

原環センター トピックス

RADIOACTIVE WASTE MANAGEMENT FUNDING AND RESEARCH CENTER TOPICS

2018.3.NO.125

目次

センターの活動状況	①
セメントとベントナイトの相互作用のナチュラルアナログ調査	③

センターの活動状況

I 運営状況

第25回理事会の開催

平成30年3月8日（木）開催の第25回理事会において、平成30年度事業計画及び収支予算等について付議し、それぞれ原案のとおり承認可決されました。

第18回評議員会の開催

平成30年3月16日（金）開催の第18回評議員会において、平成30年度事業計画及び収支予算等について付議し、それぞれ原案のとおり承認可決されました。

今回の選任により、次の方が交代されました。

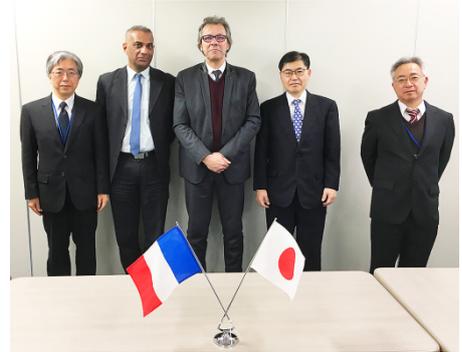
(敬称略)

区分	退任者	新任者	新任者所属・役職
評議員	藤波 秀雄	秋田 調	一般財団法人電力中央研究所 専務理事

フランス放射性廃棄物管理機関（ANDRA）との情報交換会議の開催

平成30年3月12日(月)に、当センターと協力協定を締結しているフランス放射性廃棄物管理機関（ANDRA）の帕特リック・ランデ（Patrick Landais）国際部長及び在日フランス大使館のスニル・フェリックス（Sunil Felix）原子力参事官を迎え、情報交換会議を開催しました。

今回の会議では、ANDRAが実施している地層処分プロジェクトであるCigeoプロジェクトの最新の進捗、研究開発の状況及び今後の計画などについて説明を受け、意見交換を行いました。



Ⅱ 成果等普及活動の実施状況

平成29年度 第3回原環センター講演会の開催

平成29年度第3回原環センター講演会を以下のとおり開催しました。

開催日時：平成30年2月16日（金）15：00～17:00

会場：原環センター 第1、2会議室

演題：DECOVALEXプロジェクトの歴史と現状

講演者：国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 バックエンド研究開発部門

核燃料サイクル工業研究所 環境技術開発センター

基盤技術研究開発部 ニアフィールド研究グループ

杉田 裕 氏、高山 裕介 氏

1992年に開始された、DECOVALEX（DEvelopment of COupled models and their VALidation against EXperiments）プロジェクトでは、各国の研究機関が協力して、地層処分における岩盤や緩衝材中の熱力学的・水理学的・力学的挙動とその連成挙動を考慮した解析を研究してきました。本講演では、このプロジェクトのこれまでの歴史を振り返るとともに、現フェーズの実施概要について紹介していただきました。



平成29年度 第4回原環センター講演会の開催

平成29年度第4回原環センター講演会を以下のとおり開催しました。

開催日時：平成30年3月2日（金）15：00～17:00

会場：原環センター 第1、2会議室

演題：放射性廃棄物の処分と分離・変換

講演者：内閣府 原子力政策担当室

政策企画調査官 田辺 博三 氏

放射性廃棄物に含まれる核種を分離し、短寿命核種あるいは安定核種に変換する分離・変換の処分への効果について、処分から見た時にその効果が妥当なのか、逆に処分の視点からはどのようなことを期待したいのかについての考察や将来の発電炉、核燃料サイクル及び放射性廃棄物管理のあるべき姿に関する議論への期待をお話していただきました。



セメントとベントナイトの相互作用の ナチュラルアナログ調査

処分材料調査研究プロジェクト
プロジェクト・マネジャー 藤井 直樹

1. はじめに

最初に、この研究の背景、目的、ナチュラルアナログ(Natural Analogue; NA)について簡単に説明した後、フィリピンのルソン島のSaile鉱山と今も調査をしているパラワン島のNarra地区の二つのナチュラルアナログの調査結果について紹介させていただき、そこから得た知見から、実際に処分場のベントナイトの長期健全性でどう活用できるかという考察をまとめという形で、紹介させていただきたいと思えます。

地層処分の対象の廃棄物には、ご承知のとおり、高レベル放射性廃棄物とTRU廃棄物というものがあります。特にTRU廃棄物にはさまざまな廃棄物の種類があり、**図-1**のように大断面の坑道で集積廃棄するというコンセプトで、力学的安定性等から比較的多くのセメント系材料を使うことが見込まれています。そのセメント系材料から出る高アルカリ性浸出水というのは、ベントナイトと反応して変質をさせることが実験的に確かめられています。そういう反応が進んでベントナイトが変質すると、ベントナイトに期待されている機能等が損なわれて、不安定化して、いわゆる危険な状態になるかもしれないということが危惧されます。そういうことを踏まえて、長期のベントナイトの健全性はどうかというところを、評価をしていくにあたって、我々はナチュラルアナログという方法で、実際に天然で観察できるような反応プロセスから、実際長期の挙動はどうかということの評価をするということを目的として調査しているものです。

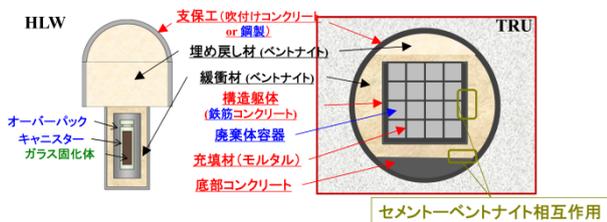


図-1 HLWとTRU廃棄物の処分概念と人工バリアシステム

2. ナチュラルアナログの定義と特徴

ナチュラルアナログは次のように定義されています。

一処分システムで生じる現象に類似した天然現象を、数万年にも及ぶ長期間のスケールで、将来処分場で

発生されると考えられるような、反応プロセス等を具体化して現象理解を進める、そしてそういう現象理解の基で安全評価に用いるような、モデルの妥当性の検証等に活用する手法⁽¹⁾—

