



JAEA-Review

2024-050

DOI:10.11484/jaea-review-2024-050

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

トピックス

Research and Development in the Fiscal Year 2023
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 2025

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

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 —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

(2024 年 11 月 19 日受理)

本報告書は、2023 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、花崗岩山間地における地下水流動の特徴に関する調査、鉱物への微量元素の分配に関する基礎と応用について報告する。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。保障措置として、人形峠環境技術センターのウラン濃縮施設における、課題や取り組みについて報告する。安全技術・設備開発として、鉱さいたい積場の防災対策について、また放射線影響評価研究として、ラドンのリスクと生体影響の評価について報告する。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 2023
in Ningyo-toge Environmental Engineering Center: Topics**

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

(Received November 19, 2024)

This report outlines some main research and development activities executed by the Ningyo-toge Environmental Engineering Center in FY2023.

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 fundamentals and applications of the partitioning of trace elements into minerals. 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 progress of safeguards activities at the uranium enrichment facility, the construction of safety measures at the mill tailings ponds, and the risk and biological effects 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 花崗岩山間地の地下水流動の不均質性を考慮した地下水流動調査技術の検討-----	3
1.2 バライト共沈法の環境放射化学・地球化学的な応用に関する研究-----	7
2. ウラン廃棄物工学研究-----	13
2.1 レーザー除染技術の開発-----	15
2.2 廃棄体容器材料のための銅合金の腐食挙動-----	20
3. 保障措置-----	25
3.1 ウラン濃縮施設の保障措置にかかる課題への取組状況-----	27
4. 安全技術・設備開発-----	29
4.1 鈹さいたい積場の右岸側斜面の巨大地震対策-----	31
5. 放射線影響評価研究-----	39
5.1 日本における屋内ラドンのリスクと参考レベルの有効性の評価-----	41
5.2 ラドン吸入後のマウス心臓中のグルタチオン関連物質の変化-----	45
6. 業績一覧-----	47
6.1 論文-----	49
6.2 報告書-----	49
6.3 招待講演-----	50
6.4 各種研究費-----	50
6.5 受賞-----	50
6.6 その他-----	51
付録1 組織図-----	52
付録2 産学官民連携の取り組み-----	53

Contents

1. Environmental research and environmental conservation	1
1.1 Investigation techniques for heterogeneity of groundwater flowing through granitic mountains...	3
1.2 Research on environmental radiochemical and geochemical applications of barite co-precipitation methods	7
2. Uranium waste engineering research	13
2.1 Development of laser decontamination technique	15
2.2 Corrosion behaviors of copper alloys for waste package material	20
3. Safeguards	25
3.1 Status of efforts for safeguards challenges at the uranium enrichment facility	27
4. Development of safety techniques and equipment	29
4.1 Countermeasures against huge earthquakes on the right bank side slope of the mill tailings pond ·	31
5. Radiation research	39
5.1 Assessing indoor radon risk and effectiveness of reference level application in Japan	41
5.2 Changes in glutathione-related metabolites in mouse heart following radon inhalation	45
6. List of achievements	47
6.1 Papers	49
6.2 Reports	49
6.3 Invited presentations	50
6.4 Grants	50
6.5 Awards	50
6.6 Others	51
Appendix 1 Organization chart	52
Appendix 2 Collaboration with industry, academia, government and private sectors	53

編集チーム

主 査：青木 勝巳（人形峠環境技術センター 計画管理室 室長）

担当者：神崎 訓枝（安全管理課）
久米 宰（保安・技術管理課）
酒瀬川 英雄（廃止措置推進課）
迫田 晃弘（計画管理室）
竹末 勘人（鉱山施設課）
谷口 淳子（総務課）
林 裕斗（施設管理課）

事務局：神崎 訓枝（計画管理室）
迫田 晃弘（計画管理室）

※なお、編集チームの所属はチームが結成された2024年4月時点、本文に記載されている所属は2023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 花崗岩山間地の地下水流動の不均質性を考慮した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、花崗岩山間地における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。ウラン廃棄物埋設処分では、自然現象（例えば、地形侵食や断層など）によって埋設処分地とその周辺施設に期待される安全機能が損なわれる恐れがないような地点を選定することが不可欠である。一方、自然現象の長期的な影響を地点選定の段階で回避することは困難であるため、その影響を安全評価に含めておくことが重要である。ウラン廃棄物埋設処分の安全評価では、ウランが地下水によって移行するシナリオ（以下、地下水シナリオという）を用いる。地下水シナリオでは、地下水の涵養域から流出域までの流域におけるウランの移行を想定するため、流出域の特定が必要となる。しかし、流域における地下水の流れは不均質であるため[1]、流出域の特定が難しい場合がある（図1）。このようなウランの移行を対象とする安全評価は、地下水流動モデルに基づいて実施されるため、地下水流動モデルの不確実性が、最終的な安全評価の不確実性に大きな影響を与える[2]。従来、地層処分技術に関わる研究開発では、花崗岩中の割れ目帯や断層などの高透水構造が注目され、透水係数の不均質性（以下、透水不均質性という）に関するボーリング調査と地下水流動解析が行われてきた[3]。しかし、ボーリング調査には費用や時間がかかる問題がある。また、花崗岩の透水不均質性が安全評価の不確実性に繋がる可能性がある。山間地の安全評価に係る地下水流動調査では、割れ目帯や断層の回避に有利な地点の選定が課題であり、地下水の流出域を特定するための調査技術と解析手法を整備する必要がある。当面の課題は、花崗岩山間地の不均質性の把握であり、地下水流動モデルの構築を目指している。

西南日本の花崗岩山間地の地表付近に着目すると、花崗岩の熱水変質や風化に伴うマサ化や粘土化がみられ、それらを覆って火山噴出物が分布する。花崗岩山間地の表層付近では、マサ化や粘土化を考慮するとともに、断層を回避した地点の選定が必要である。これまでに、人形峠環境技術センターの環境研究では、人形峠地域を対象に、花崗岩山間地における断層を回避

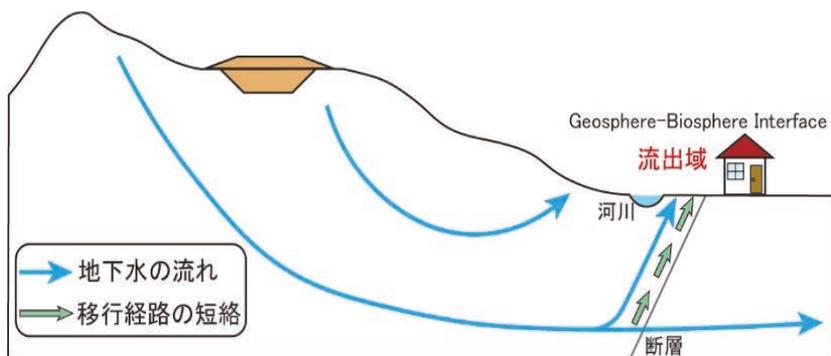


図1 流域における地下水流動のイメージ

するための地下水流動調査技術の開発[4]のほか、風化花崗岩の地下水流動の不均質性に関する研究[5]を進めてきた。一方で、花崗岩山間地の地下水流動の不均質性を考慮しつつ、地下水の流出域を特定するための総合的な調査事例はない。人形峠地域には、西南日本の山間地特有の地質が認められる。また、既存ボーリング調査により取得された岩石コアや透水性データの活用が可能であり、山間地の地下水流動調査を行う上で貴重なフィールドといえる。

このような背景を踏まえ、本研究では人形峠地域を対象に、地下水流動の不均質性の影響について、水質と同位組成の検討を行った。これまでにフィールド調査を踏まえた地下水流動予備解析及び水質と同位体組成の分析を行ったので、予察的な地下水の特徴を報告する。

得られた成果

岡山県人形峠地域の地質と湧水の分布を調べるためフィールド調査を行った結果、地質は基盤となる花崗岩及び花崗斑岩とそれを覆う火山噴出物であることが分かった。標高 1000 m 付近には火山噴出物の難透水性の溶結凝灰岩が分布し、湧水が認められる。標高 900 m 付近には高透水性の凝灰岩が分布する。また、標高 850 m 以下の河川沿いには、花崗岩がしばしば認められる。フィールド調査結果と既存ボーリング柱状図と透水係数データを踏まえて、池河（いけごう）川と十二（じゅうに）川沿いの流域を仮定し、地下水の流れを想定した結果、全水頭の分布が北から南への大局的な分布を示すことから、池河川と十二川沿いの流域から湧水（3 試料）、沢水（5 試料）、ボーリング孔内水（1 試料）を採水し、水質と酸素・水素同位体比（ $\delta^{18}\text{O}$ ・ δD ）及びストロンチウム同位体比（ $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ）を調べた。本研究の水質分析の結果を図 2 に示す。二つの流域の水質タイプは、Na-Cl 型と Na- HCO_3 型であり、下流側のイオン濃度が相対的に高い傾向にある。また、溶結凝灰岩や花崗斑岩には、Cl 成分を含む鉱物（ソーダライト $[\text{Na}_4\text{Al}_3\text{Si}_3\text{O}_{12}\text{Cl}]$ ）を確認している。水質分析の結果は、富山ほか[6]や水-岩石反応試験の水質結果[5]と整合することから、水質の変化（イオン濃度の増加）は地下水流動に伴う水-岩石反応が関係すると考えられる。

続いて、天水起源の地下水の同位体比は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、孔内水、湧水、沢水が天水線上にプロットされることから、天水起源の地下水である可能性があることが分かった（図 3）。火山噴出物の Sr 同位体比は概ね一致するが、花崗岩の Sr 同位体比は風化の影響を受けている可能性が考えられ、地質に応じた Sr 同位体比を示す（図 4）。

