



JAEA-Review

2022-080

DOI:10.11484/jaea-review-2022-080

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

ートピックスー

Research and Development in the Fiscal Year 2021
in Ningyo-toge Environmental Engineering Center: Topics

人形峠環境技術センター

Ningyo-toge Environmental Engineering Center

核燃料・バックエンド研究開発部門

Sector of Nuclear Fuel, Decommissioning and Waste Management Technology Development

March 2023

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Review

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 JAEA イノベーションハブ 研究成果利活用課
〒 319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, 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 Institutional Repository and Utilization Section,
JAEA Innovation Hub, Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail: ird-support@jaea.go.jp

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 —トピックス—

日本原子力研究開発機構 核燃料・バックエンド研究開発部門
人形峠環境技術センター

(2022 年 12 月 12 日受理)

本報告書は、2021 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探鉱から採鉱、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、廃止措置を着実に進めるために不可欠な、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の関連テーマとして、人形峠における地下水流動の特徴に関する調査、地盤構造推定手法の検討について報告する。ウラン廃棄物工学研究として、超音波洗浄を利用した除染技術開発、廃棄物の元素分析法の開発について報告する。安全技術・設備開発として、放射線管理システムの改善、安全情報に関するテキスト解析について、また放射線影響評価研究として、ラドンの摂取と生体影響の評価、人形峠における生態系の放射性核種等の挙動について報告する。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 2021
in Ningyo-toge Environmental Engineering Center: Topics**

Ningyo-toge Environmental Engineering Center
Sector of Nuclear Fuel, Decommissioning and Waste Management Technology Development
Japan Atomic Energy Agency
Kagamino-cho, Tomata-gun, Okayama-ken

(Received December 12, 2022)

This report outlines some main research and development activities executed by the Ningyo-toge Environmental Engineering Center in FY2021.

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 to steadily keep the decommissioning.

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 “Environmental research” and environmental conservation, this report describes researches on the characteristics and distribution of aquifer in Ningyo-toge and better geotechnical structure estimation methods. As for “Uranium waste engineering research”, the decontamination using ultrasonic cleaning and the elemental analysis of uranium waste are reported. Further, the followings are also reported: the improvement of the radiation management system, the text mining approach for information extraction from safety-related documents, the intake and biological effects of radon, and the behavior of trace elements and radionuclides in the ecosystem of Ningyo-toge. The achievements of those works have been widely presented through research papers etc.

Keywords: Ningyo-toge, Environmental Research, Uranium Waste Engineering Research,
Environmental Conservation, 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特徴に関する現地調査技術	3
1.2 簡易貫入試験およびチェーン微動アレー探査による地盤構造推定手法の確立	6
2. ウラン廃棄物工学研究	9
2.1 超音波洗浄効果のシミュレーション予測	11
2.2 蛍光 X 線分析装置の FP 法を用いた高濃度ウラン含有廃棄物の迅速多元素分析法の開発	14
3. 安全技術・設備開発	17
3.1 施設放射線状況遠隔集中監視システムの改善	19
3.2 安全に関するテキスト解析	22
4. 放射線影響評価研究	25
4.1 皮膚表面におけるラドンの溶解と拡散	27
4.2 メタボローム解析を用いたラドン吸入による肺中グルタチオン関連物質の変化特性	29
4.3 人形峠における生態系の微量元素および放射性核種の挙動調査	33
5. 業績一覧	35
5.1 論文	37
5.2 報告書	38
5.3 招待講演	38
5.4 受賞	38
5.5 各種研究費	38
付録 1 組織図	40
付録 2 産学官民連携の取り組み	42

Contents

1. Environmental research and environmental conservation	1
1.1 Investigation techniques related to characteristics of groundwater flowing through granitic mountains	3
1.2 Development of underground structure estimation method by portable dynamic cone penetration test and microtremor array survey	6
2. Uranium waste engineering research	9
2.1 Simulation prediction of ultrasonic cleaning effect	11
2.2 Development of fundamental parameter method in X-ray fluorescence-based rapid multi-element analysis for radioactive wastes with high uranium concentrations	14
3. Development of safety techniques and equipment	17
3.1 Improvement of the remote and centralized monitoring system for radiation management in facilities	19
3.2 Text analysis for safety	22
4. Radiation research	25
4.1 Radon solubility and diffusion in the skin surface layer	27
4.2 Changes in glutathione-related substances in lungs following radon inhalation using metabolome analysis	29
4.3 Study of the behavior of trace elements and radionuclides in the ecosystem of Ningyo-toge	33
5. List of achievements	35
5.1 Papers	37
5.2 Reports	38
5.3 Invited presentations	38
5.4 Awards	38
5.5 Grants	38
Appendix 1 Organization chart	40
Appendix 2 Collaboration with industry, academia, government and private sectors	42

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：浅井 祐哉（施設管理課）

飯尾 彰規（鉱山施設課）

石田 毅（保安・技術管理課）

川上 弘子（総務課）

神崎 訓枝（安全管理課）

澤山 兼吾（廃止措置推進課）

竹末 勘人（計画管理室）

事務局：酒瀬川 英雄（計画管理室）

迫田 晃弘（計画管理室）

※なお、本文に記載されている所属は 2021 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特徴に関する現地調査技術

計画管理室 竹末勘人

要約

環境研究の一環として、地下水流動の特徴に関する調査研究を行った。既存の現地調査技術を踏まえて、透水性割れ目のネットワークを伴う割れ目帯が認められない難透水花崗岩を確認した。また、地質分布の変遷を調べ、高透水層と低透水層の分布地域を区分した。

目的

ウラン廃棄物の合理的かつ安全な処分の研究開発の中で、環境研究ではウラン廃棄物のトレンチ処分に係る安全性を確認するための研究を行っている。花崗岩地域の地下水流動の調査では、地下水の移行経路となる割れ目の分布と透水性の把握は重要である。しかし、地質の分布が複雑で帯水層の規模が小さく、透水性が不均質な場合、一般に地下水流動解析による水位の再現が難しい。特に、断層や局所的に発達した透水性割れ目が遍在する場合は、それらの特徴と分布の把握が課題となる。従来、花崗岩分布地域の地下深部においては、断層運動と割れ目の発達に伴う高透水化が注目され、割れ目帯の分布とそれらの平均的な透水係数などを用いた地下水流動の解析が行われてきた[1]。しかし、調査費用や時間がかかる問題があるため、人形峠地域では、これまでに断層や割れ目を回避するための調査技術が検討され、2020年度までにボーリング調査により花崗岩の透水係数、割れ目と鉱物脈及び岩脈の分布、均質な地層の分布が調べられ、その調査技術の開発に取り組んできた[2]。一方、西南日本の花崗岩山間地の表層付近に着目すると、しばしば花崗岩の熱水変質、マサ化、粘土化がみられ、それらを覆って火山砕屑物と溶岩が分布しており、地質が比較的複雑である。そのため、花崗岩山間地の表層付近では、熱水変質や風化による粘土化、マサ化の影響を考慮するとともに、移行経路の偏在を回避して均質な地層を選ぶ必要がある。人形峠地域には、上述した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。2021年度は地質調査と移行経路の偏在を回避するための調査の精度の高度化に向けて、フィールド調査（地質調査、簡易ボーリング調査）と岩石コア観察及び岩石薄片観察、割れ目の分布解析を行い、地質情報を蓄積し、地下水流動の特徴を把握した。

進捗

フィールド調査（地質調査、簡易ボーリング調査）、岩石コア観察及び岩石薄片観察、割れ目の分布解析を行った。その結果、割れ目のネットワークを伴う割れ目帯が認められない難透水花崗岩を確認した。難透水花崗岩は、割れ目や鉱物脈が認められないため硬質と判断される花崗岩（硬質な花崗岩）と、自形の石英やカリ長石、黒雲母を伴う鉱物脈が発達する花崗岩（鉱物脈が発達する花崗岩）に区分できることが分かった（図1）。また、既存の原位置情報と地下水位から高透水層（マサ卓越層）及び低透水層（新鮮花崗岩、粘土質花崗岩、熱水変質花崗岩）

の分布地域を区分し、主な帯水層の分布を推定した（図 2）。

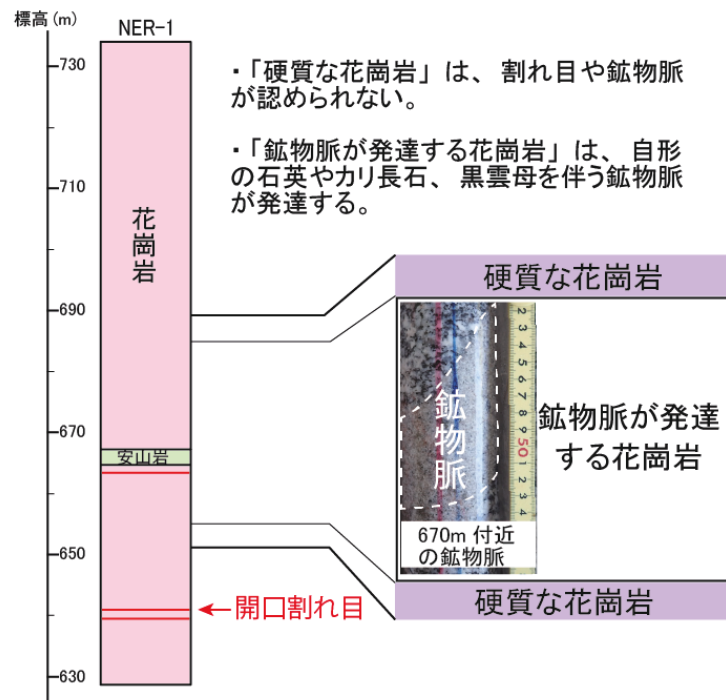


図 1 難透水花崗岩の特徴

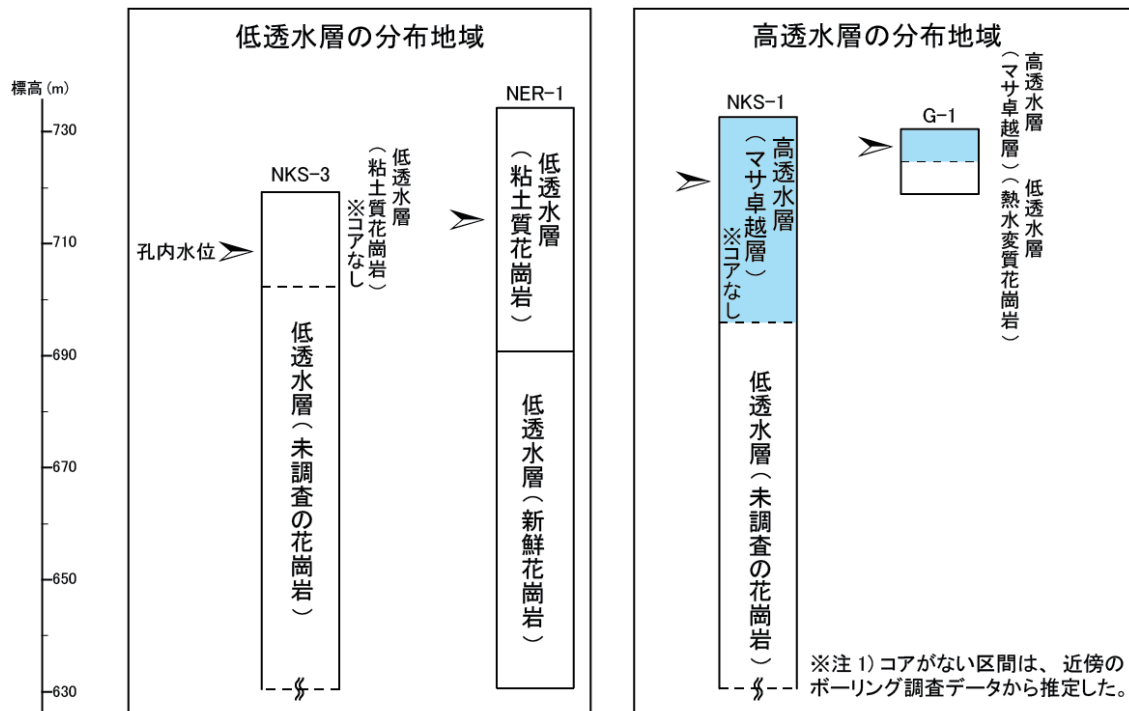


図 2 主な帯水層の分布

今後の予定

均質な地層の分布を調べるための地質調査と透水試験に加えて、地質調査の精度を高めるための地質分布の変遷の調査と、粘土化、マサ化による影響を考慮するための水－岩石反応試験を組み合わせた総合的な調査技術の開発を行う。

