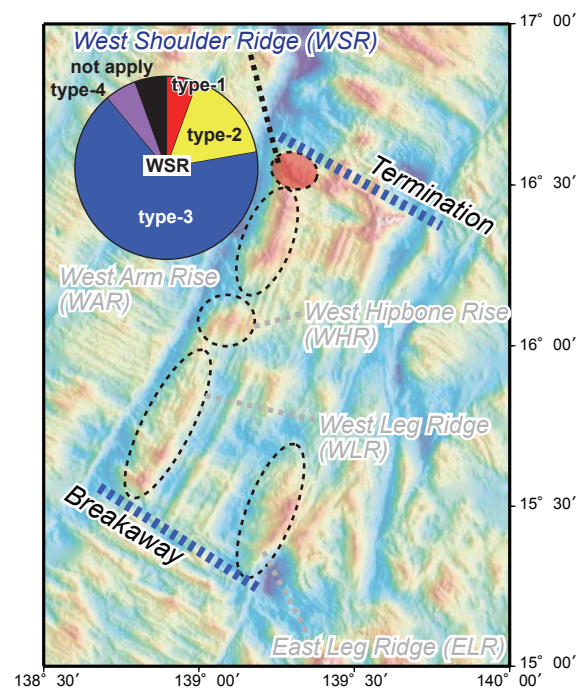


Fig. V-15. Harker diagrams of the calculated residual melt and crystal accumulation compositions in comparison with WSR gabbroic rocks. Calculation conditions are 1500 bar, QFM buffer and dry to 0.02 wt. %, 0.5 wt. % H₂O added. Starting material is YK11-08 6K#1275R07 glass. Small numbers in figure indicate temperature by MELTS calculation. Right-side figure shows index map and ratio of classified types of WSR.



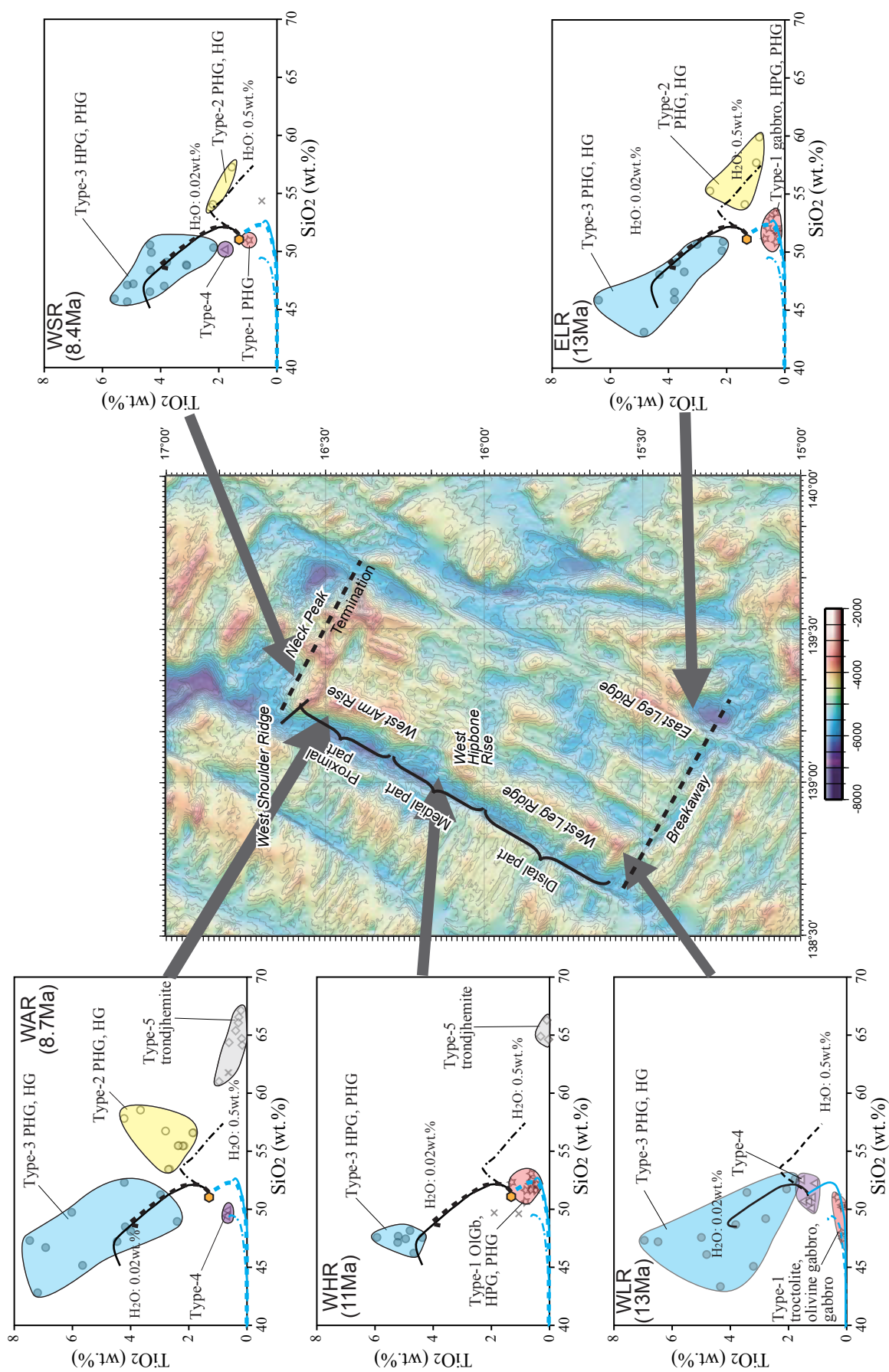


Fig. V-16. SiO_2 versus TiO_2 plot of the calculated residual melt and crystal accumulation compositions in comparison with the topography. Details shown in Figs. V-11 to V-15.

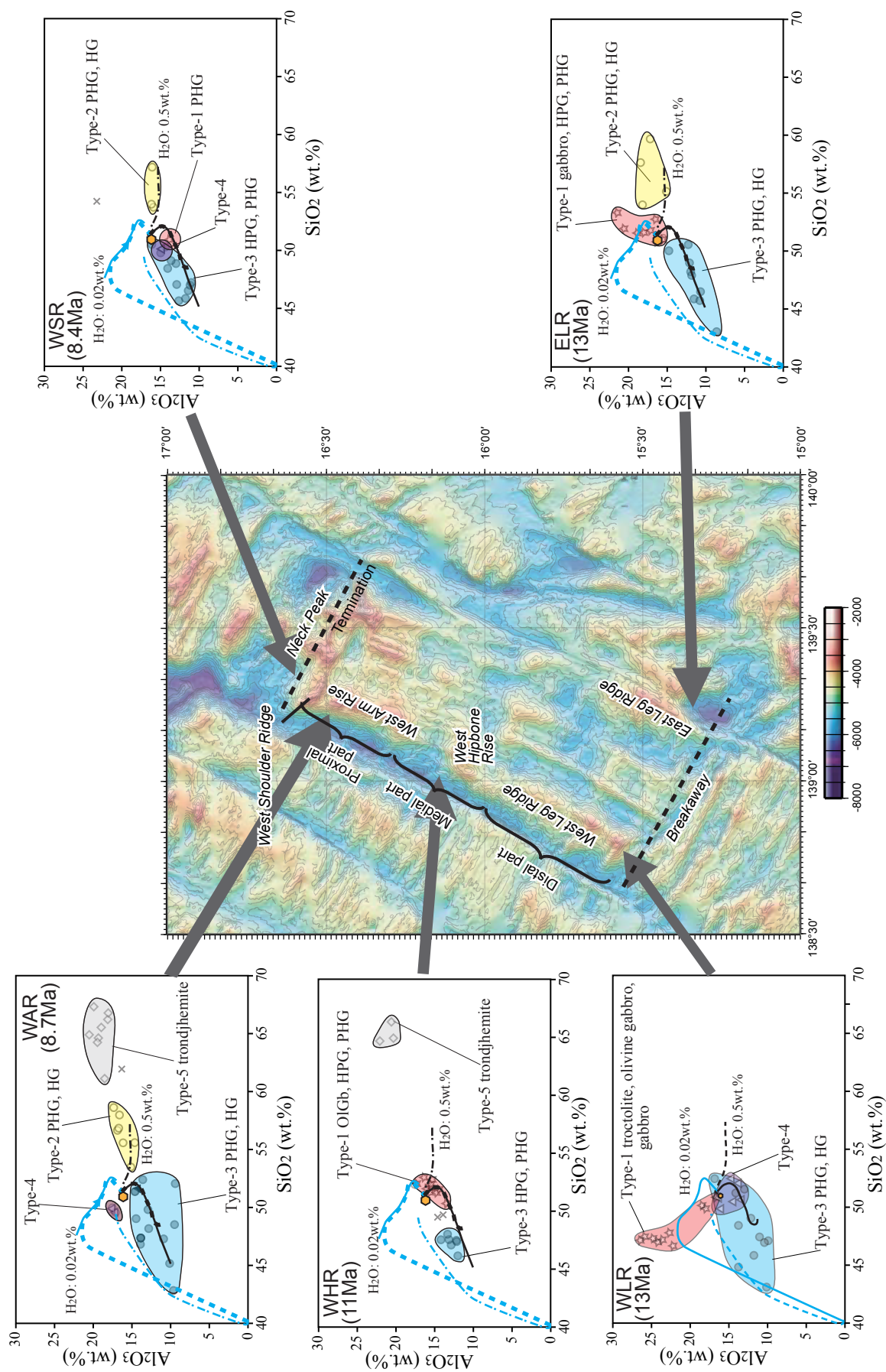


Fig. V-17. SiO_2 versus Al_2O_3 plot of the calculated residual melt and crystal accumulation compositions in comparison with the topography. Details shown in Figs. V-11 to V-15.

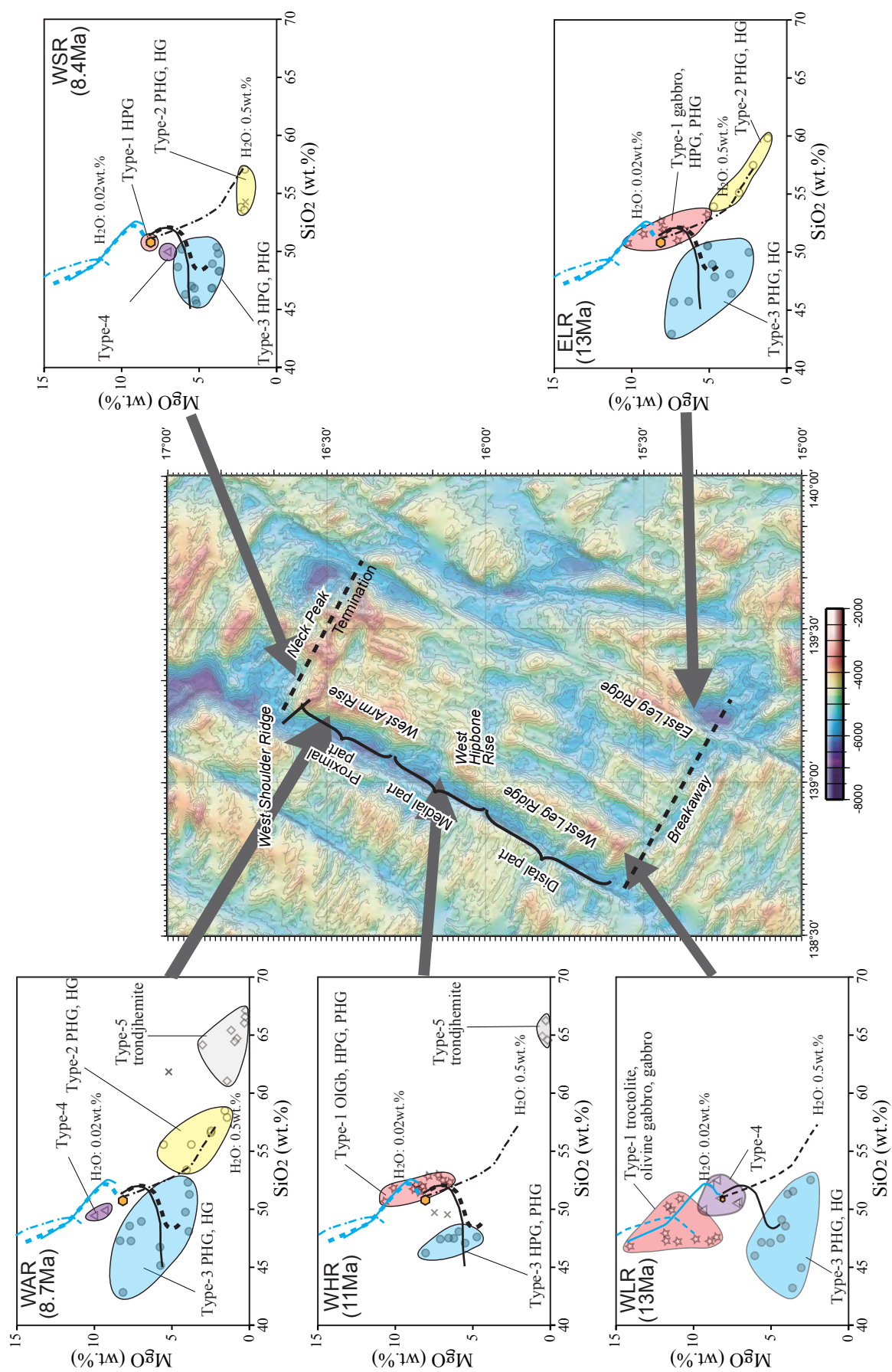


Fig. V-19. SiO₂ versus MgO plot of the calculated residual melt and crystal accumulation compositions in comparison with the topography. Details shown in Figs. V-11 to V-15.

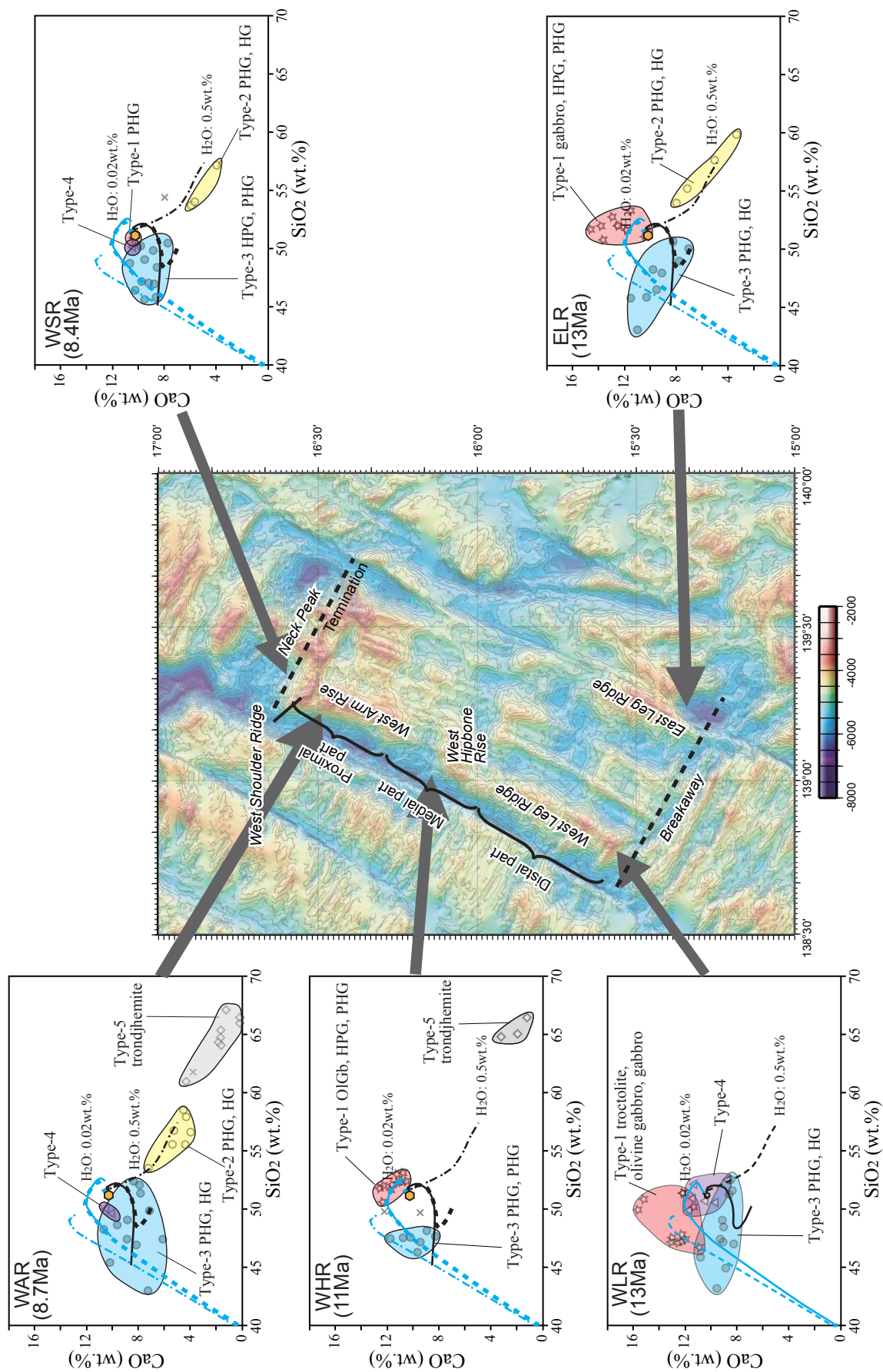


Fig. V-20. SiO₂ versus CaO plot of the calculated residual melt and crystal accumulation compositions in comparison with the topography. Details shown in Figs. V-11 to V-15.

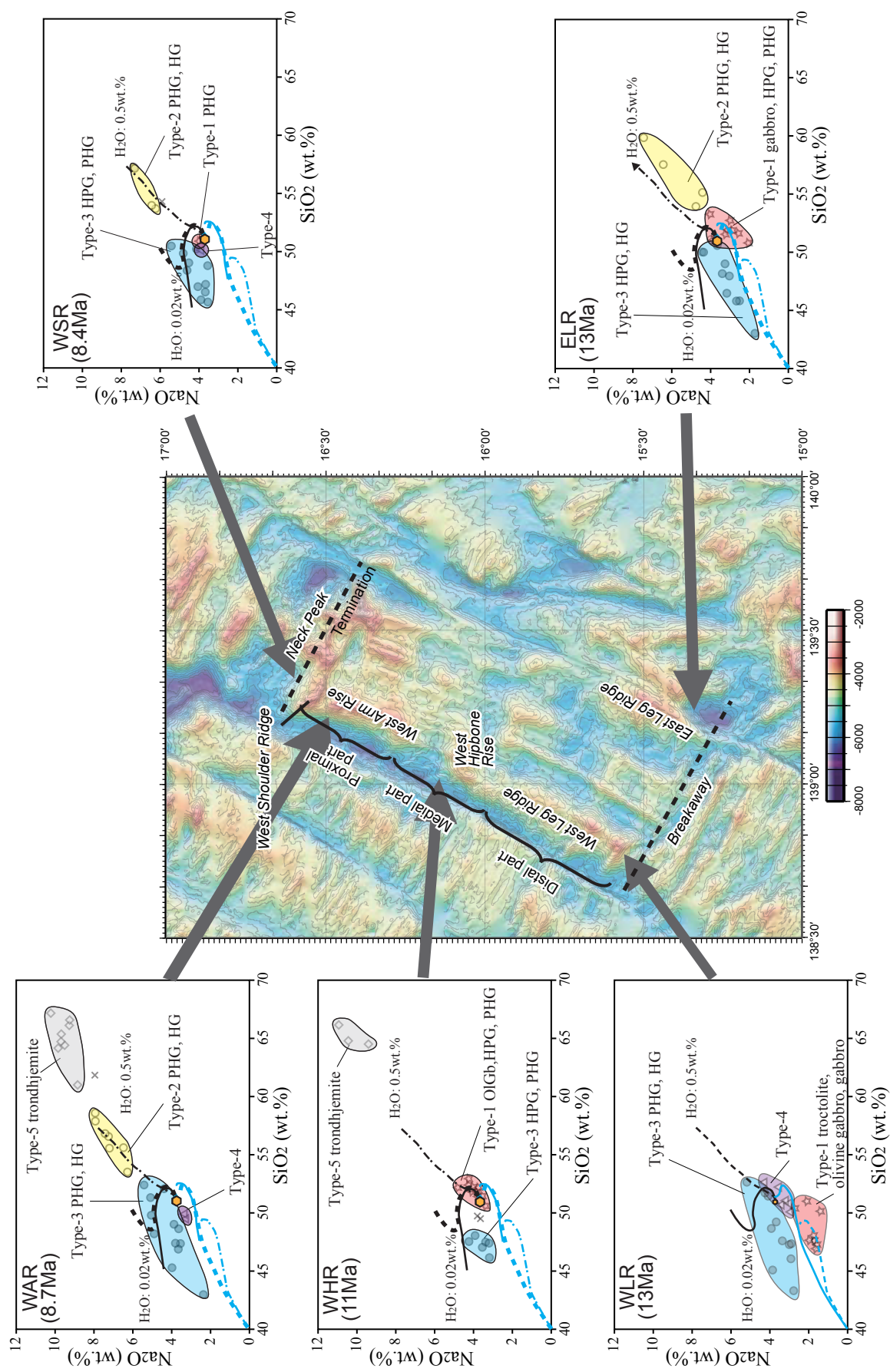


Fig. V-17. SiO₂ versus Na₂O plot of the calculated residual melt and crystal accumulation compositions in comparison with the topography. Details shown in Figs. V-11 to V-15.

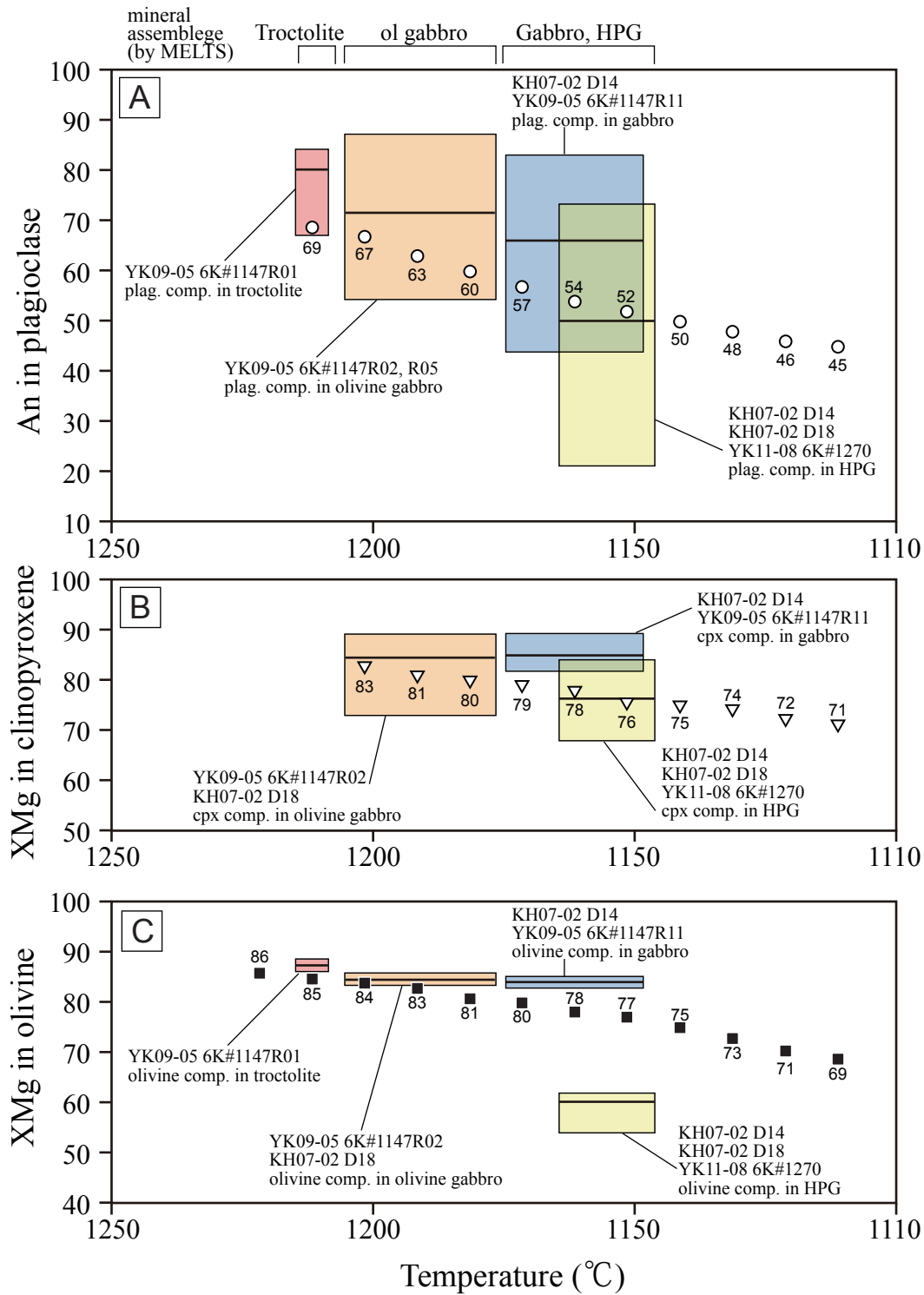


Fig. V-22. Temperature versus calculated and observed mineral compositions. A: anorthite content of plagioclase, B: magnesium number in clinopyroxene, C: magnesium number in olivine. Calculation conditions are 1500 bars, QFM buffer, and dry to 0.02 wt. %, 0.5 wt. % H₂O added. Starting material is YK11-08 6K#1275R07 glass. Rock names at the top of figures indicate crystal accumulation mineral assemblage by MELTS calculation: troctolite (1210 °C), olivine gabbro (1200 - 1180 °C), and gabbro and hornblende pyroxene gabbro (1170 - 1160 °C). Solid square (olivine), open triangle (clinopyroxene), and open circle (plagioclase) are calculated mineral compositions by MELTS calculation. Red area in figure indicates observed troctolite mineral compositions, and black horizontal bar indicates average composition. Similarly, orange area is olivine gabbro, blue area is gabbro, and yellow area is hornblende pyroxene gabbro.

