

平成 27 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 28 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27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 27 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 27 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 27 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 27 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 27 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 27 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－ガス移行連成挙動評価手法の開発－

はじめに

長半減期低発熱放射性廃棄物（以下、TRU 廃棄物という。）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の改正により、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。

平成 27 年 5 月には、平成 26 年 4 月に閣議決定されたエネルギー基本計画や、同年 5 月に公表された放射性廃棄物 WG の「中間とりまとめ」を踏まえ、最終処分法に基づく基本方針の改定（閣議決定）が行われた。改定のポイントは、①現世代の責任と将来世代の選択可能性、②全国的な国民理解、地域理解の醸成、③国が前面に立った取組、④事業に貢献する地域に対する支援、⑤推進体制の改善等であり、特に、③国が前面に立った取組として、科学的有望地が提示されることで、今後処分地の選定プロセスが進むことが予想され、TRU 廃棄物特有の問題が地層処分の安全評価において大きな障壁とならないよう、技術開発を着実に進める必要がある。

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 レポートのレファレンスケースでは最大線量が処分後 10,000 年で $2\mu\text{Sv/y}$ とされている）ヨウ素 129 および炭素 14 の低減対策に加え、その廃棄体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。

これらの重要課題に対して、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、平成 25 年度から以下の各技術開発に取り組んできた。

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
- (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 27 年度の成果を取り纏めた。

目 次

第1章 概要.....	1
1.1 背景.....	1
1.1.1 ナチュラルアナログとセーフティケース	1
1.1.2 TRU 廃棄物の地層処分におけるセメント-ベントナイト相互作用とナチュラルアナログ	2
1.1.3 ナチュラルアナログが成立するための環境条件	3
1.1.4 ナチュラルアナログ調査・研究の進め方と用語の定義	5
1.1.5 フィリピンのナチュラルアナログ調査の有意性	8
1.2 目的.....	10
1.3 本事業のこれまでの成果概要.....	11
1.3.1 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.....	11
1.3.2 Active Type のナチュラルアナログ.....	20
1.4 実施概要	34
1.4.1 全体計画	34
1.4.2 平成 27 年度実施概要.....	36
第2章 ナチュラルアナログサイトの探査.....	40
2.1 目的.....	40
2.2 フィリピン国における現地調査の概要	41
2.2.1 調査工程	41
2.2.2 現地調査の主な調査内容.....	42
2.2.3 地下水（既存井戸、湧水、既存試錐孔）調査の概要	44
2.2.4 岩石鉱物学的調査の概要.....	46
2.3 パラワン島の概要.....	51
2.3.1 パラワン島の地質概要	51
2.4 地質概査	69
2.4.1 概要.....	69
2.4.2 地理・地形的特徴.....	70
2.4.3 Narra 地区及びその周辺の概査	71
2.4.4 Rio Tuba 地区の概査	76
2.5 地下水調査.....	81
2.5.1 現地調査（現地測定・簡易分析・採水）	81
2.5.2 地下水の地球化学的特性.....	96
2.6 トレンチ調査.....	109
2.6.1 トレンチ掘削.....	109
2.6.2 壁面観察とサンプリング.....	114

2.6.3 岩石試料 (TL 法年代測定用含む) の採取	120
2.6.4 岩石鉱物学的調査	126
2.7 まとめ	239
第 3 章 年代測定による反応時間の評価	244
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	244
3.1.1 目的	244
3.1.2 パラワン島 Narra 地区のナチュラルアナログにおける年代測定の検討概要	247
3.1.3 年代測定のための試料	248
3.2 方解石の熱ルミネセンス年代測定	251
3.2.1 熱ルミネセンス年代測定法	251
3.2.2 今年度の検討概要	255
3.2.3 炭酸塩の発光特性	256
3.2.4 パラワン島の炭酸塩試料の年代測定	270
3.3 埋没木根の放射性炭素年代法による年代測定	279
3.3.1 放射性炭素年代法の概要と実施概要	279
3.3.2 AMS による放射性炭素年代測定	280
3.3.3 パラワン島 Narra 地区トレンチの埋没木根の放射性炭素年代	283
3.4 貝(化石)による生息環境と年代推定	287
3.5 まとめ	288
第 4 章 アルカリ環境下での長期変質プロセスに関わるナチュラルアナログ	292
4.1 Palawan 島 Narra 地区のナチュラルアナログ	292
4.2 トレンチ試料の鉱物・化学分析	293
4.2.1 分析項目	293
4.2.2 分析手法	293
4.2.3 鉱物産状の SEI-BEI 観察	296
4.2.4 元素マッピング	318
4.2.5 鉱物化学組成	351
4.2.6 マイクロ XRD 分析	380
4.2.7 偏光顕微鏡観察結果	387
4.3 中央パラワン島・Narra 地区における鉱物変遷モデルの考察	391
4.3.1 トレンチ 2 採取試料の岩石鉱物学的特徴	392
4.3.2 地球化学的環境としてのアルカリ地下水の地球化学的特性	394
4.3.3 パラワンオフィオライト起源の碎屑性堆積物の岩石鉱物学的特性	396
4.3.4 アルカリ地下水環境下でのサポナイトの形成プロセスとサポナイト形成環境に関わる構造 発達史	398
4.4 まとめ	407

第5章 地球化学シミュレーションモデルによる変質解析.....	410
5.1 目的.....	410
5.1.1 これまでの背景	410
5.1.2 実施内容	411
5.2 鉄含有粘土鉱物の熱力学データ	412
5.2.1 既存の熱力学データベースの調査	412
5.2.2 パラワン島 Narra 地区の高アルカリ環境の安定相の評価.....	413
5.3 地球化学反応輸送モデル.....	417
5.3.1 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.....	417
5.3.2 インプットする高アルカリ溶液の組成.....	418
5.3.3 解析条件	420
5.3.4 解析結果	426
5.4 まとめ	444
第6章 まとめ.....	447
6.1 今年度の調査結果のまとめ	447
6.1.1 実施計画	447
6.1.2 ナチュラルアナログサイトの探査	448
6.1.3 年代測定による反応時間の評価.....	450
6.1.4 アルカリ環境下でのベントナイトの長期変質プロセス	452
6.1.5 地球化学シミュレーションモデルによる変質解析.....	453

目 次

図 1.1.3-1	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	4
図 1.1.3-2	ナチュラルアナログのコンセプト	5
図 1.1.5-1	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	9
図 1.3.1-1	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	11
図 1.3.1-2	Saile 鉱山採石場 (Quarry) の露頭 (ベントナイト層-沸石層の互層関係) (左) とベントナイト (蜂の巣状の自生スメクタイト) の SEM 画像 (右)	12
図 1.3.1-3	トレンチの枕状溶岩-ベントナイト層接触部 (左) と観察結果に基づく模式断面 図 (右)	14
図 1.3.1-4	スメクタイト含有率と各基本物性との関係	15
図 1.3.1-5	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)	16
図 1.3.1-6	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	16
図 1.3.1-7	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	17
図 1.3.1-8	断裂系充填物の玄武岩比率と方解石の TL 年代	17
図 1.3.1-9	Saile 鉱山とその周辺地におけるベントナイトのアルカリ変質に係わる概念モデル	19
図 1.3.2-1	これまでの取り組みと抽出された課題	20
図 1.3.2-2	Bigbiga 地区及び Saile 鉱山周辺地区の Aksitero 累層の分布	21
図 1.3.2-3	Bigbiga 地区の Compilation Map	22
図 1.3.2-4	Bigbiga 地区での TEM 法物理探査の測定領域	23
図 1.3.2-5	LP5 グリッド L1S8~L4S4 (図 1.3.2-4 の青線の断面) の電気伝導率 (2D)	23
図 1.3.2-6	トレンチ(BBT02)の全容 (左) と採取した大口径コア (右)	24
図 1.3.2-7	DH08 孔の掘削状況 (左) と Well-1 (近傍の自墳井) の白濁 (右)	24
図 1.3.2-8	Bigbiga 地区の二次元水理地質構造概念モデル	25
図 1.3.2-9	中央/南部パラワン地域の地質図とルートマップ及び調査地点の水質	28
図 1.3.2-10	中央/南部パラワン地域の湧水地点での採水・水質測定	29
図 1.3.2-11	パラワンのアルカリ湧水の pH-Na ⁺ 濃度関係図	29
図 1.3.2-12	パラワンのアルカリ湧水の pH-Ca ²⁺ 濃度関係図	30
図 1.3.2-13	パラワンのアルカリ湧水の pH-Si 濃度関係図	30
図 1.3.2-14	パラワンのアルカリ湧水の pH-Cl 濃度関係図	30
図 1.3.2-15	Active Type のナチュラルアナログの候補サイト	31
図 1.3.2-16	ナチュラルアナログサイトとしての模式地質断面の概念図	33
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)	36
図 1.4.2-1	平成 27 年度の実施工程	37

図 2.2.1-1	現地調査の工程.....	41
図 2.2.2-1	中央／南部パラワン地域のフィールド調査ルートマップ	43
図 2.2.4-1	コア状試料のチップ採取位置.....	50
図 2.3.1-1	パラワン地域のテクトニクス[3]	51
図 2.3.1-2	パラワン島とフィリピン諸島のテクトニクス[4].....	52
図 2.3.1-3	パラワン島の広域地質図[3].....	55
図 2.3.1-4	中央/南部パラワン地域の地質図[4].....	56
図 2.3.1-5	中央/南部パラワン地域の一般的層序とテクトニクスの変遷プロセス[4]	57
図 2.3.1-6	中央/南部パラワン地域の地質断面図[4]	58
図 2.3.1-7	南部パラワン地域の地質断面図[4].....	58
図 2.4.1-1	調査地域と地質図 (MGB, 2010[]を編集)	69
図 2.4.3-1	Spillway の枕状溶岩の露頭	71
図 2.4.3-2	PWSPO-15-Rh-001 の XRD チャート.....	72
図 2.4.3-3	Narra 地区・Rio Tuba 地区等の露頭試料 XRF 分析結果 (CO ₂ を含む)	72
図 2.4.3-4	Narra 地区・Rio Tuba 地区等の露頭試料 XRF 分析結果 (CO ₂ を含まない)	72
図 2.4.3-5	ニッケル鉱山の採石場の露頭 (Narra 鉱床 (左)、Espanola 鉱床 (右))	73
図 2.4.4-1	降雨による沢の増水状況.....	76
図 2.4.4-2	Panas 層の露頭における岩石試料採取 (N08°30'13.0",E117°21'05.7")	77
図 2.4.4-3	Brooke's Point 地区の 7 Falls Spring の露頭 (左) と温泉施設の源泉 (右)	77
図 2.4.4-4	PWBPO-15-Rh-001 (Brooke's Point 地区) の XRD チャート.....	79
図 2.4.4-5	PWRTO01-15-Rh-001 (Rio Tuba 地区) の XRD チャート.....	79
図 2.4.4-6	PWRTO02-15-Rh-001 (Rio Tuba 地区) の XRD チャート.....	79
図 2.4.4-7	PWRTO03-15-Rh-001 (Rio Tuba 地区) の XRD チャート.....	80
図 2.5.1-1	Rio tuba 地区の調査地点プロット.....	81
図 2.5.1-2	調査ポイント 1 (N08°33'10.0", E117°24'01.2"), 沢, pH5.....	82
図 2.5.1-3	調査ポイント 2 (N08°32'33.4", E117°22'38.6"), クリーク pH5~6	82
図 2.5.1-4	調査ポイント 3 (N08°31'48.6", E117°21'49.7"), クリーク pH5~6	82
図 2.5.1-5	調査ポイント 4 (N08°33'44.3", E117°23'26.4"), クリーク, pH7.....	82
図 2.5.1-6	調査ポイント 5 (N08°34'14.3",E117°23'34.2"), 沢, pH6.....	83
図 2.5.1-7	調査ポイント 6 (N08°34'30.9",E117°24'15.0"), 鉱山貯水池, pH6~7	83
図 2.5.1-8	調査ポイント 7 (N08°34'24.8",E117°24'34.3"), pH7, ※通常は 8~9 程度..	83
図 2.5.1-9	調査ポイント 8 (N08°32'46.3",E117°23'04.9"), 沢, pH8.3, 26.0°C	83
図 2.5.1-10	調査ポイント 9 (N08°32'32.7",E117°22'36.8"), 生活用水井, pH7	84
図 2.5.1-11	調査ポイント 10 (N08°31'38.4",E117°23'17.8"), 生活用水井, pH6~7.....	84
図 2.5.1-12	調査ポイント 11 (N08°31'31.9",E117°23'34.7"), 生活用水井, pH7.58, 28.2°C	84
図 2.5.1-13	調査ポイント 12 : 小学校 (N08°31'35.0",E117°21'31.3"), 生活用水井, pH6	84

図 2.5.1-14	調査ポイント 13 (N08°31'40.9",E117°21'41.0"), 生活用水井, pH5-6.....	85
図 2.5.1-15	採水地点 (N08°34'31.4",E117°24'12.3"), 調査ポイント 6 と同じ鉦山貯水池のある採石場露頭の滝 (白色変質部), pH10.01, 29.3°C	85
図 2.5.1-16	鉦山貯水池のある採石場露頭の滝 (中央), pH9.35, 29.6°C	85
図 2.5.1-17	鉦山貯水池のある採石場露頭の滝 (右側), pH9.11, 31.1°C	86
図 2.5.1-18	7 Falls Hot spring のクリーク周辺の池, pH9.45, 36.5°C	88
図 2.5.1-19	7 Falls Hot spring の源泉 (N08°51'31.5", E117°48'09.7"), アルカリ泉, pH9.53, 34.1°C, ガスのバブリング (右)	88
図 2.5.1-20	Narra 地区の調査地点プロット	90
図 2.5.1-21	Narra3-1 アルカリ源泉, pH11.2, 38.4°C	90
図 2.5.1-22	Narra3-2 トレンチ調査エリア周辺のクリーク下流, pH9.73, 32.4°C	91
図 2.5.1-23	Narra3-2 トレンチ調査エリア周辺のクリーク中流, pH9.64, 33.2°C	91
図 2.5.1-24	Narra3-2 トレンチ調査エリア周辺のクリーク上流, pH9.3, 32.5°C	91
図 2.5.1-25	トレンチ 1 水試料採取および現地水質測定	91
図 2.5.1-26	トレンチ 2 水試料採取および現地水質測定	92
図 2.5.1-27	Parian の温泉水の源泉井戸 (Narra1) (N09°10'48.5",E118°15'06.5"), アルカリ泉, pH10.50, 47.2°C, ガスのバブリング (右)	92
図 2.5.1-28	Parian の温泉水の源泉井戸 (Narra1-2 : Narra1 から 15m 離れた最初に掘削した源泉井戸), アルカリ泉, pH10.56, 45.1°C	92
図 2.5.2-1	パラワン島の地下水調査地点と地下水の Stiff Diagram	102
図 2.5.2-2	パラワンのアルカリ湧水の pH-Na ⁺ 濃度関係図	103
図 2.5.2-3	パラワンのアルカリ湧水の pH-K ⁺ 濃度関係図	103
図 2.5.2-4	パラワンのアルカリ湧水の pH-Ca ²⁺ 濃度関係図	103
図 2.5.2-5	パラワンのアルカリ湧水の pH-Al ³⁺ 濃度関係図	103
図 2.5.2-6	パラワンのアルカリ湧水の pH-Mn ²⁺ 濃度関係図	104
図 2.5.2-7	パラワンのアルカリ湧水の pH-Mg ²⁺ 濃度関係図	104
図 2.5.2-8	パラワンのアルカリ湧水の pH-Fe 濃度関係図	104
図 2.5.2-9	パラワンのアルカリ湧水の pH-Si 濃度関係図	104
図 2.5.2-10	パラワンのアルカリ湧水の pH-HCO ₃ ⁻ 濃度関係図	105
図 2.5.2-11	パラワンのアルカリ湧水の pH-NO ₂ ⁻ 濃度関係図	105
図 2.5.2-12	パラワンのアルカリ湧水の pH-NO ₃ ⁻ 濃度関係図	105
図 2.5.2-13	パラワンのアルカリ湧水の pH-PO ₄ ³⁻ 濃度関係図	105
図 2.5.2-14	パラワンのアルカリ湧水の pH-SO ₄ ²⁻ 濃度関係図	106
図 2.5.2-15	パラワンのアルカリ湧水の pH-Cl 濃度関係図	106
図 2.5.2-16	パラワンのアルカリ湧水の pH-Br 濃度関係図	106
図 2.5.2-17	パラワンのアルカリ湧水の pH-F 濃度関係図	106
図 2.5.2-18	パラワンのアルカリ湧水の Mg ²⁺ -Al ³⁺ 濃度関係図	107
図 2.5.2-19	パラワンのアルカリ湧水の Mg ²⁺ -Na ⁺ 濃度関係図	107

図 2.5.2-20	Narra3-1~3-2 サイトの模式層序学的断面図と地下水（湧水）の水質.....	107
図 2.5.2-21	フィリピンの地下水の $\delta D - \delta^{18}O$ プロット図.....	108
図 2.6.1-1	Narra 地区調査エリア	109
図 2.6.1-2	Narra3-1 アルカリ泉（試料採取、水質・ガス測定）	110
図 2.6.1-3	Narra3-2 アルカリ河川（右：湧水測定地点(中流)）	110
図 2.6.1-4	トレンチ 1 掘削地点	110
図 2.6.1-5	トレンチ 2 掘削地点	111
図 2.6.1-6	トレンチ 1 掘削状況	112
図 2.6.1-7	トレンチ 2 掘削状況	113
図 2.6.2-1	トレンチ壁面削り出し状況（右：トレンチ 1、左：トレンチ 2）	114
図 2.6.2-2	トレンチ 1 の壁面観察状況	115
図 2.6.2-3	トレンチ 1 の木根を含む炭化物層（黒色の部分）	115
図 2.6.2-4	トレンチ 1 の形状.....	115
図 2.6.2-5	トレンチ 1 の模式断面図.....	116
図 2.6.2-6	トレンチ 1 の水試料採取および現地水質測定.....	116
図 2.6.2-7	トレンチ 2 の壁面観察状況	117
図 2.6.2-8	トレンチ 2 の壁面全体写真（左）と海洋性堆積物と見られる粘土層（右） ...	117
図 2.6.2-9	トレンチ 2 の形状.....	118
図 2.6.2-10	トレンチ 2 の模式断面図.....	118
図 2.6.2-11	トレンチ 2 の水試料採取および現地水質測定	119
図 2.6.3-1	Narra3-1 での岩石試料採取.....	120
図 2.6.3-2	トレンチ 1 岩石試料採取（その 1：Rh 及び Rc シリーズ）	121
図 2.6.3-3	トレンチ 1 岩石試料採取（その 2：HU シリーズ）	122
図 2.6.3-4	トレンチ 2 岩石試料採取（その 1：Rh シリーズ）	123
図 2.6.3-5	トレンチ 2 岩石試料採取（その 2：HU シリーズ）	124
図 2.6.3-6	トレンチ 2 岩石試料採取（その 3：HU シリーズ）	125
図 2.6.4-1	PWT02-15-Rh-020.....	140
図 2.6.4-2	PWT02B-15-C1-001 および PWT02B-15-C1-002	141
図 2.6.4-3	PWT02B-15-C2-0.....	141
図 2.6.4-4	PWT02B-15-C2-1-001 および PWT02B-15-C2-1-002.....	142
図 2.6.4-5	PWT02B-15-C2-2-001 および PWT02B-15-C2-2-002.....	142
図 2.6.4-6	PWNAO-15-Rh-001 の XRD チャート	143
図 2.6.4-7	PWNAO-15-HU-001~004 の定方位 XRD チャート	144
図 2.6.4-8	PWNAO-15-HU-003 の定方位 XRD チャートの(a)EG 処理によるピークシフト 及び(b)060 面の観察.....	144
図 2.6.4-9	PWT01-15-Rh-001 の XRD チャート	146
図 2.6.4-10	PWT01-15-Rh-002 の XRD チャート	146
図 2.6.4-11	PWT01-15-Rh-003 の XRD チャート	146

☒ 2.6.4-12	PWT01-15-Rh-004 の XRD チャート	147
☒ 2.6.4-13	PWT01-15-Rh-005 の XRD チャート	147
☒ 2.6.4-14	PWT01-15-Rh-006 の XRD チャート	147
☒ 2.6.4-15	PWT01-15-Rh-007 の XRD チャート	148
☒ 2.6.4-16	PWT01-15-Rh-008 の XRD チャート	148
☒ 2.6.4-17	PWT01-15-Rh-009 の XRD チャート	148
☒ 2.6.4-18	PWT01-15-Rh-010 の XRD チャート	149
☒ 2.6.4-19	PWT01-15-Rh-011 の XRD チャート	149
☒ 2.6.4-20	PWT01-15-Rh-012 の XRD チャート	149
☒ 2.6.4-21	PWT01-15-Rh-013 の XRD チャート	150
☒ 2.6.4-22	PWT01-15-Rh-014 の XRD チャート	150
☒ 2.6.4-23	PWT01-15-Rh-015 の XRD チャート	150
☒ 2.6.4-24	PWT01-15-Rh-016 の XRD チャート	151
☒ 2.6.4-25	PWT01-15-Rh-017 の XRD チャート	151
☒ 2.6.4-26	PWT01-15-Rh-018 の XRD チャート	151
☒ 2.6.4-27	PWT01-15-Rh-019 の XRD チャート	152
☒ 2.6.4-28	PWT01-15-Rh-020 の XRD チャート	152
☒ 2.6.4-29	PWT01-15-Rh-021 の XRD チャート	152
☒ 2.6.4-30	PWT01-15-Rh-022 の XRD チャート	153
☒ 2.6.4-31	PWT01-15-Rh-023 の XRD チャート	153
☒ 2.6.4-32	PWT01-15-Rh-024 の XRD チャート	153
☒ 2.6.4-33	PWT02-15-Rh-001 の XRD チャート	157
☒ 2.6.4-34	PWT02-15-Rh-002 の XRD チャート	157
☒ 2.6.4-35	PWT02-15-Rh-003 の XRD チャート	157
☒ 2.6.4-36	PWT02-15-Rh-004 の XRD チャート	158
☒ 2.6.4-37	PWT02-15-Rh-005 の XRD チャート	158
☒ 2.6.4-38	PWT02-15-Rh-006 の XRD チャート	158
☒ 2.6.4-39	PWT02-15-Rh-007 の XRD チャート	159
☒ 2.6.4-40	PWT02-15-Rh-008 の XRD チャート	159
☒ 2.6.4-41	PWT02-15-Rh-009 の XRD チャート	159
☒ 2.6.4-42	PWT02-15-Rh-010 の XRD チャート	160
☒ 2.6.4-43	PWT02-15-Rh-011 の XRD チャート	160
☒ 2.6.4-44	PWT02-15-Rh-012 の XRD チャート	160
☒ 2.6.4-45	PWT02-15-Rh-013 の XRD チャート	161
☒ 2.6.4-46	PWT02-15-Rh-014 の XRD チャート	161
☒ 2.6.4-47	PWT02-15-Rh-015 の XRD チャート	161
☒ 2.6.4-48	PWT02-15-Rh-016 の XRD チャート	162
☒ 2.6.4-49	PWT02-15-Rh-018 の XRD チャート	162

図 2.6.4-50	PWT02-15-Rh-019 の XRD チャート	162
図 2.6.4-51	PWT02-15-Rh-020 の XRD チャート	163
図 2.6.4-52	PWT02B-15-C1-001 の XRD チャート	163
図 2.6.4-53	PWT02B-15-C1-002 の XRD チャート	163
図 2.6.4-54	PWT02B-15-C2-0 の XRD チャート	164
図 2.6.4-55	PWT02B-15-C2-1-001 の XRD チャート	164
図 2.6.4-56	PWT02B-15-C2-1-002 の XRD チャート	164
図 2.6.4-57	PWT02B-15-C2-2-001 の XRD チャート	165
図 2.6.4-58	PWT02B-15-C2-2-001 の XRD チャート	165
図 2.6.4-59	PWT02-15-HU-001~008 の XRD チャート	166
図 2.6.4-60	PWT02-15-HU-009~018 の XRD チャート	167
図 2.6.4-61	PWT02-15-Rh-015 の定方位測定および EG 処理試料の定方位測定	169
図 2.6.4-62	PWT02-15-Rh-016 の定方位測定および EG 処理試料の定方位測定	169
図 2.6.4-63	PWT02B-15-C1-001 の定方位測定および EG 処理試料の定方位測定	170
図 2.6.4-64	PWT02B-15-C2-0 の定方位測定および EG 処理試料の定方位測定	170
図 2.6.4-65	PWT02B-15-C2-1-001 の定方位測定および EG 処理試料の定方位測定	171
図 2.6.4-66	PWT02B-15-C2-2-001 の定方位測定および EG 処理試料の定方位測定	171
図 2.6.4-67	PWT02B-15-C2-0 の不定方位 XRD 測定による 060 面の観察	172
図 2.6.4-68	PWT02B-15-C2-2-001 の不定方位 XRD 測定による 060 面の観察	172
図 2.6.4-69	トレンチ 1 の各試料の XRF 分析結果 (酸化物表記、CO ₂ を含む)	178
図 2.6.4-70	トレンチ 1 の各試料の XRF 分析結果 (酸化物表記、CO ₂ を含まない)	179
図 2.6.4-71	トレンチ 1 試料の XRF 測定結果による成分相互の相関 (SiO ₂ -CO ₂)	180
図 2.6.4-72	トレンチ 1 試料の XRF 測定結果による成分相互の相関 (SiO ₂ -Fe ₂ O ₃)	180
図 2.6.4-73	トレンチ 1 試料の XRF 測定結果による成分相互の相関 (SiO ₂ -CaO)	180
図 2.6.4-74	トレンチ 1 試料の XRF 測定結果による成分相互の相関 (SiO ₂ -MgO)	181
図 2.6.4-75	トレンチ 1 試料の XRF 測定結果による成分相互の相関 (SiO ₂ -Al ₂ O ₃)	181
図 2.6.4-76	トレンチ 1 試料の XRF 測定結果による成分相互の相関 (SiO ₂ -Cr ₂ O ₃)	181
図 2.6.4-77	トレンチ 1 試料の XRF 測定結果による成分相互の相関 (SiO ₂ -NiO)	182
図 2.6.4-78	トレンチ 1 試料の XRF 測定結果による成分相互の相関 (SiO ₂ -SO ₃)	182
図 2.6.4-79	トレンチ 2 の各試料の XRF 分析結果 (酸化物表記、CO ₂ を含む)	187
図 2.6.4-80	トレンチ 2 の各試料の XRF 分析結果 (酸化物表記、CO ₂ を含まない)	188
図 2.6.4-81	トレンチ 2 試料の XRF 測定結果による成分相互の相関 (SiO ₂ -CO ₂)	189
図 2.6.4-82	トレンチ 2 試料の XRF 測定結果による成分相互の相関 (SiO ₂ -CaO)	189
図 2.6.4-83	トレンチ 2 試料の XRF 測定結果による成分相互の相関 (SiO ₂ -Fe ₂ O ₃)	189
図 2.6.4-84	トレンチ 2 試料の XRF 測定結果による成分相互の相関 (SiO ₂ -MgO)	190
図 2.6.4-85	トレンチ 2 試料の XRF 測定結果による成分相互の相関 (SiO ₂ -Al ₂ O ₃)	190
図 2.6.4-86	トレンチ 2 試料の XRF 測定結果による成分相互の相関 (SiO ₂ -Cr ₂ O ₃)	190
図 2.6.4-87	トレンチ 2 試料の XRF 測定結果による成分相互の相関 (SiO ₂ -NiO)	191

図 2.6.4-88	トレンチ 2 試料の XRF 測定結果による成分相互の相関 (SiO ₂ -SO ₃)	191
図 2.6.4-89	トレンチ 2 岩石試料の希土類元素パターン	193
図 2.6.4-90	コア状試料のチップ採取位置	194
図 2.6.4-91	偏光顕微鏡写真(PWT02-15-Rh-015, その 1)	196
図 2.6.4-92	偏光顕微鏡写真(PWT02-15-Rh-015, その 2)	197
図 2.6.4-93	偏光顕微鏡写真(PWT02-15-Rh-015, その 2)	198
図 2.6.4-94	偏光顕微鏡写真(PWT02-15-Rh-016, その 1)	201
図 2.6.4-95	偏光顕微鏡写真(PWT02-15-Rh-016, その 2)	202
図 2.6.4-96	偏光顕微鏡写真(PWT02-15-Rh-016, その 3)	203
図 2.6.4-97	偏光顕微鏡写真(PWT02-15-Rh-016, その 4)	204
図 2.6.4-98	偏光顕微鏡写真(PWT02-15-Rh-016, その 5)	205
図 2.6.4-99	偏光顕微鏡写真(PWT02-15-Rh-018, その 1)	208
図 2.6.4-100	偏光顕微鏡写真(PWT02-15-Rh-018, その 2)	209
図 2.6.4-101	偏光顕微鏡写真(PWT02B-15-C1-001, その 1)	211
図 2.6.4-102	偏光顕微鏡写真(PWT02B-15-C1-001, その 2)	212
図 2.6.4-103	偏光顕微鏡写真(PWT02B-15-C1-001, その 3)	213
図 2.6.4-104	偏光顕微鏡写真(PWT02B-15-C1-001, その 4)	214
図 2.6.4-105	偏光顕微鏡写真(PWT02B-15-C2-1-001, その 1)	217
図 2.6.4-106	偏光顕微鏡写真(PWT02B-15-C2-1-001, その 2)	218
図 2.6.4-107	偏光顕微鏡写真(PWT02B-15-C2-1-001, その 3)	219
図 2.6.4-108	偏光顕微鏡写真(PWT02B-15-C2-1-001, その 4)	220
図 2.6.4-109	偏光顕微鏡写真(PWT02B-15-C2-2-001, その 1)	223
図 2.6.4-110	偏光顕微鏡写真(PWT02B-15-C2-2-001, その 2)	224
図 2.6.4-111	偏光顕微鏡写真(PWT02B-15-C2-2-001, その 3)	225
図 2.6.4-112	偏光顕微鏡写真(PWT02B-15-C2-2-002, その 1)	228
図 2.6.4-113	偏光顕微鏡写真(PWT02B-15-C2-2-002, その 2)	229
図 2.6.4-114	偏光顕微鏡写真(PWT02-15-Rh-020, その 1)	232
図 2.6.4-115	偏光顕微鏡写真(PWT02-15-Rh-020, その 2)	233
図 2.6.4-116	偏光顕微鏡写真(PWT02-15-Rh-020, その 3)	234
図 3.1.3-1	トレンチ 1 での TL 用の炭酸塩試料 (Rc-01~10A) 及び貝 (●) の採取位置	248
図 3.1.3-2	トレンチ 1 での C14 年代測定用の木根試料の採取位置	249
図 3.1.3-3	トレンチ 1 での C14 年代測定用試料及び貝 (●) の採取位置	249
図 3.1.3-4	トレンチ 1 (PWT01-15-Rh-004) で採取した貝	250
図 3.2.1-1	熱ルミネッセンス年代測定の方法	251
図 3.2.1-2	SARA 法の実施手順のイメージ	252
図 3.2.3-1	合成した方解石の XRD パターン	257
図 3.2.3-2	合成した試料の微量元素濃度	258

図 3.2.3-3	添加した微量元素量と合成した試料中に含まれる微量元素濃度	260
図 3.2.3-4	T_m - T_{stop} 法における TL グロー曲線	261
図 3.2.3-5	T_m - T_{stop} 法におけるアニーリング温度 T_{stop} と初期ピーク温度 T_m	261
図 3.2.3-6	微量元素濃度と発光量	262
図 3.2.3-7	TL グロー曲線と放射線反応曲線(Pure calcite)	264
図 3.2.3-8	TL グロー曲線と放射線反応曲(Mg1)	264
図 3.2.3-9	TL グロー曲線と放射線反応曲(Mn1)	265
図 3.2.3-10	TL グロー曲線と放射線反応曲(Mn2)	265
図 3.2.3-11	TL グロー曲線と放射線反応曲(Mn3)	266
図 3.2.3-12	TL グロー曲線と放射線反応曲(Mn4)	266
図 3.2.3-13	TL グロー曲線と放射線反応曲(Mn5)	267
図 3.2.3-14	TL グロー曲線と放射線反応曲(Dual1)	267
図 3.2.3-15	TL グロー曲線と放射線反応曲(Dual2)	268
図 3.2.3-16	TL グロー曲線と放射線反応曲(Fe1)	268
図 3.2.3-17	Mn 濃度と c-x-value	269
図 3.2.4-1	PWT01-15-Rc-001 の XRD チャート	270
図 3.2.4-2	PWT01-15-Rc-002 の XRD チャート	270
図 3.2.4-3	PWT01-15-Rc-003 の XRD チャート	271
図 3.2.4-4	PWT01-15-Rc-004 の XRD チャート	271
図 3.2.4-5	PWT01-15-Rc-005 の XRD チャート	271
図 3.2.4-6	PWT01-15-Rc-006 の XRD チャート	272
図 3.2.4-7	PWT01-15-Rc-007 の XRD チャート	272
図 3.2.4-8	PWT01-15-Rc-008 の XRD チャート	272
図 3.2.4-9	PWT01-15-Rc-009 の XRD チャート	273
図 3.2.4-10	PWT01-15-Rc-010A の XRD チャート	273
図 3.2.4-11	トレンチ 1 の炭酸塩試料の希土類元素パターン	275
図 3.2.4-12	Mn 濃度と a-x-value, b-x-value	276
図 3.2.4-13	PWT01-15-Rc-001 の TL グロー曲線	277
図 3.2.4-14	PWT01-15-Rc-010A の TL グロー曲線	278
図 3.3.2-1	AMS 装置 (ペレトロン年代測定装置) 図[22]	280
図 3.3.2-2	AMS 測定における放射性炭素年代測定のための試料調整方法[22]	281
図 3.3.3-1	パラワン島 Narra 地区トレンチサイト周辺の模式層序学的断面図	285
図 3.5.1-1	トレンチ 1 の年代測定結果	289
図 4.2.2-1	EPMA 分析試料	294
図 4.2.2-2	試料の分析と観察に用いた分析装置(a: EPMA; b: FESEM-EDS)	295
図 4.2.3-1	SEI-BEI 観察(PWT02-15-Rh-006 その 1)	296
図 4.2.3-2	SEI-BEI 観察(PWT02-15-Rh-013 その 1)	297

図 4.2.3-3	SEI-BEI 観察(PWT02-15-Rh-013 その 2).....	298
図 4.2.3-4	SEI-BEI 観察(PWT02-15-Rh-015 その 1).....	299
図 4.2.3-5	SEI-BEI 観察(PWT02-15-Rh-015 その 2).....	300
図 4.2.3-6	SEI-BEI 観察(PWT02-15-Rh-016 の Ca 鉱物に富む岩片、その 1).....	301
図 4.2.3-7	SEI-BEI 観察(PWT02-15-Rh-016、その 2).....	302
図 4.2.3-8	SEI-BEI 観察(PWT02-15-Rh-016、その 3).....	303
図 4.2.3-9	SEI-BEI 観察(PWT02-15-Rh-016、その 4).....	304
図 4.2.3-10	SEI-BEI 観察(PWT02-15-Rh-016、その 5).....	305
図 4.2.3-11	SEI-BEI 観察(PWT02B-15-C1-001、その 1).....	306
図 4.2.3-12	SEI-BEI 観察(PWT02B-15-C1-001、その 2).....	307
図 4.2.3-13	SEI-BEI 観察(PWT02B-15-C1-001、その 3).....	308
図 4.2.3-14	SEI-BEI 観察(PWT02B-15-C2-1-001、その 1).....	309
図 4.2.3-15	SEI-BEI 観察(PWT02B-15-C2-1-001、その 2).....	310
図 4.2.3-16	SEI-BEI 観察(PWT02B-15-C2-2-001、その 1).....	311
図 4.2.3-17	SEI-BEI 観察(PWT02B-15-C2-2-001、その 2).....	312
図 4.2.3-18	SEI-BEI 観察(PWT02B-15-C2-2-001、その 3).....	313
図 4.2.3-19	SEI-BEI 観察(PWT02B-15-C2-2-001、その 4).....	314
図 4.2.3-20	SEI-BEI 観察(PWT02-15-Rh-020、その 1).....	314
図 4.2.3-21	SEI-BEI 観察(PWT02-15-Rh-020、その 2).....	315
図 4.2.3-22	SEI-BEI 観察(PWT02-15-Rh-020、その 3).....	316
図 4.2.3-23	SEI-BEI 観察(PWT02-15-Rh-020、その 4).....	317
図 4.2.4-1	PWT02-15-Rh-006 のマッピング視野における SEI(a)と BEI(b).....	318
図 4.2.4-2	PWT02-15-Rh-006 の元素分布(その 1、a: Si; b: Al; c: Fe; d: Mg).....	319
図 4.2.4-3	PWT02-15-Rh-006 の元素分布(その 2、a: Ca; b: Na; c: K; d: O).....	319
図 4.2.4-4	PWT02-15-Rh-006 の元素分布(その 3、a: C; b: Ti; c: Ni; d: Mn).....	320
図 4.2.4-5	PWT02-15-Rh-006 の元素分布(その 4、Cr).....	320
図 4.2.4-6	PWT02-15-Rh-013 のマッピング視野における SEI(a)と BEI(b).....	321
図 4.2.4-7	PWT02-15-Rh-013 の元素分布(その 1、a: Si; b: Al; c: Fe; d: Mg).....	321
図 4.2.4-8	PWT02-15-Rh-013 の元素分布(その 2、a: Ca; b: Na; c: K; d: O).....	322
図 4.2.4-9	PWT02-15-Rh-013 の元素分布(その 3、a: C; b: Ti; c: Ni; d: Mn).....	322
図 4.2.4-10	PWT02-15-Rh-013 の元素分布(その 4、Cr).....	323
図 4.2.4-11	PWT02-15-Rh-015 のマッピング視野 1 における SEI(a)と BEI(b).....	323
図 4.2.4-12	PWT02-15-Rh-015 の視野 1 における元素分布(その 1 a: Si; b: Al; c: Fe; d: Mg).....	324
図 4.2.4-13	PWT02-15-Rh-015 の視野 1 における元素分布(その 2、a: Ca; b: Na; c: K; d: O).....	324
図 4.2.4-14	PWT02-15-Rh-015 の視野 1 における元素分布(その 3、C).....	325
図 4.2.4-15	PWT02-15-Rh-015 のマッピング視野 2 における SEI(a)と BEI(b).....	325

☒ 4.2.4-16	PWT02-15-Rh-015 の視野 2 における元素分布(その 1、a: Si; b: Al; c: Fe; d: Mg).....	326
☒ 4.2.4-17	PWT02-15-Rh-015 の視野 2 における元素分布(その 2、a: Ca; b: Na; c: K; d: O)	326
☒ 4.2.4-18	PWT02-15-Rh-015 の視野 2 における元素分布(その 3、a: C; b: Ti; c: Ni; d: Mn)	327
☒ 4.2.4-19	PWT02-15-Rh-015 の視野 2 における元素分布(その 4、Cr)	327
☒ 4.2.4-20	PWT02-15-Rh-016 のマッピング視野 1 における SEI(a)と BEI(b)	328
☒ 4.2.4-21	PWT02-15-Rh-016 の視野 1 における元素分布(その 1、a: Si; b: Al; c: Fe; d: Mg).....	329
☒ 4.2.4-22	PWT02-15-Rh-016 の視野 1 における元素分布(その 2、a: Ca; b: Na; c: K; d: O)	329
☒ 4.2.4-23	PWT02-15-Rh-016 の視野 1 における元素分布(その 3、C).....	330
☒ 4.2.4-24	PWT02-15-Rh-016 のマッピング視野 2 における SEI(a)と BEI(b)	330
☒ 4.2.4-25	PWT02-15-Rh-016 の視野 2 における元素分布(その 1、a: Si; b: Al; c: Fe; d: Mg).....	331
☒ 4.2.4-26	PWT02-15-Rh-016 の視野 2 における元素分布(その 2、a: Ca; b: Na; c: K; d: O)	331
☒ 4.2.4-27	PWT02-15-Rh-016 の視野 2 における元素分布(その 3、C).....	332
☒ 4.2.4-28	PWT02-15-Rh-016 のマッピング視野 3 における SEI(a)と BEI(b)	332
☒ 4.2.4-29	PWT02-15-Rh-016 の視野 3 における元素分布(その 1、a: Si; b: Al; c: Fe; d: Mg).....	333
☒ 4.2.4-30	PWT02-15-Rh-016 の視野 3 における元素分布(その 2、a: Ca; b: Na; c: K; d: O)	333
☒ 4.2.4-31	PWT02-15-Rh-016 の視野 3 における元素分布(その 3、a: C; b: Ti; c: Ni; d: Mn)	334
☒ 4.2.4-32	PWT02-15-Rh-016 の視野 3 における元素分布(その 3、Cr)	334
☒ 4.2.4-33	PWT02B-15-C1-001 のマッピング視野における SEI(a)と BEI(b).....	335
☒ 4.2.4-34	PWT02B-15-C1-001 の元素分布(その 1、a: Si; b: Al; c: Fe; d: Mg)	335
☒ 4.2.4-35	PWT02B-15-C1-001 の元素分布(その 2、a: Ca; b: Na; c: K; d: O)	336
☒ 4.2.4-36	PWT02B-15-C1-001 の元素分布(その 3、a: C; b: Ti; c: Ni; d: Mn).....	336
☒ 4.2.4-37	PWT02B-15-C1-001 の元素分布(その 4、Cr)	337
☒ 4.2.4-38	PWT02B-15-C2-1-001 のマッピング視野 1 における SEI(a)と BEI(b).....	338
☒ 4.2.4-39	PWT02B-15-C2-1-001 の視野 1 の元素分布(その 1 a: Si; b: Al; c: Fe; d: Mg)	338
☒ 4.2.4-40	PWT02B-15-C2-1-001 の視野 1 の元素分布(その 2、a: Ca; b: Na; c: K; d: O)	339

図 4.2.4-41	PWT02B-15-C2-1-001 の視野 1 の元素分布(その 3、a: C; b: Ti; c: Ni; d: Mn)	339
図 4.2.4-42	PWT02B-15-C2-1-001 の視野 1 の元素分布(その 4、Cr)	340
図 4.2.4-43	PWT02B-15-C2-1-001 のマッピング視野 2 における SEI(a)と BEI(b)	340
図 4.2.4-44	PWT02B-15-C2-1-001 の視野 2 の元素分布(その 1、a: Si; b: Al; c: Fe; d: Mg)	341
図 4.2.4-45	PWT02B-15-C2-1-001 の視野 2 の元素分布(その 2、a: Ca; b: Na; c: K; d: O)	341
図 4.2.4-46	PWT02B-15-C2-1-001 の視野 2 の元素分布(その 3、a: C; b: Ti; c: Ni; d: Mn)	342
図 4.2.4-47	PWT02B-15-C2-1-001 の視野 2 の元素分布(その 4、Cr)	342
図 4.2.4-48	PWT02B-15-C2-2-002 のマッピング視野 1 における SEI(a)と BEI(b)	343
図 4.2.4-49	PWT02B-15-C2-2-002 の視野 1 の元素分布(その 1、a: Si; b: Al; c: Fe; d: Mg)	343
図 4.2.4-50	PWT02B-15-C2-2-002 の視野 1 の元素分布(その 2、a: Ca; b: Na; c: K; d: O)	344
図 4.2.4-51	PWT02B-15-C2-2-002 の視野 1 の元素分布(その 3、a: C; b: Ti; c: Ni; d: Mn)	344
図 4.2.4-52	PWT02B-15-C2-2-002 の視野 1 の元素分布(その 4、Cr)	345
図 4.2.4-53	PWT02B-15-C2-2-002 のマッピング視野 2 における SEI(a)と BEI(b)	345
図 4.2.4-54	PWT02B-15-C2-2-002 の視野 2 の元素分布(その 1、a: Si; b: Al; c: Fe; d: Mg)	346
図 4.2.4-55	PWT02B-15-C2-2-002 の視野 2 の元素分布(その 2、a: Ca; b: Na; c: K; d: O)	346
図 4.2.4-56	PWT02B-15-C2-2-002 の視野 2 の元素分布(その 3、a: C; b: Ti; c: Ni; d: Mn)	347
図 4.2.4-57	PWT02B-15-C2-2-002 の視野 2 の元素分布(その 4、Cr)	347
図 4.2.4-58	PWT02-15-Rh-020 のマッピング視野における SEI(a)と BEI(b)	348
図 4.2.4-59	PWT02-15-Rh-020 の元素分布(その 1、a: Si; b: Al; c: Fe; d: Mg)	348
図 4.2.4-60	PWT02-15-Rh-020 の元素分布(その 2、a: Ca; b: Na; c: K; d: O)	349
図 4.2.4-61	PWT02-15-Rh-020 の元素分布(その 3、a: C; b: Ti; c: Ni; d: Mn)	349
図 4.2.4-62	PWT02-15-Rh-020 の元素分布(その 4、Cr)	350
図 4.2.5-1	メルト包有物をもつ石英の産状	351
図 4.2.5-2	スピネルとかんらん石の化学組成	354
図 4.2.5-3	輝石の組成プロット	357
図 4.2.5-4	輝石の Al(4) vs. Al(6)プロット	357
図 4.2.5-5	輝石の Al(4)、Al(6)の層序プロファイル	358
図 4.2.5-6	蛇紋石の組成プロット	362

図 4.2.5-7	緑泥石の組成プロット.....	365
図 4.2.5-8	緑泥石の化学組成 (その2)	368
図 4.2.5-9	スメクタイトの組成プロット.....	369
図 4.2.5-10	C-S-H 鉱物の組成プロット.....	372
図 4.2.5-11	C-S-H 鉱物の微量元素(a: Fe; b: Na+K).....	373
図 4.2.5-12	角閃石の組成プロット(a: エデナイト置換; b: チェルマカイト置換).....	378
図 4.2.5-13	層序と角閃石の Al(6)の関係.....	379
図 4.2.6-1	PWT02-15-Rh-006 の μ -XRD ピーク	381
図 4.2.6-2	PWT02-15-Rh-013 の μ -XRD ピーク	382
図 4.2.6-3	PWT02-15-Rh-015 の μ -XRD ピーク	383
図 4.2.6-4	PWT02B-15-Rh-016 の μ -XRD ピーク	384
図 4.2.6-5	PWT02B-15-C1-001 試料の μ -XRD ピーク.....	385
図 4.2.6-6	PWT02B-15-C2-2-002 試料の μ -XRD ピーク	386
図 4.2.6-7	PWT02-15-Rh-020 の μ -XRD ピーク	387
図 4.3.1-1	分析試料の試料採取位置 (トレンチ 2)	393
図 4.3.4-1	C-S-H と共生するサポナイト (PWT02-15-Rh-016)	400
図 4.3.4-2	C-S-H と共生するサポナイト (PWT02B-15-C2-2-001)	400
図 4.3.4-3	粒子間に成長する Fe-サポナイト (PWT02B-15-C2-2-001)	400
図 4.3.4-4	斜方輝石を置き換えるサポナイトと C-S-H と共生するサポナイト (PWT02-15-Rh-016)	401
図 4.3.4-5	単斜輝石から成長するサポナイト (PWT02-15-HU-001)	401
図 4.3.4-6	単斜輝石を置き換えるサポナイトと粒子間に成長するサポナイト (PWT02-15-Rh-016)	402
図 4.3.4-7	角閃石からのサポナイトの生成 (PWT02-15-Rh-016)	402
図 4.3.4-8	かんらん石を置き換えるサポナイト (PWT02-15-Rh-020)	403
図 4.3.4-9	パラワンオフィオライトの地質構造学的発展と碎屑性堆積物のスメクタイトの 形成モデル (I. パラワンオフィオライトの定置)	404
図 4.3.4-10	パラワンオフィオライトの地質構造学的発展と碎屑性堆積物のスメクタイトの 形成モデル (II. パラワンオフィオライトでの蛇紋岩化作用)	405
図 4.3.4-11	パラワンオフィオライトの地質構造学的発展と碎屑性堆積物のスメクタイトの 形成モデル (III. パラワンオフィオライトの隆起-浸食-移動-堆積 (碎屑性堆積物) とアルカリ地下水に伴う炭酸塩 (トラバーチン) の沈殿)	405
図 4.3.4-12	パラワンオフィオライトの地質構造学的発展と碎屑性堆積物のスメクタイトの 形成モデル (IV. 碎屑性堆積物のアルカリ変質によるスメクタイト生成と炭酸塩沈殿物 の圧密作用による岩石 (炭酸塩岩) 化)	406
図 4.3.4-13	パラワンオフィオライトの地質構造学的発展と碎屑性堆積物のスメクタイトの 形成モデル (V. 現在も蛇紋岩作用による高アルカリ地下水が生成し、碎屑性堆積物に浸 出 (Active Type のナチュラルアナログ))	406

図 4.4.1-1	処分環境とのアナログ性.....	409
図 5.2.1-1	各データベース内の鉄スメクタイト.....	413
図 5.2.2-1	Al ₂ O ₃ -FeO-MgO-Na ₂ O-SiO ₂ -H ₂ O 系の安定相図.....	414
図 5.2.2-2	Al ₂ O ₃ -FeO-Na ₂ O-SiO ₂ -H ₂ O 系の安定相図.....	415
図 5.2.2-3	Al ₂ O ₃ -FeO-Na ₂ O-SiO ₂ -H ₂ O 系 (横軸 SiO ₂) の安定相図.....	416
図 5.2.2-4	Wilson et al. (2006a)[5]の熱力学データセットの室内実験による検証[6].....	417
図 5.3.1-1	Saile 鉍山ベントナイトの初期状態におけるベントナイト中の鉍物空間分布	418
図 5.3.1-2	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鉍物組成	418
図 5.3.3-1	解析体系概念図.....	422
図 5.3.4-1	ケース M1-1 の変質解析結果 (鉍物の体積分布と空隙率)	429
図 5.3.4-2	ケース M1-2 の変質解析結果 (鉍物の体積分布と空隙率)	430
図 5.3.4-3	ケース M1-3 の変質解析結果 (鉍物の体積分布と空隙率)	431
図 5.3.4-4	ケース M1-4 の変質解析結果 (鉍物の体積分布と空隙率)	432
図 5.3.4-5	ケース M1-5 の変質解析結果 (鉍物の体積分布と空隙率)	433
図 5.3.4-6	ケース M1-6 の変質解析結果 (鉍物の体積分布と空隙率)	434
図 5.3.4-7	ケース M1-7 の変質解析結果 (鉍物の体積分布と空隙率)	435
図 5.3.4-8	ケース M1-8 の変質解析結果 (鉍物の体積分布と空隙率)	436
図 5.3.4-9	ケース M2-1 の変質解析結果 (鉍物の体積分布と空隙率)	438
図 5.3.4-10	ケース M2-2 の変質解析結果 (鉍物の体積分布と空隙率)	439
図 5.3.4-11	ケース M2-3 の変質解析結果 (鉍物の体積分布と空隙率)	440
図 5.3.4-12	ケース M2-4 の変質解析結果 (鉍物の体積分布と空隙率)	441
図 5.3.4-13	ケース M2-5 の変質解析結果 (鉍物の体積分布と空隙率)	442
図 5.3.4-14	ケース M2-6 の変質解析結果 (鉍物の体積分布と空隙率)	443
図 5.3.4-15	固相濃度の経時変化 (ケース M1-2, M1-4, M1-6, M1-8)	444
図 5.3.4-16	固相濃度の経時変化 (ケース M2-2, M2-4, M2-6)	445

表 目 次

表 1.1.4-1	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.....	7
表 1.3.1-1	ルソン島の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.....	13
表 1.3.2-1	パラワンと Zambales(ルソン島北西部)のアルカリ地下水の地球化学的特性の比較.....	29
表 1.3.2-2	ナチュラルアナログサイトの地質・地下水の地球化学的特性.....	32
表 2.2.3-1	物理化学パラメータ 測定項目	44
表 2.2.4-1	今年度のフィールド調査で採取した岩石試料と分析項目	47
表 2.2.4-2	XRD の測定条件一覧.....	48
表 2.2.4-3	XRF による定量分析条件.....	49
表 2.2.4-4	薄片観察試料と薄片作成方法.....	50
表 2.4.3-1	Spillway の露頭試料の X 線回折測定による鉱物同定.....	71
表 2.4.4-1	Narra 地区・Rio Tuba 地区等の露頭試料の X 線回折測定による鉱物同定	78
表 2.5.1-1	Rio Tuba 河川水および井戸水の現地水質調査結果.....	86
表 2.5.1-2	Rio tuba ニッケル鉱山採石場での現地水質調査結果.....	87
表 2.5.1-3	Brooke's Point (7 fall Hotspring) の現地水質調査結果.....	89
表 2.5.1-4	Narra3-1 (トレンチ調査エリア上流) の現地水質調査結果	92
表 2.5.1-5	Narra3-2 (トレンチ調査エリア周辺) の現地水質調査結果	93
表 2.5.1-6	トレンチ 1 湧水の現地水質調査.....	94
表 2.5.1-7	トレンチ 2 湧水の現地水質調査.....	95
表 2.5.1-8	Narra1(Parian)温泉水の現地水質調査結果	95
表 2.5.2-1	溶存イオン濃度及び安定同位体比 (パラワン島中・南部地区、分析(C))	98
表 2.5.2-2	地下水パラメータ・溶存イオン濃度測定結果その 1 (パラワン島中部 Narra 地区、分析(A)(B)(C))	99
表 2.5.2-3	地下水パラメータ・溶存イオン濃度測定結果その 2 (パラワン島中部 Narra 地区トレンチ、分析(A)(B)(C))	100
表 2.5.2-4	地下水パラメータ・溶存イオン濃度測定結果その 3 (パラワン島南部 Riotuba 地区及び Brooke's Point 地区、分析(A)(B)(C))	101
表 2.5.2-5	パラワンと Zambales のアルカリ地下水の地球化学的特性の比較.....	102
表 2.5.2-6	安定同位体比	108
表 2.6.1-1	トレンチ 1 の作業工程.....	111
表 2.6.1-2	トレンチ 2 の作業工程.....	112
表 2.6.2-1	トレンチ 1 の現地水質測定結果.....	116

表 2.6.2-2	トレンチ 2 の現地水質測定結果.....	119
表 2.6.4-1	Narra3-1 で採取した岩石試料と分析項目.....	126
表 2.6.4-2	トレンチ 1 で採取した岩石試料と分析項目.....	126
表 2.6.4-3	トレンチ 2 で採取した岩石試料と分析項目.....	127
表 2.6.4-4	PWT01-15-Rh-001～004 の試料の状態（試料袋に入れられた状態、乾燥前、粗砕後、および、100 μ m ふるい残分（ふるい上）と通過分（ふるい下））.....	129
表 2.6.4-5	PWT01-15-Rh-005～008 の試料の状態（試料袋に入れられた状態、乾燥前、粗砕後、および、100 μ m ふるい残分（ふるい上）と通過分（ふるい下））.....	130
表 2.6.4-6	PWT01-15-Rh-009～012 の試料の状態（試料袋に入れられた状態、乾燥前、粗砕後、および、100 μ m ふるい残分（ふるい上）と通過分（ふるい下））.....	131
表 2.6.4-7	PWT01-15-Rh-013～016 の試料の状態（試料袋に入れられた状態、乾燥前、粗砕後、および、100 μ m ふるい残分（ふるい上）と通過分（ふるい下））.....	132
表 2.6.4-8	PWT01-15-Rh-017～020 の試料の状態（試料袋に入れられた状態、乾燥前、粗砕後、および、100 μ m ふるい残分（ふるい上）と通過分（ふるい下））.....	133
表 2.6.4-9	PWT01-15-Rh-021～024 の試料の状態（試料袋に入れられた状態、乾燥前、粗砕後、および、100 μ m ふるい残分（ふるい上）と通過分（ふるい下））.....	134
表 2.6.4-10	PWT02-15-Rh-001～004 の試料の状態（試料袋に入れられた状態、乾燥前、粗砕後、および、100 μ m ふるい残分（ふるい上）と通過分（ふるい下））.....	135
表 2.6.4-11	PWT02-15-Rh-005～008 の試料の状態（試料袋に入れられた状態、乾燥前、粗砕後、および、100 μ m ふるい残分（ふるい上）と通過分（ふるい下））.....	136
表 2.6.4-12	PWT02-15-Rh-009～012 の試料の状態（試料袋に入れられた状態、乾燥前、粗砕後、および、100 μ m ふるい残分（ふるい上）と通過分（ふるい下））.....	137
表 2.6.4-13	PWT02-15-Rh-013～018 の試料の状態（試料袋に入れられた状態、乾燥前、粗砕後、および、100 μ m ふるい残分（ふるい上）と通過分（ふるい下））.....	138
表 2.6.4-14	PWT02-15-Rh-018 の試料の状態（試料袋に入れられた状態、乾燥前、粗砕後、および、100 μ m ふるい残分（ふるい上）と通過分（ふるい下））.....	139
表 2.6.4-15	PWT02-15-Rh-019 の試料の状態（試料と試料袋、小割り前、および、100 μ m ふるい通過分）.....	139
表 2.6.4-16	Narra3-1 の試料（PWNAO-15-Rh-001 及び PWNAO-15-HU-001～004）の X 線回折測定による鉱物同定.....	143
表 2.6.4-17	トレンチ 1 の試料（PWT01-15-Rh-001～024）の X 線回折測定による鉱物同定.....	145
表 2.6.4-18	トレンチ 2 の試料の X 線回折による鉱物同定結果（その 1 : Rh 及び C シリーズ）.....	155
表 2.6.4-19	トレンチ 2 の試料の X 線回折による鉱物同定結果（その 1 : HU シリーズ）.....	156
表 2.6.4-20	PWT01-15-Rh-001～007 の XRF 分析による定量結果（酸化物表記、CO ₂ 含む）.....	174

表 2.6.4-21	PWT01-15-Rh-008~014 の XRF 分析による定量結果 (酸化物表記、CO ₂ 含む)	175
表 2.6.4-22	PWT01-15-Rh-015~021 の XRF 分析による定量結果 (酸化物表記、CO ₂ 含む)	176
表 2.6.4-23	PWT01-15-Rh-022~024 の XRF 分析による定量結果 (酸化物表記、CO ₂ 含む)	177
表 2.6.4-24	PWT02-15-Rh-001~007 の XRF 分析による定量結果 (酸化物表記、CO ₂ 含む)	184
表 2.6.4-25	PWT02-15-Rh-008~014 の XRF 分析による定量結果 (酸化物表記、CO ₂ 含む)	185
表 2.6.4-26	PWT02-15-Rh-015~020 の XRF 分析による定量結果 (酸化物表記、CO ₂ 含む)	186
表 2.6.4-27	ICP-MS 及び全ケイ素アルカリ溶融脱水法による主成分・微量成分分析結果 (トレンチ 2)	192
表 2.6.4-28	薄片観察試料と薄片作成方法	194
表 3.1.1-1	フィリピンナチュラルアナログにおける放射年代測定の適用性	246
表 3.2.1-1	SAR 法手順	253
表 3.2.3-1	各合成試料の溶液組み合わせ	256
表 3.2.3-2	合成した試料の Mg, Mn, Fe 濃度	259
表 3.2.3-3	合成方解石の c-x-value	269
表 3.2.4-1	ICP-MS 及び全ケイ素アルカリ溶融脱水法による主成分・微量成分分析結果	274
表 3.2.4-2	各試料の年代に関するパラメータ	277
表 3.3.2-1	AMS 装置の概要	280
表 3.3.2-2	AMS 測定の条件	281
表 3.3.3-1	パラワン島 Narra 地区トレンチの埋没木根の放射性炭素年代測定結果	284
表 4.2.2-1	試料の分析情報	295
表 4.2.5-1	石英の化学組成	352
表 4.2.5-2	メルト包有物の化学組成	352
表 4.2.5-3	炭酸塩の化学組成	353
表 4.2.5-4	スピネルとかんらん石の化学組成	355
表 4.2.5-5	斜長石の化学組成	356
表 4.2.5-6	輝石の化学組成 (その 1)	360
表 4.2.5-7	輝石の化学組成 (その 2)	361
表 4.2.5-8	蛇紋石の化学組成 (その 1)	363
表 4.2.5-9	蛇紋石の化学組成 (その 2)	364

表 4.2.5-10	緑泥石の化学組成 (その 1)	366
表 4.2.5-11	緑泥石の化学組成 (その 2)	367
表 4.2.5-12	スメクタイトの化学組成 (その 1)	370
表 4.2.5-13	スメクタイトの化学組成 (その 2)	371
表 4.2.5-14	C-S-H 鉱物の化学組成 (その 1)	374
表 4.2.5-15	C-S-H 鉱物の化学組成 (その 2)	375
表 4.2.5-16	C-S-H 鉱物の化学組成 (その 3)	376
表 4.2.5-17	C-S-H 鉱物の化学組成 (その 4)	377
表 4.2.5-18	角閃石の化学組成	380
表 4.2.7-1	偏光顕微鏡観察による岩石鉱物学的特徴	391
表 4.3.1-1	トレンチ 2 試料の XRD・偏光顕微鏡・EPMA 分析による岩石鉱物学的特徴	394
表 4.3.3-1	Narra 地区トレンチの碎屑性堆積物のスメクタイトの生成に関する鉱物変遷過程	398
表 5.3.2-1	解析に用いた溶液データ	420
表 5.3.2-2	高アルカリ地下水生成のモデルに用いたかんらん岩の鉱物組成データ	420
表 5.3.3-1	ベントナイトの初期鉱物組成	421
表 5.3.3-2	解析に用いた溶液データ	422
表 5.3.3-3	考慮した二次鉱物とモル体積 (JNC-TDB.TRU に含有されるもの)	423
表 5.3.3-4	25°Cにおける速度論パラメータ	425
表 5.3.3-5	計算ケース	426

第1章 概要

1.1 背景

1.1.1 ナチュラルアナログとセーフティケース

東日本大震災による福島第一原子力発電所事故以降、原子力発電の再稼働や廃炉等今後の利用のあり方について安全性確保の考え方に基づく議論が深まっており、発電に伴って発生する放射性廃棄物についてもその安全性について国民的な関心が高まりつつある。高レベル放射性廃棄物や TRU 廃棄物の地層処分は、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システム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、バリアシステムの長期挙動等の”現象理解”や放射性核種の移行挙動等の”性能評価”に活用する研究が「ナチュラルアナログ (NA: Natural Analogue) 研究」といわれる。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の自然界に存在する類似現象を研究するという地層処分研究の一分野であることに加えて、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、これが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。後者の観点では、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、地域住民をはじめ国民一般まで地層処分に対する理解と協力を得ることが不可欠であることから、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、地層処分の重要な本質的な問題に対して、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]が進められている。

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 TRU 廃棄物（あるいは高レベル放射性廃棄物）の地層処分における「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。

1.1.2 TRU 廃棄物の地層処分におけるセメントーベントナイト相互作用とナチュラルアナログ

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[7]、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系材料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、セメント系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、ベントナイト系緩衝材は人工バリアシステムの中での核種移行抑制におい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長期にわたり確保するという点で、ベントナイトとセメント系材料の相互作用問題は特に重要である[8][9]。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[10]。

この相互作用におけるキーププロセスは、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ベントナイト（主にモンモリロナイト等のスメクタイト族粘土鉱物（以下、スメクタイトという。))中のスメクタイトの変質反応（Ca 型化、二次鉱物の生成、C-S-H 化やゼオライト化など）であり、この変質により、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[11][12][13]。また、余裕深度処分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系材料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[14][15]、それらの成果を基に処分場の性能評価が行われてきた[12][16]。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[11][12][13]。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[17][18]。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改良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て、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・評価に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ナチュラルアナログ研究は近年になって検討され始めたテーマであり[19][20]、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、ナチュラルアナログ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しか確認されておらず、プロジェクト型のナチュラルアナログとして調査・研究がすすめられているのはフィリピンとキプロス[21]だけである。

1.1.3 ナチュラルアナログが成立するための環境条件

地層処分システムにおけるセメント系材料の影響では、セメント系材料－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（Serpentinization）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・斑れい岩・かんらん岩（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1.1.3-1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。

この一連の反応式で示されるようなオフィオライトの低温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。

また、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。

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 1.1.3-2)。

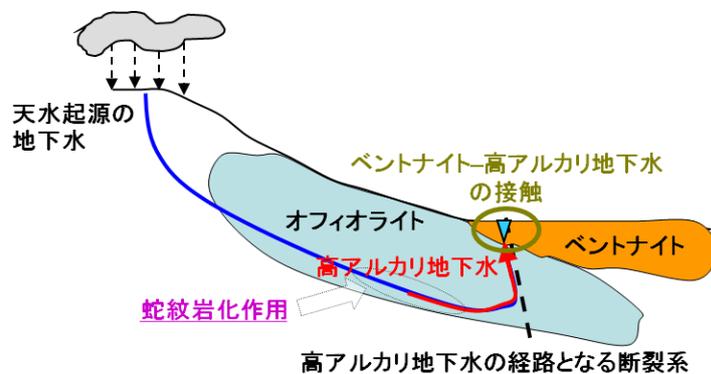


図 1.1.3-2 ナチュラルアナログのコンセプト

1.1.4 ナチュラルアナログ調査・研究の進め方と用語の定義

これまでに実施したナチュラルアナログ調査[20]を踏まえ、表 1.1.4-1 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ィオラ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、第1段階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

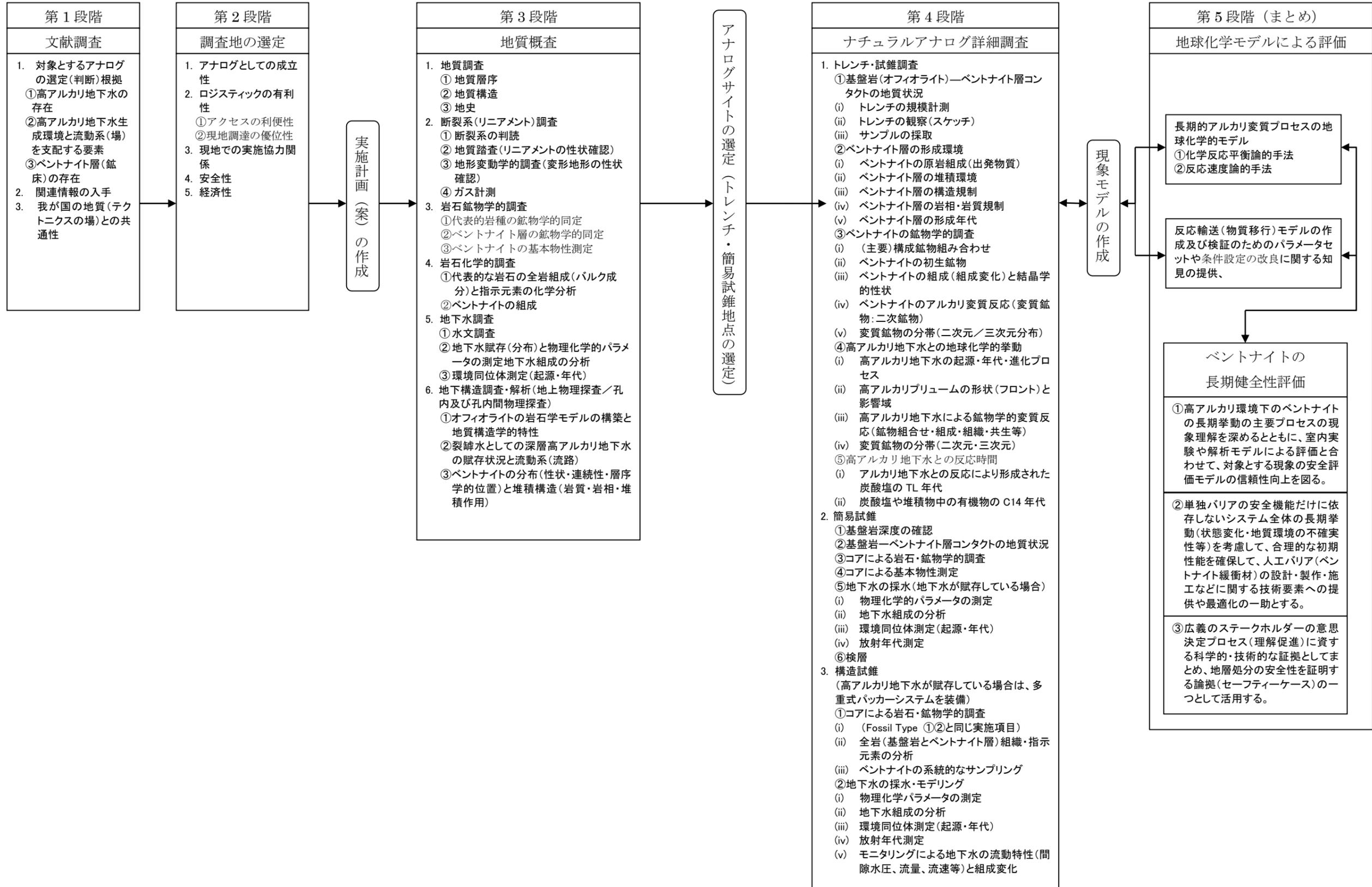
特性、環境条件に係わる基礎データを取得する。

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-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、現在もアルカリ地下水がベントナイト層に浸出するサイトを対象とするため、アルカリ地下水と接触している試料の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等の改良）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作成に必要な科学的論拠として取りまとめる。

また、本ナチュラルアナログ調査においては、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定義する。

表 1.1.4-1 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



1.1.5 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[25]。

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が存在すること
- 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していること
- 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）があること

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。

図 1.1.5-1 のように、ルソン島北西部ではアルカリ温泉水が湧出するオフィオライト（ザンバレス(Zambales)オフィオライト）とベントナイト鉱山（サイリー(Saile)鉱山）が近接して存在しており、高アルカリ地下水とベントナイト層が近接、または pH は少し低いアルカリ地下水が直接接触する露頭が存在している。また、パラワン島中南部にも大規模なオフィオライト（パラワン(Palawan)オフィオライト）が存在し、蛇紋岩化作用に伴う pH11 を超える高アルカリ湧水が見られ、それに近接してスメクタイトを含む堆積層が分布している。

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[21]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、フィリピンはこれまでの調査で明確なアルカリによるベントナイト（スメクタイト）の変質鉱物が確認された唯一のサイトであることに加え、処分のアナログとして地質環境のセッティングが単純（他の不確実なイベントが少なく解釈が容易）である点で有意である。

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。

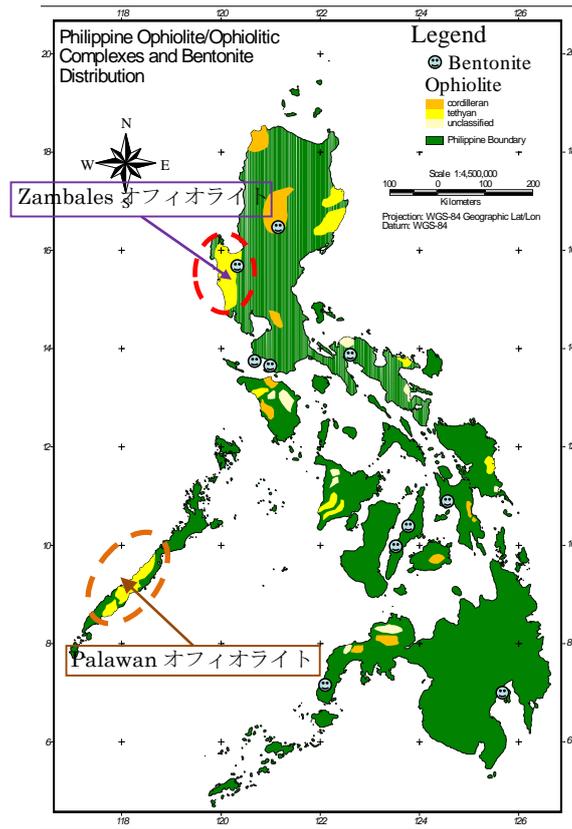


図 1.1.5-1 フィリピン国のオフィオライトとベントナイト鉱床の分布

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。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、平成25年度から5年程度の期間で、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を行い、ヨウ素・炭素移行挙動評価技術を高度化すること、また、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することを事業全体の目的としている。

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とを目的としている。そのために、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、現在も高アルカリ地下水が湧出し、ベントナイト層あるいはスメクタイトを含む粘土質堆積物と近接することが確認されたフィリピン国において、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。

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「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）をおこない、長期評価モデルの信頼性向上を図る。

1.3 本事業のこれまでの成果概要

1.3.1 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

平成 24 年度までのナチュラルアナログ調査[20]により、ルソン島北西部に分布する Zambales オフィオライトに近接する Saile 鉱山 (図 1.3.1-1) では、ベントナイト層が熱水等の影響受けずに続成作用によって生成し、その後、断層活動に伴い形成された断層系を流路として上昇したアルカリ地下水と接触したことを示す直接的証拠が得られた。これらの結果は、Saile 鉱山とその周辺地がセメント系材料とベントナイト緩衝材との相互作用のナチュラルアナログサイトとして絶好の環境条件を備えていることを示すものであり、現在はアルカリ地下水の湧出が見られないが、過去に高アルカリ地下水とベントナイトが接触し反応していたアナログサイトとして”Fossil Type”のナチュラルアナログサイト (1.3.2 参照) といえる。

ここでは、”Fossil Type”のサイトのナチュラルアナログ調査によって得られたアルカリ環境下のベントナイトの長期健全性について簡単に紹介する。

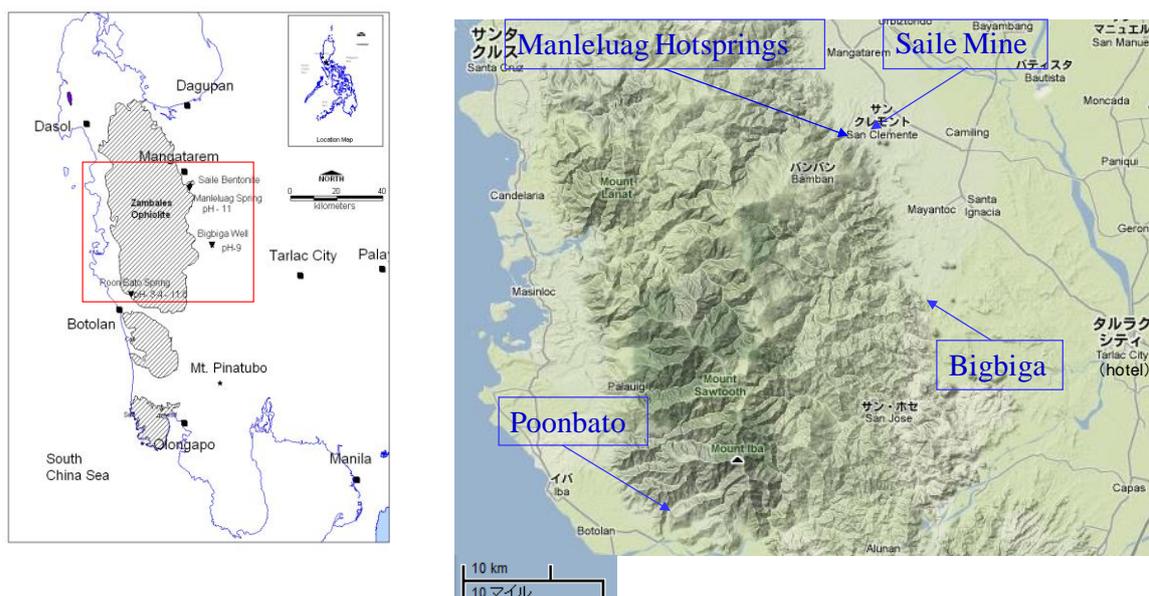


図 1.3.1-1 フィリピン国ルソン島北西部のナチュラルアナログ調査サイトの位置

(1) 地質概況

ルソン島北西部の調査対象地域は、フィリピン国・ルソン島の首都マニラ市から約 180km 離れた北西部に位置し、調査地区は北から南へ順次、Saile 鉱山地区、マンレルアッグ (Manleluag) 温泉保養施設地区、ビッグビガ (Bigbiga) 地区と最南部のプーンバト (Poonbato) 地区である (図 1.3.1-1)。

この地域には、フィリピン群島中で最大規模を有する世界有数の Zambales オフィオライト

が、約 30~40km 幅ではほぼ南北系に総延長約 130km で分布し、ルソン島西部の海岸山脈を形成している。調査地区に分布しているオフィオライトは、主に Saile 鉱山地区では、枕状玄武岩で、Manleluag 温泉保養施設地区では、細粒の斑れい岩（一部自破砕玄武岩溶岩が伴う）が優勢であり、より苦鉄質な岩相では蛇紋岩化された露頭が観察される。

このオフィオライトに累重するのがアクシテロ(Aksitero)累層である。両者の関係は、不整合[26][27][28][29]と、整合[30]とする 2 つの解釈がある。現地の地質精査から、不整合とする明白なハイエイタスや浸食エピソードが観察されないことにより、整合関係と解釈できる。この Aksitero 累層は、少なくとも深度 1,000m 以上の深海遠洋性堆積物で、主に遠洋性の浮遊性生物遺骸（珪藻類・有孔虫類など）と火山性碎屑物（火山ガラス・火山灰・パミスなど）、および少量のオフィオライト起源の単斜輝石・クロム鉄鉱などの外来物質（鉱物）から構成されている。岩相としては凝灰岩質・石灰質砂岩・シルト岩・泥岩と石灰岩質泥岩・粘土岩、石灰岩および、一部の堆積物として特徴的な級化成層のタービタイトが観察される。

Saile 鉱山のベントナイトの主な構成鉱物は、モンモリロナイト、Ca-沸石（少量のモルデン沸石・斜プチロル沸石・輝沸石）、方解石、斜長石、石英と少量の普通輝石、不透明鉱物（磁鉄鉱・クロム鉄鉱）である。これらのベントナイト-沸石類を形成した初源物質（原岩）は、火山ガラス・パミス・火山灰などを含有する凝灰岩質火山碎屑性堆積物であるが、一部遠洋性の浮遊性生物遺骸から形成された石灰質物質（燐灰石、方解石、コッコリスなど）が包有されている。ベントナイト層は、沸石層とほぼ水平な互層関係で堆積しており（図 1.3.1-2（左））、モンモリロナイトの自生鉱物としての特徴（図 1.3.1-2（右））や熱水溶液との反応で生成された特徴的な変質鉱物の沈殿（結晶化）と分帯構造などや、第四紀の火山プラグの貫入による熱の影響を示す熱変質鉱物も観察されないことから、このベントナイト-沸石は、埋没・続成作用による地球化学的反応により形成されたものと解釈できる。

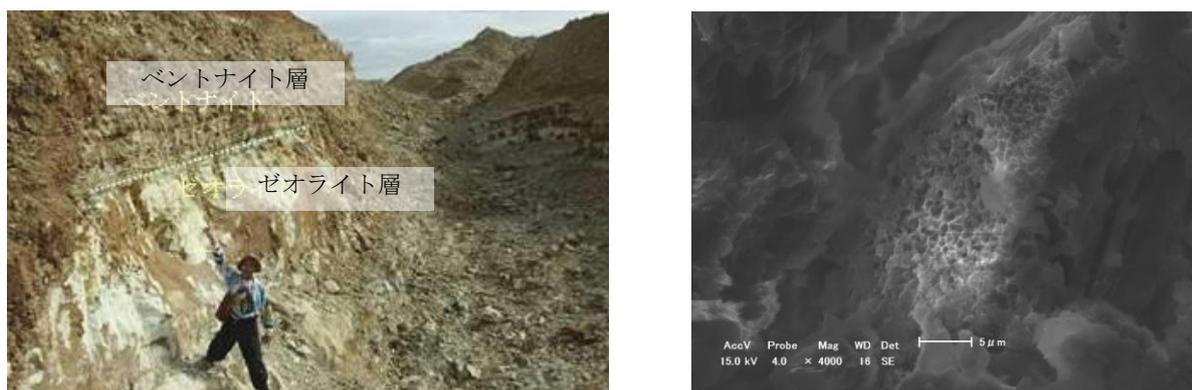


図 1.3.1-2 Saile 鉱山採石場 (Quarry) の露頭（ベントナイト層-沸石層の互層関係）（左）とベントナイト（蜂の巣状の自生スメクタイト）の SEM 画像（右）

(2) アルカリ地下水の地球化学的挙動

Zambales オフィオライトが分布する各調査地点のアルカリ地下水は、環境安定同位体比から測定値がフィリピン天水起源ライン[31]の $\delta D = 6\delta^{18}O + 7$ に乗ることから天水起源であり、表 1.3.1-1 に示すように高アルカリ (pH11 以上)、高 Ca 濃度 (Mg 濃度は極めて低い)、還元性、温泉水程度の温度という低温型蛇紋岩作用などともなう高アルカリ地下水生成の典型的な特性をもつ。これは地層処分での使用が想定される低アルカリセメント浸出水との高いアナログ性を示す。また、普通ポルトランドセメントの $Ca(OH)_2$ の溶解平衡にある溶液 (RegionII) についても pH はそれに比べると低いアナログであるといえる。

表 1.3.1-1 ルソン島の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

この地域の地下水の形成は、灰長石：苦土かんらん石：透輝石=8:2:1 の溶解反応、鉱物の溶解・沈殿反応の拡散律速および Mg 鉱物から溶解した Mg はすべて変質鉱物として沈殿すると仮定した反応速度論に基づく水-岩石シミュレーションにより説明できる。また、水-岩石反応の程度は pH の順と同じで、Poonbato 地区 > Manleluag 温泉保養施設地区 > Bigbiga 地区 > Saile 鉱山である。

Saile 鉱山では、ベントナイト層に直接アルカリ地下水が浸水している露頭観察されていないが、トレンチ底面の断裂系・破碎岩の内側の蛇紋石と外側の炭酸塩鉱物、採石場の多数の断裂系の存在と断層岩及びベントナイト表層の γ-水マンガン鉱 (Manganite: MnO(OH)) の産状、ベントナイト層の重金属・軽希土類元素の濃度特性、基盤岩との接触界面のカリ長石など特徴的なアルカリ変質鉱物の産状等これらの地質鉱物学的証拠から、過去にナチュラルアナログのコンセプト (図 1.1.3-2) で示したような (近傍の pH 11 程度の Manleluag 温泉保養施設

地区と同程度の) 高アルカリ地下水が断裂系に沿って上昇し、ベントナイト層に浸水していたと考えられる。

(3) 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

Saile 鉱山鉱区内のトレンチ調査により、枕状溶岩とベントナイト層のコンタクトが確認され、上記の地質鉱物学的証拠からナチュラルアナログとなる過去に高アルカリ地下水との相互作用があったベントナイトとして、露頭の観察、試料の採取、鉱物・化学分析、物理試験等を実施し、以下のことが明らかになった。

トレンチの枕状溶岩直上のコンタクト部のベントナイトには、枕状玄武岩の波動的な表面からほぼ等距離の幅 (約 40cm 程度) で主に炭酸塩鉱物 (方解石) による特徴的な白色変質帯 (Bleached Zone)が見られるが (図 1.3.1-3)、露頭スケールでスメクタイトのアルカリ変質の傾向を示す明確な鉱物組成の変化はない。また、この変質部は枕状溶岩の波動的な表面からほぼ等距離の幅で分布していることから、高アルカリ地下水が、オフィオライト基盤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。

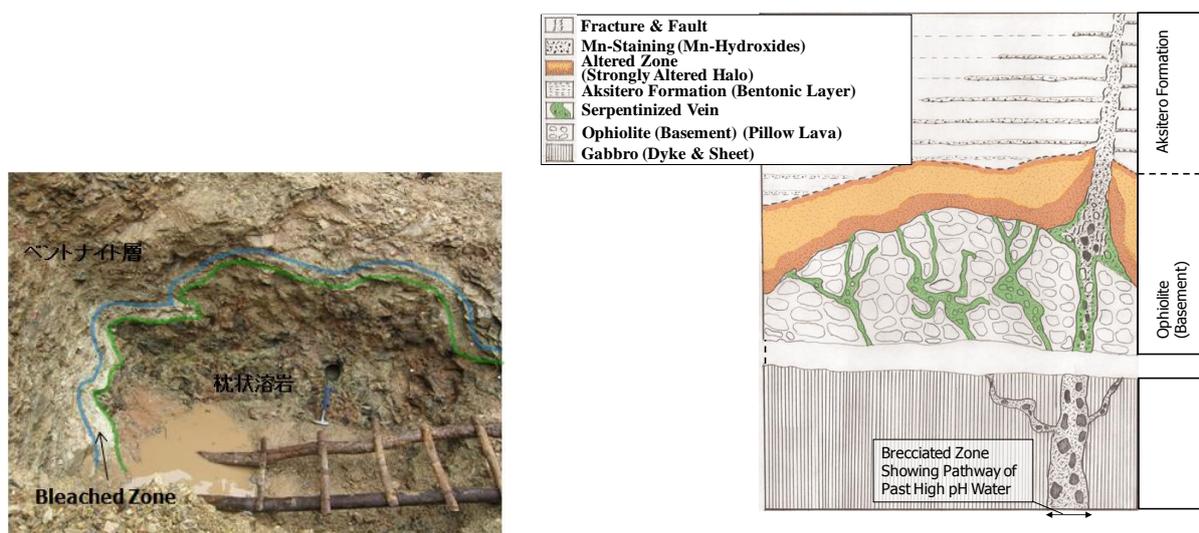


図 1.3.1-3 トレンチの枕状溶岩-ベントナイト層接触部 (左) と観察結果に基づく模式断面図 (右)

Bleached Zone の方解石を含むベントナイトは、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ある (図 1.3.1-4)。これは、ベントナイトの空隙に方解石が沈殿したことが主要因であり、アルカリのベントナイトの性質そのものへの影響は小さい一方で、空隙の減少で物質移行を抑制する状態になった可能性が高いと考えられる。

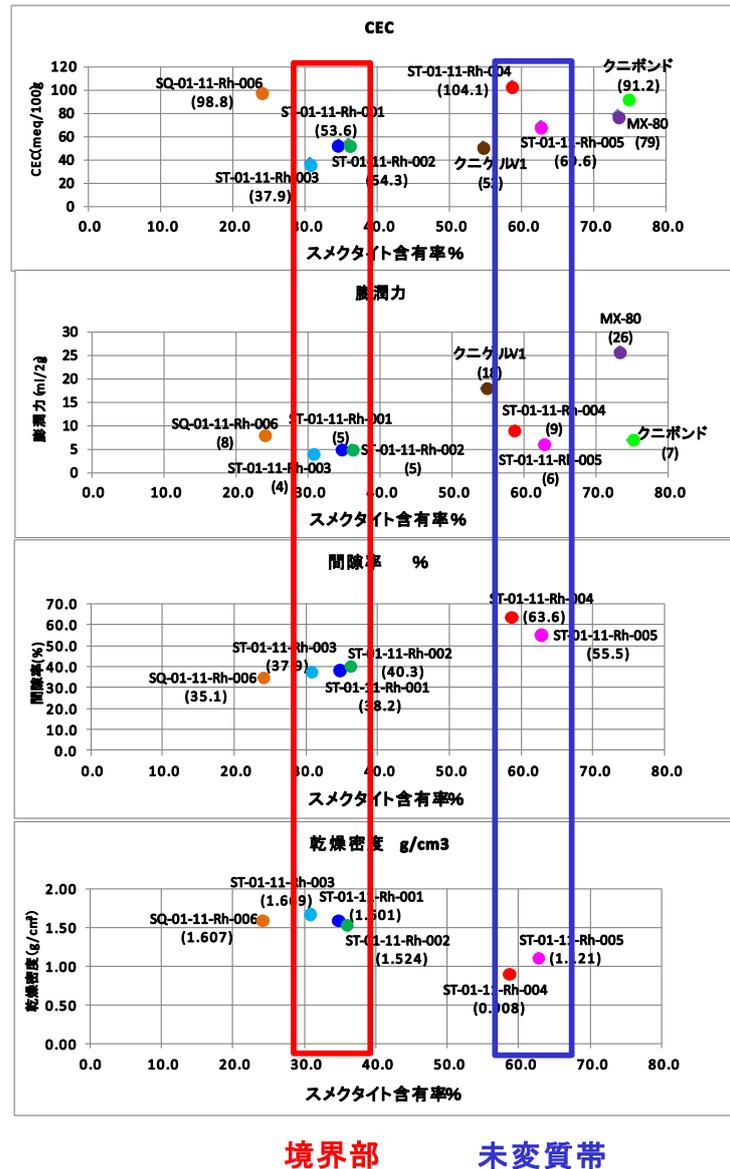


図 1.3.1-4 スメクタイト含有率と各基本物性との関係

トレンチの枕状溶岩-ベントナイトの接触界面 (図 1.3.1-5(a)) では、アルカリ変質反応により生成した、密度の低い変質ベントナイトゾーン (図 1.3.1-5(b)) と密度の高い鉄濃集帯が確認され、変質ベントナイトゾーンでは、Ca-沸石、シリカ鉱物及びカリ長石、鉄濃集帯では、粒状組織の針鉄鉱 (ゲーサイト) と羽毛状のノントロナイトとカリ長石が同定された (図 1.3.1-6)。この変質反応による影響範囲は、約 5mm に制限されており、鉄濃集帯の外側は未変質ベントナイトであることから、この鉄濃集帯がアルカリ溶液の移動を阻止する役割を担ったものと考えられる。

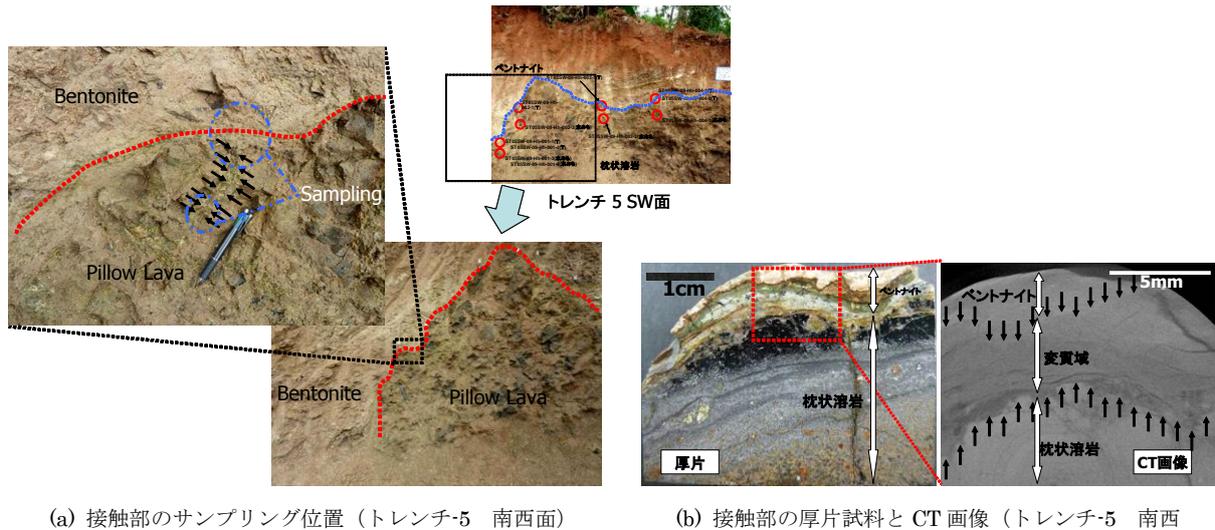


図 1.3.1-5 ベントナイトー枕状溶岩接触部のサンプリング (トレンチ-5 西南壁)

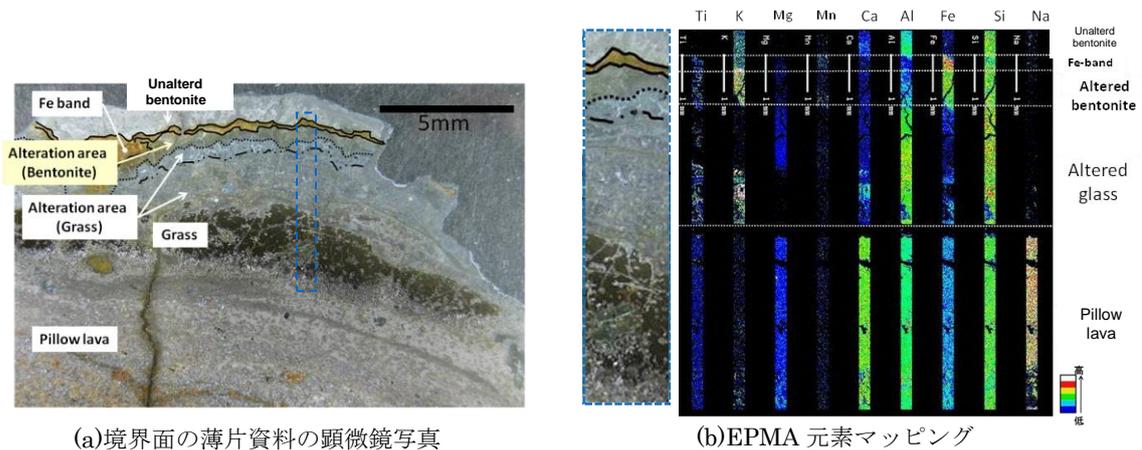


図 1.3.1-6 トレンチ-5 のベントナイトー枕状溶岩の界面の顕微鏡観察と元素マッピング

(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(かんらん石、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、2・八面体型モンモリロナイトの層間陽イオンである Ca との陽イオン交換反応により Fe 型化 (Fe-モンモリ

ロナイト) し、一部は溶解反応を伴い鉄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 1.3.1-7)。

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 (クリストバライト等) が生成されたものと解釈できる。

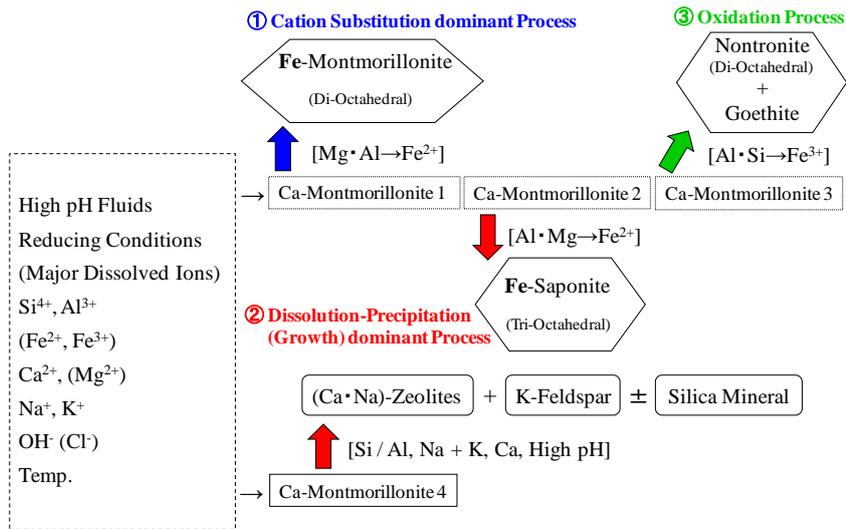


図 1.3.1-7 アルカリ環境下の Ca-モンモリロナイトの鉱物学的変遷過程

(5) 高アルカリ地下水とベントナイトの反応時間スケール

SARA(Single-Aliquot Regeneration and Added-dose)法による熱ルミネッセンス (TL: Thermo-Luminescence) 法年代測定により、断裂系充填物の方解石が数 10Ka(kilo-annum : 1000 年前)オーダーと評価された (図 1.3.1-8)。

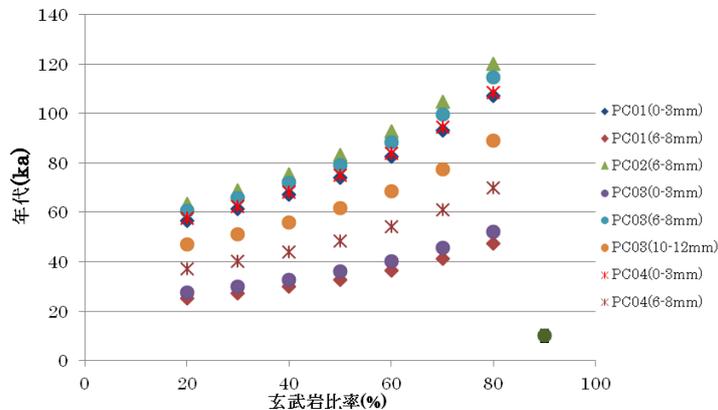


図 1.3.1-8 断裂系充填物の玄武岩比率と方解石の TL 年代

Zambales オフィオライトの生成年代については、斑れい岩中のジルコンの 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[33]、Aksitero 累層（ベントナイト）で 37.2~23.0Ma(Mega-anuum : 100 万年前)（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、Saile 鉱山採石場の断裂系が 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。

