



JAEA-Review

2025-059

DOI:10.11484/jaea-review-2025-059

2024年度人形峠環境技術センターにおける 研究・技術開発成果

トピックス

Research and Development in the Fiscal Year 2024
in Ningyo-toge Environmental Engineering Center: Topics

人形峠環境技術センター

Ningyo-toge Environmental Engineering Center

JAEA-Review

March 2026

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。本レポートはクリエイティブ・コモンズ表示 4.0 国際 ライセンスの下に提供されています。本レポートの成果（データを含む）に著作権が発生しない場合でも、同ライセンスと同様の条件で利用してください。（<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja>）
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト（<https://www.jaea.go.jp>）より発信されています。本レポートに関しては下記までお問合せください。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究開発推進部 科学技術情報課
〒 319-1112 茨城県那珂郡東海村大字村松 4 番地 49
E-mail: ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>).

Even if the results of this report (including data) are not copyrighted, they must be used under the same terms and conditions as CC-BY.

For inquiries regarding this report, please contact Library, Institutional Repository and INIS Section, Research and Development Promotion Department, Japan Atomic Energy Agency.

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1112, Japan

E-mail: ird-support@jaea.go.jp

2024 年度人形峠環境技術センターにおける研究・技術開発成果 —トピックス—

日本原子力研究開発機構 人形峠環境技術センター

(2025 年 12 月 4 日受理)

本報告書は、2024 年度に人形峠環境技術センターが実施した研究開発や技術開発に係る主要な業務を概説するものである。

人形峠環境技術センターでは、2001 年まで核燃料サイクルにおける上流側（フロントエンド）と言われるウランの採鉱から採鉱、製錬、転換、そしてウラン濃縮までの技術開発を実施し、現在ではこれら開発に使用してきた施設・設備の解体・撤去に取り組んでいる。また、2016 年に公表した「ウランと環境研究プラットフォーム」構想に基づき、ウラン廃棄物を安全に処理・処分するための研究開発にも取り組んでいる。

ウランと環境をテーマとした研究開発は、人形峠周辺環境の特徴を活かした「環境研究」及び人形峠環境技術センターの施設やポテンシャルを活かした「ウラン廃棄物工学研究」に大別される。また、安全や現場管理に関する技術開発、保健物理や放射線生物学の視点から放射線影響評価に関する研究も進めている。

本報告書では、環境研究や環境保全として、山地における地下水流動の特徴に関する調査、長寿命陰イオン系核種の鉱物固定化について報告する。ウラン廃棄物工学研究として、レーザーを利用した除染技術開発、廃棄体容器材料に関する調査について報告する。安全技術・設備開発として、人形峠環境技術センター内法面の防災対策、安全情報に関するデータ解析について、また放射線影響評価研究として、トロンの体内分布に関する数理モデル構築、ラドン泉地域における地中ラドンの調査について報告する。これら研究・技術開発の成果は、論文等を通じて積極的に外部発表するよう努めている。

**Research and Development in the Fiscal Year 2024
in Ningyo-toge Environmental Engineering Center: Topics**

Ningyo-toge Environmental Engineering Center
Japan Atomic Energy Agency
Kagamino-cho, Tomata-gun, Okayama-ken

(Received December 4, 2025)

This report outlines some main research and development activities executed by the Ningyo-toge Environmental Engineering Center in FY2024.

The Center was working on the development of the nuclear fuel cycle with a focus on its front-end (i.e., uranium exploration, mining, refining, conversion, and enrichment) until 2001, and is now dismantling and removing the facilities and equipment used in the past. In addition, based on the concept of “Uranium and environmental research platform” announced in 2016, we are also working on research and development for the safe processing and disposal of uranium wastes.

This research and development can be mainly divided into “Environmental research” and “Uranium waste engineering research”; the former takes advantage of the characteristics of the natural environment in Ningyo-toge, and the latter utilizes our facilities and potentials. Some works are also made on safety and its management as well as radiation effect research in terms of health physics and radiobiology.

Regarding the environmental research and environmental conservation, this report describes research on the heterogeneity of groundwater in granitic mountains and the mineral immobilization of long-lived anionic nuclides. As for the uranium waste engineering research, the laser-based decontamination technique and the corrosion resistance suitable for waste package material are reported. Further, the construction of safety measures at the mill tailings ponds, the data analysis of safety information, and the environmental fate of radon are also reported. The achievements of those works have been widely presented through research papers etc.

Keywords: Ningyo-toge, Environmental Research, Uranium Waste Engineering Research,
Environmental Conservation, Safeguards, Safety and Its Management, Radiation Research

目 次

1. 環境研究と環境保全	1
1.1 山地における集水域の設定に係る地下水流動調査技術の検討	3
1.2 リン酸イオン吸着処理によるバライト中のヨウ素酸、亜セレン酸、セレン酸の安定性の向上の効果	7
2. ウラン廃棄物工学研究	9
2.1 遠心機の金属製部品に対する UV レーザーによる除染効果	11
2.2 高耐性放射性廃棄体パッケージ複合材料のための酸化物分散強化型銅合金の接合技術	14
3. 安全技術・設備開発	17
3.1 EEF 西側法面における自然災害への対策と今後について	19
3.2 機械学習によるヒヤリハット情報の解析	29
4. 放射線影響評価研究	33
4.1 吸入された Rn-220 (トロン) の体内分布に関する数理モデルの構築	35
4.2 変動帯における地中ラドンポテンシャルが高い地点の偏在とその要因の解明	39
5. 業績一覧	43
5.1 論文	45
5.2 報告書	46
5.3 各種研究費	46
付録 1 組織図	47
付録 2 産学官民連携の取り組み	49

Contents

1. Environmental research and environmental conservation	1
1.1 A study on techniques for investigating groundwater flow for catchment delineation in mountainous regions	3
1.2 Improvement of the stability of IO_3^- , SeO_3^{2-} , and SeO_4^{2-} coprecipitated barite after treatment with phosphate	7
2. Uranium waste engineering research	9
2.1 Decontamination effect of UV laser cleaning on centrifuge metallic parts	11
2.2 Joining technology for oxide dispersion-strengthened copper alloy used in high-durability radioactive waste package composite material	14
3. Development of safety techniques and equipment	17
3.1 Measures against natural disasters on the western slope of the EEF and future outlook	19
3.2 Analysis of near-miss reports using machine learning	29
4. Radiation research	33
4.1 Mathematical modeling of the biodistribution of inhaled Rn-220 (thoron)	35
4.2 Investigation of uneven distribution of geogenic radon potential anomaly and its factors in a mobile belt	39
5. List of achievements	43
5.1 Papers	45
5.2 Reports	46
5.3 Grants	46
Appendix 1 Organization chart	47
Appendix 2 Collaboration with industry, academia, government and private sectors	49

編集チーム

主査：青木 勝巳（人形峠環境技術センター 戦略推進室 室長）

担当者：濱田 真吾（保安管理課）
直江 翔太（廃止措置実証課）
迫田 晃弘（戦略推進室）
徳永 紘平（鉦山施設課）
谷口 淳子（総務・共生課）
林 裕斗（施設管理課）

事務局：神崎 訓枝（戦略推進室）
迫田 晃弘（戦略推進室）

※編集チームの所属はチームが結成された 2025 年 4 月時点、本文に記載されている所属は 2024 年度末時点でのものである。

This is a blank page.

1. 環境研究と環境保全

This is a blank page.

1.1 山地における集水域の設定に係る地下水流動調査技術の検討

鉱山施設課 竹末勘人

背景と目的

人形峠環境技術センターは、ウラン廃棄物埋設処分の安全評価に係る環境研究を実施している。ウラン廃棄物に主に含まれるウランの安全評価では、将来数万年を超える長期の地下水による放射性核種の移動と、生活圏への流出の影響を考慮したケースが想定される(図1)。従来の地下水による放射性核種の移動については、一般に、地下水の通過域における帯水層の厚さ、みかけの流速および流出先の評価が行われてきた。一方、山地に位置する人形峠地域では、地下水の涵養域から流出域までの集水域の大きさが数百mから数km程度と比較的小さくなる。また、複数の集水域に跨る山地では、隣接する集水域への涵養量の割合や、流出先の流量等も考慮する必要がある。

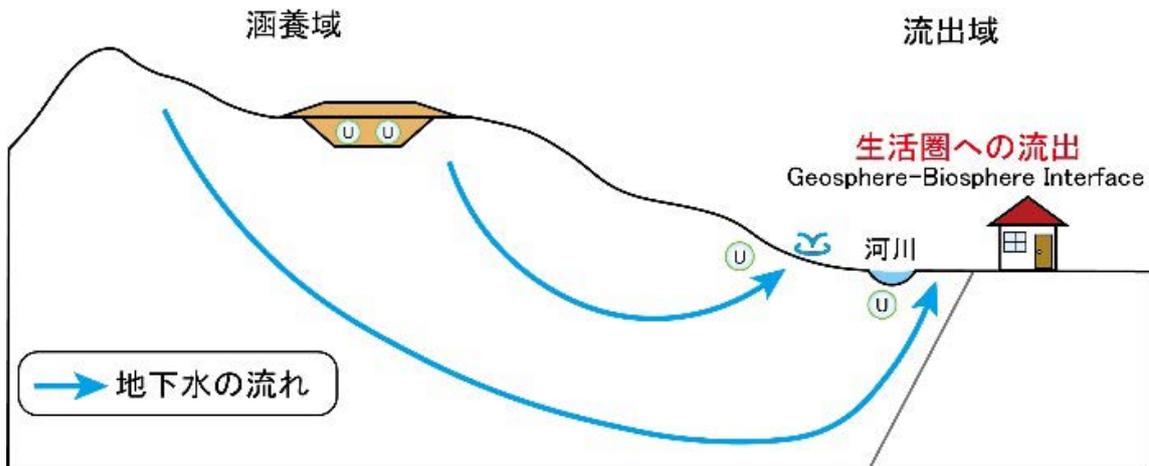


図1 集水域の地下水によるウランの移動のイメージ

一般に、重力による地下水流動は地形の影響を大きく受けている。大小の起伏を呈する集水域の地下水流動は理論的な解析に基づき、局所・中間・広域流動系の存在が想定されている[1]。集水域の実際の流動系を確認する方法については、比較的大きな堆積盆地や平野を対象に、地下水の水質や流量に関する複数の調査事例が報告されている[2, 3]。一方、山地を対象にした一連の調査事例はあまり知られていない。山地は、大小の谷が発達するとともに湧水地点も多いことから、様々なスケールの集水域が存在する可能性が考えられる。そのため、個々の集水域の境界や、涵養域と流出域の確認が必要となる。このような様々なスケールの集水域が存在する山地の特徴は未解明の部分も多いため、関連する地下水データを蓄積していく必要がある。

そこで本研究では、人形峠地域の山地を対象に、地下水によるウランの移動に関する知見を取得するため、地下水流動調査を行った。本報告書では、集水域の水質(溶存イオン濃度と同位体組成)の結果を報告する。

得られた成果

岡山県人形峠地域は、標高約 700 m の緩やかな地形が広がる地形的特徴を持つ。当該地域の北側約 2 km には標高 1000 m 級の急峻な山々が東西方向に連なっており、これらの山地の南側斜面には、吉井川の複数の源流が南方へ向かって発達する。山地の地質は、基盤の花崗岩および花崗斑岩の上位に角礫凝灰岩・凝灰岩や溶結凝灰岩が覆っている。

地下水流動解析の結果[4]を参考にして、吉井川源流域の池河川と十二川の集水域から湧水（4 試料）、沢水（26 試料）を採水し、溶存イオン濃度および酸素・水素安定同位体比（ $\delta^{18}\text{O}$ ・ $\delta^2\text{H}$ ）の分析を行った。図 2 に水試料の採水地点と水質分析結果を示す。また、鉱泉水（試料番号：KO-1, YO-1）、井戸水（試料番号：KW-1, NW-2, YW-1）、湧水（試料番号：IW-2-1, IW-3, IW-9）、沢水（試料番号：IW-1-2, IW-④-2, IW-13）を対象に、予察的にストロンチウム（Sr）同位体比（ $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ）を調べた。池河川集水域では、北側サブ集水域が Na-Cl 型、南側サブ集水域が Na-HCO₃ 型の水質を示した。十二川集水域では明瞭な水質の違いが認められなかったが、池河川集水域ではサブ集水域間で水質が異なることが確認された。同様の水質は室内における水-岩石反応試験でも確認されており[5]、湧水や沢水の水質は水と岩石の反応を通じて形成されていることが示唆された。このことから、地下水流動に伴う水-岩石反応による水質形成は、各集水域の特徴を反映していると考えられる。

さらに、各集水域における湧水、沢水の起源を確認するために、酸素・水素安定同位体比の分析を行った。その結果、水試料の酸素・水素安定同位体比は、グローバル天水線[6]よりも日本海側地域の天水線[7]付近にプロットされ、降水起源であると推定された（図 3）。降水起源の地下水については、その Sr 同位体比が地質に対応していると考え、水試料の Sr 同位体比を予察的に調べた。その結果、一部水試料（試料番号：IW-④-2, IW-2-1, YW-1）の Sr 同位体比が概ね一致していることと、人形峠花崗岩の Sr 同位体比がおおよそ 0.7069~0.7074 であることから、これら水試料は周辺に分布する花崗岩の影響を受けている可能性が示された（図 4）。