今後の予定

花崗岩山間地の流域における地下水流動の不均質性の影響について、引き続き、水質や同位体組成の分析を行うとともに、地下水の放射年代測定を実施する予定である。

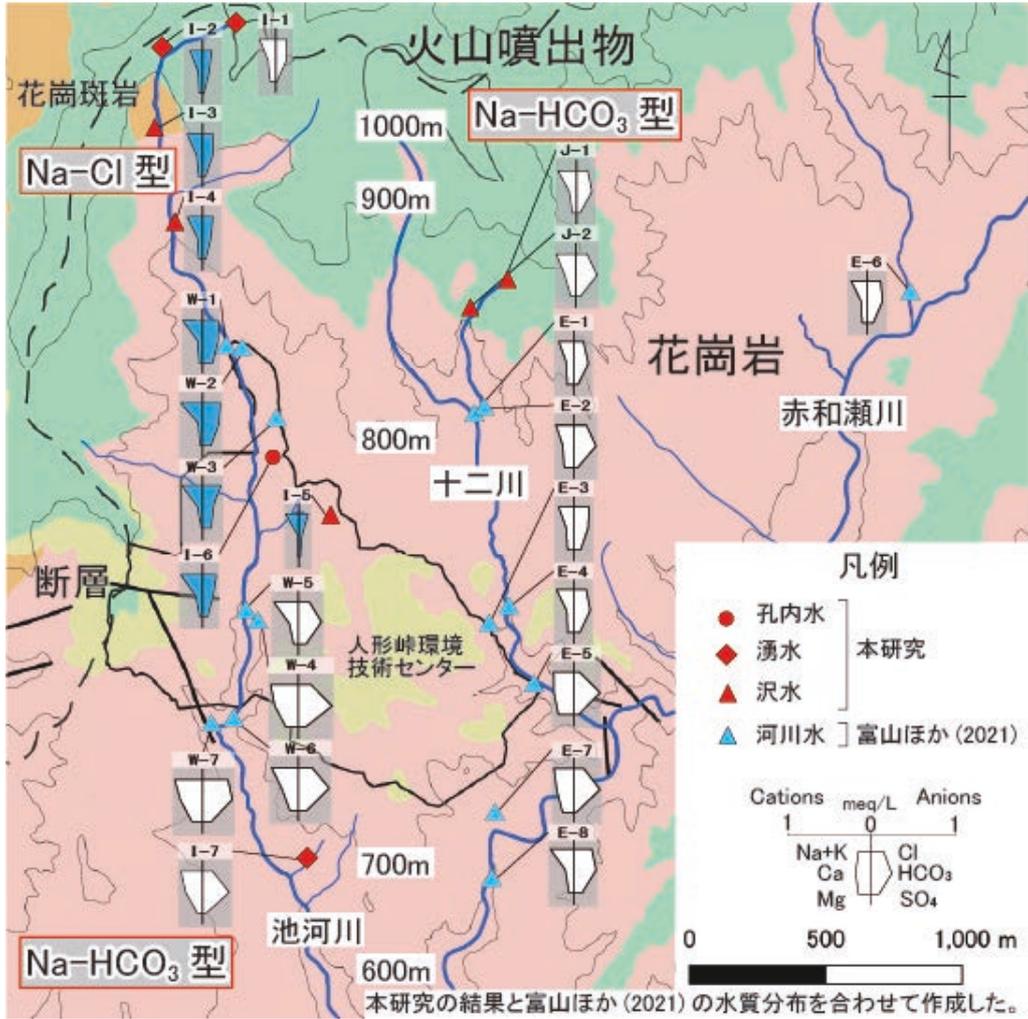


図2 流域の水質分布

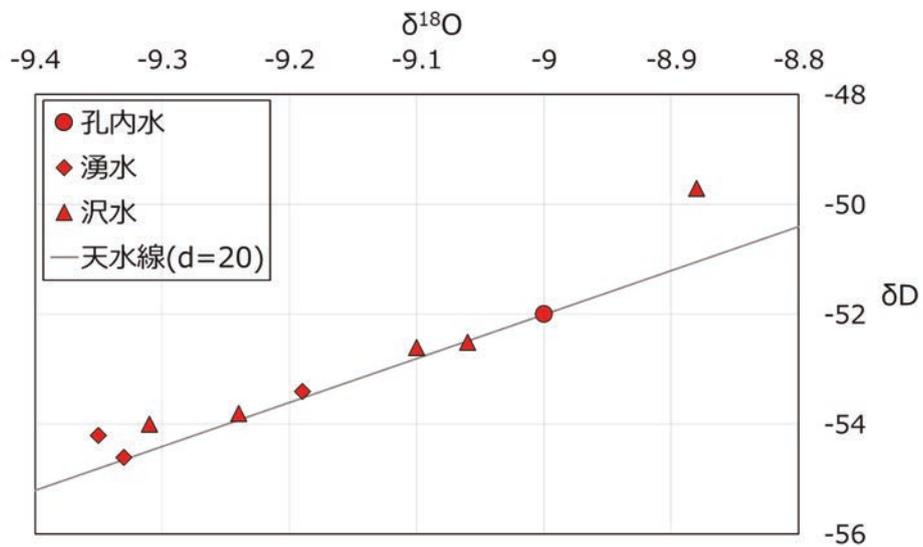


図3 酸素・水素同位体比分析の結果

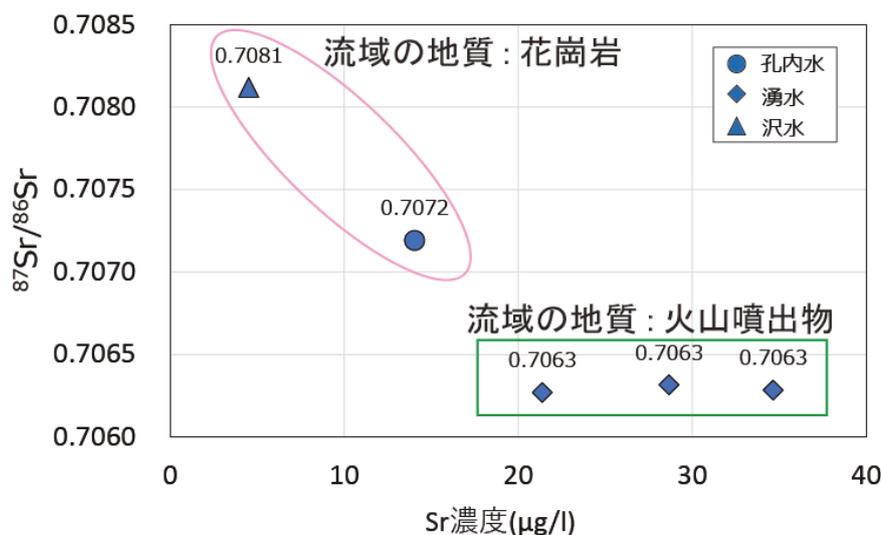


図4 ストロンチウム同位体比分析の結果

参考文献

- [1] Massimo Rinaldi, Giovanni Braca, Martina Bussettini, Angela Gurnell. Thematic Annexes on monitoring indicators and models, Deliverable 6.2, Part 2, of REFORM (REstoring rivers FOR effective catchment Management), a Collaborative project (large-scale integrating project) funded by the European Commission within the 7th Framework Programme under Grant Agreement 282656, Technical Report (2015).
- [2] 伊藤一誠, 萩沼真之, 内田雅大, 関陽児, 竹野直人, 宗像雅広. 堆積岩地域における広域地下水流動モデルの多面的検証手法の検討. 日本地質学会第118年学術大会・日本鉱物科学会2011年年会合同学術大会 水戸大会 講演要旨 (2011).
- [3] 竹内真司, 三枝博光, 天野健治, 竹内竜史. 瑞浪超深地層研究所における地下深部の水理地質構造調査. 地質学雑誌 119, 75–90 (2013).
- [4] 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. JA EA-Review 2021-068, 52 p., (2022).
- [5] 竹末勘人, 野原壯, 遠藤海人, 竹内真司. 花崗岩山間地の風化花崗岩の地下水流動の不均質性に関する研究. 地下水学会秋季講演会 (2023).
- [6] 富山眞吾, 小田代佳奈, 五十嵐敏文, 河野亮太, 小原義之. 岡山県人形峠鉱山における河川流出と水質の特徴. 環境資源工学 67, 139–146 (2021).

1.2 バライト共沈法の環境放射化学・地球化学的な応用に関する研究

鉱山施設課 徳永紘平

研究の概要

東京電力福島第一原子力発電所事故により放出された放射性核種の挙動の理解とその環境回復は重要な課題であり、この多量で多様な放射性核種が地表・地下環境でどのように移行・濃集するかを解明することができれば、地球表層の放射性核種を含むあらゆる元素の長期間にわたる物質循環予測研究として、基礎と応用の両面で重要な研究となる。筆者はこれまで、地球表層における水-堆積物（土壌）、水-鉱物間の元素分配を支配する反応プロセスの理解と、それに基づく元素挙動予測を目指した研究を行ってきた。特に、放射光 X 線吸収微細構造 (XAFS) 法を用いて元素の化学状態を直接決定し、元素挙動に影響する反応を原子・分子レベルで明らかにする研究を進めている。本稿では、これまで進めてきた鉱物への微量元素の分配に関する基礎研究を基に、長寿命陰イオン放射性核種であるセレン (Se) [1]やヨウ素 (I) [2]を効果的に処理処分する手法の開発を行った研究を紹介する。

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、東京電力福島第一原子力発電所での汚染水処理において問題となる ^{79}Se や ^{129}I は、核分裂生成核種の中でも半減期が特に長く (^{79}Se : 6.5×10^4 年、 ^{129}I : 1.6×10^7 年)、かつ水溶液中からの除去が困難な陰イオン (セレン酸 (SeO_4^{2-})、亜セレン酸 (SeO_3^{2-})、ヨウ化物 (I^-)、ヨウ素酸 (IO_3^-)) として存在する。地層を構成する岩石等の成分は負に帯電するためこれら陰イオン形核種に対する天然バリアの効果は期待できず、他の核種から分離した後に適切に安定化処理する必要があるが、効果的な処理・処分法は未だ開発されていない。これらの陰イオンの除去において、ハイドロタルサイトに代表される層状複水酸化物 (LDH) を用いた研究が従来行われてきた[3]。しかし筆者らの先行研究により、LDH への陰イオンの吸着は可逆反応であり、一旦吸着しても他の陰イオンの添加により容易に脱着することが示された[2]。特に電荷が小さなヨウ素の陰イオン (I^- , IO_3^-) において、水溶液中に多く存在する塩化物イオンや硝酸イオンとの競合により除去効率が著しく低下するため、実際の汚染水処理において LDH を用いることは難しい結果が得られている。これらヨウ素の陰イオンのうち、ヨウ化物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、ヨウ素酸に対する有効な処理処分法は未だ開発されていない。これはセレンのオキソ酸陰イオン (SeO_4^{2-} 、 SeO_3^{2-}) に対しても同様で、セレンは人体に対する高い毒性を持ち有害元素として多くの研究がなされている一方、その環境中の挙動に関する地球化学的な研究は限られており、溶液中から有効な処理処分の方法は未だ開発されていない。

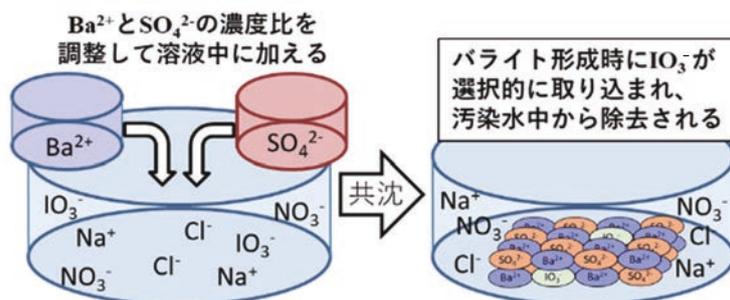


図1 バライト共沈を利用した陰イオンの除去法の考案

実験

これら長半減期の陰イオン系核種に対する新規の除去方法として、筆者らは極めて安定な鉱物であるバライト (BaSO_4) への共沈反応[4-7]を用いた手法の開発を行った(図1)。共沈とは、溶液中から鉱物が沈殿する際、本来は十分な溶解度があり沈殿しないはずの他のイオンが沈殿に取り込まれる現象である。固液界面にイオンが固定される吸着と比べると、固相内部にイオンは存在するため再溶出性が低く、長期間安定にイオンを保持することができる。バライトは硫黄の陰イオンである硫酸イオン (SO_4^{2-}) をその結晶内に持つことから、同じく陰イオンの化学形態を取るセレン酸、亜セレン酸、ヨウ素酸の固定媒体として期待できる。加えてバライトは、(1) 薬剤を水に加えるだけで容易に合成できる、(2) 様々な元素を結晶内に特徴的に取り込んで沈殿する、(3) 高い密度を持つため沈降しやすく分離しやすい、(4) 再溶解せず安定に存在する、などの特徴を有しており、これらの陰イオンを水溶液中から除去したのち、安定に処理する鉱物として非常に有用であると考えられる。本研究では、バライトへの共沈時におけるセレンやヨウ素の挙動を室内のシミュレーション実験により詳細に調べ、分配係数(固液分配比 K_d)、局所構造、格子定数などの鉱物学的な解析を行った。これらの結果を基に、バライトによるセレンやヨウ素の取り込みの可能性を検討するとともに、様々な条件下での合成実験を行い、取り込みに最適な条件を見出した。これらの知見はバライトがセレンやヨウ素の環境中移行挙動に対し重要な役割を担うことを示すだけでなく、水溶液中からこれらの陰イオン系核種を効果的に取り除いた後、安定に処理する技術の開発につながることも期待できる。

結果・考察

まず始めに、バライトへの共沈により、これらの陰イオンを水溶液中から効果的に取り除くための条件の特定を行った。鉱物への元素の分配では、一般的に(1) 鉱物表面への吸着、(2) 結晶構造内への取り込み、の2つのメカニズムが強く働くことが知られる[1]。放射光 XAFS 法による局所構造解析の結果は、セレン酸、亜セレン酸、ヨウ素酸ともにバライトの結晶内では硫酸イオンと置換し取り込まれていることを示しており、本実験系の場合は結晶内への取り込みが支配的な分配のメカニズムであることが示された(図2)。そこで、バライトとこれら陰イオンの共沈実験の条件として、初期溶液中の共存イオンの影響を調べた。まず、バライトを構成するバリウム/硫酸イオン濃度 ($[\text{Ba}^{2+}]/[\text{SO}_4^{2-}]$) 比について実験を行ったところ、すべての陰イオンにおいて硫酸イオン濃度の割合が小さくなるほどバライトに分配されやすくなることが

分かった (図 3 (a))。特にセレン酸は硫酸イオンと同型構造を持つため、その競合の傾向が顕著になる。一方、バライトにカルシウムイオン (Ca^{2+}) を加えるとバライト結晶の歪みが大きくなり、カルシウムイオンとともに亜セレン酸を加えると、その分配が大きくなることが分かった (図 3 (b))。結晶構造の歪みは、ヒ素やテルルの陰イオン (ヒ酸、亜ヒ酸、テルル酸、亜テルル酸) との共沈実験でも生じることが確認されており、カルシウムイオンが多く結晶の歪みが大きくなるほど、ヒ酸や亜テルル酸の三配位構造をとる陰イオンがバライトに分配されやすくなることが明らかになった。その他、pH、過飽和度、イオン強度などを系統的に変化させた実験を行い、これらの陰イオンがバライトに分配しやすい最適な条件を求めた。その結果、

亜セレン酸の場合は、結晶構造に歪みを与えるカルシウムイオンの濃度が高く、競合イオンの硫酸イオン濃度が低く、かつ結晶表面での錯生成がしやすい高 pH ほど、バライトに対して分配しやすいことが分かった。一方で、セレン酸、ヨウ素酸の場合は、競合イオンである硫酸イオンの濃度調整が重要なことが分かった。以上の結果を考慮し、最適な条件でバライトとセレン酸、亜セレン酸、ヨウ素酸の共沈実験を行ったところ、亜セレン酸の分配係数は、初期の条件に対して約 9,600 倍の 93,000 L/kg、セレン酸は約 7,100 倍の 11,000 L/kg、ヨウ素酸の場合は約 520 倍の 12,000 L/kg を示し、水溶液中の 90%以上の陰イオン (初期濃度: 1.0 mg/L) がバライトの構造内に取り込まれることが分かった。

次に、バライト中にこれらの陰イオンを長期間安定に保持し続ける手法の開発を行った。前述の結果の通り、バライトへのセレン酸、亜セレン酸、ヨウ素酸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新たな問題として生じた。特に電荷の小さなヨウ素酸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% と固相からの高いヨウ素の溶出が示された。しかし一方で、バライト共沈試料を希薄なリン酸イオン溶液に入れた場合、純水のみでの溶出に比べて、ヨウ素酸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 4 (a))。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 (図 4 (b))。この効果を系統的に明らかにするために、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とこ

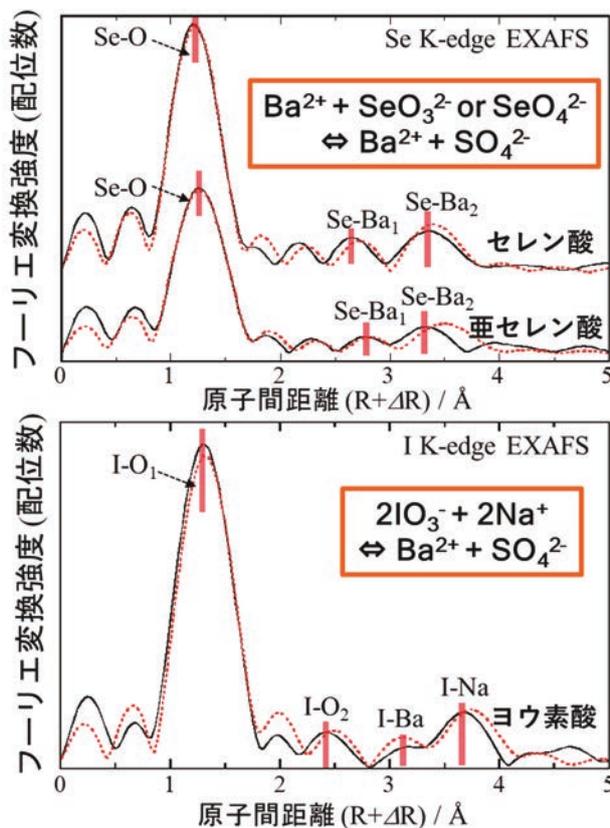


図 2 XAFS 法による Se と I の局所構造の特定

ろ、リン酸イオンはバライト表面から数ナノメートルの深さにおいてバリウムのリン酸塩の化学形態で存在することが示された。このリン酸イオンの吸着によるバライト表層での二次的な沈殿相の形成により、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と考えられる。この効果はセレン酸、亜セレン酸、ヨウ素酸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を合わせた処理を行うことで、放射性陰イオン系核種の溶液中からの効果的な除去と、鉱物構造内での長期的な安定化が可能となる[8]。

