# 平成28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)

# ーナチュラルアナログ調査―

## 平成 29 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28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 28 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
		平成 28 年度地層処分技術調查等事業 TRU 廃棄物処理・処分
	第1分冊	技術高度化開発-ヨウ素 129 対策技術の信頼性向上-
		平成 28 年度地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処理・処分
	第2分冊	技術高度化開発-炭素 14 長期放出挙動評価-
		平成 28 年度地層処分技術調查等事業 TRU 廃棄物処理・処分
O	第3分冊	技術高度化開発-ナチュラルアナログ調査-
		平成 28 年度地層処分技術調查等事業 TRU 廃棄物処理・処分
	第4分冊	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-
		平成 28 年度地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処理・処分
	第5分冊	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 とめー」(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、平成 40 年代後半を目途に最終処分事業を開始 す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 が必要 な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 2µSv/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、多様な廃棄体が存在 し、HLW のようなオーバーパックの機能がない坑道集積型の処分場概念する TRU 廃棄物の処分 では、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の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。

(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28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ー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 Bigbiga 地区のナチュラルアナログ	20
1.3.3 パラワン島のナチュラルアナログ	24
1.4 実施概要	
1.4.1 全体計画	
1.4.2 平成 28 年度実施概要	
第2章 ナチュラルアナログサイトの地質環境調査	42
2.1 目的	42
2.2 フィリピン国における現地調査と試料分析の概要	43
2.2.1 調査工程	43
2.2.2 現地調査の主な調査内容	44
2.2.3 地下水(既存井戸、湧水、既存試錐孔)調査の概要	57
2.2.4 岩石鉱物学的調査の概要	59
2.3 パラワン島の概要	65
2.3.1 パラワン島の地質概要	65
2.3.2 Narra 地区の地質概要	
<b>2.3.3 Narra</b> 地区及びその周辺の概査	85
2.4 地下水調查	92
2.4.1 現地調査(現地測定・簡易分析・採水)	92
2.4.2 地下水の地球化学的特性	
2.5 試錐調查	
2.5.1 目的	
2.5.2 試錐サイトの選定	110

2.5.3 試錐孔掘削	111
2.5.4 コア観察	114
2.5.5 岩石鉱物学的調查	123
2.5.6 試錐調査のまとめ	144
2.6 トレンチ調査	145
2.6.1 トレンチ掘削	145
2.6.2 壁面観察とサンプリング	149
2.6.3 岩石鉱物学的調查	158
2.7 まとめ	233
第3章 年代測定による反応時間の評価	238
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	238
3.1.1 目的	238
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	241
3.1.3 年代測定のための試料	242
3.2 方解石の熱ルミネセンス年代測定	246
3.2.1 熱ルミネセンス年代測定法	246
3.2.2 今年度の検討概要	250
3.2.3 炭酸塩の発光特性	251
3.2.4 パラワン島の炭酸塩試料の年代測定	262
3.3 放射性炭素年代法による年代測定	

<b>3.3</b> 放射性炭素年代法による年代測定	273
3.3.1 放射性炭素年代法の概要と実施概要	273
3.3.2 AMS による放射性炭素年代測定	274
3.3.3 パラワン島 Narra 地区のナチュラルアナログ試料の放射性炭素年代	277
3.4 まとめ	283

第4章 アルカリ環境下での長期変質プロセスとナチュラルアナログ	
4.1 パラワン島 Narra 地区のナチュラルアナログ	
4.2 ナチュラルアナログ試料の鉱物組成及び組織に関する分析・観察	
4.2.1 分析項目	
4.2.2 分析手法	
4.2.3 元素マッピング	
4.2.4 微視的観察	302
4.2.5 鉱物化学組成	325
4.2.6 マイクロ XRD 分析	354
4.2.7 スメクタイト生成と M-S-H に関する評価	358

4.3 スメクタイトの形成環境と形成プロセス	
4.3.1 スメクタイト含有砕屑性堆積物の岩石鉱物学的特性	
4.3.2 XRF 分析による岩石化学的特性	375
4.3.3 アルカリ湧水(地下水)の地球化学的特性	378
4.3.4 オフィオライト・塩基性岩起源の砕屑性堆積物中のスメクタイトの形成・	進展380
4.4 アルカリ地下水環境下でのスメクタイトの地球化学的・鉱物学的安定性	
4.4.1 アルカリ地下水環境下でのスメクタイト形成プロセスとその鉱物学的変通	墨モデ
ル	
4.4.2 処分環境とのアナログ性	
4.5 まとめ	403
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	408
5.1 実施概要	408
5.1.1 これまでの背景	408
5.1.2 本検討の目的と地球化学反応輸送モデルで再現するナチュラルアナログ	409
5.1.3 本年度の実施内容	410
5.2 地球化学反応輸送モデルによる変質解析	411
5.2.1 インプットする高アルカリ溶液の組成	411
5.2.2 解析条件	413
5.2.3 解析結果	420
5.2.4 鉄の供給を考慮した検討	428
5.3 まとめ	431
第6章 まとめ	434
6.1 今年度の調査結果のまとめ	434
6.1.1 実施計画	435
6.1.2 ナチュラルアナログサイトの地質環境調査	435
6.1.3 年代測定による反応時間の評価	436
6.1.4 アルカリ環境下での長期変質プロセスとナチュラルアナログ	437
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	439

## 図目次

义	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
义	1.1.3-2	ナチュラルアナログのコンセプト	5
义	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
义	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
义	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
义	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 (オ	右)	.14
义	1.3.1-4	スメクタイト含有率と各基本物性との関係	.15
义	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)	.16
义	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	.16
义	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
义	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
义	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
义	1.3.2-1	Bigbiga 地区及び Saile 鉱山周辺地区の Aksitero 累層の分布	.21
义	1.3.2-2	Bigbiga 地区の Compilation Map	.21
义	1.3.2-3	Bigbiga 地区の二次元水理地質構造概念モデル	.22
义	1.3.3-1	ナチュラルアナログ調査で得られた成果と今後の成果目標	.24
义	1.3.3-2	ナチュラルアナログ調査サイト(Narra 地区)の位置図	.26
义	1.3.3-3	中央/南部パラワン地域の地質図と調査地点の水質	.27
义	1.3.3-4	中央/南部パラワン地域の湧水地点での採水・水質測定	.27
义	1.3.3-5	パラワンのアルカリ湧水の pH-Na+濃度関係図	.28
义	1.3.3-6	パラワンのアルカリ湧水の pH-Ca <sup>2+</sup> 濃度関係図	.28
义	1.3.3-7	パラワンのアルカリ湧水の pH-Si 濃度関係図	.29
义	1.3.3-8	パラワンのアルカリ湧水の pH-Cl 濃度関係図	.29
义	1.3.3-9	ナチュラルアナログサイト(Narra 地区)の模式層序学的断面図と地下水水質	
			.30
义	1.3.3-10	Narra 地区トレンチの <sup>14</sup> C 年代測定結果	.31
义	1.3.3-11	C-S-H と共生する鉄サポナイトの産状	.32
义	1.3.3-12	パラワンオフィオライトの地質構造学的発展と砕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)	.33
义	1.3.3-13	パラワンオフィオライトの地質構造学的発展と砕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)	.34

义	1.3.3-14	パラワンオフィオライトの地質構造学的発展と砕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(砕屑性堆積	
	物) と	アルカリ地下水に伴う炭酸塩(トラバーチン)の沈殿)	34
义	$1.3.3 \cdot 15$	パラワンオフィオライトの地質構造学的発展と砕屑性堆積物のスメクタイト	
	の形成	モデル (IV. 砕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	
	物の圧縮	密作用による岩石(炭酸塩岩)化)	35
义	1.3.3-16	パラワンオフィオライトの地質構造学的発展と砕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、砕屑性堆積物	
	に浸出	(Active Type のナチュラルアナログ))	35
义	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)	38
义	1.4.2 - 1	平成 27 年度の実施工程	39
义	2.2.2-1	Narra 地区の調査サイトの位置図	44
义	2.2.2-2	Narra 地区の調査サイトの地形図	44
义	2.2.2-3	DH01 孔掘削状況	46
义	2.2.2-4	DH01 孔内水排水・洗浄(左)、採水(右)状況	46
义	2.2.2-5	DH02 孔掘削状況	47
义	2.2.2-6	DH02 孔内水排水・洗浄(左)、採水(右)状況	47
义	2.2.2-7	DH03 孔掘削状況	48
义	2.2.2-8	DH03 孔内水排水・洗浄状況	48
义	2.2.2-9	DH04 孔掘削状況	49
义	2.2.2-10	DH04 孔内水採水状況	49
义	2.2.2-11	トレンチ3掘削状況	51
义	2.2.2-12	トレンチ3の排水・壁面観察(左)、採水(右)	51
义	2.2.2-13	トレンチ3のサンプリング(コアサンプリング(右))	51
义	2.2.2-14	トレンチ4掘削状況	52
义	$2.2.2 \cdot 15$	トレンチ4の排水(右)、採水(左)	52
义	2.2.2-16	トレンチ4の壁面観察・サンプリング	52
义	$2.2.2 \cdot 17$	放棄したトレンチの掘削状況	53
义	2.2.2-18	トレンチ 5 掘削状況	53
义	2.2.2-19	トレンチ5の排水(右)、採水(左)	54
义	2.2.2-20	トレンチ5のサンプリング(コアサンプリング(右))	54
义	2.2.2-21	Babatou 滝での露頭調査・サンプリング	55
义	2.2.2-22	Babatou 滝の採水地点	55
図	2.2.2-23	San Isidro 周辺露頭調査	55
义	2.2.2-24	San Isidro アルカリ泉採水	56
义	2.2.2-25	Spillway 露頭調査・サンプリング	56

义	2.2.4-1	コア状試料のチップ採取位置	64
义	2.3.1-1	パラワン地域のテクトニクス[]	65
义	2.3.1-2	パラワン島とフィリピン諸島のテクトニクス[]	66
义	2.3.1-3	パラワン島の広域地質図[2]	69
义	2.3.1-4	中央/南部パラワン地域の地質図[3]	70
义	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[3]	71
义	2.3.1-6	中央/南部パラワン地域の地質断面図[3]	72
义	2.3.1-7	南部パラワン地域の地質断面図[3]	72
义	2.4.1-1	Narra 地区の地下水調査地点	92
义	2.4.1-2	Narra3-1 アルカリ泉, pH11.37, 38.5℃	93
义	2.4.1-3	Narra3-2 トレンチ調査エリア周辺のクリーク上流, pH10.09, 33.4℃	93
义	2.4.1-4	Narra3-2 トレンチ調査エリア周辺のクリーク中流, pH10.57, 33.1℃	93
义	2.4.1-5	Narra3-2 トレンチ調査エリア周辺のクリーク上流, pH9.3, 32.5℃	93
义	2.4.1-6	Narra3-2 DH01, pH11.08, 30.9°C	94
义	2.4.1-7	Narra3-2 DH02, pH11.18, 35.9°C	94
义	2.4.1-8	Narra3-2 DH03, pH11.29, 33.5°C	94
义	2.4.1-9	Narra3-2 DH04, pH11.19, 33.0°C	94
义	2.4.1-10	Narra3・2 トレンチ3, pH11.37, 33.7℃	95
义	2.4.1-11	Narra3・2 トレンチ4, pH11.17, 33.4 $^{\circ}$ C	95
义	2.4.1- $12$	Narra3-2 トレンチ5, pH11.36, 29.9℃	96
义	2.4.1-13	San Isido 温泉水の源泉井戸(Narra1),pH10.50, 47.2℃,ガスのバブリン	
	グ (右)		96
义	2.4.1-14	Babatou 滝(Narra2)	96
义	2.4.2-1	パラワン島の地下水調査地点と地下水のヘキサダイアグラム	.107
义	2.4.2-2	Narra3-1~3-2 地点の模式層序学的断面図と地下水(湧水)の水質	.108
义	2.4.2-3	試錐孔(DH01~DH04)の掘削地点	.110
义	2.4.2-4	DH01 孔掘削状況	. 111
义	2.4.2-5	DH02 孔掘削状況	.112
义	2.4.2-6	DH03 孔掘削状況	.113
义	2.4.2-7	DH04 孔掘削状況	.113
义	2.4.2-8	DH01 孔試錐コア	.115
义	2.4.2-9	DH01 孔柱状図	.116
义	2.4.2-10	DH02 孔試錐コア	.117
义	2.4.2-11	DH02 孔柱状図	.118
义	$2.4.2 \cdot 12$	DH03 孔試錐コア	.119
义	2.4.2-13	DH03 孔柱状図	.120

义	2.4.2-14	DH04 孔試錐コア	121
义	$2.4.2 \cdot 15$	DH04 孔柱状図	122
义	$2.5.5 \cdot 1$	PWDH01-16-Rh-003 ס XRD לאריך א אין אין אין אין אין אין אין אין אין א	128
义	$2.5.5 \cdot 2$	PWDH01-16-Rh-005 ס XRD לאריך א אין אין אין אין אין אין אין אין אין א	128
义	$2.5.5^{-3}$	PWDH01-16-Rh-006 ס XRD לאריך א אין אין אין אין אין אין אין אין אין א	128
义	2.5.5 - 4	PWDH01-16-Rh-007 ס XRD לאריך אין	129
义	$2.5.5^{-5}$	PWDH02-16-Rh-001 ס XRD לאריך אין	129
义	2.5.5-6	PWDH02-16-Rh-003 ס XRD לאריך אין	129
义	2.5.5-7	PWDH02-16-Rh-005 ס XRD לאריך א אין אין אין אין אין אין אין אין אין א	130
义	2.5.5-8	PWDH02-16-Rh-007 ס XRD לאריך א אין אין אין אין אין אין אין אין אין א	130
义	2.5.5-9	PWDH03-16-Rh-001 ס XRD לאריך א אין אין אין אין אין אין אין אין אין א	130
义	$2.5.5 \cdot 10$	PWDH03-16-Rh-006のXRD チャート	131
义	$2.5.5 \cdot 11$	PWDH03-16-Rh-007のXRD チャート	131
义	$2.5.5 \cdot 12$	PWDH03-16-Rh-009のXRD チャート	131
义	$2.5.5 \cdot 13$	PWDH04-16-Rh-001のXRD チャート	132
义	$2.5.5 \cdot 14$	PWDH04-16-Rh-012のXRD チャート	132
义	$2.5.5 \cdot 15$	PWDH04-16-Rh-013のXRD チャート	132
义	$2.5.5 \cdot 16$	PWDH04-16-Rh-015 の XRD チャート	133
义	$2.5.5 \cdot 17$	PWDH01-16-Rh-005の定方位測定および EG 処理試料の定方位測定の結果	135
义	$2.5.5 \cdot 18$	PWDH01-16-Rh-006の定方位測定および EG 処理試料の定方位測定の結果	135
义	$2.5.5 \cdot 19$	PWDH02-16-Rh-003の定方位測定および EG 処理試料の定方位測定の結果	136
义	$2.5.5 \cdot 20$	PWDH03-16-Rh-001の定方位測定および EG 処理試料の定方位測定の結果	136
义	$2.5.5 \cdot 21$	PWDH03-16-Rh-006の定方位測定および EG 処理試料の定方位測定の結果	137
义	$2.5.5 \cdot 22$	PWDH03-16-Rh-009の定方位測定および EG 処理試料の定方位測定の結果	137
义	$2.5.5 \cdot 23$	PWDH04-16-Rh-012の定方位測定および EG 処理試料の定方位測定の結果	138
义	$2.5.5 \cdot 24$	試錐の各試料の XRF 分析結果(酸化物表記、CO2 を含む)	143
义	$2.5.5 \cdot 25$	試錐の各試料の XRF 分析結果(酸化物表記、CO2 を含まず)	143
义	2.5.6-1	Narra 地区の地質断面と試錐孔の位置、掘削深度、採水深度の概念図	144
义	2.6.1-1	Narra 地区調査エリア	145
义	2.6.1-2	トレンチ3掘削状況	146
义	2.6.1-3	トレンチ4掘削状況	147
义	2.6.1-4	トレンチ5掘削状況	148
义	2.6.2-1	トレンチ3壁面観察(右)、コアサンプリング(右)	149
义	2.6.2-2	トレンチ4壁面観察(右)、サンプリング(右)	149
义	2.6.2-3	トレンチ5壁面観察(右)、サンプリング(右)	150
义	2.6.2-4	Narra 地区の地質断面概念図とアルカリ湧水・クリーク・トレンチ内湧水・試	

	錐孔内7	kの地球化学的特性	150
义	2.6.2-5	トレンチ3の壁面と(Rh)試料採取位置	151
义	2.6.2-6	トレンチ3の壁面と(HU)試料採取位置	151
义	2.6.2-7	トレンチ3露頭観察スケッチ	152
义	2.6.2-8	トレンチ露頭観察スケッチの凡例	153
义	2.6.2-9	トレンチ4の壁面と(Rh)試料採取位置	154
义	2.6.2-10	トレンチ4の壁面と(HU)試料採取位置	154
义	2.6.2-11	トレンチ4露頭観察スケッチ	155
义	2.6.2-12	トレンチ5の壁面と(Rh)試料採取位置	156
义	2.6.2-13	トレンチ5の壁面と(HU)試料採取位置	156
义	2.6.2-14	トレンチ5露頭観察スケッチ	157
义	2.6.3-1	トレンチ3試料の状態(分取前試料、乾燥前、乾燥・粗砕後、および、105µm	
	ふるい死	浅分(ふるい上)と通過分(ふるい下))	160
义	2.6.3-2	トレンチ4、5試料の状態(分取前試料、乾燥前、乾燥・粗砕後、および、105μm	
	ふるいを	浅分(ふるい上)と通過分(ふるい下))	161
义	2.6.3 - 3	PWT03-16-C2-001~002	162
义	2.6.3-4	PWT03-16-Rh-003 ס XRD לארך א אין אין אין אין אין אין אין אין אין א	164
义	2.6.3-5	PWT03-16-Rh-004 ס XRD לאריך א אדער אין	164
义	2.6.3-6	РWT03-16-Rh-005 $\mathcal{O}$ XRD $\mathcal{F}_{\mathcal{T}}$ — $\mathbb{N}$	164
义	2.6.3-7	PWT03-16-Rh-006 ס XRD לארך א הארט אין	165
义	2.6.3-8	PWT03-16-Rh-009 ס XRD לאריך א אראין ארא אין אין אין אין אין אין אין אין אין אי	165
义	2.6.3-9	PWT03-16-Rh-011 ס XRD לאריך א און אין אין אין אין אין אין אין אין אין אי	165
义	2.6.3-10	PWT03-16-Rh-012のXRD チャート	166
义	$2.6.3 \cdot 11$	PWT03-16-C1-002の XRD チャート	166
义	$2.6.3 \cdot 12$	PWT03-16-C1-004の XRD チャート	167
义	2.6.3-13	PWT03-16-C2-002 の XRD チャート	167
义	$2.6.3 \cdot 14$	PWT04-16-Rh-002のXRD チャート	167
义	$2.6.3 \cdot 15$	PWT04-16-Rh-006のXRD チャート	168
义	2.6.3-16	PWT04-16-Rh-009の XRD チャート	168
义	$2.6.3 \cdot 17$	PWT05-16-Rh-004のXRD チャート	168
义	$2.6.3 \cdot 18$	PWT05-16-Rh-008のXRD チャート	169
义	2.6.3-19	PWT05-16-Rh-010の XRD チャート	169
义	2.6.3-20	PWT05-16-Rh-012のXRD チャート	169
义	2.6.3 - 21	PWT05-16-C1-001の XRD チャート	170
义	2.6.3 - 22	PWT05-16-C2-001の XRD チャート	170
义	2.6.3-23	PWT03-16-Rh-004 の定方位測定および EG 処理試料の定方位測定	173

义	2.6.3 - 24	PWT03-16-C1-002 の定方位測定および EG 処理試料の定方位測定	173
义	2.6.3 - 25	PWT03-16-C1-004の定方位測定および EG 処理試料の定方位測定	174
义	2.6.3 - 26	PWT04-16-Rh-009の定方位測定および EG 処理試料の定方位測定	174
义	2.6.3 - 27	PWT05-16-Rh-010の定方位測定および EG 処理試料の定方位測定	175
义	2.6.3 - 28	トレンチの各試料の XRF 分析結果(酸化物表記、CO2 を含む)	180
义	2.6.3 - 29	トレンチの各試料の XRF 分析結果(酸化物表記、CO2を含まず)	180
义	2.6.3 - 30	各試料の XRF 測定結果による成分相互の相関(SiO <sub>2</sub> -CaO)	181
义	2.6.3-31	各試料の XRF 測定結果による成分相互の相関(SiO <sub>2</sub> -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	181
义	2.6.3 - 32	各試料の XRF 測定結果による成分相互の相関(SiO2-MgO)	182
义	2.6.3-33	各試料の XRF 測定結果による成分相互の相関(SiO <sub>2</sub> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	182
义	2.6.3-34	各試料の XRF 測定結果による成分相互の相関(SiO <sub>2</sub> -NiO)	182
义	$2.6.3 \cdot 35$	各試料の XRF 測定結果による成分相互の相関(SiO <sub>2</sub> -SO <sub>3</sub> )	183
义	2.6.3-36	各試料の XRF 測定結果による成分相互の相関(SiO2-MnO)	183
义	$2.6.3 \cdot 37$	各試料の XRF 測定結果による成分相互の相関(SiO <sub>2</sub> -Na <sub>2</sub> O)	183
义	2.6.3 - 38	各試料の XRF 測定結果による成分相互の相関(SiO <sub>2</sub> -K <sub>2</sub> O)	184
义	2.6.3 - 39	PWT03·16·C1·004の試料の様子	190
义	2.6.3-40	PWT03·16·C2·001の試料の様子	191
义	2.6.3-41	PWT04·16·Rh-009の試料の様子	191
义	2.6.3-42	PWT05-16-Rh-010の試料の様子	191
义	2.6.3-43	PWT05-16-Rh-016の試料の様子	192
义	2.6.3-44	PWT05-16-Rh-017の試料の様子	192
义	2.6.3 - 45	偏光顕微鏡写真(PWT03-16-C1-004, その1)	194
义	2.6.3-46	偏光顕微鏡写真(PWT03-16-C1-004, その2)	195
义	2.6.3-47	偏光顕微鏡写真(PWT03-16-C1-004, その3)	196
义	2.6.3-48	偏光顕微鏡写真(PWT03-16-C1-004, その4)	197
义	2.6.3-49	偏光顕微鏡写真(PWT03-16-C1-004, その5)	198
义	2.6.3-50	偏光顕微鏡写真(PWT03-16-C2-001, その1)	201
义	$2.6.3 \cdot 51$	偏光顕微鏡写真(PWT03-16-C2-001, その2)	202
义	2.6.3-52	偏光顕微鏡写真(PWT03-16-C2-001, その3)	203
义	2.6.3 - 53	偏光顕微鏡写真(PWT03-16-C2-001, その4)	204
义	$2.6.3 \cdot 54$	偏光顕微鏡写真(PWT03-16-C2-001, その5)	205
义	2.6.3 - 55	偏光顕微鏡写真(PWT04-16-Rh-009, その1)	208
义	2.6.3 - 56	偏光顕微鏡写真(PWT04-16-Rh-009, その2)	209
义	2.6.3 - 57	偏光顕微鏡写真(PWT04-16-Rh-009, その3)	210
义	2.6.3 - 58	偏光顕微鏡写真(PWT04-16-Rh-009, その4)	211
义	2.6.3-59	偏光顕微鏡写真(PWT04-16-Rh-009, その5)	212

义	2.6.3-60	偏光顕微鏡写真(PWT05-16-Rh-010, その1)	215
义	2.6.3-61	偏光顕微鏡写真(PWT05-16-Rh-010, その2)	216
义	2.6.3-62	偏光顕微鏡写真(PWT05-16-Rh-010, その3)	217
义	2.6.3-63	偏光顕微鏡写真(PWT05-16-Rh-010, その4)	218
义	2.6.3-64	偏光顕微鏡写真(PWT05-16-Rh-016, その1)	221
义	2.6.3-65	偏光顕微鏡写真(PWT05-16-Rh-016, その2)	222
义	2.6.3-66	偏光顕微鏡写真(PWT05-16-Rh-016, その3)	223
义	2.6.3-67	偏光顕微鏡写真(PWT05·16·Rh·016, その4)	224
义	2.6.3-68	偏光顕微鏡写真(PWT05-16-Rh-017, その1)	226
义	2.6.3-69	偏光顕微鏡写真(PWT05-16-Rh-017, その2)	227
义	2.6.3-70	偏光顕微鏡写真(PWT05-16-Rh-017, その3)	228
义	2.6.3-71	偏光顕微鏡写真(PWT05-16-Rh-017, その4)	229
义	3.1.3-1	トレンチ1での炭酸塩試料 (Rc-01~10A)の採取位置 (●は貝殻を確認した層)	
			242
义	3.1.3-2	トレンチ3での14C年代測定用試料の採取位置(赤字の015~017)	243
义	3.1.3 - 3	トレンチ4での14C年代測定用試料の採取位置(赤字の007~008)	243
义	3.1.3-4	カワニナの貝殻(トレンチ4)	244
义	3.1.3-5	Narra3-2 地点のアルカリ地下水が流出する河川に現在も生息するカワニナ	245
义	3.1.3-6	トレンチ5の炭酸塩試料(前処理時)	245
义	3.2.1-1	熱ルミネッセンス年代測定の概念	246
义	3.2.1-2	SARA 法の実施手順のイメージ	247
义	3.2.3-1	合成方解石の XRD パターン	252
义	3.2.3-2	LA-ICP-MS による合成方解石の微量元素測定結果(その1)	254
义	3.2.3-3	LA-ICP-MS による合成方解石の微量元素測定結果(その2)	255
义	3.2.3-4	添加濃度と測定濃度の関係	256
义	3.2.3 - 5	β線熱ルミネッセンス発光効率とγ線熱ルミネッセンス発光効率の関係	258
义	3.2.3-6	γ線熱ルミネッセンス発光効率と Mn 濃度の関係	259
义	3.2.3-7	$\gamma$ 線熱ルミネッセンス発光効率と Mn, Fe, Mg 濃度の総和との関係	259
义	3.2.3-8	β線熱ルミネッセンス発光効率と Mn 濃度の関係	260
义	3.2.3-9	<b>6</b> 線熱ルミネッセンス発光効率と Mn, Fe, Mg 濃度の総和との関係	260
义	3.2.3-10	β線熱ルミネッセンス発光効率と (Mg+Mn+Fe)/Fe との関係	261
义	3.2.4-1	PWT-01-15-Rc-001の蓄積線量に対する TL グロー曲線(その1)	263
义	3.2.4-2	PWT-01-15-Rc-001の蓄積線量に対する TL グロー曲線(その2)	264
义	3.2.4-3	PWT-01-15-Rc-001の蓄積線量に対する TL グロー曲線	265
义	3.2.4-4	追加放射線量(Gy)に対する 200-280℃間の TL 量の積算値	265
义	3.2.4-5	追加放射線量に対する 360-400℃間の TL 量の積算値	266

义	3.2.4-6	SAR 法を用いての蓄積線量測定の結果	.266
义	3.2.4-7	SAR 法を用いての蓄積線量測定の結果	.267
义	3.2.4-8	SAR 法を用いての蓄積線量測定の結果	.268
义	3.2.4-9	SAR 法を用いての蓄積線量測定の結果	.269
义	3.2.4-10	SARA 法による結果	.269
义	3.2.4-11	GSJ CRM JCp-1 (サンゴ)の TL グロー曲線	.270
义	3.2.4-12	GSJ CRM JCp-1 (サンゴ)の TL グロー曲線	.270
义	3.2.4-13	GSJ CRM JCp-1(サンゴ)の XRD パターン	.271
义	3.3.2-1	AMS 装置(ペレトロン年代測定装置)図[21]	.274
义	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[21]	.275
义	3.3.3-1	Narra3地区調査エリアのトレンチ及び試錐孔の位置図	.280
义	3.3.3-2	Narra3地区トレンチ3の試料採取位置と炭素14年代	.280
义	3.3.3-3	Narra3 地区トレンチ4の試料採取位置と炭素14年代	.281
义	3.3.3-4	Narra3地区トレンチ5の試料採取位置と炭素14年代	.281
义	3.3.3-5	炭酸塩試料(PWT05-16-Rh-007)の前処理の状況	.282
义	4.2.2-1	EPMA 分析用に準備した研磨片試料(その1)	.288
义	4.2.2-2	EPMA 分析用に準備した研磨片試料(その2)	.289
义	4.2.2-3	試料の分析と観察に用いた分析装置(EPMA)	.289
义	4.2.3-1	PWT03-16-Rh-004 のマッピングエリアの BEI (左) と SEI (右)	.290
义	4.2.3-2	PWT03-16-Rh-004 の元素分布	.291
义	4.2.3-3	PWT03-16- C1-004 のマッピングエリアの BEI (左) と SEI (右)	.292
义	4.2.3-4	PWT03-16- C1-004 の元素分布	.293
义	4.2.3-5	PWT04-16-Rh-006のマッピングエリアの BEI (左) と SEI (右)	.294
义	4.2.3-6	PWT04-16-Rh-006 の元素分布	.295
义	4.2.3-7	PWT04-16-Rh-009のマッピングエリアの BEI (左) と SEI (右)	.296
义	4.2.3-8	PWT04-16-Rh-009 の元素分布	.297
义	4.2.3-9	PWT05-16-Rh-008 のマッピングエリアの BEI (左) と SEI (右)	.298
义	4.2.3-10	PWT05-16-Rh-008 の元素分布	.299
义	4.2.3-11	PWT05-16-Rh-010 のマッピングエリアの BEI (左) と SEI (右)	.300
义	4.2.3-12	PWT05-16-Rh-010 の元素分布	.301
义	4.2.4-1	PWT03-16-Rh-004の微視的観察(その1)	.302
义	4.2.4-2	PWT03-16-Rh-004の微視的観察(その2)	.303
义	4.2.4-3	PWT03-16-Rh-004の微視的観察(その3)	.304
义	4.2.4-4	PWT03-16-Rh-004の微視的観察(その4)	.305
义	4.2.4-5	PWT03-16-Rh-004の微視的観察(その5)	.306
义	4.2.4-6	PWT03-16-Rh-004の微視的観察(その6)	.307

义	4.2.4-7	PWT03-16-C1-004の微視的観察(その1)	.308
义	4.2.4-8	PWT03-16-C1-004の微視的観察(その2)	.309
义	4.2.4-9	PWT04-16-Rh-006の微視的観察(その1)	.310
义	4.2.4-10	PWT04-16-Rh-006の微視的観察(その2)	.311
义	4.2.4-11	PWT04-16-Rh-006の微視的観察(その3)	.312
义	4.2.4-12	PWT04-16-Rh-006 の微視的観察(その4)	.313
义	4.2.4-13	PWT04-16-Rh-009 の微視的観察(その1)	.314
义	4.2.4-14	PWT04-16-Rh-009の微視的観察(その2)	.315
义	4.2.4-15	PWT05-16-Rh-008 の微視的観察(その1)	.316
义	4.2.4-16	PWT05-16-Rh-008 の微視的観察(その2)	.317
义	4.2.4-17	PWT05-16-Rh-008 の微視的観察(その3)	.318
义	4.2.4-18	PWT05-16-Rh-010 の微視的観察(その1)	.319
义	4.2.4-19	PWT05-16-Rh-010の微視的観察(その2)	.320
义	4.2.4-20	PWT05-16-Rh-010の微視的観察(その3)	.321
义	4.2.4-21	PWT05-16-Rh-010 の微視的観察(その4)	.322
义	4.2.4-22	PWT05-16-Rh-010の微視的観察(その5)	.323
义	4.2.4-23	PWT05-16-Rh-010の微視的観察(その6)	.324
义	$4.2.5 \cdot 1$	トレンチごとのクロム鉄鉱の Cr 組成の比較	.325
义	$4.2.5 \cdot 2$	輝石の Ca-Mg-Fe 化学組成ダイアグラム	.327
义	4.2.5 - 3	輝石の組成プロット(a: Al(4) vs. Al(6); b: Al(4) vs. Cr; c: En vs. Ni)	.328
义	4.2.5 - 4	Ca 角閃石の分類プロット	.331
义	$4.2.5 \cdot 5$	Mg 角閃石の分類プロット	.331
义	4.2.5-6	角閃石の種類とAサイトアルカリ組成	.332
义	4.2.5-7	角閃石の化学組成プロット(a: Al(4) vs. Al(6); b: Al(4) vs. Cr; c: Al(4) vs.	
	Na+K)		.333
义	4.2.5-8	蛇紋石の組成プロット(a: XMg vs. Ni; b: XMg vs. Ca)	.336
义	4.2.5 - 9	緑泥石の組成プロット (a: XMg vs. Ca; b: XMg vs. XAl; c: XMg vs. Cr)	.339
义	$4.2.5 \cdot 10$	スメクタイトの組成プロット(a: Si vs. Ca; b: XMg vs. Ca)	.344
义	4.2.5-1	1 リムが溶解したスチーブンサイト(a: PWT03-16-C1-004; b:	
	PWT04	-16-Rh-006)	.345
义	4.2.5-12	スメクタイトの微量成分組成プロット(a: XMg vs. Cr; b: XMg vs. Ni; d: Al va.	
	Cr; d: A	l vs. Fe)	.346
义	$4.2.5 \cdot 13$	C-S-H の Si vs. Ca プロット	.351
义	$4.2.5 \cdot 14$	C-S-H 鉱物の化学組成プロット(a: Al vs. Na+K; b: C/S ratio vs. Al)	.352
义	4.2.6-1	PWT03-16-Rh-004 のマイクロ XRD スポット領域(a: spot1; b: spot2; c: spot3)	
			.354

义	4.2.6-2	PWT03-16-C1-004 のマイクロ XRD スポット領域(a: spot1; b: spot2)354
义	4.2.6-3	PWT04-16-Rh-006 のマイクロ XRD スポット領域(a: spot1; b: spot2)354
义	4.2.6-4	PWT04-16-Rh-009 のマイクロ XRD スポット領域(a: spot1; b: spot2; c: spot3)
义	4.2.6-5	PWT05-16-Rh-008 のマイクロ XRD スポット領域(a: spot1; b: spot2)355
义	4.2.6-6	PWT05-16-Rh-010 のマイクロ XRD スポット領域(a: spot1; b: spot2)355
义	4.2.6-7	全試料のマイクロ XRD 測定データ比較
义	4.2.7-1	アルカリ影響を受けていない砕屑性堆積物の試料採取地点
义	4.2.7-2	Narra3.2 地点背後の PWNRO01 地点の露頭
义	4.2.7-3	DH04 孔コアからの分析試料のサンプリング位置359
义	4.2.7-4	PWNRO01-16-Rh-001の定方位測定および EG 処理試料の定方位測定
义	4.2.7-5	PWDH4-16-HU-010の定方位測定および EG 処理試料の定方位測定
义	4.2.7-6	PWDH4-16-HU-006の定方位測定および EG 処理試料の定方位測定361
义	4.2.7-7	PWNRO01-16-Rh-001 の加熱処理による(EG 処理)XRD プロファイルの変
	化	
义	4.2.7-8	PWDH4-16-HU-010の加熱処理による(EG処理)XRD プロファイルの変化362
义	4.2.7-9	PWDH4-16-HU-006の加熱処理による(EG処理)XRD プロファイルの変化362
义	4.2.7-10	060 反射の XRD プロファイル
义	4.2.7-11	一次鉱物から生成したスメクタイト(サポナイト)(PWDH4-16-HU-010)364
义	4.2.7-12	一次鉱物から生成したスメクタイトの M+-4Si-3R2+ダイアグラムによる解析
	結果	
义	4.2.7-13	スチーブンサイトと同定されたスメクタイトの産状(PWDH4-16-HU-010)365
义	4.2.7-14	図 4.2.7-13 のスメクタイトの M+-4Si-3R <sup>2+</sup> ダイアグラムによる解析結果365
义	$4.2.7 \cdot 15$	Narra3 地区のアルカリ地下水条件での Mg-Si 系非晶質物質の安定相
义	4.3.1-1	パラワンオフィオライトの地質構造学的発展と砕屑性堆積物のスメクタイト
	の形成	モデル(パラワンオフィオライトの定置、風化、堆積)
义	4.3.1-2	パラワンオフィオライトの地質構造学的発展と砕屑性堆積物のスメクタイト
	の形成・	モデル(砕屑性堆積物と高アルカリ地下水の相互作用)
义	4.3.2-1	XRF 測定に基づく化学成分相互の相関(SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -MgO, CaO, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )376
义	4.3.2-2	XRFに基づく化学成分相互の相関(SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -MgO, CaO, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )(拡大図)
义	4.3.3-1	Narra3 調査地区の模式層序学的断面図と地下水(湧水)の水質
义	4.3.4-1	パラワン島 Narra 地区のスメクタイト生成に係る鉱物変遷プロセス
义	4.3.4-2	粒間充填物としてのサポナイトの産状(PWT05-16-Rh-008)
义	4.3.4-3	PWT05-16-Rh-010 のスメクタイトの産状(その1)
汊	4.3.4-4	PWT05-16-Rh-010のスメクタイトの産状(その2)

义	4.3.4-5	PWT03-16-Rh-004 のスメクタイトの産状	391
义	4.3.4-6	PWT05-16-C1-004 のスチーブンサイトの産状	392
汊	4.3.4-7	PWT04-16-Rh-006のスメクタイトの産状(その1)	392
汊	4.3.4-8	PWT04-16-Rh-006のスメクタイトの産状(その2)	393
义	4.4.1-1	Narra サイトのスメクタイトの形成・進展に係る変質プロセス	397
义	4.4.2-1	ナチュラルアナログサイトの地質環境のコンセプト	399
汊	4.4.2-2	フィリピンナチュラルアナログのアルカリ変質プロセス(ルソン島 Saile 鉱山	
	のNA 。	とパラワン島 Narra 地区の NA の比較)	401
汊	4.4.2-3	パラワン島 Narra 地区の天然現象の TRU 廃棄物人工バリアにおけるアナログ	
	性		402
义	$5.3.1 \cdot 1$	Saile 鉱山ベントナイトの初期状態におけるベントナイト中の鉱物空間分布	409
义	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鉱物組	
	成		409
义	$5.3.3 \cdot 1$	解析体系概念図	413
义	5.2.3-1	二次鉱物について瞬時平衡の場合の変質解析結果(1年、10年後の鉱物分布と	
	空隙率)		421
汊	5.2.3-2	二次鉱物について瞬時平衡の場合の変質解析結果(昨年度[2]の計算結果)	422
汊	5.2.3-3	二次鉱物の溶解速度を考慮した場合の変質解析結果(1年、10年後の鉱物分布	
	と空隙	率)	423
义	5.2.3-4	二次鉱物の溶解速度を考慮した場合の変質解析結果(昨年度[2]の計算結果)	424
义	5.2.3-5	二次鉱物について瞬時平衡の場合の変質解析結果(1年、10年後の鉱物分布と	
	空隙率)		426
义	5.2.3-6	二次鉱物について瞬時平衡の場合の変質解析結果(昨年度の計算結果[2])(図	
	5.2.3-2	と同じ。)	427
义	5.2.4-1	解析体系概念図(鉄供給)	428
义	5.2.4-2	鉄の供給を考慮した場合の変質解析結果(1 年、10 年後の鉱物分布と空隙率)	
			430

## 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	$1.3.1 \cdot 1$	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	$1.3.2 \cdot 1$	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		28
表	1.3.3-2	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	2.2.1-1	現地調査の工程	43
表	2.2.2-1	DH01 孔調查実施工程	46
表	2.2.2-2	DH02 孔調查実施工程	47
表	2.2.2-3	DH03 孔調查実施工程	48
表	2.2.2-4	DH04 孔調查実施工程	49
表	$2.2.2 \cdot 5$	トレンチ3調査実施工程	51
表	2.2.2-6	トレンチ4調査実施工程	52
表	2.2.2-7	トレンチ5調査実施工程	53
表	2.2.3-1	物理化学パラメータ 測定項目	57
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(その1)	60
表	2.2.4-2	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(その2)	61
表	2.2.4-3	<b>XRD</b> の測定条件一覧	62
表	2.2.4-4	XRF による定量分析条件	63
表	2.2.4-5	薄片観察試料と薄片作成方法	64
表	2.4.1-1	Narra3-1 源泉現地水質測定結果	97
表	2.4.1-2	Narra3-2 表層水現地水質測定結果	97
表	2.4.1-3	Narra3-2 試錐孔內水現地水質測定結果	98
表	2.4.1-4	Narra3-2 トレンチ内湧水(地下水)現地水質測定結果	99
表	2.4.1-5	San Ishidro 温泉水の現地水質測定結果	99
表	2.4.2-1	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 Narra3-2	
	地区試	錐孔及びトレンチ)	102
表	2.4.2-2	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	
	地区湧	水及び小川)	103
表	2.4.2-3	重炭酸・炭酸イオン測定結果	104
表	2.4.2-4	パラワン島とルソン島(Zambales)のアルカリ地下水の地球化学的特性の比較	107
表	2.4.2-5	DH01 孔調查実施工程	111
表	2.4.2-6	DH02 孔調査実施工程	.112

