



**燃料デブリ取り出しに向けた遠隔ロボット
–計測技術の統合のための研究教育人材育成
(委託研究)**

–令和6年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業–

Research and Education for Human Resource Development in Integrated Remote Robot
and Measurement Technologies for Fuel Debris Removal
(Contract Research)

– FY2024 Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource
Development Project –

福島廃炉安全工学研究所 廃炉環境国際共同研究センター
東京大学

Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science,
Fukushima Research and Engineering Institute
The University of Tokyo

June 2026

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
原子力科学研究所 プロモーション・オフィス 科学技術情報課
〒 319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 2 番地 4
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,
Promotion Office, Nuclear Science Research Institute, Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195, Japan
E-mail: ird-support@jaea.go.jp

燃料デブリ取り出しに向けた遠隔ロボット-計測技術の統合のための研究教育人材育成
(委託研究)

—令和 6 年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業—

日本原子力研究開発機構 福島廃炉安全工学研究所
廃炉環境国際共同研究センター

東京大学

(2026 年 1 月 23 日受理)

日本原子力研究開発機構（JAEA）廃炉環境国際共同研究センター（CLADS）では、令和元年度から英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業（以下、「本事業」という。）を実施している。

本事業は、東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所（1F）の廃炉等をはじめとした原子力分野の課題解決に貢献するため、国内外の英知を結集し、さまざまな分野の知見や経験を従前の機関や分野の壁を越えて緊密に融合・連携させた基礎的・基盤的研究及び人材育成を推進することを目的としている。

平成 30 年度の新規採択課題から実施主体を文部科学省から JAEA に移行することで、JAEA とアカデミアとの連携を強化し、廃炉に資する中長期的な研究開発・人材育成をより安定的かつ継続的に実施する体制を構築した。

本研究は、令和 6 年度に採択された研究課題のうち、「燃料デブリ取り出しに向けた遠隔ロボット-計測技術の統合のための研究教育人材育成」の令和 6 年度分の研究成果について取りまとめたものである。

本研究は、1F における燃料デブリ取り出しに関して、性状把握・キャラクター化を遠隔で実現するためのロボット技術やセンサ及び放射線計測技術の開発、そして、それらの技術をシステムとして統合できる人材の育成を目指す。また、関連する研究実績や講義等のリソースを再整理することで SEEM 学の構築を目指すとともに、実際の教育現場へ展開する。令和 6 年度の実績としては、過酷環境での放射線計測・センサ技術において、高い放射線耐性が見込める中性子検出器の最適化や放射線の入射イベントを適切に生成できるシミュレータの構築、3 次元体積モデル生成のためのローバーの設計・開発を行った。また、取り出し工法に調和した遠隔ロボット技術では、遠隔操作支援のためのシミュレーション及び実機環境の構築と放射線分布推定を実現するためのセンサ構成の検討を行うとともに、運搬機能を備えたモジュール分割型軌道構造体として吊下式多腕型軌道構造体の提案、デブリサンプリングのための軽量化アームの検討、多視点遠隔操縦システム及び軌道計画器に入力するインターフェースを検討した。計測-遠隔ロボット統合技術と実証では、実スケール環境構造モデリングのための画像処理手法の開発や画像データ伝送法の検討、統合 DX プラットフォームの開発、センサ・ロボットのモジュール化の基礎検討を行った。そして、廃炉工程を俯瞰した性状把握・キャラクター化では、燃料デブリ分布推定に向けた剛体・弾性体解析手法の開発に着手するとともに、気中工法における性状把握・廃棄物管理方針を検討し、ジオポリマーの充填材として適用性を検討した。また、SEEM 学の構築では、未知の課題の抽出並びに課題解決方法や高等専門学校における SEEM 学教育を検討した。

本報告書は、日本原子力研究開発機構の英知事業における委託業務として、東京大学が実施した成果を取りまとめたものである。

廃炉環境国際共同研究センター：〒979-1151 福島県双葉郡富岡町大字本岡字王塚 790-1

Research and Education for Human Resource Development in Integrated Remote Robot
and Measurement Technologies for Fuel Debris Removal
(Contract Research)

— FY2024 Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project —

Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science,
Fukushima Research and Engineering Institute
Japan Atomic Energy Agency
Tomioka-machi, Futaba-gun, Fukushima-ken

The University of Tokyo

(Received January 23 ,2026)

The Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science (CLADS), Japan Atomic Energy Agency (JAEA), has been conducting the Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project (hereafter referred to “the Project”) from FY2019.

The Project aims to contribute to solving problems in the nuclear energy field represented by the decommissioning of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (1F), Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc. (TEPCO). For this purpose, intelligence was collected from all over the world, and basic research and human resource development were promoted by closely integrating/collaborating knowledge and experiences in various fields beyond the barrier of conventional organizations and research fields.

The sponsor of the Project was moved from the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology to JAEA since the newly adopted proposals in FY2018. On this occasion, JAEA constructed a new research system where JAEA-academia collaboration is reinforced and medium-to-long term research/development and human resource development contributing to the decommissioning are stably and consecutively implemented.

Among the adopted proposals in FY2024, this report summarizes the research results of the “Research and education for human resource development in integrated remote robot and measurement technologies for fuel debris removal” conducted in FY2024.

This research aims to develop robotic technologies, sensors, and radiation measurement techniques to remotely characterize and assess the properties of fuel debris at 1F reactor, and to cultivate personnel capable of integrating these technologies into systems. Furthermore, it seeks to establish SEEM science and deploy it in actual educational settings. Achievements in FY2024 include: optimizing neutron detectors with high radiation resistance ; constructing a simulator capable of appropriately generating radiation incident events; designing and developing a rover for generating 3D volume models; building physical environments for remote operation support; examined sensor configurations for radiation distribution estimation; proposal of a multi-arm orbital structure as a transport-capable modular orbital structure; development of lightweight arms and examined interfaces for multi-view remote control systems and orbital planners; image processing methods for full-scale environmental structure modeling; investigation on image data transmission methods; development of an integrated DX platform; studies on sensor and robot modularization; development of rigid-body and elastic-body analysis methods; characterization and waste management strategies and investigation of the applicability of geopolymers as backfill materials; establishing SEEM education.

Keywords: Fuel Debris Retrieval, Robotic, Radiation Detection, Modulation, Digital Twin, Geopolymer, Education, System Integration

This work was performed by The University of Tokyo under contract with Japan Atomic Energy Agency.

目次

1. 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業の概要	1
2. 平成 30 年度 採択課題	2
3. 令和元年度 採択課題	5
4. 令和 2 年度 採択課題	8
5. 令和 3 年度 採択課題	10
6. 令和 4 年度 採択課題	12
7. 令和 5 年度 採択課題	14
8. 令和 6 年度 採択課題	16
付録 成果報告書	19

Contents

1. Outline of Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project	1
2. Accepted Proposal in FY2018.....	2
3. Accepted Proposal in FY2019.....	5
4. Accepted Proposal in FY2020.....	8
5. Accepted Proposal in FY2021.....	10
6. Accepted Proposal in FY2022.....	12
7. Accepted Proposal in FY2023.....	14
8. Accepted Proposal in FY2024.....	16
Appendix Result Report	19

This is a blank page.

1. 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業の概要

文部科学省では、「東京電力（株）福島第一原子力発電所の廃止措置等研究開発の加速プラン（平成 26 年 6 月文部科学省）」等を踏まえ、平成 27 年度から「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」（以下、「本事業」という。）を立ち上げ、「戦略的原子力共同研究プログラム」、「廃炉加速化研究プログラム」及び「廃止措置研究・人材育成等強化プログラム」を推進している。

具体的には、国内外の英知を結集し、国内の原子力分野のみならず様々な分野の知見や経験を、機関や分野の壁を越え、国際共同研究も含めて緊密に融合・連携させることにより、原子力の課題解決に資する基礎的・基盤的研究や産学が連携した人材育成の取組を推進している。

一方、日本原子力研究開発機構（以下、「JAEA」という。）では、平成 27 年に廃炉国際共同研究センター（以下、「CLADS」という。現：廃炉環境国際共同研究センター）を組織し、「東京電力ホールディングス（株）福島第一原子力発電所の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ」等を踏まえ、東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所廃炉（以下、「1F 廃炉」という。）に係る研究開発を進めている。

また、平成 29 年 4 月に CLADS の中核拠点である「国際共同研究棟」の運用を開始したことを踏まえ、今後は CLADS を中核に、廃炉の現場ニーズを踏まえた国内外の大学、研究機関等との基礎的・基盤的な研究開発及び人材育成の取組を推進することにより、廃炉研究拠点の形成を目指すことが期待されている。

このため、本事業では平成 30 年度の新規採択課題から実施主体を文部科学省から JAEA に移行することで、JAEA とアカデミアとの連携を強化し、廃炉に資する中長期的な研究開発・人材育成をより安定的かつ継続的に実施する体制を構築することとし、従来のプログラムを、①共通基盤型原子力研究プログラム、②課題解決型廃炉研究プログラム、③国際協力型廃炉研究プログラム、④研究人材育成型廃炉研究プログラム（令和元年度より新設）に再編した。

2. 平成 30 年度 採択課題

平成 30 年度採択課題については以下のとおりである。

課題数：19 課題

共通基盤型原子力研究プログラム	11 課題（若手研究 6 課題、一般研究 5 課題）
課題解決型廃炉研究プログラム	6 課題
国際協力型廃炉研究プログラム	2 課題（日英）

平成 30 年度 採択課題一覧

共通基盤型原子力研究プログラム

【若手研究】

課題名	研究代表者	所属機関
被災地探査や原子力発電所建屋内情報収集のための半自律ロボットを用いたセマンティックサーベイマップ生成システムの開発	河野 仁	東京工芸大学
汚染土壌の減容を目的とした重液分離による放射性微粒子回収法の高度化	山崎 信哉	筑波大学
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	片岡 隆浩	岡山大学
炉心溶融物の粘性及び表面張力同時測定技術の開発	大石 佑治	大阪大学
iPS 細胞由来組織細胞における放射線依存的突然変異計測系の確立	島田 幹男	東京工業大学
レーザー共鳴イオン化を用いた同位体存在度の低いストロンチウム 90 の迅速分析技術開発	岩田 圭弘	東京大学

共通基盤型原子力研究プログラム

【一般研究】

課題名	研究代表者	所属機関
放射性核種の長期安定化を指向した使用済みゼオライト焼結固化技術の開発	新井 剛	芝浦工業大学
燃料デブリ取り出しを容易にするゲル状充填材の開発	牟田 浩明	大阪大学
レーザー蛍光法を用いた燃料デブリ変質相の同定	斉藤 拓巳	東京大学
過酷炉心放射線環境における線量測定装置の開発	岡本 保	木更津工業 高等専門学校
レーザー加工により発生する微粒子の解析と核種同定手法の開発	長谷川 秀一	東京大学

課題解決型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
合金相を含む燃料デブリの安定性評価のための基盤研究	桐島 陽	東北大学
ガンマ線画像スペクトル分光法による高放射線場環境の画像化による定量的放射能分布解析法	谷森 達	京都大学
燃料デブリ取出し時における放射性核種飛散防止技術の開発	鈴木 俊一	東京大学
アルファダストの検出を目指した超高位置分解能イメージング装置の開発	黒澤 俊介	東北大学
ナノ粒子を用いた透明遮へい材の開発研究	渡邊 隆行	九州大学
先端計測技術の融合で実現する高耐放射線燃料デブリセンサーの研究開発	萩原 雅之	高エネルギー 加速器研究 機構

国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

課題名	研究代表者	所属機関
放射性微粒子の基礎物性解明による廃炉作業リスク低減への貢献	五十嵐 康人	茨城大学
放射線耐性の高い薄型 SiC 中性子検出器の開発	三澤 毅	京都大学

3. 令和元年度 採択課題

令和元年度採択課題については以下のとおりである。

課題数：19 課題

共通基盤型原子力研究プログラム 7 課題（若手研究 2 課題、一般研究 5 課題）

課題解決型廃炉研究プログラム 4 課題

国際協力型廃炉研究プログラム 4 課題（日英 2 課題、日露 2 課題）

研究人材育成型廃炉研究プログラム 4 課題

令和元年度 採択課題一覧

共通基盤型原子力研究プログラム

【若手研究】

課題名	研究代表者	所属機関
ウラニル錯体化学に基づくテーラーメイド型新規海水ウラン吸着材開発	鷹尾 康一郎	東京工業大学
動作不能からの復帰を可能とする多連結移動ロボットの半自律遠隔操作技術の確立	田中 基康	電気通信大学

共通基盤型原子力研究プログラム

【一般研究】

課題名	研究代表者	所属機関
一次元光ファイバ放射線センサを用いた原子炉建屋内放射線源分布計測	瓜谷 章	名古屋大学
低線量・低線量率放射線被ばくによる臓器別酸化ストレス状態の検討	鈴木 正敏	東北大学
単一微粒子質量分析法に基づくアルファ微粒子オンラインモニタリングに向けた基礎検討	豊嶋 厚史	大阪大学
幹細胞動態により放射線発がんを特徴付ける新たな評価系の構築	飯塚 大輔	量子科学技術 研究開発機構
耐放射線性ダイヤモンド半導体撮像素子の開発	梅沢 仁 (～R2. 3. 31) 大曲 新矢 (R2. 4. 1～)	産業技術総合 研究所

課題解決型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
Multi-Physics モデリングによる福島 2・3 号機ペDESTAL燃料デブリ深さ方向の性状同定	山路 哲史	早稲田大学
燃料デブリ取出しに伴い発生する廃棄物のフッ化技術を用いた分別方法の研究開発	渡邊 大輔	日立GE ニュークリア・ エナジー
アパタイトセラミックスによる ALPS 沈殿系廃棄物の安定固化技術の開発	竹下 健二 (～R3. 6. 30) 塚原 剛彦 (R3. 7. 1～)	東京工業大学
拡張型スーパードラゴン多関節ロボットアームによる圧力容器内燃料デブリ調査への挑戦	高橋 秀治	東京工業大学

国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

課題名	研究代表者	所属機関
高い流動性および陰イオン核種保持性を有するアルカリ刺激材料の探索と様々な放射性廃棄物の安全で効果的な固化	佐藤 努	北海道大学
再臨界前の中性子線増に即応可能な耐放射線FPGA システムの開発	渡邊 実	静岡大学 (～R3. 3. 31) 岡山大学 (R3. 4. 1～)

国際協力型廃炉研究プログラム（日露共同研究）

課題名	研究代表者	所属機関
燃料デブリ取出し臨界安全技術の高度化	小原 徹	東京工業大学
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	金井 昭夫	慶應義塾大学

研究人材育成型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
燃料デブリ取り出し時における炉内状況把握のための遠隔技術に関する研究人材育成	浅間 一	東京大学
化学計測技術とインフォマティックスを融合したデブリ性状把握手法の開発とタイアップ型人材育成	高貝 慶隆	福島大学
放射線・化学・生物的作用の複合効果による燃料デブリ劣化機構の解明	大貫 敏彦 (～R2. 3. 31) 竹下 健二 (～R3. 6. 30) 塚原 剛彦 (R3. 7. 1～)	東京工業大学
燃料デブリ分析のための超微量分析技術の開発	永井 康介	東北大学

4. 令和2年度 採択課題

令和2年度は、2つのプログラムにおいて、研究課題の採択を決定した。
公募の概要は以下のとおりである。

公募期間：令和2年3月17日～令和2年5月14日（課題解決型）

令和2年5月13日～令和2年7月15日（国際協力型）

課題数：10 課題

課題解決型廃炉研究プログラム 8 課題（若手研究 2 課題、一般研究 6 課題）

国際協力型廃炉研究プログラム 2 課題（日英）

令和2年度 採択課題一覧

課題解決型廃炉研究プログラム

【若手研究】

課題名	研究代表者	所属機関
燃料デブリにおける特性の経年変化と環境劣化割れの調査	楊 会龍 (～R4. 7. 31) 村上 健太 (R4. 8. 1～)	東京大学
健全性崩壊をもたらす微生物による視認不可腐食の分子生物・電気化学的診断及び抑制技術の開発	岡本 章玄	物質・材料 研究機構

課題解決型廃炉研究プログラム

【一般研究】

課題名	研究代表者	所属機関
遮蔽不要な臨界近接監視システム用ダイヤモンド中性子検出器の要素技術開発	田中 真伸	高エネルギー 加速器研究 機構
$\alpha/\beta/\gamma$ 線ラジオリシス影響下における格納容器系統内広域防食の実現:ナノバブルを用いた新規防食技術の開発	渡邊 豊	東北大学
β 、 γ 、X線同時解析による迅速・高感度放射性核種分析法の開発	篠原 宏文	日本分析 センター
合理的な処分のための実機環境を考慮した汚染鉄筋コンクリート長期状態変化の定量評価	丸山 一平	東京大学
溶脱による変質を考慮した汚染コンクリート廃棄物の合理的処理・処分の検討	小崎 完	北海道大学
マイクロ波重畳 LIBS によるデブリ組成計測の高度化と同位体の直接計測への挑戦	池田 裕二	アイラボ

国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

課題名	研究代表者	所属機関
革新的水質浄化剤の開発による環境問題低減化技術の開拓	浅尾 直樹	信州大学
無人航走体を用いた燃料デブリサンプルリターン技術の研究開発	鎌田 創	海上・港湾・ 航空技術 研究所

5. 令和3年度 採択課題

令和3年度は、2つのプログラムにおいて、研究課題の採択を決定した。
公募の概要は以下のとおりである。

公募期間：令和3年3月16日～令和3年5月17日（課題解決型）
令和3年4月13日～令和3年7月1日（国際協力型 日英共同研究）
令和3年7月12日～令和3年8月18日（国際協力型 日露共同研究）

課題数：12 課題

課題解決型廃炉研究プログラム 8 課題
国際協力型廃炉研究プログラム 2 課題（日英）、2 課題（日露）

令和3年度 採択課題一覧

課題解決型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
建屋応答モニタリングと損傷イメージング技術を活用したハイブリッド型の原子炉建屋長期健全性評価法の開発研究	前田 匡樹	東北大学
燃料デブリ周辺物質の分析結果に基づく模擬デブリの合成による実機デブリ形成メカニズムの解明と事故進展解析結果の検証によるデブリ特性データベースの高度化	宇埜 正美	福井大学
ジオポリマー等による PCV 下部の止水・補修及び安定化に関する研究	鈴木 俊一	東京大学
世界初の同位体分析装置による少量燃料デブリの性状把握分析手法の確立	坂本 哲夫	工学院大学
アルファ微粒子の実測に向けた単一微粒子質量分析法の高度化	豊嶋 厚史	大阪大学
連携計測による線源探査ロボットシステムの開発研究	人見 啓太郎	東北大学
中赤外レーザー分光によるトリチウム水連続モニタリング手法の開発	安原 亮	自然科学研究機構

課題名	研究代表者	所属機関
福島原子力発電所事故由来の難固定核種の新規ハイブリッド固化への挑戦と合理的な処分概念の構築・安全評価	中瀬 正彦	東京工業大学

国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

課題名	研究代表者	所属機関
福島第一原子力発電所の廃止措置における放射性エアロゾル制御及び除染に関する研究	Erkan Nejdet (～R4. 1. 31) 三輪 修一郎 (R4. 2. 1～)	東京大学
燃料デブリ取り出しのための機械式マニピュレータのナビゲーションおよび制御	浅間 一	東京大学

国際協力型廃炉研究プログラム（日露共同研究）

課題名	研究代表者	所属機関
福島第一発電所 2、3 号機の事故進展シナリオに基づく FP・デブリ挙動の不確かさ低減と炉内汚染状況・デブリ性状の把握	小林 能直	東京工業大学
非接触測定法を用いた燃料デブリ臨界解析技術の高度化	小原 徹	東京工業大学

6. 令和4年度 採択課題

令和4年度は、2つのプログラムにおいて、研究課題の採択を決定した。
公募の概要は以下のとおりである。

公募期間：令和4年3月1日～令和4年5月6日（課題解決型）

令和4年4月7日～令和4年6月16日（国際協力型 日英共同研究）

課題数：8 課題

課題解決型廃炉研究プログラム 6 課題

国際協力型廃炉研究プログラム 2 課題（日英）

令和4年度 採択課題一覧

課題解決型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
革新的アルファダスト撮像装置と高線量率場モニタの実用化とその応用	黒澤 俊介	東北大学
3次元線量拡散予測法の確立と γ 線透過率差を利用した構造体内調査法の開発	谷森 達	京都大学
α 汚染可視化ハンドフットクロスモニタの要素技術開発	樋口 幹雄 (～R6. 3. 31) 北川 祐一 (R6. 4. 1～)	北海道大学
高放射線耐性の低照度用太陽電池を利用した放射線場マッピング観測システム開発	奥野 泰希	京都大学 (～R5. 3. 31) 理化学研究所 (R5. 4. 1～)
障害物等による劣悪環境下でも通信可能なパッシブ無線通信方式の開発	新井 宏之	横浜国立大学
無線 UWB とカメラ画像分析を組合せたリアルタイム 3D 位置測位・組込システムの開発・評価	松下 光次郎	岐阜大学

国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

課題名	研究代表者	所属機関
耐放射線プロセッサを用いた組み込みシステムの開発	渡邊 実	岡山大学
マイクロ・ナノテクノロジーを利用したアルファ微粒子の溶解・凝集分散に及ぼすナノ界面現象の探求	塚原 剛彦	東京工業大学

7. 令和 5 年度 採択課題

令和 5 年度は、2 つのプログラムにおいて、研究課題の採択を決定した。
公募の概要は以下のとおりである。

公募期間：令和 5 年 3 月 1 日～令和 5 年 4 月 14 日（課題解決型）

令和 5 年 4 月 12 日～令和 5 年 6 月 15 日（国際協力型 日英共同研究）

課題数：9 課題

課題解決型廃炉研究プログラム 7 課題

国際協力型廃炉研究プログラム 2 課題（日英）

令和 5 年度 採択課題一覧

課題解決型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
遮蔽不要な耐放射線性ダイヤモンド中性子計測システムのプロトタイプ開発	金子 純一	北海道大学
簡易非破壊測定に向けた革新的な $n \cdot \gamma$ シンチレーション検出システムの開発	鎌田 圭	東北大学
ペデスタル部鉄筋コンクリート損傷挙動の把握に向けた構成材料の物理・化学的変質に関する研究	五十嵐 豪	名古屋大学
動画像からの特徴量抽出結果に基づいた高速 3 次元炉内環境モデリング	中村 啓太	札幌大学
放射性コンクリート廃棄物の減容を考慮した合理的処理・処分方法の検討	小崎 完	北海道大学
高バックグラウンド放射線環境における配管内探査技術の開発	鳥居 建男	福井大学
PCV 気相漏洩位置及び漏洩量推定のための遠隔光計測技術の研究開発	椎名 達雄	千葉大学

国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

課題名	研究代表者	所属機関
革新的分光画像解析による燃料デブリの可視化への挑戦と LIBS による検証	牟田 浩明	大阪大学
燃料デブリ除去に向けた様々な特性をもつメタカオリンベースのジオポリマーの設計と特性評価	Yogarajah Elakneswaran	北海道大学

8. 令和 6 年度 採択課題

令和 6 年度は、2 つのプログラムにおいて、研究課題の採択を決定した。
公募の概要は以下のとおりである。

公募期間：令和 6 年 3 月 1 日～令和 6 年 4 月 25 日（課題解決型）

令和 6 年 1 月 17 日～令和 6 年 4 月 17 日（研究人材育成型）

課題数：9 課題

研究人材育成型廃炉研究プログラム 2 課題

課題解決型廃炉研究プログラム 7 課題

これらの提案について、外部有識者から構成される審査委員会において、書面審査及び面接審査を実施し、採択候補課題を選定した。

その後、PD（プログラムディレクター）・PO（プログラムオフィサー）会議及びステアリングコミッティでの審議を経て、採択課題を決定した。

令和 6 年度 採択課題一覧

研究人材育成型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
燃料デブリ取り出しに向けた遠隔ロボット-計測技術の統合のための研究教育人材育成	斉藤 拓巳	東京大学
燃料デブリ研究と SEEM 学構築を基軸とした研究人材育成	渡邊 豊	東北大学

課題解決型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
高放射線耐性を有する無線データ伝送用チップセットの要素開発(ベースバンド回路開発)	宮原 正也	高エネルギー加速器研究機構
高放射線耐性を有する無線データ伝送用チップセットの要素開発(高周波アナログ回路開発)	白根 篤史	東京工業大学
高線量かつ不可視環境下での炉内可視化を可能とするレーザ偏向検出型超音波広帯域 3D イメージングシステムの開発	木倉 宏成	東京工業大学
視界不良・高線量下での空間認識のための超音波可視化技術	林 高弘	大阪大学
耐放射線性を有するレーザスキャナと AI・画像処理による 3D モデリング法の開発	福田 知弘	大阪大学
データ駆動型オンサイト診断技術:長期的健全性を確保するための微生物腐食リスク予測	若井 暁	海洋研究開発機構
デブリ取り出しの安全性確保を目的とした中性子源等のイメージング手法の研究	松林 錦	京都大学

本報告書は、以下の課題の令和 6 年度分の研究成果について取りまとめたものである。

研究人材育成型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
燃料デブリ取り出しに向けた遠隔ロボット- 計測技術の統合のための研究教育人材育成	斉藤 拓巳	東京大学

研究成果を取りまとめた成果報告書を付録として添付する。

付録

成果報告書

This is a blank page.

令和 6 年度

日本原子力研究開発機構

英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業

燃料デブリ取り出しに向けた遠隔ロボット-計測技術の
統合のための研究教育人材育成

(契約番号 R06I098)

成果報告書

令和 7 年 3 月

国立大学法人東京大学

本報告書は、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構の「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」による委託業務として、国立大学法人東京大学が実施した「燃料デブリ取り出しに向けた遠隔ロボット-計測技術の統合のための研究教育人材育成」の令和6年度分の研究成果を取りまとめたものである。

目次

概略	viii
1. はじめに	1-1
2. 業務計画	2-1
2.1 全体計画	2-1
2.2 実施体制	2-3
2.3 令和6年度の成果の目標及び業務の実施方法	2-4
3. 実施内容及び成果	3-1
3.1 過酷環境での放射線計測・センサ技術	3-1
3.1.1 高ガンマ線線量下動作中性子ガンマ線分析モジュールの研究開発 (東京大学、再委託先：富山高専)	3-1
3.1.2 不確実性のある環境下における線源分布推定のための計測点決定手法の構築 (再委託先：工学院大学)	3-5
3.1.3 原発建屋内構造物・線源の3次元体積モデルの生成手法の開発 (再委託先：会津大学)	3-10
3.1.4 まとめ	3-16
3.2 取り出し工法に調和した遠隔ロボット技術	3-18
3.2.1 遠隔操作のための情報提示技術の開発	3-18
3.2.2 モジュール分割型軌道構造体を用いた運搬技術の開発	3-21
3.2.3 デブリサンプリング機構の開発 (再委託先：福島大学)	3-31
3.2.4 環境モデルと軌道計画に基づく動作再生を利用した遠隔操縦の高度化 (再委託先：神戸大学)	3-42
3.2.5 まとめ	3-52
3.3 計測-遠隔ロボット統合技術と実証	3-53
3.3.1 遠隔取得画像に基づいた実スケール環境構造モデリングシステムの研究開発 (連携先：原子力機構)	3-53
3.3.2 試行応答のスケラブル評価に向けた統合 DX プラットフォーム	3-62
3.3.3 モジュール化された放射線センサ・ロボット技術の統合による炉内状況把握 (再委託先：東北大学、福島高専)	3-68
3.3.4 まとめ	3-74
3.4 廃炉工程を俯瞰した性状把握、キャラクタリゼーション	3-75
3.4.1 燃料デブリ分布推定に向けた数値計算技術の開発	3-75
3.4.2 取り出し工法に応じた性状把握・廃棄物管理方針	3-79
3.4.3 SEEM 学の構築 (東京大学、再委託先：富山高専、福島高専)	3-83
3.4.4 まとめ	3-85
3.5 人材育成の取り組み	3-86
3.6 研究推進	3-91
4. 結言	4-1
参考文献	5-1

執筆者リスト

研究代表者

国立大学法人東京大学

教授	斉藤 拓巳
教授	山下 淳
上席研究員	鈴木 俊一
准教授	福井 類
准教授	島添 健次
助教	横山 諒
助教	戸田 賀奈子
特任助教	中島 慎介

再委託先

国立大学法人福島大学

教授	高橋 隆行
准教授	衣川 潤
教授	横小路 泰義
准教授	田崎 勇一
准教授	禹 ハンウル
准教授	田村 雄介
准教授	山田 竜平
教授	赤尾 尚洋
教授	鈴木 茂和
教授	高田 英治

国立大学法人神戸大学

学校法人工学院大学

国立大学法人東北大学

公立大学法人会津大学

国立高等専門学校機構福島工業高等専門学校

国立高等専門学校機構富山高等専門学校

連携先

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

主任研究員	川端 邦明
技術員	谷藤 祐太
研究員	今渕 貴志
副主任研究員	羽成 敏秀

表一覧

表 3.1.2-1	誤差の評価	.....	3-7
表 3.2.3-1	2次元ケーシングの成立プロット数	.....	3-39
表 3.2.3-2	ケーシング判定実験結果	.....	3-41
表 3.2.3-3	回収実験結果	.....	3-41
表 3.2.3-4	複数の物体のなかから特定の対象物を回収する実験結果	.....	3-42
表 3.3.1-1	各 CNN の特徴及び 1F 画像への適用可能性検討まとめ	.....	3-55
表 3.3.1-2	通信実験結果	.....	3-62
表 3.3.2-1	ロボットアームの幾何パラメータ	.....	3-68
表 3.4.1-1	剛体溶融解析の境界条件	.....	3-76
表 3.4.2-1	SEEM プレストで挙げられた気中工法のチョークポイント	.....	3-80
表 3.4.2-2	作製したジオポリマーの化学組成比	.....	3-81
表 3.5.1-1	廃止措置特論 E の概要	.....	3-86

図一覧

図 1-1	研究概要	.....	1-2
図 2. 1-1	年度別全体計画	.....	2-2
図 2. 2-1	実施体制図	.....	2-3
図 3. 1. 1-1	使用した SiC 半導体素子と LiF 中性子変換膜	.....	3-1
図 3. 1. 1-2	いくつかのガンマ線線量率下でのガンマ線応答と中性子応答	.....	3-2
図 3. 1. 1-3	TlBr から得られるエネルギースペクトルとドリフト時間	.....	3-3
図 3. 1. 1-4	リセット CSA+ランプ回路の設計概要	.....	3-4
図 3. 1. 1-5	スイッチリセット型 CSA とランプ信号を組み合わせた際の TOT の応答	.....	3-5
図 3. 1. 2-1	RPV 底部に分布する燃料デブリと空間の離散化	.....	3-6
図 3. 1. 2-2	任意の位置におけるガンマ線の入射イベント	.....	3-6
図 3. 1. 2-3	Geant4 を用いた検証実験の様子	.....	3-7
図 3. 1. 2-4	提案手法の流れ	.....	3-8
図 3. 1. 2-5	計測値に基づく線源強度パターン候補群の選定	.....	3-9
図 3. 1. 2-6	追加計測の流れ	.....	3-9
図 3. 1. 2-7	シミュレーション検証結果	.....	3-10
図 3. 1. 3-1	3 次元体積モデル生成研究用ローバー（クローラロボット）	.....	3-11
図 3. 1. 3-2	ステップフィールドでのローバー試験の様子	.....	3-12
図 3. 1. 3-3	LIDAR-SLAM による 3 次元点群地図とローバーの移動経路	.....	3-13
図 3. 1. 3-4	ローバー上部 LIDAR と下部 LIDAR のスキャンデータの比較	.....	3-13
図 3. 1. 3-5	LIDAR-カメラキャリブレーション用ターゲット	.....	3-14
図 3. 1. 3-6	3D-LIDAR と Depth カメラで観測したキャリブレーション用ターゲット（図 3. 1. 3-5）の 3 次元点群	.....	3-15
図 3. 1. 3-7	LIDAR3 次元点群地図と LIDAR+Depth カメラ 3 次元点群地図	.....	3-16
図 3. 2. 1-1	自動視点選択のシミュレーション及び実機環境の構成	.....	3-18
図 3. 2. 1-2	作業ロボットアームが移動している際の最適視点選択の結果	.....	3-19
図 3. 2. 1-3	センサの構成の概念図	.....	3-20
図 3. 2. 1-4	実機実験の構成	.....	3-21
図 3. 2. 2-1	Rail DRAGON と Rail Spider の原子炉内への導入経路 （[3. 2. 2-2]を引用し著者が作成）	.....	3-22
図 3. 2. 2-2	Rail Spider の構成要素と令和 6 年度に開発した Rail DRAGON 用の GUI を拡張した Rail Spider 用の遠隔操作 GUI	.....	3-23
図 3. 2. 2-3	軌道アーム上における共通移動ユニットの移動経路	.....	3-25
図 3. 2. 2-4	採取ロボットのアーム手先注視画面	.....	3-26
図 3. 2. 2-5	運搬ロボットのキャスク開口部注視画面	.....	3-27
図 3. 2. 2-6	Rail Spider における座標の不一致を示す概念図	.....	3-28
図 3. 2. 2-7	適切視点の概念図	.....	3-29
図 3. 2. 2-8	Rail Spider の展開手順の概念図	.....	3-30

図 3.2.3-1	改良後のアーム関節	.....	3-32
図 3.2.3-2	温度の測定点	.....	3-32
図 3.2.3-3	加熱・冷却特性の実験結果	.....	3-33
図 3.2.3-4	関節強度計測用実験装置	.....	3-34
図 3.2.3-5	関節強度の実験結果	.....	3-34
図 3.2.3-6	アームのたわみ特性の計測用実験装置	.....	3-35
図 3.2.3-7	アーム部分の拡大図	.....	3-35
図 3.2.3-8	アームのたわみ特性	.....	3-35
図 3.2.3-9	2次元ケーシングの例	.....	3-36
図 3.2.3-10	試作したグリッパの CAD 図	.....	3-37
図 3.2.3-11	3D プリンタで試作したグリッパ	.....	3-37
図 3.2.3-12	円形物体の Object Closure	.....	3-38
図 3.2.3-13	シミュレーションの出力例	.....	3-39
図 3.2.3-14	実験環境	.....	3-40
図 3.2.3-15	回収対象	.....	3-40
図 3.2.3-16	複数物体と回収対象物	.....	3-41
図 3.2.4-1	多視点遠隔操縦システムの概念図	.....	3-43
図 3.2.4-2	先行研究で開発したシステムの概観	.....	3-43
図 3.2.4-3	システムの構成	.....	3-44
図 3.2.4-4	実環境の概観	.....	3-44
図 3.2.4-5	仮想環境の概観	.....	3-45
図 3.2.4-6	燃料デブリ取り出しを模した積み木	.....	3-46
図 3.2.4-7	回収容器	.....	3-46
図 3.2.4-8	対象タスクの仮想環境モデル	.....	3-47
図 3.2.4-9	実験結果（作業時間）	.....	3-48
図 3.2.4-10	遠隔操作システムの模式図	.....	3-48
図 3.2.4-11	干渉回避範囲の設定	.....	3-49
図 3.2.4-12	比較実験に用いた環境モデル	.....	3-49
図 3.2.4-13	多角形地図	.....	3-50
図 3.2.4-14	屋外環境	.....	3-51
図 3.2.4-15	屋外環境の地図	.....	3-51
図 3.3.1-1	本検証で用いた原画像データ（出典：東京電力）	.....	3-56
図 3.3.1-2	図 3.3.1-1 の画像へ画像処理を適用した結果	.....	3-57
図 3.3.1-3	通信実験の様子	.....	3-61
図 3.3.1-4	実験に用いた LCX ケーブルとアクセスポイント	.....	3-61
図 3.3.1-5	実験に用いた観察ロボットの外観	.....	3-62
図 3.3.2-1	3次元シミュレータ	.....	3-63
図 3.3.2-2	ロボットアームの降下・挙上動作における手先部の線量率尺度	.....	3-64
図 3.3.2-3	ゲームエンジンを活用したペDESTAL 3D モデルの実時間レンダリング	.....	3-65
図 3.3.2-4	空間再現ディスプレイを活用したペDESTAL 3D モデルの3次元表示	.....	3-66
図 3.3.2-5	実機ロボットアーム操作環境	.....	3-67

図 3.3.2-6	実機ロボットアーム幾何モデル	.....	3-67
図 3.3.2-7	MIDI コントローラ	.....	3-68
図 3.3.3-1	ML-EM 法による線源推定 (測定間隔 0.1 m)	.....	3-70
図 3.3.3-2	ML-EM 法による線源推定 (測定間隔 0.2 m)	.....	3-70
図 3.3.3-3	ML-EM 法による線源推定 (測定間隔 0.5 m)	.....	3-70
図 3.3.3-4	ML-EM 法による線源推定 (測定間隔 1.0 m)	.....	3-71
図 3.3.3-5	ML-EM 法による線源推定 (測定間隔 2.75 m)	.....	3-71
図 3.3.3-6	状況に応じたモジュールの組み替え	.....	3-72
図 3.3.3-7	放射線源分布推定のためのアームモジュール	.....	3-73
図 3.4.1-1	剛体計算モデルの概要	.....	3-75
図 3.4.1-2	剛体溶融の解析モデル	.....	3-76
図 3.4.1-3	剛体溶融挙動に関するスナップショット	.....	3-76
図 3.4.1-4	解析体系模式図	.....	3-77
図 3.4.1-5	解析結果のスナップショット	.....	3-78
図 3.4.1-6	開発した弾性体計算手法の理論と数値解の比較	.....	3-78
図 3.4.2-1	a) $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 及び $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ 比、b) CaO/SiO_2 及び $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ 比、c) CaO/SiO_2 比に対する初期粘度の変化	.....	3-82
図 3.4.2-2	合成時のパラメータ ((a) $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 、(b) CaO/SiO_2 、(c) $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ 、(d) $\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2$) と CFL の相関の散布図	.....	3-83

略語一覧

CLADS	: Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science	(廃炉環境国際共同研究センター)
原子力機構	: 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構	
東京電力	: 東京電力ホールディングス株式会社	
1F	: 東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所	
東京大学	: 国立大学法人東京大学	
福島大学	: 国立大学法人福島大学	
神戸大学	: 国立大学法人神戸大学	
工学院大学	: 学校法人工学院大学	
東北大学	: 国立大学法人東北大学	
会津大学	: 公立大学法人会津大学	
福島高専	: 国立高等専門学校機構福島工業高等専門学校	
富山高専	: 国立高等専門学校機構富山高専高等専門学校	
NDF	: Nuclear Damage Compensation and Decommissioning Facilitation Corporation	(原子力損害賠償・廃炉等支援機構)
GUI	: Graphical User Interface	(グラフィカルユーザーインタフェース)
LIDAR	: Light Detection And Ranging	(ライダー)
RPV	: Rector Pressure Vessel	(原子炉圧力容器)
PCV	: Primary Containment Vessel	(原子炉格納容器)
オペフロ	: オペレーティングフロア	

概略

東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所（以下、「1F」と略す。）における燃料デブリの取り出しは、デブリの性状や分布が不明ななかで、その取り出し方法を選定し、取り出しシステムを設計していくという、Unknown Unknowns な SEEM 学的工学課題である。特に、その実現のためには、廃棄物管理までを含む廃炉工程全体からバックキャストさせた課題の抽出とそれに基づく要素技術の統合、そして、開発したシステムの実証が不可欠である。

本研究では、1F における燃料デブリ取り出しに関して、原子力損害賠償・廃炉等支援機構（以下、「NDF」と略す。）及び東京電力ホールディングス株式会社（以下、「東京電力」と略す。）によって検討が進められている気中工法オプション（以下、「充填固化工法」という。）と国立大学法人東京大学（以下、「東京大学」と略す。）鈴木上席研究員らによって提案されている、燃料デブリを充填材により安定化させた後に大きく切り出すことでデブリを取り出す工法（以下、「充填切削工法」という。）を対象に、取り出し前の性状把握・キャラクター化を遠隔で実現するためのロボット技術やセンサ及び放射線計測技術の開発、そして、それらの技術をシステムとして統合できる人材の育成を目指す。また、東京大学が中心となって進めてきた「遠隔操作技術及び核種分析技術を基盤とする俯瞰的廃止措置人材育成」（2014～2018）、「燃料デブリ取り出し時における炉内状況把握のための遠隔技術に関する研究人材育成」（2019～2023）で得られた研究実績や関連する講義等のリソースを再整理することで、具体的な教育研究基盤としての SEEM 学の構築を目指すとともに、高専学生へ提供することで実際の教育現場へ展開する。

以下に、5 カ年計画の 1 年目である令和 6 年度の業務実績を述べる。

(1) 過酷環境での放射線計測・センサ技術

- ① 高ガンマ線線量下動作中性子ガンマ線分析モジュールの研究開発（東京大学、再委託先：国立高等専門学校機構富山高等専門学校（以下、「富山高専」と略す。））

高い放射線耐性が見込める半導体ベースの中性子検出器の構造最適化、基礎性能評価、適用可能性について、検討した。

- ② 不確実性のある環境下における線源分布推定のための計測点決定手法の構築（再委託先：学校法人工学院大学（以下、「工学院大学」と略す。））

環境中に放射線源を分布させ、任意の計測点における放射線入射イベントをシミュレーションするプログラムを構築した。

- ③ 原発建屋内構造物・線源の 3 次元体積モデルの生成手法の開発（再委託先：公立大学法人会津大学（以下、「会津大学」と略す。））

3 次元体積モデル生成のためのデータ取得に使用するローバーの台車部分の設計・開発を行うとともに、放射線源位置推定に使用する搭載センサの選定・調達を行った。また、使用環境を想定しての可視カメラと 3D-Light Detection And Ranging (LIDAR) + カメラのデータフュージョンによる色付き点群地図を生成し、課題を分析した。

(2) 取り出し工法に調和した遠隔ロボット技術

- ① 遠隔操作のための情報提示技術の開発

情報提示に向けた基礎的評価を行った。遠隔操作補助に適するセンサ構成を見積るとともに、画像処理や情報提示のための計算機システム構築を進めた。

- ② モジュール分割型軌道構造体を用いた運搬技術の開発

Rail DRAGON 操作用 Graphical User Interface (GUI) の開発に取り組んだ。また、これまでに開発してきた観察ロボットを改修し、運搬機能を実現するための概念設計を行った。

③ デブリサンプリング機構の開発

(再委託先：国立大学法人福島大学（以下、「福島大学」と略す。))

アームの軽量化に向け、アーム本体の素材及び形状、関節部の構造等を先端負荷 0.5 N 程度を想定して検討した。また、小型の燃料デブリの回収に向けて要求仕様を確認し、グリッパの構造並びに駆動方式、把持センシング手法を検討した。

④ 環境モデルと軌道計画に基づく動作再生を利用した遠隔操縦の高度化

(再委託先：国立大学法人神戸大学（以下、「神戸大学」と略す。))

多視点遠隔操縦システムにおいて、実カメラだけでなく環境モデル内の仮想カメラからの映像で補完する手法の検討を行った。また、計画された軌道の環境モデル／実環境での再生時に軌道を修正する際の課題を抽出した。軌道計画に関しては、燃料デブリ取り出しの作業工程において、軌道計画に基づくマニピュレータの遠隔操縦システムの適用場面や課題を抽出した。さらに、作業者が経由点や進入不可領域を軌道計画器に入力するインタフェースを検討した。

(3) 計測-遠隔ロボット統合技術と実証

① 遠隔取得画像に基づいた実スケール環境構造モデリングシステムの研究開発

(連携先：国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（以下、「原子力機構」と略す。))

遠隔取得画像上に表れる環境影響によるノイズの除去や鮮明化を行う画像処理に深層学習を適用するための検討を行うとともに、炉内からの画像データ伝送を想定した情報通信の基盤となる通信方式選定に関するデータ取得検証実験を行った。

② 試行応答のスケラブル評価に向けた統合 DX プラットフォーム

統合 DX プラットフォームの開発に取り組んだ遠隔ロボットや環境の簡易モデルの構築や線源配置を検討した。構成モジュールによる環境情報取得に向けた評価を行った。

③ モジュール化された放射線センサ・ロボット技術の統合による炉内状況把握

(再委託先：国立大学法人東北大学（以下、「東北大学」と略す。）、国立高等専門学校機構福島工業高等専門学校（以下、「福島高専」と略す。))

燃料デブリ取り出し工法に応じた中性子線源分布推定に使用する計測の要求仕様等について検討し、中性子線源の分布推定手法についての基礎検討を行った。また、放射線源分布の推定をターゲットとしてセンサ・ロボットのモジュール化の基礎検討を行い、照射試験についても検討した。さらに、建屋内で使用するロボットのセンサ類に求められる耐放射線性と位置計測手法について検討した。

(4) 廃炉工程を俯瞰した性状把握、キャラクターゼーション

① 燃料デブリ分布推定に向けた数値計算技術の開発

保存性のよい離散化手法を適用することにより、離散化した後の固体挙動を精度よく計算する手法の開発を目指し、粒子法をベースとした剛体・弾性体解析手法の開発に着手した。

② 取り出し工法に応じた性状把握・廃棄物管理方針

気中工法における性状把握・廃棄物管理方針の検討を実施した。また、充填切削工法における充填材としてジオポリマーを対象に、充填固化における適応性をスラリーの流動性や放射性核種浸出性の点から評価し、最適なジオポリマー組成を検討した。

③ SEEM 学の構築（東京大学、再委託先：富山高専、福島高専）

SEEM 学の構築を目指し、長期にわたる廃炉工程を俯瞰したうえで、未知の課題の抽出並びに課題解決方法の検討をブレインストーミング等により行った。

福島高専の 4 年生対象廃炉工学と富山高専の 5 年生対象システム工学に SEEM 学をどのように反映させるか検討を実施した。また、全国の国立高専生にこれらの授業を広く受講させる方法について検討を行った。また、SEEM 学や廃炉人材の育成に貢献できる海外研修について検討を行った。

(5) 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間並びに廃炉環境国際共同研究センター（CLADS）等との連携を密にして研究を進めた。また、研究実施計画を推進するための打合せや会議等を開催した。

以上、5 カ年計画の 1 年目である令和 6 年度の業務項目を実施し、所期の目標を達成した。

1. はじめに

1Fにおける燃料デブリの取り出しは、デブリの性状や分布が不明ななかで、その取り出し方法を選定し、取り出しシステムを設計していくという、Unknown Unknowns な SEEM 学的工学課題である。特に、その実現のためには、廃棄物管理までを含む廃炉工程全体からバックキャストさせた課題の抽出とそれに基づく要素技術の統合、そして開発したシステムの実証が不可欠である。

本研究では、1Fにおける燃料デブリ取り出しに関して、充填切削工法を対象に取り出し前の性状把握・キャラクター化を遠隔で実現するためのロボット技術やセンサ及び放射線計測技術の開発、そして、それらの技術をシステムとして統合できる人材の育成を目指す（図 1-1）。また東京大学が中心となって進めてきた「遠隔操作技術及び核種分析技術を基盤とする俯瞰的廃止措置人材育成」（2014～2018）、「燃料デブリ取り出し時における炉内状況把握のための遠隔技術に関する研究人材育成」（2019～2023）で得られた研究実績や関連する講義等のリソースを再整理することで、具体的な教育研究基盤としての SEEM 学の構築を目指すとともに、高専学生へ提供することで実際の教育現場へ展開する。

対象とするデブリ取り出しのシナリオにおいて、遠隔ロボット技術の点で気中工法は、原子炉圧力容器（RPV）内部へアクセスする際の入口部の狭さからくるサイズ上の特徴がある。一方、充填切削工法では、炉心上部から切り出しを行っていくことになり、随時プラットフォームを構築できることが想定されるため、レールの設置など遠隔ロボットのモビリティの点での選択性が広い。そして、いずれの場合においても、高いガンマ線環境下での遠隔試料採取やその場観察を行う必要がある。特に、放射線計測においては取り出し時の臨界管理の点から、性状把握時点においても中性子計測のニーズがある。また、得られた計測データをロボットの位置情報や画像情報と統合し、面的な性状把握を自動的、戦略的に行うための DX、ディープテックに立脚した統合化技術が必要になる。

本研究の革新性は、そのようなデブリの取り出し時、そして、取り出したデブリの保管、処理処分時に想定される問題点から、バックキャストさせることで課題設定を行うことにある。Unknown Unknowns を対象とした「性状把握・キャラクター化」の課題を克服するために、シビアアクシデント解析から得られる事前情報に基づき、遠隔でのモニタリングを繰り返しながら、得られた情報に応じて、アーム等の種類やそこに搭載するセンサを変えるという柔軟性が求められる。つまり本研究では、このような課題解決のためのアプローチの本質が遠隔ロボットや放射線計測器やセンサ類のモジュール化とその統合にあると考え、モジュール化を志向した遠隔ロボット要素開発と放射線計測器・センサ開発を行うことで、システム統合や多様な要求への出戻りのない対応を容易にさせる。

