

ナチュラルアナログ研究のすゝめ

佐藤努*1

本稿では、地層処分に関わる研究者・技術者に NA 研究の重要性を再認識していただき、少しでも多くの研究者・技術者を NA 研究にいざなうため、セーフティケースを基にした市民との対話のための「言葉をつないだ物語に基づく技術力 (ナラティブ・ベイスト・エンジニアリング: NBE)」の重要性とセーフティケース構築のための NA 研究のあり方に関する筆者の考えを示した。また、ナラティブ・ベイストな地層処分研究としての NA 研究をイメージしてもらうため、筆者の関わってきたアナログにこだわらない NA 研究の事例を紹介し、どのように事例をつないでセーフティケースの構築に貢献しようと考えてきたかを記述した。

Keywords: セーフティケース, 地層処分, ナチュラルアナログ, ナラティブ・ベイスト・エンジニアリング

1 はじめに

欧米諸国の地層処分事業におけるセーフティケースの概念は、異なる地質環境を対象とした地層処分システムに対する安全評価結果の相互比較、ナチュラルアナログ (NA) の利用、処分場からの放射性核種の移動量と天然に存在する放射性核種の地下での移動量との比較等を勢力的に行い、安全評価結果とこれを「支援する論拠」とを組み合わせたものとして発展してきた[1-2]。このように、NA は、セーフティケース構築のための重要な要素と考えられている。地層処分システムにおいて想定されるプロセスに類似する実際の天然のプロセスを理解しようというのが NA 研究の目的なのだから、その重要性に議論する余地はない。実は、セーフティケースという概念が頻繁に叫ばれた 2000 年以前から最近まで、本邦の研究者から NA の重要性は指摘されてきた[例えば 3-8]。それにもかかわらず、NA 研究は、むしろ世界的にその予算規模が縮小され、それに携わる研究者数が激減している。したがって、天然におけるプロセスを総合的に診ることができ、かつそれを市民にきちんと語ることで研究者・技術者も激減している。科学的特性マップが公表されて、地層処分の成立性を市民に語るステージになってきた昨今、改めてそのことを痛切に感じるようになっていく。

そこで本稿では、地層処分に関わる研究者・技術者に NA 研究の重要性を再認識していただき、少しでも多くの研究者・技術者を NA 研究にいざなうため、セーフティケースを基にした市民との対話のための「言葉をつないだ物語に基づく技術力 (ナラティブ・ベイスト・エンジニアリング: NBE)」の重要性とセーフティケース構築のための NA 研究のあり方に関する筆者の考えを述べる。また、ナラティブ・ベイストな地層処分研究としての NA 研究を読者によりよくイメージしてもらうため、筆者の関わってきた NA 研究の事例を紹介する。

2 市民と対話するための NBE の重要性

今となっては少し古い指摘になってしまうが、2009 年 8 月 28 日の朝日新聞の天声人語によると、最近ではパソコンばかり眺め、患者の顔を見て診察しない医者が増えているそうである。科学的根拠に基づく医療が行き過ぎたゆえの問題なのだそう。科学的に正しい医療をしたからといって、必ずしも患者さんが満足するとは限らないのである。医療現場ではその反省から、「ナラティブ・ベイスト・メディスン(物語に基づく医療)」というのが提唱されているそう。つまりは話をよく聞き、一人の人間としての患者を忘れない医療のアプローチである。これと同様に、近年の工学技術では、地層処分のように、技術は成熟しているのに社会実装できていない技術がたくさんある。これには様々な原因が考えられるが、トランスサイエンスの問題、特に NBE の不足が大きな原因の一つと考えている。要するに、技術者とその技術を受け入れる市民との対話が成立しておらず、その技術が有するリスクが僅かであることを社会 (市民) に受け入れてもらえていないためと考える。

