

平成 25 年度
地層処分技術調査等事業
TRU廃棄物処理・処分技術高度化開発
報 告 書
(第 3 分冊)

—ナチュラルアナログ調査—

平成 26 年 3 月

公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター

本報告書は、経済産業省からの委託研究として、公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センターが実施した平成25年度地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発のうちナチュラルアナログ調査の成果を取りまとめたものです。

報告書の構成

平成 25 年度地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発－ナチュラルアナログ調査－は、以下の分冊により構成されている。

当該報告書	分冊名	報告書の標題
	第 1 分冊	平成 25 年度地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発－ヨウ素 129 対策技術の信頼性向上－
	第 2 分冊	平成 25 年度地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発－炭素 14 長期放出挙動評価－
◎	第 3 分冊	平成 25 年度地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発－ナチュラルアナログ調査－
	第 4 分冊	平成 25 年度地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発－人工バリア材料長期挙動評価・人工バリア評価の初期条件の設定－
	第 5 分冊	平成 25 年度地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処分技術 人工バリア長期性能評価技術開発－ガス移行連成挙動評価手法の開発－

はじめに

TRU 廃棄物の処分方策については、原子力委員会での方針等（平成 6 年の原子力長期計画等）を受けて、「TRU 廃棄物処分概念検討書」（以下、第 1 次 TRU レポート）、「TRU 廃棄物処分技術検討書－第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ－」（以下、第 2 次 TRU レポート）によって、その地層処分の技術的成立性が示され、平成 19 年 6 月には最終処分法の一部改正により、地層処分の対象廃棄物に追加された。これに伴い、平成 20 年 3 月に「特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針」及び「特定放射性廃棄物の最終処分に関する計画」が改定され、併置処分の実施も念頭に、TRU 廃棄物と高レベル放射性廃棄物は地層処分事業という統合された計画の中で、最終処分の開始を平成 40 年代後半を目途に事業を進めるというスケジュールが示されている。また、同改正法は平成 20 年 4 月より施行され、NUMO が高レベル放射性廃棄物の地層処分に加え、TRU 廃棄物の地層処分の実施主体としての認可を受けた。これらの背景を踏まえて、TRU 廃棄物の処分に向けた技術開発については、TRU 廃棄物の地層処分に関する全体基本計画（以下、基盤研究開発計画）に示されるように、高レベル放射性廃棄物処分の技術開発との整合を図りつつ、併置処分の技術的成立性をより確実にするための検討を含め、地層処分事業のスケジュールを考慮して進める必要がある。そして、NUMO が目的とする技術開発等へ直接的に反映させるために、処分事業に先行して技術基盤の整備を進めることに加え、科学的知見の拡充による技術的信頼性や安全性の向上を図るために、国の基盤研究開発として実施することが期待されている。

このような TRU 廃棄物特有の重要課題として、人工バリア材および地質媒体への収着分配係数が小さく、レファレンスケースの被ばく線量評価では高レベル放射性廃棄物に比べ 2 桁以上高いことが示されている（第 2 次 TRU レポートから最大線量が処分後 10,000 年で $2\mu\text{Sv/y}$ ）ヨウ素 129 および炭素 14 の低減対策に加え、その廃棄物の特性から大量のセメント系材料を使用することや金属腐食等によるガス発生による人工バリアの長期挙動への影響があげられる。

したがって、TRU 廃棄物処分の技術開発において、TRU 廃棄物処分の重要核種であるヨウ素 129（グループ 1）および炭素 14（グループ 2）の影響を低減するための代替技術の開発として、10 万年以上のヨウ素閉じ込め性能を目標とした複数のヨウ素固化体開発に関して、その処理プロセスの成立性を見通しを示すとともに、長期評価のためのヨウ素放出の評価モデルを提案した。一方、炭素 14 対策としては、ソースタームの現実的な評価として、インベントリ設定方法の基本的な考え方を示すとともに、金属の腐食や炭素 14 浸出率のデータを一部取得して、長期予測のためのモデル化を検討した。さらに、炭素 14 の 10 半減期に相当する 6 万年間の閉じ込めのための容器を開発し、その実現性を示した。これらの成果により、環境条件に応じた評価・概念設計に対応できる基礎的な技術・手法を整備することができたが、それらを用いた長期安全性評価の信頼性を確保するためには、これまでに提案、構築した評価手法、評価モデルの信頼性を向上させるとともに、その説明の妥当性について十分な根拠を示すことが必要である。また、精密調査地区の選定時に、対象となる地質環境に応じた予備的安全評価や施設の概念設計を実現可能な現実的な条件で実施可能とするため、材料および地質環境の多様性に対応した、人工バリアの長期挙

動に係わるデータ取得ならびに評価モデルの開発が行われたが、さらにその精緻化、信頼性向上が必要である。

長期安全性評価の信頼性を確保するためには、これまでに提案、構築した評価手法、評価モデルの信頼性を向上させるとともに、その説明の妥当性を示すための根拠を示すことが重要であり、そのためには、長期試験による評価モデルの確証に加え、類似の天然事例等による説明性の確保が必要である。

本開発では、TRU 廃棄物の地層処分における人工バリア材の特性ならびに重要核種の影響について、特に長期評価の信頼性確保の観点から、これまでに明らかになった課題を解決し、安全評価の信頼性を向上させることを目的とし、以下の各開発を実施した。

ヨウ素・炭素移行挙動評価技術高度化開発

- (1) ヨウ素 129 対策技術の信頼性向上
- (2) 炭素 14 長期放出挙動評価

人工バリア特性変化評価技術開発

- (3) ナチュラルアナログ調査
- (4) 人工バリア材料長期挙動評価・人工バリア評価の初期条件の設定
- (5) ガス移行連成挙動評価手法の開発

本分冊（第3分冊）では、ナチュラルアナログ調査に関する平成 25 年度の成果を取り纏めた。

目次

第1章 概要	1
1.1 背景	1
1.2 目的	4
1.3 本事業のこれまでの成果概要	5
1.3.1 セメントーベントナイト相互作用のナチュラルアナログが成立するための環境条件	5
1.3.2 ナチュラルアナログ調査・研究の進め方	6
1.3.3 フィリピンのナチュラルアナログ調査の有意性	7
1.3.4 調査地域の地質概要	9
1.3.5 高アルカリ地下水の地質鉱物学的証拠 (Fossil Type のナチュラルアナログの証拠)	16
1.3.6 ベントナイトの生成と地質環境 (生成環境)	20
1.3.7 高アルカリ地下水の生成・進化のプロセスと環境条件	24
1.3.8 高アルカリ地下水環境下におけるベントナイトのアルカリ変質反応	28
1.3.9 高アルカリ地下水とベントナイトの反応時間スケール	38
1.3.10 Fossil Type のナチュラルアナログによるベントナイトの長期健全性評価	39
1.3.11 今後の展望と開発戦略	41
1.4 実施概要	43
1.4.1 全体計画	43
1.4.2 平成 25 年度実施概要	46
参考文献	48
第2章 ナチュラルアナログサイトの探査	50
2.1 目的	50
2.2 フィリピン国ルソン島北西部における現地調査の概要	52
2.2.1 調査工程	52
2.2.2 現地調査の作業工程および主な調査内容	52
2.3 地下水の地球化学的調査	55
2.3.1 地下水 (既存井戸、湧水、既存試錐孔) 調査の概要	55
2.3.2 測定項目と測定方法	55
2.3.3 現地調査におけるパラメータ計測と採水	56
2.3.4 Zambales 地域の地下水の地球化学的特性	66
2.4 地上物理探査	78
2.4.1 TEM 調査方法の概要	80
2.4.2 Bigbiga における調査範囲	84
2.4.3 調査結果	88
2.5 地質精査	126

2.5.1	トレンチサイトの選定.....	126
2.5.2	トレンチ調査.....	127
2.5.3	岩石鉱物学的調査.....	131
2.5.4	岩石化学的調査.....	151
2.6	簡易試錐調査.....	156
2.6.1	試錐サイトの選定.....	156
2.6.2	試錐孔掘削作業.....	157
2.6.3	コア観察.....	158
2.6.4	コア試料による岩石鉱物学的調査.....	166
2.6.5	試錐孔内での地下水調査.....	223
2.7	アルカリ地下水の地球化学的特性・水理地質構造学的挙動.....	226
2.7.1	アルカリ地下水の賦存状況.....	226
2.7.2	アルカリ地下水の流動特性.....	226
2.8	アルカリ地下水環境下での変質鉱物の地球化学的プロセス.....	228
2.8.1	オフィオライトのアルカリ変質反応による岩石鉱物学的・地球化学的特性.....	228
2.8.2	オフィオライトのアルカリ変質反応による変質鉱物形成の地球化学的プロセス.....	290
	参考文献.....	296
第3章	年代測定による反応時間の評価.....	298
3.1	フィリピンのナチュラルアナログにおける年代測定の検討.....	298
3.2	方解石の熱ルミネセンス年代測定.....	301
3.2.1	熱ルミネセンス年代測定法.....	301
3.2.2	今年度の検討概要.....	304
3.2.3	発光原因の解明.....	304
3.2.4	放射線種と発光.....	312
3.2.5	ルミネセンスサイトの安定性について.....	315
3.2.6	採取試料の蓄積線量測定.....	317
3.2.7	まとめ.....	323
	参考文献.....	324
第4章	地球化学シミュレーションモデルによる変質解析.....	325
4.1	目的.....	325
4.2	地球化学反応輸送モデルの概要.....	326
4.2.1	地球化学反応輸送モデルで再現することを目標にした二次鉱物の空間分布.....	326
4.2.2	高アルカリ溶液の組成.....	327
4.2.3	解析モデル及び解析条件.....	328
4.2.4	熱力学データベース及び鉱物の溶解速度.....	329
4.2.5	解析ケース.....	331

4.3 解析結果と考察	334
4.3.1 Case 1- Case 4	334
4.3.2 Case 5- Case 8	338
4.3.3 Case9-Case 10	342
4.3.4 Case11-Case 12	344
4.4 解析結果の考察と地球化学モデルの課題	346
4.4.1 鉄鉱物およびカリ長石の生成	346
4.4.2 モンモリロナイトの溶解速度	346
参考文献	347
第5章 まとめ	349
5.1 今年度の調査結果のまとめ	349
5.2 今後の課題	353

図目次

図 1.3.1-1	オフィオライト（かつての海洋底（地殻+マントル）の断片）の層序.....	5
図 1.3.1-2	ナチュラルアナログのコンセプト.....	6
図 1.3.3-1	フィリピン国のオフィオライトとベントナイト鉱床の分布.....	8
図 1.3.3-2	フィリピン国ルソン島北西部のナチュラルアナログ調査サイトの位置.....	9
図 1.3.4-1	Zambales オフィオライトの分布と地質構造概念図[29].....	10
図 1.3.4-2	Zambales オフィオライトの火成岩層序図（Villones, 1980[30]を修正）.....	10
図 1.3.4-3	Zambales オフィオライトの地質図による Aksitero 累層の露頭の分布.....	11
図 1.3.4-4	Mangatarem 地域の地質図.....	14
図 1.3.4-5	ベントナイト・沸石層の互層関係露頭（Saile 鉱山採石場（Quarry））.....	15
図 1.3.4-6	Saile 鉱山採石場の全体写真と断裂系（背後は Malabobo 安山岩プラグ）.....	16
図 1.3.4-7	Saile 鉱山採石場の断層岩コアリングとマンガン附着のある試料.....	16
図 1.3.4-8	Manleluag 温泉保養地のアルカリ温泉水の湧出点.....	16
図 1.3.5-1	トレンチ-1 の南壁の断面写真と断裂系充填物の試料.....	17
図 1.3.5-2	C2 コアサンプル（断裂系充填物）の XRD プロファイルと鉱物組み合わせ.....	17
図 1.3.5-3	破碎岩の薄片とその顕微鏡写真（炭酸塩の産状）.....	17
図 1.3.5-4	トレンチ-5 の断面写真と薄片試料の界面近傍の状態.....	18
図 1.3.5-5	アルカリ変質鉱物であるカリ長石の産状.....	18
図 1.3.5-6	断層岩中の水マンガン鉱物の同定.....	19
図 1.3.5-7	主要成分元素濃度の露頭試料とトレンチ試料比較.....	19
図 1.3.5-8	重金属元素濃度の露頭試料とトレンチ試料比較.....	20
図 1.3.5-9	希土類元素濃度の露頭試料とトレンチ試料比較.....	20
図 1.3.6-1	ベントナイト層の REE 組成とアルカリ地下水の影響.....	22
図 1.3.6-2	続成変質の深度、温度及び主な鉱物の消長.....	22
図 1.3.6-3	採石場のベントナイトの産状（SEM）.....	23
図 1.3.7-1	地下水同位体比の δD - $\delta^{18}O$ 関係.....	26
図 1.3.7-2	調査地域の地下水の $2pH + \log m_{Ca^{2+}} - \log m_{H_4SiO_4}$ 関係図とシミュレーション結果.....	27
図 1.3.7-3	地下水流動系と水質形成の概念図（Manleluag 温泉保養地 - Saile 鉱山）.....	28
図 1.3.8-1	トレンチの観察結果と『Fossil Type』の模式断面図.....	29
図 1.3.8-2	サンプル採取位置と鉱物組成（トレンチ-5 の西南壁）.....	29
図 1.3.8-3	XRD プロファイル（トレンチ-5 の西南壁）.....	30
図 1.3.8-4	試料採取位置（左）と XRD プロファイル（右）（トレンチ 1 南壁）.....	31
図 1.3.8-5	スメクタイト含有率と各基本物性との関係.....	32
図 1.3.8-6	ベントナイト-枕状溶岩接触部のサンプリング（トレンチ-5 西南壁）.....	33
図 1.3.8-7	トレンチ-5 のベントナイト-枕状溶岩の界面の顕微鏡観察と元素マッピング.....	33
図 1.3.8-8	変質分帯を横切る Si-K-Ca-Mg-Fe 元素プロファイル.....	35
図 1.3.8-9	マイクロ XRD 測定結果と参照ピーク.....	35

図 1.3.8-10	鉄濃集帯の SEM 画像と鉄濃集帯中のノントロナイトと針鉄鉱の TEM 画像	36
図 1.3.8-11	鉄濃集帯のカリ長石と Fe-モンモリロナイトの特徴的な産状	36
図 1.3.8-12	変質ベントナイト領域の X線 CT 像	36
図 1.3.8-13	アルカリ環境下の Ca-モンモリロナイトの鉱物学的変遷過程	37
図 1.3.8-14	アルカリ環境下のベントナイトの長期変質における鉱物変遷シナリオ	38
図 1.3.9-1	断裂系充填物の玄武岩比率と方解石の TL 年代	39
図 1.4.1-1	本事業の全体計画 (ナチュラルアナログ調査・研究概略工程)	46
図 1.4.2-1	平成 24 年度の実施工程	47
図 2.2.1-1	現地調査の工程	52
図 2.2.2-1	フィールド調査地と移動ルート	53
図 2.2.2-2	Bigbiga Fish pond 調査エリアの Compilation Map	54
図 2.3.3-1	Bigbiga 地区 水質測定用地下水採取位置図	57
図 2.3.3-2	Bigbiga 地下水採水・地下水パラメータ測定状況	58
図 2.3.3-3	井戸水位の測定状況	59
図 2.3.3-4	Saile 鉱山 Quarry の露頭 (11/11)	60
図 2.3.3-5	Saile 鉱山および Manleluag 温泉地区 水質測定用地下水採取位置	60
図 2.3.3-6	地下水試料採取状況 (Saile Mine、Manleluag)	61
図 2.3.3-7	Manleluang 温泉施設周辺の湧水地点	62
図 2.3.3-8	Poonbato 地区 Loob Bunga Creek	63
図 2.3.3-9	Poonbato 地区 水質測定用地下水採取位置	64
図 2.3.3-10	地下水試料採取状況 (Poonbato)	65
図 2.3.4-1	Mayantoc Field Centre (Bigbiga) における ERT 予備調査の測線	79
図 2.3.4-2	測線 1、2 における ERT 調査予備調査結果 (解釈) (上段の測線に示す NB. Artesian : Well-1)	79
図 2.3.4-3	Bigbiga の調査 (物理探査作業) 前の状況 (10/31)	80
図 2.3.4-4	ERT による比抵抗と TEM による電気伝導率との相関	80
図 2.4.1-1	地表下の土壌への電磁場の伝搬	81
図 2.4.1-2	垂直磁気双極子の電磁場の伝搬	81
図 2.4.1-3	電流遮断後の地下中の電流の伝搬 (スモークリング)	82
図 2.4.1-4	調査設備の構成と発信機へ電流値と受信コイルに誘導された過渡電圧	82
図 2.4.1-5	主制御装置と受信装置	82
図 2.4.1-6	TEM 調査結果例:電圧減衰 (青) および一次場電源遮断後の時間と比抵抗の相関 (赤)	83
図 2.4.1-7	水平階層モデルにおける TEM 調査結果と解釈 (典型的な連続曲線的応答)	84
図 2.4.2-1	TEM 調査の範囲 (Bigbiga 地区)	87
図 2.4.3-1	LP1 グリッドの各測線 (L1~L3) の電気伝導率	92
図 2.4.3-2	LP1 グリッドの各 LINE (L4~L6) の電気伝導率	93
図 2.4.3-3	LP1 グリッドの各 LINE (L7~L9) の電気伝導率	94

図 2.4.3-4 LP1 グリッドの各 LINE (L1~L3) の電気伝導率 (上限: 200mS/m, 下限: 70 mS/m)	95
図 2.4.3-5 LP1 グリッドの各 LINE (L4~L6) の電気伝導率 (上限: 200mS/m, 下限: 70 mS/m)	96
図 2.4.3-6 LP1 グリッドの各 LINE (L7~L9) の電気伝導率 (上限: 200mS/m, 下限: 70 mS/m)	97
図 2.4.3-7 LP2 グリッドの各 LINE (L1~L3) の電気伝導率	98
図 2.4.3-8 LP2 グリッドの各 LINE (L4~L6) の電気伝導率	99
図 2.4.3-9 LP2 グリッドの S4~S7 の各 LINE の電気伝導率 (上限: 200mS/m, 下限: 70 mS/m)	100
図 2.4.3-10 LP3 グリッドの各 LINE (L1~L3) の電気伝導率	101
図 2.4.3-11 LP4 グリッドの LINE1 の電気伝導率	102
図 2.4.3-12 LP5 グリッドの各 LINE (L1~L4) の電気伝導率	103
図 2.4.3-13 LP5 グリッドの各 LINE (L1~L4) の電気伝導率 (上限: 200mS/m, 下限: 70 mS/m)	104
図 2.4.3-14 TEM 調査により探査された構造 (LP5 グリッドおよび LP2 グリッド内の黒線)	105
図 2.4.3-15 STRUC-1 (LP5 グリッド L1S7~L4S7) の電気伝導率	106
図 2.4.3-16 STRUC-1 (LP5 グリッド L1S7~L4S7) の電気伝導率 (上限: 200mS/m, 下限: 70 mS/m)	106
図 2.4.3-17 STRUC-2A (LP5 グリッド L2S6~L2S8) の電気伝導率	107
図 2.4.3-18 STRUC-2A (LP5 グリッド L2S6~L2S8) の電気伝導率 (上限: 200mS/m, 下限: 70 mS/m)	107
図 2.4.3-19 STRUC-2B (LP2 グリッド L3S3~L3S8) の電気伝導率	108
図 2.4.3-20 STRUC-2B (LP2 グリッド L3S3~L3S8) の電気伝導率 (上限: 200mS/m, 下限: 70 mS/m)	108
図 2.4.3-21 STRUC-2C (LP2 グリッド L4S4~L4S7) の電気伝導率	109
図 2.4.3-22 STRUC-2C (LP2 グリッド L4S4~L4S7) の電気伝導率 (上限: 200mS/m, 下限: 70 mS/m)	109
図 2.4.3-23 STRUC-3 (LP5 グリッド L1S8~L4S4) の電気伝導率	110
図 2.4.3-24 Well-1 周辺のその他の断面	111
図 2.4.3-25 Well1 周辺のその他の断面の電気伝導率 (SEC1~3)	112
図 2.4.3-26 Well1 周辺のその他の断面の電気伝導率 (SEC4~6)	113
図 2.4.3-27 Well1 周辺のその他の断面の電気伝導率 (SEC7~9)	114
図 2.4.3-28 Well1 周辺のその他の断面の電気伝導率 (SEC10~12)	115
図 2.4.3-29 Well1 周辺のその他の断面の電気伝導率 (SEC13~14)	116
図 2.4.3-30 試錐孔 (DH-06, DH-08, Well-1) 周辺の 2D 断面 (黒太線)	117
図 2.4.3-31 LP5 グリッド L1S8~L4S4 (STRUC.3) 電気伝導率 (1D)	118

図 2.4.3-32	LP5 グリッド L1S8～L4S4 (STRUC.3) 電気伝導率 (2D)	118
図 2.4.3-33	LP5 グリッド L1S7～L4S7 電気伝導率 (1D)	119
図 2.4.3-34	LP5 グリッド L1S7～L4S7 電気伝導率 (2D)	119
図 2.4.3-35	LP5 グリッド L1S6～L4S6 電気伝導率 (1D)	120
図 2.4.3-36	LP5 グリッド L1S6～L4S6 電気伝導率 (2D)	120
図 2.4.3-37	LP5 グリッド L1S5～L4S5 電気伝導率 (1D)	121
図 2.4.3-38	LP5 L1S5～L4S5 電気伝導率 (2D)	121
図 2.4.3-39	LP5 グリッド L1S4～L4S4 電気伝導率 (1D)	122
図 2.4.3-40	LP5 L1S4～L4S4 電気伝導率 (2D)	122
図 2.4.3-41	DH-05 の深度による見掛けの電気伝導率の変移状況	124
図 2.4.3-42	DH-06 の深度による見掛けの電気伝導率の変移状況	124
図 2.4.3-43	DH-07 の深度による見掛けの電気伝導率の変移状況	125
図 2.5.1-1	露頭調査状況	126
図 2.5.1-2	トレンチ(BBT02)の位置(N15° 30' 51.9", E120° 22' 54.6")	127
図 2.5.2-1	トレンチ(BBT02)の掘削	128
図 2.5.2-2	大口径岩石試料のサンプリング	128
図 2.5.2-3	Bigbiga Trench2(BBT02)の断面図と壁面試料及びコア試料の採取位置	129
図 2.5.2-4	壁面試料の採取位置	130
図 2.5.2-5	大口径岩石試料 (コア試料)	130
図 2.5.3-1	分析試料 (壁面試料及びコア試料(#5, #7)と分析ポイント)	131
図 2.5.3-2	分析試料 (コア試料(#4, #8)と分析ポイント)	132
図 2.5.3-3	分析試料 (コア試料(#1, #6, #7))	132
図 2.5.3-4	偏光顕微鏡試料 (BBT-02-13-Rh-007～008)	134
図 2.5.3-5	BBT02-13-Rh-007 の岩石組織	135
図 2.5.3-6	BBT02-13-Rh-007 の基質	136
図 2.5.3-7	BBT02-13-Rh-007 の細脈 (オパール-カルセドニー脈)	137
図 2.5.3-8	BBT02-13-Rh-007 の細脈 (沸石脈)	138
図 2.5.3-9	BBT02-13-Rh-008 の岩石組織	139
図 2.5.3-10	BBT02-13-Rh-008 の基質	140
図 2.5.3-11	BBT02-13-Rh-008 の細脈 (沸石脈)	141
図 2.5.3-12	BBT02-13-Rh-008 の細脈 (オパール-カルセドニー-沸石-炭酸塩鉱物脈)	142
図 2.5.3-13	BBT02-13-Rh-001 の粉末 XRD パターン	146
図 2.5.3-14	BBT02-13-Rh-002 の粉末 XRD パターン	146
図 2.5.3-15	BBT02-13-Rh-003 の粉末 XRD パターン	146
図 2.5.3-16	BBT02-13-Rh-004 の粉末 XRD パターン	147
図 2.5.3-17	BBT02-13-Rh-005 の粉末 XRD パターン	147
図 2.5.3-18	BBT02-13-Rh-006 の粉末 XRD パターン	147
図 2.5.3-19	BBT02-13-Rh-007 の粉末 XRD パターン	148

図 2.5.3-20	BBT02-13-Rh-008 の粉末 XRD パターン	148
図 2.5.3-21	BBT02-13-Rh-009 の粉末 XRD パターン	148
図 2.5.3-22	BBT02-13-Rh-010 の粉末 XRD パターン	149
図 2.5.3-23	Core4-1 の粉末 XRD パターン	149
図 2.5.3-24	Core4-2 の粉末 XRD パターン	149
図 2.5.3-25	Core8-1 の粉末 XRD パターン	150
図 2.5.3-26	Core8-2 の粉末 XRD パターン	150
図 2.5.4-1	トレンチ試料の主要元素比率	152
図 2.6.1-1	簡易構造試錐サイトの選定	157
図 2.6.2-1	掘削作業状況	158
図 2.6.2-2	Well-1 の白濁	158
図 2.6.3-1	DH08 試錐コア	160
図 2.6.3-2	DH09 試錐コア	161
図 2.6.3-3	柱状図の凡例	161
図 2.6.3-4	DH08 柱状図 (0~GL-15m)	162
図 2.6.3-5	DH08 柱状図 (GL-15m~30m)	163
図 2.6.3-6	DH08 柱状図 (GL-30m~40.54m)	164
図 2.6.3-7	DH09 柱状図 (0~GL-15m)	165
図 2.6.4-1	BBDH-08-13-Rh-003 のコア試料	169
図 2.6.4-2	BBDH-08-13-Rh-016 のコア試料	169
図 2.6.4-3	BBDH-08-13-Rh-018 のコア試料	169
図 2.6.4-4	BBDH-08-13-Rh-042 のコア試料	170
図 2.6.4-5	鉱物モード組成	172
図 2.6.4-6	各構成物の量比と顕微鏡写真 (BBDH-08-13-Rh-003)	174
図 2.6.4-7	各構成物の量比と顕微鏡写真 (BBDH-08-13-Rh-016)	175
図 2.6.4-8	各構成物の量比と顕微鏡写真 (BBDH-08-13-Rh-018)	177
図 2.6.4-9	各構成物の量比と顕微鏡写真 (BBDH-08-13-Rh-042)	178
図 2.6.4-10	層序と鉱物モード組成	181
図 2.6.4-11	出発鉱物とゼオライトのモード組成の関係 (a: 斜長石; b: スメクタイト)	181
図 2.6.4-12	BBDH08-13-Rh-001 の粉末 XRD パターン	184
図 2.6.4-13	BBDH08-13-Rh-002 の粉末 XRD パターン	184
図 2.6.4-14	BBDH08-13-Rh-003 の粉末 XRD パターン	184
図 2.6.4-15	BBDH08-13-Rh-004 の粉末 XRD パターン	185
図 2.6.4-16	BBDH08-13-Rh-005 の粉末 XRD パターン	185
図 2.6.4-17	BBDH08-13-Rh-006 の粉末 XRD パターン	185
図 2.6.4-18	BBDH08-13-Rh-007 の粉末 XRD パターン	186
図 2.6.4-19	BBDH08-13-Rh-008 の粉末 XRD パターン	186
図 2.6.4-20	BBDH08-13-Rh-009 の粉末 XRD パターン	186

図 2.6.4-21	BBDH08-13-Rh-010 の粉末 XRD パターン	187
図 2.6.4-22	BBDH08-13-Rh-011 の粉末 XRD パターン	187
図 2.6.4-23	BBDH08-13-Rh-012 の粉末 XRD パターン	187
図 2.6.4-24	BBDH08-13-Rh-013 の粉末 XRD パターン	188
図 2.6.4-25	BBDH08-13-Rh-014 の粉末 XRD パターン	188
図 2.6.4-26	BBDH08-13-Rh-015 の粉末 XRD パターン	188
図 2.6.4-27	BBDH08-13-Rh-016 の粉末 XRD パターン	189
図 2.6.4-28	BBDH08-13-Rh-017 の粉末 XRD パターン	189
図 2.6.4-29	BBDH08-13-Rh-018 の粉末 XRD パターン	189
図 2.6.4-30	BBDH08-13-Rh-019 の粉末 XRD パターン	190
図 2.6.4-31	BBDH08-13-Rh-020 の粉末 XRD パターン	190
図 2.6.4-32	BBDH08-13-Rh-021 の粉末 XRD パターン	190
図 2.6.4-33	BBDH08-13-Rh-022 の粉末 XRD パターン	191
図 2.6.4-34	BBDH08-13-Rh-023 の粉末 XRD パターン	191
図 2.6.4-35	BBDH08-13-Rh-024 の粉末 XRD パターン	191
図 2.6.4-36	BBDH08-13-Rh-025 の粉末 XRD パターン	192
図 2.6.4-37	BBDH08-13-Rh-026 の粉末 XRD パターン	192
図 2.6.4-38	BBDH08-13-Rh-027 の粉末 XRD パターン	192
図 2.6.4-39	BBDH08-13-Rh-028 の粉末 XRD パターン	193
図 2.6.4-40	BBDH08-13-Rh-029 の粉末 XRD パターン	193
図 2.6.4-41	BBDH08-13-Rh-030 の粉末 XRD パターン	193
図 2.6.4-42	BBDH08-13-Rh-031 の粉末 XRD パターン	194
図 2.6.4-43	BBDH08-13-Rh-032 の粉末 XRD パターン	194
図 2.6.4-44	BBDH08-13-Rh-033 の粉末 XRD パターン	194
図 2.6.4-45	BBDH08-13-Rh-034 の粉末 XRD パターン	195
図 2.6.4-46	BBDH08-13-Rh-035 の粉末 XRD パターン	195
図 2.6.4-47	BBDH08-13-Rh-036 の粉末 XRD パターン	195
図 2.6.4-48	BBDH08-13-Rh-037 の粉末 XRD パターン	196
図 2.6.4-49	BBDH08-13-Rh-038 の粉末 XRD パターン	196
図 2.6.4-50	BBDH08-13-Rh-039 の粉末 XRD パターン	196
図 2.6.4-51	BBDH08-13-Rh-040 の粉末 XRD パターン	197
図 2.6.4-52	BBDH08-13-Rh-041 の粉末 XRD パターン	197
図 2.6.4-53	BBDH08-13-Rh-042 の粉末 XRD パターン	197
図 2.6.4-54	BBDH08-13-Hu-001 の粉末 XRD パターン	198
図 2.6.4-55	BBDH08-13-Hu-008 の粉末 XRD パターン	198
図 2.6.4-56	BBDH08-13-Hu-021 の粉末 XRD パターン	198
図 2.6.4-57	BBDH08-13-Hu-023 の粉末 XRD パターン	199
図 2.6.4-58	BBDH08-13-Hu-026 の粉末 XRD パターン	199

図 2.6.4-59	BBDH08-13-Hu-040 の粉末 XRD パターン	199
図 2.6.4-60	BBDH08-13-Hu-044 の粉末 XRD パターン	200
図 2.6.4-61	コアカッティングス DH08-GL-6m の粉末 XRD パターン	200
図 2.6.4-62	コアカッティングス DH08-GL-12.21m の粉末 XRD パターン	200
図 2.6.4-63	コアカッティングス DH08-GL-12.21m の粉末 XRD パターン	201
図 2.6.4-64	コアカッティングス DH08-GL-21.05-21.87m の粉末 XRD パターン	201
図 2.6.4-65	BBDH09-13-Rh-001 の粉末 XRD パターン	202
図 2.6.4-66	BBDH09-13-Rh-002 の粉末 XRD パターン	202
図 2.6.4-67	BBDH09-13-Rh-003 の粉末 XRD パターン	202
図 2.6.4-68	BBDH09-13-Rh-004 の粉末 XRD パターン	203
図 2.6.4-69	BBDH09-13-Rh-005 の粉末 XRD パターン	203
図 2.6.4-70	BBDH09-13-Rh-006 の粉末 XRD パターン	203
図 2.6.4-71	BBDH09-13-Rh-007 の粉末 XRD パターン	204
図 2.6.4-72	BBDH09-13-Rh-008 の粉末 XRD パターン	204
図 2.6.4-73	BBDH09-13-Rh-009 の粉末 XRD パターン	204
図 2.6.4-74	BBDH09-13-Rh-010 の粉末 XRD パターン	205
図 2.6.4-75	BBDH09-13-Rh-011 の粉末 XRD パターン	205
図 2.6.4-76	BBDH09-13-Rh-012 の粉末 XRD パターン	205
図 2.6.4-77	BBDH09-13-Rh-013 の粉末 XRD パターン	206
図 2.6.4-78	BBDH09-13-Rh-014 の粉末 XRD パターン	206
図 2.6.4-79	BBDH09-13-Rh-015 の粉末 XRD パターン	206
図 2.6.4-80	BBDH09-13-Hu-002 の粉末 XRD パターン	207
図 2.6.4-81	BBDH09-13-Hu-006 の粉末 XRD パターン	207
図 2.6.4-82	BBDH09-13-Hu-010 の粉末 XRD パターン	207
図 2.6.4-83	BBDH09-13-Hu-013 の粉末 XRD パターン	208
図 2.6.4-84	BBDH09-13-Hu-014 の粉末 XRD パターン	208
図 2.6.4-85	試錐コア (Zambales Ophiolite and Aksitero Formation) の鉱物組成 (DH08 (0~GL-15m), XRD)	209
図 2.6.4-86	試錐コア (Zambales Ophiolite and Aksitero Formation) の鉱物組成 (DH08 (GL-15m~30m), XRD)	210
図 2.6.4-87	試錐コア (Zambales Ophiolite and Aksitero Formation) の鉱物組成 (DH08 (GL-30m~40.54m), XRD)	211
図 2.6.4-88	試錐コア (Zambales Ophiolite and Aksitero Formation) の鉱物組成 (DH09 (0~GL-15m), XRD)	212
図 2.6.4-89	DH08 試錐孔コア試料の主要元素比率 (BB-DH08-13-Rh-001~010)	216
図 2.6.4-90	DH08 試錐孔コア試料の主要元素比率 (BB-DH08-13-Rh-011~020)	216
図 2.6.4-91	DH08 試錐孔コア試料の主要元素比率 (BB-DH08-13-Rh-021~030)	217
図 2.6.4-92	DH08 試錐孔コア試料の主要元素比率 (BB-DH08-13-Rh-031~040)	217

図 2.6.4-93	DH08 試錐孔コア試料の主要元素比率 (BB-DH08-13-Rh-041~042)	218
図 2.6.4-94	試錐コア (Zambales Ophiolite and Aksitero Formation) の鉍物組成 (DH08(GL-0 ~15m), XRF)	219
図 2.6.4-95	試錐コア (Zambales Ophiolite and Aksitero Formation) の鉍物組成 (DH08(GL-15 ~30m), XRF)	220
図 2.6.4-96	試錐コア (Zambales Ophiolite and Aksitero Formation) の鉍物組成 (DH08(GL-30 ~40.5m), XRF)	221
図 2.6.4-97	試錐コア (Zambales Ophiolite and Aksitero Formation) の鉍物組成 (DH09(GL-0 ~15m), XRF)	222
図 2.6.5-1	揚水試験	225
図 2.8.1-1	試料 Rh-003 のマクロ観察	230
図 2.8.1-2	試料 Rh-003 の FESEM-EDS 観察・分析結果(その 1、a: FESEM 像; b: スポット分 析値; c: スポット 028 の EDS; d: スポット 029; e: スポット 030).....	230
図 2.8.1-3	試料 Rh-003 の FESEM-EDS 観察・分析結果 (その 2、 a: ゼオライトの FESEM 像; b: スポット分析値; c: スポット 037 の EDS)	231
図 2.8.1-4	試料 Rh-016 のマクロ観察	231
図 2.8.1-5	試料 Rh-016 の FESEM-EDS 観察・分析結果(その 1、 a: FESEM 像; b: スポット分 析値; c: スポット 012 の EDS; d: スポット 014 の EDS)	232
図 2.8.1-6	試料 Rh-016 の FESEM-EDS 観察・分析結果(その 2、 a: FESEM 像; b: スポット分 析値; c: スポット 015 の EDS; d: スポット 016; e: スポット 017; f: スポット 018).....	233
図 2.8.1-7	試料 Rh-018 のマクロ観察	234
図 2.8.1-8	試料 Rh-018 の FESEM-EDS 観察・分析結果(その 1、 a: FESEM 像; b: スポット分 析値; c: スポット 019 の EDS; d: スポット 022)	234
図 2.8.1-9	試料 Rh-018 の FESEM-EDS 観察・分析結果(その 2、 a: FESEM 像; b: スポット分 析値; c: スポット 023 の EDS; d: スポット 024)	235
図 2.8.1-10	試料 Rh-018 の FESEM-EDS 観察・分析結果(その 3、 a: FESEM 像; b: スポット 分析値; c: スポット 026 の EDS; d: スポット 027)	236
図 2.8.1-11	試料 Rh-042 のマクロ観察	236
図 2.8.1-12	試料 Rh-042 の FESEM-EDS 観察・分析結果(その 1、 a: FESEM 像; b: スポット 分析値; c: スポット 001 の EDS).....	237
図 2.8.1-13	試料 Rh-042 の FESEM-EDS 観察・分析結果(その 2、 a: FESEM 像; b: スポット 分析値; c: スポット 005 の EDS; d: スポット 006)	238
図 2.8.1-14	試料 Rh-042 の FESEM-EDS 観察・分析結果(その 3、 a: FESEM 像; b: スポット 分析値; c: スポット 008 の EDS; d: スポット 010; e: スポット 011)	239
図 2.8.1-15	試料 RH14 のマクロ観察	240
図 2.8.1-16	試料 RH14 の FESEM-EDS 観察・分析結果(その 1、 a: FESEM 像; b: スポット分 析値; c: スポット 038 の EDS; d: スポット 039)	240
図 2.8.1-17	試料 RH14 の FESEM-EDS 観察・分析結果(その 2、 a: FESEM 像; b: スポット分	

析値; c: スポット 041 の EDS; d: スポット 042)	241
図 2.8.1-18 試料 RH14 の FESEM-EDS 観察・分析結果(その 3、a: FESEM 像; b: スポット分析値; c: スポット 046 の EDS)	241
図 2.8.1-19 試料 Rh-003 の μ -XRD 分析(a: 分析スポットの位置; b: 分析スポットの顕微画像)	242
図 2.8.1-20 試料 Rh-003 の μ -XRD 分析結果.....	243
図 2.8.1-21 試料 Rh-016 の μ -XRD 分析(a: 緑色部; b: 白色部 1; c: 白色部 2)	244
図 2.8.1-22 試料 Rh-016 の μ -XRD 分析結果.....	245
図 2.8.1-23 試料 Rh-018 の μ -XRD 分析結果.....	246
図 2.8.1-24 試料 Rh-042 の μ -XRD 分析結果.....	247
図 2.8.1-25 試料 RH14 の μ -XRD 分析(a: リム部; b: 白色部).....	248
図 2.8.1-26 試料 RH14 の μ -XRD 分析結果.....	249
図 2.8.1-27 スメクタイト(Rh-003)の産状(a)と化学組成の特徴(b).....	251
図 2.8.1-28 ゼオライトの累帯構造(Rh-018)(a: 不均質なゼオライト; b: リム部の産状; c: コアからリムにおける組成変化)	264
図 2.8.1-29 試料 Rh-003 の元素マッピング(その 1、a: BEI; b: SEI; c: O; d: C).....	272
図 2.8.1-30 試料 Rh-003 の元素マッピング(その 2、a: Si; b: Al; c: Mg; d: Ca)	272
図 2.8.1-31 試料 Rh-003 の元素マッピング(その 3、a: Fe; b: Na; c: K; d: Mn)	273
図 2.8.1-32 試料 Rh-003 の元素マッピング(その 4、a: Ti; b: Cr; c: S).....	273
図 2.8.1-33 元素プロファイル(Rh-003)	274
図 2.8.1-34 試料 Rh-016 の元素マッピング(その 1、a: BEI; b: SEI; c: O; d: C).....	274
図 2.8.1-35 試料 Rh-016 の元素マッピング(その 2、a: Si; b: Al; c: Mg; d: Ca)	275
図 2.8.1-36 試料 Rh-016 の元素マッピング(その 3、a: Fe; b: Na; c: K; d: Mn)	275
図 2.8.1-37 試料 Rh-016 の元素マッピング(その 4、a: Ti; b: Cr; c: S).....	276
図 2.8.1-38 元素プロファイル(Rh-016)	276
図 2.8.1-39 試料 Rh-018 の元素マッピング(その 1、a: BEI; b: SEI; c: O; d: C).....	277
図 2.8.1-40 試料 Rh-018 の元素マッピング(その 2、a: Si; b: Al; c: Mg; d: Ca)	277
図 2.8.1-41 試料 Rh-018 の元素マッピング(その 3、a: Fe; b: Na; c: K; d: Mn)	278
図 2.8.1-42 試料 Rh-018 の元素マッピング(その 4、a: Ti; b: Cr; c: S).....	278
図 2.8.1-43 元素プロファイル(Rh-018)	279
図 2.8.1-44 試料 Rh-042 の元素マッピング(その 1、a: BEI; b: SEI; c: O; d: C).....	279
図 2.8.1-45 試料 Rh-042 の元素マッピング(その 2、a: Si; b: Al; c: Mg; d: Ca)	280
図 2.8.1-46 試料 Rh-042 の元素マッピング(その 3、a: Fe; b: Na; c: K; d: Mn)	280
図 2.8.1-47 試料 Rh-042 の元素マッピング(その 4、a: Ti; b: Cr; c: S).....	281
図 2.8.1-48 元素プロファイル(Rh-042)	281
図 2.8.1-49 試料 RH14 の元素マッピング(その 1、a: BEI; b: SEI; c: O; d: C).....	282
図 2.8.1-50 試料 RH14 の元素マッピング(その 2、a: Si; b: Al; c: Mg; d: Ca)	282
図 2.8.1-51 試料 RH14 の元素マッピング(その 3、a: Fe; b: Na; c: K; d: Mn).....	283

図 2.8.1-52	試料 RH14 の元素マッピング(その 4、a: Ti; b: Cr; c: S)	283
図 2.8.1-53	元素プロファイル(RH14).....	284
図 2.8.1-54	スメクタイトの X_{Fe} vs. X_{Ca} プロット	284
図 2.8.1-55	スメクタイトの X_{Ca} 組成レンジの変化.....	285
図 2.8.1-56	ゼオライト分類プロット	286
図 2.8.1-57	斜長石の三角プロット.....	286
図 2.8.1-58	輝石の三角プロット	287
図 2.8.1-59	斜方輝石の $En(MgSiO_3)$ 組成と Cr 含有量の関係.....	288
図 2.8.1-60	ガラス質物質のハーカー組成変化図(a: MgO; b: K_2O).....	289
図 2.8.2-1	パミス質岩片と変質 (a: 反射電子線像 x160; b: モンモリロナイト/ゼオライト質部, Rh-003)	290
図 2.8.2-2	斑晶と石基斜長石の変質	291
図 2.8.2-3	石基の変質組織	291
図 2.8.2-4	累帯組織を示すゼオライトースメクタイト(a: K-mont を包有するフィリップサイトとクリノプチロライト; b: x 3000).....	292
図 2.8.2-5	ガラス質物質からゼオライトへの変質過程	292
図 2.8.2-6	変質相の産状.....	293
図 2.8.2-7	火山岩からゼオライト、カルサイトまでの変質過程(a: 火山岩源岩; b: 累帯変質したゼオライト; c: 最外縁部を覆うカルサイト).....	294
図 2.8.2-8	ガラス質物質からゼオライトへの変質過程	294
図 2.8.2-9	沸石の進化	295
図 3.2.1-1	SARA 法の実施手順のイメージ	302
図 3.2.3-1	各炭酸塩の不純物濃度.....	306
図 3.2.3-2	フィリピン炭酸塩の不純物濃度	307
図 3.2.3-3	菱苦土鉱の TL データ (プレヒートなし)	308
図 3.2.3-4	X 線 440Gy 菱苦土鉱 TL のピーク分離結果.....	308
図 3.2.3-5	X 線 99Gy 照射した炭酸塩熱ルミネセンスデータ ((b)、(c)は(a)の拡大図)	309
図 3.2.3-6	Mg, P, K 濃度と各方解石の a-x-value, b-x-value, c-x-value 及び発光量の関係図... 310	
図 3.2.3-7	Mn, Fe, Sr 濃度と各方解石の a-x-value, b-x-value, c-x-value 及び発光量の関係図.....	311
図 3.2.3-8	Br 濃度と各方解石の a-x-value, b-x-value, c-x-value 及び発光量の関係図	312
図 3.2.4-1	γ 線照射装置.....	313
図 3.2.4-2	α 線及び β 線照射線源と測定皿	313
図 3.2.5-1	合成方解石のフェーディングテスト TL データ	316
図 3.2.5-2	ピークの温度前後の発光量	317
図 3.2.6-1	BB12-DH07-RW-001 の TL データ (左) と検量線 (右)	318
図 3.2.6-2	BB12-DH07-RW-003 の TL データ (左) と検量線 (右)	318
図 3.2.6-3	BB12-DH05-RW-003 の TL データ (左) と検量線 (右)	319

図 3.2.6-4	BB12-DH05-RW-005 の TL データ (左) と検量線 (右)	319
図 3.2.6-5	BB12-DH05-RW-006 の TL データ (左) と検量線 (右)	319
図 3.2.6-6	BB12-DH05-RW-007 の TL データ (左) と検量線 (右)	320
図 3.2.6-7	BB12-DH05-RW-013 の TL データ (左) と検量線 (右)	320
図 3.2.6-8	BB12-DH05-RW-014 の TL データ (左) と検量線 (右)	320
図 3.2.6-9	BB12-DH05-RW-015 の TL データ (左) と検量線 (右)	321
図 3.2.6-10	BB12-DH05-RW-016 の TL データ (左) と検量線 (右)	321
図 3.2.6-11	BB12-DH05-RW-018 の TL データ (左) と検量線 (右)	321
図 3.2.6-12	フィリピン Bigbiga (試錐コア DH05, DH07) の方解石の熱ルミネッセンス年代	323
図 4.2.1-1	Saile 鉱山産ベントナイトの初期状態におけるベントナイト中の鉱物空間分布	326
図 4.2.1-2	枕状溶岩と接するベントナイトの界面 (右写真) で観察された変質後の鉱物組成	326
図 4.2.3-1	一次元反応輸送モデル解析用に設定したベントナイトの体系.....	329
図 4.3.1-1	Case1 : 5 年後におけるベントナイト中の鉱物空間分布	335
図 4.3.1-2	Case1 : 20 年後におけるベントナイト中の鉱物空間分布	335
図 4.3.1-3	Case1 : 80 年後におけるベントナイト中の鉱物空間分布	335
図 4.3.1-4	Case2 : 5 年後におけるベントナイト中の鉱物空間分布	336
図 4.3.1-5	Case2 : 20 年後におけるベントナイト中の鉱物空間分布	336
図 4.3.1-6	Case3 : 5 年後におけるベントナイト中の鉱物空間分布	336
図 4.3.1-7	Case3 : 20 年後におけるベントナイト中の鉱物空間分布	337
図 4.3.1-8	Case4 : 5 年後におけるベントナイト中の鉱物空間分布	337
図 4.3.1-9	Case4 : 20 年後におけるベントナイト中の鉱物空間分布	337
図 4.3.1-10	Case1 : 100 年後におけるベントナイト中の鉱物空間分布.....	338
図 4.3.2-1	Case5 : 5 年後におけるベントナイト中の鉱物空間分布	339
図 4.3.2-2	Case5 : 20 年後におけるベントナイト中の鉱物空間分布	339
図 4.3.2-3	Case6 : 5 年後におけるベントナイト中の鉱物空間分布	339
図 4.3.2-4	Case6 : 20 年後におけるベントナイト中の鉱物空間分布	340
図 4.3.2-5	Case7 : 5 年後におけるベントナイト中の鉱物空間分布	340
図 4.3.2-6	Case7 : 20 年後におけるベントナイト中の鉱物空間分布	340
図 4.3.2-7	Case8 : 5 年後におけるベントナイト中の鉱物空間分布	341
図 4.3.2-8	Case8 : 20 年後におけるベントナイト中の鉱物空間分布	341
図 4.3.2-9	Case8 : 3.2 年後におけるベントナイト中の鉱物空間分布 (酸化帯で継続的に鉄が濃 集した場合)	341
図 4.3.3-1	Case9 : 5 年後におけるベントナイト中の鉱物空間分布	342
図 4.3.3-2	Case9 : 20 年後におけるベントナイト中の鉱物空間分布	343
図 4.3.3-3	Case10 : 5 年後におけるベントナイト中の鉱物空間分布	343
図 4.3.3-4	Case10 : 20 年後におけるベントナイト中の鉱物空間分布.....	343

図 4.3.4-1	Case11 : 5年後におけるベントナイト中の鉱物空間分布.....	344
図 4.3.4-2	Case12 : 5年後におけるベントナイト中の鉱物空間分布	344
図 4.3.4-3	Case12 : 10年後におけるベントナイト中の鉱物空間分布.....	345

表目次

表 1.3.4-1	調査地域の模式柱状図（層序・岩相・岩質）	13
表 1.3.4-2	Mangatarem 地域の地史の概略.....	15
表 1.3.7-1	調査サイトの地下水水質と低アルカリセメント浸出液とのアナログ性.....	25
表 1.3.8-1	ベントナイトの基本物性試験結果.....	31
表 1.3.8-2	アルカリ環境下のベントナイトー枕状溶岩界面の鉱物共生関係	34
表 1.4.1-1	高アルカリ地下水の影響によるベントナイトの長期健全性に関するナチュラルアナ ログ調査・研究の進め方.....	45
表 2.3.2-1	物理化学パラメータ 測定項目	55
表 2.3.3-1	既存井戸・既存試錐孔の水位、深度および pH.....	59
表 2.3.3-2	Saile 鉱山井戸の物理化学パラメータ	61
表 2.3.3-3	Manleluang 温泉施設周辺の湧水の物理化学パラメータ	62
表 2.3.3-4	Poonbato 地区の Loob Bunga Creek 河岸の湧水の物理化学パラメータ	65
表 2.3.4-1	地下水水質データ(A).....	67
表 2.3.4-2	地下水水質データ(B).....	68
表 2.3.4-3	地下水パラメータ、溶存イオン濃度測定結果（Bigbiga 地区）	69
表 2.3.4-4	地下水パラメータ、溶存イオン濃度測定結果（Manleluag 温泉保養地）	70
表 2.3.4-5	地下水パラメータ、溶存イオン濃度測定結果（Saile 鉱山及び Poonbato 地区） ..	71
表 2.3.4-6	Phreeqc を用いた平衡化学計算により各成分の種分化を計算した結果（1/2）	74
表 2.3.4-7	Phreeqc を用いた平衡化学計算により各成分の種分化を計算した結果（2/2）	75
表 2.4.2-1	TEM 調査のループで分割したグリッドの詳細.....	86
表 2.4.3-1	既往の研究結果に基づく岩相および物質の電気伝導率.....	90
表 2.4.3-2	人工物に起因する電気伝導率.....	91
表 2.5.3-1	分析試料と分析項目一覧（採取場所：Bigbiga BBT02）	133
表 2.5.3-2	観察結果のまとめ.....	134
表 2.5.3-3	XRD の測定条件一覧.....	143
表 2.5.3-4	同定された鉱物の一覧.....	144
表 2.5.3-5	鉱物の同定結果	145
表 2.5.4-1	XRF による定量分析条件.....	151
表 2.5.4-2	XRF 分析によるトレンチ試料の元素比率定量結果.....	152
表 2.5.4-3	Saile 鉱山と Bigbiga の Aksitero 層の試料の化学組成の比較.....	153
表 2.5.4-4	Bigbiga トレンチ試料の化学組成（ICP-MS）	155
表 2.6.4-1	試料採取深度および試料名（DH08）	167
表 2.6.4-2	試料採取深度および試料名（DH09）	168
表 2.6.4-3	モード測定結果	171
表 2.6.4-4	試錐コアの詳細分析	180
表 2.6.4-5	XRF 分析による DH08 試錐孔コア試料の元素比率定量結果（001～014）	214

表 2.6.4-6	XRF 分析による DH08 試錐孔コア試料の元素比率定量結果 (014~028)	214
表 2.6.4-7	XRF 分析による DH08 試錐孔コア試料の元素比率定量結果 (028~042)	215
表 2.6.4-8	XRF 分析による DH09 試錐孔コア試料の元素比率定量結果 (001~015)	215
表 2.6.5-1	DH08 地下水の物理化学パラメータ	223
表 2.6.5-2	DH08 掘削開始前周辺ため池 pH 測定結果 (11/2 測定)	223
表 2.6.5-3	DH09 掘削完了時採水の pH 測定結果 (11/10 採水)	223
表 2.6.5-4	試錐孔内の地下水水質データ	224
表 2.6.5-5	揚水試験結果	225
表 2.8.1-1	分析試料の一覧	229
表 2.8.1-2	分析項目	229
表 2.8.1-3	スメクタイトの化学組成(Rh-003)	250
表 2.8.1-4	ゼオライトの化学組成(Rh-003)	251
表 2.8.1-5	カルサイトの化学組成(Rh-003&Rh-016)	252
表 2.8.1-6	斜長石の化学組成(Rh-016)	253
表 2.8.1-7	スメクタイトの化学組成(Rh-016、その 1)	254
表 2.8.1-8	スメクタイトの化学組成(Rh-016、その 2)	255
表 2.8.1-9	スメクタイトの化学組成(Rh-016、その 3)	256
表 2.8.1-10	ゼオライトの化学組成(Rh-016、その 1)	257
表 2.8.1-11	ゼオライトの化学組成(Rh-016、その 2)	258
表 2.8.1-12	ガラス質物質の化学組成	258
表 2.8.1-13	輝石の化学組成(Rh-018)	259
表 2.8.1-14	斜長石の化学組成(Rh-018、その 1)	260
表 2.8.1-15	斜長石の化学組成(Rh-018、その 2)	260
表 2.8.1-16	スメクタイトの化学組成(Rh-018)	261
表 2.8.1-17	ゼオライトの化学組成(Rh-018、その 1)	262
表 2.8.1-18	ゼオライトの化学組成(Rh-018、その 2)	263
表 2.8.1-19	ガラス質物質の化学組成(Rh-018、その 1)	264
表 2.8.1-20	ガラス質物質の化学組成(Rh-018、その 2)	265
表 2.8.1-21	輝石の化学組成(Rh-042)	265
表 2.8.1-22	斜長石の化学組成(Rh-042)	266
表 2.8.1-23	スメクタイトの化学組成(Rh-042)	266
表 2.8.1-24	ゼオライトの化学組成(Rh-042)	267
表 2.8.1-25	ガラス質物質の化学組成(Rh-042)	267
表 2.8.1-26	斜長石の化学組成(RH14)	268
表 2.8.1-27	輝石の化学組成(RH14)	269
表 2.8.1-28	スメクタイトの化学組成(RH14)	270
表 2.8.1-29	ゼオライトの化学組成(RH14)	271
表 3.2.1-1	SAR 法手順	302

表 3.2.3-1	各方解石試料の不純物濃度	307
表 3.2.4-1	α 線照実験測定結果	314
表 3.2.4-2	β 線照実験測定結果	314
表 3.2.4-3	γ 線照実験測定結果まとめ	314
表 3.2.4-4	各方解石試料の熱ルミネセンス特性	315
表 3.2.6-1	各試料の蓄積線量	322
表 3.2.6-2	方解石と周囲岩石の各種放射性元素濃度と a-value、b-value、c-value 及び各種放射線量率と年間線量	322
表 4.2.2-1	解析に用いた溶液データ	328
表 4.2.2-2	高アルカリ地下水生成のモデルに用いたカンラン岩の鉍物組成データ	328
表 4.2.4-1	鉍物の熱力学データとモル体積 (cm^3/mol)[7]	330
表 4.2.4-2	25°Cにおける速度論パラメータ	331
表 4.2.5-1	解析ケース	333
表 4.2.5-2	解析ケース (ミキシングセルの大きさを考慮)	333
表 4.2.5-3	解析ケース (インプット溶液の鉄濃度の違いを考慮)	333

第1章 概要

1.1 背景

エネルギーの安定供給と二酸化炭素発生量の削減に貢献してきた原子力発電は、東日本大震災による福島第一原子力発電所事故以降、その安全性確保の考え方についての抜本的な見直しの必要性も含め、今後の利用のあり方について踏み込んだ議論が行われている。発電に伴って発生する放射性廃棄物についても国民的な関心が高まり、その重要性がより広く認識されつつある。高レベル放射性廃棄物や長半減期低発熱放射性廃棄物（以下、TRU 廃棄物という。）の地層処分は、今後の原子力政策の方向性に係わらず、これまで原子力エネルギーを利用してきたわが国にとって避けることのできない重要な課題であり、その実現に向け努力を続けなければならない。

人工バリアと天然バリアで構成される多重バリアシステムを基本とする地層処分場の長期にわたる安全評価において、地層処分に対応する長期の時間スケールに着目し、安全評価上考慮すべき現象と類似した天然現象を、その現象理解や性能評価に活用する「ナチュラルアナログ（NA: Natural Analogue）研究」による取り組みの重要性が高まりつつある。このナチュラルアナログ研究は、地層処分に必要な長期間の性能評価を行うため、自然界に存在する類似現象を研究する地層処分に関する研究の一分野であり、加えて、ナチュラルアナログ研究では、地層処分の仕組みそのものの理解を、自然界に過去から存在する類似した「もの」により行えるということから、関係者の合意形成を図っていく上で一定の役割を果たしうると考えられている。そして、わが国を含め、高レベル放射性廃棄物処分計画を進める世界各国において地層処分を実現するために、地域住民や国民一般から地層処分に対する理解と協力を得ることが不可欠でありことから、ナチュラルアナログは、わが国を含め世界各国が目指す地層処分とはどのような概念かを分かりやすく国民一般への説明を行うための有効な方策でもある。

自然環境におかれた人工的な材料が長期間にわたってどのように変化するのかという、地層処分において非常に重要な問題に対して、室内実験による検討では、特に時間スケールの観点において必然的に得られる情報に限界がある。ナチュラルアナログ研究が始まった当初は、このような人工バリアの構成材料の問題に関する研究が多く行なわれた。その後、これら材料中心のナチュラルアナログ研究に加えて、母岩中における放射性核種の移行と遅延プロセスに重点を置く傾向を示すようになった。近年では、処分システムのアナログということが注目されており、地質環境の長期安定性に関するナチュラルアナログ研究[1][2][3]や、複合的な材料で構成される処分システムの機能に影響を及ぼす構成要素間の相互作用に関するナチュラルアナログ研究[4][5][6]がすすめられている。

このような様々な役割を果たすことが可能なナチュラルアナログの定義として、「提案された放射性廃棄物処分場で予測される類似のプロセスあるいは材料にかかわる事象に着目する[7]」、「ナチュラルアナログの主要な対象は、概念あるいは数学モデルの検証であり、処分システムが有する特定の性質ではない[8]。」、「ナチュラルアナログは、それらが本来有する固有の物理化学的な

特性より、それらを形作ってきた履歴（将来の予測に使えるような）に着目する[9]。」ということが提案されている。本事業では、ナチュラルアナログの特徴を地層処分の長期安全性のセーフティケースの一つとして活用するために、さらに以下の観点に着目したナチュラルアナログのアプローチを提案している。

- ①日本の高レベル放射性廃棄物（あるいは TRU 廃棄物）処分における「セーフティケース」構築のための情報活用に向けて、科学技術的な観点からナチュラルアナログ調査・研究の到達目標を設定し、その到達目標に対応する課題の設定とそれらの展開に適した場を選定することで、NA 調査・研究計画の最適化をはかる。
- ②ナチュラルアナログ調査・研究が天然における長期の総合実験として、広義のステークホルダーの意思決定プロセス（理解促進）に資する科学的・技術的な証拠（Public Acceptance）としてのみならず、性能評価モデルの検証・改善（Performance Assessment）のための役割を担うことを認識する。すなわち、ナチュラルアナログを長期現象の直接的な証拠として活用し、主要プロセスの現象理解を深めるとともに、室内実験や解析モデルによる評価と合わせて、対象とする現象の安全評価モデルの信頼性向上を図る。
- ③ナチュラルアナログ調査・研究が様々な分野にまたがる学際的な研究であることから、大学等の専門家や事業者等幅広い分野の専門家に参加を呼びかけ、情報の共有化・知識の普及を図るとともに、フィールド調査における現地での経験者との共同作業・議論や広範な分野に渡る研究を通じて、若手研究者（技術者）の人材育成の場としてこれを活用する。

本事業で対象とする TRU 廃棄物は、再処理施設で発生する、使用済みの廃棄フィルタ（廃銀吸着材）、使用済み燃料の部品（ハル・エンドピース）、濃縮廃液と、再処理施設や MOX 燃料加工施設及び施設解体により発生する雑固体廃棄物等であり[10]、その人工バリアの基本構成として支保工、構造躯体、充填材等にセメント材の使用が想定されているため、高レベル放射性廃棄物の人工バリアシステム以上に、セメント材料との相互作用の長期評価は重要課題として位置付けられている。特に、ベントナイト緩衝材は人工バリアシステムの中での核種移行評価にとって重要な構成要素の一つであり、ベントナイト自身の基本的な性能を確保するという点で、ベントナイトとセメント材の相互作用問題は特に重要である[11][12]。これは日本だけではなく、人工バリア構成材料としてベントナイトを用いる世界の全ての地層処分システムの性能評価に共通の課題である[13]。

この相互作用におけるキープロセスとしては、ベントナイト（主にスメクタイト）がセメント系材料から溶出する高アルカリ性の間隙水によるスメクタイトの変質反応（Ca 型化、二次鉱物の生成、CSH 化やゼオライト化など）により、ベントナイトはその膨潤性が低下し、また、間隙水中の塩濃縮の結果セメンテーションや亀裂が発生し、人工バリアシステムの劣化を引き起こすことが指摘されている[14][15][16]。また、L1 廃棄物（余裕深度処分対象の放射能レベルが比較的高い低レベル放射性廃棄物）の処分概念も同様であるが、ベントナイト層の低透水性が喪失することで処分システムの性能の低下が問題となることも懸念されている。

地層処分においてセメント材から浸出する高アルカリ成分が緩衝材や岩盤に及ぼす影響を評価する目的で、これまで高アルカリ影響による緩衝材の変質に関する個別現象に関する多くの研究

が実施されており[17][18]、それらの成果を基に処分場の性能評価が行われてきた[15][19]。また、処分場における高アルカリ成分の影響に関する長期予測についても、多くの機関で実施されてきた[14][15][16]。さらに、上記短期間の試験では得られていなかった現象や、長期予測によって得られたセメント系材料と緩衝材との相互作用による変質（接触面近傍での二次鉱物の生成など）についても、比較的長期間の確証試験によってその一部が確認されてきている[20][21]。しかし、これらは実験室で得られたデータを入力情報として得られた解析結果、及び、その解析結果に関して小規模な試験体系で数年～10年程度の間を確認したものであり、処分場における数万年以上にわたる人工バリア材の挙動をすべて確認することは困難である。そのため、ナチュラルアナログを既存の室内実験や解析モデルと連携させて、それぞれのアプローチの特徴を踏まえて地層処分システムの長期健全性評価の信頼性を高めることが重要であると考えられる。例えば、ナチュラルアナログにより長期挙動の直接的な証拠を収集し、これによるモデルやそのパラメータの最適化等を行うことで長期の安全評価の解決を図ることなどである。そのためには、アナログとしての証拠の収集、すなわち可能性のあるサイトを探索し、ナチュラルアナログとなる天然現象を示す領域をその分野の専門家の経験に基づく調査・評価のより確認することが必要不可欠である。

ベントナイトやスメクタイトを含む堆積層（粘土層）のアルカリ変質に関する NA 研究は近年になって検討され始めたテーマであり[22][23]、天然環境でのベントナイト（スメクタイト）－アルカリ地下水の相互作用による長期のアルカリ変質現象については、まだ不明な点も多く、NA として積極的に取り組む課題の一つと位置付けられる。また、高アルカリ地下水とベントナイトが共存する環境は世界中でも極めて限定された場所では確認されておらず、NA プロジェクトとして調査・研究がすすめられているのはフィリピンとキプロス[24]だけである。

1.2 目的

我が国において、これまでの原子力発電の利用に伴って既に放射性廃棄物が発生しており、その処理処分対策を着実に進める必要がある。超ウラン元素を含む TRU 廃棄物の処分方策については、処分施設設計の合理化や詳細化、性能評価の信頼性向上等が課題として挙げられている。TRU 廃棄物の地層処分に必要な技術開発については、高レベル放射性廃棄物処分の技術開発との整合を図りつつ、高レベル放射性廃棄物との併置処分の技術的成立性をより確実にするための検討を含め、地層処分事業のスケジュールを考慮して進める必要がある。

このような背景のもと、本事業では、TRU 廃棄物処理・処分技術分野の課題であるヨウ素 129 及び炭素 14 の被ばく線量の低減対策を対象とし、ヨウ素 129 対策技術の信頼性向上及び炭素 14 長期放出挙動評価に関する研究開発によるヨウ素・炭素移行挙動評価技術の高度化開発、並びに、人工バリア材の長期挙動及びガス移行連成挙動評価手法の研究開発を行うとともに、ナチュラルアナログ調査を実施し、人工バリア性能評価に係る技術的信頼性の向上及び技術基盤の確立を目的としている。

本調査研究では、TRU 廃棄物処分における人工バリア性能評価に係るセメント系材料の影響による人工バリア（ベントナイト）の長期健全性について、ナチュラルアナログ調査を実施することで、アルカリ-緩衝材反応による緩衝材の長期変遷に関する直接的な根拠となるデータを取得し、それらフィールドデータと解析モデルを活用したアルカリ変質現象の解釈に基づき、その長期挙動評価の信頼性向上を図る。

このナチュラルアナログ調査では、セメント-ベントナイト相互作用のナチュラルアナログが成立する環境である、高アルカリ地下水とベントナイト層が近接することが確認されたフィリピン国ルソン島北西部において、フィールド調査及び試料分析を実施し、アルカリ地下水の影響範囲やベントナイトのアルカリ変質に関わる鉱物・地球化学・地下水等のデータを取得し、それらフィールドデータの解釈に基づき、ベントナイトアルカリ変質プロセスの現象理解を深める。また、地球化学計算や年代測定を適用し、反応時間や閉塞（Clogging）現象の評価を行い、アルカリ環境下の鉱物変遷過程とその素反応を抑制・促進環境条件や物理化学的なメカニズムの評価を行う。

1.3 本事業のこれまでの成果概要

1.3.1 セメントーベントナイト相互作用のナチュラルアナログが成立するための環境条件

地層処分システムのセメント材の影響においては、セメント材ー地下水反応に起因して高アルカリ性となる地下水との反応プロセスがキープロセスとなる。このような高アルカリ地下水の生成・流出プロセスに酷似する自然系での地球化学的環境としてオフィオライトの蛇紋岩化作用が知られている。ここで、オフィオライトとは、過去の海洋性地殻が造山運動によって大陸地殻に衝上（のしあげ）した、玄武岩・斑レイ岩・カンラン岩（超塩基性岩）などの数種類の岩石の組み合わせから成る層状複合岩体である。その一般的な火成層序を図 1.3.1-1 に示す。このオフィオライトの蛇紋岩化作用を起源とする高アルカリ地下水の組成、還元性環境、発熱反応による温度環境、ガスなどの生成環境は、放射性廃棄物の地層処分場の環境と非常に類似しており、ナチュラルアナログ研究の対象の場として絶好の環境条件（地質環境）といえる。

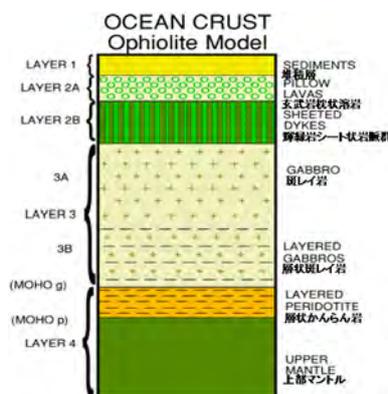
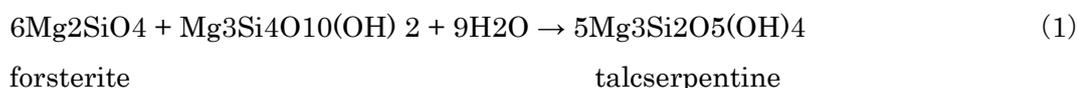


図 1.3.1-1 オフィオライト（かつての海洋底（地殻+マントル）の断片）の層序

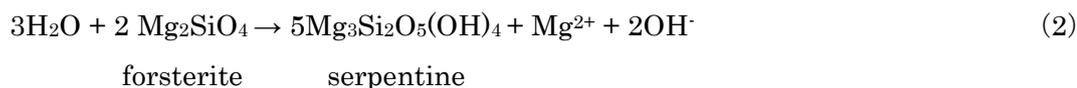
このオフィオライトの蛇紋岩化作用に由来する高 pH 地下水（温泉水も含む）の生成は、カンラン石の蛇紋岩化作用（Serpentinization）によるものであることが解っている。低温化ではカンラン岩はクリソタイル蛇紋岩へ、高温下ではアンチゴライト蛇紋岩に変質する。

蛇紋岩化作用およびそれに関連する反応について、構成式とともに以下に示す[25][26][27]。

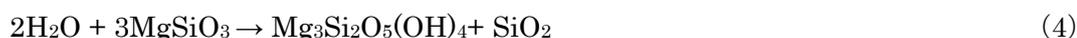
（蛇紋岩化作用）

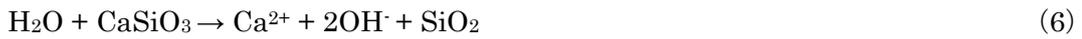


（カンラン石の溶解）

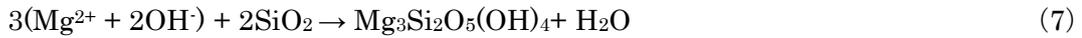


（輝石の溶解）





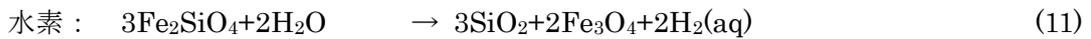
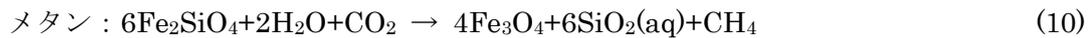
(降水の浸透)



(地下水の水質の構成)



(ガスの発生)



fayalite

magnetite

オフィオライトの蛇紋岩体の分布は世界的にみて特定の地域に限られる。このオフィオライトの蛇紋岩化作用を起源とする高アルカリ地下水、還元性、発熱反応などの環境は、放射性廃棄物処分場環境と非常に類似しており、ナチュラルアナログ研究の対象の場として絶好の環境条件である。

したがって、ベントナイト緩衝材とセメント系材料の相互作用に係わるナチュラルアナログにおいて必要な環境条件は、①ベントナイト層 (Sediment)、②高アルカリ地下水 (Fluid)、③高アルカリ地下水の経路となる断裂系 (Fracture) が存在することである。このような地質環境において、本ナチュラルアナログのコンセプトとして、ベントナイト層が断裂系に沿って上がってきている高アルカリ地下水と接触し、長期にわたりベントナイトと高アルカリ地下水の相互作用が生じている状態を考えている (図 1.3.1-2)。

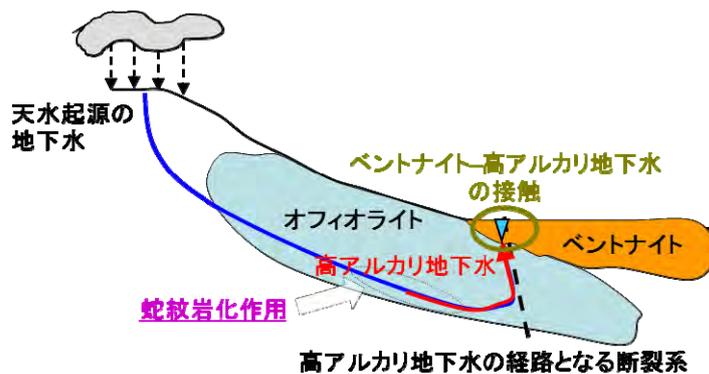


図 1.3.1-2 ナチュラルアナログのコンセプト

1.3.2 ナチュラルアナログ調査・研究の進め方

このような地質環境を有する地域を対象としてフィールド調査を中心に様々な調査を展開することになるが、ナチュラルアナログ調査として、以下のように段階的に調査を進めた。

第1段階として、アナログの要件を満たす地域、すなわち高アルカリ地下水を生成するオフィ

オライト (Ophiolite) とベントナイト層が近接する地域の文献調査を行った。

第2段階として、この過程で抽出された複数の候補地から、アナログの成立性を最優先とし、さらにロジスティックの有利性なども考慮して、調査対象地域を選定する。そして、対象地域の地質概査の実施計画案を作成した。この際、対象地域において予察調査を行い、実施計画案に反映させることで最適化を行った。

第3段階からが現地での本格的な調査・研究を開始するステージとなる。地質概査として、地質調査、地下水調査、及び本事業では高アルカリ地下水の湧出が断裂系に規制されることから断裂系調査を行い、高アルカリ地下水とベントナイト層が接触するアナログサイトを選定した。また、岩石鉱物学的調査、岩石化学的調査を実施して、ベントナイト層や高アルカリ地下水の基本特性、環境条件に係わる基礎データを取得した。

第4段階では、第3段階で選定されたアナログサイトでのトレンチ及び試錐を実施して、ベントナイトー高アルカリ地下水の相互作用及びその生成、環境条件に関する詳細な調査を実施した。ここで、ベントナイト層と高アルカリ地下水の接触については、過去にベントナイトと高アルカリ地下水と接触していたが現在は高アルカリ地下水が何らかの理由で枯れて存在していない場所を Fossil Type のナチュラルアナログサイト、現在もベントナイトと高アルカリ地下水が接触している場所を Active Type のナチュラルアナログサイトと呼ぶことにすると、Active Type のサイトにおいては、接触している地下水の採水・モニタリングが可能な構造試錐の実施もこの段階で検討する。これらの現地での調査結果を踏まえ、現象モデルの作成を行った。

最後の第5段階では、地層処分のどのナチュラルアナログとして活用できるかを明示した上で、得られたデータに基づき、長期間アルカリ環境下に晒されたベントナイトの長期健全性を評価した。またナチュラルアナログ調査での課題については、それに対応した今後の展望と開発戦略を示した。

1.3.3 フィリピンのナチュラルアナログ調査の有意性

ベントナイト緩衝材とセメント系材料の相互作用に係わるナチュラルアナログの成立 (適用) 要件を満たす地質環境は、蛇紋岩化作用が進行中のオフィオライトに直近または近接してベントナイト層が存在する地域でかつ、オフィオライト起源の高アルカリ地下水が水路となる断裂系に沿って湧出している露頭 (コンタクト部) が対象となる。このような環境は、世界中でもフィリピンやキプロスなど極めて限られた地域にしか存在しない[28]。

フィリピンの調査サイトは本ナチュラルアナログの成立 (適用) 要件を満たす以下のような特徴を有する。

- ① 蛇紋岩化作用が進行中で、高アルカリ地下水を生成するオフィオライトが広く、数多く分布し、それらの高アルカリ地下水の湧出水路として断裂系の存在
- ② 火山砕屑性堆積物起源のベントナイト鉱床やベントナイト層が高アルカリ地下水を湧出しているオフィオライトに直接または近接して分布
- ③ 島弧型の変動帯に属し、わが国の弧状列島のテクトニクスの場合と酷似しているために、データ・知見の汎用性 (適用性)

上記の特徴の内、ナチュラルアナログのコンセプトにおいては②が最も重要である。フィリピンの調査サイトはルソン島北西部に位置し、アルカリ温泉水が湧出するオフィオライト（Zambales オフィオライト）とベントナイト鉱山（Saile 鉱山）が近接して存在している。その調査サイトには高アルカリ地下水とベントナイト層が近接または直接コンタクトする露頭が存在している（図 1.3.3-1）。

また、③については、わが国の弧状列島のテクトニクスの場合と変遷史に多くの共通な地質事象（地質構造発達事象とプロセス）があり、フィリピンにおけるベントナイトの生成環境と高アルカリ地下水の形成・進化過程に深く関与する地質環境が極めて類似しているために、取得したデータや解釈の汎用性が高いことが特筆される。

これらの地質環境と地球化学的現象の多くが想定された処分環境にアナログできることが、フィリピンでのナチュラルアナログ調査の有意性を示す最大の理由である。さらに、キプロス[24]でも同様にオフィオライト起源の高アルカリ地下水とベントナイト層が近接する環境が存在するが、ベントナイト鉱床の規模や緩衝材として類似性の点でフィリピンのほうが有意である。また日本からのアクセスや調査ロジスティックの容易性等も優れていることもいえる。

これらのことから本ナチュラルアナログの候補サイトとして高アルカリ地下水とベントナイト鉱床が近接するフィリピンのルソン島北西部を選択し、図 1.3.3-2 に示す調査サイトを中心に予察調査を行った。

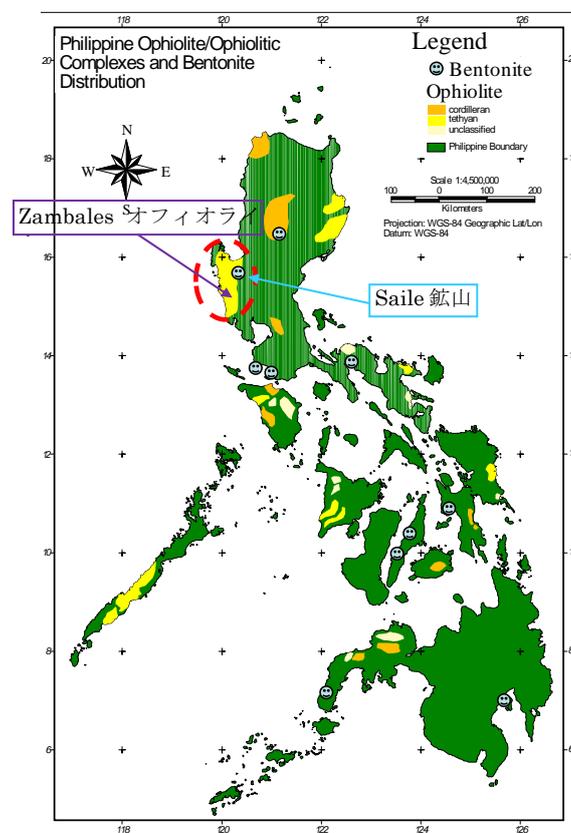


図 1.3.3-1 フィリピン国のオフィオライトとベントナイト鉱床の分布

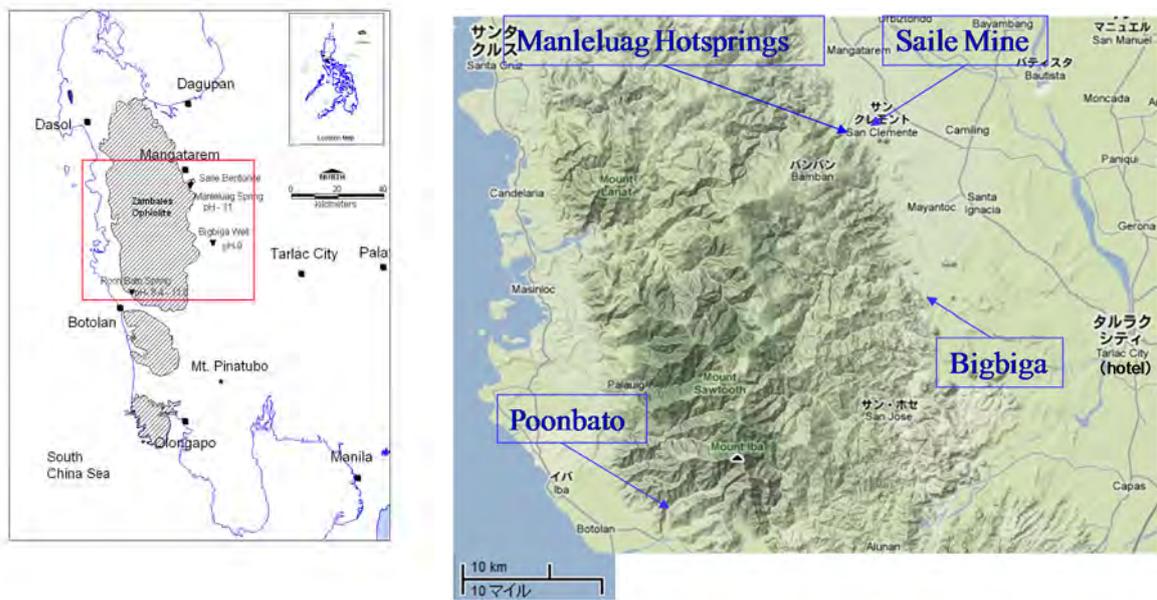


図 1.3.3-2 フィリピン国ルソン島北西部のナチュラルアナログ調査サイトの位置

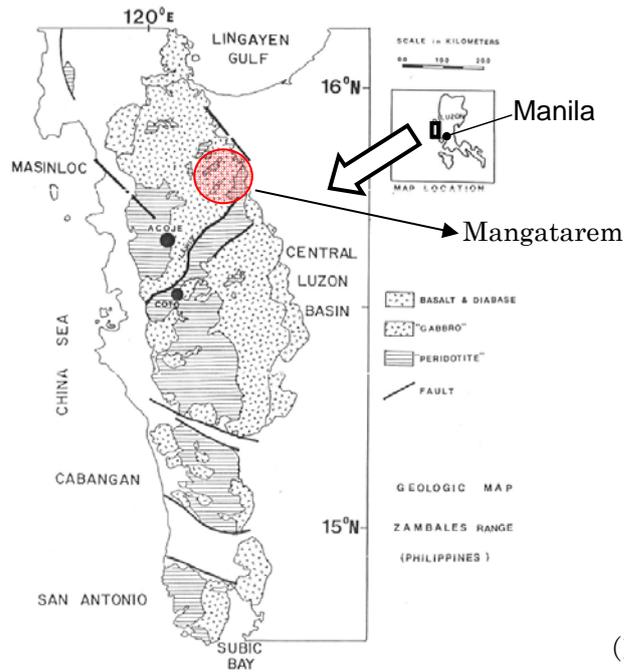
1.3.4 調査地域の地質概要

(1) Zambales オフィオライト

ルソン島北西部の地質概要については、調査対象地域である Mangatarem 地区に広く分布する Zambales オフィオライトは古第三紀・始新世中期に形成され、図 1.3.4-1 に示すように北側より、Masinloc 岩体、Cabangan 岩体、そして San Antonio 岩体から構成されている。さらに Masinloc 岩体は、北側の Acoje 岩体と南側の Coto 岩体に区分され、これらは断層で分断されている。南部においては、Poonbato 地域を調査により、オフィオライト岩体の深部を構成するカンラン岩が河道に露出していることを確認した。また、Zambales の中央部の Coto 地域にはダンカンラン岩（ダナイト：Dunite）が露出し、ニッケル鉱山が存在している。Mangatarem 地区に分布する Zambales オフィオライトは本岩体の北側の Acoje 岩体に属する。

Zambales オフィオライトの火成岩類は、上部から深部に向って、最上位から枕状溶岩（部分的に自破碎玄武岩質溶岩）・輝緑岩／細粒はんれい岩（岩脈／シル／岩床）・ノーライト質はんれい岩／粗粒はんれい岩から構成されている。また、Zambales オフィオライトの南縁（Poonbato 地区近傍）では、この岩体の中核部を構成するカンラン岩・ダナイトなどの超塩基性岩が広く分布し、オフィオライト起源の高アルカリ地下水（pH 11.7）が割れ目や小さな断裂系に沿って湧水している箇所が数多く確認される。図 1.3.4-2 に Zambales オフィオライトの火成岩層序図を示す。

また、この Zambales オフィオライトには、特徴的な Ni（Pt-Cr：随伴金属）の鉱化作用を随伴するために鉱床学的探査が実施され、現在 Ni-Pt 鉱山が開発・操業している。



(Bachman, 1983)

図 1.3.4-1 Zambales オフィオライトの分布と地質構造概念図[29]

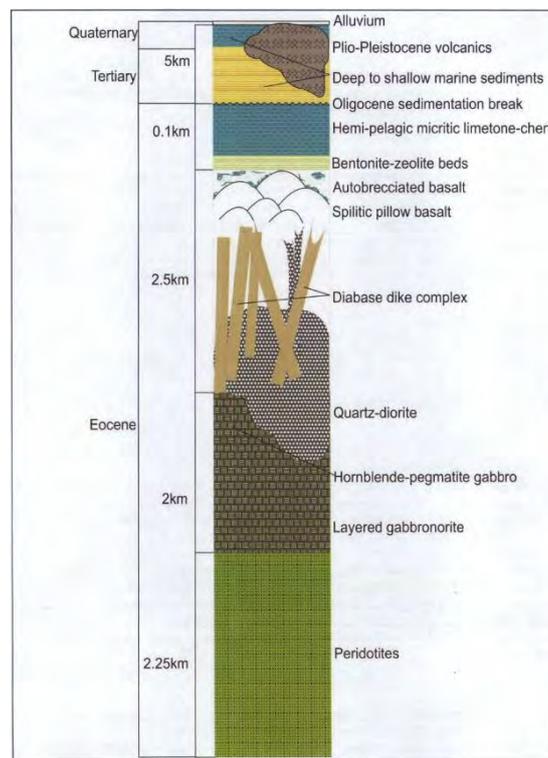


図 1.3.4-2 Zambales オフィオライトの火成岩層序図 (Villones, 1980[30]を修正)

(2) Akisitero 累層

広域的には、本調査地域はルソン島の西部域にある「Central Valley 堆積盆地」に属し、特に

凝灰岩質堆積岩（物）または、ベントナイト（質）層の分布は、図 1.3.4-3 に示すように、狭い範囲で Aksitero 川より北方の Bigbiga 地区、Mayanto 地区そして Saile 鉱山 とその周辺および、更に北方の Suaco 地区へ散在的かつ帯状に分布している[31]。

Schweller 他(1984)[31]によると、Bigbiga 地区とその周辺に分布する第三紀堆積物を取り上げ、それらの化石層序・堆積構造・堆積速度・堆積環境などにもとづく地質構造発達史を構築した。特に、Aksitero 累層の超微化石種（Nannofossil）の同定から堆積速度と堆積環境などから 2 つの部層（Member）に区分した。それによると下部層は「Bigbiga Limestone 部層（上部始新世～下部漸新世）」で、薄層の凝灰岩層を挟在する塊状で白色から淡黄色な細粒石灰岩から構成される。一方、上位層は「Burgos 部層（中部漸新世から上部漸新世）」で、淡青～灰色で泥灰質石灰岩を挟む凝灰岩質な細粒タービダイトで構成される。

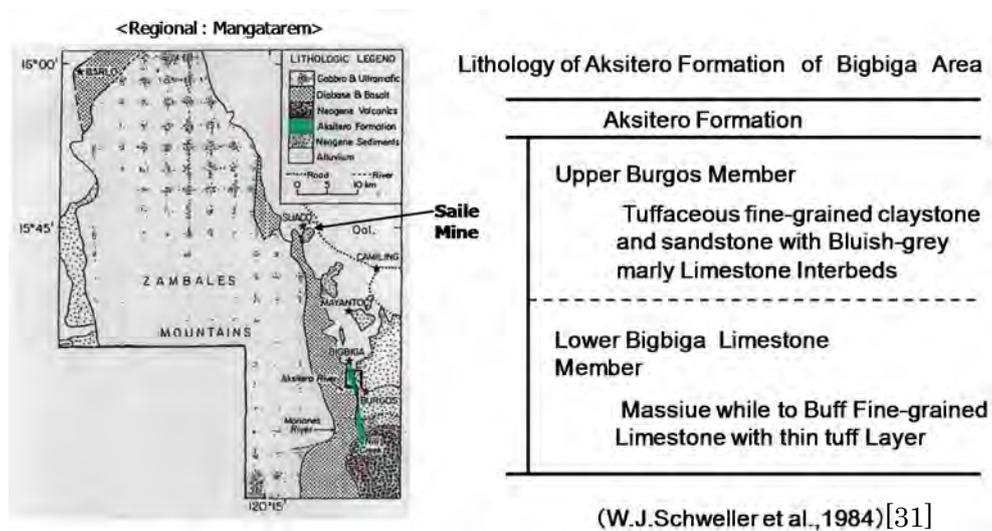


図 1.3.4-3 Zambales オフィオライトの地質図による Aksitero 累層の露頭の分布

堆積速度については、前者は、3~5(m/my)で、後者は 10(m/my)で、前者の 2 倍の堆積速度を試算し、これらの堆積環境の相違から堆積盆地の構造発達史や地史を考察している。また、この堆積速度の差異による火山砕屑性堆積物のベントナイト化にとって埋没速度・埋設深度やその層厚による堆積物の圧密作用などへの影響が推察され、Bigbiga 地区でのベントナイトの形成・分布に深く関与しているものと考えられる。

Aksitero 累層の堆積物は、基盤岩の Zambales オフィオライト火成岩類の最上位を構成する自破碎玄武岩溶岩直上に整合的に累重している。この Aksitero 累層の下部層の岩相・岩質は、微晶質・石灰軟泥質で硬化した凝灰岩質泥岩で一部珪化が進み、チャート質のものも観察される。一方、上部層については、石灰岩質泥岩、シルト岩と頁岩などから構成される。両層とも走行は NE 系～NW 系が卓越し、傾きは東への穏傾斜を示す。一般的には、これらの Aksitero 累層は石灰質粘土岩が優勢で、部分的に凝灰岩質な薄層が挟在する傾向を示している。

調査サイトの地質一般については表 1.3.4-1 に示すように、ルソン島・北西部の基盤岩を構成

する「Zambales オフィオライト (始新世<形成年代: 鉍物ジルコンの U-Pb 法で 44-48Ma>[32])」は、ルソン島西部に南北系に分布し、その延長は、おおよそ 250(km)、幅は約 50(km)で、数百メートルの標高をもつフィリピン国最大の海岸山脈を形成している。全体としては北東系に緩やかにプランジしている。

この Zambales オフィオライト最上位の枕状溶岩に整合に累重する古第三系・漸新世の「Aksitero 累層 (Zambales オフィオライトの最上位堆積物)」が胚胎している。この堆積物は、典型的な遠洋性堆積物 (外洋性堆積物) で主に石灰質・砂岩質・粘土質・泥岩質・シルト質・凝灰岩質 (火山灰/火山ガラス/軽石など) の堆積岩および、一部火山砕屑性堆積岩やタービダイトなどから構成されている。広域的には Aksitero 累層は Zambales オフィオライト岩体東側のフランク (ルソン島を構成する Central Basin 西部の周辺部) に沿って東へ穏傾斜して、岩体とほぼ併走するように細長く分布する特徴をもっている。

当調査サイトでの調査・研究対象であるベントナイトの原岩 (出発物質) は、Aksitero 累層のメンバーである火山砕屑性堆積物の中でより凝灰岩質堆積物である。その供給起源については、二つの異なる火山性砕屑物が考えられる。その一つは、Zambales オフィオライトのエンプレズメント過程で供給された火山砕屑性堆積物と、もう一つは、島弧—海溝系の火山作用により供給された火山砕屑性堆積部である。岩石化学的には、前者は塩基性 (アルカリ) の組成で、後者はカルクアルカリ岩系で特徴づけられる中性の組成をもつ。

ベントナイトはこれらの組成の異なる 2 種類の原岩が浸食・風化・運搬・堆積 (特に凝灰岩質な火山砕屑性堆積物)・埋没そして、熟成過程での埋没続成作用により生成されたものと考察される。また、ベントナイト層は北部 (Saile 鉍山とその周辺地区) の方が南部 (Bigbiga 地区) より広く優勢であるのは、北部の方がより凝灰岩質であるためと考えられる。

そして、この Aksitero 累層に河川系—岩屑流堆積物または、特徴的な深海底の扇状堆積物である新第三系・中新世の「Moriones 累層」が不整合に被覆する。基底部には、基底礫岩 (カンラン岩、はんれい岩、輝緑岩、玄武岩、枕状溶岩、蛇紋岩、石灰岩、チャート、粘土岩、ベントナイト、砂岩、泥岩などの礫) がよく発達するが、本層の大部分は、頁岩、砂岩、凝灰岩質砂岩、泥岩と偏在するタービダイトなどから構成されている。

表 1.3.4-1 調査地域の模式柱状図 (層序・岩相・岩質)

系/紀	世	絶対年代 (Ma: 百万年前)	模式柱状図	層序 (地層名・岩体名)	岩相・岩質
第四紀 (Quaternary)	完新世 (沖積世) (Holocene)	0.01Ma		Alluvium	Unconsolidated Sand, Silt and Clay with Cobbles and Boulder of Gabbro, Basalt, Andesite and Younger Sedimentary Rocks
	更新世 (Pleistocene)			<不整合> [Pliocene ~ Pleistocene Sediments]	
新第三紀 (Neogene)	鮮新世 (Pliocene)	2.5Ma		Quaternary Volcanic Plug	Malabobo Andesite Plug (Calc-alkaline Volcanoes)
		3.6Ma		[Neogene Volcanics] [Basal Conglomerates]	
	中新世 (Miocene)	5.3Ma	<不整合> [Tarlac Formation] [Malinta Formation]	Shales, Sandstone and Pebbles to Cobbles Conglomerates Tuffaceous Sandstone, locally Conglomerates	
		11.6Ma	○Moriones Formation (Channels and Debris Flow Deposits and Characteristics of Deep Sea Fans)		Shale, Sandstone, [Turbidites], Mudstone Alternation of Silty Sandstone and brown to grey Mudstone with Scattered Conglomerates bed
		15.9Ma	Basal Conglomerates consisted of Cobbles and Pebbles of Limestone, Chert, Claystone, Bentonite, Basalt, Gabbro, Diorite, Serpentine and Peridotite		
古第三紀 (Paleogene)	漸新世 (Oligocene)	23.0Ma	<不整合> Zambales Ophiolite	Saile Mine Area	Bigbiga Area
		28.4Ma	○Aksitero Formation (Pelagic and Hemi-Pelagic Sediments)		
	始新世 (Eocene)	33.9Ma	➢ Tuffaceous Sandstone, Siltstone - Calcareous Siltstone with thin Tuff-layers and Tuffaceous fine-grained Turbidites	➢ (Volcanoclastic Turbidites) ➢ Tuffaceous Sandstone ➢ Siltstone - Calcareous Siltstone with thin Tuff-layers and (Tuffaceous fine-grained Turbidites)	➢ Tuffaceous Sandstone, Siltstone, [Tuffaceous fine-grained Turbidites]
		37.2Ma	➢ Volcanoclastics Sediments including Pumice, Ash and Volcanic Glass	➢ Alteration of Bentonite and Zeolite Beds (Saile Bentonite Deposites)	➢ Massive white to buff fine-grained Claystone ➢ Bluish grey marly Claystone and Limestone with thin tuff (ash) interbeds ➢ Reddish to pale brown ferruginous Sandstone including Pumice Fragments
		48.6Ma	➢ Micritic Limestone, Chert and Limy Claystone ➢ Bentonitic Sandstone including Bentonite - Zeolite beds (Saile Bentonite Deposites)	○Volcanics - Ultramafics Basement	○Volcanics - Ultrabasic Basement
		○Intrusives	➢ Daiabase (Dyke / Sheet) ➢ Diorite (Dyke / Sheet)	➢ Auto-brecciated Basalt / Pillow Lava (Partially Spilitic Basalt) ➢ Diabase - Diorite Complex ➢ Gabbro ➢ Peridotite	
		○Volcanics - Ultramafics Basement	➢ Auto-brecciated Basalt (Partially Spilitic Basalt) ➢ Pillow Lava ➢ Gabbro / Noritic Gabbro ➢ Layered Gabbro ➢ Ultramafics (Peridotite, Dunite etc..)		

[]:unobserved

[After: Schweller et.al., 1984[31], E. E. Geary et.al., 1989[33]]

(3) Mangatarem 地域の地質層序と岩相

Mangatarem 地域には、Aksitero 累層を胚胎母層とするベントナイト・ゼオライトの鉱床 (Saile 鉱山) が存在するとともに、その西 2.7km には Manleluag 温泉保養地が存在している。平成 19 年度[28]に地質踏査を実施し、既存の地質情報の確認と新たな地質調査結果に基づき作成した地質図を図 1.3.4-4 に示す。本地区の地質図は、Mt.Malabobo の西部域において、Zambales オフィオライト (Diabase, Basalt) の基盤岩が分布し、その後堆積した地層 (Aksitero 累層、Moriones 累層)、第四紀の地層 (安山岩質円頂丘、Alluvium) が分布している。表 1.3.4-2 に、Mangatarem 地域の概略的な地史を示す。本地区における主要な断裂系は NE-SW 系であり、これはこの地域に広域的に存在している安山岩質円頂丘 (Mt. Malabobo が代表的なもの) の配列の方向と一致する。これに共役断層である NW 系と EW 系がみられる。これらの断裂系はベントナイト層を切っていることから、断裂系は Aksitero 累層の胚胎層であるベントナイト鉱床の形成後にできたと考えられる。

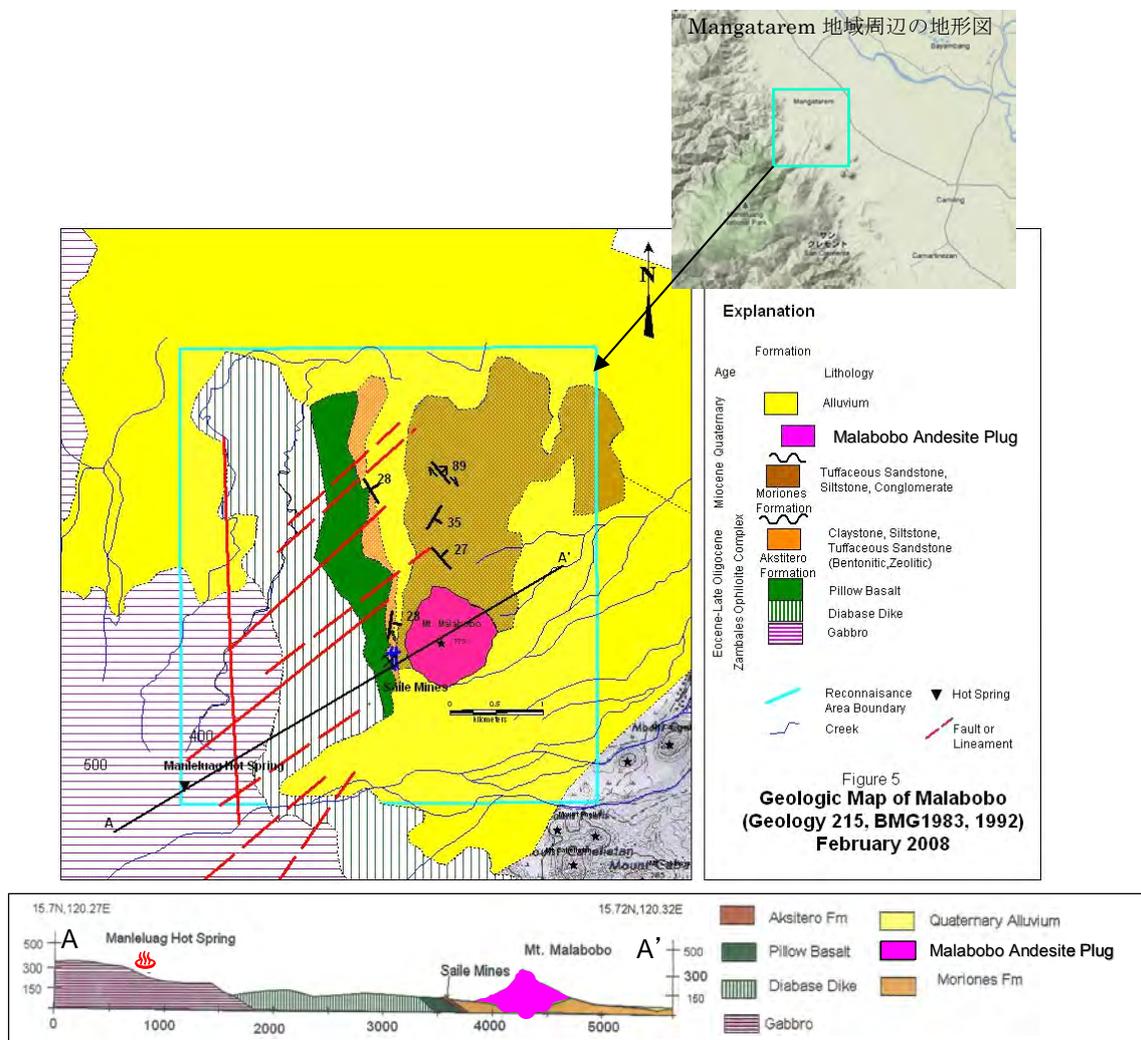


図 1.3.4-4 Mangatarem 地域の地質図

表 1.3.4-2 Mangatarem 地域の地史の概略

第四紀 <2.5 Ma>	完新世 更新世	Alluvial (河川堆積層) の堆積 安山岩質円頂丘 (Mt. Malabobo) の貫入
<5.3 Ma> 新第三紀 <23.3 Ma>	鮮新世 中新世	~~~~~不整合~~~~~ Moriones 累層 (堆積岩) ~~~~~不整合~~~~~
<29.3 Ma>	漸新世 (後半期)	Aksitero 累層 (ベントナイトおよび沸石胚胎層：凝灰岩質 シルト岩、凝灰岩質砂岩、石灰岩等)
<35.4 Ma> 古第三紀	漸新世 (前期)	Zambales オフィオライトの生成： Basalt (枕状溶岩) ↑ Diabase (岩脈・岩床)
<50.0 Ma>	始新世	↑ Gabbro (斑レイ岩)

(Ma：百万年)

この Mangatarem 地域の地質概査により、ナチュラルアナログサイトとしての適性に係わる以下の地質、断裂系、地下水の基礎情報が得られた。

- 対象地域の (Aksitero 累層中の) ベントナイト層は沸石層と互層関係にあり (図 1.3.4-5)、オフィオライト基盤岩に整合に累重、ほぼ水平に堆積し、一部基盤岩と断層で接している。基盤岩には階段状の断層 (ステップ) 構造が顕著であり、主要断裂は NE 系、副次的な共役断層として NW 系及び EW 系の断層が発達している (図 1.3.4-6)。
- ベントナイト鉱床に存在する断層に沿って、かつて高アルカリ地下水が上昇したと示唆される痕跡が存在する。特に、ベントナイト層内の断層の存在及び層理面のマンガンの附着 (Mn-Staining) が存在する (図 1.3.4-7)。
- ベントナイト鉱床 (Saile 鉱山) の西方約 2.7km に、断裂系に沿って高 pH かつ高還元状態の温水が湧出する、高アルカリ湧水地点 (Manleluag 温泉保養地：pH 11 程度) が複数存在する (図 1.3.4-8)。

これらの結果から、高アルカリ地下水と接触しているベントナイト層が存在する可能性が極めて高いことが予想され、フィリピン国ルソン島北西部の Saile 鉱山とその周辺地域 (Mangatarem 地域) をナチュラルアナログ詳細調査が可能なサイトであると判定した。



図 1.3.4-5 ベントナイト・沸石層の互層関係露頭 (Saile 鉱山採石場 (Quarry))



図 1.3.4-6 Saile 鉱山採石場の全体写真と断裂系（背後は Malabobo 安山岩プラグ）



(a) 石切り場露頭での断層岩コアのコア



(b) 断層岩コア試料

暗褐色部が Mn-Staining

図 1.3.4-7 Saile 鉱山採石場の断層岩コアリングとマンガン附着のある試料



(a) M1(pH11.1) : 温泉水の源泉



(b) M3(pH10.8) : はんれい岩中の湧水

溶存ガス (CH_4 , H_2) のバブリングが見られる。

図 1.3.4-8 Manleluag 温泉保養地のアルカリ温泉水の湧出点

1.3.5 高アルカリ地下水の地質鉱物学的証拠 (Fossil Type のナチュラルアナログの証拠)

Saile 鉱山においてナチュラルアナログ詳細調査を実施した。Saile 鉱山で掘削したトレンチにおいて、ベントナイト層とオフィオライト基盤岩の最上部の枕状溶岩とが直接接触することが確認され、さらに高アルカリ地下水が断裂系に沿ってベントナイト層まで流入していたと考えられる以下の地質学的・岩石鉱物学的な証拠を確認した。

これらの証拠から、Saile 鉱山とその周辺地域が過去に（最も近傍で共通の特性を持つ Manleluag 温泉保養地の裂か水と同程度と考えられる）高アルカリ地下水とベントナイトが接触していた”Fossil Type”のナチュラルアナログサイトとして必要な環境要件を満たすことを明らかにした。

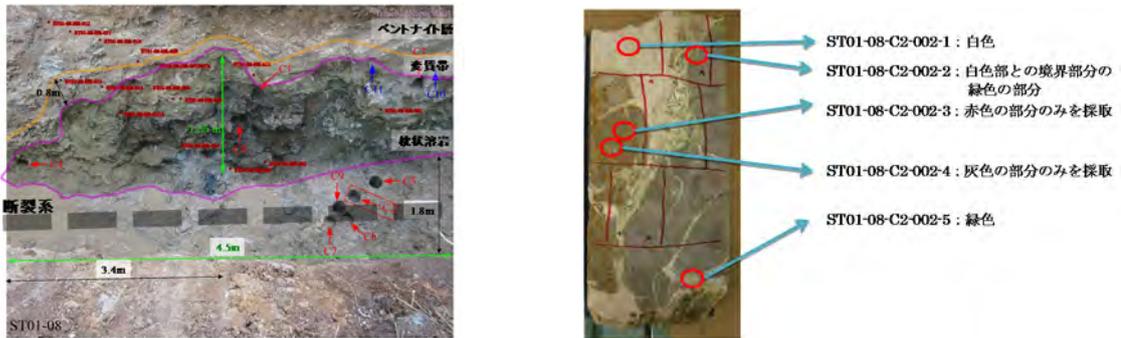
(1) 高アルカリ地下水の流路としての断裂系の存在

Saile 鉱山鉱区内において計 8ヶ所でトレンチ調査を実施した。これらのうちトレンチ-1では、枕状溶岩とベントナイト層の接触が確認された。また、トレンチ-1は断裂系そのものを掘削して

いたため（掘削方向が断層面に一致）、底部の断裂系充填物を採取し分析した（図 1.3.5-1）。

XRD による分析により、断裂系充填物は外側が蛇紋石、内側が方解石（炭酸塩鉱物）であることを同定した（図 1.3.5-2）。これは、オマーン[34]など高アルカリ地下水が枯れた場所によく観察される現象であり、蛇紋岩化作用による高アルカリ地下水が閉塞の最終段階で炭酸塩として沈殿したために生成された。これは過去に高アルカリ地下水が断裂系に沿って上がってきていたことを示す。

また、アルカリ地下水の上昇と密接に随伴した蛇紋石と炭酸塩鉱物の共生・産状関係から（図 1.3.5-3）、断裂系が形成された後、3 回以上の上昇プロセスがあったと考えられる。



(a) トレンチ-1 の断面写真と断裂系充填物の試料採取位置 (b) 断裂系充填物(C2 コア)の試料と分析箇所

図 1.3.5-1 トレンチ-1 の南壁の断面写真と断裂系充填物の試料

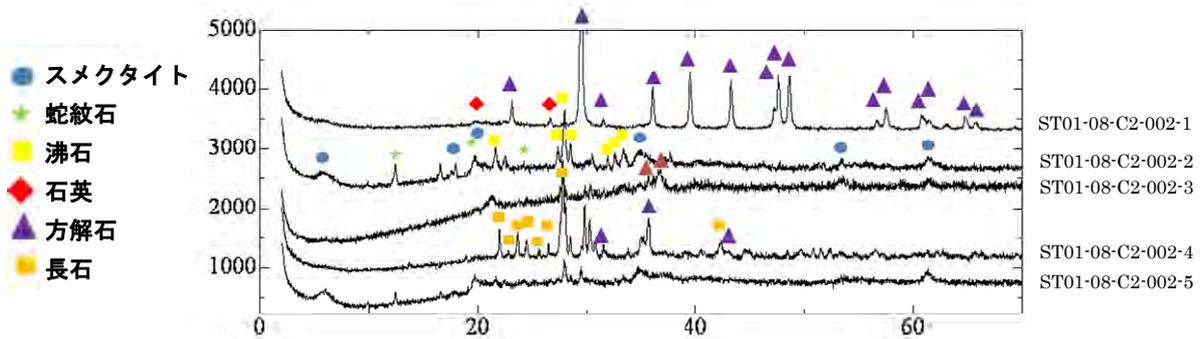


図 1.3.5-2 C2 コアサンプル（断裂系充填物）の XRD プロファイルと鉱物組み合わせ

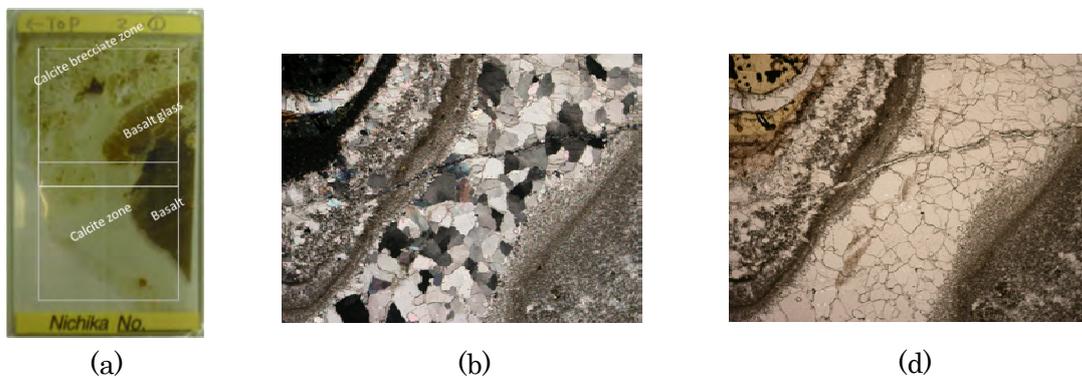


図 1.3.5-3 破碎岩の薄片とその顕微鏡写真（炭酸塩の産状）

(2) 特徴的なアルカリ変質鉱物の産状

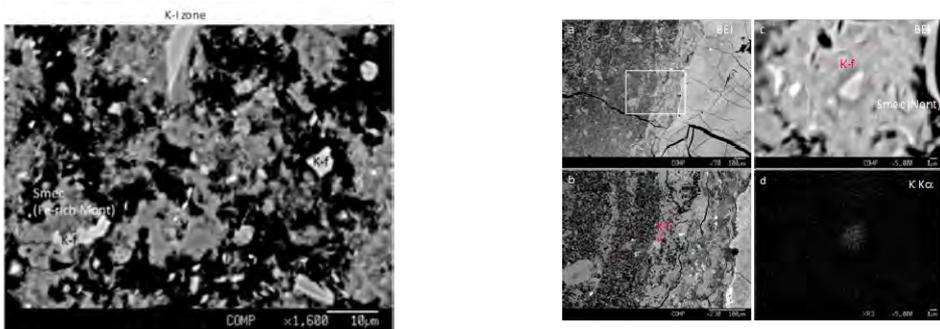
高アルカリ地下水と接触していた Fossil Type のアナログの試料として、トレンチ-5 の枕状溶岩中の脈状の蛇紋石がベントナイトに達する部分から試料を採取し、薄片を作成して、詳細な観察を行った (図 1.3.5-4)。



(a) トレンチ-5 の断面写真と試料採取位置 (b) 薄片試料のベントナイトー枕状溶岩界面の状態

図 1.3.5-4 トレンチ-5 の断面写真と薄片試料の界面近傍の状態

FESEM-EDS や EPMA 分析から、界面のアルカリ変質帯や玄武岩ガラスの変質帯において、スメクタイトとアルカリ溶液との反応で形成された低温型のカリ長石が同定された (図 1.3.5-5)。



(a) アルカリ変質帯のカリ長石の産状 (b) 玄武岩ガラス変質帯のカリ長石の産状

図 1.3.5-5 アルカリ変質鉱物であるカリ長石の産状

(3) 断裂系の充填物とベントナイト層表面及び層理面をコーティングする Mn 鉱物の存在

Saile 鉱山の石切り場露頭では、断裂系 (断裂帯) の充填物およびベントナイト層の層理面に平行に Mn-staining (暗黒色物質の附着) が見られる特徴がある (図 1.3.4-7)。この断裂系から試料を採取し、XRD、SEM-EDX による分析した結果、Mn 水酸化物の一つである水マンガン鉱物 (γ -Manganite : γ -MnOOH) が同定された (図 1.3.5-6)。これは、アルカリ環境下でかつ還元環境から酸化環境で安定である水マンガン鉱物が露頭で Mn-Staining として残存したことを示しており、この断裂系が過去に高アルカリ地下水の経路となっていたことを示す。

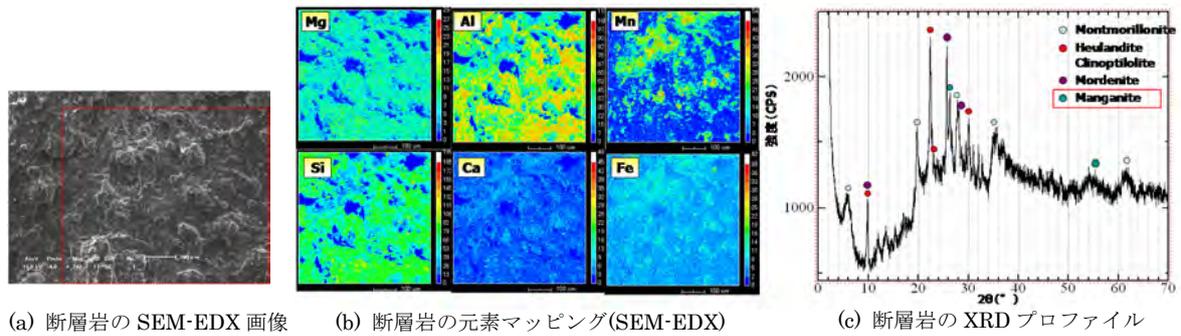


図 1.3.5-6 断層岩中の水マンガン鉱物の同定

(4) 主成分元素、微量成分元素の濃度特性

Ca、Na の濃度は石切り場露頭試料で高く、Mg、K の濃度はトレンチ試料で高い。これは高アルカリ地下水によるイオン交換反応によるものと考えられる (図 1.3.5-7)。

重金属元素についても、オフィオライトの下部層を構成する岩石の Cr や Ni は非常に濃度が高い (Cr は 2000~5000 ppm、Ni は 500~2500 ppm)。これらの岩石と反応して生成した高アルカリ地下水が Cr や Ni を運び、トレンチ試料に濃集したと考えられる (図 1.3.5-8)。

また、希土類元素については、トレンチ試料には軽希土類が濃集した左上がりの REE パターンが多いのに対して、露頭試料は平坦な試料が多い。特に、トレンチ試料は露頭試料に比べ軽希土類元素の割合が多く、その影響で全希土類濃度が高い値をとっていることがわかる。この軽希土類元素の濃集も高アルカリ地下水が下から上がってきた後、反応した影響を示す 1 つの証拠である (図 1.3.5-9)。

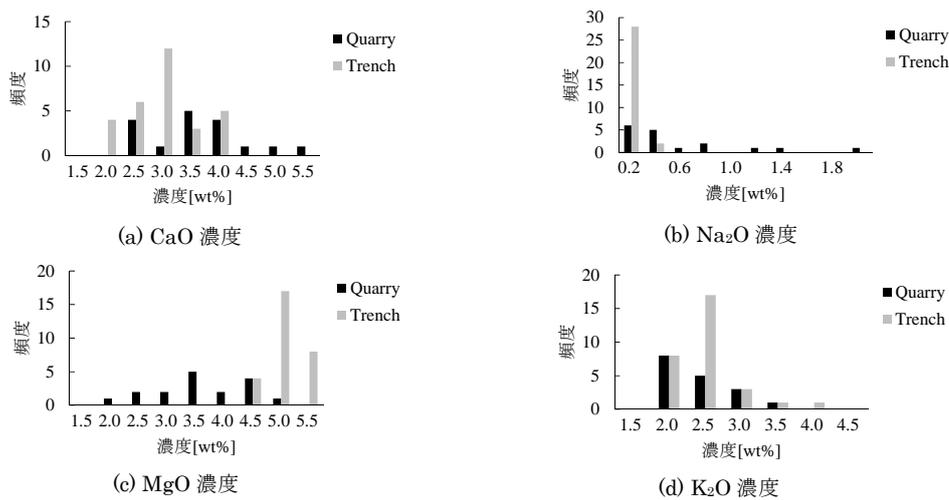


図 1.3.5-7 主要成分元素濃度の露頭試料とトレンチ試料比較

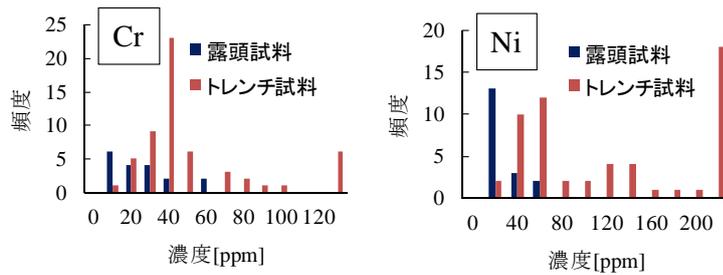
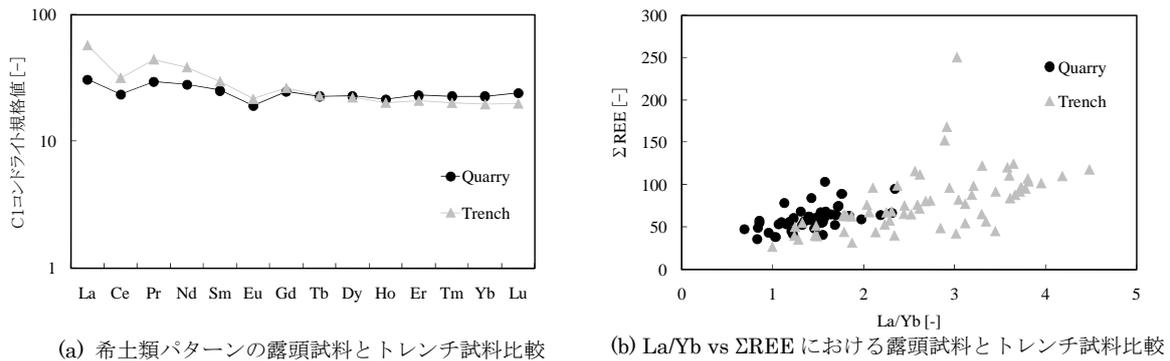


図 1.3.5-8 重金属元素濃度の露頭試料とトレンチ試料比較



(a) 希土類パターンの露頭試料とトレンチ試料比較

(b) La/Yb vs ΣREE における露頭試料とトレンチ試料比較

図 1.3.5-9 希土類元素濃度の露頭試料とトレンチ試料比較

(5) 近傍のアルカリ湧水（温泉水）の存在

Saile 鉱山から直線距離で、西へ約 2.7km にある Manleluag 温泉保養所とその周辺の湧水が、Zambales オフィオライトのはんれい岩中に観察され、高アルカリ性（天然 pH 11）で還元環境を示す（図 1.3.4-8）。

1.3.6 ベントナイトの生成と地質環境（生成環境）

ベントナイト層と沸石層を胚胎する Aksitero 累層は、フィリピン諸島の特徴的な島弧－海溝系の形成・発展過程における前弧盆の地質構造学的発達史（変遷史）のなかでの一連の侵食・運搬・堆積過程における海成堆積層として捉えることが出来る。ベントナイトの原岩（初源物質）は、遠洋性から半遠洋性環境に生息している浮遊性プランクトンなどの死骸の埋没による石灰質堆積物（石灰質シルト岩－粘土岩、石灰岩、苦灰岩）及び、島弧の火山活動によるカルクアルカリ岩系の火山噴出物とオフィオライトの定置（海洋地殻から大陸・大陸周辺の地殻化）による侵食・運搬・堆積によってそれぞれが海底に厚く堆積した火山碎屑物（岩）で構成されている。特に、ベントナイトの原岩である火山碎屑物（火山碎屑性堆積物）の岩質は、主に軽石、火山灰、火山ガラスなどから成る凝灰岩質火山碎屑物である。

この凝灰岩質火山碎屑物の供給源としては、島弧の火山活動に伴う火山噴出物である。この火山噴出物はカルクアルカリ岩系の珩長質組成（Felsic Composition）で、中性からやや曹長石質斜長石（長石）に富み、石英と少量の輝石・カンラン石などが主要な構成鉱物である。一方、オフィオライト起源の碎屑物は、マントル物質組成のカンラン石・輝石・角閃石・灰長石質斜長石

(長石)と蛇紋石などが主要な構成鉱物である。このように供給源の岩石組成の違いにより、オフィオライト起源の砕屑物は、より塩基性 (Basic Composition) の性質を示す。

また、凝灰岩質火山砕屑物は、凝灰岩質砂岩や凝灰岩質粘土岩と規則的な互層関係で堆積しているが、場所によっては、石灰質岩石中に薄層または、レンズ状の挟みとして堆積している。但し、凝灰岩質粘土岩は、一般的に塊状な堆積岩である。また、海底斜面に堆積した堆積物が、海底地すべりなどにより乱泥流堆積物 (タービダイト) としてこれらの火山砕屑物、砂岩、泥岩、シルト岩、粘土岩、石灰岩などが混在して堆積するために、層厚、岩相・岩質に著しく変化する特徴がある。

Saile 鉱山の採石場やその周辺でのトレンチ調査などにより系統的試料採取をし、偏光顕微鏡観察と XRD による鉱物同定、XRF によるバルク分析と ICP-MS による REE (希土類元素) と微量分析、EPMA による鉱物の産状観察と組成分析、BEI による鉱物表面の微細組織観察及び、FE-SEM、EDS によるナノスケールでの鉱物微細構造と組成分析などを実施した。同時に、ベントナイトの生成環境と密接な関係にある沸石類についても同様の分析手法により観察・同定・分析を実施した。

これらの分析結果から、ベントナイト層は、凝灰岩質火山砕屑物を原岩とし、構成鉱物は、主に 2 八面体ス멕タイト (Ca-ス멕タイト)、Ca-沸石類と少量の石英、方解石、燐灰石 (生物起源) 及び、輝石、カンラン石、クロム鉄鉱、磁鉄鉱等のレリクトとして構成されている。

このベントナイト層には、熱水の侵入による熱水溶液との反応で生成される特徴的な変質鉱物の晶出 (沈殿) やその結果による変質鉱物分帯が確認されない。さらに、新規貫入岩の熱の影響による高温型の変質鉱物が確認されないことから、このベントナイト層は熱水作用によって生成されたものではない。

また、Saile 鉱山の採石場のベントナイト-沸石層を対象とした REE 分析結果から、図 1.3.6-1 に示すように、採石場断層 (F3) 及び近傍 (断層ゾーン) では、高い REE パターンを示す。さらに、その断層ゾーンでは酸化地下水との混合により、 $Ce^{+3}-Ce^{+4}$ 、 $Mn^{+2}-Mn^{+4}$ が起こり、Ce 異常と Mn 鉱物への REE の濃集が認められる。しかし、断層から離れたベントナイト層-沸石層では、地下水との相互作用を起こさず、原岩の特徴であるフラットで低濃度の REE パターンを示す。

このことは、ベントナイト層-沸石層が、これらの地下水や熱水との反応により生成したのではなく埋没・続成作用により生成されたものと示唆される。さらに、図 1.3.6-2 に示すように、このベントナイト層-沸石層の鉱物組み合わせから解析すると、このベントナイト層は、典型的な埋没・続成作用による地球化学的反応により生成されたものと考察される。なお、随伴する沸石類は、殆んどが Ca-沸石類である斜プチロル沸石、輝沸石、モルデン沸石などである。

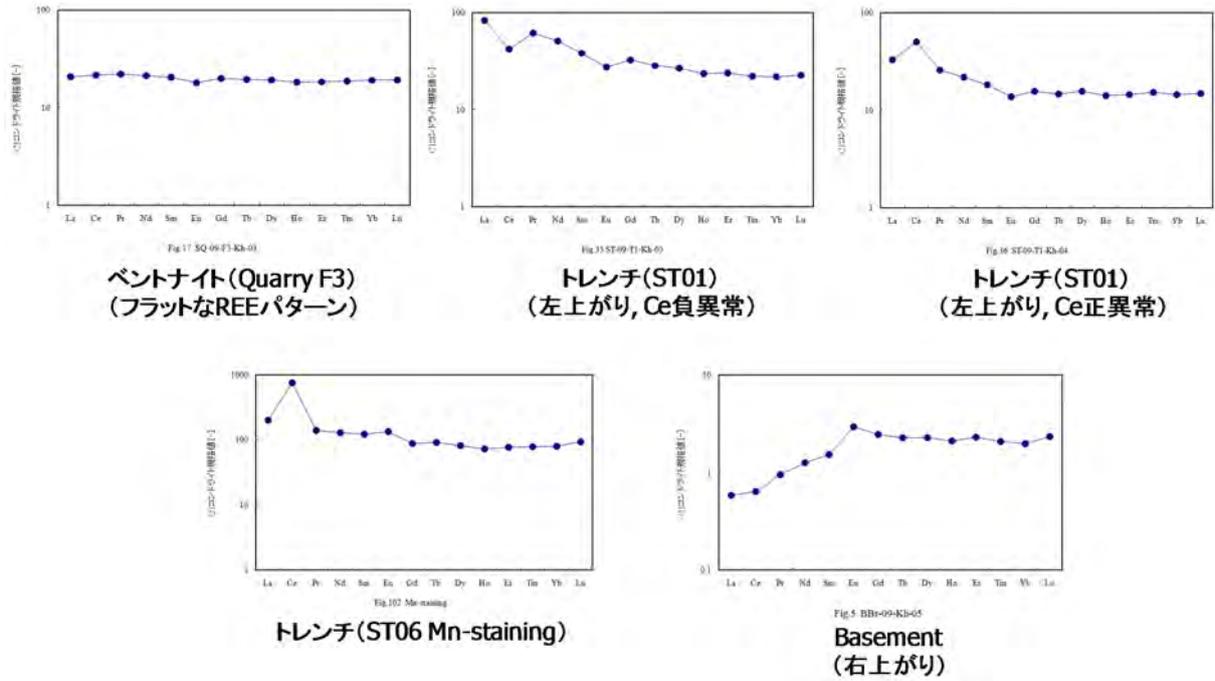
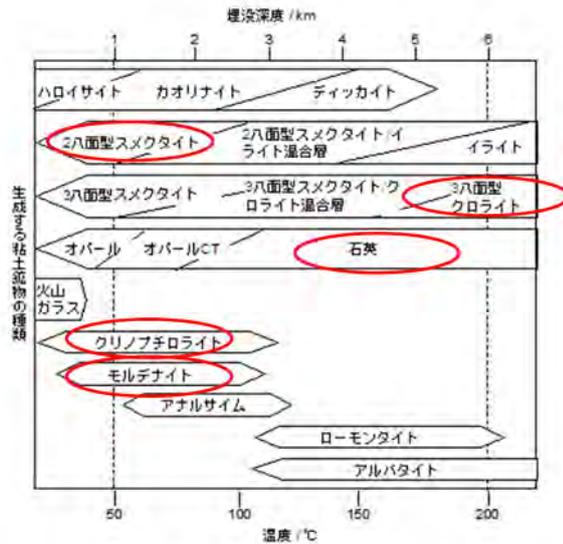


図 1.3.6-1 ベントナイト層の REE 組成とアルカリ地下水の影響



(白水晴雄, 1988[35])

図 1.3.6-2 続成変質の深度、温度及び主な鉱物の消長

調査サイトのベントナイトが埋没続成作用により生成されたことの確からしさを更に検証するために、採石場の中央部 (BM) のベントナイト試料について SEM による観察を実施した。この SEM 写真 (図 1.3.6-3) に示すように、先行事例のように特徴的な蜂の巣状の組織で自生鉱物としての形状、そしてこれまでに観察された空隙を充填して薄層 (層状) の鱗片状集合体の形状と合わせて考察すると、明らかに埋没続成作用により生成されたものと解釈される。また、同じ試料に多数の浮遊性石灰藻起源の炭酸塩鉱物 (Coccolith) が観察され、遠洋性かつ深海の堆積環境

であることを示している。

しかしながらこれまでの XRD 結果等の解析から、採石場の堆積物（ベントナイトー沸石）は続成作用によって生じたものである可能性が極めて強いものとなったが、ここで考慮しなければならないことは、採石場で認められるスメクタイトが本当に自生であるかということである。そこで SEM 観察による産状分析を行うことで Saile ベントナイトの起源である火山堆積物が海水中で自生することによりベントナイトが生じたのか、タービダイトのように他の場所でベントナイトに変質してから海水中を流れて移動したのかを検討した。

図 1.3.6-3(a)は採石場にて採取したスメクタイトに関して形状を崩さないように前処理を行い、SEM で観察したものである。このように採石場のスメクタイトはフレーク状の粒子が蜂の巣状に凝集しており、これは先行研究[36]において確認されているスメクタイトの形態と同様の特徴を持っている（図 1.3.6-3(b)）。以上のことより、採石場のベントナイトは現地性で自生によって生じたことが分かる。

また、同観察ではコココリス（浮遊性石灰藻起源の炭酸塩鉱物：Coccolith）が多く見られた（図 1.3.6-3(c)）。コココリスは深度 4000m 以下の海洋中に特徴的に見られる生物で、生物由来によって生成することで知られている。これらのコココリスが SEM 観察により多く凝集している様子を確認できたことで、この採石場部分の不定方位 XRD の結果より同定された炭酸塩鉱物は生物由来のものである可能性があることがわかった。

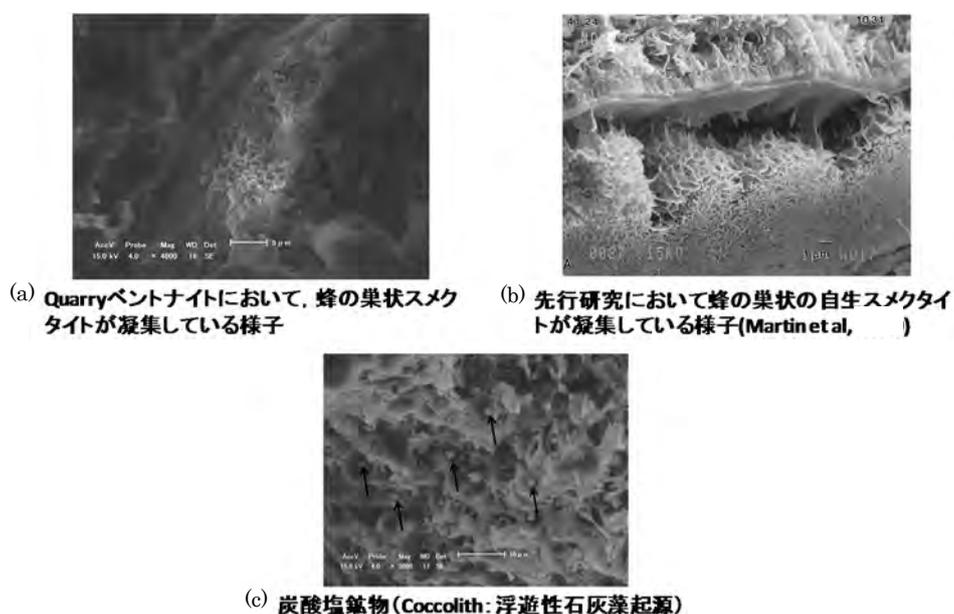


図 1.3.6-3 採石場のベントナイトの産状 (SEM)

ベントナイトの原岩組成とベントナイトの生成環境から、凝灰質火山性堆積物の続成作用によって初生鉱物として恐らく Na-スメクタイトが生成したと考えられる。また、ベントナイトと共存する液相（地下水）の REE パターンの復元や Sr 同位体比の結果から、Saile 鉱山のモンモリロナイトが Ca 型であるのは、続成過程に石灰岩が海水と反応して多くの石灰岩を溶かし込み、

多くの Ca が供給され層間での陽イオン交換により Ca 型化したと考えられる。

以上結果から、ベントナイトの生成と地質環境（生成環境）は以下の通りまとめた。

- ① 主に凝灰岩質（火山灰、火山ガラス、軽石、Ca 型斜長石、普通輝石など）火山碎屑性堆積物（Aksitero 累層のメンバー）が原岩（出発物質：初生物質）である。
- ② ベントナイト層には、多数の遠洋性かつ深海性の生物（浮遊性石灰藻・珪藻など）とその生物起源の炭酸塩鉱物の存在により生成環境は遠洋性海底環境である。
- ③ 採石場のベントナイト層（沸石層も含む）は、水平な成層構造と有律互層を示し、熱水や火成岩貫入による熱の影響が観察されないことより、熱水作用によるベントナイトの生成は考えにくい。
- ④ SEM 観察から、採石場のスメクタイトは、先行研究[36]で記載されている続成作用で生成されたスメクタイトの特徴であるフレーク状の蜂の巣状や層状の鱗片状の集合（凝集）体で、自生鉱物の形状を示している。
- ⑤ ベントナイト層の主要構成鉱物の組み合わせは（スメクタイト、スメクタイト/イライト混合層鉱物、ノントロナイトおよび、Ca 型沸石<斜プチロル沸石、輝沸石、モルデン沸石>）と方解石、石英などである。これらの鉱物組み合わせから典型的な続成作用により生成された指標鉱物である[35][37][38][39]。
- ⑥ スメクタイトの初生組成は、恐らく Na 型スメクタイトである。その後埋没続成作用過程で陽イオン交換により Ca 型スメクタイトに固相変化した。

1.3.7 高アルカリ地下水の生成・進化のプロセスと環境条件

(1) アルカリ地下水の地球科学的挙動

調査対象地域のアルカリ地下水はオフィオライト中の断裂系に伴う裂か水で、その賦存状況は温泉の源泉、自然湧水（泉など）およびオフィオライト近辺で掘削された井戸水（孔底部はオフィオライト）である。これらのアルカリ地下水は、オフィオライトー地下水との相互作用（蛇紋岩化作用など）により、高アルカリ・還元環境、発熱反応（温泉水の生成）、ガス（メタン/水素）の発生を促進し、組成的には、Ca、K イオン濃度に高く、Mg、Fe イオン濃度が低い特性を有する傾向を示す。表 1.3.7-1 に各調査地区の地下水の地球科学特性を示すが、Manleluag 温泉保養地のはんれい岩を母岩とする裂か水が、pH10.5~11 で やや高い還元性（Eh-720~-660mV）の Ca-OH 型、Saile 鉱山の井戸水は、Aksitero 累層を母岩とする中性から弱酸性で、Mg/Ca-HCO₃ 型、Bigbiga 地区の井戸水は、pH 9~10 で、還元性（Eh-120~-110mV）の Na (Ca) -HCO₃ 型である。調査対象地域の南限の Poobato 地区のカンラン岩を母岩とする裂か水が、pH 最高値の 11.7 で、還元性（Eh-260~-170mV）の Ca-OH 型である。一般的には、比較的浅部の地下水は、Ca-HCO₃ 型で、深部の地下水は、殆ど Mg イオンは含まれず Ca-OH 型になる傾向がある。特に、Ca-OH 型のアルカリ裂か水の周囲には、石灰華が広く随伴する。また、低アルカリセメントの浸出水水質と比較から、調査対象地域のアルカリ地下水の pH、溶存イオンのアナログ性があるこ

と、さらに処分場の地下環境を考えると還元性、温度についてもアナログ性があることがわかる（表 1.3.7-1）。

表 1.3.7-1 調査サイトの地下水水質と低アルカリセメント浸出液とのアナログ性

Site	Manleluag HSp. - M1	Manleluag HSp. - M4	Saile Mine	Poonbato	Bigbiga Well	low alkali cement leachates (PNC 1997)*
Sample No.	M1-11-KWP-01	M4-11-KWP-04	SA-10-KWP-01	PB-10-KWP-02	BB-11-Well1	
pH	10.84	10.92	6.73	11.7	9.16	11.09
ORP(Eh) [mV]	-662	-698	65	-178	-118	-
Temp [°C]	34.1	34.2	27.9	27.5	29.6	60
CH ₄ [ppm]	>5000	0 (2200)	0	>5000	0 (0~560)	-
H ₂ [ppm]	62	0 (230)	0	50~1320	0 (0~130)	-
Na [ppm]	1.58	1.57	13.5	23.52	7.13	43
K [ppm]	0.28	0.22	1.92	5.00	0.76	13
Ca ²⁺ [ppm]	23.6	23.75	23.9	37.26	0.33	16.8
Mg [ppm]	0.17	0.01	18.5	0	0	-
Si [ppm]	11.5	12.2	24.0	2.52	36.3	-
Al [ppm]	20.3	24.8	0.02	0	1.11	0.3
Cl [ppm]	16.6	16.6	-	-	4.99	-
HCO ₃ [ppm]	73.5	55.6	232.8	-	153.8	-

*Mix Proportion – Portland cement: silica fume: fly ash = 40: 20: 40

(2) 地下水年代と起源

地下水の涵養域（地形高度も含む）と起源を考察するために環境同位体測定（ δD 、 $\delta^{18}O$ ）結果を図 1.3.7-1 に示す。この図から全ての地下水は、フィリピン天水起源ライン[40]の $\delta D = 6\delta^{18}O + 7$ に乗ることから、天水（降雨水）起源であり、Manleluag 温泉保養地のアルカリ地下水の平均涵養高度が一番高い（約 1,600m）と解釈できた。

地下水年代については、¹⁴C による測定年代では数千年、一方 ³⁶Cl による測定年代は 100 万年のオーダーとなっている。一方、CFCs（フロン）を用いた年代測定および併せて行った環境同位体の測定からは、降水起源でありかつ数十年程度というかなり滞留時間の短い水の影響を受けている可能性が示されている。これらのことから、Zambales オフィオライト岩体中を流動する地下水の滞留時間の評価は難しいが、蛇紋岩化作用によって岩盤中で生成された地下水を主に、起源の異なる降雨起源の地下水がある程度混合している可能性が考えられる。

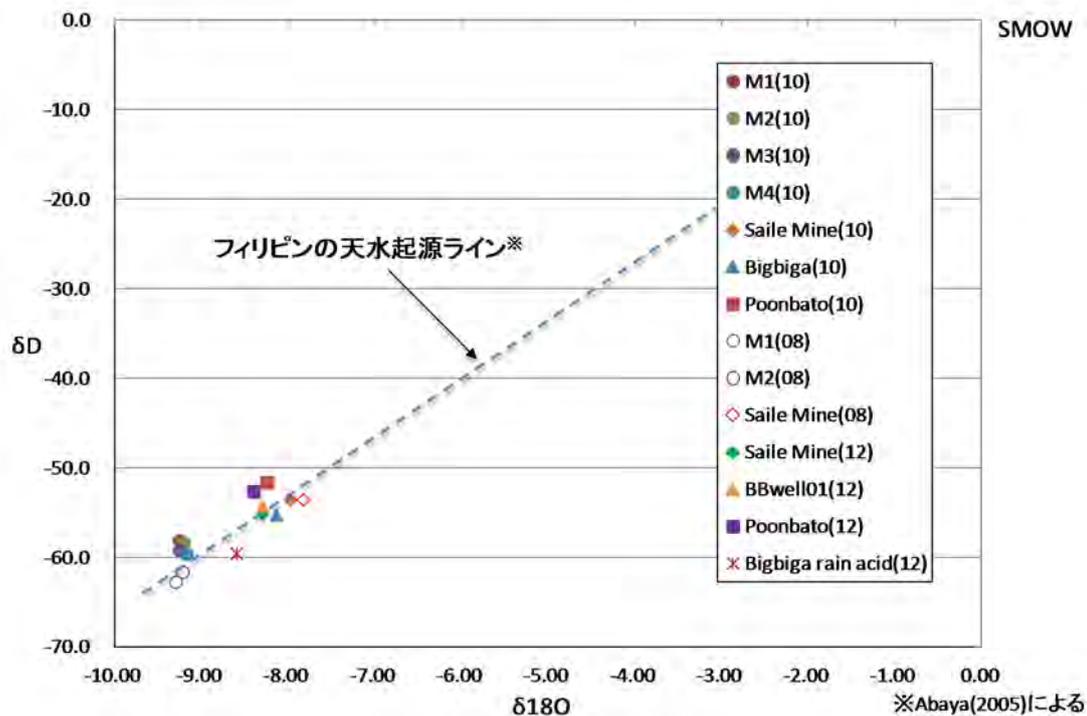


図 1.3.7-1 地下水同位体比の δD - $\delta^{18}O$ 関係

(3) アルカリ地下水の生成・進化

調査地域のアルカリ地下水は、Ca イオン濃度が高く、Mg イオン濃度が低い低温型蛇紋岩作用に伴う高アルカリ地下水生成の典型的な特徴があるため、横軸に $\log m_{H_4SiO_4}$ ($m_{H_4SiO_4}$ は H_4SiO_4 のモル濃度 [mol/l])、縦軸に $2pH + \log m_{Ca^{2+}}$ をとり、測定データをプロットして (図 1.3.7-2)、Ca イオン濃度の変化から水質変化について考察すると、Poonbato 地区の地下水以外はほとんどが地下水の $\log m_{H_4SiO_4}$ があまり変わらず、非晶質シリカとクリストバライトの溶解度の間にプロットされることから、これらシリカ鉱物の溶解度により $\log m_{H_4SiO_4}$ が決められていると判断できる。ケイ酸塩鉱物の溶解反応が進むと pH は上昇し、 H_4SiO_4 、Ca イオン濃度もともに上昇するが、過飽和条件となり他の鉱物の安定領域に入ると、 SiO_2 鉱物が生成し、 $\log m_{H_4SiO_4}$ が比較的平衡条件となる、一方、 $2pH + \log m_{Ca^{2+}}$ は一次鉱物の溶解反応により上昇する。すなわち、 $2pH + \log m_{Ca^{2+}}$ が鉱物 (岩石) - 水間の反応進行度を示すことから、水-岩石反応の程度は Poonbato 地区 > Manleluag 温泉保養地 > Bigbiga 地区 > Saile 鉱山であると解釈できる。

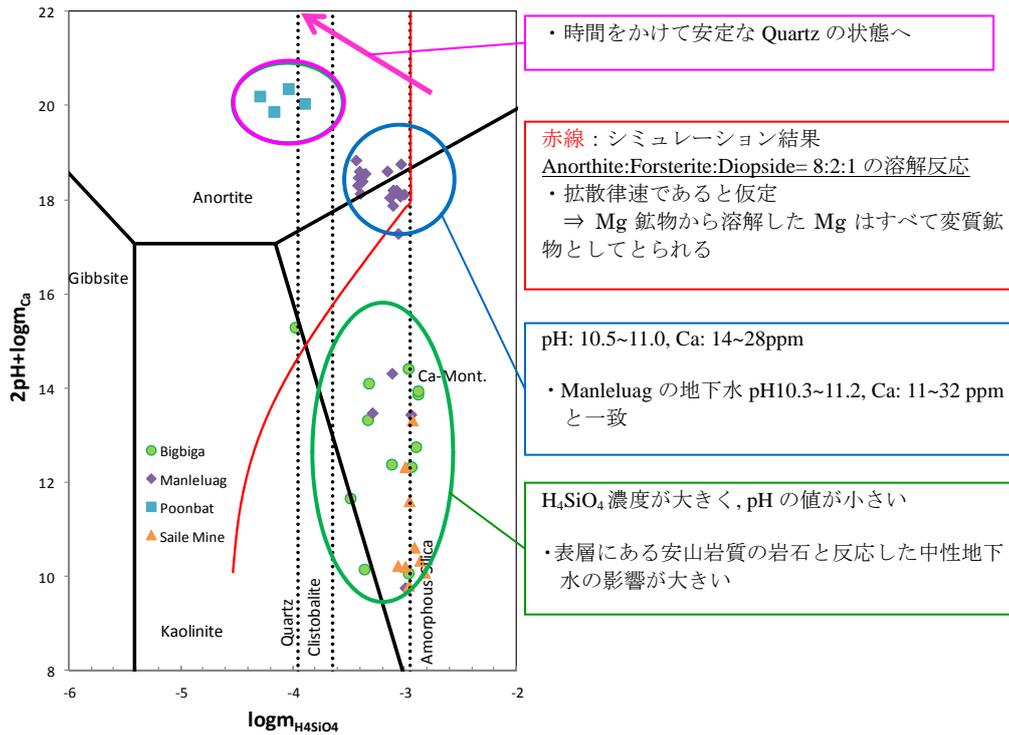


図 1.3.7-2 調査地域の地下水の $2\text{pH}+\text{logmCa}^{2+}-\text{logmH}_4\text{SiO}_4$ 関係図とシミュレーション結果

(4) 広域水理地質構造の概念モデルによる高アルカリ地下水の流動特性

Zambales 地域の地下水流動系について、湧水 (Manleluag 温泉保養地) およびベントナイト (Saile 鉱山) と高アルカリ地下水のコンタクト (Fossil Type) の発生や発達への寄与に着目しながら広域水理地質構造の概念モデルを構築した。図 1.3.7-3 に Manleluag 温泉保養地及び Saile 鉱山周辺における地下水流動系の概念図を示す。オフィオライトの蛇紋岩化作用によって生じた水と降雨起源の地下水が混合した高アルカリ地下水が、オフィオライト基盤岩中を流動しており、それが断層沿いに湧出している (Manleluag 温泉保養地)。一方ベントナイト層は透水性が小さいために遮水層として機能するため、浅い地下水帯においては降雨起源の成分で主に構成される中性に近い地下水が流動し、深層の高アルカリ地下水と分離された流動系を形成していると考えられる。ただし、高アルカリ地下水が断層沿いに上昇してベントナイト層と現在も接触している箇所は、まだ確認していない。

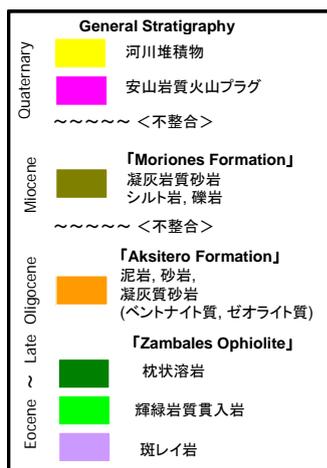
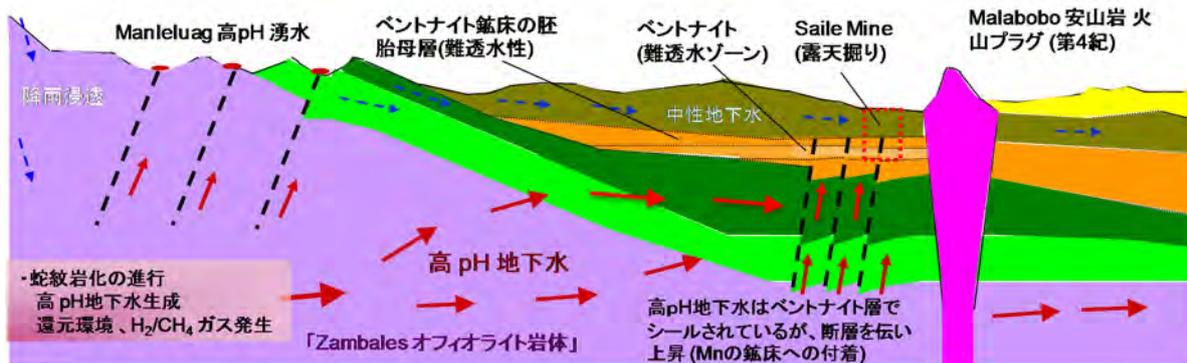


図 1.3.7-3 地下水流動系と水質形成の概念図 (Manleluag 温泉保養地 – Saile 鉱山)

1.3.8 高アルカリ地下水環境下におけるベントナイトのアルカリ変質反応

(1) トレンチ調査によるベントナイトー枕状溶岩接触部近傍の観察

基盤岩上部の枕状溶岩と Aksitero 累層との接触部の地質鉱物学的な状況を把握することを目的として、Saile 鉱山鉱区内において計 8ヶ所でトレンチ調査を実施した。

これらのうちトレンチ-1 では、枕状溶岩とベントナイト層の接触が確認された。また、トレンチ-1 は断裂系そのものを掘削（掘削方向が断層面に一致）していたことが底部の断裂系充填物の分析から明らかになった。その結果、1.3.2 で示したように断裂系充填物は外側が蛇紋石、内側が方解石であることを同定した（図 1.3.8-1A参照）。

また、トレンチ-5、トレンチ-6 でも枕状溶岩との接触が確認されたが、これらのトレンチでは、脈状の蛇紋石の充填物（図 1.3.8-1B）が枕状溶岩中に形成され、その脈状の充填物がベントナイト層の接触部まで達していることを確認した。これは断裂系から枝分かれした蛇紋岩化作用による高アルカリ地下水の経路であったことを示す。

ベントナイトの接触部近傍には、最上部の玄武岩質枕状溶岩の表面（コンタクト）からベントナイト層へ約 40cm 程度の幅の白色変質部（Bleached Zone）が観察される。この白色変質部は枕状溶岩の波状的な表面（コンタクト）からほぼ等距離の幅で分布していることから、物質移行は拡散支配であることが推察される。高アルカリ地下水（Ca-OH タイプ）が、基盤岩である Zambales オフィオライトの断裂系を流路として浸水し、ベントナイトへ拡散場支配のもと上昇

したことが考えられ、そのような高 Ca 濃度の地下水がベントナイト層に影響を及ぼした領域と考えられる。その上部は高アルカリ地下水の影響を受けていない未変質部のベントナイトである。

Bigbiga のトレンチ 1 (BBT01) においては (図 1.3.8-1◎参照)、Saile 鉱山では確認できなかった、断裂系が Aksitero 累層の下部堆積層を貫いている状況を確認することができた。

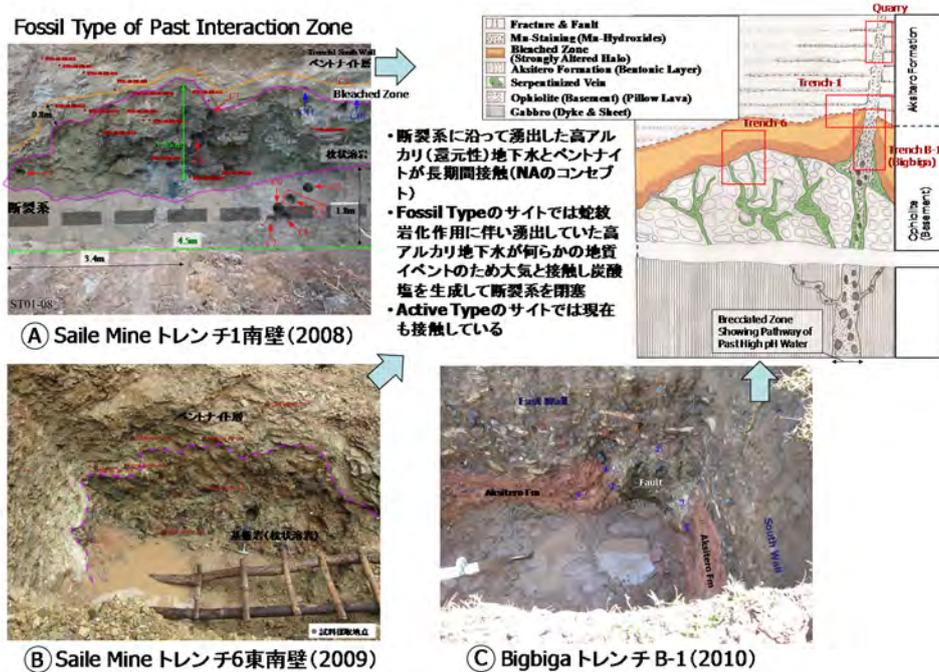


図 1.3.8-1 トレンチの観察結果と『Fossil Type』の模式断面図

(2) 変質部の鉱物組み合わせと基本物理特性

変質部と未変質部のベントナイトの鉱物組成の変化を確認するため、基盤岩との接触部からサンプリング間隔を細かくとった試料の XRD 分析を実施した。

図 1.3.8-2 にトレンチ-5 の南西面における分析対象サンプルのトレンチ断面 (南面および北面) における採取位置、図 1.3.8-3 にその XRD 分析結果を示すが、スメクタイトと沸石に加え石英、斜長石も見られるが、変質部近傍ではスメクタイトしか同定されず、ベントナイトのアルカリ変質による鉱物組成の変化はほとんど見られなかった。

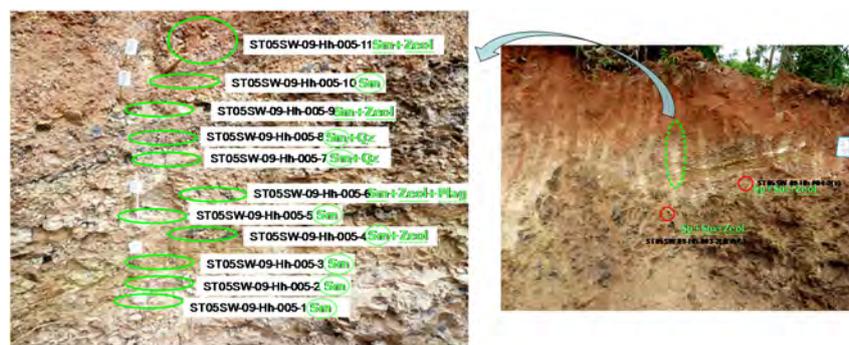


図 1.3.8-2 サンプル採取位置と鉱物組成 (トレンチ-5 の西南壁)

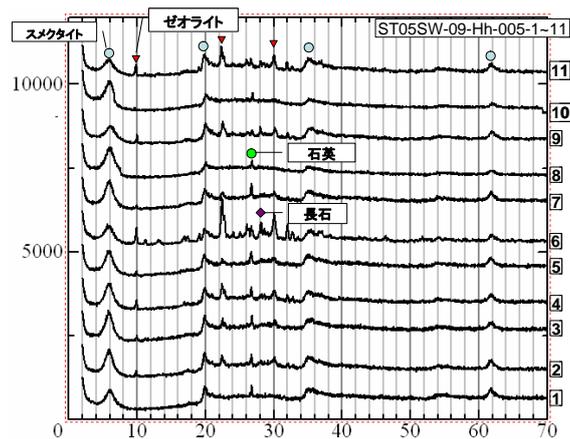


図 1.3.8-3 XRD プロファイル (トレンチ-5 の西南壁)

高アルカリ地下水との相互作用があった可能性が高い白色変質部 (境界部) のベントナイトと接触部から十分離れた高アルカリ地下水がほとんどないと考えられる (未変質帯の) ベントナイトの基本物理特性をしらべるため、境界部 (Bleached Zone) から 3 試料 (ST01-11-RH-001~003)、未変質帯から 2 試料 (ST01-11-RH-004~005)、採石場露頭」のベントナイト層から 1 試料を採取し、基本物理試験、CEC 試験、膨潤力試験と XRD 分析を実施した。

図 1.3.8-4 に試料採取位置と XRD プロファイルを示す。トレンチの試料はすべてスメクタイトが含まれているが、未変質帯 2 試料 (ST01-11-RH-004~005) はスメクタイト以外の随伴鉱物の少ないベントナイトだったのに対して、境界部の 3 試料 (ST01-11-RH-001~003) は方解石を含むベントナイトであった。表 1.3.8-1 に示す基本物性の試験結果から、未変質帯のベントナイトはスメクタイト含有率が 58.7%~62.7%であるのに対して、境界部のベントナイトはスメクタイト含有率が 30.7%~36.0%と明らかに低かった。これは、未変質帯のベントナイトがスメクタイトの純度が高いのに対して、境界部や採石場のベントナイトは方解石やゼオライトを含むためであると考えら、これが鉱物組成に強く依存していることがわかる。

次に他の基本物性について、ベントナイトの本質的な特性と関連のあるスメクタイト含有率を基準に図 1.3.8-5 のように整理し、その傾向を調べた。その結果、CEC および膨潤力については、図 1.3.8-5 (上の 2 図) に示すように明らかにスメクタイトの含有率が多いほどそれらの値は高い傾向をしめす。これは当然のことながら、スメクタイトの含有量が多いほど高い値を示し、未変質帯ベントナイトの単位質量あたりのスメクタイトの含有率が高いことを示す。一方、境界部の方解石を含むベントナイトは、図 1.3.8-5 (下の 2 図) に示すように、未変質帯ベントナイトに比べ、スメクタイト含有率が小さく、間隙率が小さく (乾燥密度が大きく)、含水比が小さい傾向が明確に示された。これらの物理特性は単位体積当たりの値であり、境界部のベントナイトのスメクタイト含有率が小さいが一方で間隙率が小さくなっていることは、ベントナイトと反応していた高アルカリ地下水との相互作用によるスメクタイトの変質が大きく影響したのではなく、ベントナイトの間隙に方解石が沈殿したことがその理由と考えられる。すなわち、境界部の方解石を含むベントナイトであっても単位体積あたりのスメクタイトの含有量は大きな変化がないと考えられる。

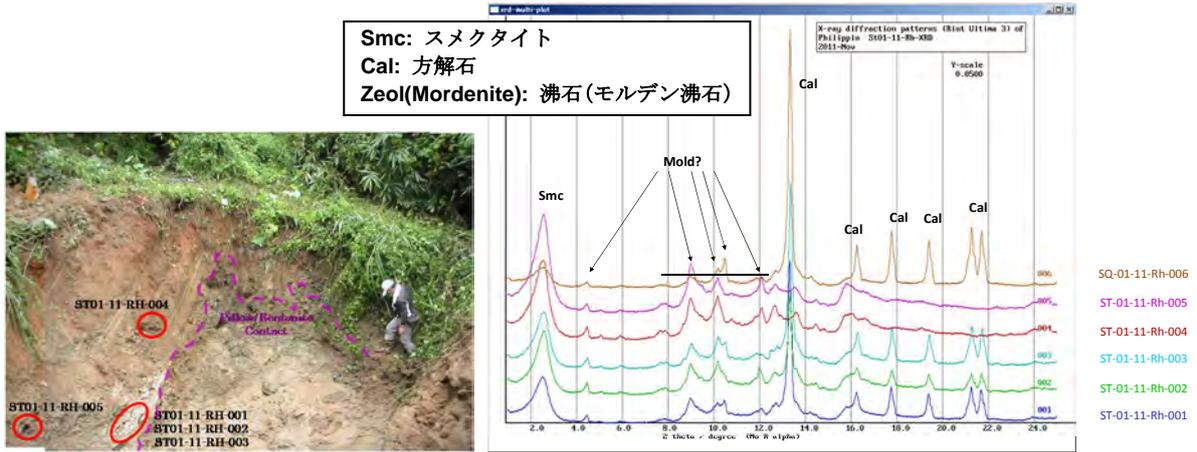


図 1.3.8-4 試料採取位置 (左) と XRD プロファイル (右) (トレンチ 1 南壁)

表 1.3.8-1 ベントナイトの基本物性試験結果

分析項目	クニゲルV1 (Na型)	MX-80 (Na型)	クニボンド (Ca型)	Saile Mine (Ca型)	Saile Mine 原鉱					
					ST-01-11- Rh-001	ST-01-11- Rh-002	ST-01-11- Rh-003	ST-01-11- Rh-004	ST-01-11- Rh-005	SQ-01-11- Rh-006
SiO ₂	70.2 ※1	60.0~62.0 ※1	66.5	51.64 ※6	40.37	39.31	25.75	64.40	64.47	63.66
Al ₂ O ₃	14.2 ※1	21.0~23.0 ※1	14.8	12.04 ※6	10.10	4.47	5.92	16.31	15.73	14.39
Fe ₂ O ₃	2.48 ※1	3.0~4.0 ※1	3.02	7.31 ※6	6.19	6.03	4.68	7.02	7.40	9.34
FeO	- ※1	- ※1	-	- ※6	32.80	29.61	48.68	3.54	3.43	3.48
CaO	2.04 ※1	0.1~0.7 ※1	2.48	2.56 ※6	3.49	3.33	2.62	4.31	4.31	3.51
MgO	2.16 ※1	2.0~3.0 ※1	3.98	2.98 ※6	0.62	0.61	0.46	0.45	0.67	0.94
Na ₂ O	2.48 ※1	2.0~3.0 ※1	0.34	0.43 ※6	0.47	0.42	0.42	0.72	1.05	0.88
K ₂ O	0.24 ※1	0.4~0.5 ※1	0.55	0.79 ※6	0.64	0.61	0.41	0.62	0.54	0.75
TiO ₂	- ※1	- ※1	0.22	0.73 ※6	0.28	0.26	0.46	0.31	0.31	0.56
MnO	- ※1	- ※1	0.01	- ※6	0.23	0.00	0.19	0.25	0.26	0.32
P ₂ O ₅	- ※1	- ※1	0.02	- ※6						
その他	- ※1	- ※1		- ※6						
CEC (meq/100g)	52 ※2	79 ※2	91.2 ※10	105.15 ※6 40.11	53.6 ※8	54.3 ※8	37.9 ※8	104.1 ※8	69.6 ※8	98.8 ※8
膨潤力 ml/2g	18 ※3 20 ※9	26 ※3	7 ※9		5 ※8	5 ※8	4 ※8	9 ※8	6 ※8	8 ※8
メチレンブルー吸着量 (mmol/100g)	82 ※3 87 ※9	110 ※3	120 ※9		52 ※7	54 ※7	46 ※7	88 ※7	94 ※7	36 ※7
含水比 %					20.1 ※7	20.4 ※7	17.2 ※7	64.8 ※7	41.7 ※7	18.6 ※7
乾燥密度 g/cm ³					1.601 ※7	1.524 ※7	1.669 ※7	0.908 ※7	1.121 ※7	1.607 ※7
真密度 g/cm ³	2.633 ※9		2.624 ※9		2.590 ※7	2.553 ※7	2.686 ※7	2.496 ※7	2.517 ※7	2.477 ※7
間隙率 %					38.2 ※7	40.3 ※7	37.9 ※7	63.6 ※7	55.5 ※7	35.1 ※7
スメクタイト含有率 %	54.7 ※3 ※4 58.0 ※9	73.3 ※3 ※4	80.0 ※9		34.7 ※7	36.0 ※7	30.7 ※7	58.7 ※7	62.7 ※7	24.0 ※7