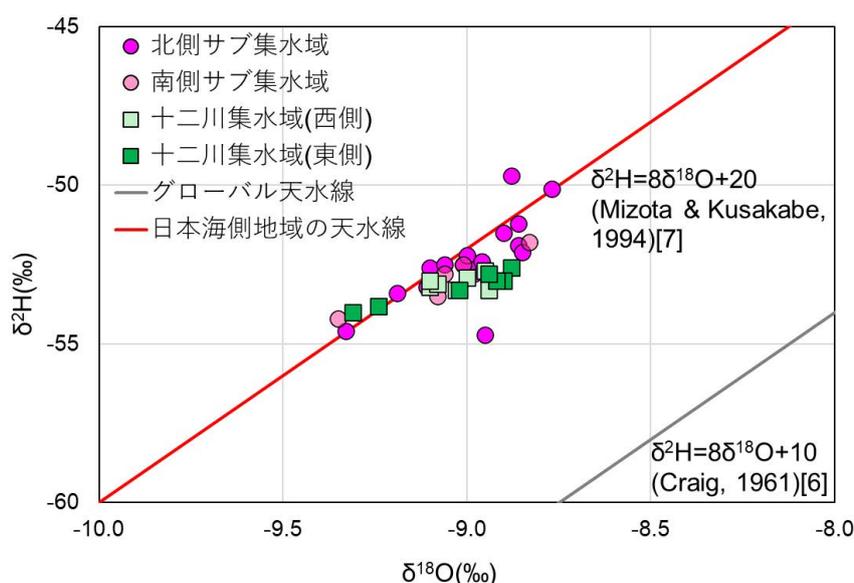


図 3 酸素・水素安定同位体比の結果

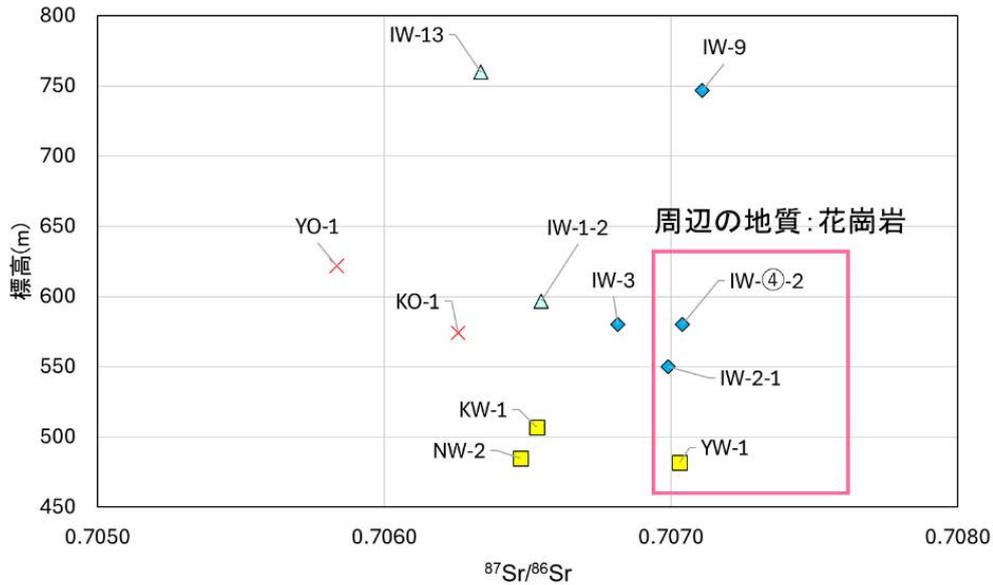


図4 ストロンチウム同位体比の結果

今後の予定

山地における集水域の地下水の特徴を把握するため、引き続き、水質や同位体組成の分析を行うとともに、流出先の流量測定を実施する予定である。

参考文献

- [1] J. Tóth. Gravitational Systems of Groundwater Flow: Theory, Evaluation, Utilization. Cambridge University Press (2009).
- [2] 小宮洋行, 中屋眞司, 益田晴恵, 日下部実. 酸素および水素の安定同位体比と水質から見た長野県松本盆地中・南部地域の広域地下水流動系. 地下水学会誌 45, pp.145-168 (2003).
- [3] J. Shaman, M. Stieglitz, D. Burns. Are big basins just the sum of small catchments? Hydrological Processes 18, pp.3195-3206 (2004).
- [4] 竹末勘人, 野原壯, 遠藤海人, 和泉昌弘, 竹内真司. 山地における集水域の設定方法に係る検討. 地下水学会春季講演会 (2025).
- [5] 人形峠環境技術センター. 2022 年度人形峠環境技術センターにおける研究・技術開発成果一トピックス. JAEA-Review 2023-049, pp.3-6 (2023).
- [6] H. Craig. Isotopic variations in meteoric waters, Science 133 (3465), pp.1702-1703 (1961).
- [7] C. Mizota, M. Kusakabe. Spatial distribution of δD - $\delta^{18}\text{O}$ values of surface and shallow groundwaters from Japan, south Korea and east China, Geochemical Journal 28, pp.387-410 (1994).

1.2 リン酸イオン吸着処理によるバライト中のヨウ素酸、亜セレン酸、セレン酸の安定性の向上の効果

鉱山施設課 徳永紘平、香西直文

JAEA 先端基礎研究センター 田中万也

東京大学 高橋嘉夫

背景と目的

核燃料の核分裂生成核種の中には半減期が極めて長いものが存在し、それらの適切な処理処分方法の開発は重要な課題である。特に福島第一原発での汚染水処理において問題となるセレン79 (^{79}Se) やヨウ素129 (^{129}I) は、核分裂生成核種の中でも半減期が特に長く、かつ水溶液中からの除去が困難な陰イオンとして存在する(ヨウ化物 (I^-)、ヨウ素酸 (IO_3^-)、亜セレン酸 (SeO_3^{2-})、セレン酸 (SeO_4^{2-})。これらの陰イオンのうちIに対してはヨウ化銀 (AgI) の生成による処理が知られている一方、その他の陰イオン系核種に対する有効な処理処分法は未だ開発されていない[1]。

実験

本研究では、長半減期を有する陰イオン性核種に対する新たな除去手法として、極めて安定な鉱物であるバライト (BaSO_4) を利用し、水溶液中から対象核種を効率的に取り込み、その後もバライト結晶中に長期的に保持させる手法の開発に取り組んだ。バライトは、塩化バリウムと硫酸ナトリウムの水溶液を混ぜるだけで生成し沈殿する。その時、水溶液中に含まれる元素がバライトの結晶中に取り込まれる(共沈反応)。本研究では、バライト中に取り込まれた IO_3^- 、 SeO_3^{2-} 、 SeO_4^{2-} の陰イオンに対する安定性の評価を行い、様々な競合イオンを含む溶液中での元素の溶出性を評価することで、長期間安定に元素を保持し続ける手法の開発を行った。

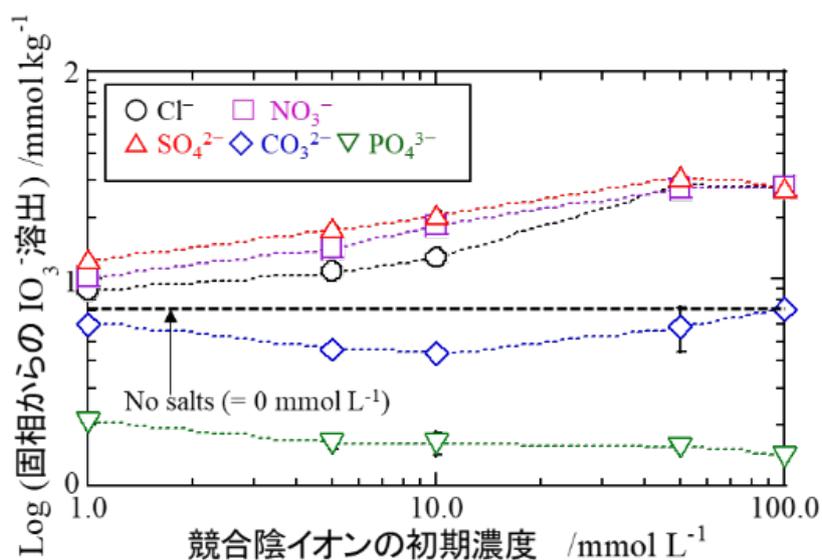


図1 競合イオンによる固相からの IO_3^- 溶出量

結果と考察

本研究の結果より、バライトへの IO_3^- 、 SeO_3^{2-} 、 SeO_4^{2-} の分配は競合イオンの存在下においても高い除去効率を示した一方、時間の経過に伴う固相からのイオンの溶出が問題として生じた。特に電荷の小さな IO_3^- に対してその影響は顕著であり、純水条件においては約 20%、塩化物イオンや硝酸イオンの競合イオンをそれぞれ含む溶液中においては約 60% と固相からの高い溶出率を示した。一方で、バライト共沈試料を希薄なリン酸イオン溶液に添加することで、純水のみでの溶出に比べて、 IO_3^- を含む陰イオンの溶出量が著しく減少する結果が得られた (図 1)。これはリン酸イオンがバライト全体を安定化させたことを示しており、他の鉱物では強い抽出剤として働くリン酸イオンが、バライトに対してはイオンの溶出を低減化させることを示唆する。これらの効果を系統的に明らかにするために、X線吸収端微細構造 (XAFS) 法による、バライト表面でのリン酸イオンの吸着メカニズムの解明を行った。その結果、リン酸イオンは時間の経過とともにバライト表面で異なる形態で存在し、短時間では表面吸着態、長時間ではバリウムのリン酸塩の表面沈殿の化学形態をとることが分かった。この時間経過によるバライト表層での二次的な沈殿物の形成により、固相からの元素の溶出が制限され、バライト全体が安定化されたことが示唆される。これらの効果は IO_3^- 、 SeO_3^{2-} 、 SeO_4^{2-} の陰イオンを含んだバライト共沈試料においても同様に確認されており、バライトへの共沈とリン酸イオン吸着の処理を合わせた I や Se の長寿命系陰イオン系核種の効果的な処理処分法を確立することができた。

本原稿は、文献[2]に記載された内容を一部抜粋して要約したものである。

参考文献

- [1] K. Tokunaga, Y. Takahashi, K. Tanaka, N. Kozai. Effective removal of iodate by coprecipitation with barite: Behavior and mechanism. *Chemosphere* 266, 129104 (2021).
- [2] K. Tokunaga, K. Tanaka, Y. Takahashi, N. Kozai, N. Improvement of the stability of IO_3^- , SeO_3^{2-} , and SeO_4^{2-} coprecipitated barite after treatment with phosphate. *Environmental Science & Technology* 57, pp.3166-3175 (2023).

2. ウラン廃棄物工学研究

This is a blank page.

2.1 遠心機の金属製部品に対する UV レーザーによる除染効果

廃止措置実証課 西脇大貴、澤山兼吾、酒瀬川英雄

JAEA 敦賀総合研究開発センター 小菅淳、瀬戸慧大、神谷豪、木曾原直之

概要

レーザー除染は廃止設備の解体前後における除染や、設備点検における作業員の被ばく低減のための除染等幅広く活用できる可能性がある[1-3]。人形峠環境技術センターは使用済み遠心機に除染試験を行った実績があり、クリアランス基準を満たす見通しを得ており、本研究は使用済み遠心機を対象とした実規模スケールでのクリアランス実証及び遠心機以外の汚染部材・核種に対するレーザー除染の有効性の評価を目的としている。

代表的な成果：UV レーザーによる除染試験

令和5年度までの試験は操作性が高く、一般産業界で最も普及しているファイバーレーザー（波長：1064 nm）を用いて、炭素鋼や塗装膜、コンクリートを対象に模擬除染試験を行った[1-3]。しかしながら、除染対象物がアルミニウム合金等の金属材料であった場合、ファイバーレーザーの波長域では反射率が高く、母材最表面に固着した汚染に対して除染が困難となり、クリアランスレベルでの除染は不可能であると予想された。そこで各素材に対して吸収率が非常に高く、また熱ダメージを与えづらいという特徴を持つUV（Ultraviolet：紫外線）レーザーの利用に着目し、どの程度の除染効果となるか検討した。

供試材はファイバーレーザーでは反射率が高く、鉄鋼材料と比較して低い除染効率となったアルミニウム合金、ステンレス鋼を含む鉄鋼、そして、鋼材表面に安定同位体を塗布した模擬汚染試料とした。図1は試験に使用したUVレーザーを示す。UVレーザー装置は（株）光響のUV-MK-kit（最大出力5 W、波長355 nm）を使用した。

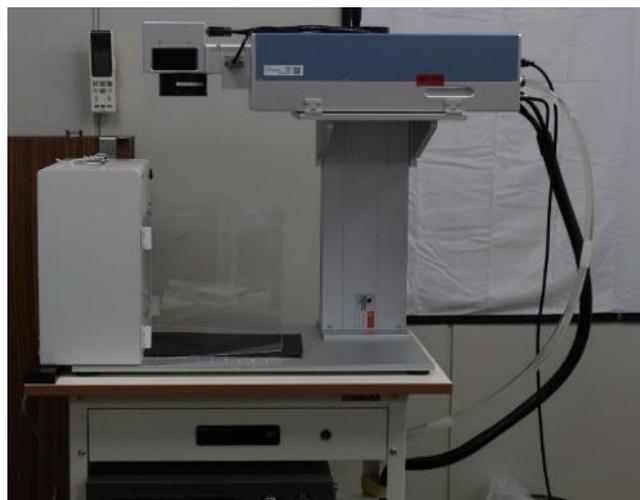


図1 UVレーザー

図2はレーザー照射走査速度を100、1000、そして、4000 mm/s と変化させた際の炭素鋼の照射後表面の写真である。右半分がレーザー照射面となっている。

走査速度(a) 100 mm/s の場合、照射面の高さは20 から 30 μm ほど高くなることが確かめられた。走査速度(b) 1000 mm/s とした場合、ほぼ均一に表面が削られており、未照射面に対しては5 μm ほど低かった。走査速度(c) 4000 mm/s とした場合、表面が波打つように不均一となり、未照射面よりも高くなる部分もあることから、溶解した金属が側面に移動して冷却固化したことが示唆された。そのため、母材が溶融した可能性が考えられた。

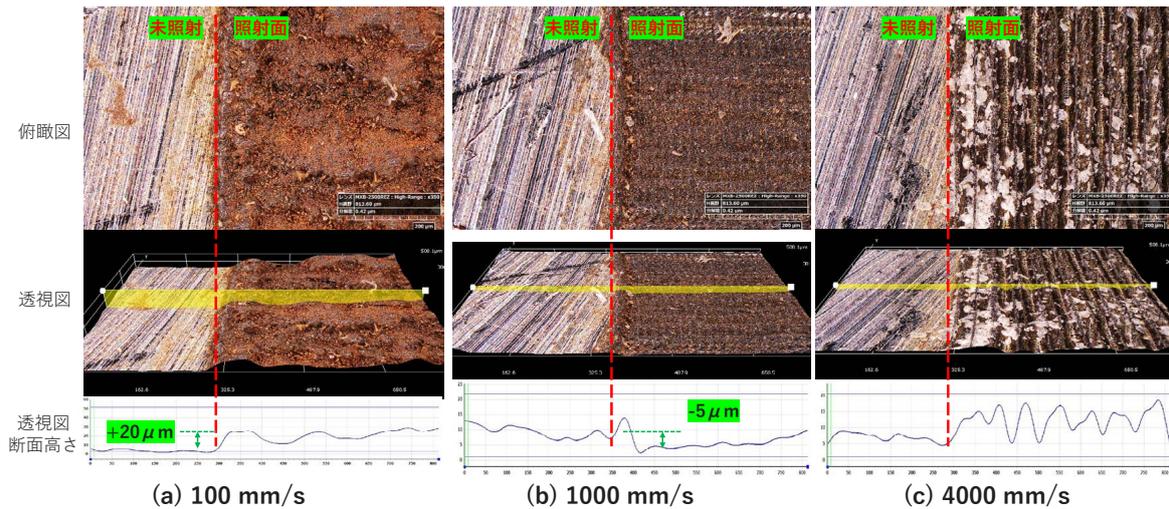


図2 炭素鋼に対するレーザー照射走査速度の影響

図3はレーザー照射走査速度を100、1000、4000 mm/s と変化させた際のアルミニウム合金の照射後表面の写真である。右半分がレーザー照射面となっている。走査速度(a) 100 及び(b) 1000 mm/s では表面はほぼ均一に削られており、照射面の高さはそれぞれ40、5 μm ほど低いことが確かめられた。しかしながら、(c) 4000 mm/s では、表面は不均一であり、未照射部分よりも照射面の方が高くなる部分もあったことから、表面除去ができなかったと考えられる。