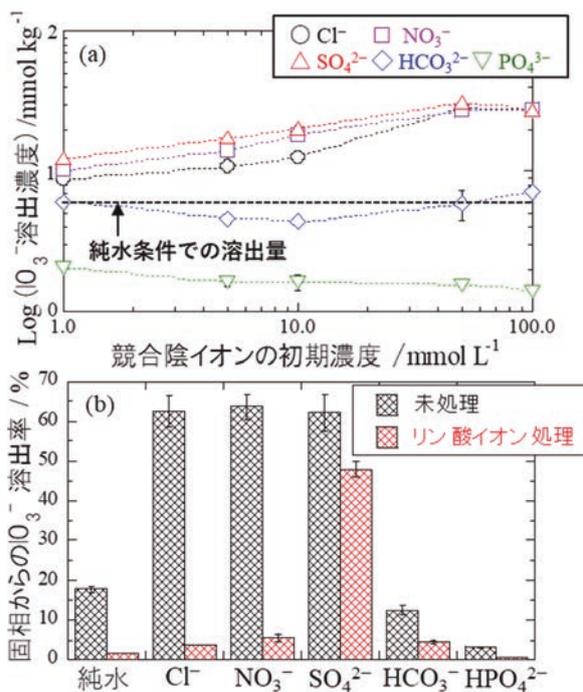
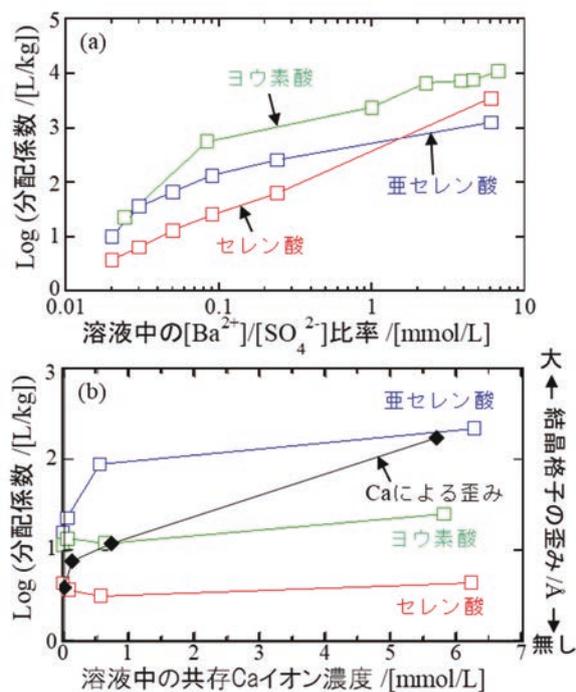


図3 陰イオンの分配における各成分の効果 図4 固相からのヨウ素酸の溶出量の変化

本研究で得られた、(1) カルシウムイオン添加によりバライト結晶構造の歪みの程度を増加させることで、他の微量元素の取り込みを促進する効果、(2) リン酸イオン吸着によりバライト表面で二次的な結晶相を生成させることで、固相からの対象元素の溶出を低下させる効果、など筆者らの研究の独自性が示された。重要なことは、これらの知見が原子・分子レベルの情報に基づいた研究成果な点である。原子・分子レベルに基づく基礎的な知見は、さまざまな環境条件でも応用が可能となる。筆者らの研究より解明されたセレンやヨウ素の固定メカニズムは、放射性廃棄物処理の分野において重要な役割を果たすのに加えて、水圏環境での中長期的なオキソ酸陰イオンの挙動を予測する上でも有用な知見となる。環境中には未だ解明されていない反応プロセスが多く存在する。こうした反応を環境試料中の元素の原子・分子レベルの情報を用いて解析を行い、その反応に潜む普遍的な物理化学原理を抽出することで、地球表層における放射性核種の移行・濃集挙動の系統的理解のための基礎情報として、環境放射化学・地球化学研究の学術基盤の発展につなげていきたい。

本原稿は、放射化学誌 2022 年度学会奨励賞特集[9]に記載された内容に追記・修正したものである。

参考文献

- [1] K. Tokunaga, Y. Takahashi. Effective removal of selenite and selenate ions from aqueous solution by Barite. *Environmental Science & Technology* 51, 9194-9201 (2017).
- [2] K. Tokunaga, Y. Takahashi, K. Tanaka, N. Kozai. Effective removal of iodate by coprecipitation with barite: Behavior and mechanism. *Chemosphere* 266, 129104 (2021).
- [3] K.H. Goh, T.T. Lim, Z. Dong. Application of layered double hydroxides for removal of oxyanions: A review. *Water Research* 42, 1343-1368 (2008).
- [4] K. Tokunaga, N. Kozai, Y. Takahashi. A new technique for removing strontium from seawater by coprecipitation with barite. *Journal of Hazardous Materials* 359, 307-315 (2018).
- [5] K. Tokunaga, T. Uruga, K. Nitta, Y. Terada, O. Sekizawa, et al. Application of arsenic in barite as a redox indicator for suboxic/anoxic redox condition. *Chemical Geology* 447, 59-69 (2016).
- [6] K. Tokunaga, Y. Yokoyama, Y. Takahashi. Estimation of Se(VI)/Se(IV) ratio in water by the ratio recorded in barite. *Geochemistry Geophysics Geosystems* 14, 4826-4834 (2013).
- [7] K. Tokunaga, Y. Yokoyama, S. Kawagucci, A. Sakaguchi, Y. Terada, et al. Selenium coprecipitated with Barite in marine sediments as a possible redox indicator. *Chemistry Letter* 42, 1068-1069 (2013).
- [8] K. Tokunaga, K. Tanaka, Y. Takahashi, N. Kozai. Improvement of the Stability of IO_3^- , SeO_3^{2-} , and SeO_4^{2-} -coprecipitated Barite after treatment with phosphate. *Environmental Science & Technology* 57, 3166-3175 (2023).
- [9] 徳永紘平. バライト共沈法の環境放射化学・地球化学的な応用に関する研究. *放射化学* 47, 20-23 (2022).

This is a blank page.

2. ウラン廃棄物工学研究

This is a blank page.

2.1 レーザー除染技術の開発

廃止措置推進課 西脇大貴、澤山兼吾、山中滯奈、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、木曾原直之

概要

原子力施設の廃止措置における作業員の被ばく低減や二次廃棄物の発生抑制の効果が期待できる除染技術としてレーザー除染が注目されている[1,2]。人形峠環境技術センターでは使用済み遠心分離機などのウラン汚染に対するレーザー除染の試験実績が既があり、そこでは小型サンプルに対してクリアランス基準を満足できる見通しを得ている。この結果に基づいて、本研究はレーザー除染による使用済み遠心分離機の実規模スケールでのクリアランス実証及び遠心分離機以外の汚染部材に対するレーザー除染の有効性の評価を最終目標とした。本報告では鋼材を想定した汚染部材・核種に対するレーザー除染の有効性を評価した代表的な結果を紹介する。

実験方法

① 模擬汚染試料の製作

実際の汚染材を供試材とすることは試料採取、加工、そして、許認可申請等の手続きに極めて長時間を要するため、コールドランの段階である本研究では模擬汚染試料を供試材とした。これは除染対象部材の鋼材に模擬核種（汚染核種の安定同位体）が溶けた液体を塗布したものであり、表面に発生した錆や付着物に汚染核種が固着していることを想定し、模擬を試みたものである。模擬核種としては安定同位体が存在するロジウム、ユウロピウム、セリウム、コバルト、セシウムとした。ロジウム、ユウロピウム、セリウム、コバルトについては高周波誘導結合プラズマ分析用の試薬（模擬核種濃度 1000 mg/L 程度、硝酸系溶液）を利用し、塗布量が 10~500 µg 程度になるよう希釈して塗布した。セシウムについては同様な液体状の試薬が入手できなかったため、炭酸セシウム粉末を純水に溶かして塗布した。図 1 に示したように、これら試料表面には塗布後いずれも発錆が認められたが、炭化セシウムを塗布した試料表面の発錆は一定程度抑えられていた。これは炭化セシウム塗布時の溶媒が純水であったためと考えている。

② レーザー照射試験

図 1 の模擬汚染試料に対して、図 2 に示した人形峠環境技術センターのパルスレーザー及び図 3 に示した敦賀総合研究開発センター（レーザー・革新技術共同研究所）の連続波レーザーを用いた除染試験を実施した。パルスレーザーは照射の ON と OFF を一定の周波数で繰り返しながら照射する方法であり、照射の無い間は除染対象が冷却されるため、母材部への熱影響が抑制されることが特徴である。連続波レーザーは連続して照射する方法であり、比較的安価に高出力のレーザー光を生成できることが特徴である。また、連続波レーザーの走査制御は、パルスレーザーを用いる場合に比べて容易である。今回、除染性能の評価のため、レーザー照射

前後の模擬汚染試料表面の外観観察及びエネルギー分散型蛍光 X 線分析による元素分析を実施した。

実験結果と考察

図 4 に鋼材に対するパルスレーザー照射試験後の試験片表面を示した。全ての模擬汚染試料に対して、最大 4 回のレーザー照射にて錆及び付着物を除去できることが確かめられた。図 5 にエネルギー分散型蛍光 X 線分析により測定したロジウムの X 線スペクトルを例として示したが、照射前に検出されたピークは 1 回目の照射によって検出下限を下回り、塗布前のスペクトルと比べて有意な違いが認められないことがわかる。

一方、連続波レーザー照射試験結果については、今回の試験範囲ではロジウム、ユウロピウム、セリウム、コバルトの模擬汚染試料は錆を除去することが可能であったが、セシウムの模擬汚染試料は付着物が残る結果となった。しかしながら、照射によって一部、付着物の除去が行われることを確かめている。このため、まずは照射条件の最適化の余地が残されていると考えられるが、パルスレーザーにより発生する繰り返し衝撃力、発錆した表面のレーザー光吸収性の違い、そして、付着物のレーザー光透過性の違いなどの影響も考慮すべきところである。

今後の試験継続を通じたより確かな除染メカニズムの考察が大切と考えている。

まとめと今後の予定

鋼材の汚染模擬汚染試料を作製してパルスレーザーと連続波レーザーで照射試験を行った。その結果、パルスレーザーにて今回の全ての模擬汚染試料に対して有効であることがわかり、連続波レーザーではセシウムを模擬核種とした試料に対しては照射条件の検討が必要であることがわかった。今後の照射条件の最適化の余地と合わせて、試験継続を通じた除染メカニズムの解明が重要と考えられる。なお、鋼材に合わせて鉛材やモルタルの模擬汚染試料に対してもレーザー照射試験をそれぞれ実施しており、何れの模擬汚染試料に対してもレーザー除染の有効性を確かめつつある。今後はこれらの結果を整理しながら、レーザー光を吸収し難い金属光沢のあるステンレス鋼材やアルミニウム合金材等に加え、塗装材やコンクリートも評価することを考えている。

本研究は 2027 年度までの 5 ヶ年予定であるが、この活動の中では除染性能の評価（ホット試験を予定）に合わせて、レーザー除染の実用化も見据えており、熱力学計算や超高速カメラ観察による揮発・蒸散メカニズム解明に基づいた発生ヒューム回収機構、実規模スケールを想定したレーザー照射の走査機構、除染状況のその場観察機構、そして、除染後の放射能サーベイ機構の概念設計や開発も検討している。

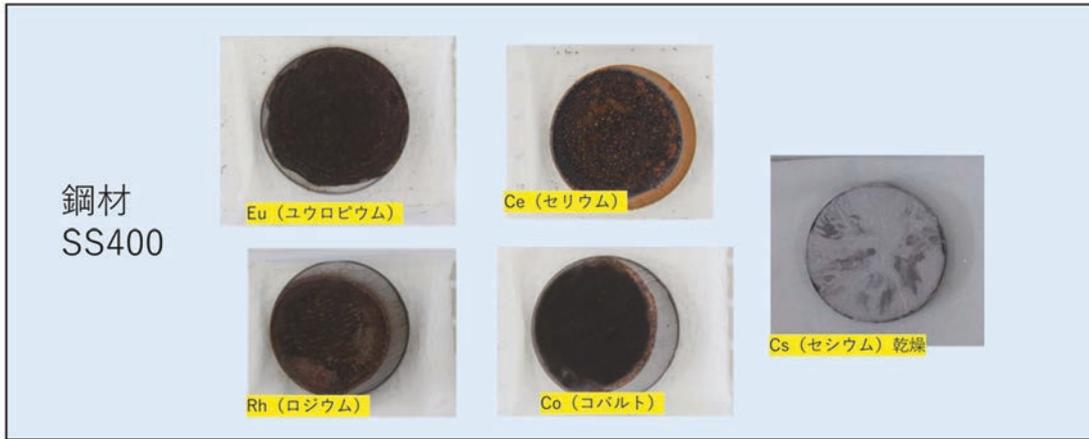
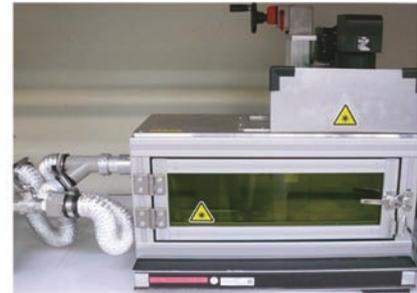


図1 模擬汚染試料

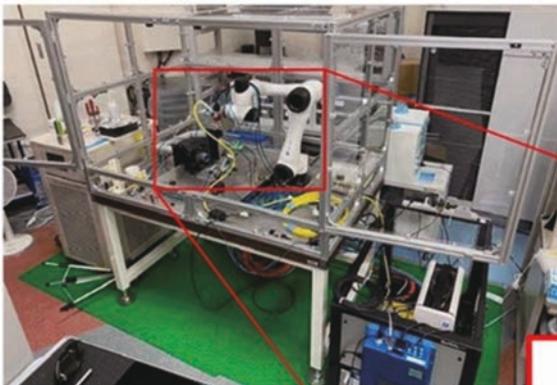
- (1) 加工装置制御
PCによる加工パラメータ任意設定 (OS Windows10) 制御用コントローラー
- (2) 短パルス光発振器 (Fiber)
最大出力100W 最大パルスエネルギー 1mJ パルス幅 100ns
繰り返し周波数 10~500kHz 波長 1.06μm [1060nm]
- (3) ビーム操作系
走査範囲 100mm×100mm 走査速度 最大7m/s
Z, θ調整範囲 高さ25mm 角度 0~45° 最小スポットサイズ ~50μmΦ
- (4) 加工ステージ
1軸ステージ 移動距離 200mm以上 パルスモータ駆動 (PC制御)
- (5) 加工装置安全カバー
短パルス光吸収観察窓付アルミ樹脂合板カバー
- (6) 安全装置
ワーク装着時の加工装置インターロック機構



