

「ナチュラルアナログ研究ワークショップ 2024」参加報告

中林亮^{*1} 新橋美里^{*1} 藤井直樹^{*2} 竹田宜人^{*3} 藤田和果奈^{*4}

はじめに

2024年9月18日、19日の2日間にかけて、ナチュラルアナログ研究ワークショップ 2024 が対面とオンラインのハイブリッド形式（北海道大学での対面と Zoom を活用したオンライン）で原子力発電環境整備機構（以下、NUMO という）の主催で開催された。参加者は対面で 20 名、オンラインで約 40 名であった。ナチュラルアナログ研究とは、放射性廃棄物処分施設と類似性を有する天然事象（ナチュラルアナログ）を調査する研究方法である。NUMO が公表した包括的技術報告書において、ナチュラルアナログ研究は、地層処分システムの長期的な安全性の傍証として、セーフティケースの重要な要素を担っている。本ワークショップでは、最新のアナログ事例に関する知識の共有と統合化、ナチュラルアナログ研究をステークホルダーとのコミュニケーションで活用し地層処分システムに対する信頼性を向上させることを目的とした取り組みに関わる意見交換等を狙いとして開催された。

1 日目は海外におけるナチュラルアナログ研究の最新事例に関する講演があり、2 日目は日本における最新事例に関する講演があった。また、2 日目の午後は、後述する 3 つのテーマに関してグループディスカッションが実施された。以下に、本ワークショップの概要について報告する。

9月18日（1日目）

講演 1 : Natural analogues to improve safety case robustness (I. McKinley 氏, McKinley Consulting)

1980 年代には、ナチュラルアナログ研究に多くのリソースが投入され、スウェーデンやスイスなどの国々で研究が進められた。初期の研究では、地層処分の実現可能性の傍証としてナチュラルアナログが活用されてきた。複数の国で処分地が決定されている、あるいは母岩が特定されるようになった現在では、放射性廃棄物を特定のサイトに埋設した場合、その場所での安全性が保証されるかどうかを詳細に評価することにナチュラルアナログの利用が重要視

されるようになってきた。講演では、ナチュラルアナログ研究の例がいくつか取り上げられ、オクロ天然原子炉の例では、プルトニウムが 20 億年にわたり移動しなかったこと（廃棄物の閉じ込め性に関するアナログ）や、炭酸塩濃度の高い環境にあるウラン鉱床の例から、炭酸塩環境におけるウランの移行特性を理解することに役立ったことなどの説明があった（写真 1）。また、現在の安全評価における最大の課題として「堅牢性（ロバスト性）」の確保を挙げられた。堅牢性とは、ある程度の不確実性があつても、十分に強力な議論や証拠があるために安全性が確保されるという考え方である。ナチュラルアナログ研究がこの堅牢性を確保するための重要な手段であることが強調された。加えて、ナチュラルアナログ研究は若手研究者の育成にも重要な役割を果たすと強調された。自然環境を実際に調査することは、地質学や廃棄物処分システムに関する実践的なスキルを習得するための貴重な経験であり、将来の専門家を育てるための重要な訓練となることである。また、人工バリアの設計を最適化するためのいくつかのコンセプトが提案された。例えば、溶接キャニスターをスクリューシールに置き換えることなどが挙げられる。このコンセプトの正当性を高めるためには、関連する鋼材のスクリューシールと溶接の耐用年数を比較する考古学アナログ研究が有用である。また、人工バリアの実用性/品質保証の観点、および長期性能の観点から、より近代的な素材の使用が有益であることが提案された。その例として、最新の樹脂の使用が挙げられた。高 pH 環境下における天然樹脂（琥珀）の安定性に関するナチュラルアナログ研究がこれを裏付ける可能性がある。



写真 1 I. McKinley 氏による講演の様子

講演 2 : More than 20 years of archaeological analogues at the LAPA, CEA/CNRS, France (D. Neff 氏, CEA)

鋼材の腐食やガラスの変質に関する考古学アナログ研究

Report on a natural analogue workshop 2024 by Ryo NAKABAYASHI (r-naka@criepi.denken.or.jp), Misato SHIMBASHI, Naoki FUJII, Yoshihito TAKEDA and Wakana FUJITA