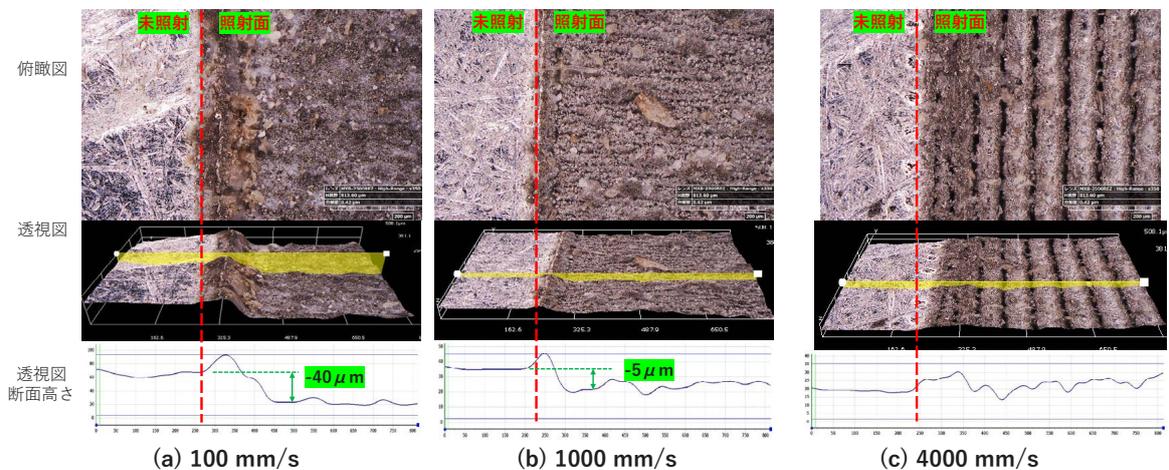


図3 アルミニウム合金に対するレーザー照射走査速度の影響

今回の照射条件の範囲にて、炭素鋼では捜査速度 1000 mm/s の条件が、アルミニウム合金では走査速度 100mm/s 以下の条件がそれぞれ表面を除去するために有効であることが分かった。その除去深さは材料種によって違いが確認されたことから、汚染の深さや材料種の違いに応じて照射条件をさらに調整する必要があると考えられた。

なお、今回照射したのは 5 mm 平方の限られた面積であったが、最も速い走査速度 4000 mm/s の場合でも照射時間が 15 秒要した。これは今回の UV レーザーの出力が 5 W 程度であり、レーザーマーカを目的としたものであったことが要因として考えられる。

実用化に向けては照射時間の短縮のため、より大出力の UV レーザー装置を使用するか、ファイバーレーザーで除去困難であった部分に選択的に照射するといった対策が必要になると考えられる。

今後の予定

使用済み遠心機から採取した金属製部品に対する除染試験を継続しながら、クリアランス基準を達成できる照射条件の最適化を予定している。合わせて、実規模スケールを想定したレーザー走査機構及びヒューム回収機構を開発することで、レーザー除染による使用済み遠心機のクリアランスを目指す。

参考文献

- [1] 人形峠環境技術センター. 2023 年度人形峠環境技術センターにおける研究・技術開発成果一トピックス—. JAEA-Review 2024-050, 55p. (2025).
- [2] 人形峠環境技術センター. 2020 年度人形峠環境技術センターにおける研究・技術開発成果一トピックス—. JAEA-Review 2021-068, 52p. (2022).
- [3] 山根いくみ, 高橋信雄, 澤山兼吾, 西脇大貴, 松本孝志, 小川潤平, 野村光生, 有馬立身, レーザークリーニングによる鋼材表面塗装膜の分離・除去. JAEA-Technology 2021-038, 18p. (2022).

2.2 高耐性放射性廃棄体パッケージ複合材料のための酸化物分散強化型銅合金の接合技術

廃止措置実証課 酒瀬川英雄

背景と目的

高レベル放射性廃棄物のオーバーパック材や低レベル放射性廃棄物のドラム缶を始めとする現在のパッケージ材は炭素鋼が選択されている。しかしながら、2015年、特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針にて「廃棄物の搬出の可能性（回収可能性）を確保すること」という改訂がなされた。国際的には、2012年のOECD/NEAの放射性廃棄物管理の報告書「決定の可逆性と放射性廃棄物の回収可能性」にて回収可能性が議論され[1]、そして、回収可能性を高める措置の一つとして「できるだけ耐久性の高い廃棄体と廃棄物容器を使用すること」を挙げている。

現在、この流れに応じた緩衝材の除去技術等の回収技術の研究開発が着手されているが[2]、そもそも回収対象である廃棄体のオーバーパック材である炭素鋼は回収を想定して選択されたものではない。とりわけ、埋設中の腐食によって構造健全性を損なう可能性があり、これは廃棄体の可搬性を損ない、そして、回収の可能性を損なう致命的な問題となることが危惧される。

そこで本研究は、埋設後の回収可能性を確保できる放射性廃棄体の全く新しいパッケージ複合材料の開発によりこの解決を図ろうとしている。具体的には、図1(a)に示したように、炭素鋼と比較してより優れた耐食性をもつ銅合金（寿命で10倍以上）（例えば、[3]）を、より高い耐圧性をもつ超硬合金（圧縮強さで8倍以上）[4]に被覆させた新しいパッケージ複合材料となる。



図1 高耐性放射性廃棄体パッケージ複合材料

パッケージ複合材料の耐食性を担う銅合金として、酸化物分散強化型銅（GLIDCOP AL-60）を候補とした。これは母相中に微細なアルミニウム酸化物粒子の分散させることで強度特性を向上させた材料である。耐食性の観点のみでは無酸素銅が候補となるが[6, 7]、より高い耐圧性も具備させることで、埋設後の構造健全性の向上がさらに期待できる高耐性放射性廃棄体パッケージ複合材料を開発するべく候補とした。

パッケージ複合材料製作のためには図1(b)に示したように、酸化物分散強化型銅合金と超硬合金を一体構造とする必要があるが、ここではそのために必要なプロセスと接合方法の策定を目的とした。

方法

耐食性を担う銅合金に対して接合方法として溶接を適用する場合、その接合中の熱影響により組織が粗大化して、超音波探傷では欠陥として誤検出される報告がある[8]。そこで、銅合金や超硬合金の組織構造や材料特性に対して、一体構造化のプロセスが及ぼす影響をできるだけ抑制でき、且つできるだけ簡素となる接合方法を調査した。

結果

パッケージ複合材料の製作のための酸化物分散強化型銅合金と超硬合金を一体構造とするプロセスを検討した結果、耐食性を担う銅合金製の外容器に耐圧性を担う超硬合金性の内容物を単純に挿入することで耐食性と耐圧性を損なわず、極めて簡素な製作工程が実現できることが考えられた。しかしながら、廃棄物を封入した廃棄体パッケージを完全に密閉するためには、銅合金製の外容器には蓋をして、その間隙を接合する必要がある。

ここでは銅合金として酸化物分散強化型銅の採用を考えているが、この接合プロセス中にその組織構造への影響を抑制しつつ、また、強度強化因子である酸化物粒子ができるだけ凝集もしくは粗大化しないような接合技術を選択する必要がある。そこで、接合技術の中でも最も酸化物粒子の分散状態への影響を抑制できるものとして、摩擦攪拌接合法（FSW: Friction Stir Welding）を選択した。

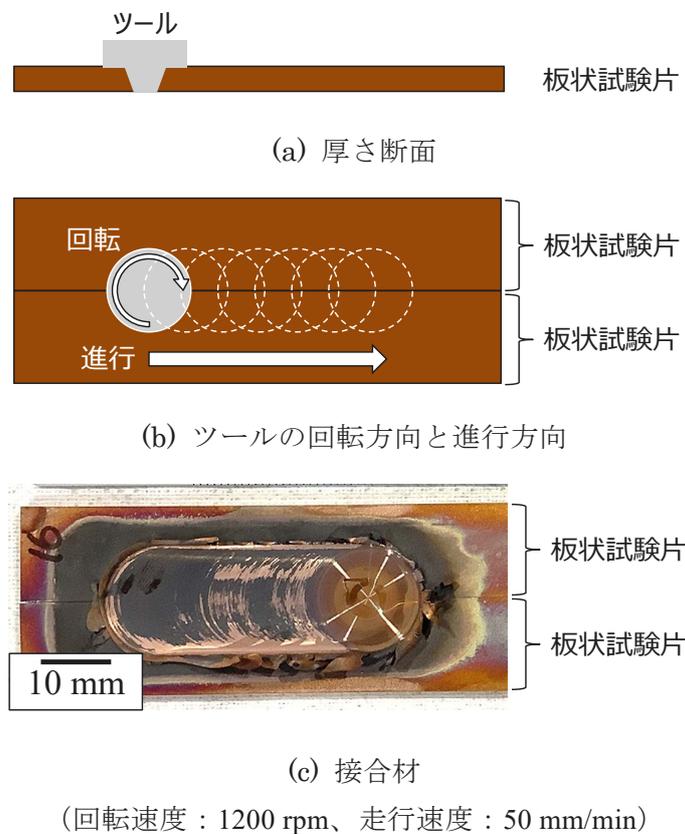


図2 FSWによる接合

摩擦攪拌接合は従来の溶接のように母相溶解を伴う接合法ではなく、接合界面に回転するツールを差し込んで（図 2 (a)）、強制的に塑性流動させながらツールを進行させることで（図 2 (b)）、固相状態のまま接合できる方法であり、酸化物粒子の凝集や粗大化を抑制しながら接合できることが考えられたためである。

様々な接合条件を調査した結果、図 2 (c)に示したように、回転速度：1200 rpm、走行速度：50 mm/min の条件にて、接合欠陥を生じることなく、FSW 接合できることを明らかとした。

今後の予定

ここでは、酸化物分散強化型合金の接合を達成するとともに、その最適な接合条件（回転速度と走行速度）について見通しを得ることができた。本研究は材料開発段階までを目的としたが、今後の実装に向けては、実際のサイズや製作工程を考慮した実規模パッケージの製作技術を開発する段階となる。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP22K12438 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] OECD/NEA. https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_48564/ (accessed: 2025 年 8 月 15 日).
- [2] NUMO. https://www.numo.or.jp/q_and_a/100052.html (accessed: 2025 年 9 月 17 日).
- [3] F. King, L. Ahonen, C. Taxén, U. Vuorinen, L. Werme. Copper corrosion under expected conditions in a deep geologic repository. Svensk Kärnbränslehantering AB Technical Report TR-01-23 (2001).
- [4] トーカロイ. <https://www.tokaloy.co.jp/wp-content/themes/tokaloy/img/cemented/材種一覧表.pdf> (accessed: 2025 年 9 月 17 日).
- [5] 人形峠環境技術センター. 2022 年度人形峠環境技術センターにおける研究・技術開発成果一トピックス. JAEA-Review 2023-049, 55p. (2025).
- [6] 川崎学, 谷口直樹, 内藤守正. 炭酸塩水溶液中における純銅のアノード分極挙動. JAEA Research 2008-012, 55p. (2008).
- [7] 杉本克久. オーバーパック材料としての炭素鋼、チタン、銅の地層処分模擬環境中における腐食特性研究の現状. 材料と環境 62, pp.208-217 (2013).
- [8] 本間信之, 千葉恭彦, 棚井憲治. 銅-炭素鋼 複合オーバーパックの試作. JNC TN8400 99-049, 94p. (1999).

3. 安全技術・設備開発

This is a blank page.

3.1 EEF 西側法面における自然災害への対策と今後について

鉱山施設課 飯尾彰規、菅原史大

はじめに

人形峠環境技術センターが所掌する峠地区のEEF（濃縮工学施設）の西側法面で、平成29年10月の台風による大雨により、幅約40mの地すべりが発生した（以下、H29ブロック）（図1、図2）。平成30年度には地質調査・斜面安定解析・対策工法選定等を行い、令和元年度に応急措置として仮設防護柵を設置した。放置すれば施設や作業員に危害が及ぶ可能性があることから、令和4年度に法面上部の対策工事（区間1）を実施した（図3）。下部工事（横ボーリング・アンカー工）により上部法面の安全性が向上することから、令和5年度に下部（区間2・3）の工事を開始したが、令和5年8月の台風7号により、幅約30m、横幅約70mの新たな地すべりが発生し（以下、R5ブロック）（図1）、工事を中断した。安全対策が完了するまで作業を再開できないことから、大型土のうによる抑え盛土工を実施し、令和6年7月より工事を再開し、令和7年2月に竣工した。今後は、R5ブロック本体の対策工の検討と、H29ブロック下部の再設計が必要であることから、本工事のこれまでの地すべり対策の検討内容と工事実績をまとめるとともに、今後について報告する。

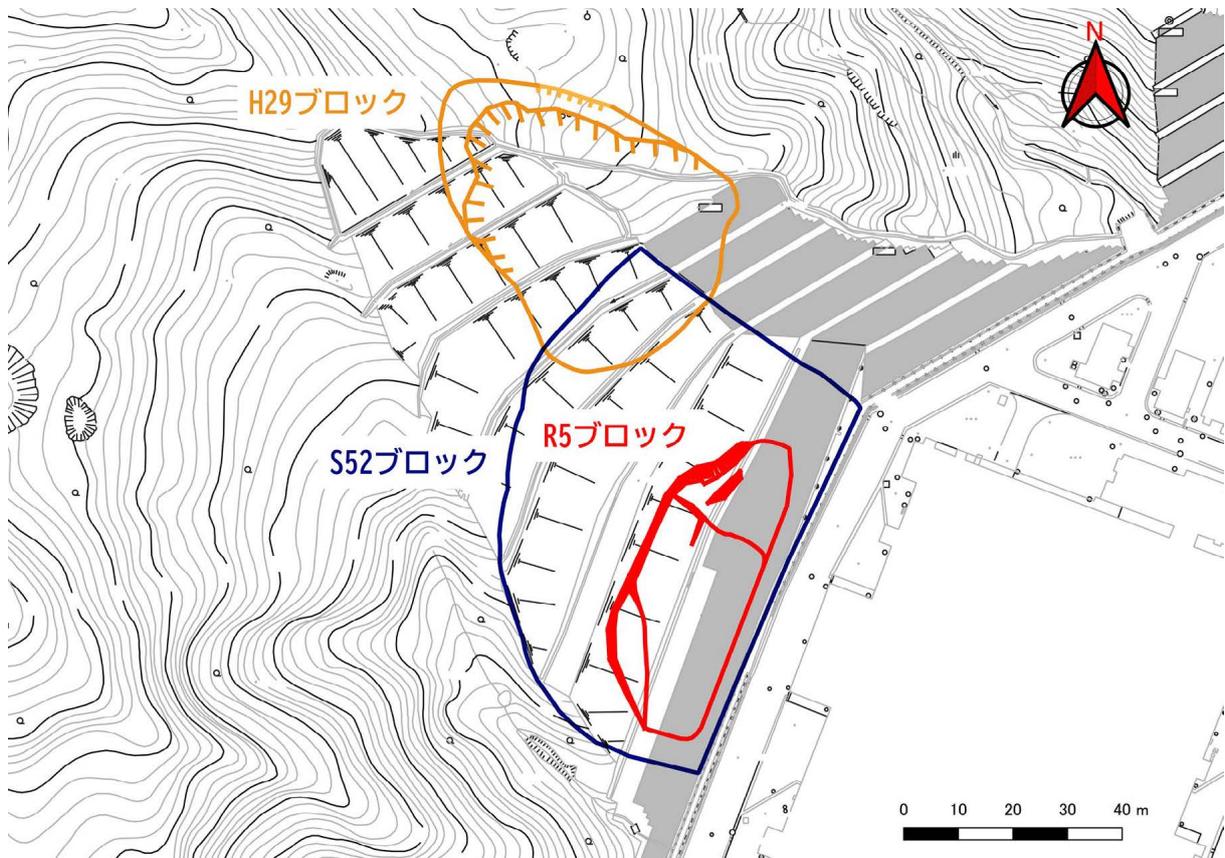


図1 過去にEEF西側法面で発生した地すべりブロック



図2 H29 地すべり全景

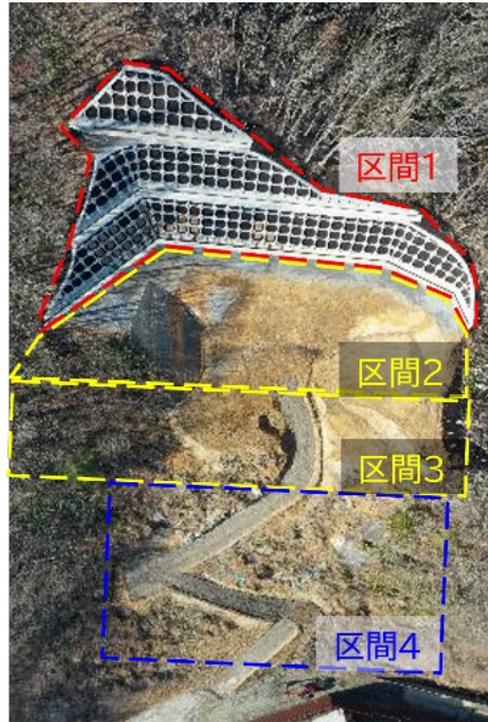


図3 法面安全対策工事範囲

地形地質概要

本報告の地すべり発生地は、濃縮工学施設（EEF）の西側法面で、H29 ブロックの直下には峠3号坑道の旧坑道が位置している（図4）。また周辺域は、基盤岩である中生代末の花崗岩類およびそれを不整合に覆う新第三期中新世の人形峠累層に属する堆積岩類・石英安山岩類が分布する（図5）[1]。