デブリ取り出し工法からバックキャストさせた遠隔ロボット計測システムにより、取り出し前の現場の 3 次元的な状況把握や高いスループットでのデブリ性状把握のためのサンプリングが可能となり、臨界管理を含めた具体的な取り出し戦略の構築につながる。特に、モジュール化された分割型軌道構造体は、充填切削工法のように展開のためのスペースが確保できれば、その自由度の高さとロボバースタから、デブリ取り出し前の遠隔による性状把握、キャラクター化において高い有効性と発展性を有しているといえる。さらに、高いガンマ線耐性を有する半導体中性子検出器やバックラッシュがないアーム・グリップ、そして、その場データなどに基づく 1F 炉内環境モデルの構築や線源分布の再構築法、燃料デブリ分布推定のためのシミュレーション技術の開発や取り出し工法に応じた性状把握・廃棄物管理方針は、どのようなデブリ取り出し工法が選択されるにしてもその有効性が期待できる。

さらに、遠隔ロボット技術と計測技術の統合は汎用性が高く、統一的な規格やロボット、センサ類のモジュール化、要素間の通信の問題をクリアすることで、通常炉の廃止措置をはじめとしたさまざまな過酷環境に対応できるオンデマンドな性状把握、キャラクター化のための遠隔性状把握システムの構築につながる相乗効果が期待できる。

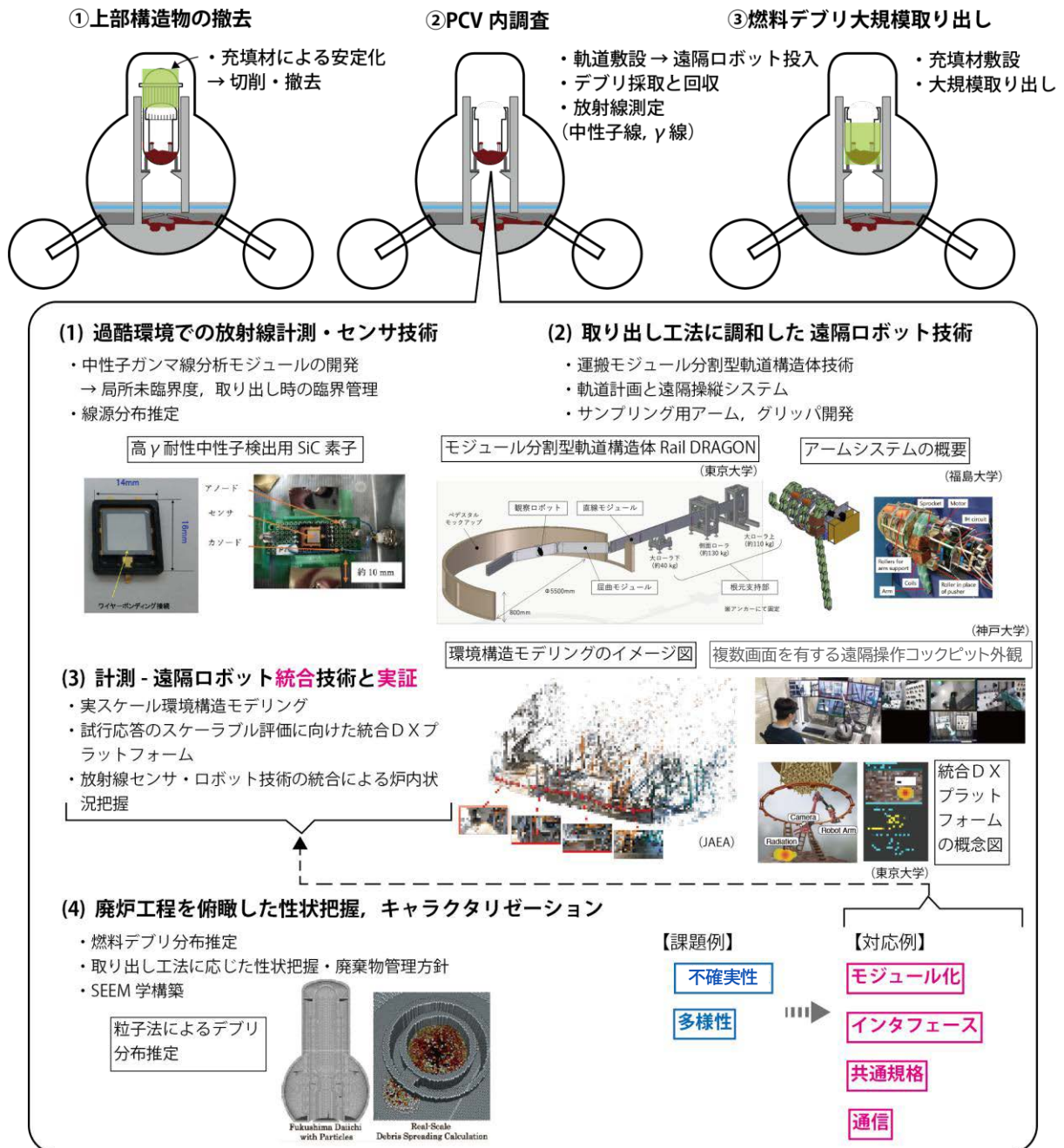


図 1-1 研究概要

本研究は、以下の実施項目から構成される。

(1) 過酷環境での放射線計測・センサ技術

- ① 高ガンマ線線量下動作中性子ガンマ線分析モジュールの研究開発
- ② 不確実性のある環境下における線源分布推定のための計測点決定手法の構築
- ③ 原発建屋内構造物・線源の3次元体積モデルの生成手法の開発

(2) 取り出し工法に調和した遠隔ロボット技術

- ① 遠隔操作のための情報提示技術の開発
- ② モジュール分割型軌道構造体を用いた運搬技術の開発
- ③ デブリサンプリング機構の開発
- ④ 環境モデルと軌道計画に基づく動作再生を利用した遠隔操縦の高度化

(3) 計測-遠隔ロボット統合技術と実証

- ① 遠隔取得画像に基づいた実スケール環境構造モデリングシステムの研究開発
- ② 試行応答のスケラブル評価に向けた統合 DX プラットフォーム
- ③ モジュール化された放射線センサ・ロボット技術の統合による炉内状況把握

(4) 廃炉工程を俯瞰した性状把握、キャラクタリゼーション

- ① 燃料デブリ分布推定に向けた数値計算技術の開発
- ② 取り出し工法に応じた性状把握・廃棄物管理方針
- ③ SEEM 学の構築

(5) 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間並びにCLADS等との連携を密にして研究を進める。また、研究実施計画を推進するための打合せや会議等を開催する。

本研究では、東京大学を連携ラボとして、原子力工学、ロボット工学、システム工学、材料工学を専門とする多様な研究者、研究機関（原子力機構、福島大学、神戸大学、東北大学、工学院大学、会津大学、富山高専、福島高専）が結集して、39歳以下の若手研究者6名を含むチームを構成して、目的を達成する。

2. 業務計画

2.1 全体計画

燃料デブリ取り出し作業では、廃炉工程全体を俯瞰したうえでのバックキャストによる課題設定と個別技術の統合と実証の繰り返しが必要になる。本研究の研究項目は、(1)過酷環境での放射線計測・センサ技術、(2)取り出し工法に調和した遠隔ロボット技術、(3)計測-遠隔ロボット統合技術と実証、(4)廃炉工程を俯瞰した性状把握、キャラクターゼーションの4項目からなり「性状把握、キャラクターゼーション」を対象に、上述した SEEM 学の実践する場を構築する(図 1-1)。(1)、(2)は個別技術の開発であり、東京電力との炉内調査の結果に加え、(4)で得られるシビアアクシデント解析による知見やデブリ取り出しの工法の特徴、また、取り出されたデブリの管理から導き出される課題の解決を目指した研究を展開する。そして、(3)において遠隔技術を用いた「性状把握、キャラクターゼーション」における Unknown Unknowns への一つの解として、モジュール化を志向したシステム統合と実際の汚染現場等を利用した実証を行う。さらに、(4)として実際の廃炉作業へのフィードバックを行うことで、上述した SEEM 学の実践する場を構築する。

年度別全体計画を図 2. 1-1 に示す。

年度別全体計画												
題目 「燃料デブリ取り出しに向けた遠隔ロボット計測技術の統合のための研究教育人材育成」 年度別全体計画												
項目	年度	令和 6 年度	令和 7 年度	令和 8 年度	令和 9 年度	令和 10 年度						
(1) 過酷環境での放射線計測・センサ技術												
① 高ガンマ線線量下動作中性子ガンマ線分析モジュールの研究開発 (東京大学、富山高専)		SiC検計 検出器選定	モジュール化検討	ロボット技術との統合検討	応答試験と最適化	実証評価						
② 不確実性のある環境下における線源分布推定のための計測点決定手法の構築 (工学院大学)		放射線シミュレーション の準備	放射線計測点の決定手法 の構築	線源分布推定手法の構築	提案システムの評価実験	提案システムの改良・評価実験						
③ 原発建屋内構造物・線源の3次元体積モデルの生成手法の開発 (会津大学)		3次元モデル生成研究 研究基盤構築	3次元体積モデル生成 放射線測定機構開発	3次元体積モデル改良 放射線測定実験	3次元体積モデル改良 放射線源位置測定	線源位置統合3次元 体積モデル						
(2) 取り出し工法に調和した遠隔ロボット技術												
① 遠隔操作のための情報提示技術の開発		情報提示の 基礎検討	情報提示インタフェースの 検討と設計	情報提示の基礎実験と評価	複数センサ情報の提示手法の 構築と評価	システム改良、統合、検証実験						
② モジュール分割型軌道構造体を用いた運搬技術の開発		GUI開発・観察 ロボ改修	Rail DRAGON改修 運搬ロボ1号機試作	運搬ロボ1号機評価・改修	運搬ロボ2号機試作・評価	模擬環境での統合						
③ デブリサンプリング機構の開発 (福島大学)		アーム軽量化 の基礎的検討	アームの第一次試作	アームの改良・加熱ユニットの 基礎的検討	加熱ユニットの試作 角度制御法の検討	アーム・グリッパモジュールの システム統合						
④ 環境モデルと軌道計画に基づく動作再生を利用した遠隔操縦の高度化 (神戸大学)		グリッパ構造の 基礎的検討	駆動力伝達機構の試作と 制御方法の検討	グリッパの原理確認 モデルの製作	グリッパの小型化・軽量化と アームへの統合	耐放射線性、高温体制、 耐腐食性評価						
⑤ 多視点映像と軌道計画を用いた遠隔操縦の基礎検討		多視点映像と軌道計画 を用いた遠隔操縦の 基礎検討	操作デバイスとソフトウェア インタフェースの設計と評価	環境モデルと動作再生の 遠隔操縦システムへの組み込み	モックアップ構築、試験実施	システム改良、再試験、 成果まとめ						
(3) 計測・遠隔ロボット統合技術と実証												
① 遠隔取得画像に基づいた実スケール環境構造モデリングシステムの研究開発 (原子力機構)		深層学習画像処理 および通信方式の 基礎研究	ノイズ除去処理系試作・ 実スケール化計算 アルゴリズム開発	画像処理手法の研究開発・ データ管理システムの設計	立体モデル統合手法の研究・ データシステム入出力機能開発	開発手法の統合と 動作検証実験						
② 試行応答のスケラブル評価に向けた統合DXプラットフォーム		簡易モデルや線源配置 によるDXプラットフォーム 検討	DXプラットフォーム上における 環境モデル変化と高並列評価	DXプラットフォーム上における 実機透過インターフェース評価	DXプラットフォーム上における バックキャスト評価	DXプラットフォーム上及び デモンストレーションにおける 評価検討						
③ モジュール化された放射線センサ・ロボット技術の統合による炉内状況把握 (東北大学)		線源分布推定 基礎検討	線源分布推定手法開発	モジュール化検討	モジュールを用いた 線源分布推定	モジュール結合による実証実験						
(福島高専)		耐放射線性と位置計測 手法の検討	耐放射線性と位置計測手法の 予備実験	耐放射線性と位置計測手法の 予備実験	照射試験と位置計測の高精度 化	照射試験と位置計測の 実装化検討						
(4) 廃炉工程を俯瞰した性状把握、 キャラクター化												
① 燃料デブリ分布推定に向けた数値計算技術の開発		剛体・弾性体計算 手法の構築	構造物破壊現象計算モデル の構築	固液連成計算手法の構築	並列化・実験理論との 比較によるV&V	福島第一体系を用いた 大規模計算						
② 取り出し工法に応じた性状把握・ 廃棄物管理方針		気中工法方針検討 充填材検討	気中工法方針検討 充填材検討	充填切削工法 放射性核種浸出挙動	充填切削工法 放射性核種浸出挙動	充填切削工法 方針検討						
③ SEEM学の構築 (東京大学、富山高専、福島高専)		SEEM学教材の 検討と研修	SEEM学教材作成と研修	SEEM学教材更新と研修	SEEM学教材更新と研修	SEEM学教材更新と研修						
(5) 研究推進		技術評価委員会の開催 △ まとめ・評価	技術評価委員会の開催 △ まとめ・評価	技術評価委員会の開催 △ まとめ・評価	技術評価委員会の開催 △ まとめ・評価	技術評価委員会の開催 △ まとめ・評価						

図 2. 1-1 年度別全体計画

2.2 実施体制

実施体制図を図 2.2-1 に示す。

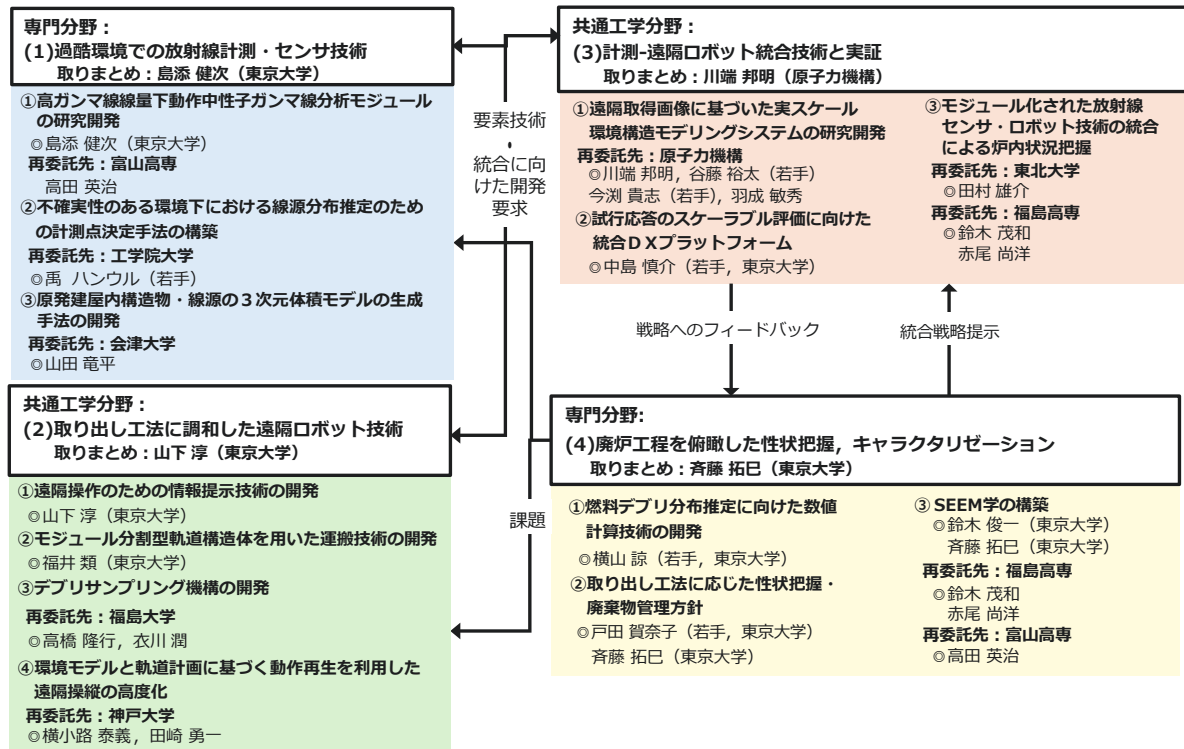


図 2.2-1 実施体制図

2.3 令和6年度の成果の目標及び業務の実施方法

(1) 過酷環境での放射線計測・センサ技術

- ① 高ガンマ線線量下動作中性子ガンマ線分析モジュールの研究開発（東京大学、再委託先：富山高専）

高い放射線耐性が見込める半導体ベースの中性子検出器の構造最適化、基礎性能評価、適用可能性について検討する。

- ② 不確実性のある環境下における線源分布推定のための計測点決定手法の構築（再委託先：工学院大学）

環境中に放射線源を分布させ、任意の計測点における放射線入射イベントをシミュレーションするプログラムを構築する。

- ③ 原発建屋内構造物・線源の3次元体積モデルの生成手法の開発（再委託先：会津大学）

3次元体積モデル生成のためのデータ取得に使用するローバーの台車部分の設計・開発を行うとともに、放射線源位置推定に使用する搭載センサの選定・調達を行う。また、使用環境を想定しての可視カメラと3D-LIDAR+カメラのデータフュージョンによる色付き点群地図を生成し、課題を分析する。

(2) 取り出し工法に調和した遠隔ロボット技術

- ① 遠隔操作のための情報提示技術の開発

情報提示に向けた基礎的評価を行う。遠隔操作補助に適するセンサ構成を見積るとともに、画像処理や情報提示のための計算機システム構築を進める。

- ② モジュール分割型軌道構造体を用いた運搬技術の開発

Rail DRAGON 操作用 GUI の開発に取り組む。また、これまでに開発してきた観察ロボットを改修し、運搬機能を実現するための概念設計を行う。

- ③ デブリサンプリング機構の開発（再委託先：福島大学）

アームの軽量化に向け、アーム本体の素材及び形状、関節部の構造等を先端負荷0.5N程度を想定して検討する。また、小型の燃料デブリの回収に向けて要求仕様を確認し、グリッパの構造並びに駆動方式、把持センシング手法を検討する。

- ④ 環境モデルと軌道計画に基づく動作再生を利用した遠隔操縦の高度化（再委託先：神戸大学）

多視点遠隔操縦システムにおいて、実カメラだけでなく環境モデル内の仮想カメラからの映像で補完する手法の検討を行う。また、計画された軌道の環境モデル／実環境での再生時に軌道を修正する際の課題を抽出する。軌道計画に関しては、燃料デブリ取り出しの作業工程において、軌道計画に基づくマニピュレータの遠隔操縦システムの適用場面や課題を抽出する。さらに、作業者が経由点や進入不可領域を軌道計画器に入力するインタフェースを検討する。

(3) 計測-遠隔ロボット統合技術と実証

- ① 遠隔取得画像に基づいた実スケール環境構造モデリングシステムの研究開発

（連携先：原子力機構）

遠隔取得画像上に表れる環境影響によるノイズの除去や鮮明化を行う画像処理に深層学習を適用するための検討を行うとともに、炉内からの画像データ伝送を想定した情報通信の基盤となる通信方式選定に関するデータ取得検証実験を行う。

- ② 試行応答のスケラブル評価に向けた統合DXプラットフォーム

統合DXプラットフォームの開発に取り組む。遠隔ロボットや環境の簡易モデルの構築や線源配置を検討する。構成モジュールによる環境情報取得に向けた評価を行う。

- ③ モジュール化された放射線センサ・ロボット技術の統合による炉内状況把握（再委託先：東北大学、福島高専）

燃料デブリ取り出し工法に応じた中性子線源分布推定に使用する計測の要求仕様等について検討し、中性子線源の分布推定手法についての基礎検討を行う。また、放射線源分布の推定をターゲットとして、センサ・ロボットのモジュール化の基礎検討を行い、照射試験についても検討する。さらに、建屋内で使用するロボットのセンサ類に求められる耐放射線性と位置計測手法について検討する。

- (4) 廃炉工程を俯瞰した性状把握、キャラクターゼーション

- ① 燃料デブリ分布推定に向けた数値計算技術の開発

保存性のよい離散化手法を適用することにより、離散化した後の固体挙動を精度よく計算する手法の開発を目指し、粒子法をベースとした剛体・弾性体解析手法の開発に着手する。

- ② 取り出し工法に応じた性状把握・廃棄物管理方針

気中工法における性状把握・廃棄物管理方針の検討を実施する。また、充填切削工法における充填材としてジオポリマーを対象に、充填固化における適応性をスラリーの流動性や放射性核種浸出性の点から評価し、最適なジオポリマー組成を検討する。

- ③ SEEM 学の構築（東京大学、再委託先：富山高専、福島高専）

SEEM 学の構築を目指し、長期にわたる廃炉工程を俯瞰したうえで、未知の課題の抽出並びに課題解決方法の検討をブレインストーミング等により行う。

福島高専の4年生対象廃炉工学と富山高専の5年生対象システム工学に SEEM 学をどのように反映させるか検討を実施する。また、全国の国立高専生にこれらの授業を広く受講させる方法について検討を行う。また、SEEM 学や廃炉人材の育成に貢献できる海外研修について検討を行う。

- (5) 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間並びに CLADS 等との連携を密にして研究を進める。また、研究実施計画を推進するための打合せや会議等を開催する。

3. 実施内容及び成果

3.1 過酷環境での放射線計測・センサ技術

3.1.1 高ガンマ線線量下動作中性子ガンマ線分析モジュールの研究開発（東京大学、再委託先：富山高専）

燃料デブリの取り出しにおいては、非常に高いガンマ線線量率下（～100 Gy/h）程度での中性子計測及びガンマ線計測が必要である。より詳細な状況把握や臨界モニタにおいては、これまで行われてきたような単なる積分型の線量率のみの計測ではなく、中性子、ガンマ線一つ一つのエネルギーを計測する高度なスペクトロメータ型の中性子・ガンマ線分析モジュールが必要となる。そのようなスペクトロメータにおいては、高ガンマ線線量率下かつロボット搭載型で動作するための、高計数率対応・検出器・回路における高放射線耐性・良好なエネルギー分解能・小型軽量性などの特性を充たす必要がある。本研究においては、数ある検出器の比較を行い、Unknown Unknowns な SEEM 学的工学課題に対応可能な高ガンマ線線量下動作中性子ガンマ線分析モジュール群の研究開発を実施する。令和 6 年度においては、具体的には高い放射線耐性が見込める炭化ケイ素（SiC）半導体ベースの中性子検出器の構造最適化・基礎性能評価・適用可能性について検討した。また、今後候補となりうる検出器について適用可能性を検討した。加えて放射線耐性を有する集積回路の検討を実施した。以下その細目について記載する。

(1) SiC 半導体型中性子分析モジュールの研究開発

SiC（シリコンカーバイド）半導体は Si（シリコン）半導体のバンドギャップ 1.12 eV と比較して 3.26 eV 程度と広く、高温環境下での動作可能性、高い放射線耐性がすでに報告されており、また、パワー半導体用途としても製造が拡大している状況であり、入手性・安定性も優れている。本研究開発においては、主に 100 Gy/h 程度までの高いガンマ線線量率下において、数 nv 程度の微弱中性子の検出を目指した中性子計測分析モジュールの開発を目指している。特に、このような応用においては、ガンマ線と中性子の弁別性能が重要である。ここでは 200 Gy/h までのガンマ線照射のデータと中性子測定データを比較することで検出可能性を検討した。

中性子変換膜は ^{10}B を用いて行われることが多いが、本研究では Q 値が ^{10}B の中性子捕獲反応よりも大きい ^6Li ($Q=4.78$ MeV) を変換膜として用いた。高ガンマ線線量率下においては、ガンマ線計測のパイルアップ等の影響によりバックグラウンド信号が大きくなるため、エネルギー計測において高い位置（高いエネルギー付与）に信号がでることは有利である。 $^6\text{Li}+n \rightarrow ^3\text{T}+^4\text{He}$ の反応を用いて、 ^3T もしくは ^4He （アルファ線）を SiC で計測することで中性子計測を行う。LiF 膜はおおよそ 10 μm 厚を用いた。本研究で使用した SiC 半導体素子と LiF 中性子変換膜を図 3.1.1-1 に示す。

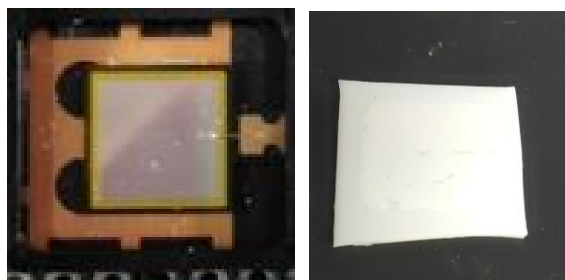


図 3.1.1-1 使用した SiC 半導体素子（左）と LiF 中性子変換膜（右）

実験においては、空乏層厚の影響評価のため 300 V での中性子検出性能の評価及びガンマ線応答の評価を行った。特に、ガンマ線線量率は 2、20、120、200 Gy/h での応答を確認した。図 3.1.1-2 にこれらの結果を示す。中性子の応答（水色）はピークの形成がみられた。また、いくつかのガンマ線線量率下での応答をみると、線量率の上昇に従い、MCA channel の値が上昇していくことが確認された。これは、信号処理系のパイルアップによる可能性が挙げられる。しかし、200 Gy/h の線量率下においても、中性子のエネルギー付与はガンマ線のエネルギー付与よりも高い位置に形成されるため、中性子の選択的検出可能性が示されている。

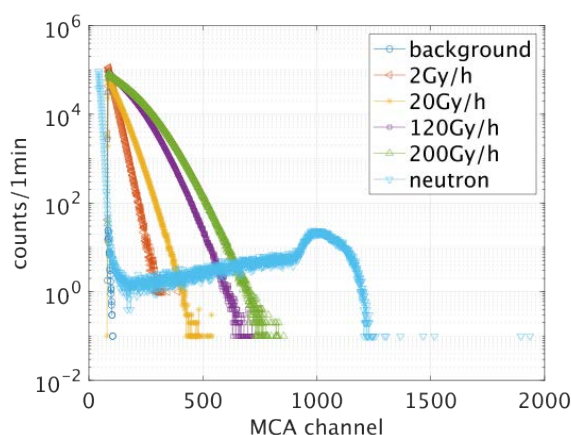


図 3.1.1-2 いくつかのガンマ線線量率下でのガンマ線応答と中性子応答

本実験での中性子検出効率は、およそ 0.024% 程度であった。検出効率の向上のために、PHITS モンテカルロシミュレーションを用いて LiF 変換膜厚の検討を行った。変換膜厚 20 μm のときはおよそ検出効率 1.5 倍の上昇が観測された。今後動作電圧や空乏層の最適化などを実施予定である。また、実際の応用については、複数枚のセンサを同時に動作させる必要があり、(3) で示しているような集積回路の開発を含めて、今後仕様検討が必要である。

(2) 中性子・ガンマ線検出器の適用可能性の検討

Unknown Unknowns に対応する中性子・ガンマ線検出器の適用可能性の検討を実施した。中性子検出器としては、一般に核分裂比例計数管、 ^3He 比例計数管、 ^{10}B 比例計数管、 ^6Li ベースシンチレータ、 $^{10}\text{B}/^6\text{Li}$ 変換膜＋半導体センサなどが挙げられる。一般に、ガスを用いた検出器は、その密度からガンマ線感度が低く、 ^3He 等においては ~ 100 cps/nv 程度以上の高い中性子計測効率を有している。一方で、ガスの封じ切りや取り扱いなどの問題は存在している。固体検出器である ^6Li ベースシンチレータ、 $^{10}\text{B}/^6\text{Li}$ 変換膜＋半導体センサは、いずれもガススペースの検出器よりガンマ線感度が高くなるため、ガンマ線感度を落とすためには、反応層や電荷収集層（空乏層）の厚みを中性子反応から生ずる荷電粒子の飛程程度に小さく抑える必要があり、結果としてそれぞれの素子単体の計測効率はあまり高くない、そして、実用上は(3)で検討するようなアレイ化を行うことで対象とする中性子効率を充たす必要がある。一方で、取り扱いの容易さやロボットへの搭載などを考慮すると固体型検出器への要望は高い。本研究では、Unknown Unknowns に対応する異なる応答性を有する中性子検出器を組み合わせる方策を引き続き検討していく。

スペクトロメータ型のガンマ線検出器においては、特に原子力応用においては ^{154}Eu からの 1274 keV ガンマ線の検出などの検出のためある程度高いエネルギー分解能（ $\sim 4\%$ @662 keV）が必要となる。候補としては、シンチレータ方式では $\text{SrI}_2(\text{Eu})$ 、 LaBr_3 、 CeBr_3 等が挙げられ、減衰時間はそれぞれ 1.2 μs 、30 ns、19 ns 程度であり、エネルギー分解能は 3%、2-3%、3-4%程度@662 keV である。一方で、化合物半導体方式では、 CdTe 、 CZT 、 TlBr が挙げられ、それぞれ 1-2%程度@662 keV より優れたエネルギー分解能を達成可能である。 CdTe は、すでに Mcps/mm^2 以上の応答速度を必要とする PCCT (Photon Counting Computed Tomography) などの分野で広く使われているが、 TlBr については密度や厚みを考慮した検討はそれほど多く行われていない。ここでは中性子検出器と同様に Unknown Unknowns に対応する異なる応答性を有する中性子検出器を組み合わせる利用の方策の検討を進めていく。図 3.1.1-3 に、5 mm 角の TlBr 素子から得られたエネルギースペクトルとチェレンコフ発光をトリガーとしてからのドリフト時間と反応深さの関係を示す。2%以下のエネルギー分解能が得られている。今後は密度や厚み、ロボットなどへの搭載性を考慮した SEEM 学への適用可能性の検討を行っていく。

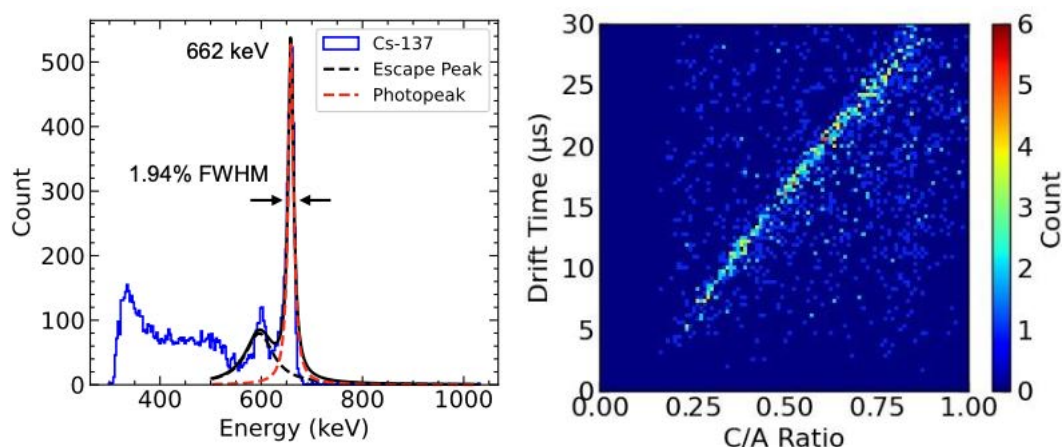


図 3.1.1-3 TlBr から得られるエネルギースペクトルとドリフト時間

(3) 放射線耐性を有する集積回路の検討

(1)で開発を行っている中性子検出器からの信号読出には、検出器近傍での増幅及び信号伝送が必要となる。また、回路系を検出器近傍に配置することから、高ガンマ線線量率下でも動作可能な放射線耐性を有する必要がある。そのため令和6年度は、TSMC 65 nm CMOS プロセスを用いた信号読出集積回路の設計検討を実施した。中性子検出のためには、初段での低ノイズ（ ~ 1000 電子@FWHM 程度）な信号増幅、ノイズ耐性の強い信号伝送が必要となる。また、高ガンマ線線量率下での動作を考えると 1 Mcps 程度の計数率特性を有している必要がある。ここでは初段の増幅として、CSA (Charge Sensitive Amplifier 電荷積分回路) の設計検討及びデジタル伝送方式と相性のよい TOT (Time Over Threshold) 方式を用いた回路方式の検討を実施した。線形応答を行う TOT 方式には、欧州原子核研究機構 (CERN) で開発が行われてきた定電流放電型フィードバックを有する CSA や我々のグループで開発を行ってきた Slew rate Limited 型などが存在するが、いずれも高ダイナミックレンジは確保できるものの高計数率には適さない。ここではスイッチリセット型 CSA とランプ信号から TOT 波形を生成する方式について主に検討を実施した。図 3.1.1-4 に設計概要を示している。

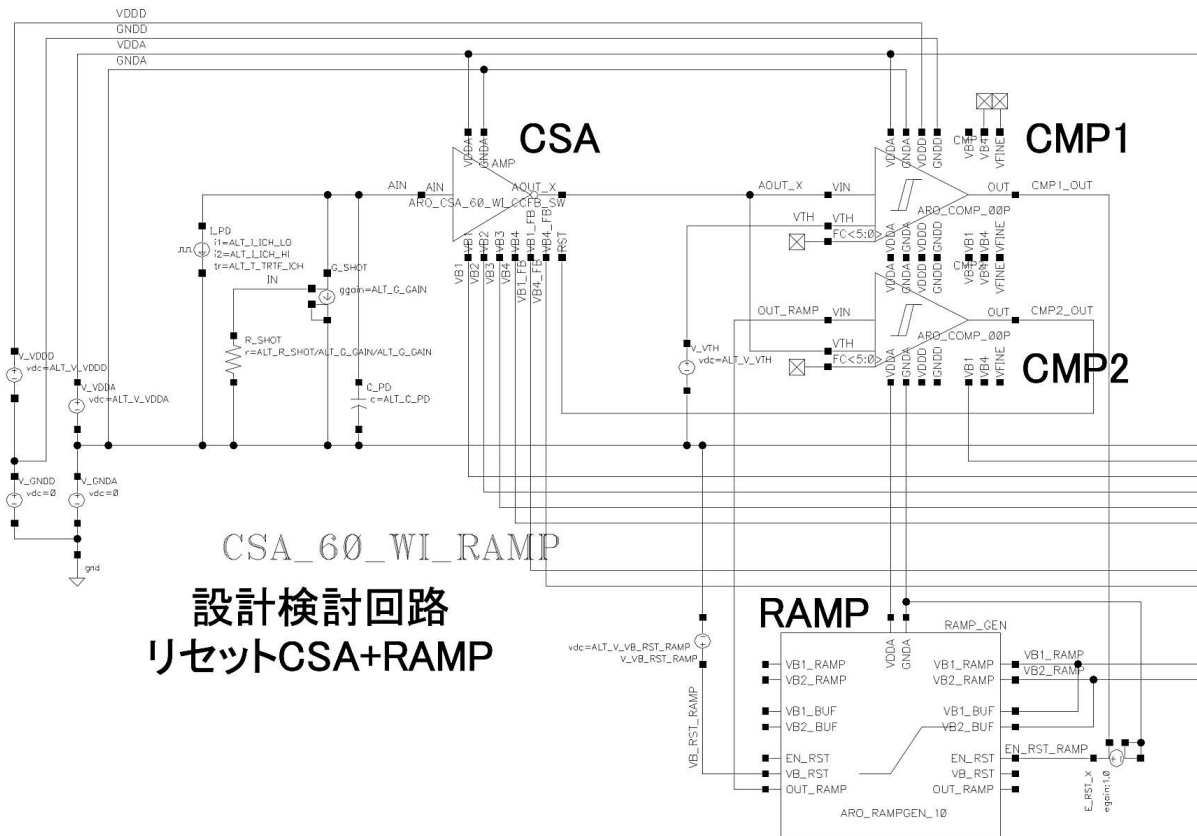


図 3. 1. 1-4 リセット CSA+ランプ回路の設計概要

図 3. 1. 1-5 に本手法を用いた場合の TOT の応答を示す。本方式では 6-8 bit 程度の線形性が得られることがわかっている。また、TOT の応答時間は 500 ns 程度以下であり、目標としている 1 Mcps も達成可能であることが示唆される。現時点での設計段階では、等価雑音電荷はゲートリークショット雑音の寄与が大きく、およそ 850 電子@RMS であり、さらに要求を充たすような設計検討が必要である。

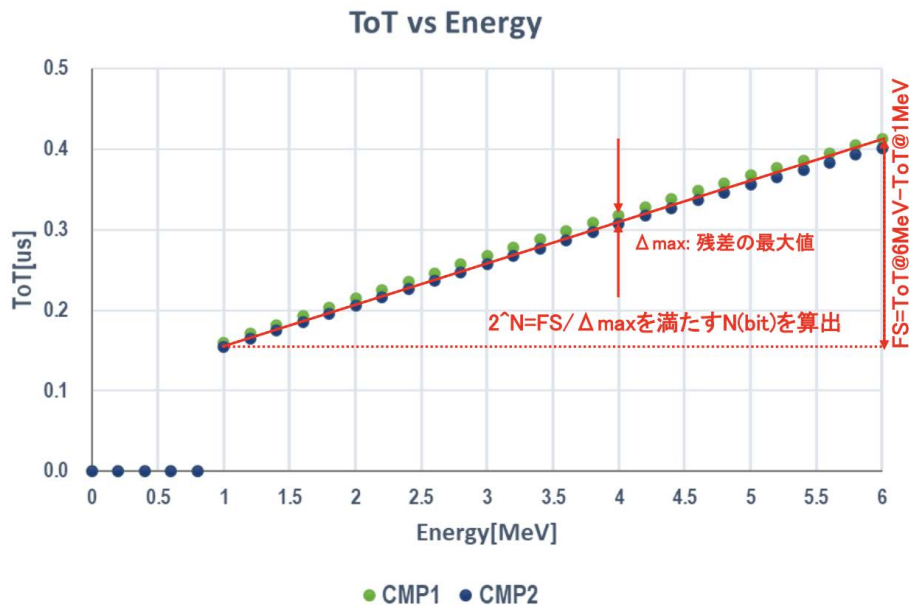


図 3.1.1-5 スイッチリセット型 CSA とランプ信号を組み合わせた際の TOT の応答

3.1.2 不確実性のある環境下における線源分布推定のための計測点決定手法の構築 (再委託先：工学院大学)

(1) 任意の計測点における放射線入射イベントのシミュレーション

本課題では、不確実性のある環境下における線源分布推定を目的とし、そのための放射線計測点決定手法の構築を行う。令和 6 年度は、環境中に線源を分布させ、任意の計測点における放射線入射イベントをシミュレーションするプログラムを構築した。

仕様としては、線源分布及び強度、検出器の位置を任意に設定した際に、放射線の入射イベントを適切に生成できるようにプログラミングを行った。センサとしては、高線量率環境下でも使用可能な非指向性検出器を想定し、線量からの距離、線源強度に応じて正しく入射数を計算できるようにした。放射線解析ライブラリとして一般的に Geant4 が用いられるが^[3.1.2-1]、計算量が非常に高いという問題がある。そこで、自作のシミュレータを構築し、解析の軽量化を図った。

放射線は等方向に広がるため、単位時間におけるガンマ線のイベント数は放射線源からの距離の二乗に反比例する。平面の空間に球状の放射線源が存在すると仮定し、放射線源の強度を I 、検出器の面積を A 、センサから放射線源までの距離を r とすると、単位時間あたりのガンマ線のイベント数 n は、式(3.1.2-1)から求まる。

$$n = \frac{AI}{4\pi r^2} \quad \text{式(3.1.2-1)}$$

燃料デブリは、RPV 底部に連続的に分布していると考えられるが、本研究では図 3.1.2-1 のように空間を離散化し、各グリッドの中心に点線源が存在すると仮定する。RPV 底部を直径 6 メートルの円形として考え、3×3 のグリッドで離散化する。

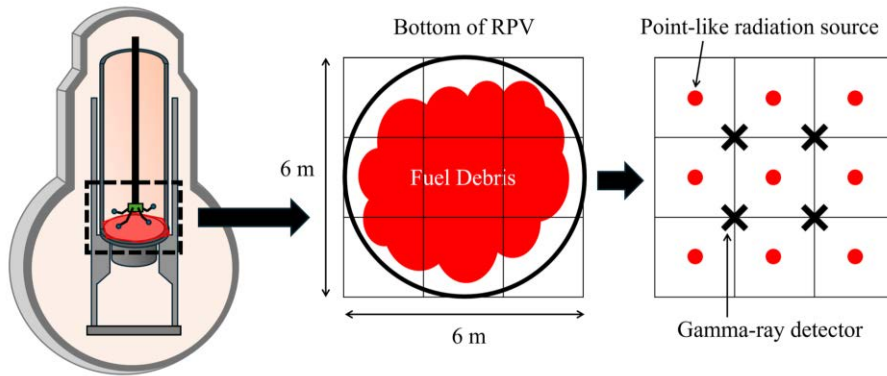


図 3.1.2-1 RPV 底部に分布する燃料デブリと空間の離散化

内部調査に投入するシステムのアーム先に非指向性検出器を搭載し、任意の位置で計測を行うとする。今回はアームの数を四つとし、同時に4箇所での計測ができると想定した。グリッド番号 j における点線を $\mathbf{s}_j = (x_j, y_j, I_j)$ で表す。 x_j 及び y_j は点線源の位置座標を表し、 I_j は線源強度である。四つのアーム先の検出器のうち、 i 番目の検出器の位置座標を $\mathbf{x}_i = (x_i, y_i)$ とすると、ガンマ線の入射数は次式となる。

$$n_{i,j} = \frac{AI_j}{4\pi\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}} \quad \text{式(3.1.2-2)}$$

$$n_i = \sum_{j=1}^N n_{i,j} \quad \text{式(3.1.2-3)}$$

ここで、 N は点線源の数を表す。

図 3.1.2-2 に示すように、ガンマ線の入射数は環境に存在する全線源から影響を受けることとなる。そのため、空間を離散化する際のグリッド数に応じて計算すべきガンマ線の入射イベントは膨大になるが、全計算を Geant4 を用いて行うのは計算負荷が非常に大きくなってしまう。

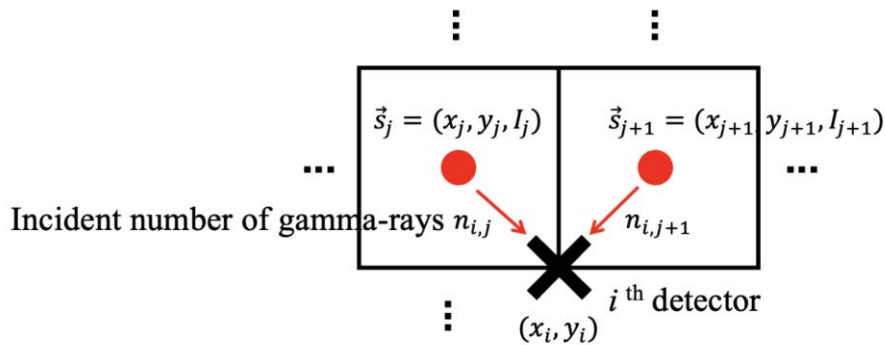


図 3.1.2-2 任意の位置におけるガンマ線の入射イベント

そこで本研究では、Geant4 を用いて線源と検出器間の距離に応じたガンマ線の入射数の誤差を評価し、自作のシミュレーションにその誤差率を反映することで入射イベントを再現する。Geant4 を用いた検証実験の様子を図 3.1.2-3 に示す。

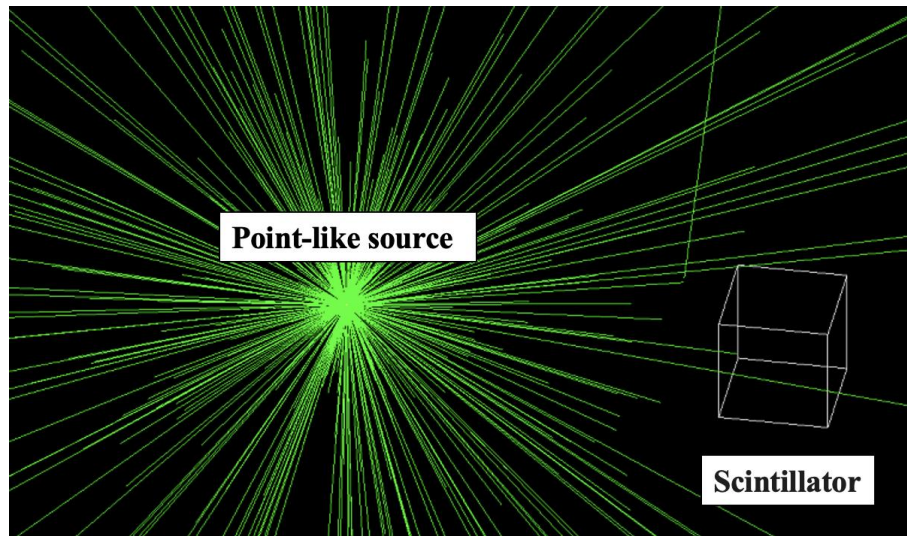


図 3.1.2-3 Geant4 を用いた検証実験の様子

白色の立方体はシンチレータ、緑色の線はガンマ線を表している。大気中に体積が 1000 cm^3 のシンチレータを配置し、 300 kBq の点線源を設置した。点線源からは等方向にガンマ線が放出され、シンチレータに入射したガンマ線の本数を計測して、式(3.1.2-1)に基づいた理論値との相対誤差を求めた。表 3.1.2-1 にシンチレータから放射線源までの距離を 2 m ～ 6 m で変化させて計測した 10 回分のガンマ線入射数の平均値、理論値、相対誤差を示す。

表 3.1.2-1 誤差の評価

線源までの距離 [m]	平均値	理論値	相対誤差 [%]
2	49.5	59.7	17.1
3	24.0	26.5	9.52
4	12.9	14.9	13.5
5	8.30	9.55	13.1
6	7.00	6.63	5.56

相対誤差の平均値を算出すると 11.8% となった。したがって、本研究のシミュレーション検証ではガンマ線入射数の誤差が正規分布に従うと仮定し、誤差分布の標準偏差が 11.8% となるよう計測されるガンマ線の入射数を設定した。

以上のように令和 6 年度は、環境中に線源を分布させ、任意の計測点における放射線入射イベントをシミュレーションするプログラムを構築した。

(2) 流体解析による事前知識に基づいた放射線源分布推定及び計測点決定手法

構築した放射線入射イベントのシミュレーションを用いて放射線源の分布を推定するとともに検出器の計測点を決定する手法を構築した。本研究では、図 3.1.2-1 に示すように空間を離散化し各グリッドの中央に点線源が存在すると近似するため、放射線源の分布推定問題は各線源の強度を推定する問題となる。

本研究では、 3×3 のグリッドの中央に位置する 9 個の点線源の強度が $0 \sim 5 \text{ MBq}$ の範囲内にあると仮定し、図 3.1.2-1 に示すような 4 箇所計測を行った際の取得可能な計測値の全パターンを事前にデータベースとして構築した。具体的には、各線源の強度を 0 MBq 、 1 MBq 、 2 MBq 、 3 MBq 、 4 MBq 、 5 MBq の 6 段階に分けると、9 個の点線源の組み合わせは

全 6^9 パターンとなる。ここで大事なのは線源強度の範囲よりも、何段階に分けるかという解像度がデータベースの大きさを決める重要なファクターとなる。今回は線源の強度を 0 ～ 5 MBq としたが、現場の状況に合わせて範囲を調整することは可能である。

この全パターンに対する図 3.1.2-1 に示すような 4 箇所での計測を行った際の取得値をデータベースとして構築する。この際における 4 箇所の計測場所は固定とする。すなわち、内部調査における最初の計測場所は事前に決められた計測点で行うとする。 k をパターン番号を示すインデックスとすると、 k 番目の線源強度のパターンは $\mathbf{d}_k = (s_{0,k}, \dots, s_{j,k}, \dots, s_{8,k})$ で表すことができる。これに対する計測値は $\mathbf{m}_k = (n_{0,k}, n_{1,k}, n_{2,k}, n_{3,k})$ で表すことができる。すなわち、本研究は $\mathbf{m}_k$ から $\mathbf{d}_k$ を推定することが目的となる。

しかし、全 6^9 パターンが存在する線源強度の候補群に対して、4 箇所での計測値 $\mathbf{m}_k$ のみで推定することは不良設計問題となる。そこで本研究では、事故当時の核燃料の流れを解析した流体シミュレーション結果から燃料デブリの大まかな分布を事前知識としてもっていると想定する。この事前知識を活用することで線源強度の候補群を絞り、不良設計問題を解決できるような仕組みを組み込む。

提案手法の流れを図 3.1.2-4 に示す。提案手法は最初の事前に決められた計測点での計測値 $\mathbf{m}$ を用いてデータベースのなかから候補群を絞る。この時点で残される候補群は数百パターン程度となる。次に、流体解析による事前知識と比較することで、さらに候補群を減らすことができる。この時点で候補を一つに絞ることができなかった場合には、検出器を搭載したアームを移動させ、新しい計測点での追加計測を行う。