参考文献

- [1] 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).
- [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・技術開発成果ートピックスー. JAEA-Review 2021-068 (2022) 52p.

1.2 簡易貫入試験およびチェーン微動アレー探査による地盤構造推定手法の確立

鉱山施設課 飯尾彰規、井上準也

目的

人形峠環境センターにおけるウラン鉱山の閉山活動を進めるにあたり、鉱山施設周辺の安全評価・対策が重要視されている。安全評価を精度よく実施するためには地下の地盤構造を正しく把握する必要があるが、ボーリングなどの一般的な掘削調査は時間・費用ともにコストが高く、実施することが難しい。

そこで時間・費用ともにコストの低い簡易貫入試験とチェーン微動アレー探査[1,2]による地盤構造の推定が有効な手法となり得る。簡易貫入試験は地盤の貫入抵抗を調べる簡易調査法の一つで、可搬性に優れる点から斜面調査などで実施される。チェーン微動アレー探査は、微動アレー探査を2次元に拡張したもので、非破壊により地盤構造を推測できる。また地表に露出している地質を直接確認する、露頭調査も地盤構造を推測する上で非常に有用である。さらに、センターでは探鉱・採鉱活動時の調査データ（ボーリングなど）が紙媒体にて蓄積されている。これらを電子化したうえで調査結果と共に位置・時間情報を可視化することで、3次元的な地盤構造の推定精度が向上することが期待される。

本研究は、過去に実施され蓄積されたデータと、簡易な現場調査を組み合わせることで地盤構造を高精度に推定する手法を新たに確立するための研究である。

得られた成果

既存のボーリングデータと、本研究で実施した現場調査結果を組み合わせることで3次元地盤モデルを8種類作成し（表1）、逆解析により地質のパラメータの最適化を実施した。モデルの妥当性は、センター内における地下水位の実測値と、解析結果の地下水位とを比較する（図1）ことで評価した。図1より、既存のボーリングデータのみで作成したモデル（ケース①）では、実測値と解析結果の最大誤差は5.5%程度であった。これに対し、露頭調査の結果を組み合わせたモデル（ケース②）では2.3%程度、露頭調査および簡易貫入試験の結果を組み合わせたモデル（ケース④）では最大誤差2.0%程度であり、本研究で実施した簡易な現場調査の結果を組み合わせることで実測値と解析結果の最大誤差が大きく減少している。このことから、既存のボーリングデータと本研究で実施した現場調査の結果を組み合わせることで、地下水位の再現精

表1 作成したモデルに使用した調査データの組み合わせ

ケース	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
ボーリングデータ	○	○	○	○	○	○	○	○
露頭調査	×	○	○	○	×	×	×	○
微動アレー探査	×	×	○	×	○	○	×	○
簡易貫入試験	×	×	×	○	×	○	○	○

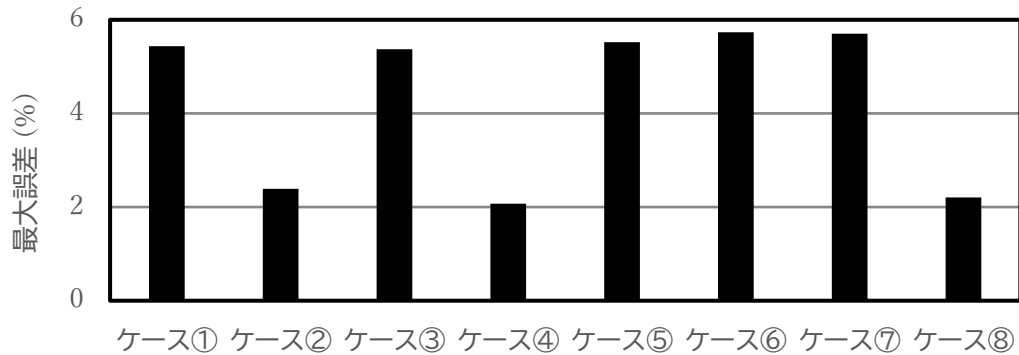


図1 各モデルにおける解析結果と実測値の誤差

度が向上することが確認され、本手法は妥当な3次元地盤モデルの構築に有効であることが示された。また、データをGISソフト（QGIS）[3]に取りまとめ、モデル構築プロセスを体系化したことで、目的に合わせた任意のモデルを容易に構築可能となった。

なお、チェーン微動アレー探査の結果を組み合わせたモデルでは、組み合わせていないモデルに比べて最大誤差の値が増加する傾向にあった。これは、チェーン微動アレー探査は大まかな地盤の様子を推定する調査法であること、調査実施者の技能熟練度不足によるものであると考えられるが、練度を上げることで地盤構造の推定手法に有用となることが考えられる。

本研究を応用・発展するために、最も妥当性の高かった地盤モデル（ケース④）を用いて、モデル領域内の斜面崩壊リスク評価を実施した。リスク評価では、地盤モデルと地表面の傾斜方向が同一かつ地表面の傾斜が30度以上の斜面を斜面崩壊危険斜面とし、判定を実施した。リスク評価結果を図2に示す。図2より、平成27年に崩壊した濃縮工学施設西側法面についても危険斜面として判定されていることから、リスク評価結果は良好な結果であるといえる。このことから、本手法は災害対策におけるリスク評価等にも活用できることが示された。

さらに、構築した地質モデルは地下水シミュレーションにより妥当性を評価しているため、地下水流動状況の把握も可能である。また、シミュレーション結果から推定した地盤は、気象、水質、物性などの多種多様な情報とともにGISソフト上で一元化することで、多角的な評価や分析、解析への応用が可能である。

本研究の副次的な効果として、探鉱・採鉱活動時から蓄積されてきた資料及び現地調査結果をGISソフト上で一元化したことで、時間的・空間的なデータ特性の把握が容易となり、データを使用した科学的な知見を容易に得ることが可能となった[4-6]。また、電子データであるため閲覧・編集およびデータを用いた計算が容易となり、業務が効率化されるとともに、電子媒体でのデータの共有が可能となったため、印刷用紙の使用量が低減化された。さらに、GISソフト（QGISおよびQField；QGISをモバイル端末に最適化されたモバイル端末用アプリケーション）[7]を導入したPC、タブレット端末を用いることで現場調査時に持っていく荷物（デジタルカメラ、GPSロガー、紙地図など）量の減少、それに伴い転倒等のリスク低下にも寄与した。

本手法を適用することで、現場調査におけるデータ取得から取りまとめまでの一連作業が効率化されるとともに、目的に合わせた任意のモデルを容易に構築可能となるため、安全かつ効率的な閉山活動および斜面災害防止策の検討などに非常に有用である。

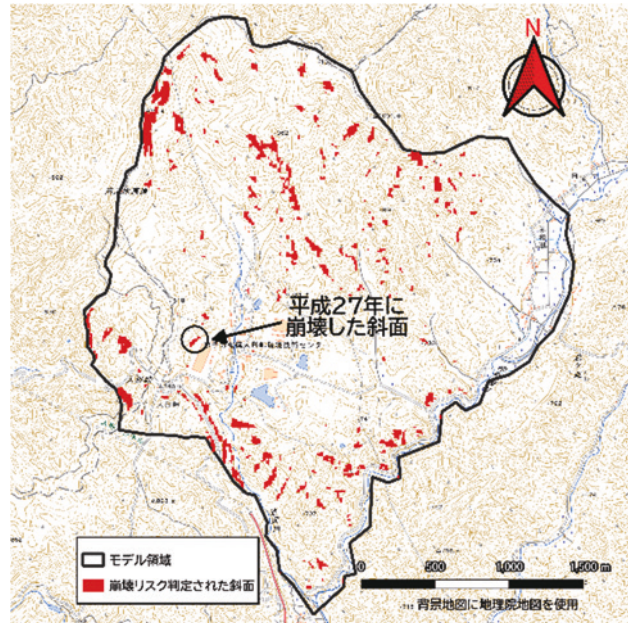


図2 斜面崩壊リスク評価結果。背景地図に地理院地図
(<https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html>) を使用

今後の予定

ボーリングデータの内容を精査し信頼性評価を試みるとともに、様々な地盤調査手法による地盤データを一元化する。また、調査データの少ない区域においてより詳細な調査を実施するとともに、高精度 GPS を用いて取得した調査データに精度の良い位置情報を与えることで、より妥当性の高い地盤モデル構築が期待される。

上記の内容を進めるとともに、簡易貫入試験等により地面に作成された貫入孔にファイバースコープ等の小型カメラを挿入し、地盤内の様子を観察する。簡易貫入試験の結果と、カメラによる観察結果を比較することで、地盤内の地質の推定精度向上が期待される。

参考文献

- [1] 今井博, 青木智幸, 石井裕泰. 微動チェーンアレーによる浅部探査. 大成建設技術センター報 46 (2013).
- [2] 高林茂夫, 市川千尋, 本山普士, 林久夫, 松岡達郎. 微動アレー探査を用いた道路下の空洞探査—チェーンアレー探査による 2 次元断面—. 日本応用地質学会 研究発表会講演論文集 2009, 35–36 (2009).
- [3] 自分の環境にあった QGIS のダウンロード, <https://qgis.org/ja/site/forusers/download.html> (accessed: 2022 年 10 月 13 日).
- [4] QGIS ビギナーズマニュアル, <https://gis-oer.github.io/gitbook/book/materials/QGIS/QGIS.html> (accessed: 2022 年 10 月 13 日).
- [5] 喜多耕一. 業務で使う QGISver. 3 完全使いこなしガイド. 全国林業改良普及協会 (2019).
- [6] 橋本雄一編. QGIS の基本と防災活用. 古今書院 (2017).
- [7] QField—モバイル[Q]GIS ソリューション, <https://qfield.org/docs/ja/> (accessed: 2022 年 10 月 13 日).