(6) Fossil Type のナチュラルアナログが示すベントナイトの長期健全性

1) Bleached Zone の規模（範囲と程度）

Bleached Zone の範囲としては、高アルカリ地下水の浸水フロント（反応フロント）として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、この変質部は枕状溶岩の波状的な表面からほぼ等距離の幅で分布していることから、高アルカリ地下水が、オフィオライト基盤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멕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、界面のアルカリ変質帯では鉄サポナイト、鉄濃集帯（ノントロナイトと針鉄鉱）、カリ長石等明確なアルカリ変質鉱物が見られるが、顕微鏡スケールで 5mm 程度の幅である。

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、ノントロ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

Bleached Zone の方解石を含むベントナイトは、未変質ベントナイトに比べ、ス멕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あり、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。

4) マクロ的なフィールドの事実

基盤岩との境界部などでベントナイトが大規模に変質している場所は全く見られず、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) まとめ

これら”Fossil Type”のナチュラルアナログサイトである Saile 鉱山とその周辺地におけるベントナイトのアルカリ変質に係わる概念モデルを図 1.3.1-9 に示す。アルカリ地下水環境下のベントナイトは、図 1.3.1-9 に示す変質の規模、変質鉱物の生成プロセス、ベントナイト鉱床のそのものの存在に加え、基本物性等の観点から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。

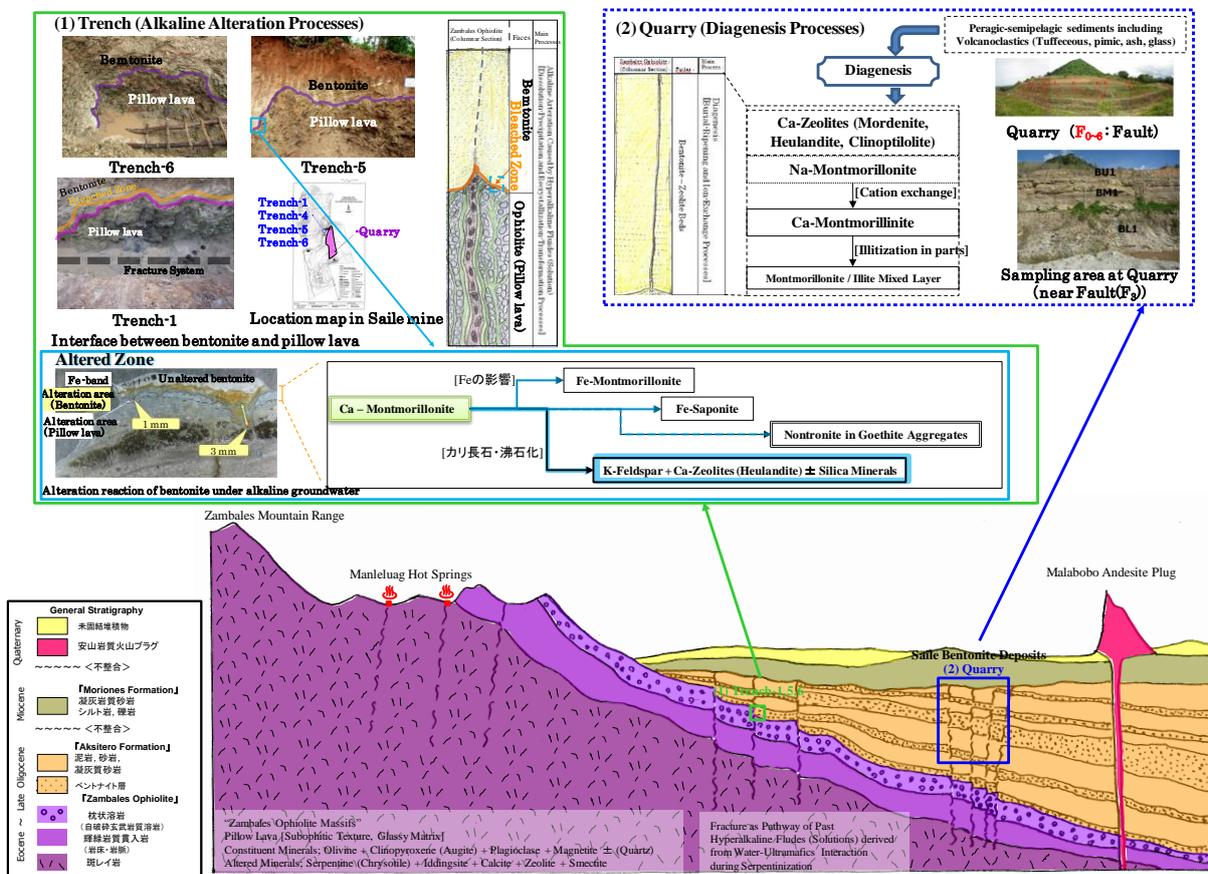


図 1.3.1-9 Saile 鉱山とその周辺地におけるベントナイトのアルカリ変質に係わる概念モデル

1.3.2 Active Type のナチュラルアナログ

平成 24 年度までの調査により、前節 (1.3.4) でまとめた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から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を明らかにすることができた一方で、このサイトでのナチュラルアナログで対応可能な課題も明確になった。図 1.3.2-1 にそれをまとめる。

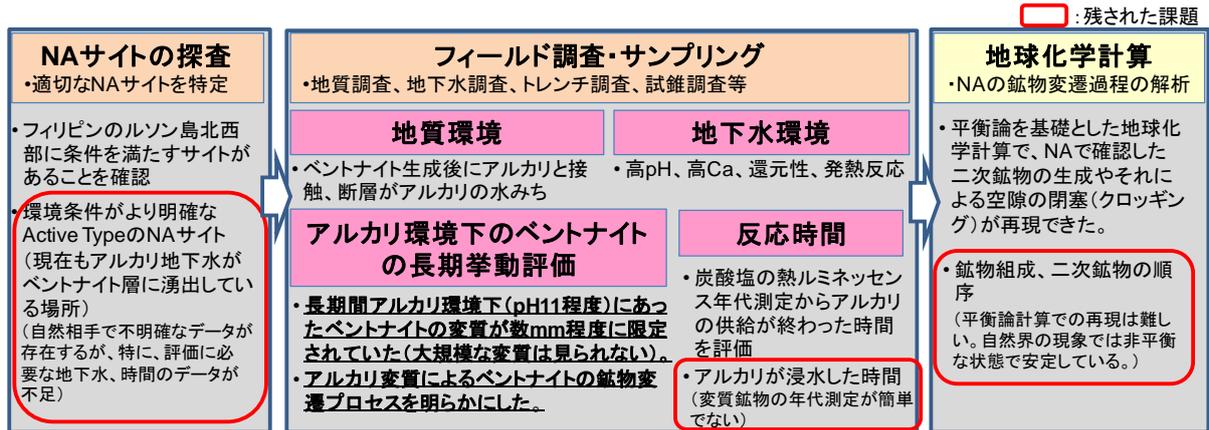


図 1.3.2-1 これまでの取り組みと抽出された課題

このフェーズ(平成 25~29 年度)で取り組むべき課題として、ナチュラルアナログデータを活用して、解析モデルの最適化を図り、人工バリアの長期挙動(ベントナイトのアルカリ変質)の予測結果の正しさをナチュラルアナログから補強することがあげられる。これは、実験・解析・ナチュラルアナログによる総合的な長期挙動評価による人工バリア長期挙動評価の信頼性向上と言い換えることができる。このようなナチュラルアナログの目標を達成のために、様々な条件のナチュラルアナログの証拠の取得し、年代測定や解析による、反応時間やアルカリ変質反応のメカニズムとその反応を抑制・促進する環境条件の評価することは不可欠であると考え。特にこれまで対象としてきた Fossil Type のサイトでは環境条件が明確でない(過去に浸出していた)アルカリ地下水の地球化学特性とその反応時間について、それらがより明確に理解できる場として、現在もなおアルカリ性地下水が浸出している Active Type のナチュラルアナログを見つけ出し、そこでの観察、試料採取と分析によりベントナイトの長期のアルカリ変質に関する直接的な根拠となるデータを取得することが重要な課題であると考え。このようなデータが得られれば、反応時間も含めたアルカリ変質現象の解釈に基づき、解析モデルの改良が可能であり、それによる処分場における人工バリア長期挙動評価の信頼性向上につなげることが可能となる。

(1) Bigbiga 地区のナチュラルアナログ

以上の背景を踏まえ、Active Type の露頭の発見可能性が期待される調査候補地として、Saile 鉱山の南南東 30km に位置する Bigbiga 地区があげられる。Bigbiga 地区では、Aksitero 累層

の分布域に pH9.3 のアルカリ地下水の自噴井が存在することが確認されていることから、Active Type のナチュラルアナログとなりうる第一の調査候補地として、予察調査も含め平成 23 年度より調査を実施してきた。ここでは、Active Type のナチュラルアナログ調査として実施した昨年度[34]までの調査結果をまとめる。

1) 地質概況

Bigbiga 地区には、Zambales オフィオライトを整合的に累重する Aksitero 累層が Zambales オフィオライト複合岩体の東縁に細長い谷地形を埋める「Trough タイプ」の堆積構造で分布している (図 1.3.2-2)。岩相・岩質については、Saile 鉱山が存在する北部の堆積物は凝灰岩質砂岩～粘土岩であるのに対して、Bigbiga 地区の南部では石灰岩質砂岩～泥岩～シルト岩と塊状な石灰岩が優勢であるが、薄層のベントナイト質砂岩やベントナイト質泥岩では、特徴的な伸長されたパミスが観察される。この地層が「鍵層」として層序・層位を考察する上で有効である。また、局所的であるが、火山性石質岩片を伴う砂質タービタイト (混濁流により深海に運ばれ堆積した陸源堆積物) や海底スランピング堆積物 (未凝固ないし半凝固の堆積物が、斜面を一団となってすべり下った堆積物) が観察される。

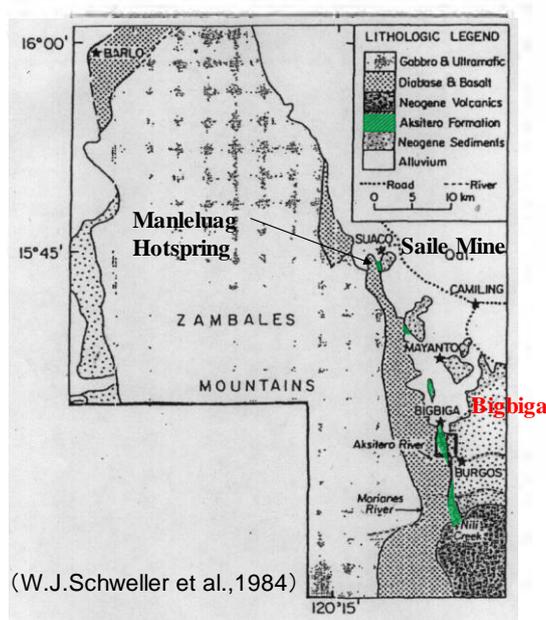


図 1.3.2-2 Bigbiga 地区及び Saile 鉱山周辺地区の Aksitero 累層の分布

2) ナチュラルアナログサイトの探査

Bigbiga 地区の調査サイトである Fish Pond 北側には NNE-SSW 系の正断層で落差 (DH2A 孔-DH2B 孔間) が約 3m 程度の断層系が存在する。Bigbiga 地区でのアルカリ地下水の賦存については、断層系近傍の Aksitero 川岸 (pH8~9)、自噴井戸は Well-1 (孔底深度:-19m,

pH9.1~9.5) と、湧水井戸は Well-3 (孔底深度: 約-100m, pH8.3~9.3) および、割れ目の発達しているオフィオライト基盤岩 (自破碎玄武岩質溶岩) 中の湧水ため池 (pH 8.7) が確認されている。また、アルカリ地下水に含有されるガス (メタン<CH₄>・水素<H₂>ガス) 検出調査から、断裂系付近と Well-1 付近に主にメタンガスの濃集箇所 (計測ポイント) が確認され、堆積層の薄い Aksitero 川西岸では水素<H₂>ガスも一部検出されており、Poonbato 地区や Manleluag 温泉保養地区等 Zambales オフィオライトのアルカリ湧水と同様に蛇紋岩作用に伴い形成されたアルカリ地下水がこの地区に分布していることが示唆される。

Bigbiga 地区の Fish Pond 周辺では、上記の地質調査、地下水調査、ガス計測の他に、トレンチ調査 (2ヶ所)、試錐調査 (10孔) を実施した。それらの調査地点と主要な計測結果を図 1.3.2-3 にまとめる。

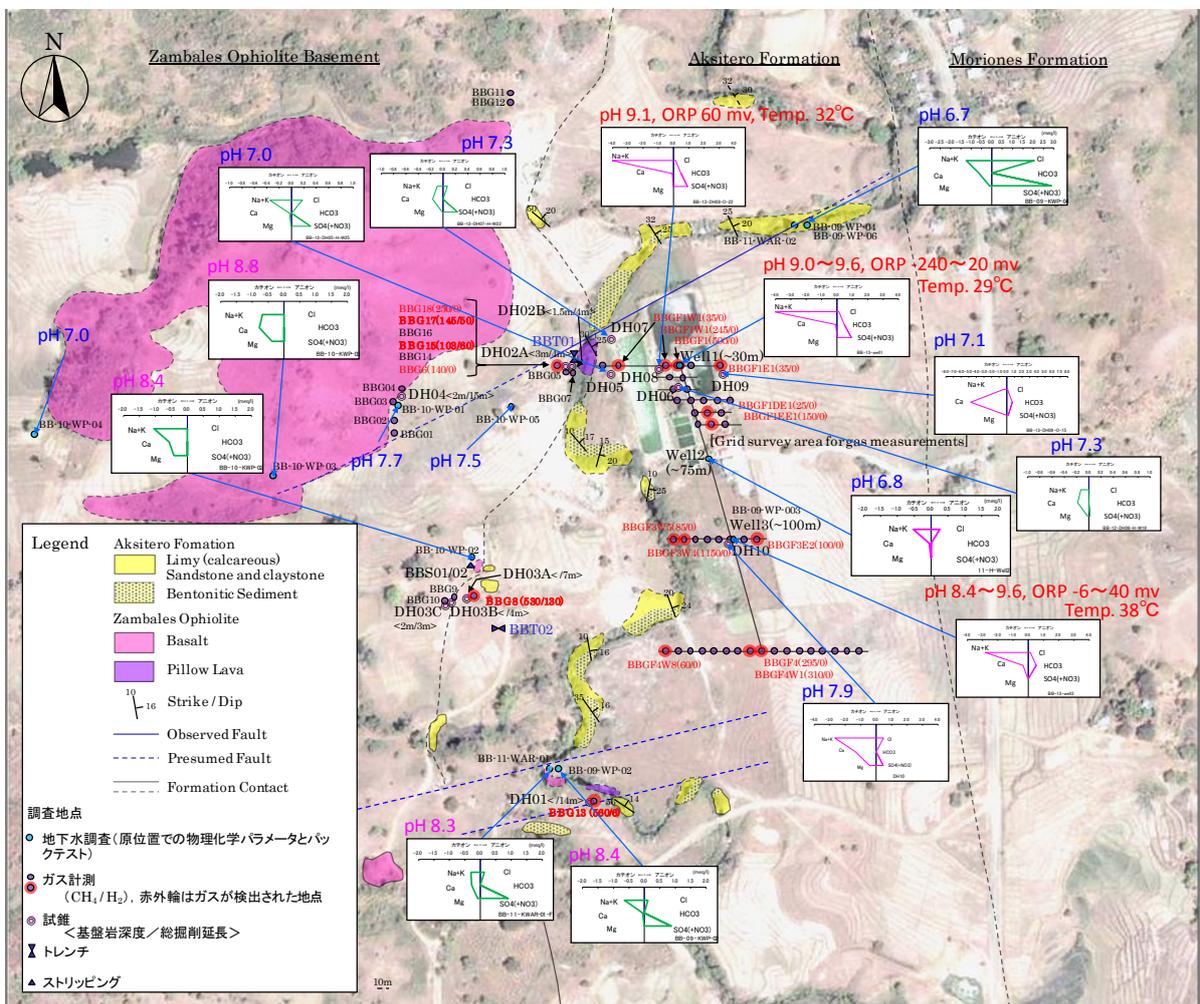


図 1.3.2-3 Bigbiga 地区の Compilation Map

また、裂か地下水 (断裂系に存在する地下水) 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みることを目的として実施した TEM 法 (過渡現象電磁探査法)

による地上物理探査により（図 1.3.2-4 の LP1～5 が測定した領域）、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ラ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（図 1.3.2-5）。

トレンチ調査（図 1.3.2-3 の BBT01, BBT02（図 1.3.2-6 左））では、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珪質泥岩が塊状に産状すること（図 1.3.2-6 右参照）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ている。

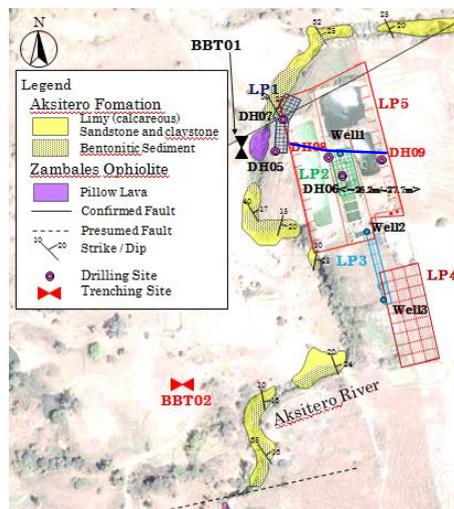


図 1.3.2-4 Bigbiga 地区での TEM 法物理探査の測定領域

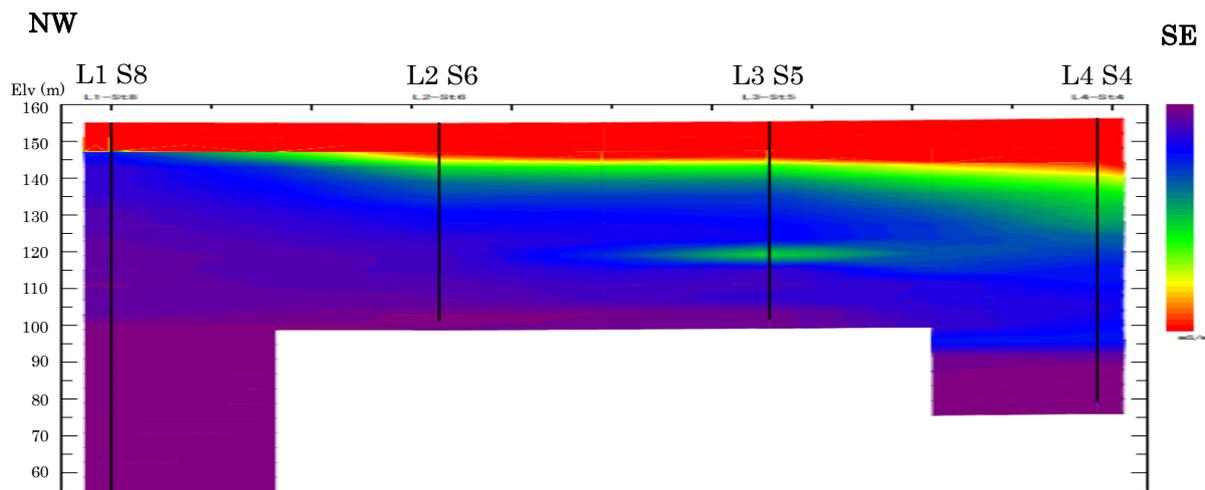


図 1.3.2-5 LP5 グリッド L1S8～L4S4（図 1.3.2-4 の青線の断面）の電気伝導率（2D）

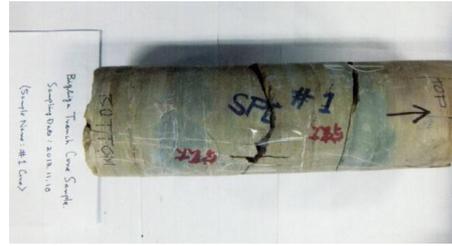


図 1.3.2-6 トレンチ(BBT02)の全容 (左) と採取した大口径コア (右)

試錐調査は、NNE-SSW 系断裂系の近傍等で実施した 3 か所 (DH05 孔～DH07 孔) に加え、上記の地上物理探査、地下水の地球化学的調査 (計測)、トレンチ調査の一連の調査データ・知見などの総合解析により、Well-1 の近傍 (DH08 孔)、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 孔)、Well-3 の近傍 (DH10 孔) を試錐地点として、試錐孔の掘削、コア採取とコア観察及び分析、揚水試験・採水と分析を実施した。

DH08 孔の掘削においては、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 (同時に近傍の Well-1 が DH08 孔の掘削水の影響で白濁した (図 1.3.2-7))、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斑れい岩 (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。一方、DH05 孔～DH07 孔及び DH09 孔ではアルカリ地下水は確認できなかった。



図 1.3.2-7 DH08 孔の掘削状況 (左) と Well-1 (近傍の自噴井) の白濁 (右)

DH10 孔は、Aksitero 累層と Zambales オフィオライトの基盤岩である安山岩質溶岩 (Pillow Basalt) とは深度 34.3 m で接していた。DH08 孔の基盤深度が 11.5m であるのに比べ、DH10 孔周辺ではステップフォルトにより基盤深度が深いため、堆積する石灰岩質層が厚い。Aksitero 累層 (海洋性堆積物) の岩質/岩相は浅部から順に砂岩泥岩互層、石灰質砂岩 (一部凝灰質)、泥岩 (粘土質) である。また、38.0~39.0 m に断裂系 (割れ目集中帯)

が存在する。

基盤岩上の Aksitero 累層のスメクタイトを含む粘土岩は DH08 孔でも同様に見られ、顕著な「鏡肌 (Slickenside)」と断層粘土 (Gouge) を随伴する断層帯が観察された。

DH10 孔の地下水は、掘削位置が Well-3 (pH8.9) 近傍で 100 m 近くまで試錐調査を実施したが、アルカリ性の地下水にはあたらなかった。ただし、揚水試験から DH10 孔の表層水の流入の影響が大きかったことを加味すると、この地点での基盤岩だけでなく直上の堆積層までアルカリ地下水が流動していた可能性がある。

3) アルカリ環境下でのベントナイトの長期変質プロセス

Bigbiga 地区の試錐孔 DH08 及び試錐孔 DH10 から採取したそれぞれのコア試料からは、アルカリ地下水がベントナイト質の粘土岩に作用していたと考えられることから、低アルカリ地下水が長期間ベントナイト質堆積層に作用する現象を自然界で適切に抽出可能なナチュラルアナログとして、概念的な水理地質構造モデルによる地下水の地化学特性と詳細な鉱物学的・鉱物化学的特性の観察・分析に基づき、ベントナイト質堆積層のアルカリ変質反応の地球化学的プロセスを考察した。

低アルカリ性地下水の水理特性・流動系を検討するために、既存井戸(Well-1)とその近傍の試錐孔(DH08)、および、これらの南西に位置する既存井戸(Well-3)とその直近の試錐孔(DH10)を包含した概念的な二次元水理地質構造モデルを作成した (図 1.3.2-8)。

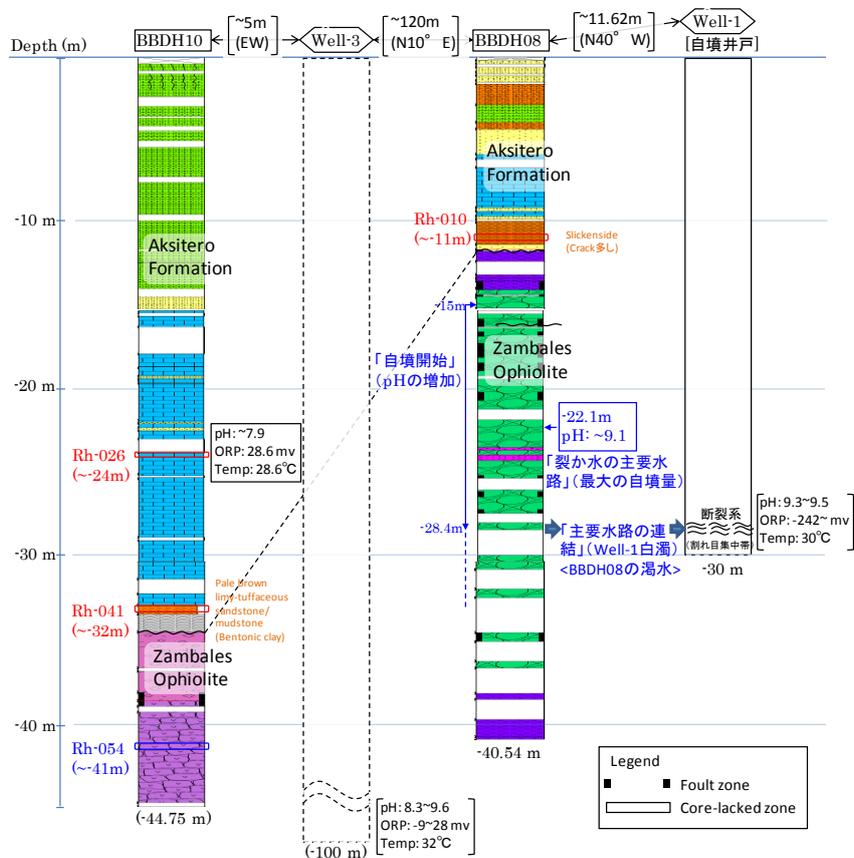


図 1.3.2-8 Bigbiga 地区の二次元水理地質構造概念モデル

図 1.3.2-8 から、低アルカリ性地下水の流動位置（深度）を検討すると、その流動位置は、基盤岩内および近傍に発達している断裂帯内部にあることから、DH08 孔では 11m、DH10 孔では、34m と算定できる。その流動方向について試錐柱状図から基盤岩深度から動水勾配を想定すると、低アルカリ性地下水は、DH08 孔（基盤深度：約 11m）から東の既存井戸(Well-1)へ流動し、南に位置する DH10 孔（基盤深度：約 34m）へ流動するものと考えられる。更に、DH08 孔（基盤深度：約 11m）において、堀削深度約 15m 近傍から自墳開始し、その自墳量は深度約 22m(pH 9.1)で最大（目視）になった。その後、堀削深度約 28m で既存井戸(Well-1)が堀削泥剤により白濁した。この白濁現象は、DH08 孔と既存井戸(Well-1)の低アルカリ地下水の裂か水の主要な水路が連結していることを意味する。

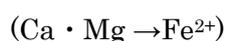
この自墳深度や白濁深度での母岩は、細粒斑れい岩 / 輝緑岩の岩脈である。この岩脈は、断裂系（割れ目帯）がよく発達しているために、おそらく、低アルカリ地下水の水路としての空間場の提供に寄与したものと考えられる。また、この岩脈の上位には、脈状の非晶質シリカ鉱物の充填が顕著で、おそらく上方への定常量の流入を低減するようなキャップロック（遮水帯）としての役割も担っていたものと考えられる。

この低アルカリ性地下水は、降雨水-Zambales オフィオライトとの相互作用、特に、地下水形成場の母岩の造岩鉱物（カンラン石、輝石類の苦鉄質鉱物）とその変質鉱物との地球化学的反応（蛇紋岩化作用）により形成されたものと考察出来る。水質は、 $\text{Na}^+(\text{K}^+)(\text{Ca}^{2+})-\text{HCO}_3^-$ タイプで若干の Cl^- と SO_4^{2-} （化石海水の影響）を含み、 pH は $9 < \text{pH} < 10$ である。

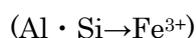
このような環境下でのベントナイト質堆積物に含有されているモンモリロナイトの低アルカリ性地下水との変質反応をまとめると以下ようになる。

① モンモリロナイトの鉄イオンとの反応を伴う変質（溶解・沈殿）反応

(Ca)-モンモリロナイト（2・八面体）→ サポナイト（3・八面体）/ 1 部 鉄サポナイト



→ ノントロナイト（2・八面体）



② モンモリロナイトの溶解・沈殿反応

(Ca)-モンモリロナイト→斜プチロル沸石+カリ長石+方解石+非晶質シリカ鉱物

この低アルカリ変質反応は、Saile ベントナイト-沸石鉱床の周辺部のトレンチ内で観察された”Fossil Type”のものと類似している。特にアルカリ変質プロセスに鉄鉱物の影響があることが Bigbica でも確認され、セメント、鉄、ベントナイトを構成材料とする TRU 処分場の長期挙動における鉄鉱物の評価の重要性が認識された。

Bigbica のナチュラルアナログでは、時間スケールは明確でないが、低アルカリ条件でも長期の相互作用ではモンモリロナイトがアルカリ変質する事例が観察された。ただし、変質の程度やもともとのベントナイトの鉱物組成や物理条件については、このサイトではデータ

の取得が十分できないため、この事例だけをもって、処分場での低アルカリ環境下のベントナイトの変質が問題となるわけではない。

したがってこれら Bibiga の調査結果から、当ナチュラルアナログ調査において、トレンチによる系統的サンプリングにより変質による鉱物組成や物理状態の空間的な変化を把握することが重要であり、これが今後の課題として明確になった。

(2) 中央／南部パラワン地域のナチュラルアナログ

1) 地質概況

パラワン島は、南部地域(Southern Palawan)にオフィオライト、北部地域(Northern Palawan)には、異地性(中国大陸の東南部に分布する岩石を起源)の堆積層(岩)とそれらの原岩の一部が変成作用により形成された各種変成岩(下部角閃岩相の変成度)で特徴づけられる。

パラワンオフィオライトは超塩基性岩、苦鉄質岩、珪長質岩と深海性堆積岩から構成され、その成因は時限的であり、その起源や組成は、地球内部の上部を構成する海底地殻と上部マントルの柱状断片と考えられている[35]。従って、オフィオライトは、マグマ弧の発達する基盤を代表していると言える。パラワンオフィオライトの岩相は、下位から、①未変質なもの・蛇紋岩化した斜方輝石かんらん岩(ハルツバージャイト)、ダナイト岩、輝岩(パイロキシナイト: Pyroxenite)からなる「Mt. Beaufort Ultramafics」、②かんらん石斑れい岩、トロクトライト(Troctolite)を含む粗粒斑れい岩から成る「Stavelly(Range) Gabbro」、③砂岩とチャートを挟むスピライト質玄武岩からなる「Espina 累層」で構成されている[36]。

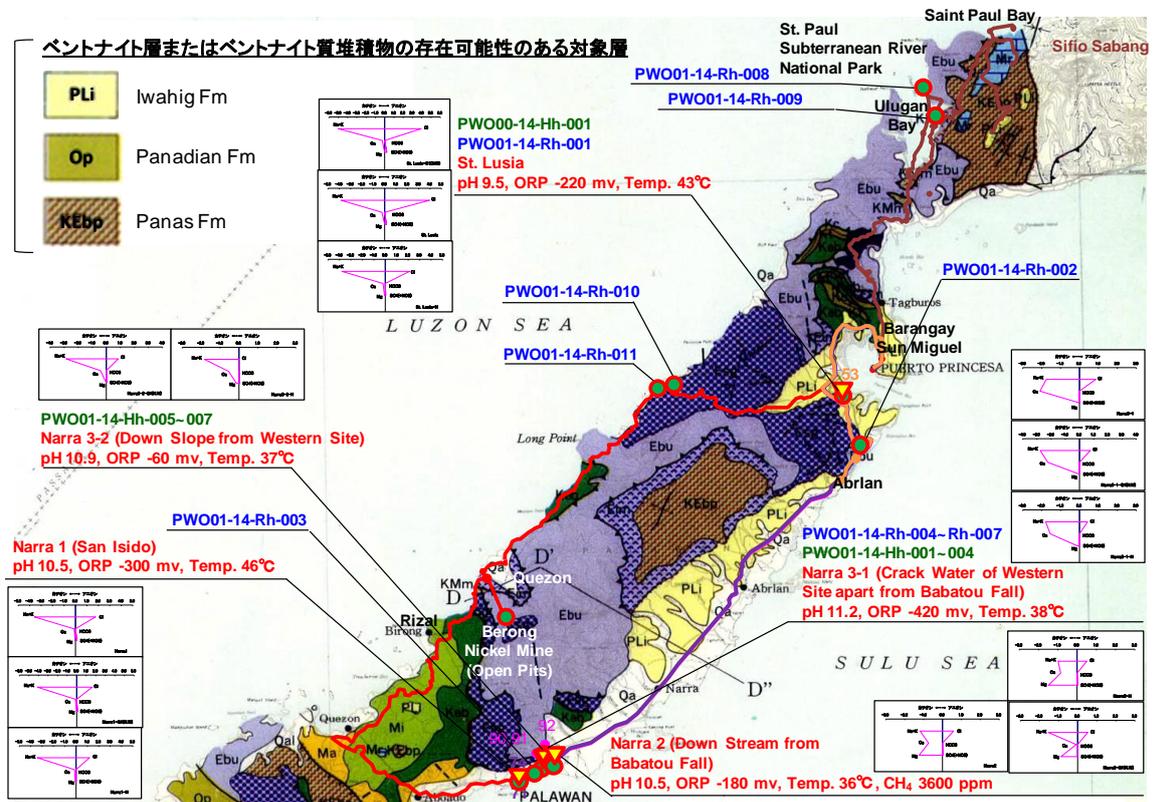
このパラワンオフィオライトを累重する Paleogene 時期の堆積岩は、砂岩、頁岩と少量の礫岩で代表される碎屑物質(例えば、Panas/Pandian 累層)を原岩としている。そして、これらの堆積岩に押しつぶされたパラワンオフィオライトの定置は、Late Eocene 時期の大洋底拡大の結果により生じたものと考えられている[37]。南部パラワン地域における堆積岩は、下位から Panas、Pandian、Isugod 層累で構成され、その岩相はタービタイト質(泥岩・シルト岩の挟在層)・塊状の石英・長石質碎屑物のものと、Sumbling、Ransang、Iwahig 累層で構成される含化石または非化石の多種の石灰岩である。また、Panas、Pandian や Sumbiling 累層での岩相変化は、それらの層序内と累層間のコンタクト部で観察される。

2) アルカリ地下水の地球化学的挙動

中央／南部パラワン地域の地質図とフィールド調査のルート MAP 及び地下水調査結果を図 1.3.2-9 に示す。オフィオライト中の断層または亀裂に伴う高 pH ($10 < \text{pH} < 12$) のアルカリ地下水の湧水を複数箇所(Narra(ナラ)地区及び St. Lucia(セントルシア)温泉)確認した(図 1.3.2-10)。これらのアルカリ地下水はほとんどの表層附近の湧水であるが(降雨水による希釈の影響大)、pH と温度が高く、酸化還元電位が低く(還元性)、総じて Mg^{2+} 濃度が低く、 Ca^{2+} 濃度が高い蛇紋岩化作用に伴うアルカリ地下水の典型的な特徴を示す(図 1.3.2-11～図 1.3.2-14)。また、岩石・鉱物学的観点からも、パラワンオフィオライトが

Zambales オフィオライトと比較してより塩基性であることは、蛇紋岩作用が顕著であり、測定したような高アルカリ地下水が形成される十分な環境であることからいえる。

Na⁺と Cl⁻濃度は明確に pH と負の相関を示すことから(図 1.3.2-11 及び図 1.3.2-14 参照)、アルカリ湧水サイトによって海水(または化石海水)の影響を受けていることが考えられ、St. Lucia が最もその影響が強い。Ca²⁺濃度と pH の正の相関はアルカリ地下水の形成過程で Ca²⁺により pH が上昇したためであり(図 1.3.2-12 参照)、また、Si 濃度と pH の負の相関はオフィオライト基盤岩の塩基性を示しているためであり(図 1.3.2-13 参照)、それぞれオフィオライト中の超塩基性岩と天水との水-岩石反応による蛇紋岩化作用による高 pH のアルカリ地下水の生成環境であることを示している。また、Zambales オフィオライトのアルカリ地下水(Poonbato)との比較では、Ca²⁺より Na⁺濃度の方が高い点は異なるが、Narra3-1 も海水影響があることも考慮すると、オフィオライト基盤岩中で生成されたアルカリ地下水の組成は比較的近いものと推測される。



(黄色下三角: 採水地点、緑丸: 岩石試料採取地点)

図 1.3.2-9 中央/南部パラワン地域の地質図とルートマップ及び調査地点の水質



(St. Lucia)



(Narra 2)

図 1.3.2-10 中央／南部パラワン地域の湧水地点での採水・水質測定

表 1.3.2-1 パラワンと Zambales(ルソン島北西部)のアルカリ地下水の地球化学的特性の比較

Site	Poonbato	Manleluag HSp. - MI	Bigbiga Well-1	Bigbiga Well-3	Bigbiga DH10	Palawan Narra-1	Palawan Narra-2	Palawan Narra-3.1	Palawan Narra-3.2	Palawan St. Lucia	low alkali cement leachates (PNC 1997)*
Sample No.	PB-10-KWP-01	M1-11-KWP-01	P-22	P-32	P-32	P-42	P-52	P-62	P-72	P-82	
pH	11.62	10.84	9.52	8.93	7.91	10.52	10.56	11.22	10.93	9.59	11.09
ORP(Eh) [mV]	27.6	-662	8	40	55	-302	-177	-414	-60	-215	-
Temp [°C]	27.6	34.1	29.2	27.8	28.6	45.2	35.5	37.5	37.0	42.7	60
CH ₄ [ppm]	>5000	>5000	0 (0-560)	0	0	0	340~3600	0	0 (>5000)	-	-
H ₂ [ppm]	50~1320	62	0 (0-130)	0	0	0	0	0	0 (>700)	-	-
Na ⁺ [ppm]	23.6	1.58	100.6	131.5	94.35	104.7	34.2	61.6	64.0	115.3	43
K ⁺ [ppm]	6.85	0.28	1.05	1.62	3.07	1.08	1.66	3.52	3.47	3.13	13
Ca ²⁺ [ppm]	37.4	23.6	1.34	8.43	1.28	2.95	1.47	44.0	6.88	5.19	16.8
Mg ²⁺ [ppm]	0	0.17	0.06	1.05	7.14	0.01	7.04	0.03	0.13	0.08	-
Si ²⁺ [ppm]	1.40	11.5	72.3	6.00	35.1	87.6	2.9	1.1	1.7	58.7	
Al ³⁺ [ppm]	0	20.3	0.01	0.04	0.45	0.43	0.35	1.79	1.31	0.01	0.3
Cl ⁻ [ppm]	-	16.6	4.50	20.0	17.0	58.0	19.0	27.0	30.0	140.0	-
SO ₄ ²⁻ [ppm]	-	-	48.0	34.0	22.0	3.90	0.52	0.12	0.47	11.0	-
HCO ₃ ⁻ [ppm]	124.1	73.5	135.6	0.3	12.9	95.5	15.5	0.5	261.2	501.8	-

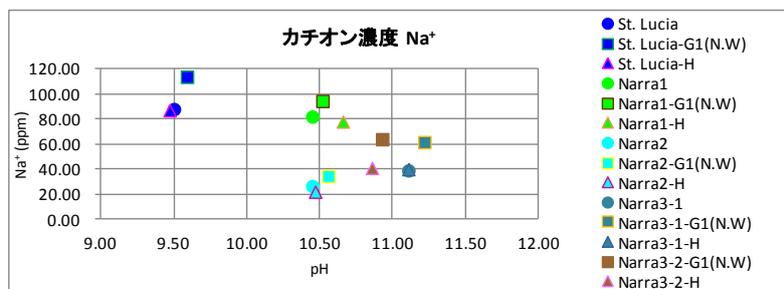


図 1.3.2-11 パラワンのアルカリ湧水の pH-Na⁺濃度関係図

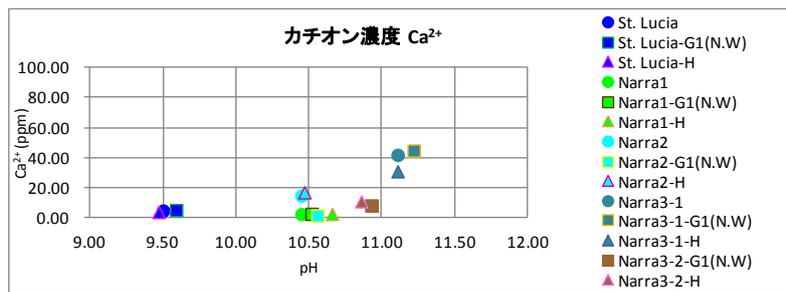


図 1.3.2-12 パラワンのアルカリ湧水の pH-Ca²⁺濃度関係図

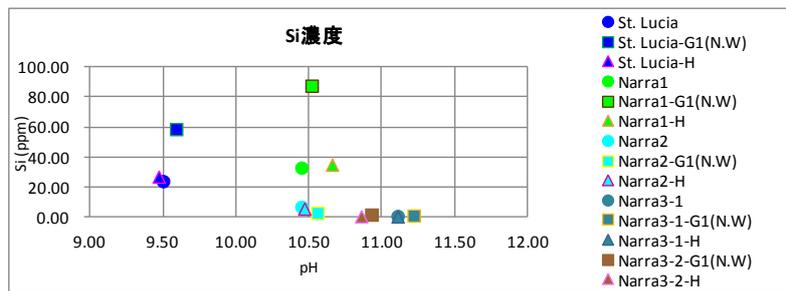


図 1.3.2-13 パラワンのアルカリ湧水の pH-Si 濃度関係図

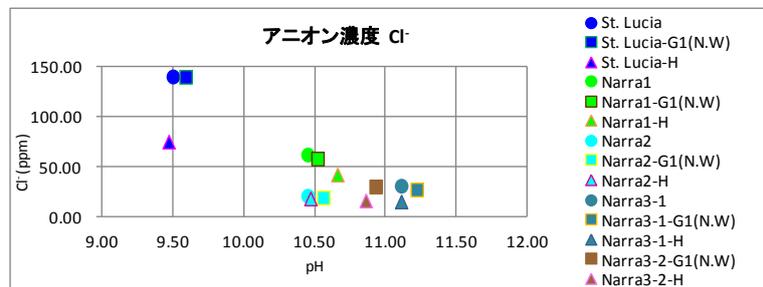


図 1.3.2-14 パラワンのアルカリ湧水の pH-Cl濃度関係図

3) ナチュラルアナログサイトの探査

Narra 地区では、高アルカリ地下水の湧出部に良く発達する石灰華(Travertine)の下位に粘土や土壌などが観察された(図 1.3.2-15)。その粘土質土壌試料はほとんどが方解石からなるものであったが、Zambales オフィオライトでは XRD で明確なピークが見られなかった蛇紋石や一部水滑石(Brucite)、霰石(Aragonite)を同定した。しかしながら、Narra 地区の高アルカリ泉の近傍では、ベントナイトのナチュラルアナログサイトとなり得るスメクタイトを含む凝灰質堆積物の明瞭な露頭は確認できなかった。

しかしながら、中央/南部パラワン地域では高 pH (10 < pH < 12) のアルカリ地下水が現在も湧出し、“Active Type” のナチュラルアナログサイトの重要な要件の一つである「pH11 程度のアルカリ地下水の賦存」を満たす有望な候補サイトは確認することができた。



(Narra3-1)



(Narra 3-2 : 石灰華の平坦地 (Narra3-1 の下流))

図 1.3.2-15 Active Type のナチュラルアナログの候補サイト

(3) ナチュラルアナログサイト成立性の評価

これまでの調査結果を踏まえ、Active Type のナチュラルアナログサイトとしての成立性を評価した。Active Type のナチュラルアナログサイトとしての具体的な成立要件（要素）は、①アルカリ地下水が pH 11 程度の高アルカリ地下水であること、緩衝材の候補材料の一つであるベントナイトのアナログとすれば、鉱物組成としては、②モンモリロナイトに富むベントナイト層またはベントナイト質堆積物が存在すること、アルカリ地下水の流路としての断層・亀裂の性状としては、③アルカリ地下水の流路となり得るオフィオライト基盤岩中の断層・亀裂がアルカリ地下水の形成・貯留場からベントナイト層へ直接連結していることである。これまでの調査結果や文献調査などから、“Active Type” のナチュラルアナログサイトとしての現状での相対的評価のための判断程度を表 1.3.2-2 に示す。

Bigbiga 地区は、①アルカリ地下水の賦存については、当地での最高 pH は、既存井戸(Well-1)の湧水地下水における pH9.0~9.6 の範囲であり、還元環境を示す。このアルカリ地下水は、Zambales オフィオライトと地下水との相互作用により形成され、Manleluag の裂か水は pH10.1 (母岩は細粒斑れい岩)、Poonbato の裂か水は、pH 11.7 (母岩はかんらん岩)、そして、Bigbiga の裂か水は、pH 9.6 (母岩は枕状玄武岩または自破碎玄武岩) である。より高い pH の地下水の形成はより母岩の塩基性度が大きくなる必要があり、Bigbiga 地区でのアルカリ地下水形成場の母岩が、枕状玄武岩または、自破碎玄武岩であることから、①の要件である高アルカリ地下水の賦存の可能性は低いと考えられる。

②モンモリロナイトに富むベントナイト層またはベントナイト質堆積物の存在については、ベントナイト形成の原岩となる凝灰岩質層の存在環境が地質環境条件となる。これまでの地表調査等により、凝灰岩質堆積物は、Bigbiga 地区で広く分布している石灰質砂岩・シルト岩・泥岩層中に挟在して分布しているが、薄層で、ベントナイト化が顕著でない。基盤岩の直上にある安山岩起源で、淡褐色の凝灰岩質砂岩には、相対的にモンモリロナイトが多いが、薄層である。このモンモリロナイト形成の程度は、ベントナイトを形成する原岩の組成に依存するためであると考えられる。Bigbiga 地区では、石英安山岩起源の凝灰岩質層が多い傾向にあるた

め、対象地層としてのベントナイト層あるいは、ベントナイト質堆積物の更なる分布の可能性は低いと考えられる。

③アルカリ地下水の流路となり得る断層・亀裂については、Bigbiga のアルカリ地下水が裂か水であることから、断層・亀裂を通路として湧水していることが明らかである。しかし、このアルカリ地下水の流路となっている断層系（割れ目集中帯）の性状については、DH08 孔のみで確認されているが、ベントナイト質堆積物とのコンタクトを判定できる断層系（割れ目集中帯）の性状を目視確認出来ていない。また、①と②が同時成立する露頭（コンタクト部）が唯一基盤岩直上に限定されるため、そのコンタクト部が、より深部になることが懸念される。

以上のように、Bigbiga 地区をナチュラルアナログサイトとしてこれらの3つの成立要件のもと検討した結果、これらの成立要件がより満足される可能性は低いものと評価し、フィールドでの調査は今年度で終了することとした。

表 1.3.2-2 ナチュラルアナログサイトの地質・地下水の地球化学的特性

調査サイト	ルソン島			パラワン島	
	Saile麓山周辺	Bigbiga地区	Pinatubo地区	Palawan島の中央部・南部地区 (Narra地区)	
NAタイプ	Fossil Type	Active Type			
1. 地質	基盤岩	Zambales Ophiolite [44~45Ma*]		Palawan Ophiolite [43.8Ma**]	
	位置	上部地殻-沈み込み帯			中国(南部)の大陸地殻
		タイプ	海底地殻		
	対象層	時期	始新世(Eocene)		後期白亜紀~始新世
		対象層	Aksitero累層(遠洋性堆積物)		火山砕屑物・火砕流堆積物 濁平火砕流堆積物(最新世) Tarlac累層(漸新世・中新世)
ベントナイト層 (Saileベントナイト 沸石鉱床)			淡褐色石灰質・凝 灰質砂岩・泥岩	凝灰質堆積物 (ベントナイト質堆 積物)	Panadian累層(鮮新世) Panas累層(始新世) 遠洋性堆積物(一部タービタイト) 泥岩・シルト岩、一部凝灰質砂岩 積物)
2. 地下水 (湧水)	賦存状況	裂隙水(温水の湧出:オフィオライト-地下水の相互作用)			
	pH	Manleluag Springs(低温)	湧水井 (低温)	Loob Banga Creek (低温)	Narra springs (高温)
	水質	Mg ²⁺ , Cl ⁻ が低く、Ca ²⁺ が高い			Mg ²⁺ が低く、Cl ⁻ , NO ₃ ⁻ , Ca ²⁺ がやや高く、Na ⁺ が高い
		Ca ²⁺ -OH型	Na ⁺ (Ca ²⁺)-HCO ₃ 型	Ca ²⁺ -OH型	Ca ²⁺ -OH型
	母岩	細粒斑レイ岩	枕状玄武岩質溶岩 (自破砕玄武岩質 溶岩)	超塩基性岩(かん らん岩・ダナイト・ハ ルツバーサイト)	超塩基性岩(かんらん岩・ダナイト・斑 れい岩)・枕状玄武岩
サイトの 成立性	①高アルカリ 地下水の 存在 (pH10~11)	○	×	○	◎
	②対象地層 の分布	◎	○ (薄層)	○	○
	③高アルカリ 地下水の 流路(断層 系の存在)	◎	◎	◎	◎
	④コンタクト の確認 (①, ②, ③ の会合部)	△	△	○	○

【相対的評価のための判断程度】◎(十分満足する), ○(満足する), ○(今年度未調査、今後の課題), △(現時点での判断が難しい), ×(満足しない)

また、Active Type のナチュラルアナログ・ポテンシャルサイトの模試地質断面図に基づく概念図を Fossil Type ナチュラルアナログサイトと合わせて図 1.3.2-16 に示す。表 1.3.2-2 に基づく上記のサイト成立性評価において、高アルカリ性地下水が確認されたパラワン島が Active Type のポテンシャルサイトとして高く評価された。

今後、パラワン島での Active Type のナチュラルアナログサイトの探査においては、対象地

層に対する地質・岩石鉱物学的調査を実施することが不可欠である。そのためには、事前調査や文献調査にもとづいて、調査地域（調査ルートや地域）を選定し、集中的な地質調査をする必要がある。さらに、対象地層の分布、層序・岩質・堆積環境、深度等の情報をできるだけ把握した上で、高アルカリ湧水周辺でのトレンチ調査などを実施し、モンモリロナイトを多く含むベントナイト層またはベントナイト質堆積物の分布に関する十分なデータ・知見などを取得することが今後重要な課題である。

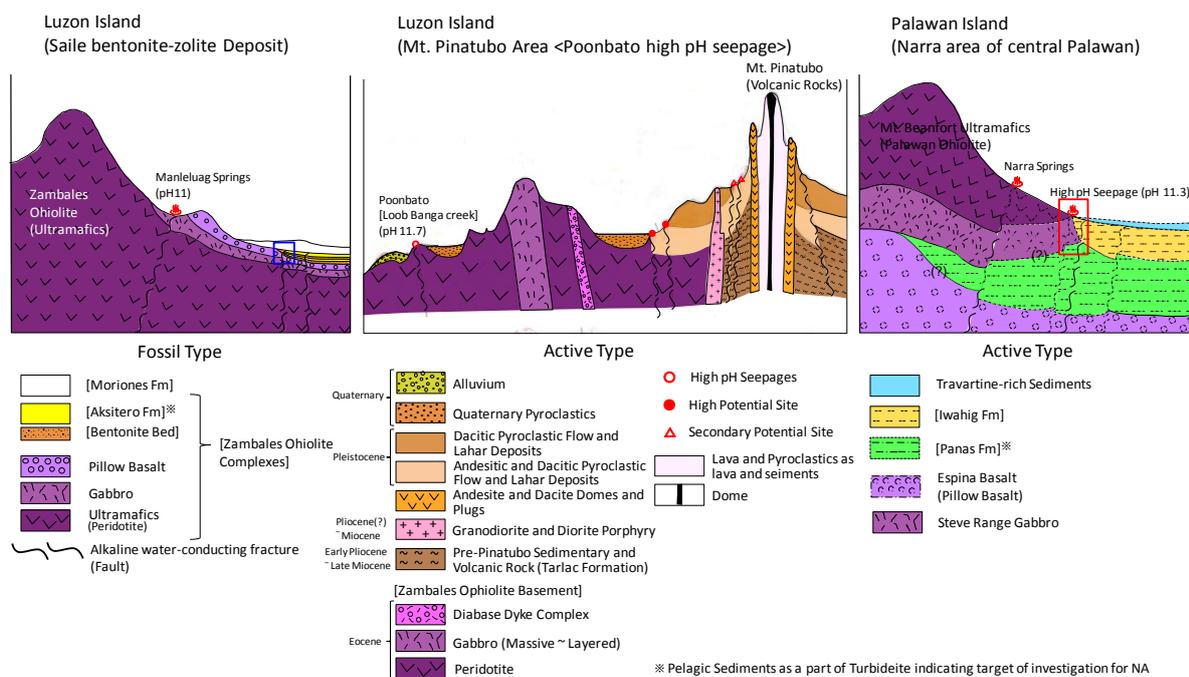


図 1.3.2-16 ナチュラルアナログサイトとしての模式地質断面の概念図

1.4 実施概要

平成 24 年度までの[20]、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（フィリピン国北西部の Saile 鉱山とその周辺地区：Fossil Type のナチュラルアナログ）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 のナチュラルアナログの）可能性が高いサイトの存在も確認され、フィリピン国のフィールドが、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。

平成 25 年度から 5 年間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ナチュラルアナログ調査を実施して、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とともに、変質鉱物の年代測定により反応時間を評価する。また、NA データを活用して地球化学計算を実施して、アルカリ環境下の鉱物変遷過程と閉塞（Clogging）現象及びその素反応の抑制・促進する条件を評価する。

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まとめた表 1.1.4-1 のナチュラルアナログ調査・研究の進め方に従い、本調査の全体計画を作成した。

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。

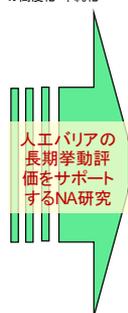
第3段階からが現地での本格的な調査・研究を開始するステージとなる。地質概査として、地質調査、地下水調査、及び本事業では高アルカリ地下水の湧出が断裂系に規制されることから断裂系調査を行い、高アルカリ地下水とベントナイト層が接触するアナログサイトを選定する。また、岩石鉱物学的調査、岩石化学的調査を実施して、ベントナイト層や高アルカリ地下水の基本特性、環境条件に係わる基礎データを取得する。

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** のナチュラルアナログ（候補）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作成に必要な科学的論拠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。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については、前記したナチュラルアナログサイト成立性の評価を昨年度に実施し、**Bigbiga** 地区の調査は昨年度で終了する一方、平成27年度からはパラワン島中南部地区を最もポテンシャルの高い調査対象サイト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5カ年の全体計画を示す。

今年度の報告では、図 1.4.1-1 の全体計画に示した 3.高アルカリ地下水の地球化学的特性と地質環境条件と 4.ベントナイトの分布と鉱物学的特性と物理特性は 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）の探査と合わせて「ナチュラルアナログサイトの探査」として第2章にまとめる。また、3.アルカリ環境下でのベントナイトの長期変質プロセスの年代測定と地球化学計算については、「年代測定による反応時間の評価」、「地球化学シミュレーションモデルによる変質解析」としてそれぞれ第3章、第5章にまとめる。したがって、詳細鉱物分析に基づくアルカリ変質プロセスの記載を第4章の「アルカリ環境下での長期変質プロセスに関わるナチュラルアナログ」にまとめる。

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	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	Safety Caseとしての説明性の向上 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) NA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、試験調査)	Bigbiga(Fishpond)地区 地質調査 物理探査 試験調査(鉱物分析)	Pinatubo地区 Palawan島中南部地区 概査(鉱物分析)	Palawan島中南部地区 Palawan島Narra地区 地質調査 地質調査 トレンチ調査(鉱物分析)	地質調査	トレンチ調査(鉱物分析)	 人工バリアの長期挙動評価をサポートするNA研究
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	湧水の採水 物理化学パラメータの計測 地下水組成の分析・評価 安定同位体比分析	孔内水等の採水 物理化学パラメータの計測 地下水組成の分析・評価 アルカリ地下水の起源・進化の評価	孔内水等の採水 物理化学パラメータの計測 地下水組成の分析・評価 アルカリ地下水の起源・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・試験コアの鉱物分析)	サンプリング(露頭・トレンチ) バルク分析(XRD)	サンプリング(試験孔・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(トレンチ・試験孔) 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(トレンチ・試験孔) 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(トレンチ・試験孔) バルク分析(XRD, XRF) 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NAによる(Saile鉱山とその周辺地における)長期変質プロセスの評価	Saile鉱山の事例を活用した地球化学モデルの適用性の検討 NAへの年代測定の適用性評価(方解石のTL年代(Bigbiga, Palawan))	Bigbiga地区の低アルカリ環境下の変質プロセス 詳細鉱物分析(μ-XRD, EPMA, FE-SEM等)	トレンチ調査 トレンチ調査 詳細鉱物分析(μ-XRD, EPMA, FE-SEM等)	トレンチ・試験調査 トレンチ・試験調査 詳細鉱物分析(μ-XRD, EPMA, FE-SEM等)	トレンチ・試験調査 トレンチ・試験調査 詳細鉱物分析(μ-XRD, EPMA, FE-SEM等)	
総合評価(目標)		Active Typeの露頭の存在可能性(調査地点の絞り込み)	Bigbigaのサイト評価 Active Typeの露頭の確認(調査地点の選定)	トレンチ調査 トレンチ調査 詳細鉱物分析(μ-XRD, EPMA, FE-SEM等)	トレンチ・試験調査 トレンチ・試験調査 詳細鉱物分析(μ-XRD, EPMA, FE-SEM等)	トレンチ・試験調査 トレンチ・試験調査 詳細鉱物分析(μ-XRD, EPMA, FE-SEM等)	

※: 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 27 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 27 年度は以下の調査を実施した。

(1) 実施計画策定

5 カ年のナチュラルアナログ調査の全体計画と平成 26 年度までの調査結果を踏まえ、平成 27 年度ナチュラルアナログ調査の年度計画及びフィリピン国を対象としたフィールド調査の詳細計画を作成した。フィールド調査計画の策定においては、台風等現地の気象状況に対応可能な安全の確保とフィールド調査の効率性を踏まえ、時間の十分な確保と 2 チーム編成による調査の実施を反映した。

(2) ナチュラルアナログサイトの探査

pH11 を超える高アルカリ性地下水湧水を確認し、近傍のベントナイト層(スメクタイトを含有する堆積物)との接触の可能性が高い中央/南パラワン地域(パラワンオフィオライト)において、平成 26 年度の概査に基づき、トレンチを掘削して露頭観察や湧水のパラメータ測定等から高アルカリ地下水と堆積層の接触地点を確認するとともに、その地球化学プロセスの解

析のために顕微鏡観察・鉱物分析用の岩石試料の採取を行った。特にナチュラルアナログの対象となるベントナイト層については、鉱物組成や化学組成を把握するとともに、サイト周辺での分布状況や起源物質と形成環境・年代についても調査した。

また、パラワン島の調査サイトにおいて、湧水等の採水と物理化学パラメータの計測を行う。溶存イオン濃度等の分析結果と計測した地下水パラメータから地下水の地球化学的特性とアルカリ地下水の生成・進化や分布を評価した。

(3) 年代測定による反応時間の評価

炭酸塩の TL 法年代の精度向上を目的として、ナチュラルアナログサイトの試料を用いたルミネッセンス特性に係わる基礎実験と年代評価を実施した。また、パラワン島等の新たな調査サイトを対象として、層状の炭酸塩鉱物 (Travertine) への TL 法年代測定や植物等の有機物への C14 年代測定の適用性について調査した。

(4) アルカリ環境下でのベントナイトの長期変質プロセス

トレンチ等で系統的に採取した試料の鉱物分析、化学分析等を実施し、アルカリ溶液の影響範囲やスメクタイトのアルカリ変質過程について評価した。

(5) 地球化学シミュレーションモデルによる変質解析

ルソン島北西部でナチュラルアナログサイトのベントナイト-基盤岩接触部のデータを用いた地球化学計算を実施して、スメクタイトのアルカリ変質プロセスの評価を行い、天然環境における地球化学モデルのデータセットの検証と改良について検討し、地球化学モデルの信頼性向上について検討した。

本年度の実施工程を図 1.4.2-1 に示す。現地調査は 6 月下旬～7 月上旬に実施した。

実施項目	平成27年(2015)												平成28年(2016)		
	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月			
①実施計画策定	H27年度実施計画策定														
②ActiveなNA サイトの探査	準備・関連情報の収集 ②.1 地質調査 ②.2 ボーリング・コア観察・サンプリング ②.3 鉱物分析/地質構造評価														
③高アルカリ地下水の地球化学的特性と地質環境条件	調査 (Palawan島南部地区等) トレンチ調査 (Palawan島中部地区) 湧水等の採水・物理化学パラメータの計測 地下水賦存の評価 ベントナイトの分布と地質構造の評価 データ取りまとめ														
④アルカリ環境下でのベントナイトの長期変質プロセス	Sale山 (Sala山) のベントナイト界面のアルカリ変質プロセスにおける二次鉱物の生成に関する地球化学計算 TL用試料のサンプリング 方解石TL特性の評価とTL年代測定 (Activeなコンタクトが確認できれば) 詳細分析によるアルカリ変質鉱物の観察・分析														
⑥委員会	▲: 委員会による決定、レビュー等 ▲: 国際Workshop等 ▲: 第1回委員会 (実施計画の評価) ▲: 第2回委員会 (調査結果の中間評価) ▲: 第3回委員会 (最終評価)														
⑦報告書作成	報告書ドラフト作成 修正														

図 1.4.2-1 平成 27 年度の実施工程

[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] (公財) 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).
- [8] NAGRA: Kristallin-I, Safety Assessment Report. Nagra Technical Report NTB 93-22, NAGRA, Wettingen, Switzerland (1994).
- [9] 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).
- [10] 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).
- [11] 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).
- [12] 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).
- [13] (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).
- [14] 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).
- [15] Johnston, R.M. and Miller, H.G.: The effect of pH on the stability of smectite. AECL-8366 (1984)
- [16] 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).
- [17] (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).
- [18] (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).
- [19] 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).
- [20] (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).
- [21] 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).
- [22] 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).
- [23] Frost, B.R. and Beard, J.S.: On Silica Activity and Serpentinization. *J. Petrology* 48(7), 1351-1368 (2007).
- [24] 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).
- [25] (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).
- [26] Amato, F.L.: Stratigraphic paleontology in the Philippine. *Philipp. Geol.*, 20, 121-140 (1965).
- [27] Garrison, R.E., Espiritu, E., Horan, L.J. and Mack, L.E.: Petrology, sedimentology and diagenesis of hemipelagic limestone and tuffaceous turbidites in the Aksitero formation, central Luzon, Philippines. *Geol. Surv. Prof. Paper*: 1112 (1979).
- [28] Ingle, J.C. Jr.: Summary of Late Paleogene-Neogene insular stratigraphy, paleobathymetry, and correlations, Philippines Sea and Sea of Japan region. Initial report of the deep sea drilling project. Wahington, U.S. Govt. printing office, 31, 837-855 (1975).
- [29] Roque, V.P. Jr., Reyes, R.P. and Gonzales, B.A.: Report on the comparative stratigraphy of the east and west sides of the mid-Luzon Central Valley, Philippines. *Mineral Engin. Mag.*, Philippines, September, 11-51 (1972).
- [30] Schweller, W.J. and Karig, D.E.: Constrains on the origin and emplacement of the Zambales ophiolite, Luzon, Philippines. *Geol. Soc. Amer.*, Abstracts with programs, 11, 152-152 (1979).
- [31] Abaya, J.G.: Determination of Recharge from Stable Isotope Datato the Hydrological Systems in the Southern Negros Geothermal Field and its Environs, Philippines. *Proceedings World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey*, 24-29 (2005).
- [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] 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).
- [34] (公財)原子力環境整備促進・資金管理センター:平成26年度地層処分技術調査等事業 TRU廃棄物処理・処分高度化開発報告書(第3分冊)ーナチュラルアナログ調査ー(2015).
- [35] Dilek, Y. and Furnes, H.: Ophiolites and their Origins. *Elements*. doi: 10.2113/gselements. 10.2.93, 10(2), 93-100 (2014).
- [36] Rashka, H., Nacario, E., Rammlmair, D., Samonte, C. and Steiner, L.: Geology of the ophiolite of central Palawan Island, Philippines. *Ophioliti*, 10, 375-390 (1985).
- [37] Cabrera, R.C.: Geology of Bulaloc, Canipan, Candian Point, Tarusan, Sapa and Katipunan Quadranges. Region IV: Bureau of Mines and Geosciences, Manila, Philippines. *Bedrock Geosciences Technical Report* 14-02 (1985).

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。そのためには、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。

本事業で実施するナチュラルアナログ調査の目的は、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、①pH 11 程度の高アルカリ地下水の存在、②スメクタイトに富むベントナイト層またはベントナイト質堆積物の存在 ③アルカリ地下水の流路となり得るオフィオライト基盤岩中の断層・亀裂がアルカリ地下水の形成・貯留場からベントナイト層へ直接連結、という三位一体の要件が必要不可欠である。

このような要件を満たす可能性が高い地域として、Zambales オフィオライトの西端の Bigbiga 地区、Zambales オフィオライト東南端（Pinatubo 火山泥流帯）及びパラワン（パラワン）オフィオライト（中央／南部パラワン地域）を対象として概査した結果、特に Active Type のナチュラルアナログサイトを特定するためには①pH 11 程度の高アルカリ地下水の存在の条件を最重視し、今年度から中央／南部パラワン地域に絞ってフィールド調査を実施する。

パラワン島で実施するナチュラルアナログサイトの探査の目的は、高アルカリ地下水（pH > 11）がベントナイト緩衝材の主要鉱物組成であるモンモリロナイトを含有する粘土質堆積岩（堆積物）層中に直接浸水しているサイト（コンタクト部）をターゲットとする Active Type としてのナチュラルアナログが成立可能なサイトを探査・選定することである。

今年度のフィールド調査では、昨年度実施したパラワン島中央部の東部沿岸域に位置する Narra（ナラ）地区において、高アルカリ地下水湧水地点と、その周辺地域を対象に地質概査、高アルカリ地下水湧水の地球化学的調査などによる初期的な調査・分析結果にもとづき、Active Type のナチュラルアナログポテンシャルサイトとして、地質精査、高アルカリ地下水の水理地質学的調査や地球化学的調査およびトレンチ調査などを実施した。

さらに、地質構造学的にポテンシャルサイトとしての可能性の高い、パラワン島の南東部沿岸域の Rio Tuba（リオチューバ）地区を対象に地質概査・地下水の地球化学的探査などを実施した。

2.2 フィリピン国における現地調査の概要

2.2.1 調査工程

今年度のフィールド調査では、平成 26 年度の概査において pH11 を超える高アルカリ性地下水湧水を確認し、ベントナイト質堆積層（スメクタイトを含有する堆積層）との接触の可能性があり **Active Type** のナチュラルアナログサイトとなり得る可能性が高いパラワン島中部（パラワンオフィオライトが分布する **Narra** 地区等）において、最初に、地質調査、地下水調査を実施してトレンチ掘削地点を選定した。次に、掘削したトレンチの壁面観察、湧水のパラメータ測定等から高アルカリ地下水と堆積層の接触地点を確認するとともに、その地球化学プロセスの解析のために顕微鏡観察・鉍物分析用の岩石試料の採取及び溶存イオン分析用の水試料の採取を行った。また、南部パラワン地域（**Rio Tuba**）等他の候補地についても、概査を実施してナチュラルアナログサイトとして不可欠な高アルカリ地下水やベントナイト質堆積物の分布の可能性を調べた。

調査期間は、図 2.2.1-1 に示すように、平成 27 年 6 月 27 日（土）から 7 月 12 日（日）までの 16 日間である。なお、調査期間を有効に使うため、調査グループを 2 チームに分けて調査を実施した。今年度の調査では、雨季のため河川の増水やそれによる道路の封鎖、停電等調査において困難な状況もあったが、**Narra** 地区の調査を中心に概ね当初計画通りに実施できた。

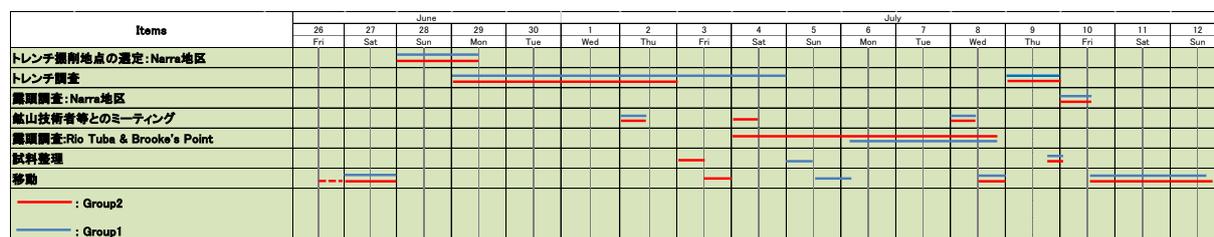


図 2.2.1-1 現地調査の工程

2.2.2 現地調査の主な調査内容

現地調査の主な調査内容を以下にまとめる。また、図 2.2.2-1 に調査ルートマップを示す。

(1) Narra 地区におけるトレンチ調査

1) トレンチ掘削地点の選定

橄欖岩の亀裂に高アルカリ (pH11.20) 泉が存在する Narra3-1 地点 (アルカリ泉が湧出しているアルカリ河川の源泉) から下流 (約 100m) に分布する石灰華 (Travertine) の平坦地 (Narra3-2) 周辺において、アルカリ湧水サイトの地球化学的特性 <pH, ORP, DO, EC, Temp>とその要因<地質・地質構造学的特性と岩石鉱物学的特性との関連性>) について調査し、2カ所のトレンチ掘削地点 (トレンチ1 : Narra3-2 地点のトレンチ2 (図5) : トレンチ1 地点下流の地形が落ち込んだ先の石灰華の堆積する場所) を選定した。

2) トレンチ掘削

アルカリ河川からの流入防止のためのドレン掘削した上で、トレンチ1の掘削を実施した。堆積しているトラバーチンからの浸出水が多く、掘削中にそれがトレンチ内に溜まるため、排水ポンプでの排水 (排水用のドレン掘削も合わせて実施) を適宜行いながら、2.8mの深度まで掘削した。

トレンチ1の掘削後にトレンチ2の掘削も開始し、同様に適宜ポンプでの浸出水の排水を行いながら2.0mの深度まで掘削した。

3) 壁面観察、岩石試料のサンプリング

両トレンチにおいて、トレンチ掘削、溜水排水後に壁面を削りだして、堆積物の地質構造や各層の岩質等の特徴について観察した。

また、両トレンチの壁面から (炭酸塩、粘土質、オフィオライト等) 岩石試料を採取した。トレンチ1では炭酸塩層が2m以上あるため、熱ルミネッセンス年代測定用の試料を採取した。当初はコアドリルで採取する予定であったが、炭酸塩層が降雨等の影響もありゆるく堆積しているため、ドリルでの採取が困難であるため、シャベルで固定してできるだけ光曝しないように採取し、容器に封入した。トレンチ2では底部に基盤岩が見られたため、低部から下方向と斜め下方向にコアドリルによるコアサンプリングを実施した。また、基盤岩直上に特徴的な黒色の粘土質堆積物が見られたため、これらの粘土質試料を中心にサンプリングを行った。

4) 地下水の物理化学パラメータ計測及び採水

前述のように掘削作業時から両トレンチとも浸出水の流量が多いことを確認した。このトレンチ底部の堆積岩の層理面から浸出する地下水を採取し、地下水の物理化学パラメータの計測をするとともに、溶存イオン分析に供する水試料の採取を行った。

(2) パラワン島南部の概査

1) Rio Tuba 地区の概査

Rio Tuba 地区にはパラワンオフィオライトの超塩基性岩とベントナイト質堆積物層が存在する可能性がある Panas 層が近接して分布しており、地質セッティングの面からはナチュラルアナログサイトとしての可能性のあるため、概査を実施した。また、地下水調査については、地区内の井戸、小川等を対象に物理化学パラメータの測定を実施した。

2) Brooke's Point (ブルックスポイント) 地区の地下水調査

Narra 地区と Rio Tuba 地区の中間に位置する Brooke's Point 地区では、アルカリ地下水の源泉を利用した温泉施設である 7 Falls Hot Spring において地下水調査を実施した。

(3) Narra 地区及びその周辺の概査

Narra 地区では、トレンチ調査を実施した Narra3 サイト以外に、枕状溶岩と斑れい岩と思われる貫入岩の露頭が見られる Spillway 及び Narra 鉱床と Espanola 鉱床の2つのニッケル鉱山 (Narra 地区に近いがエリアとしてはパラワン島南部) において露頭調査を実施した。

また、San Isido (Narra1) では、温泉施設の源泉で地下水調査を実施した。

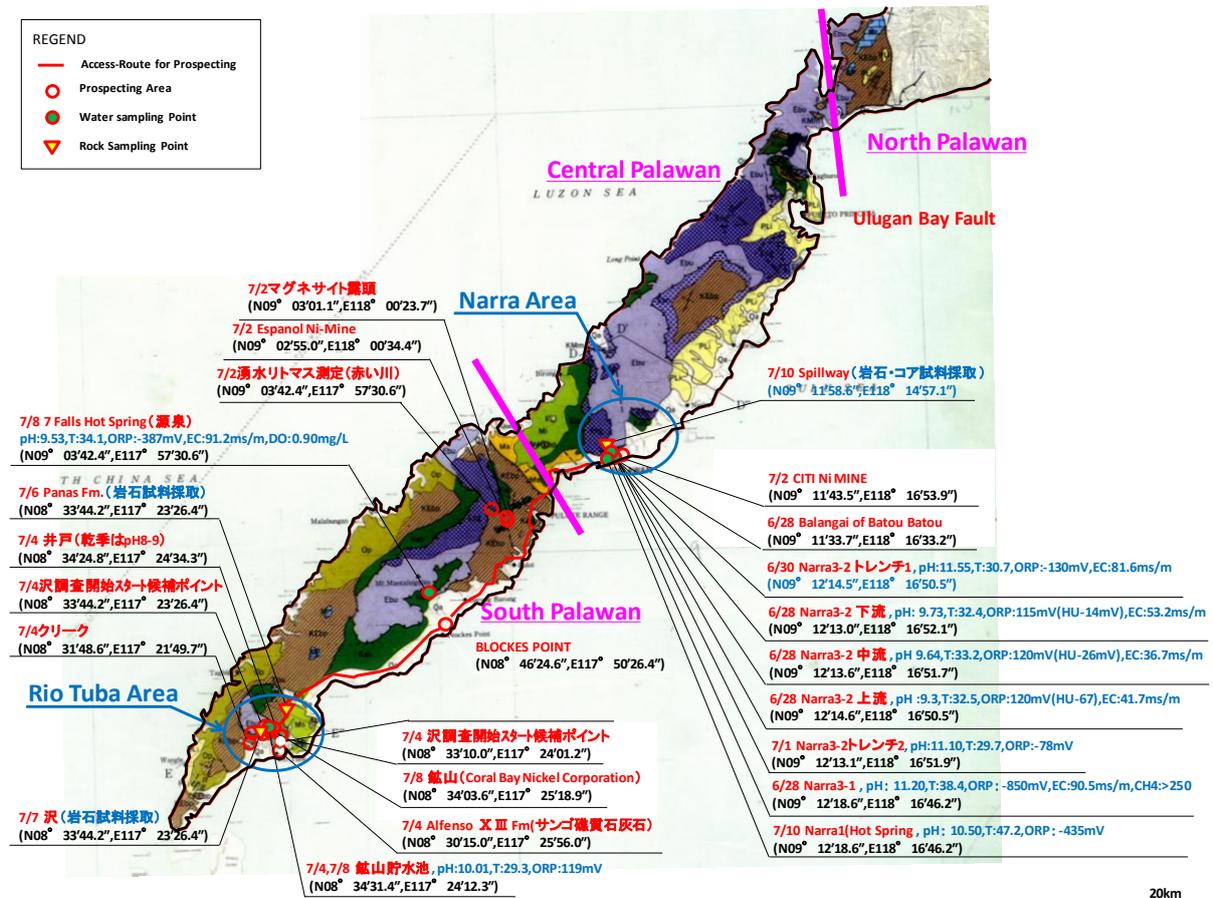


図 2.2.2-1 中央/南部パラワン地域のフィールド調査ルートマップ

2.2.3 地下水（既存井戸、湧水、既存試錐孔）調査の概要

調査地域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、中央／南部パラワン地域の湧水（アルカリ泉等）、河川、トレンチ内の浸出水を対象に地下水調査を実施した。

本調査で実施した測定項目と測定方法及び採水方法を以下に示す。

(1) 現地計測（パラメータ測定他）

地下水や河川水を対象に表 2.2.3-1 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 2.2.3-1 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

また、パックテストによる主要 5 種 (Ca, Mg, Al, Cl, SiO) の溶存イオン濃度の簡易測定及び、バブリングの確認された地点においてはポータブルガス検知器によるガス (CH₄ および H₂) の測定を実施した。

(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 0.20μm 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）×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、500μL 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。

CFCs 用の水試料は採水容器には、容積 125cc のよう珪酸ガラス瓶と蓋（内側アルミコーティング）を使用し、ステンレス容器中で、ナイロンチューブを通して地下水をガラス瓶に導入

して十分な量の地下水で置換した後に、水中で密栓した。

(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 : 誘導結合プラズマ発光分光分析法 (ICP-AES) ; ICPE-9000(島津製作所)
- ②Si : 紫外可視光分光計 : V-550(日本分光製)
- ③陰イオン : イオンクロマトグラフ法 ; Metrohm 861 Advanced Compact IC
- ④HCO₃⁻ : 60%硝酸溶液での滴定によるアルカリニティの測定値から、炭酸水素イオン (炭酸イオンも含む) を算出

(C)

- ①陽イオン : 誘導結合プラズマ質量分析法 (ICP-MS) ; ELEMENT XR(Thermo Scientific)
- ②Si : モリブデン黄吸光光度法
- ③陰イオン : イオンクロマトグラフ法 ; GC-SCL-10A-VP(島津製作所)
- ④HCO₃⁻ : フェノールフタレイン溶液を指示薬として用いて塩酸標準溶液で滴定を行い、炭酸水素イオンを分離定量
- ⑤CO₂ : CO₂ 分析計(東亜 DKK)

(4) 安定同位体比分析

地下水起源の推定のために、水素安定同位体比 (δD) 及び酸素安定同位体 ($\delta^{18}O$) を比近赤外線半導体レーザーを用いたキャビティリングダウン吸収分光法 (CRDS (Cavity Ring Down Spectroscopy)、分析精度 : $\delta^{18}O(\pm 0.1\%)$, $\delta D(\pm 1\%)$) により分析した。

2.2.4 岩石鉱物学的調査の概要

フィールド調査において採取した、Narra 地区トレンチ壁面からの採取試料及びコアドリルにより底部から採取したコア試料、Narra 地区及び Plawan 島南部の露頭採取試料の鉱物学的特徴（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）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明らかにするために、XRD による全岩分析（鉱物組み合わせ）、XRF による全岩化学分析（バルク主要成分）、ICP-MS による全岩化学分析（主成分元素、微量成分元素（希土類元素含む））を実施した。

また、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。そのために、一部の試料については、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）を実施した。なお、詳細な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・元素分布を明らかにすることを目的とした EPMA, μ -XRD, FESEM-EDS による鉱物・化学分析については、第4章に記載する。

本調査で実施した岩石試料の採取、分析項目と分析方法を以下に示す。

(1) 岩石試料の採取

パラワン島中部の Narra 地区では掘削した2ヶ所のトレンチからは、2.2.2 に記載したように壁面の炭酸塩、粘土質、オフィオライト等岩石試料、TL 測定用の炭酸塩試料、底部のコア試料を97件採取した。また、堆積物中にみられた木根1件、貝殻3件を年代や過去の環境条件把握のための試料として採取した。

また、露頭調査では、Narra3-1 サイトから1件、Spillway から1件、Brookes Point の7 Falls から1件、Rio Tuba 地区から7件、総計10件の岩石試料を採取した。表 2.2.4-1 に採取した岩石試料の一覧と分析項目を示す。

表 2.2.4-1 今年度のフィールド調査で採取した岩石試料と分析項目

Sample Labeling	Location	Description	Remarks	TL	C14	XRD	XRF	SEM	EPMA	薄片観察
PWT01-15-Rh-001	Narra Tranch1		PWS01-15-Rh-001				○	○		
PWT01-15-Rh-002			PWS01-15-Rh-002				○	○		
PWT01-15-Rh-003			PWS01-15-Rh-003				○	○		
PWT01-15-Rh-004			貝殻(巻貝), 木樫が混入	PWS01-15-Rh-004			○	○		
PWT01-15-Rh-005				PWS01-15-Rh-005			○	○		
PWT01-15-Rh-006			木樫が混入	PWS01-15-Rh-006			○	○		
PWT01-15-Rh-007			木樫が混入	PWS01-15-Rh-007			○	○		
PWT01-15-Rh-008			貝殻(巻貝), 木樫が混入	PWS01-15-Rh-008			○	○		
PWT01-15-Rh-009			貝殻(巻貝), 木樫が混入	PWS01-15-Rh-009			○	○		
PWT01-15-Rh-010				PWS01-15-Rh-010			○	○		
PWT01-15-Rh-011			木樫が混入	PWS01-15-Rh-011			○	○		
PWT01-15-Rh-012				PWS01-15-Rh-012			○	○		
PWT01-15-Rh-013			木樫(赤く織り)が混入	PWS01-15-Rh-013			○	○		
PWT01-15-Rh-014				PWS01-15-Rh-014			○	○		
PWT01-15-Rh-015			木樫が混入	PWS01-15-Rh-015			○	○		
PWT01-15-Rh-016			木樫が混入	PWS01-15-Rh-016			○	○		
PWT01-15-Rh-017			木樫が混入	PWS01-15-Rh-017			○	○		
PWT01-15-Rh-018				PWS01-15-Rh-018			○	○		
PWT01-15-Rh-019			木樫が混入	PWS01-15-Rh-019			○	○		
PWT01-15-Rh-020				PWS01-15-Rh-020			○	○		
PWT01-15-Rh-021				PWS01-15-Rh-021			○	○		
PWT01-15-Rh-022				#1(上)			○	○		
PWT01-15-Rh-023			木樫が混入	#1(中)			○	○		
PWT01-15-Rh-024			木樫が混入	#1(下)			○	○		
PWT01-15-Rh-025			木樫			○				
PWT01-15-Rc-001			-25cm カルサイト(Travertine)	C-① TL用	○			○	※	
PWT01-15-Rc-002			-40cm カルサイト(Travertine)	C-② TL用	○			○	※	
PWT01-15-Rc-003			-55cm カルサイト(Travertine)	C-③ TL用	○			○	※	
PWT01-15-Rc-004			-65cm カルサイト(Travertine)	C-④ TL用	○			○	※	
PWT01-15-Rc-005			-90cm カルサイト(Travertine)	C-⑤ TL用	○			○	※	
PWT01-15-Rc-006			-115cm カルサイト(Travertine)	C-⑥ TL用	○			○	※	
PWT01-15-Rc-007			-130cm カルサイト(Travertine)	C-⑦ TL用	○			○	※	
PWT01-15-Rc-008			-155cm カルサイト(Travertine)	C-⑧ TL用	○			○	※	
PWT01-15-Rc-009			-180cm カルサイト(Travertine)	C-⑨ TL用	○			○	※	
PWT01-15-Rc-010A			-185cm カルサイト(Travertine)	C-⑩A TL用	○			○	※	
PWT01-15-HU-001						○				
PWT01-15-HU-002						○				
PWT01-15-HU-003						○				
PWT01-15-HU-004						○				
PWT01-15-HU-005						○				
PWT01-15-HU-006		貝殻(巻貝)がある層				○				
PWT01-15-HU-007		貝殻(巻貝)がある層				○				
PWT01-15-HU-008						○				
PWT01-15-HU-009		貝殻(巻貝)がある層				○				
PWT01-15-HU-010						○				
PWT01-15-HU-011						○				
PWT01-15-HU-012						○				
PWT01-15-HU-013						○				
PWT01-15-HU-014						○				
PWT01-15-HU-015						○				
PWT01-15-HU-F006		貝殻(巻貝)								
PWT01-15-HU-F007		貝殻(巻貝)								
PWT01-15-HU-F008		貝殻(巻貝)								
PWT02-15-Rh-001	Narra Tranch2	木樫が混入	PWS02-15-Rh-001		○		○			
PWT02-15-Rh-002		木樫が混入	PWS02-15-Rh-002				○	○		
PWT02-15-Rh-003		木樫が混入	PWS02-15-Rh-003				○	○		
PWT02-15-Rh-004		木樫が混入	PWS02-15-Rh-004				○	○		
PWT02-15-Rh-005		繊維(木樫)が混入	PWS02-15-Rh-005				○	○		
PWT02-15-Rh-006		繊維(木樫)が混入	PWS02-15-Rh-006				○	○	○	
PWT02-15-Rh-007			PWS02-15-Rh-007				○	○		
PWT02-15-Rh-008			PWS02-15-Rh-008				○	○		
PWT02-15-Rh-009		繊維を含む	PWS02-15-Rh-009				○	○		
PWT02-15-Rh-010			PWS02-15-Rh-010				○	○		
PWT02-15-Rh-011			PWS02-15-Rh-011			○		○		
PWT02-15-Rh-012			PWS02-15-Rh-012				○	○		
PWT02-15-Rh-013			PWS02-15-Rh-013				○	○	○	
PWT02-15-Rh-014			PWS02-15-Rh-014				○	○		
PWT02-15-Rh-015			PWS02-15-Rh-015				○	○	○	
PWT02-15-Rh-016			PWS02-15-Rh-016				○	○	○	
PWT02-15-Rh-017		トレンチ2断面のオフサイトトープ	行方不明				○	○		
PWT02-15-Rh-018		#2 Trench A面 Mudstone					○	○	○	
PWT02-15-Rh-019		Marine Fossil bearing Mudstone #2					○	○		
PWT02-15-Rh-020		Hilt DrillコアC2と続きの基盤岩 #2 TrenchB floor PWT02B-15-C-002-3					○	○	○	
PWT02B-15-C1-001			トレンチ2断面のHilt Drillコア				○	○	○	
PWT02B-15-C1-002			トレンチ2断面のHilt Drillコア				○	○	○	
PWT02B-15-C2-0			トレンチ2断面のHilt Drillコア		○		○	○	○	
PWT02B-15-C2-1-001			コア上部(木樫が混入)※				○	○	○	
PWT02B-15-C2-1-002			コア上部の上側				○	○	○	
PWT02B-15-C2-2-001			コア上部の下側				○	○	○	
PWT02B-15-C2-2-002			コア下部の上側				○	○	○	
PWT02-15-HU-001			コア下部の下側				○	○	○	
PWT02-15-HU-002							○			
PWT02-15-HU-003							○			
PWT02-15-HU-004							○			
PWT02-15-HU-005							○			
PWT02-15-HU-006							○			
PWT02-15-HU-007							○			
PWT02-15-HU-008							○			
PWT02-15-HU-009						○				
PWT02-15-HU-010						○				
PWT02-15-HU-011						○				
PWT02-15-HU-012						○				
PWT02-15-HU-013						○				
PWT02-15-HU-014						○				
PWT02-15-HU-015						○				
PWT02-15-HU-016						○				
PWT02-15-HU-017						○				
PWT02-15-HU-018						○				
PWT02-15-HU-001R		Trench2断面の岩石試料								
PWT02-15-HU-019		07.09に採った試料	PWT02-15-HU-002を継がけ付いた試料							
PWT02-15-HU-020		07.09に採った試料	PWT02-15-HU-002を継がけ付いた試料							
PWT02-15-HU-021		07.09に採った試料 木樫が混入	PWT02-15-HU-002を継がけ付いた試料							
PWNAO-15-HU-001	Narra3-1 Spring	Clay-rich Sediment	Narr3-1 Spring			○	○			
PWNAO-15-HU-002			PW-15-HU-N31-1			○				
PWNAO-15-HU-003			PW-15-HU-N31-2			○				
PWNAO-15-HU-004			PW-15-HU-N31-3			○				
PWSP0-15-Rh-001	Spillway	#7 Spillway山道離れたところ				○	○			
PWBPO-15-Rh-001	Brooke's Point 7-Falls	7-Falls				○	○			
PWRT001-15-Rh-001		OK R-SP-3 S Palawan				○	○			
PWRT002-15-Rh-001		南/パラワン001				○	○			
PWRT002-15-HU-001	Rio Tuba	Panas Fm Sandstone				○				
PWRT002-15-HU-002			Panas Fm Sandstone				○			
PWRT002-15-HU-003			Panas Fm Sandstone				○			
PWRT002-15-HU-004			Panas Fm Sandstone				○			
PWRT002-15-Rh-001			Panas Fm Sandstone Pendeite	7/8 #5 青色貯水池			○	○		

※ : ICP-MS による化学分析
(注) : 試料が崩れたため分割しない

(2) X線回折 (XRD)

採取した全岩石試料（貝殻や木根を除く計 106 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

試料は、厚手のビニールに入れて粗砕して真空乾燥した後、メノウ乳鉢により、100 μ m のふるいを全量通過するまで粉碎し、再度真空乾燥した。

2) 測定条件

XRD の測定条件一覧を表 2.2.4-2 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 2.2.4-2 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	40kV、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、100 μ m 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) 蛍光 X 線元素分析 (XRF)

採取した岩石試料のうち、XRF 欄に○をつけた総計 67 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、粗砕し真空乾燥した後、メノウ乳鉢により、100 μ m のふるいを全量通過するまで粉碎し、再度真空乾燥した。

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 2.2.4-3 に示す条件により、XRF による定量分析を実施した。

表 2.2.4-3 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

(4) ICP 質量分析 (ICP-MS)

採取した試料のうち、XRF 欄に※をつけた総計 20 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) 試料調整・測定方法

粉末岩石試料を過塩素酸、フッ酸、硝酸で溶解、凝固し、それを硝酸、塩酸、MIIIHQ 水でとかし、それを希釈し、ICP-MS 装置を用いて測定をした。

2) Si 濃度分析

Si 濃度は、土壌分析法に規定された全ケイ素アルカリ溶融脱水法を用いて行った。

(5) 偏光顕微鏡観察

採取した試料のうち、Narra 地区のトレンチ壁面から 4 件、底部のコア試料から 4 件の総計 8 件の試料について、岩石鉱物学的特性（鉱物組み合わせ・組成・組織など）明らかにするために、薄片を作成して偏光顕微鏡による観察を行った。

1) 試料調製

偏光顕微鏡では透過光により試料を観察する必要があるため、偏光顕微鏡観察用試料は、可視光が透過する厚さ 15~20 μm 程度の薄片に調製した。薄片観察を行った試料の番号と薄片の作成方法を表 2.2.4-4 に示す。

表 2.2.4-4 薄片観察試料と薄片作成方法

試料番号	薄片用のチップを作成した試料の状態
PWT02-15-Rh-015	105 μm ふるい通過分、および、非通過分を質量比で約 1:1 に混合したもの
PWT02-15-Rh-016	同上
PWT02-15-Rh-018	同上
PWT02-15-Rh-020	人頭大の硬岩岩塊から採取したこぶし大の岩片
PWT02B-15-C1-001	ボーリングコアを半割した試料より図 2.2.4-1 のように採取した。半割した面からの深度は 15mm
PWT02B-15-C2-1-001	上に同じ。ただし、半割した面からそのままチップを採取した
PWT02B-15-C2-2-001	ボーリングコアを半割した試料より図 2.2.4-1 のように採取した。半割した面からの深度は 15mm
PWT02B-15-C2-2-002	同上

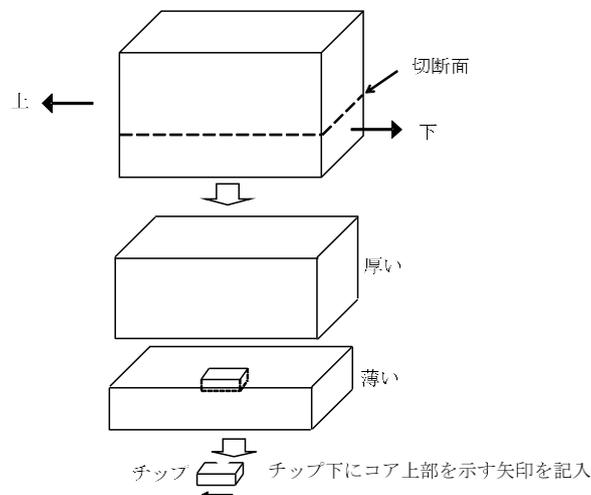


図 2.2.4-1 コア状試料のチップ採取位置

2) 顕微鏡観察

オルソスコープ（オープンニコル（単ニコル）とクロスニコル（直交ニコル））による薄片試料の観察を行う。オープンニコルでは、鉱物の形（自形・多形）、大きさ、へき開、組織、色、多色性、屈折率を、クロスニコルでは、干渉色、双晶、累帯構造、消光位・消光角を観察して鉱物の同定し、岩石の組織と鉱物組み合わせを調べた。

2.3 パラワン島の概要

2.3.1 パラワン島の地質概要

今年度実施した (1) Narra 地区、(2) Rio Tuba 地区については、パラワン島の広域的地質とテクトニックな変遷（地質構造学的背景<パラワン島の地質構造学的進化>）などを理解して、Active Type の ナチュラルアナログポテンシャルサイトとしての総合的評価が必要である。

昨年度[1]は主に、MMAJ-JICA(1988)[2]を参考に概説したが、今年度は最新のデータとそれらの総括的解析結果[3][4]を取り込んで概説する。

パラワン島は、南シナ海の南東縁にあってフィリピン群島の西端に位置している。島全体としては北東-南西へ約 600km の総延長で、その島幅は平均約 50km 以下の特異な伸長した地形的特徴を持っている。また、西側の海底には、2,000 m を超えるパラワン海溝に繋がっている。

パラワン島は、図 2.3.1-1 及び図 2.3.1-2 に示すように、2つの主要な地質体から構成されている。その1つの地質体（北パラワン島<地域>）は、本島北端に分布する北西パラワンマイクロ大陸地塊で、中国大陸周辺の地殻組成と類似している。この地塊は、漸新世から中新世時の南シナ海海底拡大時期に、中国大陸から現在の位置に移動したものと解釈されている。

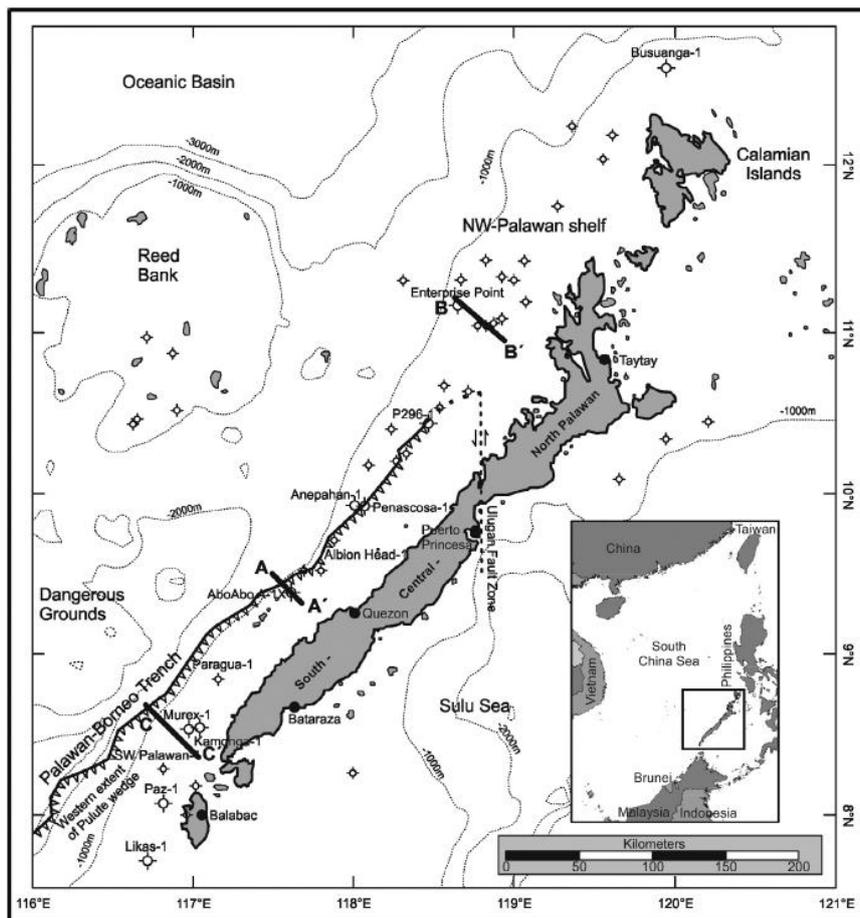


図 2.3.1-1 パラワン地域のテクトニクス[3]