ナチュラルアナログには特徴があって、まずは長期間の時間スケール、そういう室内実験を超えるようなすごい長い時間にわたる現象のデータを直接取得できるというメリットがあるということです。

あと、2つのPAとよく言われるのですけれども、ナチュラルアナログは概念的にすごく分かりやすいということで、パンフレット等でもよく利用されており、いわゆるステークホルダーに説明するとき、地層処分の安全機能はこんなもんですよという形で説明ができるような、パブリックアクセプタンス(Public Acceptance)に資するような情報として活用できます。もう一つは、パフォーマンスアセスメント(Performance Assessment)モデルの改良にも利用できるということです。

それ以外に、ナチュラルアナログは基本的に地質とか岩石学、鉱物学ということが中心になりますが、それだけじゃなくて、様々な研究分野にわたる、非常にたくさんの研究者が関わる学際的な研究になります。私も地質屋じゃなくて実はベントナイトとかシミュレーションをもともと専門にしていたので、そういう人もこういう調査に参加して、そういう様々な分野の人と意見を交換するということと、現地でフィールド調査を通して、実際にいろんな経験ができるということで、若手の人材育成等にも活用できるような場でもあるということが一つの特徴でもあります。

3. ナチュラルアナログ研究の歴史

ナチュラルアナログは1970年代の後半ぐらいからやられています。例えばブラジルなどのウラン鉱床、アフリカ・ガボン共和国のオクロの天然原子炉、カナダのシガーレイクのウラン鉱床とか、あるいは人工バリアの考古学的アナログである古代ローマ時代のくぎや銅とかから始まって、80年代ぐらいには核種移行、あるいはもっと時代が下ると、核種移行への微生物とかコロイドの影響みたいなナチュラルアナログ調査というのが結構展開されてきたという歴史があります。

表-1は、主要なナチュラルアナログプロジェクト

です。オクロは天然に核分裂反応があったサイトで、核分裂生成物などの移行が観察できます。シガーレイクは人工バリアシステムのアナログで、透水性のいい砂岩層にあるウラン鉱床で、砂岩が変質した粘土層がウラン移行を守ってくれているというようなものが観察できるサイトです。わが国では日本原子力研究開発機構の東濃鉱山でも、多くのナチュラルアナログ研究というものが展開されてきました。

表-1 主要なナチュラルアナログプロジェクト

- ・**オクロ**: アフリカ ガボンで発見された天然原子炉で放射性廃棄物の地層処分の実現性(あるいは反証)に関して、NAとして最も多く用いられている研究
- ・**シガーレイク**: カナダで発見されたウラン鉱床で、人工バリアの性能あるいは地層処分の有効性を示すNAとしてよく活用されている研究
- ・**ボソス・デ・カルダス**: ブラジルで発見された地表に近い天然ウラン鉱床で、天然バックグラウンドが高く、地層処分の核種移行挙動を含め多くの現象のNA事例として用いられている研究
- ・**マッカリン**: ヨルダンで発見された高pHの川で、セメントを用いた処分概念の環境を模擬したNA例として活用されている研究
- ・**ロック・ローモント**: スコットランドの湖沼で、気候変動による淡水・塩水系の地下水移動、海洋堆積物などのプロセスを説明する場合に用いられているNA研究
- ・**東濃**: 岐阜県土岐市のJAEA東濃鉱山のウラン鉱床を対象に展開された日本での代表的なNA研究

4. 原環センターのナチュラルアナログへの取り組み

原環センターでは、1996年ぐらいから、ナチュラルアナログ情報の整理、これは既存のナチュラルアナログ情報を調べてどういう情報が得られるかということを整備する、というようなことを行っていました。この中で、例えば、ナチュラルアナログのパンフレットを作成したり、あるいは先ほどのオクロの自然が生み出した天然原子炉現象の科学的な小冊子を作成したりということをしてきました。そして、最後の2年では、新規に実施すべきナチュラルアナログの優先課題というものを抽出しました。これは今までやられていないナチュラルアナログの中で、比較的やるべき重要な課題であること、かつ、そういう都合のいいサイトが世の中にあるかどうかというフィジビリティの観点も検討しました。その結果、優先的にやれそうなナチュラルアナログの課題として抽出されたテーマの一つが、セメントベントナイトの相互作用ナチュラルアナログということになりました。

表-2 原環センターのナチュラルアナログへの取り組み

1996～2006年度	NA情報の整備 ● NAパンフレットの作成 ● 小冊子「自然が生み出した原子炉」の作成 ● 事例研究(大学委託)
(2005～2006年度)	新規に実施すべきNAの優先課題として「セメントベントナイト相互作用のNA」を抽出
2007～2012年度	フィリピンルソン島北西部(Saile鉱山とその周辺地)のNA調査
2013～2017年度	ルソン島Bigbiga地区のNA調査
(2014年度～)	パラワン島Narra地区のNA調査

調査地の候補として、我々が実施したフィリピンのルソン島とヨーロッパの機関が中心になって調査を進めてきたキプロスがありました。フィリピンでは、当初はルソン島Saile鉱山のナチュラルアナログ調査から始まり、別のBigbiga地区に行き、2014年からパラワン島のNarra地区で調査を実施しています。

また、ヨーロッパの研究者を中心にナチュラルアナログワーキンググループというものが1985年ぐらいからつくられて、様々なナチュラルアナログの話題を提供して、ワークショップなどを開いて情報交換を行っています。我々も2011年からそれに参加して、フィリピンの成果やキプロスの成果をお互いに確認することをずっと続けております。このグループのホームページ(<http://www.natural-analogues.com/>)には、フィリピンやキプロスの研究もごく簡単ですけど紹介されていますので、アクセスしてみてください。