2. ウラン廃棄物工学研究

This is a blank page.

2.1 超音波洗浄効果のシミュレーション予測

(使用済み遠心分離機処理の実用システムに関する共同研究)

遠心分離機処理共同研究タスクチーム 酒瀬川英雄、中島正義、佐藤和彦、野村光生、

澤山兼吾、横山薫、美田豊、高橋信雄

日本原燃株式会社 (JNFL) 泉亘、小林登、米川仁、上原典文、伴忠彦

東芝エネルギーシステムズ株式会社 矢板由美、村田栄一、赤山類

伊藤忠テクノソリューションズ株式会社 (CTC) 池上泰史、小山純、入谷佳一

目的

人形峠環境技術センターは JNFL と「使用済み遠心分離機処理の実用システムに関する共同研究」を実施している[1]。ここでは新たな除染技術の研究開発を目標の一つとしており、その中では湿式除染の除染効果の促進のために利用される超音波洗浄の洗浄効果をシミュレーション予測することを目指している。

超音波洗浄に関する装置仕様や条件の最適化については、ラボスケール規模のものから実験的なアプローチを始めることが先ず考えられる。これは着実かつ一般的なアプローチであるが、実用規模までを想定した場合、段階的なスケールアップを経た検証実験が必要となる。

このアプローチに対して、超音波洗浄効果のシミュレーション予測により、その効果とシミュレーションの計算パラメータとなる装置仕様や条件との関係を把握しておけば、実用規模での洗浄効果分布も予測可能であり、段階的なスケールアップを最低限とすることができて、設計に至るまでの経費を削減することが期待できる。さらに、装置運転時の超音波洗浄効果の低下や不均質化などのトラブルシューティングの一助となることも期待できる。

要約

超音波洗浄のメカニズムではキャビテーション現象が重要である[例えば、2]。キャビテーションとは超音波による液中音圧変化に起因した気泡の発生と圧壊の現象のことであり、低音圧下で発生した気泡が高音圧下で圧壊する際、大きな衝撃力が生じる。この衝撃力が洗浄力を生み出している。このため、図1に示したように、超音波による音圧分布はキャビテーション分布と相関するものであり、キャビテーション分布が超音波洗浄効果に直結することになる。

キャビテーション分布をシミュレーション予測できれば超音波洗浄効果も予測できることになるが、そのようなシミュレーション予測の前例や報告例はなく、本研究はその一手手前のキ

$$\boxed{\text{音圧分布}} \propto \boxed{\text{キャビテーション分布}} = \boxed{\text{超音波洗浄効果}}$$

図1 音圧分布、キャビテーション分布、そして、超音波洗浄効果の関係

キャビテーションと関連する音圧に注目している。音圧に関するシミュレーション予測のためには超音波解析ソフトウェア ComWAVE™ [3]を利用している。本ソフトウェアは10億要素規模の膨大なメッシュによる高精度な音圧分布のシミュレーションが可能なのである。

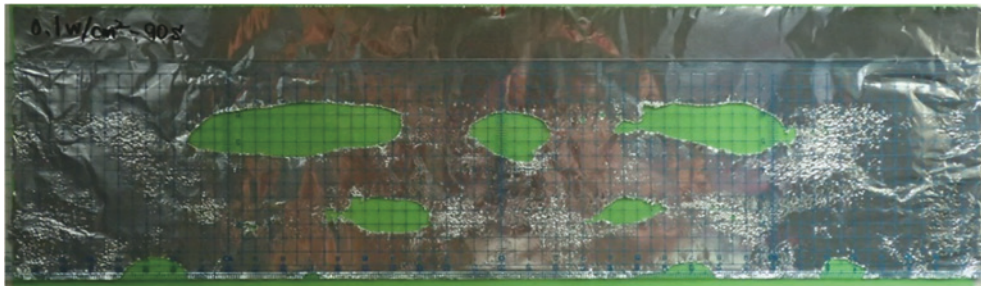
図2に超音波洗浄効果の評価実験の様子を示した。超音波洗浄槽内にアルミニウム箔を入れて超音波洗浄すると、キャビテーション分布に応じたアルミニウム箔の損傷分布を得ることができる。この損傷はキャビテーションで発生した気泡の圧壊による衝撃力によるものである。このため、アルミニウム箔の損傷分布は洗浄効果分布と一致することになる。



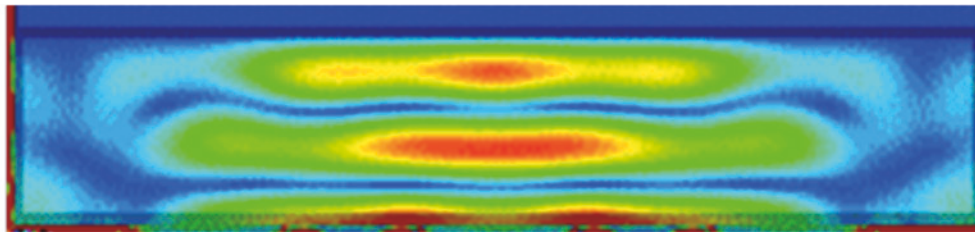
図2 超音波洗浄効果の評価実験の様子

図3(a)に図2の実験で得られた損傷分布を示した。穴が開いたり、表面が荒れている損傷部分がキャビテーション分布と対応するところであり、洗浄効果が期待できるところになる。

図3(b)にはシミュレーションで得られた音圧分布（コンター図）を示した。高い音圧の部分が赤の暖色系、低い部分は青の寒色系、その間は緑で示される。図3(a)と比較すると、完全な一致ではないものの、高い音圧の部分と損傷部分が一致する傾向が確認できた。音圧分布のシミュレーションにより、損傷分布、つまり、洗浄効果分布が予測できる可能性が示された。



(a) 実験による損傷分布



(b) シミュレーションによる音圧分布

図3 シミュレーションと実験結果の比較

今後の予定

音圧分布のシミュレーションにより、洗浄効果の分布が予測できる可能性が示された。しかしながら、シミュレーションによる音圧分布は洗浄効果と直結するキャビテーション分布と完全には一致していないところもある。このため、キャビテーション発生による音圧変化や時間的な音圧変化等をシミュレーションに取り込むことで高精度化を図る。さらには、実際の洗浄物となる複雑形状部品の洗浄効果を予測することも目指して研究を進める。

参考文献

- [1] 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
ートピックスー. JAEA-Review 2021-068 (2022) 52p.
- [2] 株式会社カイジョー, 超音波洗浄の原理. <https://www.kaijo.co.jp/sansen/technical/genri.html>
(accessed: 2022 年 8 月 9 日).
- [3] engineering-eye, ComWAVE, <https://www.engineering-eye.com/ComWAVE/> (accessed: 2022 年 8
月 9 日).

2.2 蛍光 X 線分析装置の FP 法を用いた高濃度ウラン含有廃棄物の迅速多元素分析法の開発

廃止措置推進課 西脇大貴、野村光生、小川潤平、澤山兼吾、大橋裕介

アメテック株式会社 宮城琢磨

九州大学 有馬立身

はじめに

核燃料・核原料施設で貯蔵中の放射性廃棄物や原子力施設の廃止措置において発生する放射性廃棄物の適切な処理処分のためには、廃棄物の定性・定量分析が必須である。一般的な分析法として ICP（Inductively Coupled Plasma）法が挙げられるが、試料溶解等の前処理や測定対象とマトリクス（測定対象の主要な構成成分）が同等となる標準試料が必要であり、不溶解性の焼却灰やスラッジ等（人形峠環境技術センターで発生する廃棄物の約 30%を占める）への利用は困難である。さらに、前処理による二次廃棄物の発生が課題となる。

そこで本研究は、前処理及び標準試料を必要としない分析法としてエネルギー分散型蛍光 X 線分析法（Energy Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometry: ED-XRF）及び XRF 特有の理論的定量計算法である Fundamental Parameter 法（FP 法）の利用に着目した。

ED-XRF は蛍光 X 線を利用し、非破壊・非接触で迅速に多元素を幅広い濃度範囲（ $\mu\text{g/g}$ ～1000 mg/g ）で測定可能な分析法であり、その FP 法は予め取得された元素ごとの物理定数を用いて理論スペクトルを構築し、実測した X 線スペクトルとの比較・補正を繰り返すことで標準試料を必要せずに定量を行う解析法である。また、FP 法は実測に基づいて得られるデータで補足することでマトリクスに依存することなく解析できる[1]。これは ED-XRF の分析可能な元素が一般的に Na の原子番号以上の重い元素であることにより受ける FP 法の制限に対し、実測的データにより平均元素番号を推定し補足することで、マトリクスが Na の原子番号未満の軽い元素であっても解析を収束させることが出来る補足法である。しかしながら、その対象範囲は軽元素～中間元素マトリクスに限られており、ウラン等の重元素マトリクスまでは考慮されていない。このため、高濃度のウランを含むような放射性廃棄物の分析のためには、実測的データとしてウランをマトリクスとした試料の X 線スペクトルから平均原子番号（質量吸収係数）と負の相関がある散乱線強度（特にコンプトン散乱線）を取得する必要がある。

ここでは前処理を必要としない放射性廃棄物の分析法の確立を目指して、高濃度のウランを含んだ物質の ED-XRF 分析を可能とするメソッド（FP 法上の濃度補正を含んだ理論式）の構築を行った。

メソッドの構築

メソッドの構築は光学系が偏光光学系二次ターゲット方式であり、ウランガラス（約 1 mgU/g ）が解析可能なアメテック社製の ED-XRF 装置（SPECTRO XEPOS）に付属の FP 法解析ソフトウェア Turbo Quant を用いた。この解析ソフトウェアは補足法として、散乱線強度と平均原子番号から作成される質量吸収係数検量線が予め入力されているが、従来のメソッドにはウランのデータが存在しなかった。そこで、ウランの散乱線強度を取得するため、高純度なウランにフ

ッ化ナトリウムを段階的に加え平均原子番号数を変化させた試料を分析した。得られたスペクトルから散乱線強度を取得するため、従来メソッドで利用されているターゲット元素（Mo）の K-Alpha 線の散乱線を確認したところ、ウランの L-Beta 線が干渉していた。そこで、干渉のない K-Beta 線の散乱線から強度を取得し、ウランデータを含む質量吸収係数と散乱線の関係を得た（図 1）。また、分析精度を向上させるため、高純度ウランマトリクス標準試料を分析し、感度係数の補正を行った。