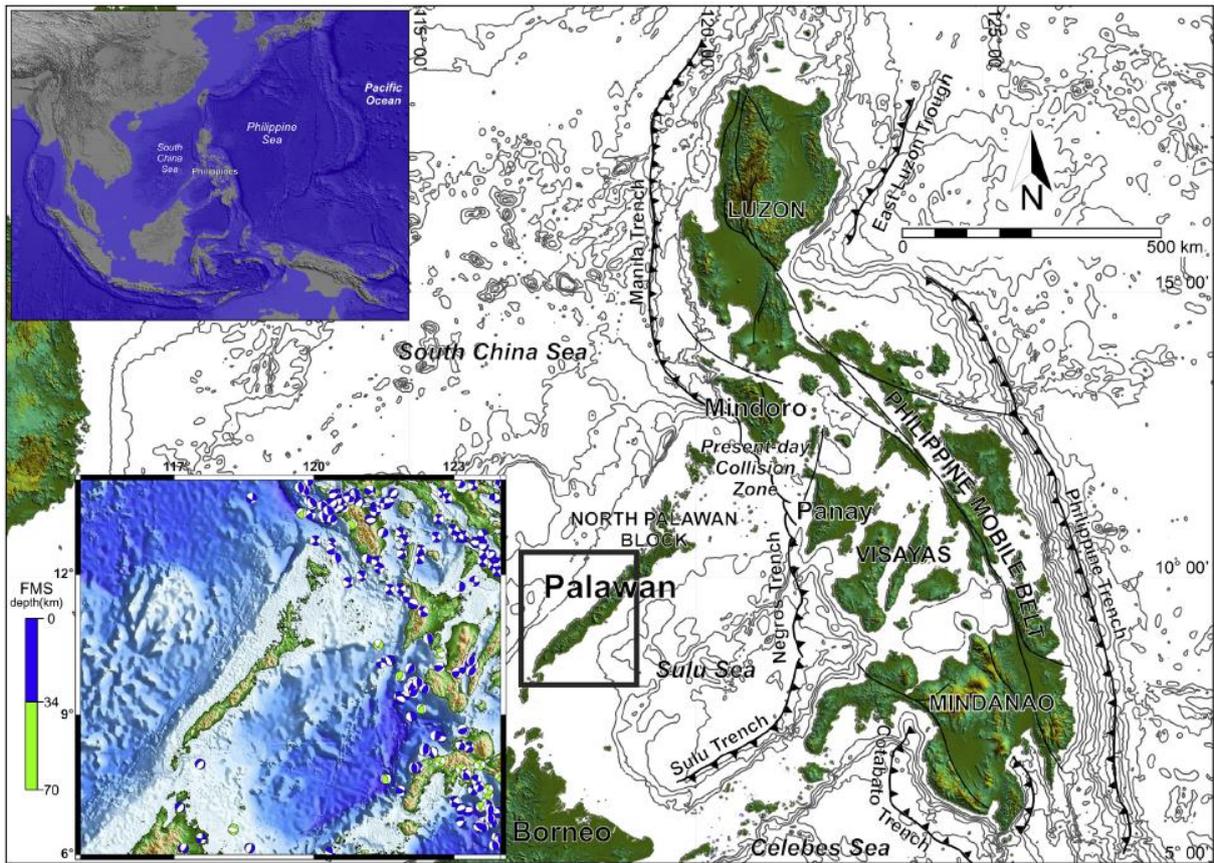


図 2.3.1-2 パラワン島とフィリピン諸島のテクトニクス[4]

これと対照的な中央/南部パラワン島（地域）は、重なり合った衝上断層系で特徴づけられる地質構造体として出現し、西沿岸では、南北系の Ulugan Fault Zone[5]により中央と南部パラワンの2つに区分されている。この衝上断層系で特徴付けられる地質構造は、思索的で中央・南部パラワン沿岸部のみ確認されている。このような地形・地質構造学的特徴から、パラワン島は3つの地域に区分される。それらは、①Ulugan Fault Zoneの東部と Ulugan Bayの北部に位置する北部パラワン地域、②Ulugan Bayの南部と Quezon-Aboabo 町を繋ぐ北部までの中央パラワン地域、そして、③Quezon-Aboabo 町を結ぶ境界から南西にある Balabac 島までの南部パラワン地域である。

但し、中央/南部パラワンの境界区分は地質学的境界ではない。つまり、北部パラワン地域と中央/南パラワン地域における沖合域での一般的な境界区分は、海底地形を表す等深線の著しい変化と一致することでの境界である。特に、パラワン島沿岸部での最も顕著な等深線の特徴は、Borneo-パラワン 海溝（船状海盆：Trough）であるが、この海溝は北部パラワン地域まで延長することではなく、衝突前縁海溝であると解釈されている[6]。

最新の論文では、特に、中央/南部パラワン地域の地質構造学的発達に対する時間的拘束などについて、数多くの生物学的層序とその相対年代の提示、試錐孔の検層、海上地震探査データ、そして特定した2層準の石灰岩（上部中新世～下部鮮新世の Tabon 石灰岩と漸新世から中期中新世

の Nido 石灰岩) の分布特性とその堆積環境などの解釈により、ダイナミックな地質構造学的発展 (テクトニックな変遷) が検討されている[3]。

また、中央/南部パラワン地域の沿岸-陸域をカバーする 2 次元/3 次元地震波探査データ (地震波速度断面図) に基づき中期から後期新生代時期のテクトニクスイベントに着目した南シナ海の南東縁の地質構造学的発展 (進化) が検討されている[4]。

ここでは、これらの最新なデータ・知見[3][4]をもとに概説する。中央/南部パラワン地域は、Cagayan 火山孤と北西のパラワンマイクロ大陸地塊間での早期~中期中新世時期の衝突によって創生され、重なり合う衝上断層帯として海底から出現したものと考えられている[7][8][9]。このような形状を持つ付加体くさびは北西 Sulu 海盆から広範囲に拡大された Dangerous Grounds の大陸地塊への衝上により形成されたものと考えられる[5][10]。いずれにせよ、中央/南部パラワン地域の形成は、原始の南シナ海(Proto-South China Sea)の変遷 に深く関与している。

さらに、原始の南シナ海の海底地殻の残存は、Sabah と Sarawak / Borneo に分布していると信じられており[6]、これが中央/南部パラワン地域のオフィオライト複合岩体の起源であると示唆されている[5][11][12][13]。原始の南シナ海海盆の滅失の始まりは、中期始新生 (約 44Ma[14]) に生じたようである。つまり、海底への沈み込みは、Luconia、Dangerous Grounds、北西パラワンマイクロ大陸地塊が沈み込んでいる衝突期間 (早期中新世晩期~中期中新世の早期) まで活動したということである[14][15][16]。最初の衝突は、南西域 (Luconia Shoals)から生起して、早期中新世[15][17]まで北東へ順次進んで行ったものと解釈されている。

しかしながら、中央/南部パラワン地域の付加体楔が大陸地殻の小片 (Dangerous Grounds や北西 Sulu 海盆) か、原始の南シナ海の残存の上にあるのかはまだ明らかではなく、さらに想定される衝突時期についても今後の議論の余地がある。

これまでの地質調査データの再検討と、沿岸域から沖合域を対象にした 2 次元/3 次元地震探査の解析データから、南シナ海南東縁における新生代のテクトニックな変遷が検討されている[4]。それらによると、北部地質体の基盤は、中新世時期にアジア大陸から移動し、フィリピン弧に衝突した大陸性マイクロ地塊で構成されている[7]。

一方、南部地質体の基盤岩は白亜紀に形成し始めた海底地殻から導かれたものと考えられているオフィオライト複合岩類で構成されている[2]。これらの大陸性マイクロ地塊とオフィオライトの間のテクトニックな境界については、現在も主要な議論を残しているが、何人かの研究者は、Ulugan Bay Fault (UBF)であると言い ([18]その他多数)、他の研究者は、UBF の北に位置する Sabang の地下河川附近に観察される衝上断層帯であると言っている ([2]その他)。南部地域におけるオフィオライトは、新第三紀晩期の浅海の碎屑性堆積物に被覆されているが、テクトニクスの窓(Tectonic Window)を形成している下位に始新世のタービタイト質堆積物が存在している[19][20]。このような形状・堆積環境などから、パラワン島は、最も若い変形イベントがオフィオライト定置に密接に関与した”古い地質体 “として考えられている[2][21][22]。

(1) パラワン島の広域的テクトニクス

パラワン島は、一般的に地震学的に安定していると言われているが、Mindoro 島と Panay 島

西側の北端は、図 2.3.1-2 に示すようにフィリピン変動帯(Philippine Mobile Belt : PMB)に衝突している。この衝突は、中新世時期にアジアの大陸性地塊が南東に移動し、PMB の西縁に到達したものと考えられている[23]。この地塊が大陸性の北部パラワン地塊(North Palawan Block:NPB)を形成している。これらの大陸性 NPB と PMB 島弧地質体の衝突は、16Ma 頃に生じた南シナ海開口の終息後に起った[9]。この衝突の最盛期は、14–12Ma 頃と解釈されている[24]。これらの衝突は、現在も進行中であり、西部 Nindoro-Panay 島と北部パラワン島で観測される地震発生に密接に関与するものである。つまり、これらの地震は、北西–南東系のマニラーニグロストレンチ間での衝上–走行移動断層メカニズムにより生起するものと解釈されている[24]。

(2) パラワン島の広域地質概要

この地域の広域地質を図 2.3.1-3 に示す。パラワン島は、特異的に地震の発生がないことで知られているが、地質構造学的には、現在も大陸–弧の衝突の場にある。そのかわりに、圧縮場のテクトニクスが、白亜紀時期のものと推察されているオフィオライト質複合岩類に保存されている数多くの不活潑な衝上断層の形状により観察される[21]。これらの衝上断層は、新第三紀晩期の碎屑性堆積物により充填されている。

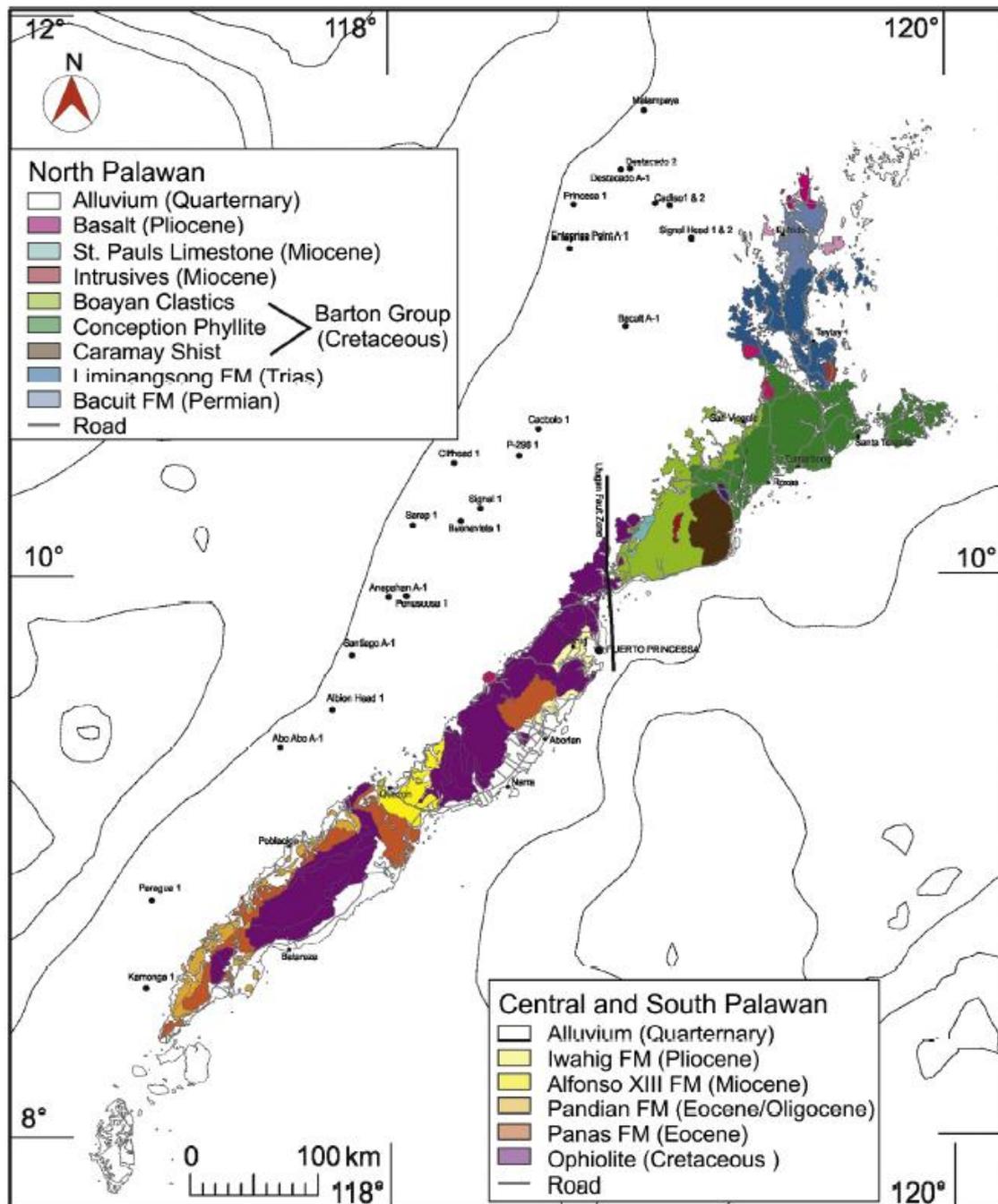


図 2.3.1-3 パラワン島の広域地質図[3]

パラワン島の最古の岩石は、中生代のオフィオライト質複合岩類（パラワンオフィオライト）である。その形成年代は、パラワンオフィオライト上位の枕状玄武岩に挟在する遠洋性堆積物やチャートに含有される化石の同定[25]と、斑れい岩とかんらん岩の放射性年代測定[2]により取得されている。

ここでは、中央/南部パラワン地域について概説する。図 2.3.1-4 に示すように、オフィオライト最上位の岩石は、始新世のタービタイト（Panas 累層）とそのタービタイトが強く硬化さ

れ、弱い変成作用を受けた岩石 (Pandian 累層) と層状石灰岩 (Sumbling 石灰岩) からなる。さらに、その上位には、晩期漸新世～早期中新世の石灰岩 (北部パラワン地域の Nido 累層、南部パラワン地域の Ransang 石灰岩)、そして、中期中新世～更新世の浅海の碎屑性堆積物とそれに伴う炭酸塩岩 (Isugod 累層、Alphonso XIII 累層、Iwahing 累層) から構成されている。これらの地域 (沿岸部と沖合域) の詳細な一般的層序 (対比) とテクトニクスの変遷プロセスなどについては図 2.3.1-5 に示す[4]。

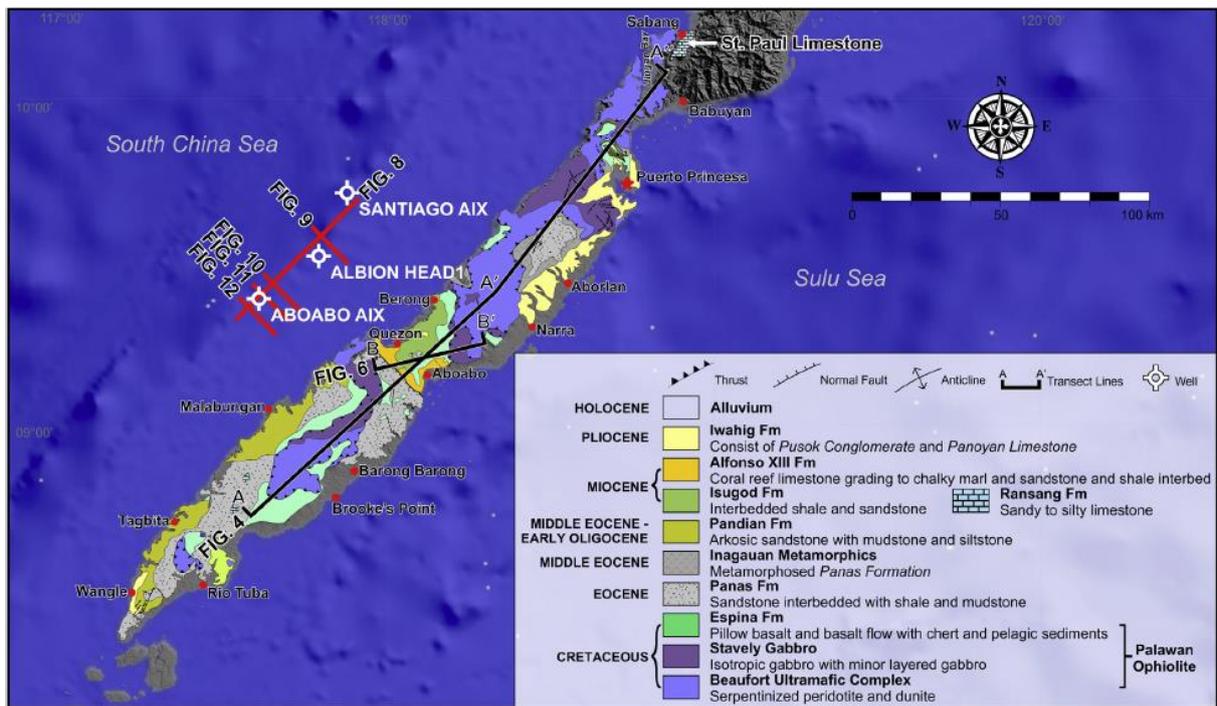


図 2.3.1-4 中央/南部パラワン地域の地質図[4]

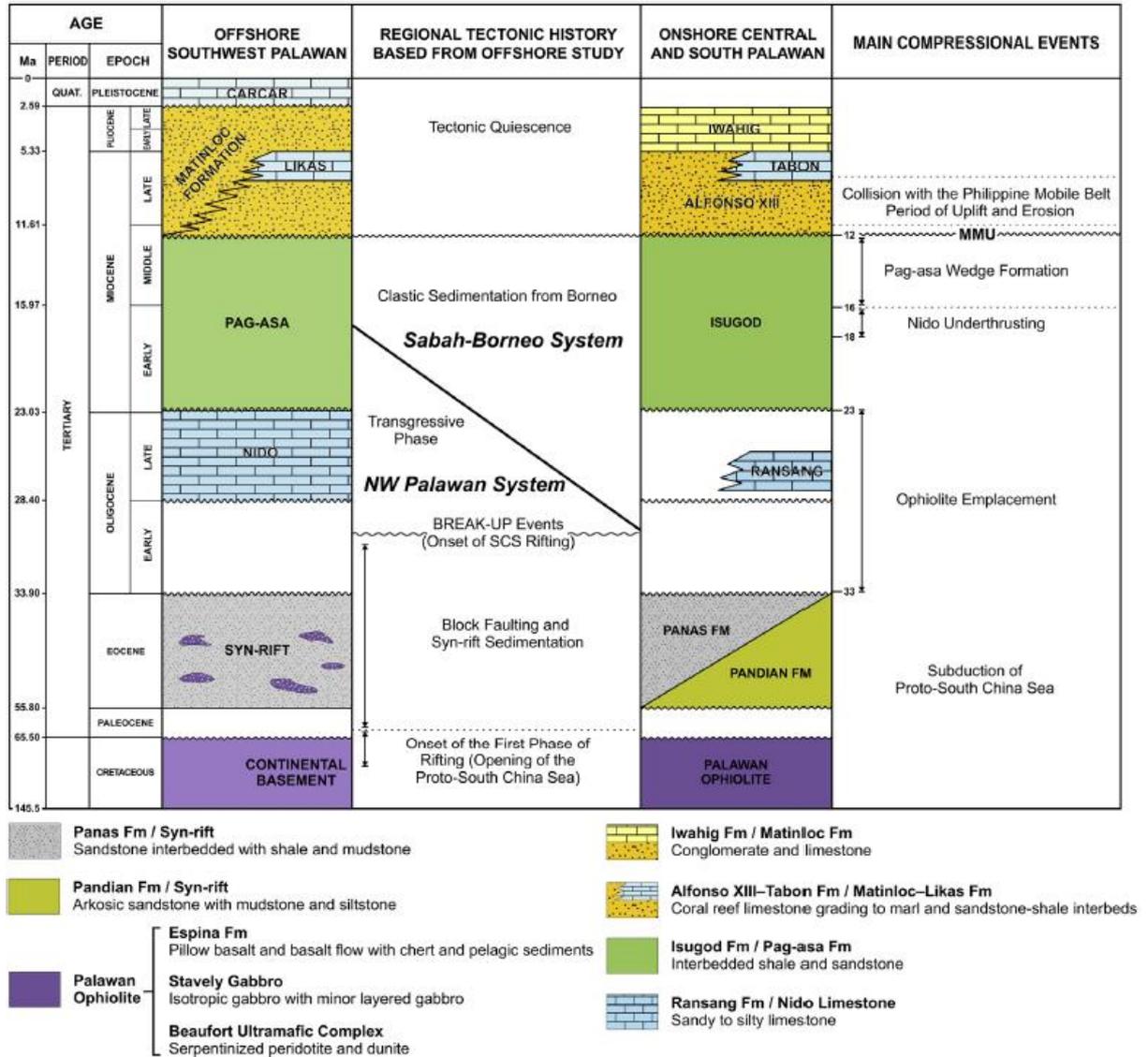


図 2.3.1-5 中央/南部パラワン地域の一般的層序とテクトニクスの変遷プロセス[4]

次に、中央/南部パラワン地域の地質断面図（図 2.3.1-6、図 2.3.1-7）による層序対比や地質構造学的関係を概説する。

図 2.3.1-6、図 2.3.1-7 に示すように、中央パラワン地域では、オフィオライトがテクトニクな窓を形成している始新世のタービダイト層（Panas 累層）の上に衝上（押しつぶせ）していることが解る。このタービダイトは砂岩・シルト岩・頁岩の互層からなる。ある場所では、衝上断層近傍または、断層面に沿って分布する深海の碎屑性堆積物が弱い変成作用の影響を受けている。これらのタービダイトは、暁新世から始新世時期にアジア大陸周辺の隆起中に形成された半地溝部（ほぼ平行な 2 本以上の正断層に挟まれ、相対的沈降によって形成された狭長な地形的凹地帯）の深部を充填した同時・隆起堆積物である。現在ではパラワン島と中国大陸の周縁に観察される[26]。このタービダイトの堆積に引き続いて、早期漸新世の南シナ海拡

大の開始が始まる[23]。また、これらのタービダイトとかんらん岩の衝上関係はいくつかの鉦山露頭で観察され、それらの衝上断層面は北傾斜である。このことはオフィオライト超塩基性岩に残存する走行移動断層の性状と一致している。

また、この遠洋性堆積物（パラワンオフィオライトの上位層）は晩期 Campanian から早期 Maastrichtian (~68Ma) の年代を示していることから、オフィオライト生成上限は、晩期白亜紀であると解釈されている[27]。パラワンオフィオライトのハルツバージャイト（かんらん石と斜方輝石を主成分鉱物とする橄欖岩）の Os（オスミウム）-Re（レニウム）年代測定から、130Ma を取得している[28]。この年代は、MMAJ-JICA (1988)[2] が斑れい岩で取得した放射性同位体年代と類似している。これらを総合すると、パラワンオフィオライトの形成は白亜紀早期から始動したものと示唆される。

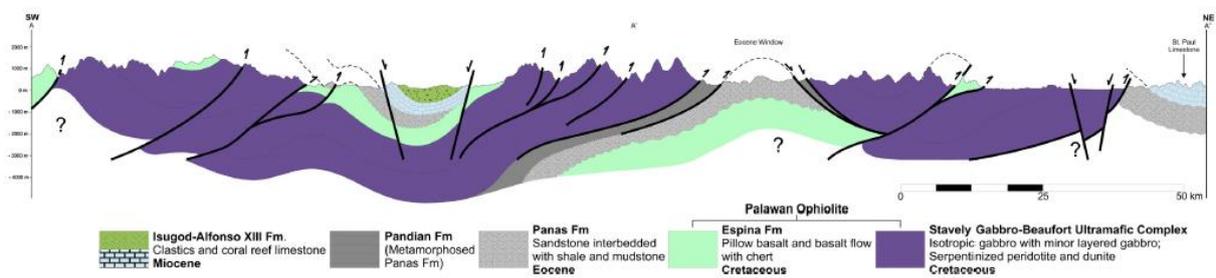


図 2.3.1-6 中央/南部パラワン地域の地質断面図[4]

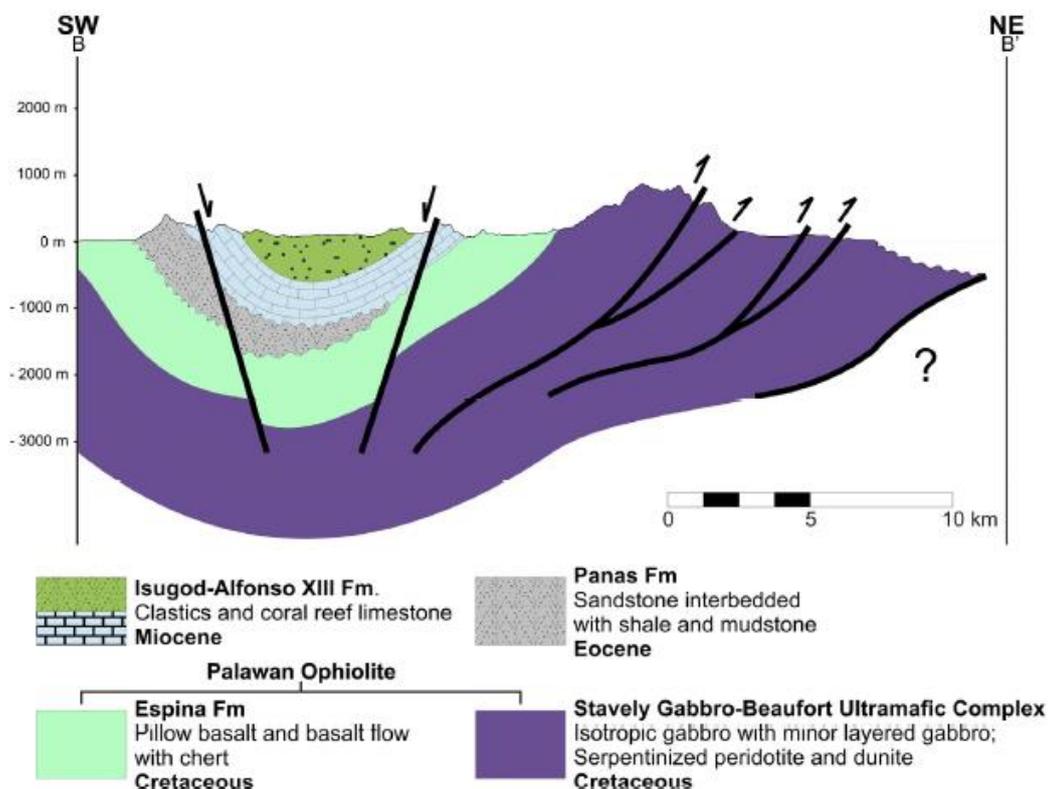


図 2.3.1-7 南部パラワン地域の地質断面図[4]

次に、地震探査解析（地質構造断面）による新第三紀堆積岩の衝上断層への充填プロセスについて Aboabo 町と Quezon 町の間にある谷に着目する。この谷は、白亜紀オフィオライトを不整合に被覆する新第三紀盆地内に存在していて、早期中新世～更新世の海成堆積層と石灰岩が、パラワンオフィオライト（苦鉄質・超苦鉄質岩）か、始新世の硬化したタービダイト層のどちらかに包囲されたでこぼこな谷の山腹に急峻にアバットして分布している。そのコンタクト近傍では、Isugod 累層のシルト岩・粘土層が 40~60°傾斜して分布している（大部分は、盆地の中央に向かって穏傾斜から比較的水平に近い傾斜を示す）。この変形様式は、一連の堆積岩の縁に見られる正断層が、盆地形成にみられる初期沈降に関係しているものと示唆されている。

南パラワン地域の Quezon 町周辺の西海岸は、Tabon 石灰岩に対応する層状石灰岩が緩やかな西傾斜で沖合域へと分布している。図 2.3.1-5 に示すように、この Tabon 石灰岩は、Alphonso XIII 累層の炭酸塩岩に対比され[4]、沖合部での Likas 石灰岩や Matinloc 累層と同等である[29]。このように沖合域と沿岸域における晩期中新世～早期鮮新世の石灰岩層序から、沖合域のほうがより若いように見える。これは前進平衡作用（陸地から供給される堆積物によって海岸線が海の方へ進出する埋め広め作用）によるものといえる[3]。この Matinloc 累層の基盤岩は、中期中新世の大不整合 MMU (Middle Miocene Unconformity: ~12Ma) の頂部に位置している。

次に、沿岸域と沖合域を繋ぐ NE-SW 系測線による地震探査解析にもとづき、両域の層序対比と地質構造特性などを図 2.3.1-4 に示す[4]。なお、沖合域の層序は、Forbes et al., (2011)[29] のデータを参照する。南西パラワン地域・沖合域での最古の岩石は、白亜紀の基盤岩である。この基盤岩は、優先的に南傾斜の数多くの正断層により傾動地塊を形成している、これに累重する地層は、断層で境界された傾動地塊により形成された半地溝部を充填した始新世の堆積物である。これらの隆起時期の堆積層と同等の沿岸域の堆積層は、始新世 Panas 累層のタービダイトである。この隆起構造と始新世堆積層の分布性状が、強い地震波の反射面を示す。この反射面は、晩期漸新世～早期中新世の Nido 石灰岩および、北部パラワン地域・陸域の St. Paul 石灰岩のものと同等である。

また、Pagasa 累層と同等であるカオス的な地震波特性ユニットは、Nido 石灰岩の頂部に位置している。

さらに、試錐孔データからは、この堆積層は、粘土岩、頁岩、シルト岩、砂岩、時折、礫岩で構成されている。一方、この地震波特性ユニットと同等な沿岸域堆積物は、Isugod 累層である。変形された Pagasa 累層をシーリングしているのは中期中新世の大不整合面(MMU)に対応する明瞭な反射面である。晩期中新世～更新世の浅海性碎屑性堆積物や炭酸塩岩に対応する最も若い地震波特性ユニットは、Matinloc 累層、Tabon 石灰岩、Quezon 累層、Carcar 石灰岩から成り、沿岸域での Alphonso XIII 累層と Iwahing 累層と同等である。

次に、地質構造断面による NW-SE 系の地震波測線での隆起地塊、半地溝帯、逆押しかぶせ断層の石灰岩、テクトニックな楔形状 と後期の楔拡張について概説する。傾動基盤について

は、沖合域における白亜紀地層が更新世地層に押し上げるような変形様式が地震探査解析図にみられる。沿岸域での隆起時期の堆積岩は、中央/南部パラワン地域や南シナ海沿岸域縁同様に始新世 Panas 累層のタービタイトである[26]。半地溝帯の内部を充填する堆積岩は、場所によっては 500m を越し、個々の傾動地塊側壁に観察される。これらの形状は、隆起段階から拡張期における連続的な沈降と堆積作用の結果であることを示唆するものである。

晩期漸新世~早期中新世の Nido 石灰岩は、非対称な堆積盆地において、一般的に水平で、若干南東へ傾斜する高感度振幅の反射面を示す。この石灰岩底部には、下位のタービタイトの堆積層か、あるいは、石灰岩が不規則な不整合関係にある白亜紀基盤岩に直接累重しているものと推察される。その分布は南西へ行くにつれてほぼ水平であるが、南東傾斜の衝上断層によって分断されていることが観察される。この衝上断層の変位は衝上断層による影響を受けた分断部での層厚が水平に重なり合うようなことを生じさせることにより、垂直的に 1,000m を越えることになったものと考えられる。

Pagasa 層(Pag-asa)内の楔については、ばらばらの反射面を示す厚い (2,500m 以上) 無秩序な地層の重なりが Nido 石灰岩頂部にあり、この無秩序な地層が Pagasa 累層に対比され、さらに、沿岸域の Isugod 累層に対比される。数多くの西へ緩傾斜の衝上断層は、衝上断層複合部の頂上部へ背斜構造が形成されるような衝上断層スラブの重なり合った並置を促すような一連の因果的關係に影響を与えている。

また、浅瀬の外側に向かって、衝上断層・褶曲変形は、Pagasa 累層の反射面が緩慢な西傾斜をもつ所で消滅している。このことは、衝上断層フロントが北西へ進行していることを示唆するものである。つまり、高度に変形された楔形の地震波特性ユニットが、ここでは Pagasa 楔であると解釈される。

Nido 石灰岩の逆押しかぶせ断層マーカーは、Nido 石灰岩と主要な楔の間が、南東へ傾斜している重なり合った衝上断層により特化された変形反射面として 500m 層厚を有している。この変形した地震波バンドの意味するものは、楔形成の着手なのか、または、Nido 石灰岩の逆押しかぶせ断層の始動に関連しているのかである。この変形起源がどちらであっても、Pagasa 累層の最古部層が堆積後の圧縮期間を意味するものである。さらに、衝上断層・褶曲変形と同時堆積物は、Pagasa 累層の上位層である。

次に、中期中新世の不整合 (MMU) と鮮新世から更新世の堆積層の最上位 (キャプ状) の関係について概説する。しかし、すべての先-同時形成の衝上・褶曲構造が、中期中新世と同様に沖合域の試誰孔でその年代が算定された不整合により曖昧になっている。フィリピン沿岸域での不整合は、フィリピン群島西部で確認される。これは中新世に最盛期であったフィリピン孤西部縁での北部パラワン大陸性地塊の衝突結果であると解釈されている[19]。この不整合は広く分布するために、中期中新世不整合(MMU)と呼称されるほど広域的な不整合として解釈される傾向がある[6]。その背景には、研究者の何人かが、MMU は異なる場所で異なる時期に生じた中新世イベントの複雑性を指摘しているためである[30]。

一方、例えば、Sarawak 島での不整合は、早期中新世と言われているが、Sr 同位体比年代からは、18.6-19.0Ma であるために、不整合が 2.0-2.5my 間に層序の時間空間的間隙(Hiatus)

をもつことが指摘されている[6]。フィリピンでは、この衝突イベントの年代が 15Ma と 12Ma 間 (沿岸域: Rangin, et al., 1991[13]; 沖合域: Silver and Rangin, 1991[31])と推定されている。これらの不整合上位層は、強弱交互の地震波反射面を示す。これらは、浅海の碎屑性堆積層で、Likas 石灰岩 (沿岸域での Tabon 石灰岩) と Carcar 石灰岩で代表される少なくとも 2 期間に形成された炭酸塩岩を挟在していることを意味する。これらの最新の堆積物は、一般的に海底岩棚域に分布する炭酸塩岩を伴うような堆積環境の形状を先に生じさせることになる。

次に、中期～晩期新生代のテクトニックイベントと南シナ海進化への密接な関係を概説する。ここでは、白亜紀における南シナ海の南東縁の開口に影響を与えたテクトニックイベントと、晩期中新世の衝突-充填のための炭酸塩岩が堆積するまでを解釈する上で重要な拘束 について概説する。このための新しいデータ・知見は、始新世 Panas 累層のタービダイトを押しかぶせた中生代パラワンオフィオライトの定置や、中央/南部パラワン地域での Nido 石灰岩への逆断層押しかぶせ、そして、Pagasa 楔の形成に係りあったイベント時期と、そのメカニズムを描写する上での有効な拘束情報である。

白亜紀基盤岩に地質構造的影響を与えた NE-SW系と NW-SE 系正断層に囲まれた傾動地塊が、南東アジア東縁の白亜紀基盤岩の厚さを薄くしていくことにより、特に、北部パラワン地塊の隆起を南東へと進めさせることになった。このような構造は、南シナ海の中国大陸東縁やパラワンの両者に観察される。この結果、断層に囲まれた隆起した傾動地塊は、非対称盆地の沈降サイトになった。このような盆地には、同時隆起したタービダイトや深海性碎屑性堆積物で構成されることになり、中央/南部パラワン地域における始新世 Panas 累層がそのものである。これらの堆積物に満たされた後、沿岸域の始新世 Sumbling 石灰岩と対比される先-Nido 炭酸塩岩の堆積が促される場所となっていく。その後、隆起が休止すると、晩期漸新世から早期中新世には極端な浅海に転じ、広範囲な卓状炭酸塩岩の堆積が促進された。沖合域において、この炭酸塩岩が Nido 石灰岩に対応される。

次に、定置されたオフィオライト、楔の形成と炭酸塩岩の堆積作用の相互関連については、特に、中央パラワン地域における始新世のテクトニックな窓の存在が、若い堆積層に押しかぶせたパラワンオフィオライト定置の始動への最も早い拘束である。この定置への最新の制限は、Aboabo-Quezon に繋がる谷が早期中新世の Isugod 累層の堆積物による供給で満たされたことである。晩期漸新世～早期中新世の Nido 石灰岩の逆断層押しかぶせは、早期中新世の Pagasa 累層の最下位部層への影響を与えた早期変形で明らかである。この石灰岩自身は、衝上断層フロントであるにも拘わらず 比較的未変形であることが注目に値する。これら衝上断層周辺やそれに沿う始新世の碎屑性堆積層が、楔に試錐した井戸の検層で確認されており、この楔形成に関与した衝上断層もまた、Nido 石灰岩の下位にある始新世タービダイトをスクラップすることになった。Pagasa 累層の最下位層の変形は、主要な Pagasa 楔の形成を引き起こし、そのイベントは早期中新世まで持続した。つまり、始新世末期と早期中新世間に生じたオフィオライト定置、早期中新世時の Nido 石灰岩への逆断層押しかぶせや、早期中新世に最盛期であった Pagasa 累層における主要な楔の形成は、始新世～早期中新世の連続的な収斂の場でのすべての産物であると言える。このことは、隆起した大陸性マイクロ地塊 (NPB<North パラワ

ン Block> : 北部パラワン大陸性地塊) を含む南シナ海南東縁や、その始原としての最前部 (Proto South China) における太古の海底地殻が、始新世~中新世まで連続した収斂 (場) のテクトニクスに余儀なくされたことを意味する。これらのイベントは、主に、隆起地塊の南東方への連続移動と、PMB の西域縁への接近によって誘発された。その要因は、類似した密度、例えば、北部での大陸性 NPB や PMB の収斂する質量と、地殻密度の異なる (例えば、Proto-South China Sea, PMB 弧) もの沈み込みと、押しつぶせ間の衝突によるものである。これは、お互いに調和しない積み重ねられた地質体ユニット、つまりアジアの類縁性としての白亜紀とその以前の大陸性地質体、タービダイトで充填された同時隆起地層に押しつぶせた白亜紀のオフィオライト、早期から中期中新世のテクトニクスな楔を押しつぶせた晩期漸新世から中期中新世の石灰岩などが、晩期中新世から鮮新世の浅海性堆積物と炭酸塩岩により杯状に累重されている。このオフィオライトは、例外なく沿岸域のみ露出している。沖合域から沿岸部への変移は、石灰岩への押しつぶせ断層と、テクトニクスな楔で現わされている。

また、Pagasa 累層内のテクトニクスな楔形成時期への拘束は、晩期漸新世~中期中新世の Nido 石灰岩と、晩期中新世から早期鮮新世の Tabon 石灰岩の 2 つの石灰岩パッケージを駆使して解釈可能である [3]。多くの研究者が、このユニットを Plute Wedge (楔) と呼称されているが、数多くの年代測定から、Plute 累層は始新世から早期漸新世と指摘され、Nido 石灰岩より古く、殆どが始新世のタービダイト (Panas 累層) と一致している [32]。

また、この楔は地震波反射面でも明らかで、Nido 石灰岩より若い早期~中期中新世の Pagasa 累層に影響を与えている。ここでの Pagasa 楔は、沖合域で観察・解析された楔である。

次に、南シナ海の変遷について概説する。地質構造学的データから解釈されるテクトニクスイベントは、南シナ海、取り分けその南東縁の発達を解釈するために重要なものである。南シナ海開口に先立ち、ブロック状断層で特徴づけられる基盤岩と、その基盤岩に同時形成された堆積盆地内に見られる顕著な隆起構造がある。この原始の南シナ海の海底地殻構造が、北パラワン地域の隆起した大陸性マイクロ地塊の西端によく保存されている。白亜紀から始新世のタービダイトは、パラワン島の北部と南部に露出している。これは南シナ海の南東縁を特徴づける深海海盆の堆積環境の証でもある。その後、漸新世になると、この南東縁は浅海になり、現在も北西パラワンから北西ボルネオまで追跡できるほど広範囲に堆積している Nido 石灰岩が観察される。

パラワン島沿岸域における堆積盆地内の初源的な同時隆起構造は、パラワンオフィオライト定置過程で被った強い変形によるものであるということが殆ど観察されていない。しかし、堆積盆地の堆積層であるタービダイトは、強力に変形し、オフィオライトコンタクト部では、中程度の変成作用を被っている。このことから、この時期 (過程) に、南シナ海の南東縁が収斂し始めたことが示唆される。この収斂は中新世へ継続されていることが、Pagasa テクトニクスな楔の産状により示されている。この楔の形成は、主要な不整合が中期中新世末 (MMU) まではフィリピン群島の西部地域で強調されている広範囲な隆起により引き継がれている。鮮新世では、結果として一般的な沈降が、この浸食イベント後、引き続き起こったが、パラワン地域の海域では、炭酸塩岩 (例えば、Tabon 石灰岩) や、浅海性碎屑性堆積層 (例えば、Matinloc

累層)の堆積を促した。この鮮新世の浅海性盆地内の堆積作用に関連した拡張的変形は、柵状地域 (Shelfale area) に影響させた同時沈降の正断層の形状内に現されている。

現状のテクトニクスでは、パラワンマイクロ大陸性地塊と PMB 西端間との衝突が衰退しているので、パラワン島の北東縁からミンドロ(Mindoro)島とパナイ(Panay)島までが収斂し続けている。パラワン島の中央/南部地域は、テクトニックな意味で安定しているが、北西ボルネオ地域では衝上-褶曲のようなテクトニックな変形が特徴的に見られる。従って、このようなシナリオは、早期漸新世時期の海洋形成以来の南シナ海南東縁での拡張的イベントを越えた圧縮イベントの卓越性を示唆するものである。

中央/南パラワン地域における中期から晩期新生代期間は、収斂するテクトニックな変遷過程でのイベントの連続として見る事が出来る。

ここでは、パラワン島における広域的テクトニクスの変遷について要約する。

- ① 白亜紀パラワンオフィオライトは、始新世 Panas 累層のタービダイトを押しかぶせした形状で定置している。この定置に係るイベントは、このタービダイトに変成作用を与えている (Panadian 累層)。つまり、Panadian 累層は Panas 累層と同時異層であるが、この変成作用の正確な年代は得られていない。その変成作用は弱く、場所により砂岩やシルト岩の硬化作用として観察される。但し、この変成年代は Panadian 累層最上位の化石年代から、早期漸新世より古くなることはない[32]。これらの観察から、この定置は、晩期漸新世(~33Ma)から早期中新世(~23Ma)間で生じたものと示唆されるが、オフィオライト質物質の初期の分離層(Detachment)は少し早い時期のもので、恐らく、オフィオライトの生成-沈み込み-押しかぶせへのテクトニックな変遷を示す先・漸新世に生じたものに違いない。これらのことは、白亜紀以降のフィリピン群島において、数回生起しているものと解釈されている[33]。
- ② 晩期漸新世~早期中新世の Nido 石灰岩の押しかぶせ断層は、早期中新世の最後に生じた。南西パラワン沖合域でのこの石灰岩は、早期中新世 Pagasa 累層の最下位層に属し、地震探査結果から約 600m の層厚があると解析されている。これは主要な楔形成以前のものである。もし、Steuer et al., (2013) [3]の 18Ma の古い年代を採用すると、Nido 石灰岩の逆押しかぶせ断層が、約 18Ma と約 16Ma 間で生じたような拘束が生じる。
- ③ Pagasa 累層を含む主要な楔変形作用は、中期中新世(~16Ma~12Ma)に生じた。この Nido 石灰岩の逆押しかぶせ断層が継続しづけている間に 16Ma 頃に Pagasa 累層内での楔形成が始まることになる。この楔頂部に堆積した同時衝上・褶曲した堆積物は、約 12Ma に楔形成末期に印された MMU によって楔頂部が削られることになる。
- ④ 後・楔拡張は、早期中新世から晩期鮮新世の Tabon 石灰岩を含む新しい地層に影響した西傾斜の正断層の形状中に明らかに現わされている。南西パラワン地域において、この後・楔形拡張は海底の柵状地域のみに出現している。このことは、楔形成に関与したイベントに誘発された地形斜面の不安定性に初源的に起因するものと示唆される。今後は、このようなイベントをよく理解することが必要である。それは、特に、分離層を伴う正断層を形成する褶曲・衝上断層のあるところは、新第三紀晩期の塊状デルタ堆積物の滑

動により誘発されることが知られているからである。

- ⑤ 中央/南部パラワン地域の基盤岩は、白亜紀のパラワンオフィオライトが優勢であるが、北パラワン地域では、初源的な大陸組成で構成されている。このオフィオライトは、オフィオライト-タービダイト境界に良存されている衝上構造に沿って同時期に上昇した始新世のタービダイト (Panas 累層) の上に定置されて産状している。この衝上運動 (活動) は、Pagasa 累層 (沿岸域の Isugod 累層) の早期中新世頃 (~20Ma) で終息したものであるが、オフィオライト定置は、後期漸新世の末期 (~23Ma) までに拘束されたものと解釈される。つまり、この定置は、33Ma から 23Ma 期間と解釈される。このオフィオライト定置の開始は始新世末期からで、始新世のタービダイト (Panas 累層) の衝上断層運動に関連した変成作用を拘束し、晩期漸新世から早期中新世の Nido 石灰岩へのポスト定置に伴った逆押しかぶせ断層で終息した。早期中新世の末期 (~16Ma) での炭酸塩岩の逆押しかぶせ断層 (活動) は、地震探査解析による地震波ユニットに見られる変形により顕著であり、これは早期から中期中新世の Pagasa 累層の早期部層に対応 (対比) される。これらの形成プロセスから、特異的なテクトニックな楔形 (Wedge) は、中期中新世の時期 (~16Ma~12Ma) に形成され、これが Pagasa 楔と呼ばれる衝上-褶曲ベルト (帯) を形成している。楔変形は広域的に観察される中期中新世不整合 (Middle Miocene Unconformity: MMU, ~12Ma) により頂部が削られている。この局所的な後-運動的な拡張は、衝上-褶曲構造、MMU や中新世末期から早期鮮新世の炭酸塩岩 (例えば、Tabon 石灰岩) に影響を与えている。従って、これらのイベントに伴った地質構造変遷は、始新世から中期中新世の末期期間での南シナ海南東縁への影響をもたらした連続的な収束域での変遷あったことを示唆している。また、衝上-褶曲ベルト内での並置された炭酸塩岩、タービダイト、浅海性海成碎屑物に観察される構造を明らかにすることが、炭化水素 (ガス・石油) の生成・濃集のための有望な堆積環境の選定に有効である。

(3) 中央/南部パラワン島の地質概要

北部パラワン地域と Calamian 島 (パラワン島の北方) 地域の地殻が大陸組成であることの証拠が十分にある一方、中央/南部パラワン地域の地殻組成については、不確かなことがある。北部パラワン地域は、優勢な泥質マトリックス中に二畳紀石灰岩の外来岩塊、二畳紀から三畳紀のチャート・砂岩・玄武岩を含有するジュラ紀のオリストローム (泥質岩層の優勢な地層群が海底地すべりにより、遠方に移動し、再堆積した堆積物) から構成されている [34]。さらに、北部パラワン地域の中央 / 南部地区に分布する Barton Group (界) は若干な変成作用を被った白亜紀の変成岩からなる [32]。それらの岩質・岩層は、東域の Caramay 片岩、白雲母片岩、Conception 千枚岩および、晩期白亜紀の Boyan 累層の砂岩、泥岩に細区分される [32]。これらの地層は深海底扇状地と盆地状平原に堆積し、その後、フィリピン変動に伴うパラワン島北部地塊の衝突時に変形を被ったと解釈されている [34]。

また、北部パラワン地域の広範囲に分布する変成岩は、中央/南部パラワン島地域での小さなパッチ状の産状に限定されている [32]。

一方、中央/南部パラワン地域に分布する堆積岩の地層は、比較的若く、そして北部パラワン島地域のものとは明白に異なることが指摘されている[32]。

1) パラワンオフィオライト (基盤岩)

パラワンオフィオライト (苦鉄質複合岩体) の上位に位置する枕状玄武岩に随伴する最古の堆積物は、早期白亜紀時のものである[8]。それは、中央/南部パラワン地域と Balabac 島の枕状玄武岩に伴う石灰質赤色粘土中から白亜紀の超微化石が確認されているからである[35]。さらに、枕状玄武岩は、 Ar^{39}/Ar^{40} 年代測定から 34Ma を取得している[36]。この年代はオフィオライトの押しつぶせ時であると解釈され、Sabah 島 (ボルネオ島北東部の沖合諸島) 中央部に分布している Telupid オフィオライトの晩期始新世時の押しつぶせ (Crocker 累層の上に衝上) 年代と一致している[15]。つまり、これら一連のテクトニックな Sarawak 造山運動が、始新世~早期漸新世間のイベントであって Sarawak 島から Sabah 島を経てパラワン島へ拡大するような広域的なものであったものと提言されている[11]。

中央/南部パラワン島地域の脊梁山脈を形成するパラワンオフィオライトは Mt. Beaufort 超塩基性複合岩体と言われ、その形成年代は後期白亜紀~始新世である。

また、このオフィオライトの定置時期は、はんれい岩による K-Ar 法により 34 ± 0.6 Ma[37] の年代が得られている。岩相・岩質は、主に蛇紋岩化作用が進んだハルツバージャイト岩 (主に、かんらん石と斜方輝石から構成) とダナイト (90 vol. % のかんらん石のみからなる完晶質超塩基性岩) から構成されている。

2) 早期第三系の Espina 累層

Espina 累層は、早期白亜紀から早期第三紀の少量の石灰岩、スピライト質玄武岩に挟在する硬頁岩と挟在するチャート (Espina 累層) から構成されていると報告されている[32]。これらの地層は中央/南部パラワン地域に広範囲に分布するが、その分布は唯一パッチ状に残存している。このような特異的な分布は、広い範囲でオフィオライトの押しつぶせ衝上断層に起因しているからである。この下部層の年代は、放散虫年代から晩期白亜紀 (Campanian の上部/ Maastrichtian の基底) とされている[38]。さらに、上部層のいくつかの有孔虫年代からは、早期第三紀 (古第三紀) であると示唆されている。Espina 累層はパラワンオフィオライトの最上位ユニット層を代表するものと示唆されている[39]。

3) 始新世から漸新世の Panas 累層 (Plute 累層)

Panas 累層は、始新世~漸新世下部の薄層泥岩・シルト岩を伴うアルコーズ質砂岩で構成されている[32]。この Panas 累層は、沖合域の海底堆積物で、ボルネオ-パラワン海溝に近接した北東系の付加体楔の大部分を占めている[5][40]。これら深海域に分布する Panas 累層の褶曲や衝上断層帯はボルネオ-パラワン海溝の東方に延びる鱗状に重なった堆積物の厚い楔を形成している。

4) 漸新世から中新世の炭酸塩岩

早期中新世の台地状炭酸塩岩は、中央/南部パラワン地域の沖合域/沿岸域においては、殆ど知られていない。ただ、中央パラワン地域の南部（Quezon 地区）で早期中新世の塊状で斜交断裂がある石灰岩（Ransang 石灰岩）で報告されており、この石灰岩は、北パラワン地域に分布する St. Pauls 石灰岩と対比されるものであると解釈されている[32]。この炭酸塩岩は、オフィオライトの頂部に保存されている。Quezon 地区から採取した炭酸塩岩での年代測定からは、中期中新世（16.5～13.5Ma）を示している。このことから、この石灰岩は、最も若い年代を示した Nido 炭酸塩岩が優勢であった時期とほぼ同じ時期に堆積・発達し始めたということである。但し、疑問として、これらの炭酸塩岩が、Nido 炭酸塩岩と対比されることである。これは、むしろ、Tabon 石灰岩か Alfonso XIII 累層（中央パラワン地域の Quezon 地区や、南パラワン地域の西沿岸部に分布）であることが示唆される[32]。これらの塊状から層理のある炭酸塩岩中で、殆どが微晶質石灰軟泥や粘土基質を多く含む砂岩中の有孔虫や超微化石の年代からは、晩期中新世（または、恐らく、中新世末期から晩期中新世）の年代を示している[32]。

また、沿岸域でのこの炭酸塩岩は西方に向けて若くなり、その下位層の年代は、15～13.5 Ma である。沖合域での Alfonso XIII 累層は Tabon 石灰岩と同世代のものと解釈されている[32]。但し、北部パラワン地域の北西沖合での Nido 炭酸塩岩岩は、16.4Ma と同じ位若い石灰岩の上位層として分布している。この年代は、地震探査のマルチチャンネル地震波データから Nido 卓上炭酸塩岩の上部に部分的に形成されたサンゴ礁として決定されたものである。

中央パラワン地域の沿岸部での試錐データからは、Nido 炭酸塩岩の卓上部として同定されている（下部中新世：18.8 Ma）。このことから、平原状の Nido 炭酸塩岩は、中部中新世以前に堆積したものであることが明白である。従って、中央パラワン地域の Quezon 地区の中部中新世より若い炭酸塩岩は、むしろ、St. Pauls (Nido) 石灰岩に代わる Tabon 石灰岩であると提言されている[41]。

次に、これらの炭酸塩岩層と衝上断層による楔形成間の関係を検討する。それは中央/南部パラワン地域の沖合域に分布する 2 層の炭酸塩岩層と、衝上断層による楔形成・発達に密接な関係があるからである。それらの炭酸塩岩である Tabon 石灰岩の時間一空間での発展は、恐らく、楔形成期間でのテクトニックな活動とリンクしている。隆起の動きは、炭酸塩岩の成長を促した南東から北西への浅海環境過程で楔を頂部へもたらしたものと提言されている[3]。この隆起は東部で始動し、現在の中央パラワン地域の沿岸域での、Tabon 石灰岩が直接オフィオライトを被覆していることが観察される。この石灰岩は早期中新世の末期のものである。10～5Ma 期間[42]での一般的な海面上昇が、石灰岩のその後の成長のための場所を提供したように考えられる。しかしながら、楔の頂部が広範囲に水平であることから、炭酸塩岩堆積を西方へ移動させる主な解釈としての海面変化については考慮されない。

従って、仮に、半地表状態で、部分的であるがテクトニックに安定な地域、例えば、沿岸域の Tabon 石灰岩を伴う中央パラワン地域では、海水面の上昇が東方への海進の結果によるものと考えられる。このような場合では、炭酸塩岩の堆積と岩礁の発達が浅海である西方

から始まり、その後、東方へ伝搬するものであるが、その反対の場合もある。中央 / 南パラワン地域のフロントにあるテクトニックに引き起こされた楔の隆起は、Tabon 石灰岩の堆積を西方へ移動させるような浅海性環境を漸次形成させたためと考えられる[3]。

沖合域での楔形成の時期は、被覆されるか、あるいは被覆するかの石灰岩の堆積環境に拘束される。衝上活動は下位 (Nido 石灰岩層) の炭酸塩岩質地層の形成後に生起し、堆積した Tabon 石灰岩による被覆と密封する以前に休止するに違いない。Nido 炭酸塩岩が南パラワン地域の下位にどのくらい遠く東方へ移動するのか、そして、その時期が衝上断層による楔の初期形成への明白な拘束であるのかが明白でない。生物学的・層序学的対比からは、これらの卓上炭酸塩岩上位は、18~20Ma で早期中新世のものに対比される。このことから、楔は 18Ma 以前には形成されなかったものと結論する。卓状炭酸塩岩が沈降して現在の深度になった時期は、確かにいくつかあるはずであるが、楔は 18Ma 後のある時期に形成し始めたのかも知れない。Tabon 石灰岩は楔をシールしたために楔形成後に堆積したものと解釈される。このことが、南部パラワン地域での楔の発達に更なる拘束を与えることになる。沿岸域での最古の Tabon 石灰岩は 16Ma (早期中新世) である。従って、楔形成は、18~16Ma の間に始動し、晩期中新世の上部 (~7Ma) まで西方へ移動し続いたものと考えられる。Tabon 石灰岩は、炭酸塩岩の堆積が晩期中新世の末期の 5Ma 頃に終息する前までの 2 百万年以上の間ほぼ鉛直方向に堆積・分布し続けた。その結果、楔フロントは、恐らく、荷重の重力による斜面滑動により何ヶ所かで崩落したものと考えられる。

次に、中央/南部パラワン地域の構造発達プロセスを考察する。これらの地域は、東方から西方への衝上断層による楔形成された楔が中新世期間の構造発達プロセスそのものである。少なくとも、中央パラワン地域は、早期中新世の末期以前までの発達過程を示している。衝上断層活動と楔の発達は前期鮮新世の早期まで継続し、その堆積環境は浅海から深海へと変化し、その堆積環境変化は、収斂の終末と一致している。

ここで取り上げている Tabon 石灰岩は東方から西方に分布しているものを対象にしている。従って、これらの炭酸塩岩は、楔の発達が東方から西方へ引き起こされるのに伴う隆起によるテクトニックに支配されているものと結論される。

中生代のパラワンオフィオライトを被覆している Tabon 石灰岩に等価な沿岸域の石灰岩層は、著しく褶曲されている。この褶曲は、中央/南部パラワン地域において NE-SW 系の海嶺軸を持つ大規模な背斜構造を示す結果となった。事実、南パラワン島の全体的な地形は、この背斜構造の影響を受けている。この褶曲は、Tabon 石灰岩の堆積後に生起されと解釈されている。Quezon 周辺に産する最も新しい石灰岩からは、中期中新世のものと同定されているので、隆起と褶曲も、若いに違いないと推定される。Quezon 町にある洞窟内の二次生成物は 1.2Ma から形成されていることから、石灰岩の陸上露出を示す隆起のタイミングに対しての拘束が考えられる。

これは、南パラワン島の形成に関与している晩期中新世から鮮新世時期の地殻短縮の第 2 段階を示すものである。このことは、Plute 累層 (Panas 累層の相当層) 内の楔が恐らく連続的に海面下にあった時期が、南パラワン島の海面から隆起した時期なのかも知れない。

これらの事実から、①中央/南部パラワン地域の沿岸部での **Nido** 炭酸塩岩の露出の証拠はなく、そこに露出している石灰岩は、若い **Tabon** 石灰岩である。②中央/南部パラワン地域の沖合部または、沿岸部での **Tabon** 石灰岩の詳細な対比から、この石灰岩は西方へ順行することにより下位にある **Plute** 累層内の楔の発達を促すようなテクトニック拘束されたものと考えられる。③**Nido** 石灰岩は、下位の **Plute** 累層の楔そのものであることが明白であり、ボルネオ西方までの「**Dangerous Ground**」全体に延長していることが地震探査測線での解析結果により追跡された。④この 2 つの石灰岩は、**Plute** 累層内楔の発達のための時間的な拘束を与えている。そして、パラワン島では、~18Ma より以前には形成されていなかったが、~7Ma まで活動的であったことが解釈される。

つまり、第 2 段階の隆起の始動は、中央/南部パラワン地域の沿岸域での **Tabon** 石灰岩の褶曲の起因となった。このイベントへの時間的拘束は、西パラワン大陸棚での後期鮮新世の末期における不整合であり、**Quezon** 町市周辺の洞窟内の二次生成物 (1.2Ma 以来) の形成をもたらした。

2.4 地質概査

2.4.1 概要

パラワン島中・南部地域を対象として、露頭調査によりベントナイトの分布、性状を確認し、ベントナイト-高アルカリ地下水の接触地点の特定のために必要な、地質・地質構造に関する情報を取得するため、今年度は、図 2.4.1-1 に示すとおり、中央パラワン島・東部沿岸域(Narra 地区)と、南部パラワン島・南東部沿岸域(Rio Tuba 地区および Brookes Point) において地質概査を実施した。

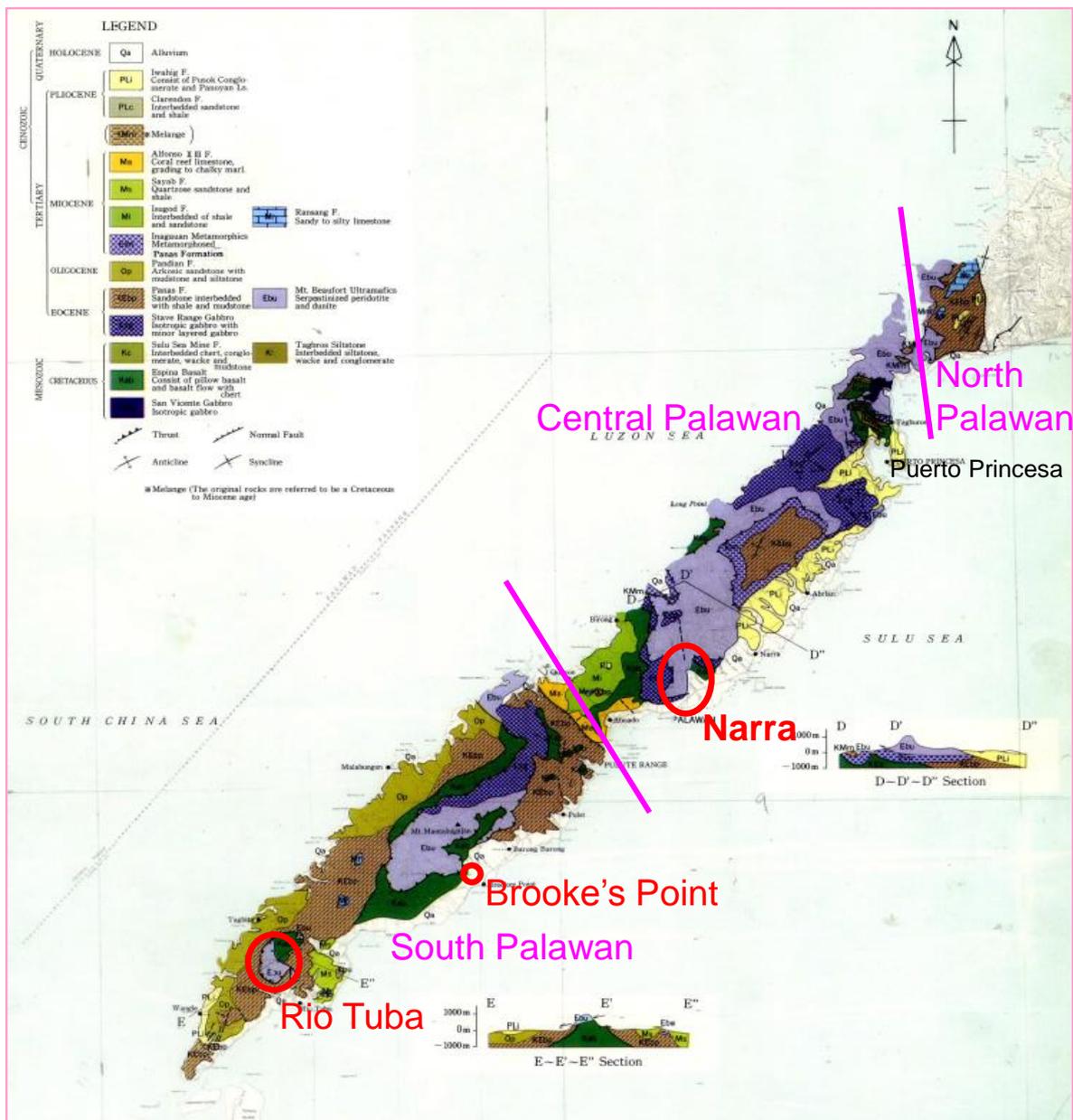


図 2.4.1-1 調査地域と地質図 (MGB, 2010[43]を編集)

2.4.2 地理・地形的特徴

今年度の精査地区である Narra 地区（中央パラワン島・東部沿岸域）はパラワン島州都・プエルトプリンセサから南東約 35km に位置する Narra 州・Caguisan 地域・Panacan 地区周辺である。調査サイトは、パラワン島東部にあるスルー海（フィリピン諸島とボルネオ島北部の間の内海）の海岸線から約 6km 西方に位置し、その標高は海拔約 60m で、東へ緩傾斜する平坦地（河川扇状地様地形）である。この調査サイト規模は東西約 80m、南北約 150m の範囲である。

一方、概査地区である南パラワン地区の Rio Tuba 地区は、パラワン島のほぼ南端に位置する Rio Tuba 市の周辺地区である。この地区の東部沿岸部は、亜熱帯～熱帯特有のマングローブが繁茂する低地帯が広く分布している。Rio Tuba へのアクセスは、Narra からの東海岸を南下する州道を約 150km 南へ向かい車で約 4 時間程度の道のりである。但し、この州道の一部は舗装されていない場所が何ヶ所もある悪路である。

2.4.3 Narra 地区及びその周辺の概査

(1) フィールド調査の概要

今年度の精査地区である Narra 地区（中央パラワン島・東部沿岸域）はパラワン島州都・プエルトプリンセサから南東約 35km に位置する Narra 州・Caguisan 地域・Panacan 地区周辺である。調査サイトは、パラワン島東部にあるスルー海（フィリピン諸島とボルネオ島北部の間の内海）の海岸線から約 6km 西方に位置し、その標高は海拔約 60m で、東へ緩傾斜する平坦地（河川扇状地様地形）である。この調査サイト規模は東西約 80m、南北約 150m の範囲である。

Narra 地区ではトレンチ掘削地点選定のために、その候補となる Narra3-2 地点（アルカリ泉のある Narra3-1 地点から下流（約 100m）に分布する石灰華(Travertine)の平坦地）周辺で概査を実施した。これらの結果は 2.6 トレンチ調査で後述する。

Spillway では、枕状溶岩と斑れい岩と思われる貫入岩の露頭を確認し（図 2.4.3-1）、岩石試料の採取(PWSPO-15-Rh-001)を行った。X 線回折測定による鉱物同定結果を表 2.4.3-1 に、X 線回折チャートを図 2.4.3-2 に示す。また、XRF による定量分析結果を棒グラフにプロットしたものを Riotuba 地区や Narra3-1 の露頭試料の結果とともに図 2.4.3-3 に、また、CO₂の含有率を控除して百分率を求めたものを図 2.4.3-4 に示す。PWSPO-15-Rh-001 は貫入岩の境界付近の変質した枕状溶岩であるが、スメクタイトの強いピークを示し、後述する Narra の碎屑性堆積物の試料と比べても Si 及び Al 量が多い。なお、ここではアルカリ地下水は確認できなかった。



図 2.4.3-1 Spillway の枕状溶岩の露頭

表 2.4.3-1 Spillway の露頭試料の X 線回折測定による鉱物同定

鉱物名			PWSPO-15-Rh-001
粘土鉱物	スメクタイト	Smectite	◎
シリカ鉱物	石英	Quartz	△
長石	斜長石	Plegioclase	△
沸石	灰十字沸石	Phillipsite	◎

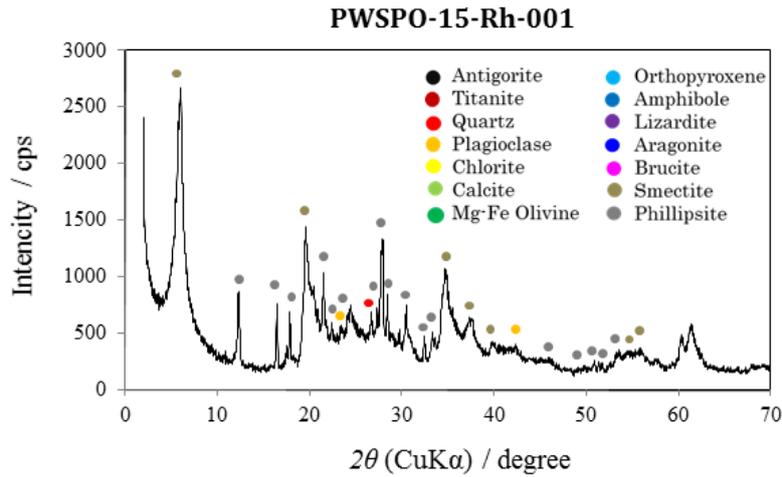


図 2.4.3-2 PWSP0-15-Rh-001 の XRD チャート

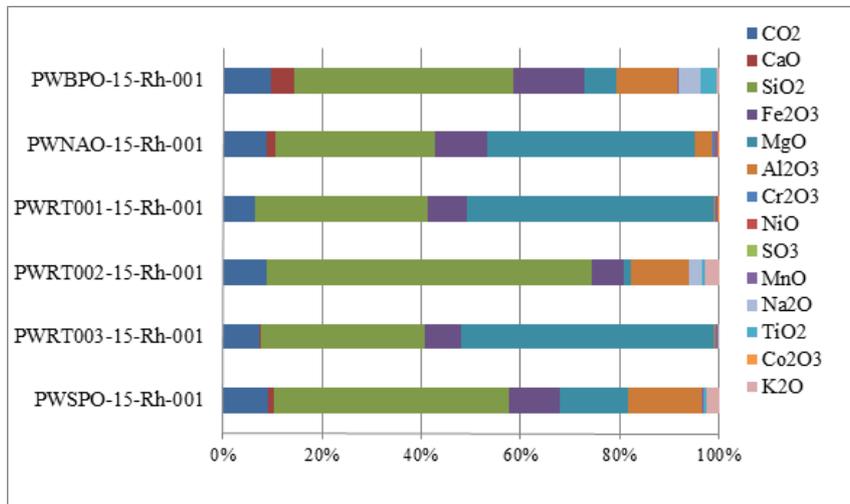


図 2.4.3-3 Narra 地区・Rio Tuba 地区等の露頭試料 XRF 分析結果 (CO₂ を含む)

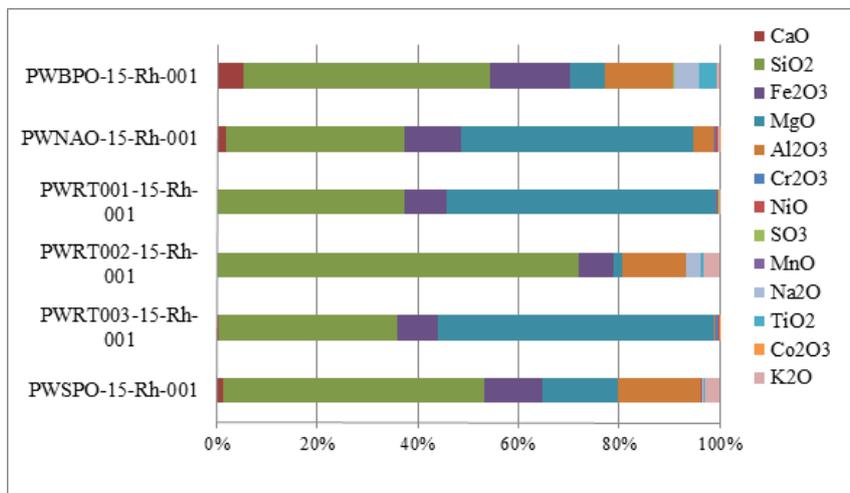


図 2.4.3-4 Narra 地区・Rio Tuba 地区等の露頭試料 XRF 分析結果 (CO₂ を含まない)

Parian（昨年度の調査で Narra1 と呼んでいたサイト）では、地下水調査のみ実施した。

Narra 地区の南西 40km の地域には、Rio Tuba 鉱床ほどの規模ではないが Narra 鉱床と Espanola 鉱床の2つのニッケル鉱山（図 2.4.3-5）が存在する（Citinickel Mine 社が採掘）が、これらの鉱床周辺ではアルカリ地下水や粘土質堆積層は確認できなかった。



図 2.4.3-5 ニッケル鉱山の採石場の露頭（Narra 鉱床（左）、Espanola 鉱床（右））

(2) 地質概要

今年度調査地区の基盤岩は、パラワンオフィオライト（超塩基性複合岩体）は、大部分がハルツバージャイト（主に、かんらん石+斜方輝石）、少量のダナイト岩（大部分がかんらん石）とウェールライト（かんらん石+透輝石）および、枕状玄武岩溶岩と遠洋性堆積物で構成されている。当地区の基盤岩の分布は北東系に伸長する南部/中央パラワン島の脊梁（標高約 1,000m）を形成し、場所により蛇紋岩化作用が顕著な露頭が観察される。

このパラワンオフィオライトは、下位から(i)Beaufort Ultramafic Complex、(ii) Stavelly Gabbro、(iii) Espina Formation（累層；枕状玄武岩・玄武岩質溶岩とチャート・遠洋性堆積物）で構成されている。その形成年代は、白亜紀（130Ma：ハルツバージャイトによる Os-Rh 年代測定法[28]）であると報告されている。その後のテクトニクス変遷過程でのこのオフィオライトの定置は、33~23 Ma（化石・微化石層序学的手法[4]）と、34 Ma（³⁹Ar-⁴⁰Ar 法[37]）と報告されている。

注目すべき事象として、これらの超塩基性岩類を起源とする高アルカリ湧水源（温泉水）が数多く観察される。特に、オフィオライト岩体東側の緩斜面に卓越した NE 系の割れ目系（断裂系）に伴う高アルカリ湧水（湧水地点：Narra3-1; pH 11.3）が顕著である。その湧水源とその周辺部に化学沈殿物としてのトラバーチン（石灰華）が広く分布する。そして、このトラバーチンの沈殿・成長・堆積・固結過程で堆積性炭酸塩質堆積物から堆積性炭酸塩岩へと岩石化が進んでいる

また、これらの高アルカリ性湧水量の多い地下水（温泉水）が、温泉保養施設（例えば San Isido (Narra1)）の温泉水として利用されている。

鉱床学的には、これらのオフィオライト表層部でのラテライト化の進んだ風化残留堆積層

(層厚約 90m) には、有用な金属鉱床 (主に、Ni、Fe、と随伴金属元素として Co) が胚胎している (例えば、中央パラワン島・Narra 地区での、CITI ニッケル鉱山・Espanola 鉱山、南部パラワン島・Rio Tuba 地区での Coral Bay ニッケル鉱山)。

1) 高アルカリ湧水に密接に随伴する堆積性炭酸塩質堆積物と堆積性炭酸塩岩

当調査サイト (Narra 地区) で観察される高アルカリ湧水源地点 (pH> 11) では、例外なく石灰質化学沈殿物が随伴している。この高アルカリ湧水源は、パラワンオフィオライト岩体の東西系に卓越した断裂系 (割れ目系) に観察される。この高アルカリ湧水 (地下水) は、パラワンオフィオライト岩体の東方へ緩傾斜する小規模な平坦地 (河川系扇状地様のテラス地形) にある数条のアルカリ地下水 (pH> 9) の小川に沿って緩やかに流下している。その平坦地の表層部には、堆積性炭酸塩質堆積物 (Carbonate Sediment) が広くかつ、厚く堆積している。湧水源周辺では、多孔質でルーズな石灰華 (Tufa) が発達しているが、その深層に行くにつれて、堆積 (沈積)・固結過程を示す平行な堆積構造や、不純物の沈殿による茶色や黄色の沈殿層が観察される。これらの堆積構造からは、石灰華が堆積後、荷重による固結化や、続成作用により細い顕著な縞状構造を示す固化プロセスが進んだ緻密で硬質な堆積性炭酸塩岩が観察される。これらの河川系 (小川) の炭酸塩沈殿物は、過飽和な石灰分を含むアルカリ性の地下水 (温泉水) が $p\text{CO}_2$ (二酸化炭素分圧) の上昇により形成されたものと解釈される (反応式: $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 = \text{Ca}^{++} + 2\text{HCO}_3^-$)。

一方、高アルカリ湧水源の深部では、大気の影響 ($p\text{CO}_2$ が低い) がないために、その地下水から CO_2 が抜け、その結果として pH が高く維持されることになる。そして、pH が高くなると炭酸塩の溶解が低下し、炭酸塩鉱物の沈殿が促進されることになる [44]。この炭酸塩鉱物としては、主に方解石・霰石と苦灰石などであるが、高い水温では霰石、低いと方解石が形成され易い [45][46]。ここでは方解石が主成分鉱物として同定されている。

また、この縞状構造の形成 (透水性が高い層と低い層の成層構造) に伴う固化プロセスにおける続成作用により、炭酸塩岩が深くなるほど熟成され、緻密で割れ目が少ない組織的に安定していくことが考えられる。その結果、空隙率の減少を促すと共に透水性が低くなる [47]。これは、炭酸塩岩の帯水層における不飽和浸透、つまり不透水層の存在を示唆するものである [48]。この水理的特性はトレンチ 2 内で計測された高アルカリ湧水の存在 (賦存) に関する水理場、特に、高アルカリ湧水 (地下水) の流動特性を考察する上で重要な水理地質構造学的知見である。

これらの堆積性炭酸塩質堆積物と堆積性炭酸塩岩には、同一層準としての連続性に乏しい埋没木根 (恐らくマングローブ様の植物木根) が観察される。ただし、下位層には、大きい埋没木根が少なく、大部分が炭化の進んだ細い木片 (腐植化) で産状している。現在の小川の周辺には、大型のうつぼかずらが繁茂している。

さらに、散在的 (局所的) ではあるが現生・汽水性の貝が小規模なコロニーとして産状している。特に、炭酸塩岩中に堀削したトレンチ 1 (高アルカリ湧水源から約 80m 東に位置する) の西壁で深度約 1m と約 2.2m 付近で現生・汽水性の貝が観察される。

一方、トレンチ2の黒色（腐植化）粘土層に、破碎された貝化石が観察されている。これらの貝化石の同定により、堆積年代と堆積環境により、高アルカリ地下水の地球科学的進化とアルカリ変質反応を考察する上で、不可欠な環境条件などを提供するものと考えている。

2) 碎屑性堆積物

今年度掘削したトレンチ1（海拔約61m）は、オフィオライト岩体の東斜面に緩慢な傾斜で分布する平坦な地形面（小規模な扇状地形形状）に位置している。この平坦地は、現在湧水している高アルカリ湧水源(Narra 3-1)から約80m東方に分布している。この高アルカリ湧水は、降雨水で希釈されながらこの平坦地の表層水として数条の浅い小川に流出している。

一方、トレンチ2は、高アルカリ地下水湧水源から約120mに位置し、この平坦地先端で段差4~5m程度の斜面（地形変換面）に位置している。この斜面は現在の稲作田に移行・収斂する。この地形変換面に掘削したトレンチ2（海拔約58m: トレンチ1から東へ約40m）の底部（約1.8m以深）には、パラワンオフィオライトが露出している。この底面直上から約80cmまで特徴的な黒色（腐植化）で、比較的層厚変化を示す碎屑性堆積物(Clastic Sediments)の露頭が観察される。礫はパラワンオフィオライト（殆どが、ハルツバージャイト）起源の岩片（亜角礫:長径2cm以下）と少量の石英安山岩起源の斜長石($Ab_{69}An_{31}$)と石英の斑晶から構成されている。基質は、一部砂質なものもあるが、大部分がシルト質から粘土質を示す。特に、上位層の堆積物（約20cmの層厚）は細かい層理面が発達する黒色粘土質である。トレンチの西壁の露頭観察、特に、礫種や粒度・構成鉱物・運搬<篩別>・堆積過程などを考慮すると現地性の地滑り堆積物と想定される。これらの碎屑性堆積層の上位には、高アルカリ地下水形成と密接な成因関係を持つ堆積性炭酸塩岩が累重している。

また、この碎屑性堆積物中には、肉眼で特異的な自形のC-S-Hと、破碎された化石が観察される。これらの化石同定により、より正確な堆積環境と年代などの情報にから、碎屑性堆積物の起源・堆積プロセス・形成年代などの地質学的解釈が明らかになることが期待される。

2.4.4 Rio Tuba 地区の概査

(1) フィールド調査の概要

南パラワン地区の Rio Tuba 地区は、パラワン島のほぼ南端に位置する Rio Tuba 市の周辺地区である。この地区の東部沿岸部は、亜熱帯~熱帯特有のマングローブが繁茂する低地帯が広く分布している。Rio Tuba 地区へのアクセスは、Narra からの東海岸を南下する州道を約 150km 南へ向かい車で約 4 時間程度の道のりである。但し、この州道の一部は舗装されていない場所が何ヶ所もある悪路である。

Rio Tuba 地区には、図 2.4.1-1 に示すようにパラワンオフィオライトの超塩基性岩とベントナイト質堆積物層が存在する可能性がある Panas 層が近接して分布しており、地質セッティングの面からはナチュラルアナログサイトとしての可能性のあるため、概査を実施した。

Rio Tuba 地区にはこのオフィオライトが風化したラテライト（リモナイト、サブロライト（リモナイトの下部にあり高品位））中のニッケルを採掘する鉱山（Rio Tuba 鉱山：フィリピンで2番目に大きいニッケル鉱床）が存在し、この鉱山会社（Nickel Asia Corp.）によって開発された典型的な鉱山都市である。

ナチュラルアナログとして高アルカリ地下水の生成環境としては、ラテライト化していない超塩基性岩がターゲットとなるため、その露頭とアルカリ湧水を確認するために Rio Tuba 地区の沢沿いの露頭調査を試みたが、降雨による増水（図 2.4.4-1）がひどく超塩基性岩の露頭は確認できなかった。



図 2.4.4-1 降雨による沢の増水状況

ベントナイト質堆積層の露頭も上記の降雨の影響で多くは確認できなかったが、Panas 層の露頭を 1 カ所確認し、試料（PWTRTO02-15-Rh-001, PWTRTO02-15-HU-001~004）を採取した（図 2.4.4-2）。超塩基性岩やアルカリ地下水とのコンタクトも確認していないが、超塩基性岩を 2 試料（PWRTO01-15-Rh-001 及び PWRTO03-15-Rh-001 及び）採取した。



図 2.4.4-2 Panas 層の露頭における岩石試料採取 (N08°30'13.0",E117°21'05.7")

Brooke's Point 地区では、図 2.4.1-1 からパラワンオフィオライトの枕状溶岩の分布が認められ、蛇紋岩作用によって生成・進化したとみられるアルカリ地下水が湧出している（図 2.4.4-3）。7 Falls Spring は高アルカリ泉を源泉とする温泉施設であり、その露頭で岩石試料 (PWBPO-15-Rh-001)を採取した。



図 2.4.4-3 Brooke's Point 地区の 7 Falls Spring の露頭（左）と温泉施設の源泉（右）

Rio Tuba 地区及び Brooke's Point 地区の露頭採取試料の X 線回折測定による鉱物同定結果を表 2.4.4-1 に、X 線回折チャートを図 2.4.4-4～図 2.4.4-7 に示す。また、XRF による定量分析結果は Narra 地区の露頭試料の結果とともに図 2.4.3-3 に、また、CO₂ の含有率を控除して百分率を求めたものを図 2.4.3-4 に示す。

Rio Tuba 地区の Panas 層(PWRTO02-15-Rh-001)は斜長石に富むが、スメクタイトはそれほど多くなかった。また、Spillway のスメクタイトに富む試料(PWSPO01-15-Rh-001)と比べると Si に富む一方 Mg が極めて少ない。

表 2.4.4-1 Narra 地区・Rio Tuba 地区等の露頭試料の X 線回折測定による鉱物同定

鉱物名			PWBPO-15 -Rh-001	PWNAO-15 -Rh-001	PWRTO01-15 -Rh-001	PWRTO02-15 -Rh-001	PWRTO03-15 -Rh-001	PWSPO-15 -Rh-001
粘土鉱物	スメクタイト	Smectite	○	○		△		◎
	緑泥石	Chlorite	△	△		△		
シリカ鉱物	石英	Quartz	◎			◎		△
長石	斜長石	Plegioclase	◎			○		△
沸石	灰十字沸石	Phillipsite						◎
かんらん石	Mg-Fe かんらん石	Mg-Fe Olivine					△	
輝石	斜方輝石	Orthopyroxene	△	△	△		○	
角閃石	—	Amphibole		△				
炭酸塩鉱物	方解石	Calcite	○	○	△			
	霏石	Aragonite		△				
	苦灰石	Dolomite					○	
蛇紋石	リザダイト	Lizardite		◎	◎		◎	
	アンチゴライト	Antigolite	△					
水酸化鉱物	ブルサイト	Brucite			△		△	
チタン石	—	Titanite	△					

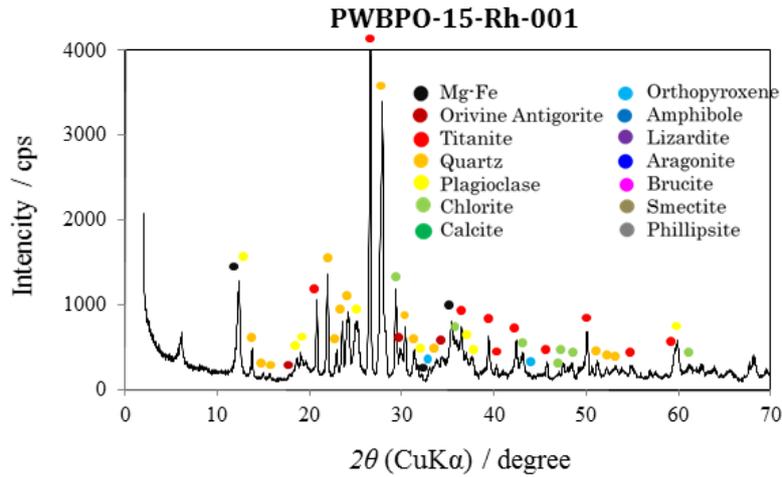


図 2.4.4-4 PWBPO-15-Rh-001 (Brooke's Point 地区) の XRD チャート

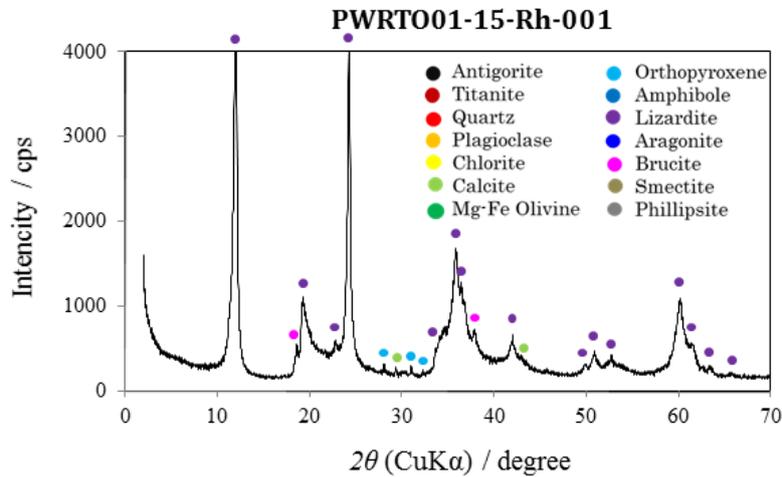


図 2.4.4-5 PWRT001-15-Rh-001 (Rio Tuba 地区) の XRD チャート

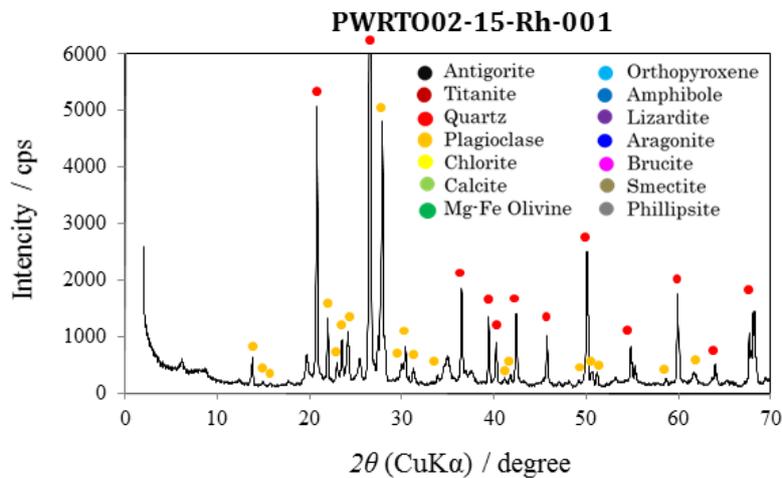


図 2.4.4-6 PWRT002-15-Rh-001 (Rio Tuba 地区) の XRD チャート

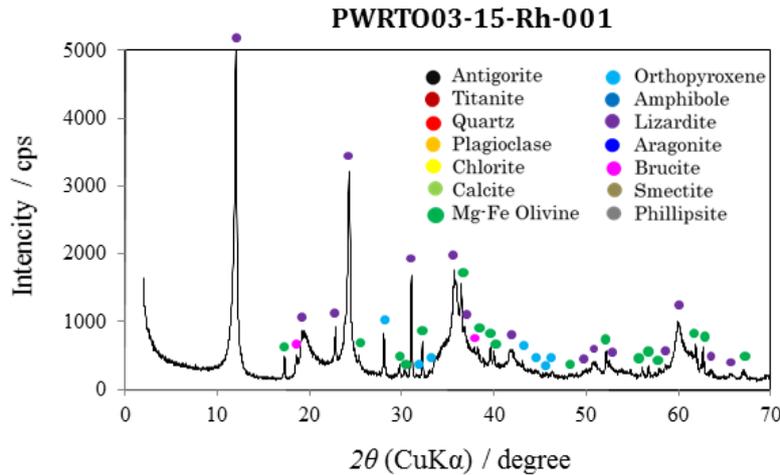


図 2.4.4-7 PWRT003-15-Rh-001 (Rio Tuba 地区) の XRD チャート

(2) 南部パラワン島・Rio Tuba 地区の地質概要

Rio Tuba 地区でのオフィオライトは、Narra 地区のものとは比べても岩質・岩相に大きな差異はないが、組成・主要鉱物の粒度・組織などの変化が大きい傾向がある。特に、カンラン石に富み、岩相としては、蛇紋岩化された超塩基性岩類（橄欖岩・ダナイト）が多く、大部分が粗粒である。蛇紋岩化された超塩基性岩類は、一般的に割れ目系（断裂系）が発達し、しばしば鉱化部を形成している。この断裂系が、有用金属（Ni, Fe, Co など）の鉱液の通路（オープンスペース）の役割を果たしたものと考えられる。

また、これらの割れ目帯（断裂系）からの湧水はアルカリ性（pH > 9）が低く、高アルカリ地下水に伴う石灰華の露頭は確認されなかった。

このオフィオライト複合岩体の北東部には、この基盤岩の上位層である枕状玄武岩が広範囲に分布している。

このオフィオライト複合岩体の南西部に、この基盤岩に不整合関係で累重する Panas 層を構成する砂岩露頭が観察される。しかし、スメクタイトの含有量は少ない。

しかし、このオフィオライト複合岩体近傍での高アルカリ湧水が遠洋性堆積物に浸出・湧水している露頭は観察されなかった。

2.5 地下水調査

2.2.2 で示した中央/南部パラワン地域の地質概査したサイト（Riotuba 地区、Brooke's Point 地区、Narra 地区）において地下水調査を実施した。昨年度の概査で高アルカリ地下水が確認された Narra 地区においては、高アルカリ泉（湧水）だけでなく、トレンチの湧水や河川水も調査した。

2.5.1 現地調査（現地測定・簡易分析・採水）

(1) Rio Tuba 地区

Rio Tuba 地区（図 2.5.1-1）での地下水調査については、地区内の井戸、小川等を対象に物理化学パラメータの測定（調査ポイント 1~7, 9, 10, 12,13 はリトマス紙のみで測定）を実施したが（図 2.5.1-2~図 2.5.1-17）、表層水のためにそのほとんどが弱酸性~中性の地下水であった。

ニッケル鉱山（Nickel Asia Corp.）採石場の露頭から鉱山貯水池に流れ込んでいる滝（源泉は採掘されていない上部）が pH10.01 であったため、この湧水を採水した（図 2.5.1-15）。表 2.5.1-1~表 2.5.1-2 に Rio tuba 地区での地下水の物理化学パラメータの現地測定結果を示す。

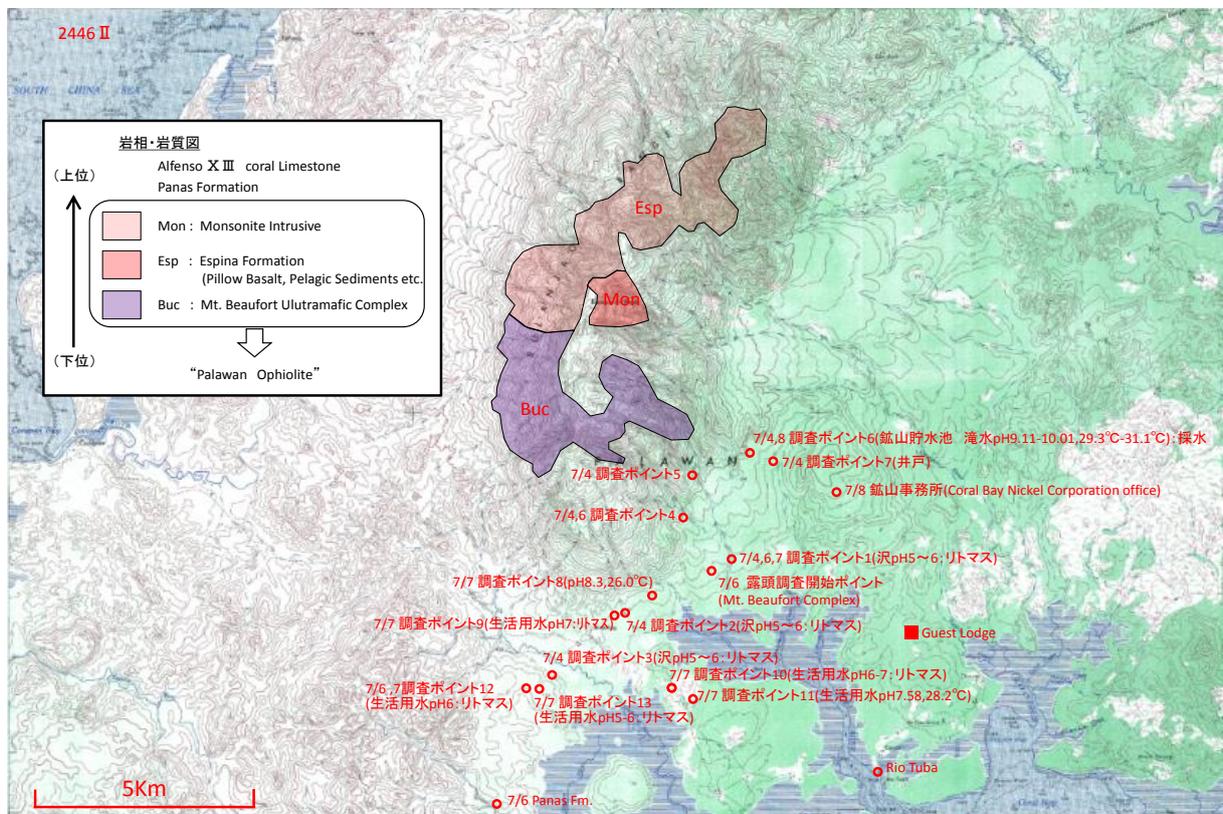


図 2.5.1-1 Rio tuba 地区の調査地点プロット



図 2.5.1-2 調査ポイント 1 (N08°33'10.0", E117°24'01.2"), 沢, pH5



図 2.5.1-3 調査ポイント 2 (N08°32'33.4", E117°22'38.6"), クリーク pH5~6



図 2.5.1-4 調査ポイント 3 (N08°31'48.6", E117°21'49.7"), クリーク pH5~6



図 2.5.1-5 調査ポイント 4 (N08°33'44.3", E117°23'26.4"), クリーク, pH7



図 2.5.1-6 調査ポイント 5 (N08°34'14.3",E117°23'34.2"), 沢, pH6

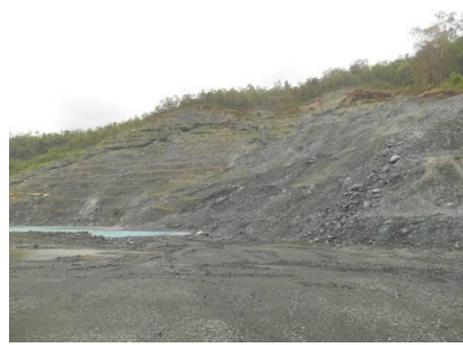


図 2.5.1-7 調査ポイント 6 (N08°34'30.9",E117°24'15.0"), 鉦山貯水池, pH6~7



図 2.5.1-8 調査ポイント 7 (N08°34'24.8",E117°24'34.3"), pH7, ※通常は 8~9 程度



図 2.5.1-9 調査ポイント 8 (N08°32'46.3",E117°23'04.9"), 沢, pH8.3, 26.0°C



図 2.5.1-10 調査ポイント 9 (N08°32'32.7",E117°22'36.8"), 生活用水井, pH7



図 2.5.1-11 調査ポイント 10 (N08° 31' 38.4" ,E117° 23' 17.8"), 生活用水井, pH6~7



図 2.5.1-12 調査ポイント 11 (N08°31'31.9",E117°23'34.7"), 生活用水井, pH7.58, 28.2°C



図 2.5.1-13 調査ポイント 12 : 小学校 (N08°31'35.0",E117°21'31.3"), 生活用水井, pH6



図 2.5.1-14 調査ポイント 13 (N08°31'40.9",E117°21'41.0"), 生活用水井, pH5-6



図 2.5.1-15 採水地点 (N08°34'31.4",E117°24'12.3"), 調査ポイント 6 と同じ鉦山貯水池のある採石場露頭の滝 (白色変質部), pH10.01, 29.3°C