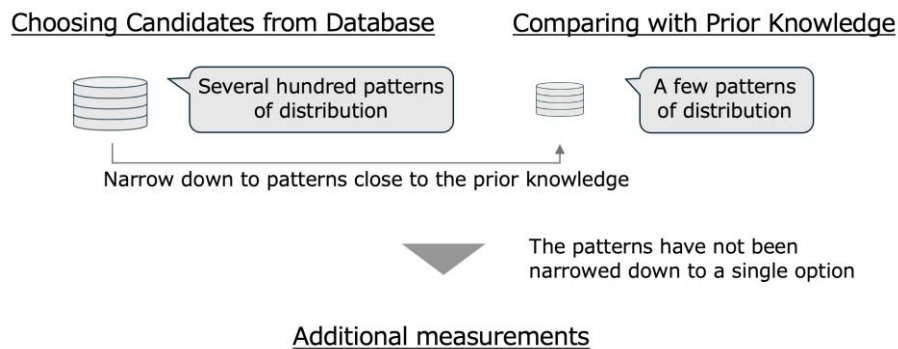


図 3.1.2-4 提案手法の流れ

最初の計測点で得られた計測値から線源強度パターンの候補群を絞る流れを図 3.1.2-5 に示す。実測値 $\mathbf{m}$ とデータベースにおける計測値 $\mathbf{m}_k$ を比較し、全計測値の差分が $\pm 10\%$ を超えたら候補群から除き、差分が $\pm 10\%$ 以内であれば候補群として残す。

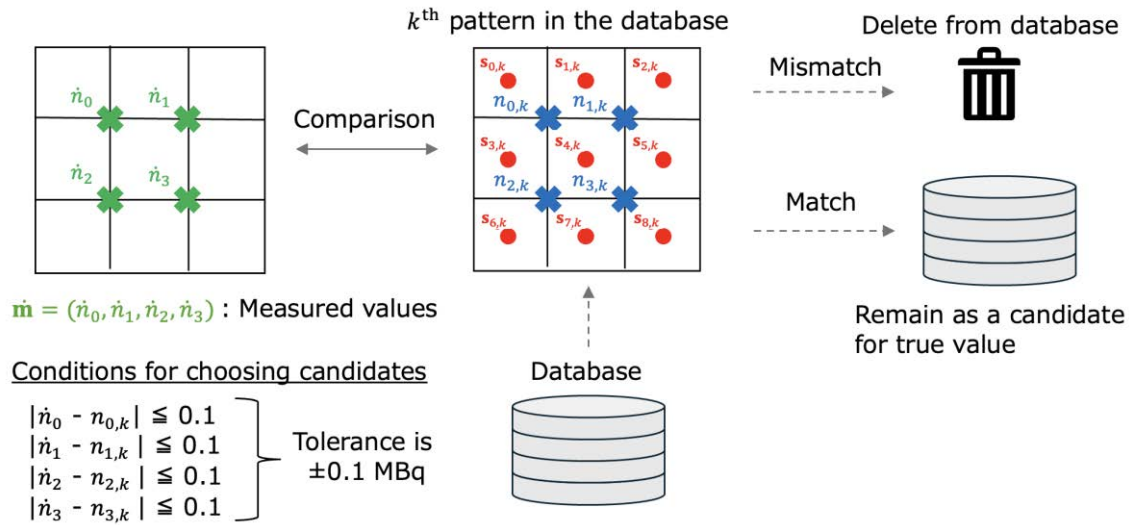


図 3. 1. 2-5 計測値に基づく線源強度パターン候補群の選定

次に、流体解析から得られた事前知識としての線源の予想分布と候補群を比較する。予想分布 $\hat{\mathbf{d}} = (\hat{s}_0, \dots, \hat{s}_j, \dots, \hat{s}_8)$ に対して候補分布 $\mathbf{d}_k$ の各線源の差分が ± 2 MBq 以内であれば候補群として残す。

事前知識と比較を行っても候補が一つに絞られなかった場合には追加計測を行う。追加計測の流れを図 3. 1. 2-6 に示す。×が最初の計測点を、+が追加計測点の候補群を表す。本研究では四つのアームを使うことを想定しているため、探索空間を破線で示すように四つに分割し、アームごとに追加計測点を定める。Section1 を例にして説明する。追加計測点の候補として、左上のグリッドの角の3箇所を検討する。線源強度パターンの候補群に対して追加計測を行った際に得られるガンマ線入射数を計算し、その分散を求める。3箇所の追加計測点の候補のなかで、この分散値が最も高い場所が分別力の高い場所と考えられるため、提案手法はこの分散値を追加計測点の決定指標として用いる。もし追加計測を行っても線源強度の候補が一つに絞られなかった場合には、同様の流れでさらに追加計測を行う。

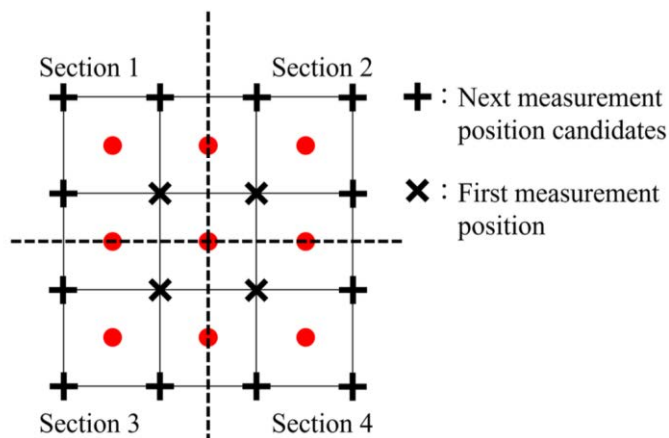


図 3. 1. 2-6 追加計測の流れ

提案手法の有効性を検証するために、シミュレーション実験を行った。図 3.1.2-7 にその結果を示す。図 3.1.2-7(a) が真値を示し、図 3.1.2-7(b) が提案手法による推定結果を示す。各グリッドの中央の数値が該当する線源の強度を表す。また、図 3.1.2-7(b) の×が最初の計測点を表し、+が追加計測点の候補群を表す。この結果から提案手法により精度よく放射線源の強度が推定できることを確認した。

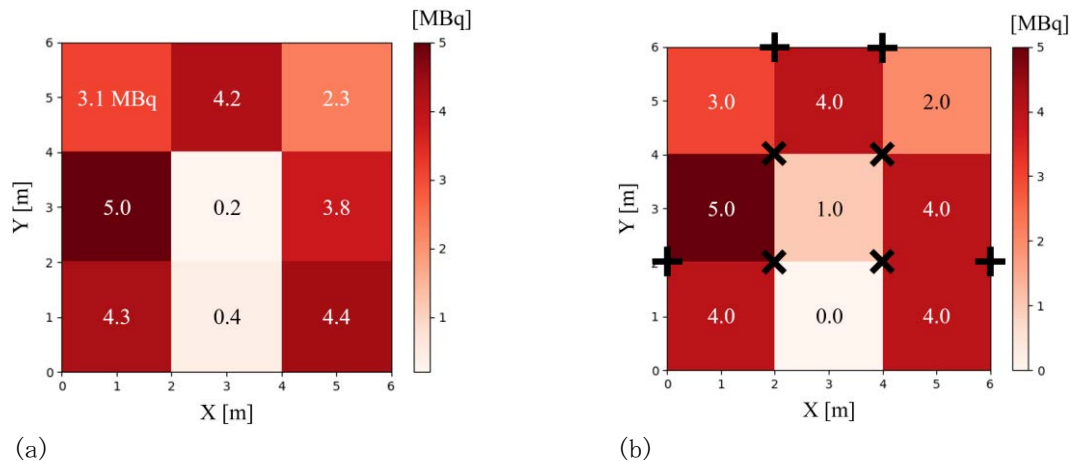


図 3.1.2-7 シミュレーション検証結果

提案手法の課題としては、流体解析による事前知識の精度に大きく依存することが挙げられる。そのため、最初の計測で得られた計測値が事前知識の予想分布と大きく異なる場合、どのように対応するかが今後の課題となる。これに関しては令和 6 年度以降に検討する。

3.1.3 原発建屋内構造物・線源の 3 次元体積モデルの生成手法の開発（再委託先：会津大学）

(1) 3 次元体積モデル生成用のローバー開発

本課題では、事故原発建屋内での放射性物質の飛散を想定して、その放射性物質（放射線源）の推定位置を表示した建屋内の 3 次元体積モデルを生成する手法を開発することを目指している。本課題では、3 次元体積モデルのベースとして 3D-LIDAR の点群データを使用した LIDAR-SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) ^[3.1.3-1]により生成する 3 次元点群地図を用いる。SLAM は、ローバー等の移動体 (Moving Vehicle) に搭載したセンサを使用して、ローバーの移動にともない取得した観測データより地図生成と自己位置推定を同時に行う技術である。3D-LIDAR を搭載したローバーを使用して、建屋内で移動しながらその観測データを得ることで、LIDAR-SLAM により建屋内の 3 次元点群地図とその移動経路の情報（ローバーの位置情報）を得ることができる。また、放射線測定器をローバーに搭載したロボットアームで把持して、測定器を 3 次元方向に移動させて測定を行うことで、ローバーの移動経路に沿った放射線強度の 3 次元分布も導出可能である。この放射線強度情報を 3 次元モデルに付与させることで、放射性物質の位置推定やその可視化を行い、3 次元体積モデルを構築する。また、調査する建屋内の構造や構造物の情報を詳細に表現するために、3 次元体積モデルは極力高解像度であり、観測した構造物の識別情報を反映させられることが望ましい。そこで本課題では、ローバーに深度カメラ (Depth カメラ) も搭載して、その深度データや画像データから得られる情報をデータフュージョンにより 3 次元点群地図に融合し、なるべく高密度な体積モデルの構築を目指す。また、使

用する画像データにアノテーションを行い、その結果を 3 次元モデルに付与する手法についても検討する。

以上の 3 次元体積モデル生成を実現するうえで、必須となるのが各種センサを搭載して事故建屋内を走行可能なローバーである。そこで、まず本課題を遂行するうえで必要となる試験用ローバーの設計・開発を行った。本課題遂行のために必要となるローバーの要件は以下である。

- ① 瓦礫等の障害物の散乱が予測される不整地床面を走破可能である
- ② 3 次元モデル生成に必要な 3 次元 LIDAR 及び Depth カメラを搭載可能である
- ③ 3 次元的な放射線強度測定のために放射線測定器を把持可能なロボットアームを有する

ここで、上記条件を満たすよう株式会社 F-Design と令和 6 年度に設計開発したローバーの写真を図 3.1.3-1 に示す。

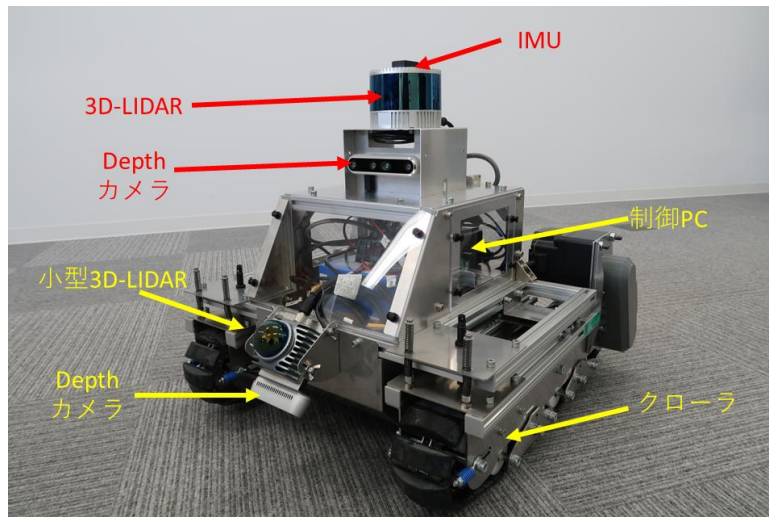


図 3.1.3-1 3 次元体積モデル生成研究用ローバー（クローラロボット）

図 3.1.3-1 に示すように、ローバーのベースには不整地床面を走破できるようクローラロボットを選んだ。このローバーで巨大な構造物を乗り越えることは困難であるが、高さ十数 cm 程度の障害物は十分に乗り越えられる。ローバーの上部には、LIDAR-SLAM データ取得用の 360 度 3D-LIDAR (LS-LIDAR-C32) と IMU (Microstrain-3DM-GX5-AHRS)、フュージョンデータ取得用の Depth カメラ (Intel Realsense D455) を搭載している。一方、ローバー上部の LIDAR とカメラのみでは、多数の障害物の散乱が予測される床面を十分な解像度でモニタできない恐れがある。そこで、今回のローバーでは図 3.1.3-1 に示すように、ローバーの進行方向の地面をより詳細にモニタするため、足元付近に小型の 360 度 3D-LIDAR (Livox Mid-360) と Depth カメラ (Intel Realsense D435i) を搭載した。上述したローバーの③要件のロボットアームについては、令和 6 年度は要求のみを定めて、詳細な設計、開発は令和 7 年度に行うことにしている。なお、本課題で開発するローバー（図 3.1.3-1）は、あくまでも想定環境下で 3 次元体積モデル生成アルゴリズムを研究する試験用データを取得するために作製したものであり、実際の建屋内で使用する機体ではないので、センサ系含めて、耐放射線機能はもたせていない。

次に、開発したローバーの走行性能とセンサのデータ取得機能を確認するため、福島ロボットテストフィールドの屋内試験場にステップフィールドの試験環境を構築した（図 3.1.3-2）。図 3.1.3-2 に示すよう、開発したローバーを三角の凹凸面上（ステップフィールド）で走行させ、走行中に問題なく搭載センサのデータが取得可能かを確認した。ここで、搭載した 2 台の 3D-LIDAR と 2 台の Depth カメラ及び IMU は、ROS2（Humble）を導入した制御 PC（図 3.1.3-1）で全て制御できるようにしており、ROS2 形式でセンサデータを取得可能である。

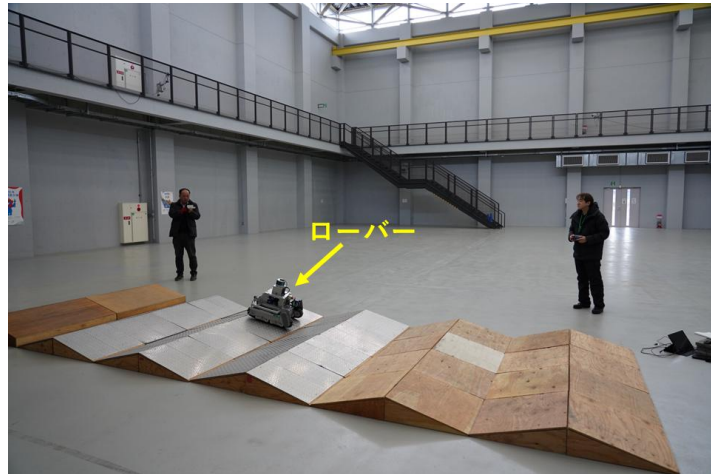


図 3.1.3-2 ステップフィールドでのローバー試験の様子

この試験から、まず、開発したローバーはステップフィールドの凹凸面を支障なく走行することを確認することができた。そして、走行中に取得した上部 LIDAR（LS-LIDAR-C32）データと IMU データを使用して、LIDAR-SLAM により 3 次元点群地図の生成を試みた。図 3.1.3-3 は IMU と LIDAR 点群をカップリングさせて高精度な自己位置推定と地図生成を行う LIDAR-SLAM アルゴリズムの一つである LIO-SAM^[3.1.3-2]を使用して生成した 3 次元点群地図を示している。図 3.1.3-3 では、ローバーを走行させたステップフィールドの形状が点群で比較的良好に復元されていることがわかる。また、図 3.1.3-3 の水色の線が SLAM の自己位置推定により導出したローバーの移動経路を示しており、所々にデータの飛びはあるものの、ステップフィールドに沿った経路を求めていることができています。

図 3.1.3-4 は、ローバーの上部に取り付けた 3D-LIDAR（LS-LIDAR-C32）と下部に取り付けた小型 3D-LIDAR（Mid-360）（図 3.1.3-1）それぞれで、同じローバー位置において取得した 1 ショットのスキャンデータを示している。図 3.1.3-4 はステップフィールドを正面から LIDAR で観測したデータであり、上部と下部で明らかにスキャン範囲が異なることと、下部に取り付けた 3D-LIDAR で床面から足元付近がより明瞭に観測できていることが示される。また、ローバーに取り付けた 2 台の Depth カメラ（図 3.1.3-1）で、ローバーの走行中に問題なく画像データとデプス情報に基づく 3 次元点群データを取得可能な事も確認した。

以上より、令和 6 年度に設計・開発したローバーは不整地面を問題なく走行でき、搭載した全センサで走行中に有効な観測データを取得可能なことを確認できた。また、搭載 3D-LIDAR と IMU データを使用して、LIDAR-SLAM により環境認識可能な 3 次元点群地図生成と自己位置推定を実行可能なことも示せた（図 3.1.3-3）。この 3 次元点群地図が、今後、生成を目指す 3 次元体積モデルのベースとなる。

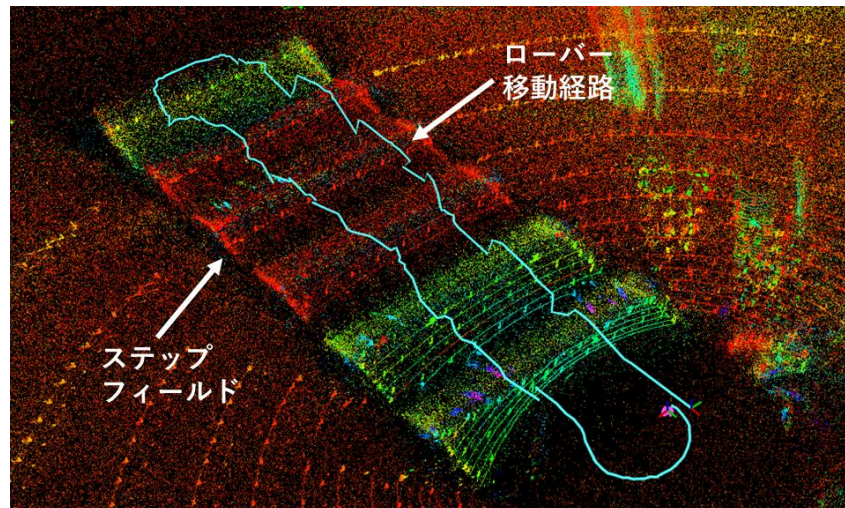


図 3.1.3-3 LIDAR-SLAM による 3 次元点群地図とローバーの移動経路

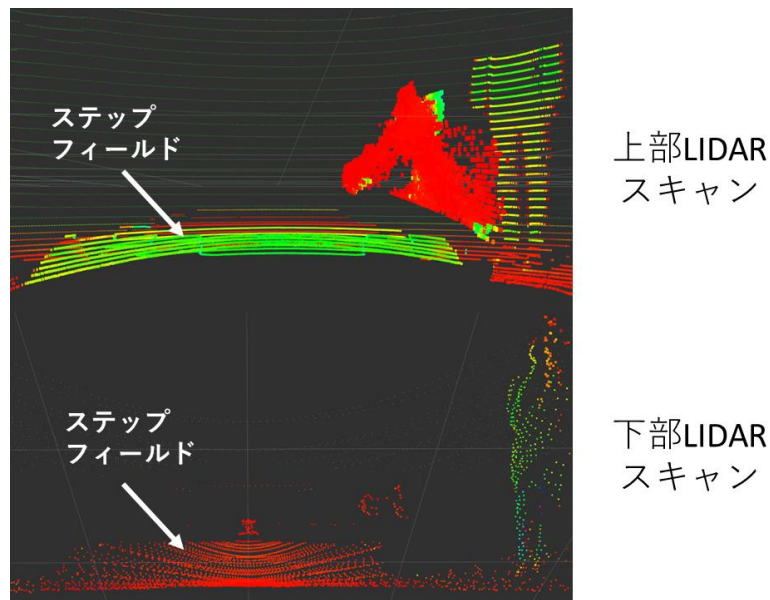


図 3.1.3-4 ローバー上部 LIDAR と下部 LIDAR のスキャンデータの比較

(2) LIDAR+カメラのデータフュージョンによる 3 次元モデル生成

図 3.1.3-3 に示すように、LIDAR-SLAM で構築した 3 次元点群地図に Depth カメラの観測データを組み合わせて、高密度かつ色情報を有した 3 次元モデルを構築する手法について研究した。特に、令和 6 年度は Depth カメラで取得する 3 次元色付き点群を LIDAR の点群地図に合成する手法を検討した。この LIDAR+カメラのデータフュージョンを行うには、LIDAR とカメラデータの各座標系を合わせる必要がある。ここで、LIDAR とカメラの座標系は、式(3.1.3-1)で関係づけられる。

$$L = R \cdot C + t \quad \text{式(3.1.3-1)}$$

ここで、 L : LIDAR 観測点の 3 次元座標、 C : カメラ観測点の 3 次元座標、 R : 回転行列、 t : 変位ベクトルである。上式より、データフュージョンのためには、 R と t を知る必要があり、

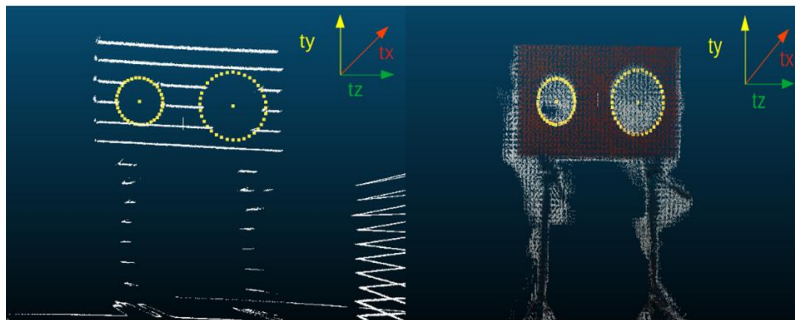
このパラメータ推定のために、まず LIDAR-カメラキャリブレーションを実行した。LIDAR-カメラキャリブレーションは LIDAR 点群とカメラ画像（3D-2D）の合成のために、二つのセンサで同時に同じ物体（チェッカーボード等）を観測し、その物体同士を 2 次元上で合わせこむよう R と t を推定する手法が従来より使われている^[3.1.3-3]。一方、LIDAR 点群とカメラ点群（3D-3D）の合成のためのキャリブレーションはこれまでほとんど行われてきていない。そこで本課題では、Yamada and Yaguchi (2024)^[3.1.3-4]の LIDAR 点群とカメラ画像のキャリブレーション法を参照し、図 3.1.3-5 に示すターゲットを用いて 3D-3D のキャリブレーションとデータフュージョンを実行した。なお、本データフュージョンの研究は、図 3.1.3-1 のローバーは設計・作製中であったので、別のクローラロボットと搭載センサを使用して推進している。



図 3.1.3-5 LIDAR-カメラキャリブレーション用ターゲット

図 3.1.3-5 のターゲットでは赤色のボードに二つの円の穴が開けられている。このターゲットを LIDAR とカメラの両方で同時観測して、各データの 3 次元点群上で円検出を行い、LIDAR とカメラの両者の点群上の二つの円同士を合わせるよう、 R と t を推定する。なお、本課題では、簡単のため、回転行列はローバー上の LIDAR とカメラの幾何学的位置から決定し、 t のみをキャリブレーションから導出するようにした。

ここで、Yamada and Yaguchi (2024) では、複数枚のボードを広範囲に配置してキャリブレーションに使用することで、LIDAR 点群-カメラ画像のデータフュージョンの精度が向上することを示した。一方、本課題における調査で図 3.1.3-5 のボードを広範囲に配置した際、カメラ点群は遠距離になるほど観測した物体の歪みが大きくなり、逆にデータフュージョンの精度が低下することがわかった^[3.1.3-5]。そこで、本課題ではローバーから約 1.5 m 離れた 1 枚のボードのみを使用して、キャリブレーションとデータフュージョンを実行することにした。図 3.1.3-6 が LIDAR とカメラでそれぞれ観測した図 3.1.3-5 のターゲットの 3 次元点群データを示しており、Point Cloud Library (PCL)^[3.1.3-6]の関数を使用して、それぞれ円検出(図 3.1.3-6 黄点)を行っている。なお、この実験では、3D-LIDAR は Velodyne VLP-16 (360 度 3D-LIDAR)、Depth カメラは Intel Realsense D435i を使用した。図 3.1.3-6 より、Depth カメラの点群の方で、色付きのより高密度な点群データが取得できていることがわかる。

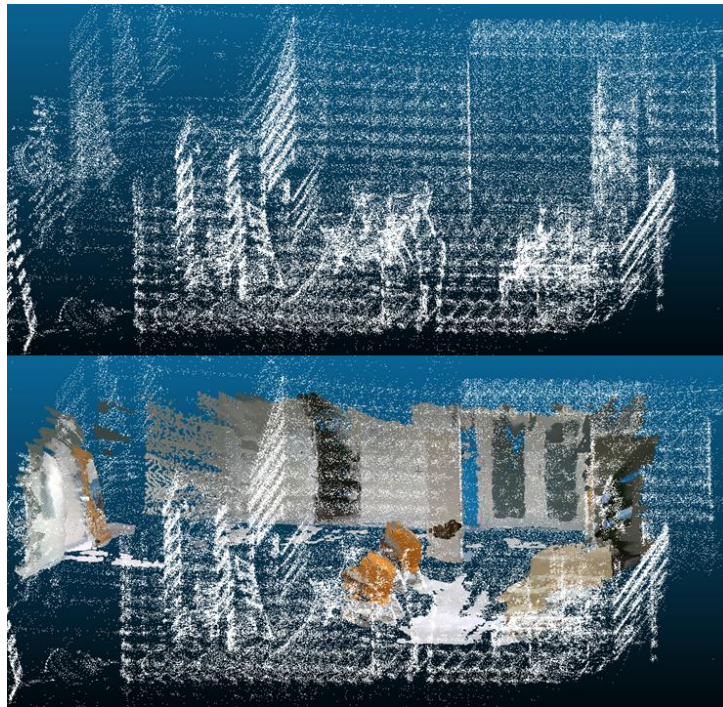


3D-LIDAR点群

Depthカメラ点群

図 3.1.3-6 3D-LIDAR と Depth カメラで観測したキャリブレーション用ターゲット
(図 3.1.3-5) の 3 次元点群

上述したキャリブレーション法で、 t を推定した後、同じローバーを使用して、LIDAR-SLAM による 3 次元点群地図生成と同時に取得したカメラ点群とのデータフュージョンを実行した。本試験は福島ロボットテストフィールドの研究棟 2F ロビーで実施している。図 3.1.3-7 に試験場所における LIO-SAM で生成した LIDAR の 3 次元点群地図（上図）とカメラ点群をフュージョンさせた 3 次元点群地図（下図）を示す。ここで、フュージョン地図はカメラの各ショットで得られた 3 次元点群を先に推定した R と t を用いて式(3.1.3-1)で座標変換したのち、SLAM で推定したローバーの移動経路に対応させて、各カメラ点群を移動させることで生成している。図 3.1.3-7 より LIDAR の 3 次元点群地図では、広範囲の部屋の形状を正確に復元できているが、構造物の詳細な構造や状態までは認識できない。一方、Depth カメラの点群を合成した 3 次元点群地図では、LIDAR の正確な地図にカメラデータから得られる高密度の色付き点群を張り合わせることで、構造物の状態や状況、例えば看板に貼ってあるポスターや壁の扉などをより正確に把握することができるようになっている。このように、本課題を通して、3 次元体積モデルのベースとなるデータフュージョン地図を構築する手法を確立することができた。



LIDAR
3次元
点群地図

LIDAR
+カメラ
3次元
点群地図

図 3. 1. 3-7 LIDAR3 次元点群地図（上図）と LIDAR+Depth カメラ 3 次元点群地図

一方、図 3. 1. 3-7 のデータフュージョン地図では、カメラ点群が合成されている領域は地図全体に対して明らかに狭い。これは、カメラの視野が狭く、かつ深度データを比較的正確に得られる距離が短いため（4～5 m 程度）、フュージョンに使用可能なデータが限られることによる。また、カメラ点群には近距離であっても歪みやノイズが多く含まれている問題がある。この対応策として、ローバーに複数台のカメラを搭載して視野をカバーすることや正確な LIDAR 点群をリファレンスとした歪補正やノイズ処理の方法を考案することが今後の検討課題となる。また、前項で記載したように本課題で開発したローバー（図 3. 1. 3-1）には、2 台の 3D-LIDAR を搭載している。図 3. 1. 3-4 に示すように 2 台の LIDAR はスキャン範囲が異なるので、二つの LIDAR 点群を組み合わせ高解像度化を図ることや画像アノテーション情報の 3 次元モデルへの付与も令和 7 年度以降の課題となり得る。

3. 1. 4 まとめ

過酷環境での放射線計測・センサ技術では、高ガンマ線線量下動作中性子ガンマ線分析モジュールの研究開発において、高い放射線耐性が見込める半導体ベースの中性子検出器の構造最適化、基礎性能評価、適用可能性について検討した。具体的には、SiC 半導体検出器の構造最適化、基礎性能、適用可能性を検討した。また、候補となりうる検出器について適用可能性を比較検討した。また、不確実性のある環境下における線源分布推定のための計測点決定手法の構築では、環境中に放射線源を分布させ、任意の計測点における放射線入射イベントをシミュレーションするプログラムを構築した。具体的には、線源分布及び強度、検出器の位置を任意に設定した際に、放射線の入射イベントを適切に生成できるシミュレータを構築した。Geant4 を用いて線源と検出器間の距離に応じたガンマ線の入射数の誤差を評価し、自作シミュレータにその誤差率を反映することで入射イベントを再現した。そして、原発建屋内構造物・線源の 3 次元体積モデルの生成手法の開発では、3 次元体積モデル生成のためのデータ取得に使用するローバーの台車部分の設計・開発を行うとともに、放射線源位置推定に使用する搭載センサ

の選定・調達を行った。また、使用環境を想定しての可視カメラと 3D-LIDAR＋カメラのデータフュージョンによる色付き点群地図を生成し、課題を分析した。具体的には、ローバーについては不整地走行可能なクローラロボットを設計・開発し、3次元体積モデル生成に必要なセンサである 3D-LIDAR と Depth カメラを 2 台ずつ搭載した。そして、ローバーの不整地模擬環境での走破性とセンサデータ取得を確認できた。また、データフュージョンについては 3D-LIDAR 点群と可視光カメラ点群を用いた合成地図を生成し、フュージョン手法と生成地図に対する課題について抽出することができた。

3.2 取り出し工法に調和した遠隔ロボット技術

3.2.1 遠隔操作のための情報提示技術の開発

(1) 情報提示に向けた基礎的評価の実施

情報提示に向けた基礎的評価の一環としてレール搭載型観測ロボットによる遠隔操作支援のための自動視点選択のシミュレーション及び実機環境の構築を進めた。本研究では、遠隔操作者にとって作業対象やロボットの操作状況を適切に視認できる視点の確保を最終目的とし、ロボットの動作による動的な自己遮蔽を克服するために、レール搭載型観測ロボットを用い、ロボットの動作に応じて最適な視点を自動的に提供する手法を提案する。以前のプロジェクトで最適な視点の選択方法の確立まで進んだが、本研究の成果として、実際の観測ロボットをレールに搭載し、選択された視点に実際に移動できるようになった。

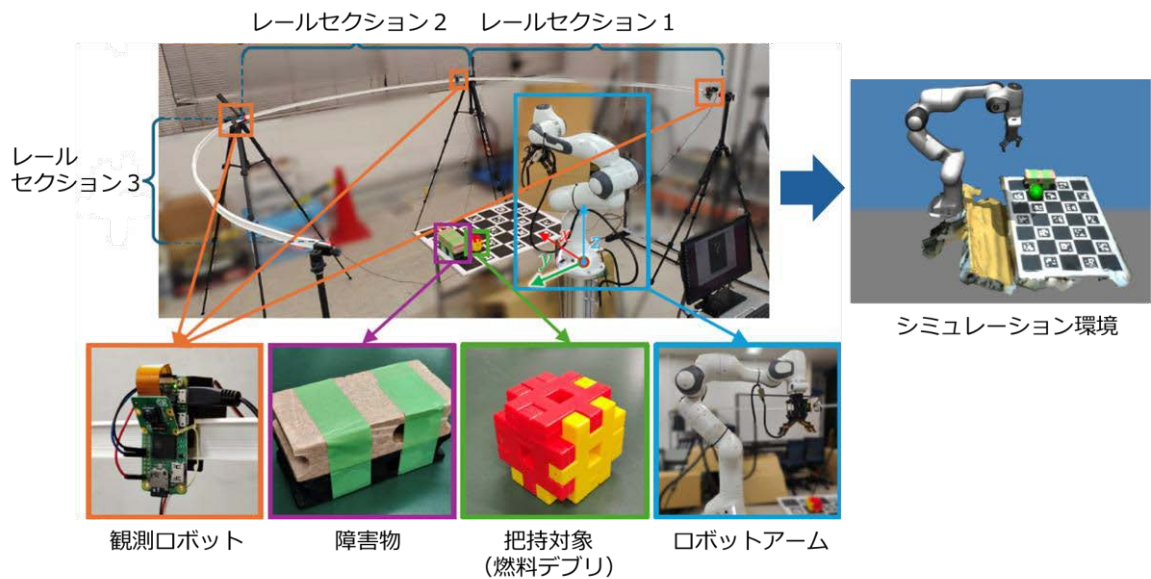


図 3.2.1-1 自動視点選択のシミュレーション及び実機環境の構成

図 3.2.1-1 に示したレール上を移動可能な観測ロボットを用いて最適視点を提供する。さらに、最適視点（すなわち最適な観測ロボットの位置）を見付けるためのシミュレーションの開発を進めた。シミュレーション環境は実機環境を模しており、異なる視点からみたロボット及び把持対象の燃料デブリの画像をレンダリングすることができる。異なる視点での対象の見易さを評価することで、最適な視点を自動的に選択することができる。把持対象の見易さは、レンダリングした画像のなかに把持対象が占めるピクセル数となる。シミュレーション環境の構築及び自動視点選択のフローを以下に説明する。

- ① レール上にある観測ロボットを動かして、異なる位置から燃料デブリを含んだロボットの作業現場を撮影する。
- ② Structure From Motion (SFM) を用いて作業現場の 3 次元モデルを作成し、シミュレーション環境に設置する。
- ③ 一定数の観測ロボットの観測位置候補を決める。

- ④ 作業用のロボットアームを実機環境の定められた場所に設置し、ロボットアームの3次元モデルをシミュレーション環境に設置する。実機のロボットアームの姿勢データを一定時間間隔でシミュレーション環境に送信することで、実機環境及びシミュレーション環境におけるロボットアームの姿勢を一致させることができる。
- ⑤ ロボットアームが作業する際に各候補の観測位置からの観測画像をレンダリングし、把持対象の見易さを評価する。
- ⑥ 最適な視点を選び、観測ロボットをその観測位置に動かす。

作業ロボットアームが移動している際の最適視点選択の結果を図 3. 2. 1-2 に示す。

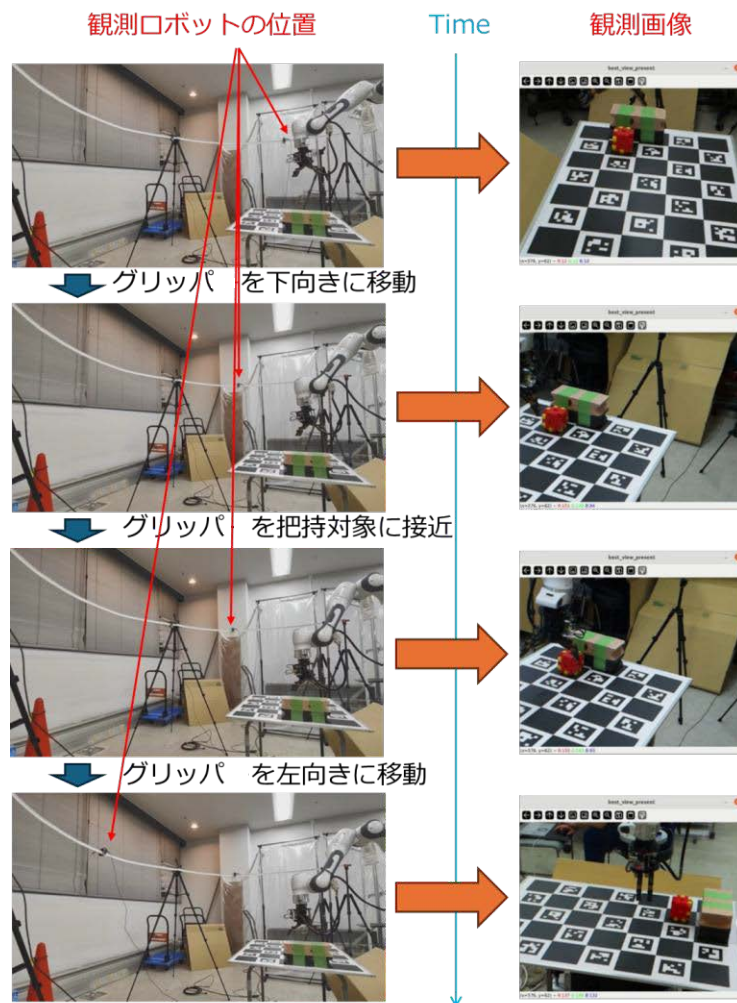


図 3. 2. 1-2 作業ロボットアームが移動している際の最適視点選択の結果

(2) 遠隔操作補助に適するセンサ構成の検討

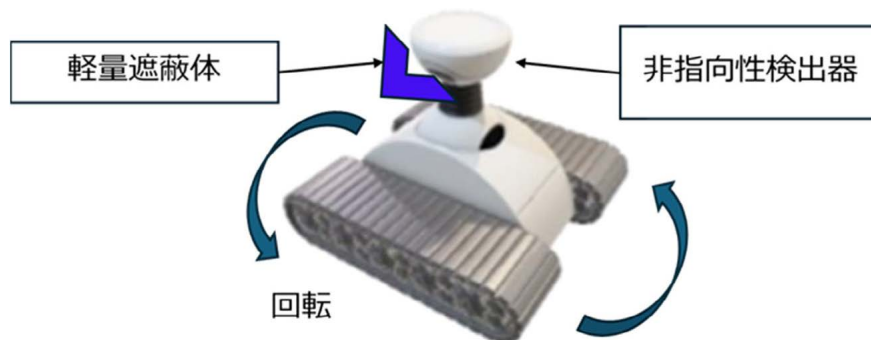
遠隔操作補助に適するセンサ構成として、指向性検出器が使えない高線量環境において非指向性検出器を用いた放射線分布推定を実現するため、軽量遮蔽体と非指向性の放射線検出器の組み合わせを検討した。本研究では、軽量遮蔽体による減衰を活用し、非指向性検出器を用いた高線量環境下での放射線分布の高精度推定手法を提案する。提案するセンサの構成の概念図を図 3. 2. 1-3 に示す。

本研究では、2 種類の構成を検討した。

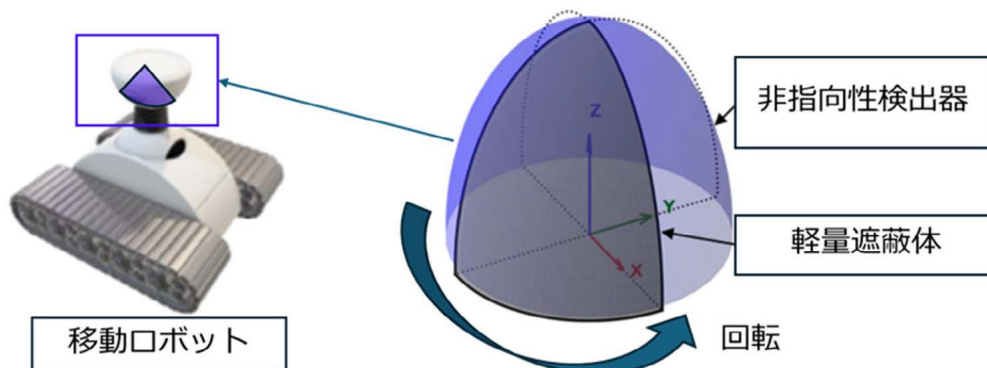
図 3. 2. 1-3(a)：ロボットの回転中心に非指向性検出器、前方に遮蔽を搭載する。遮蔽が存在する方向から入射する放射線量が低下するため、ロボットがその場で回転したとき、遮蔽がロボットと放射線源の間に存在する場合のみ測定される放射線量は低下する。低下した方向に放射線源が存在すると推定できる。

図 3. 2. 1-3(b)：非指向性検出器の周囲に軽量遮蔽体を配置する。軽量遮蔽体は、非指向性検出器を覆う球殻の 8 分の 1 の形状をしている。なお、本図では構造をわかりやすく示すために、非指向性検出器の上半分のみを描画している。この遮蔽体を回転させることで特定方向から入射する放射線を減衰させ、非指向性検出器に指向性情報を付加する。

さらに、図 3. 2. 1-4 に示すロボットを用いた実機実験を構築し、提案したセンサ構成の放射線検出における有効性の検証を進めた。



(a) ロボットの回転中心に非指向性検出器を設置、さらに検出器の前に遮蔽体を取り付ける。



(b) 球殻の 8 分の 1 の形状となる遮蔽体を非指向性検出器で覆い、さらに遮蔽体を検出器の中心軸に回転できるように機構を設ける。

図 3. 2. 1-3 センサの構成の概念図

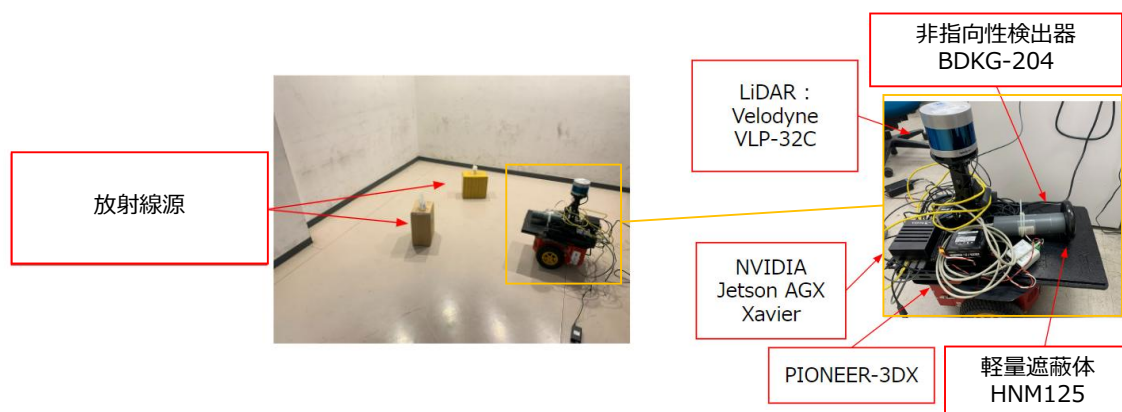


図 3.2.1-4 実機実験の構成

(3) 画像処理と情報提示のための計算機システムの検討

画像処理や情報提示のための計算機システムとして株式会社ジーデップ・アドバンス社の深層学習ワークステーション（DeepLearningSTATION II AP）を購入し、燃料デブリ取り出しに向けた廃炉ロボットの遠隔操作技術と燃料デブリ計測解析技術を統合したシステムの環境構築を進めた。また、Lenovo 社の ThinkPad X1 2-in-1 Gen 9 を購入し、廃炉ロボットの遠隔操作のための映像提示システムの環境構築を進めた。

3.2.2 モジュール分割型軌道構造体を用いた運搬技術の開発

(1) 緒論

1F では、平成 23 年 3 月に発生した事故以降廃炉に向けたさまざまな作業が進行している。そのなかの一つが燃料デブリ取り出し作業である。燃料デブリは高い放射能を有しているうえ、RPV 底部やペDESTAL 内部などのアクセスしづらい環境下に残留しており、人間が直接立ち入って取り出すことができない。そのため、遠隔操作ロボットを用いた取り出し作業が期待されている。

遠隔操作ロボットを用いた燃料デブリの取り出しには、デブリの取り出し・運搬過程における安全性の評価が必要である。そのため、本格的にデブリを取り出す前に少量のデブリ試料を採取しその性状や分布を解析する必要がある。

原子炉内に導入される、デブリの試料採取が可能な遠隔操作ロボットの先行研究として、Yokomura ら^[3.2.2-1]は、原子炉格納容器（PCV）内部の観察を目的としたモジュール分割型軌道構造体「Rail DRAGON」を提案している。図 3.2.2-1 に示すように、Rail DRAGON はモジュール分割された屈曲可能な軌道と観察ロボットで構成され、根元でモジュールを連結し、押し出すことで原子炉内へ導入される。そして、導入された軌道上を観察ロボットが移動し、廃炉作業環境の観察を行う。このロボットに取り付けられたカメラをデブリ採取用グリッパに交換することで、デブリの試料採取も可能となるよう設計されている。

一方、デブリの試料採取を行ううえでの Rail DRAGON の課題として、「作業効率」、「昇降機構」そして、「空間的隔離」の 3 点が挙げられる。まず、作業効率について Rail DRAGON は、断面が $\phi 500$ mm の貫通孔を通過することを想定していたため、原子炉内に導入される部分は 1 本の軌道構造に限られる。よって、その軌道上を動くロボットが同時に任意の複数箇所デブリを採取することは難しい。次に、昇降機構について図 3.2.2-1 に示すように、貫通孔の原子炉側の端部とデブリの残留箇所には高低差が存在する。これにより採取

本研究の目的は、燃料デブリの採取を目的とした新たな軌道構造体 Rail Spider に適したロボットシステムの構成を明らかにし各要素の要求機能を定義すること、またそれらの要素を遠隔操作するための GUI の構成を提示し、それらの GUI が令和 6 年度開発した Rail DRAGON 用の GUI の拡張であることを示すことである。



(2) 吊下式多腕型軌道構造体の構成と要求機能

本研究では、3号機のRPV内部に残留する燃料デブリの試料採取を対象とする。RPV内部には、汽水分離機や燃料棒といった構造物の残骸が存在すると考えられる。そのため実際には、RPV内部の構造物を切断・除去する装置とRail Spiderを交互に導入し、それぞれの作業を順次実施することを想定する。

Rail Spiderは図3.2.2-2に示す9つの要素で構成される。(A)アーム基礎部、(B)軌道アーム部、軌道アーム部の上を移動する(C)共通移動ユニット、(D)採取ロボット、(E)運搬ロボット、(F)観察ロボット、そして、遠隔操作GUIにおける(G)操作入力部、(H)ロボット状態表示部、(I)観察データ表示部の9つである。以下に各要素の要求機能を定義する。

① Rail Spiderの全体システムの要求機能

Rail Spiderは、廃炉現場の高放射線環境下で動作するロボットであり全体として二つの要求機能を有する。

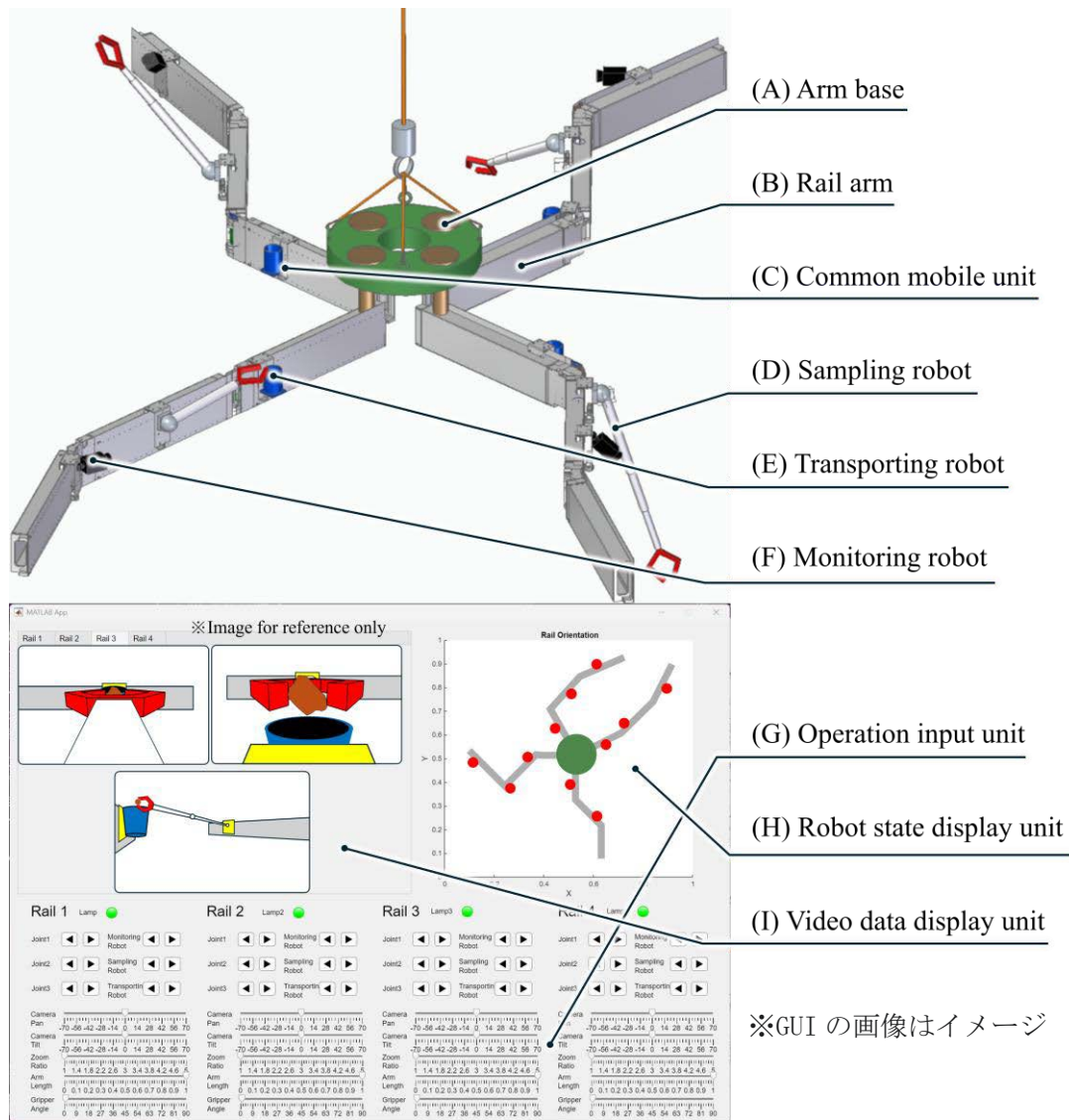


図3.2.2-2 Rail Spiderの構成要素(上)と令和6年度に開発したRail DRAGON用のGUIを拡張したRail Spider用の遠隔操作GUI(下)

