

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
(委託研究)

—令和2年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業—
Human Resource Development Related to Remote Control Technology
for Monitoring Inside RPV Pedestal during Retrieval of Fuel Debris
(Contract Research)
-FY2020 Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource
Development Project-

福島研究開発部門 福島研究開発拠点 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 Institute, Sector of Fukushima Research and Development
The University of Tokyo

December 2021

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Review

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。本レポートはクリエイティブ・コモンズ表示 4.0 国際 ライセンスの下に提供されています。本レポートの成果（データを含む）に著作権が発生しない場合でも、同ライセンスと同様の条件で利用してください。（<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja>）
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト（<https://www.jaea.go.jp>）より発信されています。本レポートに関しては下記までお問合せください。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 JAEA イノベーションハブ 研究成果利活用課
〒 319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>).

Even if the results of this report (including data) are not copyrighted, they must be used under the same terms and conditions as CC-BY.

For inquiries regarding this report, please contact Institutional Repository and Utilization Section, JAEA Innovation Hub, Japan Atomic Energy Agency.

2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan

Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

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
(委託研究)

—令和2年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業—

日本原子力研究開発機構 福島研究開発部門 福島研究開発拠点
廃炉環境国際共同研究センター

東京大学

(2021年9月7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2年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業（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、様々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、研究課題のうち、令和元年度に採択された「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」の令和2年度の研究成果について取りまとめたものである。

本研究では、燃料デブリ取り出し時における炉内状況把握のためのモニタリングプラットフォームの構築、およびプラットフォーム上を移動するセンサによる計測・可視化に関する研究開発を行う。また、このような研究課題に参画することによる研究教育、講義等の座学、施設見学、の3つの柱で研究人材を育成することを目的とする。令和2年度は、主に基本設計および要素開発に取り組んだ。

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

Human Resource Development Related to Remote Control Technology
for Monitoring Inside RPV Pedestal during Retrieval of Fuel Debris
(Contract Research)

— FY2020 Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project —

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

The University of Tokyo

(Received September 7, 2021)

The Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science (CLADS), Japan Atomic Energy Agency (JAEA), had been conducting the Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project (hereafter referred to “the Project”) in FY2020.

The Project aims to contribute to solving problems in the nuclear energy field represented by the decommissioning of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, 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 FY2019, this report summarizes the research results of the “Human resource development related to remote control technology for monitoring inside RPV pedestal during retrieval of fuel debris” conducted in FY2020.

This study deals with construction of a monitoring platform for understanding the status inside a reactor during fuel debris removal, and measurement and visualization by sensors moving on the platform. In addition, to develop research personnel through research education by participating in such research projects, classroom lectures, and facility tours is also a goal of this project. In FY2020, the main activities were base design and underlying technology development.

Keywords: Monitoring Platform, Visualization, Teleoperation, Radiation Measurement, 3D Reconstruction

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
付録 成果報告書	11

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
Appendix Result Report	11

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（日英共同研究）

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（日英共同研究 2 課題、日露共同研究 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 康一朗	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 (令和元年度まで) 大曲 新矢	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	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 (令和2年度 まで) 岡山大学

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
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

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 (平成30年度まで) 竹下 健二	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（日英共同研究）

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、日英共同研究については二国間の合同審査を実施し、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）会議での審議を経て、採択課題を決定した。

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	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
α / β / γ 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

本報告書は、以下の課題の令和2年度の研究成果を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

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 2 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

(契約番号 R02I044)

成果報告書

令和 3 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」の令和2年度の研究成果を取りまとめたものです。

目次

概略	vii
1. はじめに	1. 1-1
2. 業務計画	2. 1-1
2.1 全体計画	2. 1-1
2.2 令和2年度の成果の目標および業務の実施方法	2. 2-1
3. 令和2年度の実施内容および成果	3. 1-1
3.1 モニタリングプラットフォームの構築	3. 1-1
3.1.1 軌道構造自動施工システム	3. 1-1
3.1.2 コンパクトに巻き取り可能な高剛性軽量アーム（再委託先：福島大学）	3. 1-9
3.2 遠隔操作インタフェースの開発	3. 2-1
3.2.1 映像提示インタフェース	3. 2-1
3.2.2 高臨場感遠隔操縦システム（再委託先：神戸大学）	3. 2-6
3.3 放射線モニタリングデバイスの開発	3. 3-1
3.3.1 ガンマ線高速応答検出器の試作開発と高線量場試験と考察	3. 3-1
3.3.2 高速応答中性子検出器の試作開発と線種識別検出器の試作検証	3. 3-3
3.3.3 位置情報融合システムの検討	3. 3-5
3.4 炉内環境把握のための環境モデル立体復元手法の研究開発（連携先：原子力機構）	3. 4-1
3.4.1 推定カメラ軌道に基づいた環境モデルの次落箇所推定手法の開発および検証	3. 4-1
3.4.2 立体復元計算に有効な画像を選定する条件の調査およびその検証	3. 4-4
3.4.3 実験環境の整備	3. 4-9
3.5 研究推進	3. 5-1
3.6 教育	3. 6-1
4. 結言	4-1

執筆者リスト

事業代表者	国立大学法人東京大学	教授	浅間一
		教授	高橋浩之
		准教授	福井類
		准教授	山下淳
再委託先	国立大学法人福島大学	教授	高橋隆行
再委託先	国立大学法人神戸大学	教授	横小路泰義
連携先	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 グループリーダー 川端邦明		

表一覧

表 3.1-1	軌道モジュールの連結作業の所要時間.....	3.1-6
表 3.2-1	タスクの平均達成時間と標準偏差.....	3.2-11
表 3.3-1	中性子シンチレーター.....	3.3-3
表 3.4-1	実験条件.....	3.4-3
表 3.4-2	5 試行の立体復元結果に要する平均計算時間[秒]	3.4-8
表 3.6-1	廃止措置特論 E の概要.....	3.6-1

図一覧

図 1.1-1	モニタリングプラットフォームを用いたペDESTAL内部の計測と可視化	1.1-1
図 2.1-1	年度別全体計画	2.1-1
図 2.1-2	実施体制図	2.1-2
図 3.1-1	アクチュエータ内蔵の屈曲可能な軌道モジュール	3.1-1
図 3.1-2	PCV 内部の断面模式図	3.1-1
図 3.1-3	観察ロボットの軌道上での運用の概念図	3.1-2
図 3.1-4	軌道モジュールの連結と延伸方法の概念図	3.1-3
図 3.1-5	能動関節を用いた障害物回避の概念図	3.1-3
図 3.1-6	PCV 内部観察用軌道構造体の概念図	3.1-4
図 3.1-7	軌道構造体に対する観察ロボットの位置の比較	3.1-4
図 3.1-8	観察ロボットの軌道の側面へのぶら下がり方法	3.1-4
図 3.1-9	関節角度の変化による 2 枚の側面板の隙間の変化	3.1-5
図 3.1-10	各関節角度での側面板補間機構の 3D CAD 図	3.1-5
図 3.1-11	軌道モジュールの連結部分の 3D CAD 図	3.1-6
図 3.1-12	実際の現場での作業を模した軌道モジュールの連結作業実験の様子	3.1-6
図 3.1-13	軌道上を通過中の観察ロボットの姿勢角度	3.1-7
図 3.1-14	観察ロボットの軌道通行実験の様子	3.1-7
図 3.1-15	観察ロボットの駆動ローラと軌道の側面板の接触状態	3.1-8
図 3.1-16	LMPA アームのイメージ	3.1-9
図 3.1-17	LMPA アームの片持ち梁モデル	3.1-9
図 3.1-18	LMPA アームの片持ち梁モデル (2 段)	3.1-10
図 3.1-19	たわみ解析の結果	3.1-11
図 3.1-20	提案する巻き取り装置のイメージ	3.1-11
図 3.1-21	簡易的に試作した巻き取り装置を用いたアーム巻き取り実験の様子	3.1-12
図 3.1-22	実験の様子	3.1-12
図 3.1-23	実験で使用する試験片 (CAD 図)	3.1-13
図 3.1-24	計測した温度と共振周波数の関係	3.1-13
図 3.2-1	映像提示インタフェースの概念図	3.2-1
図 3.2-2	仮想的な環境におけるカメラ配置設計結果	3.2-2
図 3.2-3	ペDESTAL内を模擬したカメラシステム	3.2-2
図 3.2-4	台車を用いてプラットフォーム上におけるカメラの動きを模擬した様子	3.2-3
図 3.2-5	求めた環境の 3 次元モデル	3.2-3
図 3.2-6	実環境におけるカメラ配置設計結果	3.2-4
図 3.2-7	ペDESTALを模擬したレンダリング	3.2-5
図 3.2-8	複数画面を有する遠隔操縦システムの基本コンセプト	3.2-6
図 3.2-9	開発した複数画面を有する遠隔操縦コックピット	3.2-7
図 3.2-10	俯瞰用カメラ	3.2-7
図 3.2-11	ロボット手先カメラ	3.2-8
図 3.2-12	5GigE カメラ	3.2-8

図 3.2-13	10GigE カメラ	3.2-9
図 3.2-14	速度制御モード	3.2-9
図 3.2-15	位置制御モード	3.2-9
図 3.2-16	2つの整合性	3.2-10
図 3.2-17	試行毎のタスク達成時間	3.2-11
図 3.2-18	軽量高剛性アームのコンフィグレーション計画	3.2-12
図 3.3-1	モニタリングプラットフォームにおける放射線モニタリング概念図	3.3-1
図 3.3-2	小型パッケージ CeBr ₃ ガンマ線検出器	3.3-2
図 3.3-3	高線量率下での ¹³⁷ Cs のエネルギースペクトル応答	3.3-2
図 3.3-4	0.5 mm および 0.25 mm 厚の Ce:LiCAF シンチレーターの応答	3.3-3
図 3.3-5	ガンマ線応答	3.3-3
図 3.3-6	中性子イメージングシステムと中性子イベント、ガンマ線イベント弁別	3.3-4
図 3.3-7	信号処理ボードと位置トラッキングシステムとの融合画像例	3.3-5
図 3.4-1	カメラにより取得された画像の一例	3.4-2
図 3.4-2	実験条件 1 の立体復元結果	3.4-3
図 3.4-3	無次元化されたカメラ移動量 (実験条件 2)	3.4-4
図 3.4-4	カメラと直線レールの例	3.4-5
図 3.4-5	シミュレーション環境	3.4-5
図 3.4-6	スポットライトデバイスの適用例	3.4-5
図 3.4-7	仮想カメラモデルと姿勢角度	3.4-5
図 3.4-8	仮想環境上面図	3.4-6
図 3.4-9	各仮想カメラ姿勢角度における初期状態 (0 秒時) における撮影画像	3.4-6
図 3.4-10	仮想カメラ姿勢角度 0 度における立体復元結果	3.4-7
図 3.4-11	仮想カメラ姿勢角度 15 度における立体復元結果	3.4-7
図 3.4-12	仮想カメラ姿勢角度 30 度における立体復元結果	3.4-7
図 3.4-13	仮想カメラ姿勢角度 45 度における立体復元結果	3.4-7
図 3.4-14	仮想カメラ姿勢角度 60 度における立体復元結果	3.4-8
図 3.4-15	仮想カメラ姿勢角度 60 度 (0~5 秒、16 秒~20 秒のみ使用) における立体復元結果	3.4-9
図 3.4-16	代替データ (6~10 秒) を使用した立体復元の補完結果	3.4-9
図 3.4-17	実験環境の設計図	3.4-10

略語一覧

- PCV : Primary Containment Vessel (格納容器)
- LMPA : Low Melting Point Alloys (低融点合金)
- SfM : Structure from Motion (複数枚の画像から3次元情報を復元する技術)
- SOI : Silicon-On-Insulator (半導体チップの基板内部に絶縁体の層を作り、その上にシリコン膜を形成したもの)
- DAQ : Data Acquisition (データ収集)
- FWHM : Full Width Half Maximum (半値幅)
- FPGA : Field Programmable Gate Array (製造後でも再プログラム可能な集積回路)
- SIFT : Scale Invariant Feature Transform (スケール不変特徴量変換)
- MVS : Multi-View Stereo (多視点ステレオ)
- 福島第一原発 : 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
- NDF : Nuclear Damage Compensation and Decommissioning Facilitation Corporation
(原子力損害賠償・廃炉等支援機構)
- 原子力機構 : 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
- J-PARC : Japan Proton Accelerator Research Complex (大強度陽子加速器施設)

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、「福島第一原発」と略す。）1～3号機の格納容器（Primary Containment Vessel、以下、「PCV」と略す。）内部には大量の燃料デブリが存在しており、廃炉に向けてこれら燃料デブリを取り出すことが必須となる。燃料デブリ取り出し開始に向けては、これまでに遠隔操作ロボットの投入やミュオン測定等により、PCV内部の状況や燃料デブリの大まかな分布が徐々に明らかになりつつある。

原子力損害賠償・廃炉等支援機構（Nuclear Damage Compensation and Decommissioning Facilitation Corporation（以下、「NDF」と略す。））の技術戦略プランによれば、燃料デブリの取り出しは、気中-横アクセス工法に軸足を置いて進めていくことになる。遠隔操作ロボットアーム等を用いて安全かつ確実に燃料デブリの取り出しを行うためには、各作業の前に格納容器内部の3次元的な状況を正確に把握することが必要である。また、取り出し作業中には、オペレータが作業空間を適切に認知するために、適切な視点からのカメラ映像を提示する必要がある。したがって、作業に応じてペDESTAL内部にカメラやガンマ線および中性子検出器等のセンサを適切に配置し、活用することが必須となる。また、PCV内部は高線量であり、かつ燃料デブリの取り出し作業は長期にわたることが予想されるため、センサが故障することを前提にシステムを構築する必要がある。すなわち、センサ故障時、またはセンサの積算線量が一定の閾値を超えた場合には容易に交換できることが必要である。

本研究では、福島第一原発の廃炉に向けて、遠隔技術分野を中心とした研究人材の育成を行う。燃料デブリ取り出し時における炉内状況把握のためのモニタリングプラットフォームの構築、およびプラットフォーム上を移動するセンサによる計測・可視化についての研究を行う。このような研究課題に参画することによる研究教育、講義等の座学、施設見学、の3つの柱で研究人材を育成することを目的とする。

以下に、5カ年計画の2年目である令和2年度の業務実績を述べる。

(1) モニタリングプラットフォームの構築

① 軌道構造自動施工システム

軌道構造施工システムの基本設計および要素開発に取り組んだ。具体的には軌道構造の基本構成要素である単関節軌道モジュールおよび観察ユニットの移動機能部の開発に取り組んだ。

単関節軌道モジュールおよび観察ユニットの移動機能部の試作および性能評価実験を通じて要求機能の基本的な実現性は確認できたが、要求機能を完全に実現するためには、アクチュエータの再選定や機構の改良が必要なことが明らかになった。

② コンパクトに巻き取り可能な高剛性軽量アーム（再委託先：福島大学）

低融点合金（Low Melting Point Alloy、以下、「LMPA」と略す。）を用いた関節機構について、令和元年度の成果を用いて複数関節のアームを試作し、性能評価ならびに改良を行った。誘導加熱を用いた関節機構の加熱システムについて、加熱部の電子回路、コイル配置等の試作検討を行い、加熱システムの基本的な設計を行った。上記の検討結果に基づき、プラットフォーム軌道上を走行する台車を想定した、アームシステムの構想設計を行った。

LMPAを用いた複数関節のアームにおける、アーム手先のたわみについて解析を行った。解析の結果、アームの根元側を太くしてアームの先端側を細くする構造にすることで、アームのたわみを大きく軽減することができることを確認した。令和元年度に開発した誘導加熱装置の共振周波数を用いた温度センシングについて、令和2年度はアーム構造に対して十分な温度セン

シングが可能か実験から調査を行い、関節の状態を十分観察できることを確認した。ペDESTALル内にアームを入れ、内部でアームを展開することを想定した、アーム巻き取り装置の構造を考案した。簡単な装置を作製して想定する巻き取りと繰り出し動作ができることを確認した。