筆者は、幸いなことに、地層処分に関する集会等で一般市民と対話する機会を多数いただいていた。そこでは、「安全評価をしたら安全でした」という個々のエビデンスに偏重した単純な説明ではなくて、言葉をつなぐことによる相互理解のための説明を心掛けている。説明会の中では、例えば科学的特性マップの説明直後にもかかわらず、「変動帯に位置する国内で地層処分適地はないと思います」という意見や、「本当にそんなに長い間保存 (隔離) できるんですか?」という疑問をぶつけられる。主催者側は、「えっ、今説明したばかりなのに」と思っていることもあるのではないだろうか。そんな時、読者の皆さんならどのように返答されるだろうか? 筆者は、「地震や火山がたくさんある日本でも、**事実として**、数十万年前の化石が残っているところはありますよ」、「でも砂や泥に埋まった化石が、**すべて残っているわけではない**のです。粉々になったり溶けちゃったりした化石もあるのです」、「大事なことは、**どういう条件がそろっていたからその化石が残ったのか**を、処分しようとしている人が理解して説明できるかどうかなのです」、「その条件がそろっているところを見つけることができれば、我々も廃棄物を将来に残すことができるのです」と話を続ける。そうすると、「**どういう条件なの?**」、「そんなところ見つけられるの?」と話がつながって、さらに不安に思う事の問いが続けられ物語がつながっていくといっ

An encouragement of natural analogue study by Tsutomu SATO (tomsato@eng.hokudai.ac.jp)

*1 北海道大学 工学研究院
環境循環システム部門 環境地質学研究室
Environmental Geology Laboratory, Division of Sustainable Resources Engineering, Faculty of Engineering, Hokkaido University
〒060-8628 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目

本稿は、日本原子力学会バックエンド部会主催第 34 回バックエンド夏期セミナーにおける講演内容に加筆したものである。

た具合である。もちろん、説明会に対話のために来ているのではなく反対のために来ている人もいるので一朝一夕にできるものではないが、少なくとも「安全評価をしたら安全でした」という説明よりは話はつながり、引いては対話の成立につながるのではないかと考える。セーフティケースの重要な役割は、ステークホルダーの対話のための共通の土台を提供し、段階的にその信頼性を高めていくことである。したがって、セーフティケースの構築は NBE を前提としたものであることを認識して進められるべきであると考えている。

3 セーフティケース構築のための NA 研究のあり方

当初 NA 研究は、世界各国が開発しつつある処分システムの長期的安全性を裏づける情報を直接提供する目的研究であった。そのため、NA 研究の成果の反映先が明示されている必要があった。NA 研究に求められる条件や反映先は、Chapman et al.,(1984)[9]や Chapman and Miller(1993)[10]により詳細に説明されているが（詳細は湯佐(1996)[3]や吉田(1996)[4]を参照）、概念モデルの構築、安全評価モデルへのインプットデータの提供、安全評価モデルの妥当性の確認である。しかし、日本を含む世界の処分関連機関は、NA 研究の成熟の遅さに業を煮やしたか、あるいはその成果の切り貼りの容易さから、市民へのわかりやすい事例として、あるいは社会的受容のための補助材料として、NA の研究成果を使用してきた。例えば、約 13 億年前に形成されて保存されているウラン鉱床や[11]、100 万年前に堆積した泥質岩中に保存されている火山ガラス[12]、1900 年前に古代ローマ軍の要塞跡に埋められ保存されていた鉄くぎの事例（最近では Archeological analogue と呼ばれるようになっていく）[13]が頻りに紹介されてきた。しかし、このような NA 研究は、紹介する側の意に反して批判の対象とされることも多い。例えば、藤村他[14]は、「ナチュラルアナログとは、古代のガラスや金属がいまでも形を保って出土したり、ウラン鉱床のウランが何千万年や何億年も動かずに保存されていたといった類のものである。当然のことだが、形が残っていなかったり移動してしまったものについては何もわからない。（中略）大事なのは、地質中に保存された場合と保存されなかった場合の条件の違いを明らかにして、望ましい条件が現実の処分場でどれだけ長期間確実に実現するのかを検討することである。」と批判している。筆者も、この NA 研究の示し方に対する批判には同感である。わかりやすさを優先したために、「なぜ保存されたのか」という説明のところが省略されて、「地層には長く保存されているものがある」というエビデンスのみを伝える材料になっていたことによる弊害と考える。たしかに、完全になくなってしまったものを研究するのは至難の業である。しかし、少し下流にウランが流れている鉱床や、表面が少し変質して粘土鉱物に変化している火山ガラスは、処分システムとのアナログ性が弱くなることに目をつむらなければならぬかもしれないが、その時間スケールや地球化学的条件の研究は十分可能である。筆者は、完全に保存されている事例と少し変質してしまった事例をネタ（物語）にして、様々