図4 H29 ブロックと坑道位置図

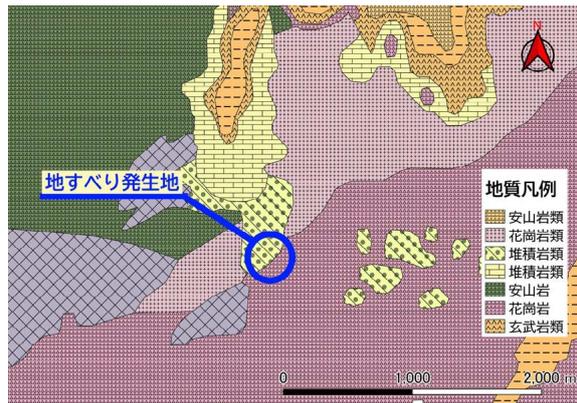


図5 周辺地域の地質

H29 ブロック

H29 ブロックでは平成30年度に地質調査・動態観測から、斜面安定解析・対策工法の選定等を実施した。

主な調査内容は、現地踏査をはじめ、測量、ボーリング掘削並びにボーリング孔を利用した

孔内傾斜計[2]による動態観測、地下水観測[3]である。表 1 にボーリングの諸元、図 6 に調査位置図をまとめた。

調査結果から作成した推定地質平面図と推定地質断面図を図 7、図 8 に示す。

滑落崖の最大幅は約 44 m であり、滑落崖頭部には凝灰角礫岩が分布している。また、滑落崖の側部はシルト岩が分布している。ボーリング調査結果では、シルト岩と礫岩の境界部付近に、弱層がみられたことから、推定すべり面をシルト岩/礫岩境界部とした。また、動態観測では明瞭な累積変位は認められず、地すべり活動は確認されなかった。

対策工は、調査・観測結果から求めた斜面安定解析結果を考慮して地すべり抑制工（以下、抑制工）と地すべり抑止工（以下、抑止工）を組み合わせで設計した。

抑制工として、地すべり頭部荷重を除去する排土工並びに横ボーリング工を選定した。なお、排土工の法面のうち地すべり頭部については、安定勾配（1:2.0）で切土工をした場合、大規模な法面が新たに造成されることになることから、法面勾配は（1:1.0）としている。この法面は安定勾配（1:2.0）より急勾配となることから、鉄筋挿入工および吹付法枠工による法面对策を実施し、法面表層の保護のため、植生基材吹付工および植生マット工を実施した。なお、横ボーリング工は常時水位の低下および降雨時の急激な水位上昇を抑えることを目的として選定している。

抑止工としては、現況すべりおよび今後拡大する可能性のある背後すべりの安定性を確保するために、施工性および経済性にも優れるアンカー工を選定した。

なお、H29 ブロック本体の安全対策工事は令和 4 年度に I 期工事（区間 1）、令和 5 年度、6 年度にかけて II 期工事（区間 2, 3）を施工し、地すべりの滑動を抑制・抑止する対策工事は完了した。

表 1 H29 ブロック調査ボーリング諸元

孔名	坑口標高 (m)	掘進長 (m)	項目	推定すべり面深度
No.1-1	765.1	50	地下水観測孔	-
No.1-2		20	孔内傾斜計観測孔	
No.2-1	753.87	18	地下水観測孔	5.8 m 付近
No.2-2		20	孔内傾斜計観測孔	
No.3-1	751.5	19	地下水観測孔	4.8 m 付近
No.3-1 別孔		5	地下水観測孔	
No.3-2		26	孔内傾斜計観測孔	
No.3-2 別孔		26	地下水観測孔	
No.4	735.36	8	地下水観測孔	-

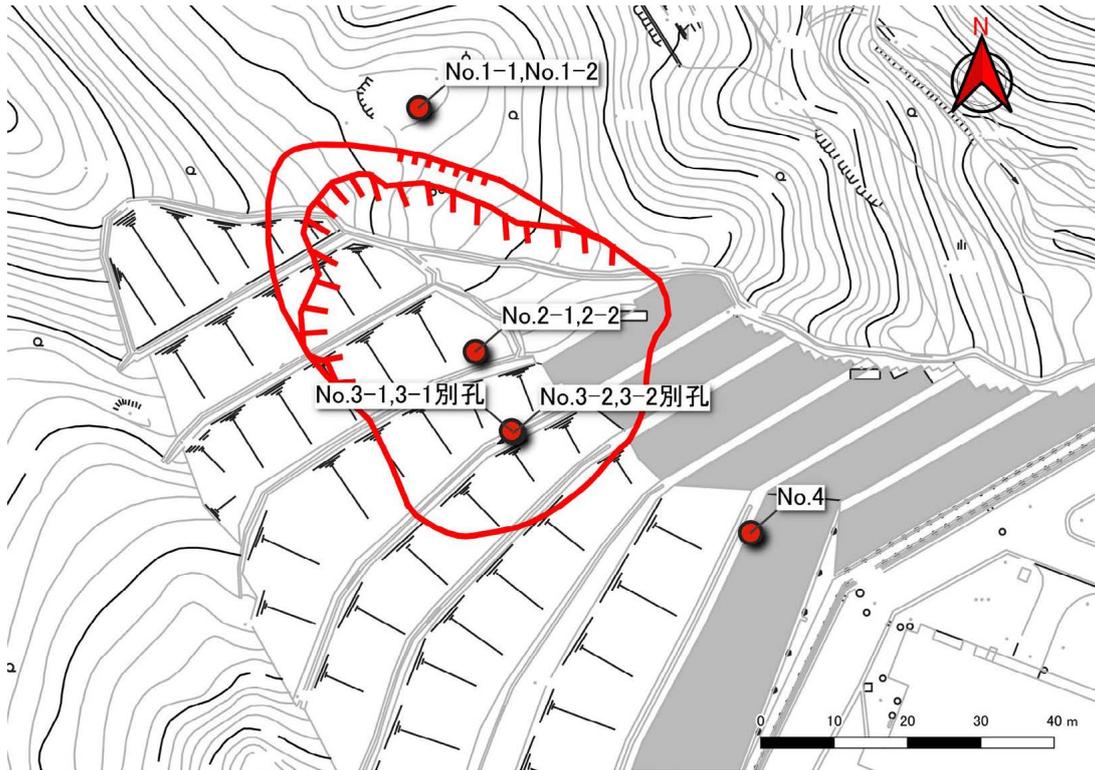


図 6 H29 ブロックボーリング調査位置図

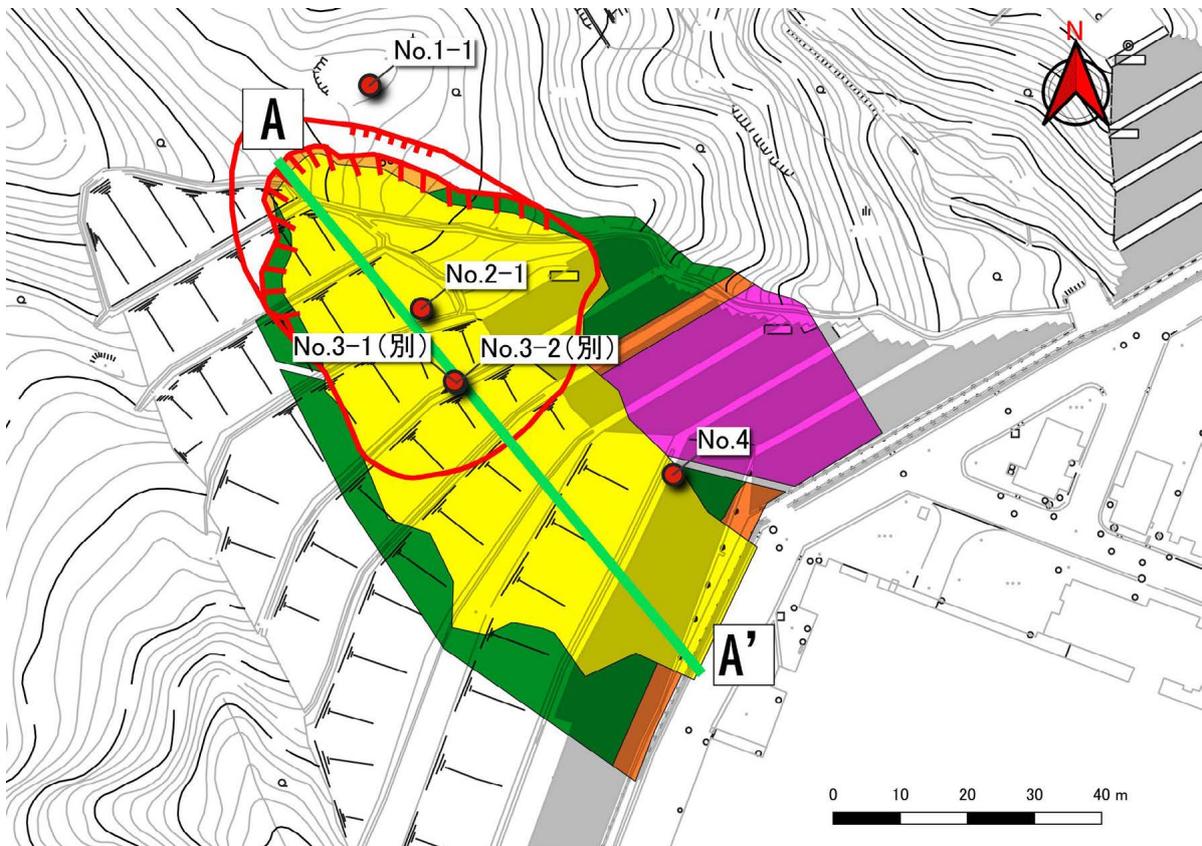


図 7 推定地質平面図

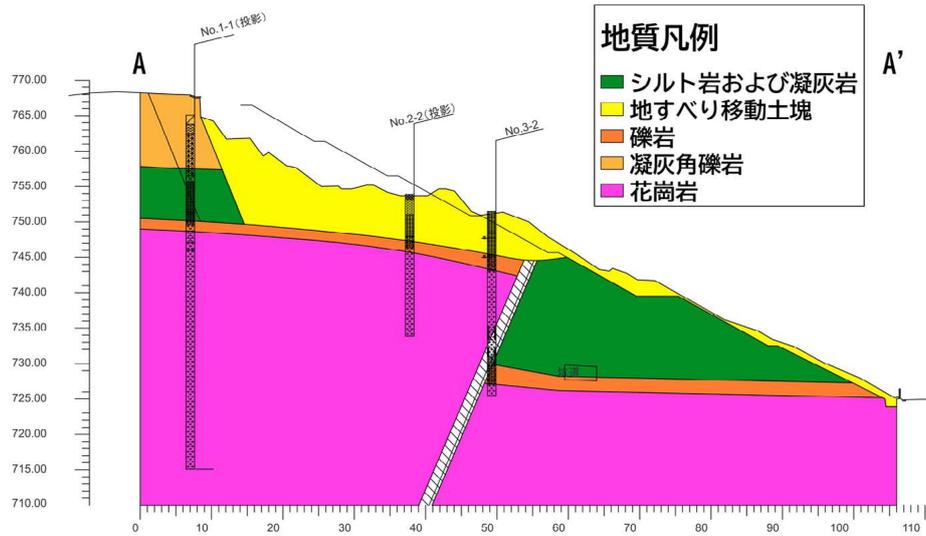


図 8 推定地質断面図

R5 ブロック

R5 ブロックの地すべりは令和 5 年 8 月の台風 7 号により、約 1,800 m² の規模で発生した。発生直後には現地踏査を実施し、令和 6 年度には地質調査・動態観測から、斜面安定解析・対策工法の選定等を実施した。併せて、地すべりの再滑動を抑制するため、大型土のうを用いた抑え盛土工事を実施した。

R5 ブロック本体の輪郭は現地踏査結果により確定した。地すべりの規模は長さ 22 m、幅 58 m、厚さは後述するボーリング地点で 6～7 m である。

現地踏査において確認できた特徴について、撮影箇所を図 9 に、特徴を図 10～図 17 に示す。地すべり頭部は滑落崖が明瞭で段差が最大 1.6 m あり、円礫（礫岩起源）を含む土砂が確認された（図 10、図 11）。地すべり地内には小規模な亀裂があり、ポールが 80 cm 程度貫入できることから小規模な副次ブロックがあると推定した（図 12）。また、地すべり背後の小段にも亀裂が発生しており（図 13）、これらの現象から後退性の地すべりであることを示唆していると判断した。地すべり背後は、昭和 52 年に発生した地すべり（以下、S52 ブロック）（図 1）の影響と推定される段差地形があり小段が消失している。周辺の露頭には泥岩層の薄層が流れ盤方向に傾斜しており、すべり面となり得る地質であることを確認した（図 14）。この露頭が見られた斜面下方にはふとんかご工が設置されているため（図 15）、崩壊対策で実施されたものと推察される。一方、表面水や湧水に関わる点では、地すべり頭部滑落崖に湧水穴が見られたため（図 16）、浅層部に地下水流動層があることが推定される。