5. パフォーマンスアセスメントへの活用

現在のナチュラルアナログ調査は、二つのPAのうちのパフォーマンスアセスメント(性能評価)への活用という観点で進めています。ナチュラルアナログは、長期のいろんな複雑なプロセスを経た長期の挙動から、主要な反応プロセスが理解できるということがメリットです。しかし、一方では、ナチュラルアナログで何でも分かるわけじゃなくて、やはりアナログなんて完全に処分場の条件と1対1で対応するわけではなく、少しずれているところもあります。例えばシミュレーションに必要な初期条件とか境界条件とかは完全には分かりませんが、ある程度は推測できます。あと、定性的なことは比較的评价できても、サイトにも拠るのですけれども、定量的な評価はできないところもたくさんあります。

そのため、ナチュラルアナログで全て処分場の難しい問題が解決するというスタンスじゃなくて、**図-2**のようにナチュラルアナログと実験やシミュレーションを合わせて、処分場で期待されている安全機能を示すということが重要であって、そういうことでセーフティケースの一つとして、ナチュラルアナログが重要な成果として位置付けられるのではないかという観点で研究を進めているということになります。

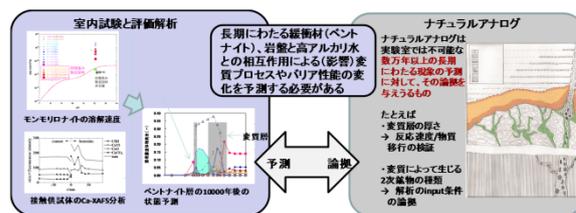


図-2 室内実験、評価解析と合わせたセーフティケースの一つとしてのナチュラルアナログの活用

6. フィールド調査から得られるもの

学際的ないろんな分野が関わるフィリピンのナチュラルアナログ研究には、多くの大学の先生やその研究室の学生に、卒論、修論、博論などのテーマとして協力いただきました。こういう若手の研究者がフィールド調査を一緒にすることで多くの貴重な経験をすることができます。例えば、私のパートナーであるベテランの地質の専門家が、実際にフィリピン大学と日本の学生を教えながら、マッピングあるいはトレンチ（調査用の溝）壁面の観察、それをどこに着目してどういうふうに観察をするのか、あるいはサンプリングするときどういう観点でそのサンプルを採っていくのかということ、実際にマンツーマンで教えながらやっていました。あと、地質調査をするための壁面の掃除を先生が、学生と一緒にやることで、実際その目で見て実際に体を動かすことで、そういう苦労も体感できます。

フィールドで調査する上で、自然を相手にするので我々はいろいろな情報を持って、こうだと推測して、ある程度の確度を持ってトレンチなり、ボーリングなりをするのですが、実は出た結果が自分の予想するものと違うというのもしょっちゅうあります。それがものすごい発見でいい意味で当たる場合もあるし、実はあんまり意味のない結果で、期待が裏切られるということもあります。そういうことにめげずにしっかり、いろんな自分が予想できないことも起こるんだということを考えながら、自然と向き合って調査を進めていく必要があります。予想しないことが起こったときには、素早く対応できるようにするためにも、事前の準備が重要だということ、調査を通してよく理解できるのだと思います。

現地調査する上で、人とコミュニケーションを取るということも重要です。現地の調査はフィリピンの技術者にやっていただくのですが、フィリピン人を相手に調査するのはなかなか大変なところもあります。約束した時間に来なかったり、単純な整備不良で調査が中断したり、そんなことはしょっちゅうです。一方で、フィリピン人はそういういい加減なところだけじゃなくて、非常に優しい人が多いですし、やるときはものすごく真面目にやるので、そういうこともいろいろ経験をしながら分かってくると、年々、お互いに仕事がしやすくなってきました。

自然に対応するという意味では、しょっちゅう来る台風も避けて通れません。2009年の台風では、マニラの首都圏の8割が冠水し、420名が亡くなりました。その後、2013年の史上最大といわれる台風では、行方不明者を含めて8,000人ぐらいの方が亡くなっています。我々がフィールド調査のために来ていたまさにそのときに、フィリピンでもめったにないこれらの台風に襲われました。2009年の台風のときには、ODAで造った立派なメイドインジャパンの片側

3車線の高速道路の外側2車線が完全に冠水しました（図-3）。日本だったら全面通行止めになるのですが、フィリピンではかろうじて生きている1車線を使って通してくれます。私たちは早くフィールドに移動したかったので、こうやって無理に通してくれる融通を利かせてくれたことに、有難いと感謝する反面、危機管理みたいな概念がこの国にあるのかなと、逆に心配になったりしました。2013年のもっと大きい台風のときには、情報の不足のため、台風上陸の直前に、ようやく日本の気象庁のウェブサイトから、中心の気圧が895hPa、最大瞬間風速が95m/秒という想像もできないような台風だということが分かりました。当然、安全対策が優先ということで、台風が来る前に深夜まで作業してボーリングのやぐらとかをすべて撤収し、その翌日の調査をすべて中止して対応しました。こういう苦労もありながら、調査を進めて成果を得ました。



図-3 走行している高速道路の外側2車線が台風で水没... (2009年9月)

7. ナチュラルアナログのコンセプトと必要な地質・地下水環境

高アルカリのセメント浸出水とベントナイトの相互作用のナチュラルアナログのコンセプト（要件）は、天然の高アルカリ（高pH）の地下水がベントナイト層に浸出していることです。したがって、まず、高アルカリ地下水が浸出しているような、セッティング（地質環境）を持つサイトが対象になります。高アルカリの地下水の天然でのアナログとして、そういう環境であるのが、オフィオライトという岩体です。

オフィオライトというのは、地球の地殻の下にマントルというものがあるのはご存じだと思いますけれども、そのマントルがプレートの境界等で隆起して、陸上に上がって定置されてきた、いろんな岩石で占められる岩体のことです。その上部のマントルを構成する、かんらん岩のような非常に塩基性の強い超塩基性岩には、これが天水と反応すると、蛇紋岩に変質するという蛇紋岩化作用があります。この蛇紋岩化作用の反応の中で高アルカリ地下水ができる可能性があります。オフィオライトがあれば

