



# 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

2024年6月

原子力発電環境整備機構





# 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

2024年6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, 2024

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

# 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

藤田 和果奈\*1,鈴木 覚\*1,森 千穂\*1,佐藤 努\*2

要旨

NUMO は包括的技術報告書を 2021 年に公表した。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\*3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。今後も最新の科学的知見を取り込んでセーフティケースを更新するにあたっては、その信頼性を向上させるため、アナログ事例(ナチュラルアナログ、考古学アナログ及び産業アナログ)についても最新知見を取り込んでいく必要がある。こうした背景から、以下の3点を目的として「ナチュラルアナログ研究ワークショップ」を開催した。

- ・ 研究機関、大学及び民間企業等が保有する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を今後更新するセーフティケースの構築や地層処分の技術・安全性 に関する幅広い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 に対する信頼性をより向上させることを目的とした取り組みに関する意見交換
- 以上を通じた、国内のアナログ研究に携わる専門家間のネットワークの強化

本ワークショップは、NUMOとJAEAが実施している共同研究の一環として、国内の研究機関、大学、民間企業等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 名が出席して 2023 年 11 月 28 日から 29 日の 2 日間にわたり開催されたものである。開催にあたっては、北海道大学大学院佐藤努教授にモデレーターを務めていただき、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 件の講演をいただいた。また、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

<sup>\*1</sup> 原子力発電環境整備機構 技術部

<sup>\*2</sup> 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

<sup>\*3</sup> 科学的,技術的,経営管理上の論拠や根拠に基づいて,論を尽くし,処分場が安全であることを説明したもの。 IAEA (2012) では,「セーフティケースは,処分施設の安全を裏付ける科学的,技術的,経営管理上の論拠ならびに証拠を集めたものであり,サイトの適合性ならびに施設の設計,建設および操業,放射線リスクの評価,そして処分施設と関連するあらゆる安全関連作業の適切性と品質の保証を包含するものである」と定義している。また,OECD/NEA (2013) では,「セーフティケースは,処分場が安全であるという主張を定量化し実証するための証拠,分析,論拠を体系的に取りまとめたものである」と定義している。

IAEA (2012): The Safety Case and Safety Assessment for Radioactive Waste. No. SSG-23.

OECD/NEA (2013): The Nature and Purpose of the Post-closure Safety Cases for Geological Repositories. NEA/RWM/R(2013)1.

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。総合討論 において得られた意見を以下にまとめる。

アナログ事例をセーフティケースの信頼性の傍証として活用するには、原位置試験や室内 試験の結果や数理モデルの評価と併せて用いる必要がある。また、事例の選定の際に成果を データベース化するなど、取り上げる事例が偏らないよう情報を集約する取り組みも重要で ある。アナログ事例を提示する際には、処分システムに有利な事例だけではなく不利な事例 も併せて示し、地層処分の環境が不利な事例とは異なることなどを丁寧に説明していくこと が重要である。

地層処分の安全確保の仕組みや安全評価の確からしさについて幅広いステークホルダーに 理解を深めていただくために、対話においては、科学的な情報を羅列するようにアナログ事 例を紹介するのではなく、アナログ事例が過去にどのような環境で、どのような過程を経て 形成され、それらが地層処分の環境にどのように類似しているのかといったことを、"物語" として伝えるナラティブベースの伝え方のほうが、ステークホルダーの納得感を高める上で 有効である。幅広いステークホルダーとの対話において取り上げるアナログ事例は、処分環 境との類似性に過度にこだわらず、地層処分の安全確保の仕組みなどをイメージしやすい事 例の方が好ましい。また、資料を用いた説明に加えて、ステークホルダーが自らアナログ事 例を観察したり触れたりできるような、体験型の取り組みも有効であると考えられる。

アナログ事例を対象とした研究についても、対象に地層処分システム全体との類似性を過度に求める必要はないだろう。アナログ事例となる現象が地層処分システムのどの部分に類似したものなのかについて、研究者自身が正当化できるならば、対象となる現象がシステムのごく一部であったとしても、アナログ事例としては十分に役立つものである。また、アナログ事例はそれ単独で地層処分システムの長期的な変遷を立証するものではなく、室内試験や原位置試験の結果、及びモデリングと組み合わせて、初めて効力を発揮するものである。

カタログとしてナチュラルアナログをデータベース化することは、情報の統合化という意味では役立つが、単なる情報の羅列とならないよう、「アナログカタログ」を利用する対象者によって収録する事例や説明の仕方などを工夫する必要がある。加えて、わが国特有の気候、地質環境の下で生じたナチュラルアナログや国内の研究者が実施したアナログ研究を充実させることは、読者に地層処分システムを身近なものと認識させる効果が期待でき、幅広いステークホルダーとの対話において役立つと考えられる。アナログカタログの取りまとめにおいては、キーとなるアナログ事例に"ナラティブ"を整備することで、読者の納得感を向上させる工夫が必要である。

アナログ事例は、既に地層処分システムの長期的な変遷に関するシナリオ構築にも適用されている。さらに、安全評価に携わる技術者がアナログ事例を自ら研究することによって、地層処分システムで将来起こりうる現象の具体的なイメージを形成することが可能となるため、今後、そのような技術者の人材育成にも役立つであろう。また、アナログ事例という対象を、異なる分野、異なる世代の技術者・研究者が共に研究することは知識継承の観点からも有効である。このような取り組みとして、ワークショップで定期的に研究成果を共有することに加えて、巡検などの体験型の企画も検討していく必要がある。

現世代の研究者間のネットワーク形成においては、共同研究を通じた連携に加えてワークショップを定期的に開催することも重要である。また、今後はアナログカタログの作成に伴う共同作業など、連携の場が増えていくことが予想される。アナログ事例を用いて推定の確からしさを説明するという方法は、土木工学あるいは文化財保全といった様々な分野においてもそれぞれに対応するアナログ事例を用いて採用されつつある。分野を超えたアナログ研究の横のつながりを充実させることは、最終的には地層処分事業にも役立つと期待できる。

NUMO はこれらの意見を踏まえて、アナログ事例をセーフティケースの更新や幅広いステークホルダーとの対話で有効的に活用できるよう、ワークショップの開催やアナログカタログの作成を通じ、継続してアナログ研究の最新情報の集約と研究機関及び NUMO 双方の人材育成に取り組んでいく。

#### Report of a natural analogue workshop 2023

### Wakana FUJITA\*1, Satoru SUZUKI\*1, Chiho MORI\*1, Tsutomu SATO\*2

In 2021 NUMO published a Pre-siting site descriptive model\*3 (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. Against this background, a workshop on Natural Analogue Studies was held on November 28th and 29th 2023, 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.

The workshop 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. During the workshop, Prof. Sato, Tsutomu of the Graduate School of Hokkaido University served as the moderator. 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.

The following is a summary of the general discussion.

It will be of benefit to use analogues to enhance confidence in the NUMO safety case in conjunction with in-situ tests, laboratory tests and mathematical modelling. It will also be important to select examples of analogues that avoid "bias" by showing not only favourable cases for a geological disposal system but also unfavourable cases. These examples should be accompanied by a careful explanation of the differences in the geological conditions / disposal concepts for both favourable and unfavourable cases.

<sup>\*1</sup> Science and Technology Department, Nuclear Waste Management Organization of Japan (NUMO)

<sup>\*2</sup> Division of Sustainable Resources Engineering, Faculty of Engineering, Hokkaido University

<sup>\*3</sup> Site descriptive model that captures key characteristics of information obtained from studies of deep geological environments in Japan.

To enhance the understanding of a wide range of stakeholders in relation to the assurance of safety and safety assessment of the geological disposal system, it will likely be more effective to tell a "narrative" about how suitable analogue sites were formed, under what conditions and by which processes. This should be accompanied by an explanation of how the selected analogue sites are similar to that of the expected geological disposal conditions in Japan, rather than to introduce analogue cases as a list of scientific information. Any analogue sites which are able to easily illustrate the basic concepts of the geological disposal system should take priority for public communication. Proactive communication with the public through, for example, analogue site visits guided by experts, might be a better solution to promote increased understanding of geological disposal systems.

For analogue studies, "concrete" similarities between both the analogue site and the geological disposal system are not necessarily required. If the researcher can rationalise the analogy between the research objective and the geological disposal system, for example, study of an elementary process that is related to a single safety function, then the analogue could still yield useful information. Analogues alone cannot establish all the supporting evidence required to confirm the safety of a geological disposal system, and therefore, should be used in conjunction with in-situ tests, laboratory tests and modelling.

As described above, compilation of analogue studies as a "catalogue" may be useful in order to integrate results of analogue studies performed worldwide. The selection of analogues and their associated descriptions should be well organised and adjusted to the target audience to make the "analogue catalogue" more than just a list of analogue case information. In such a catalogue, analogues which were formed under the unique environmental and geological conditions of Japan and studied by domestic researchers should be included. These studies are expected to be more familiar to readers with knowledge of Japanese geological conditions and geological disposal as opposed to international analogue examples. In compiling the analogues into a catalogue, it will be necessary to prepare the associated description of evolution and relevance in a "narrative" based manner. In this way it is hoped to improve both public communication and understanding.

To support networking amongst young researchers, regularly taking part in workshops in addition to joint research collaboration will be important. In the future it is expected that for researchers working on analogue studies (that are currently scattered throughout a number of institutes and universities) there will be more opportunities to collaborate, such as through joint work like the compilation of the aforementioned analogue catalogue. Although NUMO as the geological disposal implementer, may be the primary user of such a catalogue (at least for the time being), the concept of an "analogue study" is beginning to be adopted in various fields, such as civil engineering and cultural heritage preservation. The development of links between the various researchers in analogue studies and across disciplines is expected to ultimately benefit the geological disposal project.

The analogue approach has already been utilised in scenario development for the long-term evolution of geological disposal systems, and furthermore, the study of analogue cases by engineers involved in safety assessment will enable them to form a more concrete picture of the possible phenomena arising during the implementation of a geological disposal system. This will be useful for the human resource development of researchers involved in scenario development. Collaboration on analogue research between engineers and researchers of different ages / experience and also different disciplines, will facilitate knowledge transfer to

the next generation of researchers. Finally, it might also be worth considering organising hands-on activities such as field excursions.

Based on the discussion between attendees at the workshop, NUMO will continue to consolidate the latest findings on analogue research and develop human resources for both research institutes and implementers through both workshops and the compilation of an analogue catalogue. Such efforts will contribute to the effective use of analogue studies in future updates of the NUMO safety case and in communication with a wide range of stakeholders.

# 目次

1.	. ワー	クショップの背景と目的	1
2.	. 地層	処分システムの安全機能とアナログ事例の対応関係	6
3.	. ワー	クショップ講演要旨集	10
	講演 1	地質環境の隔離性能に関するナチュラルアナログ — 実例とリアリティ —	12
	講演 2	佐藤が実施してきたナチュラルアナログ研究とその方便	15
	講演 3	フィリピンのアルカリ環境下での相互作用に関するナチュラルアナログ	
		―ルソン島サイリー鉱山でのベントナイトの変質―	16
	講演 4	フィリピンナラ地区のアルカリ環境における二次生成物の生成	19
	講演 5	パラワン島ナラ地区の高アルカリ環境における火山ガラスの変質と溶解速度	21
	講演 6	水理に関するナチュラルアナログ的研究	23
	講演 7	スウェーデン・キルナ鉱山における鉄	
		<ul><li>一ベントナイト相互作用に関するナチュラルアナログ研究</li></ul>	25
	講演 8	ベントナイト内部における微生物の生存挙動について	
		- 幌延 URL の原位置腐食試験や月布ベントナイト原鉱石の研究事例	27
	講演 9	人工バリアの長期挙動に関するナチュラルアナログ研究	29
	講演 10	型 埋蔵環境が出土鉄製文化財の腐食状態に及ぼす影響	
		-平城宮跡および鷹島海底遺跡での調査を例に	32
	講演 1	<u>し</u> 地下環境における 15 年間の吹付コンクリート—軽石凝灰岩相互作用	36
	講演 12	2 ベントナイト系緩衝材の膨潤・透水性能における膠結作用の影響評価	
		ーベントナイト原鉱石をアナログとしてー	37
	講演 13	<u>3</u> アナログカタログについて	39
4.	総合	討論	43
	4.1.	地層処分の仕組みや信頼性を傍証するアナログ事例の活用方法	43
	4.1.1	. セーフティケースでアナログ事例を活用する場合	43
	4.1.2	. 幅広いステークホルダーとの対話で用いる場合	44
	4.1.3	. 研究者がアナログ事例を研究する場合	44
	4.2.	日本版カタログの作成	45
	4.3.	国内のアナログ研究の体制の在り方	
	4.3.1	. 現世代の専門家間のネットワーク形成	45
	4.3.2	. 次世代への知識継承,人材育成	46
5.	. ワー	クショップのまとめと今後の取り組み	48
参	\$考文献		49
	付録-1	ワークショップ総合討論における発言集	付-1
	付録-2	NUMO FEP リスト	付-4

#### 1. ワークショップの背景と目的

NUMO は、わが国で想定される多様な地質環境を対象にしたセーフティケースとして、包括的技術報告書(NUMO、2021)を取りまとめた。この報告書では、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以下のように示している。

- ・ 地層処分事業を進めていくうえで考慮すべき要件を整理し、地層処分の安全確保における重要な要素であるサイト選定、処分場の設計、安全性の評価に関する技術的検討や、 これらを統合するためのマネジメントに関する基本的考え方を提示(第2章)
- ・ 処分場の設置に適した地質環境を選定する方法を示すとともに、サイト選定の対象になると想定されるわが国の地下深部に広く分布する岩種を検討対象母岩として、全国規模の地質環境情報に基づき地質環境モデルを作成(第3章)
- ・ 所要の安全機能を有する処分場の設計を行うための方法を示し、上記の地質環境モデル を対象として処分場の仕様例を提示(第4章)
- ・ 閉鎖前および閉鎖後長期の安全性について評価するための方法を示すとともに、設計した処分場に対する安全評価を実施し、わが国で想定される地質環境に対して設計した処分場が安全性を確保できる見通しを提示(第5章,第6章)

包括的技術報告書第7章においては、これらの技術的な取り組みに対する信頼性を示す多面的な論拠の一つとして、ナチュラルアナログを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傍証事例として示した。

このようなセーフティケースにおけるナチュラルアナログの取り扱いは、次に示す考え方(Alexander et al., 2007)に基づくものである。「放射性廃棄物処分は、安全性の確保が必要となる対象期間が長いタイムスケールとなるため、安全性の解析はかなり挑戦的なものとなる。このタイムスケールは場合によっては 100 万年とも言われ、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。長期にわたって外挿した推定値を裏付ける方法のひとつに、自然科学的及び考古学的な類似物(あるいは、NA(著者補記:natural analogues の略\*1))を利用する方法がある。NA 研究は、科学的な洞察を提供するだけでなく、一般の人々とのコミュニケーションにおいても大きな価値を持つ。(原文:Radioactive waste disposal presents a considerable challenge to safety analysis because of the long timescales over which it is necessary to assure safety. These timescales - perhaps a million years in some cases – go well beyond those that might be considered in laboratory or field experiments. The challenge therefore is to provide evidence that, when

1

<sup>\*1</sup> 自然現象や考古学的な事物のみならず,産業的な事物においても地層処分システムの理解に役立つ類似性を有するものがある。本報告書では、英国地質調査所(BGS)が取りまとめたアナログカタログ(Milodowski et al., 2015)を参考に、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、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こととする。

models are used to extrapolate laboratory or field data into the far future, this is done appropriately and credibly. One way of corroborating long-term estimates is through the use of natural and archaeological analogues (or NA). Apart from the scientific insights that they provide, NA studies also have considerable value in communicating with the public.)

このようなナチュラルアナログの研究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))。OECD/NEA が公表したセーフティケースの構築に関する国際的な指針(OECD/NEA、2004)においては、アナログ事例を活用することの重要性について以下のように述べられている。

- あるケースでは、不確実性は、特定の評価の仮定やパラメータについての多面的な論拠を収集することによって取り扱われることがある。そのような多面的な論拠には、例えば人工バリアの長期健全性を支持するナチュラルアナログの傍証などが含まれる (原文: In some cases, uncertainty can be managed by seeking multiple lines of evidence for particular assessment assumptions or parameters, including, for example, evidence from natural analogues to support the longevity of engineered materials.)。
- ・安全な地層処分の実現可能性に対する間接的な裏付けは、自然環境の観察からも得られる。例えば、世界中のさまざまな地質環境におけるウラン鉱床の長期安定性などが挙げられる。さらに、間隙水への核種の溶解性、収着および拡散に関しても自然過程の重要性を示す十分な証拠がある。考古学アナログは、主要なバリア材料と自然過程の間における特定の相互作用に関する評価に使用されることもある(原文: Indirect support for the possibility of safe geological disposal also comes from observations of natural systems, including the longevity of uranium ore deposits in many different geological environments around the world. Furthermore, there is ample evidence of the importance of the natural processes of solubility control, sorption and diffusion in attenuating concentrations of species dissolved in porewater. Archaeological analogues may also be used to evaluate specific interactions between relevant materials and natural processes.)。
- ・ 複雑な数学的モデルに基づいた定量的な結果が示されるよりも、ナチュラルアナログによる傍証など、安全性に関するやや定量的ではない証拠に着目することの方が、一般の人々にとっては、より身近なものに感じられ、より説得力を感じられ、より関心を高めることになるだろう(原文: Highlighting less quantitative evidence for safety, including evidence from natural analogues, may be more accessible, more convincing and of more interest to the public than, say, the results of complex mathematical model.)。

これらの考え方に基づけば、ナチュラルアナログ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傍証するという技術的信頼性に資する基盤情報の一部であるだけでなく、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、 セーフティケースを活用して地層処分の仕組みなど伝える強力なツールともなり得ると考え られる。

このような背景から、NUMO は国内におけるアナログ研究の最新の動向を把握するために「ナチュラルアナログ研究ワークショップ」を開催した。以下にワークショップの目的を示す。

- ・ 大学,研究機関及び民間企業等が保有する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を今後更新するセーフティケースの構築や地層処分の技術・安全性 に関する幅広い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 に対する信頼性をより向上させることを目的とした取り組みに関する意見交換
- ・ 以上を通じた、国内のアナログ研究に携わる専門家間のネットワークの強化

本ワークショップは、NUMOとJAEAが実施している共同研究の一環として、国内の研究機関、大学、民間企業等の技術者及び研究者ら27名が出席して2023年11月28日から29日の2日間にわたり開催されたものである。開催にあたっては、北海道大学大学院佐藤努教授にモデレーターを務めていただき、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件の講演をいただいた。また、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。

本報告書は、ワークショップの講演内容と総合討論の成果を取りまとめたものであり、次に示す章から構成される。第 1 章は、ワークショップの背景と目的を取りまとめる。第 2 章は、包括的技術報告書で示した地層処分の多重バリアシステムの安全機能と、ワークショップで共有されたアナログ研究の最新成果との関係を整理する。第 3 章は、ワークショップの講演プログラムに沿って講演要旨を集約する。第 4 章は、総合討論「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」というテーマで出席者から示された意見を取りまとめる。第 5 章では、総合討論での出席者からの意見を受け、NUMOの今後の取り組みをまとめる。

