

[R2-1]

## 廃止措置のリスク要因低下手法に関する研究(2022 年度) Research on Methods for Reducing Risk Factors for Decommissioning(2022)

西村昭彦<sup>#,1)</sup>, 金井昭夫<sup>2)</sup>, 吉田稔<sup>3)</sup>, 藁科友朗<sup>2)</sup>, 鈴木庸平<sup>4)</sup>  
Akihiko Nishimura<sup>#,1)</sup>, Akio Kanai<sup>2)</sup>, Minoru Yoshida<sup>3)</sup>, Tomoro Warashina<sup>2)</sup>, Yohey Suzuki<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup> Japan Atomic Energy Agency / Fukui Univ.

<sup>2)</sup> Institute for Advanced Biosciences, Keio Univ.

<sup>3)</sup> Hyper-Environmental Robots Laboratory (HERO Lab.) HAKUSAN Co., Ltd.

<sup>4)</sup> School of Science, Univ. Tokyo

### Abstract

Research on methods for reducing risk factors for the decommissioning is summarized. A compact sampler for microorganisms and an underwater lighting equipment were developed. After testing the sampler at JAEA-NARREC, we sampled cave water containing microorganisms at the Waku Kannon Mine Cave in Fukushima prefecture. Regular microbial sampling on the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant to help grasp the state inside the containment vessel will help reduce the risk of decommissioning.

**Keyword:** Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, decommission, microorganisms, remote sampling, risk reduction

### 1. はじめに

令和 2 年度に開始した本研究の目的を以下に記す。2019 年 9 月から 2020 年 12 月末にかけて、英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業において国際協力型廃炉研究プログラムの一環として、「微生物生態系による原子炉内物体の腐食・変質に関する評価研究」を実施した[1]。ある種の微生物は鉄材料の腐食を促進するため、福島第一原子力発電所(1F)の長期にわたる廃炉作業を安全に進める上では、1F 内外の環境からのサンプリングを通じて、微生物腐食を助長する因子を解明し抑制することが重要である。本連携重点研究の意義は、異なる分野の専門家が知恵を出し合うことで、長期化する廃止措置の潜在的リスク要因を低下できる具体的な手法を提案することにある。

出来るだけ多角的に廃止措置への貢献の可能性を模索するため、以下の 8 つの小テーマを企画した。

- 1) 生息する微生物を基にした原子炉内環境の推定
- 2) 炉内からの微粒子・滞留水のサンプリング機能を有するロボット開発
- 3) ウラン鉱床に生息する微生物分析と燃料デブリからのアクチノイド捕集
- 4) 炉内の温熱風乾燥と赤外線ライト・レーザー・マイクロ波等の補助加熱
- 5) 耐放射線微生物叢の DNA 経時変化を活用した放射線影響の定量的指標の提示
- 6) 走査型電子顕微鏡を用いた微生物形態観察
- 7) 内壁が汚染した配管類の切断減容化
- 8) 産学官連携による研究推進と地域社会へのアウトリーチ(クラウドファンディング)

本研究の開始から 3 年が経過する中で、1F につい

ては徐々に内部の様子がロボット観察により明らかとなってきた。主として 1F の 1 号機については、2022 年 2 月より数種類の水中ビークルが投入され、内部の映像が明らかになってきた。中性子計測による燃料デブリの存在も証明された。2022 年 5 月には、1 号機ペダスタル基部の損傷状況が撮影された。1F 事故後に福島県沖では 2021 年 2 月 13 日と 2022 年 3 月 16 日の 2 度にわたり、震度 6 強の地震が発生している[2]。既に 2021 年 4 月には、白山工業、JAEA、東京パワーテクノロジーによる共同研究チームは、1F 格納容器健全性監視を目的に、過酷環境に耐える光ファイバ地震計の現場設置を行うことの有効性を示した[3]。今後は、この地震計以外にも多角的な状態監視技術の投入が必要である。

本研究の最終年度にあたり、前述の 1F の 1 号機の現状を鑑みて、8 つの小テーマの中で、小テーマ 1 と小テーマ 2 に重点特化することとした。最終年度は予算的な制約もあり、連携する代表 3 機関のポテンシャルを最大限活用することとした。とりわけ白山工業極限環境ロボット研究所[4]の水中ロボット開発業務の協力を得て、効果的に本研究を進めることが出来た。