*1 一般財団法人 電力中央研究所

Central Research Institute of Electric Power Industry
〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646

*2 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター
Radioactive Waste Management Funding and Research Center
〒104-0044 東京都中央区明石町 6-4 ニチレイ明石町ビル 12 階

*3 北海道大学大学院工学院 環境循環システム部門
Division of Sustainable Resources Engineering,
Graduate School of Engineering, Hokkaido University
〒060-8628 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目

*4 原子力発電環境整備機構
Nuclear Waste Management Organization of Japan
〒108-0014 東京都港区芝 4 丁目 1-23 三田 NN ビル 2 階

は、放射性廃棄物の地層処分におけるこれらの材料の長期的な変質を予測する上で重要である。腐食速度を制御する機構の理解が不可欠であり、考古学アナログの研究が盛んに行われてきた。LAPA研究所（考古材料・変質予測研究所）は20年以上にわたり、これらの研究に取り組み、多くの研究業績を公表している。講演では、無酸素環境における考古学アナログの研究開発の概要ならびに400年前の考古学鉄釘の研究で明らかにした腐食界面ナノ層の物理化学的特性について紹介があった。

講演3: Efforts on analogue studies in Finland and NA use in safety case (H. Reijonen 氏, GTK)

フィンランドとスウェーデンで実施されたナチュラルアナログ研究に関するプロジェクトが紹介された。両国では、氷河作用が地震や断層活動に与える影響を調査する研究や、ベントナイトの長期的な挙動を理解するためのアナログ研究が行われている。例えば、フィンランドのサイマー湖を対象に、氷河融解時の極端なシナリオが地下水や岩盤にどのように影響するかを調査する研究が紹介された。また、天然銅の腐食を研究する新しいプロジェクトにも言及され、酸素が豊富な環境と無酸素環境の両方における銅の腐食挙動に関する知見が示された。フィンランドやスウェーデンの規制当局は、セーフティケースにナチュラルアナログ研究を取り入れることを事業者に求めており、これがセーフティケースにおける重要な論点の一つとなっているとのことである。講演者は、セーフティケースに取り入れることで、シナリオやモデルの精度を向上させることができると述べていた。また、日本においても気候変動に関するナチュラルアナログ研究に着手すべきではないかとのコメントがあり、とくに沿岸地域における気候変動の影響を評価するために有効だろうとの指摘があった。

講演4: Natural Analogue - A proposed strategy for implementation within the NWS (UK) programme of geological disposal (S. Norris 氏, NWS)

英国で進められているナチュラルアナログ研究の活用とセーフティケースへの組み込みについての紹介があった。現在、英国の放射性廃棄物処分プログラムは、サイト選定に関する地域社会の募集段階にあり、3つのコミュニティが関心を示しているが、まだ最終決定はされていない。英国では、主にカンブリア州とリンカンシャー州の地域で、地質調査が進行中とのことであるが、現時点では規制上の制約によりボーリング調査は行えず、既存のデータに基づいた調査が行われているとのことである。具体的には、石油会社が行った調査データやボーリング孔のデータを利用して、地質を理解するための努力が続けられている。注意しなければならない点として、ナチュラルアナログ研究は、地層処分の安全評価における重要なデータ源となるが、異なる地質環境や過去の地質変動を十分に考慮する必要があるという。例えば、カンブリア州の泥岩群は過去に深く埋没した履歴があり、これが岩石の構造や鉱物組成に影響を

与えたという。このため、得られたデータを候補地の地質と直接比較する際には、その差異を十分に理解しなければならない。また、サイト選定するにあたり、地域社会との対話が非常に重要とのことである。講演者は、処分場の設計や安全性について地域住民に情報を提供し、理解を深める必要性を強調した。処分施設がどのように機能するかについて、住民に透明性のある形で説明し、彼らが十分な情報をもって意思決定できるよう支援することが事業者には強く求められているとのことである。また、ナチュラルアナログ研究で取得したデータをセーフティケースに適切に組み込むために、情報を体系的に整理するためのシステムが必要であると述べた。また、上記システムは継続的な更新と変更管理が重要であり、規制当局からデータの追跡可能性を確保することが求められているとのことである。

講演5: Application of natural analogues in the NUMO safety case (W. Fujita 氏, NUMO)