表	2.4.2-7	DH03 孔調查実施工程	.112
表	2.4.2-8	DH04 孔調查実施工程	.113
表	$2.5.5 \cdot 1$	試錐コアから採取した岩石試料と分析項目	.124
表	$2.5.5 \cdot 2$	試錐試料の状態(分取前試料、乾燥前、乾燥・粗砕後、および、105µm ふる	
	い残分	(ふるい上)と通過分(ふるい下))	.125
表	$2.5.5^{-3}$	トレンチ試料のX線回折による鉱物同定結果	.127
表	$2.5.5 \cdot 4$	定方位およびエチレングリコール処理の 001 面測定結果	.134
表	$2.5.5 \cdot 5$	PWDH01 と PWDH02 の XRF 分析による定量結果(酸化物表記、CO2含む)	
			.139
表	2.5.5-6	PWDH03 と PWDH04 の XRF 分析による定量結果 (酸化物表記、CO2 含む)	
			.140
表	2.5.5-7	PWDH01 と PWDH02 の XRF 分析による定量結果(酸化物表記、CO2含ま	
	ず)…		.141
表	2.5.5-8	PWDH03 と PWDH04 の XRF 分析による定量結果(酸化物表記、CO2含ま	
	ず)…		.142
表	2.6.1-1	トレンチ3調査実施工程	.146
表	2.6.1-2	トレンチ4調査実施工程	.147
表	2.6.1-3	トレンチ5調査実施工程	.147
表	$2.6.3 \cdot 1$	Narra3-1 地点のトレンチで採取した(Rh)岩石試料と分析項目	.158
表	2.6.3-2	Narra3-1 地点のトレンチで採取した(HU)岩石試料と分析項目	.159
表	2.6.3 - 3	トレンチ試料のX線回折による鉱物同定結果	.163
表	2.6.3-4	Narra3・2 地点採取試料(トレンチ及び試錐孔)の定方位およびエチレングリ	
	コールタ	処理の 001 面測定結果	.172
表	2.6.3-5	トレンチ3試料のXRF分析による定量結果(酸化物表記、CO2含む)	.176
表	2.6.3-6	トレンチ4、5試料のXRF分析による定量結果(酸化物表記、CO2含む)	.177
表	2.6.3-7	トレンチ3試料のXRF分析による定量結果(酸化物表記、CO2含まず)	.178
表	2.6.3-8	トレンチ4、5試料のXRF分析による定量結果(酸化物表記、CO2含まず)	.179
表	$2.6.3 \cdot 12$	Narra3-2 地区トレンチ試料の ICP-MS 及び全ケイ素アルカリ溶融脱水法に	
	よる主席	成分・微量成分分析結果	.189
表	2.6.3-10	薄片観察試料と薄片作成方法	.190
表	3.1.1-1	フィリピンのナチュラルアナログにおける放射年代測定の適用性	.240
表	3.2.1-1	SAR 法手順	.248
表	3.2.3-1	合成方解石の作成初期条件と Mg, Mn, Fe 濃度	.251
表	3.2.3-2	β線およびγ線熱ルミネッセンス発光効率	.258
表	3.2.4-1	試料の年間線量	.272
表	3.3.2-1	AMS 装置の概要	.274

表	3.3.2-2	AMS 測定の条件	275
表	3.3.3-1	パラワン島 Narra3-2 地区トレンチ3~5の各試料の放射性炭素年代測定結果	279
表	$4.2.5 \cdot 1$	スピネルの分析値	326
表	4.2.5 - 2	輝石の化学組成	329
表	4.2.5 - 3	斜長石の化学組成	330
表	4.2.5 - 4	角閃石の分析値(その1)	334
表	$4.2.5 \cdot 5$	角閃石の分析値(その2)	335
表	4.2.5-6	蛇紋石の分析値(その1)	337
表	4.2.5-7	蛇紋石の分析値(その2)	338
表	4.2.5-8	緑泥石の分析値(その1)	340
表	4.2.5-9	緑泥石の分析値(その2)	341
表	$4.2.5 \cdot 10$	緑泥石の分析値(その3)	342
表	$4.2.5 \cdot 11$	緑泥石の分析値(その4)	343
表	$4.2.5 \cdot 12$	スメクタイトの EPMA スポット分析値(その1)	347
表	$4.2.5 \cdot 13$	スメクタイトの分析値(その2)	348
表	$4.2.5 \cdot 14$	スメクタイトの分析値(その3)	349
表	$4.2.5 \cdot 15$	方解石の分析値	350
表	$4.2.5 \cdot 16$	C-S-H 鉱物の分析値	353
表	4.2.6-1	マイクロ XRD による鉱物同定結果	357
表	4.3.1-1	偏光顕微鏡観察による岩石鉱物学的特徴	371
表	4.3.1-2	試錐コア試料のX線回折による鉱物同定結果	373
表	4.3.1-3	トレンチ試料のX線回折による鉱物同定結果	374
表	4.3.1-4	トレンチ試料のマイクロ XRD による鉱物同定結果	374
表	4.3.3-1	ナチュラルアナログ調査地点(パラワン島及びルソン島)の水質分析結果	379
表	5.3.2-1	解析に用いた溶液データ	412
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	412
表	5.3.3-1	ベントナイトの初期鉱物組成	413
表	5.2.3-2	解析に用いた溶液データ	414
表	5.2.3 - 3	熱力学データの比較	415
表	5.2.2-4	熱力学データの比較(BRGM)	416
表	$5.2.2 \cdot 5$	考慮した二次鉱物とモル体積	416
表	5.2.2-6	25℃における速度論パラメータ	418
表	5.2.2-7	計算ケース	419
表	5.2.4-1	計算ケース(鉄供給)	428

#### 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

原子力発電に伴って発生す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 エ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、母岩中の放射性核種の移行とその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、ナチュラルアナログ調査・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]、オーバーパックの機能がない坑道集 積型の TRU 廃棄物処分場の人工バリアの基本構成として支保工、グラウト、インバートコンクリ ート、構造躯体、廃棄体間/内充填材等にセメント系材料の使用が想定されている。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機能が求められる[8][9]。これらの観点から、 TRU 廃棄物処分場のベントナイト系緩衝材の長期健全性に係るセメント系材料との相互作用の 長期評価は、高レベル放射性廃棄物の人工バリアシステム以上に重要課題として位置付けられて いる。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。)を主要成分とする膨潤性粘土)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、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年程度の間に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証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精緻化と信頼性向上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査して、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、データも集まりつつあるが[19][20]、天然環境でのベントナイ ト(スメクタイト)ー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加えその現象 を引き起こす地球化学的な環境条件については、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、セメント系材料一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。

この蛇紋岩化作用に由来する高アルカリ地下水(温泉水も含む)の生成は、オフィオライトを 構成するかんらん岩等の主構成鉱物であるかんらん石や輝石が天水との水-岩石反応により蛇紋 石に変質する一連の反応過程によるものであることが解っている。また、低温下(処分環境に近 い温度)ではかんらん岩はクリソタイル蛇紋岩へ、高温下ではアンチゴライト蛇紋岩に変質する。



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

蛇紋岩化作用およびそれに関連する反応について、構成式とともに以下に示す[22][23][24]。 (蛇紋岩化作用)  $6Mg_2SiO_4 + Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2 + 9H_2O \rightarrow 5Mg_3Si_2O_5(OH)_4$ (1)forsterite talc serpentine (かんらん石の溶解)  $3H_2O + 2 Mg_2SiO_4 \rightarrow 5Mg_3Si_2O_5(OH)_4 + Mg^{2+} + 2OH^{-1}$ (2)forsterite serpentine  $2H_2O + Fe_2SiO_4 \rightarrow 2Fe(OH)_2 + SiO_2$ (3)fayalite (輝石の溶解)  $2H_2O + 3MgSiO_3 \rightarrow Mg_3Si_2O_5(OH)_4 + SiO_2$ (4) $H_2O + FeSiO_3 \rightarrow Fe(OH)_2 + SiO_2$ (5) $H_2O + CaSiO_3 \rightarrow Ca^{2+} + 2OH^- + SiO_2$ (6)(降水の浸透)  $3(Mg^{2+} + 2OH^{-}) + 2SiO_2 \rightarrow Mg_3Si_2O_5(OH)_4 + H_2O$ (7)(地下水の水質の構成)  $Mg^{2+} + HCO_3^- + OH^- \rightarrow MgCO_3 + H_2O$ (8) $Ca^{2+} + HCO_3^- + OH^- \rightarrow CaCO_3 + H_2O$ (9)(ガスの発生) (10) $\mathscr{I} \mathscr{I} \mathscr{I} : 6Fe_2SiO_4 + 2H_2O + CO_2 \rightarrow 4Fe_3O_4 + 6SiO_2(aq) + CH_4$  $3Fe_2SiO_4+2H_2O$  $\rightarrow$  3SiO<sub>2</sub>+2Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>+2H<sub>2</sub>(aq) (11)水素: fayalite magnetite

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 (高 pH、高 Ca 濃度)、還元性、発熱性などの地下水環境は、セメント系材料を大量に使用する TRU 廃棄物の処分場の環境と類似しており、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。 一方、このような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)あるいはスメクタイトを含有する粘土 層、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、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



(v) モニタリングによる地下水の流動特性(間 隙水圧、流量、流速等)と組成変化



現象

モ

デ

N

 $\mathcal{O}$ 

作

成

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。

- 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、 アルカリー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、セメントーベントナイト相互作用 のナチュラルアナログが成立する環境である、現在も高アルカリ地下水が湧出し、スメクタイト を含む粘土質堆積物に浸出してい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 や変質反応の抑制・促進に係る条件について評価し、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。

-10-

#### 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裂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)と火山性砕屑物(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ー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砕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、このベントナイトー沸石は、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 δD =6δ<sup>18</sup>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に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(OPC)の Ca(OH)<sub>2</sub> の溶解平衡にある溶液 (RegionII) としても、ルソン島の調査サイトの pH は OPC の RegionII 浸出水に比べると低 いがアナログであるといえる。

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	
pН	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 <sub>4</sub> [ppm]	>5000	0 (2200)	0	>5000	0 (0~560)	-
H <sub>2</sub> [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 <sup>2+</sup> [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 <sub>3</sub> [ppm]	73.5	55.6	232.8	-	153.8	-

表 1	l.3.1-1	ルソン島の調査	トイトの地下水水	質と低アルカリ	セメント	浸出液とのアナロ	ログ性
-----	---------	---------	----------	---------	------	----------	-----

\*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・破砕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、枕状玄武岩の波状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。





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。



(a) 接触部のサンプリング位置(トレンチ-5 南西面)

(b) 接触部の厚片試料と CT 画像(トレンチ・5 南西

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)



(a)境界面の薄片資料の顕微鏡写真



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法 (Single-Aliquot Regeneration and Added-dose method; 3.2.1 熱ルミネセンス年 代測定法参照)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仮定すると、地層処分の評価期 間に比べてはるかに長期間に渡り(少なくとも 23Ma 以前~数+ 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-スメクタイトと随伴鉱物として主に輝沸石と斜プチロル沸石で構成されており、不均質に方 解石が見られる部分を除き、未変質部との鉱物組成、CEC、膨潤力の顕著な違いは見られな い。一方、界面の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) 背景

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。

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 ルアナログの証拠を取得し、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る。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る。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。

(2) Bigbiga 地区のナチュラルアナログ

以上の背景を踏まえ、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 Saile 鉱山の南南東 30km に位置する Bigbiga 地区(図 1.3.2-2 参 照)において調査を実施した[34]。

図 1.3.2-3 に示す 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 試誰孔(DH08)、および、これらの南西に位置する既存井戸(Well-3)とその直近の試誰孔(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 1.3.2-3)。



図 1.3.2-1 Bigbiga 地区及び Saile 鉱山周辺地区の Aksitero 累層の分布



図 1.3.2-2 Bigbiga 地区の Compilation Map



図 1.3.2-3 Bigbiga 地区の二次元水理地質構造概念モデル

図 1.3.2-3 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誰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)が堀削泥剤により自濁した。この自濁現象は、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、Na<sup>+</sup>(K<sup>+</sup>)(Ca<sup>2+</sup>)-HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> タイプで若干の Cl<sup>-</sup>と SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (化石海水の影響)を含み、pH(9 < pH < 10)を示す。

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のようになる。

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 (2八面体型) → サポナイト (3八面体型) /1部 鉄サポナイト

 $(Ca \cdot Mg \rightarrow Fe^{2+})$ 

→ ノントロナイト (2八面体型)

### (Al $\cdot$ Si $\rightarrow$ Fe<sup>3+</sup>)

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 ベントナイトー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 Bigbiga 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 廃棄物の地 層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。

Bigbiga 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。 1.3.3 パラワン島のナチュラルアナログ

(1) 背景

平成 24 年度[20]まで実施した、アルカリ性地下水との過去の反応が確認できたルソン島 Saile 鉱山の "Fossil Type"のナチュラルアナログに対して、平成 25 年度から現在もアルカリ 地下水がベントナイト層に浸出している "Active Type"のナチュラルアナログとして、Bigbiga において調査を実施した。しかしながら、ベントナイトの溶解が顕著な条件でない pH9.5 程度 の低アルカリの地下水しか存在せず、またベントナイト質堆積物とのコンタクト部が深部にあ るため、その影響範囲の観察・評価が難しいことから、Bigbiga のナチュラルアナログは平成 26 年度で終了した[34]。

これらのナチュラルアナログ調査の成果と課題を図 1.3.3-1 に示すが、これを踏まえ、より ベントナイトのアルカリ変質が顕著な、pH11 を超える高アルカリ条件を"Active Type"のナ チュラルアナログサイトの最も優先的な条件として、この条件を満足するアルカリ湧水を複数 地点で確認したパラワン島中部において、ナチュラルアナログサイトの探査を開始した。



図 1.3.3-1 ナチュラルアナログ調査で得られた成果と今後の成果目標

(2) 地質概要

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「Stavely(Range) Gabbro」、③砂岩とチャートを挟在 する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 岩で代表される砕屑物質(例えば、Panas / Pandian 累層)を原岩としている。そして、これ らの堆積岩に押しかぶせし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 大の結果により生起し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-長石質砕屑物のものと、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。

(3) ナチュラルアナログサイトの探査

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 Active Type のナチュラルアナログを探査・選定することを目的として、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ナラ(Narra)地区 (図 1.3.3・2 参照)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。

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。

トレンチ2においては粘土質の砕屑性堆積物を確認した。2ヶ所のトレンチ壁面の浸出水は、 pH11を超える高アルカリ地下水で流量が多い。また、トレンチ2の砕屑性堆積物では 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、pH11を超える高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[38]。



図 1.3.3-2 ナチュラルアナログ調査サイト (Narra 地区)の位置図

## (4) 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 < pH < 12)のアルカリ地 下水の湧水を複数個所 (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<sup>2+</sup>濃度が低く、Ca<sup>2+</sup> 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といえる。

Na<sup>+</sup>と Cl<sup>-</sup>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がことが考えられ、 St. Lucia が最もその影響が強い。Ca<sup>2+</sup>濃度と pH の正の相関はアルカリ地下水の形成過程で Ca<sup>2+</sup>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ー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、Ca<sup>2+</sup>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 1.3.3-3 中央/南部パラワン地域の地質図と調査地点の水質





(Narra 2)

図 1.3.3・4 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	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 Manleluag 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 Narra1 G	2015 Narra3-2 Trench2 H	2015 Narra3-2 Trench1 H	2015 Narra3-1 H	2014 Narra3-1 O	2010 PB-10-KWP-01	2011 m1-11-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 <sub>4</sub> [ppm]	0	0	>700	0	0	0	0	>5000	>5000	0 (0~560)	-
H <sub>2</sub> [ppm]	0	0	0	0	0	0	0	50~1320	62	0 (0~130)	-
Na <sup>+</sup> [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 <sup>2+</sup> [ppm]	5.50	4.26	3.78	34.9	37.1	43.6	41.9	37.4	23.6	1.34	16.8
Mg <sup>2+</sup> [ppm]	17.9	1.42	0.17	0.12	0.13	0.12	0.20	0	0.17	0.06	-
Si <sup>2+</sup> [ppm]	0.02	33	86.4	1.0	0.4	0.6	0.6	1.40	11.5	72.3	33
Al <sup>3+</sup> [ppm]	- (<0.01)	- (<0.01)	0.19	- (0.08)	- (0.01)	- (0.07)	0.16	0	20.3	0.01	0.3
Cl <sup>-</sup> [ppm]	28.6	167	56.5	27.8	27.5	25.7	29.4	-	16.6	4.50	-
SO42 [ppm]	b.d.l.	12.4	6.34	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	0.39	-	-	48.0	-
HCO3-* [ppm]	[41.08]	[198.7]	-	[19.7]	[6.297]	[10.16]	0.5	124.1	73.5	135.6	-

\*[]の値はHCO3<sup>-</sup> + CO3<sup>--</sup>, \*\* wt % - ポルトランドセメント:シリカフューム:フライアッシュ=40:20:40



図 1.3.3-5 パラワンのアルカリ湧水の pH-Na+濃度関係図



図 1.3.3-6 パラワンのアルカリ湧水の pH-Ca<sup>2+</sup>濃度関係図



図 1.3.3-7 パラワンのアルカリ湧水の pH-Si 濃度関係図



図 1.3.3-8 パラワンのアルカリ湧水の pH-Cl 濃度関係図

ナチュラルアナログを確認した Narra3 地点では、図 1.3.3-9 に示すように Narra3-2 地点 のトレンチの浸透水は Narra3-1 地点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 地点の源泉の地下水がトラバーチン(石灰華<炭酸塩層>)の上部から下部へ 浸透したのではなく、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炭酸塩層の下位の粘土質の砕屑性堆積物に浸透して いるものと考えられる。上面からの降雨水等の浸透を抑制されているのは、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く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いるためだと考えられる。



図 1.3.3-9 ナチュラルアナログサイト(Narra 地区)の模式層序学的断面図と地下水水質

(5) 年代測定による反応時間の評価

Narra 地区のトレンチでは、アルカリ地下水によって生成・堆積した炭酸塩の年代にかかわる埋没木根や貝(化石)が見つかったことから、炭酸塩の TL (Thermoluminescence:熱ルミネッセンス)年代測定に加え、新たに埋没木根の放射性炭素(<sup>14</sup>C)による絶対年代測定を実施した。

トレンチ1の最下部(深度約2.8m)を構成する堆積性炭酸塩岩層中の埋没木根(図1.3.3-10 参照)の<sup>14</sup>C年代は約4,500年であった。この年代値は、埋没木根の母岩がパラワンオフィオ ライト起源の高アルカリ湧水からの化学的沈殿により形成された堆積性炭酸塩岩であり、その 時棲息していたあるいは遺体としての植物木根が沈殿・堆積・固結プロセス中に取り込まれた ものと考えられることから、高アルカリ地下水湧水の時間スケールと見なすことが出来る。し かし、この埋没木根を含有している堆積性炭酸塩岩はパラワンオフィオライト基盤岩の直上に 累重しているものでないことから、高アルカリ湧水の時間スケール(始動開始時期)はより古 いことが見込まれる。

炭酸塩の TL 年代測定では、合成鉱物を使った基礎実験における炭酸塩の Mn 濃度と TL 特 性の関連性を踏まえ、対象試料の Mn 濃度から算出した TL 年代の補正係数を用いて、パラワ ン島 Narra 地区のトレンチサイトの炭酸塩試料の TL 年代を評価した。その結果、表層部の炭 酸塩の年代は 988ka、最深部の炭酸塩では 173ka となった。上記の<sup>14</sup>C 年代を求めた木根が 炭酸塩の形成とともに埋没したと考えると、両者の隔たりは大きい。含水率が高く分析試料と しての状態の悪さ、最初の加熱(Natural 測定)の際の感度変化の影響、蓄積線量測定時のル ミネッセンス強度の高いピークの影響、生物起源のアラゴナイトの影響等が年代を過大評価し た理由と考えられ、さらに検討が必要である。ただし、今回のトレンチ試料でも年代測定に必 要なTL発光量を示していることは確認できたため、上記の課題をクリアすることでより正確 な年代を測定できると考えられる。



図 1.3.3-10 Narra 地区トレンチの <sup>14</sup>C 年代測定結果

(6) アルカリ環境下でのベントナイトの長期変質プロセス

Palawan 島 Narra 地区のアルカリ地下水が浸出しているトレンチ2の壁面から採取した砕 屑性堆積物及びコアドリルで採取した基盤岩に近い礫を含む砕屑性堆積物について、EPMA に よる元素マッピング観察・鉱物のスポット定量分析、鉱物のマイクロ X 線回折分析を実施し、 アルカリ変質プロセスに関わる鉱物組成や化学組成の変遷過程について調べた。

Narra 地区のトレンチで確認された pH11.3 のアルカリ環境下にある砕屑性堆積物のスメク タイト(鉄サポナイト)は C-S-H と共生する産状が多くみられる(図 1.3.3-11 参照)。このこ とから、現在も見られる低温蛇紋岩化作用による高アルカリ地下水によって鉄サポナイト形成 されたと考えられる。その生成過程では、表-1 に示すように、砕屑性堆積物の超塩基性岩起源 のかんらん石、斜方輝石、少量の単斜輝石、角閃石と蛇紋石及び少量の石英、斜長石と高アル カリ地下水との反応であり、かんらん石、輝石に加え Cr-スピネル、磁鉄鉱等のマフィック鉱 物から供給される Fe によって鉄サポナイトが生成したことが示唆される。

スメクタイトが高アルカリ地下水によって生成するこのサイトの地質構造学的発展は表 1.3.3・2 及び図 1.3.3・12~図 1.3.3・16 に示すように、①パラワンオフィオライト(ハルツバー ジャイト質超塩基性岩体)の定置・隆起、②低温型蛇紋岩化作用に伴う蛇紋石、滑石、水滑石、 磁鉄鉱等の沈殿と高アルカリ性(pH > 11)地下水の形成、③パラワンオフィオライトの風化 →浸食→移動→(運搬)→堆積サイクルによる砕屑性堆積物の累積と炭酸塩沈殿物(トラバー チン)の堆積、④砕屑性堆積物に含有する斜方輝石、少量の単斜輝石、極少量のかんらん石・ 角閃石・蛇紋石のアルカリ変質によるサポナイトの生成と炭酸塩沈殿物の圧密作用による岩石 (炭酸塩岩)化、⑤現在の環境(蛇紋岩化作用による高アルカリ地下水の生成と砕屑性堆積物 への浸出が継続)と解釈することができる。



BEI:反射電子線像

図 1.3.3-11 C-S-Hと共生する鉄サポナイトの産状

表 1.3.3・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

Lithology		Primary Mineral	Water - Rock Interaction		Reaction with Hyperalkaline Groundwater		
【初期構成鉱物】         Corpertunization         Type Alter           Travertine [石灰葉:化学         CAT         Saponite:サポナイト         Nontronite:           「次レ葉:化学         Pigliodase:約長石         Septentine:蛇紋石           Carbonate         の:がんらん石-Olivine>         Bruche:ブルーサイト、水滑石           Carbonate         (た): 新倉店-Olivine>         Bruche: ブルーサイト、水滑石           (): がんらん石-Olivine>         Chichite: 総成石           (): 防食塩岩]         (): 赤倉石-Clinopyroxenes>         Calcie: 方第石           (): 赤倉石-Amphibele>         Calcie: 方第石           (): 大倉山: ホタロのite: アラゴナイト、表石         Chilite: 株正石		Type Alteration Nontronite: ノントロナイト 残塩 サイト、水滑石 や石 こ ゴナイト、霰石	溶存イオン種	Calcite Calcite (Aragonite) Smectite (Saponite)の形成			
Clastic Sediment [砕屑性堆積物]	) Dhiolite Derivatives Pyroclastics オフィオライトから派生した堆積約 [火山砕屑物]	(Qz) (Plagioclase)* Ol* Opx** (Cpx)* (Amph)* [Cr-Spinel (Magnetite)]	Sepentine* Brucite Talc Magnetite	Chlorite	$(Si^{4+}) \\ (Ca^{2+}) \\ (Al^{3+}) \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\$	$\begin{array}{c} \begin{array}{c} \textbf{Saponite} \\ (tri \circ octahedral smectite) \\ [3. /(m k \mathbb{Z} \times 79 \times 1^{-1}) \\ [X_{0.33}(Mg_3)(Al_{0.33}Si_{3.67})O_{10}(OH)_2] \\ \textbf{C-S-H} \\ \hline \textbf{Fe-Saponite} \\ (tri \circ octahedral smectite) \\ [X_{0.33}(Mg,Fe)_3(Al_{0.33}Si_{3.67})O_{10}(OH)_2 \\ \textbf{C-S-H} \end{array}$	
Pala Ophi (Harz [ハルツパ- 方輝石かん	wan iolite bergite) ジャイト:約 ふん岩	Ol Opx (Cpx) (Amph) [Cr-Spinel (Magnetite)]	Sepentine Brucite Talc Magnetite	Chlorite		(Nontronite) (Saponite) (C-S-H)	

\*: Saponiteの前駆鉱物(Precursors)

これらのことから、Narra地区のナチュラルアナログは Fossil Type のナチュラルアナログ のように火山性砕屑物を起源とし続成作用でできたベントナイトに高アルカリ地下水が過去 に浸出したのではないため(高アルカリ地下水と反応したのはベントナイトでなくオフィオラ イト起源の苦鉄質を主成分とする砕屑性堆積物)、このナチュラルアナログ事例のみでベント ナイトのアルカリ変質プロセス(特にモンモリロナイトの溶解・変質)を説明することは困難 である。しかしながら、この Narra地区のサイトでみられるスメクタイトが生成する環境は、 高アルカリ溶液がモンモリロナイトを溶解させ非膨潤性の鉱物である沸石等に変質させるだ けでなく、モンモリロナイトと同じ膨潤性等の特性を有する別のタイプのスメクタイト(鉄サ ポナイト)が形成されることを意味し、当然そのような環境ではこの鉄サポナイトは長期間安 定に存在する。したがって、Narra地区の天然現象は、TRU廃棄物の地層処分場の充填材等 のセメント系材料の高アルカリ浸出水に廃棄体容器等から鉄成分が付加されることが想定さ れる人工バリアシステムで、どのような条件でサポナイトが生成し、スメクタイトが安定に存 在することになるのかの手がかりとなり得る、絶好のナチュラルアナログであるとだと位置付 けられる。

さらに、このナチュラルアナログは Active Type であることから、①アルカリ変質反応に寄 与する高アルカリ地下水は、低温蛇紋岩化作用により現在も湧出しているため、その地球化学 特性を現地調査により直接把握できる、②炭酸塩や堆積物の年代測定が可能であり、アルカリ 地下水との反応時間が推測できる、という利点もあげられる。



図 1.3.3-12 パラワンオフィオライトの地質構造学的発展と砕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)



図 1.3.3-13 パラワンオフィオライトの地質構造学的発展と砕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)



図 1.3.3-14 パラワンオフィオライトの地質構造学的発展と砕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(砕屑性堆積物) とアルカリ地下水に伴う炭酸塩(トラバーチン)の沈殿)



図 1.3.3-15 パラワンオフィオライトの地質構造学的発展と砕屑性堆積物のスメクタイトの形成 モデル(IV. 砕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)



図 1.3.3-16 パラワンオフィオライトの地質構造学的発展と砕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、砕屑性堆積物に浸 出(Active Type のナチュラルアナログ))

1.4 実施概要

平成 24 年度までの[20]、セメント浸出水のアナログとなる高アルカリ性(高 pH,高 Ca 濃度, 還元性,35~70℃程度の)地下水と過去に接触していたこと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 リー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 カ年の予定で実施する本調査では、上記の成果を踏まえベントナイトまた はベントナイト層の主要粘土鉱物であるスメクタイトを含む堆積層に現在も高アルカリ地下水が 浸出している Active Type のナチュラルアナログサイトを対象として、ナチュラルアナログ調査 を実施して、高アルカリ地下水の影響範囲やスメクタ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、TRU 廃棄物の地層処 分の人工バリアとして様々な機能が長期間期待されるベントナイト緩衝材の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、アルカリ変質反応に関わる鉱物等の年代測定により 反応時間を評価する。また、ナチュラルアナログデータを活用して地球化学計算実施して、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「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。

#### 1.4.1 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、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、ルソン島やパラワン島を候補 地とした第2段階の調査候補地の選定から開始し、平成27年度[38]までに、第3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を実施して、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をパラワン島の Narra 地区において確認できた。したがって、平成28年度からはパラワン島 Narra 地区を対象として、 第4段階の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 調査を行う。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を合わせて「ナチュラルアナログ サイトの地質環境調査」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 長期変質プロセスと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 及び人エバリア長 期性能評価技術開 発)成果を反映)	全体計画の策定 年度の実施計画及び フィールド調査計画 策定	年度の実施計画及び フィールド調査計画 策定	年度の実施計画及び フィールド調査計画 策定	年度の実施計画及び フィールド調査計画 策定	年度の実施計画及び フィールド調査計画 策定	Safety Caseとして の説明性の向上 アルカリー鉄ー緩衝材 の長期挙動に関するNA
<ol> <li>Activeな(現在も高アル カリ地下水がスメクタイ トを含む堆積物(ベント ナイト)に浸出している) ナチュラルアナログサイ トの探査</li> </ol>	予察調査(地質概査 ガス検出調査、トレン チ調査、試錐調査)	Bigbiga(F 地質調査 物理探査 試錐調査(鉱物分析)	ish pond)地区 試錐調査(鉱物分析 Pinatubo地区 Palawan島地区 概査(鉱物分析)	)地質調査(Palawa 南部地区等) Palawan島 トレンチ調査 平成27年度 →フィールド	n島 中南部(Narraとそ 地質調査 同査で接触部(NA) 同査は5の調査を4	の周辺)地区 <b>を確認</b> 心に展開	アルカリ環境での反応に 寄与する現象、環境条 件の把握とそれを考慮し た長期変遷の評価
3. 高アルカリ地下水の地 球化学的特性と地質環 境条件	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 同位体分析	湧水・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 アルカリ地下水の地球 化学特性と流動特性	湧水等の採水 物理化学パラメータの 計測・モニタリング 地下水組成の分析・ 評価 アルカリ地下水進化 の評価	人エバリアの 長期挙動評価 をサポートす
4. ベントナイト(粘土質堆 積物)の分布と鉱物学 的特性と物理特性	予察調査(露頭・トレンチ・試錐コアの鉱 物分析)	サンブリング(露頭・試 錐孔・トレンチ) バルク分析 (XRD)	サンプリング(試錐孔) バルク分析(XRD, XRF) 詳細鉱物分析 (µ-XRD, EPMA, FE- SEM等)	サンプリング(トレンチ 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 パルク分析(XRD, XRF) 詳細鉱物分析 (µ-XRD, EPMA, FE-SEM等)	サンプリング(トレンチ) パルク分析 (XRD, XRF) 基本物性試験	▲NA研究
<ol> <li>アルカリ環境下でのペントナイトの長期変質プロセス</li> <li>詳細鉱物分析 地球化学計算 年代測定</li> </ol>	Fossil TypeのNA(に よる(Sale鉱山とそ の周辺地における) 長期変質プロセスの 評価	<u>Saile鉱山の事例左</u> Bigbigaの岩石試料へ	詳細鉱物分析 (EFMA, FE-SEM等) Bigbiga地区の低ア レカリ環境下の変質 プロセス <u>活用した地球化学モブ</u> の <u>年代潮定の適用</u> 性計 Bigbigaのサイト評価	Palawan島 トレンチ調査 詳細鉱物分析 (µ-XRD, EPMA, FE-SEM等) ルの適用性の検討 容価(方 <u>解石のTL年代</u>	Narra地区 試錐調査 トレンテ調査 詳細鉱物分析 (レンRO, ETVA, FE SEN等) <u>NAデータによる地</u> , <u>出産道のTL年代、3</u> <u>によるブルカリ他下</u> 長期アル:	トレンチ調査 詳細鉱物分析 (ルXRD, EPMA, FE-SEN等) <u>球化学モデルの検証 環想かな14年代現定</u> <u>水との反応時間の評価</u> 」) 変質プロセスの評価	✔ NAによる長期評価モデ ルの高度化・単純化 一般への人工パリア の長期安全性説明の ためのNAの活用
総合評価(目標)		Active Typeの露頭 点の絞り込み)	中間評価:▲ の存在可能性(調査地	Active Typeの露頭 確認(調査地点の選	の 成果の取りまる 定) 健全性評価へ	△: めと人エバリアの長期 の成果・知見の反映	最終評価

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 28 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28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 27 年度までの調査結果を踏まえ、平成 28 年度の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、気象状況に対応可能な安全の 確保と限定された時間でのフィールド調査の効率性を踏まえて検討した。

(2) ナチュラルアナログサイトの地質環境調査

pH11 を超える高アルカリ性地下水がベントナイトのアナログとなる砕屑性堆積物に浸出し ていることが確認されたパラワン島中部の Narra 地区とその周辺地域において、トレンチ調 査・試錐調査を実施した。また、岩石(粘土)試料の鉱物・化学分析から、砕屑性堆積物にお けるスメクタイトの生成過程と低温(50℃程度)の高アルカリ地下水が浸出している現在まで の地質環境の変遷を評価した。 トレンチ・試錐孔やアルカリ泉等の湧水から水試料を採取し、物理化学パラメータの計測を 行った。さらに、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蛇紋岩化作用 に伴う地下水の地球化学的特性と流動特性を評価した。

### (3) 年代測定による反応時間の評価

Narra サイトのナチュラルアナログにおける高アルカリ地下水との反応時間を評価することを目的として、アルカリ変質反応に関わる高アルカリ地下水との反応で生成した炭酸塩の熱ルミネッセンス(TL)年代や堆積物に含まれる炭化物の<sup>14</sup>C年代の測定について検討した。

(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とナチュラルアナログ

平成 27 年度[38]の Narra 地区での調査結果に基づき、トレンチ等で、砕屑性堆積物等の系 統的サンプリングを実施した。採取した試料の顕微鏡観察・鉱物分析を行い、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。また、TRU 廃棄物の地層処 分場の人工バリアシステムのどのアナログとなるのかについて考察した。

## (5) 地球化学シミュレーションモデルによる変質解析

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における鉄鉱物と反応速度に着目した評価 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、モデ ルの信頼性向上を図った。



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。





[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. Geochmistry: 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:鉄ー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.: Ironbentonite 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 Techinical 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証試験 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証試験 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-(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. Ofioliti, **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).

[38] (公財)原子力環境整備促進・資金管理センター:平成27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-(2016).