表 1-1 に本報告書で用いた用語と略語・略称の定義を示す。

表 1-1 本報告書で用いた用語と略語・略称

	表 1-1 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,10,000 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)。
セーフティケース	科学的,技術的,経営管理上の論拠や根拠に基づいて,論を尽くし,処分場が安全であることを説明したもの。IAEAによる定義では,「セーフティケースは,処分施設の安全を裏付ける科学的,技術的,経営管理上の論拠ならびに証拠を集めたものであり,サイトの適合性ならびに施設の設計,建設および操業,放射線リスクの評価,そして処分施設と関連するあらゆる安全関連作業の適切性と品質の保証を包含するものである」(IAEA, 2012)としている。また,OECD/NEAによる定義では,「セーフティケースは,処分場が安全であるという主張を定量化し実証するための証拠,分析,論拠を体系的に取りまとめたものである」(OECD/NEA, 2013)としている。
第2次取りまとめ	我が国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼 - 地層処分研究開発第2次取りまとめ-
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10,000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)
DOE	エネルギー省(米国)(Department of Energy)
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 Cooperation 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)
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)

#### 2. 地層処分システムの安全機能とアナログ事例の対応関係

ナチュラルアナログを始めとするアナログ事例は、地層処分の安全確保の仕組みの説明や、処分場の天然・人工バリア材料の閉鎖後長期の健全性を傍証するために整備されてきており、今後も最新のアナログ研究の成果を取り入れて、その情報を拡充する予定である。この章では、新たに拡充するアナログ事例のセーフティケースにおける位置づけを分かりやすく提示することを目的として、地層処分の安全確保の仕組みを表す「地層処分システムの安全機能」とアナログ事例との対応関係を整理する。

アナログ事例には、地層処分システム全体を傍証する事例(例えば、オクロの天然原子炉やシガーレイクのウラン鉱山など)や、バリア機能の一部を傍証する事例(例えば、ローマ時代の鉄くぎの事例や天然における高アルカリ水とベントナイトの反応など)がある。後者の事例に関わる素過程はFEP\*2として記述されるものも多い。

包括的技術報告書第4章においては、処分場の安全機能(要求事項)に対応する設計要件が階層的に整理されている(図 2-1 参照)。また、設計要件の設定の際に、設計上考慮すべき現象の抽出、及び設計したバリアの長期健全性など、バリア機能に対する影響として考慮すべき現象の抽出のために FEP が利用されている。そこで、包括的技術報告書で整理された設計要件に対応する FEP、及び各アナログ事例に関わる FEPの関係を利用することで、FEP を介して処分場の安全機能とアナログ事例との対応関係を構造化した。

地層処分システムに求める閉鎖後長期の安全機能と本ワークショップの講演で示されたアナログ事例の関係を表 2-1 にまとめる。包括的技術報告書では、設計要件に対応する FEP を付属書にまとめた(付属書 4-4 オーバーパックの設計要件と評価項目の設定;付属書 4-14 緩衝材の設計要件と評価項目の設定;付属書 4-20 廃棄体パッケージの設計要件と評価項目の設定)。これらの付属書を参照して、表 2-1 では安全機能、設計要件(地質環境に求められる要件)及び FEP の対応関係を一覧表にまとめた。

例えば、オーバーパックの設計要件や評価項目には耐食性、構造健全性、耐食性に対する 放射線影響の抑制、溶接欠陥に対する構造健全性、緩衝材の偏膨潤などに対する構造健全 性、地震活動に対する構造健全性、エロージョン・コロージョン、異種金属接触腐食(ガル バニック腐食)、滴水、操業中の大気環境、オーバーパック内部でのガス発生に伴う内圧上 昇、異常事象による荷重が設定されている。そのうち耐食性に関連する FEP は全部で 17 個あ った。本ワークショップにおいては、これらの FEP に関する新たなアナログ事例として 6 件 の講演があり、その情報を表 2-1 に赤字で示した。各講演の要旨を第 3 章に掲載する。

表 2-1 は、処分場の安全機能を最上位の構造として、トップダウン型でアナログ事例の位置づけを示したが、個別の事例からボトムアップ的に安全機能との対応関係を示すことも可能である。例えば、講演 3「フィリピンのアルカリ環境下での相互作用に関するナチュラルアナログールソン島サイリー鉱山でのベントナイトの変質ー」は、天然のベントナイトにアルカリ地下水が長期にわたり浸出していたとみられる痕跡を対象とした研究であり、地下水ーベントナイトの反応フロントでは二次鉱物のクロッギングによる物質移行・反応の抑制が見られたことから、FEPのpH条件(パッケージ化された廃棄物)(F2.3.4.1)、腐食(パッケージ

6

<sup>\*2</sup> 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。

化された廃棄物) (F2.3.4.4), 緩衝材/埋め戻し材(F3.1.2), pH条件(処分場) (F3.2.4.1), 溶解 (処分場) (F3.2.4.5), 鉱物組成の変化(処分場) (F3.2.4.6), 沈殿反応(処分場) (F3.2.4.7)に関連すると考えられる。

なお、ワークショップの講演で話題提供があったアナログ事例のうち、包括的技術報告書の付属書において構成要素との対応関係が明示されていない FEP に関連する場合は、表 2-1 の該当する構成要素にその FEP を追加し、区別のためダブルアスタリスク(\*\*)を注記した。また、表 2-1 では FEP に対応する講演タイトルを表 2-2 に示すように省略して記載している。このうち、講演 6 で引用されている F1.1.5 の建設(処分場の立坑、トンネル、処分坑道、サイロなどの掘削、坑道安定性の確保と構造物の取り付け・組み立て)は安全機能を期待する構成要素との対応関係が包括的技術報告書に示されていないため、表中には記載されていない。

#### (設計要件および評価項目の設定の流れ)

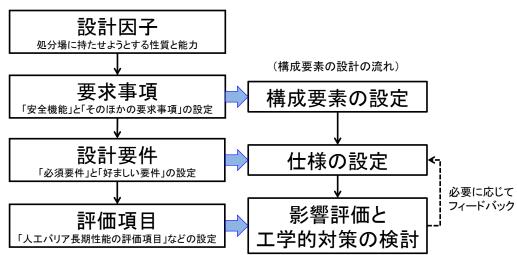


図 2-1 設計因子, 要求事項および設計要件に基づく設計の流れ(包括的技術報告書第4章 より)

# 表 2-1 処分場に求める閉鎖後長期の安全機能と構成要素の関係(設計因子:閉鎖後長期安全性)

基本概念	安全機能		構成	設計要件・地質環境に求められる要件・評価項目・	FEP と対応する講演
	3(11)		要素	影響要因等と対応する FEP	
			地質環境	廃棄体を人間の生活環境に接近あるいは露出させるような著しい影響を及ぼす自然現象が生じない	
隔離	人の接近の抑制		地質環境	現在認められている経済的価値の高い鉱物資源が存在しないこと	
閉じ込め	放射性物質の 溶 出 の 抑 制 (高レベル放	ガラスマトリク スによる溶出の 抑制	ガラス 固化体*	溶解 (廃棄体) (F2.4.1.2), 拡散 (廃棄体) (F2.4.1.3), 化学種と溶解度 (廃棄体) (F2.4.1.4), 収着と脱着(廃棄体)(F2.4.1.5), ラドンの放出(F2.4.2.2), 揮発による放出(F2.4.2.3), 放射線分解ガスによる放出(F2.4.2.4)	溶解 (廃棄体) (5. フィリピン・ナラ地区・火山ガラス)
	射性廃棄物処 分場)	廃棄体と地下水 の接触の防止	オーバー パック	耐食性(F1.1.1, F1.1.6, F1.2.3, F2.2.2, F2.3.1.1, F2.3.1.4, F2.3.2.1, F2.3.2.2, F2.3.3.4, F2.3.4.1, F2.3.4.2, F2.3.4.3, F2.3.4.4, F2.3.5.1, F2.3.5.2, F2.3.5.3, F2.3.6.6), 構造健全性(F2.3.1.1, F2.3.1.4, F2.3.2.4, F2.3.3.2, F2.3.4.12, F2.3.6.6, F3.2.3.1, F3.2.3.2.3, 耐食性に対する放射線影響の抑制(F3.2.6.2), 溶接欠陥に対する構造健全性(F1.1.1, F2.2.2, F2.3.3.4, F2.3.6.5), 緩衝材の偏膨潤などに対する構造健全性、無震活動に対する構造健全性(F1.2.4), エロージョン・コロージョン(F2.3.2.4, F2.3.4.4), 異種金属接触腐食(ガルバニック腐食)(F2.3.4.4), 滴水(F1.1.6), 操業中の大気環境(F1.1.6), オーバーバック内部でのガス発生に伴う内圧上昇(F2.3.6.2, F2.3.6.3, F2.3.7.3, F2.3.7.8), 異常事象による荷重(F1.1.8)	耐食性 (3. フィリピン・サイリー鉱山, 4. フィリピン・ナラ地区・二次生成物, 5. フィリピン・ナラ地区・火山ガラス, 11. 吹付コン, 10. 文化財腐食, 7. スウェーデン・キルナ鉱山), 構造健全性 (7. スウェーデン・キルナ鉱山)
	放射性物質の溶出の抑制(TRU等 廃棄物処分場) 廃棄体・ 廃棄体パッケージ		廃棄体パ	耐食性(F1.1.6), 閉鎖後の耐食性および構造健全性(F1.1.1, F1.2.3, F2.2.1, F2.3.1.1, F2.3.1.4, F2.3.2.1, F2.3.2.2, F2.3.2.4, F2.3.3.2, F2.3.3.4, F2.3.4.1, F2.3.4.2, F2.3.4.1, F2.3.4.2, F2.3.4.1, F2.3.5.1, F2.3.5.3, F2.3.5.3, F2.3.6.2, F2.3.6.3, F2.3.6.5, F2.3.6.6, F2.3.7.1, F2.3.7.2, F2.3.7.3, F2.3.7.4, F2.3.7.5, F2.3.7.6, F2.3.7.7, F3.2.3.2, F3.2.6.2), エロージョン・コロージョン(F2.3.2.4, F2.3.4.4), 異種金属接触腐食(ガルバニック腐食)(F2.3.4.4), 滴水(F1.1.6), 地震動の作用(F1.2.4), 鉱物組成の変化(パッケージ化された廃棄物)(2.3.4.7)**	閉鎖後の耐食性および構造健全性(3.フィリピン・サイリー鉱山,4.フィリピン・ナラ地区・二次生成物,5.フィリピン・ナラ地区・火山ガラス,11.吹付コン,10.文化財腐食,7.スウェーデン・キルナ鉱山),鉱物組成の変化(パッケージ化された廃棄物)*(10.文化財腐食,7.スウェーデン・キルナ鉱山)
	放射性物質の 移行の抑制	放射性物質の溶解の抑制 遅い地下水流速	地質環境 地質環境	地温が低いこと,地下水流動が緩慢であること,岩盤の変形が小さいこと,高 pH あるいは低 pHではないこと,酸化性雰囲気ではないこと,炭酸化学種濃度が 0.5 mol/L 以上とならないこと,掘削損傷領域および掘削影響領域(F3.1.6)**, 移行経路 (処分場) (F3.3.1)**, 移行経路 (母岩)	掘削損傷領域および掘削影響領域**(6. 水理),移 行経路(処分場)**(6. 水理),移行経路(母岩)** (6. 水理)
		による放射性物 質の移行の抑制		(4.3.1)**	
		放射性物質の移 流による移行の 抑制	緩衝材	低透水性(F3.2.2.3), コロイドろ過能(F.3.4.9, F2.4.1.7), 自己シール性(F3.2.2.3, F3.2.3.1, F3.2.3.5), 自己修復性(F3.2.2.1, F3.2.6.2, F3.2.7.4, F3.2.7.8, F3.3.3), 製作施工性, 微生物影響の防止(F3.2.5.1, F3.2.5.2), 物理的緩衝性(F3.2.2.3, F3.2.3.2, F3.2.4.4, F3.2.4.11), ニアフィールドの状態変化に対する力学的安定性(自重による長期沈下挙動)(F3.2.3.2), 地震動に対する力学的安定性(F1.2.4), イライト化(F3.2.1.1, F3.2.1.2, F3.2.2.3), 熱履歴による膨潤性の低下(F3.2.1.2), 塩濃縮(F3.2.1.1,	自己シール性 (12. ベントナイト膠結作用), 物理的 緩衝性 (11. 吹付コン, 12. ベントナイト膠結作 用), イライト化 (12. ベントナイト膠結作用), 緩 衝材の変質 (鉄・ベントナイト相互作用) (3. フィ リピン・サイリー鉱山, 4. フィリピン・ナラ地区・
		コロイド移行の 抑制	緩衝材	F3.2.4.10), 緩衝材密度の不均一性(F3.2.2.1), パイピング現象による緩衝材の流出(F3.2.2.2, F3.2.2.3), 母岩割れ目に侵入した緩衝材の流出(F3.2.2.2, F3.2.2.3, F3.2.4.9), 放射線損傷(F3.2.6.2, F3.2.6.4), 緩衝材の変質(鉄・ベントナイト相互作用)(F3.2.4.1, F3.2.4.4, F3.2.4.5, F3.2.4.6,	二次生成物, 5. フィリピン・ナラ地区・火山ガラス, 11. 吹付コン, 12. ベントナイト膠結作用), 緩衝射の変質(高 pH および高 Ca 濃度地下水による
		放射性物質の吸着	緩衝材	F3.2.4.7, F3.2.4.10, F3.2.4.11), 緩衝材の変質(シリカセメンテーション)(F3.2.1.2, F3.2.4.6), TRU 処分場に由来する高 pH ブルーム、硝酸塩の影響(F3.2.4.3), 緩衝材の変質(高 pH および高 Ca 濃度地下水による影響)(F3.2.4.1, F3.2.4.5, F3.2.4.6, F3.2.4.7, F3.2.4.10, F3.2.4.11), 岩盤のせん 断(F1.2.4), その他の人工物(F3.1.5)**, 溶解, 沈殿, 安定な鉱物相への変遷(処分場)(F3.3.2.4)**	影響) (3. フィリピン・サイリー鉱山, 4. フィリピン・ナラ地区・二次生成物, 5. フィリピン・ナラ地区・火山ガラス, 11. 吹付コン, 12. ベントナイト 膠結作用), 安定な鉱物相への変遷 (処分場) ** (12. ベントナイト膠結作用)
		放射性物質の分 散	地質環境 地質環境	地温が低いこと,地下水流動が緩慢であること,岩盤の変形が小さいこと,高 pH あるいは低 pHではないこと,酸化性雰囲気ではないこと,炭酸化学種濃度が 0.5 mol/L 以上とならないこと	
		坑道およびその 周辺が卓越の 放射性物質の 行経路となる との抑制	止水プラ グ,埋め 戻し材	低透水性,製作施工性,緩衝材および止水プラグの膨出抑制(F3.2.3.1),処分坑道や連絡坑道において,再冠水後の緩衝材および止水プラグ(ベントナイト製の場合)の膨出を抑制すること	

<sup>\*</sup>ガラス固化体も人工バリアとしての機能を期待されるが包括的技術報告書では設計の対象としない

<sup>\*\*</sup>包括的技術報告書と付属書で構成要素との対応関係が記載されていない FEP

# 表 2-2 表 2-1 に用いた講演タイトルの略称

講演	タイトル	略称
番号		
3	フィリピンのアルカリ環境下での相互作用に関するナチュラルアナログ —	フィリピン・サイリ
	ルソン島サイリー鉱山でのベントナイトの変質—	一鉱山
4	フィリピンナラ地区のアルカリ環境における二次生成物の生成	フィリピン・ナラ地
		区・二次生成物
5	パワラン島ナラ地区の高アルカリ環境における火山ガラスの変質と溶解速度	フィリピン・ナラ地
		区・火山ガラス
6	水理に関するナチュラルアナログ的研究	水理
7	スウェーデン・キルナ鉱山における鉄-ベントナイト相互座用に関するナチ	スウェーデン・キル
,	スケエー / フ・イル / 弧山におりる妖 ・ヘンド / イド相互座用に関する / / /   ュラルアナログ研究	ナ鉱山
10	7 1 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7	
10	埋蔵環境が出土鉄製文化財の腐食状態に及ぼす影響 ―平城宮跡および鷹島	文化財腐食
	海底遺跡での調査を例に	
11	地下環境における 15 年間の吹付コンクリート―軽石凝灰岩相互作用	吹付コン
12		べいしまえし圏気が
12	ベントナイト系緩衝材の膨潤・透水性能における膠結作用の影響評価 ―ベ	ベントナイト膠結作
	ントナイト原鉱石をアナログとして	用

# 3. ワークショップ講演要旨集

本章では、ワークショップで話題提供があった講演要旨をまとめた。将来、英国地質調査所 (BGS) が作成したアナログカタログの和訳版 (NUMO, 2019) \*3 を更新することを考慮して、講演要旨はその記載内容に対応するよう、以下の項目が含まれるように作成した様式を用いて記述されている。

- 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の説明
- アナログ事例の地球科学的特性の概要説明
- 安全性に関わる主要な見解
- アナログの利用限界に関する概要
- システムを表す図表
- 詳細情報が得られる参考文献リスト

なお,講演内容が,個別のアナログ研究の成果ではなく,アナログ研究の考え方など,総合的な内容に関する講演の場合については,講演要旨は自由形式で記述されている。

講演者及び講演タイトルを表 3-1 にまとめる。

<sup>\*3</sup> 放射性廃棄物管理のためのアナログカタログ(和訳版)(NUMO-TR-19-01) [13] は英国地質調査所(BGS)が 作成した技術報告書「A Catalogue of Analogues for Radioactive Waste Management」を和訳したアナログカタログ である。

# 表 3-1 講演者及び講演タイトル

(敬称略)

番号	講演者	タイトル	ページ
講演 1	吉田英一	地質環境の隔離性能に関する NA―実例とリアリティ―	12–13
講演 2	佐藤努	佐藤が実施してきたナチュラルアナログ研究とその方便	14
講演 3	藤井直樹	フィリピンのアルカリ環境下での相互作用に関するナチュラル アナログ—ルソン島サイリー鉱山でのベントナイトの変質	15–17
講演 4	新橋美里	フィリピンナラ地区のアルカリ環境における二次生成物の生成	18–19
講演 5	菊池亮佑	パラワン島ナラ地区の高アルカリ環境における火山ガラスの変 質と溶解速度	20–21
講演 6	竹内真司	水理に関するナチュラルアナログ的研究	22–23
講演 7	根本脩平	スウェーデン・キルナ鉱山における鉄—ベントナイト相互作用 に関するナチュラルアナログ研究	24–25
講演 8	天野由記	ベントナイト内部における微生物の生存挙動について—幌延 URLの原位置腐食試験や月布ベントナイト原鉱石の研究事例—	26–27
講演 9	三ツ井誠一 郎	人工バリアの長期挙動に関するナチュラルアナログ研究	28–30
講演 10	柳田明進	埋蔵環境が出土鉄製文化財の腐食状態に及ぼす影響—平城宮跡および鷹島海底遺跡での調査を例に	31–34
講演 11	新橋美里	地下環境における 15 年間の吹付コンクリート―軽石凝灰岩相互 作用	35
講演 12	伊藤大知	ベントナイト系緩衝材の膨潤・透水性能における膠結作用の影響評価—ベントナイト原鉱石をアナログとして—	36–37
講演 13	鈴木覚	アナログカタログについて	38–41

## 地質環境の隔離性能に関するナチュラルアナログ - 実例とリアリティ -

#### 名古屋大学 吉田英一

放射性廃棄物を地下に隔離・処分した後の、地下水シナリオに伴う廃棄体のみならず処分環境の長期的状態変化をできるだけ正確に把握するには、地質環境で生じた類似現象に学ぶことが不可欠である。とくに我が国のような変動体地質環境での処分場を包含する地下環境の長期的状態変化・プロセスを理解するには、同環境で生じた元素移動や物質変化に関する様々な自然現象から、隔離機能(バリア機能)に関わる類似現象を抽出することが望ましい。しかしながら、自然現象の生じた(初期)条件や過程の全てを明らかにすることは困難を