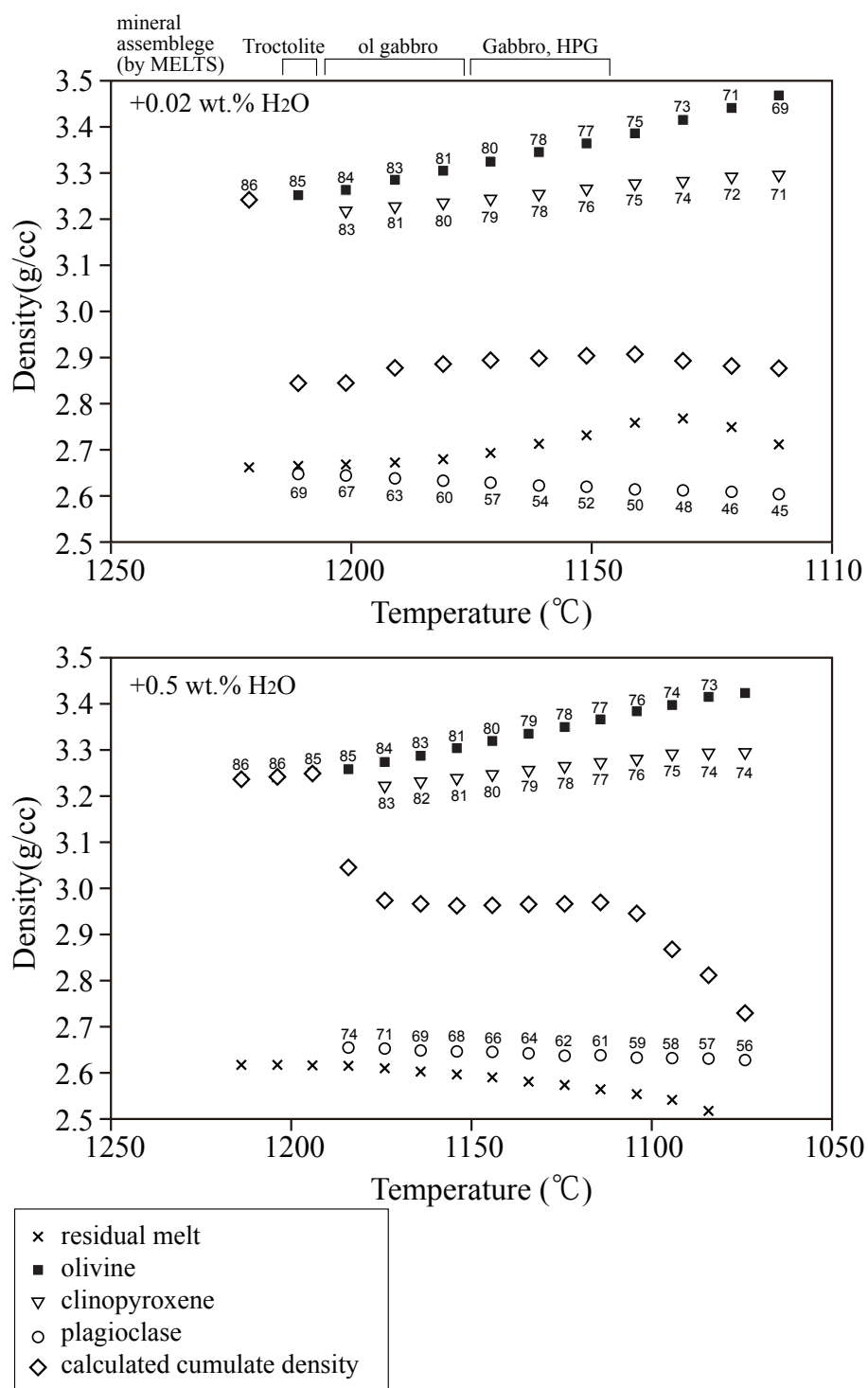


Fig. V-23. Temperature versus density plots by MELTS calculation results at 1500 bars, QFM buffer, and 0.02 wt. % or 0.5 wt. % H₂O added. Rock names at the top of figure indicate cumulate mineral assemblage by MELTS calculation: troctolite (1210 °C), olivine gabbro (1200 - 1180°C), and gabbro and hornblende pyroxene gabbro (1170 - 1160°C). Solid square (olivine), open triangle (clinopyroxene), open circle (plagioclase), x mark (residual melt), and open diamond (crystal accumulation) are calculated density by MELTS calculation. Small numbers in figure indicate An value in plagioclase and XMg value in olivine and clinopyroxene by MELTS calculation.

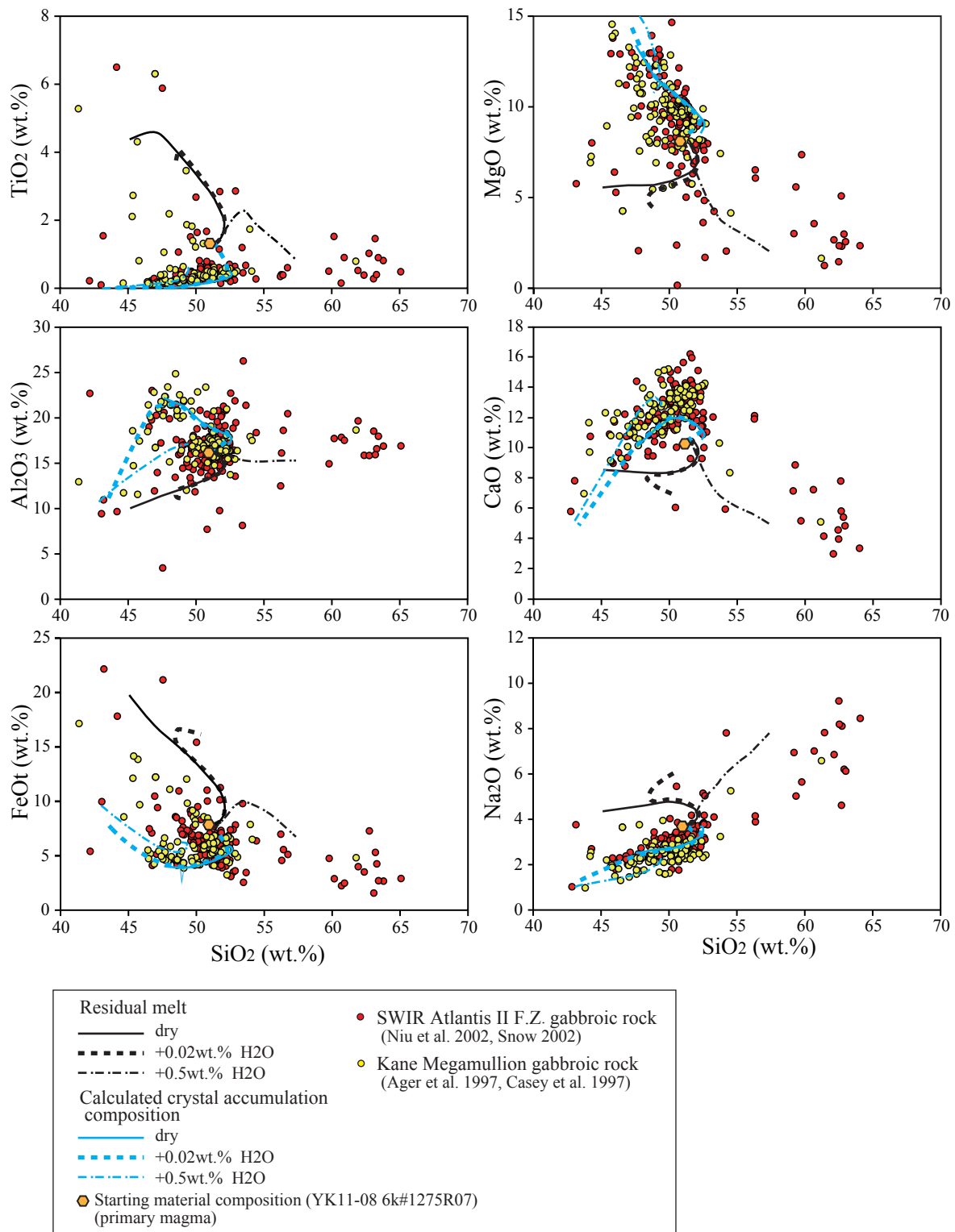


Fig. V-24. Harker diagrams of OCC gabbros and MELTS calculation results. MELTS calculation results at 1500 bars and QFM buffer. Kane Megamullion at MAR data sources are Agar et al. (1997) and Casey (1997). Atlantis fracture II zone at SWIR data sources are Niu *et al.* (2002) and Snow (2002). Petrogenesis of gabbroic rocks from the Kane Megamullion and Atlantis fracture II zone can be explained by MELTS results.

APPENDIX 6 Figures (chapter VI)

- Fig. VI-1. Schematic image of cross section of the Godzilla Megamullion and results of MELTS calculation.
- Fig. VI-2. Schematic diagram showing magmatic differentiation of gabbroic rocks in the Godzilla Megamullion at the distal-part stage (WLR; 13 Ma).
- Fig. VI-3. Schematic diagram showing magmatic differentiation of gabbroic rocks in the Godzilla Megamullion at the distal-part stage (ELR; 13 Ma).
- Fig. VI-4. Schematic diagram showing magmatic differentiation of gabbroic rocks in the Godzilla Megamullion at the medial-part stage (WHR; 11 Ma).
- Fig. VI-5. Schematic diagram showing magmatic differentiation of gabbroic rocks in the Godzilla Megamullion at the proximal-part stage (WAR; 8.7 Ma).
- Fig. VI-6. Schematic diagram showing magmatic differentiation of gabbroic rocks in the Godzilla Megamullion at the proximal-part stage (WSR; 8.4 Ma).
- Fig. VI-7. Schematic development model by two stage detachment faults of the Godzilla Megamullion.

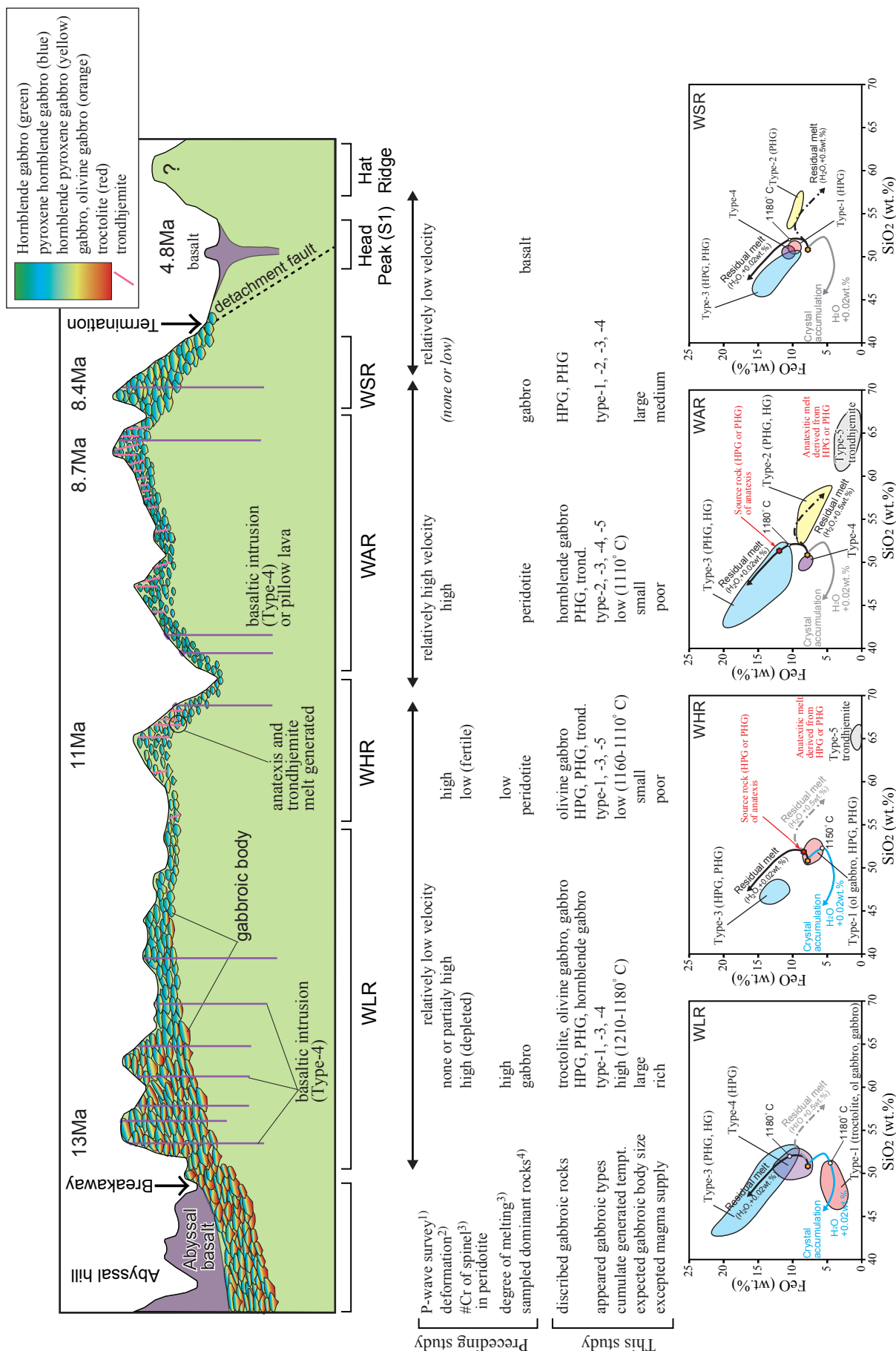


Fig. VI-1. Schematic image of cross section of the Godzilla Megamullion and results of MELTS calculation.

Upper image: Schematic image of cross section of the Godzilla Megamullion.

Proximal stage (WLR, ELR; 13 Ma): Degree of partial melting was relatively high (Snow *et al.*, in preparation), relatively abundant basaltic melt was provided to the lithosphere, and a large melt lens (magma chamber) formed.

Medial stage (WHR; 11 Ma): Degree of partial melting was relatively low (Snow *et al.*, in preparation), a small amount of basaltic melt was provided to the lithosphere, and a few small melt lenses (magma chambers) formed.

Proximal stage (WAR; 8.7 Ma): Degree of partial melting was relatively low (Snow *et al.*, in preparation), a small amount of basaltic melt was provided into the lithosphere, and a few small melt lenses (magma chambers) formed.

Proximal stage (WSR; 8.4 Ma): There are no #Cr in Cr-spinel data. However, gabbroic lithological data, mineral composition, and calculated crystallization temperature by MELTS calculation show that the melt supply was relatively high.

Lower figure: Results of MELTS calculation.

WLR: Type 1, type 3, and type 4 gabbroic rocks were collected. Estimated temperature of cumulate gabbros is relatively high.

WHR: Type 1, type 3, and type 5 gabbroic rocks were collected. Estimated temperature of cumulate gabbros and residual melt temperature are relatively low. Type 5 trondhjemite was generated by anatexis of hornblende-pyroxene gabbro.

WAR: Type 2, type 3, type 4, and type 5 gabbroic rocks were collected. WAR gabbros were generated by H₂O-poor (0.02 wt. % added) residual melt (type 3) and H₂O-rich (0.5 wt. % added) residual melt (type 2). Type 5 trondhjemite was generated by anatexis of hornblende pyroxene gabbro.

WSR: Type 1, type 2, type 3, and type 4 gabbroic rocks were collected, but few of these were type 2 gabbros. WAR gabbros were generated by H₂O-poor (0.02 wt. % added) residual melt (type 3) and H₂O-rich (0.5 wt. % added) residual melt (type 2). The estimated temperature of residual melt is suggested to be relatively high.

1) Ohara and Snow (2009); 2) Harigane *et al.* (2008, 2010, 2011); 3) Snow *et al.* (in preparation); 4) Ohara *et al.* (2011b).

A ~13Ma (Distal Part) (West Leg Ridge)

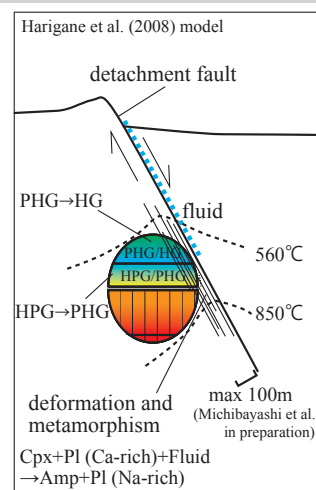
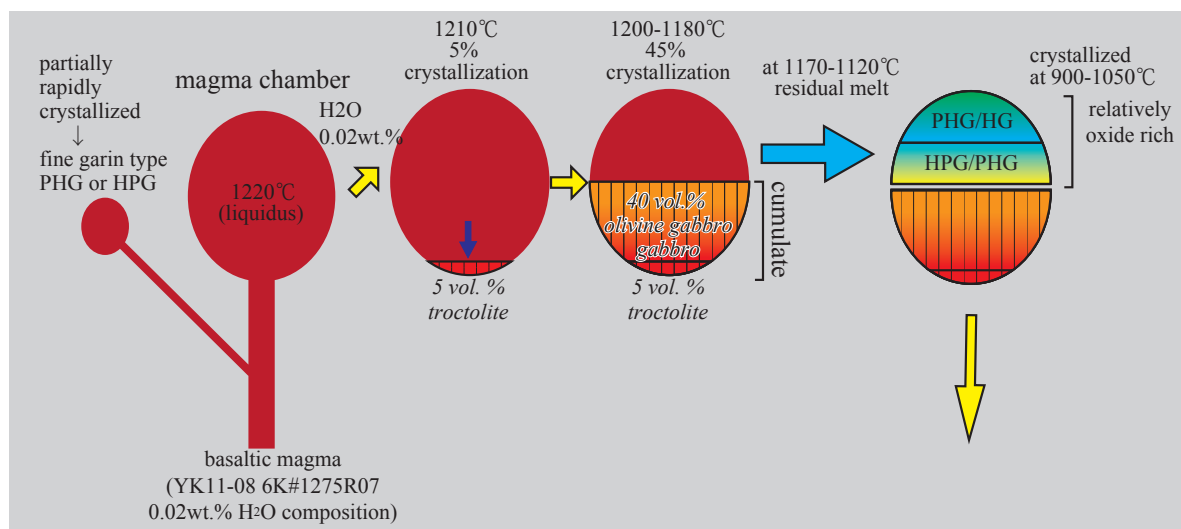


Fig. VI-2. Schematic diagram showing magmatic differentiation of gabbroic rocks in the Godzilla Megamullion at the distal-part stage (WLR; 13 Ma).

Upper image: Schematic model of generation process of gabbroic rocks showing the crystallization differentiation process based on the MELTS calculation. At this stage, temperature of crystallization is relatively high (1210 - 1180°C , type 1). Residual melt at 1170 - 1120°C , with relatively abundant FeO and TiO₂ contents, crystallized at 1050 - 900°C (type 3). Basaltic magma rapidly crystallized at lithosphere as fine grained type hornblende pyroxene gabbro or pyroxene hornblende gabbro (type 4).

Lower-right image: Schematic model of generation process of deformed gabbroic rocks based on Harigane *et al.* (2008). See Fig I-6 for details.

B ~13Ma (Distal Part) (East Leg Ridge)

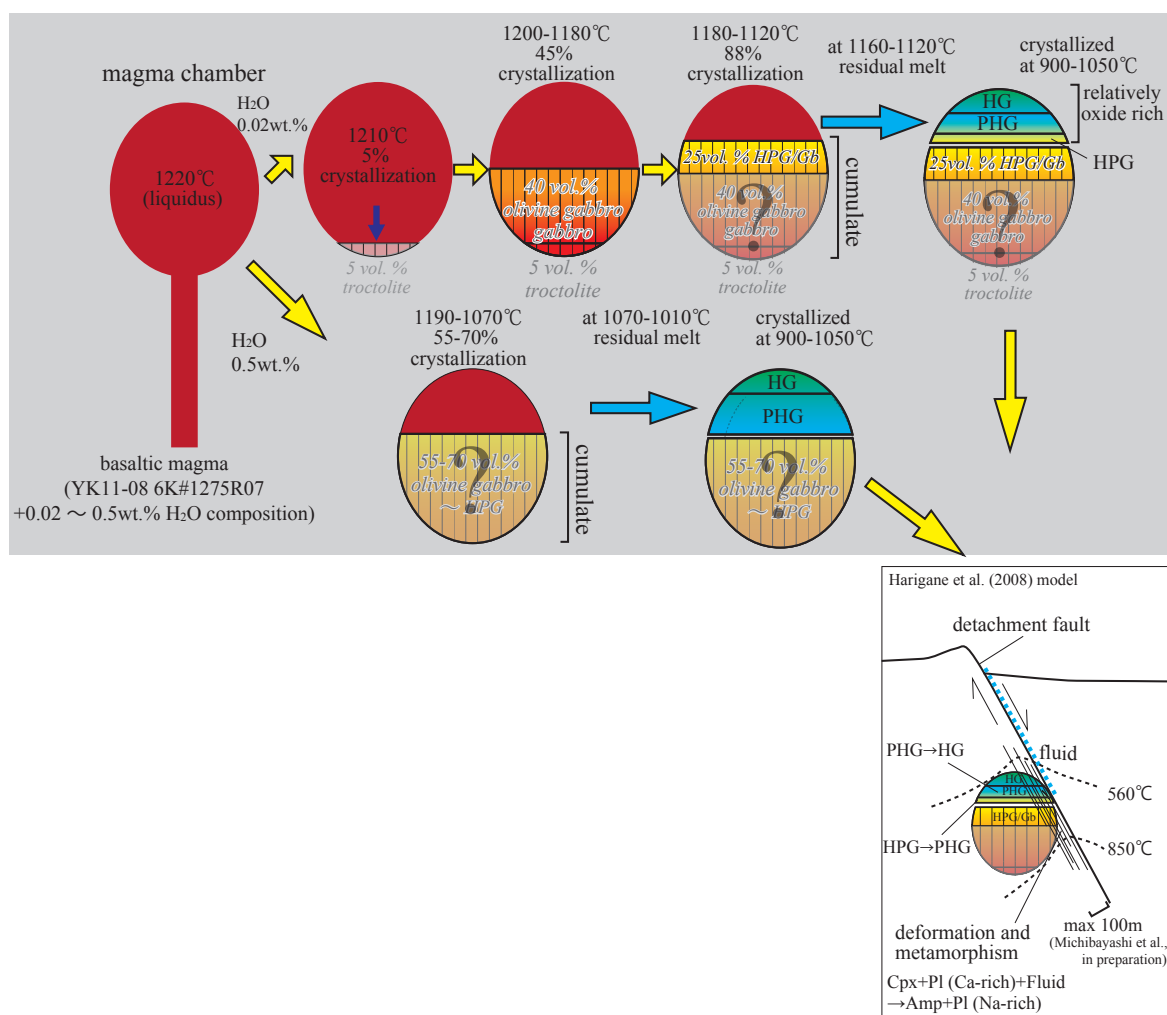


Fig. VI-3. Schematic diagram showing magmatic differentiation of gabbroic rocks in the Godzilla Megamullion at the distal-part stage (ELR; 13 Ma).

Upper image: Schematic model of generation process of gabbroic rocks showing the crystallization differentiation process based on MELTS calculation. Crystal accumulation gabbros (type 1) were generated at relatively lower temperature (1180 - 1120 °C) than WLR crystal accumulation gabbros. Residual melt at 1160 - 1120°C , with relatively abundant FeO and TiO₂ contents, crystallized at 1050 - 900 °C (Type 3). Residual melt at 1070-1010 °C , which was relatively rich in SiO₂, crystallized at 1050 - 900 °C (type 2).

Lower-right image: Schematic model of generation process of deformed gabbroic rocks based on Harigane *et al.* (2008). See Fig. I-6 for details.

C ~11Ma (Medial Part) (West Hipbone Rise)

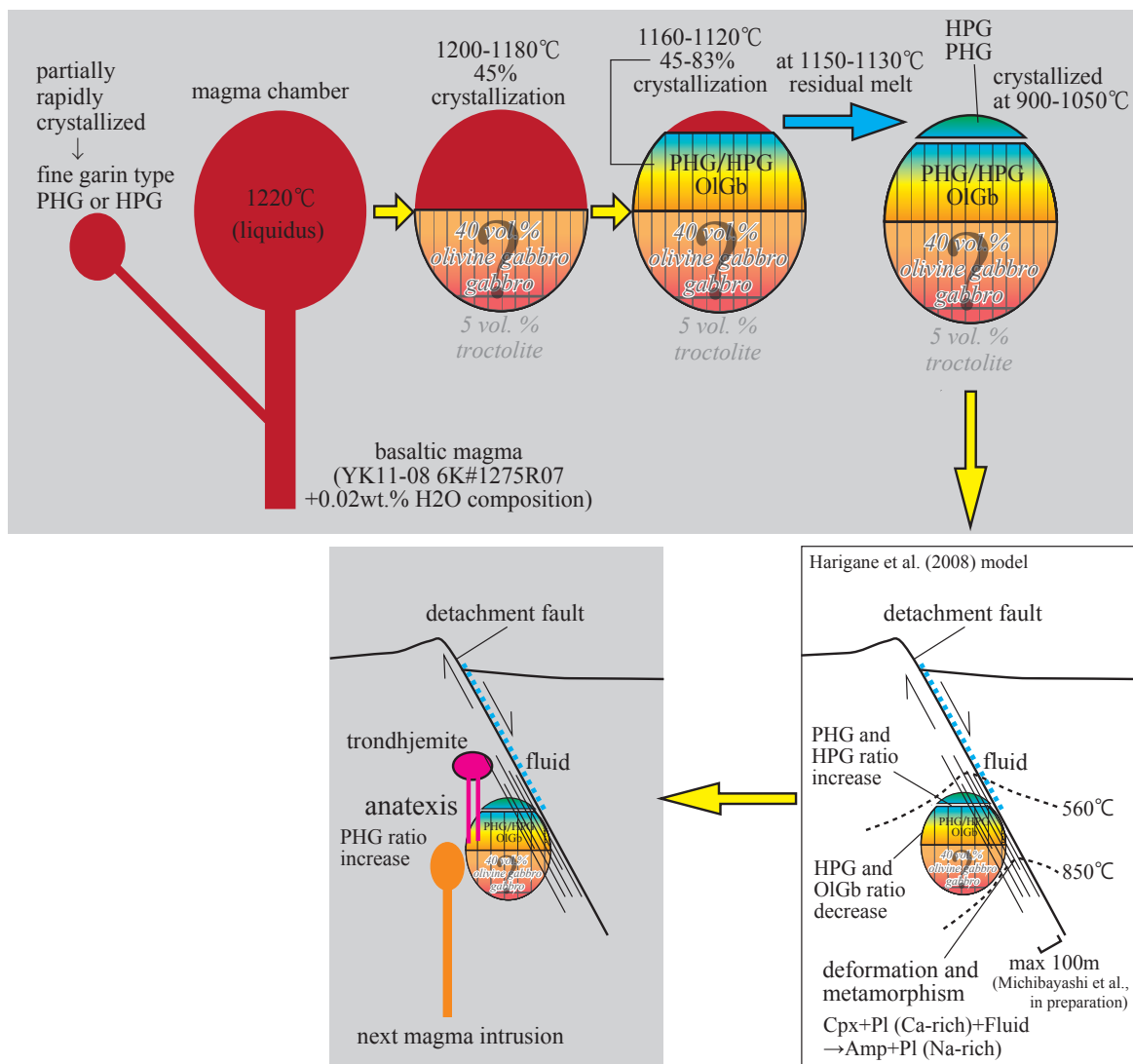


Fig. VI-4. Schematic diagram showing magmatic differentiation of gabbroic rocks in the Godzilla Megamullion at the medial-part stage (WHR; 11 Ma).