# 第2章 ナチュラルアナログサイトの地質環境調査

### 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ベントナイト -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、既存鉱物 (モンモリロナイト等)の溶解現象(溶解プロセス・溶解速度など)、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 トナイトあるいはスメクタイトを含む堆積物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。

この Active Type のナチュラルアナログが成立するために、①pH 11 程度の高アルカリ地下水 の存在、②ベントナイト層またはスメクタイトに富む粘土質堆積物の存在 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り、特に①pH 11 程度の高アルカ リ地下水の存在の条件を最重視して、Zambales オフィオライトの西端の Bigbiga 地区、Pinatubo 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)を対象としてナチュラルアナログサイトの探査を実施してき た結果、パラワン島中央部の東部沿岸域に位置する Narra 地区において、pH11 の高アルカリ地 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 グといえる露頭を確認した[1]。

今年度のフィールド調査では、Active Type のナチュラルアナログを確認した、Narra 地区の Narra3-1 地点のアルカリ泉の下流に広がるトラバーチンが堆積した平原(Narra3-2 地点)を対象と して、スメクタイトを含有する砕屑性堆積物の分布とその地質構造や高アルカリ地下水流動等を 把握することを目的とした試錐調査、アルカリ環境下でのスメクタイトの生成や安定性に関わる 現象を直接観察・分析するための試料採取を目的としたトレンチ調査を実施した。また、Narra3 地 点だけでなく広域の Narra 地区の地下水調査や露頭調査も実施した。 2.2 フィリピン国における現地調査と試料分析の概要

# 2.2.1 調査工程

今年度のフィールド調査では、平成 27 年度の調査でオフィオライト起源の高アルカリ地下水 が現在もスメクタイトを含む砕屑性堆積物に浸出している Active Type のナチュラルアナログを 確認した Narra 地区を対象として、スメクタイトを含む砕屑性堆積物(粘土層)の分布と基盤岩 の深度を把握するための試錐調査及びトレンチ調査及びその周辺地域も対象とした地下水調査、 概査を実施した。

調査期間は、表 2.2.1-1 に示すように、平成 28 年 5 月 29 日(日)から 6 月 12 日(日)までの 15 日間である。今年度の調査は極めて珍しいが降雨もなく、順調に調査を進めることができた。

月日		実施内容	宿泊先
2015年5月29日	日	東京→Manila(マニラ)	Manila <b>泊</b>
2016年5月30日	月	Manila→Puerto Princesa(プエルトプリンセサ) 着	Puerto Princesa泊
2016年5月31日	火	Puerto Princesa → Narra (ナラ) ※試錐 (DH01) 掘削調査地点の選定	
2016年6月1日	水	<ul> <li>試錐(DH01)掘削、地質・地下水調査</li> <li>※トレンチ調査地点の選定(トレンチ3)</li> <li>高アルカリ水源泉(Narra3-1)および表 層水の水質調査</li> </ul>	
2016年6月 2日	木	・ 試錐(DH02)掘削、地質・地下水調査 ・ トレンチ3およびトレンチ4掘削	
2016年6月 3日	金	<ul> <li>         ・ 試錐(DH03)掘削、地質・地下水調査         ・         ・レンチ4 地質・地下水調査(岩石、水         サンプリング)     </li> </ul>	
2016年6月 4日	±	<ul> <li>         ・ 試錐(DH04)掘削         ・         トレンチ3 地質・地下水調査(岩石、水         サンプリング)         ・         トレンチ4埋戻し     </li> </ul>	Narra 泊
2016年6月 5日	B	<ul> <li>         ・ 試錐(DH04)掘削         ・         ・         トレンチ3 地質・地下水調査(コアサン         プリング)(Narra)         </li> </ul>	
2016年6月 6日	月	<ul> <li>・ 試錐(DH04)掘削</li> <li>・ トレンチ3埋戻し</li> <li>・ DH01、DH02コア観察</li> </ul>	
2016年6月7日	火	<ul> <li>トレンチ5掘削</li> <li>DH03、DH04コア観察</li> </ul>	
2016年6月 8日	水	<ul> <li>トレンチ5 地質・地下水調査(岩石、水、 コアサンプリング)</li> </ul>	
2016年6月 9日	木	・ 露頭調査(Spillway→San Isido)、岩石試 料採取	
2016年6月10日	金	Na rra → Puerto Pri ncesa	Puerto Princesa泊
2016年6月11日	±	Puerto Princesa →Manila	Manila泊
2016年6月12日	日	Manila→東京	

表 2.2.1-1 現地調査の工程

現地調査の主な調査内容を以下にまとめる。また、調査地点の位置図と地形図をそれぞれ図 2.2.2-1、図 2.2.2-2 に示す。



図 2.2.2-1 Narra 地区の調査サイトの位置図



図 2.2.2-2 Narra 地区の調査サイトの地形図

(1) Narra 地区における試錐調査

1) 試錐孔掘削地点の選定

トラバーチン起源の炭酸塩堆積層の下位層のスメクタイトを含有する砕屑性堆積物の分布 とその堆積構造や高アルカリ地下水流動等を把握することを目的として、試錐調査を実施した。

- Narra3-1 地点のアルカリ泉の下流に広がるトラバーチン起源の炭酸塩鉱物が堆積した平原 (Narra3-2 地点)において、平成 27 年度の調査で砕屑性堆積物を確認したトレンチ2を中心 に、ほぼ南北系の走行(断面)に沿った方向に4か所の試錐孔掘削地点を選定した。
- 2) 試錐掘削・コア採取

構造試錐調査の試錐仕様については、ビット径 59.6mm のエンジン式簡易ボーリングマシ ンによるコア採取を行った。掘削可能深度は、回転トルクや人力でのロッド揚降を考慮して、 概ね 30~40m 程度である。今回はスメクタイトを含む砕屑性堆積物(粘土層)の分布と基盤 岩の深度を把握することを優先し、上記 4 地点で深度 10m 程度の浅層試錐孔(DH01~DH04) を掘削した。各試錐孔の掘削作業工程を表 2.2.2-1~表 2.2.2-4 に、掘削時の状況を図 2.2.2-3、 図 2.2.2-5、図 2.2.2-7、図 2.2.2-9 に示す。

3) 地下水の物理化学パラメータ計測及び採水

試錐孔 (DH01~DH04) においてベーラーによる坑内水を採取し、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。なお、採水 する前に掘削水の影響を除去するため、試錐孔の容積に合わせて孔内水排水・洗浄を行って いる。これらの状況を図 2.2.2-4、図 2.2.2-6、図 2.2.2-8、図 2.2.2-10 に示す。なお、得ら れた結果は、2.4 地下水調査で報告する。

4) コア観察、岩石試料のサンプリング

堀削採取された各試錐孔のコア試料について、炭酸塩堆積物の層厚、砕屑性堆積物の層厚、 基盤岩の深度等を把握するためにコア観察を行った。これら地質構造に関する情報はトレン チ掘削箇所の選定に活用した。また、XRD、XRFによるバルク分析用の試料をサンプリング した。なお、得られた結果は、2.5 試錐調査で報告する。 (DH01 孔)

# 表 2.2.2-1 DH01 孔調查実施工程

	日時	記事
5/31	16:00	試錐調査位置の選定(N9.204000°,E118.281361°)
6/1	9:00~12:00	コア掘削 GL-0m~3m (3m 付近から sediment)
	$12:30 \sim 13:50$	コア掘削 GL-3m~6m (5m 付近から basement)
	$14:15 \sim 14:30$	孔内排水洗浄、検尺(検尺深度:GL-5.15m)
	14:30	孔内水採水(GL-5.15m より)



図 2.2.2-3 DH01 孔掘削状況



図 2.2.2-4 DH01 孔内水排水・洗浄(左)、採水(右)状況

(DH02 孔)

# 表 2.2.2-2 DH02 孔調查実施工程

	日時	記事
6/2	9:00	試錐調査位置の選定(N9.203472°,E118.280861°)
	9:00~12:00	コア掘削 GL-0m~4m
	$13:00 \sim 14:00$	コア掘削 GL-4m~6m (排水ポンプ故障につき孔内排水・洗浄は
		明朝に延期)
6/3	$10:00 \sim 10:50$	孔内排水・洗浄、検尺(検尺深度:5.1m)
	10:50	孔内水採水(GL-4.8m より)



図 2.2.2-5 DH02 孔掘削状況



図 2.2.2-6 DH02 孔内水排水・洗浄(左)、採水(右)状況
(DH03 孔)

# 表 2.2.2-3 DH03 孔調查実施工程

	日時	記事				
6/3	9:00	- 試錐調査位置の選定(N9.203588°,E118.280917°)				
	$10:30 \sim 12:00$	コア掘削 GL-0m~4m				
	$13:00 \sim 17:30$	コア掘削 GL-4m~10m				
6/4	9:40~10:00	孔内排水・洗浄、検尺(検尺深度:8.5m)				
	10:00	孔内水採水(GL-8.1m より)				



図 2.2.2-7 DH03 孔掘削状況



図 2.2.2-8 DH03 孔内水排水·洗浄状況

(DH04 孔)

表 2.2.2-4 DH04 孔調查実施工程

	日時	記事
6/4	9:00	試錐調査位置の選定(N9.203861°,E118.281278°)
	$10:00 \sim 12:00$	コア掘削 GL-0m~4.5m
	$13:00 \sim 16:00$	コア掘削 GL-4.5m~10m
6/5	9:00~16:00	コア掘削 GL-10m~12m
6/6	9:40~12:00	コア掘削 GL-12m~15m
	$12:00 \sim 16:00$	コア掘削 GL-15m~15.5m
6/7	12:30~13:00	孔内排水・洗浄、検尺(検尺深度:11.1m)
	13:00	孔内水採水(GL-10.8m より)



図 2.2.2-9 DH04 孔掘削状況



図 2.2.2-10 DH04 孔内水採水状況

(2) Narra 地区におけるトレンチ調査

砕屑性堆積物等の岩石試料、特にナチュラルアナログとなる高アルカリ地下水環境下の粘土 質の砕屑性堆積物の岩相、岩質、堆積構造、変質特性や主要構成鉱物の鉱物組み合わせ・化学 組成・組織を把握することを目的として、トレンチ調査を実施した。各試錐孔の掘削作業工程 を表 2.2.2-5~表 2.2.2-7 に示す。

1) トレンチ掘削地点の選定

試錐調査と同様に、Narra3-2 地点の石灰華(Travertine)の平坦地周辺において、昨年度の結果(トレンチ1及びトレンチ2)と今回の試錐調査の結果から、炭酸塩堆積物がそれほど厚くないと判断した箇所を3か所選定した。なお、トレンチ5については、当初、図 2.2.2-1の×の位置を選定し、掘削を開始したが(図 2.2.2-17 参照)、予想よりも炭酸塩が厚いために砕屑性堆積物までの深度がかなり深いことに加え、トレンチの炭酸塩壁が軟弱で崩壊の恐れがでたため、これを放棄し、DH02 近傍の地点を再選定した。

2) トレンチ掘削

バックフォーにより、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、選定した4か所でトレンチの掘削を実施した(1か所は上記の理由で放棄)。いずれのトレンチも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、砕屑性堆積物の壁面観察とサンプリングが可能な深度(深さ2~5m程度)まで掘削した。掘削後にトレンチの位置(GPSで計測した座標)の測定、トレンチの大きさ・深度の計測を実施した。各トレンチの掘削状況を図 2.2.2-11、図 2.2.2-14、図 2.2.2-18に示す。

3) 壁面観察、岩石試料のサンプリング

各トレンチ(トレンチ3~5)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、各トレンチの壁面から砕屑性堆積物等の粘土質の岩石試料及び年代測定用の貝類、 木根、炭酸塩試料をハンドピック及びコアサンプラーで採取した。また、砕屑性堆積物につ いてはコアドリルによる大型コア試料も採取した。各トレンチでのサンプリングの状況を図 2.2.2-12、図 2.2.2-13、図 2.2.2-16、図 2.2.2-20に示す。

4) 地下水の物理化学パラメータ計測及び採水

各トレンチとも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。各トレンチでの採水の状況を図 2.2.2-12、図 2.2.2-15、図 2.2.2-19 に示す。 (トレンチ3)

表 2.2.2-5 トレンチ3調査実施工程

	日時	記事
6/2	9:30	トレンチ調査位置の選定(N9.203778°,E118.281361°)
	9:30~12:00	トレンチ掘削
6/4	9:30~15:00	トレンチ調査 (壁面観察、水・岩石試料採取)
6/5	12:00~14:30	コアドリルによる岩石試料採取



図 2.2.2-11 トレンチ3掘削状況



図 2.2.2-12 トレンチ3の排水・壁面観察(左)、採水(右)



図 2.2.2-13 トレンチ3のサンプリング (コアサンプリング (右))

(トレンチ4)

表 2.2.2-6 トレンチ4調査実施工程

	日時	記事
6/2	13:15	トレンチ調査位置の選定(N9.203583°,E118.281083°)
	$13:15 \sim 15:00$	トレンチ掘削
6/3	11:00~13:00	トレンチ内たまり水排水
	$13:00 \sim 16:00$	トレンチ調査(壁面観察、水・岩石試料採取)



図 2.2.2-14 トレンチ4掘削状況



図 2.2.2-15 トレンチ4の排水(右)、採水(左)



図 2.2.2-16 トレンチ4の壁面観察・サンプリング

(トレンチ5)

# 表 2.2.2-7 トレンチ5調査実施工程

	日時	記事
6/7	14:00	トレンチ調査位置の選定(N9.203781°,E118.280658°付近)
	$14:00 \sim 14:30$	トレンチ掘削 (軟弱地盤で崩壊の恐れがあるため放棄)
	14.50	トレンチ調査位置の再選定(N9.203500°,E118.280944°付近)
	$14:50 \sim 1600$	トレンチ掘削
6/8	$\sim 9:00$	トレンチ内たまり水排水
	9:00~14:00	トレンチ調査 (壁面観察、水・岩石試料採取)
	14:00~14:40	コアドリルによる岩石試料採取



図 2.2.2-17 放棄したトレンチの掘削状況



図 2.2.2-18 トレンチ5 掘削状況



図 2.2.2-19 トレンチ5の排水(右)、採水(左)



図 2.2.2-20 トレンチ5のサンプリング (コアサンプリング(右))

(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、アルカリ泉が湧出する Babatou 滝(Narra2 地点)周辺(図 2.2.2·21 参照)、アルカリ温泉施設がある San Isido(Narra1 地点)周辺(図 2.2.2·23 参照)及び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 (参照図 2.2.2·25) において露頭調査を実施した。

また、アルカリ地下水が湧出する Babatou 滝(Narra2 地点)(図 2.2.2-22 参照) 及び San Isido (Narra1 地点)(図 2.2.2-24 参照)では、温泉施設の源泉で地下水調査を実施した。なお、Spillway においても湧水の探査を行ったが、湧水点は確認できなかった。



図 2.2.2-21 Babatou 滝での露頭調査・サンプリング



図 2.2.2-22 Babatou 滝の採水地点



図 2.2.2-23 San Isidro 周辺露頭調査



図 2.2.2-24 San Isidro アルカリ泉採水



図 2.2.2-25 Spillway 露頭調査・サンプリング

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、パラワン島中部地域(Narra 地区)の湧水地点、試錐孔、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。

	測定パラメータ	備考	
Temp.	温度	[℃]	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

表 2.2.3-1 物理化学パラメータ 測定項目

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、ポリプロピレン製のディスポカップ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 製)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。

(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<sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, Br<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)、Si, CO<sub>2</sub> 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(一部水試料の微量元素については、 誘導結合プラズマ質量分析法(ICP-MS)で測定)
- 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: 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

(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
- ④HCO<sub>3</sub>: 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

フィールド調査において採取した、Narra 地区の Narra3-2 地点のトレンチ壁面からの採取試 料及びコアドリルにより採取したコア試料と試錐孔のコア試料、Narra 地区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 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 地区の Narra3-2 地点では掘削した 3 ヶ所のトレンチ及び4 か所 の試錐孔からは、2.2.2 に記載したように砕屑性堆積物等の粘土質の岩石試料を中心に、砕屑 性堆積物の下部層にみられる層内礫岩及び基盤岩の岩石試料を 163 件採取した。また、堆積物 中にみられた埋没木片 4 件、カワニナ貝殻 3 件、炭酸塩 1 試料、土壌 2 試料を <sup>14</sup>C 年代測定の ための試料として採取した。

また、露頭調査では、Narra2 地点から6件、Spillwayから8件の岩石試料を採取した。表 2.2.4-1、表 2.2.4-2 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(その1)

Comple Labelling	Leastion		Description	Bamada	014	VPD	VDE	100-146	EDMA II - YPD	10 1- 02 16-20	1
PWT03-16-Rb-001	Lacation		Description	トレンチ03-001 クーラーキャップ	014	AND	ARE	10F-M3	семи, р - лю	249 /1 993 194.996	
PWT03-16-Rb-002	_			トレンチ03-002 クーラーキャップ							
PWT03-16-Rb-003	_			トレンチ03-003 クーラーキャップ			•				
PWT03-16-Rb-004		4.1m		トレンチ03-004		• *			•		
PWT03-16-Rh-005	_	3.8m		トレンチ03-005							
PWT03-16-Rh-006	-	3.4m		トレンチ03-006							
PWT03-16-Rh-007	_	3.2m		トレンチ03-007		-	-	•			
PWT03-16-Rh-008	-	1 T	機混入	トレンチ03-008				ē			
PWT03-16-Rh-009	-	T T		トレンチ03-009		•	•				
PWT03-16-Rh-010	-	t t		トレンチ03-010		-	-				
PWT03-16-Rh-011	-	上部		トレンチ03-011		•	•				
PWT03-16-Rb-012	-	(F部)		トレンチ03-012							
PWT03-16-Rb-013	-	/escap	神道入	bl/2/#03-013		•	•	•			
PWT03-16-Rb-014	Narra Tranch3	-	神道入	blc2≠03-014							
PW103-16-Rh-014	Narra Trencho		*ロニナロシ	h1 0 4702-015							
PW103-16-Rh-015	_			PD2703-013							
PW103-16-Rh-016	_		不极	FU2703-016	•						
PW103-16-Rh-017		质置		トレンナ03-017. 做化石鑑定用							
PWT03-16-Rh-018	_		傑層(Boulder)	PWT03-16-Rh-C4		_	-				
PWT03-16-Rh-019			保層(Cobble)	PWT03-16-Rh-C5							
PWT03-16-C1-001	_	底部		トレンチ03-C1-001							
PWT03-16-C1-002		"		トレンチ03-C1-002		●☆	٠				
PWT03-16-C1-003		"		トレンチ03-C1-003							
PWT03-16-C1-004		"		トレンチ03-C1-004		●☆	•		•	•	
PWT03-16-C1-005		"		トレンチ03-C1-005							
PWT03-16-C2-001		中部		トレンチ03-C2-001						•	
PWT03-16-C2-002		"		トレンチ03-C2-002		•	٠		•		
PWT03-16-C3-001		上部		トレンチ03-C3-001		L					
PWT04-16-Rh-001		上部		トレンチ04-001				•			
PWT04-16-Rh-002		1.85m		トレンチ04-002		•	•				
PWT04-16-Rh-003		Ļ	礫混入	トレンチ04-003				•			
PWT04-16-Rh-004		Ļ		トレンチ04-004	1						
PWT04-16-Rh-005	NarraTrench4	底部		トレンチ04-005	1			٠			
PWT04-16-Rh-006		底部	l	トレンチ04-006、クーラーキャップ		۰	٠		•		
PWT04-16-Rh-007			木根	トレンチ04-007	٠	-	[				
PWT04-16-Rh-008			カワニナ貝殻	トレンチ04-008		1	L	1			
PWT04-16-Rh-009			Clastic Sediment: 應面	PWT04-16-Rh-C3		•*	•	L	•	•	
PWT05-16-Rh-001		上部	[	トレンチ05-001、シンウォール	1	T	Γ.	[	[	[	
PWT05-16-Rh-002		1		トレンチ05-002, シンウォール	1	1					
PWT05-16-Rh-003		i		トレンチ05-003, シンウォール	1						
PWT05-16-Rh-004	-1	底部		トレンチ05-004.シンウォール	1				1		
PWT05-16-Rh-005	-	10.49	木根	トレンチ05-005		t T	<u> </u>				
PWT05-16-Rh-006	-		カワニナ目続	トレンチ05-006				1			
PWT05-16-Rh-007			炭酸塩	トレンチ05-007				1			
PWT05-16-Rb-007B	-		出産性の本規	blc/#05-007							
PW105 10 RH 007B		上加	次設造中の不依	h1.0.4705-009			•		•		
PW105-16-Rh-008	_	上市		PD 2705-008		•	•	•	•		
PW105-16-Rh-009	Narra Trench5			PD 2705-009		•		•	•	•	
PW105-16-Rh-010	_			FD>+05-010		ΦŔ	•	-	•	•	
PWT05-16-Rh-011				トレンチ05-011				•			
PWT05-16-Rh-012	_	+		トレンチ05-012		•	•	•			
PWT05-16-Rh-013		<u></u> 低部		トレンチ05-013				•			
PWT05-16-Rh-014		底部		トレンチ05-014. 微化石鑑定用	•						
PWT05-16-Rh-015	_		硬層(Harzburgite)(Cobble)	PWT05-16-Rh-C1		_	-			-	
PWT05-16-Rh-016	_		礫層(Microgabbro)(Cobble)	PWT05-16-Rh-C2	_	٠	•			•	
PWT05-16-Rh-017	_		碳層(Diabase)(Cobble)							•	
PWT05-16-C1-001	_	L		トレンチ05-C1-001	_	٠	•				
PWT05-16-C2-001				トレンチ05-C2-001		٠	•				
PWDH01-16-Rh-001	_	1.62m		DH01-001							
PWDH01-16-Rh-002	_	2.24m		DH01-002							
PWDH01-16-Rh-003	_	2.72m		DH01-003		٠	•				
PWDH01-16-Rh-004		3.13m		DH01-004							
PWDH01-16-Rh-005	Narra Borabola 1	3.75m		DH01-005		۰	۰				
PWDH01-16-Rh-006	Nana Dorenole I	3.87m		DH01-006		۰	•				
PWDH01-16-Rh-007		4.13m		DH01-007		٠	٠				
PWDH01-16-Rh-008		4.46m		DH01-008							
PWDH01-16-Rh-009		4.64m		DH01-009							
PWDH01-16-Rh-010		5.10m		DH01-010							
PWDH02-16-Rh-001		2.00m	2.2mの札参照	DH02-001		٠	٠				
PWDH02-16-Rh-002		2.42m	2.2mの札参照	DH02-002		_	-				
PWDH02-16-Rh-003		2.85m	2.2mの札参照	DH02-003		•	•				
PWDH02-16-Rh-004		3.00m	3.0mの札参照	DH02-004		-	-				
PWDH02-16-Rh-005	Narra Borehole2	4.33m	4.0mの札参照	DH02-005		•	•				
PWDH02-16-Rh-006	-	4.89m	5.0mの札参照	DH02-006		<del></del>					
PWDH02-16-Rh-007	-	507m	5.0mの札参照	DH02-007, 礫岩湿合	1	۰×	•*	1	1		※マトリカスゴ
PWDH02-16-Rh-008	-	5,25m	5.3mの札参照	DH02-008. 礫岩混合	1			1	1		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
PWDH02-16-Rh-009		5.66m	5.5mの札参照	DH02-009	1	•		1			
PWDH03-16-Rh-001		2.71m	3.0mの礼参照	DH03-001	1	t 🖡		·			
PWDH03-16-Rb-002		3.53m	4.0mの利参照	DH03-002	1	1	1	1			
PWDH03-16-Bb-002	-	415-	40mの利参照	DH03-003	1	-		1			
PWDH03-16-Rb-004		4.15m	4.0mの利参照	DH03-004	1	1		1			
PWDH03-16-Rb-005	-1	5.05m	5.0mの利参照	DH03-005	1	1	1	1			
PWDH03-16-Rh-006	-	6.06~	6.0mの札参照	DH03-006	1			1			
PWDH03-16-Rb-007	Narra Borebole3	7.20m	7.0mの利参照	DH03-007	1			1			
PWDH03-16-Rh-009		7.50-	70mの利参照	DH03-008	1	<b>ا</b> ا	<b>ا</b> ا	1			
PWDH03-16-Rh-000	-	7.60-	70mの利参照	DH03-009	1		-	1			
PWDH03-16-Rh-010	-1	7.00m	8.0m/0.21.26.88	DH03-010	1			1			
DWDH02-10 DL CT		1.90m	20-01#PR	DH02-011	1						
PWDH03-16-Rh-011		0.20m	0.0mの利参照	DH03-011	1	-	-				
PWDH03-16-Rh-012		8.60m	3.0mの利参照	DH03-012	1	1	1				
PWDR03-16-Rh-013		10.10m	10.0m以札多照 10.0m以札多照	Un03-013	4		-	}		<u> </u>	
PWDH04-16-Rh-001	_	2./0m	3.0mの礼参照 20.のごた四	DH04-001	1	•	•	I			
PWDH04-16-Rh-002	_	3.19m	3.0mの札参照	DH04-002	1	1	<u> </u>	I			
PWDH04-16-Rh-003	_	4.24m	4.0mの利参照 40.のごた四	DH04-003	1	-	I	I			
PWDH04-16-Rh-004		4./2m	4.0mの利参照	DH04-004	1	-	I	I			
PWDH04-16-Rh-005		6.18m	1 6.0mの札参照	DH04-005			<u> </u>				
PWDH04-16-Rh-006	_	6.69m	7.0mの礼参照	DH04-006	1		-				
PWDH04-16-Rh-007	_	7.90m	8.0mの札参照	DH04-007	1	1	-	-			
PWDH04-16-Rh-008	Narra Borebole4	8.11m	8.0mの礼参照	DH04-008	1	1	-				
PWDH04-16-Rh-008B		8.79m	9.0mの札参照	DH04-008B		1					
PWDH04-16-Rh-009	_	9.65m	10.0mの札参照	DH04-009	1						
PWDH04-16-Rh-010		9.86m	10.0mの札参照	DH04-010			ļ	ļ			
PWDH04-16-Rh-011	_	10.21m	10.0mの札参照	DH04-011. 礫岩混合	1						
PWDH04-16-Rh-012		11.22m	10.0mの札参照	DH04-012	1	٠	٠				
PWDH04-16-Rh-013		11.71m	11.0mの札参照	DH04-013		٠	٠				
PWDH04-16-Rh-014		12.94m	12.0mの札参照	DH04-014							
PWDH04-16-Rh-015		15.85m	12.0mの札参照	DH04-015		۰	٠				
PWNR001-16-Rh-001	Narra Fall		Basement: 滝の上流より採取	PWNR-16-Rh-01		٠	٠				
PWNR001-16-Rh-002	Name Outside also		Clastic Sediment: コンタクト部	PWNR-16-Rh-02A	1	●☆					
PWNR001-16-Rh-003	Narra Uutcrop along new access road		Basement: コンタクト部		1	1					
PWSPO-16-Rh-001	1	1		PWSPO-001	1	1	1	1			
PWSPO-16-Rh-002	-			PWSPO-002	1			1	1		
PWSPO-16-Rh-003				PWSPO-003	1	•		1			
PWSPO-16-Rh-004	Spillway			PWSPO-004	1	•*		1	1		
PWSPO-16-Rh-005				PWSPO-005	1	- ×		1			
PWSPO-16-Rh-006	-			PWSPO-006	1	• •	•	1			
PWSPO-16-Rb-007	-		Basaltic Lava (Outcrop)	1	1	<b>1</b>	<b>–</b>	1	1		
					4						

-60-

## 表 2.2.4-2 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(その2)

	1	-		1	1			-			
Sample Labelling	Lacation		Description	Remarks	C14	XRD	XRF	ICP-MS	EPMA, μ	-XRD	薄片顕微鏡
PWN31-16-HU-001	I			PW-HU-16-N31-s1						Т	Ţ
PWN31-16-HU-002				PW-HU-16-N31-s2							
PWN31-16-HU-003	Narra3-1			PW-HU-16-N31-o3							
PWN31-16-HU-004	<b> </b>			PW-HU-10-N31-S4							
PWNR001-16-HU-001	Narra Fall		滝付近の高アルカリが湧き出しているところ	PW-HU-16-Narra-F-s1							
PWNR001-16-HU-002	Narra Outcrop along new access road		蛇紋岩上部の粘土質層	PW-HU-16-Narra-OC01							
PWNR001-16-HU-003	Narra Rice field			PW-HU-16-RF-s1							
PWT03-16-HU-001		底部		PW-HU-16-T3-s1クーラーキャップ							
DWT02-16-HU-002		100 HP					-				
PW103-10-H0-002	Narra Trench3			PW-HU-10-13-52,9-9-4-4-99							
PWT03-16-HU-003		T		PW-HU-16-T3-s3.クーラーキャッフ							
PWT03-16-HU-004		上部		PW-HU-16-T3-s4.クーラーキャップ							
PWT04-16-HU-001		底部		PW-HU-16-T4-s1.クーラーキャップ							
PWT04-16-HU-002		Ť		PW-HU-16-T4-s2,クーラーキャップ							
PWT04-16-HU-003	Narra Trench4	Ť		PW-HII-16-T4-o1 o2							
DWT04-16-HU-004		L #7					-				
PW104-10-HU-004		노하		PW-HU-16-14-83,9-9-4-4-99							
PWT05-16-HU-001		底部		PW-HU-16-T5-s1							
PWT05-16-HU-002		Î		PW-HU-16-T5-s2.クーラーキャップ							
PWT05-16-HU-003		Ť		PW-HU-16-T5-s3							
PWT05-16-HU-004	Narra Trench5	Ť		PW-HU-16-T5-s4							
DWT05-16-WU-005		Ť		DW-UL-16-T5-c5 クーラーキャップ							
DWT05-16-HU-000		 L #7		DW_UIL_10_TE0.0	I			L			
PW105-16-HU-006	l	上部		PW-HU-16-15-56.7-7-キャップ	I			L		$ \rightarrow $	
PWDH01-16-HU-001	1	1.3m		PW-HU-16-DH-1-s1	I			L			
PWDH01-16-HU-002		2.2m		PW-HU-16-DH-1-s2							
PWDH01-16-HU-003	1	2.7m		PW-HU-16-DH-1-s3							
PWDH01-16-HU-004	1	3.2m		PW-HU-16-DH-1-s4	1			1			
	Narra Borehole1	0.7			-						
PWDH01-16-HU-005		3./m		PW-HU-16-DH-1-s5							
PWDH01-16-HU-006		3.9m		PW-HU-16-DH-1-s6							
PWDH01-16-HU-007	]	4.1m		PW-HU-16-DH-1-s7							
PWDH01-16-HU-008	]			PW-HU-16-DH-1-s8							
PWDH02-16-HU-001		5.8m		PW-HU-16-DH-2-s1							
DWDH02-16-HU-002		5.0		DW 111 16 DU 2 -2							
PWDH02-10-H0-002		5.2m		PW-HU-10-DH-2-S2							
PWDH02-16-HU-003		5.0m		PW-HU-16-DH-2-s3							
PWDH02-16-HU-004	Narra Barabala?	4.9m		PW-HU-16-DH-2-s4							
PWDH02-16-HU-005	Narra Borenolez	4.4m		PW-HU-16-DH-2-s5							
PWDH02-16-HU-006		3.7m		PW-HU-16-DH-2-s6							
DWDH02-16-HU-007		2.4		PW-HU-16-DH-2-c7							
PWD1102 10 110 007		2.4m									
PWDH02-16-HU-008		1.5m		PW-HU-16-DH-2-s8							
PWDH03-16-HU-001		10m		PW-HU-16-DH-3-s1							
PWDH03-16-HU-002		9.8m		PW-HU-16-DH-3-s2							
PWDH03-16-HU-003		8.3m		PW-HU-16-DH-3-s3							
PWDH03-16-HU-004		7.9m		PW-HU-16-DH-3-s4							
DWDH02-16-HU-005		7.011									
PWDR03-10-HU-005	1	/.0m		FW-HU-10-DH-3-80	I			I			
PWDH03-16-HU-006	1	7.3m		PW-HU-16-DH-3-s6	I			L			
PWDH03-16-HU-007	Narra Barabala?	7.2m		PW-HU-16-DH-3-s7							
PWDH03-16-HU-008	INARTA DOFETIOLES	6.9m		PW-HU-16-DH-3-s8							
PWDH03-16-HU-009	1	6.1m		PW-HU-16-DH-3-s9	1						
PWDH03-16-HU-010		4.9~		PW-HU-16-DH-3-+10	1						
DWDH02-16-HUL 011	1	4.0111		DW-HIL-16-DH-2-st1	I			-			
PWDH03-16-HU-011	-	4.4m		PW-HU-16-DH-3-s11	I						
PWDH03-16-HU-012	1	3.5m		PW-HU-16-DH-3-s12	I			I			
PWDH03-16-HU-013		2.8m		PW-HU-16-DH-3-s13							
PWDH03-16-HU-014	1	1.9m		PW-HU-16-DH-3-s14							
PWDH04-16-HU-001	İ	15.8m		PW-HU-16-DH-4-s1	1						
PWDH04-16-H11-002	1	12.5m		PW-HU-16-DH-4-s?	1			1			
	1	12.0m		PHI 110 10-DH-4-52	1			1			
PWDH04-16-HU-003	-	11.8m		PW-HU-16-DH-4-s3	I			-			
PWDH04-16-HU-004		11.3m		PW-HU-16-DH-4-s4	I			L			
PWDH04-16-HU-005	1	10.5m		PW-HU-16-DH-4-s5							
PWDH04-16-HU-006	1	10.1m		PW-HU-16-DH-4-s6	1	●☆					
PWDH04-16-HU-007	Narra Borobolo/	9,7m		PW-HU-16-DH-4-s7	1		1				
PWDH04-16-HU-008	Narra Dorenoie4	8.1m		PW-HU-16-DH-4-s8	1						
PWDH04-16-HU-009	1	8.0m		PW-HU-16-DH-4-s9	1			1			
PWDH04-16-HU-010		6.4m		PW-HU-16-DH-4-s10	1	•		1			
PWDH04-16-HIL-011		0.4m		DW-HU-16-DH-4-s11	1	÷ж		1			
	1	4.9m		PW-HU-16-DU-4-s12	I			L			
PWDH04-10-HU-U12		J.∠m		PW-RU-10-DH-4-SIZ	1			-			
PWDH04-16-HU-013	-	2.2m		PW-HU-16-DH-4-s13	I			-			
PWDH04-16-HU-014		2.0m		PW-HU-16-DH-4-s14	l			-			
PWSPO-16-HU-001	Spillway		tuff	2	1		1	1	1		

### (2) X 線回折 (XRD)

採取した岩石試料のうち、XRD 欄に●をつけた総計 42 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、100μmの ふるいを全量通過するまで粉砕し、再度真空乾燥した。

2) 測定条件

XRDの測定条件一覧を表 2.2.4-3 に示す。 XRD 測定には、調整した試料を四分法により必要量(0.2g 程度)分取し、下記の計測条件

	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				
	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				
測定条件	走查範囲	4~60°				
	走査速度	5°/min				
	試料台	ガラスホルダー (回転台:1回/sec)				
	封机本植古注	不定方位				
	副科 ル 場 ハ ム	(粉末試料の表面をガラス板で平滑にした。)				
理培冬供≫	開始時の温度、湿度	19°C、11%				
<b>泉</b> 現木    本	終了時の温度、湿度	24°C、8%				
		厚手のビニール袋で粗砕後に真空乾燥し、乾燥試料を				
	松动晶体	瑪瑙乳鉢で粉砕した。粉砕試料は、100μmのふるい				
試料条件	忉1+1米1ト	を全量通過するまで粉砕を繰り返した。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				

表 2.2.4-3 XRD の測定条件一覧

※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 42 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、100μm のふるいを 全量通過するまで粉砕し、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 2.2.4-4 に示す条件により、XRF による定量分析を実施した。

項目	仕様等
X 線ターゲット	Rh
電圧	40kV
電流	95mA

表 2.2.4-4 XRF による定量分析条件

#### (4) ICP-MS 分析

採取した試料のうち、ICP-MS 欄に●をつけた総計 11 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、超純水でとかし、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、Narra3・2 地点の各トレンチ壁面から 6 件(そのうちコアドリル採取 のコア試料から 2 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15~20µm 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 2.2.4-5 に示す。

表 2.2.4-5 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
PWT03-16-C1-004	自然乾燥後、砂礫 φ 2mm アンダーの粒子で薄片作製。表面は
	酸化し褐色化しているが、内部は還元状態あったことを示す青
	緑色を呈していた。
PWT03-16-C2-001	コア試料内部の口30mm 程度を切り出し、薄片を作製した。
PWT04-16-Rh-009	試料を縦断方向に切断し、内部面から薄片を作製した。
PWT05-16-Rh-010	自然乾燥後、砂礫 φ 2mm アンダーの粒子で薄片作製。
PWT05-16-Rh-016	礫を切断し、内部から薄片を作製した。
PWT05-16-Rh-017	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

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[2]



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[3]

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[4]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 ーパラワン 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 はなく、衝突前縁海溝であると解釈されている[5]。

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 (テクトニクスな変遷) が検討されている[2]。

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[3]。

ここでは、これらの最新なデータ・知見[2][3]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[6][7][8]。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[4][9]。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[5]、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[4][10][11][12]。原始の南シナ海海盆の滅失の始まりは、中期始新生(約 44Ma[13]) に生起したようである。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 動したと言うことである[13][14][15]。最初の衝突は、南西域(Luconia Shoals)から生起して、早 期中新世[14][16]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くさびが大陸地殻の小片(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クスな変遷が検討されている[3]。 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[6]。

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[17]。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クスな境界については、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([17]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砕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、最と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[17][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 生起した南シナ海開口の終息後に起った[8]。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である 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溌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 三紀晩期の砕屑性堆積物により充填されている。

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[17]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)とそのタービダイトが強く硬化さ 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〜更新世の浅海の砕屑性堆積物と 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[3]。



図 2.3.1-3 パラワン島の広域地質図[2]



図 2.3.1-4 中央/南部パラワン地域の地質図[3]



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[3]

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ス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(押しかぶせ)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砕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づいて、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鉱 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)[17] 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[3]

図 2.3.1-7 南部パラワン地域の地質断面図[3]

- 72 -

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[3]、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[2]。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[3]。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、試誰孔データからは、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~更新世の浅海性砕屑性堆積物や炭酸塩岩に対応する最と 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、テクトニクスなくさび形状 と後期のくさび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 累層のタービダイトである[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)内のくさびについては、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関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、高度に変形されたくさび形の地震波特性ユニットが、ここでは Pagasa くさび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 石灰岩と主要なくさびの間が、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、くさび形成の着手なのか、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、すべての先ー同時形成の衝上・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 [5]。その背景には、研究者の何人かが、中期中新世不整合は異なる場所で異なる時期に生起し 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[5]。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[12];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、浅海の砕屑性堆積層で、 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クス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クスイベントと、 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時間的拘束 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 しかぶせし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 くさび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時間的拘束情報である。

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砕屑性堆積物 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、くさび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地窓(Tectonic Window)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時間的拘束である。この定置が 制限された最新のイベントは、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砕屑性堆積層が、くさびに試誰した井戸の 検層で確認されており、このくさび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 くさびの形成を引き起こし、そのイベントは中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起し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、中期中新世に最盛期であった Pagasa 累層における主要なくさびの形成 は、始新世〜中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)のテクトニクスに支配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)ものの沈み込み と、押しか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かぶせた白亜紀のオフィオライト、早期から中期中新世のニ クスなくさびを押しかぶせた晩期漸新世から早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、石灰岩への押しかぶせ断層と、テク トニクスなくさびで現わされている。

また、Pagasa 累層内のテクトニクスなくさび形成時期への時間的拘束は、晩期漸新世~早期 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[2]。多くの研究者が、このユニットを Plute Wedge(くさび)と 呼称しているが、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、このくさび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 くさびは、沖合域で観察・解析されたくさ びである。

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設構造が、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 程度な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 くさびの産 状により示されている。このくさびの形成は、主要な不整合が中期中新世末(MMU)までにフ 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、浅海性砕屑性堆積層(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)島までが収斂し続づ けている。パラワン島の中央/南部地域は、テクトニクス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クス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、収斂するテクトニクスな変遷過程 でのイベントの連続として見ることが出来る。

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)間で生起し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クスな変遷を示す先・漸新世に 生起したものに違いない。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起した。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。これは主要なくさび形成以前のものである。もし、Steuer et al., (2013) [2]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 間で生起したような時間的拘束が生じる。
- ③ Pagasa 累層を含む主要なくさび変形作用は、中期中新世(~16Ma~12Ma)に生起した。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 累層内でのくさび形成が始まることになる。このくさび頂部に堆積した同時衝上・褶曲した堆積物は、約 12Ma にくさび形成末期に印された MMU によってくさび頂部が削られることになる。
- ④ 後・くさび拡張は、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・くさび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、くさび形成 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 フィオライトー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)までに時間的拘束された ものと解釈される。つまり、この定置が起きた時期は、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、特異的なテクトニクス なくさび形(Wedge)は、中期中新世の時期(~16Ma~12Ma)に形成され、これが Pagasa く さびと呼ばれる衝上-褶曲ベルト(帯)を形成している。くさび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。この局部的な後一運動的な拡張は、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、浅海性海成砕屑物に 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、比較的に若く、そして北部パラワン 島地域のものと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[7]。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<sup>39</sup>/Ar<sup>40</sup>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か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かぶせ(Crocker 累 層の上に衝上)年代と一致している[14]。つまり、これら一連のテクトニクスな 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[10]。

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かぶせ衝上断層に 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/Mastrichan 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 た北東系の付加体くさびの大部分を占めている[4][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 くさびを形成している。

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。数少ない例として、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)として報告されており、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(離れた2つの地域に認められる地層の 同時性を決定すること)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 石灰岩と同時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 炭酸塩岩は、16.4 Ma 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くさび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、衝上断層によるくさび形成・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-空間での 発展は、恐らく、くさび形成期間でのテクトニクス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くさびを頂部へもたらしたものと 提言されている[2]。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]での一般的な海水面上昇が、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、くさび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、部分的であるがテッ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クスに引き起こされたくさびの隆起は、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[2]。

沖合域でのくさび形成の時期は、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 るくさびの初期形成への明白な時間的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、くさびは 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、くさびは 18Ma 後のあ る時期に形成し始めたのかも知れない。Tabon 石灰岩はくさびをシールしたためにくさび形 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くさびの発達に更な る時間的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、くさび形成は、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・分布し続づけた。そ の結果、くさびフロントは、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くさび形成されたくさび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。衝上断層活動とくさび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、くさび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クス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 周辺に産する最と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 ての時間的拘束が考えられる。

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)内のくさびが恐らく 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 累層内のくさびの発達を促すようなテクトニクス拘束されたもの と考えられる。③Nido 石灰岩は、下位の Plute 累層のくさび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 累層内くさびの発達のための時 間的拘束を与えている。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。

#### 2.3.2 Narra 地区の地質概要

今年度のフィールド調査地区である Narra 地区は、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ールー海(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、その標高は海抜約 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 地区の地質概要は、パラワンオフィオライト(Mt. Beaufort Ultramafics <超苦鉄質複合 岩体:主にハルツバージャイト・少量のダナイト・レールゾライト・斑れい岩などで構成される) の基盤岩と、その基盤岩近傍で直接累重する砕屑性堆積物から構成されている。

この堆積物の形成プロセスについては、パラワンオフィオライトが定置後(33~23Ma[29][32])、 地表への露出過程で、風化 - 削剥され、周囲に砕屑性堆積物(Clastic Sediments)を供給し、その 結果、このパラワンオフィオライト基盤岩の極近傍に運搬・堆積したオフィオライト起源の堆積 物である。その堆積環境からは、その形成過程が、いわゆる「風化-侵食・削剥-運搬-堆積-岩石化(続成作用)プロセス」を示す現地性の砕屑性堆積物で、その運搬距離は遠いものではないと いえる。また、初生的に蛇紋岩化作用が進んだ蛇紋岩が強く破砕されると、屡々、蛇紋岩砂岩~ 礫岩(堆積性蛇紋岩)が形成されることが報告されている[43]。

この砕屑性堆積物は、その形成過程から、後背地から供給された鉱物・岩石の岩片やそれらの 砕屑物から構成されている。これらの砕屑物堆積物は岩屑(Detritus)で、殆どが物理的風化作用の 産物である。これらの砕屑物堆積物または、固結化が進んだ砕屑性堆積岩は粒径、砕屑物・マト リックス(粒子間の充填物)の組成、組織などから分類される。

さらに、砕屑物(砕屑性堆積物)の鉱物粒径およびマトリックス、岩片と化学的堆積物を構成 する鉱物組み合わせ(主要鉱物・副成分鉱物)・組成などの分類要素の解析から、それらの堆積環 境(供給源、運搬経路・運搬距離、堆積場所、堆積時間など)を推測することが出来る[44]。また、 これらの砕屑性堆積物は、その後の埋没作用による固結化(岩石化:コンパクション <圧密作用>) や、前駆鉱物の溶解・沈殿作用などによる広義の鉱物変質(続成作用)が進展していくことにな る。

Narra 地区に分布するこれらの砕屑性堆積物は、2 つのユニット(2-Lithological Units)として、 上部層と下部層に大別される。

上部層はトラバーチン(石灰華)起源の炭酸塩沈殿物層が沈積し、その下位にはパラワンオフ ィオライト起源の砕屑性堆積物である下部層が堆積している。上部層は上位から、ルーズな炭酸 塩沈殿物から塊状で淡褐色の炭酸塩質堆積物へとその岩相変化と、下位層には若干の岩石化が観 察される。この層厚は、地形的上位では厚く、トレンチ1(平成27年度実施)周辺では5mを超 えるものと推定される。また、下位部には葉理構造をもつ炭酸塩沈殿層の薄層(約30cm程度) が挟在する。

一方、下部層は、その岩相・岩質・堆積構造などから大別すると、部分的ではるが上位が砂質 優勢で、下位は泥質優勢な黒色粘土である。この下位には不規則な分布ではあるがパッチ状粘土
質堆積物または、ほぼ層状の粘土質砕屑性堆積物が分布する。また、下部層・下位部には、特徴的な河川系チャンネル構造を思わせるその凹部や高まりに、その分布の連続性に乏しくかつ分布密度が小さい層内礫岩(Intraformational Conglomerate)が最大鉛直方向に数 m 程度で分布している。その礫岩は、肉眼的にはハルツバージャイト、等粒状斑れい岩、レールゾライト等から構成されるパラワンオフィオライト起源の多源礫岩である。