(2) 遠隔操作インタフェースの開発

① 映像提示インタフェース

オペレータへの映像提示のために、令和元年度に検討したカメラの仕様や台数等に基づきカメラ配置手法の検討を行った。原子炉建屋内の3次元モデルを活用し、そのモデルに基づき作業領域を撮像可能なカメラ配置手法の検討を行った。また、簡易的な実験用カメラシステムの構築を行った。

具体的には、環境の3次元モデルを与えられた時に、ある1つの対象物を指定したときのカメラ配置設計が2次元上で可能になった。実環境においても検証を行っており、カメラと三脚を用いた簡易なカメラシステムを構築し、円周上にカメラを動かして撮影した映像から環境の3次元モデルを復元することでカメラ配置を設計した。

② 高臨場感遠隔操縦システム（再委託先：神戸大学）

プラットフォームや高剛性軽量アームを格納容器内に敷設する作業や格納容器内での高剛性軽量アームを用いた各種作業を想定した遠隔操縦方法を検討した。令和元年度に国立大学法人神戸大学（以下、「神戸大学」と略す。）で開発した実験用ロボットプラットフォームを活用し、連携ラボ内での映像提示インタフェース検討の結果を取り入れて、遠隔操縦方法の検証が可能な遠隔操縦実験プラットフォームの基本形の開発を行った。

具体的には、高剛性軽量アームについては、超多自由度のチェーン構造となる高剛性軽量アームを作業空間内に展開する際の空間掃引領域を視覚化し、アームのコンフィグレーションの計画に関する知見を得た。また令和元年度に引き続き複数画面を有する遠隔操縦システムの直感的なインタフェースの構成法を提案し、予備の実験を行った。同時に遠隔操縦実験プラットフォームの基本形となる複数画面を有する遠隔操縦用コックピットを開発した。

(3) 放射線モニタリングデバイスの開発

令和元年度に設計開発した高速の応答性能を有する中性子、ガンマ線検出器を、模擬線源等を用いて光センサ、信号読み出し回路と合わせてスペクトロスコピー性能の改良を行った。また、トモグラフィ手法実装のための試作開発およびプラットフォームからの位置情報と放射線センサデバイスとの同期の設計開発を実施した。

具体的には模擬線源を利用した数 Sv/h の高線量率下において、設計開発したガンマ線検出器の動作検証を行い、該当のスペクトル性能が達成できることを確認した。また開発した中性子検出器のスペクトル弁別機能を確認した。位置同期については光位置3次元トラッキング技術とイメージング技術を組み合わせた性能試験を実施し、模擬線源を特定可能であることを確認した。

(4) 炉内環境把握のための環境モデル立体復元手法の研究開発（連携先：日本原子力研究開発機構（以下、「原子力機構」と略す。））

画像から立体復元処理により生成された環境モデル上の欠落部分を抽出し、補完のためのカメラ位置を推定する手法の研究開発を行うとともに、立体復元計算に有効な画像を自動的に選

定する条件の抽出、設定についての調査およびその検証を行った。また、実験環境整備のために、プラットフォーム開発を行うグループより情報を得て基礎的な設計開発を行った。

モデル復元計算とともに得られるカメラ軌道から、復元モデルの欠落部分を補完するためのカメラ位置推定手法を開発し、実験により検証を行った。また、ロボットシミュレータ Choreonoid を使用して、模擬環境モデルを撮影するシミュレーションを行い、立体復元計算に有効な画像を選定する条件の調査を行うとともに、検証実験を行った。さらに、開発中であるプラットフォームを用いた実験を行うための模擬環境について基礎的な設計を行い、原子力機構 檜葉遠隔技術開発センターにおいて設置方法等の具現化についての議論を行った。

(5) 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間ならびに廃炉環境国際共同研究センター（以下、「CLADS」と略す。）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。具体的には、毎月 1 回のプロジェクト会議を実施するとともに、研究項目間での議論、プラントメーカーとの議論を行った。

(6) 教育

福島第一原発の廃炉に向けて、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。福島第一原発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。

1. はじめに

福島第一原発 1～3 号機の PCV 内部には大量の燃料デブリが存在しており、廃炉に向けてこれら燃料デブリを取り出すことが必須となる。令和 3 年の燃料デブリ取り出し開始に向けては、これまでに遠隔操作ロボットの投入やミュオン測定等により、PCV 内部の状況や燃料デブリの大まかな分布が徐々に明らかになりつつある。

NDF の技術戦略プランによれば、燃料デブリの取り出しは、気中-横アクセス工法に軸足を置いて進めていくことになる。遠隔操作ロボットアーム等を用いて安全かつ確実に燃料デブリの取り出しを行うためには、各作業の前に格納容器内部の 3 次元的な状況を正確に把握することが必要である。また、取り出し作業中には、オペレータが作業空間を適切に認知するために、適切な視点からのカメラ映像を提示する必要がある。したがって、作業に応じてペDESTAL 内部にカメラやガンマ線および中性子検出器等のセンサを適切に配置し、活用することが必須となる。また、PCV 内部は高線量であり、かつ燃料デブリの取り出し作業は長期にわたることが予想されるため、センサが故障することを前提にシステムを構築する必要がある。すなわち、センサ故障時、またはセンサの積算線量が一定の閾値を超えた場合には容易に交換できることが必要である。

そこで本研究では、ペDESTAL 内部にモニタリングのためのプラットフォームを構築することを提案する。カメラやガンマ線および中性子検出器等の各種センサはこのプラットフォーム上を移動し、燃料デブリ取り出しのために必要な計測・可視化を行う。図 1.1-1 に本研究で提案するモニタリングプラットフォームの概念図を示す。

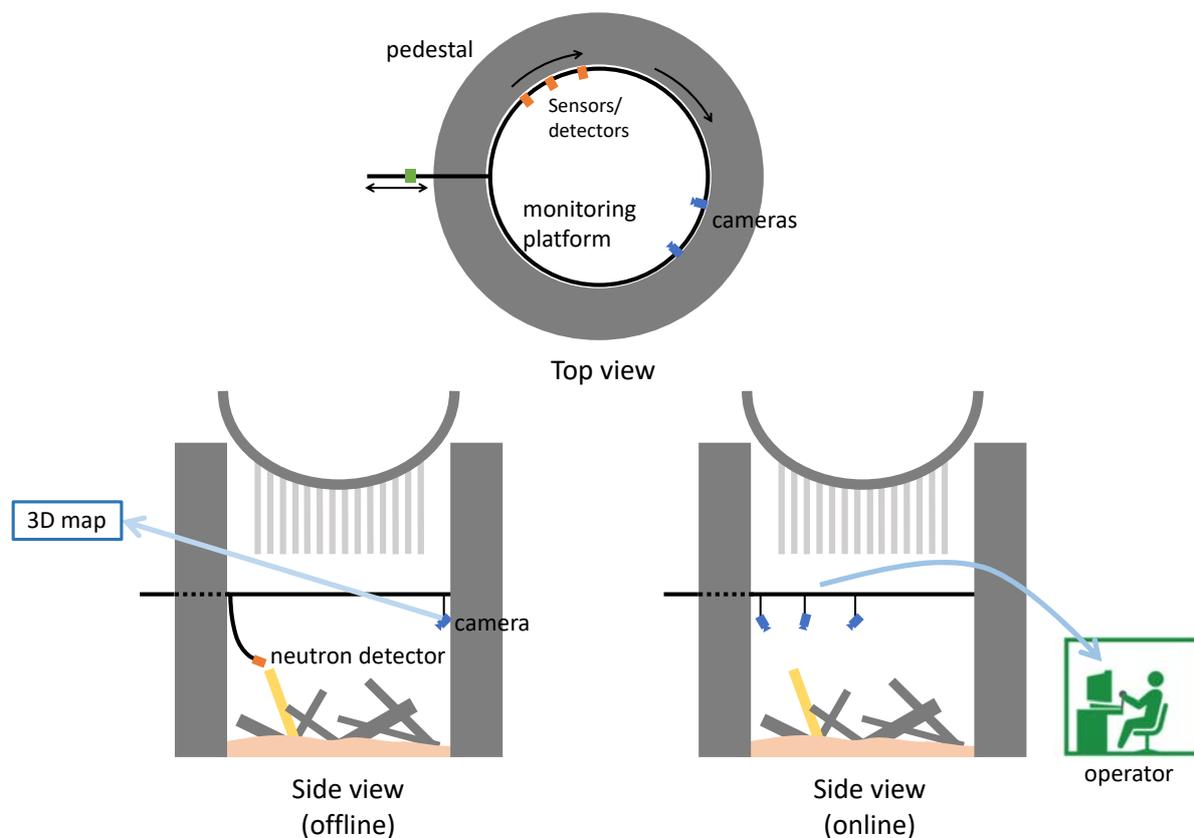


図 1.1-1 : モニタリングプラットフォームを用いたペDESTAL 内部の計測と可視化

本研究は以下の実施項目から構成される。

- (1) モニタリングプラットフォームの構築
 - ① 軌道構造自動施工システム
 - ② コンパクトに巻き取り可能な高剛性軽量アーム
- (2) 遠隔操作インタフェースの開発
 - ① 映像提示インタフェース
 - ② 高臨場感遠隔操縦システム
- (3) 放射線モニタリングデバイスの開発
- (4) 炉内環境把握のための環境モデル立体復元手法の研究開発

(1)、(2)、(3)については、国立大学法人東京大学（以下、「東京大学」と略す。）を中心とした連携ラボ（大学等）において実施し、(4)については、連携ラボ（原子力機構）において実施する。

本プログラムでは、上記の研究開発を通じて、連携ラボ（大学等）と連携ラボ（原子力機構）で適宜相互連携しながら遠隔技術分野を中心とした廃炉研究人材を育成する。

2. 業務計画

2.1 全体計画

福島第一原発の廃炉に向けて、遠隔技術分野に関する研究人材の育成を行う。燃料デブリ取り出し時における炉内状況把握という研究課題を通して研究教育を行うとともに、講義、施設見学等を通じた人材育成を行う。研究課題は、(1)モニタリングプラットフォーム構築、(2)遠隔操作インタフェース開発、(3)放射線モニタリングデバイス開発、(4)炉内環境把握のための環境モデル生成手法の研究開発、という4項目で構成される。

(1)では、モジュール分割式のプラットフォーム構築技術およびコンパクトに巻き取り可能な高剛性軽量アームの開発、(2)では、オペレータへの映像提示インタフェースおよび高臨場感遠隔操縦システムの開発、(3)では、高線量率下で動作可能な中性子/ガンマ線計測デバイスおよび位置情報との融合によるイメージング技術の開発、(4)では、カメラから得られたデータによる環境モデルの立体復元技術の開発を行う。

年度別全体計画を図 2.1-1 に示す。

項目	年度	令和元年度	令和2年度	令和3年度	令和4年度	令和5年度
(1) モニタリングプラットフォームの構築 ① 軌道構造自動施工システム		概念設計・先行要素開発	基本設計・要素開発	システム開発	モックアップ実験	システム統合実験
		←	←	←	←	←
② コンパクトに巻き取り可能な高剛性計量アーム (福島大学)		関節基本設計	アーム試作・システム構想設計	関節機構拡張	システム統合	改良・評価
		←	←	←	←	←
(2) 遠隔操作インタフェース開発 ① 映像提示インタフェース		概念設計	カメラ配置手法構築	情報提示手法構築	モックアップ実験	システム統合試験
		←	←	←	←	←
② 高臨場感遠隔操縦システム (神戸大学)		コンセプト立案・作業分析	シミュレータ構築・プロトタイプ開発	手法開発・シミュレータ検証	モックアップ構築・検証	システム改良・モックアップ検証
		←	←	←	←	←
(3) 放射線モニタリングデバイスの開発		要素開発・シミュレーション	基礎性能検証・試作開発	性能試験・改良	実証試験	改良・検証試験
		←	←	←	←	←
(4) 炉内環境把握のための環境モデル立体復元手法の研究開発		画像特徴の分析・有効条件の研究	画像選択手法、逐次的な立体復元手法の研究開発	画像収集・管理システムの研究開発、模擬環境整備	局所環境モデル統合手法の研究開発	環境モデル生成手法の統合検証実験
		←	←	←	←	←
(5) 研究推進		研究推進	研究推進	研究推進	研究推進	研究推進・取りまとめ
		←	←	←	←	←

図 2.1-1：年度別全体計画

また、実施体制を図 2.1-2 に示す。

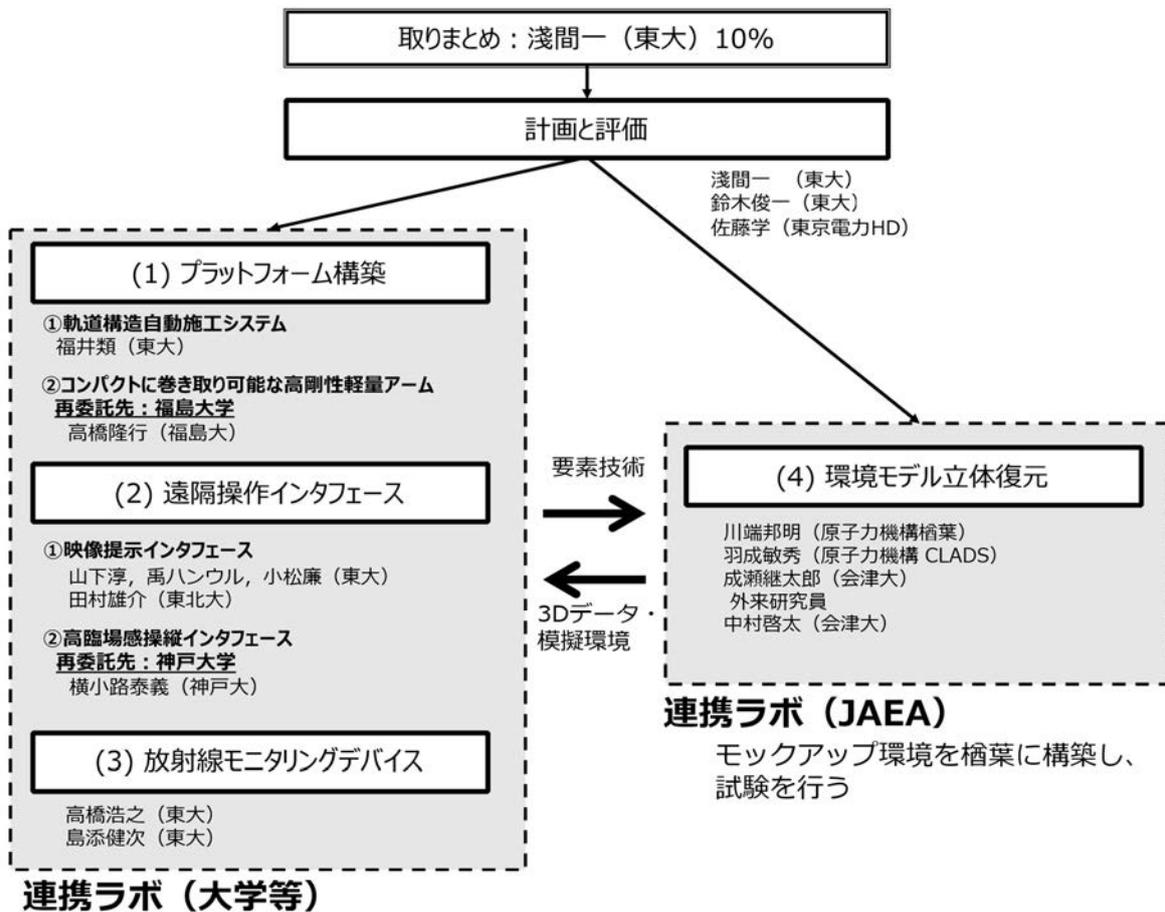


図 2.1-2：実施体制図

2.2 令和2年度の成果の目標および業務の実施方法

(1) モニタリングプラットフォームの構築

① 軌道構造自動施工システム

軌道構造施工システムの基本設計および要素開発に取り組む。具体的には軌道構造の基本構成要素である単関節軌道モジュールおよび観察ユニットの移動機能部の開発に取り組む。

② コンパクトに巻き取り可能な高剛性軽量アーム（再委託先：福島大学）

LMPA を用いた関節機構について、令和元年度の成果を用いて複数関節のアームを試作し、性能評価ならびに改良を行う。誘導加熱を用いた関節機構の加熱システムについて、加熱部の電子回路、コイル配置等の試作検討を行い、加熱システムの基本的な設計を行う。上記の検討結果に基づき、プラットフォーム軌道上を走行する台車を想定した、アームシステムの構想設計を行う。