Upper image: Schematic model of generation process of gabbroic rocks showing the crystallization differentiation process based on MELTS calculation. At this stage, the temperature of crystallization was relatively low (1160 - 1120 °C , type 1). Residual melt at 1150 - 1130 °C , which had relatively high FeO and TiO₂ contents, crystallized at 1050 - 900 °C (type 3). Basaltic magma rapidly crystallized at the lithosphere as fine grained type hornblende pyroxene gabbro or pyroxene hornblende gabbro.

Lower-right image: Schematic model of generation process of deformed gabbroic rocks based on Harigane *et al.* (2008). See Fig. I-6 for details.

Lower left image: Schematic model of generation process of trondhjemite by anatexis.

D ~8.7Ma (Proximal Part) (West Arm Rise)

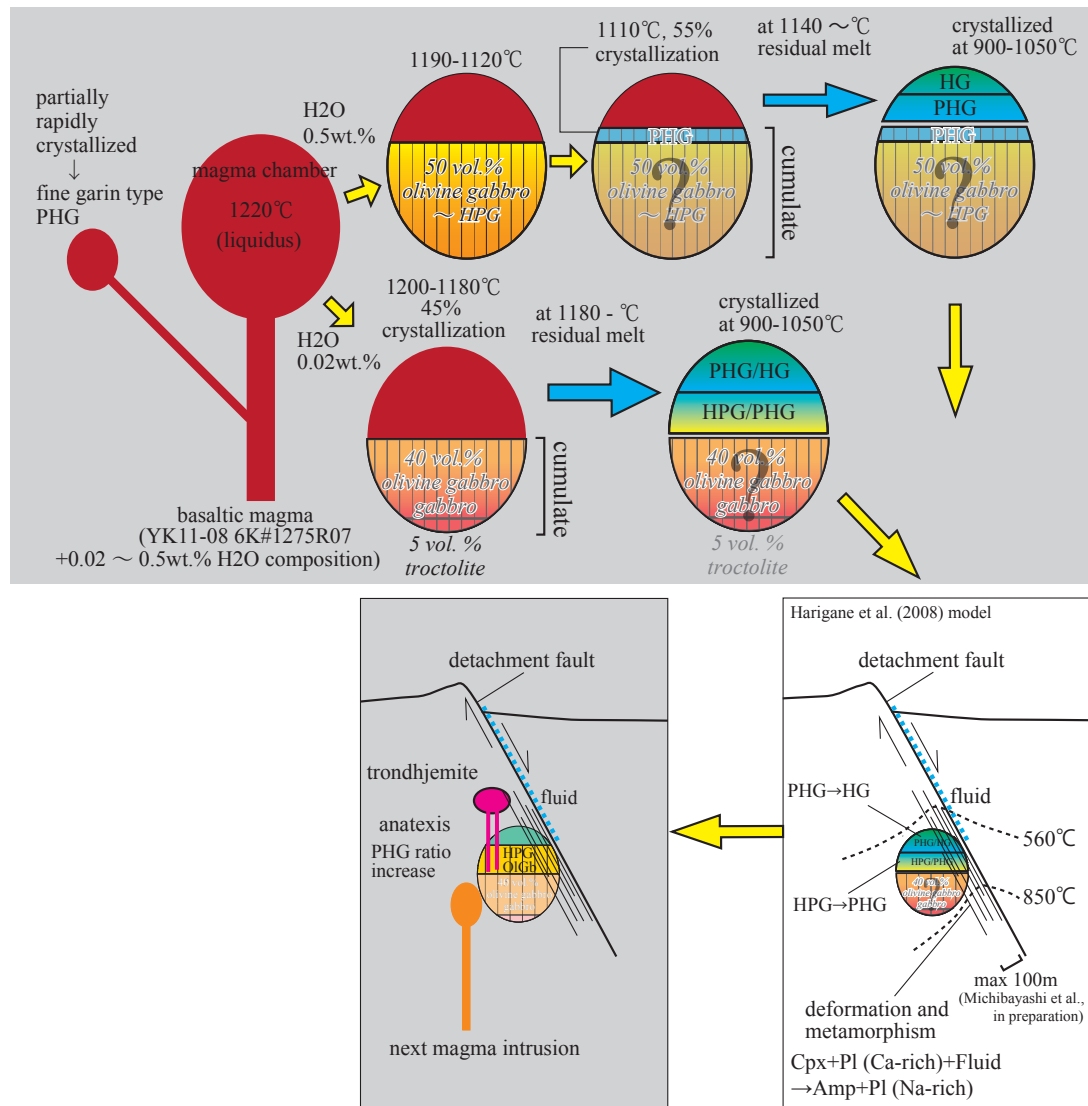


Fig. VI-5. Schematic diagram showing magmatic differentiation of gabbroic rocks in the Godzilla Megamullion at the proximal-part stage (WAR; 8.7 Ma).

Upper image: Schematic model of generation process of gabbroic rocks showing the crystallization differentiation process based on MELTS calculation. Residual melt below 1140 °C crystallized at 1050 - 900°C (type 2). Residual melt below 1180°C , which had relatively high FeO and TiO₂ contents, crystallized at 1050-900 °C (type 3). Basaltic magma rapidly crystallized at the lithosphere as fine grained type pyroxene hornblende gabbro.

Lower-right image: Schematic model of generation process of deformed gabbroic rocks based on Harigane *et al.* (2008). See Fig. I-6 for detail.

Lower-left image: Schematic model of generation process of trondhjemite by anatexis.

E ~8.4Ma (Proximal Part; Last stage) (West Soulder Ridge)

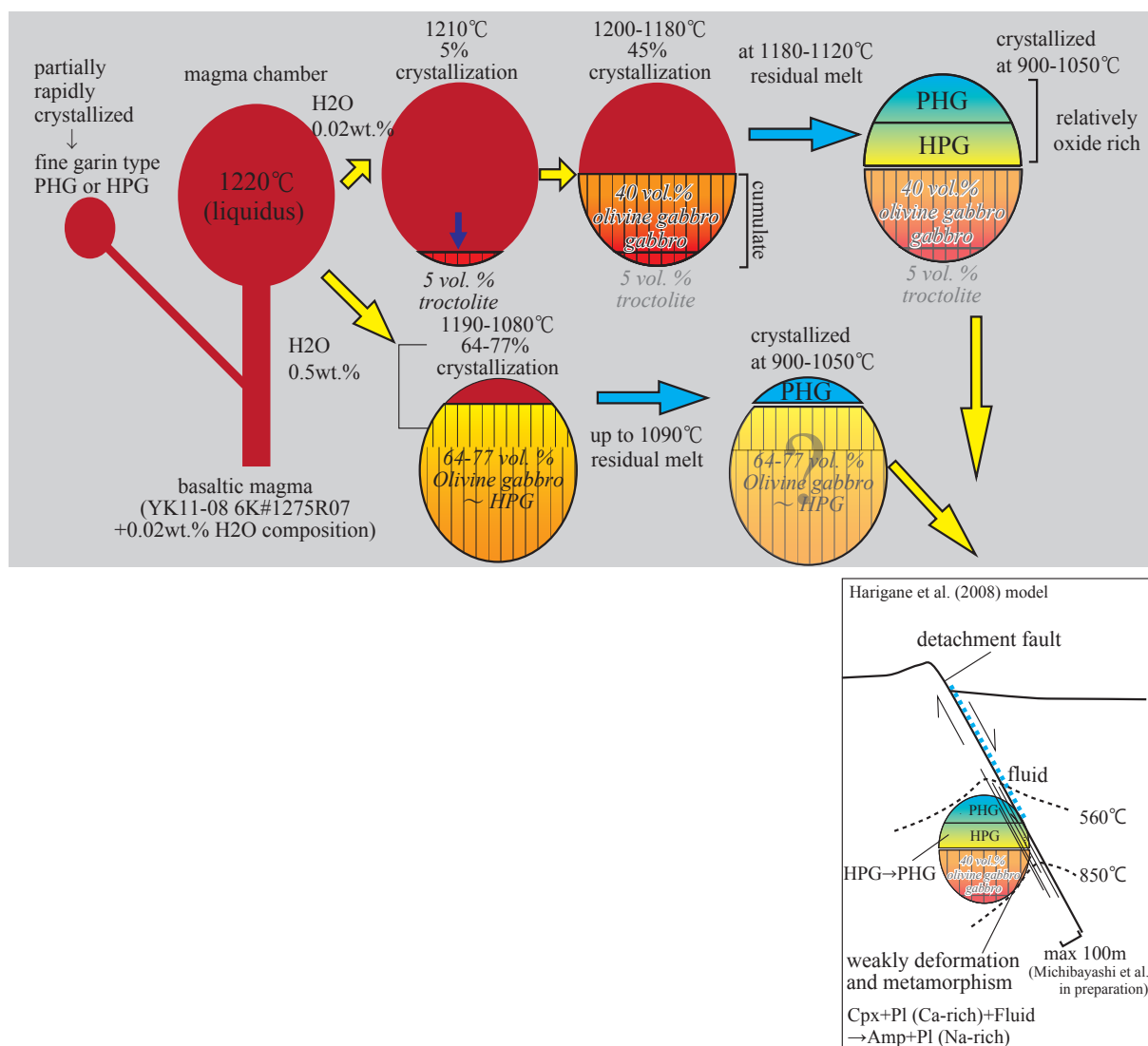


Fig. VI-6. Schematic diagram showing magmatic differentiation of gabbroic rocks in the Godzilla Megamullion at the proximal-part stage (WSR; 8.4 Ma).

Upper image: Schematic model of generation process of gabbroic rocks showing the crystallization differentiation process based on MELTS calculation. Residual melt below 1180 - 1120 °C , which had relatively high FeO and TiO₂ contents, crystallized at 1050 - 900 °C (type 3). Residual melt at up to 1090°C crystallized at 1050-900 °C (type 2). Basaltic magma rapidly crystallized at the lithosphere as fine grained type hornblende pyroxene gabbro or pyroxene hornblende gabbro.

Lower image: Schematic model of generation process of deformed gabbroic rocks based on Harigane *et al.* (2008). See Fig I-6 for details.

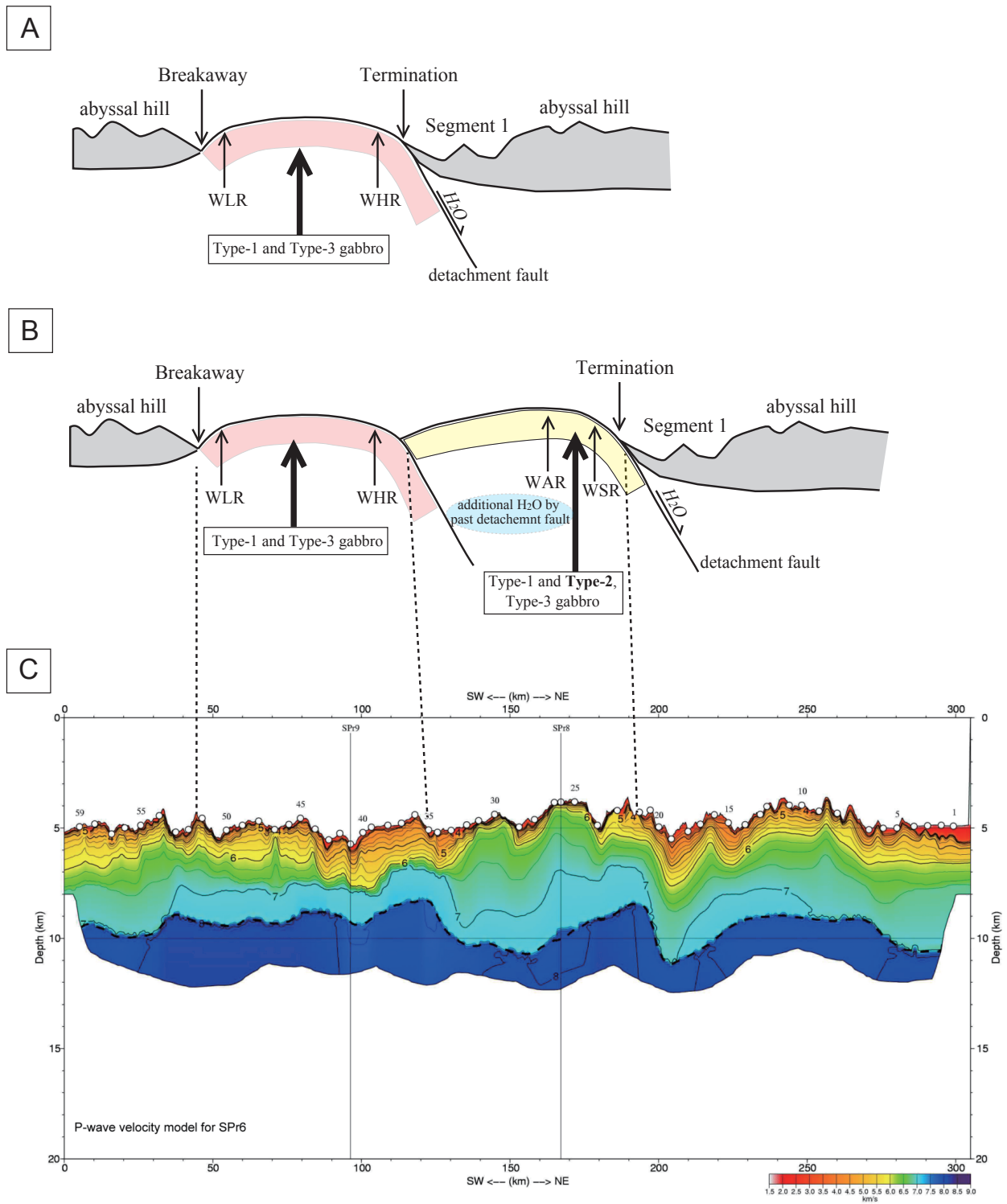


Fig. VI-7. Schematic development model by two stage detachment faults of the Godzilla Megamullion. A: 13 to 11 Ma stage. Gabbroic rocks which consist of Type 1 and Type 3 gabbros, were generated only 0.02 wt.% H₂O added magma. B: 11 Ma to 8.4 Ma. Gabbroic rocks which consist of Type 1, Type 2 and Type 3 gabbros, were generated by 0.02 or 0.5 wt.% H₂O added magma. C: P-wave velocity mode (Ohara and Snow, 2009; see Fig. I-5).

APPENDIX 7 Figures (chapter VII)

Fig. VII-1. Summary of petrogenesis of the Godzilla Megamullion gabbros using by MELTS calculation.

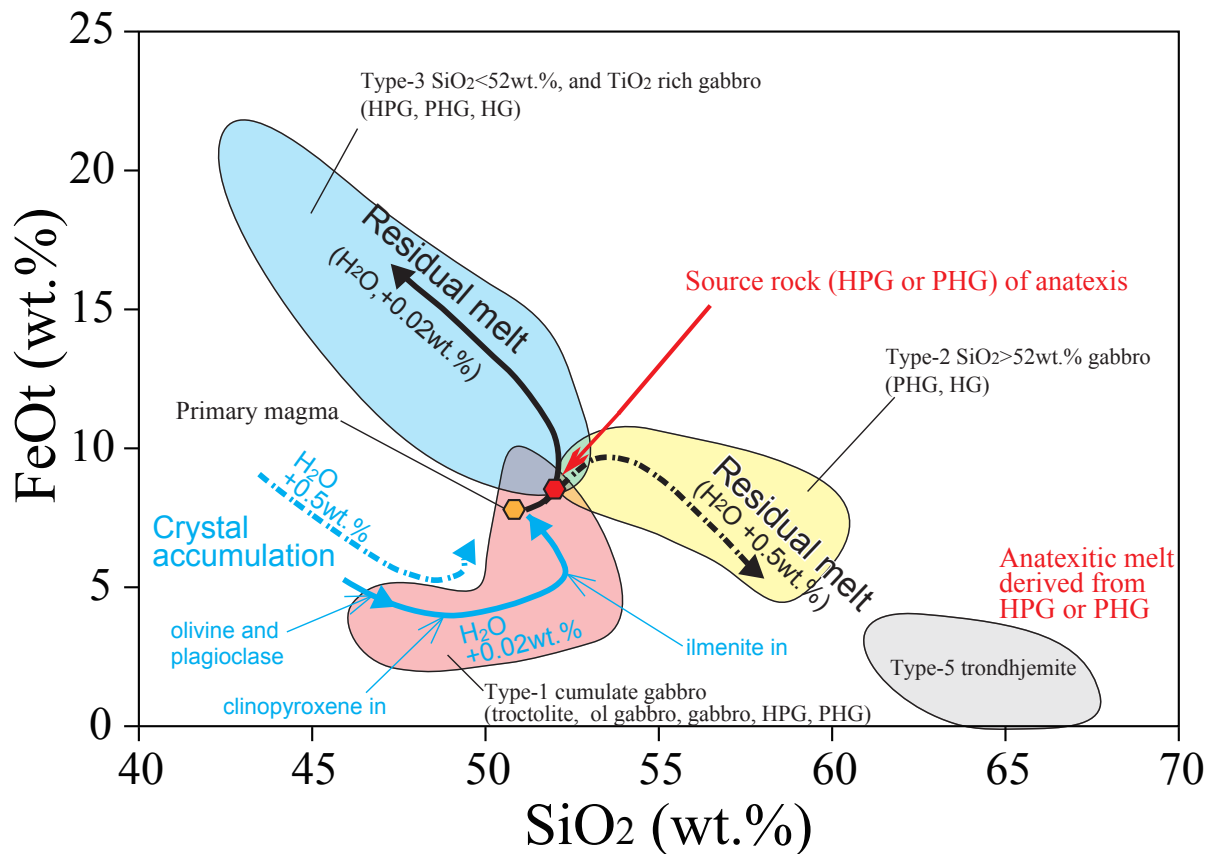


Fig. VII-1. Summary of petrogenesis of the Godzilla Megamullion gabbros using by MELTS calculation. The type 1 gabbros could have been generated by crystal accumulation in a primary magma with 0.02 wt. % H_2O added at a temperature of 1210 - 1120 °C (blue line). Residual melts derived from a primary magma with 0.5 wt.% H_2O added could have produced the type 2 gabbros at temperatures ranging up to 1140 °C (black dash line). The type 3 gabbros could have been generated from residual melts derived from a primary magma with 0.02 wt. % H_2O added at temperatures ranging up to 1180°C (black line). The mass balance calculations suggest that the type 5 trondhjemite was generated by anatexis of a gabbroic source composition comparable to the hornblende pyroxene gabbro or pyroxene hornblende gabbro.

APPENDIX 8 Tables

Table 1. List of the sampling site in the Godzilla Megamullion

Table 2. Summary of the dredging and dive results

Table 3. Modal composition of gabbroic rocks from the Godzilla Megamullion

Table 4. List of the studied sample from the Godzilla Megamullion

Table 5. Summary of sampled gabbroic rocks

Table 6. Representative analyses of plagioclase in gabbroic rocks from the Godzilla Megamullion

Table 7. An number in plagioclase

Table 8. Representative analyses of clinopyroxene in gabbroic rocks from the Godzilla Megamullion

Table 9. Representative analyses of amphibole in gabbroic rocks from the Godzilla Megamullion

Table 10. Representative analyses of olivine in Gabbroic rocks from the Godzilla Megamullion

Table 11. Whole rock compositions for gabbroic rocks from the Godzilla Megamullion

Table 12. Classified types of gabbroic rocks of the Godzilla Megamullion

Table 13. Composition of starting materials

Table 14. Representative calculated melt composition and crystal accumulation compositions

Table 15. Calculated mineral compositions at 1500bar, dry, QFM buffer condition

Table 16. Calculated mineral compositions at 1500bar, +0.02H₂O, QFM buffer condition

Table 17. Calculated mineral compositions at 1500bar, +0.5H₂O, QFM buffer condition

Table 18. Estimate of gabbroic magma temperature

Table 1. List of the sampling site in the Godzilla Megamullion

Station	Ship	Date	Grid reference	Depth (m)	Topograpy	Recovered materials
KR03-01						
D6	R/V <i>Kairei</i>	Jan. 11 2003	15° 34.56'N 138° 51.57'E	5024-3815	WLR	Peridotite and gabbro
D9	R/V <i>Kairei</i>	Jan. 15 2003	16° 26.49'N 139° 12.08'E	4765-4114	WAR	Peridotite and trondhjemite
D10	R/V <i>Kairei</i>	Jan. 15 2003	16° 26.34'N 139° 15.55'E	3840-3438	WAR	Peridotite, basalt, gabbro, amphibolite trondhjemite and talc schist
KH07-02						
D14	R/V <i>Hakuho</i>	Sep. 19 2007	15° 18.51'N 139° 11.81'E	5858-5236	ELR	Peridotite and gabbro
D18	R/V <i>Hakuho</i>	Sep. 20 2007	16° 04.27'N 139° 00.51'E	4999-4441	WHR	Gabbro and trondhjemite
D25	R/V <i>Hakuho</i>	Sep. 22 2007	16° 24.29'N 139° 14.17'E	4003-3702	WAR	Peridotite and tondhjemite
YK09-05						
6K#1140	<i>Shinkai 6500</i>	May. 9 2009	16° 24.89'N 139° 11.59'E	5166-4651	WAR	Peridotite, diorite, talc schist and tondhjemite
6K#1141	<i>Shinkai 6500</i>	May. 10 2009	16° 26.37'N 139° 15.38'E	3991-3501	WAR	Gabbro, tondhjemite, amphibolite, peridotite and talc schist
6K#1147	<i>Shinkai 6500</i>	May. 16 2009	15° 33.47'N 138° 48.06'E	4301-3624	WLR	Troctolite, gabbro and peridotite
YK11-08						
6K#1270	<i>Shinkai 6500</i>	Oct. 10 2011	16° 33.35'N 139° 22.22'E	4704-4181	WSR	Gabbro, basalt, diorite and soapstone
6K#1275	<i>Shinkai 6500</i>	Oct. 19 2011	16° 35.28'N 139° 27.87'E	4450-3723	NP	Peridotite, gabbro ando basalt
6K#1276	<i>Shinkai 6500</i>	Oct. 20 2011	16° 29.99'N 139° 34.20'E	4893-4100	NP	Gabbro, basalt and scoria
YKDT#115	R/V <i>Yokosuka</i>	Oct. 17 2011	16° 36.06'N 139° 15.93'E	4561-4153	WSR	Peridotite, peridotite mylonite, gabbro and mudstone
YKDT#116	R/V <i>Yokosuka</i>	Oct. 17 2011	16° 34.17'N 139° 15.52'E	4477-4005	WSR	Gabbro, peridotite and diabase

WLR, West Leg Ridge; WAR, West Arm Rise; ELR, East Leg Ridge; WHR, West Hipbone Rise; WSR, West Shoulder Ridge; NP, Neck Peak (see Fig. 1); YKDT, Yokosuka Deep Toward camera.

Table 2. Summary of the dredging and dive results

Cruise	Station	Area	Gabbroic	Trondhjemite
KR03-01	D06	West Leg Ridge	++++ (58)	
	D09	West Arm Rise	- (9)	
	D10	West Arm Rise	++ (63)	+ (15)
KH07-02	D14	East Leg Ridge	++++ (60)	
	D18	West Hipbone Rise	++++ (60)	+ (1)
YK09-05	6K#1140	West Arm Rise		+ (2)
	6K#1141	West Arm Rise	++++ (10)	+ (2)
	6K#1147	West Leg Ridge	++++ (11)	
YK11-08	6K#1270	West Shoulder Ridge	++++ (5)	
	6K#1275	Neck Peak	++++ (2)	
	6K#1276	Neck Peak	++++ (2)	
	YKDT#115	West Shoulder Ridge	+ (6)	
	YKDT#116	West Shoulder Ridge	++++ (28)	

- <100g

+ <1kg

++ <5kg

+++ <10kg

++++ >10kg

Table 3. Modal composition of gabbroic rocks from the Godzilla Megamullion

	Plagioclase	Olivine	Clinopyroxene	Orthopyroxene	Amphibole	Oxide	Chlorite	Cr-spinel	Apatite	Zircon
East Leg Ridge										
gabbro	67.3 (61.1-75.5)	0.1 (0-0.4)	27.0 (20.8-34.0)	3.7 (0.4-8.3)	1.6 (0-2.1)	0.2 (0-0.6)	0	0	0	0
hornblende pyroxene gabbro	49.2 (46.3-53.0)	0	24.8 (22.3-28.1)	4.8 (2.0-8.0)	14.4 (11.5-16.6)	6.9 (0.1-10.9)	0	0	0	0
pyroxene hornblende gabbro	54.1 (39.6-65.9)	0.03 (0-0.3)	7.0 (3.4-16.5)	3.1 (0.1-5.1)	26.4 (14.9-42.5)	8.8 (1.4-14.6)	0	0.4 (0-2.6)	0.0 (0-0.1)	0
hornblende gabbro	60.0	0	2.4	0.4	29.3	4.5	0	2.9	0.6	0
West Leg Ridge										
troctolite	77.8 (70.1-85.8)	19.9 (14.3-25.5)	1.9 (0-2.9)	0.1 (0-0.3)	0.4 (0-1.5)	0	0	0	0	0
olivine gabbro	50.8 (34.4-76.8)	19.6 (4.4-10.9)	24.2 (8.4-59.9)	0.3 (0-1.0)	4.8 (0.1-15.4)	0.3	0	0	0	0
gabbro	68.9	2.9	22.9	5.4	0	0	0	0	0	0
hornblende pyroxene gabbro	65.4	0.6	16.3	0.3	13.6	3.6	0	0.3	0	0
pyroxene hornblende gabbro	51.2 (43.6-67.5)	0.1 (0-0.9)	7.2 (4.3-11.0)	0.6 (0-2.3)	29.2 (12.5-33.0)	9.5 (2.5-20.4)	0	1.5 (0-10.0)	0.1 (0-0.5)	0
hornblende gabbro	67.5 (64.1-70.9)	0	1.2 (1.0-1.4)	0.3 (0.3)	26.7 (25.6-27.9)	3.6 (2.4-4.8)	0	0	0.8 (0-1.6)	0
West Hipbone Rise										
olivine gabbro	52.1	4.3	18.0	0	18.3	3.6	0	3.8	0	0
hornblende pyroxene gabbro	61.3 (59.6-67.6)	1 (0-2.5)	18.2 (11.8-20.6)	1.5 (0.5-3.5)	12.2 (4.5-16.8)	2.9 (0.1-9.9)	0.2 (0-0.9)	2.8 (0.6-9.3)	0	0
pyroxene hornblende gabbro	55.8 (47.6-62.9)	0.1 (0-0.3)	11.4 (6.8-14.0)	0.4 (0-1.3)	30.1 (13.6-38.9)	1.3 (0-3.0)	0	0.1 (0-0.3)	0	0
trondhjemitite	96.6 (95.1-98.0)	0	0	0	2.6 (1.1-4.0)	0.4 (0-0.9)	0.3 (0-0.6)	0	0	0.1 (0-0.3)
West Arm Rise										
pyroxene hornblende gabbro	47.8 (31.6-58.3)	0	6.8 (0-15.8)	1.8 (0-7.5)	37.4 (22.8-51.3)	6.6 (0-17.1)	0	0	0	0
hornblende gabbro	69.0	0	0.9	0.5	26.2	3.3	0	0	0	0.1
trondhjemitite	91.5 (82.3-98.5)	0	0	0	5.1 (0.4-15.1)	1.12 (0-3.3)	2.1 (0-12.5)	0	0	0.1 (0-0.4)
West Shoulder Ridge										
hornblende pyroxene gabbro	58.3	0.2	21.9	0.2	12.1	5.7	0.9	0.6	0.2	0
pyroxene hornblende gabbro	58.3 (48.0-75.6)	0.2 (0-2.9)	10.2 (0.5-16.61)	0.3 (0-1.5)	21.4 (8.8-29.1)	8.0 (3.1-12.6)	0.6 (0-5.0)	1.2 (0-5.0)	0.03 (0-0.1)	0
hornblende gabbro	67.1	0	0	0	26.6	6.3	0	0	0	0
Neck Peak										
gabbro	39.8	0	37.5	0	0.9	7.5	13.9	0.5	0	0
hornblende pyroxene gabbro	62.6 (57.5-67.8)	0.1 (0-0.3)	20.6 (20.4-20.9)	2.1 (0.8-3.5)	10.5 (6.6-14.4)	3.9 (3.5-4.4)	0	0	0.1 (0-0.1)	0