なレベルでの対話が可能であると考えている。これが筆者の考える「ナラティブ・ベースな地層処分研究としての NA 研究」であり、多様なステークホルダー間の合意形成のためのプラットフォームの役割を担うべきセーフティケースを構築するための NA 研究のあるべき姿と考える。

4 ナチュラルアナログ研究の事例

筆者は、原子力の分野では放射性廃棄物処分のナチュラルアナログ、環境地質学の分野では自然に学ぶ汚染水・汚染土壌の浄化法開発の一環として、様々なフィールドに出かけて自然現象を理解する研究を行ってきた。複雑な実フィールドで自然現象を理解するのは至難の業なので、仲間や学生と自然現象を前に侃々諤々議論し、その素反応のメカニズムや速度を理解するために実験室で精緻な実験をしてきた。そもそも、この議論や検証プロセスこそが「物語」であり、NA 研究にとって最も重要な部分と考える。今振り返ると、筆者は上述のような古い NA 研究の概念上、上司や発注者が肝を冷やすような NA 研究をやってきたかもしれない。なぜなら、筆者は自然現象から読み解くプロセスが地層処分事業にとって重要と考えられるなら、多少のアナログ性の曖昧さには目をつむってきたからである。ここでは、筆者が実施してきた「上司が肝を冷やすような NA 研究事例」の概略を紹介し、そのセーフティケース構築のための重要性を述べる。各研究の詳細は出版物を参照されたい。

4.1 オーストラリアクンガラウラン鉱床の事例 [15-18]

クンガラウラン鉱床は、オーストラリア北部準州のダーウィンから東へ 225km のアリゲータ川地域にある。クンガラ鉱床の形成は約 16 億年前で、現在は浸食により地表から 100m 程度の深さに分布している (Fig. 1)。地表から約 25m の深さまで風化帯が分布しており、約 30m よりも深い部分は未風化帯となっている。約 200 万年前に生成した断層に沿って、隣接する砂岩層から流入した酸化性の地下水による風化のため、一次鉱床の 4 箇のウランからなるウラニナイトのかなりの部分は、6 箇のウランからなるスコロドウスカイト（ウラニルケイ酸塩鉱物）に変質している。風化帯となった部分のウランは地下水に溶け出して下流方向へ

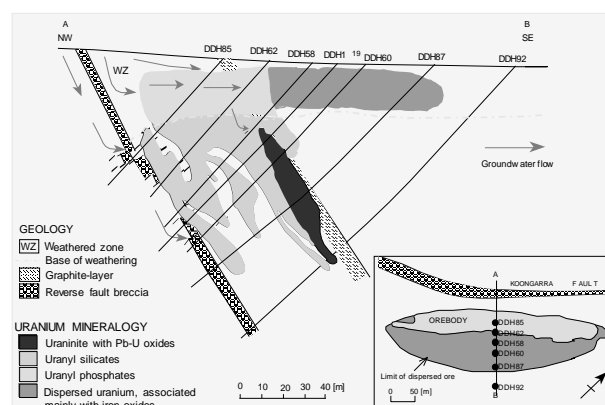


Fig. 1 Cross section and bird's eye view (lower right) of Koongarra ore deposit.

移動し、サレライト（ウラニルリン酸塩鉱物）などからなる二次鉱床を生成している。風化帯のさらに下流では、母岩である石英緑泥石片岩の風化生成物である鉄鉱物に吸着し、一部は微小なウラニルリン酸塩鉱物として沈殿していた。風化帯の水平方向の濃度分布をみると、一次鉱床から下流方向に約 60m の位置に濃度ピークが観察され、それよりも下流側ではほとんどバックグラウンドと同じ濃度レベルであった。このように読み解いたプロセスが我々に教えてくれることは沢山あるが、地層処分に関わる主なものは次の 3 つである。

- 1) 地表付近で、大きな断層が鉱床を直撃して、酸素を含んだ大きい流速の地下水が流入し、U(IV)の鉱物（ウラニナイト）と 200 万年反応すると、ウランは酸化して U(VI)となり下流に移行する。
- 2) ウランが酸化して U(VI)となっても、条件によっては、鉱物化や吸着等の様々な地球化学的作用で、下流への移行は制限される。
- 3) 地表付近であっても、酸素を含んだ地下水と反応せず、還元条件が保たれていれば、たとえ大きな断層が近くに生じたとしても、ウラニナイトは 200 万年以上の間保存される。