※1 PNC SN8410 89-033

※2 1: Ishikawa et al., 1990 ; 2: 伊藤ほか, 1993 ; 3: Lajudi et al., 1996 (第2次TRUレポート)

※3 原環センター技術報告書RWMC-TRJ-10002_2011

※4 H21年度 放射性廃棄物共通技術調査等 放射性廃棄物重要基礎技術研究調査報告書 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター

※5 H22年度 放射性廃棄物共通技術調査等 放射性廃棄物重要基礎技術研究調査報告書 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター

※6 Saile鉱山公式パンフレット

※7 クニミネ工業試験報告書 KL S-Rep No.1-482

※8 クニミネ工業試験報告書 KL S-Rep No.1-612

※9 JAEA-Research 2011-014

※10 JNC TN8410 98-021

境界部

未変質帯

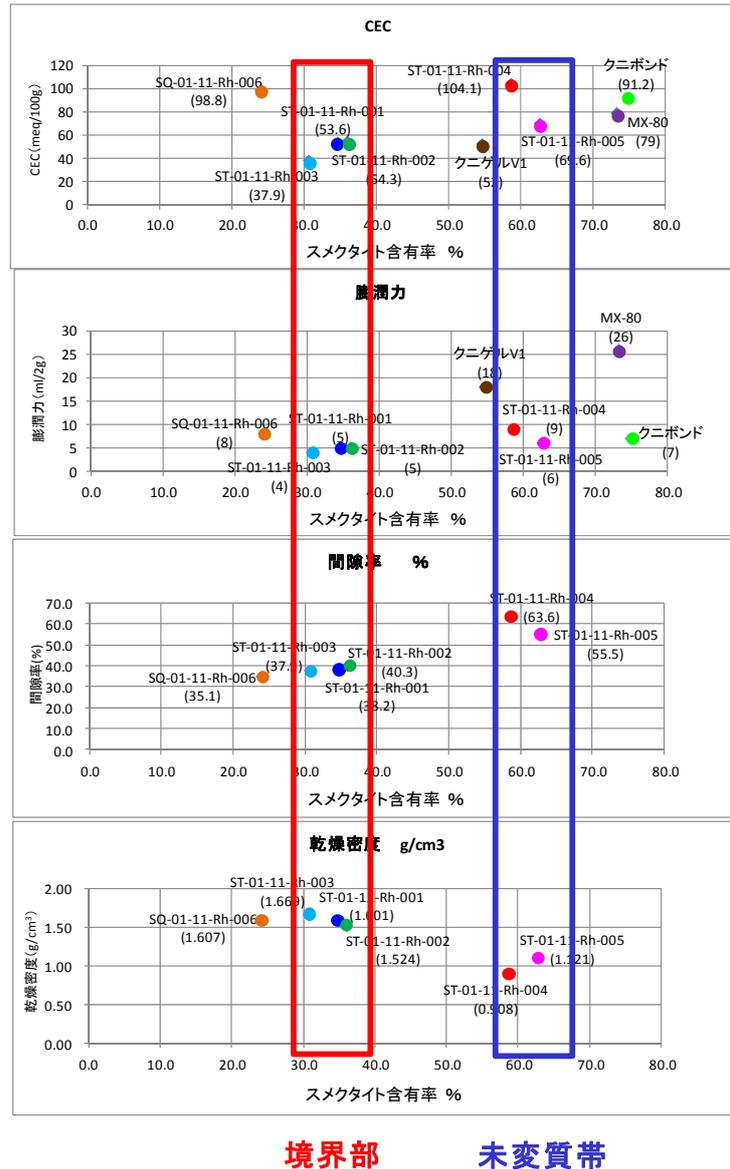


図 1.3.8-5 スメクタイト含有率と各基本物性との関係

(3) ベントナイト-枕状溶岩の界面の鉱物学・鉱物化学的特性

ベントナイトと基盤岩との接触部を含む領域の微細構造の観察のため、枕状溶岩中の亀裂充填物がベントナイト層まで達している箇所（図 1.3.8-6(a)）をサンプリングし、X線CT、顕微鏡観察（TEM, FESEM-EDS）や鉱物分析・化学分析（XRD, EPMA）に基づき、この界面で生じたアルカリ変質反応プロセスに係わる地球化学的、鉱物学的特性を観察した。

元素マッピングによる化学分析の解析結果から、この界面において、枕状玄武岩からベントナイト層へ、枕状玄武岩-枕状玄武岩の未変質ガラス-枕状玄武岩の変質ガラス-変質ベントナイト-鉄濃集帯（バンド）-未変質ベントナイトが観察された（図 1.3.8-7）。この界面全体の幅は約 1cm で、アルカリ変質反応が生じた反応幅はわずか約 5mm 程度である。

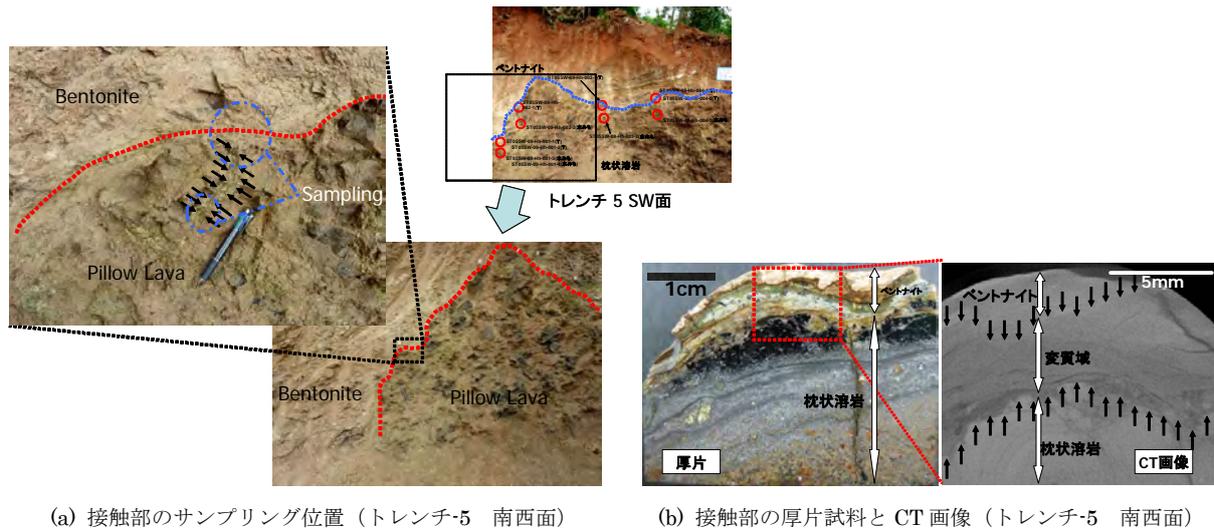


図 1.3.8-6 ベントナイトー枕状溶岩接触部のサンプリング (トレンチ-5 西南壁)

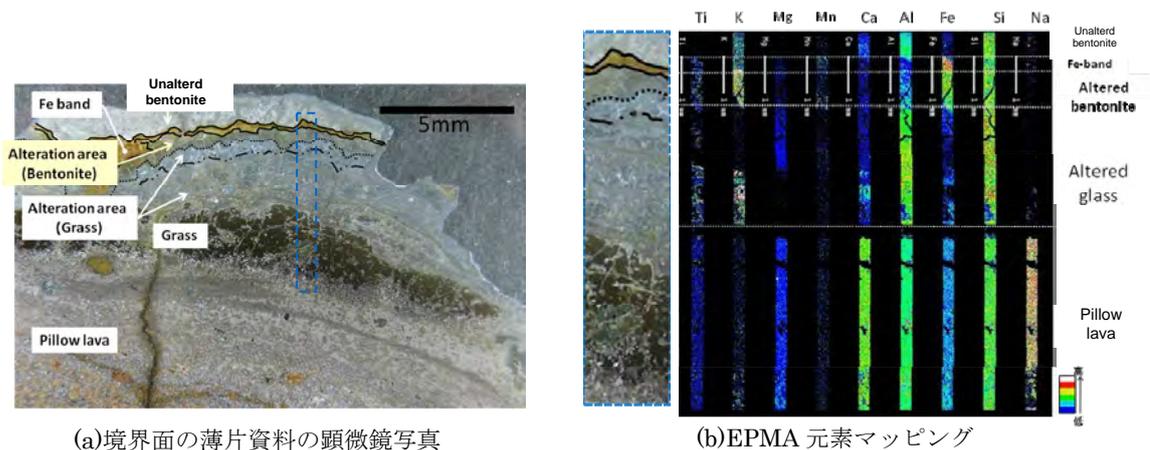


図 1.3.8-7 トレンチ-5 のベントナイトー枕状溶岩の界面の顕微鏡観察と元素マッピング

アルカリ変質反応に関与したベントナイトー枕状玄武岩の界面における鉱物組み合わせ・組成・共生・組織などについて整理した結果 (表 1.3.8-2) を示す。なお、④変質ベントナイトゾーンでは、元素マッピングの結果、 $K \cdot Fe$ の濃集に著しい反比例の関係が顕著なので (図 1.3.8-8)、内側 (枕状玄武岩の変質ガラスゾーン) を「 K -rich subzone」に、外側を「 K -poor subzone」に細区分した。

界面でのモンモリロナイトは Fe 型化が進み、 Fe -モンモリロナイトが優勢であるが、鉄濃集帯では Fe -サポナイトとノントロナイトが同定された (図 1.3.8-9)。沸石については、大部分が輝沸石で少量の斜プチロル沸石が観察された。特に、鉄濃集帯は高密度で不規則な形状を示し、その最大幅は約 $3mm$ 程度であるが、二次鉱物としては粒状組織の針鉄鉱と羽毛状のノントロナイトが共生し (図 1.3.8-10)、さらに、アルカリ変質反応により生成したカリ長石 (半自形から自形)、沸石 (恐らく、輝沸石と斜プチロル沸石) とシリカ鉱物 (恐らく、クリストバライト; 自形/アモ

ルファス) が同定された (図 1.3.8-11)。このノントロナイトは、アルカリ環境のもと Fe-モンモリロナイトが酸化環境で形成されたものと示唆される。それはノントロナイトが必ず針鉄鉱と共生していることから酸化作用により生成されたものと解釈できる。しかし、ノントロナイトの生成については、低温 (100°C)、pH 8.5~9.5 の条件下での合成が報告[41][42]され、アルカリ変質反応であるかは断定できないが、少なくともその変質反応を否定するものではない。

図 1.3.8-12 の X 線 CT 像から、鉄濃集帯と変質ベントナイト領域および玄武岩質枕状溶岩には明らかな密度変化が確認される。それは、変質ベントナイト領域と枕状溶岩のコンタクト部に空隙が観察されることである。これは前述した通り、変質ベントナイト領域では、Ca-ス멕タイトの溶解や、レリクト鉱物である斜長石の溶解-沈殿反応によるス멕タイトの生成など前駆鉱物の溶解・沈殿 (晶出) による体積減少に伴う空隙の形成結果、密度変化が生じたものと考察できる。従って、変質ベントナイト領域の密度は、未変質ベントナイト領域や鉄濃集帯よりも小さく、特に、鉄鉱物 (針鉄鉱) の沈殿による鉄濃集帯の形成に伴い、密度の大きい領域が観察される。この現象は、変質鉱物生成の化学反応や物質移動を効果的に阻止する働きをする Clogging (閉塞) 現象の物理的・化学的な場の形成を考える上で重要な地球化学的プロセスである。

表 1.3.8-2 アルカリ環境下のベントナイト-枕状溶岩界面の鉱物共生関係

Minerals Columnar Section	Characteristic minerals														Remarks		
	Smectite				Zeolites			Feldspar		Silica Minerals		Opaque Minerals					
	Ca-Mont.	Fe-Mont.	Fe-Sap.	Mont.	Heu.	Clino.	Mor.	K-Feld.	Plag.	Crystal	Amorph.	Goethite	Hem-Itm.	[Fe-Mn-Ca Phase]			
Unaltered Bentonite	○				○	○	○		<Relict> ○	○							<ul style="list-style-type: none"> * Bleached Zone of 30cm wide from the interface (Pl) * Same distance from upper boundary of pillow lava
Iron Concentration Zone (Fe-Band)		○※ (Diocahedral)	<Nodulated> ○ (Tricoahedral) Mg→Fe ²⁺	○ (Diocahedral) Al→Fe ²⁺ [Oxidation]	<Rectangular> ○	○		<Irregular> ○			<halo> ○	<Annular / Ringlike> ○		<Filmlike> ○			<ul style="list-style-type: none"> * Fe-Mn phase * Clogging (Mont. + Goethite: 1~5mm wide, High density, High pH) * Fe-Mn Goethite
Altered Bentonite (K-I)	K-poor subzone	○※※ (Diocahedral) Fe ²⁺ (Octahedral layer)	○ [Reduction]						<Relict> ○		○	○		○			<ul style="list-style-type: none"> * K-Low Zone → Fe-Rich * Plag (Relict) → Sm, Low density
		<Pillowlike> ○ (Diocahedral) Fe ²⁺ (Octahedral layer)	○		○	○		<fine grained> ○	<Relict> ○		○	○					
Altered Basaltic Glass (K-II)	○				○	○			○								
Basaltic Glass	Tachylite														Alteration minerals Mafic → Serpentine, Iddingsite, Saponite, Chlorite		
Pillow Lava	Olivine Basalt														Felsic → Smectite, Zeolites (Calcite)		

※ $Ca_{0.28}Na_{0.01}(Fe^{2+}_{1.09}Al_{0.66}Mg_{0.46}Ti_{0.07}Mn_{0.02})Si_4O_{10}(OH)_2$ [(060): 0.149~0.150 nm, Lattice spacing: 1.0~1.1 nm]

※※ $Ca_{0.11}Na_{0.05}K_{0.01}(Fe^{2+}_{1.2}Al_{0.62}Mg_{0.51})Si_4O_{10}(OH)_2$ [(060): 0.151 nm, Lattice spacing: 1.0 nm]

[Assumption for calculation of chemical formula]: ① Possible exchange for only octahedral site, ② All Si for tetrahedral site, ③ All Mg and Fe for octahedral site, ④ Rest of cation for interlayer of cation
Mont.: Montmorillonite, Sap.: Saponite, Nont.: Nontronite, Heu.: Heulandite, Clino.: Clinoptilolite, Mor.: Mordenite, K-Feld.: K-Feldspar, Plag.: Plagioclase

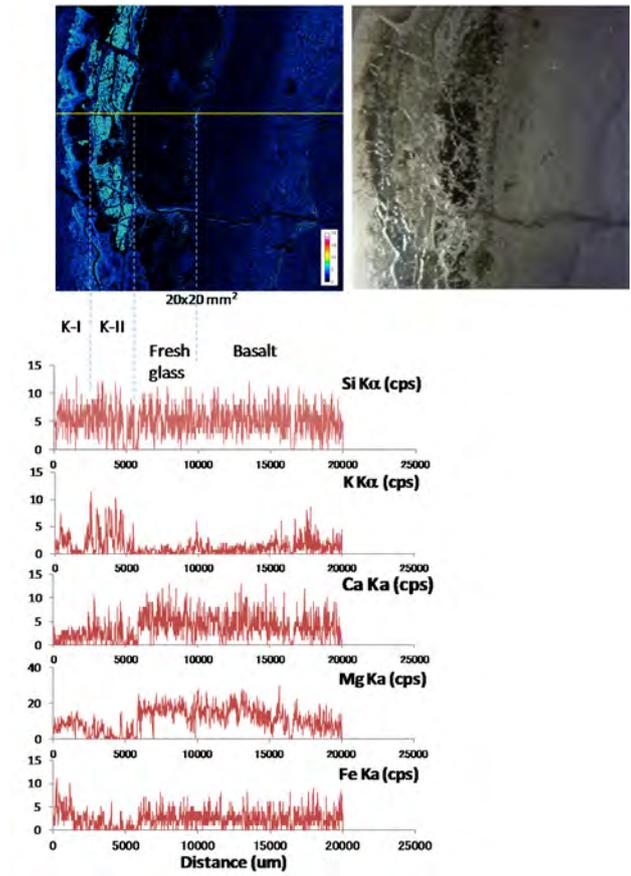


図 1.3.8-8 変質分帯を横切る Si-K-Ca-Mg-Fe 元素プロフィール

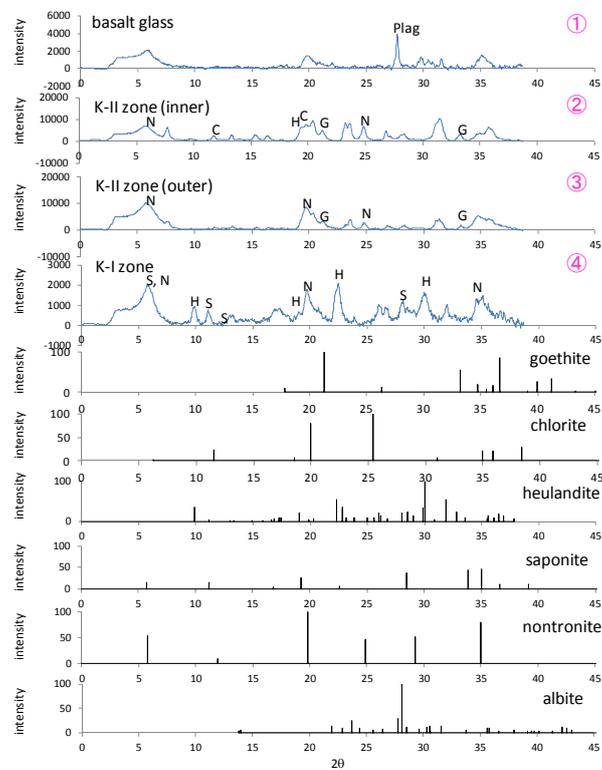


図 1.3.8-9 マイクロ XRD 測定結果と参照ピーク

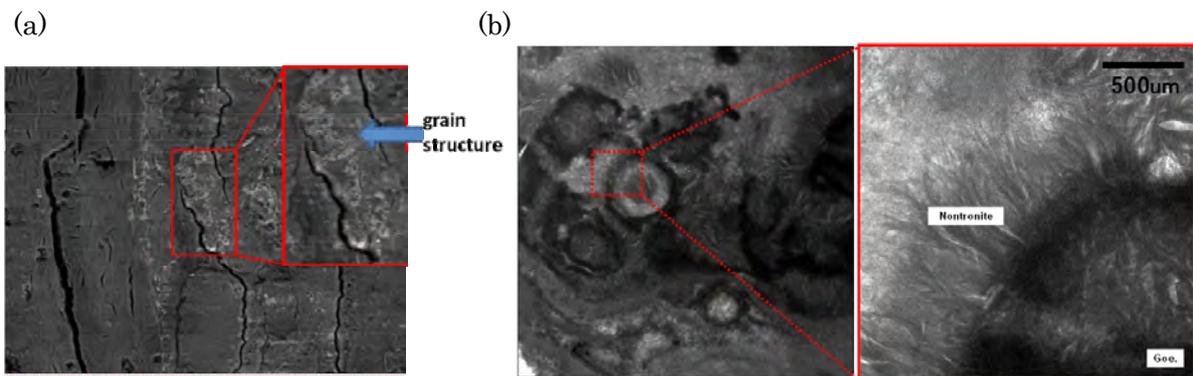


図 1.3.8-10 鉄濃集帯の SEM 画像と鉄濃集帯中のノントロナイトと針鉄鉱の TEM 画像

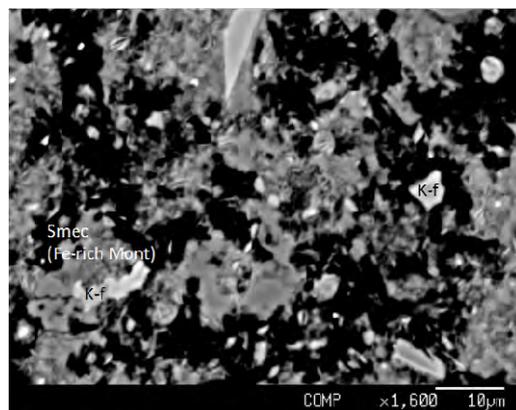


図 1.3.8-11 鉄濃集帯のカリ長石と Fe-モンモリロナイトの特徴的な産状



図 1.3.8-12 変質ベントナイト領域の X 線 CT 像

- (4) アルカリ地下水環境下でのベントナイトの長期的な変質生成鉱物の変遷シナリオ
ベントナイトのアルカリ変質反応の地球化学的プロセスとしては、モンモリロナイト層間内で

の陽イオン交換反応 (Fe 型化)、モンモリロナイトの溶解-沈殿 (結晶化) 反応による二次鉱物の生成および酸化-還元反応が考えられる。また、アルカリ地下水 (溶液) の組成は、陰イオンとして OH⁻、(Cl⁻)、陽イオンとして Si、Ca²⁺、(Mg²⁺、Fe²⁺、Fe³⁺)、Al³⁺、Na⁺、K⁺、とし、pH は 11 以上を想定する。

ベントナイトの出発物質である遠洋性堆積物の火山砕屑性堆積物が、間隙水としての古海水 (地層水) と反応しながら埋没・続成作用により生成された初生モンモリロナイトは、Na-モンモリロナイトであると想定される。その後、オストワルド熟成段階を経ながら Ca 型化が進み、Ca-モンモリロナイトとその後断裂系から浸出するアルカリ溶液との反応が生じた。

Fe 元素の顕著な化学的挙動については、還元環境下で玄武岩 (枕状溶岩) の苦鉄質鉱物 (カンラン石、輝石または不透明鉱物) に含有する Fe 元素がアルカリ溶液に溶出し、細粒化された玄武岩質ガラスの最外縁部に浸出・移動した後、2 価の Fe イオンの一部が、スメクタイトの 2・八面体型の八面体層取り込まれて Fe 型化 (Fe-スメクタイト) し、一部は溶解反応を伴い Fe-サポナイトとして沈殿し、その後、酸化環境下で余剰の 3 価の Fe が、ノントロナイトと針鉄鉱を晶出 (沈殿) させ、特徴的な鉄濃集帯を形成したものと考えられる (図 1.3.8-13)。

また、上記の Fe 元素が影響する反応と並行して、典型的なアルカリ変質反応として、モンモリロナイトの溶解-沈殿 (結晶化) 反応により、沸石 (輝沸石と少量の斜プチロル沸石) とカリ長石、およびシリカ鉱物 (恐らく、クリストバライト) が生成されたものと解釈できる。

最後に、アルカリ変質反応によるベントナイト-沸石の長期的な変質生成鉱物の変遷シナリオを俯瞰し、特に、スメクタイトの鉱物学的な変遷シナリオを青色部分で示す (図 1.3.8-14)。

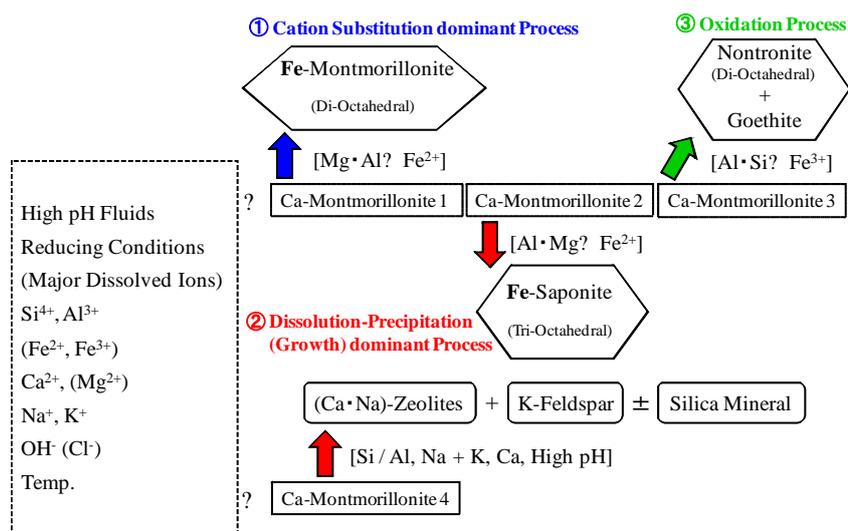


図 1.3.8-13 アルカリ環境下の Ca-モンモリロナイトの鉱物学的変遷過程

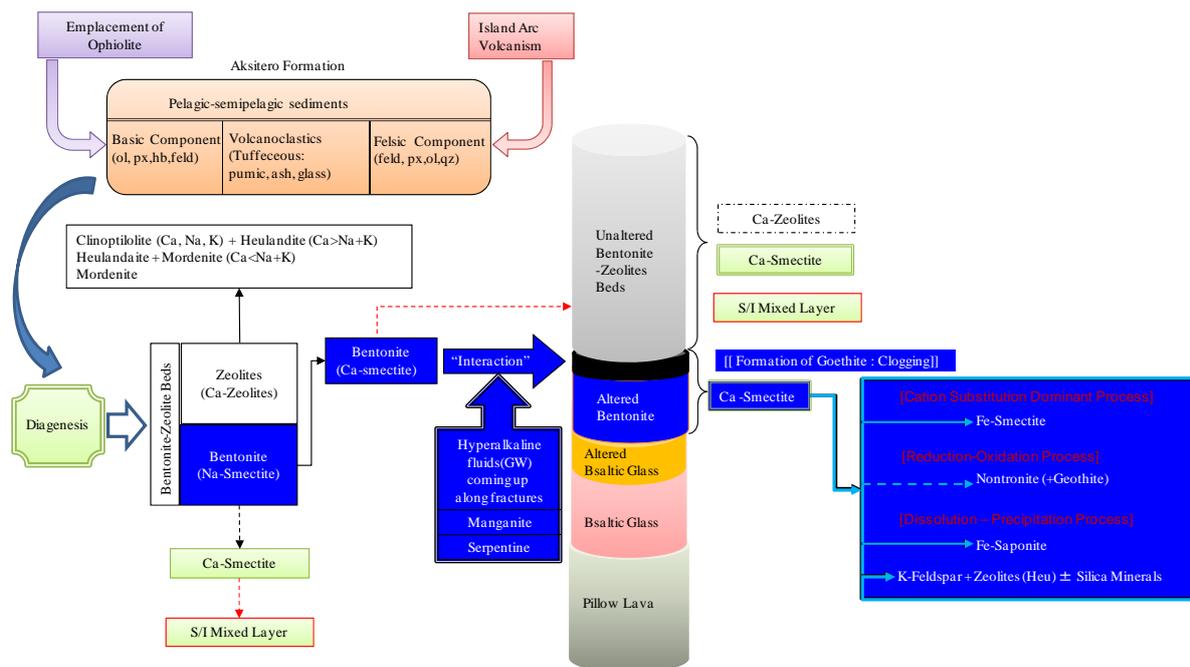


図 1.3.8-14 アルカリ環境下のベントナイトの長期変質における鉱物変遷シナリオ

1.3.9 高アルカリ地下水とベントナイトの反応時間スケール

断裂系充填物の年代値は、TL 法年代測定により方解石が数 10ka オーダーであったのに対し(図 1.3.9-1)、K-Ar 法による蛇紋石の年代値は約 95Ma であった。

蛇紋石の年代測定については、断裂系試料から複雑に混在する鉱物を分離し、純粋な蛇紋石を抽出できなかったことから、この年代値は原岩の年代と変質年代の中間を示すものと思われる。ただし、Zambales オフィオライトの生成年代については、斑レイ岩中のジルコンの U-Pb 法年代から 44~48Ma[32]、堆積層については超微化石による相対年代の評価から[31]、Aksitero 累層(ベントナイト)で 37.2~23.0Ma (後期始新世~前期漸新世)、Moriones 累層で 23.0~15.9Ma (前期中新世)であり、それに比べると蛇紋石の年代値はかなり古い年代であり、蛇紋岩化作用に伴う高アルカリ地下水の湧出時期を示しているとは考えにくく、原岩年代がどのタイミングを示すものであったかの判断も難しい。

一方で、方解石の TL 年代や Aksitero 累層や Moriones 累層の堆積年代と Saile 鉱山 Quarry の断裂系が Aksitero 累層を切っているのに対し、不整合に上部に堆積している Moriones 累層を切っていないことから、断裂系が生じた際に高アルカリ地下水の湧水があったとすると、かなりの長期間に渡り(少なくとも 23Ma 以前~数十 ka まで)高アルカリ地下水がベントナイト層と接触していた可能性が考えられる。

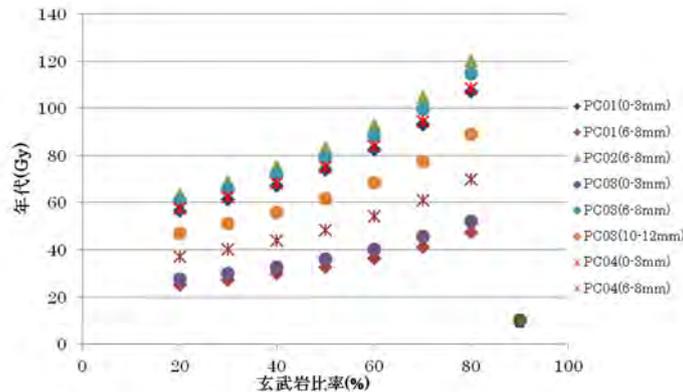


図 1.3.9-1 断裂系充填物の玄武岩比率と方解石の TL 年代

1.3.10 Fossil Type のナチュラルアナログによるベントナイトの長期健全性評価

ベントナイトの長期健全性を評価する上で、アルカリ地下水環境下でのベントナイトのアルカリ変質反応による健全性への影響については、フィリピンの Fossil Type の NA の玄武岩質枕状溶岩と直上のベントナイト層の境界部で観察される変質帯を対象に、化学反応と物質移行（マスバランス）の連成としての地球化学的挙動を地質学・岩石鉱物学・鉱物化学、溶液化学など、およびベントナイト試料の実測物性値などを考慮して、下記の検討項目に沿って評価する。

(1) 変質部 (Bleached Zone) の規模 (範囲と程度)

変質部 (Bleached Zone) の範囲としては、この高アルカリ地下水の浸水フロント（反応フロント）がオフィオライトの最上部の玄武岩質枕状溶岩の表面（コンタクト）からベントナイト層へ約 40cm 程度の幅の変質部が観察される。また、この変質部は枕状溶岩の波状的な表面（コンタクト）からほぼ等距離の幅で分布していることから、高アルカリ地下水（Ca-OH タイプの水質）が、基盤岩である Zambales オフィオライト（超塩基性岩）の断裂系を流路として浸水し、ベントナイトには拡散支配で移行したと考えられる。

変質部の変質の程度については、境界部の界面に限られるアルカリ変質帯を除いて、Ca-スメクタイトと随伴鉱物として主に輝沸石と斜プチロル沸石で構成されており、不均質に方解石が見られる部分を除き、未変質部との鉱物組成、CEC、膨潤力の顕著な違いは見られない。

一方、界面のみ観察されるアルカリ変質帯は、顕微鏡スケールで 5mm 程度の幅である。このアルカリ変質帯は、アルカリ地下水（間隙水）の主要溶存イオン（Si, Al, Mg, Fe<Mn>, Ca, K, Na, OH, <Cl>）との陽イオン交換反応や溶解-沈殿反応および、還元-酸化反応により、Ca-スメクタイトの Fe 型化（Fe-スメクタイト、サポナイト）と還元-酸化反応によるノントロナイトと共生鉱物として針鉄鉱（ゲーサイト）および、カリ長石、Ca-沸石（主に輝沸石と少量の斜プチロル沸石）とシリカ鉱物で構成されている。

(2) ベントナイトのアルカリ変質帯での物質移行

ベントナイトのアルカリ変質帯が、5mm程度に限定されている最大の要因は、ノントナイトと共生関係にある針鉄鉱の産状である。これらの両鉱物が、変質ベントナイト（界面に近い部分）や未変質ベントナイトよりも密度の高い濃集帯を形成（閉塞現象：Clogging）し、その結果、物質移行を阻止する役割を担うことになり、アルカリ変質帯の広がりを限定することになったと考えられる。

(3) ベントナイトの実測物性値

人工バリアの構成要素の一つであるベントナイトの安全機能に影響を与えると想定されている基本物性値について、トレンチの境界部（変質部：Bleached Zone）と境界部から十分離れたCa溶液の影響が見られない未変質部のベントナイト試料の実測値から評価する。

ベントナイト試料のス멕タイト含有量については、ベントナイトの未変質部では58.7~62.7%であったが、ベントナイトの境界部は30.7~36%であった。鉱物分析の結果、いずれの試料もス멕タイトを多く含むが、物性試験を行った境界部の試料は方解石が含まれていた。CECや膨潤力はス멕タイト含有率と正の相関があるため、未変質部の試料のほうが（緩衝材の機能として）いい傾向を示すが、乾燥密度が増加していることからCECや膨潤力が単位重量当たりの特性値であることを考えると、緩衝材としての機能が著しく低下したとはいえない。ス멕タイトの含有率についても、間隙等に方解石が生成したために相対的に低くなっているが、ス멕タイトが他の鉱物に変質して含有量が減少したものではない。

間隙率と乾燥密度は物質移行に極めて影響の高い物性であるが、これらの物性は境界部の方が間隙率が小さく（乾燥密度は高い）未変質部の方が大きい（乾燥密度は低い）。この理由もベントナイトの間隙に方解石が充填したためと考えられるが、方解石の生成はアルカリ変質とはそのメカニズムは異なるが、ベントナイトが変質した境界部のほうが未変質部より逆に物質移行を抑制する傾向が見られることは、長期的にベントナイトの変質が進まない方向に現象が進むという点で界面のアルカリ変質挙動と共通である。変質により物質移行が制限されることをこのNAが傍証している。

(4) マクロ的なフィールドの事実

これらの諸物性はトレンチ-1と採石場でしか取得していないが、Saileベントナイト鉱床でベントナイトが大規模にアルカリ変質している露頭は一切見られないことは紛れもない事実である。なぜなら、変質しているところがまさにNAサイトであり、調査の前半はそのような場所を見つけることこそが目的の一つであったため、トレンチ調査も含めSaile鉱山での露頭の地質調査は多くの時間を費やし詳細に行ったが、基盤岩との境界部などで大規模に変質している場所を見つけることはできなかった。

さらに、断裂系が発達し、今現在も活発に湧出している高アルカリ地下水が存在するオフィオライトの基盤の上にベントナイト層が存在し、また、それが過去にその地下水と接触していたにもかかわらず、処分場の評価期間をはるかに超える長期間ベントナイト鉱床は維持されている。

(5) ベントナイトの長期健全性の評価

以上のことから、アルカリ地下水環境下のベントナイトは、その規模、変質鉱物の生成プロセスおよび、基本物性等から考察し、ベントナイト系緩衝材に求められる諸特性の著しい劣化が確認されないことから、ベントナイトの長期健全性が保たれるものと評価できる。

1.3.11 今後の展望と開発戦略

昨年度までのフィリピン国ルソン島北西部での調査で確認した **Fossil Type** のナチュラルアナログについては、ベントナイトのアルカリ変質挙動の天然事例としてその過程が明らかにされた貴重な一例であるため、特に地球化学解析モデル再現性の確認やパラメータや条件設定の最適化の検討を行うべきである。また、アルカリ変質のプロセスを考えると、**Fossil Type** でみられた現象が一般的に生じていると考えて問題ないが、界面現象の直接の証拠はトレンチで得られた2つの薄片だけととらえられる。そのような事例を積み重ねることで、ナチュラルアナログの現象理解が深まると共に一般への長期安全性説明の根拠としての重みが増す。したがって、**Fossil Type** の事例を積み重ねることも今後の選択肢に入れておく必要はある。

一方、**Fossil Type** のサイトでの評価が困難な問題でも **Active Type** のサイトが見つければ大きく進展が見込める可能性があることから、**Active Type** のサイトのナチュラルアナログの探査を中心にフィールド調査を展開し、サイトが確認されたら、**Fossil Type** のナチュラルアナログ調査で得られた知見や課題解決に対処できる新たな方法を導入して、詳細な調査を実施すべきと考える。

今後、候補地である **Bigbiga** 地区での最重要調査は、「**Active Type**」の露頭発見であり、その露頭発見のために、前述したような不可欠な前提条件としての3つの探査要素を整理した。

この「**Active Type**」の露頭発見の可能性の高い有望な **Bigbiga** 地区で効率的な探査をする上で、地質学的特性・岩石鉱物学的特性・地質構造学的特性や、水理・地化学的特性などを考察・評価して、探査戦略を明確にすることが必要である。

ここでは、これらの探査要素の解決のための考え方とその実施のための具体的な探査手法を下記に示す。

[地下構造解析のための地上物理探査の実施]

Bigbiga 地区は、典型的な「オフィオライトの岩石学的モデル」で特徴づけられ、その地下構造は、深部から地表に向けて、超塩基性火成岩（海洋マントル）から塩基性火成岩（海洋地殻）で構成されている **Zambales** オフィオライト基盤岩とそれを整合に被覆する遠洋・深海性堆積物（**Aksitero** 累層）が累重しており、これらの両者である火成岩と堆積岩は、基本的に層状構造を示している。

また、これら両者（火成岩と堆積岩）の岩石物性（密度、熱伝導率、比抵抗値、弾性波速度など）は、明瞭な相違（物性のコントラスト）があるために、地下構造を解析するのに物理探査手法が好都合で、かつ効率的である。特に、地層の分布、断裂系・変質帯・風化帯の有無、地下水状況などの地下構造を解析する上で地上物理探査（弾性波探査・電磁波探査・電気探査など）が有用である。

取り分け、オフィオライトの岩石学的モデルに適合している Bigbiga 地区では、Zambales オフィオライト基盤岩中に賦存する高アルカリ地下水の空間的な分布とその上昇流路の場を提供する大規模な割れ目帯・断裂系の分布・性状や、凝灰岩質であるベントナイト層の分布などを解析するには、岩石・地下水などの電氣的性質を利用した電気探査のうち 2 次元比抵抗法が有効である。

実施場所は、この 2 次元比抵抗法は、地形形状に影響を受け易いことを考慮し、平成 22 年度に実施したガス計測調査範囲を十分包含し、測線は、地層の走行に直交（ほぼ E-W 方向）するようにし、測線間隔（インターバル）は、測定機の仕様（水平・垂直成分の分解能力）などの検討のもと設定する。

[高アルカリ地下水の賦存状況を確認するための深掘りの構造試錐]

高アルカリ地下水の起源と、特に、高い pH の地下水の形成・進化において、オフィオライト-水相互作用過程でのカンラン石の蛇紋岩化作用が深く関与していることが解っている。即ち、蛇紋岩化作用には、Mg-カンラン石の溶解速度が地下水の pH 値をコントロールすることになる。従って、Mg-カンラン石の溶解反応を加速できる地球化学的環境としては、カンラン石のモード比を高めることである。そのためには、オフィオライトの岩石学的モデルで示したように核心部を構成するカンラン石が豊富に含有するカンラン岩中での溶解反応で形成された地下水は高い pH 値が期待される場である。

そのためにも、深い試錐深度が好ましいが、今後の試錐深度の試算としては、Well-1 (pH 9.5) の自噴井戸深度が推定 35m<基盤深度不明>、そして、今年度この自噴井戸周辺で実施した 2 つの試錐孔（試錐孔<BB12-DH06：基盤深度約 26m>、試錐孔<BB12-DH07：基盤深度 約 17m>）から、基盤深度への最深が約 26m で、岩質としては、粉碎された枕状溶岩を含有する自破碎玄武岩質溶岩であることを参考にすれば、50m 以深、出来れば 100m 程度の深度での構造試錐を実施し、当地区での Zambales オフィオライト基盤岩の岩石学的モデルを確認して、その後の試錐計画に反映することが必要である。

試錐地点については、原則として地上物理探査の解析結果にもとづいて選定することが合理的であるが、諸般の事情により、先行して、Well-1 の近傍も選択肢の 1 つである。

但し、試錐機については、従来の簡易型から深掘り、オールコアリングの可能なケーシングシステムと、孔内採水可能な採水容器が装備されていることが必須である。

[スメクタイト量の多いベントナイト層の確認]

Bigbiga 地区でのベントナイト層の分布、岩質・岩相、堆積環境などについての情報は相当に蓄積・整備されているので、今後はより多量のスメクタイトを含有するベントナイト層を確認するためには、より凝灰岩質のベントナイト層を追跡することが必要である。

そのためにも、地上での詳細な地質調査を実施ししながら、今後の地上物理物探としての 2 次元比抵抗法の解析結果と深掘り試錐調査結果などによる総合的解析・評価することが必要である。

以上の探査結果の総合解析にもとづき、「Active Type」の露頭発見に導くことが可能となると考える。

1.4 実施概要

平成 24 年度までの[23]、過去にアルカリ性地下水との接触が確認できたベントナイト鉱床（フィリピン北西部の Saile 鉱山とその周辺地区：Fossil Type の NA サイト）におけるナチュラルアナログ調査から、ベントナイトの変質が数 mm 程度に限定されていることが確認されるとともに、その長期のアルカリ変質による鉱物変遷シナリオを明らかにし、長期間アルカリ地下水環境下にあってもベントナイトの長期健全性が保たれる可能性を示した。また、現在もアルカリ地下水がベントナイトと接触している（Active Type の NA）可能性が高いサイトの存在も確認され、フィリピン北西部のフィールドが、TRU 廃棄物の地層処分におけるアルカリ緩衝材反応による緩衝材の長期変遷の評価において多くの有益なデータを取得することが可能なナチュラルアナログサイトであることがわかった。

今年度から今後 5 カ年の予定で実施する本調査では、上記の成果を踏まえ、Active Type のナチュラルアナログサイトを中心に、アルカリ地下水の影響範囲やベントナイトのアルカリ変質に関わる鉱物・地球化学・地下水等のデータを取得し、それらフィールドデータの解釈に基づき、ベントナイトアルカリ変質プロセスの現象理解を深める。特に、Active Type のナチュラルアナログでは過渡的な変質過程を観察し、これを時間枠が短い室内実験事例と比較することで、過渡的な段階から長期経過後までの状態変遷を明らかにする。また、地球化学計算や年代測定を適用し、反応時間や閉塞（Clogging）現象の評価を行い、アルカリ環境下の鉱物変遷過程とその素反応を抑制・促進環境条件や物理化学的なメカニズムの評価を行う。

ナチュラルアナログ調査で得られた成果は、実際の処分環境とのアナログ性を明確にし、実験や計算モデルに基づく既存研究や本事業で実施する「人工バリア材料長期挙動評価・人工バリア評価の初期条件の設定」でのアルカリ環境下のベントナイトの長期挙動評価との比較・考察（長期評価モデルの検証・最適化等）をおこない、長期評価モデルの信頼性向上を図る。

1.4.1 全体計画

これまでのナチュラルアナログ調査を踏まえ、ナチュラルアナログとしてその調査をどのように進めるべきかという観点で、表 1.4.1-1 に高アルカリ地下水の影響によるベントナイトの長期健全性に関するナチュラルアナログ調査・研究の進め方を示す。

第 1 段階として、アナログの要件を満たす地域、すなわち高アルカリ地下水を生成するオフサイトとベントナイト層が近接する地域の文献調査を行う。

第 2 段階として、この過程で抽出された複数の候補地から、アナログの成立性を最優先とし、さらにロジスティックの有利性なども考慮して、調査対象地域を選定する。そして、対象地域の地質概査の実施計画案を作成する。この際、対象地域において予察調査を行い、実施計画案に反映させることで最適化を行う。

第 3 段階からが現地での本格的な調査・研究を開始するステージとなる。地質概査として、地質調査、地下水調査、及び本事業では高アルカリ地下水の湧出が断裂系に規制されることから断裂系調査を行い、高アルカリ地下水とベントナイト層が接触するアナログサイトを選定する。ま

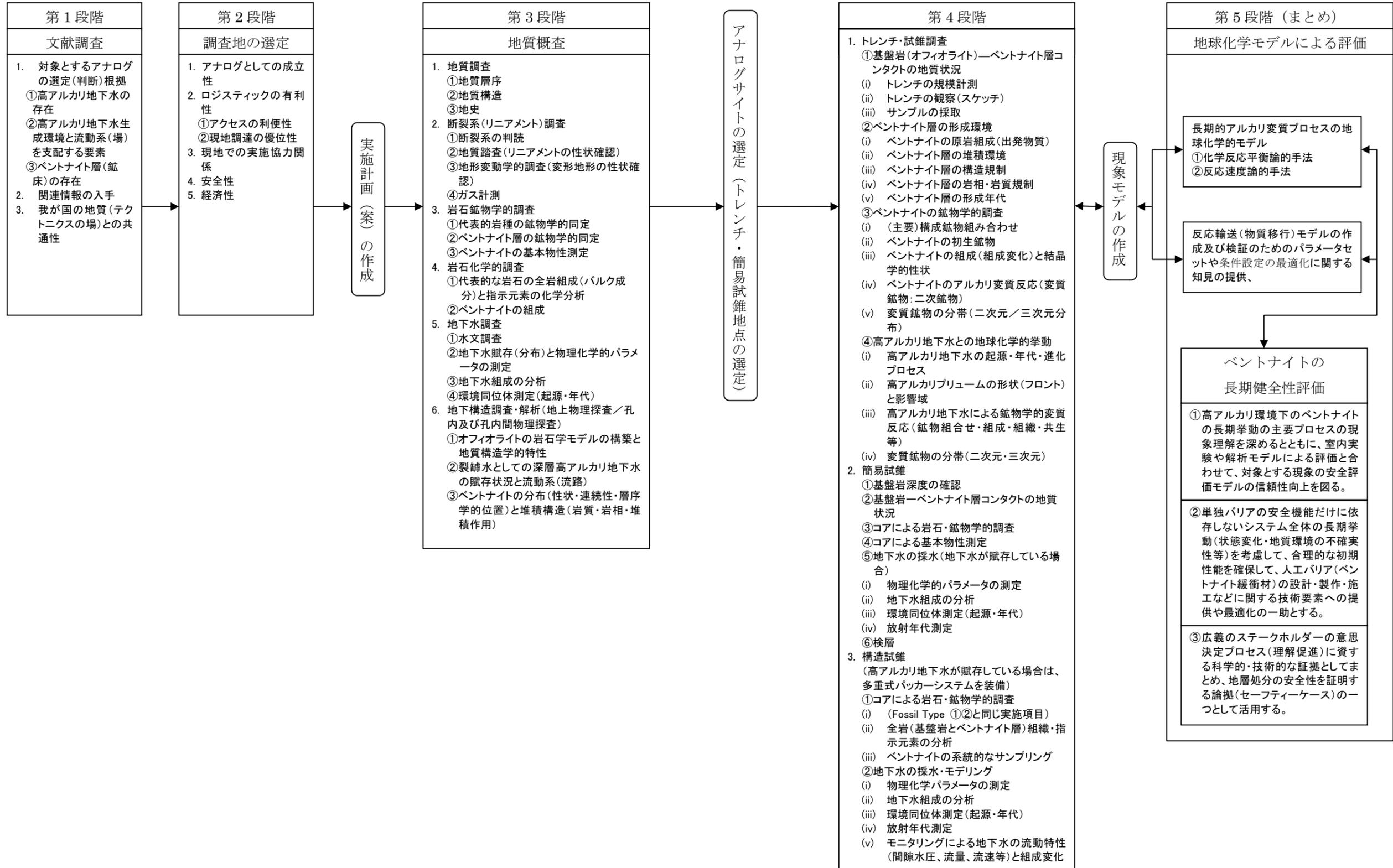
た、岩石鉱物学的調査、岩石化学的調査を実施して、ベントナイト層や高アルカリ地下水の基本特性、環境条件に係わる基礎データを取得する。

第4段階では、第3段階で選定されたアナログサイトでのトレンチ及び試錐を実施して、ベントナイトー高アルカリ地下水の相互作用及びその生成、環境条件に関する詳細な調査を実施する。本調査では、主に **Active Type** のサイトを対象とするため、接触している試料を採取や採水が非常に重要な作業となる。そして、現地での計測や試料分析から、地下水組成やその起源と進化及び流動系などアルカリ地下水に係わる地球化学的挙動とベントナイト層の形成環境とアルカリ変質に係わる鉱物学的調査を実施する。これらの現地での調査結果を踏まえ、現象モデルの作成を行う。

最後の第5段階では、作成した現象モデルに基づいて性能評価で用いる地球化学モデルによる解析を行い、ベントナイトの長期的アルカリ変質プロセスの現象理解とその性能評価に関する数値モデルの検証（パラメータや条件設定の最適化）を行う。さらに、その変質現象のベントナイトの長期健全性への影響を評価し、セーフティケースの一部として取りまとめる。

本事業は、上記のナチュラルアナログ調査の進め方の観点では、第4段階のアルカリーベントナイトのコンタクトを特定するための調査から進めることになる。そこで、現在もアルカリ地下水がベントナイトに浸出している（コンタクト）**Active Type** のナチュラルアナログの候補サイトとして、これまでの調査でそのコンタクトのポテンシャルが高いと判断された **Bigbigo** 地区をおもな調査対象として、ナチュラルアナログ調査を展開する。一方、地球化学計算の検討は **Saile** 鉱山の枕状溶岩と接触しアルカリ変質が確認されたサイトを対象として検討する。図 1.4.1-1 に今年度からおよそ5カ年の全体計画を示す。

表 1.4.1-1 高アルカリ地下水の影響によるベントナイトの長期健全性に関するナチュラルアナログ調査・研究の進め方



事業項目	～平成24年度	平成25年度	平成26年度	平成27年度	平成28年度	平成29年度	平成30年度以降
1. 実施計画策定	（平成24年度までの放射性廃棄物重要基礎技術研究調査、及び人工バリア長期性能評価技術開発）成果を反映	全体計画の策定 年度の実施計画及びフィールド調査計画策定	年度の実施計画及びフィールド調査計画策定	年度の実施計画及びフィールド調査計画策定	年度の実施計画及びフィールド調査計画策定	年度の実施計画及びフィールド調査計画策定	アルカリ反応に寄与する現象、環境条件の把握とそれを考慮したアルカリ変質の評価（例えば、酸化還元フロント、微生物活動等） NAIによる長期評価モデルの高度化・単純化
2. Activeな（現在も高アルカリ地下水が断裂系に浸出しベントナイト層と接触）NAサイト（アルカリ地下水と接触している地点）の探査	予察調査（地質調査、ガス検出調査、トレンチ調査、試錐調査）	Bigbiga(Fish pond)地区 地質調査 物理探査 試錐調査（鉱物分析）	Bigbiga(Oil mine)地区 Manleluag温泉保養地内の堆積層 地質調査 物理探査 試錐調査（鉱物分析）	Zambales又はそれ以外の高アルカリ湧水の存在するサイト 地質調査 地質・物探・試錐調査 Salaie鉱山の深部の接触部 試錐調査（鉱物分析）	地質・物探・試錐調査 Salaie鉱山の深部の接触部 試錐調査（鉱物分析）	地質・物探・試錐調査 Salaie鉱山の深部の接触部 試錐調査（鉱物分析）	アルカリ反応に寄与する現象、環境条件の把握とそれを考慮したアルカリ変質の評価（例えば、酸化還元フロント、微生物活動等） NAIによる長期評価モデルの高度化・単純化
3. 高アルカリ地下水の地球化学的特性と地質環境条件	予察調査（湧水・河川水・井戸水等の物理化学パラメータの計測、地下水組成の分析）	アルカリ地下水賦存の評価 孔内水の採水 物理化学パラメータの計測	アルカリ地下水賦存の評価 孔内水の採水 物理化学パラメータの計測 地下水組成の分析・評価	孔内水の採水 物理化学パラメータの計測 地下水組成の分析・評価 同位体分析 アルカリ地下水進化の評価	孔内水の採水 物理化学パラメータの計測・モニタリング 地下水組成の分析・評価 同位体分析 アルカリ地下水進化の評価	孔内水の採水 物理化学パラメータの計測・モニタリング 地下水組成の分析・評価 アルカリ地下水進化の評価	孔内水の採水 物理化学パラメータの計測・モニタリング 地下水組成の分析・評価 アルカリ地下水進化の評価
4. ベントナイトの分布と鉱物学的特性と物理特性	予察調査（露頭・トレンチ・試錐コアの鉱物分析）	サンプリング（露頭・トレンチ） バルク分析（XRD）	サンプリング（試錐孔・トレンチ） バルク分析（XRD, XRF） 詳細鉱物分析（EPMA, FE-SEM等）	サンプリング（試錐孔） バルク分析（XRD, XRF） 詳細鉱物分析（μ-XRD, EPMA, FE-SEM等）	サンプリング（試錐孔） バルク分析（XRD） 基本物性試験	サンプリング（試錐孔） バルク分析（XRD） 基本物性試験	サンプリング（試錐孔） バルク分析（XRD） 基本物性試験
5. アルカリ環境下でのベントナイトの長期変質プロセス 詳細鉱物分析 地球化学計算 年代測定	Fossil TypeのNAIによる（Salaie鉱山とその周辺地における）長期変質プロセスの評価	接触部の確認後は2-5の調査に移行 Salaie鉱山のベントナイト変質プロセスの経路 Bigbigaの岩石試料への年代測定の実用性評価（TL法）	Active Typeの変質プロセス・現象の理解 ベントナイトの長期挙動評価	Active Typeの変質プロセス・現象の理解 ベントナイトの長期挙動評価	Active Typeの変質プロセス・現象の理解 ベントナイトの長期挙動評価	Active Typeの変質プロセス・現象の理解 ベントナイトの長期挙動評価	Active Typeの変質プロセス・現象の理解 ベントナイトの長期挙動評価
総合評価（目標）		Fossil Typeのクロッキング現象の経路 Active Typeの露頭の存在可能性（調査地点の絞り込み）	Active Typeの露頭の存在可能性（調査地点の絞り込み）	Active Typeの露頭の存在可能性（調査地点の絞り込み）	Active Typeの露頭の存在可能性（調査地点の絞り込み）	Active Typeの露頭の存在可能性（調査地点の絞り込み）	Active Typeの露頭の存在可能性（調査地点の絞り込み）

※：茶線はFossil Typeのサイトを対象とした調査

図 1.4.1-1 本事業の全体計画（ナチュラルアナログ調査・研究概略工程）

1.4.2 平成 25 年度実施概要

本調査の目的と前項で示した全体計画に基づき、平成 25 年度は以下の調査を実施する。

(1) 実施計画策定

平成 24 年度までの調査結果を踏まえ、フィリピンルソン島北西部の調査サイトを対象とした、平成 25 年から 5 年間のナチュラルアナログ調査の全体計画を策定した上で、平成 25 年度の実施計画ならびにフィールド調査計画を具現化する。なお、全体計画の策定に当たってはできるだけ具体的なマイルストーンを設ける。

(2) ナチュラルアナログサイトの探査

1) Active なナチュラルアナログサイト（アルカリ地下水と接触している地点）の探査

現在もなおアルカリ性地下水と接触している可能性が高い Bigbiga 等において、地質調査、物理探査（比抵抗探査）を実施して、当地区の水利・地質構造を解析し、試錐地点及びトレンチ掘削地点を絞り込む。

絞り込んだ地点で、試錐孔の掘削を実施してボーリングコアの採取、孔内地下水の採水を行う。高アルカリ地下水とベントナイト層の接触地点を確認するために、コア試料の観察・鉱物分析を行い、アルカリ地下水とベントナイト層の接触の可能性を確認するとともに、調査サイトの地質構造とベントナイトの空間分布を把握する。

[参考文献]

- [1] Akagawa, F., Yoshida, H., Yogo, S. and Yamamoto, K.: Redox front formation in fractured crystalline rock: an analogue of matrix diffusion in an oxidizing front along water-conducting fractures. *Geochimistry: Exploration, Environment, Analysis* 6, 1-8 (2006).
- [2] 笹尾英嗣, 岩月輝希, 天野由記: 東濃ウラン鉱床でのナチュラルアナログ研究からみた古水理地質研究の役割. *資源地質* 56(2), 125-132 (2006).
- [3] 吉田英一, 大嶋章浩, 吉村久美子, 永友晃夫, 西本昌司: 断層周辺に発達する割れ目形態とその特徴—阿寺断層における‘ダメージゾーン’解析の試み—. *応用地質* 50(1), 16-18 (2009).
- [4] Sato, T., Akita, N. and Arai, S.: Geochemical modeling of hyperalkaline spring water and precipitates at the Oman ophiolite. *Geochim. Cosmochim. Acta* 66, S1, A669 (2002).
- [5] 福士圭介: 鉄—ベントナイト相互作用のナチュラルアナログ研究. (公財) 原子力環境整備促進・資金管理センター編, 平成 21 年度放射性廃棄物共通技術調査等 放射性廃棄物重要基礎技術研究調査 報告書 (第 2 分冊) (2009).
- [6] Fukushi, K., Sugiura, T., Morishita, T., Takahashi, Y., Hasebe, N. and Ito, H.: Iron-bentonite interaction in the Kawasaki bentonite deposit, Zao area, Japan. *Appl. Geochem.* 25(8), 1120-1132 (2010).
- [7] Côme, B. and Chapman, N.A.: Natural analogue working group; first meeting. Brussels, November 1985, CEC Nuclear Science and Technology Report, EUR 10315, Commission of the European Communities, Luxembourg (1986).
- [8] McKinley, I.G.: Applying natural analogues in predictive performance assessment. Unpublished Nagra Internal Report, Nagra, Wettingen, Switzerland (1989).
- [9] IAEA: Natural analogues in performance assessments for the disposal of radioactive wastes. IAEA Technical Report, 304, International Atomic Energy Agency, Vienna (1989).
- [10] 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター: 放射性廃棄物ハンドブック. (2012).
- [11] NAGRA: Kristallin-I, Safety Assessment Report. Nagra Technical Report NTB 93-22, NAGRA, Wettingen, Switzerland (1994).
- [12] 核燃料サイクル開発機構: わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第 2 次取りまとめ—. JNC TN1400 99-023, 1999 年 11 月 (1999).
- [13] Metcalfe, R and Walker, C. (eds): Proceedings of the international workshop on bentonite-cement interaction in repository environments. Nuclear Waste Management Organisation of Japan (NUMO) report, NUMO-TR-04-05 (2004).
- [14] NUMO: 高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性—「処分場の概要」の説明資料—. NUMO-TR-04-01 (2004).
- [15] 電気事業連合会, 核燃料サイクル開発機構: TRU 廃棄物処分技術検討書—第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ—. JNC TY1400 2005-013, FEPC TRU-TR2-2005-02, 2005 年 9 月 (2005).
- [16] (財) 原子力環境整備促進・資金管理センター: 平成 14 年度地層処分技術調査等委託費 TRU 廃棄物処分技術 人工バリア長期性能確認試験 報告書 (2003).
- [17] 久保博, 黒木泰貴, 三原守弘: ベントナイト系緩衝材のコンクリート間隙水による長期変質の基礎研究, *地盤工学会誌* 46(10), 31 (1998).
- [18] Johnston, R.M. and Miller, H.G.: The effect of pH on the stability of smectite. AECL-8366 (1984)
- [19] 共同作業チーム: TRU 廃棄物処分概念検討書. 電気事業連合会, JNC TY1400 2001-001, TRU TR-2000-01 (2000).
- [20] (財) 原子力環境整備促進・資金管理センター: 平成 18 年度地層処分技術調査等委託費 TRU 廃棄物処分技術 人工バリア長期性能確認試験 報告書 (2007).
- [21] (財) 原子力環境整備促進・資金管理センター: 平成 20 年度地層処分技術調査等委託費 TRU 廃棄物処分技術 人工バリア長期性能評価技術開発 報告書 (第 1 分冊) (2009).
- [22] Savage, D., Benbow, S., Watson, C., Takase, H., Ono, K., Oda, C. and Honda, A.: Natural systems evidence for the alteration of clay under alkaline conditions: An example from Searles Lake, California. *Appl. Clay Sci.* 47(1-2), 72-81 (2011).

-
- [23] (公財) 原子力環境整備促進・資金管理センター: 平成 24 年度放射性廃棄物共通技術調査等事業 放射性廃棄物重要基礎技術研究調査 多重バリアの長期安定性に関する基礎情報の収集及び整備 平成 19 年度～平成 24 年度の取りまとめ報告書 (2013).
- [24] Alexander, W.R. and Milodowski, A.E.: Cyprus Natural Analogue Project (CNAP) Phase II Final Report. POSIVA Working Report 2011-08, Posiva, Olkiluoto, Finland (2011).
- [25] Barnes, I. and O'NEIL, J.R.: The Relationship between Fluids in Some Fresh Alpine-Type Ultramafics and Possible Modern Serpentinization, Western United States. *Geol. Soc. of America Bull.* 80(10), 1947-1960 (1969).
- [26] Frost, B.R. and Beard, J.S.: On Silica Activity and Serpentinization. *J. Petrology* 48(7), 1351-1368 (2007).
- [27] Marques, J.M., Carreira, P.M., Carvalho, M.R., Matias, M.J., Goff, F.E., Basto, M.J., Graça, R.C., Aires-Barros, L. and Rocha, L.: Origins of high pH mineral waters from ultramafic rocks, Central Portugal. *Appl. Geochem.* 23, 3278-3289 (2008).
- [28] (財) 原子力環境整備促進・資金管理センター: 平成 19 年度放射性廃棄物共通技術調査等 放射性廃棄物重要基礎技術研究調査 報告書 (第 4 分冊) (2008).
- [29] Bachman, S.B., Lewis, S.D. and Schweller, W.J.: Evolution of a Forearc Basin, Luzon Central Valley, Philippines. *The American Association of Petroleum Geologist Bulletin* 67(7), 1143-1162 (1983).
- [30] Villones Jr., R.I.: The Aksitero formation, its implications and relationship with the Zambales Ophiolite. Philippine Bureau of Mines and Geosciences, Technical Information Series 16-80, 21 (1980).
- [31] Schweller, W.J., Roth, P. H., Karig, D. E. and Bachman, S. B.: Sedimentation history and biostratigraphy of ophiolite-related Tertiary sediments, Luzon, Philippines. *Geological Society of America Bulletin* 95, 1333-1342 (1984).
- [32] Encarnación, J., Mukasa, S.B. and Obille, E.J.: Zircon U-Pb Geochronology of the Zambales and Angat Ophiolites, Luzon, Philippines: Evidence for an Eocene Arc-Back Arc Pair. *J. Geophys. Res.* 98(B11), 19991-20004 (1993).
- [33] Geary, E.E. and Kay, R.W.: Identification of an early cretaceous ophiolite in the Camarines Norte-Calaguas Islands basement complex, eastern Luzon, Philippines. *Tectonophysics* 168(1-3), 109-126 (1989).
- [34] 佐藤努: 低温蛇紋岩化作用から学ぶ高アルカリ環境の地球・生物資源科学. *月刊地球* 34(3), 125-129 (2012).
- [35] 白水晴雄: 粘土鉱物学—粘土化学の基礎. 朝倉書店 (1988).
- [36] Martine D.B., Christophe M., Gretchen L.F.G. and Anne-Marie K.: Fluid-sediment interactions related to hydrothermal circulation in the Eastern Flank of the Juan de Fuca Ridge. *Chem. Geol.* 175(3-4), 343-360 (2001).
- [37] 歌田実: 続成作用における地層水の組成変化. *地質学論集* 15, 151-164 (1978).
- [38] 須藤俊男: 粘土鉱物学, 岩波書店 (1974).
- [39] 吉村尚久: 鉱物の変化からみた堆積盆の熱履歴評価. *石油技協誌* 59, 271-278 (1994).
- [40] Abaya, J.G.: Determination of Recharge from Stable Isotope Data to the Hydrological Systems in the Southern Negros Geothermal Field and its Environs, Philippines. *Proceedings World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey*, 24-29 (2005).
- [41] Hamilton, G. and Furtwangler, W.: Synthese von nontronit. *Tschermaks Mineral. Petrogr. Mitt.* 2, 397-406 (1951).
- [42] Caillere, S., Henin, S. and Esquevin, J.: Syntheses a basse temperature de quelques mineraux ferriques (silicate et oxides). *Bull. Soc. Fr. Mineral. Crist.* 78, 227-241 (1955).

第2章 ナチュラルアナログサイトの探査

2.1 目的

処分施設閉鎖後の再冠水段階（期間）におけるセメント反応アルカリ水（間隙水）によるベントナイト緩衝材のアルカリ変質反応がベントナイトの長期健全性に影響を及ぼすことが指摘されている。特に、ベントナイト緩衝材中でのアルカリ間隙水の地球化学的挙動（アルカリプリュームの形状と移動速度）としての拡散や移流場におけるベントナイトーアルカリ間隙水との変質反応プロセスを把握することが重要である。それは、ベントナイト界面に最初に沈殿する準安定相の初期鉱物の生成・成長や、既存鉱物（モンモリロナイト）の溶解－沈殿反応による二次鉱物の生成に深く依存するモンモリロナイトの溶解現象（溶解プロセス・溶解速度など）を理解することが必要である。

本調査の目的は、自然界で現在アルカリ地下水が直接ベントナイトに浸出している露頭（コンタクト）を対象（ここでは、「Active Type」のナチュラルアナログという）に、ベントナイトのアルカリ変質反応を支配する主要な現象と地球化学的プロセスを適切に抽出・理解するとともに、これらの変質鉱物の長期的な鉱物学的変遷を考察して、ベントナイトの長期健全性評価の一助とすることである。従って、この「Active Type」のナチュラルアナログ成立のためには、①アルカリ地下水の存在、②アルカリ地下水の流動経路となり得る断裂系の存在 ③ベントナイトの分布で示される三位一体の要件が必要不可欠である。

本年度の調査対象地域である「Bigbiga 地区」は、これまでの一連の現地調査と採取試料（露頭・トレンチ・試錐コア<岩芯>や採水）による試験・分析・同定結果などにより、「Active type」のポテンシャルサイトの一つとして選定された。1.4.1 で示した全体計画に基づき、今年度実施する現地調査の主要目標は、当地区で確認されている井戸水（Well-1 : pH ~9.3）より高いアルカリ地下水とベントナイトとの接触に係わる探査である。

本調査対象地域（Zambales オフィオライト分布地域）で確認されている高アルカリ地下水の起源・形成プロセス・進化などについては 1.3.7 で述べているが、それは降雨水とオフィオライトの水－岩石反応により形成され、オフィオライトの断裂系を流路とした裂か水である。その pH の大きさはオフィオライトの主要造岩鉱物であるカンラン石や輝石の Mg の含有量（モード比）に依存することが指摘されている[1]。この事実から、高 pH 地下水は、天水起源の地下水がオフィオライトの中核部を構成するカンラン岩中に貯留・相互作用過程での、蛇紋岩化作用により形成された地下水がより高 pH 地下水になり得ることが事例研究で示されている[2][3][4][5]。

今年度の現地調査において、最優先と考える実施内容は、裂か地下水としての高アルカリ地下水の賦存状況と流路となる流動系の分布特性を明らかにすることである。そのための現地調査の進め方は、間接的であるが地上物理探査から始まり、地下水の地球化学的調査（計測）、トレンチ調査を経て、それらの一連の調査データ・知見などの総合解析により試錐サイトを選定した後、直接確認するための簡易構造試錐調査によるアルカリ裂か水の探査である。なお、トレンチ調査

と簡易構造試錐調査で取得された岩石試料は、ベントナイト層の分布（層厚・連続性）・岩質・堆積環境・組織など、一方、オフィオライトの岩石鉱物学的特性（鉱物組み合わせ・モード・組成・組織）・変質鉱物の組成・共生・組織などを観察・分析・同定に活用される。これらのデータ・知見は、ベントナイトのアルカリ変質反応プロセスを解明する上での基礎となる。

2.2 フィリピン国ルソン島北西部における現地調査の概要

2.2.1 調査工程

これまで「ナチュラルアナログのポテンシャルサイトとして概査を実施してきた「Bigbiga 地区」を調査対象地区として、特に **Active Type** のポテンシャルサイト（アルカリ地下水が直接ベントナイト<層.>に浸水しているコンタクト部の存在）の探査として、1.1 に示すように、特に裂か地下水としての高アルカリ地下水の賦存状況と流路となる流動系の分布特性を明らかにするために、下記の種々の調査・原位置計測などを体系的かつ効率的に実施した。

調査期間は、10月30日（水）～11月14日（木）の16日間である（図 2.2.1-1）。なお、調査期間中の11月8日～9日に、台風30号（スーパー台風<Haiyan>）が接近し、当地域（Bigbiga 及び Tarlac（宿泊地））でも断続的に強い風雨に見舞われた。最悪の場合を想定し作業工程を一部変更して対応したが、当初の予定より南に逸れたため（レイテ島付近に上陸）当地域は結果的に大きな被害には合わず、また、それ以外の日は比較的天候にも恵まれたこともあり、当初計画通りの現地作業を実施できた。

Items	Oct.					Nov.													
	27	28	29	30	31	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Physical (TEM) survey																			
Analysis of Above																			
Discussion about above																			
Mapping (Outorop)																			
Gas(H ₂ ,CH ₄) survey																			
Outorop survey (Bigbiga,Saile, Poonbato)																			
Trench excavation and sampling																			
Water sampling																			
Drilling ×2 holes >30m (Max50m) Simple drawdown test (by big bailer), Borehole water sampling/Physicochemical parameter measurement																			
Others																			

図 2.2.1-1 現地調査の工程

2.2.2 現地調査の作業工程および主な調査内容

現地調査の内容と作業工程を以下の(1)～(4)にまとめる。また、今年度重点を置いた Bigbiga Fish pond エリアでの調査結果概要を既存の調査結果も一部含め **Compilation Map** として図 2.2.2-2 にまとめる。

(1) 地上物理探査

- 10/28～31：台風被害状況等による Bigbiga Fish pond 調査エリアの現状確認と比抵抗探査方法の最適化（測点配置や解析方法等）の検討（10/28～31は Bedrock Geoscience および UP のみの作業）
- 10/31～11/2AM：比抵抗探査および探査結果解析（ボーリング調査位置の選定）

(2) 地下水（既存井戸、湧水、既存試錐孔）調査

- 10/31, 11/8, 10～11：Bigbiga 地区の既存井戸・既存試錐孔における地下水位測定と深度確

認および既存井戸水などの物理化学的パラメータの計測(原位置計測 <pH, Eh, Do, 水温, 簡便な Mg・Ca イオン濃度など>)及び採水

- 11/11 : Saile Mine と Manleluang 温泉施設周辺における物理化学的パラメータの計測と採水
- 10/13 : Poonbato 地区における物理化学的パラメータの計測と採水

(3) トレンチ調査

- 11/2～11/4 : 露頭調査 (トレンチ掘削位置選定)
- 11/4～8AM : トレンチ掘削 (11/4 ホイルローダー、11/5 ブルドーザ、以降手作業による掘削)
- 11/8, 10 : 試料採取 (11/8, 10 コアドリルとロックハンマーによるサンプリング、11/9, 12 トレンチ Hilti Drill コア観察)

(4) 簡易構造試錐調査

- 11/2PM～11/7 : DH08 コアボーリング (40.54m)
- 11/5～11/7 : DH09 コアボーリング (15.40m)
- 11/8 : DH08、DH09 コア観察 (台風接近のため現場作業中止)

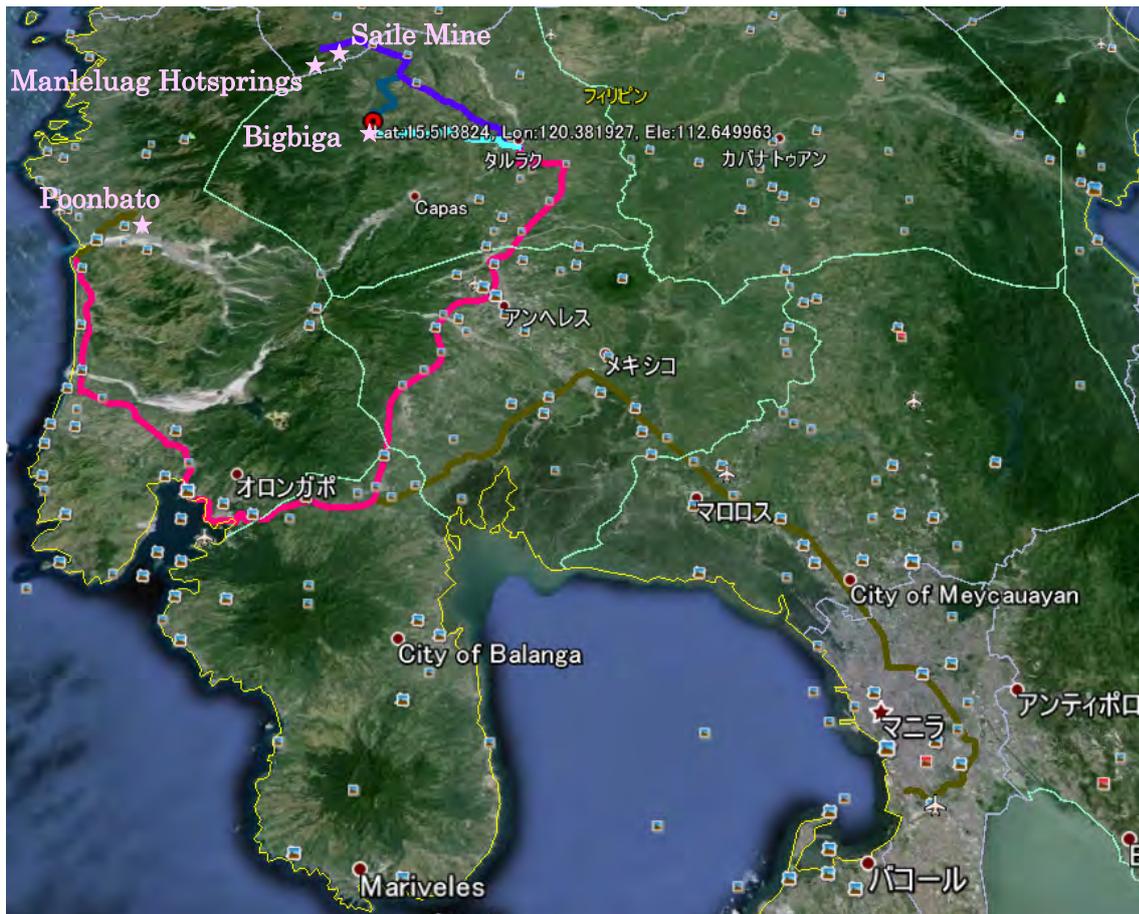


図 2.2.2-1 フィールド調査地と移動ルート

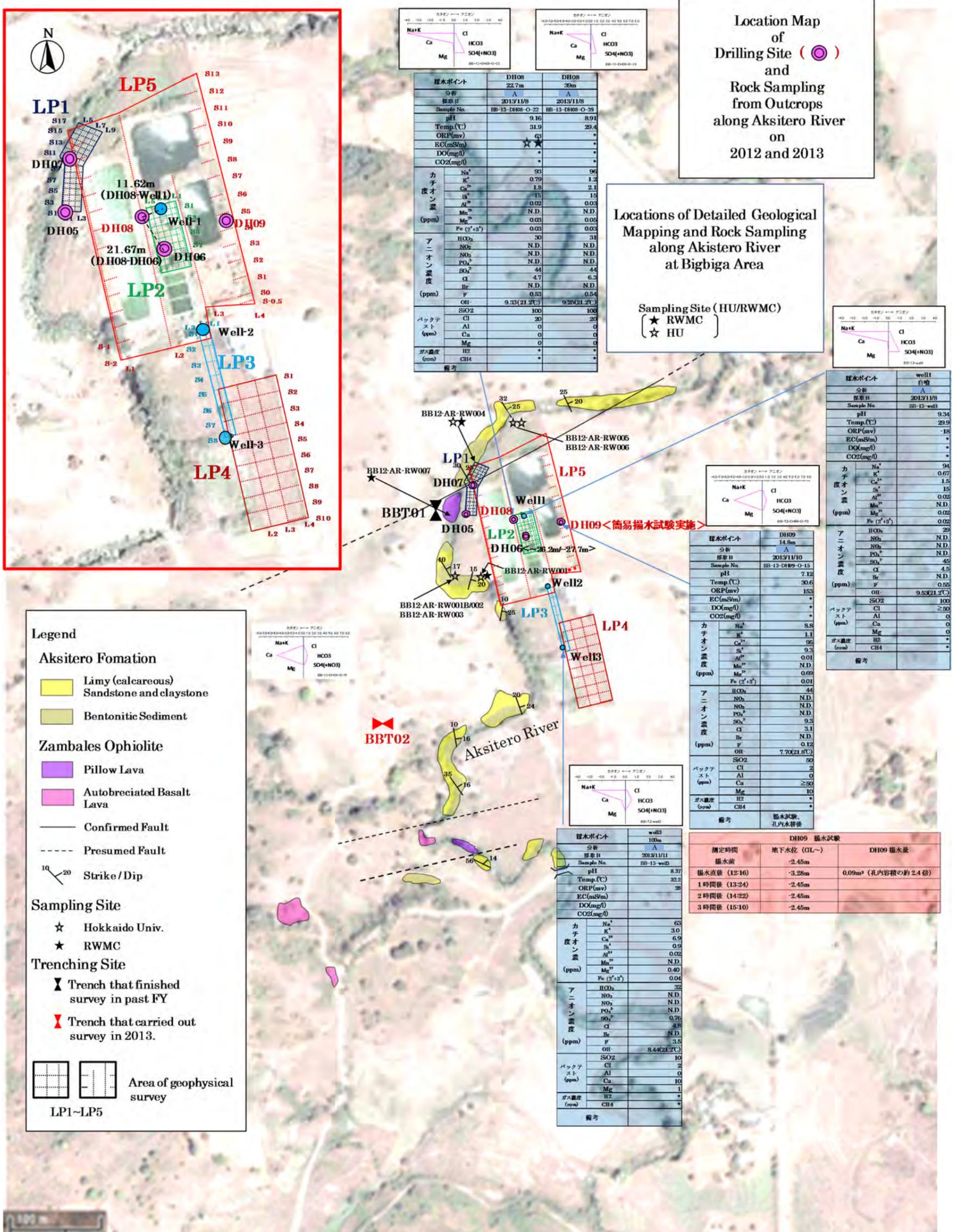


図 2.2.2-2 Bigbica Fish pond 調査エリアの Compilation Map

2.3 地下水の地球化学的調査

2.3.1 地下水（既存井戸、湧水、既存試錐孔）調査の概要

Zambales 地域（Bigbiga 地区、Saile 鉱山及び Manleluag 温泉保養地、Poonbato 地区）の高アルカリ地下水の生成・進化に係わる地下水の地球化学的特性を明らかにするために、上記調査地域の既存井戸・既存試錐孔・湧水などを対象に、定期計測を実施した。

なお、今年度掘削した試錐孔の地下水調査については、2.6 簡易構造試錐調査にまとめる。また、Bigbiga 地区の Active Type のサイトにおけるアルカリ地下水の地球化学的特性と水理地質構造学的挙動については 2.7 にまとめる。

2.3.2 測定項目と測定方法

(1) パラメータ測定

地下水や河川水を対象に表 2.3.2-1 に示す物理化学パラメータの計測を実施した。これらの測定には HORIBA pH メーター D-52, D-54（プラスチックボディ電極 9621-10D、ORP 防水電極 9300-10、導電率防水電極 9382-10D）を用いて行った。pH 校正は HORIBA 製の pH 校正液セット 101-S を用いて pH=4, 7, 9 の 3 点で行った。

表 2.3.2-1 物理化学パラメータ 測定項目

測定パラメータ			備考
Temp.	温度	[°C]	発熱反応の影響
pH	水素イオン濃度指数		アルカリ性（酸性）の度合い
ORP(Eh)	酸化還元電位	[V]	還元（酸化）の度合い
EC	電気伝導率	[mS/m]	溶存イオン量の目安
DO	溶存酸素量	[Mg/l]	酸化の度合い

(2) 採水

物理化学パラメータ測定などで地下水の特性を把握したのちに水質分析用の採水を実施した。1ヶ所につき、原水、原水ろ過水、原水+硝酸水の3セットの水試料を採取するため、採取した水（井戸水または湧水）は、原水とは別に、ディスポカップ（PP）を使って分取したのち、30mL シリンジ（テルモシリンジR）と 0.20 μ m 径メンブレンフィルター（ADVANTEC 製、親水性 PTFE）を使って1回共洗いをしてからろ過し、一箇所につき 50mL ポリビン（アズワン製） \times 2本採取した。その際、一本は濾過のみ、もう一本は、微生物の増殖によってイオン濃度が変化することや、陽イオン種が試料瓶の内壁に吸着されることなどを防ぐために、500 μ L の高純度硝酸（関東化学株式会社製硝酸（1.38）UGR）を用いて酸処理を行なった。

(3) 水質分析

採取したサンプルは、国内でイオン分析を実施した。分析したイオンは陽イオン元素 (Na, Mg, Al, P, K, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Rb, Sr, Y, Mo, Cd, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Pb, Th, U)、陰イオン (F⁻, Cl⁻, NO₂⁻, Br⁻, NO₃⁻, PO₄⁻, SO₄²⁻)、Si, CO₂ である。

溶存元素は以下の 2 種類の方法で分析した。

(A)

- ①Na, K, Ca, Mg, 全 Fe, 全 Mn, Al : 原子吸光分析法
- ②Si : モリブデン青比色法
- ③陰イオン : イオンクロマトグラフ法
- ④HCO₃⁻ : TOC 計 (全有機体炭素測定装置) により TIC (全無機炭素) を計測し、Phreeqc を用いた平衡化学計算により算出

(B)

- ①陽イオン : 誘導結合プラズマ質量分析法 (ICP-MS)
- ②Si : 誘導結合プラズマ発光分光分析法 (ICP-AES)
- ③陰イオン : イオンクロマトグラフ法
- ③CO₂ : CO₂ 分析計

2.3.3 現地調査におけるパラメータ計測と採水

(1) Bigbiga 地区の既存井戸・既存試錐孔における地下水調査

Bigbiga 地区の既存井戸・既存試錐孔 (Well-1, Well-2, Well-3, DH05, DH06, DH07) において、地下水位測定と深度確認および既存井戸水などの物理化学的パラメータの計測 (原位置計測 <pH, Eh, DO, 水温, 簡便な Mg・Ca イオン濃度など>) 及び採水を実施した。地下水水質測定および水試料採取位置を図 2.3.3-1 に、地下水採水・パラメータ測定状況を図 2.3.3-2 に示す。

水位、深度および物理化学パラメータの計測 (図 2.3.3-3) については表 2.3.3-1 にその結果をまとめる。



※赤●は地下水分析試料採取箇所、青●は、現地での水質測定箇所

図 2.3.3-1 Bigbica 地区 水質測定用地下水採取位置図



DH08



DH09



well1(1)



well1(2)



well3(1)



well3(2)

図 2.3.3-2 Bigbiga 地下水採水・地下水パラメータ測定状況



図 2.3.3-3 井戸水位の測定状況

表 2.3.3-1 既存井戸・既存試錐孔の水位、深度および pH

測定位置	地下水位(GL～)	孔底深度(GL～)	pH (水温℃)	備考
Well-1	自噴	-19m	9.01 (29.4)	※
Well-2	+0.65m	-56.75m (ポンプ位置)	7.58 (32.5)	(孔底は-75m?) ※
	+0.65m	-56.75m (ポンプ位置)	6.80 (29.3)	ORP: : 150 mV 11/10 測定
Well-3	-3.5m	-18.96m	8.15 (-)	(孔内のゴミのため ポンプが下りず) ※
	-3.42m	-100m	8.37 (32.2)	ORP: : 28 mV 11/11 測定
DH05	-1.93m	-10.07m	7.05 (29.2)	※
DH06	-3.1m	-27m	6.16 (29.4)	※
DH07	-3.2m	-18.8m	6.9 (28.8)	※

※10/31 測定

(2) Saile 鉱山の井戸と Manleluang 温泉施設周辺の地下水調査

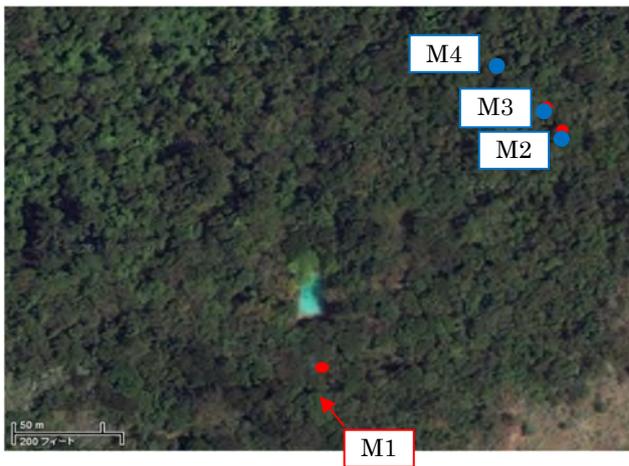
Saile 鉱山 (図 2.3.3-4) の既存井戸において採水と物理化学パラメータの計測を行った。地下水水質測定および水試料採取位置を図 2.3.3-5 に、地下水採水・パラメータ測定状況を図 2.3.3-6 に示す。表 2.3.3-2 に物理化学パラメータの測定結果を示す。



図 2.3.3-4 Saile 鉱山 Quarry の露頭 (11/11)



※赤●は地下水分析試料採取箇所、青●は、現地での水質測定箇所
Saile 鉱山及び Manleluag 温泉地区全景



Manleluag 温泉地



Saile Mine

図 2.3.3-5 Saile 鉱山および Manleluag 温泉地区 水質測定用地下水採取位置



Saile 鉱山



Manleluag(M1)



Manleluag(M2)



Manleluag(M3)



Manleluag(M4)

図 2.3.3-6 地下水試料採取状況 (Saile Mine、Manleluag)

表 2.3.3-2 Saile 鉱山井戸の物理化学パラメータ

測定位置	pH (水温℃)	ORP (mV)	EC (mg/m)	DO (mq/L)	H ₂ (ppm)	備考
Saile Mine 井戸 (N15°42'48.91", E120°11'11.22")	6.56(28.0)	79	45.8	43.91	-	学芸大

Manleluang 温泉施設周辺での源泉/温泉水の湧水地点において採水と物理化学パラメータの計測を行った。表 2.3.3-3 に各湧水地点（図 2.3.3-7）の物理化学パラメータの測定結果を示す。

表 2.3.3-3 Manleluang 温泉施設周辺の湧水の物理化学パラメータ

測定位置	pH (水温℃)	ORP (mV)	EC (mg/m)	DO (mq/L)	H ₂ (ppm)	備考
M1(源泉)	10.61(32.7)	-290	-	-	-	大林組
	10.80(33.1)	-420	49.8	51.2	-	学芸大
M2 (N15°42' 16.2" , E120°17' 02.0")	10.77(33.1)	-252	-	-	380	大林組
	パックテスト(ppm) : Ca: 20, Mg: 0					
M3 (N15°42' 16.7" , E120°17' 01.6")	10.78(33.5)	-333	26.6	53.4	-	学芸大
	10.40(34.2)	-317	-	-	-	大林組
M4 (N15°42' 17.4" , E120°17' 00.7")	10.74(33.1)	-351	51.7	0.0	-	学芸大
	10.74 (33.1)	-	-	-	0	大林組
パックテスト(ppm) : Ca: 20, Mg: 0						
	10.76 (32.7)	-358	25.4	0.0	-	学芸大



M1



M2



M3



M4

図 2.3.3-7 Manleluang 温泉施設周辺の湧水地点

(3) Poonbato 地区の地下水調査

Poonbato 地区の Loob Bunga Creek 河岸の湧水地点において採水と物理化学パラメータの計測を行った。Loob Bunga Creek の全景を図 2.3.3-8 に示す。また、Poonbato 地区での地下水水質測定および水試料採取位置を図 2.3.3-9 に、地下水採水・パラメータ測定状況を図 2.3.3-10 に示す。表 2.3.3-4 に各湧水地点の物理化学パラメータの測定値を示す。

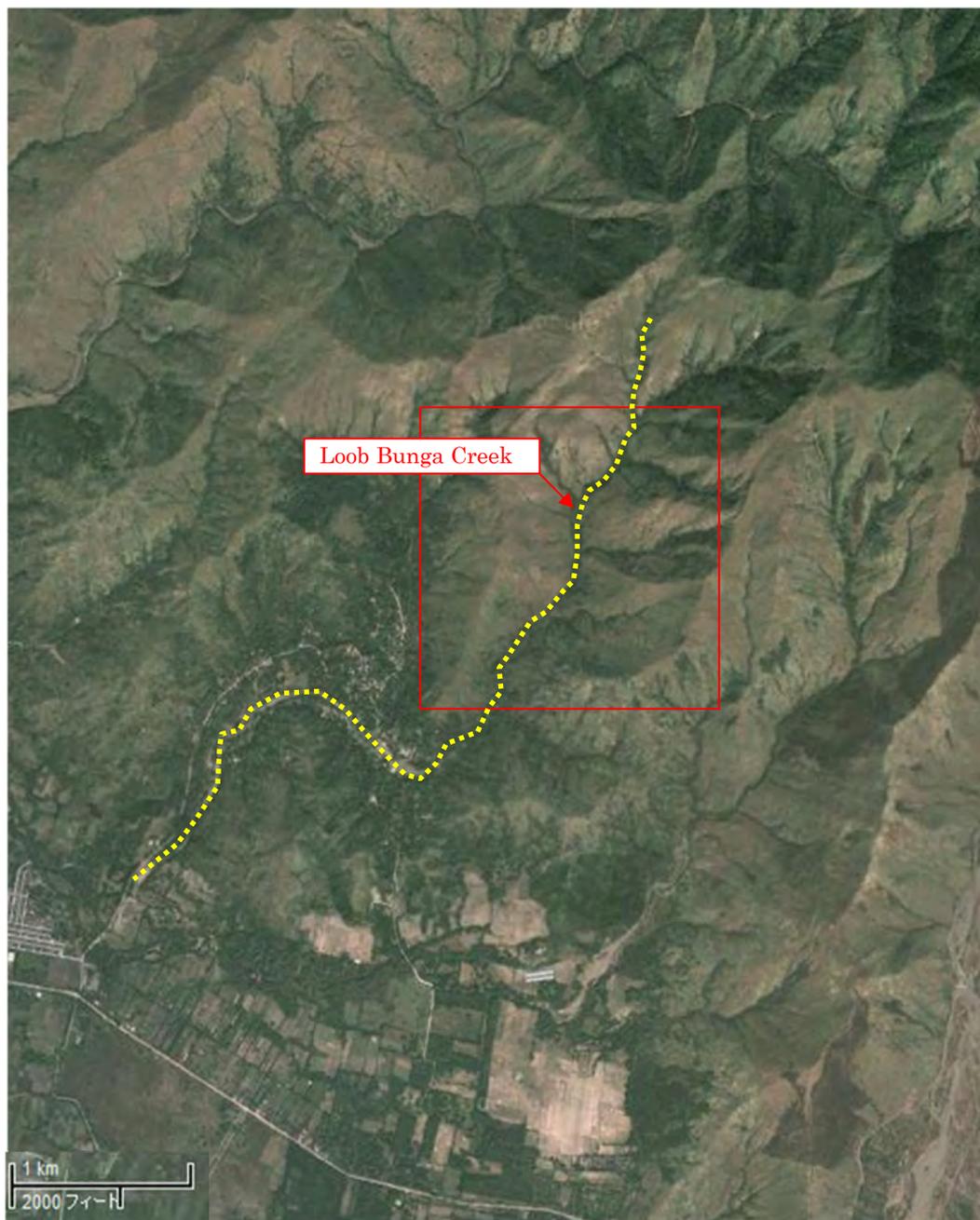


図 2.3.3-8 Poonbato 地区 Loob Bunga Creek



※赤●は地下水分析試料採取箇所、青●は、現地での水質測定箇所

図 2.3.3-9 Poonbato 地区 水質測定用地下水採取位置



Poonbato(P1)



Poonbato(P2)



Poonbato(P3)



Poonbato(P4)



Poonbato(P5-1)



Poonbato(P5-2)

図 2.3.3-10 地下水試料採取状況 (Poonbato)

表 2.3.3-4 Poonbato 地区の Loob Bunga Creek 河岸の湧水の物理化学パラメータ

測定位置	pH (水温°C)	ORP (mV)	EC (mg/m)	DO (mg/L)	H ₂ (ppm)	備考
P1 (N15°19' 13.6", E120°04' 22.1")	10.91 (28.3)	-	-	-	0	大林組
P2 (N15°19' 15.1", E120°04' 23.4")	11.31 (27.2)	-	-	-	0	大林組
パケットテスト(ppm) : SiO ₂ : 0, Cl: ≥ 50, Al: 0.05, Ca: ≥ 50, Mg: 0						
P3 (N15°19' 16.2", E120°04' 24.3")	10.96 (26.3)	-	-	-	0	大林組
P4 (N15°19' 19.3", E120°04' 26.8")	10.72 (27.8)	-	-	-	-	大林組
P5-1	11.05 (28.4)	-	-	-	56	大林組
P5-2 (N15°19' 19.8", E120°04' 26.7")	11.09 (28.3)	-	-	-	-	大林組
	11.22 (28.6)	-181	59.6	39.3	-	学芸大

2.3.4 Zambales 地域の地下水の地球化学的特性

(1) 各地域の主成分元素（カチオン、アニオン）濃度等の特徴と水質形成に関する考察

Zambales 地域の各調査地点の水質分析については(A)による結果を表 2.3.4-1 に、(B)による結果を表 2.3.4-2 に、各地点でそれらを比較してまとめた結果を表 2.3.4-3～表 2.3.4-5 に示す。

Bigbiga 水試料で、原水+硝酸水の Fe、Mn、重金属（Co、Ni 等）、Ba、Sr、Cs、REE などの濃度が原水、原水ろ過水中のこれらの濃度よりもかなり高くなっていることが判明した。しかし、Saile 鉱山、Manleluag 温泉保養地、Poonbato では、これらの 3 種類の水質の明確な違いは見られなかった。

昨年度までの調査[6]において、地下水の主成分元素の化学分析、滞留時間の推定、シミュレーションの結果により以下の結論が得られている。

- ① Saile 鉱山の地下水は高アルカリではない浅層の地下水、Poonbato 地区の地下水は高アルカリ水（pH12 に達する）であり、Bigbiga 地区、Manleluag 温泉保養地の地下水の pH も高い（pH≒10）が 12 までにはならないということが明らかにされている。
- ② このような pH の高い Manleluag 温泉保養地、Poonbato 地区の地下水には Ca が多く含まれ、Mg がほとんど含まれていないという特徴がある。
- ③ Bigbiga では Cl^- 、 SO_4^{2-} といったアニオン濃度が他の地域より高く（20ppm 程度）、若干の古海水の混入があると思われる。平均海水の Cl^- 濃度は 19800ppm であるが、その混合割合は非常に小さい。
- ④ 以上の地下水水質の特徴(1)、(2)は、水-岩石シミュレーションによって説明が可能である。すなわち、水-岩石反応の程度は Poonbato > Manleluag > Bigbiga > Saile 鉱山であろう。この結果は、滞留時間の推定、酸素・水素同位体データと調和的である。すなわち Poonbato > Manleluag > Saile 鉱山で降水涵養高度が高く、滞留時間が長いと推定されている。ただし、Manleluag、Bigbiga の高度、滞留時間共に差がない点は、シミュレーション、水質の特徴とは異なるので、これについては今後の課題である。

今年度の主成分元素分析の結果からも上記①、②、③の特徴も明らかにされ、これまでの結果と調和的である。今後は、より詳細に各元素についての考察が必要であると考え。

表 2.3.4-1 地下水水質データ(A)

Sample No.	Na mg/L	K mg/L	Ca mg/L	Mg mg/L	全Fe mg/L	全Mn mg/L	Al mg/L	Si mg/L	Cl ⁻ mg/L	SO ₄ ²⁻ mg/L	NO ₃ ⁻ mg/L	NO ₂ ⁻ mg/L	PO ₄ ³⁻ mg/L	F ⁻	Br ⁻ mg/L	TIC mg/L	pH	EC mS/m	水温 °C
BB-13-DH08-O-22	95	0.79	1.8	0.03	0.02	N.D.	0.03	16	4.7	44	N.D.	N.D.	N.D.	0.53	N.D.	30	9.33	39.5	21.2
BB-13-DH08-O-22 酸添加	93	0.70	1.9	0.03	0.03	N.D.	0.03	15	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	20.9
BB-13-DH08-O-39	93	1.0	2.2	0.04	0.02	N.D.	0.02	15	6.3	44	N.D.	N.D.	N.D.	0.54	N.D.	31	9.25	44.5	21.2
BB-13-DH08-O-39 酸添加	96	1.2	2.1	0.05	0.03	N.D.	0.03	15	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	20.9
BB-13-well1	93	0.56	1.4	0.01	0.03	N.D.	0.02	16	4.5	45	N.D.	N.D.	N.D.	0.55	N.D.	29	9.53	44.1	21.2
BB-13-well1 酸添加	94	0.67	1.5	0.02	0.02	N.D.	0.02	15	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	21.2
BB-13-DH09-O-15	8.0	1.0	94	0.71	0.01	N.D.	0.01	8.9	3.1	9.3	N.D.	N.D.	N.D.	0.12	N.D.	44	7.70	42.3	21.8
BB-13-DH09-O-15 酸添加	8.8	1.1	95	0.69	0.01	N.D.	0.01	9.3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	21.3
BB-13-well3	64	3.0	6.2	0.36	0.04	N.D.	0.02	1.0	4.8	0.76	N.D.	N.D.	N.D.	3.50	N.D.	32	8.44	33.0	21.2
BB-13-well3 酸添加	63	3.0	6.9	0.4	0.04	N.D.	0.02	0.9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	21.3
MA-13-O-WP1	24	0.41	23	0.01	0.02	N.D.	0.18	4.7	19	0.94	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	3.0	11.30	26.1	21.5
MA-13-O-WP1 酸添加	25	0.28	23	0.02	0.03	N.D.	0.19	4.4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	20.5
PB-13-OWP-02	21	1.2	65	0.02	0.02	N.D.	0.09	0.3	23	0.06	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.05	1.6	11.67	70.9	19.7
PB-13-OWP-02 酸添加	22	1.3	67	0.02	0.03	N.D.	0.08	0.3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	19.9

<Remark> (A)の手法による分析結果

表 2.3.4-3 地下水パラメータ、溶存イオン濃度測定結果 (Bigbica 地区)

採取地	位置状況	Bigbica													
		DH08				DH09				well1				well2	well3
		22.7m		39m		14.8m				自噴				56.75m	100m
GPS	N15°30' 51.90" E120°22' 53.00"				N15°30' 52.1" E120°22' 54.6"				N15°30' 52.09" E120°22' 53.17"				N15°30' 49.9" E120°22' 54.2"	N15°30' 47.5" E120°22' 55.0"	
分析	(A)	(B)	(A)	(B)	(A)	(B)	(B)	(B)	(B)	(A)	(B)	(B)	(B)	(A)	(A)
採取日	2013/11/8	2013/11/10	2013/11/8	2013/11/10	2013/11/10	2013/11/10	2013/11/10	2013/11/10	2013/11/10	2013/11/8	2013/11/10	2013/11/10	2013/11/10	2013/11/10	2013/11/11
Sample No.	BB-13-DH08-O-22	PP004(F.W)	BB-13-DH08-O-39	PP005(F.W)	BB-13-DH09-O-15	P-01(N.W)	P-02(F.W)	P-03(A.W)	P-04(RF.W)	BB-13-well1	P-71(N.W)	P-72(F.W)	P-73(A.W)	-	BB-13-well3
pH	9.16	9.16	8.91	8.91	7.12		7.13			9.34		9.37		6.80	8.37
Temp.(°C)	31.9	31.9	29.4	29.4	30.6		29.7			29.9		29.4		29.3	32.2
ORP(mv)	63	63	*	-	153		135			-18		-48		150	28
EC(mS/m)	-	-	-	-	-		71.4			-		16.7		-	-
DO(mg/l)	-	-	-	-	-		8.0			-		2.5		-	-
CO2(mg/l)	-	15.2	-	17.7	-		1.4			-		3.5		-	-
カチオン濃度 (ppm)	Na ⁺ *1	93	-	96	-	8.8	7.70	9.41	11.35	7.06	94	98.23	92.67	101.07	63
	K ⁺ *1	0.79	-	1.2	-	1.1	1.01	1.00	2.03	1.36	0.67	0.67	0.62	0.77	3.0
	Ca ²⁺ *1	1.8	-	2.1	-	95	81.60	80.45	127.84	71.28	1.5	1.35	1.42	1.61	6.9
	Si ⁺ *2	15	-	15	-	9.3	-	-	-	-	15	-	-	-	0.9
	Al ³⁺ *1	0.02	-	0.03	-	0.01	0.01	0.00	10.91	7.69	0.02	0.04	0.02	0.03	0.02
	Mn ²⁺ *1	N.D.	-	N.D.	-	N.D.	0.00	0.26	N.D.	1.04	0.60	N.D.	0.00	0.00	N.D.
	Mg ²⁺ *1	0.03	-	0.05	-	0.69	7.96	8.04	12.43	6.98	0.02	0.03	0.05	0.03	0.40
	Fe ⁽²⁺³⁺⁾ *1	0.03	-	0.03	-	0.01	0.03	b.d.l.	9.41	7.90	0.02	0.09	0.04	0.08	0.04
アニオン濃度 (ppm)	HCO ₃ ⁻ *3	30	-	31	-	44	-	-	-	-	29	-	-	-	32
	NO ₂ ⁻ *4	N.D.	0	N.D.	0	N.D.	0.0724	-	-	-	N.D.	0	-	-	N.D.
	NO ₃ ⁻ *4	N.D.	1.4582	N.D.	0.3249	N.D.	1.4403	-	-	-	N.D.	0.05144	-	-	N.D.
	PO ₄ ³⁻ *4	N.D.	0	N.D.	0	N.D.	0	-	-	-	N.D.	0	-	-	N.D.
	SO ₄ ²⁻ *4	44	0.0502	44	0.7207	9.3	5.8707	-	-	-	45	36.6829	-	-	0.76
	Cl ⁻ *4	4.7	11.3007	6.3	3.7904	3.1	4.1691	-	-	-	4.5	4.1063	-	-	4.8
	Br ⁻ *4	N.D.	0	N.D.	0	N.D.	0	-	-	-	N.D.	0	-	-	N.D.
	F ⁻ *4	0.53	0.0159	0.54	0.1062	0.12	0.1917	-	-	-	0.55	0.1443	-	-	3.5
	OH ⁻ *5	9.33(21.2°C) *5	-	9.25(21.2°C)	-	7.70(21.8°C)	-	-	-	-	9.53(21.2°C)	-	-	-	8.44(21.2°C)
	SiO ₂	100	-	100	-	50	-	-	-	-	100	-	-	-	50
バックテスト (ppm)	Cl	20	-	20	-	2	-	-	-	-	≥50	-	-	5	2
	Al	0	-	0	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	0
	Ca	0	-	0	-	≥50	-	-	-	0	-	-	-	≥50	10
	Mg	0	-	0	-	10	-	-	-	0	-	-	-	5	1
ガス濃度 (ppm)	H ₂	*	-	*	-	*	-	-	-	-	-	-	-	*	*
	CH ₄	*	-	*	-	*	-	-	-	-	-	-	-	*	*
備考					揚水試験、 孔内水替後										

<Remark>

(A)分析

- *1 原子吸光分析法によりそれぞれ元素として計測
- *2 モリブデン青による分光光度法によりケイ酸濃度をSiO₂として計測しSiに換算
- *3 TOC計によりトータル無機炭素(TIC)として計測
- *4 イオンクロマトグラフィ法により、それぞれの種として計測
- *5 液の機器分析の直前にpHと液温を計測

(B)分析

Reference

- P-01(N.W)---Sample P-01,Nonprocessing water
- P-02(F.W)---Sample P-02,Filtrated Water
- P-03(A.W)---Sample P-03,Acidding Water
- P-04(RF.W)---Sample P-04 Sample Refiltrated Water
- b.d.l.: below detection limit.

表 2.3.4-4 地下水パラメータ、溶存イオン濃度測定結果 (Manleluag 温泉保養地)

採取地	位置状況	Manleluag												
		M1				M2				M3	M4			
	GPS	N15°42'10.8" E120°16'57.5"				N15°42'16.30" E120°17'02.03"				N15°42'16.70" E120°17'03.00"	N15°42'17.93" E120°17'00.76"			
分析	(A)	(B)	(B)	(B)	(A)	(B)	(B)	(B)	(A)	(A)	(B)	(B)	(B)	
採取日	2013/11/11	2013/11/11	2013/11/11	2013/11/11	2013/11/11	2013/11/11	2013/11/11	2013/11/11	2013/11/11	2013/11/11	2013/11/11	2013/11/11	2013/11/11	
Sample No.	MA-13-O-WP1	P-41(N.W)	P-42(F.W)	P-43(A.W)	-	P-51(N.W)	P-52(F.W)	P-53(A.W)	-	-	P-61(N.W)	P-62(F.W)	P-63(A.W)	
pH	10.61		10.80		10.77		10.78		10.40	10.74			10.76	
Temp.(°C)	32.7		32.9		33.1		33.5		34.2	33.1			32.7	
ORP(mv)	-290		-420		-252		-322		-317	-			-358	
EC(mS/m)	-		49.7		-		26.6		-	-			25.3	
DO(mg/l)	-		51.2 (0)		-		53.7 (0)		-	-			0	
CO2(mg/l)	-		14.1		-		19.1		-	-			19.6	
カチオン濃度 (ppm)	Na ⁺ *1	25	25.89	26.27	30.44	-	27.07	26.61	30.99	-	-	26.60	25.11	29.73
	K ⁺ *1	0.28	0.39	0.38	0.73	-	0.37	0.36	0.66	-	-	0.36	0.32	0.60
	Ca ²⁺ *1	23	25.77	25.86	29.89	-	25.53	25.41	29.16	-	-	24.25	23.06	28.65
	Si ⁺ *2	4.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Al ³⁺ *1	0.19	0.57	0.53	1.05	-	0.53	0.50	0.97	-	-	0.51	0.44	0.84
	Mn ²⁺ *1	N.D.	0.00	b.d.l.	0.00	-	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	-	-	b.d.l.	b.d.l.	0.00
	Mg ²⁺ *1	0.02	0.02	0.02	0.03	-	0.00	0.00	0.01	-	-	0.00	0.00	0.09
	Fe (2 ⁺ +3 ⁺) *1	0.03	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	-	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	-	-	b.d.l.	b.d.l.	0.02
アニオン濃度 (ppm)	HCO ₃ ⁻ *3	3.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	NO ₂ ⁻ *4	N.D.	0	-	-	-	0	-	-	-	-	0	-	-
	NO ₃ ⁻ *4	N.D.	0.0664	-	-	-	0.1039	-	-	-	-	0.1314	-	-
	PO ₄ ³⁻ *4	N.D.	0.1449	-	-	-	0.1243	-	-	-	-	0.1512	-	-
	SO ₄ ²⁻ *4	0.94	0.3639	-	-	-	0.3209	-	-	-	-	0.9844	-	-
	Cl ⁻ *4	19	17.8325	-	-	-	32.7308	-	-	-	-	54.1394	-	-
	Br ⁻ *4	N.D.	0	-	-	-	0	-	-	-	-	0	-	-
	F ⁻ *4	N.D.	0.2028	-	-	-	0.1764	-	-	-	-	0.1944	-	-
バックテスト (ppm)	OH ⁻ *5	11.30(21.5°C)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	SiO ₂	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Cl	≥50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Al	0.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ガス濃度 (ppm)	Ca	20	-	-	-	20	-	-	-	20	-	-	-	-
	Mg	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	-
	H ₂	-	-	-	-	380	-	-	-	0	-	-	-	-
備考	塩化物バックテストで黒色の析出物													

<Remark>

(A)分析

- *1 原子吸光分析法によりそれぞれ元素として計測
- *2 モリブデン青による分光光度法によりケイ酸濃度をSiO₂として計測しSiに換算
- *3 TOC計によりトータル無機炭素(TIC)として計測
- *4 イオンクロマトグラフィ法により、それぞれの種として計測
- *5 液の機器分析の直前にpHと液温を計測

(B)分析

Reference

- P-01(N.W)---Sample P-01,Nonprocessing water
- P-02(F.W)---Sample P-02,Filtrated Water
- P-03(A.W)---Sample P-03,Acidding Water
- P-04(RF.W)---Sample P-04 Sample Refiltrated Water
- b.d.l.: below detection limit.

表 2.3.4-5 地下水パラメータ、溶存イオン濃度測定結果 (Saile 鉱山及び Poonbato 地区)

採取地	位置状況	Saile Mine			Poonbato						
		揚水井			P2			P5			
	GPS	N15°42' 48.91" E120°18' 11.21"			N15°19' 15.10" E120°04' 23.40"			N15°19' 19.80" E120°04' 26.70"			
分析	(B)	(B)	(B)	(A)	(B)	(B)	(B)	(B)	(B)	(B)	(B)
採取日		2013/11/11	2013/11/11	2013/11/11	2013/11/13	2013/11/13	2013/11/13	2013/11/13	2013/11/13	2013/11/13	2013/11/13
Sample No.		P-11(N.W)	P-12(F.W)	P-13(N.W)	PB-13-OWP-02	P-21(N.W)	P-22(F.W)	P-23(A.W)	P-31(N.W)	P-32(F.W)	P-33(A.W)
pH		6.56			11.31	11.41			11.22		
Temp.(°C)		28.0			27.2	28.0			28.1		
ORP(mv)		79.1			-	-111			-181		
EC(mS/m)		45.8			-	39.8			59.6		
DO(mg/l)		43.9 (0)			-	0			39.25		
CO2(mg/l)		2.5			-	15.8			20.8		
カチオン濃度 (ppm)	Na ⁺ *1	11.70	10.98	14.85	22	22.44	24.28	33.43	17.36	17.89	20.41
	K ⁺ *1	0.29	0.28	0.63	1.3	1.39	1.45	2.37	1.06	1.11	1.41
	Ca ²⁺ *1	29.19	26.54	32.23	67	50.35	59.12	92.47	44.59	45.81	66.89
	Si ⁺ *2	-	-	-	0.3	-	-	-	-	-	-
	Al ³⁺ *1	0.00	b.d.l.	1.00	0.08	0.56	0.57	1.41	0.51	0.45	0.97
	Mn ²⁺ *1	0.00	0.00	0.00	N.D.	b.d.l.	b.d.l.	0.01	b.d.l.	b.d.l.	0.00
	Mg ²⁺ *1	22.91	20.94	25.43	0.02	0.03	0.03	0.24	0.20	0.23	3.43
	Fe (2 ⁺ +3 ⁺) *1	b.d.l.	b.d.l.	0.40	0.03	b.d.l.	b.d.l.	0.18	b.d.l.	b.d.l.	0.03
アニオン濃度 (ppm)	HCO ₃ ⁻ *3	-	-	-	1.6	-	-	-	-	-	-
	NO ₂ ⁻ *4	0	-	-	N.D.	0	-	-	0	-	-
	NO ₃ ⁻ *4	1.8054	-	-	N.D.	0.2337	-	-	0.3879	-	-
	PO ₄ ³⁻ *4	0	-	-	N.D.	0	-	-	0	-	-
	SO ₄ ²⁻ *4	0.0468	-	-	0.06	0.0505	-	-	0.0508	-	-
	Cl ⁻ *4	3.7827	-	-	23	12.8544	-	-	25.9896	-	-
	Br ⁻ *4	0	-	-	0.05	0	-	-	0	-	-
	F ⁻ *4	0.1506	-	-	N.D.	0.2631	-	-	0.242	-	-
バックテスト (ppm)	OH ⁻ *5	-	-	-	11.67(19.7°C)	-	-	-	-	-	-
	SiO ₂	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
	Cl	-	-	-	≥ 50	-	-	-	-	-	-
	Al	-	-	-	0.05	-	-	-	-	-	-
ガス濃度 (ppm)	Ca	-	-	-	≥ 50	-	-	-	-	-	-
	Mg	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
	H ₂	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
CH ₄	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
備考				塩化物バックテストで黒色の析出物							

<Remark>

(A)分析

- *1 原子吸光分析法によりそれぞれ元素として計測
- *2 モリブデン青による分光光度法によりケイ酸濃度をSiO₂として計測しSiに換算
- *3 TOC計によりトータル無機炭素(TIC)として計測
- *4 イオンクロマトグラフィ法により、それぞれの種として計測
- *5 液の機器分析の直前にpHと液温を計測

(B)分析

Reference

- P-01(N.W)---Sample P-01,Nonprocessing water
- P-02(F.W)---Sample P-02,Filtrated Water
- P-03(A.W)---Sample P-03,Acidding Water
- P-04(RF.W)---Sample P-04 Sample Refiltrated Water
- b.d.l.: below detection limit.

(2) 平衡化学計算による計測値の評価

1) 評価方法

液試料の分析結果の信頼性は、チャージバランスを計算することによって確認されることが多い。しかし、ここで計測した試料のように、pH が中性から離れた試料の場合、チャージバランスの計算には、水酸化物イオン濃度（水素イオン濃度）を考慮することが必要である。また、無機炭素の種分化や、錯体の影響も無視することができない。

そこで、表 2.3.4-1 の計測結果をモル濃度（mmol/L）に換算した値を用いて平衡化学計算を行い、各成分の種分化を計算した上でチャージバランスの確認を行った。平衡化学計算には米国地質調査所 (USGS) が開発した PHREEQC ver. 2.18 を用いた。熱化学データベースには、PHREEQC ver. 2.18 に付属する phreeqc.dat を用いた。

チャージバランスの確認は次のように行った。

- ① 酸添加試料の Na, K, Ca, Mg, 全 Fe, 全 Mn, Al, Si の計測結果をそれぞれ Na, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Al, Si 成分の全濃度として入力する。
- ② Cl⁻, SO₄²⁻, TIC, F⁻, Br⁻をそれぞれ Cl, S(VI), C(IV), F, Br 成分の全濃度として入力する。
- ③ 水温、pH について計測値を入力し、平衡計算を行う。水温は、ろ過のみと酸添加で計測値が異なる場合は、ろ過のみの試料の計測値を用いる。
- ④ ③で収束したときのチャージバランスのエラーが小さければ、計測値は妥当なものであると考えられる。もしエラーが大きければ（習慣的には±5%程度以上）、計測値には何らかの原因による誤謬が含まれる可能性がある。チャージバランスは次の式によって計算した。

$$\text{Error (\%)} = 100 * (\text{Cat}^- - |\text{An}^+|) / (\text{Cat}^+ + |\text{An}^-|) \text{式(1)}$$

ただし、Cat および An は、それぞれ全陽イオン、および、全陰イオンによる積算チャージとする。

2) 評価結果

計算結果を表 2.3.4-6 および表 2.3.4-7 に示す。7 種の試料のうち、BB-13-DH09-O-15 および MA-13-O-WP1 はチャージバランスの誤差が 15%以上あり、それ以外は誤差が小さかったことがわかる。BB-13-DH09-O-15 については、Ca²⁺の濃度が高く、Calcite の飽和度指数 (SI) が大きかったことから、フィルターを通過した Calcite のコロイド成分が含まれていてその影響を受けたことなどが考えられる。MA-13-O-WP1 については、水酸化物イオンのカウンタとなるプラスチャージが足りない結果であったが、その原因については不明である。以下、計測結果の誤差が少なかった BB-13-DH09-O-15、MA-13-O-WP1 以外の 5 試料について述べる。

いずれの試料の計算結果についても S(VI)の種は SO₄²⁻以外のものは数%未満であり、SO₄²⁻濃度を S(VI)の全濃度とした前提は十分よい近似であったと言える。

無機炭素の種分化は BB-13-DH08-O-22, BB-13-DH08-O-39, BB-13-well1, BB-13-well3 については HCO_3^- が支配的であるが CO_3^{2-} も無機炭素の 10%程度以上含まれることがわかる。pH が高い PB-13-OWP-02 については CO_3^{2-} が支配的である。

Si の種分化は、BB-13-DH08-O-22, BB-13-DH08-O-39, BB-13-well1, BB-13-well3 については H_4SiO_4 と H_3SiO_4^- が概ね拮抗しているが、pH が高い PB-13-OWP-02 については H_3SiO_4^- が支配的である。

表 2.3.4-6 Phreeqc を用いた平衡化学計算により各成分の種分化を計算した結果 (1/2)

溶存種	Na ⁺ mmol/L	K ⁺ mmol/L	Ca ²⁺ mmol/L	CaCO ₃ mmol/L	Mg ²⁺ mmol/L	MgCO ₃ mmol/L	MgOH ⁺ mmol/L	Fe(OH) ₄ ⁻ mmol/L	Fe(OH) ₃ mmol/L	Al(OH) ₄ ⁻ mmol/L	H ₄ SiO ₄ mmol/L	H ₃ SiO ₄ ⁻ mmol/L
BB-13-DH08-O-22	4.1E+0	2.0E-02	3.5E-02	7.8E-03	9.9E-04	1.3E-04	—	2.6E-04	1.4E-04	1.0E-03	4.4E-01	1.2E-01
BB-13-DH08-O-39	4.2E+0	3.1E-02	4.1E-02	8.1E-03	1.8E-03	2.0E-04	—	3.0E-04	2.0E-04	1.0E-03	4.3E-01	1.1E-01
BB-13-well1	4.1E+0	1.7E-02	2.7E-02	8.5E-03	6.5E-04	1.2E-04	—	3.0E-04	1.0E-04	1.0E-03	3.6E-01	1.7E-01
BB-13-DH09-O-15	3.8E-1	2.8E-02	2.3E+00	—	2.7E-02	—	—	6.5E-06	1.5E-04	4.0E-04	3.3E-01	—
BB-13-well3	2.7E+0	7.7E-02	1.6E-01	5.9E-03	1.5E-02	3.3E-04	—	1.3E-04	5.5E-04	7.0E-04	3.1E-01	1.2E-02
MA-13-O-WP1	1.1E+0	7.2E-03	4.8E-01	7.5E-02	5.3E-04	4.8E-05	2.4E-04	5.0E-04	—	7.0E-04	5.5E-03	1.5E-01
PB-13-OWP-02	9.6E-1	3.3E-02	1.5E+00	7.1E-02	4.4E-04	1.2E-05	3.7E-04	5.0E-04	—	3.0E-04	1.5E-04	9.6E-03

表 2.3.4-7 Phreeqc を用いた平衡化学計算により各成分の種分化を計算した結果 (2/2)

溶存種	Cl ⁻ mmol/L	F ⁻ mmol/L	SO ₄ ²⁻ mmol/L	NaSO ₄ ⁻ mmol/L	CaSO ₄ mmol/L	HCO ₃ ⁻ mmol/L	CO ₃ ²⁻ mmol/L	CO ₂ mmol/L	Error [※] %
BB-13-DH08-O-22	1.3E-01	2.8E-02	4.5E-01	6.7E-03	1.7E-03	2.2E+00	2.5E-01	—	2.74
BB-13-DH08-O-39	1.8E-01	2.9E-02	4.5E-01	6.9E-03	2.0E-03	2.3E+00	2.2E-01	—	2.98
BB-13-well1	1.3E-01	2.9E-02	4.6E-01	6.9E-03	1.3E-03	2.0E+00	3.7E-01	—	1.29
BB-13-DH09-O-15	8.7E-02	6.3E-02	7.9E-02	—	1.8E-02	3.5E+00	—	1.5E-01	15.75
BB-13-well3	1.4E-01	1.8E-02	7.7E-03	7.9E-05	1.5E-04	2.6E+00	3.8E-02	—	1.19
MA-13-O-WP1	5.4E-01	—	9.2E-03	—	5.4E-04	1.5E-02	1.6E-01	—	-12.38
PB-13-OWP-02	6.5E-01	—	5.3E-04	—	8.3E-05	2.3E-03	5.6E-02	—	0.19

※Error は式(1)による計算値

(3) Bigbigo の地区の地下水の特徴

Bigbigo 地区 (Active サイト) におけるアルカリ地下水とベントナイト反応について調べる上において、Bigbigo 地区の地下水の水質的特徴を明らかにし、その成因を明らかにすることが重要である。そこで、以下ではこれまでのデータをもとに、Bigbigo 地区の地下水水質の特徴をまとめ、それをもとに Bigbigo 地区の地下水水質に関する成因について考察する。

これまでのデータより、Bigbigo 地区の地下水水質は、

- pH は 9 以上にはなるが、10 以上とはなっていない。
- ORP はマイナスの値とはなるものの Manleluag 温泉保養地のように -300mV といった低い値とはならない。
- Ca は、Manleluag 温泉保養地、Poonbato 地区より低いが、Mg は高い。しかし、Saile 鉱山より低い。
- Cs、Ba、Sr などアルカリ、アルカリ土類元素で高いものがある
- 原水+硝酸水で Fe、Mn、その他の重金属元素 (Co、Ni、Cu 等) Ba、Sr、REE が他の地下水 (原水、原水ろ過水)、他の地域の地下水 (原水、原水ろ過水、原水+硝酸水) より高い。

以上の Bigbigo 地区の地下水特徴の解釈、成因として以下が考えられる。

まず、主成分元素、pH、ORP 等より、Bigbigo 地区の地下水-岩石 (超塩基性岩、玄武岩) との反応の程度は、Manleluag 温泉保養地、Poonbato 地区よりも小さい。すなわち滞留時間が短いと考えられる。このことは、酸素・水素同位体データ、CFCs データ[7]とも調和的である。

Bigbigo 地下水 (原水+硝酸水) 中の Fe、Mn、微量元素 (重金属、REE、Ba、Sr、Cs) 濃度が高いが、これは 0.2 μ m 以下の微粒子中にこれらの元素が多く含まれていることを示唆する。おそらく、Fe、Mn 水酸化物と炭酸塩粒子の存在が考えられるが、今後は FE-SEM などでの同定が必要である。

Bigbigo 地区の地下水で Ca、Sr、Ba、Cs、REE が高い原因として、石灰質堆積岩との反応も考えられる。Bigbigo 地域は、Saile 鉱山、Manleluag 温泉保養地、Poonbato 地区に比べて、石灰質堆積岩が多く分布している。

Bigbigo 地区の地下水の ORP は Manleluag 温泉保養地、Poonbato 地区よりも高く、このことは地下深部からの還元性地下水 (還元的であると、Fe、Mn が地下水中に多く溶ける) が、浅層で酸化的水と混じったことによるものと示唆される。しかしながら、還元的な Manleluag 温泉保養地、Poonbato 地区の地下水中に Fe、Mn 濃度が高くないことが疑問として残る。この混合により、Fe、Mn 水酸化物が沈殿ですと、これらに多くの重金属 (Co、Ni、Cu 等) が友沈、イオン交換、吸着により多く入り込むと考えられる。

Bigbigo 地下水中の Cl⁻濃度、SO₄²⁻濃度は他の地下水 (Saile 鉱山、Manleluag 温泉保養地、Poonbato 地区) よりもかなり高い。このことは、2012 年度[7]においても指摘したように古海水の混入が考えられる。ただし、その混入率は 0.5%程度と低い。海水の pH は一般的に 9 程度であるので、海水の割合が高いと pH が 9 程度にバッファーされる。しかし、この場合、この割合が低いので、このことは考えにくい。仮に pH=11 の高アルカリ水 (99.5%) と pH9 の古海水 (0.5%)

が混じったとしたら、その混合液の pH は 11 に近いものとなる。

この混合以外に Bigbigo 地区の地下水の pH が堆積岩中の炭酸塩によりバッファーされている可能性もある。CaCO₃ と平衡にある水溶液 pH を推定すると、仮に地下水中の CO₂ 濃度を 100ppm、Ca 濃度を 100ppm とすると閉鎖系、解放系共に pH が 8 程度となる。したがってこのような水（浅層水）と高アルカリ水との混合も考えられる。

CO₂ 濃度は、Poonbato、Mandeluag > Bigbigo > Saile 鉱山の順となった。一般的に CO₂ 濃度が高いと酸性、低いとアルカリ性になりやすいが、分析結果にはこの傾向はみられていない。したがって CO₂ 濃度が pH に大きな影響を与えたとはいえない。

(4) 今後の課題

もっとも大きな課題は、Bigbigo 地下水の成因を明らかにする点にある。例えば、Bigbigo 地下水の起源として、深部高アルカリ水（超塩基性岩、玄武岩と反応した水）、古海水、浅層水（炭酸塩にバッファーされた水、バッファーされない雨水など）が考えられる。これらの割合を求め、水-岩石（超塩基性岩、玄武岩、ベントナイト、石灰質堆積岩）反応に関するシミュレーションから評価可能であると考えられる。

起源を明らかにするためには、同位体（硫黄、ストロンチウム、酸素、水素）、CFCs、塩素同位体等による滞留時間の推定を検討すべきである。

2.4 地上物理探査

「Active Type」のポテンシャルサイト（コンタクト）の探査をするための鍵は、高アルカリ地下水の賦存状況（深度・形状<規模>・流動系）と水質（pH、Eh、DO、Temp.と組成<Si, Al, Ca, Mg, <Fe>, Na, K, Cl <F>, CO_3^{2-} , HCO_3^- , SO_4^{2-} ）である。後者は、試錐孔による孔内測定と採水により可能であるが、前者は間接的アプローチではあるが、地上物理探査が有効である。

地下水調査手法としては、一般的に比抵抗探査の一つである①TEM（Transient Electromagnetic Survey）法と②ERT法（Electro-Resistivity Tomography）が適用される。但し、測定については地形的な制約（地形の高低、大河、湖沼などを避ける）がある。それは計測時に、電極の位置や配線（電線）の形状（例えばループ）とその空間／範囲（グリッドの配置）とサンプリング（計測点）の設定に十分配慮することが求められるからである。

現地調査に先立ち、ERT法により2測線（ESE/WNE）の測定と予備解析を実施したが（図 2.3.4-1、図 2.3.4-2）、装置のトラブルや現地調査二週間前の風台風による倒木被害（図 2.3.4-3）によるクリーンアップなどに時間が取られたため、電極の配線形状と計測の空間的余裕があるループ式のTEMを使用することにした。

TEM法¹は、小さいループ式のシステムを使用するため、電極配置変更などによる作業工程上の制約が少ない。また、TEM法は、ERT法とは正反対の特性を調査するものであるが、それゆえその調査結果は、図 2.3.4-4 に示すとおり、完全な相関関係を持って得られることとなり、結果の解釈についても全く同じものが得られることとなる。

一般的にTEMの計測・解析により取得された導電率のアノマリー（Conductivity anomaly）は、①岩相の変化または、境界（例えば、Zambales オフィオライトの塩基性火成岩と Aksitero 累層の堆積岩の区別）、②地質構造要素（断層、褶曲、盆地構造など）の存在、③地下水の流路になる断裂系や、その断裂系に随伴する裂か水（Water-conducting fracture system）の存在、④帯水層や化石海水（停滞水など）の賦存（High conductivity anomaly）などの可能性を意味する。

今年度のTEM法による地上物理探査の仕様（機種・測定グリッドの大きさと組み合わせ、測点間隔など）、作業内容および解析結果について以下に報告する。

¹ TEM法：地表に設置したループ状に直流電流を流し、人工的に電磁場を生成させた後、その電流を急激に遮断することで、地下に過電流を発生させ、その過電流の拡散の様子を地表に設置した磁力計により測定し、地下の比抵抗値から地下水の賦存状況などを探査する。

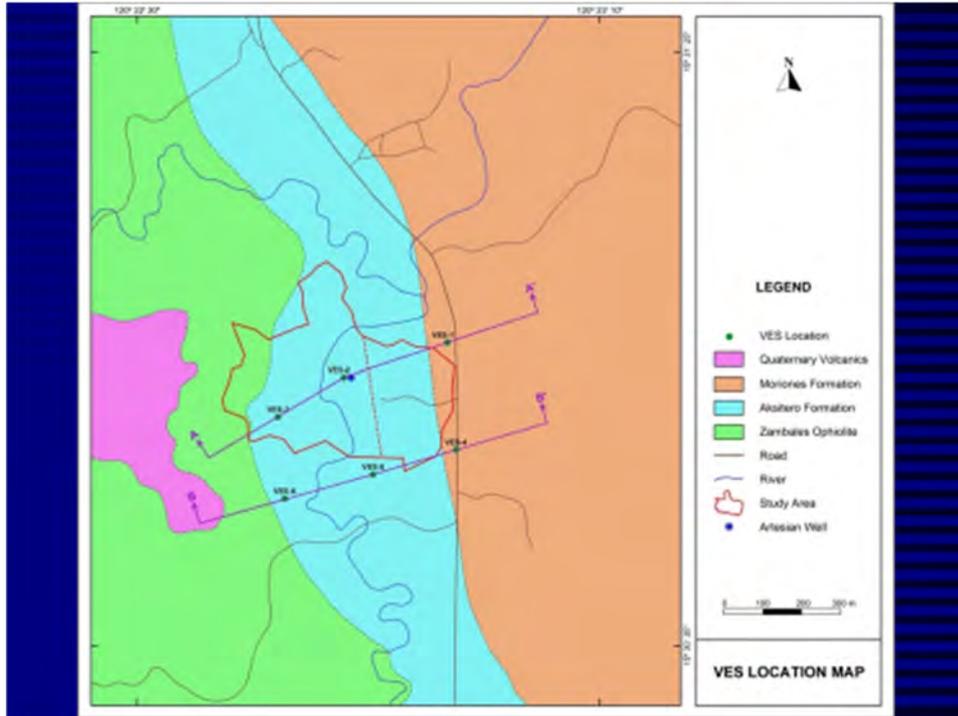


図 2.3.4-1 Mayantoc Field Centre (Bigbia) における ERT 予備調査の測線

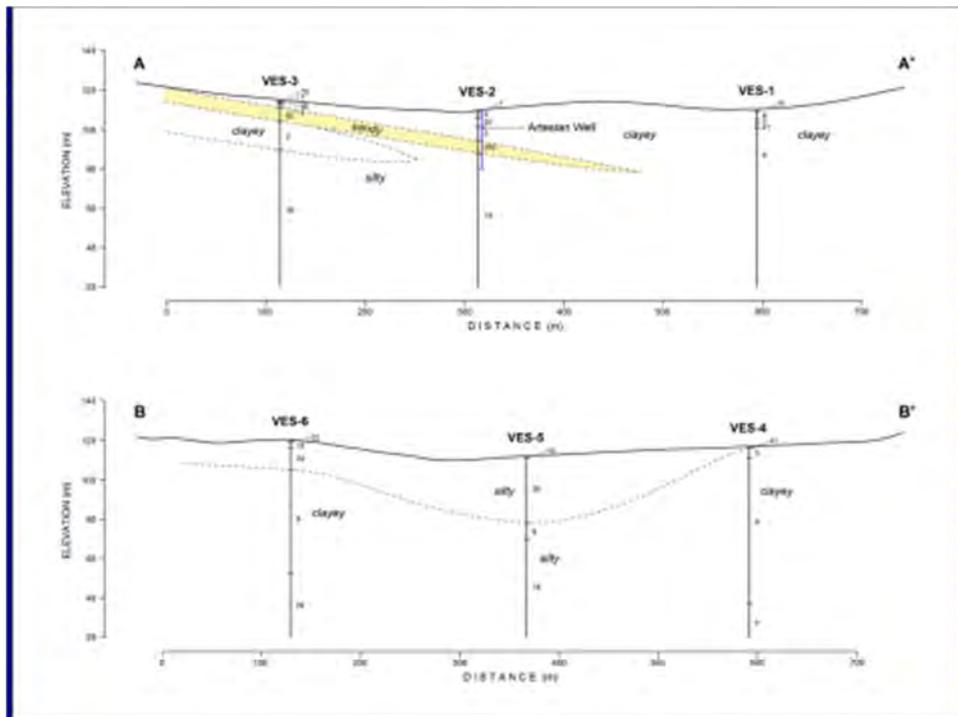


図 2.3.4-2 測線 1、2 における ERT 調査予備調査結果 (解釈) (上段の測線に示す NB. Artesian : Well-1)



図 2.3.4-3 Bigbiga の調査（物理探査作業）前の状況（10/31）

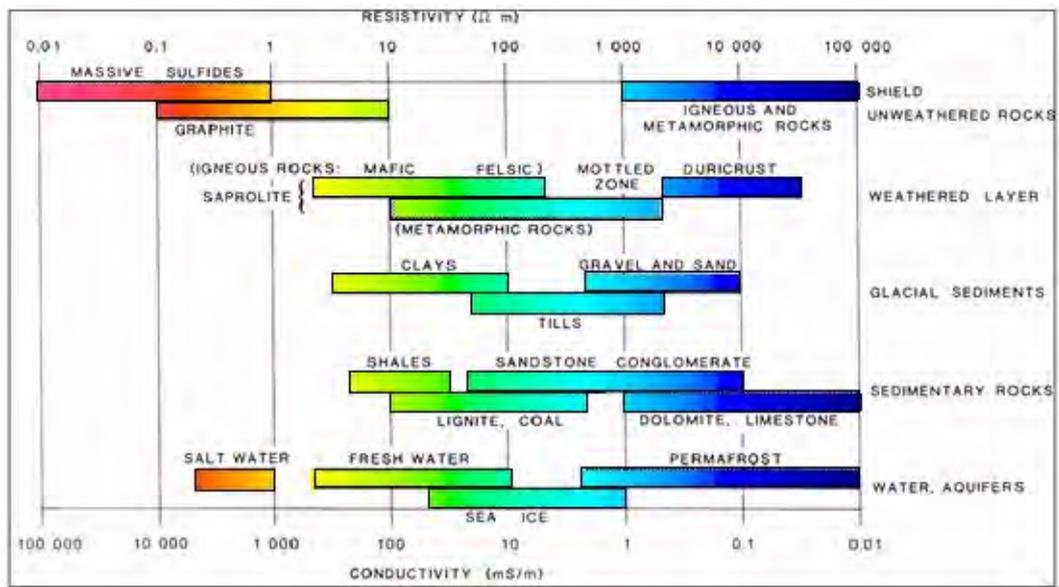


図 2.3.4-4 ERT による比抵抗と TEM による電気伝導率との相関

2.4.1 TEM 調査方法の概要

過渡現象電磁探査法（TEM）は、土壤の電気抵抗に関する情報を得るために開発された。TEM 法による物理探査は、鉱山・地熱・石油などの資源探査や、水文地質学、環境調査、防災分野等に広く活用されている。TEM 法では、送信機にて発生させた人工的な信号を用い（周波数領域方法と対照的な）時間領域で測定を行う（図 2.4.1-1）。

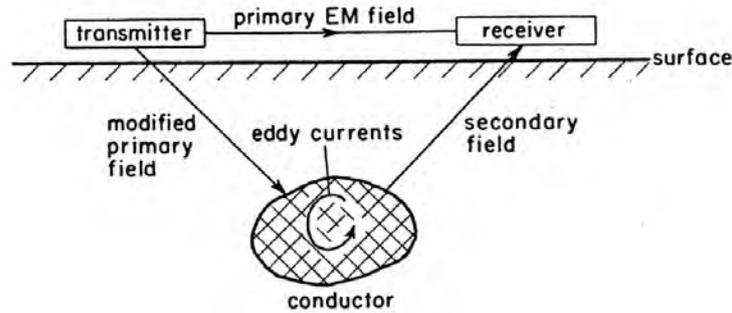
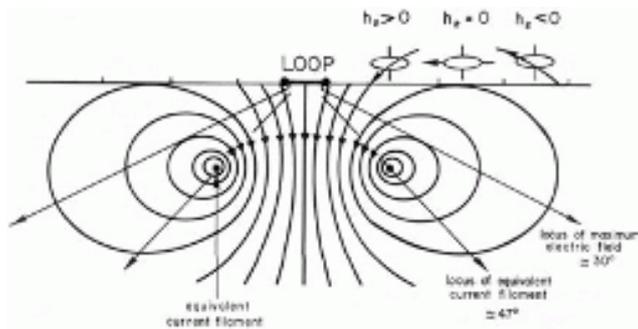


図 2.4.1-1 地表下の土壌への電磁場の伝搬

送信機から送信する電磁場（図 2.4.1-1）を急激に遮断させると、電磁誘導の法則により地表面に遮断前と同じ磁場を維持しようとする渦電流が発生する。この法則は、二次場（電磁場の伝搬は大地の比抵抗に依存する）を発生させる（図 2.4.1-2）。



(Nabighian und Macnae, 1991[8])

図 2.4.1-2 垂直磁気双極子の電磁場の伝搬

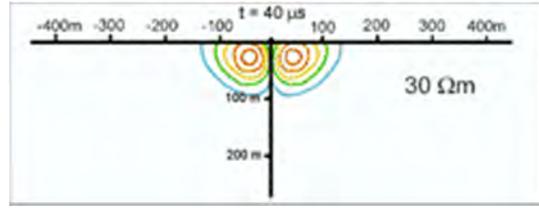
二次場の一時的な変化は、地表面で測定することができる（コイルの誘導電圧としての磁性成分 H_x 、 H_y 、 H_z 、および 2 極間に生じる電圧の水平成分 E_x 、 E_y として直接的に測定可能）。

TEM 法の探査深度は、周波数ではなく、電流切断後の時間で決まる。電流切断後の観測時間が長いほど深くなる。

地表に設置したループに流す電流を急激に遮断すると、前述のとおり電磁誘導の法則により地表面に遮断前と同じ磁場を維持しようとする渦電流が発生する。この地表の渦電流は、大地の比抵抗に応じて減衰するが、この電流の変化を妨げるような新しい渦電流が地中に生じる。このプロセスが繰り返され、あたかも渦電流が地下深部に伝播していくような現象を示し（スモークリングと呼ばれる）時間と共に、電流が地下深部に浸透していく。

これらの渦電流は、経路となる地層の比抵抗に応じて減衰するため、それらの作る磁場を時間の関数として測定することにより、地下の比抵抗分布を知ることができる。たとえば地下が高比抵抗の時は、渦電流は急速に減衰していくが、低比抵抗のときはゆっくり減衰する。

電流の伝搬状況例を図 2.4.1-3 に示す。ここでは、送信機からの電流を切った後に地表に誘導される電流の等価線（スモークリング）を示しており、均一な比抵抗を持つエリアにおいて、直径 100m のループで算出されたものである。一般的な測定時間は、 μS から mS の範囲で行われる。



(BGR, 2014[9])

図 2.4.1-3 電流遮断後の地下中の電流の伝搬（スモークリング）

(1) 現地調査機器

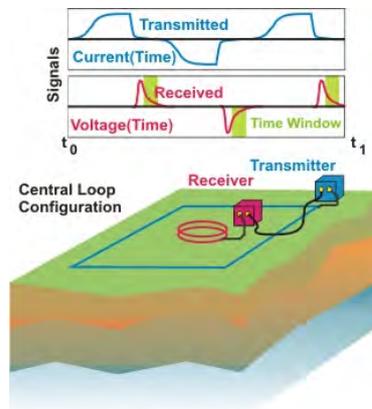
送信機には以下の2種類がある。

水平電気双極子：流電結合は、地表下の土壤中に電場を生じさせ、定電流が2極によって地面に注入されることを意味する。このようなエミッタは、例えば LOTEM (Long-offset TEM) 法に適用される。

垂直磁気双極子：電磁結合の場合、表層下にて一時的に一定の磁界を生じる大きな水平コイルによって、直流電流が誘導される。

今回の調査には、垂直磁気双極子タイプの送信機を用いた。

発信機への通電電流値と通電時間、および受信コイルに誘導された過渡電圧を図 2.4.1-4（上図）に示す（電圧のサンプリング間隔および範囲を緑の範囲で示す）。また、代表的な調査設備構成を図 2.4.1-4（下図）に示す。なお、今回の調査で使用した装置の使用状況を図 2.4.1-5 に示す。



（上図）：通電した電流値（青）と通電時間（青）と受信コイルに誘導された過渡電圧（赤）の関係
（下図）：代表的な調査設備構成

(BGR, 2014[9])

図 2.4.1-4 調査設備の構成と発信機へ電流値と受信コイルに誘導された過渡電圧



(a)主制御装置



(b)受信装置（各測点に設置し信号を受信）

図 2.4.1-5 主制御装置と受信装置

一般的に用いられるコイル構成は以下の通りとなる：

Central Loop

エミッタは、長方形の水平送信コイルにより生じた垂直磁気双極子である。受信コイルは、送信コイルの中央に置く。

Single Loop

送受信を同一のワイヤーにて行う。2つのプロセスの時間間隔をおくことで送受信を行う（フィリピン大が用いているシステム）。

Coincident Loop

送信コイルと受信コイルを互いに平行に配置する。

Separate Loop

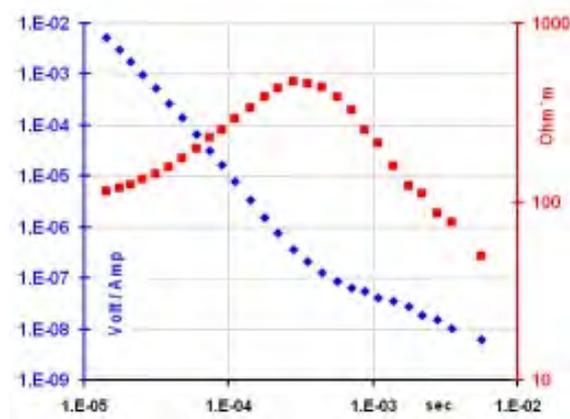
受信コイルは、所定の距離において送信機のループの外側に配置する。

(2) 現地調査実施例

取得した値は、一次場（送信機）からの発信を遮断後、受信コイルにて自動的に測定された電圧を示す。見掛け上の特定の比抵抗および、多くの定量的計算が可能である。算出値は、一般的に両対数表にプロットされる（取得した値は、コイルエリアと送信機の電流値によって標準化される）。

図 2.4.1-6 に示すフィールド調査例において、電圧の値は6桁（ $10^{-2} \sim 10^{-8}$ ）と非常に大きな範囲で測定されていることが分かる（図 2.4.1-6 青線）。

比抵抗値の時間軸方向の推移は、 $10^{-4} \sim 10^{-3} \text{sec}$ （図 2.4.1-6 の横軸の目盛）の間で、顕著な変化が見られた。見掛けの比抵抗は、はじめ $100 \Omega \text{m}$ からほぼ $500 \Omega \text{m}$ まで増加し、その後 $50 \Omega \text{m}$ まで減少した（減少傾向が収束していないため、測定を継続した場合比抵抗はより低下すると思われる）。図 2.4.1-6 より、比較的比抵抗の低い層と比抵抗の高い層が互層となっていることが分かる。なお、定量的な結論は測定値から直接得ることはできず、データをモデル化しなければ得られない。



(BGR, 2013[9])

図 2.4.1-6 TEM 調査結果例:電圧減衰（青）および一次場電源遮断後の時間と比抵抗の相関（赤）

(3) データ解析

通常データの定量的な解釈は、それぞれ異なる比抵抗値を持つ、水平方向に無限に均質な各層のモデルによってなされる。測定データとモデル応答の調整には、通常逆転換法が用いられる。

たとえば、図 2.4.1-7 (左) に示す測定結果は、図 2.4.1-7 (右) にプロットされている単純な 3 つの層のモデルにて解釈される: 厚さ数 m 程度で比抵抗 $8\Omega\text{m}$ 程度の薄い表層下に高比抵抗 ($1000\Omega\text{m}$) を示す厚い (300m 程度) 被覆岩層が続き、その下に再び比抵抗 $8\Omega\text{m}$ 程度の層が続いていることが分かる。

このモデルのグラフは赤線で示されている (実際の層の比抵抗は深くなるにつれて対数的な線形に減少している)。

不連続で比抵抗値の違う層ごとの境界が (水平に) 見られる。

この例は、チリ南部で測定されたものであり、高比抵抗値の厚さ 300m の火山岩下の熱水帯水層を示すものである。

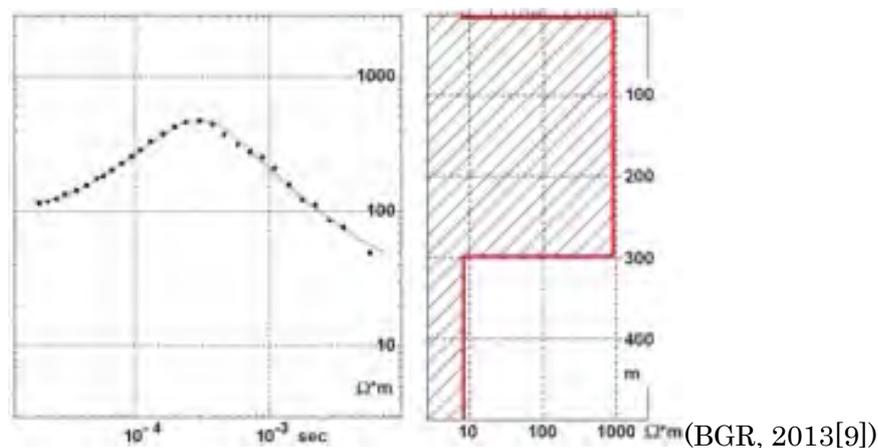


図 2.4.1-7 水平階層モデルにおける TEM 調査結果と解釈 (典型的な連続曲線的応答)

2.4.2 Bigbica における調査範囲

Bigbica における TEM 調査 (10/31~11/1 実施) 範囲を図 2.4.2-1 に示す。調査範囲は概ね $11,700\text{m}^2$ ($150\text{m}\times 85\text{m}$) で、既存井戸 (Well-1、Well-2、Well-3、DH05、DH06、DH07) を含むように設定した。

調査は当該調査範囲を、5つのグリッド (Loop) (LP1~5) に分割して実施した (表 2.4.2-1)。各調査エリアについては以下のとおり上記の既存井戸を含めた範囲を設定した。

- LP1: 調査対象地域のうち Aksitero 川東岸に隣接した DH-05 と DH-07 を含むグリッド
- LP2: 調査対象地域の中心地点で、Well-1 と DH-06 を含むグリッド
- LP3: Well-2 から Well-3 までのグリッド
- LP4: Well-3 周辺およびその西方と南方のグリッド
- LP5: LP1 および LP3 を含む調査対象地域の中央から北方全域のグリッド

TEM 調査の目的は、調査対象地域の表層下において電気伝導率(あるいは比抵抗)についての異常、あるいは急激な変化、およびそれらのコントラストが見られる地点を特定することである。当該調査のうち LP1~LP4 グリッドについては、調査範囲を細分化することで、より解像度の高い調査によって異常、あるいはその可能性のある地下構造を見つけることを目的として調査を実施した。また、LP5 グリッドにおける調査については、調査エリア全域の、より深い TEM 信号を取得することを目的として実施した。電気伝導率(あるいは比抵抗)の異常として、以下の要因が考えられる。

- 基本的な岩石学上の変化(例えば、砂岩に対する玄武岩の電気伝導率の違いが、TEM によって検知されることが十分に有意であると仮定した場合)
- 地下水の経路である破砕帯または断層として考えられる構造。地下水で満たされた地下構造は、周囲の低電気伝導率の岩体とは対照的に、高い電気伝導率(異常)の線形傾向として TEM データで理想的に反映される。
- 『**Lines** (列 5)』は、各ループにおける測線(受信機により TEM 信号を取得したライン)を示す。
- 『**Line spacing** (列 8)』は、各ループにおける測線の間隔である。LP1 グリッド、LP2 グリッド、および LP4 グリッドの測線間隔は、ステーション(各測線における測点)間隔に等しくなるよう一定の間隔で配置されている。LP5 では、ループ内に **Fish pond** を含むため、その部分での調査は出来なかった。よって、測線は **Fish pond** を挟む通路に沿って 30m の間隔とすることとした。
- 『**Station spacing** (列 9)』は、各測線における測点の間隔である。測点間隔は、ループの大きさによって調整する。LP1 グリッド、LP2 グリッド、LP3 グリッドの比較的小規模なエリア(1,000 m²程度以下)については測点間隔を 4m とし、LP1 グリッド、LP5 グリッドの大規模エリアにおいては、調査エリア全域を効率的にカバーするために測点間隔は 10m とした。
- 『**No. of data points** (列 10)』は、各ループにおける測点の数を示している。
- 『**Average depth reached** (列 11)』は、各ループにおける調査の最深深さの平均値を示している。LP4 グリッドおよび LP5 グリッドでは、大きなループでの調査のため、他のループに比べてより深層までの調査が可能となっている。
- LP5 グリッドについては、44 測点のうちデータ取得は 9 測点のみとなっているが、これは高アルカリ地下水の賦存の可能性がより高いと思われる **Well-1** を含むために、より広いループ(LP5)での調査を優先した。LP4 グリッドでの調査は L1 測線のみ計測した(『**Remarks**』参照)。

表 2.4.2-1 TEM 調査のループで分割したグリッドの詳細

Loop	Coverage	Dimensions	Area	Lines	Length of each line	Total length of line per loop	Line spacing	Station spacing	No. of data points	Average depth reached	Remarks
LP1	DH-05, DH-07	~85 m x 14 m (Irregular shape)	1,190 m ²	L1 L2 L3 L4 L5 L6 L7 L8 L9	32 m 32 m 32 m 32 m 28 m 28 m 28 m 28 m 28 m	268 m	4 m	4 m	76	30 ± 6 m	Finished
LP2	Well-1, DH-06	28m x 12m	336m ²	L1 L2 L3 L4 L5 L6	36 m 36 m 36 m 36 m 36 m 36 m	216 m	4 m	4 m	60	25 ± 5 m	Finished
LP3	Well-2, Well-3	70m x 8m	560m ²	L1 L2 L3	28 m 28 m 28 m	84 m	4 m	10 m	24	22 ± 4 m	Finished
LP4	Well-3	100m x 30m	3,000 m ²	L1 L2 L3 L4	100 m 100 m 100 m 100 m	(400 m) 80 m actual	10 m	10 m	(44) 9 actual	38 ± 15 m	Not continued; only 80 m of L1 was finished
LP5	Well-1, DH-05, DH-06, DH-07	~150m x 78m (Irregular shape)	11,700 m ²	L1 L2 L3 L4	150 m 150 m 70 m 135 m	505 m	30 m	10 m	53	60 ± 18 m 54 ± 10 m 63 ± 12 m 66 ± 15 m	Finished
	Total					(1,473 m) 1,153 m actual			(257) 222 actual		

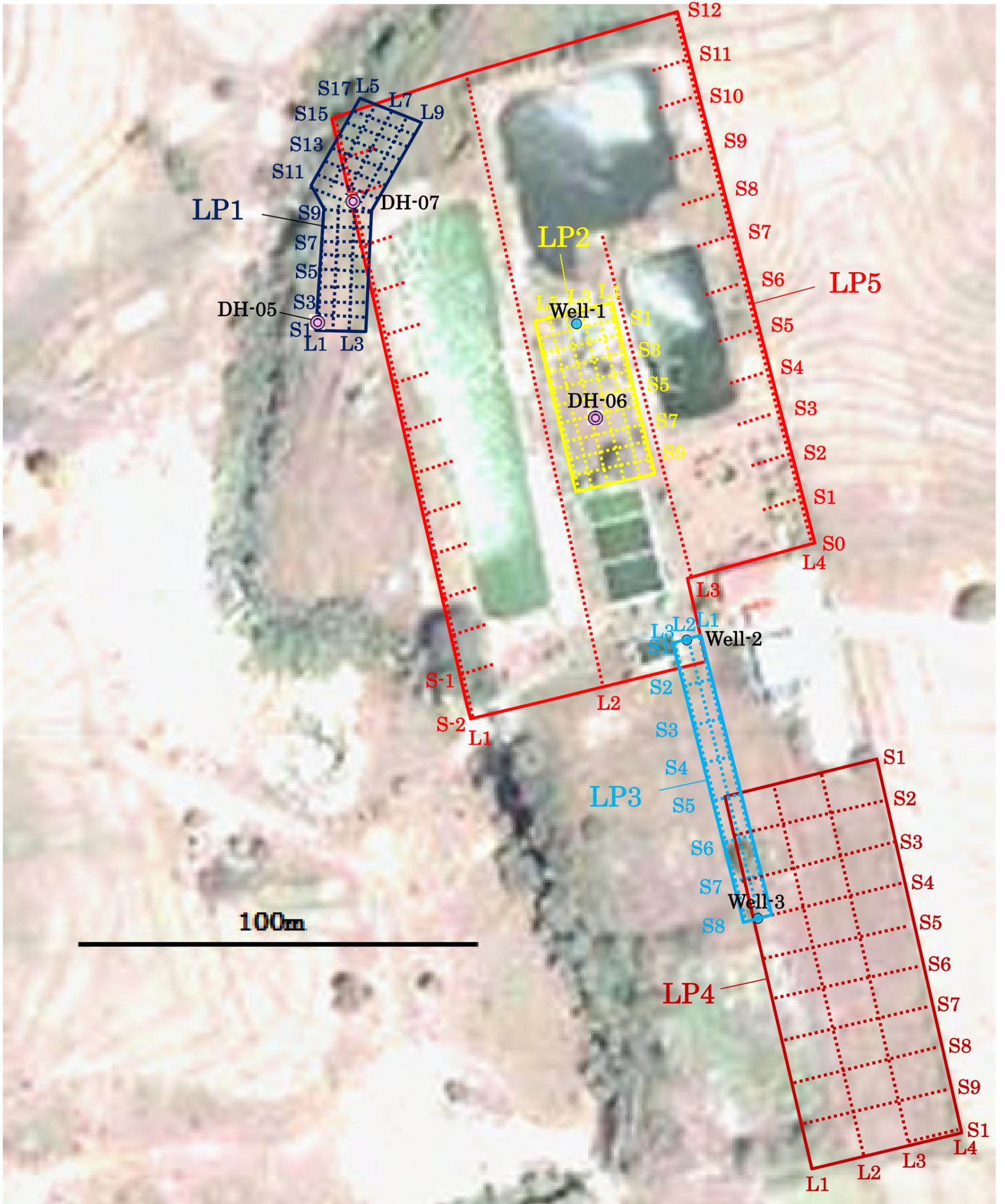


図 2.4.2-1 TEM 調査の範囲 (Bigbiga 地区)

2.4.3 調査結果

(1) 地質構造

TEM 調査を実施した範囲およびグリッドを図 2.4.2-1 に示す。L (ライン) は測線を示し、S (ステーション) は各測線 (tie line) 上の測点を示す。各調査エリアの電気伝導率の測定結果を図 2.4.3-1～図 2.4.3-13 に示す。

表 2.4.3-1 は、玄武岩、堆積岩、未固結岩と地下水の特性 (水質) の地球物理学的特性 (電気伝導率) を示している。表にはフレッシュな玄武岩が圧密された砂岩と同等の電気伝導率を有すること、粘土または頁岩混じりの砂岩の電気伝導率よりもわずかに低いこと、純粋な粘土よりも 1 桁小さいことを示している。

また、玄武岩が風化するにつれて玄武岩とこれらの堆積岩間のコントラストは減少する。風化した玄武岩はフレッシュな玄武岩よりも高い導電性を持ち、仮に風化した玄武岩が水で飽和状態であれば少なくとも 1 桁大きくなる。最も風化した状態では玄武岩の電気伝導率は砂岩の電気伝導率と同等となる (風化した玄武岩が水で飽和状態であればその電気伝導率は粘土のものと同様となる)。

1) N80E/S80W の構造 (STRUCTURE-1)

図 2.4.3-14 に示す LP5 グリッド中の N80E/S80W の構造において、ある深度で L1～L4 グリッド全域を横切るような断面に、導電性を示すと思われる測定結果を確認することができた (図 2.4.3-15)。

この断面は、浅層部で、高い導電性 (10000～38000(mS/m)) の異常を示している。この異常は L1S7 より L2S6～L2S8、L3S6～L3S7、L4S6～L4S13 にかけてトレースできる。

図 2.4.3-15 に示すような異常のトレースは、地質構造が N80E/S80W 方向への走向傾向を示唆している。また、浅層部に異常が見られることから、その地質構造が地表付近に生じていることを示唆している。

深部での微妙な変化をより分かりやすく示すため、電気伝導率の最大値及び最小値をフィルターに掛けた (電気伝導率は、図 2.4.3-16 に示すように下限値は 70mS/m、上限値は 200ms/m で切り捨てられる)。フィルターに掛けることによりデータ構成において異常の位置がより明確に確認できる。

異常個所は明確な傾斜方向を有していないが、かわりにすり鉢状の構造 (L2 および L4 のように)、あるいは正断層の階段状の構造 (L1 のように) となっていることが分かる [10]。

電気伝導率の異常値 (10,000～38,000(mS/m)) は水の値より高いが、おそらく地下水によるものと思われる (表 2.4.3-1)。これらの異常のトレースは、割れ目や断層などが地下水の水路を示している可能性がある。

2) N10W/S10E の構造 (STRUCTURE-2(2A, 2B, 2C))

LP5 グリッドにおける別の異常 (図 2.4.3-17) は、このとき L2 に沿った L2 S6～L2 S8(2A) 間で観察された。トレースラインは図 2.4.3-14 に示すように、前述の N80E/S80W (STRUCTURE-1) の走向に対して N10W/S10E と直交することが観察される。この異常は

前述のものよりも短く、わずか 20m 程度の長さで、低い電気伝導率 (2500~3000mS/m) を示しているが、電気伝導率の値は依然として水の値と一致する。

異常のトレースは前述のもの (N80E/S80W の走向) と直交するもう一つの地下水経路であることを示している可能性がある。それは、前述の構造と複合した破碎帯あるいは断層である可能性がある。

低電気伝導率は地下水の拡散・移流の可能性がある。もしそうでない場合、既存構造の中に閉じ込められている。あるいは、それは割れ目における水の流れを導いているのかもしれない。

第 2 の構造の傾きは、L2 S6 から L2 S8 にかけて(2A)の N-S 断面を見ること、および再度電気伝導率の上限値 (200mS/m) 以上と下限値 (70mS/m) 以下のデータをカットすることで見られる (図 2.4.3-18)。LP5 の調査エリアにおける N-S 間の長さによって拘束されるように、第 2 の構造は E に向かって傾斜しているように見える。

この第 2 の構造は、LP2 グリッドでも見る事ができた。LP2 グリッドの断面 (図 2.4.3-19) では、L3 および L4 に沿って線形の異常が見られる。L4 において S4~S7 間 (12m) で異常が生じているのと同時に、L3 では S3~S8 (20m) において異常が生じている。L3 と L4 の間隔は 4m であり、これは LP2 の異常を確認するために適した配置 (20m×4m) であった。

電気伝導率の値 (8000~790000) は、ここでも水の電気伝導率の範囲と一致することが確認できる。しかし、DH06 の水位が調査段階では GL-3.1m であると同時に Well-1 は自噴井戸であることから、ここで見られた異常が Well-1 よりも DH06 に近いことが予想外であることが注目される。また、Well-1 と DH06 の間での異常の接続の可能性についても注目される。しかしながら、DH06 においては高アルカリ水が見られないことから、このような物理的な繋がりの可能性は非常に低い。構造の傾斜は、S4~S7 間の N-S 断面より直線的ではないことが分かる (図 2.4.3-20)。

Well-1 直下の異常の欠落は Well-2、Well-3 の場合とは異なる。Well-2、Well-3 では地下水を示す表層の異常 (浅層での高電気伝導率) は井戸の直下に見られる (図 2.4.3-10)。ここで Well-2 は LP3 グリッドの S1、Well-3 は LP3 グリッドの S8 である (図 2.4.3-14)。Well-2 および Well-3 では、それらの直下の浅層 (1m 未満) において高電気伝導率 (13000~138000(mS/m)) であることが確認できる。Well-3 における異常が GL-0.1m の位置で 138000(mS/m)であるとともに Well-2 においては GL-0.4m の位置で 13000(mS/m)であった。

Well-3 は、LP4 グリッドにおいては L1S4 に位置するが、同様の結果が得られている (図 2.4.3-11)。Well-3 の直下において、電気伝導率 3000mS/m の異常が、GL-0.9m の位置で確認された。このように、Well-1 直下の異常の欠落は、おそらく連続した流路が分割されたエリアにおける前述の破碎帯を示している。

