

2024 年度ナチュラルアナログ 研究ワークショップ開催報告

2025 年 10 月

原子力発電環境整備機構

2024 年度ナチュラルアナログ 研究ワークショップ開催報告

2025 年 10 月

原子力発電環境整備機構

©原子力発電環境整備機構: Nuclear Waste Management Organization of Japan, 2025

本資料の全成果は著作権により保護されています。全部または一部を無断で複写・複製・転載することを禁じます。複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒108-0014 東京都港区芝4丁目1番地23号 三田NNビル2階
原子力発電環境整備機構 技術部

All parts of this work are protected by copyright. No parts of this publication may be reproduced, stored in the retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, without the prior permission of NUMO. Inquiries about copying and reproduction should be addressed to:

Science and Technology Department
Nuclear Waste Management Organization of Japan
Mita NN Bldg.1-23, Shiba 4-chome, Minato-ku, Tokyo 108-0014 Japan

2024 年度ナチュラルアナログ研究ワークショップ開催報告

藤田和果奈^{*1}，鈴木寛^{*1}，新橋美里^{*2}，中林亮^{*2}，藤井直樹^{*3}，竹田宜人^{*4}，
佐藤努^{*4}，近藤駿介^{*5}

要旨

OECD/NEA が公表した国際的なセーフティケースの作成指針に基づけば、アナログ事例はセーフティケースの技術的信頼性を高める基盤情報の一部であるだけでなく、一般の方とのコミュニケーションの場において、セーフティケースを活用して地層処分の仕組みを伝える強力なツールとなる。このような考え方は、NUMO が 2021 年に取りまとめた包括的技術報告書においても取り入れられており、アナログ事例はセーフティケースの技術的信頼性と社会的信頼性の基盤を補強する「補完的な考察」(Complementary consideration) となるものである。

NUMO は、これらの考えに基づいて、アナログ事例を更に効果的に活用していくため、国内におけるアナログ研究の最新動向を把握する目的で、2023 年 11 月に「ナチュラルアナログ研究ワークショップ 2023」を開催した。このワークショップでは、アナログ事例のデータベース化、現象評価モデルの検証と妥当性確認 (V&V: Verification & Validation) への活用、及び一般の方との対話での活用方法について討論が行われた。

これらの結果を踏まえ、NUMO は最新のアナログ事例の情報収集対象を海外にも広げ、海外の地層処分事業者がアナログ研究の成果をセーフティケースの構築にどのように役立てているかについて情報を収集するため、2024 年 9 月に「2024 年度ナチュラルアナログ研究ワークショップ」を開催した。本ワークショップでは、国内外の研究者によるアナログ事例の講演に加え、アナログ事例を人工バリアなどの長期挙動モデルの信頼性向上に役立てるための研究事例、セーフティケースの構築に活用する事例、及び対話活動におけるアナログ事例活用の課題などが紹介された。これらの講演とグループディスカッションの結果に基づき、NUMO は、以下の四つの主要な課題に今後取り組む。

(1) アナログ事例データベースの構築

アナログ事例データベースは、技術的検討と対話活動の双方に価値を提供する形で進化させることが求められる。技術的検討向けには、各事例を FEP (Features, Events, Processes の略) や設計要件などの項目と結びつけて整理し、論文や報告書に散在していたデータを一元化することで、研究の効率と信頼性を高める。一方、対話活動向けには、難解な専門用語を避け、直感的に理解できる写真・図表・映像などを豊富に盛り込む必要がある。処分場を設置

^{*1} 原子力発電環境整備機構 技術部

^{*2} 電力中央研究所 サステナブルシステム研究本部

^{*3} 原子力環境整備促進資金管理センター 地層処分バリアシステム研究開発部

^{*4} 北海道大学工学研究院 環境循環システム部門 資源循環工学分野

^{*5} 原子力発電環境整備機構 相談役

する地下深部や数万年といったスケール感を可視化し、科学的な事実をナラティブに伝えるための素材集としての機能を持たせる。データベースに収録する情報については、信頼性の高い査読済み論文を基盤としつつ、情報交流のためのワークショップや AI（Artificial Intelligence）の活用など、持続可能な情報更新の仕組みを構築することが今後の方向性となる。

また、アナログ研究として新たに取り組むべきと考えられるのは、以下のような事例が挙げられる：

- ・ 沿岸域における安全評価シナリオの構築に役立つと考えられる気候変動
- ・ 有機材料の長期健全性や現象理解に役立つと考えられる琥珀
- ・ 新たなオーバーパックの蓋接合としての「ねじ」に関する考古学アナログなど

このほかにもセーフティケースの文脈に沿って有用なアナログ事例を再検討する。これらの研究を進めるにあたっては、研究機関や大学などの若手研究者や技術者が参画しやすくなるようなプラットフォームの整備にも取り組む。

（2）現象評価モデルの検証と妥当性確認への活用

アナログ事例の活用を阻害してきた要因（現象の複雑性、初期・境界条件の不確実性、情報の希少性・一般性、アナログ事例情報へのアクセス性の困難さなど）を克服することが求められる。アナログ事例が持つ複雑性や初期・境界条件の不確実性を考慮し、まずは単純化したモデルで評価を進める。同時に、統計的手法や専門家意見聴取を用いて不確実性を定量化し、評価の信頼性を高めていくべきである。更に重要なのは、解析側と現場の研究者間との連携を高めることである。解析側が必要とするデータを明確化し、アナログ研究の担当者と共有することで、データ収集の効率を向上させることが今後の鍵となる。このためにも、ワークショップを継続的に実施し、協働しやすい環境を構築する。

（3）一般向けコミュニケーションスキルの向上

アナログ事例は、専門的な説明による納得感が得られにくい人々に向けた「第三のツール」として有効であり、地下環境の安定性や放射性物質が自然界にも存在するという事実を通じて、直感的な理解と安心感の醸成寄与することが期待される。このためには、単に事例を羅列するのではなく、「何を伝えたいか」という明確なメッセージに基づき「感動」を呼び起こすようなストーリーテリングが不可欠である。技術者が持つ専門知識と、広報担当者が持つコミュニケーションスキルを融合させ、一般の方の疑問や関心に寄り添った物語を共同で作り上げることが今後重要である。地層処分が特別な技術ではなく、自然界にも同じような現象が起きているという「補完性」を示すことで、一般の方が感じる心理的な抵抗感や不安を和らげ、納得感が得られるような事例を提示する。

（4）セーフティケースの信頼性を補完する考察の強化

上記の 1 から 3 の取り組みは、NUMO が包括的技術報告書で示した地層処分システムの長期的な安全性確保のための技術的取り組みに対する信頼性を、多面的な論拠として補強する

「補完的な考察」(Complementary consideration)として重要な役割を果たす。NUMOのセーフティケースにおいてこの役割を強化するためには、アナログ事例の充実とそれらに基づいた考察の深化が不可欠である。これにより、解析的な評価だけでは捉えにくい長期的な現象や複合的な影響に対する理解が深まり、セーフティケース全体の堅牢性(Robustness)を高めることができる。また、これらの知見を組織全体の知的資産として体系的に共有・活用できる仕組みを構築する。

これらの四つの取り組みを統合的に進めることで、アナログ事例は単なる研究ツールから、地層処分事業全体の透明性と信頼性を高めるための重要な知的資産へと転換され、科学的根拠に基づいた地層処分の安全性確保と社会の納得感醸成に貢献していくものと期待される。

Report of “Natural Analogue Research Workshop 2024”

Abstract

W. Fujita^{*1}, S. Suzuki^{*1}, M. Shimbashi^{*2}, R. Nakabayashi^{*2}, N. Fujii^{*3}, Y. Takeda^{*4},
T. Sato^{*4} and S. Kondo^{*5}

^{*1} NUMO Repository Engineering Group, ^{*2} CRIEPI, ^{*3} RWMC, ^{*4} Hokkaido University,

^{*5} NUMO Special Advisor

This report summarizes discussions and future directions for the effective utilization of analog cases to support the safety case for geological disposal. Based on international guidelines from OECD/NEA and specific input from the NUMO safety case, analog studies are recognized as a crucial "complementary consideration" tool for enhancing both the technical reliability and stakeholder acceptance of geological disposal.

To further leverage these insights, NUMO hosted the "Natural Analog Research Workshop 2023" in November 2023 to survey the latest domestic research trends in this field, discussing creation of a database of analog cases, assessing their application to the Verification & Validation (V&V) of mechanistic assessment models, and their use in public dialogue. Building on this input, the "Natural Analog Research Workshop 2024" was held in September 2024 to further gather information on how overseas geological disposal implementers apply analog research findings to safety case development.

The workshops featured presentations from domestic and international researchers on analog cases, including research examples aimed at improving the reliability of long-term behavior models for engineered barriers, applications in safety case construction, and challenges in dialogue activities. Based on this, NUMO has identified four key challenges to address going forward:

(i) Construction of an analog study database

This database is expected to provide value for both technical support and dialogue activities. For technical use, it will consolidate scattered documentation, linking cases to FEPs (Features, Events, Processes) and design requirements in order to facilitate use and ease consistency checks. For dialogue activities, this will provide syntheses that avoid complex terminology, incorporate visual material to help communicate relevance to deep underground environments and vast timescales (up to millennia or even much more), serving as a basis for communication of scientific understanding to non-specialist audiences. Future efforts will focus on building a sustainable update mechanism, possibly facilitated by AI tools, to capture reliable technical papers, alongside workshop output. New research areas are expected to include climate change impacts on coastal sites, amber as an analogue for industrial resins, and archaeological analogs for screw-type overpack lids. Additionally, communication platform development aims to encourage participation from young researchers.

(ii) Application to verification & validation (V&V) of models

Simplifications of the models used to support a safety case can sometimes be argued to ensure conservatism, but rigorous testing any that are applied to spatial- and time-scales far beyond those approachable in the laboratory inherently depends on analogs of some form. This requirement becomes even more important as models become more "realistic", as required for optimisation of repository concepts. Nevertheless, there are also fundamental differences between even the closest analogs and the repository system of interest and these need to be understood so that results are not over-interpreted. This can provide input for a general uncertainty analysis, as is presently planned for future NUMO safety cases.

(iii) Improving skills of public communication

Analog cases serve as an effective tool for technical explanation of concepts that are often difficult for non-specialists to grasp, for example by demonstrating the stability of the underground environment and the natural presence of radionuclides. This requires storytelling, based on clear messages and integrating technical expertise with communication skills, in order to create narratives that address stakeholder concerns and lead to greater public acceptance.

(iv) Strengthening complementary considerations for safety case reliability

It is now well recognized that mathematical models are necessary, but not sufficient, for developing a safety case. Such quantitative analysis needs to be complemented by "complementary considerations", qualitative arguments that support the fundamental basis of safe geological disposal. These should demonstrate an understanding of the processes that determine the long-term evolution of the repository and the robustness of the barriers that ensure that no significant risks occur at any time. The knowledge provided by analogs complements that from conventional and underground laboratory studies, which should be integrated within a knowledge management system that facilitates sharing and utilization of such understanding.

By integrating output in these four areas, analog cases are transformed from academic research into significant intellectual assets that enhance the overall transparency and reliability of the geological disposal project, contributing to safety assurance and fostering social acceptance.

目次

第1章 はじめに	1
第2章 ワークショッププログラム.....	4
第3章 講演セッションの実施結果.....	7
第4章 グループディスカッションと総合討論の概要.....	18
第5章 今後の取り組み.....	26
第6章 おわりに	28
参考文献.....	29
付録 講演要旨	付-1

第1章 はじめに

放射性廃棄物の処分では、安全性の確保が必要となる対象期間が極めて長く、数十万年から、時には 100 万年にも及ぶとされる。このような長期的なタイムスケールにおいては、安全性の解析は室内実験や原位置試験が扱える範囲をはるかに超えてしまう。したがって、室内実験や原位置試験のデータを遠い将来まで外挿することによってモデル化しようとする際には、それが適切かつ信頼できるものであるという証拠を示すことが必要となる。

OECD/NEA が公表した国際的なセーフティケースの作成指針に基づけば、アナログ事例は超長期のセーフティケースについて技術的信頼性を高める基盤情報の一部として、「補完的な考察」(Complementary consideration) となるものである。本報告書では、地層処分システムに対して類似性を有する自然現象(ナチュラルアナログ)、考古学的な事物(考古学アナログ)、及び産業的な事物(産業アナログ)をまとめて「アナログ事例」と呼び(Milodowski et al., 2015 など)、アナログ事例を自然科学的な手法で研究することを「アナログ研究」と呼ぶ。

NUMO が取りまとめた包括的技術報告書(NUMO, 2021)においては、最新の科学的知見やこれまでの技術開発成果に基づいて実施してきた安全な地層処分を実現するための技術的取り組みを示した。この報告書では、ナチュラルアナログをはじめとするアナログ事例を、地層処分のセーフティケースの信頼性を高める多面的な論拠の一つとして位置付けた。アナログ事例は安全評価で想定する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状態設定の妥当性を傍証し、安全評価におけるこれらの取り扱いの妥当性を補強する役割を担っている。例えば、炭素鋼製オーバーパックに期待する地下水とガラス固化体が早期に接触することを防ぐという安全機能が長期にわたり維持される可能性が高いことは、鉄製の考古学遺物(斧や釘)の腐食速度などのアナログ事例によって示唆される。しかし、アナログ事例は、室内試験とは異なり、その事例がどのような条件のもとで形成されたかについては情報が不十分であることがあり、その解釈には不確実性を伴う。そのような不確実性を考慮しても、アナログ事例は、セーフティケースが対象とする長期の時間スケールに対する知見をもたらすものとして有用である。