図 2.5.1-16 鉦山貯水池のある採石場露頭の滝 (中央), pH9.35, 29.6°C



図 2.5.1-17 鉦山貯水池のある採石場露頭の滝 (右側), pH9.11, 31.1℃

表 2.5.1-1 Rio Tuba 河川水および井戸水の現地水質調査結果

採取日時	位置	採取場所	測定項目	大林組	北大	備考
7/7 10:11	N08°32' 46.3" E117°23' 04.9"	調査ポイント8 	pH	8.3		
			Temp. (°C)	26.0		
7/7 10:45	N08°32' 32.7" E117°22' 36.8"	調査ポイント9(生活用水井) 	pH(リトマス)	7		
			Temp. (°C)	—		
7/7 12:02	N08°32' 38.4" E117°23' 17.8"	調査ポイント10(生活用水井) 	pH(リトマス)	6-7		
			Temp. (°C)	—		
7/7 12:25	N08°31' 31.9" E117°23' 34.7"	調査ポイント11(生活用水井) 	pH	7.58		
			Temp. (°C)	28.2		
7/7 12:51	N08°31' 35.0" E117°21' 31.3"	調査ポイント12(生活用水井) 	pH(リトマス)	6		
			Temp. (°C)	—		
7/7 13:10	N08°31' 40.9" E117°21' 41.0"	調査ポイント13(生活用水井) 	pH(リトマス)	5-6		
			Temp. (°C)	—		

表 2.5.1-2 Rio tuba ニッケル鉱山採石場での現地水質調査結果

採取日時		位置	採取場所/母岩	測定項目	大林組	北大	備考
7/8	12:00	N08°34' 31.4" E117°24' 12.3"	貯水池に注ぐ滝 (左: 白色変質部) 採水  Palawan Ophiolite (Ultramafic)	pH	—	10.01	
				Temp. (°C)	—	29.3	
				ORP (mV)	—	119	
				DO (mg/L)	—		
				EC (ms/m)	—		
				CH4(ppm)	—		
				H2(ppm)	—		
				Ca	10		
				Mg	20		
				Al	0.05		
				SiO2	<5		
Cl(D)	>50						
7/8	12:00	N08°34' 31.4" E117°24' 12.3"	貯水池に注ぐ滝 (中央)  Palawan Ophiolite (Ultramafic)	pH	9.35		
				Temp. (°C)	29.6		
				ORP (mV)	—		
				DO (mg/L)	—		
				EC (ms/m)	—		
				CH4(ppm)	—		
				H2(ppm)	—		
				Ca	—		
				Mg	—		
				Al	—		
				SiO2	—		
Cl(D)	—						
7/8	12:00	N08°34' 31.4" E117°24' 12.3"	貯水池に注ぐ滝 (右)  Palawan Ophiolite (Ultramafic)	pH	9.11		
				Temp. (°C)	31.1		
				ORP (mV)	—		
				DO (mg/L)	—		
				EC (ms/m)	—		
				CH4(ppm)	—		
				H2(ppm)	—		
				Ca	—		
				Mg	—		
				Al	—		
				SiO2	—		
Cl(D)	—						

(2) Brooke's Point 地区

Brooke's Point 地区では、アルカリ地下水の源泉を利用した温泉施設である 7 Falls Hotspring において地下水調査を実施した。図 2.5.1-18～図 2.5.1-19 に Brooke's Point 地区の調査地点の状況を、表 2.5.1-3 に地下水の物理化学パラメータの現地測定結果を示す。

源泉 (図 2.5.1-19) は pH9.53, ORP-387 mV であり、pH は低いもののメタン・水素と見られるガスのバブリングが確認できた。

Brooke's Point 地区もパラワンオフィオライトの枕状溶岩の分布が認められ、蛇紋岩作用によって生成・進化したアルカリ地下水と思われる。



図 2.5.1-18 7 Falls Hot spring のクリーク周辺の池, pH9.45, 36.5°C



図 2.5.1-19 7 Falls Hot spring の源泉 (N08°51'31.5", E117°48'09.7"), アルカリ泉, pH9.53, 34.1°C, ガスのバブリング (右)

表 2.5.1-3 Brooke's Point (7 fall Hotspring) の現地水質調査結果

採取日時		位置	採取場所/母岩	測定項目	大林組	北大	備考
7/8	15:50	N08°51' 31.5" E117°48' 09.7"	7 Falls Hot Spring のクリーク周辺の池 採水  Basalt (Palawan Ophiolite)	pH	9.45		
				Temp. (°C)	36.5		
				ORP (mV)	116		
				DO (mg/L)	—		
				EC (ms/m)	—		
				CH4(ppm)	0		
				H2(ppm)	0		
				Ca	5-10		
				Mg	0		
				Al	0		
				SiO2	50-100		
				Cl(D)	>50		
7/8	16:43	N08°51' 32.3" E117°48' 08.7"	7 Falls Hot Spring 源泉 採水  Basalt (Palawan Ophiolite)	pH	—	9.53	
				Temp. (°C)	—	34.1	
				ORP (mV)	—	-387	
				DO (mg/L)	—	0.9	
				EC (ms/m)	—	91.2	
				CH4(ppm)	0		
				H2(ppm)	0		
				Ca	5-10		
				Mg	1		
				Al	0		
				SiO2	50-100		
				Cl(D)	>50		

(3) Narra 地区

平成 26 年度の概査において pH11 を超える高アルカリ性地下水湧水を確認し、ベントナイト質堆積層（スメクタイトを含有する堆積層）との接触の可能性があり Active Type のナチュラルアナログサイトとなり得る可能性が高いパラワン島中南部（パラワンオフィオライトが分布する Narra 地区：図 2.4.1-1 参照）のうち、トレンチ調査サイト周辺（Narra3-1 及び Narra3-2）および、Narra3-2 のトレンチ（2 か所）内湧水（地下水）を対象に、その物理化学パラメータの測定と採水を実施した。

図 2.5.1-20～図 2.5.1-28 に Narra 地区の調査地点の状況を、表 2.5.1-4～表 2.5.1-8 に地下水の物理化学パラメータの現地測定結果を示す。

また、Parian（昨年度の調査で Narra1 と呼んでいたサイト）では、温泉施設の源泉（図 2.5.1-27～図 2.5.1-28）で地下水調査を実施した。この源泉は斑れい岩の亀裂から湧出しており、温度が 45～47℃と高いことと、ガス（メタン：700ppm 以上、水素は検出されず）のバブリングがあるという特徴がある。なお、この温泉施設の管理人によると、この敷地では至る所でこのような温泉が噴き出すとのことであった。

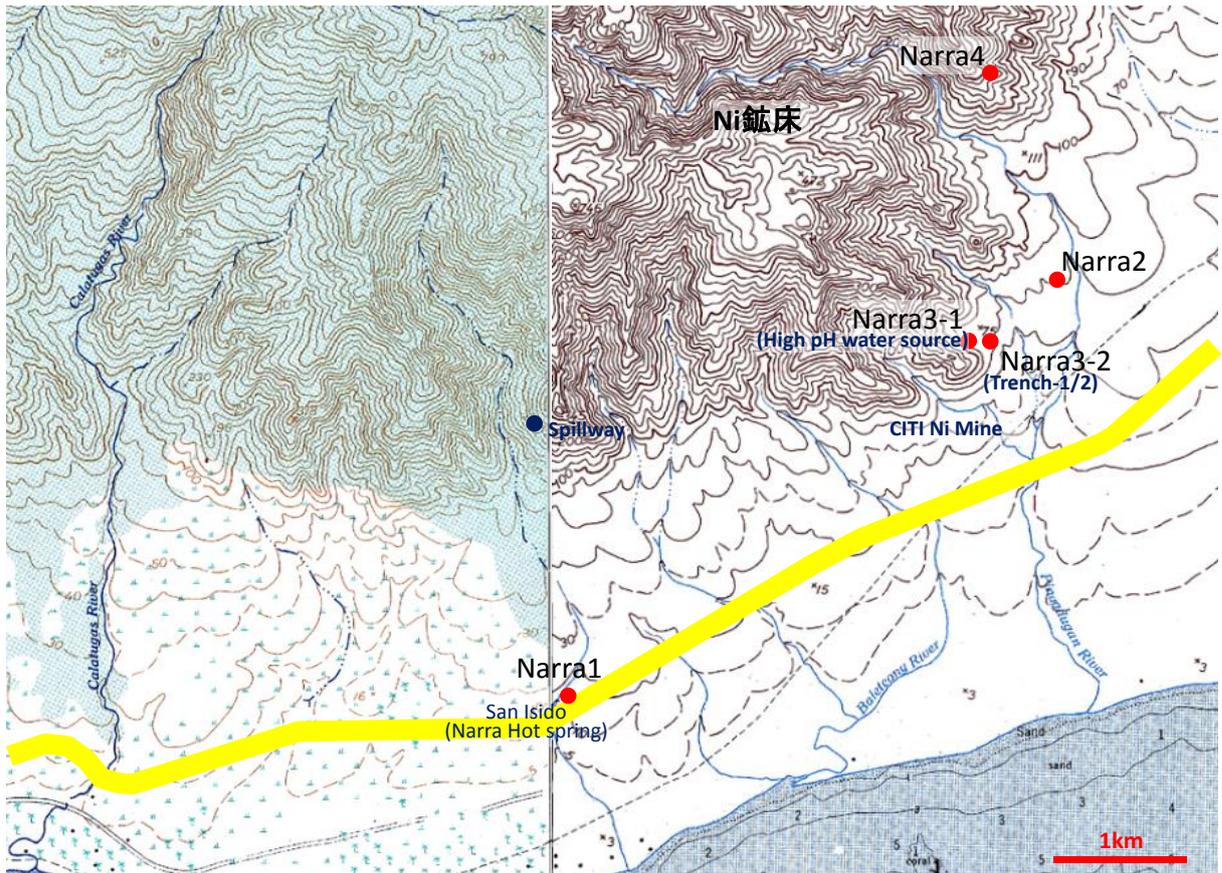


図 2.5.1-20 Narra 地区の調査地点プロット



図 2.5.1-21 Narra3-1 アルカリ泉源, pH11.2, 38.4°C



図 2.5.1-22 Narra3-2 トレンチ調査エリア周辺のクリーク下流, pH9.73, 32.4°C



図 2.5.1-23 Narra3-2 トレンチ調査エリア周辺のクリーク中流, pH9.64, 33.2°C



図 2.5.1-24 Narra3-2 トレンチ調査エリア周辺のクリーク上流, pH9.3, 32.5°C



図 2.5.1-25 トレンチ 1 水試料採取および現地水質測定



図 2.5.1-26 トレンチ 2 水試料採取および現地水質測定



図 2.5.1-27 Parian の温泉水の源泉井戸 (Narra1) (N09°10'48.5",E118°15'06.5"), アルカリ泉, pH10.50, 47.2°C, ガスのバブリング (右)



図 2.5.1-28 Parian の温泉水の源泉井戸 (Narra1-2 : Narra1 から 15m 離れた最初に掘削した源泉井戸), アルカリ泉, pH10.56, 45.1°C

表 2.5.1-4 Narra3-1 (トレンチ調査エリア上流) の現地水質調査結果

採取日時		位置	採取場所/母岩	測定項目	大林組	北大	備考
6/28	9:45	N09°12' 18.6" E118°16' 46.2"	Narra3-1(湧水) 採水  Palawan Ophiolite (Ultramafic)	pH	11.2		
				Temp. (°C)	38.4		
				ORP (mV)	-850		
				DO (mg/L)	-		
				EC (ms/m)	90.5		
				CH4(ppm)	>250		
				H2(ppm)	-		
				Ca	>50		
				Mg	0		
				Al	0.1		
				SiO2	5		
				Cl(D)	>50		

表 2.5.1-5 Narra3-2 (トレンチ調査エリア周辺) の現地水質調査結果

採取日時		位置	採取場所/母岩	測定項目	大林組	北大	備考
6/28	11:22	N09°12' 13.0" E118°16' 52.1"	Narra3-2下流(クリーク水) 採水  Travertine Deposit	pH	9.73		
				Temp. (°C)	32.4		
				ORP (mV)	115	-14	
				DO (mg/L)	-		
				EC (ms/m)	53.2		
				CH4(ppm)	-		
				H2(ppm)	-		
				Ca	10-20		
				Mg	5-10		
				Al	0		
				SiO2	10-20		
				Cl(D)	>50		
6/28	11:42	N09°12' 13.6" E118°16' 51.7"	Narra3-2中流(クリーク水) ※採水せず  Travertine Deposit	pH	9.64		
				Temp. (°C)	33.2		
				ORP (mV)	120	-26	
				DO (mg/L)	-		
				EC (ms/m)	36.7		
				CH4(ppm)	-		
				H2(ppm)	-		
				Ca	-		
				Mg	-		
				Al	-		
				SiO2	-		
				Cl(D)	-		
6/28	11:59	N09°12' 14.6" E118°16' 50.5"	Narra3-2上流(クリーク水) ※採水せず  Travertine Deposit	pH	9.3		
				Temp. (°C)	32.5		
				ORP (mV)	120	-67	
				DO (mg/L)	-		
				EC (ms/m)	41.7		
				CH4(ppm)	-		
				H2(ppm)	-		
				Ca	-		
				Mg	-		
				Al	-		
				SiO2	-		
				Cl(D)	-		
6/28	15:06	N09°12' 14.6" E118°16' 50.5"	Narra3-2上流(クリーク水) ※スコール後採水  Travertine Deposit	pH	8.67		
				Temp. (°C)	31.1		
				ORP (mV)	140		
				DO (mg/L)	-		
				EC (ms/m)	53.7		
				CH4(ppm)	-		
				H2(ppm)	-		
				Ca	20-50		
				Mg	20		
				Al	0		
				SiO2	20		
				Cl(D)	>50		
6/28	15:27	N09°12' 13.6" E118°16' 51.7"	Narra3-2中流(クリーク水) ※スコール後採水  Travertine Deposit	pH	8.92		
				Temp. (°C)	31.6		
				ORP (mV)	164		
				DO (mg/L)	-		
				EC (ms/m)	-		
				CH4(ppm)	-		
				H2(ppm)	-		
				Ca	20-50		
				Mg	20		
				Al	0		
				SiO2	20		
				Cl(D)	>50		

表 2.5.1-6 トレンチ 1 湧水の現地水質調査

採取日時		位置	採取場所/母岩	測定項目	大林組	北大	備考
6/29	16:30	N09°12' 14.4" E118°16' 50.4"	Trench1(湧水)採水はせず Travertine Deposit	pH	11.42		
				Temp. (°C)	31.1		
				ORP (mV)	-		
				DO (mg/L)	-		
				EC (ms/m)	-		
				CH4(ppm)	-		
				H2(ppm)	-		
				Ca	-		
				Mg	-		
				Al	-		
				SiO2	-		
Cl(D)	-						
6/30	14:40	N09°12' 14.4" E118°16' 50.4"	Trench1湧水 採水  Travertine Deposit	pH	11.55		
				Temp. (°C)	30.7		
				ORP (mV)	-130		
				DO (mg/L)	-		
				EC (ms/m)	81.6		
				CH4(ppm)	-		
				H2(ppm)	-		
				Ca	-		
				Mg	-		
				Al	-		
				SiO2	-		
Cl(D)	-						
7/1	15:30	N09°12' 14.4" E118°16' 50.4"	Trench1湧水 採水  Travertine Deposit	pH	11.27		
				Temp. (°C)	28.8		
				ORP (mV)	-180		
				DO (mg/L)	-		
				EC (ms/m)	-		
				CH4(ppm)	-		
				H2(ppm)	-		
				Ca	20-50		
				Mg	0		
				Al	0		
				SiO2	<5		
Cl(D)	>50						
7/9	10:21	N09°12' 14.4" E118°16' 50.4"	Trench1湧水  Travertine Deposit	pH	11.41		
				Temp. (°C)	30.3		
				ORP (mV)	-207		
				DO (mg/L)	-		
				EC (ms/m)	-		
				CH4(ppm)	-		
				H2(ppm)	-		
				Ca	-		
				Mg	-		
				Al	-		
				SiO2	-		
Cl(D)	-						

表 2.5.1-7 トレンチ 2 湧水の現地水質調査

採取日時		位置	採取場所/母岩	測定項目	大林組	北大	備考
6/30	14:40	N09°12' 13.1" E118°16' 51.9"	Trench2湧水 採水はせず  Travertine Deposit	pH	11.51		
				Temp. (°C)	29.6		
				ORP (mV)	-		
				DO (mg/L)	-		
				EC (ms/m)	-		
				CH4(ppm)	-		
				H2(ppm)	-		
				Ca	20-50		
				Mg	0		
				Al	0		
				SiO2	5		
				Cl(D)	>50		
				7/1	11:40	N09°12' 13.1" E118°16' 51.9"	Trench2湧水 採水  Travertine Deposit
Temp. (°C)	29.7						
ORP (mV)	-78						
DO (mg/L)	-						
EC (ms/m)	-						
CH4(ppm)	-						
H2(ppm)	-						
Ca	20-50						
Mg	0						
Al	0.05						
SiO2	5						
Cl(D)	>50						
7/9	10:55	N09°12' 13.1" E118°16' 51.9"	Trench2 (湧水) N側 採水  Travertine Deposit				
				Temp. (°C)	30.1		
				ORP (mV)	-270		
				DO (mg/L)	-		
				EC (ms/m)	-		
				CH4(ppm)	-		
				H2(ppm)	-		
				Ca	-		
				Mg	-		
				Al	-		
				SiO2	-		
				Cl(D)	-		
				7/9	10:55	N09°12' 13.1" E118°16' 51.9"	Trench2 (湧水) S側 採水  Travertine Deposit
Temp. (°C)	31.2						
ORP (mV)	-150						
DO (mg/L)	-						
EC (ms/m)	-						
CH4(ppm)	-						
H2(ppm)	-						
Ca	-						
Mg	-						
Al	-						
SiO2	-						
Cl(D)	-						

表 2.5.1-8 Narra1(Parian)温泉水の現地水質調査結果

採取日時		位置	採取場所	測定項目	大林組	北大	備考
7/10	10:21	N09°10' 48.5" E118°15' 06.5"	Narra1(温泉水) 採水  Travertine Deposit	pH	10.5		
				Temp. (°C)	47.2		
				ORP (mV)	+435		
				DO (mg/L)	-		
				EC (ms/m)	-		
				CH4(ppm)	>700		
				H2(ppm)	-		
				Ca	-		
				Mg	-		
				Al	-		
				SiO2	-		
				Cl(D)	-		
				7/10	10:55	N09°10' 48.5" E118°15' 06.5"	Narra1-2 (温泉水) 採水  Travertine Deposit
Temp. (°C)	45.1						
ORP (mV)	+411						
DO (mg/L)	-						
EC (ms/m)	-						
CH4(ppm)	-						
H2(ppm)	-						
Ca	-						
Mg	-						
Al	-						
SiO2	-						
Cl(D)	-						

2.5.2 地下水の地球化学的特性

中央/南部パラワン地域で採取した各水試料の水質分析結果を現地で計測した水質パラメータと合わせて表 2.5.2-1～表 2.5.2-4 に示す。また、地下水の地球化学的特性を Stiff Diagram とし図 2.5.2-1 にまとめた。

表 2.5.2-5 には、パラワン島の調査サイトの水質を、比較のために、Zambales オフィオライトが分布するルソン島の調査サイト及び(低アルカリ)セメント浸出水の水質データ[49]と合わせて示す。1.3.1(2)でも述べたように、低温型蛇紋岩化作用により生成した高アルカリ地下水の地球化学的特性(pH、Eh、温度、溶存イオン濃度)はセメント浸出水との高いアナログ性を示す。パラワンのアルカリ地下水は総じて Mg 濃度が低く、Ca 濃度が高い蛇紋岩化作用に伴うアルカリ地下水の典型的な特徴をもつ。特に Narra 地区の Narra3-1～3-2 のアルカリ地下水は、pH と温度が高く、酸化還元電位が低い(還元性)。これは、岩石・鉱物学的観点から、パラワンオフィオライトが Zambales オフィオライトと比較してより苦鉄質であること、蛇紋岩作用が顕著であることから、測定したような高アルカリ地下水が形成される十分な環境であったためだと考えられる。

溶存イオンについて、Narra 地区の高アルカリ地下水の微量成分については、表 2.5.2-1 に示すようにアルカリ土類金属(Sr, Ba)が 10~90 ppb 程度含まれている程度で、その他の元素類に差はみられない。また、変質プロセスに影響を与えるとみられる地下水中の全 Fe 濃度は Narra 地区では 0.02~0.03 ppm 程度とそれほど高い濃度ではない。また、南パラワンの Rio Tuba Mine では 0.08 ppm、7 Falls (Brooke's Point)では 0.02~0.05 ppm であった(表 2.5.2-2～表 2.5.2-4)。

中央/南部パラワン地域の地下水特性を図 2.5.2-1、表 2.5.2-5 から考察すると、Rio Tuba Mine の地下水は pH が 10 程度あるが、アルカリ金属(Na, K)、アルカリ土類金属(Ca)の濃度が数 ppm オーダーと低く、また Mg 濃度が 18 ppm と他の地区に比べてけた違いに高く、蛇紋岩化作用によるアルカリ地下水と明らかに異なる水質である。この水試料は、鉱山貯水池に注ぐ滝から採取したもので、上部の植生のあるところが源泉でそこから貯水池に流れ込んでいる湧水とみていたが、化学的な処理等の影響を受けている可能性があるため、この後の考察からは除外する。

Narra1 は斑れい岩の亀裂から湧出している温泉施設の源泉となっている温泉水で、温度が 45~47°C と高いことと、ガス(メタン: 700ppm 以上、水素は検出されず)のバブリングが顕著であるという特徴がある。これらの特徴と pH10.5、低 Mg 濃度という特徴から、この地下水も蛇紋岩化作用により生成された地下水だと考えられる。Narra3 との違いは、原岩が斑れい岩であるので(Narra3 はハルツバージャイト質かんらん岩) pH が少し低いことと、Ca 濃度が低く、Na、Cl 濃度が高いことである。Narra1 は Narra3 より標高も低く(35m)、海岸線に近いことから、現海水の影響を受けている可能性がある。

7 Falls は枕状溶岩が分布する岩体の亀裂から湧出している温泉施設の源泉である地下水で、pH9.3 程度で Na、Cl 濃度が最も高いという特徴を示す。また、Mg 濃度も Narra 地区に比べるとやや高い一方、SO₄²⁻濃度が高い。枕状溶岩との相互作用があったとすると、同じく蛇紋岩化作用による地下水であり、表層水との混合もあると思われるが、pH はそれほど高くはないと考えられる。

一方、主要成分については、pH を横軸にとって結果を図 2.5.2-2～図 2.5.2-17 に整理した。また、Mg と Al 濃度及び Mg と Na 濃度との関係をそれぞれ図 2.5.2-18 と図 2.5.2-19 に示す。pH と溶存イオンとの相関について考察すると（ただし、Rio Tuba Mine は及び Narra3-2 河川水は除く）、図 2.5.2-2 及び図 2.5.2-15 から、Na と Cl 濃度は明確に pH と負の相関を示す。これは当アルカリ湧水サイトが海水（または化石海水）の影響を受けていることが原因と考えられ、7 Falls が最もその影響が強い。

図 2.5.2-4 から、pH の高い Narra3-1 及び 3-2 トレンチの地下水は Ca 濃度が高く、これは蛇紋岩化作用によるアルカリ地下水の形成過程で Ca^{2+} により pH が上昇したことを示す証拠である。また、図 2.5.2-9 から、Si 濃度は pH と負の相関を示しているが、これはオフィオライト基盤岩の塩基性を示していると考えられ、オフィオライト中の超塩基性岩と天水との水-岩石反応による蛇紋岩化作用において、塩基性の高い（Si 濃度の低い）Narra3-1 及び 3-2 トレンチが最も高 pH のアルカリ地下水の生成環境であることを示している。

また、Mg 濃度については（図 2.5.2-7）、Narra 地区、7 Falls は総じて濃度が低く、上述の通り、これも蛇紋岩化作用に伴うアルカリ地下水生成の特徴である。

図 2.5.2-20 には、Narra3-1～3-2 サイトの模式層序学的断面図と地下水（湧水）の水質を示す。Narra3-2 トレンチの浸透水は Narra3-1 の源泉とほぼ水質が同じであり、一方、表層水と混合しているとみられるアルカリ河川水とは水質が明らかに異なる。このことから、Narra3-2 トレンチの浸透水は Narra3-1 源泉の地下水がトラバーチンを上部から下部の方へ浸透したのではなく、Narra3-1 と同様に、高アルカリ地下水が湧出するオフィオライトの亀裂のチャンネルがいくつか存在し、そこからの高アルカリ地下水がトラバーチン下の粘土質堆積物に浸透しているものと考えられる。2.4.4 の堆積性炭酸塩質堆積物と堆積性炭酸塩岩にも記載したように、縞状構造の形成（透水性が高い層と低い層の成層構造）に伴う固化プロセスにおける続成作用により、炭酸塩岩が深くなるほど熟成され、緻密で割れ目が少ない組織になることから、トラバーチンの空隙率の減少を促すと共に透水性が低くなることから、粘土質堆積物には下部のオフィオライトの亀裂からアルカリ地下水が浸出していると考えられる。また、トレンチ内の浸透水は流量が多いことから、Narra3-1 のみを源泉とするものではない。

次に、表 2.5.2-6 に CFCs 濃度測定と滞留年代評価及び安定同位体比分析結果を示す。図 2.5.2-21 に安定同位体比の値を $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ 図に既存データ（ルソン島で分析した Saile 鉱山、Manleluag 温泉保養地、Bigbiga 精査地区の試誰孔・井戸水、Poonbato の裂か水等）とフィリピンの天水曲線[50]と合わせて示した。この図から、パラワン島の湧水は昨年度のデータと同様に、ルソン島における天水起源から δD に富む傾向が見られる。

表 2.5.2-1 溶存イオン濃度及び安定同位体比 (パラワン島中・南部地区、分析(C))

Analysis Item	Name	Unit	Narra1	Narra1-2	Narra3-2	Narra3-2	
			Hot Spring	Hot Spring	Trench-1	Trench-2	
Major Elements (Balk) ⁽²⁾	Mg	μg/l	165.57	1466.83	244.19	299.01	
	Al		275.99	191.57	46.39	89.97	
	Ca		3786.98	5476.41	36665.16	39053.91	
	Ti		0.71	8.49	0.67	1.33	
	Mn		1.63	11.27	1.32	1.81	
	Fe ⁽¹⁰⁾		55.32	90.22	14.39	36.11	
Other Elements ⁽³⁾	Si ⁽⁴⁾	mg/l	72.5	74.4	16.8	20.1	
	P	μg/l	b.d.l.	20.14	b.d.l.	3.18	
	Sc		0.19	0.22	0.02	0.05	
	V		b.d.l.	2.15	0.31	0.48	
	Cr		6.03	0.12	0.42	0.50	
	Co		1.87	0.11	0.06	0.10	
	Ni		1.62	0.95	0.76	1.66	
	Cu		0.34	0.80	0.43	0.61	
	Zn		4.74	9.37	6.71	9.05	
	As		0.08	0.25	0.08	0.11	
	Rb		0.65	5.69	2.58	2.86	
	Sr		4.49	91.49	67.44	66.26	
	Mo		0.22	66.36	0.03	0.05	
	Cd		0.00	0.02	b.d.l.	b.d.l.	
	Cs		0.44	0.12	0.15	0.51	
	Ba		7.52	92.32	17.23	19.67	
	Pb		3.34	0.88	0.00	0.45	
	Th		0.00	0.01	0.00	0.00	
	U		0.04	0.10	0.00	0.05	
	Trace Elements ⁽⁵⁾		La	μg/l	5.43	5.81	5.87
Ce			0.01		0.10	0.01	0.13
Pr		0.00	0.01		0.00	0.00	
Nd		0.01	0.06		0.01	0.01	
Sm		b.d.l.	0.01		0.00	0.00	
Eu		0.00	0.01		0.00	0.00	
Gd		0.00	0.01		0.00	0.00	
Tb		0.00	0.00		0.00	0.00	
Dy		0.00	0.01		0.00	0.00	
Ho		0.00	0.00		0.00	0.00	
Er		0.00	0.01		0.00	0.00	
Tm		0.00	0.00		0.00	0.00	
Yb		0.00	0.00		0.00	0.00	
Lu		0.00	0.00		0.00	0.00	
Y	0.01	0.05	0.01	0.02			
Anion Elements ⁽⁶⁾	HCO ₃ ⁻ ⁽¹¹⁾	mg/l	51.41	130.81	119.83	20.53	
	F ⁻		0.27	1.21	0.90	0.64	
	Cl ⁻		51.1	164.5	28.25	30.26	
	NO ₂ ⁻		0.44	0.77	0.35	0.33	
	Br ⁻		0.22	0.42	0.77	0.71	
	NO ₃ ⁻		0.39	3.29	0.43	0.36	
	PO ₄ ³⁻		0.74	1.02	0.66	0.81	
	SO ₄ ²⁻		7.26	17.48	0.55	1.12	
Cation Elements ⁽⁷⁾	OH ⁻						
	Na ⁺	μg/l	96417.70	227373.15	60851.25	64918.44	
K ⁺	1458.18		4240.05	3169.12	18850.69		
Carbon Dioxide ⁽⁸⁾	CO ₂	mg/l	82.1**	24.1**	45.1**	66.4**	
Oxygen Hydrogen Isotope Element ⁽⁹⁾	δ ¹⁸ O		-7.5	-6.8	-7.4	-7.3	
	δ D		-44.7	-41.7	-43.6	-42.8	
	d-excess		15.4	12.5	15.8	15.6	

*: below detection limit.

** : Result of a measurement in the Laboratory.

<Explanation of the footnote>

(2),(3) Elements Analysis --- ICP-MS(ELEMENT XR Type)

(4) Testing Methods for Industrial Water : Molybdenum Yellow Absorptiometric Method 「JISK0101.44.1-1998」

(5) Elements Analysis --- ICP-MS(ELEMENT XR Type)

(6) Ion Chromatography Analysis --- SHIMADZU; SCL-104 VP

(7) Elements Analysis --- ICP-MS(ELEMENT XR Type)

(8) Portable Measuring Instrument (TOWA, DKK-Ti-9004)

(9) Cavity Ring Down Spectroscopy (Near-Infrared Light Semiconductor Laser Type)

(10) Total Fe. Contents (Fe₂⁺ + Fe₃⁺)

(11) HCO₃⁻; HCO₃⁻ + CO₃²⁻ <Include both ions ingredient>

表 2.5.2-2 地下水パラメータ・溶存イオン濃度測定結果その1 (パラワン島中部 Narra 地区、分析(A)(B)(C))

採水ポイント Location Elevation	Narra, Palawan																	
	N09°10' 48.5" E118°15' 06.5" 35m San Isido, Palawan Narra			N09°10' 48.5" E118°15' 06.5" 35m San Isido, Palawan Narra			N09°12' 18.6" E118°16' 46.2" 68m Crack water of Western Site from apart from Babatou Fall, Narra			N09°12' 14.6" E118°16' 50.5" 65m Down Slope from Western Site, Narra			N09°12' 13.6" E118°16' 51.7" 60m Down Slope from Western Site, Narra			N09°12' 13.0" E118°16' 52.1" 57m Down Slope from Western Site, Narra		
Classification	Hot spring (Hot well)			Hot spring (Old hot well)			Crack Water			Upper Alkaline Stream Water			Middle Alkaline Stream Water			Lower Alkaline Stream Water		
分析 採取日	2015/7/15			2015/7/15			2015/6/28			2015/6/28			2015/6/28			2015/6/28		
Sample No.	Narra1			Narra1-2			Narra3-1			Narra3-2 US			Narra3-2 MS			Narra3-2 LS		
pH	10.50	-	-	10.56	-	-	11.20	11.16	-	9.30	9.22	-	9.64	9.67	-	9.79	9.64	-
Temp.(C)	47.2	-	-	45.1	-	-	38.4	38.6	-	32.5	32.1	-	33.2	33.1	-	32.4	32.3	-
ORP(mV)	-435	-	-	-411	-	-	-850	-450	-	120	-67	-	120	-26	-	115	-14	-
EC(mS/cm)	-	0.23*	-	0.41*	-	-	90.5	84.4	-	41.7	39.3	-	36.7	34.4	-	53.2	31.8	-
DO(mg/L)	-	1.94*	-	3.74*	-	-	7.6*	0.35	-	8.4*	5.47	-	8.1*	5.99	-	8.0*	3.71	-
CO ₂ (mg/L)	-	123.4*	-	32.9*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
カチオン 濃度 (ppm)	Na ⁺	96.4	-	228	-	-	48.6	41.5	-	52.6	44.1	-	52.4	44.3	-	51.7	45.4	-
	K ⁺	1.46	-	4.24	-	-	2.94	2.82	-	2.55	2.65	-	2.55	2.75	-	2.42	2.8	-
	Ca ²⁺	3.78	-	5.48	-	-	37.5	43.6	-	27.1	30.7	-	23.9	9.56	-	7.1	9.98	-
	Si ⁺	86.4	-	79.2	-	-	0.9	0.6	-	11	11	-	10	5	-	4.2	4	-
	Al ³⁺	0.276	-	0.192	-	-	0.07	b.d.l.	-	<0.01	b.d.l.	-	0.01	b.d.l.	-	<0.01	b.d.l.	-
	Mg ²⁺	0.00018	-	0.00076	-	-	<0.01	b.d.l.	-	<0.01	b.d.l.	-	<0.01	b.d.l.	-	<0.01	b.d.l.	-
	Mn ²⁺	0.166	-	1.467	-	-	0.02	0.12	-	19.6	19.3	-	17.4	8.6	-	5.45	5.65	-
Fe ⁽²⁺³⁺⁾	0.0553	-	0.0902	-	-	0.02	b.d.l.	-	0.02	b.d.l.	-	0.03	b.d.l.	-	<0.01	b.d.l.	-	
TIC(mg/L)	-	-	-	-	-	-	0.60	-	-	74.9	-	-	69.8	-	-	32.9	-	-
アニオン 濃度 (ppm)	HCO ₃ ⁻	-	51.31	-	130.81	-	0.090	10.16*	-	261	275.8*	-	234	134.2*	-	85.5	124.7	-
	NO ₂ ⁻	-	0.43	-	0.64	-	<0.01	b.d.l.	-	<0.01	b.d.l.	-	<0.01	b.d.l.	-	<0.01	b.d.l.	-
	NO ₃ ⁻	-	0.37	-	3.25	-	0.03	b.d.l.	-	0.23	b.d.l.	-	0.05	b.d.l.	-	0.07	b.d.l.	-
	PO ₄ ³⁻	-	0.81	-	0.94	-	0.03	b.d.l.	-	0.02	b.d.l.	-	<0.01	b.d.l.	-	<0.01	b.d.l.	-
	SO ₄ ²⁻	-	6.34	-	16.14	-	0.18	b.d.l.	-	0.58	2.46	-	0.53	b.d.l.	-	0.34	b.d.l.	-
	Cl ⁻	-	56.5	-	150	-	29.5	25.7	-	36.6	33.3	-	36.2	33.7	-	35.3	32.4	-
	Br ⁻	-	0.34	-	0.44	-	0.08	b.d.l.	-	0.05	b.d.l.	-	0.05	b.d.l.	-	0.07	b.d.l.	-
	F ⁻	-	0.34	-	1.04	-	<0.01	b.d.l.	-	0.01	b.d.l.	-	0.01	b.d.l.	-	0.01	b.d.l.	-
バックテスト (ppm)	OH ⁻	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	SiO ₂	-	-	-	-	-	5	<5	-	-	10-20	-	-	5-10	-	-	5-10	-
	Cl ⁻	-	-	-	-	-	>50	-	-	-	-	-	-	-	-	>50	-	-
	Al ³⁺	-	-	-	-	-	0.1	-	-	-	-	-	-	-	-	0	-	-
	Ca	-	-	-	-	-	>50	-	-	-	-	-	-	-	-	10-20	-	-
ガス濃度 (ppm)	H ₂	0	-	0	-	0	-	-	0	-	-	0	-	-	0	-	-	
	CH ₄	>700	-	0	-	>250	-	-	0	-	-	0	-	-	0	-	-	
備考	-	-	Ca, Fe, Mg, Alは A.W.の値 *は室内測定	-	-	Ca, Fe, Mg, Alは A.W.の値 *は室内測定	Ca, Fe, Mg, Alは A.W.の値 *は室内測定	*はHCO ₃ ⁻ +CO ₃ ²⁻ カ チオンはA.W.の値	Ca, Fe, Mg, Alは A.W.の値 *は室内測定	*はHCO ₃ ⁻ +CO ₃ ²⁻ カ チオンはA.W.の値	Ca, Fe, Mg, Alは A.W.の値 *は室内測定	*はHCO ₃ ⁻ +CO ₃ ²⁻ カ チオンはA.W.の値	Ca, Fe, Mg, Alは A.W.の値 *は室内測定	*はHCO ₃ ⁻ +CO ₃ ²⁻ カ チオンはA.W.の値	Ca, Fe, Mg, Alは A.W.の値 *は室内測定	*はHCO ₃ ⁻ +CO ₃ ²⁻ カ チオンはA.W.の値	Ca, Fe, Mg, Alは A.W.の値 *は室内測定	*はHCO ₃ ⁻ +CO ₃ ²⁻ カ チオンはA.W.の値

表 2.5.2-3 地下水パラメータ・溶存イオン濃度測定結果その2 (パラワン島中部 Narra 地区トレンチ、分析(A)(B)(C))

採水ポイント Location Elevation	Narra, Palawan						
	N9°12' 14.4" ,E118°16' 50.4" 61m Trench1 in Down Slope from Western Site, Narra				N9°12' 13.1" ,E118°16' 51.9" 58m Trench2 in Down Slope from Western Site, Narra		
Classification	Seepage Water in Trench1				Seepage Water in Trench2		
採取日	2015/6/30	2015/7/1	2015/6/30	2015/7/9	2015/7/1	2015/7/1	2015/7/9
分析	A	A	B	C	A	B	C
Sample No.	Narra3-2 Trench1				Narra3-2 Trench2		
pH	11.55	11.27	11.31	-	11.10	11.39	11.40
Temp.(C)	30.7	28.8	30.1	-	29.7	28.8	30.1
ORP(mV)	-130	-180	-176	-	-78	-160	-270
EC(mS/cm)	81.6	73.4*	67.8	-	56.8*	69.5	0.31*
DO(mg/L)	7.9*	7.7*	4.34	0.95*	7.9*	4.36	2.48*
CO ₂ (mg/L)	-	-	-	86.6*	-	-	98.2
カチオン濃度 (ppm)	Na ⁺	44.6	42.6	41.5	60.9	46.1	64.9
	K ⁺	2.12	2.06	2.86	3.17	2.32	3.51
	Ca ²⁺	32.2	30.2	37.1	36.7	26.9	39.1
	Si ⁺	0.7	0.7	0.4	18.8	2.5	11
	Al ³⁺	0.01	0.01	-	0.0464	0.08	0.0900
	Mn ²⁺	<0.01	<0.01	b.d.l.	b.d.l.	<0.01	b.d.l.
	Mg ²⁺	0.02	0.01	0.13	0.244	0.02	0.299
	Fe ⁽²⁺⁺³⁺⁾	0.02	0.02	b.d.l.	0.0144	0.02	0.0361
TIC(mg/L)	3.20	3.49	-	-	2.94	-	
アニオン濃度 (ppm)	HCO ₃ ⁻	0.765	0.945	6.297	119.83	0.675	20.53
	NO ₂ ⁻	<0.01	<0.01	b.d.l.	0.29	<0.01	0.24
	NO ₃ ⁻	0.03	0.04	b.d.l.	0.58	0.02	0.22
	PO ₄ ³⁻	<0.01	<0.01	b.d.l.	0.73	<0.01	0.78
	SO ₄ ²⁻	0.08	0.08	b.d.l.	0.49	0.13	0.93
	Cl ⁻	25.6	25.8	27.5	27.7	27.3	28.0
	Br ⁻	0.07	0.07	b.d.l.	0.62	0.07	0.57
	F ⁻	<0.01	<0.01	b.d.l.	0.88	<0.01	0.71
OH ⁻	-	-	-	-	-	*	
バックテスト (ppm)	SiO ₂	-	<5	-	-	5	*
	Cl	-	>50	-	-	>50	*
	Al	-	0	-	-	0.05	*
	Ca	-	20-50	-	-	20-50	*
	Mg	-	0	-	-	0	*
ガス濃度 (ppm)	H ₂	-	0	-	-	0	*
	CH ₄	-	0	-	-	0	*
備考	Ca, Fe, Mg, AlはA.Wの値 *は室内測定	Ca, Fe, Mg, AlはA.Wの値 *は室内測定	*はHCO ₃ ⁻ +CO ₃ ²⁻ カチオンはA.Wの値	Ca, Fe, Mg, AlはA.Wの値 *は室内測定	Ca, Fe, Mg, AlはA.Wの値 *は室内測定	*はHCO ₃ ⁻ +CO ₃ ²⁻ カチオンはA.Wの値	N-sideのF.Wの値, ただしCa, Fe, Mg, AlはS+N-sideのA.Wの値

表 2.5.2-4 地下水パラメータ・溶存イオン濃度測定結果その3 (パラワン島南部 Riotuba 地区及び Brooke's Point 地区、分析(A)(B)(C))

採水ポイント Location Elevation	Riotuba, Palawan			Brookes's Point, Palawan					
	N08°34' 31.4" ,E117°24' 12.3" 60m+ α			N08°51' 31.5" ,E117°48' 09.8" 108m			N08°51' 31.5" ,E117°48' 09.8" 106 ~ 108m		
	Mine Pool Side, Palawan Riotuba			7 Falls Hot Spring, Palawan Brooke's Point			7 Falls Hot Spring, Palawan Brooke's Point		
Classification	Waterfall (white altered part)			Springhead of hot spring			Stagnant Water from Springhead		
採取日	2015/7/8			2015/7/8			2015/7/8		
分析	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Sample No.	Riotuba Mine			7 Falls 1			7 Falls 2		
pH	-	10.01	-	9.53	9.31	-	9.45	9.41	-
Temp.(°C)	-	29.3	-	34.1	37.9	-	36.5	36.3	-
ORP(mV)	-	119	-	270*	-387	-	116	52	-
EC(mS/cm)	18.5*	18.35	-	91.4*	91.2	-	91.2*	88*	-
DO(mg/L)	7.7*	5.88	-	8.0*	0.9	-	7.7*	3.7*	-
CO ₂ (mg/L)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
カチオン濃度 (ppm)	Na ⁺	2.00	2.53	164	137	-	163	136	-
	K ⁺	0.440	1.410	3.38	4.13	-	3.12	4.1	-
	Ca ²⁺	5.00	5.50	3.80	4.26	-	4.00	4.40	-
	Si ⁺	<0.5	0.02	31	33	-	32	33	-
	Al ³⁺	<0.01	-	<0.01	-	-	<0.01	-	-
	Mn ²⁺	<0.01	b.d.l.	<0.01	b.d.l.	-	<0.01	b.d.l.	-
	Mg ²⁺	16.4	17.9	1.31	1.42	-	1.09	1.31	-
Fe ⁽²⁺⁺³⁺⁾	0.08	b.d.l.	0.02	b.d.l.	-	0.05	b.d.l.	-	
TIC(mmol/L)	11.9	-	43.6	-	-	43.9	-	-	
アニオン濃度 (ppm)	HCO ₃ ⁻	21.2	41.08	121	198.7	-	126	195.8	-
	NO ₂ ⁻	<0.01	b.d.l.	0.01	b.d.l.	-	1.81	b.d.l.	-
	NO ₃ ⁻	1.42	3.34	0.44	b.d.l.	-	0.89	b.d.l.	-
	PO ₄ ³⁻	<0.01	b.d.l.	0.05	b.d.l.	-	0.01	b.d.l.	-
	SO ₄ ²⁻	0.03	b.d.l.	15.7	12.4	-	16.7	16.2	-
	Cl ⁻	28.6	30.1	162	167	-	163	165	-
	Br ⁻	0.09	b.d.l.	0.42	b.d.l.	-	<0.01	b.d.l.	-
	F ⁻	<0.01	b.d.l.	1.65	1.69	-	1.65	1.81	-
OH ⁻	-	-	-	-	-	-	-	-	
バックテスト (ppm)	SiO ₂	<5	-	50-100	-	-	50-100	-	-
	Cl	>50	-	>50	-	-	>50	-	-
	Al	0.05	-	0	-	-	0	-	-
	Ca	10	-	5-10	-	-	5-10	-	-
ガス濃度 (ppm)	Mg	20	-	1	-	-	0	-	-
	H ₂	0	-	0	-	-	0	-	-
	CH ₄	0	-	0	-	-	0	-	-
備考	Ca, Fe, Mg, Alは A.Wの値 *は室内測定	*はHCO ₃ +CO ₃ ²⁻ カ チオンはA.Wの値		Ca, Fe, Mg, Alは A.Wの値 *は室内測定	*はHCO ₃ +CO ₃ ²⁻ カ チオンはA.Wの値		Ca, Fe, Mg, Alは A.Wの値 *は室内測定	*はHCO ₃ +CO ₃ ²⁻ カ チオンはA.Wの値	

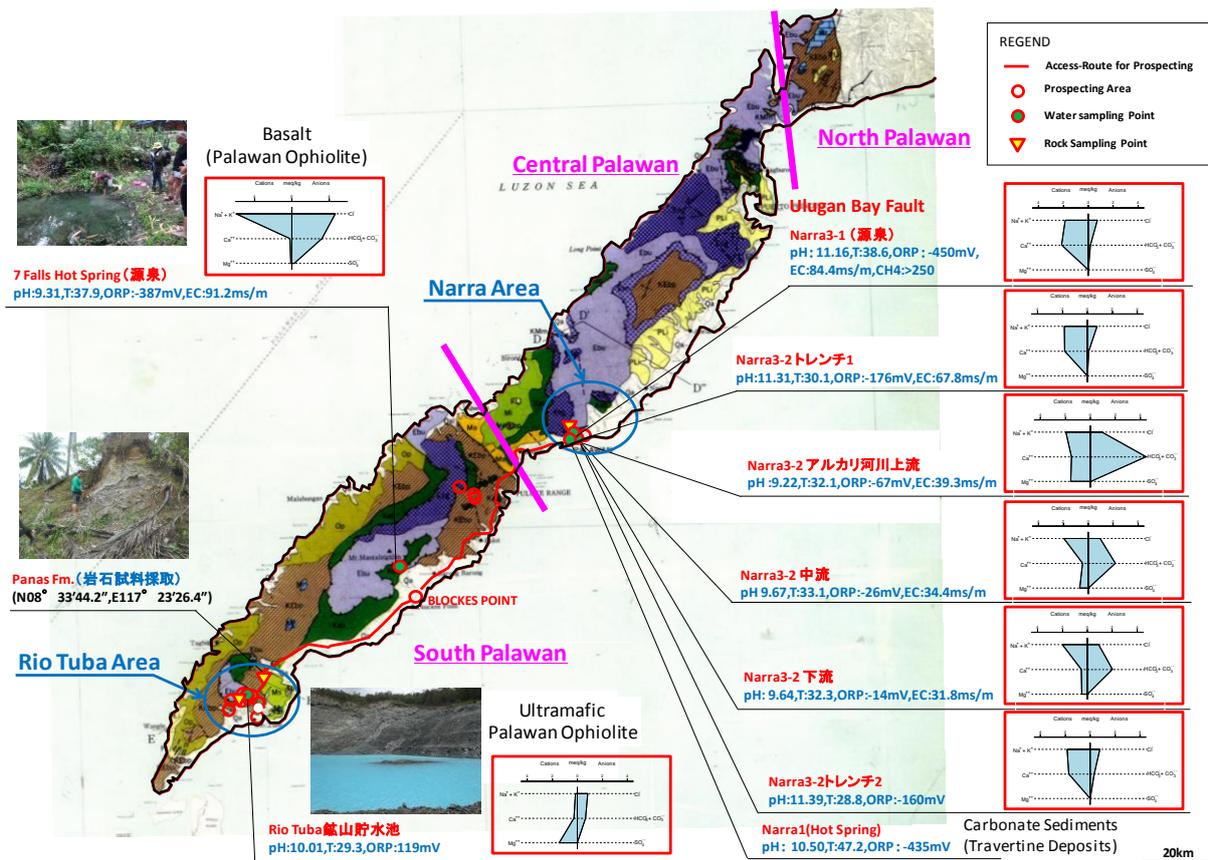


図 2.5.2-1 パラワン島の地下水調査地点と地下水の Stiff Diagram

表 2.5.2-5 パラワンと Zambales のアルカリ地下水の地球化学的特性の比較

Site	Palawan Riotuba-Waterfall	Palawan Brooke's Point - 7 Falls	Palawan Narra - 1	Palawan Narra - 3.2 Trench2	Palawan Narra - 3.2 Trench1	Palawan Narra - 3.1	Palawan Narra - 3.1	Luzon Poonbato	Luzon Manlelug HSp. - MI	Luzon Bigbiga - Well-1	low alkali cement leachates (PNC 1997)**
採取年 Sample No.	2015 Riotuba Mine H	2015 7 Falls 1 H	2015 Narra 1 G	2015 Narra-3-2 Trench2 H	2015 Narra-3-2 Trench1 H	2015 Narra3-1 H	2014 Narra3-1 O	2010 PB-10-KWP-01	2011 MI-11-KWP-01	2014 P-22	1997
pH	10.01	9.31	10.50	11.39	11.31	11.16	11.11	11.62	10.84	9.52	11.09
ORP(Eh) [mV]	119	-387	-435	-160	-176	-450	-460	27.6	-662	8	-
Temp [°C]	29.3	37.9	47.2	28.8	30.3	38.6	38.8	27.6	34.1	29.2	60
CH ₄ [ppm]	0	0	>700	0	0	0	0	>5000	>5000	0 (0-560)	-
H ₂ [ppm]	0	0	0	0	0	0	0	50-1320	62	0 (0-130)	-
Na ⁺ [ppm]	2.53	137	96.4	41.6	41.5	41.5	53.6	23.6	1.58	100.6	43
K ⁺ [ppm]	1.41	4.13	1.46	2.80	2.86	2.82	2.68	6.85	0.28	1.05	13
Ca ²⁺ [ppm]	5.50	4.26	3.78	34.9	37.1	43.6	41.9	37.4	23.6	1.34	16.8
Mg ²⁺ [ppm]	17.9	1.42	0.17	0.12	0.13	0.12	0.20	0	0.17	0.06	-
Si ²⁺ [ppm]	0.02	33	86.4	1.0	0.4	0.6	0.6	1.40	11.5	72.3	33
AlF ³⁺ [ppm]	- (<0.01)	- (<0.01)	0.19	- (0.08)	- (0.01)	- (0.07)	0.16	0	20.3	0.01	0.3
Cl ⁻ [ppm]	28.6	167	56.5	27.8	27.5	25.7	29.4	-	16.6	4.50	-
SO ₄ ²⁻ [ppm]	b.d.l.	12.4	6.34	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	0.39	-	-	48.0	-
HCO ₃ ^{-*} [ppm]	[41.08]	[198.7]	-	[19.7]	[6.297]	[10.16]	0.5	124.1	73.5	135.6	-

*[]の値はHCO₃⁻ + CO₃²⁻; ** wt % - ボルトランドセメント:シリカフェューム:フライアッシュ=40:20:40

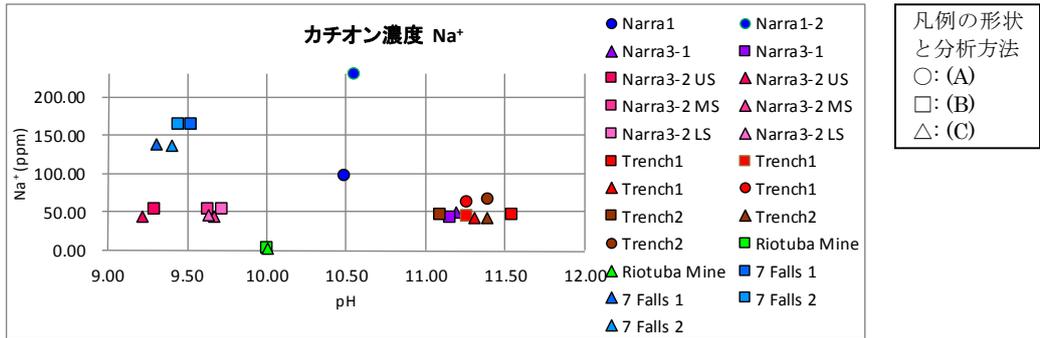


図 2.5.2-2 パラワンのアルカリ湧水の pH- Na^+ 濃度関係図

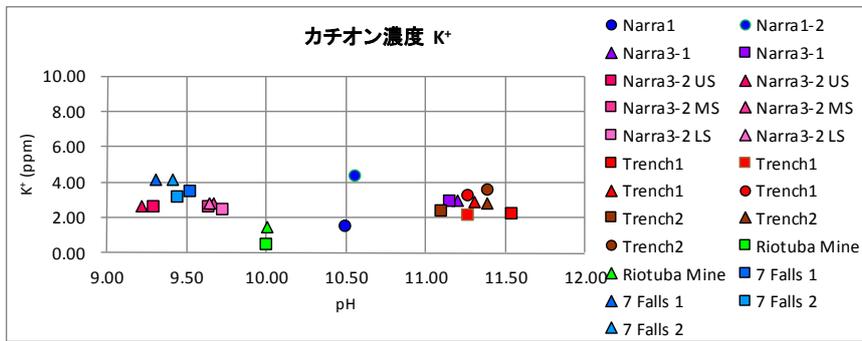


図 2.5.2-3 パラワンのアルカリ湧水の pH- K^+ 濃度関係図

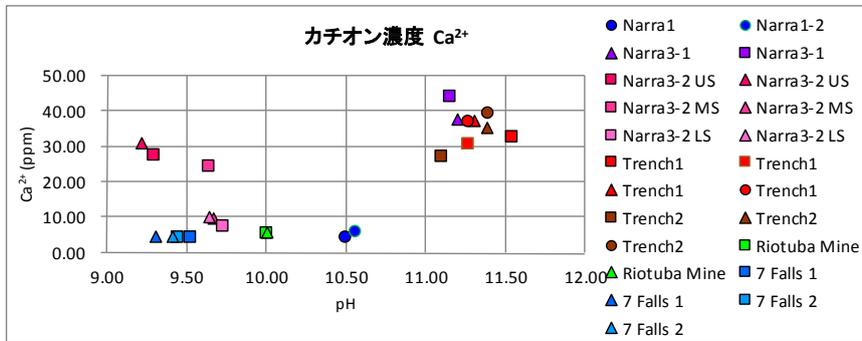


図 2.5.2-4 パラワンのアルカリ湧水の pH- Ca^{2+} 濃度関係図

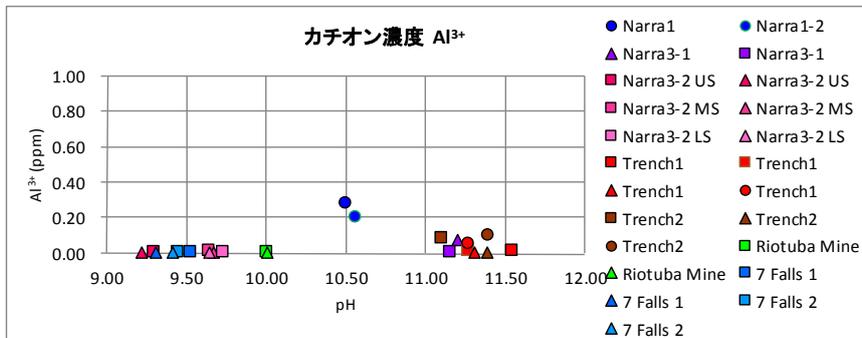


図 2.5.2-5 パラワンのアルカリ湧水の pH- Al^{3+} 濃度関係図

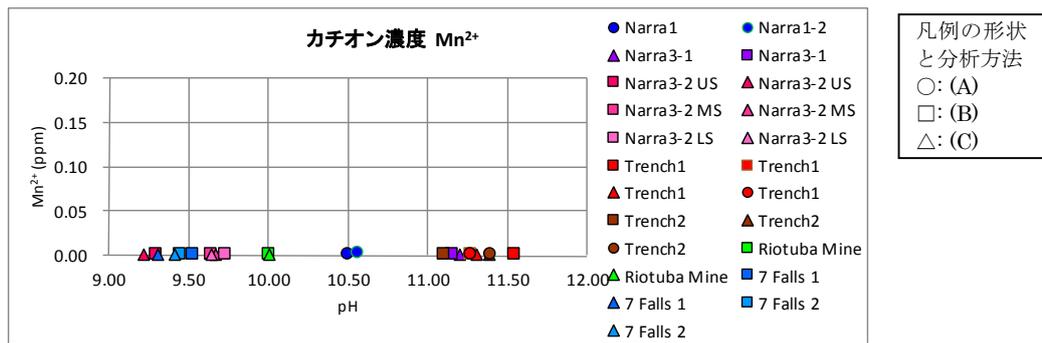


図 2.5.2-6 パラワンのアルカリ湧水の pH-Mn²⁺濃度関係図

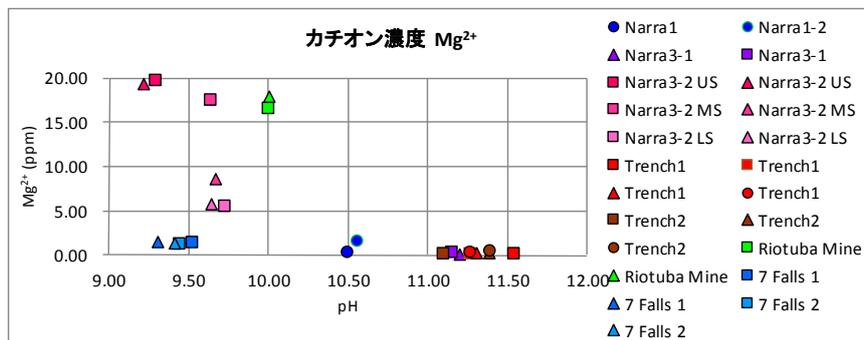


図 2.5.2-7 パラワンのアルカリ湧水の pH-Mg²⁺濃度関係図

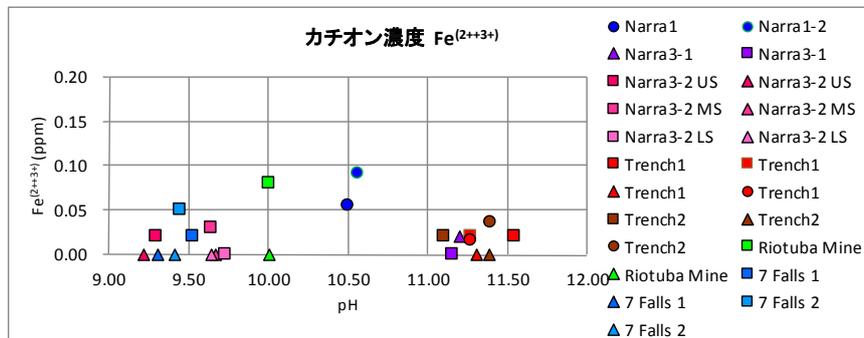


図 2.5.2-8 パラワンのアルカリ湧水の pH-Fe 濃度関係図

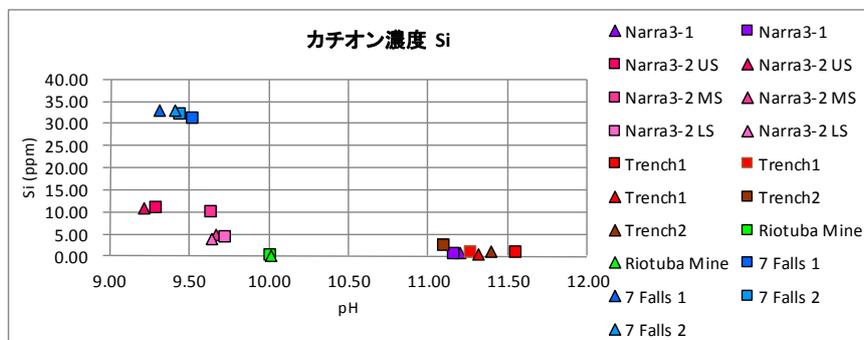
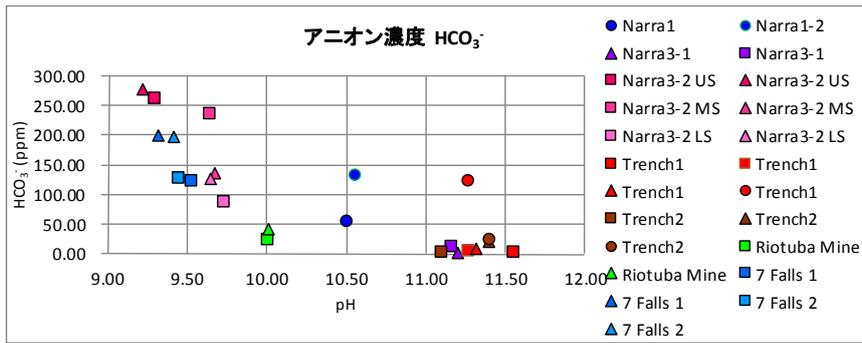


図 2.5.2-9 パラワンのアルカリ湧水の pH-Si 濃度関係図



○(A)と△(C)の値は $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ の総計

図 2.5.2-10 パラワンのアルカリ湧水の pH- HCO_3^- 濃度関係図

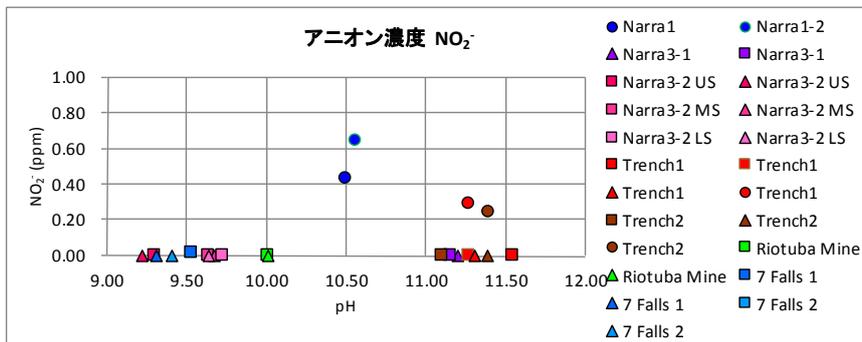


図 2.5.2-11 パラワンのアルカリ湧水の pH- NO_2^- 濃度関係図

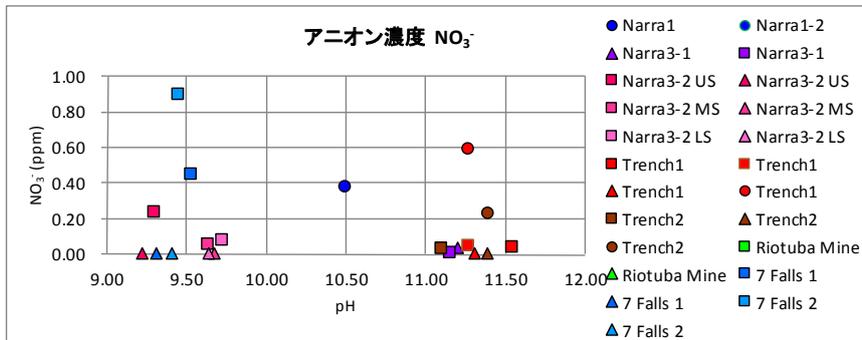


図 2.5.2-12 パラワンのアルカリ湧水の pH- NO_3^- 濃度関係図

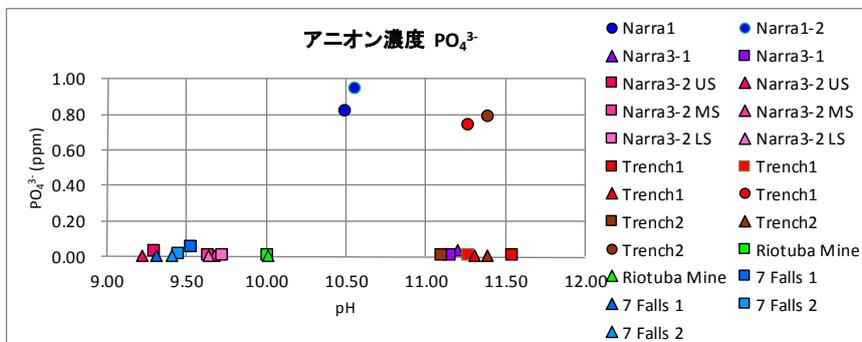


図 2.5.2-13 パラワンのアルカリ湧水の pH- PO_4^{3-} 濃度関係図

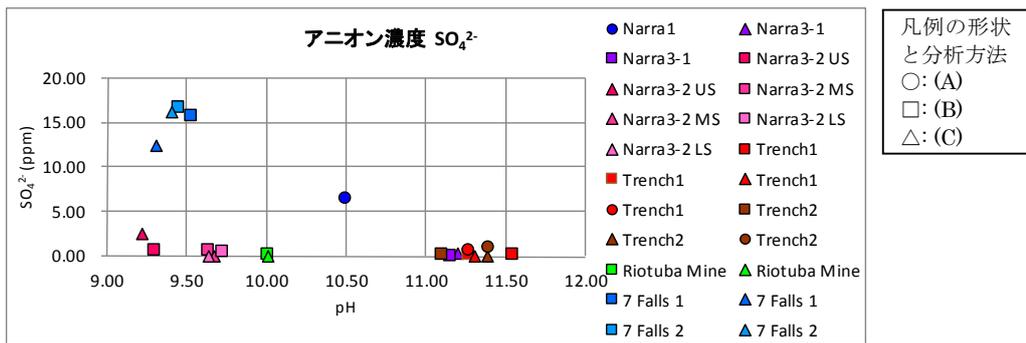


図 2.5.2-14 パラワンのアルカリ湧水の pH- SO_4^{2-} 濃度関係図

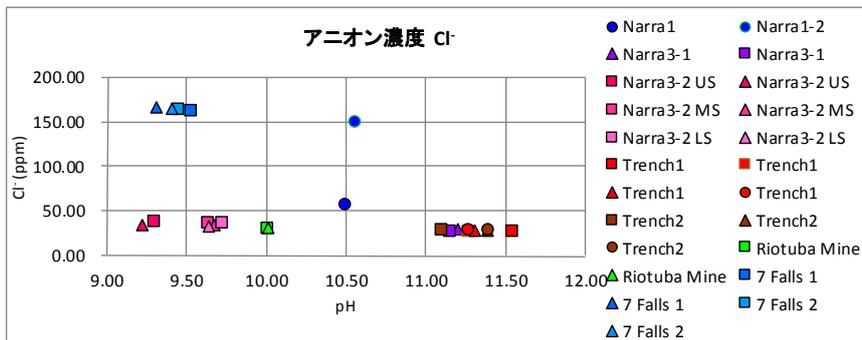


図 2.5.2-15 パラワンのアルカリ湧水の pH- Cl^- 濃度関係図

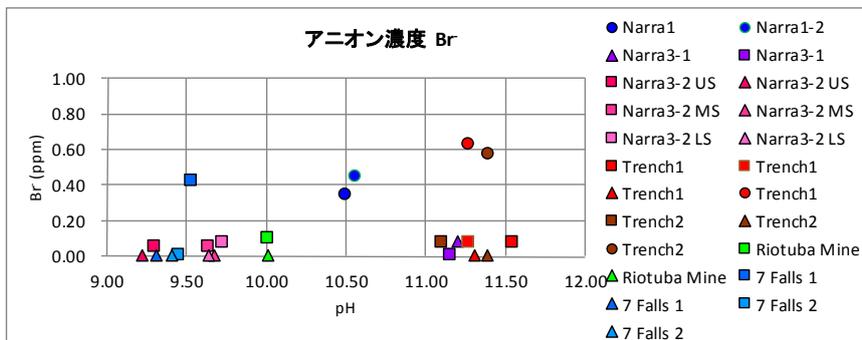


図 2.5.2-16 パラワンのアルカリ湧水の pH- Br^- 濃度関係図

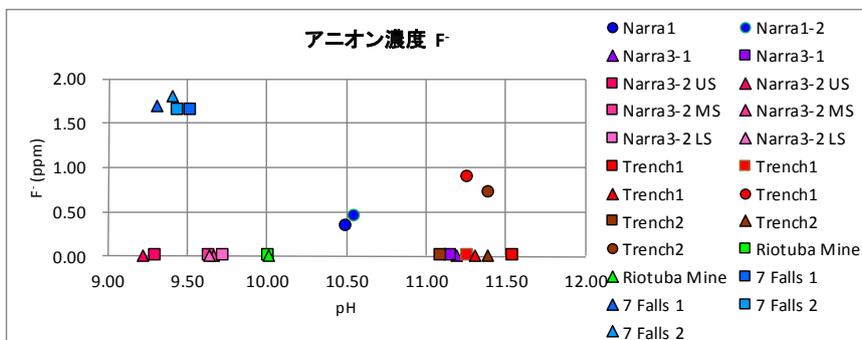


図 2.5.2-17 パラワンのアルカリ湧水の pH- F^- 濃度関係図

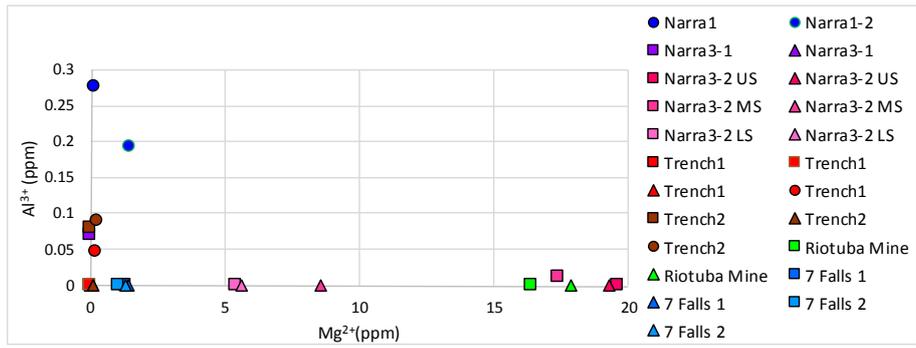


図 2.5.2-18 パラワンのアルカリ湧水の Mg^{2+} - Al^{3+} 濃度関係図

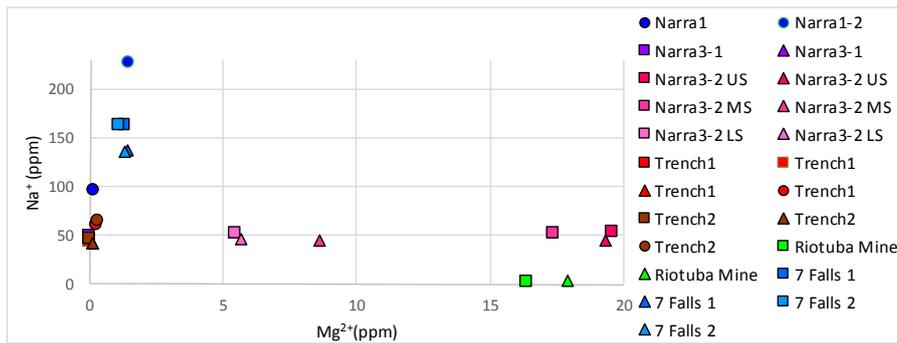


図 2.5.2-19 パラワンのアルカリ湧水の Mg^{2+} - Na^{+} 濃度関係図

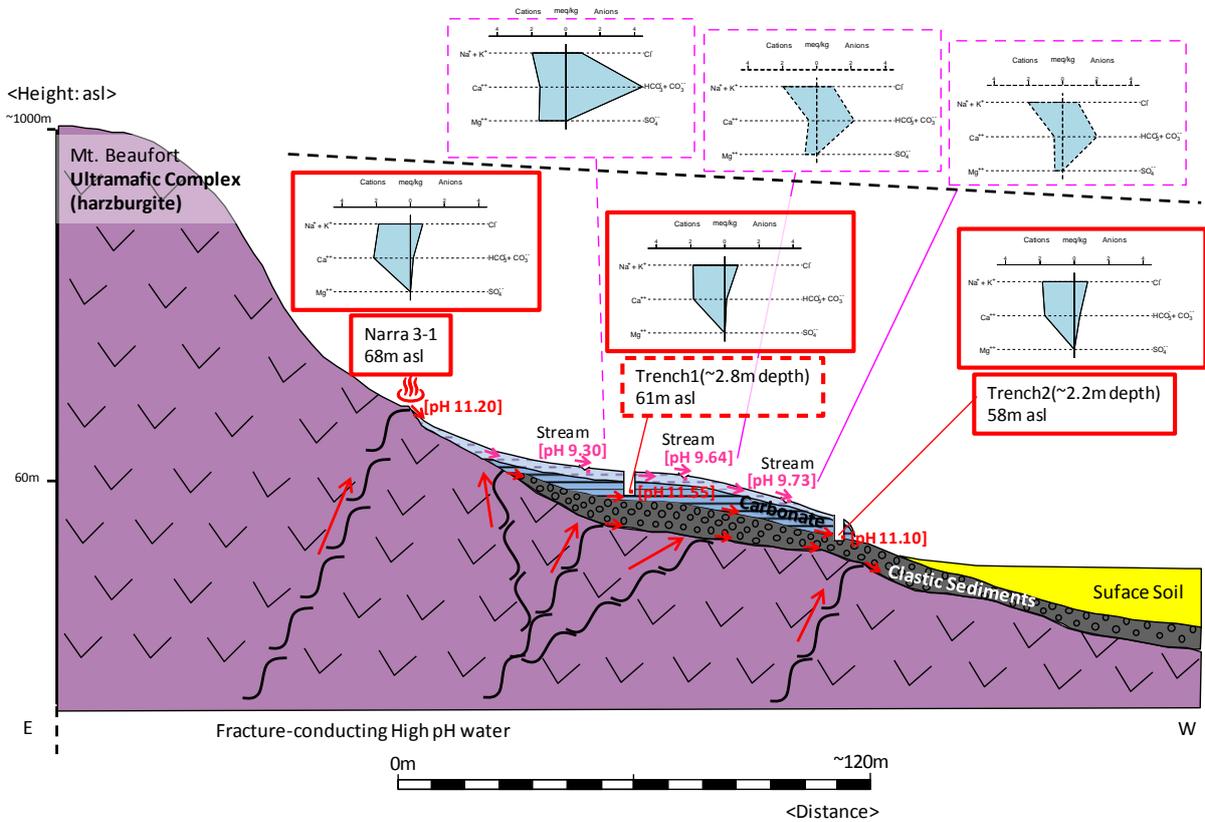


図 2.5.2-20 Narra3-1~3-2 サイトの模式層序学的断面図と地下水（湧水）の水質

表 2.5.2-6 安定同位体比

Collection place	Name of the Official Sample	PH	$\delta^{18}\text{O}$	δD	d-excess
			‰		
Nara1	Hot Spring	10.50	-7.5	-44.7	15.4
Nara1-2	Hot Spring	10.56	-6.8	-41.7	12.5
Nara3-2	Trench-1	11.55	-7.4	-43.6	15.8
	Trench-2 N.Side	11.40	-7.3	-42.8	15.6
	Trench-2 S.Side	11.13	-6.4	-39.3	12.1
	Trench-2 N+S.Side	1.37	-6.9	-40.5	12.8

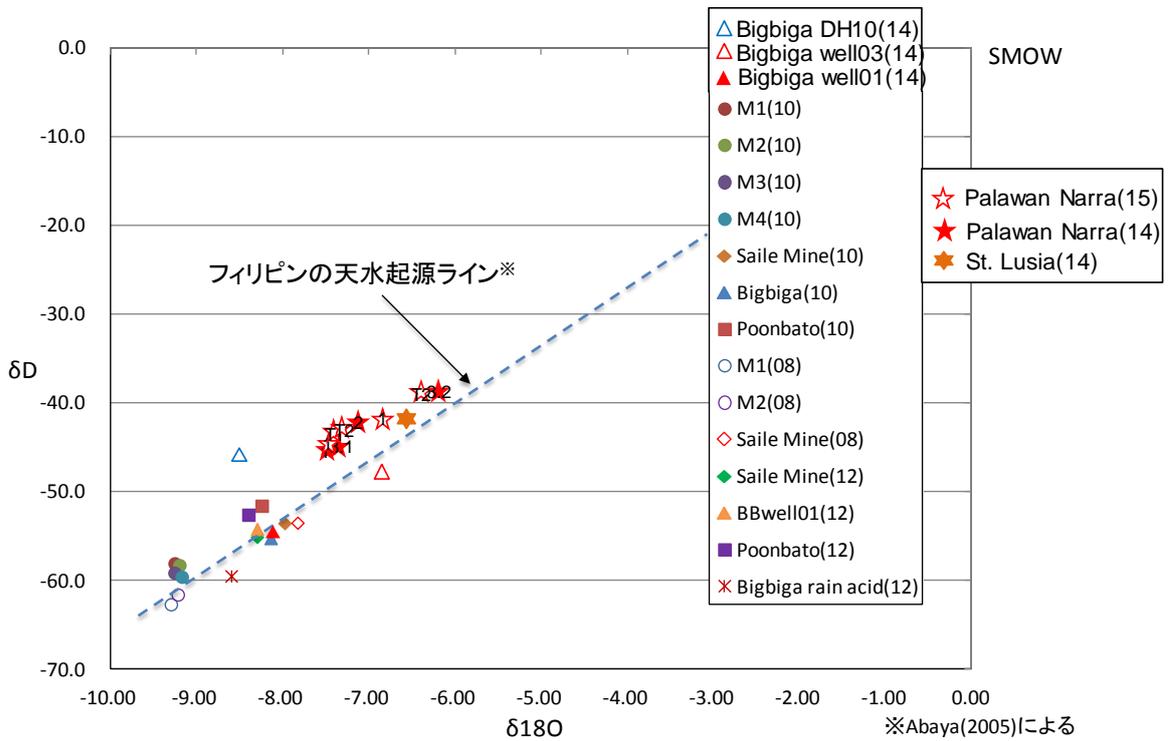


図 2.5.2-21 フィリピンの地下水の $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ プロット図

2.6 トレンチ調査

2.6.1 トレンチ掘削

(1) トレンチ掘削地点の選定のための概査

平成 26 年度の概査に基づき、Active type の NA ポテンシャルサイトであることが期待された Palawan 島中部地域の Narra 地区の Narra3-1 から Narra3-2 にかけてのエリア (図 2.6.1-1 参照) を対象として、今年度実施するトレンチ調査の掘削地点選定のための露頭調査を行った。

トレンチ掘削地点については、Narra3-1 (図 2.6.1-2) 地点の高アルカリ源泉 (pH11.20) の南東約 100m 下流側に分布する石灰華 (Travertine) の平坦地となっている Narra3-2 (図 2.6.1-3) 周辺において、アルカリ湧水サイトの地球化学的特性 (pH, ORP, DO, EC, Temp) とその要因 (地質・地質構造学的特性と岩石鉱物学的特性との関連性) について調査し、2 か所のトレンチ掘削地点を選定した。

1 か所目は、Narra3-1 の高アルカリ源泉を源流として、Narra3-2 の平坦地に注ぐ河川 (クリークを流れる表層水) の、比較的上流域周辺 (図 2.6.1-4 参照: 以降、トレンチ 1 とする) とした。2 か所目については、トレンチ 1 の下流の、地形が落ち込んだ先の石灰華の堆積する場所 (図 2.6.1-5 参照: 以降、トレンチ 2 とする) とした。

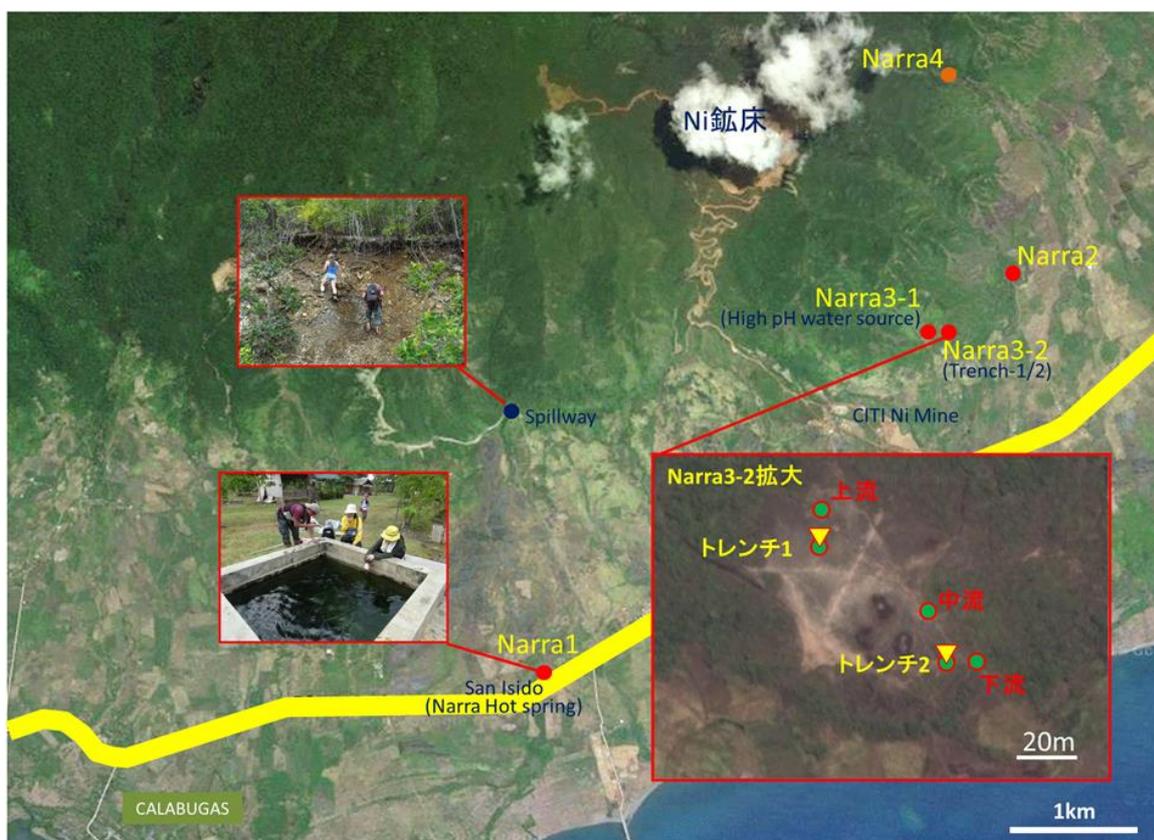


図 2.6.1-1 Narra 地区調査エリア



図 2.6.1-2 Narra3-1 アルカリ泉 (試料採取、水質・ガス測定)



図 2.6.1-3 Narra3-2 アルカリ河川 (右：湧水測定地点(中流))



図 2.6.1-4 トレンチ1 掘削地点



図 2.6.1-5 トレンチ 2 掘削地点

(2) トレンチ掘削

1) トレンチ 1

アルカリ河川からの流入防止のためのドレン掘削した上で、トレンチ 1 の掘削を実施した。堆積しているトラバーチンからの浸出水が多く、掘削中にその浸出水がトレンチ内に溜まるため、排水ポンプでの排水（排水用の釜場掘削も合わせて実施）を適宜行いながら、GL-2.8m まで掘削した（図 2.6.1-6）。表 2.6.1-1 にトレンチ 1 での作業工程を示す。

表 2.6.1-1 トレンチ 1 の作業工程

日時		作業内容
1 日目 (6/29)	9:00～	・ バックホウにて掘削前に流入水養生のドレン掘削
	10:30～	・ GL-2m 程度まで掘削 ・ 掘削土付着水をリトマス紙により pH 簡易測定：10 程度
	16:30～	・ トレンチ内浸出水の水質測定(pH 計)：pH：11.42, Temp：31.1℃
2 日目 (6/30)	8:30～	・ トレンチ内浸出水の水替え後、ベンチを設けて 0.5m 程度掘り下げ（最終掘削深度 GL-約 2.8m、ピット部を除く） ・ ラダー作成～壁面観察 ・ 岩石試料採取（北大）
	12:40～	・ ペールによるトレンチ内浸出水の排水 ・ 壁面清掃 ・ 岩石試料採取（北大）
	14:40～	・ トレンチ内浸出水の採取、水質測定(pH 計)；pH：11.55, Temp：30.7℃, ORP：-130mV, EC：81.6ms/m
3 日目 (7/1)	～13:30	・ トレンチ内浸出水の水替え ・ 岩石試料採取（RWMC）
	15:30～	・ トレンチ内浸出水の採取、水質測定(pH 計)；pH：11.27, Temp：28.8℃, ORP：-180mV
6 日目 (7/4)	9:00～	・ トレンチ内浸出水水替え ・ 岩石試料（炭酸塩）採取
11 日目 (7/9)	10:00～	・ トレンチ内の浸出水の水替え～浸出水採取、水質測定(pH 計)；pH：11.41, Temp：30.3℃, ORP：270mV



図 2.6.1-6 トレンチ 1 掘削状況

2) トレンチ 2

トレンチ 1 と同様に、適宜ポンプでの浸出水の排水を行いながら 2.0m の深度まで掘削した (図 2.6.1-7)。表 2.6.1-2 にトレンチ 2 での作業工程を示す。

表 2.6.1-2 トレンチ 2 の作業工程

日時		作業内容
1 日目 (6/30)	13:24～	・ 掘削開始
	14:40～	・ トレンチ内浸出水 (濁水) の水質測定(pH 計) : pH : 11.51, Temp : 29.6℃
	～16:00	・ 掘削完了 (最終掘削深度 GL-約 2.0m)
2 日目 (7/1)	9:00～	・ ポンプおよびペールにてトレンチ内浸出水の水替え ・ Hilti コアドリルにてコアサンプリング (2 本採取) ・ ラダー作成～壁面観察 ・ 岩石試料採取 (北大)
	11:40～	・ トレンチ内浸出水の採取、水質測定(pH 計); pH : 11.1, Temp : 29.7℃, ORP : -78mV
	12:30～	・ ポンプおよびペールにてトレンチ内浸出水の水替え
	12:55～	・ 壁面清掃、観察 ・ 岩石試料採取 (北大)
10 日目 (7/9)	10:30～	・ トレンチ内の浸出水の水替え～浸出水採取、水質測定(pH 計) ; N 側 pH : 11.40, Temp : 30.1℃, ORP : -270mV S 側 pH : 11.13, Temp : 31.2℃, ORP : -150mV



図 2.6.1-7 トレンチ 2 掘削状況

2.6.2 壁面観察とサンプリング

(1) トレンチ壁面観察および形状測定

両トレンチにおいて、トレンチ掘削、溜水排水後に壁面を削り出して（図 2.6.2-1 参照）、堆積物の地質構造や各層の岩質等の特徴について観察した。



図 2.6.2-1 トレンチ壁面削り出し状況（右：トレンチ1、左：トレンチ2）

1) トレンチ1

トレンチ1では、2.8m まで掘削したが基盤岩まで達しなかった。トレンチ1の壁面観察（図 2.6.2-2）から、この深度まで高アルカリ湧水の沈殿物として堆積したトラバーチン（炭酸塩）が厚く堆積しているが、炭酸塩の堆積物の間に貝化石や木根を含む黒色の炭化物の層（10～30cm の厚さ）が3層ほど確認できた（図 2.6.2-3 参照）。トレンチの形状と壁面観察に基づく模式断面図をそれぞれ図 2.6.2-4 と図 2.6.2-5 に示す。

トレンチ掘削作業時から浸出水の流量が多いことを確認した。このトレンチ底部の堆積岩の層理面から浸出する地下水を採取し、地下水の物理化学パラメータ（pH, 水温, ORP 等）の測定（図 2.6.2-6 および表 2.6.2-1 参照）をするとともに、溶存イオン分析に供する水試料の採取を行った。

トレンチ1で採取した地下水は、pH:11.27~11.55, ORP:-207~-130mV（表 2.6.2-1 参照）であり、大量の降雨にもかかわらず、源泉（Narra3-1: pH11.2）やアルカリ河川（Narra3-2: pH9.30~9.73）よりもトレンチ内の浸出水の pH の方が高いことから、アルカリが流出している箇所は Narra3-1 の源泉だけでなく、トレンチ下のオフィオライトから広く供給され、トレンチの堆積層はこのような高アルカリ環境下にあると思われる。

また、パックテストの結果より、Mg が低く Ca が高いことから、蛇紋岩化作用による高アルカリ水の生成の特性を示している。



図 2.6.2-2 トレンチ 1 の壁面観察状況



図 2.6.2-3 トレンチ 1 の木根を含む炭化物層（黒色の部分）

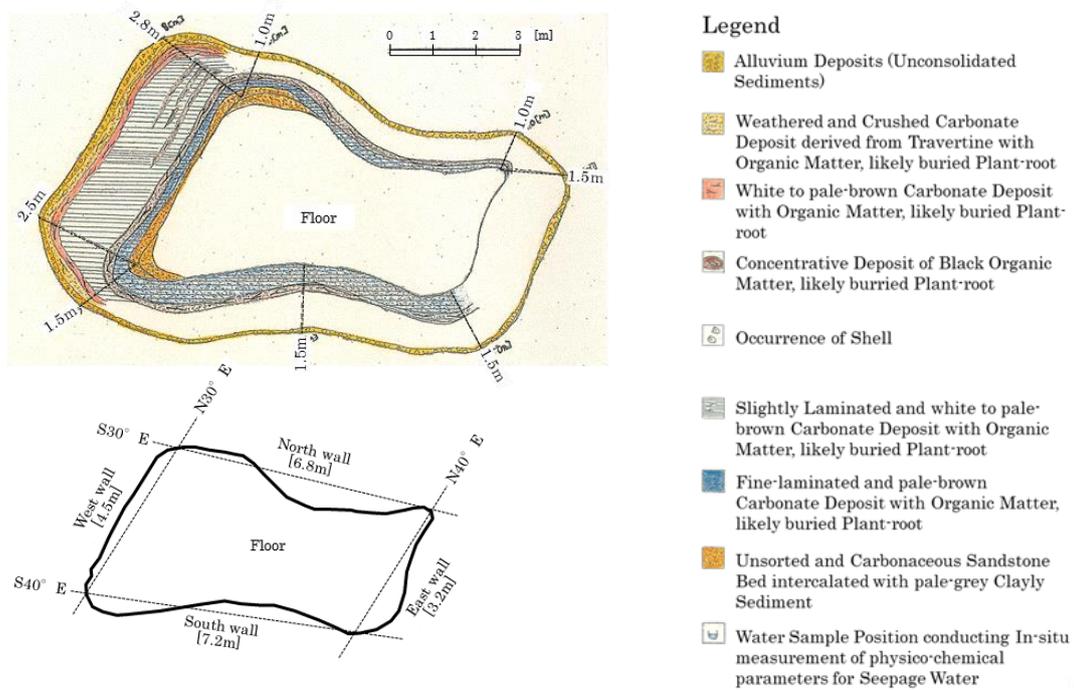


図 2.6.2-4 トレンチ 1 の形状

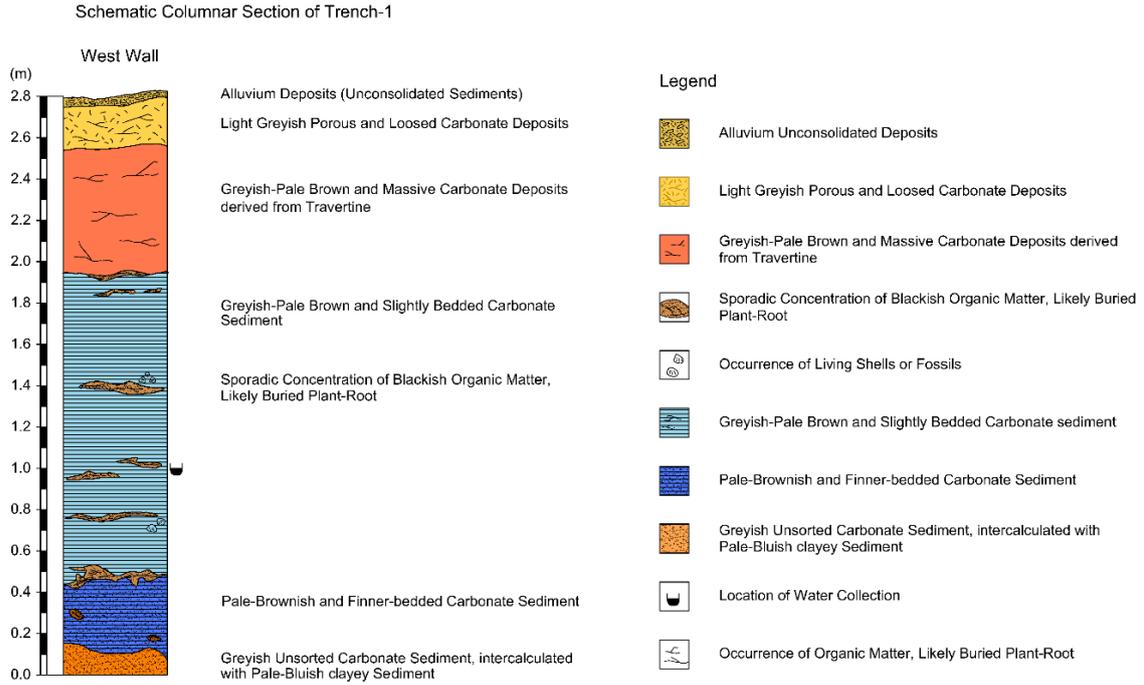


図 2.6.2-5 トレンチ 1 の模式断面図

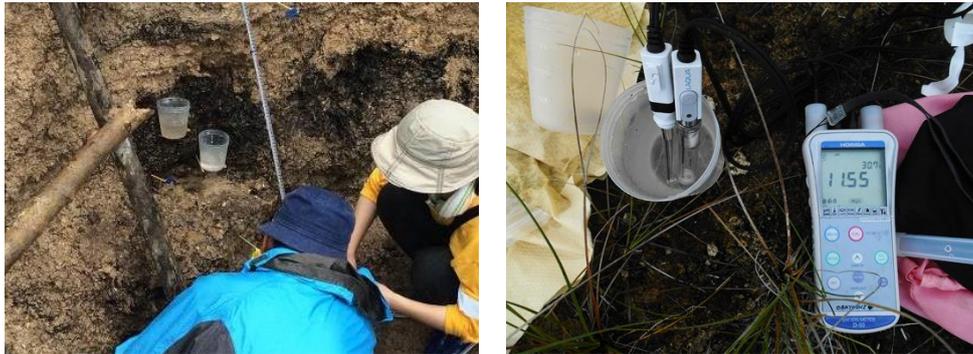


図 2.6.2-6 トレンチ 1 の水試料採取および現地水質測定

表 2.6.2-1 トレンチ 1 の現地水質測定結果

測定項目	測定値			
	pH	11.42	11.55	11.27
Temp. (°C)	31.1	30.7	28.8	30.3
ORP (mV)	—	-130	-180	-207
DO (mg/L)	—	—	—	—
EC (ms/m)	—	81.6	—	—
CH4(ppm)	—	—	—	—
H2(ppm)	—	—	—	—
Ca	—	—	20-50	—
Mg	—	—	0	—
Al	—	—	0	—
SiO2	—	—	<5	—
Cl(D)	—	—	>50	—
備考	6/29測定	6/30測定	7/1測定	7/9測定