短パルス光照射試験装置(照射ボックス)

図2 人形峠環境技術センターのパルスレーザー

1.5 kW連続波(CW)ファイバーレーザー除染装置



- CWファイバーレーザー
レーザーパワー：0~1500 W
波長：1080 nm
- ビーム走査系
最大走査範囲：100×100 mm²
最大走査速度：20 m/s
最小スポット径：50 μm (計算値)
- その他
試料吹付ガス：乾燥空気
飛散物はチコーエアータック株式会社製
小型集塵機で吸引

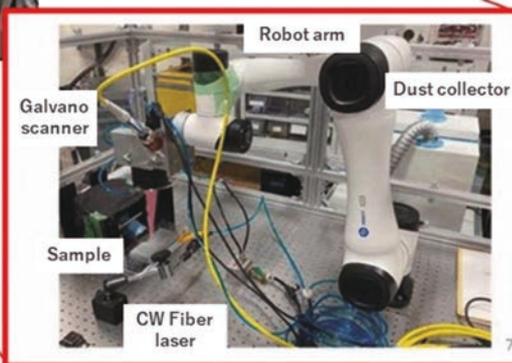


図3 レーザー・革新技術共同研究所の連続波レーザー

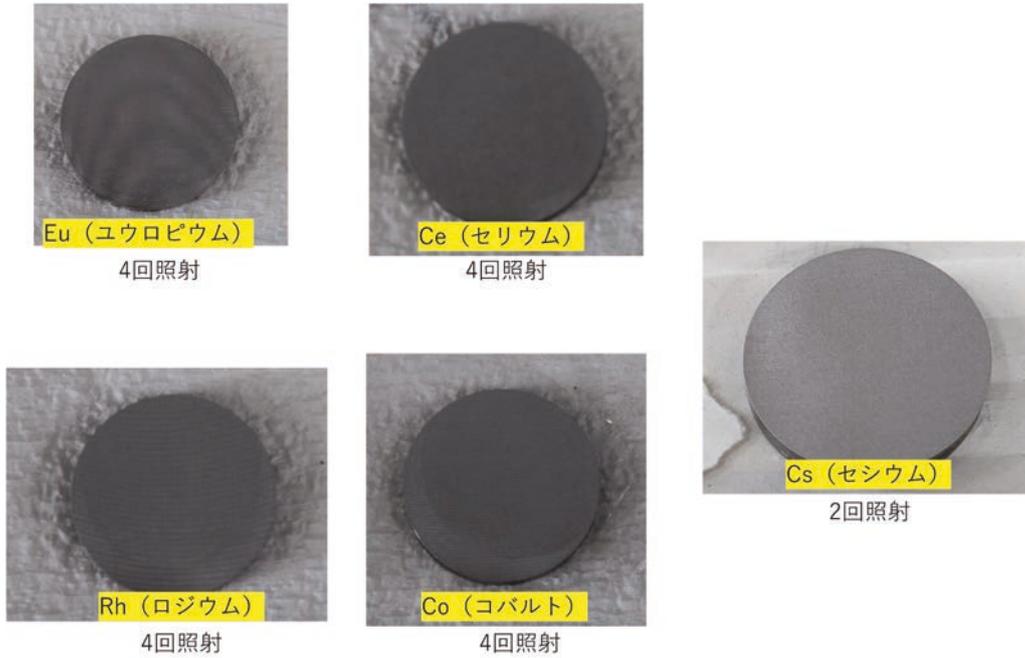


図4 パルスレーザー照射後の試験片表面（鋼材）

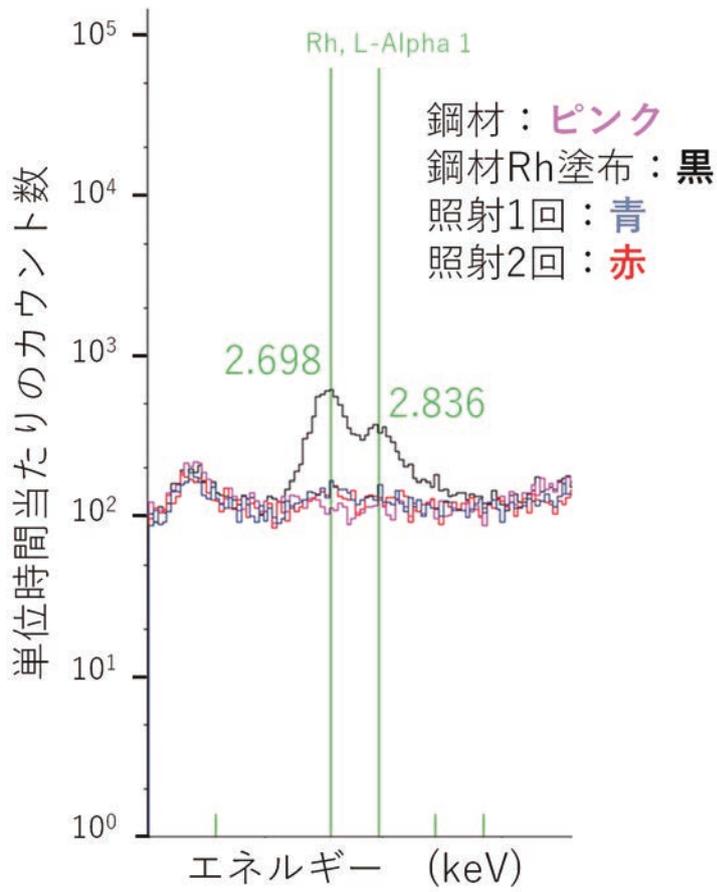


図5 パルスレーザー照射前後のロジウムのX線スペクトル（鋼材）

参考文献

- [1] 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, 18 p., (2022).
- [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ー. JAEA-Review 2021-068, 52 p., (2022).

2.2 廃棄体容器材料のための銅合金の腐食挙動

廃止措置推進課 酒瀬川英雄

量子科学技術研究開発機構 中島基樹

背景と目的

2015年、国内の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[1]。国際的にも 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ており[2]、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」が挙げられている。しかしながら、現在の放射性廃棄物の廃棄体容器は経済性の観点から炭素鋼が選ばれており、回収可能性までを考えた材料選択とはなっていない。このため、埋設中の腐食によって廃棄体の構造健全性を損ない、可搬性を損ない、そして、回収可能性を損なう可能性が考えられる。

本研究は、この炭素鋼と比較して、より優れた耐食性を持つ銅合金（寿命で10倍以上。例えば[3]）を、より高い耐圧性を持つ超硬合金（圧縮強さで8倍以上）[4]に被覆させた新しい複合材料を開発し、廃棄体の回収可能性を確保することを目指している。具体的には、図1に示したように、耐食性に優れた銅合金を耐圧性に優れた超硬合金（タングステンカーバイド-コバルト系）に被覆させた複合材料の開発を考えている。今年度はこの複合材料の中で耐食性を受け持つ銅合金の腐食挙動を明らかとすることを目的とした。これより、廃棄体容器に現時点で最も適した耐食性を具備させるための銅合金を選択することが可能となる。

実験方法

廃棄体容器材料の耐食性を担う銅合金として、無酸素銅（C1020）と酸化物分散強化型銅（GLIDCOPAL-60）を候補とした。耐食性の観点からは無酸素銅のみが候補となるが[5,6]、ここでは無酸素銅よりも高い耐圧性も具備させることで、より魅力的な廃棄体容器材料を開発すべく、微細な酸化物粒子の分散により銅合金の強度特性の改善を図った酸化物分散強化型銅合金も候補としている。

これらの候補に対して炭酸塩-塩化物水溶液中における分極試験を実施した。試験条件は、まずは地層処分におけるオーバーパック材の腐食環境を考慮して設定されたものであり、ベントナイト接触水の組成を模擬したものとした[5,6]。雰囲気は窒素雰囲気、温度は80°C、溶液条件は「条件1： $\text{HCO}_3^- = 0.01 \text{ M}$, $\text{Cl}^- = 0.05 \text{ M}$ 」及び「条件2： $\text{HCO}_3^- = 0.01 \text{ M}$, $\text{Cl}^- = 0.1 \text{ M}$ 」とした。塩化物イオン濃度を変化させた理由は、塩化物イオンが銅合金表面に生成する不働態被膜を破壊して耐食性を損なうという報告があるためである[6]。また、 HCO_3^- は NaHCO_3 、 Cl^- は NaCl にて与えた。そして、アノード方向に10 mV/minの速度で、500 mV vs. SCE（Saturated calomel electrode：飽和カロメル電極）の電位まで分極させた。

実験結果及び考察

図2に各条件における分極試験結果をそれぞれ示した。図2(a)の「条件1: $\text{HCO}_3^- = 0.01\text{M}$, $\text{Cl}^- = 0.05\text{M}$ 」で銅と酸化物分散強化型銅の腐食挙動を比較した場合、酸化物分散強化型銅の方が若干低い電位でアノード電流が立ち上がっているものの、電位約0 mV及び約80 mV付近に不働態化が認められた。ここからは酸化物分散強化型銅の耐食性の方がより優れる可能性が考えられる。

図2(b)の塩化物イオン濃度を高くした「条件2: $\text{HCO}_3^- = 0.01\text{M}$, $\text{Cl}^- = 0.1\text{M}$ 」の場合、酸化物分散強化型銅の方がより高い電位でアノード電流が立ち上がり、電位約0 mV及び約80 mV付近に不働態化が認められた。ここからは酸化物分散強化型銅の耐食性の方がより優れることが考えられる。

また、図2(a)と(b)を比較して塩化物イオン濃度の影響に注目した場合、塩化物イオン濃度が高くなると、無酸素銅はより低い電位でのアノード電流の立ち上がりが認められて、腐食が助長されることが考えられる。しかし、不働態被膜に及ぼす影響についてはより詳しい実験や考察が必要な段階である。酸化物分散強化型銅については、電位約0 mV付近の不働態被膜の破壊が助長されると考えられるが[5]、約80 mV付近の不働態被膜は逆に安定化することが考えられ、今後のより詳しい実験や考察が必要である。

まとめと今後の予定

廃棄体容器用の複合材料の中で耐食性を受け持つ銅合金として無酸素銅と酸化物分散強化型銅を候補として、まずは模擬ベントナイト接触水中の腐食挙動を調べた。その結果、酸化物分散強化型銅の方がより優れた耐食性を具備する可能性が示された。この材料は無酸素銅よりも高い耐圧性を持つため、廃棄体容器用として選択できればより望ましいと考えられる。

今後はこの新しい複合材料による廃棄体製作性の検討のため、廃棄体ミニチュアサイズのモックアップや構造要素等を試作して、製作技術に関する課題を明らかにする予定である。

謝辞

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

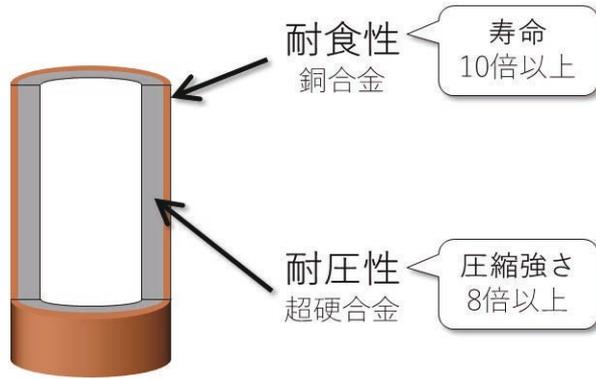
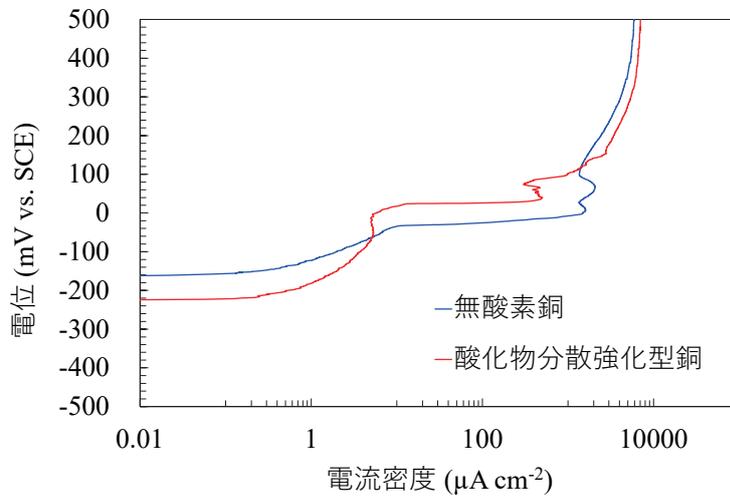


図1 廃棄体容器のための新しい複合材料

(a) 条件1 : $\text{HCO}_3^- = 0.01\text{M}$, $\text{Cl}^- = 0.05\text{M}$



(b) 条件2 : $\text{HCO}_3^- = 0.01\text{M}$, $\text{Cl}^- = 0.1\text{M}$

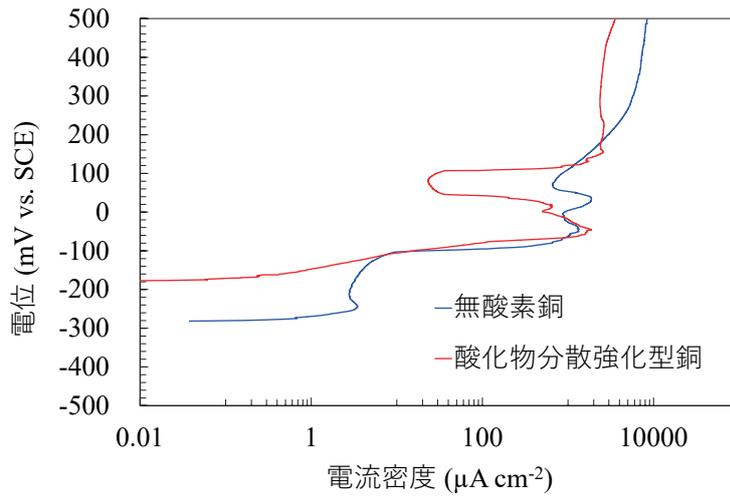


図2 分極試験結果

参考文献

- [1] 特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針.
<https://www.meti.go.jp/press/2023/04/20230428007/20230428007-2.pdf> (accessed: 2024 年 8 月 8 日).
- [2] OECD/NEA ホームページ. 決定の可逆性と放射性廃棄物の回収可能性.
https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_48564 (accessed: 2024 年 8 月 8 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 MTG ホームページ. <https://www.tokaloy.co.jp> (accessed: 2024 年 8 月 8 日).
- [5] 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, 55 p., (2008).
- [6] 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, 208–217 (2013).