このようなアナログ研究の成果を活用して地層処分の安全性を傍証する取り組みは、NUMO のみならず、海外の実施主体が作成するセーフティケースにおいても採用されている(イギリス(NDA, 2016); スイス(Nagra, 2002); ベルギー(ONDRAF/NIRAS, 2001); フランス(ANDRA, 2005); フィンランド(Posiva, 2012), スウェーデン(SKB, 2011); 米国(DOE, 2008))。このように、アナログ事例は長期にわたって外挿した推定値を裏付ける方法の一つとして科学的な洞察を提供するものであるが、それだけでなく、一般の方とのコミュニケーションにおいてもその価値があるとされている(例えば, OECD/NEA, 2004; Alexander et al., 2007)。

NUMO は、ナチュラルアナログをはじめとするアナログ事例がセーフティケースの技術的信頼性や社会的信頼性の基盤を補強するツールとして有用と考えている。アナログ事例を、地層処分事業において、更に効果的に活用していくために、国内におけるアナログ研究の最新の動向を把握することを目的として、ナチュラルアナログ研究ワークショップを 2023 年 11 月に開催した。ワークショップは、NUMO と JAEA の共同研究の一環として開催し、国内の研究機関、大学、民間企業などの技術者及び研究者ら 27 名、オンライン参加者 42 名、合計 69 名が参加した。出席者から最新のアナログ事例に関する研究などについて 13 件の講演をいただくとともに、出席者全員が参加して、包括的技術報告書におけるアナログ事例の活用を踏まえ、今後「ナチュラルアナログをどのようにセーフティケースに活用していくか」というテーマで総合討論を実施した(藤田ほか, 2024)。

総合討論では、NUMO が今後取り組むべき方向性として、以下の3点が挙げられた。

- ・ アナログ研究は国内外で進んでいるものの、学術論文や各機関が独自に発行する技術報告書などとして分散しており、利用しにくい状況にある。アナログ研究の成果を一元管理するようなデータベースを地層処分の事業者である NUMO が整備すべきではないか
- ・ 人工バリアの長期健全性に関する定量的評価技術の妥当性確認（Verification & Validation, 以下、「V&V」という）においてアナログ事例は有用であると考えるが、定量的な情報が示されていないことも多い。妥当性確認に利用するためには、定量的評価を行う研究者だけでなく、アナログ研究を担当する研究者もどのような情報が必要とされているかについて知るべき。また、その活用方法についてノウハウを研究者間で共有して効率化できるとよい
- ・ アナログ事例をセーフティケースの構築や一般の方との効果的なコミュニケーションで活用するため、目的や文脈に応じて取り上げる事例を適切に判断・活用できるよう、情報の整理・整備を行うことが必要ではないか

これらの提言を踏まえ、NUMO は、海外の地層処分事業者がアナログ研究の成果をどのようにセーフティケースの構築に役立てているかについて情報を収集するため、2024年度ナチュラルアナログ研究ワークショップを開催した。本ワークショップでは、対面参加者 20 名、オンライン参加者約 40 名が参加し、国内外の研究者によるアナログ研究の最新事例、アナログ事例の活用事例について 10 件の講演があり、また、これらの講演を踏まえて、2023 年度のワークショップの総合討論の結果から抽出した三つのテーマについてグループディスカッションを行った。

本報告書の第1章では2024年度のワークショップの背景と目的について述べた。第2章にはワークショップのプログラムを掲載する。第3章には各講演の概要を示す。第4章にはグループディスカッションの概要をまとめる。第5章には、グループディスカッションを踏まえた NUMO の取り組みについて述べる。第6章にはワークショップの成果を取りまとめる。付録には講演要旨を掲載する。表1に本報告書で用いた用語と略語・略称の定義を示す。

表 1 本報告書で用いた用語と略語・略称

用語	説明
アナログ事例	天然事象（ナチュラル）アナログ（Natural Analogue），産業アナログ（Industrial Analogue），考古学アナログ（Archaeological Analogue）の総称とする（Milodowski et al., 2015）。
考古学アナログ	地層処分システムに類似性を有する考古学的な事物や現象。対象とする時間スケールはおおよそ 150 年以上，1 万年以下（Minkley and Knauth, 2013）。
産業アナログ	地層処分システムに類似性を有する産業的な事物や現象。対象とする時間スケール 150 年以下（Minkley and Knauth, 2013）。
ナチュラルアナログ	地層処分システムに類似性を有する自然現象，特に地下深部の環境や地質学的プロセス。対象とする時間スケールはおおよそ 1 万年以上（Minkley and Knauth, 2013）。
ANDRA	放射性廃棄物管理機関（フランス）（Agence Nationale pour la Gestion des Dechets Radioactifs）
BGS	英国地質調査所（British Geological Survey）
CRIEPI	電力中央研究所（Central Research Institute of Electric Power Industry）
DOE	エネルギー省（米国）（Department of Energy）
JAEA	日本原子力研究開発機構（Japan Atomic Energy Agency）
Nagra	放射線廃棄物管理共同組合（スイス）（Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle）
NDA	原子力廃止措置機関（英国）（Nuclear Decommissioning Authority）
NUMO	原子力発電環境整備機構（Nuclear Waste Management Organization of Japan）
NWS	ニュークリアウェイストサービス（英国）（Nuclear Waste Services）
OECD/NEA	経済協力開発機構／原子力機関（Organization for Economic Co-operation and development/Nuclear Energy Agency）
ONDRAF/NIRAS	放射性廃棄物・濃縮核分裂性物質管理機関（ベルギー）（Nationale instelling voor radioactief afval en verrijkte Splijtstoffen）
Posiva	ポシヴァ社（フィンランド）（Posiva Oy）
RWMC	原子力環境整備促進・資金管理センター（Radioactive Waste Management Funding and Research Center）
RWM	放射性廃棄物管理会社（英国）（Radioactive Waste Management）
SKB	スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社（スウェーデン）（Svensk Kärnbränslehantering AB）

第2章 ワークショッププログラム

本ワークショップは、9月18日から19日の2日間にわたり、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オンライン）で開催した。参加者は対面で20名、オンラインで約40名であった。表2、表3及び表4にワークショップのプログラムを掲載する。

表2 ワークショップのプログラム（第1日目 講演会）

9月18 (September 18)		
時間 (Time)	講演内容 (Contents)	講演者 (Speaker)
14:00-14:10	Welcome note	NUMO, T. Sato (Hokkaido university)
14:10-14:30	ワークショップの背景と目的について (The background and purpose of this workshop)	NUMO, S. Suzuki
セッション1：アナログ研究の最前線 その1 (Session 1: The frontiers of the analogue studies 1)		Session chair: T. Sato (Hokkaido university)
14:30-15:00	Natural analogues to improve safety case robustness	I. McKinley (McKinley Consulting)
15:00-15:30	More than 20 years of archaeological analogues at the LAPA, CEA/CNRS, France	D. Neff (CEA)
15:30-15:45	休憩 (Break)	
セッション2：地層処分事業者のアナログ研究の取組み (Session2: Efforts on analogue studies by geological disposal implementer)		Session chair: I. McKinley (McKinley Consulting)
15:45-16:15	Efforts on analogue studies in Finland and NA use in safety case	H. Reijonen (GTK)
16:15-16:45	Natural Analogues – A proposed strategy for implementation within the NWS (UK) programme of geological disposal (tentative)	S. Norris (NWS)
16:45-17:15	Application of natural analogues in the NUMO safety case	W. Fujita (NUMO)
17:15-17:45	Discussions and wrap-up of day 1	I. McKinley

表 3 ワークショップのプログラム（第 2 日目 講演会）

9 月 19 日 (September 19)		
時間 (Time)	講演内容 (Contents)	講演者 (Speaker)
セッション 3 : アナログ研究の最前線 その 2 (Session 3: The frontiers of the analogue studies 2)		Session chair: N. Fujii (RWMC)
10:00-10:20	埋蔵環境の差異が鉄製文化財の腐食状態に及ぼす影響 (Effects of differences in burial environments on the corrosion state of iron artifacts)	A. Yanagida (Nara National Research Institute for Cultural Properties)
10:20-10:40	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への示唆 (Review of secondary minerals under natural alkaline conditions and implications for long-term cement-bentonite interactions)	M. Shimbashi (CRIEPI)
10:40-11:00	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 (Development of General Corrosion Rate Model for Carbon Steel Overpack using Artificial Intelligence Technology ~Utilization of Archaeological Analogues ~)	D. Fujiwara (TEPSYS)
11:00-11:10	休憩 (Break)	
セッション 4: コミュニケーションとアナログ研究 (Session 4: Analogues in public communication)		Session chair : Y. Takeda (Hokkaido university)
11:10-11:40	コミュニケーションでの NA の活用の経験について (Experiences of using natural analogues in public communication)	H. Furukawa (NUMO)
11:40-12:10	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 (Using Natural Analogue for Narrative Approaches in Dialogue)	T. Sato (Hokkaido university)

表 4 ワークショップのプログラム（第 2 日目 グループディスカッション）

9 月 19 日 (September 19)		
時間 (Time)	講演内容 (Contents)	講演者 (Speaker)
グループディスカッション (Group discussion)		
13:10-13:20	各国のナチュラルアナログ活用事例の振り返り (Review of natural analogue applications in various countries)	W. Fujita (NUMO)
13:20-13:35	グループディスカッションの進め方 (How to proceed with group discussion)	R. Nakabayashi (CRIEPI)
13:35-15:30	グループディスカッション (Group discussion) テーマ 1 (Subject 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 (The creation of a database of NAs to support a safety case) - 最新のアナログ事例の情報収集や品質管理の方法 (How to collect the latest NAs, How to perform quality control of the information) - セーフティケースに否定的な根拠となる事例の取り上げ方 (How to address NAs that provide negative basis for a safety case) テーマ 2 (Subject 2) : アナログ事例を用いた長期評価の V&V の仕方 (How to perform Verification & Validation on a long-term evaluation using NAs) - 長期評価モデル及び入力データの V&V に活用可能な既存のアナログ (Existing NAs that can be utilized for V&V of the long-terms evaluation models and input data) - 今後探索すべきアナログ事例について (Newly required NAs) テーマ 3 (Subject 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 (How to provide NAs when communicating with the general public) - 一般向けに訴求力のあるアナログ事例は何か (NAs that appeal to the general public) - カタログに収録する際の説明の仕方について (How to explain NAs in a database)	
15:30-15:45	休憩 (Break)	
15:45-17:00	グループディスカッションのまとめ (Summary of group discussion) モデレーター : 北大佐藤教授 (Moderator: Professor T. Sato) - 各グループの意見の紹介 (Presentations from group) - 意見交換 (Opinion exchange) - 今後の活動への提言まとめ (Summary and future activities)	
17:00-17:10	Wrap-up of the workshop	

第3章 講演セッションの実施結果

講演セッションは公開で行い、国内外のアナログ研究の取り組みについて、10 件の講演があった。図 1 に当日の講演会場の様子を示す。



図 1 講演会場の様子

講演の概要を以下にまとめる。講演要旨（英文）を付録に掲載する。なお、Q は会場からの質問、A は講演者の回答、C は会場からのコメントを意味する。

3.1 第 1 日目の講演概要

講演番号 P-1
講演タイトル Natural analogues to improve safety case robustness
講演者（所属） I. McKinley (McKinley Consulting)

（講演概要）

アナログ事例は、セーフティケースの堅牢性（Robustness）を向上させるために必要なものであり、地層処分システムが安全性に関していかに安全裕度（Safety margin）を備えているかについて、説得力のある証拠として有用である。これまでのアナログ研究は、研究者の学術的な関心から“ボトムアップ”型に進められることが多かったが、セーフティケースの堅牢性（すなわち、ある程度の不確実性があっても、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）を示すためには、重要なトピックについて地層処分事業者自身が必要とするアナログ事例の研究テーマを“トップダウン型”で示すことが有効である。

例えば、オクロ天然原子炉の例では、プルトニウムが 20 億年にわたりその場にとどまり続けたこと（廃棄物の閉じ込め性能に関するアナログ事例）や、炭酸塩濃度の高い環境にあるウラン鉱床の事例から、炭酸塩環境におけるウランの移行特性を理解することなどは、初期のアナログ研究の良好事例である。今後、不均一な構造を有する岩石中の物質移行の事例、海面変動などの地域的な環境変化に伴う物質移行の事例、オーバーパックの蓋接合方法としてねじ込み方法の妥当性を示す考古学アナログ、樹脂系廃棄物の長期健全性を示唆する事例としての天然樹脂（琥珀）の事例についてアナログ研究に取り組むことを推奨する。

国際的に関心の高いアナログ事例の研究は、国際共同研究の良好な題材となり得る。また、そのような国際的な共同研究を通じて、自然環境を実際に調査することは、若手の技術者や研究者にとって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となるものであり、将来の専門家を育てるための重要な訓練の機会となる。

(質疑)