#### 2.3.3 Narra 地区及びその周辺の概査

Narra 地区では、トレンチ調査・試錐調査を実施した Narra3 サイト以外に、アルカリ泉が湧 出する Babatou 滝(Narra2 地点)周辺までアクセス道路沿いで概査を実施し、図 2.3.3-1 に示 す PWNRO01 地点の露頭から試料を採取した。なお、当地で採取した試料は風化スメクタイトの 考察でも利用しており、その結果については 4.2.7 スメクタイト生成と M-S-H に関する評価で後 述する。また、アルカリ温泉施設がある San Isido(Narra1 地点)周辺及び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 においても露頭調査を実施し、Spillway では露頭 から試料を採取した。

Narra地区のPWNRO01地点及びSpillway で試料採取した露頭写真を図 2.3.3-2~図 2.3.3-5 に示す。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ている。



図 2.3.3-1 Narra 地区及びその周辺の概査地点(Spillway 及び PWNRO01 地点)



図 2.3.3-2 PWNRO01の露頭 (PWNRO01-16-Rh-001 試料採取地点)



図 2.3.3-3 Spillwayの露頭調査の状況



図 2.3.3-4 Spillwayの試料採取位置(PWSPO-16-Rh-003(左)、PWSPO-16-Rh-004(右))



図 2.3.3-5 Spillwayの試料採取位置(PWSPO-16-Rh-005(左)、PWSPO-16-Rh-006(右))

X線回折測定による鉱物同定結果を表 2.3.3-1 に、X線回折チャートを図 2.3.3-6~図 2.3.3-9 に示す。PWNRO01-16-Rh-001 は超塩基性岩からほぼ蛇紋岩化しているとみられ、スメクタイト は見られなかった。一方、Spillwayの試料はいずれも粘土鉱物を含んでいるとみられることから、 定方位 X線回折分析によりエチレングリコール(EG: Ethylene Glycol)処理後に 010 面ピーク位置 のシフトが見られるかを観察した。定方位測定及び EG 処理試料の定方位測定の結果を図 2.3.3-10~図 2.3.3-12に示す。いずれも EG 処理後に 010 面のピークシフトが見られたことから、 スメクタイトが含まれていると考えられる。不定方位の XRD チャートの 060 面ピークからは、 シャープな形状ではなく、全体的に広がった形状であるが、3 八面型スメクタイトとみられる。 また、粘土鉱物ではハロイサイトも同定された。

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図 2.3.3-13 に、また、CO<sub>2</sub>の 含有率を控除して百分率を求めたものを図 2.3.3-14 に示す。PWNRO01-16-Rh-001 は他の Narra 3の試料と同様に Al が少なく Mg が多いが、砕屑性堆積物(図 2.5.5-24~図 2.5.5-25、図 2.6.3-28~図 2.6.3-29)と比較すると Fe の割合は少ない。Spillwayの試料はいずれも化学組成が Narra の試料と全くことなり、Al に富み Mg に乏しい。

表	2.3.3-1	Narra 地区およ	びその周辺地区	の露頭試料の	X線回折によ	る鉱物同定結果
---	---------	------------	---------	--------	--------	---------

	粘土	鉱物	蛇紋石	斜長石	角閃石	珪酸塩鉱物	
試料名	スメクタイト	ハロイサイト	リザーダイト	曹長石	-	石英	Smectiteの060面による2八型・3八型スメクタイトの推定※
	Smectite	Halloysite	Lizardite	Albite	Amphibole	Quartz	
PWNR001-16-Rh-001	-	-	0	-	-	-	-
PWSPO-16-Rh-003	Δ	Δ	-	Δ	Δ	-	3八面体型(サポナイト)の特徴ピーク角度を示すと考えられる。
PWSPO-16-Rh-004	Δ	Δ	-	Δ	Δ	Δ	3八面体型(サポナイト)の特徴ピーク角度を示すと考えられる。
PWSPO-16-Rh-006	Δ	Δ	-	Δ	-	-	3八面体型(サポナイト)の特徴ピーク角度を示すと考えられる。



図 2.3.3-6 PWNRO01-16-Rh-001のXRD チャート



図 2.3.3-7 PWSPO-16-Rh-003の XRD チャート



図 2.3.3-8 PWSPO-16-Rh-004のXRD チャート



図 2.3.3-9 PWSPO-16-Rh-006のXRD チャート



図 2.3.3-10 PWSPO-16-Rh-003の定方位測定および EG 処理試料の定方位測定の結果



図 2.3.3-11 PWSPO-16-Rh-004 の定方位測定および EG 処理試料の定方位測定の結果



図 2.3.3-12 PWSPO-16-Rh-006の定方位測定および EG 処理試料の定方位測定の結果



図 2.3.3-13 露頭試料の XRF 分析結果(酸化物表記、CO2 を含む)



図 2.3.3-14 露頭試料の XRF 分析結果(酸化物表記、CO<sub>2</sub>を含まない)

2.4 地下水調查

Narra 地区の①表層域での地下水流動特性、②地下水(湧水も含む)の地球化学的特性を明ら かにするため、Narra3 地点でのトレンチ内壁面からのアルカリ浸出水、試錐孔で採取した地下水 及び地表水(クリーク:小川)と Narra3 地点を含む Narra 地区のアルカリ湧水地点において、 物理化学的特性<パラメータ>の原位置測定(pH、温度、電気伝導度、酸化還元電位<ORP>、 など)・簡易分析(Ca, Mg, Al, SiO<sub>2</sub>, Cl)・ガス濃度測定(H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>)と水質分析を実施した。

2.4.1 現地調査(現地測定・簡易分析・採水)

平成 27 年度の調査[1]において、pH11 を超える高アルカリ地下水がスメクタイトを含有する粘 土質の砕屑性堆積物に浸出しているナチュラルアナログを確認した Narra 地区(図 2.4.1-1 参照) において、Narra3 地点でのトレンチ内壁面からのアルカリ浸出水(トレンチ3~5)、試錐孔で 採取した地下水(DH01 孔~DH04 孔)及び地表水(クリーク:上流、中流、下流の3か所)と Narra3 地点を含む Narra 地区のアルカリ湧水地点(Narra3-1 地点、San Isido (Narra1 地点)、 Babatou 滝(Narra2 地点))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 2.4.1-1~図 2.4.1-14 に Narra 地区の調査地点の状況を、表 2.4.1-1~表 2.4.1-5 に地下水 の物理化学パラメータの現地測定結果を(各試錐孔の地下水は採水深度も)示す。なお、San Isido (Narra1 地点)の源泉は斑岩レイ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。



図 2.4.1-1 Narra 地区の地下水調査地点



図 2.4.1-2 Narra3-1アルカリ泉, pH11.37, 38.5℃



図 2.4.1-3 Narra3-2 トレンチ調査エリア周辺のクリーク上流, pH10.09, 33.4℃



図 2.4.1-4 Narra3-2 トレンチ調査エリア周辺のクリーク中流, pH10.57, 33.1℃



図 2.4.1-5 Narra3-2 トレンチ調査エリア周辺のクリーク上流, pH9.3, 32.5℃



図 2.4.1-6 Narra3-2 DH01 孔, pH11.08, 30.9℃



図 2.4.1-7 Narra3-2 DH02 孔, pH11.18, 35.9℃



図 2.4.1-8 Narra3-2 DH03 孔, pH11.29, 33.5℃



図 2.4.1-9 Narra3-2 DH04 孔, pH11.19, 33.0℃



図 2.4.1-10 Narra 3-2 トレンチ<br/>3, pH11.37, 33.7  $^\circ\!\!\mathrm{C}$ 



図 2.4.1-11 Narra 3-2 トレンチ4, pH11.17, 33.4°C



図 2.4.1-12 Narra3-2 トレンチ5, pH11.36, 29.9℃



図 2.4.1-13 San Isido 温泉水の源泉井戸 (Narra1), pH10.50, 47.2℃, ガスのバブリング (右)



図 2.4.1-14 Babatou 滝 (Narra2)

## 表 2.4.1-1 Narra3-1 源泉現地水質測定結果

採取	日時	位置	採取場所/母岩	測定項目	大林組	北大	備考
6/1	10:47	N09°12′ 18.6″	Narra3-1(湧水)	pН	11.37		
		E118°16′ 46.2″	採水	Temp. (℃)	38.5		
				ORP (mV)	-867		
				DO (mg/L)	1.19		
				EC (ms/m)	91.6		
				CH4(ppm)	200		
				H2(ppm)	0		
				Ca	20-50		
				Mg	0		
				Al	0-0.05		
			Palawan Ophiolite	SiO2	5		
			(Ultramafic)	Cl(D)	>50		

採取	日時	位置	採取場所/母岩	測定項目	大林組	北大	備考
6/1	9:30	N09°12′ 14.6″	Narra3-2上流(クリーク水)	pН	10.09		
		$E118^{\circ}16' 50.5''$	※採水せず	Temp. (℃)	33.4		
				ORP (mV)	_		
				DO (mg/L)	_		
			R. Andrewski	EC (ms/m)	—		
				CH4(ppm)	—		
			Z The Line	H2(ppm)	—		
				Ca	—		
			A CONTRACTOR	Mg	—		
			and a first a first and the	Al	—		
			Travartina Danasit	SiO2	—		
			Haventine Deposit	C1(D)	—		
6/1	9:40	N09°12′ 14.3″	Narra3-2中流(クリーク水)	pН	10.57		
		$E118^{\circ}16' 51.0''$	※採水せず	Temp. (°C)	33.1		
				ORP (mV)	—		
				DO (mg/L)	—		
			The second second	EC (ms/m)	—		
				CH4(ppm)	—		
				H2(ppm)	—		
				Ca	—		
				Mg	—		
			and a start in the start	Al	—		
				SiO2	—		
			Travertine Deposit	C1(D)			
6/1	9:50	N09°12′ 13.1″	Narra3-2下流(クリーク水)	pН	10.37		
		E118°16′ 52.1″	※採水せず	Temp. (℃)	34.2		
				ORP (mV)	—		
			103 <sup>4</sup>	DO (mg/L)	—		
				EC (ms/m)	—		
				CH4(ppm)			
				H2(ppm)	_		
				Ca	_		
				Mg	_		
				Al	—		
			Travertine Deposit	SiO2	-		
				Cl(D)	_		

衣 2.4.1-5 Narra5-2 祂睡儿的小奶地小貝侧足相?	表	2.4.1-3	Narra3-2 試錐孔内水現地水質測定結果
----------------------------------	---	---------	------------------------

採取	日時	位置	採取場所/母岩	測定項目	大林組	北大	備考
6/1	14:30	N09°12′ 14.4″	DH01孔内水	pН	11.08		
		$E118^{\circ}16' 52.9''$	採水(GL-5.15m)	Temp. (℃)	30.9		
				ORP (mV)	-79		
				DO (mg/L)	1.43		
				EC (ms/m)	56.8		
				CH4(ppm)	—		
				H2(ppm)	—		
				Ca	10-20		
				Mg	0		
				Al	0-0.05		
			Travertine Deposit	SiO2	20		
			······································	Cl(D)	>50		
6/3	10.50	N09°12′ 12.5″	DH02孔内水	pН	11.18		
		E118°16′ 51.1″	採水(GL-4.8m)	Temp. (℃)	35.9		
				ORP (mV)	-113		
				DO (mg/L)	2.72		
				EC (ms/m)	70.4		
				CH4(ppm)			
				H2(ppm)	—		
				Ca	20-50		
				Mg	0		
				Al	0-0.05		
			Travertine Deposit	SiO2	10		
				Cl(D)	>50		
6/4	10:00	N09°12′ 12.9″	DH03孔内水	pН	11.29		
		E118°16′51.3″	採水(GL-8.1m)	Temp. (°C)	33.5		
				ORP (mV)	-99		
				DO (mg/L)	2.94		
				EC (ms/m)	79.7		
				CH4(ppm)	_		
				H2(ppm)	-		
				Ca	20-50		
				Mg	0		
				Al	0-0.05		
			Travertine Deposit	S102	5		
017	10.00	N00010/ 10.0/		CI(D)	>00		
6/7	13.00	NU9*12 13.9"	DHU4扎内水	pH Tomp (°C)	22.0		
		E118°16′52.6″	採水(GL-10.8m)	$\frac{1 \text{ emp. } (\mathbf{C})}{(\mathbf{D}\mathbf{D}\mathbf{D})}$	33.0		
				$\frac{ORP(mV)}{DO(T)}$	-119		
				DO (mg/L)	2.39		
				EU (ms/m)	04.1		
				H <sub>2</sub> (nnm)			
				$\Gamma_2(ppm)$	20-50		
				Ma	0		
					0-0.05		
				SiO2	5-10		
			Travertine Deposit	C1(D)	>50		
		1					

採取	日時	位置	採取場所/母岩	測定項目	大林組	北大	備考
6/4	10:15	N09°12′ 13.6″	Trench3濁湧水	pН	11.37		
		$E118^{\circ}16' 52.0''$	採水	Temp. (℃)	33.7		
			A DECEMBER OF	ORP (mV)	-111		
			Y Partie	DO (mg/L)	5.70		
				EC (ms/m)	87.2		
				CH4(ppm)	_		
				H2(ppm)	-		
			1134	Ca	20-50		
				Mg	0		
				Al	0.1		
			Travertine Deposit	SiO2	5		
				Cl(D)	>50		
6/3	13:47	N09°12′ 12.9″	Trench4濁湧水	pН	11.17		
		$E118^{\circ}16' 51.9''$	採水	Temp. (℃)	33.4		
				ORP (mV)	-30		
				DO (mg/L)	6.41		
				EC (ms/m)	67.6		
				CH4(ppm)	-		
				H2(ppm)	-		
				Ca	20-50		
				Mg	0		
				Al	0		
			Travertine Deposit	SiO2	5		
				Cl(D)	>50		
6/8	10:15	N09°12′ 12.6″	Trench5濁湧水	pН	11.36		
		$E118^{\circ}16' 51.4''$	採水	Temp. (℃)	29.9		
				ORP (mV)	-152		
			E CONTRACTOR	DO (mg/L)	2.09		
			and the stand with	EC (ms/m)	78.3		
				CH4(ppm)	-		
				H2(ppm)	-		
				Ca	20-50		
				Mg	0		
				Al	0.05		
			Travertine Deposit	SiO2	10-20		
				Cl(D)	>50		

# 表 2.4.1-4 Narra3-2 トレンチ内湧水(地下水)現地水質測定結果

## 表 2.4.1-5 San Ishidro 温泉水の現地水質測定結果

採取	日時	位置	採取場所/母岩	測定項目	大林組	北大	備考
6/9	11:15	N09°10′ 48.5″	Narra1(San Isidro 温泉水)	pН	10.64		
		E118°15′ 06.5″	採水	Temp. (°C)	39.3		
			with the second s	ORP (mV)	-270		
				DO (mg/L)	2.04		
				EC (ms/m)	65.8		
				CH4(ppm)	>700		
				H2(ppm)	_		
			10 BUILT	Ca	5		
			DID	Mg	0		
			10 bi	Al	0.2		
			Traventine Demosit	SiO2	100		
			i ravertine Deposit	Cl(D)	>50		

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 2.4.2-1~表 2.4.2-3 に示す。また、地下水の水質組成をヘキサダイアグラム(Stiff Diagram)表示で図 2.4.2-1~図 2.4.2-8 に示す。

Narra 地区で賦存している地下水はすべて還元性のアルカリ地下水で、その水質タイプは Ca<sup>2+</sup> -OH である。また、トレンチ壁面からのアルカリ湧水すべてが還元性である。トレンチと Narra3-1のアルカリ湧水の源泉の水質組成はほぼ類似している。トレンチ4及び5は Narra3-1やトレン チ3に比べると、炭酸・重炭酸イオン(HCO<sub>3</sub>+CO<sub>3</sub>-)濃度がやや高い。試錐孔内水は総じてアルカ リ金属イオン(Na<sup>+</sup>+K<sup>+</sup>)濃度が高く出る傾向が顕著である。その他のイオンは Narra3-1 源泉やト レンチ浸出水とほぼ同様の組成である。したがって、試錐孔内水やトレンチ浸出水の水質・起源 と進化は、Narra 地区の蛇紋岩化作用に伴うアルカリ源泉の地下水そのものであることが示唆さ れる。

パラワン島の地下水調査地点と水質組成を地質図上のまとめた図を図 2.4.2-9 に示す。また、 表 2.4.2-4 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[45]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 地点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。

次に、図 2.4.2-11 に Narra3-1~3-2 地点の湧出水・地下水・トレンチ内湧水・試錐孔内水の水 質組成を示す。Narra 地区における表層域サイトスケールでは、局部的ではあるが表層水の主要 な流動系は、Narra3-1(アルカリ源泉の湧水)地点を頂点として扇形に東方(海方向)に拡がる 平坦な河川系扇状地的な地形的特徴(N-S 方向:最大約 200m、E-S 方向:最大約 150m)を示す 流動領域内を表層水理場の対象域(境界条件)とすることが出来る。

現在の表層部における主要な流動系(クリーク:小川)は、3方向で概ね東傾斜で緩やかに流下 している。中でも真ん中の流動系が、他の2つの流動系と比べると、その流動幅・流量が大きい。 これらの流動系は、地下深部において古チャンネル構造として保存されている。これらの古チャ ンネル形状は "馬蹄形 "でその深度とチャンネル幅も数 m を超えていることがフィリピン大学の TEM (Transient Electromagnetic; 電磁探査)による二次元初期解析からも示唆された。

また、トレンチ壁面での縦断面観察からもチャンネル構造が明瞭に観察され、その河川系・河 床部には、連続性に乏しく、多源の円磨された巨礫(長径:約 25cm)や細礫〜中礫層が最大幅 3m、最大層厚 1.5m 規模を持って平坦で対称性のある船底状に分布している。これらは、非定常 状態での氾濫性礫層と考えられる このような水理地質構造学的要素から、表層水の流動系は恐らく緩慢な現地形傾斜に支配され ていると想定される水頭ポテンシャル差(例えば、動水勾配)のもと、東方に向かって緩慢に流 動しているものと推察出来る。

Narra 地区におけるアルカリ源泉口(Narra3·1)からの湧水(pH 11.37)は、パラワンオフィオ ライト(基盤岩)内の断裂系に伴う裂か水で、その生成は上述したように水・岩石相互作用に伴う 蛇紋岩化作用と密接な関係に起因している。

また、この表層域に広く発達・分布している石灰華の沈殿(形成)は、超苦鉄質複合岩体の蛇 紋岩化作用プロセスに伴うアルカリ地下水との地球化学的環境に深く関与していることが事例研 究として数多く報告されている[46]。これらの扇状地様平坦地の表層域では、ルーズで未固結な炭 酸塩沈殿物が分布するところでは、アルカリ地下水からの石灰華の供給量が持続される地球化学 的環境が保持されるものと考えられる。更に、表層水(地表水)の流量・流向などの変動も大き くなく、表層水による侵食(下刻作用)が広くかつ、深く進まないものと考えられる。

一方、浅層の地下水は、アルカリ源泉口の位置する扇頂付近から地下に浸透した伏流水として、 貯留され、その流動系は岩石化が進んでいる炭酸塩沈殿層(堆積岩)を不透水層として、被圧地 下水(トレンチ壁面から湧水するアルカリ地下水)として、東方に向って流動しているものと考 えられる。

# 表 2.4.2-1 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 Narra3-2 地区試錐孔及びトレンチ)

採水オ	ポイント							Narra,	Palawan						
Laca	ation	N09°12′ 14.4″,	,E118°16′ 52.9″	N09°12′ 12.5″ ,	E118°16′ 51.1″	N09°12′ 12.9″,	E118°16′ 51.3″	N9°12′ 13.9″ ,1	E118°16′52.6″	N9°12′ 13.6″,	E118°16′ 52.0″	N9°12′ 12.9″,	E118°16′51.9″	N9°12′ 12.6″ ,	E118°16′ 51.4″
Elev	ation	47m(GI	L-5.15m)	48m(G	L-4.8m)	48m(G	L-8.1m)	47m(GI	-10.8m)	4	6m	5	9m	4	8m
		Borehole 1 in D	Jown Slope from	Borehole 2 in D	own Slope from	Borehole 3 in D	own Slope from	Borehole 4 in D	own Slope from	Trench3 in Do	own Slope from	Trench4 in Do	own Slope from	Trench5 in D	own Slope from
		Western S	Site, Narra	Western S	Site, Narra	Western Site, Narra		Western Site, Narra		Western Site, Narra		Western	Site, Narra	Western Site, Narra	
Classif	fication	Drillir	ng Hole	Drillir	ng Hole	Drillir	ng Hole	Drilling Hole Seepage Water in Trench1		Seepage Wat	ter in Trench2	Seepage Wa	ter in Trench3		
採耳	<b>反</b> 日	2016/6/1		2016/6/3		201	3/6/4	201	6/6/7	201	6/6/4	2016/6/3		201	16/6/8
分	析	А	В	A	В	А	В	A	В	A	В	А	В	A	В
Samp	ole No.	DH	H01	DH	H02	DH	H03	DI	H04	Tre	nch3	Tre	nch4	Tre	ench5
p	Н	11.08		11.18		11.29	-	11.19	-	11.37	-	11.17	-	11.36	-
Tem	p.(°C)	30.9		35.9		33.5	-	33.0	-	33.7	-	33.4	-	29.9	-
ORP	(mV)	-79		-113		-99	-	-119	-	-111	-	-30	-	-152	-
EC(m	S/cm)	56.8		70.4		79.7	-	64.7	-	87.2	-	67.6	-	78.3	-
DO(n	ng/L)	1.43		2.72		2.94	-	2.39	-	5.70	-	6.41	-	2.09	-
$CO_2(r$	mg/L)	-		-		-	-	-	-		-	-	-		
д	Na <sup>+</sup>	51.1		50.3		51.2	-	51.8	-	50.4	-	47.1	-	48.2	-
チ	K <sup>+</sup>	3.56		2.66		2.72	-	2.96	-	2.39	-	2.54	-	2.24	-
オ	Ca <sup>2+</sup>	10.40		24.8		33.9	-	22.4	-	48.5	-	36.4	-	44.8	-
ン :=	Si <sup>+</sup>	8.0		5.00		2.8	-	2.90	-	2.50	-	2.30	-	4.10	-
康	Al <sup>3+</sup>	0.07		0.16		0.07	-	0.06	-	0.08	-	0.10	-	0.13	-
/34.	Mn <sup>2+</sup>	< 0.01		< 0.01		< 0.01	-	< 0.01	-	< 0.01	-	< 0.01	-	< 0.01	-
(ppm)	Mg <sup>2+</sup>	< 0.01		0.0		0.01	-	0.02	-	0.01	-	0.02	-	< 0.01	-
	Fe (2++3+)	0.04		0.03		0.02	-	0.03	-	0.05	-	0.03	-	0.01	-
_	HCO <sub>3</sub>	21.9*		45.7*		18.5*	-	26.8*		< 0.1*	-	25.5*	-	50.3*	-
7 -	NO <sub>2</sub>	0.57		0.57		0.67	-	0.70	-	0.62	-	0.69	-	0.62	-
- +	NO <sub>3</sub>	0.25		0.22		0.24	-	0.22	-	0.22	-	0.22	-	0.22	-
ン	PO <sub>4</sub> <sup>3</sup>	< 0.01		< 0.01		< 0.01	-	<0.01	-	< 0.01	-	< 0.01	-	< 0.01	
濃	SO42	0.83		0.01		0.12	-	0.14	-	0.02	-	0.21	-	<0.01	-
度	Cl	31.56		31.3		28.74	-	21.14	-	26.96	-	28.53	-	27.82	-
( )	Br	0.14		0.07		0.07	-	0.06	-	0.07	-	3.62	-	0.06	
(ppm)	F	0.17		0.82		0.07	-	<0.01		<0.01	-	<0.01		<0.01	-
	OH			10			-	Fo. 10			-			102.90	-
	Cl	>50		>50		50	-	>50		5		>50		>50	
パックテスト	Al	0~0.05		0~0.05		0~0.05	-	0~0.05		0.1	-	200		0.05	-
(ppm)	Ca	$10 \sim 20$		$20 \sim 50$		$20 \sim 50$	-	$20 \sim 50$	-	20~50	-	20~50	-	20~50	-
	Mg	0		0		0	-	0	-	0	-	0	-	0	-
ガス濃度	H <sub>2</sub>	-	-	-		-	-	-	-		-		-		
(ppm)	CH <sub>4</sub>	-		-		-	-	-	-		-	-			
備	考	*はHCO <sub>3</sub> +CO <sub>3</sub> <sup>2</sup> Ca, Fe, Mg, Alは A Wの値	*はHCO <sub>3</sub> <sup>*</sup> +CO <sub>3</sub> <sup>2・</sup> カ チオンはA.Wの値	*はHCO <sub>3</sub> +CO <sub>3</sub> <sup>2</sup> Ca, Fe, Mg, Alは A Wの値	*はHCO3 <sup>+</sup> CO3 <sup>2・</sup> カ チオンはA.Wの値	*はHCO <sub>3</sub> +CO <sub>3</sub> <sup>2</sup> Ca, Fe, Mg, Alは A Wの値	*はHCO3 <sup>*</sup> +CO3 <sup>2*</sup> カ チオンはA.Wの値	*はHCO <sub>3</sub> <sup>*</sup> +CO <sub>3</sub> <sup>2*</sup> Ca, Fe, Mg, Alは A Wの値	*はHCO3 <sup>*</sup> +CO3 <sup>2*</sup> カ チオンはA.Wの値	*はHCO <sub>3</sub> +CO <sub>3</sub> <sup>2</sup> Ca, Fe, Mg, Alは A Wの値	*はHCO <sub>3</sub> <sup>*</sup> +CO <sub>3</sub> <sup>2・</sup> カ チオンはA.Wの値	*はHCO3 <sup>+</sup> +CO3 <sup>2*</sup> Ca, Fe, Mg, Alは A Wの値	*はHCO <sub>3</sub> <sup>*</sup> +CO <sub>3</sub> <sup>2・</sup> カ チオンはA.Wの値	*はHCO <sub>3</sub> +CO <sub>3</sub> <sup>2</sup> Ca, Fe, Mg, Alは A Wの値	*はHCO3 <sup>+</sup> +CO3 <sup>2-</sup> カ チオンはA.Wの値
		23.1107 恒	1	11.11 07 但		11.1107 但		11.1107回	1	11.1107 但	1	21.1107回	1	11.1107 @	1

## 表 2.4.2-2 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 地区湧水及び小川)

採水オ	ポイント						Narra, l	Palawan					
Laca	ation	N09°10′ 48.5″	,E118°15′ 06.5″	N09°12′ 32.7″ ,	E118°17′ 07.9″	N09°12′ 18.6″	E118°16′ 46.2″	N9°12′ 14.6″ ,	E118°16′ 50.5″	N9°12′ 14.3″ ,	E118°16′ 51.0″	N9°12′ 13.1″ ,	E118°16′ 52.1″
Elev	ation	33	2m	58	3m	54	4m	4	7m	46	3m	44	lm
				Down stream fr	om Babatou Fall	Crack water of V	Vestern Site from	Down Slope fro	m Western Site	Down Slope fro	m Western Site	Down Slope fro	m Western Site
		San Isido, P	alawan Narra	Na	irra	apart from Bab	atou Fall. Narra	Na	arra	Na	irra	Na	rra
Classif	ication	Hot spring	r (Hot well)	Crack	Water	Crack	Water	Unner Alkalin	e Stream Water	Middle Alkalin	e Stream Water	Lower Alkalin	e Stream Water
採目	άB	201	6/6/9	2014/8/11	2016/6/5	201	6/6/1	201	6/6/1	201	6/6/1	2016/6/1	
分	析	A	В	A	В	A	В	A	В	A	В	A	В
Samp	le No.	Na	rra1	Nai	rra2	Nar	ra3-1	Narra	3-2 US	Narra	3-2 MS	Narra	3-2 LS
p	Н	10.64		10.45		11.37	-	10.09	-	10.57	-	10.37	-
Temj	p.(°C)	39.3		36.3		38.5	-	33.4	-	33.1	-	34.2	-
ORP	(mV)	-270		-411		-867	-		-	-	-	-	-
EC(m	S/cm)	65.8		-		91.6	-	-	-	-	-	-	-
DO(n	ng/L)	2.04		-		1.19	-		-	-	-	-	
CO <sub>2</sub> (1	mg/L)			-		-	-		-	-	-	-	
<b>b</b>	Na <sup>+</sup>	78.0		20.0		50.4	-		-	-	-	-	
 チ	K <sup>+</sup>	0.60		1.49		2.36	-	-	-	-	-	-	-
オ	Ca <sup>2+</sup>	3.70		14.8		50.6	-	-	-	-	-	-	-
シ	Si <sup>+</sup>	38.0		0.85		0.29	-	-	-	-	-	-	-
辰	Al <sup>3+</sup>	0.29		0.06		0.13	-	-	-	-	-	-	-
~	Mn <sup>2+</sup>	< 0.01		<0.01		< 0.01	-	-	-	-	-	-	
(ppm)	$Mg^{2+}$	< 0.01		15.0		0.01	-		-	-	-	-	
	Fe (2++3+)	0.01		<0.01		0.01	-		-	-	-	-	-
-7	HCO <sub>3</sub>	60.2*		-		10.7*	-			-	-	-	
<i>y</i> _	NO <sub>2</sub>	0.35		0.03		0.63	-	-	-	-	-	-	
オ	NO <sub>3</sub>	0.22		1.04		0.23	-	-	-	-	-	-	-
ン	PO4 <sup>3</sup>	<0.01		0.03		<0.01	-	-	-	-	-	-	-
濃	SO4 <sup>2</sup>	2.56		0.38		0.05	-		-	-	-	-	
度	CI	58.76		20.8		28.03	-		-	-		-	
(nnm)	Br	0.14		0.05		0.06							
(ppm)	F OH.	<0.01		-0.01		<0.01	-			-		-	
	SiO	100		$5 \sim 10$		5	-			-	-	-	-
	Cl	>50		> 50		>50				-		-	
パックテスト	Al	200		2 > 50		> 50 0~0.05				-		-	
(ppm)	Ca	5		5		>50	-						
	Mg	0		$2 \sim 5$		0	-			-	-	-	
ガス濃度	H <sub>2</sub>	0		0		0	-			-	-	-	
(ppm)	CH <sub>4</sub>	>700		3600		200	-	-	-	-	-	-	-
	•	*/tHCO2+CO2	_	*/tHCO2+CO2	_	*/tHCOs+COs2	_						
備	考	Ca. Fe. Mg. All‡	*はHCO3+CO3 <sup>2</sup> カ	Ca. Fe. Mg. All±	*はHCO3 <sup>+</sup> +CO3 <sup>2・</sup> カ	Ca. Fe. Mg. All‡	*はHCO3 <sup>+</sup> +CO3 <sup>2</sup> カ						
		A.Wの値	チオンはA.Wの値	A.Wの値	チオンはA.Wの値	A.Wの値	チオンはA.Wの値						

濃度(mg/L)	HCO <sub>3</sub> -	CO3 <sup>2-</sup>	備考
Narra3-1	0.5	10.2	アルカリ度滴定の理論式と合致せず。参考値。
DH01 孔	2.3	19.6	アルカリ度滴定の理論式と合致せず。参考値。
DH02 孔	5.6	40.1	アルカリ度滴定の理論式と合致せず。参考値。
DH03 孔	1.2	17.3	
DH04 孔	2.8	24.0	
トレンチ3	< 0.1	< 0.1	アルカリ度滴定の理論式と合致せず。参考値。
トレンチ4	2.1	23.4	
トレンチ5	3.6	41.7	アルカリ度滴定の理論式と合致せず。参考値。
San Ishidro	11.3	48.9	アルカリ度滴定の理論式と合致せず。参考値。

表 2.4.2-3 重炭酸・炭酸イオン測定結果



図 2.4.2-1 Narra3-1 のヘキサダイアグラム表示による水質組成



図 2.4.2-2 DH01 孔のヘキサダイアグラム表示による水質組成



図 2.4.2-3 DH02 孔のヘキサダイアグラム表示による水質組成



図 2.4.2-4 DH03 孔のヘキサダイアグラム表示による水質組成



図 2.4.2-5 DH04 孔のヘキサダイアグラム表示による水質組成



図 2.4.2-6 トレンチ3のヘキサダイアグラム表示による水質組成



図 2.4.2-7 トレンチ4のヘキサダイアグラム表示による水質組成



図 2.4.2-8 トレンチ5のヘキサダイアグラム表示による水質組成



図 2.4.2-9 San Ishdro (Narra1) のヘキサダイアグラム表示による水質組成



図 2.4.2-10 パラワン島の地下水調査地点と地下水の水質組成

表 2.4.2-4 パラワン島とルソン島(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 Hot Spring	Palawan Narra -3.1 Hot Spring	Palawan Narra -3.1 Hot Spring	Palawan Narra -3.2 Trench3	Palawan Narra -3.2 Trench4	Palawan Narra -3.2 Trench5	Luzon Poonbato	Luzon Manleluag Hot Spring – M1	Luzon Bigbiga - Well-1	Low alkali cement leachates (PNC 1997)*
採取年 Sample No.	2015 Riotuba Mine O	2015 7 Falls 1 O	2016 Narra 1 San Isidro O	2015 Narra3-1 O	2016 Narra3-1 O	2016 Narra3-2 Trench3 O	2016 Narra3-2 Trench4 O	2016 Narra3-2 Trench5 O	2013 P-2 G	2013 M1 G	2014 Well1 G	1997
pH	10.01	9.31	10.64	11.16	11.37	11.37	11.17	11.36	11.41	10.80	9.52	11.09
ORP(Eh) [mV]	119	-387	-270	-450	-867	-111	-30	-152	-111	-420	8	-
Temp [°C]	29.3	37.9	39.3	38.6	38.5	33.7	33.4	29.9	28.0	32.9	29.2	60
CH <sub>4</sub> [ppm]	0	0	>700	0	200	0	0	0	> 5000	2090	0 (0~560)	-
H <sub>2</sub> [ppm]	0	0	0	0	0	0	0	0	50~1320	0 (0~62)	0 (0~130)	-
Na+ [ppm]	2.00	164	78.0	48.6	50.4	50.4	47.1	48.2	24.3	26.3	100.6	43
K+ [ppm]	0.44	3.38	0.60	2.94	2.36	2.39	2.54	2.24	1.45	0.375	1.05	13
Ca <sup>2+</sup> [ppm]	5.00	3.80	3.70	37.5	50.6	48.5	36.4	44.8	92.5	29.9	1.63	16.8
Mg <sup>2+</sup> [ppm]	16.4	1.31	0	0.02	0.01	0.01	0.02	<0.01	0.24	0.03	0.02	-
Si <sup>2+</sup> [ppm]	< 0.5	31	38	0.9	0.29	2.9	2.3	4.1	11	17	72.3	
Al <sup>3+</sup> [ppm]	< 0.01	< 0.01	0.29	0.07	0.13	0.08	0.10	0.13	1.41	1.05	0.97	0.3
Fe <sup>(2++3+)</sup> [ppm]	0.08	0.02	0.01	0.02	0.01	0.05	0.03	0.01	0.18	< 0.001	0.0058	-
Cl <sup>-</sup> [ppm]	28.6	162	58.8	29.5	28.0	27.0	28.5	27.8	12.9	17.8	4.50	-
SO42 [ppm]	0.03	15.7	2.56	0.18	0.05	0.02	0.21	<0.01	0.05	0.364	48.0	-
HCO3-**	21.2	121.0	11.3	0.09	0.5	<0.1	25.5	3.6	1.6	30.0	135.6	-

\* wt % - Portlandite Cement: Silica Fume: Fly Ash=40: 20: 40

\*\*HCO3<sup>-</sup>-アルカリ度滴定結果から算出したHCO3<sup>-</sup>+CO3<sup>2</sup>の値



図 2.4.2-11 Narra3-1~3-2 地点の模式層序学的断面図と地下水(湧水)の水質

2.5 試錐調查

2.5.1 目的

平成 27 年度[1]のトレンチ1及び2の壁面地質精査(スケッチ)・地下水調査および、鉱物学的 試験の結果を踏まえ、パラワンオフィオライト超苦鉄質複合岩体(パラワンオフィオライト基盤 岩)直上の泥質(一部粘土質)砕屑性堆積物と一部砂質の砕屑性堆積物を調査対象層として、そ の分布(層厚・連続性・基盤深度)、岩質・岩相、堆積構造(砕屑物の構成粒子の岩石鉱物学的特 性、粒径による分級度と分級成層状態などによる堆積環境)および、変質作用(肉眼での粘土化) などを把握するために、4 孔の構造試錐調査(コア観察・岩石鉱物学的試験用の試料採取・地下 水の水質組成分析用の採水と孔内原位置測定)を実施した。

また、これらの構造試錐調査のコア観察結果は、今年度実施予定している3サイトでのトレン チ調査サイトの選定根拠をより確かなものとするための先行調査を兼ねたものである。 トレンチ掘削サイトの選定のための先行的な構造試錐地点は、Narra 地区におけるこれまでの 調査結果、取り分けトレンチ1及び2でのアルカリ湧水の流動系(表層部スケール:アルカリ湧 水源から湧水経路)・地球化学的特性とその進化プロセスおよび、トレンチ2から観察されたスメ クタイト(サポナイト)の鉱物学的特性とスメクタイトを含有する砕屑性堆積物の特徴的な岩相・ 岩質・層序・堆積環境と粘土化などを考慮した。特に、調査対象層である泥質砕屑性堆積物(一 部、粘土質)の分布域(連続性)とパラワンオフィオライト基盤岩までの深度などを予測して試 錐地点の選定を思考した。

そのためには、Narra 地区における地形学的特徴に規制されている表層部のアルカリ湧水の流 動系、基盤岩深度および泥質砕屑性堆積物の層序とその連続性等の相互関係の解釈が重要である。

当地区の地形学的特徴は、全体的に東(海側) へ緩斜斜した平坦地で、小規模であるが東へ拡 がった河川系様扇状地の地形を示す。この地形特徴は、おそらくパラワンオフィオライト基盤岩 の形状に調和的なものと考えられる。従って、パラワンオフィオライト基盤岩体直上の砕屑性堆 積物も、この岩体形状に調和的に累重し、その分布は緩やかに東傾斜で、パラワンオフィオライ ト基盤岩体の主要方向である NE 系と同じ走行で連続的に分布しているものと考えられる。また、 この河川系様扇状地は東方縁に位置している稲作田縁(アルカリ源泉の湧水地点から東へ約百数 + mの距離) へ切り込むような斜面変換(Break-in-Slope)で特徴づけられている。

これらの地形学的、地質学的、岩石鉱物学的、アルカリ地下水の水理学的・地球化学的特性から、構造試錐地点は、トレンチ2を其点として、調査対象層(泥質<一部粘土質>の砕屑性堆積物) の分布を追跡するために、その分布(走行)に着目してその水平展開(南北方向)することとし た。さらに、アルカリ地下水が賦存・流動経路が観察される分布域(河川系様扇状地の中央部) での現アルカリ湧水のクリーク(小川)の流向・流量と、古河川系が想定される地形的凹部の分 布域などの知見をもとに、北西への走行延長約 80m線上に4 孔の簡易構造試錐地点を選定・配置 した(図 2.5.2-1)。



図 2.5.2-1 試錐孔 (DH01~DH04) の掘削地点

構造試錐調査の試錐仕様については、ビット径が BQ サイズ(直径 59.6mm)のエンジン式簡 易ボーリングマシンによるコア採取を行った。掘削可能深度は、回転トルクや人力でのロッド揚 降を考慮して、概ね 30~40m 程度である。今回はスメクタイトを含む砕屑性堆積物(粘土層)の 分布と基盤岩の深度を把握することを優先し、上記 4 地点で深度 10m 程度の浅層試錐孔を DH01 から順に掘削した。

(1) DH01 孔

DH01 孔の試錐作業の工程を表 2.2.2-1 に、掘削時の状況を図 2.2.2-3 に示す。深度 5m 付 近で基盤岩に達したため、掘削深度 6m で終了した。コア回収後、孔内水排水・洗浄を行った 後に、ベーラーによって坑内水を採取し、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。

	日時	記事
5/31	16:00	試錐調査位置の選定(N9.204000°,E118.281361°)
6/1	9:00~12:00	コア掘削 GL-0m~3m (3m 付近から sediment)
	$12:30 \sim 13:50$	コア掘削 GL-3m~6m (5m 付近から basement)
	$14:15 \sim 14:30$	孔内排水洗浄、検尺(検尺深度:GL-5.15m)
	14:30	孔内水採水(GL-5.15m より)

表 2.5.3-1 DH01 孔調查実施工程



図 2.5.3-1 DH01 孔掘削状況

### (2) DH02 孔

DH02 孔の試錐作業の工程を表 2.5.3・2 に、掘削時の状況を図 2.2.2・5 に示す。深度 5m 超 えたところで基盤岩に達したため、掘削深度 6m で終了した。コア回収後、DH01 孔と同様に 地下水調査を実施した。