(RS-1) 耐放射線

3号機のRPV内部は100 Sv/hの高放射線下にある。デブリの採取作業は10分に1回の頻度で実施し、デブリを格納するキャスクには3、4回分の局所的な範囲から採取したデブリ試料を格納するものとする。したがって、デブリがたまったキャスクを原子炉外に搬出する作業を30分に1回の頻度で行うことになる。さらに、一度Rail Spiderを導入すればキャスクの搬出を2回分実行可能であるものと想定し、ロボット全体がRPV内で100 Sv/hの放射線に1時間故障せず動作可能であることが求められる。

(RS-2) 遠隔操作

原子炉外の放射線量は原子炉内と比較すると小さいが、それでも建屋内はmSv/hオーダーの線量である。そのため、年間の被ばく線量限度が定められている作業員は、建屋内で長時間Rail Spiderを操作し続けることはできない。そこで、Rail Spiderのオペフロへの設置及び撤去は人の手で行うが、RPV内部への導入、デブリの試料採取及び運搬は全て建屋の外にいる操作者が遠隔操作で行うことを想定する。

② アーム基礎部(A)の要求機能

アーム基礎部はオペフロから吊り下げられたワイヤと接続し、Rail Spiderの重量を支持する構造物である。アーム基礎部の要求機能は二つある。

(RF-A-1) 水平支持

前述したようにRail SpiderはRPV構造物を切断・除去する装置と交互に導入し、順次作業を実施する。具体的には1 m分の範囲内のデブリサンプルを採取した後、Rail Spiderでその1 mの高さ分の構造物を除去する。ここで、Rail Spiderが傾くと特定の方向では採取ロボットのロボットアームが真下まで届かず、デブリを採取できない可能性がある。したがって、静止時に軌道アームを、水平に支持する必要がある。

(RF-A-2) 姿勢制御

軌道アームの姿勢が変化すると、Rail Spiderの重心が中心から移動することでRail Spiderが傾く可能性がある。また、ロープまわりにモーメントがはたらくことでロープがねじれ、Rail Spiderが回転する恐れもある。したがってアーム基礎部でこれらの傾倒や回転を抑制することが求められる。

③ 軌道アーム部(B)の要求機能

軌道アームは、アーム基礎部に対して90°間隔で接続された、1本あたりの長さ2.7 mの屈曲可能な4本のアームである。4本とする理由は、各アームがRPVの四分位全体にアクセスできるようにし、RPV内部の全ての燃料デブリを採取可能にするためである。軌道アームの要求機能は二つある。

(RF-B-1) ユニット移動

前述の環境構造化の考え方にに基づき、共通移動ユニットは軌道アーム上を前進・後退のみで移動し、その移動経路は軌道アームの位置と姿勢によって決まる。そのため、共通移動ユニットが軌道アームに沿って円滑に移動可能であることが求められる。

(RF-B-2) 軌道格納

RPV 上部の気水分離機は放射線強度が高く、完全な除去が困難である、このため中心部の $\phi 2.5$ m 分のみを除去し、周囲の構造物は残留することを想定する。したがって、導入時に残留構造物を回避できるように、軌道アームは折りたたみ直径 2 m の範囲内に格納可能であることが求められる。

④ 共通移動ユニット(C)の要求機能

共通移動ユニットは観察ロボット、採取ロボット、運搬ロボットに共通する移動用足場であり、三つの要求機能がある。

(RF-C-1) 両側面移動

Rail Spider では複数のロボットが同一の軌道アーム上で移動経路を共有するため、あるロボットの移動をほかのロボットが阻害する可能性がある。この問題を解決するために、図 3.2.2-3 に示すように軌道アームの両側面をユニットが移動可能とし、一つの軌道の上に二重の移動経路を設ける。これにより、作業中のロボットを片側面、ほかのロボットをもう片側面に分離させることで、移動の阻害を防ぐことができる。したがって、共通移動ユニットは軌道アームの長手方向に両側面・先端・後端を移動でき、かつ異なる側面を移動するロボット同士がすれ違うことが可能でなければならない。

(RF-C-2) 共通取付

軌道アーム上を動くロボットには多様な作業が期待される一方で、作業内容に応じて共通移動ユニットの構造をその都度変更すると、設計者及びロボットを投入する作業者の負担増大を招く恐れがある。このような負担増大を避けるために、どのロボットの作業部でも共通して同一のユニットに取り付け可能であることが求められる。

(RF-C-3) 逐次投入

前述の冗長化の考え方にに基づき、ロボットが故障した場合に故障したユニットを排除し、新たなユニットを逐次投入することで作業を継続させる。そのため、Rail Spider が RPV 内に導入された状態のまま、故障したユニットを軌道アームから排除しオペフロから新たなユニットを投入できる仕組みが求められる。

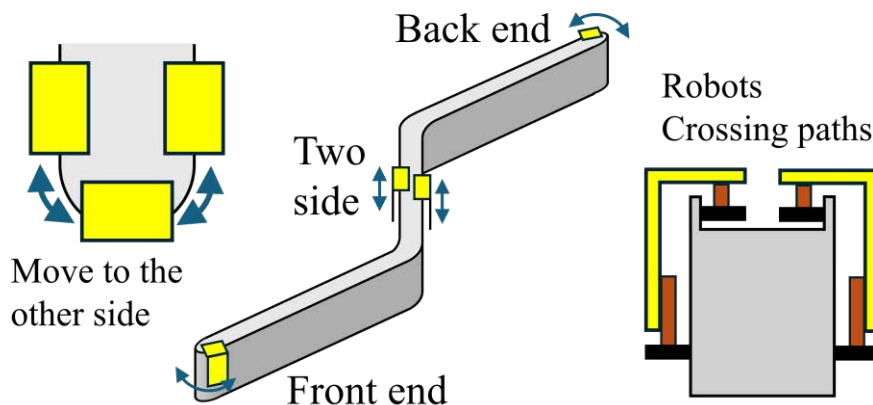


図 3.2.2-3 軌道アーム上における共通移動ユニットの移動経路

⑤ 採取ロボット(D)の要求機能

採取ロボットは、デブリを採取するためのロボットアームを共通移動ユニットに取り付けたロボットである。要求機能として三つ挙げられる。

(RF-D-1) アーム伸長

(RF-A-1) で述べたように、Rail Spider は RPV の内部構造物が除去された後、除去範囲内の 1 m のデブリを順次採取する。したがって、Rail Spider では最短でも軌道アームから 1 m 真下のデブリにロボットアームを伸ばしてアクセスできる必要がある。

(RF-D-2) デブリ把持

東京電力が令和 6 年 10 月に試験的に取り出したデブリは約 0.7 g であったが、この量でも成分及び線量の解析が行えている。これを踏まえ本研究では、1 回の採取における最大採取量を 5 g 程度と想定する。採取ロボットはロボットアーム手先のグリッパ等でこの 5 g のデブリを把持できなければならない。

(RF-D-3) 手先注視

デブリを把持するには、遠隔操作者がグリッパとデブリの距離や位置関係を正確に把握することが不可欠である。そのため、図 3.2.2-4 に示すように採取ロボットにカメラを取り付け、グリッパを注視する一人称視点の映像を取得し、遠隔操作者に提示する。

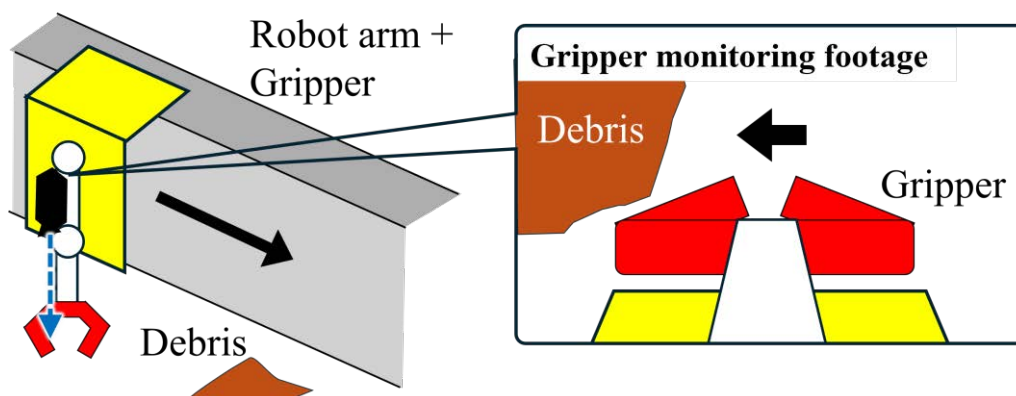


図 3.2.2-4 採取ロボットのアーム手先注視画面

⑥ 運搬ロボット(E)の要求機能

運搬ロボットは、デブリを格納するためのキャスクを共通移動ユニットに取り付けたロボットである。要求機能は二つある。

(RF-E-1) キャスク着脱

デブリ採取で必要なのはデブリ試料を格納したキャスクであり、共通移動ユニット自体を原子炉から取り出す必要はない。そこで、軌道アーム上でキャスクとユニットを分離してキャスクのみを回収し、その後新しいキャスクを RPV 内部に下ろしてユニットに取り付けることを想定する。したがって、遠隔操作によってキャスクの分離・装着を行う必要がある。

(RF-E-2) 開口部注視

キャスクにデブリを格納するには、遠隔操作者がグリッパとキャスクの位置関係を正確に把握する必要がある。また、キャスクを引き上げて回収する際はロープの位置に、運搬ロボットを正確に位置決めしなければならない。そこで、図 3.2.2-5 のようにキャスク開口部を注視する一人称視点の映像を取得し、遠隔操作者に提示する。

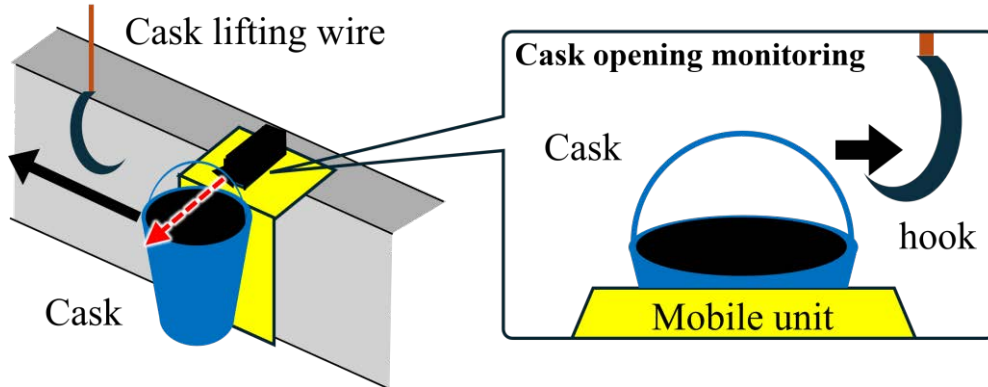


図 3.2.2-5 運搬ロボットのキャスク開口部注視画面

⑦ 観察ロボット(F)の要求機能

観察ロボットは、作業環境を俯瞰した三人称視点の映像を取得するカメラを共通移動ユニットに取り付けたロボットであり、二つの要求機能がある。

(RF-F-1) カメラ首振

作業環境の観察は、作業を行っている軌道アームに隣接する別の軌道アーム上の観察ロボットによって行われる。このとき、観察ロボットが移動する軌道アームの位置や姿勢によっては、ロボットの移動にともない観察対象が画面内から外れてしまう可能性がある。したがって、パン角度を変更できる必要がある。また、デブリ採取作業ではアームが真下に伸び、デブリ運搬作業ではキャスクが真上に引き上げられる。これらの作業を観察するため、チルト角度も変更できる必要がある。

(RF-F-2) カメラズーム

(RF-D-2) で述べたようにデブリは1試行で最大5 g程度をアームで採取し、キャスクに格納する。そのためロボットが実際に取り扱うデブリはごく微量である。そのような微量のデブリを隣接する軌道アームから観察する場合、その小ささから画面内での視認性が低下する可能性がある。そこで、カメラが5倍までズーム可能であることを要求機能とする。

⑧ 操作入力部(G)の要求機能

操作入力部はRail Spiderの遠隔操作に必要な入力を行うインターフェースである。要求機能は二つある。

(RF-G-1) 軌道姿勢制御

Rail Spiderでは、軌道アームを屈曲させることでロボットの移動経路を変更する。Rail Spiderは複数の視点を有するシステムであるため、インターフェース上の座標と提

示映像内のロボットの座標が不整合を起こす可能性がある。例えば図 3.2.2-6(a)では軌道を手前側に移動させる際、軌道アームの関節を反時計回りに屈曲させる。しかし、図 3.2.2-6(b)では同じく手前側に移動させようとすると、関節を時計回りに屈曲させる必要がある。このように映像内での移動方向が一致していても、インタフェース上での操作方向が変化する可能性があり、直感的な操作を妨げる要因となる。

Tsuji ら^[3.2.2-3]は、この課題を解決するため操作デバイスの座標系と常に整合する映像を主画面として提示し続けるシステムを提案している。このように座標の不整合を回避しながら各軌道アームの関節角度を制御可能な操作インタフェースが求められる。

(RF-G-2) ユニット操作

軌道アーム上を移動するロボットが、任意の位置に正確に位置決めできる必要がある。また、観察ロボットのカメラ首振り角度・ズーム倍率の操作、採取ロボットのアーム伸長長さ・グリップ開閉角度の操作、運搬ロボットのキャスクの分離・装着といった作業部の操作が可能であることが求められる。

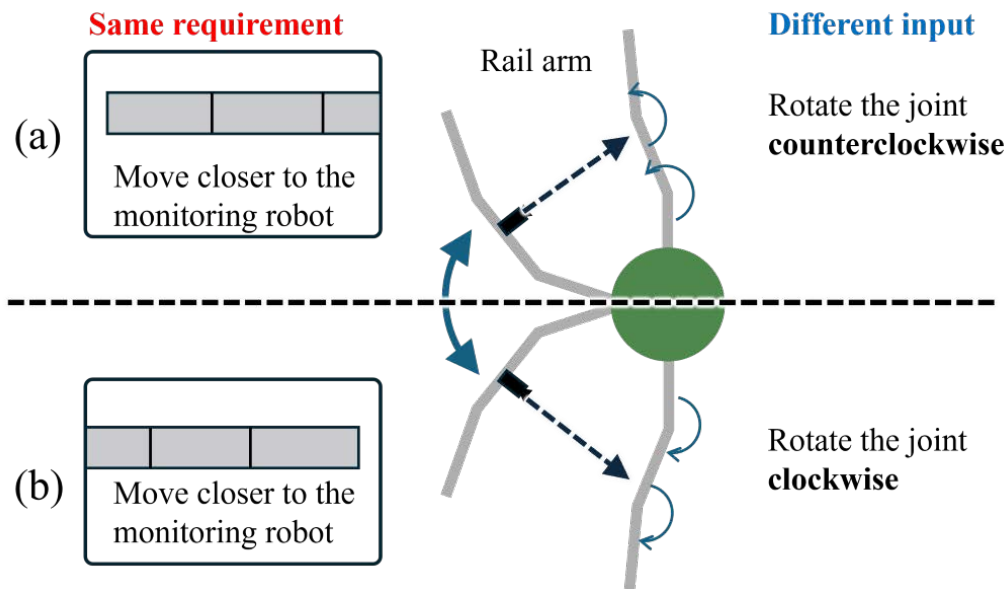


図 3.2.2-6 Rail Spider における座標の不一致を示す概念図

⑨ ロボット状態表示部(H)の要求機能

ロボット状態表示部は、軌道アームの各関節に内蔵した角度センサ及び各ロボットに搭載された位置センサをもとに、各軌道アームの姿勢とロボットの走行位置を表示するインタフェースであり、要求機能は以下のとおりである。

(RF-H-1) 即時表示

遠隔操作では遅延が生じると操作者の心理的負担が増大する。鈴木ら^[3.2.2-4]はロボット操作と精神的負担に関する調査を行い、遅延が 500 ms のときに、自分が操作していると感じる感覚（運動主体感）を感じない操作者の割合が 5 割を超えて大きく減少することを報告している。したがって、軌道アーム上のロボットの走行位置が 500 ms 以内の遅延でリアルタイムに表示されることを要求機能とする。

⑩ 観察データ表示部(I)の要求機能

観察データ表示部は遠隔操作部に作業環境の映像を提示するインタフェースである。要求機能は二つある。

(RF-I-1) 映像識別

操作者に提示される映像は観察ロボットが提示する作業環境の俯瞰映像、採取ロボットのアーム手先注視映像、運搬ロボットの開口部注視映像の3種類が存在する。これらの映像はそれぞれ4本の軌道アームから提示されるため、操作者は合計12の映像を確認する必要がある。したがって、提示される映像がそれぞれの軌道アーム上を移動するどのロボットから送られた映像かを操作者が容易に識別できることが求められる。

(RF-I-2) 適切視点

観察ロボットが作業環境を俯瞰する映像を取得する際、ロボットの移動経路に対して垂直な向きからの視点を操作者に提示する必要がある。図3.2.2-7(a)に示すように移動方向とカメラの向きが平行である場合、ロボットは映像内で奥行き方向に移動するためデブリやワイヤとの位置関係が不明確となる。一方で、図3.2.2-7(b)のように軌道の側面が映る垂直な視点の映像が提示されると、操作者はデブリやワイヤとの位置関係を正確に把握できる。このように、操作者が操作を行うのに適切な視点の映像を提示することが必要である。

なお、これらの要求機能は令和6年度に開発したRail DRAGON用のGUIを図3.2.2-2(下)のように拡張して開発する予定である。

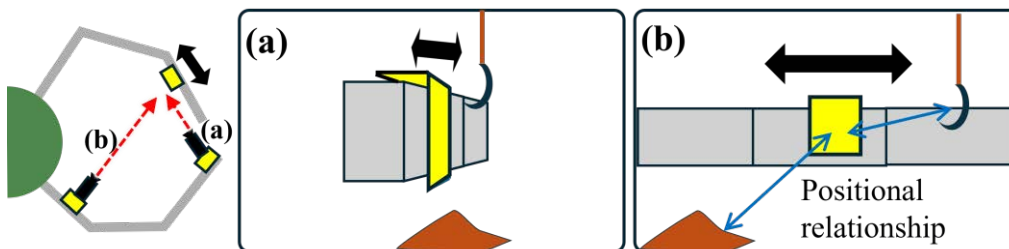


図 3.2.2-7 適切視点の概念図

(3) 吊下式多腕型軌道構造体の展開手順

Rail Spider は、図3.2.2-8に示すように(i)軌道導入作業、(ii)デブリ採取作業、(iii)デブリ格納作業、(iv)デブリ運搬作業、(v)故障ロボット回収作業の五つのプロセスで構成される。

① 軌道導入作業

軌道導入作業は、オペフロからRPV内部にRail Spiderを吊り下ろす作業である。まず、アーム基礎部にクレーンワイヤを取り付けRail Spiderを吊る。残留構造物を通過できるようにアーム基礎部をφ2mの範囲に収まるよう格納し、RPV内部に降下する。軌道アームの水平方向に障害物が存在せず、かつ軌道アームから採取対象デブリが到達可能な距離になった時点で降下を停止する。

② デブリ採取・格納・運搬作業

軌道導入作業が終了した後は、ロボットを操作し作業を行う。

まずデブリ採取作業では、軌道アームの姿勢と採取ロボットの位置を操作し、採取ロボットをデブリの真上に移動させる。そして、ロボットアームを真下に下降させ、手先のグリッパでデブリを把持し、採取する。

次に、デブリ格納作業では、採取ロボットから（同一軌道アームではなく）隣り合う軌道アーム上にある運搬ロボットにデブリを受け渡し、運搬ロボットのキャスク内に格納する。隣り合う軌道アーム間で受け渡しを行うのは、採取ロボットに取り付けられたロボットアームが鉛直軸周りに回転せずにデブリの受け渡しを行うことで、ロボットアームの動作を単純化できるためである。

最後にデブリ運搬作業では、軌道アームの姿勢と運搬ロボットの位置を操作し、運搬ロボットを引き上げ用ロープの真下に移動させる。そしてキャスクと運搬ロボットを分離し、キャスクのみロープを用いて引き上げる。

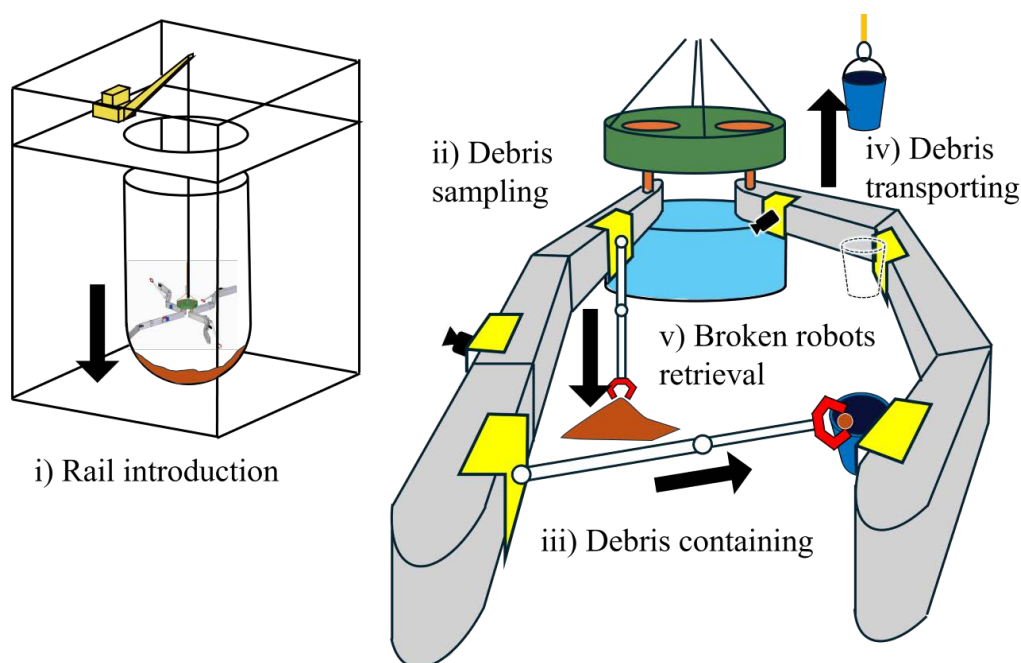


図 3.2.2-8 Rail Spider の展開手順の概念図

これらの作業は、観察ロボットによる作業環境俯瞰映像及びアーム手先またはキャスク開口部の作業部注視映像をもとに、操作者が作業部とデブリの 3 次元的な位置関係を把握しつつ行われる。

③ 故障ロボット回収作業

(RF-C-3) で述べたように、ロボットが故障した場合は軌道アームから排除し他のロボットの移動経路を阻害しないようにする。そのために、アーム基礎部の真下に回収ボックスを設置し、同一軌道アーム上の健全なロボットが故障したロボットを押し出してボックス内に落とすことで軌道アーム上から排除する。

(4) 結論

1Fにおいて、建屋上部からRPV内部に導入され、燃料デブリの試料採取を行う吊下式多腕型軌道構造体Rail Spiderを提案した。システム設計を行い以下の三つの知見を得た。

軌道アーム上を動く共通移動ユニットが軌道アームの先端または後端を通過して、両側面を移動できるようにするのが好ましい。作業を行う際にその作業と関係しないロボットを全て軌道アームの作業を行わない側面に退避させることで、軌道アーム上の同一経路を複数ロボットが共有していてもロボット同士が干渉せず円滑に作業を行うことができる。

Rail Spiderは複数の視点を有するシステムであるため、軌道アーム姿勢の操作インタフェース上の座標と提示映像内の座標が不整合を起こす可能性があり、直感的な操作を妨げる要因となる。したがって、座標の不整合を回避しながら操作可能な操作インタフェースが必要である。

デブリの格納作業を行う際に、デブリ試料を把持する採取ロボットが（同一軌道アームではなく）隣り合う軌道アーム上にある運搬ロボットに試料を受け渡すようにする。この構成を採用することで採取ロボットに取り付けられたロボットアームが鉛直軸周りに回転せずにデブリの受け渡しを行うことができ、ロボットアームの動作を単純化できる。

(5) 今後解決すべき技術課題

(RF-C-1)で述べたように、共通移動ユニットは軌道アームの全周を軌道アームに沿って移動する。通常時は軌道アームに支持されながら移動するが、故障時は軌道アームから排除されなければならない。よって、通常時は支持しつつ故障時には、排除可能な共通移動ユニット用の軌道アーム構造を開発する必要がある。

デブリ採取・格納・運搬作業ではロボットの移動や軌道姿勢制御、カメラ姿勢制御といった操作を同時に行う必要がある。複雑かつ不安定な廃炉作業環境でこのような複数の操作項目は操作者の負担を増大させる要因となる。したがってロボットの動作を一定以上自律化して操作者の負担を低減することが期待される。

3.2.3 デブリサンプリング機構の開発（再委託先：福島大学）

(1) 関節バックラッシュのない巻き取り可能なデブリサンプリング用小型アームの開発

目的の小型アームの開発に向けて、低融点合金（LMPA: Low melting point alloy）の状態変化（溶融・凝固）を用いて、関節のロック/フリー状態を切り替える巻取型のアームを提案してきており^[3.2.3-1]、これまでLMPAを状態変化させるための誘導加熱装置の開発、LMPAの状態確認のための温度センシング法の提案等基礎的な研究を行ってきた^[3.2.3-2]。

令和6年度は、アームの軽量化に向け、アーム本体の素材及び形状、関節部の構造等^[3.2.3-3]を先端負荷約3N程度を想定して改良・検討した。

改良したアームの関節（最終形）を図3.2.3-1に示す。関節中央にLMPAがあり、発熱板（ブリキ板、厚さ0.28mm）によってLMPAを挟んでいる。この発熱板を誘導加熱により加熱することでLMPAを溶融させ、関節をロック状態からフリー状態へ変化させる。フリー状態からロック状態への変化は自然冷却により行う。LMPAには、ECO SOLDER（千住金属工業社製）を使用する。ここで、溶融したLMPAが漏れ出すことを防ぐために、PTFE製のLMPAカバーを使用している。さらに、発熱板からの放熱を抑制するために、紙を重ねた断熱材（厚さ1mm）を使用し、発熱板と断熱材を、皿リベット（鉄）によってチェーンプレート（ガラスエポキシ、厚さ4mm）へ機械的に固定している。また、PAHT-CF（ナイロンと炭素繊維の複合材料）製の関節軸を使用する。なお、チェーンプレートの肉抜きと関節軸材料の変更（真鍮からPAHT-CF）により、1関節あたりの質量を52.2gから38.0gへ軽量化した。

以下、改良点のいくつかについて詳しく説明する。

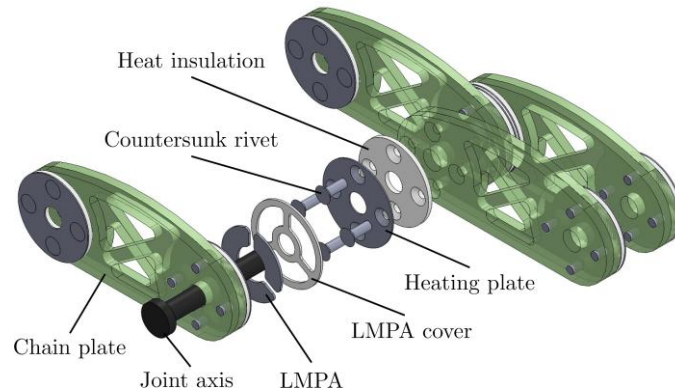


図 3.2.3-1 改良後のアーム関節

① 加熱・冷却特性の改良

LMPA を速く溶かし、速く固めるための関節構造の改良について説明する。断熱材の有無、具体的には皿リベットの材質（鉄、PEEK）を変更し、最適な組み合わせについて検討した。

誘導加熱装置でアーム関節を加熱し、自然冷却したときの発熱板とチェーンプレートの温度をサーモグラフィ（R550Pro、日本アビオニクス社製）で測定する。温度の測定点は、図 3.2.3-2 に示す点である。

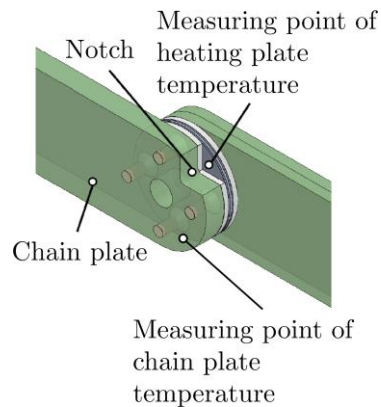


図 3.2.3-2 温度の測定点

実験に使用する関節は図 3.2.3-1 に示すものと同じ構造であり、断熱材の有無と皿リベットの材質（鉄、PEEK）を変更した 4 通りの関節に対して、実験を行う。まず、誘導加熱装置により 1.5 s 間加熱する。その後、加熱を停止して自然冷却する。ここで、加熱開始から 10 s 間、サーモグラフィにより発熱板とチェーンプレートの温度を測定する。

実験結果を図 3.2.3-3 に示す。図には、4 通りの条件全ての結果を示している。

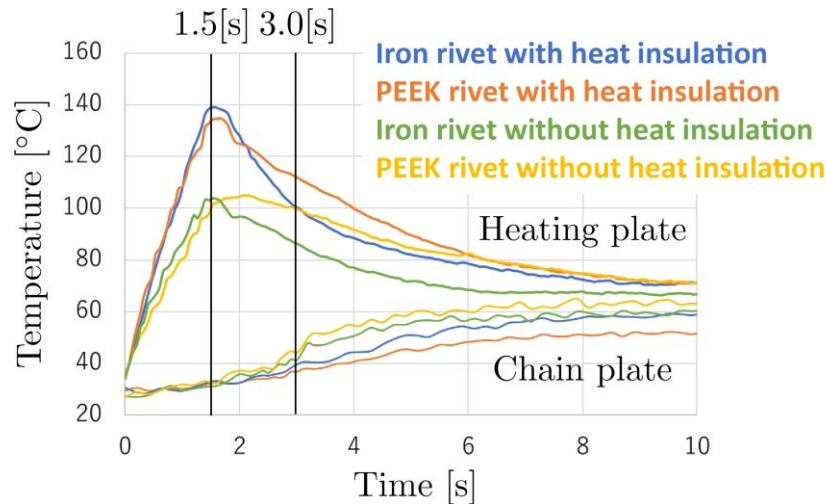


図 3.2.3-3 加熱・冷却特性の実験結果

実験結果より、断熱材を使用することで加熱特性が向上する（LMPA が速く溶ける）ことがわかる。これは、断熱材により発熱板からチェンプレートへの放熱を抑制していることによると考えられる。また、加熱停止直後から 1.5 s の間に下がる温度に着目すると、鉄製の皿リベットを使用することで冷却特性が向上する（LMPA が速く固まる）ことがわかる。これは、鉄製の皿リベットにより発熱板からチェンプレートへの放熱を促進していることによると考えられる。さらに、断熱材を使用すると冷却特性が向上する（加熱時の最高温度に比べ、加熱停止 1.5 s 後の温度の低下率が高い）ことがわかる。これは、断熱材を使用しないと加熱時にチェンプレートを温めてしまい、冷却時の放熱が抑制されることであると考えられる。

② 関節強度の改良

関節の強度をより高めるために、以下の 4 種類の LMPA を使用した関節の強度を比較し、これらのなかから最適なものを選定した。

LMPA-A : ECO SOLDER（千住金属工業株式会社製、融点：140 °C）

LMPA-B : 低温プラスチック 80 °C（株式会社青木メタル製、融点：80 °C）

LMPA-C : 低温プラスチック 119 °C（株式会社青木メタル製、融点：119 °C）

LMPA-D : LLS 109（ソルダーコート株式会社製、融点：109 °C）

実験装置を図 3.2.3-4 に示す。ロック状態のアーム関節の片端にフォースゲージ（ZTS-500N、株式会社イマダ製）を取り付け、他端（Load 側）を手で下に押すことで、関節が破壊される直前にかかっていたトルクを求める。実験に使用する関節は図 3.2.3-1 と同じ構造であり、LMPA を上記の 4 種類で比較する。

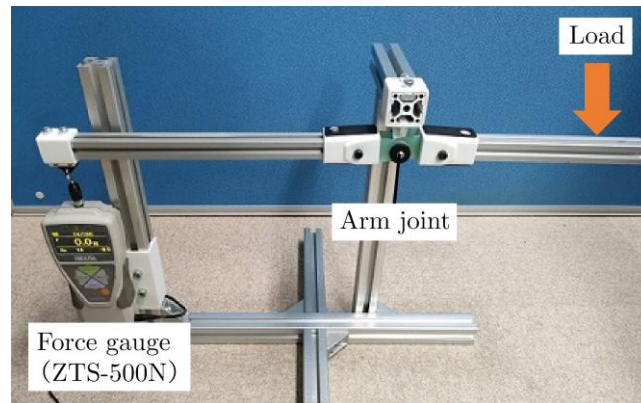


図 3.2.3-4 関節強度計測用実験装置

実験結果を図 3.2.3-5 に示す。これは各 LMPA を使用した関節の強度を表している。結果より、LMPA-A (ECO SOLDER、千住金属工業株式会社製) を使用した関節が最も強度が高く、その値は平均で 33.57 Nm であった。また、頁数の影響で詳細な説明は省略するが、LMPA-A は繰り返しの加熱に対する耐性が高く、強度が低下しづらいということも確認された。したがって、LMPA には ECO SOLDER (千住金属工業株式会社製) を使用することで、関節の強度を高められることがわかった。

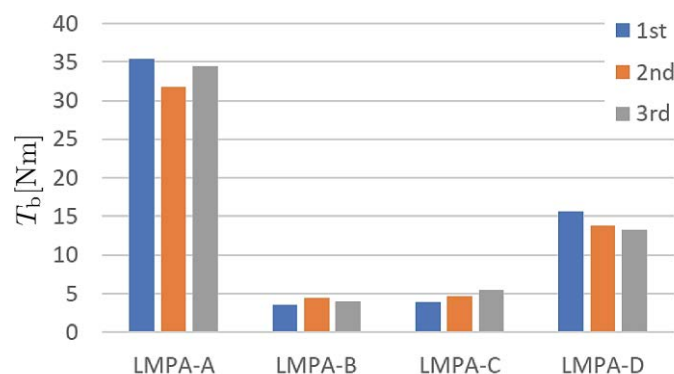


図 3.2.3-5 関節強度の実験結果

③ アームのたわみ特性

改良した関節構造をもつアームを水平に伸ばしたときの、たわみについて評価を行った。

実験装置を図 3.2.3-6 に示す。長さ 400 mm のアームの片側を固定し、もう一方に錘を取り付ける。使用するアームは図 3.2.3-7 に示すものであり、Part A が支える部分、Part B が変形させる部分である。錘の重量は 3.62 N、6.43 N、10.1 N の 3 種類あり、アーム単体の重量は 2.55 N である。これらの錘を取り付けたときのアームのたわみを、光学式モーションキャプチャ (Motion Analysis: Raptor E、Kestrel1300) を用いて計測する。アーム関節には、計測用のマーカが取り付けられている。

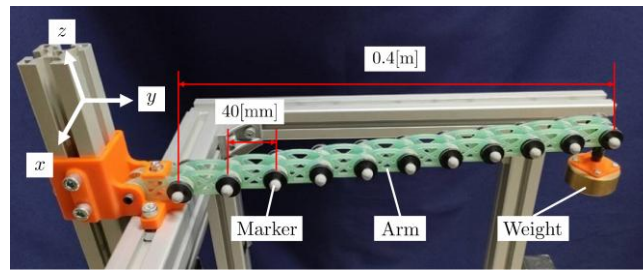


図 3.2.3-6 アームのたわみ特性の計測用実験装置

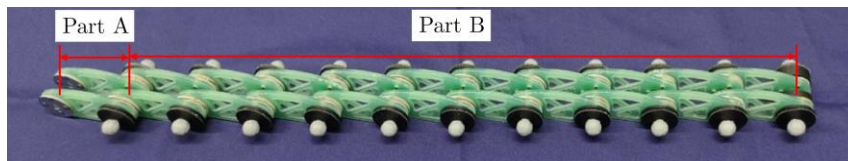


図 3.2.3-7 アーム部分の拡大図

実験結果を図 3.2.3-8 に示す。これは、アーム先端に錘を取り付けたことによる各関節地点のたわみを表している。横軸は根本（0）から先端（10）までのマーカ番号で、縦軸は錘を取り付ける前後の z 軸方向の変位である。なお、使用したモーションキャプチャシステムでは図 3.2.3-6 のように各座標軸が設定されているが、 x 及び y 軸方向の変位はほぼなかった。

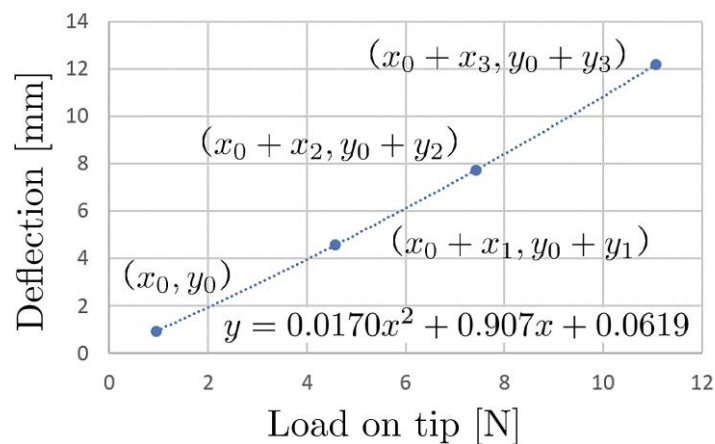


図 3.2.3-8 アームのたわみ特性

図 3.2.3-8 の実験結果を解析し、実際に使用する場面を想定した条件のアームのたわみを推定した結果、本アームを水平に 1 m 伸ばした先端に 300 g のエンドエフェクタを取り付けたときのたわみは、84.1 mm と推定された。

(2) 小型燃料デブリ回収のための軽量グリッパの開発

東日本大震災により深刻な影響を受けた 1F の廃炉作業が現在も続けられている。特に、溶け落ちた核燃料と構造物が混ざり合った燃料デブリの取り出しは、廃炉作業のなかで最も技術的に困難な課題とされており、安全に取り出すための調査が重ねられてきた。先日、燃料デブリの試験的な取り出しが実現し、現在は採取された燃料デブリの分析作業が進め

られている。今後は大規模な燃料デブリ取り出しに向け、原子炉内部に散在する燃料デブリをさまざまな場所から採取することが求められている。一方で、原子炉内部は高い放射線環境にあり、燃料デブリの組成や形状が明確でない点や放射性物質の二次的な飛散リスクにより燃料デブリの取り出しは極めて困難な状況にある。そのため、高放射線量、高温環境、水中といった原子炉内部の厳しい条件下で動作可能かつ多様な形状の燃料デブリに柔軟に対応できるグリップが必要である。

本研究におけるグリップは軽量である必要がある。グリップを軽量に設計することで、ロボットアーム全体への負担が軽減される。この結果、システム全体の軽量化が実現し、機動性の向上や、廃炉作業における廃棄物の量の削減も期待できる。本研究では、グリップ重量 200 g 未満を目標とする。また、回収対象は、周囲に固着していない 10 g 未満の小型の燃料デブリを想定する。以上を設計目標とし、グリップの駆動方式と回収機構を検討し、試作を行った。

① 駆動方式の検討

原子炉内部の高放射線環境下を想定し、アクチュエータをグリップの外部に配置して駆動力を伝達する方式について検討し、腱駆動機構について試作を行った。この機構は、腱を引くことにより動力の伝達を行う駆動方式であり、動力源を外部に配置することによるグリップの軽量化が期待できる点や空気圧駆動に比べて位置制御の精度がよい点が利点である。腱駆動機構は腱を引くことのみで用いられる場合が多く、試作では二つのアクチュエータを配置し、1 自由度を動作させている。

② 回収機構の検討

燃料デブリの回収機構では、不明瞭な形状や大きさへの対応が課題である。本研究では、物体を幾何学的に拘束する『ケーシング (caging)』手法を採用した。図 3.2.3-9 のように、ケーシングはロボットによる幾何学的な囲い込みによって物体を拘束する手法であり^[3.2.3-1]、ロボットにより形成される閉鎖領域内での対象物の位置・姿勢を許容できる点で対象物のさまざまな大きさ・形状に対応できると考えられる。図 3.2.3-10 のように試験的にグリップの爪を同心円状に 6 本配置し、試作した。

図 3.2.3-11 に示すグリップについて、対象物の形状・大きさの違いによるケーシング性能・回収性能評価を行うため、シミュレーション及び実環境での実験による検証を行った。

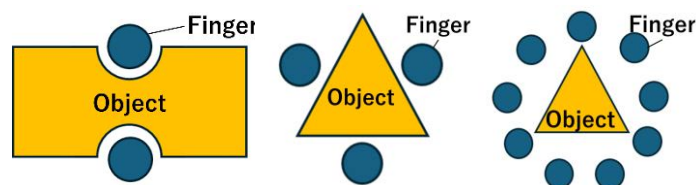


図 3.2.3-9 2次元ケーシングの例

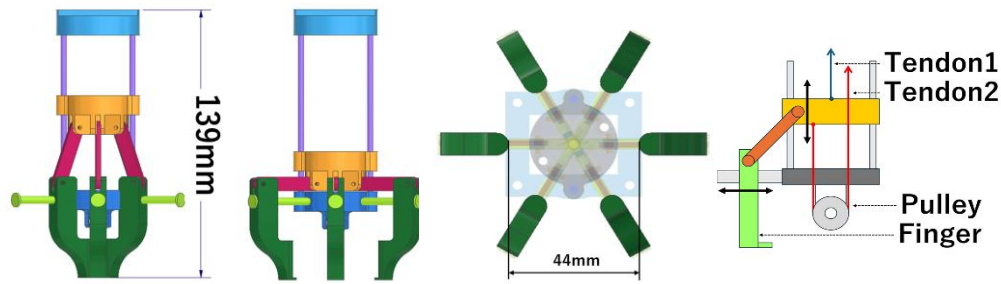


図 3.2.3-10 試作したグリッパの CAD 図

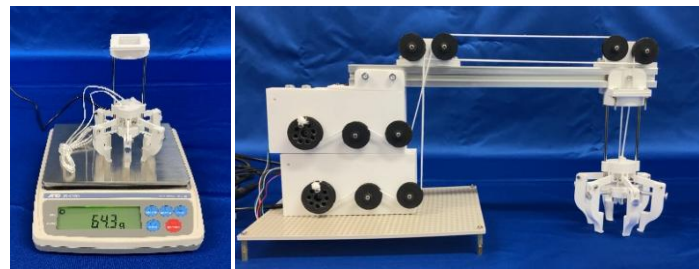


図 3.2.3-11 3D プリンタで試作したグリッパ

ケーシングを成立させるための条件として、以下の二つを挙げる。

1. 拘束条件：グリッパにより形成される囲いに対象物が抜け出せる隙間が存在しないこと
2. 内部条件：グリッパにより形成される囲いのなかに対象物が存在できること

以下、Wang 氏の『Object Closure^[3.2.3-2]』の考え方にに基づき、次の条件を満たしているかを調べた。

③ 円形物体のケーシング成立条件

対象物のコンフィギュレーション空間 (C 空間) において、対象物がグリッパの爪に囲まれて抜け出せないようにグリッパの爪を配置することを考える。図 3.2.3-12 のように対象物を円形とし、点で近似したグリッパの爪 $\mathbf{p}_i = (x_i, y_i)$ 、 $(i = 1, 2, \dots, n)$ を考える。このとき、 $\mathbf{p}_i$ は座標の中心から同心円状に n 本配置されているものとする。対象物とグリッパの爪 $\mathbf{p}_i$ の干渉を考えた場合、対象物の重心点 $\mathbf{q} = (q_x, q_y)$ が存在できない領域を C-Closure Object と呼び、 C_i で表す。 C_i の半径 rc は対象物の半径に近似できる。各グリッパの爪における隣接する C-Closure Object の領域が連結している場合、すなわち、

$$\|\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2\| < 2rc \quad \text{式 (3.2.3-1)}$$

が成り立つとき、対象物はその間を通ることができず、拘束条件を満たす。

内部条件が成立するためには、C-Closure Object の領域に属さず、C-Closure Object によって形成される閉じられた領域 $C_{\text{free_obj}}$ が存在し、その領域に対象物が存在する必要

がある。したがって、円を対象とした場合、各グリッパの点 p_i から rc 離れている点が存在する場合、つまり、

$$\|p_i - q\| \geq rc \quad \text{式(3.2.3-2)}$$

が成り立つとき、その点がグリッパによって形成された領域の内部である場合、ケーシングが成立する。ここで、点 q が閉鎖領域の内部の点であることをベクトルの外積を用いて判定する。グリッパのある点 p_i から隣接する次の点 p_{i+1} へのベクトル A と p_i から判定する点 q へのベクトル B の外積を求める、つまり、

$$A \times B = (x_{i+1} - x_i)(q_y - y_i) - (y_{i+1} - y_i)(q_x - x_i), \quad i = 1, 2, \dots, n-1 \quad \text{式(3.2.3-3)}$$

をグリッパの全ての爪の点について求め、外積の符号が全て同じであれば、点 q はグリッパの内部に存在すると判定する。

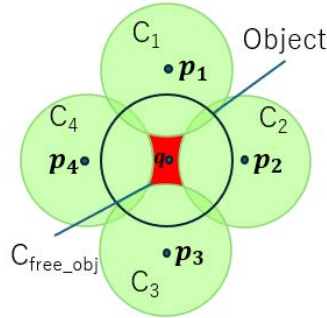


図 3.2.3-12 円形物体の Object Closure

④ 多角形物のケーシング成立条件

多角形を対象とした場合、円形のケーシングと同様に Object Closure を用いてケーシングの判定を行うが、対象物の姿勢により C-Closure Object の領域が変化し、対象物の抜け出しやすさが変わる。そのため、太田氏が行っているように対象物の最小幅を求め^[3.2.3-4]、拘束条件を

$$\|p_1 - p_2\| < (\text{対象物の最小幅}) \quad \text{式(3.2.3-4)}$$

とする。

多角形の m 個の頂点の座標を (x_k, y_k) 、 $(k = 1, 2, \dots, m)$ とすると、グリッパの各点 p_i の C-Closure Object は、 m 角形 $(\acute{x}_k, \acute{y}_k) = (x_i - x_k, y_i - y_k)$ となる。 m 角形の C-Closure Object の領域に存在せず、閉鎖領域の内部に存在する点 q は内部条件を満たす。この内外判定についても円形物体のケーシングの場合と同様に、ベクトルの外積を用いて判別する。ただし、この判定方法は凸多角形を対象としている。凹多角形では境界同士が交わってしまうため、C-Closure Object の範囲内であるのに範囲外と判定される部分が生じるためである^[3.2.3-4]。そのため、凹多角形の場合は、多角形の凸包を考える必要がある。