以上より、高濃度のウランを含んだ物質の ED-XRF 分析を可能とするメソッド「Uranium-method（U-method）」を構築した。

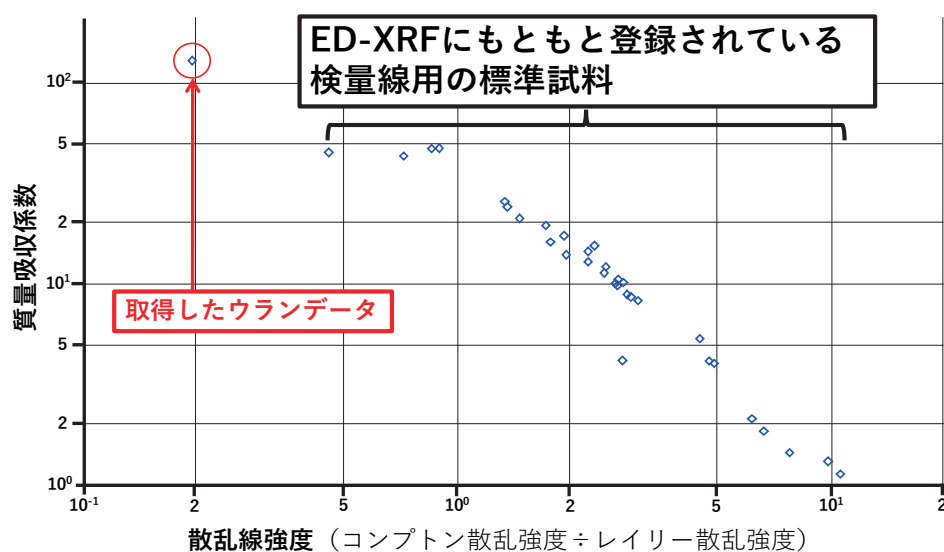


図 1 質量吸収係数と散乱線の関係（レイリー散乱線によって標準化）

性能評価

U-method の性能評価のため、液体、澱物、ウラン精鉱のマトリクスが異なる実廃棄物、合計 169 試料（濃度範囲は ICP 法の測定値より 0.003～700 mg U/g）の分析を行い、U-method および従来のメソッドで解析した。その結果、従来のメソッドでは、実廃棄物 80 試料が解析出来ず、その多くが 1 mgU/g 以上であった。一方、U-method は全数の解析が可能であった。また実廃棄物のウラン濃度について U-method と ICP 法の分析値を比較したところ、決定係数 $R^2=0.85$ と強い相関が得られ、ウランに対する分析精度が高いことが確認された（図 2）。ウラン以外の元素についても同様に比較を行ったところ、ICP 法により

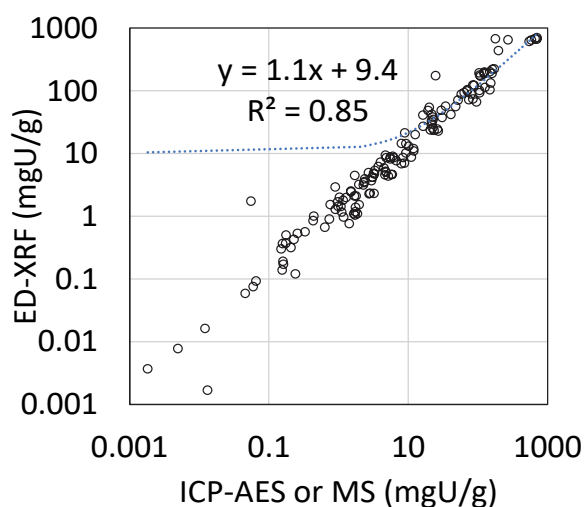


図 2 ウラン濃度についての U-Method と ICP 法の比較

定性された 29 元素のうち 18 元素において決定係数 R^2 は 0.5 以上を示した。 R^2 が 0.5 より小さくなった元素は原子番号が 30 以下の元素がほとんどであった。この結果は、原子番号が小さいほど蛍光 X 強度が得られ難くなることに起因していた。これより、U-method はウランだけではなく他の重金属元素の分析においても有効であることが明らかとなった。

まとめ

ウラン系廃棄物（ウラン濃度が $\mu\text{g/g}$ オーダー～数百 mg/g ）中のウラン及び重金属等の元素分析を非破壊で行うことのできる ED-XRF 分析 FP 法のためのメソッド「U-method」を開発した。これは ICP 法と高い相関性を持ち、ウランの濃度や廃棄物のマトリクスにかかわらず、多くの元素を 15 分程度と迅速に分析することが出来る。また、ジーエルサイエンス株式会社のカタログに掲載され商品化された[2]。

参考文献

- [1] 桜井健次. リファレンスフリー蛍光 X 線分析入門. 講談社 (2019).
- [2] ジーエルサイエンス株式会社. 放射性核種分析カタログ (2022).
<https://www.gls.co.jp/brochure/analysis.html> (accessed: 2022 年 10 月 21 日).

3. 安全技術・設備開発

This is a blank page.

3.1 施設放射線状況遠隔集中監視システムの改善

安全管理課 皆川龍平

JAEA 核燃料サイクル工学研究所 放射線管理部 放射線管理第2課 宮内亨

人形峠原子力産業株式会社 小原弘

検査開発株式会社 武元賢治

目的

安全管理課の施設放射線管理に使用している施設放射線状況遠隔集中監視システム（以下、システムという）の機器構成の見直しを行い、監視機能の向上、更新及び機能維持に必要な費用の低減並びにメンテナンス性の向上を目的とする。

要約

安全管理課では、人形峠環境技術センターで管理区域が設定されている主要5施設（ウラン濃縮原型プラント、濃縮工学施設、製錬転換施設、廃棄物焼却施設、開発試験棟）において、施設内の放射線管理を行っている。本業務を安全かつ効率的に進めるため、放射線状況（排気中放射性物質濃度、排気中 HF 濃度）や警報発生状況を一元的に遠隔監視するためのシステムを平成13年に導入し、これまで運用してきた。しかし、近年、経年劣化による構成機器の故障頻度が増加しており、放射線管理業務の効率面に影響が出始めていた。

そこで、システムの更新を行うことにしたが、現在の仕様と同じ内容で更新した場合、現行システムの製作費用が極めて高額であり、更新費用も相応に高額となることが予想された。そのため、現在の施設の運転状況や最近のシステムの機能利用状況の確認を行い、必要な機能を整理した上で構成機器（図1）を選定して、システムの更新を図った。その結果、更新費用の大幅な低減に加えて、監視機能及びメンテナンス性を向上させたシステムを構築できた。

進捗

システムの機器構成を見直すために、施設放射線管理上利用頻度の多い機能を調査した。作業への聞き取り及び作業マニュアルの内容を確認した結果、次の3機能が主に利用されていることが判明した。

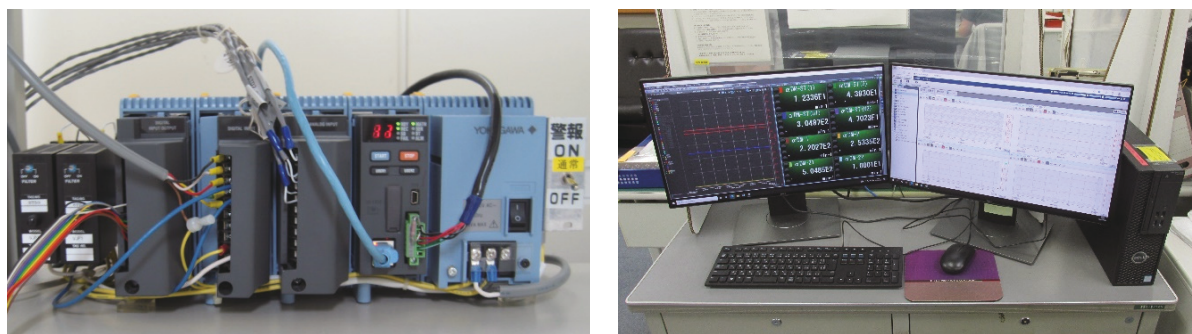


図1 更新後のシステム構成機器（左：データ収集装置 GM10 本体、右：管理用 PC）

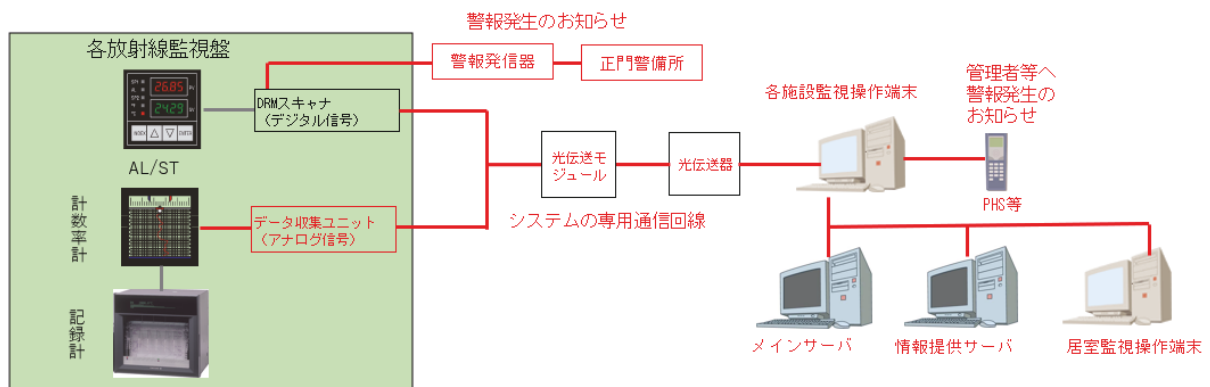
- ① 指示値のトレンドグラフ表示
- ② 測定機器及び放射線状況の異常時における警報外部出力機能
- ③ 放射線管理記録の作成に必要なデータ出力機能

そのため、これらの機能を維持しつつ、更新費用を低減することに重点を置いて構成機器の検討を行った。

現行のシステム製作費用が高額になる理由は、主要 5 施設（要約を参照）に設置している放射線監視盤から施設の放射線状況や記録作成用のデータを取得するためには、専用のシステムを用いる必要があるためである。放射線監視盤の周辺機器の構成を再度確認したところ、放射線監視盤に組み込まれている記録計の入力アナログ信号（0～5 V）を利用すれば、放射線状況等の必要なデータの取得に市販品を用いることができ、製作費用を大幅に低減できる見通しを得た。

そこで、記録計と同じメーカーから市販されているデータ収集装置 GM10[®]とロギングソフトウェア GA10[®]を用いて、記録計の入力信号から、放射線状況や記録作成用のデータを取得し、トレンドグラフと記録用データを作成できるシステムを構築した。また、測定機器及び放射線状況の異常時における警報発信は、放射線監視盤の警報接点信号を GM10[®]に取り込むことによって、外部に出力できるようにした。