表 2.5.3-2 DH02 孔調查実施工程

日時		記 事				
6/2	9:00	試錐調査位置の選定(N9.203472°,E118.280861°)				
	9:00~12:00	コア掘削 GL-0m~4m				
	$13:00 \sim 14:00$	コア掘削 GL-4m~6m (排水ポンプ故障につき孔内排水・洗浄は				
		明朝に延期)				
6/3	$10:00 \sim 10:50$	孔内排水・洗浄、検尺(検尺深度:5.1m)				
	10:50	孔内水採水(GL-4.8m より)				



図 2.5.3-2 DH02 孔掘削状況

(3) DH03 孔

DH03 孔の試錐作業の工程を表 2.5.3・3 に、掘削時の状況を図 2.2.2・7 に示す。深度 8m 付 近で基盤岩に達したため、掘削深度 6m で終了した。コア回収後、DH01 孔と同様に地下水調 査を実施した。

表 2.5.3-3 DH03 孔調查実施工程

	日時	記事				
6/3	9:00	試錐調査位置の選定(N9.203588°, E118.280917°)				
	$10:30 \sim 12:00$	コア掘削 GL-0m~4m				
	$13:00 \sim 17:30$	コア掘削 GL-4m~10m				
6/4	9:40~10:00	孔内排水・洗浄、検尺(検尺深度:8.5m)				
	10:00	孔内水採水(GL-8.1m より)				



図 2.5.3-3 DH03 孔掘削状況

### (4) DH04 孔

DH04 孔の試錐作業の工程を表 2.2.2・4 に、掘削時の状況を図 2.2.2・9 に示す。深度 7m 付 近で基盤岩に達したが、基盤岩のコアをできるだけ観察するために掘削作業を継続し、掘削深 度 16m で終了した。コア回収後、DH01 孔と同様に地下水調査を実施した。

	日時	記事
6/4	9:00	試錐調査位置の選定(N9.203861°,E118.281278°)
	$10:00 \sim 12:00$	コア掘削 GL-0m~4.5m
	$13:00 \sim 16:00$	コア掘削 GL-4.5m~10m
6/5	9:00~16:00	コア掘削 GL-10m~12m
6/6	9:40~12:00	コア掘削 GL-12m~15m
	$12:00 \sim 16:00$	コア掘削 GL-15m~15.5m
6/7	12:30~13:00	孔内排水・洗浄、検尺(検尺深度:11.1m)
	13:00	孔内水採水(GL-10.8m より)

表 2.5.3-4 DH04 孔調查実施工程



図 2.5.3-4 DH04 孔掘削状況

これら4孔のコア写真、コア観察による岩相・岩質区分図(Lithological Units)および孔内水 と岩石試料の採取/採取位置まとめた柱状図を以下に示す。なお柱状図の凡例を図 2.5.4-1 に示 す。





図 2.5.4-2 試錐孔柱状図の凡例

### (1) DH01 孔

図 2.5.2-1 に示すように、試錐孔(DH 01)(標高 47m)は最北北西端に位置し、総掘削延長 は 6m、基盤深度は 4.1m である。砕屑性堆積物の上部層(約 1.6m 深度)は、石灰華起源の淡 褐色から暗灰色の炭酸塩沈殿物(Deposit)で、下部層(約 4.1m 深度)は、暗灰色から黒色の砕 屑性堆積物から構成されている。後者には、中礫(粒径:4~64mm)と細礫(粒径:2~4mm) の多源礫を含有するが、それらの分級度(粒径分布と礫種)は均質ではなく淘汰が悪い。また、 斜方輝石の鉱物粒が全体的に観察される。

基盤岩は、暗灰色から暗緑色を呈し、一様に蛇紋岩化作用が顕著であるが、一部粘土化が観察される。基盤岩と砕屑性堆積物のコンタクト部には、堆積過程での層序間隙に相当する時間的不連続性(Hiatus:ハイエイタス>)が観察されない。



図 2.5.4-3 DH01 孔試錐コア

Drill Hole Number : DH-1 Location : Narra3-2 Elevation : 47m Core Size : NQ Total Footage : 6.00m Drilling Operation :

Depth (	(m)	Columnar Section	CR*	RB**	Sample (Sample	Number*** Location)	Lithology	Remarks
	0.50	*× *×					0.0~0.5m Carbonate sediment, pale brown	0.0~0.1m surface soil, clay clay~very fine sand, root and fine pebble included
-1	0.00	*** ***					0.5~1.6m Carbonate sediment,reddish brown ~dark gray	very fine-coarse sand clay included poor calcareous fine pebble included nor-homogeneous
- 2	1.60						1.6~2.5m Clastic sediment,dark gray	very fine sand rich, medium ~coarse sand poor opx rich, water content is high non-homogeneous angular fine pebble included
2	2.00						2.5~3.0m Clastic sediment,dark pale gray	very fine~medium sand rich clay included poor, opx rich
	3. 30 3. 80						3.0~3.3m Clastic sediment,dark gray	very fine sand rich, medium ~coarse sand poor opx rich, water content is high, non-homogeneous, angular fine pebble included
- 4	4. 10						3.3~3.8m Clastic sediment,dark pale gray	very fine~medium sand rich clay included, opx rich basult angular(φ2cm) included
— 5							3.8~4.1m Clastic sediment,dark gray ~dark greenish gray	very fine sand~clay rich, coarse sand poor, opx rich, on under contact coarse sand and granule included
6	c . 00						4.1~6.0m Ophiolite(Serpentinite) basement dark greenish gray	storongly weathered very soft∼soft rock →clayly and fine sandy
_ 0	6.00							
- 7								
- 8								
- 9								
-10								
-11								
-12								
-13								
-14								
-15								

図 2.5.4-4 DH01 孔柱状図

#### (2) DH02 孔

図 2.5.2-1 に示すように、試錐孔(DH02)(標高 48m)は最南西端に位置(トレンチ2の西縁)し、総掘削延長は 6m、基盤深度は 5.0m である。砕屑性堆積物の上部層(約 1.5m 深度)は、石灰華起源の淡褐色から褐色の炭酸塩沈殿物で、一部葉理構造を示す。下部層(約 5m 深度)は淡灰色から暗灰色,一部淡緑色の砕屑性堆積物から構成されている。 両者には、細礫から中礫の岩片(パラワンオフィオライト基盤岩起源)、蛇紋石・斜方輝石の鉱物粒がランダムに 観察される。また、局所的ではあるがパッチ状でルーズな黒色粘土が観察される。

基盤岩は強い蛇紋岩化作用が顕著な暗緑色で特徴づけられ、局所的ではあるが粘土化が進ん でいる。砕屑性堆積物と基盤岩とのコンタクト部には、DH01 孔と同様にハイエイタスは観察 されない。



図 2.5.4-5 DH02 孔試錐コア

Drill Hole Number : DH-2 Location : Narra3-2 Elevation : 48m Core Size : NQ Total Footage : 6.00m Drilling Operation :

Depth(m)	Columnar Section	CR*	RB**	Sample Number**** (Sample Location)	Lithology	Remarks
0.2	d 6 0 0 0 0 0 0 0				0.0~0.2m soil, black	root included
0.5		_			0.2~0.5m Carbonate sediment, pale brown	medium~coarse sand, root and fine pebble included
	~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~				0.5~1.0m Carbonate sediment, reddish brown	clay ~ medium sand, black clay and pale brown sand included
	1× 1×				1.0~1.5m Carbonate sediment, pale brown	very fine ~ coarse sand, calcareous sand and opx included
- 2	0		3.7 z		1.5~2.6m Clastic sediment, pale gray $\sim$ dark gray	very fine~medium sand clay and silt included poor, opx rich alternated greenish gray color (serpentine?) and gray color look like lamination
- 3					2.6~5.0m Clastic sediment,pale greenish ray	medium∼coarse sand clay included poor non-homogeneous
- 4	2019-72 2019-72 2019-72 2019-72 2019-72					
-5 5.0			ð í		5.0~6.0m Ophiolite(Serpentinite) basement dark greenish gray	storongly weathered very soft∼soft rock →clayly and fine sandy serpentine rich
6 60	0					
- 8						
9						
-10						
-11						
-12						
-13						
-14						
-15			1			



### (3) DH03 孔

図 2.2.2-1 に示すように、試錐孔(DH03) (標高 48m) はトレンチ2の北西約 15m に位置し、 総掘削延長は 10m、基盤深度は 7.1m である。砕屑性堆積物の上部層(約 2.0m 深度)は、石 灰華起源の淡褐色から褐色の炭酸塩沈殿物である。下部層は、灰色から褐色の砕屑性堆積物で あるが、下位層に特徴的な層内礫岩が層厚約 3m 以上で、その礫種は基盤岩であるパラワンオ フィオライト基盤岩から構成される多源礫である。両者には、一般的であるが、少量の斜方輝 石の鉱物粒が不規則にかつ広範に観察される。

基盤岩は、蛇紋岩化作用が顕著で、一部著しい粘土化が観察される。また、砕屑性堆積物と 基盤岩とのコンタクト部には、DH01 孔、DH02 孔と同様にハイエイタスは観察されない。



図 2.5.4-7 DH03 孔試錐コア
Drill Hole Number : DH-3 Location : Narra3-2 Elevation : 48m Core Size : NQ Total Footage : 10.00m Drilling Operation :

Depth	(m)	Columnar Section	CR*	RB***	Sample (Sample	Number*** Location)	Lithology	Remarks
		<b>~</b>					0.0~2.0m Carbonate sediment, pale brown ~ reddish brown	clay and fine ~ coarse sand, black color soil included non-homogeneous
-1		** **						
- 2	2.00	<u> </u>					2.0~2.9m Clastic sediment, grav	clay rich, fine~medium, sand poor
	0.00							opx poor, alterated clay and very fine sand included
- 3	2.90	N. 87 1 1 1 1					2.9~3.9m Clastic sediment, pale greenish gray ~ light gray	medium~coarse sand rich, opx rich non-homogeneous angular fine pebble included
- 4	3.90	10/10/10/ 10/0- 0-					3.9~7.1m Clastic sediment(Conglomerate?), pale gray ~ gray	granule ~ cobble(max ¢9cm), subangular ~ subrounded? matrix coarse sand opx rich, non-homogeneous kind of pebble is serpentinite,
- 5								slate and (chert?)
- 6								
-7	7. 10	<u>\0}</u> p./9%					7.1~10.0m Ophiolite(Serpentinite) basement	storongly weathered
- 8							dark greenish gray $\sim$ dark gray a part pale greenish gray	Very sort-soft rock —-clayly and fine sandy 7.1~7.7 Am clay rich 7.7~8.4 m fine~very fine sand rich 8.4~10.0m medium-coarse sand rich lamination looked(dark greenish gray and pale greenish gray)
- 9								
-10	10. 00	*******						
-11								
-12								
-13								
-14								
-15								

図 2.5.4-8 DH03 孔柱状図

### (4) DH04 孔

図 2.2.2-1 に示すように、試錐孔(DH04) (標高 47m) は、DH01 孔の南東 18m に位置し、 総掘削延長は最大で 16m、基盤深度は 6.5m である。砕屑性堆積物の上部層 (約 2m 深度)は、 石灰華起源の淡褐色から褐色の炭酸塩沈殿物である。下部層は、層厚約 4.5m 程度の淡褐色か ら淡緑色の砕屑性堆積物で、斜方輝石の鉱物粒や蛇紋岩の岩片を含有している。

基盤岩は、蛇紋岩化作用を一様に受け、その程度により淡緑色から暗灰色を呈している。特に

淡緑色の蛇紋岩は、緑泥石の変質鉱物が観察され、破砕部では顕著な粘土化が進んでいる。また、砕屑性堆積物と基盤岩のコンタクト部では、DH01 孔、DH02 孔、DH03 孔と同様にハイ エイタスは観察されない。



図 2.5.4-9 DH04 孔試錐コア

Drill Hole Number : DH-4 Location : Narra3-2 Elevation : 47m Core Size : NQ Total Footage : 16.00m Drilling Operation :



図 2.5.4-10 DH04 孔柱状図

2.5.5 岩石鉱物学的調查

(1) 分析の概要と前処理

Narra3-1 の試錐孔(DH01~DH04)から採取したコア試料とその分析項目を表 2.5.5-1 に示 す。ここで示した試料のうち、●で示す 16 試料について、不定方位法の X 線回折(XRD)測定 (表 2.5.5-1 の XRD 欄の☆で示す試料は定方位法 XRD も実施)による鉱物分析、蛍光 X 線 (XRF)による全岩化学分析を実施した。なお、サンプリング位置は図 2.5.4-3、図 2.5.4-5、図 2.5.4-7 図 2.5.4-9 に示すコア写真の下 5 桁の番号で示している。

各湿潤試料を分析に必要な量をシャーレ等に分取し、数日間真空乾燥を行った。PWDH01-16-Rh-003, -005, -006, -007、PWDH02-16-Rh-001, -003, -005, -007、PWDH03-16-Rh-001, -006、PWDH04-16-Rh-001 は、乾燥後メノウ乳鉢にて、力を加えずに試料をほぐし、マトリッ クス以外の礫、砂、植物根等を除去した後、粉砕した。粉砕後篩にて、105µm 以下を分画し分 析試料とした。PWDH03-16-Rh-007, -009、PWDH04-16-Rh-012, -013, -015 は、乾燥後、全 量を粉砕し、105µm 以下を分画し分析試料とした。分取前、乾燥前、乾燥・粗破砕、05µm ふ るいでふるい分けたときの残分と通過分の状態を表 2.5.5-2 に示す。

### 表 2.5.5-1 試錐コアから採取した岩石試料と分析項目

[ ]		1	<b>D</b>				VPE			
Sample Labelling	Lacation		Description	Remarks	C14	XRD	XRF	ICP-MS	EPMA, µ -XRD	薄片顕微鏡
PWDH01-16-Rh-001		1.62m		DH01-001						
DWDH01-16-Db-002		2.24-		DH01-002						
T WDHOT TO THE ODZ		2.24111		51101 002		-	-			
PWDH01-16-Rh-003		2.72m		DH01-003		•	•			
PWDH01-16-Rh-004		3 13m		DH01-004						
DWDU01 10 DL 005		0.75		DU01 005			•			
PWDH01-16-Rn-005	Narra Borehole1	3.75m		DH01-005		•×				
PWDH01-16-Rh-006		3.87m		DH01-006		●☆	•			
PWDH01-16-Rb-007		4.13m		DH01-007						
		4.1311		51101 007		•	•			
PWDH01-16-Rh-008		4.46m		DH01-008						
PWDH01-16-Rh-009		4 64m		DH01-009						
DWD1101 10 DL 010		5.40		DU01_010						
PWDH01-16-Rh-010		5.10m		DHUI-UIU						
PWDH01-16-HU-001		1.3m		PW-HU-16-DH-1-s1						
DWDH01-16-HU-002		0.0		DW-HU-16-DH-12						
PWDH01-16-H0-002		2.2m		PW-HU-16-DH-1-sz						
PWDH01-16-HU-003		2.7m		PW-HU-16-DH-1-s3						
PWDH01-16-HU-004		3.2m		PW-HU-16-DH-1-s4						
	Narra Borehole1	3.2111								
PWDH01-16-HU-005		3.7m		PW-HU-16-DH-1-s5						
PWDH01-16-HU-006		3.9m		PW-HU-16-DH-1-s6						
DUD104 40 101 007		0.0111								
PWDH01-16-HU-007		4.1m		PW-HU-16-DH-1-s7						
PWDH01-16-HU-008				PW-HU-16-DH-1-s8						
DWD1100_10_D1_001		0.00	00.の+1余四	DU00_001		t				
FWDH02-10-R11-001		2.0011	2.211077039788	DH02-001		•	•			
PWDH02-16-Rh-002		2.42m	2.2mの札参照	DH02-002						
PWDH02-16-Rb-003		2.95m	2.2mの札参昭	DH02-003		•*				
		2.00111	0.0 m +1 +0 m	D1100_004		• ^	•			
PWDH02-16-Rh-004		3.00m	3.0mの利参照	DH02-004						
PWDH02-16-Rh-005	Narra Borehole2	4.33m	4.0mの札参照	DH02-005		•	•			
DWDU02-16-DL-006		4.00	50の1 会昭	DU02-006						
1 100102 10-000		4.09M	5.0mv/1/3/mt	01102-000		- 1	-			
PWDH02-16-Rh-007		5.07m	5.0mの札参照	DH02-007, 礫岩混合		•*	•*		1	
PWDH02-16-Rh-008		5.25m	5.3mの札参昭	DH02-008 礎岩混合		1		*75	ノクス部	
		5.20111	5	moved Ald be		- 1	-	1		
PWDH02-16-Rh-009		5.66m	5.5mの利参照	DH02-009	<b>.</b>	Į		<b>.</b>	L	
PWDH02-16-HU-001	1	5.8m		PW-HU-16-DH-2-s1	I	1 "	l	1		
PWDH02=16=H11-002		E 9		PW-H11-16-DH-22	1	1	1	1		1
1 101102-10-10-002		J.ZM		1 11 110-10-DH=Z=SZ		I	-			
PWDH02-16-HU-003	1	5.0m		PW-HU-16-DH-2-s3	l	I		1		
PWDH02-16-HU-004	1	40-		PW-HU-16-DH-2-c4		1				
	Narra Borehole2	-1.0111				I		1		
PWDH02-16-HU-005		4.4m		PW-HU-16-DH-2-s5	L	L				
PWDH02-16-HU-006	1	3.7m		PW-HU-16-DH-2-s6						
DWDHOA 10 111 007	1	0.4				1		1		
PWDH02-16-HU-007		2.4m		PW-HU-16-DH-2-s/						
PWDH02-16-HU-008		1.5m		PW-HU-16-DH-2-s8	l	I		1		
DWDH02-16-DL-001		0.71	20の計会昭	DH02-001		•				
PWDH03-10-RII-001		2./IM	3.0H07#D%##	DH03-001		Чx	•			
PWDH03-16-Rh-002		3.53m	4.0mの札参照	DH03-002						
DWDH03-16-Db-003		4.15-	40~のお参照	DH03-003						
1 101103 10 101 003		4.100	4.011024638/3#	D1103 003						
PWDH03-16-Rh-004		4.45m	4.0mの札参照	DH03-004						
PWDH03-16-Rb-005		5.05m	50mの札参昭	DH03-005						
		0.00								
PWDH03-16-Rh-006		6.06m	6.0mの札参照	DH03-006		●☆	•			
PWDH03-16-Rh-007	Narra Borehole3	7 29m	7.0mの札参照	DH03-007		•	•			
		7.2011	20 04 000	BU 00 000		-	-			
PWDH03-10-Rn-008		7.50m	7.0m07和多照	DH03-008						
PWDH03-16-Rh-009		7.60m	7.0mの札参照	DH03-009		●☆	•			
DWDH03-16-Db-010		7.00-	80~のお参照	DH03-010						
T MDH03 TO TAT OTO		7.9011	0.0110770397#	Dilios dio						
PWDH03-16-Rh-011		8.20m	8.0mの札参照	DH03-011						
PWDH03-16-Rb-012		8.60m	9.0mの札参昭	DH03-012						
		10.00	100 00100	DU00.010				-		
PWDH03-16-Rh-013		10.10m	10.0mの札参照	DH03-013		L				
PWDH03-16-HU-001		10m		PW-HU-16-DH-3-s1						
DWDH02-16-HU-002		0.0		DW-UI-16-DU-22						
PWDH03-16-H0-002		9.8m		PW-HU-10-DH-3-S2						
PWDH03-16-HU-003		8.3m		PW-HU-16-DH-3-s3						
DWDH02-16-HU-004		7.0		DW-HU-16-DH-2-+4						
1 101103 10 110 004		7.311					-			
PWDH03-16-HU-005		7.5m		PW-HU-16-DH-3-s5						
PWDH03-16-HU-006		7.3m		PW-HU-16-DH-3-s6						
		7.0111								
PWDH03-16-HU-007	Narra Boreholo?	/.2m		PW-HU-16-DH-3-s7		I		I		
PWDH03-16-HU-008	Nalla Dolenoleo	6.9m		PW-HU-16-DH-3-s8						
PWDH02-16-HU-000		61		PW-H11-16-DH-20	1	1		1		
PWDH03-10-H0-009		0.IM		PW-H0-10-DH-3-55						
PWDH03-16-HU-010		4.8m		PW-HU-16-DH-3-s10						
PWDH03-16-HU-011	1	4.4m		PW-HU-16-DH-3-s11						
DWD1100 10 111 011	1	0.5				1	1	1		
PWDH03-16-HU-012		3.5m		PW-HU-16-DH-3-s12		I		I		
PWDH03-16-HU-013	1	2.8m		PW-HU-16-DH-3-s13	l	I		1		
PWDH03-16-HU-014	1	10		PW-HU-16-DH-3-c14		1				
	<u> </u>	1.0111			ł	+	<u>⊢</u>	·		
PWDH04-16-Rh-001	1	2.70m	3.0mの利参照	DH04-001	I	•		I		
PWDH04-16-Rh-002	1	3.19m	3.0mの札参照	DH04-002						
PWDH04-16-PL-002		1 94	40…の11 衆昭	DH04-002	1	I		1		
1 10-10-10-10-003	1	4.24m	1.0002763238	0104-003		I				
PWDH04-16-Rh-004		4.72m	4.0mの札参照	DH04-004						
PWDH04-16-Rh-005	1	6.18m	6.0mの札参照	DH04-005						
DWDUIGT 10 CL 100		0.1011	74 ALAM	51101 000	t	t		+	<u> </u>	h
PWDH04-16-Rh-006		6.69m	/.Umの札参照	DH04-006		I		1		
PWDH04-16-Rh-007		7.90m	8.0mの札参照	DH04-007		1				
PWDH04-16-Pb-009	1	9.11-		DH04-008	1	1	1	1		1
1 10-10-10-10-008	Narra Borehole4	0.11m	0.01102/12/2018	0104-000		1				
PWDH04-16-Rh-008B		8.79m	9.0mの札参照	DH04-008B	L	L				
PWDH04-16-Rh-009		9.65m	10.0mの札参照	DH04-009						
DWD404-10 DL 010		0.00	100	DH04 010	1	1		1		
PWDH04-16-Kh-010	1	9.86m	IU.UMUVN 参照	DH04-010				<b>.</b>		
PWDH04-16-Rh-011	1	10.21m	10.0mの札参照	DH04-011. 礫岩混合	l	I.		L		
PWDH04-16-Rb-012	1	11 22~	10.0mの刺 参昭	DH04-012		•				
		11.22111	110 m 1 0 m	51107 012				1		
PWDH04-16-Rh-013		11.71m	11.0mの札参照	DH04-013		●☆				
PWDH04-16-Rh-014		12.94m	12.0mの札参照	DH04-014						
DWDH04=16-DL-015	1	15.05	120m/0 ±1 + # #22	DH04-015	1		-	1		
FWDR04-10-KR-015		10.65m	「このいい人参照	0004-010	<b> </b>	ļ	-	<b> </b>		ļ
PWDH04-16-HU-001		15.8m		PW-HU-16-DH-4-s1	L	L		L		
PWDH04-16-HU-002		12.5m		PW-HU-16-DH-4-s2		1				
DWD1104 10 110 002		14.0		DW 101 10 DW 1 02	1	1		1		
PWDH04-16-HU-003		11.8m		PW-HU-16-DH-4-s3		I		1		
PWDH04-16-HU-004	1	11.3m		PW-HU-16-DH-4-s4	I	I.		I.		
PWDH04-16-HU-005		10.5		PW-HU-16-DH-4-c5		1		1		
		10.000		DW 100 10 011 7 00	-	1		1		-
PWDH04-16-HU-006		10.1m		PW-HU-16-DH-4-s6		1		1		
PWDH04-16-HU-007	Narra Borehole4	9.7m		PW-HU-16-DH-4-s7						
PWDH04-16-HU-008	Hana DUICIIUIC4	8.1m		PW-HU-16-DH-4-s8						
PWDH04-16-HU-000	1	0.1111 0.0		PW-HU-16-DH-40		1		1		
- HDHO-10-009		o.um		111 HO 10-DH-4-53		1				
PWDH04-16-HU-010		6.4m		PW-HU-16-DH-4-s10		I		1		
PWDH04-16-HU-011		4.9m		PW-HU-16-DH-4-s11						
PWDH04-16-HU-012	1	3.2m		PW-HU-16-DH-4-e12						
		3.2111		DW 101 10 D11 4 012		1				
-WDH04-10-HU-013	1	2.2m		FW-NU-10-DH-4-S13	l	I		-		
PWDH04-16-HU-014	1	2.0m		I PW-HU-16-DH-4-s14	1	1	i i	1		

# 表 2.5.5-2 試錐コア試料の状態(分取前試料、乾燥前、乾燥・粗砕後、および、105µm 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 (分取)	乾燥・粗粉砕後	105μm ふるい上	105μm ふるい下
PWDH01-16-Rh-003		Press Press	Pproc 4 Mars		The state of the s
PWDH01-16-Rh-005				Paralla Caracteria	Patri dadi Al'inse de
PWDH01-16-Rh-006			Principal	Persikan Lastropa	Free and A
PWDH01-16-Rh-007			Para la la	- Contraction of the second se	Free datas
PWDH02-16-Rh-001				<b>Exercise</b>	Film call and chi can an Al
PWDH02-16-Rh-003		Pitri E Ban Ban	Print Print	Pittania Listoria	Per se te
PWDH02-16-Rh-005			Prima da las Esta	Penedate Attracta	Part of the second seco
PWDH02-16-Rh-007		riter Maan Eas	Primitise Co	Parameter 4	E HERE
PWDH03-16-Rh-001		PRESERVE AND	Pikina kasa Bati	HE HE	The set of
試料名	分取前試料	乾燥前 (分取)	乾燥・粗粉砕後	105μm ふるい上	105μm ふるい下
PWDH04-16-Rh-001	The second secon		Piters Ba	Prime in a	Final Ref.
PWDH04-16-Rh-012			Pinanet	Promotion Literation	Processing Literature de
PWDH04-16-Rh-013			Pillandel	Parameter Artifice 1	Remarka
PWDH04-16-Rh-015		Prime Litati			Friday Batt

(2) XRD による鉱物相の同定

PWDH01~04の計16試料のX線回折分析による鉱物同定結果を表2.5.5-3に示す。また、 図2.5.5-1~図2.5.5-16にX線回折チャートを示す。

PWDH04-16-Rh-013, -015 以外の 14 試料は、全て礫を取り除きマトリックス部を主に分析 した。この 14 試料全てにスメクタイトのピークが確認された。また他の粘土鉱物としては、 緑泥石のピークが確認され、その他の粘土鉱物のピークは、この不定方位の分析では確認され なかった。その他の鉱物としては、沸石、角閃石、斜方輝石、蛇紋石(Lizardite)、方解石が 共通して確認された。PWDH02-16-Rh-005 と PWDH04-16-Rh-012 では単斜輝石が確認され た。PWDH02-16-Rh-003, -005 では斜長石 (曹長石)のピークが確認された。変質鉱物として、 PWDH01-16-Rh-003, -005, PWDH03-16-Rh-001 では、低温型の C-S-H (14Å トバモライト) のピークが確認され、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。

PWDH04-16-Rh-013 と PWDH04-16-Rh-015 は、基盤層から採取した試料(岩塊)を全て、 粉砕して試料に供している。PWDH04-16-Rh-013 は、主に蛇紋石で構成され、他に炭酸塩鉱 物として菱苦土石(Magnesite)と、鉄鉱物であるクロム鉄鉱(Spinel)のピークが確認され た。PWDH04-16-Rh-015 も主に蛇紋石で構成され、炭酸塩鉱物は同様に菱苦土石(Magnesite) であり、鉄鉱物として磁鉄鉱と硫化鉄のピークが確認された。また、弱いピークではあるが、 低角部にカルシウムアルミケート水和物と思われるピークが確認されている。

なお、スメクタイトと緑泥石の判別及び、スメクタイトの2八面体型・3八面体型の判断については、(3) 定方位法X線回折他による詳細検討において説明する。

	粘土	鉱物	沸石	角閃石	<b>光</b> 理 词	6	蛇紋石	カルシウムシリ ケート水和物	炭酸	塩鉱物	斜長石		鉄鉱物		カルシウムアルミケー ト水和物	珪酸塩鉱物
試料 No.	スメク タイト	録泥石	濁沸石	-	斜方輝石	単斜輝石	リザー ダイト	14Å トバモライト	方解石	菱苦土石	曹長石	磁鉄鉱	クロム鉄鉱	硫化鉄	-	ギロル石
	Smectite	Chlorite	Laumontite	Amphibole	Orthopyroxene	Clinopyroxene	Lizardite	14Å •Tobermorite	Calcite	Magnesite	Albite	Magnetite	Spinel	Iron -Sulfide	Calcium-Aluminum Oxide Hydrate	Gyrolite
PWDH01-16-Rh-003	0	0	Δ	0	Δ	-	0	Δ	Δ	-	-	-	-	_	-	-
PWDH01-16-Rh-005	0	0	Δ	Δ	Δ	-	0	Δ	Δ	-	-	-	-	_	-	-
PWDH01-16-Rh-006	0	0	Δ	0	Δ	_	0	_	Δ	_	-	_	_	_	_	-
PWDH01-16-Rh-007	0	0	Δ	0	0	-	0	_	Δ	-	-	-	-	_	-	-
PWDH02-16-Rh-001	0	0	Δ	Δ	Δ	-	0	-	0	-	-	-	-	-	-	-
PWDH02-16-Rh-003	0	0	Δ	0	Δ	_	Δ	_	Δ	_	Δ	-	-	_	-	-
PWDH02-16-Rh-005	0	0		0	0	Δ	Δ	_	Δ	-	0	-	-	_	-	-
PWDH02-16-Rh-007	0	0	Δ	0	0	-	0	-	Δ	-	-	-	-	_	-	-
PWDH03-16-Rh-001	Δ	0	Δ	0	Δ	_	0	Δ	Δ	_	-	_	_	_	_	-
PWDH03-16-Rh-006	Δ	0		0	0	-	0	-	Δ	-	-	-	-	_	-	0
PWDH03-16-Rh-007	0	0	Δ	0	0	-	0	-	Δ	-	-	-	-	-	-	-
PWDH03-16-Rh-009	0	0	Δ	0	0	_	0	_	_	_	-	_	_	_	-	-
PWDH04-16-Rh-001	0	0		0	0	-	0	_	0	-	-	-	-	_	-	-
PWDH04-16-Rh-012	0	0	Δ	0	0	Δ	0	-	0	-	-	-	-	_	-	-
PWDH04-16-Rh-013	-	_	-	-	-	-	0	-	_	-	-	Δ	0	_	-	-
PWDH04-16-Rh-015	_	_	_	_	_	_	0	_	_	0	-	0	_	0	Δ	-

## 表 2.5.5-3 試錐コア試料の X線回折による鉱物同定結果





図 2.5.5-1 PWDH01-16-Rh-003のXRD チャート











図 2.5.5-6 PWDH02-16-Rh-003のXRD チャート







図 2.5.5-8 PWDH02-16-Rh-007のXRD チャート



図 2.5.5-9 PWDH03-16-Rh-001のXRD チャート







図 2.5.5-11 PWDH03-16-Rh-007のXRD チャート



図 2.5.5-12 PWDH03-16-Rh-009のXRD チャート







図 2.5.5-14 PWDH04-16-Rh-012のXRD チャート



図 2.5.5-15 PWDH04-16-Rh-013の XRD チャート



図 2.5.5-16 PWDH04-16-Rh-015のXRD チャート

- (3) 定方位法 X 線回折他による詳細検討
  - 検査方法

試錐コア試料及びトレンチ試料の不定方位 X 線回折分析において、低角部にスメクタイト と考えられるピークが確認された。また、他の粘土鉱物として緑泥石も確認されているが、 低角部において、スメクタイトと緑泥石は、この条件では、ピーク位置を明確に判断するこ とができない。

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やノントロナイトなどの2人面体型のものか、サポナイトなどの3人面体型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 060 面の d 値を調べる。

2) エチレングリコール処理

試錐コア試料の PWDH010-16-Rh-005,-006、PWDH02-16-Rh-003、PWDH03-16-Rh-001, -006,-009、PWDH04-16-Rh-012 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処理して XRD 測定した結果の 001 面ピーク位置及びd値を表 2.5.5-4に、X線回折プロファイルを図 2.5.5-17~図 2.5.5-23 に示す。これらの測定結果では、ピークシフト量に大小があるものの、いずれもピークのシ フトが見られたので、これらの試料はスメクタイトを含むと考えられる。なお、一般的にス メクタイトはエチレングリコール処理により約2Å膨潤(低角側にピークがシフト)し、緑 泥石は変化がない。

#### 3) 060 面の観察

2 八面体シートの場合、060 面の d 値は 1.49~1.52 Å であり、CuKa 線の場合、その回折 によるピーク位置(20)は 61°~62°程度である。さらにモンモリロナイト・バイデライト は 060 面の d 値が 1.49~1.50 Å であり、ノントロナイトは 060 面の d 値が 1.51~1.52 Å で区 別される。3 八面体シートの場合は 060 面の d 値は 1.52~1.54 Å であり、CuKa 線の場合、 その回折によるピーク位置(20)は 60°程度である。

試錐コア試料の PWDH01-16-Rh-003, -005 は、60°程度に特徴的なピークを有しており、 3 八面体型スメクタイトのサポナイトであると示唆された。PWDH01-16-Rh-006, -007 はピ ークが不明瞭であるため、判定ができなかった。PWDH02-16-Rh-001 は 60°程度に特徴的 なピークを有しており、3 八面体型スメクタイトのサポナイト、PWDH02-16-Rh-003, -005, -007 は 61°付近に特徴的なピークが確認された。これより、2 八面体型のノントロナイトで あると示唆された。PWDH03-16-Rh-001, -006 は 60°程度に特徴的なピークを有しており、 3 八面体型スメクタイトのサポナイトであると示唆された。PWDH03-16-Rh-007, -009 はピ ークが不明瞭であるため、判定ができなかった。PWDH04-16-Rh-001 は 60°程度に特徴的 なピークを有しており、3 八面体型スメクタイトのサポナイトであると示唆された。-012 は ピークが不明瞭であるため、判定ができなかった。

	定方	「位	EG タ	心理後	ピークシフト		
No.	$2 \  heta$	d (Å)	$2 \  heta$	d (Å)	d (Å)		
PWDH01-16-Rh-005	$6.1^{\circ}$	14.6	$5.4^{\circ}$	16.3	1.7		
PWDH01-16-Rh-006	$5.8^\circ$	15.2	$5.1^{\circ}$	17.3	2.1		
PWDH02-16-Rh-003	$5.8^\circ$	15.3	$5.2^{\circ}$	17.0	1.7		
PWDH03-16-Rh-001	$6.0^{\circ}$	14.8	$5.7^{\circ}$	15.6	0.8		
PWDH03-16-Rh-006	$5.8^{\circ}$	15.4	$5.4^{\circ}$	16.5	1.1		
PWDH03-16-Rh-009	$5.8^{\circ}$	15.4	$5.2^{\circ}$	17.1	1.7		
PWDH04-16-Rh-012	$5.8^{\circ}$	15.2	$5.2^{\circ}$	16.9	1.7		

表 2.5.5-4 定方位およびエチレングリコール処理の 001 面測定結果



図 2.5.5-17 PWDH01-16-Rh-005 の定方位測定および EG 処理試料の定方位測定の結果



図 2.5.5-18 PWDH01-16-Rh-006の定方位測定および EG 処理試料の定方位測定の結果



図 2.5.5-19 PWDH02-16-Rh-003の定方位測定および EG 処理試料の定方位測定の結果







図 2.5.5-21 PWDH03-16-Rh-006の定方位測定および EG 処理試料の定方位測定の結果







図 2.5.5-23 PWDH04-16-Rh-012 の定方位測定および EG 処理試料の定方位測定の結果

(4) XRF(蛍光 X 線分析)による全岩化学分析

試錐コア試料の元素定量結果を表 2.5.5・5~表 2.5.5・8 に示す。なお、表の空欄は、当該元素 が検出されないことを示し、結果は酸化物表示で CO₂を含む結果と CO₂の含有率を控除して 百分率を求めたものをそれぞれ記載している。また、測定結果を棒グラフにプロットしたもの を図 2.5.5・24~図 2.5.5・25 に示す。

DH02 孔 (トレンチ 5 の近傍)、DH01 孔、DH03 孔、DH04 孔に比べ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> が多く、MgO が少ない明確な傾向示す。

表 2.5.5-5	PWDH01	と PWDH02 の	XRF 分析によ	る定量結果	(酸化物表記、	CO <sub>2</sub> 含む)
-----------	--------	------------	----------	-------	---------	---------------------

試料名		PWDH0	1-16-Rh			PWDH0	2-16-Rh	
(%)	-003	-005	-006	-007	-001	-003	-005	-007
CO <sub>2</sub>	15.6544	14.0408	13.7288	13.2148	15.8941	11.6364	12.0155	12.4714
CaO	11.3060	7.7770	3.4730	3.4937	11.3202	5.3793	1.9927	0.6943
SiO <sub>2</sub>	35.5048	38.0691	42.9095	43.0775	32.3270	51.4734	52.8611	44.5610
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21.1819	18.8612	15.5619	15.6779	22.0297	14.6995	12.0687	11.9220
MgO	12.4812	18.0342	20.4322	20.5270	11.3832	7.8846	8.6612	25.7935
$Al_2O_3$	1.6306	1.0817	1.6385	1.7403	4.7854	6.9394	10.8099	2.8257
$Cr_2O_3$	0.9445	0.9553	1.1403	1.1531	0.8484	0.6164	0.3459	0.4498
NiO	0.8016	0.5933	0.6352	0.6579	0.7462	0.4879	0.3663	0.5339
$SO_3$	0.1258	0.0836	0.0384	0.0360	0.1886	0.0332	0.0137	0.0083
MnO	0.1097	0.2812	0.1056	0.1062	0.1125	0.1114	0.2153	0.4243
Na <sub>2</sub> O	0.0510	0.0596	0.0948	0.0947	0.0950	0.3266	0.3456	0.1288
TiO <sub>2</sub>	0.0621	0.0318	0.0463	0.0473	0.1132	0.1223	0.1385	0.0402
$Co_2O_3$	0.0840	0.0722	0.0612	0.0617	0.0754	0.0554	0.0465	0.0492
$K_2O$	0.0106	0.0132	0.0633	0.0616	0.0159	0.1156	0.0428	0.0147
ZnO	0.0197	0.0151	0.0164	0.0173	0.0152	0.0289	0.0104	0.0139
SrO	0.0054	0.0071	0.0091	0.0093	0.0112	0.0155	0.0041	0.0016
$V_2O_5$	0.0139	0.0110	0.0142	0.0125	0.0198	0.0175	0.0190	0.0107
CuO	0.0048	0.0055	0.0035	0.0033	0.0097	0.0368	0.0208	0.0138
Cl	0.0058	0.0052	0.0093	0.0054	0.0066	0.0154	0.0049	0.0150
In <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	0.0160	-	-	-	-	0.0162
$Sc_2O_3$	-	-	-	-	-	-	0.0140	0.0108
Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	-	0.0016	-

	表 2.5.5-6	PWDH03 &	: PWDH04の	XRF 分析によ	る定量結果	(酸化物表記、	CO2含t
--	-----------	----------	-----------	----------	-------	---------	-------

試料名		PWDH0	3-16-Rh			PWDH	04-16-Rh	
(%)	-001	-006	-007	-009	-001	-012	-013	-015
$CO_2$	16.2377	12.3200	12.7780	11.3598	22.8573	13.5250	7.6600	9.8901
CaO	5.1010	3.3118	2.3595	2.0194	13.6680	5.9372	0.2014	0.0695
SiO <sub>2</sub>	31.4339	37.9647	46.0166	47.6619	25.5832	36.7433	41.9097	37.5727
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23.1690	11.6537	14.8293	15.4198	17.8076	13.4456	8.1034	8.8563
MgO	18.4790	32.2563	20.5482	20.3353	14.3392	26.0860	40.7419	40.6232
$Al_2O_3$	2.6486	0.8135	1.4443	1.2451	2.9737	2.8598	0.4318	0.0907
$Cr_2O_3$	1.2752	0.7086	0.6564	0.6899	1.4990	0.4426	0.3922	0.3121
NiO	0.9847	0.5323	0.5100	0.5182	0.6054	0.3267	0.2848	0.3030
SO <sub>3</sub>	0.2130	0.0316	0.1872	0.0296	0.1772	0.0220	0.0312	2.1134
MnO	0.0916	0.1665	0.1503	0.1525	0.0794	0.2132	0.1318	0.0644
Na <sub>2</sub> O	0.0915	0.0966	0.2583	0.3078	0.1014	0.1627	0.0392	0.0101
TiO <sub>2</sub>	0.0890	0.0262	0.0569	0.0606	0.1337	0.0616	0.0069	0.0075
$Co_2O_3$	0.0914	0.0488	0.0579	0.0561	0.0805	0.0450	0.0381	0.0366
K <sub>2</sub> O	0.0092	0.0197	0.1007	0.0834	0.0078	0.0356	-	-
ZnO	0.0206	0.0107	0.0125	0.0140	0.0181	0.0181	0.0060	0.0080
SrO	0.0036	0.0050	0.0068	0.0064	0.0126	0.0081	-	-
$V_2O_5$	0.0206	0.0099	0.0120	0.0109	0.0253	0.0124	0.0048	0.0053
CuO	0.0046	0.0032	0.0045	0.0091	0.0048	0.0214	0.0017	0.0031
Cl	0.0105	0.0196	0.0089	0.0054	0.0221	0.0136	0.0150	0.0340
$In_2O_3$	0.0231	-	-	-	-	0.0183	-	-
$Sc_2O_3$	-	-	-	0.0132	-	-	-	-
Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-