Q：琥珀のアナログ事例に関して、人工の樹脂と自然の樹脂でどのような違いがあるか？

A：人工の樹脂は接着剤として、建築、自動車、宇宙産業など幅広く利用されている。化学的には琥珀とは違うものであるが、有機物というレベルでは類似性がある。地層処分においては、有機物は安全性を脅かすものとして認識されることが多いのではないかと。樹脂は可燃物であるし、一部の有機物は放射性物質と錯体を形成することにより物質移行を促進する可能性がある。しかし、琥珀は長期間にわたり、昆虫などを当時の姿のまま包埋して地層から産する。このような琥珀の機能は、地層処分の安全機能を想起させるよいアナログ事例となる可能性がある。

Q：腐食寿命評価用の数学モデルの開発に取り組んでいる。アナログ事例を数学モデルの検証と妥当性確認に使いたい、どう進めるべきか、また、適切なアナログ事例について考えを聞きたい。

A：対象となるアナログ事例が形成された環境条件、例えば、地下水の地球化学条件がどう変化してきたかについて知る必要がある。炭素鋼のアナログ事例は数多くあるし、次の講演でもいくつも事例が紹介されるだろう。少し視点を変えると、アナログ事例で地層処分のシステム全体の安全性を直接的に証明することは容易ではないと考えるべきである。処分場で生ずる個別のプロセス（例えば、ガラスの溶解、金属製容器の腐食）を対象として信頼性を補完的に示唆することは可能である。

講演番号 P-2

講演タイトル More than 20 years of archaeological analogues at the LAPA, CEA/CNRS, France

講演者（所属） D. Neff (CEA)

(講演概要)

LAPA (Laboratory for Archeomaterials and Prediction of Alteration) では、20 年以上にわたり金属腐食に関する考古学アナログの研究を進めている。金属の長期的な腐食プロセスの 4 つの研究手法には、室内実験、実規模試験、考古学アナログの分析、腐食過程のモデル化があるが、それぞれが担う役割、対象とする時間スケールを適切に組み合わせて研究を進めてきた。考古学遺物の研究では、鉄の腐食生成物として、炭酸鉄を主成分とする数百ミクロンの層が確認された。更に、金属表面との境界に極薄の腐食層が存在していた。この層は、鉄の異なる酸化状態が混在する連続層であることが電子顕微鏡などで確認できた。重水を用いた腐食層の空隙率の調査では、この極薄の腐食層が炭酸塩層よりも低い空隙率を持ち、腐食の要因となる酸素の移行を抑制していることが示された。また、C-AFM（電流検出原子間力顕微鏡）により腐食層の導電性を調べたところ、絶縁性の炭酸塩層内にナノスケールの導電経路が存在することも確認された。これらの知見は、長期腐食予測の理解を深めるものであり、今後は銅の考古学的アナログ研究にも応用する予定である。

(質疑)

C：考古学遺物では、通常みられない厚い腐食層が形成されることがある。その結果、腐食の律速段階が、金属表面への酸素や水分子といった酸化剤の移行（カソード律速）から、腐食層の電子伝導へと変化するという知見は、実験からは想定できない知見であった。腐食寿命の評価モデルを構築するうえで、考慮に入れるべき重要な知見である。

Q：フランスでは、考古学アナログの知見をどのように長期腐食寿命評価に反映しているか。

A：遺物が見つかった環境と地層処分環境が異なるため、直接比較するのは容易ではないと考えている。地層処分環境は極低酸素濃度であるが、考古学遺物は地表に近く地下深部に比べて酸素が多い。そのような違いを考慮しなければならないのではないか。どのような現象をモデル化するのが重要である。

Q：低酸素環境においては腐食生成物としては、金属表面にシデライト (FeCO_3) が形成されることが多いという認識である。これに対して、考古学遺物ではマグネタイト (Fe_3O_4) やマグヘマイト ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) が多いとのことであった。このような腐食生成物の違いが腐食にどのような影響を与えると考えるか。

A：腐食層内の物質移行率と電子伝導率のどちらが支配的になるかということである。シデライトの場合は、絶縁体であり、金属表面で腐食反応が進行するため、物質移行が腐食速度を律速し、腐食層の空隙率が重要な因子となる。これに対し、マグネタイトやマグヘマイトは電子伝導性を有するので、カソード反応は腐食生成物表面で発生する。そのため、腐食層の電子伝導率が腐食速度を律速する。このような腐食生成物による現象の違いを理解することが重要である。

講演番号 P-3

講演タイトル Efforts on analogue studies in Finland and NA use in safety case

講演者（所属） H. Reijonen (GTK)

(講演概要)

フィンランドはオルキルオトにすでに処分場の建設が進んでおり、"Regional analogue"（処分場候補サイトと類似した地質環境や地殻変動の特性を有する地域の調査研究により将来的に起こりうる変化を予測する手法）のアナログ研究が進んでいる。フィンランドでは、氷河の融解後に生じるアイソスタシーの変化に伴い断層が活動し、地震が発生する。そのような過去の類似事象は、オルキルオト周辺で将来的に起こり得る地殻変動の推定に有用である。また、長期的な氷河の雪解け水が人工バリアの周辺に侵入する状況のアナログ事例としてフィンランドのサイマー湖を対象に研究した。日本においても気候変動に関連するナチュラルアナログ研究に着手すべきであり、そのような事例は、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と考えられる。

このようなアナログ事例は、アナログカタログに収録されるものであり、その定期的な更新が、セーフティケースにおけるアナログ事例の戦略的活用の基盤となる。また、各事例はただの情報の羅列に留めず、構造化された形で事業の各段階に応じて繰返し評価されるべきである。フィンランドにおいても、アナログ研究は、FEPの構築、バリア材料の性能評価、シナリオ構築、一般の方とのコミュニケーション、人工バリアの設計開発など、幅広い役割を担っている。

(質疑)

Q：講演者が、アナログ事例の活用にはホリスティック・アプローチ⁶が重要だと指摘されたことは重要であり、フィンランドではそのように取り組まれていることがよく分かった。気候変動のアナログという視点も重要である。海に囲まれた日本でも気候変動は重要である。例えば氷期－間氷期のサイクルにおける海水準変動などがある。フィンランドの経験で日本が参考にすべきことはないか。

A：フィンランドでは氷床の成長があるが、日本ではそのようなケースは考えにくい。そういった違いはあるが、日本でも気候変動のアナログ研究に取り組みは必要と考える。

Q：アナログ事例のデータベースを作るという説明があったが、どのように構成していくべきと考えたか。

A：英国でも取り組まれているようにカタログを作成するというのが一つの方法である。私自身の経験では、やはり FEP ベースのアプローチが最も体系的にまとめやすいと考える。FEP の根拠となる試験データとアナログ事例の両方がそろっているかなどの確認を実施しやすい。

Q：気候変動のアナログ事例について紹介があったが、銅の腐食に関するアナログ事例はカタログに取り入れえないのか。

A：銅のアナログ研究にすでに取り組んでいる。先ほどの講演にもあったが、アナログ事例が形成された環境と処分環境の相違点についてよく認識して取り組むべきと考えている。国際的な協力の枠組みで取り組んでいきたい。

講演番号 P-4

講演タイトル Natural Analogues – A proposed strategy & examples of implementation in the ongoing UK geological disposal programme

講演者（所属） S. Norris (NWS)

(講演概要)

英国では、現在三つの自治体が地層処分事業への関心を示しており、それらの地域の母岩となり得る泥岩と蒸発岩からなる地層のボーリング調査プロジェクトを進めている。NWS では、サイト選定前、サイト調査、建設、操業と閉鎖の4段階において、アナログ事例を活用しながら事業を進める計画である。サイト選定前の事業段階においては、FEP リストとアナログ事例を関連付け（マッピング）することや、要求事項や設計要件とアナログ事例のマッピングにより、知見の充足性のギャップ解析に用いる。また、サイト候補地の地質学的背景の理解にもアナログ事例を活用する。アナログ研究で得られる情報は、実験やモデリングから得られるデータやパラメータと同様に扱うべきであり、また、体系的な知識マネジメントのもとで扱うようにすべきと考えている。

(質疑)

Q：英国及び日本は、調査地域の選定に公募制を取り入れている点や、沿岸での処分を検討しているという共通点がある。アナログ研究についても共同で取り組む機会を作るべきではないか。

⁶ホリスティック・アプローチ：課題に対して人・プロセス・戦略・環境などの関連要素を総合的に捉え、バランスの取れた持続可能な解決策を導く方法

A：そういう機会が必要である。断層が重要な地質学的特徴であるという点も、両国に共通している。

Q：英国ではアナログカタログを公表しているが、アナログ事例を取り下げるという説明もあった。どのような基準で取り下げるのか。

A：セーフティケースへの貢献度という観点が第一に挙げられる。また、アナログ研究の追跡性も重要だった。

講演番号 P-5

講演タイトル Application of natural analogues in the NUMO safety case

講演者（所属） W. Fujita (NUMO)

（講演概要）

NUMO が取りまとめた包括的技術報告書では、アナログ事例を多面的な論拠の一つとして活用した。アナログ事例を更に効果的に活用するために、2023 年にナチュラルアナログ研究ワークショップを開催し、アナログ事例のデータベース化、解析の V&V への活用、一般の方との対話での活用について専門家と討論した。それらの意見も踏まえ、今後のセーフティケースにおける、アナログ事例の提示方法の改善にも取り組んでいる。例えば、アナログデータベースの作成では、個別のアナログ事例を地層処分システムに求められる安全機能と FEP を介して対応付け、マッピングすることで構造化して整理できるよう準備を進めている。昨年度までに収集した緩衝材に関する 10 ケースのアナログ事例を安全機能に対応付けた。このほか、アナログ研究の知識マネジメント、一般の方とのコミュニケーション、人材育成へと繋げるため、アナログ研究の包括的な計画を策定している。

（質疑）

Q：FEP の技術的根拠や設計要件の充足性根拠として、室内試験、数値解析結果、そしてアナログ事例の三つが重要ということだったが、アナログ事例のみがあって、室内試験の結果がないというようなことはあるのだろうか。

A：室内試験の事例のみが揃っていないというのは考えにくいですが、アナログ事例がないというケースはよくある。その場合には、当該事象を傍証するようなアナログ研究が必要であり、FEP を用いることで網羅性を高めることができる。

C：FEP を使うというのはよいアイデアであるが、時として FEP は、その複雑さゆえに、アナログ事例の見通しを悪くしてしまうこともある。よく整理された FEP リストが必要であろう。日本とフィンランドで協力していくのが良いだろう。

講演タイトル：第 1 日目の講演のまとめ

講演者：I. McKinley (McKinley Consulting)

（講演概要）

事務局から提起された三つの論点から本日のセッションをまとめる。

（1）アナログ事例のデータベース化について

FEP に基づいたアプローチが、英国、フィンランド及び日本の共通点であった。アナログ事例は、

これまで特定の地域を対象としたものではなかったが、今後、英国も日本も特定の調査地域が得られるようになれば、その地域で見つかるアナログの重要性は増していくはずである。講演会の質疑においても、アナログ事例の形成環境と地層処分環境の相違点に注意して、アナログ事例を用いるべきという意見があった。対象となる地域のアナログ事例であれば、他の地域のものに比べて、地球化学的な条件といった境界条件も類似性が高いとみなせるだろう。気候変動のアナログ研究は、新しい視点であったと思う。日本も取り組むべきである。

(2) 数学モデルの検証と妥当性確認へのアナログ事例の活用

アナログ事例をベンチマークに使用することや、短期間のモデルとの比較はすでに取り組まれている。しかし、どのようなアナログ事例であっても、環境の時間的変化や境界条件の不確実性など、さまざまな不確実性を伴っている。数学モデルの検証及び妥当性確認にアナログ事例を活用しようとするのであれば、そのような不確実性についてよく考えて評価に反映させるべきである。また、不確実性のマネジメントはセーフティケースの構築において極めて重要な要素のひとつである。

(3) 一般の方とのコミュニケーションへのアナログ事例の活用について

コミュニケーションへのアナログ事例の活用については、3 か国とも重要であるという点では共通している。全てのアナログ事例をコミュニケーションに活用しようという考えもあったが、アナログ事例によっては、一般の方にはわかりにくいものもあるだろう。例えば、オクロのウラン炭酸塩の沈殿をアナログ事例として説明するのは容易ではない。

まずは、地層処分の専門家自身がかつて地球科学への理解を深めるべきではないかと考える。日本にも多くのすぐれた研究者がいると認識している。しかし、しばしば試験管の中だけで精緻な研究を実施しており、その知見がそのまま地層処分に使えるかについては、よく考えるべきである。自然界は実験室よりも複雑であり、多くの不確実性を伴う。そのことを理解するのに、アナログ研究は適しており、試験管の中だけで物事を考えてきた研究者も、ぜひアナログ研究プロジェクトに参画してほしいと思う。そういった研究者が、アナログ研究の経験を踏まえて、学生を指導し、一般とのコミュニケーションに参加すれば、素晴らしい取り組みだし、良い成果を生むのではないかと。

(4) アナログ研究の今後の方向性について

最後に、若い学生や研究者を育成していくのにアナログ研究が役立つことを強調したい。このようなワークショップは、アナログ研究に興味を持つ人々にとって、“今”を知るよい機会であり、このような活動を通じて、より理解を深めてほしいと思う。2 日目のグループディスカッションには、さまざまな年齢層の研究者や専門家が集まるので、若手も交えて充実した議論となることを期待する。

3.2 第2日目の講演概要

講演番号 P-6

講演タイトル 埋蔵環境の差異が鉄製文化財の腐食状態に及ぼす影響 (Effects of differences in burial environments on the corrosion state of iron artifacts)

