

[R2-1]

廃止措置のリスク要因低下手法に関する研究(Ⅱ)

Research on Methods for Reducing Risk Factors for Decommissioning (II)

西村昭彦^{#,1)}, 藁科友朗²⁾, 金井昭夫²⁾,
岡朋宏³⁾, 木村直人³⁾, 吉田稔³⁾, 広瀬茂男³⁾
Akihiko Nishimura^{#,1)}, Tomorou Warashina²⁾, Akio Kanai²⁾,
Tomohiro Oka³⁾, Naoto Kimura³⁾, Minoru Yoshida³⁾, Shigeo Hirose³⁾

¹⁾ Japan Atomic Energy Agency / Fukui Univ.

²⁾ Institute for Advanced Biosciences, Keio Univ.

³⁾ Hyper-Environmental Robots Laboratory (HERO Lab.) HAKUSAN Co., Ltd.

Abstract

Various risk factors associated with the prolonged decommissioning of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant were examined in eight topics. Two research topics out of eight were focused on. DNA analysis for microorganisms in the torus water was investigated. The decision was made that a specially designed robot arm is prototyped in the next fiscal year. Preferable wavelength of illuminator for underwater fuel debris removal was also discussed.

Keyword: Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, decommission, microorganisms, robot, risk reduction

1. はじめに

近く新型コロナウイルス禍により延期されていた福島第一原子力発電所(以下 1F と略記)の 2 号機格納容器内部から、核燃料デブリの取り出しが開始される予定である。現在、ロボットアーム試作機^[1]を用いて、X-6 ペネトレーションから核燃料デブリに到達するための調整が続けられている。このロボットアームからは多くの教訓が得られるであろう。2 号機からのデブリ取り出し作業の進展が見通せるまで、1 号機と 3 号機は長期安定化措置を施す必要がある。尚、1 号機には水中 ROV が投入され、水没したペデスタル内部の様子が撮影され、炉心核燃料の全量が溶融落下したペデスタル内部が解明されつつある^[2]。将来、1 号機からの核燃料デブリの取り出しのためには、継続的な多機能ロボットツールの考案と開発が不可欠であり、作業環境を遠隔から長期的視点で監視する手法も必要である。

2019 年 9 月から 2020 年 12 月末にかけて、英知を集結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。ここで、炉内に流入する地下水に含まれる微生物をゲノム解析により特定する試みが行われた^[3]。本研究ではこの微生物ゲノム解析研究を起点として、以下に示す 8 つの小テーマの方向性と可能性を模索した。

- 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核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)

本報告では、小テーマ 1 として 1F トーラス水に含まれる微生物の種類と 1F 炉内環境について報告する。また、小テーマ 2 においては、1F 内部の極限環境を考慮した上で、今後の遠隔センシングを補完することが出来る微生物サンプリングに適したロボットアームを考案した。さらに、両テーマに関連する事項として、廃止措置作業に不可欠な照明の波長に関しても述べる。

2. 実施内容

2.1 1F 2 号機トーラス室の汚染水に由来する微生物叢の解析

前章で述べたように、研究代表者らは英知事業「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」において 2 号機トーラス室の汚染水(本稿では汚染水 1 とする)に由来する微生物叢の解析を実施した。その結果、同定された微生物のうち、門レベルでアノテーションできたもののほとんど(95%以上)が Proteobacteria であり、他の門の割合は極めて低かった。Proteobacteria を構成するのは、綱レベルを見ると Alphaproteobacteria(相対存在量 60%)と Gammaproteobacteria(相対存在量 37%)であった。Gammaproteobacteria には属レベルで、チオ硫酸塩を酸化する Limnobacter 属(相対存在量 28%)が含まれ、本サンプルから最も多く検出された

[R2-1]

微生物となった。同様に、Alphaproteobacteria では、Brevirhabdus 属（相対存在量 14 %）、Nisaea 属（相対存在量 9.7 %）、Magnetospira 属（相対存在量 7.8 %）が多く割合を占めた^[3]。

上記のような偏った微生物叢の分布の再現性を確認するために、本研究では、同じ 2 号機トラス室から他のロットの汚染水（汚染水 2 とする）を用いて微生物叢の解析をおこなった。ここで、汚染水 1 は最深部から 0.3-1.0 m にある水サンプルで、汚染水 2 は最深部の残渣を多く含む水サンプルであった。研究手法の細かい流れは上記の報告書に記載されているが、概略だけ述べれば、(1) 汚染水微生物のフィルターへのトラップ。(2) ファイルターからのゲノム DNA の調製。(3) PCR（ポリメラーゼ連鎖反応）による 16S リボソーム遺伝子の増幅。(4) ナノポアテクノロジー社の MinION シークエンサーによる増幅した遺伝子の塩基配列決定。(5) 16S リボソーム遺伝子の塩基配列を情報学的に解析することによる微生物叢の推定という流れとなる。なお、このうち実験的な部分に関しては、核燃料サイクル工学研究所内にある高レベル放射性物質研究施設（CPF）内にて行った。汚染水 2 の微生物叢の解析の結果、まず、汚染水 1 の微生物叢と同様の微生物が検出された。この結果は我々が同定した微生物叢に再現性があったことを意味する。一方で、汚染水 2 では、前回は最も割合が多かった Limnobacter 属は順位を落とし、首位は Brevirhabdus 属が占めた。これはトラス室由来の汚染水 1 と 2 では、同じような微生物叢で環境が構成されているが、水深によりその割合が変化することを示唆している。