試料名		PWDH0	1-16-Rh			PWDH	02-16-Rh	
(%)	-003	-005	-006	-007	-001	-003	-005	-007
CaO	13.5221	9.1802	4.1192	4.1152	13.5566	6.2141	2.3298	0.8190
SiO <sub>2</sub>	41.1699	43.6684	49.3441	49.2624	37.5987	57.6805	59.8091	50.9944
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	26.4645	23.1088	19.0638	19.0473	27.5731	17.4372	14.4297	14.3856
MgO	14.1678	20.2025	22.8514	22.8539	12.9356	8.6439	9.5136	28.5049
$Al_2O_3$	1.8812	1.2356	1.8750	1.9807	5.5237	7.6993	12.0502	3.2116
$Cr_2O_3$	1.1561	1.1479	1.3690	1.3741	1.0398	0.7209	0.4077	0.5338
NiO	1.0367	0.7512	0.8050	0.8256	0.9673	0.5943	0.4507	0.6654
SO <sub>3</sub>	0.1492	0.0981	0.0454	0.0422	0.2240	0.0382	0.0160	0.0098
MnO	0.1360	0.3420	0.1283	0.1281	0.1397	0.1315	0.2561	0.5090
Na <sub>2</sub> O	0.0575	0.0663	0.1052	0.1046	0.1071	0.3557	0.3769	0.1412
TiO <sub>2</sub>	0.0758	0.0381	0.0555	0.0562	0.1384	0.1427	0.1628	0.0476
$Co_2O_3$	0.1052	0.0887	0.0751	0.0751	0.0945	0.0658	0.0557	0.0595
K <sub>2</sub> O	0.0126	0.0155	0.0749	0.0724	0.0190	0.1332	0.0499	0.0173
ZnO	0.0255	0.0192	0.0208	0.0218	0.0197	0.0353	0.0129	0.0174
SrO	0.0070	0.0091	0.0116	0.0118	0.0146	0.0190	0.0051	0.0020
$V_2O_5$	0.0169	0.0132	0.0170	0.0149	0.0242	0.0205	0.0224	0.0127
CuO	0.0062	0.0070	0.0044	0.0042	0.0125	0.0448	0.0256	0.0172
Cl	0.0069	0.0061	0.0109	0.0063	0.0078	0.0177	0.0057	0.0177
In <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	0.0202	-	-	-	-	0.0202
$Sc_2O_3$	-	-	-	-	-	-	0.0164	0.0128
Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	-	0.0020	-

表 2.5.5-7 PWDH01 と PWDH02 の XRF 分析による定量結果(酸化物表記、CO2含まず)

試料名		PWDH0	3-16-Rh			PWDH	04-16-Rh	
(%)	-001	-006	-007	-009	-001	-012	-013	-015
CaO	6.1421	3.8954	2.7747	2.3292	17.9094	7.0551	0.2245	0.0799
SiO <sub>2</sub>	36.8729	43.4287	52.4737	53.5041	32.0772	42.3774	45.8123	42.1631
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	29.1145	14.0838	17.9211	18.2146	25.0789	16.5157	9.1332	10.3384
MgO	21.1153	35.6431	22.7804	22.2763	17.3979	29.0705	43.2884	43.9757
$Al_2O_3$	3.0907	0.9271	1.6379	1.3911	3.7046	3.2775	0.4707	0.1014
$Cr_2O_3$	1.5608	0.8428	0.7790	0.8017	2.0492	0.5347	0.4384	0.3602
NiO	1.2879	0.6629	0.6367	0.6302	0.8949	0.4144	0.3267	0.3624
SO <sub>3</sub>	0.2551	0.0370	0.2194	0.0340	0.2285	0.0261	0.0347	2.4232
MnO	0.1139	0.2000	0.1804	0.1790	0.1104	0.2603	0.1481	0.0749
Na <sub>2</sub> O	0.1036	0.1059	0.2841	0.3349	0.1217	0.1798	0.0414	0.0109
TiO <sub>2</sub>	0.1086	0.0311	0.0673	0.0703	0.1819	0.0742	0.0077	0.0086
$Co_2O_3$	0.1151	0.0591	0.0701	0.0664	0.1136	0.0554	0.0430	0.0427
K <sub>2</sub> O	0.0110	0.0232	0.1181	0.0960	0.0102	0.0422	-	-
ZnO	0.0270	0.0134	0.0156	0.0170	0.0268	0.0231	0.0069	0.0096
SrO	0.0047	0.0062	0.0086	0.0078	0.0188	0.0104	-	-
$V_2O_5$	0.0252	0.0117	0.0142	0.0126	0.0345	0.0149	0.0053	0.0061
CuO	0.0061	0.0040	0.0057	0.0111	0.0070	0.0272	0.0019	0.0038
Cl	0.0126	0.0230	0.0104	0.0062	0.0285	0.0160	0.0167	0.0390
In <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.0301	-	-	-	-	0.0231	-	-
$Sc_2O_3$	-	-	-	0.0153	-	-	-	-
Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-

表 2.5.5-8 PWDH03 と PWDH04 の XRF 分析による定量結果(酸化物表記、CO2含まず)



図 2.5.5-24 試錐の各試料の XRF 分析結果(酸化物表記、CO2を含む)



図 2.5.5-25 試錐の各試料の XRF 分析結果(酸化物表記、CO2 を含まず)

ここでは、構造試錐4孔のコア観察結果および、砕屑性堆積物の鉱物学的特性・岩石化学特性 について説明する。Narra 地区(Narra3地点周辺)の地質断面概念図と試錐孔の位置、掘削深度 および孔内湧水の地球化学的特性を分析するための採水地点(深度)を図2.5.6-1に示す。

これらの構造試錐調査から、パラワンオフィオライトの基盤深度は現地形、特に、古河川系に 規制された地形面起伏の谷様窪み(凹部)に支配されている。つまり、現地形の高まり(凸部)で は基盤深度が深くなっている。これらの基盤深度の大きなところでは砕屑性堆積物が厚く堆積し、 下部層の層厚が厚く、局所的ではあるが黒色の粘土化が顕著である。これは厚い砕屑性堆積物自 身の荷重による圧密作用により緩やかではあるが岩石化が進展していく堆積環境での間隙水との 変質反応などによる粘土化が考えられる。この堆積環境プロセスでは、恐らく続成作用を生起さ せるような地球化学的環境が提供されている可能性が期待されそうである。

また、炭酸塩沈殿物(上部層)や砕屑性堆積物に含有している木幹の埋没物質は、一般的な傾向として、上部層ではその大きさが顕著であるが、下部層ではその大きさが小さく、その数も激少する。



図 2.5.6-1 Narra 地区の地質断面と試錐孔の位置、掘削深度、採水深度の概念図

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

今年度のトレンチ調査では、平成27年度[1]に実施した、トレンチ2サイトの黒色から暗緑 色の砕屑性堆積物(下部層)の上位部・砂質の砕屑性堆積物中に不規則でパッチ状に挟在する 泥質な砕屑性堆積物と、下位部の粘土質(泥質)な砕屑性堆積物からのスメクタイト(サポナ イト)の同定、トレンチ内壁面からのアルカリ湧水(pH11.4)、そしてスメクタイトと共生する C-H-S 準安定性固相(アルカリ性領域)の存在が確認されたために、今年度は、これらの2層 準の泥質(粘土質)と砂質の砕屑物堆積物を調査対象層として調査・解析することにした。

最初に、現在湧水しているアルカリ泉源位置、そのアルカリ湧水の流動系(流向・流量)・ 地球化学的特性(物理化学パラメーターの一部である pH、Eh、水温の変化)と地形的関連性 を考察した。合わせて、調査対象層の分布(層準・層厚)、岩相・岩質・堆積環境とパラワン オフィオライトの基盤深度を把握するために実施した構造試錐データとの総合解析に基づき、 トレンチサイトを選定した。

具体的には、Narra 地区(Narra3 地点周辺)は、扇状地様の地形学的特徴とトレンチ2の 模式柱状図から判断して、構成地層、特に下部層を構成する粘土質の砕屑性堆積物の分布状況 とその走行・傾斜方向および、基盤深度により、調査対象層の走行方向を横断する断面で、図 2.6.1-1 示すトレンチサイトを選定した。そのトレンチでカバーした範囲は、地層走行の沿っ た北西方向に約 120m 程度である。掘削したトレンチは(埋め戻してある)トレンチ2を基点 (中心点)として、3サイト(トレンチ3、トレンチ4、トレンチ5)である。



図 2.6.1-1 Narra 地区調査エリア

- (2) トレンチ掘削
  - 1) トレンチ3

バックフォーにより、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3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-4.0m まで掘削した(図 2.6.1-2)。掘削後にトレンチの位置(GPS で 計測した座標)の測定、トレンチの大きさ・深度の計測を実施した。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3調査実施工程

	日時	記事
6/2	9:30	トレンチ調査位置の選定(N9.203778°,E118.281361°)
	9:30~12:00	トレンチ掘削
6/4	9:30~15:00	トレンチ調査 (壁面観察、水・岩石試料採取)
6/5	12:00~14:30	コアドリルによる岩石試料採取



図 2.6.1-2 トレンチ3掘削状況

2) トレンチ4

トレンチ3と同様に、アルカリ河川からの流入防止のためのドレン掘削した後に、適宜ポ ンプでの浸出水の排水を行いながら、GL-4.2m まで深度まで掘削した(図 2.6.1-3)。表 2.6.1-2にトレンチ4での作業工程を示す。

### 表 2.6.1-2 トレンチ4調査実施工程

日時		記事
6/2	13:15	トレンチ調査位置の選定(N9.203583°,E118.281083°)
	$13:15 \sim 15:00$	トレンチ掘削
6/3	11:00~13:00	トレンチ内たまり水排水
	$13:00 \sim 16:00$	トレンチ調査(壁面観察、水・岩石試料採取)



図 2.6.1-3 トレンチ4 掘削状況

3) トレンチ5

当初、図 2.6.1-1 の×の位置を選定し、掘削を開始したが、予想よりも炭酸塩が厚くため に砕屑性堆積物までの深度がかなり深いことに加え、トレンチの炭酸塩壁が軟弱で崩壊の恐 れがでたため、これを放棄し、DH02 孔近傍の地点を再選定して、掘削を開始した。トレン チ3、4と同様に、適宜ポンプでの浸出水の排水を行いながら、GL-3.2m まで深度まで掘削 した(図 2.6.1-4)。表 2.6.1-3 にトレンチ5 での作業工程を示す。

表	2.6.1 - 3	トレンチ5調査実施工業	程
---	-----------	-------------	---

	日時	記事
6/7	14:00	トレンチ調査位置の選定(N9.203781°,E118.280658°付近)
	14:00~14:30	トレンチ掘削(軟弱地盤で崩壊の恐れがあるため放棄)
	14:50	トレンチ調査位置の再選定(N9.203500°,E118.280944°付近)
	$14:50 \sim 1600$	トレンチ掘削
6/8	$\sim 9:00$	トレンチ内たまり水排水
	9:00~14:00	トレンチ調査(壁面観察、水・岩石試料採取)
	14:00~14:40	コアドリルによる岩石試料採取



図 2.6.1-4 トレンチ5 掘削状況

2.6.2 壁面観察とサンプリング

(1) 概要

各トレンチにおいて、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~図 2.6.1-3)、粘土質の砕屑性堆積物の岩相、岩質、堆積構造、変質特性等について観察した。

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、トレンチ壁面からハンドピック及びコアサ ンプラー(形状を崩さずにサンプリングするために金属容器(壁面に差し込んで試料を採取す る))で採取した。また、砕屑性堆積物については、トレンチ3及びトレンチ4において、コ アドリルによる大型コア試料も採取した。さらに、各トレンチで、年代測定用の貝類、木根、 炭酸塩試料、土壌も採取した。

構造試錐位置(4 地点)とトレンチサイト(3 サイト:トレンチ3、4、5)の位置関係および、アルカリ湧水(アルカリ泉源・トレンチ内壁面)・クリーク・滝などからの地球化学的特性(水質・物理化学的パラメーター)の解析図として図 2.6.2-4 に示す。

次に、今年度掘削した各トレンチについて、トレンチ壁面の露頭観察スケッチ(図 2.6.2-7、 図 2.6.2-10、図 2.6.2-13 による地質学的特徴について報告する。また、XRD による鉱物同定、 XRF によるバルク分析と EPMA による詳細な鉱物試験のための岩石試料採取位置、湧水採水 位置、年代測定用試料採取位置を合わせて記載する。



図 2.6.2-1 トレンチ3壁面観察(右)、コアサンプリング(右)



図 2.6.2-2 トレンチ4壁面観察(右)、サンプリング(右)



図 2.6.2-3 トレンチ5壁面観察(右)、サンプリング(右)



図 2.6.2-4 Narra 地区の地質断面概念図とアルカリ湧水・クリーク・トレンチ内湧水・試錐孔内 水の地球化学的特性

露頭観察の壁面(西壁<幅:約8m、深度:約4.5m>. 南壁<幅:約4m、深度:約4.5m>、北 壁<幅:約1m、深度:約5m>)

図 2.6.1-1 に示すように、トレンチ3は、トレンチ2(平成 27 年度[1]実施)と試錐孔(DH04)

<sup>(2)</sup> トレンチ3

の中間位置にある。

図 2.6.2-5、図 2.6.2-6 にトレンチ3の壁面写真とサンプリング位置を示す。鉱物試験のための岩石試料とアルカリ湧水は、調査対象層の走行方向に伸長する西壁断面露頭から採取した。



図 2.6.2-5 トレンチ3の壁面と(Rh)試料採取位置



図 2.6.2-6 トレンチ3の壁面と(HU)試料採取位置

図 2.6.2-6 に示すように(凡例は図 2.6.2-8 参照)、砕屑性堆積物の上部層は、殆どが石灰華 起源の炭酸塩沈殿物で構成され、その上位はルーズで軟弱であるが、下位は塊状で固結化が進 行しているように観察される。これらの沈殿物に挟まれた比較的下位に、層厚は数十 cm 程度 の葉理構造を示す炭酸塩質堆積物が挟在する。これらの葉理構造の炭酸塩質堆積物と塊状の炭酸塩沈殿物が、不透水層としての遮水効果の役割を示している。それはすべてのトレンチ壁面からのアルカリ湧水はこの不透水層の下位に位置しているからである。このことから、アルカリ泉源からのアルカリ地下水は、これらの炭酸塩沈殿物の伏流水として、降雨水との混和もせずに流下していることが示唆される。

下部層は、黒色(還元環境)の砕屑性堆積物で、全体的には上位は砂質で、下位は泥質である。 これらの堆積物にはパラワンオフィオライト起源の巨礫(粒径:256mm以上)から中礫(粒 径:4~64mm)の岩石片(Fragments)が含有し、局所的ではあるが、鉱物粒サイズのものも観 察される。但し、これらの岩石片と鉱物は、それらの岩種/鉱物種・粒度・形状・比重などに 応じた分別や集積が観察されるような淘汰は観察されない不規則な産状を示している。このこ とから、これらの砕屑性堆積物は、現地性で古河川系から浅海性域(沿岸域)での堆積環境が 示唆される。

鉱物学的試験のための調査対象層は、下部層・上位の黒色〜暗緑色の細粒砂質砕屑堆積物中 に不規則でパッチ状の泥質な砕屑性堆積物と、トレンチ床部周辺に連続性のある下位の黒色か ら暗緑色の粘土質(泥質)砕屑性堆積物である。但し、トレンチ2で肉眼鑑定可能であったア ルカリ環境の指示固相(不安定鉱物)である C-H-S 固相の肉眼観察は出来なかった。

埋没木根の分布は、一般的に、上部層で顕著であるが、下部層では少なく、その大きさも小 さくなる傾向を示す。また、現生の貝(カワニナ)遺骸は、殆どが上部層に多く観察される。



図 2.6.2-7 トレンチ3 露頭観察スケッチ

	1	Alluvium Unconsolidated deposits	
Clastic	Carbonate Deposits and Sediments derived from Travertine		
Sediments	2A 🕆 🯒	Pale-brownish and/or pale-grayish and Loosed Carbonate deposits	
	2В	Pale-brownish laminated Carbonate Sediments	
	2C	Dark and pale-brownish Massive Carbonate Sediments	
	Upper Zone (Sandy)		
	3A	Blackish coarse-grained Sandy Clastic Sediments	
	3B	Blackish Sandy Clastic sediments with Patchy clayey matrix including Boulder and Pebble of Palawan Ophiolite	
	Lower Zone (Muddy)		
	4A 44	Blackish Sandy and Muddy Clastic sediments including granule of Palawan Ophiolite	
	4B	Blackish and fine-grained Sandy Clastic sediments and Muddy clastic sediments	
Basement	÷ ÷ ÷	Palawan Ophiolite (Ultramafics : Harzburgite, Peridotite, gabbro)	
Legend	(3B)	Poorly sorted Intraformational Polygenetic Conglomerate (Polygenetic and Conglomeratic Sandy Sediments)	
		Organic Matter, likely Buried-Roots	
	Ø (1)	Occurrence of Living Shells	

Summary of Lithlogical Units and Legend in Trench at Narra site

図 2.6.2-8 トレンチ露頭観察スケッチの凡例

(3) トレンチ4

露頭観察の壁面(西壁<幅:約8m、深度:約4.2m>、南壁<幅:約3.5m、深度:約4.5m>、 北壁<幅:約0,5m、深度:約4.2m>)

図 2.6.1-1 に示すように、トレンチ4は、トレンチ2(平成 27 年度[1]実施)に近接し、約 5m 北東にあって、地形的には扇状地様平坦地東方縁の高まり(凸部)に位置し、アルカリ泉 源から流下するクリーク流路にも近く、トレンチ3とトレンチ5の中間距離にある。

図 2.6.2-8、図 2.6.2-9 にトレンチ4の壁面写真とサンプリング位置を示す。鉱物試験のための岩石試料採取とアルカリ湧水の採水は、調査対象層の走行方向に伸長する西壁断面の露頭にする。



図 2.6.2-9 トレンチ4の壁面と(Rh)試料採取位置



図 2.6.2-10 トレンチ4の壁面と(HU)試料採取位置

図 2.6.2-10 に示すように(凡例は図 2.6.2-8 参照)、砕屑性堆積物は、トレンチ2、3 同様 に、その上部層が主に石灰華起源の炭酸塩沈殿物・炭酸塩堆積物から構成されているが、下位 はトレンチ3で観察された葉理構造を持つ層厚数+ cm 程度の塊状炭酸塩堆積物と、塊状の炭 酸塩堆積物で構成されている。これらの堆積物は、トレンチ2、3 同様に、不透水層としての 遮水効果の役割を示している。

一方、下部層は黒色の砕屑性堆積物で、トレンチ2、3同様にやはり、上位は砂質で下位は 泥質である。但し、下部層の層厚変化が顕著である。特徴的であるが、黒色のパッチ状粘土質 泥岩を挟在する砂質砕屑性堆積物に、パラワンオフィオライト起源の多源礫で特徴づけられる 層内礫岩が、局所的な凹部に不規則に分布し、その層厚は約 1.5m 程度である。これらを構成 する礫岩は、扁平な形状で、礫径(大きさ)は人頭大から中礫程度で、礫自身の空間分布に規 則性がなくルーズに散在して沈積し、全体的にも淘汰作用が観察されない。これらの形状や分 布などから、古河川系チャンネル凹部か、沿岸域の窪んだ底部にみられる氾濫性堆積物として 堆積したものと解釈できる。

鉱物学的調査のための調査対象層である黒色から暗緑色の細粒砂岩質砕屑性堆積物や泥質 砕質性堆積物はトレンチ壁面の下位と床面に卓越している。また、下部層を構成する砕屑性堆 積物中には、トレンチ2、3同様にパラワンオフィオライトの超苦鉄質岩の亜礫状の岩石片(直 径 1cm 以下で、一部蛇紋岩が含まれる)や鉱物粒が淘汰されず不規則に産状している。

さらに、埋没木根、現生の貝遺骸の産状特性はトレンチ2、3同様で、C-S-H 不安定固相の肉眼観察はできなかった。



図 2.6.2-11 トレンチ4 露頭観察スケッチ

(4) トレンチ5

露頭観察の壁面(西壁<幅:約 17m、深度:約 3.2m>、南壁<幅:約 5m、深度:約 3.2m>、 北壁<幅:約 2m、深度:約 1m>)

図 2.6.1-1 に示すように、トレンチ5は、Narra 地区の南西端に位置し、簡易構造試錐孔 (DH02)の近傍にある。地形学的には、扇状地様平坦部の南西に位置し、古河川系の流路を形成したような浅い凹部(谷様地形)の下流部に位置している。

図 2.6.2-11、図 2.6.2-12 にトレンチ5の壁面写真とサンプリング位置を示す。鉱物試験の ための岩石試料採取とアルカリ湧水の採水は、調査対象地層の側方方向に伸長する南壁断面の 露頭にする。


図 2.6.2-12 トレンチ5の壁面と(Rh)試料採取位置



図 2.6.2-13 トレンチ5の壁面と(HU)試料採取位置

図 2.6.2-13 に示すように(凡例は図 2.6.2-8 参照)、砕屑性堆積物の上部層は、石灰華起源の炭酸塩沈殿物で構成されているが、トレンチ3、4 で観察された静穏な定常流のもとでの堆 積環境で形成された葉理構造や、固結化の進行過程を示すような塊状の炭酸塩堆積物は欠如し ている。

一方、下部層は、黒色から暗緑色の砕屑性堆積物で、他のトレンチで観察されるように、上 位部は砂質で、下位部は泥質である。ただ、上位部の細粒砂質砕屑性堆積物中にトレンチ4で 観察された分布・性状・礫種とその形状などが酷似する層内礫岩が下位の凹部に集積している。 この形状などから考察するとその形成過程は、トレンチ4の形成過程と同様であるものと解釈 できる。

埋没木根の産状は、上部層と下部層の上位部に観察されるが、他のトレンチと同様に、下方 ほど減少する傾向にある。さらに現生の貝の遺骸は、殆どが上部層に観察される。また、C-H -Sの不安定固相の肉眼観察はできなかった。



図 2.6.2-14 トレンチ5 露頭観察スケッチ

Narra3-1 地点のトレンチから採取した岩石試料とその分析項目を表 2.6.3-1、表 2.6.3-2 に、 に示す。これら試料の不定方位法の XRD(表 2.6.3-1の XRD 欄の☆印がついている一部試料は 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。

Sample Labelling	Lacation	Description		Remarks	C14	XRD	XRF	ICP-MS	EPMA, µ -XRD	薄片顕微鏡
PWT03-16-Rh-001				トレンチ03-001, クーラーキャップ						
PWT03-16-Rh-002				トレンチ03-002, クーラーキャップ						
PWT03-16-Rh-003				トレンチ03-003、クーラーキャップ		•	•			
PWT03-16-Rh-004		4.1m		トレンチ03-004		●☆	•		•	
PWT03-16-Rh-005	1	3.8m		トレンチ03-005		•	•			
PWT03-16-Rh-006		3.4m		トレンチ03-006		ě	ě			
PWT03-16-Rh-007		3.2m		トレンチ03-007		-	-	•		
PWT03-16-Rh-008		1	<b>弾湿入</b>	トレンチ03-008						
PWT03-16-Rb-009	1	<u> </u>		トレンチ03-009						
PWT03-16-Rb-010		1 t		トレンチ03-010		•	•			
PWT03-16-Rh-011		上部		►L::/=03=011			•			
PWT03-16-Rh-012		上印		L 3 (#02-012						
DWT02-16-Dh-012		西即	1進3月 3	LUX = 02-012		•	•			
PWT03-10-RH-013	Name Transka		10000000000000000000000000000000000000	1-007 03-013						
PW103-16-Rh-014	Narra Trench3	<u> </u>	(床)(八)		-					
PW103-16-Rh-013			カワニア 貝殻	FDJ703-015						
PW103-16-Rh-016			不根	トレンチ03-016	•					
PW103-16-Rh-017				トレンナ03-017、 微化石鑑定用						
PWT03-16-Rh-018			礫層(Boulder)	PWT03-16-Rh-C4						
PWT03-16-Rh-019			礫層(Cobble)	PWT03-16-Rh-C5			•	ļ		
PWT03-16-C1-001		底部		トレンチ03-C1-001						
PWT03-16-C1-002		"		トレンチ03-C1-002		●☆	•			
PWT03-16-C1-003		"		トレンチ03-C1-003						
PWT03-16-C1-004		"		トレンチ03-C1-004		●☆	•		•	•
PWT03-16-C1-005		"		トレンチ03-C1-005						
PWT03-16-C2-001		中部		トレンチ03-C2-001						•
PWT03-16-C2-002		"		トレンチ03-C2-002		•	•		•	
PWT03-16-C3-001		上部		トレンチ03-C3-001						
PWT04-16-Rh-001		上部		トレンチ04-001				٠	[	
PWT04-16-Rh-002		1.85m		トレンチ04-002		•	•			
PWT04-16-Rh-003		L	碟混入	トレンチ04-003				•		
PWT04-16-Rh-004		i		トレンチ04-004				_		
PWT04-16-Rh-005	NarraTrench4	底部		トレンチ04-005				•		
PWT04-16-Rh-006		底部		トレンチ04-006. クーラーキャップ		•	•		•	
PWT04-16-Rh-007		/50 HP	大根	トレンチ04-007						
PWT04-16-Rh-008			カワニナ目殻	トレンチ04-008						
PWT04-16-Rh-009			Clastic Sediment: 底面	PWT04-16-Rh-C3		•				
PWT05-16-Rb-001		上部		トレンチ05-001 シンウォール		• ^				
PWT05-16-Rb-002		1		トレンチ05-002 シンウォール						
PWT05-16-Rb-003		L t		トレンチ05-003 シンウォール				-		
PWT05-16-Rb-004		 庄		トレンチ05-004 シンウォール						
DWT05-16-Db-005		에 크지	大坦	LUX#05-005						
DWT05-16-Db-004				LUX#05-006						
DWT05-16-DL-007			() ノノーノ 民政							
PW103-10-Rn-007			火取場							
PWT05-16-Rh-00/B		L ±1	火酸塩甲の木依		<b>.</b>			<u> </u>		
PW103-10-Rn-008		<u> 도</u> 하				•	•		-	
PW105-16-Rh-009	Narra Trench5							-		
PW105-16-Rn-010				FD2705-010		Ψx	•	-	•	-
PW105-16-Rh-011				トレンナ05-011		-	-		ļ	
PWT05-16-Rh-012		↓ ↓		トレンチ05-012		•	•	•	ļ	
PWT05-16-Rh-013		底部		トレンチ05-013			ļ	•		
PWT05-16-Rh-014		底部		トレンチ05-014. 微化石鑑定用	•		ļ	ļ		
PWT05-16-Rh-015			碟層(Harzburgite)(Cobble)	PWT05-16-Rh-C1						
PWT05-16-Rh-016			礫層(Microgabbro)(Cobble)	PWT05-16-Rh-C2		•	•			•
PWT05-16-Rh-017			礫層(Diabase)(Cobble)							•
PWT05-16-C1-001				トレンチ05-C1-001		•	•			
PWT05-16-C2-001				トレンチ05-C2-001			•			

表 2.6.3-1 Narra3-1 地点のトレンチで採取した(Rh)岩石試料と分析項目

### 表 2.6.3-2 Narra3-1 地点のトレンチで採取した(HU)岩石試料と分析項目

Sample Labelling	Lacation		Description	Remarks	C14	XRD	XRF	ICP-MS	EPMA, µ -XRD	薄片顕微鏡
PWT03-16-HU-001		底部		PW-HU-16-T3-s1.クーラーキャップ						
PWT03-16-HU-002	Norma Transka	1 î		PW-HU-16-T3-s2,クーラーキャップ						
PWT03-16-HU-003	Narra Trench3	1 î		PW-HU-16-T3-s3.クーラーキャップ						
PWT03-16-HU-004		上部		PW-HU-16-T3-s4,クーラーキャップ						
PWT04-16-HU-001		底部		PW-HU-16-T4-s1.クーラーキャップ						
PWT04-16-HU-002	Nour Tready 4	1 1		PW-HU-16-T4-s2.クーラーキャップ						
PWT04-16-HU-003	Narra Trench4	1 î		PW-HU-16-T4-s1_s2						
PWT04-16-HU-004		上部		PW-HU-16-T4-s3,クーラーキャップ						
PWT05-16-HU-001		底部		PW-HU-16-T5-s1						
PWT05-16-HU-002		1 î		PW-HU-16-T5-s2,クーラーキャップ						
PWT05-16-HU-003	Name Transke	1 î		PW-HU-16-T5-s3						
PWT05-16-HU-004	Narra Trencho	1 î		PW-HU-16-T5-s4						
PWT05-16-HU-005		1 T		PW-HU-16-T5-s5,クーラーキャップ						
PWT05-16-HU-006		上部		PW-HU-16-T5-s6.クーラーキャップ						

#### (1) 試料調整

トレンチ3からは11 試料(PWT03-16-Rh-003, -004, -005, -006, -009, -011, -012, -019、 PWT03-16-C1-002, -004、PWT03-16-C2-002)、トレンチ4からは3試料(PWT04-16-Rh-002, -006, -009)、トレンチ5からは7試料(PWT05-16-Rh-004, -008, -010, -012, -016、PWT05-16-C1-001、PWT05-16-C2-001)の計19試料について、以下に述べるように試料の調整を行い、 X線回折(XRD)測定、蛍光X線(XRF)分析を行った。

各湿潤試料を分析に必要な量をシャーレ等に分取し、数日間真空乾燥を行った。乾燥後メノ ウ乳鉢にて、力を加えずに試料をほぐし、マトリックス以外の礫、砂、植物根等を除去した後、 粉砕した。粉砕後篩にて、105µm 以下を分画し分析試料とした。分取前、乾燥前、乾燥・粗 破砕、105µm ふるいでふるい分けたときの残分と通過分の状態を図 2.6.3-1 と図 2.6.3-2 に示 す。

PWT03-16-C1-002, -004、PWT03-16-C2-002、PWT05-16-C1-001、PWT05-16-C2-001 は ドリルコア試料である。トレンチ5のコア試料(PWT05-16-C1-001、PWT05-16-C2-001)は 軟弱なため、試料採取直後にコア形状を維持できず、そのまま封入した。トレンチ3のコア試 料(PWT03-16-C1-002, -004、PWT03-16-C2-002)は、図 2.6.3-3 に示すように、樹脂で周 囲を固めた後、注意深くカッターで切断し、それぞれの塊の鉛直方向(奥側)下部の端部から -001 と番号付けして試料名を整理した。

試料名	分取前試料	乾燥前(分取)	乾燥・粗粉砕後	105μm ふるい上	105μm ふるい下
PWT03-16-Rh-003	Prese 20	71014-06-01 686	Pitinang Bili	-venses Liste time is	-Stor Mace 18
PWT03-16-Rh-004				19110-1-6-80-001 4-6-5-1100, mail ) :-	Parts enou
PWT03-16-Rh-005	and the second sec	The second secon		(*1715) (5 Bane) (-1715) (5 Bane) (-1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1715) (1	Acts reader and
PWT03-16-Rh-006	Kastoneo Baseala	er er			Pr(10.1.06.00) 3-5-(1-1105.00) #8
PWT03-16-Rh-009					PE105-6-68-69
PWT03-16-Rh-011		- Carl			PETP-HARAN
PWT03-16-Rh-012				Provide and	-5(1-100-m <sup>2</sup> /88
PWT03-16-C1-002	Mish and has U.S. Shaki Theory			prins a close - Stor (data of ):	Permis-ector
PWT03-16-C1-004	to the second seco	EVEN LEVEL	Prinster Bas	Present 21:1012	Altriange BR
PWT03-16-C2-002	ST CONTRACTOR	Pagesta and Can	Para Para	en en el	Annual States



図 2.6.3-1 トレンチ3 試料の状態(分取前試料、乾燥前、乾燥・粗砕後、および、105µm 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(分取)	乾燥・粗粉砕後	105μm ふるい上	105μm ふるい下
PWT04-16-Rh-002		Filter ER		Provide Section 2015	791914-04.00
PWT04-16-Rh-006		Pin Pin	Pine and	Pittana Literati	
PWT04-16-Rh-009		Provide Automatical Automatica	Piraban Bi		LATORNE BE
PWT05-16-Rh-004	1)IS	reader of the second se	Filmer Bar	AND	
PWT05-16-Rh-008			PHT ELEM KD	2.51* (101 m 1)	Act terms and
PWT05-16-Rh-010	NU 3-3-8-99 (1-12-745-010)	Pindan Edi		Bits intra-til	
PWT05-16-Rh-012	Market State	rteat.	T ART	En en en esta	Parto salati Astronali da
PWT05-16-C1-001				LT IN MILES	Presedent List terrente
PWT05-16-C2-001		PERFER	Pilace Hit	Rinks different	rese de contration de la contration de l
PWT05-16-Rh-016	Print di ant rec	PWT05-16-Rh-016	0	0	0

図 2.6.3-2 トレンチ4、5 試料の状態(分取前試料、乾燥前、乾燥・粗砕後、および、105µm ふるい残分(ふるい上)と通過分(ふるい下))

PWTQ5-16-82-016

PETES-16-R=-016

P#T25-16-Rn-018

Partos-16-24-016



⊠ 2.6.3-3 PWT03-16-C2-001~002

(2) XRD による鉱物相の同定

PWT03-16-Rh-003~006, -011, -012、PWT03-16-C1-002, -004、PWT03-16-C2-002、PWT04 -16-Rh-002, -006, -009及びPWT05-16-Rh-004, -008, -010, -012、PWT05-16-C1-001、PWT05-16-C1-001 の X 線回折分析による鉱物同定結果を表 2.6.3-3 に示す。また、図 2.6.3-4~図 2.6.3-24 に X 線回折チャートを示す。

すべての試料において、粘土鉱物としてスメクタイト及び緑泥石のピークが確認された。その他の粘土鉱物のピークは、この不定方位の分析では確認されなかった。なお、スメクタイト と緑泥石の判別及び、スメクタイトの2八面体型・3八面体型の判断については、(3) 定方位 法 X 線回折による鉱物学的特性の詳細検討において説明する。他に沸石(濁沸石)、角閃石、 斜方輝石、蛇紋石(Lizardite)及び炭酸塩鉱物として方解石のピークが確認された。

**PWT03-16-Rh-004~006, -009、PWT03-16-C2-002**及び**PWT04-16-Rh-009**では、低温型の**C-S-H**(14Åトバモライト)のピークが確認され、比較的低温での鉱物のアルカリ変質反応が生じていることが示唆される。

	粘土釖	立物	沸石	角閃石	輝石	蛇紋石	カルシウ	ワムシリケート 水和物	炭酸塩鉱物
試料 No.	スメクタイト	緑泥石	濁沸石	—	斜方輝石	リザーダイト	14Å ]	ヽバモライト	方解石
	Smectite	Chlorite	Laumontite	Amphibole	Orthopyroxene	Lizardite	14Å -′	Tobermorite	Calcite
PWT03-16-Rh-003	0	0	$\bigtriangleup$	0	$\bigtriangleup$	0		_	$\bigtriangleup$
PWT03-16-Rh-004	$\bigcirc$	0	$\bigtriangleup$	0	$\bigtriangleup$	$\bigcirc$		$\bigtriangleup$	$\bigtriangleup$
PWT03-16-Rh-005	$\bigcirc$	0	$\bigtriangleup$	0	$\bigtriangleup$	$\bigcirc$		$\bigtriangleup$	$\bigtriangleup$
PWT03-16-Rh-006	$\bigcirc$	0	$\bigtriangleup$	$\bigtriangleup$	$\bigcirc$	$\bigcirc$		$\bigtriangleup$	$\bigtriangleup$
PWT03-16-Rh-009	$\bigcirc$	0	$\bigtriangleup$	$\bigtriangleup$	$\bigtriangleup$	$\bigcirc$		$\bigtriangleup$	$\bigtriangleup$
PWT03-16-Rh-011	$\bigcirc$	0	$\bigtriangleup$	0	$\bigtriangleup$	$\bigcirc$		—	0
PWT03-16-Rh-012	$\bigcirc$	0	$\bigtriangleup$	0	0	0		—	$\bigtriangleup$
PWT03-16-Rh-019	—	—	_	—	—	$\bigtriangleup$		—	—
PWT03-16-C1-002	$\bigcirc$	0	$\bigtriangleup$	0	0	$\bigcirc$		_	$\bigtriangleup$
PWT03-16-C1-004	$\bigcirc$	0	$\bigtriangleup$	0	0	$\bigcirc$		—	$\bigtriangleup$
PWT03-16-C2-002	$\bigcirc$	0	$\bigtriangleup$	0	$\bigtriangleup$	$\bigcirc$		$\bigtriangleup$	$\bigtriangleup$
PWT04-16-Rh-002	$\bigcirc$	0	$\bigtriangleup$	$\bigtriangleup$	$\bigcirc$	$\bigcirc$		—	$\bigtriangleup$
PWT04-16-Rh-006	$\bigcirc$	0	$\bigtriangleup$	0	$\bigtriangleup$	$\bigcirc$		—	$\bigtriangleup$
PWT04-16-Rh-009	$\bigtriangleup$	0	$\bigtriangleup$	$\bigtriangleup$	$\bigtriangleup$	$\bigcirc$		$\bigtriangleup$	$\bigtriangleup$
PWT05-16-Rh-004	$\bigcirc$	0	$\bigtriangleup$	0	$\bigtriangleup$	$\bigtriangleup$		—	$\bigtriangleup$
PWT05-16-Rh-008	$\bigcirc$	0	$\bigtriangleup$	0	0	$\bigtriangleup$		_	0
PWT05-16-Rh-010	$\bigcirc$	0	$\bigtriangleup$	$\bigtriangleup$	$\bigtriangleup$	$\bigtriangleup$		—	$\bigtriangleup$
PWT05-16-Rh-012	0	0	$\bigtriangleup$	0	$\bigtriangleup$	0		_	$\bigtriangleup$
PWT05-16-Rh-016	_	0	_	_	_	_	_	(柘榴石△)	_
PWT05-16-C1-001	0	0	$\bigtriangleup$	$\bigtriangleup$	$\bigtriangleup$	$\bigtriangleup$		_	$\bigtriangleup$
PWT05-16-C2-001	0	0	$\bigtriangleup$	0	$\bigtriangleup$	0		_	$\bigtriangleup$

表 2.6.3-3 トレンチ試料の X 線回折による鉱物同定結果







図 2.6.3-5 PWT03-16-Rh-004のXRD チャート



図 2.6.3-6 PWT03-16-Rh-005のXRD チャート







図 2.6.3-8 PWT03-16-Rh-009のXRD チャート



図 2.6.3-9 PWT03-16-Rh-011のXRD チャート







図 2.6.3-11 PWT03-16-Rh-019の XRD チャート



図 2.6.3-12 PWT03-16-C1-002のXRD チャート



図 2.6.3-13 PWT03-16-C1-004のXRD チャート



図 2.6.3-14 PWT03-16-C2-002のXRD チャート



図 2.6.3-15 PWT04-16-Rh-002のXRD チャート







図 2.6.3-17 PWT04-16-Rh-009の XRD チャート



図 2.6.3-18 PWT05-16-Rh-004の XRD チャート







図 2.6.3-20 PWT05-16-Rh-010のXRD チャート



図 2.6.3-21 PWT05-16-Rh-012の XRD チャート







図 2.6.3-23 PWT05-16-C1-001のXRD チャート



図 2.6.3-24 PWT05-16-C2-001のXRD チャート

- (3) 定方位法 X 線回折による鉱物学的特性の詳細検討
  - 検討方法

試錐コア試料と同様にトレンチ試料においても、低角部にスメクタイトと考えられるピー クが確認されたため、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とともに、 そのスメクタイトがモンモリロナイトやノントロナイトなどの2八面体型のものか、サポナ イトなどの3八面体型のものか確認する。