⑤ シミュレーション

③、④で導出したケーシング成立条件を用いてシミュレーションを行った。シミュレーションでは、対象物の重心点を x 軸方向 1 mm ずつ y 軸方向 1 mm ずつ変化させ、全ての組み合わせを判定する。対象物の重心点の位置座標範囲は、x 軸 y 軸ともに -30 mm～30 mm とした。多角形の場合は各対象物の位置に対し、5 度ずつ 360 度まで回転させて判定している。対象物は、円形、正三角形、正方形の 3 種類であり、それぞれ幅 10 mm、20 mm、30 mm、40 mm、50 mm とする。このとき、円の幅は直径のことであり、正三角形、正方形については一辺の長さを幅としている。また、試作したグリッパにあわせて半径 22 mm の同心円状に六つの点を配置し、これをグリッパの爪としてシミュレーションを行う。このとき、 C_{free_obj} をプロットした位置が対象物のケーシングが成立する位置である。

シミュレーション結果を表 3.2.3-1、出力例を図 3.2.3-13 に示す。シミュレーション結果は、円形（30 mm、40 mm）正三角形（30 mm、40 mm、50 mm）正方形（30 mm）の場合にケーシング成立した。

表 3.2.3-1 2次元ケーシングの成立プロット数

対象物の幅[mm]	円	正三角形	正方形
10	0	0	0
20	0	0	0
30	181	37638	7172
40	15	14136	0
50	0	1890	0

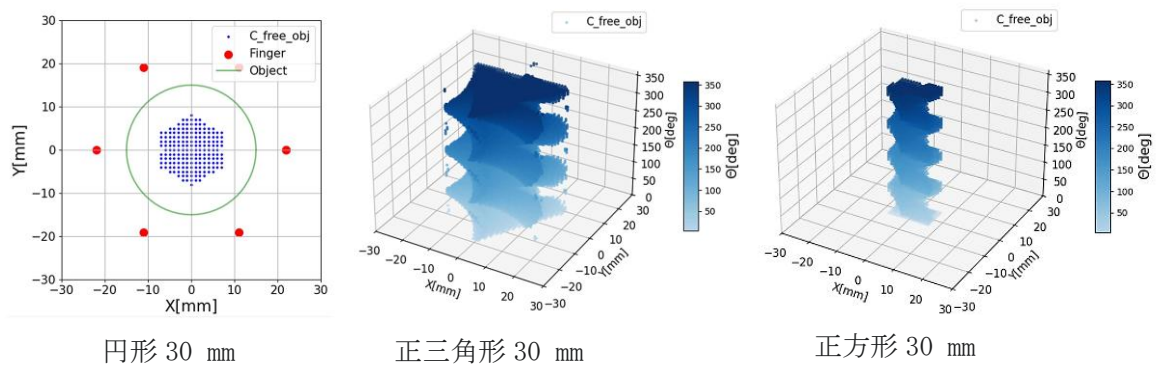


図 3.2.3-13 シミュレーションの出力例

⑥ ケーシング・回収実験

試作したロボットハンドを用いて、対象物のケーシング及び回収実験を行った。ケーシング判定の実験では、グリッパの爪で対象物をケーシングした状態から、グリッパを水平方向に移動させ、対象物がグリッパから抜け出すかどうかを調べる。回収実験では、図 3.2.3-14 に示すようにマット上に対象物を一つ配置し、試作したグリッパのモータを駆動させ、グリッパを閉じ、対象物の回収を行う。対象物は図 3.2.3-15 に示す単純形状

(円柱、三角柱、四角柱、球体) と Blender の Rock Generator 機能を利用し作成した燃料デブリのイメージモデル 3 種類 (Model1、Model2、Model3)、それぞれ幅 10 mm、20 mm、30 mm、40 mm、50 mm の 5 種を 3D プリンタで作製した。このとき、円柱の幅は底面の円の直径、三角柱及び四角柱の幅は底面の正三角形、正方形の一辺の長さを指す。ここで、円柱、角柱については厚さ 5 mm の薄い形状である。全ての回収対象物について実験を行い、結果を確認した。また、ケーシングの判定については円形、正三角形、正方形を対象とした、2 次元平面のケーシングのシミュレーション結果と比較した。

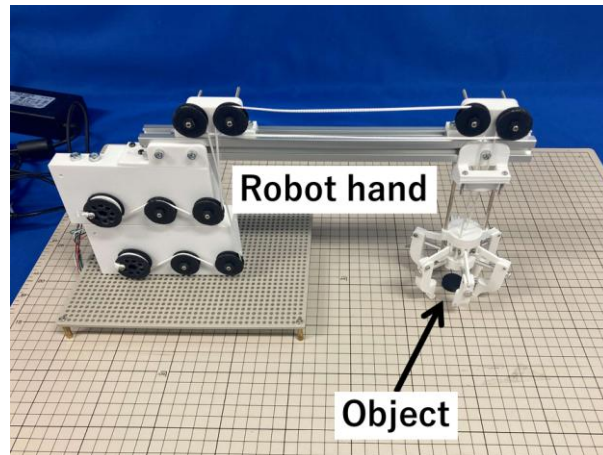


図 3.2.3-14 実験環境



図 3.2.3-15 回収対象 (左図は単純形状、右図は燃料デブリのイメージモデル)

ケーシングの実験結果を表 3.2.3-2、回収実験の結果を表 3.2.3-3 に示す。ケーシング判定実験について円、三角、四角の場合とシミュレーションの場合を比較すると、15 種類の実験のうち 13 種類が一致することが確認できた。一方で、幅 20 mm の円柱、四角柱についてシミュレーション結果と一致していない。これは、シミュレーションにおいてグリッパの爪を点として近似しているため、ケーシングが成立する領域 C_{free_obj} の範囲が一致していないことが考えられる。また、燃料デブリのイメージモデルでは、尖った形状や細長い形状が原因で、グリッパの爪の間を通り抜けやすい場合があった。対象物の形状によらない把持を目標とするうえでは、より確実な拘束が必要であることを確認した。回収実験では、グリッパを閉じる際に、グリッパの隣接する爪の間の距離は短くなっていくため、グリッパを開いた状態で爪による閉鎖領域の内部に存在できる対象物は全て回収可能であると予想していた。しかし、グリッパの形状により、閉じた状態でも空洞ができ、これにより小さい対象物が通り抜ける事象が確認された。

表 3.2.3-2 ケージング判定実験結果

対象物の幅 [mm]	円柱	三角柱	四角柱	球	モデル 1	モデル 2	モデル 3
10	×	×	×	×	×	×	×
20	○	×	○	○	×	×	×
30	○	○	○	○	○	○	×
40	○	○	×	○	○	○	×
50	×	○	×	×	○	×	○

表 3.2.3-3 回収実験結果

対象物の幅 [mm]	円柱	三角柱	四角柱	球	モデル 1	モデル 2	モデル 3
10	○	×	○	○	○	×	×
20	○	○	○	○	○	○	○
30	○	○	○	○	○	○	○
40	○	○	×	○	○	○	○
50	×	○	×	×	○	×	○

実際の環境を想定して、図 3.2.3-16 のように複数の物体のなかから特定の対象物を回収する実験を行った。本実験では、白色のモデルを回収対象物とし、グリッパは手でもって操作した。

実験結果を表 3.2.3-4 に示す。実験では、同じ対象物に対して回収できた場合とできなかった場合があり、実際の環境での燃料デブリ回収には不確実性がともなうことを確認した。課題として、グリッパの爪が周囲の物体に接触し、対象物に十分接近できないことや回収に成功しても対象物がグリッパの内部に完全に収まらず、安定性を欠く場合があった。今後は 3 次元でのケーシングについて検討し、燃料デブリの形状や周囲環境に左右されない安定した回収方法を検討する必要があることを確認した。



図 3.2.3-16 複数物体と回収対象物（白色）

表 3.2.3-4 複数の物体のなかから特定の対象物を回収する実験結果

	モデル1	モデル2	モデル3
回収できた回数 (5回中)	4	3	4

高放射線環境下で多様な形状の燃料デブリを回収可能なグリッパを実現するため、腱駆動機構による動作とケーシングを活用した回収機構について提案した。

試作したグリッパによる多様な形状の対象物の回収実験からケーシングの有効性について検証し、複数の形状・大きさに対応できること、3次元平面で検討したケーシングを用いて3次元環境で対象物を回収できることを確認したが、形状により回収可能な大きさの範囲が異なる点が課題となった。また、3次元的に対象物を拘束できていない場合も多くあったことから、2次元平面でのケーシングのみで検討するのでは不十分であると考えられる。

今後は3次元でのケーシングについて検討し、燃料デブリの形状によらない安定把持を目指す。また、腱駆動機構の腱が長い状態において十分な精度で制御可能な駆動力伝達機構並びに制御方式を開発する必要がある。さらに、原子炉内部の過酷な環境に対応できる構成部材の材質選定や質量を抑えつつ強度を確保する設計が課題である。

3.2.4 環境モデルと軌道計画に基づく動作再生を利用した遠隔操縦の高度化（再委託先：神戸大学）

廃炉作業では、環境モデル下でのシミュレーションによる事前検証が必須であり、環境モデルやそこで計画された軌道を実環境下の作業に有効に活用して、遠隔操縦を高度化すること、すなわち事前検討や実作業中での環境モデルの有効活用、事前計画軌道の再生とマニュアル操作の併用により、いかに作業を効率化し高信頼化できるかが課題である。

本研究では、代表者がこれまで取り組んできた多視点遠隔操縦システムでの視覚系と操縦系との整合性を保つ直感的な遠隔操縦方法の枠組みを拡張し、さらには研究分担者がこれまで取り組んできた障害物環境下でのマニピュレータの軌道計画手法を発展させ、両者を統合することで遠隔操縦システムの高度化を図る。

令和6年度においては、主に以下の二項目について取り組んだ。

- 環境モデル中の仮想視点を含む多視点遠隔操縦法
- 軌道計画を利用した遠隔操縦システムの適用シナリオ検討と課題抽出

(1) 環境モデル中の仮想視点を含む多視点遠隔操縦法

本研究グループでは、複数のロボットアームと複数台のカメラを用いた多視点遠隔操縦について研究を行ってきた^[3.2.4-1]。図3.2.4-1と図3.2.4-2にシステムの操縦側の概念図と開発した操縦コックピットの概観を示す。この先行研究の成果として、オペレータがある作業において最も注視する画面を「主画面」と定義し、この主画面を作業中に任意に選択可能とし、主画面と操縦デバイスとの姿勢整合性や参照座標整合性を保つことで直感的な操縦を可能とするシステムを提案した。また、環境に設置した固定カメラのみでは作業状況が把握できない場合のために、作業アームとは別にカメラアームを導入し、オペレータが自由に視点を移動できる手法も導入した。さらには、さまざまなカメラ視点からの映像に対して操縦デバイスの姿勢整合性を確保しようとする、操縦デバイスの姿勢がオペレータにとって操縦が難しい姿勢となってしまう場合があるので、オペレータが意図的に作業器と操縦器の手先姿勢の関係性を定義しなおす「姿勢のインデキシング」の機能も導入した^[3.2.4-1]。

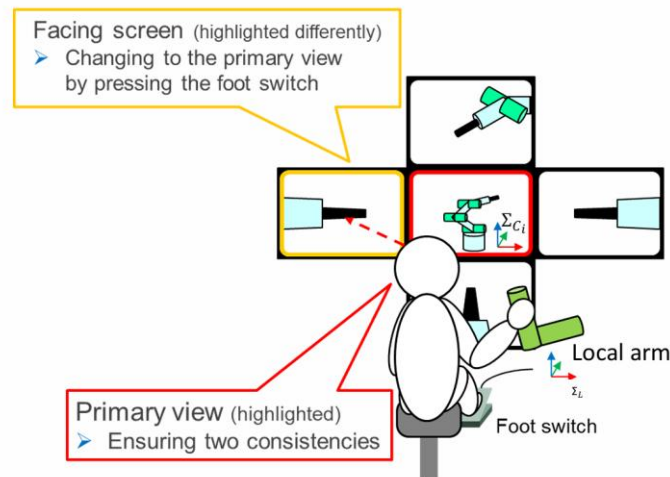


図 3. 2. 4-1 多視点遠隔操縦システムの概念図



図 3. 2. 4-2 先行研究で開発したシステムの概観

しかし、提案システムに残された大きな課題として、作業環境に固定したカメラの使用を前提としている点が挙げられる。事故後の原子炉建屋内での作業を想定した場合、高放射線下の環境に事前にカメラを設置するのは容易ではなく、一旦設置したカメラも放射線により劣化してやがて使用不可能になるため交換作業を余儀なくされるが、この交換作業も設置作業と同様容易ではない。よって本研究では、環境に実際に固定されたカメラの代わりに、仮想の作業環境に配置した仮想カメラからの視点をオペレータに提示することで、実環境下のカメラと同等の作業性が確保できるのかを実機実験を通じて検証することとする。

提案システムで導入する仮想カメラ視点はロボットシミュレーターである Gazebo を用いて作成する。提案手法におけるシステムの全体構成を図 3. 2. 4-3 に示す。実機アームの関節角度を取得し仮想空間内のアームの関節角度指令地とすることで、シミュレータ上でアームの動きを再現する。図 3. 2. 4-4 が後述する評価実験での作業環境の概観であり、図 3. 2. 4-5 がその仮想環境である。

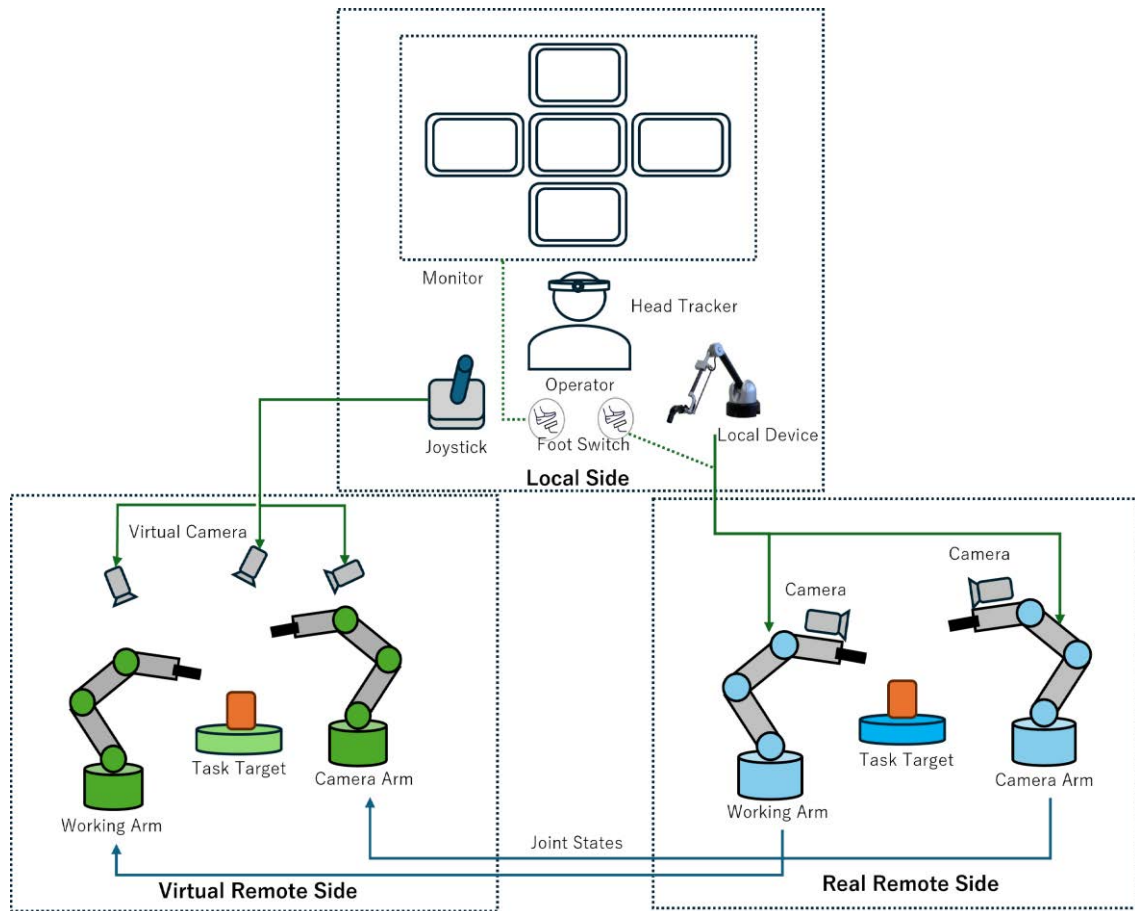


図 3.2.4-3 システムの構成

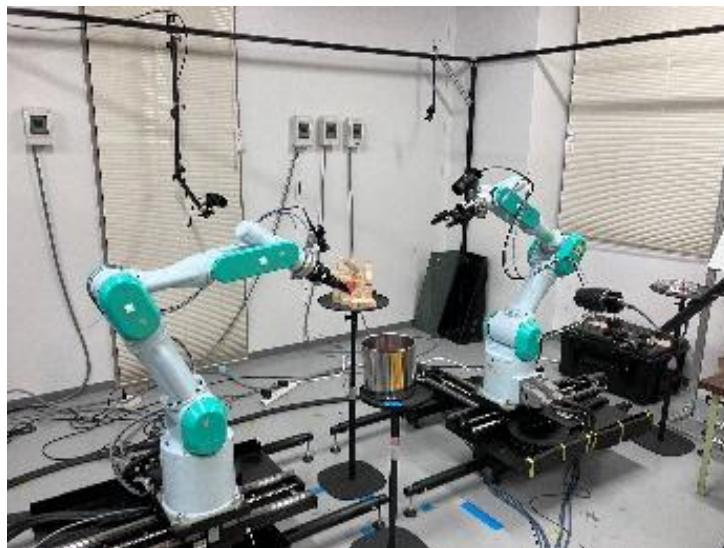


図 3.2.4-4 実環境の概観

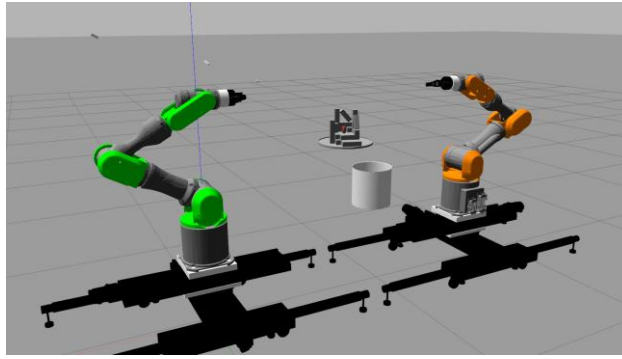


図 3. 2. 4-5 仮想環境の概観

事故後の実際の原子炉建屋内の作業環境を 3 次元モデル化するには、LiDAR 及び RGB カメラを用いた環境モデリングが必要であり、作業によって環境が変化する場合は、環境モデルも随時更新させる必要があるが、本研究ではこのようなモデリング手法には焦点を当てず、なんらかの方法で作業環境の 3 次元モデルが得られている前提とする。また、環境モデルを使用する際に実環境とのモデル化誤差や位置ずれは避けられないが、環境モデルと実環境とのずれの検知と修正については将来課題とする。

令和 6 年度での評価では、仮想カメラは環境に固定した実カメラを置き換える目的で、左右からの視点一つずつと後方上部からの俯瞰視点の三つを導入することとした。三つ全ての仮想カメラは、先行研究における自由視点カメラの視線変更方法を踏襲し、Focal Point（作業における注目点）を中心に球状に移動可能であり、また球の半径方向も移動可能であり、これはズームイン/ズームアウトに相当する。左右二つの仮想カメラの Focal Point は、作業アームのエンドエフェクタの位置とし、作業アームの移動にともなって Focal Point も追従する。一方、俯瞰視点カメラの Focal Point は、全体を把握するために作業対象上に設定する。

仮想カメラは、カメラアーム先端の自由視点カメラのように、アームの動作範囲や他の対象物との干渉といった物理的制約がないため、可動範囲や干渉を気にすることなく自由に位置や姿勢の変更が可能である。令和 6 年度は仮想カメラの操縦には、ジョイスティックを用いることとする。仮想カメラの視線変更や位置変更方法については、先行研究におけるカメラアーム先端の自由視点カメラの操作と同様に作業アーム用の操縦デバイスを利用する方法も考えられるが、令和 6 年度は仮想カメラの有効性の検証を第 1 の目的としているので、仮想カメラの位置姿勢変更に適した操作方法の検討は令和 7 年度以降の課題としたい。

評価実験では、以下の二つの条件について比較する。

[条件 1] 作業アームの手先カメラとカメラアームに加えて作業環境に実カメラ 3 台を固定した場合

[条件 2] 作業環境に固定した 3 台のカメラの代わりに仮想カメラ 3 台を導入した場合

実験のタスクは燃料デブリの回収作業を模したピックアンドブレース作業である。作業環境の中央に配置した図 3.2.4-6 に示したような色のついた積み木を掴み、図 3.2.4-7 に示した回収容器に入れると作業終了となる。積み木は図 3.2.4-6 に示すように、木製の立方体ブロックを用いて作った崩れやすい構造物上に配置した。図 3.2.4-8 に対象作業の仮想環境モデルを示す。仮想空間におけるモデルのずれは事前にできるだけ減らすよう調整したが、モデリングの精度が悪いために 10 mm から 20 mm ほどのずれている箇所があった。実験はそれぞれの条件において 3 回実験を行う。令和 6 年度の被験者は、本システムの操縦経験が 10 時間未満の 1 名のみである。



図 3.2.4-6 燃料デブリ取り出しを模した積み木



図 3.2.4-7 回収容器

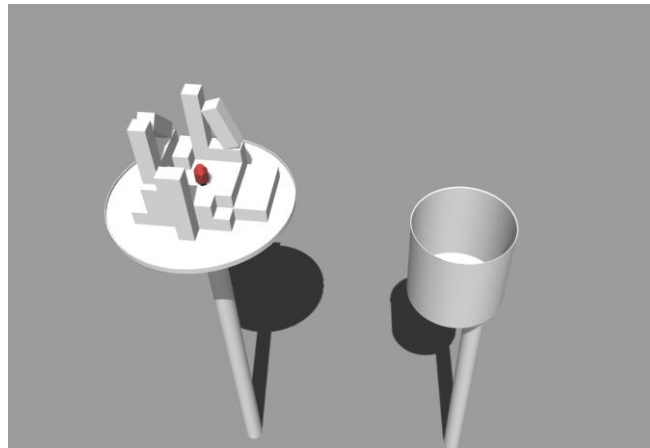


図 3.2.4-8 対象タスクの仮想環境モデル

評価指標は、1. 作業時間、2. 作業ミス回数（環境との接触や積み木の掴み損ね、落下など）、3. 主画面切り替え回数、4. 各視点の主画面選択割合とする。図 3.2.4-9 に作業時間の結果を示す。開始から積み木を掴み持ち上げるまでが picking の時間で、持ち上げてから回収容器に入れるまでが placing の時間である。それぞれの条件において大きな差はみられなかったが、提案手法である[条件 2]の方が作業時間が若干短くなっている。[条件 2]の仮想カメラはジョイスティックで操作する一方で、[条件 1]でのカメラアームはカメラ介入モードに切り替えて操作しなければならないため、この手間の差が時間に影響したと考えられる。

ミスの回数は、どちらの条件でも掴み損ねることはなかったが、両条件で作業環境との接触が 1 回ずつあった。ただし、[条件 1]における接触は、環境に固定したカメラが遠く映像がみえづらかったことに加えて、手先カメラの奥行きが把握しづらかったことが原因であるのに対し、[条件 2]における接触は、環境モデルと実環境との間にずれがあったのに仮想視点をみながら作業を行ったことが原因であった。主画面切り替え回数は、各試行で 2 回程度であり、どちらの条件も切り替え回数が数回で差はほとんどみられなかった。切り替えた主画面は一貫して俯瞰視点と手先視点であった。両条件で差が生まれなかった原因は、タスクの内容が主画面を頻繁に切り替えなければならないような難しい内容ではなかったためであると考えられる。主画面選択の時間の割合は、[条件 1]では手先視点で 24%で俯瞰視点が 76%であり、[条件 2]では手先視点としての割合が 38%とやや増加した。今回の俯瞰視点は作業アームの後方に位置しているため、俯瞰視点を主画面としたとき、操縦デバイスの姿勢はオペレータにとって操縦しやすいものとなる。そのため被験者は、俯瞰視点を主画面にし、必要に応じて手先視点をみながら操縦をすることが多かったようである。

以上本研究では、多視点遠隔操縦システムにおいて、実カメラだけでなく環境モデル内の仮想カメラからの映像で補完する手法の検討を行った。作業環境に固定した実カメラの代わりに 3D 環境モデル中の仮想カメラからの映像を提示できるシステムを構築し、実機実験により作業環境に実カメラを設置した場合とほぼ同等の作業性が得られることが確認できた。ただし、環境モデルと実環境との位置ずれにより、仮想カメラの映像のみで操縦を行うと環境と意図しない接触が生じる場合があった。よって、今後計画された軌道を再生する場合には、まず環境モデル中での再生で干渉の可能性のある部分を特定し、仮想カメラの適当な視点で確認しながらマージンをもたせるように修正するか、実環境中での再生時にも特定された個所に特に注意して、仮想カメラを有効活用しながら干渉回避するように軌道を修正する必要があることを確認した。このように、計画された軌道の環境モデル／実環境での再生時に軌道を修正する際の課題を抽出できた。

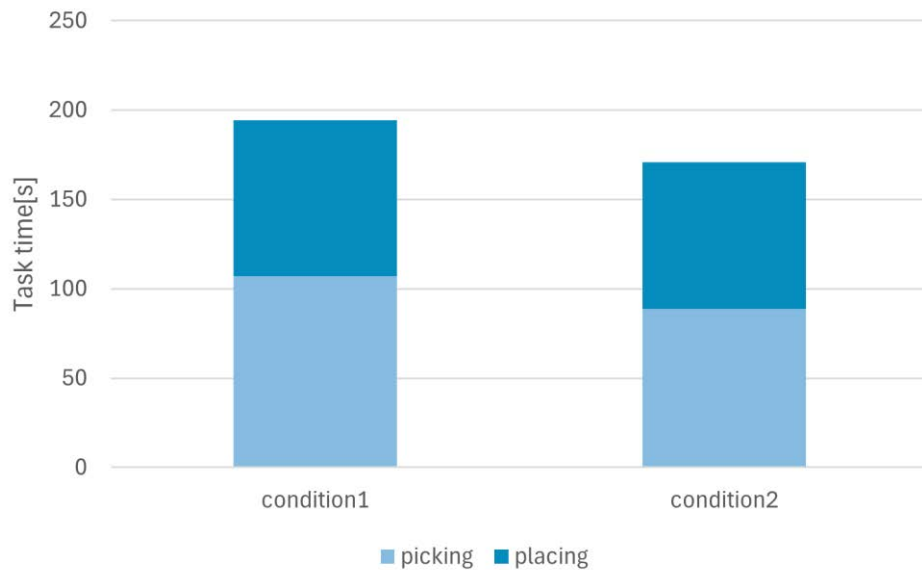


図 3. 2. 4-9 実験結果（作業時間）

(2) 軌道計画を利用した遠隔操縦システムの適用シナリオ検討と課題抽出

① 環境モデルと実環境との誤差に対応可能な遠隔操作インタフェースの検討

障害物の位置や形状が事前に予測できないような環境下において、マニピュレータが干渉回避を行いながらタスクを完了できるような遠隔操作支援システムの検討を行った。図 3. 2. 4-10 のように、操作者にはロボットマニピュレータに取り付けられたカメラの映像と合わせて環境とロボットの 3 次元モデルの可視化映像が提示される。操作者はモデル画面上で GUI を介して、マニピュレータの目標手先到達位置及び干渉を回避すべき進入禁止領域の指定を行う。これをもとに干渉せずに手先を目標位置に到達させる、マニピュレータの軌道が自動的に計算される。

干渉範囲設定機能とは、作業環境の構造や障害物位置などの把握が困難であるとき 3 次元点群データを用い干渉範囲を設定することで軌道計画の計算対象となる環境を単純化し、障害物の正確な形や位置などが把握できなくても軌道計画を用いて遠隔操作を可能にするものである。提案システムにおいては、ロボットに取り付けられた Depth カメラから得られた 3 次元点群上に軌道計画を計算するうえで回避の対象として認識されるオブジェクトを配置することで干渉範囲を設定する（図 3. 2. 4-11）。

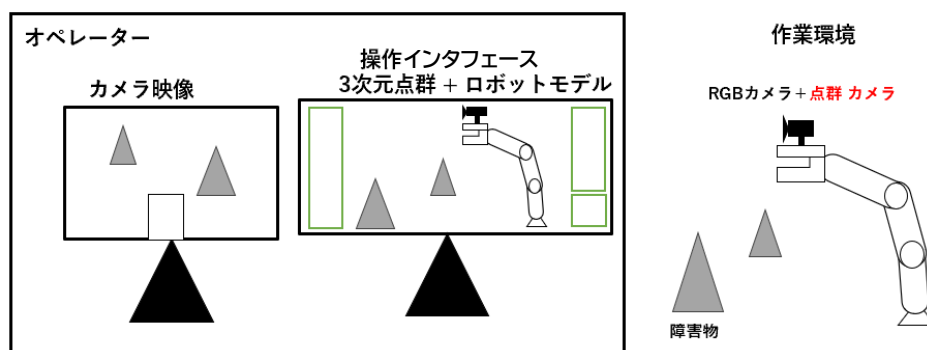


図 3. 2. 4-10 遠隔操作システムの模式図

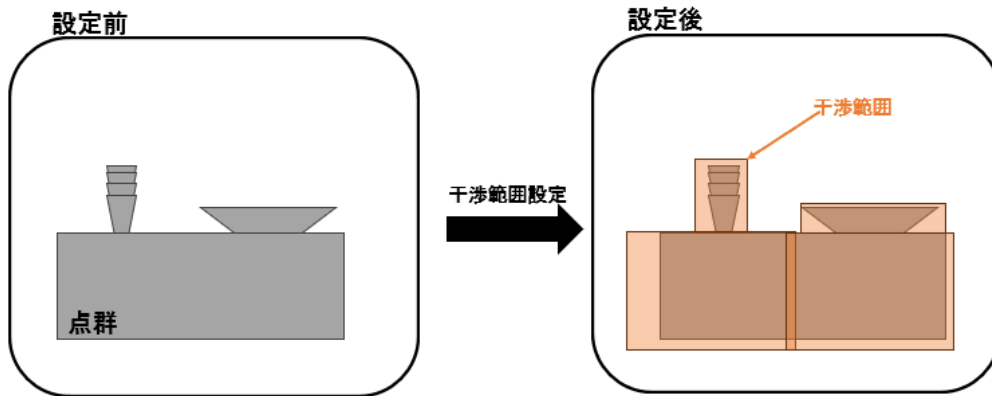


図 3.2.4-11 干渉回避範囲の設定

開発したシステムの簡易評価実験を行った。比較する手法は環境ごとに操作者が干渉回避領域を指定する方式と、環境によらず規定の環境モデルを用いつつ必要に応じて操作者が手動で干渉回避を行う方式の 2 通りである。環境モデルとロボットモデルのスクリーンショットを図 3.2.4-12 に示す。右側の目標物体を把持し左側の箱に干渉回避しながら運ぶことを模擬したタスクを行った。タスクを行う環境は三つ用意し、そのうち二つには環境モデルと異なる箇所を設けた。実験の結果、ほぼ全ての設定において提案システムでの接触回数の低減がみられた。他方、操作時間については干渉回避領域を指示する方式の方がやや大きかった。これは干渉範囲設定に要する時間や、干渉回避領域がもつマージンにより軌道が必要よりも遠回りになったことによる動作時間の増加が原因である。また、単一視点の Depth カメラ情報のみでは適切に干渉範囲を設定すること自体が容易ではないこともわかった。今後は干渉範囲設定の時間の短縮、軌道計画を行う際の環境認識、操作性にかかわる部分を改善していきたいと考えている。

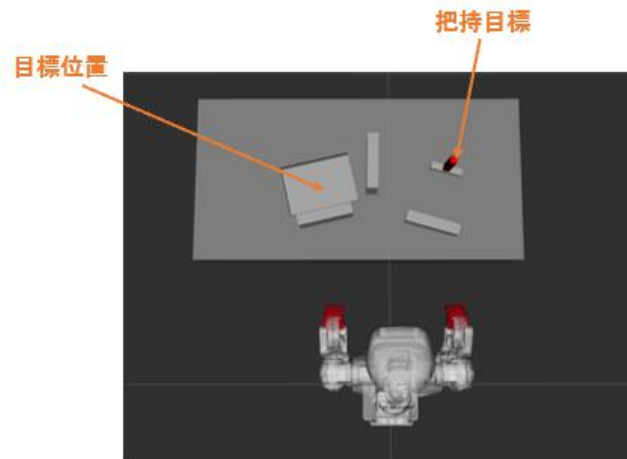


図 3.2.4-12 比較実験に用いた環境モデル

② 多角形環境モデルの基礎検討

軌道計画を援用した遠隔操作システムにおいては干渉回避や目標到達位置の指示を行うために正確な環境モデルが不可欠である。従来のボクセルや点群に基づく環境モデルはデータ量が対象とする環境の体積に比例して増大するため、記憶データサイズや処理

に要する計算コストに課題がある。これに対し、環境の自由領域（ロボットが環境と干渉せずに動作できる領域）を多角形（２次元の場合）ないし多面体（３次元の場合）の集まりとして表現した多角形地図の有用性の基礎検討を自律移動ロボットを題材として行った。

LiDAR や Depth カメラなどの測域センサを用いた計測により得られる環境の３次元点群に対し、観測点からの距離が極小である特徴点を近接点と呼ぶ。ある観測点の周囲に検出された近接点の集合に対し、各近接点の接平面で囲われる多角形領域は自由領域である。この近接点の幾何学的性質を用いて、観測点に凸多角形状の自由領域が付随するポーズグラフ地図を多角形地図と呼称する。複数の観測点から近接点がそれぞれ得られる場合、各観測点における自由領域は、上述の接線によって囲まれる領域となる。しかし、センサの計測範囲外に物体が存在する場合、図 3.2.4-13(a) のように物体が自由領域に含まれてしまうことがあるため、環境全体の自由領域を考える場合には、それぞれの自由領域を観測点の近傍領域で区切る必要がある。そこで、ボロノイ図を用いる。ボロノイ図は母点と呼ばれる点に対し、どの母点に近いかという関係で空間を分割した図である。多角形地図では図 3.2.4-13(b) のように、各観測点における近接点の接線によって囲まれる領域と観測点を母点として分割されるボロノイセルの重なる領域を自由領域とする。

経路計画などで自由領域を利用する場合、自由領域内の点を抽出する必要がある。多角形地図では、抽出点の最近傍観測点を探すことがボロノイセルを考えることに等しい。また、抽出点が近接点の接線より観測点側にあるかどうかは、観測点と近接点を結ぶベクトルと抽出点と近接点を結ぶベクトルの内積の正負のみから判定できる。したがって、多角形地図では自由領域の幾何情報を明示的に保持する必要はなく、観測点と近接点の結びつき及びそれぞれ座標情報のみを保持すればよい。

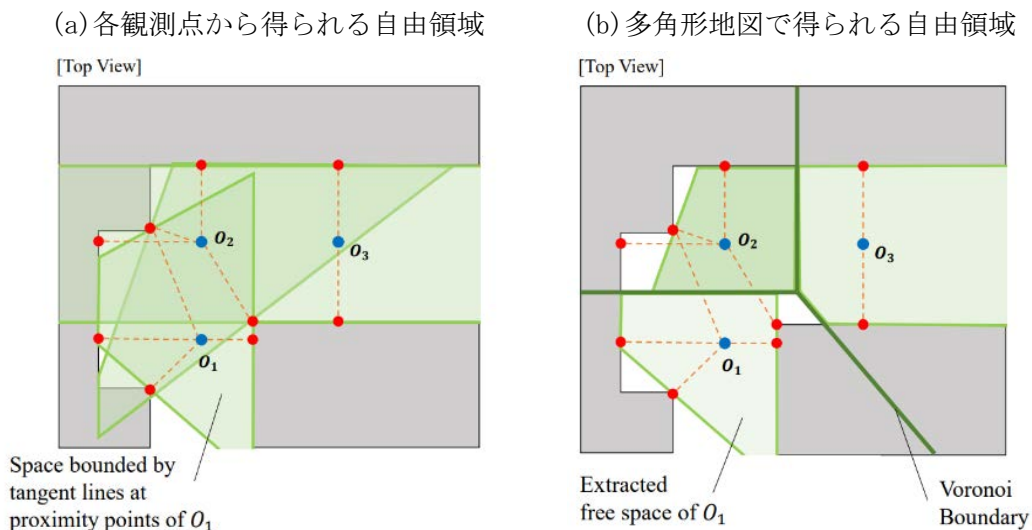


図 3.2.4-13 多角形地図

多角形地図の有効性を検証するため、屋外の実測データを用いて占有格子地図との比較を行った。環境の写真を図 3.2.4-14 に、生成された占有格子地図と多角形地図を図 3.2.4-15(a)、(b)に示す。柱などがある入り組んだ環境では自由領域の近似精度が低下することがわかる。計算時間は多角形地図のほうが大きくなった。これは占有格子地図

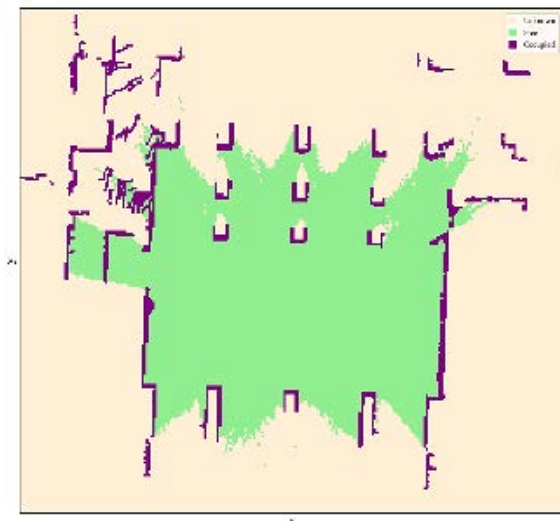
が占有度を格納した配列を参照するだけでよいのに対し、多角形地図では最近傍観測点の探索と内積計算が毎回行われるためである。ただし、占有格子地図は構築に数十秒かかる一方で、多角形地図は構築に時間はかからない。また、どちらの結果においてもデータ量は 1/2000 以下に削減できていることがわかる。

以上より、従来の占有格子地図と比較して、多角形地図は観測点が存在しない入り組んだ場所での近似精度はよくないものの、データ量の観点で大きな優位性があることがわかった。令和 7 年度以降は廃炉作業などに用いられるモバイルマニピュレータに応用するため、今後は多角形地図の 3 次元拡張を行っていく。近接点における接平面を用いて自由空間を凸分解することで軽量な環境表現が可能であると考えられ、2 次元の場合より大きなデータ削減効果が期待できる。また、3 次元拡張した多角形地図を用いた制御手法の確立も今後取り組むべき課題となる。



図 3.2.4-14 屋外環境

(a) 占有格子地図



(b) 多角形地図で得られる自由領域

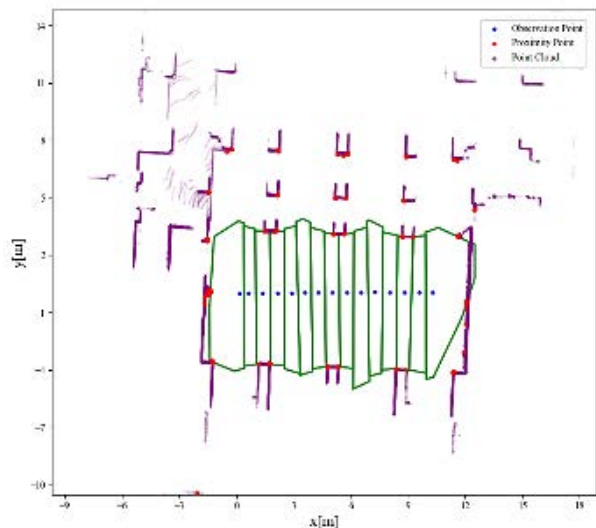


図 3.2.4-15 屋外環境の地図

3.2.5 まとめ

取り出し工法に調和した遠隔ロボット技術では、遠隔操作のための情報提示技術の開発において、情報提示に向けた基礎的評価を行った。遠隔操作補助に適するセンサ構成を見積るとともに、画像処理や情報提示のための計算機システム構築を進めた。具体的には、実施結果の要点として、レール搭載型観測ロボットによる遠隔操作支援のためのシミュレーション及び実機環境の構築と指向性検出器が使えない高線量環境における非指向性検出器を用いた放射線分布推定を実現するためのセンサ構成の検討を進めた。また、画像処理及び情報提示のための計算機システムを構築するための準備を整えた。また、モジュール分割型軌道構造体を用いた運搬技術の開発において、Rail DRAGON 操作用 GUI の開発に取り組んだ。また、これまでに開発してきた観察ロボットを改修し、運搬機能を実現するための概念設計を行った。具体的には、運搬機能を実現するための概念設計を行い、Rail DRAGON を拡張した吊下式多腕型軌道構造体 (Rail Spider) を提案した。Rail Spider のシステム構成要素を検討し、Rail DRAGON にはない新たな技術課題に取り組む必要性を明らかにした。デブリサンプリング機構の開発では、アームの軽量化に向け、アーム本体の素材及び形状、関節部の構造等を、先端負荷 0.5 N 程度を想定して検討した。また、小型の燃料デブリの回収に向けて、要求仕様を確認し、グリッパの構造並びに駆動方式、把持センシング手法を検討した。具体的には、アームに関しては、その後の議論に基づき、グリッパの重量が増加する可能性を考慮して先端負荷の目標値を 0.5 N から約 3 N に増加させて検討を進めた。結果として、関節当たりの質量を 43.6 g から 31.0 g に軽量化できた。また、軽量化したアームの強度を評価した結果、先端に 300 g の錘を装着した場合の先端変位は、アーム長 1 m に対して 84.1 mm との結果を得た。グリッパに関しては、把持センシング手法の調査・検討を進めるとともに、多様な形状のデブリを想定し、ケーシングを実現する腱駆動グリッパを設計・試作した。また、最大径 10 mm～50 mm の球体、円筒形状 (厚み 5 mm)、正三角形 (厚み 5 mm)、正方形 (厚み 5 mm)、モデリングソフトで生成した燃料デブリイメージモデルの把持実験を実施し、ケーシングによって大きさ・形状の異なる対象物を拘束できることを確認した。そして、環境モデルと軌道計画に基づく動作再生を利用した遠隔操縦の高度化については、多視点遠隔操縦システムにおいて、実カメラだけでなく環境モデル内の仮想カメラからの映像で補完する手法の検討を行った。また、計画された軌道の環境モデル／実環境での再生時に軌道を修正する際の課題を抽出した。軌道計画に関しては、燃料デブリ取り出しの作業工程において、軌道計画に基づくマニピュレータの遠隔操縦システムの適用場面や課題を抽出した。さらに、作業者が経由点や進入不可領域を軌道計画器に入力するインタフェースを検討した。具体的には、多視点遠隔操縦システムに関しては、作業環境に固定した実カメラの代わりに 3D 環境モデル中の仮想カメラからの映像を提示できるシステムを構築し、実機実験により作業環境に実カメラを設置した場合とほぼ同等の作業性が得られることが確認できた。軌道計画に関しては、計画された軌道の環境モデル／実環境での再生時に軌道を修正する際の課題を抽出した結果、環境モデルと計測データをもとにした自己位置修正が必要であることが確認された。燃料デブリ取り出しの作業工程における遠隔操縦システムの適用場面や課題の抽出については、原子炉のメンテナンスや解体における使用事例のサーベイを行った。作業者が経由点や進入不可領域を軌道計画器に入力するインタフェースについては、事前に用意したサイズの異なるボックス形状などをユーザが任意に設置することで進入不可領域を設定できることが確認された。

3.3 計測-遠隔ロボット統合技術と実証

3.3.1 遠隔取得画像に基づいた実スケール環境構造モデリングシステムの研究開発 (連携先：原子力機構)

(1) 深層学習を用いた画像処理によるノイズ除去・鮮明化に関する研究

1F の廃炉作業においては作業員の被ばくを極力減少させる観点から、ロボットが作業に使用される。通常、カメラ映像を確認しながら機器の操作を実施するが、高放射線環境の影響によるノイズや水中での浮遊物などの影響で作業環境の把握が難しい場合が考えられる。このような環境では、オペレータがカメラ映像から作業環境を正確に把握することや原子炉内の状態の適切なモニタリングに支障がでる可能性が高い。また、カメラ画像から立体モデルの復元を実施する際には、その復元精度にも影響を与える可能性が高いため、画像鮮明化やノイズ除去は必ず解決しなければいけない課題の一つである。この課題を解決するために画像処理手法を用いてロボットが取得する動画画像の鮮明化及びノイズ除去を実現することを本研究開発の目的としている。

令和 6 年度は、遠隔取得画像上に表れる環境影響によるノイズの除去や鮮明化を行う画像処理に深層学習を適用するための研究開発に着手した。深層学習の適用に関しては本タスクに適したネットワークの選定及び学習時に使用する画像データセットの作成を行い、それぞれの処理特性に関して検証を実施した。まず深層学習を使用するに際して、本タスクへの導入に適した畳み込みニューラルネットワーク (CNN) について調査を実施し、他の論文での引用や応用例が多い深層学習を用いた画像鮮明化に用いられる 4 種類の手法について調査を実施した。

各調査において学習時に使用したデータセットは DIV2K Dataset^[3.3.1-1] と呼称される高解像度化のタスクに一般的に用いられる合計 900 枚からなる画像データ群に対して回転、せん断、ノイズ付加といった画像処理を実施してデータ数を増やすデータオーグメンテーションを適用して画像枚数を 2 倍に増やした画像データ群を用いた。学習内容は、全サンプルの 1 回の学習を終えることを表す単位「エポック」を用いて 200 エポック実施した。このように作成された学習モデルを利用して、東京電力の Web サイト上で公開されている画像 (図 3.3.1-1) ^{[3.3.1-2][3.3.1-3][3.3.1-4]} に対して画像処理を適用し、人間の感覚により主観的に評価を実施した。

まず 1 件目は、深層学習を用いた画像鮮明化で有名な Super-Resolution Convolutional Neural Network (SRCNN) ^[3.3.1-5] について調査を実施した。これは、ネットワークの構造が比較的単純な 3 層構造で畳み込み層と活性化関数 Rectified Linear Unit (ReLU) の組み合わせから構成されている。一般的に深層学習を適用しない鮮明化画像処理手法と比較して高い画像鮮明化精度を実現しているが、本研究開発で想定している放射線や水中の浮遊物の影響によるノイズ除去には対応していないため、本研究開発では適当でないと考えた。

2 件目は、SRCNN の改良版として考案された Fast Super-Resolution Convolutional Neural Network (FSRCNN) ^[3.3.1-6] を選定した。SRCNN より高速に動作し画像鮮明化による高解像度化の性能が向上している。また、調整に必要なパラメータ数が少ないため学習時の条件調整がしやすいメリットがある。ノイズ除去にもある程度対応しているが、対象はブロックノイズや JPEG や PNG における圧縮ノイズに限られることが論文内で言及されており、実際に現実に表れやすい画像ノイズ (ランダムノイズ、ガウシアンノイズ、インパルスノイズ) は、図 3.3.1-2 上段のようにそのまま鮮明化されてしまった。この理由については、FSRCNN がエッジやテクスチャの復元を重視しているため、ノイズが維持されたまま誤って鮮明化された影響で、実際に画像鮮明化及びノイズ除去に関してよい結果を得ることはできなかったためだと考えられる。

3 件目は、Residual Encoder-Decoder Network (RED-Net) ^[3.3.1-7]について調査を実施した。RED-Net は、ノイズ除去や画像鮮明化などのタスクに使用されるネットワークであり、特徴としてはエンコーダとデコーダの二つの部分から構成されている。エンコーダ部分では畳み込み層と特徴を保って画像サイズを縮小するプーリング層を用いて特徴抽出を行う。デコーダ部分では転置畳み込みと呼ばれる縮小された画像の拡大手法を用いてもとの画像サイズに復元する構造となっている。また、残差学習 (Residual Learning) を導入している点が特徴として挙げられる。これは、エンコーダの各畳み込み層と対になるデコーダの畳み込み層の間にスキップ接続 (Skip Connection) を追加することで畳み込み層を経るごとに特徴量の情報が減少していくことで、学習が停滞する勾配消失問題の影響を減少させ、効率的に学習を進めることができると考えられる。RED-Net を用いて画像鮮明化及び画像からのノイズ除去を実施したところ二つの問題点が明らかになった。一つ目の問題点は学習時の適切なパラメータ設定が難しい点である。RED-Net では学習率 (次のステップにどの程度現在の結果を反映させるかを調整する指標) やバッチサイズ (1 回の学習で使用するサンプルの数) 及びエポック数 (全サンプルでの学習回数の単位) といった調整しやすいパラメータに加えて畳み込みと転置畳み込みの層数を適切に決定することが重要である。この指標は、主に学習対象の複雑さや学習データの層数によって決定されるが、決定プロセスが確立されておらず手探りで実施する必要がある。また、全く同一のパラメータで学習した場合でも途中で学習が破綻 (何らかの原因で学習が完了する前に値が発散してしまい学習の継続が不可能になること) する 경우가多く、最後まで学習が完了した場合についても図 3.3.1-2 中段に示すように画像データに鮮明化やノイズ除去といった画像処理を行ったが有益な変化を得ることはできなかった。