(2) 遠隔操作インタフェースの開発

① 映像提示インタフェース

オペレータへの映像提示のために、令和元年度に検討したカメラの仕様や台数等に基づきカメラ配置手法の検討を行う。原子炉建屋内の3次元モデルを活用し、そのモデルに基づき作業領域を撮像可能なカメラ配置手法の検討を行う。また、簡易的な実験用カメラシステムの構築を行う。

② 高臨場感遠隔操縦システム（再委託先：神戸大学）

プラットフォームや高剛性軽量アームを格納容器内に敷設する作業や格納容器内での高剛性軽量アームを用いた各種作業を想定した遠隔操縦方法を検討する。令和元年度に神戸大学で開発した実験用ロボットプラットフォームを活用し、連携ラボ内での映像提示インタフェース検討の結果を取り入れて、遠隔操縦方法の検証が可能な遠隔操縦実験プラットフォームの基本形の開発を行う。

(3) 放射線モニタリングデバイスの開発

令和元年度に設計開発した高速の応答性能を有する中性子、ガンマ線検出器を、模擬線源等を用いて光センサ、信号読み出し回路と合わせてスペクトロスコーピー性能の改良を行う。また、トモグラフィ手法実装のための試作開発およびプラットフォームからの位置情報と放射線センサデバイスとの同期の設計開発を実施する。

(4) 炉内環境把握のための環境モデル立体復元手法の研究開発（連携先：原子力機構）

画像から立体復元処理により生成された環境モデル上の欠落部分を抽出し、補完のためのカメラ位置を推定する手法の研究開発を行うとともに、立体復元計算に有効な画像を自動的に選定する条件の抽出、設定についての調査およびその検証を行う。また、実験環境整備のために、プラットフォーム開発を行うグループより情報を得て基礎的な設計開発を行う。

(5) 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間ならびに 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. 令和2年度の実施内容および成果

3.1 モニタリングプラットフォームの構築

3.1.1 軌道構造自動施工システム

令和元年度検討した、PCV 外部から施工する軌道構造の具体的な設計と試作を行った。軌道構造と観察ロボットの運用方法を明確にし、軌道の詳細設計と観察ロボットの軌道上の駆動方法を検討した。PCV 内の障害物の回避方法と、施工時の安全性の検討を具体的な設計に反映させ、アクチュエータの搭載とモジュール連結部分の共通化という工夫を施し、図 3. 1-1 に示す軌道を試作し、その実現可能性を検証した。

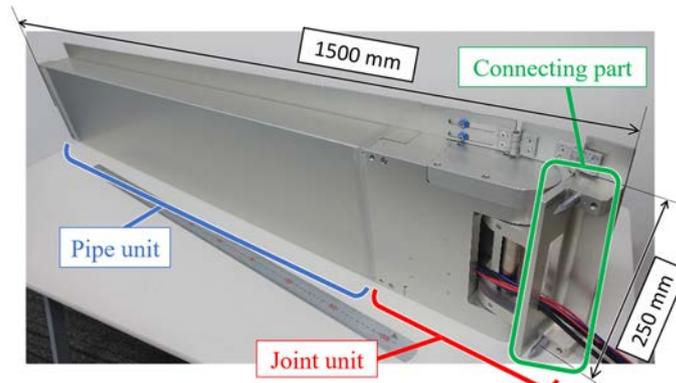


図 3. 1-1 : アクチュエータ内蔵の屈曲可能な軌道モジュール

(1) 技術課題の背景

福島第一原発では現在も廃炉に向けた作業が継続中である[1]。高放射線環境であるため人間による作業が難しく、建屋内の調査や除染作業には多くの遠隔操作ロボットが用いられてきた。特に2号機では、燃料デブリの試験的取り出しに向けて本格的な準備が行われており、さらに多くの遠隔操作ロボットが作業に利用されることが想定される。浅間は廃炉ロボットの遠隔操作の主な失敗の原因として空間認知不良による操作ミスを挙げている[2]。空間認知不良は、ロボットとその周辺を俯瞰する画像を操縦者に提供することで減らせる[3]。そのため、廃炉作業を行うロボットの周辺環境を常時観察可能なシステムを構築できれば操作の失敗を減らせる。

本研究ではペDESTAL内部でのロボットの活動も想定するため、観察用機器は図 3. 1-2 に示す原子炉格納容器内に進入する必要がある。しかし、格納容器にロボットが進入するための大きな貫通孔を空けることは、大量の放射性物質が漏洩するリスクを伴うため難しい。そのため、限られた大きさの貫通孔を通過して格納容器内部に進入する必要がある。

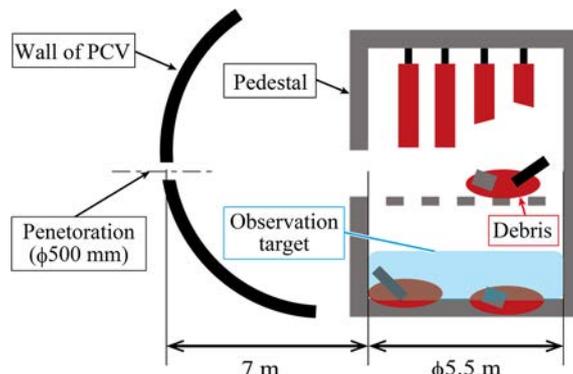


図 3. 1-2 : PCV 内部の断面模式図

格納容器内部の調査に用いられたロボット「PMORPH」[4]は貫通孔を通過する際には直線状に、平面を走行する際には矩形状に形状を変化させる。地下の落下物や堆積物の状況を把握するなど、一定の成果を上げたが、クローラ移動することから、足場が脱落している部分などでは移動できない。また、このロボットは、一時的な調査を想定したものであり、長期間の調査・観察は不可能である。

遠藤ら[5]は格納容器内部に挿入可能な超長尺多関節アームロボットである「Super Dragon」を開発している。細長いアームにカメラを取り付け小さい貫通孔に対応するアプローチは、本研究の参考になる。一方、アームに観察用機器を固定する場合、観察用機器交換の際に放射性物質により汚染された機械全体を回収する必要があるという問題がある。

以上のように、高放射線環境での長期運用と複雑な環境への対応を両立したシステムは未だない。そのため、本研究では事故炉格納容器内部を常時観察するシステムを実現する設計解を示す。さらに、システムの主要構成要素を製作し、その性能を検証することで提案する設計解の基本的な実現性を示すことを目的とする。

(2) 事故炉格納容器内部を常時観察するための観察用軌道システム

① 観察用システムの要求機能

観察用システムの主な要求事項は(i)高放射線環境による観察用機器故障への対応、(ii)ロボットの動作環境の多視点からの監視、(iii)ペDESTAL内部へのアクセス、(iv)装置の可搬性と施工時間短縮の両立、(v)多様な障害物への対応の5点である。以降でそれぞれについて述べる。

② 高放射線環境への対応

高放射線環境においては、半導体を利用している観察用機器が短期間で故障することが想定される。そのため、観察用機器を容易に交換できる必要がある。そこで、格納容器内部に施工した軌道の上を、観察用機器を搭載したロボット（以下、「観察ロボット」と略す。）が移動することにより、観察用機器の容易な交換を実現する。図 3.1-3 に示すように故障により使用不能となった観察ロボットは軌道の先端付近に設置したキャスク内に廃棄し軌道上から取り除く。

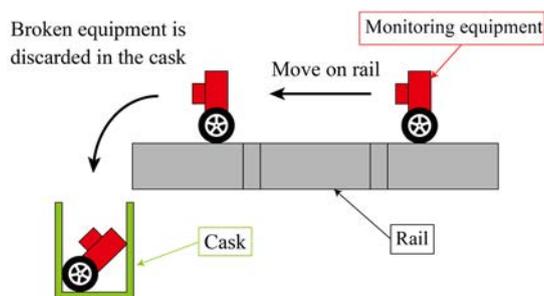


図 3.1-3：観察ロボットの軌道上での運用の概念図

③ 多視点からの監視のための複数台同時稼働に対応した低コストな観察用ロボット

作業用ロボットの遠隔操作ミスを減らすためにはロボットとその周辺の環境を多視点から見た画像を操縦者に提示することが有効である。そのため、軌道上では複数台の観察ロボットが同時に稼働できる必要がある。さらに、高放射線環境により観察ロボットが短時間で使用不能となるため、短期間で観察ロボットを製作し、投入する必要がある。本システムでは観察用ロボットを低コストで使い捨て可能とすることにより、交換の負担を小さくする。

④ ペDESTAL内部へのアクセスのための軌道の延伸

観察用機器は直径 500 mm の貫通孔から格納容器内部に投入する必要がある。貫通孔からペDESTALまでの距離は 7 m と長いので、ペDESTAL内部でも軌道を支持することが望ましい。しかし、ペDESTAL内部では足場の脱落が確認されているため格納容器内部での軌道の支持は難しい。そのため、本システムでは片持ち軌道を延伸させペDESTAL内部へアクセスする。軌道の断面を、直径 500 mm の円に収まる範囲で断面二次モーメントを大きくすることにより、貫通孔を通過でき、かつ重力によるたわみを小さくする。

⑤ 可搬性と施工時間短縮両立のための軌道モジュール化と作業員による押し出し施工

軌道を施工する際の作業員の被ばく量を許容範囲に収めるため、軌道の施工・運搬にかかる時間は十分短い必要がある。本システムでは軌道モジュール化し、施工と運搬を同時に可能とし、総施工時間を短縮する。また、作業失敗のリスクと施工時間を小さくするため、図 3.1-4 に示すように作業員が人手で軌道の根元にモジュールを連結し、押出す方法を採用した。

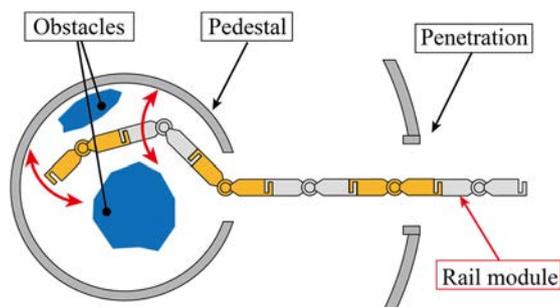


図 3.1-4：軌道モジュールの連結と延伸方法の概念図

⑥ 障害物対応のための能動関節をもつ屈曲軌道

ペDESTAL内部には溶け落ちた燃料デブリやグレーチングなどの障害物の存在が報告されている。そこで、蛇型アームロボットのアプローチを取り入れ、図 3.1-5 のようにペDESTAL内部に進入する部分に能動関節を持たせて屈曲を可能とすることで障害物を回避する。さらに、関節部であっても観察ロボットが移動可能なように関節部の構造に工夫を施す。

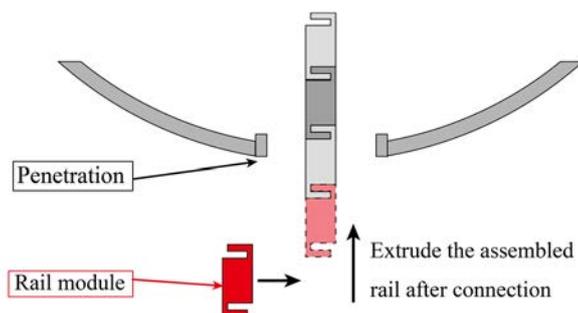


図 3.1-5：能動関節を用いた障害物回避の概念図

(3) PCV 内部観察用軌道構造体の設計と開発

① PCV 内部観察用軌道構造体の全体構成

図 3.1-6 のように、本システムは軌道とその上を移動する観察ロボットから構成され、軌道は格納容器外部で支持されている。

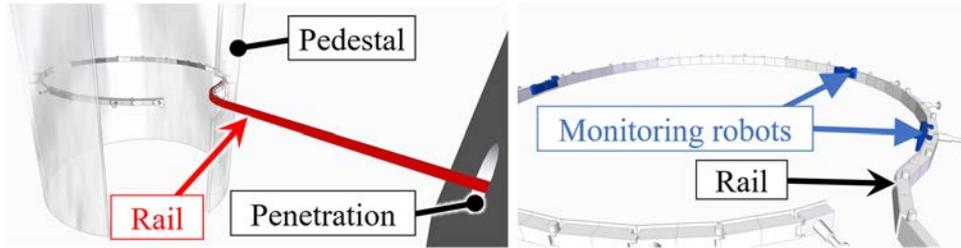


図 3.1-6 : PCV 内部観察用軌道構造体の概念図

② 観察ロボットの移動手法の検討

観察ロボットの移動手法を検討するにあたり、まず観察ロボットと軌道の位置関係を検討する。図 3.1-7 に示す上方、側方、下方の 3 通りが考えられる。軌道の断面二次モーメントを大きくするために軌道の断面が縦長になることと格納容器貫通孔の大きさを考慮すると、軌道の側方にロボットがいる場合が空間を最も有効に使うことができる。

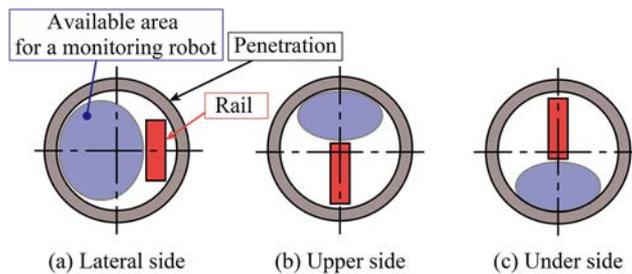


図 3.1-7 : 軌道構造体に対する観察ロボットの位置の比較

ロボットが機械的拘束により軌道に張り付けば、小型の支持構造を取り付けるのみで拘束可能であることに加え、観察ロボットが軌道を跨ぐ構造にすることで重力による落下を防げるため採用した。ロボットが軌道自体に引っかかる場合、軌道がペDESTAL 内壁に接触した際、観察ロボットがペDESTAL 内壁と干渉するという問題が生じる。この問題点を解決するため、図 3.1-8 のようにロボットが軌道の側面に取り付けた板に引っかかる構造とした。

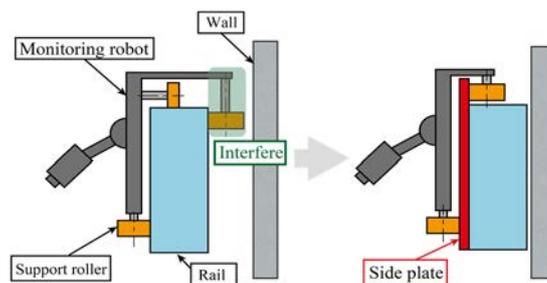


図 3.1-8 : 観察ロボットの軌道の側面へのぶら下がり方法

③ 屈曲軌道モジュールの基本設計

屈曲軌道モジュールの要求仕様は、(i)軽量である、(ii)関節間の距離を容易に変更可能である、(iii)連結作業が容易である、の 3 点である。

(i)について、直線軌道部の大半を断面二次モーメントが大きく断面積の小さいパイプ構造とする。(ii)について、屈曲軌道モジュールは 1 つの関節と直線軌道部からなるため、関節間の距離を容易に変更するために関節部とその他の部分を分離可能とし、直線軌道部分の長さを変更可

能とする。(iii)についてはモジュール間の連結部と関節部-パイプ構造部の連結部を同一の構造とすることで、連結作業を規格化し、同一の作業で連結可能とする。

以上で述べた基本設計をもとに、図 3.1-1 に示す屈曲軌道モジュールを開発した。モジュールを直線軌道部であるパイプユニットと関節ユニットに分割可能とし、パイプユニットの長さを変更することで関節間の距離を変更可能としている。モジュールの両端にはモジュール同士を連結するための連結部が備わっており、関節ユニットとパイプユニット間の連結も共通の形状の部分によって行われる。