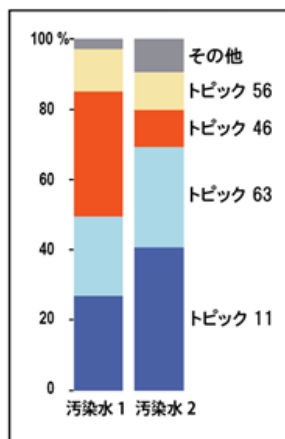


Figure 1 Environmental topics analysis of microbial flora derived from contaminated water in the torus chamber（トラス室汚染水に由来する微生物叢の環境トピックス解析）。トピックス 56（汚泥、活性化、廃水、バイオリアクター、プラント）、トピックス 46（バイオフィルム、水、飲料、銅、増殖）、トピックス 63（海洋、水、沿岸、海、海水）、トピックス 11（ビーチ、砂、海洋、表層、油）

特定の環境を構成する微生物叢が明らかになると、それを構成する微生物がどのような環境や状況にいたのかを国立遺伝学研究所の開発した微生物統合DB「MicrobeDB.jp」^[4]と照らし合わせることで、推定することができる。すなわち、このデータベースでは特定の微生物に紐づけられる環境や状況をトピックと呼んでおり、例えばトピック 63 は、海洋、水、沿岸、海、海水などの環境（や状況）と対応関係があることが分かる。**Figure 1** は汚染水 1 と 2 のトピックの割合を示している。両者を比較すると汚染水 1 では、トピック 46（バイオフィルム他）の割合が多く、汚染水 2 ではトピック 46 が著しく減少するが、その代わりとして海洋や海水に関連するトピックであるトピック 63 やトピック 11 が増えていることがわかる。すなわち、トラス室の最深部はより海に近い環境に生息する微生物（バクテリア）より構成されていることが示唆される。汚染水の化学分析の結果は、汚染水 2 がより海水に近い組成であることが明らかになっており、本結果を支持している。

さて、原子炉内には東京電力により微生物の増殖を防ぐためにヒドラジンが投与されているが、その抑制効果は不明確であった。今回の実験から、少なくともトラス室では特定の微生物の生態系が成立することが示唆された。現状では、微生物の絶対量は汚染水の DNA 量から見積もると、近隣の海の微生物量に届かないため特に問題はない。今後の廃炉の過程で、特定の微生物の増殖が起きないように、また微生物の増殖の結果として、有害物質などが生産されないように、定期的な監視を提言したい。

2.2 作業用多自由度アーム機構の開発

1 F での燃料デブリの取り出しをはじめとする廃炉作業を行うには、高放射線環境下において重量物のハンドリングができるロボットアームが求められる。通常、アームの各関節部にアクチュエータとその駆動回路が取り付けられたものが多いが、モータドライバをはじめとする電子回路は放射線に対して弱いため、高放射線環境下での作業では支障をきたす^[5]。また、アームの各関節にアクチュエータを備えた構造では重量が大きく、アームの自重を支えるためにアクチュエータの出力の大半が使われてしまう。そのため、アームの可搬重量が小さいことが課題であり、アームが軽量であることが望まれる^[6]。

小テーマ 2 では、小テーマ 1 の微生物サンプリングをはじめとする高放射線環境下で汎用的な作業を行うことを目的とし、関節部に電子回路を含まない高ペイロードのロボットアームを提案する。**Figure 2** に主要要素の構成を示す。このロボットアームは、3 自由度のアーム本体の先端に 3 自由度の手首機構と 1 自由度のハンド機構を含む合計 7 自由度を有する。ハンド機構の開閉を含む各関節を駆動するためのモータはすべて基台部に配置されており、全てのモータからの駆動力をアームの各関節にあるプーリー群で所定の関節駆動軸まで伝達させる。この構造により 3 つの利点が得られる。

[R2-1]