地すべり背後の小段にも排水機能が停止するほどの多量の土砂が流入し土砂堆砂したため、応急で排水路を造成しており（図 17）、表面水が集中しやすい地形・地下水条件であると言える。右側崖部には沢が見られるが、常時流水があり流量も比較的多い。

表 2 にボーリングの諸元、図 18 に調査位置図をまとめた。ボーリング調査は、R5 ブロック

地内と背後の地質状況を確認するとともに、地すべり観測孔の設置や標準貫入試験の実施を目的として計3孔を実施した。

動態観測の結果から、地すべりの活動性は認定されないが、上部のボーリング工との連動性が確認されることから、地すべりの影響を受けている可能性が示された（表3）。

調査・観測結果から、予備設計を実施し、地すべり対策工はH29ブロックと同様に、抑制工として頭部排土工、横ボーリング工を、抑止工としてアンカー工を検討している。

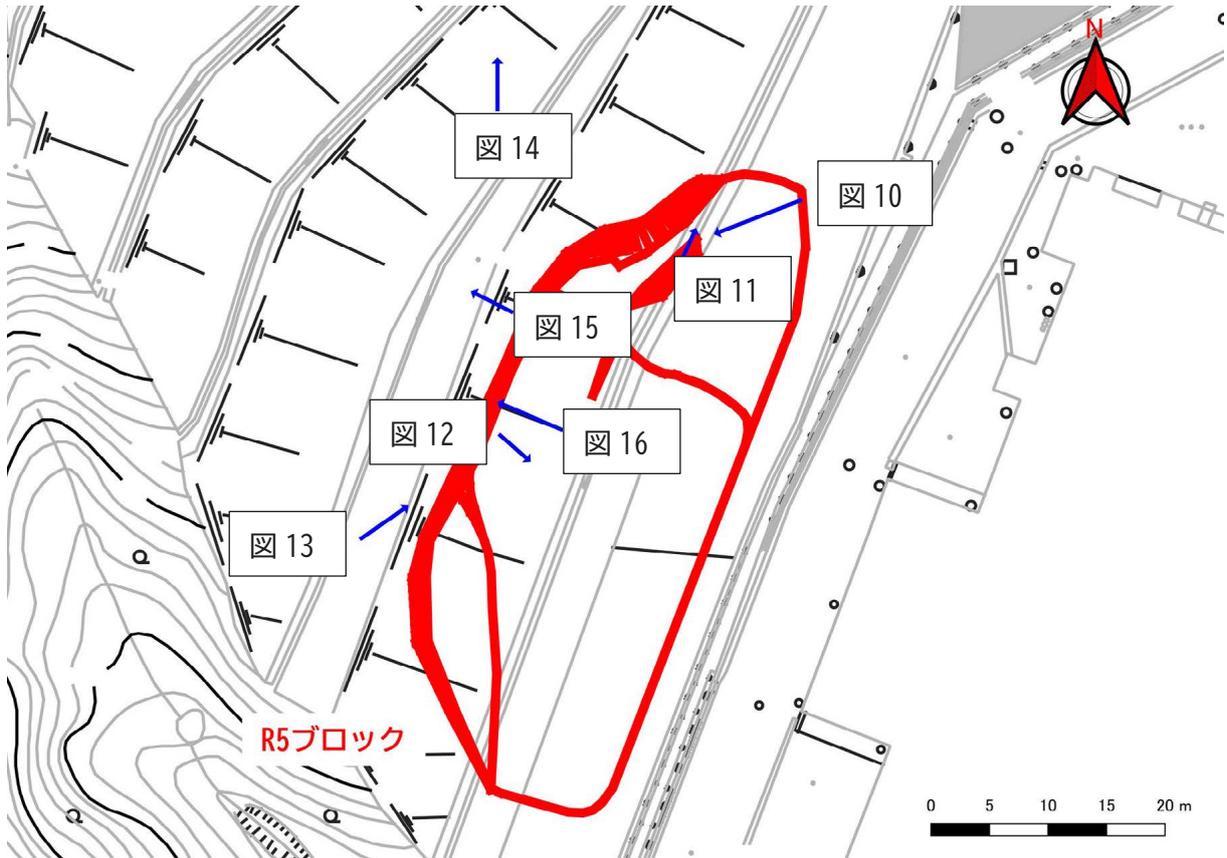


図9 現地踏査写真の撮影箇所



図10 左側崖部より地すべり全景
(赤線は頭部滑落崖)



図11 頭部滑落崖近景



図 12 地すべり地内の副次ブロック



図 13 すべり背後小段に発生した亀裂



図 14 流れ盤方向の泥岩層（地すべり地背後）



図 15 地すべり背後のふとんかご工



図 16 頭部滑落崖に見られた湧水穴



図 17 応急で設けた排水路

表 2 R5 ブロック調査ボーリング諸元

孔名	坑口標高 (m)	掘進長 (m)	項目	推定すべり面深度
R6-No.1	738.91	17.00	孔内傾斜計観測孔	11.0 m 付近
R6-No.2	734.23	15.00	孔内傾斜計観測孔	6.3 m 付近
R6-No.2'				6.00

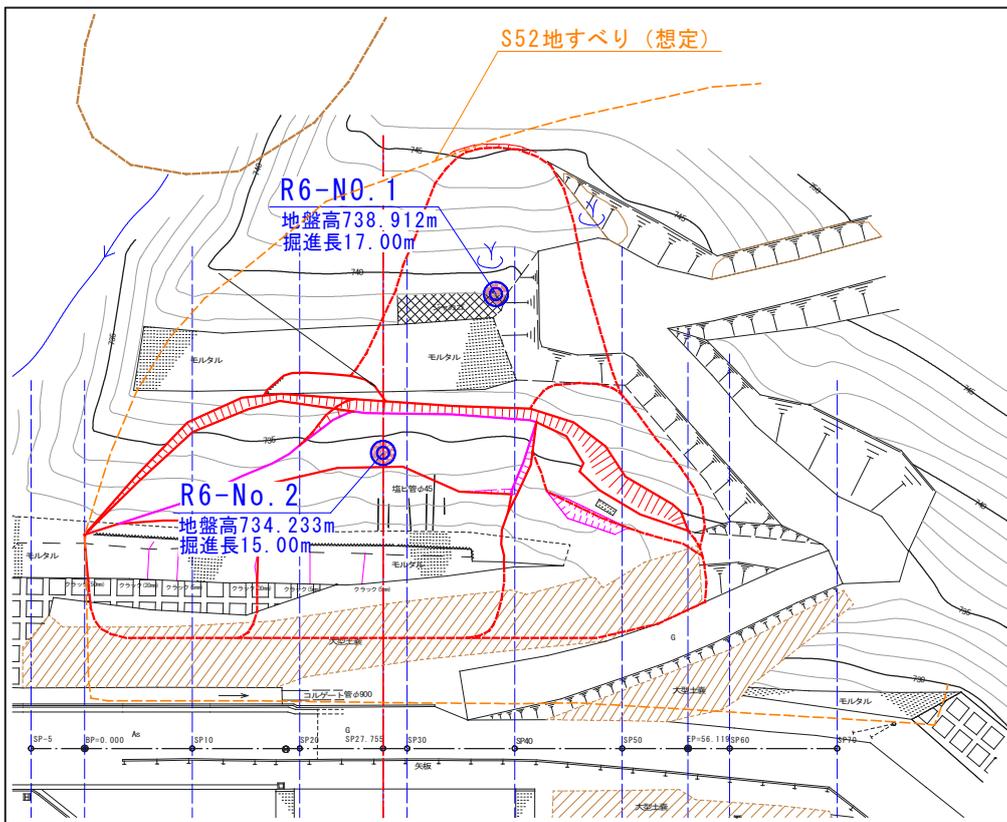


図 18 R5 ブロック周辺ボーリング調査位置図

表 3 傾斜計観測結果表

ブロック	孔番	観測期間	想定すべり面深度	傾斜計差目深度	主な変動			評価				総合評価							
					今回観測期間 (~R6 11.21)	最大変動量/月	観測開始後の累積変動 (~R6 11.21)	地形との関連性	果積性	気象条件との関連性	他孔との運動性	地すべり変動の可能性	判定理由						
S52ブロック	R6-No.1	R6.7.24 ~ R6.11.21	11.00m 乱れた泥岩下面	0.5m	・8/6から9/3の間にX軸で0.2mm程度の変動が見られるが、その後の果積はない。	X軸 約0.2mm (R6.8)	X軸 約0.2mm	あり (フロンカゴ)	なし	あり	なし	なし	なし	8月後半の降雨後に微小な変動が見られるが、その後の果積性は認められない。					
				1.0m	・8/6から9/3の間にX軸で0.1mm程度の変動が見られるが、その後の果積はない。	X軸 約0.1mm (R6.8)	X軸 約0.1mm	あり (フロンカゴ)	なし	あり	なし	なし	なし	なし	なし				
				1.5m	・10/24から11/21の間にX軸で0.1mm程度の変動が見られる。	X軸 約0.1mm (R6.11)	X軸 約0.2mm	あり (フロンカゴ)	なし	なし	大きな降雨無し	なし	なし	なし	なし	11月に微小な変動が見られるが、前後期間に果積性は見られない。			
				10.5m	・9/25から11/21の間にX軸で計0.6mm程度の変動が見られ、その間は果積している。	X軸 約0.4mm (R6.11)	X軸 約0.6mm	あり (S52ブロック)	あり	大きな降雨無し	あり	なし	なし	なし	なし	想定すべり面付近の深部に果積性を伴う微小な変動が見られる。変動量が小さく気象条件との関連性が不明であるため活動性は認定しないが、No.2別孔との運動性が確認されるため、地すべりの影響を受けている可能性はある。			
	R5ブロック S42ブロック	R6-No.2	R6.7.24 ~ R6.11.21	6.30m 土砂下面 6.85m 乱れた泥岩下面	3.0m	・8/6から11/21の間にX軸で0.2mm程度の変動が見られるが、一部回帰する。	X軸 約0.2mm (R6.11)	X軸 約0.2mm	なし	あり(一部回帰)	大きな降雨無し	なし	なし	なし	なし	微小な変動が見られるが、一部回帰する。			
					3.5m	・8/6から11/21の間にX軸で0.6mm程度の変動が見られるが、一部回帰する。	X軸 約0.2mm (R6.11)	X軸 約0.6mm	なし	あり(一部回帰)	大きな降雨無し	なし	なし	なし	なし	なし	なし		
					4.0m	・8/6から11/21の間にX軸で0.6mm程度の変動が見られるが、一部回帰する。	X軸 約0.2mm (R6.11)	X軸 約0.6mm	なし	あり(一部回帰)	大きな降雨無し	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	
					4.5m	・8/6から11/21の間にX軸で0.4mm程度の変動が見られるが、一部回帰する。	X軸 約0.2mm (R6.11)	X軸 約0.4mm	なし	あり(一部回帰)	大きな降雨無し	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし
					6.0m	・8/6から9/3の間、並びに10/24から11/21の間にX軸で計0.6mm程度の変動が見られ、果積性も認められる。	X軸 約0.4mm (R6.11)	X軸 約0.6mm	あり (R5、S52ブロック)	あり	大きな降雨無し	あり	大きな降雨無し	あり	あり	あり	あり	想定すべり面付近の深部に果積性を伴う微小な変動が見られる。変動量が小さく気象条件との関連性が不明であるため活動性は認定しないが、No.1別孔との運動性が確認されるため、地すべりの影響を受けている可能性はある。	
					6.5m	・10/24から11/21の間にX軸で0.1mm程度の変動が見られる。	X軸 約0.1mm (R6.11)	X軸 約0.2mm	あり (R5、S52ブロック)	なし	大きな降雨無し	なし	大きな降雨無し	なし	あり	あり	なし	なし	

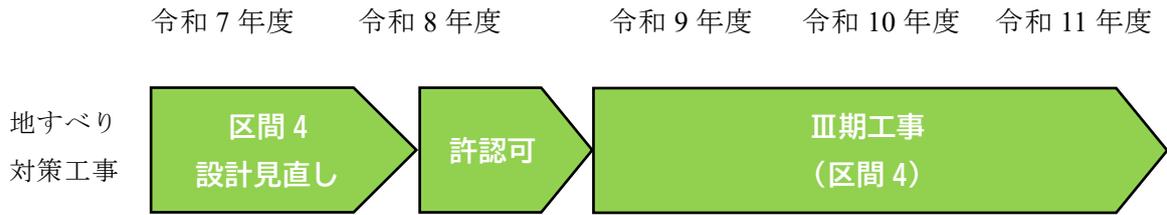


図 19 EEF 西側法面の安全対策工事に係る今後の工程

今後の予定

EEF 西側法面の安全対策工事に係る今後の工程を図 19 に示す。

R5 ブロックの予備設計および区間 4 を考慮した詳細設計・設計見直しについては令和 7 年度より実施し、令和 8 年度に工事に係る許認可申請を実施する。R5 ブロックの安全対策を含む区間 4 の施工は令和 9 年度～令和 11 年度に実施する予定である。

R5 ブロックの抑止工として検討しているアンカー工は地中部に根入れする工法であるが、直下には峠地区の旧坑道が位置しており、坑道までの土被り厚は数 m であることから、アンカー工と旧坑道の交差が懸念される。アンカー工が旧坑道と交差する場合には工事費が大きく増大し、施工途中に発覚した場合は工事中止等の大きな問題に発展することから、事前に旧坑道（空洞）の有無把握を目的とした地質調査の実施を検討予定である。

参考文献

- [1] 動力炉・核燃料開発事業団. 日本のウラン資源（Ⅱ）, PNC TN7420 88-006, pp.18-21 (1988).
- [2] 土木研究所, 応用地質, 坂田電機, 日本工営. 地すべりにおける挿入式孔内傾斜計計測マニュアル, 理工図書 (2010).
- [3] 上野将司, 中里裕臣. 地すべり調査・観測の進展と展望. 日本地すべり学会誌 49, pp.1-11 (2012).