④ 参考軌道側面板補間機構の設計

観察ロボットは屈曲軌道モジュールの側面に取り付けた板にオーバーハングして移動する。関節角度を変化させると図 3.1-9 のように側面板間の距離が大きく変化し、観察ロボットに大きな姿勢変化が生じたり、通過不可といった問題が生じたりする。そのため、側面板間の隙間を埋める図 3.1-10 のような機構を開発した。隙間を埋めるために板ばねのような変形できる素材を使う方法が考えられるが、関節角度の変更・維持のための力が必要となる。そのため、リンク機構を構成することで連続的な関節角の変化に対応する。そこで 2 つの蝶番と樹脂ワッシャによるスライダ機構で構成される機構を開発した。この機構は関節軸とあわせて四節リンク機構を構成する。

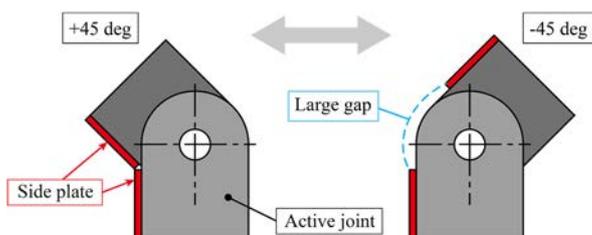


図 3.1-9：関節角度の変化による 2 枚の側面板の隙間の変化

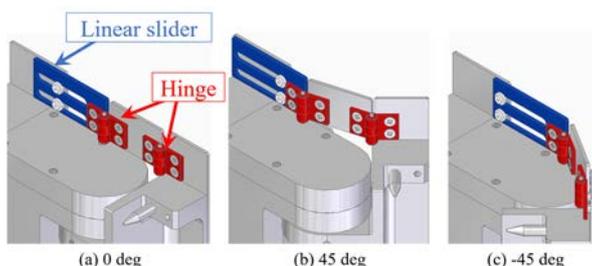


図 3.1-10：各関節角度での側面板補間機構の 3D CAD 図

⑤ 連結部の設計

連結部に要求されることは、作業員により容易に連結できることと大モーメントによる荷重に耐えうる強度、関節のアクチュエータへの配線が通る空間を確保する必要がある。連結作業は一般的に位置合わせと締結に分けられる。位置合わせは、ガイドピンを用いて行う。今回は位置決めに必要な最低限の 2 本のガイドピンを設ける。締結については、通常の場合と同様、ボルトによって行う。

以上を踏まえ、モジュール連結部の設計・開発を行った。図 3.1-11 に示すように、2 本のガイドピンによって位置を合わせたのち 2 本のボルトを締結することにより連結作業が完了する。ガイドピンを軌道の上下面に近づけ、内部を空洞化することでガイドピン間の距離を長くして大モーメントに耐えられるようにし、同時に配線用の空間を確保している。

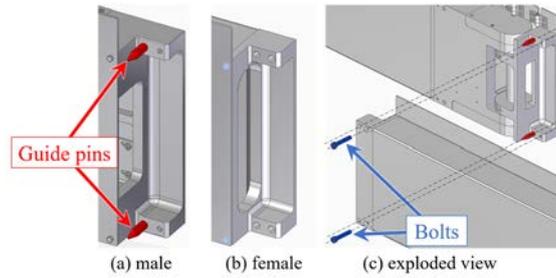


図 3.1-11：軌道モジュールの連結部分の 3D CAD 図

(4) モジュール分割型軌道の実現性評価実験

① 屈曲軌道モジュールの連結作業性検証実験

実際に製作した屈曲軌道モジュールの連結作業を作業者の被ばく量が十分小さい範囲に収められる程度の短時間で行うことができるか検証を行った。許容線量から逆算して目標時間を 5 分とした。事故現場での作業を想定し、ヘルメット・保護メガネ・マスクを装備した大学院生 1 名（20 代男性）が連結作業を行い、所要時間を計測した。作業を 3 回行ったところ、表 3.1-1 に示す結果となった。連結作業に要した時間は平均 1 分 40 秒であり、目標の 5 分より十分短い。連結作業の様子を図 3.1-12 に示す。これにより、今回設計した連結部によって十分短い時間で連結作業が行えることが分かった。

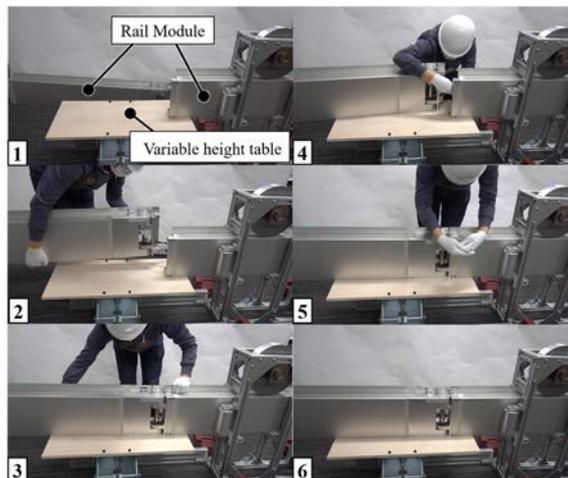


図 3.1-12：実際の現場での作業を模した軌道モジュールの連結作業実験の様子

表 3.1-1 軌道モジュールの連結作業の所要時間

	First	Second	Third
Time	1 min 28 s	1 min 28 s	2 min 5 s

② 観察ロボットの移動円滑性評価実験

関節ユニットの側面板補間機構によって、観察ロボットの円滑な移動が実現されることを確認するために、移動中の観察ロボットの姿勢角の変動がカメラの視野角に対して十分小さい範囲（今回は 0.1 rad 以内を目標と設定）に収まっているか検証した。屈曲軌道モジュール 2 つを連結して固定し、関節上を観察ロボットに通行させる。X 軸、Y 軸、Z 軸回りの姿勢角をそれぞれロール角、ピッチ角、ヨー角とする。関節角度は機械的な限界を±45 度としていることから 0 度、45 度、-45 度とした状態で前進・後進を 3 回ずつ行った。実験中は観察ロボットにマーカを取り付け、

モーションキャプチャにより観察ロボットの位置と姿勢を計測した。結果として関節角度が45度のときを除き、すべて通行に成功した。関節角度が45度のときは、前進1回目と2回目は途中でひっかかりつつも通過に成功し、3回目は途中でひっかかり、通過に失敗した。また、後進は3回ともひっかかり通過に失敗した。

移動時の観察ロボットのロール角・ピッチ角の変化を図3.1-13に、それぞれの角度・進行方向における前進の様子を図3.1-14に示す。関節角度が0、-45度の時にはロール角、ピッチ角ともに変動が0.1 rad以内に収まっており、側面板補間機構は、以上の関節角度においては観察ロボットの円滑な移動を実現することが分かった。関節角度が45度のときに観察ロボットが引っかかったのは、図3.1-15のように軌道の側面と駆動輪との接触面積が小さく、十分な駆動力を得られていないことが原因と考えられる。

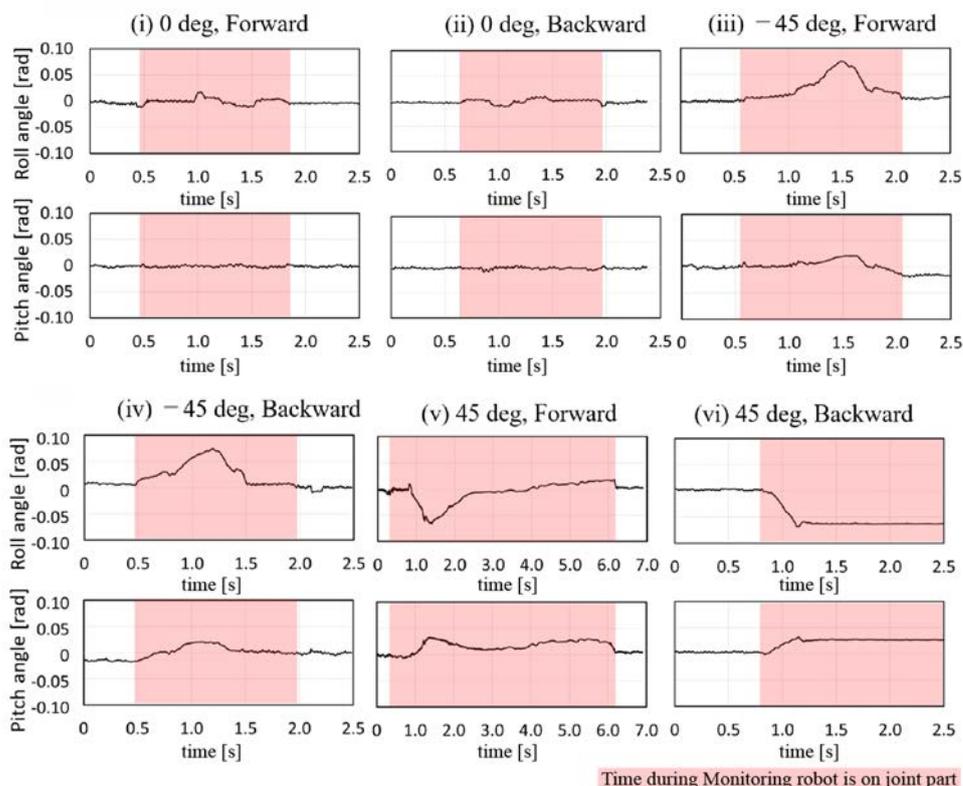


図 3.1-13 : 軌道上を通過中の観察ロボットの姿勢角度

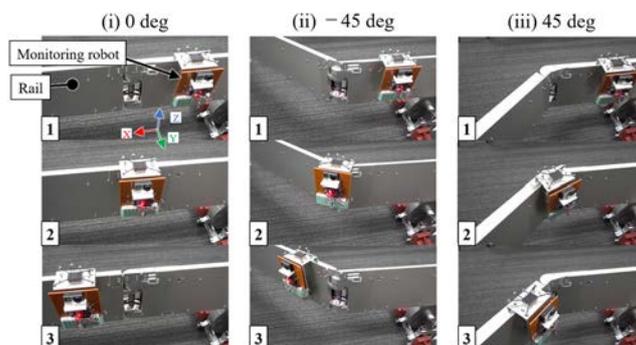


図 3.1-14 : 観察ロボットの軌道通行実験の様子

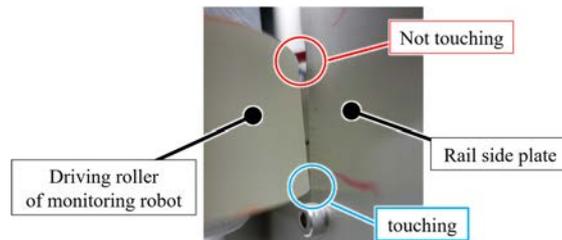


図 3.1-15：観察ロボットの駆動ローラと軌道の側面板の接触状態

(5) まとめ

福島第一原発2号機のデブリ取り出し作業を踏まえた事故炉格納容器内の常時観察を行うためのシステムの設計解を示した。システムの要求機能から、軌道上を観察ロボットが通行するアプローチを採用した PCV 内部観察用軌道構造体を製作した。軌道は能動的な関節をもち、関節毎にモジュール分割される。モジュール化によって作業者の被ばく量を抑制できる。モジュール間の連結は、ピンによる位置決めとボルトの締結によって、短時間で作業できることが分かった。

また、関節部に側面板を補間する機構を設けることにより、側面板間の距離が離れたときにも観察ロボットが円滑に通行できることが分かった。今後は、観察ロボットが関節上を通過できないケースの解決と能動関節の制御を行うことが必要となる。

参考文献

- [1] 東日本震災関連委員会，原子力ロボット記録と提言，Technical report，日本ロボット学会，2014.
- [2] 浅間一，福島第一原子力発電所の廃炉におけるロボット技術の活用と今後の課題，日本ロボット学会誌，vol. 36，no. 6，2018，pp. 380-383.
- [3] Shiroma, N., Sato, N., Chiu, Y., and Matsuno, F., Study on Effective Camera Images for Mobile Robot Teleoperation, 13th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication, 2004, pp. 107-112.
- [4] 安達弘典，岡田聡，松崎謙司，福島第一原子力発電所の格納容器内部調査向けに開発したロボット，日本ロボット学会誌，vol. 36，no. 6，2018，pp. 395-398.
- [5] Endo, G., Horigome, A., and Takata, A., Super Dragon: A 10-m-Long-Coupled Tendon-Driven Articulated Manipulator, IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 4, no. 2, 2019, pp. 934-941.

3.1.2 コンパクトに巻き取り可能な高剛性軽量アーム（再委託先：福島大学）

令和2年度は、LMPA を用いたコンパクトに巻き取り可能な高剛性軽量アーム（図 3.1-16）のたわみ解析、巻き取り装置の開発、関節の状態認識のためのセンサレス温度センシングを実施した。

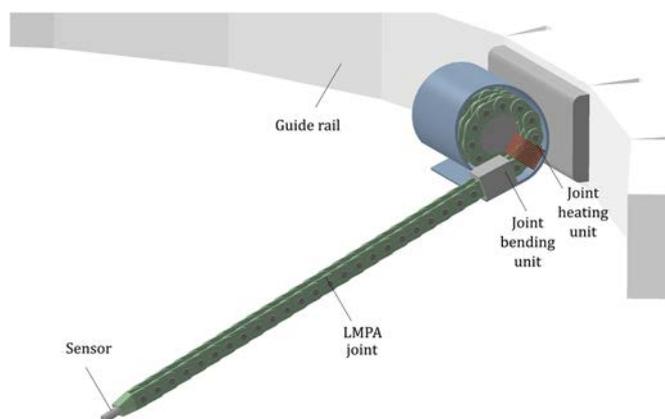


図 3.1-16 : LMPA アームのイメージ

(1) LMPA アームのたわみ解析

本研究で提案する LMPA 関節ユニットは、プレート、ピン、発熱材、LMPA（低融点はんだ）で構成されており、これを直列に連ねることによって LMPA アームが構成される。2 枚の発熱材に挟まれた LMPA を後述する誘導加熱（IH）装置を用いて融解させることで、LMPA の状態を変化させて関節が自由に回転可能なフリー状態にすることができる。加熱を止めると LMPA は凝固し、関節が固定されるロック状態となる。

① アームのたわみの導出

モニタリングアームは周囲壁面から伸びてペDESTAL内全域をカバーする必要があるため、最短でも約 4 m のアーム長が必要である。この長さまでアームを伸ばした際に、アーム自重とアーム手先設置物の重量によってアームがたわむことが考えられる。アーム手先に発生するたわみは、カメラを目標位置に正確に到達できなくなる可能性があるため、十分小さいことが望ましい。そこで、アームを片持ち梁と仮定し（図 3.1-17）、手先でどの程度たわみが発生するか解析する。

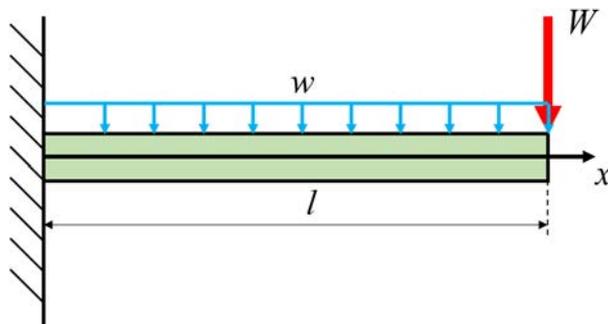


図 3.1-17 : LMPA アームの片持ち梁モデル

各パラメータは、カメラ等の手先に加わる荷重 W を 9.81 N、アームの等分布荷重 w を 11.20 N/m、アーム長 l を 4 m、ヤング率 E を 24.3 GPa とする[1]。断面二次モーメント I は、アームに用いているチェーンプレートの幅 h と厚み b の長方形として計算し、 $5.33 \times 10^{-9} \text{ m}^4$ とする。その結果、アーム手先のたわみ y は約 4.38 m となることが確認された。これは、アーム全長 4 m に対してたわみが非常に大きいため、アームの設計を変更してたわみを小さくする必要がある。アームのたわみを小さくするためには、アームの自重 w を小さくする、アームのヤング率 E を大きくする、アームの断面二次モーメント I を大きくするなどの方法がある。アームの自重 w およびアームのヤング率 E の変更は、アームに用いている材料の特性に大きく依存するため、今回はアームの断面二次モーメントの変更、つまりアームの断面形状の変更によってアームのたわみを小さくすることを考える。