講演者 (所属) A. Yanagida (Nara National Research Institute for Cultural Properties)

(講演概要)

講演者は、鉄製文化財の保存の観点から埋蔵環境と遺物の腐食について研究を進めている。このような知見が、地層処分の研究にも応用可能であると考え、金属製遺物の考古学アナログの研究を進めている。例えば、金属製遺物は埋蔵環境によって異なる酸素濃度下で腐食するため、発掘された場所によって鉄製遺物の腐食状況が異なる。酸化的な環境から出土した遺物では、異なる種類の腐食生成物が密度の異なる層が複数混在しており、比較的高い腐食速度を示す一方、還元的な環境下から出土した遺物は、均質な腐食生成物に覆われており、比較的低い腐食速度を示すことが分かった。地下に埋設された廃棄物周辺では、時間の経過とともに酸素量が減少していく。本研究の結果が、地層処分環境が酸素の多い環境から酸素が欠乏するようになるまで過渡的に変化していく過程のオーバーパックの腐食状態の推定に役立つと考えられる。

(質疑)

Q：腐食層のひび割れと局所的な腐食の間に関連性はあるか。

A：酸素の少ない還元的な環境から出土する遺物は、時間とともに色が変わるなどの変化が確認されており、発掘後に錆層が変化するという現象がみられる。ひび割れについても、現時点では発生時期が不明である。

Q：出土した遺物の周りの地球化学的な環境について情報はるか。例えば、砂層だと水の流れが速く、酸化されやすいといった情報はるか。

A：私の研究では、すでに発掘されたものであるとか、埋蔵環境が不明なケースが多くみられる。そのような点に焦点を当てた研究は JAEA で実施されている。ご指摘のあった環境と遺物の腐食状態の関係については、現在研究している。これまでの研究に基づくと、礫や砂層から出土する場合には、かなり腐食が進行しているが、シルト層、粘土層などでは腐食の進みが少ない傾向にある。

Q：どのようにして酸化還元環境を判断しているか

A：地下水の溶存濃度も測定しているが、腐食生成物の種類で判断している。

Q：実験室ではシデライトと金属表面の間に鉄ケイ酸塩が生じている。考古学遺物でもそのような傾向はあるか？

A：これまでの研究では、そのような界面を観測できておらず、不明である。

講演番号 P-7:

講演タイトル 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ーベントナイトの長期相互作用への示唆 (Review of secondary minerals under natural alkaline conditions and implications for long-term cement-bentonite interactions)

講演者 (所属) M. Shimbashi (CRIEPI)

(講演概要)

放射性廃棄物処分場において、ベントナイトは低透水性を有するため、放射性核種の移行を抑制する人工バリアとして使用されている。一方、周囲に設置されるセメント系材料からは段階的にアルカリ浸出液が発生し、これがベントナイトを変質させ、透水性を変化させる可能性がある。これらの影響を評価するために反応輸送モデルが用いられているが、二次鉱物の種類やその鉱物学的変化に関する知見が不足しており、モデル結果には不確実性が伴う。したがって、長期的なセメントーベントナイト相互作用により生成される二次鉱物の理解が重要であり、実験とアナログ研究の活用が求められる。本研究では、自然界の低温アルカリ環境において形成された二次鉱物を調査し、セメントーベントナイト相互作用において生成される鉱物種とその変化過程を明らかにした。これにより、反応輸送モデルの妥当性検証に資する知見が得られた。

(質疑)

- Q：低温であっても時間が経過すればトバモライトが生成するという見解を示していたが、どのようにその見解を得るに至ったか。
- A：実験では高温条件でしかトバモライトが確認できていないが、オフィオライトのアナログ事例の研究から粘土鉱物との反応によりトバモライトが生成しているなどの事例があった。この事例は低温で形成されたものであったので、上述のような見解となった。
- Q：トバモライトの熱力学データは十分に得られているのか
- A：トバモライトの熱力学データは比較的多い。私たちの研究では、トバモライトの生成を熱力学的な平衡論で推定している。解析においては、速度論的な効果も考慮して、生成速度が遅い鉱物を除外するなどの工夫を行った結果、アナログ事例のような天然環境でのトバモライトの生成が再現された。
- C：この研究が優れている点は、一つのアナログ事例だけでなく、複数のアナログ事例を組み合わせることによって、新しい知見を導き出している点である。また実験、解析、アナログ事例を組み合わせ、モデルの妥当性や現象理解の確からしさについて論じている点も良い事例である。アナログ研究を進めるためには、このようなアプローチを取るべきだと考える。

講演番号	P-8
講演タイトル	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～ (Development of General Corrosion Rate Model for Carbon Steel Overpack using Artificial Intelligence Technology ~Utilization of Archaeological Analogues~)
講演者 (所属)	D. Fujiwara (TEPSYS)

(講演概要)

講演者は、オーバーパックの長期的な腐食量を評価するために、機械学習による腐食評価モデルの開発を目指している。これまでに金属腐食データベースに収録されたデータを用いた機械学習により、腐食評価モデルを構築した。このモデルを外挿し、考古学アナログの結果と比較することで、モデルの妥当性を確認しようとしている。考古学アナログから得られるデータは、その環境の多様性などから不確実性を有しているため、腐食量を両方で直接比較するので

はなく、環境条件の不確実性を入力として評価モデルで計算した腐食量と、考古学アナログデータの分布を比較したところ、概ね一致していた。また、埋設時の環境条件の変遷に伴う不確実性や、出土物の代表性、腐食環境と地層処分環境との違いなどが、アナログ事例をモデルの妥当性確認に活用する際の課題として挙げられる。

(質疑)

Q：アナログ性にこだわりすぎなければ、機械学習の教師データとして利用できるデータは世界中に数多くあるのではないか。

A：データが数多くあることはよいことだが、学習させるデータの品質が課題と感じている。例えば、間違ったデータを学習に用いてしまうなどが挙げられる。

C：間違っていることが後からわかったらそれを訂正すればよいのではないか。今後は AI を使って、データの選別なども実施できるような時代になっていくだろう。

Q：モデル構築において、腐食生成物の情報はどの程度考慮されているのか

A：腐食生成物の情報を直接モデルに入れているわけではないが、学習用データの選定において、環境条件を知るうえで腐食生成物の情報は重要な情報である。

Q：大量のデータから、腐食速度のモデル式を導いているが、理論的な式と比較した相違点はどのようなものがあったか

A：時間のべき乗則、温度依存性がアレニウス型となることは人間の知識として、AI に組み込んでいるが、それ以外の環境への依存性については、AI 学習により決めている。例えば pH 依存性は既往の文献とは異なっていた。メカニズムとモデルの関係は重要であり、今後取り組んでいきたいと考えている。

Q：ナチュラルアナログとの関係について、実際の事例では、環境条件が時間とともに変わっていくと考えられるが、そのようなことは考慮されているのか？

A：今回説明した結果は、酸素以外の環境条件は固定している。酸素の条件は海外の文献を参考に 100 年後に酸素が消費されてなくなるという設定を取り入れて解析した。環境条件の変化についてデータが得られるようであれば、モデルに取り込むことは可能。

講演番号 P-9

講演タイトル 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 (Experiences of using natural analogues in public communication)

講演者 (所属) H. Furukawa (NUMO)

(講演概要)

講演者は、NUMO において多くの対話活動に参加しており、NUMO が行っている出前授業や対話型全国説明会で用意する資料には、アナログ事例が複数紹介されているものの、自らの経験では、アナログ事例を活用した説明はしていない。その理由として、説明者側にはアナログ事例に対する高い専門知識が要求されること、また、聞き手側はアナログ事例の説明からすぐには地下環境の安定性を直感的にイメージできないといったことがある。今後、アナログ事例を一般の方とのコミュニケーションに活用していくためには、受け取り手が天然バリアの働きを容易にイメージできる説明の仕方や、腑に落ちる説明の仕方について、対話活動の専門家と研究者がともに考えていくべきである。

(質疑)

Q：対話型説明会でアナログ事例を使ったことはないか？

A：技術職員は使っているかもしれないが、自分は使っていない。アナログ事例は、地層処分の仕組みなどの説明の中で、設計などのエビデンスを補完するものであって、単独では使いにくいという印象である。

Q：海外ではどのように使われているか情報を持っていないか。

A：説明を聞いて腑に落ちるかどうか重要である。スウェーデンの説明者に話を聞いたことがあるが、アナログ事例を見せることで一般の方とのコミュニケーションには役立っているとのことである。そのような観点から、対話におけるアナログ事例の適用事例を集めていくことも重要である。

講演番号 P-10

講演タイトル 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
(Using Natural Analogue for Narrative Approaches in Dialogue)

講演者(所属) T. Sato (Hokkaido university)

(講演概要)

アナログ研究の成果は、地層処分システムの長期的安全性を裏付ける情報を提供するものであり、その目的に応じて、複数の役割が期待されている。例えば、専門家が推定した地層処分の将来像の確からしさを評価するためのベンチマークとしての役割がある。また、世界的に地層処分事業が進む中、対話活動が増えてきており、一般の方とのコミュニケーションで用いるツールとしての役割も大きくなっている。しかしながら、アナログ事例の活用の多くの場面において、アナログ事例の分かり易さを優先した結果、かえって一般の方に不安を抱かせてしまうケースも見られる。このような背景から、講演者はコミュニケーションにおいて、アナログ事例を用いる場合にはナラティブなアプローチを提案している。例えば、アナログ事例を用いて地層処分システムの安全性を正当化するようなエビデンスを示す際には、ネガティブなアナログ事例も併せて示すことで、地層処分がそのような環境条件にはないといった示し方である。このように対話を進めることで、相手の疑問に答える言葉を繋げ、受け取り手の理解度を高めながら、納得感も高めていくことが重要である。

(質疑)

Q：ナチュラルアナログは長期のエビデンスが得られることが重要と考えていた。一般の方に説明するのに使いたいが、どのようにして時間の長さを理解してもらうのが難しいと感じている。アナログ事例の時間スケールをナラティブに説明するにはどうしたらよいか。

A：聞き手によって、興味がある時間スケールは異なると考えられる。50年以上はわからないという人もいれば考古学に造詣の深い人であれば、1,000年という時間スケールに興味があるかもしれない。ナラティブにアプローチする中で、聞き手が気になっている時間スケールを把握しながら、そこに適したアナログ事例を話題に出すという工夫することが有効かもしれない。これまでのアナログ研究の反省点は、そのような聞き手の興味に寄り添って話題を提示できるような情報整理が不足していた点にある。今後は対話の中で、聞き手の興味に応じて、適切な話題を提示できるような“紙芝居”が必要であり、説明を行う関係者がコンテン

ツを協力して作り上げていくべきではないか。

第4章 グループディスカッションと総合討論の概要

国内外のアナログ研究の取り組み状況の講演を踏まえて、三つのグループに分かれてグループディスカッションを行った。グループディスカッションは、2023年度のワークショップの総合討論から導かれた以下の三つのテーマについて実施した。

- ・ 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
- ・ 一般向けのアナログ事例の情報の提供の仕方について

グループディスカッションにおいては、対面参加者が各テーマに6名程度となるように分けられ、グループ内でファシリテーター、記録係、タイムキーパー及び発表者の役割を与えた。ディスカッションは120分間行い、終了後、各グループの討議内容を発表者が報告し、オンラインを含めた参加者全員で共有した後、総合討論を行った。

4.1 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

セーフティケースの文脈とは、一連の地質環境特性の評価、処分場の設計、及び安全評価に基づいて導かれる地層処分に関する論述のことである。現在、アナログ事例の情報は、学術論文、各研究機関の報告書などの様々な形、さまざまな場所に散在している状況にあり、アナログ事例をセーフティケースの文脈に沿って技術的根拠とする際にアクセスしづらいという課題がある。今後、アナログ事例の情報を統合的に管理していくために、どのようにデータベース化すべきかについて、以下の3点から討論した。

- ・ データベースに収録するアナログ事例の記載フォーマット
- ・ データベースに収録する情報の品質管理方策
- ・ 持続的にアナログ事例の情報を収集し更新する仕組みについて

テーマ1の参加者と議題を表5に示す。

表 5 テーマ1の参加者と議題

ファシリテーター	新橋美里 (CRIEPI)
グループ参加者 (順不同)	石寺孝充 (JAEA), 黒田知真 (発表者, CRIEPI), 藤田和果菜 (NUMO), 鈴木覚 (NUMO)
議題	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

討議にあたり、図2に示すデータベースの構成案に基づいて、データベースの利用者として、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のに適したアナログ事例を検索する専門家及び対話活動など、一般の方とのコミュニケーションの場で活用するアナログ事例を検索する専門家を想定した。