Table 4. List of the studied sample from the Godzilla Megamullion (1/4)

Dredge/Dive	No	Lithology	Dredge/Dive	No	Lithology
<i>KR03-01 D06 (West Leg Ridge)</i>			<i>KR03-01 D09 (West Arm Rise)</i>		
	1001c	Pyroxene hornblende gabbro		101	Trondhjemite
	1001f	Hornblende pyroxene gabbro*		102	Trondhjemite
	1002	Pyroxene hornblende gabbro			
	1003	Pyroxene hornblende gabbro	<i>KR03-01 D10 (West Arm Rise)</i>		
	1004	Pyroxene hornblende gabbro		101	Hornblende gabbro
	1005	Pyroxene hornblende gabbro		102	Pyroxene hornblende gabbro
	1006	Pyroxene hornblende gabbro		103	Pyroxene hornblende gabbro
	1007	Pyroxene hornblende gabbro		104	Pyroxene hornblende gabbro
	1008	Pyroxene hornblende gabbro		105	Pyroxene hornblende gabbro
	1009	Pyroxene hornblende gabbro		106	Hornblende gabbro
	1011	Pyroxene hornblende gabbro		107	Hornblende gabbro
	1012	Pyroxene hornblende gabbro		112	Pyroxene hornblende gabbro
	1013	Pyroxene hornblende gabbro		113	Hornblende gabbro
	1103	Pyroxene hornblende gabbro		115	Pyroxene hornblende gabbro
	1104	Pyroxene hornblende gabbro		117	Trondhjemite
	1107	Pyroxene hornblende gabbro		118	Hornblende gabbro
	1201	Hornblende gabbro		123	Pyroxene hornblende gabbro
	1202	Pyroxene hornblende gabbro		124	Hornblende gabbro
	1204	Pyroxene hornblende gabbro		126	Hornblende gabbro
	1205	Pyroxene hornblende gabbro		127	Pyroxene hornblende gabbro
	1207	Pyroxene hornblende gabbro		128	Pyroxene hornblende gabbro
	1208	Pyroxene hornblende gabbro		129	Hornblende gabbro
	1214	Pyroxene hornblende gabbro		132	Trondhjemite
	1301	Pyroxene hornblende gabbro		133	Hornblende gabbro
	1303	Pyroxene hornblende gabbro		143	Pyroxene hornblende gabbro
	1304	Hornblende gabbro		144	Hornblende gabbro
	1305	Pyroxene hornblende gabbro		146	Trondhjemite
	1306	Pyroxene hornblende gabbro		148	Hornblende gabbro
	1401	Pyroxene hornblende gabbro*		151	Pyroxene hornblende gabbro
	1402	Pyroxene hornblende gabbro*		154	Hornblende gabbro
	1403	Pyroxene hornblende gabbro		155	Pyroxene hornblende gabbro
	1404	Pyroxene hornblende gabbro*		159	Pyroxene hornblende gabbro
	1405	Pyroxene hornblende gabbro*		162	Pyroxene hornblende gabbro
	1406	Pyroxene hornblende gabbro		163	Hornblende gabbro
	1501	Pyroxene hornblende gabbro*		302	Trondhjemite
	1503	Pyroxene hornblende gabbro*			
	1504	Pyroxene hornblende gabbro			
	1505	Pyroxene hornblende gabbro*			
	1506	Hornblende pyroxene gabbro*			
	1509	Pyroxene hornblende gabbro			
	1511	Hornblende pyroxene gabbro			
	1606A	Pyroxene hornblende gabbro			

* Fine grain type

Continued (2/4)

Dredge/Dive	No	Lithology
<i>KH07-02 D14 (East Leg Ridge)</i>		
	001	Hornblende gabbro
	002	Hornblende pyroxene gabbro
	003	Hornblende pyroxene gabbro
	004	Pyroxene hornblende gabbro
	005	Pyroxene hornblende gabbro
	006	Pyroxene hornblende gabbro
	007	Hornblende pyroxene gabbro
	008	Pyroxene hornblende gabbro
	009	Hornblende gabbro
	010	Gabbro
	011	Pyroxene hornblende gabbro
	012	Pyroxene hornblende gabbro
	013	Gabbro
	014	Pyroxene hornblende gabbro
	015	Pyroxene hornblende gabbro
	016	Pyroxene hornblende gabbro
	017	Pyroxene hornblende gabbro
	018	Gabbro
	019	Pyroxene hornblende gabbro
	020	Pyroxene hornblende gabbro
	021	Gabbro
	022	Gabbro
	023	Pyroxene hornblende gabbro
	024	Pyroxene hornblende gabbro
	025	Pyroxene hornblende gabbro
	026	Gabbro
	027	Pyroxene hornblende gabbro
	028	Pyroxene hornblende gabbro
	029	Hornblende gabbro
	030	Hornblende gabbro
	032	Pyroxene hornblende gabbro
	033	Gabbro
	034	Pyroxene hornblende gabbro
	035	Pyroxene hornblende gabbro
	036	Hornblende gabbro
	037	Hornblende gabbro
	040	Pyroxene hornblende gabbro
	041	Hornblende gabbro
	042	Hornblende gabbro
	043	Pyroxene hornblende gabbro
	044	Pyroxene hornblende gabbro
	045	Hornblende pyroxene gabbro
	046	Pyroxene hornblende gabbro
	047	Pyroxene hornblende gabbro
	048	Hornblende gabbro

Dredge/Dive	No	Lithology
<i>KH07-02 D14 (East Leg Ridge)</i>		
	049	Hornblende pyroxene gabbro
	050	Pyroxene hornblende gabbro
	051	Pyroxene hornblende gabbro
	052	Hornblende gabbro
	053	Pyroxene hornblende gabbro
	054	Hornblende gabbro
	055	Hornblende gabbro
	056	Pyroxene hornblende gabbro
	057	Pyroxene hornblende gabbro
	058	Pyroxene hornblende gabbro
	059*	Pyroxene hornblende gabbro

Continued (3/4)

Dredge/Dive	No	Lithology
<i>KH07-02 D18 (West Hipbone Rise)</i>		
	001	Pyroxene hornblende gabbro
	002Gr	Trondhjemite
	002Gb	Pyroxene hornblende gabbro
	003	Pyroxene hornblende gabbro
	004	Pyroxene hornblende gabbro
	005Gr	Hornblende pyroxene gabbro
	005Gb	Trondhjemite
	006	Pyroxene hornblende gabbro
	007	Pyroxene hornblende gabbro
	008	Pyroxene hornblende gabbro
	009	Pyroxene hornblende gabbro
	010	Pyroxene hornblende gabbro
	011	Pyroxene hornblende gabbro
	012	Pyroxene hornblende gabbro
	013	Pyroxene hornblende gabbro
	014	Pyroxene hornblende gabbro
	015	Trondhjemite
	016	Pyroxene hornblende gabbro
	017	Pyroxene hornblende gabbro
	018	Hornblende pyroxene gabbro
	019	Pyroxene hornblende gabbro
	020	Pyroxene hornblende gabbro
	021	Hornblende pyroxene gabbro
	022	Pyroxene hornblende gabbro
	023	Hornblende gabbro
	024	Pyroxene hornblende gabbro
	025	Pyroxene hornblende gabbro
	026	Pyroxene hornblende gabbro
	027	Pyroxene hornblende gabbro
	028	Pyroxene hornblende gabbro
	029	Hornblende pyroxene gabbro
	030	Hornblende pyroxene gabbro
	031	Pyroxene hornblende gabbro
	032	Pyroxene hornblende gabbro
	033	Pyroxene hornblende gabbro
	034	Pyroxene hornblende gabbro
	036	Pyroxene hornblende gabbro
	037	Pyroxene hornblende gabbro
	038	Pyroxene hornblende gabbro
	039	Pyroxene hornblende gabbro
	040	Pyroxene hornblende gabbro
	041	Hornblende gabbro
	043	Pyroxene hornblende gabbro
	045	Pyroxene hornblende gabbro
	046	Pyroxene hornblende gabbro

Dredge/Dive	No	Lithology
<i>KH07-02 D18 (West Hipbone Rise)</i>		
	047	Hornblende gabbro
	048f	Hornblende pyroxene gabbro
	048c	Hornblende pyroxene gabbro
	049	Hornblende pyroxene gabbro
	050	Hornblende pyroxene gabbro
	051	Pyroxene hornblende gabbro
	052	Pyroxene hornblende gabbro*
	053	Olivine gabbro
	054	Hornblende pyroxene gabbro
	055	Hornblende pyroxene gabbro
	056	Pyroxene hornblende gabbro
	057	Hornblende pyroxene gabbro
	058	Hornblende pyroxene gabbro
	059	Hornblende pyroxene gabbro
	060	Hornblende pyroxene gabbro
	061	Hornblende pyroxene gabbro

KH07-02 D25 (West Arm Rise)

201	Trondhjemite
-----	--------------

* Fine grain type

Continued (4/4)

Dredge/Dive	No	Lithology
<i>YK09-05 6K#1140 (West Arm Rise)</i>		
	R12	Trondhjemite
	R13	Trondhjemite

YK09-05 6K#1141 (West Arm Rise)

	R01	Hornblende gabbro
	R02Gb	Pyroxene hornblende gabbro
	R02Gr	Trondhjemite
	R03Gb	Hornblende gabbro
	R03Gr	Hornblende gabbro
	R04	Pyroxene hornblende gabbro
	R06	Pyroxene hornblende gabbro*
	R07	Trondhjemite
	R08OxGb	Pyroxene hornblende gabbro
	R08McGb	Pyroxene hornblende gabbro*
	R09OxGb	Pyroxene hornblende gabbro
	R10Gr	Pyroxene hornblende gabbro
	R11CGb	Hornblende gabbro
	R11fGb	Hornblende gabbro*
	R11Gb	Pyroxene hornblende gabbro
	R13Gr	Hornblende gabbro
	R13OxGb	Hornblende gabbro
	R14OxGb	Pyroxene hornblende gabbro
	R14OxGr	Trondhjemite
	R15OxGb	Pyroxene hornblende gabbro
	R16OxGb	Pyroxene hornblende gabbro
	R18	Hornblende gabbro*

YK09-05 6K#1147 (West Leg Ridge)

	R18	Hornblende gabbro
	R01	Troctolite
	R02	Olivine gabbro
	R03	Troctolite
	R04	Troctolite
	R05	Olivine gabbro
	R06	Troctolite
	R07	Troctolite
	R08	Olivine gabbro
	R09	Troctolite
	R11	Gabbro
	R14	Olivine gabbro

* Fine grain type

Dredge/Dive	No	Lithology
<i>YK11-08 6K#1270 (West Shoulder Ridge)</i>		
	R05c	Pyroxene hornblende gabbro
	R05f	Pyroxene hornblende gabbro*
	R06c	Pyroxene hornblende gabbro
	R06f	Hornblende pyroxene gabbro*
	R08	Hornblende pyroxene gabbro
	R11	Pyroxene hornblende gabbro
	R12	Pyroxene hornblende gabbro

YK11-08 6K#1275 (Neck Peake)

	R02	Hornblende pyroxene gabbro
	R04	Hornblende pyroxene gabbro

YK11-08 6K#1276 (Neck Peake)

	R05c	Gabbro
	R05f	Hornblende pyroxene gabbro*

YK11-08 YKDT#115 (West Shoulder Ridge)

	R57	Hornblende gabbro
--	-----	-------------------

YK11-08 YKDT#116 (West Shoulder Ridge)

	R01	Hornblende pyroxene gabbro
	R02	Hornblende pyroxene gabbro
	R03	Pyroxene hornblende gabbro
	R04f	Hornblende gabbro
	R05	Hornblende pyroxene gabbro
	R06	Pyroxene hornblende gabbro
	R07	Pyroxene hornblende gabbro
	R08	Pyroxene hornblende gabbro
	R09	Pyroxene hornblende gabbro*
	R10	Pyroxene hornblende gabbro*
	R11	Hornblende pyroxene gabbro

Table 5. Summary of sampled gabbroic rocks

	East Leg Ridge (ELR)	West Leg Ridge (WLR)	West Hipbone Rise (WHR)	West Arm Rise (WAR)	West Shoulder Ridge (WSR)	Neck Peak (NP)	total
Troctolite	0	6	0	0	0	0	6
Olivine Gabbro	0	4	1	0	0	0	5
Gabbro	8	1	0	0	0	1	10
Hornblende Pyroxene Gabbro	6	3	16	0	6	3	34
Pyroxene Hornblende Gabbro	31	38	39	25	12	0	145
Hornblende Gabbro	11	2	3	20	2	0	38
Trondhjemite	0	0	3	19	0	0	22
total	56	54	62	64	20	4	260

Table 6. Representative analyses of plagioclase in gabbroic rocks from the Godzilla Megamullion (1/4)

lithology	troctolite				olivine gabbro				gabbro				hornblende pyroxene gabbro												
	YK09	YK09	YK09	YK09	KH	KH	KH	KH	KH	KH	KH	KH	KH	KH	KH	KH	KH	KH	KH	KH	KH	KH	KH	KH	KH
cruise	1147	1147	1147	1147	D18	D18	D18	D18	D14	D14	D14	D14	D14	D14	D14	D14	D14	D14	D14	D14	D14	D14	D18	D18	D18
sample No.	R01	R02	R05	R05	053	053	053	small	013	018	018	018	026	R11	002**	003**	007	005	005	048f	048f	small	048f	048f	048f
No. anal.	29	13	22	22	25	11	11	11	8	7	25	20	28	12	48	27	23	23	23	23	23	13	13	13	13
wt. %																									
SiO ₂	48.97	49.74	50.89	56.98	56.88	56.88	56.88	50.88	51.06	50.35	52.89	49.05	57.51	55.10	54.99	56.05	55.96	55.96	56.80	56.80	56.80	56.80	56.80	56.80	56.80
TiO ₂			0.05	0.06	0.05	0.05	0.05	0.04	0.06	0.04	0.04	0.03	0.08	0.07	0.05	0.04	0.07	0.07	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
Al ₂ O ₃	32.64	31.95	30.58	26.61	26.65	26.65	26.65	28.67	28.73	29.27	29.62	32.18	26.96	26.33	28.33	27.24	26.82	26.82	26.41	26.41	26.41	26.41	26.41	26.41	26.41
Cr ₂ O ₃	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
FeO	0.32	0.31	0.42	0.17	0.14	0.14	0.14	0.41	0.41	0.34	0.42	0.19	0.32	0.32	0.29	0.11	0.15	0.15	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
NiO	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
MnO	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
MgO	0.15	0.10	0.05	0.01	0.01	0.01	0.01	0.04	0.04	0.03	0.06	0.03	0.03	0.02	0.03	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
CaO	16.19	15.57	13.72	8.61	8.67	8.67	8.67	12.22	12.18	12.66	12.81	15.47	9.20	9.08	11.03	9.45	9.10	9.10	8.57	8.57	8.57	8.57	8.57	8.57	8.57
Na ₂ O	2.20	2.58	3.52	6.48	6.60	6.60	6.60	4.02	4.11	3.70	4.13	2.57	6.28	5.86	5.13	5.99	6.15	6.15	6.53	6.53	6.53	6.53	6.53	6.53	6.53
K ₂ O	0.02	0.03	0.07	0.06	0.04	0.04	0.04	0.05	0.06	0.05	0.07	0.03	0.09	0.11	0.12	0.03	0.11	0.11	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
Total	100.51	100.30	99.34	99.03	99.08	99.08	99.08	96.37	96.68	96.44	100.09	99.57	100.54	96.93	100.02	98.96	98.41	98.41	98.56	98.56	98.56	98.56	98.56	98.56	98.56
O =	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Si	2.231	2.266	2.333	2.552	2.573	2.573	2.573	2.395	2.396	2.369	2.398	2.251	2.568	2.553	2.481	2.542	2.552	2.552	2.581	2.581	2.581	2.581	2.581	2.581	2.581
Ti	0.000	0.000	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001	0.003	0.002	0.002	0.001	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	
Al	1.752	1.716	1.652	1.405	1.421	1.421	1.421	1.590	1.589	1.623	1.583	1.740	1.419	1.438	1.507	1.456	1.442	1.442	1.415	1.415	1.415	1.415	1.415	1.415	
Cr	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
Fe	0.012	0.012	0.016	0.006	0.005	0.005	0.005	0.016	0.016	0.013	0.016	0.007	0.012	0.012	0.011	0.004	0.006	0.006	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	
Ni	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
Mn	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
Mg	0.010	0.007	0.003	0.001	0.001	0.001	0.001	0.003	0.003	0.002	0.004	0.002	0.002	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	
Ca	0.790	0.760	0.674	0.413	0.420	0.420	0.420	0.616	0.612	0.638	0.622	0.760	0.440	0.451	0.533	0.459	0.445	0.445	0.417	0.417	0.417	0.417	0.417	0.417	
Na	0.194	0.227	0.313	0.562	0.579	0.579	0.579	0.366	0.374	0.337	0.363	0.229	0.544	0.526	0.448	0.527	0.543	0.543	0.575	0.575	0.575	0.575	0.575	0.575	
K	0.001	0.002	0.004	0.004	0.002	0.002	0.002	0.003	0.003	0.003	0.004	0.002	0.005	0.006	0.007	0.002	0.006	0.006	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	
Total	4.991	4.990	4.998	4.947	5.005	5.005	5.005	4.993	4.996	4.988	4.993	4.993	4.994	4.992	4.992	4.993	4.999	4.999	4.999	4.999	4.999	4.999	4.999	4.999	
An	80.2	76.9	68.0	42.2	42.0	42.0	42.0	62.5	61.9	65.2	62.9	76.8	44.5	45.8	53.9	46.5	44.7	44.7	42.0	42.0	42.0	42.0	42.0	42.0	42.0
Ab	19.7	23.0	31.6	57.4	57.8	57.8	57.8	37.2	37.8	34.5	36.7	23.1	55.0	53.5	45.3	53.3	54.6	54.6	57.9	57.9	57.9	57.9	57.9	57.9	57.9
Or	0.1	0.2	0.4	0.4	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.4	0.2	0.5	0.7	0.7	0.2	0.6	0.6	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2

* fine grain type (microgabbro)

** oxide mineral rich type

*** fine grain and oxide mineral rich type

KR: KR03-01

KH: KH07-02

YK09: YK09-05

YK11: YK11-08

Table 6. continued (2/4)

lithology	hornblende pyroxene gabbro				pyroxene hornblende gabbro											
	cruise	YK11	YK11	YK11	KR	D6	KR	D6	KR	D6	KR	D6	KR	D6	KR	D6
sample No.		1270	1270	R08	1001c	1001c	1007**	1007**	1007**	1007**	1205**	1205**	1207**	1207**	1207**	1207**
No. anal.	33	21	21		12	10	37	15	26	21	15	15	11	7	20	12
wt. %																
SiO ₂	60.34	55.60	55.60		56.30	56.13	53.84	60.58	60.67	60.29	60.62	59.24	59.82	60.51	59.82	63.69
TiO ₂	0.06	0.06	0.06		0.06	0.02	0.05	0.04	0.03	0.05	0.03	0.05	0.04	0.04	0.04	0.02
Al ₂ O ₃	24.47	27.77	27.77		25.33	25.56	28.88	24.72	24.57	24.20	23.94	24.66	25.31	23.97	25.31	22.85
Cr ₂ O ₃	0.00	0.01	0.01		0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01
FeO	0.15	0.30	0.30		0.15	0.22	0.13	0.22	0.22	0.23	0.22	0.22	0.24	0.21	0.24	0.17
NiO	0.00	0.01	0.01		0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	0.03	0.02	0.01	0.02	0.01
MnO	0.01	0.01	0.01		0.00	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.00	0.01	0.01
MgO	0.01	0.04	0.04		0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01
CaO	5.89	9.66	9.66		7.83	7.85	11.41	6.25	6.21	6.04	5.71	6.72	7.40	5.90	7.40	4.23
Na ₂ O	7.91	5.86	5.86		6.47	6.47	4.92	7.87	8.04	7.97	8.32	7.48	7.35	7.86	7.35	9.01
K ₂ O	0.21	0.08	0.08		0.07	0.05	0.17	0.16	0.13	0.19	0.20	0.18	0.09	0.20	0.09	0.20
Total	99.04	99.40	99.40		96.25	96.35	99.47	99.88	99.91	99.02	99.09	98.61	100.30	98.72	100.30	100.20
O =	8	8	8		8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Si	2.708	2.516	2.516		2.614	2.605	2.446	2.699	2.677	2.710	2.722	2.678	2.660	2.724	2.660	2.809
Ti	0.002	0.002	0.002		0.002	0.001	0.002	0.001	0.001	0.002	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001
Al	1.294	1.481	1.481		1.386	1.398	1.547	1.298	1.277	1.282	1.267	1.314	1.329	1.272	1.329	1.188
Cr	0.000	0.000	0.000		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe	0.006	0.011	0.011		0.006	0.009	0.005	0.008	0.008	0.009	0.008	0.008	0.009	0.008	0.009	0.006
Ni	0.000	0.000	0.000		0.001	0.001	0.001	0.000	0.001	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000	0.001	0.000
Mn	0.000	0.000	0.000		0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
Mg	0.000	0.003	0.003		0.001	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000
Ca	0.283	0.468	0.468		0.389	0.390	0.556	0.298	0.293	0.291	0.274	0.326	0.354	0.285	0.354	0.200
Na	0.687	0.514	0.514		0.582	0.582	0.433	0.679	0.687	0.694	0.724	0.655	0.632	0.686	0.632	0.770
K	0.012	0.005	0.005		0.004	0.003	0.010	0.009	0.007	0.011	0.012	0.010	0.005	0.011	0.005	0.011
Total	4.993	5.001	5.001		4.984	4.989	5.000	4.995	4.954	5.000	5.011	4.996	4.993	4.987	4.993	4.987
An	28.8	47.5	47.5		39.9	40.0	55.6	30.2	29.7	29.2	27.2	32.9	35.7	29.0	35.7	20.4
Ab	70.0	52.1	52.1		59.7	59.7	43.4	68.8	69.6	69.7	71.7	66.1	63.7	69.9	63.7	78.4
Or	1.2	0.5	0.5		0.4	0.3	1.0	0.9	0.7	1.1	1.2	1.0	0.5	1.1	0.5	1.2

* fine grain gabbro (microgabbro)

** oxide mineral rich type

*** fine grain and oxide mineral rich type

KR: KR03-01

KH: KH07-02

YK09: YK09-05

YK11: YK11-08

Table 6. continued (3/4)

lithology	pyroxene hornblende gabbro															
	KH	KH	KH	KH	KH	KH	KH	KH	KH	KH	KH	KH	KH	KH	KH	KH
sample No.	D18	D18	D18	D18	D18	D18	D18	D18	D18	D18	D18	D18	D18	D18	D18	D18
	002	002	056	056	056	056	056	056	056	056	056	056	056	056	056	056
		small		small		small		small		small		small		small		small
No. anal.	1	14	4	3	33	5	3	14	1	7	1	14	1	7	1	33
wt. %																
SiO ₂	55.65	56.91	57.16	65.66	57.20	56.63	64.10	64.72	63.02	60.11	61.45	63.02	60.11	60.11	61.45	58.42
TiO ₂	0.00	0.04	0.09	0.00	0.05	0.04	0.04	0.02	0.05	0.05	0.02	0.05	0.05	0.05	0.02	0.04
Al ₂ O ₃	27.30	26.40	27.01	21.58	26.59	26.62	20.67	20.68	21.09	24.17	24.12	21.09	24.17	24.17	24.12	25.90
Cr ₂ O ₃	0.00	0.01	0.02	0.02	0.01	0.00	0.04	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01
FeO	0.10	0.31	0.30	0.18	0.14	0.27	0.18	0.15	0.13	0.07	0.09	0.13	0.07	0.07	0.09	0.11
NiO	0.04	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.01	0.01	0.02	0.00
MnO	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01	0.01	0.03	0.00	0.04	0.02	0.03	0.04	0.02	0.02	0.03	0.01
MgO	0.00	0.26	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01
CaO	9.20	8.50	8.97	2.52	8.63	8.97	1.91	1.68	2.80	5.72	5.51	2.80	5.72	5.72	5.51	7.46
Na ₂ O	6.13	6.64	6.09	10.17	6.53	6.38	9.97	10.34	9.63	8.22	8.36	9.63	8.22	8.22	8.36	7.05
K ₂ O	0.01	0.04	0.12	0.03	0.07	0.04	0.11	0.12	0.09	0.14	0.14	0.09	0.14	0.14	0.14	0.06
Total	98.41	99.14	99.81	100.18	99.25	99.01	97.07	97.73	96.85	98.52	99.74	96.85	98.52	98.52	99.74	99.06
O =	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Si	2.537	2.575	2.567	2.882	2.582	2.567	2.900	2.908	2.866	2.712	2.735	2.866	2.712	2.712	2.735	2.630
Ti	0.000	0.001	0.003	0.000	0.002	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.001	0.002	0.002	0.002	0.001	0.001
Al	1.467	1.407	1.430	1.117	1.414	1.422	1.102	1.095	1.130	1.285	1.265	1.130	1.285	1.285	1.265	1.374
Cr	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe	0.004	0.012	0.011	0.007	0.005	0.010	0.007	0.006	0.005	0.003	0.003	0.005	0.003	0.003	0.003	0.004
Ni	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000
Mn	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.002	0.001	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001	0.000
Mg	0.000	0.017	0.001	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
Ca	0.449	0.412	0.431	0.119	0.417	0.436	0.092	0.081	0.136	0.277	0.262	0.136	0.277	0.277	0.262	0.360
Na	0.541	0.582	0.530	0.865	0.571	0.561	0.874	0.900	0.848	0.719	0.721	0.848	0.719	0.719	0.721	0.615
K	0.000	0.002	0.007	0.002	0.004	0.002	0.007	0.007	0.005	0.008	0.008	0.005	0.008	0.008	0.008	0.003
Total	5.000	5.012	4.983	4.992	4.997	5.002	4.987	4.998	4.994	5.007	4.997	4.994	5.007	5.007	4.997	4.990
An	45.3	41.3	44.6	12.1	42.1	43.6	9.5	8.2	13.8	27.6	26.5	13.8	27.6	27.6	26.5	36.8
Ab	54.6	58.4	54.7	87.8	57.5	56.1	89.8	91.1	85.7	71.6	72.8	85.7	71.6	71.6	72.8	62.9
Or	0.0	0.2	0.7	0.2	0.4	0.2	0.7	0.7	0.5	0.8	0.8	0.5	0.8	0.8	0.8	0.3
* fine grain gabbro (microgabbro)																
** oxide mineral rich type																
*** fine grain and oxide mineral rich type																
KR: KR03-01																
KH: KH07-02																
YK09: YK09-05																
YK11: YK11-08																