② 段付きアーム構造

アームの等分布荷重 w は、根元から先端に近づくほど小さくなっていくため、アームの等分布荷重によって発生するトルクは先端に近づくほど小さくなっていく。そこで、根元が太く、先端が細い段付き形状にすることでたわみを減らすことができるのではないかと考えた。アームを太さの変わる 2 段の片持ち梁と仮定し（図 3.1-18）、解析を行う。ここで、 W はカメラ等の手先に加わる荷重、 w_1 を段付き部分から先端までの等分布荷重、 w_2 を根元から段付き部分までの等分布荷重、 l_1 をアーム全長、 l_2 を根元から段付き部までの長さとする。断面二次モーメント I は、アームに用いているチェーンプレートの幅 h と厚み b の長方形として計算する。

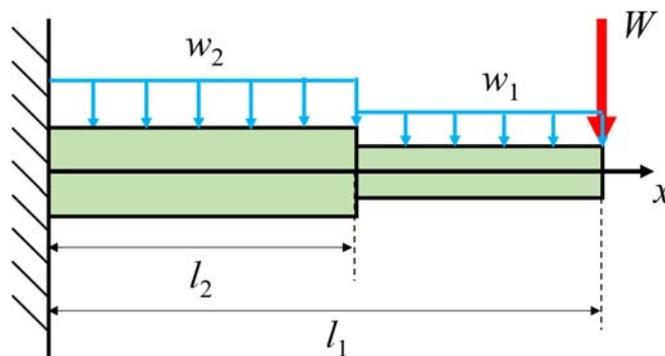


図 3.1-18 : LMPA アームの片持ち梁モデル (2 段)

解析では、根元側の断面積を $b = 16 \text{ mm}$ 、 $h = 40 \text{ mm}$ とし、先端側の断面積を $b = 8 \text{ mm}$ 、 $h = 20 \text{ mm}$ とする。 w_1 および w_2 は材料密度と実測した部品の重さを用いて設定している。

解析の結果を図 3.1-19 に示す。横軸が根元から段付き部までの長さ l_2 、縦軸がアーム先端におけるたわみ量を表している。グラフより根元側の太い部分を長くしていくとたわみの量が減少していくが、長くしすぎるとたわみの量が増加していくことがわかる。今回の解析では、 $l_2 = 2.9 \text{ m}$ の際にたわみが最も小さくなり（図 3.1-19 青線）、その大きさは 0.48 m となった。以上から、アーム形状を段付き構造にすることで、アームのたわみを大きく低減できることが確認された。ただし、この解析はまだ極めて簡単なモデルで行ったものであり、今後、さらに最適な形状を検討する予定である。

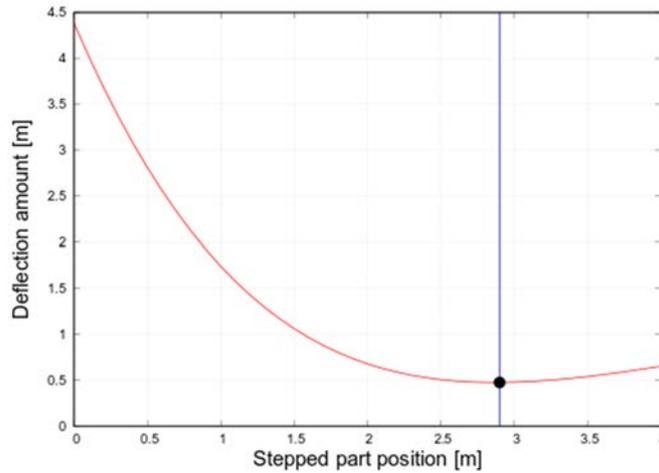


図 3.1-19：たわみ解析の結果

(2) LMPA アーム巻き取り装置

モニタリングアームをペDESTAL内部に入れる際に、搬入口としてX-6 ペネトレーションを想定している。X-6 ペネトレーションの直径は約 550 mm であり[2]、モニタリングアームはこの寸法以下の状態で通過しなければならない。そこで、アームをらせん状に巻き取ることができる巻き取り装置（図 3.1-20）を提案する。

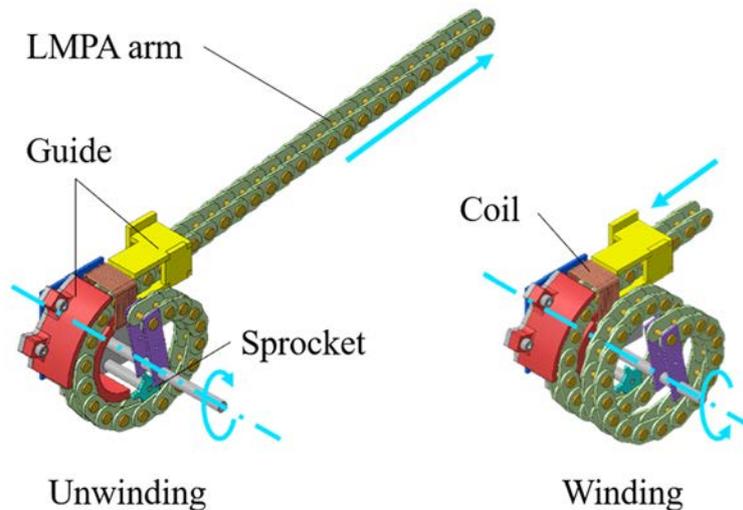


図 3.1-20：提案する巻き取り装置のイメージ

提案する巻き取り装置は、誘導加熱装置、アームの関節角度を変えるためのガイド、アームの巻き取りと繰り出しを行うためのスプロケット、アームの根元を固定する固定具で構成されている。巻き取り装置の先端に誘導加熱用のコイルが設置されており、コイルの前後に直線状のガイドと円弧状のガイドが取り付けられている。アームの繰り出しを行う場合には、スプロケットを回転させ、チェーン状のアームを繰り出す。コイルに関節が入ると、LMPA が融解され関節がフリー状態になる。その状態で1関節分繰り出すと、フリー状態の関節は直線状のガイドによって円弧状から直線状へ伸ばされ、そこで関節が冷えてロック状態へ遷移する。この動作を繰り返すことで、アームは巻き取られた状態から直線状の状態へ遷移しつつ繰り出すことができる（図 3.1-20 左）。巻き取りの際には、繰り出しの逆順で動作することで、らせん状にアームが巻き取られる（図 3.1-20 右）。

この方法でアームの巻き取りと繰り出しが可能か確認するために、図 3.1-21 に示すような簡易的な装置を製作し、動作確認を行った。実験では、スプロケットの代わりに手でアームを動かして確認を行った。誘導加熱装置の印加電圧は 30 V で行った。図に示すように、提案する方法でアームの巻き取りと繰り出し動作が可能であることを確認した。

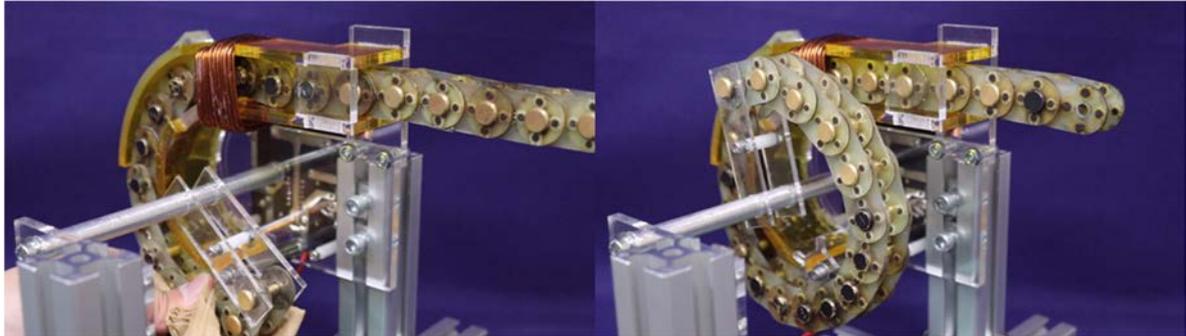


図 3.1-21：簡易的に試作した巻き取り装置を用いたアーム巻き取り実験の様子

(3) センサレス温度センシングを用いた LMPA 関節の温度測定

巻き取り装置を用いてアームの巻き取りと繰り出しを行うためにはアームの関節がフリー状態かロック状態か認識する必要がある。この方法として、令和元年度に、誘導加熱装置に用いている LC 共振回路の共振周波数を利用したセンサレス温度測定方法を提案した。また、実験からモニタリングアームの発熱材をコイル内に設置し、温度と共振周波数の間に相関があることを確認した。実際には、発熱材以外のアームを構成する部品も含めてコイル内に設置するため、令和 2 年度はアームを構成した状態でセンサレス温度測定が可能か確認した。

図 3.1-22 に実験の様子を示す。実験では図 3.1-23 に示す試験片をコイル内に設置し、赤外線サーモグラフィカメラ（日本アビオニクス株式会社、InfReC R550pro）用いて加熱部の温度を計測し、オシロスコープを用いてコイルの共振周波数の測定を行った。加熱部の温度はサーモカメラを用いて測定するため、図 3.1-23 に示すようにガラスエポキシ製のチェーンプレートの一部に切り欠きを入れ、発熱材の温度を計測できるようにしている。実験の際のコイルの印加電圧は 20、25、30 V とし、各印加電圧で 5 回ずつ計測を行った。

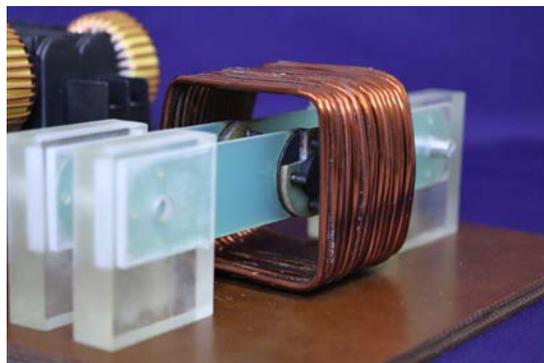


図 3.1-22：実験の様子

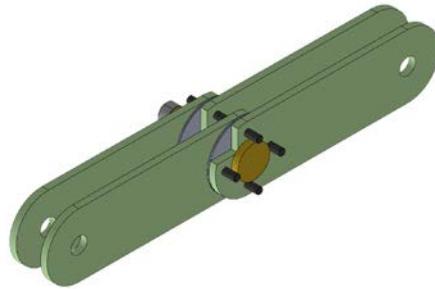


図 3.1-23：実験で使用する試験片（CAD 図）

図 3.1-24 に印加電圧 30 V における、計測した温度と共振周波数の関係を示す。グラフで示されるように、温度と共振周波数の間に線形的に相関があることが確認された。印加電圧 20、25 V のときも同様の結果であった。本研究でモニタリングアームには、LMPA として低融点はんた（融点約 140 °C）を用いている。よって、この実験結果から、本研究の使用用途では、共振周波数を用いてはんたの状態（関節の状態）を推定することが可能であると考えられる。

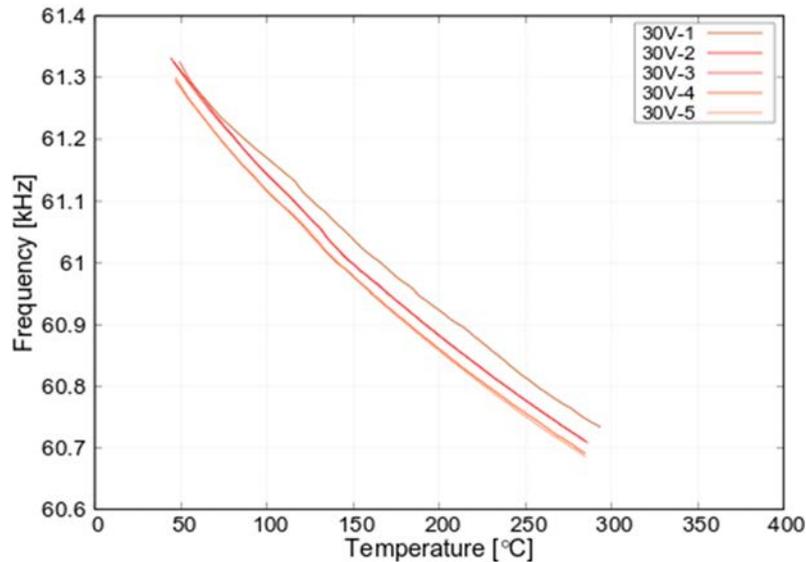


図 3.1-24：計測した温度と共振周波数の関係

参考文献

- [1] 株式会社廣杉計器, ガラスエポキシの材料性質,
<https://hirosugi.co.jp/technical/material/GG.html> (参照: 2020 年 9 月 11 日) .
- [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 2 号機原子炉格納容器内部調査実施結果,
https://www.tepco.co.jp/decommission/common/images/progress/retrieval/unit2_meeting_20190228.pdf (参照: 2021 年 2 月 18 日) .

3.2 遠隔操作インタフェースの開発

3.2.1 映像提示インタフェース

(1) 令和2年度の実施事項

本研究で想定しているモニタリングプラットフォームの映像提示インタフェースの概念図を図3.2-1に示す。作業状況や環境の3次元モデル情報に応じて、複数台のカメラを適切な位置に配置し、カメラで撮影した現在の映像および3次元モデル情報を活用することで、遠隔操作に有効な映像をオペレータへと提示する。

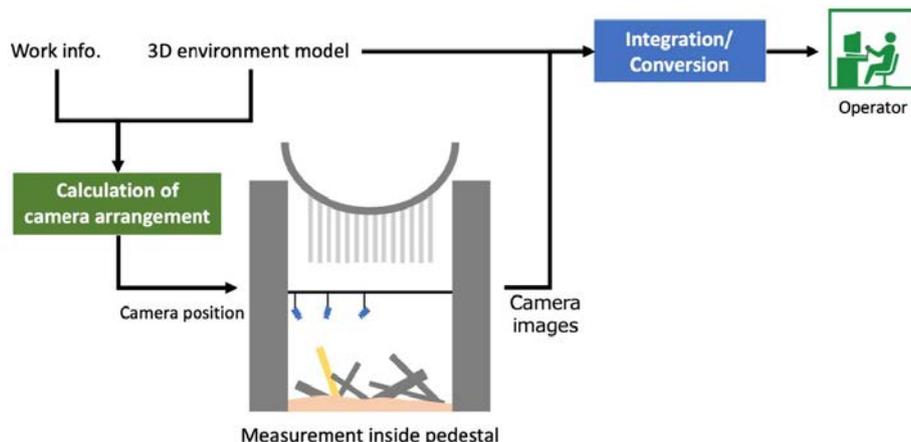


図 3.2-1：映像提示インタフェースの概念図

令和2年度は、令和元年度に検討したカメラの仕様や台数に基づいて、カメラ配置設計手法の検討を行った。具体的には、環境の3次元モデルを与えられた時に、ある1つの対象物を指定したときのカメラ配置設計が2次元上で可能になった。実環境においても検証を行っており、カメラと三脚を用いた簡易なカメラシステムを構築し、円周上にカメラを動かして撮影した映像から環境の3次元モデルを復元することでカメラ配置を設計した。さらにレンダリングソフトウェアと画像処理を用いて、ペDESTAL内で撮影したかのような不明瞭で放射線ノイズの含んだ映像シミュレーションが可能となった。次より詳細に説明を行う。

(2) カメラ配置設計手法

本研究においては、ペDESTALの側面に沿うようにモニタリングプラットフォームが展開される想定である。ここではペDESTALは円柱であると近似し、本研究ではカメラ配置設計を2次元上で考える。したがって、カメラの配置設計とは、複数台のカメラを円周上のどこに配置するかという問題に落とし込むことができる。

今回は環境の3次元モデルが与えられて、その環境中で1つの可視化対象を選んだ時に、可視化対象の視認性のよい複数台カメラの配置設計を行う。視認性を客観的に定量評価することが難しいため、本カメラ配置設計手法において遠隔操作に望ましい3つの指標を定義した。それは、

- ・可視化対象が映像の中央に映るほど視認性が高い
- ・可視化対象が他の障害物に遮蔽されないほど視認性が高い
- ・2台のカメラが角度をつけて可視化対象を映すほど視認性が高い