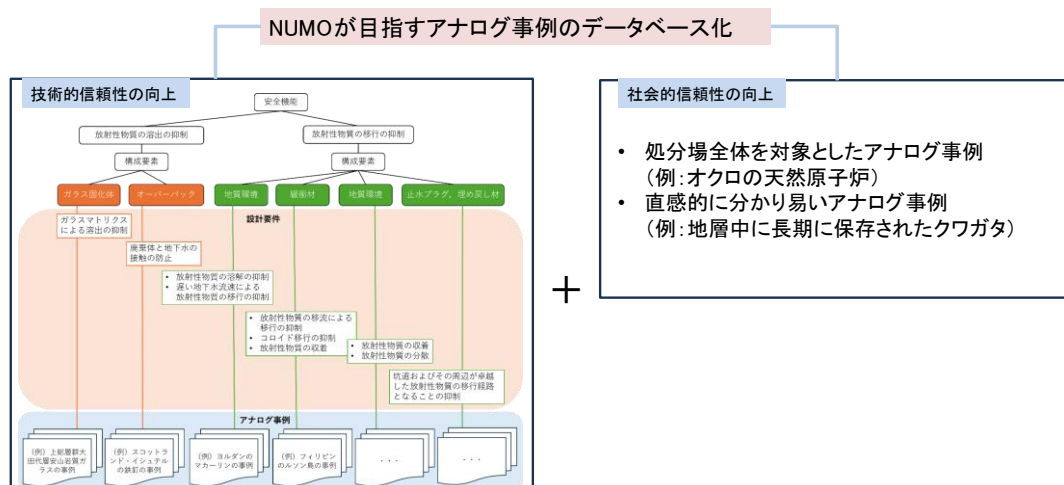


図 2 アナログ事例のデータベースの構成

タイトル	
1. アナログシステムが表現するもしくは適用できる地層処分施設の特定の構成要素、	
2. アナログシステムが関連する iFEP の説明	
3. アナログ事例の地球科学的特性の概要説明	
以下の項目を含むように記載	
・ 地史や歴史など NA サイトの情報	
・ 時間に関する情報（鉱物の形成年代など）	
・ 境界条件に関する情報（地下水化学組成、動水勾配など）	
・ 材料特性に関する情報（密度、拡散係数、透水係数など）	
4. 安全性に関わる主要な見解	
5. アナログの利用限界に関する概要	
6. システムを表す図表	
7. 詳細情報が得られる参考文献リスト	

図 3 既存のデータベースフォーマット案

4.1.1 データベースフォーマットの改訂案

グループディスカッションの結果を図 4 に示す。また、次のように結果をまとめる。既存のデータベースフォーマット（図 3）においては、FEP⁷（Features, Events, and Processes）との関連性を記入す

⁷FEP：放射性廃棄物の地層処分の安全評価において、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）や、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）に分けたリスト。

ることになっているが、設計要件や研究分野との関連付けも必要である。「アナログ事例の地球科学的特性の概要説明」においては、類似の現象を調査した事例や実験結果と比較した結果などについても記載されているとよいのではないか。「アナログ事例の適用範囲（あるいは利用限界）」の項目では、想定する処分システムとどのように違うのかなど、適用する際の注意事項をまとめるべきである。「システムを表す図表」では、アナログ事例を視覚的に理解できるよう、空間的なスケールや時間的な変化をイメージとしてあらわした図表やストーリーボードを用いるとよいと考えられる。

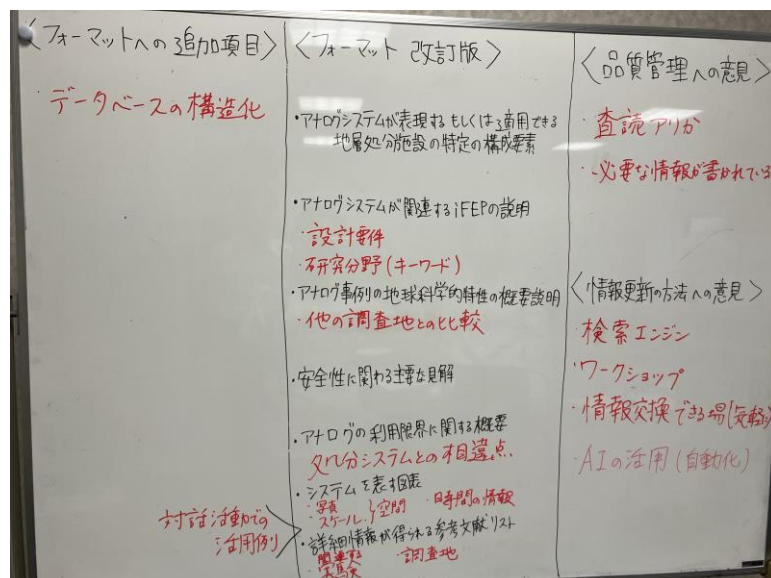


図 4 テーマ1のグループ討議の結果をまとめたホワイトボード
赤字の部分が、既存のフォーマット（黒字）に追加した事項

4.1.2 データベースの品質管理について

データベースの品質を保つためには、査読済みの論文に基づいたデータが望ましい。しかし、査読されていない古い報告書にも貴重なデータが多く存在するため、それらをどのように扱うべきかという課題も指摘された。品質の情報としては、査読論文であっても、現象が起こった環境条件に関する情報が記載されているかなど、必要事項の記載の十分性も考慮すべきと考えられる。

4.1.3 持続的にアナログ事例の情報を収集し更新する仕組みについて

インターネット掲示板など、気軽に情報共有ができるプラットフォームの整備、AIを活用した自動更新の他に、本ワークショップのような、異なる分野の専門家が意見交換できる場が有効と考えられる。

4.2 現象評価モデルの検証と妥当性確認について

処分システムの長期的な変遷の理解や状態変遷の記述は、地球化学的な解析結果などに基づいているが、処分システムが対象とする時間スケール及び空間スケールは、解析の基礎となっている実験と比較して、大きく異なっているため、解析技術の検証と妥当性の確認（V&V）が課題である。アナログ事例は、地球化学的解析技術の検証と妥当性の確認にも役立つ可能性があるが、十分には

活用されていないと考えられる。グループ 2 では、アナログ事例を V&V に活用するため、以下の点から討議を行った。

- ・ 地層処分システムの場合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的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
- ・ 今後有効的にアナログ事例を現象評価モデルの V&V で用いるための方策について

テーマ 2 の参加者と議題を表 6 に示す。

表 6 テーマ 2 の参加者と議題

ファシリテーター	藤井直樹 (RWMC)
グループ参加者 (順不同)	柳田明進 (奈良文化財研究所), 中林 亮 (発表者 CRIEPI), 田窪勇作 (NUMO), 藤原大資 ((株) テプコシステムズ), 野中麻衣 (JAEA)
議題	テーマ 2 : アナログ事例を用いた長期評価の V&V の仕方

4.2.1 長期的な性能評価においてアナログ事例の活用が進まない理由

テーマ 2 のディスカッションの取りまとめ結果を図 5 に示す。活用が進まない理由としては、現状のアナログ事例の情報が有する以下のような特徴が原因と考えられる。

- ・ 現象の複雑性：複数の現象が相互に作用するため、シミュレーションモデルでの再現が困難であること
- ・ 初期・境界条件の不確実性：現象がいつ始まり、どの程度の期間進行したかといった情報が不明確であること
- ・ アナログ事例に関する情報の希少性と一般性：データ量が少なく、また特定の研究対象地域の特有の条件に依存しているため、普遍的な検証に用いるのが難しいこと
- ・ アナログ事例の情報へのアクセス性：アナログ事例の情報は、異なる学術雑誌や研究機関の報告書に分散しており、その量も膨大であるため、解析技術の研究者が容易にアクセスすることは困難である。また、アクセスできたとしても、内容を読み解くには専門知識が要求され、解析の専門家がそれらを取りまとめることは容易ではない。

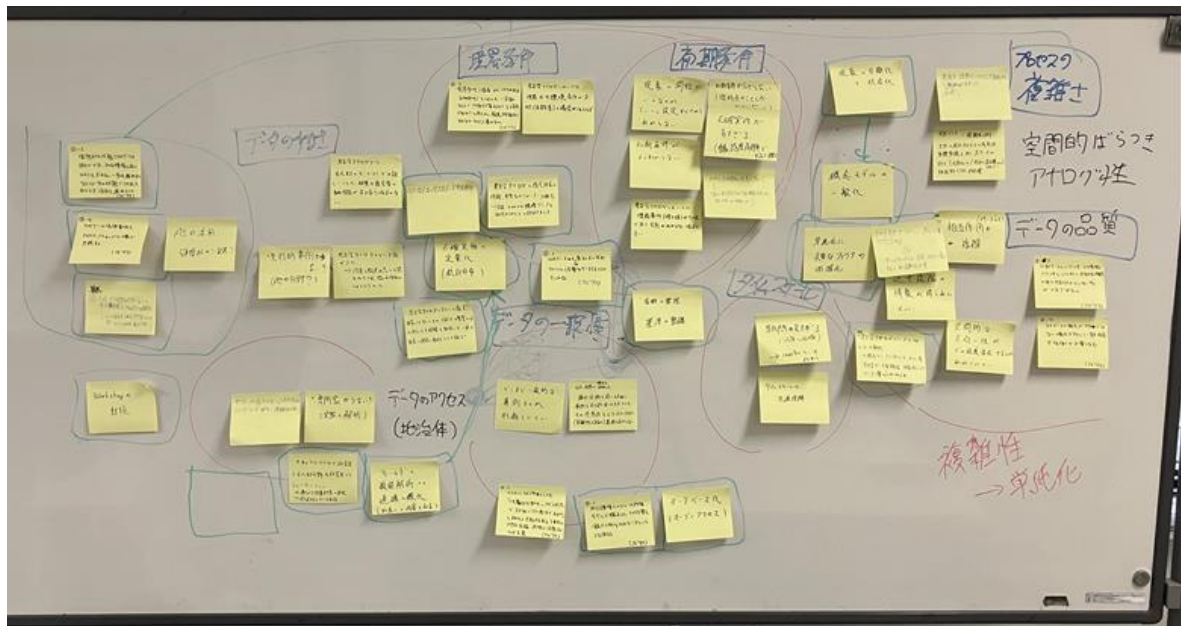


図 5 テーマ2のグループ討議の結果をまとめたホワイトボード

4.2.2 アナログ事例を現象評価モデルの V&V で用いるための方策

地球化学解析などの解析技術の V&V にアナログ事例を活用するための方策として、以下を提案する。

- ・ モデルの単純化：複雑な現象を単純化して評価することで、第一段階としてモデルの妥当性を評価すること
- ・ 不確実性の定量化：初期・境界条件の不確実性を統計的な手法や専門家の意見聴取によって定量化すること。専門家の意見聴取では透明性・追跡性を高めるために、検討過程を詳細に文書化することが重要である
- ・ 解析側から必要となるデータを明確化する：解析側が必要とするデータのリストを作成し、アナログ研究の担当者と共有することで、データ収集の効率化を図ること
- ・ 研究者間のコミュニケーション促進：解析や実験及びフィールド調査など、異なる手法で研究する専門家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、モデルの検証を進展させる上で重要である

4.3 一般向けのアナログ事例の情報の提供の仕方について

アナログ事例は、地層処分安全性を説明する際に、それを支持する実験結果あるいは計算結果の説明だけでは、納得感を得にくい人々に対し、「第三のツール」として有効と考えられる。しかしながら、情報の提供の仕方が適切でなければ、その能力を発揮させることはできない。テーマ 3 では以下の点から討議を行った。

- ・ アナログ事例を用いた情報提供が必要となるのは、説明会などで地層処分事業についてはじめて説明を受ける方あるいは広報イベントの場などで、NUMO のブースをはじめて訪れた方などが対象と考えられる。このような方々に、どのようにアナログ事例を用いて説明

することが有効と考えられるか？

- ・ アナログ事例の説明の場としては、説明会のような一方向の説明の場と車座での対話のように双方向の場が考えられる。どのようにアナログ事例を用いて説明することが有効と考えられるか？

テーマ3の参加者と議題を表7に示す。

表 7 テーマ3の参加者と議題

ファシリテーター	竹田宜人（北海道大学）
グループ参加者 （順不同）	古川宏（発表者，NUMO），石井智子（（株）太平洋コンサルタント）， 佐藤努（北海道大学），木村関耶（北海道大学），近藤駿介（NUMO）
議題	一般向けのアナログ事例の情報の提供の仕方について

4.3.1 説明に用いるアナログ事例の在り方

テーマ3のディスカッションの様子と取りまとめ結果を図6及び図7に示す。また、その結果を次のようにまとめる。アナログ事例を用いたとしても、その説明が複雑であれば、一般の方の納得感を得るのは容易ではない。説明に用いるアナログ事例は、誰もが感覚的に理解できるような事象であり、例えば、地下深部の地質環境が長期間にわたり安定していることや、酸素のない還元環境下でのオーバーパックの腐食の進展といった、安全評価で示される現象が自然界にも存在し、長期的に観察されていることを示すべきである。このように、地層処分が特別な技術ではないこと、例えば「放射性物質が天然にも存在し、地質環境中に閉じ込められていること」を示すことで、一般の方が感じる心理的な抵抗感や不安を和らげ、納得感を得られるような事例であるべきである。そのためには、地層処分というシステム全体を理解してもらうためのメタファー（比喻）として、アナログ事例を活用すべきであり、そのような事例であれば、地層処分との厳密な類似性にこだわる必要はないと考えられる。

事例の選定においては「感動」が重要な要素となる。人が行動を起こすのは、心が動くときである。もし、NUMOの広報において、アナログ事例が利用されていないのであれば、それは対話において説明する人自身が、アナログ事例によって心を動かされていない可能性がある。説明者自身が、感動したならば、その気持ちとともにアナログ事例を伝えれば、相手にも響くかもしれない。聞いた時に「なるほど」と思えるようなアナログ事例を選定すべきである。