高アルカリ地下水が必ず存在するわけではないですが、その可能性が非常に高いということで、着目した岩体です。

図-4はフィリピンのオフィオライト分布と調査サイトの位置を示します。表-3は、フィリピンのオフィオライトが分布するところで見られる、高アルカリ地下水の水質を示しています。右側に低アルカリセメントの浸出水のデータを示して、高pH

であること、あと非常にカルシウムのイオン濃度が高いことが特徴です。温度が地質学的高温状態ではなく、かつ地下深部での処分を想定しているので還元状態であり、地下深部で想定されるセメント浸出水のアナログとみられるということで、オフィオライトから生成される高アルカリ地下水に着目しました。

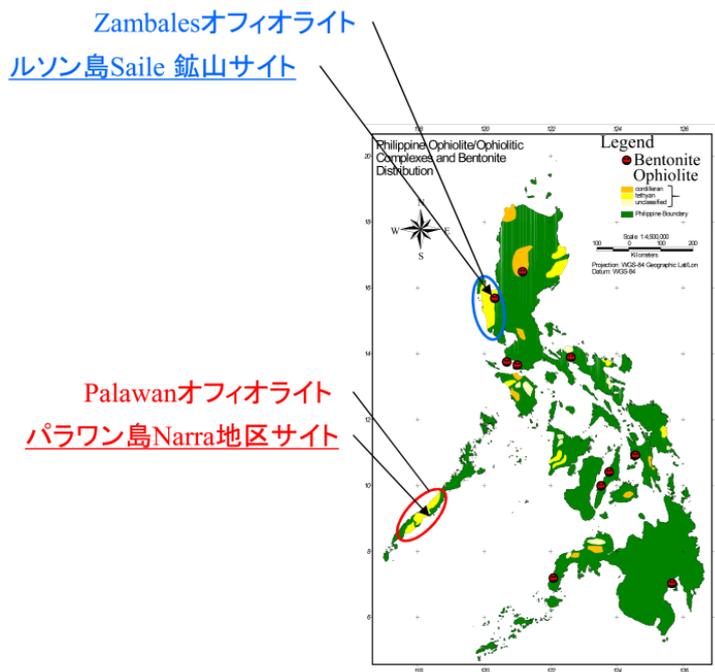


図-4 フィリピン国内のオフィオライト分布と調査サイトの位置

表-3 フィリピン国内のアルカリ湧水の水質

Site	Palawan Riotuba-Waterfall	Palawan Brooke's Point - 7 Falls	Palawan Narra -1 Hot Spring	Palawan Narra -3.2 Trench2	Palawan Narra -3.2 Trench1	Palawan Narra -3.1 Hot Spring	Palawan Narra -3.1 Hot Spring	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 I O	2015 Narra I G	2015 Narra3-2 Trench2 O	2015 Narra3-2 Trench1 O	2015 Narra3-1 O	2014 Narra3-1 O	2013 P-2 G	2013 M1 G	2014 Well1 G	1997
pH	10.01	9.31	10.50	11.39	11.31	11.16	11.11	11.41	10.80	9.52	11.09
ORP(Eh) [mV]	119	-387	-435	-160	-176	-450	-460	-111	-420	8	-
Temp [°C]	29.3	37.9	47.2	28.8	30.3	38.6	38.8	28.0	32.9	29.2	60
CH ₄ [ppm]	0	0	>700	0	0	0	0	> 5000	2090	0 (0-560)	-
H ₂ [ppm]	0	0	0	0	0	0	0	50-1320	0 (0-62)	0 (0-130)	-
Na ⁺ [ppm]	2.00	164	96.4	46.1	44.6	48.6	53.6	24.3	26.3	100.6	43
K ⁺ [ppm]	0.44	3.38	1.46	2.32	2.12	2.94	2.68	1.45	0.375	1.05	13
Ca ²⁺ [ppm]	5.00	3.80	3.78	26.9	32.2	37.5	41.9	92.5	29.9	1.63	16.8
Mg ²⁺ [ppm]	16.4	1.31	0.17	0.02	0.02	0.02	0.20	0.24	0.03	0.02	-
Si ²⁺ [ppm]	< 0.5	31	86.4	2.5	0.7	0.9	0.6	11	17	72.3	-
Al ³⁺ [ppm]	< 0.01	< 0.01	0.19	0.08	0.01	0.07	0.16	1.41	1.05	0.97	0.3
Fe ⁽²⁺³⁺⁾ [ppm]	0.08	0.02	0.06	0.02	0.02	0.02	0.17	0.18	< 0.001	0.0058	-
Cl ⁻ [ppm]	28.6	162	56.5	27.3	25.6	29.5	29.4	12.9	17.8	4.50	-
SO ₄ ²⁻ [ppm]	0.03	15.7	6.34	0.13	0.08	0.18	0.39	0.05	0.364	48.0	-
HCO ₃ ⁻ * [ppm]	21.2	121.0	-	0.67	0.77	0.09	0.5	1.6	30.0	135.6	-

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

8. ベントナイト、スメクタイト、モンモリロナイトの関係

もう一つのベントナイトに関して簡単に説明します。ベントナイトとかスメクタイトとかモンモリロナイト、という用語は聞いたことがあるかと思いますが、厳密にいうとそれぞれ意味が違って、スメクタイトというのは図-5（右）に示すように、粘土層が水を挟み込んだものです。積層構造を持つこういう種類の粘土鉱物のグループ名のことをスメクタイトといいます。スメクタイトは大まかに、3八面体型と2八面体型という2タイプのものに分類ができます。その2八面体型の粘土鉱物の一つがモンモリロナイトです。モンモリロナイトと石英、玉髄、長石類などの随伴鉱物で構成されるものがベントナイトというものです。