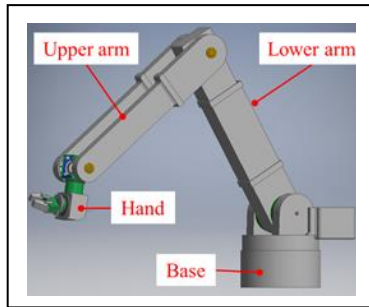


Figure 2 Component composition of the specially designed robot arm

- 1) 全てのアクチュエータとその駆動回路を基台部に配置することで、ハンドリングする高放射性物質からそれらとの距離を大きくとれる。高い耐放射線性を確保できる。
- 2) アーム部自体の軽量化が可能である。また、基台部のアクチュエータの動力を組み合わせることで、高重量の可搬物のハンドリングが可能となる。
- 3) アーム部を密閉構造にできる。放水による洗浄が可能となり、保守保全が容易となる。

これまでに、アーム機構の試作を 3D プリンタを活用して行い、アーム部における各機構の設計概念の検証を行った。現在は、提案しているアーム機構および専用の移動台車を含めたロボットシステムを製作中である。今後は、現場環境を模擬した実験環境にて、想定される作業の動作確認実験を行い、本提案の有効性と適用範囲の明確にする。

2.3 水中作業時の適正な照明波長の選択

2.1 で述べたように、現在の 1F トーラス室内部は微生物解析の結果、窒素供給による低酸素、ヒドラジン添加による還元雰囲気、低栄養が維持されている。日照も無くシアノバクテリアも存在比率が抑制されている。海水成分との共通点も見出される特異な微生物バイオーム環境となっている。また、2.2 では、高放射線環境下で汎用的な作業を行うためのロボットアームの新機構の提案を行った。1F 内部は γ 線による水分子や窒素分子の分解の合成により亜硝酸ミストが生成している。アーム部を密閉構造にでき、また基台部にアクチュエータを集約させることができるため、これらの放射線遮蔽と亜硝酸ミストからの密閉隔離が可能となる。

1F 水中作業には水中照明は欠かせない。しかし、かつて TMI での水中作業では、高輝度照明と制御棒駆動機構から漏洩した油分を栄養源として、大量の微生物発生による水の透明度低下に悩まされた^[7]。したがって今後の作業には、TMI を教訓とした微生物抑制の観点から、光合成に不適な波長 (450–650nm) の照明や、或いは UV-A (315–400nm) 以下の紫外線照明を、これらの波長と適合するカメラと併せてロボットに実装することが肝要である。

3. まとめと最終年度への展開

今年度は、発表審査を受け小テーマ 1 と 2 の連携を重視した。現行の 1F 廃炉ロードマップには、内部の腐食・劣化という概念が重視されていない。事故から 11 年が経過した現在、1F 内の物理的・化学的・微生物的な各種の腐食は監視が重要となる。微生物を 1F 炉内環境調査のためのプローブとして活用する視点は、ロボット搭載の各種センサーを補完するものである。

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。事故直後、1 号機ペDESTAL に溶融落下した核燃料デブリは、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^[8]。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。「1 号機の核燃料デブリも球状或いは円筒状の形状を有し多孔質である」、との想定も少なからず根拠がある(微生物や地球の営みから学ぶべきことは多い)。

本研究の最終年度は、本報告で提案するロボットアームシステムの製作と並行して、円筒状模擬物体の引き上げ用のロボット製作と模擬体周囲水のサンプリング試験を行う。実施には、JAEA の櫛葉遠隔技術開発センター^[9]のロボット試験水槽を使用する予定である。

謝辞

トラス水サンプルについては東京電力からの提供を受けました。関係者に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] 経済産業省資源エネルギー庁 HP ニュース 2020-02-28, https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteiky/debris_3.html
- [2] 東京電力 HP、1 号機 PCV 内部調査の状況(2022/02/24) https://www.tepco.co.jp/decommission/common/images/progress/retrieval/unit1_meeting_20220224.pdf
- [3] 金井昭夫, 藁科友朗, 駒義和, 西村昭彦, 比内浩, Elena Shagimardanova (2022) 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 2021-048 DOI:10.11484/jaea-review-2021-048
- [4] 国立遺伝学研究所 微生物データベース MicrobeDB.jp <https://dbarchive.biosciencedbc.jp/jp/microbedb/desc.html>
- [5] 日本ロボット学会 東日本震災関連委員会, 原子力関係記録作成分科会, “原子力ロボット記録と提言”, 日本ロボット学会 HP, 2014. 10. 1
https://www.rsj.or.jp/databox/committees/141001saigaikiroku_fainai_zanntei.pdf
- [6] 広瀬茂男, 馬書根. “ワイヤ干渉駆動型多関節マニピュレータの開発.” 計測自動制御学会論文集 26.11 (1990): 1291-1298
- [7] K. J. Hofstetter, et al., Nuclear Technology, Vol. 87, 837-844 (1989)
- [8] NHK for School 「枕状溶岩」
https://www2.nhk.or.jp/school/movie/clip.cgi?das_id=D0005400315_00000&p=box
- [9] JAEA-NARREC : <https://naraha.jaea.go.jp/>