### 2. 実施内容

#### 2.1 サンプリング装置の考案と関連重要事項

2022 年 4 月以降、水中 ROV による 1 号機の調査が進展している。これまで 1F 内部に投入されたロボットに搭載されたセンサ類は、カメラ、線量計、温度計の 3 種類が殆どであった。ところが 1 号機投入の水中 ROV には、中性子検出機が搭載され、核燃料の存在が確認された。また、映像からは滴り落ちた雫状の固化物が各所に見受けられている。これは現在は水中に没している状態ではあるが、事故当時はその場所には水は無く、上部から高温の溶融物が滴下したことを意

## [R2-1]

味している。

事故直後、1号機ペDESTALに溶融落下した燃料デブリは、表面張力により形状が保持される。同時に水中での急激な冷却により、表層は固化し内部では徐々にFPガスと水素が気泡化する。このような状況は、海底溶岩流の冷却固化と類似している。ハワイ沖の海底噴火時には、海底一面に無数の枕状溶岩の堆積が生じる事が報告されている。この特徴的な形状は地底からの溶岩ブルームが海中に噴出した際の水压と急冷によるものである[5]。これまでの水中ROVの映像からはいくつかの不定形の堆積物や棚状の沈殿物がみとめられる。したがって、「1号機の燃料デブリも海底溶岩流のように、球状或いは円筒状の形状を有し多孔質である」との想定も否定できない。

自然界には多様な微生物が棲息しており、雨水や地下水と共に破損した原子炉建屋に流入しているであろう。福島県富岡町での調査では好気性微生物が多く存在し、鉄酸化細菌として *Gallionella* 属などが検出された[6]。30日間の培養後は優占種であった鉄酸化細菌は検出されない。鉄酸化細菌にとっては溶存鉄が豊富な環境でなければ死滅してしまう。燃料デブリが存在する格納容器内の状態は、溶存鉄は豊富にあるものの、殺菌効果のあるヒドラジンによる還元性環境と窒素ガス注入による酸素濃度低下が維持されている。加えて、栄養素となるリンや無機塩類も枯渇状態と考えられる。このように想像される環境を監視するためにも、定期的な微生物腐食を目的としたサンプリングが必要である。



Fig. 1 Portable Water Sampler and Lighting Equipment

Figure 1 に採水器と水中照明器具の外観を示す。ポリタンク内に周囲水を取水ポンプで取り込む簡易構造とした。電磁弁と逆流防止弁を設けて、通電により取水ポンプは容積 2L のポリタンク内に採水を行い、中の空気は外部に排気される。浮力を打ち消すため、鉛ブロックの重量で調整を行った。取水ポンプは汎用の 12V バッテリーで動作させる。水中照明器具は、伸縮棒の先端にハロゲンライトを 2 個取り付けた。ライトには光合成バクテリアを刺激する波長をカットする色フィルターを取り付けた。また、伸縮棒の先端には水中カメラ用の雲台も取り付けた。

日本原子力研究開発機構檜葉遠隔技術開発センター (JAEA-NARREC) において、ロボット試験水槽を用いたトラス水サンプリング試験を実施した[7]。

その結果をもとに福島県石川町和久観音鉦山でのサンプリングを検証した。これらを次節に述べる。

## 2.2 サンプリング装置の試作と動作テスト

ロボット試験水槽の利用については、日本原子力研究開発機構の施設共用制度を通じて、申請を行い安全審査を経て利用が承認された。この水槽は、水中ロボットの開発を支援する目的で供用されているものであるが、利用者の発案次第で様々な利用が可能である。2022年7月12日、水中からの円筒形状物を回収するロボット開発試験とのスケジュールの調整を行い、採水器の動作試験を行った。Figure 2(upper)は、水槽上部から採水器を投下した様子である。水槽上部には作業のためブリッジを渡してある。採水器はジブクレーンとロープで吊り下ろした。



Fig.2 Water Sampling Demonstration  
(upper) Scene of dropping the device into the water tank  
(lower) Installation at the bottom of the tank