Table 6. continued (4/4)

lithology	hornblende gabbro						trondhjemite			
	KR	KH	KH	YK09	KR		KH	KH	KH	KH
cruise	D6	D14	D14	I141	D10		D18	D18	D18	D25
sample No.	1304	001	001	R13	107		002	005	005	201
		small			small					
No. anal.	38	3	16	30	3		25	7	35	
wt. %										
SiO ₂	60.44	67.04	65.45	65.01	65.38		66.38	66.34	67.02	
TiO ₂	0.05	0.01	0.01	0.03	0.01		0.01	0.01	0.02	
Al ₂ O ₃	24.11	21.05	21.74	21.24	20.26		19.89	20.31	19.69	
Cr ₂ O ₃	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01		0.01	0.01	0.01	
FeO	0.19	0.22	0.20	0.10	0.22		0.23	0.17	0.21	
NiO	0.01	0.05	0.02	0.01	0.00		0.02	0.01	0.01	
MnO	0.01	0.03	0.01	0.01	0.00		0.01	0.01	0.01	
MgO	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01		0.01	0.01	0.00	
CaO	6.01	2.07	3.07	2.41	1.44		1.01	1.46	0.75	
Na ₂ O	7.93	10.24	9.67	10.17	10.34		11.09	10.48	10.85	
K ₂ O	0.22	0.31	0.37	0.20	0.07		0.05	0.16	0.49	
Total	99.00	101.02	100.56	99.19	97.75		98.72	98.96	99.06	
O =	8	8	8	8	8		8	8	8	
Si	2.715	2.917	2.870	2.885	2.932		2.950	2.939	2.967	
Ti	0.002	0.000	0.000	0.001	0.000		0.000	0.000	0.001	
Al	1.277	1.079	1.123	1.111	1.071		1.042	1.060	1.027	
Cr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001		0.000	0.000	0.000	
Fe	0.007	0.008	0.007	0.004	0.008		0.009	0.006	0.008	
Ni	0.000	0.002	0.001	0.000	0.000		0.001	0.000	0.001	
Mn	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000		0.000	0.000	0.000	
Mg	0.001	0.000	0.001	0.000	0.001		0.001	0.001	0.000	
Ca	0.290	0.096	0.144	0.114	0.069		0.048	0.069	0.036	
Na	0.691	0.863	0.822	0.874	0.898		0.955	0.899	0.931	
K	0.012	0.017	0.021	0.011	0.004		0.003	0.009	0.028	
Total	4.996	4.984	4.990	5.001	4.984		5.008	4.985	4.998	
An	29.2	9.9	14.6	11.4	7.1		4.8	7.1	3.6	
Ab	69.6	88.4	83.3	87.4	92.4		94.9	92.0	93.6	
Or	1.2	1.8	2.1	1.1	0.4		0.3	0.9	2.8	
* fine grain gabbro (microgabbro)										
** oxide mineral rich type										
*** fine grain and oxide mineral rich type										
KR: KR03-01										
KH: KH07-02										
YK09: YK09-05										
YK11: YK11-08										

Table 7. An number in plagioclase

		Euhedral plagioclase				small plagioclase			
		average	max	min.	N.	average	max	min.	N.
Troctolite		80.2	84	67	55				
	WLR	80.2	84	67	55				
Olivine gabbro		59.2	87	37	63	42.0	44	39	11
	WLR	71.3	87	54	37				
	WHR	42.0	47	37	26	42.0	44	39	11
Gabbro		65.9	83	44	89				
	ELR	62.8	70	44	69				
	WLR	76.8	83	68	20				
Hornblend pyroxene gabbro		49.6	73	21	122	43.1	51	34	19
	ELR	54.9	73	39	47	48.1	51	45	3
	WHR	45.9	57	21	54	42.2	45	34	16
	WSR	47.5	51	46	21				
HPG (oxide mineral rich type)		45.5	49	39	60				
	ELR	45.5	49	39	60				
HPG (fine grain and oxide mineral rich type)		28.8	41	21	33				
	WSR	28.8	41	21	33				
Pyroxene hornblende gabbro		39	48	8	91	28.8	48	3	45
	WLR	40	42	38	13	40.1	42	39	12
	WHR	43	48	33	43	37.2	48	8	19
	WAR	9.8	11	8	4	7.8	11	3	14
	WSR	36.8	47	24	31				
PHG (fine grain type)		55.7	73	48	37				
	WLR	55.7	73	48	37				
PHG (oxide mineral rich type)		29.6	54	8	82	24.1	33	8	70
	ELR	35.9	54	16	20	20.4	30	11	12
	WLR	30.4	35	20	40	28.7	33	24	40
	WAR	21.8	34	8	22	13.9	32	8	18
HG		19.8	35	7	89	8.5	11	7	6
	ELR	14	21	7	21	9.9	11	9	3
	WLR	29.9	34	25	38				
	WAR	11.4	16	8	30	7.1	8	7	3
Trondhjemite		4.7	15	3	62	3.6	4	3	9
	WHR	5.6	15	3	34				
	WAR	3.6	4	3	28	3.6	4	3	9

Table 8. Representative analyses of clinopyroxene in gabbroic rocks from the Godzilla Megamullion (1/2)

lithology cruise sample No.	troctolite			olivine gabbro			gabbro			hornblende pyroxene gabbro					
	YK09 1147 R01	YK09 1147 R06		YK09 1147 R02	YK09 1147 R05	KH D18 053	KH D14 026	YK09 1147 R11		KR D6 1001*	KH D14 007	KH D14 002**	KH D18 005		
No. anal.	5	22		21	38	7	16	35		30	7	11	16		
wt. %															
SiO ₂	52.07	52.26		52.11	52.78	51.63	52.88	53.34		52.21	52.51	52.08	52.14		
TiO ₂	0.66	0.68		0.42	0.35	0.92	0.52	0.28		0.68	0.63	0.84	0.62		
Al ₂ O ₃	3.42	3.12		3.42	2.41	2.55	2.57	2.56		1.96	2.38	2.21	2.84		
Cr ₂ O ₃	1.13	1.15		0.95	0.43	0.03	0.18	0.44		0.13	0.04	0.01	0.06		
FeO	4.26	4.23		4.40	6.01	8.55	5.63	5.10		8.98	8.64	11.11	6.10		
NiO	0.03	0.03		0.02	0.02	0.03	0.02	0.03		0.01	0.01	0.01	0.02		
MnO	0.15	0.13		0.14	0.20	0.24	0.17	0.15		0.26	0.22	0.33	0.19		
MgO	17.44	17.04		17.15	16.55	14.70	15.97	17.98		14.67	15.05	14.11	15.08		
CaO	20.15	20.90		20.37	20.59	19.88	21.97	19.60		20.25	20.22	19.58	21.14		
Na ₂ O	0.28	0.37		0.36	0.31	0.57	0.34	0.26		0.41	0.34	0.43	0.72		
K ₂ O	0.00	0.00		0.01	0.01	0.01	0.00	0.00		0.01	0.03	0.01	0.01		
Total	99.58	99.92		99.35	99.66	99.10	100.25	99.75		99.57	100.09	100.72	98.93		
O =	6	6		6	6	6	6	6		6	6	6	6		
Si	1.905	1.910		1.912	1.942	1.933	1.937	1.945		1.949	1.944	1.937	1.938		
Ti	0.018	0.019		0.012	0.010	0.026	0.014	0.008		0.019	0.018	0.023	0.017		
Al	0.147	0.134		0.148	0.104	0.112	0.111	0.110		0.086	0.104	0.097	0.125		
Cr	0.033	0.033		0.027	0.013	0.001	0.005	0.013		0.004	0.001	0.000	0.002		
Fe	0.130	0.129		0.135	0.185	0.267	0.172	0.155		0.280	0.267	0.345	0.190		
Ni	0.001	0.001		0.001	0.001	0.001	0.001	0.001		0.000	0.000	0.000	0.001		
Mn	0.005	0.004		0.004	0.006	0.007	0.005	0.005		0.008	0.007	0.010	0.006		
Mg	0.950	0.927		0.937	0.907	0.819	0.871	0.976		0.816	0.830	0.782	0.835		
Ca	0.789	0.818		0.800	0.811	0.797	0.862	0.765		0.809	0.802	0.780	0.842		
Na	0.020	0.026		0.026	0.022	0.041	0.024	0.018		0.030	0.024	0.031	0.052		
K	0.000	0.000		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		0.001	0.002	0.000	0.001		
Total	3.997	4.001		4.002	4.001	4.006	4.003	3.996		4.002	3.999	4.007	4.007		
X _{Mg}	0.879	0.878		0.874	0.831	0.754	0.835	0.863		0.744	0.756	0.694	0.815		
En	50.8	49.5		50.1	47.7	43.5	45.7	51.5		42.8	43.7	41.0	44.8		
Fs	7.0	6.9		7.2	9.7	14.2	9.0	8.2		14.7	14.1	18.1	10.2		
Wo	42.2	43.6		42.7	42.6	42.3	45.2	40.4		42.5	42.2	40.9	45.1		

* fine grain gabbro (microgabbro)

** oxide mineral rich type

*** fine grain and oxide mineral rich type

KR: KR03-01

KH: KH07-02

YK09: YK09-05

YK11: YK11-08

Table 8. Continued (2/2)

lithology	hornblende pyroxene gabbro				pyroxene hornblende gabbro									
	KH D18 048f	YK11 1270 R08	YK11 1270 R06f***		KR D6 1401*	KR D6 1007**	KR D6 1205**	KR D6 1207**	KH D18 002	KH D18 056	KH D18 52	KR D10 102**	YK11 1270 R12**	
No. anal.	6	5	30		18	26	4	15	12	17	19	6	13	
wt. %														
SiO ₂	51.32	51.84	51.73		52.68	50.69	50.23	50.88	51.91	51.95	51.62	51.65	51.88	
TiO ₂	0.87	0.91	0.59		0.48	0.42	0.51	0.29	0.68	0.84	0.96	0.48	0.39	
Al ₂ O ₃	2.39	2.44	1.49		1.40	1.02	1.02	1.08	2.43	2.59	2.50	1.25	1.90	
Cr ₂ O ₃	0.01	0.11	0.01		0.09	0.01	0.01	0.02	0.04	0.02	0.02	0.02	0.01	
FeO	8.58	7.66	11.54		8.35	20.54	19.62	17.53	6.72	8.79	8.62	11.64	9.66	
NiO	0.01	0.00	0.01		0.02	0.02	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	
MnO	0.28	0.23	0.42		0.24	0.54	0.54	0.49	0.21	0.25	0.26	0.40	0.30	
MgO	14.55	14.64	12.25		15.01	9.33	9.92	10.38	15.36	14.44	14.64	11.91	13.69	
CaO	20.34	20.63	20.90		20.85	17.06	16.91	18.00	21.10	20.32	20.41	20.83	20.85	
Na ₂ O	0.52	0.87	0.65		0.35	0.34	0.38	0.36	0.45	0.57	0.53	0.61	0.64	
K ₂ O	0.01	0.01	0.00		0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.02	0.01	
Total	98.88	99.34	99.58		99.47	99.98	99.15	99.05	98.90	99.78	99.58	98.84	99.35	
O =	6	6	6		6	6	6	6	6	6	6	6	6	
Si	1.930	1.934	1.961		1.964	1.975	1.968	1.978	1.936	1.934	1.927	1.974	1.953	
Ti	0.025	0.026	0.017		0.014	0.012	0.015	0.009	0.019	0.023	0.027	0.014	0.011	
Al	0.106	0.107	0.066		0.061	0.047	0.047	0.049	0.107	0.114	0.110	0.056	0.084	
Cr	0.000	0.003	0.000		0.003	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.001	0.000	
Fe	0.270	0.239	0.366		0.260	0.669	0.643	0.570	0.210	0.274	0.269	0.372	0.304	
Ni	0.000	0.000	0.000		0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	
Mn	0.009	0.007	0.013		0.008	0.018	0.018	0.016	0.007	0.008	0.008	0.013	0.010	
Mg	0.815	0.814	0.692		0.834	0.542	0.579	0.601	0.853	0.801	0.814	0.678	0.768	
Ca	0.819	0.824	0.849		0.833	0.712	0.710	0.750	0.843	0.810	0.816	0.852	0.841	
Na	0.038	0.063	0.048		0.026	0.026	0.029	0.027	0.032	0.041	0.038	0.045	0.047	
K	0.000	0.000	0.000		0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	
Total	4.012	4.017	4.013		4.003	4.002	4.008	4.002	4.008	4.006	4.010	4.007	4.018	
X _{Mg}	0.751	0.773	0.654		0.762	0.447	0.474	0.513	0.803	0.745	0.752	0.646	0.716	
En	42.8	43.4	36.3		43.3	28.2	30.0	31.3	44.8	42.5	42.9	35.6	40.1	
Fs	14.2	12.7	19.2		13.5	34.8	33.3	29.7	11.0	14.5	14.2	19.6	15.9	
Wo	43.0	43.9	44.5		43.2	37.0	36.7	39.0	44.2	43.0	43.0	44.8	44.0	

* fine grain gabbro (microgabbro)

** oxide mineral rich type

*** fine grain and oxide mineral rich type

KR: KR03-01

KH: KH07-02

YK09: YK09-05

YK11: YK11-08

Table 9. Representative analyses of amphibole in gabbroic rocks from the Godzilla Megamullion (1/5)

Lithology	olivine gabbro				gabbro			
	cpx rim		needle		cpx rim		cpx rim	
cruise	YK	KH	KH	KH	KH	KH	KH	KH
sample No.	1147	D18	D18	D18	D14	D14	D14	D14
	R05	053	053	053	018	018	026	026
color	B	B	G	G	G	G	B	B
No. anal.	6	4	4	4	8	8	3	3
wt. %								
SiO ₂	50.93	42.59	43.76	43.76	50.25	50.25	52.26	52.26
TiO ₂	0.60	2.22	0.55	0.55	0.19	0.19	0.70	0.70
Al ₂ O ₃	4.09	11.07	9.42	9.42	3.50	3.50	4.52	4.52
Cr ₂ O ₃	0.03	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.24	0.24
FeO	13.75	12.97	16.68	16.68	14.79	14.79	6.77	6.77
NiO	0.27	0.01	0.01	0.01	0.04	0.04	0.01	0.01
MnO	0.27	0.18	0.24	0.24	0.21	0.21	0.16	0.16
MgO	15.12	12.92	11.12	11.12	13.84	13.84	18.80	18.80
CaO	11.14	11.15	11.44	11.44	10.92	10.92	12.25	12.25
Na ₂ O	0.88	3.06	2.45	2.45	0.59	0.59	0.82	0.82
K ₂ O	0.25	0.50	0.35	0.35	0.02	0.02	0.03	0.03
Total	97.07	96.69	96.05	96.05	94.05	94.05	96.55	96.55
O =	23	23	23	23	23	23	23	23
Si	7.320	6.324	6.616	6.616	7.451	7.451	7.393	7.393
Ti	0.065	0.248	0.063	0.063	0.021	0.021	0.074	0.074
Al	0.693	1.937	1.678	1.678	0.611	0.611	0.753	0.753
Cr	0.004	0.001	0.003	0.003	0.001	0.001	0.027	0.027
Fe ³⁺	0.743	0.390	0.462	0.462	0.785	0.785	0.291	0.291
Fe ²⁺	0.909	1.221	1.646	1.646	1.048	1.048	0.509	0.509
Ni	0.031	0.001	0.001	0.001	0.005	0.005	0.001	0.001
Mn	0.033	0.023	0.031	0.031	0.027	0.027	0.019	0.019
Mg	3.237	2.857	2.504	2.504	3.056	3.056	3.962	3.962
Ca	1.715	1.774	1.853	1.853	1.735	1.735	1.855	1.855
Na	0.244	0.881	0.719	0.719	0.171	0.171	0.224	0.224
K	0.046	0.095	0.067	0.067	0.005	0.005	0.006	0.006
total	15.040	15.752	15.642	15.642	14.916	14.916	15.113	15.113
XMg	0.78	0.70	0.60	0.60	0.74	0.74	0.89	0.89
color: B=brown amphibole, G=green amphibole								
* fine grain gabbro (microgabbro)								
** oxide mineral rich type								
*** fine grain and oxide mineral rich type								
				KR: KR03-01				
				KH: KH07-02				
				YK09: YK09-05				
				YK11: YK11-08				

Table 9. Continued (2/5)

Lithology	hornblende pyroxene gabbro																							
	euhedral												needle											
	cruise sample No.	KH D14 007	KH D14 007	KH D14 002**	KH D14 002**	KH D14 003**	KH D14 003**	KH D18 005	KH D18 005	KH D18 048f	KH D18 048f	KH D18 048f	KH D18 048f	KH D18 048f	KH D18 048f	KH D18 048f	KH D18 048f	KH D18 048f	KH D18 048f	KH D18 048f	KH D18 048f	KH D18 048f	KH D18 048f	KH D18 048f
color	B	G	B	G	B	G	B	G	B	G	B	G	B	G	B	G	B	G	B	G	B	G	B	G
No. anal.	15	19	16	2	3	2	4	3	9	10	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18
wt. %																								
SiO ₂	44.93	50.51	43.39	47.91	41.03	43.44	41.80	41.57	42.10	44.53	41.79	41.79	41.79	41.79	41.79	41.79	41.79	41.79	41.79	41.79	41.79	41.79	41.79	41.79
TiO ₂	2.33	0.51	2.79	0.25	2.91	1.17	4.24	0.81	4.10	0.33	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
Al ₂ O ₃	9.38	5.75	10.94	8.02	10.68	9.74	10.60	11.70	11.59	10.18	10.62	10.62	10.62	10.62	10.62	10.62	10.62	10.62	10.62	10.62	10.62	10.62	10.62	10.62
Cr ₂ O ₃	0.07	0.03	0.01	0.03	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
FeO	14.41	14.34	15.98	19.85	15.18	17.39	12.59	16.72	12.47	17.62	16.91	16.91	16.91	16.91	16.91	16.91	16.91	16.91	16.91	16.91	16.91	16.91	16.91	16.91
NiO	0.03	0.02	0.02	0.00	0.00	0.04	0.01	0.04	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
MnO	0.18	0.25	0.23	0.27	0.20	0.27	0.18	0.25	0.19	0.26	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27
MgO	12.75	14.23	11.78	10.74	11.02	9.69	12.72	10.66	12.80	10.72	10.01	10.01	10.01	10.01	10.01	10.01	10.01	10.01	10.01	10.01	10.01	10.01	10.01	10.01
CaO	11.02	11.08	10.52	10.51	10.68	11.24	10.56	11.04	10.40	11.27	10.69	10.69	10.69	10.69	10.69	10.69	10.69	10.69	10.69	10.69	10.69	10.69	10.69	10.69
Na ₂ O	2.20	0.97	2.73	1.51	2.63	2.24	2.96	2.81	3.39	2.53	3.28	3.28	3.28	3.28	3.28	3.28	3.28	3.28	3.28	3.28	3.28	3.28	3.28	3.28
K ₂ O	0.32	0.06	0.15	0.04	0.30	0.17	0.40	0.32	0.35	0.13	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39
Total	97.62	97.73	98.53	99.13	94.05	94.57	96.07	95.93	97.40	97.59	97.99	97.99	97.99	97.99	97.99	97.99	97.99	97.99	97.99	97.99	97.99	97.99	97.99	97.99
O =	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23
Si	6.567	7.211	6.303	6.892	6.268	6.644	6.239	6.281	6.184	6.602	6.274	6.274	6.274	6.274	6.274	6.274	6.274	6.274	6.274	6.274	6.274	6.274	6.274	6.274
Ti	0.256	0.055	0.305	0.026	0.334	0.135	0.476	0.092	0.453	0.037	0.452	0.452	0.452	0.452	0.452	0.452	0.452	0.452	0.452	0.452	0.452	0.452	0.452	0.452
Al	1.616	0.967	1.873	1.360	1.922	1.756	1.864	2.084	2.005	1.778	1.879	1.879	1.879	1.879	1.879	1.879	1.879	1.879	1.879	1.879	1.879	1.879	1.879	1.879
Cr	0.008	0.003	0.001	0.004	0.001	0.003	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
Fe ³⁺	0.570	0.821	0.834	1.124	0.537	0.289	0.392	0.703	0.414	0.610	0.197	0.197	0.197	0.197	0.197	0.197	0.197	0.197	0.197	0.197	0.197	0.197	0.197	0.197
Fe ²⁺	1.192	0.890	1.108	1.263	1.402	1.935	1.179	1.409	1.117	1.574	1.926	1.926	1.926	1.926	1.926	1.926	1.926	1.926	1.926	1.926	1.926	1.926	1.926	1.926
Ni	0.003	0.002	0.003	0.000	0.000	0.004	0.002	0.005	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
Mn	0.022	0.030	0.028	0.033	0.026	0.035	0.023	0.032	0.024	0.033	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035
Mg	2.777	3.026	2.549	2.301	2.510	2.207	2.827	2.399	2.801	2.367	2.238	2.238	2.238	2.238	2.238	2.238	2.238	2.238	2.238	2.238	2.238	2.238	2.238	2.238
Ca	1.726	1.694	1.636	1.620	1.748	1.841	1.688	1.787	1.636	1.789	1.719	1.719	1.719	1.719	1.719	1.719	1.719	1.719	1.719	1.719	1.719	1.719	1.719	1.719
Na	0.624	0.268	0.768	0.420	0.778	0.664	0.857	0.821	0.964	0.727	0.954	0.954	0.954	0.954	0.954	0.954	0.954	0.954	0.954	0.954	0.954	0.954	0.954	0.954
K	0.060	0.010	0.028	0.008	0.058	0.034	0.076	0.062	0.066	0.025	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076
total	15.422	14.978	15.435	15.051	15.585	15.546	15.624	15.675	15.668	15.543	15.750	15.750	15.750	15.750	15.750	15.750	15.750	15.750	15.750	15.750	15.750	15.750	15.750	15.750
XMg	0.70	0.77	0.70	0.65	0.64	0.53	0.71	0.63	0.71	0.60	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54
color: B=brown amphibole, G=green amphibole																								
* fine grain gabbro (microgabbro)																								
** oxide mineral rich type																								
*** fine grain and oxide mineral rich type																								
KR: KR03-01												KH: KH07-02												
YK09: YK09-05												YK11: YK11-08												

Table 9. Continued (3/5)

Lithology	hornblende pyroxene gabbro										pyroxene hornblende gabbro									
	clinopyroxene rim										euhedral									
	cruise sample No.	KH D14 007	KH D18 005	KH D18 005	KH D18 048f	KH D18 005	KH D18 005	KH D18 005	KH D18 005	KH D18 005	KR D6 1001c	KR D6 1205**	KR D6 011**	KR D14 012**	KR D10 052	KR D10 052	KR D10 052	KR D10 052	KR D10 052	KR D10 052
color		B	B	G	B	B	B	G	B	B	B	B	B	G	B	B	G	B	B	G
No. anal.		2	5	9	4	5	3	10	4	5	5	3	10	4	10	5	5	5	5	9
wt. %																				
SiO ₂		51.07	43.32	43.10	44.05	41.54	45.81	46.82	44.59	42.51	47.33	42.25	44.14	47.33	42.51	47.33	42.25	44.14	47.33	42.25
TiO ₂		0.42	1.05	0.97	1.74	2.43	1.18	1.31	0.68	4.08	0.84	1.68	0.20	0.84	4.08	0.84	1.68	0.20	0.84	1.68
Al ₂ O ₃		6.04	11.31	11.72	9.45	10.31	4.96	5.40	8.18	10.98	7.57	11.16	9.05	7.57	10.98	7.57	11.16	9.05	7.57	11.16
Cr ₂ O ₃		0.01	0.04	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.00	0.01	0.02	0.02	0.02	0.00	0.01	0.02	0.00
FeO		12.90	12.49	12.49	12.80	15.81	26.30	24.22	16.91	12.19	12.83	17.48	22.76	12.83	12.19	12.83	17.48	22.76	12.83	17.48
NiO		0.01	0.02	0.04	0.01	0.01	0.01	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.02	0.01
MnO		0.29	0.26	0.19	0.27	0.21	0.35	0.34	0.31	0.18	0.22	0.24	0.25	0.31	0.18	0.22	0.24	0.25	0.31	0.18
MgO		15.59	12.31	12.96	13.52	10.52	6.48	7.93	11.45	12.91	14.16	10.54	7.99	11.45	12.91	14.16	10.54	7.99	11.45	12.91
CaO		10.96	12.77	11.70	10.57	10.51	9.49	9.61	9.81	11.03	11.58	10.52	11.15	9.81	11.03	11.58	10.52	11.15	9.81	11.03
Na ₂ O		1.08	2.57	2.90	2.44	2.60	1.72	1.56	2.87	3.04	2.11	3.28	2.41	2.87	3.04	2.11	3.28	2.41	2.87	3.04
K ₂ O		0.04	0.59	0.34	0.42	0.24	0.46	0.31	0.25	0.37	0.29	0.20	0.05	0.25	0.37	0.29	0.20	0.05	0.25	0.37
Total		98.42	94.46	96.36	95.30	94.19	96.78	97.54	95.08	96.84	94.72	97.36	98.02	95.08	96.84	94.72	97.36	98.02	95.08	96.84
O =		23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23
Si		7.157	6.515	6.399	6.539	6.384	7.048	7.035	6.725	6.273	6.922	6.299	6.664	6.725	6.273	6.922	6.299	6.664	6.725	6.273
Ti		0.045	0.119	0.109	0.195	0.280	0.136	0.148	0.077	0.453	0.092	0.188	0.023	0.077	0.453	0.092	0.188	0.023	0.077	0.453
Al		0.998	2.005	2.051	1.652	1.867	0.900	0.956	1.453	1.909	1.305	1.961	1.611	1.453	1.909	1.305	1.961	1.611	1.453	1.909
Cr		0.001	0.004	0.002	0.001	0.001	0.002	0.001	0.001	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001	0.002
Fe ³⁺		1.004	0.000	0.297	0.731	0.513	0.992	1.061	0.878	0.204	0.382	0.716	0.688	0.878	0.204	0.382	0.716	0.688	0.878	0.204
Fe ²⁺		0.508	1.836	1.253	0.858	1.518	2.393	1.982	1.255	1.300	1.187	1.462	2.185	1.255	1.300	1.187	1.462	2.185	1.255	1.300
Ni		0.001	0.002	0.004	0.002	0.001	0.001	0.004	0.003	0.001	0.001	0.001	0.001	0.003	0.001	0.001	0.001	0.001	0.003	0.001
Mn		0.035	0.033	0.024	0.035	0.028	0.046	0.043	0.040	0.023	0.028	0.031	0.032	0.040	0.023	0.028	0.031	0.032	0.040	0.023
Mg		3.254	2.758	2.867	2.990	2.409	1.485	1.775	2.573	2.838	3.085	2.343	1.797	2.573	2.838	3.085	2.343	1.797	2.573	2.838
Ca		1.645	2.057	1.861	1.680	1.731	1.564	1.547	1.585	1.744	1.814	1.680	1.803	1.585	1.744	1.814	1.680	1.803	1.585	1.744
Na		0.292	0.749	0.834	0.702	0.775	0.514	0.454	0.839	0.870	0.597	0.948	0.705	0.839	0.870	0.597	0.948	0.705	0.839	0.870
K		0.008	0.113	0.064	0.080	0.048	0.090	0.059	0.048	0.070	0.054	0.038	0.010	0.048	0.070	0.054	0.038	0.010	0.048	0.070
total		14.947	15.925	15.766	15.465	15.556	15.171	15.064	15.476	15.687	15.468	15.667	15.521	15.476	15.687	15.468	15.667	15.521	15.476	15.687
XMg		0.86	0.60	0.70	0.78	0.61	0.38	0.47	0.67	0.69	0.72	0.62	0.45	0.67	0.69	0.72	0.62	0.45	0.67	0.69
color: B=brown amphibole, G=green amphibole																				
* fine grain gabbro (microgabbro)																				
** oxide mineral rich type																				
*** fine grain and oxide mineral rich type																				