This is a blank page.

3. 保障措置

This is a blank page.

3.1 ウラン濃縮施設の保障措置にかかる課題への取組状況

保安・技術管理課 久米宰、山崎有仁、中島伸一、林原健一
 JAEA 安全・核セキュリティ統括本部 中村仁宣、石田毅
 検査開発株式会社 山田茂樹、岡本諒

要約

日本原子力研究開発機構人形峠環境技術センター（以下、人形峠センターという）では、国内初の遠心分離法によるウラン濃縮技術の実用化のため、1979年のウラン濃縮パイロットプラントの試験運転を開始後、2001年までのウラン濃縮原型プラント運転終了に至るまでの間、ウラン濃縮に係る技術開発活動が実施されてきた。現在はウラン濃縮施設（以下、濃縮施設という）の廃止措置に係る技術開発を実施している。ウラン濃縮技術は、核兵器用の高濃縮ウランの製造につながる機微技術であることから、核不拡散の観点において、その情報を厳格に管理する必要がある。人形峠センターは研究開発活動を実施するにあたって、核不拡散対応を含む保障措置上の様々な課題解決に取り組んできた[1]。本稿では廃止措置段階における保障措置にかかる課題への取り組み状況について紹介する。

廃止措置段階での課題

人形峠センターは、遠心分離法によるウラン濃縮研究開発活動がすでに終了しており、図1に示すように廃止措置に係る技術開発の段階に移行している。現在は下図のように廃止措置、核燃料物質の対応とともに遠心分離機及び付属設備の解体が実施されている。



図1 廃止措置及び遠心分離機解体計画概要

濃縮施設の廃止措置を進めていくにあたり、保障措置をどのように終了していくかを検討する必要がある。保障措置ロードマップ策定に向けての課題として、濃縮施設の枢要設備である遠心分離機の核不拡散上の対応について考慮する必要がある。具体的には、次の2点が課題として挙げられる。

i) 解体する遠心分離機の核不拡散上の扱い

人形峠センターでは、遠心分離機処理技術開発に移行している。遠心分離機処理は2000年から着手し、継続的に実施している。遠心分離機の解体では、遠心分離機の構造等の核不拡散上管理すべき情報を確実に消滅させることが重要であり、解体された遠心分離機の部品については、裁断やプレスによって情報の消滅を実施している。

人形峠センターに対する頻度限定無通告査察(LFUA: Limited Frequency Unannounced Access)は、施設が運転していることを前提としたものであり、解体中の遠心分離機が再利用されていないことなど、核不拡散上の管理が適切であるか確認できない。このため、LFUAを補完する新しい保障措置手法の検討が必要となる。

ii) 濃縮施設の廃止措置段階における保障措置の適用について

現在、廃止措置段階にある濃縮施設の保障措置手法について、国や国際原子力機関(IAEA)と協議を行っている。IAEAとしては、枢要設備である遠心分離機が永久解体され、かつ遠心分離機が完全に使用できない状態になるまでは濃縮施設としての保障措置を適用するとの考えを示している。今後は、具体的な「遠心分離機の永久解体、かつ完全に使用できない状態」の内容について、IAEAとの協議が必要である。

課題への取組み

i) 解体する遠心分離機の核不拡散上の扱い

濃縮タスクフォースにおいて、国やIAEAと議論を重ねた結果、遠心分離機処理活動の透明性を高めることを目的として、施設者から遠心分離機の処理台数や解体スケジュールなどの情報提供、査察官による濃縮施設への立ち入り、解体した遠心分離機の管理状況の目視観察などを実施する透明性確保のための訪問(Transparency Visit)が行われることとなった。

Transparency Visitは、2005年に試験的に実施され、その効果がIAEAで確認されたことから、2006年より本格導入された。これまでTransparency Visitにおいて、核不拡散管理上の問題を指摘されたことはなく、人形峠センターの遠心分離機処理活動によって解体された遠心分離機について、核不拡散上の管理は適切であることが確認されている。

ii) 濃縮施設の廃止措置段階における保障措置の適用について

人形峠センターとしては、「遠心分離機の永久解体、かつ完全に使用できない状態」の条件について、保障措置会合等を通じて、国やIAEAと引き続き協議していく。

参考文献

[1] 石田毅, 中島伸一, 近藤伸次, 林原健一, 山田茂樹, 岡本諒, 中村仁宣. 人形峠環境技術センターウラン濃縮施設による保障措置にかかる課題への取組状況. 第44回日本核物質管理学会年次大会会議論文集, (2023).

4. 安全技術・設備開発

This is a blank page.

4.1 鉱さいたい積場の右岸側斜面の巨大地震対策

鉱山施設課 河野亮太、飯尾彰規、菅原史大、長安孝明、福嶋繁
株式会社ウエスコ 岡田信之

背景と目的

岡山県では、県内に被害をもたらす地震は南海トラフ巨大地震だけでなく、断層型地震もあることを示し被害想定を行い公表している。県の想定によると大立断層・田代峠―布江断層では最大震度 6 強の地震が発生し、人形峠環境技術センターには震度 6 弱の被害をもたらすとされている（図 1）[1]。2011 年 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震では、東北と関東の 3 つの鉱山の鉱さいたい積場で集積物（鉱さい）の流出事故が発生している。これを踏まえ、集積場技術指針（鉱業上使用する工作物等の技術基準を定める省令の技術指針（内規）[2]）が見直され、2012 年に過去及び将来にわたって最強と考えられる地震動（以下、レベル 2 地震動という）に対する新しい安定性評価法が追加された。

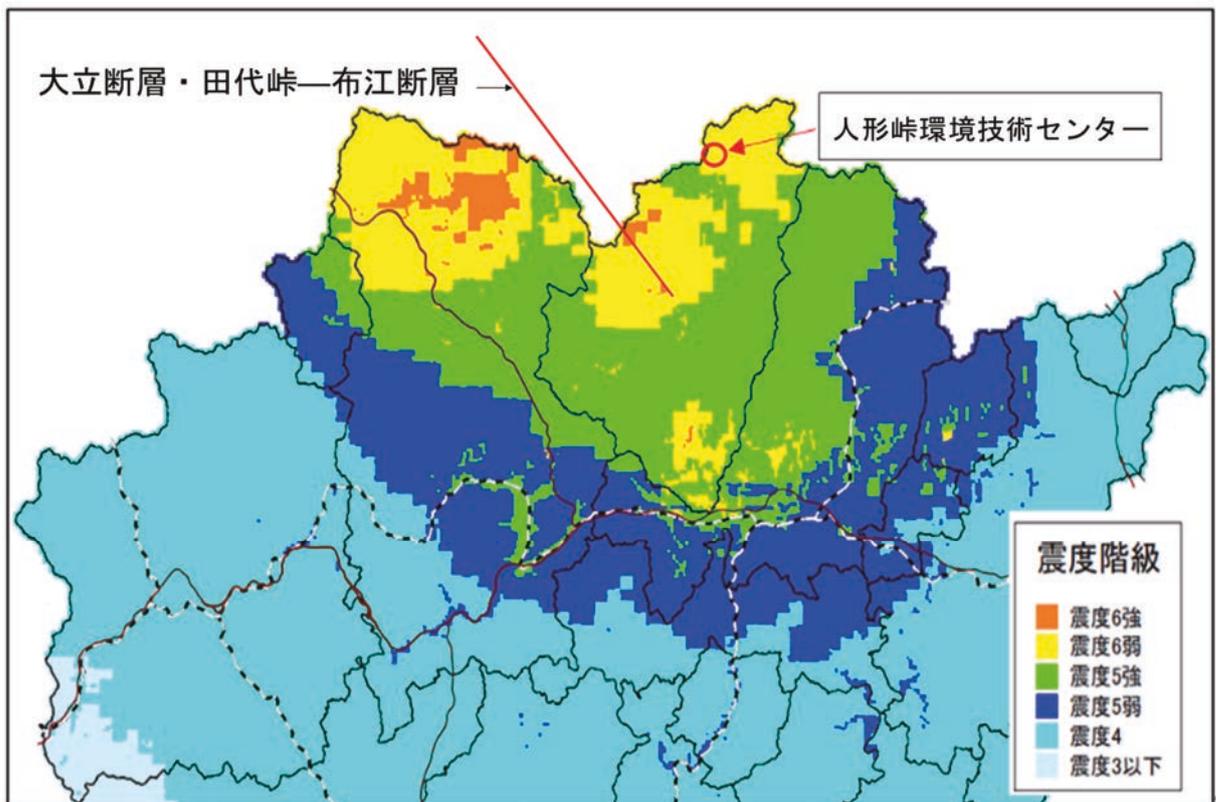
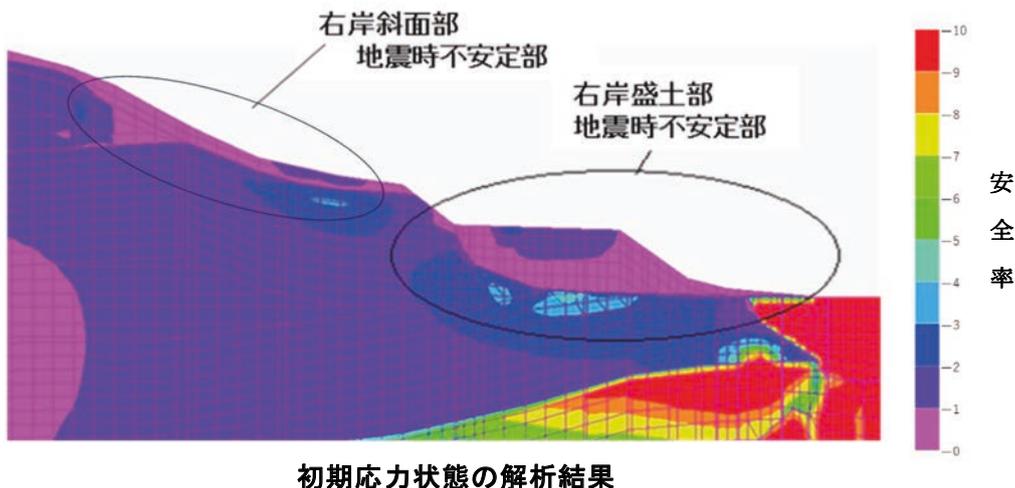


図 1 大立断層・田代峠―布江断層の地震の震度分布
(参考文献[1] p.51 図 3.8.2 より一部改変)

人形峠環境技術センターで維持管理している夜次鉱さいたい積場について、新しい技術指針に従い安定性を評価した結果、鉱さいたい積場のコンクリートかん止堤では、円弧すべりや崩壊の可能性はなく安全であることが確認されたが、コンクリートかん止堤下流部の盛土部や自

然斜面ではレベル2地震動で地すべりが発生する結果となった。これは、鉦さいたい積場からの埋設された送水管が破損して、放射性物質を含む未処理の坑廃水や地震により液状化した（泥水化した）鉦さいが流出する可能性を意味する（図2）。また、夜次鉦さいたい積場は、岡山県を代表する吉井川（一級河川）水系の上流域に位置することから鉦さいたい積場右岸側の盛土部と斜面部における巨大地震時の安全対策を実施した。



鉦さいたい積場下流部右岸

図2 巨大地震対策箇所の対策前の状況

ダム軸断面の初期応力状態の確認

図3にダム軸断面における現状解析モデル（FEMモデル）と初期応力状態のダム軸断面における局所安全率を示す。安全率1.0未満の部分（ピンク色）は、ダム軸左岸側の斜面表層部と、ダム軸右岸側の盛土部及びダム軸右岸側斜面の表層部に認められ、特にダム軸右岸側の盛土部周辺の地盤は初期状態から局所安全率が既に1.0を下回っており、地震時に崩れる可能性が高いことが分かった。

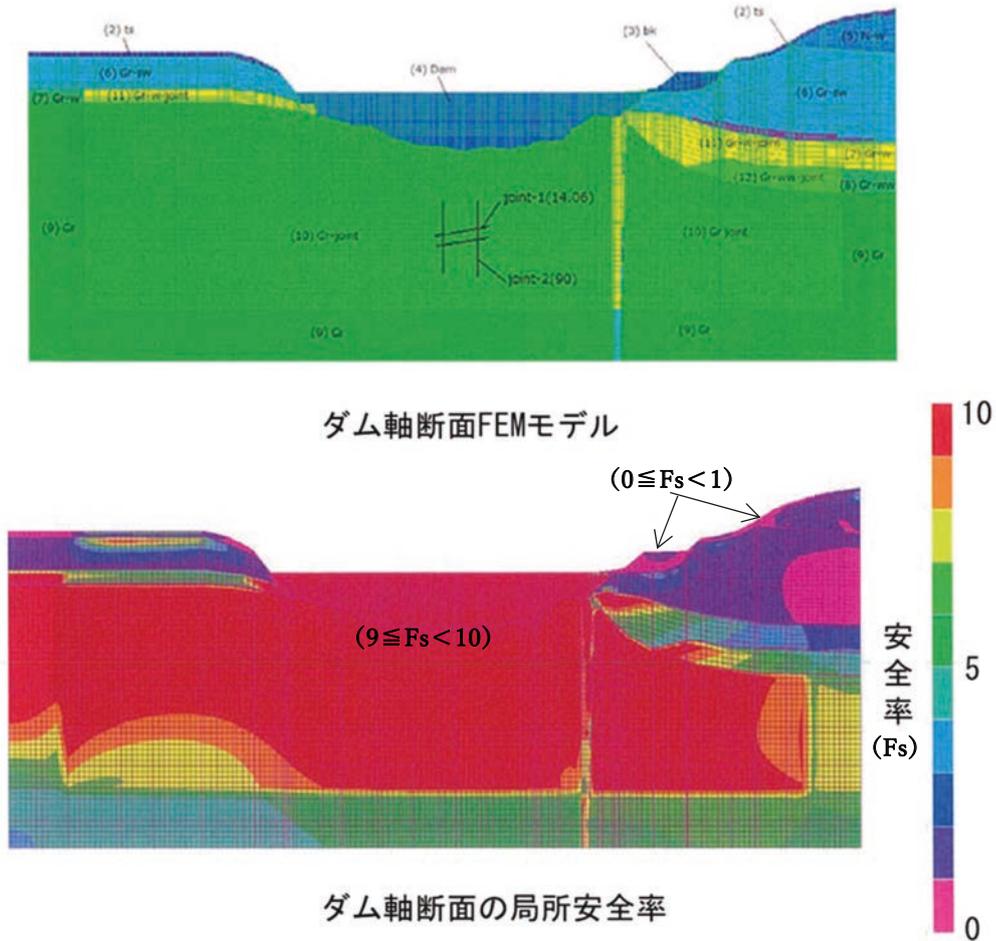


図3 ダム軸断面における現状解析モデルと初期応力状態の局所安全率

対策工法の選定

① 斜面部 (図4)

