

[R2-1]

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

西村昭彦 ^{#,A)}, 金井昭夫 ^{B)}, 吉田稔 ^{C)},
Akihiko Nishimura ^{#,A)}, Akio Kanai ^{B)}, Minoru Yoshida ^{C)}

^{A)} Japan Atomic Energy Agency / Fukui Univ.

^{B)} Keio Univ.

^{C)} Hakusan Co., Ltd.

Abstract

Various risk factors associated with the prolonged decommissioning of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant were examined. Eight research themes were planned for the risks caused by microorganisms contained in groundwater and rainwater flowing into the furnace. Research on specific methods for reducing these risks has been started.

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

1. はじめに

2021 年度より福島第一原子力発電所（以下では 1F と略記）の 2 号機格納容器内より、核燃料デブリの取り出しが予定されていた。しかしながら新型コロナウイルス禍のため 2020 年 12 月の時点で、計画の 1 年間の延期が報じられた。コロナ禍の有無に関わらず 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 号機は現状のまま長期安定化措置を施す必要がある。

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（以下では英知事業と略記）において国際協力型廃炉研究プログラムとして、ロシアとの国際協力が採択された（以下では日露と略記）。研究課題名は、「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」であり、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開始された。

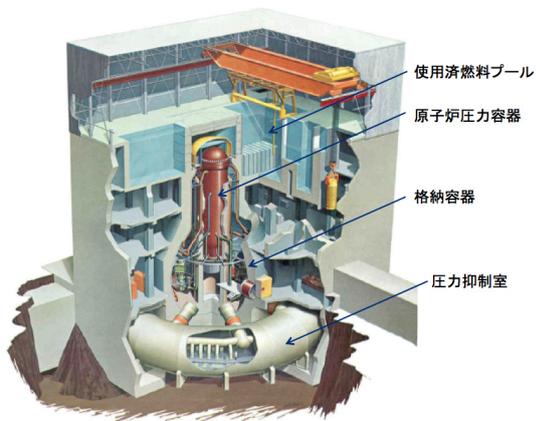


Figure 1 Cut-view of Mark-1 Type BWR

Fig.1 に沸騰水型原子炉である 1F の断面を示す^[1]。
地下水は圧力抑制室が設置されたトラス室の建屋
nishimura,akihiko@jaea.go.jp

基礎の破孔部分から流入している。破孔の位置と大きさは不明である。建屋周囲には凍土壁が建設され、ある程度流入量は抑制されている。地下水に含まれるある種の微生物は鉄材料の腐食を促進するため、燃料デブリの風化及び格納容器や鉄筋コンクリートの強度低下が進行し、長期にわたる廃炉作業のリスク上昇要因することが予想される。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である。

2. 研究概要と構成

連携重点研究の開始にあたり 8 つの小テーマを設定した。実際の研究の開始にあたっては、1F 廃止措置の進展に合わせ見直しを行う。

2.1 生息する微生物を基にした原子炉内環境の推定

原子炉内からの滞留水のサンプリングを実施し、その微生物の種類が特定されることで環境を推定することが出来る。湿潤環境から乾燥状態まで、また、寒冷状態から高温まで、幅広い環境に微生物は順応する。温度、酸素、pH、塩分濃度、有機物、放射線量、などの環境条件に対して、好熱菌、好アルカリ菌、好酸菌、好塩菌、放射線耐性菌などの極限環境下で増殖できる微生物が存在する。特に、100 度を超える高温環境で繁殖できる超好熱性古細菌や、10000Gy を超える放射線量の環境でも増殖が可能な放射線耐性菌などに注目することで、燃料デブリ周辺の環境を推定する。設備として、日本原子力研究開発機構（JAEA）の核燃料サイクル工学研究所内の管理区域に設置された小型 DNA シーケンサー、遠心冷却機および冷凍庫を活用する。

[R2-1]

2.2 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

1Fの廃止措置に関しては、これまで多くのロボットが考案・試作され、いくつかが現場に投入されている。主として得られた情報は、画像観察、線量計測、温度計測であり、2019年2月になって初めて、2号機のペDESTAL内部の燃料デブリにロボットアームが接触する段階となった。微粒子・滞留水の採取に関してはカメラと一体となった専用ツールが試作されているが、未だロボットに搭載できる状態ではなく更なる改良が必要である。一方でロボット自体も一層の改善が必要となる。本テーマでは、多関節・長尺・軽量中空構造のロボットアームに注目し、微粒子・滞留水のサンプリング機能に関する基本事項を提案する。