2021年にNUMOが公表した包括的技術報告書は、NUMOがどのようにサイトの調査を進め、安全な処分場の設計・建設・操業・閉鎖を行い、閉鎖後の長期間にわたる安全性を確保しようとしているのかについて、これまでに蓄積された科学的知見や技術を統合して包括的に説明したものであり、特定のサイトを対象としないセーフティケースとして作成している。この報告書において、ナチュラルアナログ研究は地層処分システムの長期的な安全性の傍証としてセーフティケースの重要な要素を担っている。講演では、後述するグループディスカッションのテーマに関連する、「アナログ事例のカタログ化」、「現象評価モデルの検証と妥当性確認」、「ステークホルダーとのコミュニケーション」について、2023年度に実施されたナチュラルアナログ研究ワークショップで出された意見が紹介された。NUMOはこうした意見を取り込みつつナチュラルアナログ研究を進めている。その一例として、処分場の閉鎖後の安全に関する要因を、地層処分システムの各構成要素の特性（Feature）、特性に影響を与える事象（Event）、地層処分システムの時間的変遷の過程（Process）に分けたFEPリストを活用し、アナログ事例と処分システムの構成要素を対応付ける方策について紹介があった。

9月19日（2日目）

講演6: 埋蔵環境の差異が鉄製文化財の腐食状態に及ぼす影響（柳田明進氏、奈良文化財研究所）

著者らは遺跡等から出土した鉄製文化財の保存方法の研究に取り組んでおり、その研究から得られた知見は炭素鋼オーバーパック材料の長期腐食モデルの検証にも活用可能と考えられる。このような観点から、考古学的な鉄製遺物をナチュラルアナログとして活用する有効性について紹介があった。地層処分の初期には酸素が関与する腐食が進行し、酸素が消費されると還元環境下での腐食が始まる。この研究の対象となった平城宮においては、地層が出土品の

発掘位置によって異なっており、その結果、酸化環境と還元環境の両方の埋設環境を観察できるため、両環境下での長期的な腐食現象を比較することが可能であることが紹介された。

**講演7：天然のアルカリ環境における二次鉱物に関する文献調査とセメント-ベントナイトの長期相互作用の示唆
(新橋美里氏, 電力中央研究所)**

放射性廃棄物処分施設に関する性能評価では、アルカリ環境下におけるベントナイトの変質反応とそれに伴う透水性の変化を評価することが必要である。この評価期間は非常に長いため、室内試験や原位置試験のみならず、天然における長期の地球化学反応を観察することが有用とのことである。本件では、天然のアルカリ環境、かつ、低温(100°C以下)条件下で二次生成物の生成が報告されている文献を調査した結果が発表された。具体的には、高温熱変成を受けた泥灰岩付近、オフィオライト岩体付近、アルカリ塩湖で産出が認められるアルカリ溶液に関連した地球化学反応を調査した結果とのことである。この文献調査により、セメント-ベントナイト相互作用により生成される可能性がある二次生成物の鉱物種や生成条件、安定性に関する知見が得られた。これらは、放射性廃棄物処分施設におけるセメント-ベントナイト相互作用を予測するために実施される物質移行-化学反応連成解析において、二次生成物の設定根拠もしくは設定の妥当性確認に有用とのことである。

講演8：機械学習を用いたオーバーパック腐食評価モデル整備～ナチュラルアナログデータの活用について～(藤原大資氏, テプコシステムズ)

オーバーパックの腐食評価モデルを補完するために、機械学習を用いた新しいアプローチが検討されている。具体的には、機械学習を用いた予測結果を、従来の機構論的(理論的)モデルと比較し、両者の結果を比較・統合することで信頼性の高い腐食予測を実現することを目指すとともに、将来的に確率論的評価を行うためのベースとして利用することを期待しているという。作成したモデルと入力データ(対数正規分布等を仮定)を用いて、ナチュラルアナログ研究で取得されたデータの再現を試みた結果、バンド幅で示された結果内にナチュラルアナログのデータが収まることが示された。

講演9：対話活動におけるナチュラルアナログ活用の経験について(古川宏氏, NUMO)

地層処分に関する市民との対話では、地層処分システムに期待される安全性や長期的な性能等についてわかりやすく説明することが信頼性を高める鍵であるとされている。ナチュラルアナログ事例は、それらを示す多面的な論拠の一つとして非常に有用であるが、時間が限られている説明会の場では十分に活用できないことが多々あるという問題