更新前後のシステムの構成は図 2 のとおりである。



※更新後の構成に記載が無い機器は廃止

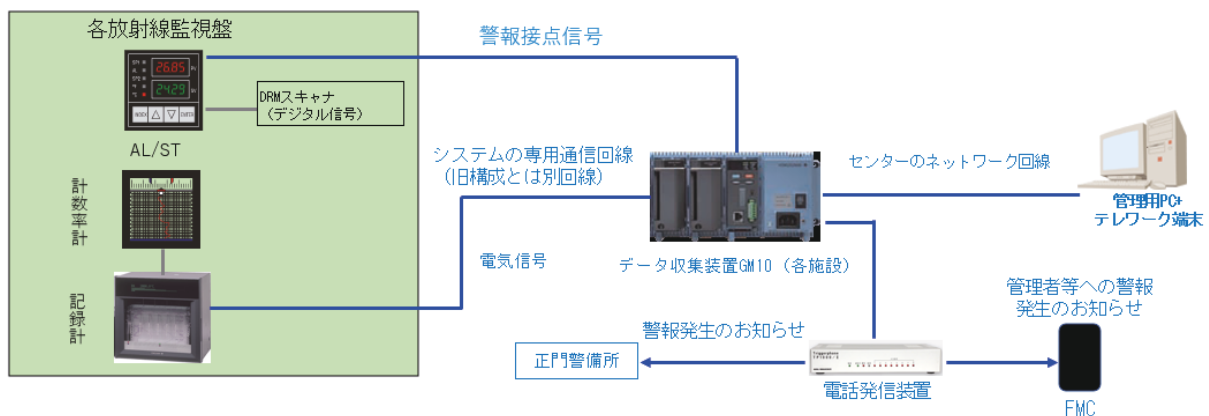


図 2 システムの構成図（上：更新前、下：更新後）

今回の施設放射線状況遠隔集中監視システムの改善において、構成機器のほとんどを高額な専用システムではなく、市販品に変更することで、更新に係る費用を9割以上低減することができた。また、従来は必要であった専用機器のリース（年間100万円超）が不要となり、ランニングコストも格段に抑えることができた。さらに、市販品であるため交換部品の入手も容易になり、ユーザー側で操作可能な設定範囲も広がったほか、GM10[®]の監視機能と日本原子力研究開発機構（JAEA）のテレワーク環境を利用し、JAEA 外からでも放射線状況の確認が可能になるなど、メンテナンス性、機能拡張性及び監視機能の面でも改善がなされた。

今後の予定

放射線管理を効率的に進める上で有用な機能があれば、構成機器を追加し、更に利便性や安定性の向上を図っていく予定である。

3.2 安全に関するテキスト解析

安全管理課 神崎訓枝

はじめに

福島第一原子力発電所事故以降、原子力施設に安心安全を求める声はより一層高まっており、我々は、社会からの信頼を失わぬよう安全に業務を遂行していかなければならない。現在、人形峠環境技術センターでは、年間 150 件程度のヒヤリ・ハット（事故には至らなかったが、ヒヤッとしたハッとした事象）が報告されている。そこで、本研究では、より安全な業務遂行体制の整備に向け、従業員の安全意識向上、組織としての保安力と安全基盤の向上を目指して、安全情報に関するテキスト解析を行った。

概要

2021 年度は、厚生労働省の職場のあんぜんサイト (<https://anzeninfo.mhlw.go.jp/>) で公開されている労働災害事例を用いてテキスト解析を行った。解析は、テキスト解析でよく用いられるプログラミング言語 Python（パイソン）を使用した。

解析用データは、死亡災害データベース（以降、死亡 DB と呼ぶ）と労働災害（死傷）データベース（以降、死傷 DB と呼ぶ）の 2017 年度分を使用した（図 1）。死亡 DB からは 978 件、死傷 DB からは 31,553 件の合計 32,531 件の労働災害の概要を抽出した。概要は 2～3 文の文書で、その文書を品詞分解し、キーワードとなる全 13,714 個の名詞だけを抽出した。

収集した解析用データを意味のある数値へ変換するために、抽出した単語の TF-IDF 値を算出した。TF-IDF 値は、単語出現頻度を表す TF 値と逆文書頻度（文書集合中にある単語が含まれる文書の割合の逆数）を表す IDF 値の積で、単語の重要度を表す指標である。ここで、重要単語は、TF 値が 0.05～0.5、すなわち、5%以上の文書に表れており（ある程度使用され）、文章の 50%以下にある（意味なく多用されていない）32 個の単語に絞った。機械学習の一種であるの自己組織化マップで、全 32,531 件の労働災害の 32 個の単語に対する TF-IDF 値を解析した（図 2）。

図 2 の出力マップには、多数の六角形のユニット（人工ニューロン）が並べられており、入力データの特徴を学習して、各ユニットに入力データによく似たデータが出力されている。出

死亡 DB 文書例「事業場倉庫付近の側溝を流れる水を利用するために側溝の中に入って工具を洗浄中、被災者の姿が見えなくなったため、事業主が探していたところ、8 m 離れた下流の側溝で、うつ伏せで倒れている被災者を発見した。」

死傷 DB 文書例「受注の現場にて、二階建住宅の一階屋根の上の端で、前にあるその家の塀（フェンス）に前かがみの姿勢で塗装作業をしていた。立ち上がり上を向いたとき立ち眩みがし、バランスを崩して、すぐ下の庭の土の上に転落した。腰から落ちて、腰の骨の一部と足首を骨折してしまった。」

図 1 死亡 DB と死傷 DB の文書例

謝辞

本報告は、核燃料・バックエンド研究開発部門の部門長ファンド令和3年度若手研究者・技術者育成プログラムに採択された研究課題「原子力施設のヒヤリ・ハットから起こり得る事故を推測するための類似度解析法の確立」の成果の一部である。

4. 放射線影響評価研究

This is a blank page.

4.1 皮膚表面におけるラドンの溶解と拡散

安全管理課 迫田晃弘、神崎訓枝

JAEA 東濃地科学センター 保安・施設管理課 田中裕史

岡山大学 石田毅、片岡隆浩、光延文裕、山岡聖典

背景と目的

ラドン (^{222}Rn) は環境中に普遍的に存在する放射性気体であり、肺がんのリスク因子として知られている。一方で、放射能泉でみられる療養効果の要因としての理解も進められてきた。このような背景から、我々は、ラドンやその子孫核種の体内・体表面での挙動解析、および様々な被ばく評価を行ってきた[例えば、1]。具体的には、ラドンの吸入・経口摂取・皮膚吸収、ラドン子孫核種の吸入・皮膚沈着である。この結果、被ばく線量への寄与について、主な経路はラドン子孫核種の吸入であるが、被ばく条件によってはラドンの皮膚吸収も無視できないことが明らかになった。

そこで、本研究では、ラドンの皮膚吸収のメカニズムを理解するために、皮膚表面でのラドンの浸透現象に関する数理モデルの開発、および関連パラメータを取得した。前者では、既存の体内動態モデル[1]に組み込まれていた皮膚コンパートメントを2つ(角質層・表皮・真皮層)に分割して、さらに角質層でのラドンの拡散をモデル化した(図1)。後者では、媒体(特に温泉水)と皮脂が接すると仮定して、代表的な皮脂成分へのラドンの分配係数を実験的に得た。なお、研究の詳細は論文[2]を参照いただきたい。

結果とまとめ

代表的な皮脂成分(トリオレイン、オレイン酸、ミリスチン酸メチル、スクアレン)へのラドンの分配係数(=皮脂成分中ラドン濃度/空气中ラドン濃度)は、37℃において4.28~7.26、皮膚中成分比を考慮した4種混合物では6.43であった。水(分配係数0.2程度)よりもよく溶けるが、多くの脂肪酸や中性脂肪と同等であることがわかった。

本分配係数などをパラメータにもつ体内動態モデルを構築し、計算とヒト実験の結果を比較した。一例を図2に示す。このとき、計算値が実験値に最もよく適合するように角質中のラドン拡散係数を調整している。ヒト実験では呼気中ラドン濃度を分析しているが、モデル計算はこれをよく表現できていることがわかった。また、旧モデル[1]に比べて、特に皮膚から体外への放出過程が改善されている(図2(a))。また、別の計算結果から、ラドンに富む温水へ20分間入浴した後、最表層のラドン濃度は表皮・真皮中に比べて1,000倍ほど高いこともわかった。

逆推定した角質中のラドン拡散係数は $10^{-14} \sim 10^{-13} \text{ m}^2/\text{sec}$ のオーダーにあり、これまでに報告されているラドン難透過物質と同じほど低かった。しかし、角質厚の代表値は $10 \mu\text{m}$ ほどに薄いので、媒体中濃度が高ければ、呼気で検出できるほどのラドンが体内に吸収される。今後は、モデルの精度を高めるために、より多くの被験者を対象に評価を進めることが必要である。

皮膚中のラドン分布は、特定の標的(細胞)を設定して行う線量計算にとって有用な情報となる。例えば、放射線リスクでは基底細胞、ラドン温泉の健康効果ではランゲルハンス細胞が

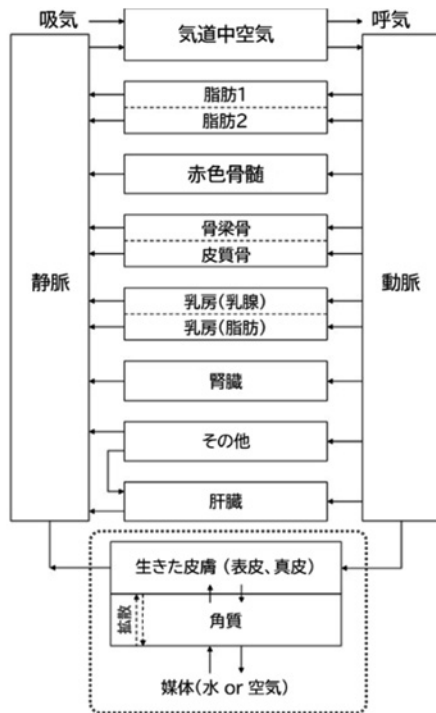


図 1 皮膚吸収のメカニズムを組み込んだラドン体内動態モデル

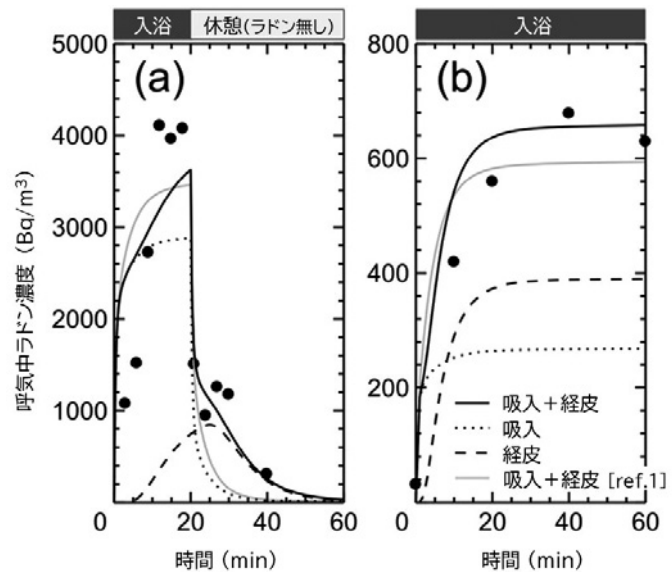


図 2 ヒト実験と最適化したモデル解析の比較例
(a) Tempfer et al. (2005) [3] (b) Furuno (1982) [4]

(両実験において、被験者はラドンに富む温水に入浴して、定期的な呼気採取と濃度測定を実施)

考えられている。今回は角質中を主に評価したが、線量計算の精緻化や皮膚吸収のメカニズムの理解に向けて、今後は表皮・真皮中を対象にした検討が望まれる。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP21K10426 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] A. Sakoda, Y. Ishimori, J. Tschiersch. Evaluation of the intake of radon through skin from thermal water. *Journal of Radiation Research* 57, 336–342 (2016).
- [2] A. Sakoda, T. Ishida, N. Kanzaki, H. Tanaka, T. Kataoka, F. Mitsunobu, K. Yamaoka. Radon solubility and diffusion in the skin surface layer. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 19, 7761 (2022).
- [3] H. Tempfer, A. Schober, W. Hofmann, H. Lettner, F. Steger. Biophysical mechanisms and radiation doses in radon therapy. In *Radioactivity in the Environment*; L.P. McLaughlin, S.E. Simopoulos, F. Steinhäusler, Eds. 7, 640–648. Amsterdam, Elsevier (2005).
- [4] K. Furuno. Studies on trace elements in the field of balneology (II) Determination of radon contents in the air of radioactive spa areas, and excretion of radon in expiratory air after using spring water. *J. Jpn. Soc. Balneol. Climatol. Phys. Med.* 45, 49–67 (1982).