伴う。そこには常に不確実性が伴っており、プロセスを詳細化し定量化しようとすればするほど、核種移行プロセス(バリア機能に関するプロセス)での知りたいとするプロセスとの、いわゆる'類似性'においてギャップが生じることは否めない(ナチュラルアナログの限界)。また、自然現象の多くは、それらの生じた時間スケールが地層処分の安全評価の時間スケールよりもオーダーで異なることが多く、現象の解像度(内挿の精度)が低くなることは避けられない。その不確実性を低減し、解像度を高めるには、実験条件を明確にした室内試験や原位置試験が不可欠であるものの、一方でこれら短期間の実験結果に基づく、長期的な現象への適用性(外挿の確からしさ)の検討も忘れてはならない。

ここでは、これらの認識のもと、変動体地質環境で生じた元素移動・隔離機能に関わる地質現象のアナログ性と、それらから学ぶことのできる定性的・定量的メッセージ(変動体地質環境における核種隔離機能のリアリティ)について述べたい。取り上げる主な地質現象とメッセージ、今後議論・確認すべき項目などは以下の通りである(順不同:なお、これらの事象のアナログ性についても当ワークショップで併せて議論できればと考えている)。

#### <地質環境核種隔離機能の長期持続性>

- ウラン鉱床(月吉・人形峠)
  - ▶1000万年を超える変動体地質環境での隔離性能
- 割れ目形成とネットワークの持続性(変動体花崗岩アナログ)
  - ▶水理モデルのベースとなる結晶質岩中割れ目ネットワーク構造の長期安定性

#### <断層とバリア機能>

- 断層破砕帯中の元素移動(月吉ウラン鉱床・阿寺断層)
  - ▶断層ガウジの核種隔離および水理学的遮蔽機能

#### <酸化還元反応>

- 地表からの酸化還元フロント形成(結晶質岩・付加体)
  - ▶結晶質岩・堆積岩の地表からの影響範囲(酸化フロント楔の到達深度と元素移動)
- 鉄酸化物の長期挙動(土岐花崗岩・LPG 地下備蓄サイト・高師小僧)
  - ▶鉄酸化物の不可逆性と核種吸着機能(マトリクス拡散を含む:マトリクス拡散深さの限界)
  - ▶オーバーパックの長期鉄腐食挙動(一旦形成された鉄酸化物の長期保持:不可逆性)
- 鉄酸化物のバリア機能(月吉ウラン鉱床・土岐花崗岩)
  - ▶酸化物の核種吸着機能 (オーバーパック腐食生成物:バリア機能としてカウントすべき)
  - ▶粘土鉱物や含鉄鉱物(雲母など)の核種吸着機能(岩盤の普遍的バリア機能:不可 逆性)

#### <マトリクス拡散>

- 岩盤の割れ目形成とシーリングプロセス(結晶質岩・付加体:自己シーリング機能)
- 割れ目充填鉱物のバリア機能(核種吸着効果としてカウントすべき)
- 変質とマトリクス拡散(マトリクス拡散深さは無限ではない)

#### <ベントナイト変質>

• ベントナイト中コンクリーション (月布鉱山: Ca イオンの影響は限定的)

など

その他,自然現象や考古学的事象から学べると思われる現象として;

#### <微生物>

▶微生物は悪者か?(微生物による元素濃集現象:黄鉄鉱や化石化プロセス)

# <オーバーパック>

▶オーバーパックの寿命は数千年か? (ローマ時代の釘)

#### <コンクリート>

- ▶コンクリートは砂礫に戻るのか? (ローマンコンクリート)
- ▶コンクリートとコンクリーション

など

以上,核種移行に関わる実際の地質現象から学べることとして(私見);

- ▶現在の核種移行シナリオは、極端に保守的ではないか?保守的すぎることが'リファレンス'として理解されていることによる弊害があるように思う(実際のバリア機能がリアリティよりも低くカウントされていることによる地層処分に対するネガティブなイメージの増幅)。これらに対しては、個別のプロセスよりも、変動体地質環境の核種保持機能(バリア機能)を包括的に示すことのほうが地層処分の社会的受容において効果的ではないかと考える。
- ▶変動体地質環境で生じた自然現象に学び、地質環境に合致した核種移行評価にすべきではないか?とくに将来的に具体的なサイトが決まった際には、サイトの地質環境にフォーカスした自然現象(アナログ)を再検討し、サイト特性としての長期的バリア機能をより具体的に提示することで、社会的にも地層処分場の隔離機能の妥当性が納得されていくと考えられ、その準備もしておくことが望ましい。

<以下関連する研究論文の一部を示します。参考になれば幸いです。>

- Yoshida,H. (1994) Relation between U-series nuclide migration and micro-structural properties of sedimentary rocks. Applied Geochemistry, vol.9, pp.479-490.
- Yoshida,H., Yui,M., Shibutani,T. (1994) Flow-path structure in relation to nuclide migration in sedimentary rocks -An approach with field investigations and experiments for uranium migration at Tono uranium deposit, central Japan-. Jour. Nucl. Sci. Tech., vol.31, No.8, pp.803-812.
- Osawa, H., Sasamoto, H., Nohara, T., Ota, K., Yoshida, H. (1995) Development of a conceptual flow-path model of nuclide migration in crystalline rock -A case study at the Kamaishi in-situ test site, Japan-. Proc. Mat. Res. Soc. Symp., vol.239, pp.1267-1273.
- Iwatsuki, T., Yoshida, H. (1999) Groundwater chemistry and fracture mineralogy in the basement granitic rock in the Tono uranium mine area, Gifu prefecture, Japan -Groundwater composition, Eh evolution analysis by fracture filling minerals-. Geochemical Journal, vol. 33, pp. 19-32.
- Yoshida, H., Aoki, K., Semba, T., Ota, K., Amano, K., Hama, K., Kawamura, M., Tsubota, K. (2000) Overview of the stability and barrier functions of the granitic geosphere at the Kamaishi mine; Relevance to radioactive waste disposal in Japan. Engineering Geology, vol. 56, pp. 151-162.
- Yoshida, H., Takeuchi, M., Metcalfe, R. (2005) Long-term stability of flow-path structure in crystalline rocks distributed in an orogenic belt, Japan. Engineering Geology, 78, pp.275-284.

- Akagawa,F., Yoshida,H., Yogo,Y., Yamamoto,K. (2006) Redox front formation in fractured crystalline rock: an analogue of matrix diffusion in oxidizing front along water conducting fracture. Geochemistry, Exploration, Environment and Analysis, Vol.6, pp.49-56. (corresponding author)
- Yoshida, H., Yamamoto, K., Yogo, S., Murakami, Y. (2006) An analogue of matrix diffusion enhanced by biogenic redox reaction in fractured sedimentary rock. Journal of Geochemical Exploration, 90, 134-142.
- Yoshida, H., Yamamoto, K., Murakami, Y., Matasuoka, K. (2006) Formation of biogenic iron-oxide nodules in reducing sediments as an analogue of near-field redox reaction products. Physics and Chemistry of the Earth, 31, pp.593-599.
- Yoshida,H., Metcalfe,R., Yamamoto,K., Murakami,Y., Hoshii,D., Kanekiyo,A., Hayashi,T. (2008) Redox front formation in an uplifting sedimentary rock sequence: An analogue for redox-controlling processes in the geosphere around deep geological repositories for radioactive waste. Applied Geochemistry, 23, pp.2364-2381.
- Yoshida, H., Yamamoto, K., Murakami, Y., Katsuta, N., Hayashi, T. (2008) The development of Fenodules surrounding biological material mediated by microorganisms. Environmental Geology, vol. 55, pp. 1363-1374.
- Yoshida, H., Metcalfe, R., Seida, Y., Takahashi, H., Kikuchi, T. (2009) Retardation capacity of altered granitic rock distributed along fractured and faulted zones in the orogenic belt of Japan. Engineering Geology, 106, pp.116-122.
- Yoshida,H., Nishimoto,S., Metcalfe,R. (2010) Altered crystalline rock distributed along groundwater conductive fractures and the retardation capacity in the orogenic field of Japan. Proceedings of the 12th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management ICEM2009, Liverpool, UK, ICEM-16332.
- Yamamoto, K., Yoshida, H., Akagawa, F., Nishimoto, S., Metcalfe, R. (2013) Redox front penetration in the fractured Toki Granite, central Japan: An analogue for redox reaction and redox buffering in fractured crystalline host rocks for repositories of long-lived radioactive waste. Applied Geochemistry, vol. 35, pp. 75-87. (corresponding author)
- Yoshida, H., Maejima, T., Nakajima, S., Nakamura, N., Yoshida, S. (2013) Features of fractures forming flow paths in granitic rock at an LPG storage site in the orogenic field of Japan. Engineering Geology, vol. 152, pp. 77-86.
- Yoshida,H., Metcalfe,R., Ishibashi,M., Minami,M. (2013) Long-term stability of fracture systems and their behaviour as flow-paths in uplifting granitic rocks from the Japanese orogenic field. Geofluids, vol.13, pp.45-55.
- Yoshida, H., Nagatomo, A., Oshima, A., Metcalfe, R. (2014) Geological characterisation of the active Atera Fault in central Japan: Implications for defining fault exclusion criteria in crystalline rocks around radioactive waste repositories. Engineering Geology, vol. 177, pp. 93-103.
- Yoshida,H., Yamamoto,K., Minami,M., Katsuta,N., Sirono,S., Metcalfe,R. (2018) Generalized conditions of spherical carbonate concretion formation around decaying organic matter in early diagenesis. Scientific Reports, 8:6308 |DOI:10.1038/s41598-018-24205-5.

以上

# 佐藤が実施してきたナチュラルアナログ研究とその方便

# 北海道大学 佐藤努

以下のリストに示す文献の内容に基づいて、ナチュラルアナログの研究事例として、オーストラリアクンガウラン鉱床の事例、フィリピンセイルベントナイト鉱床の事例、フィリピンパワラン島の高アルカリ泉での事例などが取り上げられた。また、市民との対話におけるアナログ事例の活用の在り方において、一方的に技術的正当性を示すのではなく、アナログ事例を題材とする物語(ナラティブ)をベースとしたコミュニケーションの重要性について講演があった。

#### 参考文献

- 1 佐藤努・福士圭介 (2003): 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**, 193-200.
- 2 佐藤努(2015):放射性廃棄物処分の安全研究における地盤工学技術者の盲点,地盤工学 会誌,63-6(689),12-15.
- 3 佐藤努(2018): ナチュラルアナログ研究のすゝめ、原子力バックエンド研究、25-2、 113-118.

# フィリピンのアルカリ環境下での相互作用に関するナチュラルアナログ -ルソン島サイリー鉱山でのベントナイトの変質-

講演者:藤井直樹

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

ベントナイト, セメント系材料, 鋼製容器

#### 2. アナログシステムが関連する iFEP の説明

放射性廃棄物処分施設で充填材や構造材として用いられるセメント系材料は、地下水と反応することによるアルカリ間隙水が発生する(F2.3.4.1、F3.2.4.1)。また、TRU 廃棄物の処分場では鋼製廃棄体パッケージ容器が地下水と接触することによって、鉄がイオンとして溶出し、腐食が進行する(F2.3.4.4)。アルカリ間隙水や溶出した鉄イオンがベントナイトへ侵入すると、モンモリロナイトの溶解(F3.2.4.5)を伴いベントナイトが変質し(F3.2.4.6、F3.2.4.7)、緩衝材(F3.1.2)に求められている膨潤性や低透水性等の機能が喪失する可能性が考えられる。

- F2.3.4.1 pH条件 (パッケージ化された廃棄物)
- F2.3.4.4 腐食 (パッケージ化された廃棄物)
- F3.1.2 緩衝材/埋め戻し材
- F3.2.4.1 pH 条件(処分場)
- F3.2.4.5 溶解(処分場)
- F3.2.4.6 鉱物組成の変化(処分場)
- F3.2.4.7 沈殿反応(処分場)

#### 3. アナログ事例の地球科学的特性の概要説明

TRU廃棄物の処分環境におけるHFSCの浸出水相当の高アルカリ性流体が天然でみられる ナチュラルアナログサイトとして、大規模なオフィオライトが分布し、蛇紋岩化作用に伴 うアルカリ地下水の湧水がみられるフィリピンのルソン島北西部とパラワン島中部が挙げ られる。

ルソン島北西部のサイリー(Saile)鉱山のナチュラルアナログでは、続成作用により自生した天然のベントナイトにアルカリ地下水との長期にわたり浸出していたとみられる痕跡として、ベントナイトにつながる断裂帯の割れ目の外側の脈状の蛇紋石と内側の方解石の充填、変質鉱物中のカリ長石、層理面をコーティングする Mn 鉱物の存在、重金属元素や軽希土類元素の濃集を確認した。

このようなアルカリ地下水との長期にわたる相互作用によって、ベントナイトと枕状溶岩との境界部に方解石の沈殿を伴う白色のベントナイト層のアルカリ影響領域を確認した。このベントナイト層を詳細に分析した結果、カリ長石、Ca-沸石、シリカ鉱物に加え、

Fe, Mg に富むスメクタイト系粘土鉱物が二次鉱物みられる明確なアルカリ変質に伴う変質帯を確認したが変質領域は最大でも 5mm に限定されていた。アルカリ変質帯のフロントには、Fe に富むスメクタイト系のノントロナイトとその共生鉱物とみられるゲータイトが密度の高い鉄濃集帯を形成しており、これらの二次鉱物のクロッギングにより物質移行・反応が抑制され、その先のベントナイトは未変質のまま残存しているもの考えている。

さらには、トレンチで確認したこのようなアルカリ地下水との相互作用は、ベントナイト 鉱床のいたるところで生じていたと推測されるが、ベントナイトが大規模にアルカリ変質 している露頭は一切見られないことから、断裂系が発達したオフィオライトの基盤の上に 堆積し、また今現在も活発に湧出している高アルカリ地下水と過去に接触していたにもか かわらず、処分場の評価期間をはるかに超える長期間ベントナイト鉱床は維持されている ことをこのベントナイト鉱床は示している。

ただし、Saile 鉱山のナチュラルアナログサイトでは既にアルカリ地下水の供給は止まって

いるため、相互作用によるアルカリ変質反応後の痕跡は観察できるが、アルカリ地下水の水質や浸出時の環境条件に加えアルカリとの反応時間も明確でないため、アルカリの条件や溶解ー沈殿ー結晶化に至る変質プロセスの評価が困難であった。そのため、現在もアルカリ性地下水が流出している候補サイトを探査した。その結果、苦鉄質の堆積物にアルカリ地下水が浸出し、先の Saile 鉱山のナチュラルアナログでもみられた高アルカリ環境下における二次鉱物としての Fe、Mg に富むスメクタイト系の生成物を確認した候補サイトがパラワン島中部のナラ(Narra)地区のナチュラルアナログサイトである。

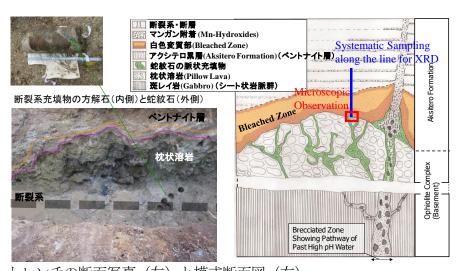
#### 4. 安全性に関わる主要な見解

フィリピンルソン島の Saile 鉱山のナチュラルアナログから、高アルカリ地下水環境下でのベントナイトのアルカリ変質反応は、(1)数 mm に制限されていたアルカリ変質帯の規模、(2)変質鉱物の生成プロセスおよび、(3)基本物性、(4)フィールドのマクロな観点から考察すると、ベントナイト系緩衝材に求められる諸特性の著しい劣化が確認されないことから、高アルカリ地下水環境下でもベントナイトの長期健全性が保たれるものと評価できる。

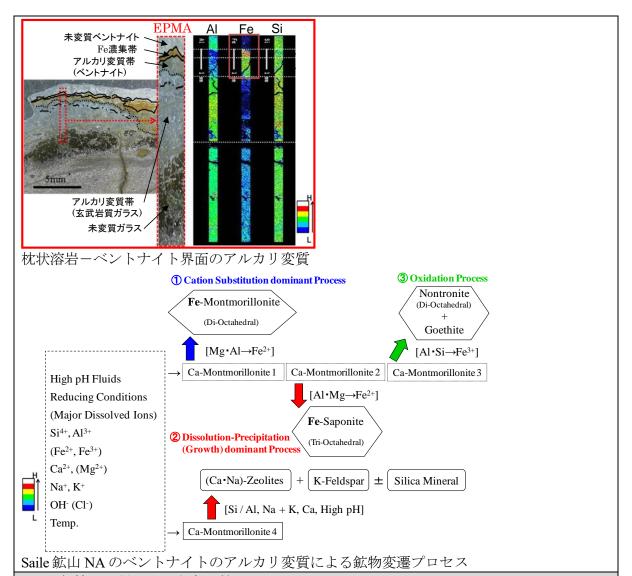
# 5. アナログの利用限界に関する概要

Saile 鉱山のナチュラルアナログサイトでは既にアルカリ地下水の供給は止まっているため、相互作用によるアルカリ変質反応後の痕跡は観察できるが、アルカリ地下水の水質や浸出時の環境条件に加えアルカリとの反応時間も明確でない。pH や Fe 濃度が異なる条件でのベントナイトのアルカリ変質のアナログとみるのは注意を要する。また、相互作用の結果として生成した二次鉱物は同定できるが、溶解ー沈殿ー結晶化に至る変質プロセスは不明確である。

#### 6. システムを表す図表



トレンチの断面写真(左)と模式断面図(右)



#### 7. 詳細情報が得られる参考文献リスト

Fujii, N., Arcilla, C.A., Yamakawa, M., Pascua, C., Namiki, K., Sato, T., Shikazono, N and Alexander W.R. (2011). Natural Analogue Studies of Bentonite Reaction Under Hyperalkaline Conditions: Overview of Ongoing Work at the Zambales Ophiolite, Philippines. ASME 2010 13th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management, ICEM2010-40022, pp.41-50. https://doi.org/10.1115/ICEM2010-40022.

(公財) 原子力環境整備促進・資金管理センター (2013). 平成 24 年度放射性廃棄物共通技術調査等事業 放射性廃棄物重要基礎技術研究調査 多重バリアの長期安定性に関する基礎情報の収集及び整備 平成19年度~平成24年度のとりまとめ報告書.

藤井直樹,山川稔,鹿園直達,佐藤努 (2014). 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(10),pp.361-375. https://doi.org/10.5575/geosoc.2014.0036.