表 2.4.3-1 既往の研究結果に基づく岩相および物質の電気伝導率

Material	電気伝導率範囲(mS/m)	Reference/s
Groundwater from sandstone	1138-1251	BHP Billiton, 2011[11]
Groundwater from basalt	258-1352	BHP Billiton, 2011[11]
Groundwater from basalt	82-532	Razack, 2013[12]
Groundwater from basalt	10-45	Tweed, 2006[13]
Groundwater from basalt	<25	Locsey, 2004[14]
Groundwater from basalt	3.2-82	Das, 2005 ¹⁵
Groundwater from alluvium	35-213	BHP Billiton, 2011[11]
Topsoil	6-313	AQUIM[16]
Alluvial soil	100-200	Rai, 2013[17]
Alluvium, clay	>100	CGWB[18]
Alluvium, sand with clay	50-100	CGWB[17]
Alluvium, sand	20-50	CGWB[17]
Sand	29-91	AQUIM[19]
Sand, marl	10	Bernard, 2006[20]
Dry sand, limestone	1	Bernard, 2006[19]
Clay saturated with brackish to saline water	333	Zohdy, 1969[21]
Clay saturated with fresh to brackish water	125-200	Zohdy, 1969[20]; AQUIM[15]
Clay & silty sand saturated with fresh water	40-91	Zohdy, 1969[20]
Clay	100-167	AQUIM[15]
Clay	100	Bernard, 2006[19]
Shale	200-556	AQUIM[15]
Sandy clay	111-167	AQUIM[15]
Sandstone, shale	71-100	AQUIM[15]
Sandstone	11-63	AQUIM[15]
Water-saturated sandstone	>20	CGWB[17]
Fractured sandstone	3-20	CGWB[17]
Compact sandstone	0.7-7	AQUIM[15]
Compact sandstone	<3	CGWB[17]
Weathered basalt with water	25-50	Rai, 2013[16]
Weathered basalt saturated with water	13-100	Kumar, 2008[22]
Weathered basalt saturated with fresh water	17-33	Zohdy, 1969[23]
Weathered basalt	29-286	AQUIM[15]
Weathered basalt	13-33	CGWB[17]
Dry weathered basalt	1-17	Kumar, 2008[21]
Moderately weathered basalt with water	14-25	Rai, 2013[16]
Moderately weathered basalt	23-33	AQUIM[15]
Vesicular basalt	17-25	AQUIM[15]
Vesicular basalt	11	Kumar, 2008[21]
Amygdaloidal basalt	7-13	CGWB[17]
Zeolitic basalt	9	Hoareau[24]
Fractured basalt	15-25	AQUIM[15]
Mugearite (Alkali feldspar-bearing basalt)	11.2	Hoareau, 2005[23]
Fresh basalt saturated with saline water	25-33	Zohdy, 1969[22]
Fresh basalt saturated with fresh water	1.4-3.3	Zohdy, 1969[22]
Fresh/ massive basalt	<17	AQUIM[15]
Fresh/ massive basalt	4-10	CGWB[17]
Fresh/ massive basalt	<14	Rai, 2013[16]
Fresh/ massive basalt	6-7	Kumar, 2008[21]
Basalt saturated with seawater	1.4-19	Cox, 1971
Basalt	4.5	Hyndman, 2007
Basalt	0.1	Bernard, 2006[19]

表 2.4.3-2 人工物に起因する電気伝導率

Loop	Station	Conductivity	Depth	Artifact
LP2 (付録 1.2.A)	L1 S2	11,000 mS/m	0.5 m	Electric cable tower
LP2 (付録 1.2.A)	L1 S10	4,600 mS/m	0.8 m	Electric cable tower
LP3 (付録 1.3)	L1 S3 to S4	70,000 mS/m	0.2 m	Metal post
LP3 (付録 1.3)	L3 S1	11,000 mS/m	0.5 m	Buried pipe of electric wires

3) N60W/S60E の構造

LP5 グリッドにおける地質構造調査は、Well-1 周辺の新たな断面方向の構造を確認するために実施した (図 2.4.3-24)。異なる方向の断面構造は、LP5 グリッドの 4 本の測線 (L1~L4) それぞれの測点から構成されている。各測線における測点の連続性の確認のためにそれぞれの断面の調査を行った結果を図 2.4.3-25~図 2.4.3-29 に示す。調査された 14 のクロスラインのうち N60W/S60E 方向に位置するセクション 10 は最も明らかな連続性を①深度 5m 以下から 3,40m における電気伝導率の範囲が 75~175mS/m での連続性、②および深度約 40m における 80 弱~70mS/m の電気伝導率の連続的な変化をより明確に示している (図 2.4.3-23、図 2.4.3-28 の SEC10、図 2.4.3-31~図 2.4.3-32)。そのため、この方向から DH09 の位置を決めることとし、LP5 グリッドの L4 上で Well-1 の S60E の位置に決定した (図 2.4.3-24)。

注意事項としては、地下水に起因する上記の浅層における電気伝導率 2500~790000(mS/m) の異常は、人工物 (例えば鉄塔や電線) からも影響を受ける可能性があることを認識しておく必要がある。表 2.4.3-2 は異常が人工物に起因している測点の一覧を示す。ここで、人工物による異常から天然由来の異常を区別する方法は、異常の分布状況を確認することである。人工物による異常は、まばらもしくは一点のみに見られ、天然由来の異常は連続的な分布として見られる傾向にある。

4) 試錐孔周辺の 2D 断面

アルカリの自噴井である Well-1 周辺の電気伝導率の二次元的な広がりを確認するため、図 2.4.3-30 に示す測線について、測定したデータを用いて 2D 解析を実施した。図 2.4.3-31~図 2.4.3-40 に測点のデータと合わせて結果を示す。

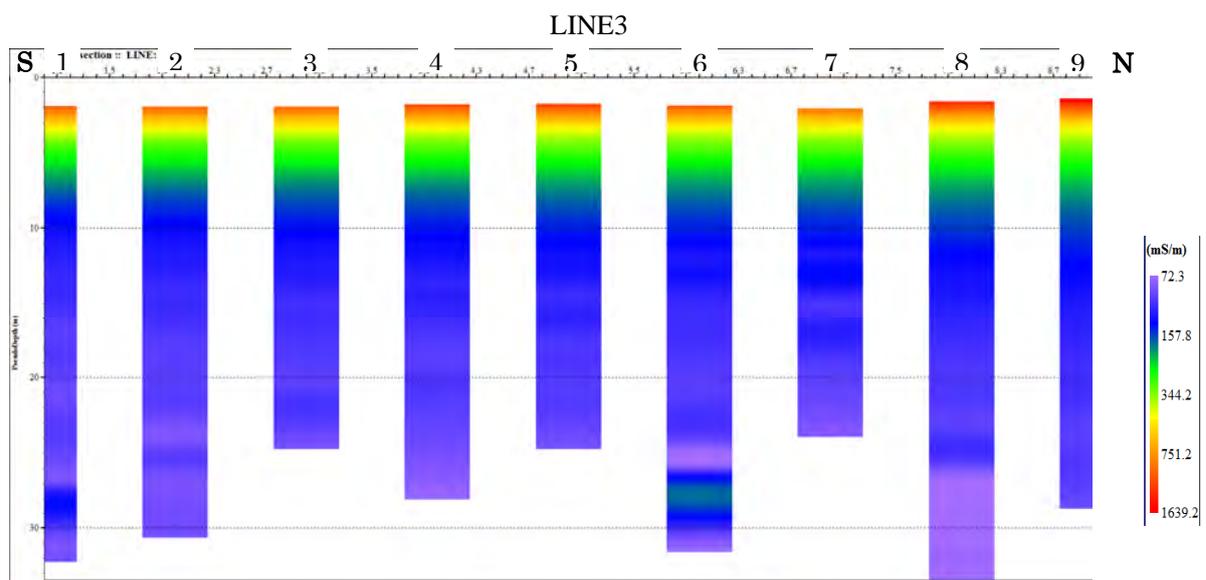
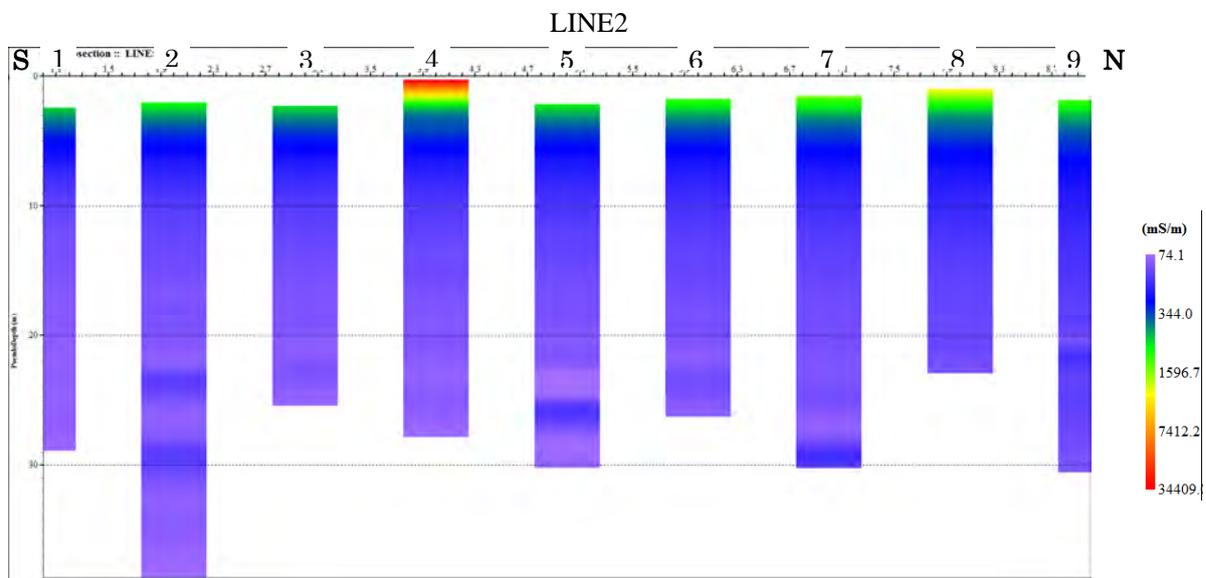
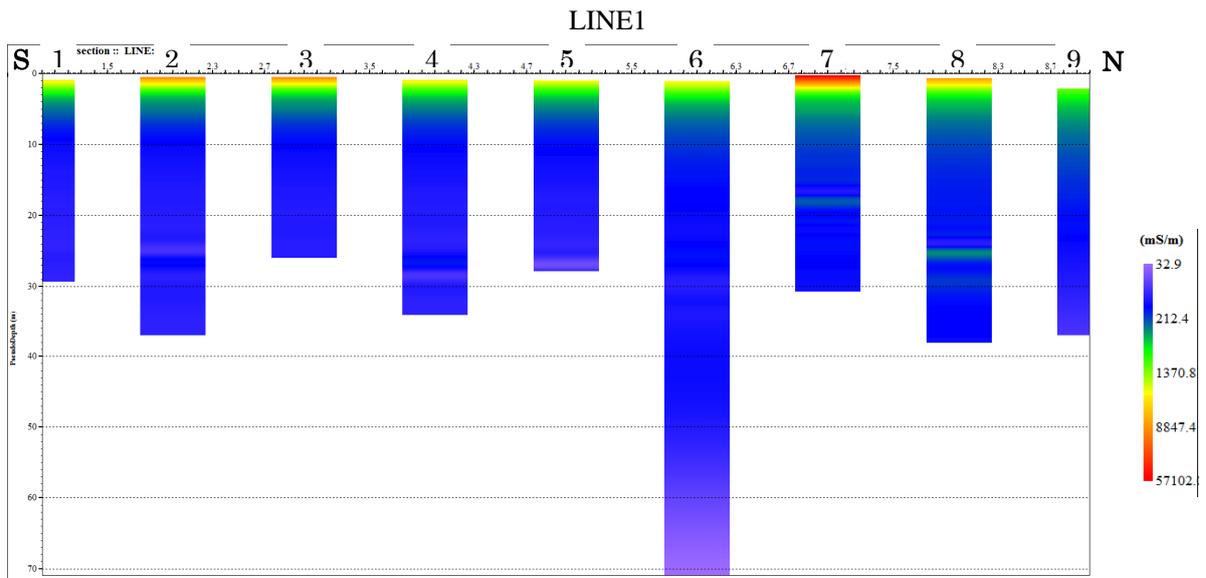


図 2.4.3-1 LP1 グリッドの各測線 (L1~L3) の電気伝導率

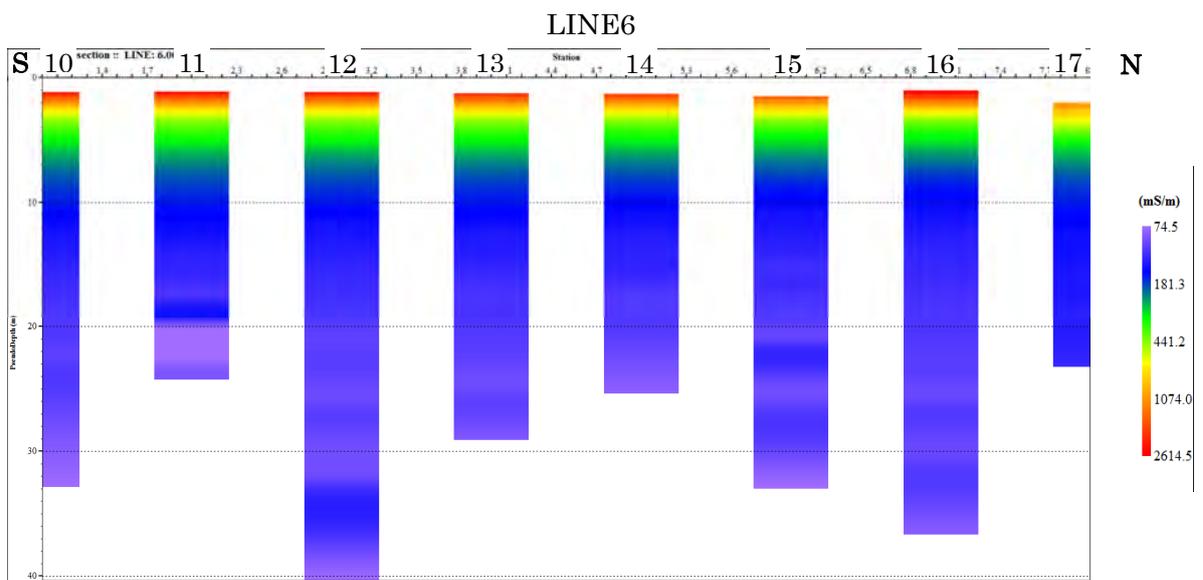
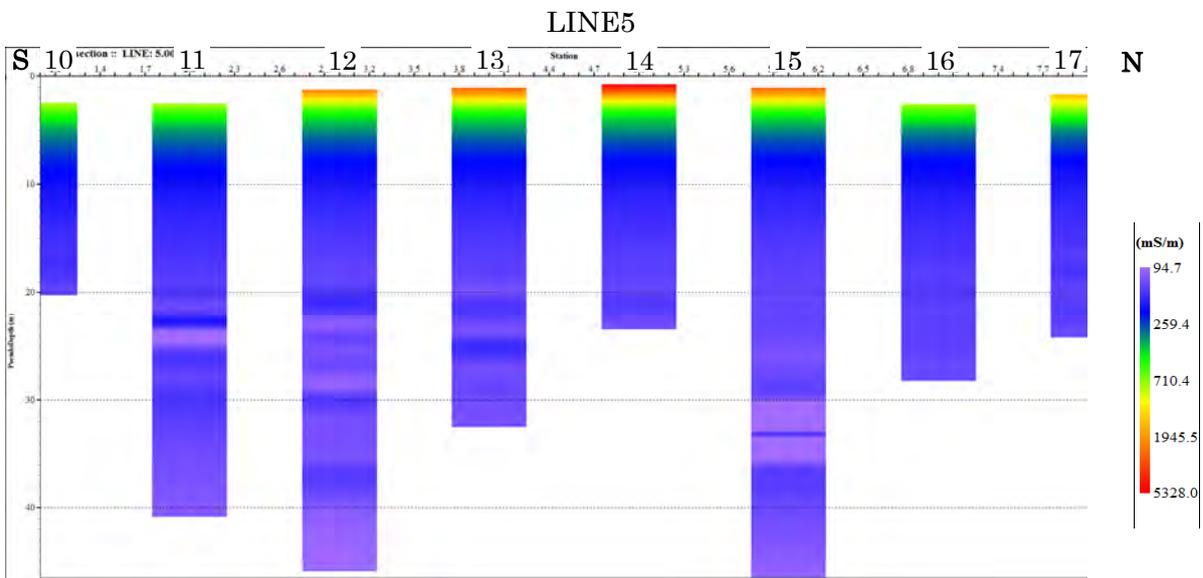
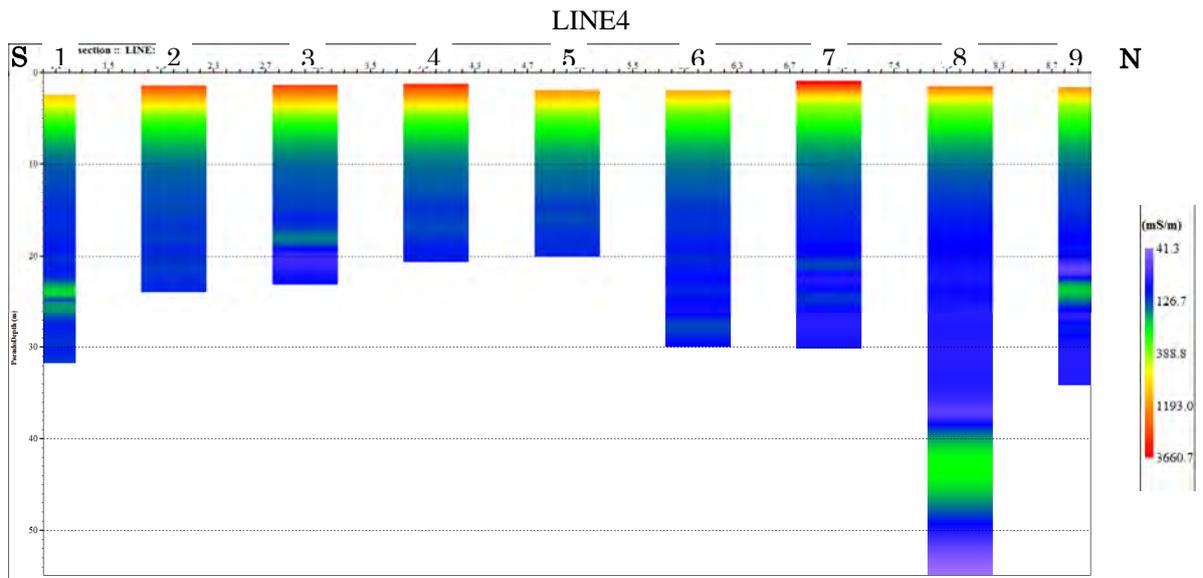


図 2.4.3-2 LP1 グリッドの各 LINE (L4~L6) の電気伝導率

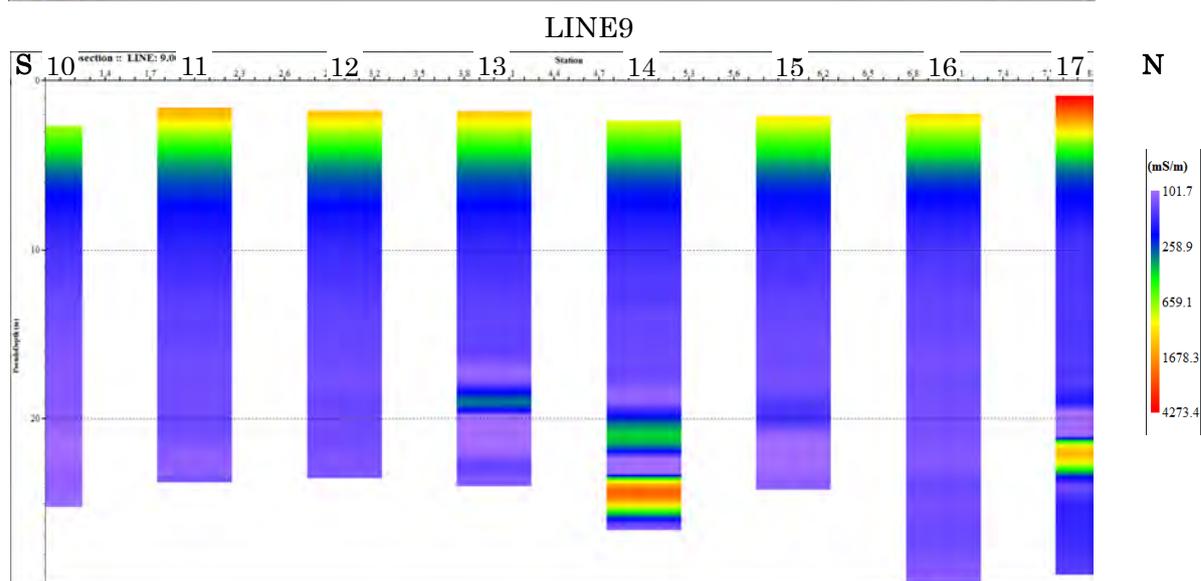
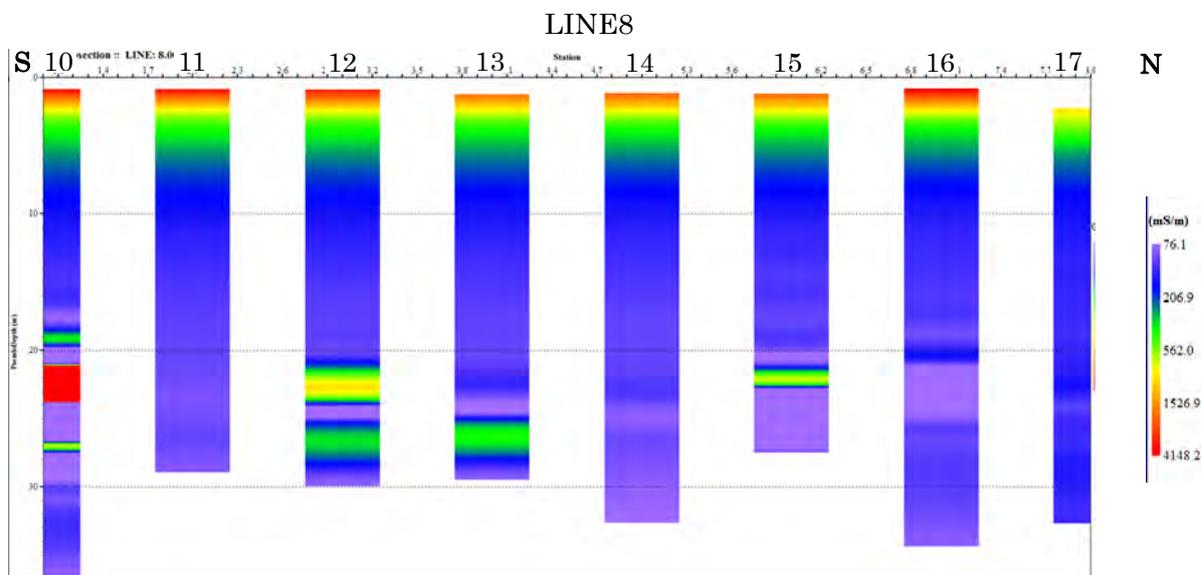
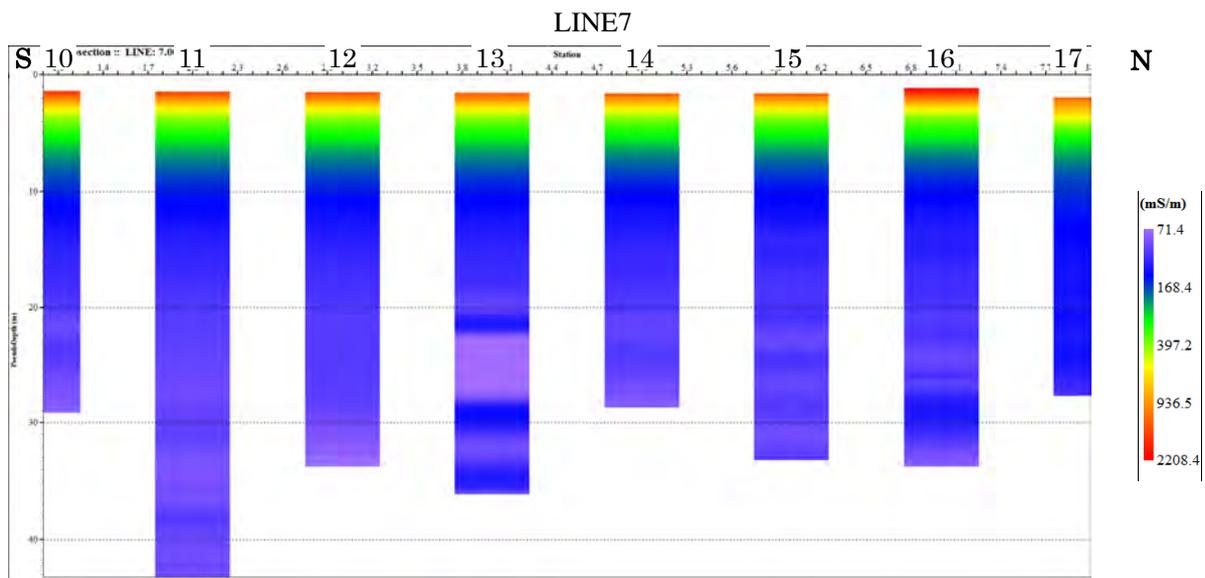


図 2.4.3-3 LP1 グリッドの各 LINE (L7~L9) の電気伝導率

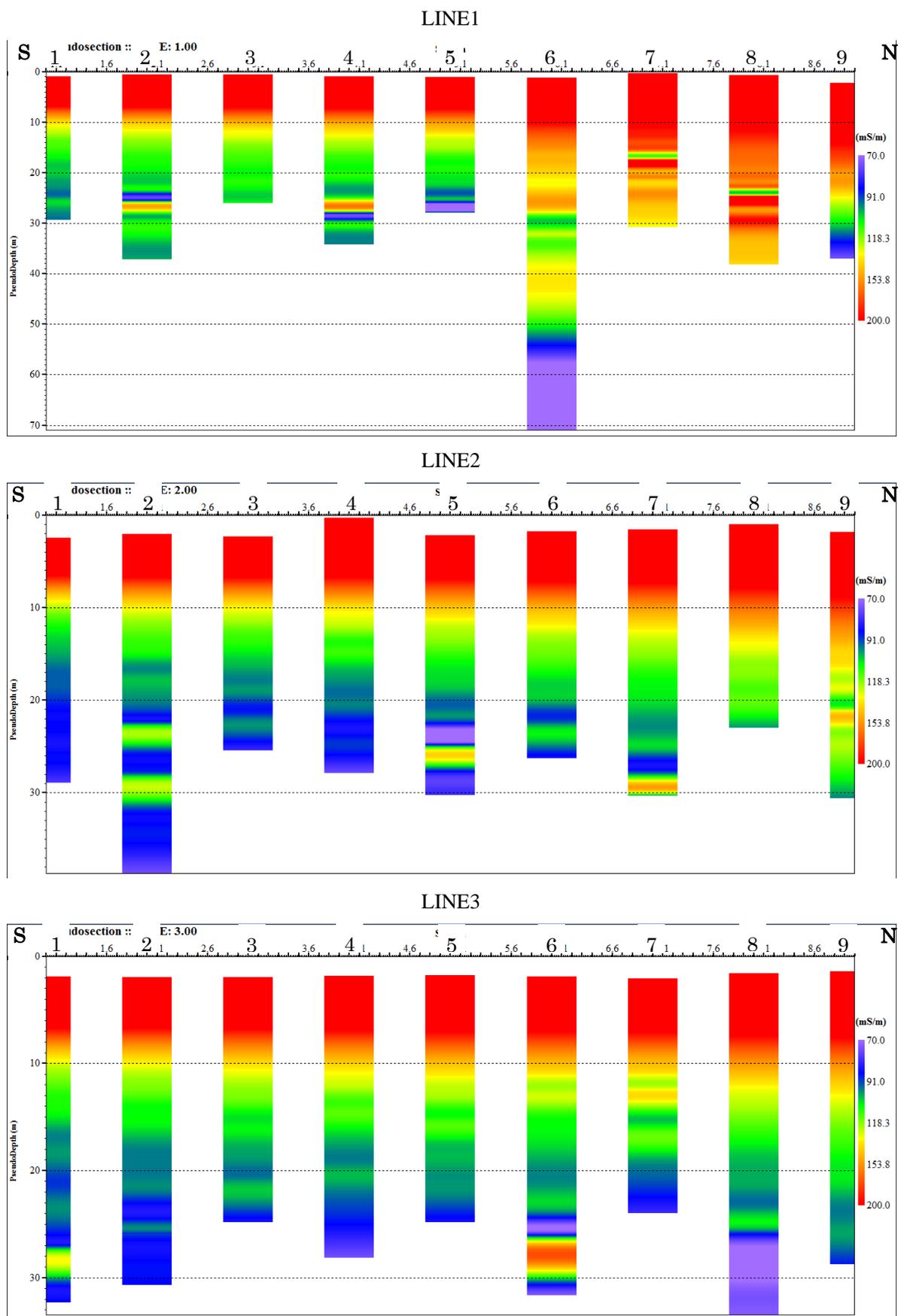


図 2.4.3-4 LP1 グリッドの各 LINE (L1~L3) の電気伝導率 (上限: 200mS/m, 下限: 70 mS/m)

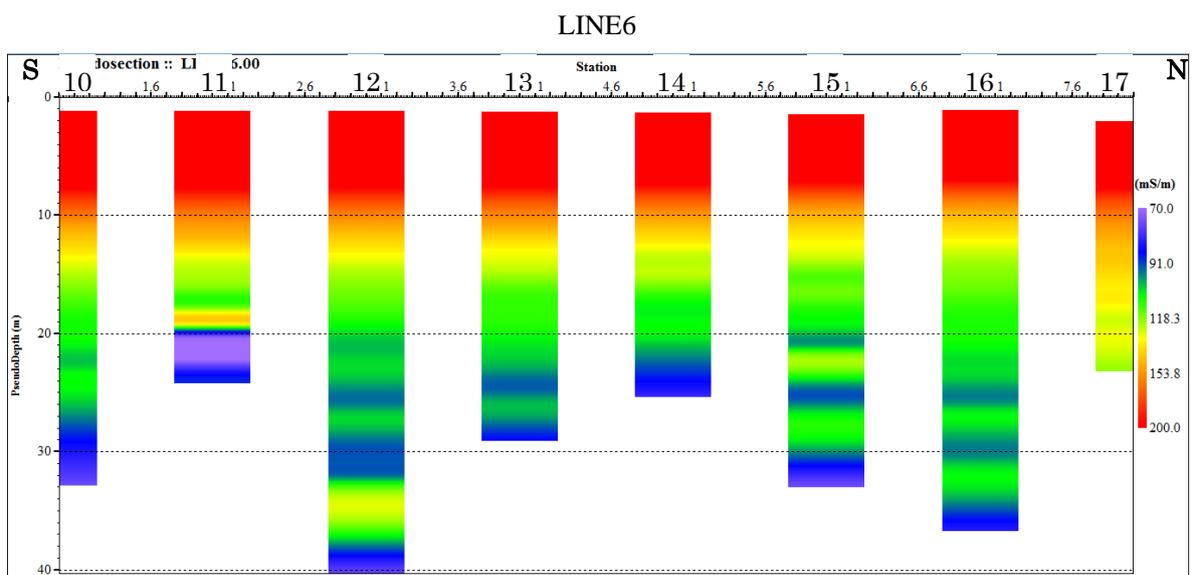
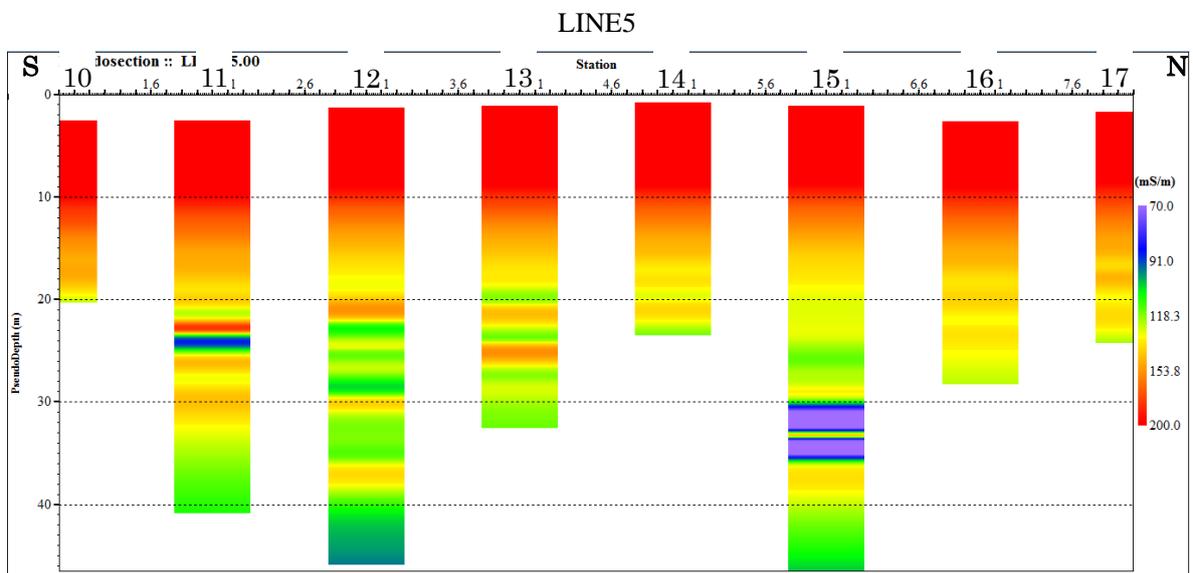
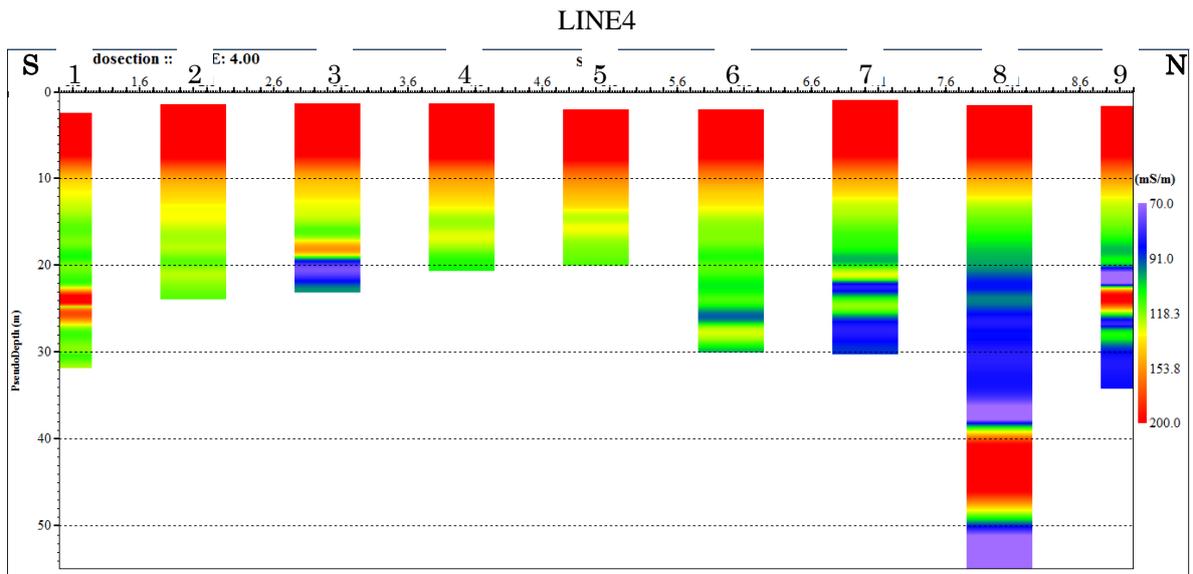


図 2.4.3-5 LP1 グリッドの各 LINE (L4~L6) の電気伝導率 (上限: 200mS/m, 下限: 70 mS/m)

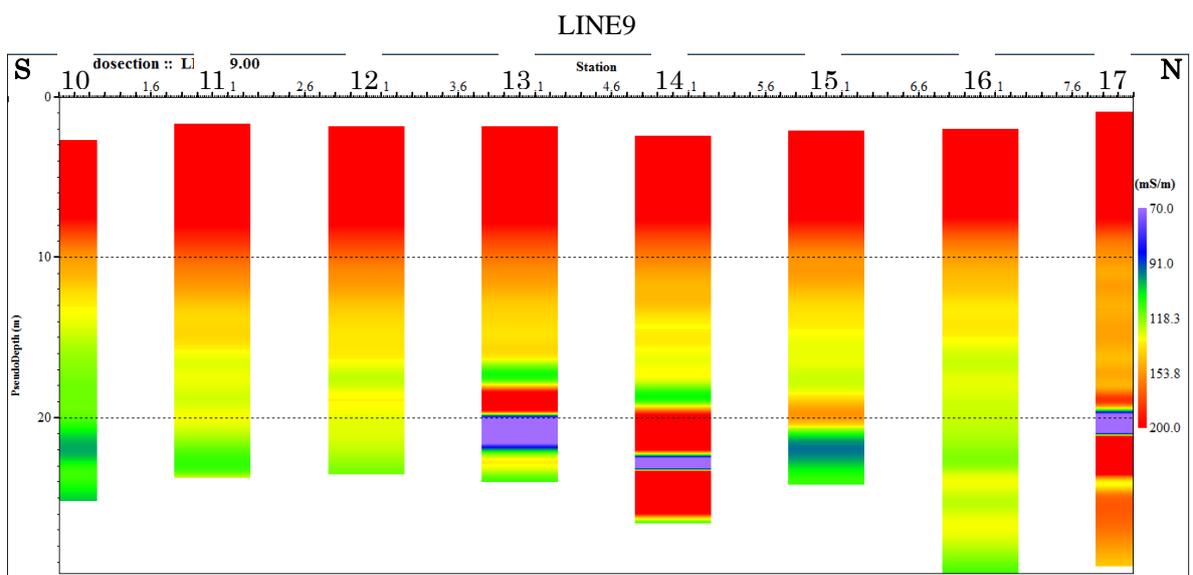
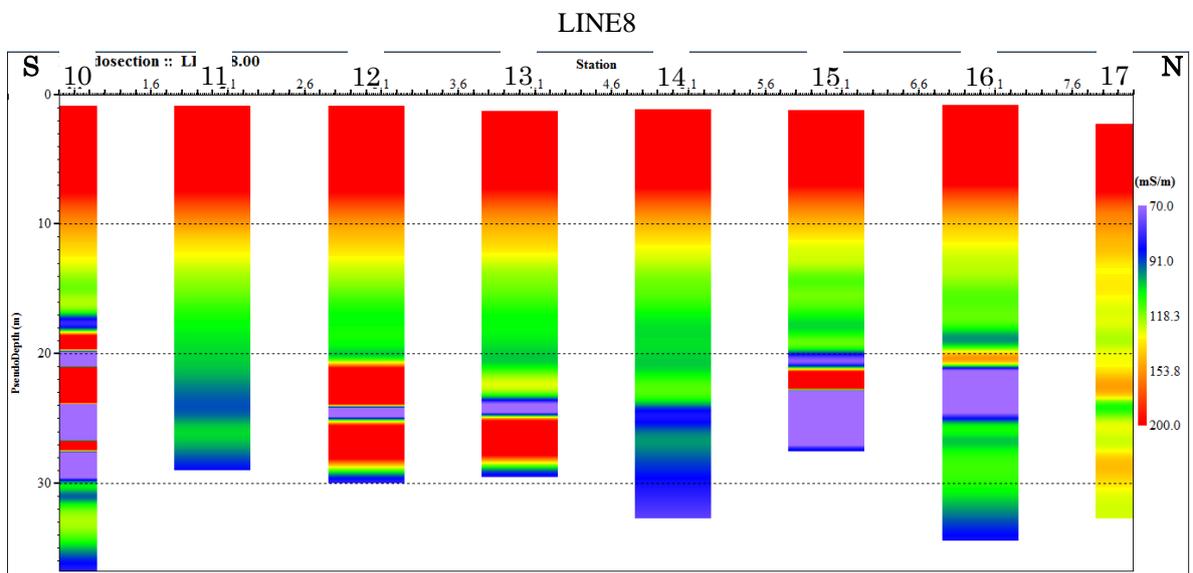
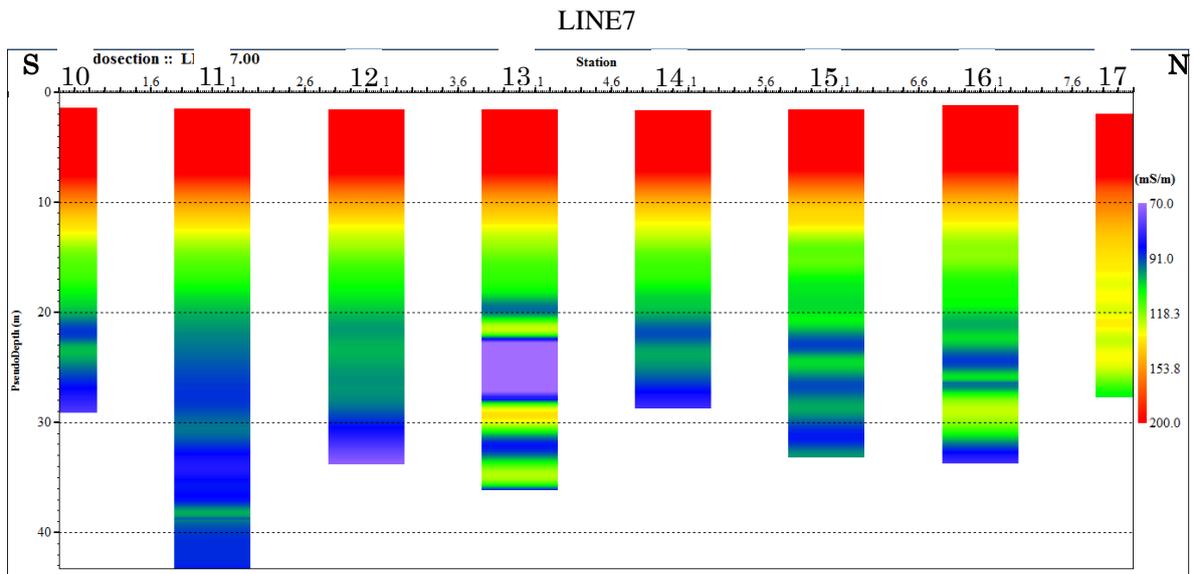


図 2.4.3-6 LP1 グリッドの各 LINE (L7~L9) の電気伝導率 (上限: 200mS/m, 下限: 70 mS/m)

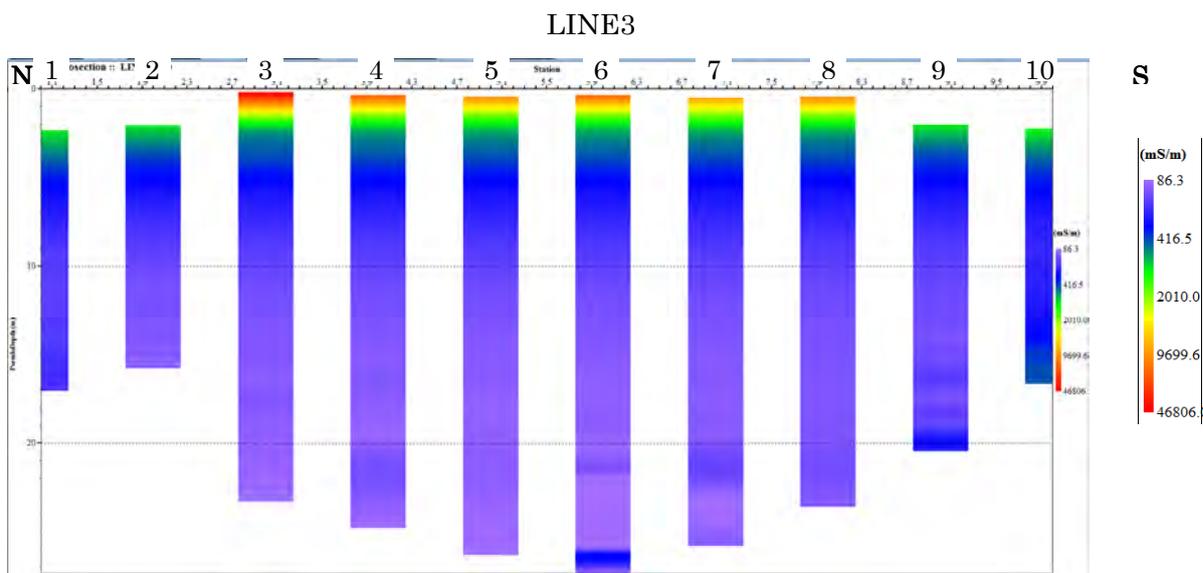
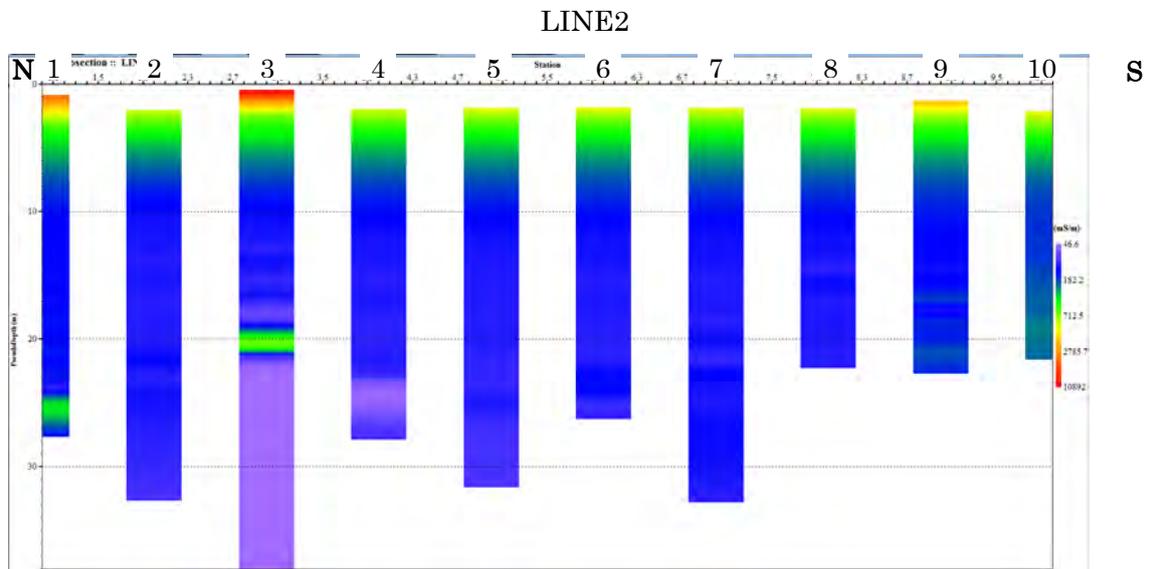
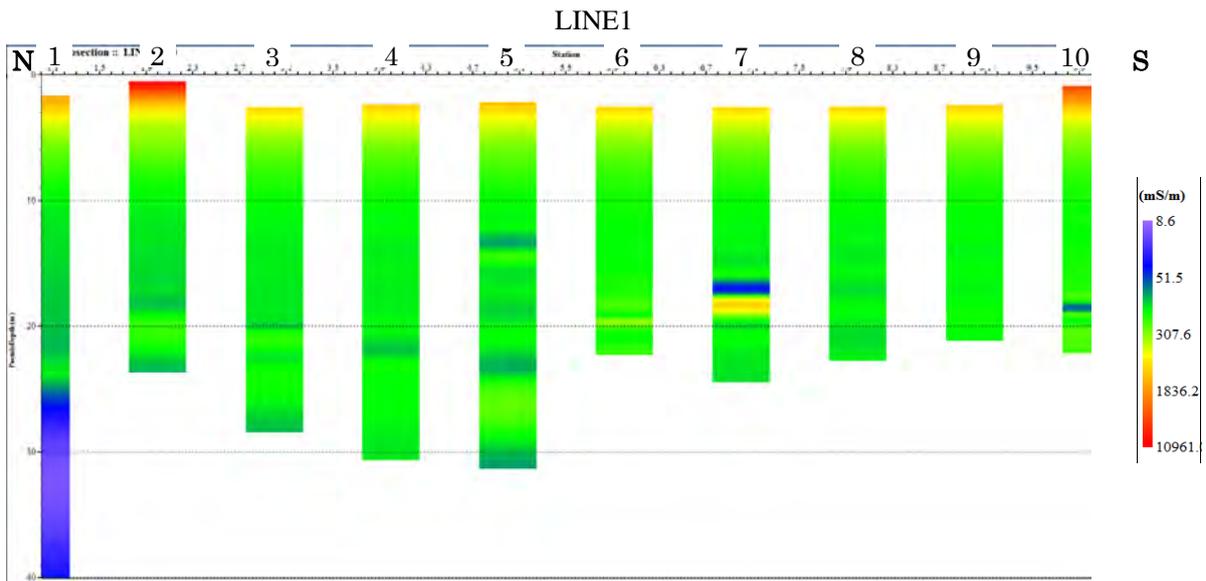


図 2.4.3-7 LP2 グリッドの各 LINE (L1~L3) の電気伝導率

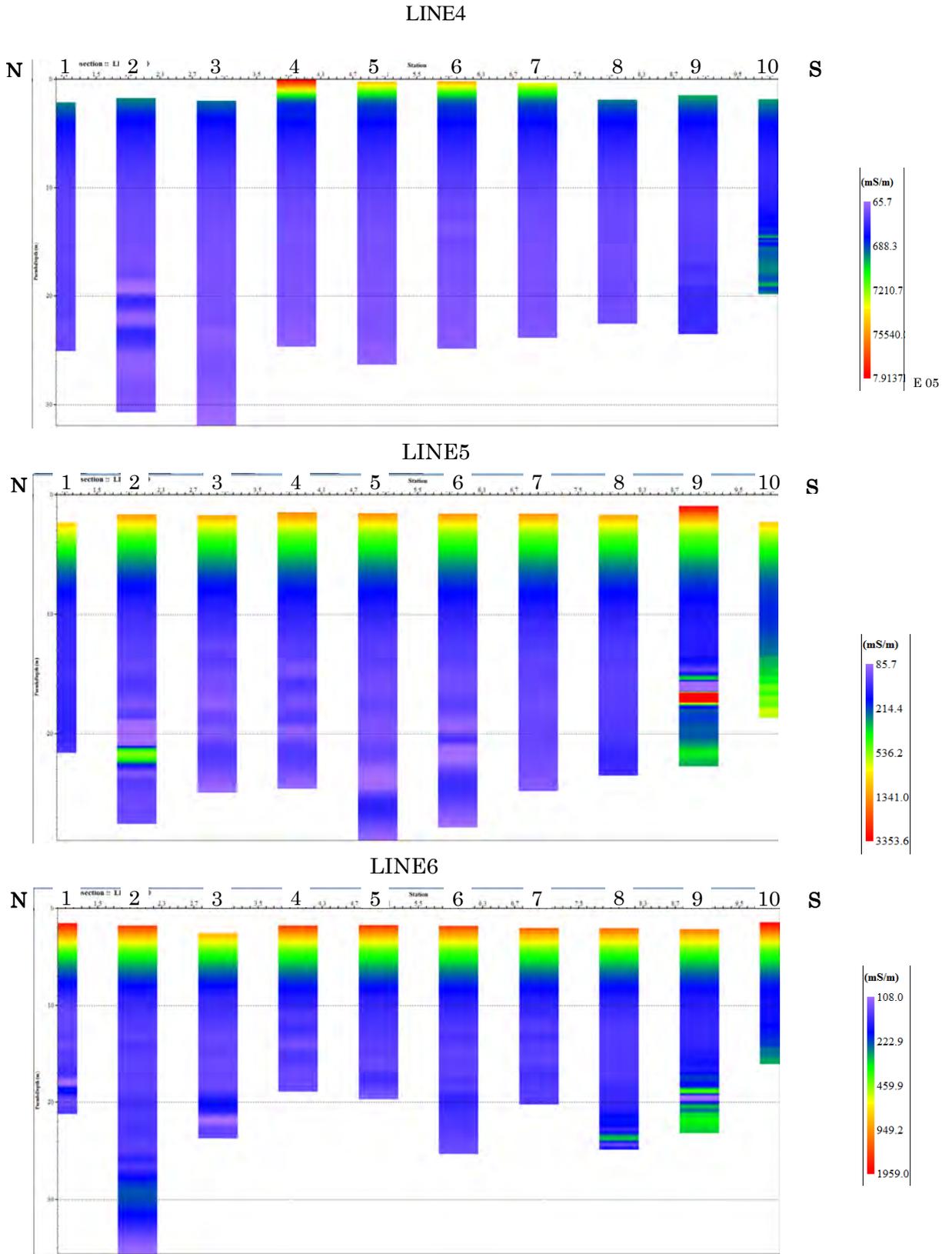


図 2.4.3-8 LP2 グリッドの各 LINE (L4~L6) の電気伝導率

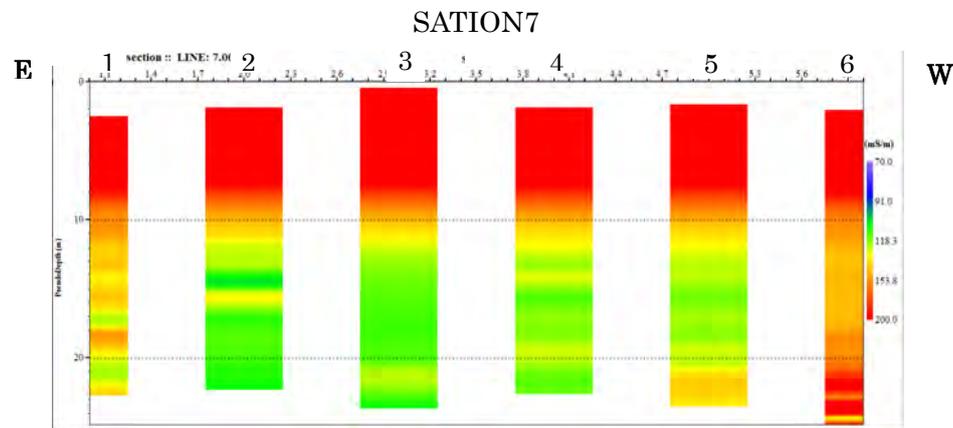
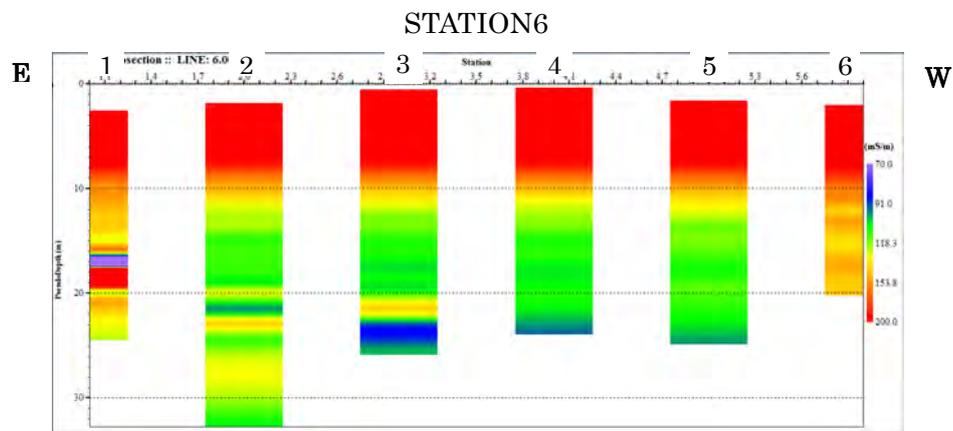
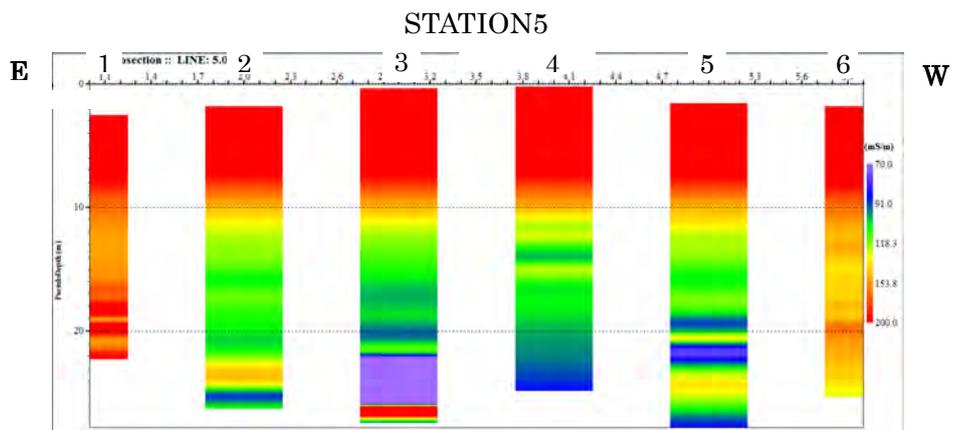
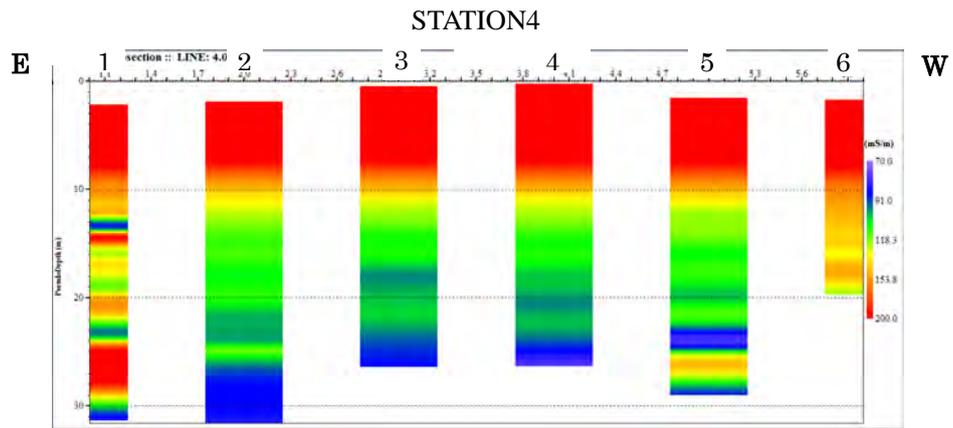


図 2.4.3-9 LP2 グリッドの S4~S7 の各 LINE の電気伝導率(上限:200mS/m,下限:70 mS/m)

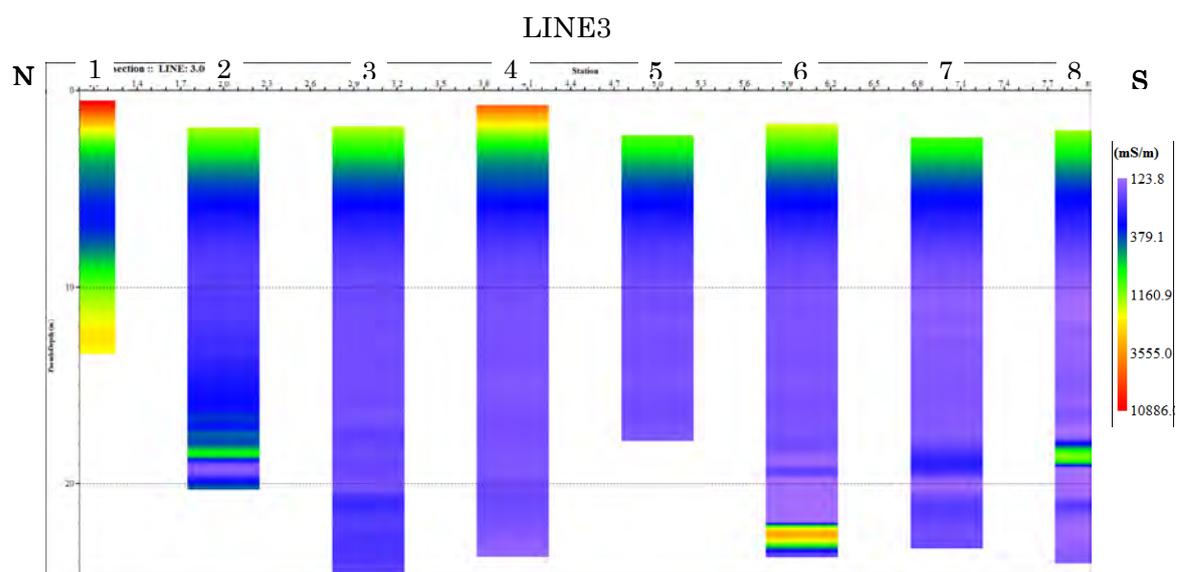
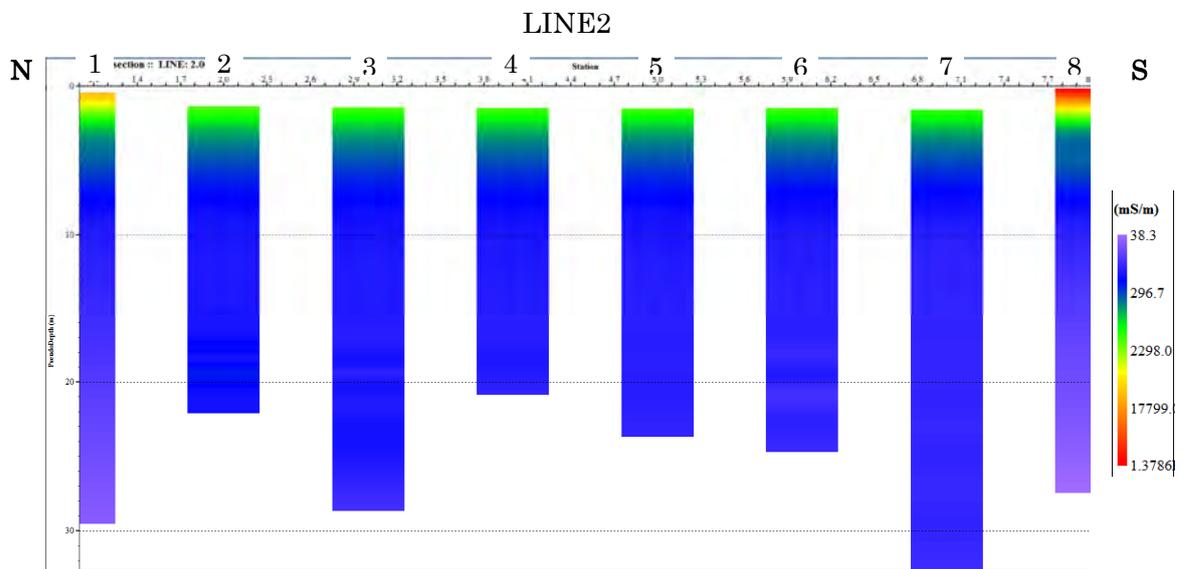
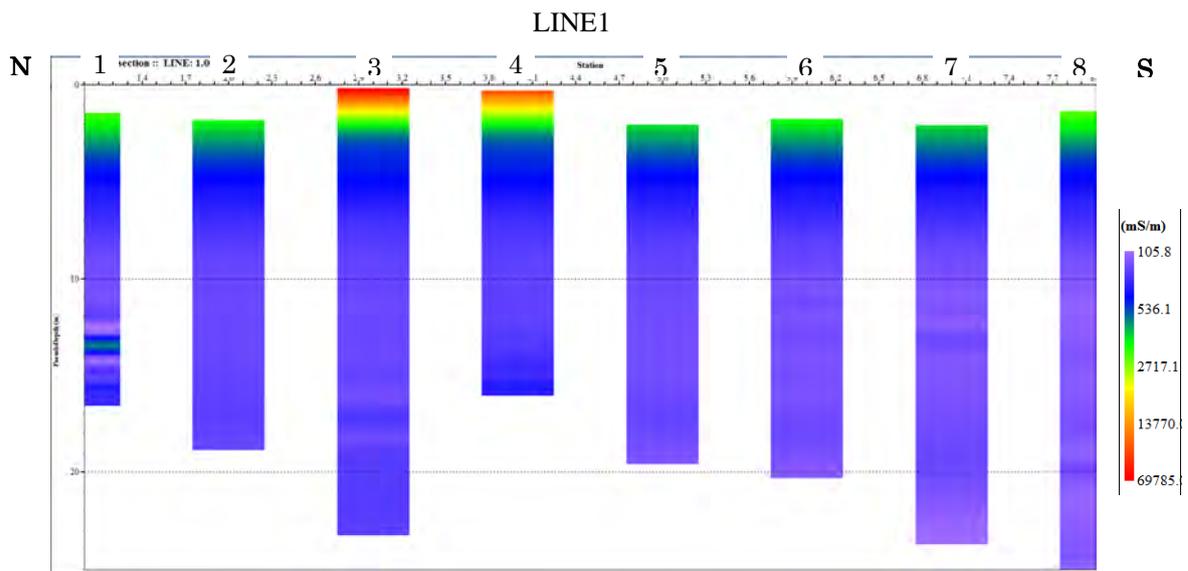


図 2.4.3-10 LP3 グリッドの各 LINE (L1~L3) の電気伝導率

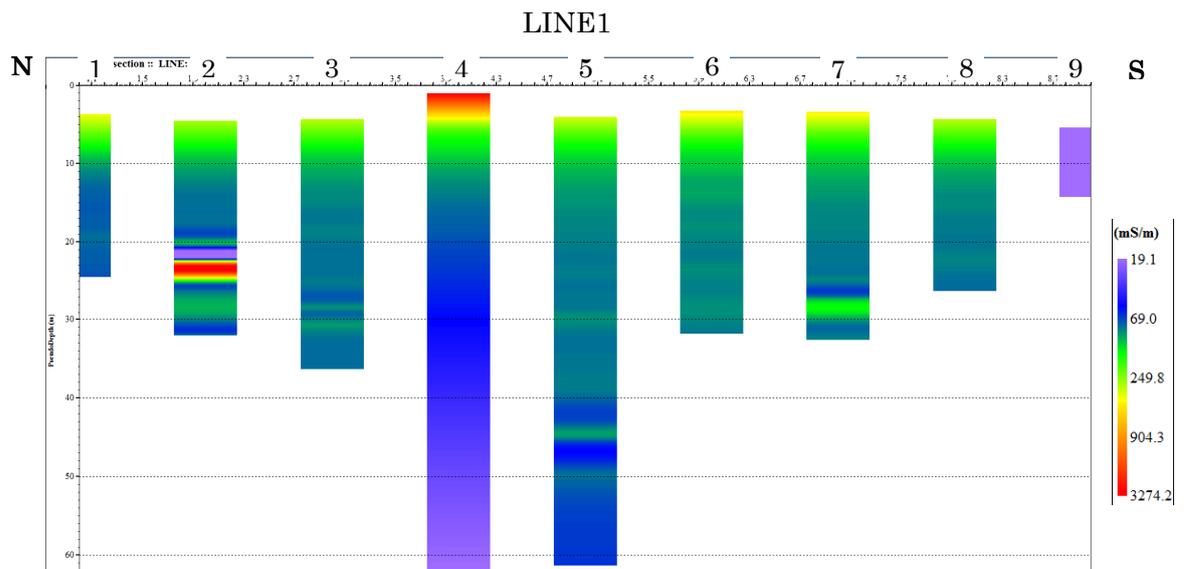


図 2.4.3-11 LP4 グリッドの LINE1 の電気伝導率

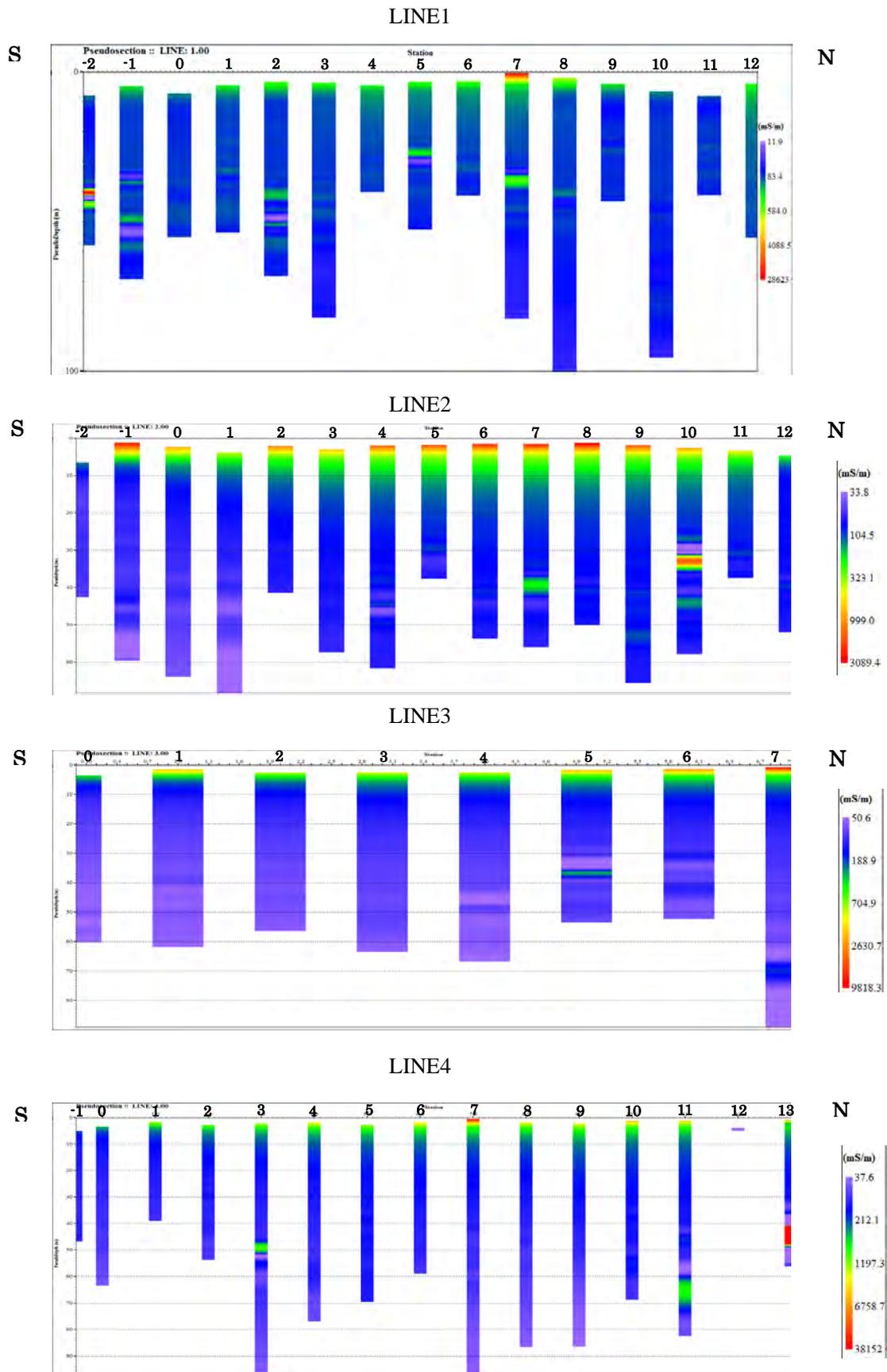


図 2.4.3-12 LP5 グリッドの各 LINE (L1~L4) の電気伝導率

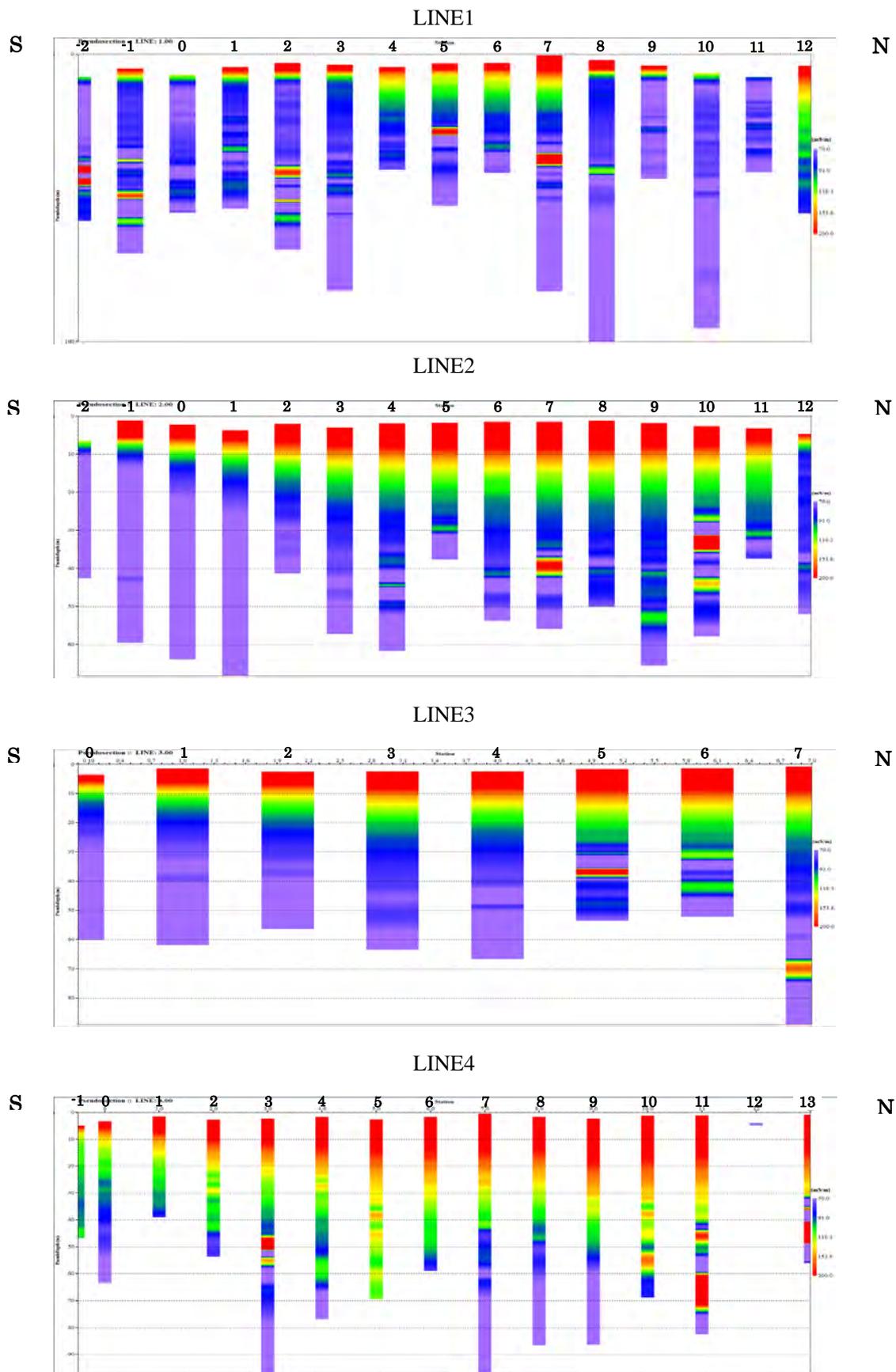


図 2.4.3-13 LP5 グリッドの各 LINE (L1~L4) の電気伝導率(上限:200mS/m,下限:70 mS/m)

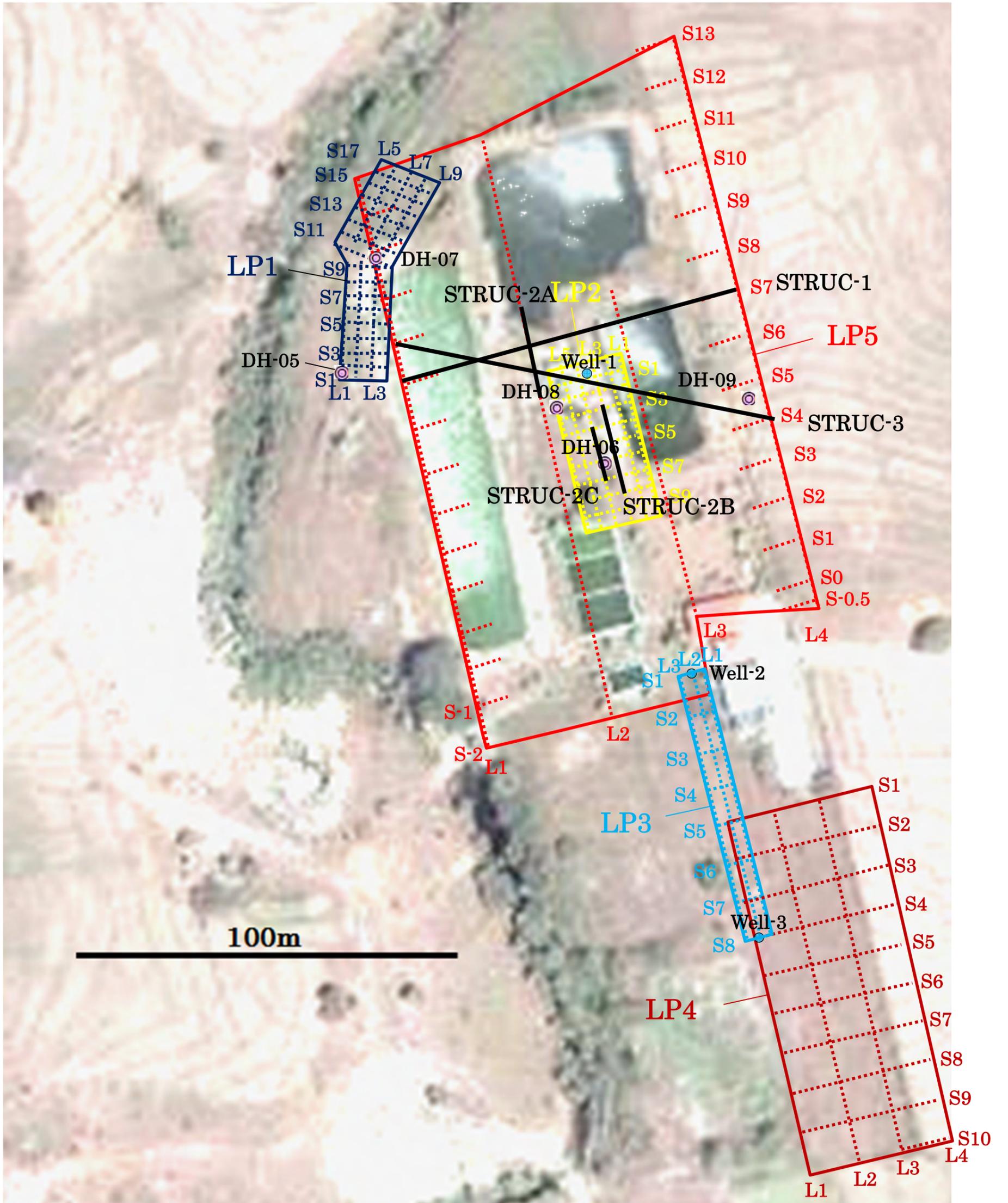


図 2.4.3-14 TEM 調査により探査された構造 (LP5 グリッドおよび LP2 グリッド内の黒線)

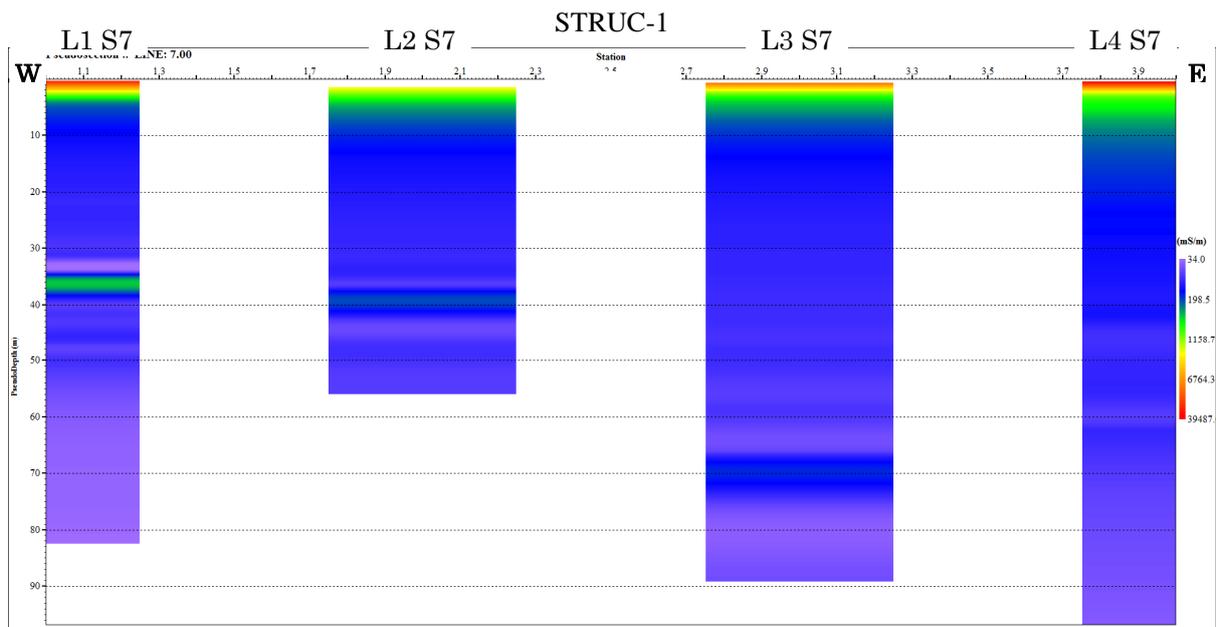


図 2.4.3-15 STRUC-1 (LP5 グリッド L1S7~L4S7) の電気伝導率

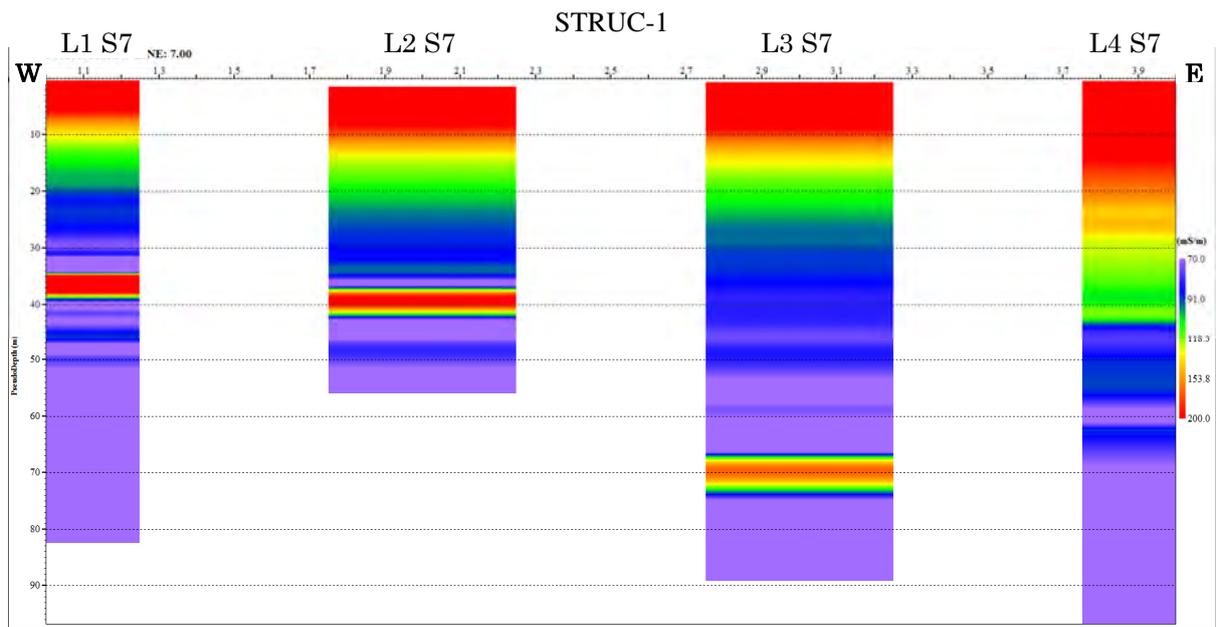


図 2.4.3-16 STRUC-1 (LP5 グリッド L1S7~L4S7) の電気伝導率 (上限 : 200mS/m, 下限 : 70 mS/m)

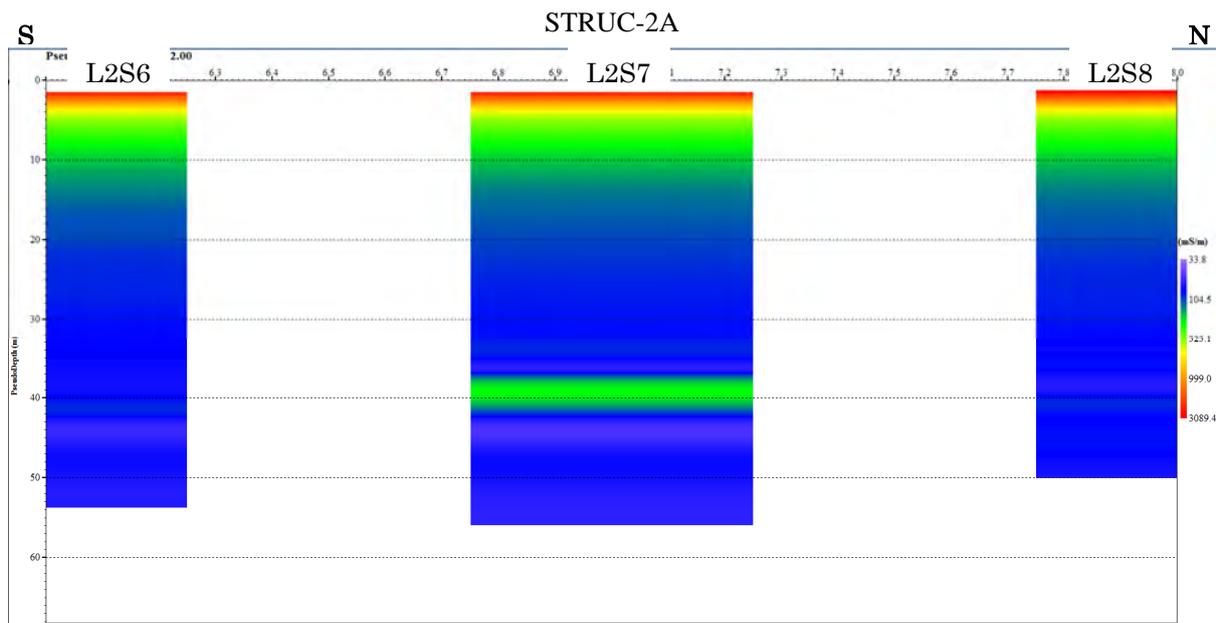


図 2.4.3-17 STRUC-2A (LP5 グリッド L2S6~L2S8) の電気伝導率

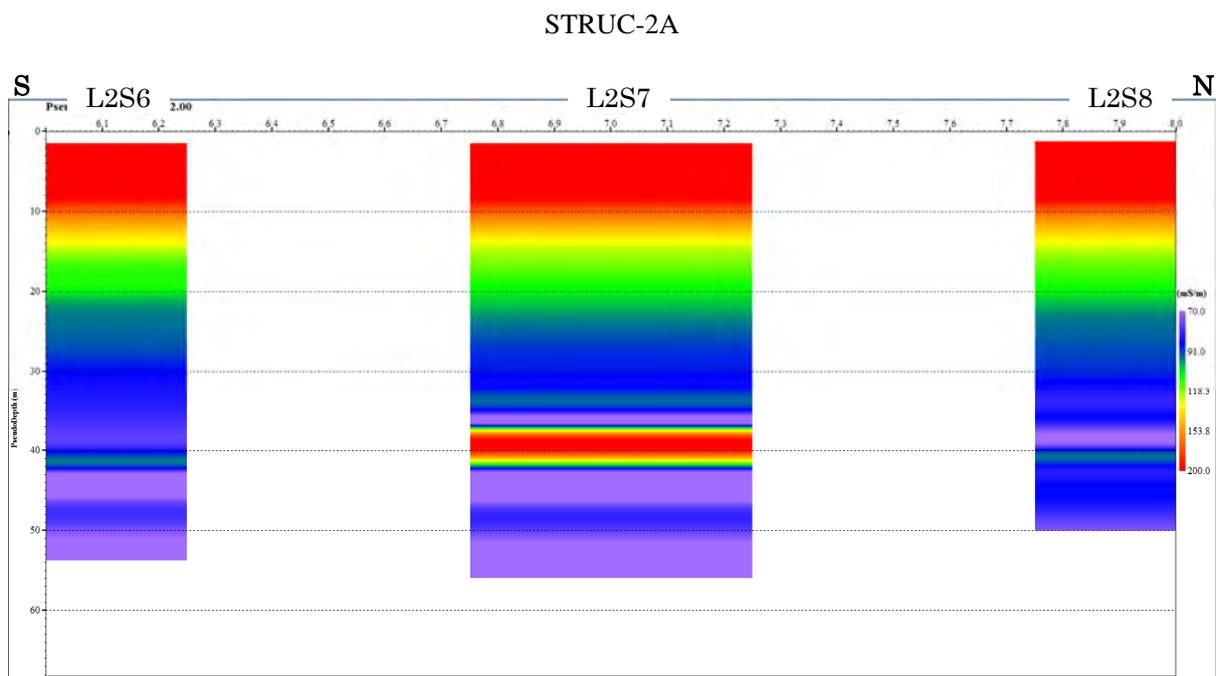


図 2.4.3-18 STRUC-2A (LP5 グリッド L2S6~L2S8) の電気伝導率 (上限 : 200mS/m, 下限 : 70 mS/m)

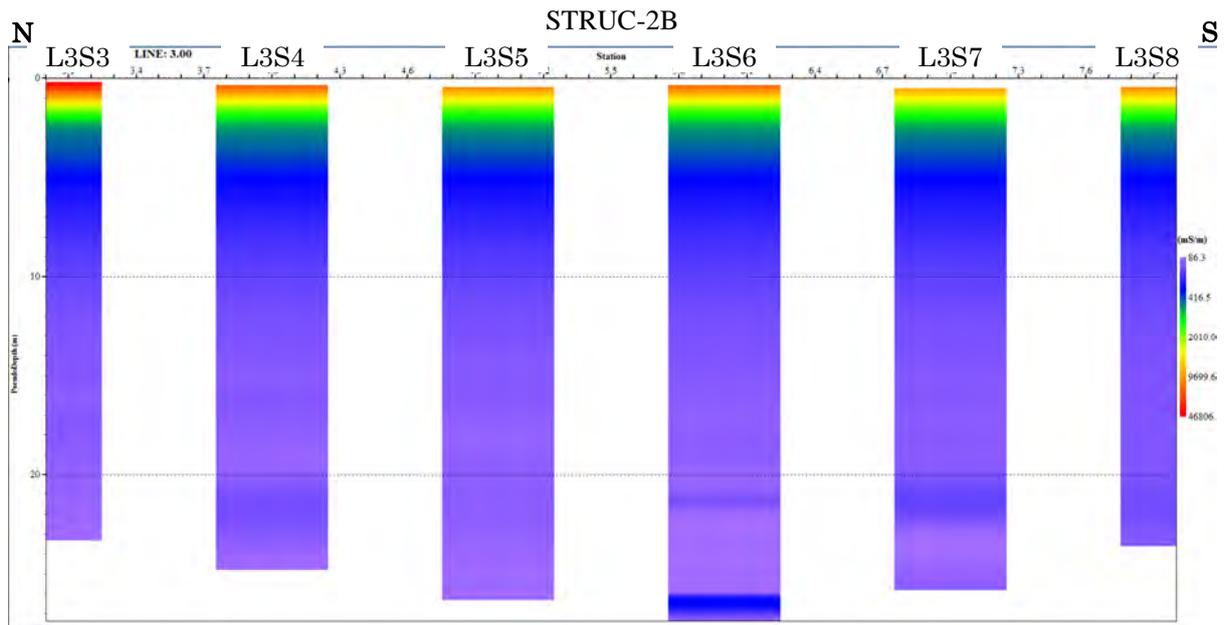


図 2.4.3-19 STRUC-2B (LP2 グリッド L3S3~L3S8) の電気伝導率

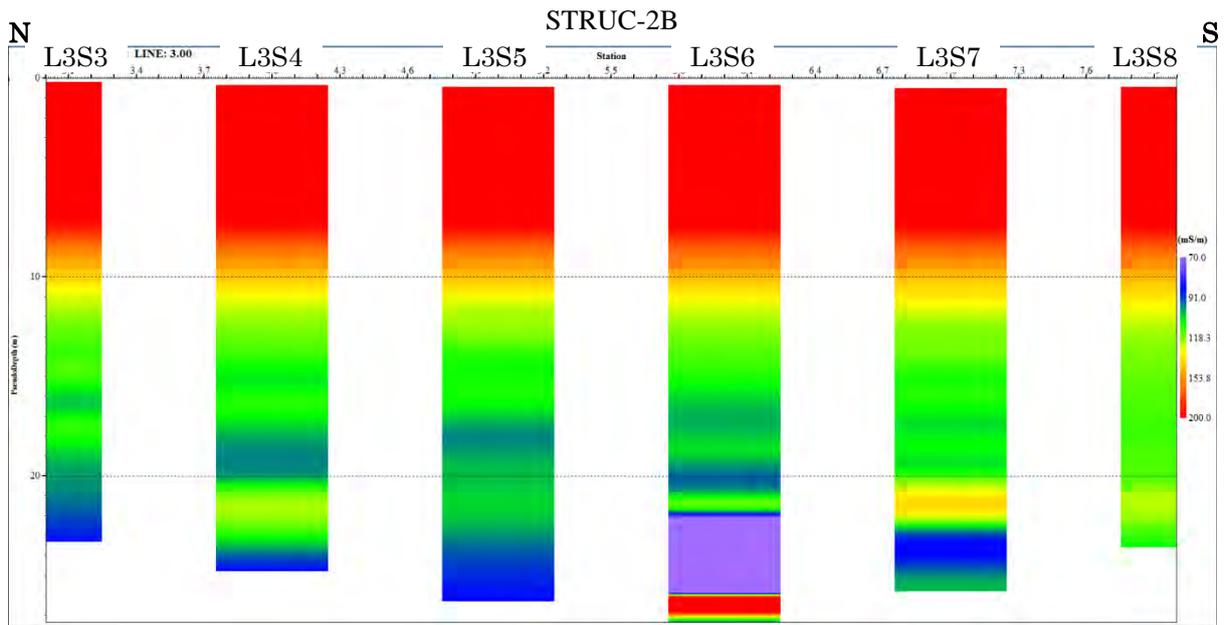


図 2.4.3-20 STRUC-2B (LP2 グリッド L3S3~L3S8) の電気伝導率 (上限 : 200mS/m, 下限 : 70 mS/m)

STRUC-2C

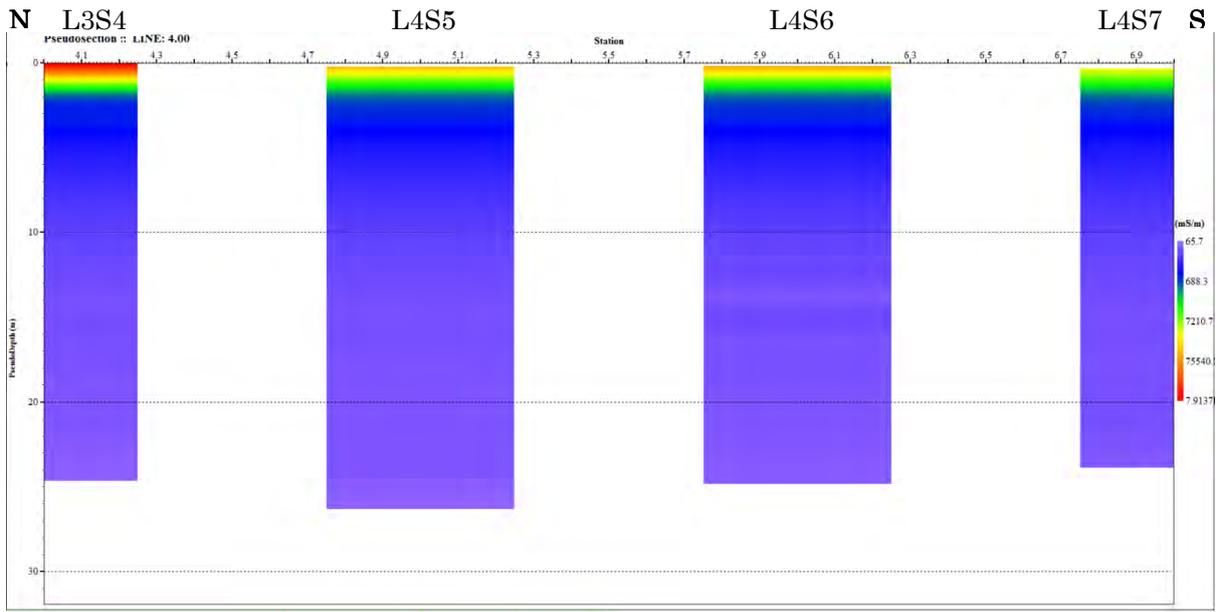


図 2.4.3-21 STRUC-2C (LP2 グリッド L4S4~L4S7) の電気伝導率

STRUC-2C

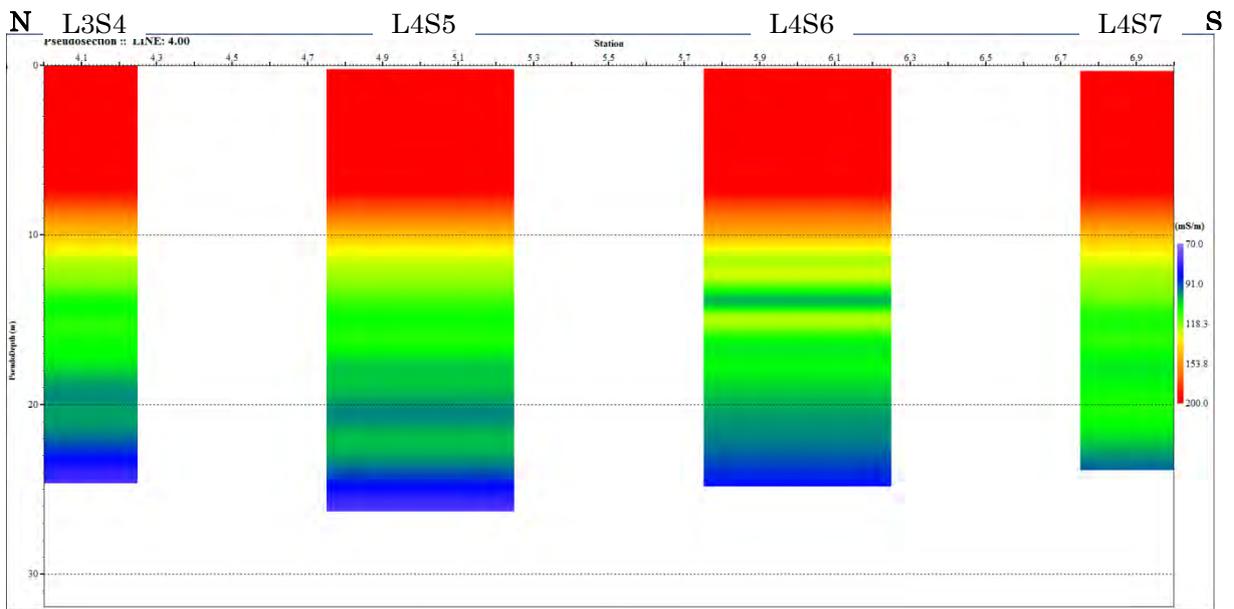


図 2.4.3-22 STRUC-2C (LP2 グリッド L4S4~L4S7) の電気伝導率 (上限 : 200mS/m, 下限 : 70 mS/m)

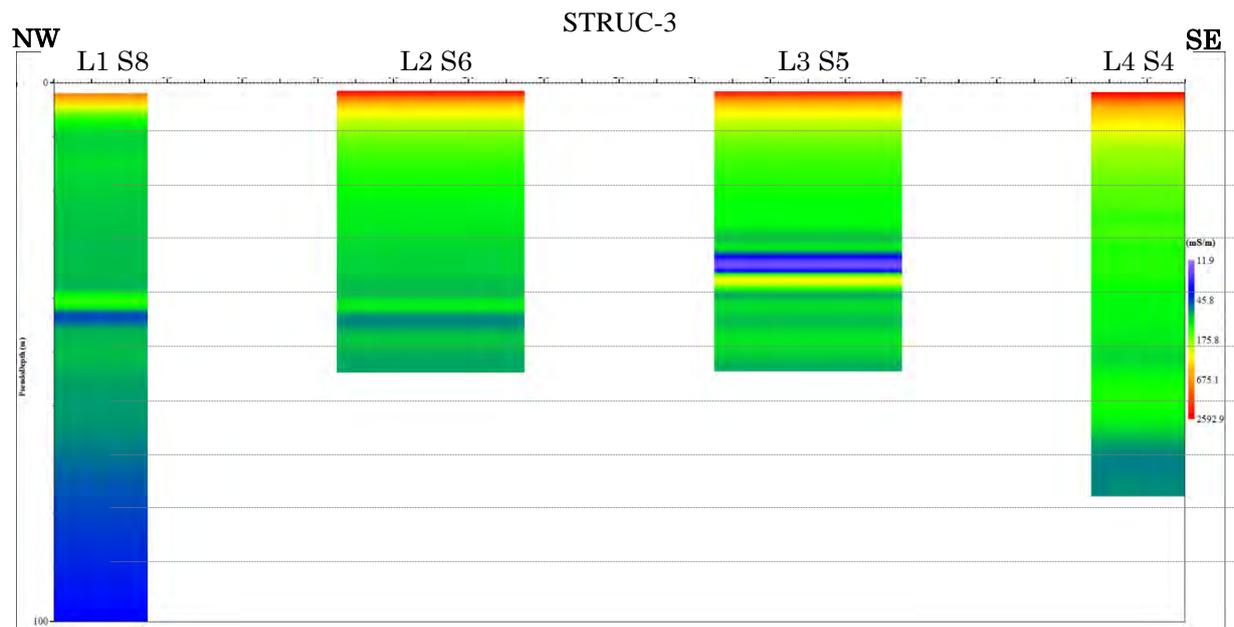


図 2.4.3-23 STRUC-3 (LP5 グリッド L1S8~L4S4) の電気伝導率

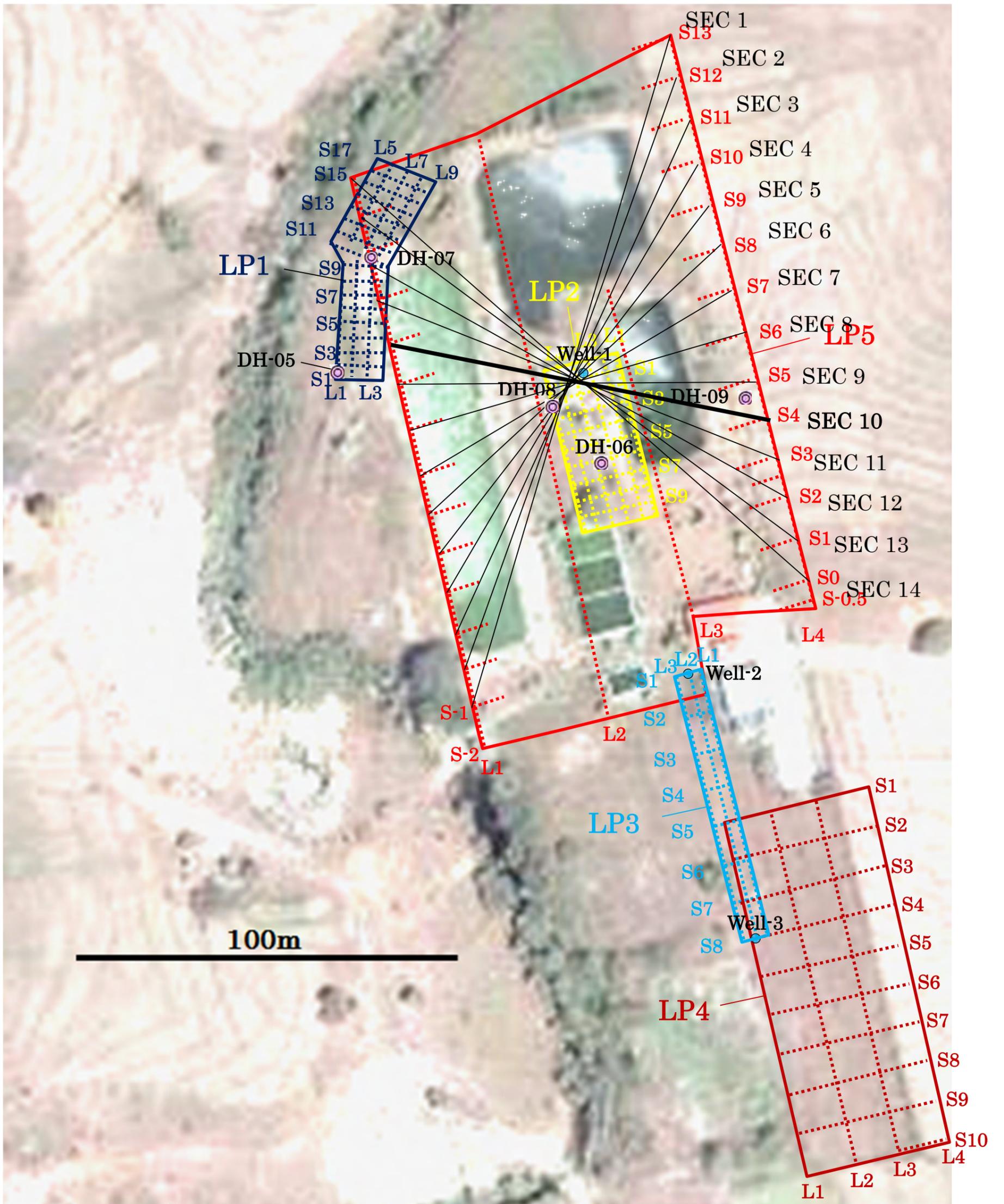


図 2.4.3-24 Well-1 周辺のその他の断面

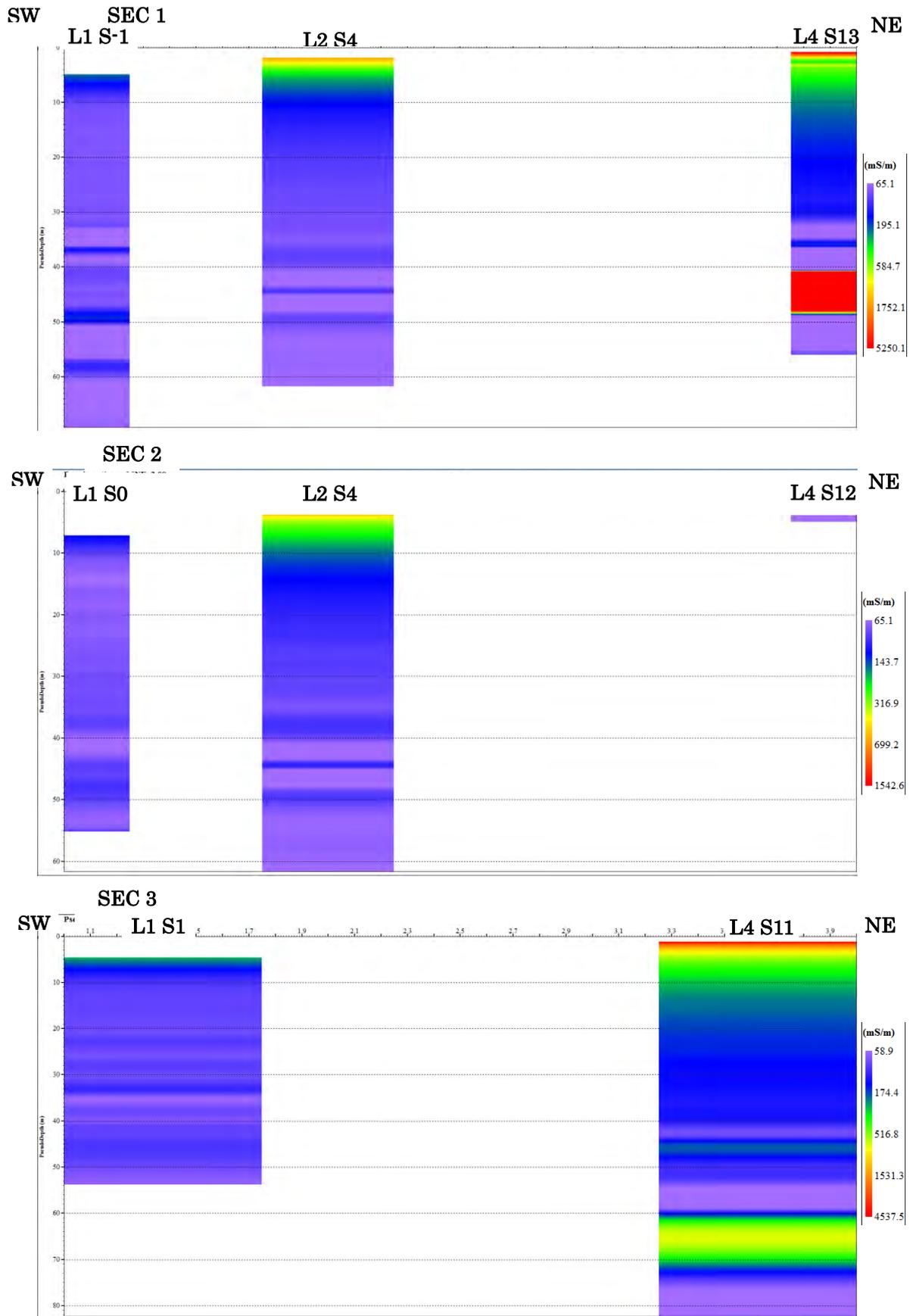


図 2.4.3-25 Well1 周辺のその他の断面の電気伝導率 (SEC1~3)

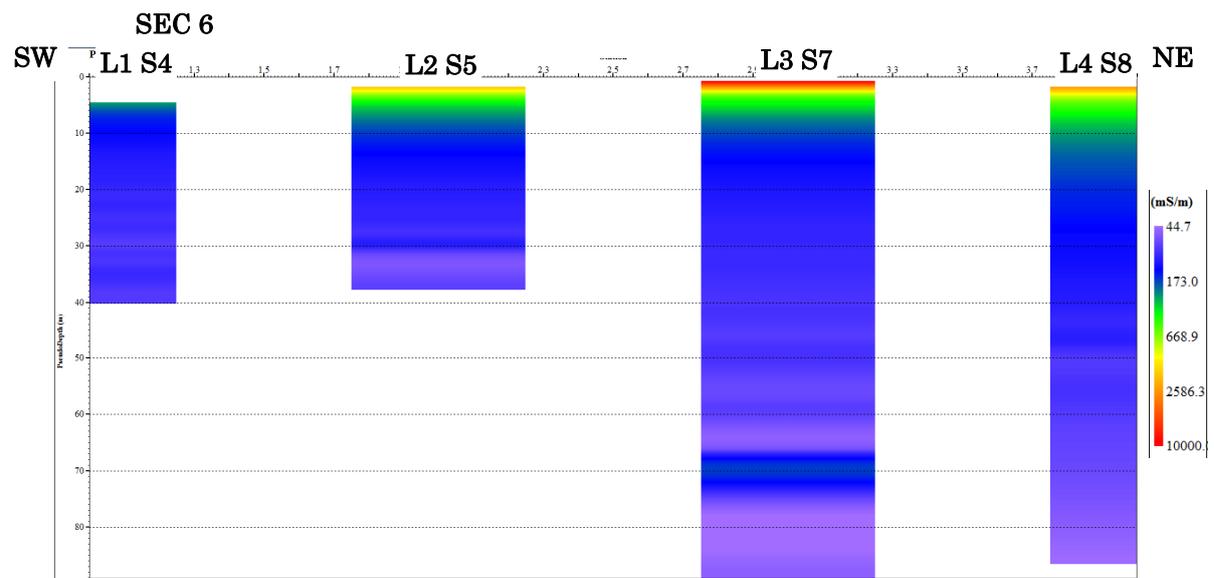
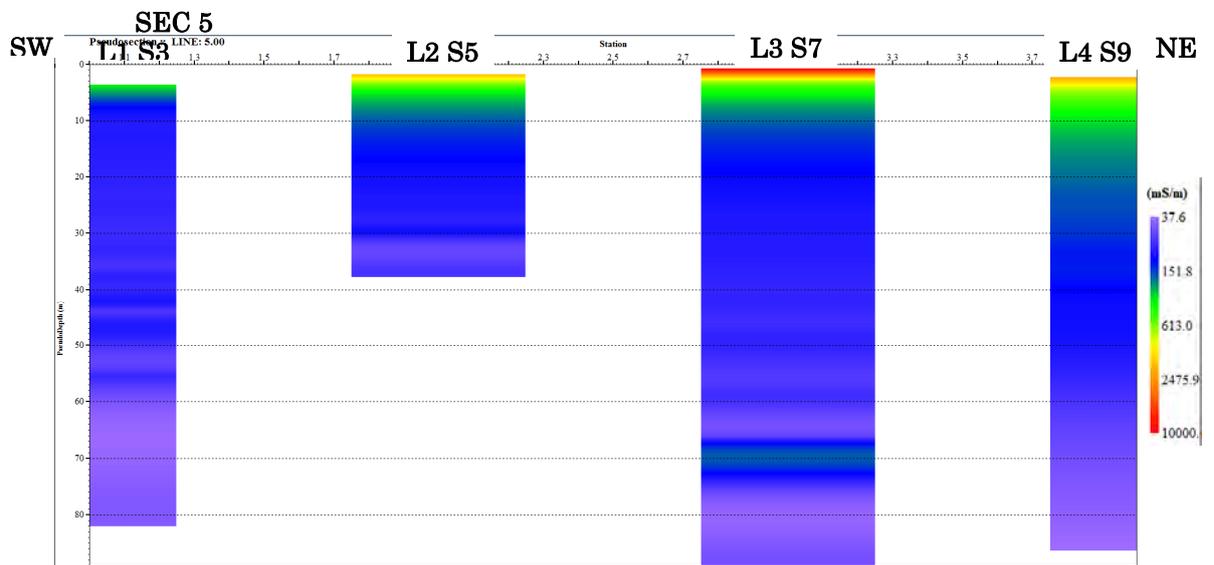
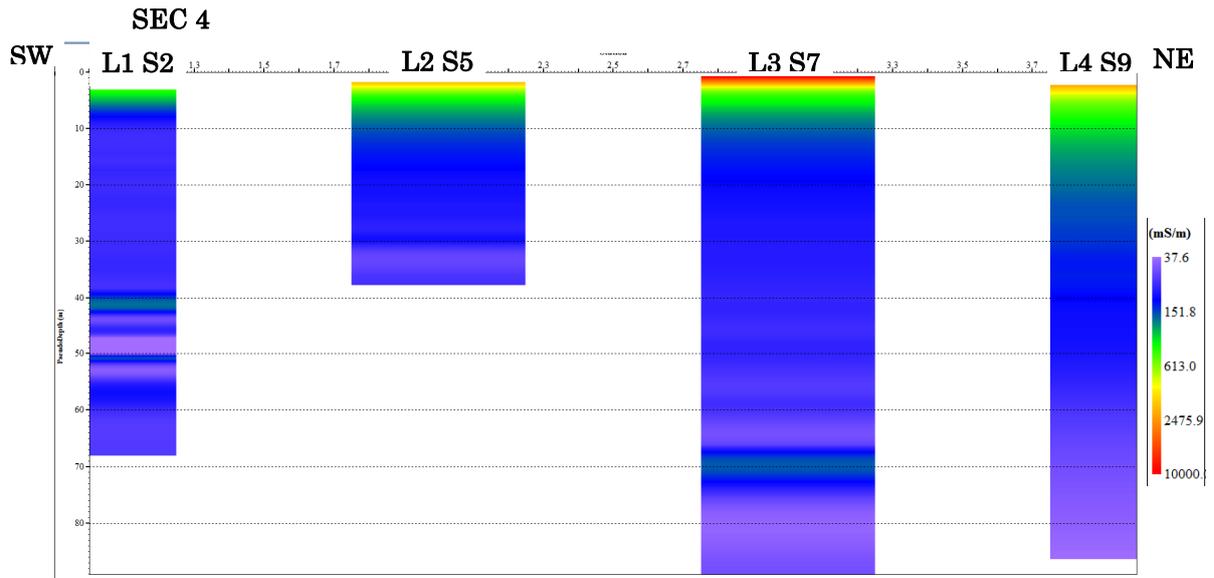


図 2.4.3-26 Well1 周辺のその他の断面の電気伝導率 (SEC4~6)

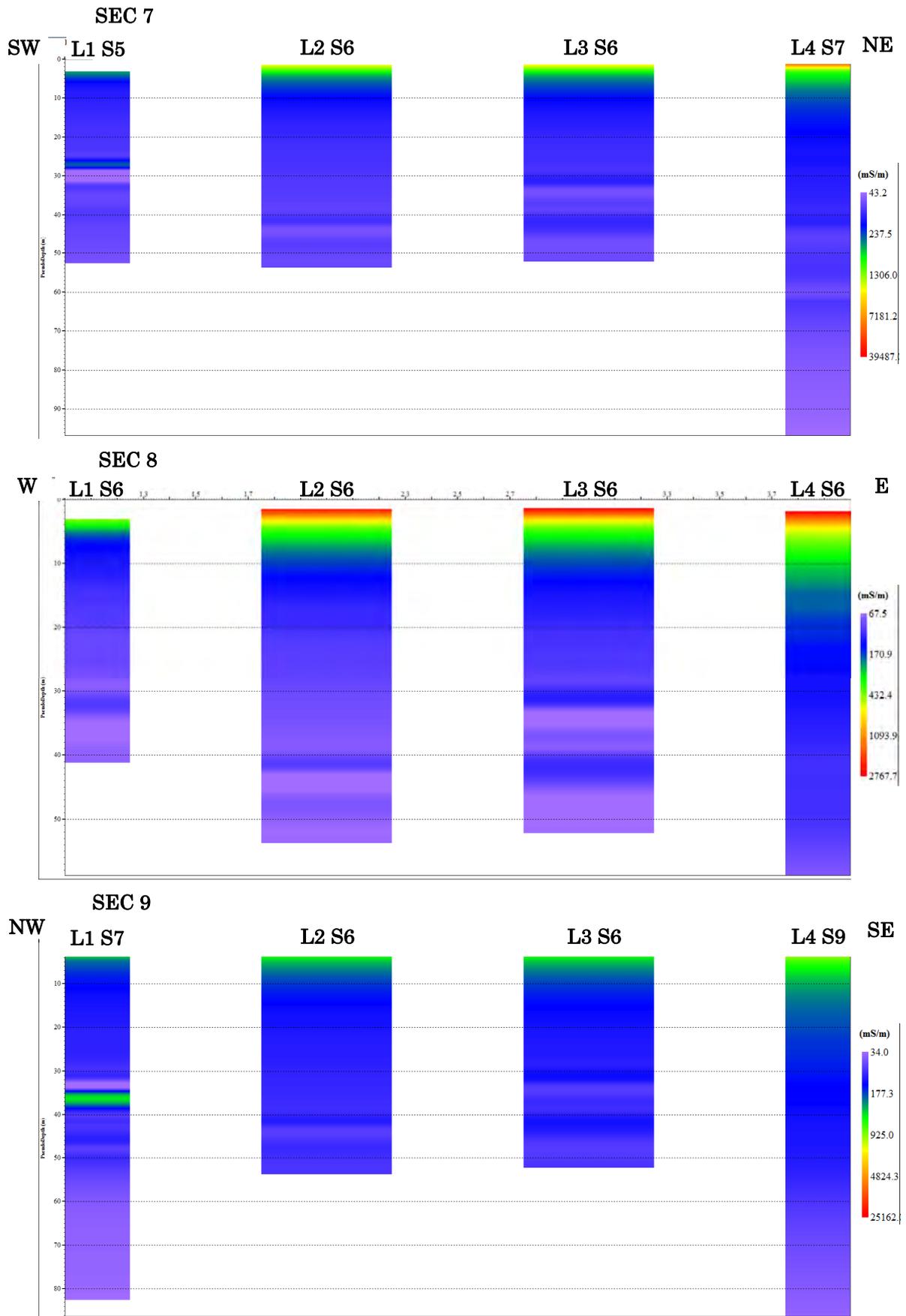


図 2.4.3-27 Well1 周辺のその他の断面の電気伝導率 (SEC7~9)

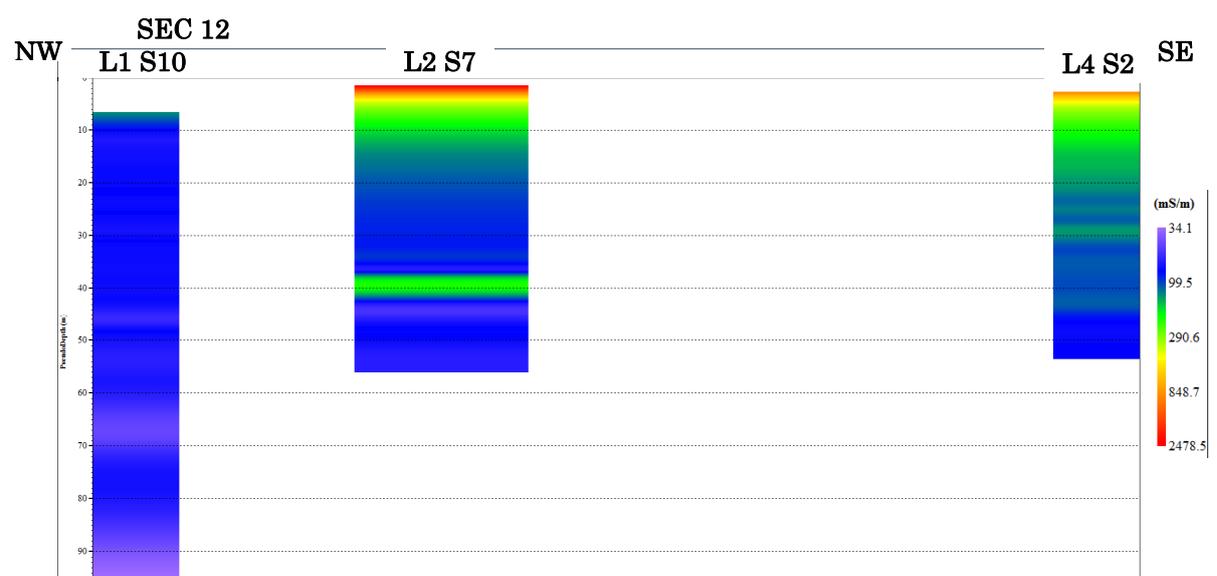
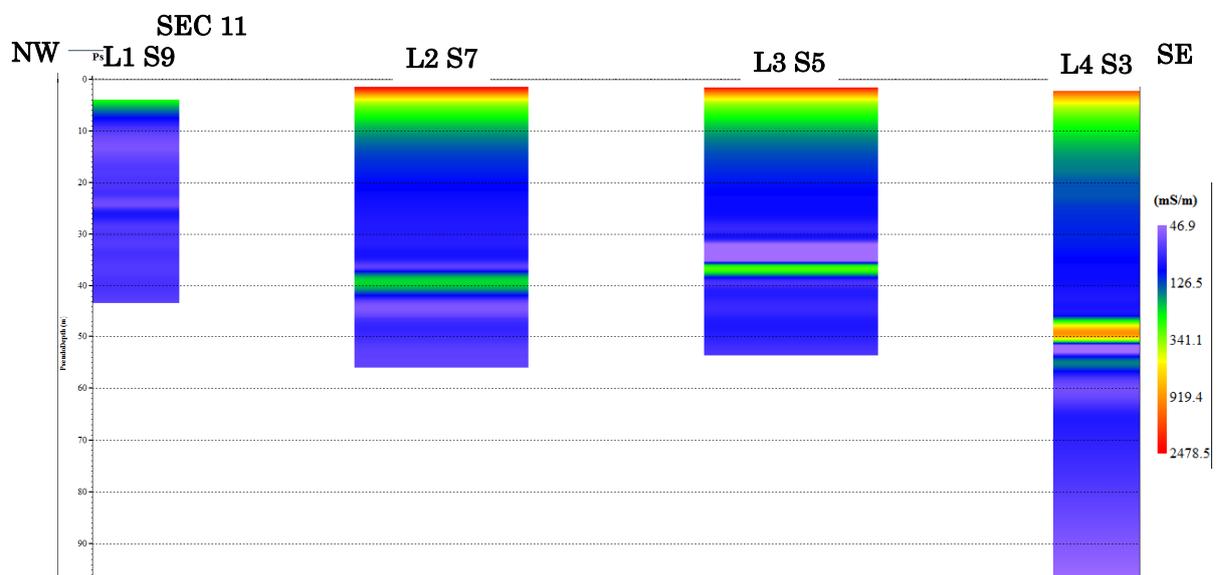
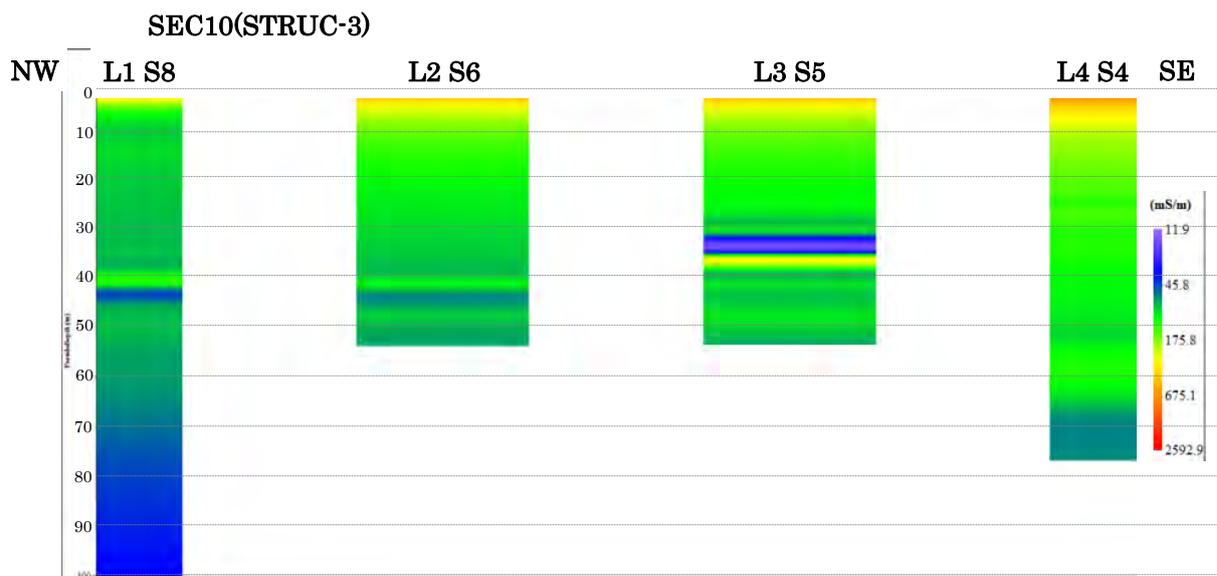


図 2.4.3-28 Well1 周辺のその他の断面の電気伝導率 (SEC10~12)

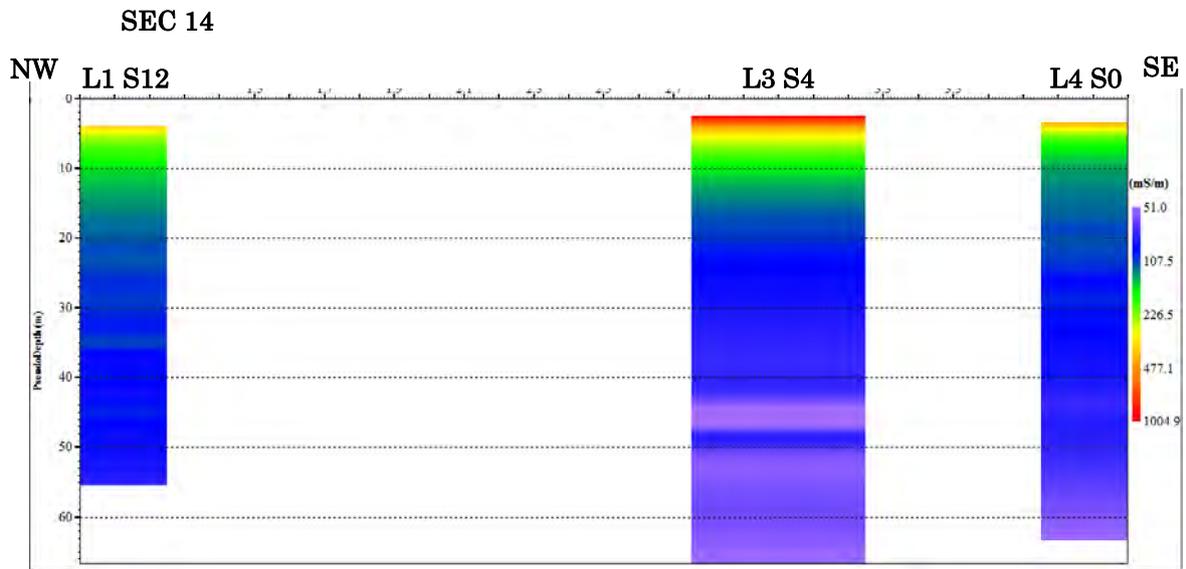
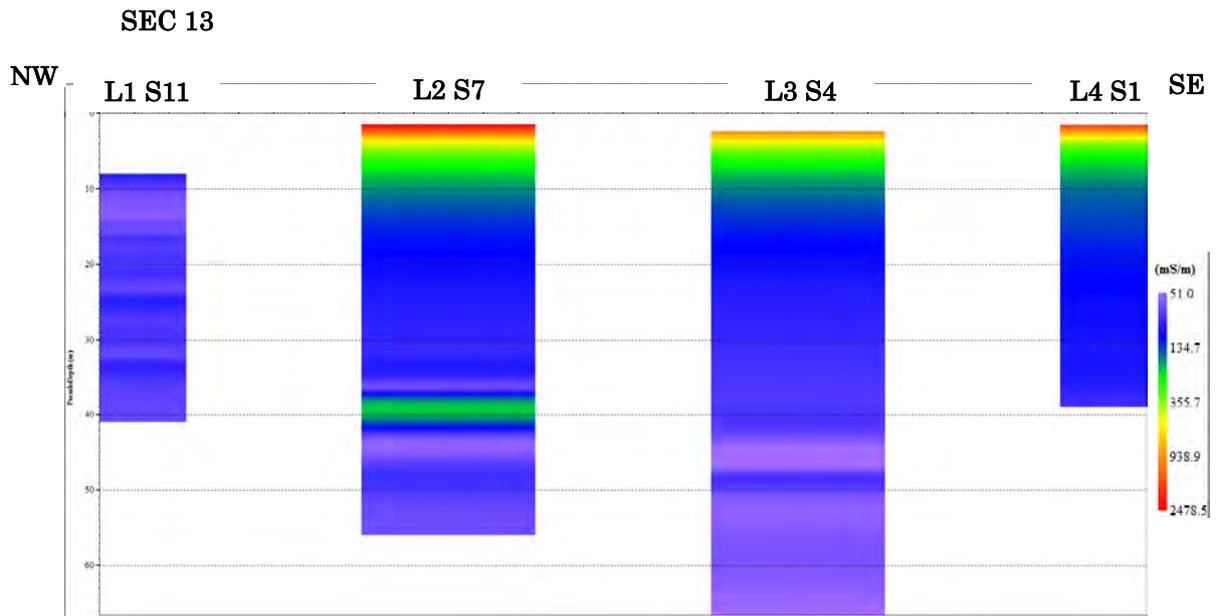


図 2.4.3-29 Well1 周辺のその他の断面の電気伝導率 (SEC13~14)

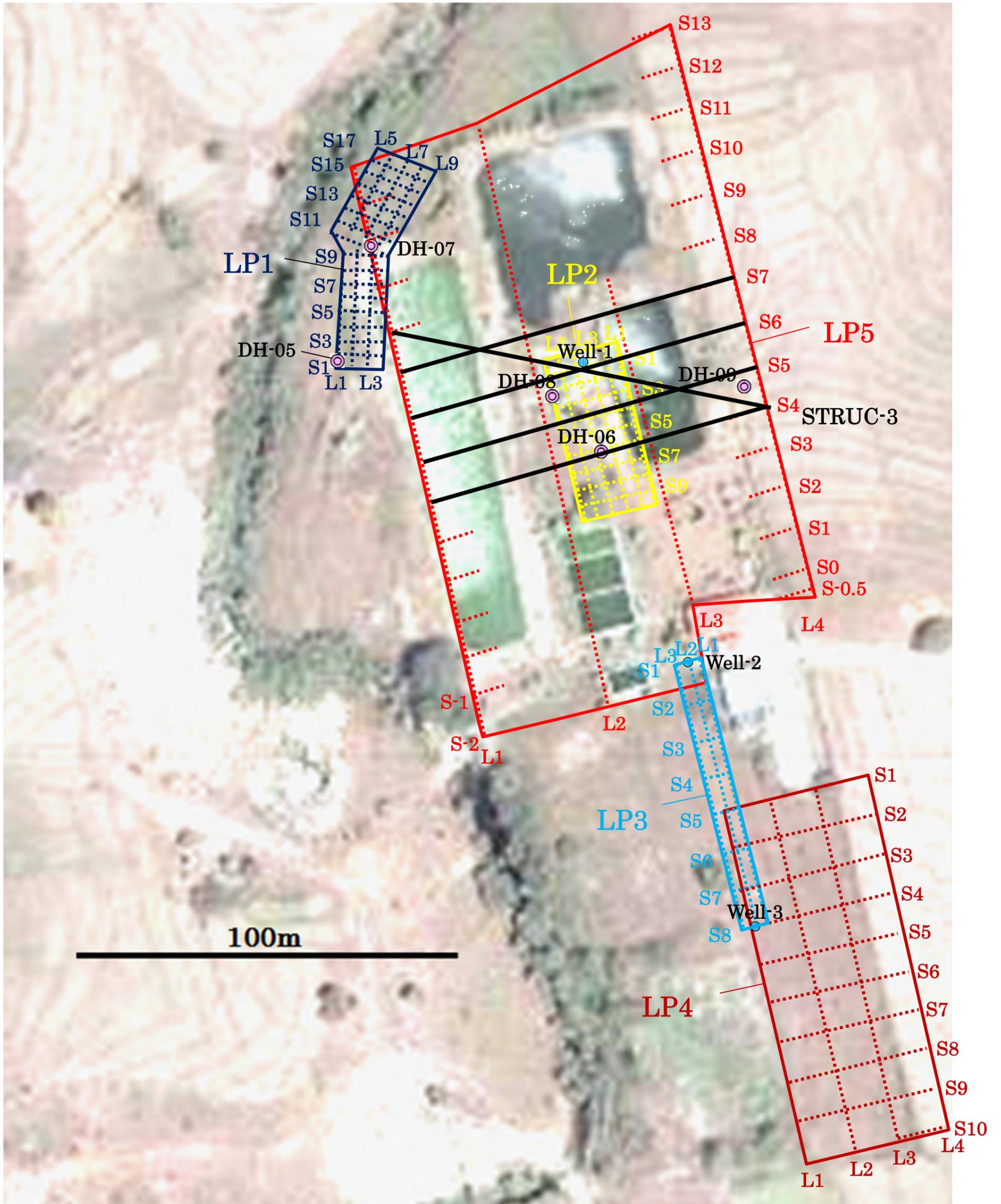


図 2.4.3-30 試錐孔 (DH-06, DH-08, Well-1) 周辺の 2D 断面 (黒太線)

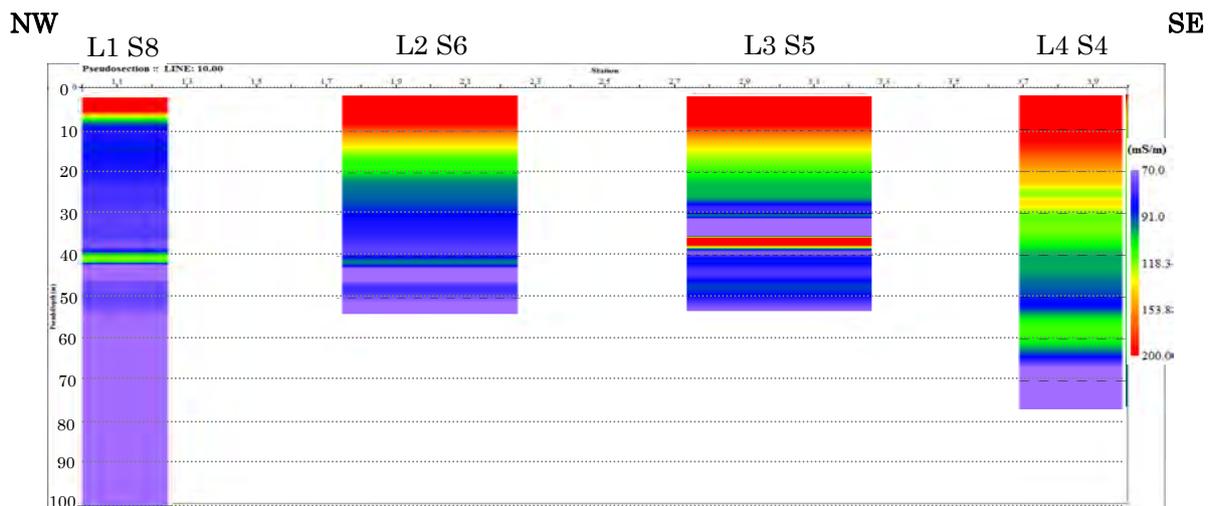


図 2.4.3-31 LP5 グリッド L1S8~L4S4 (STRUC.3) 電気伝導率 (1D)

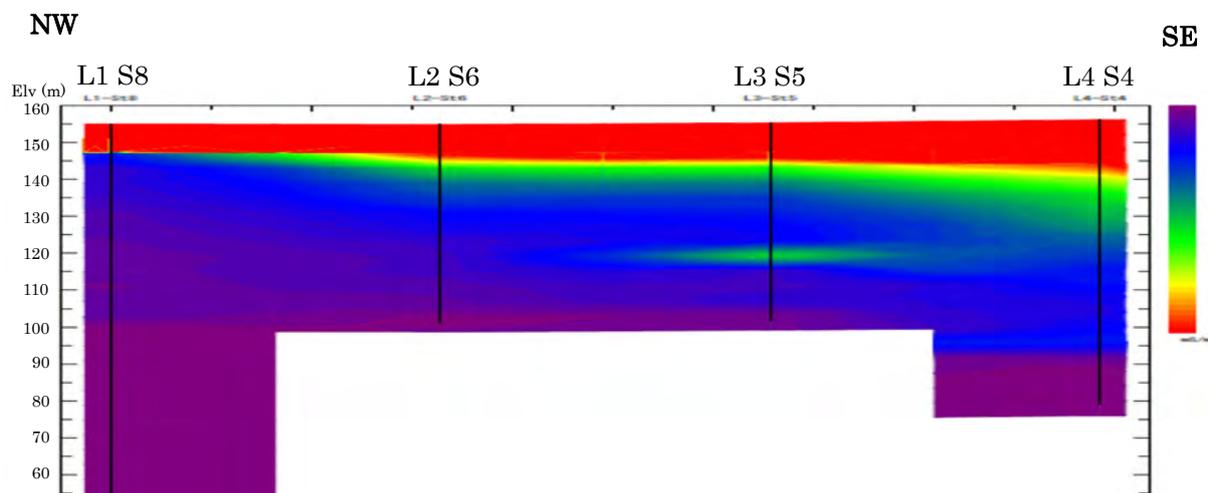


図 2.4.3-32 LP5 グリッド L1S8~L4S4 (STRUC.3) 電気伝導率 (2D)

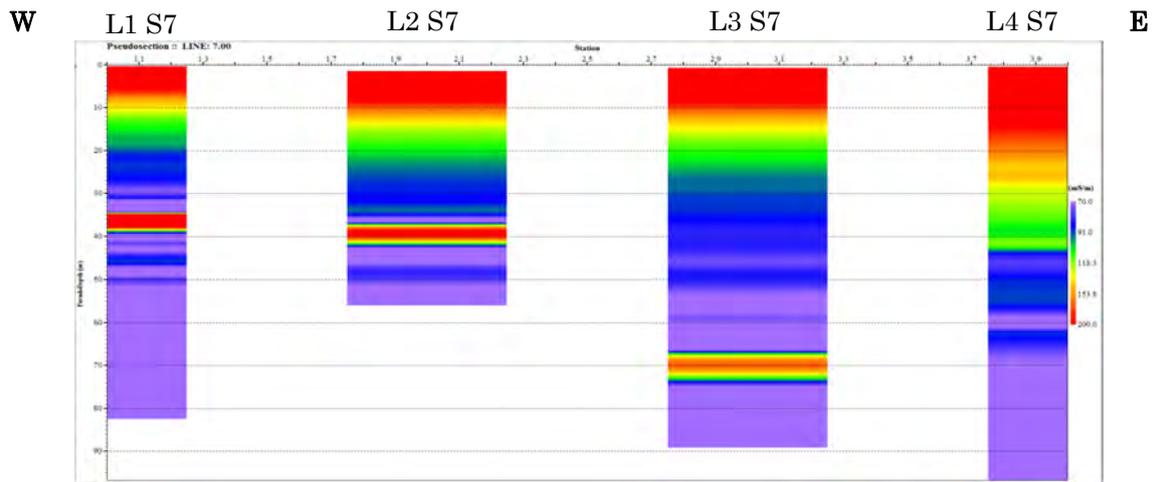


図 2.4.3-33 LP5 グリッド L1S7~L4S7 電気伝導率 (1D)

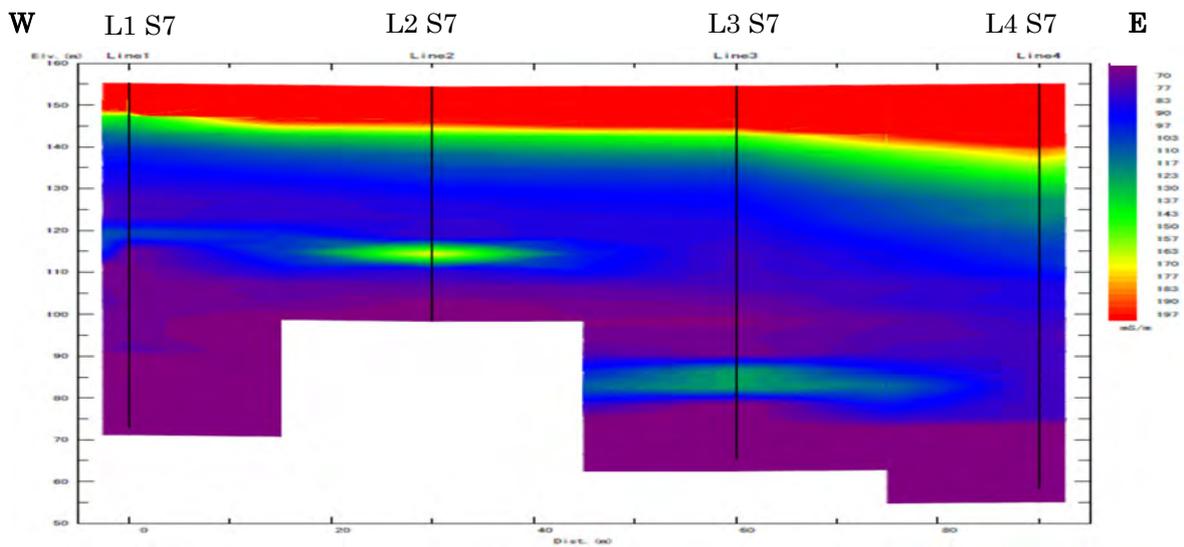


図 2.4.3-34 LP5 グリッド L1S7~L4S7 電気伝導率 (2D)

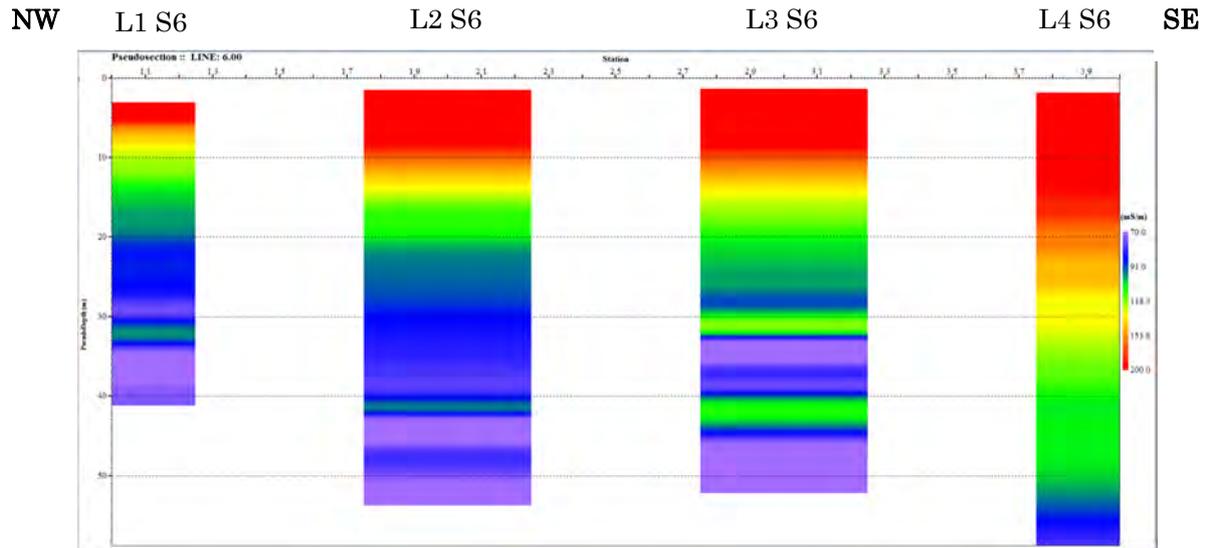


図 2.4.3-35 LP5 グリッド L1S6~L4S6 電気伝導率 (1D)

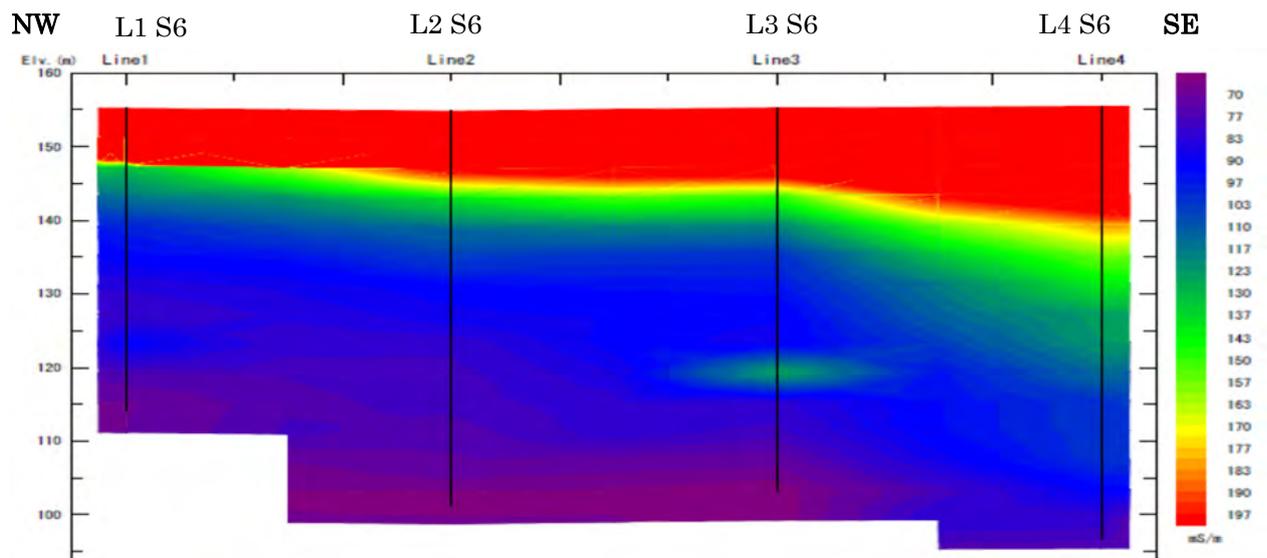


図 2.4.3-36 LP5 グリッド L1S6~L4S6 電気伝導率 (2D)

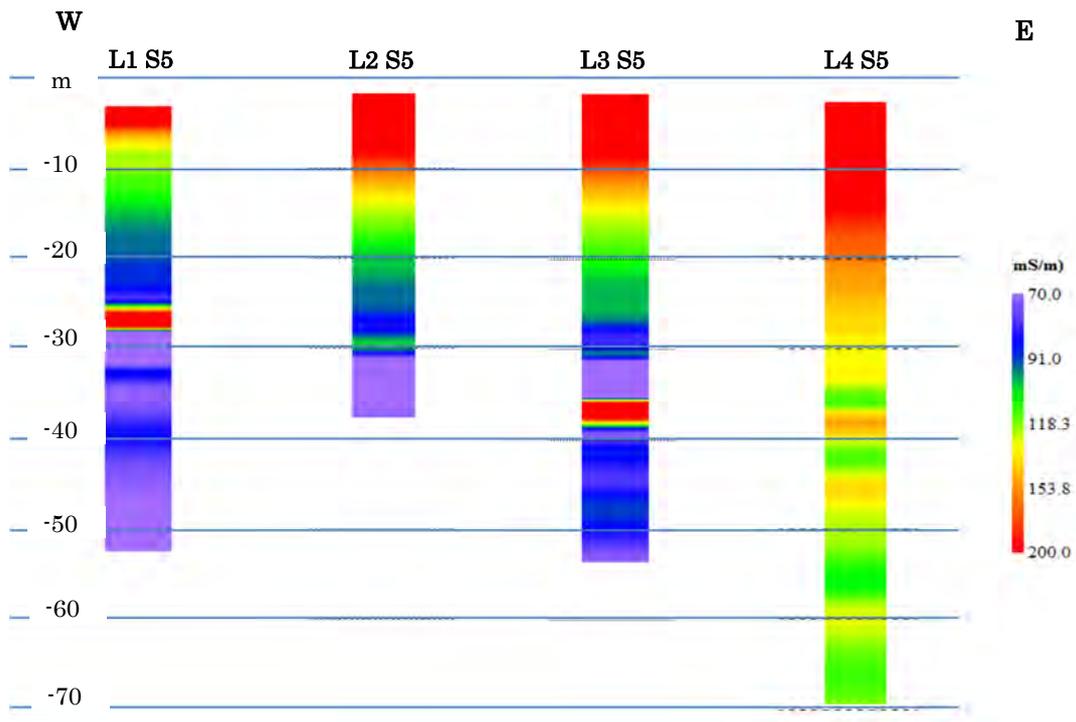


図 2.4.3-37 LP5 グリッド L1S5～L4S5 電気伝導率 (1D)

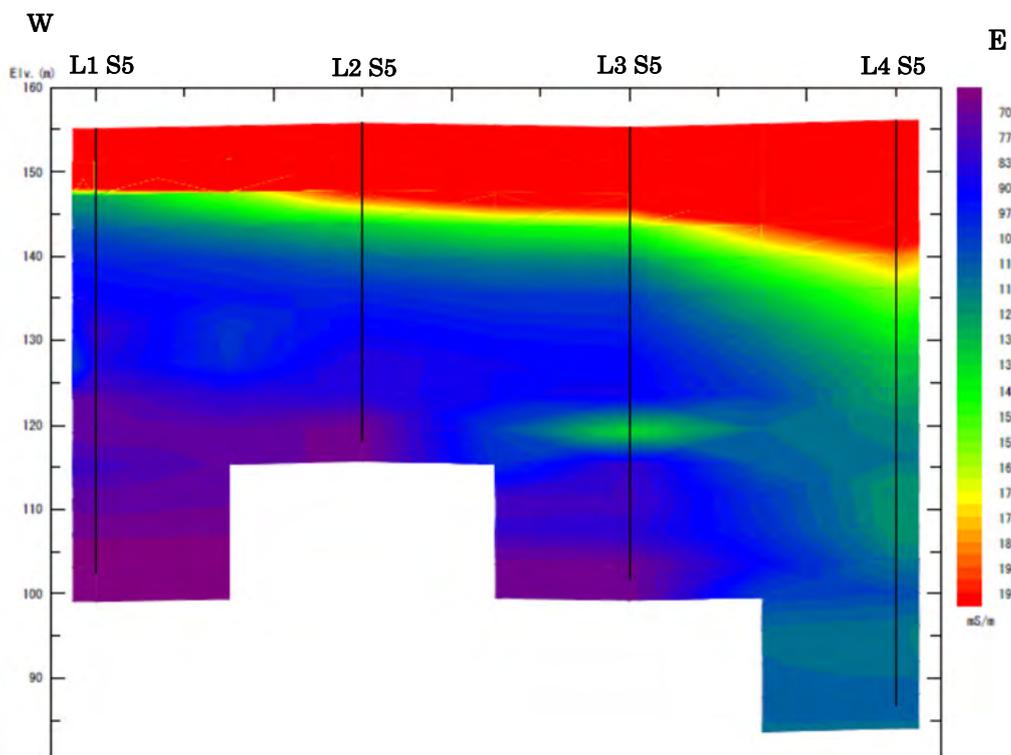


図 2.4.3-38 LP5 L1S5～L4S5 電気伝導率 (2D)

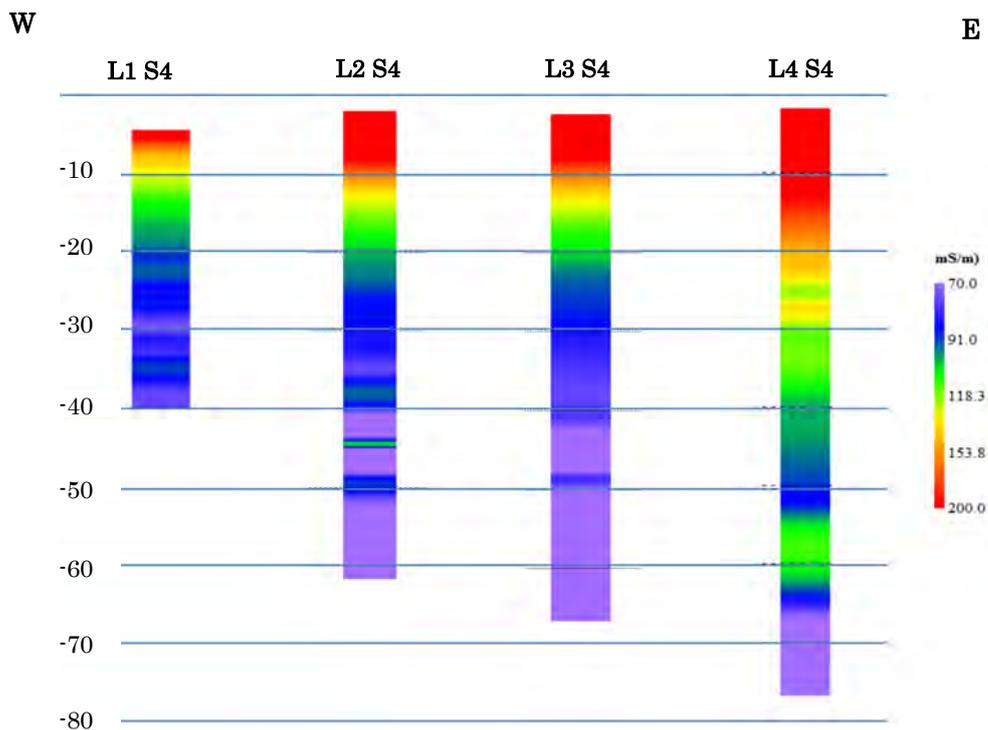


図 2.4.3-39 LP5 グリッド L1S4~L4S4 電気伝導率 (1D)

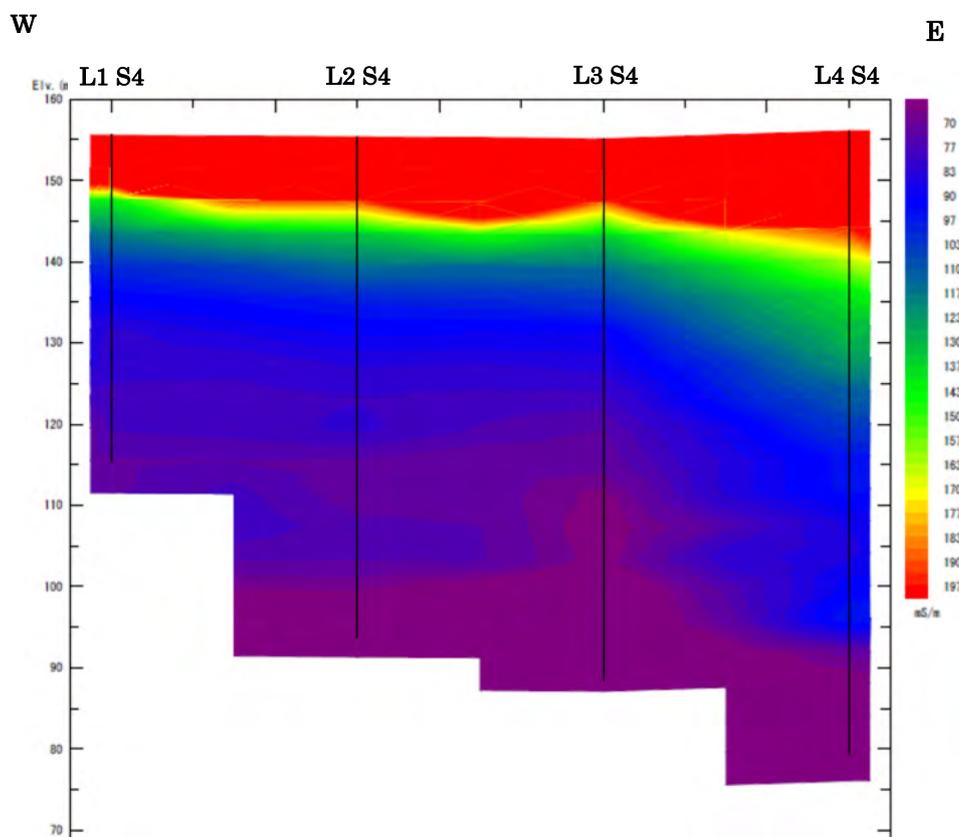


図 2.4.3-40 LP5 L1S4~L4S4 電気伝導率 (2D)

(2) Aksitero 累層 (砂岩・泥岩) と基盤岩のオフィオライト (玄武岩) のコンタクト

図 2.4.3-41～図 2.4.3-43 は、DH05、DH06、DH07 の TEM プロファイルを示している。かけ離れて最も高い値の電気伝導率値は他のデータの傾向を分かりやすくするため、プロットデータから除外されている。

これらの結果より、見掛けの電気伝導率は発生する電磁界に起因し、地表面の付近で最も高くなることを示している。その後、見掛けの電気伝導率は、深度に伴って減少する電磁気信号の強度とともに、徐々に減少する。深くなるにつれて解像度が低くなることにより、見掛けの電気伝導率にわずかな変動が見られる (プロットの最深部では信号が弱くなっているため)。

図中のプロットは、ボーリングデータに基づいた砂岩・泥岩とその下の玄武岩のコンタクト部の深さを示している。LP5 グリッドの深度 26m におけるコンタクト部のデータから見られるように、DH06 においてのわずかな変動を除いて、識別可能な電気伝導率の変化が無いことが分かる。しかし電磁界の伝達深さが GL-26m に届かなかったため、それは検証されなかった。深さに伴う電気伝導率の急激な変化が見られないことは、2 相 (砂岩・泥岩と玄武岩) 間に明確な電気伝導率のコントラストがないためと考えられる。従って、オフィオライトの基盤岩直上の Aksitero 累層はトレンチ調査や試錐調査から非常に硬質な珪質泥岩またはポーセラナイトと考えられているが、その Aksitero 累層とオフィオライト基盤岩 (玄武岩) とのコンタクトについては TEM での判断が難しいことを示している。