点が紹介された。限られた時間内で効果的に説明を行うための工夫が必要であり、とくに対話の中で信頼性を確保しながら情報を伝える方法が求められるという。

講演10：対話におけるナラティブ・アプローチのためのナチュラルアナログの利用(佐藤努氏, 北海道大学)

地層処分の説明会や対話の場では、技術者が一方的に情報を伝えるだけでは、住民の理解や信頼を得るのが難しい場合が多いという。とくにナチュラルアナログに関する研究結果を説明する際には、具体的なデータの背景や、なぜその事象が起きたのかを詳しく説明しないと、住民が納得しにくいという問題点が挙げられた。ナチュラルアナログを使った事例説明は、住民に対して「こういうデータがあるから安全だ」と押し付けるだけではなく、対話の中で住民が自らの疑問に答えを見つけられるような形で行うことが重要とのことである。つまり、ナチュラルアナログを効果的に使うためには、データを提示するだけでなく、住民との対話を通じて疑問や不安に応えるアプローチが重要で、技術的なデータに加え、物語性を持たせることで、住民が納得しやすい形にすることが有効であることが紹介された。

グループディスカッション

2日目の午後は、3つのテーマに関してグループディスカッションが実施された(写真2)。グループディスカッションは、対面参加者が各テーマに約6名ずつとなるように振り分けられた。グループ内でファシリテーター、記録係、タイムキーパー、発表者という役割が割り当てられ、約120分間、議論を交わすとともに、発表準備を進め、全体での発表ならびに意見交換の場が設けられた。以下、各テーマの議事をまとめると。



写真2 グループディスカッションの様子

テーマ1：セーフティケースの文脈に沿ったアナログ事例のデータベース化について

アナログ事例は、地質環境の長期安定性や人工バリアの

長期挙動に関する安全評価上の設定の合理性を示す場や、対話活動など幅広いステークホルダーとのコミュニケーションの場において活用されることが期待される。アナログ事例の十分な活用を促すためには、上記活動を実施する専門家がアナログ事例を簡単に検索することができるよう、アナログ事例のデータベース化することが有用と考えられる。そこで、テーマ1では、データベースに収録するアナログ事例のフォーマットについて意見交換を行った。具体的には、2023年度に実施した本ワークショップの講演要旨のフォーマットを基に、追加すべき項目について議論した。追加すべき項目としては、アナログシステムが関連する設計要件や、関連するキーワード、他の類似のサイトでのアナログ事例との比較、処分システムとの相違点、アナログ事例の空間的・時間的スケールに関する情報、対話活動での活用例などが挙げられた。さらには、データベースに収録する情報の品質管理に関する方策や、持続的にアナログ事例を収集・蓄積し、データベースを更新していく仕組みづくりに関して意見交換を行った。データベースの更新に際しては、本ワークショップのような気軽に意見交換ができる場が重要であるという意見が出た。

テーマ2：アナログ事例を活用した安全評価に用いられている現象評価モデルの検証と妥当性確認について

テーマ2では、地層処分システムの場の状態変遷の記述の検証や、その設定根拠としている地球化学解析などの検証と妥当性の確認に、現状ではアナログ事例が十分に活用されていない理由について意見交換を行うとともに、今後有効的にアナログ事例を現象評価モデルの検証と妥当性確認で用いるための方策について意見交換を行った。ナチュラルアナログ事例が十分に活用されていない理由として、初期・境界条件やタイムスケールの不明確さ、プロセスの複雑性、データの品質やアナログ性の不確実さ、データの少なさ、データへのアクセスの難しさ等が挙げられた。これに対して、地質学的情報や実験的評価を基にした推定や、現状のデータを活用しながら研究を進めることができた。また、データの不確実性を定量化するために、フィールドデータの取得や専門家の判断を活用することも議論された。データが少ない点については、ナチュラルアナログ研究や考古学アナログ研究においてモデル検証に必要となるデータが十分に取得できていない可能性や、さらに報告書が膨大で検証に必要なデータにアクセスすることが困難である可能性が指摘された。解決策として、モデル研究者とフィールド研究者の間で必要なデータをリストアップし、共有することが重要であり、データのカタログ化も進められるべきだという意見が出された。とくに、NUMOのカタログ化の取り組みが重要であり、モデル検証に必要なデータが簡単に抽出できるようになることが理想とされた。総じて、現状のデータを活用し、研究者間のコミュニケーションとデータの共有を促進することが、モデル検証の進展に重要であると結論づけられた。