4.2 メタボローム解析を用いたラドン吸入による肺中グルタチオン関連物質の変化特性

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

はじめに

自然界に存在するラドン (^{222}Rn) は、放射性希ガスで肺がん誘発因子として知られる一方で、療養の一要素としても知られてきた。例えば、鳥取県三朝町ではラドン温泉療法が有名で、適応症に気管支喘息や変形性関節症などがある。このようなラドンに起因する健康影響・効果の基礎的研究を進めるため、JAEA と岡山大学は「極微量ウラン影響効果試験」を実施している [例えば、1-3]。本研究では、これまで検討してきた還元型グルタチオンや酸化型グルタチオンに加え、新たに、それらの活性イオウ分子種を検出し、その変化を検討してきた。昨年度に発行された 2020 年度人形峠環境技術センターにおける研究・技術開発成果では、主に、マウスの脳や肝臓で還元型グルタチオン (G-SH) やシステイン (Cys-SH) に結合し酸化を受け易いチオール基 (-SH) に余分なイオウが結合した活性イオウ分子種 (G-S-SH、Cys-S-SH) が検出され、ラドン吸入後にその割合が変化することを報告した [4,5]。今年度は、継続して実施しているラドン吸入後のマウス諸臓器のメタボローム解析の中から、特にラドン曝露の影響を受け易い肺に関する結果の一部を報告する。

方法と結果

8 週齢・雄の BALB/c マウスを、ラドンを含む空気 (200、2000、20000 Bq/m³) を送り込んだケージの中で、1、3、10 日間飼育した。ラドン吸入直後の肺を分析サンプルとして、イオウ関連代謝物に特化したメタボローム解析であるサルファーインデックス解析を行った。群間の平均の差については多重比較検定 Tukey-Kramer 法を用いて、相関係数については無相関検定を用いて、統計的検定を行った。有意水準は 5% 以下 (* $P < 0.05$ 、** $P < 0.01$ 、*** $P < 0.001$) とした。

その結果、数十種類の代謝物を検出した。そのうち、還元型グルタチオンとその活性イオウ分子種では、図 1 のような変化が見られた。また、2 分子の還元型グルタチオンがジスルフィド結合によってつながった酸化型グルタチオン (GS-SG) とその活性イオウ分子種では、図 2 のような変化が見られた。

図 1 及び図 2 からは、ラドンの濃度や曝露日数に依存した各代謝物の変化特性は見えなかったが、酸化型グルタチオンよりも還元型グルタチオンの方が統計的に有意な変化が多数見られた。そこで、ラドンの濃度、曝露日数、還元型グルタチオン関連物質の相関を調べたところ、これらの項目には特徴的な相関があることがわかった (図 3)。すなわち、還元型グルタチオンとその活性イオウ分子種には負の相関があり、濃度は還元型グルタチオンと正の相関、その活性イオウ分子種とは負の相関、日数は濃度とおおよそ逆の結果であった。

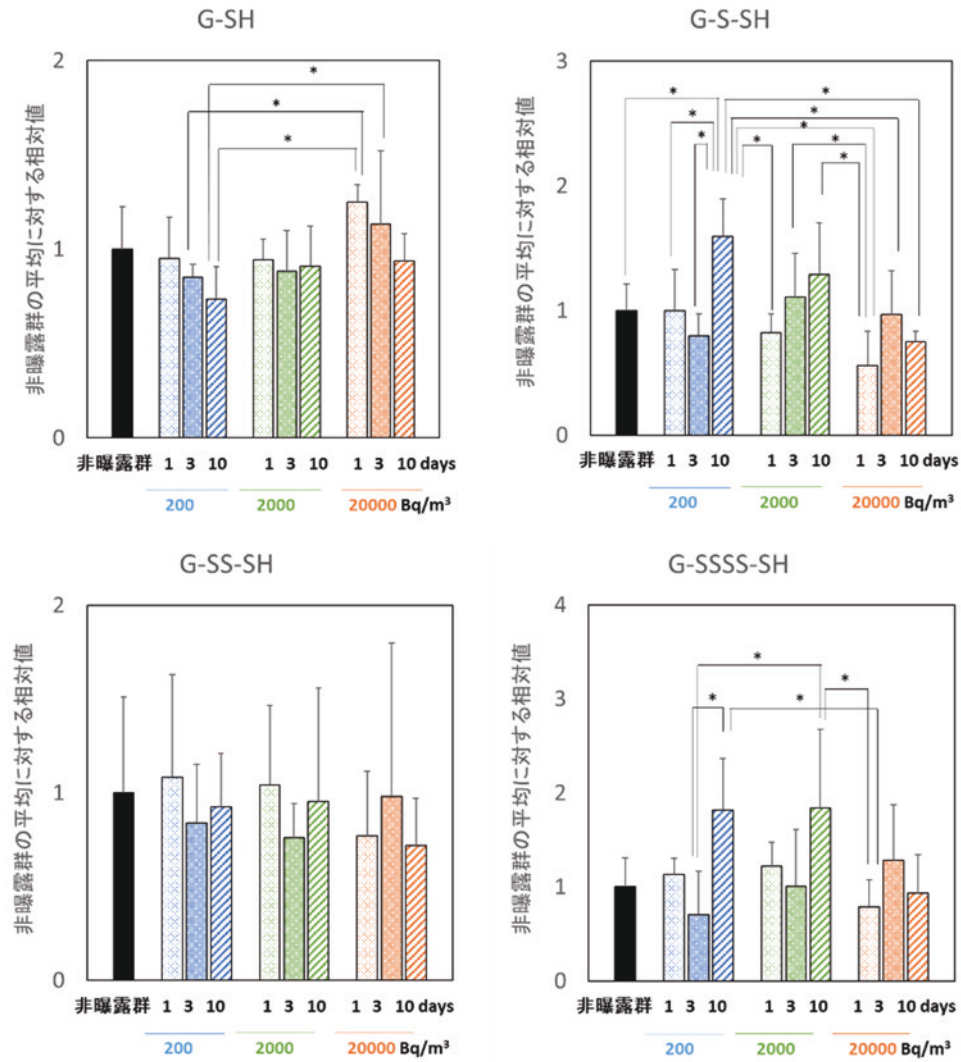


図1 ラドン吸入後の還元型グルタチオン (G-SH) とその活性イオウ分子種 (G-S-SH 等) の変化 (平均±標準偏差、n=6、*P<0.05)

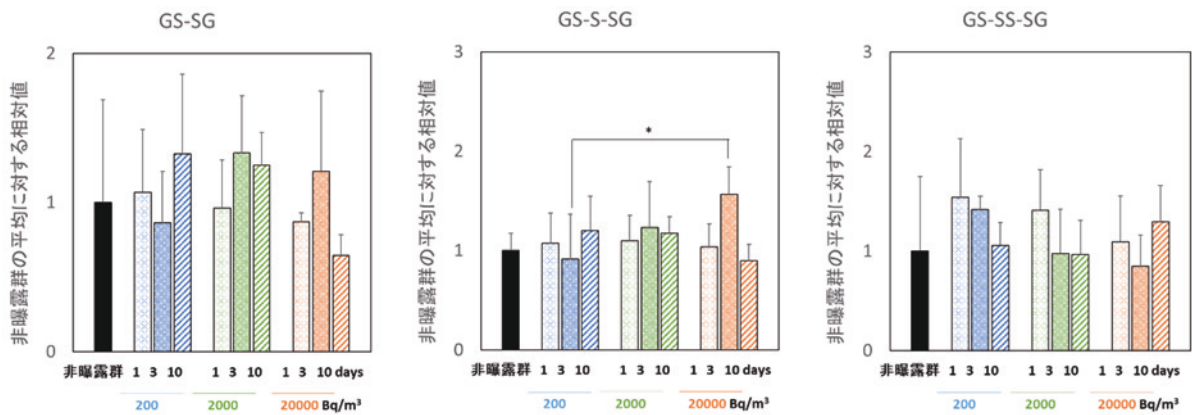


図2 ラドン吸入後の酸化型グルタチオン (GS-SG) とその活性イオウ分子種 (GS-S-SG 等) の変化 (平均±標準偏差、n=6、*P<0.05)

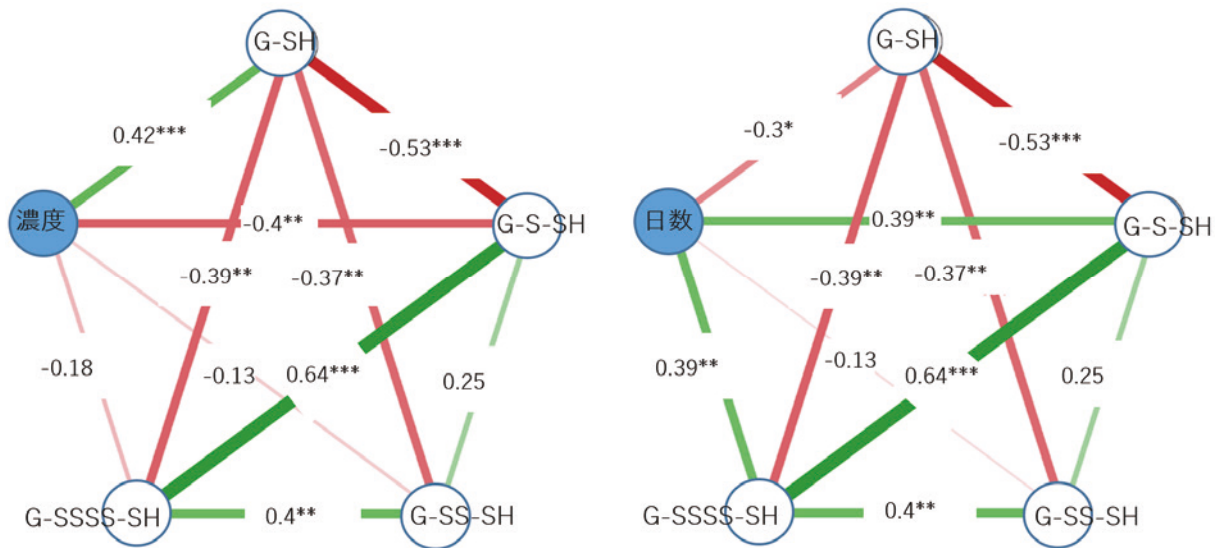


図3 ラドンの濃度や曝露日数と還元型グルタチオン (G-SH) 関連物質の相関関係 (無向グラフと相関係数。赤が負、緑が正の相関。線の太さは相関の強さ。* $P<0.05$ 、** $P<0.01$ 、*** $P<0.001$)