2.3 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

1Fの原子炉建屋の基礎には破損箇所があり、そこから炉内に地下水が流入している。ペDESTAL内に落下した核燃料デブリは地下水と接触し、化学的・微生物的な腐食作用に曝されている。東京電力では使用済み燃料プールの腐食に関して、微生物の影響を懸念する報告が為されているが、実質的には配管腐食抑制剤として冷却水に添加しているヒドラジンの殺菌作用に依存するのみである。一方、微生物のリン酸塩鉱物形成作用によるアクチノイドの溶解度低減や、燃料デブリ表面を微生物のセメント形成作用によりコーティングし風化抑制をすることが可能である。本テーマでは、微生物を活用した滞留水浄化システムについての提案を行う。

2.4 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

1Fの圧力容器内部には冷却水が注水されている。2019年11月、注水を段階的に停止して内部を乾燥化する方向に進み始めている。しかしながら、原子炉建屋の基礎が損傷しているため地下水の流入を完全に停止させることは困難である。現在、原子炉建屋を取り囲む凍土壁を維持する冷却装置を利用して、原子炉建屋と圧力抑制室の間の滞留水を凍結させることが出来れば、建屋内への地下水の流入を停止出来る。そして冷却装置の排熱を利用してペDESTAL内に温熱風を吹き込むことで、段階的にペDESTAL内部を湿潤環境から乾燥状態に移行させることが可能である。この時、FP微粒子の温熱風による拡散を抑制する必要がある。このため乾燥には温熱風に加えて、赤外線ライトやレーザー或いはマイクロ波などの空気の流れを伴わない遠隔加熱方法を補助的に併用する。ここでFP微粒子濃度の監視と分析にはレーザーブレイクダウン分光を活用する。以上のようなペDESTAL内部乾燥を行うことで、生息する微生物を極限環境に限定的な種に抑制することが出来る。以上に関する要素技術の調査を実施する。

2.5 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

1F炉内の腐食進展は、1)放射線照射による物理作用、2)局部電池や溶存酸素などの化学作用、3)微生物による腐食作用、3つが複合的に絡み合っている。1)と2)は時間経過や濃度低下により作用が減少するが、3)は微生物が増殖すれば作用が増大する。しかし、プルトニウム238などの α 粒子に晒される環境は、放射線に耐性のある微生物にとっても苛烈な環境である。廃止措置が長期化する中で、高放射線下においても繁殖する微生物叢(集団)を観察し、DNAに生じる突然変異の位置と頻度等を解析することで、人間が立ち入ることのできない高線量下での生物影響に関する定量的な指標とする。

2.6 走査型電子顕微鏡を用いた微生物形態観察

微生物体内に含まれるカルシウムイオンをランタノイドイオンに含む試薬で置換することで、微生物の細胞骨格を真空中でも損傷を与えずに保持することが可能である。この技術を走査型電子顕微鏡による微生物観察に適用することを提案する。ここで微生物はロシア原子力施設及び1Fの汚染水に含まれている微生物を対象とする。

2.7 微生物形態観察内壁が汚染した配管類の切断減容化

廃止措置では内壁が汚染した配管類の処分が深刻となる。汚染物は、水溶性、コロイド、不溶性残渣、微生物叢などの混合物である。これらを切断し容積を減じる工夫が必要である。この際に極力微粒子等の発生を抑制し、配管類の内部に封じ込めた状態で処理することが肝要である。基本となる実施手順を以下に記す。1)切断部位の確認、2)端部の液体窒素冷却、3)切断部位を外部から加熱、4)内壁に付着した揮発性汚染物の蒸散、5)冷却された端部への揮発性汚染物の凝縮、6)切断部位の昇温、7)切断部位の圧接(熱間鍛造)、8)切断部位の溶接、9)溶接帯の中心部分の溝掘り加工、10)溝部分を起点とした繰り返し変形による疲労切断。以上の実施手順の中で、J-PARCセンターとの協力により、中性子発生用水銀ターゲットを対象に、その模擬試験体による要素実験を実施する。加熱源にはレーザー、マイクロ波、抵抗加熱等を用いる。揮発性汚染物は水銀及びトリウム水を考慮する。

2.8 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)

長期化する廃止措置の理解を得る最も分かりやすいインデックスは、産学官連携による本テーマの推進に対してクラウドファンディングを創設することである。ファンディングに資金が集まるならば、そのテーマは理解されていると云える。クラウドファン

[R2-1]