2) トレンチ2

トレンチ2では、2.0mまで掘削し基盤岩に達した。壁面観察(図 2.6.2-7)からトレンチ2でも同様に炭酸塩の堆積物の下に木根を含む炭化層が見られたが、トレンチ1に比べるとトラバーチンの堆積層が60cmと薄いのにに対し、炭化層は80cm程度の厚さがあった。トレンチ2で特筆されるのは、基盤岩直上には海洋性堆積物(この層にも貝化石が見られる)と思われる粘土層が確認できたことである(図 2.6.2-8 参照)。トレンチの形状と壁面観察に基づく模式断面図をそれぞれ図 2.6.2-9 と図 2.6.2-10 に示す。

また、トレンチ1と同様に掘削作業時から浸出水の流量が多いことを確認した。

トレンチ2で採取した地下水(図 2.6.2-11 参照)は、pH:11.10~11.51, ORP:-207~-78mV(表 2.6.2-2 参照)であり、トレンチ1と同様に、トレンチ内の浸出水のpHの方がNarra3-1の源泉やアルカリ河川よりも高く、これからもアルカリが流出している箇所はNarra3-1の源泉からの流入だけでなく、トレンチ下のオフィオライトから広く供給されていることがうかがえる。

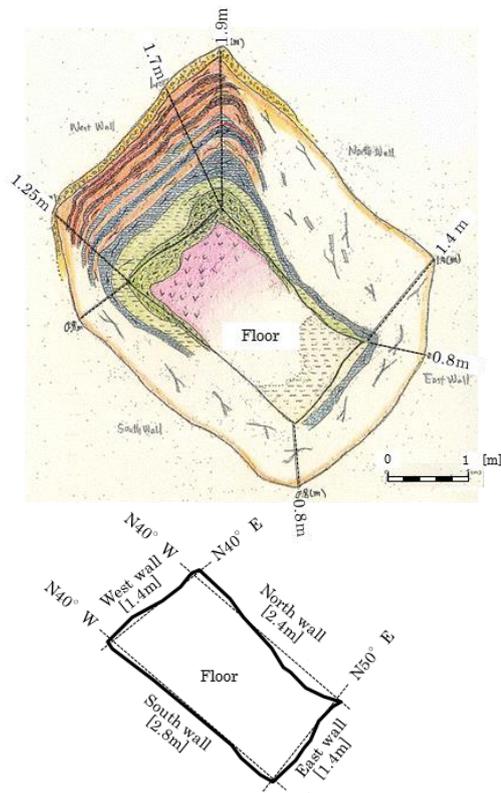
また、海洋性堆積物と思われる粘土層が、この高アルカリ地下水に接触していることから、トレンチ2はActive Typeのナチュラルアナログの可能性が高いことがこの時点で確認できた。



図 2.6.2-7 トレンチ2の壁面観察状況



図 2.6.2-8 トレンチ2の壁面全体写真(左)と海洋性堆積物と見られる粘土層(右)

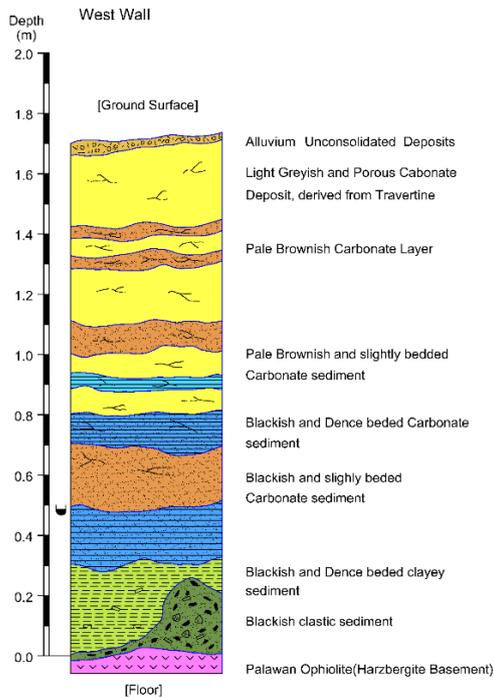


Legend

- Alluvium Deposits (Unconsolidated Sediments)
- White to pale-brown Carbonate Deposit derived from Travertine with Organic Matter, likely Plant-root
- Concentrative Deposit of Black Organic Matter, likely buried Plant-root
- Slightly Laminated and pale-brown Carbonate Deposit with Organic Matter, likely buried Plant-root
- Slightly Laminated and black Carbonate Deposit with Organic Matter, likely buried Plant-root
- Black soft Clayey Sediments
- Black Mudstone including Pebble and Shell fragment (Partially Crushed)
- Palawan Ophiolite (Basement; Ultramafics)
- Occurrence of Shell
- Pale brown-coloured Zone
- Black-coloured Zone (Reduced Condition)
- Water Sample Position conducting In-situ measurement of physico-chemical parameters for Seepage Water

図 2.6.2-9 トレンチ 2 の形状

Schematic Columnar Section of Trench-2



Legend

- Alluvium unconsolidated Deposits
- Light Greyish and Porous Carbonate Deposit, derived from Travertine
- Pale Brownish Carbonate Layer
- Pale Brownish and slightly bedded Carbonate sediment
- Blackish and Dence beded Carbonate sediment
- Blackish and Dence beded clayey sediment
- Blackish clastic sediment
- Palawan Ophiolite (Harzbergite Basement)
- Occurrence of Organic Matter, likely buried Plant-Root
- Occurrence of CSH
- Occurrence of Living Shells or Fossils
- Location of water collection
- Pale-Brownish Zone
- Blackish Zone

図 2.6.2-10 トレンチ 2 の模式断面図



図 2.6.2-11 トレンチ 2 の水試料採取および現地水質測定

表 2.6.2-2 トレンチ 2 の現地水質測定結果

測定項目	測定値			
	pH	11.51	11.1	11.4
Temp. (°C)	29.6	29.7	30.1	31.2
ORP (mV)	—	-78	-270	-150
DO (mg/L)	—	—	—	—
EC (ms/m)	—	—	—	—
CH4(ppm)	—	—	—	—
H2(ppm)	—	—	—	—
Ca	20-50	20-50	—	—
Mg	0	0	—	—
Al	0	0.05	—	—
SiO2	5	5	—	—
Cl(D)	>50	>50	—	—
備考	6/30測定	7/1測定	7/9測定	7/9測定

2.6.3 岩石試料 (TL 法年代測定用含む) の採取

ベントナイト質堆積層等の主要構成鉱物の鉱物組み合わせ・化学組成・組織を把握するための XRD、XRF による分析、および鉱物組成・産状 (組織) に係わるデータの取得のための偏光顕微鏡観察や微細構造分析に供する岩石試料を、トレンチ壁面及び底部から採取した。

岩石試料の一部は、TL 年代法による炭酸塩形成年代の測定に供するため、トラバーチンの堆積している層から数 cm 程度の塊状の炭酸塩試料を採取した。

また、トレンチ試料との比較のため、高アルカリ地下水の源泉である Narra3-1 において、露頭試料のサンプリングを実施した。

(1) 試料採取

1) Narra3-1

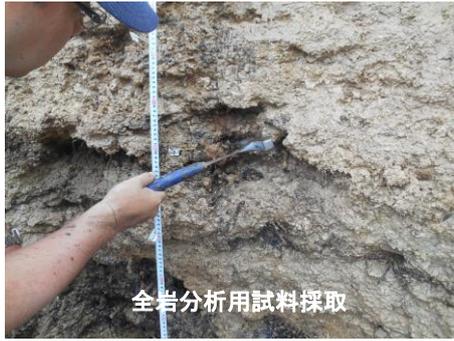
Narra3-1 の高アルカリ泉の噴出口周辺の砂状の試料を中心に 5 試料を採取した。サンプリング位置を図 2.6.3-1 に示す。



図 2.6.3-1 Narra3-1 での岩石試料採取

2) トレンチ 1

岩石試料のサンプリング位置を図 2.6.3-2～図 2.6.3-3 に示す。トレンチ 1 では炭酸塩層が 2m 以上あるため、全岩分析試料に加え、熱ルミネッセンス年代測定用の試料を採取した。熱ルミネッセンス年代測定用の試料は光曝抑制のためコアドリルで採取する予定であったが、降雨等の影響により炭酸塩層がゆるく堆積しており、ドリルでの採取が困難であったため、シャベルで固定し、できるだけ光曝しないように容器に封入して採取した (図 2.6.3-2)。なお、試料番号については、Rh (及び Rc) シリーズの試料は上部から、HU シリーズの試料は底部から順に番号を付けている。



全岩分析用試料採取



TL 法年代測定用試料採取

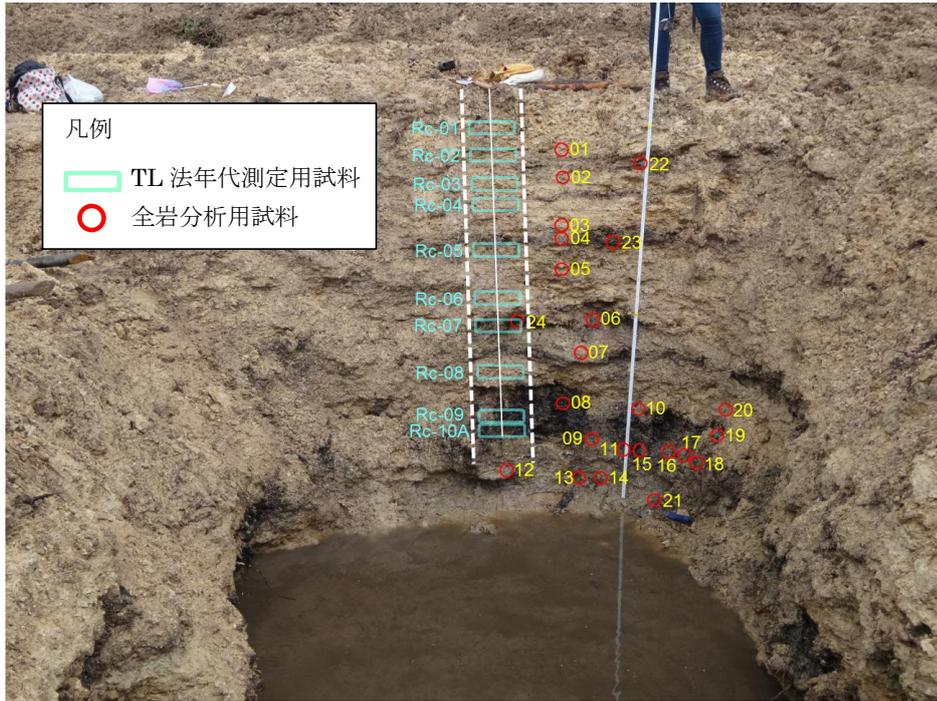
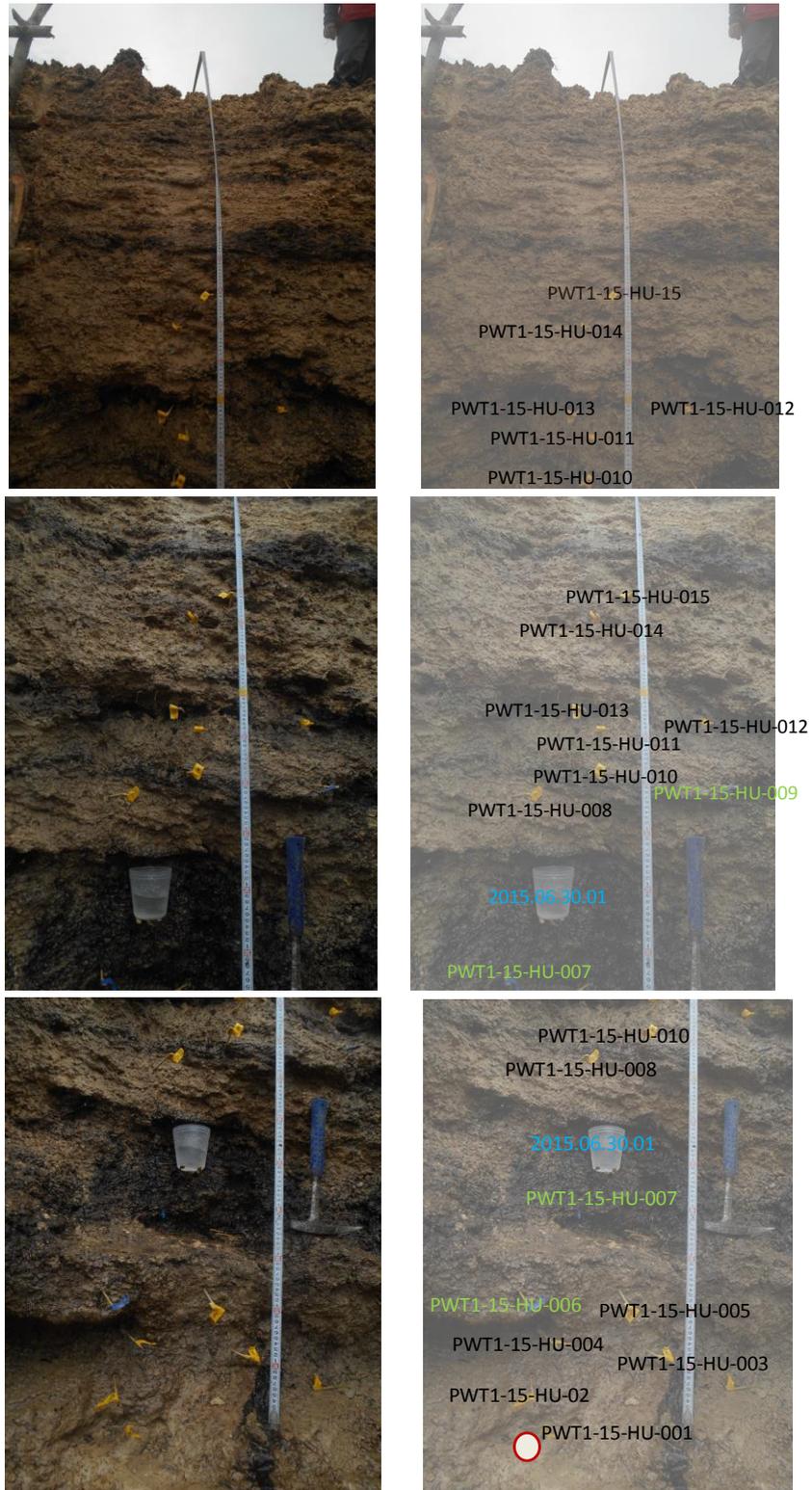


図 2.6.3-2 トレンチ 1 岩石試料採取 (その 1 : Rh 及び Rc シリーズ)



※赤丸は金属製クーラーキャップにより形状を崩さずに塊ごと採取した試料

図 2.6.3-3 トレンチ 1 岩石試料採取 (その 2 : HU シリーズ)

(2) トレンチ2

岩石試料のサンプリング位置を図 2.6.3-4～図 2.6.3-6 に示す。トレンチ2では底部に基盤岩が見られたため、低部から下方向と斜め下方向にコアドリルによるコアサンプリングを実施した。また、基盤岩直上に特徴的な黒色の粘土質堆積物が見られたため、これらの粘土質試料を中心にサンプリングを行った。なお、試料番号についてはトレンチ1と同様に、Rh（及び Rc）シリーズの試料は上部から、HU シリーズの試料は底部から順に番号を付けている。

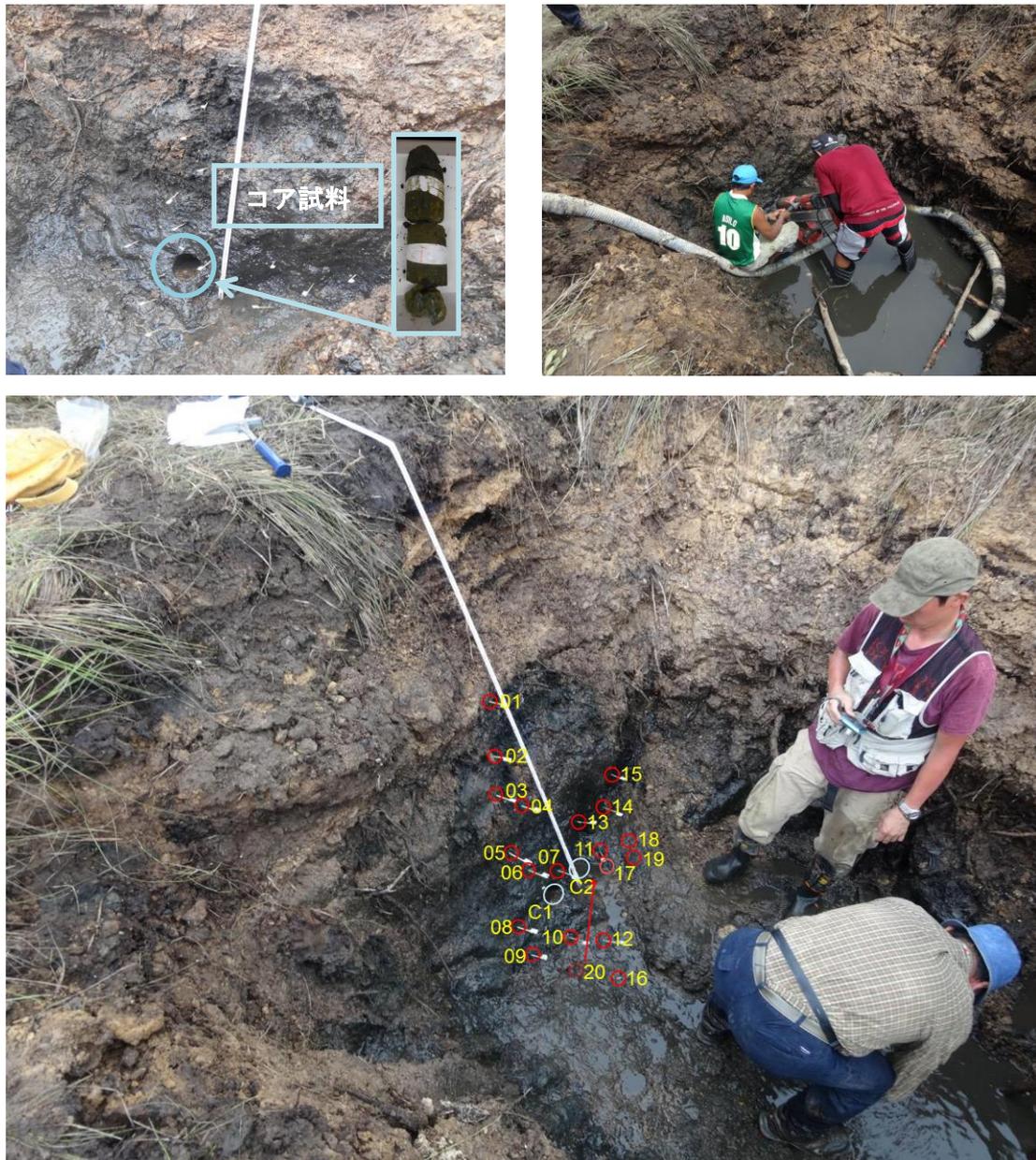


図 2.6.3-4 トレンチ2岩石試料採取（その1：Rh シリーズ）

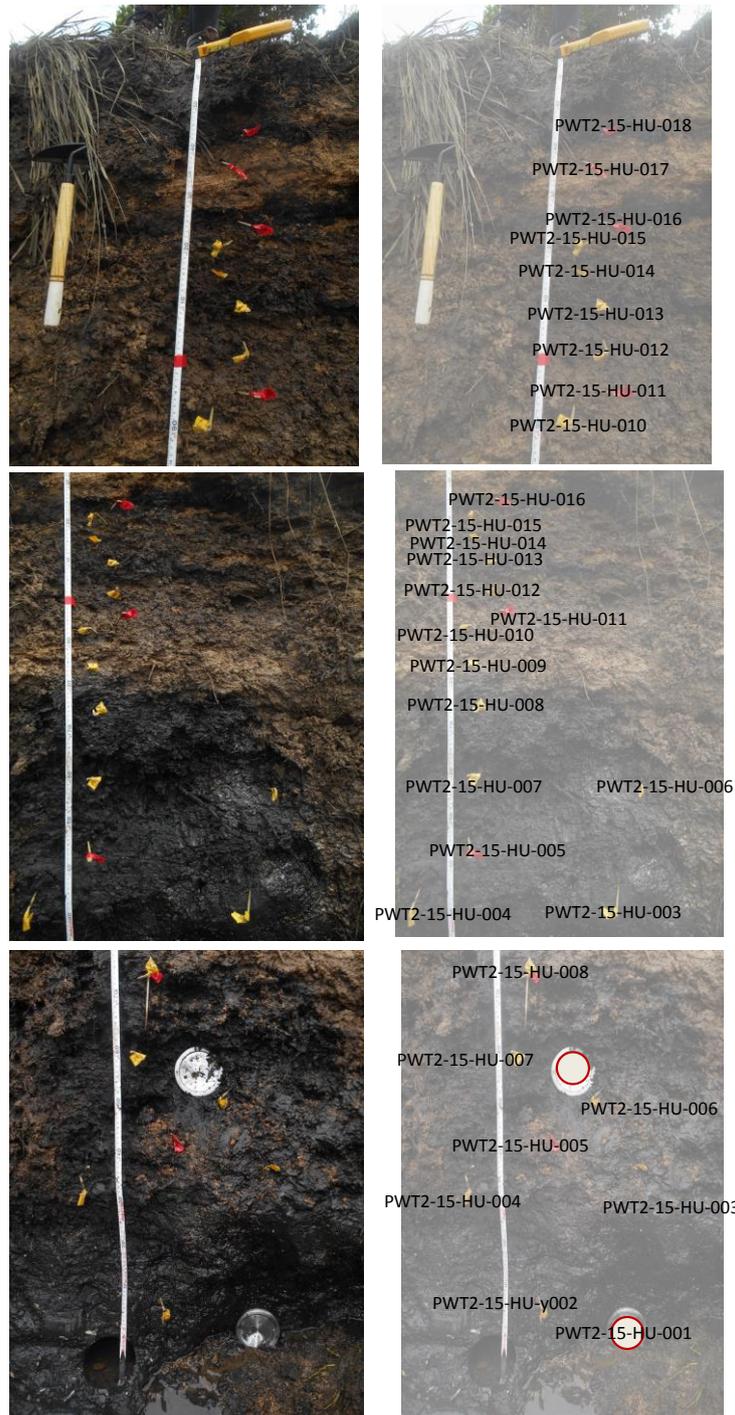


図 2.6.3-5 トレンチ 2 岩石試料採取 (その 2 : HU シリーズ)

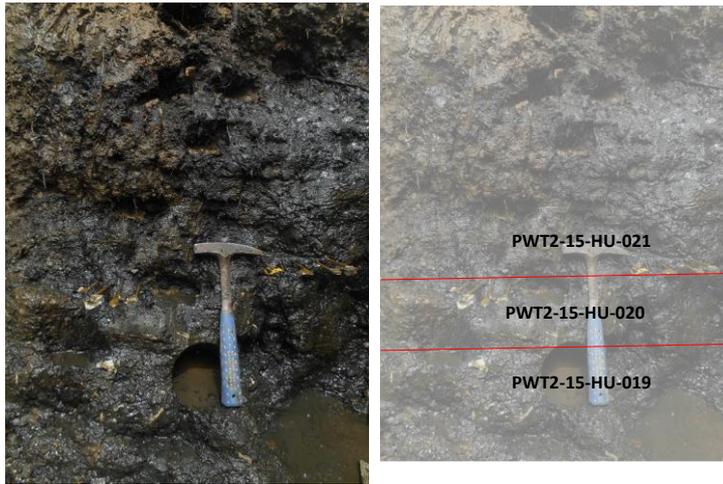


図 2.6.3-6 トレンチ 2 岩石試料採取 (その 3 : HU シリーズ)

2.6.4 岩石鉱物学的調査

Narra 地区の Narra3-1 から採取した岩石試料とその分析項目を表 2.6.4-1 に、トレンチから採取した岩石試料とその分析項目を表 2.6.4-2~表 2.6.4-3 にそれぞれ示す。これら試料の不定方位法の XRD(表 2.6.4-3 に示すトレンチ 2 の一部試料は定方位法 XRD を実施)による鉱物分析、XRF による全岩化学分析、ICP-MS による微量成分分析及び詳細な鉱物の組成及び構造・組織の観察を目的とした EPMA, μ -XRD, FESEM-EDS を実施した。

なお、C14 年代測定用試料(PWT01-15-Rc-001~010A)の分析結果は第 3 章に、EPMA, μ -XRD, FESEM-EDS の分析結果は第 4 章に記載する。

表 2.6.4-1 Narra3-1 で採取した岩石試料と分析項目

Sample Labelling	Location	Description	Remarks	TL	C14	XRD	XRF	SEM, EPMA	薄片顕微鏡
PWNAO-15-Rh-001	Narra3-1 Spring	Clay-rich Sediment	Narra3-1 Spring			○	○		
PWNAO-15-HU-001			PW-15-HU-N31-1			○			
PWNAO-15-HU-002			PW-15-HU-N31-2			○			
PWNAO-15-HU-003			PW-15-HU-N31-3			○			
PWNAO-15-HU-004			PW-15-HU-N31-4			○			

表 2.6.4-2 トレンチ 1 で採取した岩石試料と分析項目

Sample Labelling	Location	Description	Remarks	TL	C14	XRD	XRF	SEM, EPMA	薄片顕微鏡	
PWT01-15-Rh-001	Narra Tranch1		PWS01-15-Rh-001			○	○			
PWT01-15-Rh-002			PWS01-15-Rh-002			○	○			
PWT01-15-Rh-003			PWS01-15-Rh-003			○	○			
PWT01-15-Rh-004			貝殻(巻貝), 木根が混入	PWS01-15-Rh-004			○	○		
PWT01-15-Rh-005				PWS01-15-Rh-005			○	○		
PWT01-15-Rh-006			木根が混入	PWS01-15-Rh-006			○	○		
PWT01-15-Rh-007			木根が混入	PWS01-15-Rh-007			○	○		
PWT01-15-Rh-008			貝殻(巻貝), 木根が混入	PWS01-15-Rh-008			○	○		
PWT01-15-Rh-009			貝殻(巻貝), 木根が混入	PWS01-15-Rh-009			○	○		
PWT01-15-Rh-010				PWS01-15-Rh-010			○	○		
PWT01-15-Rh-011			木根が混入	PWS01-15-Rh-011			○	○		
PWT01-15-Rh-012				PWS01-15-Rh-012			○	○		
PWT01-15-Rh-013			木根(赤く細い)が混入	PWS01-15-Rh-013			○	○		
PWT01-15-Rh-014				PWS01-15-Rh-014			○	○		
PWT01-15-Rh-015			木根が混入	PWS01-15-Rh-015			○	○		
PWT01-15-Rh-016			木根が混入	PWS01-15-Rh-016			○	○		
PWT01-15-Rh-017			木根が混入	PWS01-15-Rh-017			○	○		
PWT01-15-Rh-018				PWS01-15-Rh-018			○	○		
PWT01-15-Rh-019			木根が混入	PWS01-15-Rh-019			○	○		
PWT01-15-Rh-020				PWS01-15-Rh-020			○	○		
PWT01-15-Rh-021				PWS01-15-Rh-021			○	○		
PWT01-15-Rh-022				#1③(上)			○	○		
PWT01-15-Rh-023			木根が混入	#1②(中)			○	○		
PWT01-15-Rh-024			木根が混入	#1①(下)			○	○		
PWT01-15-Rc-001			-25cm カルサイト(Travertine)	C-① TL用	○		○	○※		
PWT01-15-Rc-002			-40cm カルサイト(Travertine)	C-② TL用	○		○	○※		
PWT01-15-Rc-003			-55cm カルサイト(Travertine)	C-③ TL用	○		○	○※		
PWT01-15-Rc-004			-65cm カルサイト(Travertine)	C-④ TL用	○		○	○※		
PWT01-15-Rc-005			-90cm カルサイト(Travertine)	C-⑤ TL用	○		○	○※		
PWT01-15-Rc-006			-115cm カルサイト(Travertine)	C-⑥ TL用	○		○	○※		
PWT01-15-Rc-007			-130cm カルサイト(Travertine)	C-⑦ TL用	○		○	○※		
PWT01-15-Rc-008			-155cm カルサイト(Travertine)	C-⑧ TL用	○		○	○※		
PWT01-15-Rc-009			-180cm カルサイト(Travertine)	C-⑨ TL用	○		○	○※		
PWT01-15-Rc-010A		-185cm カルサイト(Travertine)	C-⑩A TL用	○		○	○※			
PWT01-15-HU-001						○	○			
PWT01-15-HU-002						○	○			
PWT01-15-HU-003						○	○			
PWT01-15-HU-004						○	○			
PWT01-15-HU-005						○	○			
PWT01-15-HU-006		貝殻(巻貝)がある層				○	○			
PWT01-15-HU-007		貝殻(巻貝)がある層				○	○			
PWT01-15-HU-008						○	○			
PWT01-15-HU-009		貝殻(巻貝)がある層				○	○			
PWT01-15-HU-010						○	○			
PWT01-15-HU-011						○	○			
PWT01-15-HU-012						○	○			
PWT01-15-HU-013						○	○			
PWT01-15-HU-014						○	○			
PWT01-15-HU-015						○	○			

○※: ICP-MSによる化学分析

表 2.6.4-3 トレンチ 2 で採取した岩石試料と分析項目

Sample Labelling	Lacation	Description	Remarks	TL	C14	XRD	XRF	SEM, EPMA	薄片顕微鏡
PWT02-15-Rh-001	Narra Trench2	木根が混入	PWS02-15-Rh-001		○	○	○		
PWT02-15-Rh-002		木根が混入	PWS02-15-Rh-002			○	○※		
PWT02-15-Rh-003		木根が混入	PWS02-15-Rh-003			○	○		
PWT02-15-Rh-004		木根が混入	PWS02-15-Rh-004			○	○		
PWT02-15-Rh-005		繊維(木根)が混入	PWS02-15-Rh-005			○	○※		
PWT02-15-Rh-006		繊維(木根)が混入	PWS02-15-Rh-006			○	○	○	
PWT02-15-Rh-007				PWS02-15-Rh-007		○	○※		
PWT02-15-Rh-008				PWS02-15-Rh-008		○	○		
PWT02-15-Rh-009		繊維を含む		PWS02-15-Rh-009		○	○※		
PWT02-15-Rh-010				PWS02-15-Rh-010		○	○		
PWT02-15-Rh-011				PWS02-15-Rh-011		○	○	○	
PWT02-15-Rh-012				PWS02-15-Rh-012		○	○※		
PWT02-15-Rh-013				PWS02-15-Rh-013		○	○	○	
PWT02-15-Rh-014				PWS02-15-Rh-014		○	○		
PWT02-15-Rh-015				PWS02-15-Rh-015		●	○※	○	○
PWT02-15-Rh-016				PWS02-15-Rh-016		●	○※	○	○
PWT02-15-Rh-017			トレンチ2底面のオフィオライトトップ	行方不明					
PWT02-15-Rh-018				#2 Trench A面 Mudstone			○	○	○
PWT02-15-Rh-019			Marine Fossil bearing Mudstone	#2			○	○	
PWT02-15-Rh-020			Hilti DrillコアC2と続きの基盤岩	#2 Trench2 Floor -PWT02B-15-C-002-3			○	○	○
PWT02B-15-C1-001				トレンチ2底部のHilti Drillコア			○	○	○
PWT02B-15-C1-002				トレンチ2底部のHilti Drillコア			○	○	
PWT02B-15-C2-0			コア最上部(木根が混入)※※	トレンチ2底部のHilti Drillコア		○	○	○	
PWT02B-15-C2-1-001			コア上部の上側	トレンチ2底部のHilti Drillコア			○	○	○
PWT02B-15-C2-1-002			コア上部の下側	トレンチ2底部のHilti Drillコア			○	○	
PWT02B-15-C2-2-001			コア下部の上側	トレンチ2底部のHilti Drillコア			○	○	○
PWT02B-15-C2-2-002			コア下部の下側	トレンチ2底部のHilti Drillコア			○	○	○
PWT02-15-HU-001							○		
PWT02-15-HU-002							○		
PWT02-15-HU-003							○		
PWT02-15-HU-004							○		
PWT02-15-HU-005						○			
PWT02-15-HU-006						○			
PWT02-15-HU-007						○			
PWT02-15-HU-008						○			
PWT02-15-HU-009						○			
PWT02-15-HU-010						○			
PWT02-15-HU-011						○			
PWT02-15-HU-012						○			
PWT02-15-HU-013						○			
PWT02-15-HU-014						○			
PWT02-15-HU-015						○			
PWT02-15-HU-016						○			
PWT02-15-HU-017						○			
PWT02-15-HU-018						○			
PWT02-15-HU-001R		Trench2底の岩石試料				○			
PWT02-15-HU-019		07/09に採った試料	T02-15-HU-002を細かく分けた試料			○			
PWT02-15-HU-020		07/09に採った試料	T02-15-HU-002を細かく分けた試料			○			
PWT02-15-HU-021		07/09に採った試料 木根が混入	T02-15-HU-002を細かく分けた試料			○			

○※: ICP-MSによる化学分析
 ●: 定方位XRDも実施
 ※※: 試料が崩れたため分割しない

(1) 試料調整

PWT01-15-Rh-001～024 および PWNAO-15-Rh-001 及び PWT02-15-Rh-001～018 は高い含水比（ペースト状）で透明樹脂の試料袋に封入した。PWT02-15-Rh-019 は、小礫状にてアルミ入りのサンプル袋に封入した。PWT02-15-Rh-020 は岩片、そして PWT02B-15-C1, C2 はボーリングコアとして布製の試料袋に封入した。

ペースト状の試料は、湿潤状態で 20g 程度分取し、真空乾燥したのち、木槌で粗砕した。粗砕したものを 100mL の容器に直径 10mm のステンレス球 10 個と粗砕試料を入れ、3 分間ハンドシェイクした後、100 μ m のふるいで分画した。ペースト状の試料について、試料袋に養生された状態、乾燥前の試料、乾燥および粗砕後の試料、105 μ m ふるいでふるい分けたときの残分と通過分、の状態を表 2.6.4-4～表 2.6.4-13 に示す。

PWT02-15-Rh-019 は、黒褐色の基質部を小割して分取し、粗砕して真空乾燥したのち、上と同様にボールミル粉碎して分画した。PWT02-15-Rh-019 と試料袋、小割り前の状態、および、100 μ m ふるい通過分を表 2.6.4-15 に示す。

ドリルコア PWT02B-15-C1, C2-0, C2-1, C2-2 は、樹脂で周囲を固めた後、注意深く半割した。それぞれの塊の鉛直方向下部の端部を-001、上部の端部を-002 として試料名を整理した。C2-0 はコア形状を維持していなかったため、1 試料として扱うこととした。ドリルコア PWT02B-15-C1, C2-0, C2-1, C2-2 を図 2.6.4-2 から図 2.6.4-5 に示す。

表 2.6.4-4 PWT01-15-Rh-001~004 の試料の状態 (試料袋に入れられた状態、乾燥前、粗砕後、および、100 μ m ふるい残分 (ふるい上) と通過分 (ふるい下))

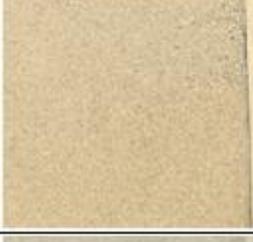
試料名	取出し前試料	乾燥前	乾燥・粗粉碎後	100 μ mふるい上	100 μ mふるい下
PWT01-15-Rh-001					
PWT01-15-Rh-002					
PWT01-15-Rh-003					
PWT01-15-Rh-004					

表 2.6.4-5 PWT01-15-Rh-005~008 の試料の状態 (試料袋に入れられた状態、乾燥前、粗砕後、および、100 μ m ふり残分 (ふるい上) と通過分 (ふるい下))

試料名	取出し前試料	乾燥前	乾燥・粗粉碎後	100 μ mふるい上	100 μ mふるい下
PWT01-15-Rh-005					
PWT01-15-Rh-006					
PWT01-15-Rh-007					
PWT01-15-Rh-008					

表 2.6.4-6 PWT01-15-Rh-009～012 の試料の状態（試料袋に入れられた状態、乾燥前、粗砕後、および、100 μ m ふるい残分（ふるい上）と通過分（ふるい下））

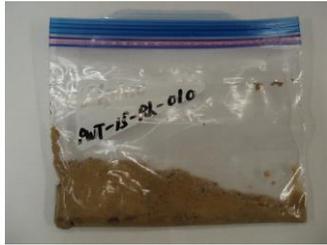
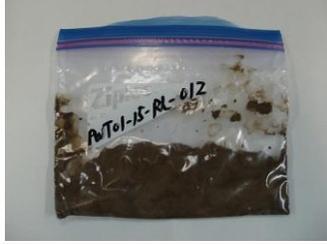
試料名	取出し前試料	乾燥前	乾燥・粗粉碎後	100 μ m ふるい上	100 μ m ふるい下
PWT01-15-Rh-009					
PWT01-15-Rh-010					
PWT01-15-Rh-011					
PWT01-15-Rh-012					

表 2.6.4-7 PWT01-15-Rh-013~016 の試料の状態 (試料袋に入れられた状態、乾燥前、粗砕後、および、100 μ m ふり残分 (ふるい上) と通過分 (ふるい下))

試料名	取出し前試料	乾燥前	乾燥・粗粉碎後	100 μ mふるい上	100 μ mふるい下
PWT01-15-Rh-013					
PWT01-15-Rh-014					
PWT01-15-Rh-015					
PWT01-15-Rh-016					

表 2.6.4-8 PWT01-15-Rh-017~020 の試料の状態 (試料袋に入れられた状態、乾燥前、粗砕後、および、100 μ m ふるい残分 (ふるい上) と通過分 (ふるい下))

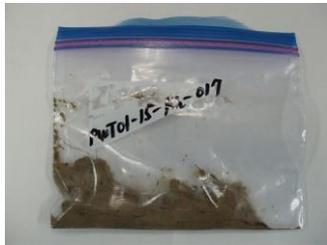
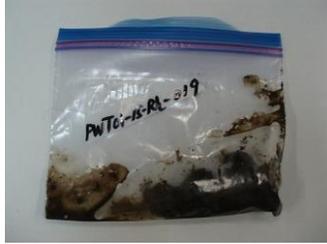
試料名	取出し前試料	乾燥前	乾燥・粗粉碎後	100 μ m ふるい上	100 μ m ふるい下
PWT01-15-Rh-017					
PWT01-15-Rh-018					
PWT01-15-Rh-019					
PWT01-15-Rh-020					

表 2.6.4-9 PWT01-15-Rh-021～024 の試料の状態（試料袋に入れられた状態、乾燥前、粗砕後、および、100 μ m ふるい残分（ふるい上）と通過分（ふるい下））

試料名	取出し前試料	乾燥前	乾燥・粗粉碎後	100 μ mふるい上	100 μ mふるい下
PWT01-15-Rh-021					
PWT01-15-Rh-022					
PWT01-15-Rh-023					
PWT01-15-Rh-024					

表 2.6.4-10 PWT02-15-Rh-001~004 の試料の状態（試料袋に入れられた状態、乾燥前、粗砕後、および、100 μ m ふるい残分（ふるい上）と通過分（ふるい下））

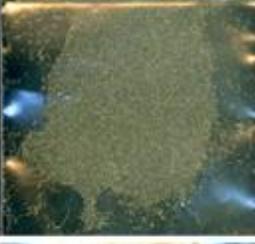
試料名	分取前試料	乾燥前	乾燥・粗粉碎後	100 μ mふるい上	100 μ mふるい下
PWT02-15-Rh-001					
PWT02-15-Rh-002					
PWT02-15-Rh-003					
PWT02-15-Rh-004					

表 2.6.4-11 PWT02-15-Rh-005～008 の試料の状態（試料袋に入れられた状態、乾燥前、粗砕後、および、100 μ m ふるい残分（ふるい上）と通過分（ふるい下））

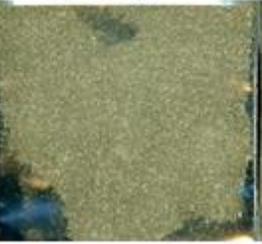
試料名	分取前試料	乾燥前	乾燥・粗粉碎後	100 μ mふるい上	100 μ mふるい下
PWT02-15-Rh-005					
PWT02-15-Rh-006					
PWT02-15-Rh-007					
PWT02-15-Rh-008					

表 2.6.4-12 PWT02-15-Rh-009~012 の試料の状態 (試料袋に入れられた状態、乾燥前、粗砕後、および、100 μ m ふり残分 (ふるい上) と通過分 (ふるい下))

試料名	分取前試料	乾燥前	乾燥・粗粉碎後	100 μ mふるい上	100 μ mふるい下
PWT02-15-Rh-009					
PWT02-15-Rh-010					
PWT02-15-Rh-011					
PWT02-15-Rh-012					

表 2.6.4-13 PWT02-15-Rh-013~018 の試料の状態（試料袋に入れられた状態、乾燥前、粗砕後、および、100 μ m ふり残分（ふるい上）と通過分（ふるい下））

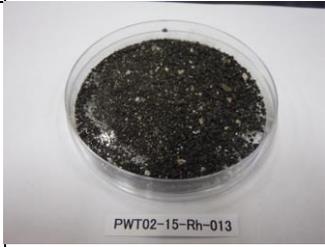
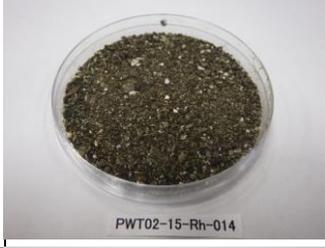
試料名	分取前試料	乾燥前	乾燥・粗粉碎後	100 μ mふるい上	100 μ mふるい下
PWT02-15-Rh-013					
PWT02-15-Rh-014					
PWT02-15-Rh-015					
PWT02-15-Rh-016					

表 2.6.4-14 PWT02-15-Rh-018 の試料の状態 (試料袋に入れられた状態、乾燥前、粗砕後、および、100 μ m ふり残分 (ふるい上) と通過分 (ふるい下))

試料名	分取前試料	乾燥前	乾燥-粗粉碎後	100 μ mふるい上	100 μ mふるい下
PWT02-15-Rh-018					

表 2.6.4-15 PWT02-15-Rh-019 の試料の状態 (試料と試料袋、小割り前、および、100 μ m ふり通過分)

試料名	試料袋と試料	小割り前	粒度調整後
PWT02-15-Rh-018			



図 2.6.4-1 PWT02-15-Rh-020



図 2.6.4-2 PWT02B-15-C1-001 および PWT02B-15-C1-002

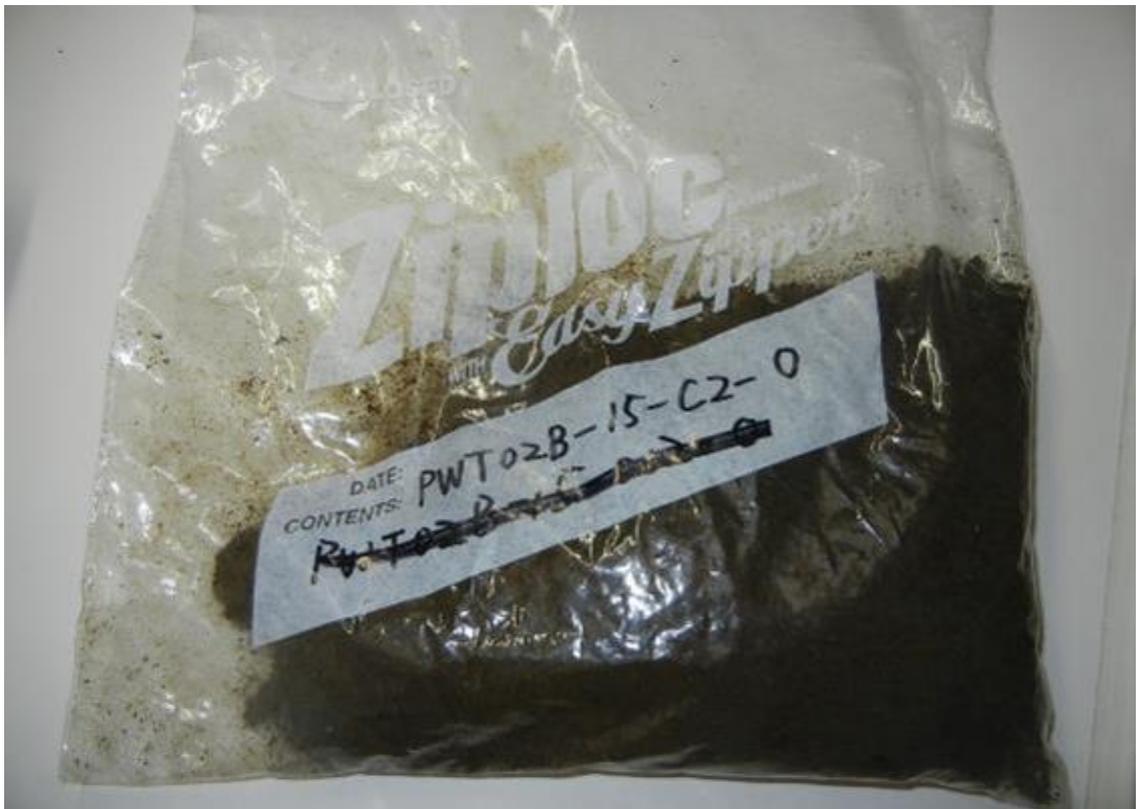


図 2.6.4-3 PWT02B-15-C2-0



図 2.6.4-4 PWT02B-15-C2-1-001 および PWT02B-15-C2-1-002



図 2.6.4-5 PWT02B-15-C2-2-001 および PWT02B-15-C2-2-002

(2) 鉱物学的特性 (XRD)

1) Narra3-1 から採取した試料の鉱物学的特性

Narra3-1 から採取した PWNAO-15-Rh-001 及び PWNAO-15-HU-001~004 の X 線回折測定による鉱物同定結果を表 2.6.4-16 に示す。なお、PWNAO-15-HU-001~004 は定方位法 X 線回折測定を行った。また、X 線回折チャートを、図 2.6.4-6 及び図 2.6.4-7 に示す。

PWNAO-15-HU-003 及び 004 は 14Å のピークを示し、この 14Å のピークを持つ鉱物としてスメクタイト、緑泥石、バーミキュライトが考えられることから、PWNAO-15-HU-003 についてはエチレングリコール(EG)処理によるピークシフトを確認した。その結果、14Å のピークの低角側へのシフトが明確に見られ、14Å 鉱物がスメクタイトであると判定した。さらに、006 面の観察から、2 八面体スメクタイトとみられる 1.5Å のピークが見られることから、このスメクタイトはノントロナイトであると考えられる。

表 2.6.4-16 Narra3-1 の試料 (PWNAO-15-Rh-001 及び PWNAO-15-HU-001~004) の X 線回折測定による鉱物同定

試料名	粘土鉱物		輝石	角閃石	蛇紋石	炭酸塩鉱物		水酸化 鉱物
	スメクタイト	緑泥石	斜方輝石	-	リザードイト	方解石	霏石	ブルサイト
	Smectite	Chlorite	Orthopyroxene	Amphibole	Lizardite	Calcite	Aragonite	Brucite
Rh-001	△	△	△	△	◎	○	△	
HU-001	△				○	◎		◎
HU-002	△				○	◎		○
HU-003	◎				○			△
HU-004	◎				○	○		△

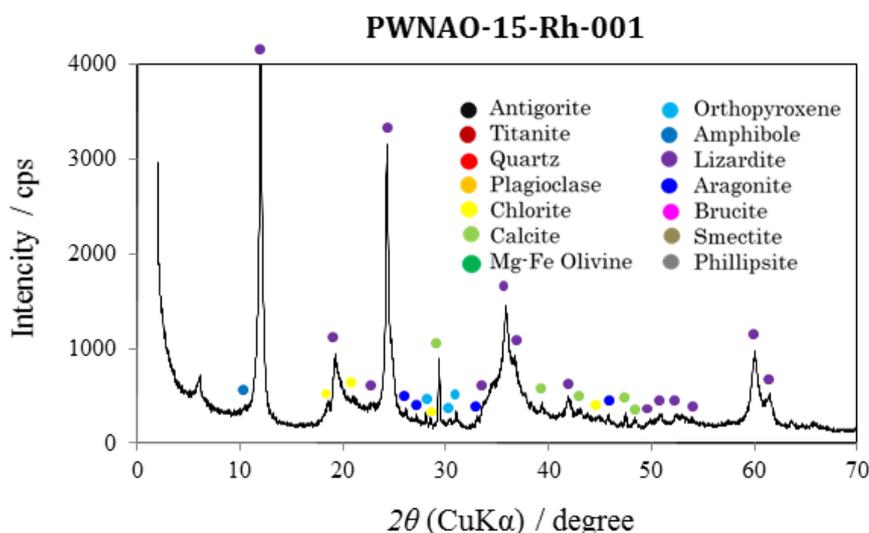


図 2.6.4-6 PWNAO-15-Rh-001 の XRD チャート

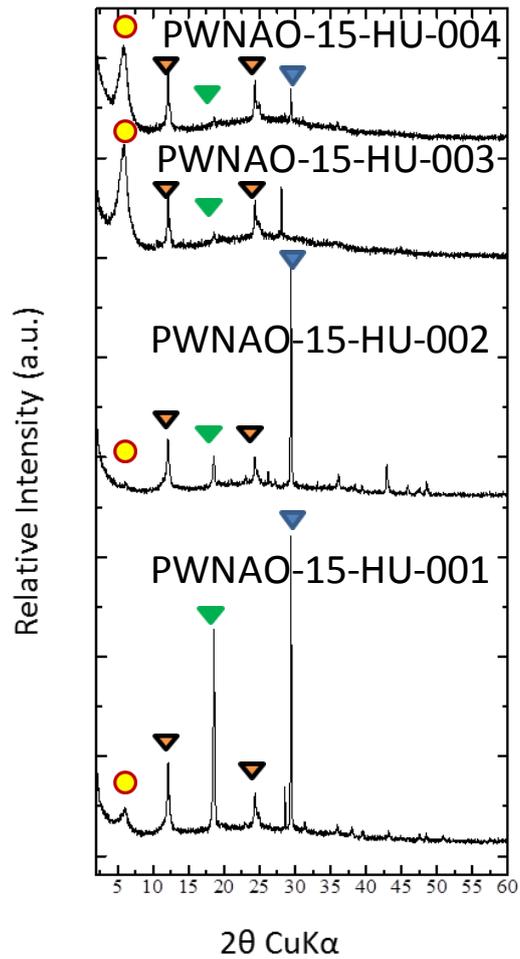
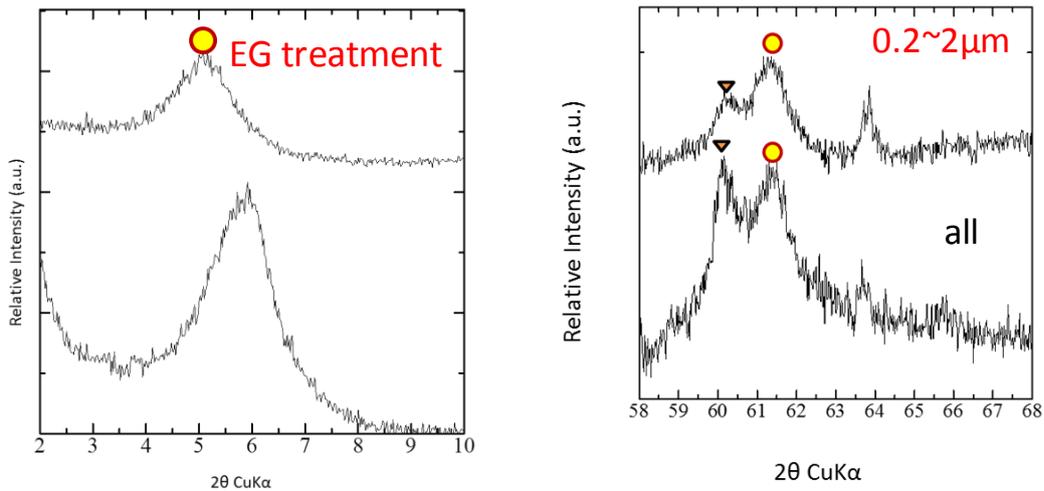


図 2.6.4-7 PWNAO-15-HU-001~004 の定方位 XRD チャート



(a) EG 処理後の 14\AA のピークシフト

(b) 060 面の観察

図 2.6.4-8 PWNAO-15-HU-003 の定方位 XRD チャートの(a)EG 処理によるピークシフト及び (b)060 面の観察

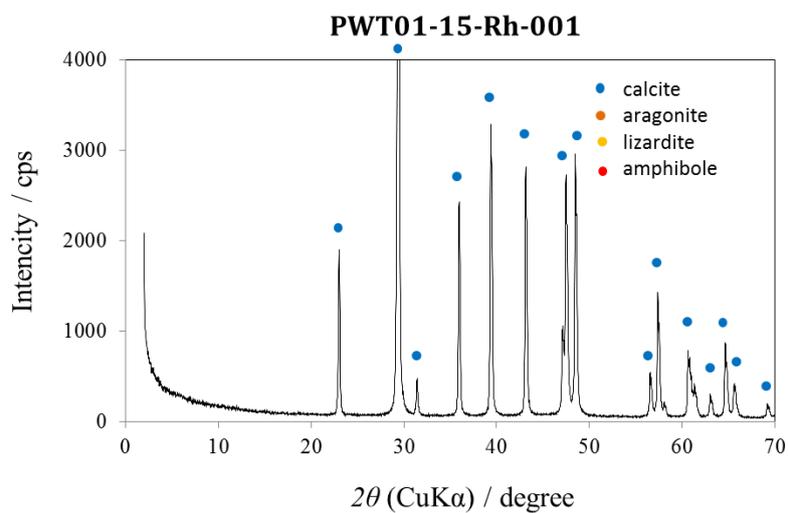
2) トレンチ1から採取した試料の鉱物学的特性

トレンチ1から採取した岩石試料のX線回折測定による鉱物同定結果を表2.6.4-17に示す。また、PWT01-15-Rh-001～024のX線回折チャートを、図2.6.4-9から図2.6.4-32に示す。

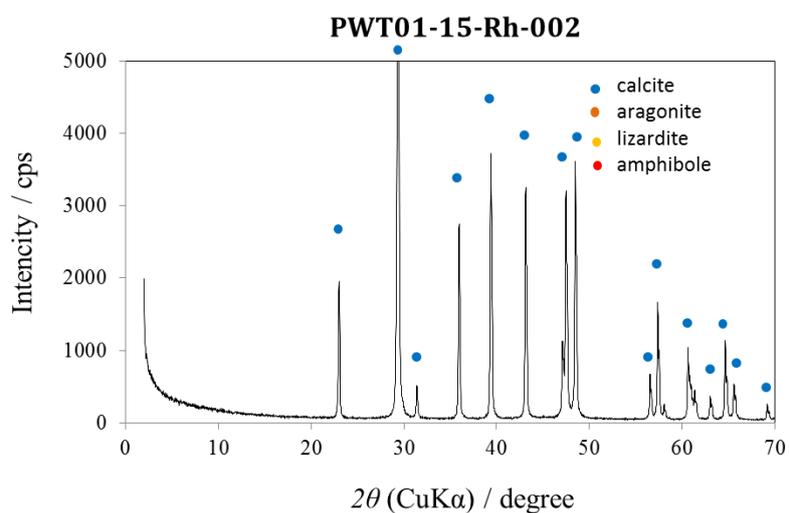
これらの試料の主な成分は方解石である。その他、リザーダイトとアラゴナイトが少量含まれる。また、PWT01-15-HU-001～015の試料でも同定された鉱物は方解石のみであった。

表 2.6.4-17 トレンチ1の試料 (PWT01-15-Rh-001～024) のX線回折測定による鉱物同定

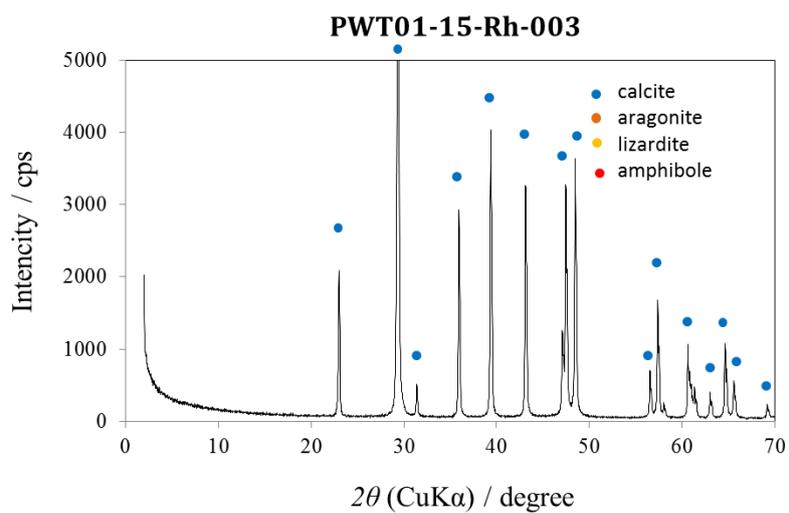
試料名 PWT01-15-Rh-	沸石	角閃石	蛇紋石	炭酸塩鉱物		鉄酸化鉱物
	濁沸石	-	リザーダイト	方解石	霰石	針鉄鉱
	Laumontite	Amphibole	Lizardite	Calcite	Aragonite	Geothite
Rh-001				◎		
Rh-002				◎		
Rh-003				◎		
Rh-004			△	◎	△	
Rh-005				◎		
Rh-006		△		◎		
Rh-007		△	△	◎	△	
Rh-008				◎		
Rh-009			△	◎	△	
Rh-010				◎		
Rh-011			△	◎	△	
Rh-012	△		△	◎	△	
Rh-013			△	◎	△	
Rh-014			△	◎	△	
Rh-015			△	◎	△	
Rh-016			△	◎	△	
Rh-017			△	◎	△	
Rh-018			△	◎	△	
Rh-019			△	◎	△	△
Rh-020			△	◎	△	
Rh-021			△	◎	△	
Rh-022				◎	△	
Rh-023		△	△	◎	△	
Rh-024				◎		
HU-001~015				◎		



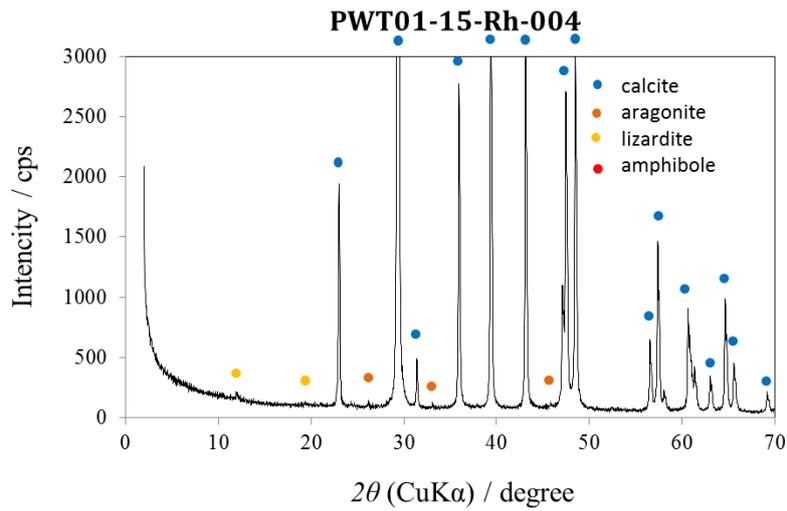
☒ 2.6.4-9 PWT01-15-Rh-001 の XRD チャート



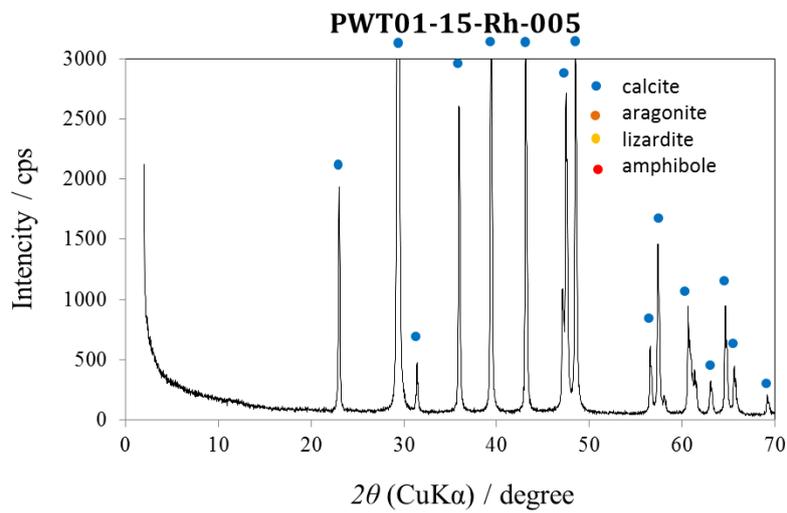
☒ 2.6.4-10 PWT01-15-Rh-002 の XRD チャート



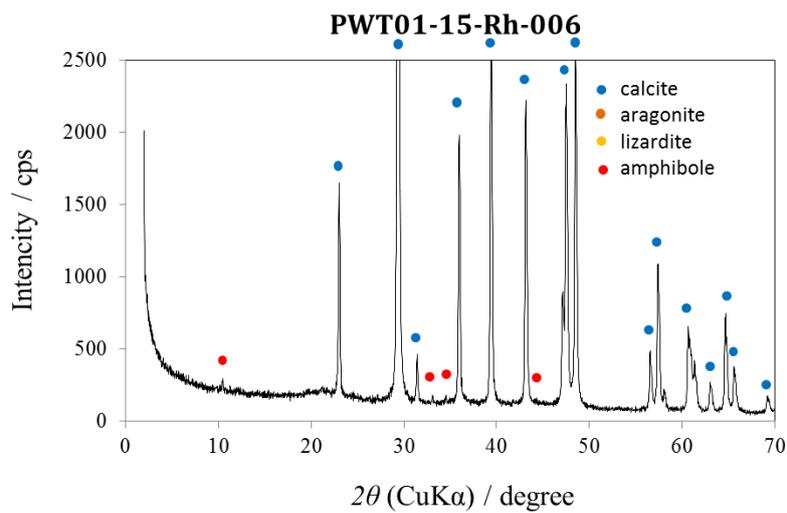
☒ 2.6.4-11 PWT01-15-Rh-003 の XRD チャート



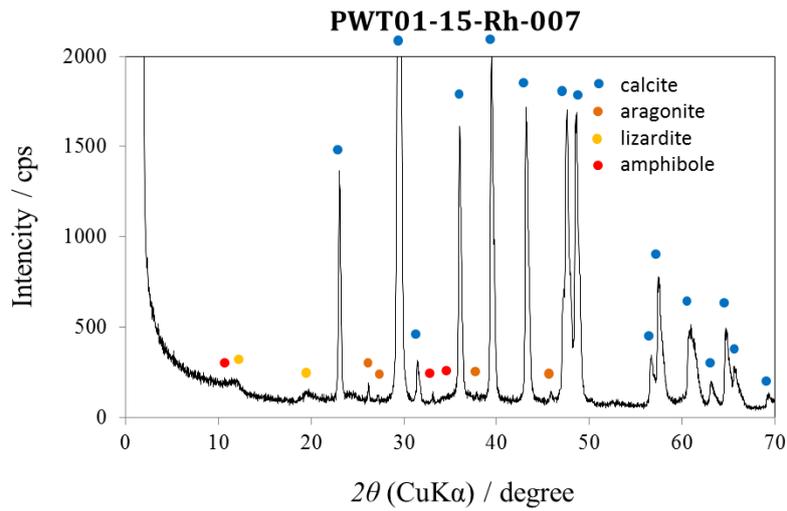
☒ 2.6.4-12 PWT01-15-Rh-004 の XRD チャート



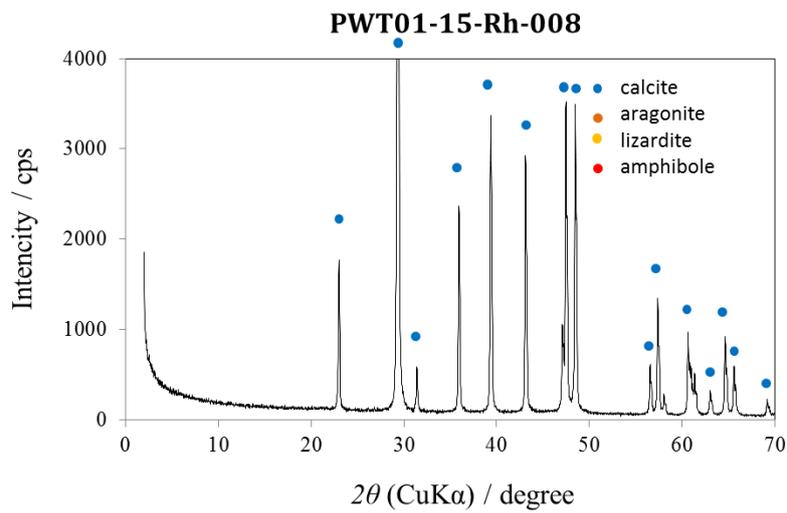
☒ 2.6.4-13 PWT01-15-Rh-005 の XRD チャート



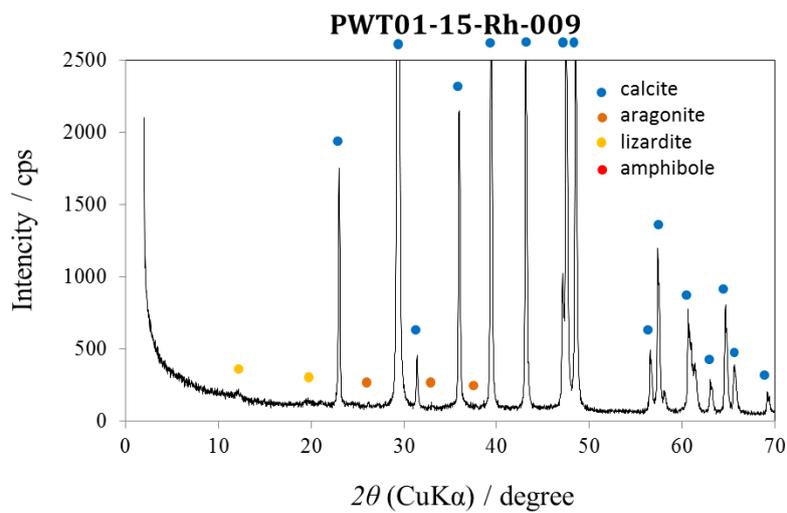
☒ 2.6.4-14 PWT01-15-Rh-006 の XRD チャート



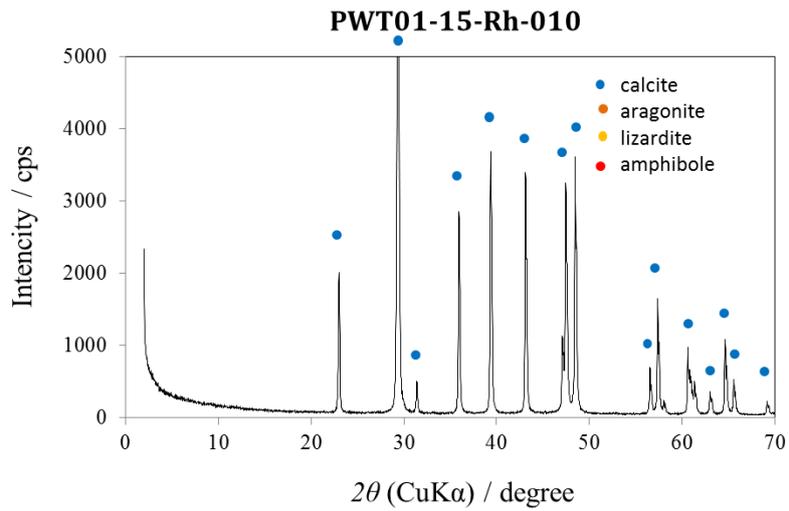
☒ 2.6.4-15 PWT01-15-Rh-007 の XRD チャート



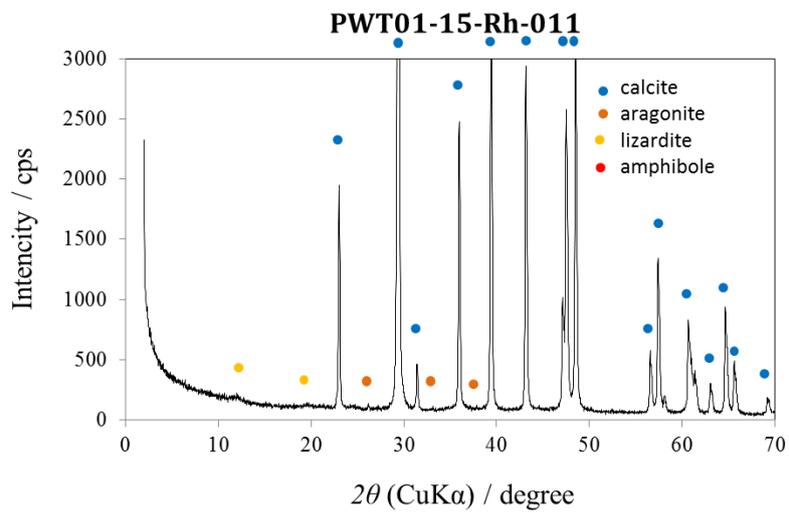
☒ 2.6.4-16 PWT01-15-Rh-008 の XRD チャート



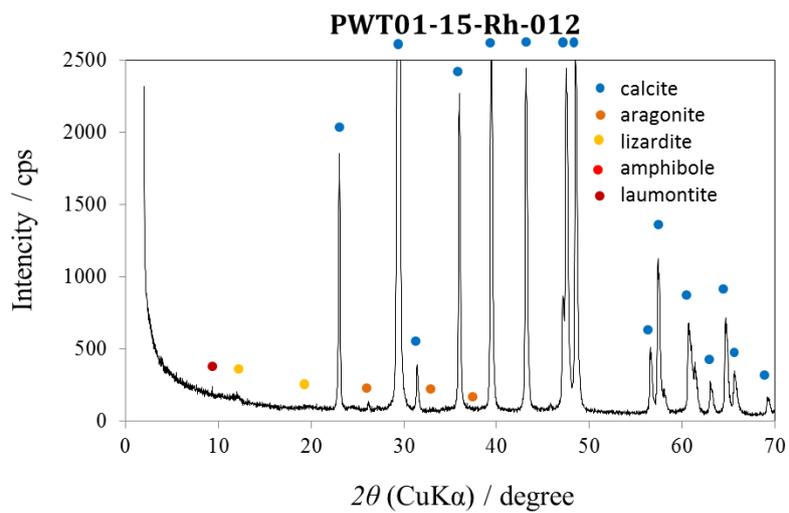
☒ 2.6.4-17 PWT01-15-Rh-009 の XRD チャート



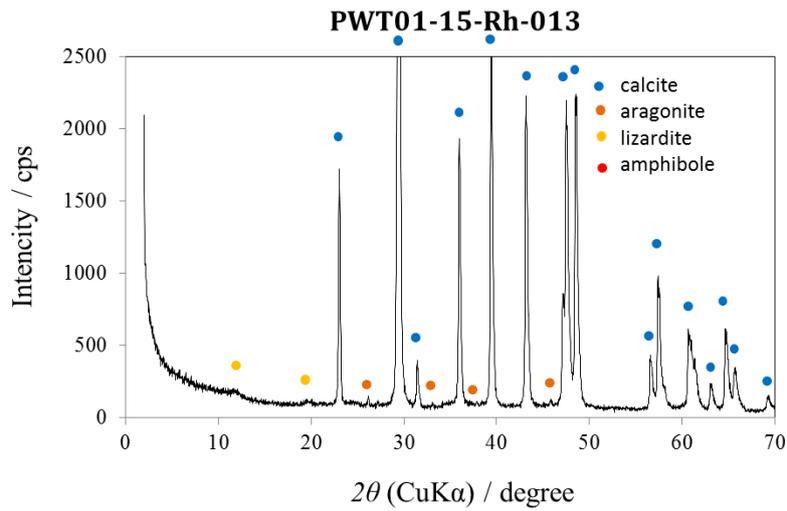
☒ 2.6.4-18 PWT01-15-Rh-010 の XRD チャート



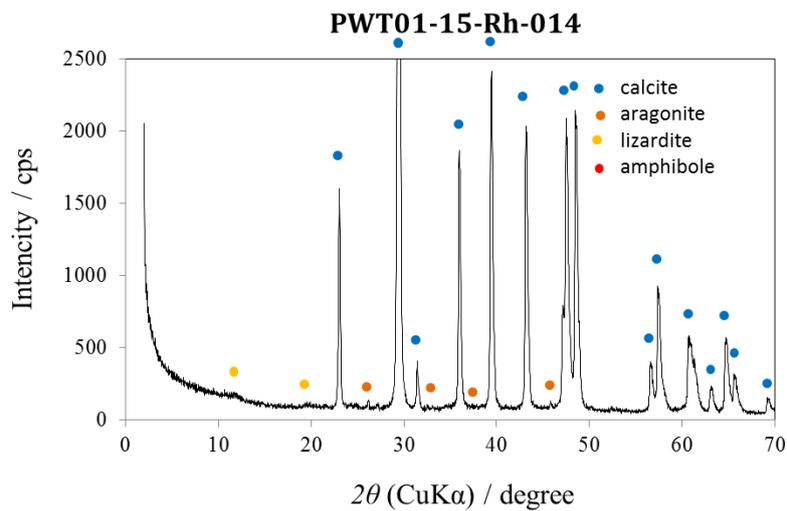
☒ 2.6.4-19 PWT01-15-Rh-011 の XRD チャート



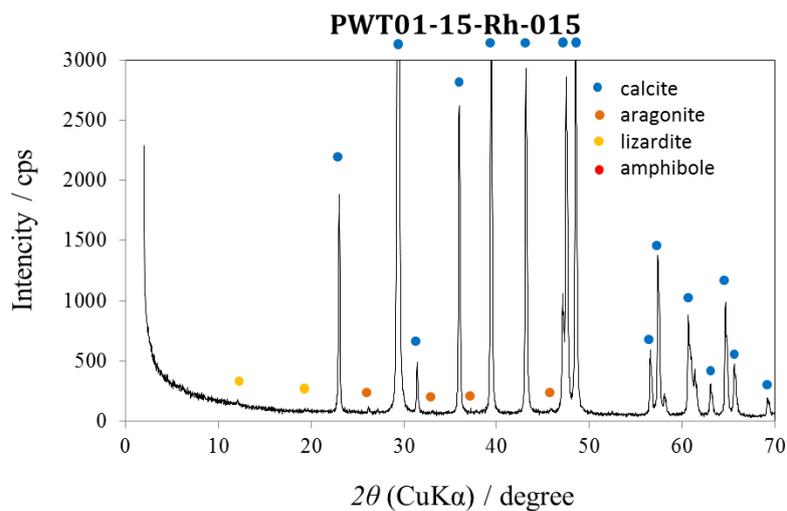
☒ 2.6.4-20 PWT01-15-Rh-012 の XRD チャート



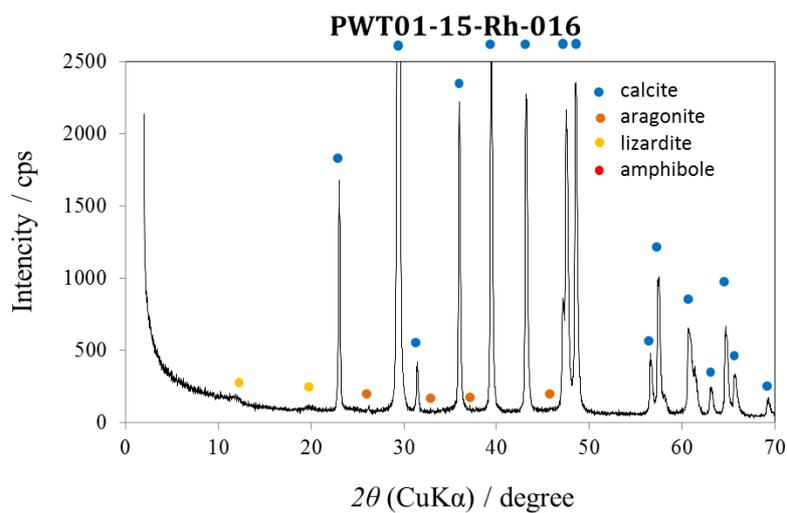
☒ 2.6.4-21 PWT01-15-Rh-013 の XRD チャート



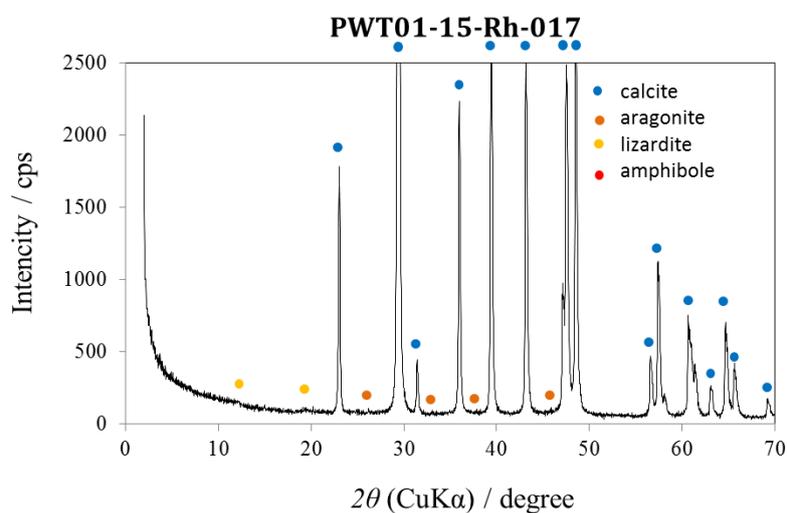
☒ 2.6.4-22 PWT01-15-Rh-014 の XRD チャート



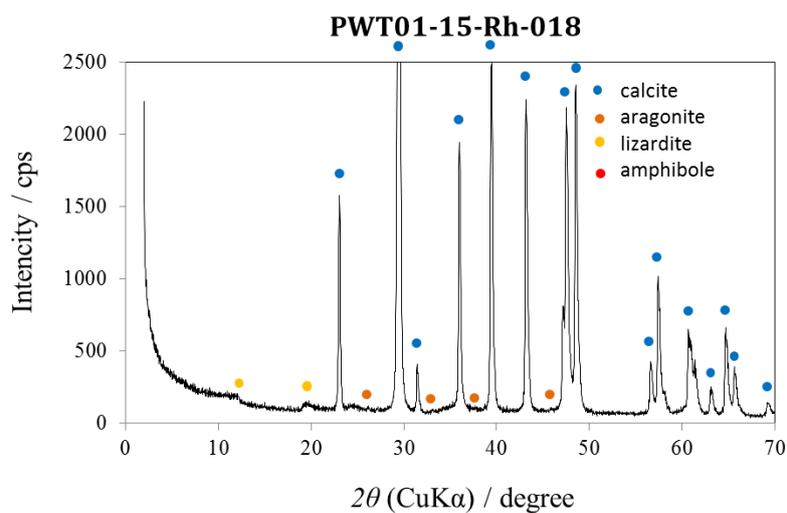
☒ 2.6.4-23 PWT01-15-Rh-015 の XRD チャート



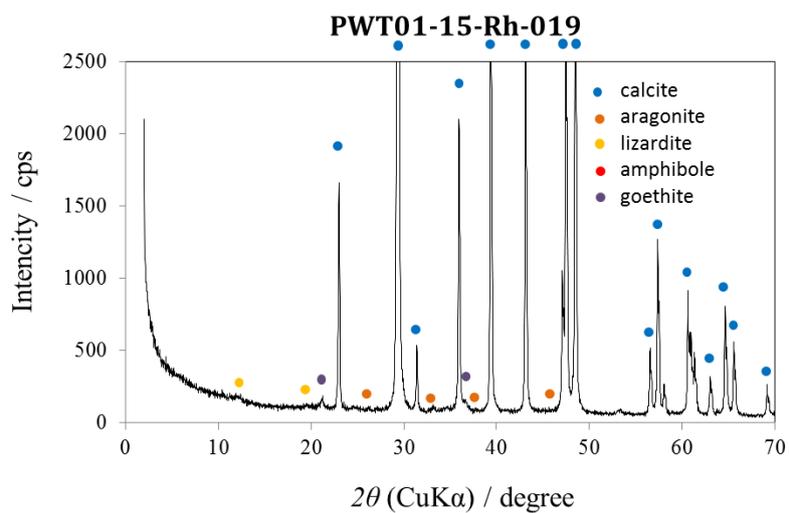
☒ 2.6.4-24 PWT01-15-Rh-016 の XRD チャート



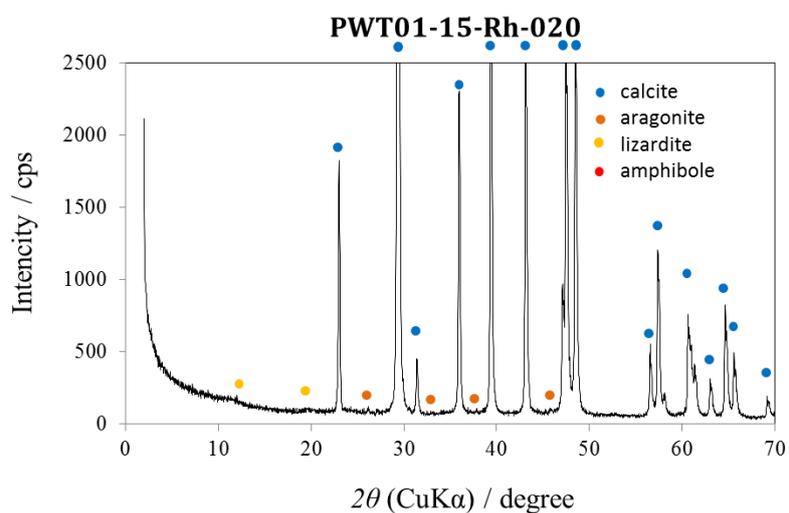
☒ 2.6.4-25 PWT01-15-Rh-017 の XRD チャート



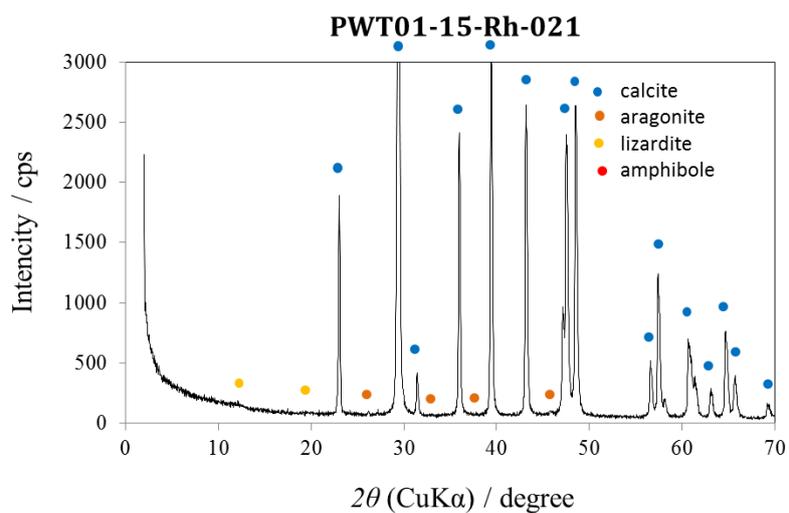
☒ 2.6.4-26 PWT01-15-Rh-018 の XRD チャート



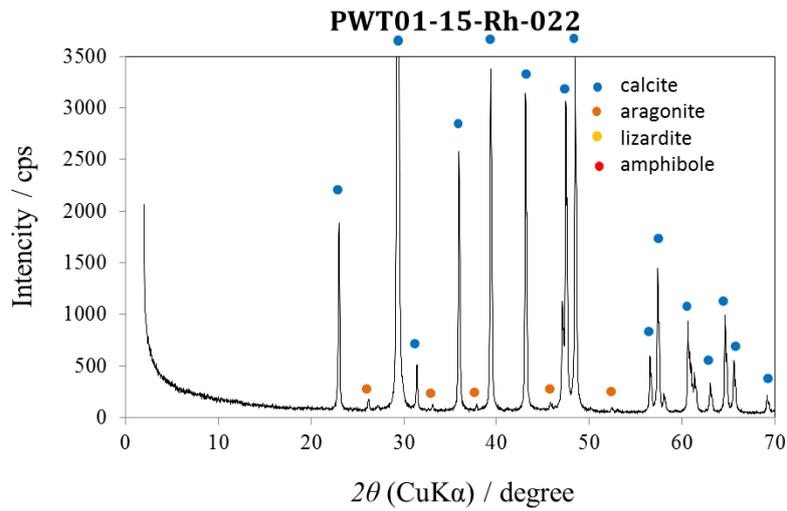
☒ 2.6.4-27 PWT01-15-Rh-019 の XRD チャート



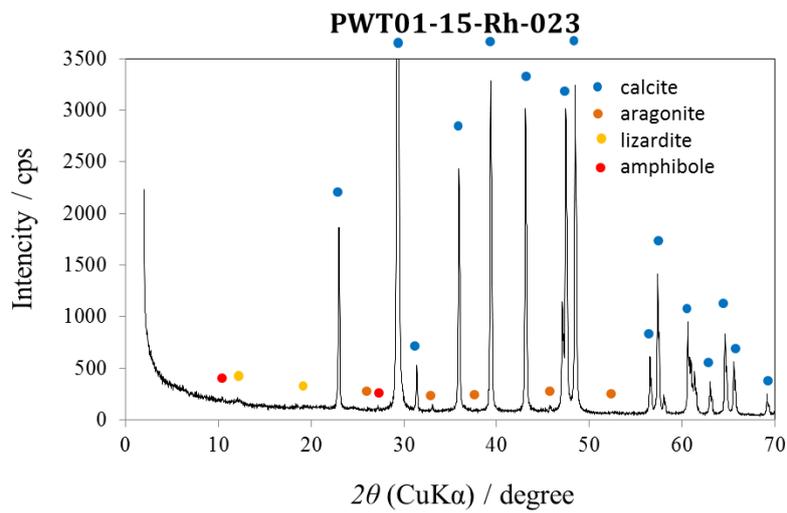
☒ 2.6.4-28 PWT01-15-Rh-020 の XRD チャート



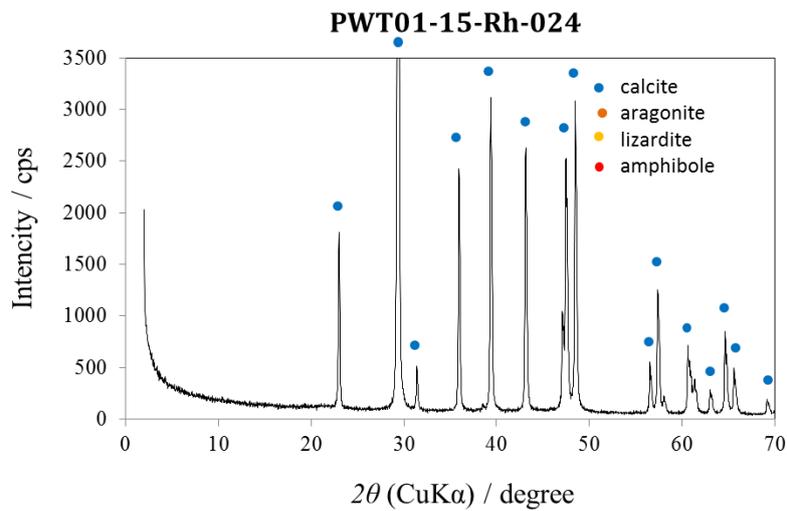
☒ 2.6.4-29 PWT01-15-Rh-021 の XRD チャート



☒ 2.6.4-30 PWT01-15-Rh-022 の XRD チャート



☒ 2.6.4-31 PWT01-15-Rh-023 の XRD チャート



☒ 2.6.4-32 PWT01-15-Rh-024 の XRD チャート

3) トレンチ 2 から採取した試料の鉱物学的特性

トレンチ 2 から採取した PWT02-15-Rh-001~020 および PWT02B-15-C1, C2 の X 線回折測定による鉱物同定結果を表 2.6.4-18 に、PWT02-15-HU-001~018 の鉱物同定結果を表 2.6.4-19 に示す。また、X 線回折チャートを図 2.6.4-33 から図 2.6.4-60 に示す。

トレンチの壁面および底部より採取した岩石試料 (Rh-001~020) について、大きく分けて 3 つのグループからなる。1 つは、比較的表層のグループ (Rh-001~004)、もう 1 つは、中位のグループ (Rh-005~019)、そして、最後が底部 (Rh-020) である。

表層のグループは、方解石が主体で、そのピークは大きな強度を示している。その他、低角部の粘土鉱物 (スメクタイトと緑泥石と考えられる)、角閃石、斜方輝石のピークが目立つ。また少量であるが、蛇紋石 (リザーダイト)、緑泥石のピーク、および、変質鉱物と考えられる沸石類と C-S-H (14Å トバモライト) のピークが認められる。また、(物理的な) 下位に行くほど方解石のピークが小さくなり、その他のピークが強くなる。XRD チャートの中でピンクの帯はかんらん石の特徴ピークが存在する範囲を示しているが、このグループの試料にはかんらん石のピークは見られなかった。

中位のグループは、低角部の粘土鉱物のピークが非常に強いことが特徴的である。表層のグループで非常に強いピークを示した方解石は下位に行くほど小さくなる傾向にある。表層のグループに見られたのと同じ鉱物のピークを確認することができる。かんらん石のピークは確認できない。変質鉱物である低温型の C-S-H (14Å トバモライト) の強いピークを示すもの (Rh-016 など) もあり、比較的低温での鉱物のアルカリ変質反応が生じたか生じていることが示唆される。

底部は堅岩の基盤だが、たがねなどを用いて起こして採取したのが 020 である。蛇紋石が支配的であり、Mg-Fe かんらん石と斜方輝石を確認することができる。

不定方位法による X 線回折チャートのみでは、低角部の粘土を同定するには至らない。候補となる鉱物は、主に、スメクタイト、緑泥石、バーミキュライトである。スメクタイトはさらに、モンモリロナイトなどの 2 八面体タイプか、サポナイトなどの 3 八面体タイプかを区別することも重要である。これらの粘土鉱物の同定には、エチレングリコール置換などによる前処理を施した試料に対して定方位法による測定などを行う必要がある。

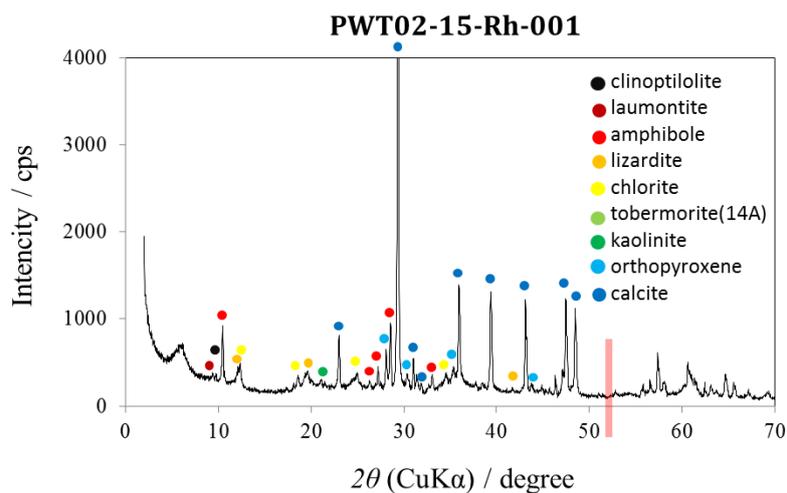
表 2.6.4-18 トレンチ 2 の試料の X 線回折による鉱物同定結果 (その 1 : Rh 及び C シリーズ)

試料名	粘土鉱物			沸石		角閃石	輝石	かんらん石	蛇紋石	カルシウムシリケート 水和鉱物	炭酸塩鉱物
	スメクタイト	緑泥石	カオリナイト	斜プチロル沸石、 輝沸石	濁沸石	-	斜方輝石	Mg-Fe かんらん石	リザーダイト	14Å トバモライト	方解石
	Smectite	Chlorite	Kaolinite	Clinoptilolite, heulandite	Laumontite	Amphibole	Orthopyroxene	Mg-Fe Olivine	Lizardite	14Å Tobermorite	Calcite
PWT02-15-Rh-	001	△	△	△	△	△	○	△		△	◎
	002	△	△	△	△	△	○	△		△	◎
	003	△	△	△	△	△	○	△		△	◎
	004	○	△	△	△	△	○	△		△	◎
	005	○	△	△	△	△	○	△		△	◎
	006	○	△	△	△	△	○	△		△	○
	007	○	△	△		△	△	△		○	△
	008	○	△	△		△	△	△		○	△
	009	○	△	△		△	○	△		○	○
	010	○	△	△		△	○	△		○	○
	011	○	△	△		△	△	△		○	○
	012	○	△	△		△	△	△		○	△
	013	○	△	△		△	○	△		△	△
	014	○	△	△		△	○	△		△	○
	015	○	△	△		△	○	△		△	○
	016	○	△	△		△	△	△		○	△
	018	○	△	△		△	△	△		○	△
	019	○	△	△		△	△	△		○	○
	020	△	△			△		○	△	◎	
	PWT02B-15-	C1-001	○	△	△	△	△	△	△		○
C1-002		○	△	△		△	△	△		○	△
C2-0		○	△			△	△	△		○	○
C2-1-001		○	△			△	△	△		○	◎
C2-1-002		○	△			△	△	△		○	◎
C2-2-001		○	△			△	△	△		○	◎
C2-2-002		○	△			△	△	△		○	◎

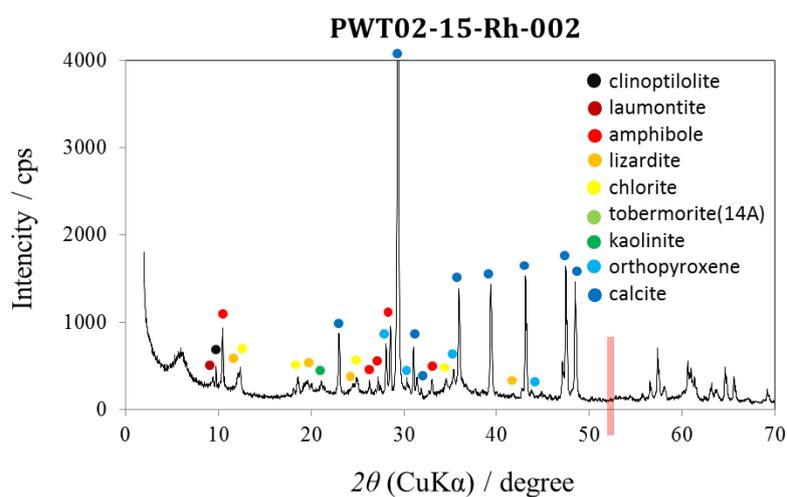
表 2.6.4-19 トレンチ 2 の試料の X 線回折による鉱物同定結果 (その 1 : HU シリーズ)