第1案 安定勾配切土工+植生工

安定勾配で切土を行い表面は植生工により法面保護する。

第2案 地山補強土工

補強材を地中部に打設し斜面の安定を図る。受圧構造に吹付法枠工を併用する。

第3案 グラウンドアンカー工

アンカー材を地中部に緊張をかけ斜面の安定を図る。受圧構造に吹付法枠工を併用する。

(選定結果)

第1案は導水管の移設が発生するため不適と判断した。第2案と第3案を比較したところ、第3案が経済性と構造的から優れていたため、第3案「グラウンドアンカー工」を選定した。

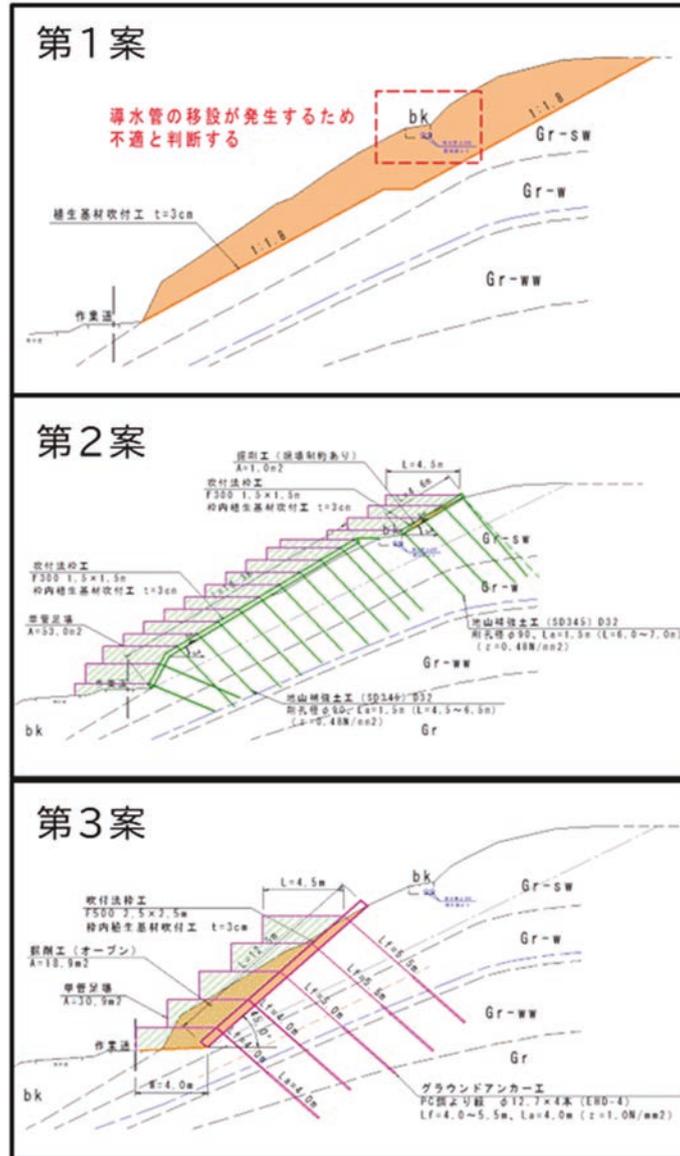


図4 斜面部の対策工法案

② 盛土部 (図5)

第1案 盛土再構築

既設の盛土を撤去し、強度のある材料で盛土を再構築する。

第2案 地盤改良

盛土の一部を地盤改良し、盛土の強度を高めて安定を図る。

第3案 グラウンドアンカー工

アンカー材を地中部に緊張をかけ斜面の安定を図る。受圧構造に吹付法砕石工を併用する。

(選定結果)

第1案は導水管の移設が発生するため不適と判断した。第2案と第3案の経済性は同等であるが、構造的性と施工性を考慮して、第3案「グラウンドアンカー工」を選定した。

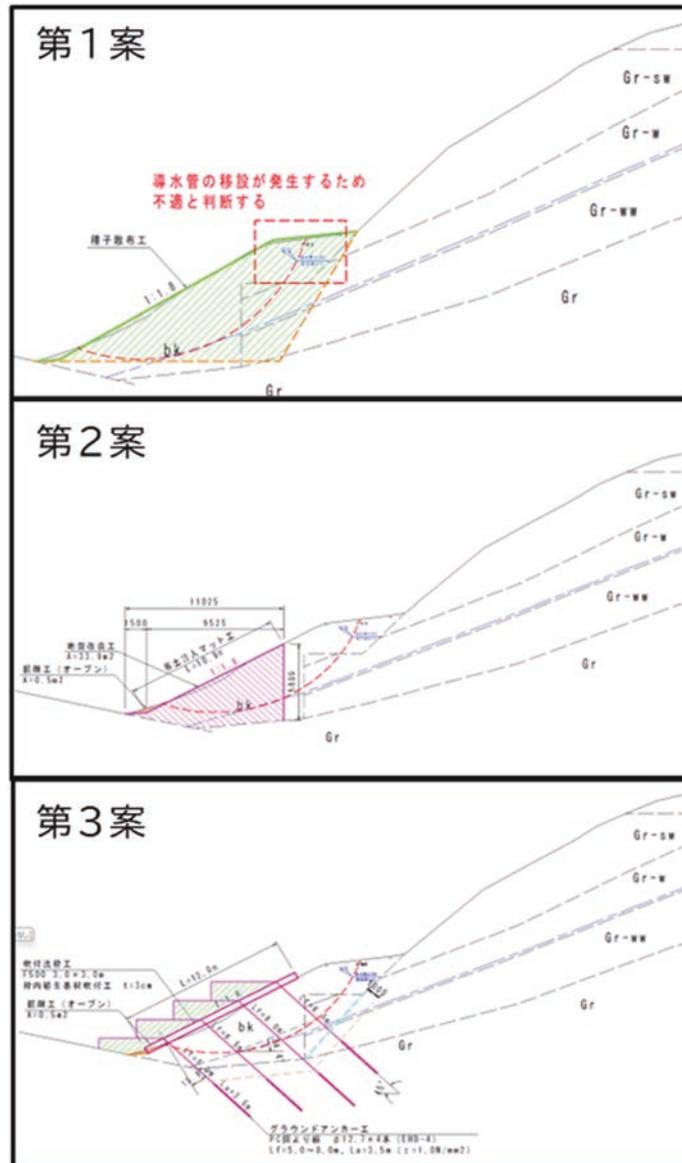


図5 盛土部の対策工法案

安全対策工法のレベル2地震時の評価

選定された対策工法（グラウンドアンカー工）の効果や有効性について確認するため、2次元 FEM 地震応答解析を実施した。解析の結果を図6に示す。盛土部及び自然斜面部ともに、レベル2地震動時の安全率が大幅に改善され安全率1.0未滿を示す部分がほとんどなくなり、安全対策工の施工により地震時の安全が確保されることが示された。

グラウンドアンカー工による安全対策工事は、詳細設計を2021年度、対策工事を2023年度に実施して、夜次鉱さいたい積場の巨大地震に対する対策工が完成した。図7に工事完成写真を示す。

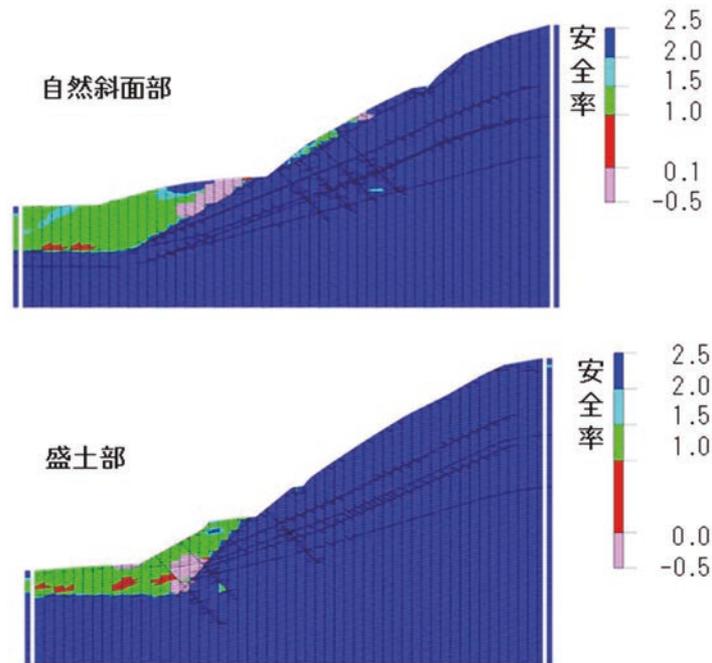


図6 グラウンドアンカー工法の地震応答解析



図7 鉦さいたい積場の右岸側斜面の地震対策工事

今後の予定

施工したグラウンドアンカー工が、その機能を十分発揮しているか否かを確認するために、アンカー頭部の腐食状況や法枠工のコンクリート構造物のひび割れ等の定期点検を行う。また、グラウンドアンカー工の健全性を確保するためにはアンカー頭部が損傷を受けないように防護する必要がある。このため、落石や倒木防止を行うとともに、もし損傷が発生した場合は、直ちに補修または新規のアンカー打設等の適切な処置を講ずることとしている。

参考文献

- [1] 岡山県ホームページ. 断層型地震の被害想定について.
<https://www.pref.okayama.jp/page/386396.html> (accessed: 2024 年 10 月 17 日).
- [2] 鉱業上使用する工作物等の技術基準を定める省令の技術指針（内規）（20121115 商局第 4 号）, 90-120, (2012).

This is a blank page.

5. 放射線影響評価研究

This is a blank page.

5.1 日本における屋内ラドンのリスクと参考レベルの有効性の評価

安全管理課 迫田晃弘

JAEA 敦賀廃止措置実証本部 石森有

背景と目的

ラドン (^{222}Rn) は土壌や建材に含まれるラジウム (^{226}Ra) を起源として、環境中に広く分布している。自然放射線による被ばくの約半分が屋内ラドンに起因し、喫煙に次ぐ肺がんのリスク因子であることが知られている。屋内ラドンのリスクについては、鉱山労働者の疫学調査で得られたリスク係数を用いて推定がなされてきたが、高濃度からの外挿であることや鉱山と一般家屋の環境の違いなどが指摘され、実際の屋内ラドンの疫学調査も実施されるようになった。

各国で実施された屋内ラドンの疫学調査を統合した解析により、 100 Bq m^{-3} 程度のラドン濃度でもリスクの有意な増加が観察された。例えば、 100 Bq m^{-3} あたり 16% のリスク増加の報告がある[1]。このような背景から、居住環境のラドンに対する参考レベルとして、世界保健機構 (WHO) が 100 Bq m^{-3} (ただし、これが達成できない場合でも 300 Bq m^{-3} を超えるべきではない)、国際放射線防護委員会 (ICRP) が 300 Bq m^{-3} (上限値として、 $100 \sim 300 \text{ Bq m}^{-3}$ の範囲内で合理的に達成できる限り低く設定することを推奨)、国際原子力機関 (IAEA) が 300 Bq m^{-3} (上限値として) を設定した。なお、ラドンの平衡係数 0.4、年間の屋内滞在 7,000 時間と仮定すれば、ラドン濃度 300 Bq m^{-3} は年間実効線量 10 mSv ほどに相当する。

現在、欧州を中心に各国が参考レベルを設定し、規制やガイドラインの形でラドン被ばくの管理がなされている[2]。一方、日本では、屋内ラドン濃度は概して低く、これまでに行動計画の策定や参考レベルの設定はなされていない。今後、国際動向を踏まえた議論が国内で進むにつれ、国内の調査研究で得られた知見が必要となる。

そこで、本研究では、日本に参考レベルを適用した際の施策としての効果を明らかにするために、国際機関が勧告する参考レベルを超える国内家屋での肺がん死者数を推定した。なお、研究の詳細は論文を参照いただきたい[3]。

方法

ラドンのリスク計算には、米国環境保護庁 (EPA) によって開発されたモデル[4]を使用した。生涯リスクの計算に必要なパラメータとして、日本人の性別・年齢別の全死因と肺がんによる死亡率 (2020 年)、喫煙率 (2019 年) と喫煙による肺がんの相対リスク (男性 4.4、女性 2.8) を用意した。なお、喫煙のリスクは、日本人を対象にした疫学調査[5]に基づく数値を適用し、EPA が想定する米国人向けの数値 (男性 14、女性 12) よりも低かった。

生涯にわたる一定のラドン曝露率 (平衡係数 0.4、居住係数 0.7) の仮定の下、日本の屋内ラドン濃度の確率密度分布[6]を考慮して、ラドン濃度 1 Bq m^{-3} 毎の全原因肺がん死の生涯リスクと集団寄与割合を算出した。また、ラドン起因の肺がん死者数を性別・喫煙経歴別・ラドン濃度別に推定した。