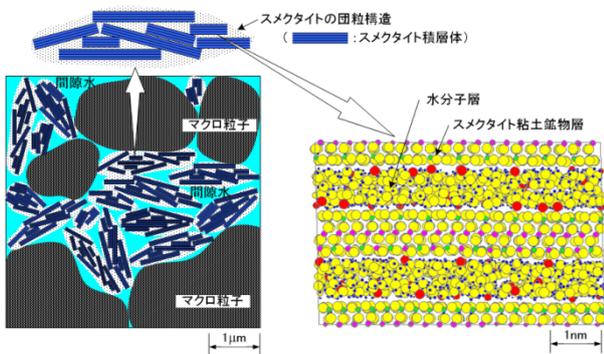


図-5 ベントナイトの微細構造(左)とスメクタイトの分子構造(右)

モンモリロナイトも当然ですが一連のスメクタイト鉱物は、外側に水があると、層間に水を吸い込んでぶわっと膨らむ性質、いわゆる膨潤性というものを持ちます。また、層間に挟まれた水は非常に構造化されて動きにくく、それ故に水が通りにくい低透水性も持ちます。したがって、こういうモンモリロナイトを主成分とするベントナイトというのは低透水性、膨潤性を持ち、緩衝材としていい材料ということになります。この後のナチュラルアナログの中でサポナイトとかスチーブンサイトとかノントロナイトという違うタイプのスメクタイト鉱物の名前が

出てきたら、このモンモリロナイトの仲間だなというふうに思ってください。

9. ルソン島のSaile鉱山のナチュラルアナログ

ルソン島のSaile鉱山はZambalesオフィオライトの東端に位置して、図-6にあるようにベントナイト層が水平に堆積しています。このベントナイト層は、もともとは火山性細屑物（さいせつぶつ）、いわゆる火山灰みたいなものが海に堆積してベントナイトに変質してできたものです。そういうベントナイトに高アルカリ地下水が過去に作用していたというサイトがSaile鉱山です。現在はアルカリの水みちが閉塞（へいそく）されて、高アルカリ地下水が流動していないんですけれども、過去には高アルカリ地下水がこのサイトに流れていたという地質学的な複数の痕跡があります。そういう意味でベントナイトに高アルカリ地下水が接触していた、セメント-ベントナイトシステムのナチュラルアナログサイトということができます。



図-6 ルソン島Saile鉱山のナチュラルアナログ概念図

Saile鉱山から2.7kmぐらい離れたところに高アルカリ地下水の湧水地点（図-7 Manleluag Hot Spring）があり、そこと大体類似の地下水が流れていたんだろうということが推測できます。Saile鉱山の中でトレンチを掘削すると、オフィオライトの基盤岩の上にベントナイトがあり、実際に基盤岩の中の断層系を見ると蛇紋石や方解石で充填（じゅうてん）されています。これはまさに高アルカリ地下水が通ってきた証拠を示します。したがって、ここでは高アルカリ地下水が、この断層沿いに通ってきて、上のベントナイトに作用していたと考えられます。

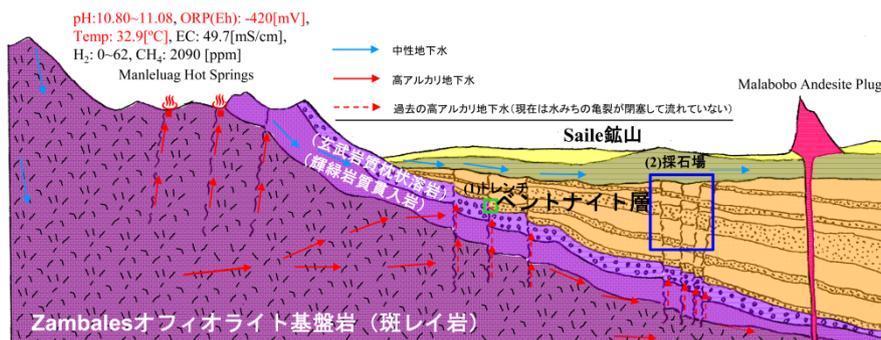


図-7 Saile鉱山およびその周辺地域の地質構造（東西方向断面）

図-8のトレンチの模式断面図ではオレンジ色の部分で、これは実際の色では白っぽく変質という変色をしている層が見えます。恐らくこれが、ベントナイトが変質している層ではないかと考え、数cmごとにサンプリングして、XRD (X線回折) で分析しました。基盤岩に近いところではスメクタイトがアルカリにやられてなくなっている部分があるかと予測しましたが、ほとんどそういう変化はありませんでした。同じように等間隔に採取したサンプルで行った、CEC (陽イオン交換能) とか膨潤力とかの試験でも、あまり違いは見られませんでした。白っぽく見えたのはどうやら空隙 (くうげき) に方解石が充填したためであり、スメクタイト自体はあんまり変質していませんでした。さらにもっと詳細に分析をしたところ、ベントナイトの明らかな変質帯というのを観察することができました。それが図-9の写真で、基盤岩の上のガラスの部分でアルカリで変質していて、その上にベントナイトの変質層が薄くあります。さらにその上の黄色っぽいところが、鉄が濃集しているところで、その上のベントナイトは全く変質していないことが観察されました。



図-8 Saile鉱山のトレンチの断面写真 (左) と模式断面図 (右)

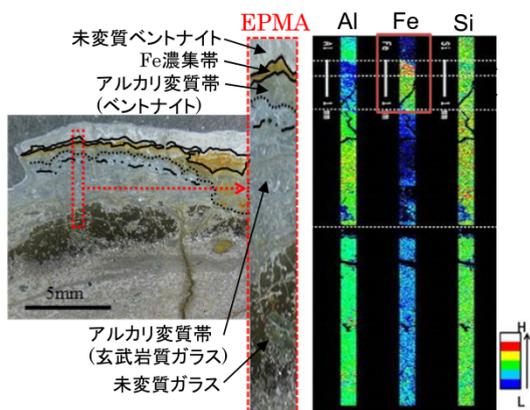


図-9 Saile鉱山サイトのベントナイト界面のアルカリ変質帯

実際には最大でもたった5mmしかベントナイトが変質しなかったというのが、この界面の観察から分

かりました。変質してどういう鉱物ができているのか、これは長期挙動評価のシミュレーションで非常に重要な知見なので、マイクロXRDで分析したところ、イオン交換で鉄モンモリロナイトになったり、違うタイプ (3八面体型) の鉄サポナイトというスメクタイトに変わったり、あるいはまた違うタイプのノントロナイトに変わったりというようなものを同定することができました。あとはよく実験で見られるゼオライト、カリ長石、シリカ鉱物のようなものも同定されました。