# フィリピンナラ地区のアルカリ環境における二次生成物の生成

講演者:新橋美里

タイトル フィリピンナラ地区のアルカリ環境における二次生成物の生成

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

ベントナイト, セメント系材料

#### 2. アナログシステムが関連する iFEP の説明

放射性廃棄物処分施設で用いられるセメント系材料は、地下水と反応することによるアルカリ間隙水が発生する (F2.3.4.1, F3.2.4.1)。アルカリ間隙水がベントナイトへ侵入すると、ベントナイトが変質することが考えられる (F3.2.4.6, F3.2.4.7)。

- F2.3.4.1 pH 条件 (パッケージ化された廃棄物)
- F3.2.4.1 pH条件(処分場)
- F3.2.4.6 鉱物組成の変化(処分場)
- F3.2.4.7 沈殿反応(処分場)

# 3. アナログ事例の地球科学的特性の概要説明

フィリピンナラ地区では、オフィオライトと天水の反応により生成した Ca-OH タイプのアルカリ水 (pH>11) と堆積物の相互作用が確認されている (Shimbashi et al., 2018)。堆積物は蛇紋岩と斑レイ岩が混在したものであり、約 15,000 年前より堆積した (Shimbashi et al., 2020)。堆積環境は海水域から淡水域へ推移しており、堆積環境に応じて二次生成物が変化していることが認められた。具体的には、層間に一部水酸化物シートを有するノントロナイトは、海水の侵入がある条件における堆積物とアルカリ水との反応により生じたことが考えられた。堆積環境が淡水域に推移した後は、海水の侵入がない条件における堆積物とアルカリ水の相互作用により、10,000 年以内に Fe や Mg を含有する粘土や 14 Å トバモライトが生成していた (Shimbashi et al., 2020, 2022)。Fe や Mg を含有する粘土は、不完全な水酸化物シートと交換性 Ca イオンを 2:1 層の層間に含む構造をしており、アルカリ水と堆積物の相互作用が進むにつれ、層間の水酸化物シートが徐々に減少する等の鉱物学的変化が認められた。また、Fe や Mg を含有する粘土中の Fe は元々2 価であったものの、試料採取の際に酸化した可能性が示された (Shimbashi et al., 2022)。

本調査地における層間に不完全な水酸化物シートを有するスメクタイト様鉱物の生成は、放射性廃棄物処分施設のセメント系材料付近におけるベントナイトのアルカリ変質によっても層間に不完全な水酸化物シートを有するスメクタイト様鉱物が生成し得ることを示唆する(Shimbashi et al., in press)。これは、セメント系材料と粘土岩の相互作用に関する既往の原位置試験において、層間に  $Mg(OH)_2$  を有する Mg 含有粘土の生成が議論されている先行研究と整合的である(Lerouge et al., 2017)。一方、本調査地における 14 Å トバモライトの生成より、セメント系材料付近におけるベントナイトのアルカリ変質によって 14 Å トバモライトが生成し得ることが示唆された(Shimbashi et al., in press)。しかし、ベントナイトや粘土のアルカリ変質を調査した既往の実験では、14 Å トバモライトの生成は報告されていない(Shimbashi et al., in press and references therein)。これは、準安定な C-S-H 等は比較的短期間で生成が認められないためと考えられる。本調査地における 14 Å トバモライトの生成に要した期間(10,000 年以内)を考慮すると、放射性廃棄物処分施設におけるベントナイトの性能評価では、C-S-H から 14 Å トバモライトへの相変化を考慮することが重要と考えられる(Shimbashi et al., in press)。

#### 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

- Lerouge, C., Gaboreau, S., Grangeon, S., Claret, F., Warmont, F., Jenni, A., et al. (2017). In situ interactions between opalinus clay and low alkali concrete. Physics and Chemistry of the Earth, 99, 3–21.
- Shimbashi, M., Sato, T., Yamakawa, M., Fujii, N. & Otake, T. (2018). Formation of Fe-and Mg-rich smectite under hyperalkaline conditions at Narra in Palawan, the Philippines. *Minerals*, 8(4), 155.
- Shimbashi, M., Yokoyama, S., Kikuchi, R., Otake, T. & Sato, T. (2022). Characteristics and formation pathways of iron- and magnesium-silicate-hydrates and smectites under natural alkaline conditions. *Clays and Clay Minerals*, 70(4), 492–513.
- Shimbashi, M., Yokoyama, S., Sato, T. (in press). Review of secondary phases formed under natural alkaline conditions at low temperatures and implications for cement–bentonite interactions in radioactive waste repositories. *Clays and Clay Minerals*.
- Shimbashi, M., Yokoyama, S., Watanabe, Y., Sato, T., Otake, T., Kikuchi, R., et al. (2020). Formation of natural silicate hydrates by the interaction of alkaline seepage and sediments derived from serpentinized ultramafic rocks at Narra, Palawan, the Philippines. *Minerals*, 10(8), 719.

# パラワン島ナラ地区の高アルカリ環境における火山ガラスの変質と溶解速度

#### 講演者: 菊池亮佑

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

ガラス固化体, セメント系材料

#### 2. アナログシステムが関連する iFEP の説明

放射性廃棄物処分施設で用いられるセメント系材料は、地下水と反応することによるアルカリ間隙水が発生する(F2.3.4.1, F.3.2.4.1)。また、地下に埋設されたオーバーパックは地下水と接触することによって、鉄がイオンとして溶出し、腐食が進行する(F2.3.4.4)。アルカリ間隙水や溶出した鉄イオンがガラス固化体と接触すると、ガラスの溶解速度が増加し(F2.4.1.2, F3.2.4.5)、放射性核種の移行抑制効果が早期に喪失する可能性が考えられる。

- F2.3.4.1 pH条件(パッケージ化された廃棄物)
- F2.3.4.4 腐食 (パッケージ化された廃棄物)
- F2.4.1.2 溶解 (廃棄体)
- F3.2.4.1 pH条件(処分場)
- F3.2.4.5 溶解(処分場)

#### 3. アナログ事例の地球科学的特性の概要説明

フィリピン国パラワン島ナラ地区(9°12′14″N, 118°16′51″E)では、オフィオライトと天水の反応により生成した Ca-OH タイプの高アルカリ水(pH > 11)と堆積物の相互作用によって、Mg や Fe に富んだスメクタイト様鉱物の生成が確認されている(Shimbashi et al., 2018, 2022)。堆積物は基盤岩である蛇紋岩の砕屑物を主とし、約 15,000 年前より堆積していることが  $^{14}$ C 年代測定を基に推定されており、堆積環境も海水域から淡水域へ推移したことが示唆されている(Shimbashi et al., 2020)。堆積物の一部に見られる火山灰層(堆積年代が4516±73 から 3445±73 年前と推定)では、流紋岩質マグマを起源とする火山ガラスの粒子が含まれている(Kikuchi et al. 2022)。バブルウォール状の特徴的な粒子外形を保存しつつも、ガラス表面近傍では高アルカリ水との相互作用による変質と二次鉱物の生成が確認される。二次鉱物は周囲の蛇紋岩砕屑物中でも確認される Fe や Mg に富んだスメクタイト様鉱物に加えて、Si や Al に富んだ組成のスメクタイト様鉱物やその前駆体と考えられる低結晶質かつ 200-300 Å程度のナノ粒子が混在している。ガラスの初期粒径および反応時間(≒堆積年代)を基にすると、ガラスの溶解速度は最大でも  $10^{-11.1}$  mol  $m^2$   $s^{-1}$  と推定される。

# 4. 安全性に関わる主要な見解

先行研究におけるガラス溶解試験では高アルカリ環境で初期溶解速度に近い溶解速度を維持するケースが報告されているが、本事例の 4000 年程度の長期にわたって高アルカリ水による変質を受けたガラスでは、pH11における初期溶解速度よりも約2.5桁低い値を示した。ガラス周囲に形成した二次鉱物による被覆や界面近傍での局所的な水質の変化が溶解速度の抑制に寄与していることが考えられる。また、火山ガラスの周囲で観察された二次鉱物種は、高アルカリ環境でのガラスの溶解実験で報告例の多い沸石類ではなくスメクタイトに類するものであり、これは間隙水の化学組成と既存の熱力学的データベースから生成が予測される鉱物種と比較的良く整合していると言える。

#### 5. アナログの利用限界に関する概要

本事例の反応場における水質は低アルカリセメント浸出水相当である一方,普通ポルトランドセメントから初期に浸出してくる水 (pH12.5-13 程度) との相互作用は,より高 pH環境を形成すると予想される。また,火山ガラスの化学組成は珪長質であり,ガラス固化体として用いられるホウケイ酸ガラスよりも一般的に溶解速度が低い傾向がある。

#### 6. システムを表す図表

(準備中)

# 7. 詳細情報が得られる参考文献リスト

- Kikuchi, R., Sato, T., Fujii, N., Shimbashi, M., & Arcilla, C. A. (2022). Natural glass alteration under a hyperalkaline condition for about 4000 years. *Scientific reports*, *12*(1), 16012. https://doi.org/10.1038/s41598-022-20482-3
- Shimbashi, M., Sato, T., Yamakawa, M., Fujii, N. & Otake, T. (2018). Formation of Fe-and Mg-rich smectite under hyperalkaline conditions at Narra in Palawan, the Philippines. *Minerals*, 8(4), 155. https://doi.org/10.3390/min8040155.
- Shimbashi, M., Yokoyama, S., Kikuchi, R., Otake, T. & Sato, T. (2022). Characteristics and formation pathways of iron- and magnesium-silicate-hydrates and smectites under natural alkaline conditions. *Clays and Clay Minerals*, 70(4), 492–513. https://doi.org/10.1007/s42860-022-00197-2.
- Shimbashi, M., Yokoyama, S., Watanabe, Y., Sato, T., Otake, T., Kikuchi, R., et al. (2020). Formation of natural silicate hydrates by the interaction of alkaline seepage and sediments derived from serpentinized ultramafic rocks at Narra, Palawan, the Philippines. *Minerals*, 10(8), 719.

# 水理に関するナチュラルアナログ的研究

講演者: 竹内真司

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

ニアフィールド、母岩

#### 2. アナログシステムが関連する iFEP の説明

処分場の建設 (F1.1.5) に伴って掘削損傷領域および掘削影響領域 (F3.1.6) (以下, EDZ) が形成される。これらの領域は周辺母岩よりも透水性が高くなることが予想され、処分場周辺の核種の選択的な移行経路 (F3.3.1) となると考えられる。また, EDZ が母岩中の亀裂や断層と交差する場合は、母岩中の移行経路 (F4.1.6) を形成することとなる。これらの経路の形成は、漏出した放射性核種の選択的な移行経路となることが懸念される。

- F1.1.5 建設
- F3.1.6 掘削損傷領域および掘削影響領域
- F3.3.1 移行経路(処分場)
- F4.3.1 移行経路(母岩)

#### 3. アナログ事例の地球科学的特性の概要説明

葛根田花崗岩(0.2Ma), 滝谷花崗岩(1 Ma), 土岐花崗岩(67Ma) など, 我が国には様々な形成年代を持つ花崗岩が分布する。これらの花崗岩体中にはいずれも亀裂形成と鉱物充填を経験していることが Yoshida et al.(2013)によって明らかとされた。すなわち, ①熱水循環による亀裂中への高温鉱物(vermicular chlorite)を伴う板状の方解石の形成, ②花崗岩体の上昇中の高圧流体による板状方解石への亀裂形成と微細な方解石の形成, ③岩体上昇後の低温の天水侵入を起源とする板状方解石の亀裂充填である(Yoshida et al.,2013)。 Yoshid et al.(2013)は, これらの亀裂は岩体貫入の初期に形成され, その後の岩体上昇時には新たな亀裂が形成されることなく, 初生的な亀裂に鉱物が充填されるというモデルを提唱した。

一方,白亜紀~古第三紀の付加体(堆積岩)である四万十帯については Ono et al.(2016)によるコア観察等により,付加体中の深部の亀裂には方解石で充填された亀裂が多く認められ、浅部ではこれが地表水により溶解されていることが確認された。

さらに、新第三紀の付加体である葉山層群中に多数観察される炭酸塩コンクリーションは低透水性で高い硬度を有することが明らかとなっている(竹内ほか、2022)。これらの中には、断層破砕帯中で破壊を受けたものやコンクリーションそのものが断層による変位を受けているものが観察される。しかしながらこれらのコンクリーションの亀裂部は方解石等で充填されていることが確認されている。このことは、わが国に広く分布する付加体中での地層処分の可能性を示唆している。同様の亀裂充填構造は新第三紀の内湾的環境で堆積した瑞浪層群や関東山地の五日市盆地の新第三系などにも確認されている。

炭酸塩コンクリーションは、Yoshida et al.(2015, 2018)によりその形成プロセスが明らかにされてきており、このプロセスを応用した人工材料が吉田らによって開発された。この人工のコンクリーション化剤は地下施設周辺の EDZ やボアホールの超長期のシーリング材としての適用が期待される。人工コンクリーション化剤の地層処分場における坑道周辺のEDZへの適用が実現すれば、ガラス固化体、オーバーパック、緩衝材に次ぐ、第4の人工バリアとしての利用が期待される。

#### 4. 安全性に関わる主要な見解

岩石中の透水性亀裂は天然の鉱物-水反応により、長期間にわたってシーリングされることが期待される。

天然のコンクリーションが数百万年から数千万年間の超長期の安定性を有することから、人工のコンクリーション化剤も同様のシーリング性能を維持することが期待される。

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

- H. Yoshida, R. Metcalfe, M. Ishibashi and M. Minami (2013): Long-term stability of fracture systems and their behaviour as flow paths in uplifting granitic rocks from the Japanese orogenic field, Goefluids, 13, 45-55.
- H. Yoshida, A. Ujihara, M. Minami, Y. Asahara, N. Katsuta, K. Yamamoto, S. Sirono, I Maruyama, S. Nishimoto & R. Metcalfe (2015): Early post-mortem formation of carbonate concretions around tusk-shells over week-month timescales, Scientific reports, DOI: 10.1038/srep14123
- H. Yoshida, K. Yamamoto, M. Minami, N. Katsuta, S. Shirono, & R. Metcalfe (2018): Generalized conditions of spherical carbonate concretion formation around decaying organic matter in early diagenesis, Scientific reports, DOI:10.1038/s41598-018-24205-5
- T. Ono, H. Yoshida & R. Metcalfe (2016): Use of fracture filling mineral assemblages for characterizing the formation process of an accretionary complex: an example from the Shimanto Belt southern Kyushu, Japan, J. Struct. Geol. 87 81-94.

竹内真司,後藤 慧,中村祥子,吉田英一 (2022) : 炭酸カルシウムコンクリーションの水理・力学特性,地質学雑誌128,371-375.

# スウェーデン・キルナ鉱山における鉄ーベントナイト相互作用に関する ナチュラルアナログ研究

講演者:根本脩平

## 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

高レベル放射性廃棄物,緩衝材,炭素鋼オーバーパック

## 2. アナログシステムが関連する NUMO-FEP の説明

地下深部に埋設されたオーバーパックは、処分場の閉鎖後に地下水と接触することによって、鉄がイオンとして溶出し、腐食が進行する (F2.3.4.4)。緩衝材の主成分であるベントナイトは、溶出した鉄イオンと化学反応し、変質することで (F2.3.4.7, F2.3.4.12)、緩衝材の膨潤性や収着性などの性能を低下させる可能性がある (NUMO, 2021)。

F2.3.4.4 腐食 (パッケージ化された廃棄物)

F2.3.4.7 鉱物組成の変化(パッケージ化された廃棄物)

F2.3.4.12 化学的プロセスがその他のプロセスに与える影響(パッケージ化された廃棄物)

## 3. アナログ事例の地球科学的特性の概要説明

スウェーデン北部に位置するキルナ鉱山はヨーロッパの主要な鉄鉱床であるが、一部でベントナイトが確認されている。鉄鉱床は 15-20 億年前にダイクが、トラキ安山岩及び流紋岩に貫入することによって形成された。ベントナイトは地表から約 1,200 m の深さに分布しているが、塊状あるいは断層に伴って分布しており、空間的な連続性は乏しい(Martinsson et al., 2016; Rieger, 2017)。

本研究で採取した試料は、主に磁鉄鉱、黒雲母、Ca型スメクタイト(ベントナイトの主成分)により構成されている。ベントナイトは、トラキ安山岩あるいは流紋岩が熱水変質することによって生成したものと考えられている。試料の観察に基づくと、ベントナイトと磁鉄鉱の界面は、磁鉄鉱と黒雲母を主要構成鉱物とする鉄鉱床と白色のベントナイトが明瞭な境界で接触している場合と、白色のベントナイト中に磁鉄鉱の結晶が単独で分散している場合に大別できる。これらの磁鉄鉱とベントナイトの界面をSEM-EDS、EPMA及びTEMで調べたが、ベントナイト中の鉄の濃度は磁鉄鉱との界面でも、界面から離れた位置と同じ程度か、わずかに増加する程度で、鉱物学的にスメクタイトが変質した形跡や、交換性陽イオンがFeイオンで置換された形跡は確認されなかった。

磁鉄鉱とベントナイトの接触期間を推定するため、磁鉄鉱と接触するスメクタイト及び黒雲母に対して K-Ar 年代測定を行った。スメクタイトの K-Ar 年代は 3.5 億年前であった。磁鉄鉱はベントナイトよりも古く 15~20 億年前に形成されたものとされている(Rieger, 2017)。

このように、磁鉄鉱とスメクタイトが数億年にわたり接触しているにも関わらず、スメクタイトへの鉄イオンの拡散は確認されず、ベントナイトの変質が進んでいない結果が得られた(検討継続中)(根本ほか、2023)。

# 4. 安全性に関わる主要な見解

炭素鋼の主要な腐食生成物である磁鉄鉱は、還元的かつ水飽和したベントナイト中でも安定しており、Fe イオンの溶出が極めて少ないため、スメクタイトとの反応は起こりにくく、緩衝材中のスメクタイトが磁鉄鉱によって変質することは考えにくい。しかし、金属である炭素鋼が腐食する場合、Fe イオンの供給量が磁鉄鉱の溶解よりも多く、スメクタイトとの反応は起こりやすい。したがって、緩衝材中のスメクタイトは磁鉄鉱によって変質しにくく、結果は異なると考えられる。

## 5. アナログの利用限界に関する概要

本事例は、腐食生成物とベントナイトの相互作用によるものであり、炭素鋼の腐食時に生成される鉄イオンとの反応は含まれていない。したがって、炭素鋼の腐食が十分進み、オ

ーバーパックが厚い腐食生成物の層で覆われた状態に対してのみ適用できるものと考えられる。

埋設直後の金属表面と緩衝材が接触する,あるいは腐食生成物の層が薄い状況とは異なる。

# ベントナイト内部における微生物の生存挙動について ー幌延 URL の原位置腐食試験や月布ベントナイト原鉱石の研究事例ー

天野由記1, 別部光里1, 大野宏和2, 佐藤智文1, 伊藤雅和3, 谷口直樹1

<sup>1</sup>日本原子力研究開発機構 核燃料サイクル工学研究所, <sup>2</sup>日本原子力研究開発機構 幌延深地層研究センター, <sup>3</sup>クニミネ工業株式会社

## 講演者: 天野由記

タイトル ベントナイト内部における微生物の生存挙動について - 月布ベントナイト原鉱 石の研究事例-

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

高レベル放射性廃棄物、緩衝材、炭素鋼オーバーパック、母岩

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

本事例は、山形県大江町月布ベントナイト鉱山梅ノ木田鉱床における月布ベントナイト鉱 |山の坑道壁面から採取された岩石ブロック試料の物理特性および微生物特性調査に基づくも のである。採取対象のベントナイト層は、ベントナイト鉱石中のモンモリロナイト含有層が 異なるとされている 3 層を対象とし、クニゲル V1 の原料として使用される 29 番層および 31 番層と、クニゲル V1 よりモンモリロナイト含有率が低いとされる1番層から採取した。ベン トナイト性状はいずれもNa型、モンモリロナイト含有量は1番層で28%、29番層で34-36%、 31 番層で 38-48%,メチレンブルー吸着量はそれぞれ 42,52-54,58-72 mmol/100g,乾燥密度 は 1.9, 1.6, 1.7-2.0g/cm³, 空隙率は 24, 34, 24-35%, 細孔径分布の中央値は 0.06, 0.2, 0.05 µm, 31 番層から採取した試料は二次鉱物の脈の貫入が認められるなど,不均質性を有してい た。微生物分析の結果,培養法に基づく生菌数は 1 および 29 番層で検出されたが,31 番層で は検出されなかった。対象試料中の DNA 解析の結果から,すべての原鉱石及び緩衝材ブロッ クの試料内部で低い現存量を示し、複数種の微生物が存在していたが多様性は低く、構成種 として貧栄養・低水分等極限環境下で生存可能な種や芽胞を形成する種が優占種として検出 されたことから、微生物活性は高くないと推察された。また、微生物活性を抑制する条件と して高乾燥密度、低水分量、低空隙率等が重要であることが示唆された。さらに、市販のべ ントナイトの微生物群集は原鉱石と比較して多様性が高く微生物が混入した可能性があるこ と、高密度の緩衝材ブロックに加工することにより微生物増殖が抑制される可能性があるこ とが示された。

# 4. 安全性に関わる主要な見解

高乾燥密度で空隙サイズが極めて小さい条件が長期にわたって形成される環境下では、ベントナイト中の微生物活性は非常に低い状態で保持されると推定される。

## 5. アナログの利用限界に関する概要

本事例は、月布ベントナイト鉱床を対象として、限られた試料数の分析結果から得られた ものであり、乾燥密度、空隙分布、モンモリロナイト含有率、地層年代等様々な条件におい てデータを拡充することで、信頼性を向上させることができると考える。

## 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

日本原子力研究開発機構・原子力環境整備促進・資金管理センター, 令和 3 年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 ニアフィールドシステム評価確証技術開発, 2022.