(DH-05) LP1 – Between L1 S1 and L1 S2

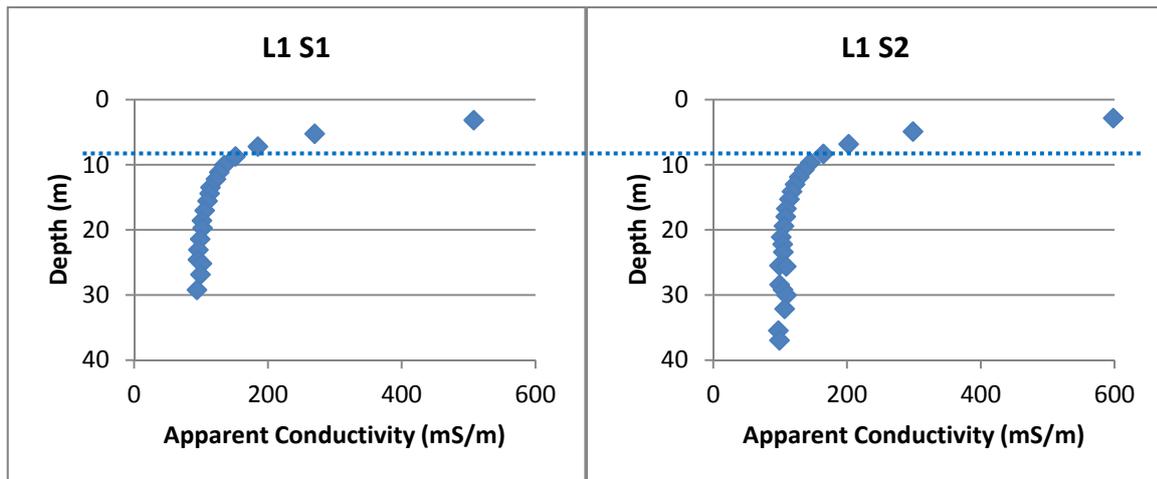


図 2.4.3-41 DH-05 の深度による見掛けの電気伝導率の変移状況

(DH-06) LP2 – Between L3 S7, L3 S8, L4 S7 and L4 S8

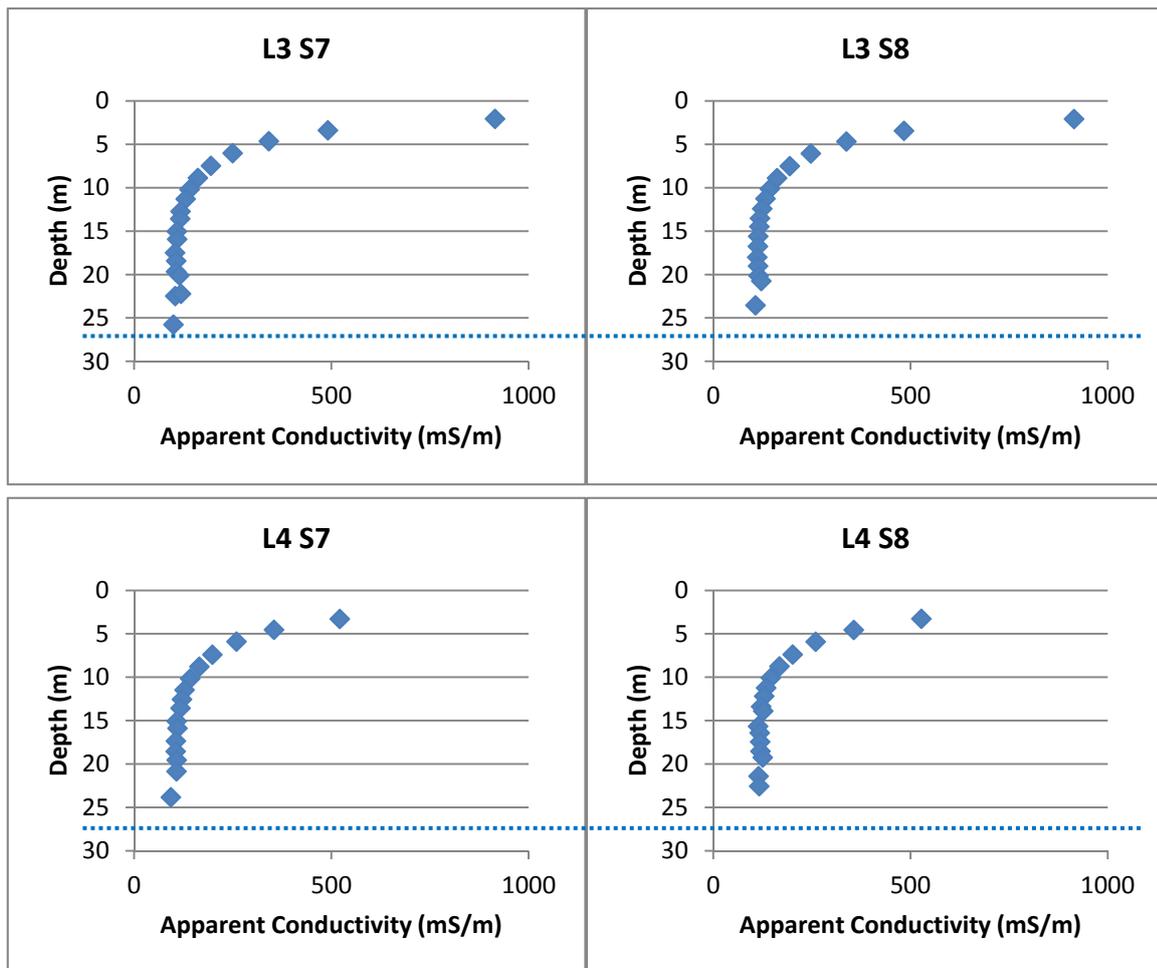


図 2.4.3-42 DH-06 の深度による見掛けの電気伝導率の変移状況

LP5 – On top of DH-06

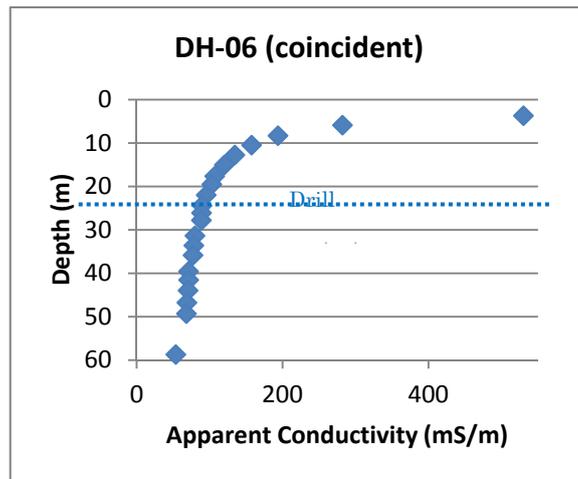
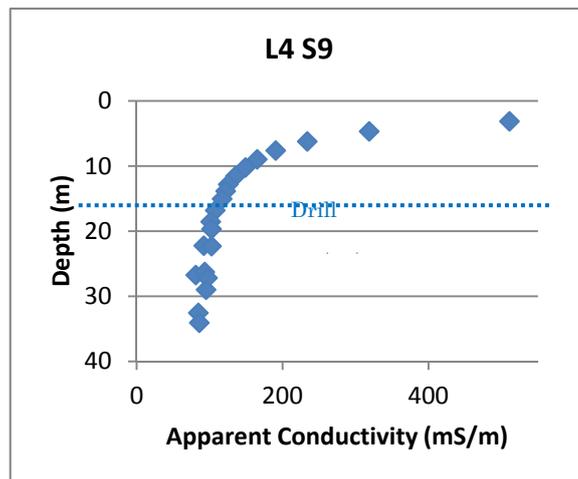


図 2.4.3-42 DH-06 の深度による見掛けの電気伝導率の変移状況

(DH-07) LP1 – L4 S9



LP1 – Between L7 S1 and L8 S1

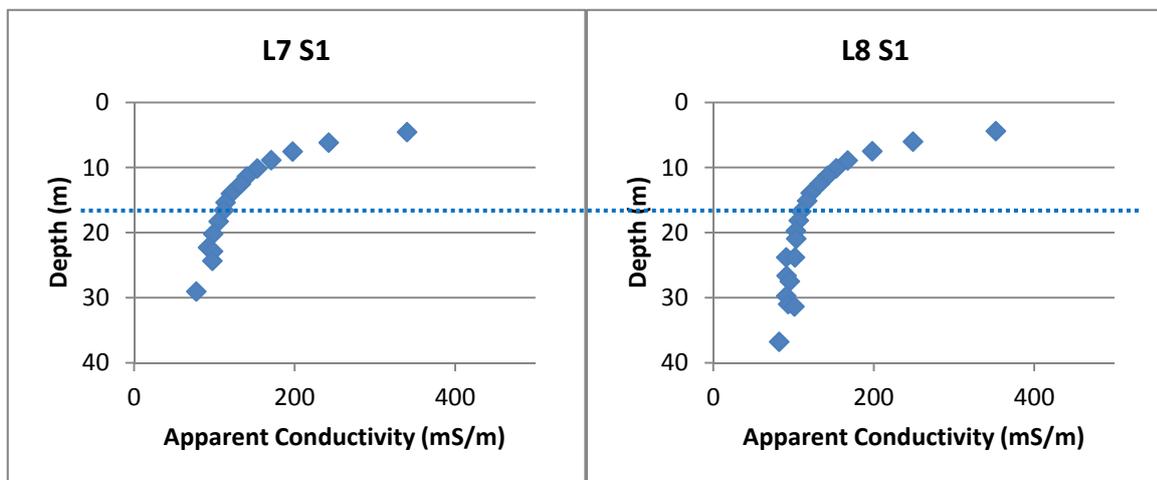


図 2.4.3-43 DH-07 の深度による見掛けの電気伝導率の変移状況

2.5 地質精査

2.5.1 トレンチサイトの選定

今年度の地質調査は、特に Saile 鉱山とその周辺に分布するベントナイトと Bigbiga 地区に分布するベントナイトの岩石鉱物学・鉱物化学的特性を比較するためのトレンチ調査のサイトを選定のために実施した。両者のベントナイトの出発物質（初生物質）は、典型的な遠洋性堆積物で、主に浮遊性生物遺骸（珪藻・有孔虫類など）と火山碎屑性体積物（火山ガラス・パミスなど）から構成されているが、Bigbiga 地区の堆積物は石灰質で、石灰質砂岩層や泥岩層が優勢である。しかし、所により凝灰岩質の薄層を挟在する互層関係を示し、一部ベントナイト質である。

トレンチ調査のサイトを選定するために、Aksitero 川岸の露頭やその近傍を精査し（図 2.5.1-1）、風化していないフレッシュな Aksitero 累層の露頭の分布とより深部からのアルカリ地下水との相互作用の可能性を考慮して、Well-1 に比べ地下水位が低いアルカリ地下水が賦存する Well-3 の西方で、BBDH-3A/3B/3C の試錐孔の南南西、約 50m 地点を選定した（図 2.5.1-2）。



①DH01 付近



②DH02 付近



③DH03(A~C)西側(今回トレンチ調査位置)

図 2.5.1-1 露頭調査状況

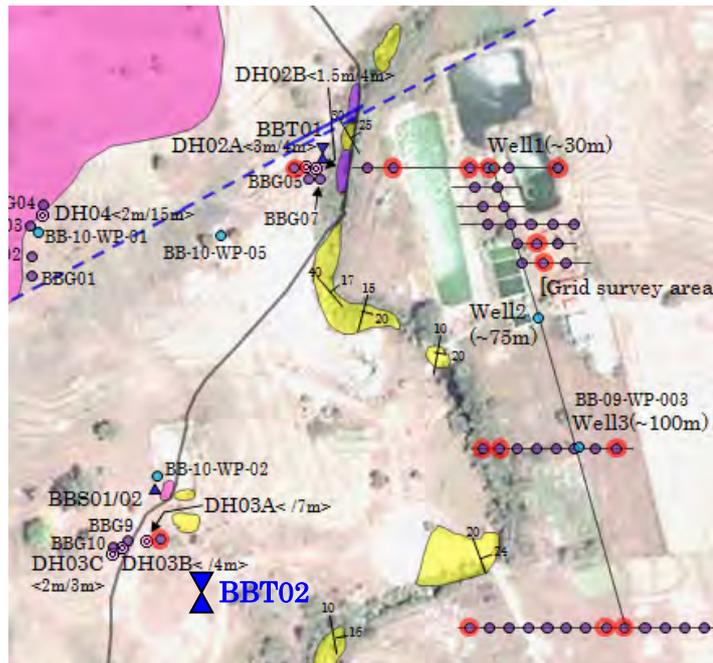


図 2.5.1-2 トレンチ(BBT02)の位置(N15° 30' 51.9", E120° 22' 54.6")

2.5.2 トレンチ調査

Fossil Type の Saile Mine と Active Type のポテンシャルサイトとして期待される Bigbiga の両ベントナイト層の鉱物学的特徴（鉱物組成・鉱物組み合わせ・組織・共生・原岩組成・変質反応など）を比較検討し、両者の鉱物学的特性を考察すると共に、原岩の岩石化学的特性を明らかにするために Bigbiga 地区におけるトレンチ調査（露頭観察と岩石試料採取）を実施した。

(1) トレンチ掘削

サンプリングの対象としている Aksitero 累層の層厚が 2~3m 程度と予想して、基盤岩最上部の枕状溶岩に達するまでトレンチを掘削することとした。ただし、Bigbiga 近辺でバックホーを調達することが困難なため、ホイールローダーにより斜面を横方向に削って山側の露頭を出すように掘削を 11/4 より開始したが、Aksitero 累層が予想以上に硬くパワー不足で深く掘り下げるのが難しいことが判明した。そのため、翌日から重機をブルドーザに切り替えて掘削作業を計測した。ただし、ホイールローダーやブルドーザでは深さが稼げないため、翌々日(11/5)からは手作業により掘削した。

上記作業により、サイズ(幅約 3m X 高さ約 2m X 長さ約 10m のほぼ長方形：トレンチの延長方向は東西系)のトレンチを掘削した(図 2.5.2-1)。



①ホイローラーによる掘削



②ブルドーザによる掘削



③手掘り掘削



④BBT02の全容

図 2.5.2-1 トレンチ(BBT02)の掘削

(2) 試料採取

トレンチ底部から Hilti Drill により (図 2.5.2-2) 大口径岩石試料 (8 コア)、またトレンチ壁面から Handpick により岩石試料 (6 試料) を採取した。トレンチの断面図と試料採取位置を図 2.5.2-3~図 2.5.2-4 に、採取したコア試料と位置関係を図 2.5.2-5 に示す。すべて「Akisetro 累層」の石灰質粘土岩・シルト岩であるが、部分的に凝灰岩質である。但し、手掘りによる最深部 (約 3m) での採取試料は基盤岩である「Zambales Ophiolite」の枕状玄武岩ではなかった。



コアリング作業



コア採取位置

図 2.5.2-2 大口径岩石試料のサンプリング

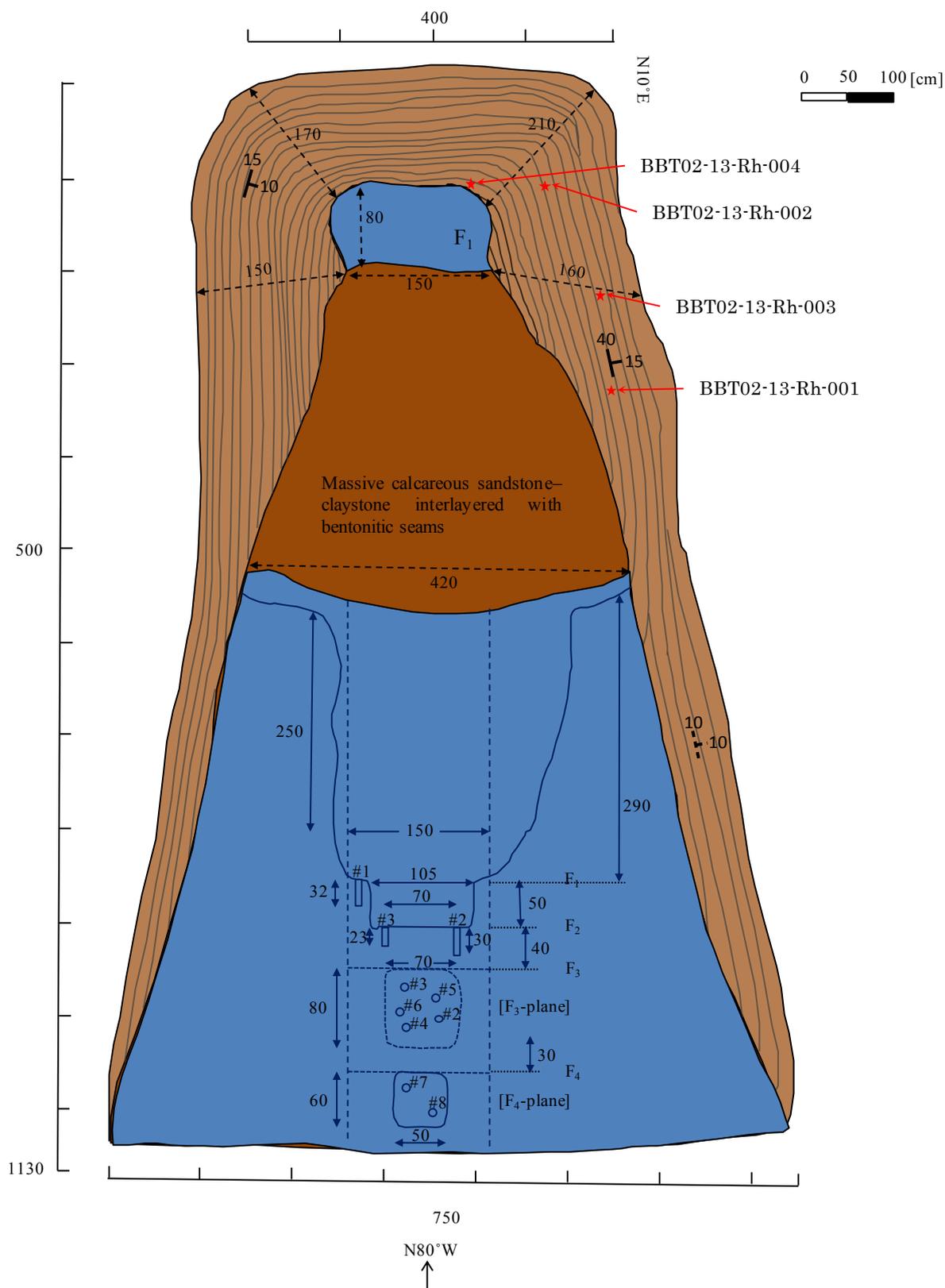
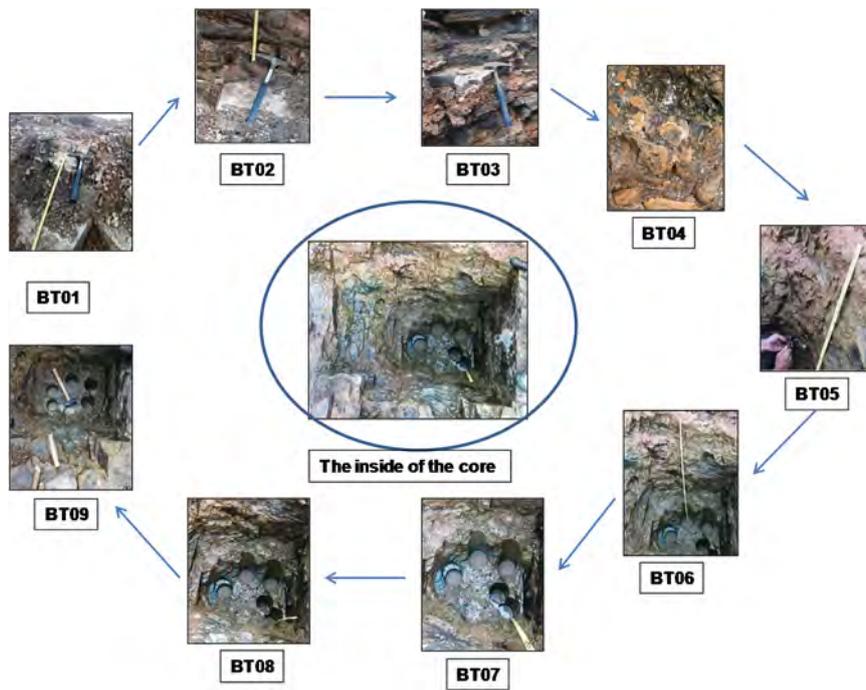


図 2.5.2-3 Bigbiga Trench2(BBT02)の断面図と壁面試料及びコア試料の採取位置



(a) 壁面試料の採取位置



(b) 試料の採取したトレンチ壁面の拡大写真

図 2.5.2-4 壁面試料の採取位置



図 2.5.2-5 大口径岩石試料（コア試料）

2.5.3 岩石鉱物学的調査

Bigbiga 地区に分布する Aksitero 累層の優勢な堆積岩である石灰岩質泥岩～砂岩の一部に薄層（4～5cm 程度）のベントナイト質の凝灰岩質砂岩が層理面に平行に挟在する。また、Bigbiga 地区に特徴的な分布をする珪質泥岩（またはポーセラナイト：チャートより緻密ではなく、少量であるが一部不純物として粘土鉱物を含有する）が塊状に産状し、その色肌が陶器のような様相を示し、一部に還元環境色を思わせるような明瞭な淡青緑色を呈していて、淡灰色の他の部分と対照的な岩相がみられる。

トレンチ内では、前者は壁面に、後者は床面に分布している。これらの堆積岩の岩石鉱物学的特性（鉱物組み合わせ・組成・組織など）を調査するために、壁面からは岩片を床面からは大口径岩石試料を採取した。分析したコア試料とその分析箇所及び壁面試料の写真を図 2.5.3-1～図 2.5.3-3 に示す。

全岩石試料の分析内訳は表 2.5.3-1 に示す。

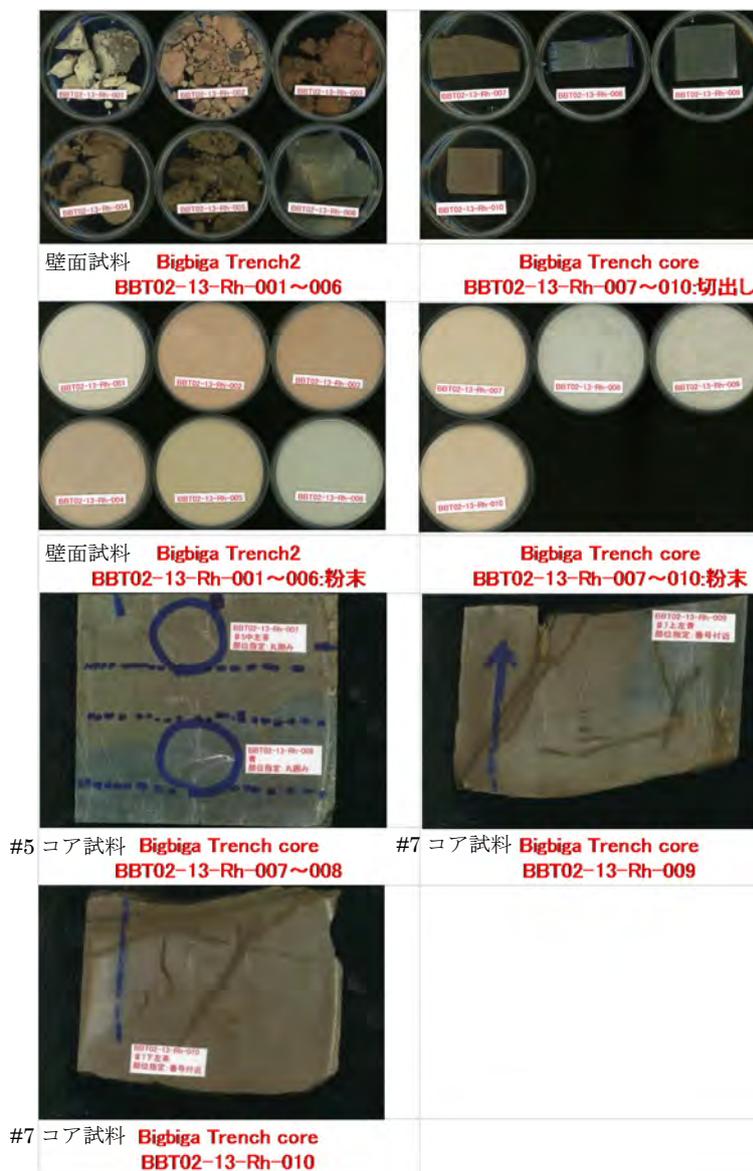


図 2.5.3-1 分析試料（壁面試料及びコア試料(#5, #7)と分析ポイント)



Core #4

Core4-1

- Light brown
- Silt to fine sand-sized grains
- Fine laminations
- Silica and carbonate veins
- Occurrences of Mn staining (MnO_2 + $MnO(OH)$)

Core4-2

- Same textural characteristics as sample Core4-1 but with greenish-brown color; boundary between the two is a distinct color boundary
- Greenish-brown discoloration occur as lenses and is texturally continuous with brown unit (sample Core4-1)



Core #8

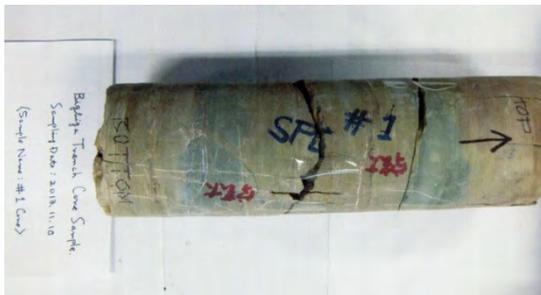
Core8-1

- Light brown
- Silt to fine sand-sized grains
- Fine laminations
- Silica and carbonate veins observed

Core8-2

- Greenish - brown, occur as lenses in light brown sandstone (Core8-1)
- Distinct color boundary but no textural differences with Core8-1

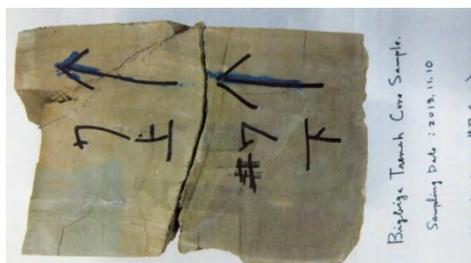
図 2.5.3-2 分析試料 (コア試料(#4, #8)と分析ポイント)



コア#1



コア#6



コア#7

図 2.5.3-3 分析試料 (コア試料(#1, #6, #7))

表 2.5.3-1 分析試料と分析項目一覧（採取場所：Bigbiga BBT02）

採取場所 詳細	試料名	分析項目	備考
Bigbiga Trench2 Wall	BBT02-13-Rh-001	XRD, XRF	碎石状
	BBT02-13-Rh-002		碎石状
	BBT02-13-Rh-003		碎石状
	BBT02-13-Rh-004		碎石状
	BBT02-13-Rh-005		碎石状
	BBT02-13-Rh-006		碎石状
	BT01	ICP-MS (Si 除く主 成分元素、微量成分 元素) XRF (SiO ₂)	碎石状 Outer layer part 薄茶
	BT02		碎石状 0.5m from the top 茶
	BT03		碎石状 1.0m from the top 薄茶
	BT04		碎石状 1.5m from the top 青
	BT05		碎石状 2.0m from the top 青
	BT06		碎石状 2.5m from the top 茶
	BT07		碎石状 3.0m from the top 青
	BT08		碎石状 5.5m from the top 薄茶
BT09	碎石状 4.0m from the top 茶		
Bigbiga Trench Core	BBT02-13-Rh-007	XRD, XRF, 偏光顕 微鏡観察	#5 コア 中左茶 部位指定：丸囲み
	BBT02-13-Rh-008		#5 コア 中左青 部位指定：丸囲み
	BBT02-13-Rh-009	XRD, XRF	#7 コア 上左青 部位指定：番号 付近
	BBT02-13-Rh-010		#7 コア 下左茶 部位指定：番号 付近
	BC01A	ICP-MS (Si 除く主 成分元素、微量成分 元素) XRF (SiO ₂)	#1 コア 茶
	BC01B		#1 コア 青
	BC06A		#6 コア 茶
	BC06B		#6 コア 青
	BC07A		#7 コア 茶
	BC07B		#7 コア 青
	Core4-1	XRD	#4 コア 茶 部位指定：丸囲み
	Core4-2		#4 コア 青-茶境界部 部位指定： 丸囲み
	Core8-1		#8 コア 茶 部位指定：丸囲み
	Core8-2		#8 コア 青-茶境界部 部位指定： 丸囲み

(1) 偏光顕微鏡観察

1) 試料調製

偏光顕微鏡観察では透過光により試料を観察する必要があるため、観察用試料は厚さ 15～20 μm 程度の薄片（図 2.5.3-4）に調製した。水分子を層間に取り込み膨潤する膨潤性粘土鉱物を含んでいることから、薄片作製においては非極性溶媒を使用した。

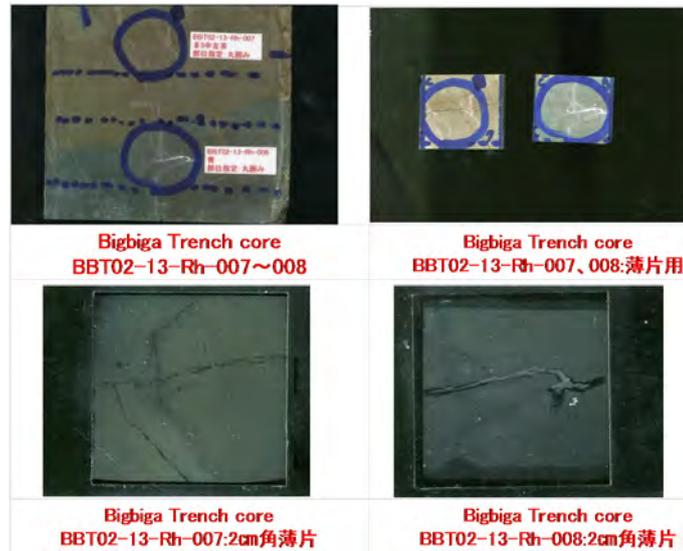


図 2.5.3-4 偏光顕微鏡試料 (BBT-02-13-Rh-007~008)

2) 観察結果

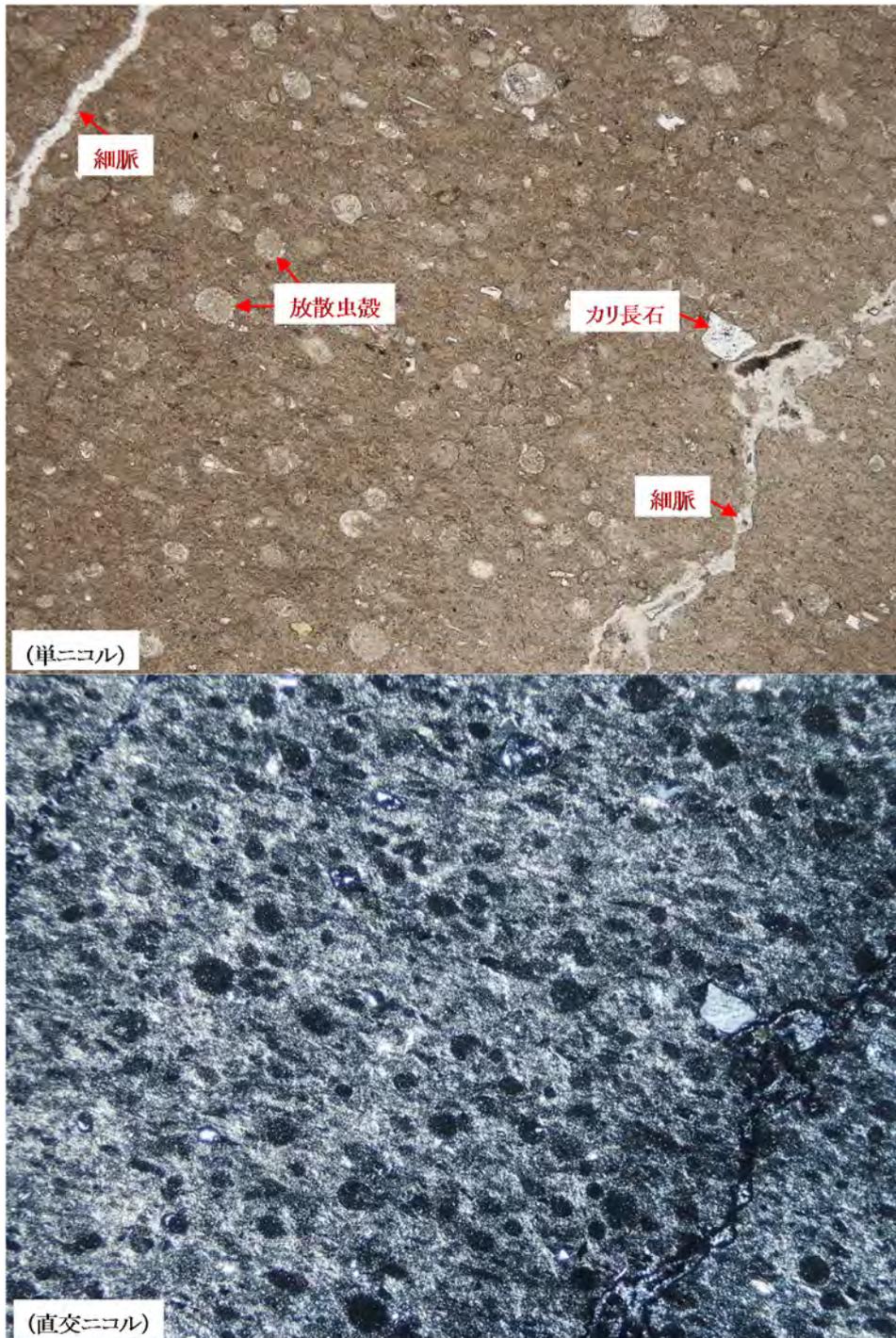
観察結果のまとめを表 2.5.3-2 に示す。また、BBT02-13-Rh-007 の偏光顕微鏡写真を図 2.5.3-5~図 2.5.3-8 に、BBT02-13-Rh-008 の偏光顕微鏡写真を図 2.5.3-9~図 2.5.3-12 にそれぞれ示す。

両試料ともに海底に堆積したオパール質生物遺骸殻などを起源とするものであり、続成変質作用を受けて沸石やスメクタイトなどが生成している。主成分はオパールとスメクタイトであり、細脈などに沸石とカルセドニー、また碎屑粒子としては石英・斜長石・カリ長石・苦鉄質鉱物（スメクタイトに変質）などをわずかに含む。両試料間に大きな差異はないが、BBT02-13-Rh-008 では細脈中の沸石の一部が炭酸塩鉱物に変質しているほか、細脈中のオパールのカルセドニーへの変質がやや多く、続成変質作用の進行度がやや高い可能性もある。肉眼で認識される両試料のそれぞれの色調は、不純物の量比または酸化還元状態の差異を反映している可能性もあるが、明らかではない。

これらの偏光顕微鏡観察結果から、床面から採取した岩石は珪質泥岩またはポーセラナイト (Prrcellanite) と判定した。

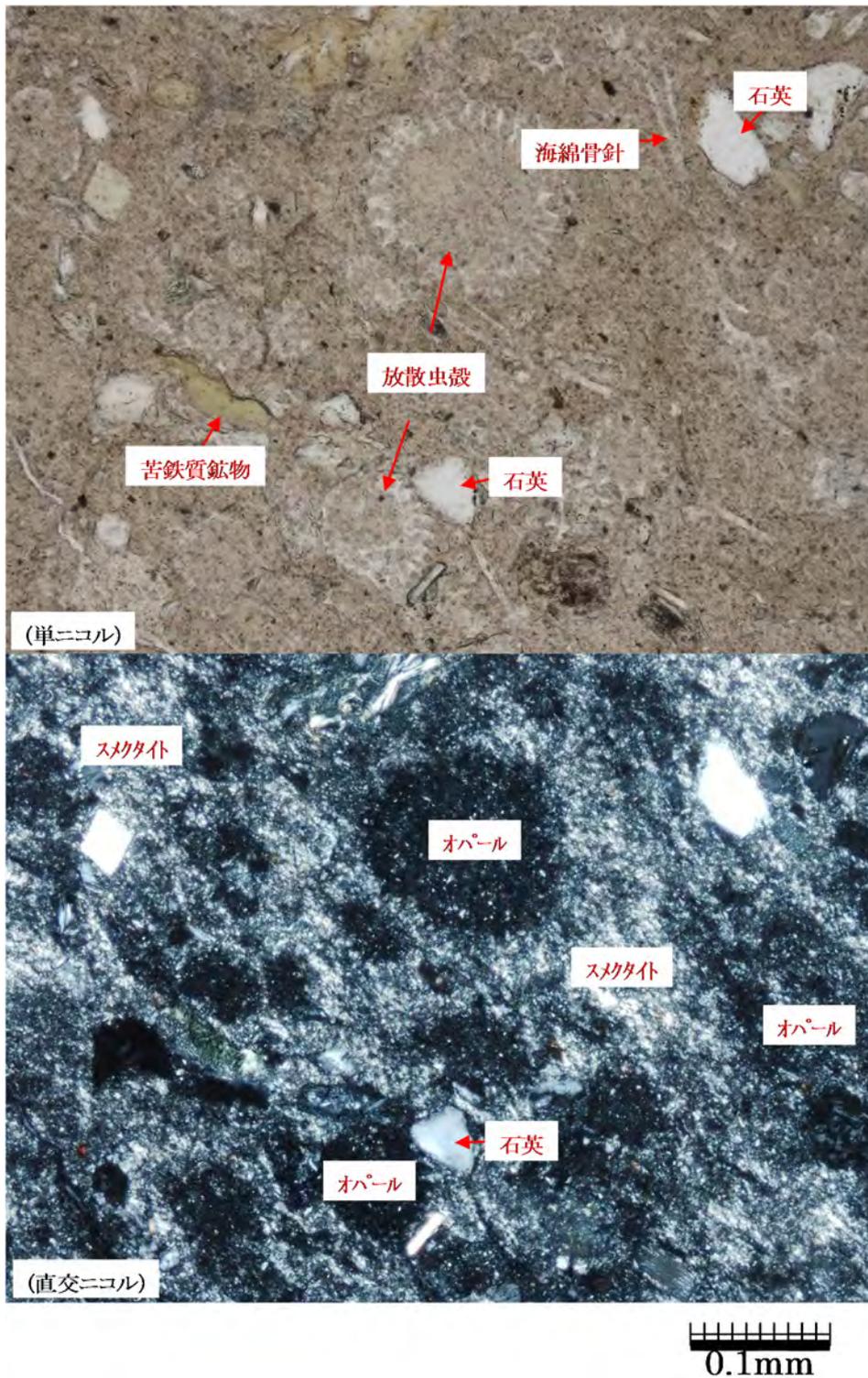
表 2.5.3-2 観察結果のまとめ

試料	基質	細脈	備考
BBT02-13-Rh-007	オパールとスメクタイトから主に構成され、隠微晶質。わずかに碎屑性の石英・斜長石・カリ長石・苦鉄質鉱物の結晶片や火山岩などの岩片を含む。	細脈幅 0.5 mm程度以下 沸石・オパール・カルセドニーからなる。	放散虫や海綿骨針、珪藻などのオパール質生物遺骸殻などの堆積により生成した珪質泥岩またはポーセラナイト。
BBT02-13-Rh-008	オパールとスメクタイトから主に構成され、隠微晶質。わずかに碎屑性の石英・斜長石・カリ長石・苦鉄質鉱物の結晶片や火山岩などの岩片を含む。	細脈幅 1 mm程度以下 沸石・オパール・カルセドニーからなる。 沸石の一部は炭酸塩鉱物に変質している。	放散虫や海綿骨針、珪藻などのオパール質生物遺骸殻などの堆積により生成した珪質泥岩またはポーセラナイト。



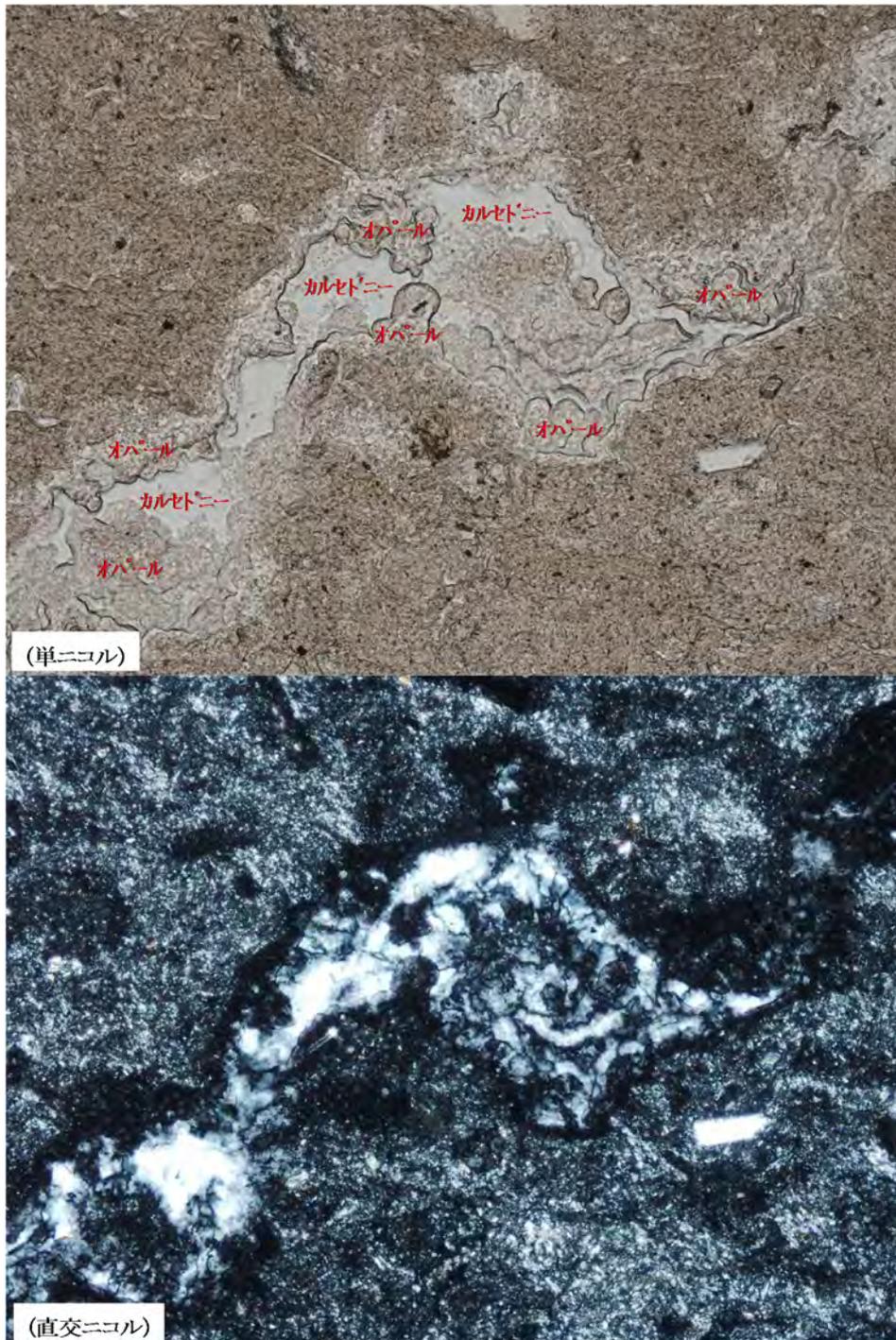
放散虫や海綿骨針、珪藻などのオパール質生物遺骸殻などの堆積により生成した珪質泥岩またはポーセラナイトである。基質中に、石英・斜長石・カリ長石などのわずかな碎屑粒子と、幅 0.5mm 程度以下の細脈を含む。

図 2.5.3-5 BBT02-13-Rh-007 の岩石組織



基質はオパールとスメクタイトから主に構成され、わずかに碎屑性の石英や苦鉄質鉱物の結晶片などを含む。直交ニコルでオパールは暗黒、スメクタイトは細かく輝いて見える部分。

図 2.5.3-6 BBT02-13-Rh-007 の基質

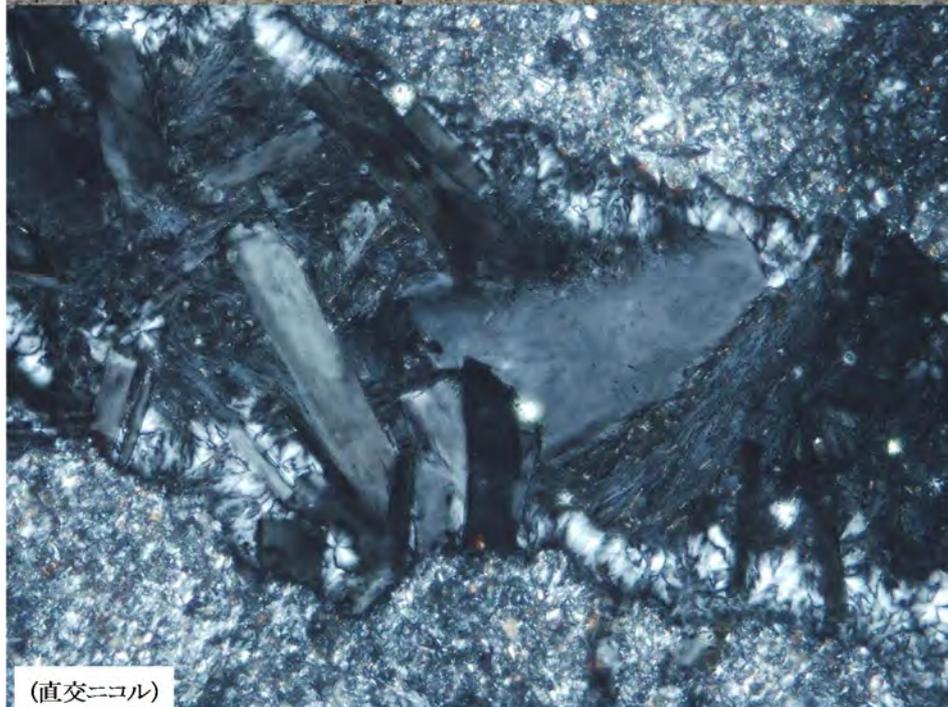


オパールとカルセドニーからなる細脈の拡大。
カルセドニーは微細な繊維状石英の集合体である。

図 2.5.3-7 BBT02-13-Rh-007 の細脈 (オパールーカルセドニー脈)



(単ニコル)

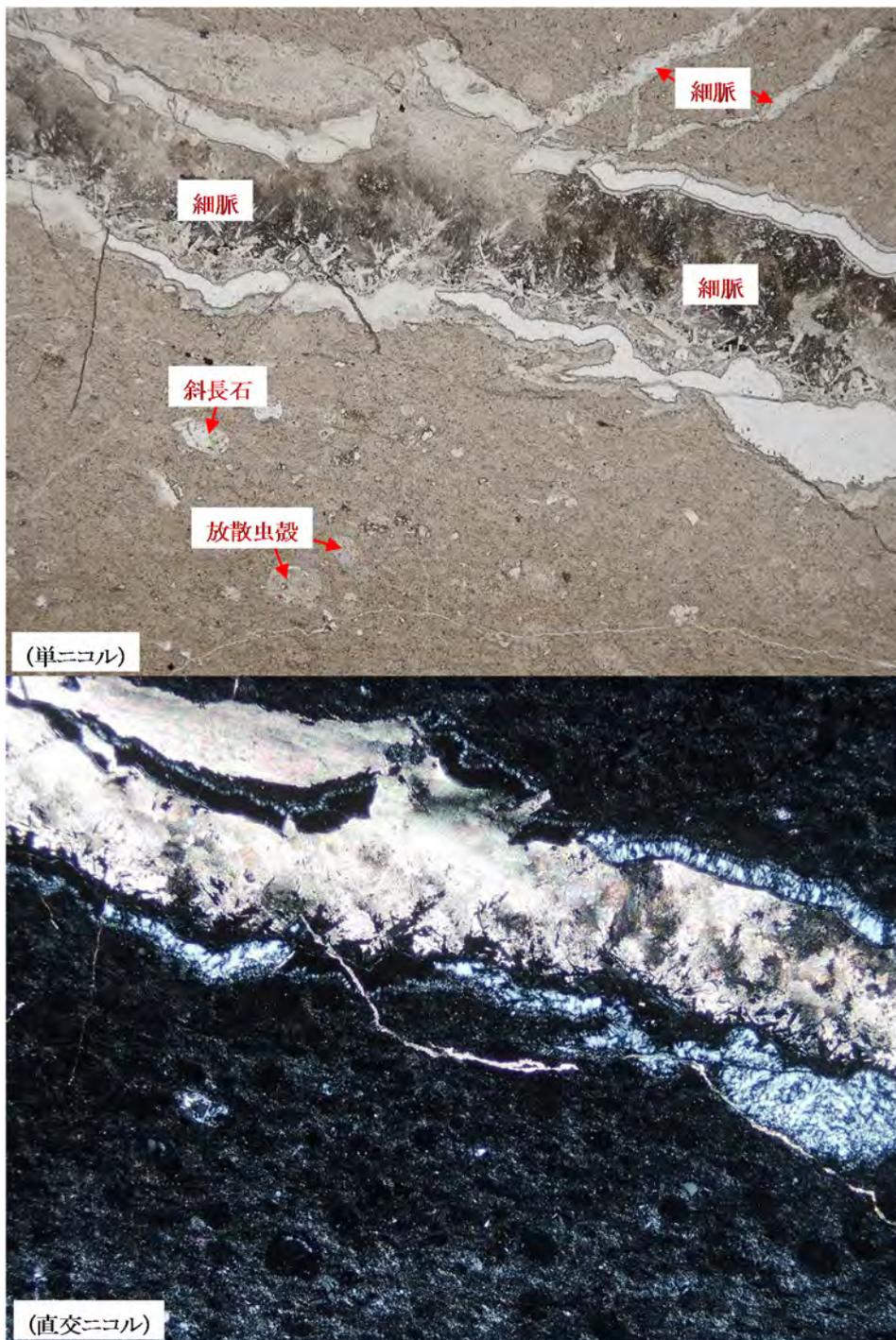


(直交ニコル)

0.1mm

沸石と考えられる鉱物が充填した細脈の拡大。拍子木状のもの(Cpt:斜プチロル沸石)と針状のもの(Mor:モルデン沸石)とがあるように見える。

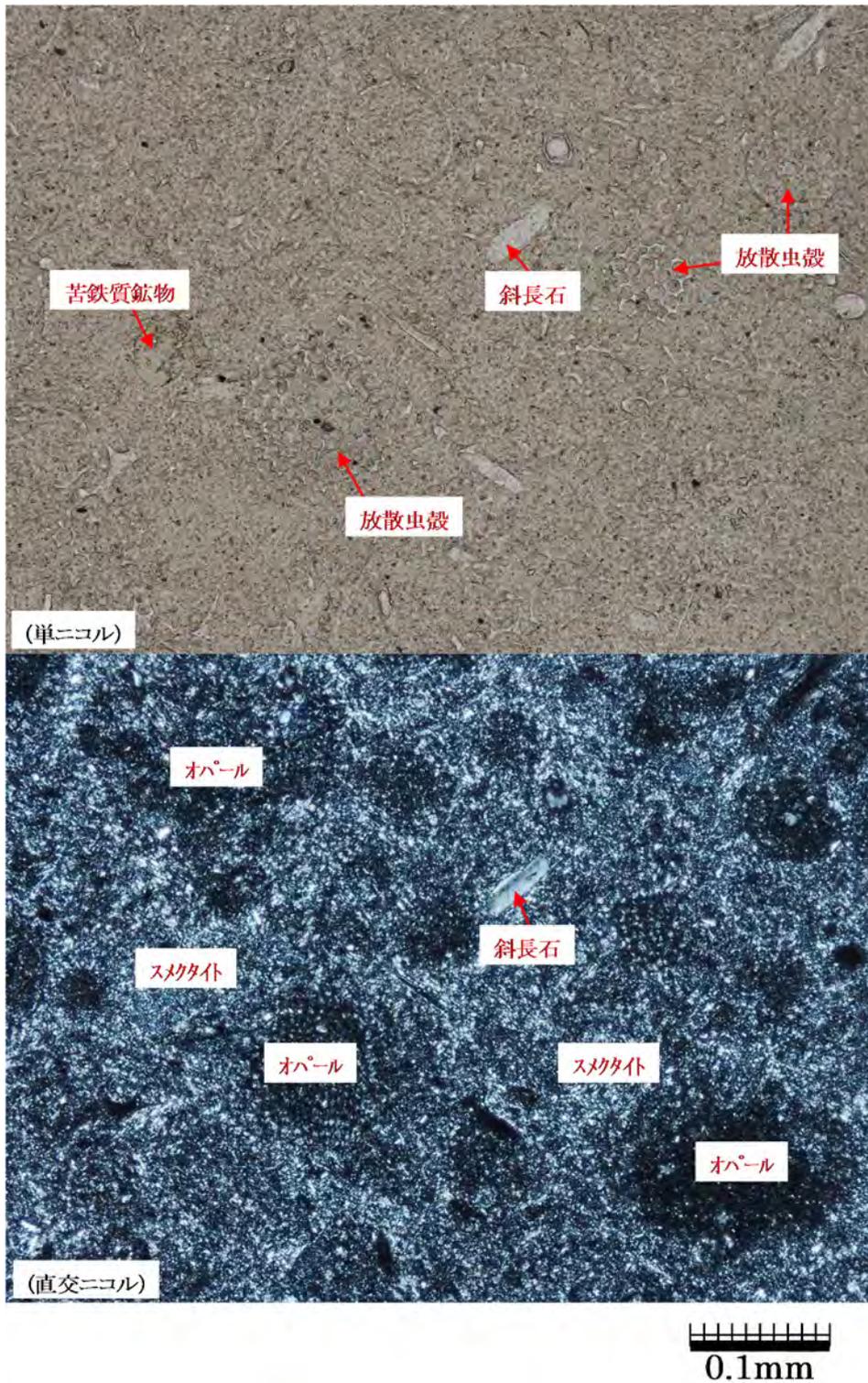
図 2.5.3-8 BBT02-13-Rh-007 の細脈 (沸石脈)



1mm

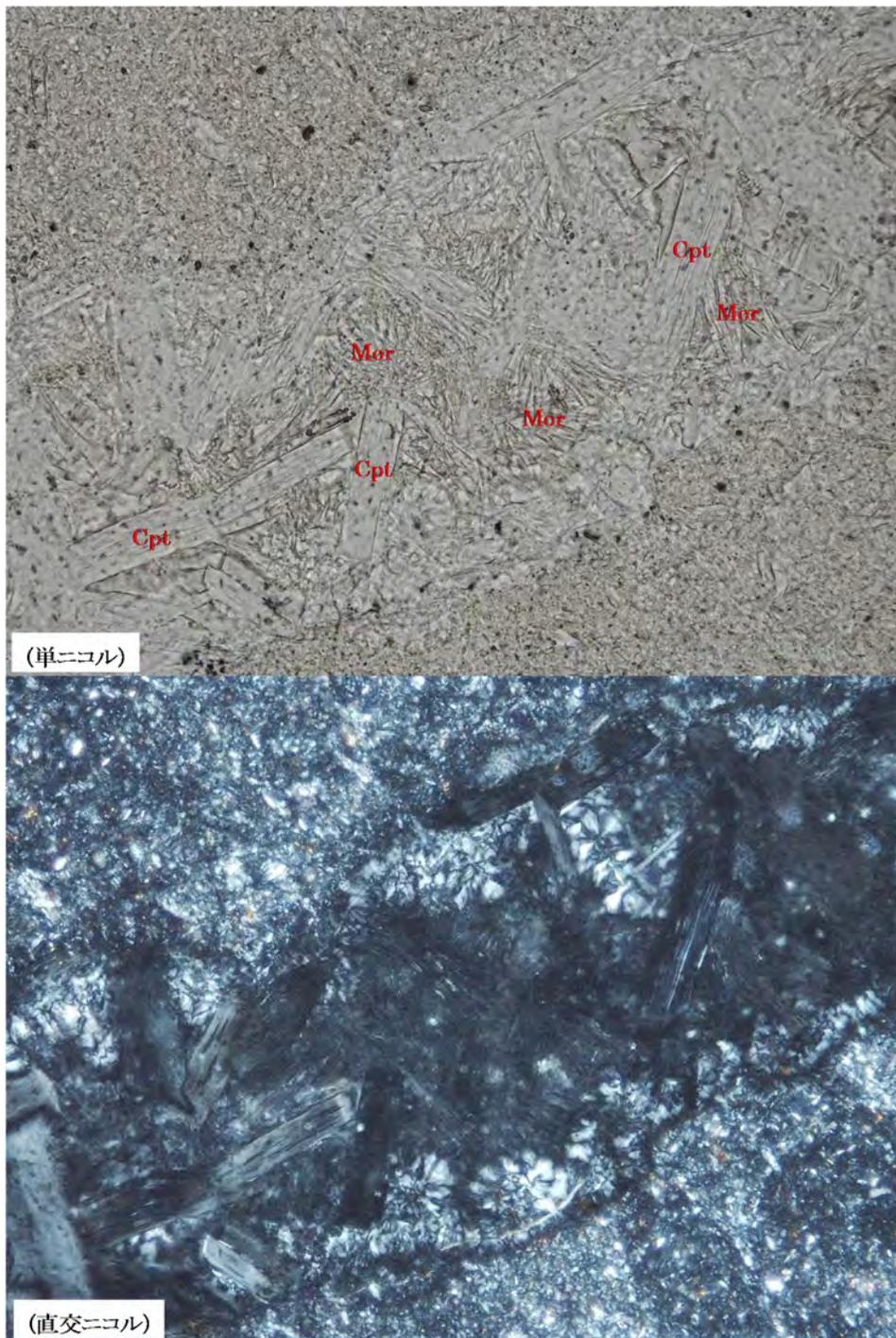
放散虫や海綿骨針、珪藻などのオパール質生物遺骸殻などの堆積により生成した珪質泥岩またはポーセラナイトである。基質中に、石英・斜長石・カリ長石などのわずかな碎屑粒子と、幅 1mm 程度以下の細脈を含む。

図 2.5.3-9 BBT02-13-Rh-008 の岩石組織



基質はオパールとスメクタイトから主に構成され、わずかに碎屑性の斜長石や苦鉄質鉱物の結晶片などを含む。直交ニコルでオパールは暗黒、スメクタイトは細かく輝いて見える部分。径 0.1mm 前後の丸い輪郭が放散虫殻で、主にオパールからなる。

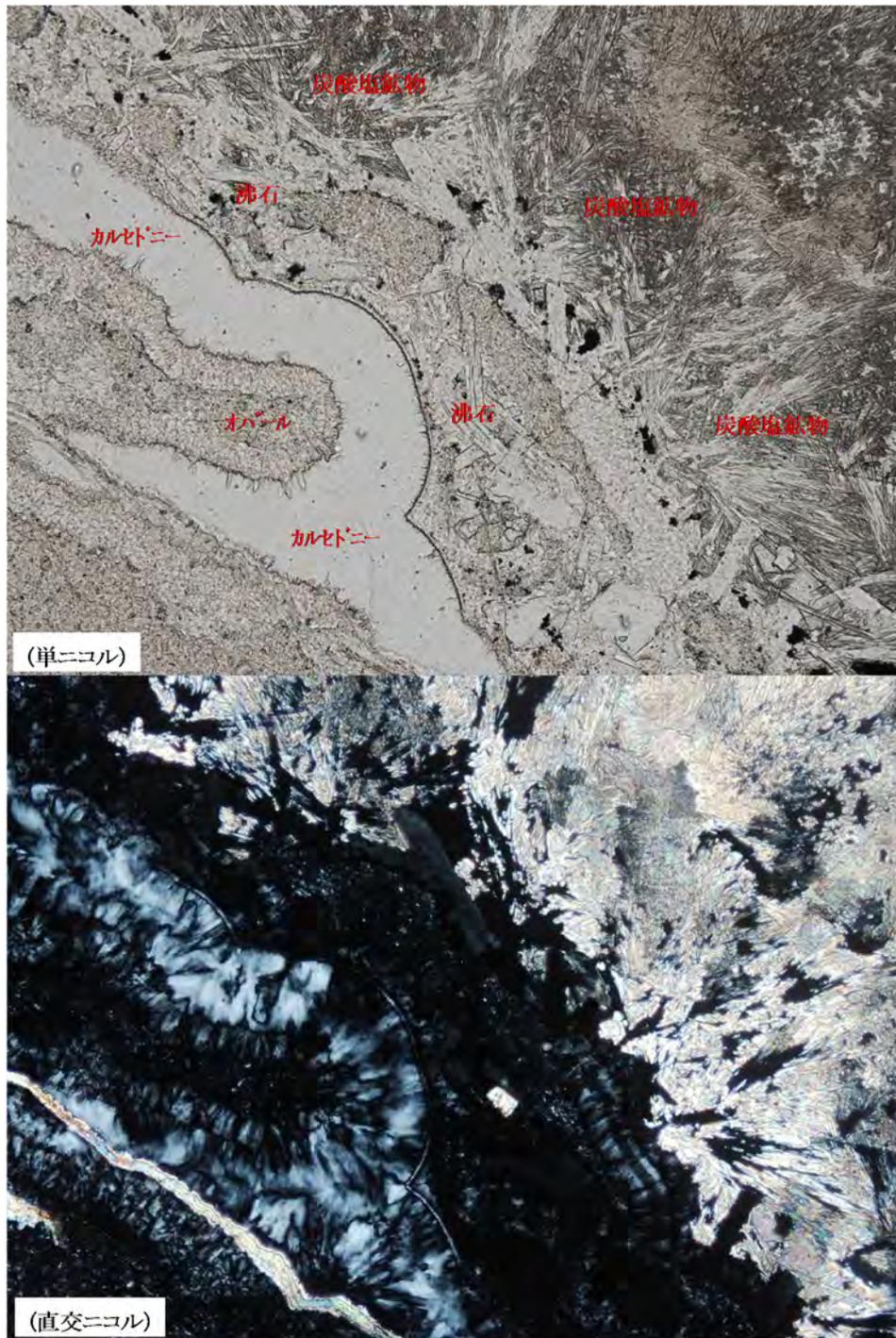
図 2.5.3-10 BBT02-13-Rh-008 の基質



0.1mm

沸石と考えられる鉱物が充填した細脈の拡大。拍子木状のもの(Cpt:斜プチロル沸石)と針状のもの(Mor:モルデン沸石)とがあるようにも見える。

図 2.5.3-11 BBT02-13-Rh-008 の細脈 (沸石脈)



0.1mm

細脈の拡大。②ではオパールに伴うカルセドニーがやや多い。また、針状の沸石は、その外形を残したまま、しばしば炭酸塩鉱物に変質している。

図 2.5.3-12 BBT02-13-Rh-008 の細脈 (オパール-カルセドニー-沸石-炭酸塩鉱物脈)

(2) X線回折 (XRD)

トレンチ内から採取した表 2.5.3-1 に示す試料のうち、壁面から 6 件、床面コアから 8 件の総計 14 件の鉱物学的特性（鉱物組み合わせなど）を明らかにするために、XRD による全岩分析・同定を実施した。

1) 試料調整

Bigbiga Trench2 の試料は XRD および XRF に供するため全量粉末とした。Bigbiga Trench Core の試料は、コンクリートカッターで分析に供する量を切出し粉末とした。

2) 測定条件

XRD の測定条件一覧を表 2.5.3-3 に示す。

XRD 測定には、調整した試料を四分法により必要量（0.2g 程度）分取し、下記の計測条件により粉末試料の表面をガラス板で平滑にする充填方法を適用した。

表 2.5.3-3 XRD の測定条件一覧

項目		詳細
装置名		PANALYTICAL社、X'Pert PRO
方式		高速半導体検出器エクセラレータ
測定条件	ソーラスリット	0.04rad （入射側、受光側共通）
	発散スリット	1°
	ターゲット	Cu
	電圧、電流	40 k V、45mA
	走査範囲	4~60°
	走査速度	5°/min
	試料台	ガラスホルダー （回転台：1回/sec）
	試料充填方法	不定方位 (粉末試料の表面をガラス板で平滑にした。)
環境条件※	開始時の温度、湿度	19°C、11%
	終了時の温度、湿度	24°C、8%
試料条件	粉碎操作	厚手のビニール袋で粗砕後に真空乾燥し、乾燥試料を瑪瑙乳鉢で粉碎した。粉碎試料は、100μmのふるいを全量通過するまで粉碎を繰り返した。ふるいを全通した試料は、仕上げに再度真空乾燥した。
	乾燥操作	真空乾燥

※温度および湿度の調整チャンバーは使用していない。温度および湿度は、X線回折装置内の測定開始前後の結果。

3) 鉱物の同定結果

同定された鉱物の一覧を表 2.5.3-4 に、鉱物の同定結果を表 2.5.3-5 にそれぞれ示す。また、XRD 測定結果を図 2.5.3-13～図 2.5.3-26 にそれぞれ示す。

本評価において曹長石と灰長石はピーク位置が近く判別が困難なため区別していない、ピークチャートの判例には代表鉱物として「Albite」と記載した。同様の理由で斜プチロル沸石、灰斜プチロル沸石、機沸石は区別せず「Clinoptilolite」と記載した。なお、粘土鉱物（モンモリロナイト）の有無の判定は、本来ピーク位置 10°以下の低角側の最強ピークで評価できるが、本試料の多くが最強ピーク位置にピークが存在しないことから、クニピア F（純度の高いモンモリロナイト試料）で顕著に確認できる 20°、35°、45°付近のピークの有無をもって判定した。

鉱物の同定の結果、試料の鉱物構成の傾向は 3 つのグループがあり、炭酸鉱物が顕著でその他粘土鉱物、沸石、珪酸鉱物から構成される Rh-001、②モンモリロナイト、長石、沸石、珪酸鉱物で構成される Rh-002～005、③、①と概ね同様の鉱物構成だが殆ど炭酸鉱物を含まない Rh-006 及びコア試料の 8 件（Rh-007～010 及び Core4-1～2, Core8-1～2）である。②のグループでは①、③の主要ピークであるオパールが同定されていない。このオパールと判断したピークは方珪石のデータベースとピーク位置が僅かにずれていること、ピークがシャープでないことから、結晶性の低いオパール等の珪酸鉱物で構成されていると考えられる。

トレンチのコア試料では、オパールを主体として石英、ゼオライト、スメクタイトが同定されたが、ベントナイトではなかった。ただし、比較的スメクタイト量の多い堆積岩であることから、本地域で高アルカリ泉が見つかり、本層準と接触している事実が見つければ、高アルカリ地下水 - スメクタイト反応のアナログには成り得る試料と考える。ただし、石灰岩や玄武岩の層準との関係は不明である。

表 2.5.3-4 同定された鉱物の一覧

分類	鉱物名		XRD データベース記載の化学式
粘土鉱物	モンモリロナイト	Montmorillonite	$(\text{Na,Ca})_{0.33}(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$
長石	曹長石	Albite, calcian	$\text{Na}_{0.499}\text{Ca}_{0.491}(\text{Al}_{1.488}\text{Si}_{2.506}\text{O}_8)$
	曹長石	Albite, calcian, ordered	$(\text{Na,Ca})(\text{Si,Al})_4\text{O}_8$
	灰長石	Anorthite	$\text{Ca}_{0.66}\text{Na}_{0.34}\text{Al}_{1.66}\text{Si}_{2.34}\text{O}_8$
沸石	斜プチロル沸石	Clinoptilolite	$(\text{Na,K,Ca})_6(\text{Si,Al})_{36}\text{O}_{72} \cdot 20\text{H}_2\text{O}$
	灰斜プチロル沸石	Clinoptilolite-Ca	$\text{KNa}_2\text{Ca}_2(\text{Si}_{29}\text{Al}_7)\text{O}_{72} \cdot 24\text{H}_2\text{O}$
	輝沸石	Heulandite	$\text{CaAl}_2\text{Si}_7\text{O}_{18} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
珪酸鉱物	石英	Quartz	SiO_2
	オパール	Opal	SiO_2
炭酸鉱物	方解石	Calcite	CaCO_3

表 2.5.3-5 鉱物の同定結果

試料名		同定鉱物									
シリーズ	NO.	粘土鉱物	長石			沸石			珪酸鉱物		炭酸鉱物
		モンモリロナイト	曹長石	曹長石	灰長石	斜プチロル沸石	灰斜プチロル沸石	輝沸石	石英	オパール	方解石
		Montmorillonite	Albite, calaian	Albite, calaian, ordered	Anorthite	Clinoptilolite	Clinoptilolite -Ca	Heulandite	Quartz	Opal	Calcite
Bigbiga Trench2 Wall	Rh-001	△					△		○	◎	◎
	Rh-002	○		△			△		◎		
	Rh-003	○		△			△		◎		△
	Rh-004	○		△			△		◎		
	Rh-005	○		△			△		◎		
	Rh-006	△		△			△		◎	◎	△
Bigbiga Trench2 Core	Rh-007(Core5)	△		△			△		○	◎	
	Rh-008(Core5)	△		△			△		○	○	
	Rh-009(Core7)	△		△			△		○	◎	
	Rh-010(Core5)	△		△			△		○	◎	
	Core4-1	△		△			△		○	◎	
	Core4-2	△		△			△		○	◎	
	Core8-1	△		△			△		○	◎	
	Core8-2	△		△			△		○	◎	

◎:ピーク強度が非常に強い ○:ピークが強い △:ピークが弱い 無印:ピークが確認できない、または非常に弱い

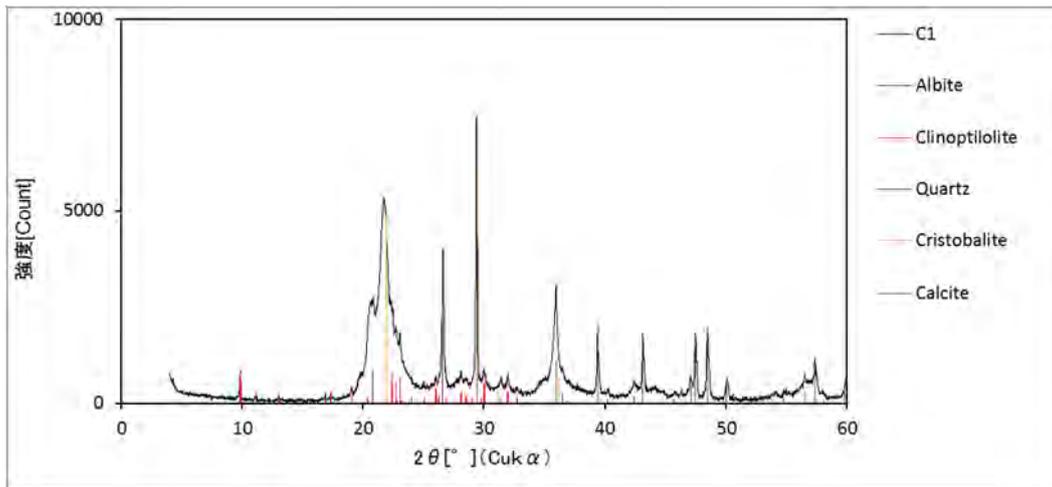


図 2.5.3-13 BBT02-13-Rh-001 の粉末 XRD パターン

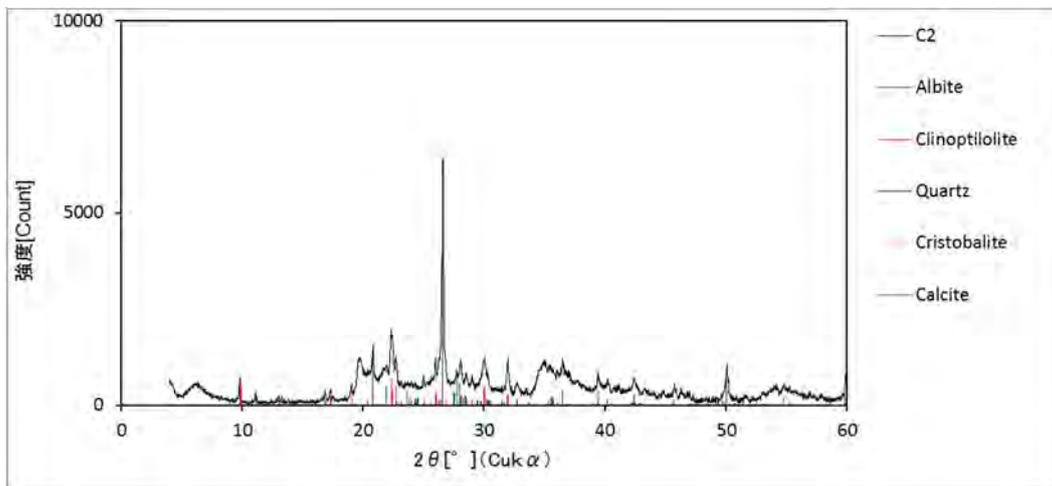


図 2.5.3-14 BBT02-13-Rh-002 の粉末 XRD パターン

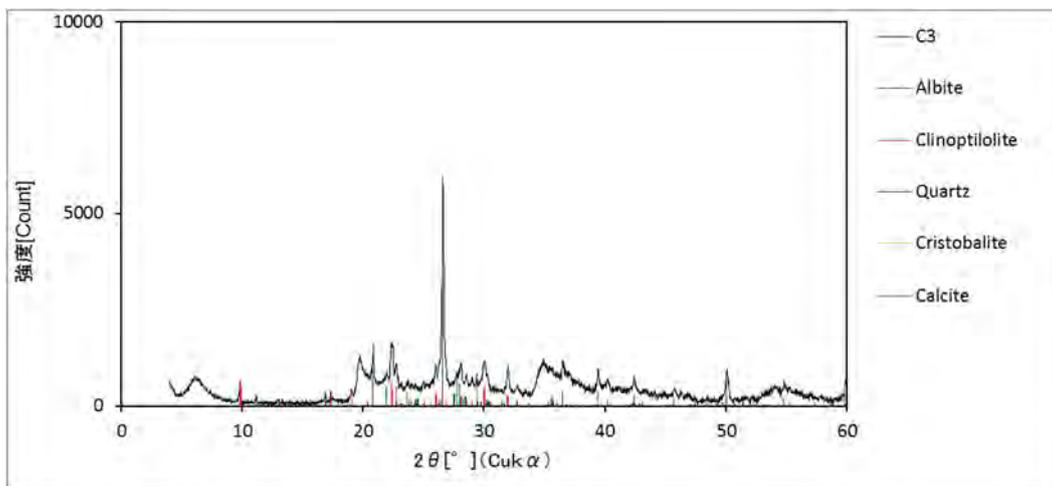


図 2.5.3-15 BBT02-13-Rh-003 の粉末 XRD パターン

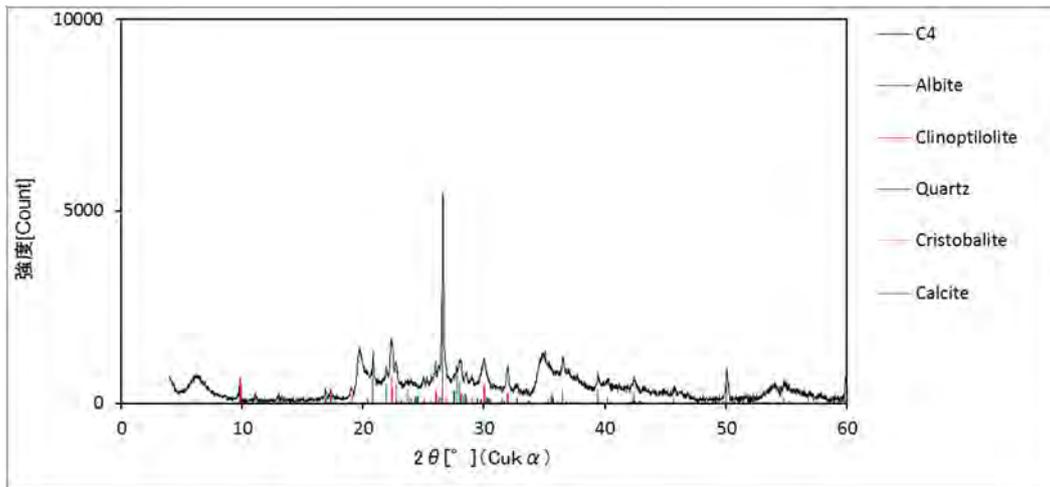


図 2.5.3-16 BBT02-13-Rh-004 の粉末 XRD パターン

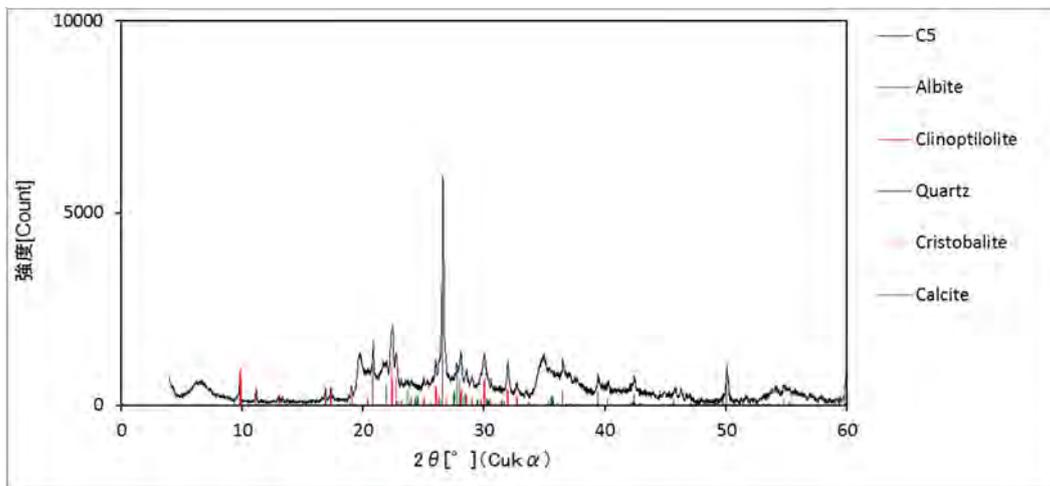


図 2.5.3-17 BBT02-13-Rh-005 の粉末 XRD パターン

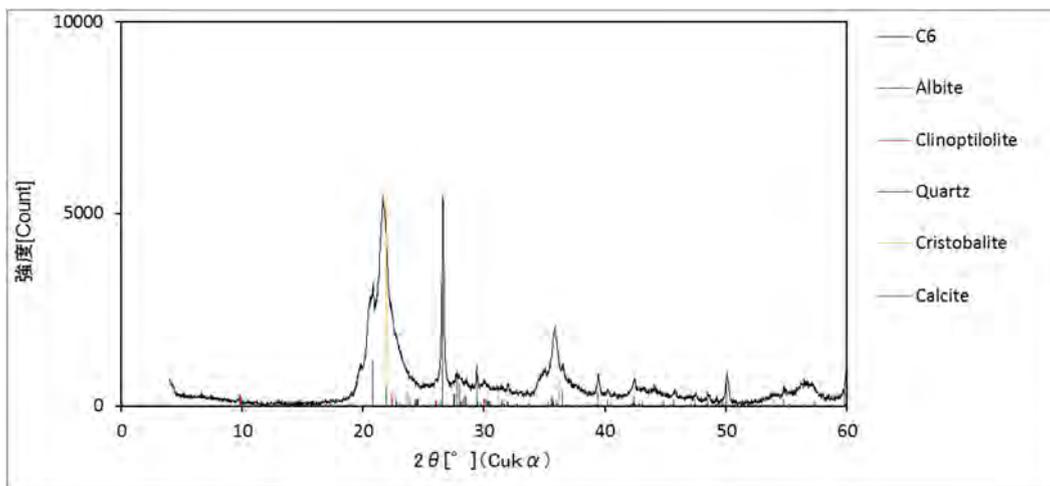


図 2.5.3-18 BBT02-13-Rh-006 の粉末 XRD パターン

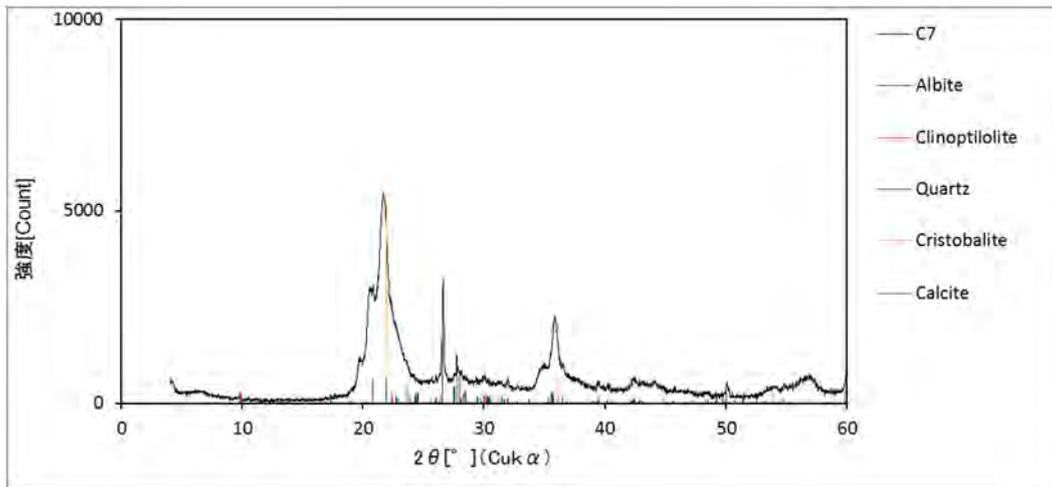


図 2.5.3-19 BBT02-13-Rh-007 の粉末 XRD パターン

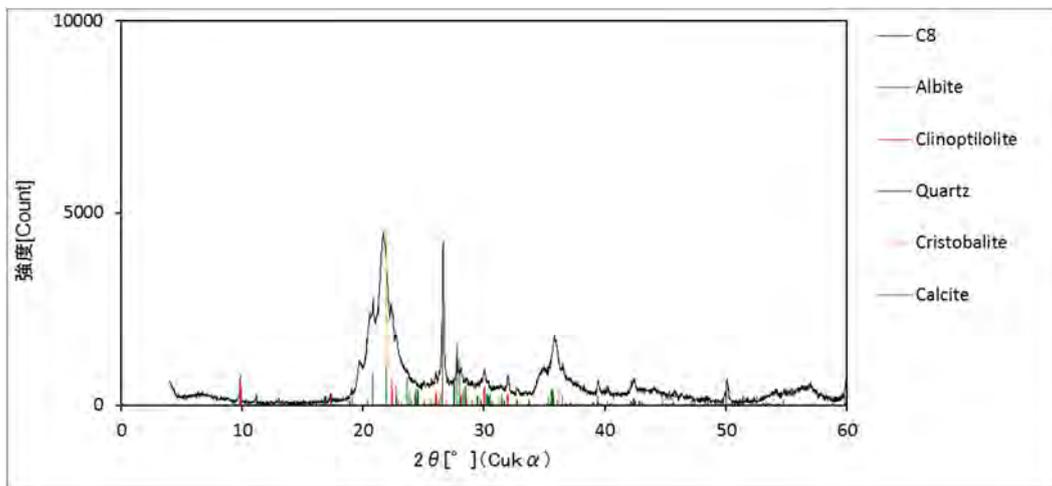


図 2.5.3-20 BBT02-13-Rh-008 の粉末 XRD パターン

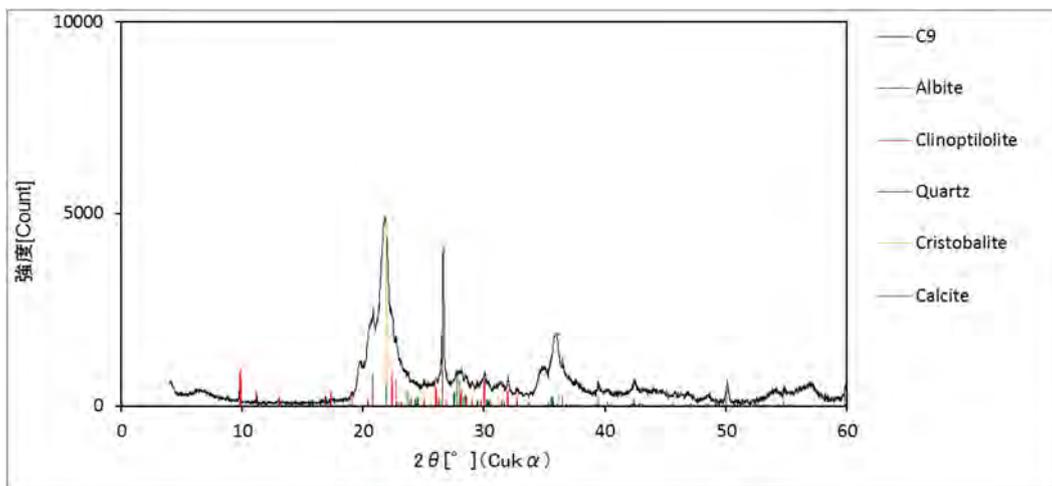


図 2.5.3-21 BBT02-13-Rh-009 の粉末 XRD パターン

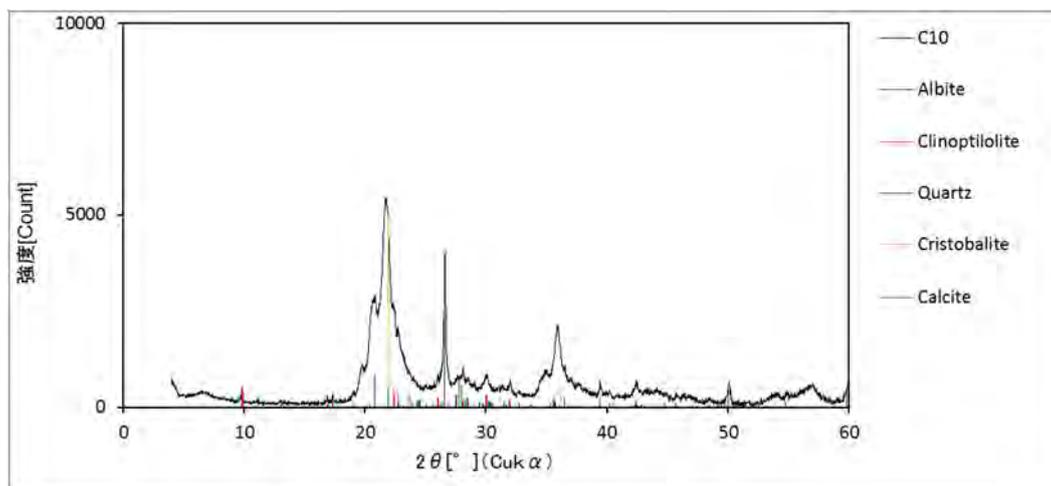


図 2.5.3-22 BBT02-13-Rh-010 の粉末 XRD パターン

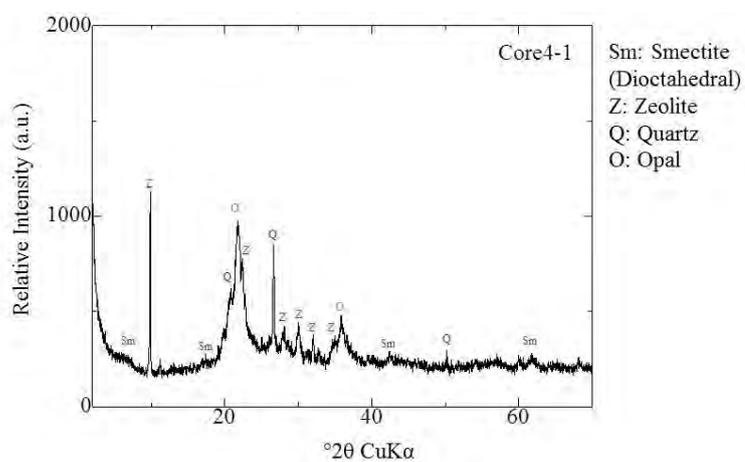


図 2.5.3-23 Core4-1 の粉末 XRD パターン

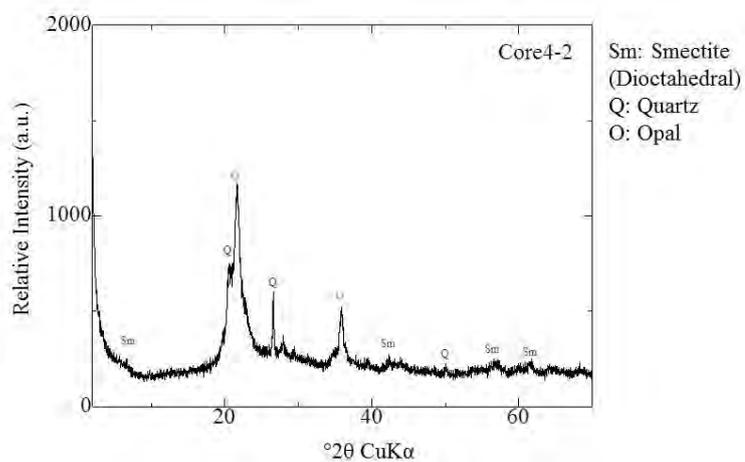


図 2.5.3-24 Core4-2 の粉末 XRD パターン

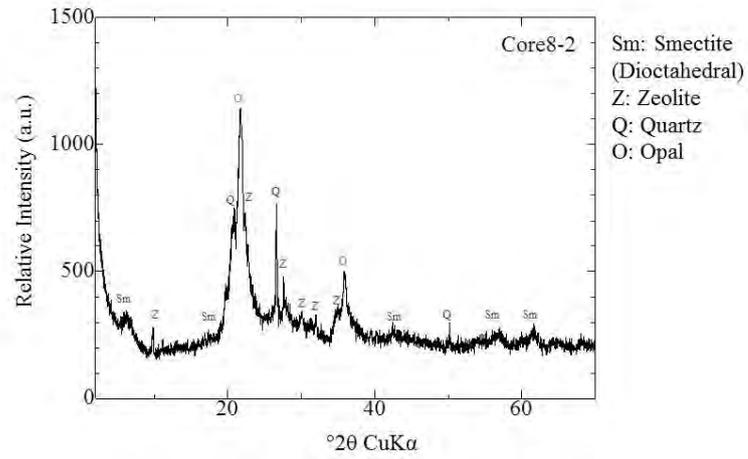


図 2.5.3-25 Core8-1 の粉末 XRD パターン

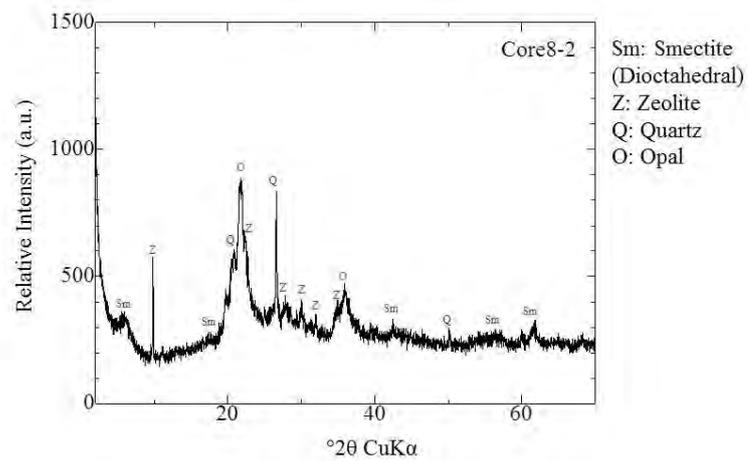


図 2.5.3-26 Core8-2 の粉末 XRD パターン

2.5.4 岩石化学的調査

トレンチ内から採取した岩石試料の岩石化学的特性を明らかにするために、XRF による全岩バルク成分の化学分析、及び ICP-MS による主成分元素分析、微量成分元素分析を行った。

(1) 蛍光 X 線元素分析 (XRF)

トレンチ内から採取した表 2.5.3-1 に示す試料のうち、壁面から 6 件、床面コアから 4 件の総計 10 件の XRF による全岩化学分析を実施した。

1) 試料調整

試料は XRD と同様に調製した。

2) 測定条件

XRD 試料とともに調製した試料より 0.2g 程度分取し、島津製作所の波長分散型蛍光 X 線分析装置 XRF-1800 を用いて、表 2.5.3-1 に示す条件により、XRF による定量分析を実施した。

表 2.5.4-1 XRF による定量分析条件

項目	仕様等
X 線ターゲット	Rh
電圧	40kV
電流	95mA

3) XRF 分析結果

XRF 分析によるトレンチ試料の元素比率定量結果を表 2.5.4-2 に示す。また、そのうち主要な元素の比率を棒グラフとして示したものを図 2.5.4-1 示す。

トレンチの試料はいずれもケイ酸塩鉱物を主成分とすることがわかる。このことは、XRD 分析の結果と整合している。Rh-001 はやや方解石の含有率が高い。また、Rh-001 および Rh-006~010 は、Rh-002~005 に比べて Si の含有率が高く、Al が少ないことから、スメクタイト及び石英もしくはクリストバライトなどの含有率が高いためと考えられる。

壁面から採取したベントナイト質凝灰岩質砂岩の薄層を挟在する石灰岩質泥岩～砂岩の化学組成全般については、SiO₂ と Al₂O₃ 成分の間には僅かであるが反比例的な変化が認められる。これはモンモリロナイトのモード組成に反映しているものと考えられる。つまり Al₂O₃ 成分の増加がモンモリロナイトの産状に依存しているものと示唆される。また、SiO₂ 成分の増加は、シリカ鉱物の産状によるものである。CaO 成分には著しい変化はない。これは方解石の産状が少ないためと考えられる。

これらのバルク成分は、造岩鉱物の組成と量比（モード比）により決定されるために、XRD で同定された鉱物種の組成および量比に支配される。前述したように全岩の XRD で同定され

た鉱物は、全岩で著しい鉱物組み合わせの差異がなく、主に粘土鉱物（主にモンモリロナイト）、斜長石、沸石（斜プチロル沸石）、シリカ高異物（石英・クリストバライト）、方解石で構成されている。但し、方解石は壁面からの試料のみに限定される特徴がある。従って、壁面からの試料のバルク成分の化学的変化については、主要構成鉱物の組成・量比（モード比）および堆積後の変質反応の規模（範囲・程度）についても定性的なために、化学組成変化を正確に考察することには限界がある。

一方、珪質岩の化学組成については、全体として、化学成分から一様な含有量を持つ均質岩であった。

また、同じ Aksitero 層の試料である Saile 鉱山のベントナイト層と Bigbiga のトレンチ試料との化学組成の比較を表 2.5.4-3 に示す。Si/Al 比の違いは顕著であるが、スメクタイトを含む Rh-002~005 は Si, Al, Mg, Ca, Fe の含有率が Saile の未変質ベントナイトにより近い値である。

表 2.5.4-2 XRF 分析によるトレンチ試料の元素比率定量結果

BBT02-13-Rh-	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10
CaO	6.559	3.247	3.290	2.762	2.691	1.498	1.168	1.486	1.5389	1.2663
CO ₂	18.244	12.692	13.269	11.876	11.557	14.654	14.506	14.107	14.7134	13.1889
SiO ₂	69.534	62.764	60.298	61.719	64.180	76.287	76.539	74.454	73.0645	76.8534
Al ₂ O ₃	2.877	8.358	10.234	10.785	10.047	3.531	3.341	4.405	4.6333	3.764
Fe ₂ O ₃	0.973	6.086	6.232	6.647	5.639	1.822	2.370	2.791	3.0746	2.4849
MgO	0.491	2.521	2.663	2.934	2.328	0.869	0.914	1.216	1.3786	1.0599
TiO ₂	0.107	0.346	0.331	0.351	0.345	0.131	0.123	0.168	0.1705	0.1385
K ₂ O	0.355	1.039	1.106	1.339	1.537	0.601	0.583	0.799	0.8172	0.6723
MnO	0.165	0.695	0.988	0.314	0.457	0.030	0.034	0.054	0.0429	0.0401
P ₂ O ₅	0.386	1.375	1.079	0.754	0.762	0.199	0.177	0.227	0.2501	0.2688
Na ₂ O	0.131	0.279	0.281	0.257	0.272	0.182	0.165	0.185	0.2052	0.179
SrO	0.022	0.029	0.023	0.026	0.018	0.006	0.005	0.007	0.007	0.006
SO ₃	0.037	0.040	0.036	0.026	0.028	0.121	0.018	0.027	0.023	0.016
Cr ₂ O ₃	0.006	0.011	0.009	0.013	0.012	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007
CuO	0.028	0.025	0.028	0.022	0.007	0.004	0.004	0.005	0.004	0.004
ZnO	0.004	0.015	0.014	0.016	0.015	0.006	0.006	0.008	0.008	0.006

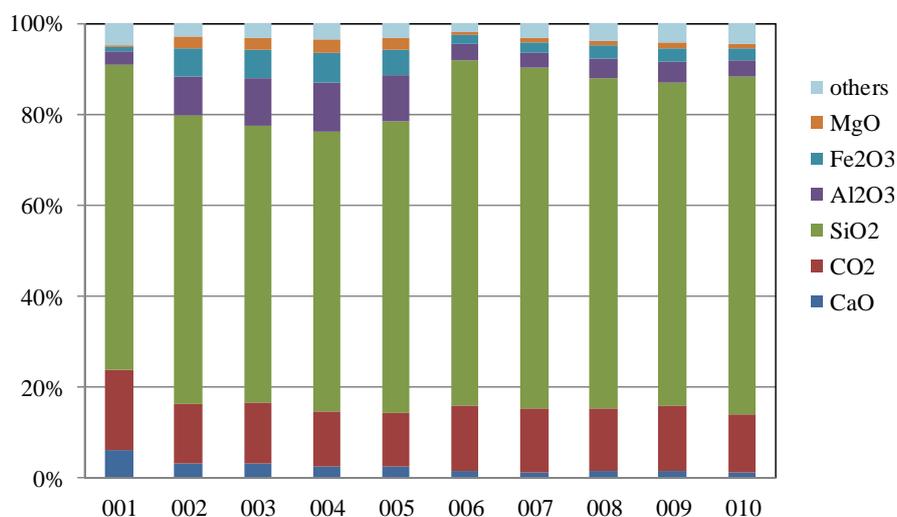


図 2.5.4-1 トレンチ試料の主要元素比率

表 2.5.4-3 Saile 鉱山と Bigbiga の Aksitero 層の試料の化学組成の比較

分析項目	クニボンド	クニゲルV1	MX-80	Saile Mine	Bigbiga Trench2										Saile Mine 原鉱					
					Wall					Core					Trench1 境界部			Trench1 未変質部		採石場露頭
					BBT02-13-Rh-001	BBT02-13-Rh-002	BBT02-13-Rh-003	BBT02-13-Rh-004	BBT02-13-Rh-005	BBT02-13-Rh-006	BBT02-13-Rh-007	BBT02-13-Rh-008	BBT02-13-Rh-009	BBT02-13-Rh-010	ST-01-11-Rh-001	ST-01-11-Rh-002	ST-01-11-Rh-003	ST-01-11-Rh-004	ST-01-11-Rh-005	SO-01-11-Rh-006
SiO ₂	66.5	70.2	60.0 ~ 62.0	51.64	69.53	62.76	60.30	61.72	64.18	76.29	76.54	74.45	73.06	76.85	40.37	39.31	25.75	64.40	64.47	63.66
Al ₂ O ₃	14.8	14.2	21.0 ~ 23.0	12.04	2.88	8.36	10.23	10.78	10.05	3.53	3.34	4.40	4.63	3.76	10.10	4.47	5.92	16.31	15.73	14.39
Fe ₂ O ₃	3.02	2.48	3.0 ~ 4.0	7.31	0.97	6.09	6.23	6.65	5.64	1.82	2.37	2.79	3.07	2.48	6.19	6.03	4.68	7.02	7.40	9.34
FeO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CaO	2.48	2.04	0.1 ~ 0.7	2.56	6.56	3.25	3.29	2.76	2.69	1.50	1.17	1.49	1.54	1.27	32.80	29.61	48.68	3.54	3.43	3.48
MgO	3.98	2.16	2.0 ~ 3.0	2.98	0.49	2.52	2.66	2.93	2.33	0.87	0.91	1.22	1.38	1.06	3.49	3.33	2.62	4.31	4.31	3.51
Na ₂ O	0.34	2.48	2.0 ~ 4.0	0.43	0.13	0.28	0.28	0.26	0.27	0.18	0.16	0.19	0.21	0.18	0.62	0.61	0.46	0.45	0.67	0.94
K ₂ O	0.55	0.24	0.4 ~ 0.5	0.79	0.35	1.04	1.11	1.34	1.54	0.60	0.58	0.80	0.82	0.67	0.47	0.42	0.42	0.72	1.05	0.88
TiO ₂	0.22	-	-	0.73	0.11	0.35	0.33	0.35	0.34	0.13	0.12	0.17	0.17	0.14	0.64	0.61	0.41	0.62	0.54	0.75
MnO	0.01	-	-	-	0.17	0.70	0.99	0.31	0.46	0.03	0.03	0.05	0.04	0.04	0.28	0.26	0.46	0.31	0.31	0.56
P ₂ O ₅	0.02	-	-	-	0.39	1.37	1.08	0.75	0.76	0.20	0.18	0.23	0.25	0.27	0.23	0.00	0.19	0.25	0.26	0.32
その他	-	-	-	-	18.34	12.81	13.38	11.98	11.64	14.80	14.54	14.16	14.76	13.23	-	-	-	-	-	-
CEC (meq/100g)	91.2	52	79	105.15 40.11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	53.6	54.3	37.9	104.1	69.6	98.8
膨潤力 ml/2g	7	18	26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	5	4	9	6	8
メチレンブルー吸着量 (mmol/100g)	120	82	110	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	52	54	46	88	94	36
含水比 %	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20.1	20.4	17.2	64.8	41.7	18.6
乾燥密度 g/cm ³	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.601	1.524	1.669	0.908	1.121	1.607
真密度 g/cm ³	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.590	2.553	2.686	2.496	2.517	2.477
開隙率 %	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	38.2	40.3	37.9	63.6	55.5	35.1
スメクタイト含有率 %	75.0	54.7	73.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	34.7	36.0	30.7	58.7	62.7	24.0

※BBT02-13-Rh-002~005はスメクタイトのXRDのピークが強い試料(青枠)

(2) ICP 質量分析 (ICP-MS)

トレンチ内から採取した表 2.5.3-1 に示す試料のうち、壁面から 9 件、床面コアから 6 件の総計 15 件の ICP-MS による主成分元素、微量成分元素の化学分析を実施した。

1) ICP-MS 分析結果

ICP-MS によるトレンチ試料の元素比率定量結果をに示す。主成分である Na₂O、K₂O、CaO、MgO、FeO、AlO₃、FeO をたしても 20%位にしか達せず、XRF の結果と同様に、この岩石は SiO₂ にとむ珪質な岩石である。

薄片の顕微鏡観察により、amygdule 中に石英、粘土鉱物がみられ、また matrix 中に水酸化鉄、炭酸塩鉱物、粘土鉱物が多く見られ primary な鉱物 (長石、輝石、オリビン等) がほとんど見られない (若干の雲母あり) ので、この SiO₂ に富んでいるのは、新鮮なデイサイト、安山岩、これらの凝灰岩であるためというのではなく、これらの岩石、堆積岩が変質作用を受けシリカや炭酸塩に富む岩石になったためであると思われる。シリカは主として amygdule 中、脈 (veinlet) として存在している。炭酸塩も脈状に存在しており、炭酸塩化は、変質作用の後期に生じたといえる。一例ではあるが、CaO にかなり富む試料もあるので、炭酸塩化作用をかなりうけた場合もある。このような珪質化作用、炭酸塩化作用、粘度化作用がどのような原因で生じたのかが問題となる。その原因として、低温の地下水、高温の熱水と岩石との反応があげられる。

微量成分濃度は、Ni: 40-109ppm、Cu: 37-338ppm、Zn: 108-237ppm、Pb: 643-1562、Ba: 2838-5076ppm、Ca: 21.5-130ppm などであった。

これらの微量成分組成と Saile 鉱山のトレンチ採石場ベントナイト層、沸石層中の微量成分

組成との比較検討を行ってみる。

Saile 鉱山のベントナイト試料は、

Ni: 7-885ppm、Cu: 27-399ppm、Zn: 6-868ppm、Pb: 0.3-23ppm、Ba: 7-1796ppm、Ca: 4-14ppm である。

Saile 鉱山のトレンチ試料は、

Ni: 3-13ppm、Cu: 30-406ppm、Zn: 90-867ppm、Pb: 0.3-23ppm、Ba: 7-829ppm、Ca: 3-45ppm である。

Bigbica トレンチ試料の Pb、Ba、Ca 濃度は、Saile 鉱山のベントナイト、トレンチ試料のこれらの濃度より高いと言える。この理由としては、①Bigbica トレンチ試料中に炭酸塩が多く、これらの中に Pb、Ba、Ca が多い。②Bigbica トレンチ試料の源石が SiO₂ 含量の多い火成岩である。③アルカリ地下水によるアルカリ変質で Pb、Ba、Ca がアルカリ地下水から岩石に付加されたことが考えられる。これらの中で①、③が考えやすい。もっとも考えやすいのは、アルカリ地下水と岩石との反応により炭酸塩の生成により、Pb、Ba 軽希土類が炭酸塩に取り込まれたというプロセスである。今後は、この原因について明らかにするためのもっと詳細な分析・観察が必要である。

表 2.5.4-4 Bigbiga トレンチ試料の化学組成 (ICP-MS)

Sample No.	BT01	BT02	BT03	BT04	BT05	BT06	BT07	BT08	BT09	BC01A	BC01B	BC06A	BC06B	BC07A	BC07B
Location	Outer layer part	0.5m from the top	1.0m from the top	1.5m from the top	2.0m from the top	2.5m from the top	3.0m from the top	3.5m from the top	4.0m from the top	Core Sample(#1-Brown color)	Core Sample(#1-Blue color)	Core Sample(#8-Brown color)	Core Sample(#8-Blue color)	Core Sample(#7-Brown color)	Core Sample(#7-Blue color)
Na (wt.%)	2.78	3.00	3.26	2.82	2.81	2.98	2.25	2.93	2.63	2.30	2.34	2.84	3.19	3.03	3.00
Mg	1.00	0.39	1.40	0.83	0.30	0.63	0.58	1.19	0.64	0.57	0.77	0.69	0.97	0.91	0.65
Al	4.80	2.90	5.68	4.11	2.57	2.87	3.41	3.93	3.74	3.47	3.86	3.88	5.03	4.63	3.98
P	0.15	0.10	0.24	0.06	0.05	0.14	0.05	0.21	0.08	0.06	0.08	0.07	0.06	0.06	0.08
K	0.96	0.70	1.10	1.09	0.73	0.78	0.85	1.06	0.93	0.90	1.00	1.01	1.23	1.22	1.09
Ca	2.71	17.25	2.97	1.38	1.05	1.98	1.05	2.61	1.18	1.17	1.54	1.27	1.81	1.49	1.31
Se (ppm)	13.82	6.39	17.51	10.27	4.93	5.37	8.11	12.30	8.51	9.10	9.98	9.05	12.01	11.40	9.53
Ti (wt.%)	0.06	0.04	0.07	0.08	0.08	0.03	0.09	0.05	0.11	0.14	0.06	0.10	0.11	0.11	0.11
V (ppm)	50.20	28.96	96.50	91.49	36.95	45.79	65.48	74.99	66.67	74.95	56.44	88.47	89.63	66.46	79.68
Cr	29.30	18.52	38.96	38.70	18.60	43.18	33.97	38.21	33.13	36.58	23.47	24.69	36.58	38.36	30.96
Mn (wt.%)	0.41	0.36	1.24	0.06	0.03	0.28	0.02	0.46	0.03	0.14	0.05	0.20	0.07	0.09	0.05
Fe	0.91	0.41	1.42	0.62	0.32	0.66	0.50	1.26	0.59	0.45	0.62	0.66	0.78	0.87	0.64
Co (ppm)	23.51	11.81	44.60	15.04	6.24	18.83	9.12	24.10	9.04	11.18	15.39	12.09	18.50	16.31	13.99
Ni	88.15	34.20	173.26	56.08	29.46	67.84	38.54	127.33	108.50	39.45	55.94	45.60	74.23	60.50	53.33
Cu	180.07	253.89	338.04	84.88	26.85	155.99	26.09	339.95	31.50	36.31	47.49	46.55	37.15	45.77	37.05
Zn	167.79	126.22	236.94	150.50	108.12	157.28	119.32	191.05	136.29	129.23	159.56	128.99	171.30	149.53	181.38
Ga	65.19	149.06	b.d.1	b.d.1	b.d.1	b.d.1	b.d.1	b.d.1							
As	13.45	8.11	18.61	4.17	5.03	12.97	3.88	18.68	4.99	3.62	4.29	4.97	5.17	5.14	7.26
Rb	31.37	17.60	28.17	31.73	22.28	16.63	32.63	19.15	34.00	34.70	32.03	32.38	46.77	43.25	36.83
Sr	321.52	545.16	422.79	203.26	104.82	343.56	116.63	376.23	139.25	158.12	174.92	166.73	174.19	160.05	156.76
Y	71.30	41.68	107.55	39.48	17.32	50.23	23.24	94.96	27.74	34.70	38.22	32.29	36.09	32.90	30.44
Zr	114.65	42.01	161.75	124.33	23.57	105.20	52.53	128.98	70.52	113.00	73.05	111.89	114.80	129.84	127.38
Nb	0.05	0.02	0.39	0.16	0.09	0.07	0.08	0.44	0.14	0.13	0.17	0.19	0.14	0.12	0.26
Mo	1.44	1.37	2.01	1.36	1.31	1.53	1.08	1.51	1.28	1.61	1.34	1.40	1.48	1.46	1.51
Ag	b.d.1	b.d.1	b.d.1	b.d.1	b.d.1	b.d.1	b.d.1	b.d.1	b.d.1	b.d.1	b.d.1	b.d.1	b.d.1	b.d.1	b.d.1
Cd	0.10	0.17	0.26	0.07	0.19	0.22	0.08	0.04	2.95	0.05	0.04	0.05	0.24	0.04	0.04
In	0.10	0.05	0.17	0.11	0.05	0.08	0.08	0.15	0.08	0.09	0.10	0.08	0.11	0.09	0.09
Sn	3.99	6.69	6.20	2.56	21.39	2.24	1.62	6.61	4.45	3.04	3.04	2.86	0.26	0.96	2.10
Sb	18.98	15.69	20.02	18.66	16.06	20.01	11.66	20.76	15.34	15.28	15.43	20.02	19.30	22.10	22.98
Cs	2.65	1.41	3.07	3.31	2.00	2.58	2.76	3.42	3.13	2.97	3.26	3.08	4.07	3.79	3.18
Ba	4036.06	4060.49	5045.03	4232.87	3335.68	4793.68	2838.86	5076.58	3381.16	3476.97	3525.47	4329.37	4191.33	4392.53	4437.52
La	88.19	50.78	129.90	45.23	21.48	72.80	30.78	109.04	36.44	44.33	41.83	49.39	44.23	41.54	41.54
Ce	26.25	13.36	44.11	19.45	12.18	16.22	17.81	36.63	20.36	21.78	25.48	22.99	27.48	25.20	22.79
Pr	11.80	6.89	17.29	6.47	3.17	9.55	4.70	15.88	5.46	7.07	6.25	7.56	6.74	6.42	6.42
Nd	80.73	47.67	118.42	44.31	21.38	65.49	31.51	108.67	36.75	44.86	47.45	42.58	50.96	45.67	43.30
Sm	11.03	6.58	16.52	6.32	3.01	8.80	4.41	15.32	5.24	6.31	6.57	6.00	7.13	6.51	6.14
Eu	2.72	1.58	4.13	1.58	0.71	2.15	1.07	3.79	1.26	1.52	1.64	1.43	1.75	1.54	1.48
Gd	11.91	6.89	18.05	6.76	3.22	9.42	4.51	16.89	5.47	7.14	6.20	6.20	6.64	6.27	6.27
Tb	1.78	1.02	2.71	1.05	0.49	1.37	0.69	2.57	0.82	0.99	1.07	0.96	1.10	1.01	0.96
Dy	10.97	6.27	16.73	6.48	2.94	8.26	4.16	15.95	5.06	6.03	6.52	6.71	6.08	5.73	5.73
Ho	2.22	1.26	3.38	1.30	0.61	1.66	0.82	3.23	1.01	1.22	1.32	1.18	1.32	1.20	1.12
Er	6.18	3.56	9.66	3.79	1.75	4.64	2.39	9.28	2.91	3.44	3.77	3.36	3.74	3.40	3.16
Tm	0.84	0.49	1.34	0.54	0.25	0.62	0.34	1.26	0.40	0.49	0.52	0.47	0.53	0.48	0.44
Yb	5.15	2.99	8.10	3.43	1.58	3.64	2.12	7.79	2.50	3.12	3.28	2.90	3.33	3.03	2.74
Lu	0.77	0.44	1.20	0.53	0.25	0.55	0.33	1.13	0.39	0.47	0.51	0.43	0.51	0.47	0.41
Hf	2.28	0.38	3.28	2.50	0.27	1.68	0.61	2.45	0.95	1.14	2.07	1.62	2.57	2.69	2.69
Ta	0.00	0.00	0.03	0.01	0.00	0.01	0.00	0.03	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
W	5.21	2.02	1.60	0.67	1.67	0.72	56.45	1.11	1.25	0.75	12.40	5.19	1.56	0.98	1.46
Th	0.21	0.20	0.34	0.22	0.12	0.18	0.17	0.22	0.19	0.20	0.20	0.18	0.21	0.21	0.23
Pb	743.66	771.55	838.56	766.78	812.38	814.75	643.67	783.40	779.08	688.26	756.11	821.02	882.69	883.25	1562.08
Bi	0.43	0.29	0.81	0.51	0.28	0.40	0.35	0.64	0.46	0.43	0.54	0.42	0.53	0.51	0.51
U	3.30	1.79	3.56	2.76	1.53	2.18	2.62	2.86	2.88	2.95	3.22	3.02	3.99	3.71	3.22
Th	0.51	1.05	0.72	0.79	0.76	2.74	0.94	0.68	0.60	0.89	0.61	0.61	0.98	0.65	0.79
SiO ₂ (g/kg)	736	569	708	802	917	828	899	675	837	813	771	793	768	781	751

b.d.1: below detection limit.
SiO₂はXRFで測定

2.6 簡易試錐調査

簡易構造試錐調査の目的は、今年度から数年間に高アルカリ地下水の湧水（浸水）の賦存状況（水理場）と、その直近または近傍に胚胎するベントナイト層とのコンタクト（露頭）の直接探査である。

本調査対象地域で確認されているすべての高アルカリ地下水の起源と流動系は、基盤岩であるオフィオライトの蛇紋岩化作用（水-岩石反応）により形成・進化し、そのオフィオライト岩盤中の断裂系を流路として上昇した裂か水である。この事実から、高アルカリ地下水の探査の基本は、高アルカリ地下水を随伴する断裂系（断層・割れ目集中帯など）を直接確認することである。合わせて、高アルカリ地下水の pH の緩衝性の影響（効果）を理解するために、オフィオライト基盤岩を整合に被覆しているベントナイト層を胚胎している Aksitero 累層（堆積岩）中に賦存する地下水、特に被圧地下水（帯水層）の組成と流動系を考察するための地質・地下水データなどが必要である。

また、アルカリ地下水が湧水している井戸（Well-1）周辺での基盤岩であるオフィオライトと被覆堆積岩（Aksitero 累層）であるベントナイト質堆積岩を対象に、アルカリ変質反応プロセスの地球化学的な考察のためには、地表から地下深部まで連続的なコア観察と必要な岩石試料採取が可能な試錐調査が有利である。

2.6.1 試錐サイトの選定

試錐サイトの選定については、アルカリ地下水を随伴する断裂系（High pH Water-Conducting Fracture System）を如何に探査するかが第 1 の選定条件になる。これまでの調査結果の総合評価により、すでにポテンシャルサイトの候補地として、Bigbiga 地区が選定された。この候補地内での試錐サイトの選定のために、間接的ではあるが、地上比抵抗電磁探査（TEM）を先行して実施した。

今回、この電磁探査のフィールドデータの初期解析結果（図 2.4.3-31～図 2.4.3-40）から、Aksitero 累層（堆積岩）中の浅層部と深層部であるオフィオライト岩盤岩中にアノマリーが解析・検出された。合わせて、Bigbiga 候補地区内でアルカリ地下水を湧水している井戸（Well-1）の賦存状況を解析・評価した。

その結果、TEM のアノマリーを示し、①Well-1 の近傍（DH08）と、②アノマリーの東限（測定グリット内の東端ループ計測点）の地点（DH09）の 2 サイトを試錐地点として選定した（図 2.6.1-1）。

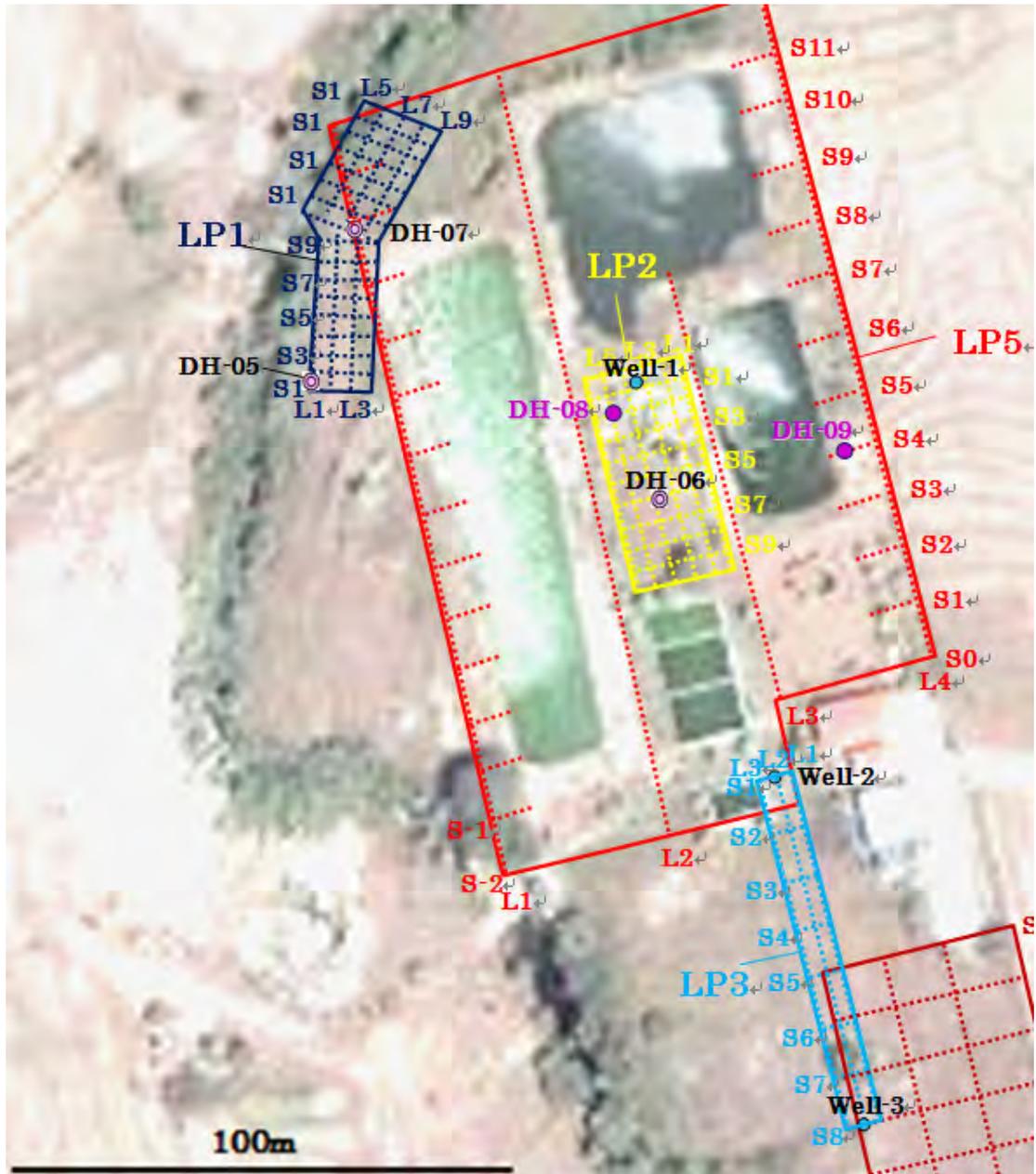


図 2.6.1-1 簡易構造試錐サイトの選定

2.6.2 試錐孔掘削作業

簡易構造試錐調査の試錐仕様については、コア口径が BQ サイズ（直径約 5cm）でオールコア採取である。

試錐作業の工程実績は、2 孔（①:DH-08（掘削期間：11/2～11/8）、掘削深度：39m、②DH-09（掘削期間：11/5～11/7）、掘削深度：15.4m）である（図 2.6.2-1）。

なお、DH08 の掘削において、掘削深度が 15m を超えるあたりからアルカリ地下水の自噴が観測される一方、掘削深度 28.4m より、近傍の Well-1 では DH08 の掘削水の影響のためと思われる白濁が見られた（図 2.6.2-2）。



①DH08



②DH09

図 2.6.2-1 掘削作業状況



図 2.6.2-2 Well-1 の白濁

2.6.3 コア観察

オフィオライト基盤岩と Aksitero 累層を対象に、堀削採取されたコア（岩芯）の観察などにより試錐コア柱状図を作成した。採取したコアの写真を図 2.6.3-1～図 2.6.3-2 に、コア柱状図を図 2.6.3-4～図 2.6.3-7（凡例は図 2.6.3-3）に示す。

作成にあたっては、ベントナイト層の層厚・粒度・固結度・岩相・岩質・堆積構造（堆積環境）・変質特性・特異な鉱物種・割れ目・断裂系特性や、ベントナイト層の上盤 / 下盤との岩相・岩質および、累重関係、そして、オフィオライト基盤岩においては、変質特性、特にアルカリ地下水の浸出に伴う地球化学的反応による変質鉱物の鉱物学的・鉱物化学的特性と浸出経路となる割れ目・断裂系特性に注視して観察を実施した。

(1) DH08

Aksitero 累層とオフィオライト基盤岩である Zambares 層とは深度 11.5m で断層関係で接する。Aksitero 累層は、全体に凝灰質で石灰質な岩相を示す。

上部 2.9m までは風化色である黄褐色を呈する凝灰質な細粒砂岩もしくはシルトからなる。全体にパミシヤスでベントニックな岩相を示す。

2.9～5.8m 間は全体に暗緑色を呈し、凝灰質で石灰質な細粒砂岩や泥岩からなる互層である。細粒砂岩のラミナを観察すると、一部にシャープな地層境界と上方細粒化（地層境界が不明瞭になる）が確認され、タービダイトにより生じた構造と推定される。また、黒色の軟質な包有物（φ 0.5mm 程度）がスポット状に確認され、有機物（kelogen）と推定される。

5.8～9.8m間は全体に淡緑灰色を呈し、石灰質な岩相を呈する。一部伸長した軽石や軟質な黒色パッチがラミナ（角度 10 度前後）と調和的に認められる。また、最下部では削り込み作用で堆積したと推定される粒径が粗い砂岩が確認され、メノウと推定される珪質な礫も認められる。

9.8～11.5m間は全体に暗褐色を呈する、泥質な岩相を示す。ボーリングコアでは土砂状で採取され、一部にやや硬い珪質な柱状コアが確認される。この地層は、既往ボーリングで確認されたものと類似しており、当地域の地質構造や地史を考えるうえで重要な鍵層と判断した。

11.5m以深、暗緑色～淡緑色を呈し、Zambares オフィオライトの基盤岩である。上位の Aksitero 累層とは断層関係で接し、16mまでは亀裂や土砂化し、亀裂は鏡肌（スリッケンサイド）を呈する。

オフィオライトは、全体としては、変質した斑レイ岩（gabbro）、枕状溶岩、自破碎玄武岩質溶岩（autobrecciated basalt lava）、輝緑岩（diabase）が確認できる。所々、透明～白色の脈が確認される。これらは、大部分は、塩酸による発砲現象が確認されないため、石英脈が主体であるが、24.4mでは反応が見られ、（角度 70 度でフェザー状のレンズ）、カルサイト脈と考えられる。

(2) DH09

Aksitero 累層とオフィオライト基盤岩である Zambares 層とは深度 13.2m で断層関係で接する。また、当地点は Fish Pond の脇に位置し、約 1.5mは盛土（掘削ズリ）で Aksitero 累層の礫状コアからなる。

Aksitero 累層は、全体に凝灰質で石灰質な岩相を示す。

上部 5mまでは風化色である黄褐色を呈する凝灰質な細粒砂岩もしくはシルトからなる。全体にパミシャスでベントニックな岩相を示す。一部暗緑色味が強い分が認められ、凝灰質な傾向が強く、ベントニックな岩相と推定される。また、亀裂面は暗褐色に変色する場合が多い。

5m以深、暗灰から淡緑灰色を呈し、新鮮岩盤となる。

5.0～7.2m間は、黒色～暗灰色の細粒砂岩とシルトの互層からなる。全体に石灰質で 5～10 度程度のラミナが確認される。DH-08 同様にシャープな地層境界と上方細粒化（地層境界が不明瞭になる）が確認され（たとえば 5.4m付近）タービダイトにより生じた構造と推定される。

7.2～10m間は全体に灰色～淡緑灰色を呈し、石灰質な岩相を呈する。白色の伸長したレンズがラミナに沿って認められる。岩芯はしっかりしているが、亀裂に沿って暗褐色に変色している。

10～13.15m間は細粒な砂岩を主とし、暗灰色を呈する。ラミナは 10 度程度である。また、10 mに自形のカルサイトを確認する。

13.15m以深、暗緑色～淡緑色を呈し、Zambares オフィオライトの基盤岩である。上位の Aksitero 累層とは断層関係で接し、14.97mまでは亀裂や土砂化し、亀裂は鏡肌（スリッケンサイド）を呈する。また、13.7mまでは断層角礫状を呈する。

オフィオライトは、細粒で無斑晶な自破碎状玄武岩質溶岩（autobrecciated basalt lava）を主体とする。所々、透明～白色の脈が確認される。これらは、大部分は、塩酸による発砲現象が確認されないため、石英脈が主体であるが、14.5mでは反応が見られ、カルサイト脈と考えられる。

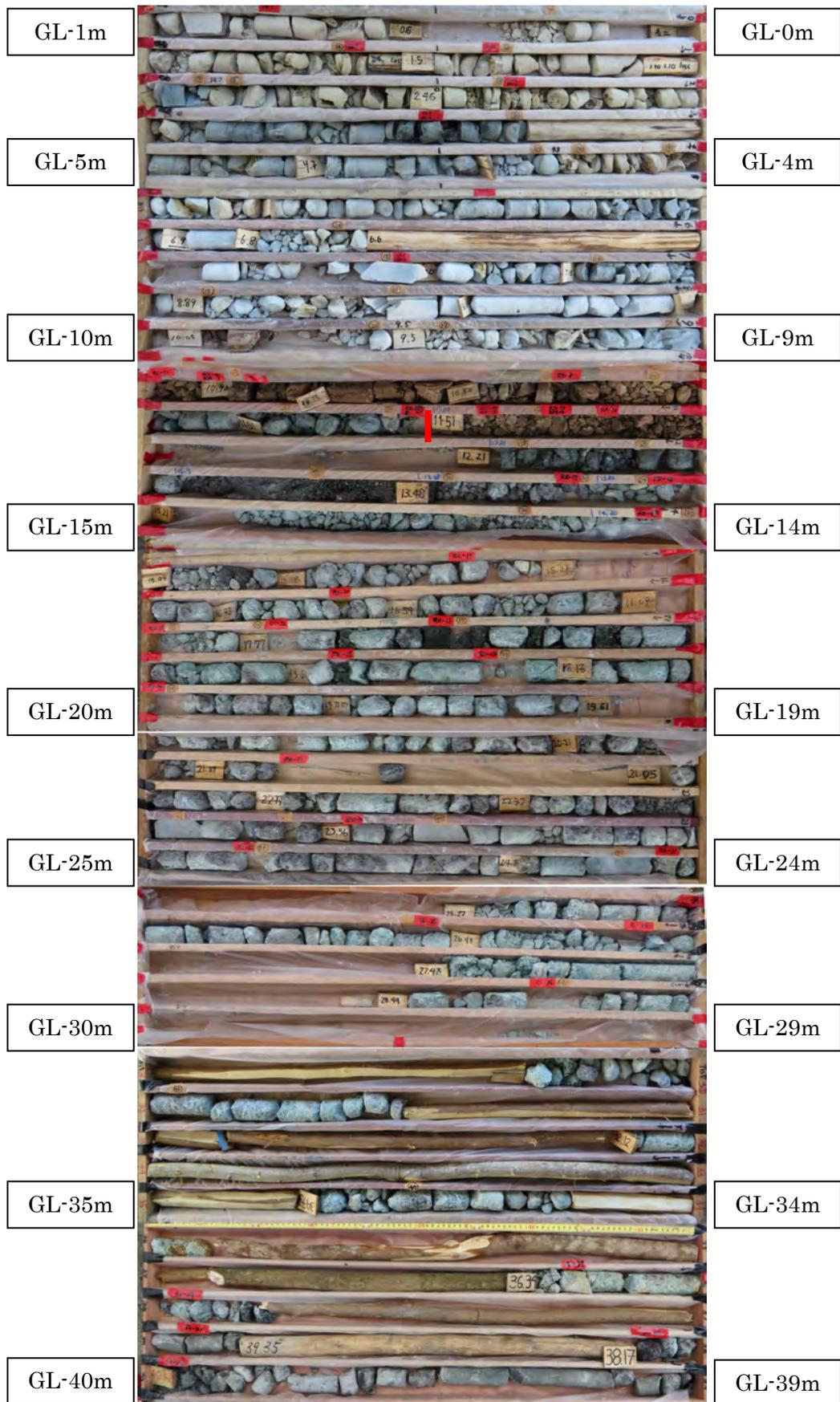


図 2.6.3-1 DH08 試錐コア



図 2.6.3-2 DH09 試錐コア

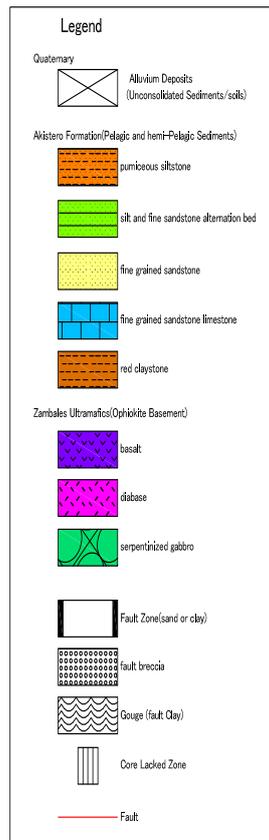


図 2.6.3-3 柱状図の凡例

Drill Hole Number : DH-08
 Location : N 15° 30' 51.9" , E 120° 22' 53.0"
 Elevation : 107m
 Core Size : NQ
 Total Footage : 40.54m
 Drilling Operation : 2. Nov. 2013 (pm) ~ 7. Nov. 2013 (pm)

Depth (m)	Columnar Section	CR %	RB %	Sample Number (Sample Location)	Lithology	Remarks
0.20				BBDHN-13-R0-001	0.00~0.20m surface soil (Alluvium deposits)	
0.40					unconsolidated sediments	0.7m <70° crack plane is black color
0.60				BBDHN-13-R0-001	0.60~1.00m light yellow white fine grained sandstone tuffaceous	0.9m spot状のcalcite (biogenic ?) (lamination <10° concordant)
1.00				BBDHN-13-R0-002		1.1m <60° This crack plane is brown
1.10				BBDHN-13-R0-003	1.10~1.50m light yellow white fine grained tuffaceous sandstone	1.4~1.43m ② brown bed and white layer => cal ③ blue layer => ?
1.50				BBDHN-13-R0-004	1.60~2.85m light yellow brown pumiceous siltstone	1.6m clay (bentonite ?)
1.60						1.9~2.0m clay (bentonite ?)
2.85				BBDHN-13-R0-004	0.00~2.90m weathered color 2.90m~ reduction color	
2.90				BBDHN-13-R0-005		2.1m tuffaceous ss
2.95				BBDHN-13-R0-006	2.95~3.90m black mud stone and blueish grey sandstone alternated bed	2.3~2.9m there are many high angle cracks crack plane is brown color
3.90				BBDHN-13-R0-007		2.9m black bitumen inclusion
3.90				BBDHN-13-R0-008		3.4~3.6m <80~90° calcite vein
3.90				BBDHN-13-R0-009	3.90~4.30m light yellow browns tuffaceous siltstone	3.4m tabularite ? sharp boundary, upward fine grain
4.30				BBDHN-13-R0-010		3.7~3.8m elastic cyclic (dislocation ?)
4.30				BBDHN-13-R0-011	4.30~5.80m blueish to pale grey calcareous tuffaceous fine grained sandstone	4.0~4.3m hair crack (include green mineral) 4.5m calcite vein (hair crack)
5.80				BBDHN-13-R0-012		4.7m clay (bentonite ?)
6.00				BBDHN-13-R0-013	5.80~9.20m light pale green tuffaceous calcareous fine grained sandstone → limestone	5.1m black bitumen inclusion
6.60				BBDHN-13-R0-014		5.8~5.9m <45° crack plane is yellow brown include pyrite
6.60				BBDHN-13-R0-015		5.9~6.0m <70° open crack plane is reddish brown
6.60				BBDHN-13-R0-016		6.6~6.7m cpx or bery? (light green color)
6.60				BBDHN-13-R0-017		6.8m black fragment (bentonite)
6.60				BBDHN-13-R0-018		Dip 0~10° green patch (φ) mm black inclusion
6.60				BBDHN-13-R0-019		7.15m black pitted inclusion (not reaction) soft
6.60				BBDHN-13-R0-020		7.5m opaque mineral perlage pyrite
6.60				BBDHN-13-R0-021		⑦ 7.59m, 8.5m pumice elongate <20°φ ~ 2mm <70° hair crack
6.60				BBDHN-13-R0-022		8.7~8.8m alteration Mn <45° crack cal <70° crack
6.60				BBDHN-13-R0-023		tabularite ? => 9.00~9.20m
6.60				BBDHN-13-R0-024	9.00~9.20m medium grained sandstone include SiO2 mineral patch (agate ?)	9.1~9.5m cracky 20zone calcareous rock crack plane slickenside normal Fault ?
6.60				BBDHN-13-R0-025	9.20~9.50m light yellow brown calcareous fine grained sandstone	9.5m light yellow white clay (bentonite ?)
6.60				BBDHN-13-R0-026		
6.60				BBDHN-13-R0-027	9.50~9.70m light yellow white (grey) fine grained sandstone (cal reaction)	10.2~10.3m siliceous layer in ss fragment
6.60				BBDHN-13-R0-028	9.80~11.20m brown mudstone (clay) => red claystone ?	⑩ 10.8m 付付付 dark orange layer (bentonite ?) <5° crack slickenside
6.60				BBDHN-13-R0-029	11.20~11.50m medium ~ fine grained sandstone	11.50m Aksitero Formation Zambales ophiolite member
6.60				BBDHN-13-R0-030	11.50~11.60m fault breccia	
6.60				BBDHN-13-R0-031	11.60~12.21m autobrecciated basalt (lava)	11.8m crack slickenside many 11.9~12.2m black and green clay attach a crack side
6.60				BBDHN-13-R0-032		⑪ 12.2m green clay
6.60				BBDHN-13-R0-033	13.00~13.20m autobrecciated basalt (lava)	← (micro gabbro) 13.1m crack plane : cal slickenside
6.60				BBDHN-13-R0-034	13.20~13.46m serpentinized basalt (many black parts)	
6.60				BBDHN-13-R0-035	13.46~13.90m black sand is perhaps basalt	
6.60				BBDHN-13-R0-036	13.90~14.20m serpentinized gabbro	← cutting and falling deposits
6.60				BBDHN-13-R0-037	14.20~14.30m clay (fault gouge)	⑫ 14.02m silica mineral (agate ?) or (corundum ?)
6.60				BBDHN-13-R0-038	14.30~23.40m black and light green (alternated) serpentinized gabbro	14.4m silica vein ※ about 13.0~16.0m 付付付 cracky zone Fault effect

CR : Core Recovery (Core-lacked Zone)
 RB : Range of Brecciation (Crush-Breccia, Fault-Breccia/Fragmentation, Fracturing, cracking)

図 2.6.3-4 DH08 柱状図 (0~GL-15m)

Depth (m)	Columnar Section	CR*	RB**	Sample Number ***(Sample Location)	Lithology	Remarks										
15.21				BBDHN-13-R-019	14.30~23.40m black and light green (alternated) serpentized gabbro	black and green color alteration crack plane is fresh There is many low angle crack but, clay part → high angle										
15.50					(15.50~16.00m : include clay, dark green and black color)	16.2~16.3m high angle shear 16.4m crack → tale? 16.5m pygmatic silica vein (no reaction)										
16.00					BBDHN-13-R-020	(16.30~16.59m : include clay, dark green color)	17.7m ∠70°vein 18.1m ∠60°crack slickenside									
16.09						(17.00~17.90m : include sand, dark green color)	10m 径、core 非円柱状 (φ=10cm columnar core)									
16.30					BBDHN-13-R-021 BBDHN-13-R-022 BBDHN-13-R-023 BBDHN-13-R-024 BBDHN-13-R-025		BBDHN-13-H-035 BBDHN-13-H-036 BBDHN-13-H-037 BBDHN-13-H-038	(18.20~18.70m : crack plane is soft)	18.0~20.0m black part include py 18.3m spherulite(xenolite or silica) + pyrite 18.7m ∠20°silica vein ⑨ 19.35m vertical pale green vein 19.7~20.5m black parts many							
16.59									BBDHN-13-R-026 BBDHN-13-R-027 BBDHN-13-R-028 BBDHN-13-R-029		BBDHN-13-H-039	(20.00~20.50m : silica vein ∠70° shear zone)	about φ=10cm columnar core is many contents 20.20m clay 20.50m white vein : silica green vein : serpentinite? crack plane is fresh (almost) 24.0~24.1m vertical crack 24.6m ∠50°crack 22.2m smoothly (serpentinic) ⑩ 23.4m φ1mm 程度等粒状 ∠0°foliation 24.0~24.1m open crack ∠70~80°付着 24.1m crack plane is yellow brown color crater spot ※24.4m ∠70°cal lens			
17.00												BBDHNSL-13-R-004		22.1	23.40~23.56m diabase 23.56~23.85m sp. gabbro	※diabase rough skin serpentinized but, finer grain and smoother than gabbro
17.90															BBDHN-13-R-031 BBDHN-13-R-032 BBDHN-13-R-033	
18.20					BBDHN-13-R-034 BBDHN-13-R-035			25.10~25.27m	※deeper than 25.0m 2m 毎の掘削のため、ロスが多くなる (25.1~25.27m green clay) no cal reaction → silica mineral almost (26.1~26.43m green clay) (27.2~27.43m green clay)							
18.70								BBDHN-13-R-036 BBDHN-13-R-036		BBDHN-13-H-045	27.20~27.43m	black part → basalt ? (bubbly, not porphyritic) black, pale green and gray contrast boundary is not sharp				
19.00	BBDHN-13-R-036 BBDHN-13-R-036		BBDHN-13-H-045	28.00~28.44m												
19.20				BBDHN-13-R-036 BBDHN-13-R-036		BBDHN-13-H-045	28.00~28.44m									
20.00	BBDHN-13-R-036 BBDHN-13-R-036		BBDHN-13-H-045				28.00~28.44m									
20.50				BBDHN-13-R-036 BBDHN-13-R-036		BBDHN-13-H-045	28.00~28.44m									
21.00	BBDHN-13-R-036 BBDHN-13-R-036		BBDHN-13-H-045				28.00~28.44m									
21.05				BBDHN-13-R-036 BBDHN-13-R-036		BBDHN-13-H-045	28.00~28.44m									
21.70	BBDHN-13-R-036 BBDHN-13-R-036		BBDHN-13-H-045				28.00~28.44m									
22.1				BBDHN-13-R-036 BBDHN-13-R-036		BBDHN-13-H-045	28.00~28.44m									
23.40	BBDHN-13-R-036 BBDHN-13-R-036		BBDHN-13-H-045				28.00~28.44m									
23.56				BBDHN-13-R-036 BBDHN-13-R-036		BBDHN-13-H-045	28.00~28.44m									
23.85	BBDHN-13-R-036 BBDHN-13-R-036		BBDHN-13-H-045				28.00~28.44m									
24.20				BBDHN-13-R-036 BBDHN-13-R-036		BBDHN-13-H-045	28.00~28.44m									
25.10	BBDHN-13-R-036 BBDHN-13-R-036		BBDHN-13-H-045				28.00~28.44m									
25.27				BBDHN-13-R-036 BBDHN-13-R-036		BBDHN-13-H-045	28.00~28.44m									
26.00	BBDHN-13-R-036 BBDHN-13-R-036		BBDHN-13-H-045				28.00~28.44m									
26.10				BBDHN-13-R-036 BBDHN-13-R-036		BBDHN-13-H-045	28.00~28.44m									
26.33	BBDHN-13-R-036 BBDHN-13-R-036		BBDHN-13-H-045				28.00~28.44m									
27.20				BBDHN-13-R-036 BBDHN-13-R-036		BBDHN-13-H-045	28.00~28.44m									
27.43	BBDHN-13-R-036 BBDHN-13-R-036		BBDHN-13-H-045				28.00~28.44m									
28.00				BBDHN-13-R-036 BBDHN-13-R-036		BBDHN-13-H-045	28.00~28.44m									
28.44	BBDHN-13-R-036 BBDHN-13-R-036		BBDHN-13-H-045				28.00~28.44m									
30.00				BBDHN-13-R-036 BBDHN-13-R-036		BBDHN-13-H-045	28.00~28.44m									
	BBDHN-13-R-036 BBDHN-13-R-036		BBDHN-13-H-045				28.00~28.44m									

CR* : Core Recovery (Core-lacked Zone)

RB** : Range of Brecciation (Crush-Breccia, Fault-Breccia/Fragmentation, Fracturing, cracking)

図 2.6.3-5 DH08 柱状図 (GL-15m~30m)

Depth (m)	Columnar Section	CR [※]	RB ^{※※}	Sample Number ^{※※※※} (Sample Location)	Lithology	Remarks
30.44					24.20~39.35m serpentinized gabbro (like auto brecha)	全体に岩質がsoft pale green colorが強い
31.60				BBDHN-13-Rb-446		
32.12						
34.20				BBDHN-13-Rb-437 BBDHN-13-Rb-447	34.20~34.73m (include green clay)	about 34.6m crack slickenside
34.73						
35.90				BBDHN-13-Rb-438 BBDHN-13-Rb-448		
36.30						
37.80				BBDHN-13-Rb-439 BBDHN-13-Rb-449	deeper 37.80m It becomes black in the whole 37.8~40.54m autobrecciated basalt (lava)	diabase: fine grain size mineral (equigranular)
38.17						Fault gouge?
39.35				BBDHN-13-Rb-441		
40.40			BBDHN-13-Rb-450			
40.40			BBDHN-13-Rb-442	40.40~40.54m include black clay	40.0~40.4m like basalt crater spot	
40.54						
41						
42						
43						
44						
45						

CR[※] : Core Recovery (Core-lacked Zone)

RB^{※※} : Range of Brecciation (Crush-Breccia, Fault-Breccia/Fragmentation, Fracturing, cracking)

図 2.6.3-6 DH08 柱状図 (GL-30m~40.54m)

Drill Hole Number : DH-09
 Location : N 15° 30' 52.1" , E 120° 22' 54.6"
 Elevation : 108m
 Core Size : NQ
 Total Footage : 14.97m
 Drilling Operation : 4. Nov. 2013 (am) ~ 7. Nov. 2013 (pm)

Depth (m)	Columnar Section	CR [※]	RB ^{※※}	Sample Number ^{※※※} (Sample Location)	Lithology	Remarks
1					0.00~1.54m bank φ 1~5cm white calcareous rock 0.25~0.74m, 1.0~1.3m : loss	pumiceous silt : dark yellow brown fine grain ss : light pale green 全体にcalcareous tuffaceous
1.54				BBDH0-13-R0-001 BBDH0-13-R0-002 BBDH0-13-H0-001	1.54~3.40m pumiceous silt and fine green sandstone alternation bed	1.54~1.88m : ★include bentonitic clay pale green=tuffaceous ss ∠70°crack plane dark brown
2					HCL ... reaction almost I=5~10cm columnar core or flake core	1.8~2.7m : vertical crack It weathered along a crack 3.4~3.5m : silica-mineral (agate?) ②3.8m : ∠70°cal vein, brown layer (上層粘土化) 3.8~3.9m : sandy 左部分支持 4.0m ∠80°hair crack gap in the strata
2.24 2.40 2.74				BBDH0-13-R0-003 BBDH0-13-R0-004 BBDH0-13-R0-005		
3				BBDH0-13-R0-006	3.40~5.03m dark yellow brown pumiceous siltstone	
3.18 3.40				BBDH0-13-R0-007 BBDH0-13-H0-002		
4					0.00~5.00m weathered color 5.0m~ reduction color	
4.20 4.40				BBDH0-13-R0-008		
5				BBDH0-13-R0-009	5.03~6.70m black fine ss and dark grey silt alternated bed (fine grained sandstone major)	5.0~5.2m : vertical crack It weathered along a crack
5.78 6.00				BBDH0-13-H0-003 BBDH0-13-H0-004		5.15m, 5.75m : emerald green color layer (width 2cm)
6				BBDH0-13-R0-005	in the whole calcareous laminar dip 5~10°	5.37m : ∠15°layer dip concordant yellow color
6.40 6.50 6.70				BBDH0-13-H0-005 BBDH0-13-R0-010 BBDH0-13-H0-006 BBDH0-13-H0-007 BBDH0-13-H0-008		6.2~6.3m : vertical crack, crack plane is reddish brown 6.3m : ∠5~10°mal white lithic (width 1cm) 6.5m : ∠70°vein black inclusion (spot) ∠20° opaque mineral
7				BBDH0-13-R0-011 BBDH0-13-H0-009	6.70~10.00m light pale green tuffaceous calcareous fine grained sandstone → limestone	about 7.2m boundary : clay (yellow brown) 7.5m : ∠70°crack open and hair crack brown color → Mn ? 7.7m : white clay
7.24 7.40 7.70				BBDH0-13-R0-012		8.8~9.3m : vertical crack—yellow-brown 9.6m : thickness 1 cm black layer (∠5°)
8				BBDH0-13-R0-013 BBDH0-13-H0-011 BBDH0-13-H0-012	10.00~13.15m dark gray fine sandstone (mudy) I = 5 ~ 10cm columnar core or flake core	9.2m : vertical crack 10.5m ∠45°hair crack vertical cal vein
8.42 8.80						10.0m : pegmatic cal (euhedral cry) laminar angle 0~10° 11.2m : ∠45° hair crack 13.6m : partially green color
9						
9.34 9.50 9.75						
10				BBDH0-13-R0-014 BBDH0-13-H0-013 BBDH0-13-H0-014	13.15~13.70m auto-brecciated basalt (lava) (Fault zone)	13.15m Aksitro Formation Zambales ophiolite member
10.26 10.40 10.71 10.85						13.15~13.7m : Fault brecha crack plane slickenside 13.5m include Aksitro member (normal fault) deeper than 13.7m : crack plane slickenside 14.5m : cal vein, qz spot
11						
11.26 11.80						
12						
12.16 12.80						
13				BBDH0-13-R0-015 BBDH0-13-H0-015	13.70~14.97m auto-brecciated basalt (lava) 14.50~14.56m pebble core 14.70~14.97m	
13.15 13.22 13.60						
14						
14.50 14.70 14.97						
15						

CR[※] : Core Recovery (Core-lacked Zone)
 RB^{※※} : Range of Brecciation (Crush-Breccia, Fault-Breccia/Fragmentation, Fracturing, cracking)

図 2.6.3-7 DH09 柱状図 (0~GL-15m)

2.6.4 コア試料による岩石鉱物学的調査

ここでは、試錐孔（DH08）で観察・計測されたオフィオライト基盤岩中の断裂系を流路として上昇しているアルカリ地下水（掘削水の混入した試錐孔内での pH 計測値：22m 深度－pH9.16 / 39m 深度－pH8.91）が浸出している自破碎玄武岩質溶岩または細粒はんれい岩（オフィオライトの上部を構成する火成岩）とベントナイト質砂岩または泥岩（Aksitero 累層）から採取したコア（岩芯）試料によるアルカリ変質反応の地球化学的プロセスについて岩石鉱物学的に観察・考察する。

このようなアルカリ地下水環境下において、ベントナイトのアルカリ変質反応の地球化学的プロセスを考察するためには、例えば、モンモリロナイトの溶解現象、そしてその溶解過程で沈殿（晶出）した初期鉱物の形成・性状などや、溶解－沈殿反応による変質反応生成鉱物（二次鉱物の形成など）の岩石鉱物学的・鉱物化学的特性に関する基礎的データを取得することが必要になる。また、同時に基盤岩であるオフィオライトを構成する主要造岩鉱物の変質反応による変質反応生成鉱物特性を明らかにし、アルカリ地下水との相互作用に関する地球化学的プロセスを考察する上での基礎データを取得するが基本となる。

そのために、前者は、岩石記載（鉱物組み合わせ・鉱物組成・組織・共生など）を目的とする偏光顕微鏡観察（Petrography）、後者は、鉱物組み合わせ（主要造岩鉱物）を明らかにするために XRD による全岩分析と、鉱物形成を支配する要素の 1 つである岩石化学的特性を考察するために XRF による全岩分析（バルク主要成分）を実施した。

(1) 分析コア試料の内訳

分析のために DH08 試錐孔より採取した試料（コア試料 49 件、掘削時のスライム試料 4 件）とその深度を表 2.6.4-1 に、DH09 試錐孔より採取した試料（コア試料 20 件）とその深度を表 2.6.4-2 に示す。

表 2.6.4-1 試料採取深度および試料名 (DH08)

深度 (m)	試料名	深度 (m)	試料名
0.30	BBDH08-13-Hu-001	17.50	BBDH08-13-Rh-021
0.70	BBDH08-13-Rh-001	17.70	BBDH08-13-Rh-022
1.40	BBDH08-13-Rh-002	17.95	BBDH08-13-Rh-023
1.50	BBDH08-13-Rh-003	18.35	BBDH08-13-Rh-024
2.30	BBDH08-13-Rh-004	18.70	BBDH08-13-Rh-025
3.00	BBDH08-13-Rh-005	19.95	BBDH08-13-Rh-026
3.36	BBDH08-13-Hu-008	20.00	BBDH08-13-Rh-027
5.40	BBDH08-13-Rh-006	20.06	BBDH08-13-Rh-028
7.60	BBDH08-13-Rh-007	21.70	BBDH08-13-Rh-029
10.08	BBDH08-13-Hu-021	23.46	BBDH08-13-Hu-040
10.20	BBDH08-13-Rh-008	23.50	BBDH08-13-Rh-030
10.80	BBDH08-13-Rh-009	24.10	BBDH08-13-Rh-031
10.82	BBDH08-13-Hu-023	24.70	BBDH08-13-Rh-032
10.90	BBDH08-13-Rh-010	24.78	BBDH08-13-Hu-044
10.95	BBDH08-13-Rh-011	25.00	BBDH08-13-Rh-033
11.15	BBDH08-13-Rh-012	26.10	BBDH08-13-Rh-034
11.25	BBDH08-13-Rh-013	26.50	BBDH08-13-Rh-035
11.40	BBDH08-13-Rh-014	28.30	BBDH08-13-Rh-036
11.51	BBDH08-13-Rh-015	34.30	BBDH08-13-Rh-037
11.73	BBDH08-13-Hu-026	36.20	BBDH08-13-Rh-038
13.00	BBDH08-13-Rh-016	37.90	BBDH08-13-Rh-039
13.20	BBDH08-13-Rh-017	38.17	BBDH08-13-Rh-040
14.10	BBDH08-13-Rh-018	39.40	BBDH08-13-Rh-041
15.40	BBDH08-13-Rh-019	40.50	BBDH08-13-Rh-042
16.70	BBDH08-13-Rh-020		

※スライム試料は次の4試料 DH08-GL-6m、DH08-GL-12.21m、DH08-GL-14.3m、DH08-GL-21.05-21.87m

※※太字の4試料は偏光顕微鏡観察を行った試料。

※※※赤字の5試料は詳細な鉱物分析 (SFSEM-EDS, μ -XRD, EPMA) を行った試料。

表 2.6.4-2 試料採取深度および試料名 (DH09)

深度 (m)	試料名	深度 (m)	試料名
1.60	BBDH09-13-Rh-001	6.80	BBDH09-13-Rh-010
1.80	BBDH09-13-Rh-002	6.80	BBDH09-13-Hu-006
2.40	BBDH09-13-Rh-003	8.40	BBDH09-13-Rh-011
2.70	BBDH09-13-Rh-004	8.90	BBDH09-13-Rh-012
3.00	BBDH09-13-Rh-005	9.08	BBDH09-13-Hu-010
3.40	BBDH09-13-Rh-006	10.20	BBDH09-13-Rh-013
3.79	BBDH09-13-Hu-002	13.20	BBDH09-13-Hu-013
3.80	BBDH09-13-Rh-007	13.20	BBDH09-13-Rh-014
4.60	BBDH09-13-Rh-008	13.84	BBDH09-13-Hu-014
5.03	BBDH09-13-Rh-009	14.50	BBDH09-13-Rh-015

(2) 岩石鉱物学的特性 (Petrography : 岩石記載)

今年度の簡易構造試錐調査でアルカリ地下水 (pH 9.17) が噴出している試錐孔 (DH08) から、現在、このアルカリ地下水と接触・進行している基盤岩のアルカリ変質反応の地球化学的プロセスが観察できる 4 件の火成岩 (基盤岩の **Zambales** オフィオライト : 主に自破碎玄武岩溶岩、枕状玄武岩溶岩、岩脈状の少量の細粒はんれい岩、細粒輝緑岩) と Saile 鉱山のベントナイトと堆積環境 (堆積相、層序・層準、層厚) と比較・検討するために、部分的に凝灰岩質またはベントナイト質である 1 件の石灰岩質砂岩～泥岩 (**Akisitero** 累層の堆積岩) を選定した。また、これら 5 件のコア試料は、詳細な鉱物学分析に使用され、特に、現在アルカリ地下水環境下にある 3 件の火成岩 (**Zambales** オフィオライト) については、アルカリ変質反応の地球化学的プロセスを考察する。

最初に基礎データとして、これらの太字で示す 4 件のコア試料の主要造岩鉱物の組み合わせ・組成・共生・組織および変質鉱物などの特徴 (岩石鉱物学的特性) について偏光顕微鏡により観察・同定・解析にもとづきそれぞれの岩石鉱物学的記載 (岩石名の決定) を実施した。

1) 試料

ここで使用した岩石試料は、アルカリ地下水が湧水する井戸 (Well-1) の南西約 11m に位置する DH08 試錐孔から採取した 4 コア (岩芯) 試料である。

岩石記載のための偏光顕微鏡観察 (造岩鉱物の組成・鉱物組み合わせ・変質鉱物など) に選定した 4 件のコア試料の内訳は下記の通りである。

- ① **BBDH-08-13-Rh-003** (深度 : 1.5m、石灰質砂岩～泥岩、少量なベントナイト質砂岩) (図 2.6.4-1)
- ② **BBDH-08-13-Rh-016** (深度 : 13m、変質枕状玄武岩) (図 2.6.4-2)

③ BBDH-08-13-Rh-018 (深度：14.2m、変質細粒はんれい岩) (図 2.6.4-3)

④ BBDH-08-13-Rh-042 (深度：40.4m、変質細粒輝緑岩) (図 2.6.4-4)



図 2.6.4-1 BBDH-08-13-Rh-003 のコア試料



図 2.6.4-2 BBDH-08-13-Rh-016 のコア試料



図 2.6.4-3 BBDH-08-13-Rh-018 のコア試料



図 2.6.4-4 BBDH-08-13-Rh-042 のコア試料

2) 分析方法

ダイヤモンドカッターにより試料をおよそ $30 \times 20 \times 10\text{mm}$ の直方体に切断して薄片用のチップとする（一次切断）。チップの片面を#180～#2500 の研磨剤を用いて研磨し（一次研磨）、プレパラートに接着剤を用いて貼り付ける。プレパラートに貼り付いたチップを厚さ 5mm 程度に薄く切断する（二次切断）。#180～#800 の研磨剤を用いて研磨機上で厚さ 0.1mm 以下まで研磨する。さらに、メノウ板上で#2500 の研磨剤を用いて正確に 0.03mm の厚さに調整する（二次研磨）。最終的に、 $6\mu\text{m}$ 、 $3\mu\text{m}$ および $1\mu\text{m}$ のダイヤモンドペーストを用いて琢磨機上で鏡面磨きをして観察用の研磨薄片とする。観察面の小さい試料については、2～3 枚を作製する。

薄片は、偏光顕微鏡を用い、下方ポーラーおよび直交ポーラー下において観察記載を行う。モード測定は、メカニカルステージを取り付けた偏光顕微鏡を用い、縦横 0.5mm の間隔で走査し、2,000 ポイントに達するまで同定・計数する。観察面の小さい試料については、縦横 0.25mm の間隔とする。

偏光顕微鏡下における観察に際しては、各構成物の量比を薄片上の観察面全体に対して、多量（ $>50\%$: ◎）、中量（ $20 \sim 50\%$: ○）、少量（ $5 \sim 20\%$: △）、微量（ $<5\%$: +）、および、きわめて微量（ $<1\%$: ±）という基準で目視により判定した。

3) 結果

4 件のコア試料の偏光顕微鏡観察結果による主要造岩鉱物の鉱物組み合わせとそのモード組成比率を表 2.6.4-3 と図 2.6.4-5 に示す。これらの付図表および偏光顕微鏡写真（図 2.6.4-6～図 2.6.4-9）から取りまとめる。

表 2.6.4-3 モード測定結果

試料 番号	層準	Core sample ID	EPMA sample ID	Thin Section ID	記載（偏光顕微 鏡）	記載（旧）	Ol	Qz/ Crystb	Plag	Opx	Cpx	Opq	Gl	Zeol	Mica	Smec	Goe	Calc	Others	Pore& crack	total
①	上位	BBDH08-13-Rh- 003	Rh-003	③up	石灰質砂岩-泥 岩<粘土岩>	石灰質泥岩						0.1	0.3	1.0		2.3	0.2	95.0	0.3	1.0	100
③	上位	BBDH08-13-Rh- 016	Rh-016	②up	変質自破碎玄武 岩（溶岩）	変質安山岩（ハイ アロクリスタイ ト）		(○)	7.4	0.8	2.4	0.1	0.8	0.2	0.1	81.6		1.3	2.7	2.9	100
④	—	BBDH08-13-Rh- 018	Rh-018	①	変質自破碎玄武 岩（溶岩）	複輝石安山岩	○		24.1	0.1	3.8	1.6	18.2	0.6		47.2	0.1		2.6	1.9	100
⑤	下位	BBDH08-13-Rh- 042	Rh-042	②low	変質自破碎玄武 岩（溶岩）	単斜輝石安山岩		0.6/ 0.6	67.0		1.7	1.3		1.1		24.3		0.1	2.2	1.4	100
②	下位	BBDH08-13-Rh- 014	RH14	③low	変質自破碎玄武 岩（溶岩）																

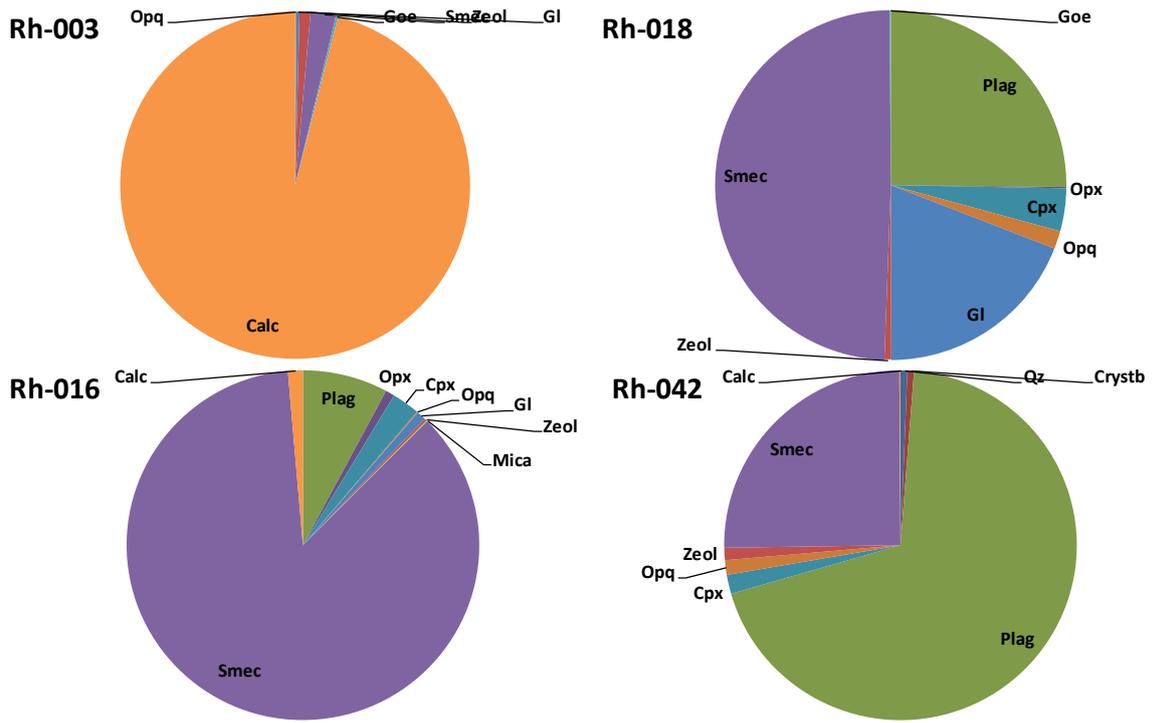


図 2.6.4-5 鉱物モード組成

① BBDH-08-13-Rh-003

石灰質化石を散含する石灰質砂岩－泥岩<粘土岩>である。基質はミクライト質な炭酸塩鉱物によって埋められている。火山ガラス片が僅かに含まれており、やや凝灰質な性質を示す（図 2.6.4-6）。