長期といっても年代がどれくらいかということですけれども、高アルカリ地下水がいつから浸出して、いつ止まったか、両方の年代を調べるということは実は非常に難しい課題です。いつ止まったかについては、先ほど紹介した炭酸塩の充填物は高アルカリ地下水が止まったときにできるので、その年代から、大体数万年から10万年ぐらいのオーダーであると推定できました。いつから浸出したのかというのは非常に難しく、これは断層系の年代から評価しました。フィリピンのベントナイト鉱床に幾つか断層が走っていて、その断層には高アルカリ地下水がかつて流れていたという痕跡が残っているので、断層ができたときには高アルカリ地下水が流れていたと推定しました。ベントナイト鉱床を胚胎する地層は2,900万年前のもので、その上側の (2,300万年前にできた) 地層には断層がないので、その差から少なくとも2,300万年前には高アルカリ地下水がここには流れていたと考えました。そういうものがずっと流れていたとすると、2,300万年前から10万年前のものすごい長い期間高アルカリ地下水がここに流動していた可能性が示唆されるということになります。

ただし、直接界面を観察したところで評価した年代ではないですし、そもそも変質鉱物の年代測定は非常に難しいので、こういう既に止まったサイトでの年代評価というのはなかなか難しいことになります。また、実際の高アルカリ地下水はどういうものが流れていたか、という詳細を調べるのも難しいです。ルソン島はそのようなもうすでに終わった反応であり、それよりも、今流れているアクティブサイトではそれらの課題を明らかにできるという利点があるため、調査サイトを移すことにしました。

10. パラワン島のサイトでの調査

パラワン島のNarra地区に高アルカリ地下水が流出していて、そこに炭酸塩の平原があります。そこでトレンチを掘ると炭酸塩の下に碎屑性堆積物があります (図-10)。その碎屑性堆積物はスメクタイトを大量に含む粘土です。そういうことから、この碎屑性堆積物に今現在もpH11を超えるような高アルカリ地下水が流動しているような環境なので、ベントナイトではないのですが、ベントナイトを構成す

るスメクタイトとアルカリの反応が見られるサイトとして、調査をしています。

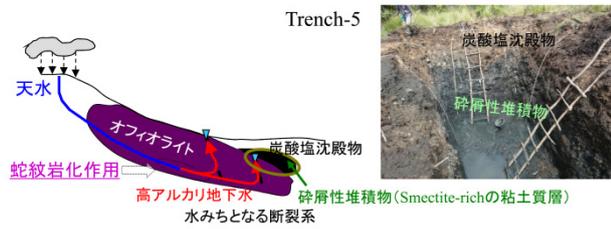


図-10 パラワン島Narra地区のナチュラルアナログ概念図

年代については、今現在も高アルカリ地下水が流れているので、いつから流れてきたかということの評価すればいいことになります。特に直接地下水の年代を示す炭酸塩がいつできたかについて、それが炭酸塩は高アルカリ地下水と大気との反応でできていると考えられることから、一番古い¹⁴C年代（放射性炭素年代）で大体2700年ぐらい、堆積物ができた年代（土壌中の有機物の¹⁴C年代）は大体1万年弱ぐらいなので、それぐらいの期間にわたり高アルカリ地下水が浸出しているサイトだと評価をしています。

ベントナイトではないため、砕屑性堆積物がどういうふうにできたのかということも理解しないと、このサイトの評価ができません。Saile鉱山のベントナイトの元は火山灰、火山性細屑物でしたけれども、このサイトはオフィオライトの基盤岩そのものです。基盤岩を構成するハルツバージャイドあるいは斑れい岩という岩石が風化してそれが浸食されて運ばれて、堆積してできたものが砕屑性堆積物となります。これに高アルカリ地下水が相互作用して上側に炭酸塩の沈殿物ができているというのが今の現在の状態です（図-11）。

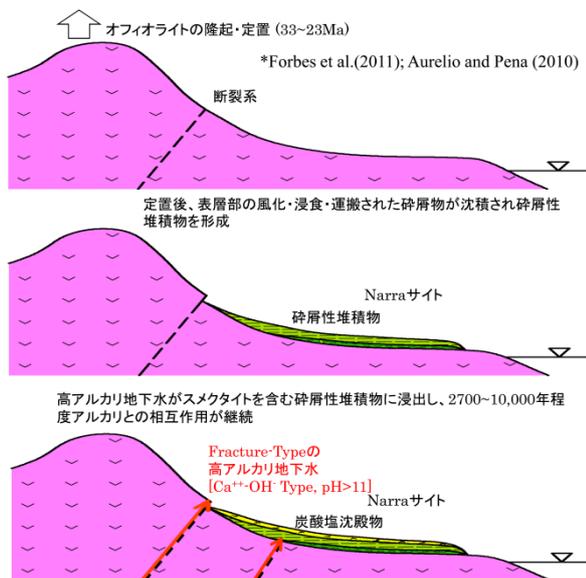


図-11 パラワン島Narra地区のナチュラルアナログサイトの地質構造学的発展と砕屑性堆積物の形成図

このサイトはベントナイトではないので、セメント-ベントナイトシステムのアナログとは言えないですが、変質プロセスのナチュラルアナログというふうに見ることができると思います。