日本原子力研究開発機構・原子力環境整備促進・資金管理センター, 令和 4 年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 ニアフィールドシステム評価確証技術開発, 2023.

Hernsdorf et al. (2017): Potential for microbial H<sub>2</sub> and metal transformations associated with novel bacteria and archaea in deep terrestrial subsurface sediments. The ISME J. 11, 1915-1929.

核燃料サイクル開発機構(1999): わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性-地層処分研究開発第2次取りまとめ-分冊2. 核燃料サイクル開発機構技術報告書. JNC TN1400 99-023.

本研究は、経済産業省資源エネルギー庁の委託事業「高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業(JPJ007597); 平成 30 年度~令和 4 年度 ニアフィールドシステム評価確証技術開発」の成果の一部である。

# 人工バリアの長期挙動に関するナチュラルアナログ研究

三ツ井誠一郎\*

\*国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

#### 1. はじめに

地層処分の評価では、数百年から数万年以上の極めて長い時間スケールを扱う。評価に用いる予測モデルを開発するため、様々な実験的研究が行われているが、我々が実施できる実験は、間もなく実験期間100年を迎える「ピッチドロップ実験(ピッチと呼ばれる極めて粘性の高い流体の滴下を観察する現時点で世界最長の科学実験とされる)」<sup>1)</sup>のような特殊な例を除くと、長くても10年から20年程度であり、地層処分で想定される長期の現象を十分には模擬できていない可能性がある。ナチュラルアナログ研究は、地層処分で想定される現象に類似した自然現象の研究により、長期の時間スケールで進行する現象の理解や、実験等に基づいて作成したモデル等の長期予測への適用性の評価を目指すものである<sup>2)</sup>。

動力炉・核燃料開発事業団(平成 10 年に核燃料サイクル開発機構に改組後、日本原子力研究所と統合し、平成 17 年より日本原子力研究開発機構)では、昭和 61 年度(1986 年度)に天然バリアと人工バリアを対象としたナチュラルアナログ研究が開始された。ここでは、我々がこれまで取り組んできた人工バリアの長期挙動に関するナチュラルアナログ研究の概要を紹介する。

## 2. 人工バリアと対象としたナチュラルアナログ

図1に例示したように,ガラス 固化体の溶解/変質,オーバーパックの腐食,緩衝材の変質のナチュラルアナログとして,それぞれ天然火山ガラスの変質,考古学的金属製品等の腐食,天然ベントナイト等の変質を対象とした研究を実施してきた。以下にそれぞれの研究内容を示す。

# (1)天然火山ガラスの変質

・降下火砕堆積物中の火山ガラス の変質 3,4)

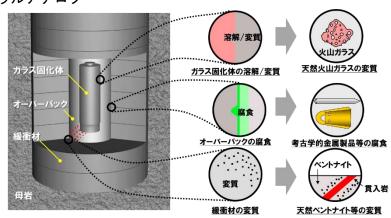


図1 人工バリアとナチュラルアナログの組合せの例

降下火砕堆積物(スコリア層)に含まれる火山ガラス(変質期間 280 年から 45000 年)を対象に、雨水由来の地下水との接触による変質事例を調査した。火山ガラスの表面には厚さ数  $\mu$  m 程度の変質層が生成しており、地下水中の溶存ケイ酸濃度の増加に伴って変質速度が低下すること、溶存ケイ酸濃度の高い条件では変質鉱物としてスメクタイトが観察されることなどの結果を得た。また、模擬廃棄物ガラスと合成火山ガラスを用いた室内浸出試験を行い、両者の溶解・変質挙動に大きな違いはなく、火山ガラスを対象としたナチュラルアナロ

グ研究がガラス固化体の長期的な溶解/変質挙動の評価に活用できることを確認した。

・泥質層中の火山ガラスの変質 5,6)

緩衝材中のガラス固化体の変質のナチュラルアナログとして、泥質層中の火山ガラス(変質期間 90 万年から 100 万年)の変質事例を調査した。数十万年を超える変質期間にも係わらずガラスが残存しており、ガラス屈折率の測定結果等から全体的に水和変質を被っていることが確認できた。溶存ケイ酸濃度が高い事例であり、処分環境で高い溶存ケイ酸濃度となる場合はガラス固化体の健全性が長期間維持されることを示唆する。

# (2)考古学的金属製品等の腐食

・土壌埋設水道管の腐食 7

土壌中に埋設されていた鋳鉄製水道管(埋設期間 20 年から 66 年)の腐食事例を調査した。 水道管の実測の最大腐食深さは 3mm 程度であり、最大腐食深さと埋設期間の関係が概ねべき 乗則で表現できることを確認した。

・考古学的鉄製品の腐食 8,9,10)

土壌中に埋蔵されていた考古学的鉄製品(埋蔵期間 400 年から 2000 年)の腐食事例を調査した。酸化的な埋蔵環境から出土した鉄製品と較べ、還元的な埋蔵環境から出土した鉄製品の腐食量は小さくなる傾向が認められた。また、一部の腐食事例においては腐食生成物皮膜による腐食反応抑制効果の考え方が数百年を超える長期の時間スケールにおいても適用可能であることを示唆する結果を得た。

・考古学的銅製品の腐食 11,12)

土壌中に埋蔵されていた考古学的青銅製品(埋蔵期間 2000 年)の腐食事例を調査した。青銅器(銅鐸、銅戈)は、青銅器一般にみられる緑青からなる腐食生成物に覆われておらず、外観を見る限りは比較的良好な遺存状態であった。また、土壌中の青銅器由来成分の分布を調査した結果、Cu及びPbは、埋納坑から少なくとも2m程度離れた場所まで移動しているのに対し、Snは青銅器近傍に残存する傾向があることが確認できた。Snの挙動は青銅器の遺存状態に影響している可能性がある。

#### (3)緩衝材の変質

イライト化 13,14)

熱による天然ベントナイトや粘土質岩中のモンモリロナイトのイライト化事例を調査した。 イライト化に関するみかけの活性化エネルギーを得るとともに、100℃以下の温度条件ではイ ライト化の可能性が低いことが示唆された。

鉄製品の影響による変質 15,16)

考古学的鉄製品と長期間接触していた土壌の変質事例を調査した。酸化的な環境、還元的な環境のいずれについても、腐食生成物の沈殿により土壌が固結(セメンテーション)している状態が確認された。層状ケイ酸塩鉱物と腐食生成物の界面の分析では層状ケイ酸塩鉱物に明瞭な変質が認められず、層状ケイ酸塩鉱物の鉱物学的な変質が生じていないことを示唆する結果が得られた。

## 参考文献

- 1) Edgeworth, R. et al., Eur. J. Phys. pp. 198–200 (1984).
- 2) 湯佐泰久、資源と素材、118、631-640(2002).

- 3) 湯佐泰久他, 日本原子力学会誌, 33, 890-905 (1991).
- 4) 三ツ井誠一郎他, 放射性廃棄物研究, 2,105-119 (1996).
- 5) Kamei, G., et al., Appl Geochem, 15, 141–155 (2000).
- 6) Mitsui, S., et al., Proceedings of ENS Topseal '99, Volume II, 344–348 (1999).
- 7) 炭山守男他, 研究開発報告書類 JNC-TJ8400 99-042(1999).
- 8) 核燃料サイクル開発機構, 高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築-平成17年取りまとめ-分冊2: 工学技術の開発, JNC TN1400 2005-015 (2004).
- 9) Mitsui, S., et al., Mater. Res. Soc. Symp. Proc. 1475, 545–550 (2012).
- 10)三ツ井誠一郎,一般国道9号(鳥取西道路)の改築に伴う埋蔵文化財発掘調査報告書,17(2015).
- 11)三ツ井誠一郎他,下田遺跡,(財)大阪府文化財調査研究センター調査報告書,18,371-381 (1996).
- 12)三ツ井誠一郎他, 文化財科学, 77, 1-14 (2018).
- 13) Kamei, G., et al., Mater. Res. Soc. Symp. Proc., 257, 505–512 (1992).
- 14) Kamei, G., et al., Journal of Physics and Chemistry of Solids, 66, 612–614 (2005).
- 15)日本原子力研究開発機構,原子力環境整備促進・資金管理センター,高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業ニアフィールドシステム評価確証技術開発 平成30年度~令和4年度取りまとめ報告書(2023).
- 16)柳田明進他, 文化財論叢 V, 奈良文化財研究所, 843-856 (2023).

# 埋蔵環境が出土鉄製文化財の腐食状態に及ぼす影響 -平城宮跡および鷹島海底遺跡での調査を例に

講演者:柳田明進

タイトル 平城宮跡における出土鉄製文化財の腐食

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,

高レベル放射性廃棄物、緩衝材、炭素鋼オーバーパック

## 2. アナログシステムが関連する NUMO-FEP の説明

地下深部に埋設されたオーバーパックは、処分場の閉鎖後に水分不飽和の過渡期環境を経て、酸素欠乏環境に移行する過程で地下水と接触することによって(F2.3.4.2)、鉄がイオンとして溶出し、腐食が進行する(F2.3.4.4)。また、緩衝材の主成分であるベントナイトは、溶出した鉄イオンと化学反応し、変質する可能性がある。

- F2.3.4.2 酸化還元条件 (パッケージ化された廃棄物)
- F2.3.4.4 腐食 (パッケージ化された廃棄物)
- F2.3.4.7 鉱物組成の変化(パッケージ化された廃棄物)

## 3. アナログ事例の地球科学的特性の概要説明

平城宮跡は奈良市に位置する遺跡であり、奈良時代(710-794年)の政治、行政の中枢施設としての性格を有する。平城宮跡からは主に奈良時代以降に属する鉄製文化財が多数出土している。また、平城宮内では特別史跡として登録されており、遺跡の整備のために30箇所において、ボーリングコアによる地質調査、および水位観測孔での水質調査が実施されている(奈良国立文化財研究所、1979)。水質調査では、1971-1977年に年1回、春、もしくは秋に現地で採水した地下水の電気伝導度、溶存酸素、アニオン、カチオンなど22項目の測定が計測されている。

本研究では平城宮跡の異なる地点から出土した鉄製文化財に対して、XRF、XRD、X線 CT を用いて非破壊にて腐食状態把握するとともに(柳田ほか,2023a;柳田ほか,2023b),腐 食層片に対して顕微ラマン分光分析, SEM-EDX, TEM-EDX を実施し, 既存の環境デー タを利用して鉄製文化財の腐食と埋蔵環境の関係を検討した(日本原子力研究開発機構, 2021;日本原子力研究開発機構,2022;日本原子力研究開発機構,2023)。その結果,酸化的 な環境から出土したと思われる鉄製遺物では金属鉄が残存するものと,しないものが認め られた。 金属鉄が認められる鉄製文化財の腐食層は内部に  $Fe_3O_4$ , その上部に  $\alpha$ -FeOOH が 存在する Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/α-FeOOH の 2 層構造であると推定された。また、鉄と腐食層の界面付近で CI が検出される傾向が認められた。また、金属鉄が残存していないものでは、腐食層から α-FeOOH が検出された。一方で、還元的な環境から出土したと推定される遺物は内部に金 属鉄が残存しており、腐食層は FeCO₃ によって構成されていることが示された。還元環境 から出土した鉄製遺物の X 線 CT 撮像をおこない、腐食層厚さを腐食量と仮定して腐食速 度を算出したところ, 0.008 mm/y を示した。また、いずれの環境においても、腐食生成物 の沈殿より土壌が固結(セメンテーション)している状態が確認された。層状ケイ酸塩鉱 物と腐食生成物の界面の分析では層状ケイ酸塩鉱物に明瞭な変質が認められず、層状ケイ 酸塩鉱物の鉱物学的な変質が生じていないことを示唆する結果が得られた。

## 4. 安全性に関わる主要な見解

埋設直後の過渡期環境のように酸素を含む環境においては、 $\alpha$ -FeOOH、 $Fe_3O_4$ の腐食層が形成されると推測される。また、酸素欠乏環境においては  $FeCO_3$  が形成され、腐食速度は 0.008 mm/y であった。鉄の影響により土壌が固結(セメンテーション)している状態は確認されたものの、層状ケイ酸塩鉱物の明瞭な変質は認められなかった。

# 5. アナログの利用限界に関する概要

本事例では、鉄製文化財の周辺の土質は砂質、粘土質など多様であり、ベントナイト中

での反応でないことを考慮する必要がある。また、考古学アナログでは埋蔵環境が時代と ともに変遷する可能性があることから、埋蔵環境が埋蔵時に変化している可能性があるこ とを考慮してて現象を理解する必要がある。

## 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

奈良国立文化財研究所,平城宮整備調査報告1,奈良国立文化財研究所学報36,1979. 日本原子力研究開発機構,原子力環境整備促進・資金管理センター,令和2年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業ニアフィールドシステム評価確証技術開発報告書 令和3年3月,2021.

日本原子力研究開発機構,原子力環境整備促進・資金管理センター,令和3年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業ニアフィールドシステム評価確証技術開発報告書 令和4年3月,2022.

日本原子力研究開発機構,原子力環境整備促進・資金管理センター,令和4年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業ニアフィールドシステム評価確証技術開発報告書 令和5年3月,2023.

柳田明進,浦蓉子,三ツ井誠一郎,石寺孝充,川喜田竜平,平城宮・京出土鉄製遺物の腐食に及ぼす埋蔵環境の影響 ー埋蔵時における鉄製遺物内部への塩化物塩集積に関する検討ー,文化財論叢 V,奈良文化財研究所,2023a,pp.843-856

柳田明進, 脇谷草一郎, 和田一之輔, 平城宮跡出土鉄製文化財の腐食状態に及ぼす埋蔵環境の影響, 第70回材料と環境討論会 講演集,2023b, pp.23-24

## タイトル 鷹島海底遺跡における出土鉄製文化財の腐食

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,

高レベル放射性廃棄物、緩衝材、炭素鋼オーバーパック

## 2. アナログシステムが関連する NUMO-FEP の説明

地下深部に埋設されたオーバーパックは、処分場の閉鎖後に水分不飽和の過渡期環境を経て、酸素欠乏環境に移行する過程で地下水と接触することによって(F2.3.4.2)、鉄がイオンとして溶出し、腐食が進行する(F2.3.4.4)。また、緩衝材の主成分であるベントナイトは、溶出した鉄イオンと化学反応し、変質する可能性がある。

- F2.3.4.2 酸化還元条件(パッケージ化された廃棄物)
- F2.3.4.4 腐食 (パッケージ化された廃棄物)
- F2.3.4.7 鉱物組成の変化(パッケージ化された廃棄物)

#### 3. アナログ事例の地球科学的特性の概要説明

調査地は長崎県松浦市鷹島の南岸に位置する鷹島海底遺跡である。鷹島の立地する伊万里湾は湾口部が3箇所のみの閉鎖性の強い湾であり、湾内では養殖に伴う餌散布の影響によって、富栄養化の進行が指摘されている。鷹島海底遺跡では蒙古襲来(元寇)の弘安の役(1281年)の暴風雨によって沈没した元軍船に関連する遺物が多数出土しており、船体の一部や冑、刀剣などの金属製品、球形土製品(てつはう)などが出土している。

鷹島海底遺跡から出土した鉄製文化財の腐食に関しては、大澤(大澤:1997、大澤: 2004), 柳田 (柳田: 2018) によって報告されている。また, 鷹島海底遺跡では, 現地海 底の底層海水の EC, DO, pH や堆積物の溶存酸素, ORP, pH などの環境データが報告され ている(髙妻・柳田:2021)。環境調査より,底層海水中の溶存酸素濃度は夏期において 約 4mg/L に低下し,冬期に約 8 mg/L に上昇する挙動を示す。また,堆積物中で溶存酸素 が含まれる深度は年間を通じて表層から約 10 mm であり、堆積物中は概ね酸素が欠乏し た環境と考えられる。鷹島海底遺跡から出土した鉄製文化財は内部の金属鉄が完全に溶 出しており、内部が空洞になっていることから、埋蔵時の腐食速度は高いものと考えら れる。また、表面は厚い CaCO<sub>3</sub> からなるコンクリーションに覆われておいる。このコン クリーションがどのような過程で形成されたかは現在検討中である。 鉄製文化財には 2 タ イプの腐食の形態が認めらえており、一つは腐食生成物として主に α-FeOOH が形成され ているものであり、もう一方は FeS2 などの硫化鉄が形成されているものである。出土位 置と腐食生成物の関係を検討したところ、α-FeOOH が形成されるものは砂質から出土し ていること,硫化鉄が形成されているものはシルトから出土している傾向が認められて いる。また、木製の文化財との複合遺物では、顕著に硫化鉄が形成される傾向があり、 これについては現地での木質試料と炭素鋼を用いた暴露試験においても確認されてい

## 4. 安全性に関わる主要な見解

海底遺跡から出土した鉄製文化財では、多くのもので内部の金属鉄が消失しており、 埋蔵時の腐食速度は高い状態が維持されていたと推測される。また、堆積物の種類や有 機物の有無によって、α-FeOOH が生成する腐食過程と硫化鉄が生成する腐食過程に変化 すると推察される。

## 5. アナログの利用限界に関する概要

本事例は台風による防風というイベントによって沈没した船に関連した鉄製文化財を対象としており、当初の鉄製文化財の埋蔵状態は個々の遺物によって異なると推察される。また、埋蔵されてきた堆積物においても、砂質、シルト質などであることが報告されており、ベントナイト中での反応ではないことを考慮する必要がある。

## 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

大澤正己,鷹島海底遺跡出土木製碇使用円形頭釘の金属学的調査,鷹島海底遺跡 III,鷹島町教育委員会 1996, pp.33-46

大澤正己, 鷹島海底遺跡出土鉄釘の金属学的調査, 鷹島海底遺跡 XI, 鷹島町教育委員会, 2005, pp.97-104

高妻洋成,柳田明進,鷹島海底遺跡における元軍船の現地保存に関する研究,蒙古襲来 沈没船の保存・活用に関する学際研究,琉球大学国際地域創造学部考古学研究室,pp.51-96,2021

柳田明進,埋蔵環境下における金属製遺物の腐食に関する研究,京都大学人間環境学研究科学位論文,2018,pp.74-119

## 地下環境における 15 年間の吹付コンクリート―軽石凝灰岩相互作用

講演者:新橋美里

タイトル 地下環境における15年間の吹付コンクリート―軽石凝灰岩相互作用

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ベントナイト、セメント系材料

## 2. アナログシステムが関連する iFEP の説明

放射性廃棄物処分施設で用いられるセメント系材料は、地下水と反応することによるアルカリ間隙水が発生する(F2.3.4.1, F3.2.4.1)。アルカリ間隙水がベントナイトへ侵入すると、ベントナイトが変質し(F3.2.4.6、F3.2.4.7)、緩衝材の透水性などの性能が変化することが考えられる(F3.2.4.11)。ベントナイトの変質に伴うモンモリロナイトなどの一次鉱物の溶解は、透水性を増加させる方向に働くことが懸念される一方、二次生成物の生成は、間隙を埋めることにより透水性を低下する方向に働く場合がある(横山ら、2011)。

- F2.3.4.1 pH条件(パッケージ化された廃棄物)
- F3.2.4.1 pH条件(処分場)
- F3.2.4.6 鉱物組成の変化(処分場)
- F3.2.4.7 沈殿反応(処分場)
- F3.2.4.11 化学的プロセスがその他のプロセスに与える影響(処分場)

## 3. アナログ事例の地球科学的特性の概要説明

日本原燃株式会社所有の試験空洞では、約 15 年前に岩盤(軽石凝灰岩)にコンクリートが吹付処理されている。この吹付コンクリート―岩盤相互作用の結果、吹付コンクリートと接する数 mm—数 cm の範囲の岩盤において、火山ガラス等の非晶質な初期物質の溶解に伴い、非晶質な C-(A-)S-Hが生成していた。C-(A-)S-Hが生成した層では間隙率の減少が認められた一方、界面より数 mm 以深では間隙率や透水性は変化していないことが明らかとなった。また、岩石の間隙水に対する吹付コンクリートの影響領域は、少なくとも界面より 9 cm に及ぶことが分かった(新橋ら、2023)。

本調査地や既往の知見より、ベントナイトのアルカリ変質反応では C-(A-)S-H からトバモライト等の安定相鉱物への変遷を想定することが必要なものの、低温条件(本調査地の水温 9.7-15°C)であれば、その変遷は少なくとも十数年以降であることが示唆された(新橋ら、2023)。また、本調査地の比較的長期の実測データは、再現解析を実施する際の検証用データにもなる。本調査地の再現解析を実施することは、ベントナイトの性能評価に必要な予測解析を実施するにあたり、考慮すべき二次鉱物の選定や、それらの生成速度の設定の説明性向上に繋がることが期待される(検討継続中)。

# 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

新橋美里, 横山信吾, 渡邊保貴, 吉川絵麻, 湊大輔. (2023). 15年間吹付コンクリートに接した 軽石凝灰岩のアルカリ影響. 原子力バックエンド研究, 30(2), 43-57.