このクングラウラン鉱床の NA 研究は、OECD/NEA の傘下に、日本を含む多数の国の機関が参加して実施された地層処分のためのものである。それにもかかわらず、特にプロジェクトの後期では、関係者の評判がすこぶ悪かった。それは、「こんな浅い所に地層処分しないのに、どこがアナログ研究だ」という評価によるところが大きい。確かに、高レベル放射性廃棄物は 300m 以深に処分するし、大きな断層は避けることとなっているし、再処理後のガラス固化体の処分ではウランは重要な核種ではないので、セーフティケースの概念も広まっていない当時としては、もっともな批判だったかもしれない。しかし、現在では、地層処分でも隆起が重要な変動シナリオとなっているし、現在大きな問題となっているウラン廃棄物の処分に対しても重要な知見を示していると考えられる。そしてなによりも、上述の藤村他[14]で批判されていたものに応える内容が含まれている意義は大きいと信じる。

4.2 フィリピンセイルベントナイト鉱床の事例[19]

セイルベントナイト鉱床は、フィリピンルソン島のマニラから 180km 離れた北西部に位置するマンレルアッグ温泉保養施設の傍に位置する。この地域にはオフィオライトという複合岩体が分布しており、その中の超塩基性岩の低温蛇紋岩化作用により生成した pH11 程度の高アルカリ地下水が、この地域に発達している断層系に沿って上昇して湧いている。また、現地でのトレンチ調査により、この高アルカリ地下水がオフィオライト最上部の枕状溶岩中にある断層を通してベントナイト層にまで達していたことが明らかとなった。この高アルカリ地下水は Ca-OH 系の組成を示し、セメント間隙水と類似した性質を持つため、現地で観察された枕状溶岩とベントナイト層との界面は、TRU 廃棄物の処分場で予定されているベントナイトとセメントの界面のアナログとみなすことができる (Fig. 2)。ただし、

高アルカリ地下水と言っても、その pH は 11 程度にとどまっているので、低アルカリセメントの間隙水程度であることに注意する必要がある。本 NA 研究では、かつて高アルカリ地下水と反応したであろう枕状溶岩とベントナイト層の界面を精緻に調べ、ベントナイトの変質とその広がりについて考察した (Fig. 3)。詳細な分析の結果、枕状溶岩中の亀裂から達した高アルカリ地下水によるベントナイトは変質していた。しかし、その変質領域は 5mm 程度に制限されていた。また、その変質領域では、変質によって新たに針鉄鉱や鉄や Mg に富むスメクタイト、カリ長石、沸石等が生成し、空隙を充填（クロッキング）していることも明らかとなった。特筆すべきは、変質領域がわずかであったことと、高アルカリ地下水によりベントナイトに含まれるスメクタイト（アルミニウムやマグネシウムに富む）が変質しているが、そこに鉄や Mg に富むスメクタイトが新たに生成していることである。これは、オフィオライト岩体中には鉄や Mg が大量に存在し、高アルカリ地下水中にそれらの溶存イオンが含まれていたことによるものと考えられる。このように読み解いた界面におけるプロセスと、このような地質セッティングにベントナイト鉱床が存在していることが我々に教えてくれることは次の 4 つである。

- 1) 低アルカリセメント間隙水と類似の高アルカリ地下水が多数の断層系を通して湧出する地質条件であっても、地質学的時間スケールでベントナイト鉱床が存在していた。
- 2) ベントナイトと高アルカリ地下水が反応し、ベントナイトは変質していたが、その変質領域はミリメートルスケール内に限定されていた。
- 3) ベントナイトの変質領域では二次的に鉱物が生成し、

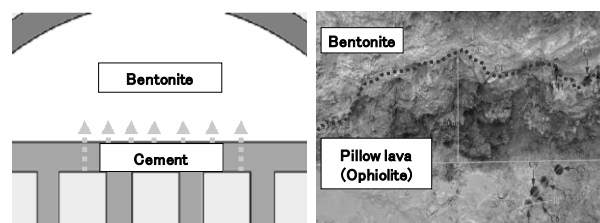


Fig. 2 Interface of bentonite-cement in TRU waste disposal and bentonite-pillow lava in Saile bentonite mine in Phillipine.