まとめ

本実験条件でのマウス肺の吸収線量は、数 nGy (200 Bq/m³ で 1 日間) ~ 数 μ Gy (20000 Bq/m³ で 10 日間) と試算できる[3]。この際のラドン吸入による諸臓器中の酸化ストレスの変化はすでに報告しており[2]、本研究ではグルタチオン等のチオール化合物に注目して更に詳細な検討を進めた。図3より、還元型グルタチオンが増加するとその活性イオウ分子種は減少し、還元型グルタチオンが減少するとその活性イオウ分子種は増加することが明らかになった。この結果から、還元型グルタチオンとその活性イオウ分子種が生体内で複雑に制御されている可能性が示唆できた。また、ラドンの濃度や曝露日数に対して還元型グルタチオンの量は相関があり、還元型グルタチオンとその活性イオウ分子種はラドン吸入の影響を受けていることがわかった。近年、活性イオウ分子種が通常チオール化合物に比べて高い求核性、抗酸化活性、酸化ストレス耐性を発揮するという報告があることから、活性イオウ分子種は被ばく影響評価の重要な指標になると考えられる。

今後の予定

本稿では、ラドン吸入後のマウス諸臓器のメタボローム解析の成果の一部として、肺のグルタチオン関連物質の変化を報告した。今後は、引き続きグルタチオン以外にも検出された数十種類の代謝物について総合的に解析し、報告していく。また、肺以外の臓器についても検討を続け、被ばくと活性イオウ分子種との関連を調査していく予定である。さらに、低線量被ばくによって働く生体の機構は複雑で曖昧なものであることが予想できるため、それをより分かりやすく総合的に評価できるデータ解析手法の検討にも取り組みたい。

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 (2015), 41 p.
- [2] T. Kataoka, N. Kanzaki, A. Sakoda, H. Shuto, J. Yano, S. Naoe, H. Tanaka, K. Hanamoto, H. Terato, F. Mitsunobu, K. Yamaoka. Evaluation of the redox state in mouse organs following radon inhalation. *Journal of Radiation Research* 62, 206–216 (2021).
- [3] 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, 731–738 (2010).
- [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. JAEA-Review 2021-068 (2021), 52 p.
- [5] JAEA 廃炉環境国際共同研究センター, 岡山大学. ラドンを代表としたアルファ核種の吸入による内部被ばくの横断的生体影響評価 (委託研究), 令和 2 年度英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業. JAEA-Review 2021-028 (2020), 57 p.

4.3 人形峠における生態系の微量元素および放射性核種の挙動調査

安全管理課 迫田晃弘

JAEA 敦賀廃止措置実証本部 石森有

鳥取大学 寶來佐和子、村上翔一

目的と調査内容

環境中での元素・核種の移行は、地下水や表層水との作用、風による舞い上がり、土砂崩れなど地形の変化、人間や動植物の活動など様々な要因が考えられる。本研究では動物に着目して、人形峠環境技術センターにおける元素・核種の挙動を明らかにするため、2016 年 5 月～2017 年 8 月（積雪期間を除く）にかけて毎月、土壌（堆積物）・環境水・動物を採取して、微量元素や天然放射性核種（ウラン、ラジウム（ ^{226}Ra ））の含有濃度の分析、および濃縮係数を評価した。採取場所には特徴の異なる 3 か所を選定し（図 1）、また、採取動物は食物連鎖などを考えて両生類（カエル、イモリ）を中心に、そのほか節足動物（バッタなど）も採取した。

結果とまとめ

土壌・環境水・動物中のウラン・ラジウムの濃度レベルは、おおよそ採取場所①、②、③（図 1）の順で高かった。各濃度データからウラン・ラジウムの濃縮係数（陸域、淡水域生態系）を求め、IAEA データベース[1]と比較すると（図 2：陸域生態系のみを例示）、両生類に対する両元素の濃縮係数は本研究が初めての報告であることがわかった。生態系や元素ごとに、両生類の傾向に近い動物のグループ（哺乳類など）が明らかになった。また、節足動物では、原因は不明ながら、データベースとの傾向に違いもみられた。本研究の成果が、放射線防護に係る環境影響評価（特にパラメータ整備）に貢献することが期待される。

動物個体中ウラン濃度について、栄養段階の指標に用いられる窒素安定同位体比（ $\delta^{15}\text{N}$ ）との相関を調べた。その結果、鉱さいたい積場でのみ正の相関がみられ（図 3）、食物連鎖によるウランの生体濃縮が明らかになった。同様の傾向はヒ素でもみられた。食物連鎖における元素



図 1 採取場所（①②：鉱山施設、③対照）

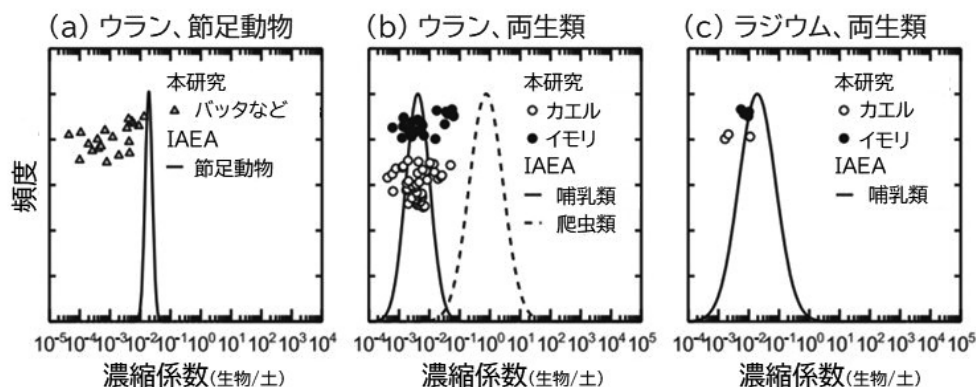


図2 陸域生態系におけるウラン・ラジウム濃縮係数の測定値と IAEA データベース[1]の比較例（縦軸の“頻度”は曲線データに対してのみ有効。プロットデータは試料毎の測定値であり、視認性を高めるために散布）

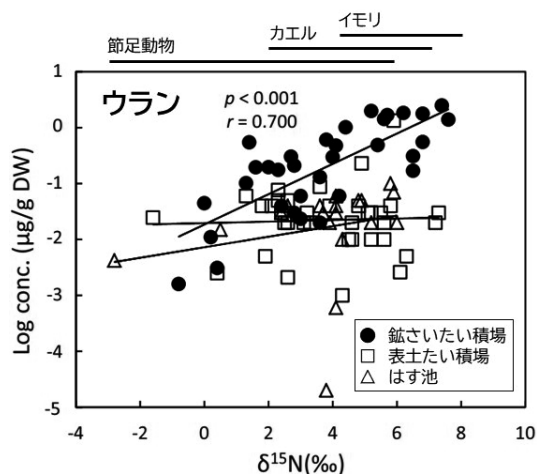


図3 $\delta^{15}\text{N}$ とウラン濃度の関係

挙動（濃縮）をより全体的に明らかにするには、今後、生態系の他の動物にも検討を広げることが必要である。

本稿は成果の一部であり、詳細は論文[2,3]を参照いただきたい。

参考文献

- [1] International Atomic Energy Agency (IAEA). Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer to Wildlife. Technical Reports Series No. 479. Vienna (2014).
- [2] A. Sakoda, S. Murakami, Y. Ishimori, S. Horai. Concentration ratios of ^{238}U and ^{226}Ra for insects and amphibians living in the vicinity of the closed uranium mine at Ningyo-toge, Japan. Journal of Radiation Research 61, 207–213 (2020).
- [3] S. Horai, S. Murakami, A. Sakoda, R. Nakashita, T. Kunisue, Y. Ishimori. Environmental monitoring of trace elements and evaluation of environmental impacts to organisms near a former uranium mining site in Ningyo-toge, Japan. Environmental Monitoring and Assessment 194, 415 (2022).

5. 業績一覧

This is a blank page.

5.1 論文

[査読あり]

1. Y. Ohashi. Determination of trace uranium in waste using a gamma-ray measurement system. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A 1025, 166128 (2022).
2. T. Kataoka, S. Naoe, K. Murakami, R. Yukimine, Y. Fujimoto, N. Kanzaki, A. Sakoda, F. Mitsunobu, K. Yamaoka. Mechanisms of action of radon therapy on cytokine levels in normal mice and rheumatoid arthritis mouse model. Journal of Clinical Biochemistry and Nutrition 70, 154–159 (2022).
3. A. Sakoda, N. Nomura, Y. Kuroda, T. Kono, W. Naito, H. Yoshida. Review of engagement activities to promote awareness of radiation and its associated risk amongst the Japanese public before and after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. Journal of Radiological Protection 41, 1258–1287 (2021).
4. H. Yoshida, Y. Kuroda, T. Kono, W. Naito, A. Sakoda. Panel session toward improved communication and engagement with the public after the Fukushima Dai-ichi NPP accident – Study reports and discussion with specialists from relevant fields. Journal of Radiation Protection and Research 46, 134–142 (2021).
5. T. Kataoka, H. Shuto, S. Naoe, J. Yano, N. Kanzaki, A. Sakoda, H. Tanaka, K. Hanamoto, F. Mitsunobu, H. Terato, K. Yamaoka. Radon inhalation decreases DNA damage induced by oxidative stress in mouse organs via the activation of antioxidative functions. Journal of Radiation Research 62, 861–867 (2021).
6. Y. Narazaki, A. Sakoda, S. Takahashi, N. Momoshima. Cosmogenic ^7Be : Particle size distribution and chemical composition of ^7Be -carrying aerosols in the atmosphere in Japan. Journal of Environmental Radioactivity 237, 106690 (2021).
7. A. Sakoda, Y. Ishimori, N. Kanzaki, H. Tanaka, T. Kataoka, F. Mitsunobu, K. Yamaoka. Dosimetry of radon progeny deposited on skin in air and thermal water. Journal of Radiation Research 62, 634–644 (2021).
8. Y. Ueda, A. Eguchi, K. Tokunaga, K. Kikuchi, T. Sugita, H. Okamura, H. Naganawa, H. Urea-introduced ionic liquid for the effective extraction of Pt (IV) and Pd (II) ions. Industrial & Engineering Chemistry Research 61, 6640–6649 (2022).
9. Md. M. Hasan, M. Janik, A. Sakoda, T. Iimoto. Status of radon exposure in Bangladeshi locations and dwellings. Environmental Monitoring and Assessment 193, 770, 2021.
10. 神崎訓枝. 放射線生物学でのデータ可視化の有用性－自己組織化マップによる放射線の生体応答解析－. 放射線生物研究 56, 295–307 (2021).