横山信吾,中村邦彦,田中幸久,廣永道彦. (2011). 放射性廃棄物処分におけるベントナイト系 材料のアルカリ溶液による変質挙動(その2)ーアルカリ溶液の種類がベントナイト混 合土の透水性へ及ぼす影響-. 電力中央研究所 研究報告, N10037.

# ベントナイト系緩衝材の膨潤・透水性能における膠結作用の影響評価 ーベントナイト原鉱石をアナログとしてー

講演者:伊藤大知

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

## ベントナイト系緩衝材

## 2. アナログシステムが関連する iFEP の説明

緩衝材は数万年以上の長期にわたり、廃棄物の崩壊熱由来の高温(F3.2.1.2)・塩類を含む地下水との接触(F3.2.4.11)・岩盤のクリープ変形や廃棄物容器の腐食膨張等による高圧(F3.2.3.5)といった複雑な地下環境下に置かれることで、ベントナイト中の鉱物の溶解・沈殿反応(F3.3.2.4)を含めた膠結作用が発生し、膨潤性や透水性などバリア性能に係る材料特性が劣化する可能性が懸念されている。

#### 該当する FEP

- F3.2.1.2 熱的プロセスがその他のプロセスに与える影響(処分場)
- ・F3.2.3.5 力学的プロセスがその他のプロセスに与える影響(処分場)
- ・F3.2.4.11 化学的プロセスがその他のプロセスに与える影響(処分場)
- ・F3.3.2.4 溶解、沈殿、安定な鉱物相への変遷(処分場)

## 3. アナログ事例の地球科学的特性の概要説明

膠結作用を受けて変質した緩衝材のアナログとして、続成変質作用による生成過程において膠結作用の影響を受けているベントナイト鉱床を活用可能と考え、山形県月布鉱山(地質年代:約1000万年伊藤ら、1999)、アメリカ・ワイオミング州 Ten Sleep鉱山(地質年代:約1億年 Heathman, 1939)、中国・吉林省劉房子鉱山(地質年代:約1億 5000万年 Tomita & Zhang, 1990)の3鉱山より Na型ベントナイトの原鉱石を入手し、研究に供した.

これらの原鉱石を用いて不攪乱・再構成状態の供試体を作製し、膨潤特性・透水特性を要素実験的に評価した。その結果、膨潤特性において、体積変化を拘束された条件(膨潤圧実験相当)では膠結作用の影響によりおよそ半分ほどに特性が低下する一方、体積変化を許容した条件(膨潤変形実験相当)では体積拘束条件に比べ膠結作用の影響が弱まることが分かり、損傷部や隙間の充填性(自己シール性・自己修復性)は維持されることが分かった。原鉱石の年代が古くなるにつれ特性の低下度合いが大きくなる傾向がみられ、経年に伴う膠結作用による膨潤特性への影響が強まることが分かった(伊藤ら、2022.)。透水特性において、いずれの原鉱石においても不攪乱・再構成試料において計測された透水係数は同様であり、原鉱石の年代と透水係数の低下度合いとの相関性も見られなかった(Ito et al., 2022.)。このことから、透水特性においては膠結作用を受けた場合においても維持されることが分かった。また、並行して塊状試料・薄片試料に対する SEM-EDS 分析を実施したところ、膠結物質としてシリカ系鉱物が有力であることが示唆された(検討継続中)。

## 4. 安全性に関わる主要な見解

膠結作用により体積拘束下での膨潤特性は著しく低下するものの、体積変化の許容される条件では影響が弱まることから、損傷部や隙間の充填性(自己シール性・自己修復性)は維持されることが分かった。また、操業初期と同様の低透水性を期待できることが分かった。

# 5. アナログの利用限界に関する概要

地層処分で対象とされる時間スケール(数万年~数十万年)と、原鉱石の生成年代(数 千万年~数億年)の違いにより、鉱物変質現象の進展度とそれに伴う特性変化に関する更 なる検討が必要である.

# 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

伊藤雅和,石井卓,中島均,平田征弥:ベントナイトの成因・生成環境に関する一考察, 粘土化学第38巻第3号,pp.181-187,1999.

Heathman, J.H.: Bentonite in Wyoming, the geological survey of wyoming, bulletin No.28, University of Wyoming, pp.1-20, 1939.

Tomita K. and Zhang, N.: Some natural Na-bentonites in China, 鹿児島大学理学部紀要. 地学・生物学, Vol. 23, pp.1-8, 1990.

伊藤大知, 王海龍, 小峯秀雄: 地層処分におけるベントナイト系緩衝材の膠結作用に伴う超長期的劣化を考慮した自己修復性評価手法の提案, 地盤工学会誌, 70(4), pp.6-11, 2022. Ito, D., Wang, H. and Komine, H.: Experimental study of aging-induced cementation effect on permeability property of bentonites, Rock and Fracture Mechanics in Rock Engineering and Mining, Vol.1124, 2022. <a href="https://doi.org/10.1088/1755-1315/1124/1/012118">https://doi.org/10.1088/1755-1315/1124/1/012118</a>

# アナログカタログについて

# 鈴木 覚 原子力発電環境整備機構

本文書は,2023年11月に実施した「ナチュラルアナログワークショップ」への参加者に, アナログカタログについて紹介するために,NUMO(2019)の一部を抜粋し,要約したものです (4.を除く)。

## 1. アナログカタログについて

アナログカタログ(NUMO, 2019)は、英国 Radioactive Waste Management(RWM 社、現: NWS)からの委託により英国地質調査所(BGS)が作成した技術報告書「A Catalogue of Analogues for Radioactive Waste Management」を和訳した文書である。本文書では、セーフティケースの裏付けに利用可能な、長期の時間スケールにわたり処分システムが有する可能性のある性能を示すための自然システム、考古学システム、産業システムのアナログ事例を BGS が収集したものを取りまとめた。カタログ作成においては、広範囲にわたる関連する国内外の研究事例に関する論文・報告書からの情報を使用している。

## 2. セーフティケースにおけるナチュラルアナログの利用

アナログは、定性的なデータから定量的なデータまで多岐にわたるデータにより、セーフティケースの裏付けに利用することができる。例として以下のようにセーフティケースの多くの側面に対して適用することが可能である。

- ・ アナログは、地層処分施設とその長期変遷に関連しうるメカニズムやプロセスを明らかにし、セーフティケースの信頼性を高める。
- ・ アナログは、室内の条件や室内試験の短期的な時間スケールでは容易に研究できない、 長期の(地質的に長期の)時間スケールで起こると想定されるプロセスの影響につい て、定性的な理解を与える。
- ・ アナログは、地層処分施設の母岩(地層処分場を取り囲む地下岩盤)や人工バリア材料の長期にわたる性能に関する、予測モデルや室内試験結果の外挿の検証に利用できる。

過去 30 年間で作成された各国のセーフティケースでは、概念モデル開発の裏付けとして、 モデルの検証として、あるいは定量的なデータの直接的なインプットとしてなど、様々な形 でアナログが利用されている。にもかかわらず、全てのセーフティケースがアナログ情報の 使用箇所を明確に記述しているわけではなく、多くは非明示的である。また、使用した関連 報告書の一部は公にはされていない補足文書である場合もある。

アナログ(自然アナログ,考古学アナログ,産業アナログを含む総称)は、地層処分施設の性能の理解の論証に有用であり、特定の物質は長期間存続するという証拠となる。しかしながら、そうした物質は特定の地層処分環境において、必要な期間、存続するという決定的

な証拠にはならない。なぜなら、アナログ物質が存続した条件は、地層処分システムで生じ、変遷すると想定される条件と一致しない可能性があるからである。したがって、アナログはその点を踏まえて使用されるべきであり、セーフティケースにおいては補足的な論拠としてのみ用いることができる。それにもかかわらず、適切なアナログは、論理的、数学的な論拠を裏付けるための長期間の実際的な証明として有益となりうる。

## 3. アナログカタログの構成と記載事例

NUMO(2019)に記載されている,アナログ事例は以下の4つのセクションに分け,さらに主要な安全バリア機能ごとに分類されている。以下の章節番号は,NUMO(2019)のものをそのまま掲載する。

## 第2章人工バリアシステム

2.1 廃棄物形態

事例1:ガラス固化された高レベル放射性廃棄物のアナログとしての天然ガラス

2.2 容器の性能

事例2:英国サウス・デヴォンのリトルハム湾:ペルム期泥岩の天然銅の腐食

事例3:インテシュルの古代ローマ軍の釘:鉄腐食

2.3 ニアフィールドのバリア材料に関するアナログ

事例4:古代のセメント:セメント系材料の寿命

事例5:ハドリアヌスの城壁のセメント:セメント系材料の寿命

事例 6: 北アイルランド: セメントのアナログ

事例7:マッカリン:ケイ酸カルシウム水和物相の寿命

事例8:マッカリン:アルカリ影響領域のアナログ

事例9:オマーン:セメント環境における微生物の生存

事例 10:ヨルダンのマッカリン:セメント環境における微生物の生存

事例 11: イタリア トディのドゥナロッバ森林: 粘土層の長期隔離特性

事例 12:フィリピン:粘土の長期隔離特性

事例 13:キプロス:粘土の長期隔離特性

事例14:火成貫入による泥岩の変質:粘土バリアの熱安定性

事例 15:人工バリアシステム:コロイド

事例 16:ベントナイト:地層処分施設の深度で洗掘は起こりうるか?

事例 17: 放射線分解

## 第3章 天然バリアシステム

3.1 亀裂性結晶質母岩の長期性能

事例 18: セラフィールド: 地下水システムへの将来の気候変動影響の予測のための古水理 地質学の利用

事例 19:スウェーデンのエスポとラクセマー:深部地下水システムの長期安定性

事例 20:ルパン鉱山:永久凍土環境のナチュラルアナログ

事例 21: 東濃: 母岩の安定性のナチュラルアナログ

3.2 母岩としての岩塩の長期性能

事例 22: 岩塩中の地層処分施設のナチュラルアナログ

3.3 長期隔離の概念

事例 23:マトリクス拡散:母岩の長期隔離特性

第4章 自然システムにおける放射性核種移行

4.1 自然システムにおける遅延

事例 24:ポソス・デ・カルダス:ブラジルのモロ・デ・フェロ およびオサム・ウツミ鉱山-序論

事例25:ポソス・デ・カルダス:ブラジルのモロ・デ・フェロー放射性核種移行

事例 26:ポソス・デ・カルダス:ブラジルのオサム・ウツミ鉱山-放射性核種移行

事例 27: ポソス・デ・カルダス: ブラジルのオサム・ウツミ鉱山 - 酸化還元フロント

事例 28:エル・ベロカルプロジェクト:放射性廃棄物の処分場からのウランの可動化と移

行のアナログ

事例 29: スコットランドのニードルズ・アイ: ウランの可動化と移行

事例30:スコットランドのブロブスタ:ウランの可動化と移行

事例 31:サウステラス鉱山:ウランの可動化と移行

事例32:オーストラリアのアリゲーターリバー:ウランの可動化と移行

事例33:スコットランドのローモンド湖:ハロゲン移行の研究

4.2 自然システムにおけるコロイド移行

事例34:ブラジルのモロ・デ・フェロおよびポソス・デ・カルダス - コロイド輸送

4.3 全体システム性能

事例 35: オクロー地層処分施設の長期挙動のナチュラルアナログ

事例 36:カナダのシガーレイク - 地層処分施設全体へのナチュラルアナログといえるか 各々の事例には、以下の情報が記載されている

- ・ 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の説 明
- ・ アナログ事例の地球科学的特性の概要説明
- ・ 安全性に関わる主要な見解
- アナログの利用限界に関する概要
- システムを表す図表
- ・ 詳細情報が得られる参考文献リスト

#### 4. 日本版アナログカタログの提案

以上で紹介したアナログカタログには、日本の研究者のアナログ研究の成果も含まれるものの、日本で見つかったアナログ事例として収録された成果は一部に限られている。アナログ事例が日本で起こった現象であることは、セーフティケースの傍証事例として、必須の条件ではない。しかし、考古学アナログや産業アナログのように、過去数千年以内に発生した

現象を対象としたアナログの場合には、日本特有の環境条件が、現象にも影響している可能性もある。そのようなアナログ事例が多く収録されていることは、わが国の地層処分のセーフティケースの信頼性をさらに向上させるうえで、より好ましいものと考えられる。このため、日本版アナログカタログの作成を提案するとともに、アナログ研究に携わる研究者に情報提供の協力をお願いしたい。

# 参考文献

NUMO (2019): 放射性廃棄物管理のためのアナログカタログ(和訳版), NUMO-TR-19-01 (https://www.numo.or.jp/technology/technical\_report/pdf/TR-19-01.pdf)

## 4. 総合討論

総合討論では、「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」をテーマに以下の3つの論点について出席者全員で意見交換を行った。

- ・ 包括的技術報告書におけるアナログの利用方法の課題は何か(4.1節)。
- ・ "アナログカタログ"をどのように更新していくべきか、また日本版アナログカタログをどのように作成すべきか (4.2節)。
- 国内のアナログ研究の体制はどうあるべきか(4.3節)。

なお、意見の取りまとめにおいては、出席者の意見を発言の趣旨を踏まえて著者が分類し、適宜 補足を入れた。そのため、取りまとめた意見は付録-1に記録した出席者の発言内容と完全には一致 していないが、趣旨に相違がないことを出席者により確認いただいた。付録-1には、総合討論の際 の出席者の発言録を時系列に沿って記す。

# 4.1. 地層処分の仕組みや信頼性を傍証するアナログ事例の活用方法

アナログ事例は、第1章で述べたように包括的技術報告書を含め各国のセーフティケースにおいて処分システムの安全性の説明を補強する多面的論拠のひとつとして活用されているほか、幅広いステークホルダーとの対話活動で、地層処分の安全確保の仕組みなどを分かりやすく説明する補助的な情報として用いられている。以下では、アナログ事例を活用する目的ごとに、「セーフティケースでアナログ事例を活用する場合」、「幅広いステークホルダーとの対話でアナログ事例を用いる場合」、及び「研究者がアナログ事例を研究する場合」のそれぞれについて意見をまとめる。

## 4.1.1. セーフティケースでアナログ事例を活用する場合

このテーマでは、包括的技術報告書におけるアナログ事例の活用について NUMO から説明し、 今後セーフティケースを更新していく際に気を付けるべき点について意見を出し合った。出席者から示された意見を以下に示す。

- ・ アナログ事例を示す際には、地層処分の仕組みの説明に有利な事例だけではなく、不利な事 例についても併せて示すことが重要と考える。
- ・ 同じアナログ事例でも、閉じ込めに有利にはたらく場合と不利にはたらく場合がある。例えば、沈殿・膠結作用は放射性廃棄物と地下水との接触を遅らせるが緩衝材の膨潤を阻害する可能性がある。どちらの場合も記載すべきである。
- ・ 本ワークショップの出席者が実施しているアナログ研究も含め、包括的技術報告書に引用されていない事例もある。傍証に利用する事例の選定基準の整備が必要ではないか。
- ・ 安全機能の論証は、室内試験の結果、数理モデルによる評価、及びアナログ事例による傍証 を組み合わせて実施するものであるため、アナログ事例のみを明示的に引用する必要はない のではないか。
- ・ 人工バリアの経時的変化は劣化という側面からしか語られていないが、実際には(膠結作用等により)より閉じ込め性が向上していくようなケースがアナログ事例からも認められているため、地層処分システムの頑健性が増していく方向へ「進化」していく視点からアナログ事例を活用するといった検討も必要である。

・ 微生物が金属イオンを取り込んで沈殿する現象などもアナログ事例として活用できる可能性がある。安全評価シナリオに組み入れるべき現象は、セーフティケースの更新のタイミングで、最新の知見を取り込みつつ、見直していく必要がある。

## 4.1.2. 幅広いステークホルダーとの対話で用いる場合

幅広いステークホルダーとの対話において、アナログ事例は地層処分の仕組みを分かりやすく示すことに役立つ。このようなアナログ事例の活用方法に関して、出席者から示された主な意見を以下に示す。

- ・ 地層処分の信頼性を示すエビデンスとしてアナログ事例を羅列する従来の方法では、ステークホルダーには伝わりにくいように感じる。アナログ事例の説明の仕方や取り上げる事例に内容を分かりやすく物語("ナラティブ")(佐藤努,2018)として説明するような、受け取り手に寄り添う工夫が不足しているように感じる。
- ・ 地層中に長期にわたって良好な状態で保存されたクワガタ虫の例など、処分場システムに厳密に対応する事例でなくても、シンプルで分かりやすいものも含めて活用していくべきではないか。
- ・ 幅広いステークホルダーに興味を持ってもらうためには、"説明型"の対話だけでなく、興味 を持った人と実際にアナログ事例を観察するような、"体験型"の対話も有効ではないか。
- ・ 対話活動においても、前述のようにアナログ事例を示す際に、地層処分の仕組みの説明に有 利な事例だけではなく、不利な事例についても併せて示すことが、納得感を得る上で重要と 考える。
- ・ 専門家が知りたいと思っているアナログ事例と、幅広いステークホルダーに訴求力のあるア ナログ事例は必ずしも一致しない。対象者によって、より適したアナログ事例を選択すべき であろう。
- ・ 地層処分の説明会の後、オクロの天然原子炉の事例を用いた説明を聞いて、地層処分の仕組 みがよくわかったという意見を頂いたことがある。一般の方との対話においては、地層処分 の仕組みについての技術的な説明よりも、適切なアナログ事例を用いたコミュニケーション の方が受け入れられやすいのではないか。