結果と考察

表 1 にラドン起因の集団寄与割合 (PAF) と肺がん死者数を示す。PAF は、屋内ラドン曝露群 (全人口に相当) において肺がんで死亡した者のうち、真に屋内ラドンが原因で肺がん死亡した者の割合を意味する。また、表 2 に原因別の肺がん死者数を整理した。

ラドンによる肺がん死者数を濃度別にみると、家屋割合が大きい 20 Bq m⁻³ までの濃度範囲で男女ともに半数以上を占めていた (表 1)。全人口に対する同死者数の 90 パーセンタイル値は約 40 Bq m⁻³、95 パーセンタイル値は約 50 Bq m⁻³、99 パーセンタイル値は約 80 Bq m⁻³ であった。100 Bq m⁻³ を超える家屋に注目すると 10 人、これは全体 (2,034 人) の 0.5%ほどで、全原因の肺がん死者数 (75,585) のわずか 0.01%である。不確かさは伴うものの、この 10 人が意味するのは、参考レベル 100 Bq m⁻³ を日本に適用して遵守された場合の回避可能性のある肺がん死ともいえる。

また、全原因の肺がん死者数について、男性は喫煙者の方が多かったが、女性では非喫煙者の方が多かった (表 2)。これは、肺がん死の 9 割以上が喫煙者で起こるとされる米国とは状況が異なるが、主な理由として、日本人の喫煙の相対リスクと女性の喫煙率が低いことがあげられる。このとき、喫煙以外の原因も考慮する必要があるが、本研究で求めた全人口に対するラドンの PAF は 0.028 (男性 0.023、女性 0.035) で、近年報告された諸外国の数値よりも低かった (66 か国の推定中央値 0.084~0.165、日本 0.023~0.044) [7]。これは日本の屋内ラドン濃度が総じて低いため、濃度分布の 90 パーセンタイル値は 25 Bq m⁻³、95 パーセンタイル値は 32 Bq m⁻³、99 パーセンタイル値は 52 Bq m⁻³ である。

ラドンのリスク低減方策には予防 (新築の住居) と低減 (既存の住居) があり、いずれにも参考レベルが適用されうる。しかし、特に後者に関して、日本において参考レベル 100~300 Bq m⁻³ を導入しても、肺がん死の低減を統計上有意に観察するのは難しいと考えられる。つまり、肺がん死者数の観点だけでいえば、参考レベルに施策としての合理性と実効性は期待できない。2002 年の建築基準法の改正 (常時換気システムの設置) に伴うラドン濃度の低下傾向[6]も考えれば、今後、国内でラドン対策を実施する場合、その目的や意義を明確にすることが必要である。一方、高濃度の家屋は今後も存在するであろうから、引き続き、高濃度化の要因調査に関する研究は求められる。

現状、屋内ラドンに対する施策として考えるべきは、個人自らのリスク認知のための基本的情報の提供、自主的な測定・評価の支援及び測定結果に対する不安解消に向けた支援と考える。現在の日本で自主的なラドン測定や低減措置が広く浸透するとは考えにくく、これを踏まえた明確で実行可能なリスクコミュニケーションの目標の設定及び計画・展開が重要である。

普遍的に存在するラドンの対策を考えるには、我が国の屋内ラドンの現状を認識したうえで、公衆衛生対策としての目的の設定、生活習慣や生活環境に関連する予防可能なリスク因子とのリスク比較、それら因子に対する既存の施策と実効性の評価など、総合的な検討と判断が望まれる。

表1 日本における屋内ラドンの集団寄与割合とラドン起因の肺がん死者数の推定結果

ラドン濃度 (Bq m ⁻³)	集団寄与割合 (-)				ラドンによる肺がん死者数 (-)					
	男性		女性		男性		女性		全体	
	喫煙者	非喫煙者	喫煙者	非喫煙者	喫煙者	非喫煙者	喫煙者	非喫煙者	喫煙者	非喫煙者
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1-5	0.1788	0.0009	0.0023	0.0010	0.0023	0.0010	0.0023	0.0023	32	36
6-10	0.3269	0.0033	0.0084	0.0037	0.0085	0.0037	0.0085	116	127	133
11-15	0.2120	0.0035	0.0088	0.0039	0.0089	0.0039	0.0089	122	133	139
16-20	0.1186	0.0027	0.0069	0.0030	0.0069	0.0030	0.0069	94	104	108
21-25	0.0659	0.0019	0.0049	0.0021	0.0049	0.0021	0.0049	67	74	77
26-30	0.0375	0.0013	0.0034	0.0015	0.0034	0.0015	0.0034	47	51	54
31-35	0.0220	0.0009	0.0024	0.0010	0.0024	0.0010	0.0024	32	35	37
36-40	0.0133	0.0006	0.0016	0.0007	0.0017	0.0007	0.0017	23	25	26
41-45	0.0085	0.0005	0.0012	0.0005	0.0012	0.0005	0.0012	16	17	18
46-50	0.0053	0.0003	0.0008	0.0004	0.0008	0.0004	0.0008	11	12	13
51-60	0.0058	0.0004	0.0010	0.0004	0.0010	0.0004	0.0010	14	15	16
61-70	0.0027	0.0002	0.0006	0.0002	0.0006	0.0002	0.0006	8	8	9
71-80	0.0013	0.0001	0.0003	0.0001	0.0003	0.0001	0.0003	4	5	5
81-90	0.0007	0.0001	0.0002	0.0001	0.0002	0.0001	0.0002	3	3	3
91-100	0.0004	0.0000	0.0001	0.0000	0.0001	0.0000	0.0001	2	2	2
101<	0.0005	0.0001	0.0002	0.0001	0.0002	0.0001	0.0002	3	3	3
合計	1	0.0170	0.0434	0.0188	0.0434	0.0188	0.0434	594	649	679
								(650)	(593)	(681)
								(110)	(110)	(760)
								759	1,273	2,032
								(760)	(1,274)	(2,034)

(注) 最下行は濃度別の各値を加算した結果であるが、丸めの誤差のため、表2で相当する数値(表1の括弧内に表示)とは必ずしも一致しない。

表 2 日本における原因別の肺がん死者数の推定結果

原因	肺がん死者数 (-)						
	男性		女性		全体		合計
	喫煙者	非喫煙者	喫煙者	非喫煙者	喫煙者	非喫煙者	
ラドン	650	593	110	681	760	1,274	2,034
その他 (喫煙含む)	38,247	13,757	5,863	15,684	44,110	29,441	73,551
合計	38,897	14,350	5,973	16,365	44,870	30,715	75,585

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP21K10426 及びウエスコ学術振興財団（学術研究費助成事業）の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] S. Darby, D. Hill, A. Auvinen, J.M. Barros-Dios, H. Baysson, et al. Radon in homes and risk of lung cancer: Collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. *BMJ* 330, 223 (2005).
- [2] World Health Organization (WHO). Radon database.
<https://www.who.int/data/gho/data/themes/topics/topic-details/GHO/gho-phe-radon-database>
(accessed: 2024 年 8 月 5 日).
- [3] 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, 109–117 (2024).
- [4] Environmental Protection Agency (EPA). EPA Assessment of Risks from Radon in Homes. EPA 402-R-03-003 (2003).
- [5] K. Wakai, M. Inoue, T. Mizoue, K. Tanaka, I. Tsuji, et al. Tobacco smoking and lung cancer risk: an evaluation based on a systematic review of epidemiological evidence among the Japanese population. *Japanese Journal of Clinical Oncology* 36, 309–324 (2006).
- [6] G. Suzuki, I. Yamaguchi, H. Ogata, H. Sugiyama, H. Yonehara, et al. A nation-wide survey on indoor radon from 2007 to 2010 in Japan. *Journal of Radiation Research* 51, 683–689 (2010).
- [7] J. Gaskin, D. Coyle, J. Whyte, D. Krewski. Global estimate of lung cancer mortality attributable to residential radon. *Environmental Health Perspectives* 126, 057009 (2018).

5.2 ラドン吸入後のマウス心臓中のグルタチオン関連物質の変化

安全管理課 神崎訓枝、迫田晃弘

岡山大学 片岡隆浩、光延文裕、山岡聖典

背景と目的

ラドンは、放射性希ガスで肺がん因子として知られる。その一方で、療養に用いられることもある（いわゆる、ラドン療法）。しかし、そのメカニズムには未解明な部分が多い。そこで、岡山大学と原子力機構では、ラドン療法のメカニズム解明のため、共同研究「極微量ウラン影響効果試験」を実施して、動物実験によってラドン吸入は抗酸化機能などを亢進させることを明らかにしてきた（[例えば[1]）。近年では、抗酸化物質グルタチオンに関連した代謝物を網羅的に調べるメタボローム解析を実施し、ラドン吸入後の脳・肝臓・肺の抗酸化機能の変化を報告した[2,3]。本稿では、その続報として、ラドン吸入後のマウス心臓について調べた結果を報告する。

方法

8週齢のオスのBALB/cマウスを用い、マウスケージにラドンを含む空気を送り込むことでマウスにラドン吸入させた。ラドンは、ウラン系列の放射性核種を豊富に含む自然土壌から発生させ、濃度は、バックグラウンドレベル（対照、約20 Bq m⁻³）、200 Bq m⁻³、2,000 Bq m⁻³、20,000 Bq m⁻³とし、吸入期間は1日間、3日間、10日間とした。吸入終了直後、マウスから心臓を摘出し、グルタチオンに関連する代謝物を網羅的に（約70種類）分析できるメタボローム解析を実施した。得られた結果は、多重比較検定のDunnnett検定を行って対照群と比較した。

結果と考察

メタボローム解析によってマウス心臓中から40種類の代謝物が検出され、そのうち、対照群と比較して統計的に有意に変化があった代謝物は30種類あった。例えば、グルタチオンには還元型グルタチオン（G-SH）と酸化型グルタチオン（GS-SG）があり、いずれも200 Bq m⁻³または2,000 Bq m⁻³のラドンを吸入した群で減少した（図1）。

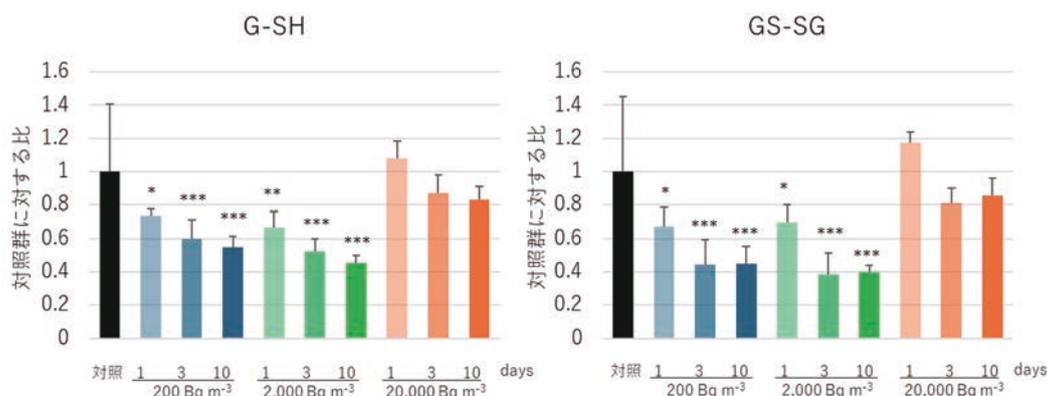


図1 ラドン吸入後のマウス心臓中の還元型・酸化型グルタチオンの変化

(群平均±標準偏差、各群 6 匹、有意確率：*P<0.05、**P<0.01、***P<0.001 vs 対照群)

また、G-SH と GS-SG の各々に余分な硫黄 (S) が結合した超硫黄分子 GS-S-H と GS-S-SG は、200 Bq m⁻³ または 2,000 Bq m⁻³ のラドンを吸入した群で増加し、通常のグルタチオンとは反対の変化が見られた (図 2)。

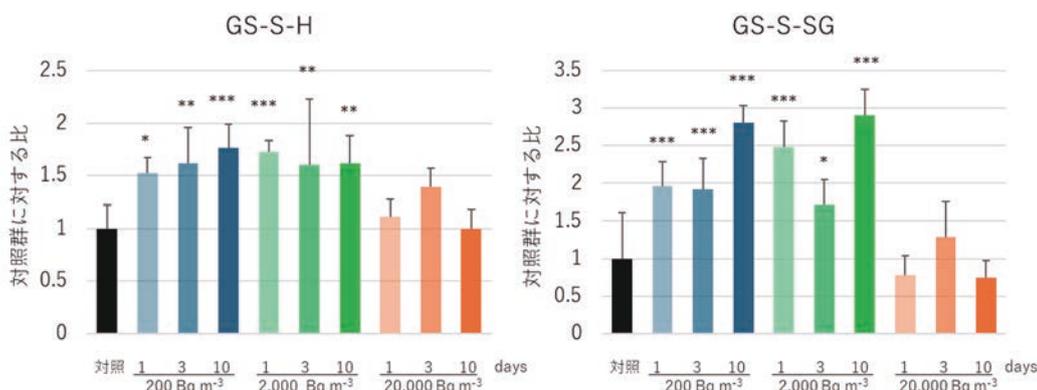


図 2 ラドンを吸入後のマウス心臓中のグルタチオン超硫黄分子の変化

(群平均±標準偏差、各群 6 匹、有意確率：*P<0.05、**P<0.01、***P<0.001 vs 対照群)

一般的に酸化ストレスの指標には、グルタチオンの還元型・酸化型の割合や総量が使われる。図 1 の結果からは、通常のグルタチオンの還元型・酸化型の割合はラドンを吸入をしても一定であり、総量は 200~2,000 Bq m⁻³ のラドンを吸入で減少したことがわかる。図 2 の結果からは、超硫黄分子でも還元型・酸化型の割合は一定であるが、総量は 200~2,000 Bq m⁻³ のラドンを吸入で増加したことがわかる。その他の関連代謝物も図 1 や図 2 で示したいずれかの変化に似ているものが多数あったことから、200~2,000 Bq m⁻³ と 20,000 Bq m⁻³ で異なる機能が働き、低濃度域では心臓中の酸化ストレスが上手く制御されていることが推察できる。ただし、群によっては標準偏差が大きいものも見られたため、データ処理の方法の再検討も含め、まだ結果を精査する必要があると考えている。今後は、グルタチオン関連代謝物が合成される経路を詳細に調べ、20,000 Bq m⁻³ のラドンを吸入では変化が見られなかった理由や超硫黄分子の合成や機能に関する詳細を明らかにし、ラドンの効果についての議論を進めていく。

参考文献

- [1] 石森有, 迫田晃弘, 田中裕史, 光延文裕, 山岡聖典, 片岡隆浩, 恵谷怜央. 極微量ウラン影響効果試験(2) (共同研究). JAEA-Research 2015-024, 41 p., (2016).
- [2] N. Kanzaki, S. Sakoda, T. Kataoka, L. Sun, H. Tanaka, I. Ohtsu, K. Yamaoka. Changes in sulfur metabolism in mouse brains following radon inhalation. International Journal of Environmental Research and Public Health 19, 10750 (2022).
- [3] 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, 44 p., (2024).