4.3.2 アナログ事例の一般の方への伝え方

アナログ事例を列挙するだけではどれほど良い事例であっても聞き手に十分伝わらない可能性がある。話が伝わるためには、話を聞く側と、話す側がお互いに同じ目線で共感できるように場を設定することが重要である。また、伝える際には、単に「説明」するのではなく、自然界の長期的な安定性や、安全評価で示される現象が自然界でどのように起こっているかという補完的な側面を物語るナラティブなコミュニケーションを通じて、その場でストーリーを作り上げていくことも重要である。NUMO の技術者と広報担当者がコミュニケーションを図る中で作り上げた、安全評価の根拠となる自然界の事象を補完的に示すアナログ事例を用いたストーリーであれば、一般の方の共感もより得られやすくなるのではないかと考えられる。また、そのストーリーにも「感動」するポイントがあるべきである。

第5章 今後の取り組み

第4章に記したグループディスカッションと総合討論に基づいて、ナチュラルアナログの活用に関する、今後取り組むべき課題と方向性を以下のようにまとめた。

(1) アナログ事例データベースの構築

アナログ事例データベースは、技術的検討と対話活動の双方に価値を提供する形で進化させることが求められる。技術検討向けには、各事例をFEPや設計要件などの項目と結びつけ整理する。これにより、論文や報告書に散在していたデータを一元化し、研究の効率と信頼性を高める。一方、対話活動向けには、難解な専門用語を避け、直感的に理解できる写真・図表・映像などを豊富に盛り込む必要がある。処分場を設置する地下深部や数万年といったスケール感を可視化し、科学的な事実をナラティブに伝えるための素材集としての機能を持たせる。データベースに収録する情報については、信頼性の高い査読済み論文を基盤としつつ、情報交流のためのワークショップやAIの活用など、持続可能な情報更新の仕組みを構築することが今後の方向性となる。

また、アナログ研究として新たに取り組むべきと考えられるのは、以下のような事例が挙げられる。

- ・沿岸域における安全評価シナリオの構築に役立つと考えられる気候変動
- ・有機材料の長期健全性や現象理解に役立つと考えられる琥珀
- ・新たなオーバーパックの蓋接合としての「ねじ」に関する考古学アナログ など

このほかにもセーフティケースの文脈に沿って有用なアナログ事例を再検討する。これらの研究を進めるにあたっては、研究機関や大学などの若手研究者や技術者が参画しやすくなるようなプラットフォームの整備にも取り組む。

(2) 現象評価モデルの検証と妥当性確認など、セーフティケースの信頼性確保への活用

ナチュラルアナログ事例の活用を阻害してきた要因を克服することが求められる。アナログ事例が持つ複雑性や初期・境界条件の不確実性を考慮し、まずは単純化したモデルで評価を進める。同時に、統計的手法や専門家意見聴取を用いて不確実性を定量化し、評価の信頼性を高めていく。更に重要なのは、解析側と現場の研究者間との連携を強化することである。解析側が必要とするデータを明確化し、アナログ研究の担当者と共有することで、データ収集の効率を向上させることが今後の鍵となる。このためにもワークショップを継続的に実施し、協働しやすい環境を整えていく。

(3) 一般向けコミュニケーションスキルの向上

アナログ事例は、専門的な説明による納得感が得られにくい人々に向けた「第三のツール」として有効であり、地下環境の安定性や放射性物質が自然界にも存在するという事実を通じて、直感的な理解と安心感を醸成に寄与することが期待される。このためには、単に事例を羅列するのではなく、「何を伝えたいか」という明確なメッセージに基づき、「感動」を呼び起こすようなストーリーテリングが不可欠である。技術者が持つ専門知識と、広報担当者が持つコミュニケーションスキルを融合させ、一般の方の疑問や関心に寄り添った物語を共同で作り上げることが今後重要である。これらの取り組みを通じて、アナログ事例を単なる研究ツールから、地層処分事業全体の透明性と信頼性を高めるための重要な知的な資産へと転換する。

(4) セーフティケースの信頼性を補完する考察の強化

アナログ事例は、セーフティケースの信頼性を補完する考察「Complementary consideration」として重要な役割を果たす。このことは、海外実施主体である Posiva 及び NWS のセーフティケースや、McKinley 氏の講演でも指摘されたことであり、NUMO のセーフティケースにおいてこの役割を強化するためには、アナログ事例の充実とそれらに基づいた考察の深化が不可欠である。これにより、解析的な評価だけでは捉えにくい長期的な現象や複合的な影響に対する理解が深まり、セーフティケース全体の堅牢性 (Robustness) を高めることができる。また、これらの知見を組織全体の知的資産として体系的に共有・活用できる仕組みを構築することが肝要である。

NUMO は、今後もこれら 4 つの課題に包括的に取り組みを進め、科学的根拠に基づいた地層処分の安全性の確保と、それに対する社会の納得感の醸成に貢献していく。

第6章 おわりに

本報告書では、ナチュラルアナログをはじめとするアナログ事例の活用に関する議論を踏まえ、地層処分事業の信頼性向上に向けた今後の方向性を示した。議論を通じて、アナログ事例は単なる研究ツールではなく、安全評価の検証から一般の方との対話に至るまで、多岐にわたる重要な役割を担う知的な資産であることを再認識した。今後、NUMO は以下の四つの課題に対して包括的に取り組みを進める：

- ・ アナログ事例データベースの構築
- ・ 現象評価モデルの V&V への活用
- ・ コミュニケーションの品質の向上
- ・ セーフティケースの信頼性を補完する考察の強化

これらの取り組みを統合的に進めることで、科学的根拠に基づいた地層処分の安全性の確保と、それに対する社会の納得感を醸成に役立てたい。本報告書が、これらの取り組みを推進するための羅針盤となるものと期待する。

謝辞

本ワークショップに出席いただき、講演及び討議に参加いただいた方々からは、今後、NUMO がセーフティケースを用いた一般の方とのコミュニケーションにアナログ事例を活用していくにあたり、多くのアイデアやヒントを頂いた。また、原子力発電環境整備機構、梅本博之顧問には、ワークショップの企画にあたり、講演会及びグループディスカッションのテーマ検討において、多くの有益な助言をいただいた。電力中央研究所、横山信吾研究推進マネージャー、NUMO 技術部石黒勝彦相談役、瀬尾俊弘部長、小林正人課長には、本稿のとりまとめにあたり、レビューにご協力をいただいた。この場を借りて、講演者及び協力者各位のご尽力に対し心より感謝の意を表する。

参考文献

- Alexander, W.R. and McKinley, L.E., eds. (2007) : Deep Geological Disposal of Radioactive Waste, Radioactivity in the environment, Vol. 9, Elsevier.
- ANDRA (2005) : Dossier 2005 Argile Tome Safety evaluation of a geological repository.
- DOE (2008) : Yucca Mountain Repository License Application. Safety Analysis Report, DOE/RW-0573, Docket No. 63-001.
- 藤田和果菜, 鈴木覚, 森千穂, 佐藤努 (2024) : 2023 年度ナチュラルアナログ研究ワークショップ開催報告, NUMO-TR-24-02.
- Milodowski, A.E., Alexander, W.R., West, A.M., Shaw, R.P., McEvoy, F.M., Scheidegger, J.M. and Field, L.P. (2015) : A Catalogue of Analogues for Radioactive Waste Management. British Geological Survey, CR/15/106.
- Minkley, W. and Knauth, M. (2013) : Integrity of rock salt formations under static and dynamic impact. Natural Analogues for Safety Cases of Repositories in Rock Salt, NEA/RWM/R (2013) 10.
- Nagra (2002) : Project Opalinus Clay: Safety Report. Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste, NTB 02-05.
- NDA (2016) : Geological Disposal. Overview of the generic Disposal System Safety Case, DSSC/101/01.
- NUMO (2021) : 包括的技術報告書：わが国における安全な地層処分の実現, NUMO-TR-20-03.
- OECD/NEA (2004) : Post-closure safety case for geological repositories, NEA/RWM/R (2013) 1.
- OECD/NEA (2013) : The Nature and Purpose of the Post-closure Safety Cases for Geological Repositories. NEA/RWM/R (2013) 1.
- ONDRAF/NIRAS (2001) : SAFIR2 - Safety Assessment and Feasibility Interim Report2, NIROND 2001-06E.
- Posiva (2012) : Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiloto - Synthesis 2012, Possiva Report 2012-12.
- SKB (2011) : Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark. Main report of the SR-Site project, TR-11-01.

付録 講演要旨

P-1. Natural analogues to improve safety case robustness

Ian G. McKinley

McKinley Consulting, Switzerland

1. Introduction

The NUMO safety case (NUMO, 2021) demonstrates that safe disposal of the reference inventories of HLW and TRU waste is possible for the specified representative geological settings specified. Nevertheless, there are assumptions and simplifications involved in the model chain that may not apply to specific sites. By focusing natural analogues on these, it would be possible to make assessments more realistic (which is essential to allow comparison of sites / concepts), increase safety margins in some cases and focus supporting R&D in a more cost-effective manner. This top-down guidance of NA projects becomes more important as repository sites are identified and non-technical stakeholders take a greater interest in disposal projects.

2. Key analogue challenges from the NUMO safety case

Assessment of the safety case results can clearly identify key topics for future work. For example, in most of the cases studies, total dose is dominated by ^{129}I released from TRU group 1. This can be directly attributed to the assumption that the disposed AgI is unstable and immediately decomposes to release highly mobile I⁻ - effectively unconstrained by either solubility limits or sorption and so long-lived that decay is insignificant within the assessment timescale. As a result of this, ongoing R&D is being conducted to examine options to recondition this waste – a process that would be costly and result in a range of secondary waste that may be equally problematic. In actual fact, AgI may be reasonably stable, based on the observation that it occurs as a natural mineral (iodargyrite) in low temperature systems. It may thus be very useful to search for analogues to assess AgI stability in geological systems, in particular where the pH is high.

TRU group 3 is also problematic as the models assume bitumen is unstable under high pH / nitrate conditions. For this waste form, there are also concerns about risks of runaway oxidation – which has also resulted in work to consider reconditioning it – which could be hazardous as well as costly. Development of a more robust assessment of the practicality of disposal of this waste could be supported by natural analogue studies of natural (or archaeological) bitumen in contact with high nitrate / high pH groundwaters.

Releases from TRU waste dominate those from HLW except in the case of high salinity (high carbonate) groundwaters due to assumption of highly mobile $(\text{UO}_2)(\text{CO}_3)_3^{4-}$ formation based on results of chemical thermodynamic models. Although such models are compatible with simple laboratory experiments, they contradict the observed low mobility of U in highly reducing conditions. Analogue studies would be useful to determine if $(\text{UO}_2)(\text{CO}_3)_3^{4-}$ is actually formed under relevant geological conditions and, if so, if it can actually migrate through microporous clays similar to the bentonite buffer.

More generally, the conceptual models of RN migration used are simplified by assuming that no transport is facilitated by colloids or microbes and that gas transport is insignificant. Analogues to test

such assumptions for relevant Japanese geological conditions would be very valuable to support future safety cases.

3. Challenges for site-specific optimisation

A specified goal for NUMO is to develop disposal concepts and associated safety / environmental impact assessments that are optimised for specific volunteer sites. There are a number of topics here where natural analogue support would be extremely useful. An example, extending the previously mentioned support for improved RN migration model, would be analogues to support both the development and testing of RN migration models in structurally-heterogeneous rocks (e.g., extrusive volcanics found throughout Japan). Here the ideal NA location would contain a well-defined / datable tracer source (e.g., an ore body) upflow of a relevant rock formation.

Also to support assessment of volunteer sites, analogues that allow assessment of RN migration processes in relevant coastal sub-sea environments would be useful. A goal would be to identify locations where advective flow may occur – e.g., due to artesian / geothermal conditions or as a result of sea-level change. Already some concepts have been proposed to optimise EBS design, for example replacing welded canisters by screw seals. Although these clearly have many practical advantages, to support acceptance of this approach, archaeological analogues to compare the longevity of screw seals and welds for relevant steels would be useful.

More speculatively, the use of more modern materials has been suggested as providing benefits in terms of EBS practicality / QA and also long-term performance. An example here would be use of modern resins, but here this could be supported by NA studies of natural resin (amber) stability at high pH / in relevant host rocks

4. Practical implementation

When considering planning projects to meet the goals identified above, it is worth noting that the issues are relevant also to other national programmes and hence international collaboration can be both cost-effective and bring access to wider resources (financial, technical and expert staff). It can also be useful if sites can be identified / projects defined that allow several topics to be addressed together.

References

NUMO (2021) : The NUMO Pre-siting SDM-based Safety Case, NUMO-TR-21-01

P-2. More than 20 years of archaeological analogues at the LAPA, CEA/CNRS, France

NEFF Delphine; DILLMANN Philippe

LAPA, IRAMAT, NIMBE, CEA, CNRS,
Université Paris-Saclay, CEA Saclay 91191, Gif-sur-Yvette, France

1. Context

The study of archaeological analogues for the corrosion of steel or alteration of glass over centuries is a crucial issue for the prediction of long term alteration of these materials in a nuclear waste deep geological repository. Understanding the mechanisms controlling the corrosion kinetics is necessary and archaeological analogues are one of the pillar for such studies. The LAPA laboratory (Laboratory for Archeomaterials study and for Prediction of Alteration) is specialized for more than 20 years on these topics and developed specific methodologies for these approaches [1]. This paper presents an overview of the studies developed and focused more precisely on archaeological iron analogues in anoxic media. It presents the methodology developed on 400 year archaeological iron nails to determine the physico-chemical properties of the corrosion layer and of the interfacial nanolayer in particular.