Figure 2(lower)はロボット試験水槽の底部に置かれた採水器による採水の様子である。写真の中央近く黄色矢印の先端に小さく見えるのが採水器である。水深 5m の底に置かれた採水器内の空気は圧縮されて、内部に周囲水が取り込まれている。取水ポンプを動作させると、気泡が排出されて上昇してゆく。30 秒程でポリタンク内は満水となった。

## 2.4 ウラン採掘鉦山の環境サンプル取得

昨年度に訪問した和久観音鉦山は、大津市田上花崗岩体と並ぶ日本有数のペグマタイト鉦山の一つであ

## [R2-1]

り、福島県石川町教育委員会により保存されている[8]。岩床状ペグマタイトと呼ばれる大規模な鉱床であり、第一鉱体内部には水深 8m 程の洞穴がある。また、ここは人形峠でのウラン採掘が行われる以前は、我が国で最も品質の高いウラン鉱山のひとつとして知られていた。前回調査では竿式の採水器を使用して、洞穴の水面近くを少量採水した[9]。今年度は、前述した取水ポンプ付の採水器により、洞穴底部からの採水を行い微生物のサンプリングを行う。

目的はこの第一鉱体の洞穴を、1F のモックアップ環境と見立てて、今後長期化する廃止措置の技術開発の拠点とするためである。近くを流れる金田川からの地下水は洞穴の中の水位と連動している。第一鉱体と金田川の間には田畑があり、雨水の含侵を介して地下水には有機物や無機塩類などの微生物に必要な栄養源も供給されていると思われる。洞穴の中は暗くペグマタイト岩床からは、電気石からの鉄溶出や微量のウランの溶出も期待できる。1F 廃止措置を進める上で、微生物環境としても、水中機器開発のテストフィールドとしても適した環境である。

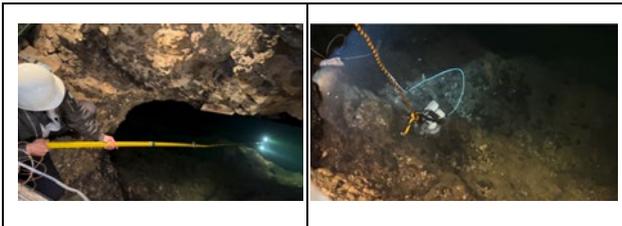


Fig.3 Water Sampling in Waku Kannon Mine Cave (No.1)

(left) Underwater lighting and video shooting  
(right) Dropping the water sampler

Figure 3 (left) は和久観音鉱山第一鉱体内部にある洞穴にて、製作した照明器具を水面に降ろして、洞穴内部を観察している様子を示す。洞穴の足場より 1m 程水面に近づいて、照明器具で水中を照らすとライトで照らされた約 3m 程の水中を確認する事が出来た。

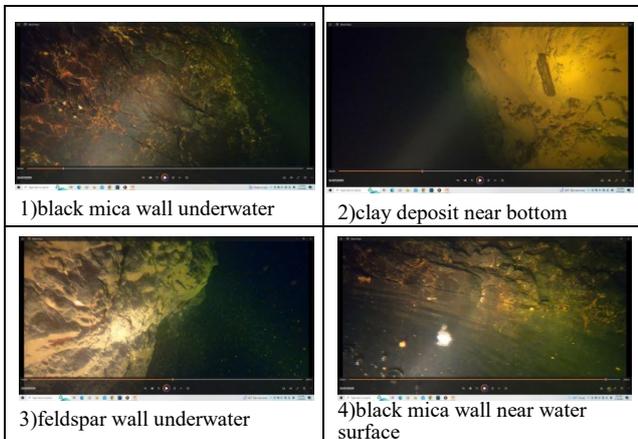


Fig.4 Capture Photo of Underwater Video Shooting in Waku Kannon Mine Cave No.1

Figure 3 (right) は、採水器を水中に降ろして採水を行っている様子である。取水ポンプの動作とともにタンク内の空気が排出し気泡となり上昇している。気泡が消失した後、さらに 30 秒程ポンプを動作させタンク内を洞穴水で満たした。