KR: KR03-01
KH: KH07-02
YK09: YK09-05
YK11: YK11-08

Table 9. Continued (4/5)

Lithology	pyroxene hornblende gabbro														
	anhedral			small grain			needle			clinopyroxene rim					
	KR	D6	KH	KH	D18	D18	KR	D6	KR	KH	D18	KH	KR	D10	KR
cruise sample No.	1401*	056													
color	B	G													
No. anal.	32	9													
wt. %															
SiO ₂	43.20	43.57		43.48			48.32	46.45	47.78	48.69	42.83	45.06	42.39	46.07	42.91
TiO ₂	4.07	1.73		0.31			0.75	0.39	0.46	0.16	2.98	0.64	2.62	1.36	2.54
Al ₂ O ₃	10.39	10.57		11.82			4.28	4.54	4.89	4.10	11.56	9.73	9.41	5.34	8.15
Cr ₂ O ₃	0.09	0.01		0.00			0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01
FeO	11.83	15.83		11.00			16.61	28.29	23.80	26.03	11.13	12.09	18.62	18.89	18.19
NiO	0.04	0.01		0.03			0.00	0.02	0.02	0.02	0.00	0.02	0.00	0.02	0.01
MnO	0.14	0.21		0.22			0.25	0.43	0.41	0.51	0.20	0.23	0.31	0.34	0.30
MgO	13.19	11.64		14.43			12.39	5.83	8.38	7.77	13.45	14.15	9.15	10.37	9.54
CaO	10.90	10.99		11.52			10.61	9.44	9.85	9.23	11.40	11.37	10.34	10.07	10.06
Na ₂ O	2.65	2.67		2.89			1.08	1.09	0.88	0.81	3.08	2.47	2.98	2.50	2.76
K ₂ O	0.64	0.44		0.46			0.11	0.24	0.12	0.13	0.39	0.29	0.41	0.39	0.42
Total	97.15	97.67		96.05			94.41	96.74	96.59	94.51	97.03	96.05	96.25	95.36	94.90
O =	23	23		23			23	23	23	23	23	23	23	23	23
Si	6.369	6.430		6.385			7.263	7.121	7.172	7.243	6.313	6.627	6.490	7.052	6.634
Ti	0.451	0.192		0.035			0.085	0.045	0.052	0.018	0.331	0.071	0.302	0.157	0.295
Al	1.805	1.838		2.046			0.759	0.819	0.865	0.718	2.008	1.686	1.697	0.964	1.484
Cr	0.010	0.001		0.000			0.001	0.002	0.001	0.003	0.001	0.001	0.002	0.000	0.002
Fe ³⁺	0.194	0.590		0.575			0.793	1.369	1.234	1.552	0.150	0.574	0.359	0.494	0.411
Fe ²⁺	1.265	1.363		0.775			1.294	2.257	1.753	1.685	1.221	0.913	2.024	1.924	1.941
Ni	0.005	0.001		0.003			0.000	0.002	0.002	0.002	0.000	0.002	0.000	0.003	0.002
Mn	0.018	0.026		0.027			0.032	0.056	0.052	0.064	0.025	0.029	0.041	0.044	0.039
Mg	2.898	2.560		3.156			2.774	1.332	1.873	1.721	2.953	3.100	2.087	2.365	2.197
Ca	1.722	1.737		1.812			1.708	1.549	1.584	1.470	1.799	1.790	1.696	1.651	1.665
Na	0.756	0.764		0.821			0.314	0.325	0.256	0.233	0.879	0.703	0.883	0.742	0.826
K	0.120	0.082		0.086			0.021	0.047	0.023	0.025	0.073	0.055	0.080	0.076	0.083
total	15.613	15.586		15.723			15.043	14.924	14.866	14.732	15.753	15.551	15.660	15.472	15.578
XMg	0.70	0.65		0.80			0.68	0.37	0.52	0.51	0.71	0.77	0.51	0.55	0.53

color: B=brown amphibole, G=green amphibole

* fine grain gabbro (microgabbro)

** oxide mineral rich type

*** fine grain and oxide mineral rich type

KR: KR03-01

KH: KH07-02

YK09: YK09-05

YK11: YK11-08

Table 9. Continued (5/5)

cruise sample No.	pyroxene hornblende gabbro		hornblende gabbro		trondhjemite					
	orthopyroxene rim		anhedral	small grain	euhedral					
	KH	D14			KH	D18	KH	D18	D25	D25
	011**		001	107		002		002	201	201
color	G		G	B	B	B	G	G	B	B
No. anal.	8		16	8	8	12	5	5	21	21
wt. %										
SiO ₂	47.41		45.98	45.64		43.49		43.95	47.38	47.38
TiO ₂	1.23		1.36	2.15		1.74		1.25	2.05	2.05
Al ₂ O ₃	5.20		5.85	6.39		8.50		8.12	5.99	5.99
Cr ₂ O ₃	0.00		0.02	0.01		0.01		0.01	0.02	0.02
FeO	24.19		27.31	17.50		18.56		19.46	14.60	14.60
NiO	0.01		0.01	0.02		0.04		0.09	0.04	0.04
MnO	0.33		0.51	0.33		0.34		0.29	0.48	0.48
MgO	8.17		5.96	11.15		9.85		9.26	14.29	14.29
CaO	9.65		9.23	9.38		10.69		10.71	8.30	8.30
Na ₂ O	1.62		1.70	2.55		2.50		2.50	3.09	3.09
K ₂ O	0.33		0.24	0.38		0.47		0.41	0.29	0.29
Total	98.14		98.17	95.52		93.49		94.28	96.54	96.54
O =	23		23	23		23		23	23	23
Si	7.073		6.948	6.875		6.627		6.74	6.853	6.853
Ti	0.138		0.155	0.244		0.199		0.14	0.223	0.223
Al	0.914		1.041	1.134		1.528		1.47	1.022	1.022
Cr	0.000		0.002	0.001		0.002		0.00	0.002	0.002
Fe ³⁺	1.046		1.213	0.773		0.485		0.39	1.321	1.321
Fe ²⁺	1.971		2.238	1.430		1.881		2.10	0.444	0.444
Ni	0.001		0.002	0.003		0.005		0.01	0.004	0.004
Mn	0.041		0.065	0.042		0.044		0.04	0.059	0.059
Mg	1.816		1.341	2.503		2.236		2.11	3.079	3.079
Ca	1.541		1.494	1.514		1.746		1.76	1.286	1.286
Na	0.469		0.498	0.745		0.737		0.74	0.867	0.867
K	0.062		0.047	0.074		0.091		0.08	0.053	0.053
total	15.074		15.042	15.337		15.581		15.60	15.212	15.212
XMg	0.48		0.37	0.64		0.54		0.50	0.87	0.87

color: B=brown amphibole, G=green amphibole

* fine grain gabbro (microgabbro)

** oxide mineral rich type

*** fine grain and oxide mineral rich type

KR: KR03-01

KH: KH07-02

YK09: YK09-05

YK11: YK11-08

Table 10. Representative analyses of olivine in gabbroic rocks from the Godzilla Megamullion

lithology	troctolite		olivine gabbro		gabbro		hornblende pyroxene gabbro		pyroxene hornblende gabbro	
	YK09	KH	YK09	KH	YK09	KH	YK11	KR	KH	
	1147	D18	1147	D18	1147	D18	1270	D6	D18	
	R01	053	R02	053	R11		R08	1007**	052	
No. anal.	16	13	11	13	8		8	5	1	
wt. %										
SiO ₂	41.45	36.51	40.57	36.51	40.13		36.43	32.49	38.55	
TiO ₂		0.01		0.01	0.01		0.02	0.03	0.31	
Al ₂ O ₃	0.04	0.01	0.04	0.01	0.00		0.01	0.01	0.56	
Cr ₂ O ₃	0.02	0.01	0.02	0.01	0.00		0.00	0.01	0.04	
FeO	12.55	33.38	14.01	33.38	15.12		35.04	57.17	35.94	
NiO	0.05	0.03	0.06	0.03	0.14		0.02	0.01	0.05	
MnO	0.20	0.61	0.23	0.61	0.22		0.64	1.07	0.19	
MgO	47.10	30.01	45.92	30.01	44.55		29.24	10.43	15.64	
CaO	0.05	0.03	0.06	0.03	0.04		0.06	0.06	7.39	
Na ₂ O	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01		0.02	0.02	0.24	
K ₂ O	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00		0.00	0.01	0.04	
Total	101.46	100.61	100.93	100.61	100.23		101.47	101.32	98.95	
O=	4	4	4	4	4		4	4	4	
Si	1.012	0.999	1.004	0.999	1.005		0.995	1.004	1.099	
Ti	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		0.000	0.001	0.007	
Al	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000		0.000	0.000	0.019	
Cr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		0.000	0.000	0.001	
Fe	0.256	0.764	0.290	0.764	0.317		0.800	1.477	0.856	
Ni	0.001	0.001	0.001	0.001	0.003		0.000	0.000	0.001	
Mn	0.004	0.014	0.005	0.014	0.005		0.015	0.028	0.005	
Mg	1.712	1.222	1.692	1.222	1.663		1.190	0.480	0.664	
Ca	0.001	0.001	0.002	0.001	0.001		0.002	0.002	0.226	
Na	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		0.001	0.001	0.013	
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		0.000	0.000	0.001	
Total	2.988	3.001	2.996	3.001	2.994		3.005	2.995	2.892	
Fo	87	62	85	62	84		60	25	44	
Fa	13	39	15	39	16		40	75	56	
* fine grain gabbro (microgabbro)					YK09: YK09-05					
** oxide mineral rich type					YK11: YK11-08					

Table 11. Whole rock compositions for gabbroic rocks from the Godzilla Megamullion (1/12)

Cruise Sample No.	Troctolite										Olivine Gabbro			
	YK09-05 6K#1147										YK09-05 6K#1147			
	R01tr	R03tr	R04tr	R06tr	R07tr	R09tr	R09tr	R09tr	R09tr	R09tr	R02OlGb	R05tr	R14tr	KH07-02 D18 053
Major elements (wt.%)														
SiO ₂	47.33	47.50	46.85	47.38	47.68	47.25	47.25	47.25	47.25	47.25	47.96	50.97	50.36	52.47
TiO ₂	0.06	0.13	0.06	0.08	0.12	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.12	0.33	0.16	0.66
Al ₂ O ₃	26.42	24.72	22.16	23.59	25.93	24.21	24.21	24.21	24.21	24.21	22.68	16.61	18.43	17.32
Fe ₂ O ₃	2.99	4.33	5.14	3.92	3.46	3.95	3.95	3.95	3.95	3.95	4.13	4.57	6.08	7.75
MnO	0.04	0.06	0.07	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.08	0.09	0.13
MgO	8.26	9.16	13.14	10.91	7.92	10.25	10.25	10.25	10.25	10.25	10.96	10.11	10.76	6.50
CaO	13.05	12.08	10.89	12.21	12.96	12.53	12.53	12.53	12.53	12.53	12.28	15.19	11.36	10.73
Na ₂ O	1.84	1.98	1.66	1.82	1.80	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.76	2.10	2.71	4.23
K ₂ O	0.00	0.04	0.02	0.02	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.03	0.03	0.14
P ₂ O ₅	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.06
L.O.I.	1.14	1.76	3.44	1.90	2.54	2.09	2.09	2.09	2.09	2.09	1.70	1.22	0.33	1.20
Trace elements (ppm)														
Ba	n.d.	1	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1	8	5	64
Cr	115	26	350	305	88	100	100	100	100	100	397	1165	284	23
Nb	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2
Ni	318	285	462	415	215	319	319	319	319	319	347	133	307	33
Rb	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	4	7
Sr	190	141	159	156	157	161	161	161	161	161	133	108	134	238
V	9	22	15	23	25	24	24	24	24	24	33	148	63	181
Y	3	5	4	4	5	5	5	5	5	5	5	12	10	15
Zn	13	24	27	20	32	20	20	20	20	20	20	33	32	40
Zr	15	17	13	13	16	15	15	15	15	15	16	18	19	34
C.I.P.W. NORM														
Il	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.6	0.3	1.3
Mag	0.7	0.9	1.1	0.9	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	1.3	1.7
Ap	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
Or	0.0	0.2	0.1	0.1	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.8
Ab	15.6	16.8	14.1	15.4	15.3	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	14.9	17.8	23.1	36.1
An	64.0	58.7	53.2	56.3	62.7	58.9	58.9	58.9	58.9	58.9	54.1	36.0	38.2	28.0
Di-Wo	0.3	0.6	0.4	1.8	0.7	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	2.9	16.5	7.7	10.5
Di-En	0.3	0.4	0.3	1.4	0.5	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	2.2	12.3	5.4	6.4
Di-Fs	0.0	0.1	0.1	0.3	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.4	2.6	1.6	3.6
Hy-En	5.2	6.0	7.7	5.3	7.3	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	8.0	4.8	6.5	0.7
Hy-Fs	1.0	1.4	1.6	1.0	1.6	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.0	1.9	0.4
Qtz														
Crn														
Fo	10.6	11.5	17.4	14.4	8.4	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	5.7	10.5	6.5
Fa	2.2	3.0	3.9	2.9	2.0	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.5	1.4	3.3	4.0
Ne														

Table 11. continued (2/12)

Cruise	Gabbro					
	Sample No.	013	KH07-02 D14	021	026	033
Major elements (wt.%)						
		013	KH07-02 D14	021	026	033
						YK09-05 6K#1147
						R110IGb
						1276R05C
						YK11-08 6K#1276
SiO ₂	51.74	53.37	52.04	51.69	50.08	44.74
TiO ₂	0.40	0.31	0.27	0.28	0.13	7.04
Al ₂ O ₃	18.05	21.49	20.64	18.81	17.92	11.74
Fe ₂ O ₃	4.82	4.02	3.66	5.09	4.06	16.60
MnO	0.09	0.09	0.07	0.11	0.08	0.24
MgO	7.49	4.79	6.16	8.67	10.63	6.79
CaO	14.66	11.58	13.90	11.96	15.68	9.77
Na ₂ O	2.68	4.14	3.19	3.34	1.39	2.89
K ₂ O	0.05	0.20	0.04	0.05	0.02	0.16
P ₂ O ₅	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.03
L.O.I.	0.62	0.86	0.78	2.07	1.13	1.72
Trace elements (ppm)						
Ba	14	4	n.d.	9	n.d.	176
Cr	348	17	254	362	761	41
Nb	2	2	1	1	2	15
Ni	83	41	58	151	200	47
Rb	4	4	5	5	4	4
Sr	122	217	144	135	80	121
V	152	104	99	122	103	859
Y	13	9	10	10	8	18
Zn	22	28	19	55	19	90
Zr	20	20	23	15	8	49
C.I.P.W. NORM						
Il	0.8	0.6	0.5	0.5	0.3	13.6
Mag	1.1	0.9	0.8	1.1	0.9	3.7
Ap	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1
Or	0.3	1.2	0.2	0.3	0.1	1.0
Ab	22.8	35.2	27.1	28.4	11.8	24.8
An	37.2	39.6	42.0	36.3	42.7	18.9
Di-Wo	14.9	7.5	11.3	9.7	14.7	12.6
Di-En	10.4	5.0	8.0	6.8	11.1	7.5
Di-Fs	3.2	2.0	2.3	2.0	2.1	4.5
Hy-En	4.3	2.6	2.6	3.0	8.9	5.4
Hy-Fs	1.3	1.1	0.7	0.9	1.7	3.3
Qtz						
Cm						
Fo	2.8	3.1	3.4	8.3	4.6	3.0
Fa	0.9	1.4	1.1	2.6	1.0	1.9
Ne						

Table 11. continued (3/12)

Cruise	KH07-02 D14			KR03-01 D6		Hornblende Pyroxene Gabbro									
	002	003	007	1001*	1506*	005Gbb	030	048	050	054	058	059	060	061	
Major elements (wt.%)															
SiO2	45.93	43.15	52.84	50.08	52.58	51.66	46.18	52.86	49.55	51.98	51.57	47.07	47.47	47.57	
TiO2	3.82	4.90	0.46	1.19	1.56	0.52	4.75	0.66	1.04	0.59	0.80	5.28	4.47	5.27	
Al2O3	11.62	8.78	16.49	15.98	14.66	15.72	12.28	15.30	14.60	16.11	14.91	13.05	12.58	14.42	
Fe2O3	19.00	22.55	6.29	9.15	9.79	7.15	15.52	7.96	12.20	7.59	9.04	15.65	14.93	14.71	
MnO	0.20	0.24	0.12	0.15	0.17	0.12	0.21	0.14	2.55	0.14	0.18	0.24	0.23	0.21	
MgO	6.07	7.12	7.58	8.71	7.78	8.22	7.68	7.35	6.22	7.67	7.88	5.22	6.26	4.56	
CaO	10.54	11.21	13.03	11.68	8.70	12.61	9.85	11.24	9.52	11.69	11.81	9.61	10.44	8.51	
Na2O	2.68	1.89	3.09	2.92	4.32	3.79	3.33	4.29	3.68	4.05	3.64	3.64	3.39	4.36	
K2O	0.09	0.11	0.08	0.11	0.14	0.18	0.16	0.11	0.47	0.11	0.13	0.20	0.19	0.13	
P2O5	0.05	0.06	0.03	0.04	0.27	0.02	0.03	0.08	0.16	0.06	0.05	0.05	0.04	0.27	
L.O.I.	-0.01	-0.01	0.77	2.02	1.56	0.65	0.54	0.71	7.33	0.83	0.81	0.20	0.45	-0.15	
Trace elements (ppm)															
Ba	96	121	0	34	103	37	120	43	233	27	53	196	129	169	
Cr	32	42	77	348	284	85	113	24	34	33	29	24	95	19	
Nb	2	2	1	2	14	5	5	4	10	4	4	13	8	13	
Ni	15	12	37	126	127	75	94	20	165	35	29	8	22	10	
Rb	3	5	4	4	7	6	5	5	7	5	6	23	10	7	
Sr	66	41	113	125	144	222	124	185	308	201	189	153	141	191	
V	1233	1585	162	281	258	173	1062	184	245	182	218	674	605	561	
Y	17	17	15	30	36	18	16	25	34	19	22	22	20	18	
Zn	70	97	32	49	93	34	66	40	112	40	53	85	83	51	
Zr	32	28	25	144	106	48	32	50	109	44	37	42	41	49	
C.I.P.W. NORM															
Il	7.4	9.5	0.9	2.3	3.0	1.0	9.1	1.3	2.0	1.1	1.5	10.2	8.6	10.1	
Mag	4.2	5.0	1.4	2.0	2.1	1.6	3.4	1.7	2.7	1.7	2.0	3.4	3.3	3.2	
Ap	0.1	0.1	0.1	0.1	0.7	0.1	0.1	0.2	0.4	0.2	0.1	0.1	0.1	0.6	
Or	0.5	0.6	0.5	0.6	0.9	1.1	1.0	0.7	2.8	0.6	0.8	1.2	1.2	0.8	
Ab	23.1	16.3	26.3	24.9	36.9	27.7	28.4	35.7	31.4	32.0	31.0	31.2	29.0	37.3	
An	19.7	15.4	31.1	30.4	20.4	25.5	18.3	22.3	22.2	25.6	24.2	18.9	18.8	19.7	
Di-Wo	13.8	17.1	14.1	11.6	8.9	15.5	13.0	13.9	10.2	13.5	14.4	12.1	14.0	8.9	
Di-En	6.2	7.7	9.3	7.4	5.5	10.2	7.5	8.6	4.6	8.6	8.8	6.2	7.6	4.5	
Di-Fs	7.6	9.2	3.7	3.4	2.9	4.2	4.9	4.4	5.6	4.0	4.8	5.6	5.9	4.2	
Hy-En	4.2	3.7	7.7	5.0	7.6				0.3		0.5	2.5	1.9	1.5	
Hy-Fs	5.1	4.4	3.1	2.3	4.0				0.4		0.3	2.2	1.5	1.4	
Qtz															
Cm															
Fo	3.5	4.7	1.3	6.7	4.5	7.3	8.3	6.9	7.5	7.5	7.3	3.1	4.4	3.8	
Fa	4.7	6.1	0.6	3.4	2.6	3.3	6.0	3.9	10.0	3.9	4.4	3.1	3.8	3.9	
Ne						2.4	0.1	0.4		1.4					
* Fine grain type															

* Fine grain type

Table 11. continued (4/12)

Cruise	Hornblende Pyroxene Gabbro					
	YK11-08 6K#1270		YK11-08 6K#1275		YK11-08 YKDT#116	
Sample No.	R06f	R08	R02	R04	R01	R05
Major elements (wt.%)						
SiO ₂	47.17	54.34	52.80	50.88	50.52	49.88
TiO ₂	4.98	0.48	2.38	2.23	4.42	4.38
Al ₂ O ₃	11.43	23.45	16.44	16.97	16.50	15.36
Fe ₂ O ₃	16.56	5.41	9.04	10.25	10.53	12.42
MnO	0.29	0.12	0.17	0.17	0.18	0.20
MgO	5.21	1.92	4.08	5.05	3.69	3.60
CaO	9.85	7.99	8.67	9.23	7.86	8.98
Na ₂ O	3.84	6.02	5.43	4.47	5.60	4.97
K ₂ O	0.24	0.16	0.62	0.47	0.30	0.16
P ₂ O ₅	0.43	0.11	0.37	0.29	0.40	0.05
L.O.I.	0.20	0.76	1.40	1.61	0.00	-0.16
Trace elements (ppm)						
Ba	169	44	158	110	200	177
Cr	43	9	69	92	15	17
Nb	13	4	12	10	31	18
Ni	18	43	23	48	11	12
Rb	24	4	15	27	4	4
Sr	154	417	212	211	337	295
V	567	68	308	307	350	453
Y	49	15	44	38	34	20
Zn	133	57	95	120	52	76
Zr	59	79	157	122	115	77
C.I.P.W. NORM						
Il	9.6	0.9	4.5	4.3	8.5	8.4
Mag	3.7	1.2	2.0	2.2	2.3	2.7
Ap	1.0	0.3	0.9	0.7	1.0	0.1
Or	1.4	0.9	3.7	2.8	1.8	1.0
Ab	32.9	49.6	43.8	38.1	45.0	40.8
An	13.5	36.7	18.8	25.1	19.2	19.3
Di-Wo	13.9	1.0	9.2	8.0	7.3	10.6
Di-En	6.7	0.4	5.0	4.4	4.1	5.2
Di-Fs	7.0	0.6	3.9	3.4	2.9	5.2
Hy-En	1.2			0.4	7.4	
Hy-Fs	1.2			0.3		
Qtz				0.3		
Crn						
Fo	3.7	3.1	3.7	5.5	3.6	2.7
Fa	4.2	4.5	3.2	4.7	2.8	3.0
Ne		0.8	1.3		1.5	0.9

Table 11. continued (5/12)

Pyroxene Hornblende Gabbro												
Cruise	KH07-02 D14											
Sample No.	004	005	006	008	011	015	016	017	022	028	050	056
Major elements (wt.%)												
SiO ₂	55.24	46.58	57.68	50.14	54.08	50.90	50.93	48.04	45.86	50.66	51.19	52.06
TiO ₂	2.62	3.81	0.95	2.20	1.35	2.17	0.29	4.33	6.43	3.05	0.68	0.56
Al ₂ O ₃	15.20	10.72	18.38	14.91	18.10	10.01	16.35	11.98	10.89	12.36	15.50	17.04
Fe ₂ O ₃	11.34	19.63	8.90	17.06	8.80	14.78	6.57	17.46	14.93	16.01	9.72	6.96
MnO	0.19	0.32	0.10	0.27	0.13	0.22	0.12	0.27	0.21	0.22	1.32	0.14
MgO	3.06	3.53	2.00	2.48	4.45	8.26	9.62	4.47	6.97	4.90	6.65	7.49
CaO	7.37	9.71	5.07	7.25	8.03	11.11	13.75	9.32	11.70	8.46	10.59	12.59
Na ₂ O	4.62	3.34	6.58	4.55	4.89	2.43	2.26	3.27	2.83	3.86	4.03	3.05
K ₂ O	0.31	0.24	0.18	0.31	0.15	0.07	0.10	0.18	0.12	0.16	0.23	0.07
P ₂ O ₅	0.05	2.11	0.16	0.83	0.03	0.04	0.01	0.69	0.05	0.31	0.10	0.03
L.O.I.	0.21	0.36	0.44	0.70	1.34	1.25	1.01	0.49	0.52	0.38	3.45	1.00
Trace elements (ppm)												
Ba	112	124	95	115	67	40	19	152	161	99	127	12
Cr	4	3	3	14	63	49	228	17	20	14	33	103
Nb	6	10	5	9	4	4	1	10	8	7	7	2
Ni	n.d.	n.d.	n.d.	5	28	35	94	6	22	n.d.	101	46
Rb	10	15	5	21	6	6	5	11	7	7	6	5
Sr	117	89	138	143	150	73	122	105	117	82	267	136
V	248	172	74	109	290	575	146	306	645	563	186	188
Y	42	81	53	72	30	31	11	54	17	52	28	15
Zn	85	119	46	140	50	69	29	106	62	98	80	46
Zr	63	72	728	67	146	49	14	68	36	51	80	23
C.I.P. W. NORM												
Il	5.0	7.4	1.8	4.2	2.6	4.2	0.6	8.3	12.4	5.9	1.3	1.1
Mag	2.5	4.3	1.9	3.8	1.9	3.3	1.4	3.9	3.3	3.5	2.1	1.5
Ap	0.1	5.1	0.4	2.0	0.1	0.1	0.0	1.7	0.1	0.8	0.2	0.1
Or	1.9	1.5	1.1	1.8	0.9	0.4	0.6	1.1	0.7	1.0	1.4	0.4
Ab	39.4	28.7	56.1	39.1	41.6	20.8	19.3	28.1	24.3	33.1	33.2	26.0
An	20.0	13.8	20.3	19.6	27.2	16.4	34.3	17.8	16.9	16.2	23.7	32.8
Di-Wo	6.9	8.9	1.7	4.8	5.3	16.4	14.3	10.3	17.4	10.2	11.9	12.5
Di-En	2.9	2.9	0.6	1.2	2.8	8.9	9.8	4.3	10.8	4.4	6.3	8.1
Di-Fs	4.0	6.3	1.2	3.8	2.3	6.8	3.3	6.0	5.5	5.7	5.3	3.6
Hy-En	4.8	6.1	4.4	4.5	8.1	11.9	7.0	7.0	2.9	8.0	7.3	7.3
Hy-Fs	6.6	13.4	8.9	13.7	6.8	9.1	2.4	9.9	1.5	10.4	1.5	3.2
Qtz	5.8	1.8	1.7			1.7		1.8		1.0		
Cm												
Fo				0.4	0.2		5.1		2.7		7.3	2.4
Fa				1.2	0.2		1.9		1.5		6.7	1.2
Ne											0.6	