ディングは、主に寄付、製品販売、投資の3つから構成される。先ず制度として既に公知されている JAEA の特定寄付の制度を活用する。

3. 進展

3.1 英知事業日露「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」

本章では研究方針の基盤を支える表記のプログラムの概要を記す。

2019 年度 - 2020 年度に実施された同プログラムの目的は、1F の廃炉プロセスに有用な微生物に関係した知見を得ることにある。このため、同発電所やその敷地内外に生息する微生物群集の実態を明らかにする。1F の敷地境界南（処理水タンク群の南）の表層土、発電所近くの海底土とその直上水、3km 沖合の表層水等からサンプルを採取し、メタゲノム解析（微生物の培養を介せず、その DNA を直接解読することで、生息する微生物の情報を得ること）を実施した。その結果、現状で、1F 敷地周辺で検出される放射線量であれば、その高低にかかわらず、同じような環境を比較した場合、細菌叢の構造に大きな変化がないことが示唆された。また、1F2 号機のトラス室に由来する環境 DNA の解析を行い、トラス室では、*Limnobacter thiooxidans* が主たる構成細菌として同定されると共に、幾つかの細菌種が細菌叢を形成している可能性がある。共同研究相手のロシアのカザン大学では、日本で得られた配列データを情報学的に解析すると共に、ロシアの放射線による環境汚染に関してまとめた。これらの知見を総括し、1F の廃炉プロセスに有用となる提言をまとめた。

提言の詳細は報告書を参照されたい^[2]。特筆すべきは、事故後 10 年が経過して初めて炉内の微生物環境の一端が明らかになった点である。トラス室滞留水から最も多く検出された *L. thiooxidans* であり、これは、チオ硫酸塩酸化細菌として知られている。また、*Magnetospira* 属の中にもチオ硫酸を電子供与体として化学独立栄養増殖を行う種が報告されていることから、滞留水にチオ硫酸塩が存在し、それを利用することで、これらのバクテリアが増殖している可能性がある。さて、原子炉 2 号機の炉心下部の制御棒駆動機構と中性子線量計測系等には、電気配線ケーブルが接続されており、ケーブルの被覆材料としてゴム・プラスチック類が多用されている。ここで、ゴムの架橋化のため加硫されている硫黄は、放射線により生成する過酸化水素により酸化され、チオ硫酸に変化する可能性がある。確認実験が必要なことに疑いはないが、このような推論は微生物の解析無しでは検討することもできない。また、*L. thiooxidans* は酸素の補給がない海水中の炭素鋼表面上でも増殖が確認され、金属腐食に関係するバクテリアと報告されていることから、原子炉内においても腐食を促進している可能性も浮上した。さらに、同バクテリアは、フランスの放射線核種貯蔵プール内の水からも、その存在が報告されており、放射性

物質が混入した滞留水内で増殖できる可能性もある。この意味で、*Limnobacter* 属に放射線耐性があるか否かは今後重要となる。

一方、上位 4 綱を構成する塩基配列から種を想定した場合、*L. thiooxidans*、*Brevirhabdus pacifica*、*Nisaea* sp. 及び *Magnetospira* sp. である。これらのバクテリアの生育温度は 44 °C 以下であり、トラス室中の滞留水の温度計測結果とも一致している。

以上、微生物の種類が決定されれば、原子炉内の環境を推定することが可能であり、光学的・電気化学的な遠隔センシング技術と補完しあうことで、炉内状況を多角的把握できることから、廃止措置の潜在リスクの低下に貢献できる。

3.2 福島県和久観音鉱山を活用した模擬環境研究

小テーマ 2.1「生息する微生物を基にした原子炉内環境の推定」と小テーマ 2.3「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」に関して、これらを推進する模擬環境として福島県石川町に現存する和久観音鉱山の活用を検討した。本鉱山は日本有数のペグマタイト鉱床として有名であり、第二次世界大戦末期にはウラン採掘が検討された。これらの歴史的経緯は石川町歴史民俗資料館に展示されており、石川町教育委員会の認可を得て洞窟内部調査を実施した。

第一鉱体内部には水深 8m の洞穴水が滞留している。坑道入口から約 30m の位置には金田川が流れ、洞穴水の水位は金田川の水位と連動している。周囲に棚田が広がり、洞穴には周囲環境に含まれる微生物が流入していると思われる。Fig.2 に洞窟水の採水の様子を示す。



Figure 2 Sampling stagnant water containing microorganisms from the cave of WaguKannon uranium mining

地下水は建屋基礎の破孔から内部に侵入している。一方、継続的に注入されている汚染水処理施設を経

[R2-1]