年代測定で示された時間にわたり、高アルカリ地下水とこの砕屑性堆積物との相互作用があり、そこでスメクタイトができる過程というのは、風化によるものと、アルカリ相互作用によるものと、2つ考えられるので、それをみなければなりません。風化でできたものを判別するために、高アルカリ地下水が作用していないところで採ったサンプルを分析すると、一部粘土ができていました（図-12）。そういうことで、風化によってスメクタイトができるということも確認できます。一方、高アルカリ地下水でできたスメクタイトは、もっとはっきりピークが見えて、よりスメクタイト化が進んでいるというのが、この結果からはっきり分かりました。

したがって、主に高アルカリ地下水とオフィオライトを構成しているような鉱物、あるいは蛇紋石みたいなものが反応してこういうスメクタイトができているんですけども、実は、スメクタイトといってもいろんなタイプのスメクタイト鉱物できていて、スチープンサイトとかサポナイトとかノントロナイトとかいうようなものができています。残念ながらモンモリロナイトのようなAl-richなものではありません。ただ、そういう違うタイプのスメクタイトには、図-13のようなC-S-H（カルシウムシリケートハイドレート）とサポナイトが共生するような産状が幾つか見られていて、これが高アルカリ溶液の沈殿からスメクタイトができたという証拠になります。

この環境で分かったのは、高アルカリ地下水がスメクタイトをつくる環境となりうる。ただ単純な高アルカリ地下水だけじゃなくて、これに固相から溶けたシリカ、アルミ、カルシウム、特に鉄とマグネシウムが影響して、高アルカリ地下水からスメクタイトができやすい環境になっている、そういうサイトであるということが分かりました。

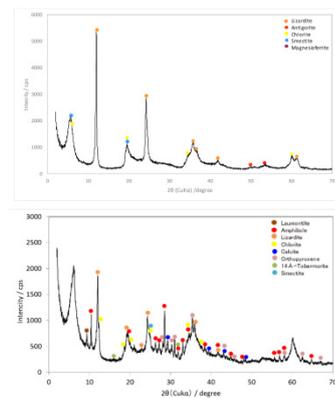


図-12 風化物（上図）と砕屑性堆積物（下図）のXRDチャート

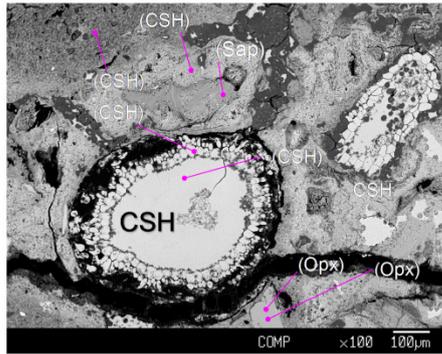


図-13 C-S-Hと共生するサポナイト (Sap)

11. まとめ

何が分かったかというのを簡単に整理します。ルソン島のサイトからは、白色の変質をしているとみられていたところでは、全然モンモリロナイトの変質は見られなくて、実は変質したのは5mm程度だったということがわかりました。その反応でできた鉄の粘土鉱物、ノントロナイトや鉄サポナイトというスメクタイト鉱物のようなものが、実は物質移行を抑制し、変質反応を抑制して、それでその先のベントナイトが守られていた、というようなことが起きていたと理解しています。界面だけのことを見てそれが言えるのかという疑問もあるかと思いますが、そもそも長期間高アルカリ地下水がかつては流れて、いろいろアルカリとの相互作用があったと思われるのですが、そういう状況でもベントナイト鉱床が大規模に残っています。我々の調査でターゲットとするのは、ベントナイトの変質なので、そういうのをくまなく探しても、実は一つもベントナイトが変質したところは見つかっていないという事実がありますので、ベントナイトが、高アルカリ地下水があっても十分残ることを示したサイトでもあり

ます。

パラワン島のナチュラルアナログからは、高アルカリ地下水はモンモリロナイトを溶かす作用があるけれども、一方で、別のタイプのスメクタイト鉱物を生成するような、そういう好ましい環境をつくる環境でもあるということがわかりました。特にそれに影響を与えているのが鉄やマグネシウムのイオンと考えられます。

表-4 ナチュラルアナログからのエビデンス

ルソン島Saile鉱山のナチュラルアナログ

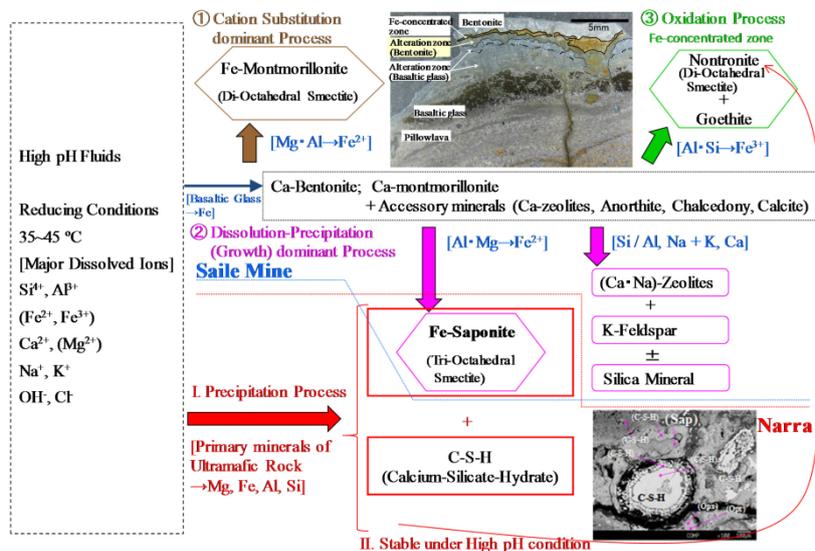
- ◆ ベントナイトの基盤岩との接触部付近の白色帯(bleached zone)ではモンモリロナイトの変質はほとんど見られなかった。
- ◆ 明らかなベントナイトのアルカリ変質はたった5mm程度だった。
- ◆ 変質反応に伴い生成した鉄粘土鉱物のクロッキング(空隙閉塞)が物質移行を抑制し変質反応を抑制した。
- ◆ 長期間アルカリ地下水との接触があってもかわらず大規模なベントナイト鉱床が今も存在。