[査読なし]

1. S. Andresz*, A. Sakoda*, W-H Ha, F. Kabrt, T. Kono, M. Sáez-Muñoz, O. Nusrat, C. Papp, R. Qiu, P. Bryant. The IRPA Young Generation Network: Activity report from the middle of 2018 to the

beginning of 2021. Journal of Radiation Protection and Research 46, 143–150 (2021).

**Equal contribution*

5.2 報告書

1. K. Tokunaga, Y. Takahashi, K. Tanaka, N. Kozai. Effective removal of iodate (IO_3^-) by coprecipitation with barite. Annual Report of ASRC 2020. Japan Atomic Energy Agency (2021).
2. 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 (2022) 18p.
3. 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・技術開発成果ートピックスー. JAEA-Review 2021-068 (2022) 52p.

5.3 招待講演

1. 酒瀬川英雄. ウラン廃棄物工学研究：金属・コンクリート等の除染技術. 令和3年度国際原子力実践教育道場 オンライン講演会（主催：国際原子力人材育成大学連合ネットワークによる原子力教育基盤整備モデル事業），オンライン, 2022 年 3 月.

5.4 受賞

[外部表彰]

1. 迫田晃弘. 自然起源放射性物質による被ばく線量の評価向上と精緻化に資する研究. 奨励賞, 日本放射線影響学会, 2021 年.

[機構内表彰]

1. 加工事業廃止措置推進チーム. 国内初となるウラン濃縮事業（加工事業）の廃止措置への取組. 模範賞, 理事長表彰, 2021 年.

5.5 各種研究費

[外部資金]

1. 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.

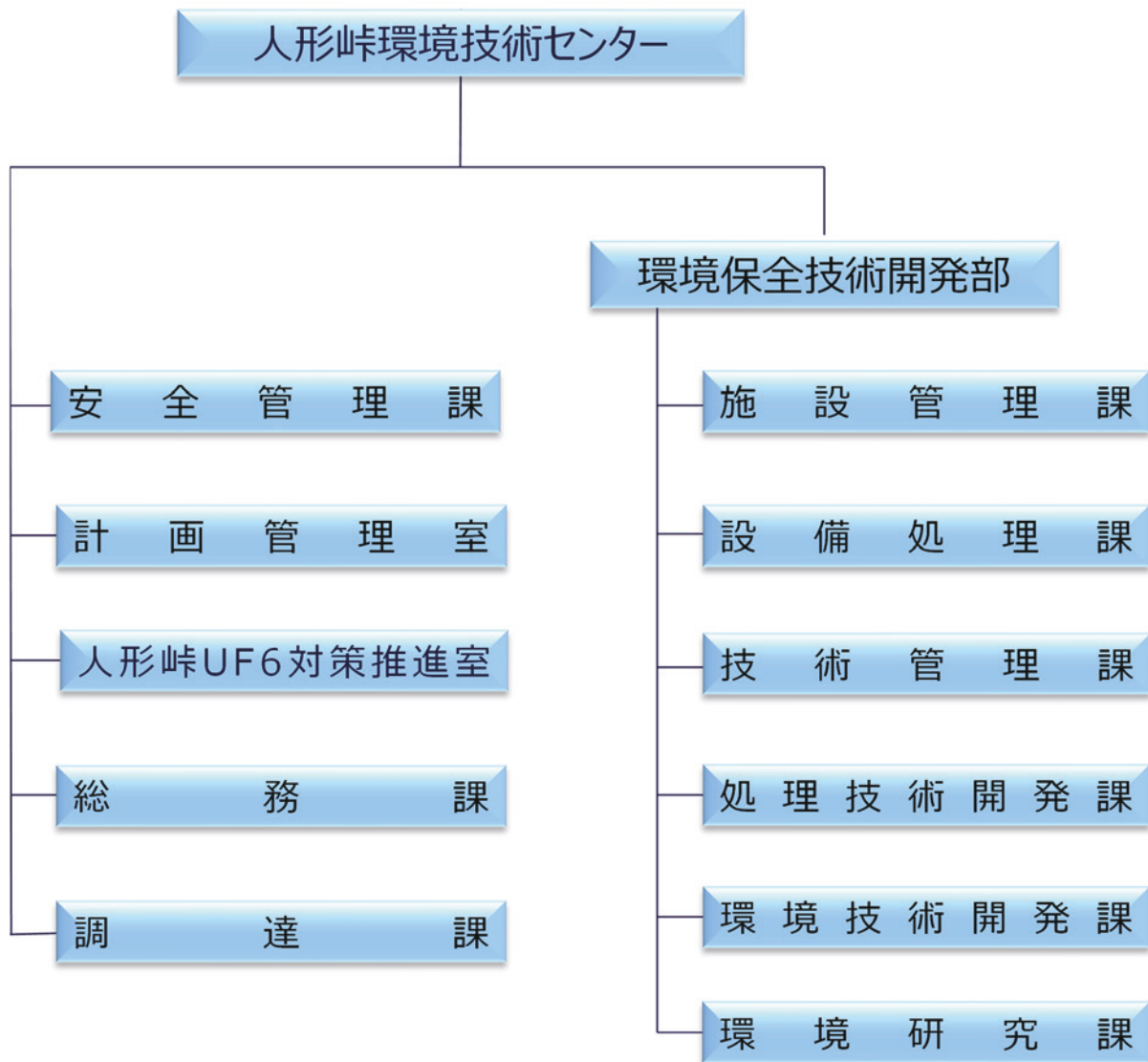
2. 神崎訓枝（代表者）．自然放射線被ばくの環境変化に対する生体恒常性維持機能の解明．科研費 基盤研究（C），2021－2023 年度．
3. 徳永紘平（代表者）．バライト共沈と固化体形成を組み合わせた陰イオン形核種の安定化処理法の開発，科研費 若手研究，2019－2021 年度．
4. 迫田晃弘（代表者）．福島原発事故で専門家の社会に向けた活動はどのように変わったか？－放射線防護からみた活動のあり方の考察．「放射線災害・医科学研究拠点」共同利用・共同研究（受入機関：広島大学），2021 年度．

[機構内資金]

1. 野村光生（代表者），有馬立身（連携先：九州大学），高橋良夫（連携先：ライテック株式会社）．短パルス光による放射性廃棄物のクリアランス化実証試験．理事長裁量経費，日本原子力研究開発機構，2021 年度．
2. 神崎訓枝（代表者）．原子力施設のヒヤリ・ハットから起こり得る事故を推測するための類似度解析法の確立．若手研究者・技術者育成ファンド，日本原子力研究開発機構（核燃料・バックエンド研究開発部門），2021 年度．
3. 山根いくみ（代表者），有馬立身（連携先：九州大学）．レーザークリーニング装置によるコンクリート塗装膜の分離に係る調査研究．若手研究者・技術者育成ファンド，日本原子力研究開発機構（核燃料・バックエンド研究開発部門），2021 年度．
4. 西脇大貴（代表者），宮城琢磨（連携先：アメテック株式会社）．ウラン系廃棄物（液体、粉体、金属等）の X 線による非破壊迅速成分分析法の開発．若手研究者・技術者育成ファンド，日本原子力研究開発機構（核燃料・バックエンド研究開発部門），2021 年度．
5. 飯尾彰規（代表者）．簡易貫入試験およびチェーン微動アレー探査による地盤構造推定手法の確立．若手研究者・技術者育成ファンド，日本原子力研究開発機構（核燃料・バックエンド研究開発部門），2021 年度．
6. 徳永紘平（代表者）．XAFS 法を用いた人形峠鉱さいたい積場におけるヒ素及びウランの化学的挙動の評価．若手研究者・技術者育成ファンド，日本原子力研究開発機構（核燃料・バックエンド研究開発部門），2021 年度．
7. 井上準也（代表者），増本清（連携先：島根大学）．最適化手法を適用した地下水モデルの妥当性評価．1F 廃炉研究開発推進費 基盤型廃炉研究開発プログラム B，日本原子力研究開発機構（事業計画統括部，福島研究開発部門），2020－2021 年度．
8. 徳永紘平（代表者）．鉄・マンガン鉱物の結晶相遷移による人形峠土壌堆積物の元素固定化プロセスの検証．萌芽研究開発制度，日本原子力研究開発機構（事業計画統括部），2020－2021 年度．

付録1 組織図

(2021年4月1日～2021年7月31日)



(2021 年 8 月 1 日～2022 年 3 月 31 日)



付録2 産学官民連携の取り組み

計画管理室 日野田晋吾

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）

食材の味と香りで第1次～3次までの地域食品事業の革新を目指す。本件は味覚センサー及び高感度ガス分析装置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）の実現を目指すもので、前年度[1]に引き続き実施した。

2021年度は、美作大学製スパークリングワイン及び原料の地元産ぶどうの測定に加え、つやま和牛に合う日本酒の組み合わせ測定を実施した。後者は「つやま宵」と題した商品化に寄与した（図1）。

津山高専との連携

定期的実施している岡山大学、津山工業高等専門学校（津山高専）と連携した3者シンポジウムとして、三機関が有する産学官連携機能を有効的に活用することで、津山高専と人形峠環境技術センターが位置する作州地域のさまざまな課題や要望に取り組み、作州地域の地域活性につなげていくことを目的に、2022年2月4日に「第2回 EReTTSa シンポジウム～SDGs時代の地域活性～」を開催した（図2）。なお、新型コロナウイルス感染症拡大のため、オンライン開催であった。

また、2021年12月17日には、本科5年生を対象とした“環境科学 放射能”講座において、放射線及び放射性廃棄物についての講義を酒瀬川英雄 研究主幹（環境研究課）が行った（図3）[2]。

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における事業の透明性確保、分かりやすい情報提供に加えて地域の方々との交流が重要との考えから、鏡野町総合文化施設ペスタロッタ館内に設置している「サテライトオフィスふらっと」の運用を継続した[1]。

サテライトオフィスの2021年度の来訪者は1,300名を超えた。2021年度は新型コロナウイルス感染症の影響により、一時休館を余儀なくされたものの、ウェブを活用した企業相談、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毎月実施した（図4）。

参考文献

- [1] 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・技術開発成果ー トピックスー. JAEA-Review 2021-068 (2022) 52p.
- [2] 津山高専, 最近のできごと（令和3年12月）,
<https://www.tsuyama-ct.ac.jp/oshiraseVer4/dekigoto/dekigoto202112.html> (accessed: 2022年10月13日).



五葉 賀 呑み国なめらか
特別純米雄町

五葉 賀 呑み国なめらか





蔵 香りはなやか
純米吟醸



牛肉料理にあう酒

つやま宵 With Beef







牛肉文化の聖地つやま

牛肉料理にあう酒 飲み比べセット

干し肉や煮ごり、そずり鍋、ホルモンうどんなど
津山の牛肉料理とあわせてお楽しみください



五葉 賀 呑み国なめらか 特別純米雄町 五葉 賀 呑み国なめらか 特別純米雄町







図 3 講義の様子



図 4 工作教室の様子