4 件目は、Noise2Noise ^[3.3.1-8] と呼称されるノイズ除去処理用の CNN について調査を実施した。このネットワークの特徴として学習用の画像データの収集の容易さが挙げられる。一般的に深層学習を適用して画像からのノイズ除去処理を実施する場合、ノイズが存在しない元となる画像データとノイズを付与した画像データをペアで学習させる必要がある ^[3.3.1-9]、具体的な名称は存在しないが、通称 Noise2Clean と呼称されている。この手法を 1F で取得された画像群に適用しようとした場合、ノイズが存在しない画像を取得することが困難であると考えられる。その場合、期待されるノイズ除去処理の精度を満たさない可能性が高くなるのが容易に想定される。一方、Noise2Noise ではノイズが存在しないクリーンな画像データが不要で、異なる種類のノイズを付加したペア画像のみを学習に使用するため 1F のような応用的な状況下での運用に適していると考えられる。ただし、学習時のペアにおいて付加するノイズは互いに独立した状態を仮定として数学的に理論が構築されているため、その点には注意する必要がある。本検討では上記で説明した画像データ群に対してガウシアンノイズ (平均値 $\mu=0$ 、標準偏差 $\sigma=20\sim50$) の間でランダムに設定した画像データ群を Noise2Noise 用データセットとして使用した。ここで、Noise2Noise を利用してノイズ除去処理を実施した結果を図 3.3.1-2 下段に示す。今回の試験では、ほとんどの場合で画像中からのノイズが減少したことが確認できた。しかし、画像中のノイズがランダムで独立性が担保されていることが拘束条件の一つであるため、画像の状態によっては十分な性能を発揮できない場合がある。引き続きその条件整理を進めていくことが現場適用する際の課題である。

これまでの検討結果を表 3.3.1-1 に示す。勿論、今回調査した深層学習手法以外にもさまざまな画像処理に関するネットワークが存在するが、学習時にクリーンデータを必要としないことで Noise2Noise は学習データの作成・収集といった点でほかの手法と比較して効率的であり、学習も比較的破綻し辛いことが判明したため、この深層学習手法を主として 1F で得られた画像のノイズ除去処理・鮮明化を実施していくこととした。

表 3.3.1-1 各 CNN の特徴及び 1F 画像への適用可能性検討まとめ

ネットワーク名	特徴	鮮明化及びノイズ除去に対する所感	1F で得られるノイズあり画像への適用可能性
SRCNN	● 主に画像のディテールを復元するのに適しており、鮮明化を目的の中核として設計された CNN	● 画像鮮明化は可能 ● ノイズ除去への対応は不可	×（画像鮮明化への適用は考えられるが放射線や水中の浮遊物といったノイズ源の除去への適用は難しい）
FSRCNN	● SRCNN と比較してエッジの復元に効果があり、調整が必要なパラメータも少なく精度も高い	● 画像鮮明化は可能 ● ノイズ除去への対応は不可	×（画像鮮明化への適用は考えられるが放射線や水中の浮遊物といったノイズ源の除去への適用は難しい）
RED-Net	● 画像鮮明化とノイズ除去の両方に対応しているとされているネットワークの層数を変更でき構成自由度が高い	● ハイパーパラメータの調整が難しい学習が途中で破綻してしまう場合が比較的多い	△（学習を最後まで完了させることが難しく安定した鮮明化及びノイズ除去処理を実現することは難しい）
Noise2Noise	● 通常ノイズ除去の学習に必要なクリーンデータが不要なためデータ収集コストが低い ● 数学的にクリーンデータを使用した場合の学習と同等の精度が担保されている	● ハイパーパラメータの最適化なしで一定のノイズ減少効果を確認 ● 定式化されたノイズ（ガウシアンノイズ等）では高いノイズ除去精度を実現	○（パラメータの最適化がされていない場合でも一定のノイズ除去効果が確認でき、学習データやパラメータの最適化によりさらなる画像処理精度の向上が期待される）



図 3.3.1-1 本検証で用いた原画像データ^{[3.3.1-2][3.3.1-3][3.3.1-4]}
(出典：東京電力)



図 3.3.1-2 図 3.3.1-1 の画像へ画像処理を適用した結果
(上段：FSRCNN、中段：RED-Net、下段：Noise2Noise)

(2) 画像伝送を行うための通信方式に関する研究

本研究課題においては、原子炉内で得られたカラー画像を遠隔操作によって原子炉外に伝送させて、それらに基づいて画像処理を適用し、環境構造モデリングを行うための要素技術、システム化技術について研究開発することが目的となっている。これまでの取り組みでは、屈曲可能なモジュール型軌道構造体^[3.3.1-10]上に沿って走行するカメラを搭載した観察ロボットによって画像が取得されることを想定した立体モデリング計算法^[3.3.1-11]、オンラインモデリングシステム^[3.3.1-12]について研究開発を行ってきた。ここでは、一般的な無線ネットワーク通信の技術を使用することでカラー画像取得から立体モデリングまでのシステム成立性について検証が行われた。本プロジェクトにおいても、軌道構造体を原子炉内作業基盤として位置づけて、軌道上を移動しつつカラー画像を取得し外部に伝送して実スケール炉内環境構造モデルを生成する、というコンセプトを踏襲することを考える

と実装性について議論をしていく必要がある。そこで、研究初年度の本研究課題においては、前述の機能をシステムティックに実現するためにも原子炉内において画像を取得して炉外に伝送するための通信手段・方式について検討を行い、候補となる方式の性能について検証実験を行った。

ここで、計算機等において一般的に用いられる通信方式・機器について調査、整理を行った。通信方式としての大別として有線通信と無線通信がありそれぞれの特徴がある。本研究課題で想定されている原子炉内に展開される軌道構造体上を移動する機器から画像を伝送する、という視点で考えると以下ようになる。

- 有線通信

通信速度を高く、安定させることができる。送受信機器間の通信のためのケーブルを設置するためにケーブルマネジメントが必要。

- 無線通信

有線通信より通信速度は低い。環境要因で通信途絶の可能性があり、通信規格により伝送性能が異なる。送受信機器に専用デバイスを設置して通信を行う形式であり、ケーブルマネジメントは不要。

これらの特徴について、前述の想定する開発システムの形式や環境条件の観点から考えてみる。軌道構造体上を機器が移動することを考えると、有線通信方式ではケーブルマネジメントが大きな課題になると考えられる。特に、複数の機能モジュールを同時に移動して動作させることが期待されていることから、通信の高速化や安定化の特徴はあるものの、実装するには技術的に克服すべき点（例えば、ケーブルマネジメントのための新たな追加的な機構設計やシステム設計が必要になる）がある。

また、無線通信について考えると、計算機等における通信規格として一般的には以下のようなものが使用されており、デバイス等の入手性がよい。

- Bluetooth

2.4 GHz 帯で動作する低消費電力無線通信規格を用いたもの。オーディオストリーミング等で広く使用される。

通信速度：125 kbps～2 Mbps、通信距離：最大 100 m

- Zigbee

2.4 GHz、900 MHz、868 MHz 等の無認可周波数帯で動作する低消費電力無線通信。低データレートでの近距離通信向け。

通信速度：20～250 kbps、通信距離：最大 100 m

- Wi-Fi

IEEE802.11 規格に準拠した 2.4 GHz 帯と 5 GHz 帯で動作する無線ローカルエリアネットワーク（WLAN）用通信。

通信速度：11 Mbps～1.3 Gbps、通信距離：最大 300 m

このように、通信速度や通信距離等にそれぞれ特徴がある。ここで、1Fにおける事故を受けて現在の原子炉内環境は以下のようなものである。原子炉そのものは厚みのある鋼鉄で覆われた空間であり、内部にも鋼鉄性の構造物が設置されているとともに、構造物等を支持するための台や放射線遮蔽材として鉄筋コンクリートも配置されている。また、事故後に原子炉の温度を低下させるために冷却水が注入されており、これらが炉内の熱を帯びた構造物等と接触して水蒸気となり、気中に拡散されることで高湿度状態となっているとされている。このように原子炉外からみると、原子炉内環境は、鋼鉄やコンクリートで製造された構造物が設置されていて、気中は高湿度の鋼鉄製の閉鎖空間ということとなる。これらの環境条件に鑑みると、原子炉外もしくは挿入口に通信機を設置しての炉内機器との無線通信は、途絶や通信速度の低下等の可能性が否定できない。さらに、立体モデリングに用いるカラー画像を伝送することを考えると、画像サイズや伝送周期にもよるが数十 Mbps オーダーの通信速度が必要となってくる。これらの調査、分析を行った結果、有線通信、無線通信、本研究課題の想定する機器運用方式や作業環境条件を考えると、ケーブルマネジメントなしにカラー画像伝送可能な通信速度を保てる方式としては一長一短である。

一方、上記の調査の過程において、我々は漏洩同軸ケーブルを用いた通信技術について情報を得た。漏洩同軸ケーブル (Leaky Coaxial Cable : LCX) とは、高周波電気信号向けに使用される被覆電線の一種である同軸ケーブルの外部被覆に複数の孔や隙間を施し、同軸ケーブル内に流した電波がこれらの孔や隙間から漏洩することで、周辺に電波を輻射することが可能な構造のケーブルである^[3.3.1-13]。つまり、ケーブルを所望のエリアや空間に敷設することで、漏洩電波をケーブル周辺に分布させることが可能となっている。つまり、LCX ケーブルそのものが無線通信アンテナのように機能することになり、地下街、ビル内、工場内、倉庫内、列車内、地下鉄やトンネル内等での通信サービス提供のためインフラ技術として活用されている。我々のアプローチでは、軌道構造体を原子炉内に展開することが想定されていることから、軌道構造体上の観察ロボットが移動する際の障害にならない位置に LCX ケーブルを軌道に沿って設置することで、LCX ケーブルを介した近距離 Wi-Fi 通信によって原子炉外の計算機と観察ロボットの間での通信を実現できる可能性があると考えた。一方で、我々の想定する条件では、金属製の軌道構造体に沿って LCX ケーブルを設置することになり、画像伝送のための通信経路としての実用的であるかについては調査が必要であると考えた。

以下では実験条件及び結果について述べる。ここで図 3.3.1-3 は、軌道構造体を用いた実験セットアップを示している。今回の実験では、開発されたプロトタイプのうち、屈曲モジュール 2 リンクと 1 駆動関節分を軌道構造体として見立て、金属筐体の側面に設置した LCX ケーブルを介した通信について検証実験を行った。LCX ケーブルは、エイチ・シー・ネットワークス株式会社製の F-8D-LCX を使用し、LCX ケーブルを接続するアクセスポイントには、フルノシステムズ社製 ACERA950 を用いた。また、アクセスポイントで用いた電波プロトコルは IEEE802.11n (2.4GHz) でインフラストラクチャネットワークモードに設定した。軌道構造体が屈曲することを考慮に入れて LCX ケーブルはリンカー一つ (リンク長 1.5 m) に対して 1.2 m の LCX ケーブルを配置し、リンク間をつなぐ関節部に 0.5 m のアプローチケーブルを配した (図 3.3.1-4)。また、予備実験においてアクセスポイント本体から電波発信されていることが判明したことから、LCX ケーブルのみを介した通信性能をみるためにアクセスポイント周辺をゲル入りの袋で覆って電波遮蔽を行った。さらに、図 3.3.1-5 は今回実験に用いた軌道構造体に沿って移動する観察ロボットの外観を示している。観察ロボットには、カメラ画像を取得し伝送するためのカメラモジュール及び無線 LAN デバイ

スが接続された組み込み計算機 Raspberry Pi4 TypeB (8 GB Memory、Ubuntu 20.04LTS) が搭載されている。観察ロボットからの画像受信や通信状態モニタリングを行うためのデスクトップ計算機 (Intel Xeon Gold 5222(3.8 GHz 4Cores)×2、96 GB Memory、4 TB SSD、Ubuntu 20.04LTS) を LCX ケーブルが接続されたアクセスポイントに有線接続して実験を行った。

実験では、前述の屈曲モジュール 2 リンクと 1 駆動関節からなる軌道構造体の基部、関節部、先端部 (図 3.3.1-3) において、通信状態として電波強度、スループット、画像伝送周期について測定することとした。電波強度測定には、各地点周辺にラップトップ計算機 (WindowsPC) を設置してソフトウェア Wi-Fi Analyzer によって測定した。また、スループットについては、前述のデスクトップ計算機上でソフトウェア・ツール iperf によって測定を行った。また、画像伝送周期については、ミドルウェア ROS (Robot Operating System) フレームワークによって 320×240 pixel、640×480 pixel、1280×960 pixel の解像度の画像を観察ロボット上で圧縮した後に伝送した際のデスクトップ計算機での受信周期について測定を行った。

表 3.3.1-2 は前述の条件で実施した実験結果の一覧を示している。電波強度の結果についてみると、一般的に安定した通信接続を維持できるといわれている -70~-50 dBm の範囲内に分布しており、各地点において電波強度の観点で安定接続が可能であることがわかった。ここで、関節部周辺において他の地点よりも少し低いレベルにあるが、関節部周辺は 2 本の LCX ケーブルを接続しているアプローチケーブルのある部分となっており、アプローチケーブルからは電波が輻射されないことからその影響がでているものと思われる。また、スループットの測定については、受信スループットについての測定値をみており、30 秒間の平均値を表に記載している。結果より各地点で 38.8~42.8 Mbits/s の範囲にあることがわかり、前述した画像伝送に必要な数十 Mbps オーダーの通信速度がでることが確認された。さらに、画像伝送周期の実効値を確認するために、デスクトップ計算機と観察ロボットに ROS Noetic Ninjemys をインストールして、観察ロボット上のカメラモジュールで撮影した画像を圧縮し、ビデオレートと同じ 30 Hz で配信 (image_transport^[3.3.1-14]を活用) することでデスクトップPC上での受信周期を測定した。各地点での測定結果は、320×240 pixel、640×480 pixel ではビデオレート 30 Hz を維持し、1280×960 pixel では 5 Hz 程度であることがわかった。これらの実験結果により、軌道構造体の金属筐体に LCX ケーブルを接触して設置した場合においても観察ロボットとの無線通信が可能であることがわかった。高解像度画像の伝送はビデオレートレベルを維持できないことがわかった。原子炉内環境のモニタリングや立体モデリング計算には高解像度画像が有用な場合があると考えられるが、今回の実験の結果から、画像解像度の選択、観察ロボットの移動速度や移動パターンの設定等の議論の参考になるデータが得られたと考えられる。今後も同様の実験を積み重ねることで通信特性を把握し、軌道構造体上に通信インフラを展開する方法について検討していく。

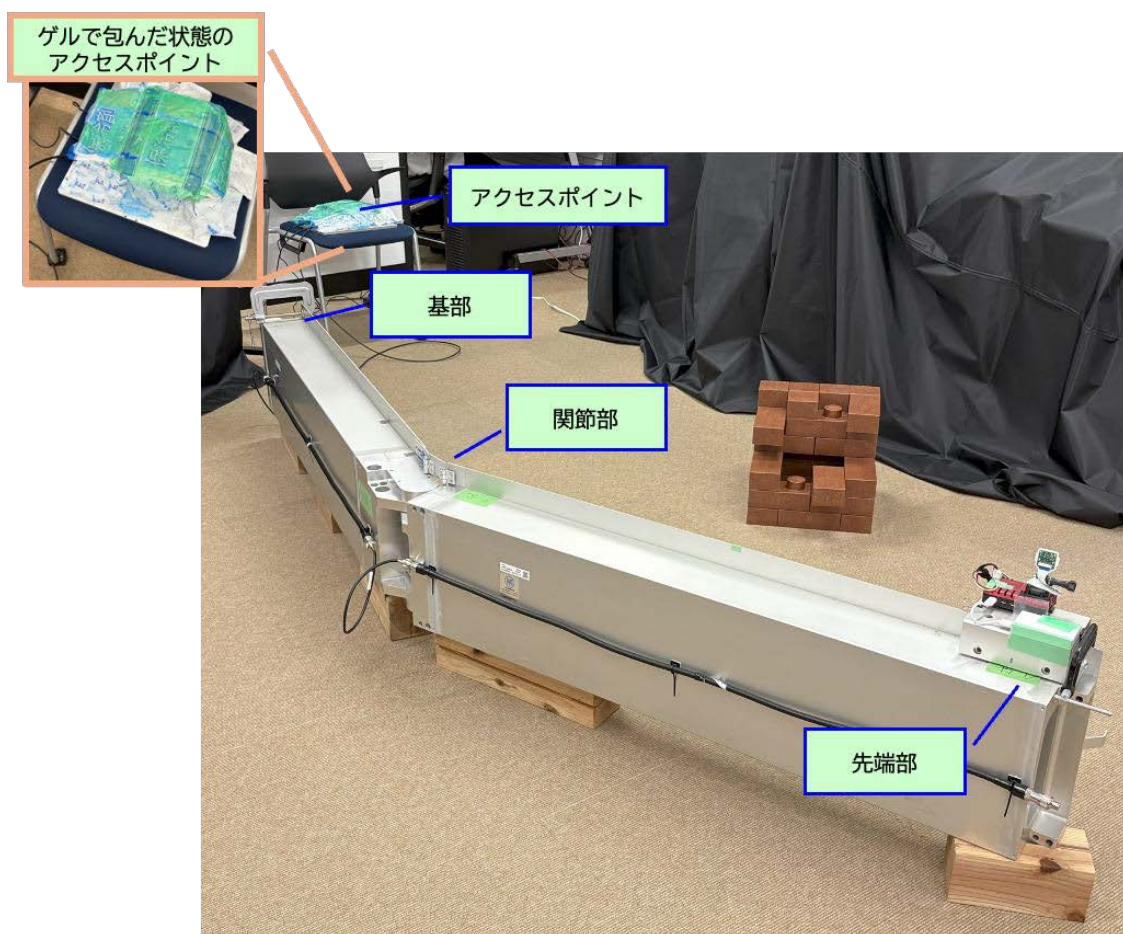


図 3.3.1-3 通信実験の様子

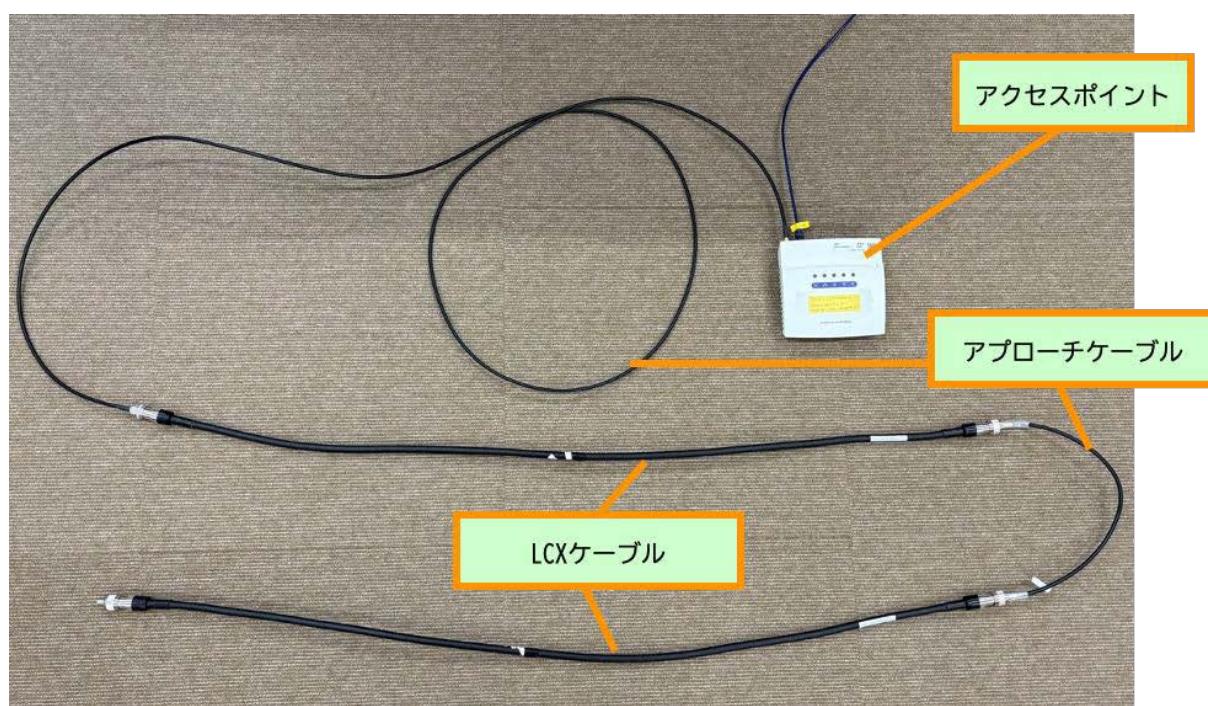


図 3.3.1-4 実験に用いた LCX ケーブルとアクセスポイント

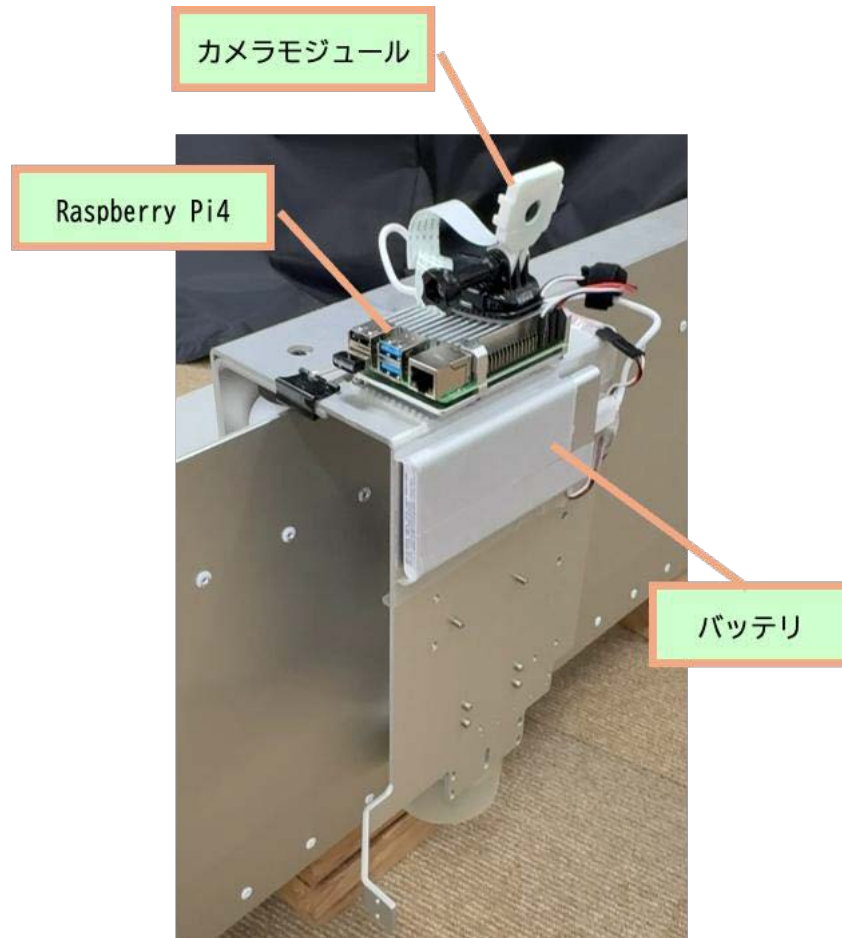


図 3.3.1-5 実験に用いた観察ロボットの外観

表 3.3.1-2 通信実験結果

			基部	関節部	先端部
電波強度 (dBm)			-65~-63	-68~-67	-63~-62
スループット (Mbps/s)			38.8	42.8	40.3
画像伝送周期 (Hz)	320×240 (pixel)		30.00	29.97	29.96
	640×480 (pixel)		30.02	30.01	30.01
	1280×960 (pixel)		5.45	5.49	5.20

3.3.2 試行応答のスケラブル評価に向けた統合 DX プラットフォーム

(1) 3次元シミュレータの構築と予備的検討

本項目では、統合 DX プラットフォームの開発として、特に燃料デブリ取り出し工程の 3 次元シミュレータの構築と予備的検討に取り組んだ。シミュレータとしては Gazebo^[3.3.2-1] を活用し、ロボットミドルウェア ROS1^[3.3.2-2] Noetic をベースに操作指令の入力を図った。遠隔ロボットや環境の簡易モデルの構築や線源配置を検討した。具体的には、ロボットモデルとしては、関連事業で開発された 2.5 m 規模のロボットアームの 3D モデルを構築した。燃料デブリに見立てた模擬物質の 3D モデルを床面に配置することで、ロボットアームを下に伸ばすことで燃料デブリに接近するという、燃料デブリ回収工程の一部を再現した。

図 3.3.2-1 に、3 次元シミュレータの模式図を示す。構成モジュールによる環境情報取得に向けた評価として、床面に配置した燃料デブリ模擬物質の各々が線源と想定したときのロボットアーム手先の線量率を計算可能とした。

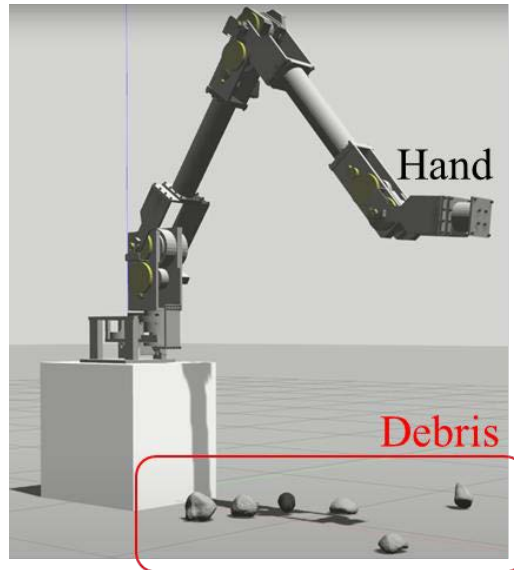


図 3.3.2-1 3次元シミュレータ

ロボットアーム手先における線量率尺度 I を、式(3.3.2-1)にて計算した。線源からの距離のみによって決定される値であり、核種などを考慮しない。あくまで尺度としての用法にとどまっており、各デブリの線量率などの導入は今後の課題とする。

$$I = \sum \left\| \frac{1}{p_{hand} - p_{debris}} \right\| \quad \text{式(3.3.2-1)}$$

ロボットアームを初期位置から燃料デブリ付近まで降下させ、その後初期位置まで挙上させたときのロボットアーム手先における線量率尺度 I を図 3.3.2-2 に示す。30 s 前後のとき、ロボットアーム手先が燃料デブリ付近に位置し 燃料デブリからロボットアーム手先までの距離が小さくなったことで、線量率尺度が概ね 4→10 と、2 倍程度に増加していることがわかる。同様のデータは、線源から測定対象までの距離情報さえあれば計算可能である。すなわち、例えばロボットアーム手先だけでなくロボットベース部などの部位でも計算可能であるので、両者の電装系の受ける線量率の違い、その影響による電装系の損傷を定量的に見積る手がかりとなると考えられる。なお、現状では線源と測定対象点の間に存在する物体によるガンマ線の遮蔽効果などは計算に入っていない。PHITS や Geant4 などの放射線シミュレーションのフレームワークを導入することで、当該効果の計算が可能となると考えられる。

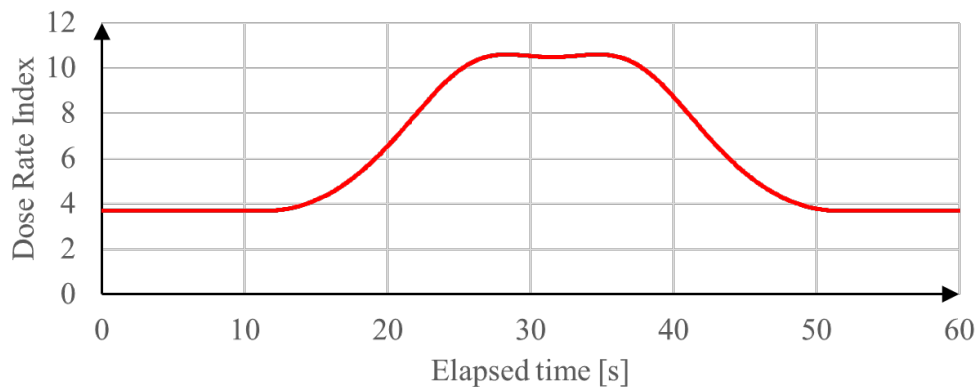
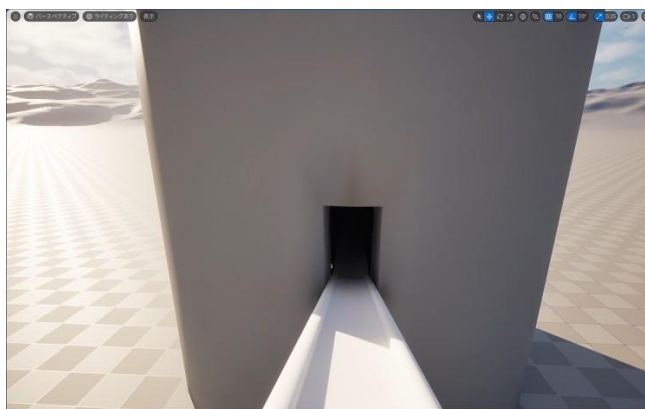


図 3.3.2-2 ロボットアームの降下-挙上動作における手先部の線量率尺度

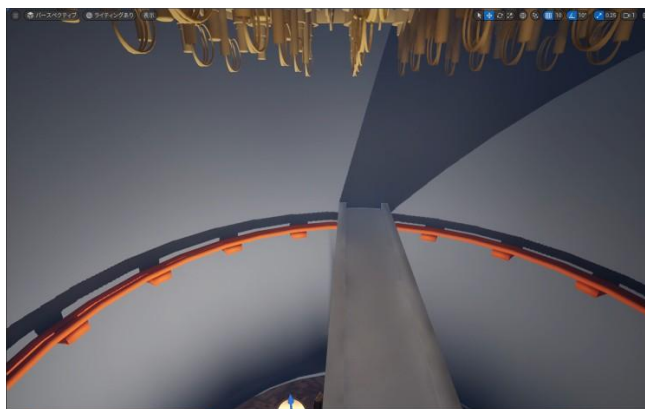
また、前述までの遠隔操作と計測装置の統合を指向したシミュレータ構築と並行した取り組みとして、実時間のレンダリングを指向した試みについて説明する。近年の深層学習技術を支えてきた GPU (Graphics Processing Unit) は元来ゲームアプリケーションや CAD (Computer-Aided Design) ソフトウェアにおけるリアルタイム画像処理を目的として発展してきた。近年の GPU 周辺技術の進歩により、ゲームエンジンを活用した建築・製造業等における実時間の写實的レンダリングに基づくデジタルツイン構築が盛んに取り組まれている。燃料デブリ取り出し工程における代表事例として debrisEye^[3.3.2-3]が存在する。

本事業の終了課題（英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業 研究人材育成型廃炉研究プログラム「燃料デブリ取り出し時における炉内状況把握のための遠隔技術に関する研究人材育成」）において構築された PCV ペDESTAL の 3D モデルをゲームエンジンの一つである Unreal Engine 5 で描画した事例を図 3.3.2-3 に示す。計算機仕様として、CPU 2.9 GHz、RAM 32 GB、NVIDIA GeForce RTX 4050 Laptop GPU を搭載するラップトップ PC にて検証を行った。内部で視点を操作することで PCV 内部の構造分布や距離感を視覚的に捉えることができる。例えば、光源配置がない状態だと何一つ視認できない状況が再現された。光源や噴霧などを容易に配置編集し、その影響を見積ることが可能である。今後、計測システムとの統合を視野に入れた外部コンポーネントとの通信が有効となると考えられる。

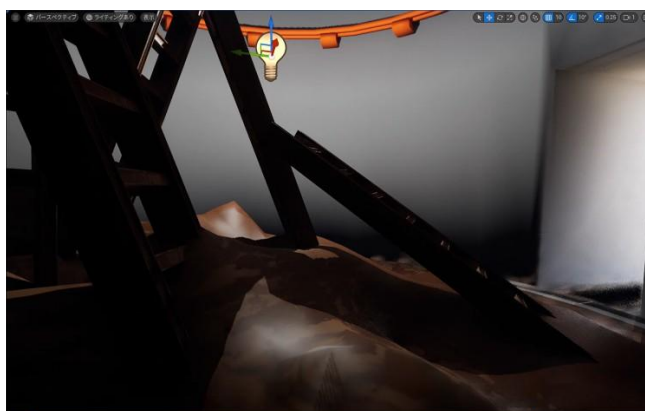
入口



進入直後



底部



天井仰角

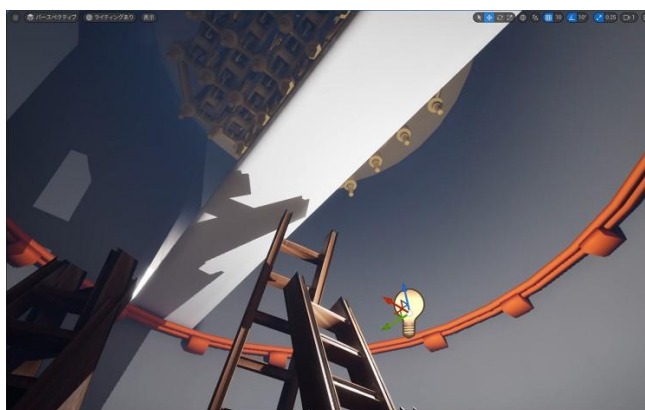


図 3.3.2-3 ゲームエンジンを活用したペDESTAL 3D モデルの実時間レンダリング

加えて、DX 環境の 3 次元的提示に向けた試みとして、空間再現ディスプレイを活用した PCV ペデスタルモデルの 3 次元表示を行った。3 次元表示の様子を図 3.3.2-4 に示す。空間再現ディスプレイは、一般の 3D モデルを 3 次元的に表示し、断面などを編集することで例えば製造業における設計組立て支援、医療分野における手術経路シミュレーションに活用されている。燃料デブリ取り出し工程における同様の支援機構への活用が期待される。



図 3.3.2-4 空間再現ディスプレイを活用したペデスタル 3D モデルの 3 次元表示

今後の課題として、シミュレータ環境やソフトウェアの刷新を図る。例えば、ロボットモデルや環境情報取得に活用したロボットミドルウェア ROS1 は、令和 7 年内にサポートが終了する。後継版の ROS2 等への対応が不可欠となる。

(2) 実機-DX 環境の等価的入力評価に向けた入出力デバイス検討

統合 DX プラットフォームの構築にあたって、DX プラットフォーム自体の開発と並行して実機遠隔操作の評価のための環境構築が必要となる。そこで、DX プラットフォームと同様に操作可能な実機遠隔操作環境の一環として、音響機器操作デバイスを活用したロボットアーム操作に取り組んだ。

MIDI (Musical Instrument Digital Interface) は電子楽器演奏データの共通規格であり、音響操作機器の操作通信においても標準的に活用されている。多数のスライダや回転操作入力を受け付けるオーディオミキサ等の MIDI コントローラは、ロボット関節角度などの直接的入力や各種制御パラメータの調整にも効果的に作用すると考えられる。このような背景から、災害対応ロボット競技会におけるヒューマノイドロボットの遠隔操作での使用例が報告されている^[3.3.2-4]。これは燃料デブリ取り出しにおける、多様な構成要素から成る遠隔操作システムを見通しよく取り扱ううえでのヒントとなると考えられる。

実機ロボットアーム操作環境を図 3.3.2-5 に示す。制御用ノート PC に操作入力のための MIDI コントローラとロボット制御用の Arduino マイコンが接続されている。Arduino マイコンは、小型卓上ロボットアーム Braccio を制御する。

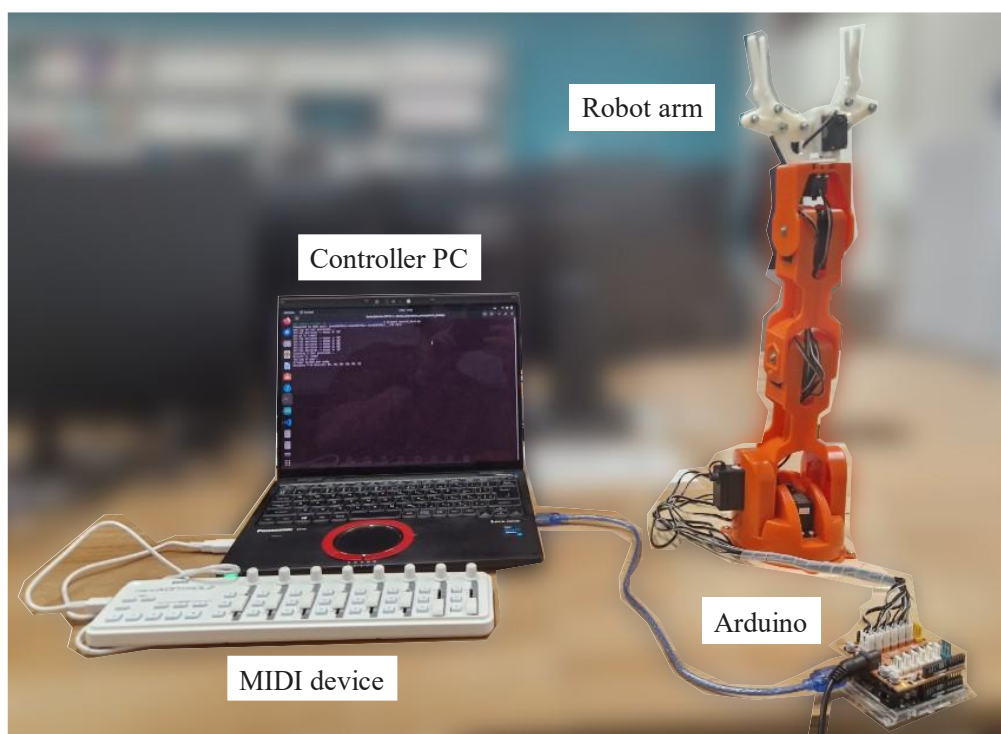


図 3.3.2-5 実機ロボットアーム操作環境

卓上ロボットアームの幾何モデルを図 3.3.2-6 に示す。各々の寸法値は表 3.3.2-1 に記載した。

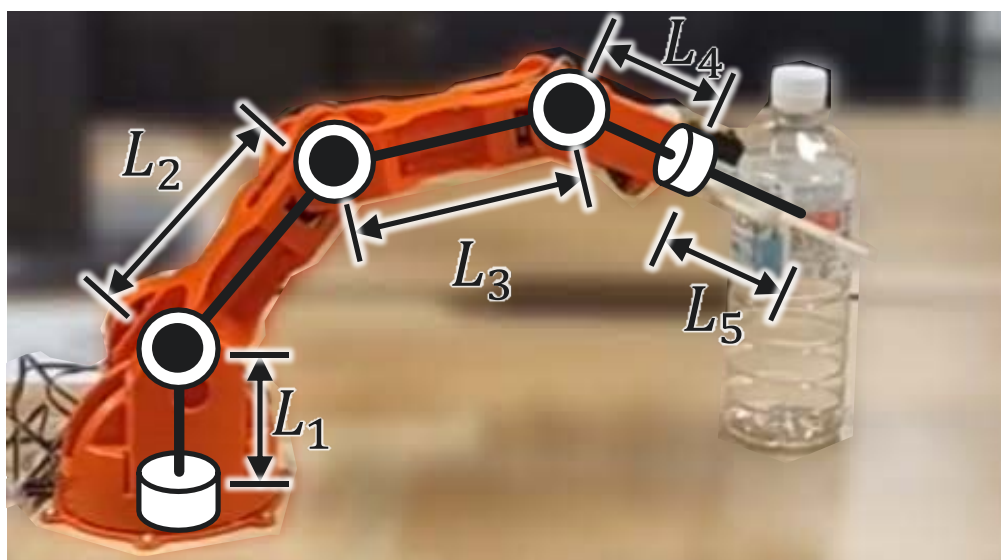


図 3.3.2-6 実機ロボットアーム幾何モデル

表 3.3.2-1 ロボットアームの幾何パラメータ

Parameters [m]	Value
L_1	0.05
L_2	0.12
L_3	0.22
L_4	0.06
L_5	0.06

MIDI コントローラの構成を図 3.3.2-7 に示す。八つのリニアスライダとロータリスイッチをはじめとした各種入力を備える。

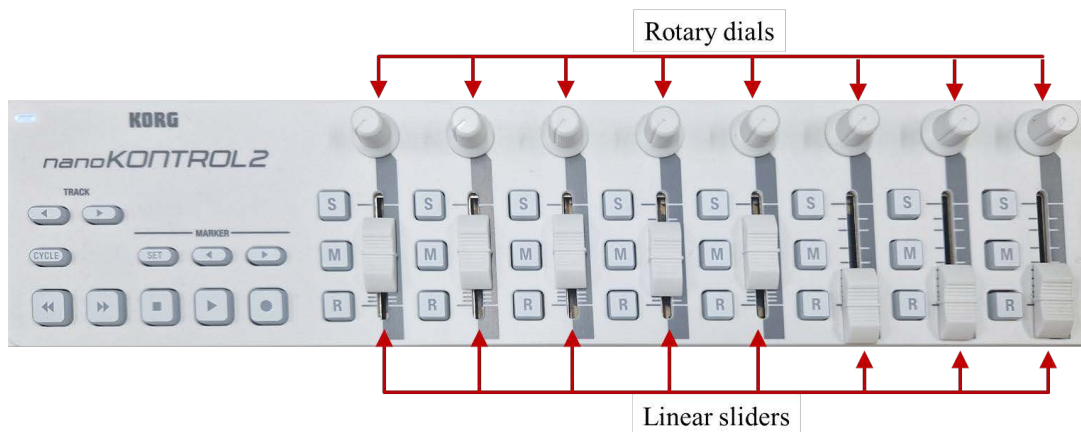


図 3.3.2-7 MIDI コントローラ

制御 PC にて Python をベースとした制御プログラムを作成し、MIDI コントローラへの入力を関節角度指令へと変換・ロボット操作した。今後の課題として、DX プラットフォーム上でのロボットモデルの追加と同等の入力の受付の評価が存在する。また、MIDI コントローラを活用した各種遠隔操作機能の充実も挙げられる。例えば、以下が存在する。

- ロボット制御パラメータやカメラなどのセンサパラメータの動的な調整と保存
- キーポーズの作成や設計軌道のインタラクティブな再生、巻き戻し
- モータフェーダの導入による実機ロボットや DX プラットフォームからの入力デバイスへのフィードバック

3.3.3 モジュール化された放射線センサ・ロボット技術の統合による炉内状況把握 (再委託先：東北大学、福島高専)

(1) 中性子線源分布推定についての基礎検討

炉内の状況は未知の部分が多く、また、作業の進捗に応じて変化する。したがって、カメラや放射線センサ等による継続的な状況把握が必要である。特に、燃料デブリの分布を把握し、臨界管理をしながら燃料デブリの取り出しをするためには、中性子線源の分布を把握することが必要となる。

線源の分布を把握するためには、ロボット技術と放射線計測技術を統合し、複数地点での検出器の位置推定結果と中性子やガンマ線の測定結果を融合する必要がある。

令和 6 年度は、燃料デブリ取り出し工法に応じた中性子線源分布推定に使用する計測の要求仕様等について検討し、中性子線源の分布推定手法についての基礎検討を行った。

燃料デブリの取り出し工法については、格納容器内が非常に高線量であり人が入れないこと、放射能の拡散を抑えつつ格納容器を開口しなければならないこと、燃料デブリの状態変化による再臨界に対処しなければならないこと等さまざまな考慮すべきことがある。これらを踏まえて NDF 及び東京電力ではいくつかの案が検討されているが、ここでは特に気中工法及び充填固化工法、充填切削工法^[3.3.3-1]を想定することとした。

気中工法は、燃料デブリが気中に露出した状態もしくは低水位で浸漬した状態で取り出す工法であり、上からのアクセスと横からのアクセスが検討されている。また、気中工法オプションは、充填材により燃料デブリを安定化させつつ現場線量を低減し、オペレーションフロアに設ける比較的小さな開口部から、掘削等により、燃料デブリや炉内構造物等を取り出す工法である。充填切削工法は、燃料デブリを充填材により安定化させた後に大きく切り出すことでデブリを取り出す工法である。

本研究では、これらの工法を想定し、取り出しや充填固化の前に上からアクセスして放射線の計測を行い、線源の分布を把握することを考える。

放射線を測定するセンサは通常、測定地点でのスカラー量もしくはセンサによってはそれに加えて放射線の飛来方向を知ることができるが、いずれにしても単一地点での測定では放射線がどこから飛んできたか、すなわち線源がどこであるかは特定できない。そのため、複数地点での計測が必要不可欠である。

原子炉内部の多地点で測定されたカウントデータをもとに線源の分布を推定する方法として、ここでは、ベイズ推定と最大事後確率推定（MAP 推定）による方法^[3.3.3-2]、逐次近似画像再構成法の一つである Maximum Likelihood-Expectation Maximization（ML-EM）法^[3.3.3-3]と機械学習ベースの手法の一つである Deep Image Prior^[3.3.3-4]について適用可能性を検討した。ベイズ推定を用いる利点は、炉心損傷の進行状況や過去のシミュレーション結果等の事前情報を組み込むことができる点である。事前分布を適切に選択することが良好な推定結果につながるが、適切な事前分布の設定は容易ではない。一方、ML-EM 法は PET や CT 画像再構成でも広く用いられている手法であり、中性子計測データの処理にも適用が容易であるが、3 次元空間では収束速度が遅く、大規模なデータを扱う場合には計算負荷が高くなる。Deep Image Prior は、事前学習不要で複雑な分布に対してもニューラルネットワークによって適応的な表現が可能であるという利点がある一方で、反復計算の負荷が高いことや過学習のリスクがある。

令和 6 年度はこのうち ML-EM 法に着目し、測定空間の密度が推定結果にどのような影響を与えるかについて、まずは 2 次元平面内でのシミュレーションで評価した。シミュレーションにおいては壁等による遮蔽や散乱は無視できるものとし、直径 5.5 m の円形領域内に 10 点の点線源をランダムに配置した状態で、一定間隔の格子点上で測定を行ったものとして ML-EM 法による画像再構成によって線源の推定を行った。図 3.3.3-1～図 3.3.3-5 は、それぞれ 0.1 m、0.2 m、0.5 m、1.0 m、2.75 m 間隔で測定した際の結果の例である。各図の左は線量分布を表しており、右は ML-EM 法によって推定された線源分布である。

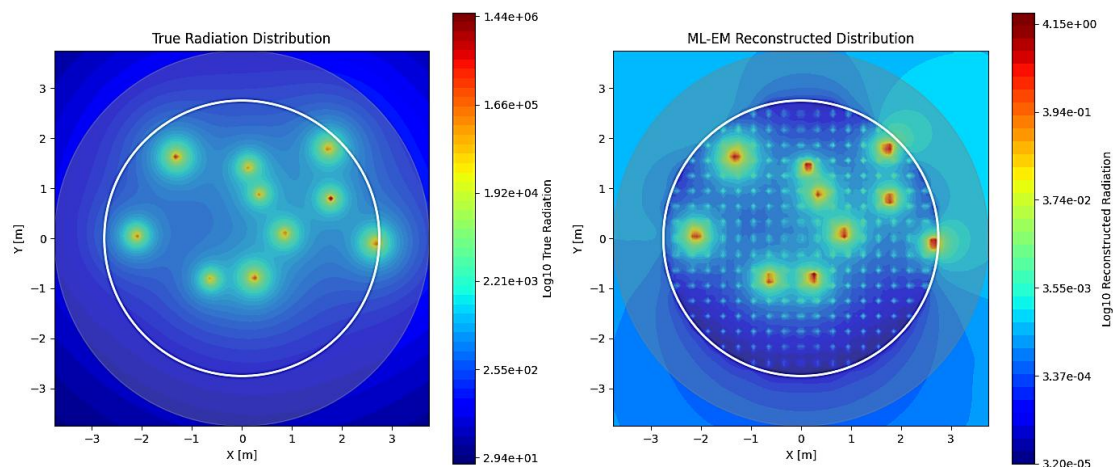


図 3.3.3-1 ML-EM 法による線源推定 (測定間隔 0.1 m)