テーマ3：一般向けのアナログ事例の情報の提供の仕方について

テーマ3では、「一般向けのアナログ事例の情報の提供の仕方について」を主題として、①アナログ事例は何の説明に適しているのか？その特質を整理する。②①の特質から、「セーフティケース」の文脈のどこで使えるのか？③市民向けの資料を作成する際に、アナログ事例を用いて説明することにおいて配慮すべき事項は何か？のサブテーマに分けテーブルワークを行った。①は付せんへの意見出しの方法を用い、①の議論を踏まえて、②と③について自由討議を行い、ファシリテーターが記録する方法で進行した。

写真3はその際の付せんと議論を記録したホワイトボード、図1と図2はその意見等を構造化したものである。結論として、③市民向けの資料を作成する際に、アナログ事例を用いて説明することにおいて配慮すべき事項は何か？の問い合わせに対して、コンテンツの作成において着目すべき視点として以下の点が指摘された。

- ・長時間を表現するコンテンツとしての理解。
- ・地層処分は自然の事例、自然のなせる技、自然の態様、自然に学ぶ技術であること。
- ・事実であること。
- ・人を引き付け身近でイメージしやすいネタとしての理解。
- ・使われない理由を考えること。

その具体化として、「アナログ事例を用いて説明することが有効となる場合を説明者と技術者の協働で整理したカタログ、ネタ帳を作成しておくこと」が提案された。



写真3 ホワイトボード上の記録

「ナチュラルアナログ研究ワークショップ2024」参加報告

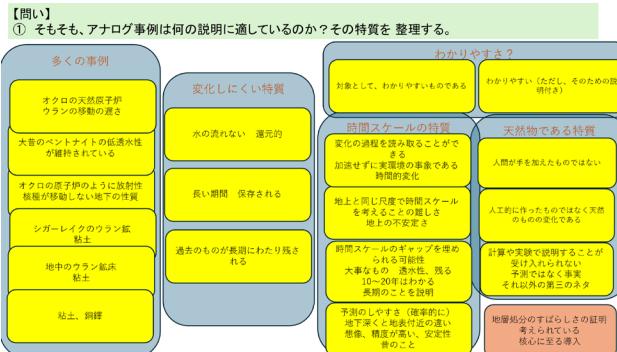


図1 ホワイトボードの構造化（付せん）

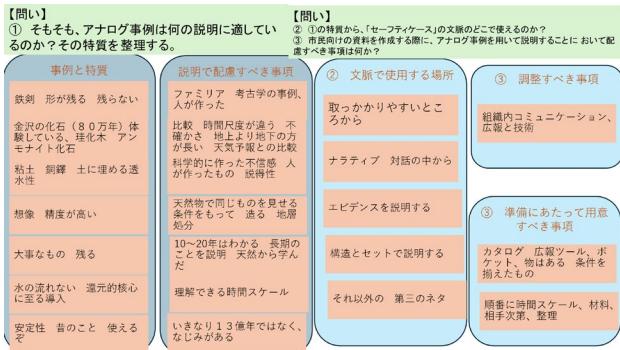


図2 ホワイトボードの構造化（聞き取り）

おわりに

本ワークショップの報告書は NUMO より 2025 年 3 月頃に発刊予定である。各講演ならびにグループディスカッションの詳細については報告書を参照されたい。ナチュラルアナログ研究は、地層処分に関する技術的信頼性ならびにステークホルダーに対する社会的信頼性を向上するためにも重要な研究テーマと考える。さらに、McKinley 氏が語ったように、若手研究者の育成にも重要な役割を果たすものと考える。バックエンド分野の研究者（とくに、若手研究者）には、ぜひ積極的に関与していただければ幸いである。

最後に、本ワークショップの開催にあたり、企画・運営にご尽力された NUMO の鈴木覚氏、田窪勇作氏、永井翔氏、北海道大学の佐藤努教授に心より感謝申し上げます。