斜長石：粒径 0.68mm 以下、半自形～他形、厚板状～破片板状を呈し、集片双晶および累帯構造が発達する。清澄で新鮮である。

不透明鉱物：粒径 0.11mm 以下、他形、粒状を呈して点在する。

石灰質化石片：粒径 0.38 mm以下で比較的結晶度の良好な炭酸塩鉱物によって置換されている。有孔虫、腕足動物、棘皮動物などが認められる。

火山ガラス片：粒径 0.27mm 以下で骨片状を呈して点在する。バブルウォール型が主体となっている。

沸石：粒径 0.18mm 以下、他形、不定形板状～不定形状を呈し、一部の火山ガラス片を交代して仮像を形成している。

スメクタイト：粒径 0.01mm 以下、他形、微細繊維束状～微細不定形状を呈し、褐色を示す。炭酸塩鉱物と共生して広範に散在する。

水酸化鉄：粒径 0.02mm 以下、他形、微細不定形状を呈し、暗褐色を示す。基質において局所的に濃集する。

炭酸塩鉱物：粒径 0.12mm 以下、他形、微細不定形状を呈し、基質の大部分を構成する。大部分は粒径 0.005mm 以下ときわめて微細で、ミクライト質である。

非晶質物質：隠微晶質で微細不定形状を呈し、暗灰色を示す。粉状をなして局所的に濃集する。

クラック：幅 0.1mm 以下で薄片上に 30 条以上認められ、配向性を示して広範に分布する。充填鉱物もなく、周囲の変質等も認められないことから、薄片作製時の乾燥収縮により生成したクラックの可能性が高い。

構成物		
鉱物片	略号	量
斜長石	Pl	±
不透明鉱物	Opq	±
その他碎屑片		
石灰質化石片	CB	+
火山ガラス片	Vg	±
基質		
沸石	Ze	±
スメクタイト	Sme	+
水酸化鉄	IH	±
炭酸塩鉱物	Cb	◎
非晶質物質	Amo	±
その他		
クラック	Cra	+
写真 上: 下方ポーラー 下: 直交ポーラー 0.5mm		

図 2.6.4-6 各構成物の量比と顕微鏡写真 (BBDH-08-13-Rh-003)

② BBDH-08-13-Rh-016

基質が著しくスメクタイト化した変質自破碎玄武岩（溶岩）である。安山岩岩片が散在しており、ハイアロクラスタイトを原岩としている可能性も考えられる（図 2.6.4-7）。

斜長石：粒径 0.49mm 以下、半自形～他形、厚板状～破片板状を呈し、累帯構造や集片双晶が発達する。新鮮で清澄なものが多く、火山ガラスを包有するものも認められる。

斜方輝石：粒径 0.42mm 以下、半自形～他形、柱状を呈し、淡褐色～淡緑色の弱い多色性を示す。

単斜輝石：粒径 0.57mm 以下、他形、柱状～破片柱状を呈し、淡緑色を示して散在する。

不透明鉱物：粒径 0.09mm 以下、他形、粒状～不定形粒状を呈する。

安山岩：粒径 0.60mm 以下、角礫～亜角礫状を呈して点在する。無斑晶質でガラスが残存し、インターサータル～ハイアロオフィティック組織を示す。

沸石：粒径 0.10mm 以下、他形、不定形板状を呈し、細脈状をなして濃集する。

雲母鉱物：粒径 0.06mm 以下、他形、不定形板状を呈し、淡褐色を示す。スメクタイトと共生して基質を構成する。

スメクタイト：粒径 0.03mm 以下、他形、繊維束状～微細不定形状を呈し、褐色を示す。弱い定向配列を示して基質の大部分を構成する。

不透明鉱物(基質)：粒径 0.02mm 以下、他形、不定形粒状を呈する。落斜光下では黄黒色の金属反射を示しており、硫化鉱物とみられる。

炭酸塩鉱物：粒径 0.20mm 以下、他形、不定形状を呈し、細脈を構成する。

非晶質物質：隠微晶質で暗褐色を示し、スメクタイトと共生して基質を構成する。

細脈：幅 0.4mm 以下で炭酸塩鉱物からなり、薄片上に 1 条認められる。

クラック：幅 0.3mm 以下で薄片上に 20 条以上認められ、基質の定向配列と同様な配向性を示して広く分布する。枝分かれ状をなして広がり、充填鉱物は生成していない。

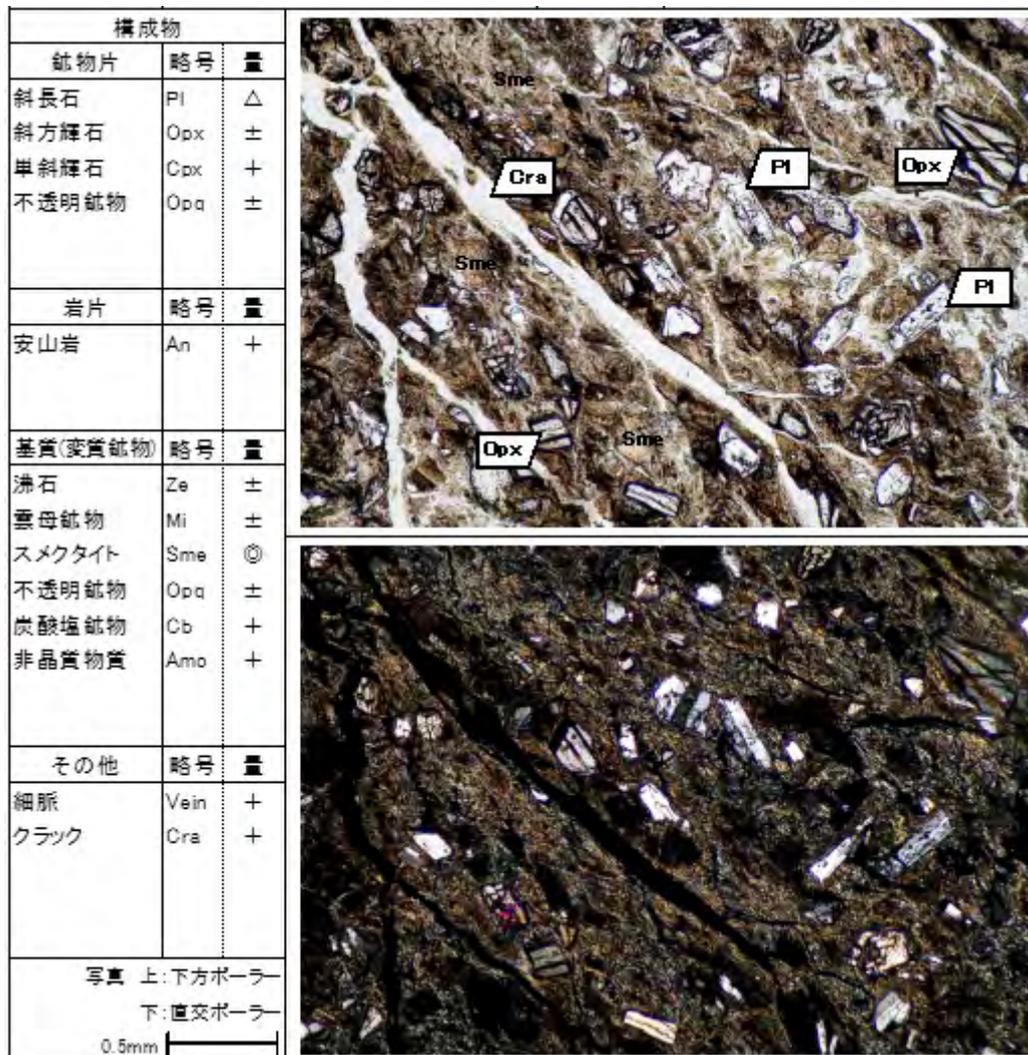


図 2.6.4-7 各構成物の量比と顕微鏡写真 (BBDH-08-13-Rh-016)

③ BBDH-08-13-Rh-018

輝石類の斑晶を含むややガラス質な変質自破碎玄武岩（溶岩）であり、新鮮な石基にはハイアロオフィティック組織が観察される（図 2.6.4-8）。

斜長石：粒径 1.28mm 以下、半自形～他形、厚板状または針状～柱状を呈する。斑晶は累帯構造および弱い集片双晶を示す。石基を埋めるものは粒径 0.2mm 以下で、針状～柱状を呈し、局所的に流理配列を示す。急冷によるスワロウテイル状の形態を示すものや、微細で晶子に近いものが存在する。

角閃石：1 粒のみ存在し、粒径 0.3mm、他形、緑褐色～褐色の多色性を示す。細粒な単斜輝石が反応縁状に取り囲んでいる。

斜方輝石：粒径 0.43mm 以下、自形～他形、柱状を呈し、淡褐色～淡緑色の弱い多色性を示す。斑晶は短柱状を呈し、自形性が強い。石基を構成するものは、柱状を呈して点在する。

単斜輝石：粒径 0.65mm 以下、他形、柱状～不定形状を呈し、淡緑色を示す。斑晶をなすものには、単純双晶を示すものが認められる。石基を埋めるものは、粒径 0.2mm 以下で散在し、結晶表面に微細な不透明鉱物が付着している。

不透明鉱物：粒径 0.15mm 以下、他形、不定形状を呈する。大部分は粒径 0.02mm 以下と微細である。

火山ガラス：褐色～無色透光性を示し、一部には同心円状の割れ目の痕跡が確認される。

沸石：粒径 0.10mm 以下、他形、放射繊維束状を呈し、脈状をなして濃集する。

スメクタイト：粒径 0.02 mm 以下、他形、微細不定形状を呈し、淡褐色～褐色を示す。火山ガラスを交代し、細脈状をなして広く分布する。

水酸化鉄：粒径 0.02mm 以下、他形、微細不定形状を呈し、赤褐色を示してスメクタイトと共生する。

非晶質物質：隠微晶質で暗褐色を示し、微細不定形状を示す。石基中に網目状をなして広がっている。火山ガラスの脱ガラス化によって生成したとみられる。

孔隙：孔径 1.45mm 以下、不定形状を呈し、スメクタイトの濃集部に分布する。

構成物		
斑晶	略号	量
斜長石	Pl	+
角閃石	Ho	±
斜方輝石	Opx	±
単斜輝石	Cpx	+
石基		
斜長石	Pl	○
斜方輝石	Opx	±
単斜輝石	Cpx	△
不透明鉱物	Opx	△
火山ガラス	Vg	△
変質鉱物		
沸石	Ze	±
スメクタイト	Sme	○
水酸化鉄	IH	±
非晶質物質	Amo	+
その他		
孔隙	P	+
写真 上: 下方ポーラー 下: 直交ポーラー 0.5mm		

図 2.6.4-8 各構成物の量比と顕微鏡写真 (BBDH-08-13-Rh-018)

④ BBDH-08-13-Rh-042

斑晶の少ない変質自破碎玄武岩 (溶岩) であり、石基はインターサタル組織を示す (図 2.6.4-9)。

斜長石：粒径 0.68mm 以下、半自形～他形、厚板状または針状～柱状を呈する。斑晶は累帯構造、集片双晶が発達し、火山ガラスを包有する。石基を埋めるものは粒径 0.2mm 以下で、柱状～不定形板状を呈し、局所的に流理配列を示す。

単斜輝石：粒径 0.77mm 以下、他形、柱状～不定形状を呈し、淡緑色を示す。斑晶には、単純双晶を示すものが認められる。石基を埋めるものは、粒径 0.2mm 以下で点在する。

石英：粒径 0.38mm 以下、他形、不定形状を呈し、孔隙の壁に扇形をなして晶出している。

クリストバライト：粒径 0.09mm 以下、他形、不定形状を呈し、孔隙の壁に扇形に濃集して晶出している。

不透明鉱物：粒径 0.16mm 以下、半自形～他形、六角粒状～不定形粒状を呈する。大部分

は粒径 0.02mm 以下と細粒で、石基斜長石の粒間に散在する。

沸石：粒径 0.82mm 以下、他形、不定形板状を呈し、孔隙を充填するものや、細脈を構成するものが認められる。

スメクタイト：粒径 0.02 mm以下、他形、微細不定形状を呈し、淡褐色～褐色を示す。火山ガラスを交代し、石基中に広く分布する。

非晶質物質：隠微晶質で暗褐色を示し、微細不定形状を示す。石基斜長石の粒間を埋めており、火山ガラスの脱ガラス化によって生成したとみられる。

細脈：脈幅 0.2mm 以下で薄片上に 1 条認められ、沸石によって充填される。

クラック：幅 0.05mm 以下で薄片上に 3 条程度認められ、開口している部分が多く、壁に沿ってスメクタイトが生じている。

孔隙：孔径 1.40mm 以下で、球状～不定形状を呈して散在する。石英、クリストバライトが壁に沿って晶出しており、その内部をさらに沸石によって充填されているものが認められる。

構成物		
斑晶	略号	量
斜長石	Pl	±
単斜輝石	Cpx	±
石基		
石英	略号	量
石英	Qtz	±
クリストバライト	Crn	±
斜長石	Pl	◎
単斜輝石	Cpx	+
不透明鉱物	Opq	+
変質鉱物		
沸石	略号	量
沸石	Ze	+
スメクタイト	Sme	○
非晶質物質	Amo	+
その他		
細脈	略号	量
細脈	Vein	±
クラック	Cra	±
孔隙	P	+
写真 上: 下方ポーラー 下: 直交ポーラー 0.5mm		

図 2.6.4-9 各構成物の量比と顕微鏡写真 (BBDH-08-13-Rh-042)

Aksitero 累層の堆積岩 (BBDH-08-13-Rh-003) は、大部分が炭酸塩鉱物としての方解石が優勢でその起源も生物起源のものが多く観察された。初源物質が火山砕屑性物質のために火山ガラスも僅かに含まれ、やや凝灰岩質な組織に半自形で部分的に集片双晶や累帯構造を示す斜長石が産状している。これらの鉱物を交代または一部交代した不定形の沸石や微細繊維束状のスメクタイトが散在している。これらの鉱物組み合わせやスメクタイトの産状から判断して、Saile 鉱山のベントナイトと比べると、凝灰岩質より石灰質であるのが特徴で岩石名としては石灰質泥岩 (もしくは砂岩) である。

次に、現在、アルカリ地下水環境下にある Zambales オフィオライトのコア試料について記述する。

(深度 13.00m 附近のコア試料(BBDH-08-13-Rh-016 : 基盤岩から約 1.5m 下部の位置))

この岩石の班晶は、特徴的な苦鉄質鉱物として単斜輝石 (透輝石~普通輝石) と斜方輝石 (頑火輝石~紫蘇輝石) の両輝石から構成されるやや塩基性の組成の岩石であるが、著しい変質反応が確認されず、自形から半自形の斜長石とオフィテック組織を示す典型的な玄武岩組織を示す。全体として、石基の基質 (マトリクス) は玄武岩質ガラス質で、大部分が著しいスメクタイト化が進んでおり、部分的には、この玄武岩質ガラスの変質反応で形成された沸石類が観察される。また、方解石の細脈も観察される。これらの鉱物組み合わせやガラス質である特徴から、変質が進んだ玄武岩質溶岩で、多数のクラックが基質の定向配列と同様な配向性で分布していることから、岩石名としては自破碎玄武岩質溶岩である。

(深度 14.10m 附近のコア試料(BBDH-08-13-Rh-018 : 基盤岩から約 2.5m 下部の位置))

この岩石は、班晶として唯一カンラン石が観察されているが、上記コア試料 (BBDH-08-13-Rh-016) と同様に両輝石を含有し、半自形から他形の斜長石とオフィテック組織を示めすが、この斜長石は、部分的に特徴的な流理配列や急冷によるスワロテイル状の形態を示す。また、この単斜輝石の一部がマグマ噴出時の溶液との溶解反応により形成された角閃石が単斜輝石の反応縁として産状しているのが観察される。一方、石基の基質も上記の岩石と同様で、その玄武岩質ガラスの一部はスメクタイト化が進み、その産状は微細不定形状と細脈状で分布している。また、放射繊維束状の沸石類も観察される。これらの観察結果から、岩石名としては自破碎玄武岩質溶岩である。

(深度 40.5m (試錐孔底) のコア試料(BBDH08-13-Rh-042: 基盤岩から約 30m 下部の位置))

この岩石は班晶が少なく、石基はインターサータル組織を示す。班晶としては、単斜輝石と半自形から他形の斜長石から構成され、この斜長石にも局所的に流理配列が観察される。石基の基質も同様に玄武岩質ガラスを交代して形成された微細不定形のスメクタイトと、孔隙を不定形板状に充填にするものと細脈状に産状する沸石類が観察される。また、不定形のシリカ鉱物 (石英またはクリストバライト) が孔隙の壁に扇形に濃集し晶出している。これらの観察結果から、岩石名としては自破碎玄武岩質溶岩である。

以上まとめると、主要造岩鉱物の組み合わせ、組織、変質程度などの差異があるものの Zambales オフィオライトのすべてのコア試料は、自破碎玄武岩質溶岩である (表 2.6.4-4)。

表 2.6.4-4 試錐コアの詳細分析

試料番号	層準	Core sample ID	EPMA sample ID	Thin Section ID	記載(新)	初生鉱物	二次鉱物
①	上位	BBDH08-13-Rh-003	Rh-003	③up	Calcareous bentonite (tuffaceous)	Clinopyroxene Plagioclase Glass	Calcite Apatite Nontronitic montmorillonite Stellerite
③		BBDH08-13-Rh-016	Rh-016	②up	Altered Autobrecciated Basalt	Clinopyroxene Plagioclase Quartz Glass	Montmorillonite Heulandite- Phillipsite
④		BBDH08-13-Rh-018	Rh-018	①	Altered Autobrecciated Basalt	Olivine Clinopyroxene Plagioclase (Quartz) Glass	Montmorillonite Heulandite- Phillipsite
⑤		BBDH08-13-Rh-042	Rh-042	②low	Altered Autobrecciated Basalt	Clinopyroxene Orthopyroxene Plagioclase Quartz Glass	Montmorillonite Clinoptilolite
②	下位	BBDH08-13-RH14	RH14	③low	Altered Autobrecciated Basalt	Clinopyroxene Plagioclase Glass	Mn-rich calcite Nontronitic montmorillonite Heulandite

また、アルカリ地下水環境下での変質反応によるスメクタイト、沸石類および一部シリカ鉱物の地球化学的な形成プロセスについては、自破砕玄武岩質溶岩の基質を構成する玄武岩質ガラスと石基としての細粒の反自形または他形の斜長石の溶解-沈殿反応によるものと観察・考察される。

(Zambales オフィオライトのコア試料(BBDH08-13-Rh-016 / 18 / 42)の鉱物モード組成)

図 2.6.4-10 から、スメクタイトの形成量は深度依存性が見られる。この依存性には単純にガラス量比との相間関係が認められないが、斜長石の溶解反応による斜長石の消費との関係があるとすれば、このスメクタイトの形成量は、玄武岩質ガラスと斜長石の変質反応による交代・消費量のバランスによるものと考えられる。

このような地球化学的な形成プロセスは、基質の玄武岩質ガラスと随伴・共生している細粒の斜長石とのアルカリ変質反応として捉えることにより、ベントナイトのアルカリ変質反応のアナログとして十分成立するものと考えられる。それはベントナイトの初源物質は火山ガラス、パミス、斜長石などから構成されているからである。

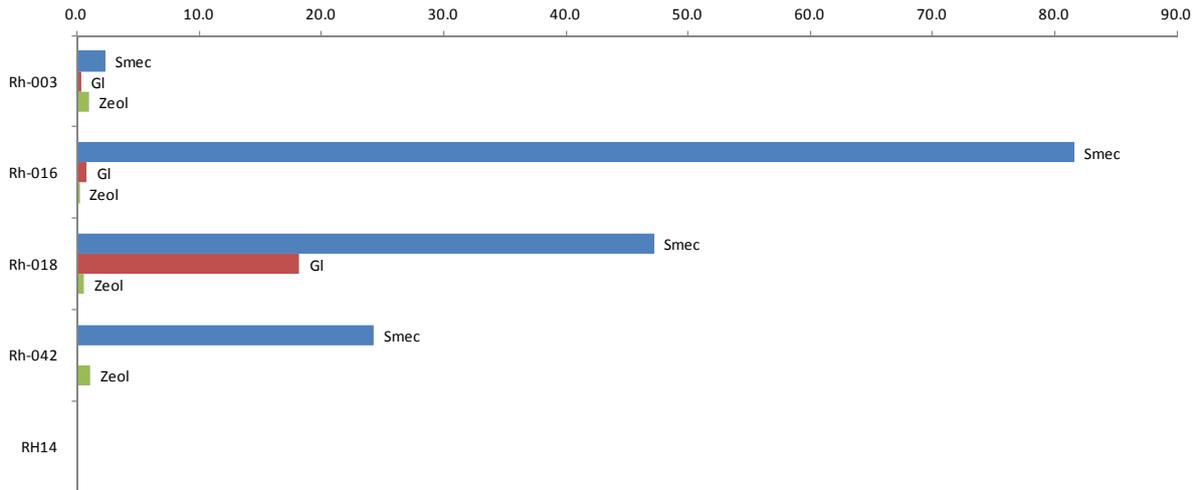


図 2.6.4-10 層序と鉱物モード組成

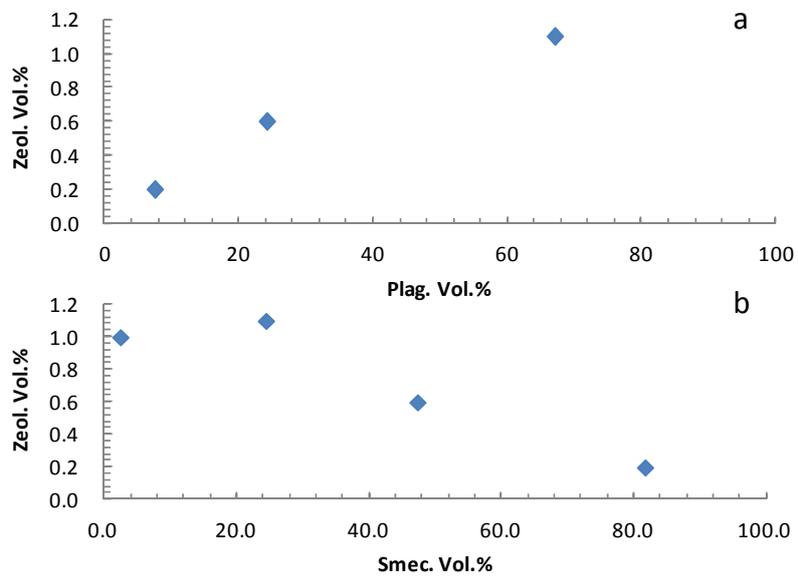


図 2.6.4-11 出発鉱物とゼオライトのモード組成の関係 (a: 斜長石; b: スメクタイト)

(3) 鉱物学的特性 (XRD)

2孔の試錐孔 (BBDH08/09) から連続的に採取した表 2.6.4-1～表 2.6.4-2 に示す全コア試料を使用して、鉱物学的特性 (鉱物組み合わせなど) を明らかにするために、XRD による全岩分析・同定を実施した。測定条件はトレンチ試料と同様である (表 2.5.3-3)。

XRD 測定結果を図 2.6.4-12～図 2.6.4-84 にそれぞれ示す。この鉱物同定結果に基づき、各試錐孔の鉱物組み合わせ表を図 2.6.4-85～図 2.6.4-88 に整理した。

Aksitero 累層を構成する堆積岩は典型的な遠洋性堆積物で、主に遠洋性浮遊性生物の遺骸から形成された石灰質砂岩～泥岩と石灰岩および、島弧火山活動により供給された火山砕屑性堆積物から構成され、しばしば凝灰岩質堆積物を挟在し、ベントナイトの初原物質 (出発物質) になっている。このような地質環境下では、図 2.6.4-85～図 2.6.4-88 に示すように、Aksitero 累層の堆積岩の鉱物学的特性は、下部層に斜長石や単斜輝石 (普通輝石) および、輝沸石と斜プチロル沸石が集中する傾向がみられる。全体としては、石英、沸石 (モルデン沸石)、方解石、2-八面体スメクタイト、不透明鉱物では鉄鉱物として磁鉄鉱、鉄水酸化物、マンガン鉱物としてデントライト、水マンガン鉱、硫化鉱物として極少量の黄鉄鉱、そして火山ガラスが同定されている。これらの鉱物の中で、二次鉱物は、沸石類、Fe-スメクタイト (ノントロナイト質スメクタイト)、Mn-rich 方解石と生物起源の方解石および、燐灰石である。

一方、基盤岩であるオフィオライトは、上位から自破碎玄武岩質溶岩一少量の枕状玄武岩一細粒はんれい岩と、これらの塩基性火成岩へ貫入した細粒輝緑岩の岩脈が観察される。しかし、一般的に変質作用によりこれらの塩基性岩のそれぞれの境界が不明瞭な場合が多く、特に深度 25m から 34m 間に変質程度が顕著である。それは恐らく、アルカリ地下水との変質反応が進展したものと考えられる。

Zambales オフィオライトの鉱物学的特性については、初生鉱物である苦鉄質鉱物が班晶として少量のカンラン石、単斜輝石 (透輝石から普通輝石) と斜方輝石 (紫蘇輝石) および、珪長質鉱物としては斜長石、少量のシリカ鉱物と不透明鉱物 (磁鉄鉱、少量の黄鉄鉱とマンガナイト・デントライト) などから構成されている。全体としては班晶が少なく、組織はサブオフィテックである。

一方、変質鉱物としては、粘土鉱物 (モンモリロナイト)、沸石類 (モルデン沸石、輝沸石、斜プチロル沸石など)、炭酸塩鉱物 (方解石) などから構成されている。なお、これらの変質反応による変質生成鉱物の形成に関する地球化学的プロセスについては、後章 (2.7) で報告する。

次に、ベントナイト層の胚胎可能性を確認するために、ベントナイトの初原物質 (原岩) となる凝灰岩質堆積物の存在とその堆積環境などを考察することである。そのためには 2 孔の試錐孔 (BBDH08 / DH09) のコア観察記載と今回の XRD による岩石鉱物学的特性とを合わせて検討することが必要である。

肉眼観察によるコア柱状図から、上位のパミス (軽石) 質シルト岩と基盤岩直上の赤色粘土岩がベントナイト質であることである。それは両者ともベントナイトの主要な初原物質である凝灰岩質の岩相・岩質を示すからである。特に、下位の赤色粘土岩が、苦鉄質鉱物の輝石類 (単斜輝石と斜方輝石) から構成される玄武岩質の火山砕屑性堆積物を含有し、上位のパミス質シルト岩

は安山岩質の火山砕屑性堆積物を含有していることが示唆される。これはフィリピンの弧状列島発達段階における島弧火山の活動に深く関与している。それは初期の火山活動が塩基性（玄武岩質溶岩）から徐々に中性（安山岩質溶岩）にそのマグマ組成を変化する特徴を示すからである [25][26]。

この事実から、下位の赤色粘土岩が初期の玄武岩質の火山活動に、上位のパミス質シルト岩は恐らく中期の安山岩質の火山活動により供給され、その後、海底に堆積した火山砕屑性堆積物を起源とすることと整合的である。さらに、赤色粘土岩の苦鉄質鉱物の比重が他の鉱物より大きいことから、重力効果により深部へ堆積したこととも合理的である。

また、XRDによる分析結果から、両者には粘土鉱物として2-八面体型モンモリロナイトが同定されているが、下位の赤色粘土岩の方が、その回折強度が強いことから、モンモリロナイトの含有量が多いと考えられる。その他の変質鉱物として沸石類（輝沸石、斜プチロル沸石）、シリカ鉱物、炭酸塩鉱物として方解石が同定されている。これらの鉱物組み合わせから、Saile 鉱山のものと比較して有意義な差異はないものと考えられる。

従って、ベントナイト質砂岩～粘土岩の形成（堆積）には、凝灰岩質という岩質、堆積環境と続成過程としての深度・オストワルド熟成時間が支配的な要素になっていると考えられる。

また、局所的ではあるがしばしば層理面に沿って数センチメートル程度の薄層のベントナイト質の砂岩や泥岩が観察される。

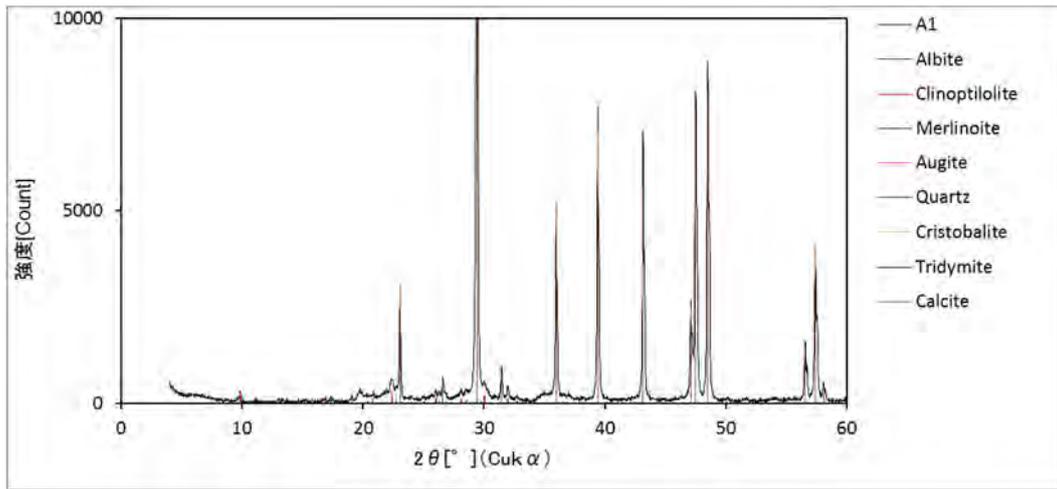


図 2.6.4-12 BBDH08-13-Rh-001 の粉末 XRD パターン

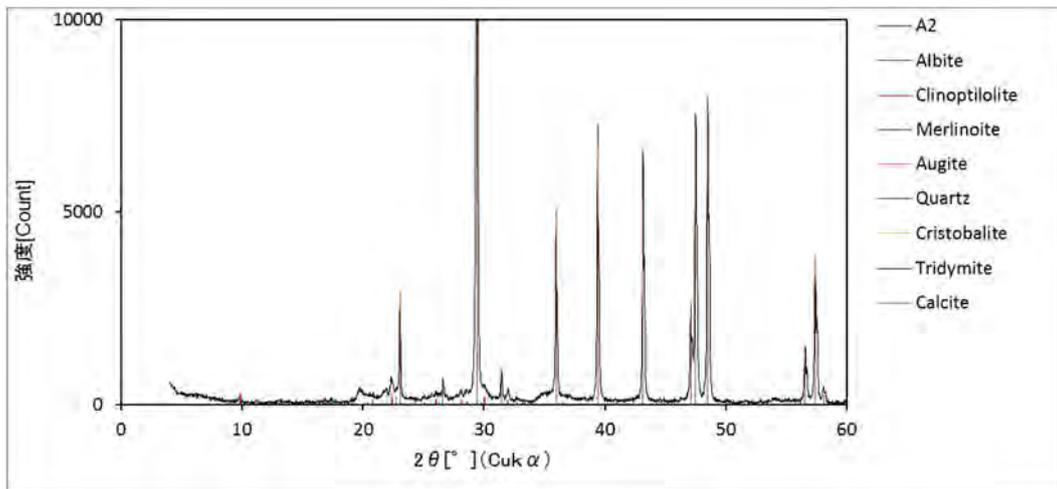


図 2.6.4-13 BBDH08-13-Rh-002 の粉末 XRD パターン

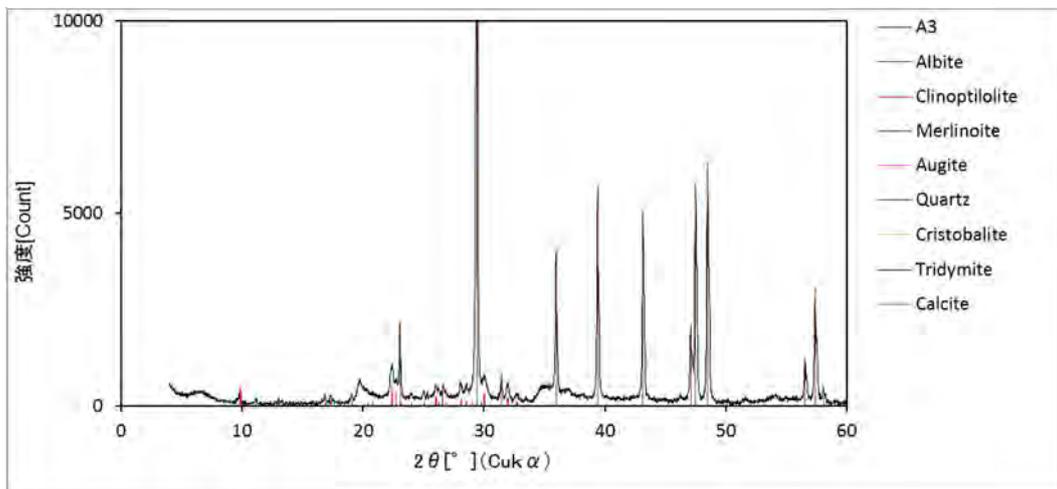


図 2.6.4-14 BBDH08-13-Rh-003 の粉末 XRD パターン

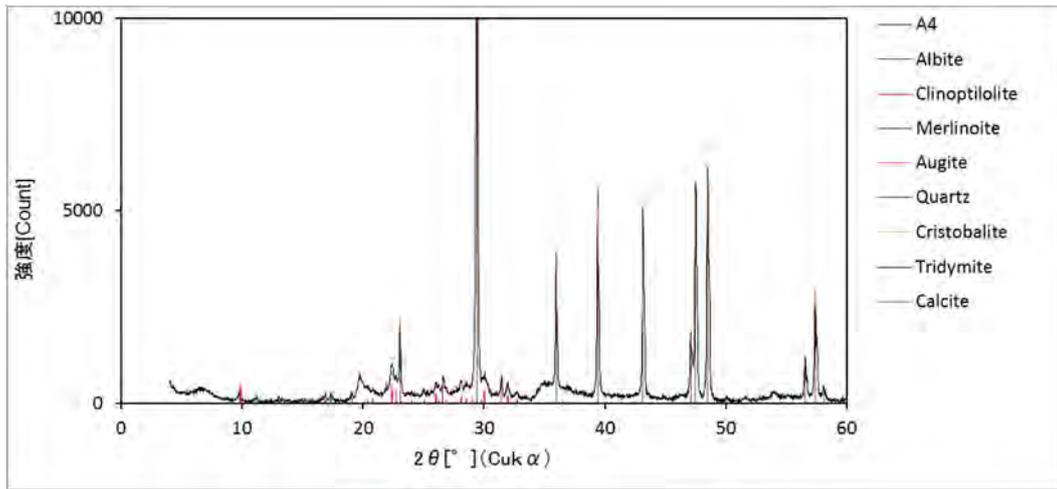


図 2.6.4-15 BBDH08-13-Rh-004 の粉末 XRD パターン

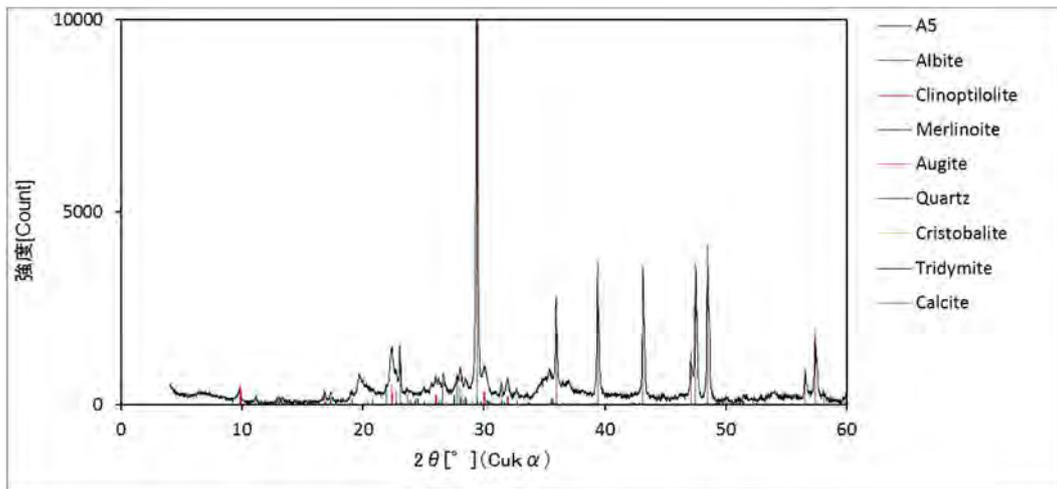


図 2.6.4-16 BBDH08-13-Rh-005 の粉末 XRD パターン

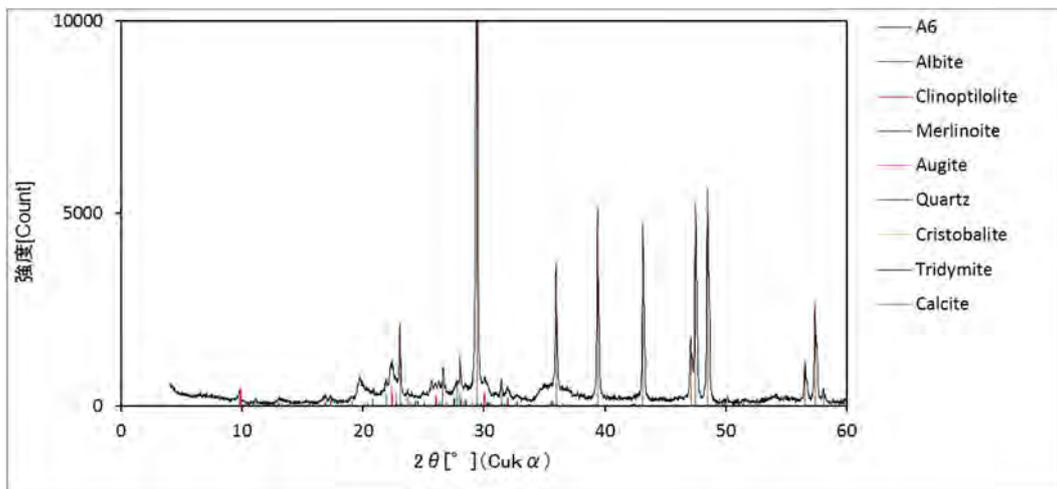


図 2.6.4-17 BBDH08-13-Rh-006 の粉末 XRD パターン

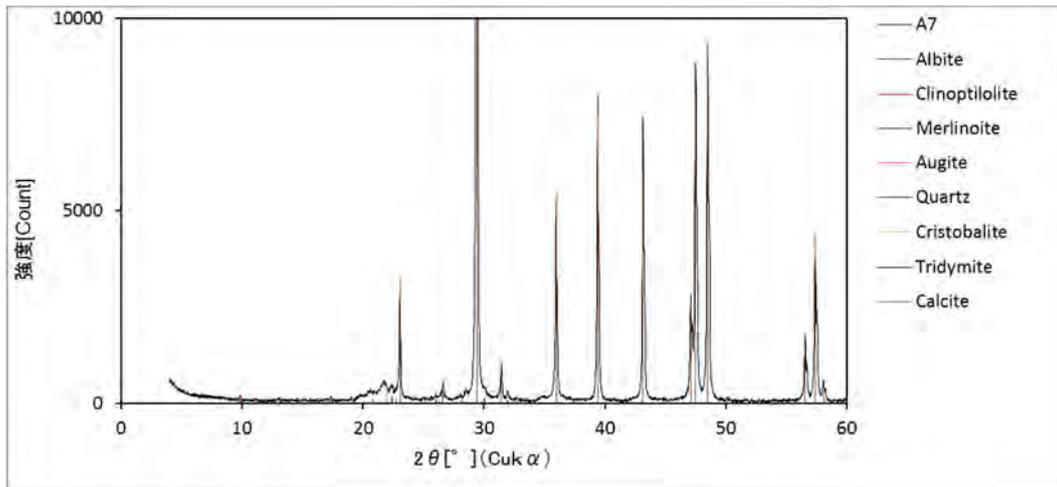


図 2.6.4-18 BBDH08-13-Rh-007 の粉末 XRD パターン

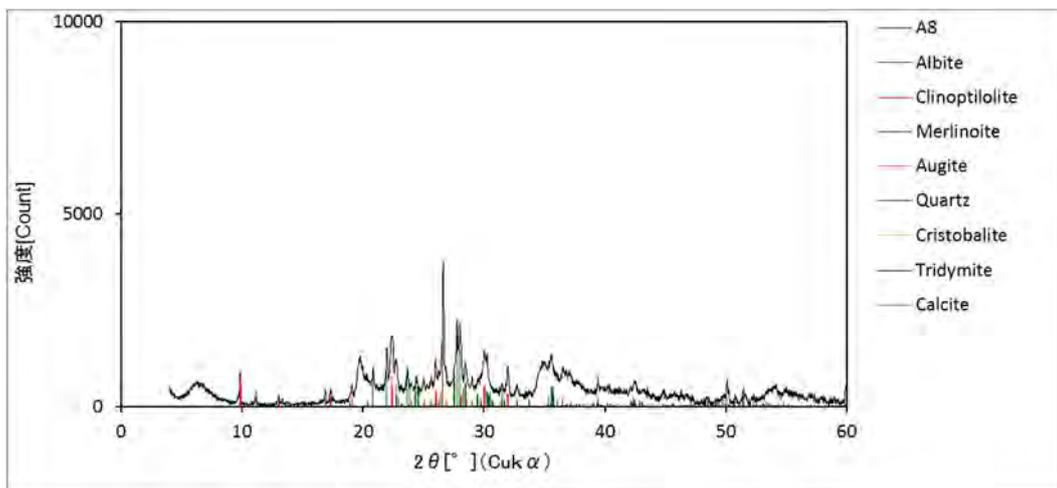


図 2.6.4-19 BBDH08-13-Rh-008 の粉末 XRD パターン

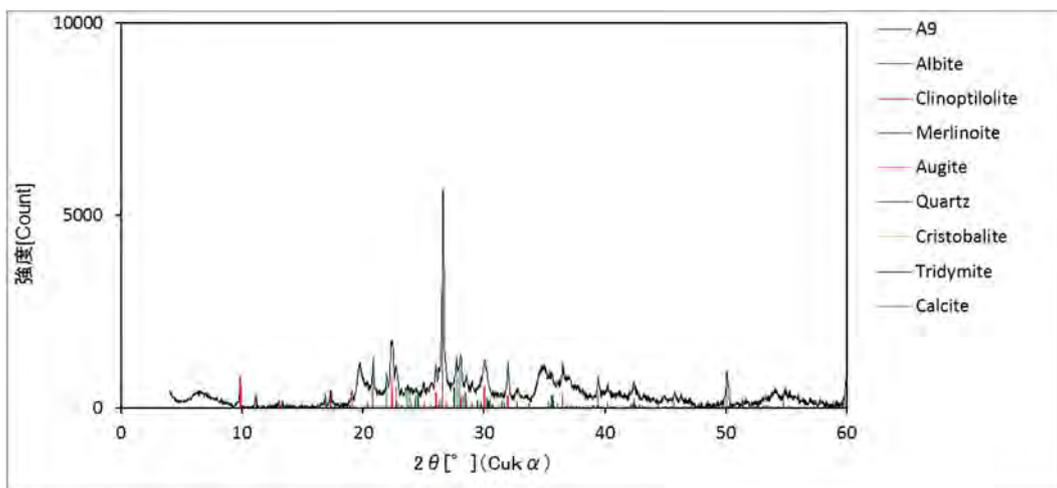


図 2.6.4-20 BBDH08-13-Rh-009 の粉末 XRD パターン

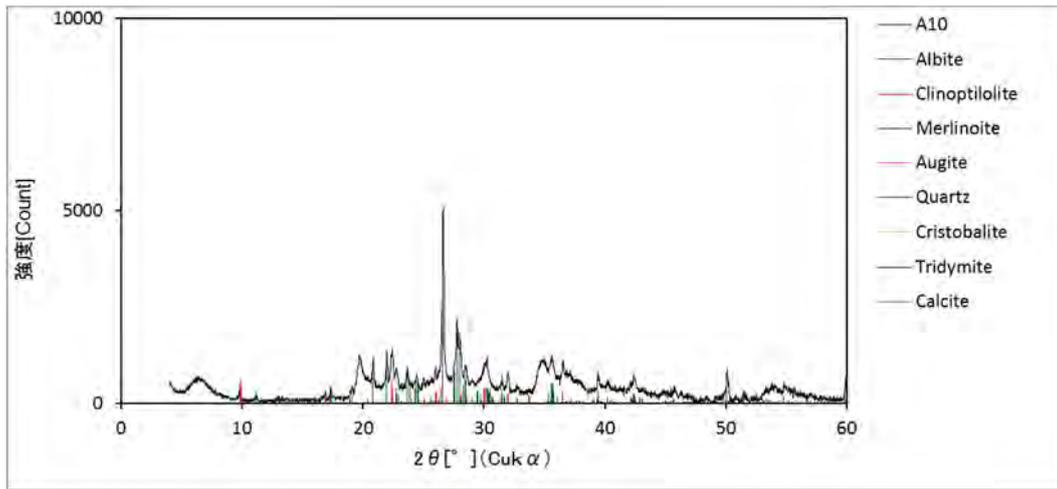


図 2.6.4-21 BBDH08-13-Rh-010 の粉末 XRD パターン

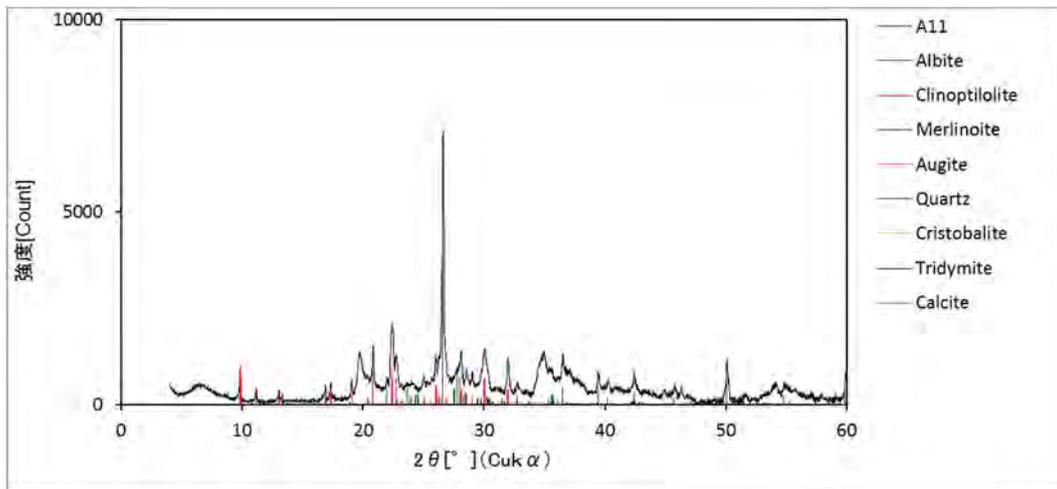


図 2.6.4-22 BBDH08-13-Rh-011 の粉末 XRD パターン

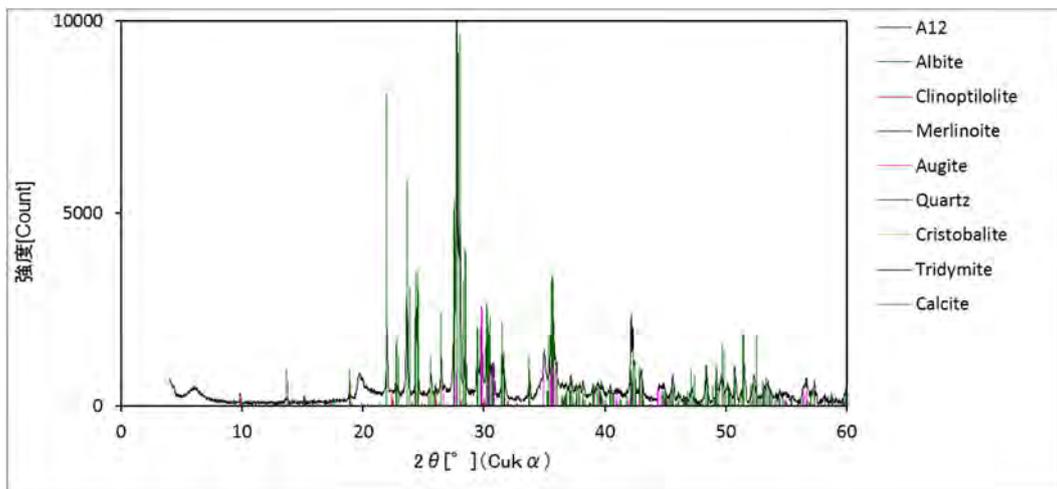


図 2.6.4-23 BBDH08-13-Rh-012 の粉末 XRD パターン

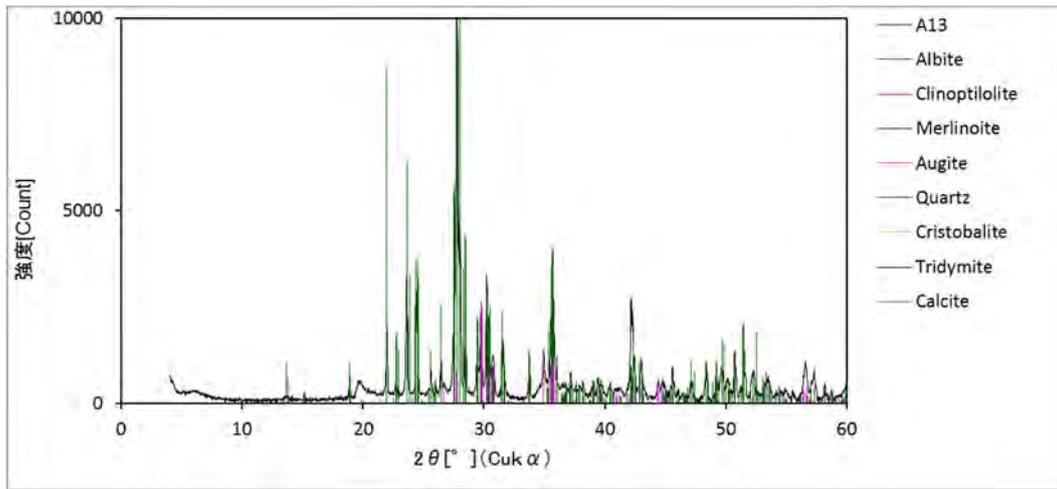


図 2.6.4-24 BBDH08-13-Rh-013 の粉末 XRD パターン

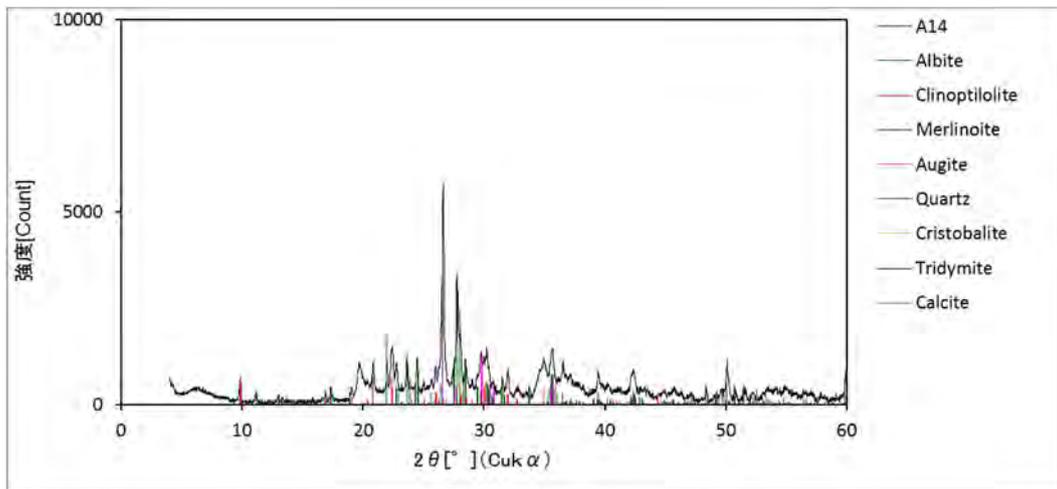


図 2.6.4-25 BBDH08-13-Rh-014 の粉末 XRD パターン

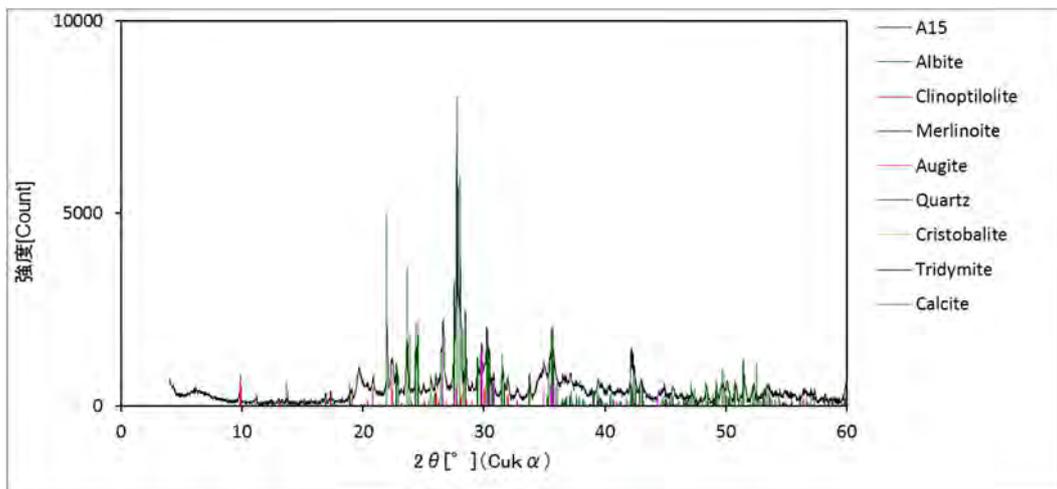


図 2.6.4-26 BBDH08-13-Rh-015 の粉末 XRD パターン

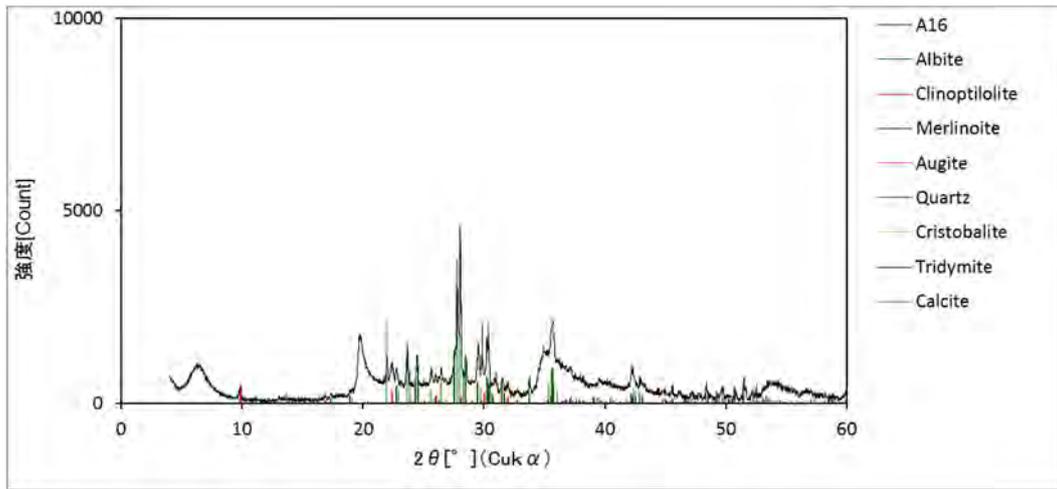


図 2.6.4-27 BBDH08-13-Rh-016 の粉末 XRD パターン

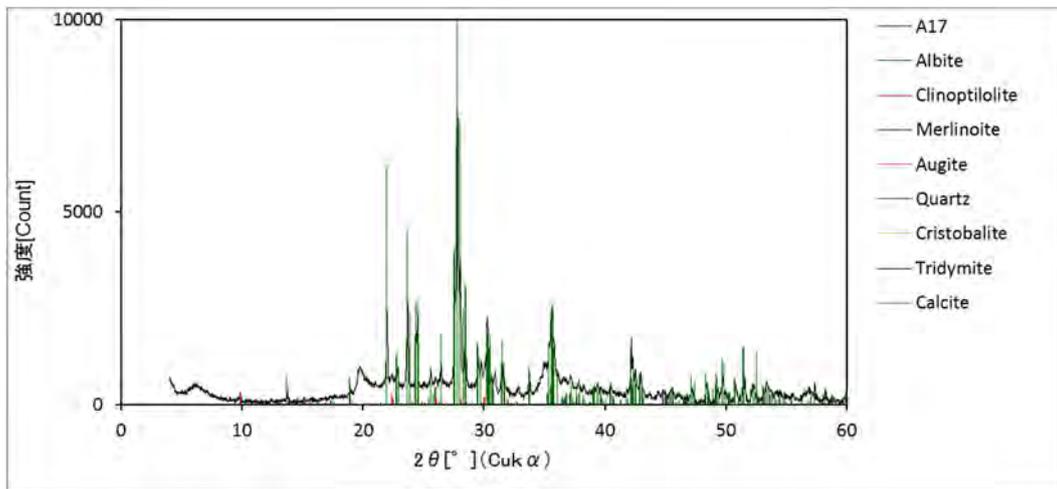


図 2.6.4-28 BBDH08-13-Rh-017 の粉末 XRD パターン

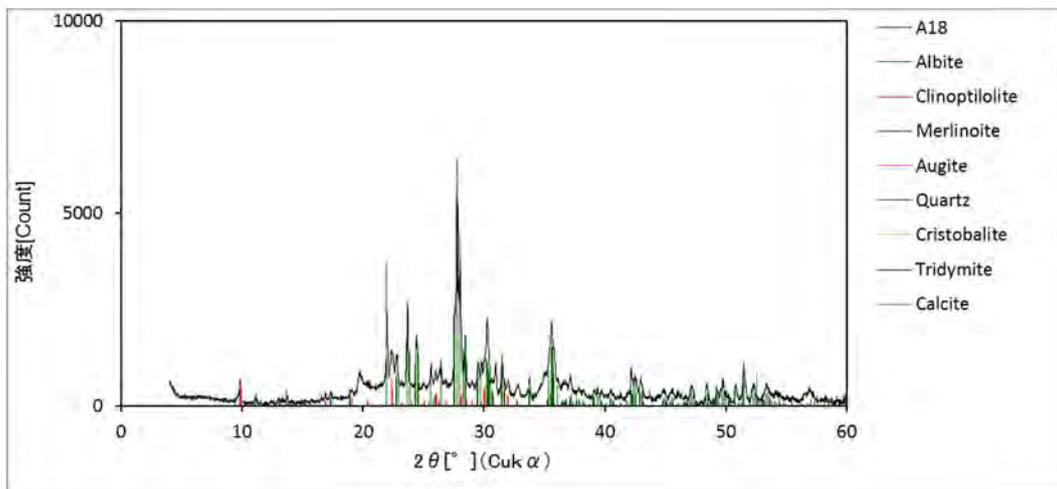


図 2.6.4-29 BBDH08-13-Rh-018 の粉末 XRD パターン

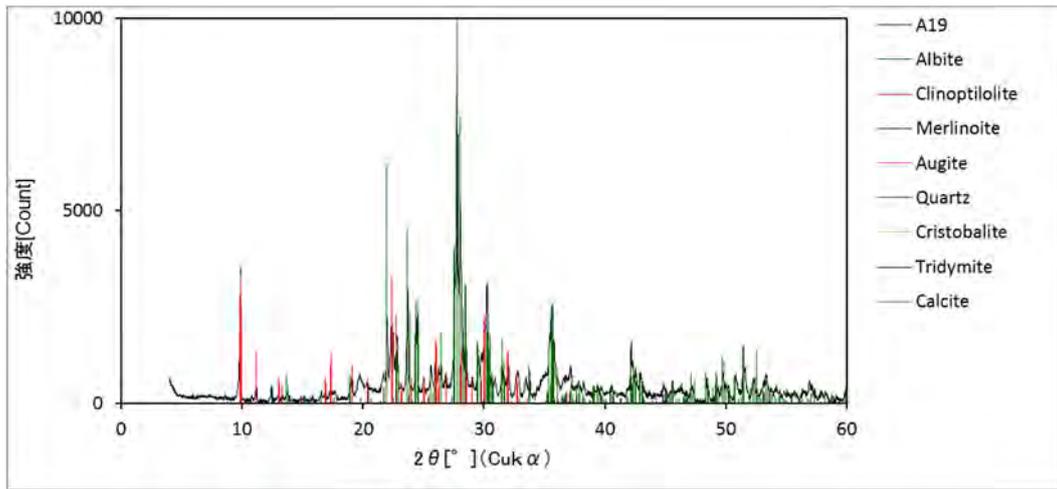


図 2.6.4-30 BBDH08-13-Rh-019 の粉末 XRD パターン

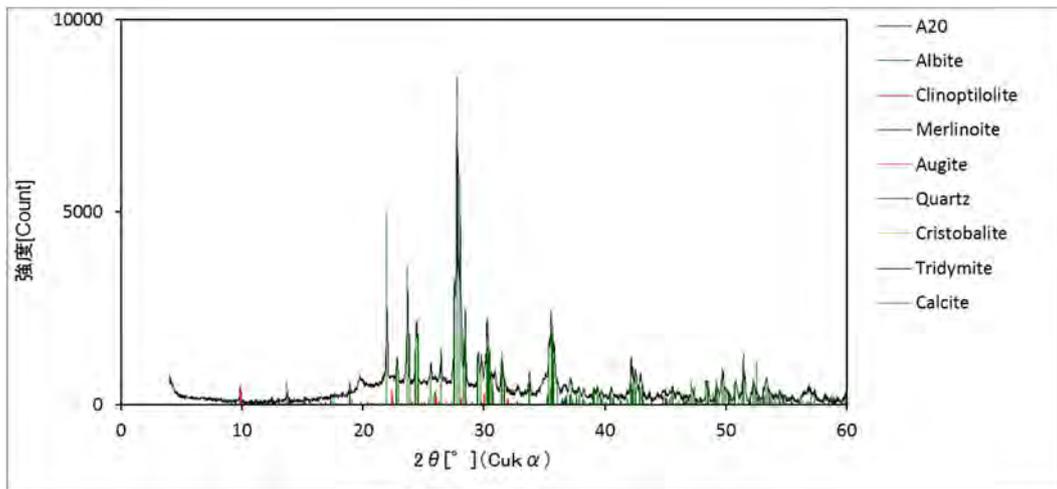


図 2.6.4-31 BBDH08-13-Rh-020 の粉末 XRD パターン

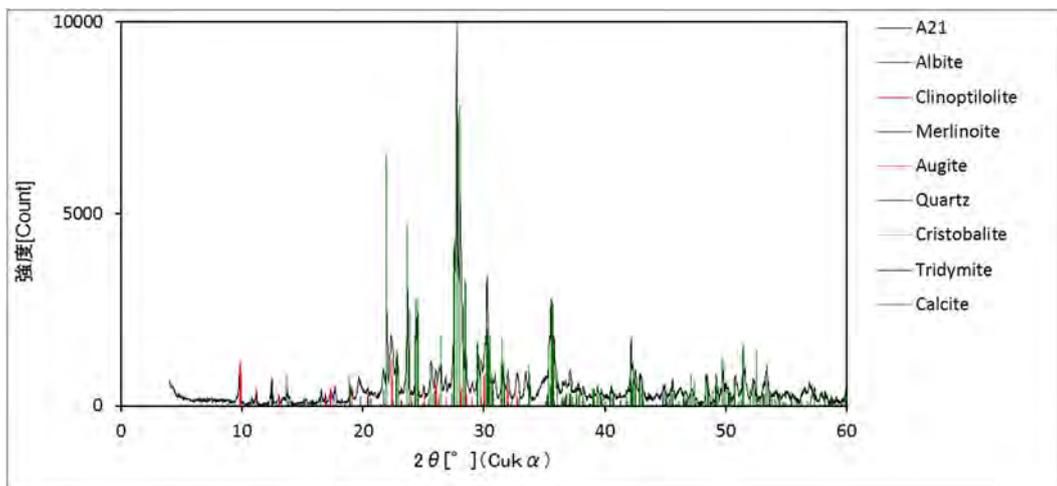


図 2.6.4-32 BBDH08-13-Rh-021 の粉末 XRD パターン

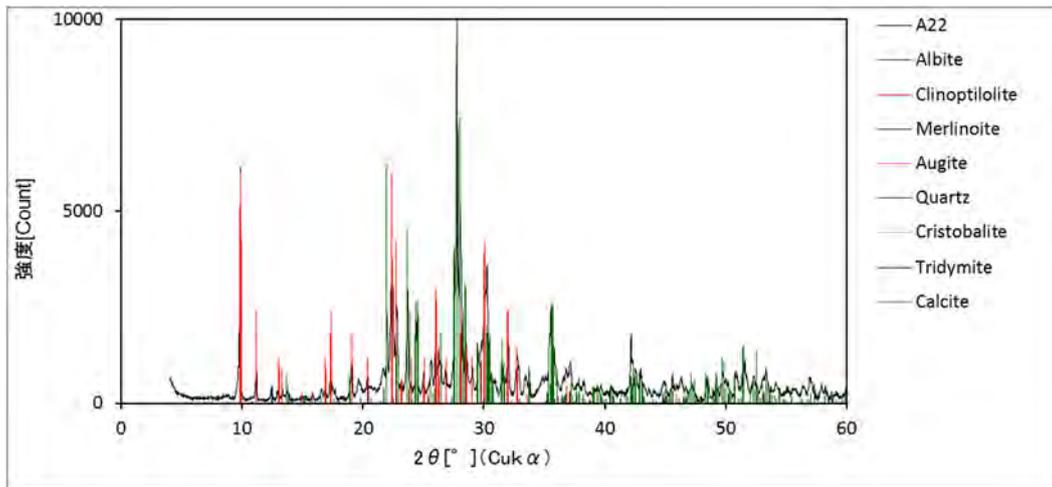


図 2.6.4-33 BBDH08-13-Rh-022 の粉末 XRD パターン

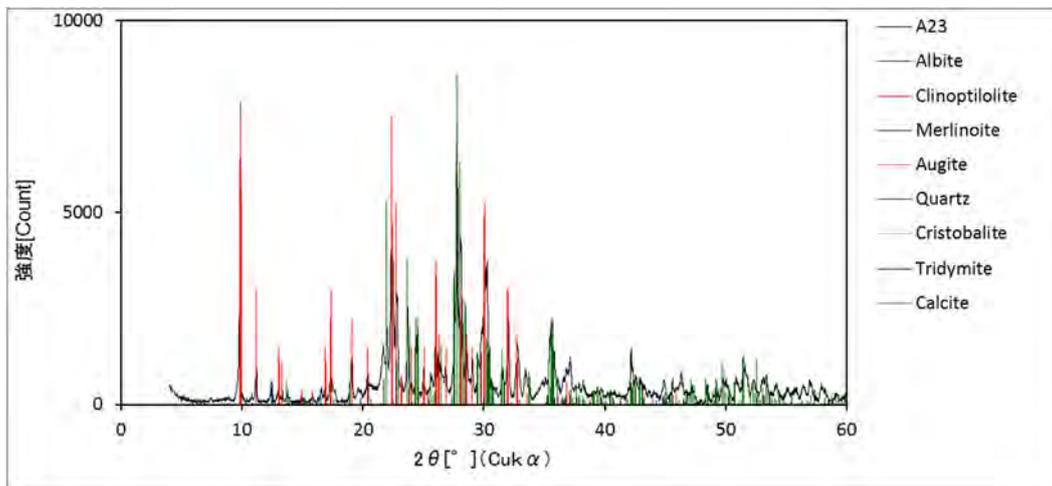


図 2.6.4-34 BBDH08-13-Rh-023 の粉末 XRD パターン

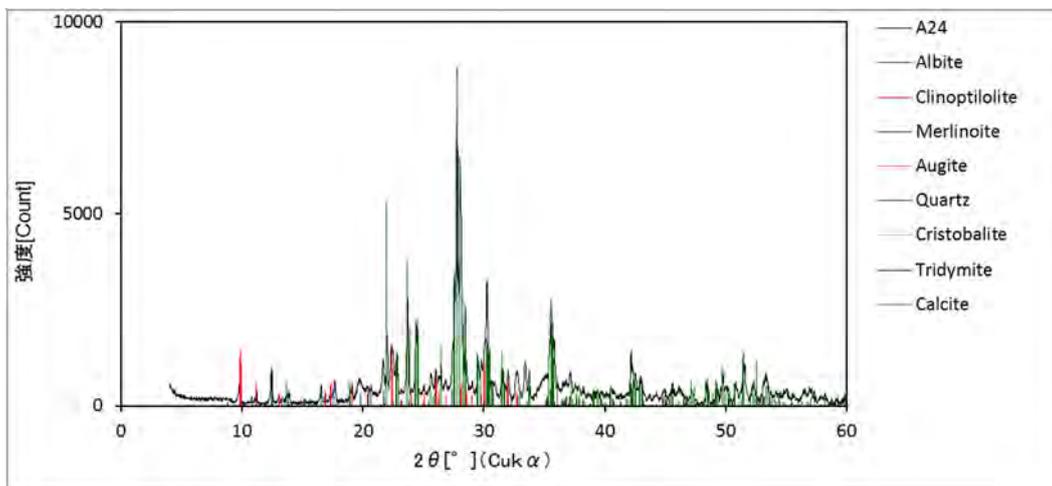


図 2.6.4-35 BBDH08-13-Rh-024 の粉末 XRD パターン

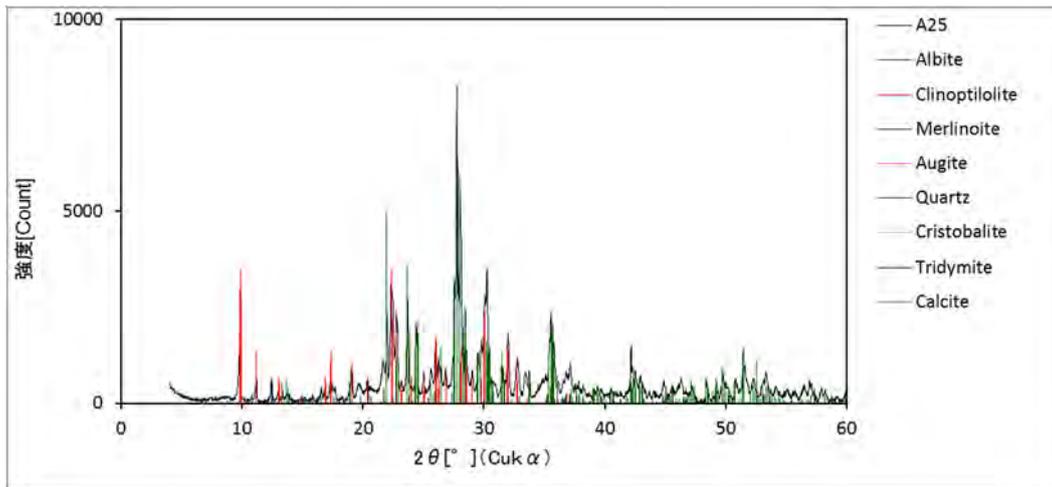


図 2.6.4-36 BBDH08-13-Rh-025 の粉末 XRD パターン

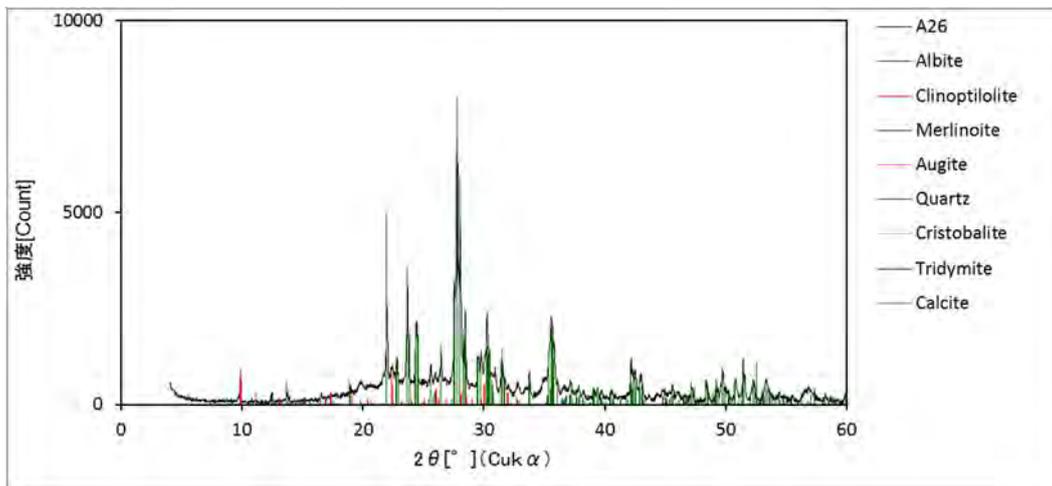


図 2.6.4-37 BBDH08-13-Rh-026 の粉末 XRD パターン

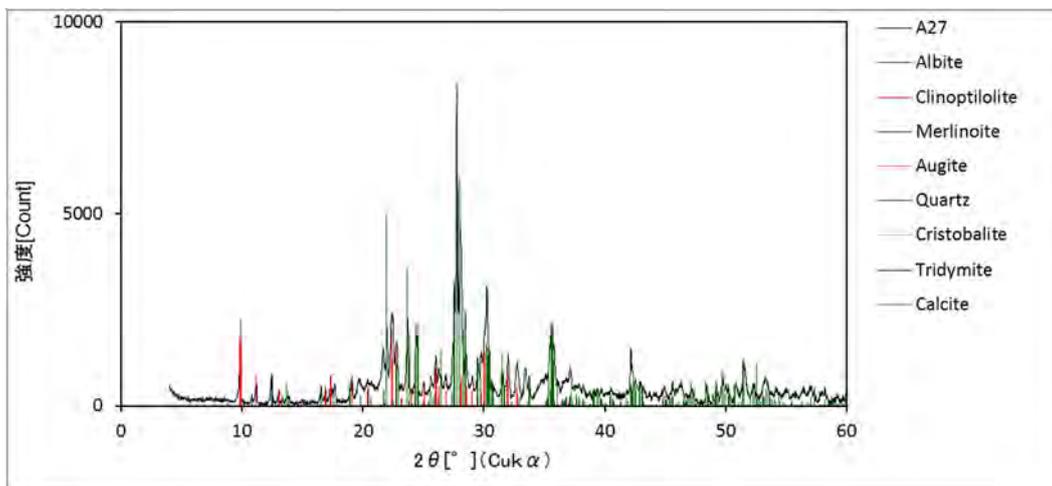


図 2.6.4-38 BBDH08-13-Rh-027 の粉末 XRD パターン

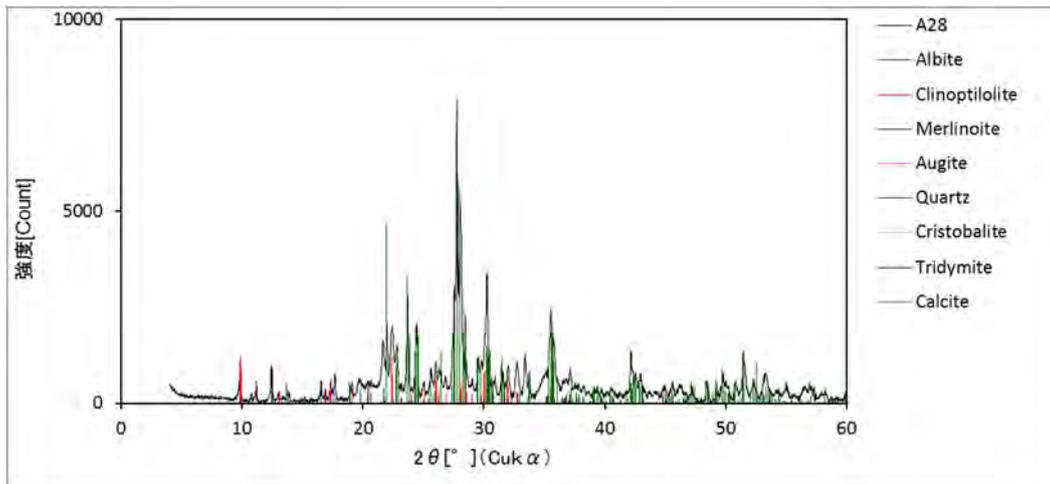


図 2.6.4-39 BBDH08-13-Rh-028 の粉末 XRD パターン

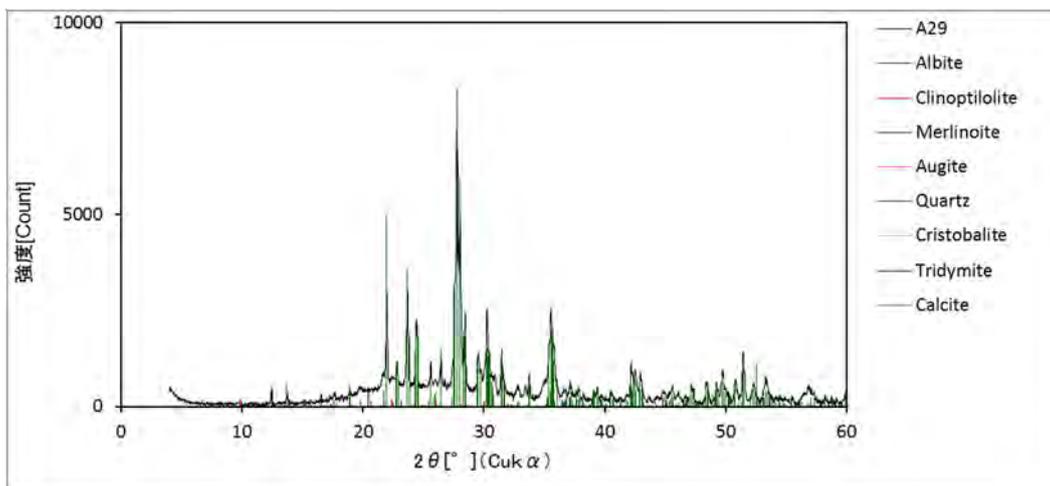


図 2.6.4-40 BBDH08-13-Rh-029 の粉末 XRD パターン

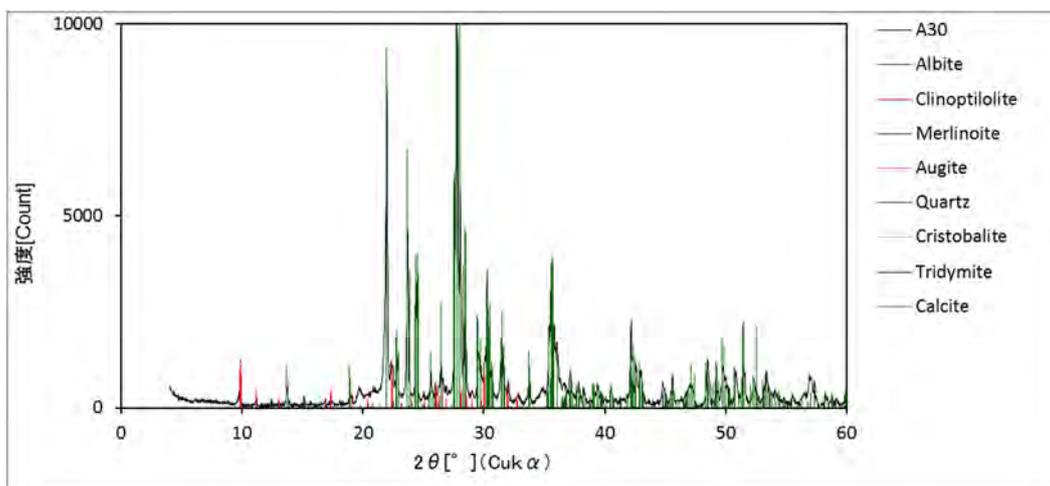


図 2.6.4-41 BBDH08-13-Rh-030 の粉末 XRD パターン

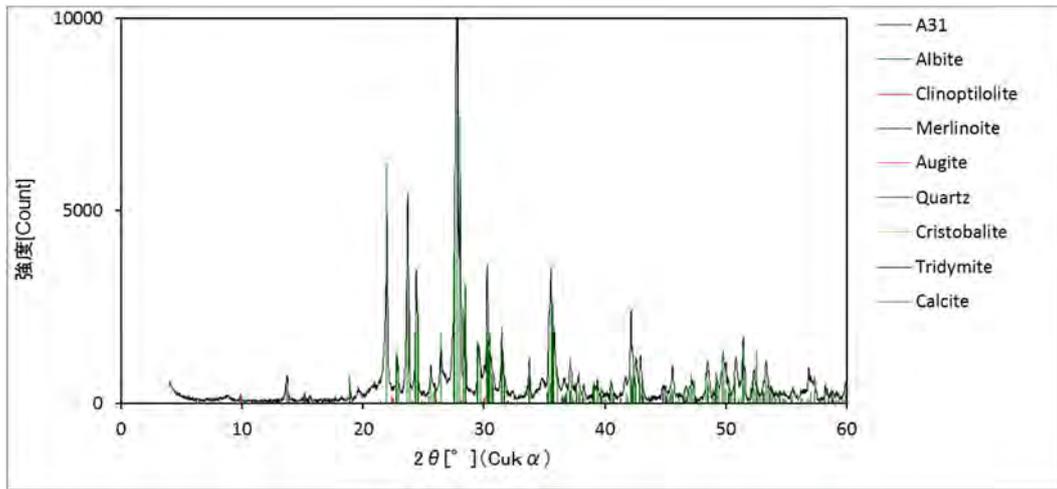


図 2.6.4-42 BBDH08-13-Rh-031 の粉末 XRD パターン

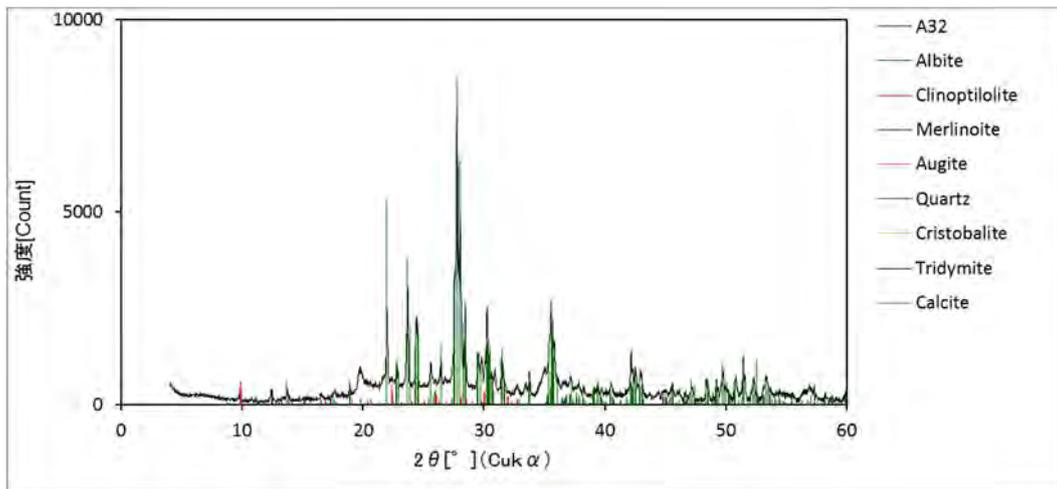


図 2.6.4-43 BBDH08-13-Rh-032 の粉末 XRD パターン

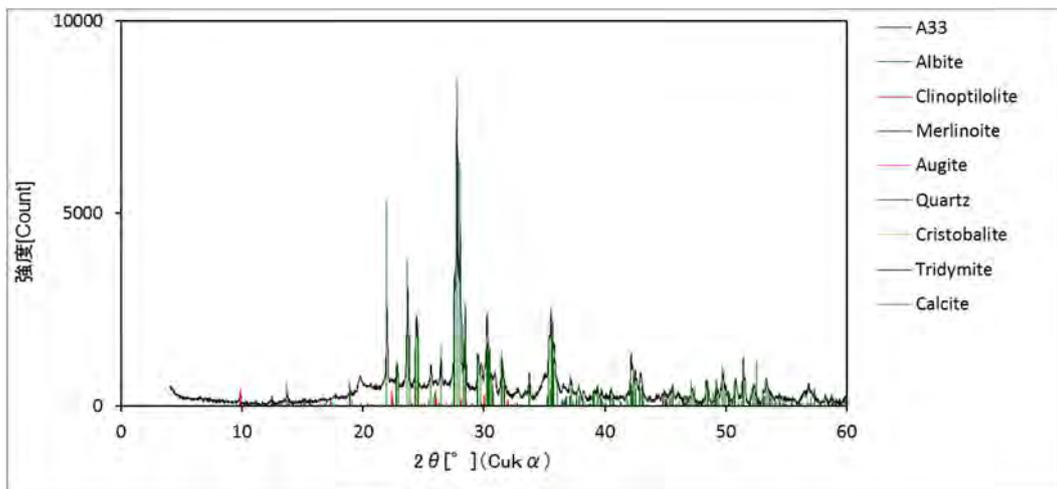


図 2.6.4-44 BBDH08-13-Rh-033 の粉末 XRD パターン

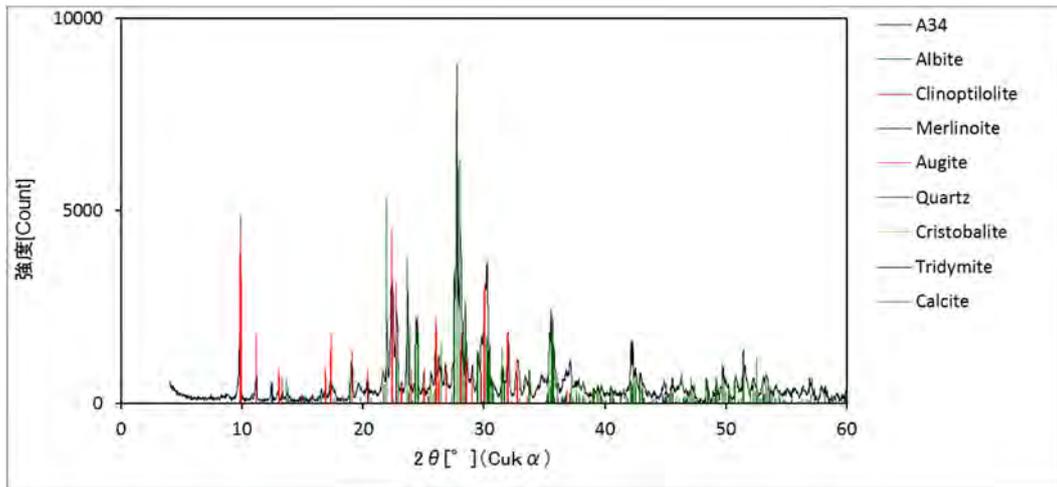


図 2.6.4-45 BBDH08-13-Rh-034 の粉末 XRD パターン

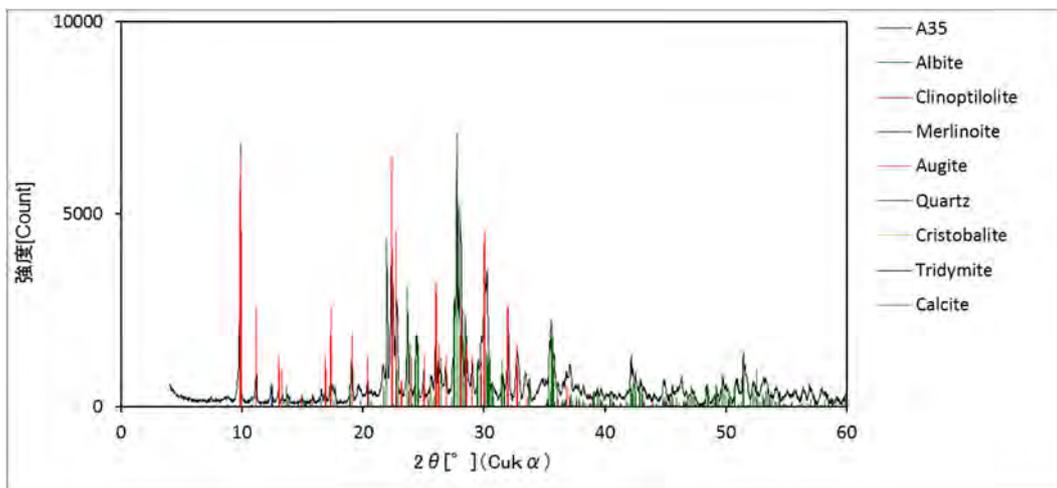


図 2.6.4-46 BBDH08-13-Rh-035 の粉末 XRD パターン

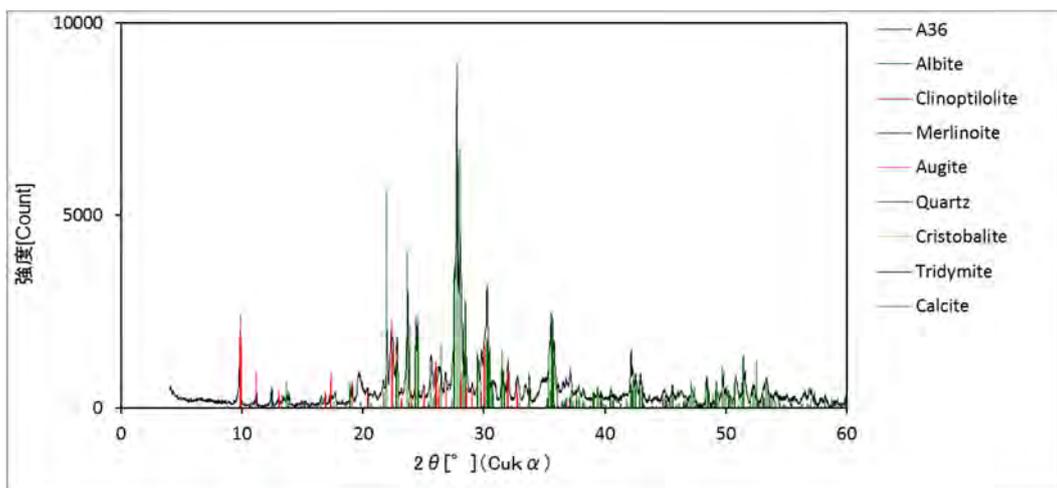


図 2.6.4-47 BBDH08-13-Rh-036 の粉末 XRD パターン

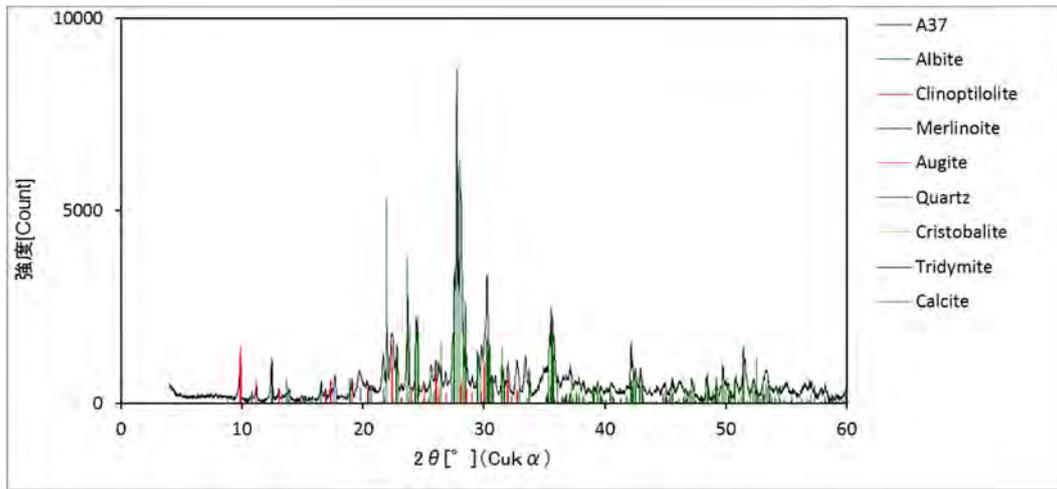


図 2.6.4-48 BBDH08-13-Rh-037 の粉末 XRD パターン

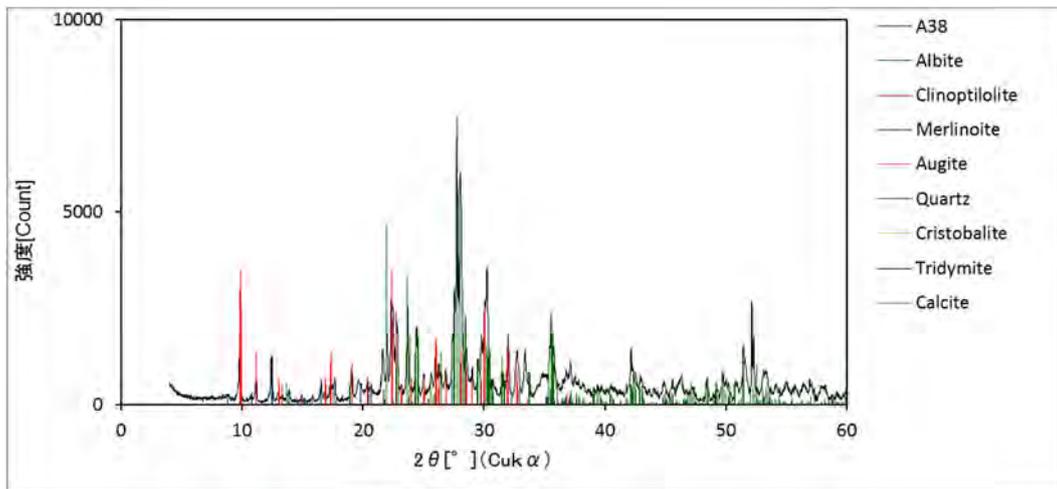


図 2.6.4-49 BBDH08-13-Rh-038 の粉末 XRD パターン

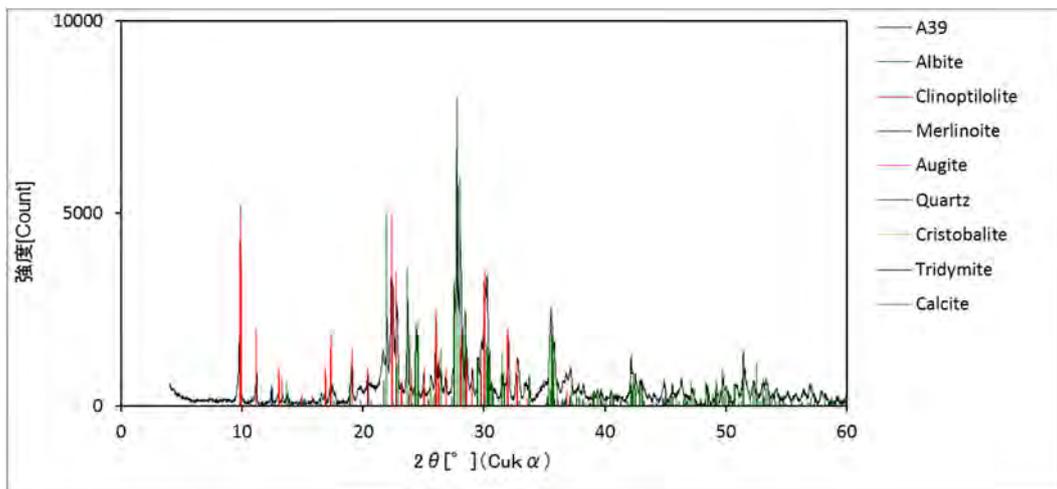


図 2.6.4-50 BBDH08-13-Rh-039 の粉末 XRD パターン

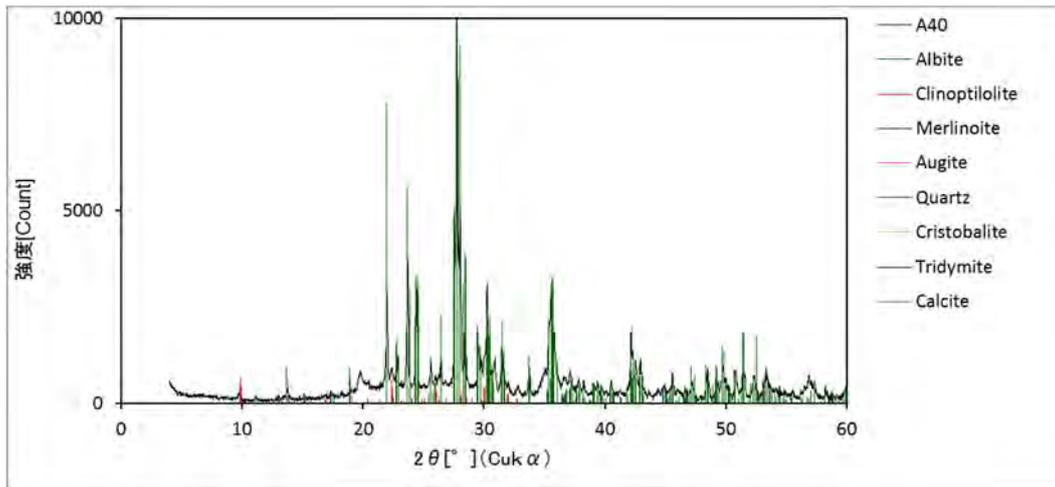


図 2.6.4-51 BBDH08-13-Rh-040 の粉末 XRD パターン

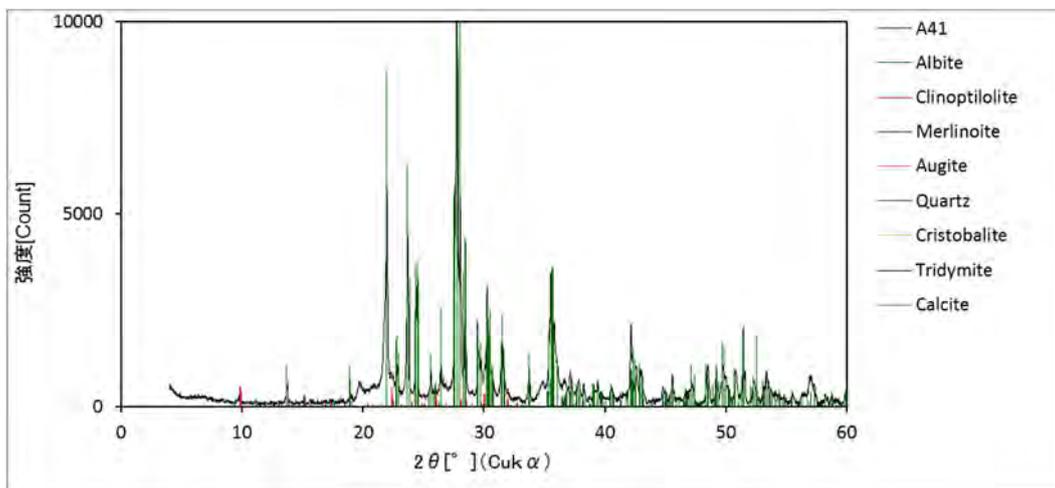


図 2.6.4-52 BBDH08-13-Rh-041 の粉末 XRD パターン

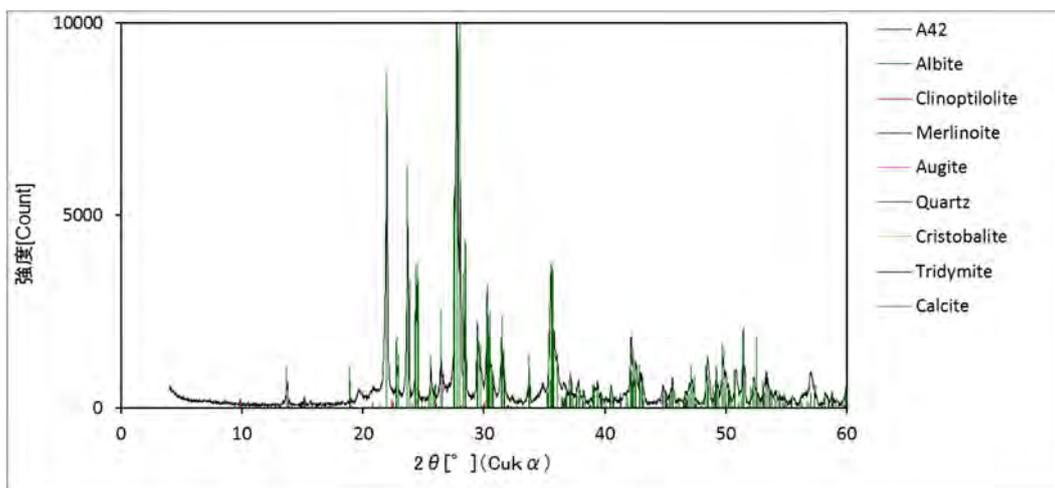


図 2.6.4-53 BBDH08-13-Rh-042 の粉末 XRD パターン

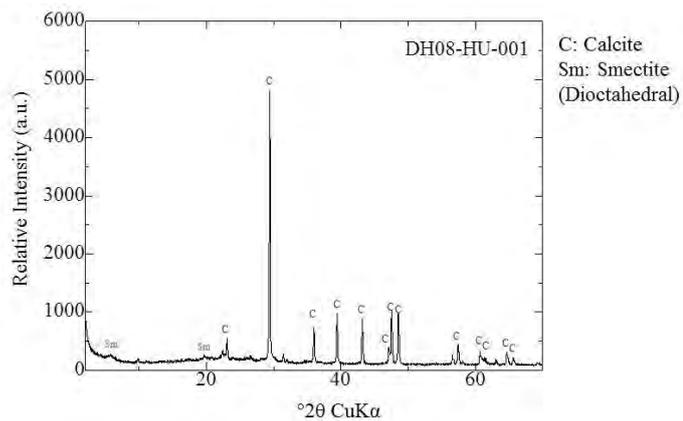


図 2.6.4-54 BBDH08-13-Hu-001 の粉末 XRD パターン

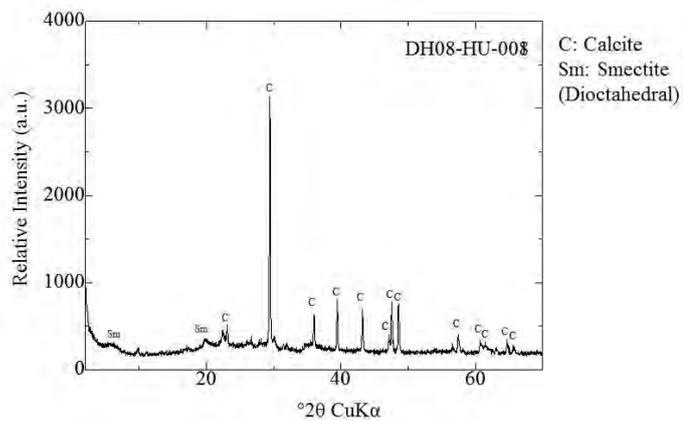


図 2.6.4-55 BBDH08-13-Hu-008 の粉末 XRD パターン

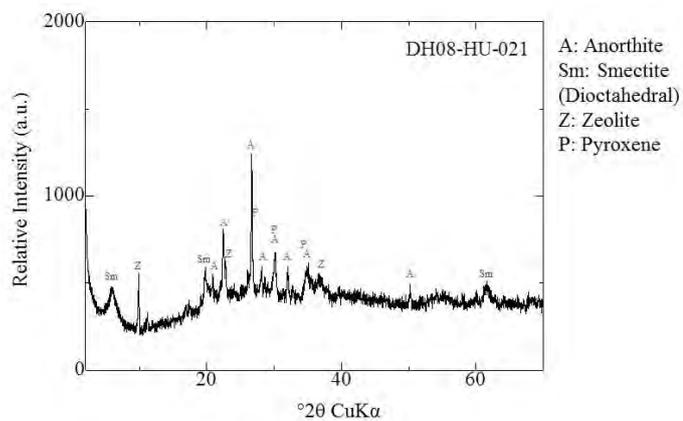


図 2.6.4-56 BBDH08-13-Hu-021 の粉末 XRD パターン

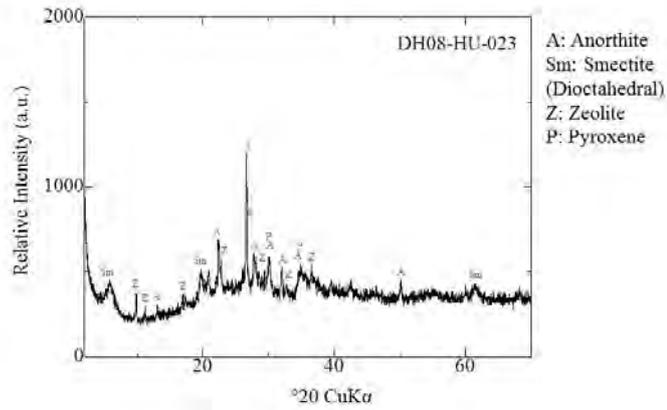


図 2.6.4-57 BBDH08-13-Hu-023 の粉末 XRD パターン

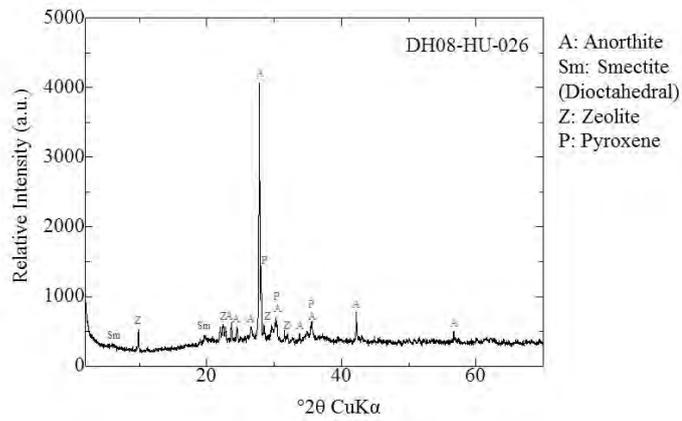


図 2.6.4-58 BBDH08-13-Hu-026 の粉末 XRD パターン

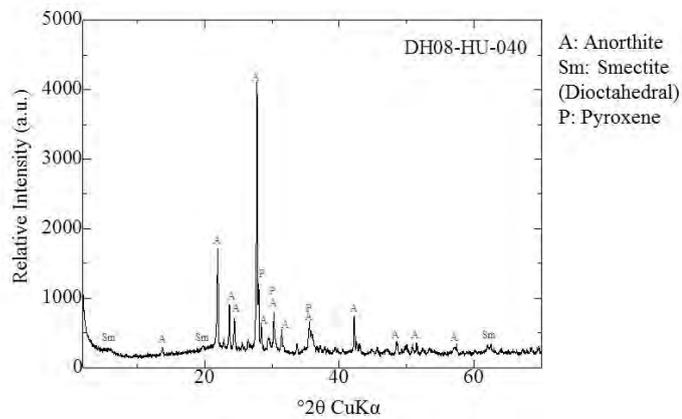


図 2.6.4-59 BBDH08-13-Hu-040 の粉末 XRD パターン

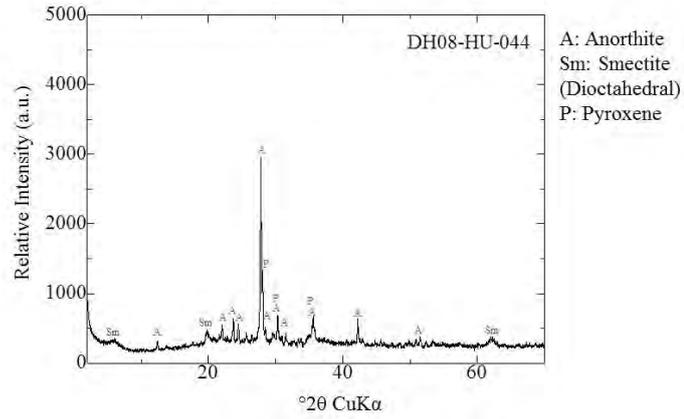


図 2.6.4-60 BBDH08-13-Hu-044 の粉末 XRD パターン

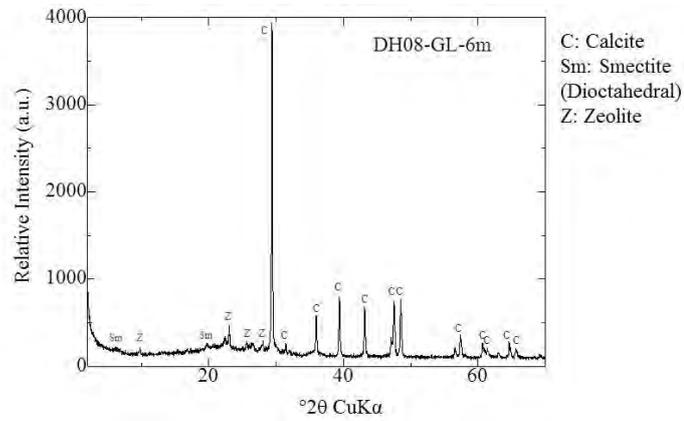


図 2.6.4-61 コアカッティングス DH08-GL-6m の粉末 XRD パターン

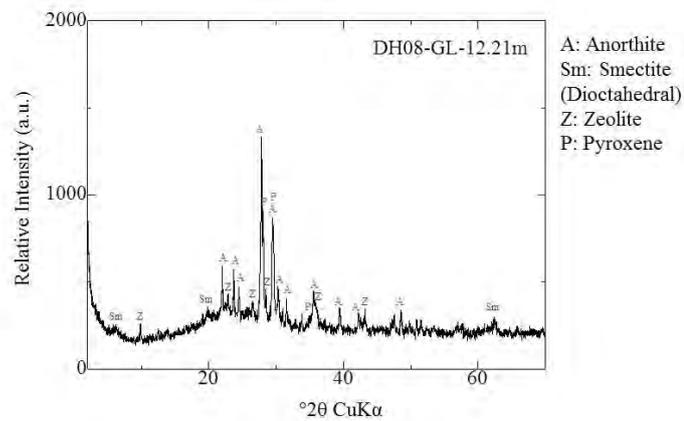


図 2.6.4-62 コアカッティングス DH08-GL-12.21m の粉末 XRD パターン

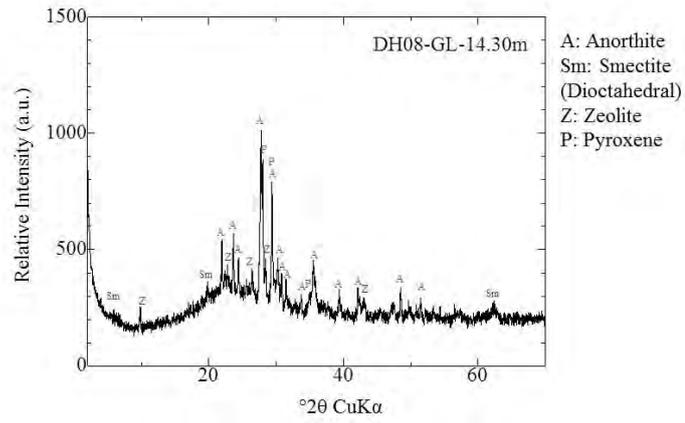


図 2.6.4-63 コアカッティングス DH08-GL-12.21m の粉末 XRD パターン

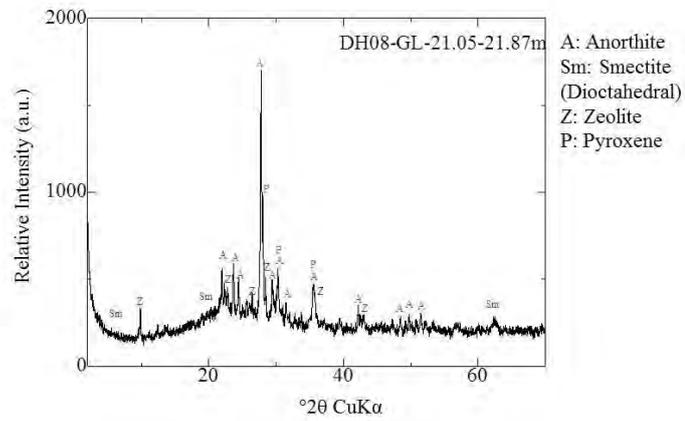


図 2.6.4-64 コアカッティングス DH08-GL-21.05-21.87m の粉末 XRD パターン

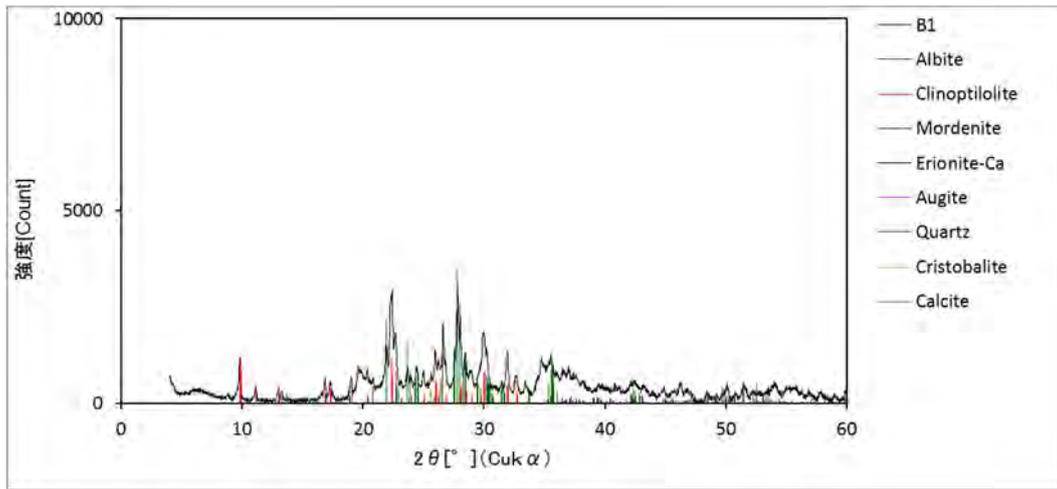


図 2.6.4-65 BBDH09-13-Rh-001 の粉末 XRD パターン

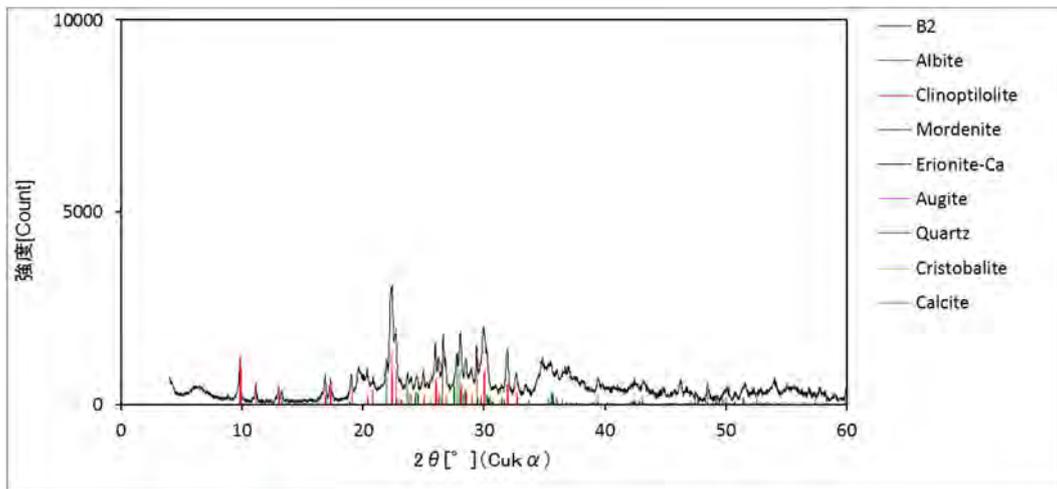


図 2.6.4-66 BBDH09-13-Rh-002 の粉末 XRD パターン

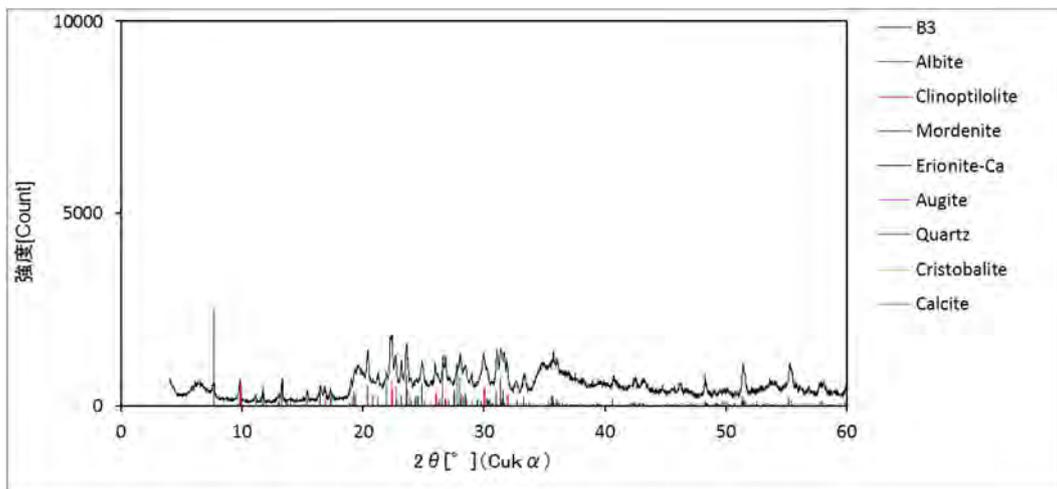


図 2.6.4-67 BBDH09-13-Rh-003 の粉末 XRD パターン

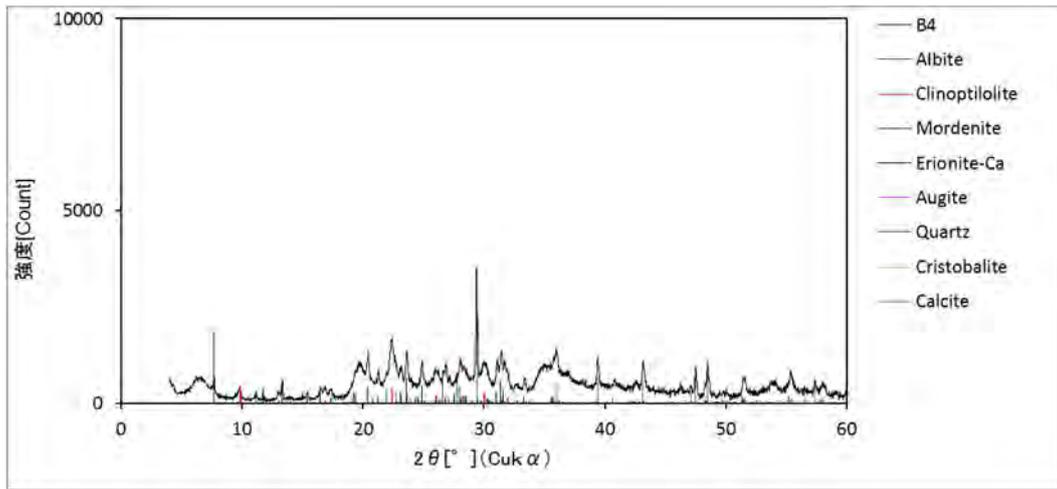


図 2.6.4-68 BBDH09-13-Rh-004 の粉末 XRD パターン

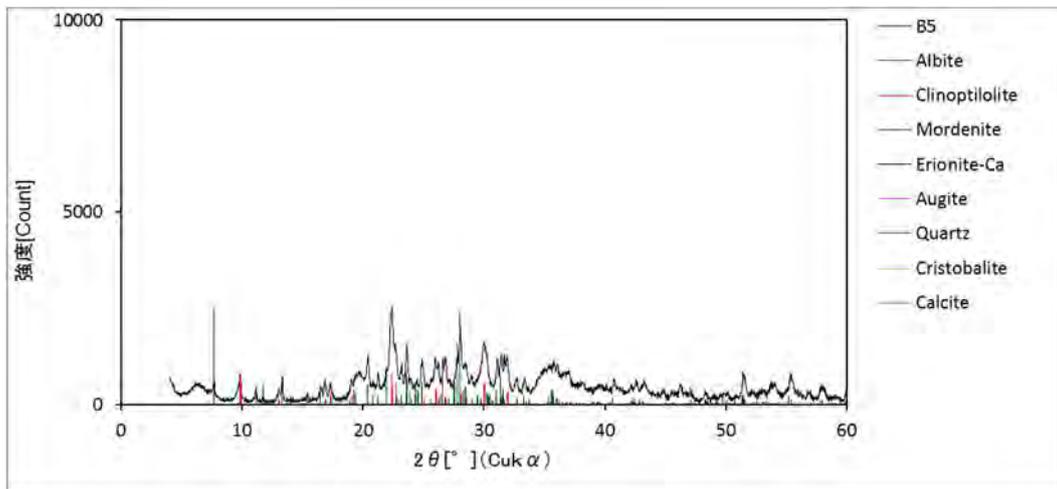


図 2.6.4-69 BBDH09-13-Rh-005 の粉末 XRD パターン

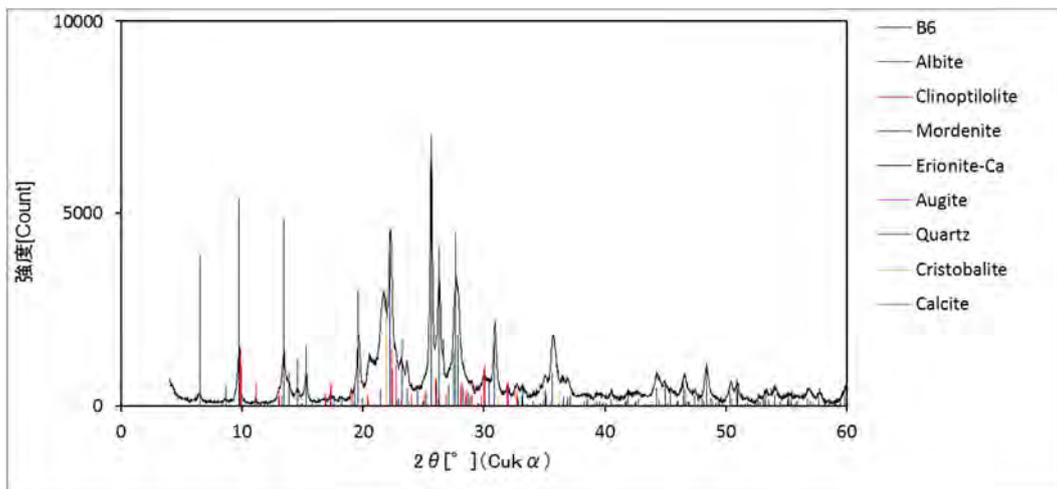


図 2.6.4-70 BBDH09-13-Rh-006 の粉末 XRD パターン

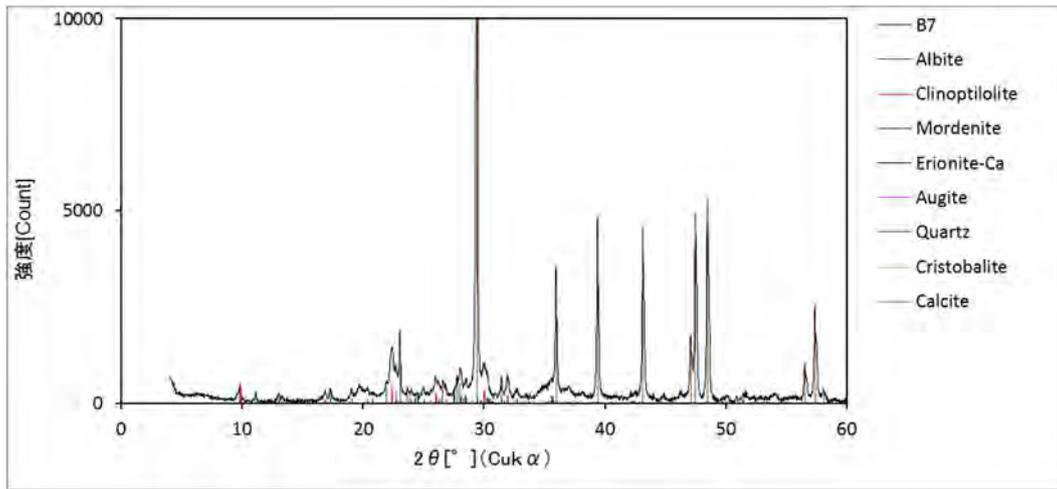


図 2.6.4-71 BBDH09-13-Rh-007 の粉末 XRD パターン

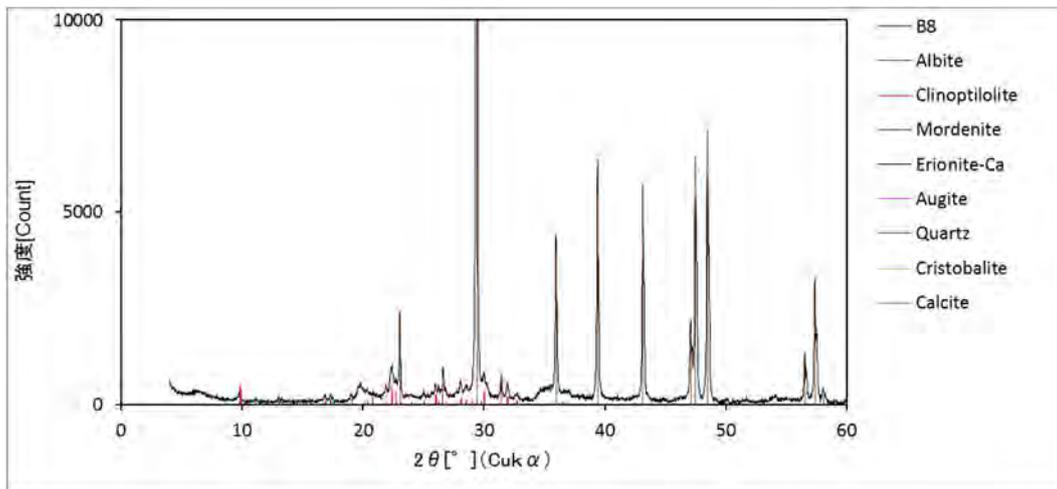


図 2.6.4-72 BBDH09-13-Rh-008 の粉末 XRD パターン

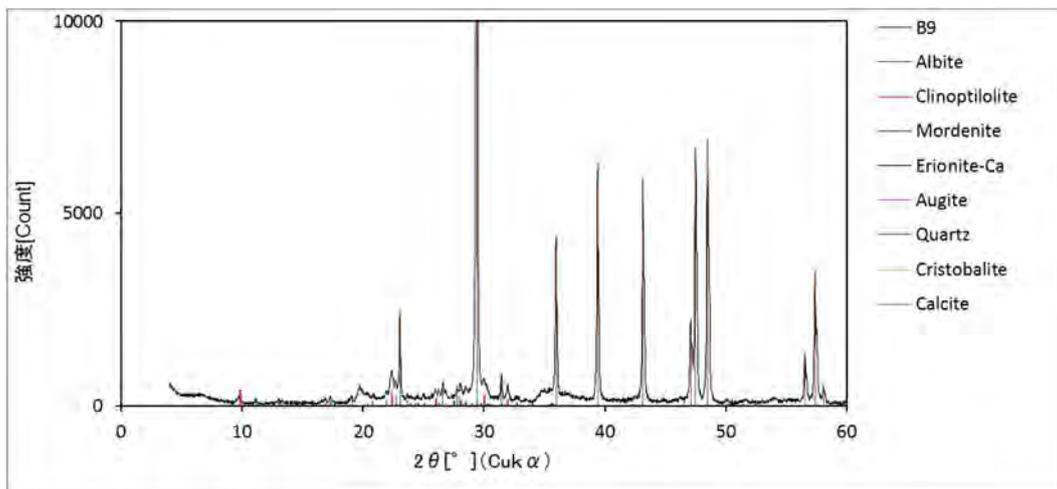


図 2.6.4-73 BBDH09-13-Rh-009 の粉末 XRD パターン

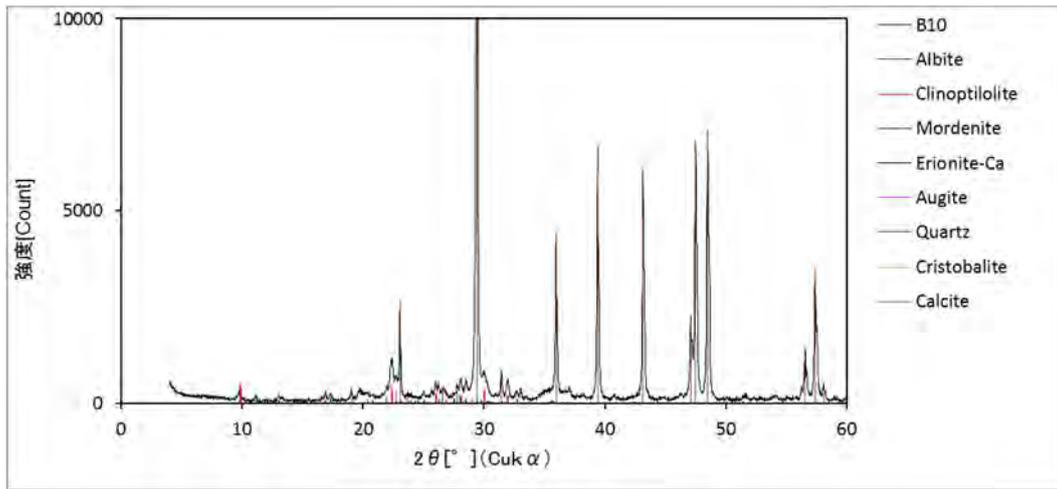


図 2.6.4-74 BBDH09-13-Rh-010 の粉末 XRD パターン

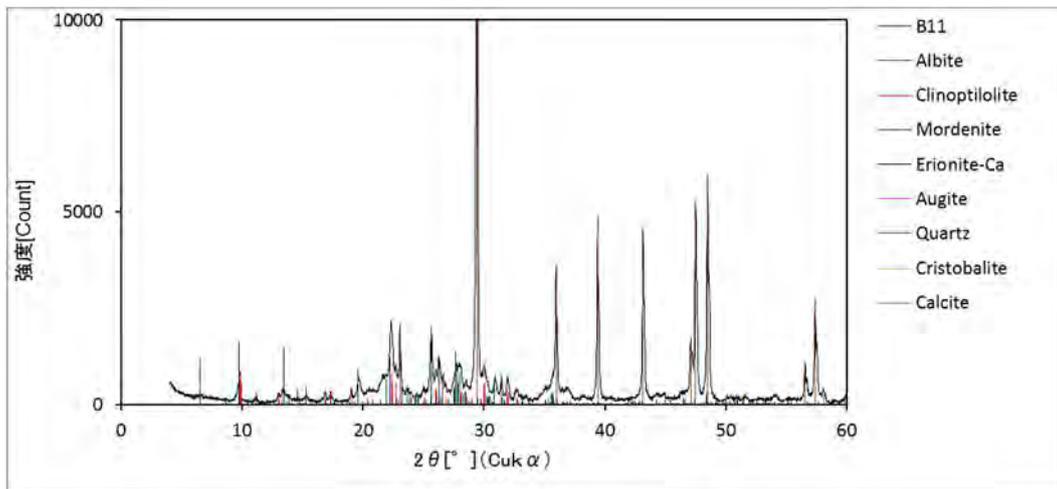


図 2.6.4-75 BBDH09-13-Rh-011 の粉末 XRD パターン

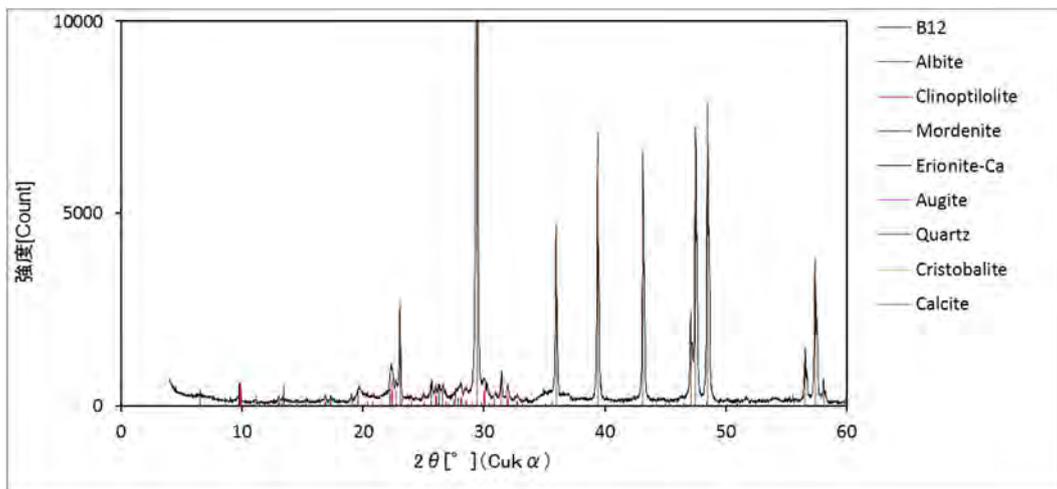


図 2.6.4-76 BBDH09-13-Rh-012 の粉末 XRD パターン

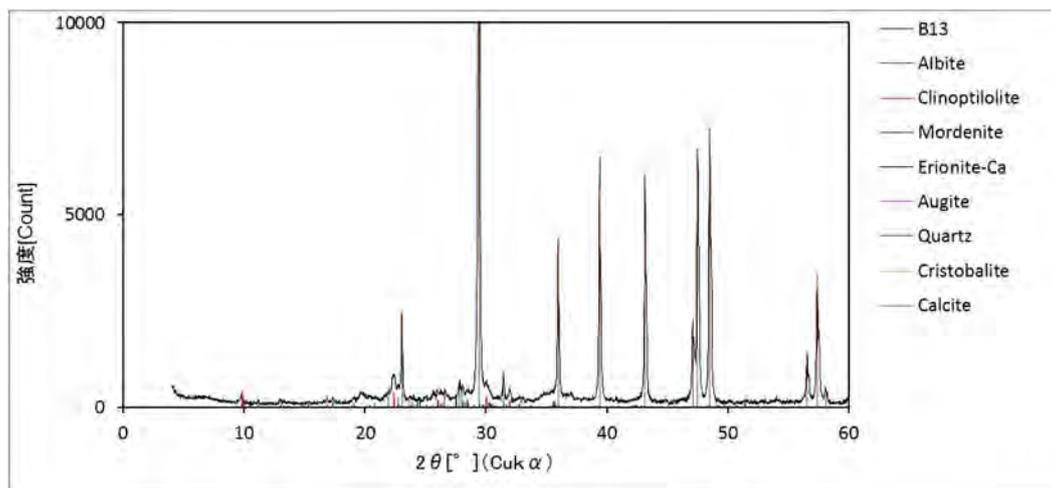


図 2.6.4-77 BBDH09-13-Rh-013 の粉末 XRD パターン

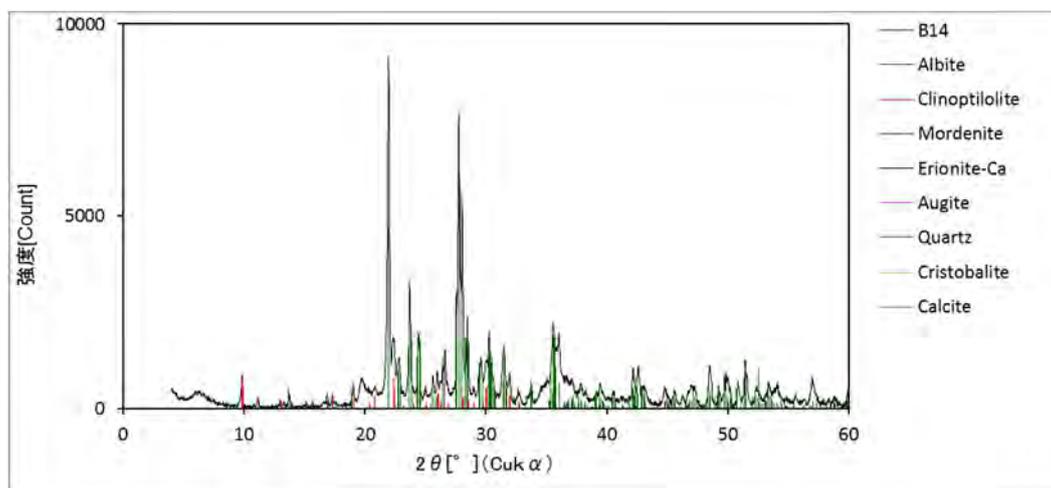


図 2.6.4-78 BBDH09-13-Rh-014 の粉末 XRD パターン

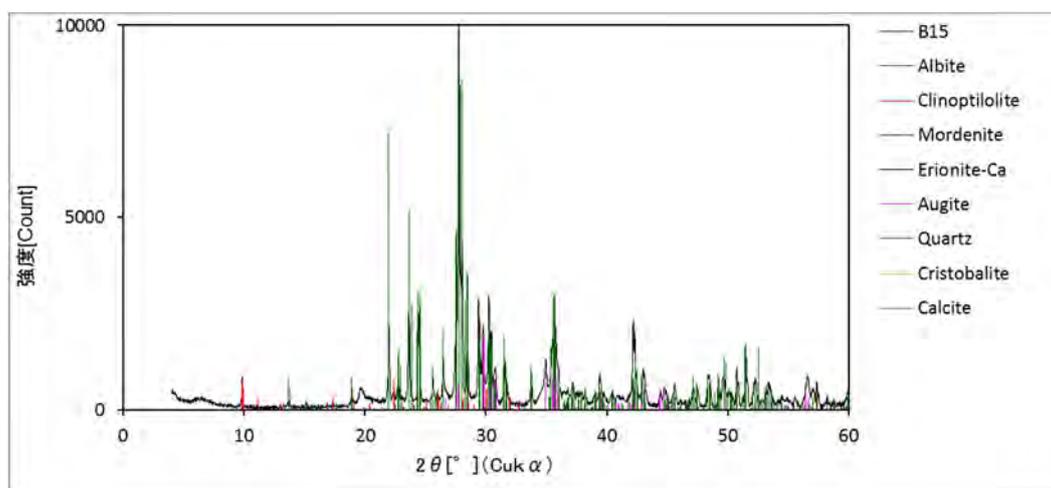


図 2.6.4-79 BBDH09-13-Rh-015 の粉末 XRD パターン

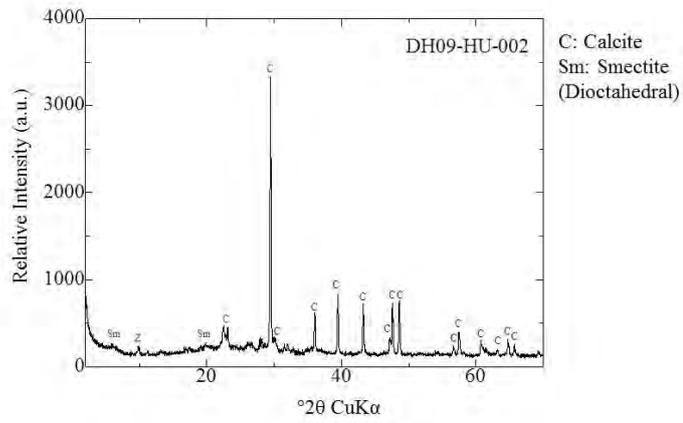


図 2.6.4-80 BBDH09-13-Hu-002 の粉末 XRD パターン

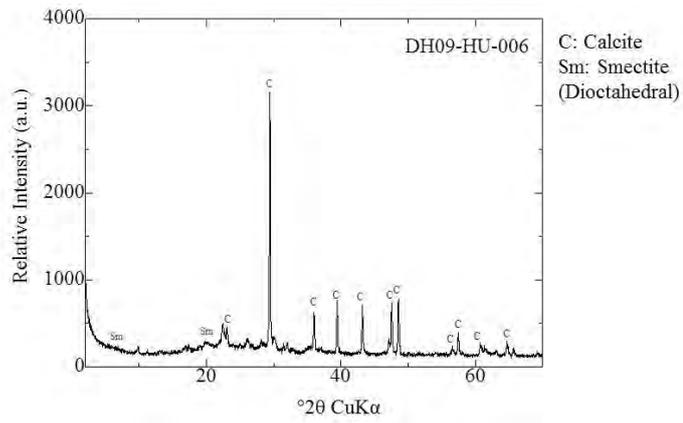


図 2.6.4-81 BBDH09-13-Hu-006 の粉末 XRD パターン

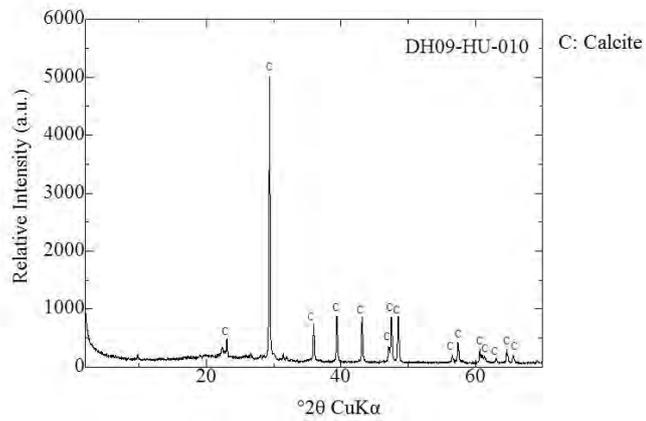


図 2.6.4-82 BBDH09-13-Hu-010 の粉末 XRD パターン

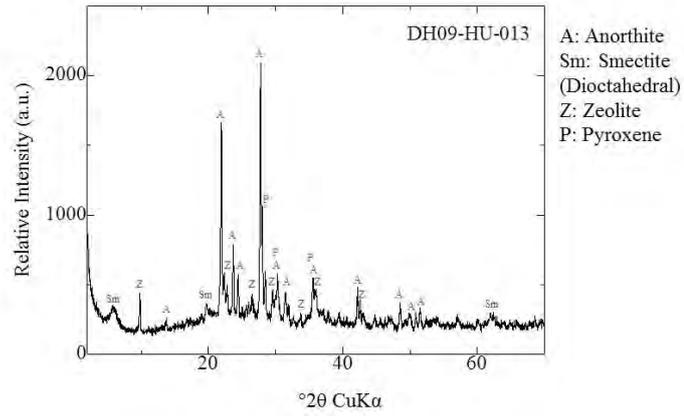


図 2.6.4-83 BBDH09-13-Hu-013 の粉末 XRD パターン

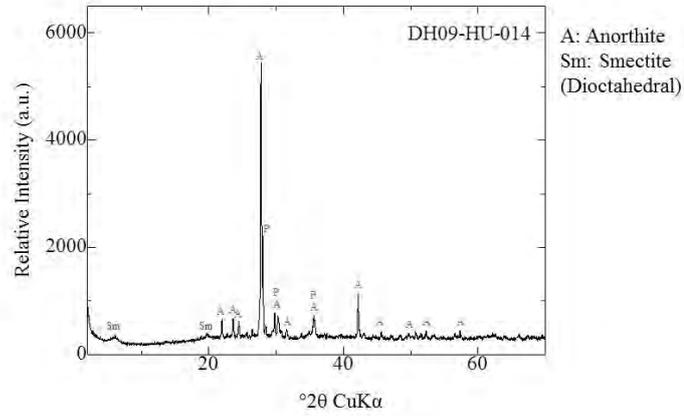


図 2.6.4-84 BBDH09-13-Hu-014 の粉末 XRD パターン

Drill Hole Number : DH-08 Core Size : NQ Total Footage : 40.54m				Mafic Minerals			Felsic Minerals		Silica Minerals		Clay Minerals	Zeolite Minerals					Carbonate Minerals		Opaque Minerals			Remarks			
Depth (m)	Columnar Section	CR*	RB**	Sample Number*** (Sample Location)		OL.	CPX.		OPX.		Feld		Quartz	Crist.	Montmorillonite	M.	H.	CL.	Ph.	St.	Cal.	Mag.	Mn.	Py.	MnOOH MnO ₂
							Diop.	Aug.	Hyp.	Plag.	K-feld.														
0.20				BBDHN-13-Rb-001	Hu-001									△							○				
0.40				BBDHN-13-Rb-001	Rh-001							△	△	△			△	△			○				
0.60				BBDHN-13-Rb-002	Rh-002							△	△	△			△	△			○				
1.00				BBDHN-13-Rb-003	Rh-003							△	△	*△			△	*△			*○	*		*	
1.10				BBDHN-13-Rb-004	Rh-004							△	△	△			△	△			○				
1.50				BBDHN-13-Rb-005	Rh-005							△	△	△			△	△			○				
1.60				BBDHN-13-Rb-006	Hu-008							△	△	△							○		△		
2.85				BBDHN-13-Rb-007	Rh-006							△	△	△			△	△			○				
3.90				BBDHN-13-Rb-008	Rh-007							△	△	△			△	△			○				
4.30				BBDHN-13-Rb-009	Rh-008							△	△	△			△	△			○				
5.80				BBDHN-13-Rb-010	Rh-009							△	△	△			△	△			○				
6.00				BBDHN-13-Rb-011	Rh-010							△	△	△			△	△			○				
6.60				BBDHN-13-Rb-012	Rh-011							△	△	△			△	△			○				
6.80				BBDHN-13-Rb-013	Rh-012							△	△	△			△	△			○				
8.60				BBDHN-13-Rb-014	Rh-013							△	△	△			△	△			○				
8.60				BBDHN-13-Rb-015	Rh-014							△	△	△			△	△			○				
9.20				BBDHN-13-Rb-016	Rh-015							△	△	△			△	△			○				
9.50				BBDHN-13-Rb-017	Rh-016							△	△	△			△	△			○				
9.70				BBDHN-13-Rb-018	Rh-017							△	△	△			△	△			○				
9.80				BBDHN-13-Rb-019	Rh-018							△	△	△			△	△			○				
9.80				BBDHN-13-Rb-020	Hu-021	○	○		○			○	○	○			○	○							
11.20				BBDHN-13-Rb-021	Rh-008							○	○	○			○	○							
11.20				BBDHN-13-Rb-022	Rh-009							○	○	○			○	○							
11.50				BBDHN-13-Rb-023	Hu-023	○	○		○			○	○	○			○	○							
11.60				BBDHN-13-Rb-024	Rh-010							○	○	○			○	○							
11.60				BBDHN-13-Rb-025	Rh-011							○	○	○			○	○							
11.60				BBDHN-13-Rb-026	Rh-012							○	○	○			○	○							
11.60				BBDHN-13-Rb-027	Rh-013							○	○	○			○	○							
11.60				BBDHN-13-Rb-028	Rh-014	△	*△		*○			○	○	*△			△	*△			*			*	
11.60				BBDHN-13-Rb-029	Rh-015	△	*△		*○			○	○	*△			△	*△			*			*	
12.21				BBDHN-13-Rb-030	Hu-026	△	△		○			○	○	△			△	△							
13.00				BBDHN-13-Rb-031	Rh-016			*	*		*○			*○			△	△			*	*		*	*
13.20				BBDHN-13-Rb-032	Rh-017									△			△	△							*
13.46				BBDHN-13-Rb-033	Rh-018			*	*		*○			*△			△	△	*	*		*			*
13.90				BBDHN-13-Rb-034	Rh-019																				
14.20				BBDHN-13-Rb-035	Rh-020																				
14.30				BBDHN-13-Rb-036	Rh-021																				
14.97				BBDHN-13-Rb-037	Rh-022																				

* CR: Core Recovery
 ** RB: Range of Brecciation
 *** Sample Number: Rh: RWMC, Hu: Univ. of Hokkaido

Minerals: Ol.(Olivine), Cpx.(Clinopyroxene), Diop.(Diopside), Aug.(augite), Opx.(Orthopyroxene), Hyp.(Hyperthene), Feld.(Feldspar), Plag.(Plagioclase), K-feld.(K-feldspar), Qz.(Quartz), Crist(Cristobalite), M.(Mordenite), H.(Heulandite), Cl.(Clinoptilolite), Ph.(Phillipsite), St.(Stellerite), Mag.(Magnetite), Mn.(Mn-oxide or Mn-hydroxide), Py.(Pyrite)

Drill cuttings -6.0m
 Calcite ○
 Smectite △
 Zeolite △

Drill cuttings -12.2m
 Anorthite ○
 Smectite △
 Zeolite △
 Pyroxene ○

Drill cuttings -14.3m
 Anorthite ○
 Smectite △
 Zeolite △
 Pyroxene ○

図 2.6.4-85 試錐コア (Zambales Ophiolite and Aksitero Formation) の鉱物組成 (DH08(0~GL-15m), XRD)

Drill Hole Number : DH-08 Core Size : NQ Total Footage : 40.54m				Mafic Minerals			Felsic Minerals		Silica Minerals		Clay Minerals	Zeolite Minerals					Carbonate Minerals		Opaque Minerals			Remarks		
Depth (m)	Columnar Section	CR*	RB**	Sample Number*** (Sample Location)	OL	CPX.		OPX.	Feld		Qz	Tridy.	Montmorillonite	M.	H.	CL.	Ph	St.	Cal.		Mag.		Mn.	Py.
						Diop.	Aug.		Hyp.	Plag.														
15.21	[Green pattern]			BBDHN-13-R0-419																				
15.50					Rh-019																			
16.00	[Green pattern]			BBDHN-13-R0-420																				
16.09					Rh-020																			
16.30	[Green pattern]			BBDHN-13-R0-421																				
16.59					Rh-021																			
17.00	[Green pattern]			BBDHN-13-R0-422																				
17.90					Rh-022																			
18.20	[Green pattern]			BBDHN-13-R0-423																				
18.70					Rh-023																			
19.20	[Green pattern]			BBDHN-13-R0-424																				
19.90					Rh-024																			
20.00	[Green pattern]			BBDHN-13-R0-425																				
20.50					Rh-025																			
21.05	[Green pattern]			BBDHN-13-R0-426																				
21.70					Rh-026																			
22.1	[Green pattern]			BBDHN-13-R0-427																				
23.40					Rh-027																			
23.56	[Green pattern]			BBDHN-13-R0-428																				
23.85					Rh-028																			
24.00	[Green pattern]			BBDHN-13-R0-429																				
24.20					Rh-029																			
24.20	[Green pattern]			BBDHN-13-R0-430																				
24.40					Rh-030																			
24.50	[Green pattern]			BBDHN-13-R0-431																				
24.80					Rh-031																			
25.10	[Green pattern]			BBDHN-13-R0-432																				
25.27					Rh-032																			
25.50	[Green pattern]			BBDHN-13-R0-433																				
25.70					Rh-033																			
26.00	[Green pattern]			BBDHN-13-R0-434																				
26.10					Rh-034																			
26.33	[Green pattern]			BBDHN-13-R0-435																				
26.50					Rh-035																			
27.00	[Green pattern]			BBDHN-13-R0-436																				
27.20					Rh-036																			
27.43	[Green pattern]			BBDHN-13-R0-437																				
28.00					Rh-037																			
28.44	[Green pattern]			BBDHN-13-R0-438																				
29.00					Rh-038																			
30.00	[Green pattern]																							

Drill cuttings -21.05~-21.87m
 Anorthite ⊙
 Smectite △
 Zeolite ○
 Pyroxene ○

* CR: Core Recovery
 ** RB: Range of Brecciation
 *** Sample Number: Rh: RWMC, Hu: Univ. of Hokkaido
 Minerals: OL.(Olivine), Cpx.(Clinopyroxene), Diop.(Diopside), Aug.(augite), Oxp.(Orthopyroxene), Hyp.(Hyperthene), Feld.(Feldspar), Plag.(Plagioclase), K-feld.(K-feldspar), Qz.(Quartz), Crist.(Cristobalite), M.(Mordenite), H.(Heulandite), Cl.(Crinoptilolite), Ph.(Phillipsite), St.(Stellerite)
 Mag.(Magnetite), Mn.(Mn-oxide or Mn-hydroxide), Py.(Pylite)

図 2.6.4-86 試錐コア (Zambales Ophiolite and Aksitero Formation) の鉱物組成 (DH08(GL-15m~30m), XRD)

(4) 岩石化学的特性 (XRF)

2 孔の試錐孔 (BBDH08/09) から連続的に採取した表 2.6.4-1～表 2.6.4-2 に示す全試料を使用して、XDF により全岩化学組成(バルク成分) 分析を実施し、岩石化学特性を検討した。測定条件はトレンチ試料と同様である (表 2.5.4-1)。

分析結果は表 2.6.4-5～表 2.6.4-8 及び図 2.6.4-89～図 2.6.4-93 に示す。この全岩化学分析結果に基づき、各試錐孔の化学組成の変化を図 2.6.4-94～図 2.6.4-97 に整理した。

これまでの偏光顕微鏡観察と XRD 回折・同定による主要構成鉱物 (造岩鉱物) の組み合わせと組成などのデータをもとに主要化学組成の変化とその要因などについて考察する。

BBDH08 の試錐孔において、Aksitero 累層の堆積岩は、岩相・岩質を反映して、石灰質砂岩～石灰岩質泥岩の層準では明らかに CaO に富み、ベントナイト質の上位のパミス質シルト岩と下位の赤色粘土岩は、粘土鉱物の存在のために若干の Al₂O₃, SiO₂ に富み、CaO がかなり減少する。また、赤色粘土岩では苦鉄質鉱物の存在のために Fe₂O₃, MgO の急激な増加と斜長石の存在のために若干の SiO₂, Al₂O₃ が示される。

基盤岩との境界では、これまでの観察 (Saile 鉱山のトレンチ-1) と同様な物質移動の影響 (変質帯) が確認される。この試錐孔は現在もアルカリ裂罅水が自噴していることもあり、組成変化で増加傾向を示す成分は、CaO, Al₂O₃, K₂O, Na₂O, MnO, P₂O₅ で、逆に減少傾向を示す成分は、SiO₂, Fe₂O₃ である。この事実は、主要構成鉱物や基質の玄武岩質ガラスを交代して形成された粘土鉱物などの変質反応を考察する上で考慮すべきことである。

基盤岩の Zambales オフィオライトにおいては、構成岩である自破碎玄武岩質溶岩と一部蛇紋岩化したはんれい岩と、少量の輝緑岩のそれぞれの組成を一様に反映し、物質移動に伴うような有意義な組成変化を示していない。

BBDH09 の試錐孔において、Aksitero 累層の堆積岩は、BBDH09 の試錐孔と同じように岩相・岩質を反映しているが、ベントナイト質のパミス質シルト岩については、正にほぼ反対の組成変化を示す。その著しい組成変化は CaO である。これは多くの方解石の産状に起因するものと考えられる。

基盤岩においては、堀削深度が約 2m 程度なので考察には無理があるが、基盤岩との境界には物質移動を示す明瞭な変質帯は確認されていない。

表 2.6.4-5 XRF 分析による DH08 試験孔コア試料の元素比率定量結果 (001~014)

BBDH08-13-Rh-	001	002	003	004	005	006	007	008	009	010	011	012	013	014
CaO	40.572	40.012	30.447	31.228	39.456	36.374	44.655	3.301	2.686	3.012	2.464	10.167	11.585	5.837
CO ₂	34.315	31.606	29.606	28.828	24.187	26.674	35.537	11.134	8.787	10.448	10.455	10.533	8.756	10.096
SiO ₂	19.392	21.149	29.083	28.782	20.747	25.662	16.448	60.791	61.270	60.586	62.700	52.404	51.236	59.943
Al ₂ O ₃	2.740	3.509	5.171	5.455	7.162	6.219	1.454	11.873	12.882	11.393	10.792	16.231	17.010	11.245
Fe ₂ O ₃	1.418	1.971	3.227	3.357	5.005	2.610	0.642	6.521	6.422	6.892	6.010	4.499	5.137	6.327
MgO	0.807	0.876	1.411	1.271	1.838	1.291	0.563	3.232	2.975	3.227	2.695	3.323	3.225	2.996
TiO ₂	0.162	0.247	0.339	0.375	0.582	0.251	0.072	0.408	0.372	0.417	0.376	0.381	0.413	0.343
K ₂ O	0.217	0.210	0.308	0.299	0.431	0.332	0.147	1.227	1.785	1.631	2.001	0.420	0.389	1.440
MnO	0.109	0.113	0.082	0.079	0.098	0.101	0.113	0.243	1.273	0.853	1.221	0.207	0.105	0.429
P ₂ O ₅	0.086	0.086	0.097	0.115	0.114	0.095	0.077	0.203	0.588	0.381	0.482	0.012	0.018	0.280
Na ₂ O	0.068	0.095	0.079	0.079	0.239	0.239	0.059	0.920	0.768	1.022	0.621	1.725	2.050	0.916
SrO	0.060	0.057	0.057	0.048	0.035	0.049	0.082	0.019	0.016	0.013	0.015	0.019	0.022	0.016
SO ₃	0.032	0.033	0.027	0.028	0.029	0.033	0.126	0.017	0.027	0.019	0.019	0.013	0.012	0.022
Cr ₂ O ₃	0.007	0.009	0.008	0.007	0.007	0.007	0.008	0.008	0.009	0.009	0.010	0.016	0.021	0.011
CuO	0.004	0.004	0.006	0.006	0.004	0.003	0.002	0.012	0.021	0.026	0.021	0.012	0.008	0.025
ZnO	0.003	0.004	0.006	0.006	0.007	0.005	0.002	0.016	0.014	0.014	0.013	0.008	0.007	0.012

表 2.6.4-6 XRF 分析による DH08 試験孔コア試料の元素比率定量結果 (014~028)

BBDH08-13-Rh-	015	016	017	018	019	020	021	022	023	024	025	026	027	028
CaO	7.317	5.685	5.467	5.465	5.534	5.395	5.995	5.453	4.846	5.465	5.362	5.142	4.744	5.110
CO ₂	9.947	12.832	9.734	9.383	9.874	7.504	9.409	9.364	9.263	9.936	9.790	7.619	10.595	9.512
SiO ₂	56.768	57.035	59.637	61.843	60.458	63.523	59.893	63.081	65.410	59.751	62.434	63.795	62.195	61.983
Al ₂ O ₃	12.522	12.712	14.024	13.522	14.258	13.321	14.823	13.685	12.555	14.395	13.452	13.842	12.740	13.930
Fe ₂ O ₃	6.771	4.092	4.029	3.550	3.605	3.909	3.466	2.563	2.279	3.723	2.911	3.239	3.503	3.111
MgO	3.394	5.881	3.873	2.491	2.175	1.654	1.627	1.157	0.887	1.779	1.238	1.518	1.489	1.642
TiO ₂	0.322	0.329	0.296	0.310	0.301	0.293	0.320	0.275	0.221	0.308	0.261	0.279	0.252	0.253
K ₂ O	0.990	0.255	0.416	0.622	0.908	0.869	1.169	1.220	1.425	1.444	1.349	0.905	1.445	1.198
MnO	0.184	0.171	0.134	0.085	0.080	0.088	0.070	0.045	0.033	0.053	0.046	0.069	0.047	0.056
P ₂ O ₅	0.073	0.056	0.056	0.059	0.057	0.061	0.063	0.050	0.062	0.057	0.066	0.072	0.096	0.068
Na ₂ O	1.528	0.848	2.197	2.528	2.631	3.250	3.068	3.011	2.944	3.002	3.019	3.404	2.839	3.060
SrO	0.019	0.022	0.036	0.039	0.046	0.040	0.042	0.050	0.038	0.033	0.036	0.039	0.040	0.032
SO ₃	0.022	0.022	0.017	0.013	0.011	N.D.	0.012	N.D.	N.D.	0.012	0.011	N.D.	0.053	0.011
Cr ₂ O ₃	0.011	0.010	0.005	0.006	0.007	0.006	0.005	0.005	N.D.	0.006	0.006	0.005	0.016	0.005
CuO	0.005	0.004	0.004	0.005	0.003	0.004	0.003	0.002	0.001	0.001	0.002	0.004	0.002	0.002
ZnO	0.011	0.007	0.007	0.008	0.008	0.008	0.007	0.005	0.008	0.008	0.007	0.007	0.008	0.009

表 2.6.4-7 XRF 分析による DH08 試錐孔コア試料の元素比率定量結果 (028~042)

BBDH08-13-Rh-	029	030	031	032	033	034	035	036	037	038	039	040	041	042
CaO	5.118	5.371	5.396	5.347	5.215	5.431	5.171	5.723	5.396	5.240	5.150	5.667	5.053	5.823
CO ₂	7.374	8.567	8.562	9.201	8.373	9.548	9.549	9.144	9.678	10.271	9.162	8.878	8.540	8.595
SiO ₂	63.738	62.492	60.843	60.302	62.060	61.516	62.501	60.835	60.225	60.549	64.773	59.980	62.730	61.393
Al ₂ O ₃	13.911	14.073	14.812	14.773	14.283	13.880	13.415	14.945	14.873	13.665	12.729	15.107	13.924	13.890
Fe ₂ O ₃	3.291	3.248	3.753	3.741	3.547	3.138	2.906	3.032	3.243	3.507	2.586	3.948	3.425	3.625
MgO	1.453	1.260	2.355	2.352	2.074	1.229	1.210	1.632	1.724	1.456	1.119	2.244	1.519	1.082
TiO ₂	0.280	0.285	0.306	0.306	0.289	0.283	0.247	0.309	0.287	0.279	0.239	0.298	0.278	0.296
K ₂ O	0.917	0.715	0.791	0.784	0.755	1.694	1.743	1.316	1.309	1.732	1.071	0.375	0.792	1.041
MnO	0.068	0.042	0.083	0.083	0.080	0.039	0.036	0.049	0.051	0.042	0.034	0.083	0.045	0.065
P ₂ O ₅	0.067	0.072	0.062	0.051	0.057	0.034	0.083	0.099	0.047	0.055	0.066	0.045	0.063	0.093
Na ₂ O	3.643	3.728	2.930	2.938	3.141	3.099	3.110	2.889	3.064	3.152	3.018	3.241	3.532	4.007
SrO	0.032	0.034	0.043	0.039	0.038	0.040	0.040	0.060	0.049	0.048	0.036	0.044	0.037	0.043
SO ₃	0.012	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.343	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.012	0.009
Cr ₂ O ₃	0.005	0.006	0.006	0.007	0.007	0.005	0.005	0.005	0.006	0.006	0.006	0.007	0.006	0.006
CuO	0.003	0.001	0.003	0.003	0.003	0.002	0.001	0.002	0.003	0.002	0.002	0.003	0.002	0.002
ZnO	0.009	0.008	0.006	0.006	0.008	0.007	0.008	0.006	0.006	0.007	0.007	0.006	0.007	0.006