Table 11. continued (6/12)

Pyroxene Hornblende Gabbro														
Cruise	KR03-01 D6													
Sample No.	1007	1202	1204	1205	1207	1301	1401*	1402*	1403	1405	1501*	1505*	1601A	
Major elements (wt.%)														
SiO ₂	45.05	51.40	46.05	52.61	48.63	47.55	51.02	52.21	43.31	47.15	50.78	50.65	47.29	
TiO ₂	3.27	3.50	4.89	1.79	3.87	5.05	1.18	1.08	4.41	6.58	1.25	1.42	7.03	
Al ₂ O ₃	13.95	14.22		17.02	13.89	11.19	16.45	13.81	10.32	10.52	13.29	14.37	10.22	
Fe ₂ O ₃	19.29	13.58	17.00	10.77	15.98	18.56	8.48	9.32	23.81	18.78	13.82	13.17	17.45	
MnO	0.28	0.23	0.22	0.19	0.26	0.30	0.13	0.18	0.34	0.38	0.25	0.23	0.31	
MgO	2.89	3.72	5.72	2.37	3.83	4.12	7.62	8.32	3.41	4.77	6.61	6.69	5.29	
CaO	9.05	8.77	10.94	8.67	9.17	9.52	11.48	11.36	9.71	8.40	10.52	9.69	9.22	
Na ₂ O	3.94	4.18	2.99	5.27	3.99	3.38	3.19	3.53	2.87	3.04	3.01	3.32	2.95	
K ₂ O	0.22	0.30	0.09	0.24	0.21	0.21	0.31	0.11	0.25	0.34	0.17	0.10	0.18	
P ₂ O ₅	2.04	0.12	0.04	1.07	0.17	0.12	0.15	0.07	1.57	0.04	0.29	0.34	0.06	
L.O.I.	1.34	0.82	0.21	0.35	0.46	0.12	1.15	1.45	0.84	1.18	0.32	0.86	0.47	
Trace elements (ppm)														
Ba	114	145	149	94	142	173	96	38	163	223	75	86	211	
Cr	18	16	38	9	14	19	310	320	50	23	214	209	18	
Nb	6	5	3	7	7	13	8	3	10	9	5	9	9	
Ni	3	8	15	n.d.	2	5	118	73	16	7	66	94	9	
Rb	17	25	9	20	15	16	9	5	19	14	8	6	9	
Sr	139	133	101	186	128	105	145	117	97	84	105	162	85	
V	219	371	1103	143	486	487	247	266	217	563	210	175	545	
Y	82	38	20	108	32	42	27	28	85	42	60	57	29	
Zn	115	99	88	110	104	135	64	68	213	127	134	122	82	
Zr	56	80	30	290	52	60	66	48	45	74	69	92	69	
C.I.P.W. NORM														
Il	6.3	6.7	9.4	3.4	7.5	9.7	2.3	2.1	8.5	12.7	2.4	2.7	13.6	
Mag	4.3	3.0	3.8	2.4	3.5	4.1	1.9	2.0	5.3	4.2	3.0	2.9	3.9	
Ap	4.9	0.3	0.1	2.6	0.4	0.3	0.4	0.2	3.8	0.1	0.7	0.8	0.1	
Or	1.3	1.8	0.5	1.4	1.2	1.3	1.8	0.6	1.5	2.0	1.0	0.6	1.1	
Ab	33.9	35.7	25.7	45.0	34.2	29.0	27.2	30.1	24.8	26.1	25.8	28.4	25.4	
An	20.1	19.4	19.4	22.3	19.7	15.0	29.9	21.7	14.8	14.3	22.5	24.3	14.3	
Di-Wo	5.1	9.9	14.8	5.9	10.6	13.4	11.1	14.5	10.0	11.6	11.9	9.2	13.2	
Di-En	1.4	4.3	7.3	2.1	4.2	5.3	7.0	9.0	2.8	5.3	5.9	4.7	6.9	
Di-Fs	3.9	5.6	7.2	4.0	6.5	8.3	3.4	4.6	7.7	6.2	5.7	4.2	5.9	
Hy-En	2.5	5.0	2.5	3.7	3.1	5.1	5.4	5.5	4.1	6.8	10.4	10.3	6.4	
Hy-Fs	6.8	6.6	2.4	7.0	4.8	8.0	2.6	2.8	11.6	7.9	10.1	9.2	5.5	
Qtz		1.6				0.5				2.8			3.6	
Crm														
Fo	2.4		3.3	0.1	1.6		4.7	4.4	1.2		0.3	1.3		
Fa	7.3		3.6	0.2	2.7		2.5	2.5	3.8		0.3	1.3		
Ne														
* Fine grain type														

* Fine grain type

Table 11. continued (7/12)

Pyroxene Hornblende Gabbro										
Cruise	KH07-02 D18									
Sample No.	001	002Gb	004	016	017	022	026	052	056	
Major elements (wt.%)										
SiO ₂	52.30	51.82	50.64	47.99	49.68	47.48	47.37	52.19	52.98	
TiO ₂	1.32	0.40	0.84	4.89	1.90	6.03	5.01	0.50	0.66	
Al ₂ O ₃	15.50	14.54	13.52	13.53	13.85	13.42	12.42	15.53	16.40	
Fe ₂ O ₃	8.83	7.07	9.02	14.32	11.29	12.46	12.82	8.64	7.75	
MnO	0.17	0.13	0.14	0.24	0.16	0.19	0.20	0.15	0.13	
MgO	6.05	9.49	10.01	5.64	7.00	5.96	6.75	8.11	6.79	
CaO	10.69	12.30	12.36	9.07	12.27	10.88	11.95	10.92	10.82	
Na ₂ O	4.79	3.87	3.37	4.06	3.74	3.45	3.34	3.82	4.29	
K ₂ O	0.29	0.35	0.08	0.16	0.08	0.10	0.12	0.10	0.15	
P ₂ O ₅	0.05	0.02	0.02	0.10	0.03	0.03	0.02	0.04	0.03	
L.O.I.	0.55	0.51	0.97	0.72	0.34	0.32	-0.04	1.05	0.94	
Trace elements (ppm)										
Ba	58	14	25	138	58	162	135	37	60	
Cr	30	76	48	38	29	20	36	33	25	
Nb	5	1	2	10	3	8	8	4	4	
Ni	34	39	79	26	43	18	34	35	30	
Rb	7	8	4	12	5	7	4	6	6	
Sr	189	173	179	169	170	153	150	203	243	
V	278	157	288	543	485	574	573	175	193	
Y	24	13	17	19	19	15	17	21	20	
Zn	57	38	33	65	48	51	56	47	44	
Zr	73	30	32	46	34	37	40	37	41	
C.I.P.W. NORM										
Il	2.5	0.8	1.6	9.4	3.6	11.6	9.6	1.0	1.3	
Mag	1.9	1.5	2.0	3.2	2.5	2.7	2.8	1.9	1.7	
Ap	0.1	0.0	0.0	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	
Or	1.7	2.1	0.4	1.0	0.5	0.6	0.7	0.6	0.9	
Ab	35.2	26.2	26.0	34.8	27.3	29.5	27.2	32.6	36.5	
An	20.1	21.4	21.7	18.4	21.0	21.1	18.8	25.1	25.2	
Di-Wo	13.8	16.7	16.7	11.1	16.8	13.9	17.1	12.2	11.9	
Di-En	8.1	11.3	10.9	6.0	9.7	9.1	10.7	7.5	7.3	
Di-Fs	5.1	4.1	4.6	4.6	6.4	3.9	5.4	3.9	3.9	
Hy-En				1.7		3.7		2.4	0.8	
Hy-Fs				1.3		1.6		1.3	0.4	
Qtz										
Crn										
Fo	5.0	8.8	9.9	4.5	5.6	1.5	4.4	7.3	6.3	
Fa	3.4	3.5	4.6	3.8	4.1	0.7	2.5	4.2	3.7	
Ne	3.0	3.7	1.4		2.5		0.7			

Table 11. continued (8/12)

Pyroxene Hornblende Gabbro												
Cruise	KR03-01 D10			YK09-05 6K#1141								
Sample No.	102	112		R02Gb	R04	R06*	R08McGb*	R08OxGb	R09OxGb	R10Gr	R14OxGb	R15OxGb
Major elements (wt.%)												
SiO ₂	48.16	48.53		51.33	61.91	49.54	49.94	52.39	49.82	55.58	42.87	47.36
TiO ₂	4.05	4.25		3.02	0.61	0.63	0.64	4.28	6.10	2.27	7.25	7.55
Al ₂ O ₃	12.97	9.66		14.84	16.32	17.28	17.62	13.76	13.20	16.36	9.75	14.13
Fe ₂ O ₃	11.70	15.97		12.75	4.07	9.63	8.82	9.81	13.91	9.56	21.87	13.05
MnO	0.20	0.30		0.21	0.11	0.18	0.17	0.23	0.29	0.18	0.36	0.34
MgO	3.75	7.35		3.75	4.87	9.24	8.79	3.83	3.97	3.59	7.71	7.28
CaO	10.99	9.92		8.07	3.85	10.19	10.49	8.60	7.38	5.61	7.50	6.35
Na ₂ O	4.97	3.67		5.16	7.95	3.19	3.37	5.48	5.08	6.54	2.42	3.80
K ₂ O	0.19	0.29		0.17	0.04	0.09	0.09	0.15	0.23	0.23	0.23	0.10
P ₂ O ₅	3.00	0.06		0.70	0.27	0.04	0.08	1.47	0.03	0.08	0.03	0.05
L.O.I.	0.91	0.78		0.44	0.84	1.59	1.38	0.40	0.07	0.48	1.54	1.52
Trace elements (ppm)												
Ba	149	143		129	91	21	29	187	264	197	224	245
Cr	8	41		46	140	261	247	23	23	17	72	29
Nb	12	11		7	18	3	4	14	19	13	3	11
Ni	0	33		34	224	158	114	81	16	25	62	97
Rb	6	4		6	6	6	5	6	6	4	19	3
Sr	238	93		238	149	172	177	204	137	190	75	166
V	341	568		248	33	142	134	199	755	320	2055	584
Y	86	38		36	85	17	19	81	32	47	18	18
Zn	51	67		65	35	74	72	48	53	41	90	57
Zr	57	82		102	158	40	54	69	102	105	29	72
C.I.P.W. NORM												
Il	7.8	8.2		5.8	1.2	1.2	1.2	8.2	11.7	4.3	14.0	14.5
Mag	2.6	3.5		2.8	0.9	2.1	1.9	2.2	3.1	2.1	4.8	2.9
Ap	7.2	0.2		1.7	0.6	0.1	0.2	3.5	0.1	0.2	0.1	0.1
Or	1.2	1.8		1.0	0.2	0.6	0.5	0.9	1.4	1.4	1.4	0.6
Ab	42.5	31.5		44.1	67.4	27.2	28.7	46.8	43.5	55.8	20.9	32.5
An	12.6	9.1		17.0	8.8	32.8	33.0	12.6	12.7	14.7	15.3	21.5
Di-Wo	9.6	16.8		7.9	3.6	7.5	7.9	8.7	10.1	5.4	9.3	4.2
Di-En	4.8	9.2		3.5	2.4	4.7	5.0	5.1	5.3	2.6	4.9	3.0
Di-Fs	4.5	7.0		4.4	0.9	2.3	2.4	3.2	4.5	2.6	4.2	0.8
Hy-En	2.0	1.3		3.3	9.7	3.2	2.1	4.5	2.9	3.0	9.7	15.3
Hy-Fs	1.8	1.0		4.2	3.6	1.6	1.0	2.8	2.5	3.0	8.4	4.1
Qtz					0.6			1.7				0.5
Cm												
Fo	1.8	5.6		1.9		10.8	10.5		1.2	2.4	3.5	
Fa	1.9	4.7		2.6		6.0	5.6		1.1	2.6	3.4	
Ne												
* Fine grain type												

* Fine grain type

Table 11. continued (9/12)

Pyroxene Hornblende Gabbro													
Cruise	YK11-08 6K#1270						YK11-08 YKDT#116						
Sample No.	R05c	R05f*	R06c	R11	R12		R03	R04F	R06	R07	R08	R09	R10
Major elements (wt.%)													
SiO2	50.26	50.15	45.88	51.02	48.79		47.00	54.00	48.40	47.08	49.06	53.75	45.68
TiO2	2.23	1.79	5.62	0.98	3.14		3.94	2.26	4.39	5.20	3.84	2.33	5.19
Al2O3	14.77	15.10	12.12	14.09	13.45		13.24	16.51	14.48	11.56	14.13	16.34	13.02
Fe2O3	12.03	11.33	16.94	10.92	13.43		16.96	11.33	13.97	17.03	13.28	11.63	16.18
MnO	0.21	0.19	0.32	0.61	0.21		0.26	0.18	0.22	0.29	0.22	0.23	0.23
MgO	5.83	6.52	4.99	7.66	6.09		4.03	2.12	3.59	5.11	3.94	2.05	4.96
CaO	10.02	10.40	8.81	10.45	10.82		8.92	5.81	8.70	9.29	9.73	6.04	9.62
Na2O	4.23	4.02	4.09	4.07	3.75		4.20	6.64	4.80	3.92	4.68	6.41	3.75
K2O	0.26	0.30	0.27	0.14	0.15		0.21	0.42	0.28	0.19	0.20	0.44	0.22
P2O5	0.15	0.19	0.95	0.05	0.18		1.24	0.73	1.16	0.33	0.91	0.77	1.15
L.O.I.	0.79	1.02	-0.15	0.41	0.23		1.10	0.62	0.76	0.02	0.01	0.43	0.61
Trace elements (ppm)													
Ba	102	72	185	49	92		170	216	198	179	169	221	189
Cr	46	155	19	48	38		13	13	12	31	14	11	25
Nb	6	5	17	3	4		11	8	19	14	18	9	16
Ni	35	52	7	51	13		30	10	11	16	9	6	9
Rb	15	9	10	6	8		11	10	20	13	6	17	11
Sr	215	218	199	227	202		262	303	292	183	268	287	248
V	354	257	516	220	557		286	154	315	533	332	96	646
Y	33	33	39	17	23		41	47	45	32	43	47	38
Zn	90	74	96	70	86		110	113	93	109	76	103	97
Zr	62	62	82	35	44		45	52	64	66	80	46	52
C.I.P.W. NORM													
Il	4.3	3.4	10.8	1.9	6.0		7.6	4.3	8.4	10.0	7.4	4.5	10.0
Mag	2.6	2.5	3.7	2.4	3.0		3.7	2.5	3.1	3.8	2.9	2.6	3.6
Ap	0.4	0.5	2.3	0.1	0.4		3.0	1.7	2.8	0.8	2.2	1.8	2.8
Or	1.5	1.8	1.6	0.8	0.9		1.3	2.5	1.7	1.2	1.2	2.6	1.3
Ab	35.2	32.9	35.1	33.0	32.0		36.0	56.7	41.1	33.7	40.1	54.8	32.1
An	20.8	22.5	14.1	19.9	19.6		16.9	14.1	17.3	13.6	17.1	14.6	18.3
Di-Wo	11.9	11.8	10.0	13.4	14.0		8.3	4.3	7.8	12.9	10.7	4.4	9.4
Di-En	6.3	6.6	4.8	7.5	7.4		3.3	1.4	3.5	6.1	5.0	1.4	4.6
Di-Fs	5.2	4.8	5.0	5.3	6.1		5.1	3.0	4.3	6.6	5.6	3.2	4.7
Hy-En			1.4				2.6	0.4	1.5	1.7	0.1	1.2	2.9
Hy-Fs			1.4				4.0	0.9	1.8	1.9	0.1	2.7	2.9
Qtz													
Crn													
Fo	5.9	6.9	4.5	8.2	5.5		3.0	2.4	2.9	3.5	3.4	1.8	3.5
Fa	5.4	5.6	5.2	6.4	5.0		5.2	5.7	3.9	4.2	4.2	4.4	4.0
Ne	0.5	0.8		0.9	0.0								

* Fine grain type

Table 11. continued 10/12)

Cruise	Hornblende Gabbro										
	KH07-02 D14			KR03-01 D6			KR03-01 D10			YK09-05 6K#1141	
Sample No.	001	009	029	1201	1304	101	106	R01	R03Gb	R03Gr	R11bDio
Major elements (wt %)											
SiO ₂	59.90	48.29	49.08	51.69	49.18	52.05	55.57	53.50	45.21	57.93	56.62
TiO ₂	0.85	3.50	3.76	2.14	2.84	1.12	2.40	2.75	5.72	4.28	1.94
Al ₂ O ₃	17.16	12.12	12.19	13.25	12.34	9.53	14.86	15.36	10.35	16.80	17.04
Fe ₂ O ₃	9.22	17.12	18.18	15.50	17.24	12.93	8.48	8.96	15.66	6.00	9.59
MnO	0.16	0.29	0.31	0.28	0.27	0.21	0.23	0.21	0.42	0.22	0.14
MgO	1.23	3.60	4.64	3.42	4.00	10.78	5.27	3.89	5.46	1.45	2.47
CaO	3.38	9.98	7.97	8.61	9.29	8.15	4.57	7.47	10.45	4.58	4.18
Na ₂ O	7.53	3.55	3.45	4.33	3.76	4.44	7.27	6.32	4.02	7.99	7.31
K ₂ O	0.41	0.21	0.19	0.27	0.22	0.24	0.11	0.17	0.25	0.13	0.18
P ₂ O ₅	0.16	1.34	0.23	0.51	0.86	0.55	1.23	1.36	2.46	0.61	0.54
L.O.I.	0.55	0.12	0.00	0.21	0.66	1.95	1.90	0.22	0.77	0.23	1.23
Trace elements (ppm)											
Ba	139	141	107	134	111	8	99	141	181	289	204
Cr	4	11	12	15	14	110	31	12	20	13	10
Nb	13	14	8	8	11	12	20	14	16	71	19
Ni	n.d.	4	9	3	20	201	128	70	23	24	16
Rb	10	15	11	19	10	4	5	6	6	6	9
Sr	104	119	104	137	122	32	128	215	101	184	198
V	34	159	231	192	212	228	97	165	431	184	91
Y	147	86	36	69	65	50	86	66	68	72	60
Zn	128	128	109	133	106	80	77	36	70	38	47
Zr	1016	83	59	88	60	102	142	91	56	157	76
C.I.P.W. NORM											
Il	1.6	6.7	7.3	4.1	5.5	2.1	4.6	5.3	11.0	8.2	3.7
Mag	2.0	3.8	4.0	3.4	3.8	2.8	1.9	2.0	3.5	1.3	2.1
Ap	0.4	3.2	0.6	1.2	2.1	1.3	2.9	3.3	5.9	1.5	1.3
Or	2.4	1.2	1.2	1.6	1.3	1.4	0.7	1.0	1.5	0.7	1.1
Ab	64.2	30.5	29.6	37.1	32.3	38.0	62.0	53.9	34.4	67.9	62.3
An	11.9	16.7	17.5	16.1	16.4	5.4	7.6	13.2	9.6	9.7	13.3
Di-Wo	1.6	10.3	8.8	9.9	10.3	13.3	3.0	6.4	11.2	3.8	1.7
Di-En	0.4	3.7	3.5	3.4	3.8	8.1	1.8	3.5	5.9	2.7	0.7
Di-Fs	1.3	6.9	5.4	6.8	6.8	4.5	1.0	2.7	5.0	0.8	1.0
Hy-En	2.7	5.4	8.2	5.2	6.3	3.1	4.0	2.1	3.2	0.9	3.9
Hy-Fs	9.4	10.1	12.5	10.3	11.4	1.7	2.2	1.6	2.7	0.3	5.9
Qtz	1.9	1.5	1.4	0.8	0.2					2.3	
Crm											
Fo						11.2	5.2	2.9	3.3		1.1
Fa						6.9	3.2	2.4	3.0		1.9
le											

Table 11. continued (11/12)

Hornblende Gabbro									
Cruise	YK09-05 6K#1141						YK11-08		
Sample No.	R11CGb	R11fGb	R11Gr	R13OxGb	R13Gr	R18Dio	YKDT#115R57		
Major elements (wt.%)									
SiO ₂	46.78	48.98	56.82	47.32	58.62	56.62	57.21		
TiO ₂	6.96	2.46	2.86	4.56	3.72	1.94	1.61		
Al ₂ O ₃	14.12	14.64	16.91	11.10	17.54	17.04	16.50		
Fe ₂ O ₃	14.14	13.83	7.25	15.89	5.29	9.59	9.89		
MnO	0.34	0.25	0.16	0.27	0.12	0.14	0.18		
MgO	5.51	6.64	2.43	7.86	1.60	2.47	2.03		
CaO	8.38	9.14	5.47	9.14	4.73	4.18	4.14		
Na ₂ O	3.63	3.88	7.51	3.57	8.00	7.31	7.51		
K ₂ O	0.11	0.16	0.16	0.26	0.16	0.18	0.40		
P ₂ O ₅	0.05	0.02	0.44	0.04	0.21	0.54	0.53		
L.O.I.	0.70	0.99	0.28	0.07	0.48	1.23	0.26		
Trace elements (ppm)									
Ba	232	94	242	160	310	204	514		
Cr	23	115	14	63	17	10	9		
Nb	11	3	20	8	23	19	28		
Ni	13	26	49	124	44	16	35		
Rb	4	6	4	6	5	9	5		
Sr	175	186	221	112	220	198	228		
V	507	592	216	748	237	91	62		
Y	16	17	61	31	45	60	57		
Zn	48	64	26	48	21	47	62		
Zr	58	31	159	47	192	76	87		
C.I.P.W. NORM									
Il	13.4	4.7	5.5	8.8	7.1	3.7	3.1		
Mag	3.1	3.0	1.6	3.5	1.2	2.1	2.2		
Ap	0.1	0.1	1.0	0.1	0.5	1.3	1.3		
Or	0.6	1.0	0.9	1.5	1.0	1.1	2.4		
Ab	31.0	33.2	63.9	30.6	68.0	62.3	64.1		
An	22.2	22.3	12.1	13.7	11.5	13.3	10.2		
Di-Wo	8.2	9.8	5.2	13.4	4.5	1.7	2.9		
Di-En	5.0	5.1	2.8	7.6	3.3	0.7	1.0		
Di-Fs	2.7	4.4	2.2	5.2	0.7	1.0	2.0		
Hy-En	8.8	1.3	1.0	1.4	0.7	3.9	2.0		
Hy-Fs	4.7	1.1	0.8	0.9	0.1	5.9	4.1		
Qtz	0.1				1.4				
Crm									
Fo		7.2	1.6	7.6		1.1	1.5		
Fa		6.8	1.4	5.7		1.9	3.3		
Ne									

Table 11. continued (12/12)

Trondhjemite												
Cruise	KH07-02 D18			KR03-01 D9		KH07-02 D25-201		YK09-05 6K#1140		YK09-05 6K#1141		
Sample No.	002Gr	005Gr	015	101	102			R12	R13	R02Gr	R07Gr	R14Gr
Major elements (wt.%)												
SiO ₂	66.28	64.63	64.89	66.67	66.19		64.24	64.51	65.50	67.26	61.09	64.87
TiO ₂	0.11	0.02	0.34	0.26	0.30		0.16	0.62	0.40	0.17	0.94	0.16
Al ₂ O ₃	20.64	22.01	20.34	18.11	18.07		19.43	19.36	19.05	19.89	18.59	20.52
Fe ₂ O ₃	0.38	0.32	1.27	2.35	3.11		1.25	2.65	2.17	0.73	3.53	2.11
MnO	0.01	0.00	0.02	0.05	0.06		0.04	0.04	0.05	0.01	0.26	0.02
MgO	0.27	0.23	0.49	0.26	0.26		2.83	0.87	1.06	0.21	1.31	0.75
CaO	1.28	3.29	2.01	0.17	0.18		1.67	1.86	1.66	1.26	4.39	1.73
Na ₂ O	10.92	9.41	10.42	9.24	9.27		9.84	9.50	9.69	10.18	8.80	9.68
K ₂ O	0.09	0.08	0.14	2.88	2.53		0.53	0.49	0.37	0.27	0.27	0.15
P ₂ O ₅	0.01	0.01	0.08	0.02	0.02		0.01	0.10	0.04	0.02	0.81	0.02
L.O.I.	0.20	0.25	0.17	0.21	0.10		1.87	0.32	0.24	0.20	0.58	0.64
Trace elements (ppm)												
Ba	47	101	231	90	91		295	375	293	260	228	245
Cr	n.d.	7	n.d.	8	10		4	8	7	9	10	14
Nb	12	1	5	40	22		5	9	8	9	25	4
Ni	2	17	5	17	20		42	44	27	20	51	36
Rb	6	7	7	27	24		9	8	6	6	5	5
Sr	108	376	122	8	9		214	174	131	147	232	243
V	n.d.	n.d.	14	6	7		2	19	11	4	46	88
Y	57	13	16	76	48		34	42	51	9	128	7
Zn	5	0	7	43	62		57	42	30	5	38	18
Zr	1235	847	139	242	297		124	368	1463	112	102	86
C.I.P.W. NORM												
Il	0.2	0.0	0.7	0.5	0.6		0.3	1.2	0.8	0.3	1.8	0.3
Mag	0.1	0.1	0.3	0.5	0.7		0.3	0.6	0.5	0.2	0.8	0.5
Ap	0.0	0.0	0.2	0.1	0.1		0.0	0.2	0.1	0.1	1.9	0.0
Or	0.6	0.4	0.8	17.0	15.0		3.1	2.9	2.2	1.6	1.6	0.9
Ab	92.4	79.6	86.5	78.3	78.6		81.5	80.5	82.1	86.2	74.7	82.0
An	6.3	16.2	8.4	0.0	0.2		7.3	8.6	7.4	6.1	10.5	8.5
Di-Wo			0.5	0.5	0.2		0.4		0.2		2.6	
Di-En			0.2	0.1	0.0		0.3		0.1		1.2	
Di-Fs			0.2	0.4	0.2		0.1		0.1		1.3	
Hy-En	0.7	0.6		0.5	0.6			2.2	2.5	0.5	1.2	1.9
Hy-Fs	0.3	0.4		2.2	3.4			2.5	2.1	0.7	1.3	2.5
Qtz	-0.8	2.1		0.3	0.4			1.3	1.9	3.8		2.1
Crn	0.3	0.5						0.1		0.6		1.3
Fo			0.7				4.8				0.6	
Fa			0.7				1.0				0.7	
Ne			0.9				1.0					