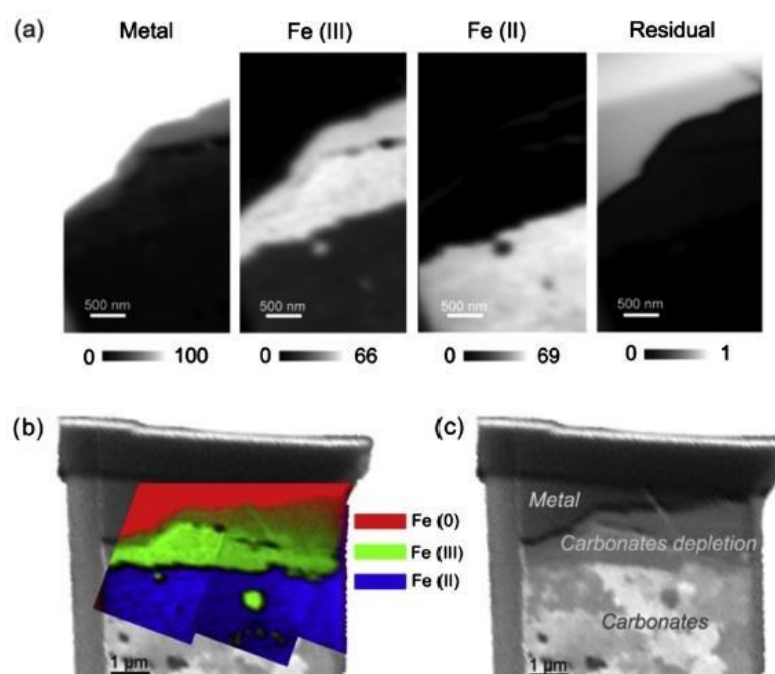
2. Methodology

Transverse sections and thin films (FIB) were studied by a multi-technique approach determining the phases' morphology, distribution and nature at micrometric and nanometric scales. Optical microscopy, Scanning Electron Microscope (SEM) coupled Energy Dispersive Spectroscopy (EDS), μ X ray diffraction (μ XRD) μ X-ray fluorescence (μ XRF) and μ raman spectroscopy were used to analyse the corrosion layers from the metal interface until the external soil. The interface in itself was studied by Transmission Electronic Microscope (TEM) and Scanning Transmission X-ray Microscopy (STXM) under synchrotron radiation. In addition, the investigated archaeological artefacts were immersed one to four months in marked media to trace the localization of the corrosion reaction: 1/ in a D_2O desaturated solution to trace the water diffusion (the oxidant), 2/ Cu^{2+} ions to mark the transport of the electrons through the conductive phases of the corrosion layer [2]. Deuterium was analysed by nanoSIMS and copper by SEM-EDS, μ XRD and micro X-Ray Absorption Near Edge Spectroscopy (μ XANES) under synchrotron radiation. Last characterization by conductive AFM (C-AFM) gave some new insight on the conductive properties at the nanometric scale.

3. Results

A layer of several 100 μm made of iron carbonates, siderite (FeCO_3) and chukanovite ($\text{Fe}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$) was identified [3]. In addition a submicrometric layer was detected at the metal/corrosion product interface that questioned the corrosion processes. This nanolayer was predicted by corrosion modeling based on the point defect model theory [4]. It was characterized as a continuous layer made of a mix of FeII and FeIII species (maghemite/magnetite) thanks to TEM and STXM observations (Figure 1) [5]. Questioning the physical properties of this layer, NanoSIMS observation of D/H ratio distribution after immersion in D_2O showed that this interfacial layer was less porous than the carbonate layer. Last, local conductivity was determined inside the corrosion layer by C-AFM [6]. Nanometric conductive pathways were identified through the insulating carbonate layer. This methodology allowed to refine the understanding of the corrosion mechanisms from the viewpoint of long term prediction and will be applied to copper archaeological analogues.

Figure 1: STXM investigations of the sample thin film GL10-03 (Glinet archaeological site) [5]



References

- [1] P. Dillmann, D. Neff, D. Féron, Archaeological analogues and corrosion prediction: from past to future. A review, *Corros. Eng. Sci. Technol.* 49 (2014) 567–576. <https://doi.org/doi:10.1179/1743278214Y.0000000214>.
- [2] M. Saheb, D. Neff, C. Bataillon, E. Foy, P. Dillmann, Copper tracing to determine the micrometric electronic properties of a thick ferrous corrosion layer formed in an anoxic medium, *Corros. Sci.* 53 (2011) 2201–2207. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2011.02.042>.
- [3] M. Saheb, P. Berger, L. Raimbault, D. Neff, P. Dillmann, Investigation of iron long-term corrosion mechanisms in anoxic media using deuterium tracing, *J. Nucl. Mater.* 423 (2012) 61–66. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2012.01.018>.

- [4] C. Bataillon, F. Bouchon, C. Chainais-Hillairet, J. Fuhrmann, E. Hoarau, R. Touzani, Numerical methods for the simulation of a corrosion model with moving oxide layer, *J. Comput. Phys.* 231 (2012) 6213–6231. <https://doi.org/10.1016/J.JCP.2012.06.005>.
- [5] Y. Leon, M. Saheb, E. Drouet, D. Neff, E. Foy, E. Leroy, J.J. Dynes, P. Dillmann, Interfacial layer on archaeological mild steel corroded in carbonated anoxic environments studied with coupled micro and nano probes, *Corros. Sci.* 88 (2014) 23–35. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2014.07.005>.
- [6] F. Mercier-Bion, J. Li, H. Lotz, L. Tortech, D. Neff, P. Dillmann, Electrical properties at the nanometer scale of iron corrosion layers formed in anoxic environment, *Corros. Sci.* (2018) 98–110. <https://doi.org/10.1016/J.CORSCI.2018.03.028>.

P-3. Efforts on analogue studies in Finland and NA treatment in safety case

Heini Reijonen

Geological Survey of Finland (GTK)

Over the past several decades, numerous large-scale natural analogue projects have been conducted in Finland, with significant involvement from Finnish institutions specializing in geological disposal. These projects have explored a wide range of topics, from Engineered Barrier System (EBS) analogues - such as studies on copper and bentonite - to regional-scale processes, like the assessment of glacially induced seismicity. Considerable effort has also been dedicated to integrating natural analogue data into safety cases over the years. This presentation highlights some of the most recent advancements in natural analogue research. Additionally, it provides a short overview of the comprehensive application of natural analogue knowledge in safety cases, drawing on recent experiences that span both operational and generic safety cases, as well as a thorough review of natural analogue strategies worldwide.

P-4. Natural Analogues – A proposed strategy & examples of implementation in the ongoing UK geological disposal programme

Simon Norris

Nuclear Waste Services, UK.

This presentation initially considers the work undertaken to develop a strategy for utilising natural analogues (NAs) in Nuclear Waste Services' (NWS), UK, geological disposal facility (GDF) programme. The work is largely based on the extensive review of the strategic use of NAs in the international context, lessons learnt from various past programmes and by considering how the strategy could look like in the current framework of the UK's GDF programme. The strategy presented aims to support this programme. The main message is that NA information and projects can and should be handled through the same procedures as any research utilising existing and upcoming NWS protocols. This means that NAs need to be a part of knowledge management, rather than, for example, a stagnant database. Including NAs as part of the data screening allows the knowledge base to be updated according to needs arising from the changes in the GDF programme when moving from generic stage towards more site and design specific phases. It is foreseen that key to the best utilisation of NA information is to include it in the NWS' digital safety case, making the information and the related methodology transparent.

The presentation also refers to NWS' GDF siting programme as at September 2024. Three Community Partnerships exist in the UK. Existing data and knowledge, collected prior to NWS, in the related sites is being collated to build understanding, help identify uncertainties and aid in the refinement of the forward programme. For the rock types of interest, use is being made of regional analogues. This approach considers data from similar settings to a potential GDF site (e.g. the same formation as the potential GDF host rock or a similar formation with the same tectonic setting), which could be used to extend the information base on a particular site.

P-5. Application of natural analogues in the NUMO safety case

Wakana Fujita, Satoru Suzuki

Nuclear Waste Management Organization of Japan

1. Analogues in the NUMO safety case

In 2021 NUMO published a Pre-siting site descriptive model (SDM)-based safety case (hereafter referred to as the NUMO safety case). The NUMO safety case provides comprehensive descriptions of how to proceed with site investigations, design, construction, operation and the closure of a deep geological repository. Furthermore, it lays out how to ensure long-term safety after closure of the repository, by integration of state-of-the-art scientific knowledge and technology in a non-site-specific manner. In the NUMO safety case, studies of natural analogues are noted as being able to provide important supporting evidence to enhance confidence in the long-term safety of the geological disposal system. As the NUMO safety case will be continually updated with the latest scientific information in the future, NUMO will also incorporate the latest findings from appropriate natural analogue studies to further improve that confidence.

2. Overview of Natural Analogue Workshop 2023

The Workshop on Natural Analogue Studies 2023 was held as part of a joint research project between NUMO and JAEA, with 27 engineers and researchers from domestic research institutes, universities, and private companies. It was held with the following objectives:

- Integration of state-of-the-art knowledge from analogue studies performed by universities, research institutes and private companies.
- Expert discussion on how analogues can be applied to future updates of the NUMO safety case and how they can be used for communication with a wide range of stakeholders to further improve confidence in the geological disposal system.
- Strengthen links between experts within the research network involved in analogue studies in Japan.

After 13 presentations on the latest findings from analogue studies, all attendees participated in a general discussion on the theme of "How natural analogues can be used in the NUMO safety cases" and was based on the current description of analogue studies in the NUMO safety case. At the workshop, we will summarize the opinions from researchers presented at the general discussion.

3. Current and future initiatives on analogues to improve confidence in the geological disposal in the updated safety case

We related analogues to the safety function of the geological disposal system. "Mapping" of analogues was demonstrated to improve confidence in the updated safety case. Including analogues introduced at the

workshop last year, 10 analogues were chosen for mapping. In Chapter 4 in the NUMO safety case, design requirements corresponding to the safety functions of the disposal repository are organized hierarchically. FEPs, a list of conditions (Feature, Event, Process) that likely occurs in a repository and important for determining requirements of repository design is used to extract physicochemical processes that would affect natural and engineered barrier system. Therefore, by using the FEPs corresponding to the design requirements organized in the NUMO safety case, we structured the relation between analogues and safety functions of the repository.

Finally, NUMO's initiatives to build confidence in the geological disposal project using analogues through collaborative research, creation of database, holding workshops will be summarized.

References

NUMO (2021) : The NUMO Pre-siting SDM-based Safety Case, NUMO-TR-21-01.

P-6. Effects of differences in burial environments on the corrosion state of iron artifacts

Akinobu Yanagida

Nara National Research Institute for Cultural Properties

1. Introduction

To validate the long-term corrosion model for overpack material made of carbon steel, the data obtained from laboratory experiments are insufficient to fully verify the model's accuracy and the underlying corrosion mechanisms. Therefore, utilizing archaeological iron artifacts as natural analogs is effective. Moreover, although corrosion involving oxygen occurs in the initial stage of the geological repository, corrosion under reducing environments begins after the oxygen is completely consumed¹⁾. Since both oxidizing and reducing environments can be observed in reburial conditions of iron artifacts, we can evaluate long-term corrosion phenomenon in both conditions. This study examines the corrosion state of iron artifacts excavated from different burial environments.

2. The samples and methods

Iron artifacts excavated from oxygen-rich and reducing conditions in Japan (referred to as Arti_{ox} and Arti_{red}) were investigated. High-energy X-ray CT (Hi-CT), X-ray fluorescence analysis (XRF), and micro-X-ray diffraction analysis (μ -XRD) were applied to evaluate corrosion morphology and composition. Fine fragments detached from the artifacts were used for micro-X-ray CT (μ -CT), and cross-sectional analysis using a scanning electron microscope (SEM).

3. Results and discussion

Based on the Hi-CT images, the rust thickness of Arti_{ox} and Arti_{red} was 2.51 and 1.13 mm, respectively, indicating that the rust layer in oxygen-rich environments is thicker than in reduced environments. Moreover, the thinning of carbon steel in Arti_{red} showed a more localized tendency compared to that in Arti_{ox}. Additionally, XRF analysis revealed that in Arti_{ox}, Cl was detected in the inner corrosion layer beneath the exfoliated surface corrosion layer, whereas in Arti_{red}, Cl was not detected within the inner corrosion layer. μ -CT and SEM observation of cross-sectional samples revealed that the rust layer in Arti_{ox} consisted of alternating layers of high- and low-density rust, composed of α -FeOOH (Goethite) and Fe₃O₄ (Magnetite). In contrast, the rust layer in Arti_{red} was homogeneous, consisting of FeCO₃ (Siderite). Based on these findings, it is considered that in environments containing dissolved oxygen, such as those in the transitional phase of geological disposal, corrosion products composed of α -FeOOH and Fe₃O₄ are formed. Subsequently, in reducing environments, corrosion products consisting of FeCO₃ are likely to form.

Acknowledgments

This study was performed as public offering work of Japan Society of Corrosion Engineering funded by NUMO. Additionally, part of this research was supported by JSPS KAKENHI (21K00998, 23K23268, 24K00164).