パラワン島Narra地区のナチュラルアナログ

- ◆ オフィオライトのハルツバージャイト(蛇紋岩)、斑レイ岩と高アルカリ地下水との反応で様々なタイプのスメクタイトが生成される。

Fe, Mgを含む高アルカリ溶液はスメクタイトの生成(安定性)に好ましい環境

でも、このアルカリがスメクタイトを作る環境、これはオフィオライトだから起きたので、ベントナイトでもそんな反応が起きるのか、という疑問については、図-14に示すようにルソン島のサイトではベントナイトが変質して違うタイプの鉄サポナイトとかノントロナイトとかができています。だから、処分環境のベントナイトでも十分そういう(アルカリがスメクタイトを溶解させるよりも生成させる)変質反応が起きるといえることが、これらの二つのアナログで示せ、それゆえ、これらのナチュラルアナログからベントナイトの長期健全性がいえるのではないかと考えます。



ベントナイト(モンモリロナイト)と高アルカリ溶液との反応でもサポナイト等が変質鉱物として生成

図-14 ルソン島Saile鉱山のナチュラルアナログとパラワン島Narra地区のナチュラルアナログのアルカリ変質反応の比較

先ほど言ったように、アルカリ溶液はモンモリロナイトを溶解させます。一方で別のタイプのサポナイトとかスチープンサイトとかノントロナイトといった、スメクタイト鉱物を生成させる環境でもあります。鉄とマグネシウムの環境というのは、処分場でもそういう環境がある可能性も十分考えられます。海水が流入されるとかもあるので、処分場で全く起きない環境でもありません。Saile鉱山ではそういう反応でできたサポナイトとかノントロナイトが、実は変質鉱物としてクロッキング（空隙を閉塞）をして、物質移行を抑制してベントナイトの変質を抑制している、こういうことから見て処分場のアルカリ環境というのは、スメクタイト（モンモリロナイト）を溶かす環境でもあるけれども、スメクタイトを生成する環境でもあり、そういう反応で実際にできた鉱物である、別のタイプのスメクタイトがベントナイトの変質を抑制したりすることで、実際には、ベントナイト緩衝材の大幅な機能低下のような変質が起こる可能性は低いのではないかとというのが、ナチュラルアナログ調査を経て感じた実感であります。

表-5 ベントナイトの長期健全性

処分環境でのベントナイトの長期健全性

- ・アルカリ溶液はスメクタイト(モンモリロナイト)を溶解させるが、一方で、スメクタイト(サポナイト、スチープンサイト、ノントロナイト)を生成させる。
 - ◆ Narra地区のNAでは、Fe、Mgを含む高アルカリ環境がスメクタイトの生成に好ましい環境。
 - 施工時の鉄部材の影響、海水からのFe、Mgの流入、コロイドによる流入
 - ◆ Saile鉱山のNAでは、ベントナイト-アルカリ相互作用によりモンモリロナイトがサポナイト(ノントロナイト)に変質している。
 - ◆ Saile鉱山のNAでは、ノントロナイト等の鉄粘土鉱物のクロッキングがベントナイトの変質を抑制している。

処分場のアルカリ環境は、スメクタイトを生成する環境でもあるため、それによりモンモリロナイトの溶解・変質が生じて、スメクタイトが維持されることで、緩衝材の大幅な機能低下・喪失が引き起こされるほどのベントナイトの変質が生じる可能性は低い。

12. 今後の課題

実際に世の中の人に安全ですってことを示すためには、まだまだ課題があって、アルカリ環境で、今言ったこういう議論において、どの程度になるとスメクタイトが生成して、それが安定に存在するような環境になるか、というところのデータがまだ少し足りません。よりたくさんデータを取ってできれば定性的なデータに整理したらいいかと思います。

一方で、地球化学モデルへの反映というものはまだちょっと試行錯誤のところがあります。実際に天然の複雑なプロセスを再現するのはなかなか難しく、ここができないモデルで室内実験結果を外挿して、処分場の予測をすると、これで十分なんですか？と

言われるのではないかと思います。やっぱりこのようなナチュラルアナログのキャリブレーションをもっとやって、いろんな環境でも再現ができるようなモデル、それで処分場の予測をやったらもっと信頼性が上がるんじゃないか、そういう意味でもっとこういう検討を進めていくべきだと思います。

クロッキングに関しては、そういうものができていたというのは分かるのですが、実はメカニズムとかどういう環境でできるものかというのは、はっきりまだ分かっていません。鉄とマグネシウムがない環境でも実は実験等でもこういうクロッキングのようなのが生じるんですけども、それもあんまり分かっていないので、そういうところをもう少し現象理解からですけども、やっていくべきだと思います。

（本稿は、経済産業省資源エネルギー庁から受託して実施した「平成19～24年度 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」及び「平成25～28年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業（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」の成果に基づき、平成29年12月15日に開催された平成29年度原環センター研究発表会における研究発表の内容を再現し作成したものです。）

参考文献

- (1) 吉田英一，北山一美，佐藤努（2010）ナチュラルアナログ；自然に学ぶ地層処分 数万年先を予測する工学技術とは？第1回．日本原子力学会誌，52(8)，31-35.
- (2) （公財）原子力環境整備促進・資金管理センター（2013）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.
- (3) （公財）原子力環境整備促進・資金管理センター（2015）平成26年度地層処分技術調査等事業 TRU廃棄物処理・処分高度化開発報告書（第3分冊）－ナチュラルアナログ調査－.
- (4) （公財）原子力環境整備促進・資金管理センター（2016）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）－ナチュラルアナログ調査－.
- (5) （公財）原子力環境整備促進・資金管理センター（2017）平成28年度地層処分技術調査等事業 TRU廃棄物処理・処分高度化開発報告書（第3分冊）－ナチュラルアナログ調査－.

編集発行

公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター

〒104-0044 東京都中央区明石町6番4号（ニチレイ明石町ビル12階）

TEL 03-6264-2111（代表） FAX 03-5550-9116

ホームページ <https://www.rwmc.or.jp/>