Figure 4 に水中ビデオ映像からのキャプチャー画像を示す。水中にはライトを散乱するような微粒子の浮遊は少なく鮮明な映像が得られた。水面近くの洞穴の壁面は黒雲母で覆われている。洞穴の底部近傍は、黄土色の粘土状微粒子の堆積で覆われている。このためカメラを近づけると水流で微粒子が舞い上がった。色フィルターにより緑色となったライトの明かりが洞穴内の暗渠を照らす。洞穴の深部は長石と思われる白色の壁面となっている。光の届かない深部は第一鉱体坑道の入り口方向を向いており、金田川からの地下水が洞穴内に流れ込んできている。

## 2.5 ウラン採掘鉱山に由来する微生物ゲノム解析

ウラン採掘鉱山として福島県和久観音鉱山を選び、鉱山内の (1) 第一鉱体内の洞穴水と (2) 同鉱山に特徴的な鉱物のサンプリングを行なった。また、取得したサンプルより環境 DNA の調製、DNA から微生物を同定するために必要な 16S リボソーム RNA 遺伝子領域の PCR 増幅、並びに PCR 産物の次世代シーケンサーによる塩基配列を実施した。

まず、洞穴水サンプルに関しては、取得した当日のうちに慶應義塾大学先端生命科学研究所 (山形県鶴岡市) に持ち帰り、孔径 0.22  $\mu\text{m}$  のメンブレンフィルターで微生物を濃縮後、DNA 取得を行う前までに同フィルターを超低温冷凍庫にて -80 度にて保存した。また鉱物サンプルとしては、同鉱山に由来する、電気石、黒雲母、モナズ石などを多く含む環境サンプルを持ち帰り、このサンプルも DNA 取得を行う前まで -80 度にて保存した。これらのサンプルに由来する環境 DNA を取得後、バクテリア 16S rRNA 領域に対する PCR プライマーで増幅したところ、期待されるサイズのバンドが得られたので、精製後にイルミナ社の次世代シーケンサー NovaSeq 6000 システムにて配列の解析を行い、数十万から数百万リードに及ぶ配列を得た。これらの配列の詳細は現在、解析中であるが、パイロットテストの結果、洞穴水や鉱物サンプルには、数多くの未培養性バクテリアの配列 (Uncultured bacterium partial 16S rRNA gene) が同定されてきたので、これまでにあまり解析できていないバクテリアが生息している可能性がある。

## 3. まとめと今後の展開

R2-1 を終了するにあたりまとめと今後の展開を述べる。現在、1F においては IRID と東京電力により、1号機の水中ピークル探査が進められている。ペDESTAL 基部の損壊と鉄筋コンクリート構造体の鉄筋の露出という事態が明らかとなり、改めて鉄鋼材の腐食抑制が課題となる[10]。1号機ペDESTAL 内は、 $\gamma$ 線・

## [R2-1]

中性子と水と微生物と鉄腐食が一か所に重なり合う特異で過酷な極限環境である。このような極限環境を抱えた 1F の保全にとって、本報告の「はじめに」で述べたように格納容器の振動監視の必要性は増すばかりである。

本研究では、廃止措置のリスク低減に役立つ 8 つの小テーマを企画し、その中で最終年度は 2 つの小テーマを重点化した。小テーマ 1 と 2 の連携については、具体的には微生物サンプリングのための採水器の製作と JAEA-NARREC 及び福島県和久観音鉾山洞穴での実証である。ロボット搭載のハードウェアを利用した遠隔計測は重要である。しかしハードウェアによる方法は、定量性に優れるが劣化と故障に悩まされる。したがって環境中の微生物ゲノム解析による微生物種の同定と環境の逆推定を併用することが効果的である。ここで製作したような小型の採水器を 1F 内に常設するだけで、採水とともに微生物をサンプリング可能である。異種分野の融合によるイノベーションが低コストで生まれる。採水からは、放射性核種の検出に加えて硝酸イオンやリン酸塩などの測定を行うことで化学的腐食や微生物栄養素のデータにもなる。「はじめに」で触れた「多角的な状態監視技術」の主たるものが微生物を活用した状態監視である。

我々は既に福島第一原子力発電所トーラス室に由来する汚染水サンプルの取得と同サンプルに存在する微生物叢の解析を進行中である[11] (学術論文準備中)。ここで、福島第一原子力発電所に由来するサンプルの取得に伴う制限の下で、微生物解析の基本的なセットアップを実施した。これにより既報[1]を発展させることで、1F 事故初期の津波の海水流入やその後の継続的な冷却水注入による環境変遷の解明の一助に資するものとした。本連携重点研究を通じて、ウラン採掘鉾山のサンプルを取得し、その解析を行えたことは、1F 類似環境の模擬データを取得することに他ならず、限定された環境に生きている微生物叢を解析する上での非常に良いコントロールを取得できた。