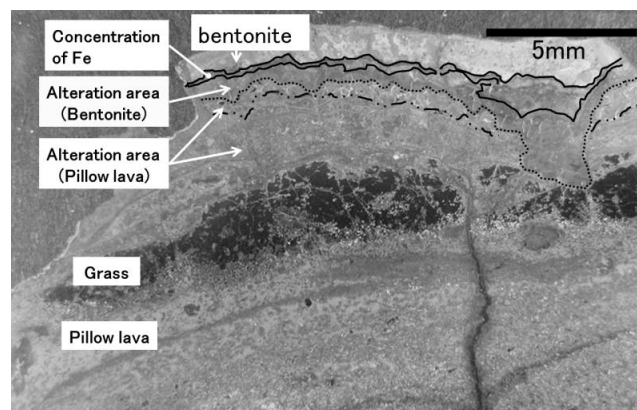


Fig. 3 Photograph of the bentonite-pillow lava interface.

それらによって空隙が充填（クロッキング）されていた。そのクロッキングにより、物質移行が制限され変質領域が限定された可能性がある。

- 4) ベントナイト中のスメクタイトが高アルカリ地下水と反応しても、条件によっては二次鉱物としてスメクタイトが生成することがある。

本 NA 研究でクロッキング現象がクローズアップされたのと時を同じくして、様々な国のセーフティケースの一つとして、人工バリア材界面のクロッキング現象が地下研での現場実験[20]や室内実験[21]、および地球化学解析[22-24]で取り上げられるようになっていた。しかし、解析結果において、クロッキングしている鉱物が天然では稀にしか認められない鉱物であったり、高温条件でしか生成しない鉱物が登場していると、強烈な批判の対象となるので、注意が必要である。どのような岩石（材料）の空隙に、どのような組成を持つ溶液が流れたら、どのような二次鉱物によって空隙がどのようにクロッキングしていくのか、あるいはクロッキングしないのかを理解していく必要があると考える。今後はより一層、天然で認められるクロッキング現象を説明するためのデータベースの拡充と検証が求められていくものとする。

4.3 フィリピンパラワン島の高アルカリ泉での事例[25]

4.2 で紹介したベントナイトのアルカリ変質の事例では、ベントナイトがアルカリで変質するとアナルサイムなどのゼオライトに変質すると考えていた技術者を驚かせるものであった。それもそのはず、変質を模擬するための実験では、セメント間隙水を模擬するため NaOH, KOH, Ca(OH) 溶液を使用していたからである。セイルベントナイト鉱床ではアルカリ変質でゼオライトも生成していたが、鉄や Mg に富むスメクタイトも生成し、界面での空隙のクロッキングに寄与していた。実際の処分場でも、間隙水は単純な NaOH, KOH, Ca(OH) 溶液ではなく、複雑な組成で鉄や Mg を含む可能性がある。変質領域が限られていたのがクロッキングによるものと仮定し、処分場でのクロッキングを期待するためには、現有の地球化学反応モデルとデータベースで、上述の界面でのクロッキング現象を再現できる必要があると考える。しかし、ベントナイトと反応した高アルカリ地下水の通り道になっていた亀裂は充填されて反応は終了している、反応の当事者である高アルカリ地下水は採取できないし（ベントナイト鉱床から離れた場所での採取は可能であるが）、なによりもどれくらいの間ベントナイトと高アルカリ地下水が接していたかを推し量ることが困難であった。

そこで、現在でも高アルカリ地下水と反応しているベントナイトを見つける必要があった。フィリピンには高アルカリ地下水を生成するオフィオライト岩体とベントナイトの母材である火山灰をもたらす火山が多数存在するから、それを発見できる高いポテンシャルを有していた。約 10 年をかけてそのような研究サイトをフィリピンで探したが、現在でも発見するに至っていない。しかし、パラワン島にあるオフィオライトの山体から流れ出る高アルカリ地下水を調査したところ、その下流に溜まっていた堆積物中で大