である。最初の2つは直感的に視認性が高いと理解できることが想定されるため、最後の1つだけ説明を加える。前述の通り、円滑な遠隔操作のためにはモニタを介して深度情報をオペレータに伝えることが非常に重要である。複数台のカメラ映像をオペレータに見せることで、両目で見

たのと同様にオペレータはステレオ視を活用して環境の深度情報を得ることができる。その際に、2台のカメラが同じ場所から可視化対象を撮影したのではステレオ視の効果が薄い。したがって、2台のカメラが角度をつけて可視化対象を映すことが重要である。これが3つ目の指標の意味である。

これらの3つの指標を定式化することで最終的な評価関数を定義し、評価関数が最大となるカメラ配置が本カメラ配置設計手法の結果となる。本手法において、評価関数の最適化は全探索で行っている。仮想的な環境で、2台のカメラで最適なカメラ配置を求めた結果が図3.2-2である。2台のカメラをそれぞれ0度から360度まで1度刻みで動かし、最適なカメラ配置を探索した。図3.2-2(a)では、x軸およびy軸は1台目および2台目のカメラの位置をそれぞれ表している。カメラは円周上のみ動くのでカメラの位置は0度から360度の角度で示しており、カメラは常に円の中央方向を向いているとした。また、z軸は評価関数の値を示している。図3.2-2(b)では、俯瞰図を示しており、外側の青い円周上のみカメラが動くことができる。最終的に求めたカメラの位置は赤点でカメラの視野を緑の点線で示している。ここでは、可視化対象および障害物は小さい円で近似しており、ラベル1が可視化対象で、それ以外は障害物である。

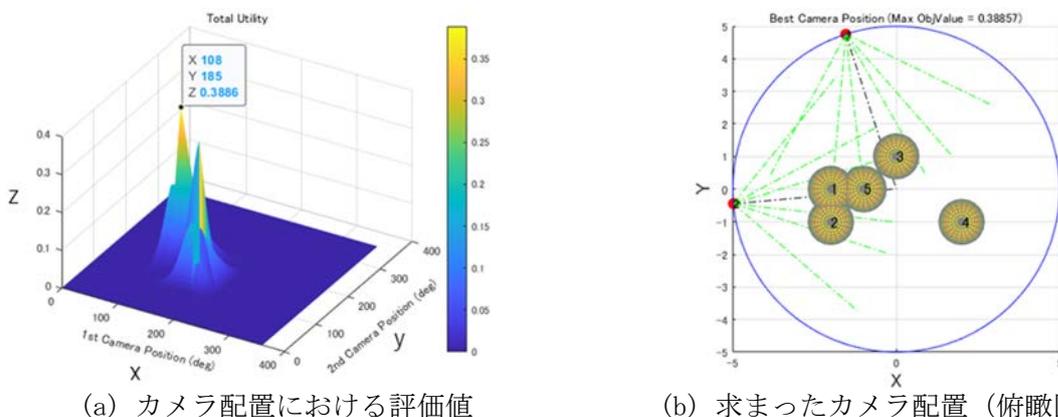


図 3.2-2：仮想的な環境におけるカメラ配置設計結果

(3) 簡易なカメラシステム構築および実環境におけるカメラ配置設計

カメラ配置設計を実環境で評価するために、簡易なカメラシステムを構築した。構築したカメラシステムを図3.2-3に示した。ペDESTAL内部を模擬するため直径5mの円周上にカメラを配置した。図3.2-3(a)の床面にある黄色いメジャーが直径5mの線である。図3.2-3(b)に使用した3つの障害物と1つの可視化対象の拡大図を示した。カメラはGoPro HERO9 BLACKを使用し、三脚を用いて配置した。

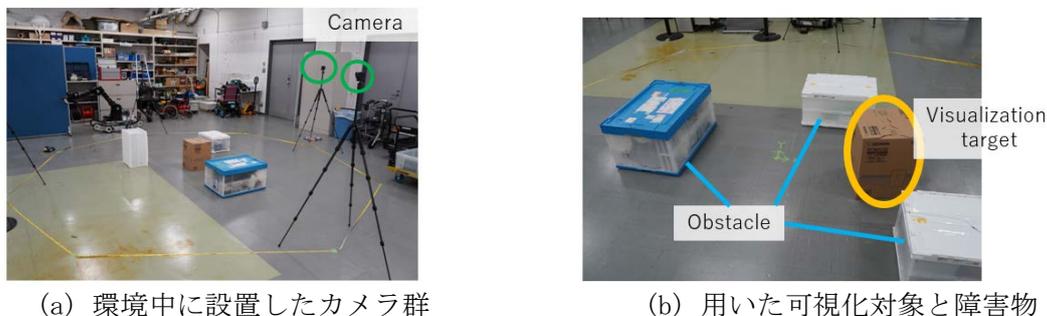


図 3.2-3：ペDESTAL内を模擬したカメラシステム

提案したカメラの配置設計手法を用いるためには、環境の3次元モデル情報が必要である。しかし、あらかじめ環境の3次元モデルを用意することは困難である。したがって、複数視点で撮影した映像から Structure from Motion（以下、「SfM」と略す。）を用いて、環境の3次元モデルを作成することを考える。福島第一原発のペDESTAL内では1台のカメラをモニタリングプラットフォーム上で動かしながら撮影することを想定して、台車にカメラを乗せて円周上に動かして撮影した（図3.2-4）。撮られた映像をSfMのソフトウェアで処理することで、図3.2-5に示す環境の3次元モデルを得た。今回は、SfMのソフトウェアとしてRealityCapture [1]を用いたが、連携先の原子力機構でSfMの研究開発が進められているため、将来的には原子力機構の研究成果を用いることを考えている。

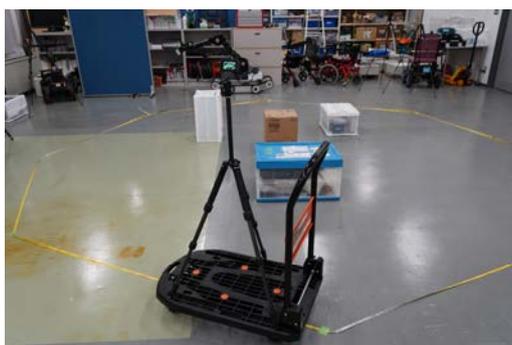
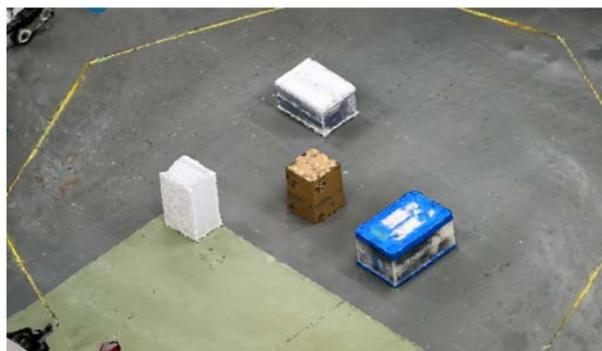


図3.2-4：台車を用いてプラットフォーム上におけるカメラの動きを模擬した様子



(a) 俯瞰図



(b) 斜視図

図3.2-5：求めた環境の3次元モデル

求めた環境の3次元モデルを用いて、図3.2-3(b)で示した可視化対象とした2台のカメラ配置設計を行った結果を図3.2-6に示す。図3.2-6(a)で求めたカメラ配置を、図3.2-6(b)および図3.2-6(c)において求めたカメラ配置からの映像をそれぞれ示している。図3.2-6(b)および図3.2-6(c)からわかるように、障害物によって遮蔽されることなく、2台のカメラが別々の方向から可視化対象のダンボール箱が映っていることが分かる。よって、実環境においても提案するカメラ配置設計手法の有効性を示すことができた。今回は、2次元上における静的な環境において適用可能なカメラ配置設計手法を提案した。今後、カメラは2次元上だけでなくプラットフォームから下に吊り下げることや、燃料デブリ取り出しアームの作業に応じた最適視点の設計が必要になる可能性がある。したがって、今回提案したカメラ配置設計手法においても改善の余地があると考えているため、廃止措置の状況に応じて柔軟に対応していきたい。



図 3.2-6：実環境におけるカメラ配置設計結果

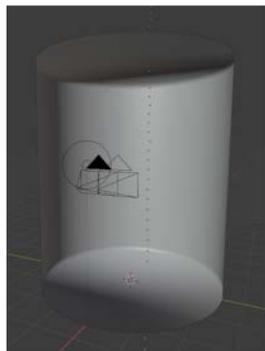
(4) レンダリングを用いた実際のペDESTAL内のシミュレーション

前述したように簡易なカメラシステムを構築したことで、研究室内で簡単な実験を行えるようになった。しかし、実際のペDESTAL内においては鮮明な映像が撮れないことが想定される。例えば、以下の点が不鮮明な映像の原因となる。

- ・ 外部照明がない真っ暗な環境で、カメラに取り付けた照明による反射・白飛び等
- ・ 画像処理に必要なテクスチャの少ない壁面
- ・ ガンマ線による放射線ノイズ
- ・ 天井から滴る冷却水
- ・ 水の中に沈む燃料デブリを水の外から見た際の水面の反射
- ・ 燃料デブリの熱による水蒸気の発生

したがって、このような不鮮明の映像をシミュレーション上で生成可能とすることで、実際にペDESTAL内の映像を用いて遠隔操作が可能であるか、または、画像処理技術を用いて遠隔操作の補助が可能か等の検証を行うことができる。本研究では、レンダリングソフトウェアであるBlender [2]で生成した映像に画像処理を用いて放射線ノイズを付与することで、実際のペDESTAL内で撮ったかのような映像生成を試みた。

生成された映像を図 3.2-7 に示す。図 3.2-7(a)では、Blender でモデル化したペDESTALを示した。ペDESTALは円柱として近似し、カメラ上部に 1 つの点光源を設定した。また、天井の一部の箇所から透明度の高い球を継続的に落とすことで、天井から滴る冷却水を模擬した。図 3.2-7(b)では実際にレンダリングした映像に、仮想的に放射線ノイズを加えたものを示した。映像中央の垂直方向に見える点線は、天井から滴る冷却水である。また、映像全体に散らばる白い点は放射線ノイズである。放射線ノイズについては、令和 2 年度の成果である[3]を利用した。[3]では、ガンマ線によって撮像素子に溜まる電荷量を Geant4 [4]を用いてシミュレーションした後、ヒストグラムの類似度を用いて電荷量を画像の輝度値へと変換することで、できるだけ正確な放射線ノイズを模擬した。



(a) Blender 上に構築したペDESTAL (b) レンダリング映像に放射線ノイズを付与した
図 3.2-7 : ペDESTAL を模擬したレンダリング

レンダリングを用いた実際のペDESTAL内のシミュレーションが可能になったことで、ペDESTAL内における画像処理技術の適用性の検証が可能となった。例えば、多視点映像からの環境の3次元モデル生成は、現時点では、通常的环境中で撮影した鮮明な映像に対してのみ生成可能であることが検証されているが、実際のペDESTAL内における放射線ノイズ等を含んだ不鮮明な映像に対しても同様に環境モデルの3次元モデル生成が可能であるかどうか検証が必要な可能性がある。また、オペレータへ提示する映像を実際の現場で撮影したかのように不鮮明にすることで、遠隔操作の練習への活用も期待される。しかし、現段階ではレンダリングに時間がかかるため、リアルタイム性には課題が残る。

令和2年度において

- ・水の中に沈む燃料デブリを水の外から見た際の水面の反射
- ・燃料デブリに熱による水蒸気の発生

については、Blenderを用いたモデル化は行っていない。なぜなら、水面の反射に対しては偏光カメラの使用を、水蒸気の発生に対しては赤外線カメラの使用を考えているが、Blenderではそれらの原理となる光の偏光、可視光外の赤外線のシミュレーションに対応していないからである。現時点では、上記の2つが廃止措置において非常に重要であるかどうかは分かっていないが、並行して検討を進めていきたいと思っている。具体的には、水槽や加湿器等を用いて実際に模擬した環境を作成することで、偏光カメラおよび赤外線カメラの有効性検証を進めている。

参考文献

- [1] CapturingReality, RealityCapture, <https://www.capturingreality.com> (参照：2021年3月2日)。
- [2] Blender.org, Blender, <https://www.blender.org/download/> (参照：2021年3月2日)。
- [3] Komatsu, R., Woo, H., Tamura, Y., Yamashita, A., Asama, H., Gamma-Ray Image Noise Generation Using Energy-Image Converter Based on Image Histogram, 2021 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, 2021, pp. 93-99.
- [4] Agostinelli, S., et al., Geant4 - a Simulation Toolkit, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, vol. 506, no. 3, 2003, pp. 250-303.

3.2.2 高臨場感遠隔操縦システム（再委託先：神戸大学）

プラットフォームや高剛性軽量アームを格納容器内に敷設する作業や格納容器内での高剛性軽量アームを用いた各種作業を想定した遠隔操縦方法を検討した。令和元年度に神戸大学で開発した実験用ロボットプラットフォームを活用し、連携ラボ内での映像提示インタフェース検討の結果を取り入れて、遠隔操縦方法の検証が可能な遠隔操縦実験プラットフォームの基本形の開発を行った。

具体的には、高剛性軽量アームについては、超多自由度のチェーン構造となる高剛性軽量アームを作業空間内に展開する際の空間掃引領域を視覚化し、アームのコンフィグレーションの計画に関する知見を得た。また令和元年度に引き続き複数画面を有する遠隔操縦システムの直感的なインタフェースの構成法を提案し、予備的実験を行った。同時に遠隔操縦実験プラットフォームの基本形となる複数画面を有する遠隔操縦用コックピットを開発した。

(1) 遠隔操縦実験プラットフォームの基本形の開発

① 複数画面を有する遠隔操縦コックピットの開発

操縦者に複数の視点からの映像を提示するため、複数画面を有する遠隔操縦コックピットを開発した。コンセプトとしては図 3.2-8 に示すようなものであり、5 つの画面を十字型に配置することを想定し、操縦者がディスプレイを見る際の首の振りを 30 度以内となるように 27 インチのディスプレイとした。また、基本性能として解像度が WQHD、リフレッシュレートが 100 Hz 以上のディスプレイを選定した結果、Pixio 27 インチディスプレイ「PX277P」を採用した。



図 3.2-8：複数画面を有する遠隔操縦システムの基本コンセプト

開発したコックピットの概観を図 3.2-9 に示す。操縦者が椅子に座った際の目線の高さを 120 cm、ディスプレイからの距離を 120 cm と仮定し、中央部のディスプレイの中央部が操縦者の目線正面となるように配置した。上下左右のディスプレイについてはシームレスに、操縦者の方向に向くように角度をつけて配置した。

ディスプレイを支えるフレームについては株式会社ミスミ製アルミフレームで製作し、マスターアームを設置するテーブル部は SUS 製 ZF ベースフレームを用いた。テーブル部は様々なマスターアームを設置できるよう前後、左右、上下に可動できるようにした。

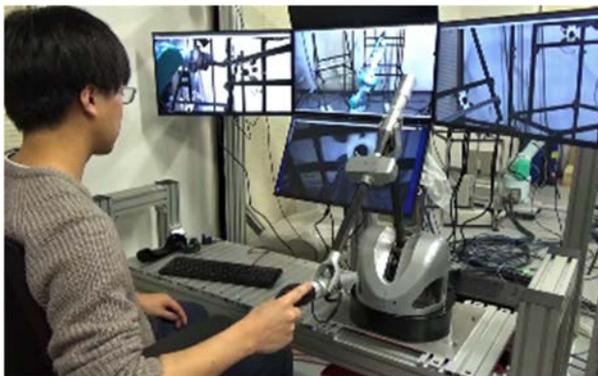


図 3.2-9：開発した複数画面を有する遠隔操縦コックピット

② 遠隔操縦用高解像度カメラの検討

操縦者に精細な映像を提示するためには高解像度なカメラが必要であるが、カメラの解像度を高くするほど通信データ量の限界からフレームレートが下がり、操作性が低下する。そこでまずマシンビジョン市場で実績がある CameraLink、GigE、USB の 3 つの通信規格のデモ機を用いて、遠隔操縦用に適した解像度・フレームレート・遅延時間・伝送距離などの仕様を現在取得可能な機種から決定した。その結果、①解像度が 2K (2048×1536 px) 程度の映像をフレームレート 100 fps 以上で取得可能であること、②先の条件①を満たす映像を 100 ms 程度の遅延時間で提示可能であること、③伝送距離が 10 m 以上を有すること、④ROS に統合するため Linux 環境で開発可能であることの 4 点を主な条件として設定した。