## 4.1.3. 研究者がアナログ事例を研究する場合

アナログ研究は、廃棄物や人工バリアが埋設される地下環境や、天然バリアとなる地層等の長期 的な変化や劣化を類推するのに役立つ地学的な類似プロセスを対象に、処分環境で生じ得る現象の 理解、または安全評価に用いられている現象評価モデルの妥当性の検証を目的に行われている。主 な意見を以下にまとめる。

- ・ 自然現象の初期条件や、熱・水理・力学・化学的環境の変遷に対するアナログ性を追及すればするほど、その研究対象が限定されたものになる。安全機能の論証は、室内試験の結果、数理モデルによる評価、及びアナログ事例による傍証を組み合わせて実施するものであるならば、アナログ事例と地層処分システムとの過度な類似性を求める必要はない。
- ・ 処分場で起こり得るプロセスに類似する事例を豊富なアナログから収集することで、人工バ

リア及び天然バリアの核種移行パラメータや透水係数等の不確実性としてとり得る値の幅の 検討に活用したい。

- ・ アナログ研究においては、対象となる自然現象が生じた際の環境条件や継続期間などの情報が大きな不確実性を伴う可能性や、場合によっては情報が得られないという可能性も考えられる。そのような場合には、地質学的な手法のみにてアナログ研究を実施するのではなく、自然現象を模擬して実施する室内試験や解析を援用することで効率的に現象理解を進めることが可能となる。
- ・ 長期的な処分システムの変遷プロセス理解のため、処分システムのどの構成要素でアナログ が必要となるのか示してはどうか。

#### 4.2. 日本版カタログの作成

NUMO は英国地質調査所 (BGS) が作成した技術報告書「A Catalogue of Analogues for Radioactive Waste Management」を和訳したアナログカタログ (Milodowski et al., 2015) を公開している。「今後、日本独自のアナログカタログの作成をすべきか」という NUMO からの問いについて、出席者より示された意見を以下にまとめる。

- ・ アナログカタログには、幅広いステークホルダーとの対話で役立つよう、地層処分システム の基本的概念の成立性の傍証となる事例を収録すべきだ。
- ・ 読み手の対象として専門家を想定するのか,あるいは一般向けなのか,その位置づけを明確 にして作成すると良い。
- ・ 将来は処分候補地となるサイト周辺で研究したアナログ事例を収録することもあると考えられる。現時点では、幅広く事例を収録することになるのではないか。
- ・ 取りまとめの方法として、今回のワークショップの要旨集で試みたように、アナログ事例と して記載すべき事項についてフォーマットを揃えて並べるだけでは、どうアナログ事例が地 層処分に役立つのかが分かりにくい。処分システム全体とアナログ事例の対応関係を可視化 する工夫や、"ナラティブ"を加えて解説するなどの工夫が必要だ。
- ・ 国内で研究されたアナログ事例も収録し、事例を充実させること、及び英訳して公表することで、海外の事業者も活用できるカタログを作成するとよいのではないか。

## 4.3. 国内のアナログ研究の体制の在り方

本ワークショップでは、ナチュラルアナログに加えて考古学アナログ、産業アナログなど幅広いアナログを対象とした研究者が出席しているが、その活動は各組織、研究者個人に委ねられており、組織の垣根を超えた体制の整備が必要と考えられる。「より効率的かつ効果的にアナログ研究を進めるために、どのような体制作りが必要か」というNUMOからの問いについて、「現世代の専門家間のネットワーク形成」、及び「次世代への知識継承、人材育成」という観点からの議論があった。出席者より示された意見を以下にまとめる。

# 4.3.1. 現世代の専門家間のネットワーク形成

本ワークショップでは幅広いアナログを対象とした研究者が集まった。異なる分野、異なる専門

的バックグラウンドを持つ研究者間の連携の在り方に関する意見を以下にまとめる。

- ・ アナログ事例の第一の利用者は、地層処分事業者である NUMO であろう。幅広いステークホルダーとの対話への活用など、まずは NUMO がどのようなアナログ事例を充足しなければならないか、既存のアナログ事例でどのような情報が不足しているかなど、NUMO のニーズを発信する必要があるのではないか。例えば、NUMO が安全評価における重要なパラメータを提示し、研究者と NUMO で意見交換をしながらアナログ事例の選択や活用を進めていくことなどが挙げられる。
- ・ 研究者は、NUMO のニーズも踏まえセーフティケースでの成果の活用を意識してアナログ研究を進められると良いのではないか。
- ・ アナログ研究は、自然現象の観察と室内試験・原位置試験、モデリングのそれぞれの結果を 相補的に用いながら進めていく必要があるため、技術や知識の集結を目的に、より一層研究 者同士、あるいは研究者と NUMO との緊密な連携体制を整えていくことも重要ではないか。
- ・ このようなワークショップは、アナログ研究の最新成果の共有に役立つだけでなく、研究を 進める上で各研究者が抱える課題解決のヒントを得られるなどの効果があることを実感した。
- ・ アナログ研究は、地層処分事業のためだけに実施されるべきものではない。用途を限定しすぎない方が研究の幅を広げることができる。地層処分事業は理学、工学など学際的な側面があるので、必ずしも地層処分を対象にアナログ研究を実施していなくても、最終的に地層処分事業にも役立つと考えることもできる。
- ・ アナログ研究を通じて現象の初期条件や熱・水理・力学・化学的環境の変遷が明らかになれば文化財の保全にもその知見を役立てる(専門:文化財保全)。
- ・ 産業アナログの研究成果は自身の研究分野の発展に活かせるため、今後もこのようなワーク ショップに参加していきたい(専門:地盤工学)。
- ・ 複雑な自然現象を観察し、理解する素養を身に付けるには時間や経験が必要となる。NUMO が共同研究でマネジメント能力を発揮するためには、地質学や地球化学の知識を積んでいく ことに加えて、アナログ研究に必要なロジスティクス\*4、自然観察や巡検を体験する機会も提供し、NUMO側の人材育成にも取り組んでいくべきである。

## 4.3.2. 次世代への知識継承. 人材育成

アナログ研究に携わる研究者の育成も各組織,研究者個人に委ねられている状況である。組織の 垣根を超えた次世代への知識の継承,人材育成という観点から,出席者の意見を以下にまとめる。

・ 異分野の研究者と協力してアナログ研究を実施する際には、研究者個人の信頼関係がベース になっている(例えば、考古学者との協業など)。しかし、そのような関係は容易に継承でき るものではなく、次世代にどう引き継いでいくかが課題と考える。このような知識継承の課

<sup>\*4</sup> 以下に挙げられるような、アナログ研究を行うにあたって必要な一連の作業を指す。

<sup>•</sup> サイトとなり得る自然現象を見極めること

研究サイトでどのようなデータをどれくらいの精度で取得するかを決定すること

<sup>•</sup> 試料採取や露頭観察のためのボーリング調査・トレンチ調査を行うにあたって、行政に許可を取り付けたり、周辺 住民の理解を得たりすること

<sup>•</sup> ボーリング調査のための機材やバックホウ、水質分析のための道具や試料採取のための道具・容器など、研究に必要な器材を取りそろえること

題に対する取り組みを進めるべきではないか。

- ・ 地層処分システムの長期的な変遷は、将来の話であり、経験に基づいて知識を継承すること は容易ではない。アナログ研究は、過去に起こった現象を状況証拠を積み上げて紐解いてい くものであり、このようなアプローチは将来の地層処分システムの長期的な変遷に関するシ ナリオの構築にも応用可能であろう。アナログ研究を通じて、地層処分のシナリオ開発に関 する知識を継承していくことが可能ではないか。
- ・ 異なる世代,異なる分野の研究者がアナログ事例という具体的かつ共通する研究対象について議論することも,知識継承や人材育成に役立つのではないか。例えば,巡検のような形で 天然のアナログを見に行く,オーバーパックやベントナイトなどの人工バリアの実物を見るなど。
- ・ 研究成果のみならず、本総合討論で話し合われたような議論の積み重ねも記録として残し、 次に引き継いでいくことも重要である。

# 5. ワークショップのまとめと今後の取り組み

総合討論での出席者からの意見のうち、NUMO の今後の取り組みに繋がるものは以下の 3 つに集約される。

- ① カタログとしてナチュラルアナログをデータベース化することは、情報の統合化という意味では役立つが、単なる情報の羅列とならないよう、「アナログカタログ」を利用する対象者によって収録する事例や説明の仕方などを工夫する必要がある。加えて、わが国特有の気候、地質環境の下で生じたナチュラルアナログや国内の研究者が実施したアナログ研究を充実させることは、読者に地層処分システムを身近なものと認識させる効果が期待でき、幅広いステークホルダーとの対話において役立つと考えられる。アナログカタログの取りまとめにおいては、キーとなるアナログ事例に"ナラティブ"を整備することで、読者の納得感を向上させる工夫が必要である。
- ② 現世代の研究者間のネットワーク形成においては、共同研究を通じた連携に加えてワークショップを定期的に開催することも重要である。また、今後はアナログカタログの作成に伴う共同作業など、連携の場が増えていくことが予想される。アナログ事例を用いて推定の確からしさを説明するという方法は、土木工学あるいは文化財保全など様々な分野で採用されつつあり、分野を超えたアナログ研究の横のつながりを充実させることは、最終的には地層処分事業にも役立つと期待できる。
- ③ アナログ事例は、既に地層処分システムの長期的な変遷に関するシナリオ構築にも適用されているが、さらに、安全評価に携わる技術者がアナログ事例を自ら研究することによって、地層処分システムで将来起こりうる現象の具体的なイメージを形成することが可能となるため、今後、そのような技術者の人材育成にも役立つであろう。また、アナログ事例という対象を、異なる分野、異なる世代の技術者・研究者が共に研究することは知識継承の観点からも有効である。このような取り組みとして、ワークショップで定期的に研究成果を共有することに加えて、巡検などの体験型の企画も検討していく必要がある。

これらの意見を踏まえ、今後は NUMO や研究者だけでなく、幅広いステークホルダーを対象と したアナログカタログの作成、分野や世代の垣根を超えた、アナログ研究に携わる研究者の継続的 なネットワークの形成と人材育成に取り組んでいくことが肝要である。

2024年度は、国際的なアナログ研究の最新動向を集約し、海外の事業者によるセーフティケースでのアナログ事例の活用方法に知見を得るため、ワークショップを開催する。海外の研究者や事業者による講演会は、以下に挙げる2点を目的として実施する。

- アナログカタログの作成を進めるにあたり、国内外の最新のアナログ研究の動向について情報を得ること。
- ・ セーフティケースにおけるアナログ事例の活用方法として、海外の実施主体の良好事例に学ぶこと。特に、アナログ事例を用いて地層処分の社会的信頼性を向上するコミュニケーションの在り方について出席者で意見交換を行うこと。

# 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.
- IAEA (2012): The Safety Case and Safety Assessment for Radioactive Waste. No. SSG-23.
- OECD/NEA (2013): The Nature and Purpose of the Post-closure Safety Cases for Geological Repositories. NEA/RWM/R (2013) 1.
- 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., 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 (2019): 放射性廃棄物管理のためのアナログカタログ (和訳版), NUMO-TR-19-01.
- 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.
- 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.
- 佐藤努(2018): ナチュラルアナログ研究のすゝめ、原子力バックエンド研究、25-2、113-118.
- 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.

## 謝辞

本報告書の取りまとめにおいては、佐藤努・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教授にご指導・ご助言をいただいた。また、ワークショップにおいては、吉田英一・名古屋大学大学院環境学研究科博物館教授、竹内真司・日本大学文理学部地球科学科教授、菊池亮佑・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助教授、伊藤大知・早稲田大学理工学術院創造理工学部講師、新橋美里・電力中央研究所 SS 研究本部地質・地下環境研究部門主任研究員、天野由記・日本原子力研究開発機構核燃料バックエンド研究開発部門核燃料サイクル工学研究所環境技術開発センター研究副主幹、藤井直樹・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次長、三ツ井誠一郎・日本原子力研究開発機構ニアフィールド研究グループマネージャー、柳田明進・奈良文化財研究所埋蔵文化財センター主任研究員から貴重な講演を頂戴した上、発表要旨の公開に了承を頂いた。また、総合討論での出席者の皆様のご意見からは、今後、NUMOがセーフティケースを用いた幅広いステークホルダー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。この場を借りて、関係者各位、協力者各位のご尽力に対し心より感謝の意を表する。

# 付録-1 ワークショップ総合討論における発言集

ワークショップの総合討論における出席者の発言を以下にまとめる。個別の発言は文章に起こす にあたって表現が変わっている場合がある。なお、本報告書に掲載するにあたって出席者からは内 容の確認と承認を得ている。

<ol> <li>包括的</li> </ol>	①包括的技術報告書におけるアナログの利用方法の課題は何か			
発言者	所属*	内容		
佐藤	北大	お話し(ナラティブ)がない。セーフティケースの傍証となるアナログ事例を示して、理解を受け手に委ねるスタンスとなっている。		
佐藤	北大	地層処分の安全評価に重要なパラメータを NLMO が提示し、その上で議論してはどうか。		
佐藤	北大	「保守的」という言葉は、一般の人に「NLMO は現象を理解していないから そのような対応をしているのだろう」というような負の印象を与えるため 慎重に用いるべき。		
安楽	JAEA	部分的な最適化だけではなく、システム全体として本当に最適なのかはよく考える必要がある。天然の事象とあまりかけ離れないものを取り上げるべき。		
安楽	JAEA	工学的に最適な事例でもシステム全体の説明として一般の方に分かりにく くなるような事例は好ましくない。		
安楽	JAEA	オクロのようなアナログ事例は安全性の説明としてセーフティケースの最初のほうにあるべきではないか。		
黒田	電中研	水みちのクロッギングなどはプロセスを示すと分かり易い。		
佐藤	北大	過去に行った解析の結果が若い世代に知られていない。		
山本	大林組	処分場の構成要素のどの部分に対応するアナログがあるとよいか,マップ 化するところから始めてはどうか。		
横山	電中研	沈殿→膠着の過程は、浸透率を低下させる可能性があるが、緩衝材の膨潤 を妨げる可能性もある。同じ現象でも地層処分に有利にも不利にも働く場 合があるので、両方示すべき。		
佐藤	北大	自己シール性を期待しつつ流出は避けるのはベントナイトの特性に対して 矛盾した要求である。月布のプロジェクトを一例としてみても、日本は緩 衝材の自己シール性に、欧米は流出に関心がある。		
竹内	日大	アナログ研究を誰のために、何のために行うのかもっと共有すべきだ。実物を見てみんなで議論することで新しい発想が生まれる。		
佐藤	北大	アナログ研究は狭義には NUMO のためにあるが、結局は国や国民が対話をする時のためになるものである。		
柴田	太平洋コンサル	ワークショップの内容が一般の人に伝わるかどうかには疑問がある。地層 処分の入り口としては分かり易いので興味を持ってもらう工夫が必要である。		
佐藤	北大	興味を持ってもらえる "ネタ" を準備する必要がある。一緒にモノを観察するのも有効である。		
石寺	JAEA	室内試験を行っている立場として、ナチュラルアナログの不確実性にどう 対応していくかに関心がある。		

佐藤	北大	不確実性については議論の中で科学的にリーズナブルなものに折り合いをつけていくしかないのではないか。
吉田	名大	不確実性には作業仮説を立て真摯に議論を重ねてチューニングしていくことで対応する。
竹内	日大	環境条件に拘り過ぎる必要はない。
小林	太平洋コンサル	アナログとは何か、定義から始めるべきだ。
中林	電中研	セーフティケースの長期安全性評価の章にアナログ事例を用いた評価を取り入れるべきではないか。
柳田	奈文研	文化財が地層処分事業に役立つことが示すことで、文化財の新しい価値を 提示できる。環境条件やプロセスが分かれば文化財の保護にも結び付く。
新橋	電中研	なぜアナログについてのみ非明示的ではいけないのか。
菊池	北大	地層処分に都合の良い事例のみを取り上げているという印象を持たれない よう気を付けるべきだ。
後藤	NUMO	微生物が放射性物質を取り込んで沈殿するケースなど、シナリオと乖離する現象をどうセーフティケースに組み込むかに課題があると感じる。
石井	太 平 洋 コンサル	一般の人にも分かり易く、研究者・技術者も引用できるアナログの活用は 両立できるものなのか。
吉川	電中研	アナログとなり得る例は数多くあるので、事例を取捨選択することに課題がある。様々なバックグラウンドを持つ読者に満足されるセーフティケースをいかに作っていくかが大事だ。
	ログカタロク 対すべきか	「"をどのように改定していくべきか、また日本版アナログカタログをどのよ
発言者	所属*	内容
中林	電中研	カタログを作成するだけではなく、長期不確実性の評価の参考のため、安全評価を行う対象を決めて、その対象に関連するアナログ事例を持ち寄り、値のばらつきを評価し合うような場を準備してはどうか。
吉田	名大	一般に向けてなのか、専門家に向けてなのか、ネガティブな事例はどのように取り上げるのかなどを、新しいカタログを作成する前に明確にするべきだ。
小林	太平洋コンサル	アナログの事例をただ並べるだけでは分かりにくいので工夫が必要である。
佐藤	北大	クワガタの事例などは、地層処分の有用性を一般の人々に示すには有用 だ。
3国内の	    アナログ研	 究の体制はどうあるべきか
発言者	所属*	内容
三ツ井	JAEA	考古学アナログを対象とした研究を行うには、文化財科学分野の関係者との連携が不可欠である。知識だけではなく、人的ネットワークの次世代への継承も課題である。
藤井	原環	国として積極的にアナログ研究に取り組んでいないのが実態だ。
根本	NUMO	実際に現場を見た経験は業務に役立っている。

μш	タナ	要旨を事前に読んだがイメージが湧かなかった。実物のオーバーパックや
片田	名大	ベントナイトの膨潤試験などを体験できると印象に残りやすい。

# \*所属機関の略称は以下の通り

北大(北海道大学), JAEA (日本原子力研究開発機構), 電中研 (電力中央研究所), 太平洋コンサル (株式会社太平洋コンサルタント), 名大 (名古屋大学), 日大 (日本大学), 奈文研 (奈良文化財研究所), NLMO (原子力発電環境整備機構), 原環 (原子力環境整備促進・資金管理センター)

# 付録-2 NUMO FEP リスト

# 付表 2-1 NUMO FEP リスト (NUMO, 2021, 第6章より)

		付表 2-1 NUMO FEP リス
No.	FEP 番 号	FEP名
1	F1.1.1	品質保証と管理
2	F1.1.2	サイト調査
3	F1.1.3	処分場の設計
4	F1.1.4	工程と計画
5	F1.1.5	建設
6	F1.1.6	操業
7	F1.1.7	閉鎖
8	F1.1.8	事故と予期しない事象
9	F1.1.9	処分場の管理
10	F1.1.10	モニタリング
11	F1.1.11	処分場のマーカー
12	F1.2.1	構造運動
13	F1.2.2	造山運動
14	F1.2.3	弾性,塑性または脆性的変 形
15	F1.2.4	地震活動
16	F1.2.5	火山・マグマ活動
17	F1.2.6	変成作用
18	F1.2.7	熱水活動
19	F1.2.8	地域的な侵食と堆積
20	F1.2.9	続成作用
21	F1.2.10	土壌生成
22	F1.2.12	地質の変化に伴う水文学的 /水文地質学的な変化
23	F1.2.13	地質学的変動に伴う地形学 的な変化
24	F1.3.1	地球規模の気候変動
25	F1.3.2	地域的で局所的な気候変動
26	F1.3.3	海水準の変動
27	F1.3.4	氷河周辺の影響
28	F1.3.5	局所的な氷河と氷床の影響
29	F1.3.6	暖かい気候の影響(熱帯と 砂漠)
30	F1.3.7	気候変動に伴う水文学的な 変化
31	F1.3.8	気候変動に伴う生態学的な 変化
32	F1.3.9	気候変動に伴う人間の対応
33	F1.3.10	気候変動に伴う地形学的な 変化