また、本研究を基盤として現在、学術変革領域 A の応募が実現しており、本連携重点研究の金井と西村が、微生物を用いた放射線研究の計画班を担当すると共に、総括班のメンバーを担っている。他の研究費への公募に関しても、共同研究者を介して応募中である。

一方、連携重点研究での展開として令和 4 年度より R4-1 が採択されている。これは放射性廃棄物貯蔵ドラム缶の保存方法の改善として、レーザ蒸発によるドラム缶表面の錆除去と微生物腐食の関係を解明する研究課題である。通常の熱殺菌と紫外線 LED による DNA 不活性化を組み合わせ、微生物による鉄腐食の加速因子解明と抑制手法を提案する。このテーマについては、住友財団や JFE など企業ファンドへの申請を実施した。また、JAEA 施設共用制度を通じて JRR-3 による中性子照射の利用を行う。

## 謝辞

和久観音鉾山でのサンプル採取に関して、福島県石川町教育委員会の承諾を頂きました。また、石川鉾物

採掘跡保存会の鈴木正博氏らには、鉾体内での採水サンプリングに関してご指導を頂きました。

また、連携重点研究として、JAEA-NARREC のロボット試験水槽を利用いたしました。ロボット試験水槽での採水器の動作試験に関しては、白山工業の松村芳昭取締役や広瀬茂男所長の他、極限環境ロボット研究所の研究員の支援によるものです。

関係者に厚く御礼申し上げます。

## 参考文献

- [1] “微生物生態系による原子炉内物体の腐食・変質に関する評価研究”、JAEA-Review 2021-48  
<https://jopss.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Review-2021-048.pdf>
- [2] 気象庁地震データベース  
<https://www.data.jma.go.jp/svd/eqdb/data/shindo/index.html>
- [3] 森下日出喜、吉田稔、西村昭彦、他 3 名、“光パルス干渉方式地震計を用いた円筒水槽振動特性の観測”、保全学、Vol.20, No.1, pp.101-108
- [4] 白山工業極限環境ロボット研究所 (HERO Lab.)  
[https://www.hakusan.co.jp/research\\_and\\_development/hero\\_lab.html](https://www.hakusan.co.jp/research_and_development/hero_lab.html)
- [5] J. G. Moore, “Mechanism of Formation of Pillow Lava”, *American Scientist*, Vol.63, No.3, pp. 269-277, 1975
- [6] 土津田雄馬、大貫敏彦、“地下水中の微生物群と燃料デブリ模擬物の反応に関する検討”、日本原子力学会誌、Vol.65, NO.4, pp. 243-247, 2023
- [7] 日本原子力研究開発機構施設共用制度 (樹葉遠隔技術開発センター)  
<https://naraha.jaea.go.jp/use/index.html>
- [8] 中野聰志、他、“田上ベグマタイトの産状”、琵琶研報、NO.33, pp.18-95, 2021  
[https://www.jstage.jst.go.jp/article/rrlbm/33/0/33\\_18/\\_pdf-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/rrlbm/33/0/33_18/_pdf-char/ja)
- [9] 西村昭彦、金井昭夫、吉田稔、“廃止措置のリスク要因低下手法に関する研究”、日本原子力学会 2021 年春の年会 2J19、Online 開催
- [10] 東京電力 HP、2023 年 3 月 30 日 (廃炉・汚染水・処理水対策チーム第 112 回事務局会議)、資料 3-3 燃料デブリ取り出し準備、1 号機 PCV 内部調査 (後半)、pp.8-12  
[https://www.tepco.co.jp/decommission/information/committee/roadmap\\_progress/pdf/2023/d230330\\_08-j.pdf](https://www.tepco.co.jp/decommission/information/committee/roadmap_progress/pdf/2023/d230330_08-j.pdf)
- [11] 藁科友朗、他、“福島第一原発トーラス室に由来する微生物群集構造解析”、第 45 回日本分子生物学年会、3PW-13-4、2022 年 12 月 2 日、幕張メッセ