3.2 機械学習によるヒヤリハット情報の解析

保安管理課 神崎訓枝

はじめに

ナレッジマネジメントは、個人や組織の持つ知識を活用する経営手法の1つであり、原子力分野では、Nuclear Knowledge Management と呼ばれ、原子力に関する技術的専門知識と能力を開発・維持するために必要不可欠なものである。特に、安全性を高める上で、自発的な Incidents（事故には至らなかったが問題が発生した状態：インシデント）や Near-Misses（危険を察知して回避したがヒヤリとした状態：ヒヤリハット）等の報告は重要な知識源となる[1]。しかし、現実には、情報収集・共有に課題が多く、特に、ヒヤリハット等の軽微な事象の報告を促すためには、原子力施設の従業員が知識共有の価値を認識し、その文化を醸成する努力が必要である[2]。そこで、著者は、より効果的な安全対策の検討を進めるため、ヒヤリハット報告の解析を実施してきた[3]。ここでは、実際のヒヤリハット報告を機械学習で解析し、知識をまとめ、ユーザが情報の全体像を確認しながら必要な知識へアクセスできるシステムを開発したので報告する。

テキスト解析

実際に日本原子力研究開発機構で報告された約 5000 件のヒヤリハットを、プログラム言語 Python を用いて解析した。ヒヤリハット報告の内容は非公開のため、ここでは例を用いて説明する。まず、文書中で使われた単語から、名詞、動詞、形容詞を抽出し、基本形（例えば、「歩き」「歩け」「歩こう」は全て「歩く」）でまとめ、解析に不要な「する」「いる」「こと」等の単語を除外した。次に、文書における単語の重要度を評価できる TF（Term Frequency、文書中の単語の出現頻度）-IDF（Inverse Document Frequency、文書全体での単語のレア度を表す逆文書頻度）を求め、テキストデータを数値データへ変換した（図 1）。

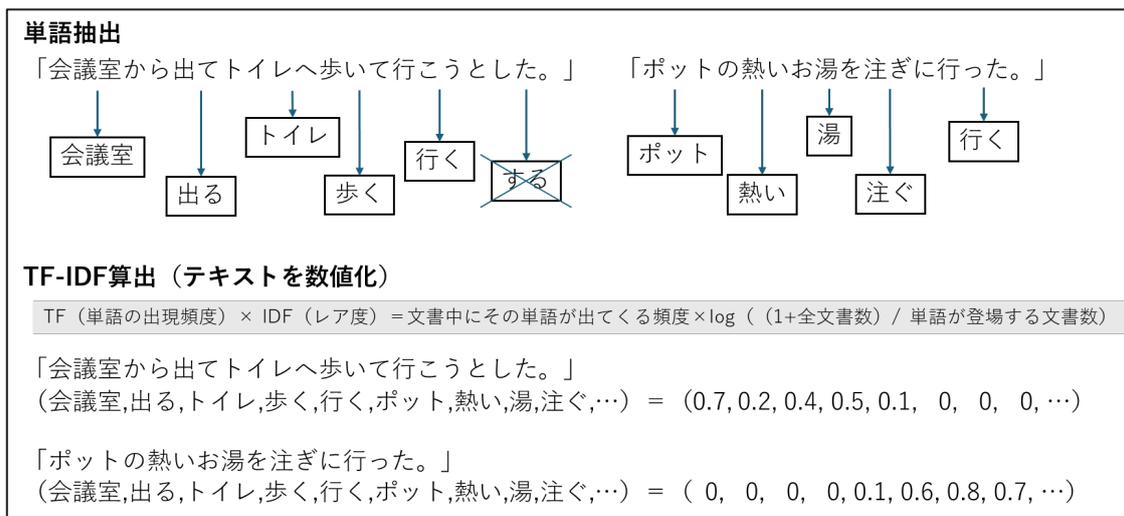


図 1 テキスト解析例

クラスタリング

テキストデータを数値データに変換した文書ベクトルを用いて、クラスタリングを行った。クラスタリングとは、似ているデータをグループ化する解析方法である。クラスタリングには、自己組織化マップという機械学習の一種を用いた。自己組織化マップについて簡単に説明すると、入力データ（学習データ）と同じ形式のベクトルを持つあらかじめ用意した複数のノードの集まりをマップとし、入力データの特徴をマップに学習させて写像する視覚表現に優れたクラスタリング手法である[4]。これによって似たようなヒヤリハット報告をグループ化することで、必要な知識を得る過程で関連情報に効率的にアクセスできるようにした（図2）。

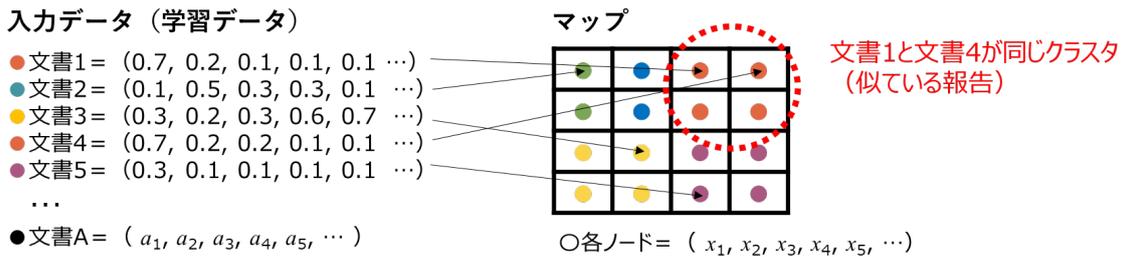


図2 テキストをクラスタリングする概念図

開発したシステム

本研究で開発したシステムは、視覚表現に優れた自己組織化マップの利点を活かし、クラスタリング結果を視覚でわかりやすく見せるようにデザインした（図3 (a)）。また、「作業」「危険要因」「リスク」「改善措置」で階層的にマップを作成することで、解析結果に文書の特徴だけでなく意味を持たせた（図3 (b)）。それにより、マップ上の各ノードをクリックして、体系化された安全情報を検索できるようになっている。具体的には、ユーザは、クラスタリングされた「作業」のマップを見て、関連しそうな「作業」グループを選択する。知りたい「作業」グループを選べば、その「作業」に関連する「危険要因」を知ることができ、知りたい「危険要因」グループを選べば、その「危険要因」に関する「リスク」を知ることができ、知りたい「リスク」グループを選べば、その「リスク」に対して行われた「改善措置」例を知ることができる。逆に、気になる「改善措置」を検索し、マップを遡って、その「改善措置」を含む「リスク」「危険要因」「作業」を見つけることもできる。

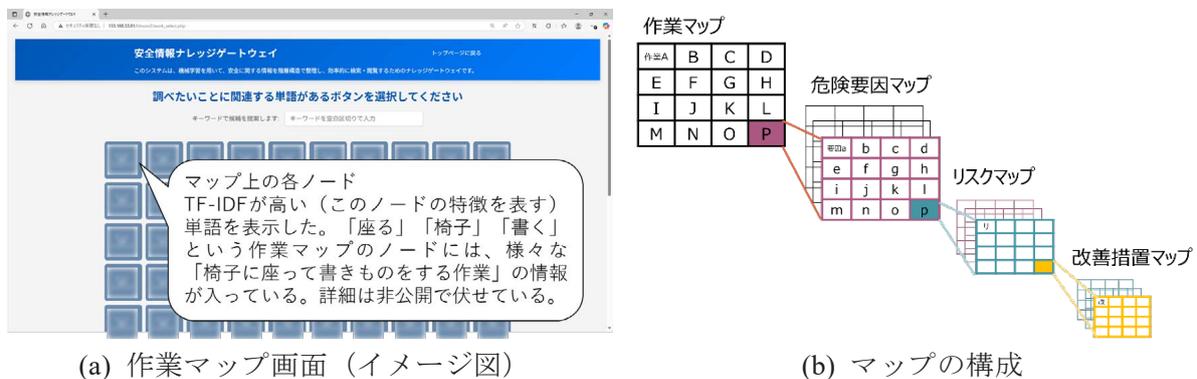


図3 開発したシステムの概要

評価例

例えば、図1の事象である「会議室から出てトイレへ歩いて行こうとした。(作業)」に関する情報を得るため、「トイレ」と検索した。その結果、トイレに関する情報がまとめられている「トイレ」「開ける」「入る」というノードが見つかった。このノードには、トイレの故障、慌てていて衝突、視界が悪いため衝突、濡れていて転倒という危険要因が見つかり、トイレに行くだけでも複数の種類の危険があることがわかった。同時に、「ドア」「開ける」「入る」というノードも見つかった。このノードには「トイレ」という単語は出てこなかったが、トイレ以外の「ドア」に注目した情報が含まれていた。「ドア」はトイレ以外にもあるため、TF-IDFで「ドア」が重要視された結果と考えられる。安全について検討する際には、特定の事象（ここでは「トイレ」）に限定せず、広く可能性を考えることが重要である。「トイレ」の情報だけでなく「ドア」の情報も得られることで、潜在的な危険性をより広範囲に捉えることができ、より効果的な安全対策につながると言える。

まとめ

本研究は、ヒヤリハット報告を視覚表現に優れた機械学習の一種である自己組織化マップでクラスタリングして知識をまとめ、ユーザが必要な情報へアクセスできるシステムを開発した。

本研究で開発したシステムの通常の実験システムと比較した利点は、①クラスタリングの結果を視覚的に提示することで、関連する情報をひとまとまりとして捉え、個別の実験結果を一件ずつ確認しなくても、情報の全体像が一目で把握可能、②表現の異なる似た事象を集約することで、膨大な情報の中から重複した内容を何度も確認する手間が省け、より効率的に必要な情報にたどり着くことが可能の2点が挙げられる。人間が一度に処理できる情報量には限りがある。本研究では、人工知能（機械学習）が得意とする大量の情報処理はコンピュータに任せ、人間が直感的に理解しやすいように整理・加工された情報を用いたより効果的な安全対策を提案した。引き続き、安全最優先で業務を進めるため、蓄積された貴重な知識をどのようにまとめ、活用していくか、検討していく。

謝辞

本研究は、日本原子力研究開発機構令和5年度萌芽研究開発制度の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] IAEA. Knowledge Management for Nuclear Industry Operating Organizations. IAEA-TECDOC-1510 (2006).
- [2] IAEA. Guide to Knowledge Management Strategies and Approaches in Nuclear Energy Organizations and Facilities. IAEA Nuclear Energy Series No. NG-G-6.1 (2022).
- [3] 人形峠環境技術センター. 2021年度人形峠環境技術センターにおける研究・技術開発成果一トピックス—. JAEA-Review 2022-080, 44p. (2023).
- [4] T. Kohonen. Self-Organizing Maps. Springer (1995).

This is a blank page.

4. 放射線影響評価研究

This is a blank page.

4.1 吸入された Rn-220 (トロン) の体内分布に関する数理モデルの構築

保安管理課 迫田晃弘、神崎訓枝

岡山大学 片岡隆浩、山岡聖典

背景と目的

通常、生活環境における「ラドン被ばく」とは、Rn-222 子孫核種の吸入による呼吸気道への沈着による被ばくを指すことが多い。これは、ラドンが貴ガスで化学的に不活性であり、吸入しても多くが呼気で体外へ排出されるためである。しかし、温泉利用等の特殊環境においては、一定の環境条件が整えば、Rn-222 (ラドンガス) の吸入や経皮摂取による被ばく線量も無視できないことが明らかになっている[1]。

一方、使用建材によっては同位体の Rn-220 (トロンガス) の屋内濃度が高まることが指摘されており、その子孫核種の吸入による線量計算がなされている[2]。また、温泉利用の観点から、実験小動物を用いたトロンガス摂取の生理学的効果の検討が進められている[3]。トロンガスの特徴としてラドンガス (3.8 日) よりも短い半減期 (56 秒) があり、体内へ取り込み次第、速やかに放射壊変する。このため、ラドンガスとトロンガスの体内分布は異なると推察できるが、その検証はなされておらず、被ばく線量への影響も明らかではない。

そこで本研究では、トロンガスの体内分布の経時変化を明らかにするため、短半減期核種に適用可能なモデルを開発した。本稿では、本モデルと計算結果の進捗及び今後の予定を概説する。

計算モデルと結果例

吸入されたトロンガスは気道を経由して肺胞に至り、そこで一部が血液吸収され、血流のって全身をめぐる。ラドンガスの体内動態を計算した際、「外気と気道内のラドン濃度は等しい」、「血液循環に係る時間は半減期に比べて無視できるほど短い」と仮定できたが[4]、トロンの場合、短半減期のためにこれら仮定は適切とはいえない。両者を考慮するために、呼吸気道モデル[5]と体内動態モデル[4]を組み合わせることにした (図 1)。各コンパートメントでのトロンガスの収支を微分方程式で表し、体内濃度の時間変化を数値計算した。

その結果、トロンガスは呼吸気道内でも有意に減衰することが確認された (図 2 (a, c))。また、脂肪組織において、トロンガスとラドンガスの間で結果の傾向に顕著な違いが認められた (図 2 (b, d))。脂肪組織は血液-組織間の分配係数が高いため、濃度の飽和には時間を要するが、飽和時ラドン濃度は高値を示した。一方で、トロンの場合、(同じ元素であるため) 分配係数は等しく高いものの、放射壊変による減衰の寄与が大きく、ラドンに比べて飽和時トロン濃度は高くなかった。

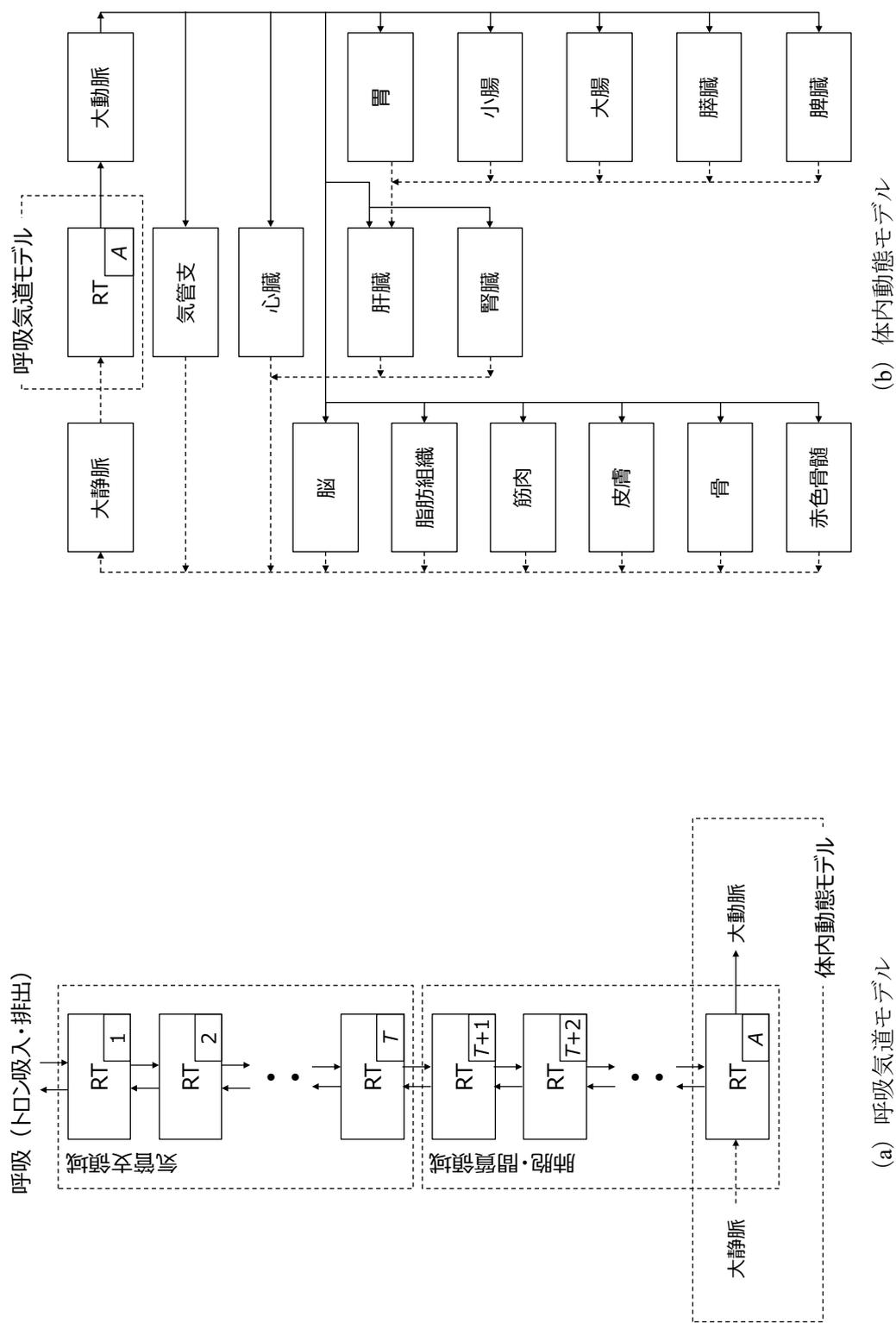
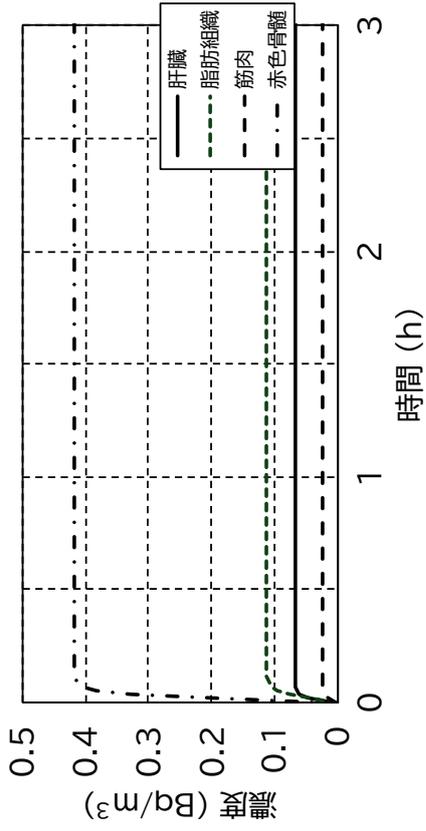
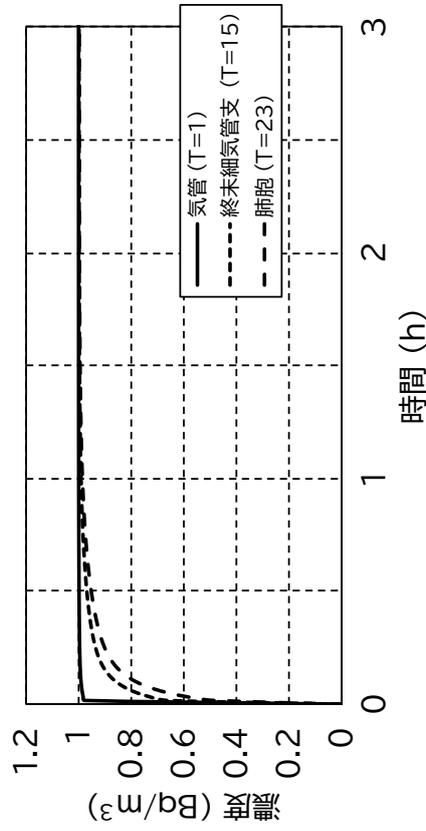