由した冷却水は燃料デブリと接触することによりウラン等を溶出させ、圧力抑制室に流れ込む。地震と水素爆発の衝撃により建屋各所の破孔から雨水も侵入している。建屋内部の間隙を満たす地下水は、漏洩箇所がある圧力抑制室内の滞留水と部分的に混じりあう。雨水や地下水は微生物を含んでいる。以上のような状況で、燃料デブリは化学的・微生物的な作用を受ける。このため JAEA では滞留水の放射能について継続的に計測しデータベースを整備してきた^[3]。今後は、滞留水のゲノム分析結果を微生物データベースに登録する^[4]。加えて、地下水由来の微生物のリン酸塩鉱物形成作用によるアクチノイド取り込みや、微生物のセメント形成作用により燃料デブリ風化抑制の可能性について検討を行う。

3.3 JAEA が運営する施設共用制度等の活用

1F 内部で活動するロボット機器の開発のために、JAEA により大学や企業が廉価で利用可能な施設が運営されている^[5]。これまで筆者らは JAEA の施設共用制度を活用して、檜葉遠隔技術開発センター(NARREC)において、高線量・腐食性環境でも長期間使用が可能な光ファイバ地震計の設置と計測実験を行った。設置に際しては専用設計されたロボットを使用した。研究成果は保全学会誌 2021 年 4 月号に掲載された^[6]。本報は、POPI 方式の高感度地震計の実用化を目的として、その実施試験として原子炉格納容器、石油貯蔵タンク、化学プラント反応容器などタンク形状の構造体の振動特性の報告である。タンク形状構造体として NARREC に設置された水中ロボット操作用試験水槽を使用した。Fig.3 に地震計設置にあたって 1F 内での作業のために開発した専用ロボットによる設置試験の様子を示す。



Figure 3 Demonstration of installation of a POPI seismometer around a water tank in NARREC by a specially designed robot

前述した 8 つの小テーマにおいても、可能な限り JAEA の施設や分析機器の有効活用を行う。とりわけ 1F からサンプリングされた滞留水のゲノム解析に関しては、JAEA の核燃料サイクル工学研究所の管理区域内にて実施する。

4. まとめと次年度の展開

初年度は 8 つの小テーマを設定するとともに、英知事業日露の成果を最大限活用して、具体的な研究テーマの起動の検討を行った。今後は、2～3 の小テーマに絞り込むことが重要であると判断した。特に小テーマ 2.1「生息する微生物を基にした原子炉内環境の推定」と小テーマ 2.3「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」に関して、これらを推進する模擬環境として福島県石川町に現存する和久観音鉱山の活用が可能となった。また、東京電力との意見交換を通じて、1F 廃止措置のリスク低減の観点から考えて、内部の微生物の活動を抑制すること、可能ならば内部を殺菌することが肝要である。また、小テーマ 2.2「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」に関しては、光ファイバ地震計の光ファイバ敷設技術をベースとした多機能ロボット技術の成果を取り入れた活動を展開してゆく。

今後の活動展開を支える資金として、科研費の挑戦的萌芽研究(萌芽)及び国際共同研究強化に申請中である。また、英知事業の課題解決型廃炉研究プログラムや国際協力型廃炉研究プログラムにも申請を行う準備を進めている。研究開発環境としては、引き続き慶応義塾大学先端生命科学研究所がゲノム解析の中心となる^[7]。さらに 1F 廃止措置のためのロボット開発の新拠点として、極限環境ロボット研究所 HERO Lab. を 2020 年に設立し、先端的な研究開発活動を行っている^[8]。

謝辞

1F からの滞留水等のサンプルについては東京電力からの提供を受けました。本研究は令和 2 年度連携重点研究 R2-1 として東京大学を通じて資金支援を受けました。関係者に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] H. Yamana, “廃炉に向けた取り組みと課題”, エネ百科 福島第一情報, <https://www.ene100.jp/fukushima/7264>
- [2] 英知事業令和 2 年成果報告書
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 (R02I049) JAEA-Review to be published.
- [3] 福島第一原子力発電所事故廃棄物に関する分析データ集 FRAnDLi, <https://frandli-db.jaea.go.jp/FRAnDLi/>
- [4] 国立遺伝学研究所 生命科学系データベース MicrobeDB, <https://microbedb.jp/>
- [5] JAEA 檜葉遠隔技術開発センター(NARREC) 施設利用シミュレーション
<https://naraha.jaea.go.jp/use/simulation.html>
- [6] 森下日出喜ら, “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, 20(1), p.101 - 108, 2021/04
保全技術アーカイブ, <https://mainte-archive.cloud/010234>
- [7] 慶応義塾大学先端生命科学研究所
<http://www.iab.keio.ac.jp/>
- [8] 極限環境ロボット研究所 HERO Lab.
https://www.hakusan.co.jp/research_and_development/hero_lab.html