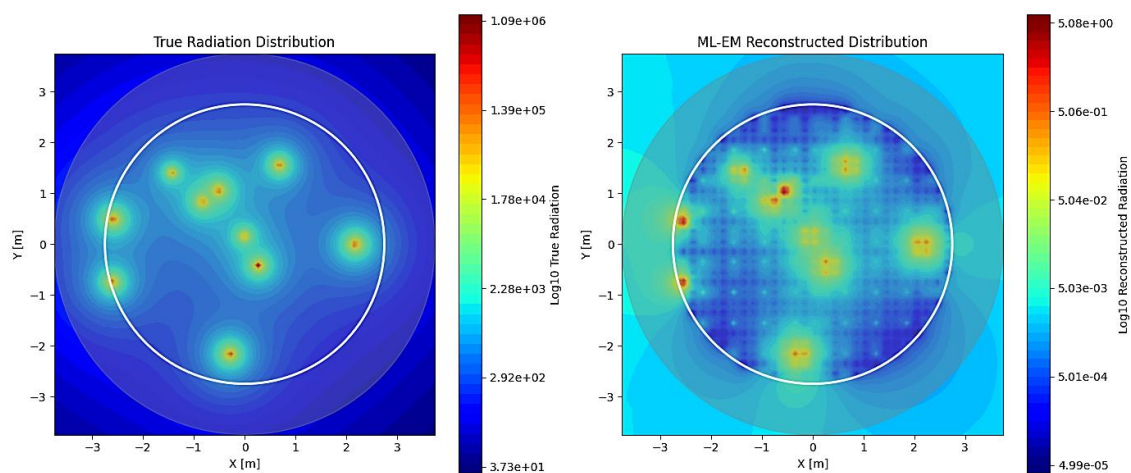


図 3.3.3-2 ML-EM 法による線源推定 (測定間隔 0.2 m)

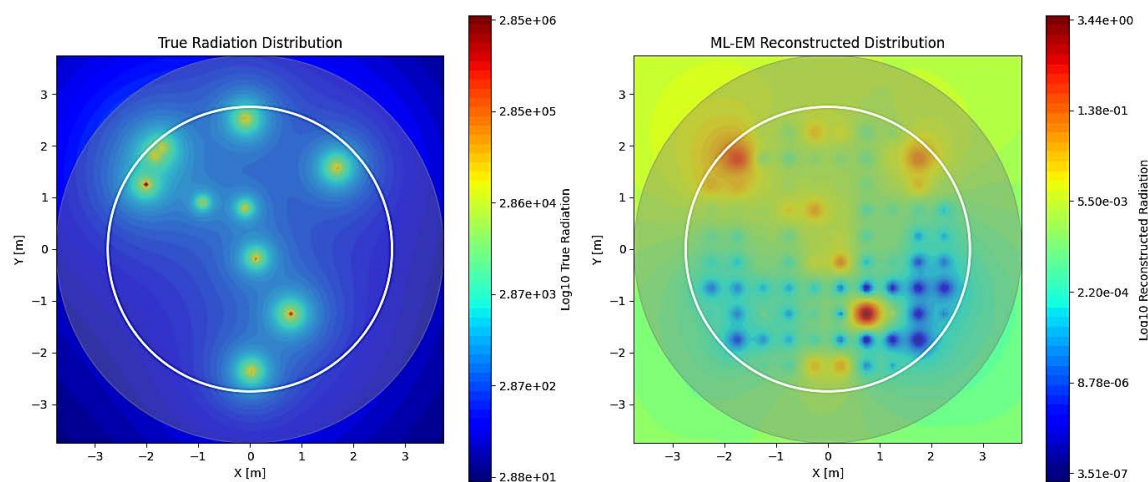


図 3.3.3-3 ML-EM 法による線源推定 (測定間隔 0.5 m)

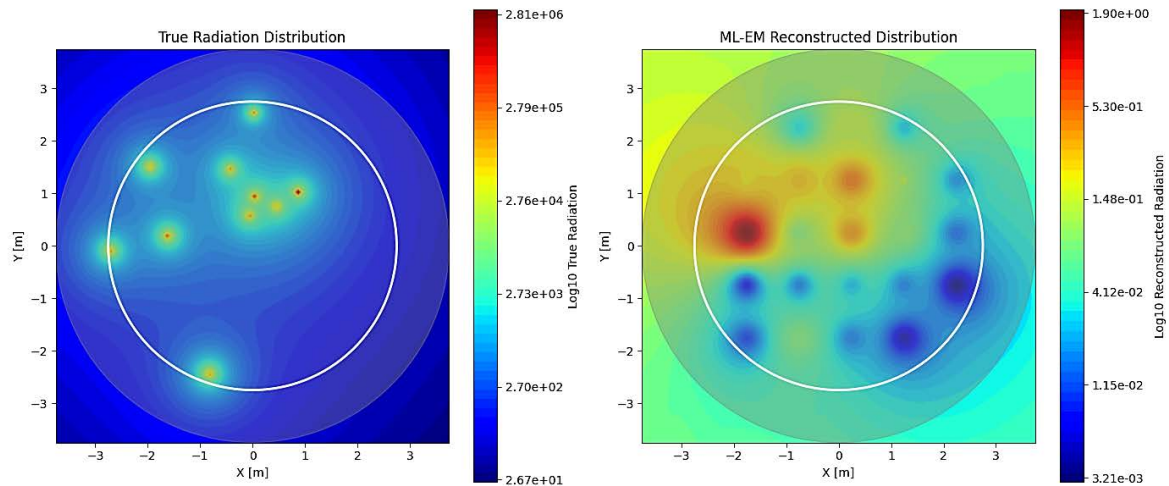


図 3.3.3-4 ML-EM 法による線源推定（測定間隔 1.0 m）

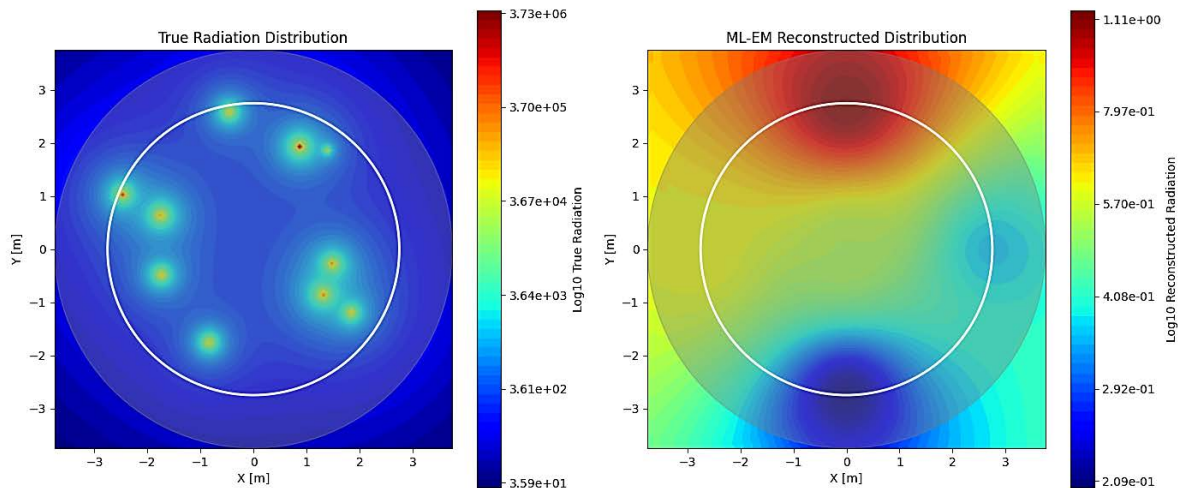


図 3.3.3-5 ML-EM 法による線源推定（測定間隔 2.75 m）

図から明らかなように、測定間隔が 0.5 m 以内の場合はある程度正しく線源の推定がなされているが、1.0 m 以上の場合は線源の推定精度が低くなっている。測定間隔を小さくすることによって、繰り返し計算を行わなくても概ね正しく線源の推定を行うことができると期待できるが、一方で測定に要する時間的コストが膨大になってしまう。推定精度と測定時間（測定箇所数）はトレードオフの関係にあるため、オペレーションにかけることのできる時間の制約に基づいて適切な測定間隔を設定することが肝要である。

(2) センサ・ロボットの機能モジュール化についての基礎検討

選択されるデブリ取り出し工法や逐次明らかになる炉内状況に応じて必要となるロボットや放射線検出器等センサの機能は変わりうる。したがって、センサやロボットを適切な粒度でモジュール化し、適用状況に応じてモジュールを組み替えることが肝要である。

令和 6 年度は、放射線源分布の推定をターゲットとして、センサ・ロボットのモジュール化の基礎検討を行った。

原子炉内部の状況に応じたモジュールの組み替えや高放射線環境下での運用による故障を考慮すると、各モジュールが独立して交換可能であること、部分的な故障がシステム全体に波及しない設計であること、また、現場での迅速な交換を実現するための統一された接合部及びインタフェースを有することが必要である。これらの要求項目を踏まえ、ここではプラットフォーム上に4種類の主要モジュールを搭載するという考え方で検討を行う。

検討にあたっては、3.2.2項で検討されているRail Spiderの利用を前提とした。プラットフォームとはRail Spiderのアーム基礎部及び軌道アーム部を指している。この上に移動モジュール、アームモジュール、センサモジュール、ハンドモジュールがタスクや状況に応じて適切な組み合わせで搭載される(図3.3.3-6)。

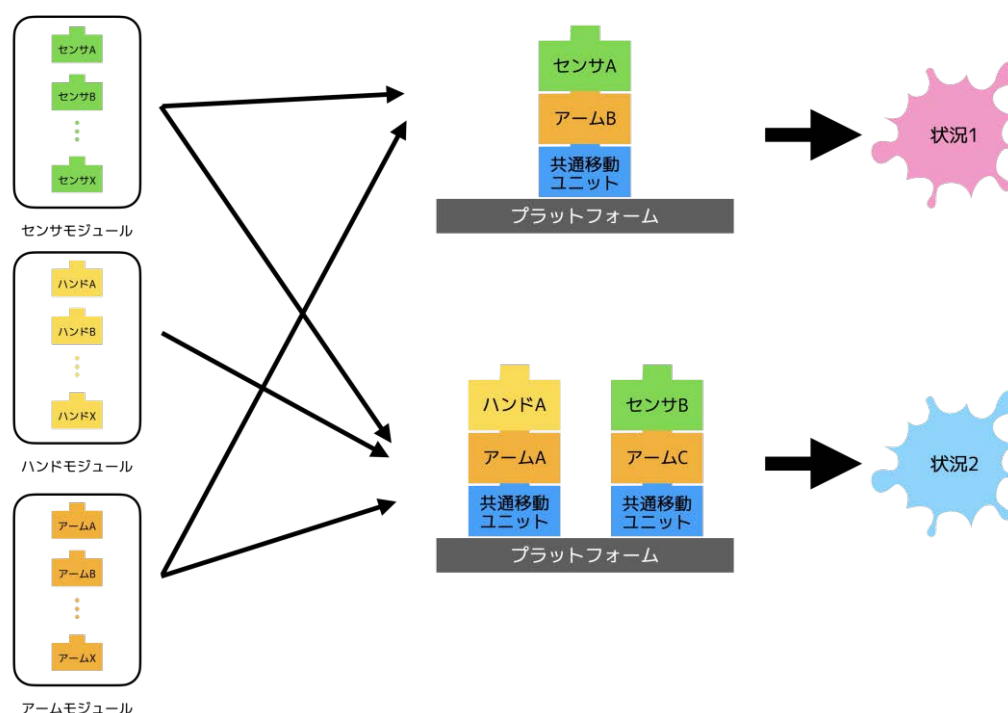


図 3.3.3-6 状況に応じたモジュールの組み替え

移動モジュールは軌道アーム部を移動するためのモジュールであり、3.2.2項で共通移動ユニットと呼ばれているものである。このモジュールに対して状況に応じてアーム、センサ、ハンドのモジュールを取り付けて利用する。センサ、ハンドモジュールについては、アームモジュールの先に取り付けるか、または移動モジュールに直接取り付けることが想定される。センサモジュールとしては、ガンマ線や中性子を測定するための放射線センサモジュールやカメラモジュール、温度等を測定するためのモジュールなどさまざまなものが考えられる。例えば放射線源分布の推定というタスクであれば、共通移動ユニットにアームモジュールが取り付けられ、その先にガンマ線・中性子を測定可能なセンサモジュールを取り付ける。一方、燃料デブリのサンプリングであれば、サンプリング自体を行うためのハンドモジュールがアームモジュールの先に取り付けられて利用されるとともに、臨界管理のために中性子を測定するためのセンサモジュールが別のアームモジュールの先に取り付けられて利用されることが考えられる。各モジュールは直接相互通信するのではなく、中央制御ユニットを介して情報のやり取りを行う。また、電源については各モジュールがバッテリーを搭載するものとする。

放射線源分布の推定にあたっては、原子炉内部の複数箇所に 3 次元的に放射線測定センサを配置する必要がある。Rail Spider のプラットフォーム自体を上下させることも可能ではあるが、軌道アーム上のほかのモジュールにも影響を与えてしまうため現実的ではない。そこで、軌道アーム部から下方向に放射線センサモジュールを下ろすためのアームモジュールを用いるものとする。軌道アームの姿勢変化と共通移動ユニットによるアーム上の移動によって、水平面内の移動は可能であるため、放射線源分布推定に必要なアームモジュールは鉛直下方向にのみ伸展できればよい。令和 6 年度は、高ガンマ線線量下動作中性子ガンマ線分析モジュールの研究開発に取り組んでいる東京大学、富山高専のグループと議論し、放射線センサモジュールの目標サイズを 80 mm×80 mm×80 mm、目標質量を 1 kg と設定した。また、軌道アームの高さから最大で 2.5 m 程度まで放射線センサモジュールを下に降ろすことを想定する。さらに、(1)での結果に基づき、最低でも 0.5 m 間隔で測定を行う必要がある。一方で、アームモジュールは共通移動ユニットに接続して移動するため、測定時以外はある程度コンパクトになることが求められる。

以上を踏まえて、アームモジュールの機構としては、テレスコピックアーム機構（図 3.3.3-7 左）もしくはワイヤウインチ機構（図 3.3.3-7 右）を候補とした。



図 3.3.3-7 放射線源分布推定のためのアームモジュール
（左：テレスコピックアーム機構、右：ワイヤウインチ機構）

テレスコピックアーム機構は伸縮する多段構造のアームであり、比較的剛性が高く、先端での振動を小さく抑えられることが期待できるが、機構が複雑で重量が増え、伸縮機構の摩耗や詰まりのリスクが想定される。ワイヤウインチ機構では、ワイヤでセンサを吊り下げ、ウインチを用いて上下させる。シンプルな構造で軽量に作ることもできるという利点があるが、剛性が低くセンサの振動が避けられない、ワイヤが絡まるリスクがあるなどの課題がある。令和 7 年度以降では、これらの機構について試作を通じて適用可能性を評価する予定である。

また、放射線源分布の推定をターゲットとして、センサ・ロボットのモジュール化の基礎検討を行い、照射試験についても検討した。具体的には、国内の照射施設を調査し検討した結果、株式会社アトックス技術開発センターのガンマ線照射施設（Co-60）で令和 7 年度以降に照射試験を行い、耐放射線性評価を行うこととした。

(3) 耐放射線性と位置計測手法の検討

要求される耐放射線性を検討した。RPV 内部の線量率を最大 100 Gy/h で 10 時間の作業と仮定し 1000 Gy とした。 ^{60}Co と ^{137}Cs のガンマ線エネルギーの違いが電子部品の耐放射線性にどのような影響を与えるのか文献調査をしたが、文献を見付けることができなかった。

位置計測について検討した結果、俯瞰カメラとマーカーを使ってロボットに搭載してあるマーカーを認識する手法が本システムに適していると判断した。

3.3.4 まとめ

計測-遠隔ロボット統合技術と実証では、遠隔取得画像に基づいた実スケール環境構造モデリングシステムの研究開発において、遠隔取得画像上に表れる環境影響によるノイズの除去や鮮明化を行う画像処理に深層学習を適用するための検討を行うとともに、炉内からの画像データ伝送を想定した情報通信の基盤となる通信方式選定に関するデータ取得検証実験を行った。具体的には、画像処理に適用した深層学習のネットワークについて特徴の調査及び基礎的な画像処理実験による検討を実施し、令和 7 年度以降の研究開発において主に使用するネットワークを選定した。また、画像データ伝送のために原子炉内の環境条件と通信方法の特徴を整理したうえで、漏洩同軸ケーブルを用いた通信方式に注目して基礎的な通信実験を実施してデータ収集及び性能確認を行った。また、試行応答のスケラブル評価に向けた統合 DX プラットフォームにおいて、統合 DX プラットフォームの開発に取り組んだ。遠隔ロボットや環境の簡易モデルの構築や線源配置を検討した。構成モジュールによる環境情報取得に向けた評価を行った。具体的には、実施結果の要点として、3 次元シミュレータの構築と予備的検討及び入出力デバイス検討を挙げる。構築した 3 次元シミュレータ上では、ロボットアーム手先部における燃料デブリ模擬物質由来の線量率尺度の評価が可能となった。そして、モジュール化された放射線センサ・ロボット技術の統合による炉内状況把握において、燃料デブリ取り出し工法に応じた中性子線源分布推定に使用する計測の要求仕様等について検討し、中性子線源の分布推定手法についての基礎検討を行った。また、放射線源分布の推定をターゲットとして、センサ・ロボットのモジュール化の基礎検討を行い、照射試験についても検討した。さらに、建屋内で使用するロボットのセンサ類に求められる耐放射線性と位置計測手法について、検討した。具体的には、センサ・ロボットのモジュール化の粒度について検討し、3.2.2 項(2)②で検討中の Rail Spider から下方向にセンサを降ろし中性子等の計測をする方法について検討した。要求される耐放射線性を検討した。RPV 内部の線量率を最大 100 Gy/h で 10 時間の作業と仮定し 1000 Gy とした。 ^{60}Co と ^{137}Cs のガンマ線エネルギーの違いが電子部品の耐放射線性にどのような影響を与えるのか文献調査をしたが、文献を見付けることができなかった。位置計測について検討した結果、俯瞰カメラとマーカーを使ってロボットに搭載してあるマーカーを認識する手法が本システムに適していると判断した。

3.4 廃炉工程を俯瞰した性状把握、キャラクターゼーション

3.4.1 燃料デブリ分布推定に向けた数値計算技術の開発

(1) 剛体モデルの開発

燃料デブリのような高ヤング率を有する固体を剛体とみなし、モデリングを実施した。従来手法^[3.4.1-1]では、剛体を剛体としてモデリングしたため、燃料デブリ分布推定において重要な相変化（溶融・凝固等）及び混相流適用に課題があった。そこで、本研究では流体の支配方程式を用いながらも剛体を計算できる手法を確立した。剛体計算手法の概略図を図 3.4.1-1 に示す。最初は剛体も流体として扱うため、流体、剛体識別することなく運動量保存式を計算する。その後、剛体と識別された粒子群の初期形状を維持するように重心を中心として座標修正することで剛体を模擬した^[3.4.1-2]。本手法は重心の剛体の加速度が理論解と一致することが証明されているため、剛体計算として有用だけでなく、双方とも流体の支配方程式を用いているため、連成問題で課題となる(1)圧力勾配に起因する力、(2)粘性力を陰的に考慮できているという特徴を有する。さらに、剛体の並進・回転に関する数値誤差を低減させるための時間積分法を導入した。具体的には、速度を陰的に計算し、回転に関する変数クォータニオンをルンゲクッタ法によって更新した。

開発した剛体モデルの妥当性を評価するために氷の溶融解析を実施した。図 3.4.1-2 に解析体系を示す。境界条件等を表 3.4.1-1 に示す。立方体の氷（剛体）を 60 °C の温度に投下し、その溶融する様子を解析する。文献によれば、水面に浮遊する剛体の安定角はその剛体のアスペクト比によって決定される^[3.4.1-3]。この理論により、溶融にともなって氷は逐次アスペクト比が変化することによって、その安定角も逐次変化し、回転をとまなう溶融が発生する。この現象を再現するためには、固液相変化と剛体の運動量・角運動量が適切に保存されている必要があるため、本事象を解析対象として選定した。

図 3.4.1-3 に溶解する氷のスナップショットを示す。水面に対して垂直に入射した氷は溶融にともなってその安定角が変化していることがわかる。40 s～80 s にかけて、傾きは軽度であった一方、80 s 以降は著しい回転挙動を示した。以上の現象が定性的ではあるものの再現できたことにより、本解析手法は剛体の運動量、角運動量、エネルギーを離散化した後でも適切に保存できていることが示唆された。

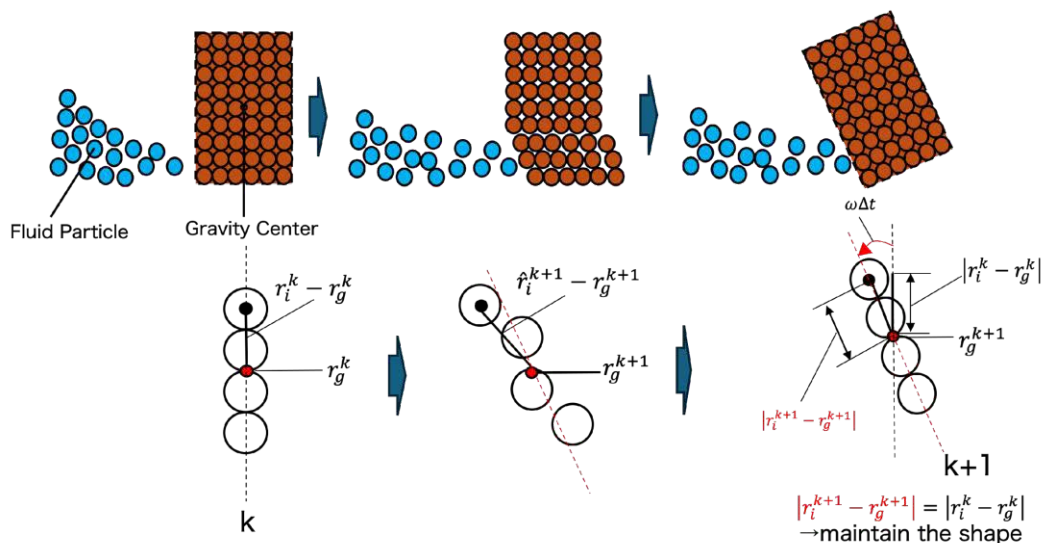


図 3.4.1-1 剛体計算モデルの概要

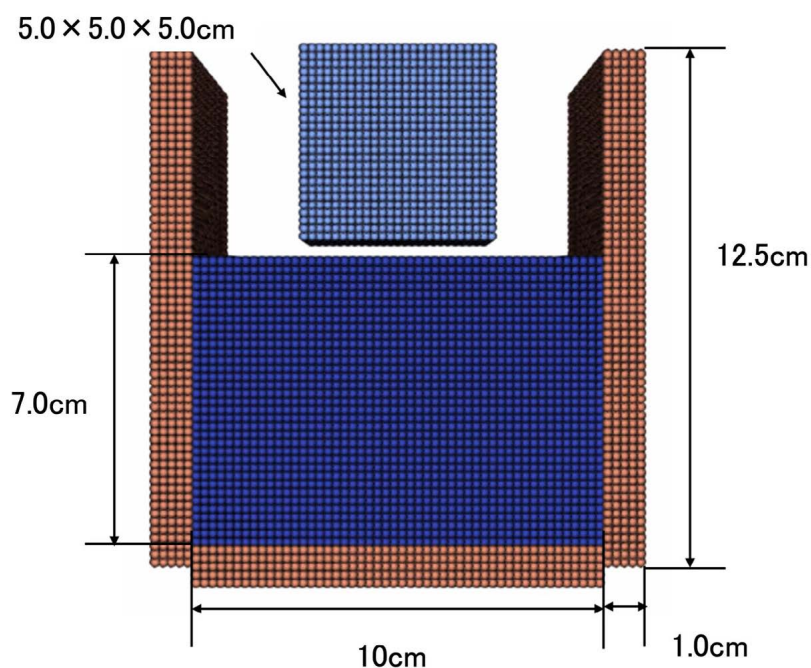


図 3. 4. 1-2 剛体溶融の解析モデル

表 3. 4. 1-1 剛体溶融解析の境界条件

Parameters	Value
Particle spacing (m)	0.002
Effective radius (m)	0.005
Density (kg/m ³)	1000
Viscosity of fluid (Pa.s)	5.0×10^{-4}
Thermal Conductivity (W/m K)	1.0
Melting Temperature (K)	273
Specific Heat (J/kg K)	4200
Latent Heat for Fusion (J/kg)	2.2×10^6
Time step width Δt (s)	5.0×10^{-4}

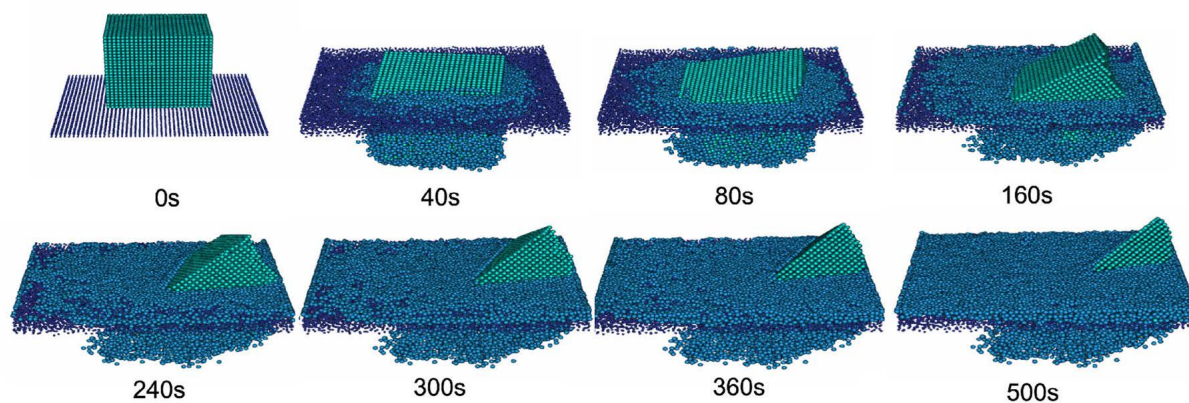


図 3. 4. 1-3 剛体溶融挙動に関するスナップショット

(2) 弾性体モデルの開発

弾性体は保存系であることから、離散化後にエネルギーが適切に保存されていることが重要である。したがって、本研究では弾性体の計算に対しても保存性のよい時間積分法を適用した。弾性体の支配方程式にはひずみエネルギー密度関数を用いた以下の線形弾性体に関する支配方程式を採用した^[3.4.1-4]。

$$\rho_0^s \frac{Du^s}{Dt} = - \sum_j S_j : \frac{\partial F_j}{\partial r_i} + \rho_0^s g, \quad \text{式(3.4.1-1)}$$

$$S_j = \lambda^s \text{tr}(\epsilon) + 2\mu^s \epsilon, \quad \text{式(3.4.1-2)}$$

ρ_0 、 u 、 S 、 F 、 g 、 ϵ 、 λ 、 μ はそれぞれ密度、速度ベクトル、Piola-Kirchhoff ストレステンソル、変形勾配テンソル、重力加速度、ひずみテンソル、ラメの定数である。上付き文字 s は弾性体を表し、下付き文字 i 、 j はそれぞれ粒子の番号を表す。時間積分に関しては、保存性のよいシンプレクティック積分法を導入した。

$$u^{k+1} = u^k + \frac{Du^{k+1}}{Dt} \Delta t \quad (3.4.1-3)$$

プログラムを検証するために、片持ち梁の振動に関する理論解との比較を実施した。図3.4.1-4に解析に関する模式図を示す。長さ0.2 m、幅0.02 mの梁の先端から固定端にかけて図に示すような初速を与える。梁のヤング率とポアソン比はそれぞれ 3.25×10^6 Paと0.4である。このときの先端の変位は理論的に求めることができる。

図3.4.1-5、図3.4.1-6にスナップショット及び理論解との比較を示す。ラベルは水平方向の応力分布を表している。固定端から先端にかけて綺麗に応力分布が表示されており、有限要素法の解析結果と同等以上の精度で計算できることを確認した。また、定量的な比較に関しては、時間刻みが大きい場合に理論から外れていく傾向があった一方、時間刻みを適切に設定することで、理論値に一致することがわかった（図3.4.1-6）。以上のことから開発した手法は弾性体を精度よく計算できることがわかった。令和7年度以降、本手法と流体との連成計算手法の開発及び破壊力学を導入し、機構論的に燃料デブリ移行挙動を推定できる手法の確率を目指す。

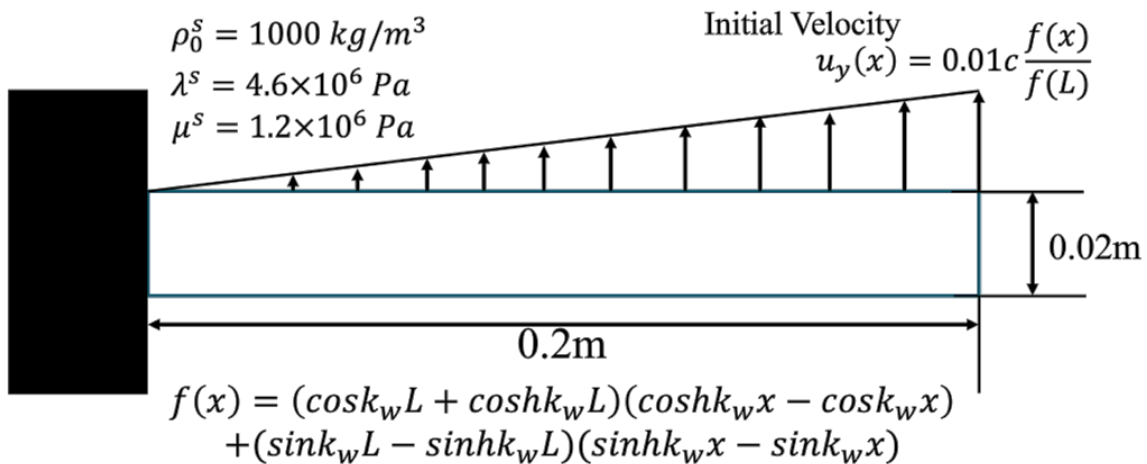


図 3.4.1-4 解析体系模式図

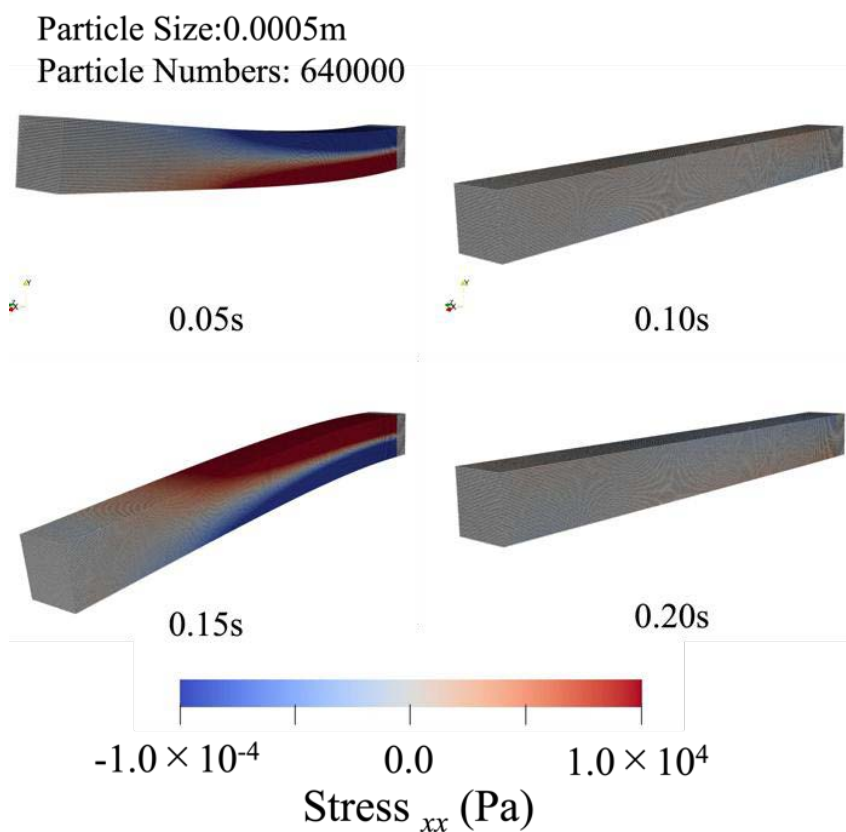


図 3. 4. 1-5 解析結果のスナップショット

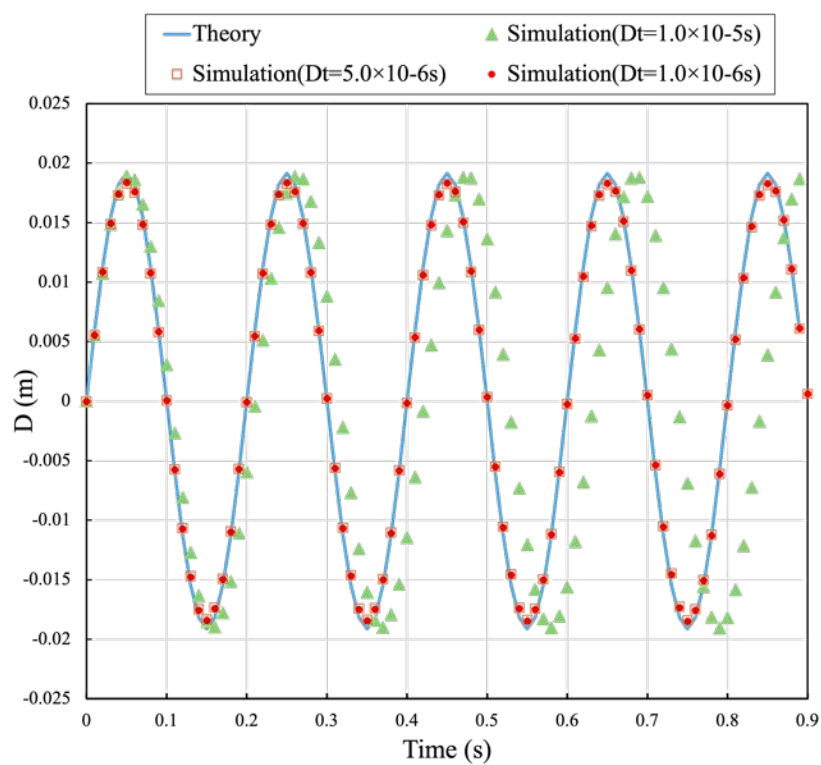


図 3. 4. 1-6 開発した弾性体計算手法の理論と数値解の比較

3.4.2 取り出し工法に応じた性状把握・廃棄物管理方針

(1) 気中工法における性状把握・廃棄物管理方針

気中工法は、NDF が提案している燃料デブリ取り出し工法の一つであり、燃料デブリが気中に露出した状態、もしくは低水位で浸漬した状態で取り出す工法である^[3.4.2-1]。遮蔽に水を用いないことから、取り出しは上部からプラットフォーム型アクセス装置を用いて、あるいは横からロングアームの遠隔装置を用いて、そして、遠隔無人ロボット（ROV）を用いて行う。その特徴は、現在気中で維持されている状況を大きく変化させずに取り組むため、状態変更にとまなう懸案等が少ない点や冠水工法よりも早期に燃料デブリ取り出し作業が開始できる点がある。一方、現場が高線量であるため、他工法と比較して多種多様の遠隔操作装置が必要であり、開発・設計・検証に長い期間を要する点や高線量の燃料デブリと廃棄物を上から取り出すため、オペフロに高重量のセル、取り出し機器の設置が必要となり、これらを支持する構台の規模が大きくなる点がある。

気中工法におけるチョークポイントとして、後で述べる SEEM 学ブレンストーミングでは工程を準備、取り出し、廃棄物管理段階、全体に分け表 3.4.2-1 のようにまとめている。なお、このチョークポイントは、事業 1 年目のものであり、特に廃棄物管理については、十分には議論できていない。今後、研究の進展、より広範なメンバーでのブレンストーミングを経て、精緻化していく。このようなチョークポイントを受けた性状把握・廃棄物管理方針としては以下が考えられる。

【性状把握方針】

- 遠隔の取り出し装置、特に、エンドエフェクタの設計から性状把握方針へのフィードバック
- 3 次元的なデブリ分布推定とデジタルツインの構築に資する性状把握
 - 機器の展開やケーブルの敷設
 - オペレータの負荷低減
- 環境情報の把握と予測
 - 空間線量に加えて、ダスト濃度、温度、湿度、酸素など情報
 - 取り出し時の上記情報の変化の予測

【廃棄物管理方針】

- 長期保管、処分を踏まえた回収したデブリの廃棄体化
- 廃棄体化時のデブリの集約
- 長期保管や処分を想定したデブリ取り出し時、汚染水処理の検討

表 3.4.2-1 SEEM プレストで挙げられた気中工法のチョークポイント

準備	• 上部構造体撤去の失敗 • 上部構造体撤去時の敷地境界の線量超過 • 上部構造体撤去時のデブリ微粒子の漏洩 • 建屋の設計の失敗 • 工台の耐震設計 • 構造物の劣化による崩落 • 装置の設計の失敗 • デブリの性状や分布に関する情報不足から、切削、回収の具体的設計ができない
取り出し	• 取り出し機器の失敗 • 作業のためにさまざまなツールが必要であり、エンドエフェクタを変更する都度、ベースに戻すことになり、効率が悪い • センサ情報の不足のためにロボットの現在状態が把握できず、多量のケーブルを含む周囲との干渉の恐れから身動きがとれなくなる • 破損・劣化した機材の交換の手段や経路が確保できない • オペレータ起因の失敗 • 取り出し装置が長尺なため遠隔操作が困難 • フルリモートでの作業により、オペレータの負荷が増加 • 熟練のオペレータ不足 • センシングの失敗 • 遠隔操作の通信ブラックアウト • 劣悪な内部環境のため、カメラ、センサ類が所定の動作をしない • 建屋の破損、変化による失敗 • 取り出し作業により、建屋構造物が破損し、崩落する • 取り出し作業により、滞留水汲み上げ浄化が間に合わない • 汚染水管理の失敗 • 酸素の混入によるデブリの性状変化 • デブリ粉末による汚染水の性状変化と汚染水処理系の能力不足 • ダスト関係による失敗 • レーザー切断によるダストの粒径が小さく、捕集できない • 排気の処理系の負荷大きくなり、処理が追いつかない • ダスト濃度が上昇して作業中断が頻発
廃棄物管理	• 廃棄物管理の失敗 • 管理する収納缶の数が膨大 • 収納缶内のデブリ片、粉末の処理を行い、廃棄体化する必要がある • 微粒子を回収するためのフィルタの廃棄が大量で廃棄物の量が膨大になってしまう

(2) スラリーの流動性の評価

充填切削工法における充填材としてジオポリマーを対象に、充填固化における適応性の検討をスラリーの流動性や放射性核種浸出性の点から評価し、最適なジオポリマー組成を検討した。ジオポリマー組成の最適化には、合成時における化学組成を人為的に変化させ、その影響を明らかにする手段が必要である。しかしながら、既存のジオポリマーの出発物質であるメタカオリンは、カオリナイトの化学組成に依存する固有の $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 比をもつことから、ジオポリマーのマトリックスの組成を任意に変更することが難しい。本課題では、Walkley et al., 2016^[3, 4, 2-2] 合成方法を参考に異なる $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 比のアルミノシリケート粉末を作製し、出発物質とした。この粉末に対し、ケイ酸ナトリウム水溶液、ケイ酸カリウム水溶液、 NaOH 、 KOH 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ を組み合わせ、任意の化学組成（表 3.4.2-2）をもつジオポリマーを作製した。陽イオンは、 Na 、 K のみ、あるいは Na と Ca が共存する場合も考慮した。これは、固化体を作製する際に、固化する対象の廃棄物から供給されうるほかの多価陽イオンの影響や出発物質として、メタカオリンだけではなく、高炉スラグを使用する可能性を考慮するためである。 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 比は、0.25 から 0.5、 CaO/SiO_2 比は、0~0.6、 $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ 比を 0~0.5、 $\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ 比は 0~0.5 の間となるように化学組成比を変化させた。なお、電荷的中性を保つために Al^{3+} と陽イオンの電荷数を同一にするように設定した。水/バインダーの比は全て 2 となるように設定した。試薬は特筆しない限り、富士フイルム和光純薬株式会社の試薬特級を使用した。

スラリーの流動性評価には、粘度計 SV-1A（A&D 株式会社）を使用した。ジオポリマーの粘度は、出発物質を混合し、2 分間攪拌棒を用いて混合したのちに、粘度の測定に供した。測定時には、恒温水循環装置を使用し、25 °C にて実験した。図 3.4.2-1 に、測定した粘度の結果を示す。サンプル A、C、E においては、電荷的中性を保つため $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ と $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ は同様に増加し、その結果、粘度が増加することが示された。また、サンプル G、H、I、J においては、 $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ と CaO/SiO_2 が反比例するが、これも $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ が増加することで粘度が増加した。なお、サンプル K、L という Na_2O の添加を行わなかった CaO/SiO_2 のみのパラメータの確認においては、明らかな粘度の増加は認められなかった。以上より、施工性の最適化に関しては、 $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ の値を変化させることにより、最適化が可能であると示唆された。本実験系においては、 $\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ を加えた系においては、混合した即時に急結し、粘度の測定が実施不可能であった。

表 3.4.2-2 作製したジオポリマーの化学組成比

Sample	$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$	CaO/SiO_2	$\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$	$\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2$
A	0.25	0	0.25	0
B	0.25	0	0	0.25
C	0.33	0	0.33	0
D	0.33	0	0	0.33
E	0.5	0	0.5	0
F	0.5	0	0	0.5
G	0.5	0.1	0.4	0
H	0.5	0.2	0.3	0
I	0.5	0.3	0.2	0
J	0.5	0.4	0.1	0
K	0.5	0.5	0	0
L	0.5	0.6	0	0

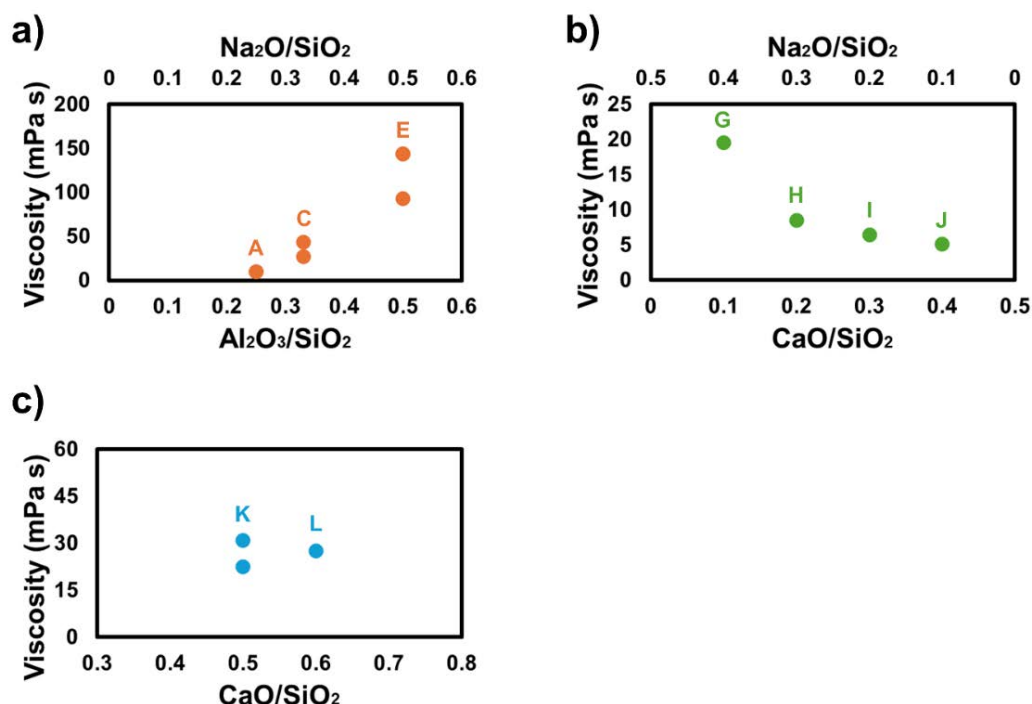


図 3.4.2-1 a) Al₂O₃/SiO₂ 及び Na₂O/SiO₂ 比、b) CaO/SiO₂ 及び Na₂O/SiO₂ 比、
c) CaO/SiO₂ 比に対する初期粘度の変化

(3) 放射性核種浸出性の評価

放射性核種浸出性の評価においても、3.4.2 項(1)にて用いたジオポリマーの合成方法を用いて、ジオポリマー固化体を作製した。ジオポリマーは 61 種類作製し、陽イオンを Na、K、あるいは Na と Ca、K と Ca の組み合わせも考慮した。Al₂O₃/SiO₂ は 0.25～0.5、CaO/SiO₂ は 0～0.35、Na₂O/SiO₂ は 0～0.4、K₂O/SiO₂ は 0～0.4 の間となるように化学組成比を変化させた。作製したジオポリマーのスラリーは、直径 1.2 cm、高さ 0.5 cm の PFA 製の円柱型の容器に入れ密閉養生した。養生温度は 25 °C または 40 °C とし、養生時間は 7 日間とした。浸出試験は、合成したジオポリマーを純水の入った遠沈管に入れて、25 °C の恒温恒湿器で 24 時間行った。このとき液固比は、固化体の表面積の 10 倍となるように設定した。なお、Cs は CsCl 溶液をジオポリマー作製時に添加した。濃度は 1 wt% あるいは 10 ppm を用いた。

浸出試験の結果は Cumulative fraction leached (CFL) として示す。CFL は以下の式で計算した。CFL はジオポリマーの Cs 固化性能の評価指標として用いられ、値が小さいほどジオポリマーの Cs 固化性能が高いことを示している。

$$CFL = \frac{A_n}{A_0} \cdot \frac{V}{S} \quad \text{式(3.4.2-1)}$$

ここで、 A_n は浸出した Cs イオンの量であり、 A_0 は Cs の初期濃度を表す。また、 V と S はそれぞれジオポリマーの体積と表面積を表す。

浸出試験の結果を図 3.4.2-2 に示す。合成時の化学組成比のパラメータのうち、Al₂O₃/SiO₂ が最も相関係数が高く、0.53 となり、Al₂O₃/SiO₂ が低いことで CFL が小さい傾向となった。しかしながら、他のパラメータを含め、一つの元素組成比が CFL に強く相関している結果とはならなかった。しかしながら、 $x=0$ にプロットされているデータを除くと、Na₂O/SiO₂ と CaO/SiO₂ は CFL と正の相関があり、かつ Na₂O よりも CaO を用いたジオポリマーは CFL が

高くなる傾向がある。一方で、 K_2O/SiO_2 を増加させた場合は、必ずしも正の相関となっているわけではない可能性が示唆された。以上より、ジオポリマー組成の放射性核種浸出性の最適化は、ジオポリマーの化学組成を決定する複数のパラメータの調整により達成できることが示唆された。

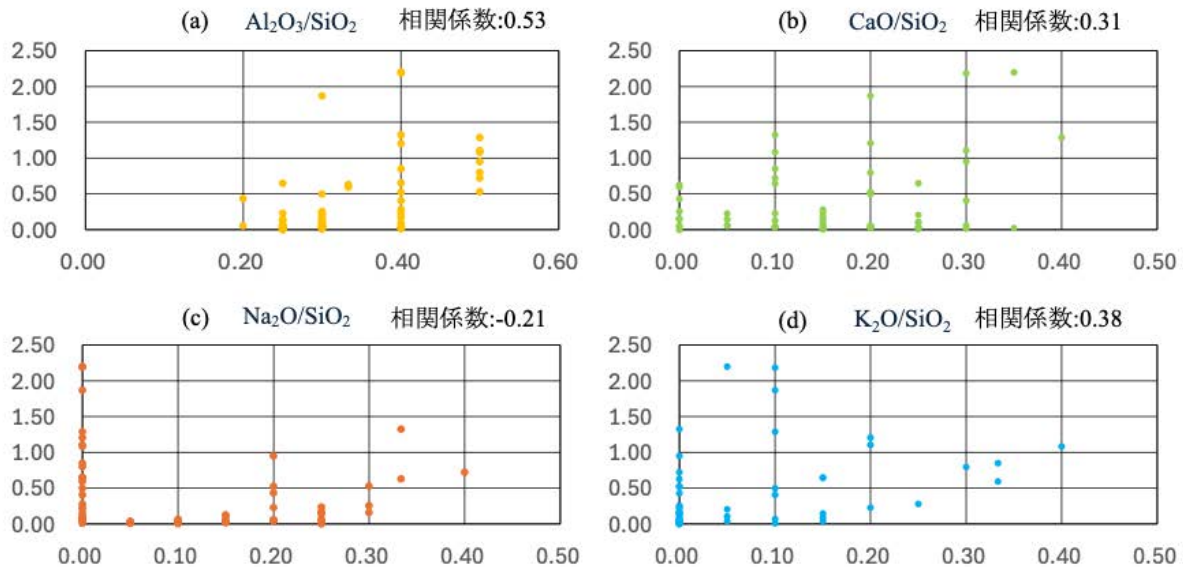


図 3.4.2-2 合成時のパラメータ ((a) Al_2O_3/SiO_2 、(b) CaO/SiO_2 、(c) Na_2O/SiO_2 、(d) K_2O/SiO_2) と CFL の相関の散布図