表 2.6.4-8 XRF 分析による DH09 試錐孔コア試料の元素比率定量結果 (001~015)

BBDH09-13-Rh-	001	002	003	004	005	006	007	008	009	010	011	012	013	014	015
CaO	3.614	5.243	4.766	7.924	5.164	2.908	26.982	33.004	34.999	34.564	24.724	36.137	34.897	3.714	11.474
CO ₂	11.555	12.275	11.659	16.588	12.550	10.283	29.402	30.878	32.050	33.901	28.038	32.747	33.091	9.902	11.803
SiO ₂	61.259	59.373	58.412	54.116	59.649	77.233	32.463	26.585	24.044	23.265	39.532	24.131	23.312	63.256	49.734
Al ₂ O ₃	12.863	12.026	12.624	11.075	12.285	6.899	5.850	4.561	4.340	4.299	4.835	3.673	3.724	14.063	14.938
Fe ₂ O ₃	5.384	5.822	6.981	6.118	5.442	0.555	2.825	2.595	2.375	1.641	1.078	1.709	2.459	2.890	5.151
MgO	2.362	2.592	2.771	2.288	2.432	0.277	1.213	1.220	1.000	0.922	0.576	0.715	1.375	2.077	3.946
TiO ₂	0.761	0.727	0.894	0.771	0.844	0.225	0.384	0.319	0.382	0.381	0.218	0.184	0.287	0.188	0.328
K ₂ O	1.140	0.996	1.175	0.678	0.901	0.314	0.326	0.369	0.344	0.227	0.363	0.226	0.221	0.599	0.700
MnO	0.128	0.195	0.103	0.043	0.110	0.044	0.100	0.130	0.123	0.112	0.069	0.115	0.105	0.038	0.097
P ₂ O ₅	0.085	0.225	0.206	0.202	0.145	0.201	0.013	0.094	0.135	0.082	0.056	0.078	0.084	0.047	0.056
Na ₂ O	0.529	0.354	0.264	0.126	0.284	1.035	0.218	0.109	0.133	0.144	0.427	0.176	0.189	3.115	1.695
SrO	0.037	0.053	0.061	0.033	0.036	0.041	0.115	0.075	0.134	0.068	0.041	0.048	0.047	0.022	0.020
SO ₃	N.D.	0.017	0.018	0.015	0.016	0.017	N.D.	0.026	0.037	0.028	0.028	0.034	0.188	0.019	0.014
Cr ₂ O ₃	0.008	0.008	0.008	0.009	0.008	0.005	0.007	0.008	0.007	0.007	N.D.	0.008	N.D.	0.005	0.011
CuO	0.009	0.008	0.011	0.009	0.007	0.004	0.004	0.006	0.005	0.003	0.003	0.002	0.003	0.004	0.002
ZnO	0.009	0.012	0.011	0.013	0.011	0.012	0.003	0.006	0.011	0.005	0.003	0.002	0.004	0.010	0.007

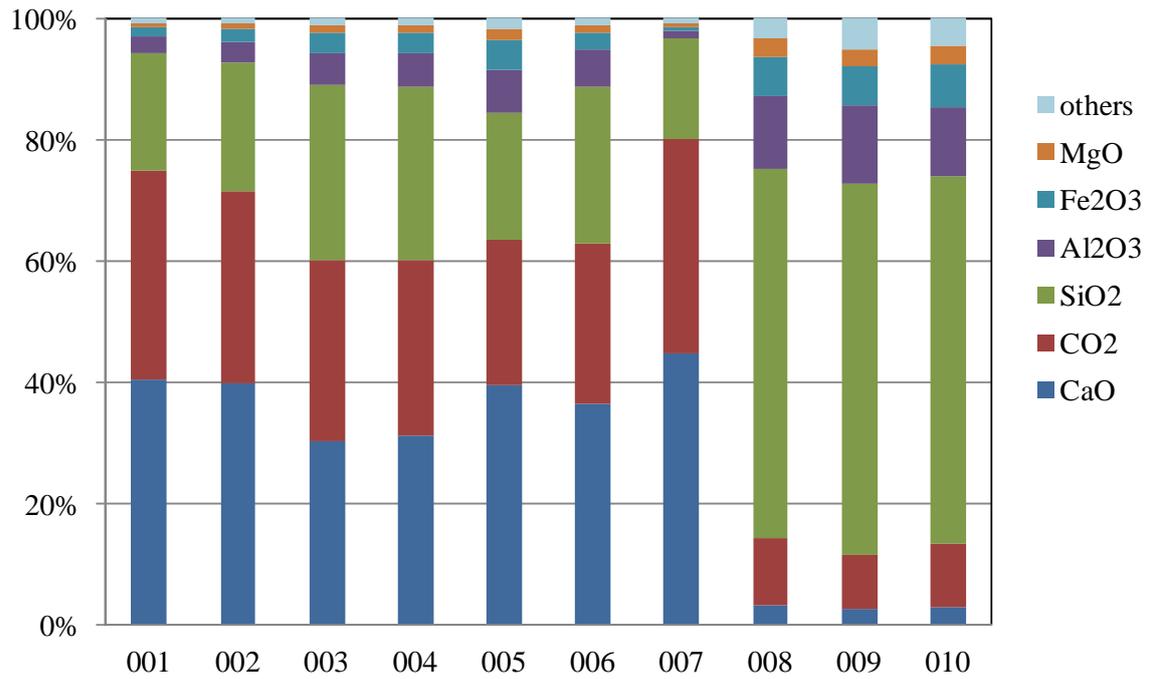


図 2.6.4-89 DH08 試錐孔コア試料の主要元素比率 (BB-DH08-13-Rh-001~010)

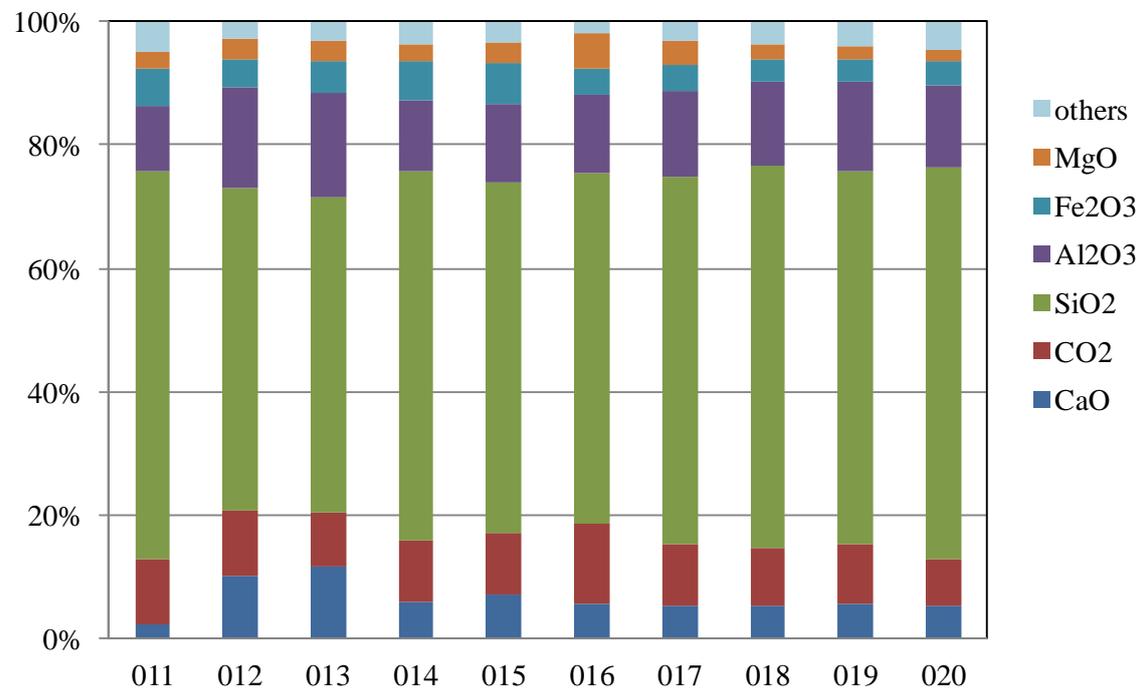


図 2.6.4-90 DH08 試錐孔コア試料の主要元素比率 (BB-DH08-13-Rh-011~020)

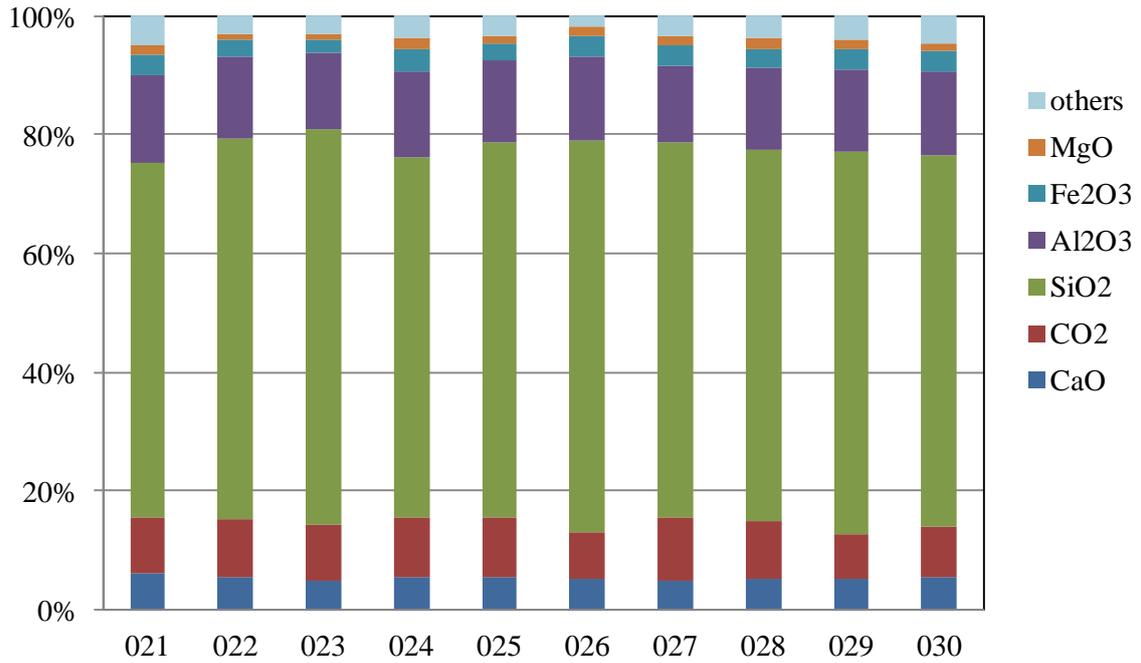


図 2.6.4-91 DH08 試錐孔コア試料の主要元素比率 (BB-DH08-13-Rh-021~030)

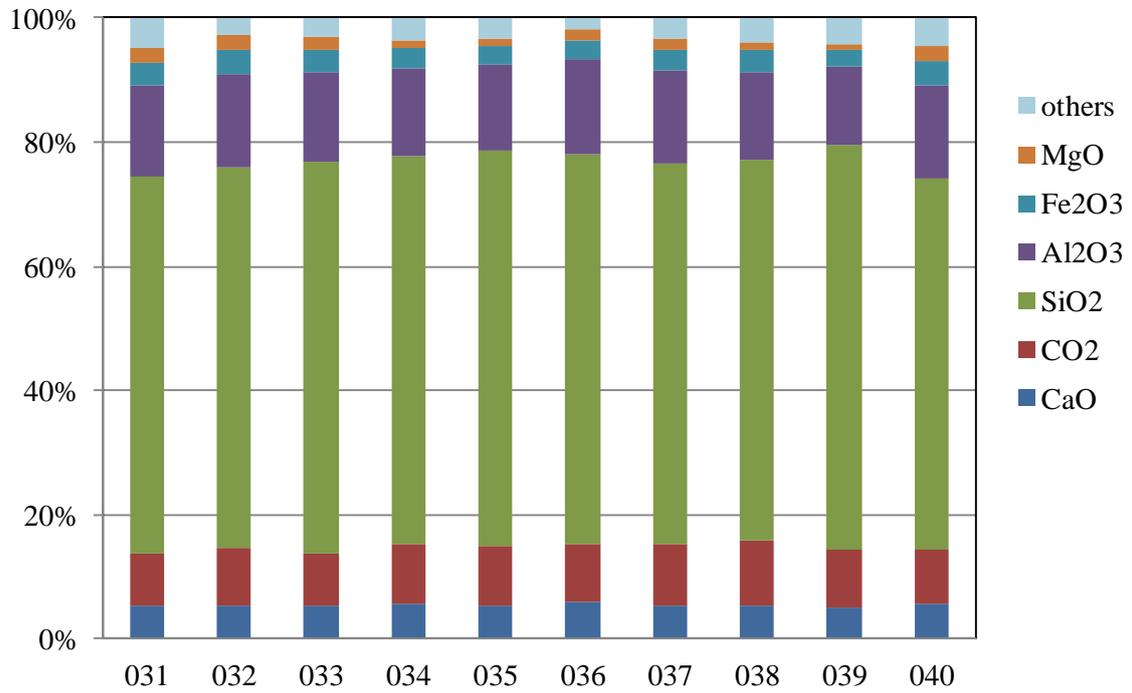


図 2.6.4-92 DH08 試錐孔コア試料の主要元素比率 (BB-DH08-13-Rh-031~040)

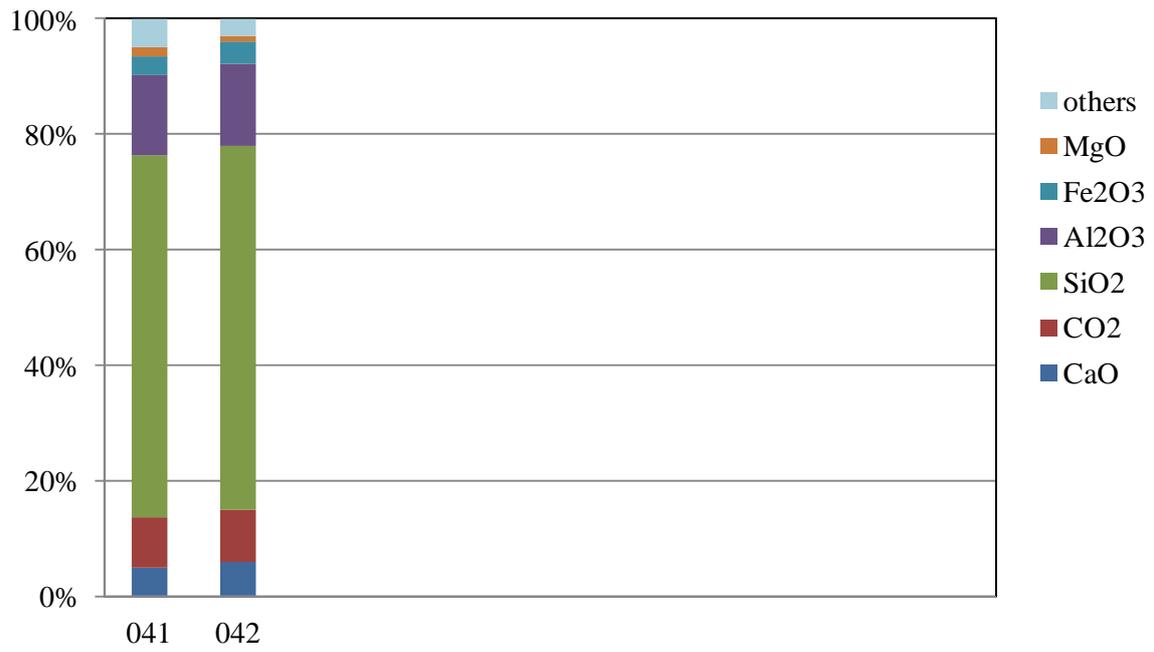


図 2.6.4-93 DH08 試錐孔コア試料の主要元素比率 (BB-DH08-13-Rh-041~042)

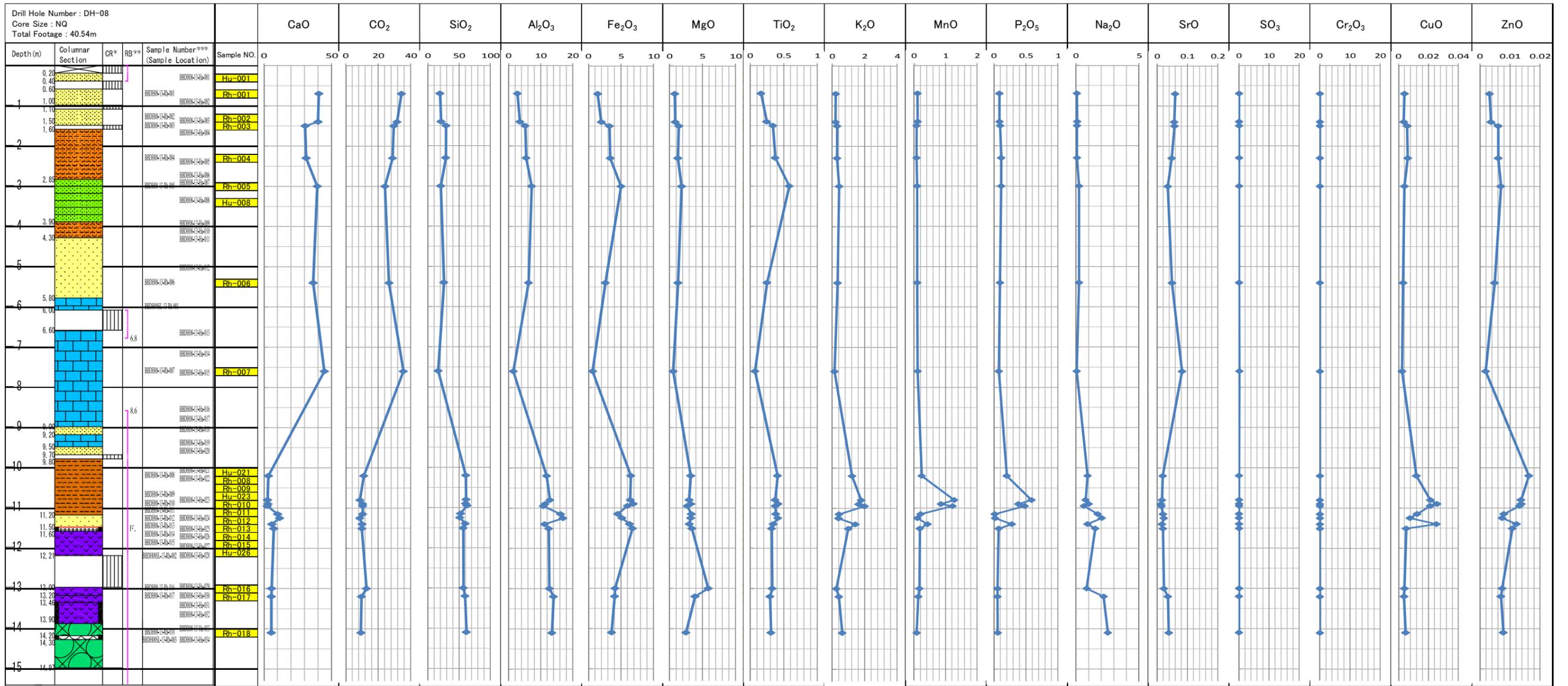
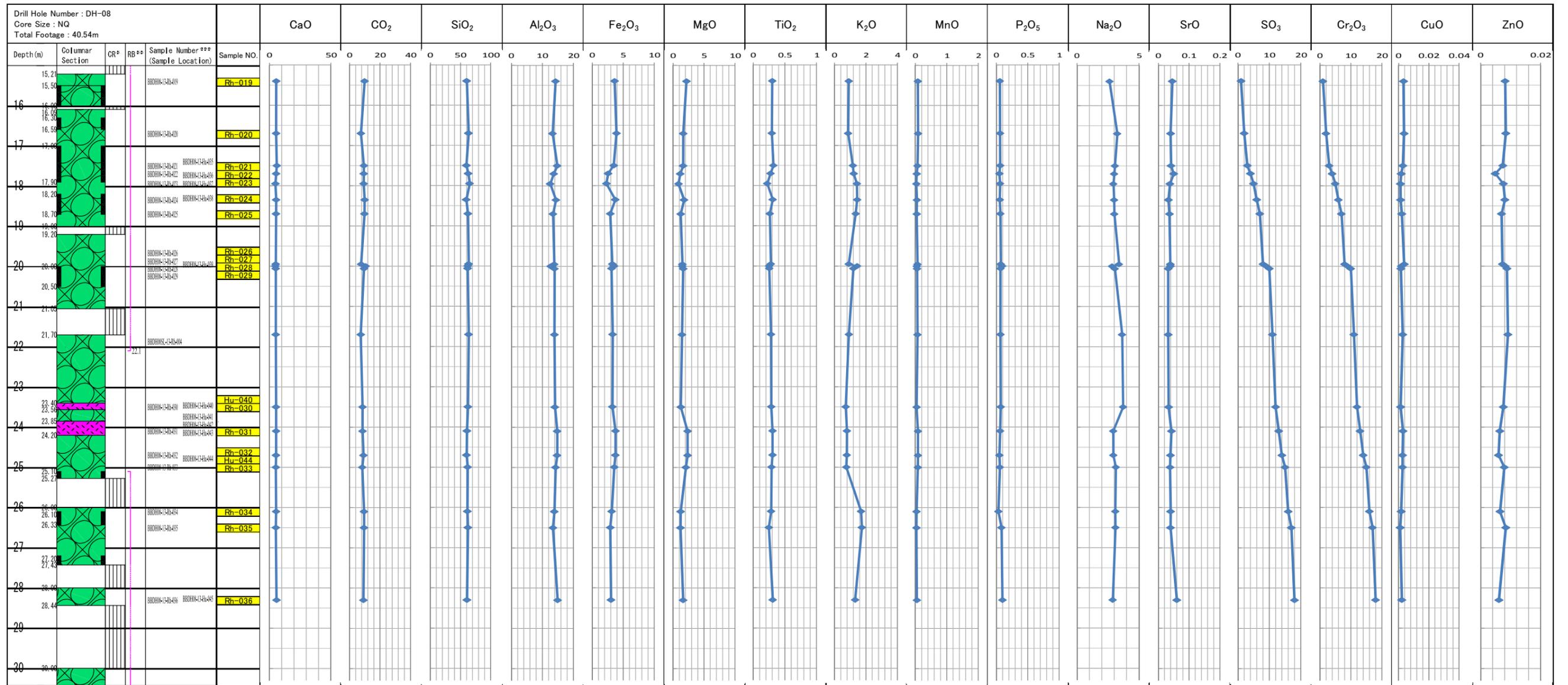
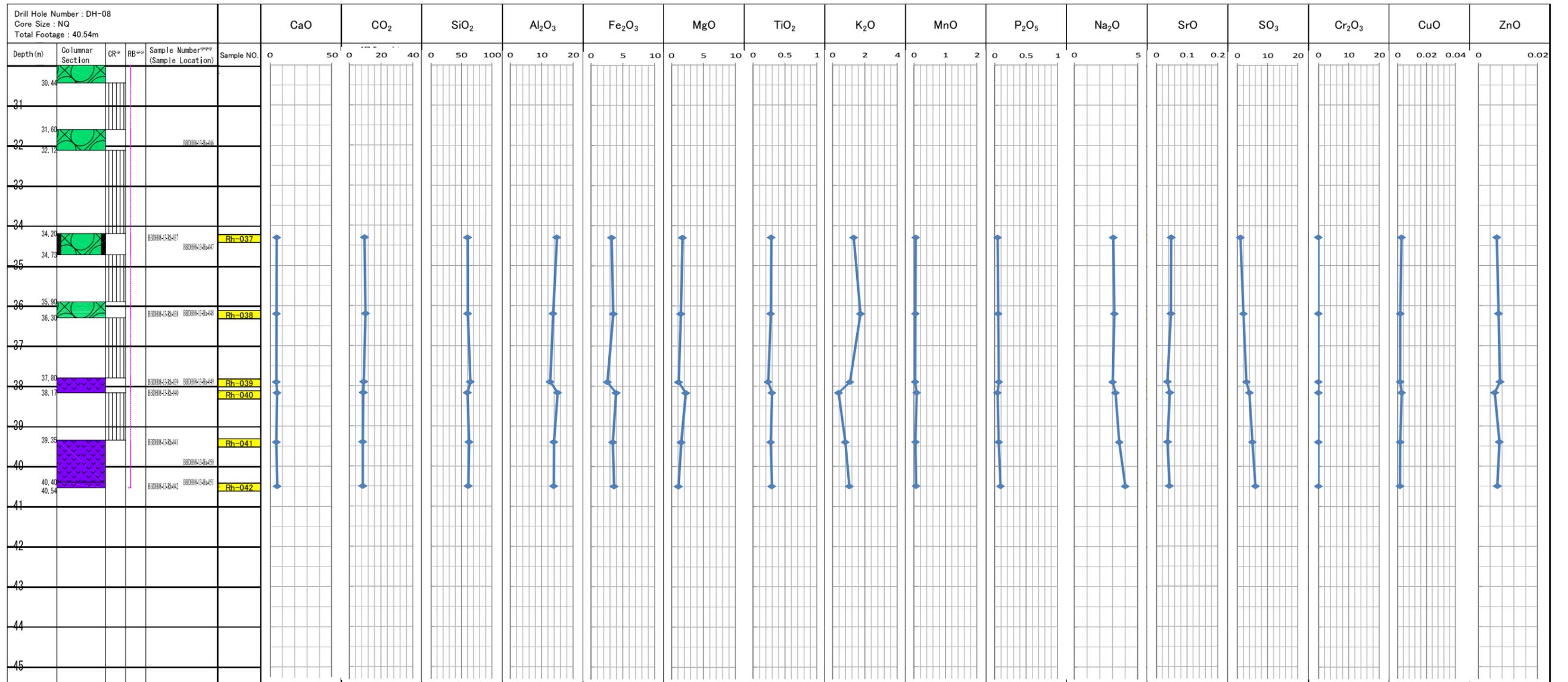


図 2.6.4-94 試錐コア (Zambales Ophiolite and Aksitero Formation) の鉱物組成 (DH08(GL-0~15m), XRF)



* CR: Core Recovery
 ** RB: Range of Brecciation
 *** Sample Number: Rh: RWMC, Hu: Univ. of Hokkaido

図 2.6.4-95 試錐コア (Zambales Ophiolite and Aksitero Formation) の鉍物組成 (DH08(GL-15~30m), XRF)



* CR: Core Recovery
 ** RB: Range of Brecciation
 *** Sample Number: Rh : RWMC, Hu : Univ. of Hokkaido

図 2.6.4-96 試錐コア (Zambales Ophiolite and Aksitero Formation) の鉱物組成 (DH08(GL-30~40.5m), XRF)

2.6.5 試錐孔内での地下水調査

(1) 物理化学パラメータの原位置測定

1) DH08

DH08 の pH は掘削深度が 15m を超えるあたりから pH が上昇し、掘削深度 20m 付近では pH はほぼ Well-1 と同程度を示した。掘削時に DH08 に自噴していた地下水及び掘削完了後の孔内地下水の物理化学的パラメータを Well-1 (20m 付近の流路系が連結している) の測定値と合わせて表 2.6.5-1 に示す。また、試錐孔は泥水を使って掘削しているため、泥水として利用したため池の物理化学的パラメータを表 2.6.5-2 に示す。

表 2.6.5-1 DH08 地下水の物理化学パラメータ

測定位置	掘削深度	地下水位(GL~)	pH (水温℃)	ORP(mV)	備考
DH08 自噴水	-27.48m	自噴	9.17 (29.5)	—	11/5 17:10
Well-1	-27.48m	-8cm	9.31 (29.3)	—	同上
DH08 自噴水	-32.12m	自噴	9.04 (29.0)	—	11/6 17:17
Well-1	-32.12m	-3cm	9.14 (29.0)	—	同上
DH08 (-22.7m)	40.54m	—	9.16 (31.9)	63	11/10 16:28
DH08 (-39m)	40.54m	—	8.91 (29.4)	—	11/12 11:30
Well-1	40.54m	—	9.34 (29.9)	-18	11/8 11:25

表 2.6.5-2 DH08 掘削開始前周辺ため池 pH 測定結果 (11/2 測定)

測定位置	地下水位(GL~)	孔底深度(GL~)	pH (水温℃)	備考
DH08 西	—	—	7.30 (28.8)	
DH08 東	—	—	8.08 (29.6)	

2) DH09

DH09 は基盤岩まで達した 15.4m で掘削を完了したが、アルカリ地下水の存在は確認できなかった。掘削完了後の孔内地下水の物理化学的パラメータを表 2.6.5-3 に示す。また、試錐孔は表 2.6.5-2 に特性を示す DH08 と同じ泥水を使って掘削している。

表 2.6.5-3 DH09 掘削完了時採水の pH 測定結果 (11/10 採水)

採水位置	地下水位(GL~)	pH (水温℃)	ORP[mV]	備考
Well-1	自噴	9.37 (29.4)	-48	学芸大
DH09 (-14.8m)	-2.45m	7.12 (30.6)	153	大林
DH09 (-14.8m)	-2.45m	7.13 (29.7)	135	学芸大

(2) 地球化学的特性 (水質)

DH08 はアルカリ地下水の自噴が最も顕著だった-22.7m と孔底に近い-39.0m で採水し、DH09 はアルカリ地下水の流出が認められなかったため、孔底に近い-14.8m で採水し、イオン分析を実施した。表 2.6.5-4 に各試錐孔の水質分析結果を Well-1 の結果と合わせて示す。

表 2.6.5-4 試錐孔内の地下水水質データ

採取地	Collection place	Bigbiga								
	GPS data	Well-1			DH-08		DH-09			
		N15°30'52.09" E120°22'53.17"			N15°30'51.90" E120°22'53.00"		N15°30'96.00" E120°22'82.20"			
		Altitude(m)			112	90	73	131		
採取日	2013/11/10	2013/11/10	2013/11/10	2013/11/10	2013/11/10	2013/11/10	2013/11/10	2013/11/10	2013/11/10	
Sample No.	P-71(N.W)	P-72(F.W)	P-73(A.W)	PP004(F.W)	PP005(F.W)	P-01(N.W)	P-02(F.W)	P-03(A.W)	P-04(RF.W)	
pH	9.37			9.16	8.91	7.13				
Temp.(°C)	29.4			31.9	29.4	29.7				
ORP(mV)	-48			63	-	135				
EC(mS/m)	16.7			-	-	71.4				
DO(mg/l)	2.5			-	-	8.0				
CO ₂ (mg/l)	3.5			15.2	17.7	1.4				
カチオン濃度 (ppb)	Na	98226.99	92666.80	101072.25	101243.80	103993.07	7696.95	9413.01	11352.90	7062.77
	Mg	32.44	53.18	33.09	34.13	447.51	7955.57	8039.82	12429.10	6982.71
	Al	39.59	22.25	33.34	17.70	961.05	14.17	0.19	10911.06	7690.87
	P	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	0.67	b.d.l.	b.d.l.	21.13	19.84
	K	669.53	621.70	772.65	680.50	1294.84	1014.10	998.47	2025.58	1358.19
	Ca	1352.92	1424.94	1612.21	1837.42	2489.39	81597.19	80452.58	127844.81	71278.34
	Sc	4.07	3.73	4.16	4.38	5.33	2.52	2.34	4.85	4.17
	Ti	6.69	4.67	6.19	4.45	71.96	2.65	1.44	18.01	50.60
	V	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	2.34	2.73	13.28	8.60
	Cr	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.
	Mn	0.79	0.47	1.17	0.08	14.26	0.17	255.98	1035.81	601.50
	Fe	91.52	40.74	81.85	26.13	2231.79	26.14	b.d.l.	9408.97	7899.38
	Co	0.00	0.00	0.00	b.d.l.	0.34	0.17	0.43	6.27	3.77
	Ni	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	32.40	19.80
	Cu	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	0.76	3.11	0.90	b.d.l.	24.76	16.11
	Zn	3.91	3.82	3.89	3.86	b.d.l.	3.93	3.97	b.d.l.	b.d.l.
	As	1.07	1.03	1.18	1.15	1.17	0.35	0.39	1.39	1.03
	Rb	0.24	0.24	0.25	0.26	1.15	0.52	0.46	1.76	1.53
	Sr	3.47	3.74	5.47	2.12	3.45	82.45	82.11	199.33	115.36
	Y	0.03	0.02	0.02	0.01	0.46	0.02	0.01	8.10	4.81
	Mo	2.02	1.86	2.00	1.97	2.11	0.13	0.33	b.d.l.	0.08
	Cd	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	b.d.l.	b.d.l.	0.06	0.03
	Cs	0.00	0.02	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.05	0.16
	Ba	91.51	57.92	140.07	40.71	52.09	214.53	232.59	699.15	493.83
	La	0.01	0.01	0.00	0.00	0.10	0.01	0.00	2.90	1.71
	Ce	0.02	0.01	0.01	0.01	0.28	0.00	0.00	4.19	2.50
	Pr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.86	0.51
	Nd	0.01	0.01	0.01	0.01	0.21	0.00	0.00	4.17	2.47
	Sm	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00	1.13	0.66
	Eu	0.02	0.01	0.04	0.01	0.03	0.04	0.05	0.45	0.30
	Gd	0.01	0.00	0.00	0.00	0.08	0.00	0.00	1.38	0.83
	Tb	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.22	0.13
Dy	0.01	0.00	0.00	0.00	0.09	0.00	0.00	1.33	0.79	
Ho	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.28	0.16	
Er	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.80	0.47	
Tm	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.11	0.07	
Yb	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.71	0.43	
Lu	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.12	0.07	
Pb	0.02	0.04	0.02	0.01	0.23	0.02	b.d.l.	5.06	4.00	
Th	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.04	0.08	
U	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.03	0.03	0.05	0.05	
(mg/l)	Si	37	35	36	36	38	23	24	34	-
アニオン濃度 (ppm)	F ⁻	0.1443			0.0159	0.1062	0.1917			
	Cl ⁻	4.1063			11.3007	3.7904	4.1691			
	NO ₂ ⁻	0			0	0	0.0724			
	Br ⁻	0			0	0	0			
	NO ₃ ⁻	0.05144			1.4582	0.3249	1.4403			
	PO ₄ ⁻	0			0	0	0			
	SO ₄ ²⁻	36.6829			0.0502	0.7207	5.8707			
備考				-22m	-39m					

b.d.l.: below detection limit.

<Remark>

Reference

P-01(N.W)---Sample P-01,Nonprocessing water

P-02(F.W)---Sample P-01,Filtered Water

P-03(A.W)---Sample P-01,Acidifying Water

P-04(RF.W)---Sample P-03 Sample Refiltered Water

(3) 簡易揚水試験

1) DH08

DH08 では Well1 と同様に地下水が自噴したため、揚水（回復）試験は実施していない。

2) DH09

試錐孔掘削後に地下水位と表層水の流入等による変化を観察するために、ケーシング挿入後に以下の要領で揚水試験（孔内の地下水を排水し、その後の地下水位の計測）を実施した（図 2.6.5-1）。

表 2.6.5-5 に排水後の書く時間での地下水位の測定結果を示す。

- 坑内水容積（φ0.06m、掘削深度 GL-15.4m、地下水位 GL-2.45m より 0.037m³）
- 孔内容積の 2 倍以上を目途に置換
- 孔底のスライム（約 0.03m³）はポンプにて揚水（孔内水位の回復がやや遅く、ポンプによる揚水が困難）
- その後ベラー（容量 866cc）にて 70 回（0.06m³）揚水
- 合計約 0.09m³揚水



図 2.6.5-1 揚水試験

表 2.6.5-5 揚水試験結果

測定時間	地下水位（GL～）
揚水前	-2.45m
揚水直後（12:16）	-3.28m
1 時間後（13:24）	-2.45m
2 時間後（14:22）	-2.45m
3 時間後（15:10）	-2.45m

2.7 アルカリ地下水の地球化学的特性・水理地質構造学的挙動

Bigbiga 地区における ActiveType のナチュラルアナログ調査・研究の主要な目的は ベントナイトのアルカリ変質反応による鉱物学的・鉱物化学的特性を理解し、その変質反応に係る地球化学的プロセスを考察して、変質生成鉱物の長期の鉱物学的変遷シナリオを構築する上で、最も基本の前提条件となるのがアルカリ地下水の探査である。

特に、アルカリ地下水のベントナイトとの接触（浸出）現象については、このアルカリ地下水の起源とその進化過程および、流動特性を明らかにすることが必要である。前者については組成変化が、後者については流動系（ポテンシャルパスとしての水路）・流量・流速などに関するデータ・知見などが必須である。従って、このためには水（天水起源の降雨水）－岩石（超塩基性オフィオライト）相互作用としての地球化学的挙動とアルカリ地下水の水理場とその流動系としての水理地質構造を考察することが重要である。

ここでは、アルカリ地下水の水地球化学的特性および、水理地質構造学的特性と物理化学的パラメータを考慮しながら、水理場としてローカルであるがその流動系を考察する。

2.7.1 アルカリ地下水の賦存状況

これまでの一連の調査・解析・考察結果から、アルカリ地下水の自噴しているサイトは、この Bigbiga 地区にある既存の「Well-1（深度：-19m、pH 9.01~9.37）」だけである。その他に「Well-3（深度：-100m、pH 8.37）」と Aksitero 川西岸にある湧水（pH 8.4）がアルカリ性の地下水として計測されている。

この自噴地下水は、前述したように、オフィオライトとの水相互作用により形成され、その後、オフィオライト岩盤内に発達した断裂系内を水路として上昇したアルカリ裂か水であると解釈している。

2.7.2 アルカリ地下水の流動特性

今年度の簡易構造試錐調査で、自噴井戸の Well-1 から南西約 11m の地点で掘削した試錐孔 DH08 内でアルカリ地下水の自噴が確認された。この事実から、特に Well-1 と DH08 試錐孔間距離（およそ 11m）での水理地質構造学的特性に基づく、このアルカリ地下水の流動特性を理解し、水理場としてはローカルではあるが現実的な流動系を考察する。

最初に、自噴する既存井戸水（Well-1）の流量は、四季の降雨量に顕著な影響を受けないことから、このアルカリ地下水は、一般的な涵養・蒸発・浸透過程から考えると、ベントナイトを不透水層として被圧地下水（帯水層）として独立した流動場のもと賦存しているものと考えられる。ただ、このアルカリ地下水はオフィオライト起源であるために、その流出場所がオフィオライトと Aksitero 累層の堆積岩との境界または、断裂系を流路とするのかは不明である。それは、Well-1 の地質構造特性であるオフィオライト基盤岩までの深度、自噴アルカリ地下水の深度・岩相そして、流路を規制する断裂系（割れ目集中帯など）に関する情報が不十分であるからである。

しかし、今年度実施した DH08 孔の試錐調査結果、アルカリ地下水挙動を考察する上で、有意

義なデータを取得することが出来た。

DH08 のコア観察と泥水（近傍の養魚池からの堀削水）堀削試錐孔での原位置採水・計測結果から下記のデータを取得した。

DH08 オフィオライト基盤岩までの深度：11.50m
累重するアキシテロ累層（細粒砂岩～粘土岩）とは断層関係。

断裂系（割れ目集中帯など）：オフィオライト岩盤内でごく普通に観察される。
特に、変質程度は深度約 25m 付近より強くなる傾向がある。
（断裂系の発達状況に支配傾向がある。）

自噴深度：22.7m（開始）
深度 28.4m で Well-1 の水位低下と白濁する。
（DH08 孔と Well-1 の水路が連結）

自噴深度付近に細粒輝緑岩または細粒はんれい岩の貫入（岩脈）が観察される。

試錐孔内での pH 計測（堀削水：泥水使用のため pH 希釈の可能性）

深度	22m	pH	9.16
深度	39m	pH	8.91

これらのデータから、DH08 のアルカリ地下水は、その自噴深度（22.7m）がオフィオライト基盤岩中に賦存し、この基盤岩中の断裂系を流路として上昇した裂か水であること、また、アルカリ裂か水が、深度約 22m 付近で滞留（貯留）・流動する独立系の水理場と流動系を形成したと思われる要因として、上記の岩脈（貫入）の役割が考えられる。それは、元来流動場であった変質自破碎または枕状玄武岩への後期火成岩（細粒輝緑岩または、細粒はんれい岩）の貫入活動（火成活動）により、空間の場の提供を図り、その結果明瞭な水路になるようなローカルな流動系を形成したものと考えられる。さらに、この岩脈は緻密な岩相・岩質のために「Cap Rock」の役目で不透水層（バリア）として機能したものと考えられる。

また、深度約 29m 付近では、自噴と共に、Well-1 の水位低下と白濁する事象から、両者間には連結している水路（断裂系または、割れ目）の存在が確信できる。また、Well-1 の水位低下の事象から、このアルカリ地下水の動水勾配は DH08 孔に向かうことが示唆される。

さらに、Well-1 から南に約 40m で堀削した、DH06 孔での基盤岩までの深度が約 26m であることから、DH08 孔と比べて約 15m の差があることと合わせて、やはり動水勾配は南へ向かうことがより自然である。

但し、Well-1 との連結部については、今後の Well-1 に関する情報の取得により、更なるアルカリ地下水の水理場とその流動系が明らかにすることが出来る。

2.8 アルカリ地下水環境下での変質鉱物の地球化学的プロセス

Active Type におけるベントナイトのアルカリ変質反応により形成される変質鉱物の鉱物学的・鉱物化学的特性に係る地球化学的プロセスを考察する上で、その要因（トリガー）となるアルカリ地下水の流動特性と地球化学的特性の理解に向けた具体的な取り組みが必要である。そのためには、これまでの調査・研究結果による新たな重要度の高い課題への取り組みを明確にし、その優先テーマを絞ることが必要である。

それは、ベントナイトのアルカリ変質反応の規模（範囲・程度）が予想以上にある限られた狭い範囲（オフィオライトとベントナイトの界面）であったことである。このことは少なくとも 2 つの取り組みをする課題があるということになる。

その一番目は、アルカリ地下水（溶液）がベントナイトに浸出する過程での溶液のダイナミックスとしての取り扱いである。一般的には、ベントナイト内での物質移動の大部分が拡散支配場であるが、一部幾何学形状を持つ割れ目（不均質な湿潤・膨潤などによるベントナイトとの反応に伴う体積の減少・密度低下などにより形成）などを水路として移流場が想定される。その両者に共通するダイナミックスは、このアルカリ溶液の性状（アルカリプルームの形状とアルカリフロントの挙動および組成変化など）とその移動速度などの理解である。

二番目は、ベントナイトとアルカリ溶液との変質反応による変質鉱物の形成プロセスでの固相変化である主に陽イオン交換で代表されるネオトランスフォーム（結晶縁での交代・置換など）および、モンモリロナイトやシリカ鉱物などの溶解－沈殿反応による二次鉱物の形成（結晶核の誕生－結晶核の成長－熱力学的安定な鉱物）である。特に、後者のモンモリロナイトの溶解現象の理解と溶解速度の算定は極めて重要である。

これらの現象を可能な限り自然界で適切に抽出して、必要なデータ・知見などを取得する必要がある。ここでは、アルカリ地下水が自噴している試錐孔（DH08）から採取した 5 件のコア試料について、詳細な鉱物学的・鉱物化学的特性にもとづくアルカリ変質反応の地球化学的プロセスを考察する。なお、鉱物の組成および構造・組織（性状、共生関係）などの観察・同定・元素分布・化学分析には EPMA、 μ -XRD、FESEM-EDS、WDS を使用した。

2.8.1 オフィオライトのアルカリ変質反応による岩石鉱物学的・地球化学的特性

ここではオフィオライト最上位にある Aksitero 累層の石灰質・凝灰岩質砂岩（1 試料）とオフィオライト複合火成岩体最上位の苦鉄質火成岩（自破碎玄武岩質溶岩、一部の枕状溶岩・細粒輝緑岩・はんれい岩）から 4 試料を選定した。その分析試料と分析項目を、表 2.8.1-1 と表 2.8.1-2 に示す。

鉱物分析のために作成した顕微鏡薄片のうち、オフィオライト岩盤内でアルカリ地下水と接触していた岩石試料は 4 件（BBDH08-13-Rh-016 / Rh-018 / Rh-042 / Rh-014）である。

表 2.8.1-1 に示すように、オフィオライトの初生鉱物は、透輝石～普通輝石（CP）少量の紫蘇輝石（OPX : Rh-042 のみ観察）、斜長石、不透明鉱物（主に磁鉄鉱）、石英／クリストバライト（Rh-042 のみ含有）などである。一方、変質鉱物は、モンモリロナイト、沸石（輝沸石、十字沸

石、一部が斜プチロル沸石)、方解石などである。

表 2.8.1-1 分析試料の一覧

試料番号	層準	Core sample ID	EPMA sample ID	Thin Section ID	記載(新)	初生鉱物	二次鉱物
①	上位	BBDH08-13-Rh-003	Rh-003	③up	Calcareous bentonite (tuffaceous)	Clinopyroxene Plagioclase Glass	Calcite Apatite Nontronitic montmorillonite Stellerite
③		BBDH08-13-Rh-016	Rh-016	②up	Altered Autobrecciated Basalt	Clinopyroxene Plagioclase Quartz Glass	Montmorillonite Heulandite- Phillipsite
④		BBDH08-13-Rh-018	Rh-018	①	Altered Autobrecciated Basalt	Olivine Clinopyroxene Plagioclase (Quartz) Glass	Montmorillonite Heulandite- Phillipsite
⑤		BBDH08-13-Rh-042	Rh-042	②low	Altered Autobrecciated Basalt	Clinopyroxene Orthopyroxene Plagioclase Quartz Glass	Montmorillonite Clinoptilolite
②	下位	BBDH08-13-RH14	RH14	③low	Altered Autobrecciated Basalt	Clinopyroxene Plagioclase Glass	Mn-rich calcite Nontronitic montmorillonite Heulandite

表 2.8.1-2 分析項目

分析項目	分析手法	試料形態	分析・観察
微細観察・分析	FESEM-EDS	破断片 (1 試料)	鉱物の産状観察と化学組成 (簡易 ZAF 定量による)
微細鉱物同定分析	μ -XRD	同上	ビデオ観察と X 線回折のデバイシ ェラーリング解析
反射電子線像, X 線 像観察	EPMA	研磨薄片 (2 試料)	鉱物の産状観察と組成推定
WDS 分析	同上	同上	スポット定量分析 (分析領域は反射電子線像で示す)
元素分布観察	同上	同上	元素マッピング (Si, Al, Fe, Mg, Ca, Na, K, O, C)

(1) 変質鉱物と共生鉱物の化学組成および微細組織

1) Rh-003

緻密な凝灰岩質の岩片は、白色の破片を内包する粘土で構成されていることがわかる（図 2.8.1-1）。白色の包有物の多くは微化石や火山岩斑晶の斜長石である。



図 2.8.1-1 試料 Rh-003 のマクロ観察

破断した岩片についての FESEM-EDS 観察・分析結果を図 2.8.1-2～図 2.8.1-3 に示す。

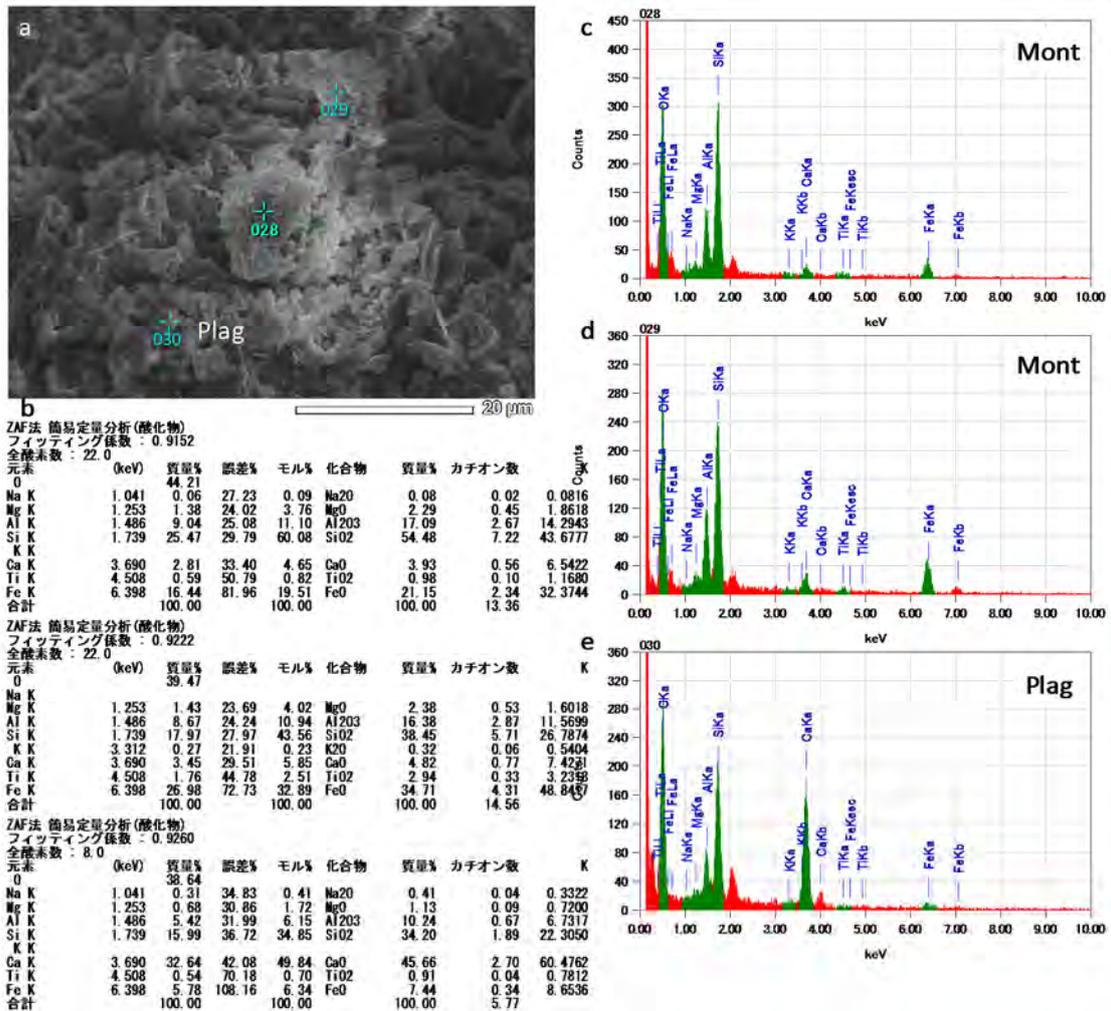


図 2.8.1-2 試料 Rh-003 の FESEM-EDS 観察・分析結果(その 1、a: FESEM 像; b: スポット分析値; c: スポット 028 の EDS; d: スポット 029; e: スポット 030)

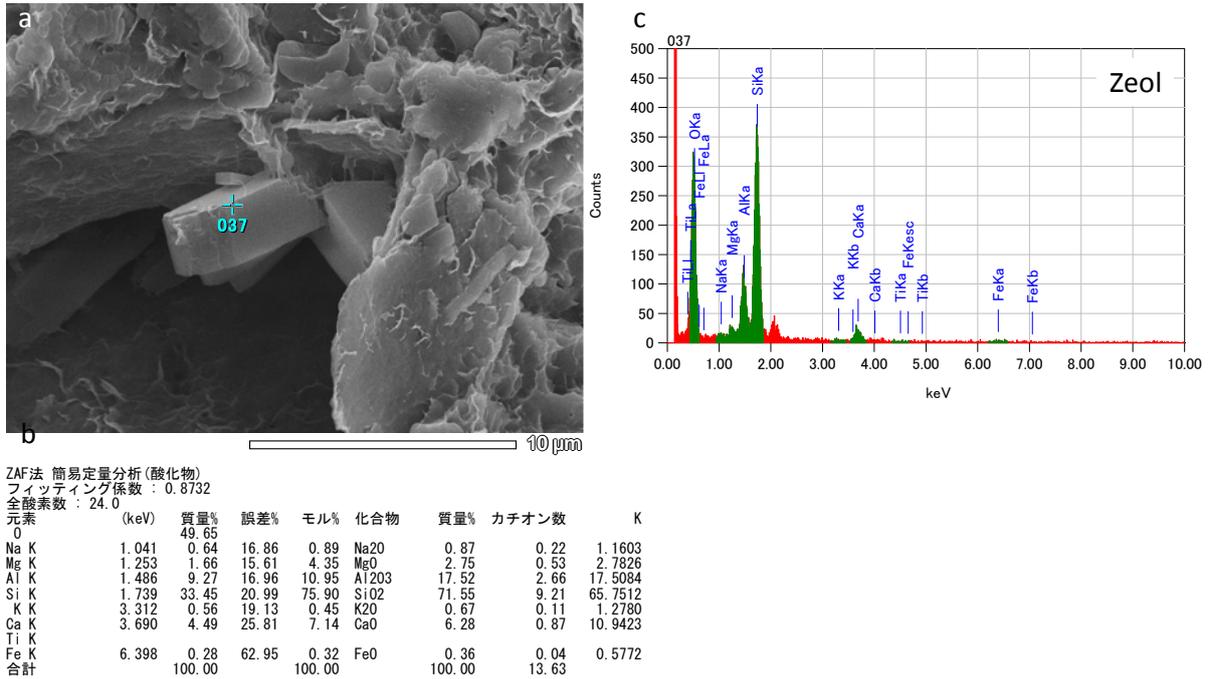


図 2.8.1-3 試料 Rh-003 の FESEM-EDS 観察・分析結果 (その 2、a: 沸石の FESEM 像; b: スポット分析値; c: スポット 037 の EDS)

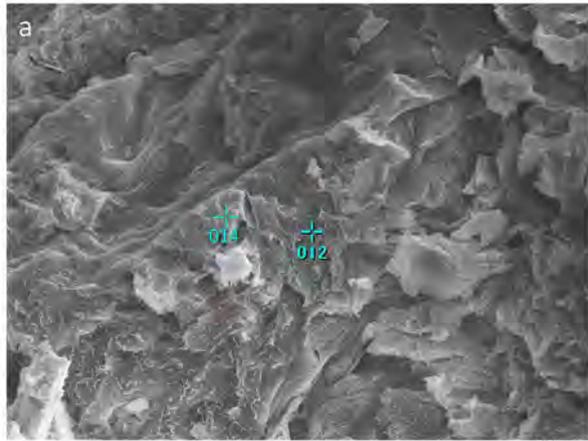
2) Rh-016

輝緑岩と記載されたこの試料 Rh-016 について、岩石、鉱物学的記載のための切断し試料準備を行った。図 2.8.1-4 には岩片試料の写真を示す。



図 2.8.1-4 試料 Rh-016 のマクロ観察

図 2.8.1-5～図 2.8.1-6 に、破断試料における FESEM-EDS 観察・分析結果を示す。



b

ZAF法 簡易定量分析(酸化物)
 フィッティング係数 : 0.8928
 全酸素数 : 22.0

元素	(keV)	質量%	誤差%	モル%	化合物	質量%	カチオン数
O		46.27					
Na K	1.041	0.11	15.71	0.15	Na2O	0.15	0.04
Mg K	1.253	2.91	14.12	7.70	MgO	4.83	0.91
Al K	1.486	8.57	15.26	10.20	Al2O3	16.19	2.42
Si K	1.739	28.35	18.27	64.83	SiO2	60.65	7.68
K K	3.312	0.98	15.79	0.81	K2O	1.19	0.19
Ca K	3.690	3.34	21.32	5.35	CaO	4.67	0.63
Ti K	4.508	0.39	32.44	0.53	TiO2	0.66	0.06
Fe K	6.398	9.07	52.01	10.43	FeO	11.67	1.24
合計		100.00		100.00		100.00	13.16

ZAF法 簡易定量分析(酸化物)
 フィッティング係数 : 0.8734
 全酸素数 : 22.0

元素	(keV)	質量%	誤差%	モル%	化合物	質量%	カチオン数	K
O		46.66						
Na K	1.041	1.50	12.48	2.09	Na2O	2.02	0.49	2.4689
Mg K	1.253	3.30	11.49	8.73	MgO	5.48	1.03	5.1093
Al K	1.486	9.43	12.50	11.22	Al2O3	17.82	2.64	16.3840
Si K	1.739	27.99	15.08	63.99	SiO2	59.88	7.52	51.9153
K K	3.312	0.28	12.94	0.23	K2O	0.34	0.05	0.6532
Ca K	3.690	2.56	17.41	4.10	CaO	3.58	0.48	6.2746
Ti K	4.508	0.62	26.47	0.83	TiO2	1.03	0.10	1.2883
Fe K	6.398	7.65	42.53	8.80	FeO	9.85	1.03	15.9065
合計		100.00		100.00		100.00	13.34	

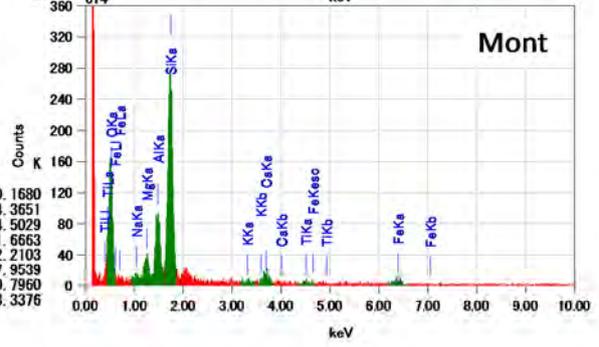
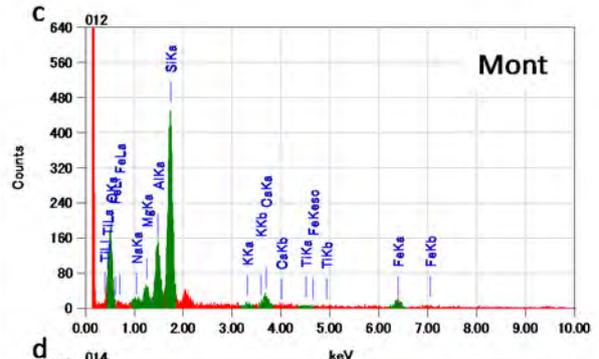


図 2.8.1-5 試料 Rh-016 の FESEM-EDS 観察・分析結果(その 1、a: FESEM 像; b: スポット分析値; c: スポット 012 の EDS; d: スポット 014 の EDS)

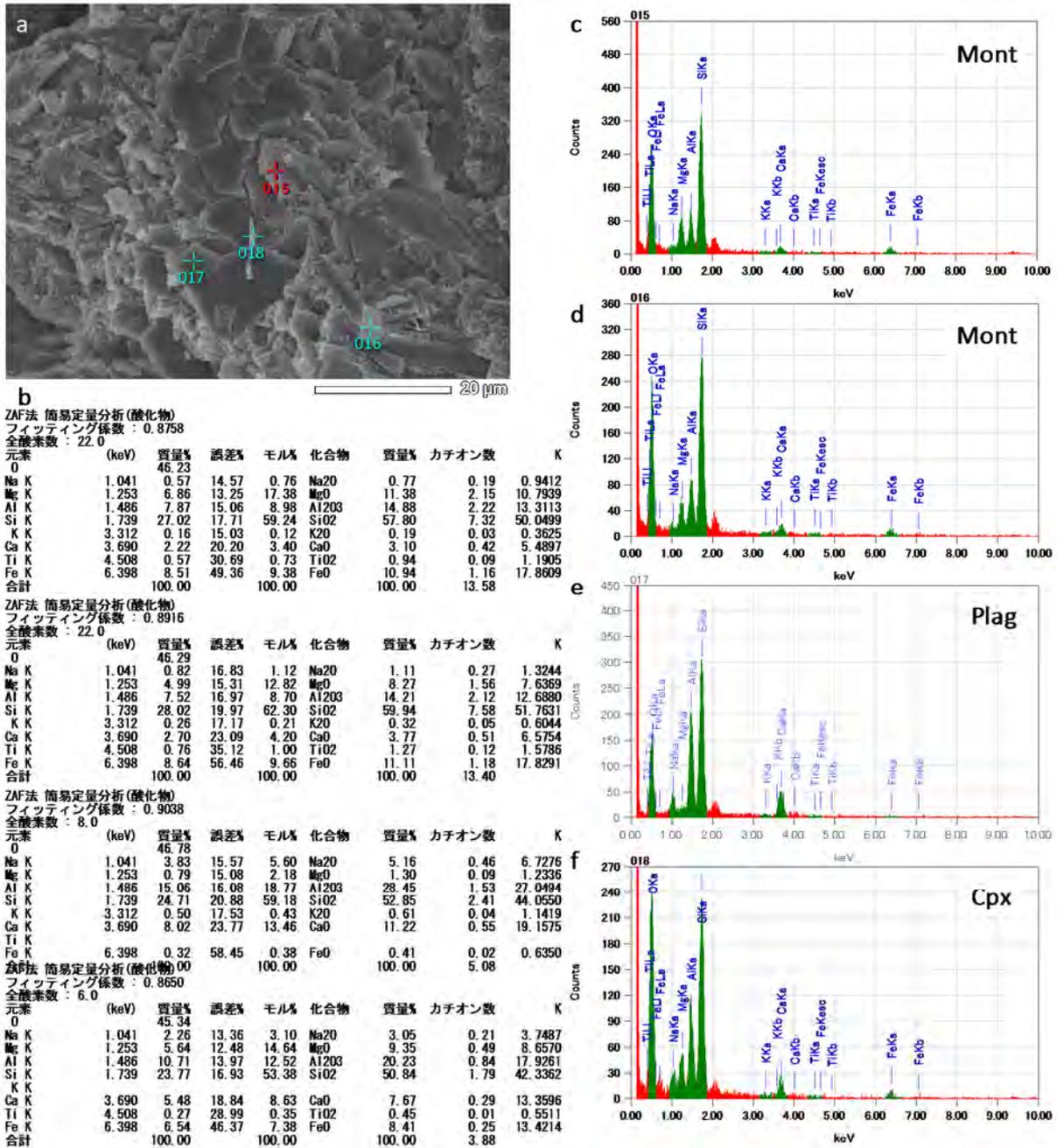


図 2.8.1-6 試料 Rh-016 の FESEM-EDS 観察・分析結果(その 2、a: FESEM 像; b: スポット分析値; c: スポット 015 の EDS; d: スポット 016; e: スポット 017; f: スポット 018)

3) Rh-018

蛇紋岩と記載された試料 Rh-018 について、岩石・鉱物学的記載のための分析を行った。切断面から、内部は角礫化した苦鉄質溶岩質物質で構成されていることがわかる (図 2.8.1-7)。



図 2.8.1-7 試料 Rh-018 のマクロ観察

この試料における破断片の FESEM-EDS 観察・分析を行った。図 2.8.1-8～図 2.8.1-10 に示す。

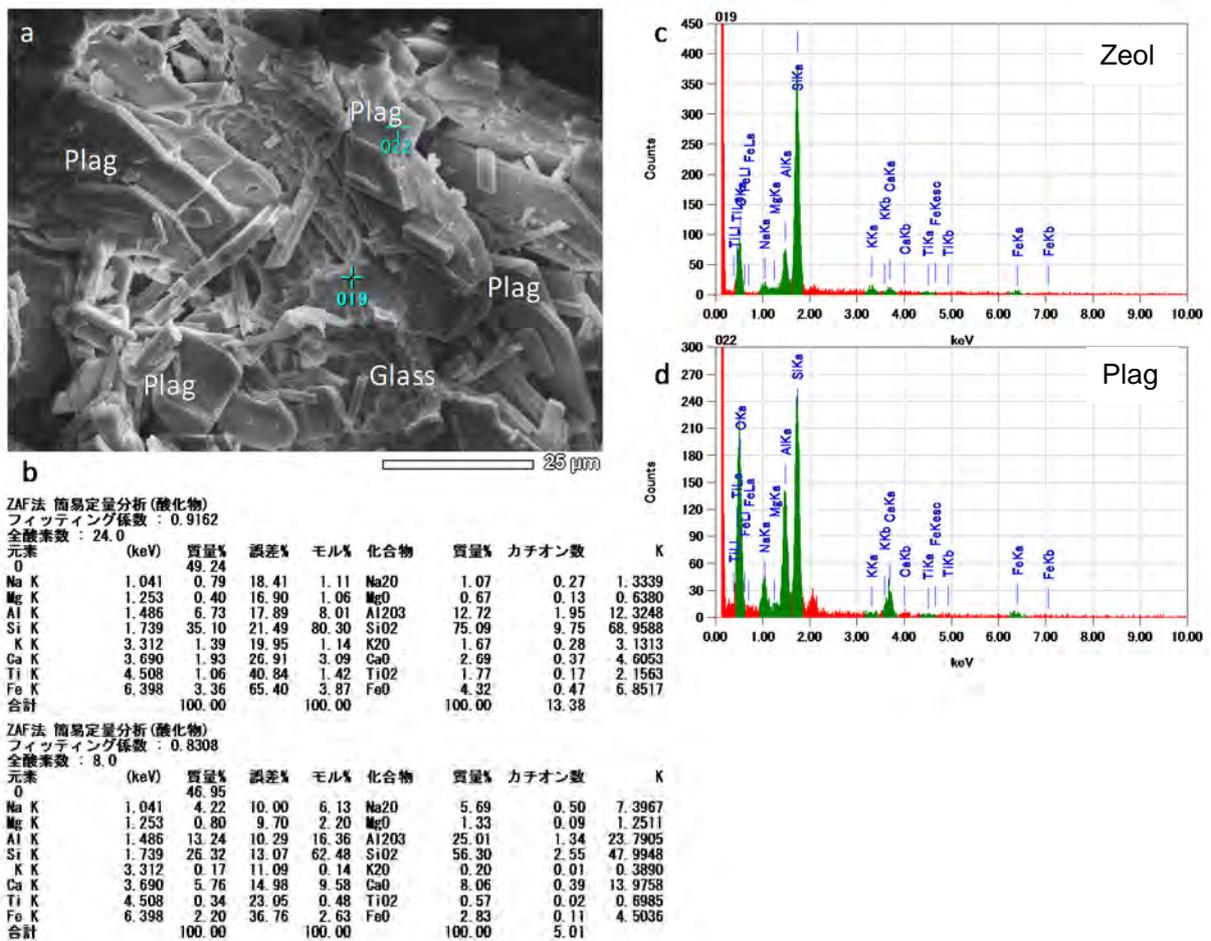


図 2.8.1-8 試料 Rh-018 の FESEM-EDS 観察・分析結果(その 1、a: FESEM 像; b: スポット分析値; c: スポット 019 の EDS; d: スポット 022)

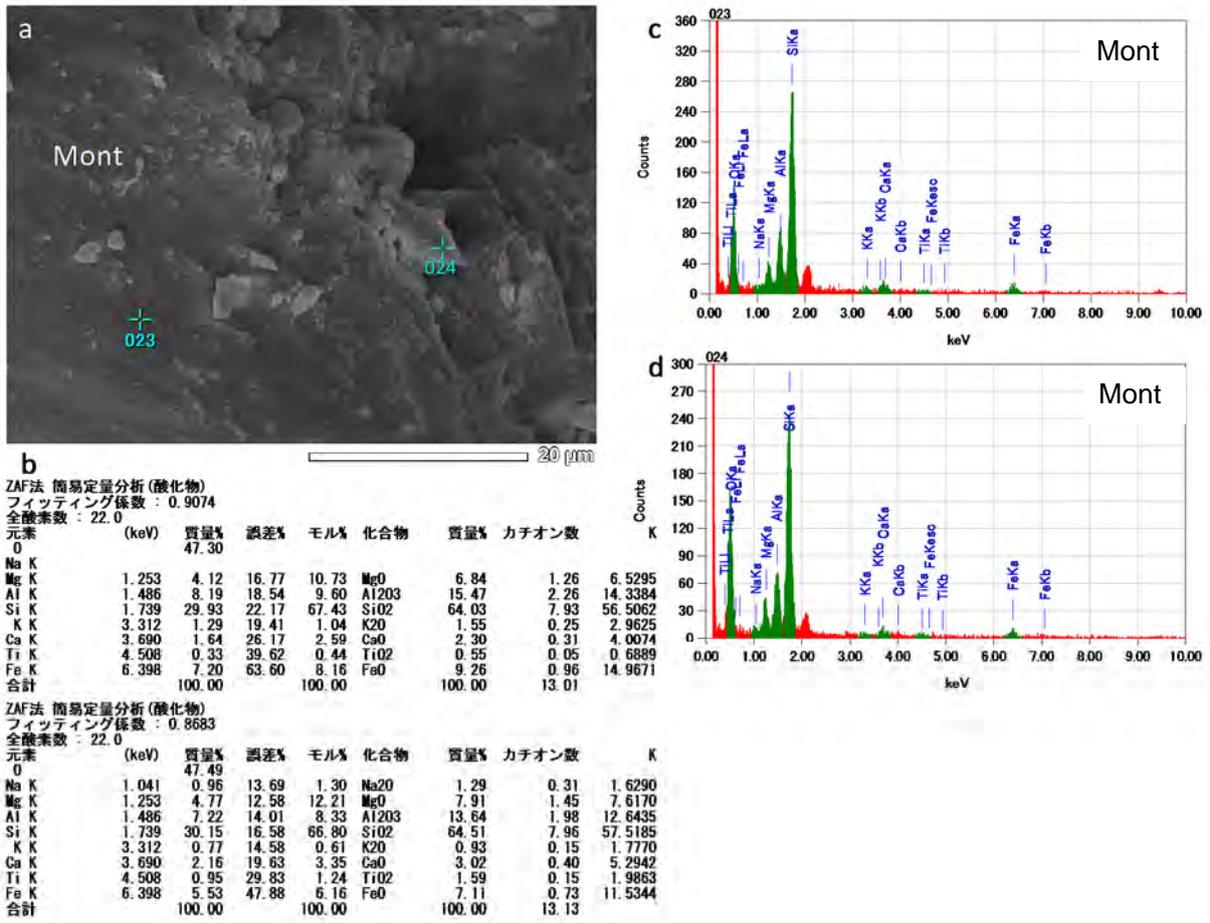


図 2.8.1-9 試料 Rh-018 の FESEM-EDS 観察・分析結果(その 2、a: FESEM 像; b: スポット分析値; c: スポット 023 の EDS; d: スポット 024)

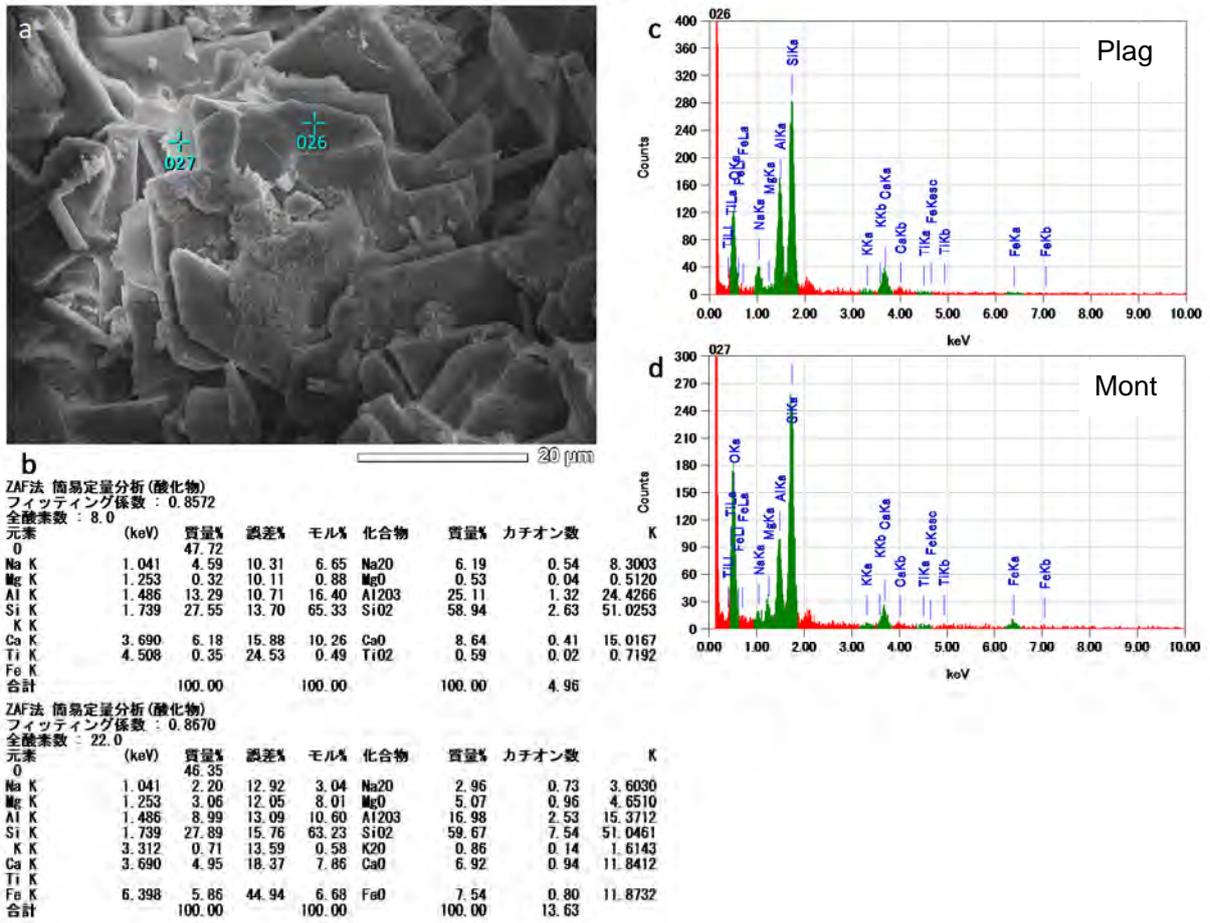


図 2.8.1-10 試料 Rh-018 の FESEM-EDS 観察・分析結果(その 3、a: FESEM 像; b: スポット分析値; c: スポット 026 の EDS; d: スポット 027)

フレッシュな板状結晶は、すべて隠微晶質の石基ガラス部の斜長石である。

4) Rh-042

Rh-042 試料の岩石・鉱物学的記載のための分析を行った。切断面から、微細なセル状組織が観察でき、これは苦鉄質溶岩の風化・変質組織と思われる(図 2.8.1-11)

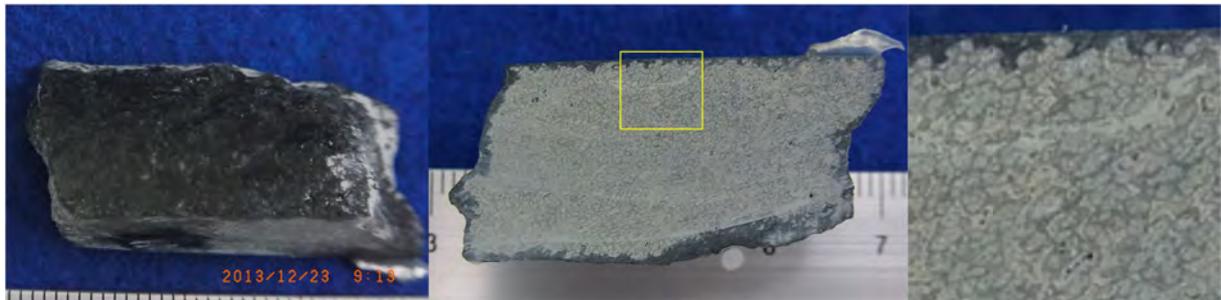


図 2.8.1-11 試料 Rh-042 のマクロ観察

この試料における破断片の FESEM-EDS 観察・分析を行った。図 2.8.1-12～図 2.8.1-14 に示す。

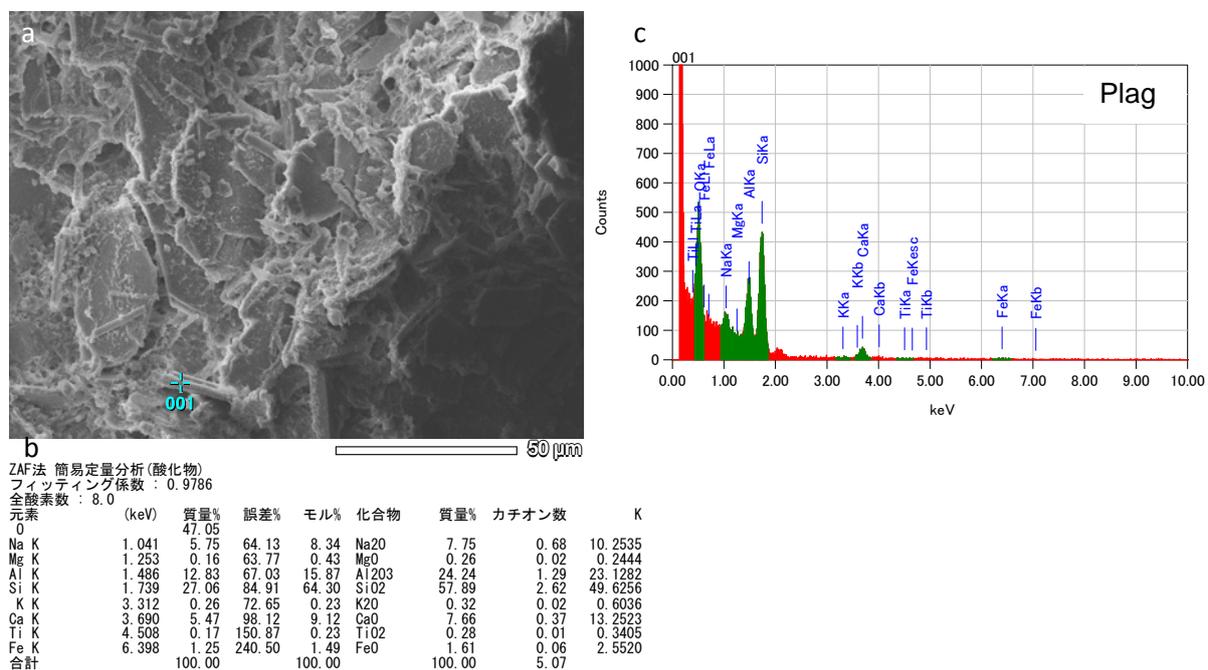
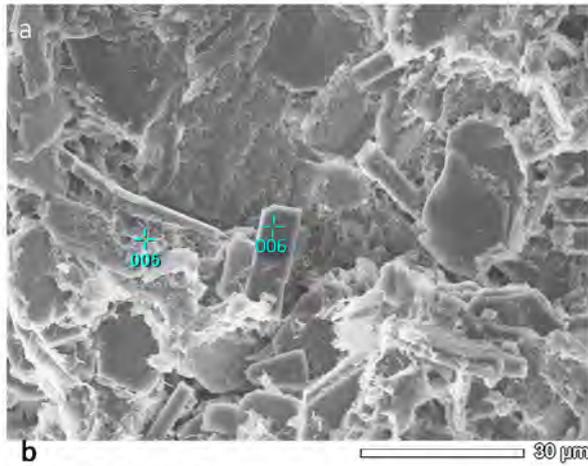


図 2.8.1-12 試料 Rh-042 の FESEM-EDS 観察・分析結果(その 1、a: FESEM 像; b: スポット分析値; c: スポット 001 の EDS)



ZAF法 簡易定量分析(酸化物)
 フィッティング係数 : 0.8943
 全酸素数 : 24.0

元素	(keV)	質量%	誤差%	モル%	化合物	質量%	カチオン数
O		43.10					
Na K	1.041	2.61	18.38	3.52	Na2O	3.52	1.01
Mg K	1.253	3.83	16.85	9.77	MgO	6.35	1.40
Al K	1.486	3.65	18.06	4.19	Al2O3	6.90	1.21
Si K	1.739	26.47	20.20	58.40	SiO2	56.62	8.39
K K	3.312	1.72	17.30	1.36	K2O	2.07	0.39
Ca K	3.690	4.74	23.47	7.33	CaO	6.63	1.05
Ti K	4.508	0.15	35.79	0.19	TiO2	0.25	0.03
Fe K	6.398	13.73	57.36	15.23	FeO	17.66	2.19
合計		100.00		100.00		100.00	15.68

ZAF法 簡易定量分析(酸化物)
 フィッティング係数 : 0.9182
 全酸素数 : 8.0

元素	(keV)	質量%	誤差%	モル%	化合物	質量%	カチオン数	K
O		47.21						
Na K	1.041	4.84	17.23	7.00	Na2O	6.53	0.57	8.7572
Mg K	1.253	1.06	16.96	2.89	MgO	1.75	0.12	1.6788
Al K	1.486	13.84	18.10	17.05	Al2O3	26.15	1.39	25.1665
Si K	1.739	26.23	23.16	62.10	SiO2	56.11	2.53	48.0285
K K								
Ca K	3.690	6.04	26.45	10.01	CaO	8.45	0.41	14.7353
Ti K								
Fe K	6.398	0.79	65.04	0.94	FeO	1.02	0.04	1.6338
合計		100.00		100.00		100.00	5.06	

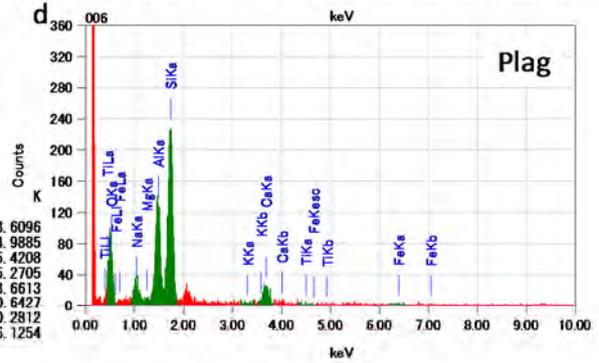
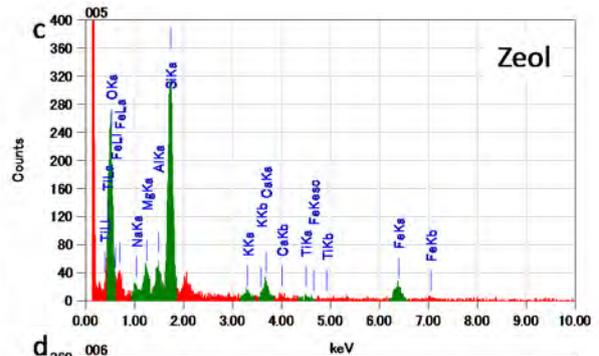


図 2.8.1-13 試料 Rh-042 の FESEM-EDS 観察・分析結果(その 2、a: FESEM 像; b: スポット分析値; c: スポット 005 の EDS; d: スポット 006)

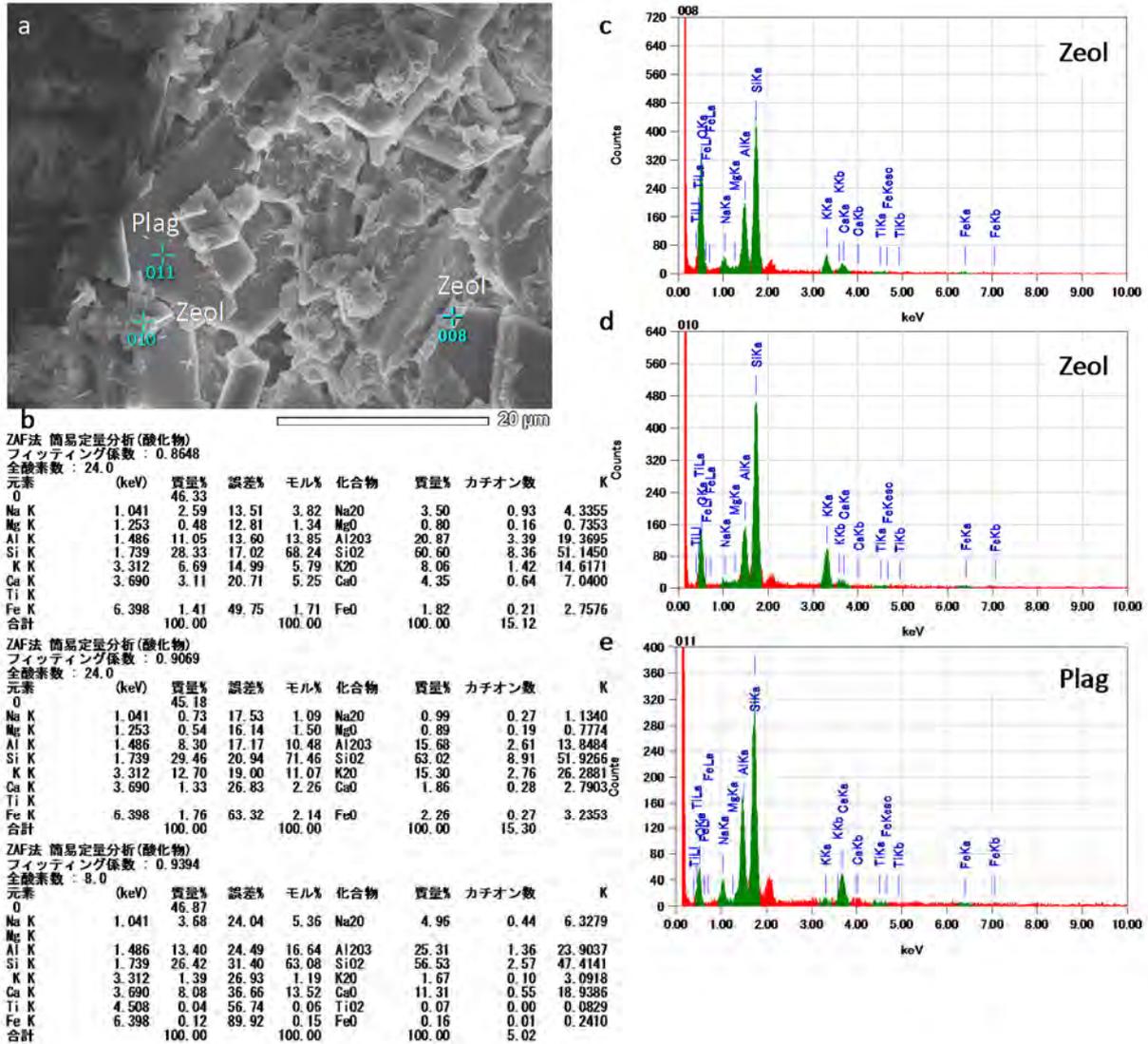


図 2.8.1-14 試料 Rh-042 の FESEM-EDS 観察・分析結果(その 3、a: FESEM 像; b: スポット分析値; c: スポット 008 の EDS; d: スポット 010; e: スポット 011)

5) RH14

RH14 試料の岩石・鉱物学的記載のための分析を行った。切断面からは、内部には不均質な緑色変質組織が残されていることがわかる (図 2.8.1-15)。



図 2.8.1-15 試料 RH14 のマクロ観察

この試料における破断片の FESEM-EDS 観察・分析を行った。図 2.8.1-16～図 2.8.1-18 に示す。

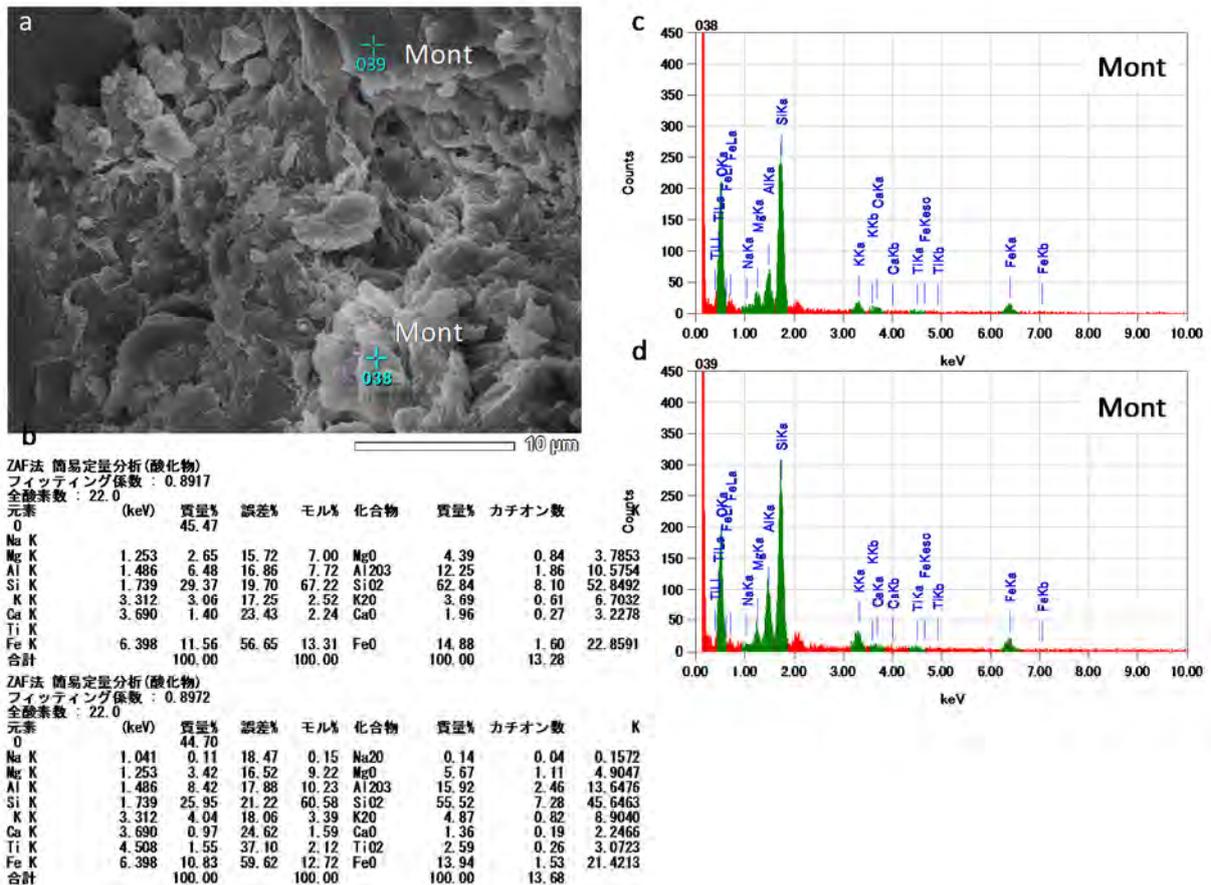


図 2.8.1-16 試料 RH14 の FESEM-EDS 観察・分析結果(その 1、a: FESEM 像; b: スポット分析値; c: スポット 038 の EDS; d: スポット 039)

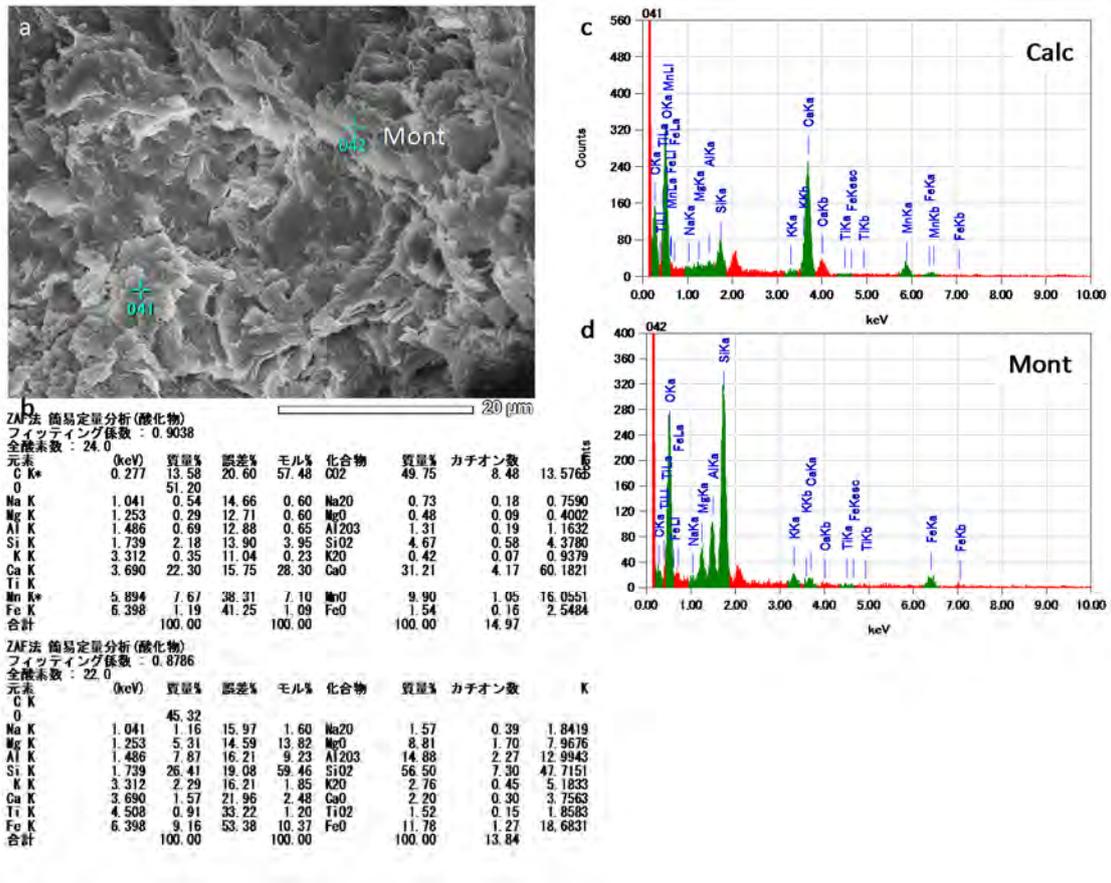


図 2.8.1-17 試料 RH14 の FESEM-EDS 観察・分析結果(その 2、a: FESEM 像; b: スポット分析値; c: スポット 041 の EDS; d: スポット 042)

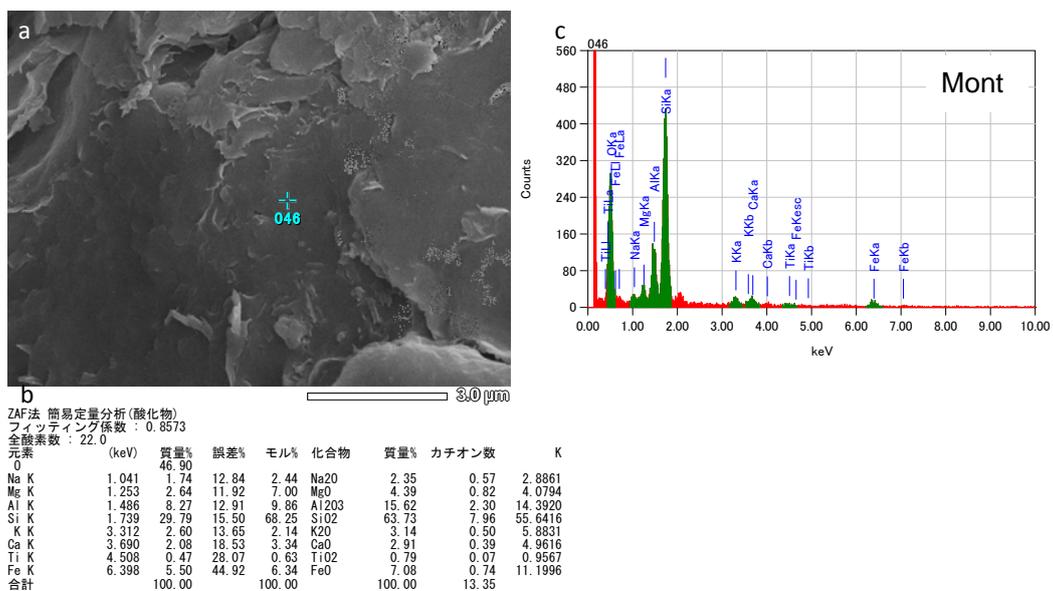


図 2.8.1-18 試料 RH14 の FESEM-EDS 観察・分析結果(その 3、a: FESEM 像; b: スポット分析値; c: スポット 046 の EDS)

(2) 変質鉱物の微細結晶相の決定

変質相の特徴を捉えるために、高感度な結晶相同定が可能なマイクロ XRD 測定を行った。測定はすべて、ビーム径 300 ミクロンにおいて鉱物学的評価に用いた。

1) Rh-003

マイクロ XRD 測定試料の様子を図 2.8.1-19 に示す。

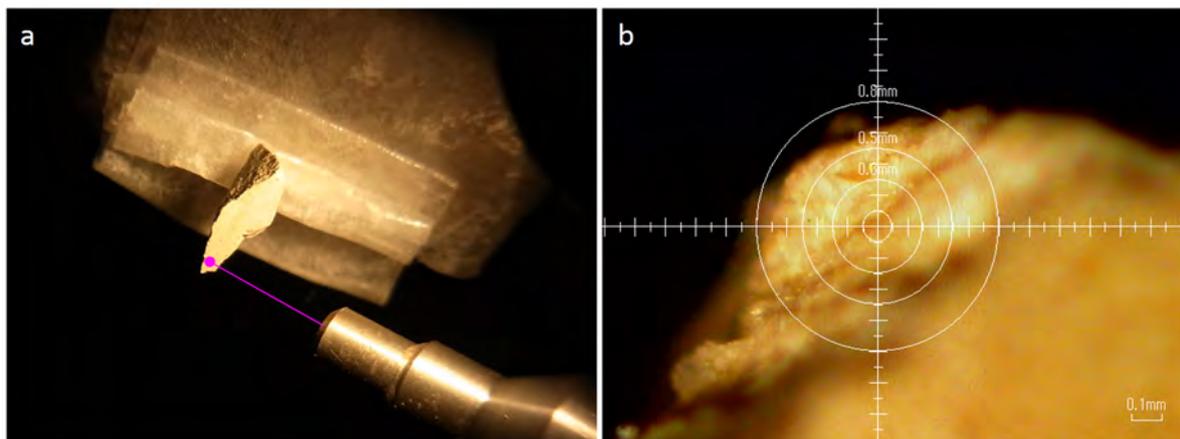


図 2.8.1-19 試料 Rh-003 の μ -XRD 分析(a: 分析スポットの位置; b: 分析スポットの顕微画像)

得られた回折パターンを参照データと共に図 2.8.1-20 に示す。

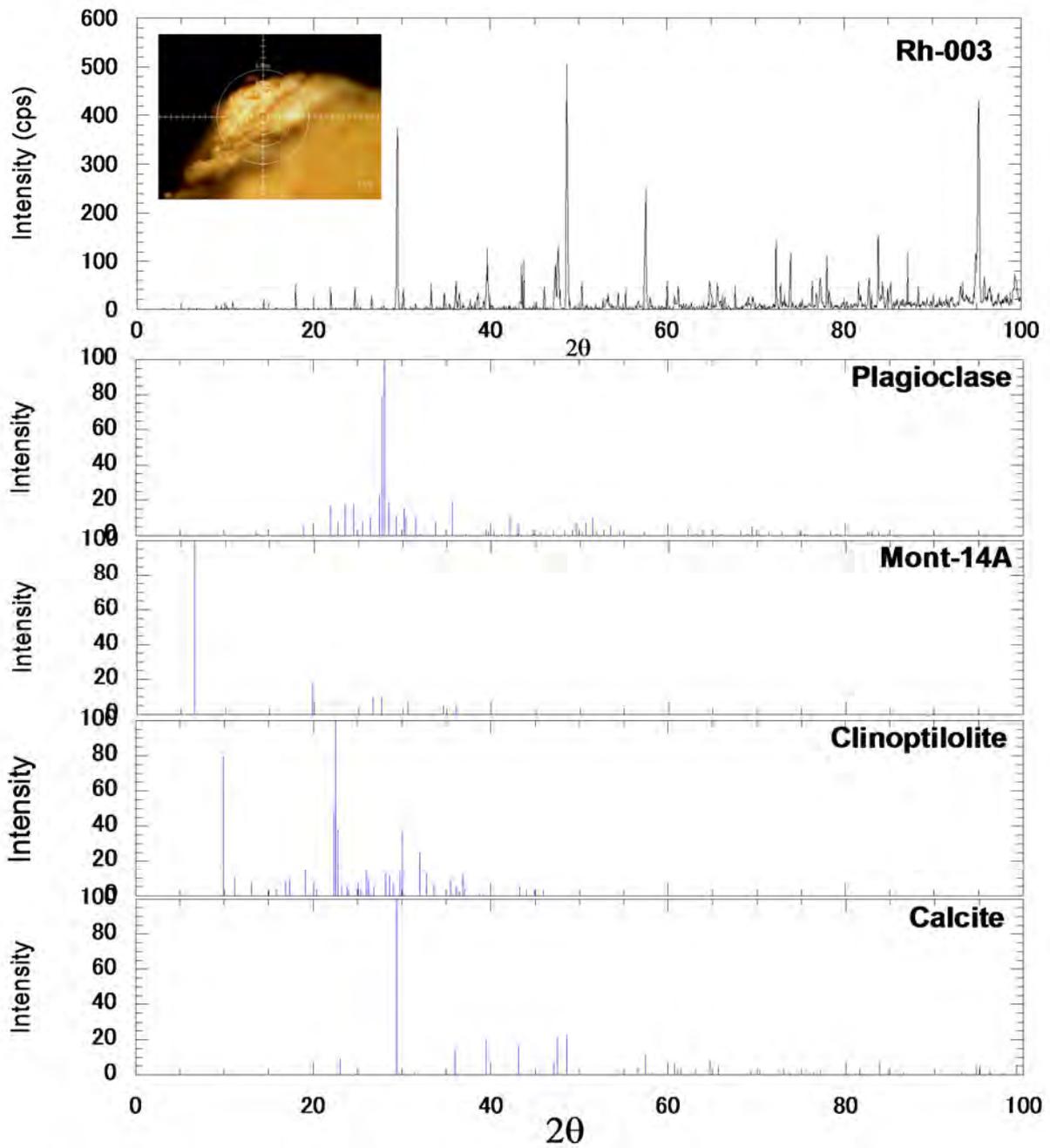


図 2.8.1-20 試料 Rh-003 の μ -XRD 分析結果

方解石、モンモリロナイトのピークが確認できる。

2) Rh-016

マイクロ XRD 測定試料の様子を図 2.8.1-21 に示す。

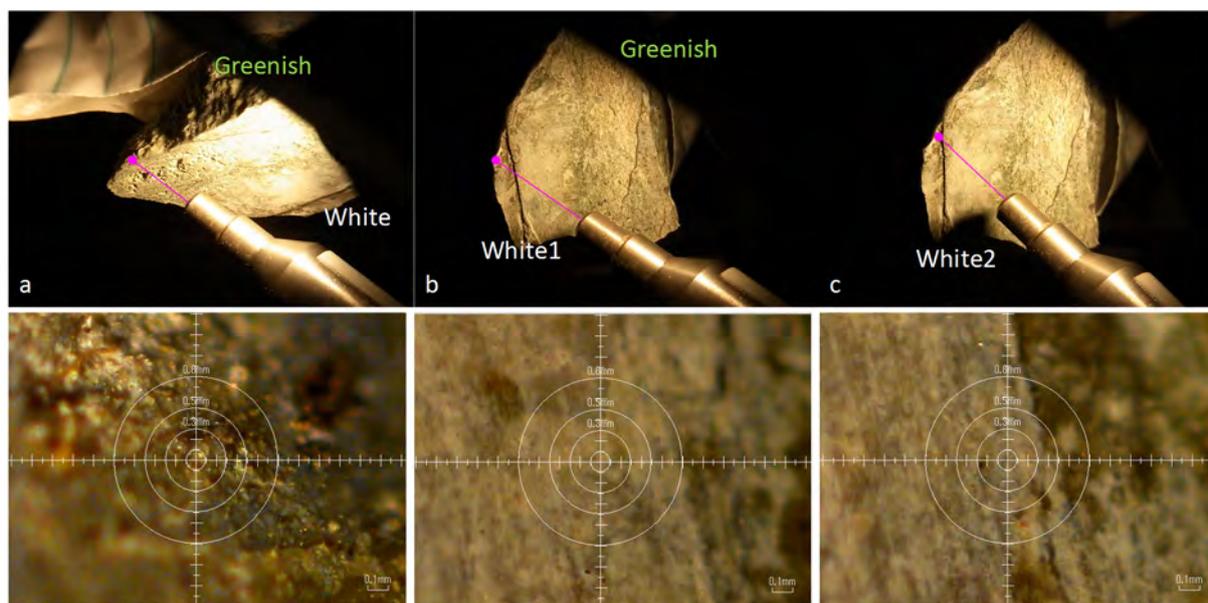


図 2.8.1-21 試料 Rh-016 の μ -XRD 分析(a: 緑色部; b: 白色部 1; c: 白色部 2)

得られた回折パターンを参照データと共に図 2.8.1-22 に示す。

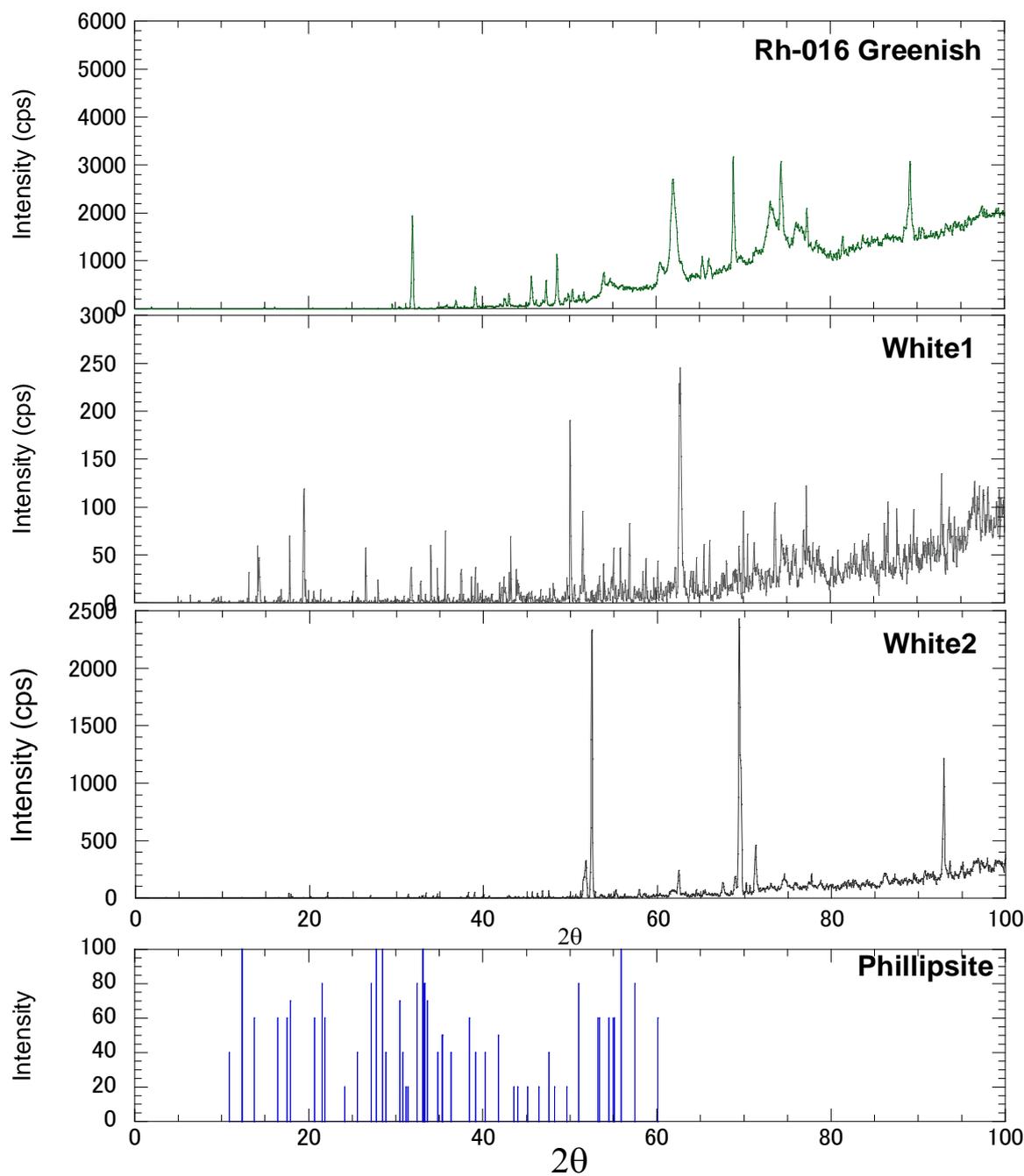


図 2.8.1-22 試料 Rh-016 の μ -XRD 分析結果

緑色部には、十字沸石に一致するピークが確認できる。

3) Rh-018

得られた回折パターンを参照データと共に図 2.8.1-23 に示す。

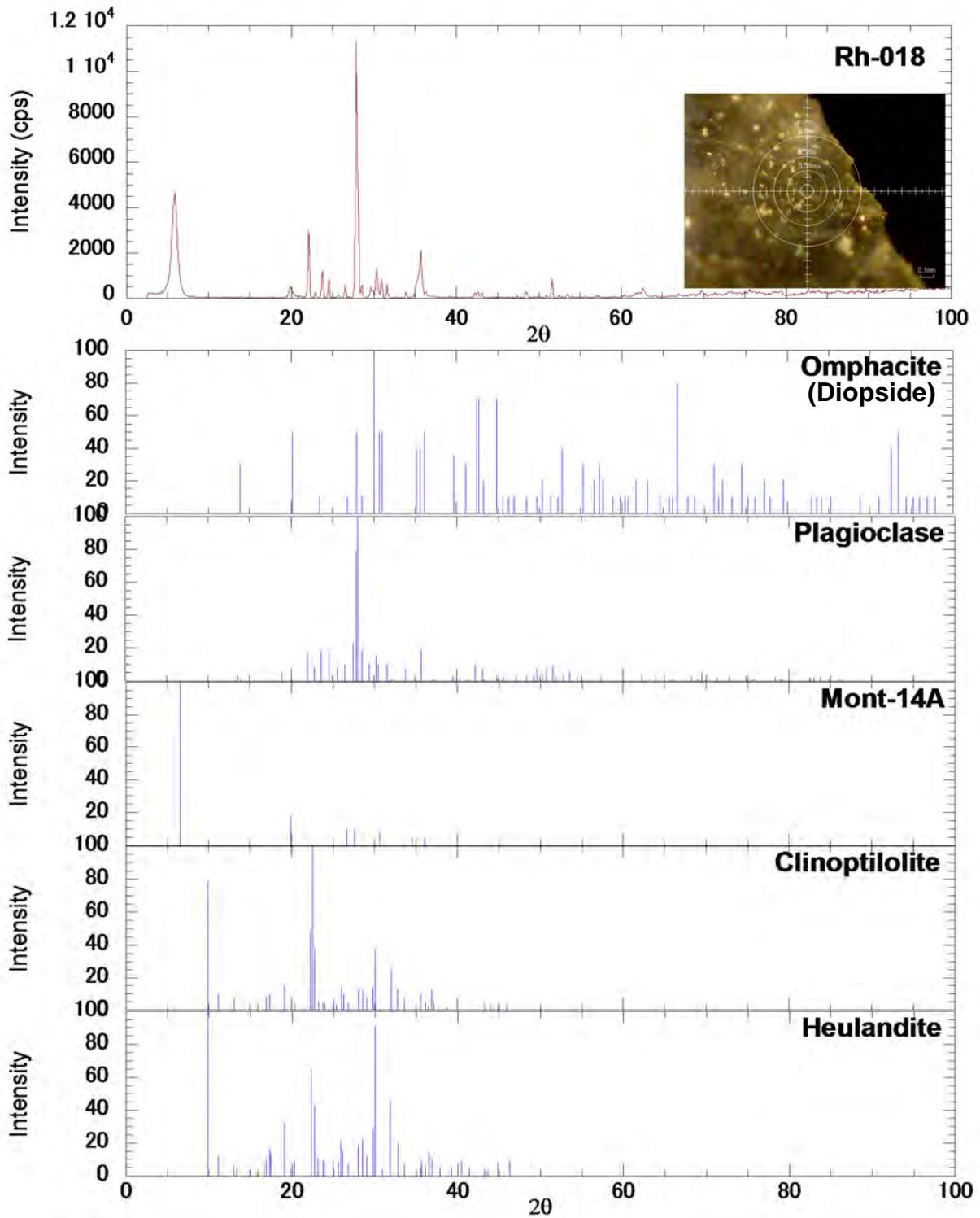


図 2.8.1-23 試料 Rh-018 の μ -XRD 分析結果

モンモリロナイト、輝沸石-斜プチロル沸石に一致するピークが確認できる。

4) Rh-042

得られた回折パターンを参照データと共に図 2.8.1-24 に示す。

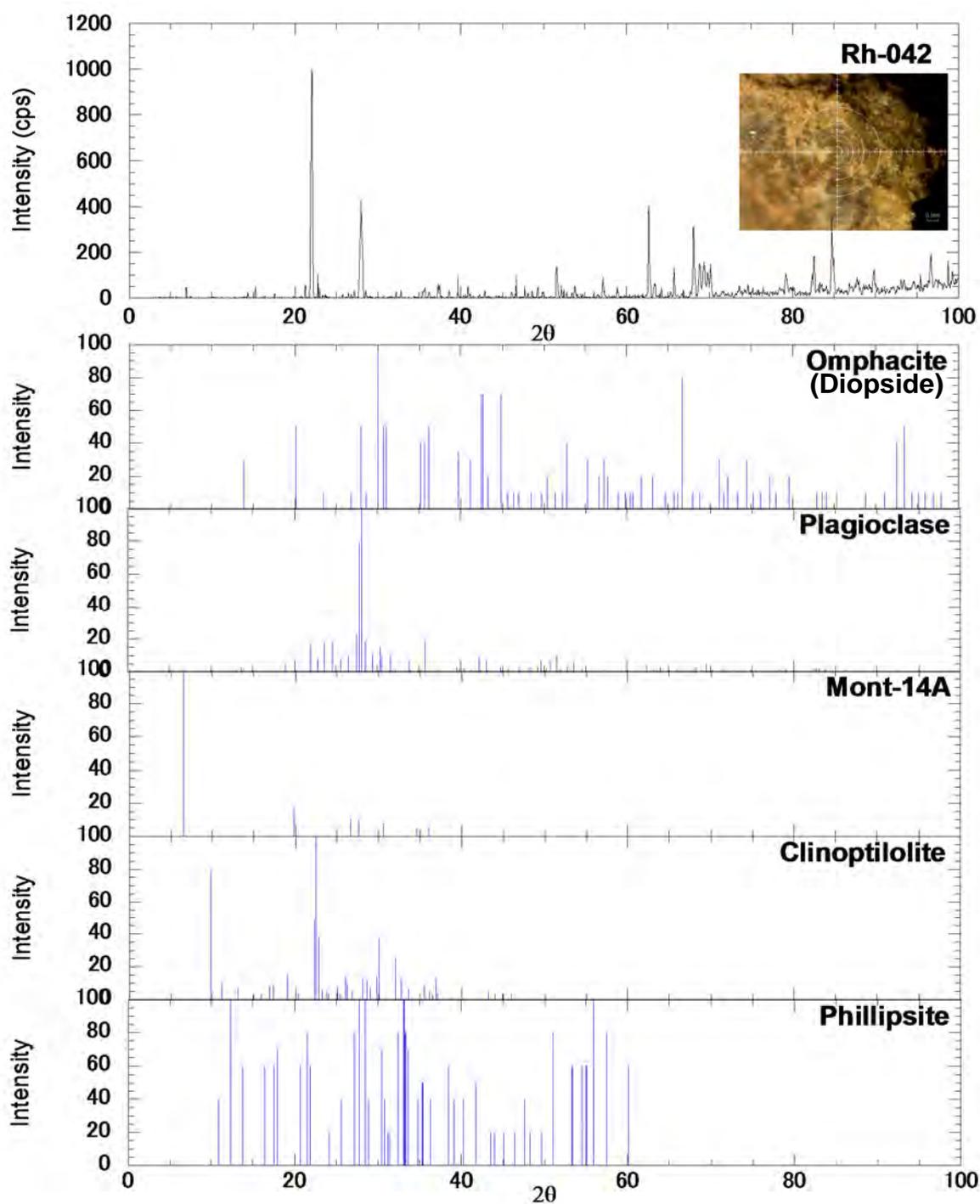


図 2.8.1-24 試料 Rh-042 の μ -XRD 分析結果

斜プチロル沸石、十字沸石に一致するピークが確認できる。

5) RH14

マイクロ XRD 測定試料の様子を図 2.8.1-25 に示す。

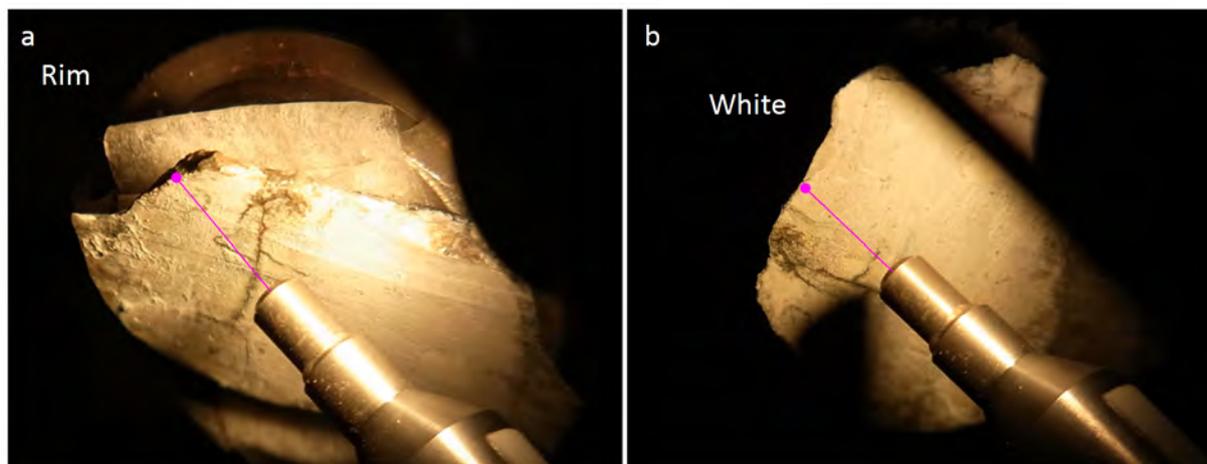


図 2.8.1-25 試料 RH14 の μ -XRD 分析(a: リム部; b: 白色部)

得られた回折パターンを参照データと共に図 2.8.1-26 に示す。

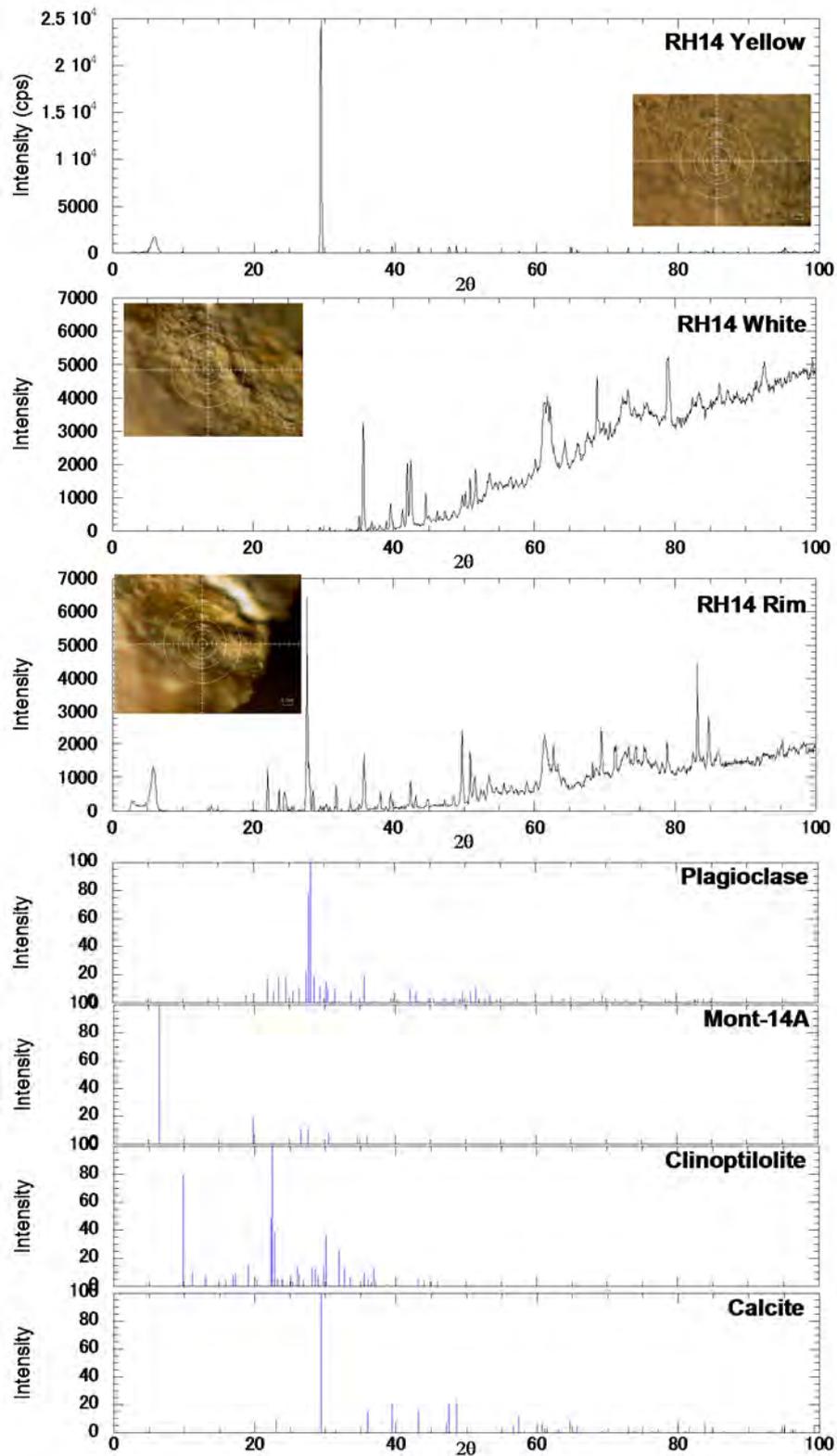


図 2.8.1-26 試料 RH14 の μ -XRD 分析結果

リム部には斜プチロル沸石のピークが、内部の白色部は方解石の強いピークが確認できる。

(3) 変質鉱物と共生鉱物の鉱物化学的特徴

各試料において、電子線スポットによるX線波長分散分析を行った（加速電圧は15 kV）。得られた強度データ(cps)は標準試料測定データに対してOxide ZAF補正を行い、定量値とした。求められた化学組成から酸素数に基づき、各鉱物の構造式を計算した。ただし沸石については便宜的に酸素数をスメクタイトのそれ(O=22)としてある。結果を以下に列記する。

1) Rh-003

各鉱物の分析値を表 2.8.1-3~表 2.8.1-4 に示す。

表 2.8.1-3 スメクタイトの化学組成(Rh-003)

Sample ID Rh-003												
No.	262	263	265	266	267	268	269	270	272	273	274	275
wt												
No.	262	263	265	266	267	268	269	270	272	273	274	275
SiO ₂	54.71	46.72	50.66	56.36	50.08	54.77	52.85	54.77	55.89	46.10	51.41	54.74
Al ₂ O ₃	10.59	9.98	10.40	11.48	10.17	11.92	12.62	11.83	12.23	10.82	10.97	10.57
TiO ₂	0.51	0.34	0.36	0.38	0.31	0.35	0.27	0.47	0.35	0.36	0.47	0.51
FeO	16.05	11.80	13.61	14.04	10.85	13.50	10.38	13.86	12.87	10.27	12.65	15.89
Cr ₂ O ₃	0.00	0.02	0.05	0.05	0.05	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MnO	0.05	0.04	0.07	0.06	0.04	0.06	0.03	0.02	0.04	0.05	0.07	0.07
MgO	3.75	3.06	3.15	3.92	3.11	3.44	3.31	3.45	3.55	2.97	3.58	3.50
CaO	3.40	9.76	2.67	2.90	8.30	2.59	7.91	2.53	2.80	6.32	5.60	2.16
Na ₂ O	0.09	0.15	0.07	0.15	0.10	0.15	0.13	0.04	0.10	0.13	0.18	0.14
K ₂ O	2.73	1.62	2.33	2.57	1.93	2.77	1.36	2.35	1.89	0.95	1.62	2.69
Total	91.87	83.48	83.36	91.91	84.94	89.55	88.89	89.32	89.72	77.96	86.54	90.26
O = 22												
No.	262	263	265	266	267	268	269	270	272	273	274	275
Si	7.845	7.463	7.913	7.939	7.725	7.912	7.672	7.920	7.968	7.658	7.741	7.941
Al	1.790	1.880	1.915	1.906	1.849	2.029	2.160	2.015	2.055	2.120	1.947	1.807
Ti	0.055	0.041	0.042	0.040	0.036	0.038	0.029	0.051	0.037	0.044	0.054	0.055
Fe	1.925	1.576	1.778	1.655	1.399	1.631	1.260	1.677	1.534	1.427	1.593	1.928
Cr	0.000	0.002	0.007	0.005	0.006	0.001	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mn	0.006	0.005	0.009	0.007	0.005	0.008	0.004	0.003	0.005	0.007	0.008	0.009
Mg	0.801	0.728	0.732	0.823	0.714	0.740	0.717	0.743	0.755	0.735	0.804	0.756
Ca	0.522	1.670	0.447	0.438	1.372	0.400	1.230	0.392	0.427	1.126	0.904	0.336
Na	0.026	0.048	0.022	0.042	0.030	0.042	0.037	0.011	0.028	0.043	0.052	0.039
K	0.500	0.330	0.463	0.462	0.381	0.511	0.253	0.433	0.344	0.200	0.312	0.497
Total	13.468	13.743	13.327	13.317	13.517	13.312	13.363	13.244	13.153	13.360	13.414	13.369
Comment												
	3up-clay_10	3up-clay_11	3up-clay_13	3up-clay_14	3up-clay_15	3up-clay_16	3up-clay_17	3up-clay_18	3up-clay_20	3up-clay_21	3up-clay_22	3up-clay_23
XFe	0.706	0.684	0.708	0.668	0.662	0.688	0.637	0.693	0.670	0.660	0.665	0.718
XCa	0.498	0.816	0.479	0.465	0.770	0.420	0.809	0.469	0.534	0.822	0.713	0.385
XK	0.477	0.161	0.497	0.490	0.213	0.536	0.166	0.518	0.431	0.146	0.246	0.570

観察した一つのクラストにおけるスメクタイトについて、X_{Fe} vs. X_Kプロットで示した（図 2.8.1-27）。Fe-Kに富む組成的特徴を持っていることがわかる。

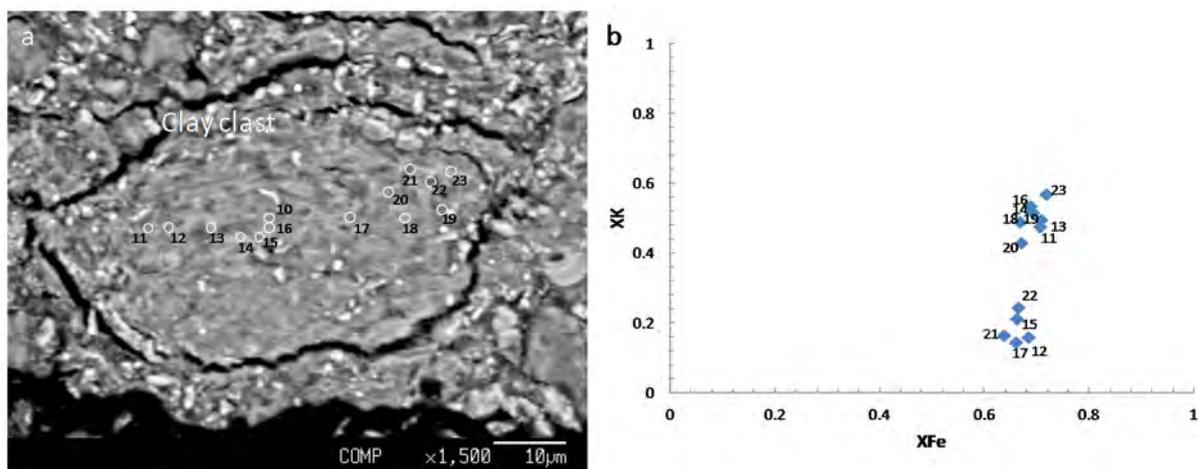


図 2.8.1-27 スメクタイト(Rh-003)の産状(a)と化学組成の特徴(b)

沸石の化学組成を表 2.8.1-4 に示す。

表 2.8.1-4 沸石の化学組成(Rh-003)

Sample ID Rh-003						
No.	254	256	257	258	259	260
SiO ₂	67.58	60.26	56.46	65.22	60.12	63.24
Al ₂ O ₃	13.30	10.72	10.57	12.18	11.23	13.80
TiO ₂	0.01	0.03	0.12	0.00	0.17	0.72
FeO	0.14	0.59	2.65	0.22	1.00	4.96
Cr ₂ O ₃	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.03
MnO	0.02	0.00	0.03	0.00	0.04	0.02
MgO	1.11	0.76	0.99	0.96	1.21	2.29
CaO	5.09	5.30	5.18	5.01	5.02	5.37
Na ₂ O	0.15	0.16	0.12	0.13	0.09	0.13
K ₂ O	0.05	0.01	0.22	0.08	0.18	0.43
Total	87.46	77.83	76.35	83.81	79.06	90.99
O = 22						
No.	254	256	257	258	259	260
Si	8.950	9.020	8.790	9.016	8.901	8.395
Al	2.076	1.891	1.939	1.985	1.959	2.159
Ti	0.001	0.003	0.015	0.000	0.019	0.072
Fe	0.016	0.074	0.346	0.025	0.124	0.551
Cr	0.001	0.000	0.000	0.002	0.000	0.003
Mn	0.002	0.000	0.004	0.000	0.006	0.002
Mg	0.220	0.170	0.230	0.197	0.267	0.453
Ca	0.723	0.850	0.863	0.742	0.796	0.764
Na	0.038	0.047	0.036	0.035	0.026	0.033
K	0.009	0.003	0.044	0.015	0.035	0.073
Total	12.034	12.057	12.266	12.016	12.131	12.505
Comment	³ up- plg_in_pumice_ 2	³ up- mont_in_pumice_ _4	³ up- mont_in_pumice_ _5	³ up- zeol_in_pumice_ 6	³ up- zeol_in_pumice_ 7	³ up- clay_in_calcite_ 8
Si/Al	4.312	4.770	4.532	4.541	4.543	3.888
XNK	0.060	0.055	0.085	0.062	0.070	0.121
NOTE:	XNK = (Na+K)/(Ca+Na+K)					

方解石の化学組成を表 2.8.1-5 に示す。

表 2.8.1-5 方解石の化学組成(Rh-003&Rh-016)

Sample ID	Rh-003		Rh-016	
No.	253	255	261	156
SiO2	2.19	0.06	0.01	0.00
Al2O3	0.51	0.03	0.02	0.00
TiO2	0.04	0.01	0.01	0.00
FeO	0.36	0.11	0.06	0.15
Cr2O3	0.04	0.00	0.00	0.00
MnO	0.04	0.12	0.07	6.55
MgO	0.10	0.01	0.01	0.53
CaO	52.81	58.89	56.51	55.63
Na2O	0.01	0.03	0.00	0.00
K2O	0.03	0.00	0.00	0.00
Total	56.14	59.26	56.67	62.85
O = 1				
Si	0.035	0.001	0.000	0.000
Al	0.010	0.001	0.000	0.000
Ti	0.001	0.000	0.000	0.000
Fe	0.005	0.002	0.001	0.002
Cr	0.001	0.000	0.000	0.000
Mn	0.001	0.002	0.001	0.084
Mg	0.002	0.000	0.000	0.012
Ca	0.906	0.993	0.997	0.902
Na	0.000	0.001	0.000	0.000
K	0.001	0.000	0.000	0.000
Total	0.960	0.999	1.000	1.000
Comment	^{3up-} plg_in_pumice 001	^{3up-} cal_in_pumice 3	^{3up-} ccalcite_9	^{2up-} Cc_48
NOTE:	CaO in CaCO3 as O = 1.			

2) Rh-016

各鉱物の分析値を表 2.8.1-6~表 2.8.1-12 以下に示す。

表 2.8.1-6 斜長石の化学組成(Rh-016)

Sample ID Rh-016											
No.	109	110	111	112	113	114	118	119	152	155	252
SiO2	51.49	49.32	48.75	47.88	52.02	50.02	48.91	49.18	49.01	48.40	49.45
Al2O3	29.15	31.33	31.76	32.68	29.91	30.98	30.86	31.22	31.72	32.74	32.37
TiO2	0.06	0.02	0.00	0.04	0.00	0.00	0.02	0.00	0.04	0.00	0.02
FeO	0.35	0.34	0.20	0.33	0.22	0.29	0.26	0.27	0.16	0.20	0.67
Cr2O3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00
MnO	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.03	0.00	0.02	0.00
MgO	0.26	0.10	0.09	0.10	0.13	0.12	0.08	0.09	0.09	0.09	0.12
CaO	13.05	14.68	15.37	16.06	13.19	14.16	14.87	15.09	15.13	15.78	15.11
Na2O	3.51	3.08	2.48	2.09	3.88	3.15	2.92	2.71	2.69	2.40	2.64
K2O	0.19	0.07	0.07	0.05	0.10	0.06	0.08	0.05	0.03	0.03	0.06
Total	98.06	98.93	98.71	99.23	99.44	98.79	97.99	98.63	98.88	99.69	100.43
O = 8											
No.	109	110	111	112	113	114	118	119	152	155	252
Si	2.384	2.277	2.256	2.211	2.375	2.306	2.281	2.277	2.263	2.222	2.252
Al	1.591	1.705	1.732	1.778	1.610	1.684	1.696	1.704	1.726	1.771	1.737
Ti	0.002	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.002	0.000	0.001
Fe	0.014	0.013	0.008	0.013	0.008	0.011	0.010	0.010	0.006	0.008	0.025
Cr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000
Mn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000
Mg	0.018	0.007	0.006	0.007	0.009	0.008	0.005	0.006	0.006	0.006	0.008
Ca	0.647	0.726	0.762	0.794	0.645	0.700	0.743	0.749	0.749	0.776	0.737
Na	0.315	0.276	0.223	0.187	0.343	0.281	0.264	0.243	0.241	0.214	0.233
K	0.011	0.004	0.004	0.003	0.006	0.004	0.005	0.003	0.002	0.002	0.004
Total	4.982	5.009	4.991	4.994	4.995	4.994	5.005	4.994	4.994	5.000	4.997
Comment	2up-plg_001	2up-plg_2	2up-plg_3	2up-plg_4	2up-plg_5	2up-plg_6	2up-cpx_10	2up-cpx_11	2up-px_44	2up-px_47	2up_line_f rom zeol_to_m ont_69end

表 2.8.1-7 スメクタイトの化学組成(Rh-016、その1)

Sample ID	Rh-016															(continue to 2)		
No.	125	126	127	130	132	134	143	206	208	209	210	212	213	214	215			
wt																		
No.	125	126	127	130	132	134	143	206	208	209	210	212	213	214	215			
SiO2	56.34	62.08	57.88	54.69	53.41	52.33	49.35	50.16	58.51	53.89	52.24	55.97	55.49	56.90	50.93			
Al2O3	9.09	13.56	15.26	19.11	8.29	14.78	10.58	10.29	15.00	11.12	11.11	11.96	14.04	13.63	10.17			
TiO2	0.39	0.00	0.03	0.13	0.45	1.32	0.14	0.17	0.03	0.08	0.30	0.17	0.20	0.13	0.12			
FeO	4.78	0.12	0.73	2.04	4.60	1.41	2.34	5.05	1.26	4.82	6.67	6.72	7.72	6.38	7.22			
Cr2O3	0.01	0.00	0.00	0.00	0.07	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.02	0.00			
MnO	0.18	0.00	0.01	0.09	0.22	0.08	0.17	0.11	0.02	0.10	0.13	0.11	0.10	0.10	0.13			
MgO	4.91	1.09	1.56	4.34	3.96	1.42	6.07	4.31	1.52	3.98	5.53	5.08	5.13	5.51	5.38			
CaO	2.30	4.33	6.74	8.02	2.14	7.10	1.43	1.94	5.14	2.50	1.71	2.54	1.77	2.42	2.15			
Na2O	0.35	0.46	0.84	2.41	0.38	3.51	0.61	0.49	0.89	0.41	0.55	0.54	0.46	0.77	0.49			
K2O	2.22	0.26	0.11	0.72	1.97	0.47	1.84	1.58	0.77	1.42	1.70	1.70	3.02	1.60	1.36			
Total	80.56	81.90	83.18	91.54	75.48	82.43	72.55	74.08	83.14	78.30	79.94	84.82	87.93	87.45	77.94			
O = 22																		
No.	125	126	127	130	132	134	143	206	208	209	210	212	213	214	215			
Si	8.547	8.806	8.277	7.382	8.634	7.807	8.220	8.293	8.370	8.374	8.096	8.155	7.899	8.019	8.129			
Al	1.625	2.266	2.573	3.040	1.580	2.600	2.077	2.006	2.530	2.037	2.030	2.054	2.355	2.264	1.914			
Ti	0.044	0.000	0.003	0.013	0.055	0.148	0.017	0.021	0.004	0.009	0.034	0.019	0.021	0.014	0.014			
Fe	0.606	0.015	0.088	0.230	0.622	0.176	0.327	0.698	0.150	0.626	0.865	0.818	0.919	0.752	0.963			
Cr	0.001	0.000	0.000	0.000	0.008	0.002	0.003	0.000	0.000	0.000	0.002	0.001	0.000	0.002	0.000			
Mn	0.023	0.000	0.001	0.010	0.030	0.010	0.024	0.015	0.002	0.013	0.017	0.014	0.012	0.012	0.017			
Mg	1.110	0.230	0.333	0.873	0.955	0.317	1.507	1.062	0.324	0.921	1.277	1.104	1.089	1.157	1.281			
Ca	0.374	0.658	1.033	1.159	0.370	1.135	0.255	0.344	0.788	0.417	0.283	0.397	0.270	0.365	0.367			
Na	0.102	0.126	0.234	0.630	0.120	1.015	0.198	0.156	0.247	0.122	0.165	0.153	0.127	0.210	0.152			
K	0.430	0.047	0.020	0.125	0.406	0.089	0.391	0.332	0.141	0.281	0.335	0.316	0.548	0.288	0.277			
Total	12.862	12.148	12.561	13.462	12.779	13.298	13.018	12.927	12.556	12.800	13.104	13.033	13.240	13.083	13.115			
Comment	2up-clay_17	2up-clay_18	2up-clay_19	2up-clay_22	2up-clay_24	2up-clay_26	2up-clay_35	2up_lin_e_from_zeol_to_mont_23	2up_lin_e_from_zeol_to_mont_25	2up_lin_e_from_zeol_to_mont_26	2up_lin_e_from_zeol_to_mont_27	2up_lin_e_from_zeol_to_mont_29	2up_lin_e_from_zeol_to_mont_30	2up_lin_e_from_zeol_to_mont_31	2up_lin_e_from_zeol_to_mont_32			
XFe	0.353	0.060	0.209	0.208	0.394	0.358	0.178	0.396	0.317	0.405	0.404	0.426	0.458	0.394	0.429			
XCa	0.413	0.792	0.803	0.606	0.413	0.507	0.302	0.413	0.670	0.509	0.361	0.458	0.286	0.423	0.461			
XK	0.475	0.056	0.016	0.065	0.453	0.040	0.463	0.399	0.120	0.342	0.428	0.365	0.580	0.334	0.348			

表 2.8.1-8 スメクタイトの化学組成(Rh-016、その2)

Sample ID	Rh-016 (continued from 1)														(continue to 3)		
No.	216	217	218	223	224	226	228	229	230	231	232	233	234	235	236		
wt																	
No.	216	217	218	223	224	226	228	229	230	231	232	233	234	235	236		
SiO2	57.22	56.16	51.46	55.50	53.63	48.86	56.77	56.80	56.29	56.86	50.19	57.97	51.27	52.52	54.32		
Al2O3	11.06	12.54	11.13	14.63	11.69	10.45	13.08	14.92	11.13	13.15	13.69	14.13	12.21	14.43	12.56		
TiO2	0.24	0.20	0.10	0.14	0.14	0.14	0.08	0.10	0.11	0.09	0.16	0.14	0.15	0.07	0.05		
FeO	6.58	6.05	5.79	6.70	6.20	6.21	3.68	10.04	5.81	6.61	8.29	6.28	7.40	7.33	3.52		
Cr2O3	0.02	0.00	0.00	0.04	0.00	0.06	0.00	0.05	0.00	0.00	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00		
MnO	0.13	0.08	0.14	0.12	0.12	0.12	0.11	0.21	0.13	0.14	0.13	0.11	0.15	0.10	0.06		
MgO	5.41	6.09	4.50	5.88	5.17	5.53	3.84	8.79	5.93	5.17	5.76	6.16	5.68	4.25	3.17		
CaO	1.93	2.35	2.11	1.68	1.98	1.62	1.28	1.55	2.06	2.17	2.00	2.29	2.21	1.85	2.83		
Na2O	0.40	0.61	0.25	0.33	0.38	0.43	0.39	0.72	0.70	0.50	0.33	0.55	0.57	0.41	0.93		
K2O	1.52	1.35	1.11	3.18	1.24	1.70	6.66	1.95	1.40	2.06	2.73	1.84	1.56	3.57	2.61		
Total	84.50	85.44	76.59	88.18	80.55	75.12	85.89	95.11	83.56	86.76	83.31	89.49	81.21	84.53	80.05		
O = 22																	
No.	216	217	218	223	224	226	228	229	230	231	232	233	234	235	236		
Si	8.310	8.077	8.227	7.841	8.170	8.067	8.234	7.552	8.256	8.091	7.631	7.978	7.885	7.814	8.285		
Al	1.894	2.126	2.097	2.436	2.098	2.033	2.236	2.338	1.924	2.206	2.454	2.292	2.214	2.530	2.258		
Ti	0.026	0.022	0.012	0.015	0.016	0.018	0.008	0.010	0.012	0.010	0.019	0.014	0.017	0.008	0.006		
Fe	0.799	0.728	0.775	0.791	0.790	0.858	0.447	1.116	0.713	0.787	1.054	0.723	0.952	0.912	0.450		
Cr	0.002	0.000	0.000	0.004	0.000	0.008	0.000	0.005	0.000	0.000	0.004	0.002	0.000	0.000	0.000		
Mn	0.016	0.010	0.019	0.014	0.016	0.017	0.014	0.023	0.017	0.017	0.016	0.013	0.019	0.013	0.008		
Mg	1.171	1.306	1.071	1.237	1.174	1.361	0.831	1.743	1.296	1.096	1.306	1.265	1.303	0.943	0.720		
Ca	0.301	0.362	0.362	0.255	0.323	0.287	0.199	0.221	0.324	0.332	0.326	0.338	0.364	0.295	0.462		
Na	0.113	0.170	0.076	0.090	0.113	0.139	0.109	0.185	0.198	0.138	0.097	0.146	0.169	0.117	0.275		
K	0.281	0.247	0.227	0.574	0.242	0.359	1.233	0.331	0.263	0.374	0.529	0.323	0.306	0.677	0.508		
Total	12.913	13.047	12.865	13.257	12.942	13.144	13.310	13.524	13.001	13.052	13.435	13.095	13.229	13.310	12.972		
Comment	2up_lin e_from zeol_to _mont_ 33	2up_lin e_from zeol_to _mont_ 34	2up_lin e_from zeol_to _mont_ 35	2up_lin e_from zeol_to _mont_ 40	2up_lin e_from zeol_to _mont_ 41	2up_lin e_from zeol_to _mont_ 43	2up_lin e_from zeol_to _mont_ 45	2up_lin e_from zeol_to _mont_ 46	2up_lin e_from zeol_to _mont_ 47	2up_lin e_from zeol_to _mont_ 48	2up_lin e_from zeol_to _mont_ 49	2up_lin e_from zeol_to _mont_ 50	2up_lin e_from zeol_to _mont_ 51	2up_lin e_from zeol_to _mont_ 52	2up_lin e_from zeol_to _mont_ 53		
XFe	0.406	0.358	0.420	0.390	0.402	0.387	0.350	0.390	0.355	0.418	0.447	0.364	0.422	0.492	0.384		
XCa	0.433	0.464	0.544	0.277	0.477	0.365	0.129	0.299	0.413	0.393	0.342	0.419	0.433	0.271	0.371		
XK	0.404	0.317	0.342	0.625	0.357	0.458	0.800	0.450	0.335	0.443	0.556	0.400	0.365	0.621	0.408		

表 2.8.1-9 スメクタイトの化学組成(Rh-016、その3)

Sample ID	Rh-016 (continued from 2)								
No.	238	239	241	242	243	245	246	247	250
wt									
No.	238	239	241	242	243	245	246	247	250
SiO ₂	54.09	53.47	47.66	50.70	53.11	58.53	48.79	59.69	51.23
Al ₂ O ₃	11.92	11.58	10.38	11.92	11.19	11.82	9.89	12.48	10.27
TiO ₂	0.48	0.15	0.49	0.18	0.49	0.06	0.06	0.27	0.10
FeO	7.42	6.71	7.29	6.29	7.95	4.68	3.32	4.19	6.30
Cr ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.01	0.05	0.00	0.02
MnO	0.13	0.13	0.12	0.09	0.16	0.05	0.07	0.07	0.11
MgO	5.68	5.16	5.89	4.64	4.54	3.52	2.68	3.67	4.54
CaO	1.65	1.83	2.23	1.60	1.53	3.22	3.23	2.67	2.34
Na ₂ O	0.49	0.33	0.50	0.80	0.41	0.69	0.45	0.66	0.24
K ₂ O	2.18	1.41	1.64	2.00	2.54	1.24	1.01	1.41	0.97
Total	84.04	80.77	76.20	78.22	81.99	83.82	69.56	85.11	76.13
O = 22									
No.	238	239	241	242	243	245	246	247	250
Si	8.019	8.156	7.866	8.038	8.112	8.462	8.478	8.457	8.270
Al	2.083	2.082	2.019	2.227	2.014	2.014	2.025	2.084	1.953
Ti	0.054	0.017	0.061	0.022	0.056	0.006	0.008	0.029	0.013
Fe	0.920	0.856	1.006	0.834	1.016	0.566	0.483	0.497	0.851
Cr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.009	0.001	0.007	0.000	0.003
Mn	0.016	0.017	0.017	0.013	0.020	0.006	0.011	0.009	0.015
Mg	1.254	1.173	1.448	1.097	1.034	0.759	0.695	0.775	1.093
Ca	0.263	0.299	0.395	0.271	0.250	0.499	0.602	0.405	0.405
Na	0.141	0.099	0.160	0.246	0.122	0.194	0.152	0.181	0.075
K	0.412	0.275	0.344	0.404	0.496	0.228	0.224	0.254	0.200
Total	13.162	12.973	13.316	13.152	13.129	12.736	12.686	12.690	12.877
	2up_lin	2up_lin	2up_lin	2up_lin	2up_lin	2up_lin	2up_lin	2up_lin	2up_lin
	e_from	e_from	e_from	e_from	e_from	e_from	e_from	e_from	e_from
Comment	zeol_to	zeol_to	zeol_to	zeol_to	zeol_to	zeol_to	zeol_to	zeol_to	zeol_to
	mont	_mont_	_mont_	_mont_	_mont_	_mont_	_mont_	_mont_	_mont_
	55	56	58	59	60	62	63	64	67
XFe	0.423	0.422	0.410	0.432	0.496	0.427	0.410	0.391	0.438
XCa	0.322	0.445	0.439	0.294	0.288	0.541	0.616	0.482	0.595
XK	0.505	0.408	0.383	0.438	0.572	0.248	0.229	0.303	0.294

表 2.8.1-10 沸石の化学組成(Rh-016、その1)

Sample ID Rh-016													(continue)			
No.	135	136	137	139	140	142	148	151	153	184	186	187	188	189	190	
SiO2	67.92	62.20	63.72	57.49	56.43	54.91	57.46	66.34	54.12	62.17	61.06	61.94	59.92	58.47	56.29	
Al2O3	12.09	11.23	16.30	16.39	15.69	14.97	15.44	16.37	14.95	10.71	16.53	17.62	15.80	16.46	15.02	
TiO2	0.01	0.00	0.01	0.05	0.04	0.00	0.04	0.00	0.01	0.05	0.01	0.05	0.00	0.05	0.03	
FeO	0.01	0.01	0.06	0.00	0.05	0.05	0.03	0.10	0.10	0.38	0.01	0.18	0.08	0.03	0.00	
Cr2O3	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	
MnO	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00	0.03	0.03	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	
MgO	0.73	0.76	0.10	0.00	0.01	0.01	0.04	0.14	0.02	0.70	0.11	0.15	0.01	0.00	0.01	
CaO	2.94	2.99	2.01	2.00	2.02	1.78	1.88	1.43	1.92	2.96	2.03	2.41	1.68	2.02	1.91	
Na2O	0.87	0.85	2.15	2.45	2.02	2.14	1.84	1.99	2.18	0.70	1.71	1.99	1.93	2.06	1.99	
K2O	1.16	1.03	2.59	5.41	4.48	2.75	4.58	2.37	2.20	1.22	2.64	4.76	3.37	4.02	3.67	
Total	85.76	79.06	86.94	83.78	80.74	76.63	81.32	88.73	75.54	78.94	84.09	89.11	82.81	83.11	78.91	
O = 22																
No.	135	136	137	139	140	142	148	151	153	184	186	187	188	189	190	
Si	9.161	9.118	8.634	8.321	8.405	8.502	8.479	8.745	8.480	9.155	8.554	8.358	8.576	8.415	8.511	
Al	1.922	1.941	2.603	2.796	2.755	2.732	2.686	2.544	2.761	1.860	2.729	2.803	2.666	2.792	2.678	
Ti	0.001	0.000	0.001	0.005	0.005	0.000	0.004	0.000	0.001	0.005	0.001	0.005	0.000	0.005	0.003	
Fe	0.001	0.001	0.007	0.000	0.007	0.006	0.004	0.011	0.014	0.047	0.001	0.020	0.010	0.003	0.000	
Cr	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	0.000	0.000	0.004	0.000	0.000	
Mn	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.003	0.002	0.000	0.005	0.004	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	
Mg	0.146	0.166	0.021	0.000	0.003	0.001	0.008	0.028	0.005	0.154	0.022	0.031	0.002	0.000	0.001	
Ca	0.424	0.470	0.291	0.310	0.322	0.296	0.298	0.202	0.322	0.467	0.305	0.349	0.257	0.311	0.309	
Na	0.228	0.241	0.564	0.689	0.582	0.642	0.528	0.507	0.663	0.201	0.466	0.519	0.536	0.575	0.582	
K	0.199	0.192	0.447	0.999	0.851	0.543	0.862	0.398	0.439	0.228	0.471	0.820	0.615	0.739	0.708	
Total	12.087	12.128	12.569	13.120	12.929	12.725	12.869	12.436	12.689	12.123	12.549	12.906	12.665	12.841	12.792	
Comment	2up-zeol-dark_27	2up-zeol-dark_28	2up-zeol-bright_29	2up-zeol-bright_31	2up-zeol-bright_32	2up-zeol-bright_34	2up-zeol-bright_40	2up-zeol-dark_43	2up-zeol_45	2up_line_from_zeol_to_mont_1	2up_line_from_zeol_to_mont_3	2up_line_from_zeol_to_mont_4	2up_line_from_zeol_to_mont_5	2up_line_from_zeol_to_mont_6	2up_line_from_zeol_to_mont_7	
Si/Al	4.766	4.698	3.317	2.976	3.051	3.112	3.157	3.438	3.071	4.923	3.134	2.982	3.217	3.014	3.179	
XNK	0.501	0.480	0.776	0.845	0.816	0.800	0.824	0.817	0.774	0.479	0.754	0.793	0.817	0.808	0.807	

NOTE: XNK = (Na+K)/(Ca+Na+K)

表 2.8.1-11 沸石の化学組成(Rh-016、その2)

Sample ID Rh-016 (continued)											
No.	192	193	194	195	197	198	199	201	204	205	237
SiO2	58.57	64.82	60.69	64.97	59.71	57.32	57.32	57.97	54.72	56.81	59.75
Al2O3	15.46	18.21	16.95	18.70	16.37	14.95	15.65	15.69	14.97	16.41	16.43
TiO2	0.03	0.04	0.03	0.04	0.02	0.00	0.01	0.05	0.01	0.02	0.03
FeO	0.01	0.00	0.03	0.00	0.06	0.00	0.09	0.05	0.10	0.04	0.23
Cr2O3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.02	0.00
MnO	0.01	0.03	0.02	0.00	0.01	0.00	0.03	0.02	0.01	0.00	0.01
MgO	0.15	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00	0.07	0.00	0.13
CaO	2.14	2.21	1.88	2.03	1.89	1.93	1.99	1.98	1.93	2.02	2.64
Na2O	1.65	2.69	2.31	2.13	2.43	2.43	1.83	2.24	2.65	2.11	2.60
K2O	3.10	3.16	3.61	5.75	2.27	2.39	4.86	2.04	1.42	3.82	1.41
Total	81.11	91.15	85.50	93.63	82.77	79.04	81.81	80.04	75.88	81.25	83.22
O = 22											
No.	192	193	194	195	197	198	199	201	204	205	237
Si	8.554	8.443	8.452	8.359	8.514	8.576	8.436	8.536	8.499	8.367	8.469
Al	2.662	2.795	2.782	2.836	2.751	2.637	2.715	2.723	2.740	2.849	2.744
Ti	0.003	0.004	0.003	0.004	0.002	0.000	0.001	0.006	0.001	0.002	0.003
Fe	0.001	0.000	0.003	0.000	0.008	0.000	0.011	0.007	0.013	0.005	0.027
Cr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	0.000	0.000	0.002	0.000
Mn	0.001	0.003	0.002	0.000	0.002	0.000	0.003	0.002	0.002	0.000	0.001
Mg	0.033	0.000	0.000	0.003	0.000	0.001	0.003	0.000	0.017	0.000	0.027
Ca	0.334	0.308	0.281	0.280	0.289	0.310	0.313	0.313	0.322	0.319	0.401
Na	0.467	0.679	0.623	0.531	0.671	0.706	0.522	0.639	0.798	0.603	0.715
K	0.578	0.526	0.641	0.943	0.412	0.456	0.912	0.384	0.281	0.718	0.254
Total	12.633	12.758	12.786	12.957	12.650	12.686	12.920	12.609	12.670	12.865	12.641
Comment	2up_line_from zeol_to_mont_9	2up_line_from zeol_to_mont_1	2up_line_from zeol_to_mont_2	2up_line_from zeol_to_mont_2	2up_line_from zeol_to_mont_5						
Si/Al	3.213	3.020	3.038	2.947	3.095	3.253	3.108	3.135	3.102	2.937	3.086
XNK	0.757	0.796	0.818	0.840	0.789	0.789	0.821	0.766	0.770	0.806	0.708

表 2.8.1-12 ガラス質物質の化学組成

Sample ID Rh-016			
No.	120	123	124
SiO2	64.98	59.91	60.49
Al2O3	14.78	12.69	14.90
TiO2	0.33	0.00	0.30
FeO	1.38	0.05	1.79
Cr2O3	0.05	0.04	0.10
MnO	0.04	0.01	0.04
MgO	1.36	1.38	2.62
CaO	3.97	3.61	4.55
Na2O	2.50	0.46	2.00
K2O	1.31	0.38	1.09
Total	90.69	78.53	87.88
Comment	2up-mi-in- plg_12	2up-gm_15	2up-min- in-cpx_16

3) Rh-018

各鉱物の分析値を表 2.8.1-13~表 2.8.1-20 に示す。

表 2.8.1-13 輝石の化学組成(Rh-018)

SampleID	Rh-018													
No.	2	3	20	23	24	28	31	33	115	116	117	121	122	
SiO2	52.30	55.72	49.81	51.35	52.37	49.08	51.73	54.51	52.47	51.60	52.21	51.80	52.20	
Al2O3	2.12	0.98	1.26	1.79	1.88	3.47	0.98	0.99	1.55	1.93	1.31	2.36	2.15	
TiO2	0.18	0.05	0.29	0.12	0.12	0.29	0.09	0.09	0.13	0.25	0.11	0.20	0.21	
FeO	2.06	2.91	24.37	7.87	17.70	4.35	5.16	5.68	1.71	2.64	4.81	2.26	1.87	
Cr2O3	0.14	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.28	0.05	0.07	0.12	0.00	
MnO	0.12	0.20	0.74	0.52	0.44	0.26	0.37	0.29	0.12	0.19	0.24	0.12	0.15	
MgO	18.48	33.55	22.61	24.12	24.50	14.23	16.29	28.35	18.83	16.83	27.19	17.10	17.73	
CaO	21.10	1.39	1.57	1.51	3.96	20.36	18.28	1.07	20.87	20.83	1.39	21.44	21.43	
Na2O	0.23	0.03	0.02	0.02	0.14	0.32	0.21	0.04	0.20	0.30	0.00	0.27	0.25	
K2O	0.04	0.03	0.03	0.02	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	
Total	96.78	95.01	100.70	87.32	101.12	92.37	93.11	91.04	96.15	94.60	87.34	95.67	96.02	
O = 6														
Si	1.949	1.995	1.883	2.045	1.912	1.938	2.015	2.052	1.963	1.971	2.044	1.956	1.959	
Al	0.093	0.041	0.056	0.084	0.081	0.162	0.045	0.044	0.068	0.087	0.060	0.105	0.095	
Ti	0.005	0.001	0.008	0.004	0.003	0.009	0.003	0.003	0.004	0.007	0.003	0.006	0.006	
Fe	0.064	0.087	0.770	0.262	0.540	0.144	0.168	0.179	0.054	0.084	0.158	0.072	0.059	
Cr	0.004	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.008	0.001	0.002	0.004	0.000	
Mn	0.004	0.006	0.024	0.018	0.014	0.009	0.012	0.009	0.004	0.006	0.008	0.004	0.005	
Mg	1.027	1.791	1.274	1.432	1.334	0.838	0.946	1.591	1.050	0.958	1.587	0.962	0.992	
Ca	0.843	0.053	0.064	0.064	0.155	0.862	0.763	0.043	0.837	0.853	0.058	0.867	0.862	
Na	0.017	0.002	0.002	0.001	0.010	0.025	0.016	0.003	0.014	0.022	0.000	0.020	0.018	
K	0.002	0.002	0.002	0.001	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	
Total	4.007	3.983	4.082	3.911	4.049	3.985	3.968	3.925	4.002	3.989	3.921	3.994	3.997	
Wo	0.436	0.027	0.030	0.037	0.076	0.467	0.407	0.024	0.431	0.450	0.032	0.456	0.451	
En	0.531	0.927	0.604	0.814	0.657	0.455	0.504	0.878	0.541	0.506	0.880	0.506	0.519	
Fs	0.033	0.045	0.365	0.149	0.266	0.078	0.090	0.099	0.028	0.044	0.087	0.038	0.031	
Comment	1_cpx_2	1_cpx_3	1_gm-cpx_20	1_gm-cpx_23	1_gm-cpx_24	1_gm-cpx_28	1_gm-cpx_31	1_gm-cpx_33	2up-cpx_7	2up-cpx_8	2up-cpx_9	2up-cpx_13	2up-cpx_14	
NOTE	Wo = Ca / (Ca+Mg+Fe); En = Mg / (Ca+Mg+Fe); Fs = Fe / (Ca+Mg+Fe).													