これらの条件を満たす最適な機種として、俯瞰カメラにオムロンセンテック株式会社製 STC-MCS322U3V (2048×1536 px, 121 fps) を 3 台 (図 3.2-10)、ロボット手先カメラにオムロンセンテック株式会社製 STC-MCS241U3V (1920×1200 px, 163 fps) を 1 台採用した (図 3.2-11)。ともに通信規格は USB3.0 であり、手先カメラには解像度よりもフレームレートを優先した機種を選定した。俯瞰カメラのレンズにはカメラ配置を検討するために焦点距離が可変であるバリフォーカルレンズを、手先カメラは小型化するため、カメラから 10 cm 先で水平方向幅が 15 cm 程度取得可能な画角となる固定焦点レンズを採用した。



図 3.2-10：俯瞰用カメラ
[オムロンセンテック株式会社製 STC-MCS322U3V (2048×1536 px@121 fps)]



図 3.2-11：ロボット手先カメラ
[オムロンセンテック株式会社製 STC-MCS241U3V (1920×1200 px@163 fps)]

また、上記の USB3.0 規格のカメラに加えて、GigE の次世代規格である 5GigE、および 10GigE 規格のカメラを検証用として 1 台ずつ導入した (図 3.2-12、図 3.2-13)。画像データ転送速度の理論値は USB3.0 が 400 Mbytes/s、5GigE が 550 Mbytes/s、10GigE が 1100 Mbytes/s である。10GigE カメラ 1 台の検証では、2K(2048×1536 px)@215 fps の映像を約 100 ms の遅延時間で映像提示が可能であることを確認し、USB3.0 カメラよりも高解像度で低遅延な映像取得が期待できる結果を得た。5GigE カメラは USB3.0 カメラと同程度の性能であった。GigE カメラは USB3.0 カメラに比べて伝送距離でも有利であることから、5GigE、10GigE 規格は遠隔操縦用カメラとして今後有力な候補になりうると考えられる。ただし、5GigE、10GigE はともに導入が始まったばかりで、現状はまだ機種が少なく、要求に適した選定を行うことが困難である。特に 10GigE カメラは本体寸法も USB3.0 カメラなどに比べると非常に大きく、PoE 対応の機種もないため、設置やケーブルの取り回しなどについて検討する必要がある。



図 3.2-12：5GigE カメラ
[Teledyne DALSA 社製 C2450 (2464×2056 px@121 fps)]



図 3.2-13 : 10GigE カメラ
[Baumer 社製 VLXT-31C. I (2048×1536 px@215 fps)]

なお、以上のカメラ機種選定においては、研究用プラットフォームという目的から、耐放射線性能に関しては一切考慮していない。今後開発したプラットフォームにおいて、解像度を変更するなどして、作業に応じた必要解像度等の要求スペックを明らかにし、実際の現場に投入するカメラの選定の際の指針を提供できるようにしたいと考えている。

(2) 格納容器内での作業を想定した遠隔操縦方法の検討

① 複数画面を有する遠隔操縦システムの直感的なインターフェースの構成法

本研究プロジェクトでは、格納容器内に設置したモニタリングプラットフォームに設置した複数台のカメラからの映像を見ながらロボットアームを遠隔操縦する状況が想定されるので、ここでは複数画面を有する遠隔操縦システムの直感的なインターフェースの構成法についての研究成果[3][4]を述べる。

廃炉作業における遠隔操縦に限らず広く一般に遠隔操縦においては、以下に挙げる 2 つの問題点がある。1 つ目は、制御モードの選択であり、図 3.2-14 に示す速度制御モードと図 3.2-15 に示す位置制御モードの 2 つから作業に合わせて適した方を設定する必要がある。2 つ目は、図 3.2-16 に示す参照座標の整合性と姿勢の整合性の確保の問題である。こちらは複数画面を有する遠隔操縦システムにおいて、オペレータが参照している画面を切り替えた際に顕著になる問題である。参照座標の整合性はマスタアームの手先の動作方向と、オペレータが参照する画面に映るフォロワームの手先の動作方向が一致している状態であり、姿勢の整合性はマスタアームとフォロワームの手先姿勢が一致している状態である。

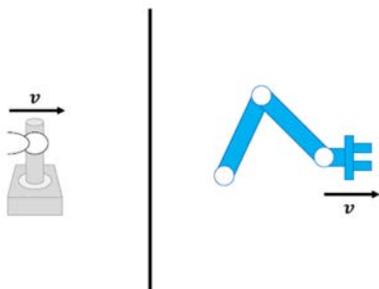


図 3.2-14 : 速度制御モード

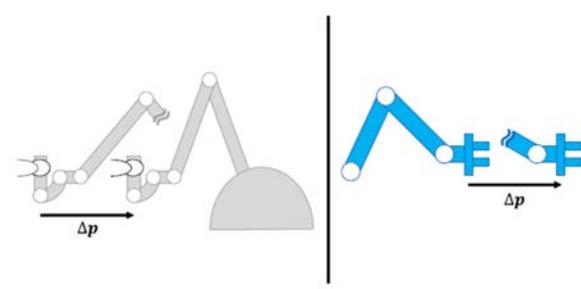


図 3.2-15 : 位置制御モード

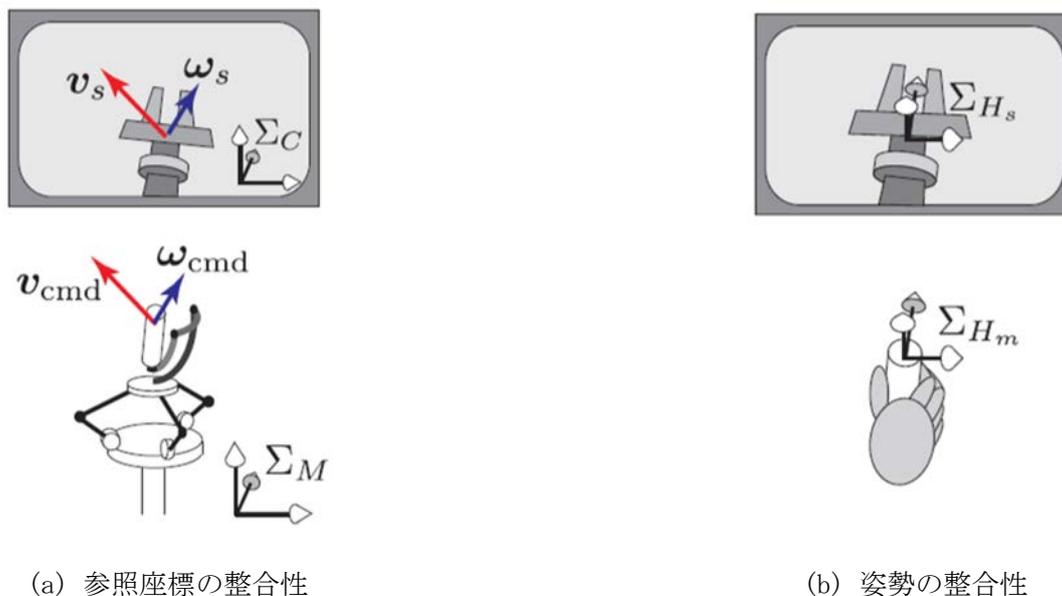


図 3.2-16 : 2 つの整合性

これらの問題を解決するために、複数画面からオペレータが選択した主画面と整合する遠隔操縦法を提案した。主画面とはオペレータが作業をする際に最も注目する画面であり、ヘッドトラッカーとフットスイッチを用いてオペレータが選択する。ヘッドトラッカーによってオペレータの頭の向きを計測し、その向きにある画面を強調する。画面の強調中にフットスイッチを押すことで、オペレータが主体的にその画面を主画面として選択することができる。この手法の利点として、提示する画面の配置や数に依存しない点が挙げられる。選択された主画面のカメラ座標系をマスタの参照座標とすることで、主画面において参照座標の整合性を確保する。また、以前に提案したマスタアームの姿勢拘束手法[1][2]を選択した主画面のカメラ座標系に対し利用することで、姿勢の整合性を確保する。

また、選択された主画面に応じて制御モードを設定する。この時、並進成分と回転成分をそれぞれ別々に設定する。各画面が映す作業環境の状態から、オペレータが取り組もうとしている作業が想定できるため、姿勢の整合性を崩さないように各制御モードを設定できる。例えば、フォロワーム全体や対象タスクを含む作業環境全体を俯瞰的に捉えるカメラ視点からの映像を主画面とした場合、オペレータは対象物体までの粗い位置決めのようなフォロワームの手先を大きく動かすような作業を行おうとしていると想定される。よって、並進成分は速度制御モード、回転成分は位置制御モードとする。一方で、エンドエフェクタを大きく映すようなカメラ視点からの映像を主画面とした場合、オペレータはエンドエフェクタによる対象物体への接触を伴うような繊細な作業などが想定される。よって、並進成分は位置制御モード、回転成分は姿勢の整合性を保つため速度制御モードとする。このように、各カメラ配置に応じて並進・回転成分を別々に適したモードに設定する。なお上記モードの振り分けはあくまで一例であり、選択した主画面に応じて並進成分と回転成分それぞれ独立に適当な制御モードを振り分けることが重要となる。

以上の提案手法の有効性を検証するため、マスタアームに Haption 製力覚フィードバックデバイス「Virtuose 6d35-45」、フォロワームに三菱重工業株式会社（以下、「三菱重工」と略す。）製汎用ロボットアーム「PA10」を用いて実験を行った。タスクはフォロワーム内の異なる位置・姿勢にある 2 つのロータリスイッチを回すタスクとした。ロータリスイッチの回転はフォロワームの終端の第 7 軸目のロール軸を用いることが効率的なので、令和元年度に対象としたボタン

押下のタスクよりもさらに姿勢整合性の確保が重要となるタスクである。

オペレータへの画面提示は4画面とし、それぞれ俯瞰画面、手先画面、左右側面画面とした。手法は従来手法、俯瞰画面において姿勢の整合性のみが確保された旧提案手法、選択された主画面に対し2つの整合性が確保され適切な制御モードとなる提案手法の3手法を比較した。被験者は1人である。

各手法の平均タスク達成時間と標準偏差を表3.2-1に、試行毎のタスク達成時間を図3.2-17に示す。従来手法と旧提案手法についてはばらつきがあり、標準偏差も大きくなっていることが分かる。これはスイッチを回す際に参照座標の整合性が確保されておらず、正しくエンドエフェクタをロール回転のみさせることができず、姿勢の調節を行いながらスイッチを回すなどしていたためだと考えられる。一方、提案手法では手先画面を主画面として2つの整合性が確保された状態でスイッチを回せるので安定して回しやすく、かつ速度制御モードの回転指令であるため手元のマスタを大きく回す必要がなく、手先位置も固定しやすかったためだと考えられる。現状ではまだ被験者が1人のみであるため、まだ提案手法の有効性であるとははっきりとは言えないが、姿勢が大きく関わる作業では提案手法が有効に働く可能性があることが示唆される。

表 3.2-1 タスクの平均達成時間と標準偏差

Method	Conv.	Prev.	Prop.
Averaged task completion time [s]	202.718	180.844	165.550
Standard deviation [s]	29.311	26.870	15.124

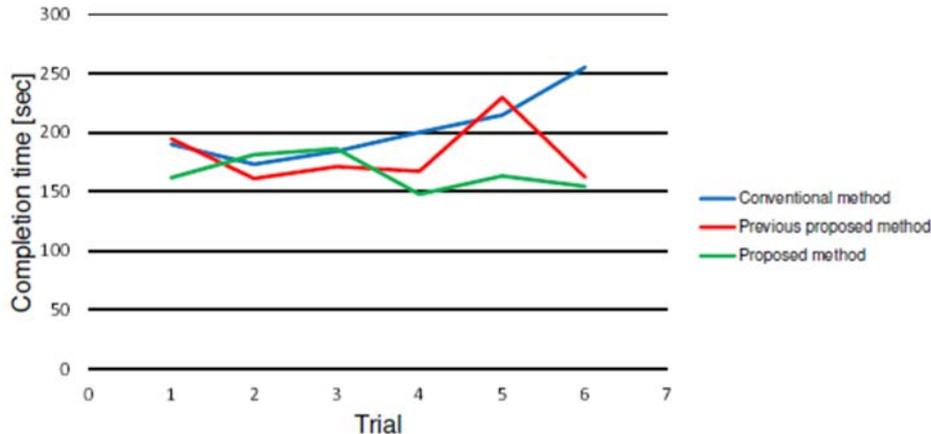


図 3.2-17：試行毎のタスク達成時間

② 高剛性軽量アームのコンフィグレーション計画

本研究で開発が予定されている高剛性アームは LMPA を満たした多数の関節を有するチェーン構造となっており、根元部で LMPA を加熱して望みの角度にしたのちに冷却させて関節部をロックさせ、チェーンブロックを1つずつ繰り出すことで障害物を迂回して手先カメラを指定の位置に設置するなど、望みの形状（コンフィグレーション）にすることができる。しかし、一旦根元で設定した関節角度は、ブロックを繰り出した後は変更できないため、このアームならではの動作計画を考える必要がある。令和元年度は、まず最終的に望ましいアームのコンフィグレーションを設定し、そこから順次ブロックを巻き戻す際にアームが掃引する空間の和集合を求め、その掃

引空間が環境内の障害物と干渉しなければ、最初に設定したアームのコンフィグレーションは実現可能であると判定できるという、コンフィグレーション計画の基本コンセプトを見出した。令和2年度は、この基本コンセプトを実際にプログラム化して掃引空間を可視化できるようにした。

図 3.2-18 に、MATLAB で作成した簡易的なプログラムによる高剛性軽量アームの掃引空間の可視化によるコンフィグレーション計画の例を示す。今回はコンセプト検証の段階のため、高剛性軽量アームは全長 10 m で長さ 1 m のセグメントが 10 個結合しているものとし、XY 平面空間内の座標 (0, 10) [m] に下向きに設置されているものとする。各関節の角度は、すべてのセグメントを展開したとき、アームが垂直下方に直線となる場合を 0 とし、反時計回りの回転を正となるように定義する。なおここで設定したアーム長やアームの設置位置の座標および以下に示す障害物の寸法は、想定している格納容器内部の寸法および状況とは全く関連がなく、以下のシミュレーションもあくまで基本的なコンセプトの妥当性チェックが目的であることに注意されたい。

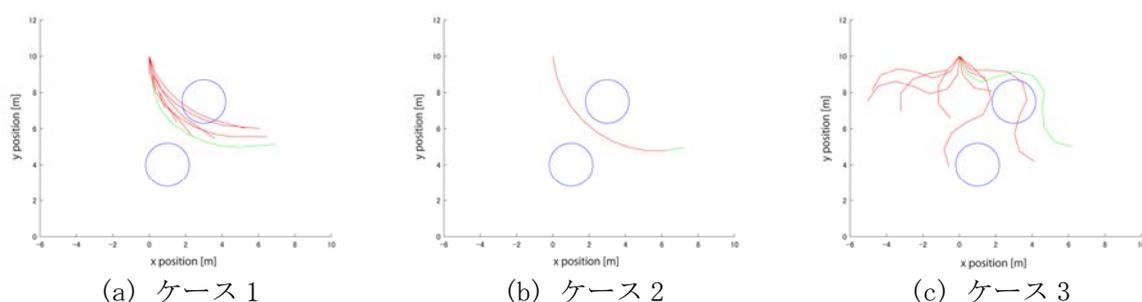


図 3.2-18：軽量高剛性アームのコンフィグレーション計画

まず図 3.2-18(a)は、根元からの関節角度を順に (5, 5, 10, 20, 15, 10, 10, 10, 0) [deg]としたときの最終的なアームのコンフィグレーションを緑色のスケルトンで表示しており、障害物に見立てた座標 (3, 7.5) [m] 半径 1.2 m の円 1 と座標 (1, 4) [m] 半径 1.2 m の円 2 を回避できている。しかし、各セグメントをひとつずつ巻き戻した際のコンフィグレーションを赤いスケルトンで示すと、巻き戻す途中で円 1 と干渉していることが分かり、このコンフィグレーションは実現不可であることが分かる。

次に図 3.2-18(b)は、アームのコンフィグレーションが (10, 10, 10, 10, 10, 10, 10, 10, 10, 10) [deg] と関節角度をすべて均等に配分した例であり、図に示すように巻き戻した際の掃引空間は最小限となる。一方、図 3.2-18(c)はアームのコンフィグレーションが (20, 40, 50, -5, -30, -40, -40, 10, 30, 40) [deg] の場合であり、最終コンフィグレーションでは障害物の円 1 を上方から迂回しようとしたものであるが、巻き戻して掃引される空間は非常に大きく、円 1 だけでなく円 2 までも干渉してしまっている。

このように、高剛性軽量アームのコンフィグレーション計画においては、最終コンフィグレーションにおいて障害物と干渉しないようにするだけでなく、繰り出し途中のコンフィグレーションにおいても障害物と干渉しないようなものを計画しなければならない、一度設定した関節角度は変更できないこともあり、コンフィグレーション計画には注意を要する。

今回簡易的に作成したプログラムのように、掃引空間を可視化できれば、障害物を回避できるようなコンフィグレーションをインタラクティブに計画することは可能であろう。また実際にアームを展開した際には、実際の関節角度は計画した角度からずれる可能性があるため、そのような誤差の影響を後段の関節角度の修正で補正する、ある種のフィードバック補償を行う必要がある。

と思われる。これらについては今後の検討課題としたい。また、本手法は多自由度のセグメント結合体のコンフィギュレーションの計画という意味では、本研究プロジェクトで別途開発中のモニタリングプラットフォームの展開時にもここで得られた知見を活用できる可能性がある。

参考文献

- [1] 永柄孝之, 横小路泰義, ロボットの遠隔操縦におけるインデキシング操作中のマスタアームの手先姿勢拘束の有効性, 第 34 回日本ロボット学会学術講演会, 2D1-04, 2016.
- [2] 辻廣樹, 片山雷太, 永野光, 田崎勇一, 横小路泰義, マスタ・スレーブ方式の遠隔操縦における接続の繰り返しに伴う手先姿勢誤差の修正法の提案と評価, 第 37 回日本ロボット学会学術講演会, 2A1-01, 2019.