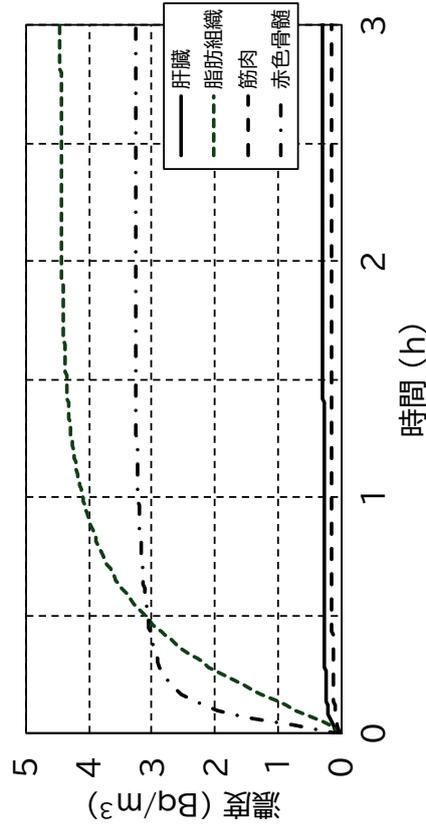
図1 呼吸気道モデルと体内動態モデル (呼吸気道モデルでは気道や肺胞内の空気中濃度、体内動態モデルでは臓器・組織中濃度を計算。マウスの気道分岐回数は $T = 15$ 、 $A = 23$ 。ラットとヒトは $T = 16$ 、 $A = 25$ 。)



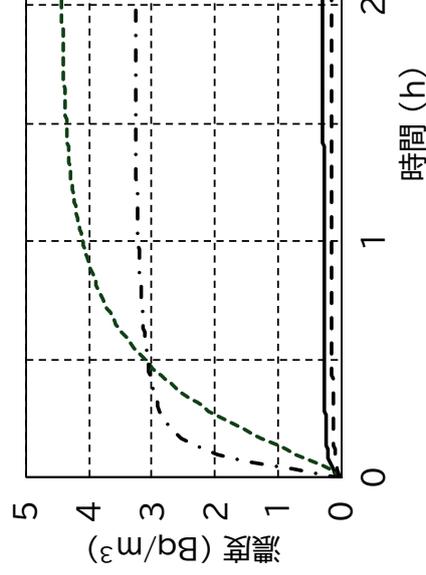
(a) 呼吸気道内トロン



(b) 臓器・組織内トロン



(c) 呼吸気道内ラドン



(d) 臓器・組織内ラドン

図2 呼吸気道内と臓器・組織中トロン濃度の時間変動 (吸入濃度 1 Bq/m³、マウスの場合)

今後の予定

これまでの進捗として、トロンガスの体内動態モデルと計算結果の一例を上述した。最終的に線量係数を導出するには、トロン子孫核種の体内分布に関する情報も必要である。トロンガス（本モデル計算）と子孫核種（動物実験）の体内分布を比較すると、明らかに異なる。よって今後は、体内摂取されたトロンガスに由来する子孫核種（特に、半減期が比較的長い Pb-212（10.6 時間））の体内動態について、先行研究[6, 7]等に基づき評価検討を進める予定である。

参考文献

- [1] 片岡隆浩, 迫田晃弘, 神崎訓枝, 光延文裕, 山岡聖典. ラドン温泉療法の適応症とそのメカニズムに関する最近の研究動向. 日本温泉気候物理医学会雑誌 88, pp.57-72 (2025).
- [2] International Commission on Radiological Protection (ICRP). Occupational Intakes of Radionuclides: Part 3. ICRP Publication 137. Annals of the ICRP 46 (2017).
- [3] Y. Kobashi, T. Kataoka, N. Kanzaki, T. Ishida, A. Sakoda, H. Tanaka, Y. Ishimori, F. Mitsunobu, K. Yamaoka. Comparison of antioxidative effects between radon and thoron inhalation in mouse organs. Radiation and Environmental Biophysics 59, pp.473-482 (2020).
- [4] A. Sakoda, Y. Ishimori, A. Kawabe, T. Kataoka, K. Hanamoto, K. Yamaoka. Physiologically based pharmacokinetic modeling of inhaled radon to calculate absorbed doses in mice, rats and humans. Journal of Nuclear Science and Technology 47, pp.731-738 (2010).
- [5] A. Sakoda, Y. Ishimori, K. Yamaoka, T. Kataoka, F. Mitsunobu. Absorbed doses of lungs from radon retained in airway lumens of mice and rats. Radiation and Environmental Biophysics 52, pp.389-395 (2013).
- [6] R.T. Drew. ^{212}Pb distribution studies in the rat. Health Physics 20, pp.617-623 (1971).
- [7] 迫田晃弘, 神崎訓枝, 田中裕史, 片岡隆浩, 山岡聖典. 同位体をトレーサとしたラドン子孫核種の体内動態に関する研究. 日本健康開発雑誌 40, pp.90-94 (2019).

4.2 変動帯における地中ラドンポテンシャルが高い地点の偏在とその要因の解明

鉱山施設課 野原壯、竹末勘人

保安管理課 迫田晃弘

背景と目的

温泉に含まれるラドンは、日本人にとって身近な自然放射性元素であり、ウランやラジウムの放射壊変によって、主に岩石や土壌から発生している。ラジウムがキュリー夫妻によって発見されてから 100 年以上経つが、ラドンの性質や分布は不明な点が多く、謎が多い元素である。一方、ラドンは喫煙に次ぐ肺がんの主な原因であり、2009 年の WHO の勧告を踏まえて、屋内ラドンに係る人為条件と地中のラドン供給能力の自然条件（以下、地中ラドンポテンシャル）の調査が主に欧州で行われている。その結果、地中ラドンポテンシャルが高い地点（以下、高ラドンポテンシャル地点）が断層帯や火山の近傍に偏在することがわかっている（例えば、[1]）。変動帯に位置する我が国は、断層帯や火山の近傍に高ラドンポテンシャル地点が偏在する可能性が考えられる。また、従来、高ラドンポテンシャルと地下水ラドン濃度との関係は注目されていないが、一部でラドンを含む井戸水の利用による屋内ラドン濃度の上昇が報告されており、地質と地下水を考慮した調査が必要である。

本研究の目的は、「変動帯における高ラドンポテンシャル地点の偏在と、その要因の解明」であり、優先する課題は、わが国の高ラドンポテンシャル地点の情報取得である。我が国では、断層沿いの地下水や地震に関連するラドン異常や、沿岸の地下水湧出に伴うラドン異常が研究されており、このような異常は、地下水ラドン濃度が関係している可能性が考えられる。一方、地中ラドンポテンシャルの全国調査では、被ばくの影響が相対的に大きい高ラドンポテンシャル地点の把握が重要であり、高ラドンポテンシャル地点の偏在と、その要因の解明が急務である。本研究では、ラドン泉地域における高ラドンポテンシャル地点の偏在を確認して、その要因を把握する。

変動帯におけるラドン泉研究の意義

本研究は、地下水が豊富な我が国の特徴を踏まえて、高濃度のラドン泉が自然湧出する地域を対象に行う。土壌のラドン濃度は変化幅が大きく、多数の要因（親核種の分布、水分量、温度、粒子サイズなど）がある（例えば、[2]）。これまで、欧州を中心に各国の自然環境や社会環境の違いを踏まえて、高ラドンポテンシャル地点の偏在とその要因の研究が行われているが、地中ラドン濃度の要因の特定は一般に難しい。しかし、地中ラドン濃度が顕著に高い場合、要因の候補を絞り込める。

世界の一部の火山では、CO₂ の移動に伴う顕著に高いラドン濃度が報告されている（例えば、[3]）。そのため本研究では、地下水中の CO₂ の脱ガスに伴うラドンに注目している。CO₂ の脱ガスや岩盤割れ目の地下水の移動速度は、ラドンの拡散速度の数倍から数十倍である。半減期が約 3.8 日のラドンは、一般に地中の移動距離が 1 m 未満だが、地下水と CO₂ の移動により最大数十 m に及ぶ。我が国においても、CO₂ を含むラドン泉の自然湧出によって地中ラドンポテンシャルが増加する可能性が考えられ、高ラドンポテンシャル地点における地下水流動、地質

特性、CO₂フラックスなどのパラメータの把握とモデル解析が望まれる。

本研究は、変動帯における高ラドンポテンシャル地点の調査手法の整備を最終目標とする。変動帯の自然現象は、断層帯と火山に加えて、地下深部のスラブ水の上昇と、隆起侵食に伴う地下水流動の変遷も考慮する。スラブ水は一般に塩濃度が高く[4]、階層的な広域地下水流動[5]の底部を流れる地下水が、上昇するスラブ水を取込んで希釈しながら、流出域に移動すると考えられる。このような地下水の水質と流動は、ラジウムの溶脱、移動の要因と考えられる。また、自然湧出に伴うCO₂の脱ガスや酸化は、鉄共沈によるラジウム濃集部の形成[6]の原因となる。隆起侵食は、地形変化に伴う広域地下水流動の変化と、段丘の形成や河川浸食による局所的な湧出地点の変化が想定される。そのため、ラジウムの半減期（約1600年）を考慮して、千年間程度の溶脱、移動、濃集の継続と、侵食に注目する。

高ラドンポテンシャル地点近傍には地中ラドンポテンシャルが低い地点も存在する。本研究では、このような地点ごとの自然環境の違いを調べて阻害要因に係る情報を得る。さらに、阻害要因の解明のため、地下水中のラドンが地表に移行する様子を再現した室内試験を計画中である。一連の研究は、わが国のラドン被ばくの低減を目標にしており、このような、高ラドンポテンシャル地点の偏在やその要因の情報は、地中ラドンポテンシャルマップの調査手法の整備と、新築時の制限と対策に係る基礎情報を提供することで、我が国の全国調査への貢献を目指す。また、高ラドンポテンシャルの偏在並びにその要因と、阻害要因の情報は、高ラドンポテンシャル地点周辺の安全性の確認や、効果的な土壌改良対策への活用が期待できるため、研究成果を海外に発信して、世界の変動帯のラドン被ばく低減への貢献を目指す。

方法と結果

本研究は、主にフィールド調査（自然環境の地表調査とラドン測定）を行う。対象地域は、地下水中のラドン濃度が比較的高い地域で、地質の違いを考慮して、花崗岩（島根県三瓶、鳥取県三朝）、火山（山梨県増富）、断層帯（兵庫県有馬）、のラドン泉地域である。これらの地域では、温泉水と土壌のラドン測定の結果が公表されており、既存の情報を踏まえてフィールド調査を実施中である。

一般に地中ラドンポテンシャルは、地中のラドン濃度と移動の係数（透気係数）で評価され、土壌の調査は深さ約1 mで実施される。まず、従来の方法でフィールド調査を行いラドン泉地域のデータを取得して、課題を抽出している。調査内容と結果の詳細は文献[7]を参照されたい。以下、概要を記述する。

2024年度は、高濃度のラドンを含有するラドン泉2地域を対象に、地表の空間ガンマ線線量率及びラドン散逸率の現場測定を行った。その結果、ラドン泉の自然湧出地点から10 m以内の斜面の地下水面の直上に、局所的に高ラドンポテンシャル地点が分布すると考えられた。空間ガンマ線線量率は0.5 µSv/h以上、ラドン散逸率は最大約9 Bq/m²・sであった。

今後の予定

ラドン泉のラドン濃度と高ラドンポテンシャルとの関係については引き続き調査を行う。地下水及びガスの移行と、地下浅部のラジウム濃集による高ラドンポテンシャル地点を想定して、

地下水流動、地質特性、CO₂フラックスなどのパラメータの把握とモデル解析を試みる予定である。

ラジウム濃集については、地下水中のラジウム並びにラジウム沈殿物の調査を予定している。地下水及びガスの移行については、土壌の透水（透気）性とラドン散逸率を組み合わせた調査方法のほか、粘土層や土壌水分等の阻害要因の試験を計画している。一方、ラドン泉地域の高ラドンポテンシャル地点では、花崗岩地域の谷沿い斜面の岩盤の割れ目と礫質堆積物の不均質な透水性と、局所的に高い空間ガンマ線線量率が認められることから、CO₂の脱ガスによる局所的なラドンの移動が予想される。このような局所的なラドンの移動の重要性を踏まえて移動パラメータの調査方法を検討する予定である。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 24K08315 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] G. Ciotoli, M. Voltaggio, P. Tuccimei, M. Soligo, A. Pasculli, S. Beaubien, S.E. Bigi. Geographically weighted regression and geostatistical techniques to construct the geogenic radon potential map of the Lazio region. *Journal of Environmental Radioactivity* 166, pp.355-375 (2017).
- [2] A. Sakoda, Y. Ishimori. Mechanisms and modeling approaches of radon emanation for natural materials, Japan, *J. Health Phys.*, 52, pp.296-306 (2017).
- [3] M. Neri, E. Ferrera, S. Giammanco, G. Currenti, R. Cirrincione, G. Patanè, V. Zanon. Soil radon measurements as a potential tracer of tectonic and volcanic activity. *Scientific Reports* 6, 24581 (2016).
- [4] 風早康平, 高橋正明, 安原正也, 西尾喜朗, 稲村明彦, 森川徳敏, 佐藤務, 高橋浩, 北岡豪一, 大沢信二, 尾山洋一, 大和田道子, 塚本斉, 堀口桂香, 戸崎裕貴, 切田司. 西南日本におけるスラブ起源深部流体の分布と特徴. *日本水文科学会誌* 44, pp.3-16 (2014).
- [5] J. Tóth. A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. *Journal of Geophysical Research* 68, pp.4795-4812 (1963).
- [6] 佐々木宗健, 徂徠正夫, 奥山康子, 村岡洋文. 本邦の炭酸塩沈殿物を多量に伴う温泉・鉱泉の地化学的特徴. *岩石鉱物科学* 38, pp.175-197 (2009).
- [7] 野原壯, 竹末勘人, 迫田晃弘. 地下水流動は地中ラドンポテンシャルに影響するか? 地下水学会秋季講演会 (2025).