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 060 面の d 値を調べる。

2) エチレングリコール処理

トレンチ試料のPWT03-16-Rh-004, PWT03-16-C1-002, -004, PWT04-16-Rh-009、PWT05 -16-Rh-010 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処理して XRD 測定した。定方位 XRD 測定結果の 001 面ピーク位置及び d 値を試錐コアの結果と合わせて表 2.6.3-4 に、X 線回折プロファイルを 図 2.6.3-25~図 2.6.3-29 に示す。これらの測定結果では、ピークシフト量に大小があるもの の、いずれもピークのシフトが見られたので、これらの試料はスメクタイトを含むと考えら れる。

3) 006 面の観察による砕屑性堆積物の鉱物学的特性

2 八面体シートの場合、060 面の d 値は 1.49~1.52 Å であり、CuKα線の場合、その回折 によるピーク位置(20)は 61°~62°程度である。さらにモンモリロナイト・バイデライト は 060 面の d 値が 1.49~1.50 Å であり、ノントロナイトは 060 面の d 値が 1.51~1.52 Å で区 別される。3 八面体シートの場合は 060 面の d 値は 1.52~1.54 Å であり、CuKα線の場合、 その回折によるピーク位置(20)は 60°程度である。

トレンチ試料の PWT03-16-Rh-003, -004, -005, -006, -009, -011, -012、 PWT03-16-C2-002 は、60°程度に特徴的なピークを有しており、3 八面体型スメクタイトのサポナイトである と示唆された。PWT03-16-C1-002, -004はピークが不明瞭であるため、判定ができなかった。 PWT04-16-Rh-002, -009は、60°程度に特徴的なピークを有しており、3 八面体型スメクタ イトのサポナイトであると示唆された。また、PWT04-16-Rh-006は、60°程度に特徴的な ピークが確認されるがやや不鮮明なため、判定には至らなかった。PWT05-16-Rh-004, -010, -012、 PWT05-16-C1-001、 PWT05-16-C2-001は、61°付近に特徴的なピークが確認された。 これより、2 八面体型のノントロナイトであると示唆された。また、PWT05-16-Rh-008は、 60°程度に特徴的なピークを有しており、3 八面体型スメクタイトのサポナイトであると示 唆された。

試錐コアの分析結果も含めて、今回 Narra3-2 地点で採取した試料中に含まれるスメクタ イトは、概ね3八面体型であるサポナイトが主であると考えられるが、トレンチ5(及びDH02

## 孔)付近においては、2八面体型であるノントロナイトが含まれる傾向にあった。

N	定方	位	EG 処	理後	ピークシフト
No.	$2 \  heta$	d (Å)	$2 \  heta$	d (Å)	d (Å)
PWDH010-16-Rh-005	$6.1^{\circ}$	14.6	$5.4^\circ$	16.3	1.7
PWDH010-16-Rh-006	$5.8^{\circ}$	15.2	$5.1^\circ$	17.3	2.1
PWDH02-16-Rh-003	$5.8^{\circ}$	15.3	$5.2^\circ$	17.0	1.7
PWDH03-16-Rh-001	$6.0^{\circ}$	14.8	$5.7^{\circ}$	15.6	0.8
PWDH03-16-Rh-006	$5.8^{\circ}$	15.4	$5.4^\circ$	16.5	1.1
PWDH03-16-Rh-009	$5.8^{\circ}$	15.4	$5.2^\circ$	17.1	1.7
PWDH04-16-Rh-012	$5.8^{\circ}$	15.2	$5.2^\circ$	16.9	1.7
PWT03-16-Rh-004	$5.8^{\circ}$	15.1	$5.2^{\circ}$	16.8	1.7
PWT03-16-C1-002	$5.7^{\circ}$	15.4	$5.1^\circ$	17.3	1.9
PWT03-16-C1-004	$5.7^{\circ}$	15.5	$5.2^{\circ}$	17.1	1.6
PWT04-16-Rh-009	$5.7^{\circ}$	15.4	$5.1^\circ$	17.5	2.1
PWT05-16-Rh-010	$5.9^{\circ}$	14.9	$5.6^{\circ}$	15.8	0.9

表 2.6.3-4 Narra3-2 地点採取試料(トレンチ及び試錐孔)の定方位およびエチレングリコール 処理の 001 面測定結果



図 2.6.3-25 PWT03-16-Rh-004 の定方位測定および EG 処理試料の定方位測定





PWT03-16-C1-002の定方位測定および EG 処理試料の定方位測定



図 2.6.3-27 PWT03-16-C1-004の定方位測定および EG 処理試料の定方位測定



図 2.6.3-28 PWT04-16-Rh-009の定方位測定および EG 処理試料の定方位測定



図 2.6.3-29 PWT05-16-Rh-010 の定方位測定および EG 処理試料の定方位測定

(4) XRF(蛍光 X 線分析)による岩石化学的特性

砕屑性堆積物の岩石化学的特性を明らかにするために、トレンチ壁面で採取した砕屑性堆積 物試料について、XRF による全岩化学分析を行った。

さらに、試錐コアも含めて、分析したバルク成分(バルク全岩組成)にもとづき、Narra3-2 地点に分布する砕屑性堆積物の岩石化化学的特性について考察する。

1) トレンチ壁面試料の XRF(蛍光 X 線分析)による全岩化学分析

トレンチ3試料の元素定量結果を表 2.6.3-5、表 2.6.3-7に、トレンチ4及びトレンチ5試 料を表 2.6.3-6、表 2.6.3-8に示す。なお、表の空欄は、当該元素が検出されないことを示し、 結果は酸化物表示でCO2を含む結果とCO2の含有率を控除して百分率を求めたものをそれぞ れ記載している。また、測定結果を棒グラフにプロットしたものを図 2.6.3-30、図 2.6.3-31 に示す。

トレンチ5は、トレンチ3および4に比べAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>が多く、MgOが少ない傾向にあった。同 じく、試錐試料においても、トレンチ5の近傍であるDH02孔は、DH01孔、DH03孔、DH04 孔に比べAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>が多く、MgOが少ない傾向にあり、トレンチ試料と同様な傾向を有していた。

トレンチ5の礫岩(PWT05-16-Rh-016)は、その鉱物組成から斑れい岩由来であると見られ、 そこに多く見られる斜長石から Al が供給されたため、トレンチ5の砕屑性堆積物の Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含有率が高くなっているものと考えられる。

試料名						PWT03-16	i				
(%)	-Rh-003	-Rh-004	-Rh-005	-Rh-006	-Rh-009	-Rh-011	-Rh-012	-Rh-019	-C1-002	-C1-004	-C2-002
CO <sub>2</sub>	12.765	10.642	11.202	13.299	12.331	13.862	14.188	13.089	12.664	14.246	16.995
CaO	3.4066	3.5460	4.4493	4.9682	4.5220	3.5017	3.8848	4.0387	3.9982	3.2350	4.4613
$SiO_2$	35.879	39.894	34.193	31.757	29.394	28.748	31.645	33.794	31.207	41.076	32.247
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20.360	20.003	21.410	25.607	26.689	28.498	25.363	17.695	22.206	16.603	22.572
MgO	23.500	21.899	24.348	18.791	22.168	20.539	20.189	29.359	24.899	21.118	18.049
$Al_2O_3$	1.8666	1.4785	1.7546	2.5451	1.8684	2.0257	2.0427	0.5230	2.1834	1.4918	2.6477
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.7475	0.7926	0.7994	1.3749	1.1705	1.0115	0.8503	0.6139	1.1875	0.7661	1.4438
NiO	0.7939	0.7200	0.8338	0.8455	0.9908	1.0746	0.9222	0.5915	0.8686	0.6106	0.7422
$SO_3$	0.1433	0.0115	0.1453	0.1633	0.1432	0.1735	0.2390	0.0496	0.1691	0.0147	0.1440
MnO	0.2827	0.5190	0.6062	0.2702	0.3463	0.2162	0.3574	0.1109	0.2577	0.5060	0.3089
Na <sub>2</sub> O	0.0634	0.1432	0.0626	0.1031	0.0812	0.0773	0.0651	-	0.0715	0.1029	0.0927
$TiO_2$	0.064	0.0707	0.0607	0.1062	0.0818	0.0728	0.0639	-	0.0923	0.0507	0.0982
$Co_2O_3$	0.0742	0.0741	0.0796	0.0964	0.1019	0.0977	0.0943	0.0596	0.0889	0.0697	0.0839
K <sub>2</sub> O	0.0082	0.0557	0.0091	0.0084	0.0060	0.0052	0.0069	0.0051	0.0089	0.0554	0.0099
ZnO	0.0121	0.0163	0.0136	0.0204	0.0210	0.0199	0.0152	0.0086	0.0181	0.0130	0.0188
SrO	0.0041	0.0122	0.0058	0.0054	0.0061	0.0067	0.0052	0.0026	0.0051	0.0094	0.0053
$V_2O_5$	0.0145	0.0115	0.0146	0.0218	0.0189	0.0170	0.0158	-	0.0210	0.0111	0.0209
CuO	0.005	0.0048	0.0045	0.0054	0.0066	0.0067	0.0035	-	0.0052	0.0043	0.0048
Cl	0.0107	0.1060	0.0087	0.0118	0.0535	0.0092	0.0292	0.0500	0.0149	0.0165	0.0558
In <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	0.0211	0.0201	-	0.0199	-	-
$Sc_2O_3$	-	-	-	-	-	0.0175	-	-	0.0146	-	-
Lu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	-	-	0.0100	-	-	-

表 2.6.3-5 トレンチ3 試料の XRF 分析による定量結果(酸化物表記、CO2 含む)

表 2.6.3-6 トレンチ4、5 試料の XRF 分析による定量結果(酸化物表記、CO2 含む)

試料名		PWT04-16					PWT05-16	5		
(%)	-Rh-002	-Rh-006	-Rh-009	-Rh-004	-Rh-008	-Rh-010	-Rh-012	-Rh-016	-C1-001	-C2-001
CO <sub>2</sub>	14.263	13.729	16.964	14.185	14.783	9.4587	14.512	6.7072	12.868	13.131
CaO	3.8506	3.3968	11.788	1.6989	7.6041	4.6133	2.2868	8.8162	1.8385	4.2853
SiO <sub>2</sub>	27.681	39.030	33.547	49.36	35.188	42.455	40.758	29.389	50.149	44.638
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	26.493	18.777	19.732	17.174	22.348	23.870	19.751	9.6436	15.433	15.873
MgO	23.124	21.144	14.619	8.914	10.950	11.557	13.720	27.223	8.3526	14.310
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.8488	1.8269	1.3833	6.8279	6.8292	5.6254	6.7055	17.623	9.4561	5.8539
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.9280	0.8418	0.717	0.4876	0.9278	0.9204	0.6388	0.0207	0.467	0.6727
NiO	1.1401	0.7183	0.7015	0.542	0.4268	0.8123	0.665	0.0867	0.4808	0.49
SO <sub>3</sub>	0.2065	0.0247	0.0099	0.0061	0.1105	0.0329	0.0145	0.0152	0.0112	0.0181
MnO	0.1455	0.1931	0.2833	0.1905	0.3769	0.1164	0.3079	0.2643	0.1806	0.191
Na <sub>2</sub> O	0.0715	0.0888	0.0662	0.3446	0.1082	0.1867	0.3374	0.0311	0.3798	0.2135
TiO <sub>2</sub>	0.0616	0.0727	0.0481	0.114	0.1856	0.1129	0.1071	0.058	0.1345	0.1149
Co <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.1050	0.0726	0.072	0.063	0.0808	0.0812	0.0731	0.0276	0.0566	0.0589
K <sub>2</sub> O	0.0055	0.0301	0.0177	0.0437	0.0315	0.0901	0.0483	-	0.0475	0.0908
ZnO	0.0221	0.0142	0.0123	0.0126	0.0138	0.0176	0.0124	0.0167	0.0116	0.0117
SrO	0.0060	0.0102	0.0092	0.0069	0.0110	0.0153	0.0085	0.0414	0.0065	0.012
$V_2O_5$	0.0166	0.0142	-	-	-	0.0178	0.0155	-	-	-
CuO	0.0066	0.0049	0.0035	0.0136	0.0157	0.0121	0.012	-	0.019	0.0112
Cl	0.0241	0.0114	0.0048	0.0016	0.0103	0.0032	0.0108	0.0163	0.0872	0.0242
In <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	0.0202	-	-	-	-	-	-	-
Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	0.0131	-	-	0.0154	-	0.0135	-
Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	0.0012	0.0013	-	0.0019	-	0.0014	0.0018	-
ZrO <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	-	0.0182	-	-

表 2.6.3-7	トレンチ3試料の XRF 分析による定量結果	(酸化物表記、	CO <sub>2</sub> 含まず)
-----------	------------------------	---------	----------------------

試料名						PWT03-16					
(%)	-Rh-003	-Rh-004	-Rh-005	-Rh-006	-Rh-009	-Rh-011	-Rh-012	-Rh-019	-C1-002	-C1-004	-C2-002
CaO	3.9622	4.0202	5.0658	5.7606	5.1819	4.0770	4.5588	4.7427	4.6266	3.8574	5.4280
SiO <sub>2</sub>	40.797	44.320	38.208	36.090	33.110	32.863	36.348	38.735	35.4076	47.5090	38.1475
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24.414	23.248	25.053	30.730	31.560	34.367	30.845	21.447	26.5284	20.4658	28.7238
MgO	26.048	23.838	26.628	20.923	24.480	22.978	22.648	32.651	27.5862	23.7148	20.7732
$Al_2O_3$	2.1130	1.6365	1.9535	2.8808	2.0976	2.3064	2.3354	0.5975	2.4681	1.7161	3.1155
$Cr_2O_3$	0.8785	0.9065	0.9195	1.6144	1.3560	1.1907	1.0098	0.7296	1.3898	0.9246	1.7857
NiO	0.9840	0.8597	1.0036	1.0478	1.2076	1.3418	1.1628	0.7420	1.0713	0.7808	0.9855
SO <sub>3</sub>	0.1661	0.0130	0.1650	0.1885	0.1635	0.2013	0.2794	0.0581	0.1950	0.0174	0.1743
MnO	0.3366	0.5997	0.7050	0.3215	0.4064	0.2584	0.4310	0.1334	0.3054	0.6189	0.3888
Na <sub>2</sub> O	0.0698	0.1549	0.0680	0.1140	0.0891	0.0858	0.0725	-	0.0787	0.1145	0.1057
TiO <sub>2</sub>	0.0751	0.0807	0.0696	0.1244	0.0946	0.0855	0.0757	-	0.1077	0.0611	0.1210
$Co_2O_3$	0.0892	0.0863	0.0934	0.1159	0.1207	0.1181	0.1149	0.0724	0.1065	0.0862	0.1070
$K_2O$	0.0095	0.0630	0.0103	0.0097	0.0069	0.0060	0.0081	0.0060	0.0102	0.0659	0.0120
ZnO	0.0151	0.0195	0.0165	0.0253	0.0256	0.0249	0.0192	0.0109	0.0224	0.0167	0.0250
SrO	0.0052	0.0146	0.0071	0.0067	0.0075	0.0084	0.0066	0.0033	0.0064	0.0122	0.0071
$V_2O_5$	0.0170	0.0131	0.0168	0.0256	0.0218	0.0200	0.0187	-	0.0246	0.0134	0.0259
CuO	0.0062	0.0057	0.0054	0.0067	0.0080	0.0084	0.0044	-	0.0064	0.0055	0.0064
Cl	0.0124	0.1199	0.0099	0.0137	0.0611	0.0106	0.0342	0.586	0.0172	0.0196	0.0675
In <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	0.0263	0.0253	-	0.0245	-	-
$Sc_2O_3$	-	-	-	-	-	0.0205	-	-	0.0170	-	-
Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$Lu_2O_3$	-	-	-	-	-	-	-	0.0125	-	-	-

表 2.6.3-8 トレン	チ4、5試料の	XRF 分析による定量	結果(酸化物表記、	CO <sub>2</sub> 含まず)
---------------	---------	-------------	-----------	----------------------

試料名		PWT04-16					PWT05-16			
(%)	-Rh-002	-Rh-006	-Rh-009	-Rh-004	-Rh-008	-Rh-010	-Rh-012	-Rh-016	-C1-001	-C2-001
CaO	4.5158	4.0078	14.359	2.0248	9.0018	5.1314	2.7204	9.6166	2.1606	5.0394
SiO <sub>2</sub>	31.845	44.828	39.500	56.890	40.560	46.410	47.140	31.635	57.098	50.928
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	32.217	22.891	25.225	21.090	27.512	27.152	24.286	10.686	18.613	19.239
MgO	25.970	23.635	16.781	9.9929	12.327	12.447	15.423	28.598	9.2501	15.888
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.1182	2.0877	1.6198	7.7750	7.8028	6.1171	7.6775	18.803	10.623	6.6181
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.1013	1.0046	0.8971	0.5861	1.1180	1.0321	0.7676	0.0228	0.5532	0.8010
NiO	1.4377	0.9072	0.9312	0.6909	0.5440	0.9451	0.8493	0.0973	0.5991	0.6131
$SO_3$	0.2412	0.0291	0.0120	0.0073	0.1301	0.0365	0.0172	0.0166	0.0131	0.0212
MnO	0.1753	0.2336	0.3593	0.2321	0.4604	0.1317	0.3755	0.2923	0.2164	0.2299
Na <sub>2</sub> O	0.0797	0.0985	0.0753	0.3831	0.1209	0.2000	0.3761	0.0326	0.4174	0.2353
TiO <sub>2</sub>	0.0729	0.0865	0.0600	0.1367	0.2229	0.1264	0.1284	0.0638	0.1589	0.1365
$Co_2O_3$	0.1280	0.0887	0.0922	0.0775	0.0996	0.0925	0.0901	0.0306	0.0684	0.0715
K <sub>2</sub> O	0.0064	0.0355	0.0214	0.0520	0.0372	0.1000	0.0573	-	0.0558	0.1065
ZnO	0.0280	0.0180	0.0164	0.0161	0.0177	0.0205	0.0159	0.0187	0.0145	0.0147
SrO	0.0076	0.0130	0.0123	0.0089	0.0141	0.0179	0.0109	0.0466	0.0082	0.0151
$V_2O_5$	0.0196	0.0169	-	-	-	0.0199	0.0186	-	-	-
CuO	0.0084	0.0062	0.0046	0.0173	0.0200	0.0141	0.0153	-	0.0237	0.0141
Cl	0.0281	0.0134	0.0058	0.0019	0.0122	0.0035	0.0129	0.0177	0.1022	0.0284
$In_2O_3$	-	-	0.0267	-	-	-	-	-	-	-
$Sc_2O_3$	-	-	0.0016	0.0017	-	-	-	-	0.0022	-
Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	0.0157	-	0.0022	0.0185	0.0016	0.0160	-
$ZrO_2$	-	-	-	-	-	-	-	0.0205	-	-



図 2.6.3-30 トレンチの各試料の XRF 分析結果(酸化物表記、CO<sub>2</sub>を含む)



図 2.6.3·31 トレンチの各試料の XRF 分析結果(酸化物表記、CO<sub>2</sub>を含まず)

2) 砕屑性堆積物の岩石化学的特性

パラワンオフィオライト(基盤岩)起源である砕屑性堆積物の主要バルク組成による岩石 化学的特性(地球化学的特性)を考察する上で、特に、粘土鉱物・変質鉱物などの生成環境 とその環境変遷(状態変遷)を理解するために主要バルク組成の中で、SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, MgO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、そして、砕屑性堆積物の主要な起源物質(原岩)である超苦鉄質複合岩体に多く含 有される NiO, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>に特化し、主要成分と微量成分の地球化学的挙動を検討するために岩石 化学的特性を検討する。

試錐、トレンチ等 Narra 地区で採取した試料の含有金属元素の質量含有率(酸化物)の SiO<sub>2</sub>との比をプロットした図を、図 2.6.3-30~図 2.6.3-42 に示す。

CaとSiO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>とSiO<sub>2</sub>に弱い負の相関、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>とSiO<sub>2</sub>, NiOとSiO<sub>2</sub>に負の相関が認められ、Na<sub>2</sub>OとSiO<sub>2</sub>, K<sub>2</sub>OとSiO<sub>2</sub>に弱い正の相関が認められた。



図 2.6.3-32 各試料の XRF 測定結果による成分相互の相関(SiO<sub>2</sub>-CaO)



図 2.6.3-33 各試料の XRF 測定結果による成分相互の相関(SiO<sub>2</sub>-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)



図 2.6.3-34 各試料の XRF 測定結果による成分相互の相関(SiO<sub>2</sub>-MgO)



図 2.6.3-35 各試料の XRF 測定結果による成分相互の相関(SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)



図 2.6.3-36 各試料の XRF 測定結果による成分相互の相関(SiO<sub>2</sub>-NiO)



図 2.6.3-37 各試料の XRF 測定結果による成分相互の相関(SiO<sub>2</sub>-SO<sub>3</sub>)



図 2.6.3-38 各試料の XRF 測定結果による成分相互の相関(SiO<sub>2</sub>-MnO)



図 2.6.3-39 各試料の XRF 測定結果による成分相互の相関(SiO<sub>2</sub>-Na<sub>2</sub>O)



図 2.6.3-40 各試料の XRF 測定結果による成分相互の相関(SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O)



図 2.6.3-41 各試料の XRF 測定結果による成分相互の相関(SiO<sub>2</sub>-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)



図 2.6.3-42 各試料の XRF 測定結果による成分相互の相関(SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub>)

Narra3-2 地点でのトレンチ3、4,5の3サイトの試料、4孔の構造試錐調査によるコア 試料について、その岩石化学的特性を以下にまとめる。

a. トレンチ3

超苦鉄質岩類起源の砕屑性堆積のバルク組成は、原岩のバルク組成に規制され、ケイ酸 成分(SiO<sub>2</sub>)に乏しく、その含有量は 32.8-47.5 wt.%で、ケイ酸成分に不飽和な超塩基性岩 類の特徴を示す。特に、原岩がハルツバージャイト起源である砕屑性堆積物の岩石化学的 特性は、特徴的に CaO の含有量が少ない。これは主要な苦鉄質鉱物である斜方輝石が、Ca に乏しいためである。

砕屑性堆積物を構成する超苦鉄質岩類の細粒岩石片や鉱物粒については、前者は蛇紋岩 化作用を受けた蛇紋岩(蛇紋石・滑石,カンラン石・輝石類 そして、初生鉱物としてのクロ ム鉄鉱・磁鉄鉱など)や、苦鉄質鉱物(カンラン石・斜方輝石と極少量の単斜輝石など) で構成されているために、著しく MgO(20.7-27.5wt%)や Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(20.4-34.3wt%)の含有量 が多く、加えて NiO(0.7-1.3wt%)と Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(0.8-1.7wt%)の含有量も多い。

 一方、粘土鉱物の生成・進化(鉱物学的変遷)環境に好ましい地球化学的な場としての バルク組成(SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, MgO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>など)に着目すると、取り分けアルミナ成分 (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)の含有量(1.7~3.1 wt.%)が低い傾向にあるが、下位(泥質部)の方が上位(砂質 部)よりばらつきが見られるが、全体として比較的一定である。合わせて、CaO(3.8-5.7wt%)も低濃度である。

SiO<sub>2</sub>との相関関係(組成変化)を検討すると、全体的には Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>-NiO には、それぞれ負の相関が見られるが、CaO-SiO<sub>2</sub>, MgO - SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>には殆ど組成変化を伴う相関関係がなく、ほぼ一定である。

また、砕屑性堆積物・下部層上位の砂質部と下位の泥質には明らかに 2 つのトレンドが 見られる。そのバルク組成は、MgO と Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>に顕著で、その他のバルク組成変化は認めら れない。

b. トレンチ4

これらの砕屑性堆積物のバルク組成は、トレンチ3と基本的には大きな差異はない。SiO<sub>2</sub> の含有量は 31.8-44.8wt%で若干低い。CaO については最大値の 14.3wt%の 1 試料が例外 的に分析された。これは C-S-H の産状に起因していると考えられる。MgO(16.7-25.9wt%) と Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(22.8-32.2wt%)の含有量は高いが,微量元素である NiO(0.9-1.4wt%)と Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(0.8-1.1wt%)も比較的に高いが、全体としては、これらのバルク組成はトレンチ3 と同じ傾向を示す。

一方、粘土鉱物の生成・進化環境に好ましい地球化学的な場としてのアルミナ成分(1.6-2.1wt%)が低く、下位層と上位層の間にもそのバルク組成上の優位性が認められない。

次に、SiO<sub>2</sub>との相関関係を検討すると、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>, NiO-SiO<sub>2</sub>には負の相関がある。 粘土鉱物の生成・進化環境に取って好都合なバルク組成である CaO-SiO<sub>2</sub>, MgO-SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>には、意義ある相関は認められない。

c. トレンチ5

これらの砕屑性堆積物のバルク組成は、粘土鉱物の生成・進化環境に好ましい地球化学 的な場を提供している。例えば、バルク主成分である SiO<sub>2</sub>(40.5-57.0wt%), CaO(2.0-9.0wt%), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(18.6-27.5wt%), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(6.1-10.6wt%)は著しく高い含有量である。特に、 SiO<sub>2</sub> と Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の含有量は最大であるが、MgO(9.9-15.8wt%)の含有量が最小であることが 特筆できる。

一方、微量成分である NiO(0.5-0.9wt%)と Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0.5-1.1wt%)は、他のトレンチのものと比べると中程度の含有量である。

SiO<sub>2</sub>と主要バルク組成との相関関係を検討すると、CaO-SiO<sub>2</sub>と Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>にはそれ ぞれの負の相関が見られるが、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>と MgO-SiO<sub>2</sub>には殆ど相関が見られない。ま た、砕屑性堆積物・下部層の上位・漸移帯・下位に区分される岩相・岩質への依存性につ いては、下位の方が上位のものと比べて SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の含有量が高いが、CaO, MgO と Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> については両者に大きな差異はない。

このことから、これらの砕屑性堆積物・下部層の下位(泥質部)と上位(砂質部)の間 に岩相・岩質とバルク主要成分とに依存性がある。それが、砂質部より泥質部が粘土鉱物 生成に好ましい地球化学的な環境(場)であることを示している。

 d. トレンチ2(平成27年度実施[1])を含めた Narra3-2 地点のトレンチサイトの砕屑性堆 積物

トレンチ2と今年度実施したトレンチ3~5間のバルク組成変化は、全体としてほぼ同様な傾向を示すが、トレンチ2の方がバルク組成変化幅が大きく、特に、CaO、Na2O含有量が大きく、MgOが少ないことが認められる。

また、トレンチ5は他と比べて、SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>Oの含有量が多いが、MgOが少ない特 質を示している。

e. 試錐孔(DH01):総掘削深度(約 6m)、基盤深度(約 4.1m)

SiO<sub>2</sub>に対するバルク組成変化は試錐孔(DH01)とトレンチの砕屑性堆積物のもとと比べ て大きな差異はないが、基盤岩の粘土質部は MgO の含有量が多く、CaO と Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の含有 量が少ないことが認められる。これは原岩のバルク組成を反映したものと考えられる。

f. 試錐孔(DH02):総掘削深度(約 6m)、基盤深度(約 5m)

SiO<sub>2</sub>に対するバルク組成変化は試錐孔(DH01)とトレンチの砕屑性堆積物のもとと比べ て大きな差異はないが、基盤岩の粘土質部は MgO の含有量が多く、CaO と Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の含有 量が少ないことが認められる。これは原岩のバルク組成を反映したものと考えられる。

- g. 試錐孔(DH03):総掘削深度(約 10m)、基盤深度(約 7.1m) 砕屑性堆積物と基盤岩の粘土質部のバルク組成変化は、試錐孔(DH02)と殆ど差異がない。
- h. 試錐孔(DH04):総掘削深度(約 16m)、基盤深度(約 6.5m)
   砕屑性堆積物と基盤岩の粘土質部のバルク組成変化は、上記試錐孔の(DH02), (DH03),
   (DH04)と比べて大きな差異は認められない。

i. 全試錐孔の岩石化学特性

主要バルク組成の含有量は SiO<sub>2</sub>(32.0-59.8wt%), CaO(0.2-17/9wt%), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(9.1-29.1 wt%), MgO(9.5-43.9wt%), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(0.1-12.0wt%), Na<sub>2</sub>O(0.01-0.37wt%), K<sub>2</sub>O(0.01-0.13wt%) で、微量元素の含有量は、NiO(0.3-1.2wt%), Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(0.3-2.0wt%)である。

但し、基盤岩の粘土質部は、原岩組成を反映し、MgO に富み. CaO と Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> に乏しい岩 石化学的特性を示す。

SiO<sub>2</sub>に対するバルク組成変化を見ると、CaO-SiO<sub>2</sub>と Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>に強い負の相関が あるが、MgO-SiO<sub>2</sub>には比較的良い負の相関が認められるが、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>には試錐孔 (DHO2)を除けば負の相関が見られる。なお、Na<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub>と K<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub>には比較的良い正 の相関がある。一方、NiO-SiO<sub>2</sub>, Co<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>と Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>には負の相関で、特に前者 2つは調和的な負の相関がみられる。

これらの岩石化学的特性から、トレンチや試錐調査で取得した両者の砕屑性堆積物との 間にはバルク組成の差異はない。合わせて、基盤岩の粘土質部と比べてバルク組成上に有 意義な差異は認められない。これは、砕屑性堆積物と粘土化が進んでいる基盤岩には、成 因的(起源)に同じであることと、パラワンオフィオライト超苦鉄質複合岩体の定置後の 一連の風化・浸食・運搬・沈積(堆積)過程の地球化学的環境のもとで形成されたことを 示唆するものである。

#### j. 粘土鉱物生成環境に係る岩石化学的特性

これらのすべての XRF 分析の結果に基づき、風化・侵食・運搬・堆積・岩石化(固結化 に伴う初期の続成作用も含む)の生成・熟成プロセスもと、粘土鉱物・変質鉱物(二次鉱 物も含む)の生成環境を原岩バルク組成の岩石化学的特性に着目して検討する。

大部分の試料は、パラワンオフィオライト超苦鉄質複合岩体を構成する苦鉄質岩石のハ ルツバージャイト(主成分鉱物は斜方輝石、かんらん石で、少量の単斜輝石および、少量 のクロム鉄鉱と磁鉄鉱など)起源の砕屑性堆積物のために原岩のバルク組成を反映し、MgO に富み、CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>に著しく乏しく、Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O にも乏しい。さらに,シリカ成分(SiO<sub>2</sub>)に 乏しい不飽和な超塩基性岩としての特性がある。また、オフィオライトの特性として NiO, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(一部、白金族も随伴)に富む。

この一例として、Narra 地区・調査サイトの南西部に広く分布している蛇紋岩質ハルツ バージャイトの著しいラテライト化に伴い Ni-成分が溶脱・富化(Ni-<Cr> 酸化物・硫 化物などの鉱石)し、その結果 Ni-鉱床(CITI 鉱山)を形成している。勿論、この鉱床 は現在稼業中である。

一般的には、粘土鉱物の生成・熟成に好ましいバルク組成としては、SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO,
MgO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, FeO と水が必要である。SiO2 の組成範囲は、トレンチ試料では 31.857.0 wt.%、試錐コアでは 32-59.8 wt.%で両者間にはその差異が認められないが、苦鉄質
岩石起源にも拘わらず一部(トレンチ5で3試料、試錐孔(DH01)で2試料、(DH02)で3
試料、(DH03)で2試料)シリカ成分の高いものがあり、試錐コアの方が顕著である。

最初に、主要なバルク組成の中で、SiO<sub>2</sub>と弱い負の相関がみられるのが MgO と、幅広 な相関がみられるのが CaO であるが、二つの相関傾向がみられる。それは緩慢な相関と急 勾配のものである。但し、強い負の相関がみられるのは Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> である。

また、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>との相関は明らかに2つのグループに分かれている。一つのグループ(トレンチ5)は、ある一定の含有量(~8 wt.%)を保っている。二つめのグループの4 wt.%以下で、緩慢な負の相関がみられる。

一方、副成分である NiO, Co<sub>2</sub>O<sub>3</sub>とはかなり強い負の相関があり、Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>にも負の相関が みられる。

ここでは、粘土鉱物や変質鉱物、特にアルミノケイ酸塩鉱物のスメクタイト族粘土鉱物の生成環境に好都合な地球化学的な場として不可欠である CaO, MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>のマスバランス(バルク組成)の中で、取り分け Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の地球化学的挙動が重要である。この意味で、トレンチ5の鉱物学的変遷プロセスと合わせて考察することが必要である。

(5) 誘導プラズマ質量分析 (ICP-MS) 及び Si 濃度分析

表 2.6.3-1 に示す Narra3-2 地区トレンチの 11 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 SiO<sub>2</sub> 濃度と合わせて、それら の結果を表 2.6.4-27 に示す。

分析結果からは、SiO<sub>2</sub> 濃度がトレンチ4>>トレンチ5>トレンチ3という明確な傾向が示さ れた。一方、Al 濃度について総じてトレンチ4の濃度が高いが、SiO<sub>2</sub> 濃度ほどその差は顕著 ではなかった。

EI.	Unit	PWT03-16-C2-002	PWT03-16-Rh-007	PWT03-16-Rh-008	PWT03-16-Rh013	PWT03-16-Rh-014	PWT04-16-Rh-001	PWT04-16-Rh-003	PWT04-16-Rh-005	PWT05-16-Rh-009	PWT05-16-Rh-011	PWT05-16-Rh-012	PWT05-16-Rh-013
Na		0.11	0.04	0.06	0.06	0.07	0.06	0.03	0.08	0.07	0.12	0.26	0.27
Mg	wt%	11.92	16.81	10.79	8.92	7.73	13.40	19.31	14.02	8.71	12.82	7.62	6.42
Al		1.81	1.00	1.17	0.99	1.38	1.34	1.12	1.42	2.79	1.65	4.10	3.95
Р		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
K		0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.03	0.02	0.06	0.07	0.06
Ca		2.54	1.97	5.98	8.86	8.05	4.79	2.35	2.40	6.27	2.86	1.65	1.39
Sc		26.65	15.12	16.80	14.87	19.87	19.27	11.70	18.57	22.86	16.42	28.44	25.19
Ti		0.05	0.02	0.03	0.02	0.04	0.03	0.02	0.03	0.05	0.03	0.06	0.06
V	ppm	78.47	47.60	50.62	48.33	59.90	52.40	42.32	53.91	51.82	42.64	63.81	52.00
Cr		2786.60	1880.03	1964.54	1662.70	2029.61	2090.17	1793.67	1941.15	1493.37	1538.66	1725.34	1468.73
Mn		0.30	0.14	0.08	0.16	0.15	0.12	0.20	0.20	0.33	0.44	0.24	0.16
Fe	WL 70	13.65	10.83	10.81	9.41	13.31	12.03	8.00	11.38	12.32	9.73	11.67	10.71
Co		279.83	190.53	187.73	203.16	238.23	198.37	146.61	242.47	275.25	238.08	220.71	198.37
Ni		5696.39	4386.05	4826.02	4234.58	5286.61	5437.20	4517.30	5312.34	5215.72	5068.34	4440.97	3996.22
Cu		17.91	10.64	14.12	15.59	19.82	19.39	9.83	21.88	43.91	27.26	71.54	62.75
Zn		486.06	433.79	438.67	138.74	161.23	151.76	135.66	152.69	152.30	142.18	145.60	75.87
As		0.68	0.46	0.38	0.27	0.51	0.64	0.11	0.40	0.47	0.32	0.38	0.40
Rb		0.19	0.10	0.15	0.26	1.24	0.18	0.19	1.35	0.82	1.65	1.90	2.04
Sr		33.48	18.66	22.67	34.20	37.53	43.29	22.47	59.12	54.33	64.59	52.71	44.68
Y		3.01	1.00	1.26	1.52	1.98	1.64	0.82	1.67	1.87	1.44	3.54	3.26
Zr		5.41	1.78	2.39	2.35	3.49	3.12	1.19	3.72	2.93	1.58	3.68	3.95
Nb		0.25	0.08	0.08	0.11	0.16	0.11	0.03	0.18	0.12	0.07	0.14	0.15
Mo		0.10	0.10	0.05	0.07	0.06	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.01	0.01
Cs		0.05	0.04	0.04	0.10	0.11	0.08	0.07	0.29	0.24	0.39	0.20	0.18
Ba	-	2.63	2.14	2.95	2.19	26.86	1.86	1.87	3.84	2.83	6.66	5.66	5.39
La		0.88	0.34	0.38	0.45	0.62	0.46	0.19	0.60	0.53	0.26	0.69	0.68
Ce		1.84	0.62	0.67	0.85	1.18	0.84	0.34	1.34	0.93	0.50	1.37	1.31
Pr	ppm	0.30	0.11	0.13	0.13	0.19	0.14	0.07	0.17	0.15	0.09	0.23	0.21
Nd	PPIN	1.32	0.49	0.60	0.67	0.92	0.70	0.34	0.83	0.71	0.43	1.13	1.08
Sm		0.37	0.13	0.17	0.19	0.24	0.21	0.10	0.22	0.22	0.15	0.36	0.33
Eu		0.12	0.05	0.06	0.06	0.08	0.07	0.03	0.07	0.08	0.06	0.15	0.14
Gd		0.44	0.16	0.20	0.21	0.31	0.26	0.12	0.25	0.29	0.20	0.47	0.44
Tb		0.07	0.02	0.03	0.04	0.05	0.04	0.02	0.04	0.05	0.03	0.08	0.08
Dy		0.43	0.15	0.20	0.22	0.29	0.24	0.12	0.27	0.32	0.23	0.56	0.53
HO		0.10	0.03	0.05	0.05	0.07	0.06	0.03	0.06	0.07	0.05	0.13	0.11
Er		0.30	0.10	0.14	0.16	0.21	0.17	0.09	0.18	0.21	0.16	0.39	0.35
1111 X7b		0.03	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.01	0.03	0.03	0.02	0.06	0.03
ID		0.32	0.12	0.15	0.16	0.22	0.19	0.09	0.19	0.23	0.10	0.38	0.05
		0.05	0.02	0.02	0.03	0.04	0.03	0.01	0.03	0.03	0.03	0.06	0.05
Ta Ta		0.02	0.00	0.08	0.09	0.15	0.11	0.04	0.15	0.01	0.00	0.15	0.15
Ph		1.67	1.21	1.30	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	1.27
Th		0.17	0.05	0.06	0.90	0.12	0.08	0.02	0.15	0.00	0.47	0.01	0.12
II		0.02	0.05	0.00	0.07	0.12	0.08	0.02	0.15	0.08	0.04	0.10	0.02
SO	(ma/kc)	0.02	0.62	0.02	0.02	0.05	0.02	7 30	8.81	62.14	47.53	39.47	70.12
502	1118/ Kg/	0.14	0.07	0.32	0.20	0.40	2.41	1.37	0.01	02.14	47.33	37.47	10.12

# 表 2.6.3-12 Narra3-2 地区トレンチ試料の 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

- (6) 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15~20µm 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 2.6.3-10 に示す。

式 <b>1.0.0</b> 10 \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \	表 2.6.3-10	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
PWT03-16-C1-004	自然乾燥後、砂礫 Φ2mm アンダーの粒子で薄片作製。表面は酸化し
	褐色化しているが、内部は還元状態あったことを示す青緑色を呈し
	ていた (図 2.6.3-39)。
PWT03-16-C2-001	コア試料内部の口30mm 程度を切り出し、薄片を作製した(図
	$2.6.3-40)_{\circ}$
PWT04-16-Rh-009	試料を縦断方向に切断し、内部面から薄片を作製した(図 2.6.3-41)。
PWT05-16-Rh-010	自然乾燥後、砂礫Φ2mmアンダーの粒子で薄片作製(図 2.6.3-42)。
PWT05-16-Rh-016	礫を切断し、内部から薄片を作製した(図 2.6.3-43)。
PWT05-16-Rh-017	同上 (図 2.6.3-44)。