試料名	粘土鉱物			角閃石	輝石	かんらん石	蛇紋石	滑石	水滑石	磁鉄鉱	カルシウムシリケート 水和鉱物	炭酸塩鉱物
	スメクタイト	緑泥石	カオリナイト	-	単斜輝石	Mg-Fe かんらん石	リザーダイト	タルク	ブルーサイト	マグネタイト	14Å トバモライト	方解石
	Smectite	Chlorite	Kaolinite	Amphibole	Clinopyroxene	Mg-Fe Olivine	Lizardite	Talc	Brucite	Magnetite	14Å Tobermorite	Calcite
PWT02-15-HU-	018											◎
	017											◎
	016											◎
	015											◎
	014											◎
	013											◎
	012											◎
	011											◎
	010											◎
	009											◎
	008	○	△	△				○	△	△		△
	007	△	△	△				△	△			◎
	006	△	△	△				△	△			◎
	005	○	△	△				○	△	△		◎
	004	○	△	△		△		○	△	○	○	△
	003	○	△	△				○	△	△		◎
	002	○	△	△		△		○	△	○	△	△
001	○	△	△		△		○	△	○	△	△	

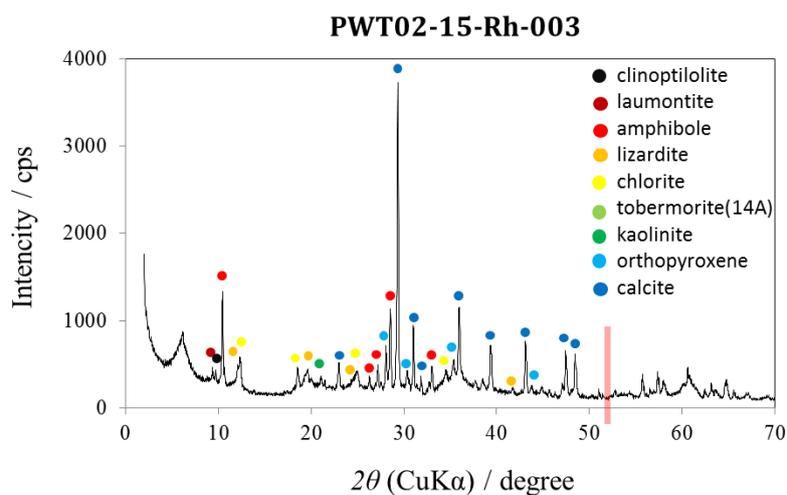
※HU シリーズは Rh シリーズとは逆にトレンチ底部の試料から番号付けしているため、PWT02-15-HU-001 が最深部の試料



☒ 2.6.4-33 PWT02-15-Rh-001 の XRD チャート



☒ 2.6.4-34 PWT02-15-Rh-002 の XRD チャート



☒ 2.6.4-35 PWT02-15-Rh-003 の XRD チャート

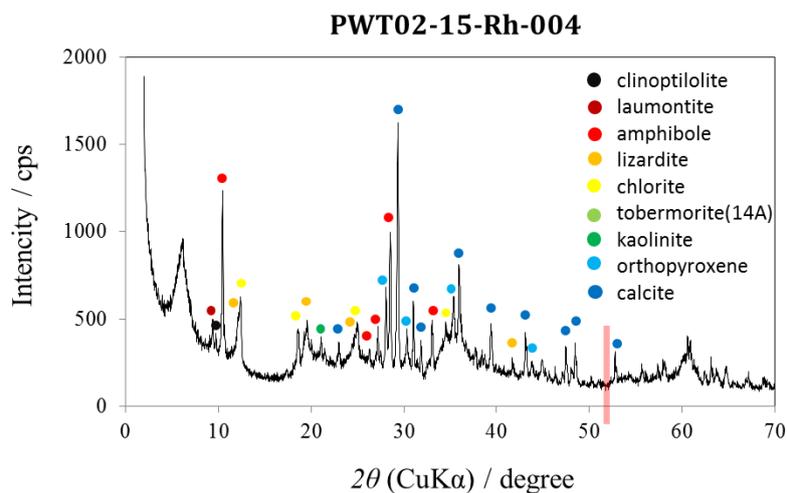


図 2.6.4-36 PWT02-15-Rh-004 の XRD チャート

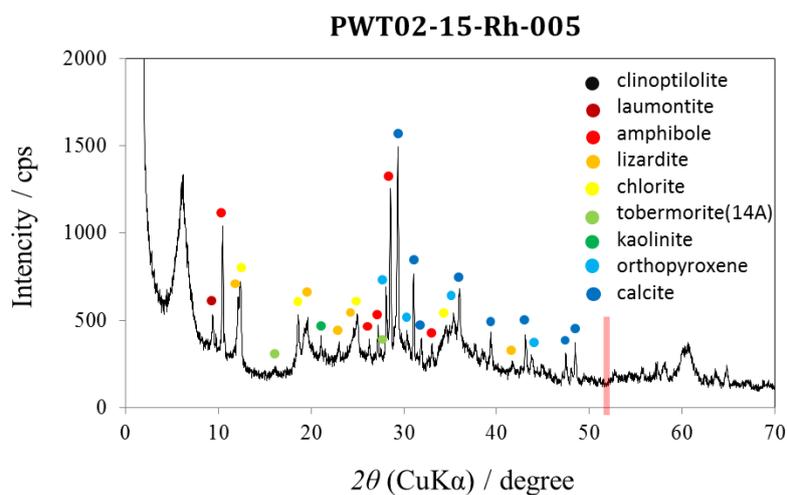


図 2.6.4-37 PWT02-15-Rh-005 の XRD チャート

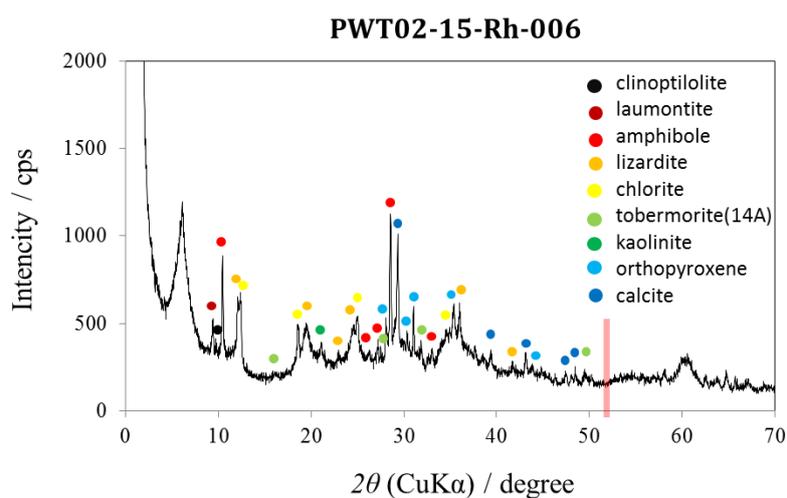
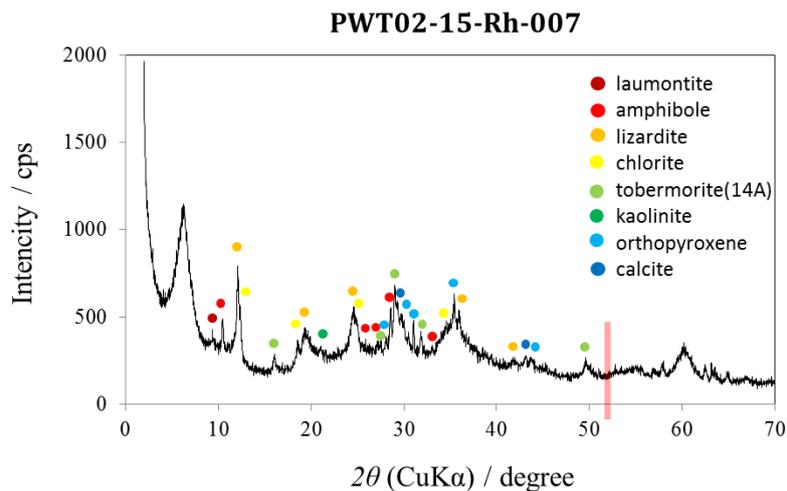
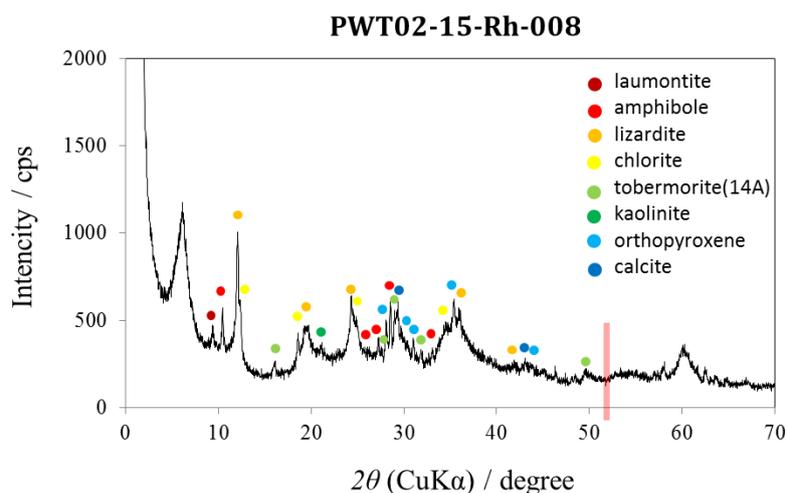


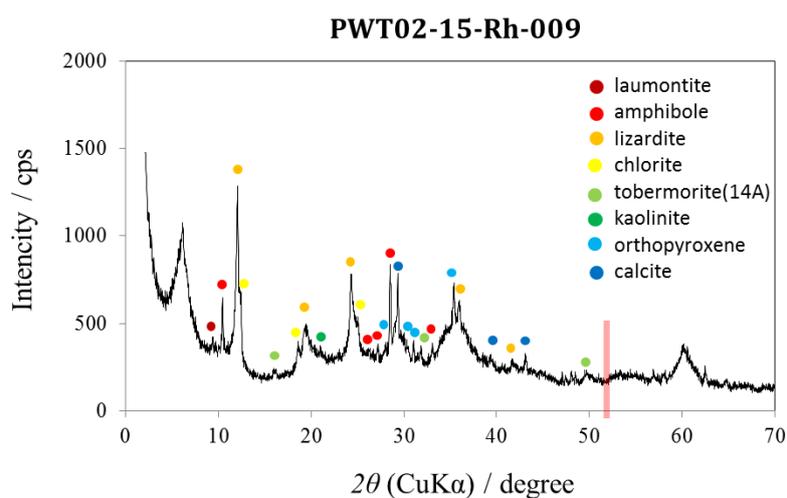
図 2.6.4-38 PWT02-15-Rh-006 の XRD チャート



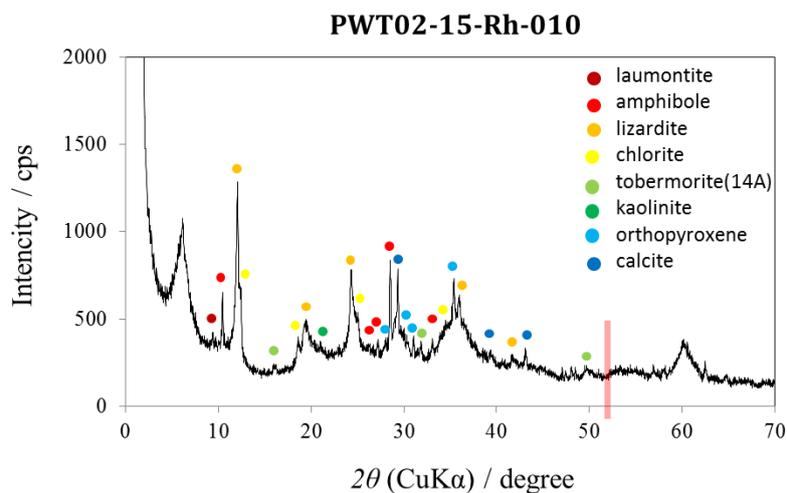
☒ 2.6.4-39 PWT02-15-Rh-007 の XRD チャート



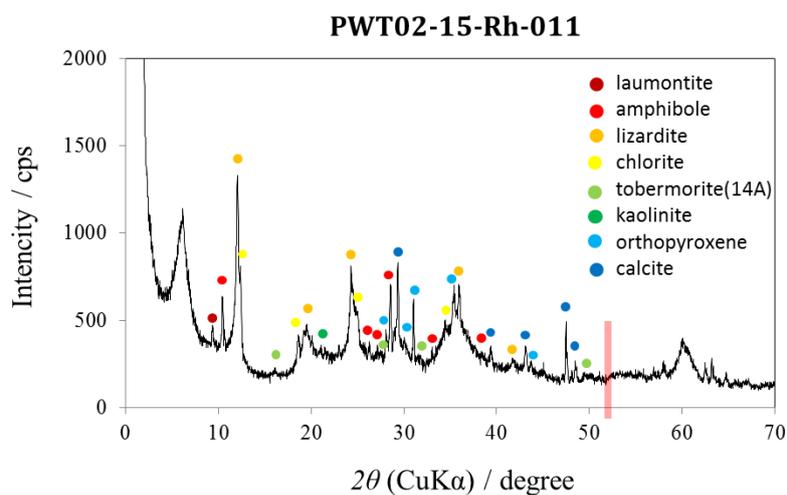
☒ 2.6.4-40 PWT02-15-Rh-008 の XRD チャート



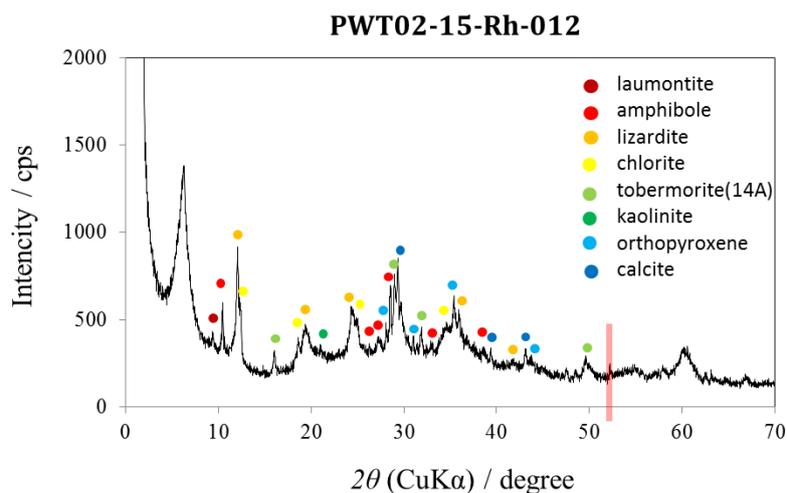
☒ 2.6.4-41 PWT02-15-Rh-009 の XRD チャート



☒ 2.6.4-42 PWT02-15-Rh-010 の XRD チャート



☒ 2.6.4-43 PWT02-15-Rh-011 の XRD チャート



☒ 2.6.4-44 PWT02-15-Rh-012 の XRD チャート

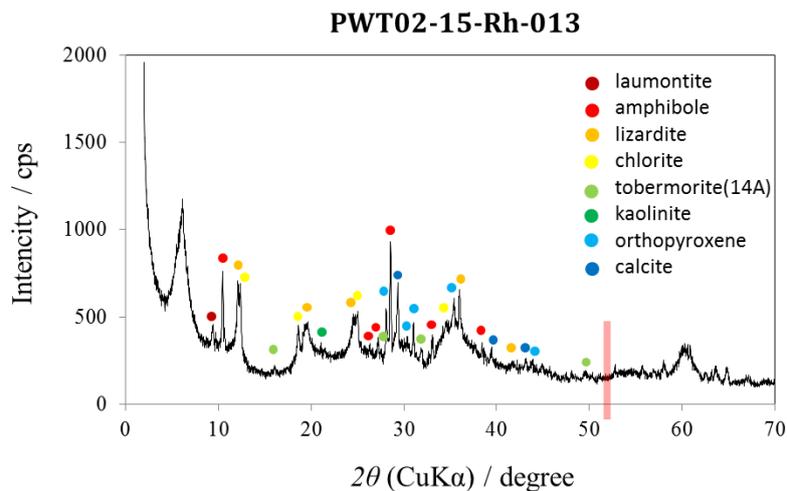


図 2.6.4-45 PWT02-15-Rh-013 の XRD チャート

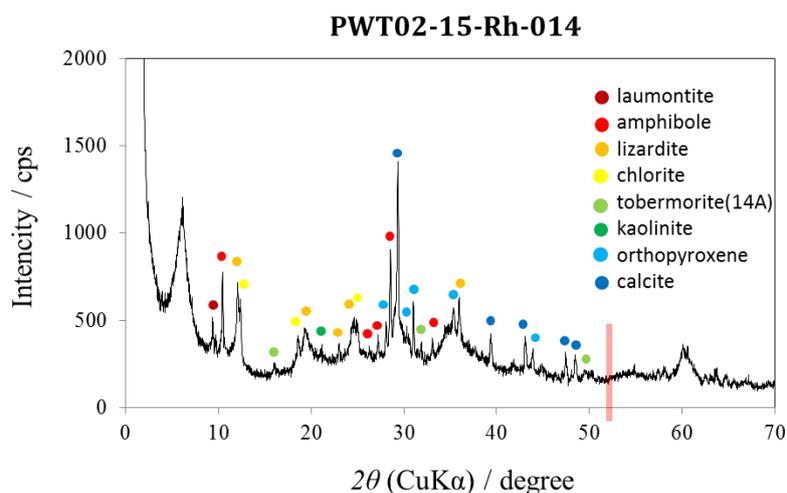


図 2.6.4-46 PWT02-15-Rh-014 の XRD チャート

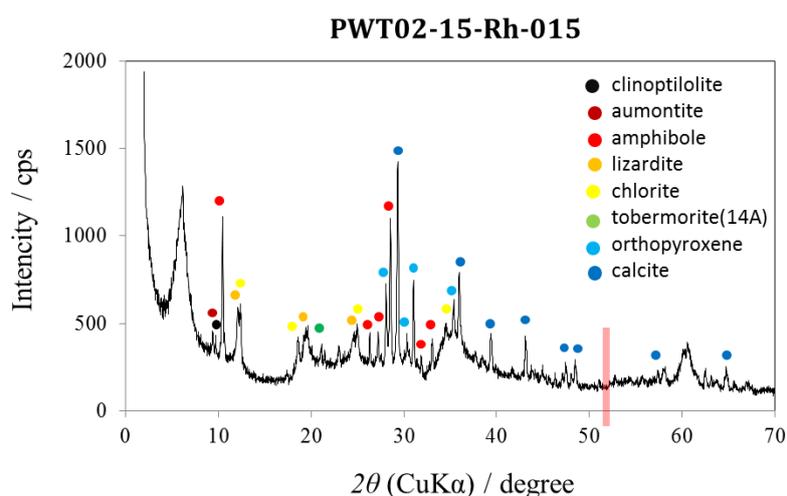
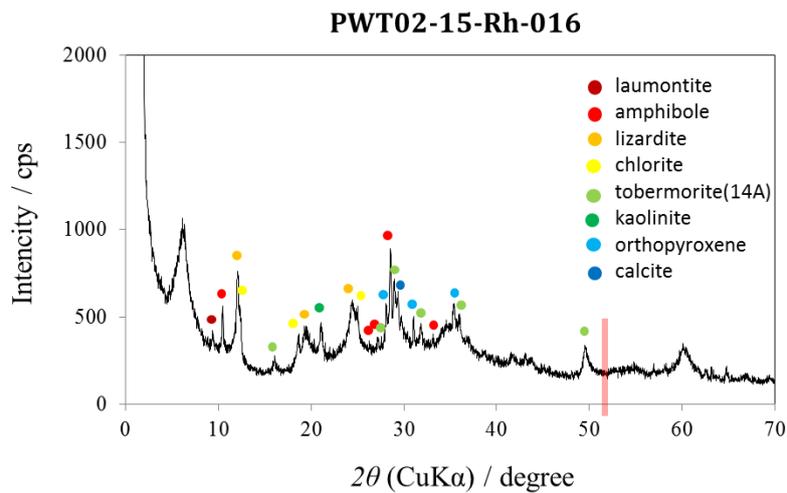
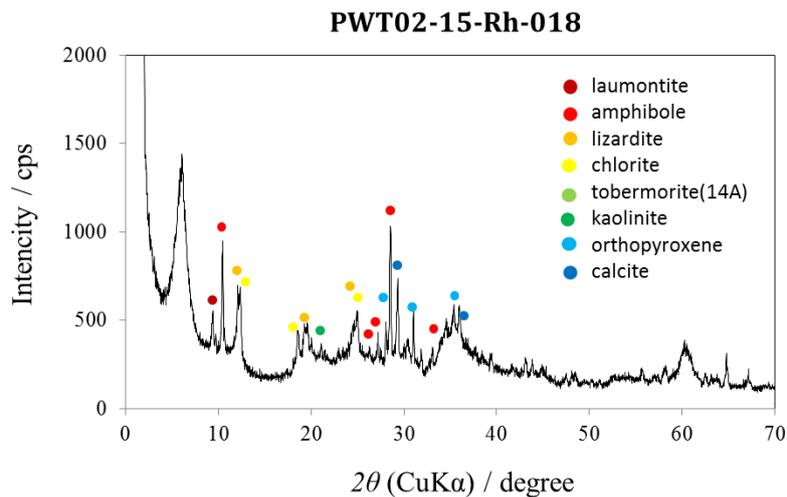


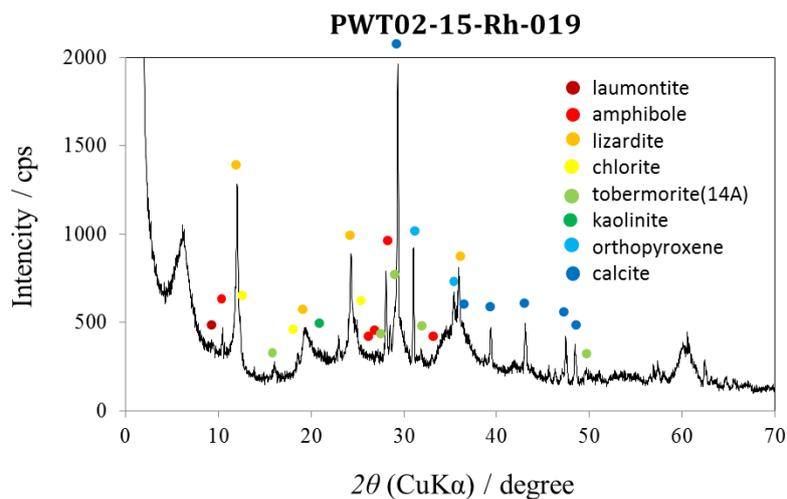
図 2.6.4-47 PWT02-15-Rh-015 の XRD チャート



☒ 2.6.4-48 PWT02-15-Rh-016 の XRD チャート



☒ 2.6.4-49 PWT02-15-Rh-018 の XRD チャート



☒ 2.6.4-50 PWT02-15-Rh-019 の XRD チャート

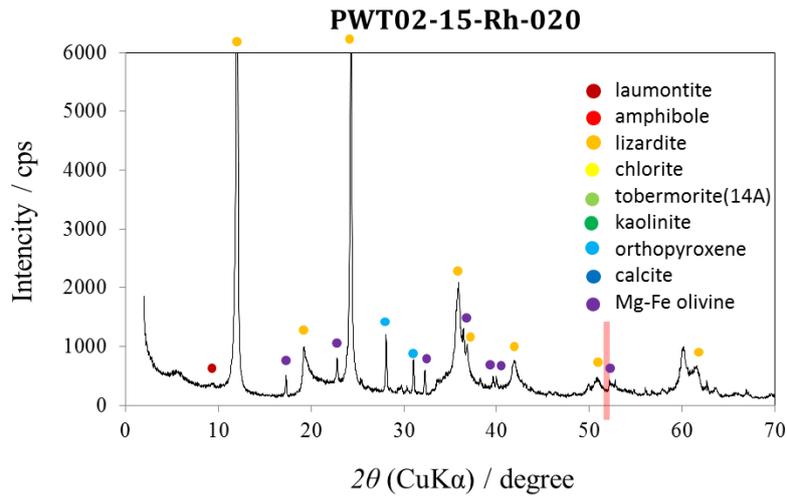


図 2.6.4-51 PWT02-15-Rh-020 の XRD チャート

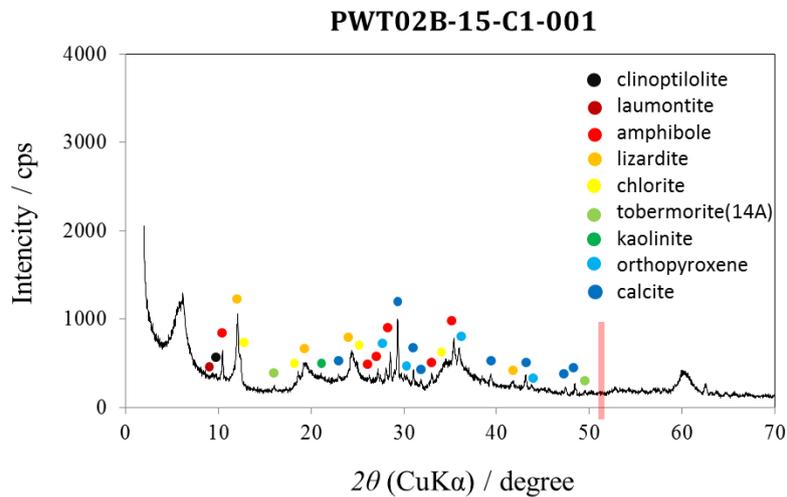


図 2.6.4-52 PWT02B-15-C1-001 の XRD チャート

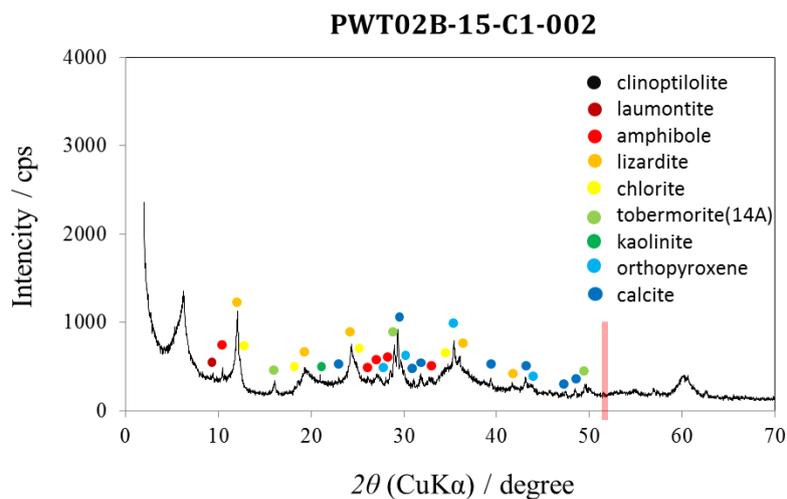


図 2.6.4-53 PWT02B-15-C1-002 の XRD チャート

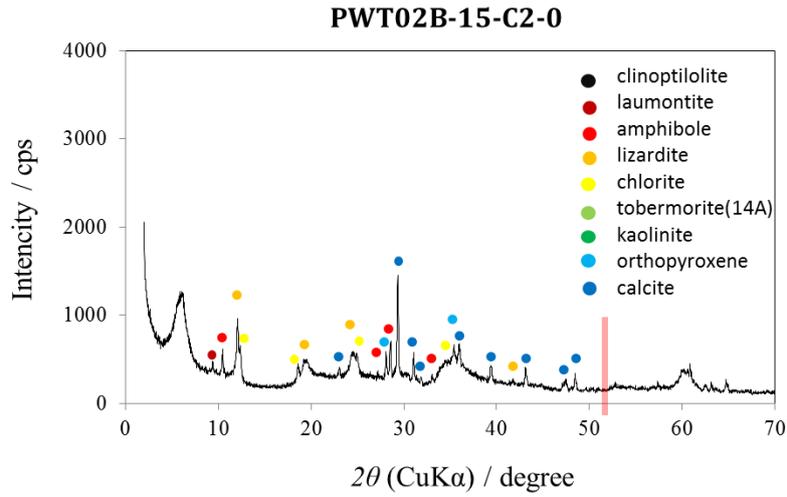


図 2.6.4-54 PWT02B-15-C2-0 の XRD チャート

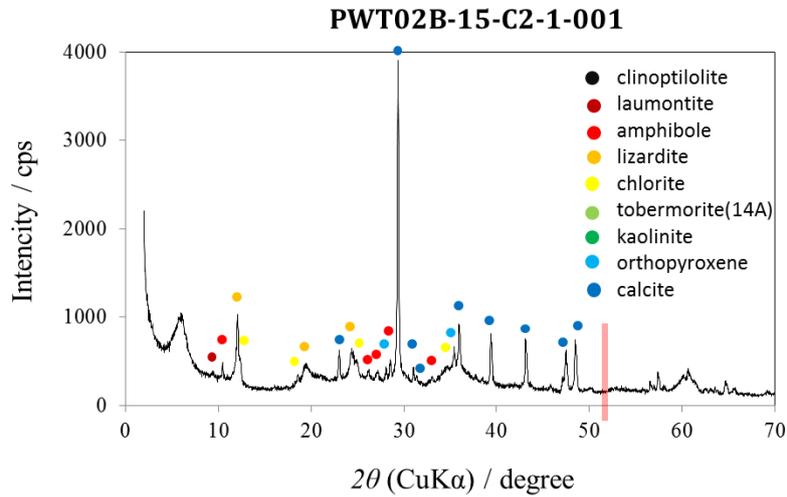


図 2.6.4-55 PWT02B-15-C2-1-001 の XRD チャート

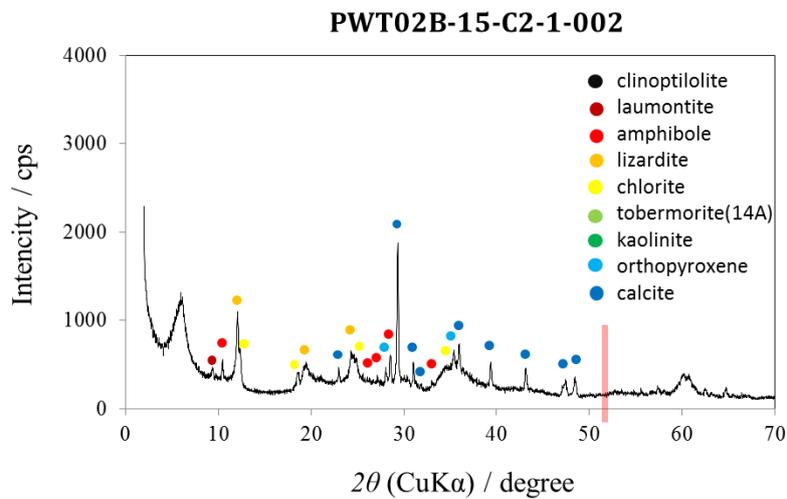


図 2.6.4-56 PWT02B-15-C2-1-002 の XRD チャート

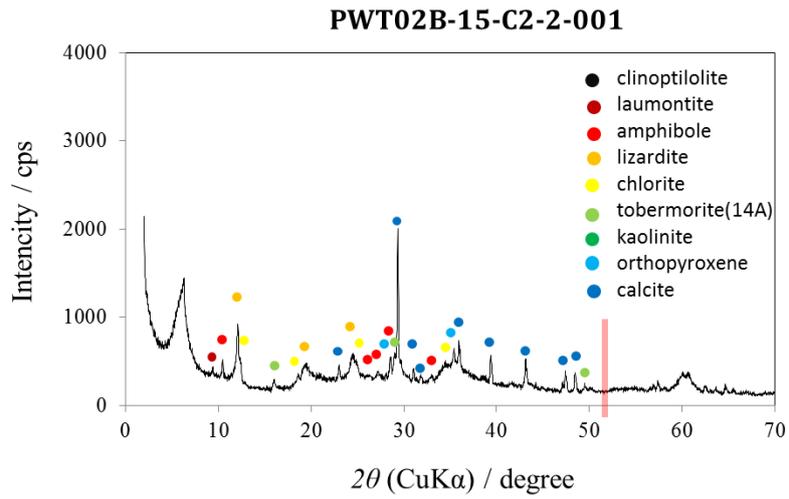


図 2.6.4-57 PWT02B-15-C2-2-001 の XRD チャート

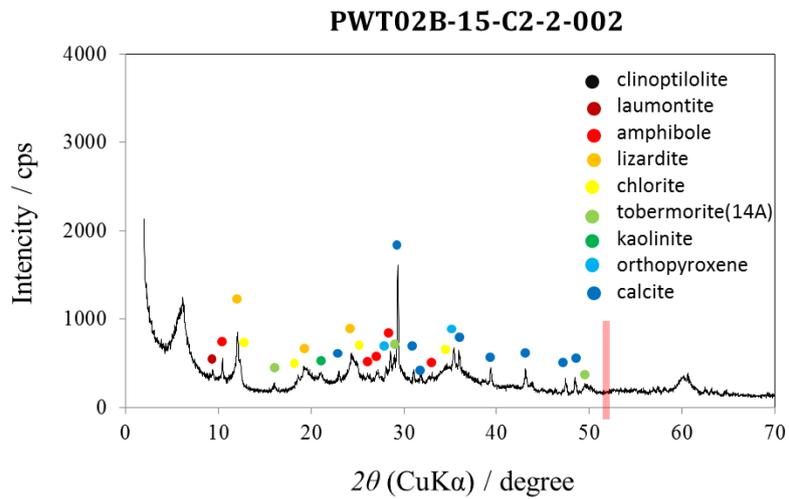
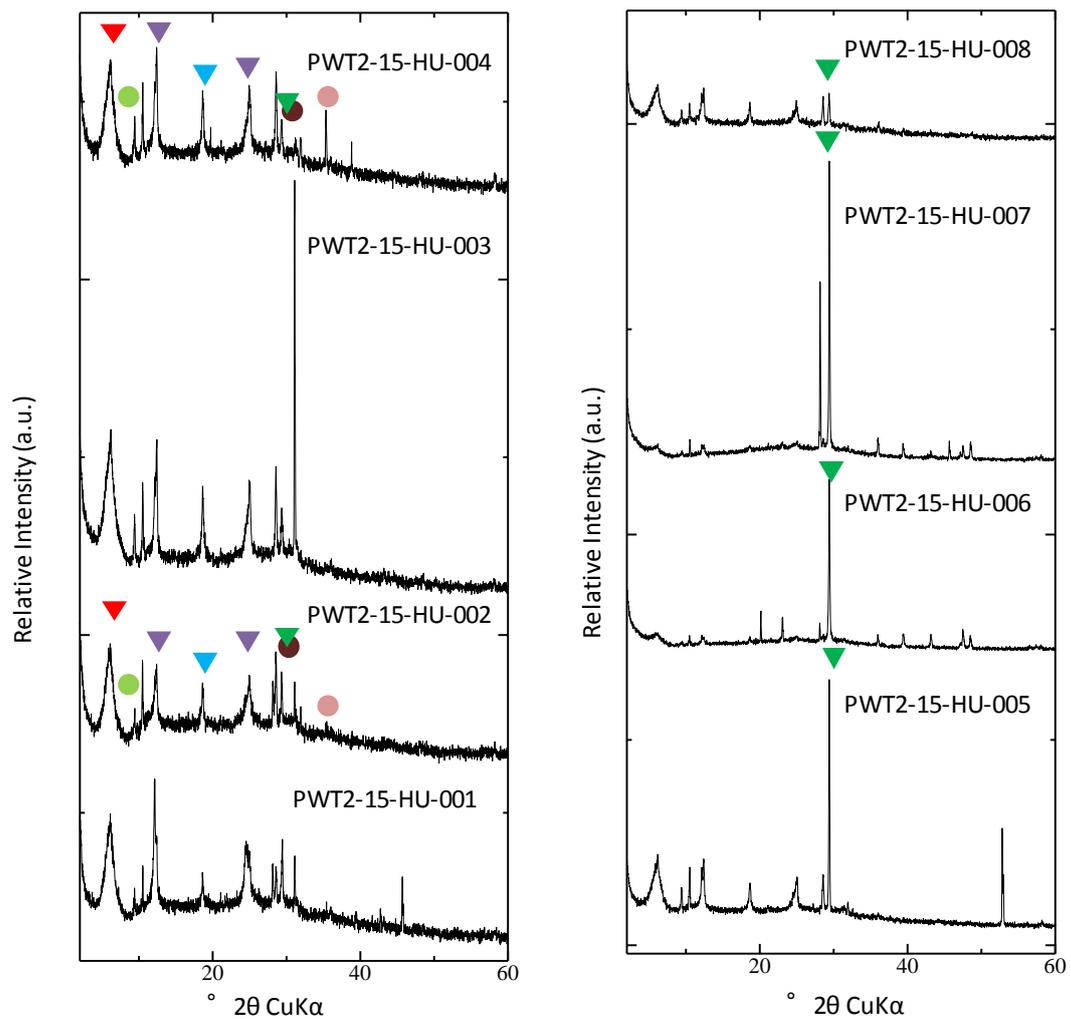


図 2.6.4-58 PWT02B-15-C2-2-001 の XRD チャート



- ▼ 14 Å 鉱物
- ▼ 蛇紋石
- タルク
- 磁鉄鉱
- ▼ カルサイト
- ▼ ブルーサイト
- 透輝石

図 2.6.4-59 PWT02-15-HU-001~008 の XRD チャート

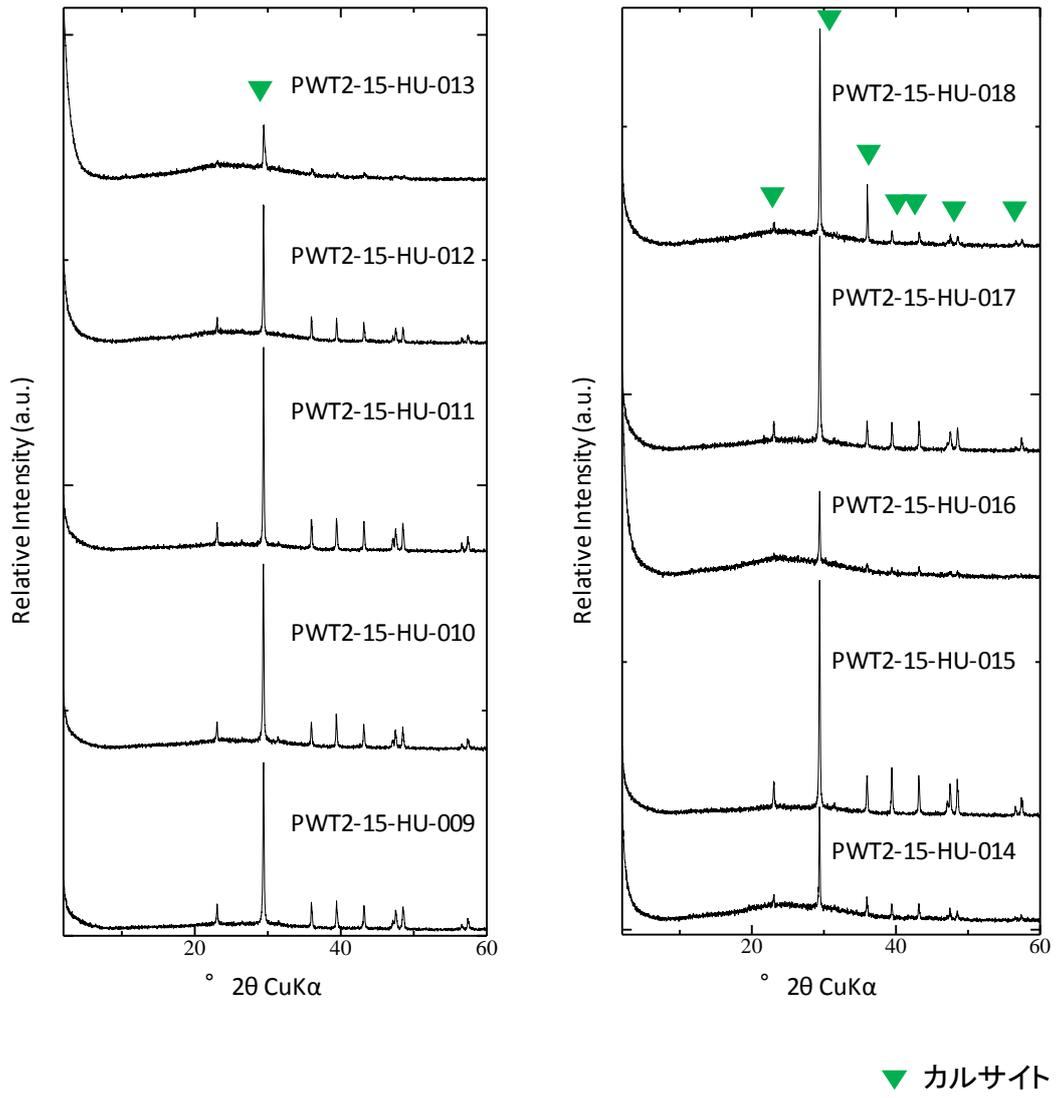


図 2.6.4-60 PWT02-15-HU-009~018 の XRD チャート

4) 定方位法 X 線回折による詳細検討

a. 検討方法

トレンチ 2 の各試料の不定法 XRD 測定結果において、低角部 (14\AA) に強いピークが認められる。このピークは、スメクタイト、緑泥石、バーミキュライト、および、それらの鉱物の複合ピークのいずれかであると考えられる。ここでは、これらの試料にスメクタイトが含まれるかどうかを確認すること、そして、そのスメクタイトがモンモリロナイトなどの 2 八面体型のものか、サポナイトなどの 3 八面体のものか確認することが重要である。

スメクタイトが含まれるかどうかを調べる方法は、エチレングリコール置換処理により底面間隔が大きくなるかどうか確認することである。この測定では、底面を強調しピークシフトを明瞭にするために、通常は定方位試料を用いる。

八面体シートの状態を調べるためには、不定方位法により 006 面の d 値を調べる。

b. エチレングリコール処理

PWT02-15-Rh-015 および PWT02-15-Rh-016 の 2 試料について、定方位法によって測定用の供試体を作製して XRD 測定を行うとともに、この供試体をエチレングリコール (EG) 処理して XRD 測定した結果を図 2.6.4-61~図 2.6.4-66 に示す。

これらの測定結果では、ピークの低角側へのシフトが明確に見られた試料はスメクタイトを含むと考えられる。PWT02B-15-C1-001 と PWT02B-15-C2-1-001 でピークのシフトが顕著でないのは電荷の影響があるためだと考えられる。一方、PWT02B-15-C2-0 や PWT02B-15-C2-2-001 では EG 処理後のピークが 2 つもつ形状が顕著になる。これらの試料ではスメクタイトに加え緑泥石の混合が考えられる。

c. 006 面の観察

2 八面体シートの場合、006 面の d 値は $1.47\sim 1.5\text{\AA}$ であり、CuK α 線の場合、その回折によるピーク位置 (2θ) は $62^\circ\sim 64^\circ$ 程度である。3 八面体シートの場合は 1.5\AA より大きい d 値を示し、そのピーク位置は $59^\circ\sim 61^\circ$ 程度である。図 2.6.4-67~図 2.6.4-67 にトレンチ 2 のコア試料について 006 面の観察のための不定方位 XRD 測定 $2\theta=50^\circ\sim 70^\circ$ の結果を示す。これらの試料を含めトレンチ 2 のいずれの試料についても 60° 程度のピークが卓越しており、 $62^\circ\sim 64^\circ$ 付近のピークは見られなかった。このことから、トレンチ 2 の試料に含まれる粘土鉱物は 3 八面体型であり、スメクタイトはサポナイトであることがわかる。

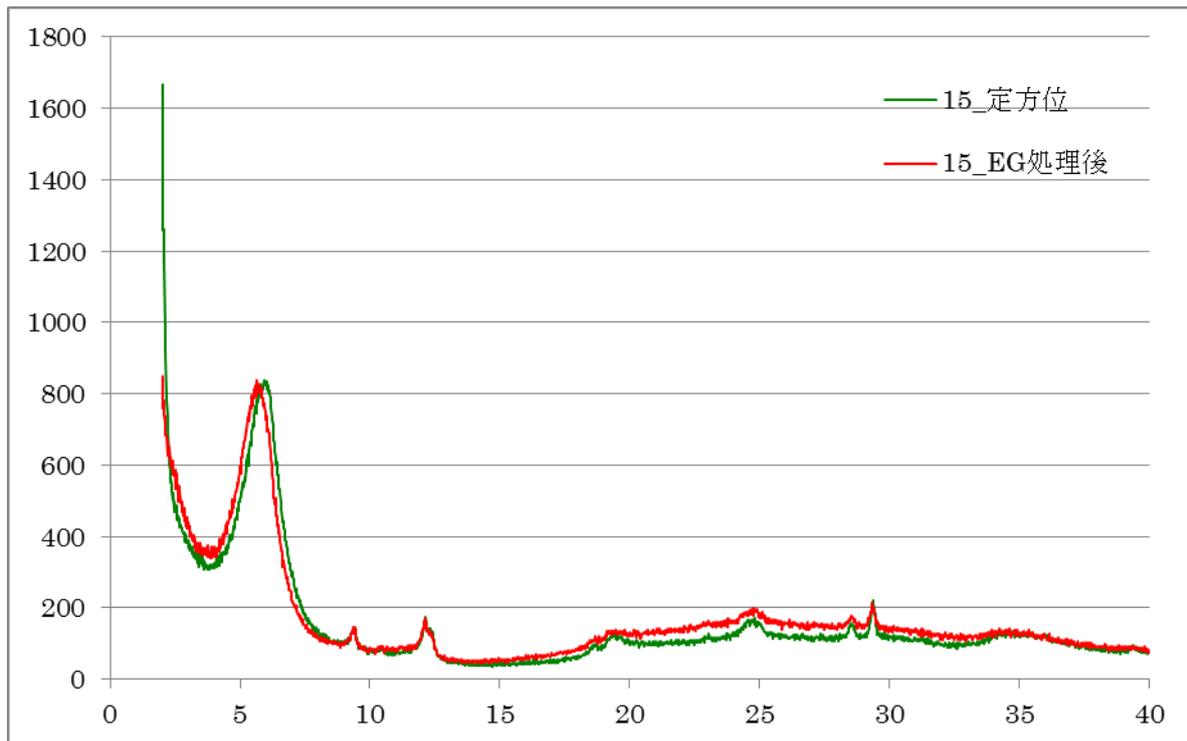


図 2.6.4-61 PWT02-15-Rh-015 の定方位測定および EG 処理試料の定方位測定

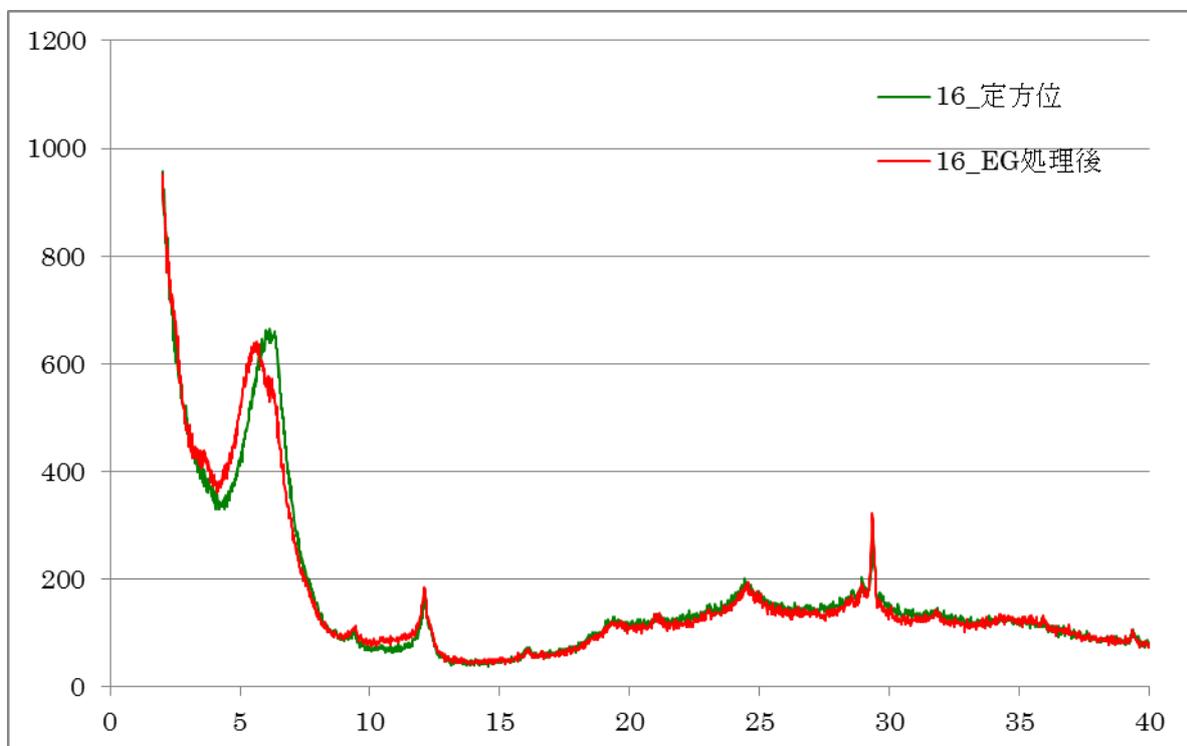


図 2.6.4-62 PWT02-15-Rh-016 の定方位測定および EG 処理試料の定方位測定

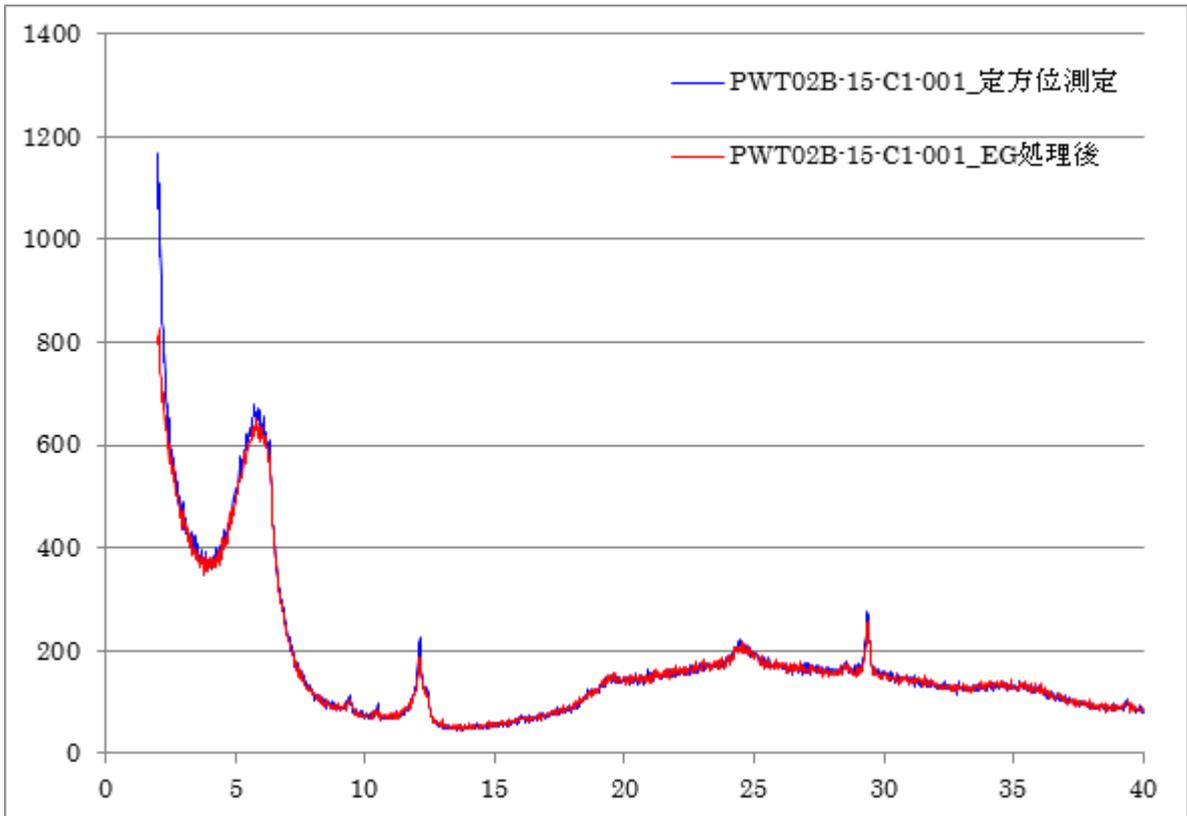


図 2.6.4-63 PWT02B-15-C1-001 の定方位測定および EG 処理試料の定方位測定

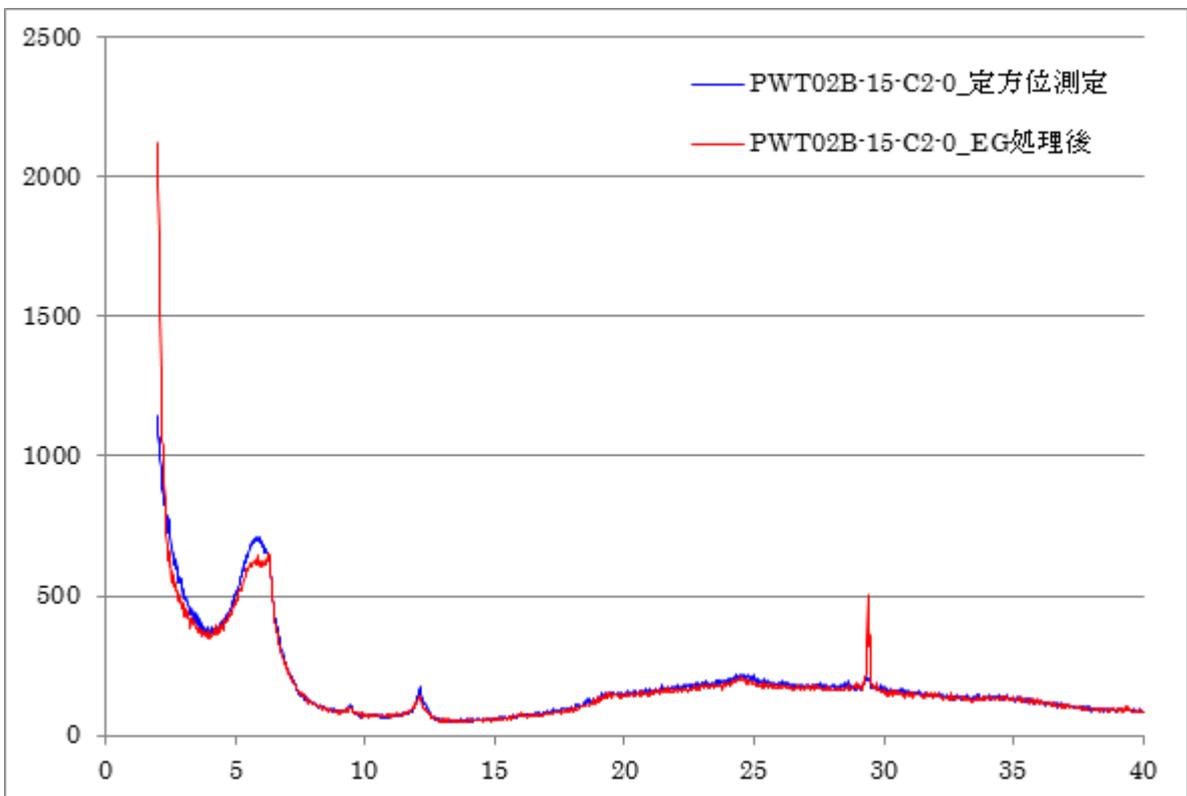


図 2.6.4-64 PWT02B-15-C2-0 の定方位測定および EG 処理試料の定方位測定

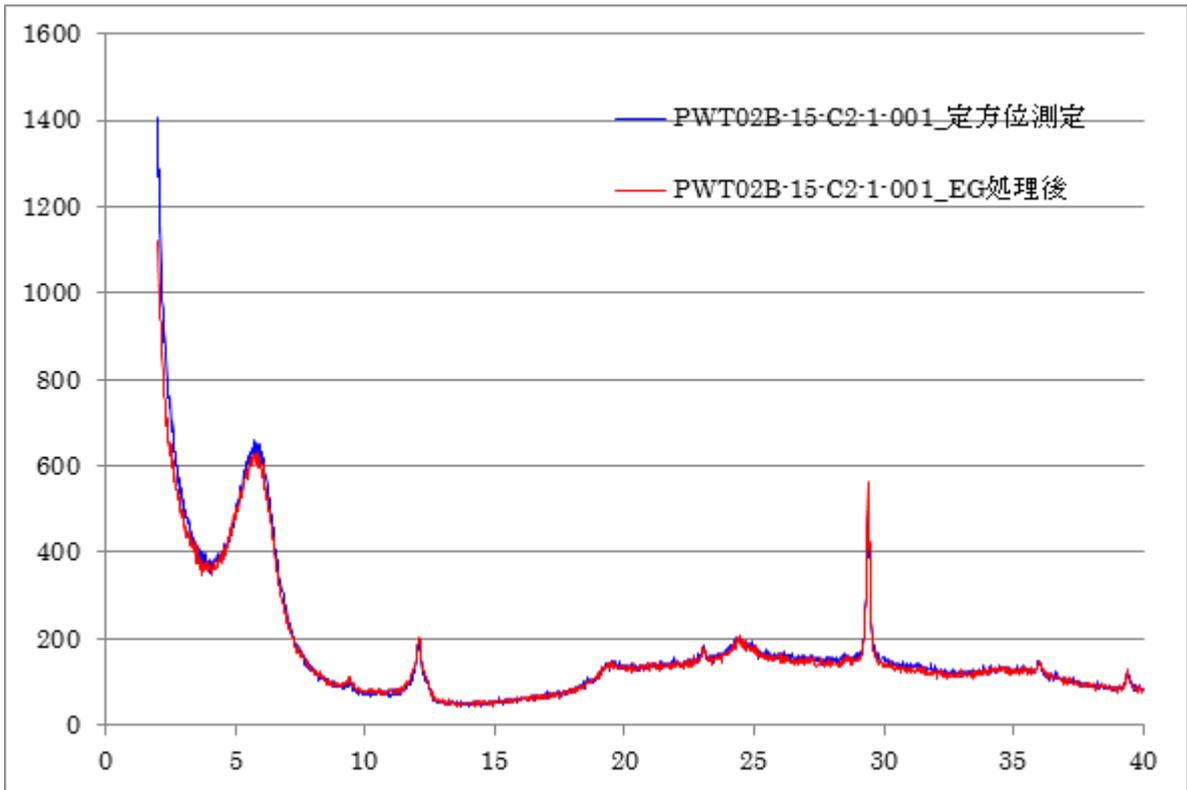


図 2.6.4-65 PWT02B-15-C2-1-001 の定方位測定および EG 処理試料の定方位測定

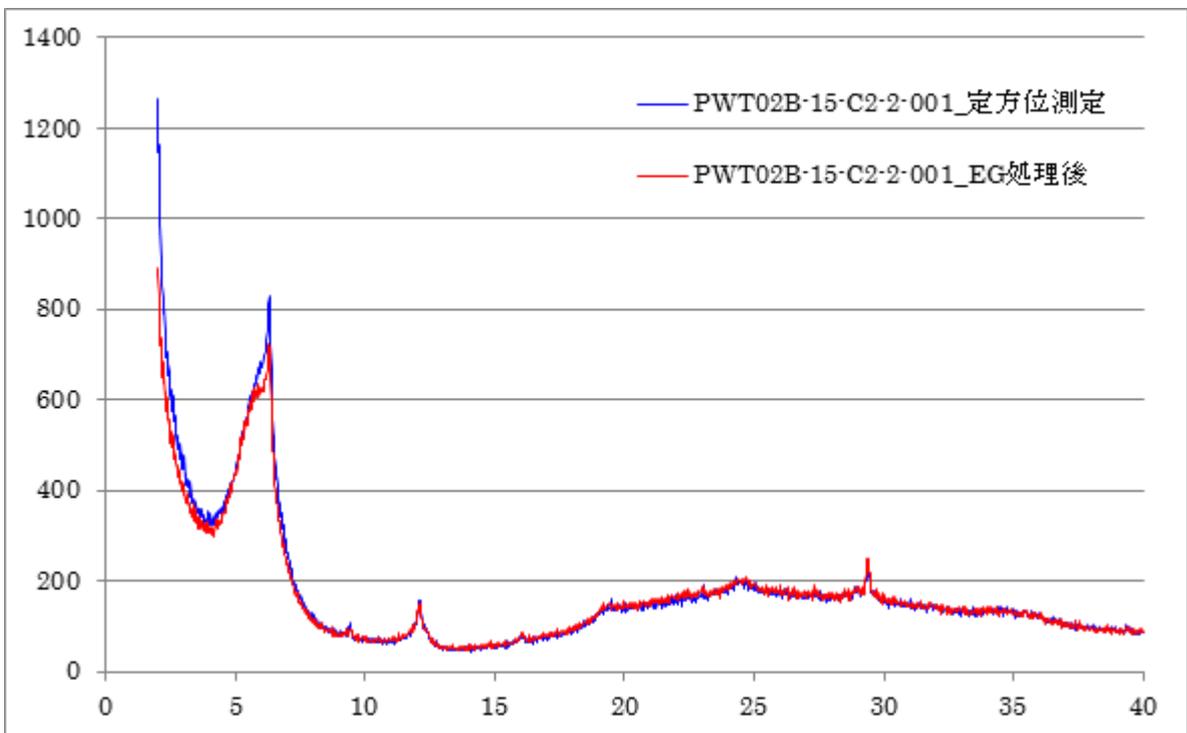


図 2.6.4-66 PWT02B-15-C2-2-001 の定方位測定および EG 処理試料の定方位測定

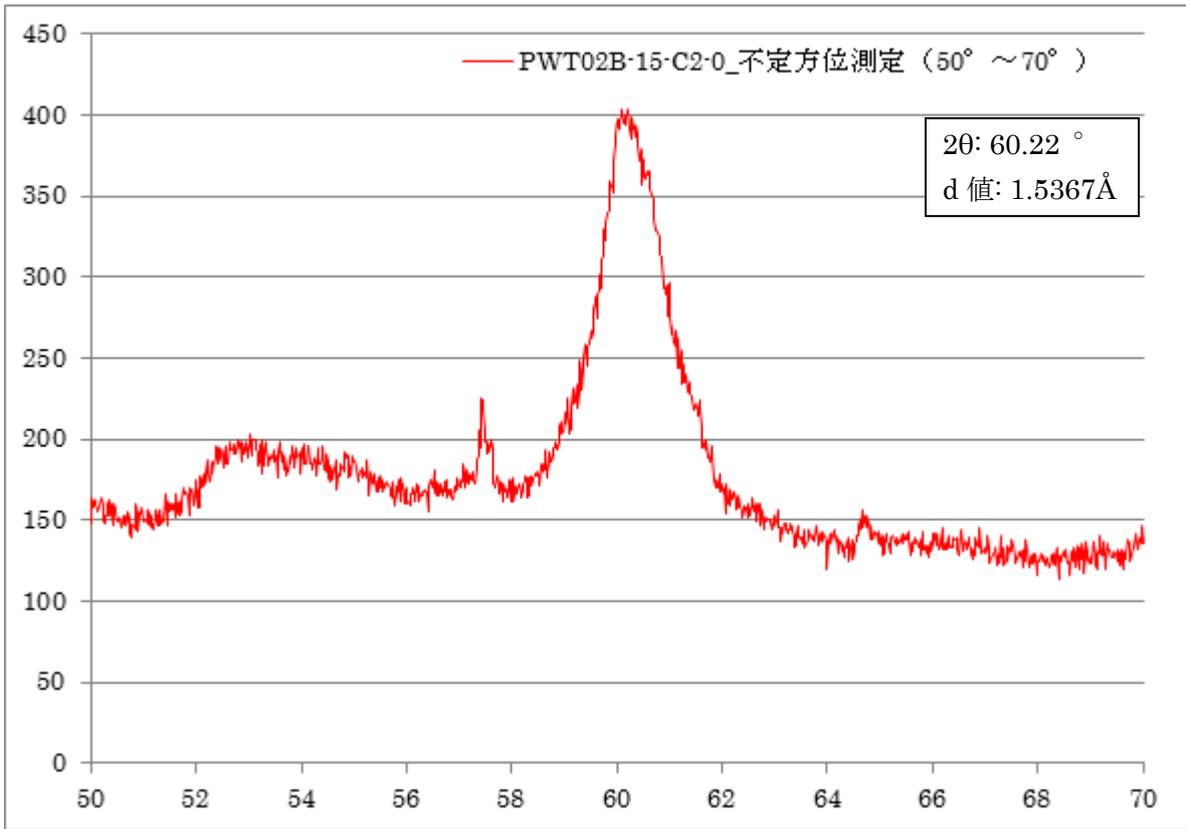


図 2.6.4-67 PWT02B-15-C2-0 の不定方位 XRD 測定による 060 面の観察

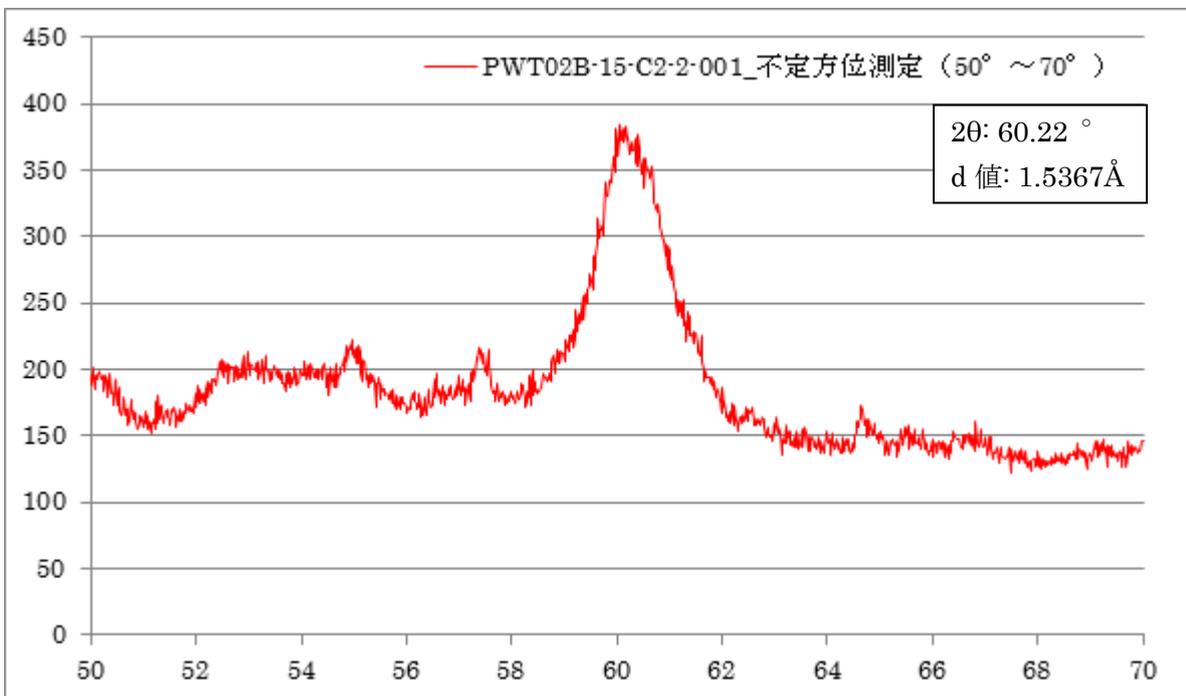


図 2.6.4-68 PWT02B-15-C2-2-001 の不定方位 XRD 測定による 060 面の観察

(3) XRF (蛍光 X 線分析) による全岩化学分析

1) トレンチ 1 の試料の全岩化学分析結果

PWT01-15-Rh-001~024 の XRF 分析による定量結果を表 2.6.4-20 から表 2.6.4-23 に示す。表の空欄は、当該元素が検出されないことを示す。測定結果を棒グラフにプロットしたものを図 2.6.4-69 に、また、CO₂ の含有率を控除して百分率を求めたものを図 2.6.4-70 に示す。

この測定結果からトレンチ 1 の全 24 試料の主成分は方解石 (または霞石) であると考えられ、わずかにマグネシウム含有鉱物を含むことがわかる。XRD 測定結果から、このマグネシウム含有鉱物は主に蛇紋石であることがわかる。

また、トレンチ 1 試料のそれぞれにおける含有金属元素の質量含有率 (酸化物) の SiO₂ との比をプロットした図を、図 2.6.4-71 から図 2.6.4-78 に示す。MgO のみ、SiO₂ との有意な相関が認められた。

表 2.6.4-20 PWT01-15-Rh-001~007 の XRF 分析による定量結果 (酸化物表記、CO₂ 含む)

試料名	PWT01-15-Rh-						
	001	002	003	004	005	006	007
CO ₂	37.4342	37.0309	37.6209	41.86	36.3885	60.41	31.8594
CaO	60.6574	62.0501	61.4937	53.7046	59.4625	34.6192	53.0232
SiO ₂	0.2814	0.0419	0.0426	1.0876	0.9714	1.0596	4.5098
Fe ₂ O ₃	0.0634	0.0291	0.0386	0.6703	0.1413	1.1393	0.4676
MgO	1.3905	0.6412	0.6088	2.3689	2.8195	2.0994	9.9131
Al ₂ O ₃	0.018	0.009	0.0065	0.051	0.0142	0.2063	0.0307
Cr ₂ O ₃	0.0121	0.0132	0.0123	0.0236	0.0139	0.0316	0.018
NiO	0.0043	0.0028	0.0036	0.0194	0.0067	0.011	0.0198
SO ₃	0.0291	0.0277	0.0266	0.0353	0.0292	0.1322	0.0344
MnO				0.0184	0.0048	0.0055	0.0152
Na ₂ O	0.0387	0.0627	0.0673	0.078	0.0723	0.1415	0.0417
TiO ₂						0.0421	
Co ₂ O ₃				0.0041	0.0015	0.0034	0.0024
SrO	0.0626	0.0683	0.0666	0.0581	0.0658	0.0367	0.0562
Cl	0.0021	0.0027	0.0047	0.0046	0.0042	0.033	0.0049
K ₂ O						0.0051	
In ₂ O ₃		0.0177				0.0119	
P ₂ O ₅	0.0038	0.0025	0.0029	0.0129		0.0075	
ZnO	0.0013		0.0027	0.0011	0.0011	0.0009	0.0013
CuO	0.001		0.0022	0.0015	0.0013	0.0015	0.0016
Br					0.0009	0.0027	0.0008
Ga ₂ O ₃				0.0005	0.0009		

単位：%

表 2.6.4-21 PWT01-15-Rh-008～014 の XRF 分析による定量結果 (酸化物表記、CO₂ 含む)

試料名	PWT01-15-Rh-						
	008	009	010	011	012	013	014
CO ₂	54.4133	42.6668	36.6111	39.8201	34.7545	33.2716	33.5738
CaO	43.9271	50.3123	61.399	53.8269	58.2889	56.9163	57.2631
SiO ₂	0.1585	1.6975	0.3906	1.719	1.923	2.8344	2.4307
Fe ₂ O ₃	0.4815	1.478	0.1514	1.3558	0.5443	0.3678	0.3986
MgO	0.6775	3.1929	1.2236	2.6947	4.0641	6.3053	6.0444
Al ₂ O ₃	0.0341	0.2165	0.0294	0.2134	0.0985	0.0648	0.0557
Cr ₂ O ₃	0.0214	0.0764	0.0131	0.0577	0.0353	0.0266	0.0234
NiO	0.008	0.0751	0.0051	0.0584	0.0392	0.0245	0.0241
SO ₃	0.1188	0.121	0.0336	0.0988	0.0789	0.0604	0.048
MnO	0.0041	0.017	0.0042	0.0177	0.0192	0.0109	0.012
Na ₂ O	0.0769	0.0576	0.0583	0.0524	0.0505	0.0365	0.0407
TiO ₂							
Co ₂ O ₃	0.002	0.0074		0.0065	0.0038	0.0028	0.0034
SrO	0.0414	0.0615	0.0747	0.0615	0.0731	0.0717	0.0734
Cl	0.0129	0.0085	0.003	0.005	0.0043	0.0044	0.0075
K ₂ O							
In ₂ O ₃	0.0139				0.0203		
P ₂ O ₅	0.0038	0.0055		0.0072			
ZnO	0.0012	0.0018	0.0011	0.0018	0.0016		0.0014
CuO	0.0013	0.0019	0.0018	0.0015	0.0007	0.0019	
Br	0.0024	0.0023		0.0016			
Ga ₂ O ₃							

単位：%

表 2.6.4-22 PWT01-15-Rh-015～021 の XRF 分析による定量結果（酸化物表記、CO₂ 含む）

試料名	PWT01-15-Rh-						
	015	016	017	018	019	020	021
CO ₂	37.364	34.0482	35.0651	31.445	39.8884	34.7937	36.3831
CaO	58.8095	56.4582	58.8367	54.9053	53.7928	58.1559	59.238
SiO ₂	0.7549	2.6517	1.4109	4.5394	1.3832	1.8763	0.9193
Fe ₂ O ₃	0.5297	0.6116	0.6289	1.0828	2.7716	0.1408	0.3207
MgO	2.2005	5.9365	3.7382	7.6623	1.5334	4.8123	2.8798
Al ₂ O ₃	0.0819	0.0645	0.0525	0.0897	0.2106	0.0357	0.0368
Cr ₂ O ₃	0.0316	0.0294	0.03	0.0318	0.0888	0.0153	0.0193
NiO	0.0358	0.0244	0.0204	0.0394	0.0737	0.0063	0.0164
SO ₃	0.045	0.0398	0.0355	0.0395	0.0993	0.0386	0.0412
MnO	0.0124	0.0146	0.0148	0.0248	0.0195		0.0127
Na ₂ O	0.0467	0.0416	0.0605	0.0526	0.0363	0.0479	0.0498
TiO ₂					0.0214		
Co ₂ O ₃	0.0035		0.0036	0.0042	0.0114		
SrO	0.077	0.071	0.0829	0.0712	0.0545	0.0718	0.0783
Cl	0.0054	0.0086	0.0106	0.0029	0.0065	0.0025	0.0028
K ₂ O							
In ₂ O ₃							
P ₂ O ₅			0.0044	0.0057			
ZnO			0.0021	0.0021	0.0035	0.0012	
CuO			0.003	0.0014	0.0033	0.0018	0.0017
Br	0.002				0.002		
Ga ₂ O ₃							

単位：%

表 2.6.4-23 PWT01-15-Rh-022～024 の XRF 分析による定量結果（酸化物表記、CO₂ 含む）

試料名	PWT01-15-Rh-		
	022	023	024
CO ₂	41.6972	46.3315	48.2244
CaO	56.0354	48.8813	49.235
SiO ₂	0.3587	1.0492	0.3803
Fe ₂ O ₃	0.3284	1.2614	0.3716
MgO	1.3324	1.7956	1.4961
Al ₂ O ₃	0.0252	0.1443	0.0353
Cr ₂ O ₃	0.0201	0.0871	0.0269
NiO	0.0111	0.0929	0.0075
SO ₃	0.0271	0.1839	0.0584
MnO	0.0094	0.008	
Na ₂ O	0.0524	0.0585	0.0806
TiO ₂		0.0143	
Co ₂ O ₃		0.0084	0.0021
SrO	0.0662	0.0592	0.0574
Cl	0.0031	0.0092	0.0172
K ₂ O			
In ₂ O ₃	0.0181		
P ₂ O ₅	0.0095	0.006	
ZnO	0.0024	0.0033	0.002
CuO	0.0034	0.0032	0.003
Br		0.0027	0.0022
Ga ₂ O ₃			

単位：%

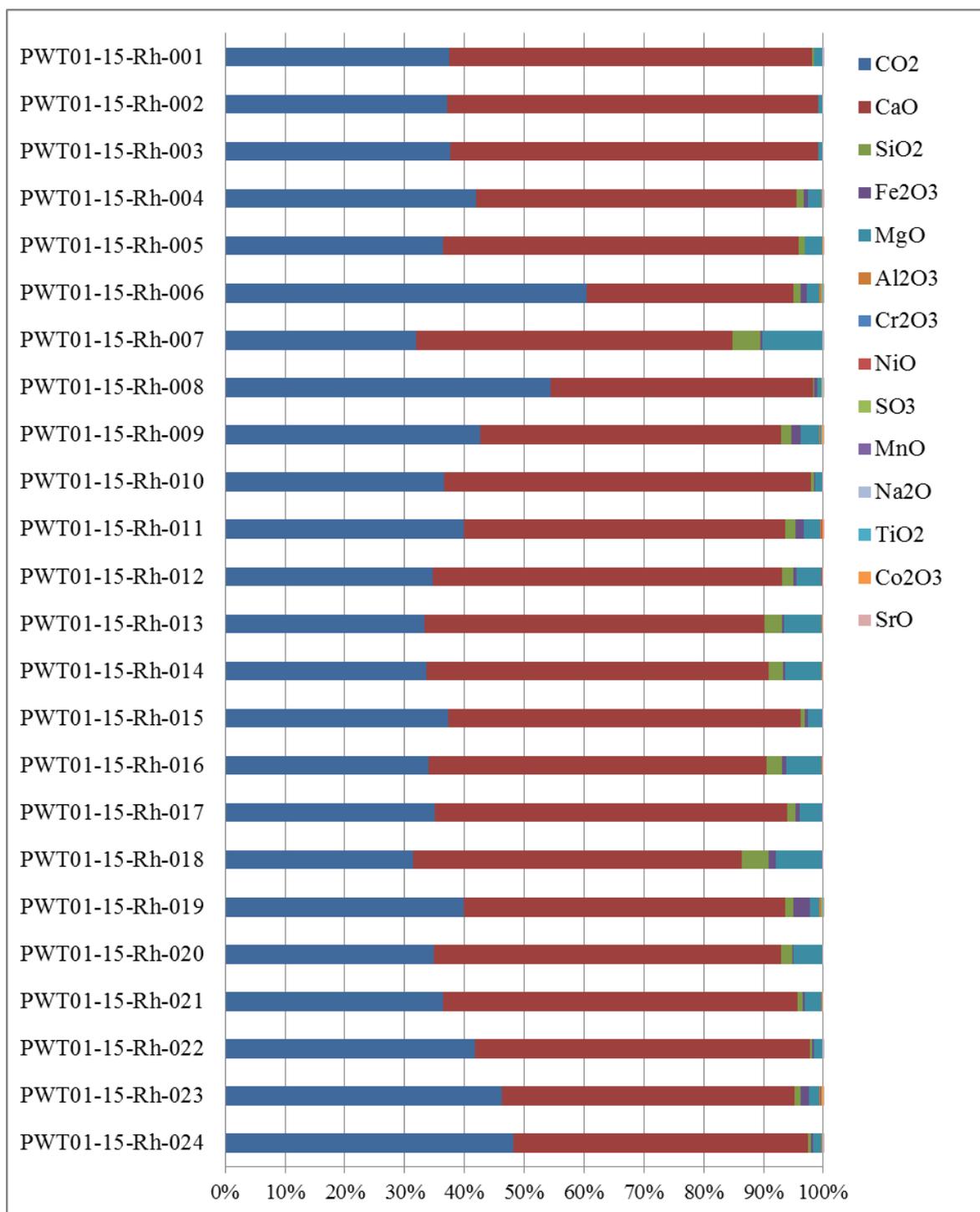


図 2.6.4-69 トレンチ 1 の各試料の XRF 分析結果 (酸化物表記、CO₂を含む)

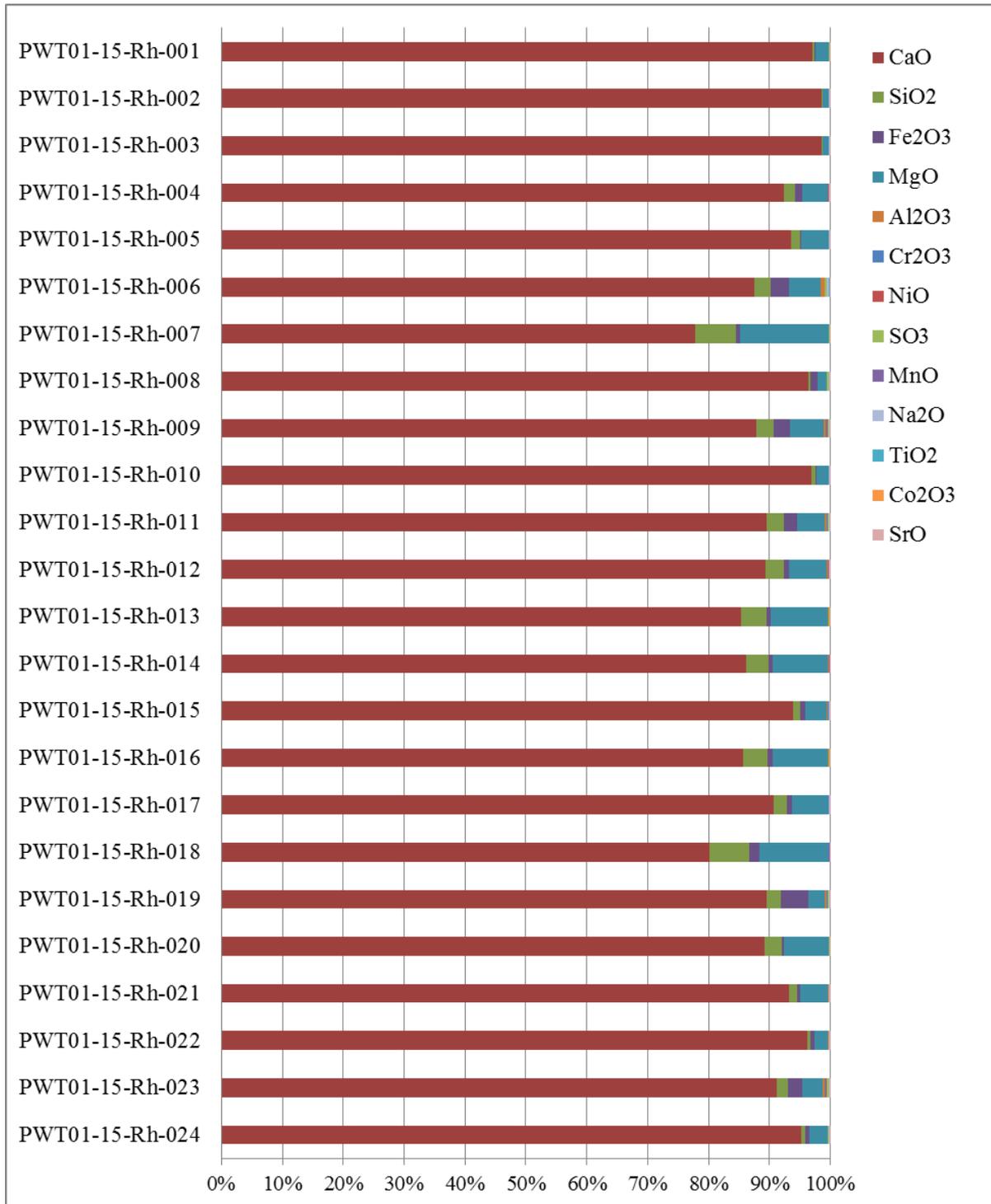


図 2.6.4-70 トレンチ 1 の各試料の XRF 分析結果 (酸化物表記、CO₂ を含まない)

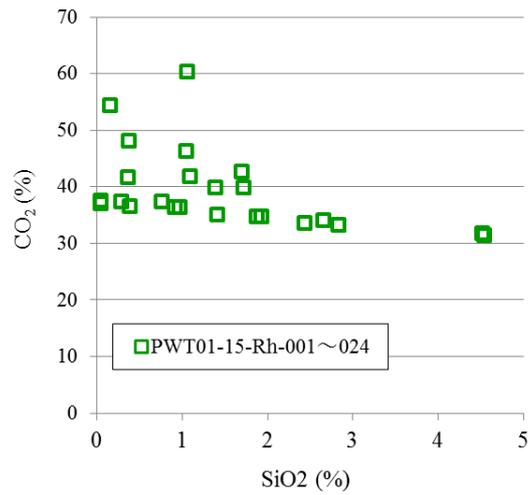


図 2.6.4-71 トレンチ 1 試料の XRF 測定結果による成分相互の相関 (SiO₂-CO₂)

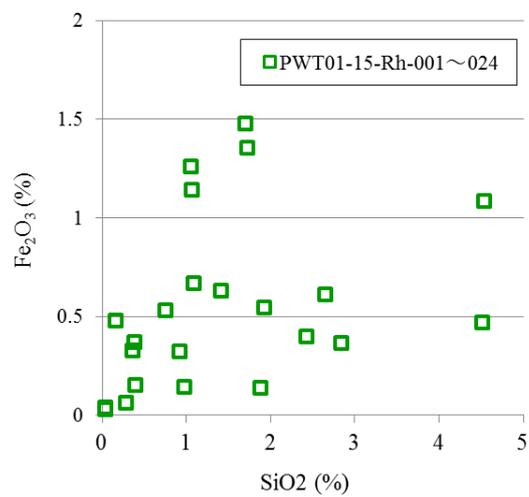


図 2.6.4-72 トレンチ 1 試料の XRF 測定結果による成分相互の相関 (SiO₂-Fe₂O₃)

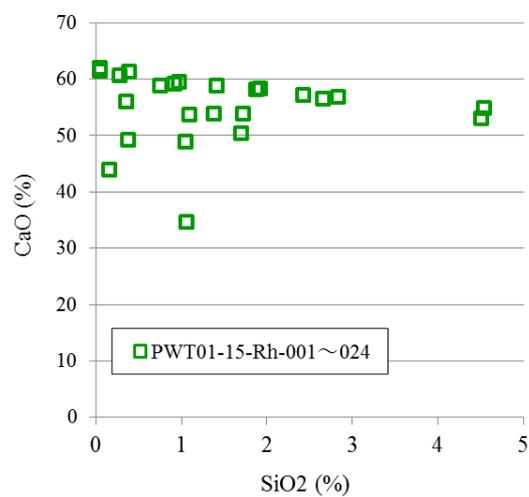


図 2.6.4-73 トレンチ 1 試料の XRF 測定結果による成分相互の相関 (SiO₂-CaO)

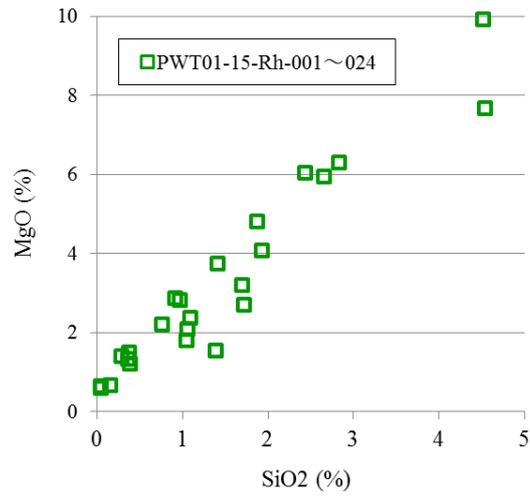


図 2.6.4-74 トレンチ 1 試料の XRF 測定結果による成分相互の相関 (SiO₂-MgO)

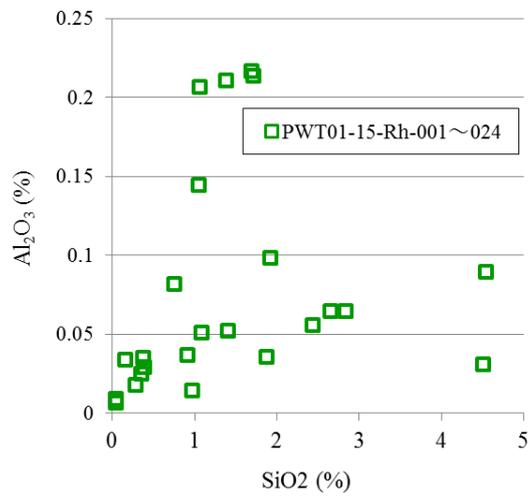


図 2.6.4-75 トレンチ 1 試料の XRF 測定結果による成分相互の相関 (SiO₂-Al₂O₃)

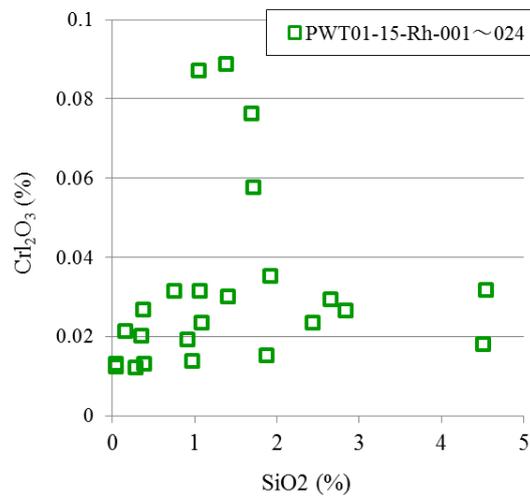


図 2.6.4-76 トレンチ 1 試料の XRF 測定結果による成分相互の相関 (SiO₂-Cr₂O₃)

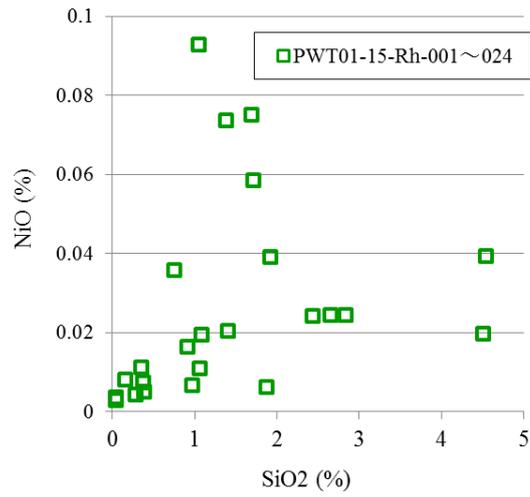


図 2.6.4-77 トレンチ 1 試料の XRF 測定結果による成分相互の相関 (SiO₂-NiO)

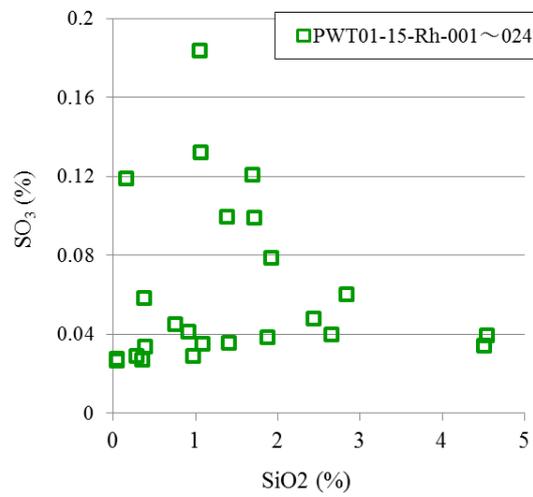


図 2.6.4-78 トレンチ 1 試料の XRF 測定結果による成分相互の相関 (SiO₂-SO₃)

2) トレンチ 2 の試料の全岩化学分析結果

PWT02-15-Rh-001～020 および PWT02B-15-C0～C2 の各試料の XRF 分析による定量結果を表 2.6.4-24 から表 2.6.4-26 に示す。表中のハイフン(－)は、当該元素が検出されないことを示す。測定結果を棒グラフにプロットしたものを図 2.6.4-79 に、また、CO₂ の含有率を控除して百分率を求めたものを図 2.6.4-80 に示す。

上記の測定結果から、トレンチ 2 の試料はアルミニウムの含有率が非常に小さく、逆に鉄およびマグネシウムを多く含むケイ酸塩鉱物が主体であることが示唆される。このことは、XRD 分析の測定結果とよく整合している。

また、トレンチ 2 試料のそれぞれにおける含有金属元素の質量含有率（酸化物）の SiO₂ との比をプロットした図を、図 2.6.4-81 から図 2.6.4-88 に示す。これらの図では、PWT02-15-Rh-001 から-012 までのグループ、-013 から-019 までのグループ、-020、および、ボーリングコアの計 4 つのグループに分けて示した。

表 2.6.4-24 PWT02-15-Rh-001~007 の XRF 分析による定量結果 (酸化物表記、CO₂ 含む)

試料名	PWT02-15-Rh-						
	001	002	003	004	005	006	007
CO ₂	37.312	33.4673	24.5226	20.6127	17.8274	15.3659	12.6032
CaO	21.8586	27.2197	14.2426	8.3224	11.1376	13.4059	14.0312
SiO ₂	15.947	14.8202	24.7483	28.9917	30.981	32.6123	34.1133
Fe ₂ O ₃	13.8501	13.2527	20.2671	25.9485	24.0649	24.0085	25.0115
MgO	6.7739	7.2568	10.067	9.8089	9.4682	9.2701	10.0207
Al ₂ O ₃	2.0649	1.7955	3.2048	3.5186	3.7459	2.9012	1.8168
Cr ₂ O ₃	1.2469	1.3751	1.8148	1.7003	1.5198	1.1794	1.0287
NiO	0.2799	0.2744	0.4355	0.4508	0.6355	0.7358	0.8843
SO ₃	0.1549	0.1068	0.1497	0.1443	0.1268	0.0654	0.0881
MnO	0.1546	0.0957	0.1192	0.1021	0.0819	0.0767	0.1215
Na ₂ O	0.0969	0.099	0.1225	0.1124	0.0955	0.0921	0.0595
TiO ₂	0.086	0.0859	0.1247	0.1302	0.1179	0.1014	0.0503
Co ₂ O ₃	0.0597	0.0524	0.0892	0.0927	0.0986	0.0931	0.0907
SrO	0.0222	0.0321	0.014	0.0077	0.0081	0.009	0.0069
Cl	0.0204	0.0182	0.0176	0.0169	0.0212	0.0188	0.0209
V ₂ O ₅	0.0179	0.02	0.026	-	0.029	0.019	0.015
K ₂ O	0.0147	-	0.0152	0.0152	0.018	0.0222	0.0155
In ₂ O ₃	0.0144	-	-	-	-	-	-
P ₂ O ₅	0.0122	-	-	-	-	-	-
ZnO	0.0106	0.0125	0.0169	0.0164	0.0186	0.0173	0.0169
CuO	0.0026	0.0028	0.0023	0.0037	0.0041	0.0059	0.0049
Br	-	0.0012	-	-	-	-	-
ZrO ₂	-	-	-	0.0031	-	-	-
Ga ₂ O ₃	-	-	-	0.0013	-	-	-
PbO	-	-	-	-	-	-	-

単位 : %

表 2.6.4-25 PWT02-15-Rh-008～014 の XRF 分析による定量結果 (酸化物表記、CO₂ 含む)

試料名	PWT02-15-Rh-						
	008	009	010	011	012	013	014
CO ₂	13.7375	12.7984	13.0212	13.6257	13.2138	14.6951	15.6192
CaO	11.0558	7.1372	11.353	9.1716	15.4055	8.306	14.8723
SiO ₂	34.315	33.9563	35.4206	32.6725	35.5518	31.4214	32.2339
Fe ₂ O ₃	24.6311	22.4216	21.0331	23.2236	20.6632	28.688	22.408
MgO	11.7135	19.4791	15.3767	16.6853	11.2652	11.0374	10.0853
Al ₂ O ₃	2.1618	1.8154	1.7683	2.0317	1.7955	3.0851	2.3862
Cr ₂ O ₃	0.9938	0.8581	0.6705	1.0298	0.694	1.2053	0.9894
NiO	0.8867	0.9397	0.8664	0.9764	0.9053	0.926	0.8409
SO ₃	0.1056	0.1493	0.0583	0.118	0.0542	0.134	0.0883
MnO	0.1012	0.1462	0.1324	0.1957	0.1605	0.1066	0.1614
Na ₂ O	0.0709	0.0524	0.0873	0.0664	0.074	0.0983	0.0906
TiO ₂	0.0602	0.0873	0.0571	0.05	0.0608	0.1003	0.0794
Co ₂ O ₃	0.0894	0.0767	0.0714	0.0787	0.0751	0.1114	0.0826
SrO	0.0067	0.005	0.0094	0.0077	0.0084	0.0074	0.01
Cl	0.0184	0.0254	0.0238	0.0172	0.0191	0.0148	0.0141
V ₂ O ₅	0.0158	0.0171	0.0124	0.0152	0.0162	0.0215	0.0174
K ₂ O	0.0141	0.0151	0.0203	0.0136	0.0169	0.0169	
In ₂ O ₃	-	-	-	-	-	-	-
P ₂ O ₅	-	-	-	-	-	-	-
ZnO	0.0173	0.0146	0.0132	0.016	0.0144	0.0182	0.0151
CuO	0.0054	0.0051	0.0046	0.0047	0.006	0.0061	0.0059
Br	-	-	-	-	-	-	-
ZrO ₂	-	-	-	-	-	-	-
Ga ₂ O ₃	-	-	-	-	-	-	-
PbO	-	-	-	-	-	-	-