表 2.8.1-14 斜長石の化学組成(Rh-018、その1)

Rh-018												(continue)
No.	5	6	19	25	30	35	37	43	46	50	52	54
SiO2	57.45	58.95	56.14	54.50	59.35	65.69	59.14	65.98	59.07	58.38	54.23	64.02
Al2O3	27.03	28.08	27.26	27.18	29.34	21.15	24.37	21.34	23.89	22.97	25.98	27.11
TiO2	0.01	0.02	0.04	0.04	0.00	0.03	0.02	0.04	0.03	0.04	0.06	0.04
FeO	0.29	0.33	0.27	0.45	0.36	0.65	0.43	0.63	0.45	0.47	0.45	0.46
Cr2O3	0.02	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02
MnO	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.03	0.00	0.04	0.01	0.00	0.00	0.02
MgO	0.04	0.19	0.07	0.08	0.17	0.12	0.11	0.09	0.16	0.10	0.07	0.21
CaO	9.72	9.73	9.89	10.41	10.38	6.64	8.99	6.96	8.74	8.96	10.96	9.54
Na2O	5.94	6.37	5.67	5.10	6.21	4.73	4.98	4.29	5.57	5.07	5.01	5.83
K2O	0.10	0.08	0.10	0.07	0.15	0.63	0.29	0.63	0.20	0.31	0.10	0.26
Total	100.60	103.77	99.45	97.84	105.97	99.65	98.33	99.99	98.13	96.29	96.86	107.49
O = 8												
No.	5	6	19	25	30	35	37	43	46	50	52	54
Si	2.564	2.552	2.537	2.509	2.521	2.893	2.680	2.893	2.686	2.705	2.528	2.657
Al	1.422	1.433	1.452	1.475	1.469	1.098	1.302	1.103	1.280	1.254	1.427	1.326
Ti	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000	0.001	0.001	0.002	0.001	0.001	0.002	0.001
Fe	0.011	0.012	0.010	0.017	0.013	0.024	0.016	0.023	0.017	0.018	0.017	0.016
Cr	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001
Mn	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001
Mg	0.003	0.013	0.004	0.006	0.011	0.008	0.008	0.006	0.011	0.007	0.005	0.013
Ca	0.465	0.451	0.479	0.514	0.473	0.313	0.437	0.327	0.426	0.445	0.547	0.424
Na	0.514	0.535	0.497	0.456	0.511	0.404	0.437	0.365	0.491	0.456	0.452	0.469
K	0.006	0.004	0.006	0.004	0.008	0.035	0.017	0.035	0.012	0.018	0.006	0.014
Total	4.985	5.001	4.987	4.982	5.005	4.777	4.896	4.754	4.924	4.904	4.986	4.921
Comment	1_matrix_p lg_5	1_matrix_p lg_6	1_gm- plg_19	1_alt-gm- plg_25	1_gm- zeol_30	1_gm-alt- gm-zeol- alt-gm_35	1_gm-alt- gm-zeol- alt-gm_37	1_gm-alt- gm-zeol- alt-gm_43	1_gm-alt- gm-zeol- alt-gm_46	1_gm-alt- gm-zeol- alt-gm_50	1_gm-alt- gm-zeol- alt-gm_52	1_gm-alt- gm-zeol- alt-gm_54

表 2.8.1-15 斜長石の化学組成(Rh-018、その2)

Rh-018 (continued)												
No.	55	61	69	70	75	78	79	82	105	106	107	108
SiO2	58.60	56.84	62.22	55.89	48.51	43.67	54.82	51.94	48.71	59.70	55.57	58.26
Al2O3	26.20	26.01	28.06	27.03	21.04	18.24	26.17	23.81	21.30	24.69	26.36	25.38
TiO2	0.01	0.06	0.09	0.00	0.03	0.27	0.01	0.06	0.00	0.06	0.05	0.08
FeO	0.47	0.36	0.45	0.48	0.41	0.57	0.44	0.36	0.22	0.62	0.22	0.32
Cr2O3	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.03
MnO	0.01	0.00	0.01	0.01	0.07	0.07	0.00	0.02	0.00	0.02	0.01	0.05
MgO	0.17	0.10	0.51	0.10	1.59	0.56	0.38	0.25	0.20	1.65	0.09	0.46
CaO	9.00	9.58	8.79	10.38	9.05	8.05	10.12	9.11	8.59	8.15	9.45	8.49
Na2O	5.96	5.58	6.86	5.43	3.81	3.62	5.34	5.31	4.50	5.61	5.61	5.25
K2O	0.15	0.14	0.15	0.10	0.14	0.31	0.13	0.20	0.17	0.32	0.10	1.03
Total	100.58	98.68	107.14	99.42	84.64	75.37	97.42	91.10	83.70	100.83	97.45	99.36
O = 8												
No.	55	61	69	70	75	78	79	82	105	106	107	108
Si	2.609	2.584	2.600	2.532	2.578	2.613	2.535	2.567	2.611	2.646	2.559	2.627
Al	1.375	1.394	1.382	1.443	1.318	1.286	1.427	1.388	1.346	1.290	1.430	1.349
Ti	0.000	0.002	0.003	0.000	0.001	0.012	0.000	0.002	0.000	0.002	0.002	0.003
Fe	0.018	0.014	0.016	0.018	0.018	0.028	0.017	0.015	0.010	0.023	0.009	0.012
Cr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.001
Mn	0.000	0.000	0.000	0.001	0.003	0.004	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.002
Mg	0.011	0.007	0.032	0.007	0.126	0.050	0.026	0.019	0.016	0.109	0.006	0.031
Ca	0.429	0.467	0.393	0.504	0.516	0.516	0.502	0.483	0.494	0.387	0.466	0.410
Na	0.514	0.492	0.556	0.477	0.392	0.420	0.479	0.509	0.468	0.482	0.501	0.459
K	0.009	0.008	0.008	0.006	0.009	0.023	0.008	0.013	0.012	0.018	0.006	0.059
Total	4.965	4.967	4.989	4.987	4.962	4.953	4.994	4.997	4.956	4.958	4.978	4.954
Comment	1_gm-alt- gm-zeol- alt-gm_55	1_gm-alt- gm-zeol- alt-gm_61	1_gm-alt- gm-zeol- alt-gm_69	1_gm-alt- gm-zeol- alt-gm_70	1_gm-alt- gm-zeol- alt-gm_75	1_gm-alt- gm-zeol- alt-gm_78	1_gm-alt- gm-zeol- alt-gm_79	1_gm-alt- gm-zeol- alt-gm_82	1_gm-alt- gm-zeol- alt- gm_105	1_gm-alt- gm-zeol- alt- gm_106	1_gm-alt- gm-zeol- alt- gm_107	1_gm-alt- gm-zeol- alt- gm_108

表 2.8.1-16 スメクタイトの化学組成(Rh-018)

Sample ID Rh-018												
No.	4	7	12	27	29	76	77	80	85	65	104	
wt												
No.	4	7	12	27	29	76	77	80	85	65	104	
SiO ₂	47.74	51.86	53.63	49.48	39.62	51.12	50.64	44.42	50.88	61.10	56.17	
Al ₂ O ₃	10.53	10.35	10.84	11.55	9.34	12.17	11.28	16.73	10.05	7.71	12.96	
TiO ₂	0.21	0.22	0.17	0.24	0.10	0.23	0.50	0.08	0.37	0.10	0.25	
FeO	1.68	1.77	2.00	2.16	2.30	1.50	1.51	0.84	1.72	5.13	1.94	
Cr ₂ O ₃	0.00	0.03	0.00	0.01	0.04	0.03	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	
MnO	0.23	0.27	0.29	0.17	0.18	0.11	0.12	0.07	0.09	0.35	0.12	
MgO	4.79	4.14	6.17	5.24	4.45	4.48	3.50	1.47	2.81	11.19	4.47	
CaO	2.67	2.77	2.57	2.65	2.69	2.74	2.69	5.78	2.69	4.92	2.85	
Na ₂ O	0.32	0.43	0.22	0.35	0.19	0.38	0.24	2.37	0.71	1.09	0.27	
K ₂ O	0.17	0.19	0.30	0.36	0.15	0.53	0.33	0.22	1.01	0.56	1.39	
Total	68.33	72.02	76.19	72.20	59.05	73.29	70.85	71.97	70.34	92.15	80.41	
O = 22												
No.	4	7	12	27	29	76	77	80	85	65	104	
Si	8.308	8.530	8.370	8.189	8.085	8.282	8.444	7.511	8.610	8.199	8.338	
Al	2.160	2.006	1.995	2.254	2.246	2.323	2.216	3.334	2.005	1.220	2.268	
Ti	0.027	0.027	0.020	0.030	0.016	0.028	0.063	0.010	0.047	0.010	0.028	
Fe	0.244	0.243	0.261	0.299	0.393	0.203	0.211	0.118	0.244	0.575	0.241	
Cr	0.000	0.004	0.000	0.001	0.006	0.004	0.006	0.000	0.000	0.000	0.000	
Mn	0.034	0.038	0.038	0.024	0.031	0.015	0.016	0.010	0.013	0.040	0.015	
Mg	1.242	1.015	1.435	1.294	1.353	1.082	0.870	0.370	0.709	2.239	0.989	
Ca	0.498	0.488	0.430	0.470	0.588	0.475	0.481	1.048	0.488	0.708	0.452	
Na	0.107	0.135	0.068	0.112	0.076	0.118	0.079	0.776	0.232	0.283	0.078	
K	0.038	0.039	0.061	0.075	0.040	0.110	0.070	0.048	0.218	0.095	0.263	
Total	12.658	12.525	12.677	12.747	12.832	12.640	12.457	13.225	12.566	13.370	12.671	
Comment	1_matri x_4	1_matri x_clay_7	1_matri x_clast_12	1_alt- gm- clay_27	1_gm- clay_29	1_gm- alt-gm- zeol-alt- gm_76	1_gm- alt-gm- zeol-alt- gm_77	1_gm- alt-gm- zeol-alt- gm_80	1_gm- alt-gm- zeol-alt- gm_85	1_gm- alt-gm- zeol-alt- gm_65	1_gm- alt-gm- zeol-alt- gm_104	
XFe	0.164	0.193	0.154	0.187	0.225	0.158	0.195	0.242	0.256	0.204	0.196	
XCa	0.774	0.736	0.771	0.715	0.836	0.676	0.763	0.560	0.521	0.652	0.571	
XK	0.060	0.059	0.108	0.115	0.057	0.157	0.112	0.026	0.232	0.087	0.331	

表 2.8.1-17 沸石の化学組成(Rh-018、その1)

Sample ID	Rh-018												(continue)
No.	8	9	10	11	13	14	15	16	17	32	34	36	91
SiO2	58.96	70.06	53.75	62.65	62.92	63.68	60.10	53.20	49.81	65.42	75.30	75.18	60.05
Al2O3	13.06	14.23	14.30	18.16	11.85	10.56	17.09	16.74	13.42	17.74	11.04	10.88	15.13
TiO2	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.03	0.03	0.02	0.11	0.17	0.04
FeO	0.00	0.02	0.06	0.17	0.03	0.08	0.03	0.02	0.03	0.10	1.10	1.10	0.12
Cr2O3	0.00	0.00	0.02	0.06	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
MnO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.04	0.01	0.05	0.03	0.00
MgO	0.69	1.11	0.05	0.10	0.74	0.56	0.00	0.00	0.02	0.09	0.42	0.42	0.25
CaO	3.30	3.02	1.86	2.16	3.20	2.50	1.82	2.03	1.98	1.87	1.53	1.51	4.50
Na2O	0.92	0.68	5.25	2.84	0.79	0.71	2.87	2.19	1.63	2.70	1.84	1.76	0.82
K2O	0.81	0.76	1.89	2.46	0.75	1.03	2.94	2.62	2.40	2.60	1.03	1.60	2.30
Total	77.74	89.89	77.19	88.61	80.29	79.13	84.86	76.85	69.36	90.55	92.43	92.67	83.20
O = 22													
No.	8	9	10	11	13	14	15	16	17	32	34	36	91
Si	8.825	8.996	8.372	8.383	9.070	9.279	8.419	8.240	8.513	8.530	9.415	9.409	8.553
Al	2.303	2.153	2.626	2.864	2.014	1.813	2.821	3.056	2.704	2.726	1.627	1.606	2.540
Ti	0.000	0.000	0.001	0.001	0.002	0.001	0.001	0.004	0.004	0.002	0.010	0.016	0.004
Fe	0.000	0.003	0.007	0.019	0.004	0.009	0.004	0.003	0.004	0.011	0.115	0.115	0.014
Cr	0.000	0.000	0.003	0.007	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000
Mn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.005	0.001	0.005	0.004	0.000
Mg	0.155	0.212	0.011	0.020	0.158	0.121	0.000	0.000	0.006	0.018	0.079	0.079	0.053
Ca	0.530	0.416	0.310	0.310	0.494	0.390	0.273	0.338	0.363	0.261	0.206	0.203	0.686
Na	0.268	0.170	1.585	0.736	0.221	0.202	0.780	0.658	0.541	0.681	0.446	0.426	0.225
K	0.154	0.125	0.377	0.420	0.137	0.191	0.525	0.517	0.523	0.432	0.165	0.255	0.417
Total	12.234	12.075	13.293	12.759	12.100	12.009	12.823	12.816	12.663	12.662	12.067	12.113	12.494
Comment	1_matrix_dast_8	1_matrix_dast_9	1_matrix_dast_10	1_matrix_dast_11	1_zoned_dast_1_3	1_zoned_dast_1_4	1_zoned_dast_1_5	1_zoned_dast_1_6	1_zoned_dast_1_7	1_gm-zeol_32	1_gm-alt-gm-zeol-alt-gm_34	1_gm-alt-gm-zeol-alt-gm_36	1_gm-alt-gm-zeol-alt-gm_91
Si/Al	3.831	4.178	3.188	2.927	4.504	5.118	2.985	2.696	3.149	3.129	5.788	5.860	3.367
XNK	0.443	0.415	0.864	0.788	0.420	0.502	0.827	0.777	0.746	0.810	0.748	0.771	0.483
NOTE:	XNK = (Na+K)/(Ca+Na+K)												

表 2.8.1-18 沸石の化学組成(Rh-018、その2)

Sample ID Rh-018 (continued)											
No.	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
SiO2	55.65	66.53	62.87	65.37	60.54	63.65	60.15	60.68	61.74	58.67	58.63
Al2O3	13.38	13.22	12.69	12.87	12.00	15.84	16.49	15.84	16.89	16.37	17.18
TiO2	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.06	0.03	0.03	0.05
FeO	0.05	0.01	0.08	0.00	0.05	0.05	0.02	0.01	0.00	0.01	0.13
Cr2O3	0.03	0.00	0.00	0.02	0.02	0.00	0.03	0.02	0.01	0.00	0.00
MnO	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.00	0.03	0.00	0.01	0.00	0.00
MgO	0.54	0.91	0.88	0.79	0.77	0.24	0.02	0.05	0.02	0.00	0.04
CaO	4.58	4.38	4.44	4.42	4.20	2.59	1.98	1.88	1.94	1.95	2.04
Na2O	0.59	0.37	0.31	0.34	0.46	2.10	2.47	2.67	2.19	2.35	2.25
K2O	1.32	0.29	0.40	0.31	0.45	4.38	2.43	2.33	2.62	2.17	2.64
Total	76.14	85.73	81.69	84.12	78.50	88.86	83.61	83.52	85.45	81.55	82.95
O = 22											
No.	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
Si	8.612	8.976	8.930	8.990	8.954	8.574	8.503	8.578	8.527	8.487	8.381
Al	2.440	2.102	2.125	2.086	2.092	2.515	2.748	2.639	2.749	2.790	2.894
Ti	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.007	0.003	0.004	0.005
Fe	0.007	0.002	0.010	0.000	0.006	0.006	0.003	0.001	0.000	0.001	0.015
Cr	0.004	0.000	0.000	0.002	0.003	0.000	0.003	0.002	0.002	0.000	0.000
Mn	0.000	0.000	0.001	0.001	0.002	0.000	0.004	0.000	0.002	0.000	0.000
Mg	0.125	0.184	0.187	0.162	0.169	0.049	0.003	0.011	0.003	0.000	0.008
Ca	0.760	0.633	0.676	0.652	0.665	0.374	0.299	0.284	0.286	0.303	0.312
Na	0.177	0.096	0.085	0.091	0.131	0.549	0.676	0.731	0.587	0.658	0.624
K	0.260	0.050	0.072	0.054	0.084	0.753	0.438	0.420	0.461	0.400	0.481
Total	12.384	12.044	12.086	12.038	12.106	12.820	12.678	12.671	12.619	12.643	12.719
Comment	1_gmalt-gm-zeolalt-gm_93	1_gmalt-gm-zeolalt-gm_94	1_gmalt-gm-zeolalt-gm_95	1_gmalt-gm-zeolalt-gm_96	1_gmalt-gm-zeolalt-gm_97	1_gmalt-gm-zeolalt-gm_98	1_gmalt-gm-zeolalt-gm_99	1_gmalt-gm-zeolalt-gm_100	1_gmalt-gm-zeolalt-gm_101	1_gmalt-gm-zeolalt-gm_102	1_gmalt-gm-zeolalt-gm_103
Si/Al	3.530	4.271	4.202	4.309	4.279	3.409	3.094	3.251	3.102	3.042	2.896
XNK	0.365	0.187	0.189	0.181	0.244	0.777	0.788	0.802	0.785	0.778	0.780

不均質が確認できた沸石について詳細な分析結果を図 2.8.1-28 に示す。

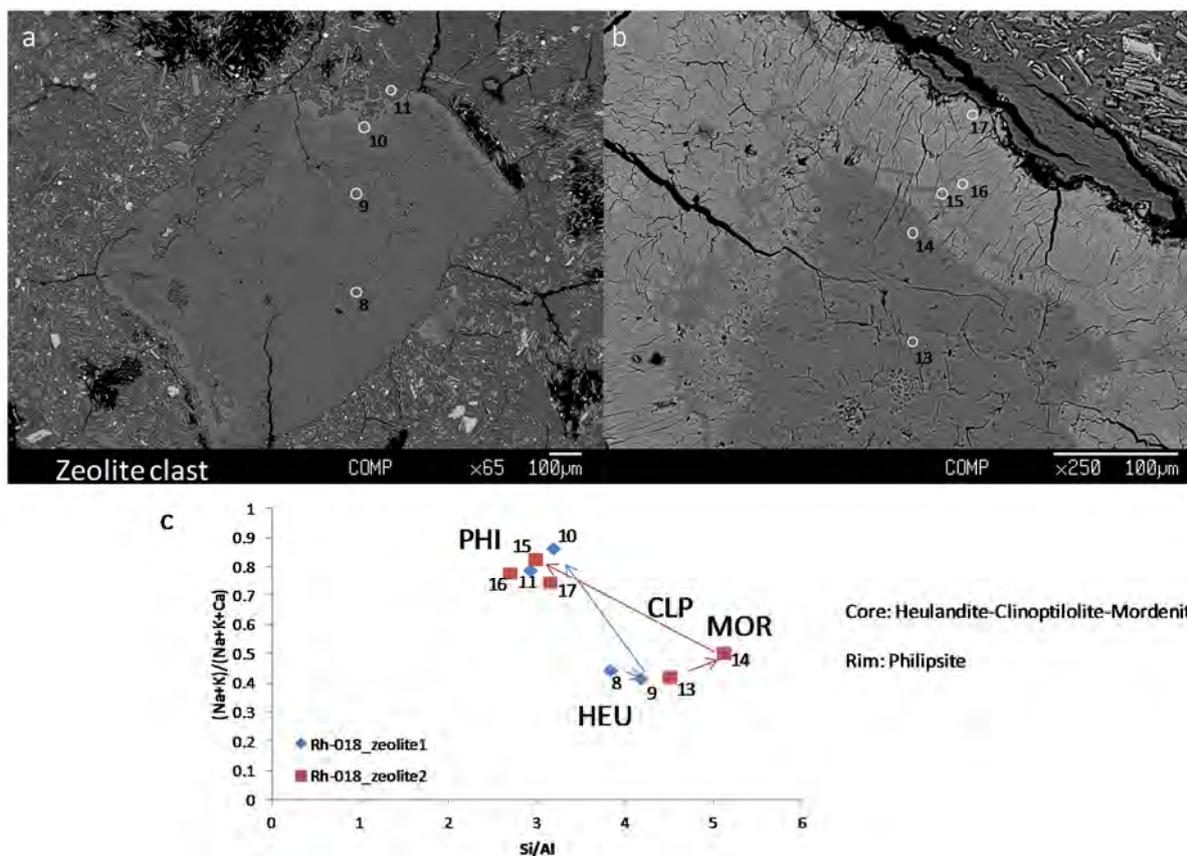


図 2.8.1-28 沸石の累帯構造(Rh-018)(a: 不均質な沸石; b: リム部の産状; c: コアからリムにおける組成変化)

輝沸石質コアは、直接十字沸石質リムに変わっているものと、モルデン沸石、斜プチロル沸石経由で十字沸石質リムへ変化するものの2つのゾーニングパターンが確認された。

Rh-018 試料に多く残存しているガラス質物質の化学組成を表 2.8.1-19、表 2.8.1-20 に示す。

表 2.8.1-19 ガラス質物質の化学組成(Rh-018、その1)

Sample ID	Rh-018										
No.	1	18	22	38	39	40	41	42	44	45	47
SiO ₂	71.19	74.31	74.36	76.73	75.18	76.11	76.15	76.63	75.55	75.84	69.37
Al ₂ O ₃	13.95	11.16	11.19	10.48	10.62	10.43	10.61	10.75	10.54	10.61	15.22
TiO ₂	0.18	0.22	0.23	0.12	0.14	0.14	0.15	0.17	0.14	0.15	0.12
FeO	0.29	1.01	1.02	0.75	0.93	1.01	0.92	0.85	0.98	0.96	0.80
Cr ₂ O ₃	0.00	0.04	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.06	0.00	0.00
MnO	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.03	0.03	0.04	0.02	0.03	0.03
MgO	0.14	0.37	0.38	0.22	0.39	0.25	0.23	0.17	0.26	0.20	0.26
CaO	2.56	1.60	1.66	1.33	1.52	1.31	1.33	1.29	1.45	1.32	4.44
Na ₂ O	0.76	1.72	1.88	1.80	1.76	1.70	1.69	1.83	1.76	1.84	2.90
K ₂ O	0.55	1.03	0.81	1.77	1.47	1.70	1.59	1.56	1.46	1.51	0.89
Total	89.67	91.50	91.59	93.23	92.06	92.69	92.70	93.29	92.21	92.46	94.03
Comment	1_mi_001	1_gm-gl_18	1_gm-mt_22	1_gm-alt-gm-zeol-alt-gm_38	1_gm-alt-gm-zeol-alt-gm_39	1_gm-alt-gm-zeol-alt-gm_40	1_gm-alt-gm-zeol-alt-gm_41	1_gm-alt-gm-zeol-alt-gm_42	1_gm-alt-gm-zeol-alt-gm_44	1_gm-alt-gm-zeol-alt-gm_45	1_gm-alt-gm-zeol-alt-gm_47

表 2.8.1-20 ガラス質物質の化学組成(Rh-018、その2)

Sample ID Rh-018 (continued)											
No.	48	49	51	53	56	57	58	59	60	62	64
SiO2	73.90	71.19	73.25	68.34	76.11	73.04	73.59	74.75	74.58	74.98	75.47
Al2O3	10.34	13.40	11.68	14.31	10.91	10.79	11.36	11.00	11.04	11.80	11.12
TiO2	0.15	0.15	0.14	0.11	0.16	0.15	0.18	0.19	0.18	0.19	0.16
FeO	0.86	0.85	0.99	0.47	0.95	0.93	0.97	0.82	1.00	0.64	0.97
Cr2O3	0.02	0.02	0.00	0.00	0.04	0.06	0.00	0.01	0.00	0.03	0.00
MnO	0.06	0.02	0.07	0.00	0.04	0.05	0.03	0.06	0.05	0.01	0.06
MgO	0.36	0.26	0.35	0.18	0.27	0.71	0.39	0.40	0.41	0.14	0.34
CaO	1.46	3.16	1.96	4.02	1.33	2.23	1.72	1.63	1.66	1.70	1.60
Na2O	1.67	2.43	2.16	2.69	1.64	1.62	1.87	1.79	1.70	2.18	1.79
K2O	1.68	1.19	1.23	1.07	1.69	1.62	1.61	1.51	1.53	1.65	1.65
Total	90.50	92.67	91.83	91.18	93.14	91.20	91.72	92.17	92.16	93.31	93.16
Comment	1_gm-alt- gm-zeol- alt-gm 48	1_gm-alt- gm-zeol- alt-gm 49	1_gm-alt- gm-zeol- alt-gm 51	1_gm-alt- gm-zeol- alt-gm 53	1_gm-alt- gm-zeol- alt-gm 56	1_gm-alt- gm-zeol- alt-gm 57	1_gm-alt- gm-zeol- alt-gm 58	1_gm-alt- gm-zeol- alt-gm 59	1_gm-alt- gm-zeol- alt-gm 60	1_gm-alt- gm-zeol- alt-gm 62	1_gm-alt- gm-zeol- alt-gm 64

4) Rh-042

各鉱物の分析値を表 2.8.1-21~表 2.8.1-25 に示す。

表 2.8.1-21 輝石の化学組成(Rh-042)

SampleID Rh-042									
No.	166	167	168	175	177	178	179	183	
SiO2	50.71	50.59	50.54	51.58	51.62	51.50	51.69	49.89	
Al2O3	2.12	1.65	1.88	1.30	1.05	1.88	1.15	2.24	
TiO2	0.14	0.12	0.15	0.09	0.10	0.08	0.12	0.09	
FeO	3.18	3.30	3.45	3.39	3.83	4.32	3.90	3.56	
Cr2O3	0.04	0.04	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	
MnO	0.30	0.32	0.33	0.33	0.40	0.45	0.46	0.33	
MgO	15.02	15.24	15.17	15.30	14.93	14.47	14.53	13.37	
CaO	21.18	20.53	20.85	21.09	20.89	19.85	20.29	21.79	
Na2O	0.28	0.29	0.26	0.25	0.25	0.26	0.27	0.31	
K2O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	
Total	92.97	92.08	92.63	93.33	93.08	92.83	92.43	91.57	
O = 6									
Si	1.980	1.993	1.982	2.005	2.015	2.012	2.028	1.986	
Al	0.098	0.076	0.087	0.060	0.048	0.087	0.053	0.105	
Ti	0.004	0.004	0.004	0.003	0.003	0.002	0.004	0.003	
Fe	0.104	0.109	0.113	0.110	0.125	0.141	0.128	0.118	
Cr	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
Mn	0.010	0.011	0.011	0.011	0.013	0.015	0.015	0.011	
Mg	0.874	0.895	0.887	0.886	0.869	0.843	0.850	0.793	
Ca	0.886	0.866	0.876	0.878	0.874	0.831	0.853	0.930	
Na	0.021	0.023	0.020	0.019	0.019	0.020	0.020	0.024	
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	
Total	3.977	3.977	3.980	3.972	3.967	3.952	3.952	3.971	
Wo	0.475	0.463	0.467	0.468	0.468	0.458	0.466	0.505	
En	0.469	0.478	0.473	0.473	0.465	0.464	0.464	0.431	
Fs	0.056	0.058	0.060	0.059	0.067	0.078	0.070	0.064	
Comment	2low-plg- pheno 58	2low-plg- pheno 59	2low-plg- pheno 60	2low- cpx 67	2low- cpx 69	2low- cpx 70	2low- cpx 71	2low- cpx 75	
NOTE	Wo = Ca / (Ca+Mg+Fe); En = Mg / (Ca+Mg+Fe); Fs = Fe / (Ca+Mg+Fe).								

表 2.8.1-22 斜長石の化学組成(Rh-042)

Rh-042								
No.	162	163	171	172	173	176	180	182
SiO2	53.08	54.33	55.70	55.53	54.38	54.05	53.67	54.45
Al2O3	28.00	28.41	28.54	27.67	28.02	28.97	28.85	27.66
TiO2	0.01	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
FeO	0.22	0.28	0.22	0.19	0.14	0.35	0.22	0.13
Cr2O3	0.00	0.08	0.00	0.05	0.02	0.00	0.03	0.06
MnO	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.03
MgO	0.10	0.05	0.03	0.03	0.03	0.06	0.05	0.02
CaO	10.23	11.11	10.72	10.25	10.89	11.57	11.62	10.83
Na2O	4.60	4.93	5.28	5.56	5.23	4.90	4.64	5.07
K2O	0.07	0.04	0.06	0.07	0.04	0.04	0.03	0.03
Total	96.31	99.25	100.53	99.36	98.75	99.95	99.13	98.28
O = 8								
No.	162	163	171	172	173	176	180	182
Si	2.476	2.469	2.493	2.515	2.482	2.445	2.445	2.495
Al	1.540	1.522	1.506	1.477	1.508	1.544	1.549	1.494
Ti	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe	0.009	0.011	0.008	0.007	0.005	0.013	0.009	0.005
Cr	0.000	0.003	0.000	0.002	0.001	0.000	0.001	0.002
Mn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001
Mg	0.007	0.004	0.002	0.002	0.002	0.004	0.004	0.001
Ca	0.511	0.541	0.514	0.498	0.533	0.561	0.567	0.532
Na	0.416	0.434	0.458	0.489	0.463	0.430	0.410	0.451
K	0.004	0.002	0.003	0.004	0.002	0.002	0.002	0.002
Total	4.964	4.986	4.985	4.992	4.996	4.999	4.986	4.983
Comment 2low-plg_5;2low-plg_55;2low-plg_6;2low-plg_64;2low-plg_65;2low-cpx_6;2low-cpx_7;2low-cpx_74								

表 2.8.1-23 スメクタイトの化学組成(Rh-042)

Sample ID Rh-042		
No.	165	164
wt		
No.	165	164
SiO2	56.35	51.85
Al2O3	11.65	9.21
TiO2	0.17	0.30
FeO	3.25	4.93
Cr2O3	0.00	0.01
MnO	0.08	0.10
MgO	4.56	3.66
CaO	1.92	2.34
Na2O	1.26	1.04
K2O	1.67	1.40
Total	80.90	74.84
O = 22		
No.	165	164
Si	8.406	8.480
Al	2.049	1.776
Ti	0.019	0.037
Fe	0.405	0.674
Cr	0.000	0.002
Mn	0.010	0.014
Mg	1.015	0.891
Ca	0.306	0.410
Na	0.365	0.328
K	0.317	0.292
Total	12.892	12.904
Comment 2low-zeol_57 2low-zeol_56		
XFe	0.285	0.430
XCa	0.310	0.398
XK	0.321	0.283

表 2.8.1-24 沸石の化学組成(Rh-042)

Sample ID Rh-042		
No.	157	159
SiO ₂	66.34	69.14
Al ₂ O ₃	12.81	12.50
TiO ₂	0.01	0.01
FeO	0.02	0.02
Cr ₂ O ₃	0.03	0.00
MnO	0.00	0.00
MgO	0.14	0.14
CaO	2.99	3.01
Na ₂ O	2.00	2.06
K ₂ O	0.73	0.62
Total	85.07	87.49
O = 22		
No.	157	159
Si	9.053	9.151
Al	2.061	1.950
Ti	0.001	0.001
Fe	0.002	0.002
Cr	0.003	0.000
Mn	0.000	0.000
Mg	0.028	0.027
Ca	0.437	0.426
Na	0.528	0.529
K	0.128	0.105
Total	12.241	12.191
Comment	2low-zeol_49	2low-zeol_51
Si/Al	4.393	4.692
XNK	0.600	0.598
NOTE:	XNK = (Na+K)/(Ca+Na+K)	

表 2.8.1-25 ガラス質物質の化学組成(Rh-042)

Sample ID Rh-042	
No.	169
SiO ₂	56.74
Al ₂ O ₃	11.91
TiO ₂	0.12
FeO	0.32
Cr ₂ O ₃	0.00
MnO	0.04
MgO	0.24
CaO	3.26
Na ₂ O	1.00
K ₂ O	0.89
Total	74.52
Comment	2low-gm-gl_61

表 2.8.1-27 輝石の化学組成(RH14)

SampleID	RH14					
No.	279	281	282	283	286	292
SiO2	52.97	51.61	52.84	52.76	51.17	50.16
Al2O3	2.32	3.64	2.55	2.12	4.25	4.96
TiO2	0.16	0.12	0.11	0.11	0.18	0.26
FeO	8.63	4.47	4.99	4.73	5.79	5.78
Cr2O3	0.10	0.21	0.18	0.12	0.03	0.13
MnO	0.25	0.11	0.11	0.10	0.15	0.12
MgO	22.30	18.52	19.34	19.56	18.71	18.41
CaO	13.98	21.16	20.00	20.91	20.09	19.54
Na2O	0.07	0.12	0.15	0.13	0.16	0.21
K2O	0.01	0.00	0.12	0.00	0.00	0.03
Total	100.79	99.96	100.38	100.53	100.52	99.61
O = 6						
Si	1.913	1.885	1.918	1.915	1.864	1.844
Al	0.099	0.157	0.109	0.091	0.182	0.215
Ti	0.004	0.003	0.003	0.003	0.005	0.007
Fe	0.261	0.137	0.152	0.144	0.176	0.178
Cr	0.003	0.006	0.005	0.003	0.001	0.004
Mn	0.008	0.003	0.003	0.003	0.005	0.004
Mg	1.201	1.008	1.046	1.059	1.016	1.009
Ca	0.541	0.828	0.778	0.813	0.784	0.770
Na	0.005	0.009	0.010	0.009	0.011	0.015
K	0.001	0.000	0.005	0.000	0.000	0.002
Total	4.035	4.035	4.030	4.040	4.045	4.047
Wo	0.270	0.420	0.394	0.403	0.397	0.393
En	0.600	0.511	0.530	0.525	0.514	0.516
Fs	0.130	0.069	0.077	0.071	0.089	0.091
Comment	3low-plg_4	3low-plg_6	3low-plg_7	3low-plg_8	3low-cpx_11	3low-cpx_17
NOTE	Wo = Ca / (Ca+Mg+Fe); En = Mg / (Ca+Mg+Fe); Fs = Fe / (Ca+Mg+Fe).					

表 2.8.1-28 スメクタイトの化学組成(RH14)

Sample ID RH14															
No.	277	278	287	288	289	294	295	297	298	299	300	301	302	305	306
wt															
No.	277	278	287	288	289	294	295	297	298	299	300	301	302	305	306
SiO2	53.66	56.63	54.37	53.78	53.66	56.80	57.58	56.53	56.61	57.80	56.14	55.81	59.35	55.13	50.01
Al2O3	8.97	9.44	7.67	9.45	7.58	10.01	9.85	10.19	10.78	10.09	10.98	10.39	10.05	11.79	7.27
TiO2	0.55	0.36	0.38	0.38	0.33	0.53	0.43	0.60	0.56	0.47	0.38	0.47	0.49	0.41	0.27
FeO	17.56	15.35	15.67	15.28	14.78	15.86	14.11	16.27	15.51	14.14	15.02	16.33	14.89	10.61	12.52
Cr2O3	0.00	0.04	0.04	0.00	0.04	0.00	0.01	0.01	0.00	0.04	0.01	0.03	0.00	0.00	0.00
MnO	0.45	0.41	0.34	0.40	0.38	0.36	0.28	0.31	0.38	0.29	0.33	0.33	0.25	0.20	0.18
MgO	4.26	5.18	4.89	3.69	4.87	5.12	5.49	4.77	4.84	5.33	4.58	4.65	5.78	6.20	4.94
CaO	1.80	2.11	2.15	2.03	2.10	2.22	2.42	2.15	2.10	2.31	2.09	2.23	2.17	4.57	2.46
Na2O	0.24	0.18	0.26	0.12	0.25	0.12	0.25	0.11	0.15	0.25	0.15	0.10	0.19	0.30	0.13
K2O	4.18	3.08	2.85	3.06	2.73	2.84	2.18	2.91	3.00	1.99	3.14	3.07	2.70	0.60	1.43
Total	91.67	92.77	88.61	88.19	86.71	93.85	92.60	93.84	93.92	92.71	92.81	93.41	95.87	89.79	79.21
O = 22															
No.	277	278	287	288	289	294	295	297	298	299	300	301	302	305	306
Si	7.857	7.995	8.084	8.010	8.118	7.929	8.034	7.910	7.885	8.038	7.900	7.868	8.024	7.797	8.154
Al	1.548	1.571	1.344	1.660	1.351	1.647	1.619	1.680	1.770	1.654	1.821	1.726	1.602	1.965	1.397
Ti	0.061	0.039	0.042	0.042	0.037	0.056	0.045	0.063	0.059	0.049	0.040	0.050	0.050	0.043	0.033
Fe	2.151	1.812	1.948	1.904	1.870	1.851	1.647	1.904	1.807	1.644	1.768	1.925	1.684	1.254	1.706
Cr	0.000	0.004	0.005	0.000	0.005	0.000	0.001	0.001	0.000	0.005	0.001	0.004	0.000	0.000	0.000
Mn	0.056	0.049	0.043	0.051	0.049	0.043	0.033	0.037	0.045	0.034	0.039	0.039	0.029	0.024	0.025
Mg	0.929	1.090	1.083	0.819	1.098	1.065	1.141	0.994	1.004	1.105	0.961	0.977	1.164	1.306	1.201
Ca	0.282	0.319	0.342	0.325	0.340	0.332	0.362	0.323	0.313	0.345	0.315	0.337	0.314	0.693	0.430
Na	0.067	0.049	0.076	0.033	0.072	0.034	0.067	0.031	0.042	0.068	0.041	0.028	0.051	0.082	0.042
K	0.781	0.555	0.541	0.581	0.526	0.505	0.388	0.519	0.533	0.354	0.564	0.553	0.466	0.108	0.298
Total	13.732	13.481	13.508	13.425	13.466	13.461	13.338	13.462	13.458	13.295	13.451	13.507	13.383	13.272	13.286
Comment	3low-plg_2	3low-plg_3	3low-mont_1_2	3low-mont_1_3	3low-mont_1_4	3low-mont_1_9	3low-mont_2_0	3low-mont_2_2	3low-mont_2_3	3low-mont_2_4	3low-mont_2_5	3low-mont_2_6	3low-mont_2_7	3low-large-cpx_30	3low-mont_3_1
XFe	0.698	0.624	0.643	0.699	0.630	0.635	0.591	0.657	0.643	0.598	0.648	0.663	0.591	0.490	0.587
XCa	0.250	0.346	0.357	0.346	0.362	0.381	0.444	0.370	0.353	0.450	0.342	0.367	0.378	0.785	0.558
XK	0.691	0.601	0.565	0.619	0.561	0.580	0.475	0.595	0.600	0.461	0.613	0.603	0.561	0.122	0.387

表 2.8.1-29 沸石の化学組成(RH14)

Sample ID RH14			
No.	307	308	309
SiO ₂	60.06	53.83	62.72
Al ₂ O ₃	14.64	13.92	16.51
TiO ₂	0.00	0.00	0.03
FeO	0.11	0.15	0.26
Cr ₂ O ₃	0.00	0.01	0.00
MnO	0.00	0.01	0.05
MgO	1.26	1.40	1.03
CaO	4.66	4.21	5.04
Na ₂ O	0.43	0.37	0.57
K ₂ O	0.57	0.46	0.65
Total	81.73	74.37	86.86
O = 22			
No.	307	308	309
Si	8.594	8.478	8.473
Al	2.470	2.584	2.629
Ti	0.000	0.001	0.003
Fe	0.013	0.020	0.030
Cr	0.000	0.002	0.000
Mn	0.000	0.002	0.006
Mg	0.268	0.329	0.207
Ca	0.714	0.710	0.730
Na	0.118	0.114	0.149
K	0.104	0.093	0.112
Total	12.282	12.332	12.339
Comment	3low-mont_32	3low-zeol- vein_33	3low-zeol- vein_34
Si/Al	3.480	3.281	3.223
XNK	0.237	0.226	0.264
NOTE:	XNK = (Na+K)/(Ca+Na+K)		

(4) 化学（元素）マッピング

アルカリ地下水環境下でのオフィオライト変質反応に伴う物質（主要バルク成分）移動を考察する上で、化学マッピングが有効である。これは、特に、物質移動の地球化学的プロセスで生起する変質鉱物の形成と共生鉱物間との地球化学的環境変化（変質反応場の変遷）の理解およびその変質反応プロセスを明らかにすることに役立たせることが出来る。

EPMAによる元素マッピングの結果を以下に示す。視野はすべて 10x10 mm²である。

1) Rh-003

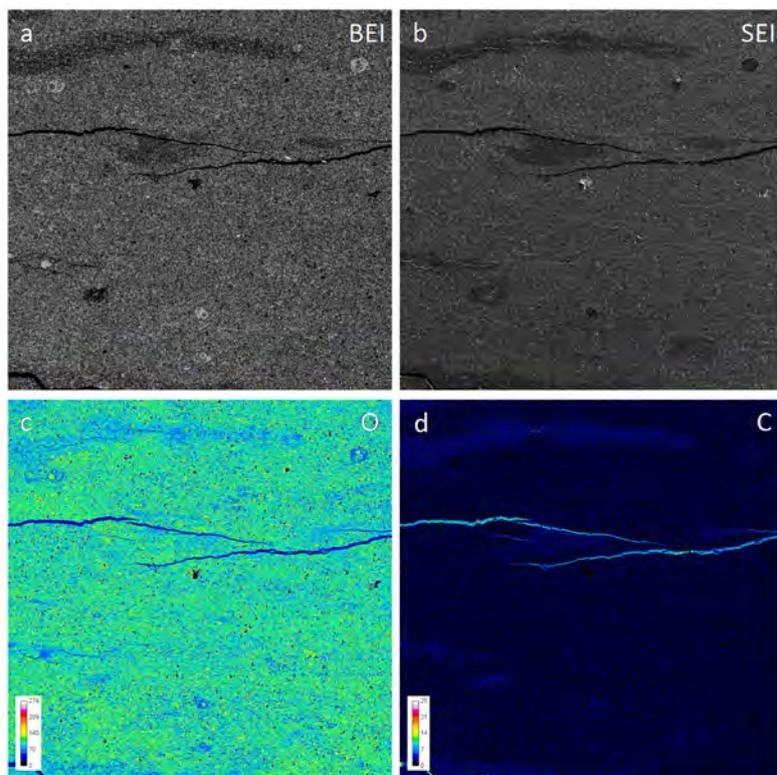


図 2.8.1-29 試料 Rh-003 の元素マッピング(その 1、a: BEI; b: SEI; c: O; d: C)

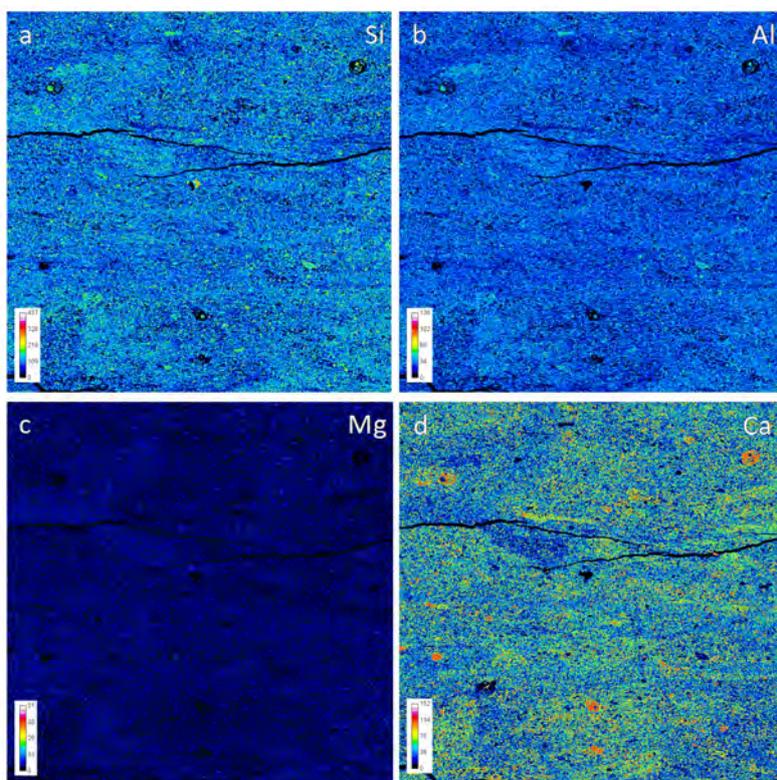


図 2.8.1-30 試料 Rh-003 の元素マッピング(その 2、a: Si; b: Al; c: Mg; d: Ca)

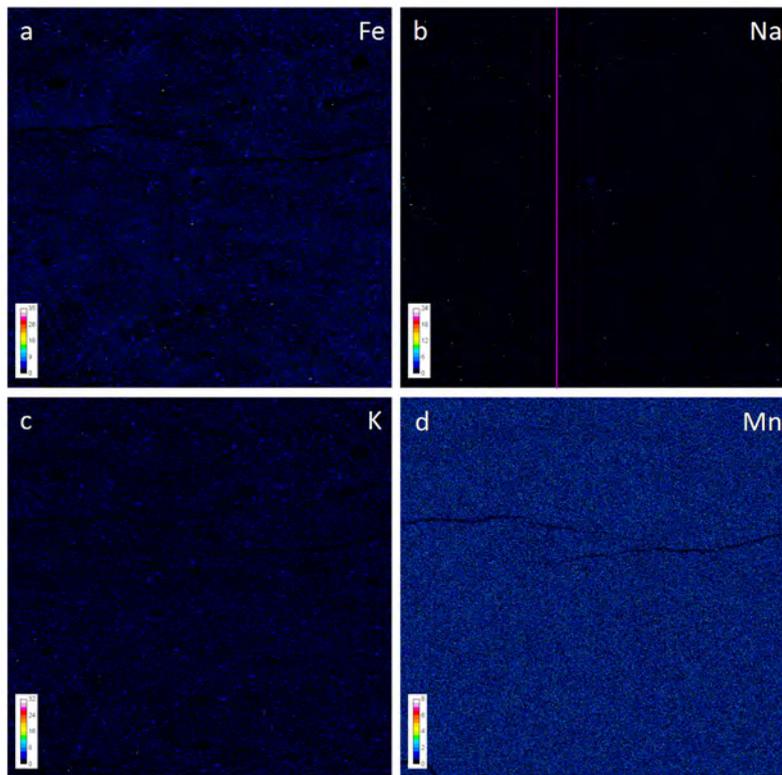


図 2.8.1-31 試料 Rh-003 の元素マッピング(その 3、a: Fe; b: Na; c: K; d: Mn)

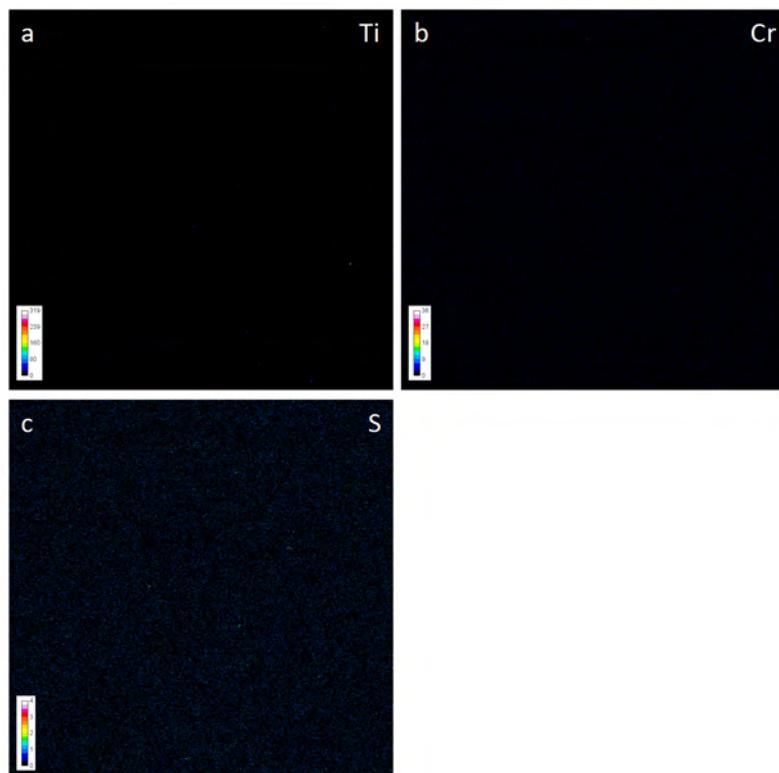


図 2.8.1-32 試料 Rh-003 の元素マッピング(その 4、a: Ti; b: Cr; c: S)

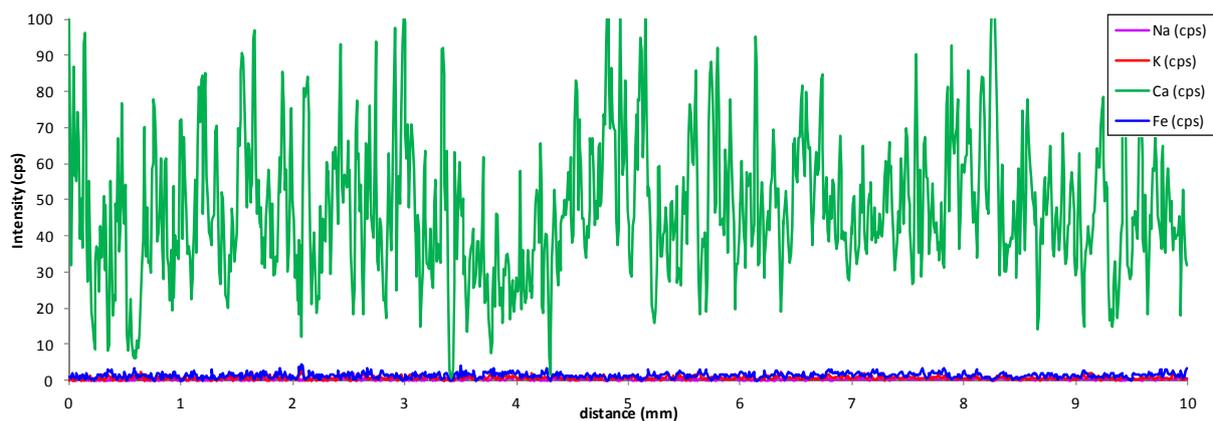


図 2.8.1-33 元素プロフィール(Rh-003)

2) Rh-016

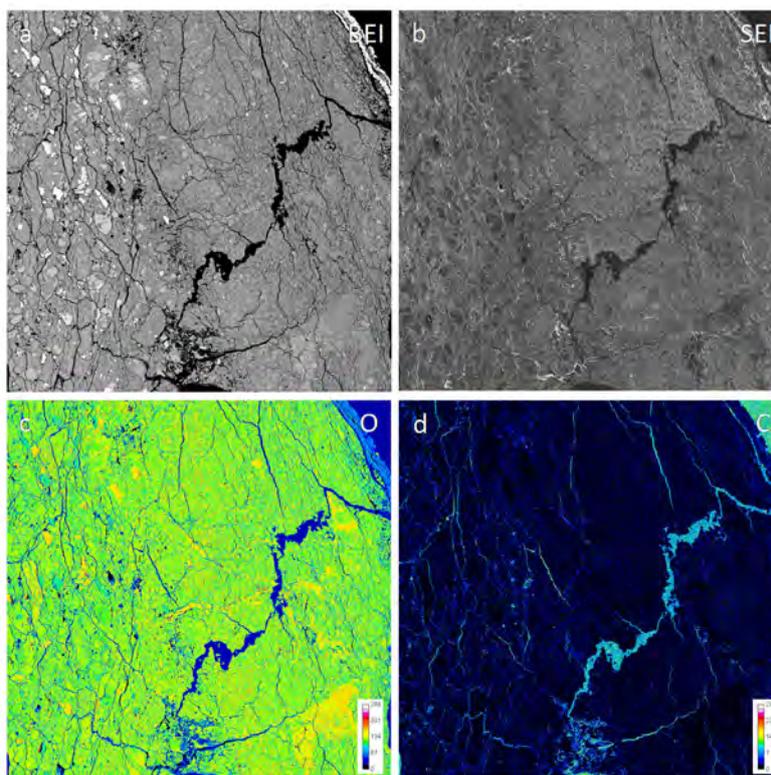


図 2.8.1-34 試料 Rh-016 の元素マッピング(その1、a: BEI; b: SEI; c: O; d: C)

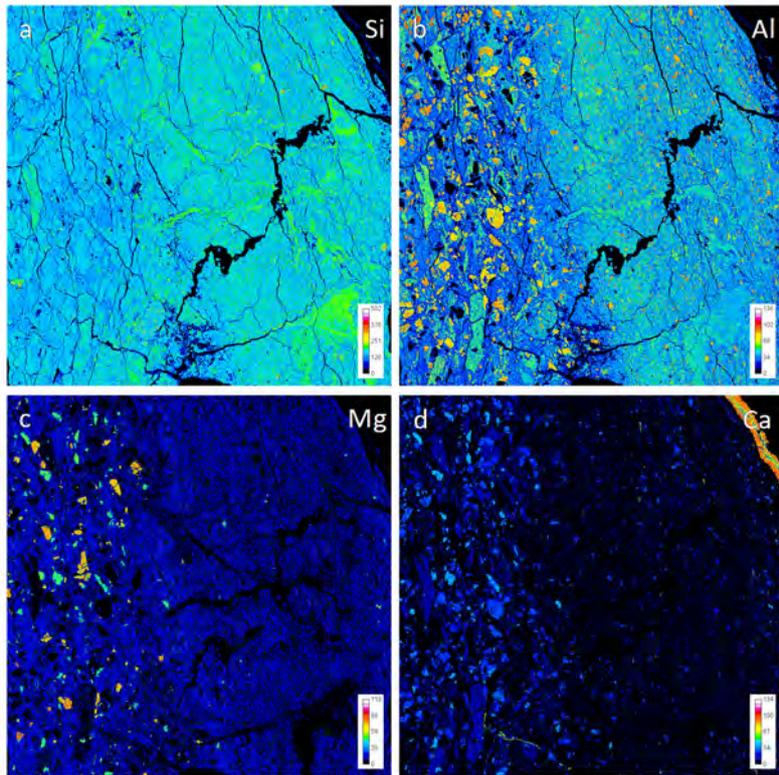


図 2.8.1-35 試料 Rh-016 の元素マッピング(その 2、 a: Si; b: Al; c: Mg; d: Ca)

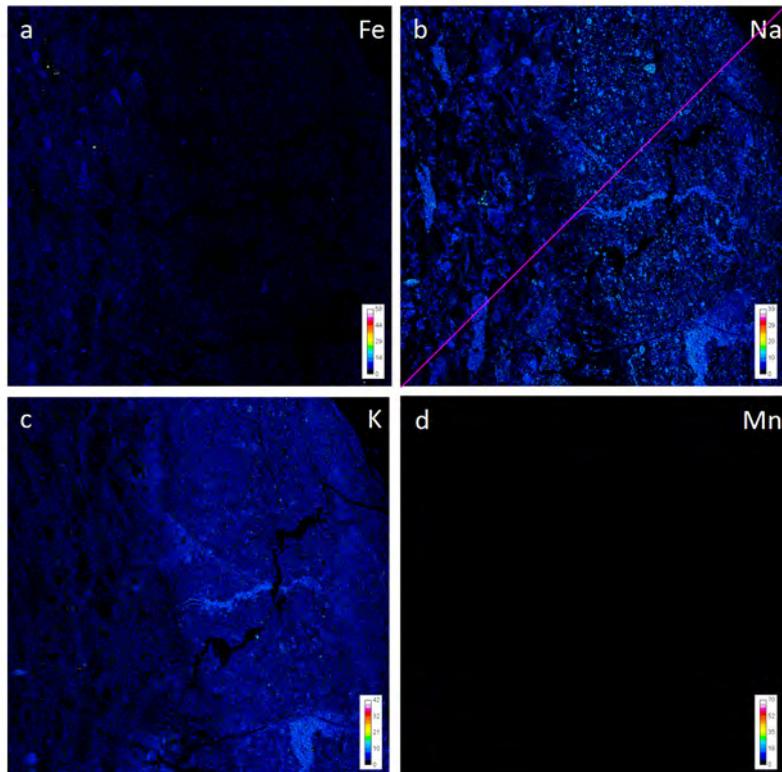


図 2.8.1-36 試料 Rh-016 の元素マッピング(その 3、 a: Fe; b: Na; c: K; d: Mn)

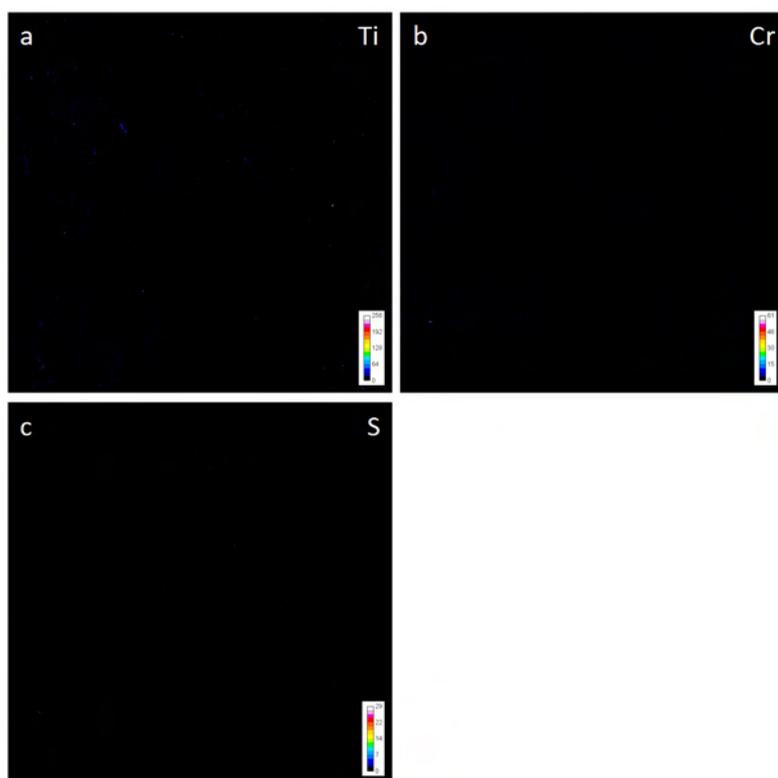


図 2.8.1-37 試料 Rh-016 の元素マッピング(その 4、a: Ti; b: Cr; c: S)

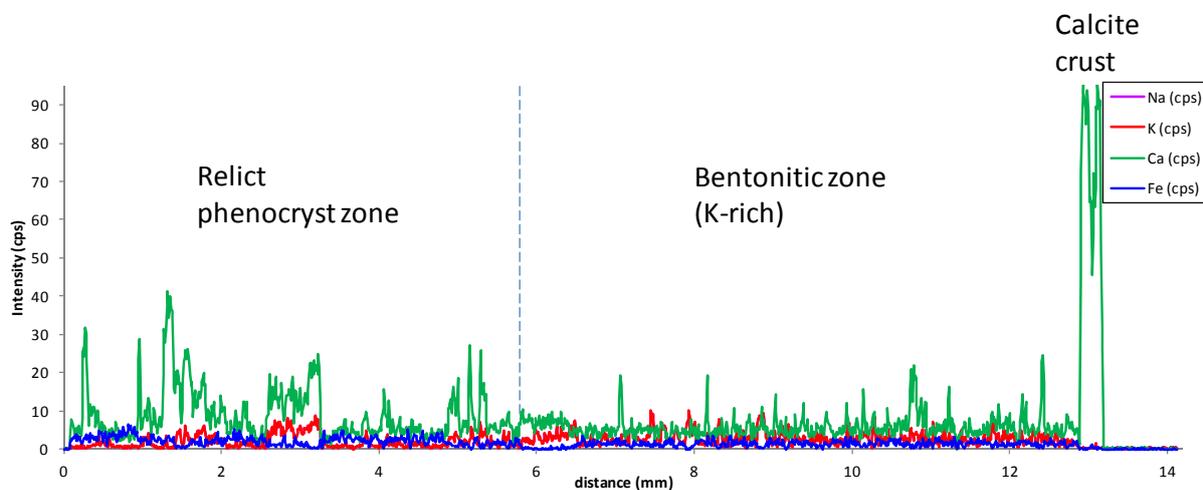


図 2.8.1-38 元素プロファイル(Rh-016)

3) Rh-018

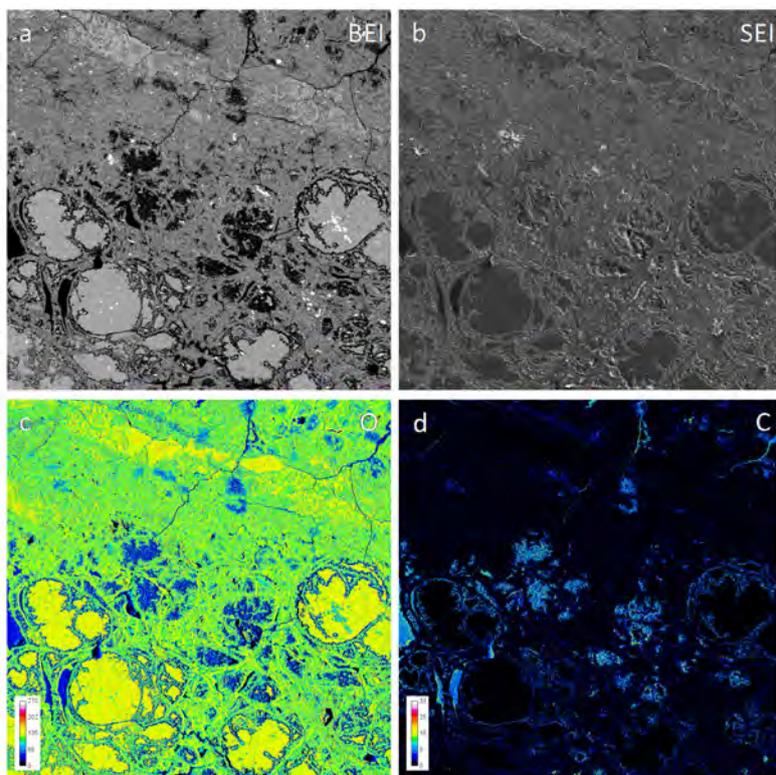


図 2.8.1-39 試料 Rh-018 の元素マッピング(その 1、a: BEI; b: SEI; c: O; d: C)

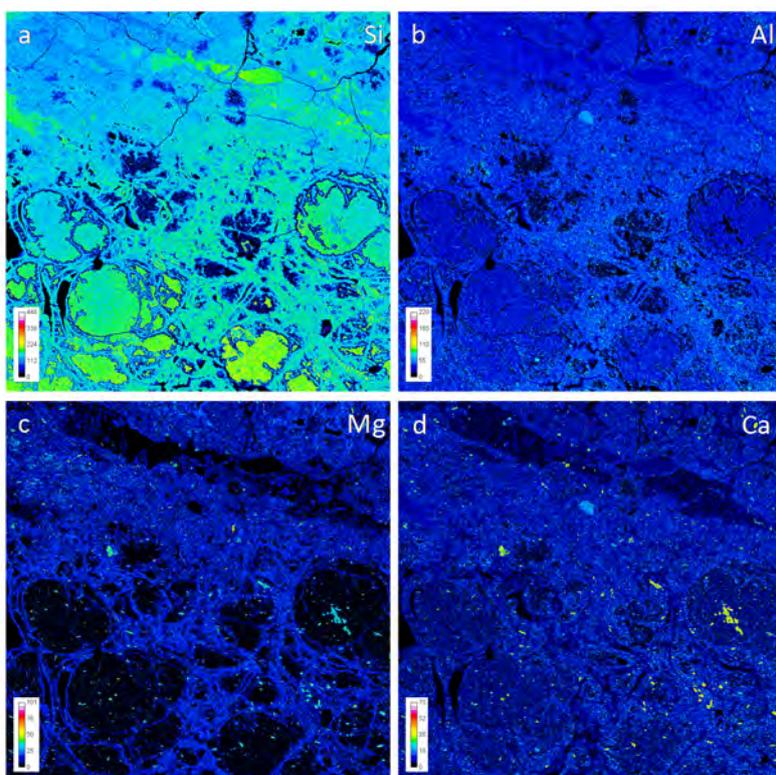


図 2.8.1-40 試料 Rh-018 の元素マッピング(その 2、a: Si; b: Al; c: Mg; d: Ca)

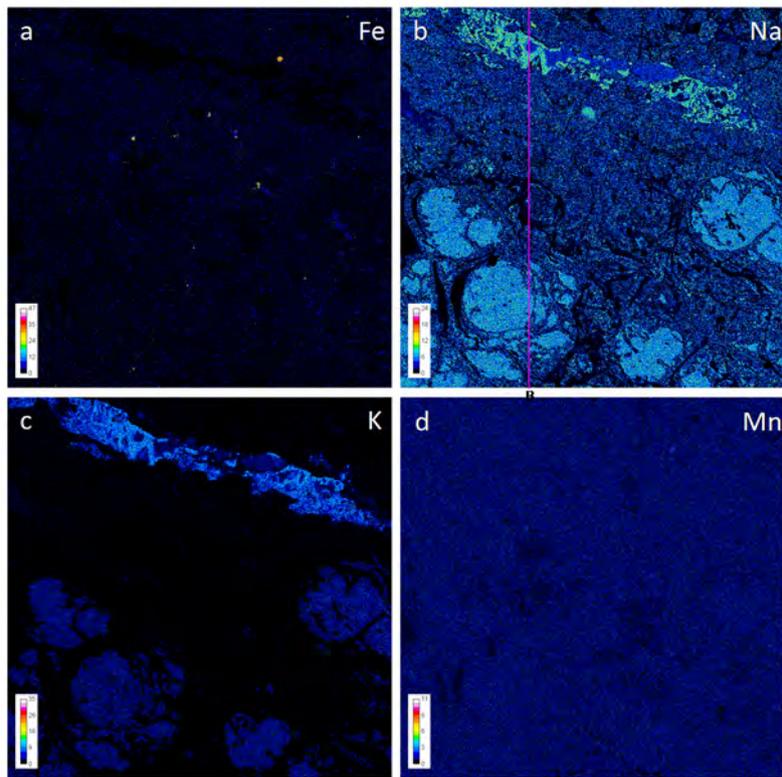


図 2.8.1-41 試料 Rh-018 の元素マッピング(その 3、a: Fe; b: Na; c: K; d: Mn)

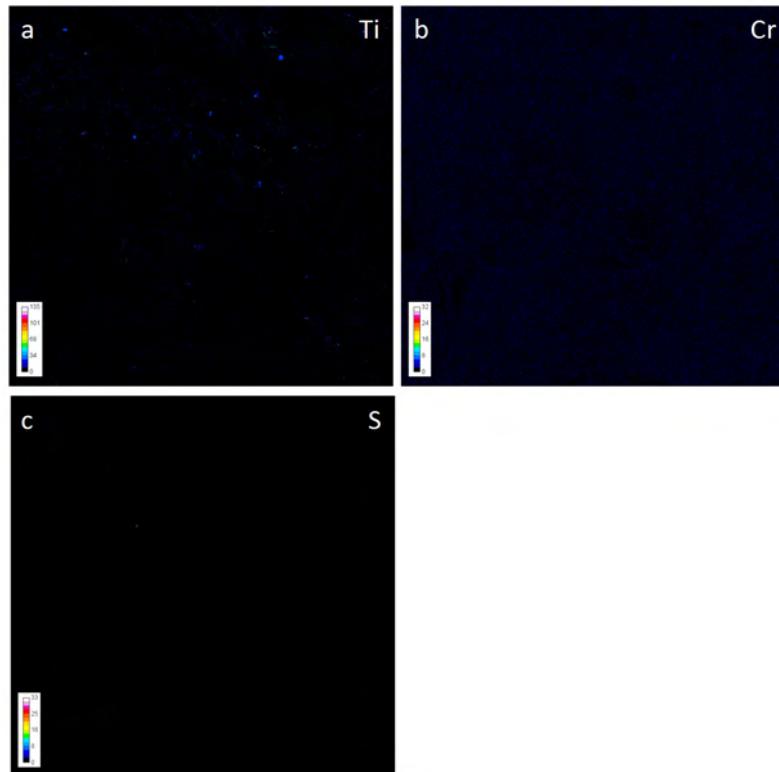


図 2.8.1-42 試料 Rh-018 の元素マッピング(その 4、a: Ti; b: Cr; c: S)

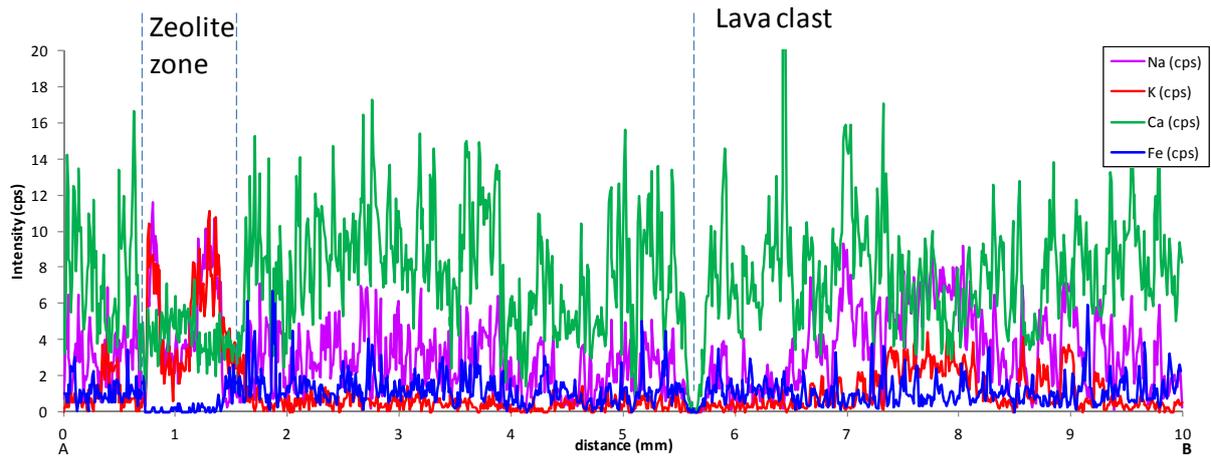


図 2.8.1-43 元素プロファイル(Rh-018)

4) Rh-042

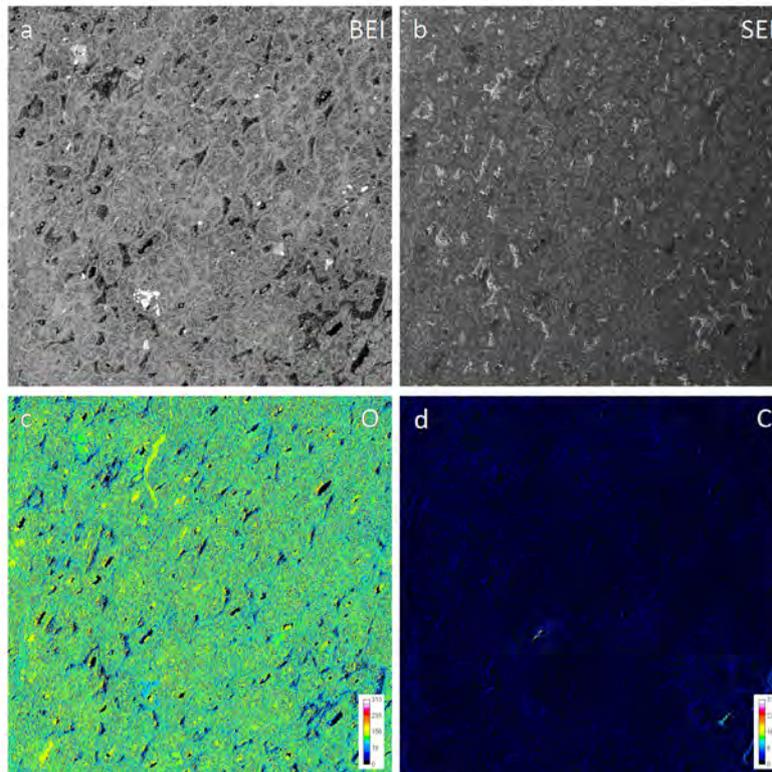


図 2.8.1-44 試料 Rh-042 の元素マッピング(その1、a: BEI; b: SEI; c: O; d: C)

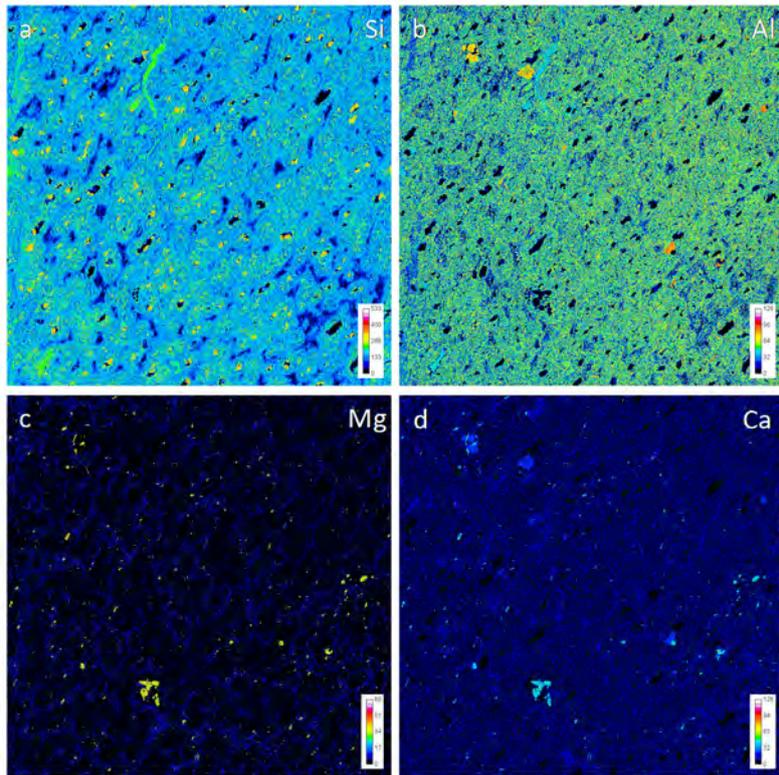


図 2.8.1-45 試料 Rh-042 の元素マッピング(その 2、 a: Si; b: Al; c: Mg; d: Ca)

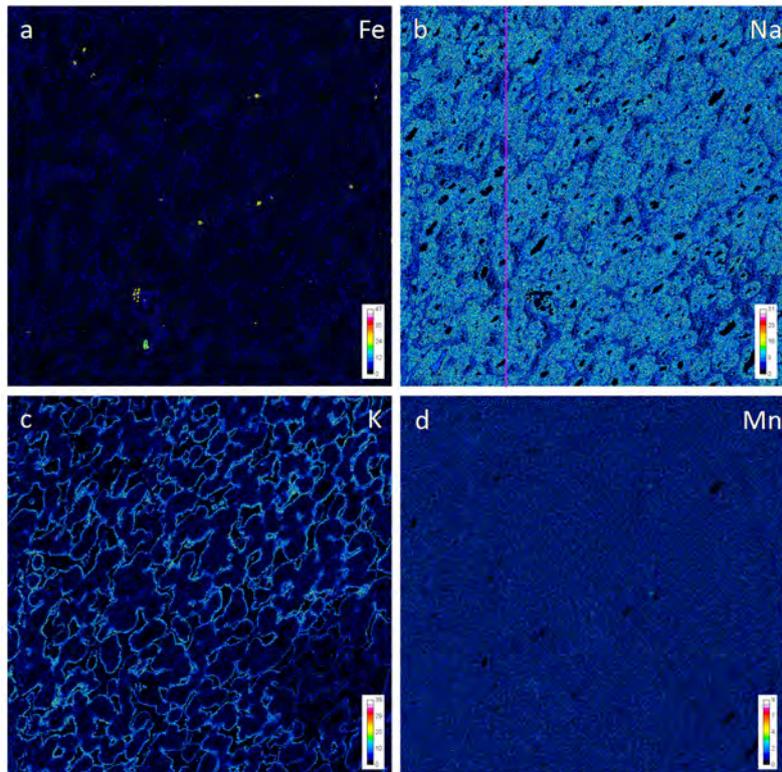


図 2.8.1-46 試料 Rh-042 の元素マッピング(その 3、 a: Fe; b: Na; c: K; d: Mn)

特徴的な変質組織は、セル状構造に現れているが、セルは K-rich リムで境されており、変質流体の最後は K に富む流体であったことがうかがい知れる。

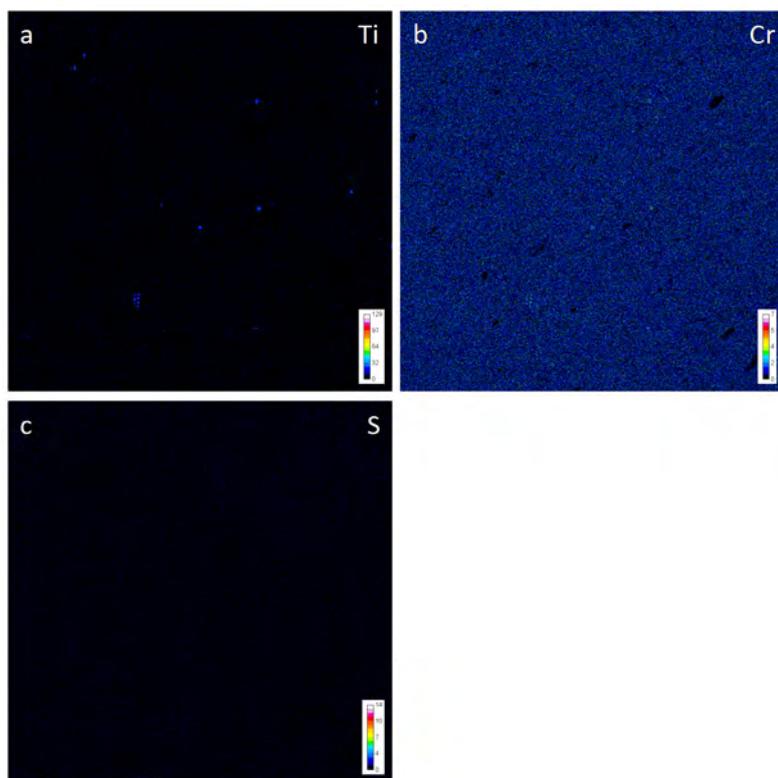


図 2.8.1-47 試料 Rh-042 の元素マッピング(その 4、a: Ti; b: Cr; c: S)

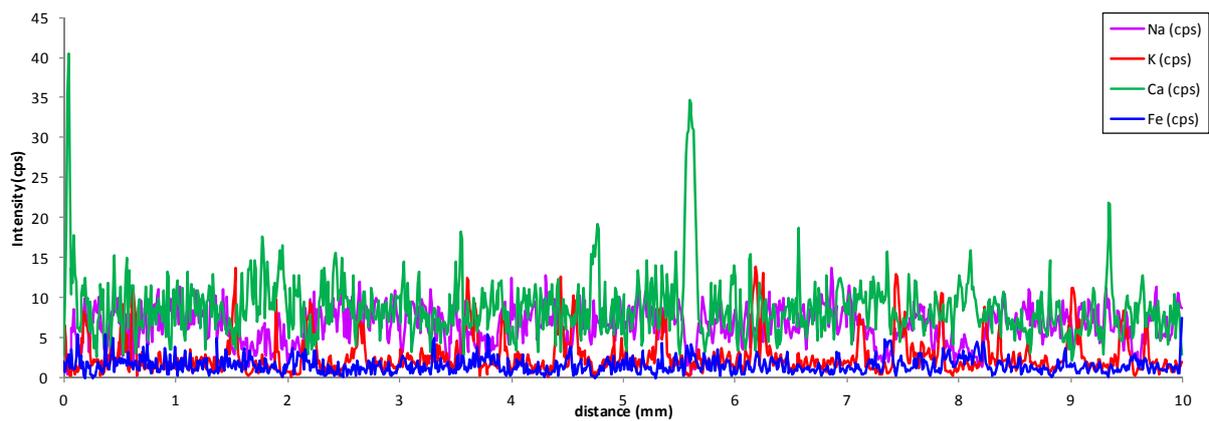


図 2.8.1-48 元素プロファイル(Rh-042)

5) RH14

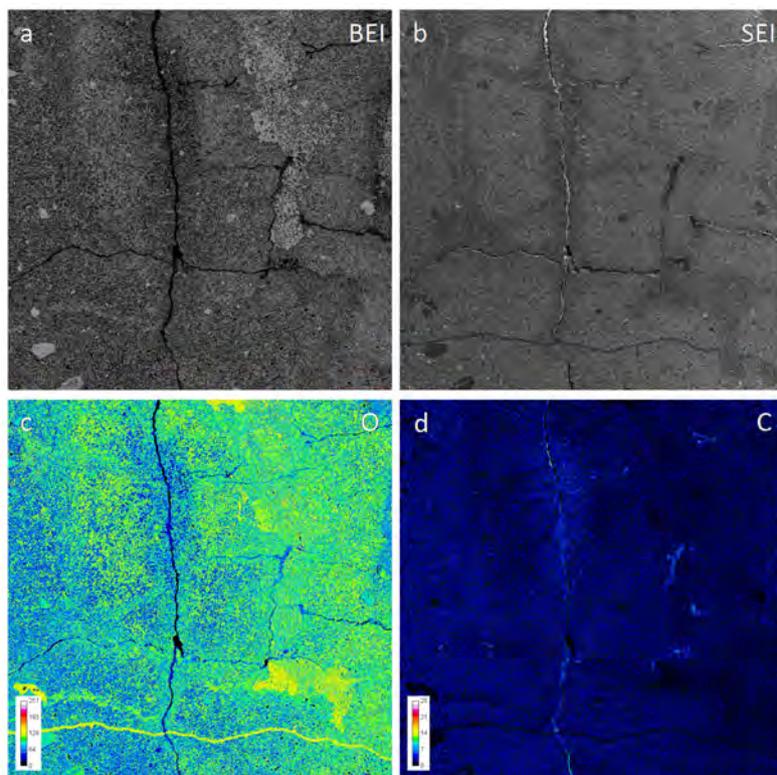


図 2.8.1-49 試料 RH14 の元素マッピング(その 1、a: BEI; b: SEI; c: O; d: C)

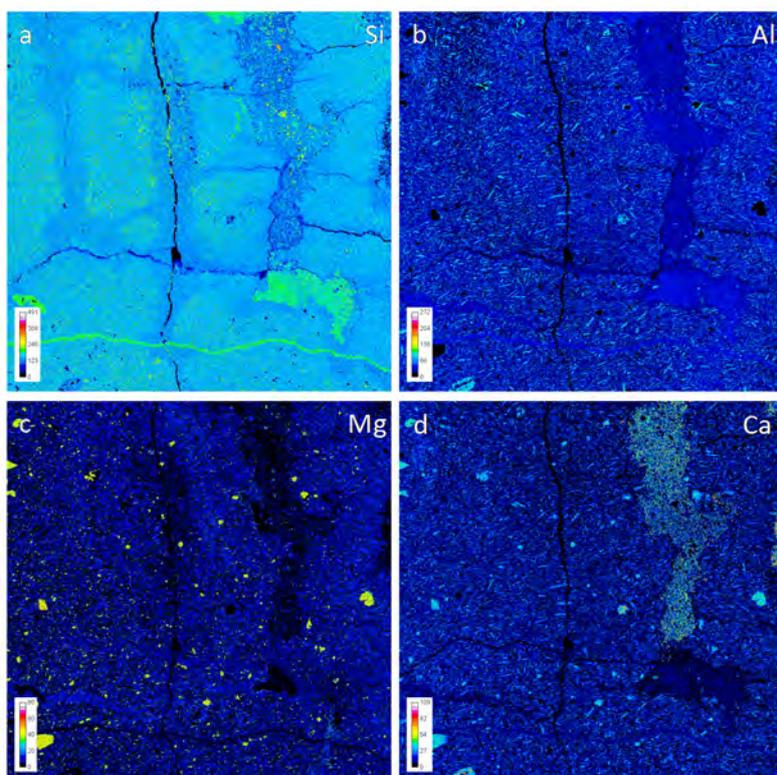


図 2.8.1-50 試料 RH14 の元素マッピング(その 2、a: Si; b: Al; c: Mg; d: Ca)

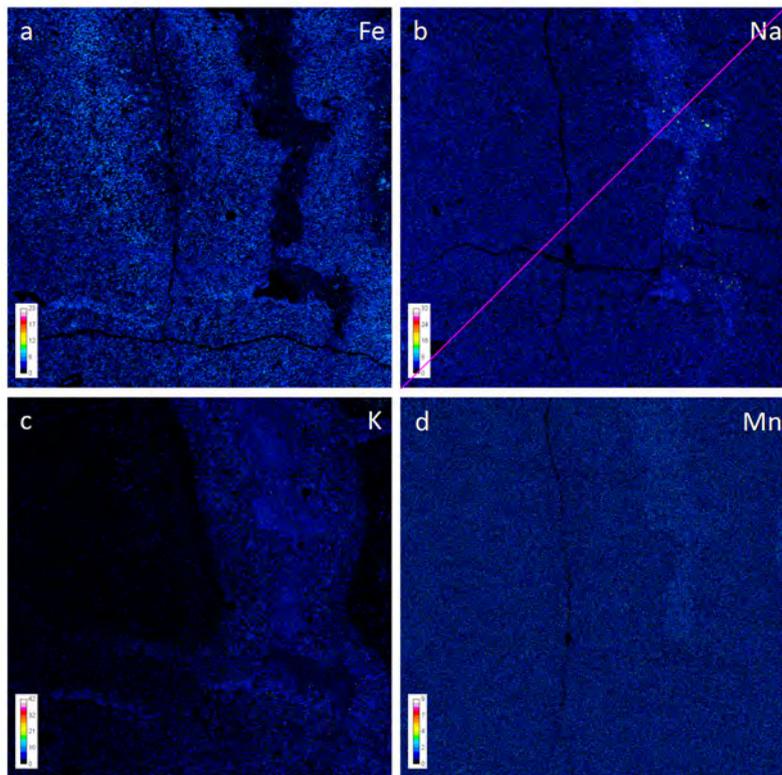


図 2.8.1-51 試料 RH14 の元素マッピング(その 3、a: Fe; b: Na; c: K; d: Mn)

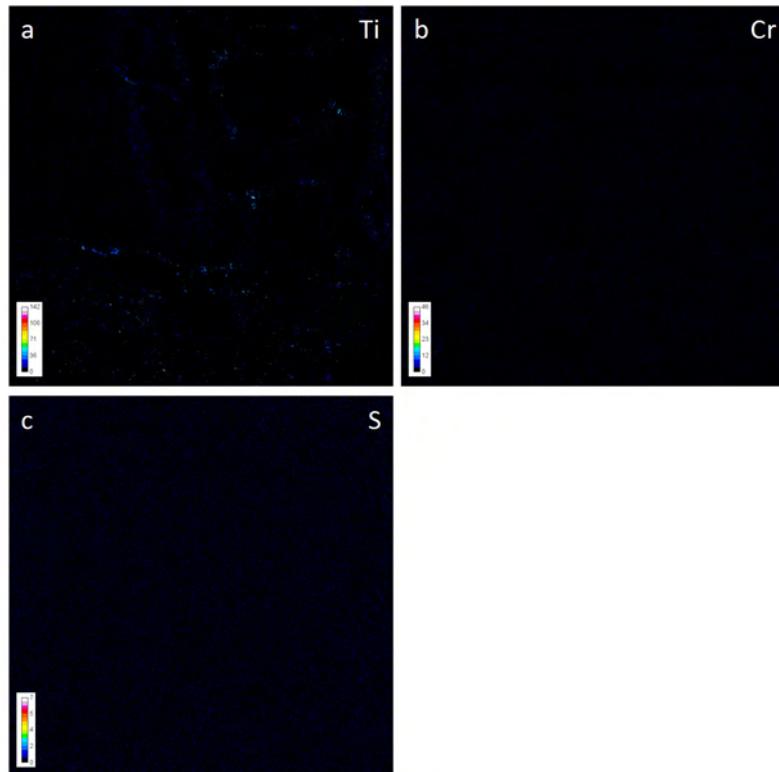


図 2.8.1-52 試料 RH14 の元素マッピング(その 4、a: Ti; b: Cr; c: S)

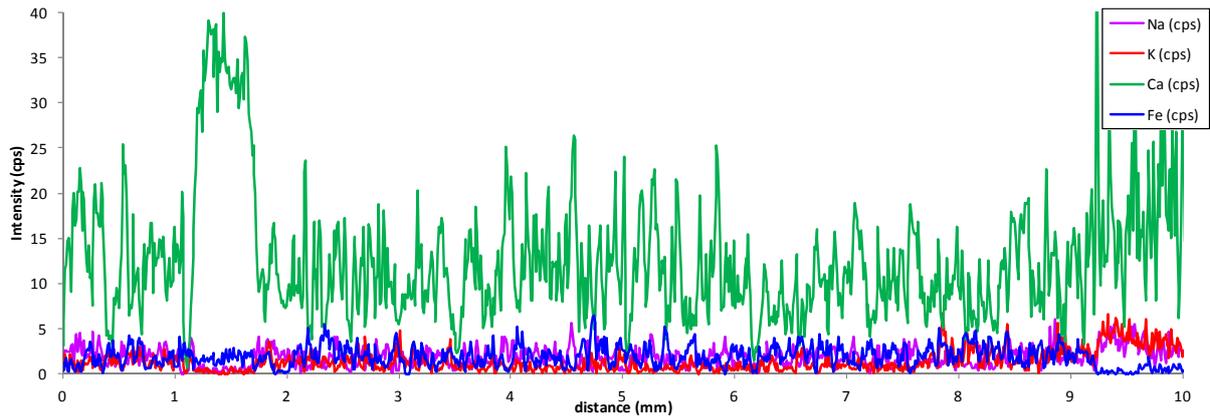


図 2.8.1-53 元素プロファイル(RH14)

(5) 変質鉱物と共生鉱物の鉱物学的・鉱物化学的特性

主要な変質鉱物と共生鉱物の鉱物化学的特性を明らかにするために、それぞれの鉱物の化学組成を代表的な組成図にプロットし検討した。

1) スメクタイト

スメクタイトの X_{Fe} - X_{Ca} のフラクション図 (図 2.8.1-54) とスメクタイトの X_{Ca} 組成レンジの変化図 (図 2.8.1-55) に示すように、 X_{Ca} 組成は堆積岩 (Rh-003) を除けば組成変動幅が小さく、深度方向にやや Ca に富む傾向を示す。しかしながら、最深度のものは (Rh-042) は組成変化が殆どなくほぼ一定である。これは分析数の少なさによるかも知れないが、全体として概ねピークは $X_{Ca}=0.4$ 付近である(図 2.8.1-55)。

一方、 X_{Fe} 組成は、 X_{Ca} と同じように堆積岩のものを除けば組成変動幅が小さく、深度方向に Fe に減じる傾向を示す。全体として、 X_{Ca} と同様ピークは $X_{Fe}=0.4$ 付近である。

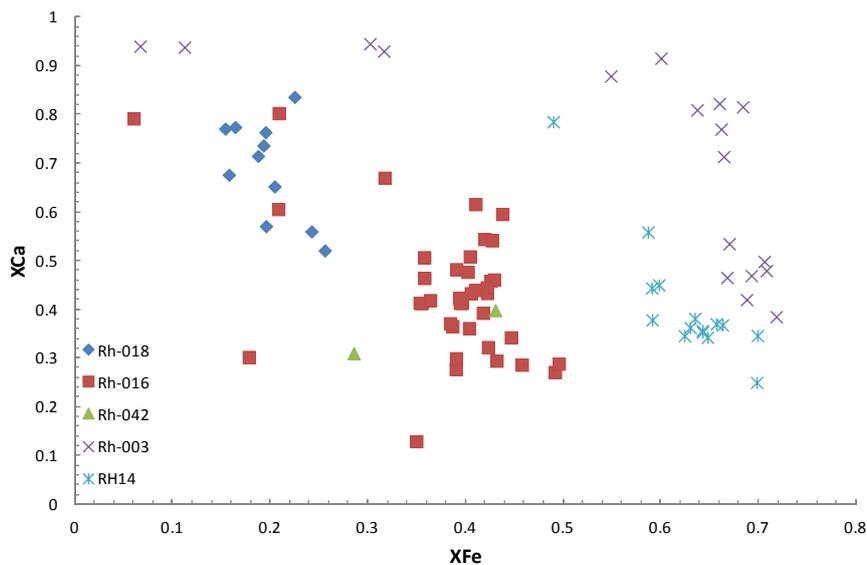


図 2.8.1-54 スメクタイトの X_{Fe} vs. X_{Ca} プロット

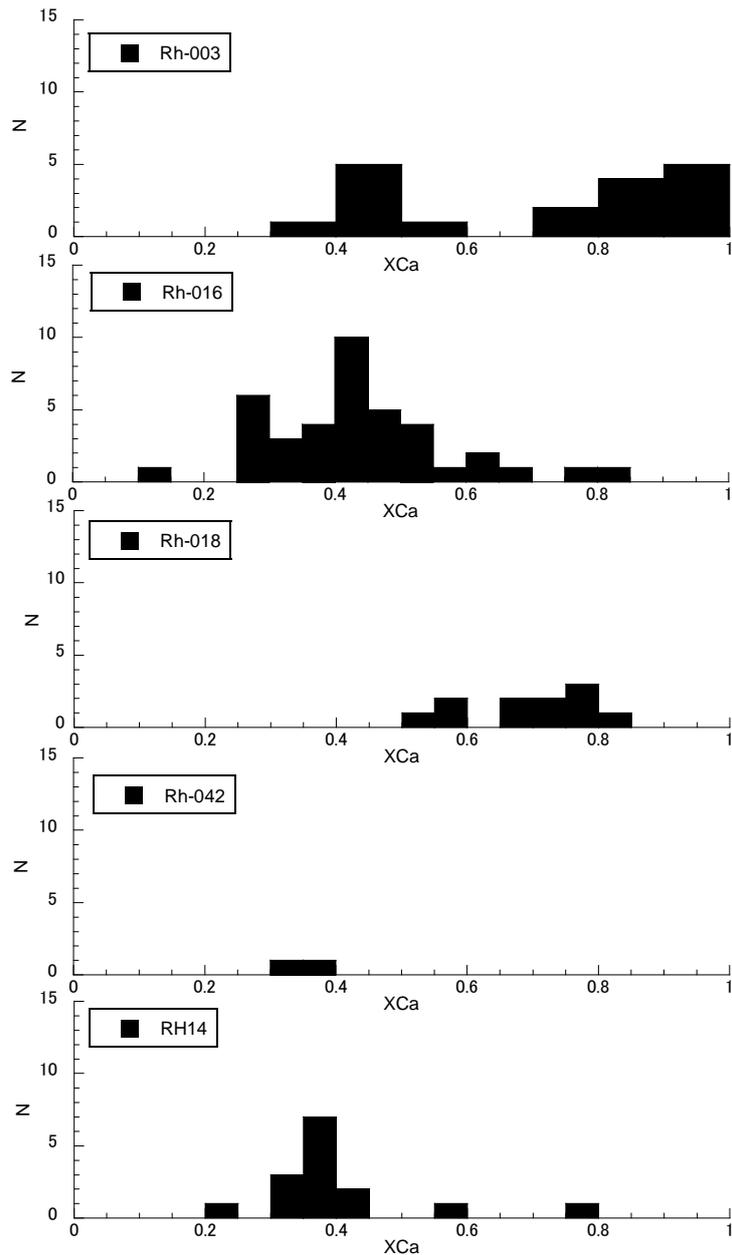


図 2.8.1-55 スメクタイトの X_{Ca} 組成レンジの変化

2) 沸石

沸石の形成過程（進化）を考察するために、沸石分類図（図 2.8.1-56）を示す。この図より、玄武岩質ガラスのアルカリ変質反応により形成された Ca-モンモリロナイトが輝沸石に、その後、K に富むアルカリ地下水との変質反応により斜プチロル沸石に、そして最終的には、K-モンモリロナイトから十字沸石への変質（進化）していくことが考えられる。さらに、この十字沸石は Ca に富むアルカリ地下水により再び斜プチロル沸石へ変化し、その後、CO₂ に富む表層地下水の中和・緩衝作用により方解石の沈殿へと鉱物の進化が考えられる。

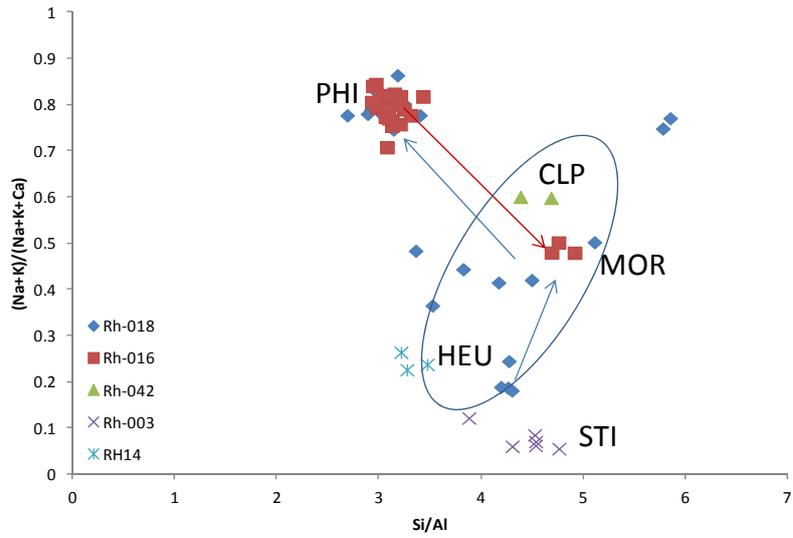


図 2.8.1-56 沸石分類プロット

3) 斜長石

斜長石の組成変化を検討するために、系：An ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ：灰長石) - Ab ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ：曹長石) - Or (KAlSi_3O_8 ：正長石)の三角図 (図 2.8.1-57) にプロットする。この図から 斜長石の組成範囲は歪灰長石(An90)から曹灰長石(An60~40)で広い組成範囲が示される。組成変化も最深度のもの (Rh-042) を除けば、深度方向へ Na に富む (Ab :曹長石) 傾向を示す。

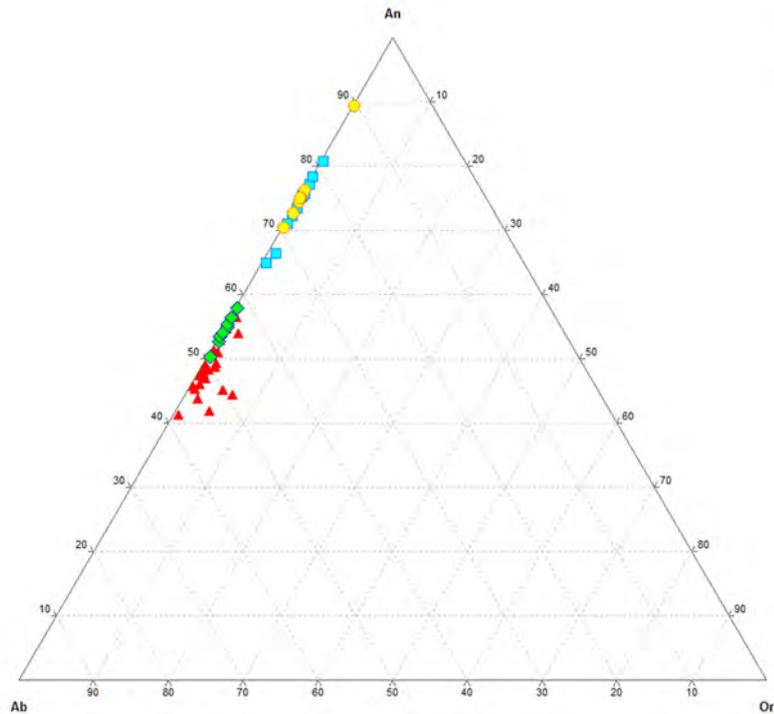


図 2.8.1-57 斜長石の三角プロット

4) 輝石

輝石の組成変化を検討するために、系：Wo (CaSiO₃：珪灰石)－En (MgSiO₃：頑火輝石)－FS (FeSiO₃：鉄珪輝石) (中間成分：WO50En50 <CaMgSi₂O₆：透輝石>、WO50FS50 <CaFeSi₂O₆：ヘデンベルグ輝石>) の三角図 (図 2.8.1-58) にプロットする。この図から、輝石は単斜輝石と斜方輝石の両輝石が示される。単斜輝石はその組成から Ca に富む透輝石から普通輝石で、斜方輝石は、Mg に富む頑火輝石から紫蘇輝石で構成されている。但し斜方輝石は Rh-018 試料のみから観察される。また、特に、Mg に富む斜方輝石 (En 成分に富む輝石) の起源を検討するために Cr 含有量との関係図 (図 2.8.1-59) にプロットした。この図に示すように、その組成特徴からマントル起源の特異な Mg に富むマグマから晶出した可能性がある。

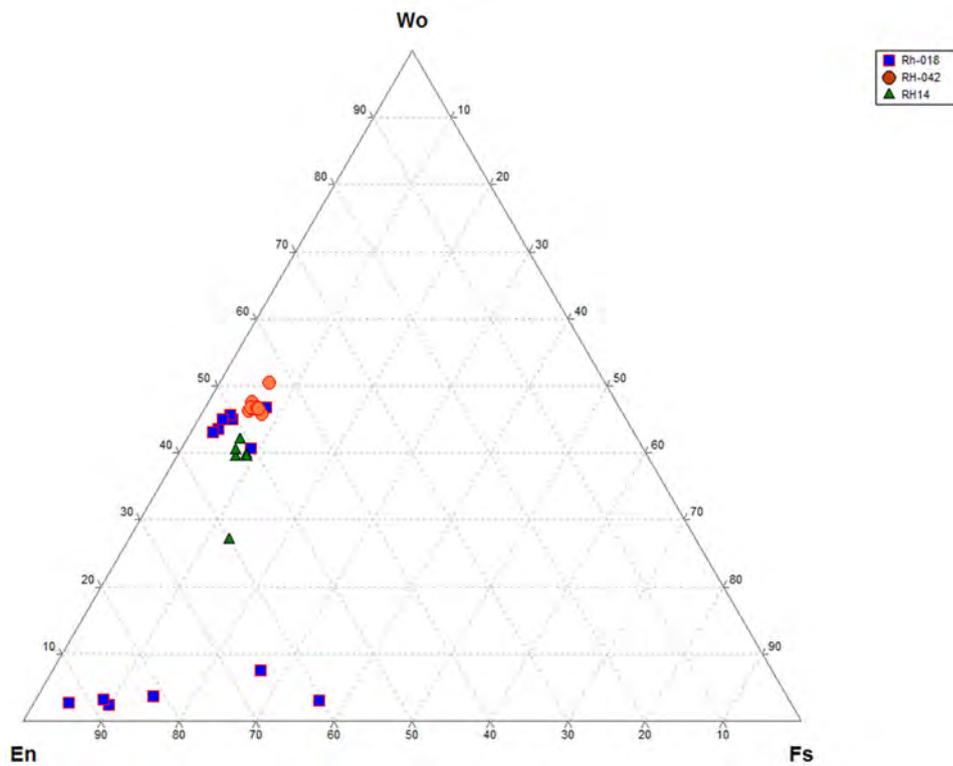


図 2.8.1-58 輝石の三角プロット

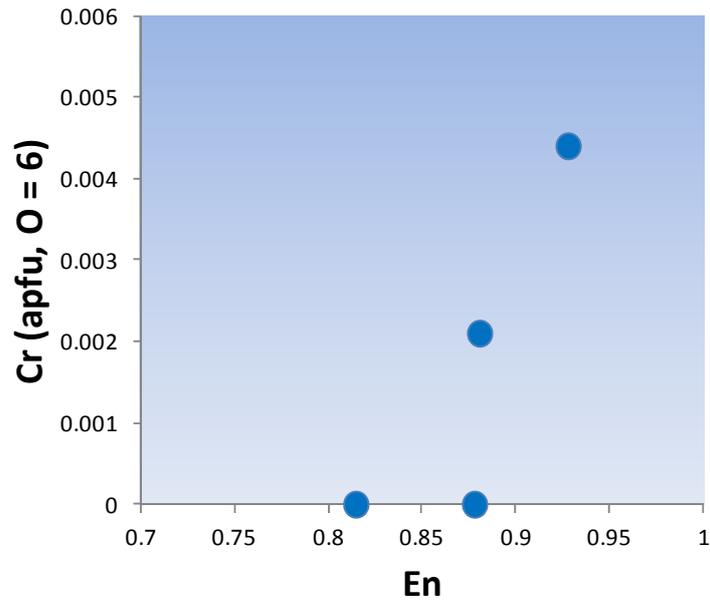


図 2.8.1-59 斜方輝石の $\text{En}(\text{MgSiO}_3)$ 組成と Cr 含有量の関係

5) ガラス質物質

堆積岩 (Rh-003) を除くコア試料は玄武岩質溶岩で、基質 (マトリックス) がガラス質である特徴がある。特に、アルカリ地下水との変質反応に大きく寄与するのでその組成を把握することが必要である。

ガラスは結晶と共存していたマグマの残液成分であるため、化学組成の変化は、冷却時の結晶分化過程を反映している。図 2.8.1-60 にハーカー組成変化図を示す。

この図から、 SiO_2 の組成範囲はその範囲幅が広く、 SiO_2 の増加に伴い、 K_2O は直線的に増加するが、 MgO は逆に減少する。その増加と減少幅はそれぞれ 0.5~約 2wt %、と 0.2~約 2.3 wt %である。これらの組成変化やその幅については、恐らく岩石種とその岩質の違いや変質程度に依存するものと考えられる。

2.8.2 オフィオライトのアルカリ変質反応による変質鉱物形成の地球化学的プロセス

現在、アルカリ裂か水（自噴）が湧水（接触）している試錐孔（BBDH08 孔）から採取したコア試料（5 件）を対象に、岩石鉱物学的・鉱物学的・鉱物化学的特性などを明らかにするために偏光顕微鏡観察、EPMA などの詳細な分析・解析を実施してきた。但し、現在観察されるアルカリ裂か水は、基盤岩内のみ賦存している。ここでは、特に、オフィオライトの構成岩である最上位の石灰質・凝灰岩質砂岩～泥岩（Aksitero 累層の堆積岩）および、基盤岩である自破碎玄武岩質溶岩（Zambales Ophiolite）とアルカリ地下水との変質反応による変質鉱物の形成に関する地球化学的プロセスを考察する。

岩相・岩質については、前者はパミスを含む部分的にベントナイト質であること、後者は、岩石の岩質・岩相と組織上、多くの玄武岩質ガラスと少量ではあるが班晶として斜長石から構成されている。これらはアルカリ変質反応に大きく関与する前駆物質となっている。

アルカリ変質鉱物としては、モンモリロナイト、沸石類、シリカ鉱物、方解石などでアルカリ変質反応生成物の示準鉱物であるカリ長石は同定されなかった。特に興味深いのは、玄武岩質溶岩中の前駆物質のアルカリ変質反応の出発物質がモンモリロナイトであることである。この事実から、この変質反応の地球化学的プロセスはベントナイトのアルカリ変質反応による鉱物学的・鉱物化学的アナログとして取り扱うことが出来る。

また、その変質反応プロセスを示す変質鉱物の結晶構造・組織は、モンモリロナイトの部分的交代・置換過程を示す累帯構造とモンモリロナイトの部分的溶解を示す平行成長そして、モンモリロナイトの溶解－沈殿反応による熱力学的に安定な二次鉱物の形成などが観察される。

ここでは、オフィオライトのアルカリ変質反応プロセスを示す変質鉱物の組成と結晶構造・組織などを検討した後、今回取得したデータや知見などを総合的に解析し、変質反応生成鉱物の変遷(進化)シナリオを考察する。

最初に、石灰質・凝灰岩質砂岩～泥岩（BBDH08-13-Rh-003）を図 2.8.2-1 に示す。この図から、前駆物質はパミスで、アルカリ変質反応によるモンモリロナイトと Ca-沸石が平行成長の同時沈殿（晶出）を示している。恐らくその後、Ca²⁺イオンの中和・緩衝作用による方解石の沈殿が生じたものと示唆される。

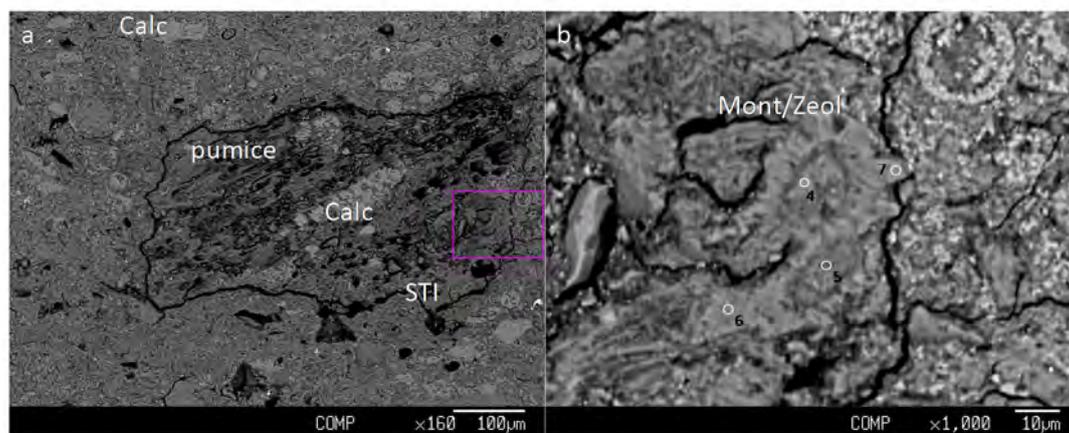


図 2.8.2-1 パミス質岩片と変質 (a: 反射電子線像 x160; b: モンモリロナイト／沸石質部, Rh-003)

BBDH08-13-Rh-014 を図 2.8.2-2～図 2.8.2-3 に示す。この上の図から前駆物質である斜長石の中心部がモンモリロナイトのインクルージョン様に部分的交代され、恐らくその後、Mn に富む方解石に充填されている。また、下の図からは、細長い針状の斜長石を交代した短冊状の輝沸石とモンモリロナイトが近接して産状している。これはモンモリロナイトの溶解－沈殿反応によるものと考えられる。

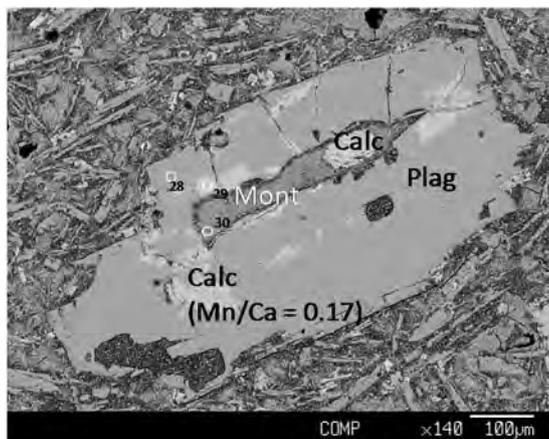
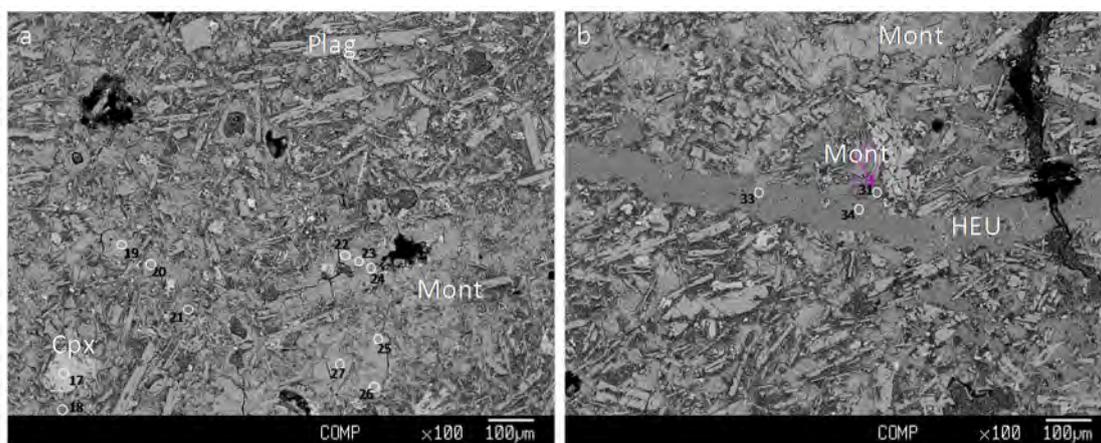


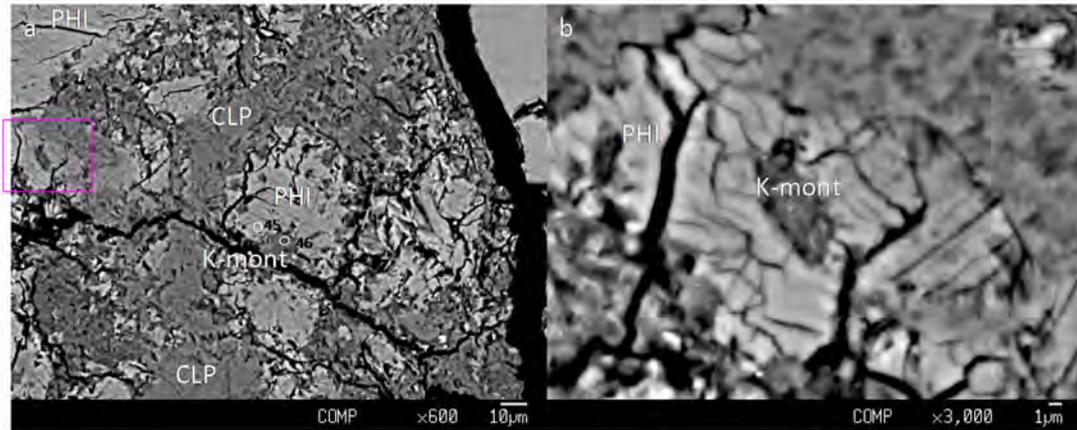
図 2.8.2-2 斑晶と石基斜長石の変質



(a: モンモリロナイト化した石基ガラス; b: モンモリロナイト化した石基ガラスと脈状沸石)

図 2.8.2-3 石基の変質組織

BBDH08-13-Rh-016 を図 2.8.2-4 に示す。この図から恐らく、玄武岩質ガラスのアルカリ変質により K-モンモリロナイトが形成され、その後部分的な交代過程で取り囲むように十字沸石とその外側に斜プチロル沸石の累帯構造が形成されたものと観察される。



Spot# 45: Phillipsite

Spot# 46: K-rich montmorillonite

MontはKに富み、フィリップサイトに包有される。

図 2.8.2-4 累帯組織を示す沸石スメクタイト(a: K-mont を包有する十字沸石と斜プチロル沸石; b: x 3000)

BBDH08-13-Rh-018 を図 2.8.2-5 に示す。この図からは玄武岩質溶岩の基質（マトリックス）を構成している玄武岩質ガラスと細長いマイクロライト（恐らく斜長石）のアルカリ変質反応により形成された Ca-モンモリロナイトが沸石類への変質形成過程が観察される。その形成過程は Ca-モンモリロナイトを出発物質としてアルカリ変質反応により、モンモリロナイトの溶解-沈殿反応で輝沸石が形成され、その後その外縁部を十字沸石により部分的に交代されているものと観察される。

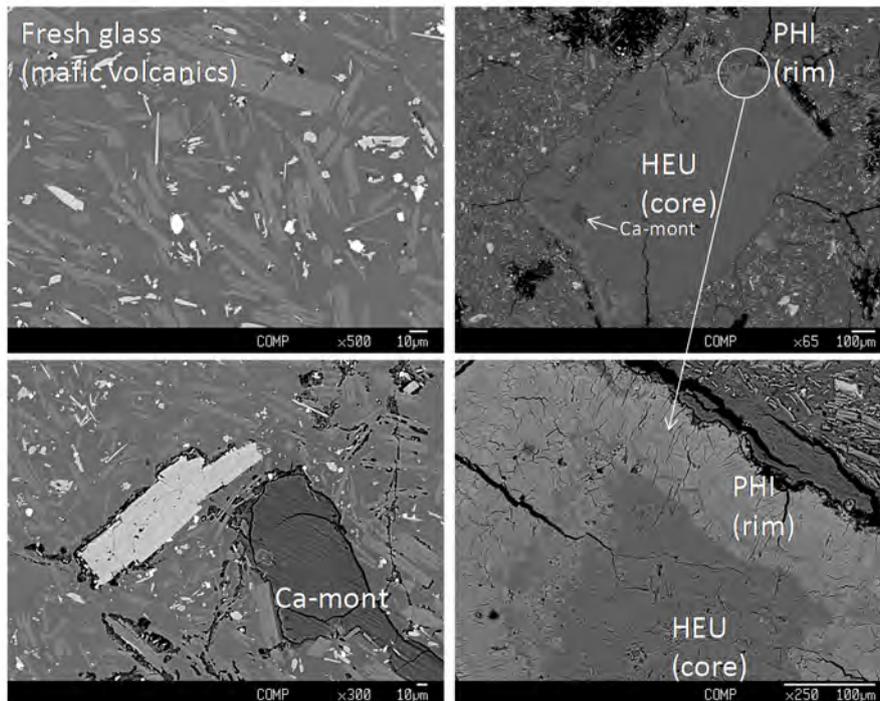
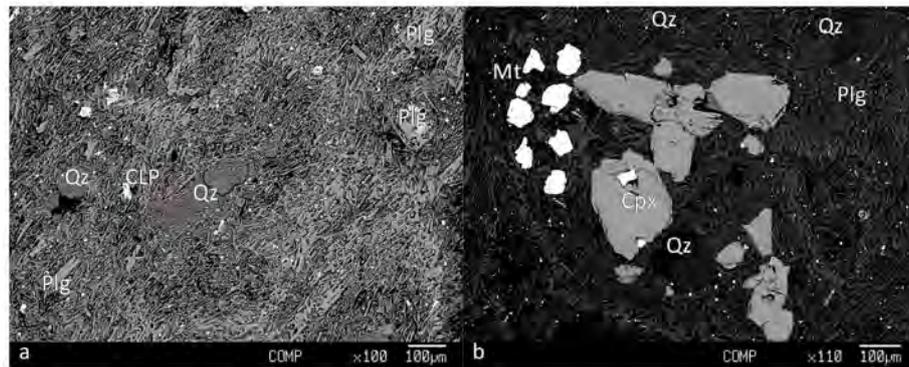


図 2.8.2-5 ガラス質物質から沸石への変質過程

BBDH08-13-Rh-042 を図 2.8.2-6 に示す。この図からは、比較的多い半自形石英の斑晶とアモルファスシリカ鉱物（恐らくクリストバライト）と、単斜輝石と斜長石の特徴的な集班状組織を示している。また、半自形の石英をオーバーグロースする斜プチロル沸石が観察される。これは恐らく玄武岩質ガラスのアルカリ変質反応より形成されたものと考えられる。散在する不透明鉱物（磁鉄鉱）は、モンモリロナイトの酸化反応により形成されたものと考えられる。



(a: 斑晶石英とオーバーグロースする斜プチロル沸石; b: 斑晶の集合組織)

図 2.8.2-6 変質相の産状

最後に、観察されたこれらの変質鉱物の組成・鉱物学的構造・組織 から、アルカリ変質反応による変質反応生成鉱物の地球化学的プロセスを 2 件の試料 (BBDH08-13-Rh-016 / 018) から検討・考察する。

図 2.8.2-7 に示すように、Rh-016 においては、アルカリ変質反応による変質反応生成鉱物の地球化学的プロセスは、(i) 玄武岩質ガラスからの K-モンモリロナイト形成、(ii) やや高温環境で十字沸石へ変質、(iii) 高温の Ca、Si に富む地下水との変質反応により斜プチロル沸石へ変質、(iv) 低温の地下水との中和・緩衝作用により方解石の沈殿が考えられる。

また、図 2.8.2-8 に示すように、Rh-018 においては、その地球化学的プロセスは、(i) 玄武岩質ガラスからの Ca-モンモリロナイト形成、(ii) やや高温で輝沸石へ変質、(iii) K、Al の富む高アルカリ地下水による十字沸石への変質が考えられる。

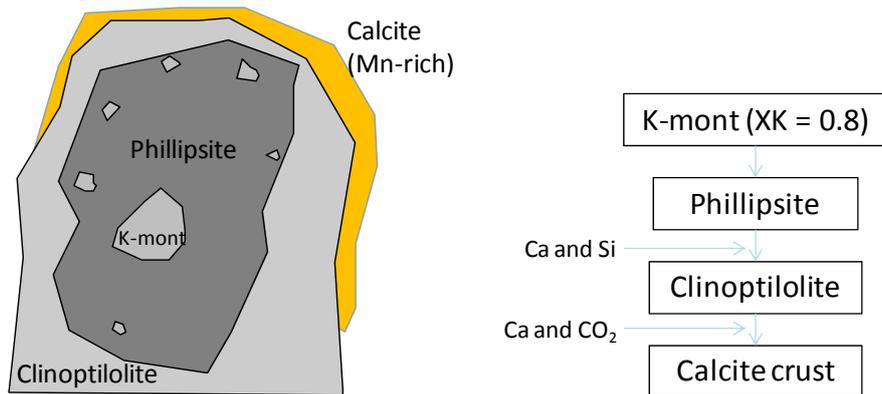
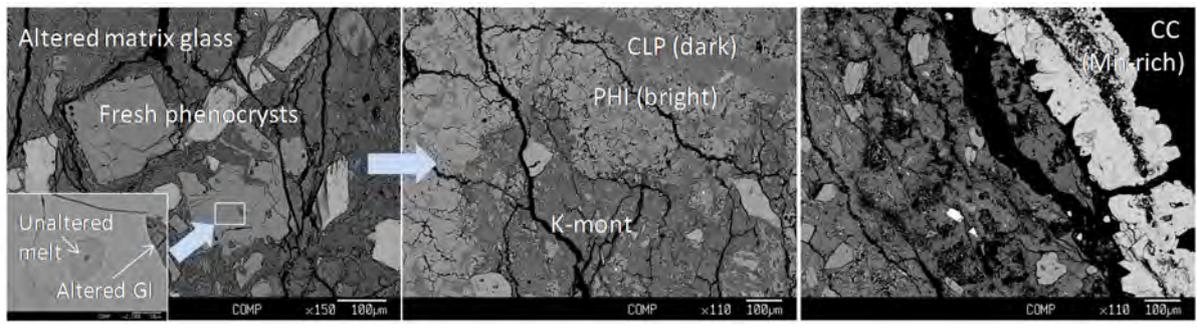


図 2.8.2-7 火山岩から沸石、方解石までの変質過程(a: 火山岩源岩; b: 累帯変質した沸石; c: 最外縁部を覆う方解石)

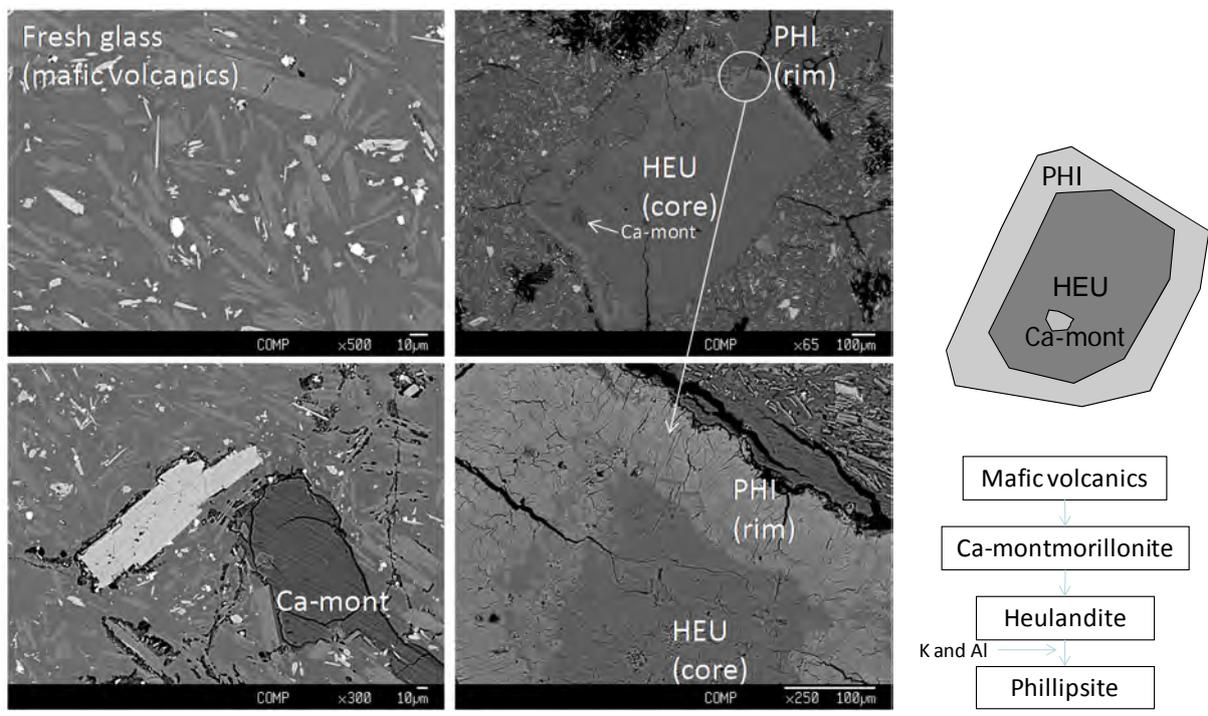


図 2.8.2-8 ガラス質物質から沸石への変質過程

今回観察・分析した玄武岩質溶岩ガラスの沸石類の進化については、図 2.8.2-9 に示すように、出発物質としての Ca-モンモリロナイトが輝沸石に、その後、K に富む高アルカリ地下水との変質反応により斜プチロル沸石へ、さらに K-モンモリロナイトと十字沸石へ進化していく (BBDH08-13-Rh-018)。さらに、この十字沸石は Ca に富む高アルカリ地下水により再び斜プチロル沸石へと変質し、最後に、CO₂ に富む表層地下水により中和・緩衝作用により方解石の沈殿に移行することが考えられる。なお、モンモリロナイトからの沸石への変質プロセスは、温度、pH および、溶液中の化学種 (主要な陽イオン活量 : Ca, Na+K, Al / Si) など強く依存し、特に、Al / Si 比が小さい場合 (Si に富む溶液) は斜プチロル沸石と十字沸石の形成、大きい場合 (Al に富む溶液) は、輝沸石と方沸石が形成されやすいことが指摘されている [27]。

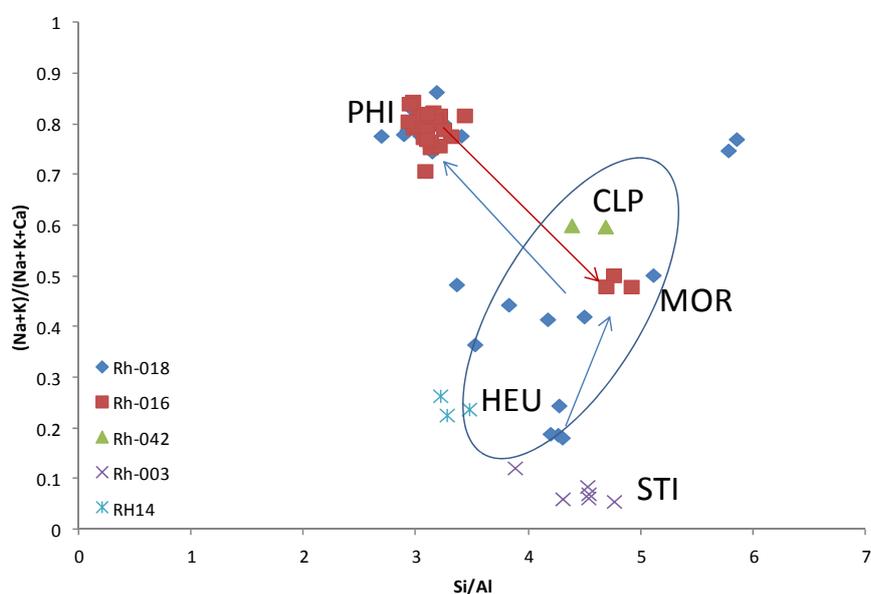


図 2.8.2-9 沸石の進化

これらの解析結果を総合すると、オフィオライトの前駆物質 (玄武岩質ガラス、斜長石、パミスなど) のアルカリ変質反応による変質反応生成物の形成に係る地球化学的プロセスは、①Ca-モンモリロナイトと②K-モンモリロナイトを出発物質として形成され、その後のアルカリ地下水 (溶液) との変質反応により、Ca-Na-K 沸石として、(i) 十字沸石と斜プチロル沸石系列と、(ii) 輝沸石と十字沸石系列の形成が考えられる。この差異は原岩の鉱物組成・バルク組成とその反応時の地下水の組成、pH、温度および、滞留時間 (接触時間) などに依存するものと考えられる。

今後、変質鉱物の形成と反応系列に係る地球化学的プロセスをより確かなものにするために、適切な試料によるデータ・知見の蓄積が必要である。

[参考文献]

- [1] Alexander, W.R., Mckinley, I.G., Arcilla, C.A., Takahashi, Y., Kawamura, H., Yamakawa, M. and Aoki, K.: Hyperalkaline natural analogue potential in the Philippines. Proc. 2008. East Asia Forum on Radwaste Management Conference (2008 EAFORM, 2nd conference), 20-23 (2008).
- [2] Barnes, I., and O'Neil, J.R.O.: The relationship between fluid in some fresh Alpine-type ultramafics and possible modern serpentinization, western United States. Geol. Soc. Amer. Bull. 80, 1947-1960 (1969).
- [3] Marques, J.M., Carreira, P.M., Carvalho, M.R., Matias, M.J., Goff, F.B., Basto, M.J., Graca, R.C., Aires-Barros, J. and Rocha, L.: Origin of high pH mineral water from ultramafic rocks, Central Portugal. Appl. Geochem. 23, 3278-3289 (2008).
- [4] Power, I.M., Wilson, S.A. and Dipple, G.M.: Serpentinite carbonate for CO₂ sequestration. Elements 9, 115-121 (2013).
- [5] Evans, B.W., Hattori, K. and Baronnet, A.: Serpentinite: what, why, where? Elements 9, 99-110 (2013).
- [6] (公財) 原子力環境整備促進・資金管理センター: 平成 24 年度放射性廃棄物共通技術調査等事業 放射性廃棄物重要基礎技術研究調査 多重バリアの長期安定性に関する基礎情報の収集及び整備 平成 19 年度～平成 24 年度の取りまとめ報告書 (2013).
- [7] (公財) 原子力環境整備促進・資金管理センター: 平成 24 年度放射性廃棄物共通技術調査等事業 放射性廃棄物重要基礎技術研究調査 報告書 (第 3 分冊) (2013).
- [8] Nabighian, M.N. and Macnae, J.C.: Time Domain Electromagnetic Prospecting Methods, in: Nabighian, M.N. Electromagnetic Methods in Applied Geophysics - Application Part A, 2, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma, USA (1991).
- [9] BGR: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. (Federal Institute for Geosciences and Natural Resources) (2014).
http://www.bgr.bund.de/EN/Themen/GG_Geophysik/Bodengeophysik/Transienten_EM/tem_inhalt_en.html;jsessionid=8AE209E0BE99A6219C317F925CDB6682.1_cid297?nn=1555818#doc1554096bodyText7
- [10] Alexander, W.R. and Milodowski, A.E. (eds): Cyprus Natural Analogue Project (CNAP) Phase IV Final Report. Posiva Working Report WR 2014-02, Posiva, Eurajoki, Finland (2014).
- [11] BHP Billiton Mitsubishi Alliance: Caval Ridge Coal Mine Project - Environmental Impact Statement-. (2011).
- [12] Razack, M., Aboubaker, M. and Jalludin, M.: Numerical Modeling of the Dikhil Basaltic Aquifer, South West Djibouti, Horn of Africa. Journal of Groundwater Research, 2(1) (2013).
- [13] Tweed, S.O., Leblanc, M., Webb, J A. and Lubczynski M.W.: Remote sensing and GIS for mapping groundwater recharge and discharge areas in salinity prone catchments, Southeastern Australia. Hydrogeology Journal, 15, 75-96 (2006).
- [14] Locsey, K. L.: Hydrogeochemistry and hydrology of a basalt aquifer system, the Atherton Tablelands, North Queensland. PhD Dissertation, Queensland University of Technology (2004).
- [15] Das, A., Krishnaswami, S., Sarin, M. M. and Pande, K.: Chemical weathering in the Krishna Basin and Western Ghats of the Deccan Traps, India: Rates of basalt weathering and their controls. Geochimica et Cosmochimica Acta, 69(8), 2067-2084 (2005).
- [16] AQUIM: Aquifer India Mapping Project.
<http://www.aquiferindia.org/>
- [17] Rai, S., Thiagarajan, S., Kumari, Y., Rao, V. and Manglik, A.: Delineation of aquifers in basaltic hard terrain using Vertical Electrical Soundings data. Journal of Earth System Science, 122(1), 29-41 (2013).
- [18] CGWB: Central Ground Water Board.
http://cgwb.gov.in/CR/achi_geo_stu.html
- [19] AQUIM: Aquifer India Mapping Project.
<http://www.aquiferindia.org/>
- [20] Bernard, J.: Training Course on Electrical Methods: Principles, Field Operation, and

Interpretation. IRIS Instruments, (2006).

[21] Zohdy, A. and Jackson, D.: Application of deep electrical soundings for groundwater exploration in Hawaii. *Geophysics*, 34(4), 584 – 600 (1969).

[22] Kumar, D., Dutta, S., Ahmed, S., Chandra, S., Krishnamurthy, N.S., Zaidi, F., Nabi, A. and Sreedevi, P.D.: Integration of various geophysical approaches is must in groundwater exploration in Deccan Traps. 3rd International Conference on Water Resources and Arid Environments and 1st Arab Water Forum (2008).

[23] Zohdy, A. and Jackson, D.: Application of deep electrical soundings for groundwater exploration in Hawaii. *Geophysics*, 34(4), 584 – 600 (1969).

[24] Horeau, J. L., Nicolini, E., Fritz, B., and Delcher, E.: Geochemical signatures of underground waters in a basaltic tropical environment: Experimental approach. *Bulletin de la Societe Geologique de France*, 176, 257-267 (2005).

[25] Garrison, R.E., Espiritu, E., Horan, L.J., Mack, L.E.: Petrology, sedimentology and diagenesis of hemipelagic limestone and tuffaceous turbidites in the Aksitero formation, Central Luzon, Philippines. *Geol. Sur. Professional Paper*, 1112 (1979).

[26] Hawkins, J.W., and Evance, C.A.: Geology of the Zambales range, Luzon, Philippines Island: Ophiolite derived from an Island Arc – Back Arc Basin Pair. In: D.Hayes (Editor), *The tectonic and geologic evolution of southeast area and islands, part 2*, Am. Geophys. Union, *Mongor.* 27, 95~123 (1983).

[27] Savage, D., Walker, C., Arthur, R., Rochelle, C., Oda, C., and Takase, H.: Alteration of bentonite by hyperalkaline fluids: A review of the role of secondary minerals. *Physics and Chemistry of the Earth*, 32, 287~297 (2007).

第3章 年代測定による反応時間の評価

3.1 フィリピンでのナチュラルアナログにおける年代測定の検討

ナチュラルアナログ研究は、自然界に存在する類似現象に着目し、特に室内実験など他の方法で直接評価できない長期現象を直接観察し、地層処分の性能評価に役立てるという役割を担っている。そのため、その類似現象やそこまでに至るプロセスの時間スケールを把握することは極めて重要な課題であると位置づけられる。

フィリピン共和国ルソン島には、Zambales オフィオライトが広く分布しており、年代の古い順にかんらん岩・斑レイ岩・輝緑岩岩脈・玄武岩枕上溶岩・Aksitero 累層（泥岩、砂岩、凝灰質砂岩（ベントナイト質、ゼオライト質））で構成されている。また、地下にはオフィオライト起源の高アルカリ水が流れている。この高アルカリ地下水は、断裂系に沿って湧出し、ベントナイト層に接触しており高アルカリ水によるベントナイトの変質プロセスを研究するのに適した地域である。

このようなナチュラルアナログサイトにおいて最も把握すべき時間スケールは、オフィオライト蛇紋岩化作用などに伴う高アルカリ環境下のベントナイトの変質過程における①ベントナイト胚胎層（深海成の碎屑性堆積物）の堆積時期及び埋没・続成変質作用の時期、②高アルカリ地下水の生成時期（滞留時間）、③高アルカリ地下水のベントナイト層への侵入・浸透時期、④高アルカリ地下水によるベントナイト層の変質帯の形成時期、である。これらの年代評価の適用性の検討のために、放射年代測定手法の適用性を整理した（表 3.2.1-1）。表 3.2.1-2 には、当地域（フィリピン国ルソン島北西部）の岩相層序と合わせて、今後検討すべき岩石（鉱物）及び地下水の滞留年代測定を整理した結果を示す。

ベントナイトの変質プロセスの時間スケールを把握するためには、ベントナイトの変質帯の形成時期を直接測定することが望ましい。しかし、ベントナイト変質プロセスの温度が低いことが推定されるため（150 度以下）、熱年代学的手法によって年代を直接測定することは難しい。またベントナイトの変質で生じた鉱物に適した年代測定法にも乏しい。そこで、オフィオライトに着目し、高アルカリ地下水が通った痕跡である断裂系充填物の年代決定からこの地域でいつ頃から高アルカリ地下水による変質が起こっていたかを推定することを検討する。

断裂系充填物に含まれる炭酸塩鉱物（方解石）は高アルカリ地下水が閉塞される最終期に CO₂ に接して形成したと考えられることから、方解石の生成年代から高アルカリ地下水の閉塞時期を推定することが可能である。これまでの検討により、熱ルミネッセンス（TL）法による年代測定の適用可能性が確かめられたが、評価年代の精度向上や適用可能性の範囲を探るために、炭酸塩鉱物の TL 特性とそれを踏まえた年代測定について検討した。

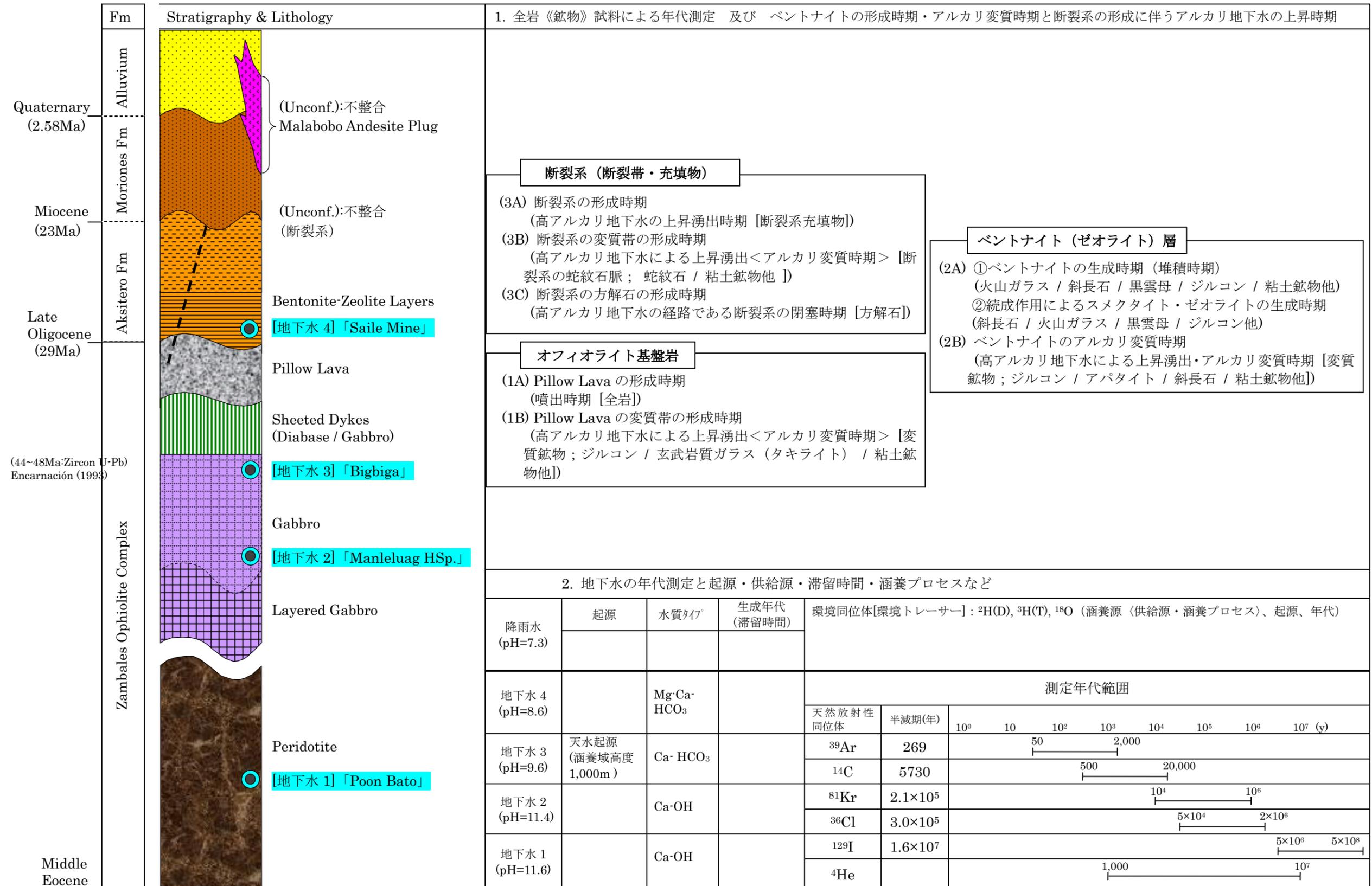
表 3.2.1-1 フィリピンルソン島北西部のナチュラルアナログにおける放射年代測定の実用性

放射年代測定内容	放射年代測定のための試料仕様	放射年代測定法			備考<可能な分析依頼先>
		液相	固相 (鉱物/全岩)	放射年代測定法[測定年代範囲]	
1. ベントナイト胚胎層 (深海成の碎屑性堆積物) の堆積時期及び埋没・続成変質作用の時期	(1) ベントナイト層における未変質部の主要構成鉱物 (2) ベントナイト層を構成する主要構成鉱物		(i) ベントナイト層の未変質な鉱物 1) 主要構成鉱物 ➢ 斜長石 ➢ 黒雲母・絹雲母 ➢ 石英 ➢ (火山ガラス・軽石) 2) U-Th 含有の副成分鉱物 ➢ ジルコン ➢ モナザイト ➢ アラナイト ➢ ゼノタイム ➢ アパタイト 3) その他 ➢ 化石 (ii) ベントナイトを構成する変質鉱物 ➢ ベントナイトと共生関係にある鉱物	(i) K-Ar [10,000~30 億年] (ii) U-Pb [100 万~45 億年] (iii) Rb-Sr [6,000 万~45 億年] (iv) ESR [1,000~100 万年] (v) FT [50 万~10 億年] (vi) OSL [0~50 万年] (vii) TL [0~50 万年] (viii) LA-ICP-MS (U-Pb) (ix) Ar-Ar (x) CHIME [8000 万年~]	※ 閉鎖温度放射年代 (年代値) (ii) SHRIMP<広島大> (ix) <AIST> (x) サブグレイン年代<名古屋大>
2. 高アルカリ地下水の生成時期 (滞留時間)	(1) オフィオライト-水相互作用 (蛇紋岩化作用) ① オフィオライト基盤岩中の断裂系に伴う地下水 (湧水) ② 試錐孔 (オフィオライト岩盤内) の地下水 (深層地下水)	地下水		(i) ¹⁴ C [500~40,000 年] (ii) ³⁶ Cl [50,000~200 万年] (² H(D), ¹⁸ O (涵養源・起源))	(i) <名古屋大/ (JAEA・TGC) > (ii) <電中研/オーストラリア国立大> <名古屋大>
3. 高アルカリ地下水のベントナイト層への侵入・浸透時期	(1) オフィオライト岩体中の断裂帯 (高アルカリ地下水の水路) の変質部 (2) ベントナイト層中の断裂帯 (高アルカリ地下水の水路) の変質部 (3) 試錐孔内での断裂帯の変質部		(i) 断裂帯の充填物 ➢ 粘土鉱物他 ➢ 蛇紋石 ➢ 斜長石 (曹長石) ➢ 方解石	(i) K-Ar [10,000~30 億年] (ii) U-Pb [100 万~45 億年] (iii) Rb-Sr [6,000 万~45 億年] (iv) ESR [1,000~100 万年] (v) FT [50 万~10 億年] (vi) OSL [0~50 万年] (vii) TL [0~50 万年] (viii) U-Th [0~50 万年] (ix) LA-ICP-MS (K-Ar) (x) EPMA (xi) CHIME [8000 万年~] (xii) SHRIMP (U-Pb)	(v) <金沢大> (vi) <金沢大> (vii) <金沢大>
4. 高アルカリ地下水によるベントナイト層の変質帯の形成時期	(1) オフィオライト岩体の上部層 (枕状溶岩) の変質部 (2) ベントナイト層の変質 (変質ハロー) 部 (3) 試錐孔内でのベントナイト層の変質 (変質ハロー) 部		(i) タキライト層の変質部 ➢ 玄武岩質ガラス ➢ 粘土鉱物他 ➢ 斜長石 (ii) ベントナイト層の変質ハロー部 ➢ 粘土鉱物他 ➢ 蛇紋石 ➢ 斜長石 ➢ ジルコン他 (U-Th 含有の副成分鉱物)	(ix) LA-ICP-MS (K-Ar) (x) EPMA (xi) CHIME [8000 万年~] (xii) SHRIMP (U-Pb)	

ESR : Electron Spin Resonance, FT : Fission Track, OSL : Optically Stimulated Luminescence, TL : Thermal Luminescence,

CHIME : Chemical Th-U-total Pb Isochron Method, SHRIMP : Sensitive High Resolution Ion-MicroProbe, LA-ICP-MS : Laser Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry

表 3.2.1-2 フィリピンルソン島北西部のナチュラルアナログ調査における放射年代測定



3.2 方解石の熱ルミネセンス年代測定

3.2.1 熱ルミネセンス年代測定法

熱ルミネセンス (Thermoluminescence: TL) 年代測定法とは、環境放射能により放射線を受けた鉱物を加熱するときに出るルミネセンス (発光) の量から年代を算出する方法である。試料自体にウランやカリウムなどの放射性核種をほとんど含まなくても年代測定が可能である。

U,Th,K 等の放射性元素からの放射線 (α,β,γ 線) や宇宙線が鉱物に照射されると、鉱物を構成する原子の電子が電離する。電子が欠けた部位をルミネセンスセンター (正孔) と呼ぶ。電離した電子の大部分はすぐに元の状態になるが、一部は欠陥光子や不純物に捕らえられ捕獲電子と成る。捕獲電子は加熱や光の照射等の刺激を与えることにより解放され、正孔と再結合し、この際にルミネセンス現象が起こる。熱による発光を熱ルミネセンス、光による発光を光励起ルミネセンス (Optically stimulated luminescence) と呼ぶ。

ルミネセンス量は今まで鉱物が受けた放射線量 (蓄積線量) に比例するので、ルミネセンス量を調べることにより蓄積線量を求めることができる。鉱物周囲の自然放射線の強さを基にすれば、蓄積線量との関係から時間情報 (経過年代) を知ることができる。式では次のように表せる。

$$\text{年代} = \text{蓄積線量} / \text{年間線量} \quad (3.2.1-1)$$

年間線量は 1 年間に鉱物が受ける放射線の量であり、鉱物周囲の自然放射線の強さ、すなわち放射性元素の濃度より算出する。TL 方法は数十万年までの年代を対称にできる [1][2]。アルカリ地下水の湧出は現在も続いており、対象とするイベントの年代域が若いことが期待される。TL 法の年代適用範囲は数十万年までであることも、本手法が通していると思われる理由である。蓄積線量及び年間線量は以下の手順により算出する。

(1) 蓄積線量測定

サンプルの蓄積放射線量を求めるための実験過程の詳細を以下に述べる。

1) SARA 法

ルミネセンス年代測定法による蓄積線量の算出は、人工放射による線量とルミネセンス測定で得たシグナル強度の関係を求める検量線を引き、その検量線を利用して天然放射線による蓄積線量を求めるというものである。検量線をどのように求めるか依存して、いろいろな算出法ありその中で近年一般的に用いられているのは、SAR (single-aliquot regenerative-dose) 法である [2]。SAR 法とは、サンプルから 1 つのアリコートを取り出し、“線量を与える (本照射) (天然ルミネセンス測定時はなし) —プレヒート-TL 測定—一定線量照射 (テスト照射) —プレヒート-TL 測定” の手順を繰り返し行い検量線を引く方法である。なお、プレヒートとは、人工照射後に生成する不安定なシグナルを除去するために行う手順である (表 3.2.1-1 参照)。つまり、1 つのアリコートのみで、既知の人工照射とルミネセンス測定から検量線を求め、その検量線に天然ルミネセンスを内挿し、蓄積線量を得る方法である。テスト照射は繰り返しの

加熱と放射線照射に伴う試料の感度変化の補正のために行う手順である。

しかし、SAR 法では方解石等で生じるとされる最初の加熱(天然ルミネセンス測定)後の重大な感度変化[3]が問題になってしまう。そこで、今回の測定ではこの感度変化を無視できる SARA (single-aliquot regeneration and added-dose) 法を使用した。SARA 法の手順を以下に記述する。

SARA 法では、1 つのサンプルから 4~5 アリコートを取り出し、各アリコートに特定量の放射線 (今回は 0,30,60,90Gy または 0,30,60,90,120Gy) を照射する。追加照射後に各アリコートの蓄積線量を SAR 法で測定し、追加照射量の関数として SAR 法蓄積線量を図示することにより蓄積線量を求める方法である (図 3.2.1-1 参照)。感度変化が起きていない場合、描かれた直線の傾きは 1 になるが、負の感度変化 (最初の加熱によって線量に対する発光量が減少すること) が場合は傾きが >1 に、反対に正の感度変化 (最初の加熱によって線量に対する発光量が増加すること) が起きた場合は傾きが <1 になる。

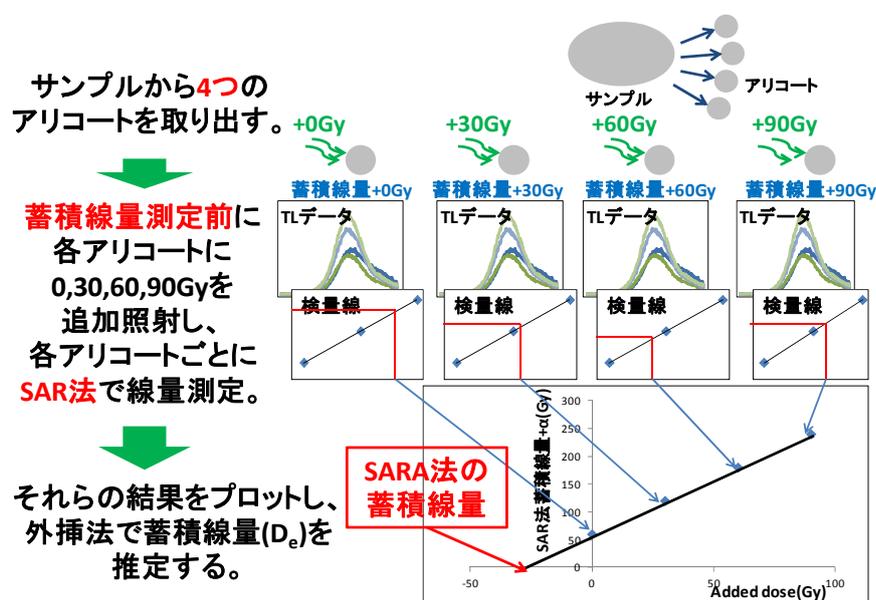


図 3.2.1-1 SARA 法の実施手順のイメージ

表 3.2.1-1 SAR 法手順

1. X 線を照射する
2. プレヒート(200°C,240 秒)
3. RTL 測定(L_i)
4. テスト照射する
5. カットヒート(200°C,240 秒)
6. RTL 測定(T_i)
7. 1 に戻る

2) TL 測定条件

TLCI 撮影からサンプルの熱ルミネセンスが最も多い赤色熱ルミネセンス (Red Thermoluminescence) を測定する。RTL 測定のため、受光波長域を約 600-650nm にする透過フィルター (R60, hoya+IRC-65L, kenko) を付けた光電子増倍管 (浜松フォトニクス, 受光波長域 300-850nm, ピーク 420nm) を使用する。TL 測定温度は 100-400°C、加熱率は 1°C/s で行う。追加照射は 0,30,60,90Gy または 0,30,60,90,120Gy を照射する。人工的に放射線を照射するために、線量率 0.12Gy/s の X 線を利用する。プレヒートは 200°C、240 秒間とする。本照射、テスト照射は各アリコートに相当量を照射する。

3) 蓄積線量誤差

周囲の岩石との距離や沈積した年代の差のため、採取位置によって蓄積線量が異なると考えられるため複数の位置・深さから試料を採取し、蓄積線量を評価する。採取場所の差異による蓄積線量誤差を最小にするため、各位置の各アリコート測定を 1 回ずつにする。

(2) 年間線量測定

年間線量の測定には、試料採取場所に線量計を置き直接測定する方法と、試料中と試料周囲の放射性元素濃度から測定する方法がある。今回は後者の方法を利用し年間線量を求める。年間線量計算に必要な放射性元素は U, Th, Rb, K である。これらの濃度を XRF、EPMA、LA-ICP-MS を用いて測定する。

1) 年間線量算出

本研究では年間線量を算出するために、Ito et al. (2009)[4]の式を用いる。

$$\begin{aligned} \text{Annual dose (Gy/year)} &= D_{\alpha} + D_{\beta} + D_{\gamma} \\ &= \frac{2.18 \times U(\text{ppm}) + 0.6111 \times Th(\text{ppm})}{1 + 1.5 \times W.C.} \times a \\ &\quad + \frac{0.146 \times U(\text{ppm}) + 0.0273 \times Th(\text{ppm}) + 0.00038 \times Rb(\text{ppm}) + 0.649 \times K_2O(\%)}{1 + 1.25 + W.C.} \times b \\ &\quad + \frac{0.113 \times U(\text{ppm}) + 0.0476 \times Th(\text{ppm}) + 0.202 \times K_2O(\%)}{1 + 1.14 + W.C.} \times c \end{aligned} \tag{3.2.1-2}$$

ここで、 D_{α} , D_{β} , D_{γ} はそれぞれ α 崩壊、 β 崩壊、 γ 崩壊からの放射線に基づく年間線量である。 a は有効 α 線量、 $w.c.$ は含水比である。なお、年間線量の算出において以下のことに留意する。

a. D_{α} の項

α 線の飛程範囲はおよそ 10 μm である。このため、年代測定を行う方解石自身からの α 線のみを考慮し、玄武岩からの α 線はないものと仮定する。

b. W.C. (含水比)

現在までの試料の保存場所・状態が分からない場合は、正確な含水比を得ることができないとして含水比を0と仮定した。

c. U、Th、Rb 濃度

LA-ICP-MS 測定では ^{29}Si , ^{43}Ca , ^{85}Rb , ^{86}Sr , ^{87}Rb , ^{88}Sr , ^{232}Th , ^{234}U , ^{238}U の濃度を測定し、これらの結果から各放射性同位体の同位体存在比率を用いて U、Th、Rb 濃度を算出する。 ^{85}Rb は Rb の 72.17%、 ^{238}U は U の 99.2745%、 ^{232}Th は Th の 100% を占める存在比率であるため、U、Th、Rb 濃度は測定した濃度の存在比率の逆数をかけることから算出する。

d. 宇宙線

年間線量を考慮するには、宇宙線の寄与を考えなければならない。Prescott and Hutton (1994)[5]の式を用いて宇宙線の算出を行う。

2) 年間線量誤差

年間線量 (AD) の誤差については以下の誤差伝播の式を用いて算出する。ここで σ_{AD} 、 σ_{U} 、 σ_{Th} 、 σ_{Rb} はそれぞれ年間線量の相対誤差、U 濃度の相対誤差、Th 濃度の相対誤差、Rb 濃度の相対誤差である。以下の式により算出した年間線量の相対誤差をもとに年間線量の誤差を算出する。

$$\sigma_{\text{AD}}^2 = \sigma_{\text{U}}^2 + \sigma_{\text{Th}}^2 + \sigma_{\text{Rb}}^2 \quad (3.2.1-3)$$

3.2.2 今年度の検討概要

ルミネセンス測定はその年代適用範囲と普遍的な鉱物（石英、長石、方解石）で測定を行えることから、Daniels et al., (1953)[6]の熱ルミネセンス測定法を始めとし、考古試料や火山噴出物、堆積物の年代測定に利用されてきた。しかしルミネセンス法は、年間線量の評価や二次的な影響に対する安定性等の問題があり、現在も基礎的な研究が続けられている。

炭酸塩熱ルミネセンス年代測定は、石英を利用する熱ルミネセンス年代測定と比較し利用例が少ない。これは炭酸塩熱ルミネセンス特性が加熱による物性変化の影響 ([7][8]) や、不純物濃度 ([9][10]) 等に大きく依存しそれらの影響の補正について理解がすすんでいないことが原因と考えられる。

そこで、高アルカリ地下水の閉塞時の年代を示すと考えられる炭酸塩試料について TL 法年代測定によりその生成年代を評価するにあたり、基礎実験を行い、得られた値の評価について理解をすすめるとともに、採取試料の蓄積線量を求めた。

3.2.3 発光原因の解明

炭酸塩鉱物の TL 強度は他鉱物と比べ高い値を示し、その発生メカニズムについて多くの研究がなされてきた。Medlin (1968)[9]は、炭酸塩の発光は Mn^{2+} イオンサイトの遷移が主な原因であり、そのため鉱物中の Mn 濃度によって TL 特性が変化することを示した。Townsend et al., (1994)[10]は Medilin の研究結果を基に高 Mn 濃度の天然方解石と Mn 濃度や他元素濃度の低い Iceland Spar と合成方解石を温度 20-400°C、波長 200-800nm 範囲で TL 測定を行った結果、Mn 以外の不純物濃度によっても TL 特性が変化することが分かった。

Mn 以外の元素では U 濃度が方解石熱ルミネセンスに大きく影響するという報告もある ([11])。また微量元素の有無により熱ルミネセンス特性が変化することも示されている。

塚本(1994)[12]は、方解石カソードルミネセンスの発光促進元素として Mn が、発光抑制作用として Fe が最も重要な元素とし、これらの量比によって発光量が増加することを示している。カソードルミネセンスと熱ルミネセンスは励起エネルギー以外の発光メカニズムは同様なので、方解石熱ルミネセンスにおいても発光抑制の役割を果たす元素が存在し、それらが発光量に影響を及ぼすことが考えられる。

そこで発光メカニズムの理解をすすめるために、炭酸塩の化学組成と発光特性の関連の調査が必要である。

試料として断裂系の炭酸塩に加えて、合成炭酸塩、およびモンゴル産炭酸塩 3 種、ブラジル産炭酸塩（菱苦土鉱）の化学組成を調べた上で、X 線を 99Gy 照射し、熱ルミネセンス測定を行うことで、各熱ルミネセンス特性を測定、比較した。合成方解石は昨年度報告した方法で作成した [13]。

不純物濃度測定は LA-ICP-MS により測定を行った。測定装置は金沢大学理工学域の 7500S Agilent を用いた。外部標準試料として NIST610 を用いた。測定した元素濃度は 7Li , ${}^{11}B$, ${}^{23}Na$, ${}^{24}Mg$, ${}^{27}Al$, ${}^{29}Si$, ${}^{31}P$, ${}^{39}K$, ${}^{42}Ca$, ${}^{43}Ca$, ${}^{45}Sc$, ${}^{47}Ti$, ${}^{51}V$, ${}^{53}Cr$, ${}^{55}Mn$, ${}^{57}Fe$, ${}^{59}Co$, ${}^{62}Ni$, ${}^{63}Cu$, ${}^{66}Zn$, ${}^{85}Rb$, ${}^{88}Sr$, ${}^{89}Y$, ${}^{90}Zn$, ${}^{93}Nb$, ${}^{95}Mo$, ${}^{133}Cs$, ${}^{137}Ba$, ${}^{139}La$, ${}^{140}Ce$, ${}^{141}Pr$, ${}^{146}Nd$, ${}^{147}Sm$, ${}^{151}Eu$, ${}^{157}Gd$, ${}^{159}Tb$, ${}^{163}Dy$, ${}^{165}Ho$, ${}^{166}Er$, ${}^{169}Tm$, ${}^{172}Yb$, ${}^{175}Lu$, ${}^{178}Hf$, ${}^{181}Ta$, ${}^{208}Pb$, ${}^{232}Th$, ${}^{238}U$ である (図 3.2.3-1~図 3.2.3-2)。このうち、比較的濃度が多かったものは Mg, K, Mn, Fe, Sr であった (表 3.2.3-1)。

熱ルミネセンスグローブは方解石毎に異なる。菱苦土鉱の TL は 130, 190, 260, 320, 380°C にピークが存在する (図 3.2.3-3~図 3.2.3-5)。DR10-3②は 100, 230, 260°C に発光ピークを持ち、他の方解石 TL と比較して大きな発光量を示す。DH1A は 100, 230, 260°C にピークを持ち 100, 230, 260°C の順に発光量が大きくなる。DH1B は 100, 230°C の発光ピークを持ち、この試料だけ 260°C ピークが存在しない。フィリピン方解石は 100, 180, 260°C にピークを持つ。発光量は 100°C ピークが最大で、続いて 260, 180°C の順に大きくなる。合成方解石 TL は、他試料と比較し最低の発光量を示す。しかしピーク数は最大で 100, 170 とそれ以降に複数 (少なくとも 2 つ以上) のピークを示す。さらに菱苦土鉱はそれより低い発光量と多いピーク数を示す。

ほとんどの試料で共通して、100 度と 230 度で発光ピークが存在するが、フィリピン炭酸塩では 230°C にピークは存在しない (図 3.2.3-5(C))。これはフィリピン炭酸塩が純粋な方解石でなく他鉱物を含む試料であること、何らかの理由により発光サイトのエネルギー準位があがりピーク温度が 230°C から 260°C へ遷移したこと、もしくは不純物濃度や欠陥格子が他試料に比べ特殊な