This is a blank page.

5. 業績一覧

This is a blank page.

5.1 論文

[査読あり]

- 1) K. Tanaka, K. Yamaji, H. Masuya, J. Tomita, M. Ozawa, N. Yamazaki, K. Tokunaga, M. Fukuyama, Y. Obara, I. Maamoun, A. Yamaguchi, Y. Takahashi, N. Kozai, B. Grambow. Microbially formed Mn(IV) oxide as a novel adsorbent for removal of Radium. *Chemosphere* 355, 141837 (2024).
- 2) H. Sakasegawa, M. Nakajima, T. Kato, T. Nozawa, M. Ando. Anisotropic creep property related to non-spherical shape of mechanically alloyed powder of oxide dispersion strengthened F82H. *Materials Today Communications* 40, 109659 (2024).
- 3) K. Oguri, N. Hagura, A. Yamaguchi, M. Okumura, H. Matsuura, Y. Tsunashima, K. Aoki, Y. Arai, S. Watanabe. Characterization of mineral composition using PIXE and EXAFS analyses to elucidate the Barium adsorption mechanism. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 556, 165516 (2024).
- 4) 迫田晃弘, 石森有. 日本における屋内ラドン対策の議論に向けたリスク評価. *保健物理* 59, pp.109-117 (2024).
- 5) S. Naoe, A. Tanaka, N. Kanzaki, R. Takenaka, A. Sakoda, T. Miyachi, K. Yamaoka, T. Kataoka. Effect of radon inhalation on murine brain proteins; Investigation using proteomic and multivariate analyses. *Acta Medica Okayama* 78, pp.387-399 (2024).
- 6) Y. Ueda, C. Micheau, K. Akutsu Suyama, K. Tokunaga, M. Yamada, N. Yamada, D. L. Bourgeois, R. D. Motokawa. Fluorous and organic extraction systems; A comparison from the perspectives of coordination structures, interfaces, and bulk extraction phases. *Langmuir* 40, pp.24257-24271 (2024).
- 7) M. Nagasawa, Y. Shimizu, A. Yamaguchi, K. Tokunaga, H. Mukai, N. Aoyagi, H. Mei, Y. Takahashi. Interpretation of vertical migration and enrichment processes of rare earth elements (REEs) in ion-adsorption-type mineralization in Japan based on REE speciation analyses. *Chemical Geology* 670, 122431 (2024).
- 8) S. Andresz, C. Betos, W-H. Ha, T. Hamida, B.S. Hussain, F. Kabrt, O. Nusrat, A. Michaelidesova, T.V.M. Lima, N. Movsisyan, F. Otoo, C. Papp, J. Piechtoka, R. Qiu, M. Sáez Muñoz, A. Sakoda, T. Kono, V.P. Singh, I. Tsorxe, H. Yoshida. How to start a network? Experience in networking and achievements of the IRPA Young Generation Network. *Proceedings of the Sixth International Symposium on the System of adiation Protection. Annals of the ICRP* 53 (1_suppl), pp.38-45 (2024).
- 9) 片岡隆浩*, 迫田晃弘*, 神崎訓枝, 光延文裕, 山岡聖典. ラドン温泉療法の適応症とそのメカニズムに関する最近の研究動向. *日本温泉気候物理医学会雑誌* 88, pp.57-72 (2025).
*共同筆頭著者
- 10) Y. Narazaki, A. Sakoda, N. Akata, H. Itoh, N. Momoshima. Measurement and analysis of long-term variation of atmospheric ⁷Be activity concentrations in Dazaifu (western Japan). *Journal of Environmental Radioactivity* 284, 107612 (2025).
- 11) A. Sakoda, Y. Ishimori, M.M. Hasan, Q. Jin, T. Iimoto. In situ observation and theoretical study of temporal variations in radon exhalation rates from the gypsum board of a cavity wall: a comparison with a solid concrete wall. *Journal of Environmental Radioactivity* 287, 107703 (2025).

[査読なし]

- 1) 秋吉優史, 迫田晃弘, 大久保秀輝, 関口寛, 牧大介. 第5回日本放射線安全管理学会・日本保健物理学会合同大会印象記. 保健物理 60, pp.74-79 (2025).

5.2 報告書

- 1) 人形峠環境技術センター, 2023年度人形峠環境技術センターにおける研究・技術開発成果一トピックスー, JAEA-Review 2024-050, 55 p. (2024).

5.3 各種研究費

[機構外]

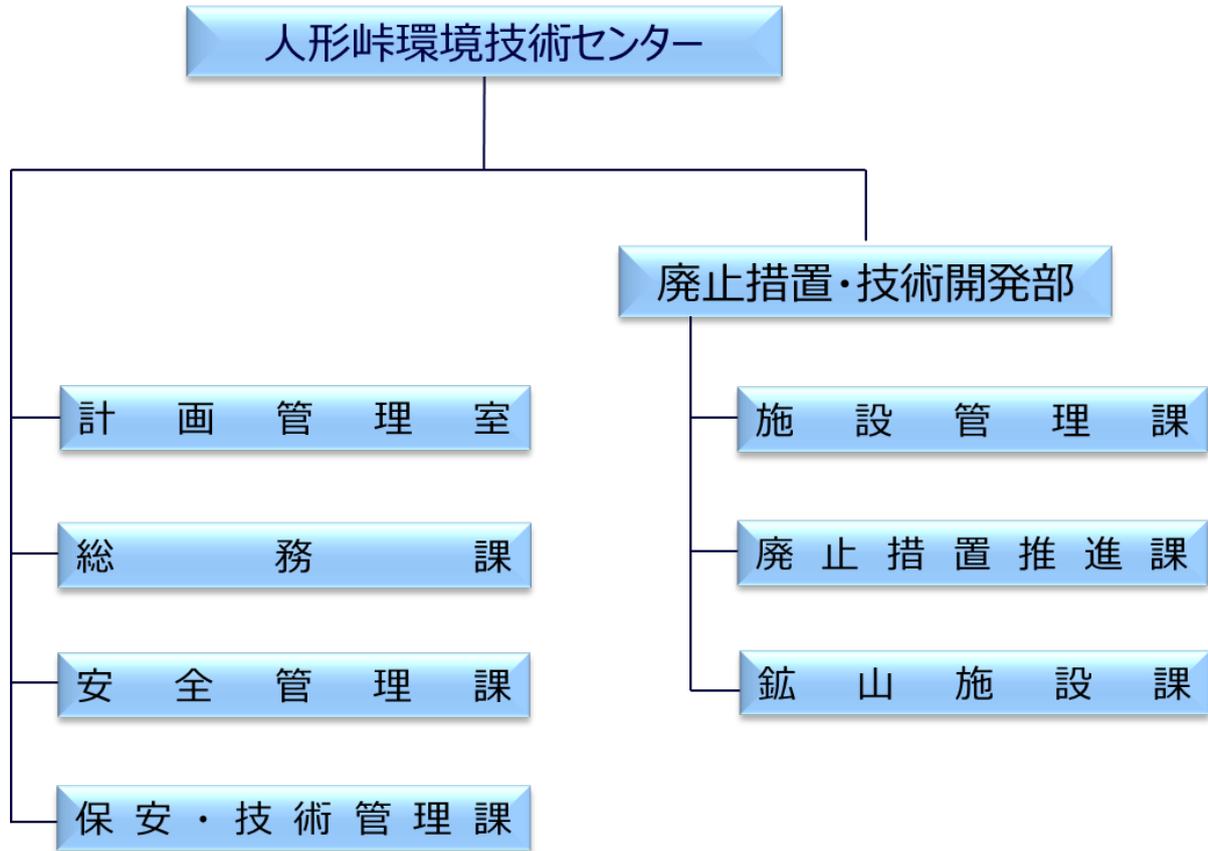
- 1) 酒瀬川英雄 (代表者). 回収可能性を確保する放射性廃棄体パッケージ複合材料の開発, 科研費 基盤研究 (C), 2022-2024年度.
- 2) 徳永紘平 (代表者), 鉄鉱物の化学状態の変化に伴う環境中でのヒ素及びウランの移行素過程に関する研究, 科研費 若手研究, 2023-2024年度.
- 3) 飯本武志 (代表者), 五十嵐悠, 主原愛, 迫田晃弘 (分担者). 放射線環境マネジメントのための革新的 RP 体系の開発とその社会実装, 科研費 基盤研究 (B), 2024-2026年度.
- 4) 光延 聖 (代表者), 白石 史人, 濱村 奈津子, 加藤 真悟, 徳永紘平 (分担者). 水田土壌表層へのヒ素異常濃集を支配する複合要因の解明と自然模倣型土壌浄化への応用, 科研費 基盤研究 (B), 2023-2027年度.
- 5) 飯本武志 (代表者), 小川達彦, 迫田晃弘, 主原愛, 五十嵐悠 (分担者). 自然起源放射性物質のトランスサイエンス問題に着眼したリスク教育法の開発, 科研費 国際共同研究加速基金 (海外連携研究), 2023-2025年度.

[機構内]

- 1) 神崎訓枝 (代表者). Society 5.0 実現に向けた危険予知 AI 搭載サイバー空間による安全作業支援体制の構築. 萌芽研究開発制度, 2023-2024年度.

付録1 組織図

(2024年4月1日～2024年10月31日)



(2024年11月1日～2025年3月31日)



付録2 産学官民連携の取り組み

戦略推進室 青木勝巳
検査開発株式会社 宮川洋

岡山大学との連携

岡山大学と日本原子力研究開発機構は、双方の有する研究施設、研究成果、人材等を活かし、連携協力することによって、相互の研究及び人材育成の充実を図ることを目的として、2007年に包括的連携協力協定を締結している。

本年度の活動として、2025年3月28日、人形峠環境技術センターにおいて協定に基づく連携協議会を開催（オンライン併用）し、2024年度の連携協力事業、2025年度の連携協力事業の計画（案）についての報告と協議を行った（図1）。また共同研究成果発表会で本年度の研究成果についての報告と質疑応答を行った。



図1 岡山大学との連携協議会の様子

津山工業高等専門学校との連携

津山工業高等専門学校（津山高専）と人形峠環境技術センターは、地域の特徴を活かし、研究及び人材育成を目的として、2008年に連携協力協定を締結している。

本年度の活動として、人材育成のため2024年4月から7月にかけて、電気電子システム系5年生と情報システム系5年生を対象として全15回シリーズで“環境科学”の講義を行った（表1、図2）。

表 1 2024 年度津山高専での環境科学講座

実施日	講義内容	担当者（所属 [*] ）
4月9日	ガイダンス	日野田 晋吾（計画管理室）
4月16日	原子力機構・人形峠環境技術センター紹介	青木 勝巳（計画管理室）
4月23日	地球環境問題、低炭素社会の構築	青木 勝巳（計画管理室）
4月30日	水と人間活動、生物多様性の保全	迫田 晃弘（計画管理室）
5月7日	化学物質と環境、公害防止と環境保全	青木 勝巳（計画管理室）
5月14日	循環型社会の構築、廃棄物対策	迫田 晃弘（計画管理室）
5月21日	我が国におけるエネルギー事情	迫田 晃弘（計画管理室）
5月28日	放射性物質の処理・処分	酒瀬川 英雄（廃止措置推進課）
6月4日	中間試験	青木 勝巳（計画管理室）
6月11日	除染技術開発	西脇 大貴（廃止措置推進課）
6月18日	山間地の安全評価に係る地下水流動調査技術	竹末 勘人（鉱山施設課）
6月25日	自然起源放射性物質の環境影響評価に関連して	迫田 晃弘（安全管理課）
7月2日	地球化学的な思考を基にした研究紹介	徳永 紘平（鉱山施設課）
7月9日	機械学習によるデータ解析	神崎 訓枝（安全管理課）
7月16日	講義の最後にあたって	青木 勝巳（計画管理室）
7月23日	休講・レポート提出期限	

*当時の所属名を示す。



図 2 津山高専での講義の様子

美作大学との取り組み（食品事業を革新するプラットフォームの構築）

美作大学からの依頼に基づき、2019年度から同大学が進める食味学研究事業ビジネスモデルの構築に協力している。協力内容は、味覚センサー及び高感度ガス質量分析装置（図3）を用いて食材の味と香りを数値化、可視化することで、食材の差別化要因の視覚化と生産システム化（地元産農産物の差別化及び改良、食品製造の原料選別、食材加工技術の向上、食品流通の品質管理等）の実現を目指している。本年度の活動として、地域で肥育されている「つやま和牛」の試験測定結果の報告等を実施した。



図3 食材の香りを数値化する高感度ガス質量分析装置

サテライトオフィスにおける活動

人形峠環境技術センターの事業の透明性確保、分かりやすい情報提供に加えて地域の方々との交流を促進するため、2020年6月に鏡野町総合文化施設ペスタロッジ館内に「サテライトオフィスふらっと」を開設している。

2024年度の来訪者は1,500名を超え、開館以来の累計来訪者は約6,900名となった。2023年5月8日の新型コロナウイルス感染症の5類感染症移行後も、必要な対策を取りつつ、企業相談、幼児から小学校低学年の児童を対象とした科学に触れ合う工作教室を実施した（図4）。2024年10月27日には、3回目となる宇宙航空研究開発機構（JAXA）、日本宇宙フォーラム（JSF）及び鏡野町と連携した実験教室を開催した（図5）。



図4 サテライトオフィスでの工作教室の様子



図5 JAXA、JSF 及び鏡野町と開催した実験教室の様子

This is a blank page.