(NUMU, 2U21, 勇り草より)				
No.	FEP 番 号	FEP名		
34	F1.4.1	気候への人間活動の影響		
35	F1.4.2	社会的・制度的な進展		
36	F1.4.3	技術的な進展		
37	F1.4.4	処分場の認識と動機に関す る事項		
38	F1.4.5	掘削活動		
39	F1.4.6	採鉱その他の地下での活動		
40	F1.4.7	侵入行為のないサイト調査		
41	F1.4.8	地表の環境		
42	F1.4.9	水の取扱い(地下水,地表 水)		
43	F1.4.10	爆発と衝突		
44	F1.4.11	環境修復行為		
45	F1.4.12	故意の人間侵入		
46	F1.5.1	隕石と宇宙ゴミ		
47	F1.5.2	生物相の進化		
48	F2.1.1.1	固体廃棄物		
49	F2.1.2.1	金属廃棄物		
50	F2.1.2.2	有機廃棄物		
51	F2.1.2.3	非金属無機廃棄物		
52	F2.1.3	コンディショニング材料		
53	F2.1.4.1	放射性核種の含有量		
54	F2.1.4.2	化学物質の含有量		
55	F2.1.5	廃棄体の特性		
56	F2.2.1	容器		
57	F2.2.2	オーバーパック		
58	F2.3.1.1	放射性崩壊による熱の発生 と移動		
59	F2.3.1.2	化学的な熱の発生と移動		
60	F2.3.1.3	生物学的な熱の発生と移動		
61	F2.3.1.4	熱的プロセスがその他のプロセスに与える影響(パッケージ化された廃棄物)		
62	F2.3.2.1	再冠水/脱飽和(パッケージ化された廃棄物)		
63	F2.3.2.2	熱による水理学的影響(パッケージ化された廃棄物) ガスによる水理学的影響		
64	F2.3.2.3	ガスによる水埋字的影響 (パッケージ化された廃棄 物)		

No.	FEP 番 号	FEP名
	· .y	水理学的プロセスがその他
65	F2.3.2.4	のプロセスに与える影響 (パッケージ化された廃棄 物)
66	F2.3.3.1	容器の変形
67	F2.3.3.2	材料の体積変化(パッケー ジ化された廃棄物)
68	F2.3.3.3	容器の移動
69	F2.3.3.4	応力腐食割れ
70	F2.3.3.5	ガス爆発 (パッケージ化さ れた廃棄物)
71	F2.3.3.6	力学的プロセスがその他の プロセスに与える影響(パ ッケージ化された廃棄物)
72	F2.3.4.1	pH 条件(パッケージ化さ れた廃棄物)
73	F2.3.4.2	酸化還元条件(パッケージ 化された廃棄物)
74	F2.3.4.3	援乱物質の濃度 (パッケージ化された廃棄物)
75	F2.3.4.4	腐食(パッケージ化された廃棄物)
76	F2.3.4.5	高分子化合物の分解(パッケージ化された廃棄物)
77	F2.3.4.6	溶解(パッケージ化された 廃棄物)
78	F2.3.4.7	鉱物組成の変化(パッケージ化された廃棄物)
79	F2.3.4.8	沈殿反応(パッケージ化された廃棄物)
80	F2.3.4.9	キレート剤の効果(パッケージ化された廃棄物)
81	F2.3.4.10	コロイドの形成(パッケー ジ化された廃棄物)
82	F2.3.4.11	化学的濃度勾配 (パッケージ化された廃棄物)
83	F2.3.4.12	化学的プロセスがその他の プロセスに与える影響 (パッケージ化された廃棄物)
84	F2.3.5.1	微生物の増殖と活性阻害 (パッケージ化された廃棄 物)
85	F2.3.5.2	微生物/生物が媒介するプロセス (パッケージ化された廃棄物)
86	F2.3.5.3	生物学的プロセスがその他 のプロセスに与える影響 (パッケージ化された廃棄 物)
87	F2.3.6.1	放射性核種の崩壊と連鎖生 成(パッケージ化された廃 棄物)
88	F2.3.6.2	放射線分解(パッケージ化 された廃棄物)

No.	FEP 番 号	FEP名
89	F2.3.6.3	ヘリウムの生成
		放射線の減衰(パッケージ)
90	F2.3.6.4	化された廃棄物)
91	F2.3.6.5	放射線損傷(パッケージ化 された廃棄物)
		放射線学的プロセスがその
92	F2.3.6.6	他のプロセスに与える影響 (パッケージ化された廃棄
		物)
93	F2.3.7.1	金属腐食によるガス生成 (パッケージ化された廃棄
	1 2.0.1.1	物)
94	F2.3.7.2	有機物分解によるガス生成 (パッケージ化された廃棄
01	1 <b>2</b> .0 <b>2</b>	物)
95	F2.3.7.3	ラドンの生成(廃棄体)
96	F2.3.7.4	放射線分解によるガス生成 (パッケージ化された廃棄
	- <b></b> 0.,.1	物)
97	F2.3.7.5	揮発(パッケージ化された 廃棄物)
98	F2.3.7.6	ガスの溶解(パッケージ化
99	F2.3.7.7	された廃棄物) ガス誘発による破損
99	F 2.3.1.1	ガス発生がその他のプロセ
100	F2.3.7.8	スに与える影響(パッケー
101	F2.4.1.2	ジ化された廃棄物) 溶解(廃棄体)
101	F2.4.1.3	拡散(廃棄体)
102	F2.4.1.4	化学種と溶解度 (廃棄体)
103	F2.4.1.5	収着と脱着 (廃棄体)
105	F2.4.1.6	錯体形成(廃棄体)
106	F2.4.1.7	コロイドとしての放出
107	F2.4.2.1	気体廃棄物の放出
	F2.4.2.2	ラドンの放出
	F2.4.2.3	揮発による放出
	F2.4.2.4	放射線分解ガスによる放出
111	F2.4.3	固相を媒体とする放出
112	F2.4.4	人間の行為に起因する汚染
		物質の放出   移行経路(パッケージ化さ
113	F2.5.1	れた廃棄物)
114	F2.5.2.1	移流(パッケージ化された 廃棄物)
115	F2.5.2.2	分散(パッケージ化された
		廃棄物)   分子拡散(パッケージ化さ
116	F2.5.2.3	れた廃棄物)

No.	FEP 番 号	FEP名
117	F2.5.2.4	溶解、沈殿、安定な鉱物相 への変遷(パッケージ化さ れた廃棄物)
118	F2.5.2.5	化学種と溶解度(パッケー ジ化された廃棄物)
119	F2.5.2.6	収着と脱着(パッケージ化 された廃棄物)
120	F2.5.2.7	錯体形成(パッケージ化された廃棄物)
121	F2.5.2.8	コロイドの移行 (パッケージ化された廃棄物)
122	F2.5.3	ガスを媒体とする移行 (パッケージ化された廃棄物)
123	F3.1.1	設計
124	F3.1.2	緩衝材/埋め戻し材
125	F3.1.3	処分孔/坑道の封入材
126	F3.1.4	立孔/斜孔の封入材
127	F3.1.5	その他の人工物
128	F3.1.6	掘削損傷領域および掘削影 響領域
129	F3.2.1.1	熱伝導と対流
130	F3.2.1.2	熱的プロセスがその他のプロセスに与える影響(処分場)
131	F3.2.2.1	再冠水/脱飽和(処分場)
132	F3.2.2.2	パイピング/流出
133	F3.2.2.3	水理学的プロセスがその他 のプロセスに与える影響 (処分場)
134	F3.2.3.1	材料の体積変化(処分場)
135	F3.2.3.2	クリープ
136	F3.2.3.4	ガス爆発(処分場)
137	F3.2.3.5	力学的プロセスがその他の プロセスに与える影響(処 分場)
138	F3.2.4.1	pH 条件(処分場)
139	F3.2.4.2	酸化還元条件(処分場)
140	F3.2.4.3	擾乱物質の濃度(処分場)
141	F3.2.4.4	腐食(処分場)
142	F3.2.4.5	溶解(処分場)
143	F3.2.4.6	鉱物組成の変化(処分場)
144	F3.2.4.7	沈殿反応(処分場)
145	F3.2.4.8	キレート剤の効果(処分 場)
146	F3.2.4.9	コロイドの形成(処分場)
147	F3.2.4.10	化学的濃度勾配(処分場)

	FEP 番	
No.	号	FEP名
140	E0.0.4.1.1	化学的プロセスがその他の プロセスに与える影響(処
148	F3.2.4.11	分場)
149	F3.2.4.12	高分子化合物の分解(処分 場)
150	F3.2.5.1	微生物の増殖と活性阻害 (処分場)
151	F3.2.5.2	微生物/生物が媒介するプロセス (処分場)
152	F3.2.5.3	生物学的プロセスがその他 のプロセスに与える影響 (処分場)
153	F3.2.6.1	放射性核種の崩壊と連鎖生 成(処分場)
154	F3.2.6.2	放射線分解(処分場)
155	F3.2.6.3	放射線の減衰(処分場)
156	F3.2.6.4	放射線損傷(処分場)
157	F3.2.6.5	臨界
158	F3.2.6.6	放射線学的プロセスがその 他のプロセスに与える影響 (処分場)
159	F3.2.7.1	金属腐食によるガス生成 (処分場)
160	F3.2.7.2	有機物分解によるガス生成 (処分場)
161	F3.2.7.3	ラドンの生成(処分場)
162	F3.2.7.4	放射線分解によるガス生成 (処分場)
163	F3.2.7.5	揮発(処分場)
164	F3.2.7.6	ガスの溶解(処分場)
165	F3.2.7.7	ガス誘発による破損(処分 場)
166	F3.2.7.8	ガス生成がその他のプロセ スに与える影響(処分場)
167	F3.3.1	移行経路(処分場)
168	F3.3.2.1	移流(処分場)
169	F3.3.2.2	分散(処分場)
170	F3.3.2.3	分子拡散(処分場)
171	F3.3.2.4	溶解,沈殿,安定な鉱物相 への変遷(処分場)
172	F3.3.2.5	化学種と溶解度(処分場)
173	F3.3.2.6	収着と脱着(処分場)
174	F3.3.2.7	錯体形成(処分場)
175	F3.3.2.8	コロイドの移行(処分場)
176	F3.3.3	ガスを媒体とする移行(処分場)
177	F3.3.4	固相を媒体とする移行(処 分場)

No.	FEP 番 号	FEP名
178	F3.3.5	人間の行為に起因する汚染 物質の放出(処分場)
179	F4.1.1	層序
180	F4.1.2	母岩の岩質
181	F4.1.3	大規模の不連続性
182	F4.1.4	天然資源
183	F4.1.5	未検出の事象
184	F4.1.6	建設前の地熱状態
185	F4.1.7	建設前の水理学的状態
186	F4.1.8	建設前の応力状態
187	F4.1.9	建設前の地化学的状態
188	F4.1.10	建設前の生物学的状態
189	F4.1.11	建設前のガスの状態
190	F4.2.1.1	処分場の熱影響 (母岩)
191	F4.2.1.2	気候変動の熱影響 (母岩)
192	F4.2.1.3	将来的な母岩の熱的条件に 影響を与えるその他のプロ セス
193	F4.2.2.1	処分場の水理学的影響(母 岩)
194	F4.2.2.2	気候変動の水理学的影響 (母岩)
195	F4.2.2.3	将来的な母岩の水理学的条件に影響を与えるその他の プロセス
196	F4.2.3.1	処分場の力学的影響(母 岩)
197	F4.2.3.2	気候変動の力学的影響(母岩)
198	F4.2.3.3	将来的な母岩の力学的条件 に影響を与えるその他のプ ロセス
199	F4.2.4.1	処分場の地球化学的影響 (母岩)
200	F4.2.4.2	気候変動の地球化学的影響(母岩)
201	F4.2.4.3	将来的な母岩の地球化学的 条件に影響を与えるその他 のプロセス
202	F4.2.5.1	処分場の生物学的影響(母岩)
203	F4.2.5.2	気候変動の生物学的影響(母岩)
204	F4.2.5.3	将来的な母岩の生物学的条件に影響を与えるその他の プロセス
205	F4.2.6	放射線学的プロセス(母 岩)
206	F4.2.7.1	ガス源

No.	FEP 番 号	FEP名
207	F4.2.7.2	ラドンの生成(母岩)
208	F4.2.7.3	揮発(母岩)
209	F4.2.7.4	ガスの溶解(母岩)
210	F4.2.7.5	ガス誘発による破損(母 岩)
211	F4.3.1	移行経路(母岩)
212	F4.3.2.1	移流(母岩)
213	F4.3.2.2	分散(母岩)
214	F4.3.2.3	分子拡散(母岩)
215	F4.3.2.4	マトリクス拡散
216	F4.3.2.5	溶解, 沈殿, 安定な鉱物相 への変化 (母岩)
217	F4.3.2.6	化学種と溶解度 (母岩)
218	F4.3.2.7	収着と脱着 (母岩)
219	F4.3.2.8	錯体形成(母岩)
220	F4.3.2.9	コロイドの移行(母岩)
221	F4.3.3	ガスを媒体とする移行(母 岩)
222	F4.3.4	固相を媒体とする移行(母岩)
223	F4.3.5	人間の行為に起因する移行 (母岩)
224	F5.1.1	地形と形態
225	F5.1.2	生物群系
226	F5.1.3.1	表層土壌
227	F5.1.3.2	土かぶり
228	F5.1.3.3	水中堆積物
229	F5.1.4	表層付近の帯水層と水に関 する特性
230	F5.1.5.1	湿地
231	F5.1.5.2	湖と河川
232	F5.1.5.3	湧泉と排水域
233	F5.1.6	沿岸の特性
234	F5.1.7	海洋の特性
235	F5.1.8	大気
236	F5.1.9	植生
237	F5.1.10	動物
238	F5.1.11	気候と天候
239	F5.1.12	水文学的状況と水収支(表層)
240	F5.1.13	侵食と沈降
241	F5.1.14	生態学的/生物学的/微生

No.	FEP 番	FEP名
	号	物学的システム
242	F5.2.1	人間の特徴(生理的,代 謝)
243	F5.2.2	年齡,性別,民族
244	F5.2.3.1	農作業従事者の食習慣
245	F5.2.3.2	狩猟/採集者の食習慣
246	F5.2.3.3	その他の食習慣
247	F5.2.4	習慣(食習慣を除く)
248	F5.2.5.1	共同体の種類
249	F5.2.5.2	共同体の場所
250	F5.2.5.3	水源
251	F5.2.6	食物と水の処理
252	F5.2.7	住居
253	F5.2.8	自然/半自然状態の土地と 水の利用
254	F5.2.9	郊外/農業としての土地と 水の利用
255	F5.2.10	都市/工業としての土地と 水の利用
256	F5.2.11	自然環境の余暇やその他の 利用
257	F5.3.1.1	生活圏への地下水の放出
258	F5.3.1.2	表層の土壌や土かぶりによ る移行
259	F5.3.1.3	表層の水による移行
260	F5.3.1.4	溶解と沈殿(生活圏)
261	F5.3.1.5	化学種と溶解度(生活圏)
262	F5.3.1.6	収着と脱着(生活圏)
263	F5.3.1.7	錯体形成(生活圏)
264	F5.3.1.8	コロイドの輸送(生活圏)

No.	FEP 番 号	FEP名		
265	F5.3.2.1	生活圏へのガスの放出		
266	F5.3.2.2	ラドンの生成(生活圏)		
267	F5.3.2.3	土壌や水からの揮発		
268	F5.3.3	固相を媒体とする移行(生 活圏)		
269	F5.3.4	人間の行為に起因する移行 (生活圏)		
270	F5.3.5	大気中の移行と沈着		
271	F5.3.6	生物を媒体する移行		
272	F5.3.7	食物連鎖と汚染物質の取り 込み		
273	F5.4.1	汚染された飲料水と食物		
274	F5.4.2	汚染された非食用生産物		
275	F5.4.3	その他の汚染媒介物		
276	F5.4.4.1	人間の被ばく		
277	F5.4.4.2	人間以外の生物の被ばく		
278	F5.4.5.1	人間の線量測定と生物学的 減衰		
279	F5.4.5.2	人間以外の生物の線量測定 と生物学的減衰		
280	F5.4.6.1	人間への放射性毒性/影響		
281	F5.4.6.2	人間以外の生物への放射性 毒性/影響		
282	F5.4.7.1	人間への化学毒性/影響		
283	F5.4.7.2	人間以外の生物への化学毒性/影響		
284	F5.4.8	ラドンとラドンの娘核種に よる被ばく		

付表 2-2 NUMO FEP の構造 (階層 1 および階層 2)

階層 1 <sup>※1</sup>	階層 2		
F1 外的要因	F1.1 処分場に関する事象		
	F1.2 地質学的事象		
	F1.3 気候的事象		
	F1.4 将来の人間活動		
	F1.5 その他		
F2 パッケージ化された廃棄物	F2.1 廃棄体の特徴と性質		
に関する要因	F2.2 パッケージ化された廃棄物の特徴と性質		
	F2.3 パッケージ化された廃棄物におけるプロセス*		
	2		
	F2.4 核種の放出		
	F2.5 パッケージ化された廃棄物における核種移行		
F3 処分場に関する要因	F3.1 処分場の特徴と性質		
	F3.2 処分場におけるプロセス <sup>*2</sup>		
	F3.3 処分場における核種移行		
F4 母岩に関する要因	F4.1 母岩の特徴と性質		
	F4.2 母岩におけるプロセス <sup>*2</sup>		
	F4.3 母岩における核種移行		
F5 生活圏に関する要因	F5.1 表層環境		
	F5.2 人間のふるまい		
	F5.3 生活圏における核種移行		
	F5.4 被ばくに関する要因		

- ※1 NUMO FEP は最大 4 の階層から構成され、FEP 番号が付与されている。付表 2-2 に階層 1 および階層 2 の分類を示す。「F1 外的要因」「F2.2 パッケージ化された廃棄物の特徴と性質」「F3.1 処分場の特徴と性質」「F4.1 母岩の特徴と性質」については階層 3 までとなっており、その他は階層 4 まで分かれている。
- ※2 F2.3, F3.2, F4.2 は共通の構成となっている。階層 3 が、熱プロセス、水理学的プロセス、力学的プロセス、化学的プロセス、生物学的プロセス、放射線学的プロセス、ガスに関するプロセスに分かれ、階層 4 において具体的な現象を表す FEP としてリスト化されている。

付表 2-3 統合 FEP リスト

FEP 番号	FEP名		
IF1	造山運動		
IF2	地質構造の変形		
IF3	地震活動		
IF4	火山・マグマ活動		
IF5	熱水活動		
IF6	広域的な侵食と堆積		
IF7	続成作用		
IF8	気候変動		
IF9	放射線分解		
IF10	放射線損傷		
IF11	熱プロセス		
IF12	再冠水/脱飽和		
IF13	容器の変形		
IF14	容器の移動		
IF15	水化学		
IF16	腐食		
IF17	高分子化合物の分解		
IF18	溶解		
IF19	沈殿反応		
IF20	化学的変質		
IF21	微生物/生物が媒介するプロセス		
IF22	ガス相の形成		
IF23	水の輸送		
IF24	パイピング/流出		
IF25	材料の体積変化		
IF26	クリープ		
IF27	未検出の母岩の特性		
IF28	処分場による水理学的影響		
IF29	処分場による力学的影響		

# 原子力発電環境整備機構 (略称:原環機構) Nuclear Waste Management Organization of Japan (NUMO)