量の鉄や Mg に富むスメクタイトの生成を確認した。堆積物中には貝化石、植物片、有機物が含まれ、堆積年代を知ることができるので、堆積物粒子間隙のスメクタイトの生成に要した時間スケールを知ることができる。残念ながら、ここで観察できる現象は、ベントナイト-高アルカリ地下水反応のアナログにはなっていない。しかし、高アルカリ環境での鉄や Mg に富むスメクタイトの生成と粒子空隙のクロッキングメカニズムを理解し、安全評価で使用しているモデルやデータベースで再現できるか否かの検証を可能にする絶好の材料である。現地調査と採集試料の分析の結果、数千年オーダーの時間をかけて堆積物の粒子間隙に Ca とケイ酸に富む充填物 (calcium silicate hydrate: C-S-H) や鉄・Mg とケイ酸に富む充填物 (iron silicate hydrate: F-S-H) あるいは magnesium silicate hydrate: M-S-H) 鉄・Mg に富むスメクタイトなどが生成されていた (Fig. 4)。高アルカリ地下水との接触時間が相対的に長い深部での堆積物では、粒子空隙が鉄・Mg に富むスメクタイトで充填されていたが、浅部の接触時間が相対的に短い堆積物では、F-S-H や M-S-H で充填されていた。この観察結果から、高アルカリ水と堆積物の反応により、まず準安定相である F-S-H や M-S-H が沈殿し、それがスメクタイトへ変化しているものと推定される。現在地層処分場の安全評価で使用されているデータベースには、これらの準安定相のデータは存在しない。したがって、反応の生成物としてこれらの準安定相を結果に出現させることはできない。クロッキングをベントナイト-オーバーパック界面およびベントナイト-コンクリート界面の長期性能評価のセーフティケースの一つとして構成するためには、これら準安定相のデータを拡充するとともに、それらの安定相への変質モデルを用意する必要がある。ここで示したパラワン島の高アルカリ水が流れる堆積物中で観察された反応は、それらに十分貢献できる材料を提供しているものとする。

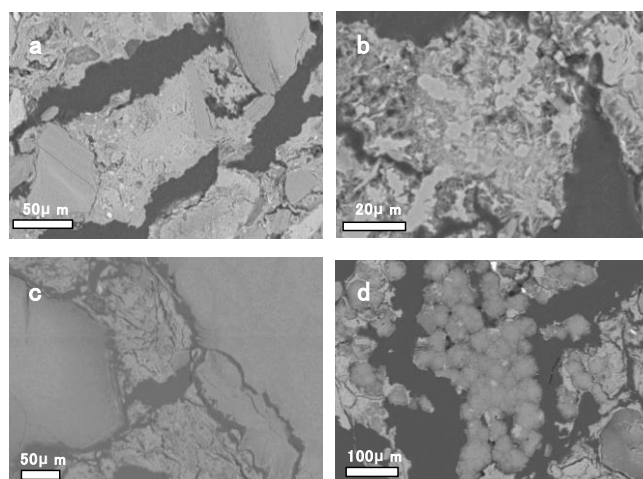


Fig. 4 Minerals in the matrix of the clastic sediments from DH4 at different depths: (a) Solid phase with Si, Fe, and Mg at 3 m; (b) Solid phase with Si and Ca at 3 m; (c) Smectite at 6 m; (d) Solid phase with Si and Ca at 6 m.

5 おわりに

室内実験や解析だけをやってきた研究者や技術者がいきなり野外に出かけても、そこで繰り広げられているプロセスを説明できるわけではない。地層処分の成立性を市民に語るステージになってきた現在では、天然におけるプロセスを総合的に診ることができ、かつそれを市民にきちんと物語として語ることでできる NBE 力を有した研究者・技術者が必要である。その物語の集約こそがセーフティケースだからである。本稿で示した筆者の経験から、それらの力は NA 研究の立案から完成までのプロセスで養われると考える。NA 研究は、NBE 力養成のための唯一無二の存在と考えるので、地層処分の多くの研究者・技術者におすすめする。

謝辞

ここで事例として示したオーストラリアクンガラウラン鉱床のナチュラルアナログ研究は、OECD/NEA の国際プロジェクト、フィリピンの2つのナチュラルアナログ研究は、経済産業省資源エネルギー庁の「高レベル放射性廃棄物等の地層処分に係る技術開発事業 (TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発)」により実施した研究成果を示した藤井他 (2014) [19]および Shimbashi et al. (2018)[25]からの引用である。ここに記してお礼申し上げる。