Table 12. Classisfeid types of the Godzilla Megamullion gabbroic rocks

	MORB normalized	lithology	major elements	WLR	ELR	WHR	WAR	WSR
type-1	depleted	cumulate	low FeO, TiO ₂	troctolite				
	St>1, Rb>1		high MgO, Al ₂ O ₃ , CaO	olivine gabbro		olivine gabbro		
	low HFS		SiO ₂ =46-54 wt. %	gabbro	gabbro			
	extremely low Ba, K				HPG	HPG		
					PHG	PHG		PHG
type-2	high LIL		low FeO, MgO, CaO		PHG		PHG	PHG
	most enrich		high Na ₂ O		HG		HG	HG
			SiO ₂ >52 wt. %					
type-3	high LIL	generally small	low Al ₂ O ₃ , MgO, CaO, Na ₂ O			HPG		HPG
	extremely high Ti	plagioclase occurred	extremely high FeO, TiO ₂	PHG	PHG	PHG	PHG	PHG
		(oxide gabbro)	SiO ₂ <52 wt. %	HG	HG		HG	
type-4		fine grain	low TiO ₂	HPG				
				PHG			PHG	PHG
type-5	High Ba, Zr	trondhjemite	low FeO, TiO ₂ , MgO, CaO			trondhjemite	trondhjemite	
			high Al ₂ O ₃ , Na ₂ O					
			SiO ₂ >60 wt. %					

Table 13. Composition of starting materials

	KR0301 D06-1508*	YK11-08 6K#1275R07**
Major Elements		
SiO ₂	48.86	50.55
TiO ₂	1.16	1.31
Al ₂ O ₃	16.56	16.06
Fe ₂ O ₃	8.80	8.67
MnO	0.13	0.14
MgO	10.34	8.13
CaO	11.02	10.23
Na ₂ O	2.40	3.67
K ₂ O	0.11	0.10
P ₂ O ₅	0.09	0.14
total	99.47	98.99
100% normalized		
SiO ₂	49.12	51.06
TiO ₂	1.17	1.33
Al ₂ O ₃	16.65	16.22
Fe ₂ O ₃	8.85	8.75
MnO	0.13	0.14
MgO	10.40	8.21
CaO	11.08	10.33
Na ₂ O	2.41	3.71
K ₂ O	0.11	0.10
P ₂ O ₅	0.09	0.15
total	100	100
#Mg	69.9	65.0
FeO/MgO	0.77	0.96
Trace Elements		
Cr	459	336
Ni	219	91
V		212

* analyzed by Hiroshi Sato

** analyzed by Osamu Ishizuka

Table 14. Representative calculated residual melt composition and crystal accumulation compositions (1/3)
1500bar, **dry**, QFM STD=1275R07 (Calculation 35)

Temp. (C)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Residual melt compositions										
SiO ₂	51.46	51.76	52.07	52.08	51.77	51.07	50.17	48.95	47.08	45.14
TiO ₂	1.34	1.44	1.67	1.98	2.36	2.80	3.29	3.86	4.59	4.40
Al ₂ O ₃	16.37	15.86	15.05	14.55	14.03	13.48	12.88	12.19	11.28	10.07
Fe ₂ O ₃	1.38	1.46	1.59	1.75	1.92	2.12	2.32	2.55	2.83	3.25
FeO	6.68	6.94	7.54	8.34	9.21	10.18	11.26	12.52	14.22	16.72
MnO	0.14	0.15	0.16	0.18	0.21	0.25	0.29	0.33	0.37	0.40
MgO	8.21	7.85	7.42	6.90	6.47	6.14	5.88	5.70	5.68	5.55
CaO	10.43	10.44	10.17	9.55	9.07	8.73	8.50	8.39	8.49	8.60
Na ₂ O	3.74	3.84	4.03	4.29	4.51	4.69	4.77	4.72	4.46	4.36
K ₂ O	0.10	0.11	0.13	0.15	0.18	0.21	0.24	0.28	0.31	0.35
P ₂ O ₅	0.14	0.15	0.18	0.22	0.27	0.33	0.41	0.52	0.67	1.15
FeO total	7.93	8.25	8.97	9.92	10.94	12.08	13.34	14.81	16.77	19.64
H ₂ O										
Crystal accumulation compositions										
SiO ₂	47.62	49.07	49.07	50.27	51.09	51.74	52.14	52.41	52.64	52.35
TiO ₂	0.00	0.05	0.05	0.12	0.17	0.23	0.29	0.37	0.45	0.44
Al ₂ O ₃	22.19	21.30	21.30	19.69	18.98	18.51	18.19	17.94	17.71	17.19
Fe ₂ O ₃	0.00	0.15	0.15	0.31	0.40	0.47	0.53	0.59	0.65	0.70
FeO	4.12	3.85	3.85	3.97	4.18	4.39	4.59	4.78	4.98	5.31
MnO	0.09	0.07	0.07	0.07	0.06	0.06	0.06	0.07	0.08	0.09
MgO	13.40	11.55	11.55	10.85	10.32	9.89	9.55	9.26	8.98	8.58
CaO	10.09	11.33	11.33	12.02	11.94	11.68	11.43	11.18	10.93	10.67
Na ₂ O	2.48	2.62	2.62	2.69	2.85	3.01	3.18	3.36	3.54	3.65
K ₂ O	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.05	0.07
P ₂ O ₅	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FeO total	4.12	3.98	3.98	4.25	4.54	4.81	5.07	5.31	5.56	5.94

Table 14. Continued (2/3)

1500bar, +0.02H₂O, QFM STD=1275R07 (Calculation 48)

Temp. (C)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Residual melt compositions												
SiO ₂	51.45	51.71	52.05	52.11	51.95	51.38	50.67	49.80	48.74	48.49	48.84	50.40
TiO ₂	1.34	1.42	1.63	1.93	2.27	2.66	3.09	3.55	4.05	3.77	3.22	2.64
Al ₂ O ₃	16.37	15.99	15.16	14.69	14.20	13.71	13.20	12.66	12.07	11.60	11.33	11.51
Fe ₂ O ₃	1.38	1.44	1.57	1.72	1.87	2.05	2.23	2.42	2.61	2.81	2.93	2.91
FeO	6.68	6.88	7.43	8.19	8.97	9.85	10.76	11.74	12.82	13.72	14.03	13.55
MnO	0.14	0.15	0.16	0.18	0.20	0.24	0.27	0.31	0.34	0.36	0.35	0.32
MgO	8.21	7.86	7.44	6.92	6.47	6.12	5.83	5.59	5.41	5.00	4.51	3.89
CaO	10.42	10.45	10.24	9.61	9.10	8.74	8.47	8.29	8.20	7.93	7.65	6.92
Na ₂ O	3.74	3.83	4.00	4.27	4.49	4.69	4.81	4.85	4.79	5.04	5.43	6.05
K ₂ O	0.10	0.11	0.12	0.15	0.17	0.20	0.23	0.26	0.30	0.36	0.42	0.51
P ₂ O ₅	0.14	0.15	0.18	0.21	0.26	0.31	0.38	0.47	0.58	0.82	1.12	1.03
FeO total	7.93	8.18	8.84	9.74	10.66	11.69	12.77	13.92	15.17	16.24	16.66	16.17
H ₂ O	0.02	0.02	0.03	0.03	0.04	0.04	0.05	0.07	0.08	0.12	0.18	0.28
Crystal accumulation compositions												
SiO ₂	40.12	47.30	48.80	50.07	50.80	51.50	51.90	52.16	52.33	52.07	51.80	51.61
TiO ₂	0.00	0.00	0.04	0.12	0.16	0.22	0.29	0.36	0.45	0.82	1.09	1.23
Al ₂ O ₃	0.00	21.55	21.44	19.72	19.02	18.54	18.21	17.96	17.74	17.34	17.01	16.75
Fe ₂ O ₃	0.00	0.00	0.12	0.30	0.38	0.46	0.52	0.58	0.64	0.77	0.88	0.95
FeO	13.23	4.41	3.92	3.99	4.19	4.39	4.59	4.79	5.00	5.50	6.01	6.45
MnO	0.27	0.09	0.08	0.07	0.07	0.06	0.06	0.07	0.08	0.10	0.12	0.13
MgO	45.94	14.42	11.86	11.04	10.53	10.07	9.73	9.45	9.21	8.96	8.77	8.63
CaO	0.44	9.85	11.15	12.05	12.05	11.80	11.56	11.34	11.13	10.93	10.76	10.61
Na ₂ O	0.00	2.37	2.58	2.63	2.79	2.94	3.09	3.25	3.39	3.46	3.51	3.56
K ₂ O	0.00	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07
P ₂ O ₅	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FeO total	13.23	4.41	4.03	4.26	4.53	4.81	5.06	5.32	5.58	6.19	6.80	7.31

Table 14. Continued (3/3)

1500bar, **+0.5H₂O**, QFM STD=1275R07 (Calculation 36)

Temp. (C)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Residual melt compositions																					
SiO ₂	51.20	51.29	51.39	51.56	51.84	52.08	52.31	52.53	52.75	52.99	53.27	53.54	53.82	54.36	55.06	55.64	56.11	56.50	56.82	57.08	57.40
TiO ₂	1.33	1.34	1.35	1.39	1.54	1.69	1.83	1.96	2.08	2.18	2.26	2.30	2.21	1.92	1.69	1.49	1.33	1.19	1.06	0.95	0.86
Al ₂ O ₃	16.29	16.43	16.56	16.49	16.30	16.12	15.95	15.79	15.64	15.50	15.38	15.28	15.23	15.20	15.23	15.24	15.24	15.24	15.24	15.24	15.28
Fe ₂ O ₃	1.38	1.38	1.38	1.40	1.48	1.55	1.62	1.67	1.72	1.76	1.79	1.81	1.84	1.84	1.77	1.71	1.66	1.60	1.55	1.50	1.45
FeO	6.65	6.60	6.55	6.58	6.96	7.31	7.61	7.87	8.07	8.23	8.33	8.38	8.40	8.26	7.76	7.31	6.91	6.53	6.18	5.86	5.57
MnO	0.14	0.14	0.14	0.14	0.15	0.17	0.18	0.19	0.20	0.20	0.21	0.22	0.23	0.24	0.26	0.28	0.30	0.31	0.32	0.33	0.34
MgO	8.17	7.85	7.54	7.22	6.72	6.26	5.83	5.44	5.07	4.73	4.40	4.10	3.78	3.45	3.17	2.93	2.71	2.53	2.36	2.20	2.06
CaO	10.37	10.46	10.54	10.59	10.00	9.47	8.98	8.54	8.13	7.75	7.40	7.06	6.72	6.38	6.10	5.85	5.65	5.47	5.32	5.17	4.94
Na ₂ O	3.72	3.75	3.79	3.85	4.12	4.37	4.60	4.81	5.00	5.17	5.34	5.51	5.77	6.09	6.43	6.72	6.97	7.20	7.41	7.60	7.79
K ₂ O	0.10	0.10	0.10	0.11	0.12	0.13	0.15	0.16	0.18	0.19	0.21	0.23	0.25	0.27	0.30	0.33	0.36	0.39	0.42	0.45	0.47
P ₂ O ₅	0.14	0.14	0.14	0.15	0.17	0.19	0.21	0.23	0.26	0.28	0.31	0.34	0.38	0.43	0.49	0.54	0.60	0.67	0.73	0.79	0.76
FeO total	7.89	7.84	7.79	7.84	8.29	8.70	9.06	9.37	9.62	9.81	9.93	10.01	10.06	9.92	9.35	8.85	8.40	7.98	7.58	7.21	6.88
H ₂ O	0.51	0.51	0.52	0.53	0.60	0.67	0.75	0.83	0.92	1.01	1.11	1.22	1.36	1.54	1.74	1.94	2.16	2.37	2.60	2.83	3.09
Crystal accumulation compositions																					
SiO ₂	40.16	40.09	40.02	43.43	47.67	48.46	48.85	49.09	49.26	49.37	49.44	49.09	47.94								
TiO ₂	0.00	0.00	0.00	0.00	0.17	0.23	0.28	0.34	0.40	0.46	0.54	0.63	0.71								
Al ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	11.61	16.08	16.70	16.92	17.01	17.04	17.03	17.01	16.94	16.79								
Fe ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.00	0.38	0.47	0.51	0.55	0.58	0.62	0.65	0.68	0.71								
FeO	13.06	13.43	13.82	9.16	5.43	5.04	5.02	5.10	5.24	5.41	5.60	5.67	5.45								
MnO	0.24	0.25	0.26	0.17	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07	0.08	0.08	0.09	0.09								
MgO	46.12	45.80	45.48	28.85	16.36	14.23	13.23	12.60	12.14	11.78	11.46	10.97	10.03								
CaO	0.42	0.43	0.43	5.69	12.27	13.06	13.23	13.21	13.12	13.00	12.86	12.70	12.47								
Na ₂ O	0.00	0.00	0.00	1.08	1.56	1.74	1.88	2.01	2.13	2.24	2.35	2.43	2.49								
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01								
P ₂ O ₅	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00								
FeO total	13.06	13.43	13.82	9.16	5.78	5.46	5.48	5.60	5.77	5.97	6.18	6.28	6.09								

Table 15. Calculated mineral compositions at 1500bar, dry, QFM buffer condition

Index	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
T (C)	1221	1211	1201	1191	1181	1171	1161	1151	1141	1131
Olivine										
SiO ₂	40.12	39.98	39.77	39.50	39.24	38.98	38.73	38.46	38.20	37.77
TiO ₂	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FeO	13.24	13.95	15.05	16.40	17.72	18.97	20.23	21.52	22.83	24.97
MnO	0.27	0.30	0.34	0.42	0.51	0.63	0.75	0.87	0.99	1.12
MgO	45.93	45.33	44.39	43.25	42.11	41.01	39.89	38.75	37.60	35.74
CaO	0.44	0.45	0.45	0.43	0.42	0.41	0.41	0.40	0.39	0.40
Na ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
P ₂ O ₅	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fo	0.86	0.85	0.84	0.82	0.81	0.79	0.78	0.76	0.75	0.72
Fa	0.14	0.15	0.16	0.18	0.19	0.21	0.22	0.24	0.25	0.28
Feldspar										
SiO ₂		50.82	51.56	52.46	53.29	54.03	54.73	55.41	56.08	56.71
TiO ₂		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al ₂ O ₃		31.51	31.01	30.40	29.84	29.34	28.87	28.41	27.95	27.52
Fe ₂ O ₃		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FeO		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MnO		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MgO		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CaO		14.14	13.55	12.84	12.19	11.60	11.04	10.51	9.97	9.47
Na ₂ O		3.52	3.86	4.28	4.65	4.99	5.31	5.62	5.91	6.18
K ₂ O		0.01	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.08	0.12
P ₂ O ₅		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
An		0.689	0.659	0.623	0.590	0.561	0.533	0.507	0.480	0.455
Ab		0.310	0.340	0.376	0.408	0.437	0.464	0.490	0.515	0.538
Or		0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.003	0.003	0.005	0.007
Clinopyroxene-1										
SiO ₂			51.83	51.70	51.49	51.07	50.61	50.08	49.51	49.46
TiO ₂			0.44	0.52	0.63	0.82	1.05	1.32	1.64	1.54
Al ₂ O ₃			4.17	4.11	4.13	4.28	4.45	4.65	4.88	4.75
Fe ₂ O ₃			1.29	1.36	1.45	1.59	1.75	1.93	2.12	2.27
FeO			5.52	6.23	6.83	7.05	7.23	7.38	7.50	8.08
MnO			0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MgO			18.00	18.06	17.94	17.41	16.85	16.26	15.66	15.26
CaO			18.53	17.77	17.28	17.50	17.75	18.03	18.32	18.24
Na ₂ O			0.22	0.24	0.25	0.28	0.32	0.35	0.39	0.41
K ₂ O			0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
P ₂ O ₅			0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
#Mg			0.853	0.838	0.824	0.815	0.806	0.797	0.788	0.771
En			0.523	0.526	0.525	0.513	0.500	0.487	0.474	0.464
Wo			0.387	0.372	0.363	0.371	0.379	0.388	0.399	0.399
Fs			0.090	0.102	0.112	0.117	0.121	0.124	0.127	0.138
Clinopyroxene-2										
SiO ₂					53.04	52.79	52.55	52.33	52.12	51.89
TiO ₂					0.29	0.35	0.41	0.46	0.50	0.46
Al ₂ O ₃					3.17	3.19	3.20	3.21	3.19	3.13
Fe ₂ O ₃					1.06	1.13	1.19	1.26	1.32	1.41
FeO					11.34	12.00	12.67	13.35	14.04	15.03
MnO					0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MgO					24.11	23.70	23.31	22.94	22.57	21.81
CaO					6.88	6.72	6.53	6.33	6.11	6.13
Na ₂ O					0.12	0.13	0.13	0.14	0.15	0.15
K ₂ O					0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
P ₂ O ₅					0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
#Mg					0.791	0.779	0.766	0.754	0.741	0.721
En					0.681	0.672	0.664	0.656	0.648	0.629
Wo					0.140	0.137	0.134	0.130	0.126	0.127
Fs					0.180	0.191	0.202	0.214	0.226	0.243

Table 16. Calculated mineral compositions at 1500bar, +0.02H₂O, QFM buffer condition

Index	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
T (C)	1221	1211	1201	1191	1181	1171	1161	1151	1141	1131	1121	1111
Olivine												
SiO ₂	40.12	40.00	39.79	39.53	39.28	39.03	38.78	38.53	38.28	37.93	37.59	37.30
TiO ₂	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FeO	13.23	13.87	14.92	16.24	17.55	18.76	19.98	21.21	22.44	24.20	25.95	27.49
MnO	0.27	0.29	0.33	0.41	0.48	0.59	0.70	0.81	0.92	1.04	1.11	1.13
MgO	45.94	45.39	44.50	43.39	42.27	41.21	40.14	39.06	37.97	36.44	34.96	33.69
CaO	0.44	0.45	0.45	0.43	0.42	0.41	0.40	0.40	0.39	0.39	0.39	0.39
Na ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
P ₂ O ₅	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fo	0.861	0.854	0.842	0.826	0.811	0.796	0.782	0.766	0.751	0.728	0.706	0.686
Fa	0.139	0.146	0.158	0.174	0.189	0.204	0.218	0.234	0.249	0.272	0.294	0.314
Feldspar												
SiO ₂		50.71	51.40	52.28	53.09	53.80	54.45	55.07	55.64	56.12	56.50	56.81
TiO ₂		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al ₂ O ₃		31.59	31.12	30.53	29.98	29.50	29.06	28.64	28.25	27.92	27.66	27.45
Fe ₂ O ₃		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FeO		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MnO		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MgO		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CaO		14.23	13.68	12.99	12.35	11.79	11.26	10.78	10.32	9.94	9.64	9.39
Na ₂ O		3.47	3.79	4.19	4.56	4.88	5.18	5.46	5.72	5.93	6.09	6.22
K ₂ O		0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.04	0.05	0.07	0.09	0.11	0.13
P ₂ O ₅		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
An		0.693	0.666	0.631	0.599	0.570	0.544	0.520	0.498	0.479	0.464	0.452
Ab		0.306	0.334	0.368	0.400	0.428	0.453	0.477	0.499	0.517	0.530	0.541
Or		0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.003	0.004	0.005	0.006	0.007
Clinopyroxene-1												
SiO ₂			51.82	51.68	51.52	51.12	50.67	50.16	49.57	49.34	49.29	49.23
TiO ₂			0.44	0.52	0.61	0.79	1.01	1.27	1.59	1.63	1.55	1.50
Al ₂ O ₃			4.20	4.15	4.13	4.27	4.45	4.66	4.90	4.92	4.83	4.78
Fe ₂ O ₃			1.29	1.36	1.43	1.57	1.72	1.89	2.07	2.23	2.34	2.44
FeO			5.42	6.09	6.78	7.00	7.17	7.31	7.41	7.81	8.26	8.64
MnO			0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MgO			17.94	17.97	17.98	17.47	16.92	16.35	15.75	15.30	14.96	14.65
CaO			18.68	17.99	17.30	17.50	17.75	18.03	18.33	18.39	18.36	18.36
Na ₂ O			0.22	0.24	0.25	0.28	0.31	0.34	0.37	0.39	0.41	0.42
K ₂ O			0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
P ₂ O ₅			0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
#Mg			0.855	0.840	0.825	0.816	0.808	0.799	0.791	0.777	0.763	0.751
En			0.521	0.524	0.525	0.514	0.502	0.489	0.476	0.465	0.456	0.448
Wo			0.390	0.377	0.363	0.370	0.379	0.388	0.398	0.402	0.402	0.404
Fs			0.088	0.100	0.111	0.116	0.119	0.123	0.126	0.133	0.141	0.148
Clinopyroxene-2												
SiO ₂						52.83	52.59	52.37	52.15	51.93	51.74	51.58
TiO ₂						0.34	0.40	0.45	0.50	0.48	0.44	0.41
Al ₂ O ₃						3.20	3.22	3.23	3.24	3.21	3.17	3.14
Fe ₂ O ₃						1.11	1.18	1.24	1.30	1.38	1.44	1.50
FeO						11.91	12.56	13.21	13.88	14.73	15.55	16.28
MnO						0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MgO						23.78	23.40	23.05	22.70	22.09	21.49	20.99
CaO						6.71	6.53	6.32	6.10	6.05	6.02	5.97
Na ₂ O						0.12	0.13	0.14	0.14	0.15	0.15	0.15
K ₂ O						0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
P ₂ O ₅						0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
#Mg						0.781	0.769	0.757	0.745	0.728	0.711	0.697
En						0.674	0.666	0.658	0.651	0.637	0.622	0.610
Wo						0.137	0.134	0.130	0.126	0.125	0.125	0.125
Fs						0.189	0.201	0.212	0.223	0.238	0.253	0.265

Table 17. Calculated mineral compositions at 1500bar, +0.5H₂O, QFM buffer condition

Index	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
T (C)	1214	1204	1194	1184	1174	1164	1154	1144	1134	1124	1114	1104	1094
Olivine													
SiO ₂	40.16	40.09	40.02	39.92	39.73	39.54	39.35	39.17	38.98	38.79	38.60	38.42	38.22
TiO ₂	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FeO	13.06	13.43	13.82	14.31	15.30	16.28	17.26	18.23	19.20	20.17	21.14	22.11	23.09
MnO	0.24	0.25	0.26	0.27	0.30	0.34	0.38	0.42	0.46	0.49	0.53	0.57	0.63
MgO	46.12	45.80	45.48	45.06	44.24	43.43	42.62	41.81	41.00	40.20	39.39	38.58	37.75
CaO	0.42	0.43	0.43	0.44	0.42	0.41	0.39	0.38	0.36	0.35	0.33	0.32	0.31
Na ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
P ₂ O ₅	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fo	0.863	0.859	0.854	0.849	0.837	0.826	0.815	0.803	0.792	0.780	0.768	0.757	0.744
Fa	0.137	0.141	0.146	0.151	0.163	0.174	0.185	0.197	0.208	0.220	0.232	0.243	0.256
Feldspar													
SiO ₂				49.67	50.19	50.68	51.16	51.61	52.04	52.45	52.84	53.19	53.48
TiO ₂				0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al ₂ O ₃				32.28	31.94	31.60	31.28	30.98	30.69	30.41	30.15	29.91	29.71
Fe ₂ O ₃				0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FeO				0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MnO				0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MgO				0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CaO				15.05	14.64	14.25	13.87	13.51	13.17	12.85	12.54	12.26	12.03
Na ₂ O				2.99	3.23	3.46	3.68	3.88	4.08	4.27	4.45	4.61	4.74
K ₂ O				0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03
P ₂ O ₅				0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
An				0.735	0.714	0.694	0.675	0.657	0.640	0.624	0.608	0.594	0.583
Ab				0.264	0.285	0.305	0.324	0.342	0.359	0.375	0.390	0.404	0.416
Or				0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002
Clinopyroxene													
SiO ₂				51.16	50.94	50.70	50.42	50.12	49.77	49.39	48.90	48.38	
TiO ₂				0.62	0.73	0.86	1.01	1.18	1.37	1.59	1.86	2.15	
Al ₂ O ₃				4.74	4.79	4.86	4.94	5.05	5.19	5.34	5.56	5.81	
Fe ₂ O ₃				1.42	1.50	1.57	1.65	1.74	1.82	1.92	2.03	2.17	
FeO				5.02	5.36	5.68	5.98	6.26	6.51	6.73	6.87	6.93	
MnO				0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
MgO				16.97	16.80	16.62	16.40	16.16	15.89	15.60	15.22	14.76	
CaO				19.85	19.64	19.47	19.32	19.22	19.15	19.13	19.22	19.45	
Na ₂ O				0.22	0.24	0.25	0.26	0.28	0.29	0.31	0.33	0.35	
K ₂ O				0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
P ₂ O ₅				0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
#Mg				0.857	0.848	0.839	0.830	0.821	0.813	0.805	0.798	0.791	
En				0.498	0.495	0.492	0.487	0.483	0.477	0.471	0.463	0.452	
Wo				0.419	0.416	0.414	0.413	0.413	0.413	0.415	0.420	0.429	
Fs				0.083	0.089	0.094	0.100	0.105	0.110	0.114	0.117	0.119	

Table 18. Estimate of gabbroic magma temperature

Type	Topography		WLR		ELR		WHR	WAR		WSR	
	Rock	H ₂ O	0.02	0.02	0.02	0.5		0.02	0.5	0.02	0.5
Type-1	troctelite		1210								
	OIGb		1200-1180				1160-1120				
	Gb		1200-1180	1180-1140							
	HPG			1140-1120			1160-1120				
	PHG			1140-1120			1160-1120			1120?	
Type-2	PHG					1070-1010			1140-		1090-
	HG					1070-1010			1060-		
Type-3	HPG			1160-1120						1170-	
	PHG		1170-	1160-1120			1150-1130	1180-		1170-	
	HG		1170-	1160-1120				1180-			
Type-4	fine grain type		○					○	○	○	○
Type-5	trondhjemite						HPG	HPG, PHG			

Cumulus mineral apperaed temperature

Residual melt differtiated temperature (solid temperature = 1050 - 900°C)

Anatexis of HPG or PHG (solid temperature = below 900°C)