References

1) NUMO, The NUMO Pre-siting SDM-based Safety Case, NUMO-TR-21-01. pp.4-28-29, 2021

Keywords: Archeological analogue, Iron artifacts, Long-term corrosion, Corrosion products

P-7. Review of secondary minerals under natural alkaline conditions and implications for long-term cement-bentonite interactions

Misato Shimbashi^{*1}, Shingo Yokoyama¹, Tsutomu Sato²

¹Central Research Institute of Electric Power Industry, ²Hokkaido University

1. Introduction

In radioactive waste repositories, bentonite is used as an engineered barrier to inhibit radionuclide migration, due to its low permeability. Cementitious materials are often installed around the bentonite as engineered barriers or peripheral components. Because cementitious materials produce alkaline leachate in four stages (Stage I~IV; Glasser, 2011), alkaline leachate from cementitious materials is expected to alter bentonite and change permeability.

For the performance assessment of radioactive waste repositories, the alkaline alteration of bentonite and subsequent changes in permeability were evaluated using reactive transport (RT) modeling, which considers the dissolution of primary minerals in bentonite and the precipitation of secondary minerals. However, knowledge regarding secondary mineral species and their subsequent mineralogical transitions is relatively lacking, leading to uncertainty in the RT modeling results. To validate the RT modeling results, understanding the secondary mineral species from long-term cement-bentonite interactions and their subsequent mineralogical transitions is important. For this purpose, laboratory experiments and natural analog (NA) studies should be pursued vigorously because laboratory experiments can be conducted under a wide variety of conditions and NA studies can observe long-term phenomena.

In this study, secondary minerals formed in natural alkaline environments at low temperatures are reviewed to understand the species of secondary minerals and their mineralogical transitions during cement-bentonite interactions. The details are reported by Shimbashi et al. (2024). This study briefly introduces Shimbashi et al. (2024).

2. Natural sites and their analogs to radioactive waste repositories

Shimbashi et al. (2024) compiled three types of natural sites that produced

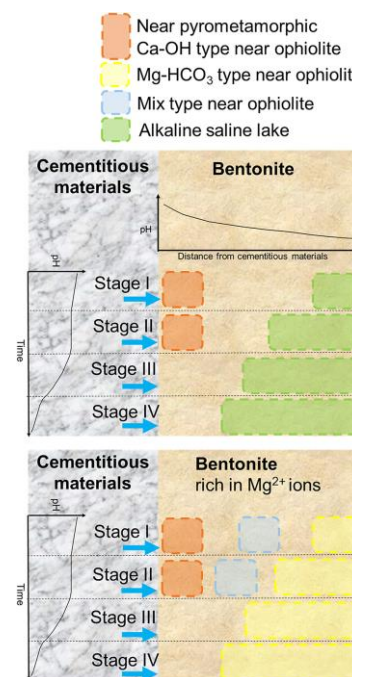


Fig. 1. Conceptual diagram showing analogy to cement-bentonite interactions (Shimbashi et al., 2024).

alkaline fluids at low temperatures: near-pyrometamorphic rocks, ophiolites, and alkaline saline lakes. Fig.1 shows a conceptual diagram of the spatiotemporal cement-bentonite interactions depending on whether the chemical conditions are Mg-rich. Based on the chemical compositions of alkaline fluids at each site, how the chemistry of alkaline fluids at each site is analogous with bentonite interacting with cementitious materials is illustrated in Fig. 1. Specifically, alkaline fluids near pyrometamorphic rocks and Ca-OH type alkaline fluids near ophiolite are analogous to the chemical environment of bentonite close to cementitious materials with Stage I and II alkaline leachates. The chemical environment of alkaline saline lakes may be analogous to the chemical environment of bentonite that occurs farther from the cementitious material interface. Similarly, the chemical environment of Mg-HCO₃ type alkaline fluids near ophiolites may be analogous to the chemical environment of bentonite farther from the interface of cementitious materials and under Mg-rich conditions. Mixed-type alkaline fluids are analogous to the chemical environment at the intermediate part of bentonite, where Ca-OH type and Mg-HCO₃ type each have similarities.

The secondary minerals formed in natural alkaline fluids are summarized and presented in Table 1. This list indicates the possible secondary minerals formed by the alkaline alteration of bentonite, varying in time and space. Furthermore, a comparison between findings from the compilation of natural geochemical reactions and findings from previous laboratory and in-situ experiments provides implications for the mineralogical transitions of some secondary minerals. These findings will be useful for validating the RT modeling results for cement-bentonite interactions.

Table 1. List of secondary minerals (Shimbashi et al., 2024).

Setting	Type	Analog to waste repositories	Secondary phases
Pyrometamorphic rocks		Alteration of bentonite close to cementitious materials with Stage I and II alkaline leachates	Calcium silicates C-A-S-H Aluminum silicates Si-Al-rich gel Carbonates Calcite Sulfates Ettringite Thaumasite
Ophiolite	Ca-OH		Calcium silicates 14 Å tobermorite Aluminum silicates Clinoptilolite Heulandite K-feldspar Magnesium or iron silicates Chrysotile Nontronite (with partial interlayer of hydroxide sheets) Fe-bearing polygorskite Fe- and Mg-bearing clays which comprise TOT layers, imperfect interlayer hydroxide sheets, and interlayer cations Saponite Sepiolite Carbonates Calcite Others Silica minerals Pyrite
	Mg-HCO ₃	Alteration of bentonite located farther from cementitious materials and rich in Mg ²⁺ ions	Magnesium or iron silicates (Fe-bearing) chrysotile M-S-H Chlorite Carbonates Hydrated magnesium (hydroxyl) carbonate phases Aragonite Calcite Others LDH Non-crystalline aluminum Magnetite Pyrite Iron-hydroxide
	Mix	Alteration of bentonite located at intermediate sites where Ca-OH-type and Mg-HCO ₃ -type are similar to bentonite, respectively.	Magnesium or iron silicates M-S-H? Carbonates Aragonite Calcite Others Brucite LDH
Alkaline saline lake		Alteration of bentonite farther from the cementitious material interface	Aluminum silicates Hydrous alkali aluminosilicate gel Phillipsite Analcime Clinoptilolite Chabazite Al-rich smectite Albite K-feldspar Mixed-layer illite-smectite Magnesium or iron silicates Mg- (Fe- and Ti-) rich smectite Fe-rich illite Chlorite Glauconite Ferribidellite SiO ₂ minerals Opal Quartz Chalcedony Amorphous silica Others Gaylussite Searlesite Anhydrite Aragonite

References

Glasser, F. (2011). Handbook of Advanced Radioactive Waste Conditioning Technologies. Woodhead Publishing, 67–135.

Shimbashi, M. et al. (2024). Clays and Clay Minerals, 72, e2, 1-16.

Keywords: cement-bentonite interaction, secondary mineral, pyrometamorphic rock, ophiolite, alkaline saline lake

P-8. Development of General Corrosion Rate Model for Carbon Steel Overpack using Artificial Intelligence Technology ～ Utilization of Archaeological Analogues ～

Daisuke Fujiwara, Kouya Ganaha

TEPCO SYSTEMS CORPORATION JAPAN

1. Abstract

How to utilize archaeological analogues is controversial issue for the corrosion prediction of overpack for deep geological repository (DGR) of high level waste. Although it is recognized as indispensable evidence to derive conceptual corrosion model and to validate the applicability of corrosion prediction model to over a period of thousands years, the use of analogues accompanies difficulties due to several uncertainties and differences comparing to actual DGR conditions. Those consists of (i) uncertainty in environmental condition transition, (ii) difference of environmental condition to DGR ones, (iii) unavailability of detail corrosion layer and surrounding soil information because of important cultural properties, (iv) difference of metallurgy technology for each period, (v) most-well preserved analogues might be remained that will result in biased sampling [1]. Therefore, the validation analysis of corrosion rate model also should be carried out with statistical uncertainty analyses to compare with analogues. In this study, the corrosion prediction model was derived using artificial intelligence (AI) for aerobic and anaerobic conditions, and uncertain parameter distributions of dependent variables were decided for uncertainty in analogues. Overview of development items for overpack corrosion prediction are shown in the schematics in Figure 1 and red character items correspond to the tasks in the current scope.

This study was performed as public offering work of Japan Society of Corrosion Engineering funded by Nuclear Waste Management Organization of Japan (NUMO).

2. Development of carbon steel corrosion rate model

JAEA overpack data base [2] was utilized to derive carbon steel corrosion rate equation for aerobic and anaerobic conditions using AI Feynman (AIF) [3]. The AIF is “Neuro-Symbolic Regression” python library to find symbolic expression that matches data from an unknown function, which is called as “physics–inspired neural network” that supports scientists discovering hidden physics and chemistry from dataset. The derived corrosion rate models are power law of time period with multipliers of exponential term of temperature, pH, saline concentration of underground water, oxygen concentration and buffer material. These models will also be utilized to feedback to the enhancement of mechanistic corrosion rate models and the optimization of experimental design for additional future experiments.

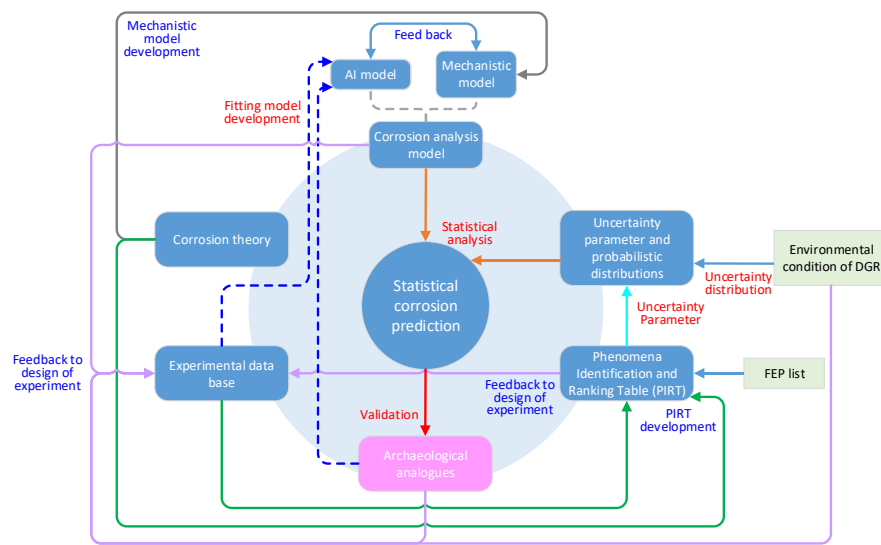


Figure 1. Overview of development items for overpack corrosion prediction

3. Statistical uncertainty analysis of corrosion rate of archaeological analogues

Statistical uncertainty analyses of corrosion rate of archaeological analogues from Yamato ancient tomb [4] were carried out using derived corrosion models based on the AESJ technical standard [5] for statistical safety analysis for nuclear power plant. The uncertainty parameter were selected from dependent variables of each corrosion models, and the uncertainty distribution were deduced from analogue document and engineering judgement. The statistical analysis were based on simultaneous Latin Hypercube Sampling (LHS) method and order statistics using Wilks' formula. The corrosion rate of 95/5 percentile with 95% tolerance limit values were confirmed to cover analogue data that implies applicability of “uncertainty parameter setting and corrosion model combination” to long term overpack lifetime estimation.

4. Conclusion

In this study, the scheme to validate the applicability of corrosion model to DGR overpack was developed using archaeological analogues based on statistical uncertainty analysis method.

References

- [1] Fraser King, “Natural Analogues and their Use in Supporting the Prediction of Long-Term Corrosion Behavior of Copper-coated UFC”, NWMO TR-2021-19, 2021
- [2] “JAEA overpack data base”, <https://opdb.jaea.go.jp/opdb/>
- [3] Silviu-Marian Udrescu, “AI Feynman 2.0: Pareto-optimal symbolic regression exploiting graph modularity”, 34th Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2020), Vancouver, Canada.
- [4] Yoshikawa, H., E. Gunji, and M. Tokuda. “Long stability of iron for more than 1500 years indicated by archaeological samples from the Yamato tumulus”, Journal of Nuclear Materials, Volume 379, Ussie 1-3, 30, 2008
- [5] “Standard procedures for applying the statistical method in the safety evaluation”, AESJ-SC-S001, 2021

P-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

原子力発電環境整備機構

1. NUMO の対話・広報活動

NUMOは、「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」（平成12年6月7日法律第117号），「特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針」（令和5年4月28日改定）に基づき，対話・広報活動を実施している。

地層処分の安全性については，NUMO が地層処分の実施主体として，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包括的技術報告書として取りまとめている。

対話・広報活動においては，「地層処分の必要性」，「地層処分の安全性」，「文献調査」，「地域共生」を訴求事項としているが，このうち「地層処分の安全性」については，包括的技術報告書を拠り所として，全国の皆さまへ分かりやすく説明していくこととしている。

2. 対話活動におけるナチュラルアナログの利用

筆者は2015年の入構以来，NUMO が国とともに実施している対話型全国説明会などを通じて3千人以上との対話を行ってきた。

どのような対象者にも分かりやすい説明が求められる NUMO の対話活動において，ナチュラルアナログ事例をどのような場面でどのように活用しているのか，筆者が経験上，工夫して伝えるようにしている点，一方で使いづらい点，対話活動において一般の方より寄せられる声なども紹介しながら，ナチュラルアナログ事例を第一線で研究する皆さんと悩みなどを共有し，より分かりやすい説明方法等を探る。



対話活動の様子

原子力発電環境整備機構

(略称：原環機構)

Nuclear Waste Management Organization of Japan (NUMO)