参考文献

- [1] NEA/OECD: Confidence in the Long-term Safety of Deep Geological Repositories: Its development and communication (1999).
- [2] NEA/OECD: Post-closure safety case for geological repositories: Nature and purpose (2004).
- [3] 湯佐泰久: ナチュラルアナログ研究のすゝめ, 放射性廃棄物研究, 2, pp.85-92 (1996).
- [4] 吉田英一: ナチュラルアナログ研究の再考—東濃ウラン鉱床における研究を例にして—, 放射性廃棄物研究, 2, pp.93-103 (1996).
- [5] 佐藤努・福士圭介: 廃棄物処分のナチュラルアナログ研究—あまりアナログにこだわるな—, 資源地質, 53(2), pp.193-200 (2003).
- [6] 北山一美・佐藤努・吉田英一: 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, pp.473-477 (2010).
- [7] 北山一美・佐藤努・吉田英一: 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2回, 日本原子力学会誌, 52, pp.553-558 (2010).
- [8] 北山一美・佐藤努・吉田英一: 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3回, 日本原子力学会誌, 52, pp.657-662 (2010).
- [9] Chapman, N. A., McKinley, I.G. and Smellie, J.A.T.: The potential of natural analogues in assessing systems for deep disposal of high-level radioactive waste. SKB Tech. Report 84-16 (1984).
- [10] Chapman, N.A. and Miller, W.: Natural Analogue Working Group. Fifth Meeting, Toledo, October 1992. CEC Nuclear Science and Technology Report, EUR 15176. (1993).
- [11] Miller, W., Alexander, R., Chapman, N., McKinley, I. and Smellie, J.: Geological disposal of radioactive wastes and natural analogues, Pergamon Pres. (2000).
- [12] Kamei, G., Yusa, Y. and Arai, T.: A natural analogue of nuclear waste glass in compacted bentonite. *Applied Geochemistry*, **15**, 153-167 (2000).
- [13] Angus, N.S., Brown, G.T. and Cleere, H.F.: The iron nails from the Roman legionary fortress at Inchtuthil, Perthshire. *J. Geochem. Exploration*, **46**, 35-62 (1962).
- [14] 藤村陽・石橋克彦・高木仁三郎: 高レベル放射性廃棄物の地層処分はできるか II-地層処分の安全性は保証されていない-, 科学, 3月号, 264-274 (2001).
- [15] 柳瀬信之・佐藤努・磯部博志・関根敏一: ナチュラルアナログ研究への選択的抽出法の適用とその重要性—クンガラウラン鉱床の場合—, 放射性廃棄物研究, **2**, 121-135 (1996).
- [16] 大貫敏彦・村上隆・磯部博志・柳瀬信之・佐藤努: オーストラリア・クンガラウラン鉱床におけるナチュラルアナログ研究, 放射性廃棄物研究, **2**, 137-143 (1996).
- [17] Sato, T., Murakami, T., Yanase, N., Isobe, H., Payne, T.E. and Airey, P.L.: Iron nodules scavenging uranium from groundwater, *Environ. Sci. Technol.* **31**, 2854-2858 (1997).
- [18] Murakami, T., Ohnuki, T., Isobe, H. and Sato, T.: Mobility of uranium during weathering, *Am. Mineral.* **82**, 888-899 (1997).
- [19] 藤井直樹・山川稔・鹿園直建・佐藤努: フィリピン国・ルソン島北西部に分布するザンバレスオフィオライトで生成されたアルカリ溶液との反応によって変質されたベントナイトの地球化学的・鉱物化学的特性, 地質学雑誌, **120**, 361-375 (2014).
- [20] Mäder, U. et al.: 5-year chemico-physical evolution of concrete-claystone interfaces, Mont Terri rock laboratory (Switzerland), *Swiss J Geosci.* **11**, 307-327 (2017).
- [21] Torres, E., Turrero, M.J., Escribano, A., Martín, P.L.: Geochemical interactions at the concrete-bentonite interface of column experiments, PEBS, FP7-249681, p.73 (2013).
- [22] Bradbury, M.H., et al.: The long term geochemical evolution of the nearfield of the HLW repository, NARGRA Technical Report12-01, p.134 (2014).
- [23] Wilson, J.: FEBEX-DP: geochemical modeling of iron-bentonite interactions, QRS-1713A-R3, Quintessa, p.66 (2017).
- [24] Mon, A. et al.: Long-term non-isothermal reactive transport model of compacted bentonite, concrete and corrosion products in a HLW repository in clay, *J. Contaminant Hydrology*, **197**, 1-16 (2017).
- [25] Shimbashi, M., Sato, T., Yamakawa, M., Fujii, N. and Otake, T.: Formation of Fe- and Mg-rich smectite under

hyperalkaline conditions at Narra in Palawan, the Philippines. *Minerals*, **8**(4), 155 (2018).