3.4.3 SEEM 学の構築（東京大学、再委託先：富山高専、福島高専）

(1) SEEM 学のコンセプト構築

1F の廃止措置で最大の課題である燃料デブリ取り出しは令和 6 年に試験的取り出しがはじまり、大規模燃料デブリ取り出し工法についても NDF 等において検討が進められている。取り出し案として気中工法、冠水工法及び充填工法が主に検討されているが、格納容器損傷にともなう放射性核種を含む微粒子の外部への飛散防止など不確定要素は多い。また、2 号機及び 3 号機においては、燃料ハンドルや制御棒が PCV 底部において観察された。これらの結果はともに事故時に RPV 底部に制御棒の RPV 貫通孔よりも大きな開口部が生じたことを示しており、燃料デブリ取り出し時には RPV 底部をより安定な状況にして作業安全を高める必要があることを示唆している。また、1 号機では RPV を支えるペDESTAL においてコンクリートの損傷が認められ、構造物の機能維持を図りながら燃料デブリを取り出す必要がある。このように、1F の燃料デブリ取り出しを完遂するためには、現状並びに将来を見据えて、数多くの視点から課題を捉える必要がある。

ここで将来が読めない不確実性の高い現象を完全に予測することは確かに困難である。ただし、将来何が起こりそうかリスクを含めて俯瞰し、仮説をたてたうえで、あらかじめ何らかの備えをすることは可能であり、影響度合いが大きいと思われる不確実な事象を徹底的に洗い出し、モニタリングによって仮説を検証することが重要となる。

そこで、廃炉に本質的に必要な課題を見付けるためには、従来の現状から考える意図的計画法とは異なり、エンドステート（最終状態）から考える仮説指向計画法が有効であると考えられた。

また、一旦抽出されたアイデアに対するリスク分析として、機能的劣化と機器劣化の双方から失敗に至るパスを考え、その致命度を評価する必要があり、Objective Tree (OT) と Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) による分析の有効性についても議論を行った。

以上のことから、SEEM 学は上記手法を組み合わせた概念が重要であると判断された。

(2) SEEM 学構築のためのブレインストーミングの実施

SEEM 学の構築を目指し、長期にわたる廃炉工程を俯瞰したうえで、未知の課題の抽出並びに課題解決方法の検討をブレインストーミング等により行った。

ブレインストーミングの実施手順を以下に示す。

1. 何故失敗したか（仮想）を抽出して議論—時間軸を意識したリスクを抽出
2. 成功するためにはどうすればよいか、既存概念に囚われないアイデアを抽出
3. 外的リスクを踏まえての問題点・課題の議論
4. リスクを踏まえたアイデア改善案を抽出
5. 時間軸を意識した成功パスを構築
6. パスごとにリスクを評価

具体的には、NDF の燃料デブリ工法評価小委員会が取りまとめた工法を対象に、エンドステートから全体を俯瞰する「俯瞰的廃止措置」に基づき、ブレインストーミングを実施した。実施にあたっては、東京大学関連グループのみならず、英知研究人材育成事業を行っている東北大学グループとも一緒に議論を行った。ブレインストーミングは本来対面が望ましいが、参加メンバーが多岐にわたるため、チーム向けオンラインコラボレーションホワイトボードである Figjam を用いて Zoom により議論を進めた。なお、東北大学グループとは東京大学検見川研修センターに宿泊して対面で研究紹介並びにブレインストーミングを実施した。ブレインストーミングは、NDF の 3 工法である①気中工法、②冠水工法、③気中＋充填工法について 3 グループで議論を行い、準備、取り出し、廃棄物管理、廃止措置終了の時間軸に対してリスクの深刻度を整理した。

例えば、グループ 1（気中工法）では、リスクの事象の重要性に応じた色分けを行い、ダスト飛散、構造物の健全性が安全上重要であると判断された。また、対策として、土盛り、ロボットの機能分離、デブリ切り出しを大きくすることにより取り出しのみならず、廃棄物対策にも有効であるとの結果を得た。

グループ 2（冠水工法）では、技術的のみならず社会的な合意形成の難しさや万一の場合の対策の重要性が挙げられた。また、水漏れ対策として、区画を区切るなどのあらかじめの対応を考える重要性が指摘された。

グループ 3（気中工法＋充填工法）では、充填の判断方法、充填材の選定（取り出しから廃棄物処分）、故障した場合の対処などが課題として抽出され、対策として課題に対応する充填材のさらなる研究開発が必要であるとの結論を得た。

なお、令和 7 年度は、ブレインストーミングに加えて、さまざまな有識者へのヒアリングも実施する。

(3) 高専機構における活動状況

福島高専の 4 年生対象廃炉工学と富山高専の 5 年生対象システム工学に SEEM 学をどのように反映させるか検討した。また、全国の国立高専生にこれらの授業を広く受講させる方法について検討を行った。

検討の結果、SEEM 学に関する新しい教材が必要であることから、令和 7 年度に長岡技術科学大学のスタジオを活用して e-learning 用教材を作成することとした。e-learning 高等教育連携 (eHELP: e-learning Higher Education Linkage Project) 等の枠組みを活用して、他高専の学生が受講できるように調整することとした。SEEM 学や廃炉人材の育成に貢献できる海外研修については、原子力機構ワシントン事務所において見学先の議論を行い、先方からアメリカ原子力規制委員との討論について提案があった。

3.4.4 まとめ

廃炉工程を俯瞰した性状把握、キャラクターゼーションでは、保存性のよい離散化手法を適用することにより、離散化した後の固体挙動を精度よく計算する手法の開発を目指し、粒子法をベースとした剛体・弾性体解析手法の開発に着手した。具体的には、流体の支配方程式を用いて、剛体を安定的に計算する手法を開発した。時間積分法には陰解法とルンゲクッタ法を採用し、高精度で剛体の運動を計算できるアルゴリズムを構築した。また、弾性体を計算する手法も開発し、シンプレクティック積分法を導入することで数値不安定性を回避した。両手法についてプログラムの検証及び妥当性評価を行い、本手法が剛体・弾性体の運動を安定的に計算できることを確認した。また、取り出し工法に応じた性状把握・廃棄物管理方針において、気中工法における性状把握・廃棄物管理方針の検討を実施する。また、充填切削工法における充填材としてジオポリマーを対象に、充填固化における適応性をスラリーの流動性や放射性核種浸出性の点から評価し、最適なジオポリマー組成を検討した。具体的には、気中工法における性状把握・廃棄物管理方針の検討を以下で述べる SEEM 学ブレンストーミングの一環として実施した。組成を替えたジオポリマーを作製し、スラリーの流動性を粘度測定から評価するとともに、Cs を対象にした浸出試験を行い、浸出量を評価した。そして、SEEM 学の構築において、SEEM 学の構築を目指し、長期にわたる廃炉工程を俯瞰したうえで、未知の課題の抽出並びに課題解決方法の検討をブレンストーミング等により行った。福島高専の 4 年生対象廃炉工学と富山高専の 5 年生対象システム工学に SEEM 学をどのように反映させるか検討を実施した。また、全国の国立高専生にこれらの授業を広く受講させる方法について検討を行った。また、SEEM 学や廃炉人材の育成に貢献できる海外研修について検討を行った。具体的には、NDF の燃料デブリ工法評価小委員会が取りまとめた工法を対象に、エンドステートから全体を俯瞰する「俯瞰的廃止措置」に基づき、ブレンストーミングを実施した。また、経験がない作業に対するリスク分析として、機能的劣化と機器劣化の双方から失敗に至るパスを考え、その致命度を評価することが、SEEM 学に置いて必要との議論から、OT と FMEA による分析についても議論した。また、福島高専 4 年生対象廃炉工学と富山高専 5 年生対象のシステム工学に SEEM 学に関する内容を追加するために、令和 7 年度に教材を作成することとした。また、全国の国立高専生に受講してもらうために、高専間単位互換制度を活用することとし、令和 8 年度から受講できるように調整することとした。海外研修については、原子力機構ワシントン事務所と議論を行い、原子力規制委員会 (NRC) の委員長または委員との議論、また、イギリスでセラフィード廃止措置に関するロボットの研究開発をしているマンチェスター大学研修を候補とした。

3.5 人材育成の取り組み

● 産学連携講座の実施

本研究では、産学連携講座として「統合廃炉工学講座」を開設しており、その一環として 1F の廃炉に向けての廃止措置に関する講義を 13 回にわたり大学院生向けに実施した。講義名は「廃止措置特論 E」であり（表 3.5.1-1）、受講者数は 68 人であった。講義内容としては、1F 廃炉の現状から将来の課題まで、技術のみならず社会科学的知見も含めた幅広くかつ深掘りした講義を実施した。具体的には、1F 事故の概要についての講義の後、通常発電所の廃止措置とは何か、また、事故炉の廃止措置との相違点は何かについて講義を行った。

また、現在及び将来行われる 1F の廃止措置に関する研究開発の取り組みと課題、オンサイトの高線量現場で必須技術となるロボット技術（遠隔操作技術）の適用、核種分析技術・放射線計測技術、オフサイトを含んだ環境影響評価、バックエンドとして極めて重要となるデブリ燃料管理技術や廃棄物管理について講義を行った。講義の概要を表 3.5.1-1 に示す。

表 3.5.1-1 廃止措置特論 E の概要

	月日	時間	担当教官	講義内容
第 1 回	10 月 9 日（水）	14:55-16:40	岡本教授	1F 事故の概要
第 2 回	10 月 16 日（水）	同上	鈴木上席研究員	1F の現状と廃炉プログラム(1)
第 3 回	10 月 23 日（水）	同上	鈴木上席研究員	1F の現状と廃炉プログラム(2)
第 4 回	10 月 30 日（水）	同上	長谷川教授	原子核分析技術
第 5 回	11 月 6 日（水）	同上	斉藤教授	放射性廃棄物管理(1)
第 6 回	11 月 20 日（水）	同上	山下教授	極限環境におけるロボットセンシング技術
第 7 回	11 月 27 日（水）	同上	高橋教授	放射線計測技術
第 8 回	12 月 4 日（水）	同上	松崎教授	環境影響評価 (オフサイト含む)
第 9 回	12 月 11 日（水）	同上	福井准教授	ロボットによるロボットのための環境構造化技術
第 10 回	12 月 18 日（水）	同上	斉藤教授	放射性廃棄物管理(2)
第 11 回	1 月 8 日（水）	同上	松日楽特任研究員	ネットワーク化協働ロボット
第 12 回	1 月 15 日（水）	同上	寿楽教授	1F 及び他の施設における原子力発電所廃止措置に対する社会的影響
第 13 回	1 月 22 日（水）	同上	岡本教授	リスク評価とリスク管理

以上のように、本講義では、1F 廃止措置の現状の課題のみならず、将来何を行う必要があるかなど、さまざまな視点から幅広く盛り込まれて議論され、1F 廃止措置に対する学生の理解度を深めることができた。

- NEST ARTRED の実施

経済協力開発機構／原子力機関(OECD/NEA)のNuclear Education Skills and Technology (NEST) フレームワークにおける NEST CLADS Project において、NEST Fellow 5名の受入れと1名の派遣を実施した。具体的には、韓国浦項工科大学から1名(令和6年8月19日～9月27日)、英国 Manchester 大学から2名(令和6年9月2日～10月11日、10月1日～11月29日)、ドイツ FH Aachen、University of Applied Sciences、Biomedical engineering から2名(令和6年9月17日～12月12日、11月5日～12月12日)を受入れ、ドイツ TUM (令和6年8月4日～10月13日)へ1名の派遣である。実施に際しては、JAEA CLADS と連携して、1F 見学のほか関連施設や企業の見学を合わせて実施した。

- 第10回次世代イニシアティブ廃炉技術カンファレンス NDEC-10 での発表

令和7年2月26、27日に、福井県敦賀市で開催された第10回次世代イニシアティブ廃炉技術カンファレンス(NDEC-10)において、本研究にかかわる学生が3件発表し、1件受賞した。

本研究では、各研究項目を学生の卒論・修論・博論の研究テーマとし、学生の研究指導を行いながら研究開発を行っており、その研究教育を通して人材育成を行っている。その結果、学術雑誌3本、国際発表6件、国内発表8件の第1著者が学生となっている。

本研究に関して得られた成果は以下のとおりである。

【国内会議発表】

(1) 過酷環境での放射線計測・センサ技術

① 高ガンマ線線量下動作中性子ガンマ線分析モジュールの研究開発

[1]永井 寛大、島添 健次、青山 敬、鈴木 崇仁、中村 尚司、松本 哲郎、増田 明彦、真鍋 征也、シリコンカーバイド(SiC)半導体検出器による単色高速中性子の検出性能評価、日本原子力学会 2025年春の年会 令和7年3月13日。

[2]永井 寛大、島添 健次、Moh Hamdan、青山 敬、鈴木 崇仁、中村 尚司、シリコンカーバイド(SiC)半導体検出器を用いた飛行時間法による中性子エネルギースペクトルの計測、日本原子力学会 2024年秋の大会、東北大学 川内北キャンパス 9月12日。

(2) 取り出し工法に調和した遠隔ロボット技術

① 遠隔操作のための情報提示技術の開発

[3]森田 英嗣、中島 慎介、安 琪、山下 淳：軽量遮蔽体による減衰を活用した非指向性検出器による高線量3次元空間における放射線源分布推定、第10回次世代イニシアティブ廃炉技術カンファレンス(NDEC-10)、敦賀、2025.2。

[4]杉浦 鉄宰、中島 慎介、安 琪、山下 淳：運転実績データがない燃料デブリ取り出しシステムに対する致命度分析、第10回次世代イニシアティブ廃炉技術カンファレンス(NDEC-10)、敦賀、2025.2。

[5]山下 淳：【キーノート講演】核融合炉に適用可能なセンサ情報処理技術、第25回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会講演論文集(SI2024)、pp.978-979、盛岡、2024.12。

[6]森田 英嗣、小松 廉、中島 慎介、安 琪、山下 淳、浅間 一：非指向性検出器と自己遮蔽を搭載した移動ロボットによる放射線分布推定、第24回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会講演論文集(SI2023)、pp.1989-1993、新潟、2023.12。

③ デブリサンプリング機構の開発

- [7]横田 開、高橋 隆、低融点合金を用いた巻取型高剛性長尺アーム-関節状態推定法の提案と関節強度評価-、第 25 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 2024、令和 6 年 12 月 19 日受賞。

(4) 廃炉工程を俯瞰した性状把握、キャラクター化

① 燃料デブリ分布推定に向けた数値計算技術の開発

- [8]横山 諒、三輪 修一郎、岡本 孝司 マイクロスケールデブリから構成されるデブリベッド挙動解析に向けた GPU 並列完全陽解法型 DEM-MPH 法、日本原子力学会 2024 年秋の大会、2024. 9。

- [9]益子 智成、横山 諒、1F3 デブリ-構造物相互作用の推定に向けた高精度 FSI 計算手法の開発に関する研究、第 10 回次世代イニシアティブ廃炉技術カンファレンス (NDEC-10)、2025. 2 受賞。

② 取り出し工法に応じた性状把握・廃棄物管理方針

- [10]M. Viaud, K. Toda, T. Saito, Immobilization of Radionuclides in Fly-ash/Slag-based Geopolymer Matrices, 日本原子力学会 2025 年春の年会, オンライン, 2025. 3.

【国際会議発表】

(1) 過酷環境での放射線計測・センサ技術

① 高ガンマ線線量下動作中性子ガンマ線分析モジュールの研究開発

- [1]K. Nagai, K. Shimazoe, K. Aoyama, T. Suzuki, T. Nakamura, H. Tanaka, T. Matsumoto, S. Manabe, J. Ishii, Performance of SiC based neutron detector in high-dose gamma-ray field, 2024 IEEE NSS MIC RTSD, TAMPA, FLORIDA, USA, 31 October.
- [2]K. Nagai, K. Shimazoe, K. Aoyama, T. Suzuki, T. Nakamura, H. Tanaka, T. Matsumoto, S. Manabe, J. Ishii, Neutron-gamma discrimination evaluation with SiC based neutron detector, FDR2024, Naraha, Fukushima, JAPAN, 12 Oct.
- [3]M. Hamdan, B. Feng, K. Shimazoe, M. Nogami, K. Hitomi, H. Takahashi, M. Uenomachi, H. Toyokawa, Characterization of TlBr Gamma Detector Based on Electrical Charge and Cherenkov Light Analysis, iWoRiD 2024, Lisbon, Portugal, 1 July.

② 不確実性のある環境下における線源分布推定のための計測点決定手法の構築

- [4]H. Matsuno and H. Woo: Estimation of Radiation Source Distribution in RPV Based on Prior Knowledge of Fuel Debris Spreading, Proceedings of the 2025 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII2025), pp.1387-1391, 2025.

(2) 取り出し工法に調和した遠隔ロボット技術

① 遠隔操作のための情報提示技術の開発

- [5]E. Morita, S. Nakashima, R. Komatsu, Q. An, A. Yamashita: Estimation of Radiation Distribution Using Shielding Attenuation by a Mobile Robot Equipped with Non-Directional Detectors and Lightweight Shielding, Proceedings of the International Topical Workshop on Fukushima Decommissioning Research 2024 (FDR2024), FDR2024-1065, pp.1-4, Fukushima (Japan), October 2024.
- [6]Shinsuke Nakashima, Alessandro Moro, Ren Komatsu, Angela Faragasso, Nobuto Matsuhira, Hanwool Woo, Kuniaki Kawabata, Atsushi Yamashita and Hajime Asama: Decommissioning Robot Manipulator for Fuel Debris Retrieval, Proceedings of the International Topical Workshop on Fukushima Decommissioning Research 2024 (FDR2024), FDR2024-1011, pp.1-4, Fukushima (Japan), October 2024.

- [7]M. Sung, M. Sandison, Nobuto Matsuhira, Son-Cheol Yu, Hajime Asama: Hybrid Tele-Operation Framework for Multi-Robot Coordination in Hazardous Environments, International Topical Workshop on Fukushima-Daiichi Decommissioning Research 2024 (FDR2024) , FDR2024-1091, pp.1-4, Fukushima (Japan), October 2024.
- (3) 計測-遠隔ロボット統合技術と実証
- ① 遠隔取得画像に基づいた実スケール環境構造モデリングシステムの研究開発
- [8]K. Kawabata, H. Yashiro, T. Hanari, T. Imabuchi, Feasibility Study on Three Dimensional Modeling Based on Merging of Models Obtained by Images Selected from Time-Series Images, The 2025 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, WedA1T4.7, 2025.
- (4) 廃炉工程を俯瞰した性状把握、キャラクターゼーション
- ① 燃料デブリ分布推定に向けた数値計算技術の開発
- [9]R. Yokoyama, M. Kondo, S. Suzuki, K. Okamoto, Large-Scale Ex-Vessel Corium Spreading Calculation Using a Particle Method for Estimating Fuel Debris Distribution in Fukushima Daiichi Unit 1: Effect of Cooling Efficiency on Spreading, 14th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics, Operation and Safety (NUTHOS-14), 2024.8.
- [10]R. Yokoyama, S. Suzuki, K. Okamoto, Development of Large Scale Highly Viscous Fluid-Structure Interaction Calculation Method For Clarifying Sedimentaion Behavior of Fuel Debris In Unit 3, International Topical Workshop on Fukushima Decommissioning Research (FDR2024), 2024.10.
- ② 取り出し工法に応じた性状把握・廃棄物管理方針
- [11]A.C. Yildirim, Radionuclide Diffusion Through Metakaolin based Geopolymer Matrix, International Topical Workshop on Fukushima Decommissioning Research (FDR2024), 2024.10.

【論文発表】

- (1) 過酷環境での放射線計測・センサ技術
- ① 高ガンマ線線量下動作中性子ガンマ線分析モジュールの研究開発
- [1]M. Hamdan, B. Feng, K. Shimazoe, M. Nogami, K. Hitomi, H. Takahashi, M. Uenomachi and H. Toyokawa, Characterization of TlBr gamma detector based on electrical charge and Cherenkov light analysis. Journal of Instrumentation, 19(11), 2024, C11017.
- (2) 取り出し工法に調和した遠隔ロボット技術
- ① 遠隔操作のための情報提示技術の開発
- [2]杉浦 鉄宰、中島 慎介、浅間 一、安 琪、山下 淳：福島第一原子力発電所における燃料デブリ取り出し作業向け監視システム設計のためのリスク分析、日本原子力学会和文論文誌、2025。
- [3]Z. Liu, S. Nakashima, R. Komatsu, N. Matsuhira, H. Asama, Q. An and A. Yamashita: Automatic Viewpoint Selection by Rail-Mounted Observation Robots for Teleoperation Assistance in Unmanned Working Environments, International Journal of Automation Technology, vol.19, no.4, July 2025.

(3) 廃炉工程を俯瞰した性状把握、キャラクターゼーション

① 燃料デブリ分布推定に向けた数値計算技術の開発

- [4] R. Yokoyama, Y. Xu, S. Miwa, K. Okamoto, A novel fully explicit GPU-accelerated discrete element method coupled with moving particle hydrodynamics (DEM-MPH) for simulating the underwater particle sedimentation behavior, Progress in Nuclear Energy, Vol.180, 105615, 2025.2. DOI: 10.1016/j.pnucene.2025.105615
- [5] R. Yokoyama, K. Wang, S. Suzuki, S. Miwa, K. Okamoto, Determination of Spearman's rank correlation for melt spreading-solidification dynamics through the combination of integrated experiments and Monte Carlo method, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol.242, 126831, 2025.6. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2025.126831

3.6 研究推進

毎月 1 回程度の定例ミーティングを実施するとともに、SEEM 学ブレストミーティングを行った。

- キックオフミーティング

開催日：令和 6 年 9 月 11 日（水）

場所：オンライン（Zoom）

主な議題： 契約締結について
今後のスケジュール
今後の方針
予算執行の注意点

- 第 2 回定例ミーティング

開催日：令和 6 年 10 月 25 日（金）

場所：オンライン（Zoom）

主な議題： 進捗報告
今後のイベント（令和 6 年度中間フォロー、SEEM 学ブレスト、1F 見学）
外部発表（令和 6 年 10 月 3 日「JAEA 廃炉基盤プラットフォーム」、令和 6 年 10 月 21 日「英知事業第 1 回ワークショップ」）

- 第 3 回定例ミーティング

開催日：令和 6 年 11 月 22 日（金）

場所：オンライン（Zoom）

主な議題： 進捗報告（福島大アームの仕様について）
今後のイベント（令和 6 年度中間フォロー、課題紹介動画の作成、SEEM 学ブレスト、1F 見学、東北大学との合同合宿）、外部発表

- 第 4 回定例ミーティング

開催日：令和 6 年 12 月 27 日（金）

場所：オンライン（Zoom）

主な議題： 進捗報告
令和 6 年度中間フォロー、令和 7 年度契約関係
今後のイベント（課題紹介動画の作成、SEEM 学ブレスト、1F 見学、東北大学との合同合宿）、外部発表

- 第 1 回 SEEM 学ブレスト

開催日：令和 7 年 1 月 14 日（火）

場所：東京大学工学部 14 号館 430 号室、オンライン（Zoom）併用

主な議題： 今後のブレストの進め方
テーマ「機械システムの設計手法に関する研究」、今後の進め方

- 第 5 回定例ミーティング

開催日：令和 7 年 1 月 17 日（金）

場所：オンライン（Zoom）

主な議題： 進捗報告
令和 6 年度中間フォロー報告、令和 7 年度契約関係
SEEM 学ブレスト
今後のイベント（課題紹介動画の作成、1F 見学、東北大学との合同合宿、令和 6 年度報告書）、外部発表

● 第2回 SEEM 学ブレスト

開催日：令和7年2月19日（水）

場所：東京大学工学部14号館430号室、オンライン（Zoom）併用

主な議題：テーマ「廃炉の状況」

ブレストの進め方

● 第6回定例ミーティング

開催日：令和7年2月28日（金）

場所：オンライン（Zoom）

主な議題：進捗報告

令和6年度成果報告書、令和7年度契約関係

SEEM 学ブレスト

今後のイベント（1F 見学、東北大学との合同合宿、令和6年度報告書）

外部発表（令和7年3月25日（火）13：00-15：00

「第13回廃炉研究開発連携会議における SEEM 学の取り組み紹介」

● 第7回定例ミーティング

開催日：令和7年3月21日（金）

場所：オンライン（Zoom）

主な議題：進捗報告

令和6年度完了報告、令和6年度成果報告書

SEEM 学ブレスト

合同セミナー

今後のイベント（1F 見学）

外部発表（令和7年3月25日（火）13：00-15：00

「第13回廃炉研究開発連携会議における SEEM 学の取り組み紹介」

令和7年度上期のミーティングスケジュール、令和7年度進め方

4. 結言

1Fにおける燃料デブリの取り出しは、デブリの性状や分布が不明ななかで、その取り出し方法を選定し、取り出しシステムを設計していくという、Unknown Unknowns な SEEM 学的工学課題である。特に、その実現のためには、廃棄物管理までを含む廃炉工程全体からバックキャストさせた課題の抽出とそれに基づく要素技術の統合、そして、開発したシステムの実証が不可欠である。

本研究では、1Fにおける燃料デブリ取り出しに関して、NDF 及び充填固化工法と充填切削工法を対象に、取り出し前の性状把握・キャラクターゼーションを遠隔で実現するためのロボット技術やセンサ及び放射線計測技術の開発、そして、それらの技術をシステムとして統合できる人材の育成を目指す。また、東京大学が中心となって進めてきた「遠隔操作技術及び核種分析技術を基盤とする俯瞰的廃止措置人材育成」(2014～2018)、「燃料デブリ取り出し時における炉内状況把握のための遠隔技術に関する研究人材育成」(2019～2023) で得られた研究実績や関連する講義等のリソースを再整理することで、具体的な教育研究基盤としての SEEM 学の構築を目指すとともに、高専学生へ提供することで実際の教育現場へ展開する。

以下に、5 カ年計画の 1 年目である令和 6 年度の業務実績を述べる。

(1) 過酷環境での放射線計測・センサ技術

① 高ガンマ線線量下動作中性子ガンマ線分析モジュールの研究開発

高い放射線耐性が見込める半導体ベースの中性子検出器の構造最適化、基礎性能評価、適用可能性について検討した。具体的には、SiC 半導体検出器の構造最適化、基礎性能、適用可能性を検討した。また、候補となりうる検出器について適用可能性を比較検討した。

② 不確実性のある環境下における線源分布推定のための計測点決定手法の構築

環境中に放射線源を分布させ、任意の計測点における放射線入射イベントをシミュレーションするプログラムを構築した。具体的には、線源分布及び強度、検出器の位置を任意に設定した際に、放射線の入射イベントを適切に生成できるシミュレータを構築した。Geant4 を用いて線源と検出器間の距離に応じたガンマ線の入射数の誤差を評価し、自作シミュレータにその誤差率を反映することで入射イベントを再現した。

③ 原発建屋内構造物・線源の 3 次元体積モデルの生成手法の開発

3 次元体積モデル生成のためのデータ取得に使用するローバーの台車部分の設計・開発を行うとともに、放射線源位置推定に使用する搭載センサの選定・調達を行った。また、使用環境を想定しての可視カメラと 3D-LIDAR+カメラのデータフュージョンによる色付き点群地図を生成し、課題を分析した。具体的には、ローバーについては不整地走行可能なクローラロボットを設計・開発し、3 次元体積モデル生成に必要なセンサである 3D-LIDAR と可視光カメラを 2 台ずつ搭載した。そして、ローバーの不整地模擬環境での走破性とセンサデータ取得を確認できた。また、データフュージョンについては 3D-LIDAR 点群と可視光カメラ点群を用いた合成地図を生成し、フュージョン手法と生成地図に対する課題について抽出することができた。

(2) 取り出し工法に調和した遠隔ロボット技術

① 遠隔操作のための情報提示技術の開発

情報提示に向けた基礎的評価を行った。遠隔操作補助に適するセンサ構成を見積るとともに、画像処理や情報提示のための計算機システム構築を進めた。具体的には、実施結果の要点として、

レール搭載型観測ロボットによる遠隔操作支援のためのシミュレーション及び実機環境の構築と指向性検出器が使えない高線量環境における非指向性検出器を用いた放射線分布推定を実現するためのセンサ構成の検討を進めた。また、画像処理及び情報提示のための計算機システムを構築するための準備を整えた。

② モジュール分割型軌道構造体を用いた運搬技術の開発

Rail DRAGON 操作用 GUI の開発に取り組んだ。また、これまでに開発してきた観察ロボットを改修し、運搬機能を実現するための概念設計を行った。具体的には、Rail DRAGON を拡張した吊下式多腕型軌道構造体 (Rail Spider) を提案した。Rail Spider のシステム構成要素を検討し、Rail DRAGON にはない新たな技術課題に取り組む必要性を明らかにした。

③ デブリサンプリング機構の開発

アームの軽量化に向け、アーム本体の素材及び形状、関節部の構造等を先端負荷 0.5 N 程度を想定して検討した。また、小型の燃料デブリの回収に向けて、要求仕様を確認し、グリップの構造並びに駆動方式、把持センシング手法を検討した。具体的には、アームに関しては、その後の議論に基づき、グリップの重量が増加する可能性を考慮して先端負荷の目標値を 0.5 N から約 3 N に増加させて検討を進めた。結果として、関節当たりの質量を 43.6 g から 31.0 g に軽量化できた。また、軽量化したアームの強度を評価した結果、先端に 300 g の錘を装着した場合の先端変位は、アーム長 1 m に対して 84.1 mm との結果を得た。グリップに関しては、把持センシング手法の調査・検討を進めるとともに、多様な形状のデブリを想定し、ケーシングを実現する臍駆動グリップを設計・試作した。また、最大径 10 mm～50 mm の球体、円筒形状 (厚み 5 mm)、正三角形 (厚み 5 mm)、正方形 (厚み 5 mm)、モデリングソフトで生成した燃料デブリイメージモデルの把持実験を実施し、ケーシングによって大きさ・形状の異なる対象物を拘束できることを確認した。

④ 環境モデルと軌道計画に基づく動作再生を利用した遠隔操縦の高度化

多視点遠隔操縦システムにおいて、実カメラだけでなく環境モデル内の仮想カメラからの映像で補完する手法の検討を行った。また、計画された軌道の環境モデル／実環境での再生時に軌道を修正する際の課題を抽出した。軌道計画に関しては、燃料デブリ取り出しの作業工程において、軌道計画に基づくマニピュレータの遠隔操縦システムの適用場面や課題を抽出した。さらに、作業者が経由点や進入不可領域を軌道計画器に入力するインタフェースを検討した。具体的には、多視点遠隔操縦システムに関しては、作業環境に固定した実カメラの代わりに 3D 環境モデル中の仮想カメラからの映像を提示できるシステムを構築し、実機実験により作業環境に実カメラを設置した場合とほぼ同等の作業性が得られることが確認できた。軌道計画に関しては、計画された軌道の環境モデル／実環境での再生時に軌道を修正する際の課題を抽出した結果、環境モデルと計測データをもとにした自己位置修正が必要であることが確認された。燃料デブリ取り出しの作業工程における遠隔操縦システムの適用場面や課題の抽出については、原子炉のメンテナンスや解体における使用事例のサーベイを行った。作業者が経由点や進入不可領域を軌道計画器に入力するインタフェースについては、事前に用意したサイズの異なるボックス形状などをユーザが任意に設置することで進入不可領域を設定できることが確認された。

(3) 計測-遠隔ロボット統合技術と実証

① 遠隔取得画像に基づいた実スケール環境構造モデリングシステムの研究開発

遠隔取得画像上に表れる環境影響によるノイズの除去や鮮明化を行う画像処理に深層学習を適用するための検討を行うとともに、炉内からの画像データ伝送を想定した情報通信の基盤となる通信方式選定に関するデータ取得検証実験を行った。具体的には、画像処理に適用した深層学習のネットワークについて特徴の調査及び基礎的な画像処理実験による検討を実施し、令和7年度以降の研究開発において主に使用するネットワークを選定した。また、画像データ伝送のために原子炉内の環境条件と通信方法の特徴を整理したうえで、漏洩同軸ケーブルを用いた通信方式に注目して基礎的な通信実験を実施してデータ収集及び性能確認を行った。

② 試行応答のスケラブル評価に向けた統合 DX プラットフォーム

統合 DX プラットフォームの開発に取り組んだ。遠隔ロボットや環境の簡易モデルの構築や線源配置を検討した。構成モジュールによる環境情報取得に向けた評価を行った。具体的には、実施結果の要点として、3次元シミュレータの構築と予備的検討及び入出力デバイス検討を挙げる。構築した3次元シミュレータ上では、ロボットアーム手先部における燃料デブリ模擬物質由来の線量率尺度の評価が可能となった。

③ モジュール化された放射線センサ・ロボット技術の統合による炉内状況把握

燃料デブリ取り出し工法に応じた中性子線源分布推定に使用する計測の要求仕様等について検討し、中性子線源の分布推定手法についての基礎検討を行った。また、放射線源分布の推定をターゲットとして、センサ・ロボットのモジュール化の基礎検討を行い、照射試験についても検討した。さらに、建屋内で使用するロボットのセンサ類に求められる耐放射線性と位置計測手法について検討した。具体的には、センサ・ロボットのモジュール化の粒度について検討し、検討中の Rail Spider から下方向にセンサを降ろし中性子等の計測をする方法について検討した。要求される耐放射線性を検討した。RPV 内部の線量率を最大 100 Gy/h で 10 時間の作業と仮定し 1000 Gy とした。 ^{60}Co と ^{137}Cs のガンマ線エネルギーの違いが電子部品の耐放射線性にどのような影響を与えるのか文献調査をしたが、文献を見付けることができなかった。位置計測について検討した結果、俯瞰カメラとマーカーを使ってロボットに搭載してあるマーカーを認識する手法が本システムに適していると判断した。

(4) 廃炉工程を俯瞰した性状把握、キャラクターゼーション

① 燃料デブリ分布推定に向けた数値計算技術の開発

保存性のよい離散化手法を適用することにより、離散化した後の固体挙動を精度よく計算する手法の開発を目指し、粒子法をベースとした剛体・弾性体解析手法の開発に着手した。具体的には、流体の支配方程式を用いて、剛体を安定的に計算する手法を開発した。時間積分法には陰解法とルンゲクッタ法を採用し、高精度で剛体の運動を計算できるアルゴリズムを構築した。また、弾性体を計算する手法も開発し、シンプレクティック積分法を導入することで数値不安定性を回避した。両手法についてプログラムの検証及び妥当性評価を行い、本手法が剛体・弾性体の運動を安定的に計算できることを確認した。

② 取り出し工法に応じた性状把握・廃棄物管理方針

気中工法における性状把握・廃棄物管理方針の検討を実施する。また、充填切削工法における充填材としてジオポリマーを対象に、充填固化における適応性をスラリーの流動性や放射性核種

浸出性の点から評価し、最適なジオポリマー組成を検討した。具体的には、気中工法における性状把握・廃棄物管理方針の検討を以下で述べる SEEM 学ブレンストーミングの一環として実施した。組成を替えたジオポリマーを作製し、スラリーの流動性を粘度測定から評価するとともに、Cs を対象にした浸出試験を行い、浸出量を評価した。

③ SEEM 学の構築

SEEM 学の構築を目指し、長期にわたる廃炉工程を俯瞰したうえで、未知の課題の抽出並びに課題解決方法の検討をブレンストーミング等により行った。福島高専の 4 年生対象廃炉工学と富山高専の 5 年生対象システム工学に SEEM 学をどのように反映させるか検討を実施した。また、全国の国立高専生にこれらの授業を広く受講させる方法について検討を行った。また、SEEM 学や廃炉人材の育成に貢献できる海外研修について検討を行った。具体的には、NDF の燃料デブリ工法評価小委員取りまとめた工法を対象に、エンドステートから全体を俯瞰する「俯瞰的廃止措置」に基づき、ブレンストーミングを実施した。また、経験がない作業に対するリスク分析として、機能的劣化と機器劣化の双方から失敗に至るパスを考え、その致命度を評価することが、SEEM 学において必要との議論から、OT と FEMA による分析についても議論した。また、福島高専 4 年生対象の廃炉工学と富山高専 5 年生対象のシステム工学に SEEM 学に関する内容を追加するために、令和 7 年度に教材を作成することとした。また、全国の国立高専生に受講してもらうために、高専間単位互換制度を活用することとし、令和 8 年度から受講できるように調整することとした。海外研修については、原子力機構ワシントン事務所と議論を行い、NRC の委員長または委員との議論、また、イギリスでセラフィールド廃止措置に関するロボットの研究開発をしているマンチェスター大学研修を候補とした。

本研究を通して、四つの実施項目（過酷環境での放射線計測・センサ技術、取り出し工法に調和した遠隔ロボット技術、計測-遠隔ロボット統合技術と実証、計測-遠隔ロボット統合技術と実証、廃炉工程を俯瞰した性状把握、キャラクターゼーション）において、当初想定していた成果を得た。令和 7 年度以降、各項目の研究を進めるとともに、項目間の連携、特に、廃炉工程を俯瞰した性状把握、キャラクターゼーションからのフィードバックや計測-遠隔ロボット統合技術と実証における環境構造モデリング及び DX プラットフォーム構築のためのデータ等の集約、放射線センサ・ロボット技術の統合のための個別技術のモジュール化と連携を進める。

参考文献

- [3.1.2-1] S. Agostinelli, J. Allison, K. Amako, J. Apostolakis, H. Araujo et al., Geant4-a simulation toolkit, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 506, 2023, pp.250-303
- [3.1.3-1] G. Zhan, S. Singh, LOAM:Lidar Odometry and Mapping in Real-time, Robot. Sci. Syst. 2, 2014, pp.1-9
- [3.1.3-2] T. Shan, B. Englot, D. Meyers, W. Wang, C. Rattu, LIO-SAM: Tightly-coupled Lidar Intertial Odometry via Smoothing and Mapping, In Proceeding of the 2020 IEEE/RSJ IROS, LasVegas, NV, USA, 24 October 2020-24 January 2021
- [3.1.3-3] Q. Zhang, R. Pless, Extrinsic Calibration of a Camera and Laser Range Finder (improves camera calibration), In Proceeding of the 2004 IEEE/RSJ IROS, Sendai, Japan, 28 September, 2 October, 2004
- [3.1.3-4] R. Yamada, Y. Yaguchi, Probability-Based LIDAR-Camera Calibration Considering Target Positions and Parameter Evaluation Using a Data Fusion Map. Sensors, 24, 2024, 3981
- [3.1.3-5] T. Minakawa, Research of high-density 3D model construction by data fusion of camera point clouds and LiDAR point clouds, Graduation thesis in the University of Aizu, 2025
- [3.1.3-6] B.R. RuSu, S. Cousins, W. Garage, 3D is here: Point Cloud Library (PCL), In Proceeding of the IEEE/ICRA, Shanghai, China, 9-13 May 2011
DOI: 10.1109/ICRA.2011.5980567
- [3.2.2-1] R. Yokomura et al., Rail DRAGON: Long-Reach Bendable Modularized Rail Structure for Constant Observation Inside PCV, IEEE Robotics and Automation Letters, vol.9, no.4, 2024, pp.3275-3282
- [3.2.2-2] 東京電力ホールディングス株式会社, “燃料デブリ取り出し状況”,
<https://www.tepco.co.jp/decommission/progress/retrieval/> (参照: 2025年3月10日)
- [3.2.2-3] H. Tsuji et al., Primary-view-consistent Operation Method of Master Controller in Multiple Screen Teleoperation System, In proc. of IEEE/SICE International Symposium on System Integration, 2021, pp.110-115
- [3.2.2-4] 鈴木健太他, 遠隔操作ロボットを直感的に操作するための操作インタフェースの開発—遅延下における操作者の運動主体感と精神的負担の調査—, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2024, 1P2-B03
- [3.2.3-1] 瀬戸徳文, Luis Canete, 高橋隆行: 原子炉内部調査用ロボットの開発—低融点合金を用いたサンプリングアームユニットの試作—, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2018, 1P2-M02
- [3.2.3-2] 瀬戸徳文, 情野瑛, 高橋隆行: 原子炉内部調査用モニタリングアームの開発—関節状態判別方法の提案と状態遷移法の検討—, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2020, 2P1-P01
- [3.2.3-3] 横田開, 高橋隆行: 低融点合金を用いた巻取型高剛性長尺アーム—関節状態推定法の提案と関節強度評価—, 第 25 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2024, 2F1-09
- [3.2.3-4] 横田開, 高橋隆行: 低融点合金を用いた巻取型高剛性長尺アーム—巻き取りシステムの試作—, ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2024, 1P2-A06

- [3.2.4-1] 奥田珠貴, 横小路泰義, 田崎勇一, 永野光, 片山雷太: 自由移動視点を含む多視点遠隔操縦システムの構築とその有効性検証, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, 2024, 1P2-A05
- [3.3.1-1] E. Agustsson and R. Timofte, NTIRE 2017 Challenge on Single Image Super-Resolution: Dataset and Study, Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2017, pp.1122-1131
DOI: 10.1109/CVPRW.2017.150
- [3.3.1-2] 東京電力ホールディングス株式会社, “福島第一原子力発電所 3 号機原子炉格納容器 (PCV) ガス管理システムダクトの状況確認結果について”, 2012 年 11 月 28 日
<https://photo.tepco.co.jp/date/2012/201211-j/121128-01j.html>
(参照: 2025 年 2 月 28 日)
- [3.3.1-3] 東京電力ホールディングス株式会社, “福島第一原子力発電所 1 号機ベント管下部周辺の調査結果について (2 日目)”, 平成 25 年 11 月 14 日
<https://photo.tepco.co.jp/date/2013/201311-j/131114-01j.html>
(参照: 2025 年 2 月 28 日)
- [3.3.1-4] 東京電力ホールディングス株式会社, “福島第一原子力発電所 1号機原子炉格納容器内部調査の実施状況 (2 月 10 日時点)”, 2022 年 2 月 10 日
<https://photo.tepco.co.jp/date/2022/202202-j/220210-01j.html>
(参照: 2025 年 2 月 28 日)
- [3.3.1-5] C. Dong, C.C. Loy, K. He, X. Tang, Learning a Deep Convolutional Network for Image Super-Resolution, in Proceedings of European Conference on Computer Vision (ECCV), 2014, pp.184-199 DOI: 10.1007/978-3-319-10593-2_13
- [3.3.1-6] C. Dong, C.C. Loy, X. Tang, Accelerating the Super-Resolution Convolutional Neural Network, in Proceedings of European Conference on Computer Vision (ECCV), 2016, pp391-407 DOI: 10.1007/978-3-319-46475-6_25
- [3.3.1-7] K. He, X. Zhang, S. Ren, J. Sun, Deep Residual Learning for Image Recognition, Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2016, pp.770-778 DOI: 10.1109/CVPR.2016.90
- [3.3.1-8] J. Lehtinen, J. Munkberg, J. Hasselgren, S. Laine, T. Karras, M. Aittala, T. Aila, Noise2Noise: Learning Image Restoration without Clean Data, Proceedings of the 35th International Conference on Machine Learning (PMLR), 2018, pp.2965-2974
- [3.3.1-9] Z. Kai, Z. Wangmeng, C. Yunjin, M. Deyu, Z. Lei, Beyond a gaussian denoiser: Residual Learning of deep CNN for Image Denoising, IEEE transactions on image processing, vol.26, Issue 7, 2017, pp.3142-3155 DOI: 10.1109/TIP.2017.2662206
- [3.3.1-10] R. Yokomura, M. Goto, T. Yoshida, S. Warisawa, T. Hanari, K. Kawabata and R. Fukui, Rail DRAGON: Long-reach Bendable Modularized Rail Structure for Constant Observation inside, IEEE Robotics and Automation Letters, vol.9, Issue 4, 2024, pp3275-3282 DOI: 10.1109/LRA.2024.3366022
- [3.3.1-11] T. Hanari, K. Nakamura, T. Imabuchi and K. Kawabata, Image Selection Method from Image Sequence to Improve Computational Efficiency of 3D Reconstruction: Application of Fixed Threshold to Remove Redundant Images, Journal of Robotics and Mechatronics, vol.36, no.6, 2024, pp.1537-1549

- [3.3.1-12] 川端, 松本, 羽成, 八代, 後藤, 福井, 中村, 原子炉内状況把握のための時系列画像からの オンライン立体モデリングシステム, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 予稿集, 2024, 1P2-B04
- [3.3.1-13] 塚本, 侯, 鈴木, 丹羽, LCX (漏えい同軸ケーブル) を用いた無線 LAN システム, 電子情報通信学会通信ソサイエティマガジン, 10 巻, 2 号, 2016, pp.86-91
- [3.3.1-14] ROS Wiki, “image_transport”, https://wiki.ros.org/image_transport (参照: 2025 年 3 月 1 日)
- [3.3.2-1] N. Koenig, A. Howard, Design and use paradigms for Gazebo, an open-source multi-robot simulator, 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), vol.3, 2004, pp.2149-2154
DOI: 10.1109/IROS.2004.1389727
- [3.3.2-2] M. Quigley, K. Conley, B.P. Gerkey, J. Faust, T. Foote, J. Leibs, R. Wheeler, A.Y. Ng, ROS: An open-source robot operating system, Workshops at the IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2009
- [3.3.2-3] T. Yamashita, K. Shimomura, E. Nagai, T. Yasumatsu, S. Mizokami, Estimation of RPV damage and fuel debris relocation behavior in the PCV at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station 1 - development of 3D estimation diagrams and the debrisEye, Spring Annual Meeting of the Atomic Energy Society of Japan, 2024
- [3.3.2-4] R. Ueda, M. Murooka, Y. Ohara, I. Kumagai, R. Terasawa, Y. Furuta, K. Kojima, T. Karasawa, F. Sugai, S. Iwaishi, S. Nozawa, Y. Kakiuchi, K. Okada, M. Inaba, Humanoid integrated UI system for supervised autonomy with massive data visualization over narrow and unreliable network communication for DRC competition, 2015 IEEE-RAS 15th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids), 2015, pp.797-804 DOI: 10.1109/HUMANOIDS.2015.7363445
- [3.3.3-1] 鈴木俊一, 俯瞰的アプローチによる燃料デブリ取り出し代替工法の提案, 保全学, vol.17, no.4, 2019, pp.83-90
- [3.3.3-2] 陳奎里, 田村雄介, 平田泰久, 複数移動ロボットによる未知環境での放射線源探査, 第 25 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 2024, 2F1-10
- [3.3.3-3] A.P. Dempster, N.M. Laird, D.B. Rubin, Maximum Likelihood from Incomplete Data via the EM Algorithm, Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological), vol.39, no.1, 1977, pp.1-38
- [3.3.3-4] D. Ulyanov, A. Vedaldi, V. Lempitsky, Deep Image Prior, Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2018, pp.9446-9454
- [3.4.1-1] K. Shibata, S. Koshizuka, and M. Sakai et al., Numerical analysis of acceleration of a free-fall lifeboat using the MPS method, International Journal of Offshore and Polar Engineering 23(4), 2013, pp.279-285
- [3.4.1-2] S. Koshizuka, A. Nobe, Y. Oka, Numerical analysis of breaking waves using the moving particle semi-implicit method, International Journal for Numerical Methods in Fluids, 26, 1998, pp.751-769
- [3.4.1-3] E.N. Gilbert, How things float, American Mathematical Monthly, 98, 1998, pp.201-216
- [3.4.1-4] A. Khayyer, H. Gotoh, and H. Falahaty et al., Towards development of enhanced fully-Lagrangian mesh-free computational methods for fluid-structure interaction, Journal of Hydrodynamics, 30, 2018, pp.49-61

- [3.4.2-1] 原子力損害賠償・廃炉等支援機構, “燃料デブリ取り出し工法評価小委員会”, 2024 年 3 月 7 日, <https://ndf.s2.kuroco-edge.jp/files/user/press/at2024/20240308h.pdf> (参照: 2025 年 2 月 3 日)
- [3.4.2-2] B. Walkley, R.S. Nicolas, M.A. Sani and et al, Synthesis of stoichiometrically controlled reactive aluminosilicate and calcium-aluminosilicate powders, Powder Technol, vol.297, Sep. 2016, pp.17-33