状態であること等、複数の原因が考えられる。

100℃ピークはどの炭酸塩 TL でも最大を示し、次に発光量大きいピークは試料によって異なる。共通ピークである 230℃ピークは比較的大きい発光量を示すが、他温度でもピークを示す試料では他温度ピークのほうが大きい場合もある（合成方解石）。

方解石試料は菱苦土鉱と比べると、発光量が非常に大きいことが分かる。また、菱苦土鉱のピーク数はほぼ全ての方解石試料に比べて多いが、方解石試料には共通して存在する巨大な 100℃ピークが菱苦土鉱には存在しない。純粋な方解石を想定している合成方解石と今回用いた純粋な菱苦土鉱はピークの表れ方が似ているが、発光量は合成方解石の大きい。

発光量増加に相関を示す元素はまだ特定できないが、Fe が低ければ発光量が多くなる傾向がある（図 3.2.3-6～図 3.2.3-7）。Mn, Mg, Sr 濃度が少ないほどピーク数は増える傾向がある。合成炭酸塩のピークは低く、菱苦土鉱は高いことから、今後、Mg 濃度についても考慮する必要がある。

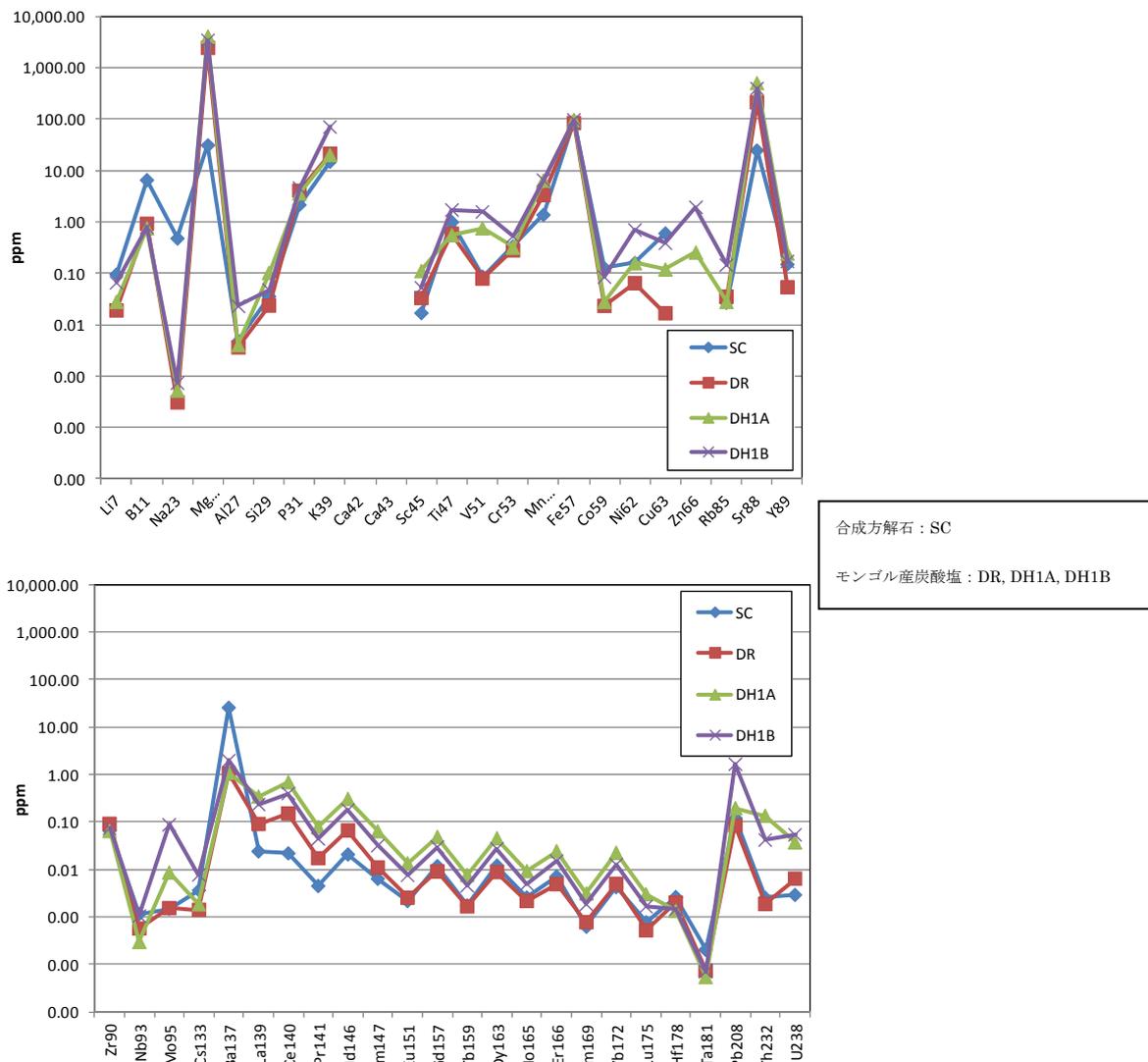


図 3.2.3-1 各炭酸塩の不純物濃度

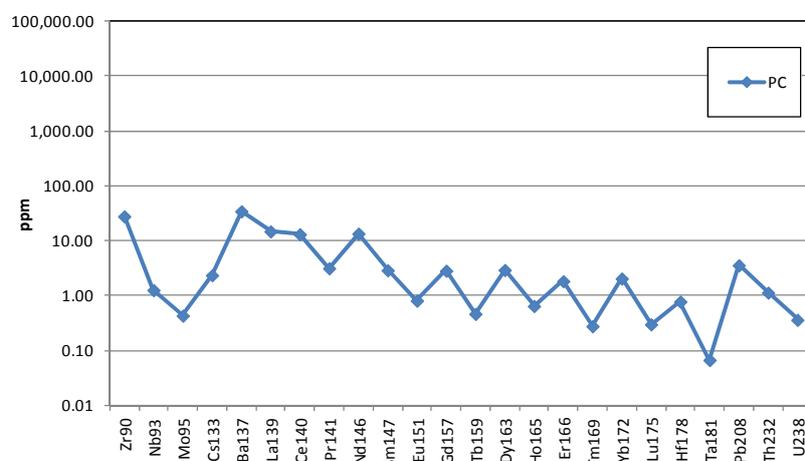
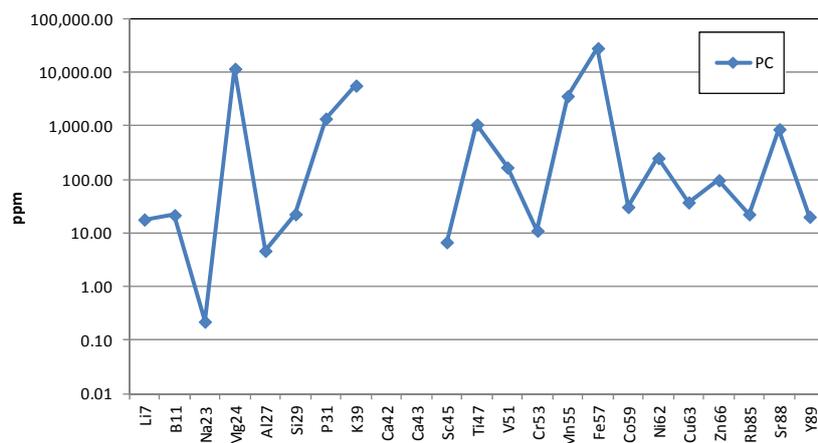


図 3.2.3-2 フィリピン炭酸塩の不純物濃度

表 3.2.3-1 各炭酸塩試料の不純物濃度

	Mg24(ppm)	P31(ppm)	K39(ppm)	Mn55(ppm)	Fe57(ppm)	Sr88(ppm)	Ba137(ppm)
PC	12000±2000	1400±300	5700±1000	3700±300	29000±7000	880±60	35±7
DH1A	4090±40	3.6±0.4	20±9	6.4±0.2	97±9	70±5	1.1±0.1
DH1B	3450±30	4.6±2	71±7	5.2±1	98±8	55±1	2.0±0.7
SC	31.3±0.3	2.2±0.1	15±2	1.4±0.07	92±2	3.4±0.1	25.6±0.2
DR10-3②	2470±70	4.1±3	22±5	3.4±0.3	85±1	30±1	1.1±0.1

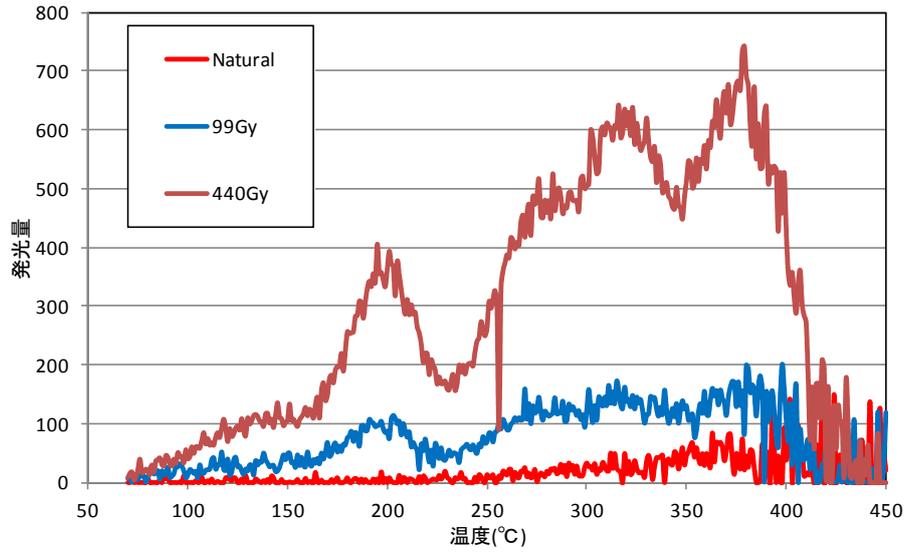


図 3.2.3-3 菱苦土鈇の TL データ (プレヒートなし)

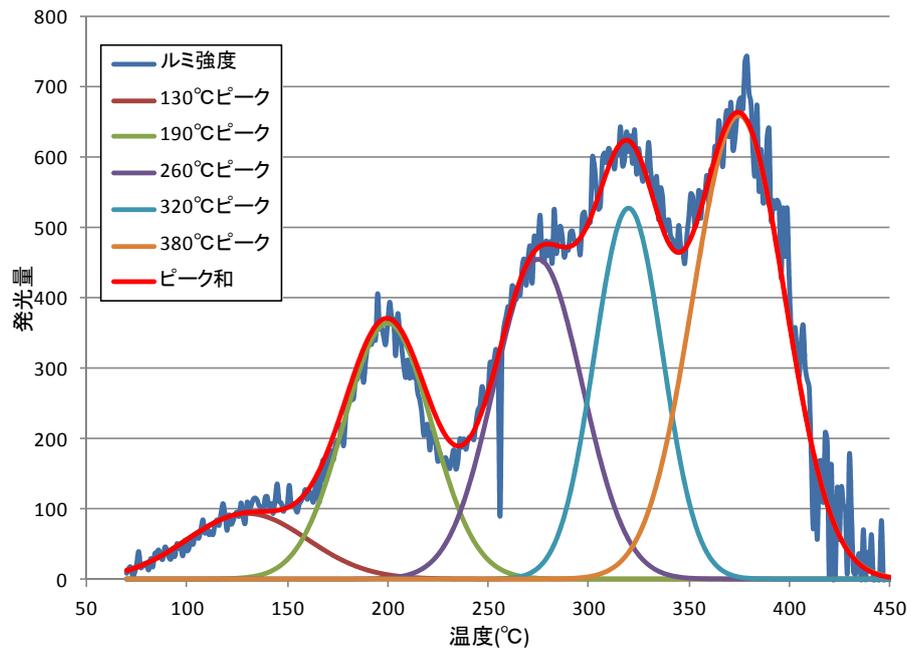


図 3.2.3-4 X線 440Gy 菱苦土鈇 TL のピーク分離結果

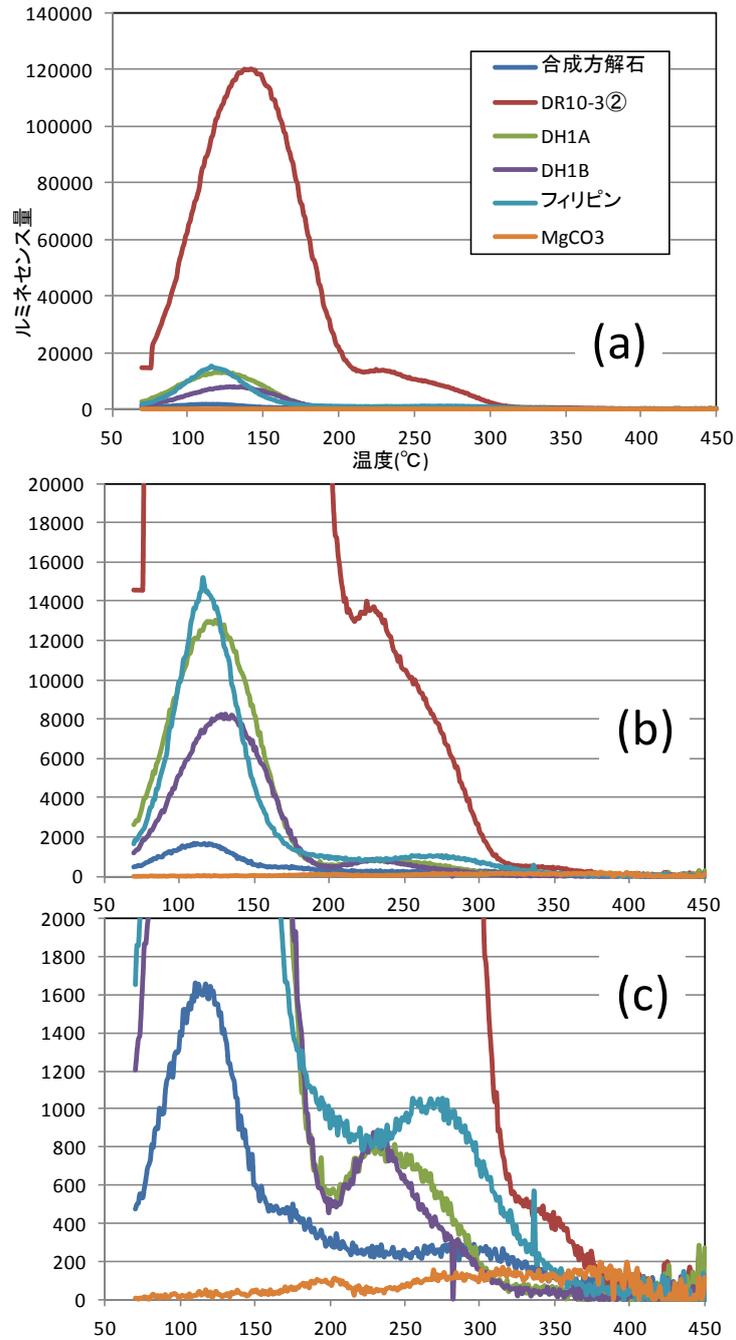
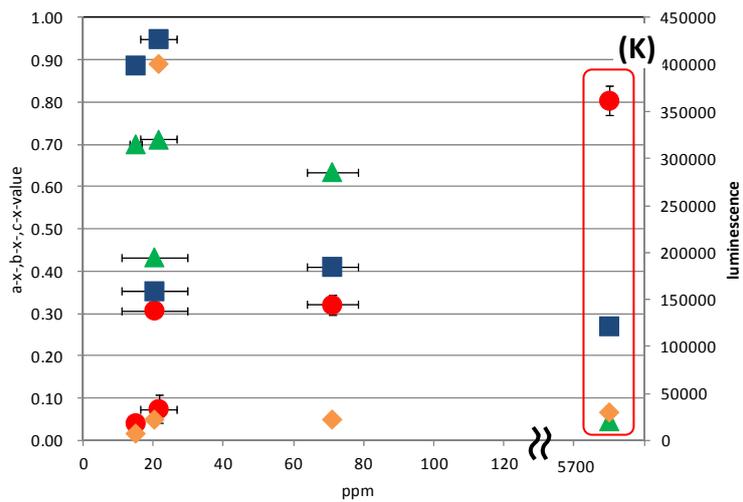
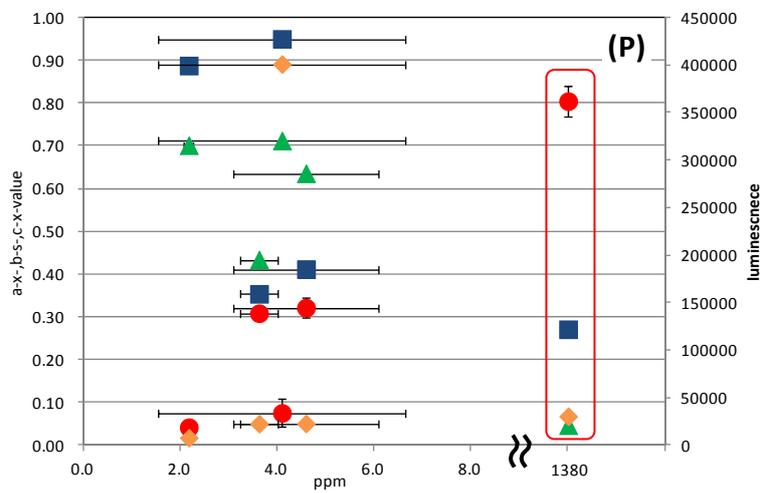
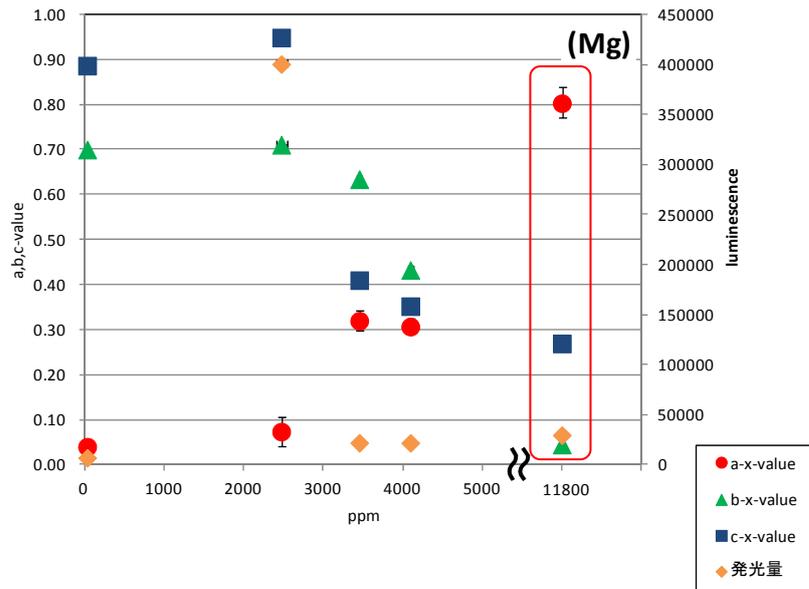
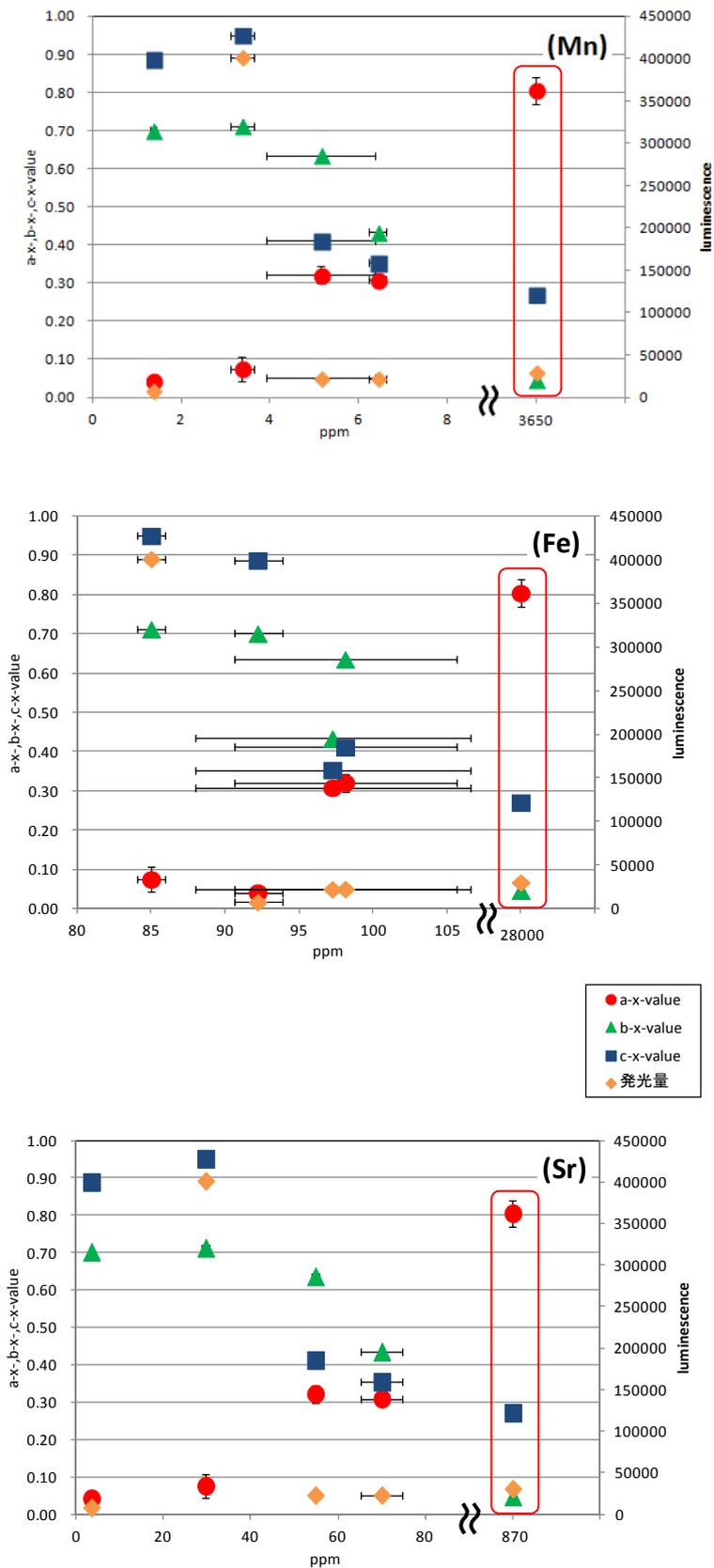


図 3.2.3-5 X線 99Gy 照射した炭酸塩熱ルミネセンスデータ ((b)、(c)は(a)の拡大図)



(赤枠はフィリピン方解石)

図 3.2.3-6 Mg, P, K 濃度と各炭酸塩の a-x-value, b-x-value, c-x-value 及び発光量の関係図



(赤枠はフィリピン方解石)

図 3.2.3-7 Mn, Fe, Sr 濃度と各炭酸塩の a-x-value, b-x-value, c-x-value 及び発光量の関係図

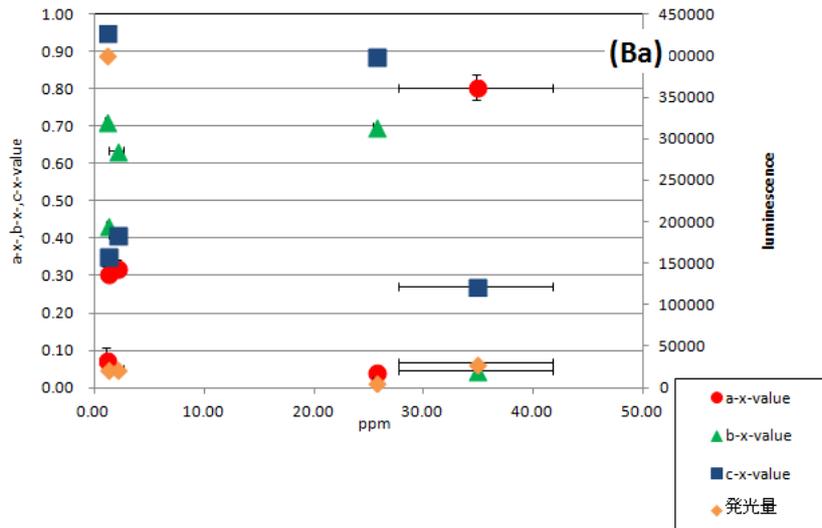


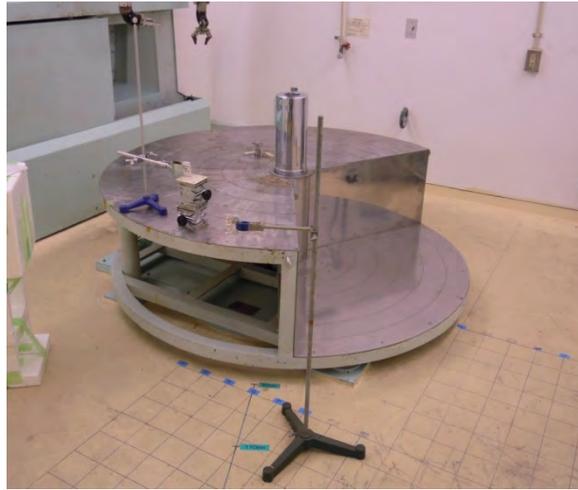
図 3.2.3-8 Br 濃度と各炭酸塩の a-x-value,b-x-value,c-x-value 及び発光量の関係図

3.2.4 放射線種と発光

ルミネセンス測定装置では、蓄積線量測定の際に必要な放射線の人工照射（再現照射）とそのルミネセンス量の関係から求める検量線の作成に、再現照射として X 線源もしくは β 線源を利用する。本研究室では X 線を利用して検量線を引いている。石英では X 線と自然放射線 (α, β, γ 線) の間に放射線量に対するルミネセンス量の差はないことが先行研究で示されているが、方解石においては、放射線に対するルミネセンスの挙動に関する基礎研究がほとんどない。そこで α, β, γ 線それぞれの照射実験を行い、X 線熱ルミネセンスを基準とした発光感度の調査を、上述の不純物濃度との関連も含め、行う必要がある。

γ 線照射は京都大学原子炉実験所 (KUR) の Co-60 γ 線照射装置を用い行った (図 3.2.4-1)。 α 照射にはアメリシウム・ α 線源(^{241}Am :5.4MeV)を使用した。 β 照射には ^{90}Sr ・ β 線源(10kBq)を用いた (図 3.2.4-2)。

^{90}Sr は β 線を放出して ^{90}Y (半減期 2.67 日) となり、 ^{90}Y も β 崩壊して ^{90}Zr となる。 ^{90}Y は、核分裂直後ほとんど存在しないが、時間の経過と共に量が増す。約 1 ヶ月後には放射平衡が成立して、 ^{90}Sr と ^{90}Y の放射能強度は等しくなる。 β 線源の線量を測定するために、自然放射線 (α, β, γ 線) 間の放射線量に対するルミネセンス量の差がない石英に β 線を任意量照射し、同試料の X 線検量線ルミネセンス蓄積線量測定の結果を用いた。その後、各方解石試料に任意量の β 線を照射し、X 線ルミネセンス蓄積線量測定を行い、石英実験結果からの β 線照射量とこれらの結果から X 線ルミネセンスに対する β 線ルミネセンスの感度率 (b-X-value とする) を求めた。



(台座中心が γ 線源。写真手前のスタンドの位置が放射線源から 110cm の位置。)

図 3.2.4-1 γ 線照射装置



^{241}Am ・ α 線源

^{90}Sr ・ β 線源

測定皿

図 3.2.4-2 α 線及び β 線照射線源と測定皿

石英の X 線 TL 測定結果が 0.028Gy/h であったので、 β 線照射量にはこの値を用いる。本測定で用いた ^{90}Sr ・ β 線源は非常に線量率が低く、長時間照射(日単位)を行っても十分な放射線量を蓄積できず、微弱な発光しか生じなかった。そのため、TL 測定結果の精度に問題がある可能性がある。より正確な測定のためには、放射線量が高い β 線源を用いるか、TL 測定の光感度を上げる必要がある。それぞれの測定結果を表に示す(表 3.2.4-1~表 3.2.4-3)。

その結果、 α 線ルミネッセンス感度率、 β 線ルミネッセンスの感度率、 γ 線ルミネッセンス感度率ともに、試料依存性があった(表 3.2.4-4)。方解石の a-x-value はフィリピン方解石、DH1B、DH1A、DR10-3②、合成方解石の順に大きい。さらに、化学組成との比較を行ったところ Mg, Mn, Fe, Sr で相関を示した。(図 3.2.3-6~図 3.2.3-8)。b-x-value では、Mg, K, Mn, Fe, Sr 濃度が高くなるにつれ b-x-value が減少する傾向が観察された。また、c-x-value においては、Mg, Mn, Fe, Sr で逆相関関係を示した。

これらの結果より、a-x-value、b-x-value、c-x-value 全てで相関または逆相関関係を示した不純物濃度は Mg, Mn, Fe, Sr 濃度であった。カソードルミネッセンスでは、Mn, Fe 濃度の 2 つの要

因によって方解石カソードルミネセンス特性が決定すると報告されているため、方解石熱ルミネセンス特性も単一の不純物濃度(Fe)のみで決まるのではなく、a-x-value、b-x-value、c-x-valueで相関を示した Mg, Mn, Sr 濃度等の複数の要因によって決まることが考えられる。そのため、より正確に不純物濃度と方解石熱ルミネセンス特性の関係性を評価するためには、複数の不純物濃度を考慮することが課題としてあげられる。

表 3.2.4-1 α線照実験測定結果

試料	α線照射時間と TL 測定結果(Gy)					試料量(mg)	線量率(Gy/h)
	1 時間	5 時間	10 時間	15 時間	20 時間		
PC	20.1	115	219			28	22±1.3
DH1A	8.5	36.8	75.1			32	7.4±0.6
DH1B	8.7	37	74.1			34	7.3±0.8
SC		11.1	17.6	25.2	35.2	20	1.6±0.3
DR10-3②	3.5	10.5	17.2			38	1.5±1.2
Qz		5.6	11.5	15.2		34	1.0±0.2

表 3.2.4-2 β線照実験測定結果

試料	照射時間(h)	TL 測定線量(Gy)	線量率(Gy/h)
PC	105	0.134	0.0013
DH1A	121	1.45	0.012
DH1B	98	1.72	0.018
SC	236	4.57	0.019
DR10-3②	48	0.944	0.020
Qz	90.5	2.5	0.028

表 3.2.4-3 γ線照実験測定結果まとめ

測定日時	線量率(Gy/h)	試料	TL 測定結果(Gy)
2012 年 12 月	38.2	石英	134.5
		フィリピン方解石	36.4
2013 年 7 月	35.2	DH1A	34.9
		DH1B	40.6
		DR10-3②	93.8
		フィリピン方解石	26.7
2013 年 12 月	33.4	石英	162
		合成方解石	144

表 3.2.4-4 各方解石試料の熱ルミネセンス特性

	a-x-value	b-x-value	c-x-value	発光量
PC	0.80±0.03	0.05	0.27	30240
DH1A	0.31±0.02	0.43	0.35	22460
DH1B	0.32±0.02	0.64	0.41	22593
SC	0.04±0.009	0.70	0.89	7617
DR10-3②	0.08±0.03	0.71	0.95	400997
石英	0.04±0.004	1	1	0

3.2.5 ルミネセンスサイトの安定性について

長石ルミネセンス年代測定では、電子トラップ不安定により時間経過と共にルミネセンスが減衰していく現象（フェーディング）が存在し、年代評価の際に補正が必要となるが、方解石熱ルミネセンスではフェーディングの研究例がなく、フェーディングの有無も分かっていない。そこで照射と測定に間に時間をおき、フェーディング現象について解明する必要がある。

昨年度の研究[13]により、方解石ではフェーディングの効果は無視できることを明らかにしたが、化学組成とフェーディングの関係を明らかにするために、今年度は追加で合成方解石を利用して、フェーディング実験を行った。

フェーディング実験では、[X線照射(165Gy)-ルミネセンス測定]を繰り返し行った。3回目の測定後に[X線照射(165Gy)-14日間常温保管-ルミネセンス測定]（ディレイド測定）の手順で測定を行いルミネセンスの変化を測定した（図 3.2.5-1）。プレヒートは行わなかった。発光量は80,150,250℃ピークの温度前後10～15度間の積算値を用い、評価した（図 3.2.5-2）。

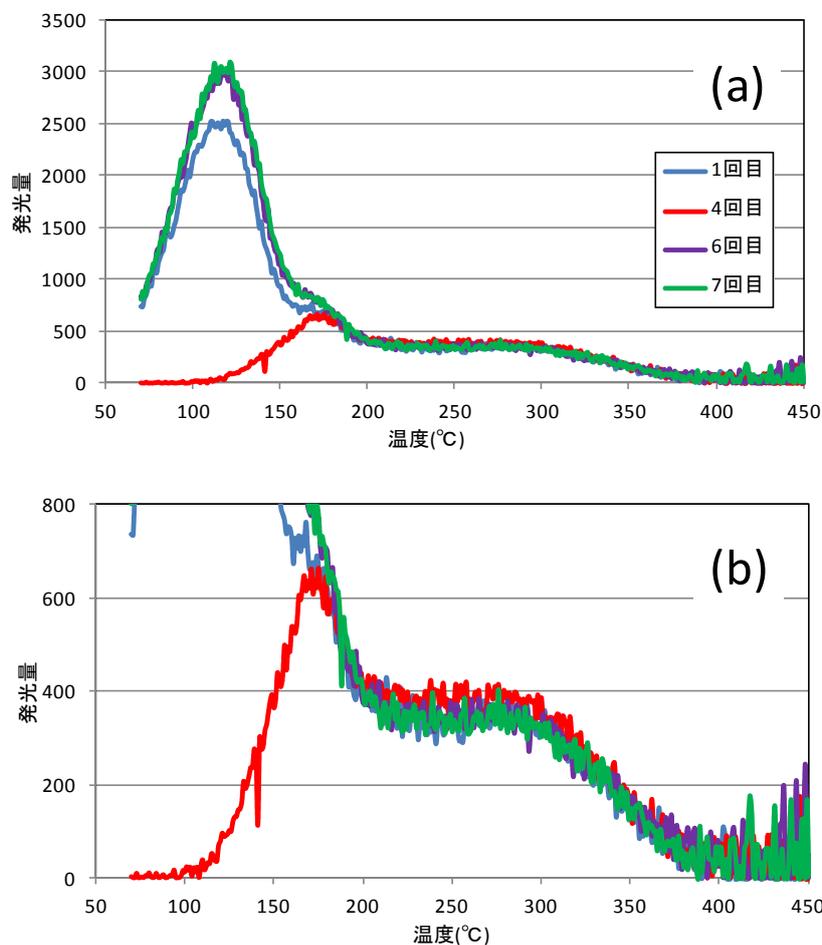
その結果80℃ピークでは、1-3回目の繰り返し測定間に大きな発光量の変化なかったが、4回目のディレイド測定では発光を示さなかった。5回目以降の繰り返し測定では1-3回目の結果よりも少し大きい発光量を示している。150℃ピークでは、1-3回目まで徐々に発光量が増加し、ディレイド測定で発光量が減少する。その後5、6回目まで発光量は増加するがそれ以降は一定の値を示す。250℃ピークでは、1-3、5-8回目の発光量に大きな変化はないが、4回目の測定結果は80、150℃ピークとは対照的に発光量増加を示している。

方解石は80℃ピークで大きなフェーディングを示すことがわかった。これは照射終了直後の試料からルミネセンスが発生するアフタグロー（after-grow: AG）現象によって発光量が減衰したと考えられる。180℃ピークは大きな発光量を示す80℃ピークの影響を受けるため、ディレイド測定における180℃ピーク発光量の減少は80℃ピークの減衰が原因と考えられる。しかし、ディレイド測定(4回目)を除いた1-6回目までの測定で180℃ピークの発光量は80℃ピークとは異なり、徐々に増加していることがわかった。180℃ピークは加熱によって感度変化が生じる可能性がある。

250℃ピークは、80,150℃ピークと異なりディレイド測定で発光量が増加している。珊瑚化石の方解石 TL では、天然環境で長時間をかけて蓄積した線量（蓄積線量）によるルミネセンスと人工照射（X線）によるルミネセンスで発光ピークが異なること報告されている[14]。これは、

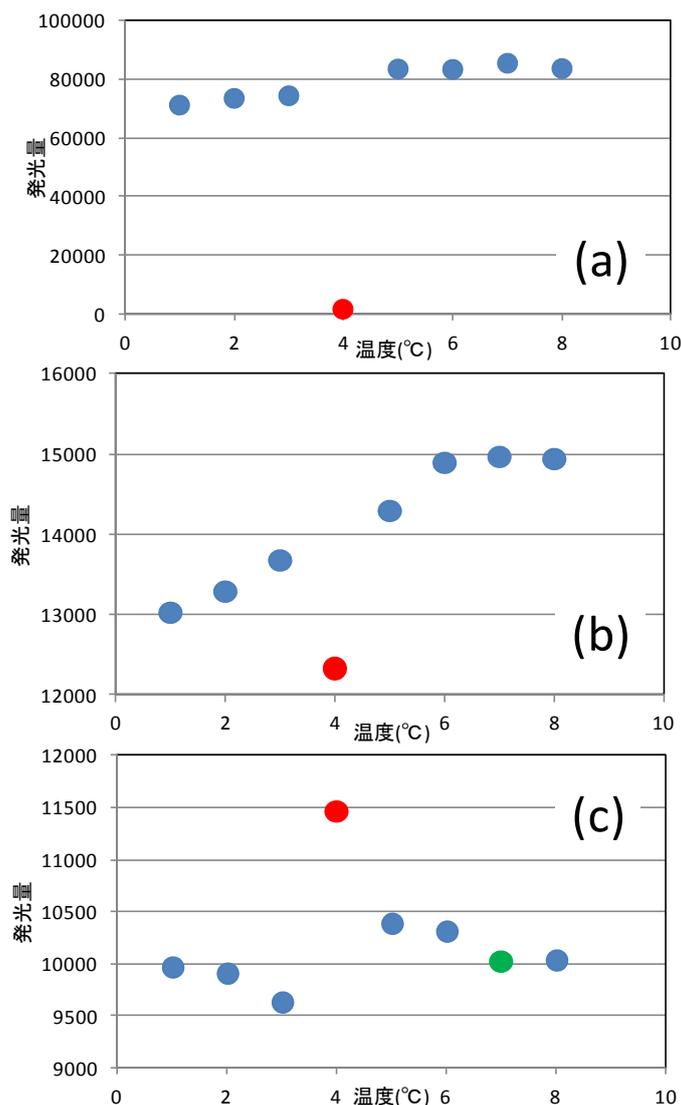
本来 80℃で発光するような浅い位置にある捕獲電子が長い時間をかけてより安定したエネルギー準位に遷移したことにより 250℃の高い励起エネルギーによって発光するようになったことが原因と考えられ、本ディレイド測定における 250℃ピークの増加も 80、150℃ピークのエネルギーが遷移したと考えられる。

ピーク毎にルミネセンス特性が異なり、またそれぞれが関係し合っていると考えられるため、方解石でフェーディング測定を行うときは各ピークの評価が必要と考えられる。また、より正確なフェーディング評価を行うためには、不純物が少ない合成方解石以外にも不純物濃度が多く含まれる天然方解石を用いて測定を行い、不純物濃度がどのようにルミネセンスフェーディングに影響するかを調査し評価する必要がある。



(1.6.7 回目[X線照射(165Gy)-ルミネセンス測定]と 4 回目[X線照射(165Gy)-14 日間常温保管-ルミネセンス測定]の手順で得たデータを比較した。(b)は(a)の拡大図。)

図 3.2.5-1 合成方解石のフェーディングテスト TL データ



((a)80°Cピーク、(b)180°C、(c)250°Cピーク積算 165Gy 繰り返し測定結果。青丸は[X 線照射(165Gy)・ルミネセンス測定]、赤丸(4 回目)は[X 線照射(165Gy)・14 日間常温保管・ルミネセンス測定]。)

図 3.2.5-2 ピークの温度前後の発光量

3.2.6 採取試料の蓄積線量測定

TL法を利用し、昨年度[6]フィリピン国ルソン島北西部の Bigbiga の試錐コア (DH05 及び DH07) からサンプリングした方解石の蓄積線量測定を行った。

方解石の赤色熱ルミネセン (RTL) 測定のため、受光波長域を約 600-650nm にする透過フィルター (R60, hoya+IRC-65L, kenko) を付けた光電子増倍管 (浜松フォトニクス、受光波長域 300-850nm、ピーク 420nm) を使用した。TL 測定温度はそれぞれ 100-400°C、加熱率は 1°C/s で行う。再現照射には、線量率 0.11Gy/s の X 線を利用した。方解石のプレヒートは 180°C、180 秒間とした。

秒間とした。

今回測定した方解石試料の TL グロー曲線のピーク温度は、Natural (自然放射線) では 280℃、人工放射線 (X 線) では 250℃に表れ、それぞれピーク温度が異なる。これは、放射線によって励起され電子捕獲中心に捕獲された電子が長い時間をかけてより安定したエネルギー準位に遷移したことが原因と考えられる。よって検量線の作成には、Natural では 260～290℃の TL グローカーブシグナル、事前放射線では 230℃～260℃の TL グローカーブシグナルの積算値を用いた。

各試料の TL データと検量線の結果を図 3.2.6-1～図 3.2.6-11 に示し、得られた蓄積線量を表 3.2.6-1 にまとめる。

また得られた蓄積線量を、同一試料ではないが、今回基礎実験に供したフィリピン断裂充填試料の化学組成と同等であったと仮定して、その試料の a-x-value、b-x-value、c-x-value を用いて年代値を見積もった。また炭酸塩脈の産状、特に周辺岩石との距離によっても年間線量が変わるため、周辺岩石からの影響の割合を代えていくつか年代を見積もった。本来なら各試料に対して、化学分析およびルミネッセンス特性の測定を行う必要があるため、年代値はおおよその見積もりではあるが、得られた年代は 10ka から 500ka にわたった。

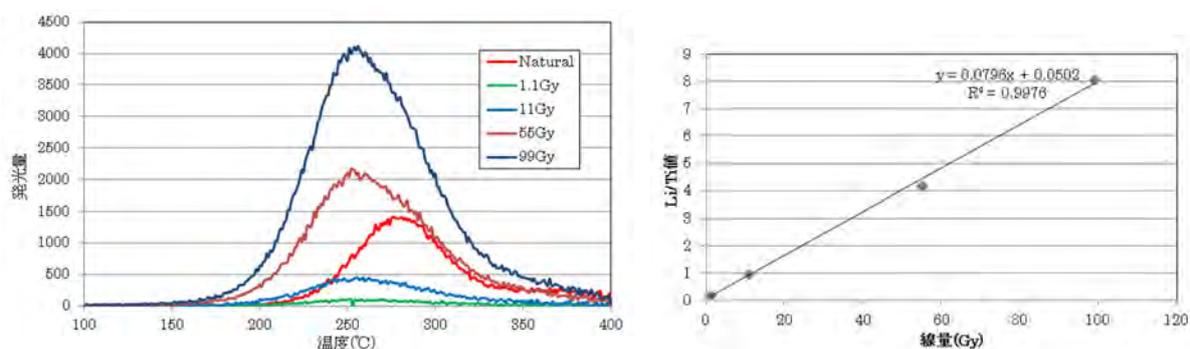


図 3.2.6-1 BB12-DH07-RW-001 の TL データ (左) と検量線 (右)

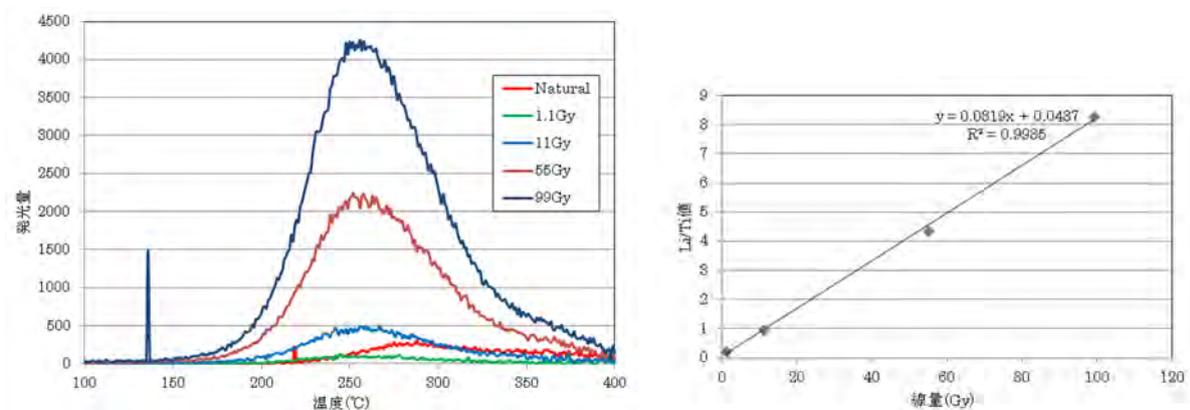


図 3.2.6-2 BB12-DH07-RW-003 の TL データ (左) と検量線 (右)

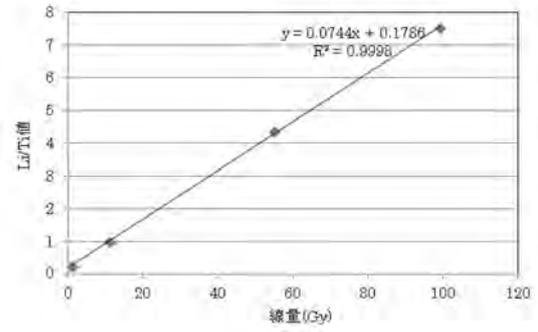
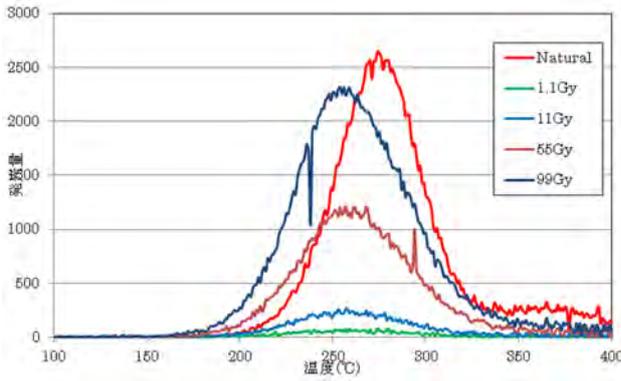


図 3.2.6-3 BB12-DH05-RW-003 の TL データ (左) と検量線 (右)

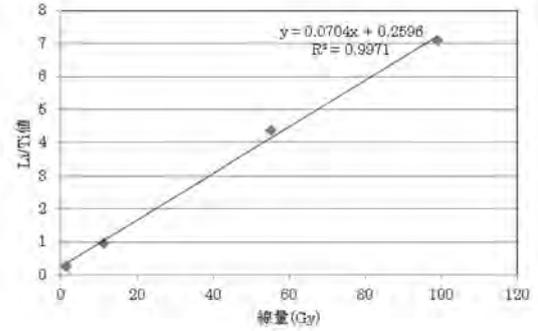
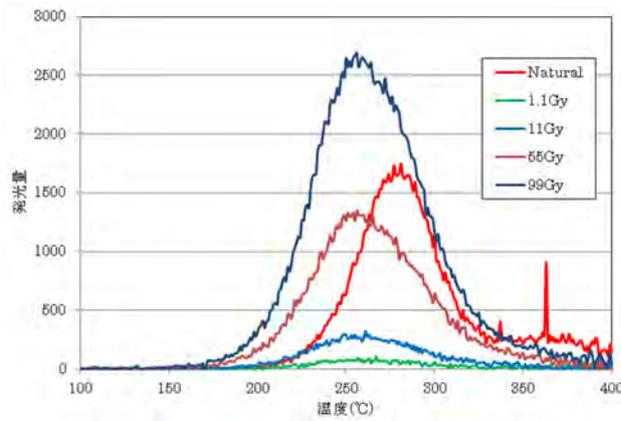


図 3.2.6-4 BB12-DH05-RW-005 の TL データ (左) と検量線 (右)

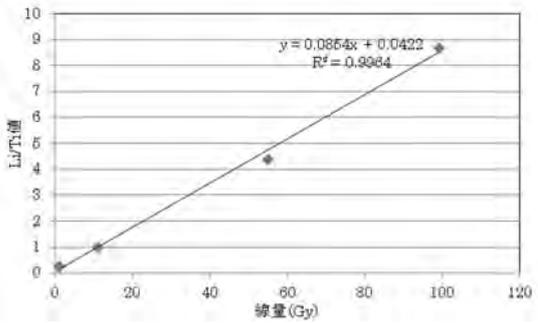
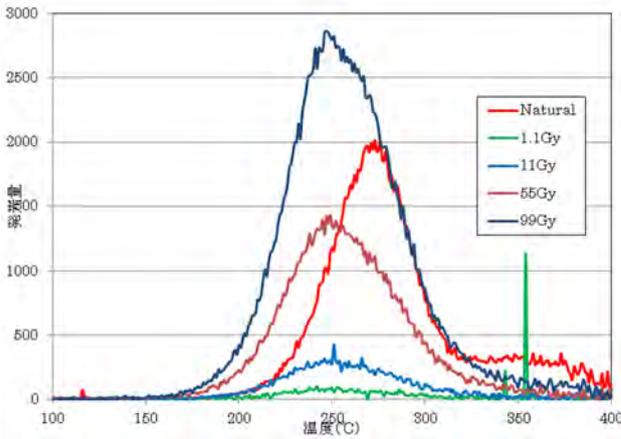


図 3.2.6-5 BB12-DH05-RW-006 の TL データ (左) と検量線 (右)

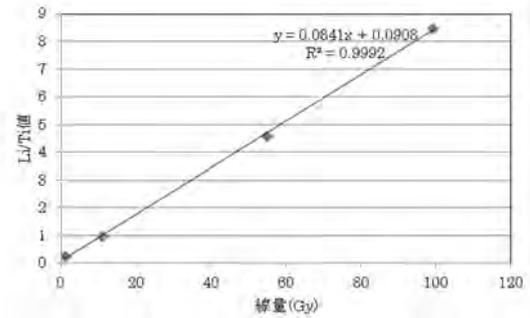
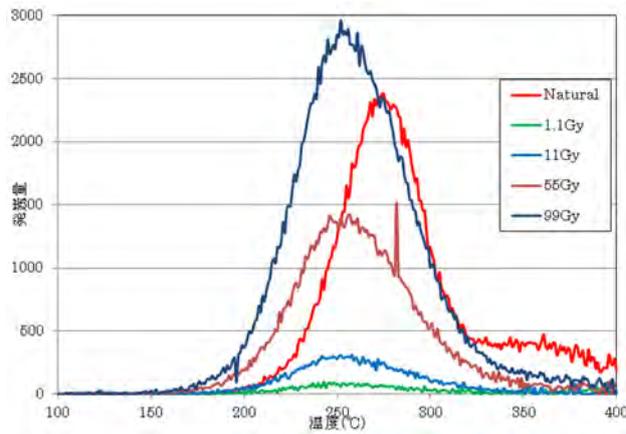


図 3.2.6-6 BB12-DH05-RW-007 の TL データ (左) と検量線 (右)

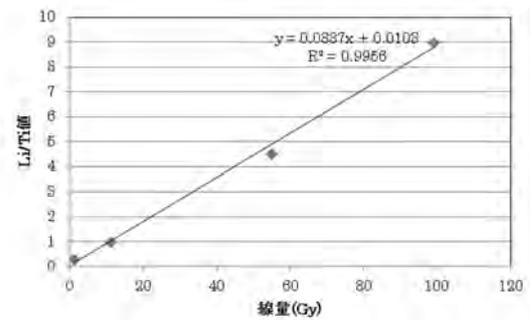
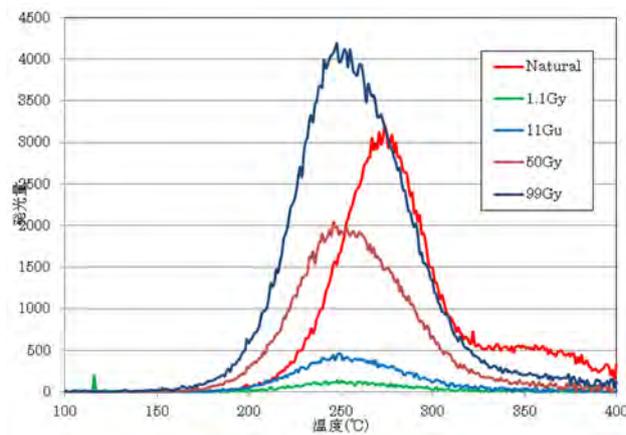


図 3.2.6-7 BB12-DH05-RW-013 の TL データ (左) と検量線 (右)

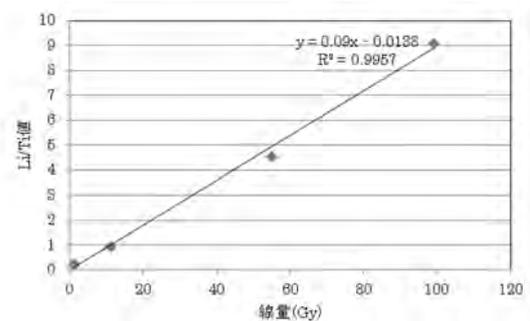
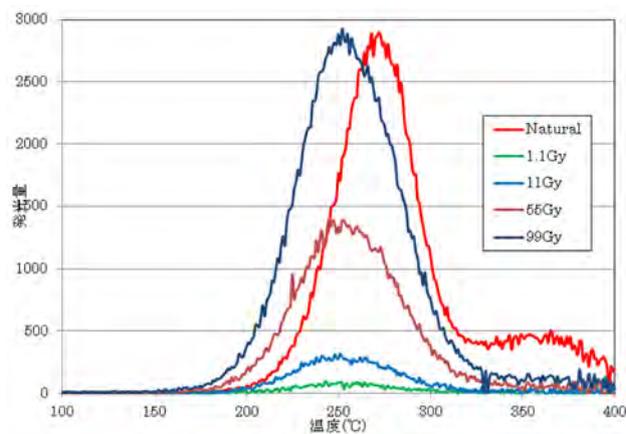


図 3.2.6-8 BB12-DH05-RW-014 の TL データ (左) と検量線 (右)

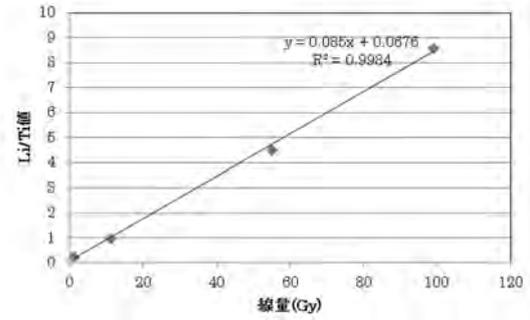
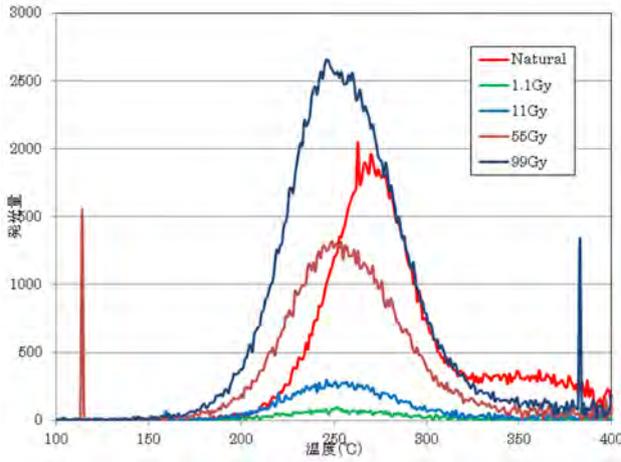


図 3.2.6-9 BB12-DH05-RW-015 の TL データ (左) と検量線 (右)

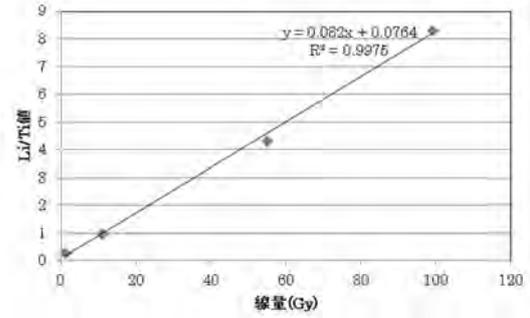
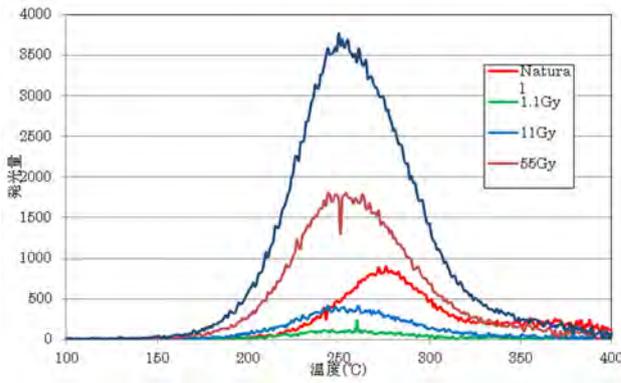


図 3.2.6-10 BB12-DH05-RW-016 の TL データ (左) と検量線 (右)

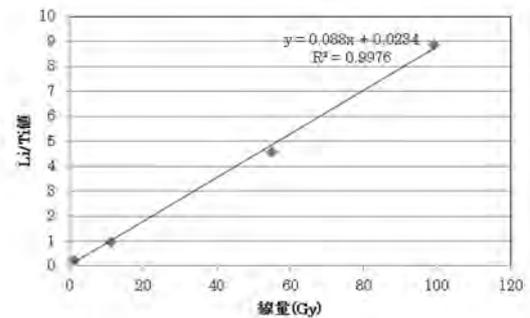
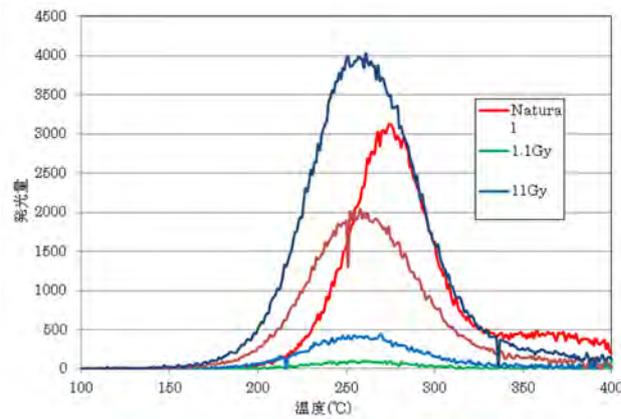


図 3.2.6-11 BB12-DH05-RW-018 の TL データ (左) と検量線 (右)

表 3.2.6-1 各試料の蓄積線量

Sample	蓄積線量 (Gy)
BB12-DH07-RW-001	38.2
BB12-DH07-RW-003	6.7
BB12-DH05-RW-003	129
BB12-DH05-RW-005	74.3
BB12-DH05-RW-006	62.5
BB12-DH05-RW-007	78
BB12-DH05-RW-013	66.2
BB12-DH05-RW-014	85
BB12-DH05-RW-015	62.6
BB12-DH05-RW-016	24.7
BB12-DH05-RW-018	73.8

表 3.2.6-2 方解石と周囲岩石の各種放射性元素濃度と a-value、b-value、c-value 及び各種放射線量率と年間線量

	方解石脈	角礫岩
U(ppm)	0.15	0.071
Th(ppm)	0.63	0.051
Rb(ppm)	12	8.4
K2O(%)	0	0.24
含水比(W.C.for Lumi)	0	0
α (mGy/y)	0.57	
a-value	0.80	
β (mGy/y)	0.002	0.01
b-value	0.046	0.046
γ (mGy/y)	0.013	0.016
c-value	0.27	0.27
宇宙線(mGy/y)	0.12	0.12
年間線量(mGy/y)	0.70	0.14

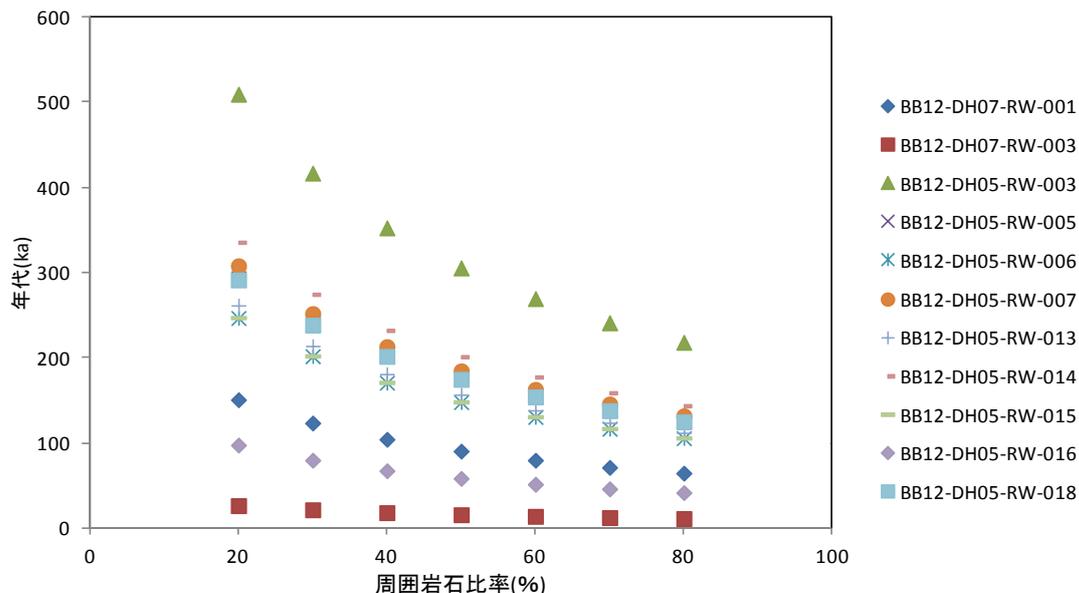


図 3.2.6-12 フィリピン Bigbica (試錐コア DH05, DH07) の方解石の熱ルミネッセンス年代

3.2.7 まとめ

炭酸塩の TL 年代は、フィリピンの NA におけるアルカリとの反応時間にかかわる評価において適用可能な数少ない手法の一つである。今年度の検討により、Bigbica の炭酸塩鉱物の TL 年代が適用可能であることが確かめられた。

ただし、仮定の条件も多く年代値についてはおおよその見積りであり、化学分析やルミネッセンス特性を直接計測して、より精緻な形成年代評価をすることがまずは課題である。

フィリピンのナチュラルアナログにおける年代測定では、分離が困難な微量の試料というのが大きな制約条件となっているが、コアの vein 状の微量の炭酸塩試料でも TL 測定や化学分析の可能性を検討することが今後の重要な課題である。

また、炭酸塩については、U-Th 法の適用も確認されており [15]、評価した TL 年代の妥当性確認も含め今後検討することが望ましい。

参考文献

-
- [1] 兼岡一郎: 年代測定概論. 東京大学出版会 (1998).
- [2] 橋本哲夫: ルミネッセンス (発光) で探る古代情報. 新潟日報事業社 (2005).
- [3] Duller, G.A.T., Penkman, K.E.H. and Wintle, A.G.: Assessing the potential for using biogenic calcites as dosimeters for luminescence dating. *Radiation Measurements* 44, 429-433 (2009).
- [4] Ito, K., Hasebe, N., Sumita, R., Arai, S., Yamamoto, M., Kashiwaya, K., and Ganzawa, Y.: LA-ICP-MS analysis of pressed powder pellets to luminescence geochronology. *Chem. Geol.* 262, 131-137 (2009).
- [5] Prescott, J.R. and Hutton, J.T.: Cosmic ray contributions to dose rates for luminescence and ESR dating: Large depths and long-term variations. *Radiation Measurements* 23(2/3), 497-500 (1994).
- [6] Daniels, F., Boyd, C.A. and Saunders, D.F.: Thermoluminescence as a research tool. *Science* 117, 343-349 (1953).
- [7] Roque, C., Guibert, P., Vartanian, E., Bechtel, F., Schvoerer, M.: Thermoluminescence-dating of calcite: study of heated limestone fragments from Upper Paleolithic layers at Combe Sauniere. Dordogne, France. *Quaternary Science Reviews* 20, 935-938 (2001).
- [8] Buylaert, J.P., Murray, A.S., Huot, S., Vriend, M.G.A., Vandenberghe, D., De Corte, F., Van Den Haute, P.: A comparison of quartz OSL and isothermal TL measurements on Chinese loess. *Radiation Protection Dosimetry* 119(1-4), 474-478 (2006).
- [9] Medlin, W.L.: The nature of traps and emission centers in thermoluminescent rock materials. In *Thermoluminescence of Geological Materials* (Edited by D.J. McDougall), Ch.4. Academic Press, New York (1968).
- [10] Townsend, P.D., Luff, B.J. and Wood, R.A.: Mn²⁺ Transitions in the TL emission spectra of calcite. *Radiation Measurement* 23(2/3), 433-440 (1994).
- [11] Valle-Fuentes, F.J., Garcia-Guinea, J., Cremades, A., Correcher, V., Sanchez-Moral, S., Gonzalez-Martin, R., Sanchez-Munoz, L. and Lopez-Arce, P.: Low-magnesium uranium-calcite with high degree of crystallinity and gigantic luminescence emission. *Applied Radiation and Isotopes* 65, 147-154 (2007).
- [12] 塚本斉: ルミネッセンス顕微鏡・分光分析を利用した岩石・鉱物の研究. *地質ニュース* 474, 46-56 (1994).
- [13] (公財) 原子力環境整備促進・資金管理センター: 平成 24 年度放射性廃棄物共通技術調査等事業 放射性廃棄物重要基礎技術研究調査 報告書 (第 3 分冊) (2013).
- [14] Ninagawa K., Kitahara T., Toyoda S., Hayashi K., Nishida H., Kinjo M. and Kawana T.: Thermoluminescence dating of the Ryukyu Limestone. *Quatern. Sci. Rev.* 20, 829-833 (2001).
- [15] Watanabe, Y., Nakai, S. and Lin, A.: Attempt to determine U-Th ages of calcite veins in the Nojima fault zone, Japan. *Geochemical Journal*, 42, 507-513 (2008).

第4章 地球化学シミュレーションモデルによる変質解析

4.1 目的

TRU 廃棄物処分場ではセメント系材料とベントナイトが接して設置される可能性が高い。そのため、実際の処分場を模擬したセメント-ベントナイト接触試料に対して数多くの変質加速実験が実施されてきた。また、その実験結果を再現することを目的として次元反応輸送モデリングが行われ、モデルや熱力学データベースの検証がなされてきた。しかし短期間の室内実験結果やそこで得られた手法のみでは天然環境の長期間現象を予測することは難しく、ベントナイトの長期安定性評価には実際の天然環境で生じた長期間の現象に関するデータが必要不可欠である。この問題の解決のため、先に述べたようなモデルや熱力学データベースのような得られた知見を実際の処分場へと還元していく作業が必要となる。

フィリピン国ルソン島北西部の Fossil Type のナチュラルアナログ調査サイトである Saile 鉱山のトレンチで観察された、高アルカリ地下水との相互作用により 1~5mm のベントナイトのアルカリ変質帯を含むベントナイトと枕状溶岩の接触部を対象として、アルカリ変質により変化する接触部の鉱物組成について、地球化学計算コード PHREEQC による変質解析を行う。この解析モデルに関する情報収集及び変質解析において不可欠であるベントナイト基本物性（ベントナイトの間隙率・乾燥密度・スメクタイト含有率）については、平成 24 年度の調査[1]で取得した値を適用し、熱力学データベースは BRGM の Thermoddem を使用する。特に、ここで対象とするフィリピンのナチュラルアナログサイトの試料のベントナイトの変質が制限されている主要因を考察するため、高アルカリ地下水、クロッキングの影響について検討を行う。

具体的には、①本サイトにおけるベントナイトの変質プロセスを数値計算的な解析に基づく、変質過程の予測、②①で用いた反応輸送モデルや構成式、熱力学データベースの実際の天然現象への適用性の検証、を目的とした地球化学シミュレーションモデルによる変質解析を実施する。

①では室内実験によって明らかになったベントナイトの溶解や二次鉱物の生成といった高アルカリの変質プロセスを解析し、サイトにおいて生じた 1mm-5mm という非常に限定的なベントナイトの変質範囲とクロッキングを理論的に説明することを目的とした。一方、②ではモデルに用いた熱力学データベースや速度論データの天然現象への適用性を検証することを目的とした。また界面ベントナイトの変質をモデリングする上で今の段階では不足しているデータ（高アルカリ水の生成メカニズムや高アルカリ水のベントナイトに接する流量等）が多く、条件を一つに設定するのが難しいパラメータがいくつか存在する。そこで本項では不明確なパラメータを変動パラメータとして扱い、モデルの設定条件が解析結果へ及ぼす影響についても考察した。

4.2 地球化学反応輸送モデルの概要

4.2.1 地球化学反応輸送モデルで再現することを目標にした二次鉱物の空間分布

1.3.8 で説明したように、枕状溶岩とベントナイトの接触界面では、界面の枕状溶岩のガラス部分に変質していると共に、界面の接触部であるベントナイトも高アルカリ地下水と反応して溶解し低密度となるとともに、Fe-サポナイトやカリ長石の生成が認められる。このベントナイト変質部よりも 1-5mm 程度の下流側には、ノントロナイトと針鉄鉱で特徴付けられる鉄濃集帯が観察され、X線 CT 観察により鉄濃集帯部は空隙が減少して高密度になっていた。

以上から、高アルカリ地下水との反応前は図 4.2.1-1 に示すような鉱物組成であったものが、反応が終結した際は図 4.2.1-2 のような鉱物組成と空間分布になったと考えられる。したがって、本検討で実施する地球化学反応輸送モデルで再現すべき鉱物組成と空間分布は図 4.2.1-2 に示すものである。

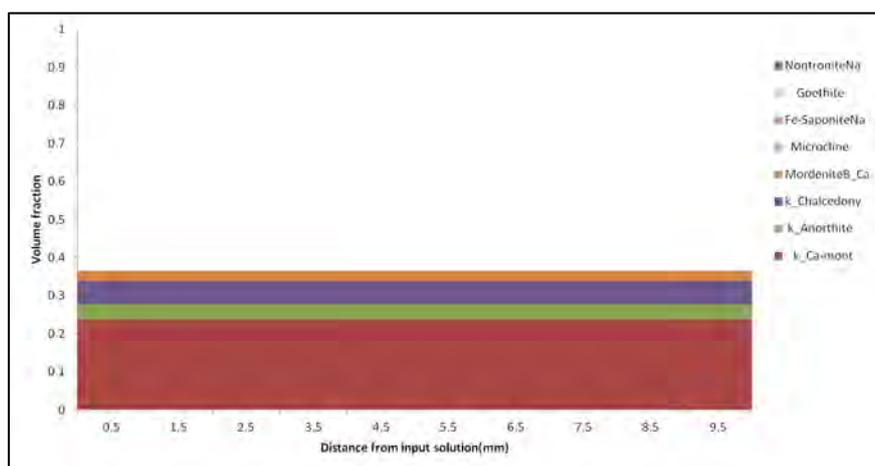


図 4.2.1-1 Saile 鉄山産ベントナイトの初期状態におけるベントナイト中の鉱物空間分布

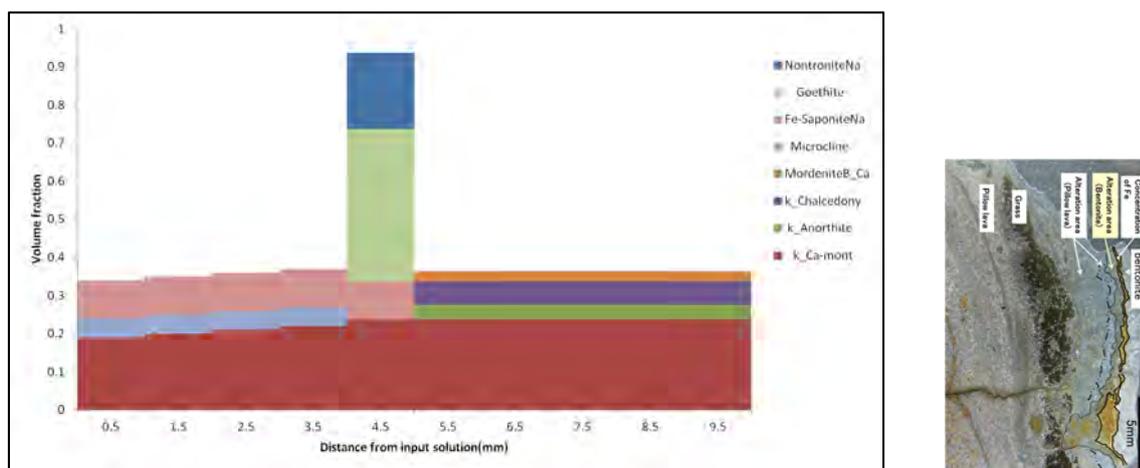


図 4.2.1-2 枕状溶岩と接するベントナイトの界面（右写真）で観察された変質後の鉱物組成

4.2.2 高アルカリ溶液の組成

地球化学モデリングの概要とセッティングは平成 24 年度[1]に検討した内容と同様のものであるが、二次生成鉱物として考慮する鉱物の種類と分布を観察結果に合わせ、その生成ためにインプットする高アルカリ溶液の組成を考慮することとした。

平成 24 年度[1]の調査によって、Manleluag、Poonbato、Saile 鉱山における高アルカリ泉の実測データを使用しても、測定地点の化学組成の違いが解析結果に与える影響は小さかった。そこで今回は、はじめに実測データとして Manleluag の高アルカリ泉の溶液データ (Manlenuue 温泉の中で最も pH が高かったもの) を用いた。

しかし、実際の地表で採水する高アルカリ水は、カンラン石の低温蛇紋岩作用により発生したものが断裂系に沿って亀裂を通過した後のものであり、その蛇紋岩化に際して Mg や Fe とシリカが消費されるため、カンラン岩の水和反応で生成する溶液に比べて溶存 Mg や Fe が少ない。界面での反応では鉄を主成分とするスメクタイトである Fe-サポナイトやノントロナイト、鉄水酸化鉱物の針鉄鉱の生成が認められているので、亀裂を上昇し枕状溶岩中のガラスの Fe を溶脱させた溶液より溶存 Fe 濃度が低い可能性が高いと考えられる。そこで地表に湧出する前の高アルカリ地下水として、岩石学的研究に関する報告の多いオマーンのカンラン岩の鉱物組成と典型的な雨水を反応させ、Fe 鉱物の沈殿を suppress して計算した地下水組成を反応高アルカリ地下水とした。

具体的な方法は、オマーンの低温蛇紋岩化作用と高アルカリ地下水の生成に関する先行研究である秋田(2002)[2]を参考にした。まず、典型的な雨水 1kg の反応溶液として用意し、その 900g が蒸発した 25°C の溶液がカンラン岩と反応する地下水と設定した (表 4.2.2-1)。この蒸発の過程で生成した沈殿物は海泡石 (Sepiolite)・水苦土石 (Hydromagnesite)・方解石等でありオマーンオフィオライトの亀裂に生成している二次鉱物と一致している。ちなみに、蒸発後の Na・Cl 濃度は 10 倍となっている。

次に、上で求めた反応溶液にカンラン岩の構成鉱物を添加する計算を行った。このシミュレーションでは、カンラン岩の構成鉱物は少しずつ添加され、添加された鉱物はその都度溶解度に従って瞬時に溶解すると共に、過飽和になった鉱物は瞬時に沈殿する設定となっている。ここでの構成鉱物の添加量は、地下にしみこんだ地表水が徐々に水みちのカンラン岩と反応することを模擬している。このとき添加されるカンラン岩の構成鉱物は松影(1997)[3]によって報告された鉱物の EPMA 定量分析とモード組成測定を参考に設定した。GWB の熱力学データセットには、カンラン岩の構成鉱物の端成分鉱物しか含まれていないため、固溶体は端成分鉱物の混在物として表現した。苦土カンラン石 (Forsterite)、鉄カンラン石 (Fayalite)、頑火輝石 (Enstatite)、鉄紫蘇輝石 (Ferrosilite)、透輝石 (Diopside) を組み合わせて、松影(1997)[4]の分析値をできるだけ忠実に再現した鉱物組み合わせのモデリングをカンラン岩の組成とした (表 4.2.2-2)。カンラン岩として添加される鉱物比は Forsterite : Fayalite : Enstatite : Ferrosilite : Diopside = 0.79 : 0.08 : 0.11 : 0.01 : 0.01 である。今回行ったモデリングでは、最終的にカンラン岩の構成鉱物を 2mol 反応させている。

なお、高アルカリ泉は大気に対して閉鎖的な環境に置かれていたと考えられるので、それを模擬するためにカンラン岩と反応溶液の反応過程において二酸化炭素の供給がないように設定した。すなわち、系に存在する二酸化炭素やメタン等の炭素種はスタートの反応溶液に含まれていたも

のみとなる。

表 4.2.2-1 解析に用いた溶液データ

		溶液 1	溶液 2
pH		11.08	12.1
Temp.(°C)		34.0	25.0
pe		-12.1	-13.2
溶液濃度 (ppm)	Na ⁺	1.58	126
	K ⁺	0.280	13
	Ca ²⁺	23.6	379
	Si ⁴⁺	11.5	0.0179
	Al ³⁺	20.3	1.52x10 ⁻³
	Mg ²⁺	0.17	7.04x10 ⁻⁴
	Fe ⁺ (2+, 3+)	0.001	0.0475
	HCO ₃ ⁻	73.5	0.001
	Cl ⁻	charge balance	

表 4.2.2-2 高アルカリ地下水生成のモデルに用いたカンラン岩の鉱物組成データ

Minerals	Chemical formula	(wt%)
Forstelite	Mg ₂ (SiO ₄)	79
Fayalite	Fe ₂ (SiO ₄)	8.0
Enstatite	Mg ₂ Si ₂ O ₆	11
Ferrosilite	FeMgSi ₂ O ₆	1.0
Diopside	CaMg(Si ₂ O ₆)	1.0

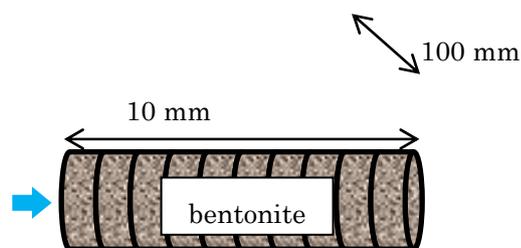
4.2.3 解析モデル及び解析条件

地球化学計算コードPHREEQC[5]を用いた一次元反応輸送モデルにより、ベントナイトのアルカリ変質反応による鉱物組成の経時変化データの取得を試みた。物質移行は拡散支配とし、分散長は考慮しないこととした。ベントナイトの実効拡散係数はMihara and Sasaki(2005) [6]より4.71E-10 m²/sとし、モンモリロナイトの陽イオン交換反応は考慮しなかった。解析は長さ10 mm、直径100 mmのセルを10分割した一次元体系で行った(図 4.2.3-1)。反応溶液は40Lとし、上流側は濃度固定境界、下流側は濃度勾配ゼロ境界とした。平成23年度の検討において、解析モデルに関する情報収集及び変質解析において不可欠であるベントナイト基本物性のベントナイトの間

隙率、乾燥密度、スメクタイト含有率を取得しており、本解析ではそれらの値を採用している。

今回の解析では、鉄鉱物の沈殿によるクロッキングの有無を検討するため、各解析ケースで酸化還元電位が変化するケースと変化しないケースで計算を実施している。具体的には、反応溶液の最下流のセルで、酸素を0.2気圧含む大気と平衡になるように設定して計算を実施した。実際のトレンチ試料の観察では、枕状溶岩とベントナイトの界面から1-5mmの部分に鉄濃集帯ができてクロッキングしていたが、モデル解析上はその存在はどこに酸化帯セルを設定するか否かで決まるため、今回の解析では便宜上最終セル（界面から10mmの部分）に設定した。その最終セルの反応後の溶液をピックアップし、別に設定した大気と平衡なセルに投入する計算を別途実施し、そこで生成・消滅する鉱物を積算することで、酸化還元電位が変化するケースと変化しないケースを比較した。

また、今回の解析では、二次鉱物相として鉄鉱物を「考慮する場合」と「考慮しない場合」を設定している。これは、反応後に鉄鉱物が飽和に達していても沈殿を許可しない場合を「考慮しない場合」、飽和に達していれば沈殿することを許可する場合を「考慮する場合」としている。



Hot spring water
(Diffusion)

図 4.2.3-1 一次元反応輸送モデル解析用に設定したベントナイトの体系

4.2.4 熱力学データベース及び鉱物の溶解速度

熱力学データベースは、フランスの地質調査所 (BRGM) が公表している **Thermoddem**[7] を用いた。ベントナイトの鉱物含有割合として Na 型モンモリロナイトを 60wt%、付随鉱物として、方解石を 5wt%、モルデン沸石を 10wt%、斜長石として灰長石を 5wt%、非晶質シリカとして玉髄を 10wt% とした。乾燥密度は 1.1 Mg/m³ であり間隙率は 60% と設定した。二次鉱物としては実際に現場試料から実際に観察されている鉄鉱物ノントロナイトおよび針鉄鉱、長石の一種である微斜長石 (Microcline)、沸石の輝沸石、斜プチロル沸石、モルデン沸石を二次鉱物として設定した。本モデルで考慮した鉱物の熱力学データをまとめたものを表 4.2.4-1 に示す

表 4.2.4-1 鉱物の熱力学データとモル体積 (cm³/mol)[7]

Minerals	Log K	ΔH (kJ/mol)	Molar volume (cm ³ mol ⁻¹)
Anorthite	25.31	-314.36	100.79
Calcite	1.85	1.85	36.93
Chalcedony	-3.46	19.57	22.68
Clinoptilolite	-2.11	-69.84	209.66
Fe-SaponiteCa	26.54	-256 776	139.9614
Fe-SaponiteK	24.93	-238 293	143.50
Fe-SaponiteMg	26.73	-260 846	140.2119
Fe-SaponiteNa	26.07	-248 471	140.8164
Goethite	0.36	38.22	20.82
Heulandite	2.46	-155.10	315.65
Microcline	0.04	-56.46	108.74
Mordenite	-2.92	-67.88	209.80
Na-Montmorillonite	11.17	-326.67	262.48
NontroniteCa	-4.72	28.77	137.79
NontroniteK	-6.32	47 247	141.3248
NontroniteMg	-4.42	24 695	137.8962
NontroniteNa	-5.18	37 069	138.6415

粉末状のモンモリロナイトの溶解速度式は、温度と pH の影響を考慮した Sato 式[8]と飽和度の影響を考慮した Oda 式[9]を組み合わせた Sato-Oda 式を考慮した。Oda 式は pH12.1 (70°C)の実験系で算出された式である。以下にそれぞれの式を記述する。

・ Sato 式[8]

$$f(OH^-) = \left(4.74 \cdot 10^{-6} \cdot e^{-39.6/RT} \cdot \frac{177 \cdot e^{20.4/RT} \cdot a_{OH^-}}{1 + 177 \cdot e^{20.4/RT} \cdot a_{OH^-}} + 1.70 \cdot e^{-69.7/RT} \cdot \frac{0.0297 \cdot e^{23.5/RT} \cdot a_{OH^-}}{1 + 0.0297 \cdot e^{23.5/RT} \cdot a_{OH^-}} \right)$$

・ Oda 式[9]

$$f(\Delta G_r) = 1 - \exp\left(-2.56 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{\Delta G_r}{2RT}\right)^3\right)$$

ここで、R は気体定数(J/K/mol)、T は絶対温度(K)、a_{OH⁻}は水酸化物イオンの活量、f(ΔG_r)は反応のギブスの自由エネルギー変化の関数である。

モンモリロナイトの溶解速度は以下のように表すことができる。

$$\text{モンモリロナイトの溶解速度} = f(OH^-) \cdot A_{min} \cdot f(\Delta G_r)$$

ここで、A_{min} は鉱物の反応表面積(m²/dm³)である。本報ではモンモリロナイトの比表面積として Yokoyama et al. (2005) [10]にて算出された 7(m²/g)を使用した。

灰長石と玉髓の速度式は Lasaga et al. (1994)[11]と Palandri and Kharaka (2004)[12]によって以下の式で表される。

$$Rate = \left(k^{nu} \exp \left[\frac{-E_a^{nu}}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298.15} \right) \right] a_H^{nu} + k^H \exp \left[\frac{-E_a^H}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298.15} \right) \right] a_H^{nH} + k^{OH} \exp \left[\frac{-E_a^{OH}}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298.15} \right) \right] a_H^{nOH} \right) \cdot A_{min} \cdot \left[1 - \exp \left(\frac{\Delta G_r}{RT} \right) \right]$$

一方で、方解石の生成速度に関しては以下の式で表される[11][12]。

$$Rate = \left(k \cdot \exp \left[\frac{-E_a}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298.15} \right) \right] \right) \cdot A_{min} \cdot \left[\left(\exp \left(\frac{\Delta G_r}{RT} \right) \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right]$$

ここでkは速度定数(mol/m²/s)、上付き文字のnuとH、OHはそれぞれ中性と酸性、アルカリ性の領域における反応を表している。a_HはH⁺の活動度であり、nは指数である。E_aは反応の活動エネルギー(J/mol)。A_{min}は鉱物の反応表面積を表している(m²/dm³)。ただし、方解石に関してはpHの影響を考慮していない。

灰長石と玉髄、方解石の速度パラメータを表 4.2.4-2 に示す。ただし、灰長石の速度パラメータとしては曹長石の速度パラメータを代用した。

表 4.2.4-2 25°Cにおける速度論パラメータ

Minerals	Anothite ^{*1}	Chalcedony ^{*2}	Calcite ^{*3}
Specific surface area (m ² / g)	0.24	0.03	0.5
Log knu(mol/m ² /s)	-12.1	-	-6.84
Eanu(kJ/mol)	61.1	-	48.1
nnu	-	-	-
Log kH(mol/m ² /s)	-9.47	-	-
EaH(kJ/mol)	64.3	-	-
nH	0.335	-	-
Log kOH(mol/m ² /s)	-9.38	-13.7*	-
EaOH(kJ/mol)	60.6	-	-
nOH	-	-0.55*	-

The kinetic constants are determined with data from:

*¹ Chou and Wollast (1984)[13]; Chou and Wollast (1985)[14]; Burch et al. (1993)[15]; Hellmann (1994)[16]; Knauss and Copenhaver, (1995)[17]; Alekseyev et al. (1997)[18]; Hellmann and Tisserand (2006)[19]

*² Savage et al. (2002)[20]

*³ Inskeep and Bloom (1985)[21]; Lioliou et al. (2007)[22]

* The parameters are obtained at 40°C

4.2.5 解析ケース

表 4.2.5-1～表 4.2.5-3 に解析ケースの一覧を示す。表では Manleluag 温泉地における湧水の溶液データ (溶液 1) に加え、オマーンオフィオライトで発生する高アルカリ泉を模擬したモデリングの溶液データ (溶液 2) を使用した (表 4.2.2-1)。以下ではモンモリロナイトの溶解および、灰長石、玉髄、方解石の溶解生成を速度論的に取り扱い、その他の鉱物の溶解生成反応は平

衡論的に取り扱った（表 4.2.4-1、表 4.2.4-2）。実際のトレンチから採取した枕状溶岩－ベントナイト界面の観察結果から、輝沸石、斜プチロル沸石、モルデン沸石等の二次鉱物の生成は考慮せず、鉄スメクタイト（鉄サポナイト、ノントロナイト等）鉄鉱物（赤鉄鉱、針鉄鉱）、カリ長石の生成を考慮した（表 4.2.4-1）。

Case1-4 では溶液 1 を使用し、二次生成物の生成を考慮した。その結果 input 側で大量の方解石の沈殿を確認した。これは変質プロセスとして観察結果と異なる。この原因として、使用した溶液 1 は地上での実測値であり、実際の高アルカリ地下水よりも多くの炭酸イオンを含んでいることが考えられる。また、地上で実測された高アルカリ地下水の pH を本解析に用いることも問題点として挙げられる。また、地上で採水した高アルカリ地下水は、湧出後の大気との反応や地表水との混合により pH が緩衝され、低温蛇紋岩化で生成された直後の pH よりも低下している可能性が高い。そこで Case5-8 では測定時の大気との接触による地下水への影響を考慮し、オマーンオフィオライトの高アルカリ地下水生成プロセスを模擬した地下水を反応溶液として使用した。さらに方解石の沈殿が空隙に与える影響を無視するため、方解石の反応・生成を無視する設定とした。

Case3, 4, 7, 8 では、鉄鉱物（鉄サポナイト、針鉄鉱）の生成を考慮しない場合について解析を行い、鉄鉱物の生成を考慮する Case 1、2、5、6 の結果と比較することで鉄鉱物の生成の有無が解析結果に与える影響について考察を行った。また Case 3、4、7、8 ではセルの酸化還元が変化しない場合（常に還元的）な場合の解析を行い、Case1、2、5、6 の酸化還元状態が還元的→酸化的に変化する場合の解析結果と比較することで、ベントナイト中の酸化還元環境の変化がベントナイトの空隙に与える影響について考察を行った。

Case1-8 ではミキシングセル（モデル上の反応溶液）の体積をベントナイトの空隙容量と等しい 0.0464L として計算した。本解析では物質移行として拡散のみを考慮しているため、ミキシングセルの体積量が本解析結果に大きな影響を与える[23]。そこで Case 9,10 では、Case5 で考慮した解析条件で、それぞれミキシングセルの体積量を各々ベントナイトの空隙容量の 1/2 倍、2 倍である 0.0232(L)、0.0927(L)として解析を実施した（表 4.2.5-2）。また、鉄鉱物の生成量はインプット溶液の Fe 濃度に大きく左右されることが予想されるため、Case11,12 では Case5 で考慮した解析条件で、それぞれミキシングセルの鉄濃度を各々 Case5 の 10 倍、100 倍として解析を実施した（表 4.2.5-3）。

表 4.2.5-1 解析ケース

No.	溶液組成	二次鉱物相		ベントナイト	酸化還元 電位	セル体積
		鉄鉱物	沸石	スメクタイト溶 解モデル		
			カリ-長石			
1	溶液 1	考慮する	考慮する	Sato-Oda 式 [1]	変化しない	ベントナイトの空隙体 積と等しい
2					変化する	
3		考慮しない			変化しない	
4					変化する	
5	溶液 2	考慮する			変化しない	
6					変化する	
7		考慮しない			変化しない	
8					変化する	

表 4.2.5-2 解析ケース（ミキシングセルの大きさを考慮）

No.	解析条件	ミキシングセル(L)
9	Case 5 と	ベントナイトの空隙体積の 0.5 倍
10	同様	ベントナイトの空隙体積の 2.0 倍

表 4.2.5-3 解析ケース（インプット溶液の鉄濃度の違いを考慮）

No.	解析条件	インプット溶液の鉄濃度
11	Case5 と	Case1 の 10 倍
12	同様	Case1 の 10 ² 倍

4.3 解析結果と考察

4.3.1 Case 1- Case 4

図 4.3.1-1～図 4.3.1-10 に Case 1- Case 4 におけるベントナイト中の鉱物空間分布の解析結果を示す。

Case1、Case2 では反応開始から 5 年後にはベントナイト全域においてモルデン沸石、玉髓のほとんどが溶解し、入水側 2.0mm から 6.0 mm の区間ではカリ長石の生成を確認した(図 4.3.1-1、図 4.3.1-4)。カリ長石の生成位置はともかく、高アルカリ地下水とベントナイトの反応により、低温での高アルカリ溶液の代表的な二次生成物であるカリ長石の生成は表現可能であった。

モルデン沸石は本解析では平衡論として取り扱っているため、インプットされる溶液がモルデン沸石に対して不飽和であることを示している。一方、玉髓は速度論的な取り扱いをしたが、その速度を扱う支配方程式で計算した結果では、5 年程度で玉髓が消失してしまうことを示している。Case1、Case2 は二次鉱物相として鉄鉱物を考慮しているが、インプット溶液中の溶存鉄濃度が低いために、ベントナイト中での鉱物組成の中に鉄鉱物を認めることはなかった。さらに、酸化還元電位が変化し、酸化帯を設定したケースであっても、インプット溶液中の溶存鉄濃度が低いために針鉄鉱等の沈殿による空隙の充填やクロッキングは認められなかった。反応開始 20 年後には初期鉱物であるモルデン沸石、玉髓は全て溶解し、二次鉱物として Fe サポナイトが入水側 0 から 0.5 mm の区間でわずかに沈殿することを確認した(図 4.3.1-2、図 4.3.1-5)。また、その生成量は 80 年後には増加していた(図 4.3.1-3)。これは、インプット溶液中の溶存鉄濃度が低いにもかかわらず、時間の経過と共に溶存シリカ濃度が上昇し、間隙水組成が溶解度の低い Fe サポナイトの飽和に達したためと考える。

Case3、Case4 では反応開始から 5 年後にはベントナイト全域においてモルデン沸石、玉髓のほとんどが溶解し、入水側 2.0mm から 6.0 mm の区間ではカリ長石の生成を確認した(図 4.3.1-6、図 4.3.1-8)。

反応開始から 20 年後には初期鉱物であるモルデン沸石、玉髓は全て溶解し、それ以外の鉱物組成や量は、二次鉱物相として鉄鉱物を考慮していない Case1、Case2 とほぼ同じ結果となっている(図 4.3.1-7、図 4.3.1-9)。また、20 年後のベントナイトの間隙水の pH は試料内での位置に依らず 11 程度を示した。

モンモリロナイトの溶解量は Case 1- Case 4 のいずれのモデルにおいても同程度で、Case1 では Input 側で 71.5%、Output 側で 94.6%残存した。また、いずれのケースも灰長石、スメクタイトの溶解は徐々に進み、100 年経過した時点で図 4.3.1-10 のような鉱物組成に近づく傾向がみられた。

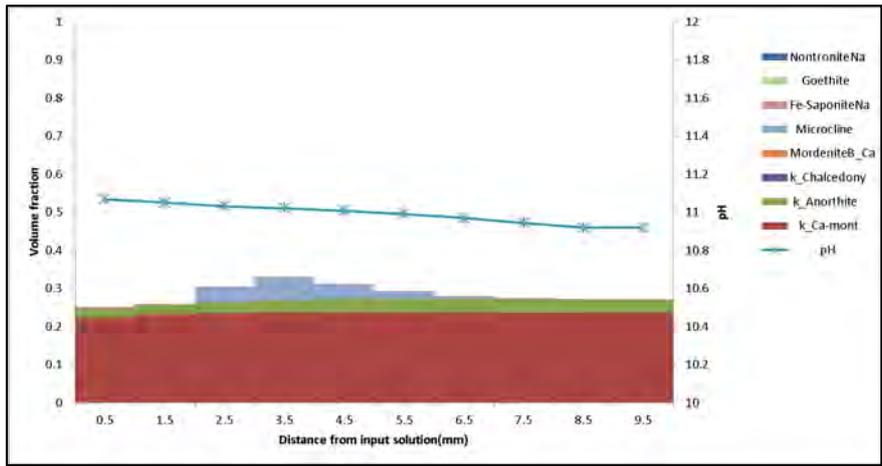


図 4.3.1-1 Case1 : 5年後におけるベントナイト中の鉱物空間分布

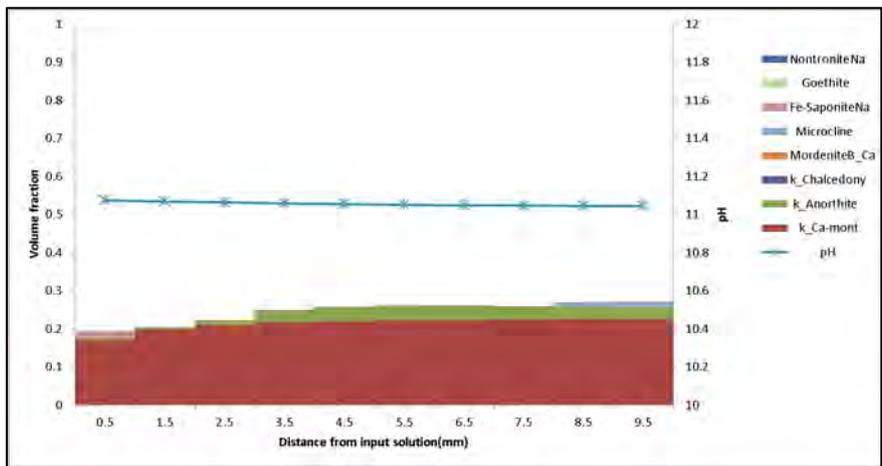


図 4.3.1-2 Case1 : 20年後におけるベントナイト中の鉱物空間分布

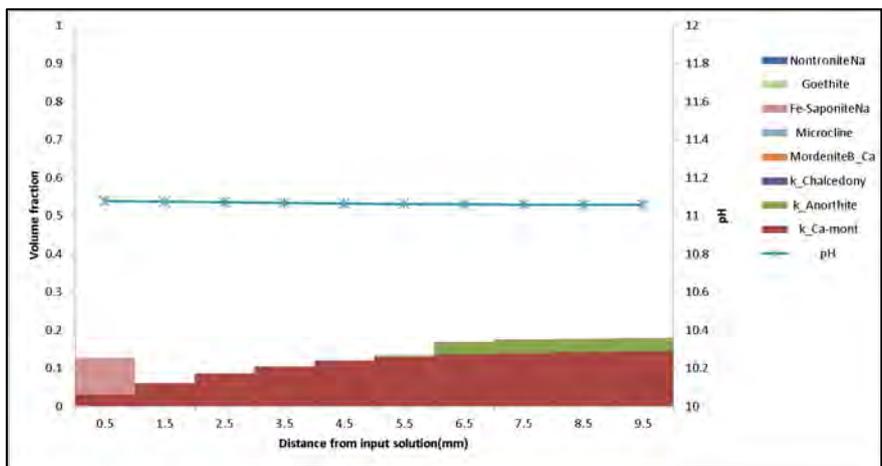


図 4.3.1-3 Case1 : 80年後におけるベントナイト中の鉱物空間分布

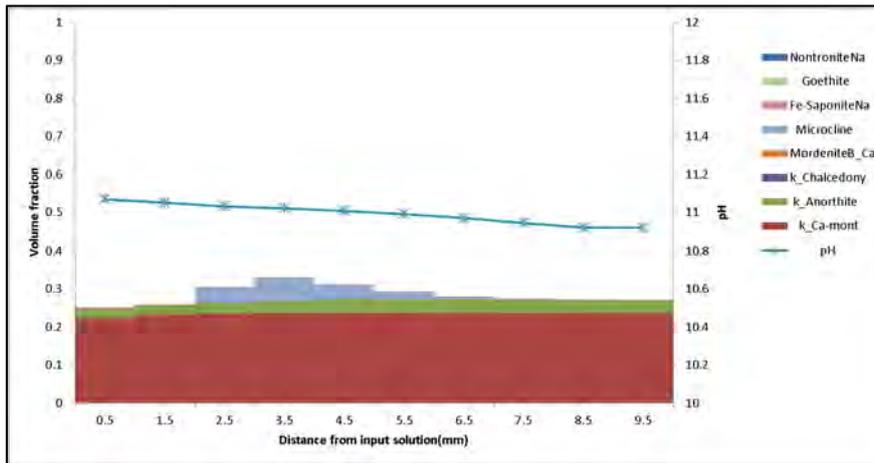


図 4.3.1-4 Case2 : 5 年後におけるベントナイト中の鉱物空間分布

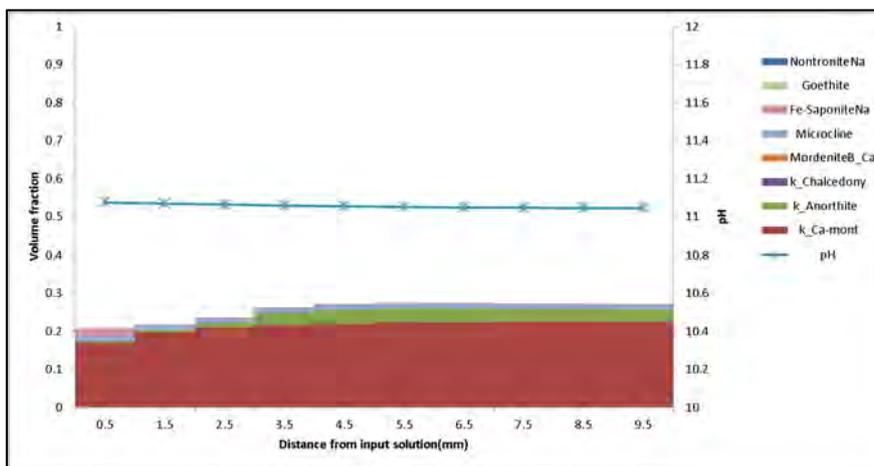


図 4.3.1-5 Case2 : 20 年後におけるベントナイト中の鉱物空間分布

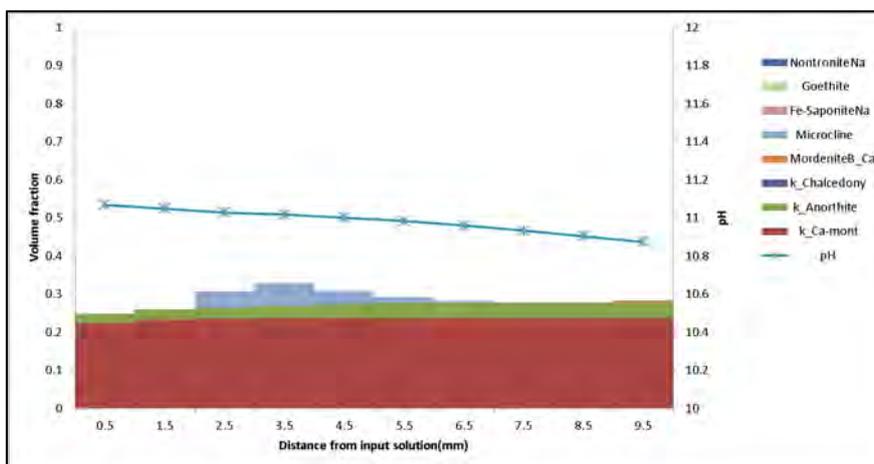


図 4.3.1-6 Case3 : 5 年後におけるベントナイト中の鉱物空間分布

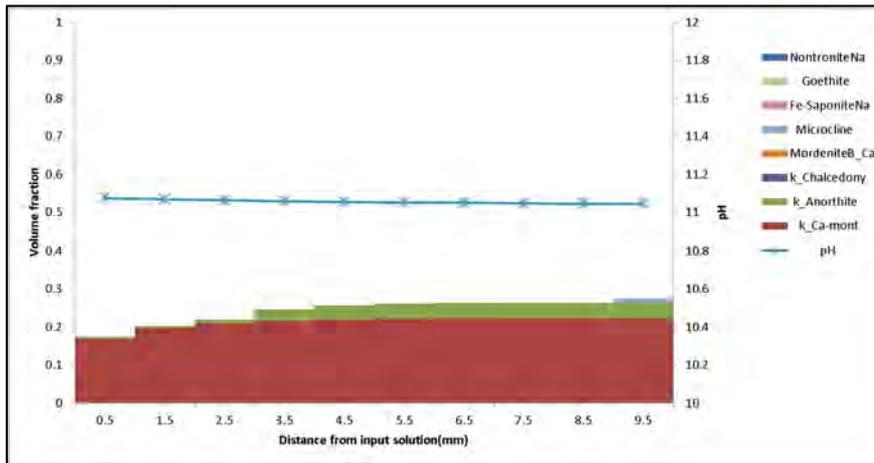


図 4.3.1-7 Case3 : 20 年後におけるベントナイト中の鉱物空間分布

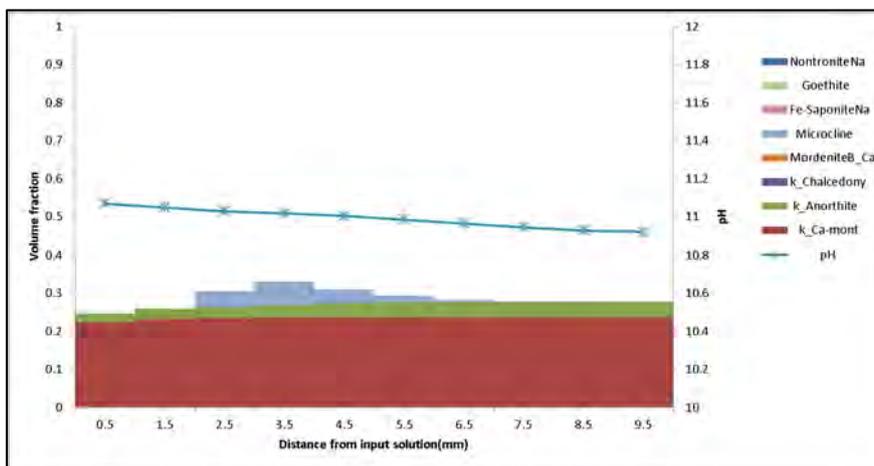


図 4.3.1-8 Case4 : 5 年後におけるベントナイト中の鉱物空間分布

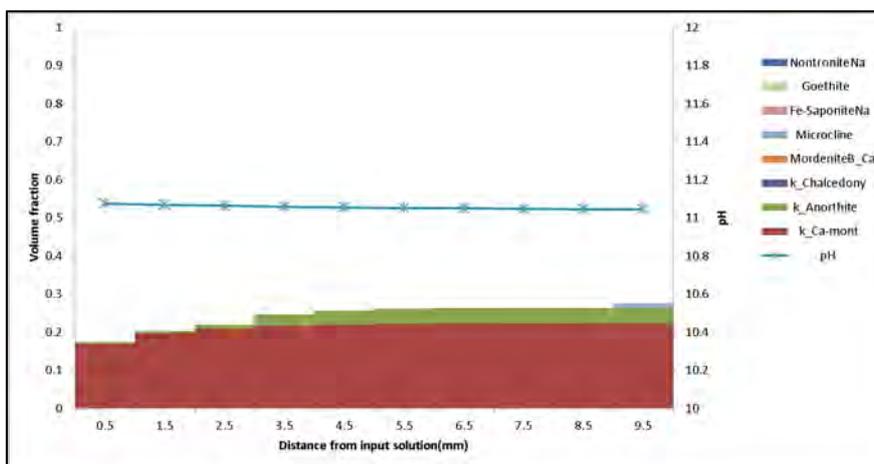


図 4.3.1-9 Case4 : 20 年後におけるベントナイト中の鉱物空間分布

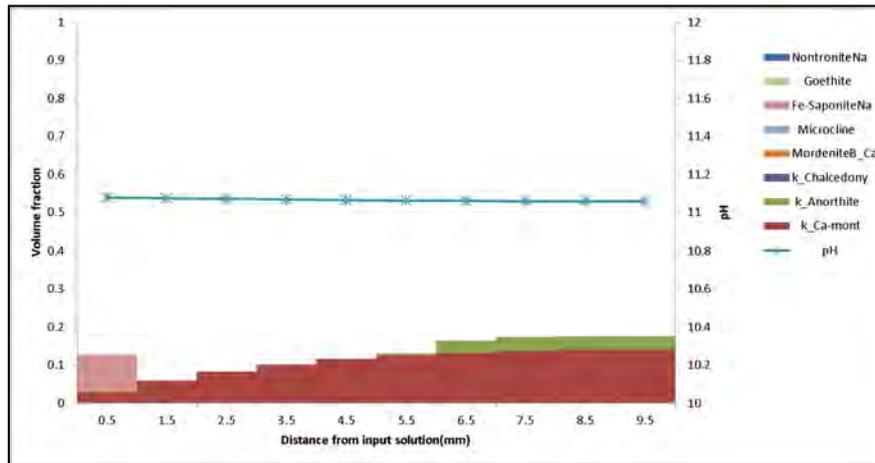


図 4.3.1-10 Case1 : 100 年後におけるベントナイト中の鉱物空間分布

4.3.2 Case 5- Case 8

図 4.3.2-1～図 4.3.2-8 に Case 5- Case 8 におけるベントナイト中の鉱物空間分布の解析結果を示す。Case5、Case6 では開始 5 年後にベントナイト全域においてモルデン沸石、玉髄のほとんどが溶解し、入水側 4.0mm から 6.0 mm の区間ではカリ長石の生成を確認した (図 4.3.2-1、図 4.3.2-3)。また二次鉱物として Fe サポナイトが入水側 0 から 0.5 mm の区間で大量に沈殿し、Case1、Case2 と大きく異なる結果となった。これはひとえに、インプット溶液の溶存鉄濃度の違いによるものである。

反応開始 20 年後には初期鉱物であるモルデン沸石、玉髄は全て溶解し、二次鉱物として Fe サポナイトが入水側 0 から 0.5 mm の区間で沈殿し、空隙をクロッキングしている (図 4.3.2-2、図 4.3.2-4)。実際の界面試料では、界面で生成する鉄サポナイトでクロッキングするような事実は認められていないが、これは鉄サポナイトの生成を平衡論的に取り扱っているためと考える。また、上述のように鉄サポナイトの生成が入水側で確認されている場合は、酸化帯を設定しても既に溶存鉄が消費されているために、針鉄鉱によるクロッキングは観察されなかった。

Case7、Case8 では開始 5 年後にベントナイト全域においてモルデン沸石、玉髄のほとんどが溶解し、入水側 4.0mm から 6.0 mm の区間ではカリ長石の生成を確認した (図 4.3.2-5、図 4.3.2-7)。また、酸化還元電位が変化して酸化帯を設定したケース (Case8) では、3.2 年後に全て針鉄鉱の沈殿で空隙が充填されクロッキングすることが確認された。これはインプット溶液として溶液 1 を入力したケースと大きく異なり、溶存鉄濃度の差によるものと推察される (図 4.3.2-9)。

反応開始 20 年後には初期鉱物であるモルデン沸石、玉髄は全て溶解し、鉄鉱物の沈殿は認められなかった (図 4.3.2-6、図 4.3.2-8)。20 年後のベントナイトの間隙水の pH は位置に依らず、11.4 程度を示した。

Case5、Case6 のモンモリロナイトの溶解量は Input 側で 1.12%、Output 側で 58.2% 残存した。Case7、Case8 のモンモリロナイトの溶解量は Input 側で 1.22%、Output 側で 59.1% 残存した。

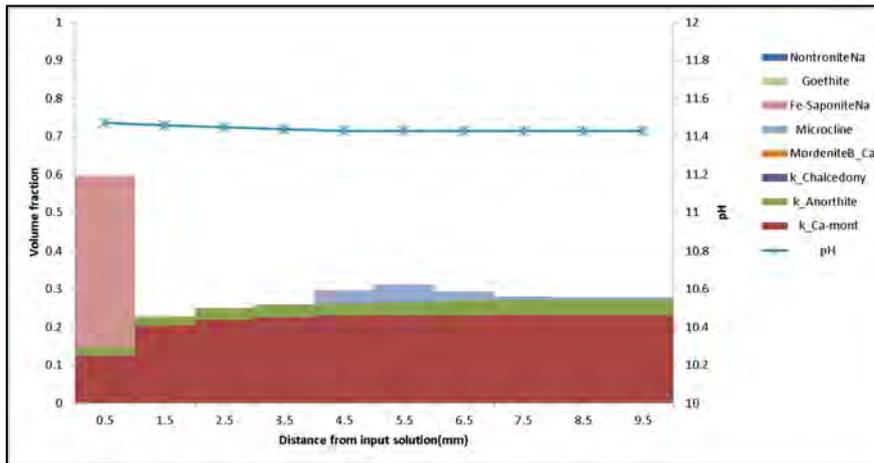


図 4.3.2-1 Case5 : 5年後におけるベントナイト中の鉱物空間分布

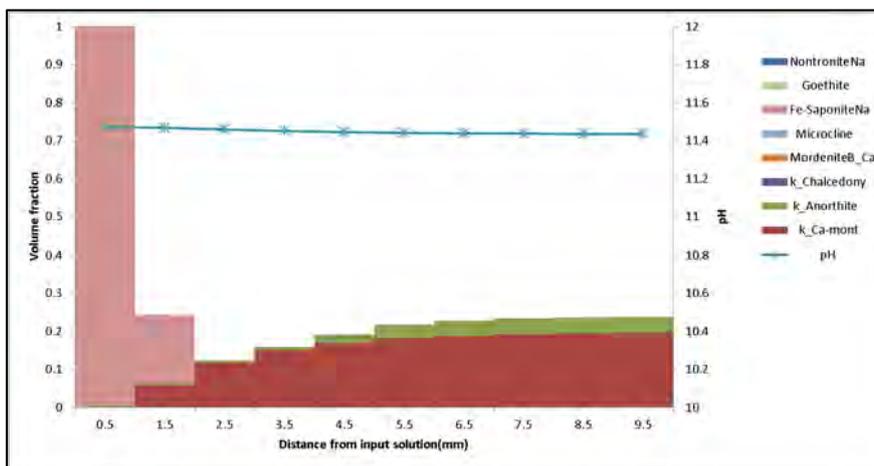


図 4.3.2-2 Case5 : 20年後におけるベントナイト中の鉱物空間分布

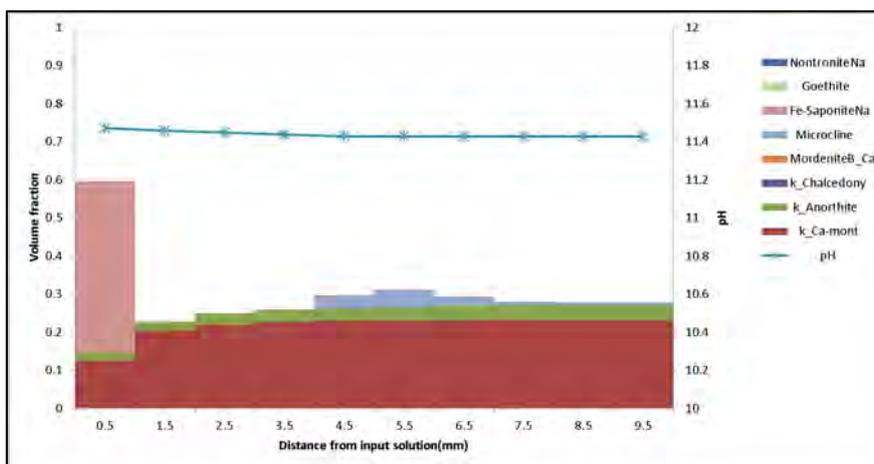


図 4.3.2-3 Case6 : 5年後におけるベントナイト中の鉱物空間分布

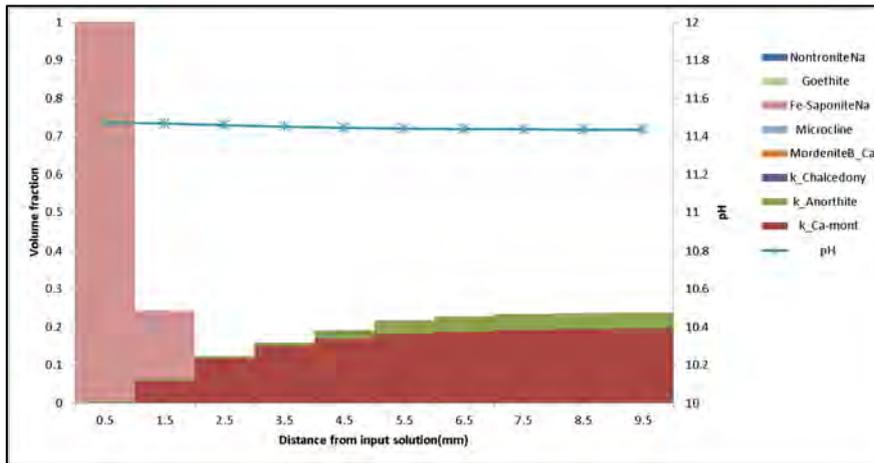


図 4.3.2-4 Case6 : 20 年後におけるベントナイト中の鉱物空間分布

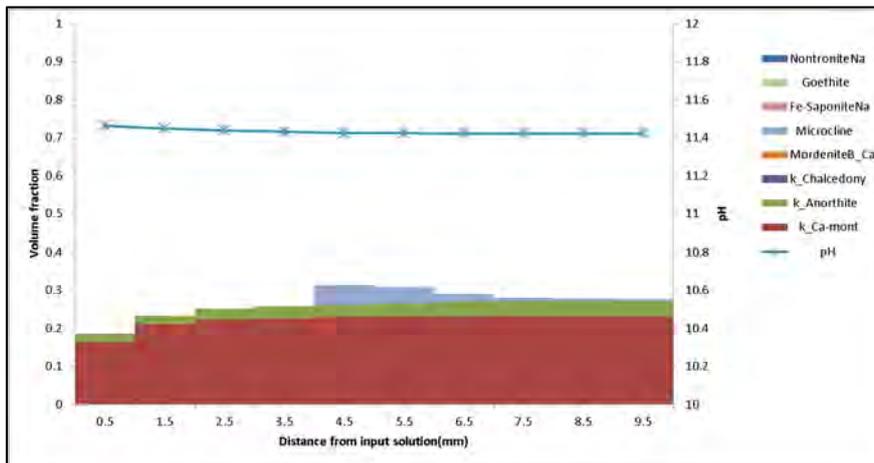


図 4.3.2-5 Case7 : 5 年後におけるベントナイト中の鉱物空間分布

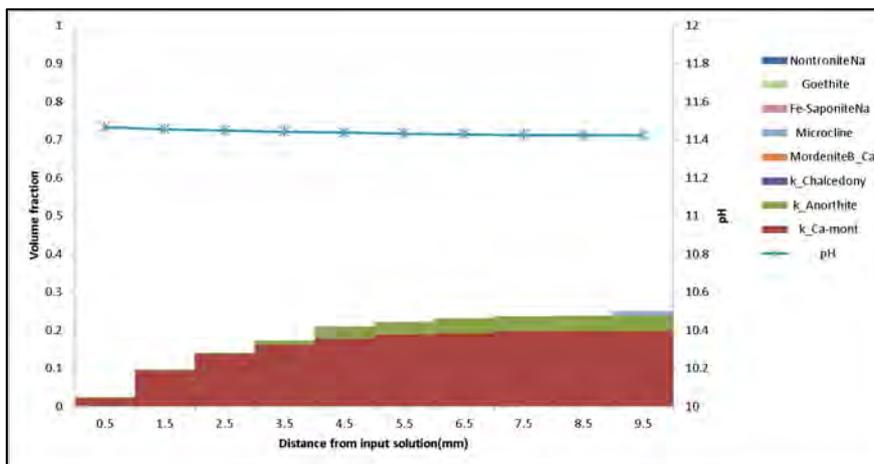


図 4.3.2-6 Case7 : 20 年後におけるベントナイト中の鉱物空間分布

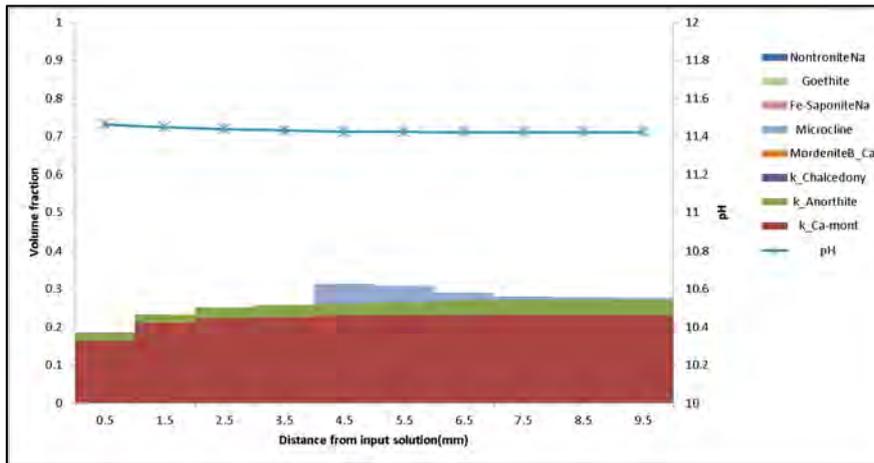


図 4.3.2-7 Case8 : 5年後におけるベントナイト中の鉱物空間分布

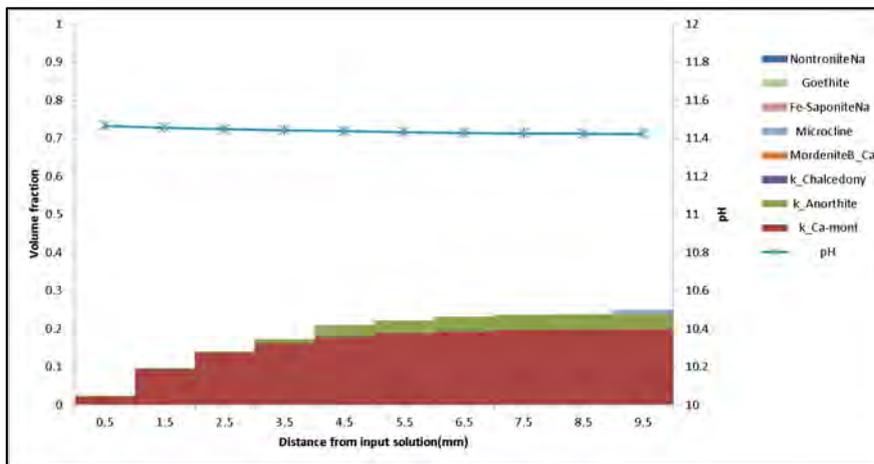


図 4.3.2-8 Case8 : 20年後におけるベントナイト中の鉱物空間分布

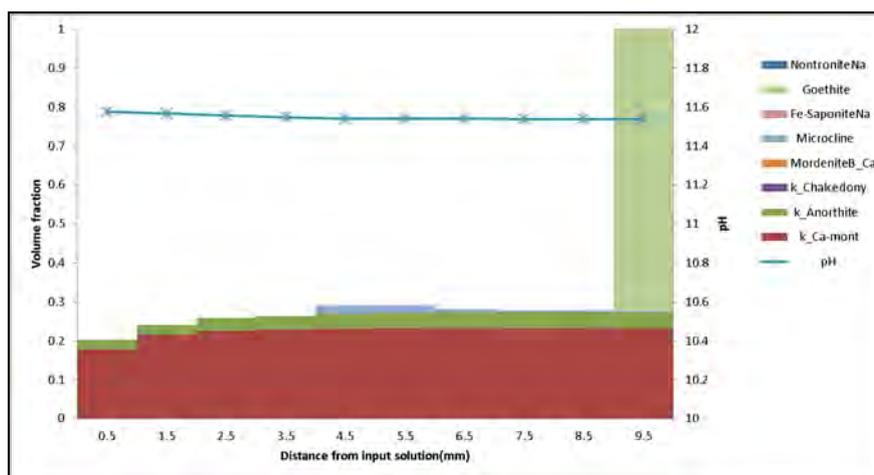


図 4.3.2-9 Case8 : 3.2年後におけるベントナイト中の鉱物空間分布 (酸化帯で継続的に鉄が濃集した場合)

4.3.3 Case9-Case 10

図 4.3.3-1～図 4.3.3-4 に Case9、Case 10 におけるベントナイト中の鉱物空間分布の解析結果を示す。Case9 では反応開始 5 年後にはベントナイト全域においてモンモリロナイト、灰長石、モルデン沸石が全体的に残存し、玉髄は入水側 9.0mm のセル以外でそのほとんどが溶解していた（図 4.3.3-1）。また入水側 3.0mm から 5.0 mm の区間ではカリ長石の生成を確認した。また、どちらのケースにおいても設定した酸化帯では針鉄鉱の沈殿で空隙が充填されクロッキングされていることが確認された。

反応開始 20 年後には初期鉱物であるモルデン沸石、玉髄は全て溶解し、二次鉱物として生成していたカリ長石は残存した（図 4.3.3-2）。

Case10 では反応開始 5 年間でカリ長石の生成と溶解を確認し、ベントナイト全域においてモルデン沸石、玉髄のほとんどが溶解した（図 4.3.3-3）。

反応開始 20 年後には初期鉱物であるモルデン沸石、玉髄は全て溶解し、二次鉱物は確認できなかった（図 4.3.3-4）。

Case9、Case10 のいずれにおいても 20 年後のベントナイトの間隙水の pH は位置に依らず 11.4 程度を示した。

モンモリロナイトの溶解量は Case9 では Input 側で 22.5%、Output 側で 89.3%残存し、Case10 では Input 側で 3.40%、Output 側で 70.4%残存した。したがって、ミキシングセルの大きさはベントナイト中のモンモリロナイト残存量に大きく影響していることが明らかとなった。

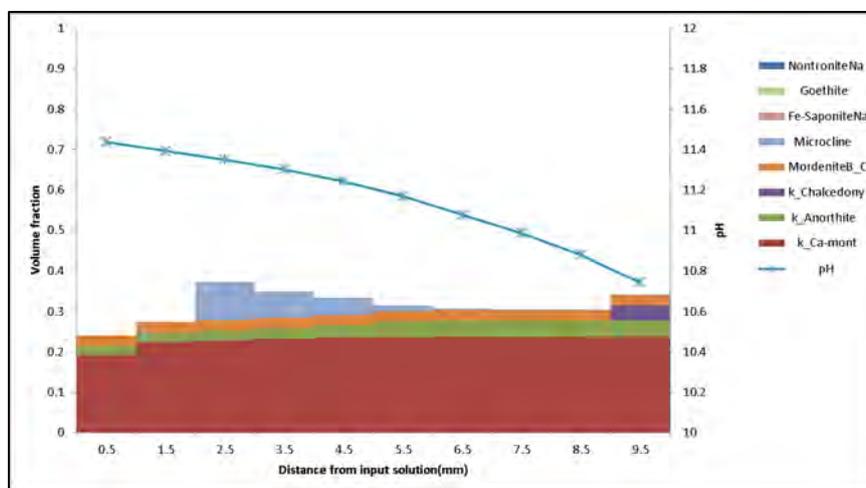


図 4.3.3-1 Case9 : 5 年後におけるベントナイト中の鉱物空間分布

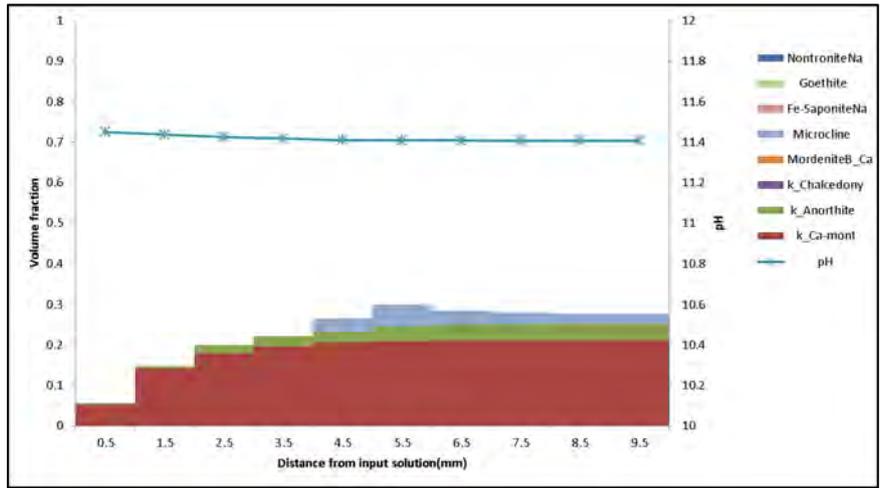


図 4.3.3-2 Case9 : 20 年後におけるベントナイト中の鉱物空間分布

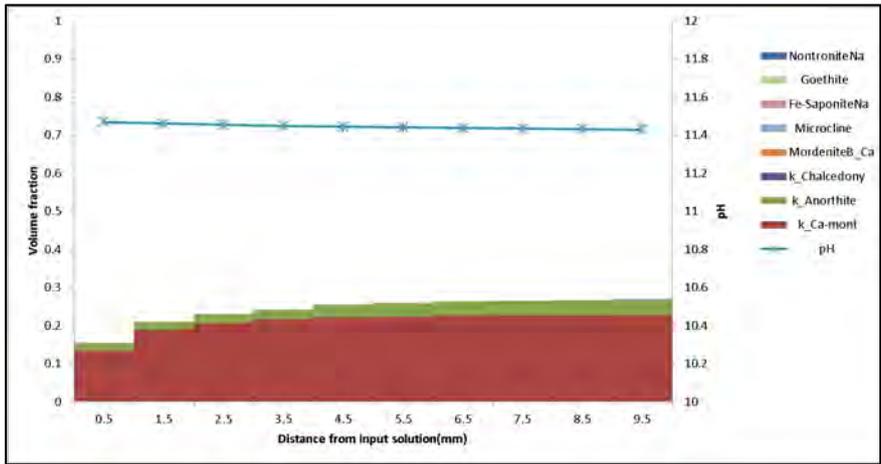


図 4.3.3-3 Case10 : 5 年後におけるベントナイト中の鉱物空間分布

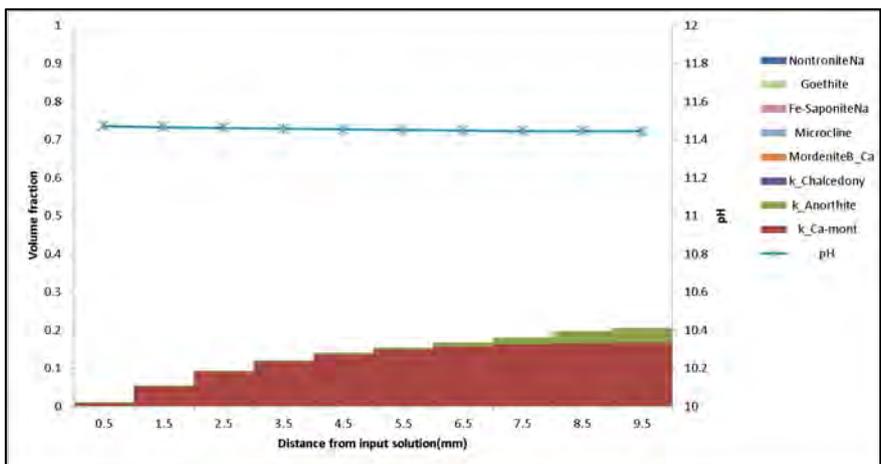


図 4.3.3-4 Case10 : 20 年後におけるベントナイト中の鉱物空間分布

4.3.4 Case11-Case 12

Case 11 では5年経過した時点でカリ長石が生成し、その後カリ長石が溶解した後に灰長石、スメクタイトの溶解が続いた(図 4.3.4-1)。Case12 では、5年経過した時点でノントロナイトが大量に沈殿したのを確認し(図 4.3.4-2)、10年後にはノントロナイトは完全に溶解していた(図 4.3.4-3)。

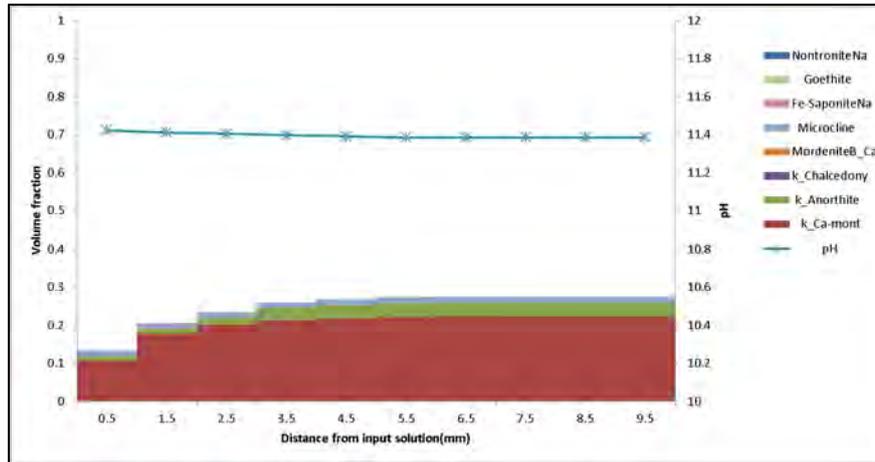


図 4.3.4-1 Case11 : 5年後におけるベントナイト中の鉱物空間分布

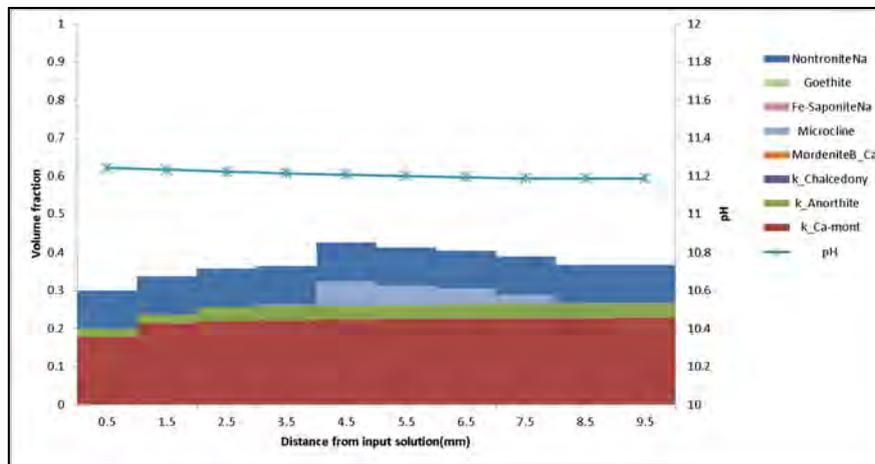


図 4.3.4-2 Case12 : 5年後におけるベントナイト中の鉱物空間分布

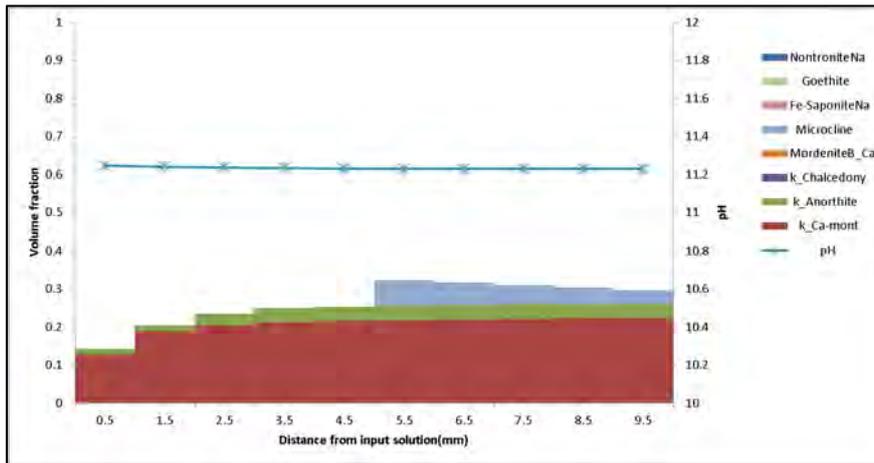


図 4.3.4-3 Case12 : 10 年後におけるベントナイト中の鉱物空間分布

4.4 解析結果の考察と地球化学モデルの課題

4.4.1 鉄鉱物およびカリ長石の生成

実際の界面試料では、変質ベントナイト層で一次鉱物として入っていたモンモリロナイトが溶解し、鉄サポナイトの生成が認められている。また、酸化帯では鉄(III)の珪酸塩であるノントロナイトと針鉄鉱の生成が認められ、この二次的に生成する針鉄鉱によりベントナイトの空隙は充填されていた。上述の鉄鉱物の生成のためには、地表で採取して分析した Manleluag 温泉水中の溶存鉄濃度では不十分で、カンラン岩の水和溶解反応による溶存鉄濃度程度が必要であることも明らかとなった。ただし、溶存鉄濃度が十分にあれば、変質ベントナイト内で確認された鉄サポナイトの生成は再現可能であるが、その生成を平衡論的に取り扱うとその生成に溶存鉄は消費されてしまい、下流側で確認されているノントロナイトや針鉄鉱は飽和に達しないために沈殿しないことになってしまう。鉄サポナイトの生成を速度論的に取り扱うことによって、その両者の共存が表現できるものとする。

また、実際の界面試料では、変質ベントナイト帯にカリ長石の生成が認められている。この生成は、界面付近でモンモリロナイトが溶解して低密度になっていることと合わせて、界面付近で高アルカリ溶液とベントナイトが反応した証拠となっている。このカリ長石の生成はどの解析ケースでも認められていることから、高アルカリ溶液による初期含有鉱物の溶解によって規定されているものと推察される。

4.4.2 モンモリロナイトの溶解速度

今回、モンモリロナイトの溶解は速度論的に取り扱い、最新の知見を踏まえて Sato や小田の溶解速度式を組み合わせて評価した。ただし、これらは分散系で求められたもので、圧縮系では溶解速度は二桁程度遅延され、モンモリロナイトの有効反応表面積を変えるなどして実験結果を再現する必要があることが指摘されている[24]。しかし、今回は有効反応表面積として用いたのはクニゲル V1 中に含まれるモンモリロナイトの端面積を入力しているため、地質学的時間に比べて比較的早くモンモリロナイトが溶解する結果となっている。ただし、モンモリロナイトの溶解速度に関しては、上述のように圧縮系では数桁異なることが報告されているので、モンモリロナイトの溶解速度を遅延させるためのパラメータ設定の条件は今後検討することが可能である。

一方、今回の解析結果では、長期における拡散速度を支配するミキシングセル (Reservoir) サイズの大きさも変動パラメータとして取り扱い、それぞれで得られた解析結果の比較を行なった。その結果、一番顕著な違いは Input 側 1mm-5mm におけるスメクタイトの溶解量であった。特に input 側 1mm のセルのスメクタイト残存量は Case9、Case10 でそれぞれ 22.5%、3.40%で大きく異なっていた。この結果により Reservoir サイズの違いがスメクタイトの溶解に与える影響は大きく、今回の Case10 の結果ではカリ長石の溶解が 20 年で生じてしまっていることを考えると、Case10 より Case9 の Reservoir サイズが小さな Input 溶液の方が界面における反応に近いことが推定されるが、Reservoir サイズの天然現象での適用については、さらに詳細に検討すべきである。

[参考文献]

- [1] (公財) 原子力環境整備促進・資金管理センター: 平成 24 年度放射性廃棄物共通技術調査等事業 放射性廃棄物重要基礎技術研究調査 報告書 (第 3 分冊) (2013).
- [2] 秋田奈生子: オマーンオフィオライトに湧出する高アルカリ泉と沈殿物の地球化学. 金沢大学修士論文, 110 (2002).
- [3] 松影香子・荒井章司: オマーンオフィオライトのマントル～モホ遷移帯の火成岩岩石学. 月刊地球, 21(6), 339-344 (1999).
- [4] 松影香子・荒井章司: オマーンオフィオライトのマントル～モホ遷移帯の火成岩岩石学. 月刊地球, 21(6), 339-344 (1999).
- [5] Parkhurst, D.L. and Appelo, C.A.J.: User's guide to PHREEQC (version 2)-a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. USGS Water-resour. Inv. Rep., 99-4259 (1999).
- [6] Mihara, M. and Sasaki, R.: RAMDA; Radio-nuclides Migration Datasets (RAMDA) on cement, bentonite and rock for TRU waste repository in Japan. JNC TN8400 2005-027 (2005).
- [7] Blanc, P. and Galihnou, H.: Thermochimie: Estimation des entropies, capacités calorifiques et volumes molaires des phyllosilicates deshydrates et hydrates, Rapport final. Rapport BRGM/RP-55966-FR (2007).
- [8] Sato, T., Otani, Y., Takayama, H., Yokoyama, S., Oda, C., Honda, A., Yoneda, T.: Effect of deviation from equilibrium on dissolution rate of smectite under hyperalkaline condition. Proc. Int. Conf. Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement (2007).
- [9] 小田治恵, 本田明, 高瀬博康, 小曾根健嗣, 佐々木良一, 山口耕平, 佐藤努: セメント系材料由来のアルカリ性条件における緩衝材の鉱物学的変遷シナリオに基づく化学反応・物質移動連成解析. 粘土科学, 51(2), 34-49 (2012).
- [10] Yokoyama, S., Kuroda, M. and Sato, T.: Atomic force microscopy study of montmorillonite dissolution under highly alkaline conditions. Clays and Clay Minerals 53(2), 147-154 (2005).
- [11] Lasaga, A.C., Soler, J.M., Ganor, J., Burch, T.E. and Nagy, K.L.: Chemical-weathering rate laws and global geochemical cycles. Geochimica et Cosmochimica Acta 58, 2361-2386 (1994).
- [12] Palandri, J.L. and Kharaka, Y.K.: A compilation of rate parameters of water-mineral interaction kinetics for application to geochemical modeling. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report, 04-1068 (2004).
- [13] Chou, L. and Wollast, R.: Study of the weathering of albite at room-temperature and pressure with a fluidized-bed reactor. Geochimica et Cosmochimica Acta 48, 2205-2217 (1984).
- [14] Chou, L. and Wollast, R.: Steady-state kinetics and dissolution mechanisms of albite. American Journal of Science 285, 963-9938 (1985).
- [15] Burch, T.E., Nagy, K.L. and Lasaga, A.C.: Free-energy dependence of albite dissolution Kinetics at 80°C and pH 8.8. Chemical Geology 105, 137-162 (1993).
- [16] Hellmann, R.: The albite-water system: Part I. The kinetics of dissolution as a function of pH at 100, 200, and 300°C. Geochimica et Cosmochimica Acta 58, 595-611 (1994).
- [17] Knauss, K.G. and Copenhaver, S.A.: The effect of malonate on the dissolution kinetics of albite, quartz, and microcline as a function of pH at 70°C. Applied Geochemistry 10, 17-33 (1995).
- [18] Alekseyev, V.A., Medvedeva, L.S., Prisyagina, N.I., Meshalkin, S.S. and Balabin, A.I.: Change in the dissolution rates of alkali feldspars as a result of secondary mineral precipitation and approach to equilibrium. Geochimica et Cosmochimica Acta 61, 1125-1142 (1997).
- [19] Hellmann, R. and Tisserand, D.: Dissolution kinetics as a function of the Gibbs free energy of reaction: An experimental study based on albite feldspar. Geochimica et Cosmochimica Acta 70, 364-383 (2006).
- [20] Savage, D., Noy, D. and Mihara, M.: Modelling the interaction of bentonite with hyperalkaline fluids. Applied Geochemistry 17(3), 207-223 (2002).

-
- [21] Inskeep, W.P. and Bloom, P.R.: An evaluation of rate equations for calcite precipitation kinetics at $p\text{CO}_2$ less than 0.01 atm and pH greater than 8. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 49, 2165-2180 (1985).
- [22] Lioliou, M.G., Paraskeva, C.A., Koutsoukos, P.G. and Payatakes, A.C.: Heterogeneous nucleation and growth of calcium carbonate on calcite and quartz. *Journal of Colloid and Interface Science* 308, 421 -428 (2007).
- [23] Watson, C., Hane, K., Savage, D., Benbow, S., Cuevas, J. and Fernandez, R.: Reaction and diffusion of cementitious water in bentonite: Results of 'blind' modeling. *Applied Clay Science* 45, 54-69 (2009).
- [24] 中林亮, 木嶋達也, 塚田康元, 佐藤努, 大竹翼, 金子勝比古, 米田哲朗: 高アルカリ環境における圧縮ベントナイト中のシリカ鉱物の溶解 - X 線 CT 観察および地球化学モデリングによる定量的評価. *粘土科学*, 52(1), 9-22 (2013).

第5章 まとめ

5.1 今年度の調査結果のまとめ

本事業で実施したフィリピン国ルソン島北西部におけるナチュラルアナログは、今後実際に処分事業を進めて行くに当たり、基礎的かつ学際的な知見として処分事業の進捗に貢献し得る諸分野の広範な研究テーマの内、重要な基礎テーマを対象に、大学等の基礎的研究機関等と連携して取り組んでいくことにより、所要の基盤技術を確立することとあわせ、研究成果や収集した情報について広く提供を行い、情報の共有化、知識の普及を図るために、平成 19 年度より「放射性廃棄物重要基礎技術研究調査」の一テーマとして開始された。

ここでナチュラルアナログの対象としているセメントーベントナイト相互作用は、HLW にくらべ多くのセメント材を使用する TRU 廃棄物の地層処分において重要な問題であると位置づけられていることから、今年度より「TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発」において、TRU 廃棄物処分における人工バリア性能評価に係るセメント系材料の影響による人工バリア（ベントナイト）の長期健全性について、ナチュラルアナログ調査を実施することで、アルカリ-緩衝材反応による緩衝材の長期変遷に関する直接的な根拠となるデータを取得し、それらフィールドデータと解析モデルを活用したアルカリ変質現象の解釈に基づき、その長期挙動評価の信頼性向上を図ることを目的として実施した。

今年度は、ナチュラルアナログ調査として、①実施計画策定、②ナチュラルアナログサイトの探査、③年代測定による反応時間の評価、④地球化学シミュレーションモデルによる変質解析、について検討した。以下にその成果をまとめる。

①実施計画策定

平成 24 年度までの過去にアルカリ地下水と接触していた Fossil Type のナチュラルアナログの調査結果を踏まえ、フィリピンルソン島北西部の特に現在もベントナイトとアルカリ地下水が接触している Active Type の調査サイトを対象とした、平成 25 年から 5 年間のナチュラルアナログ調査の全体計画を策定した上で、平成 25 年度の実施計画ならびにフィールド調査計画を作成した。

②ナチュラルアナログサイトの探査

今年度の現地調査では、裂か地下水としての高アルカリ地下水の賦存状況と流路となる流動系の分布特性を明らかにすることに主眼を置き、Active Type のナチュラルアナログの候補地としてフィリピン国ルソン島北西部の Bigbigat 地区を対象として、地上物理探査から始まり、地下水の地球化学的調査（計測）、トレンチ調査を経て、それらの一連の調査データ・知見などの総合解析により試錐サイトを選定した後、直接確認するための簡易構造試錐調査によるアルカリ裂か水の探査を実施した。

TEM 法（過渡現象電磁探査法）による地上物理探査により、Bigbiga 候補地区内でアルカリ地下水を湧水している井戸近傍の Aksitero 累層（堆積岩）中の浅層部と深層部であるオフィオリイ

ト岩盤岩中に電気伝導度のアノマリーが解析・検出された。合わせて、Well-1 の賦存状況を解析・評価した。これらの結果から、①Well-1 の近傍 (DH08) と、②アノマリーの東限 (測定グリット内の東端ループ計測点) の地点 (DH09) の 2 サイトを試錐地点として選定した。

トレンチ調査では、Zambales オフィオライト基盤岩まで掘削深度が達しなかったが、Bigbiga 地区に分布する Aksitero 累層の優勢な堆積岩である石灰岩質泥岩～砂岩の一部に薄層 (4～5cm 程度) のベントナイト質の凝灰岩質砂岩が層理面に平行に挟在すること、また、Bigbiga 地区に特徴的な分布をする珩質泥岩 (またはポーセラナイト：チャートより緻密ではなく、少量であるが一部不純物として粘土鉱物を含有する) が塊状に産状することが確認できた。トレンチの試料はいずれもケイ酸塩鉱物を主成分とし、壁面から採取したベントナイト質凝灰岩質砂岩の薄層を挟在する石灰岩質泥岩～砂岩の化学組成全般については、 SiO_2 と Al_2O_3 成分の間には僅かであるが反比例的な変化が認められる。これはモンモリロナイトのモード組成に反映しているものと考えられる。

試錐調査では、DH08 の掘削において、掘削深度が 15m を超えるあたりからアルカリ地下水の自噴が観測され、オフィオライト基盤岩中の断裂系を流路として上昇しているアルカリ地下水 (掘削水の混入した試錐孔内での pH 計測値：22m 深度-pH9.16 / 39m 深度-pH8.91) がベントナイト質砂岩または泥岩 (Aksitero 累層) と自破碎玄武岩質溶岩または細粒はんれい岩 (オフィオライトの上部を構成する火成岩) に浸出していることを確認した。

試錐コアの観察及び鉱物・化学分析から以下のことが明らかになった。

Aksitero 累層を構成する堆積岩は典型的な遠洋性堆積物で、主に遠洋性浮遊性生物の遺骸から形成された石灰質砂岩～泥岩と石灰岩および、島弧火山活動により供給された火山碎屑性堆積物から構成され、しばしば凝灰岩質堆積物を挟在し、ベントナイトの初原物質 (出発物質) になっている。このような地質環境下のもと、下部層に斜長石や単斜輝石 (普通輝石) および、輝沸石と斜プロチロ沸石が集中する傾向がみられる。全体としては、石英、沸石 (モルデン沸石)、方解石、2-八面体スメクタイト、不透明鉱物では鉄鉱物として磁鉄鉱、鉄水酸化物、マンガン鉱物としてデントライト、水マンガン鉱、硫化鉱物として極少量の黄鉄鉱、そして火山ガラスが同定されている。これらの鉱物の中で、二次鉱物は、沸石類、Fe-スメクタイト (ノントロナイト質スメクタイト)、Mn-rich 方解石と生物起源の方解石および、燐灰石である。

一方、基盤岩であるオフィオライトは、上位から自破碎玄武岩質溶岩～少量の枕状玄武岩～細粒はんれい岩と、これらの塩基性火成岩へ貫入した細粒輝緑岩の岩脈が観察される。しかし、一般的に変質作用によりこれらの塩基性岩のそれぞれの境界が不明瞭な場合が多く、特に深度 25m から 34m 間に変質程度が顕著である。それは恐らく、アルカリ地下水との変質反応が進展したものと示唆される。

Zambales オフィオライトの鉱物学的特性については、初生鉱物である苦鉄質鉱物が班晶として少量のかんらん石、単斜輝石 (透輝石から普通輝石) と斜方輝石 (紫蘇輝石) および、珩長質鉱物としては斜長石、少量のシリカ鉱物と不透明鉱物 (磁鉄鉱、少量の黄鉄鉱とマンガナイト・デントライト) などから構成されている。全体としては班晶が少なく、組織はサブオフィテックである。

一方、変質鉱物としては、粘土鉱物 (モンモリロナイト)、沸石類 (モルデン沸石、輝沸石、斜

プチロ沸石など)、炭酸塩鉱物(方解石)などから構成されている。

肉眼観察によるコア柱状図から、上位のパミス(軽石)質シルト岩と基盤岩直上の赤色粘土岩はベントナイト質である。それは両者ともベントナイトの主要な初原物質である凝灰岩質の岩相・岩質を示すからである。特に、下位の赤色粘土岩が、苦鉄質鉱物の輝石類(単斜輝石と斜方輝石)から構成される玄武岩質の火山砕屑性堆積物を含有し、上位のパミス質シルト岩は安山岩質の火山砕屑性堆積物を含有していることが示唆される。これはフィリピンの弧状列島発達段階における島弧火山の活動に深く関与しており、初期の火山活動が塩基性(玄武岩質溶岩)から徐々に中性(安山岩質溶岩)にそのマグマ組成を変化する特徴を示すためである。

この事実から、下位の赤色粘土岩が初期の玄武岩質の火山活動に、上位のパミス質シルト岩は恐らく中期の安山岩質の火山活動により供給され、その後、海底に堆積した火山砕屑性堆積物を起源とすることと整合的である。さらに、赤色粘土岩の苦鉄質鉱物の比重が他の鉱物より大きいことから、重力効果により深部へ堆積したと考えられる。また、下位の赤色粘土岩の方が、XRD回折強度が強いことから、モンモリロナイトの含有量が多いと考えられる。これらの鉱物組み合わせから、Saile 鉱山のものと比較して有意義な差異はないものと考えられる。

従って、ベントナイト質砂岩～粘土岩の形成(堆積)には、凝灰岩質という岩質、堆積環境と続成過程としての深度・オストワルド熟成時間が支配的な要素になっていると考えられる。また、局所的ではあるがしばしば層理面に沿って数センチメートル程度の薄層のベントナイト質の砂岩や泥岩が観察される。

アルカリ地下水の地球化学的特性については、Bigbiga 地区のアルカリ地下水が他の Zambales オフィオライト地域のアルカリ地下水に比べて、pH が低い、ORP が高い、低 Ca 濃度、高 Mg 濃度という特性は、地下水-岩石(超塩基性岩、玄武岩)との反応の程度が小さく、滞留時間が短いためと考えられる。また、Fe、Mn、微量元素(重金属、REE、Ba、Sr、Cs)濃度が高いのは、Fe、Mn 水酸化物と炭酸塩粒子の存在が示唆される。

水理地質構造学的挙動については、自噴する既存井戸水(Well-1)の流量は、四季の降雨量に顕著な影響を受けないことから、このアルカリ地下水は、一般的な涵養・蒸発・浸透過程から考えると、ベントナイトを不透水層として被圧地下水(帯水層)として独立した流動場のもと賦存しているものと考えられる。また、DH08 のアルカリ地下水は、その自噴深度(22.7m)がオフィオライト基盤岩中に賦存し、この基盤岩中の断裂系を流路として上昇した裂か水であること、また、アルカリ裂か水が、深度約 22m 付近で滞留(貯留)・流動する独立系の水理場と流動系を形成したと思われる要因として、岩脈の貫入の役割が考えられる。それは、元来流動場であった変質自破砕または枕状玄武岩への後期火成岩(細粒輝緑岩または、細粒はんれい岩)の貫入活動(火成活動)により、空間の場の提供を図り、その結果明瞭な水路を形成し、その水路を流動系としたと考えられる。そして、この岩脈は、緻密な岩相・岩質のために「Cap Rock」の役目で不透水層(バリア)として機能したものと考えられる。

また、オフィオライトのアルカリ変質反応による変質鉱物形成の地球化学的プロセスが観察され、玄武岩質ガラスと少量ではあるが班晶として斜長石から構成されている自破砕玄武岩質溶岩(Zambales Ophiolite)とアルカリ地下水との変質反応により、アルカリ変質鉱物としては、モンモリロナイト、沸石類、シリカ鉱物、方解石などが同定されたが、アルカリ変質反応生成物の

示準鉱物であるカリ長石は同定されなかった。特に興味深いのは、玄武岩質溶岩中の前駆物質のアルカリ変質反応の出発物質がモンモリロナイトであることである。この事実から、この変質反応の地球化学的プロセスはベントナイトのアルカリ変質反応による鉱物学的・鉱物化学的アナログとして取り扱うことが出来る。解析結果から、オフィオライトの前駆物質（玄武岩質ガラス、斜長石、パミスなど）のアルカリ変質反応による変質反応生成物の形成に係る地球化学的プロセスは、①Ca-モンモリロナイトと②K-モンモリロナイトを出発物質として形成され、その後のアルカリ地下水（溶液）との変質反応により、Ca-Na-K 沸石として、(i) フィリップサイトと斜プチロル沸石系列と、(ii) 輝沸石とフィリップサイト系列の形成が考えられる。この差異は原岩の鉱物組成・バルク組成とその反応時の地下水の組成、pH、温度および、滞留時間（接触時間）などに依存するものと考えられる。

③年代測定による反応時間の評価

断裂系充填物に含まれる炭酸塩鉱物（方解石）は高アルカリ地下水が閉塞される最終期に CO₂ に接して形成したと考えられることから、方解石の生成年代から高アルカリ地下水の閉塞時期を推定するために、炭酸塩鉱物の熱ルミネッセンス（TL）特性（炭酸塩の化学組成と発光特性の関連、放射線種による発光特性）の基礎実験を実施して把握した上で、蓄積線量を評価式を最適化し、Bigbica 地区で採取した炭酸塩の年代測定について検討した。

炭酸塩鉱物の化学組成と発行特性については、発光量増加に相関を示す元素はまだ特定できないが、Fe が低ければ発光量が多くなる傾向がある。一方、Mn、Mg、Sr 濃度が少ないほどピーク数は増える傾向がある。また、合成炭酸塩のピークは低く、菱苦土鉱は高いことから、Mg 濃度も注目する必要があるかもしれない。

α, β, γ 線それぞれの照射実験を行い、X 線熱ルミネッセンスを基準とした発光感度を評価し、X 線ルミネッセンスに対する α, β, γ 線それぞれのルミネッセンスの感度率 (a-x-value, b-x-value, c-x-value) を求めた。そして、得られた感度率を用いて、Bigbica の炭酸塩鉱物の TL 年代が 10ka から 500ka と評価され、本調査サイトの炭酸塩において TL 年代の適用可能性が確認できた。

④地球化学シミュレーションモデルによる変質解析

フィリピンの Saile 鉱山のトレンチで確認した、ベントナイトと枕状溶岩の接触部界面でのベントナイトのアルカリ変質にともなう鉱物組成の変化とそれによるクロッキングの影響について、地球化学計算コード PHREEQC による変質解析を行い検討した。

高アルカリ溶液の組成（Manleluag の実測値と雨水-カンラン岩の反応によるアルカリ溶液）、鉄鉱物の沈殿の有無、酸化還元電位の変化の有無、ミキシングセルの堆積量と鉄濃度の違いを考慮したケーススタディから、界面で観察された鉄鉱物の生成のためには、地表で採取して分析した Manleluag 温泉水中の溶存鉄濃度では不十分で、カンラン岩の水和溶解反応による溶存鉄濃度程度が必要であることも明らかとなった。ただし、溶存鉄濃度が十分にあれば、変質ベントナイト内で確認された鉄サポナイトの生成は再現可能であるが、その生成を平衡論的に取り扱ったとその生成に溶存鉄は消費されてしまい、下流側で確認されているノントロナイトやゲーサイトは飽和に達しないために沈殿しないことになってしまう。鉄サポナイトの生成を速度論的に取り扱う

ことによって、その両者の共存が表現できるものとする。

また、実際の界面試料では、変質ベントナイト帯にカリ長石の生成が認められている。この生成は、界面付近でモンモリロナイトが溶解して低密度になっていることと合わせて、界面付近で高アルカリ溶液とベントナイトが反応した証拠となっている。このカリ長石の生成はどの解析ケースでも認められていることから、高アルカリ溶液による初期含有鉱物の溶解によって規定されているものと推察される。

また、ミキシングセルの大きさが反応速度、特にモンモリロナイトの溶解速度に大きく影響することが確かめられ、天然現象での取り扱いについてさらに詳細に検討すべきであることが確認できた。

5.2 今後の課題

本事業の前半における主要な課題は、ナチュラルアナログサイトとして「Active Type」の露頭（アルカリ裂か水がベントナイト層に浸水しているコンタクト部位）を探索することである。そのための効率的な探索手法（実施内容）としては、アルカリ裂か水の賦存状況とその出来るだけ近傍のベントナイト層の胚胎状況を探索することが必要とされる。これらの目的のために、間接的ではあるが地上物理探査（TEM法）を実施・解析し、直接的な試錐調査を実施した。その結果、アルカリ地下水が自噴している既存井戸（pH 9.3）から南西約 11m 離れたサイトで堀削した DH08 試錐孔で、基盤岩である Zambales オフィオライト岩盤内でアルカリ裂か水（pH 9.1）が確認できた。

一方、ベントナイト層の胚胎状況については、Bigbiga 地区での被覆岩である Aksitero 堆積岩の石灰質泥岩～砂岩が優勢であるが、局所的ではあるが、層理面に平行な薄層として挟在し、岩質的には凝灰岩質として胚胎している。

なお、基盤岩近傍の淡赤色泥岩の構成鉱物から判断すると、その岩質・岩相が塩基性の火山碎屑性堆積岩の特徴を示すパミスを含む凝灰岩質質であることから、今後、詳細な岩石鉱物学的・鉱物化学的な検討が必要である。

また、アルカリ変質反応については、基盤岩である自破碎玄武岩質溶岩の石基（マトリックス：玄武岩質ガラス、斜長石など）のモンモリロナイト化が顕著で、これらが出発物質として Ca-モンモリロナイト、K-モンモリロナイトや一部ノントロナイト質スメクタイトおよび、沸石化（斜プチロル沸石、輝沸石、フィリップサイト）が観察された。しかし、アルカリ変質反応生成物の典型的な準鉱物の一つであるカリ長石は同定できなかった。

これらの事実を踏まえ今後の課題としては、①pH の高い（pH 11 強）アルカリ裂か水、②このアルカリ裂か水が浸水しているベントナイト層のコンタクト部位の探索である。前者の高い pH の裂か水の探索には、アルカリ裂か水の形成に不可欠な Zambales オフィオライトの蛇紋岩化過程での水-岩石相互作用に必要な Mg-Ca に富む苦鉄質岩石の寄与が必要なために、Zambales オフィオライト核心部へのより深い深度（試錐深度）へのアプローチが必要になる。後者のベントナイト層（ベントナイト質堆積物）の探索については、塩基性火山碎屑物起源の淡赤色泥岩を含む凝灰岩質堆積物の胚胎層を追跡することが必要である。

さらに、ベントナイト層の胚胎状況と鉱物学的特性などを検討・評価するために、追加調査サイトとして、既存井戸（Well-1）の北約 5km にある旧鉱山跡（沸石-ベントナイト鉱床）周辺やアルカリ源泉（Manleluang 温泉保養施設）の近傍にルーフベンダント状に残存可能性のあるベントナイト層の地質（ベントナイト質堆積物の分布と岩質など）・地質構造（断裂系の分布と性状）・岩石鉱物学的特性（ベントナイトの鉱物学的特性）および、アルカリ地下水に伴うトラバーチン（石灰華）の分布と物理化学的パラメーター計測などの地球化学的調査と総合した調査・解析・評価が必要である。