6. 業績一覧

This is a blank page.

6.1 論文

[査読あり]

- 1) K. Tokunaga, Y. Takahashi, N. Kozai. Arsenic and iron speciation and binding in the surface soils in Ningyo-toge mill tailings pond using X-ray absorption fine spectroscopy. *Journal of Nuclear and Radiochemical Sciences* 23, 14-19 (2023).
- 2) T. Sugita, M. Mori, N. Kozai. Photocatalytic unification of iodine species using platinum-loaded titanium dioxide. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* 438, 114548 (2023).
- 3) 石田毅, 中島伸一, 近藤伸次, 林原健一, 山田茂樹, 岡本諒, 中村仁宣. 人形峠環境技術センターウラン濃縮施設による保障措置にかかる課題への取組状況. 第 44 回日本核物質管理学会年次大会会議論文集. 4 p., (2023).
- 4) T. Yomogida, T. Hashimoto, T. Okumura, S. Yamada, H. Tatsuno, H. Noda, R. Hayakawa, S. Okada, S. Takatori, T. Isobe, T. Hiraki, T. Sato, Y. Toyama, Y. Ichinohe, O. Sekizawa, K. Nitta, Y. Kurihara, S. Fukushima, T. Uruga, Y. Kitatsuji, Y. Takahashi. Application of transition-edge sensors for micro-X-ray fluorescence measurements and micro-X-ray absorption near edge structure spectroscopy: a case study of uranium speciation in biotite obtained from a uranium mine. *Analyst* 149, 2932-2941 (2024).
- 5) A. Sakoda, Y. Ishimori, Q. Jin, T. Iimoto. Improved data analysis techniques for calculating more accurate radon and thoron exhalation rates from building interior solid walls. *Applied Radiation and Isotopes* 207, 111180 (2024).
- 6) K. Tanaka, K. Yamaji, H. Masuya, J. Tomita, M. Ozawa, S. Yamasaki, K. Tokunaga, K. Fukuyama, Y. Ohara, 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).
- 7) Y. Narazaki, A. Sakoda, N. Akata, H. Itoh. N. Momoshima. Variation analysis of atmospheric ^7Be activity concentrations with respect to precipitation. *Journal of Environmental Radioactivity* 277, 107432 (2024).
- 8) A. Sakoda, Y. Ishimori, M.M. Hasan, Q. Jin, T. Iimoto. Seasonal variations in radon and thoron exhalation rates from solid concrete interior walls observed using in situ measurements. *Atmosphere* 15, 701 (2024).

6.2 報告書

- 1) 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—. JA EA-Review 2023-049, 44 p., (2023).
- 2) 徳永紘平, 山口瑛子, 高橋嘉夫, 清水優希, 吉田俊太郎, 光延聖. 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. *SPring-8 User Experiment Report* 2023B1589 (2023).
- 3) 徳永紘平, 渡辺勇輔, 山口瑛子. 浅地中でのウラン等元素移行・遅延機構解明を目的とした人形峠センター鉱さいたい積場堆積物に含まれるウラン等の物理化学状態の解明. *SPring-8 User Experiment Report* 2023B1937 (2023).

6.3 招待講演

- 1) H. Tanigawa, M. Nakajima, H. Sakasegawa, M. Ando, Y. Watanabe, T. Nozawa, Y. Katoh, T. Nakata. Phase stability of long term creep tested F82H and its correlation with irradiation resistance. International Conference on Fusion Reactor Materials 21 (ICFRM-21), Granada, October 2023.

6.4 各種研究費

[原子力機構外]

- 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) 迫田晃弘 (代表者). リスクに対応できる社会を目指した生活環境中ラドンのダイナミクス研究, 科研費 基盤研究 (C), 2021-2023 年度.
- 3) 神崎訓枝 (代表者). 自然放射線被ばくの環境変化に対する生体恒常性維持機能の解明, 科研費 基盤研究 (C), 2021-2023 年度.
- 4) 香西直文 (代表者), 徳永紘平 (分担者). きのか枯死後のセシウム溶出挙動に着目した森林内セシウム循環機構解明研究, 科研費 基盤研究 (C), 2021-2023 年度.
- 5) 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.
- 6) 徳永紘平 (代表者). シデライトの化学状態の変化に伴う環境中での放射性核種の移行・濃集挙動の解明, ERAN(放射能環境動態・影響評価ネットワーク共同研究拠点), 若手研究, 2023 年度.
- 7) 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.
- 8) 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.

[原子力機構内]

- 1) 神崎訓枝 (代表者), 皆川龍平, 曳沼裕一, 加藤正人. 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.

6.5 受賞

[外部表彰]

- 1) 迫田晃弘. 奨励賞, 日本原子力学会中国・四国支部, 2023 年.
- 2) 竹末勘人. 若手優秀講演賞, 花崗岩山間地の風化花崗岩の地下水流動の不均質性に関する研究. 日本地下水学会 2023 年秋季講演会, 2023 年.

[内部表彰]

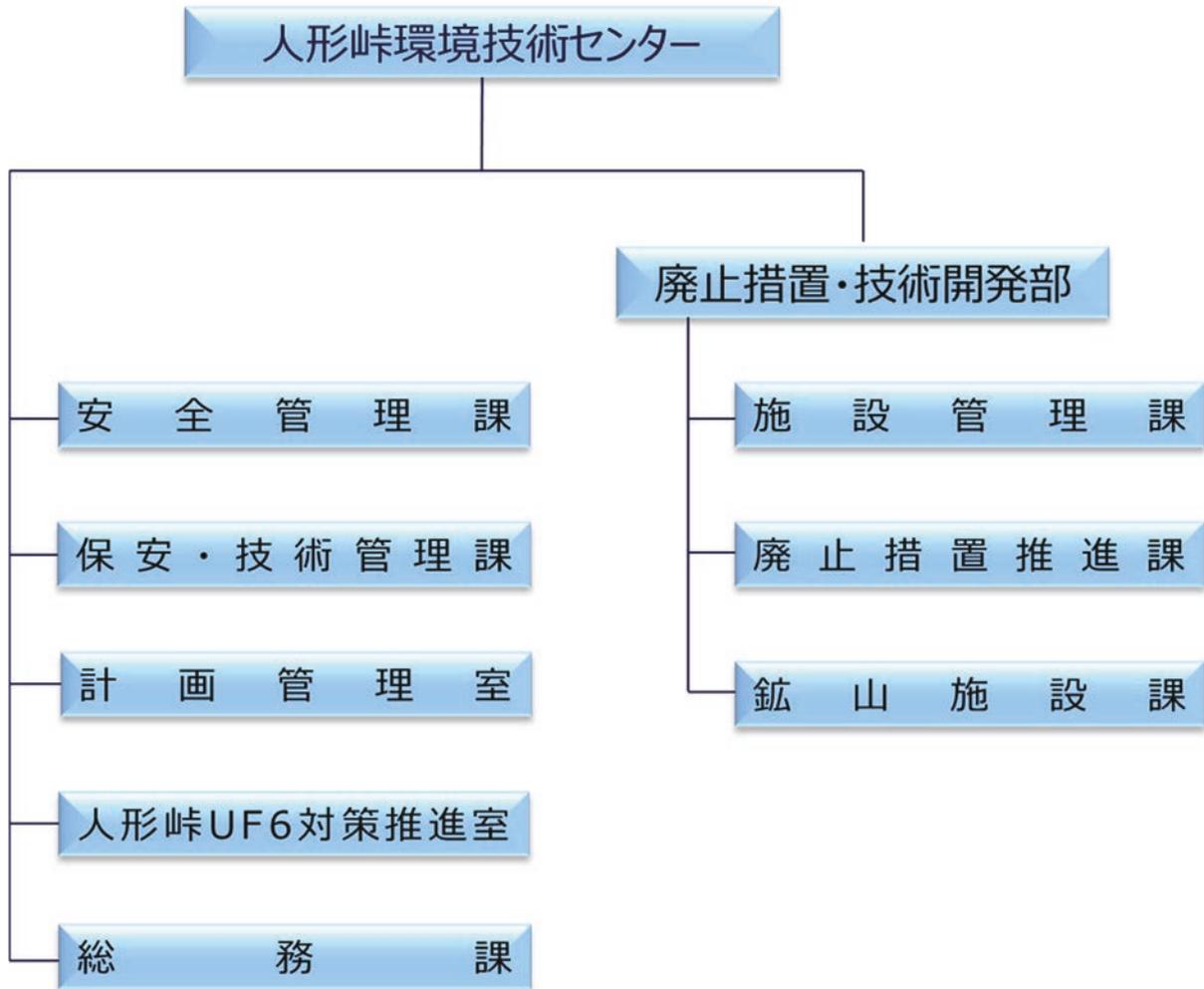
- 1) 人形峠 UF6 プロジェクト交渉団. 廃止措置に伴う人形峠核燃料物質の海外事業者への譲渡しに向けた契約締結に係る取組, 模範賞, 理事長表彰, 2023 年.

6.6 その他

- 1) 酒瀬川英雄. 使用済み遠心分離機の除染技術と超音波洗浄効果予測法の開発, 超音波ソリューションセミナー 2024, 伊藤忠テクノソリューションズ株式会社, オンライン, 2024 年 2 月.

付録1 組織図

(2023 年 4 月 1 日 ~ 2024 年 3 月 31 日)



付録2 産学官民連携の取り組み

計画管理室 青木勝巳

検査開発株式会社 宮川洋

岡山大学との連携

岡山大学と原子力機構は、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、2024年3月19日、岡山大学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、2023年度の連携協力事業、2024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

津山高専との連携

津山工業高等専門学校（津山高専）と原子力機構は、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2023年4月から8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。また、2023年6月16日には、先進科学系5年生へ“放射線及び放射性物質”に係る講義を行った（表1、図2）。

表 1 2023 年度津山高専での環境科学講座

電気電子システム系 5 年、情報システム系 5 年		
実施日	講義内容	担当者 (所属)
4 月 11 日	ガイダンス	日野田 晋吾 (計画管理室)
4 月 18 日	原子力機構・人形峠環境技術センターの紹介	中島 正義 (計画管理室) 日野田 晋吾 (計画管理室)
4 月 25 日	地球環境問題、低炭素社会の構築	日野田 晋吾 (計画管理室)
5 月 2 日	水と人間活動、生物多様性の保全	日野田 晋吾 (計画管理室)
5 月 9 日	化学物質と環境、公害防止と環境保全	日野田 晋吾 (計画管理室)
5 月 16 日	循環型社会の構築、廃棄物対策	日野田 晋吾 (計画管理室)
5 月 23 日	我が国におけるエネルギー事情	日野田 晋吾 (計画管理室)
5 月 30 日	放射性廃棄物の処理・処分	酒瀬川 英雄 (廃止措置推進課)
6 月 6 日	中間試験	日野田 晋吾 (計画管理室)
6 月 13 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 (計画管理室)
6 月 20 日	除染技術開発	西脇 大貴 (廃止措置推進課)
6 月 27 日	地下水モデルの最適化研究	井上 準也 (鉱山施設課)
7 月 4 日	自然起源放射性物質の環境影響評価	迫田 晃弘 (安全管理課)
7 月 11 日	機械学習によるデータ解析	神崎 訓枝 (安全管理課)
7 月 18 日	講義の最後にあたって	日野田 晋吾 (計画管理室)
7 月 25 日	(休講・期末レポート提出期限)	日野田 晋吾 (計画管理室)
先進科学系 5 年		
実施日	講義内容	担当者 (所属)
6 月 16 日	放射性廃棄物の処理・処分	酒瀬川 英雄 廃止措置推進課

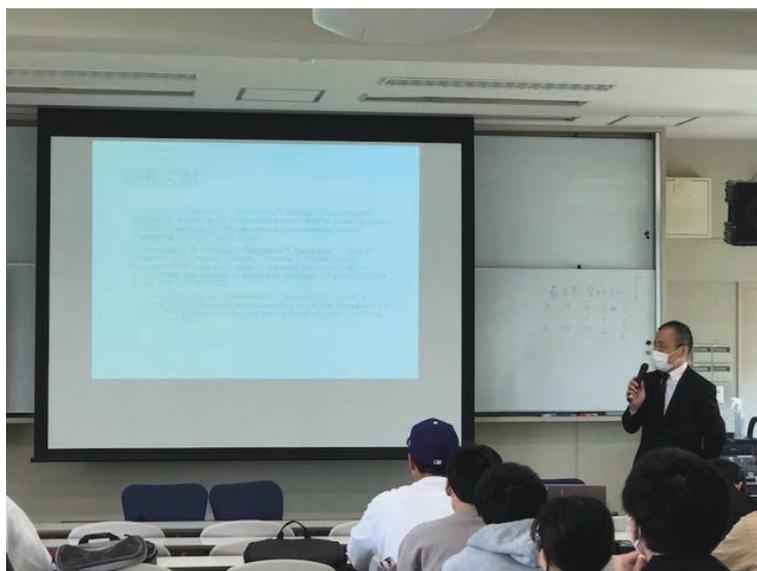


図 2 津山高専での講義の様子

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）

人形峠環境技術センターは、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。具体的には、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、津山産小麦を使用したパン、地域で栽培されているひめのもち（もち米）、地域で肥育されている「つやま和牛」等の試験測定を実施した。



図3 食材の香り数値化で使用してい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では、センター事業の透明性確保、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。

本年度の来訪者は1,800名を超え、開館以来の累計来訪者は約5,400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体験教室を実施した（図4）。2023年9月24日には、昨年度に続き2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）。人形峠環境技術センターでは「サテライトオフィスふらっと」の成果を取りまとめ、今後の運用の改善につなげる計画である。



図4 サテライトオフィスでの体験教室の様子



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.