単位：%

表 2.6.4-26 PWT02-15-Rh-015~020 の XRF 分析による定量結果 (酸化物表記、CO₂ 含む)

試料名	PWT02-15-Rh-				
	015	016	018	019	020
CO ₂	17.4865	12.7349	17.3105	13.9011	13.2138
CaO	8.2867	16.5569	7.3367	13.5995	15.4055
SiO ₂	29.3421	37.7597	29.87	34.7865	35.5518
Fe ₂ O ₃	26.5598	19.4952	29.2581	18.7108	20.6632
MgO	11.4817	9.6623	10.0312	15.6793	11.2652
Al ₂ O ₃	3.7331	1.8061	3.6235	1.1788	1.7955
Cr ₂ O ₃	1.5585	0.7121	1.1196	0.7245	0.694
NiO	0.803	0.8265	0.821	0.7617	0.9053
SO ₃	0.2054	0.0667	0.1408	0.0345	0.0542
MnO	0.1158	0.1242	0.0962	0.4131	0.1605
Na ₂ O	0.1071	0.0713	0.0923	0.0544	0.074
TiO ₂	0.116	0.0547	0.1085	0.0273	0.0608
Co ₂ O ₃	0.1038	0.0718	0.1135	0.0624	0.0751
SrO	0.0076	0.007	0.0079	0.0073	0.0084
Cl	0.0318	0.0172	0.0077	0.0096	0.0191
V ₂ O ₅	0.0243	-			0.0162
K ₂ O	0.0115	0.0152	0.0135	0.0139	0.0169
In ₂ O ₃	-	-		0.0208	-
P ₂ O ₅	-	-			-
ZnO	0.0191	0.0133	0.0174	0.0109	0.0144
CuO	0.0062	0.005	0.0054	0.0034	0.006
Br	-	-			-
ZrO ₂	-	-			-
Ga ₂ O ₃	-	-			-
PbO	-	-			-

単位：%



図 2.6.4-79 トレンチ 2 の各試料の XRF 分析結果 (酸化物表記、CO₂ を含む)

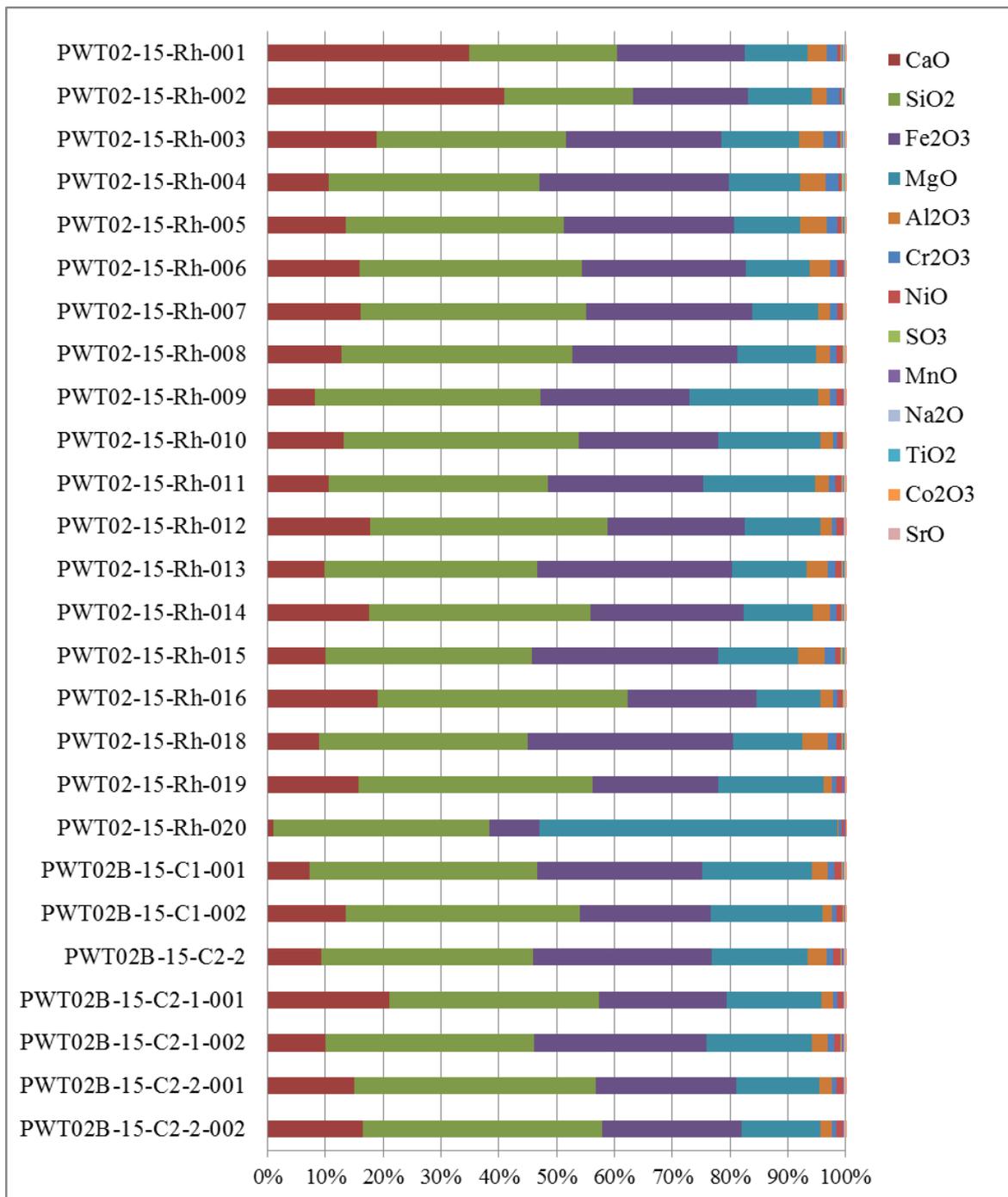


図 2.6.4-80 トレンチ 2 の各試料の XRF 分析結果 (酸化物表記、CO₂ を含まない)

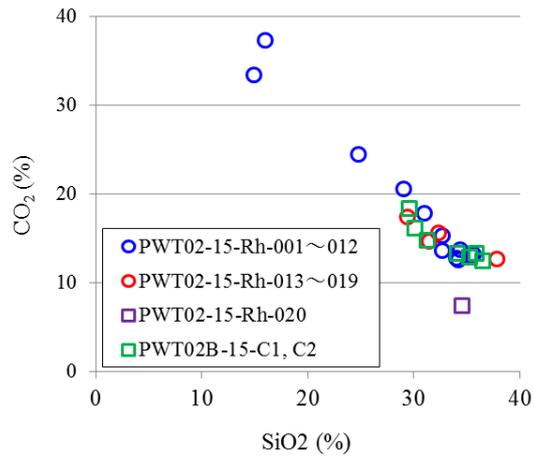


図 2.6.4-81 トレンチ 2 試料の XRF 測定結果による成分相互の相関 ($\text{SiO}_2\text{-CO}_2$)

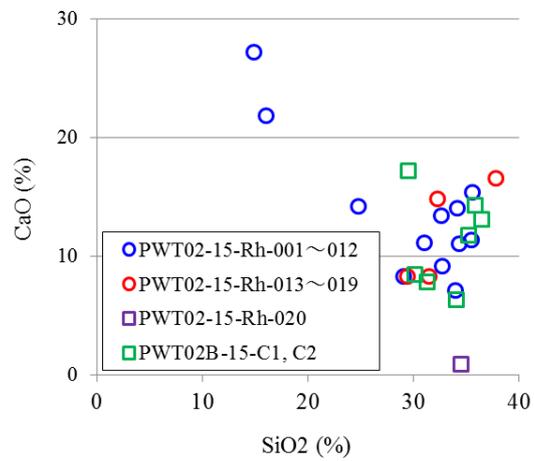


図 2.6.4-82 トレンチ 2 試料の XRF 測定結果による成分相互の相関 ($\text{SiO}_2\text{-CaO}$)

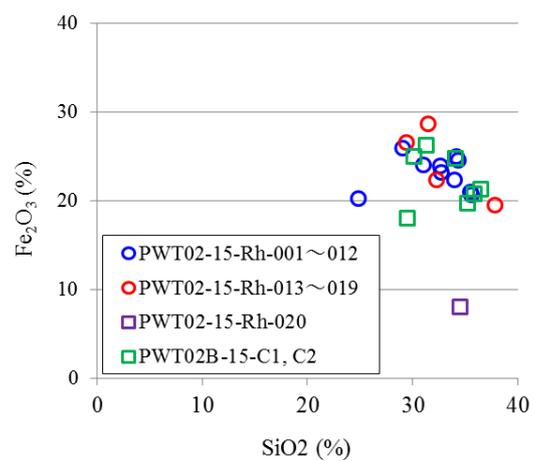


図 2.6.4-83 トレンチ 2 試料の XRF 測定結果による成分相互の相関 ($\text{SiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$)

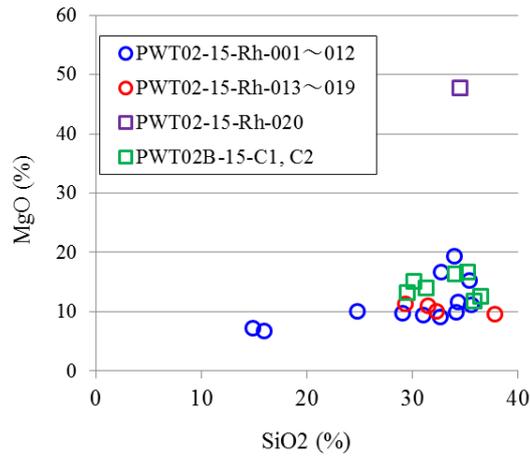


図 2.6.4-84 トレンチ 2 試料の XRF 測定結果による成分相互の相関 (SiO₂-MgO)

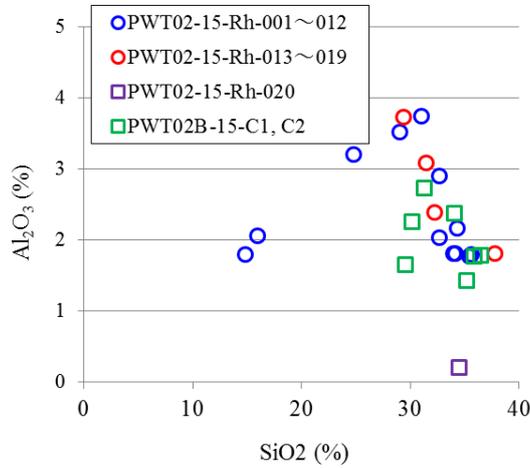


図 2.6.4-85 トレンチ 2 試料の XRF 測定結果による成分相互の相関 (SiO₂-Al₂O₃)

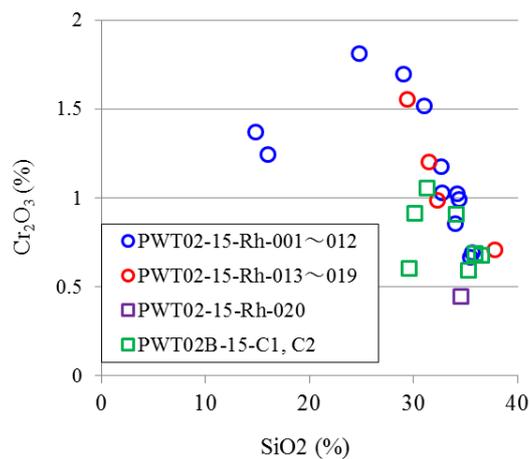


図 2.6.4-86 トレンチ 2 試料の XRF 測定結果による成分相互の相関 (SiO₂-Cr₂O₃)

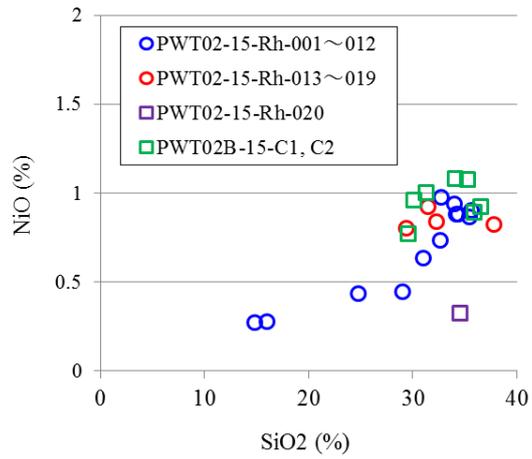


図 2.6.4-87 トレンチ 2 試料の XRF 測定結果による成分相互の相関 (SiO₂-NiO)

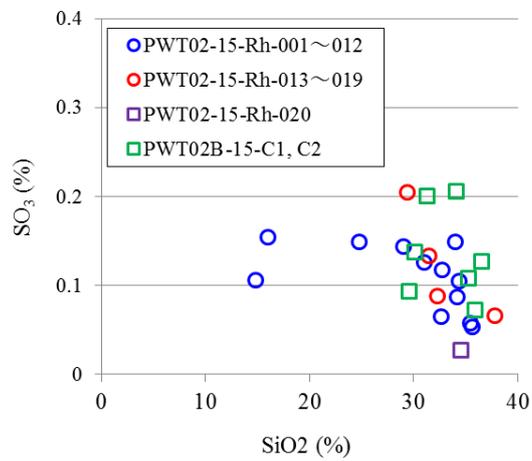


図 2.6.4-88 トレンチ 2 試料の XRF 測定結果による成分相互の相関 (SiO₂-SO₃)

3) 誘導プラズマ質量分析 (ICP-MS) 及び Si 濃度分析

表 2.6.4-3 に示すトレンチ 2 の 10 試料について、ICP-MS により主成分・微量成分分析を行った。全ケイ素アルカリ溶融脱水法で定量した Si 濃度と合わせてにそれらの結果を表 2.6.4-27 に示す。なお、トレンチ 1 の TL 用試料の分析結果は第 3 章に示す。

また、希土類元素パターンを図 2.6.4-89 に示す。

表 2.6.4-27 ICP-MS 及び全ケイ素アルカリ溶融脱水法による主成分・微量成分分析結果 (トレンチ 2)

Sample No.	BR-11	BR-12	BR-13	BR-14	BR-15	BR-16	BR-17	BR-18	BR-19	BR-20
Location	PWT02-15-Rh-002	PWT02-15-Rh-005	PWT02-15-Rh-007	PWT02-15-Rh-008	PWT02-15-Rh-012	PWT02-15-Rh-015	PWT02-15-Rh-018	PWSP0-15-Rh-001	PWBPO-15-Rh-001	PWRT002-15-Rh-001
Na (wt.%)	2.84	1.74	13.69	3.06	2.73	2.81	2.22	3.23	6.45	4.46
Mg	5.33	5.43	7.16	10.28	7.81	6.74	7.33	5.85	2.76	0.28
Al	2.72	3.02	3.46	2.85	2.53	3.90	2.57	8.60	9.47	5.63
P	b.d.l	0.25	0.01							
K	0.11	0.07	0.09	0.29	0.26	0.20	0.20	3.10	0.82	1.74
Ca	18.28	6.61	6.89	5.80	7.46	4.40	9.81	1.76	3.98	0.34
Sc (ppm)	18.96	26.11	26.47	20.19	20.91	30.36	18.84	32.61	27.65	3.19
Ti (wt.%)	0.07	0.07	0.18	0.04	0.04	0.07	0.05	0.16	1.78	0.16
V (ppm)	88.52	105.43	120.33	73.63	56.13	114.28	63.81	100.34	412.08	22.41
Cr	7253.46	8975.15	5871.10	5654.89	4748.62	11139.20	4369.63	752.65	10.28	30.48
Mn (ppm)	780.26	440.33	859.84	1299.14	846.75	672.56	886.40	528.56	1339.36	32.90
Mn (wt.%)	0.08	0.04	0.09	0.13	0.08	0.07	0.09	0.05	0.13	0.00
Fe (wt%)	9.52	14.26	13.90	13.84	13.82	18.04	11.48	6.52	9.43	1.63
Fe (ppm)	95190	142604	139001	138368	138241	180417	114780	65175	94298	16302
Co (ppm)	258.33	387.47	282.46	272.81	341.22	469.00	264.04	45.50	38.35	5.66
Ni	2270.44	4424.01	6033.31	6220.46	7598.86	6526.45	5771.95	243.27	71.48	22.62
Cu	12.51	20.59	29.25	21.66	26.03	26.99	20.60	94.68	50.17	11.31
Zn	126.14	153.89	187.71	123.92	187.77	165.22	128.68	124.99	173.13	80.27
Ga	3.64	0.87	2.20	40.84	34.42	37.93	23.21	43.26	45.76	39.43
As	5.02	2.63	1.10	3.24	3.28	3.11	2.67	3.58	3.04	10.68
Rb	1.42	1.92	2.35	1.80	1.86	1.11	2.14	63.08	12.36	57.30
Sr	367.48	77.17	124.47	128.61	128.28	133.10	105.47	130.19	412.19	148.40
Y	2.91	2.52	5.33	2.67	2.65	3.04	2.54	5.16	37.41	9.45
Zr	287.00	194.32	381.20	202.99	6.45	142.53	71.80	176.84	59.95	6.09
Nb	0.33	0.44	1.47	0.03	0.01	0.03	0.02	0.02	17.47	0.12
Mo	1.79	1.05	1.84	1.39	1.25	1.52	1.09	1.25	4.17	1.32
Cs	0.54	1.25	0.62	0.50	0.45	0.45	0.53	1.10	0.50	2.73
Ba	271.19	59.49	152.14	2825.88	2410.76	2639.09	1751.49	2869.16	2980.57	2620.92
La	1.53	1.12	0.87	1.26	1.07	1.40	1.12	1.97	36.96	16.08
Ce	3.51	2.83	2.76	2.33	2.12	3.29	2.18	3.68	74.81	33.22
Pr	0.44	0.34	0.37	0.35	0.32	0.44	0.32	0.66	9.70	4.11
Nd	1.49	1.30	1.53	1.18	1.11	1.54	1.17	2.51	31.92	12.31
Sm	0.37	0.36	0.54	0.34	0.33	0.43	0.32	0.84	7.88	2.78
Eu	0.10	0.10	0.19	0.10	0.10	0.13	0.10	0.27	2.33	0.57
Gd	0.41	0.37	0.72	0.36	0.38	0.48	0.37	1.04	7.68	2.20
Tb	0.07	0.06	0.13	0.06	0.06	0.08	0.06	0.17	1.18	0.31
Dy	0.49	0.43	0.93	0.44	0.45	0.56	0.43	1.23	7.32	1.82
Ho	0.11	0.10	0.21	0.10	0.10	0.12	0.10	0.24	1.48	0.36
Er	0.36	0.31	0.67	0.31	0.33	0.39	0.31	0.78	4.23	1.06
Tm	0.06	0.05	0.11	0.05	0.05	0.06	0.05	0.13	0.60	0.16
Yb	0.45	0.38	0.79	0.37	0.38	0.45	0.36	0.96	3.88	1.14
Lu	0.08	0.06	0.12	0.07	0.07	0.07	0.06	0.16	0.58	0.17
Hf	3.52	3.12	6.43	2.37	0.10	1.26	0.59	1.48	0.78	0.13
Ta	0.00	0.01	0.04	b.d.l	0.00	b.d.l	b.d.l	0.00	0.91	0.01
W	7.47	6.59	2.12	0.95	3.74	1.79	15.46	1.12	0.70	2.15
Pb	12.45	6.93	10.42	7.22	9.41	7.09	7.00	12.34	8.40	18.95
Th	0.60	0.49	0.42	0.51	0.48	0.59	0.38	0.54	5.35	6.10
U	0.46	0.31	0.76	0.25	0.25	0.27	0.21	0.24	1.47	1.44
SiO ₂ (g/kg)	232	409	427	388	421	361	435	525	537	894

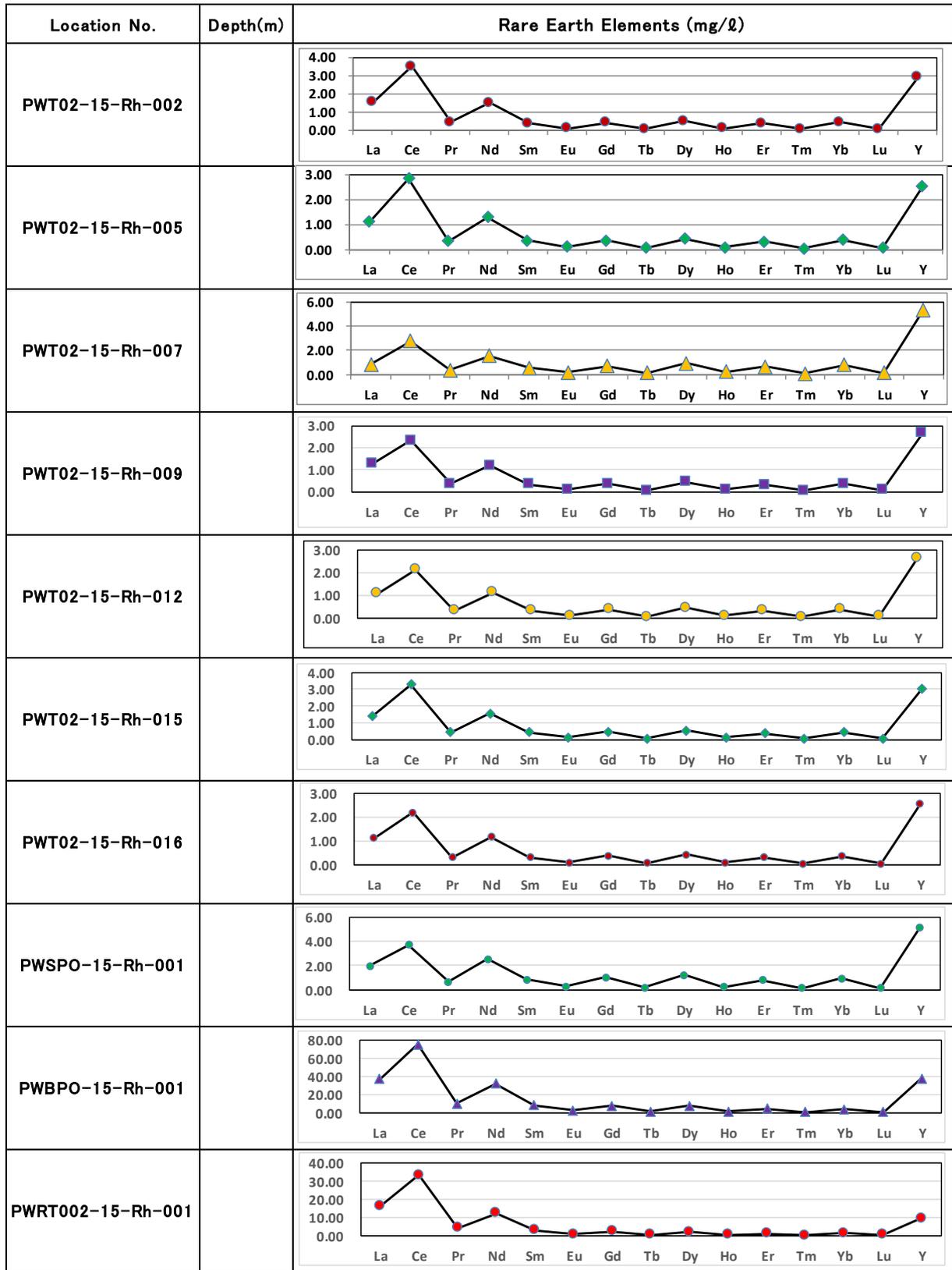


図 2.6.4-89 トレンチ 2 岩石試料の希土類元素パターン

(4) 光学顕微鏡観察

1) 試料調整

偏光顕微鏡では透過光により試料を観察する必要があるため、偏光顕微鏡観察用試料は、可視光が透過する厚さ 15~20 μm 程度の薄片に調製した。薄片観察を行った試料の番号と薄片の作成方法を表 2.6.4-28 に示す。

表 2.6.4-28 薄片観察試料と薄片作成方法

試料番号	薄片用のチップを作成した試料の状態
PWT02-15-Rh-015	105 μm ふるい通過分、および、非通過分を質量比で約 1:1 に混合したもの
PWT02-15-Rh-016	同上
PWT02-15-Rh-018	同上
PWT02-15-Rh-020	人頭大の硬岩岩塊から採取したこぶし大の岩片
PWT02B-15-C1-001	ボーリングコアを半割した試料より図 2.6.4-90 のように採取した。半割した面からの深度は 15mm
PWT02B-15-C2-1-001	上に同じ。ただし、半割した面からそのままチップを採取した
PWT02B-15-C2-2-001	ボーリングコアを半割した試料より図 2.6.4-90 のように採取した。半割した面からの深度は 15mm
PWT02B-15-C2-2-002	同上

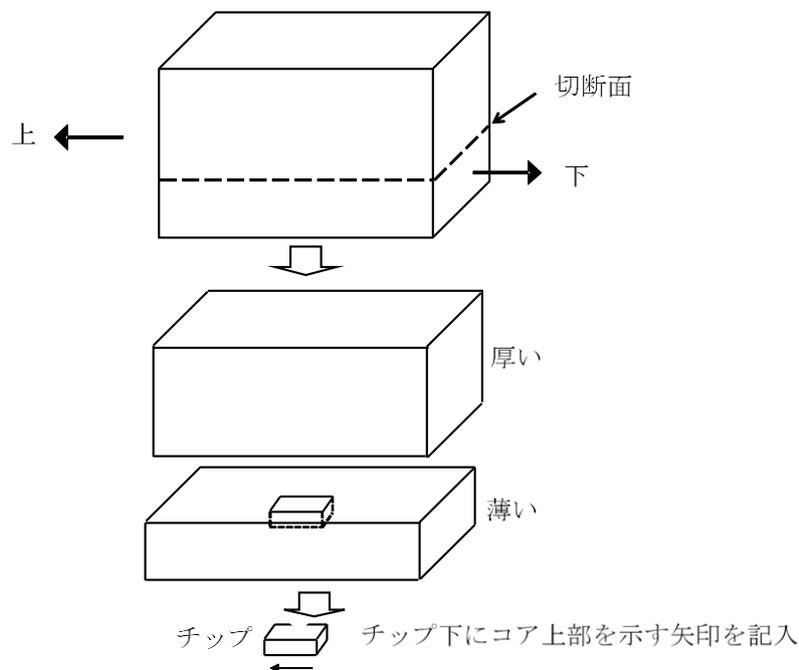


図 2.6.4-90 コア状試料のチップ採取位置

2) 凡例

[岩片・植物片]

SP:蛇紋岩 CPX:かんらん石単斜輝岩 WEB:かんらん石ウェブステライト GB:はんれい岩 BKS:黒色片岩 TR:トレモラ閃石岩 AC:アクチノ閃石岩 TC:タルク岩 CB:炭酸塩岩 PLT:植物遺体

[初生鉱物・鉱物片]

Ol:かんらん石 Opx:斜方輝石 Cpx:単斜輝石 Px:(詳細不明)輝石 Mf:(詳細不明)苦鉄質鉱物 Pl:斜長石 Cr:クロムスピネル Tc:タルク Ac:アクチノ閃石 Chl:緑泥石 Ga:ざくろ石 Tr:トレモラ閃石 Cb:炭酸塩鉱物 C:炭質物

[2次鉱物]

Ant:アンチゴライト Liz:リザルダイト Chr:クリソタイル Sp:蛇紋石一般 Br:ブルーサイト Mt:磁鉄鉱 Tc:タルク Ser:絹雲母 Ac:アクチノ閃石 Am:角閃石(一般) Chl:緑泥石 Grp:石墨 Cc:方解石(一般) Cpt:斜プチロル沸石 Lau:濁沸石 Zeo:沸石(一般) Tbr:トバモライト Wsp:蛇紋石の風化鉱物(Pya:パイロオーライト,Coa:コーリングイト) Sm:スメクタイト(一般) Pop:(詳細不明)沈澱性不透明物質 Pcr:(詳細不明)沈澱性結晶質物質 Rcr:(詳細不明)置換性結晶質物質

[その他の記号]

MX:基質 CM:セメント IP:粒間孔隙

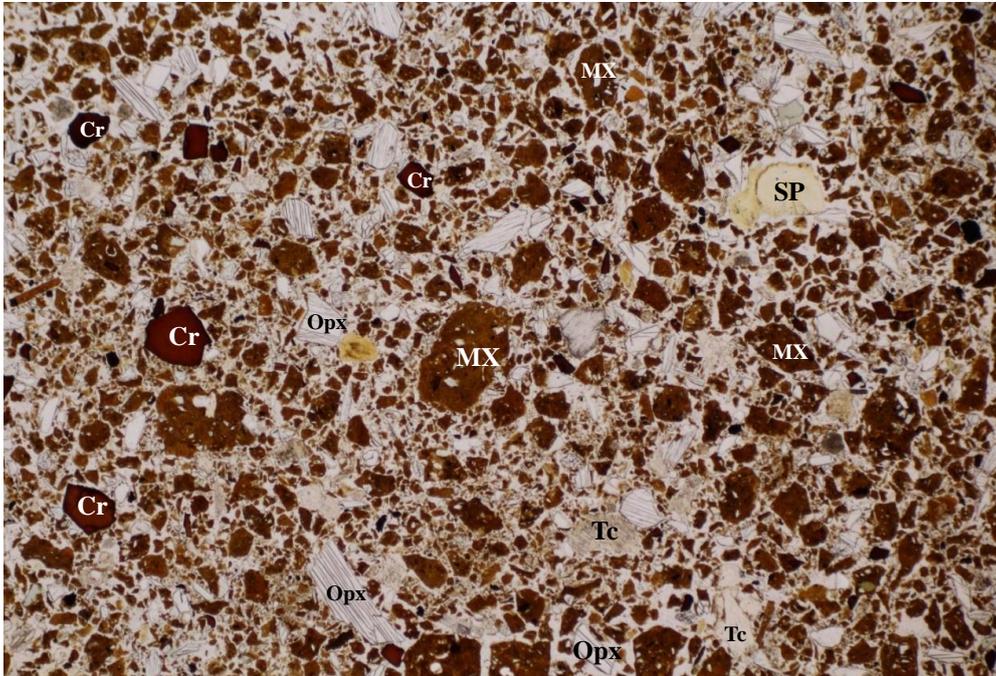
():仮像 []:脈, プール(注:メッシュ組織の格子部をつくる Chr は便宜上, 脈扱いしていない)

3) 偏光顕微鏡写真および観察

ここでは、Narra 地区のトレンチ-2 の西壁と床面から採取した 8 試料(1 件のパラワンオフィオライト、7 件の碎屑性堆積物)による偏光顕微鏡観察を実施した。

- a. PWT02-15-Rh-015 の偏光顕微鏡観察の結果
 同定した鉱物とその産状を顕微鏡写真とともに図 2.6.4-91～図 2.6.4-93 に示す。

碎屑性堆積物試料
 オープンニコル



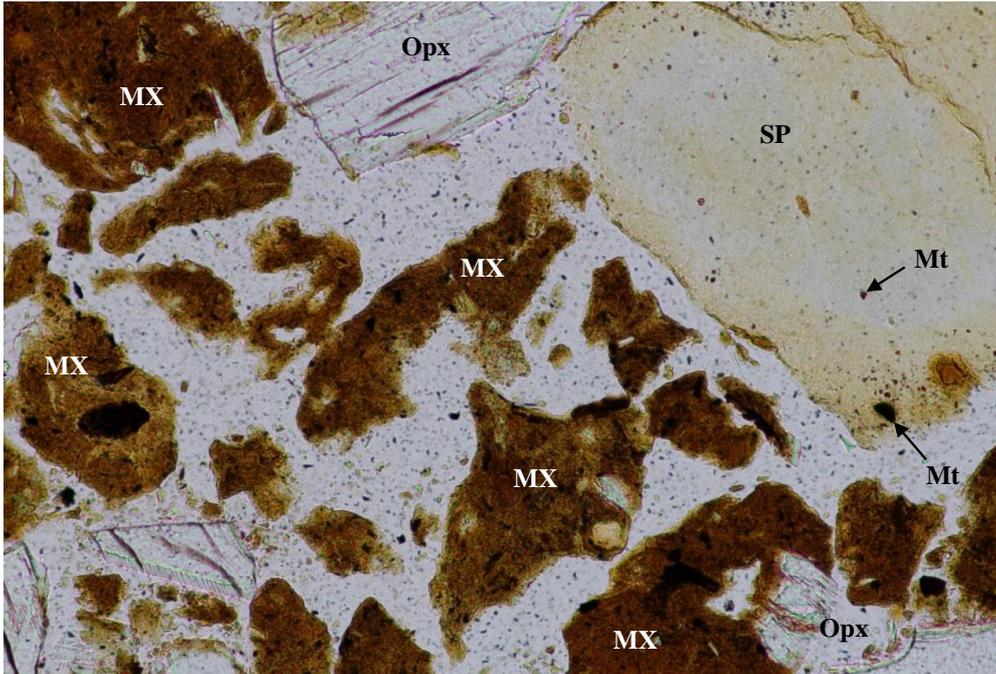
クロスニコル



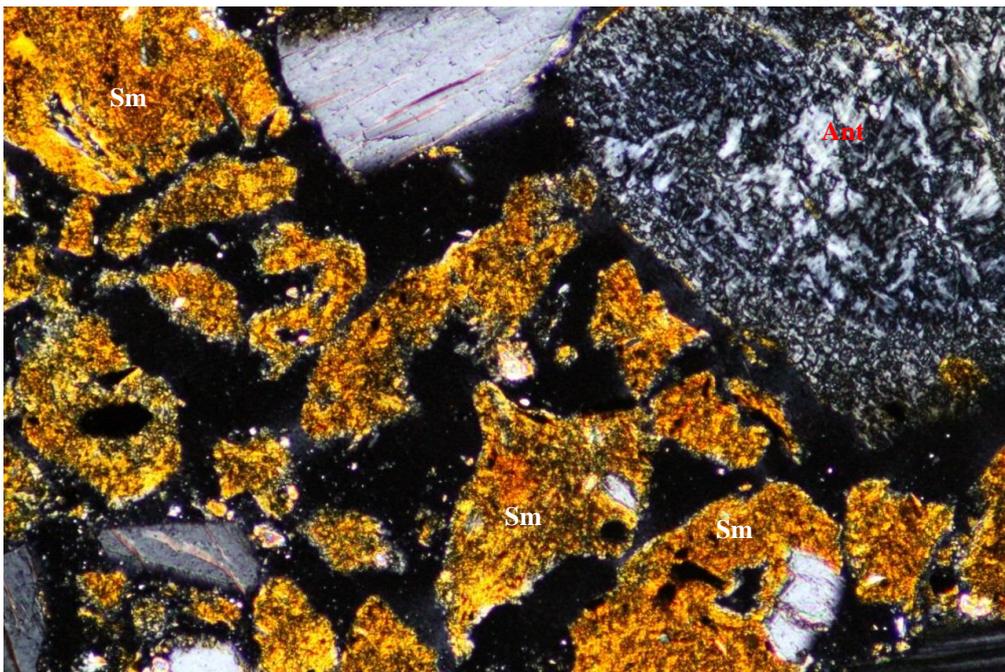
スケール 1.0 mm

図 2.6.4-91 偏光顕微鏡写真(PWT02-15-Rh-015, その1)

オープンニコル



クロスニコル

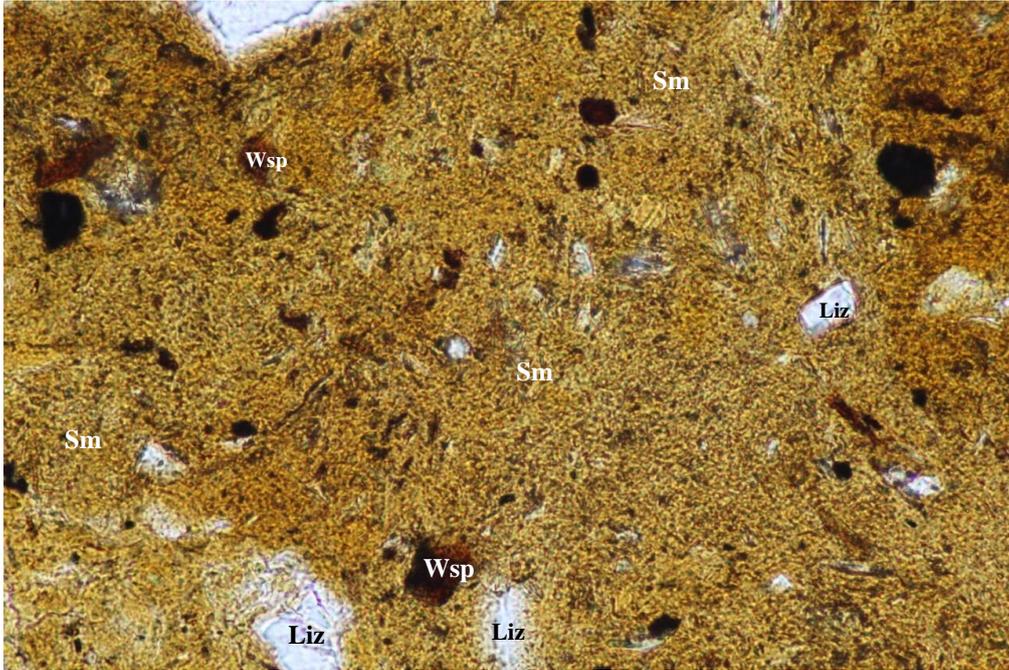


スケール 0.1 mm

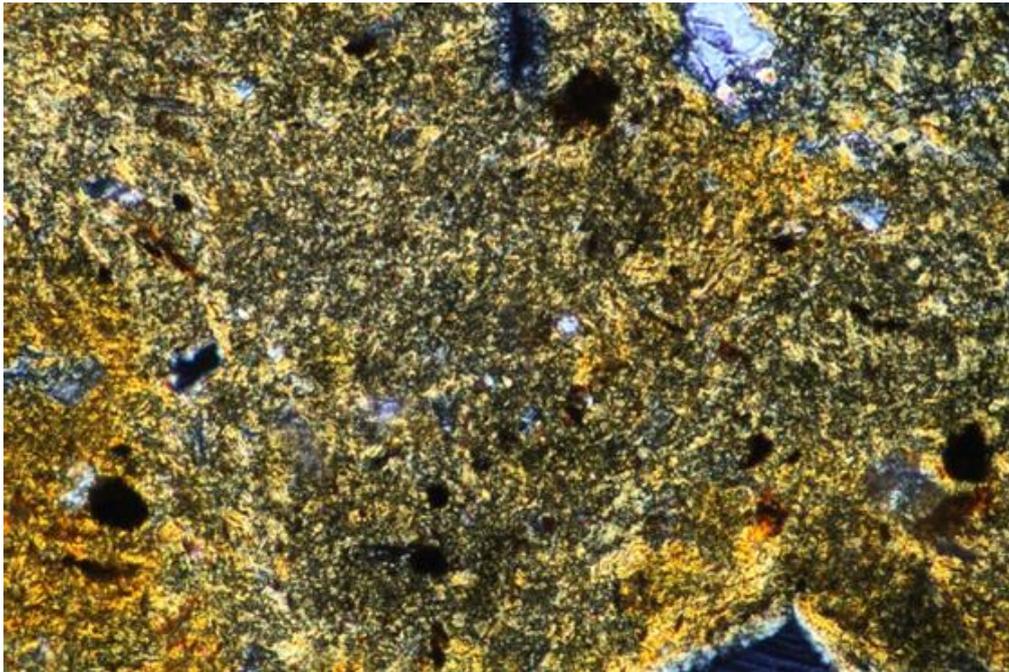
【備考】視野の SP はブレイデッド・マット組織を示す、アンチゴライト蛇紋岩（自形クロムスピネルを含み、ダナイト源と考えられる）。基質は主としてサポナイト系のスメクタイト。

図 2.6.4-92 偏光顕微鏡写真(PWT02-15-Rh-015, その2)

オープンニコル



クロスニコル



スケール 0.1 mm



【備考】大部分が微細なスメクタイト（淡褐色～褐色）で、その中に新鮮な蛇紋岩片（Liz）や風化した蛇紋岩（Wsp）が散在する。

図 2.6.4-93 偏光顕微鏡写真(PWT02-15-Rh-015, その2)

(a) 肉眼的特徴

褐色を呈する、細粒砂混りの土壌。

(b) 岩石組織

基質が褐色の風化土壌からなり、この中に径 0.9mm 以下の岩片・鉱物片が散在する。

(c) 岩片・鉱物片（または初生鉱物）

Opx>>TC・Cr・SP>>Ga・(Px)・Tr・Cb・PLT

- ・ Opx は角～亜角。長径 0.9mm 以下。多色性のないエンスタタイト質。しばしば Cpx の離溶ラメラあり。
- ・ TC は亜角～亜円。径 0.5mm 以下。Tc の集合体。
- ・ Cr は角～亜角。径 0.5mm 以下。淡褐色～黄褐色。まれに濃褐色～暗赤褐色（チョコレート色）。
- ・ SP は亜角～亜円。径 0.9mm 以下。一部はブレイデッド・マット組織（綾織り状組織）を示すアンチゴライト蛇紋岩で、少なくともその一部は、自形 Cr を含むダナイト源蛇紋岩。また、メッシュ組織を示す。リザルダイト-クリソタイル蛇紋岩あり。Cr を Tc 脈がメッシュ状に切る粒子あり。Chr 集合体あり。蛇紋岩片の一部は Chl 化している。
- ・ Ga は亜角。径 0.3mm 以下。
- ・ (Px) は半自形、径 0.2mm 以下。Chl 化。Opx を交代したと考えられる。
- ・ Tr は亜角。自形性の強い柱状。長径 0.3mm 以下。無色。120° で交る 2 方向のへき開顕著。
- ・ Cb は角～亜角。径 0.6mm 以下。斜交する 2 方向のへき開顕著。
- ・ PLT は断面が径 0.1mm の円形（孔隙多数）維管束の見える柱状の破片や炭質物化したフィルム状。

(d) 基質とセメント

〔基質〕 褐色で微細な風化鉱物が主体。砂分 23%、細粒分 77%。

(e) 2 次鉱物

〔基質〕 基質の主体である褐色の鉱物は Sm であるが、パイロオーライトやコーリングイトなどの蛇紋石（やブルーサイト）の風化鉱物も生成している可能性が高い。

パイロオーライト：ハイドロタルサイト族の鉱物。組成は、 $Mg_6Fe_2(CO_3)(OH)_{16} \cdot 4H_2O$

コーリングイト：組成は、 $Mg_{10}Fe_2^{3+} [(OH)_{24} | CO_3] \cdot 2H_2O$

〔岩片〕 SP を赤褐色や褐色の Wsp が交代。前者はコーリングイト、後者はパイロオーライトなどと考えられる。

(f) 備考

- ・ ざくろ石(Ga)がグロシュラーであれば、トレモラ閃石(Tr)とともにロジン岩に由来す

る可能性が高い。

(g) 考察

本試料は基盤岩から約 80cm 上位に位置する細粒の礫層である。基質は、径 0.9mm 以下の岩片・鉱物片が散在している。主要構成鉱物は、柱状～亜柱状で、長径 0.9mm 以下の頑火輝石質の斜方輝石（単斜輝石と固相分離組織を示し、一部緑泥石に交代されている）、亜柱状～亜円状で、径 0.5mm 以下の滑石（集合体を形成）、亜柱状～亜円状で、径 0.9mm 以下の蛇紋石（リザルダイト・クリソタイル、アンチゴライトで構成されるが、一部、自形の Cr-スピネルを含有するダナイト質起源が考えられる。蛇紋石の一部は緑泥石化作用が顕著である）、亜柱状で、径 0.3mm 以下のガーネット、柱状で長径 0.3mm 以下のトレモラ角閃石と、柱状～亜柱状で、径 0.6mm 以下の炭酸塩鉱物（主として方解石）である。基質は、主としてスメクタイト、蛇紋石や水滑石の風化変質鉱物としてのパイロオーライトやコーリングイトが観察される。

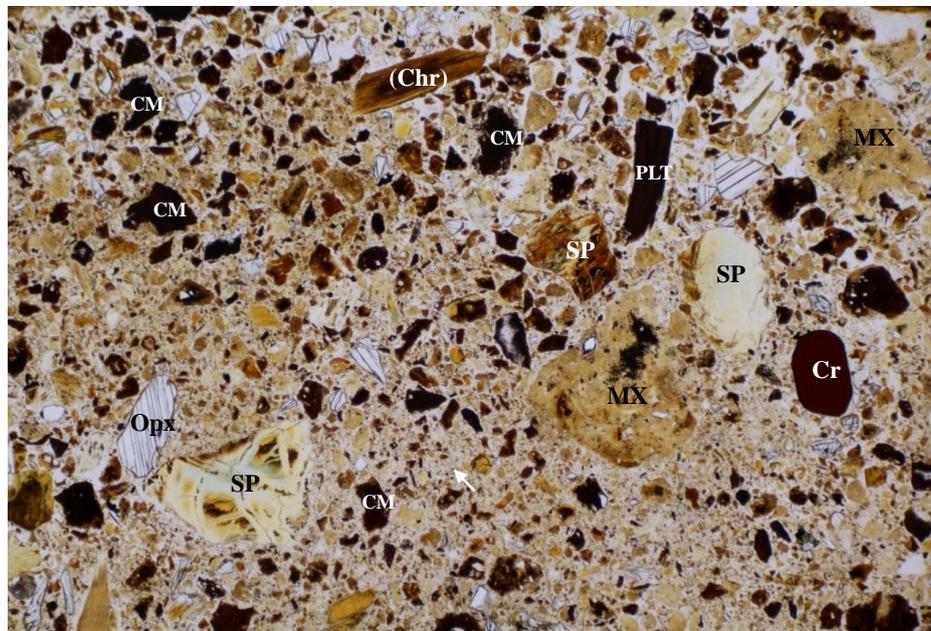
また、断面が径 0.1mm で円形維管束の柱状破片や、炭質物化したフィルム状の植物遺体が観察される。

b. PWT02-15-Rh-016 の偏光顕微鏡観察の結果

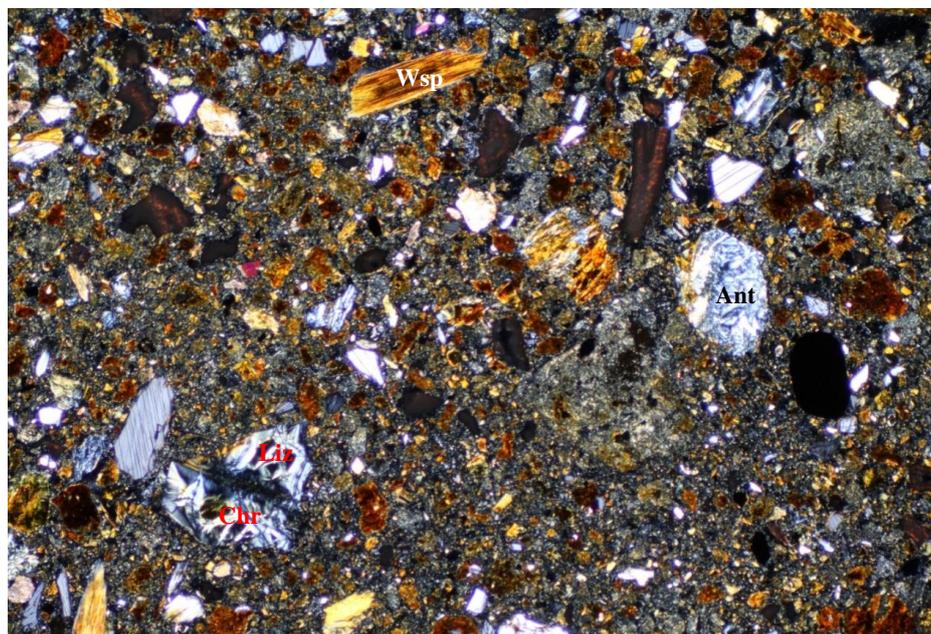
同定した鉱物とその産状を顕微鏡写真とともに図 2.6.4-94～図 2.6.4-98 に示す。

碎屑性堆積物試料

オープンニコル



クロスニコル

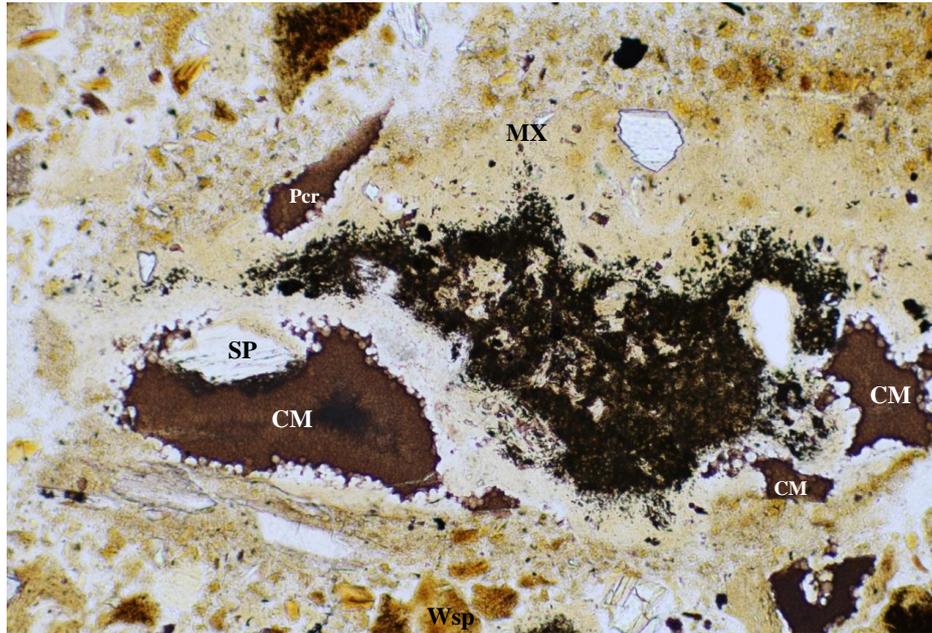


スケール 1.0 mm

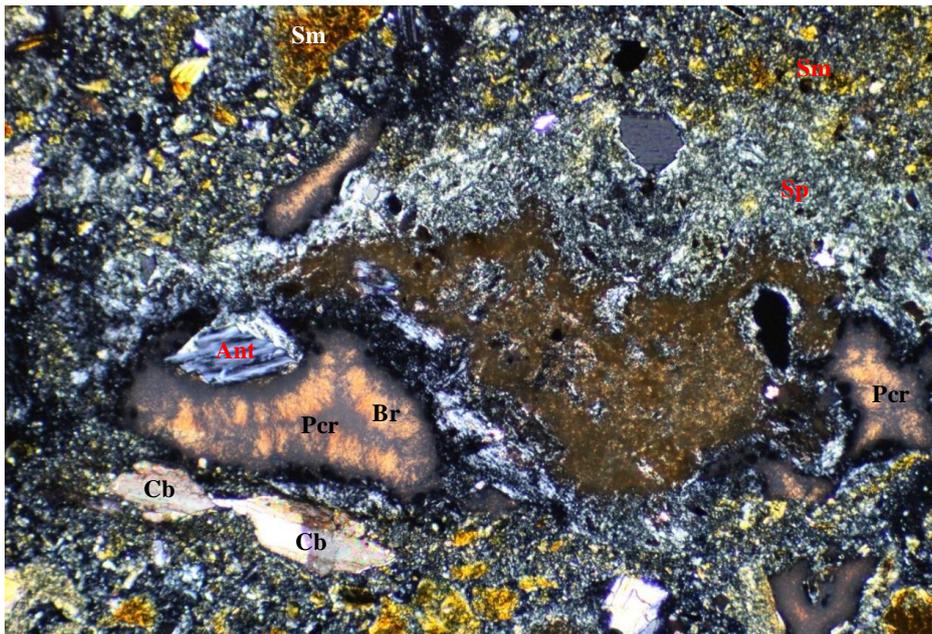
【備考】SPは左端がメッシュ組織を示すリザルダイト・クリソタイル蛇紋岩。右端がブレイデット・マット組織を示すアンチゴライト蛇紋岩。CMはセメント物質の破片と考えられ、詳細不明の鉱物からなる。この鉱物は植物片(PLT)をも交代。

図 2.6.4-94 偏光顕微鏡写真(PWT02-15-Rh-016, その1)

オープンニコル



クロスニコル

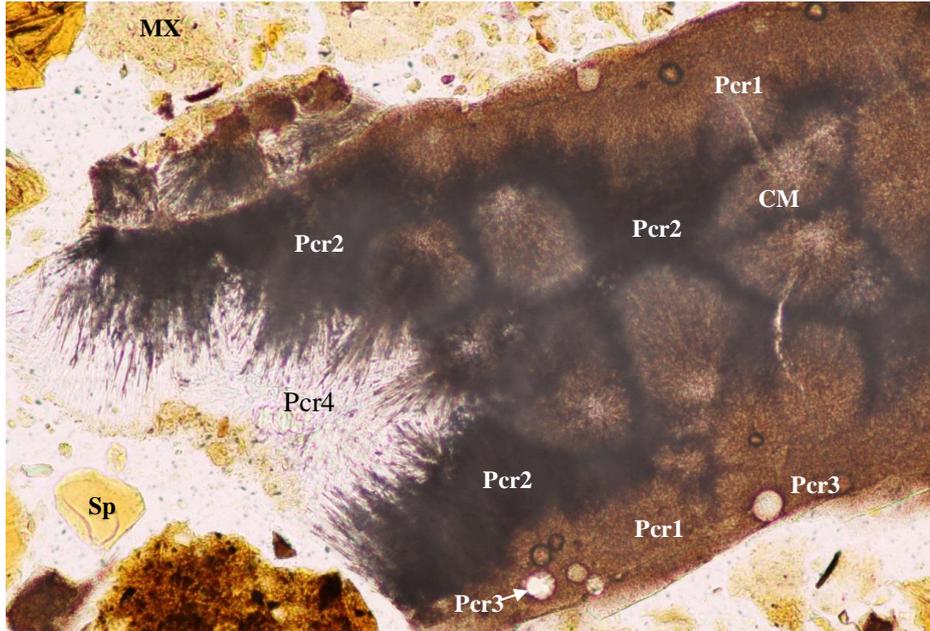


スケール 0.1 mm

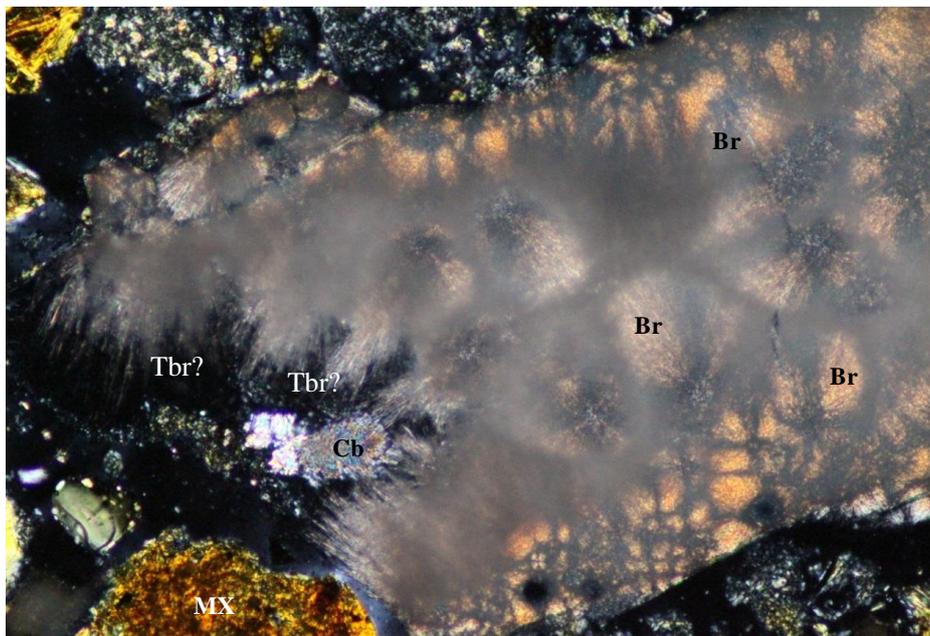
【備考】まとまった基質部の拡大。セメント物質（CM）が生成。主体は色調と干渉色からすると Fe を含むブルーサイトである可能性が高い。

図 2.6.4-95 偏光顕微鏡写真(PWT02-15-Rh-016, その2)

オープンニコル



クロスニコル



スケール 0.1 mm

【備考】セメント部分 (Fe を含む)、セメントを構成する結晶に4種類ある。Pcr1 はブルーサイトである可能性が高い。Pcr4 はトバモライトの可能性。

図 2.6.4-96 偏光顕微鏡写真(PWT02-15-Rh-016, その3)

オープンニコル



クロスニコル

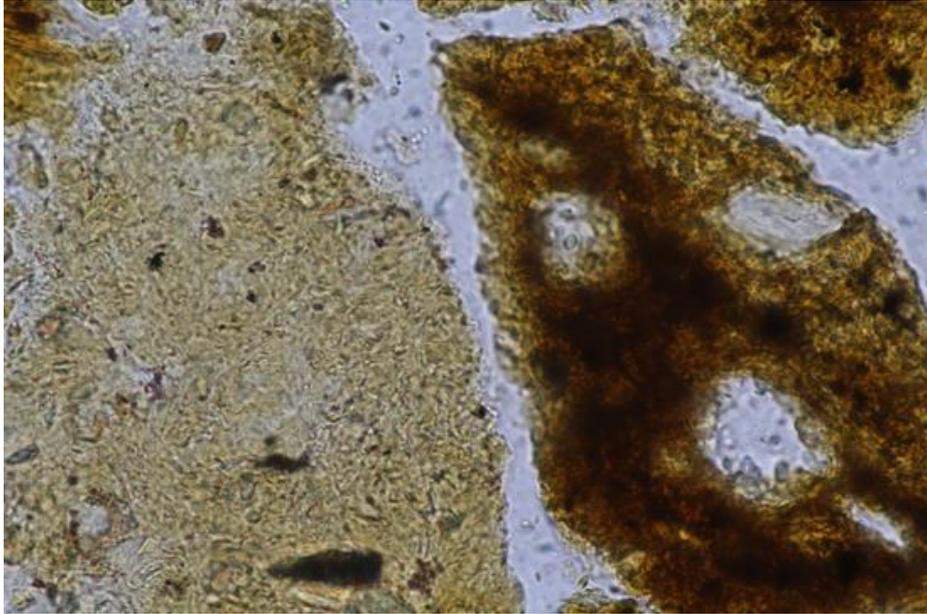


スケール 0.1 mm

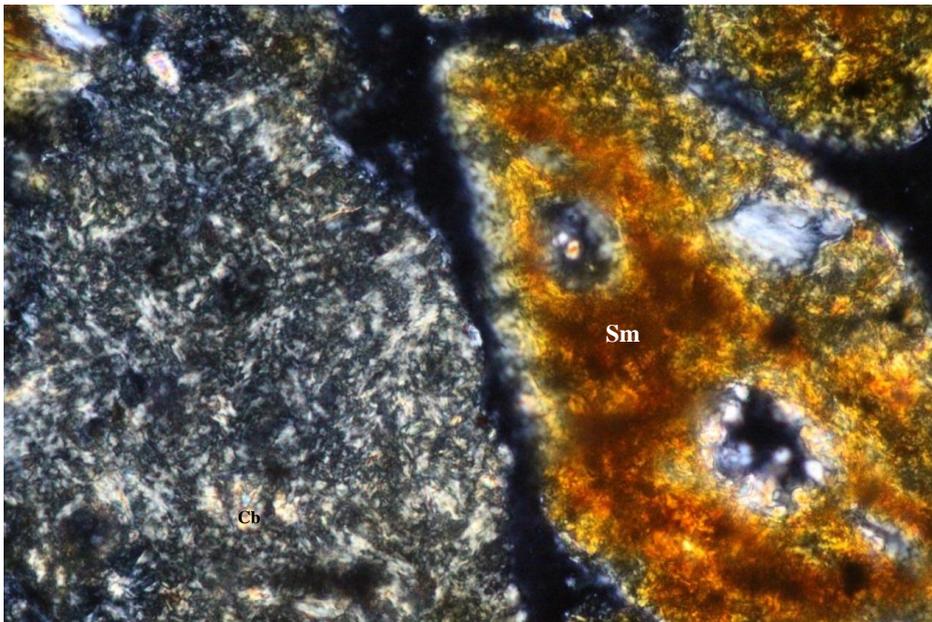
【備考】 PLT (木片?) を Pcr1 と同様の鉱物が置換。主としてブルーサイトの可能性。

図 2.6.4-97 偏光顕微鏡写真(PWT02-15-Rh-016, その4)

オープンニコル



クロスニコル



スケール 0.1 mm

【備考】左側の Cb 以外は干渉色が灰～暗灰で、蛇紋石、緑泥石、トバモライトなどの可能性がある。

図 2.6.4-98 偏光顕微鏡写真(PWT02-15-Rh-016, その5)

(a) 肉眼的特徴

褐色を呈する、細粒砂混りの土壌。

(b) 岩石組織

基質は帯褐灰色～黄褐色～褐色で、微細な葉片状～塊状の粘土鉱物からなる。この中に径 1.5mm 以下の岩片・鉱物片が散在。

(c) 岩片・鉱物片（または初生鉱物）

SP>>Opx>TC・CB・Cr・PLT>BKS

- ・SP は角～亜角～亜円。径 1.4mm 以下。メッシュ組織を示すリザルダイト・クリソタイル蛇紋岩、ブレイデッド・マット組織を示すアンチゴライト蛇紋岩、両者が共存するもの（アンチゴライトが後から生成か）、クリソタイル集合体がある。Liz や Chr は Ant に比べて、褐色風化し易い。
- ・Opx は角～亜円。長径 1.0mm 以下。Cpx の離溶ラメラあり。
- ・TC は亜角。径 0.3mm 以下。
- ・CB は亜角。径 0.4mm 以下。微細または粗粒結晶集合体。
- ・Cr は角～亜円。径 0.6mm 以下。暗赤褐色～褐色。
- ・PLT は角～亜角、柱状。長径 0.9mm、直径 0.2mm 以下。褐色を示し、Rcr (Pcr と同様の干渉色黄灰で、反射色白色の微細針状結晶) に置換。
- ・BKS は円。楕円形で、長径 0.17mm。Ser, Chl, Grp からなる変形した片状岩。

(d) 基質とセメント

〔基質〕 褐色で微細な風化鉱物が主体。砂分 23%、細粒分 77%。

〔セメント〕 Pcr は粒子や基質間に形成された孔隙を充填。多くは径 1.0mm 以下にブロック化して、粒子状に見える。下に示すように 3 種類あり。

(e) 2 次鉱物

〔基質〕 基質は主に Sm 主体の褐色の粘土鉱物からなり、少量であるが、帯褐灰色、干渉色灰の微細鉱物主帯の部分あり。後者は Sp, Tbr, Chl の可能性が考えられる。微細な Sp 片も散在するが、多くは褐色～黄褐色の Wsp に変質。パイロオーライトなどと考えられる。

〔セメント〕 Pcr は同一の孔隙を充填して、以下の 3 種類が認められる。

- ①全体に褐色を呈し、干渉色黄灰。反射色白色の微細針状結晶の束状、放射状の集合体。Fe を含むブルーサイトの可能性。
- ②透過光を通さず、反射率は低い針状結晶。①の集合体の隙間を充填。
- ③球粒状、無色で、干渉色暗灰の微細結晶。①に包有される。微量。
- ④無色、針状で干渉色暗灰。Tbr の可能性。

〔岩片〕 SP を赤褐色や褐色の Wsp が交代。赤褐色のものはコーリングイト、褐色はパイロオーライトなどと考えられる。

(f) 備考

- ・Pcrの多くは破片化しているが、本来は粒子+基質（細粒分）間に開口した孔隙を充填したものと考えられる。
- ・セメントとして生成した鉱物（Pcr）と木片（PLT）を置換する鉱物（Rcr）が同一と考えられる。このことは、植物遺体がセメント物質（鉄ブルーサイト等と考えられる）が沈澱する流体（Fe-Mgに富む水）につかっていた可能性を示す。
- ・X線粉末回折からは Sm・Cc・Liz・Am>Tbr・Chl・Ant・Chr>Tc・Kao?・Pya・Coa?

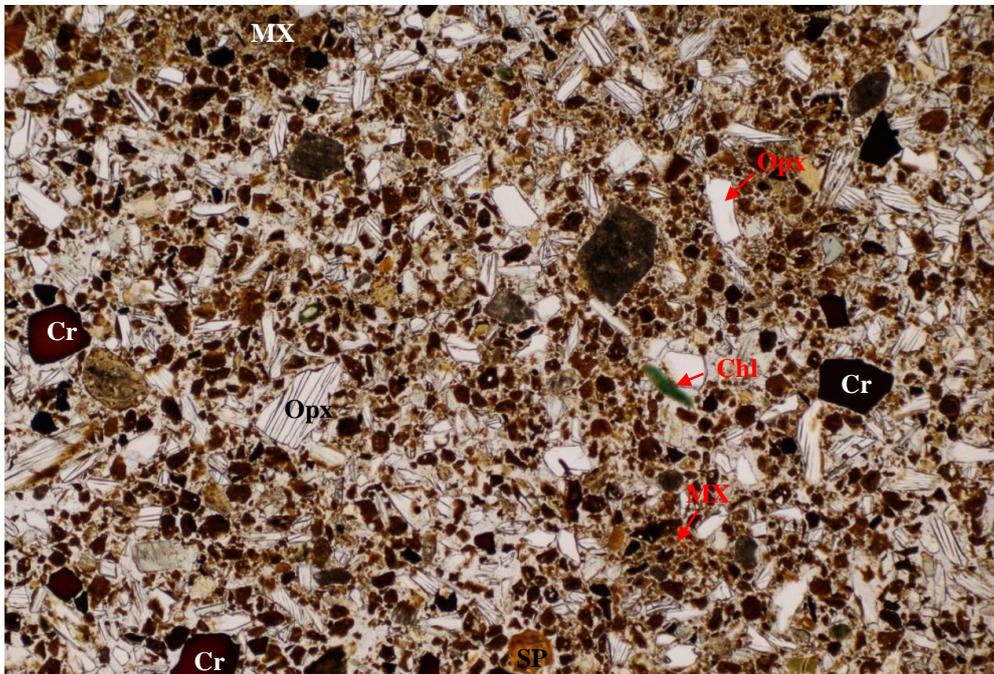
(g) 考察

本試料は、基盤岩より約20cm上位に位置する細礫の礫層である。基質は、微細な葉片状～塊状の粘土質で、径1.5mm以下の岩片・鉱物片が散在し、一部、径0.3mm以下で亜柱状のタルク岩、径0.4mm以下の亜柱状の斑れい岩と、0.17mm以下の黒色片岩（変形・変質し絹雲母・緑泥石・石墨の鉱物組み合わせ）を含有している。主要構成鉱物は、蛇紋石（リザルダイト・クリソタイル、アンチゴライトで、一部クリソタイルの集合体を形成）、斜方輝石（柱状～亜円状で、径1.0mm以下の斜方輝石が、単斜輝石と固相分離組織を示す）、Cr-スピネル（柱状～亜柱状で、径0.6mm以下）である。基質は、スメクタイト、蛇紋石（パイロオーライトの風化変質鉱物）、炭酸塩鉱物（殆どが方解石）、C-S-H（トバモライト）と緑泥石からなる微細鉱物の集合帯として観察される。

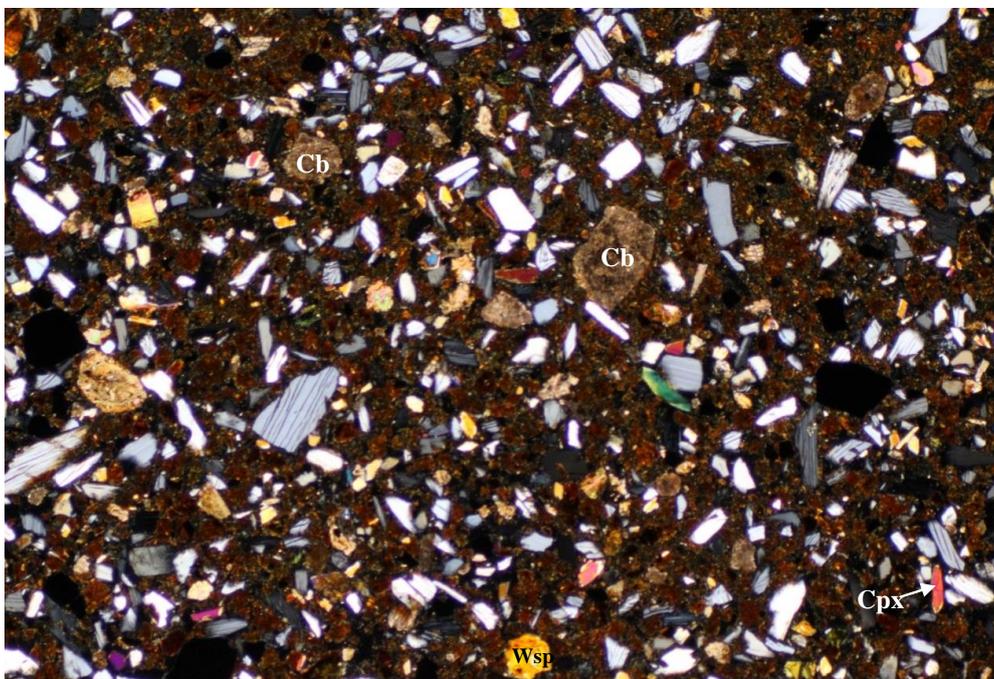
また、長径0.9mm、直径0.2mm以下の柱状～亜円状植物遺体が、針状で微細なC-S-H様の炭酸塩鉱物（トバモライト）へ変質・交代されている産状と、針状で束状や放射状に集合するFe-水滑石などが観察される。

- c. PWT02-15-Rh-018 の偏光顕微鏡観察の結果
 同定した鉱物とその産状を顕微鏡写真とともに図 2.6.4-99～図 2.6.4-100 に示す。

碎屑性堆積物試料
 オープンニコル



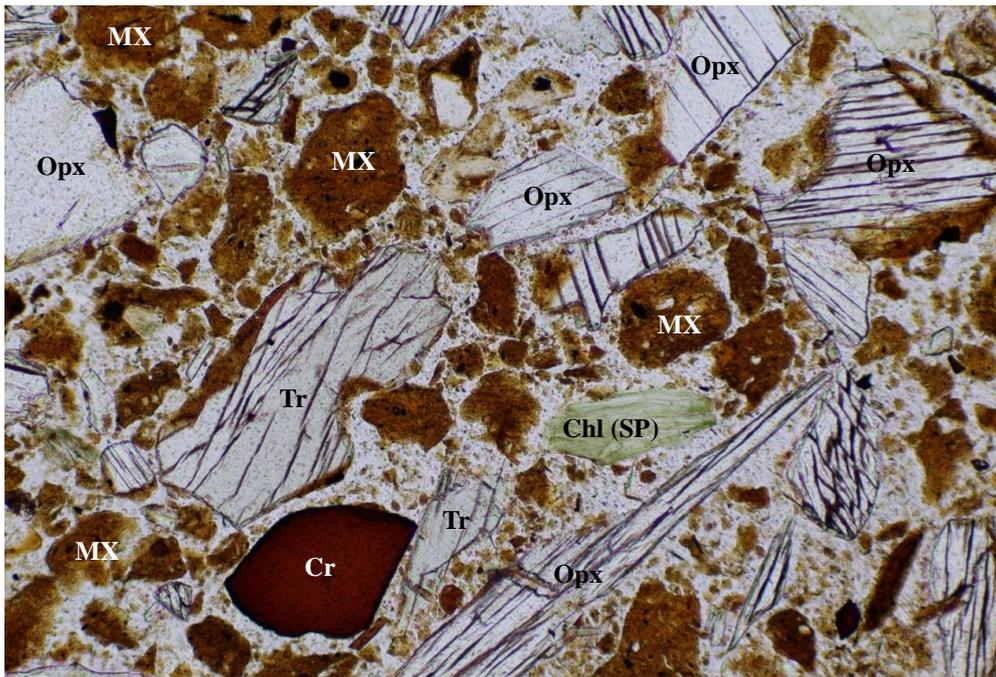
クロスニコル



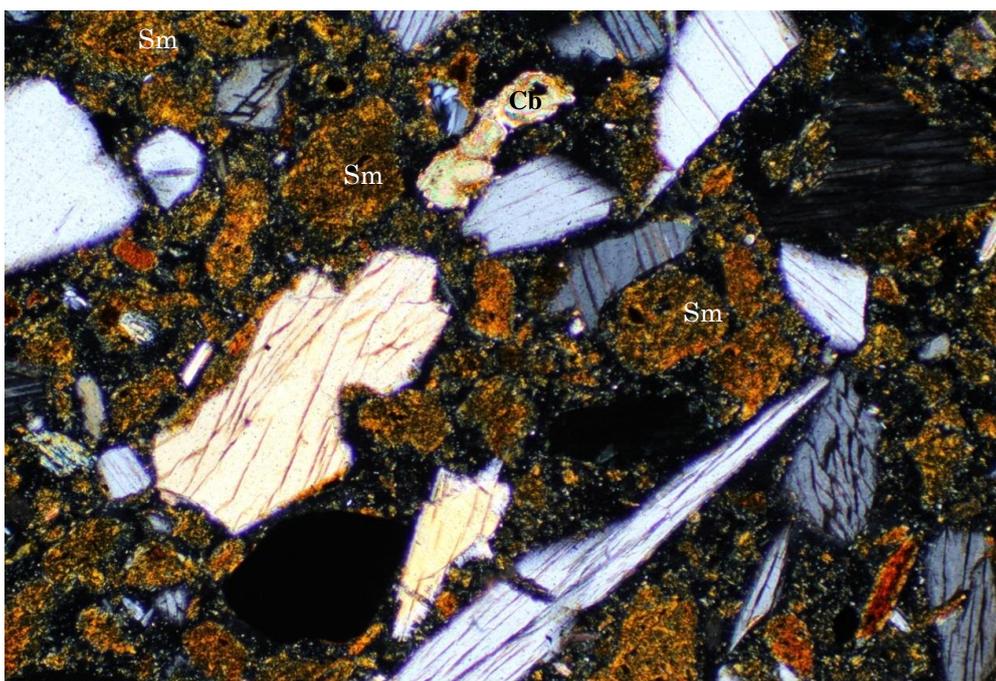
スケール 1.0 mm

図 2.6.4-99 偏光顕微鏡写真(PWT02-15-Rh-018, その1)

オープンニコル



クロスニコル



スケール 0.1 mm

図 2.6.4-100 偏光顕微鏡写真(PWT02-15-Rh-018, その2)

- (a) 肉眼的特徴
褐色を呈する、極粗粒砂混りの土壌。

(b) 岩石組織

基質は褐色で、微細な葉片状粘土鉱物が主体。この中に径 1.2mm 以下の岩片・鉱物片が散在する。

(c) 岩片・鉱物片（または初生鉱物）

Opx>SP>CB・Cpx・Cr・Tr・PLT・(Px)>Chl

- Opx は角～亜角。長径 1.2mm 以下。しばしば Cpx の離溶ラメラあり。
- SP は角～亜円。長径 0.6mm 以下。ブレイデッド・マット組織を示すアンチゴライト蛇紋岩が認められるが、褐色～赤褐色に変質。メッシュ組織を示す SP 片は確認できない。
- CB は亜角。径 0.5mm 以下。微細または粗粒の Cb からなる。
- Cpx は亜角、柱状、淡緑色。長径 0.3mm 以下。
- Cr は角～亜角。径 0.5mm 以下。暗赤褐色～褐色。
- Tr は角～亜角、柱状。長径 0.4mm 以下。
- PLT は柱状の破片。長径 0.4mm 以下。クロスニコルで光を通さない。
- (Px) は亜角～亜円。径 0.4mm 以下。完全に変質し、Chl 化。
- Chl は亜円、板状。長径 0.4mm 以下。青緑色で、多色性あり。蛇紋石を交代したらしく見える。

(d) 基質とセメント

〔基質〕 褐色で微細な風化鉱物が主体。砂分 32%、細粒分 68%。

(e) 2次鉱物

〔基質〕 基質には微細な褐色、赤褐色の鉱物が卓越する。主として Sm と考えられるが、パイロオーライトやコーリングイトなどの蛇紋石（やブルーサイト）の風化鉱物を伴うと考えられる。

〔岩片〕 SP を赤褐色や褐色の W_{sp} が交代。前者はコーリングイト、後者はパイロオーライトなどと考えられる。

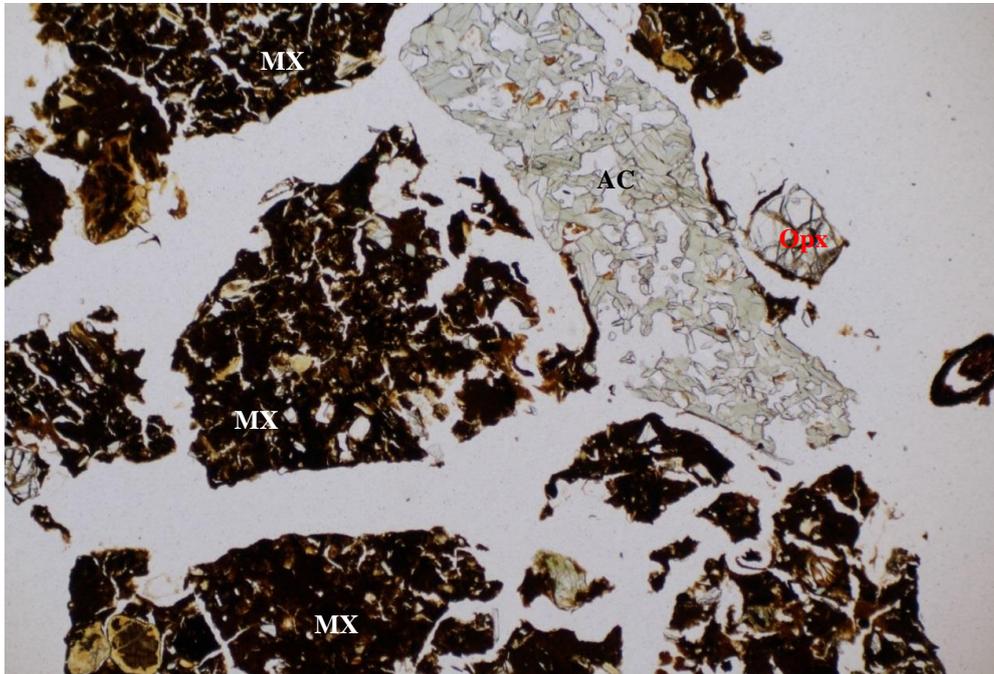
(f) 考察

本試料は基盤岩ら約 40cm 上位に位置する極粗粒の礫層である。基質は、微細な葉片状の粘土質で、径 1.2mm 以下の岩片・鉱物片が散在している。主要構成鉱物は、柱状～亜柱状で、長径 1.2mm 以下の斜方輝石（一部、単斜輝石と固相分離組織を示す）、柱状～亜円状で長径 0.6mm 以下の蛇紋石（主としてアンチゴライト）、亜柱状～柱状で、長径 0.3mm 以下の単斜輝石、Cr-スピネル、亜柱状～柱状で、長径 0.4mm 以下のトレモラ角閃石および、輝石を完全に変質した緑泥石と蛇紋石を交代した緑泥石が観察される。基質は、主としてスメクタイトが卓越し、蛇紋石または、水滑石の風化変質鉱物としてパイロオーライトやコーリングイトが観察される。

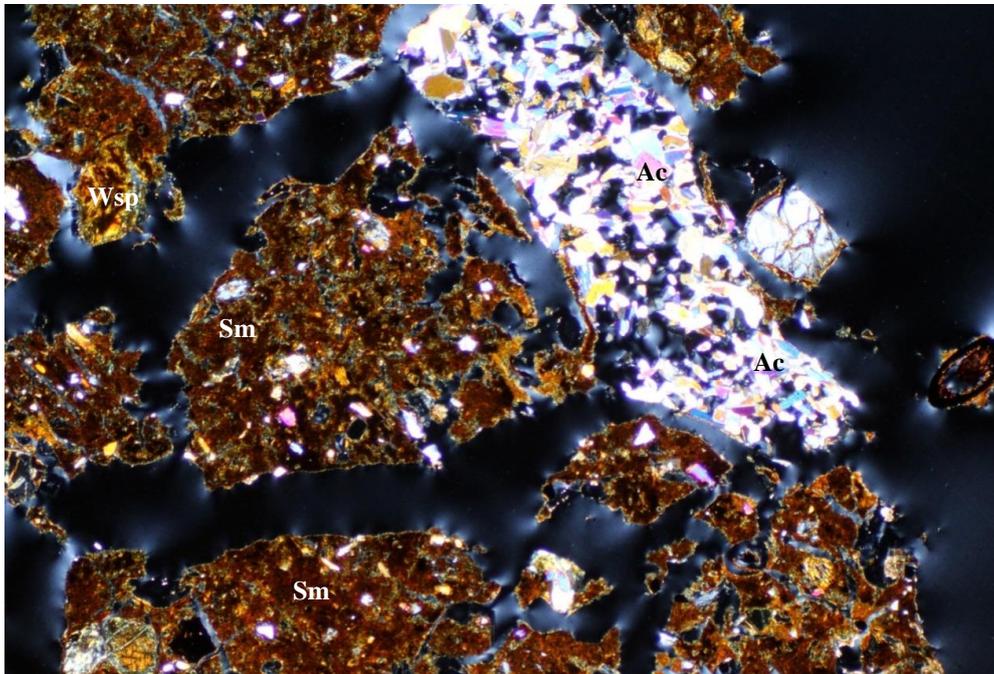
また、長径 0.4mm 以下の柱状の植物遺体破片も観察される。

- d. PWT02B-15-C1-001 の偏光顕微鏡観察の結果
 同定した鉱物とその産状を顕微鏡写真とともに図 2.6.4-101～図 2.6.4-104 に示す。

碎屑性堆積物試料
 オープンニコル



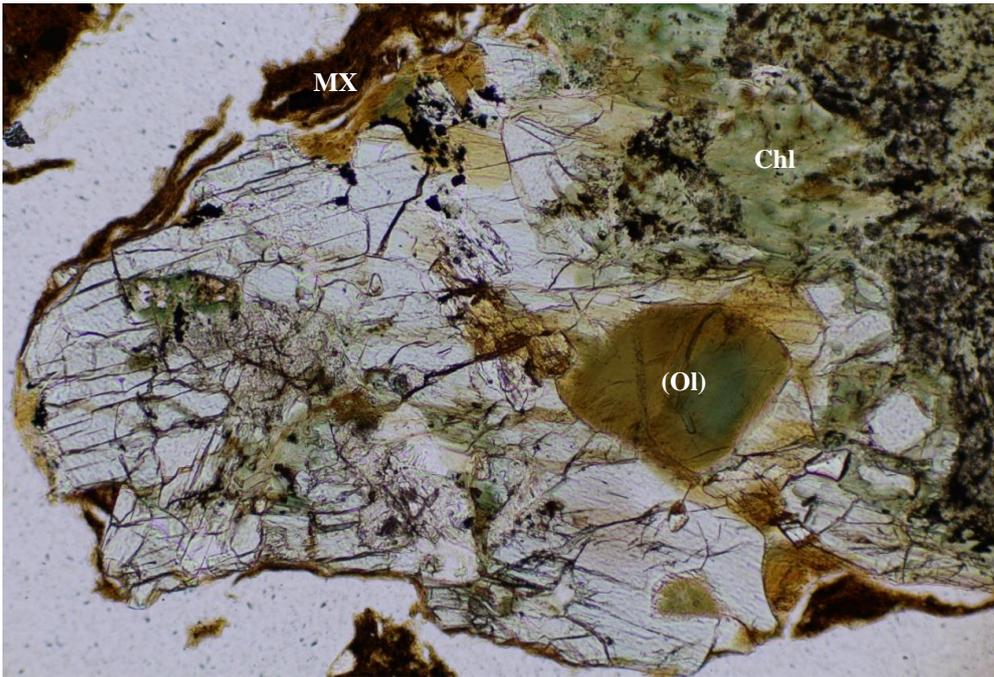
クロスニコル



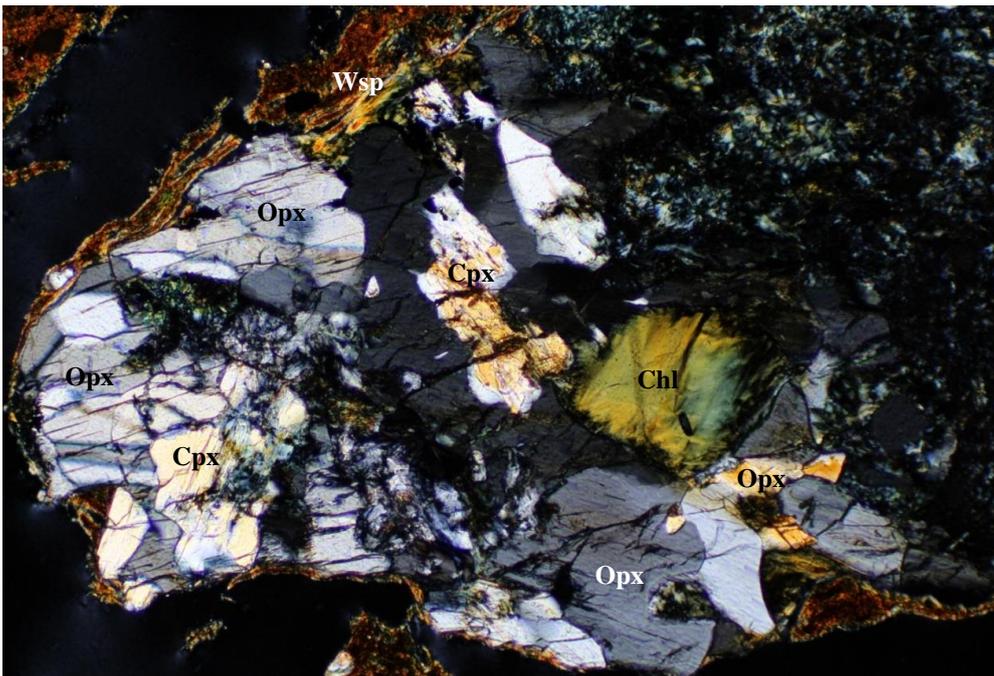
スケール 1.0 mm

図 2.6.4-101 偏光顕微鏡写真(PWT02B-15-C1-001, その1)

オープンニコル



クロスニコル

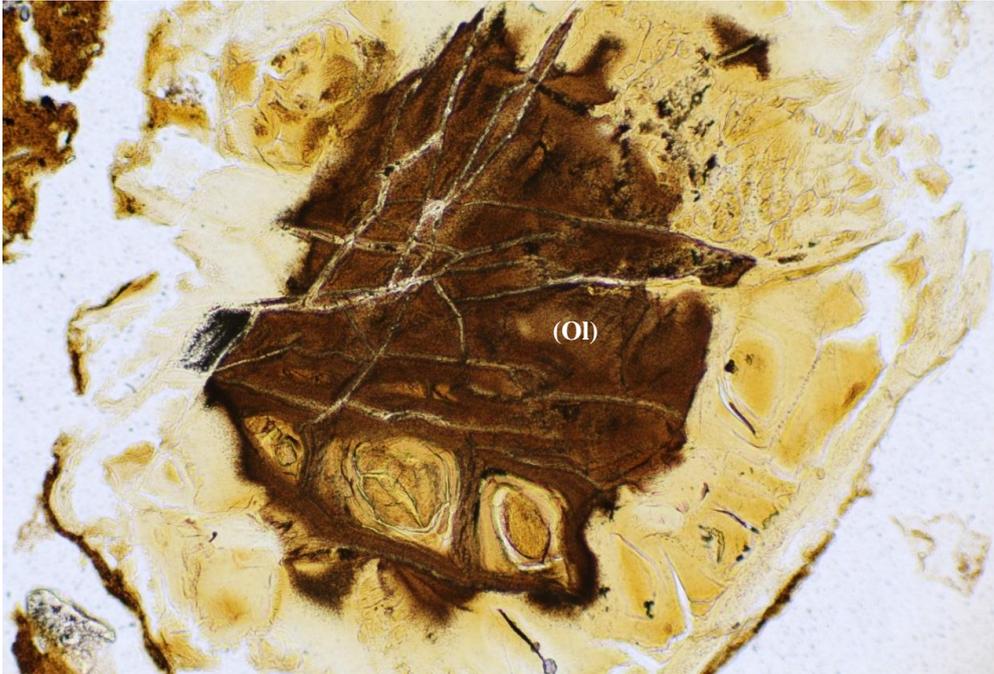


スケール 0.1 mm

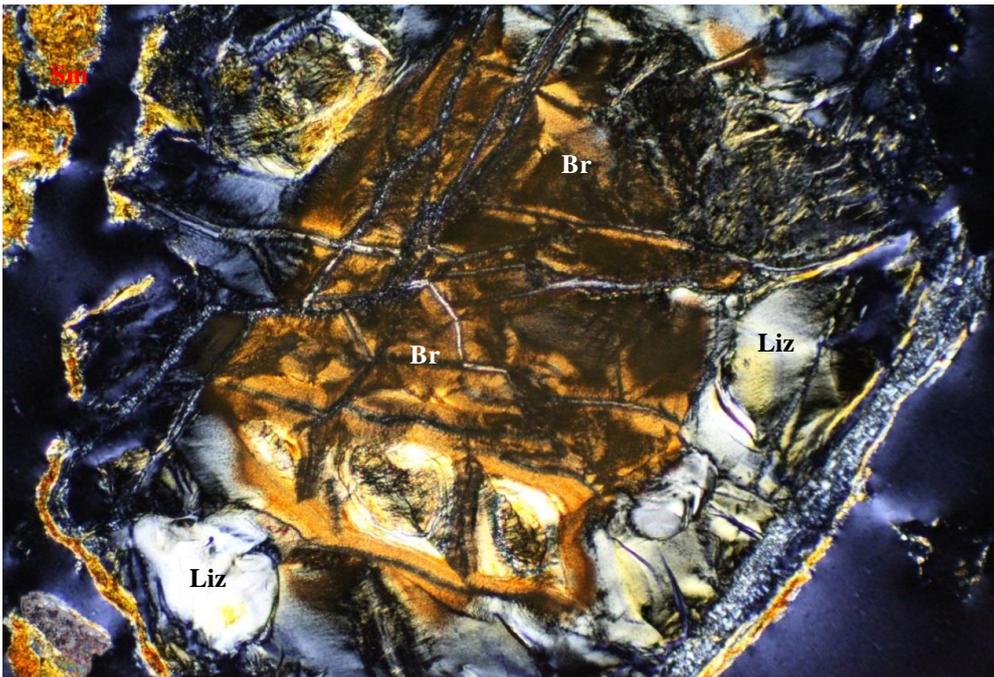
【備考】 かんらん石ウェブステライト

図 2.6.4-102 偏光顕微鏡写真(PWT02B-15-C1-001, その2)

オープンニコル



クロスニコル

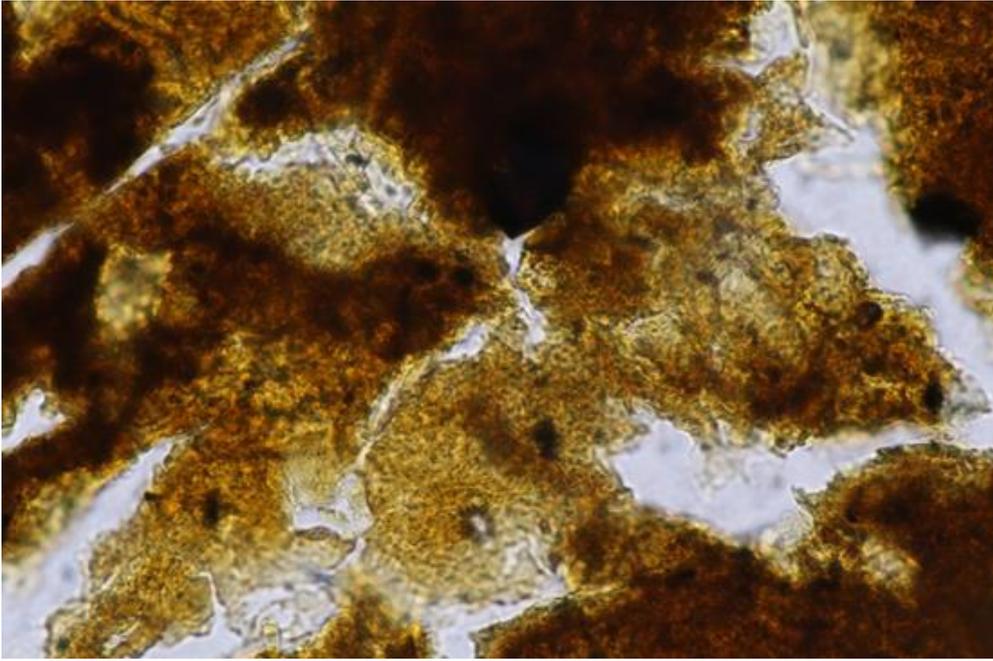


スケール 0.1 mm

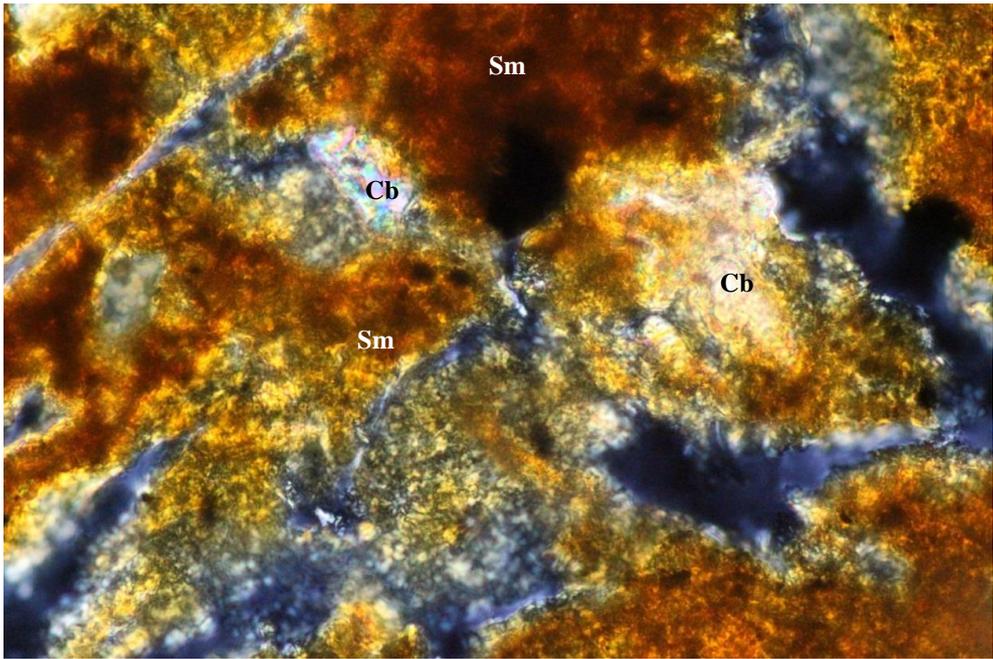
【備考】メッシュ組織を示すリザルダイトークリソタイル蛇紋岩のメッシュセーターの部分にブルーサイトが生成. 全体に褐色の風化鉱物に変化しつつある。

図 2.6.4-103 偏光顕微鏡写真(PWT02B-15-C1-001, その3)

オープンニコル



クロスニコル



スケール 0.1 mm

【備考】Sm (スメクタイト) と炭酸塩鉱物 (Cb) 以外に淡褐色～無色で、干渉色灰 (～暗灰) の微細な鉱物が生成する。蛇紋石、トバモライトなどの可能性。

図 2.6.4-104 偏光顕微鏡写真(PWT02B-15-C1-001, その4)

(a) 肉眼的特徴

褐色を呈する、極粗粒砂混りの土壌。

(b) 岩石組織

基質が褐色の風化土壌からなり、この中に径 4mm 以下の岩片・鉱物片が散在する。

(c) 岩片・鉱物片（または初生鉱物）

SP>Opx>AC・WEB>>Cr

- SP は角～亜円。径 4mm 以下。メッシュ組織を示すリザルダイト・クリソタイル蛇紋岩とブレイデット・マット組織を示すアンチゴライト蛇紋岩の粒子がある。前者の初生鉱物は Ol>(Opx)>>Cpx・(Cr)であるので、ハルツバージャイト質である。また、メッシュの中心に Br を生じるものあり。
- Opx は角～亜円。径 0.5mm 以下。波動消光顕著。しばしば変質し、Liz ないし、さらに変質して Wsp に交代した。
- AC は亜角。長径 1.8mm。長径 0.5mm 以下の柱状 Ac の集合体。X'=無色、Z'=淡緑色。
- WEB は亜角。径 2.0mm。Opx>Cpx・(Ol)からなる。自形の Chl 化した(Ol)を含む。Opx と Cpx は互いに入り組んだ縫合状。
- Cr は亜角～亜円。径 0.2mm 以下。黄褐色～褐色のものが多く、一部暗赤褐色（チョコレート色）。

(d) 基質とセメント

〔基質〕 褐色で微細な風化鉱物が主体。礫分 2%、砂分 25%、細粒分 73%。

(e) 2次鉱物

〔基質〕 基質の主体である褐色の鉱物は主として Sm であるが、パイロオーライトやコーリンサイトなどの蛇紋石（やブルーサイト）の風化鉱物を伴う可能性が高い。

〔岩片〕 SP を赤褐色や褐色の Wsp が交代。前者はコーリンサイト、後者はパイロオーライトなどと考えられる。

(f) 備考

- X 線粉末回折からは、Sm・Cc・Liz・Chr・Ant>Opx・Chl・Am・Kao>Tbr・Br・Tc?・Pya?・Coa?