自然乾燥前



自然乾燥後

図 2.6.3-47 PWT03-16-C1-004の試料の様子



## 図 2.6.3-48 PWT03-16-C2-001の試料の様子



図 2.6.3-49 PWT04-16-Rh-009の試料の様子



自然乾燥前



自然乾燥後

### 図 2.6.3-50 PWT05-16-Rh-010の試料の様子


図 2.6.3-51 PWT05-16-Rh-016の試料の様子



図 2.6.3-52 PWT05-16-Rh-017の試料の様子

2) 凡例

〔岩片・植物片〕

SP:蛇紋岩 LPS:低温沈澱性蛇紋石類集合体 TR:トレモラ閃石岩 PLT:植物遺体

〔初生鉱物・鉱物片〕

Ol:かんらん石 Cpx:単斜輝石 Opx:斜方輝石 Pl:斜長石 Qz:石英 Cr:クロムスピネル Zr:ジルコン

〔2次鉱物〕

Sm:スメクタイト(一般) Ant:アンチゴライト Chr:クリソタイル Liz:リザルダイト Lps:低温沈澱性蛇紋石類(クリソタイル、ジュエライト、微細なブルーサイトの可能性を含 む) Wsp 蛇紋石(やブルーサイトの)風化鉱物(パイロオーライトやコーリンガイト) Br:ブルーサイト Mt:磁鉄鉱 Wo:珪灰石 Tr:トレモラ閃石 Chl:緑泥石 Cb:炭酸塩鉱物 Amo:非晶質物質 Pop:沈澱性不透明物質(総称)

〔その他の記号〕

MX:基質 CM:セメント<sup>1</sup> IP:粒間孔隙

( ):仮像 MX:基質 CM:セメント FP:フラクチャー孔隙 〔 〕:脈・プール

<sup>1</sup> 粒間充填物質。以下、光学顕微鏡観察における記載では"セメント"を粒間充填物質の意味で使用。

## 3) 偏光顕微鏡写真および観察

今年度掘削したトレンチ内から採取した砕屑性堆積物の4試料と、層内礫岩の極少礫(長径3cmの扁平した亜礫)の2試料を対象にそれぞれの岩石鉱物学的調査を実施した。その内 訳はトレンチ3からPWT03-16-C1-004とPWT03-16-10-C2-001(両者とも大口径試料)の 2試料で砕屑性堆積物・下部層の粘土質部から採取し、トレンチ4からはPWT04-16-Rh-009 の1試料で砕屑性堆積物・下部層の粘土質部から採取し、トレンチ5からは、PWT05-16-Rh-010の1試料で砕屑性堆積物・下部層の砂質部から採取し、合わせて2試料の層内礫岩を採 取した。これら総計の6試料は、岩石鉱物学的特徴を考察するために薄片を作製して、偏光 顕微鏡観察を行った。

但し、粘土質の砕屑性堆積物については、試料の形状上、直径 2mm 以下の残渣(岩石片 や鉱物粒)での薄片作製となり、粘土質部(マトリックス部)での変質鉱物の同定・組成・ 組織・共生関係などに関する詳細なデータ・知見を取得することに限界があった。 a. PWT03-16-C1-004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 2.6.3-45~図 2.6.3-49 に示す。
 [砕屑性堆積物・下部層(泥質部)]
 オープンニコル



クロスニコル



スケール 1.0 mm

図 2.6.3-53 偏光顕微鏡写真(PWT03-16-C1-004, その1)



クロスニコル



スケール 0.1 mm

【備考】低温沈澱性蛇紋石集合体(LPS)は縞状の沈澱組織を示し、磁鉄鉱ダストを伴わない. 褐色化しており、風化鉱物に変化しつつある。干渉色が暗い部分はジュエライト(不良結晶度の蛇紋石類)、干渉色が黄色の部分はブルーサイトの可能性。

図 2.6.3-54 偏光顕微鏡写真(PWT03-16-C1-004, その2)



クロスニコル



スケール 0.1 mm





クロスニコル





図 2.6.3-56 偏光顕微鏡写真(PWT03-16-C1-004, その4)

\_



クロスニコル





図 2.6.3-57 偏光顕微鏡写真(PWT03-16-C1-004, その5)

(a) 肉眼的特徵

砂礫の基質を、新鮮面が青緑色を呈する粘土状物質が充填。全体として軟質で、 空気に触れると淡褐色に変化。

(b) 岩石組織

特になし。

- (c) 岩片・鉱物片・生物遺体(または初生鉱物)SP>>Opx>Cpx>PX・TR>LPS・Ac・Cr・Tr
  - SP は亜角~円。径 2.0mm 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。Tc 脈の生成するものあり。また、ブレイデッド・マット組織(綾織り組織)を示すアンチゴライト蛇紋岩の粒子を少量含む。Chr 集合体粒子もある。Opx や Cpx が残存することあり。まれに Ol が残存するものもある。Sp のほか、Chl が生成することあり。さらに、Wsp が広く生成。
  - Opx は亜角~円。しばしば周囲に沿って蛇紋石化が進み、それがさらに褐色の Wsp 化。径 2.0mm 以下。
  - ・ Cpx は亜角~円。へき開が細かく発達し、しばしば異剥石様。径 1.6mm 以下。
  - PX は亜円。(Px)の集合体であるが、完全に変質し、(Opx)か(Cpx)かの区別できず。
    径 2.0mm 以下。
  - TR は長柱状の Tr 集合体。Chl を伴う。LPS は円。縞状の沈澱組織を示す。Mt ダストを伴わない。ジュエライト(不良結晶度蛇紋石類)とブルーサイトの縞状互 層かもしれないが、風化し、褐色を呈する。
  - ・ Ac は淡青緑色~淡黄色の多色性。Cpx?をそっくり交代するため、伸長等不明。
  - ・ Cr は角~亜円。暗赤褐色(チョコレート色)、一部淡褐色。径 0.3mm 以下。
  - ・ Tr は角~亜角、柱状。
- (d) 基質とセメント1

〔基質〕

褐色~暗褐色で微細な風化鉱物が主体。

- (e) 二次鉱物
  - ・ 基質は黄褐色に風化した微細な Sp 片ほかと、それらをさらに充填する極めて微細 な葉片状~粒状物質よりなる。Sm や Wsp が主体と考えられるが、詳細不明。
  - ・ Wsp はまた、SP や Opx 粒子をしばしば交代。
- (f) 備考

- · 砂礫。Ф2mm アンダーの粒子で薄片作製(粒径の記載は参考程度)。
- ・ 乾燥前の試料は表面が褐色に酸化するが、深さ数 mm より内部は青緑色を呈する。 すなわち,還元環境にあったことを示す。
- 砂礫の基質を上述の青緑色粘土が充填。
- クロムスピネルは、Cr/Al 比が高い暗赤褐色のもの(ダナイトやハルツバージャイト由来)と、Cr/Al 比が相対的に低い淡褐色のもの(レルゾライに由来の可能性)がある。
- ・ LCS は蛇紋岩化作用停止時に、蛇紋岩のフラクチャーを流動する地下水が高 Mg となり、沈澱した可能性を示す。
- (g) 考察

偏光顕微鏡観察から、この試料は蛇紋岩質の細粒砕屑性堆積物で、基質(マトリック ス)は青緑色の粘土質物質(粘土鉱物、縞状組織を示す低温型沈殿性蛇紋石類の集合体、 滑石などと、風化鉱物 <パイロオーライトやコーリンガイト が主体)で充填されてい る。主要な砕屑物は、パラワンオフィオライト基盤岩を構成する超苦鉄質岩の岩石片・ 鉱物・生物遺体(木根が主体)などから構成されている。これらの砕屑物を構成する鉱 物は、亜角礫から円礫上(長径 2mm 以下)の蛇紋石類(低温型のメッシュ組織のクリ ソタイル(Chrysotile)と砂時計構造のリザルダイト(Lizardite))と、少量の高温型の卓 上・綾織組織のアンチゴライト(Antigorite)、複輝石類(大部分が斜方輝石と、少量の単 斜輝石)、かんらん石と角閃石類などから構成されている。これらの特徴的な蛇紋石は、 かんらん石、輝石などの苦鉄質鉱物の変質作用(蛇紋石化作用)で生成され、その過程 で生成された自形の磁鉄鉱を包有し、少量であるが初生鉱物であるクロマイト(クロム 鉄鉱)が集合状に産状している。

また、一部であるが緑泥石、陽起石(Actinolite)が前駆鉱物の苦鉄質鉱物を交代しての 生成が観察される。

一方、砕屑物を構成する岩片としては、蛇紋岩質超塩基性岩や、極少量であるが透角 閃岩の岩片も観察される。これらの砕屑性堆積物の源岩推察には、特徴的に産状するク ロムスピンネルの組成[Cr#; (C /Cr + Al), Mg#:(Mg / Mg + Fe+ 2)、および Cr /Al の原子 比]の相違により、その起源を明らかにすることが出来る[47]。これらの組成変化から、 この砕屑物の供給源はハルツバージャイト、ダナイトおよび、レルゾライトのような超 苦鉄質岩由来のものと考えられるが、鉱物 3 成分系(系:カンラン石-斜方輝石-単斜輝 石)での鉱物量比からは、ハルツバージャイトが優勢である。 b. PWT03-16-C2-001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 2.6.3-50~図 2.6.3-54 に示す。
 [砕屑性堆積物・下部層(泥質部):直径 2mm 以下]
 オープンニコル



クロスニコル



備考:基質はオープンニコルで褐色のもの(MX1)と、粒子ー褐色基質が分離・ブロック化した間を充填する黒褐色基質の部分(MX2)がある。

図 2.6.3-58 偏光顕微鏡写真(PWT03-16-C2-001, その1)



クロスニコル



スケール 1.0mm \_\_\_\_\_

備考:SPはブルーサイト化した蛇紋岩の粒子と考えられる。

図 2.6.3-59 偏光顕微鏡写真(PWT03-16-C2-001, その2)



クロスニコル



スケール 0.1mm \_\_\_\_\_

備考:Amoは分離ブロック間の孔隙ないし、溶脱痕を充填するように見える。

## 図 2.6.3-60 偏光顕微鏡写真(PWT03-16-C2-001, その3)



クロスニコル



スケール 0.1mm \_\_\_\_\_

図 2.6.3-61 偏光顕微鏡写真(PWT03-16-C2-001, その4)



クロスニコル



スケール 0.1mm \_\_\_\_\_

備考:基質の孔隙の壁から、白色のほぼ非晶質の鉱物(オパールAなどのシリカ鉱物?)が 成長し、残った空間を暗褐色の非晶質物質が充填する。

図 2.6.3-62 偏光顕微鏡写真(PWT03-16-C2-001, その5)

- (a) 肉眼的特徴褐色を呈する軟質の砂礫。
- (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 紋岩主体の粒子が散在する。これらがブロック化し、分離して、その空間を黒色の基質 が充填する。この部分は前者より少ないが、やはり蛇紋岩や、植物遺体などの粒子が散 在する。さらに、これらには溶脱痕状の粒子が抜けた跡が認められ、結晶質・非晶質の 物質が充填する。

(c) 岩片・鉱物片・生物遺体(または初生鉱物)〔岩片・鉱物片〕

 $SP \!\!\!> \!\!Opx \!\!\!> \!\!Cpx \!\!\!> \!\!PX \!\cdot PLT \!\cdot TR \!\!\!> \!\!LPS \!\cdot Ac \!\cdot Cr \!\cdot Tr$ 

- SP は亜角~円。径 2.0mm 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。Tc 脈の生成するものあり。また、ブレイデッド・マット組織(綾織り組織)を示すアンチゴライト蛇紋岩の粒子を少量含む。Chr 集合体粒子もある。Opx や Cpx が残存することあり。まれに Ol が残存するものもある。Sp のほか、Chl が生成することあり。さらに、Wsp が広く生成。
- Opx は亜角~円。しばしば周囲に沿って蛇紋石化が進み、それがさらに褐色の Wsp 化。径 2.0mm 以下。
- ・ Cpx は亜角~円。へき開が細かく発達し、しばしば異剥石様。径 1.6mm 以下。
- PX は亜円。(Px)の集合体であり、完全に変質しているため、(Opx)か(Cpx)かの区 別できず。径 0.2mm 以下。
- TR は長柱状の Tr 集合体. Chl を伴う。
- PLT は柱状、亜角~亜円。長径 3.0mm 以下。
- ・ LPS は円。縞状の沈澱組織を示す。Mt ダストを伴わない。ジュエライト(不良結 晶度蛇紋石類)とブルーサイトの縞状互層かもしれないが、風化し、褐色を呈する。
- ・ Ac は淡青緑色~淡黄色の多色性。Cpx?をそっくり交代するため、伸長等不明。
- ・ Cr は角~亜円。暗赤褐色(チョコレート色)、一部淡褐色。径 0.3mm 以下。
- ・ Tr は角~亜角、柱状。
- (d) 基質とセメント<sup>1</sup>

〔基質〕

基質は MX1 と MX2 に区別できる。MX1 はオープンニコルで褐色。この MX1 と含ま れる粒子からなるブロックが分離した、その空間を充填して、黒褐色基質の MX2 が生 成。粒子の散在が目立つので基質としたが、セメント<sup>1</sup>の暗褐色 Amo と類似の物質が主 体である可能性が高い。

[セメント1]

Amo

- ・ Amoは主として暗褐色〜褐色で、基質間の分離した空間や、PLT中の孔隙を充填。 また、白色半透明のSi?(オパールA?)が、溶脱痕状の孔隙の壁からコロフォーム状 に成長。残った空間を上記暗褐色Amoが充填。
- (e) 二次鉱物

Sm>Wsp>Am

- Sm は基質(MX1)に広く生成。
- WspはSPなどを交代。特にリザルダイトークリソタイル蛇紋岩や、Opx粒子で著しい。
- ・ Amoは MX2 中に黒褐色物質として生成。また、孔隙の充填物質として、2 種類の 物質が生成。
- (f) 備考
  - ・ 黒褐色~暗褐色の非晶質物質は、Fe(3価)を含むであろう。
  - ・ 組織の特徴は、溶解による溶脱痕(溶解孔隙)の生成と、再沈澱が起こっているこ とを示す。
- (g) 考察

この試料は上記 PWT03-16-C1-004 試料同様に蛇紋石質の細粒砕屑性堆積物で、基質 は褐色と黒色に区分される。基質部には蛇紋石(低温型の沈殿性蛇紋石)、植物片など から構成され、褐色部にはスメクタイトや非晶質物質(オパールかシリカ鉱物)に充填 されている。 主な砕屑物は、超苦鉄質岩類の岩片・鉱物・植物遺体などから構成され ている。

この砕屑物を構成する鉱物や岩片についても、上記の試料との相違はないが、前駆鉱物の溶脱に伴う溶解孔隙が屡々観察される。この孔隙内に再沈殿鉱物(シリカまたはオパール<?>の充填、および、孔隙の壁面にコロフォーム状のブルーサイト<滑石>)が生成している。

この砕屑物を構成するクローマイトの「CR#と Mg#の組成比」及び鉱物3成分の量比から、ハルツバージャイト優勢の超苦鉄質岩類から供給されたものと考えられる。

c. PWT04-16-Rh-009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 2.6.3-55~図 2.6.3-59 に示す。
 [砕屑性堆積物・下部層(泥質部):直径 2mm 以下]
 オープンニコル



スケール 1.0mm -





スケール 1.0mm -

Br

【備考】「Amo+Br」は溶脱痕を充填した可能性と、これらが別の場所で、形成された粒子であるという2つの可能性が考えられる。





クロスニコル



スケール 0.1mm \_\_\_\_\_備考:Br?は分離したブロック間ないし、溶脱痕を充填。

図 2.6.3-65 偏光顕微鏡写真(PWT04-16-Rh-009, その3)



クロスニコル



スケール 0.1mm -

備考:「Br?+Amo」は溶脱痕(溶解孔隙)を充填して沈澱した可能性が高い。





クロスニコル



スケール

図 2.6.3-67 偏光顕微鏡写真(PWT04-16-Rh-009, その5)

- (a) 肉眼的特徴褐色を呈する、やや固結した砂礫
- (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 7.0mm 以下の 蛇紋岩主体の円磨粒子が散在する。これらの一部はブロック化し、分離して、その空間 を黒色の基質が充填する。

(c) 岩片・鉱物片・生物遺体(または初生鉱物)

〔岩片·鉱物片〕

## SP>>PX·GBS>Opx>Cpx>Cr

- SPは亜角~亜円。径 6.5mm以下. ほとんどが、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(多くは Wsp 化)。まれにアンチゴライト濃集脈を伴う。
  また微量ながら、アンチゴライト蛇紋岩の粒子あり。
- PX は亜円。径 7mm 以下。Cpx と少量の Opx からなり、Cr(不透明鉱物化)のシンプレクタイトを伴う。Chl が少量生成。
- GBS は亜円。径 4mm+。自形 Pl 斑晶の仮像が認められる。完全に変質し、Chl を生じ、さらに Sm などに交代。
- Opx は亜角~亜円。径 3.5mm 以下。ときに Cpx の他形、粒状結晶を伴う。一部 は変質し、Liz, Chr, Wsp などを生じる。
- · Cpx は角~亜角、柱状。径 0.3mm 以下。
- · PLT は柱状、亜角~亜円。長径 3.0mm 以下。
- ・ Cr は亜円、粒状。径 0.8mm 以下。赤鉄鉱。一部周囲から Mt 化。
- (d) 基質とセメント<sup>1</sup>

〔基質〕

基質は MX1 と MX2 に区別できる。MX1 は基質の大部分を占め、オープンニコルで 褐色。この MX1 と粒子からなるブロックが、分離した空間を充填して、黒褐色基質の MX2 が生成。

[セメント1]

Amo+Br?

- ・ Amo+Br?は、MX1 と MX2 のそれぞれや、両者の境界付近に形成された溶脱痕ないし、フラクチャー状の孔隙を充填。
- (e) 二次鉱物

Sm>Wsp

[Amo+Br?]

- ・ Sm は淡褐色、微細で、基質に広く生成。また、無色(~淡褐色)で、放射状集合 が球粒状をなす(干渉色淡黄)ことあり。
- ・ Wsp は鏡下で淡褐色〜褐色。Sp を広く交代。
- 〔Amo+Br?〕の Amo は孔隙の壁から成長。無色。干渉色暗灰で、しばしば球粒状。 (オパール?)残りの空間を埋めて、暗褐色または淡褐色〜無色で、干渉色黄灰の 繊維状物質が充填。Feの多い Br の可能性。これは繊維結晶の球粒状集合体のこと もある。また、壁側に無色で繊維状結晶の球粒状集合体(干渉色黄:Br?が成長し、 残った空間を褐色の Amo が埋めることもある)。
- (f) 備考
  - 特になし。
- (g) 考察

この試料は蛇紋岩質の砕屑性堆積物で、形状としては上記2件のものと著しい相違は ないが、鉱物粒としては、単斜輝石が斜方輝石より多く、これら輝石の一部にクロマイ トのシンプレクタイト(二次的に生成された複数の鉱物連晶)を伴っているのが特筆さ れる。

蛇紋石については、多くの輝石類の蛇紋岩化作用により交代されて生成されているが、 一部緑泥石に変質しているのが観察される。

基質は褐色部と黒褐色に区分され、溶脱痕や割れ目状の孔隙を形成している。この孔隙には、球粒状のオパール(?)か、繊維状のFeに富むブルーサイトにより充填している。 また、基質中のスメクタイトは淡褐色,微細で、その形状が放射状集合の球粒状を示している。

岩片としては、殆どがリザルダイトークリソタイル蛇紋岩やアンチゴライト蛇紋岩お よび、緑色された玄武岩が観察される。この玄武岩の自形斜長石斑晶は完全に仮像化し、 緑泥石に変質し、さらにスメクタイトへ交代されている。

この砕屑物は、クロマイトの「Cr#・Mg#の組成」と鉱物量比からレールゾライト由 来が優勢と考えられる。 d. PWT05-16-Rh-010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 2.6.3-60~図 2.6.3-63 に示す。
 [砕屑性堆積物・下部層(砂質部)]
 オープンニコル



クロスニコル



スケール 1.0 mm \_\_\_\_

備考:写真中のLPSは縞状の組織を示す沈澱性蛇紋石(クリソタイル主体)。褐色に風化鉱物化。

図 2.6.3-68 偏光顕微鏡写真(PWT05-16-Rh-010, その1)



クロスニコル



スケール

図 2.6.3-69 偏光顕微鏡写真(PWT05-16-Rh-010, その2)



クロスニコル



スケール





スケール

図 2.6.3-71 偏光顕微鏡写真(PWT05-16-Rh-010, その4)

- (a) 肉眼的特徴淡褐色を呈する、未固結の礫混じり砂。
- (b) 岩石組織特になし。
- (c) 岩片・鉱物片・生物遺体(または初生鉱物)
  〔岩片・鉱物片〕
  SP>>Opx>TC・GBS>LPS・PLT・Cpx>QR・Cr・Pl・Qz
  - Pは亜角~亜円。径 2.0mm 以下。大部分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。微量のアンチゴライト蛇紋岩を含む。Opx や Ol の残存するもの あり。多くは黄褐色~褐色に風化し、Wsp を生じる。
  - Opx は亜角~亜円。径 1.0mm 以下。部分的に Liz 化さらに Wsp 化。
  - ・ TC は亜円。径 1.0mm 以下。脈状のタルク集合体が円磨粒子化したもの。
  - GBS は亜円。径 1.9mm。玄武岩組織の仮像のみを残し完全変質。Chl の他 Pum らしい鉱物含む。
  - ・ LPS は亜角~亜円。径 1.7mm。縞状の沈澱組織を示し、クリソタイル主体であったと考えられるが、黄褐色の Wsp 化。
  - ・ PLT は長柱状~板状。長径 1.8mm 以下。
  - · Cpx は角~亜角。淡褐色。径 0.3mm 以下。
  - ・ QR は亜円。長径 0.6mm 以下。Tr を伴う。
  - ・ Cr は亜角~亜円。径 0.5mm 以下。暗赤褐色(チョコレート色)。
  - · Pl は角。長径 0.5mm 以下。
  - ・ Qz は角。長径 0.3mm 以下。
- (d) 基質とセメント<sup>1</sup>

〔基質〕

褐色の基質と黒褐色の基質がある。他の試料の産状から見て、分離した初生基質であ る褐色のMX1とその間を充填する黒褐色基質のMX2から構成されていた可能性が高い。 〔セメント1〕

粒間充填状に沈殿する単一物質からなるセメント1は認められない。

(e) 二次鉱物

Sm>Wsp>Chl

- ・ Sm は淡褐色、微細で、基質の主体。
- ・ Wsp は蛇紋岩の粒子を交代。

· ChlはSPやOpxの一部に生成。

(f) 備考

· Φ2mm アンダーの粒子で薄片を作製(粒径の記載注意)。

(g) 考察

この試料は蛇紋石質の砕屑性堆積物で、形状としてはこれまでの砕屑性堆積物との差異は認められない。

鉱物粒としてはほとんどが蛇紋石、複輝石で、少量のかんらん石、透角閃石、クロマ イトなどである。蛇紋石は複輝石とかんらん石の蛇紋岩化作用により生成された。

岩片としては大部分がリザルダイトークリソタイル蛇紋岩と極少量のアンチゴライト蛇紋岩で、少量の玄武岩が観察される。この玄武岩には自形の斜長石斑晶と石英が含有され、苦鉄質鉱物は完全に変質し、その一部に緑泥石とパンペリーナイト(恐らく、灰長石と透輝石の反応生成物<?>)の生成が観察される。

基質は褐色と黒色部分に区別され、大部分が低温型沈殿性蛇紋石類の集合体を形成している。

この砕屑物は、クロマイトの「Cr#・Mg#の組成」と鉱物量比からハルツバージャイト由来が優勢と考えられる。

e. PWT05-16-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 2.6.3-64~図 2.6.3-67 に示す。
 [砕屑性堆積物・下部層(砂質部の層内礫岩)]
 オープンニコル



スケール 1.0 mm \_\_\_\_\_ 備考:スカルンの1種の可能性と高温型ロジン岩の可能性がある。

図 2.6.3-72 偏光顕微鏡写真(PWT05-16-Rh-016, その1)



クロスニコル



スケール

0.1 mm





クロスニコル



スケール

図 2.6.3-74 偏光顕微鏡写真(PWT05-16-Rh-016, その3)



クロスニコル





図 2.6.3-75 偏光顕微鏡写真(PWT05-16-Rh-016, その4)

(a) 肉眼的特徵

暗緑色を呈する塊状岩。灰白色の鉱物が、粒間充填状や脈状に生成。暗緑色部は微細 な薄板状の粘土鉱物集合体。

- (b) 岩石組織
  ネマトブラスティック組織。
- (c) 岩片・鉱物片・生物遺体(または初生鉱物)特になし。
- (d) 基質とセメント<sup>1</sup>特になし。
- (e) 二次鉱物

Wo>>Chl>>Zr

[Br]

- ・ Woは長柱状結晶の束状集合体。干渉色灰で、消光角が小さい。伸長負。
- ・ Chl は板状。X'=淡緑色、Z'=エメラルドグリーンの多色性顕著。干渉色灰~インク ブルー。Woの粒間に集合体をつくって分布。
- ・ Zr は自形~半自形、短柱状。長径 0.1mm 以下。
- ・ 〔Br〕は脈をつくる。微細なフレーク状鉱物の集合。オープンニコルで淡褐色。干 渉色黄。直消光、伸長正。鉄を含むブルーサイトか?
- (f) 備考
  - ・ 目視で灰白色の粒間充填状~脈状の部分は、鏡下では微細鉱物集合体で、暗色。一 方、目視で暗緑色の塊状部は、鏡下では無色。
  - ・ スカルンの1種である可能性と高温型のロジン岩である可能性がある。
- (g) 考察

この試料は、肉眼観察では暗緑色で直径 3cm 程度の扁平状亜礫で、表面には脈状(幅約5mm)の灰白色の鉱物が観察される。この礫には、長柱状の珪灰石(Wollastonite)が含有され、それらの鉱物粒間に緑泥石や Fe に富む滑石が充填している。さらに、角閃石がネマトブラスティック組織(多数の針状ないし、繊維状で、一定方向の配列する変性組織)を示し、自形から半自形で短柱状のジルコン(Zircon)が観察される。

また、暗緑色部には微細な薄板状の粘土鉱物の集合体が観察される。

これらの構成鉱物や組織の特徴から、珪灰岩の可能性がある。

f. PWT05-16-Rh-017 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 2.6.3-68~図 2.6.3-71 に示す。 [砕屑性堆積物・下部層(砂質部の層内礫岩)]



図 2.6.3-76 偏光顕微鏡写真(PWT05-16-Rh-017, その1)





1.0mm

スケール

図 2.6.3-77 偏光顕微鏡写真(PWT05-16-Rh-017, その2)
オープンニコル





スケール

0.1 mm



オープンニコル



クロスニコル



スケール

図 2.6.3-79 偏光顕微鏡写真(PWT05-16-Rh-017, その4)

(a) 肉眼的特徵

緑灰色を呈する、塊状ち密な岩石。暗緑色を呈する直径 5mm 以下のクロットが散在。 灰白色の鉱物細脈あり。

(b) 岩石組織

デカッセイト組織。直径 2~5mm の珪灰石の東状集合体が斑状に散在。その間を、柱 状のトレモラ閃石が充填する。

(c) 岩片・鉱物片・生物遺体(または初生鉱物)

〔岩片・鉱物片〕

(Px)?

- ・ (Px)?は他形、径 0.5mm 以下。離溶ラメラらしい仮像を残し、Chl, Tr に交代。
- (d) 基質とセメント1特になし。
- (e) 二次鉱物

Tr>Wo>Op

[Chl+Amo]

- ・ Tr は自形~他形、長径 0.2~0.5mm。無色。
- ・ Woは長柱状結晶の東状の集合体。干渉色灰、消光角小さい伸長負。結晶の湾曲が 著しい。キンクへき開も生成。
- Op は他形~半自形。径 0.1mm 以下。
- ・ 〔Chl+Amo〕は幅 0.1mm 以下の脈をつくる。Chl はやや不良結晶度、一部良結晶 度で、干渉色灰~インクブルー(異常干渉色)。脈の内部に余った空間を淡褐色の Amo が充填する。
- (f) 備考
  - ・ スカルンの1種である可能性が高いが、高温型のロジン岩の可能性も考えられる。
  - 主としてトレモラ閃石のち密な集合体からなるという点からは、ネフライトの1種であると言っても良い。
- (g) 考察

この試料は,肉眼観察では緑灰色の塊状で緻密な岩石で,その大きさは直径 3cm 程度の 亜礫であり、灰白色鉱物の細脈が観察される。この礫岩には直径 2~5mm 程度の珪灰石 の束状集合体が斑状に散在し、それらの間隙を緻密な透角閃石が充填している。その他、 輝石(斜方輝石?)の仮像と緑泥石が観察される。これらの構成鉱物と組織から、珪灰岩か 透角閃岩の可能性がある。

4) 岩石鉱物学的考察

蛇紋岩質の砕屑性堆積物の供給源は、主要な初生構成鉱物が斜方輝石(少量の単斜輝石)、 かんらん石、クロム鉄鉱(一部スピンネル)、磁鉄鉱などで構成されることと、クロム鉄鉱 の組成(Cr#,Mg#)および、Cr/Al比からハルツバージャイトであることが解釈できる。一般 的ではあるが、オフィオライトを構成するハルツバージャイトはマントル内での部分溶融が 進み、その結果マグマを大量に生産した後の溶け残ったマントルかんらん岩であると考えら れる。

これらの砕屑性堆積物に特徴的に含有される蛇紋石は、パラワンオフィオライト超苦鉄質 複合岩体中の主にかんらん石と斜方輝石(一部単斜輝石)の蛇紋岩化作用により生成された もので、大部分が低温型のリザルダイトークリソタイルで構成されるが、局所的に高温型ア ンチゴライト(350℃以上)が観察される。

砕屑性堆積物を構成している低温型蛇紋石の存在は、低温状態での蛇紋岩化作用により生 成されたことを意味する。このことは、パラワンオフィオライト超苦鉄質複合岩体内の熱履 歴の観点から、ごく表層部での低温環境下の蛇紋岩化作用により生成されたリザルダイトと クリソタイルで構成された蛇紋岩質ハルツバージャイトが、定置後の風化・浸食・運搬・沈 積して形成された砕屑性堆積物であると考えることが出来る。

一方、高温型のアンチゴライトの生成は恐らく高温状態であった岩体内部で生成された蛇 紋石が起源と考えられる。この高温型のアンチゴライトの生成は、恐らく、パラワンオフィ オライト超苦鉄質複合岩体の定置以前の高温環境(マグマの結晶分化過程)で生成されたも のと考えられる。

これらのことを総合すると、砕屑性堆積物はパラワンオフィオライト超苦鉄質複合岩体が 定置後、比較的表層部が風化・浸食・運搬され沈積した現地性の砕屑物であること推察され る。 さらに、これらの砕屑性堆積物の堆積・岩石化(固結化)過程でのいわゆる続成作用 も進むものと考えられる。但し、この地表近傍に胚胎する現地性の砕屑性堆積物内での蛇紋 岩化作用は観察されない。それは高温型アンチゴライトが低温型リザルダイトークリソタイ ルへの変質反応が確認されないことを意味する[48]。さらに、これらの砕屑性堆積物中に掘 削したトレンチ壁面からの湧水は高アルカリ性で高 Mg / Si 比であることから、蛇紋岩化作 用が停止している岩体に見られる地球化学的特性を示している[49]。

これらの砕屑性堆積物の供給源は、後背地に分布するパラワンオフィオライト超苦鉄質複 合岩体を構成するハルツバージャイトが主要で、一部であるがレールゾライト質橄欖岩も含 まれる。また、層内礫岩(2 試料)の肉眼観察からは、中粒から粗粒で、完晶質暗緑色火成 岩で、数 cm 程度幅の白色鉱物が網目状に観察される。偏光顕微鏡観察で同定された主要鉱 物は、自形から半自形の珪灰石(Wollasonite)と、半自形の透角閃石(Tremolite)が特異的で あり、変質鉱物として蛇紋石、滑石、緑泥石、そして稀な鉱物としてジルコン粒が珪灰石の 包有物として観察される。これらの鉱物組成と産状から、斜長石一斑れい岩と考えられる。 これらの特異的な鉱物組み合わせは、恐らく Ca に富んだ溶液との反応により、主要鉱物 であった斜長石(前駆鉱物)が Ca-Al ケイ酸塩鉱物の珪灰石や透角閃石と Fe-Mg ケイ酸 塩鉱物の蛇紋石や緑泥石に置換されたものと考えられる。なお、網目状の白色鉱物は、恐ら くソーダ珪灰石(Pectolite)と考えられる。但し、珪灰石や透角閃石は、特徴的な Ca-Al ケ イ酸塩鉱物のスカルン(Skarn: 石灰岩やドロマイトと花こう岩との接触部での接触交代作 用により形成される石灰苦土ケイ酸塩鉱物の集合体)を代表する主要鉱物である。これらの 鉱物と産状などから珪灰岩か透角閃岩または、ロディンジャイト岩(Rodingite)の可能性もあ るが、これらの岩石がすべて高温環境(一部熱水・Ca 交代反応)で形成されるものである ことから、この可能性は低いものといえる。 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 Active Type のナチュラルアナログを確認したパラワ ン島 Narra 地区において、スメクタイトを含有する砕屑性堆積物の分布とその地質構造や高アル カリ地下水流動等を把握することを目的とした試錐調査、アルカリ環境下でのスメクタイトの生 成や安定性に関わる現象を直接観察・分析するための試料採取を目的としたトレンチ調査を実施 した。

Narra3-1 地点の高アルカリ源泉の南東約 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 地点で調査したすべての試錐孔(DH01~DH04)及びトレンチ3~5に おいて、pH11 を超える高アルカリ地下水が浸出している砕屑性堆積物を確認し、高アルカリ地 下水が炭酸塩沈殿物の見られる Narra3-2 調査サイト全域の地下に高アルカリ地下水が流動して いると考えられる。

試錐調査から、パラワンオフィオライトの基盤深度は現地形、特に、古河川系に規制された地 形面起伏の谷様窪み(凹部)に支配されている。つまり、現地形の高まり(凸部)では基盤深度 が深くなっている。これらの基盤深度の大きなところでは砕屑性堆積物が厚く堆積し、下部層の 層厚が厚く、局所的ではあるが黒色の粘土化が顕著である。これは厚い砕屑性堆積物自身の荷重 による圧密作用により緩やかではあるが岩石化が進展していく堆積環境での間隙水との変質反応 などによる粘土化が考えられる。

トレンチ調査においては、粘土鉱物生成環境に係る岩石化学的特性から、大部分の試料は、パ ラワンオフィオライト超苦鉄質複合岩体を構成する苦鉄質岩石のハルツバージャイト(主成分鉱 物は斜方輝石、かんらん石で、少量の単斜輝石および、少量のクロム鉄鉱と磁鉄鉱など)起源の 砕屑性堆積物のために原岩のバルク組成を反映し、MgO に富み、CaO, Al2O3に著しく乏しく、 Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O にも乏しい。さらに、シリカ成分(SiO<sub>2</sub>)に乏しい不飽和な超塩基性岩としての特性が ある。これらのことを総合すると、砕屑性堆積物はパラワンオフィオライト超苦鉄質複合岩体が 定置後、比較的表層部が風化・浸食・運搬され沈積した現地性の砕屑物であること推察される。 しかし、トレンチ5及び試錐孔(DH02)の試料は、他のトレンチ、試錐孔とは傾向が異なり、Al2O3、 SiO2成分に富んでいる。一般的には、粘土鉱物の生成・熟成に好ましいバルク組成としては、SiO2, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, MgO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, FeO と水が必要であり、特にアルミノケイ酸塩鉱物のスメクタイ ト族粘土鉱物の生成環境においては、SiO2, MgO に加え、Al2O3 が必要であり、トレンチ5 近傍 ではこのような地球化学的環境があるものと期待される。このような差が生じた原因として、今 年度のトレンチでは、平原に形成された河川系の谷を埋めた沿岸域の層内礫層(Intraformational Conglomerate)とみられる礫岩層が局所的にみられた。この礫岩の化学組成の違いにより、砕屑 性堆積物のバルク化学組成の違いに影響を与え、トレンチ5の礫岩はその鉱物組成から斑れい岩 由来であると見られ、そこに多く存在する斜長石から Al が供給されたとみられる。

XRD による鉱物分析では、粘土化しているトレンチ及び試錐孔の試料からはほぼすべてで、ス メクタイトの明瞭なピーク(定方位 XRD パターンの EG 処理後のピークシフト)を示した。偏 光顕微鏡観察でもすべてのトレンチの砕屑性堆積物で(泥質部砂質部とも)スメクタイトがみら れた。不定方位 XRD の 060 面のピーク形状から、Narra3-2 地点で採取した試料中に含まれるス メクタイトは、概ね3 八面体型であるサポナイトが主であると考えられるが、トレンチ5(及び DH02 孔)付近においては、2 八面体型であるノントロナイトが含まれる傾向にあった。 [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 27 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-(2016).

[2] Steuer, S., Franke, D., Meresser, F., Savva, D., Pubellier, M., Auxietre, J.-L. and Aurelio, M.: Time constraints on the evolution of the southern Palawan island, Philippines from onshore and offshore correlation of Miocene limestones. J. Asian Earth Sci. 76, p412-427 (2013).
[3] 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 Palawan (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).

[4] 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).

[5] Hutchison, C. S., and Vijayan, V. R.: What are the Spratly Islands? J. Asian Earth Sci., **39**, 371-385 (2010).

[6] Holloway, N.: North Palawan block—its relation to Asian mainland and role in evolution of South China Sea. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, **66**, 1355–1383 (1982).

[7] 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).

[8] 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).

[9] Hinz, K., and Schluter, H.U.: Geology of dngerous grounds, South China Sea, and the continental margin of southwest Palawan: Results of Sonne cruises SO-23 and SO- 27, Energy, 10,3 / 4, p297-315 (1985).

[10] 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).

[11] Rangin, C., Bellon, H., Bernard, F., Letouzey, J., Muller, C., and Sanudin, T.: Neogene arccontinent collosion in Sabah, Northern Borneo (Malaysia). Tectonophysics, **183**(1-4), 305-319 (1990).

[12] Rangin, C., Stephan, J. F., Butterlin, J., Bellon, H., Muller, C., Chorowitz, J. and Baladad, D.: Collision neogine 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).
[13] Tongkul, F.: Tectonic evolution of Sabah, Malaysia. Journal of Southeast Asian Earth Sciences, 6 (3 / 4), 395-405 (1991).

[14] 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).

[15] Huchison, C. S.: The North-West Borneo Trough. Marine Geology, **271** (1-2), 32-43 (2010).
[16] Huchison, C. S.: Chapter XIV-The Ophiolite basement, in Geology of North West Borneo, edited, p295-223, Elseviier, Amsterdam (2005).

[17] 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-Palawan V-VI, Area, West Negros Area and Samar I-IIII Area. Report submitted by MMAJ-JICA to the Republic of the Philippines. MMAJ-JICA, Tokyo, Japan. (1988).

[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., Forbed, M.: Structural Constrains 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 Palawan structures; implications on the evolution of the South China Sea. In; Proceedings of the 34<sup>th</sup> 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 Palawan 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 Palawan 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 Palawan Island. Newsletter Stratigraphy, **16** (1), 19-48 (1986).

[28] Santos, R.A.: Chromite and Platinum group mineralization in Arc-related ophiolites; Constraints form 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.: Strucural characterization of offshore Southwast Palawan, 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 contex 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 snadstone in Central Palawan, Philippines: Constraints on the tectonic development of Palawan, The Ialand 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. Breymann, 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 ophiolitesm 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 kayanite-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 Palawan, Philippines. Journal of Asian Earth Sciences, **18** (3), 369-389 (2000).

[39] Jasin, B.: Middle Miocene planktonic Foraminifera and their implication in the Geology - 236 - of Sabah. In: G.H. Teh, et al.(eds). Bull. Geol. Soc. Malaysia, 45, 157-162 (2010).

[40] Franke, D., Barckhausen, U. Baristeasm 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 Palawan, Philippines, Christion-Albrechts-University, Kiel (2002).

[42] Haq, B.U., Hardenbol, A.N., and Vali, P.R.: Chronology of Fluctuating Sea Level Since the Triassic. Science, **235** (4793), 1156-1167 (1987).

[43] 荒井章司: 環伊豆地塊蛇紋岩. 静岡大学地球科学研究報告, 20, 175-185 (1994).

[44] Boggs, Jr.S.: Principles of Sedimentology and Stratigraphy. Pearson Prentice Hall: Upper Saddle River, New Jersey 07458 (2006).

[45] 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).

[46] Power, I.M., Wilson, S.A., and Dipple, G.M.: Serpentinite Carbonation for CO<sub>2</sub> Sequestration. Element, **9** (2), 115-121 (2013).

[47] 荒井章司: クロマイトー不思議なマントル構成岩ー. 地学雑誌, 119 (2), 392-410 (2010)

[48] Craw, D, Landis, C.A. and Kelsey, P.I.: Authigenic chrysotile formation in the matrix of Quaternary Debris flows, northern Southland, New Zealand. Clays and Clay minerals, **35** (1), 43-52 (1987).

[49] 加藤孝幸, 水落幸広, 二ノ宮淳, 斎藤晃生: 白色蛇紋石の常温・常圧下における沈殿. 日本地 質学会 第 111 年学術大会 演旨, 143 (2004).