(g) 考察

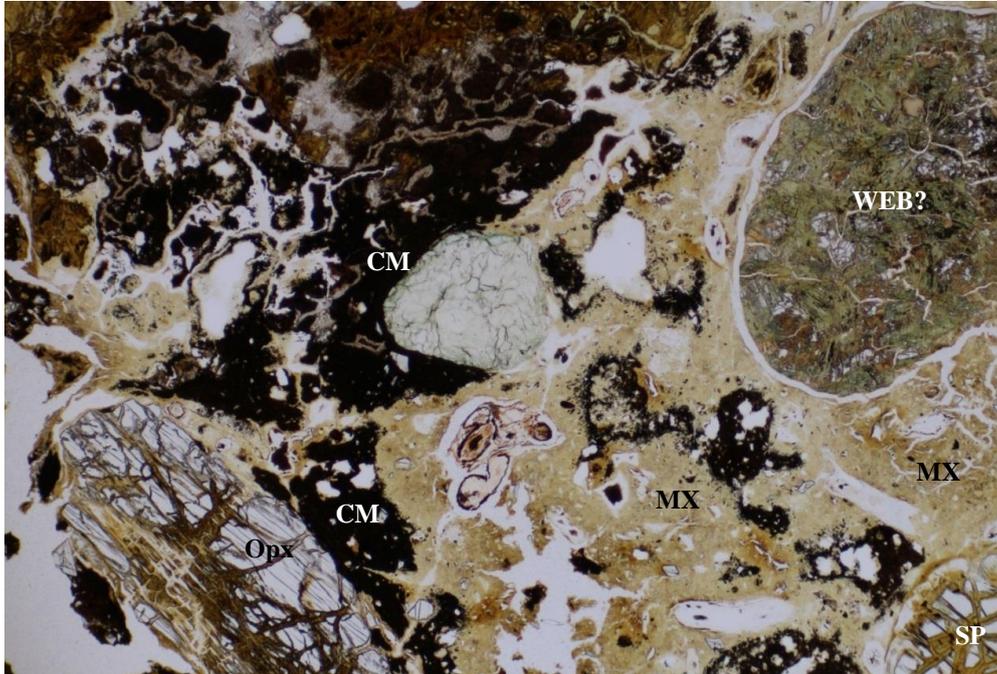
本試料は基盤岩直上に累重する極粗粒で散在するハルツバージャイト質の礫層で、基質は径 4mm 以下のハルツバージャイト質の岩片・鉱物片から構成される。一部亜角礫上のアクチノ角閃石を含むかんらん石ウェブスライト（斜方・単斜輝石と少量のかんらん石が主成分鉱物）が含まれる。これらの岩片・鉱物片は、上記基盤岩(PWT020-15-Rh-020)の構成鉱物の組成・産状（組織）などとほぼ同じであるが、自形のかんらん石を交代した緑泥石や、縫合状の斜方・輝石の産状が観察される。

一方、基質は微細な風化鉱物が主体な砂質である。特に、褐色の鉱物は主としてスメクタイトであるが、蛇紋石や水滑石の風化鉱物であるパイロオーライトやコーリンガイトの産状の可能性もある。

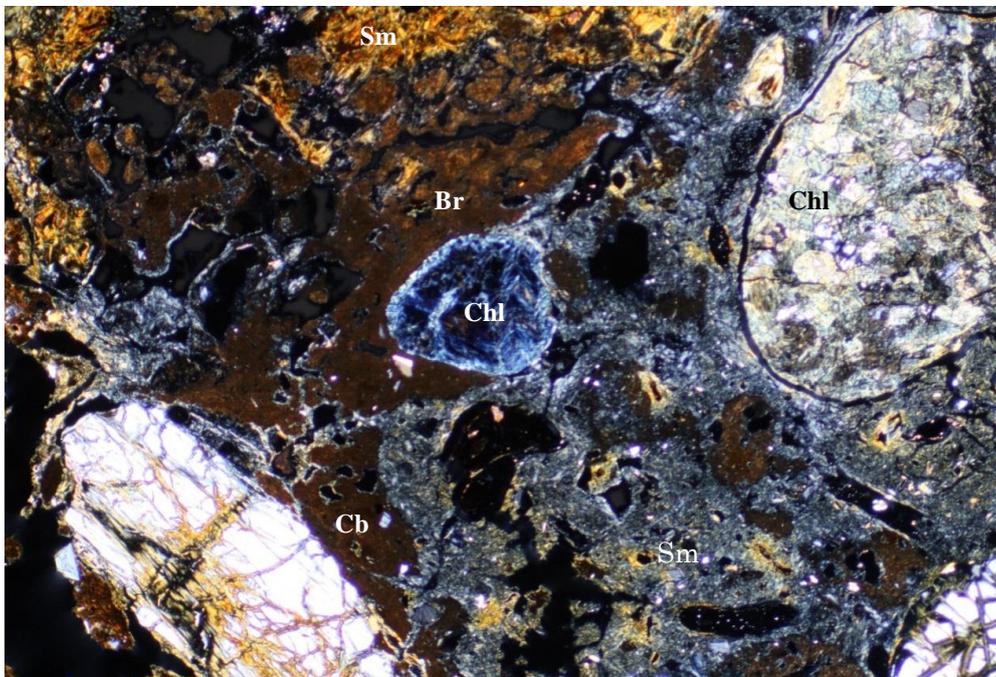
また、炭酸塩鉱物（方解石）や C-S-H（トバモライト）の沈殿相が観察される。

- e. PWT02B-15-C2-1-001 の偏光顕微鏡観察の結果
 同定した鉱物とその産状を顕微鏡写真とともに図 2.6.4-105～図 2.6.4-108 に示す。

碎屑性堆積物試料
 オープンニコル



クロスニコル

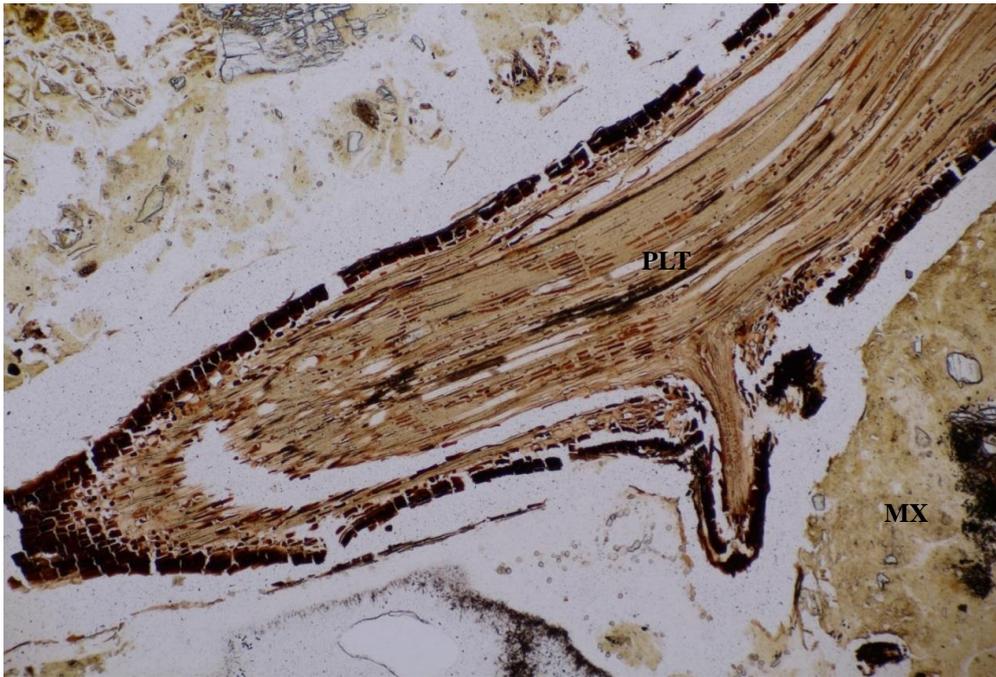


スケール 1.0 mm

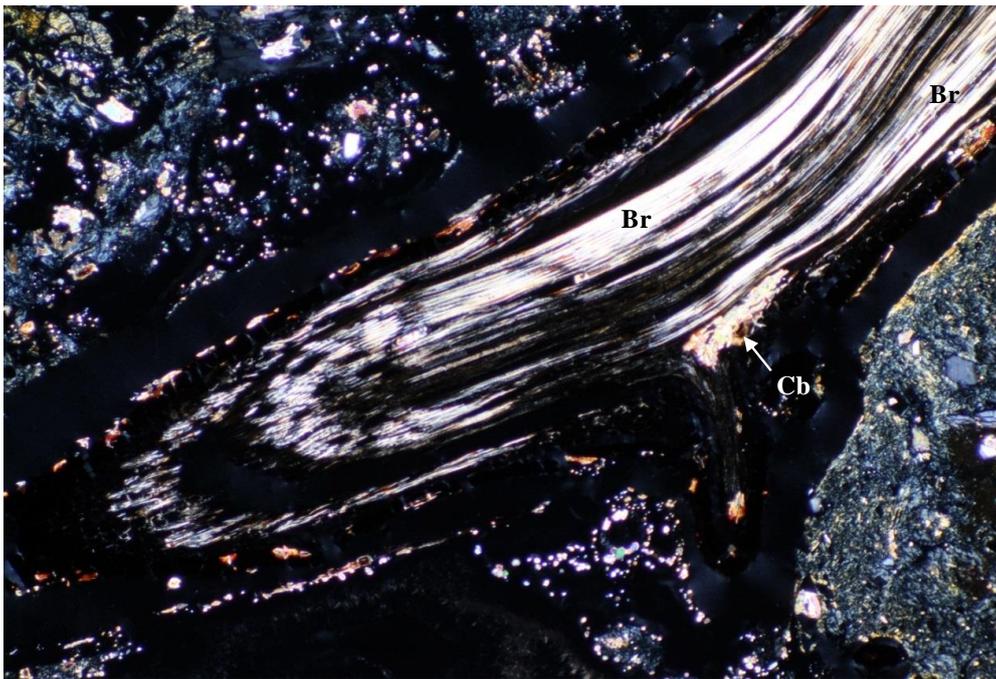
【備考】 基質 (MX) にはスメクタイト (干渉色黄灰) 以外の鉱物も目立つ。

図 2.6.4-105 偏光顕微鏡写真(PWT02B-15-C2-1-001, その1)

オープンニコル



クロスニコル

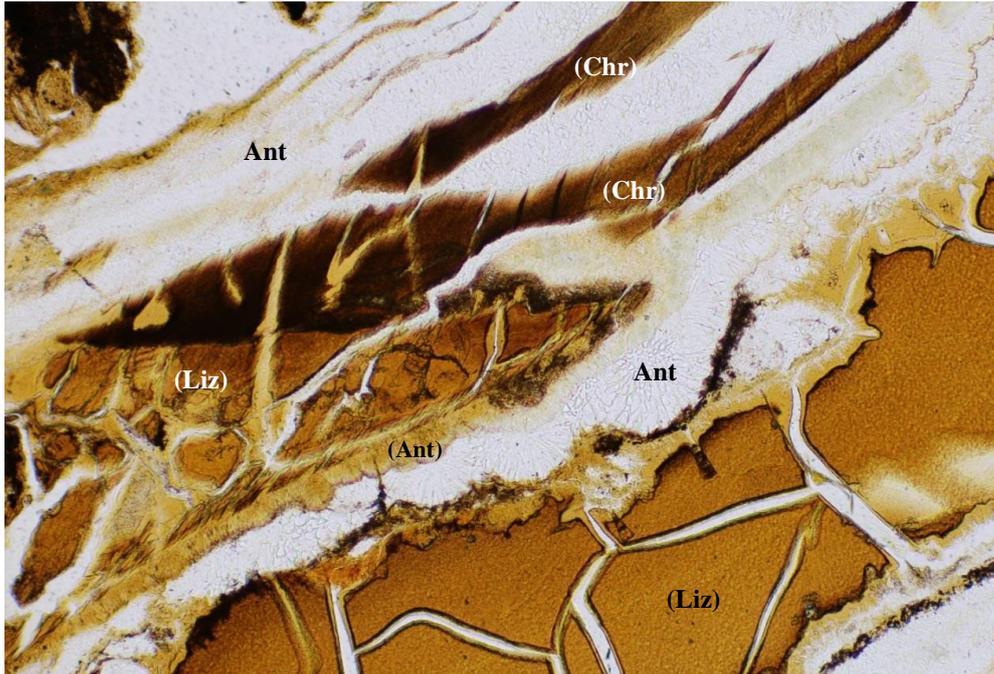


スケール 0.1 mm

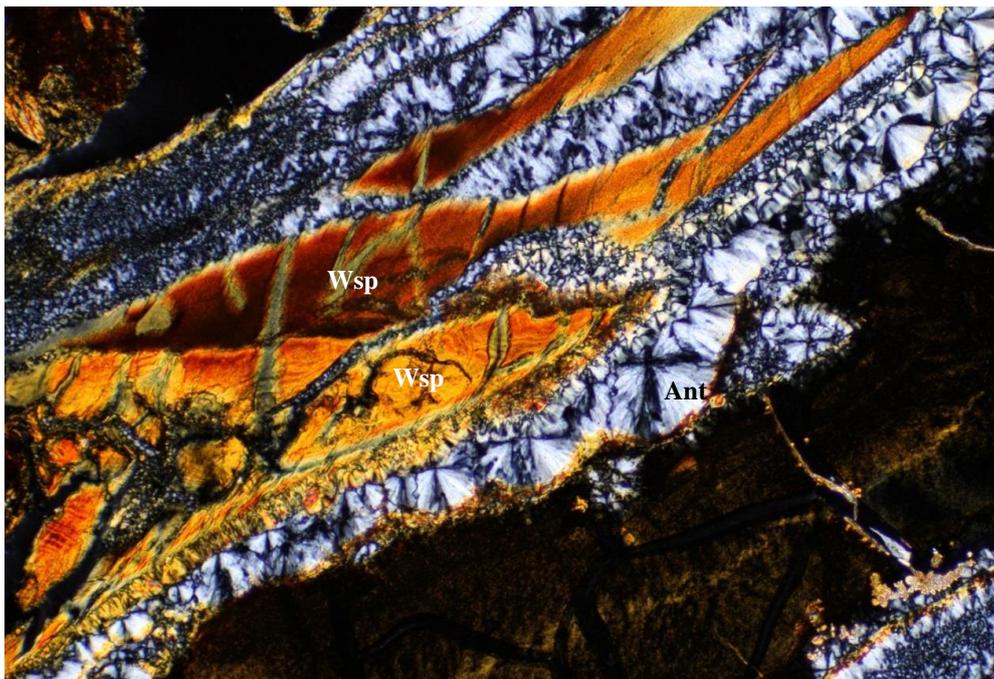
【備考】ブルーサイト様鉱物に置換された植物遺体。

図 2.6.4-106 偏光顕微鏡写真(PWT02B-15-C2-1-001, その2)

オープンニコル



クロスニコル

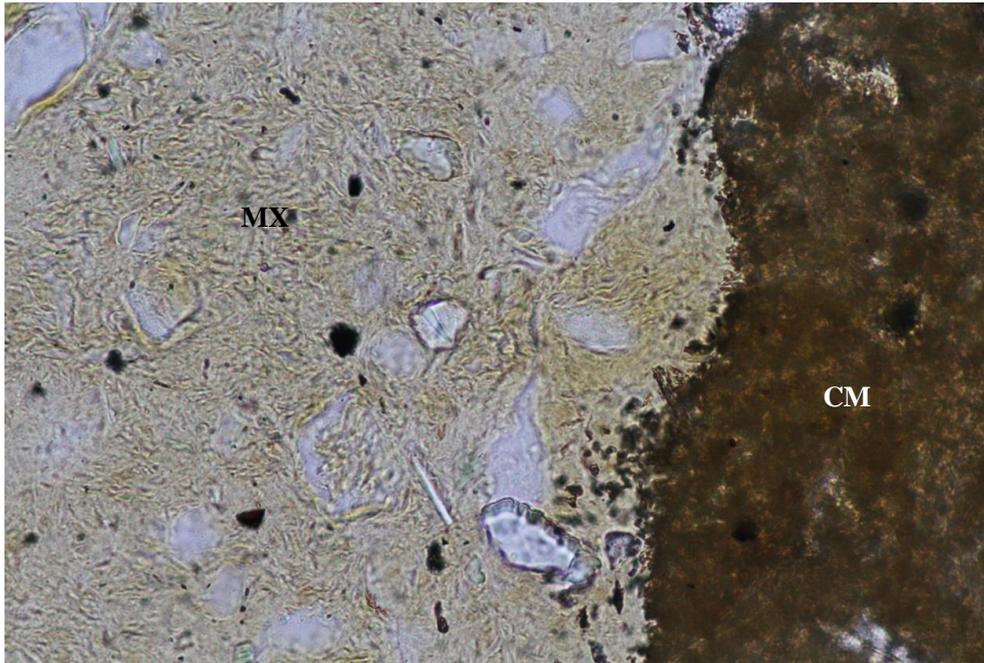


スケール 0.1 mm

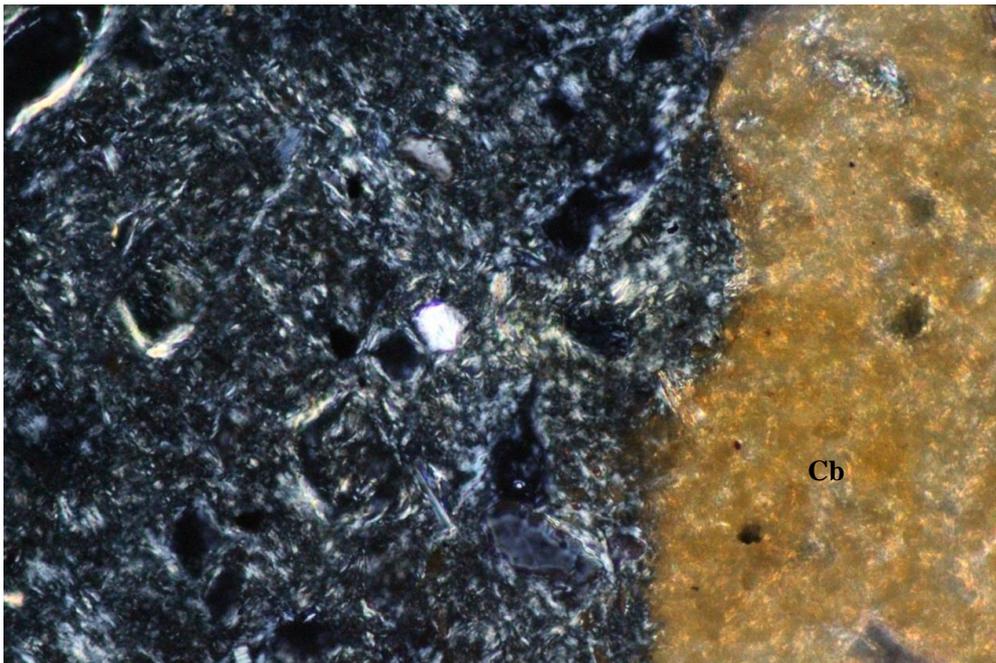
【備考】蛇紋岩片。リザルダイトとクリソタイルからなる蛇紋岩組織を切ってアンチゴライトが生成。しかし、風化作用の進行はリザルダイトとクリソタイルが早く、アンチゴライトの風化鉱物化は局所的に留まる。

図 2.6.4-107 偏光顕微鏡写真(PWT02B-15-C2-1-001, その3)

オープンニコル



クロスニコル



スケール 0.1 mm

【備考】 基質 (MX) は蛇紋石が主体らしい。

図 2.6.4-108 偏光顕微鏡写真(PWT02B-15-C2-1-001, その4)

(a) 肉眼的特徴

褐色を呈する、礫（主として細礫、少量の中礫を含む）混りの土壌。

(b) 岩石組織

基質が黄褐色の風化土壌からなり、この中に径 5.5mm 以下の岩片・鉱物片が散在する。

(c) 岩片・鉱物片（または初生鉱物）

SP>>GB・Opx・WEB?・PLT>Cr

- ・ SP は亜角～円。径 5.5mm 以下。メッシュ 組織を示すリザルダイト・クリソタイル蛇紋岩および、ブレイデット・マット組織を示すアンチゴライト蛇紋岩がある。原岩は主としてハルツバージャイト。Opx+Cr+Cpx からなる、スピネルシンプレクタイトあり。
- ・ GB は亜円。径 4mm 以下。(Pl)・Cpx・(Mf)からなる。完晶質岩。Pl はソーシュライト化。Mf は緑色の粘土鉱物 (Chl 他) に交代した。(ソーシュル石：細粒のゾイサイト (緑簾石の一種), 曹長石, 絹雲母, 石英, 方解石, 緑泥石, ルチルなどの混合物)
- ・ Opx は亜角。径 3.6mm 以下。ときに Cpx の離溶性ラメラあり。波動消光顕著。
- ・ WEB?は円。径 3.5mm。2 種類の Px からなるようだが、いずれも完全に変質している。
- ・ PLT は角～亜円。長径 5mm 以下。組織を残し、Br>Cb に置換された植物遺体あり (直径 0.3mm 以下)。その他、円径断面の粒子など。
- ・ Cr は角～亜角。径 0.2mm 以下。暗赤褐色～褐色。

(d) 基質とセメント

[基質] 褐色で微細な風化鉱物が主体。礫分 13%、砂分 24%、細粒分 63%。

[セメント] Pcr

- ・ 粒子と基質間に形成された粒間を充填。微細で、無色～淡褐色。

(e) 2 次鉱物

[基質] 基質の主体である褐色の鉱物は主に Sm であるが、Sp ないし Chl と考えられる干渉色灰～暗灰の微細鉱物が卓越する部分もある。パイロオーライトやコーリンガイトなどと考えられる蛇紋石 (やブルーサイト) の風化鉱物も生成している。

[セメント] Pcr

- ・ Pcr は微細で、粒間を充填。主として、Cb である(XRD から方解石)

[岩片] SP を赤褐色や褐色の Wsp が交代した。前者はコーリンガイト、後者はパイロオーライトなどと考えられる。

(f) 備考

- ・ 植物遺体のブルーサイトなどへの置換は、高い Mg 濃度の温水に浸かっていた時期があったことを示すと考えられる。
- ・ X線粉末回折からは、Cc>Sm・Liz>Ant・Opx・Chr・Am・Chl>Tc・Pya・Coa?

(g) 考察

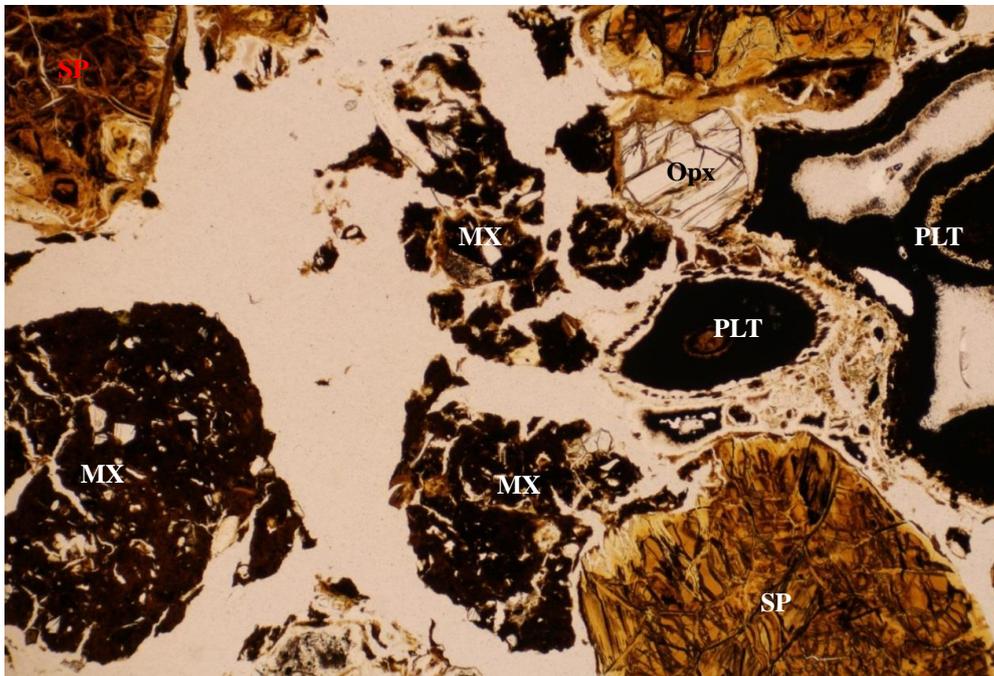
本試料は基盤岩直上に累重する主として細礫と少量の中礫が混在するハルツバージャイトの礫層である。基質は径 5mm 以下のハルツバージャイト質と、極少量であるが亜円礫状の径 4mm 以下の斑れい岩の岩片・鉱物片から構成される。この斑れい岩の主成分鉱物は斜長石、単斜輝石、石英で構成される完晶質であるが、斜長石の一部はソーシユライト化と、単斜輝石の緑泥石化が観察される。クロムスピネルや蛇紋岩類の鉱物組成・産状（組織）などについては、上記のものとの相違はない。斜方輝石は、単斜輝石と固相分離（共晶による離溶性ラメラ）組織が観察される。

特徴的な産状として長径 5mm 以下の柱状～亜円状植物木根が観察され、その産状を残存した形状で水滑石と少量の炭酸塩鉱物に置換されている。

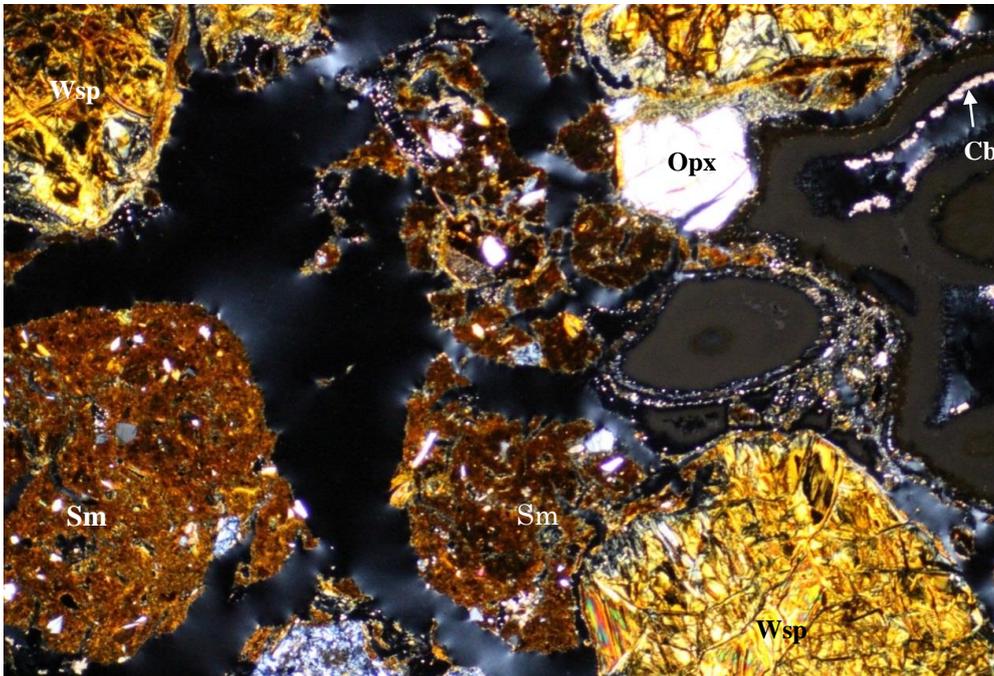
一方、基質は微細な風化鉱物が主体な砂質であり、スメクタイトと蛇紋石（一部、パイロオーライトやコーリングイトおよび、水滑石へ変質）および、緑泥石の微細鉱物が卓越する部分が観察される。

- f. PWT02B-15-C2-2-001 の偏光顕微鏡観察の結果
 同定した鉱物とその産状を顕微鏡写真とともに図 2.6.4-109～図 2.6.4-111 に示す。

碎屑性堆積物試料
 オープンニコル



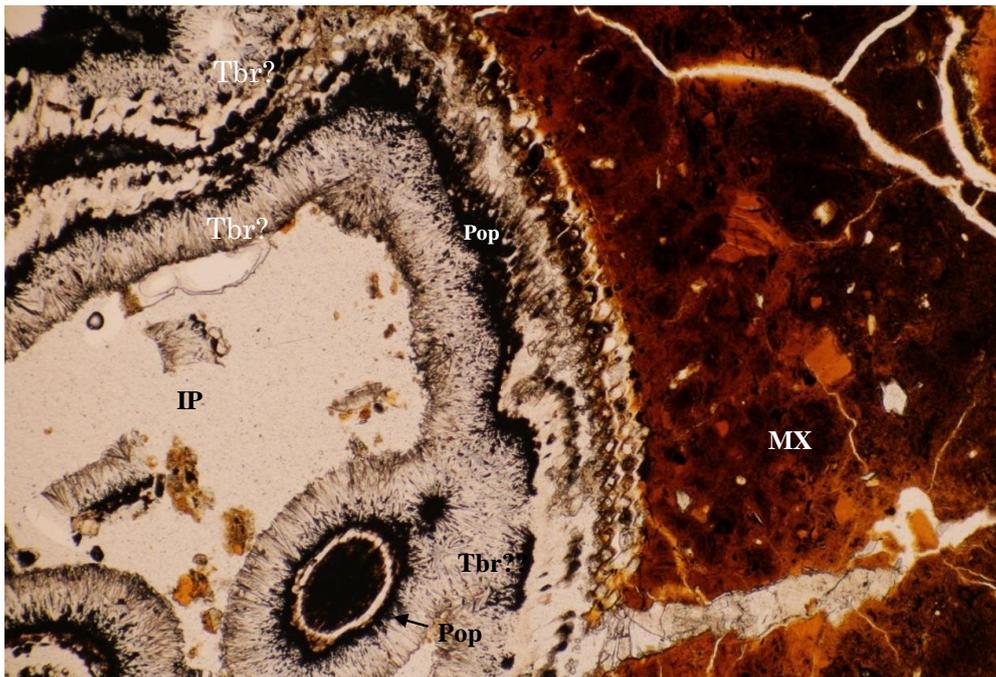
クロスニコル



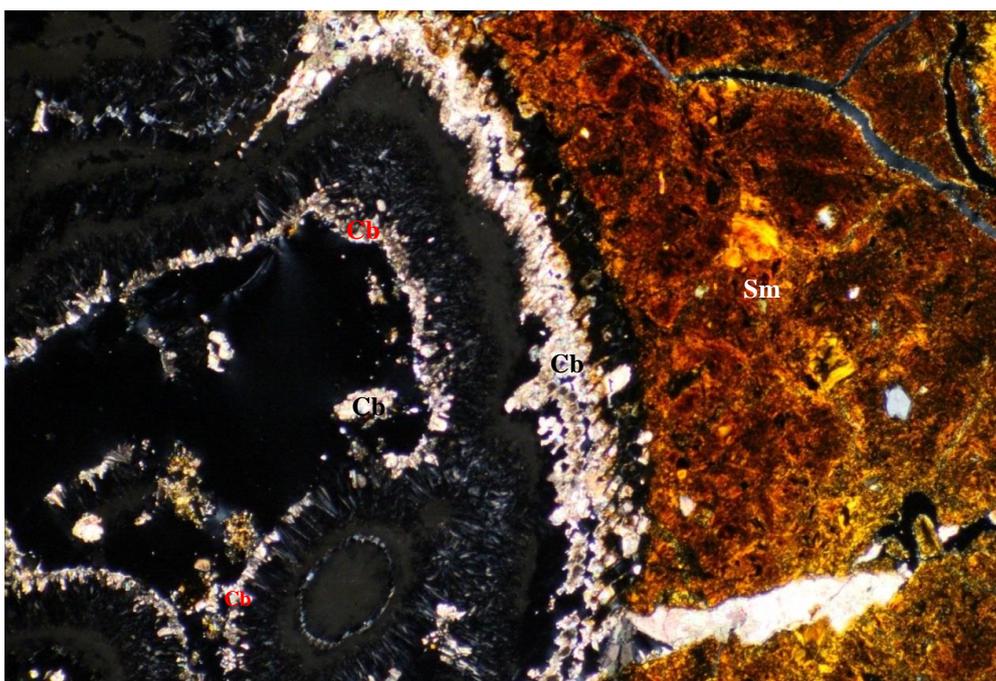
スケール 1.0 mm

図 2.6.4-109 偏光顕微鏡写真(PWT02B-15-C2-2-001, その1)

オープンニコル



クロスニコル

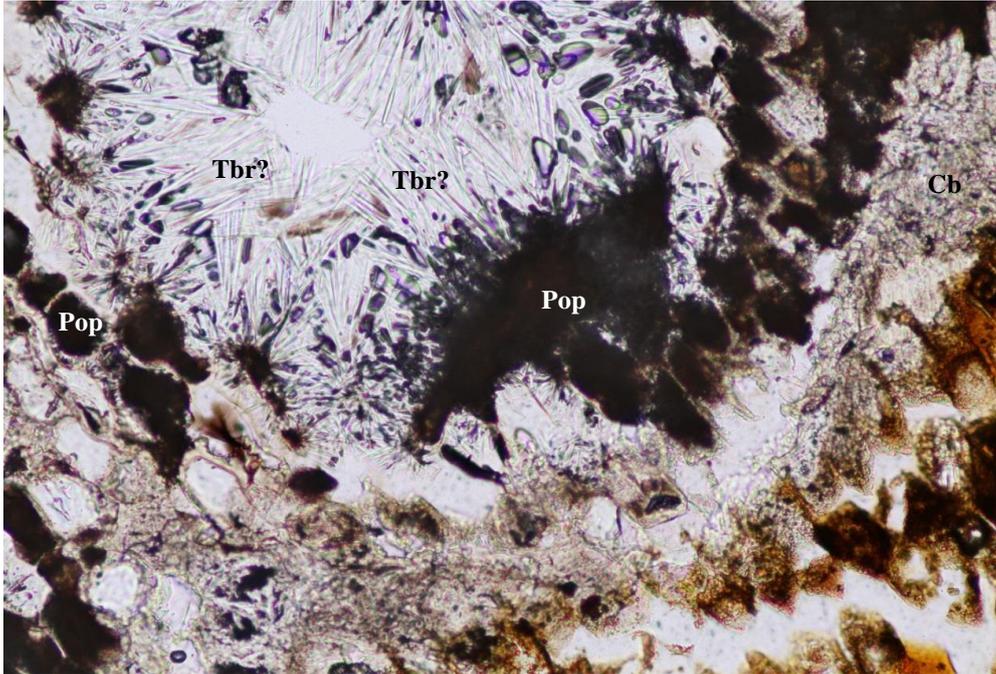


スケール 1.0 mm

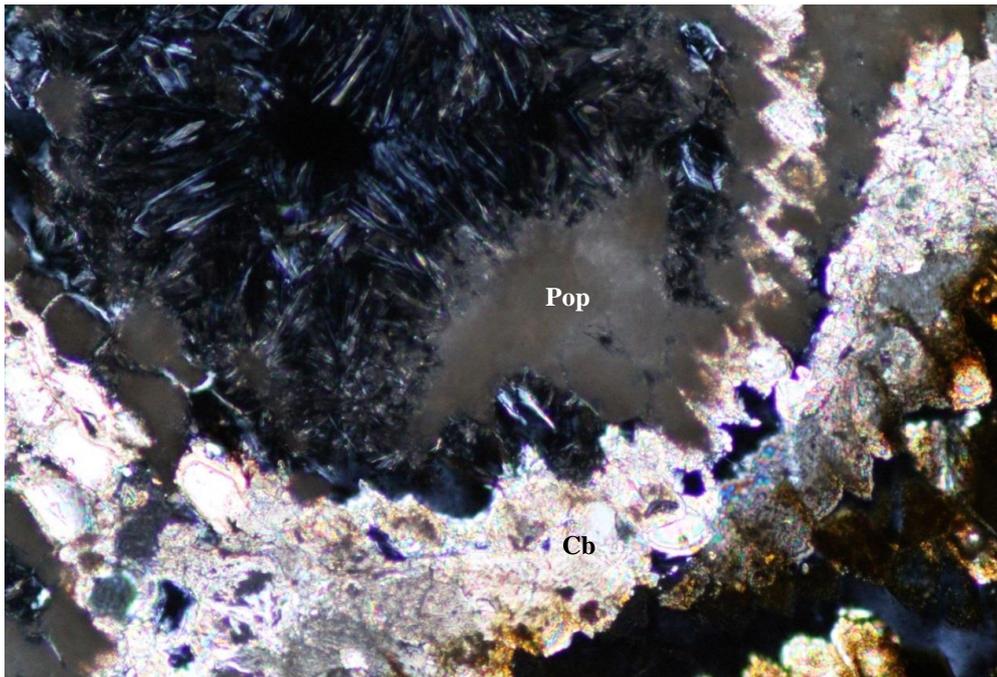
【備考】孔隙を菱形の炭酸塩鉱物 (Cb)、トバモライト (Tbr?)、および不透明鉱物 (Pop) が充填。

図 2.6.4-110 偏光顕微鏡写真(PWT02B-15-C2-2-001, その2)

オープンニコル



クロスニコル



スケール 0.1 mm

【備考】 孔隙充填物. 前の写真の一部。

図 2.6.4-111 偏光顕微鏡写真(PWT02B-15-C2-2-001, その3)

(a) 肉眼的特徴

褐色を呈する、礫（礫は主として細礫、一部中礫）混りの土壌。

(b) 岩石組織

基質が褐色の風化土壌からなり、この中に黄褐色に風化の進んだ、径 5mm 以下の蛇紋岩粒子が多数分布する。

(c) 岩片・鉱物片（または初生鉱物）

SP>>TR>Opx・PLT・Cr

- ・SP は亜円～円。径 5mm 以下。メッシュ組織を示すリザルダイトークリソタイル蛇紋岩とブレイデット・マット組織を示すアンチゴライト蛇紋岩がある。両者が共存する粒子あり。前者を切って後者（アンチゴライト蛇紋岩）が形成されている例あり。褐色～黄褐色に風化作用が進むが、アンチゴライト生成部は風化しにくく、よく残存する。
- ・TR は亜円。径 1.8mm 以下。長柱状の Tr が主体で、粒間を青緑色の Chl? が埋める。CPX 源の可能性。
- ・Opx は亜角。径 0.8mm 以下。多くは Wsp 化。
- ・PLT は種子状の楕円形など。
- ・Cr は角。径 0.15mm 以下。暗赤褐色～淡褐色。

(d) 基質とセメント

〔基質〕 褐色で微細な風化鉱物が主体。礫分 16%、砂分 18%、細粒分 66%。

〔セメント〕 2 種類の結晶 (Pcr) と詳細不明の不透明物質 (Pop) からなる。

(e) 2 次鉱物

〔基質〕 基質の主体である褐色の鉱物は主として Sm であるが、パイロオーライトなどの、蛇紋石（やブルーサイト）の風化鉱物も生成している可能性が高い。

〔セメント〕 Cb・Chr?・Pop

径 10mm の孔隙に、菱形の Cb（シデライト、またはドロマイト）、Chr?（干渉色暗灰の針状結晶、直消光、伸長正）や Pop が生成する例あり。空洞を残す。

〔岩片〕 SP を赤褐色や褐色の Wsp が交代。前者はコーリンガイト、後者はパイロオーライトなどと考えられる。

(f) 備考

- ・リザルダイトークリソタイルに比べてアンチゴライトが風化作用に強いことがわかる。
- ・炭酸塩鉱物、トバモライトと沈澱性不透明物質(非晶質?)がセメントとして粒間に生成。間隙水が Ca, Fe や Si に富んでいたと考えられる。
- ・X線粉末回折からは、Cc・Sm・Liz>Opx・Chr・Chl・Ant・Am・Tbr>Tc・Pya

(g) 考察

本試料は基盤岩直上に累重する主として細礫と、一部中礫が混在するハルツバージャ

イト質岩石と、一部トレモラ角閃岩の礫層である。基質は径 5mm 以下の蛇紋石の鉱物片が多数観察される。主要構成鉱物は斜方輝石、Cr-スピネルで、径 0.8mm 以下の斜方輝石は、亜角状で、蛇紋石（リザルダイト・クリソタイル、アンチゴライトから構成され、アンチゴライトが前者の蛇紋石を脈状に横断）に変質している。径 1.8mm 以下のトレモラ角閃石岩は亜円状で、長柱状のトレモラ角閃石が主体で、粒間を青緑色の緑泥石様鉱物で充填されている。

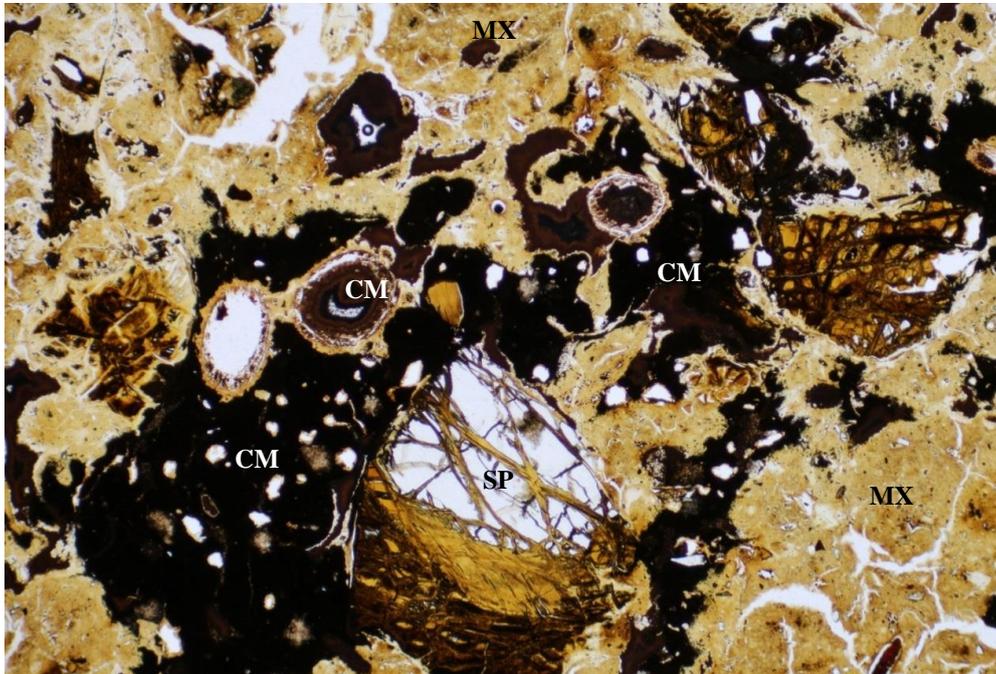
種子状で楕円形の植物遺体が観察される。

基質は、スメクタイト、蛇紋石の変質鉱物であるパイロオーライト・コーリンガイトや水滑石が観察されるが、径 10mm 程度の空隙に菱形のシデライトかドロマイト様の炭酸塩鉱物が充填している。

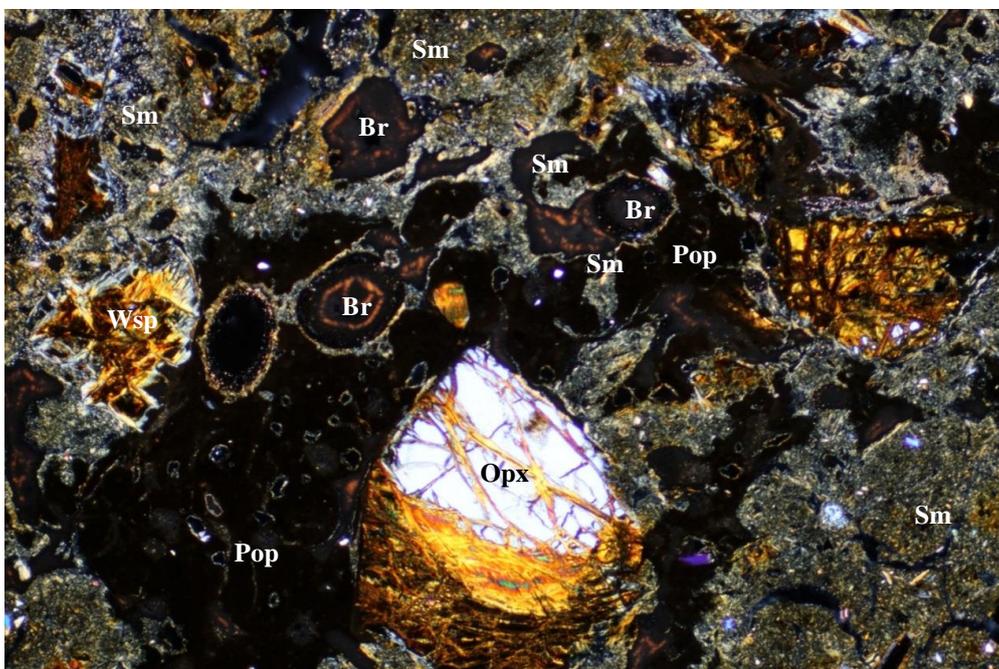
また、化学沈殿相である非晶質 C-S-H（トバモライト）も観察される。

- g. PWT02B-15-C2-2-002 の偏光顕微鏡観察の結果
 同定した鉱物とその産状を顕微鏡写真とともに図 2.6.4-112～図 2.6.4-113 に示す。

碎屑性堆積物試料
 オープンニコル



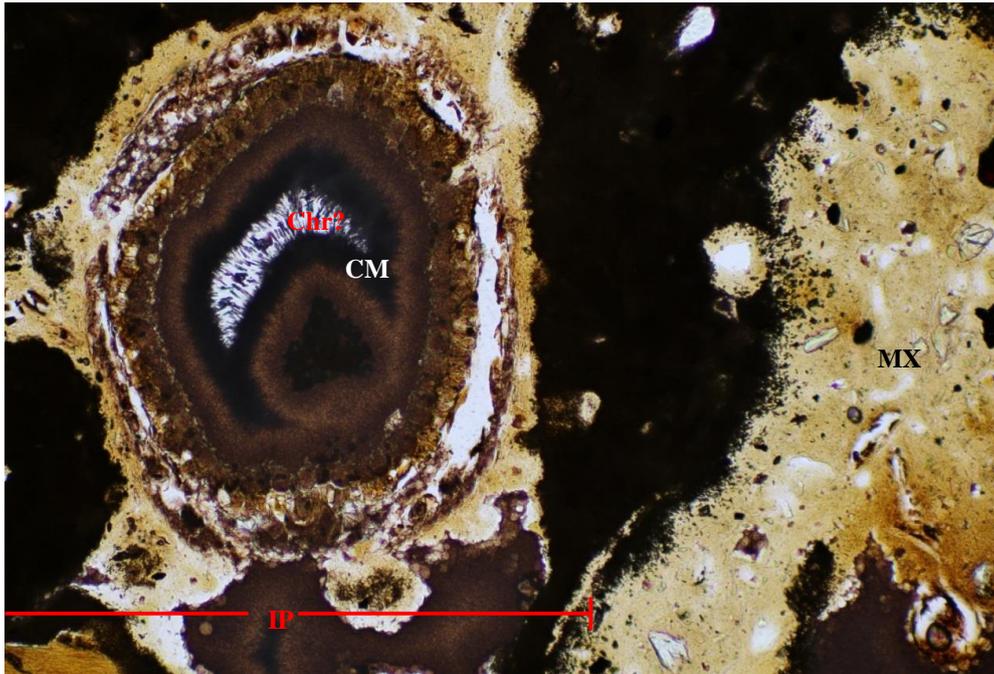
クロスニコル



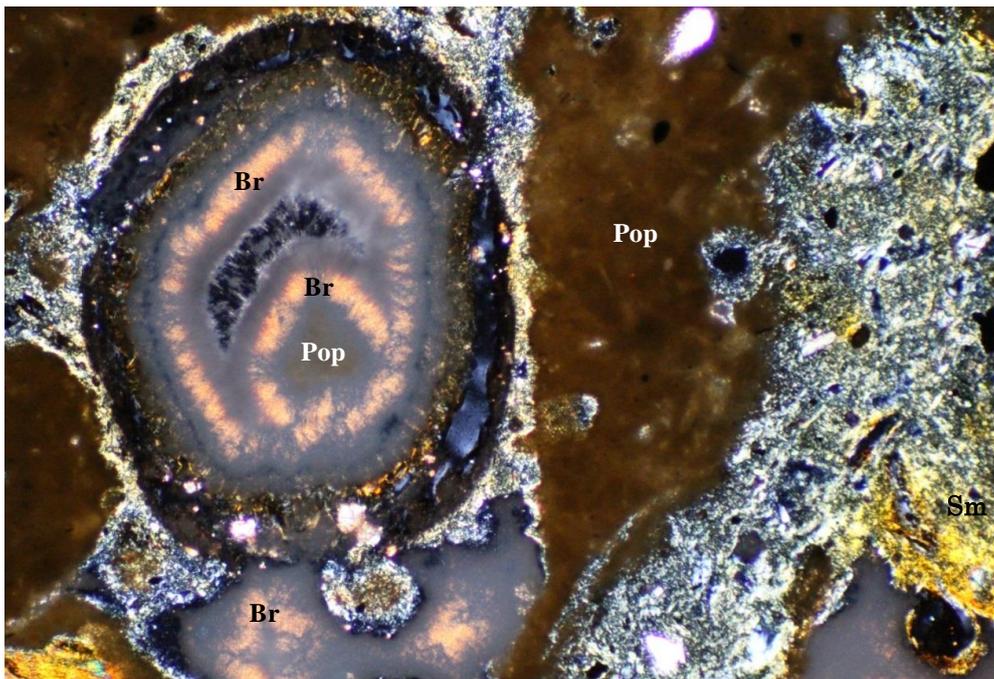
スケール 1.0 mm

図 2.6.4-112 偏光顕微鏡写真(PWT02B-15-C2-2-002, その1)

オープンニコル



クロスニコル



スケール 0.1 mm

【備考】 基質には干渉色が黄灰 (Sm) 以外に灰～暗灰色の鉱物が生成。蛇紋岩などであると考えられる。

図 2.6.4-113 偏光顕微鏡写真(PWT02B-15-C2-2-002, その2)

(a) 肉眼的特徴

褐色を呈する、礫（礫は主として細礫、一部中礫）混りの土壌。

(b) 岩石組織

基質が褐色の風化土壌からなり、この中に径 7mm 以下の風化作用の進んだ蛇紋岩粒子が散在する。

(c) 岩片・鉱物片（または初生鉱物）

SP>>PLT・Opx>Cr・Cpx

- ・SP は角～円。径 7mm 以下。主としてメッシュ組織を示すリザルダイトークリソタイル蛇紋岩。一部、ブレイデット・マット組織を示すアンチゴライト蛇紋岩。しばしば黄褐色や赤褐色の Wsp に交代。Opx をしばしば含み、原岩は主としてハルツバージャイトと考えられる。
- ・PLT は柱状、胞子様の円形断面など。長径 2.5mm 以下。
- ・Opx は亜角～亜円。径 3.0mm 以下。ときに Cpx の離溶ラメラあり。2～3 粒子が接合することあり。Cr とのシンプレタイトが生成することあり。
- ・Cr は角。径 0.1mm 以下。暗赤褐色。
- ・Cpx は角。径 0.2mm 以下。

(d) 基質とセメント

〔基質〕 褐色で微細な風化鉱物が主体。礫分 15%、砂分 9%、細粒分 76%。

〔セメント〕 粒間を不透明物質 (Pop) が充填する。さらに、残った空間を Br が充填。

(e) 2 次鉱物

〔基質〕 基質の主体である褐色の鉱物は主として Sm であるが、干渉色灰～暗灰の Sp らしい鉱物も存在。また、パイロオーライトなどの、蛇紋石（やブルーサイト）の風化鉱物も伴う可能性がある。

〔セメント〕 Pop>Br>Tbr?

- ・Pop は詳細不明。非晶質？クロスニコルで赤褐色の光を通す水酸化鉄様のものと、完全に光を通さないものあり。
- ・残った空間を淡褐色の微細鉱物 (Fe を含む Br と思われる) が充填した。
- ・Tbr?はさらに残った空間に微量生成。針状で干渉色暗灰。

〔岩片〕 SP を赤褐色や褐色の Wsp が交代。前者はコーリンガイト、後者はパイロオーライトなどと考えられる。

(f) 備考

- ・リザルダイトークリソタイルに比べてアンチゴライトが風化作用に強いことがわかる。
- ・X線粉末回折からは、 Cc・Sm・Liz>Opx・Tbr・Am>Ant・Chr・Tc・Br・Kao?・Lau?

(g) 考察

本試料は、基盤岩直上に累重する主として細礫と一部中礫が混在するハルツバージャ

イト質岩石の礫層で、PWT02B-15-C2-2-001 試料の上部のものである。基質は、径 7mm 以下の蛇紋石が散在している。主要構成鉱物は、PWT02B-15-C2-2-001 のものとの差異がないが、斜方輝石と単斜輝石が固相分離組織を示すことと、0.2mm 以下の柱状な単斜輝石が観察される。

基質は、スメクタイト、蛇紋石（変質鉱物のパイロオーライト/コーリングイト）と水滑石や、水酸化鉄様の不透明鉱物が観察される。

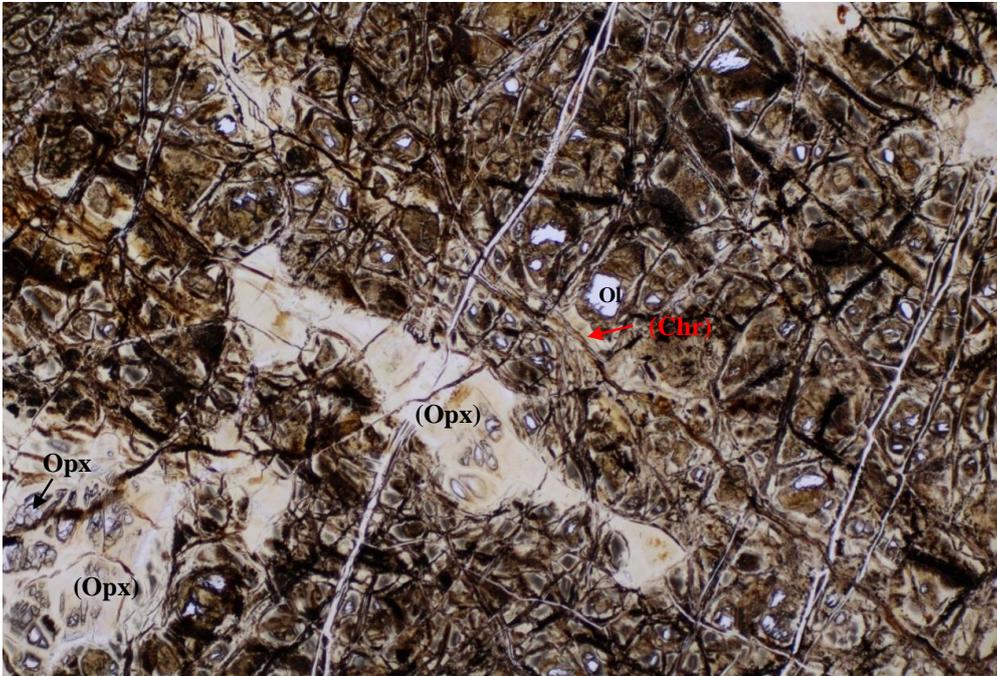
また、空隙を Fe-水滑石様の微細鉱物と針状の C-S-H 様鉱物も観察される。

a. PWT02-15-Rh-020

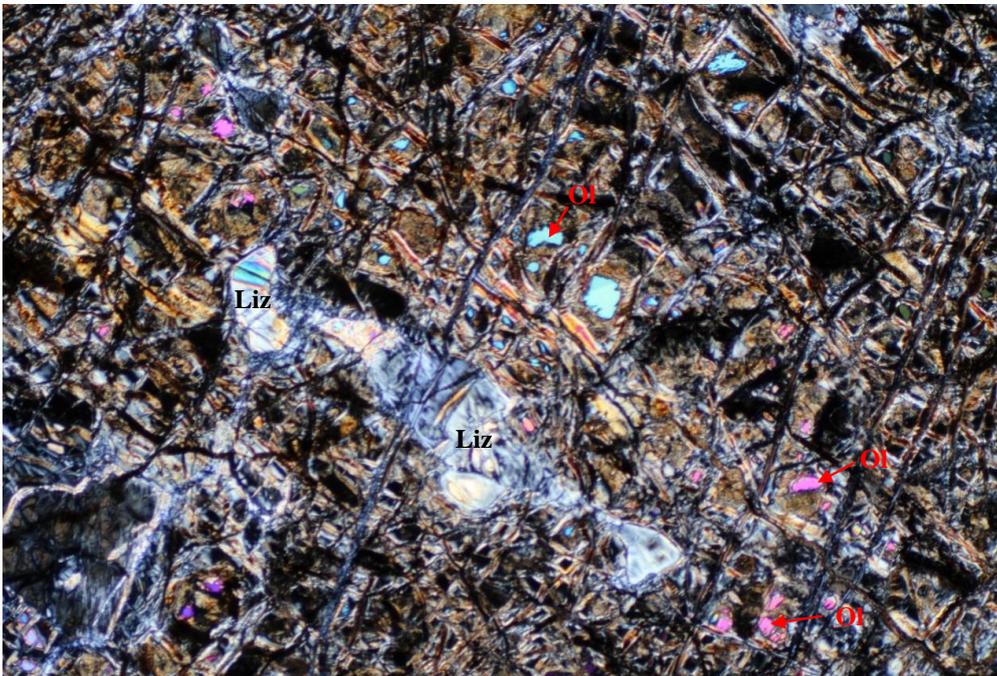
同定した鉱物とその産状を顕微鏡写真とともに図 2.6.4-114～図 2.6.4-116 に示す。

超塩基性岩石試料

オープンニコル



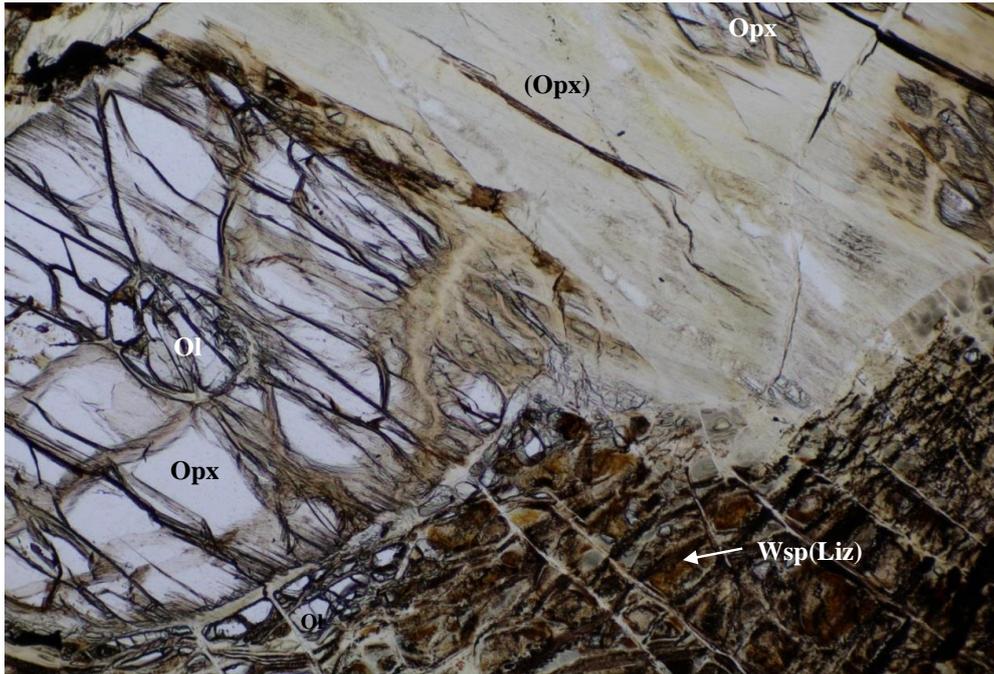
クロスニコル



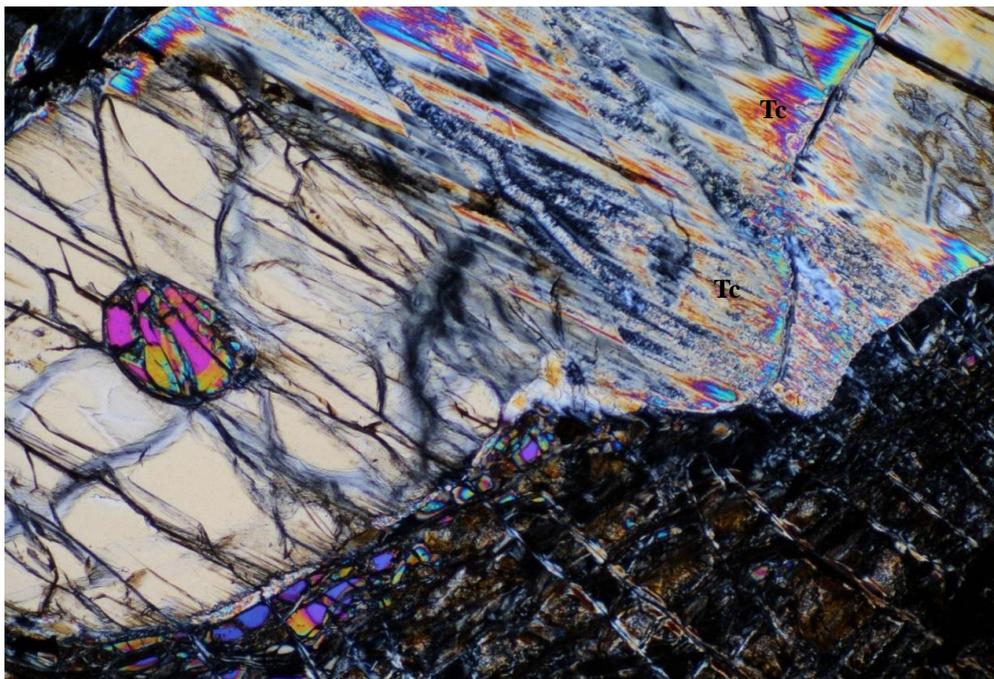
スケール 1.0 mm

図 2.6.4-114 偏光顕微鏡写真(PWT02-15-Rh-020, その1)

オープンニコル



クロスニコル

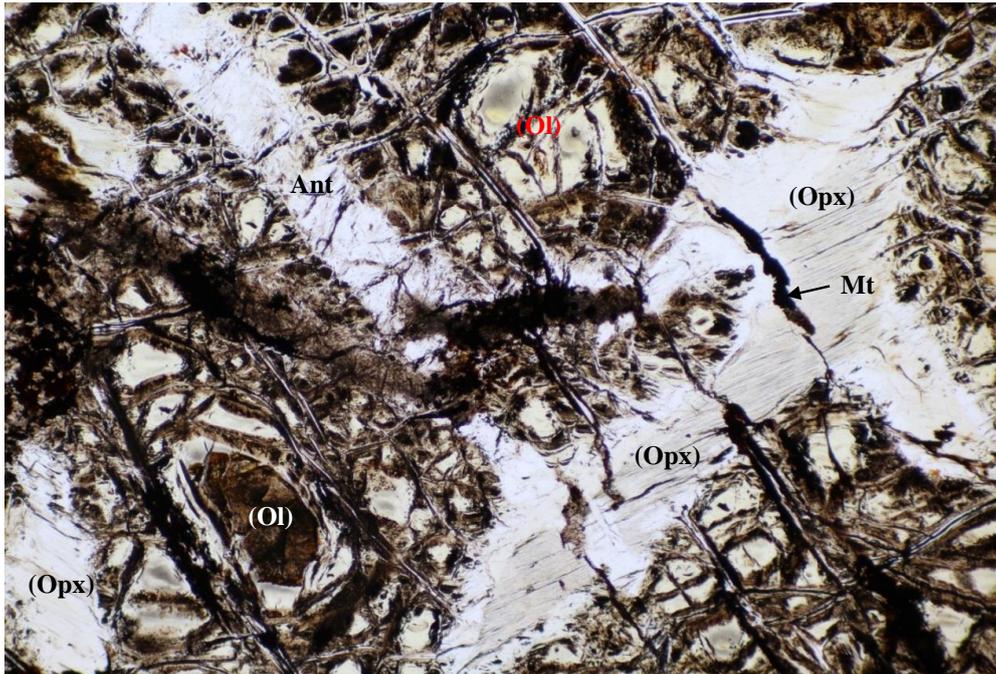


スケール 1.0 mm

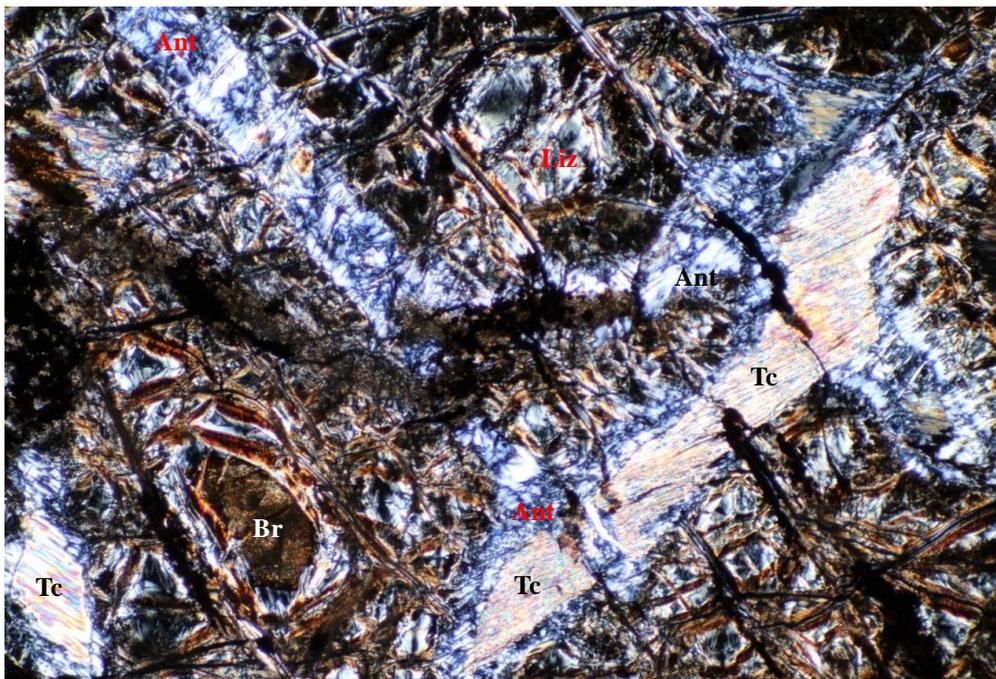


図 2.6.4-115 偏光顕微鏡写真(PWT02-15-Rh-020, その2)

オープンニコル



クロスニコル



スケール 1.0 mm

【備考】 Liz と Chr からなるメッシュ組織を切って Ant が生成. Opx は Tc 化し, その周囲にも Ant が生成

図 2.6.4-116 偏光顕微鏡写真(PWT02-15-Rh-020, その3)

(a) 肉眼的特徴

淡褐色に風化した塊状蛇紋岩。灰白色の鉍物脈が発達する。

(b) 岩石組織

初生かんらん岩の組織はプロトグラニユラー組織である可能性が高い（蛇紋岩化が進み、やや不明）。蛇紋岩組織は大部分メッシュ組織。局所的にメッシュ組織がブレイデッド・マット組織に再編されかかっている。

(c) 岩片・鉍物片（または初生鉍物）

$Ol > Opx \gg Cpx \cdot Cr$

- Ol は大部分変質するが、メッシュ組織のセンターに少量残存する。
- Opx は他形、粒状～粒間充填状。長径 1～10mm。波動消光顕著。半ば変質し、Liz などに交代。完全に変質し、周囲を Ant に取り巻かれることがある。
- Cr は他形、粒状。径 0.2mm 以下。Cr-(Px)のシンプレクタイトあり。この Cr は黄褐色で、Cr/Al 比がやや低いと考えられる。

(d) 基質とセメント

(e) 2次鉍物

$Liz \cdot Chr \cdot Br \cdot Chl \cdot Tc \cdot Ant \cdot Wsp \cdot Mt \cdot [Br+Mt] \cdot [Ant+Tc] \cdot [Ant+Br]$

- Liz は Ol を交代して、メッシュ組織のセンターを構成する。
- Chr はメッシュ組織の格子を構成する。
- Br はメッシュ中心の Ol が残っていた部分を交代した。
- Chl は Opx などを交代した Liz をさらに交代。淡緑色。
- Tc は Opx を部分交代した。
- Ant は (Opx) の周辺などの Liz-Chr を交代した。
- Wsp は褐色～赤褐色で、Sp や Br を交代した。パイロオーライトないし、コーリンガイトと考えられる。
- Mt はダスト状でメッシュ中心の Liz 中に散在するが微量である。
- [Br+Mt] はメッシュの格子部に生成。Mt はダスト状であるが、ときに強い自形性あり。
- [Ant+Tc] は脈をつくる。メッシュ組織を切る。
- [Ant+Br] は脈をつくる。メッシュ組織を切る。

(f) 備考

- 相対的に低温でリザルダイトークリソタイルをつくる蛇紋岩化作用が進行した後、アンチゴライト他の生成する高温の場へもたらされた。これが、広域変成作用か貫入岩による接触変成作用かは不明なものの、一般に貫入岩の接触変成作用により、Opx の滑石化や、アンチゴライトやブルーサイトの生成が不均質に起こることがよくある。
- X線粉末回折からは、 $Liz \cdot Chr \cdot Ant \cdot Ol \cdot Opx > Tc \cdot Mix? \cdot Lau? \cdot Pya?$
→Br は存在するが、XRD の検出限界以下であると考えられる。

(g) 考察

本試料はトレンチ床面から採取されたパラワンオフィオライトの基盤岩であるハルツバージャイト（かんらん石と斜方輝石が主成分鉱物）である。特に、苦鉄質鉱物のかんらん石と斜方輝石が比較的強い蛇紋岩化作用を受けている。蛇紋石鉱物は低温型クリソタイルとリザルダイおよび、高温型アンチゴライトがメッシュ組織と局所的にブレイデッド・マット組織を示す。この蛇紋岩化作用は、低温型から高温型への環境変化（低温型の蛇紋石を高温型の蛇紋石が脈状に横断）を示すことから、これは広域変成作用か貫入岩による接触変成作用が考えられるが、おそらく、パラワンオフィオライトの定置か、オフィオライトへの後期貫入岩である斑れい岩や輝緑岩の貫入（岩脈）による高温の場によるものと示唆される。

これらの蛇紋岩化作用に伴いかんらん石を交代した水滑石（ブルーサイト）や斜方輝石を部分交代した滑石（タルク）が観察される。但し、これらの苦鉄質鉱物のコア部分が残存していることから、完全な蛇紋岩そのものではなく、蛇紋岩化が進行したハルツバージャイトである。

また、少量の緑泥石が斜方輝石を交代したリザルダイトをさらに交代し、特徴的な淡緑色を示す。不透明鉱物としては、多形・粒状のクロムスピネルと、ダスト状でメッシュ組織のリザルダイト中に散在する微量の磁鉄鉱（マグネタイト）が観察される。この後者は、その産状から蛇紋岩化作用により形成された副産物鉱物であることが示唆される。

4) 岩石鉱物学的考察

a. 原岩

これらの試料（トレンチ2の西壁と床面から採取）による偏向顕微鏡観察から岩石鉱物学的特徴（変質鉱物を含む主要構成鉱物組み合わせ・産状/共生・組織など）と、それらの特徴から原岩を考察すると、基盤岩であるパラワンオフィオライト(PWT02-15-Rh-020)は、単斜輝石を微量含むハルツバージャイト質超塩基性火成岩（斜方輝石かんらん岩）である。

他の碎屑性堆積物(Clastic Sediments)を構成する岩片・鉱物片の原岩は、自形の Cr-スピネルを含有するダナイト質超塩基性火成岩起源(ダンかんらん岩:PWT02-15-Rh-015)、透角閃石で特徴づけられるトレモラ角閃岩起源(PWT02-15-C2-2-001, PWT02-15-Rh-018)、かんらん石ウェブスライト起源（両輝石かんらん岩；PWT02-15-C1-001）と斑れい岩起源(PWT02-15-C2-1-001, PWT02-15-Rh-016)であると考えられる。これらの原岩は、苦鉄質鉱物の組成とモード（鉱物の容積%）による程度の差はあるが、蛇紋岩化作用が顕著である。

b. 蛇紋岩化作用

超塩基性火成岩と地下水との相互作用過程において、特に超塩基性火成岩の主要構成鉱物であるかんらん石や両輝石で代表される苦鉄質鉱物の蛇紋岩化作用が特筆される。一般に相対的高温（約 350°C以上）で形成する蛇紋石はアンチゴライトで、それより低温では、リザルダイト・クリソタイルが形成し、これらの低温型蛇紋石は 100°C以下でも形成される。

今回採取されたトレンチ2からの試料からは、高温型アンチゴライトの産状は局所的で、低温型蛇紋石を横断する脈状としてのみ観察される。これら産状関係から、アンチゴライトの形成は低温型蛇紋石の形成後に生じたものと考えられる。この現象は新たな高温環境での形成環境が必要となる。これは、パラワンオフィオライトの定置過程でのテクトニクス変遷過程か、パラワンオフィオライトを構成する斑れい岩や輝緑岩などの貫入岩による熱の供給によって生じた高温環境が高温型アンチゴライトの生成をもたらしたものと示唆される。

c. 蛇紋岩化作用に伴う水滑石・クリソタイルと地下水との相互作用

このパラワンオフィオライトのハルツバージャイト（斜方輝石かんらん岩）の基盤岩は、炭酸塩鉱物（主に方解石）が少なく、水滑石やクリソタイルが多く含まれる。一般的には蛇紋岩化作用が進行している超塩基性火成岩体では、地下水（Ca-OH タイプ）は高 Ca になり、その結果、炭酸塩鉱物を多く沈殿することが指摘されている[51][52]。このことからこの基盤岩は、少なくとも地表近傍ではかんらん石や輝石を消費して蛇紋石などの Mg-鉱物を形成するような地球科化学的環境にはないことが示唆される。

一方、碎屑性堆積物を構成する種々の岩片の基質には、少量の炭酸塩鉱物と C-S-H（主にトバモライトなど）が観察される。これは水滑石や蛇紋石の生成後の残液が、Ca や Si に富むようになり析出したものと考えられる。特に、高 Mg / Si 比の場合では水滑石が析出すると指摘されている[53]。

また、植物遺体（木根）を水滑石や C-S-H が置換していることから、高アルカリで、高

Mg/Si 比の地球化学的場と地下水がかなりの時間浸透するような水理場が存在したものと示唆される。基質の 3 八面体型スメクタイト（サポナイト）もこのような環境のもとで形成されたものと考えられる。

2.7 まとめ

実験ではスメクタイトの溶解が顕著になる pH11 程度の高アルカリ地下水がスメクタイトを含有する粘土質堆積物中に直接浸水しているサイト（コンタクト部）、いわゆる **Active Type** のナチュラルアナログ、を探索・選定することを目的として、平成 26 年度の概査[1]で pH11 を超えるアルカリ湧水を複数地点で確認したパラワン島中央部の東部沿岸域に位置する Narra 地区を中心に、地質概査、高アルカリ地下水の水理地質学的調査や地球化学的調査およびトレンチ調査などを実施した。

Narra 地区の Narra3-1 地点の高アルカリ源泉（pH11.20）の南東約 100m 下流側に分布する石灰華（Travertine）の平坦地となっている Narra3-2 周辺を対象として露頭調査を行い、2カ所のトレンチ（トレンチ 1：Narra3-2 の平坦地に注ぐ河川の比較的上流域周辺、トレンチ 2：トレンチ 1 の下流の地形が落ち込んだ先の石灰華の堆積する場所）掘削地点を選定し、トレンチ調査を実施した。

2.0m まで掘削し基盤岩に達したトレンチ 2 において、基盤岩直上には碎屑性堆積物と思われる粘土層を確認した。このトレンチ 2 を含む 2ヶ所のトレンチ壁面の浸出水は、pH11 の高アルカリ地下水で流量が多い。またトレンチ 2 の碎屑性堆積物では XRD による鉱物分析からスメクタイトが同定されことから、アルカリ地下水が現在もスメクタイトを含む粘土質堆積物に浸出している **Active Type** のナチュラルアナログといえる露頭が本事業で初めて確認された。

地下水の地球化学特性と流動特性の観点から、Narra 地区の高アルカリ地下水は、pH と温度が高く、酸化還元電位が低い（還元性）。また Narra3-1~3-2 地区だけでなく Palawan のアルカリ地下水は総じて Mg 濃度が低く、Ca 濃度が高い蛇紋岩化作用に伴うアルカリ地下水の典型的な特徴を示す。Narra3-2 トレンチの浸透水は Narra3-1 の源泉とほぼ水質が同じであり、一方、表層水と混合しているとみられるアルカリ河川水とは水質が異なる。このことから、Narra3-2 トレンチの浸透水は Narra3-1 源泉の地下水がトラバーチンを上部から下部の方へ浸透したのではなく、Narra3-1 と同様に、高アルカリ地下水が湧出するオフィオライトの亀裂のチャンネルいくつか存在し、そこからの高アルカリ地下水がトラバーチン下の粘土質堆積物に浸透しているものと考えられる。これは、炭酸塩鉱物の縞状構造の形成（透水性が高い層と低い層の成層構造）に伴う固化プロセスにおける続成作用により、炭酸塩岩が深くなるほど熟成され、緻密で割れ目が少ない組織的に安定していくため、炭酸塩質堆積物が不透水層となって上面からの降雨水等の浸透を抑制しているためだと考えられる。

トレンチ 2 の基盤岩直上の碎屑性堆積物は、パラワンオフィオライト（殆どが、ハルツバージャイト）起源の岩片（歪角礫:長径 2cm 以下）の礫と少量の石英安山岩起源の斜長石($Ab_{69} An_{31}$)と石英の斑晶から構成されている。基質は、一部砂質なものもあるが、大部分がシルト質から粘土質を示す。特に、上位層の堆積物（約 20cm の層厚）は細かい層理面が発達する黒色粘土質である。トレンチの西壁の露頭観察、特に、礫種や粒度・構成鉱物・運搬<篩別>・堆積過程などを考慮すると現地性の地滑り堆積物と想定される。

この碎屑性堆積物に含まれるスメクタイトは、定方位 XRD のエチレングリコール処理によるピークのシフトや 006 面の観察から 3 八面体型スメクタイトであるサポナイトが主であることが同定された。

さらにこのアルカリ地下水と接触していた碎屑性堆積物や基盤岩の薄片の顕微鏡観察から岩石鉱物学的特徴（変質鉱物を含む主要構成鉱物組み合わせ・産状/共生・組織など）について以下の

ことが明らかになった。

①原岩

基盤岩であるパラワンオフィオライトは、単斜輝石を微量含むハルツバージャイト質超塩基性火成岩（斜方輝石かんらん岩）である。

他の碎屑性堆積物(Clastic Sediments)を構成する岩片・鉱物片の原岩は、自形の Cr-スピネルを含有するダナイト質超塩基性火成岩起源（ダンかんらん岩）、透角閃石で特徴づけられるトレモラ角閃岩起源、かんらん石ウェブスライト起源と斑レイ岩起源であると考えられる。これらの原岩は、苦鉄質鉱物の組成とモード（鉱物の容積%）による程度の差はあるが、蛇紋岩化作用が顕著である。

②蛇紋岩化作用

超塩基性火成岩と地下水との相互作用過程において、特に超塩基性火成岩の主要構成鉱物であるかんらん石や両輝石で代表される苦鉄質鉱物の蛇紋岩化作用が特筆される。トレンチ 2 の試料からは、高温型アンチゴライトの産状は局所的で、低温型蛇紋石を横断する脈状としてのみ観察される。これら産状関係から、アンチゴライトの形成は低温型蛇紋石の形成後に生じたものと考えられる。この現象は新たな高温環境での形成環境が必要となる。これは、パラワンオフィオライトの定置過程でのテクトニクス変遷過程か、パラワンオフィオライトを構成する斑レイ岩や輝緑岩などの貫入岩による熱の供給によって生じた高温環境が高温型アンチゴライトの生成をもたらしたものと示唆される。

③蛇紋岩化作用に伴う水滑石・クリソタイルと地下水との相互作用

このパラワンオフィオライトのハルツバージャイト（斜方輝石かんらん岩）の基盤岩は、炭酸塩鉱物（主に方解石）が少なく、水滑石やクリソタイルが多く含まれる。一般的には蛇紋岩化作用が進行している超塩基性火成岩体では、地下水（Ca-OH タイプ）は高 Ca になり、その結果、炭酸塩鉱物を多く沈殿する。このことからこの基盤岩は、少なくとも地表近傍ではかんらん石や輝石を消費して蛇紋石などの Mg-鉱物を形成するような地球科化学的環境にはないことが示唆される。

一方、碎屑性堆積物を構成する種々の岩片の基質には、少量の炭酸塩鉱物と C-S-H（主にトバモライトなど）が観察される。これは水滑石や蛇紋石の生成後の残液が、Ca や Si に富むようになり析出したものと考えられる。また、植物遺体（木根）を水滑石や C-S-H が置換していることから、高アルカリで、高 Mg/Si 比の地球化学的場と地下水がかなりの時間浸透するような水理場が存在したものと示唆される。基質の 3 八面体型スメクタイト（サポナイト）もこのような環境のもとで形成されたものと考えられる。

以上の結果を踏まえ、当面の目標であった Active Type のナチュラルアナログサイトを特定することができ、今後ナチュラルアナログ調査として一段階ステップが進み、このナチュラルアナログサイトでのアルカリ変質プロセスの調査を中心に今後展開することとなる。

ただし、アルカリ地下水と接触していたスメクタイトは 2 八面体型のモンモリロナイトではなく 3 八面体型のサポナイトである。サポナイトの生成やアルカリ地下水との相互作用をナチュラルアナログとしてどう位置づけるかを明らかにして、今後の調査を進める必要がある。

[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 26 年度地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処理・処分高度化開発報告書 (第 3 分冊) — ナチュラルアナログ調査 — (2015).
- [2] MMAJ-JICA (Metal Mining Agency of Japan-Japan International Cooperation Agency): Report on the Mineral Exploration: Mineral Deposits and Tectonics of two Contrasting Geologic Environments in the Republic of the Philippines-パラワン V-VI, Area, West Negros Area and Samar I-III Area. Report submitted by MMAJ-JICA to the Republic of the Philippines. MMAJ-JICA, Tokyo, Japan. (1988).
- [3] Steuer, S., Franke, D., Meresser, F., Savva, D., Pubellier, M., Auxietre, J.-L. and Aurelio, M.: Time constraints on the evolution of the southern パラワン island, Philippines From onshore and offshore correlation of Miocene limestones. *J. Asian Earth Sci.* **76**, p412-427 (2013).
- [4] Aurelio, M.A., Forbes, M., Taguibao, K.J.L., Savella, R., Bacud, J.A., Franke, D., Pubellier, M., Savva, D., Meresse, F., Steuer, S. & Carranza, C.: Middle to Late Cenozoic tectonic events in south and central パラワン (Philippines) and their implications to the evolution of the southeastern margin of South China Sea: Evidence from onshore structural and offshore seismic data. *Marine and Petroleum Geology*, doi:10.1016/j.marpetgeo. 2013.12.002 (2013).
- [5] Schluter, H.U., Hinz, K., and Block, M.: Tectono-stratigraphic terranes and detachment faulting on the South China Sea and Sulu Sea, *Marine Geology* 130, 1-2, P39-51 (1996).
- [6] Hutchison, C. S., and Vijayan, V. R.: What are the Spratly Islands? *J. Asian Earth Sci.*, **39**, 371-385 (2010).
- [7] Holloway, N.: North パラワン block—its relation to Asian mainland and role in evolution of South China Sea. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, **66**, 1355–1383 (1982).
- [8] Letouzey, J.L., Sage, and Muller, C.: Geological and Structural Maps of Eastern Asia. p73, Notice : Institute Francis du Petrol. Paris. Introductory notes, AAPG, Tulsa, OK (1988).
- [9] Taylor, B., and Hayes, D.E.: Origin and history of the South China Sea Basin, in *The tectonic and Geological Evolution of Southeast Asian seas and Islands*, edited by D.E. Hayes, p23-56, AGU, Washington, D.C. (1983).
- [10] Hinz, K., and Schluter, H.U.: Geology of dangerous grounds, South China Sea, and the continental margin of southwest パラワン: Results of Sonne cruises SO-23 and SO- 27, *Energy*, 10,3 / 4, p297-315 (1985).
- [11] Cullen, A.B.: Transverse segmentation of the Baram-Balabac Basin, NW Borneo: refining of the model of Borneo's tectonic evolution, *Petroleum Geoscience*, 16, p3-29 (2010).
- [12] Rangin, C., Bellon, H., Bernard, F., Letouzey, J., Muller, C., and Sanudin, T.: Neogene arc-continent collision in Sabah, Northern Borneo (Malaysia). *Tectonophysics*, **183**(1-4), 305-319 (1990).
- [13] Rangin, C., Stephan, J. F., Butterlin, J., Bellon. H., Muller, C., Chorowitz, J. and Baladad, D.: Collision neogene d'arc volcaniques dans le centre des Philippines: Stratigraphie et structure de la chaine d'antique (Ile de Panay). *Bull. Soc. Geol. France*, **162** (3), 465-477 (1991).
- [14] Tongkul, F.: Tectonic evolution of Sabah, Malaysia. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, **6** (3 / 4), 395-405 (1991).
- [15] Concepcion, R., Dimalanta, C., Yumul, G., Faustino-Eslava, D., Queano, K., Tamayo, R., and Imai, A.: Petrography, geochemistry, and tectonics of a rifted fragment of Mainland Asia: evidence from the Lasala Formation, Mindoro Island, Philippines, *International Journal of Earth Sciences*, 101 (1), 273-290 (2012).
- [16] Hutchison, C. S.: The North-West Borneo Trough. *Marine Geology*, **271** (1-2), 32-43 (2010).
- [17] Hutchison, C. S.: Chapter XIV-The Ophiolite basement, in *Geology of North West Borneo*, edited, p295-223, Elsevier, Amsterdam (2005).
- [18] Saldivar-Sali, A.: Reef exploration in the Philippines: In Paper presented at the second Circum-Pacific energy and mineral resources Conference, Honolulu, Hawaii, 30 July-4 August 1978 (1978).
- [19] Aurelio, M.A., Taguibao, K.J.L., Pubellier, M., Dieter, F., Forbes, M.: Structural Constraints on post-rift ophiolite emplacement and thrust-fold deformation in Southern Palawan,

Philippines; implications to the evolution of the south-eastern margin of the South China Sea. In Proceedings of the 34th International Geological Congress, Brisbane, Australia, 5-10 August 2012 (in CD) (2012).

[20] Taguibao, K. J., Aurelio, M. A., Savva, D., Pubellier, M.: Onshore パラワン structures: implications on the evolution of the South China Sea. In: Proceedings of the 34th International Geological Congress, Brisbane, Australia, 5-10 August 2012 (in CD).

[21] Mitchell, A.H. G., Hernandez, F., de la Cruz, A.P.: Cenozoic evolution of the Philippine archipelago. *J. Southeast Asia Earth Sci.*, **1**, 1-20 (1986).

[22] Aurelio, M.A.: A review of mechanisms of ophiolite emplacement: Philippine examples. *J. Geol. Soc. Philipp.* **51**, 3-4, p87-89 (1986).

[23] Holloway, N.H.: The north パラワン block, Philippines; its relation to the Asian mainland and its role in the evolution of the South China Sea. *Geol. Soc. Malays, Bull.* **14**, 19-58 (1981).

[24] Marchadier, Y., and Rangin, C.: Polyphase tectonics at the southern tip of the Manila trench, Mindoro-Tablas islands, Philippines. *Tectonophysics*, **183**, 273-287 (1990).

[25] Tumanda, F. P., Santos, R., Tan, M.N., David Jr., S.D., Billedo, E. B. and Pena, R.: Guidebook for fieldtrips. In: Third Symposium of International Geological Correlation Programme No. 350 (IGCP 350), Cretaceous Environment Change in East and South Asia, p23 (1995).

[26] Sales, A. O., Jacobsen, E. C., Morando, Jr., A. A., Banavidez, J. L., Navarro, F. A., Lima, A. E.: The petroleum potential of deepwater northwest パラワン block GSEC 66. *J. Asia earth Sci.*, **15**, 217-240 (1997).

[27] Wohlfahrt, R., Cepek, P., Gramann, F., Kempter, E. and Porth, H.: Stratigraphy of パラワン Island. *Newsletter Stratigraphy*, **16** (1), 19-48 (1986).

[28] Santos, R.A.: Chromite and Platinum group mineralization in Arc-related ophiolites: Constraints from Palawan and Dinagat ophiolite complexes, Philippines. Ph. D. Dissertation, Univ. of Tokyo, Japan. P193 (1977).

[29] Forbes, M.T., Mapaye, C.B. and Bacud, J. A.: Structural characterization of offshore Southwest パラワン, Philippines using the most recent 2D/3D seismic data. In: Proceedings of the Southeast Asia Petroleum Exploration (SEAPEX) Meeting, Manila, Philippines, 6 April (2011).

[30] Mat Zin, I. C., and Tucker, M. E.: An alternative stratigraphic scheme for the Sarawak Basin. *J. Asian Earth Sci.*, **17**, 215-232 (1999).

[31] Silver, E. A., and Rangin, C.: Development of the Celebes Basin in the context of Western Pacific marginal basin history. In : Silver , E. A., Rangin, C., von Breyman, M. T., (Eds.), *Proceeding of Ocean drilling Program, Leg 124 Scientific results*, 39-50 (1991).

[32] Aurelio, M.A., and Pena, R.E.: *Geology of the Philippines Tectonics and Stratigraphy*, second ed., vol.1. Mines and Geosciences Bureau, Department of Environment and Natural resources, Quezon, Philippines (2010).

[33] Encarnacion, J.: Multiple ophiolite generation preserved in the northern Philippines and the growth of an island arc complex. *Tectonophysics*, **392**, 103-130 (2004).

[34] Shigeyuki, S., Shizuo, T., Graciano, P.Y., Sevillo, D.D., and Daniel, K.A.: Composition and provenance of the Upper Cretaceous to Eocene sandstone in Central パラワン, Philippines: Constraints on the tectonic development of パラワン, The Island Arc, **9** (4), 611-626 (2000).

[35] Muller, C.: Biostratigraphy and Geological Evolution of the Sulu Sea and Surrounding Area, in Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific results, vol. 124, edited by E.A. Silver, C. Rangin and M.T.v. Breyman, p121-130, ODP, college Station, TX (1991).

[36] Encarnacion, j. P., Musaka, S. B., and Obille, E. J.: Zircon U-Pb geochronology of the Zambales ophiolite and Angat ophiolite Luzon, Philippines: Evidence for the Eocene arc-back arc pair. *Jour. of Geophysical research*, **98**, 19991-20004 (1993).

[37] Encarnacion, J., Essene, E.J., Mukase, S.B. and Hall, C.: High pressure and temperature subophiolite kyanite-garnet amphibolite generated during ignition of mid-Tertiary subduction, Palawan, Philippines. *Jour. of Petrology*, **36**, 1481-1503 (1995).

[38] Almasco, J. N., Rodolfo, K., Fuller, M. and Frost, G.: Paleomagnetism of パラワン, Philippines. *Journal of Asian Earth Sciences*, **18** (3), 369-389 (2000).

-
- [39] Jasin, B.: Middle Miocene planktonic Foraminifera and their implication in the Geology of Sabah. In: G.H. Teh, et al.(eds). Bull. Geol. Soc. Malaysia, 45, 157-162 (2010).
- [40] Franke, D., Barckhausen, U. Baristeam N. Engels, M. Ladage, S. Lutz, R. Montano, J. Pellejera, N. Ramos, E.G. and Schnabel, M.: The continent-ocean transition at the southeastern margin of the South China Sea. Marine and petroleum Geology, **28** (6), 1187-1204 (2011).
- [41] Rehm, S.: The Miocene Carbonates in Time and Space On-and Offshore SW パラワン, Philippines, Christian-Albrechts-University, Kiel (2002).
- [42] Haq, B.U., Hardenbol, A.N., and Vali, P.R., (1987). Chronology of Fluctuating Sea Level Since the Triassic. Science, **235** (4793), 1156-1167.
- [43] MGB (Mines and Geosciences Bureau, Philippines): Geology of the Philippines. Quezon City: Mines and Geosciences Bureau, Manila, Philippines. (2010).
- [44] Bialkowski, S.E.: Use of Acid Distributions in Solubility Problems (2004).
- [45] Pentecost, A.: Travertine. Dordrecht, Netherlands : Kluwer Academic Publishers Group, ISBN 1-4020-3523-3 (2005).
- [46] Fouke, B.W., Farmer, J. D., Des Marais., Pratt, D.J. Sturchio.L/. Burns, N.C., Discipulo, P.C., M.K.: Depositional facies and aqueous-solid geochemistry of travertine-depositing hot springs(Angel Terrace, Mammoth Hot Spring, Yellowstone National Park, U.S.A.). Jour, of Sedimentary Research, **70**, 565-585 (2000).
- [47] 小鯛桂一: 岩盤透水性のグラフ表示. 地質調査所月報, **35** (9), 419-434 (1984).
- [48] 吉本周平, 土原健男, 石田聡, 今泉眞之: 炭酸塩岩帯水層における不飽和浸透に関する研究レビュー. 農工研技報, **207**, 109~126 (2008).
- [49] 入矢桂史郎, 新村亮, 久保博, 黒木泰貴: 人工バリア材の変質に関する研究. 動力炉・核燃料開発事業団委託研究成果報告書, PNC ZJ1201 97-001 (1997).
- [50] 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, April (2005).
- [51] Barnes, I., O' Neil, J. R. and Trescases, J. J. (1978) : Present day serpentinization in New Caledonia, Oman and Yugoslavia. Geochimica et Cosmochimica Acta., 42, 144-145.
- [52] 秋田奈生子・佐藤 努 (2001) : オマーンオフィオライトに湧出する高アルカリ泉と沈澱物の生成過程. 日本鉱物学会, 日本岩石鉱物鉱床学会学術講演要旨集, 2001, 159.
- [53] Hemley, J. J., Montoya, J. W., Christ, C. L. and Hostetler, P. B. (1977) : Mineral equilibria in the MgO-SiO₂-H₂O system: I Talc-chrysotile-forsterite-brucite stability relations. Amer. Jour. Sci., 277, 322-351.