3.3 放射線モニタリングデバイスの開発

燃料取り出し時の放射線モニタリングにおいては、核種弁別が可能な精度の高いスペクトロスコピー能力が実現可能な良好なエネルギー分解能、高線量場で計数が可能な高速応答性能、 ^{137}Cs 、 ^{60}Co などの核種に加えて、核燃料の指標となりうる ^{154}Eu などの高エネルギーガンマ線を高感度に検出可能なガンマ線スペクトロスコピーシステムが求められる。本研究では、研究開発を実施するモニタリングプラットフォーム（図 3.3-1）において搭載可能な小型の放射線モニタリングデバイスの開発と検証を目的とする。ここでは化合物半導体に比較して高速応答が可能なシンチレーター検出器システムの開発と高線量率下での動作検証を実施し、Sv/h で動作可能なことを確認した。

加えてモニタリングシステムにおいては、中性子モニタリングも重要な技術となる。特に廃炉の環境下においては高ガンマ線バックグラウンド下において中性子を計測する必要があるため、令和 2 年度は高速応答が可能なシンチレーター方式と、中性子やガンマ線の付与するエネルギーパターンが識別可能な微細シリコンピクセルセンサ方式の試作検討および性能検証試験を実施した。これによりパターン識別が可能であり高い位置分解能が実現できることが確認された。また、モニタリングプラットフォームとの統合のための位置情報とセンサ情報の統合のための技術検討を実施した。ここでは光を用いた位置追跡と放射線モニタリングデバイスにおける検出時間を統合することで、もとの位置を再現することが可能であることが確認された。以下、項目別に詳細を記載する。

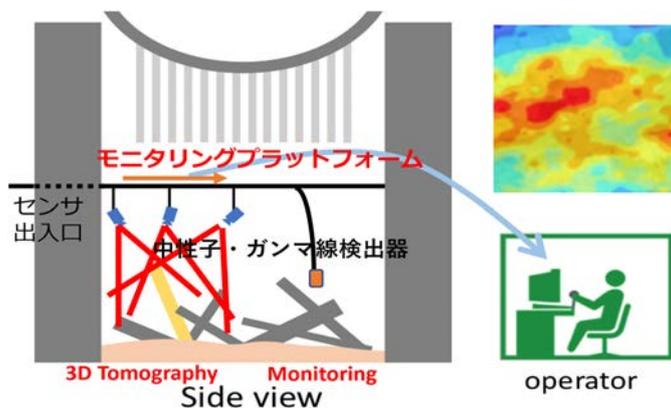


図 3.3-1：モニタリングプラットフォームにおける放射線モニタリング概念図

3.3.1 ガンマ線高速応答検出器の試作開発と高線量場試験と考察

燃料取り出し時の放射線モニタリングにおいて必要とされる精度の高いスペクトロスコピーが実現可能な、良好なエネルギー分解能を有しており、かつ高線量場で利用可能な高い計数率特性、指標となりうる高エネルギーガンマ線（例えば ^{154}Eu の 1274 keV）に対して高い感度を有するようなシンチレーターの選定を行った。本研究全体で開発を行うモニタリングプラットフォームとの融合により、比較的小型のセンサを可動させることでモニタリング可能なセンサを開発する。令和 2 年度は、令和元年度に概念設計および選定を行った CeBr_3 シンチレーターにおいて後段の信号処理回路と組み合わせた特性試験を実施した。 CeBr_3 は減衰時定数 20 ナノ秒程度の高速応答を示し、かつ 3~4 %台の良好なエネルギー分解能を示すことが知られている。加えて LaBr_3 で見られるような自己放射能を有しておらず、バックグラウンドに埋もれることなく精度の高い計測が可能であると考えられる。また信号処理においては、長い時定数を有する電荷積分回路ではなく、

直接高速のアナログデジタルコンバーターによりデジタル変換、波形を取得しエネルギー情報を抽出することで高線量率下でも動作可能なシステムが実現可能である。また CeBr_3 の密度はおよそ 5.2 g/cc であり、 CdTe 、 CZT 、 Ge などとほぼ同等の検出効率を有している。本研究では、 5 mm 角や 10 mm 角の小型の角型シンチレーター素子を試作し、高速デジタル変換することで特性評価を実施した[1][2] (図 3.3-2)。

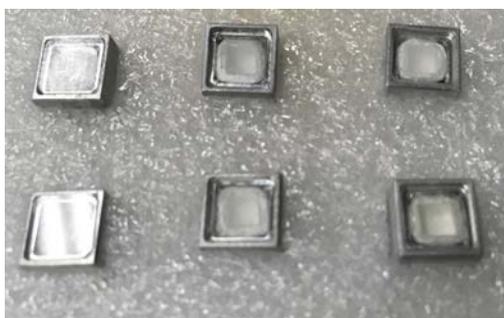


図 3.3-2 : 小型パッケージ CeBr_3 ガンマ線検出器

まず、開発した結晶の温度依存性を検証するために $10 \text{ }^\circ\text{C}$ から $40 \text{ }^\circ\text{C}$ までの温度において特性の変化およびピーク位置の変化を観測した。温度を下げるるとともに発光量の増加が観測され、分解能のわずかな向上が観測された。 $15 \text{ }^\circ\text{C}$ と $40 \text{ }^\circ\text{C}$ での増幅度の差は 11.3% であった。

図 3.3-3 に高線量率下 (1.4 Sv/h) での試作開発した 5 mm 角の CeBr_3 ガンマ線スペクトロメーターの応答性能を示す。 CeBr_3 は潮解性を有しており劣化を防ぐために湿度 1% 以下の環境で、 Al ケースおよび光の取り出し面は石英ガラスでハウジングする構成とした。放射線モニタリングデバイスのセンサ部分の大きさは光電子増倍管も含めて $10 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$ 程度である。デジタル波形のサンプリングは 1 Gsps 、 14 bits の高精度 ADC で行い、波形を積分することでエネルギー値を算出している。パイルアップがほとんど起こらない 26 mSv/h での応答と比較して、若干パイルアップ、ランダムコインシデンスなどの影響により高エネルギー側にテールを持っているが、大きな分解能の劣化なく 662 keV のピークを観測することに成功した。観測されたエネルギー分解能は 26 mSv/h のときに 4.4% 、 1.4 Sv/h のときに 5.6% 程度であり、高いスペクトル弁別性能を維持できることが確認された。また同様に ^{60}Co についても高線量率下でのエネルギースペクトルの取得が可能であり、対象とする ^{154}Eu のような高エネルギーガンマ線核種についての高線量率下での弁別可能性が示された。今後さらなる特性改善のためには 3 mm 角程度の、より小さいピクセル検出器を複数配置し、より高い線量率下への適用も検討していく。

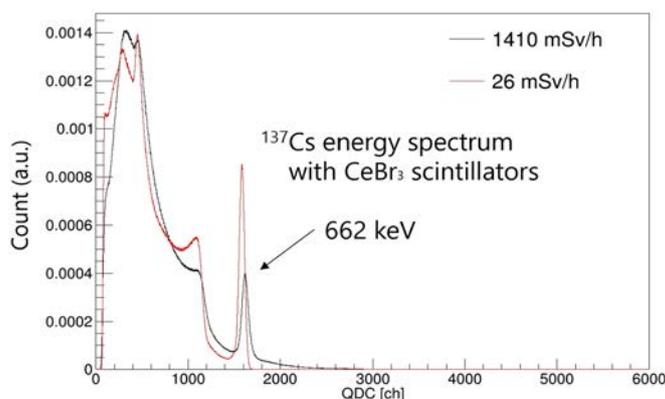


図 3.3-3 : 高線量率下での ^{137}Cs のエネルギースペクトル応答

3.3.2 高速応答中性子検出器の試作開発と線種識別検出器の試作検証

燃料デブリ取り出し時の放射線モニタリングにおいては、中性子のモニタリングも重要な技術となる。ガンマ線検出器については前節でのべた高速の CeBr₃ を用いることでパイルアップすることなく高線量率まで動作可能であることが示されてきた。中性子検出においては、ガンマ線の高線量率下で動作するために、同様にバックグラウンド除去のための高速応答のシンチレーター検出器を用いることが考えられる。以下表 3.3-1 に主な候補を示しているが、現在主に使われている Eu:LiCAF は発光量が多いものの、減衰時定数が非常に長いため今回の用途には向かないと考えられる。高速応答としての候補は Ce:LiCAF および Li-glass が考えられるが、今回は最も減衰時定数が短い Ce:LiCAF について検討を行った。Ce:LiCAF は発光量が Eu:LiCAF に比較して少なく、高精度な読み出し手法が必要とされる。加えて発光波長が短いため、300 nm 以下の波長においても感度をもつ光検出器の選定およびコンタクト面の設計が求められる。

表 3.3-1 中性子シンチレーター

	Eu:LiCAF	Ce:LiCAF	Li-glass
Light Yield	~40000 ph/n	~5000 ph/n	~6000 ph/n
Decay	1600	40	75
Wavelength	360-390	280-320	395

加えて、ガンマ線バックグラウンドの低減を想定して、薄型 (0.5 mm, 0.25 mm) のシンチレーターの試作と応答評価を行った。図 3.3-4 に ²⁵²Cf 線源からの中性子イベントを検出したスペクトルを示す。どちらの厚さの場合もピークを確認することができ、正常な動作が確認できた。今回の結果においては 0.25 mm のほうが良好な弁別性能を呈しているように見られるが、今後中性子ガンマ線弁別性能および中性子感度を含めた最適化の検討を実施していく予定である。

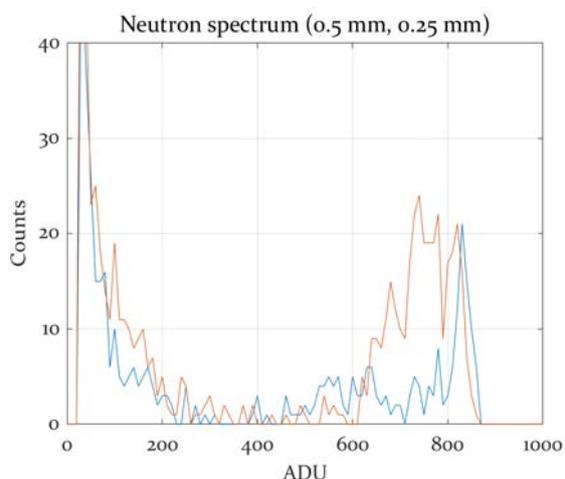


図 3.3-4 : 0.5 mm および 0.25 mm 厚の Ce:LiCAF シンチレーターの応答

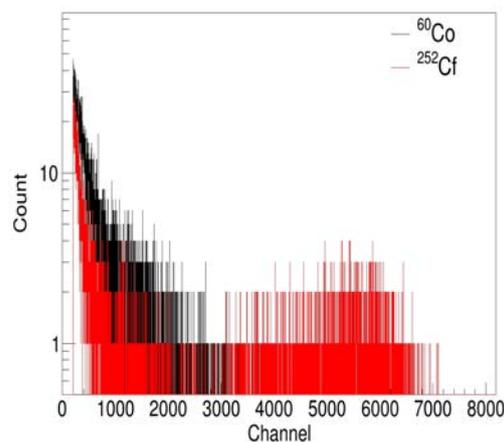


図 3.3-5 : ガンマ線応答

加えて、ガンマ線への応答を確認するために ⁶⁰Co のガンマ線照射時の応答 (図 3.3-5 中の黒) と ²⁵²Cf の中性子照射時の応答 (図 3.3-5 中の赤) を比較した。データは開発したディジタイザーを用いた波形取得を行い、波形を平均化、積分することで波高値分布を算出した。データ数が少ないが、ガンマ線によりイベントと中性子によるイベントを波高値により弁別可能であることが

確認できた。今後、計測時間を伸ばした詳細な検討を行っていく。利用しているデジタル波形取得システムは CeBr_3 と同等のものであり、ガンマ線のモニタリングと中性子のモニタリングの両方が同時に可能なシステムを構築可能であることが確認できた。

中性子検出器については上記の高速シンチレーター方式に加えて、中性子やガンマ線が物質と相互作用して検出器に与えるエネルギー付与のパターンから弁別することを考え、微細ピクセル構造を有する半導体検出器を用いたシステムの試作開発を実施してきた。ガンマ線により生成される高速の電子の軌跡および中性子と変換材料（今回の場合 ^{10}B ）により生成される ^4He 、 ^7Li の信号を弁別することで線種の弁別が可能であるかどうかの試験を実施した。また微細ピクセル検出器についての分解能評価を実施した。今回は SOI (Silicon-On-Insulator) 技術を用いて、高抵抗シリコン半導体と集積回路を一体化したモノリシック検出器を用いて検証を行った。ピクセルサイズは $30\ \mu\text{m}$ 程度であり、シリコン検出器の表面に ^{10}B の中性子変換膜を蒸着し、中性子検出器として動作させた[3]。中性子照射は J-PARC BL10 で照射実験を行った。図 3.3-6 に開発した中性子イメージングシステムの外観の写真を示す。図中に中性子由来イベントと考えられるイベントとガンマ線由来と思われるイベントの例を示す。中性子イベントにおいてはアルファ線により比較的大きな電荷雲が観測される。一方でガンマ線イベントにおいては、シリコン半導体内でコンプトン散乱により反跳された高速電子の軌跡が観測される。得られたエネルギー付与のクラスターサイズとエネルギーの関係からマッピングすることで中性子イベントとガンマ線イベントが弁別可能であることが確認できた。エネルギー付与パターンによる線種弁別能力は特に廃炉下の高ガンマ線照射下における中性子検出に有効であると考えられ、今後対応する線量率下での実験を検討する。また開発した本センサでの空間分解能は、中性子イベントに対して計測されたエネルギー分布の重心演算を行うことでおよそ $4\ \mu\text{m}$ (FWHM) という良好な値を達成した。今後、本センサのシリコン層の厚みや放射線耐性について検討することで、廃炉作業下での適用可能性について検討を行っていく予定である。

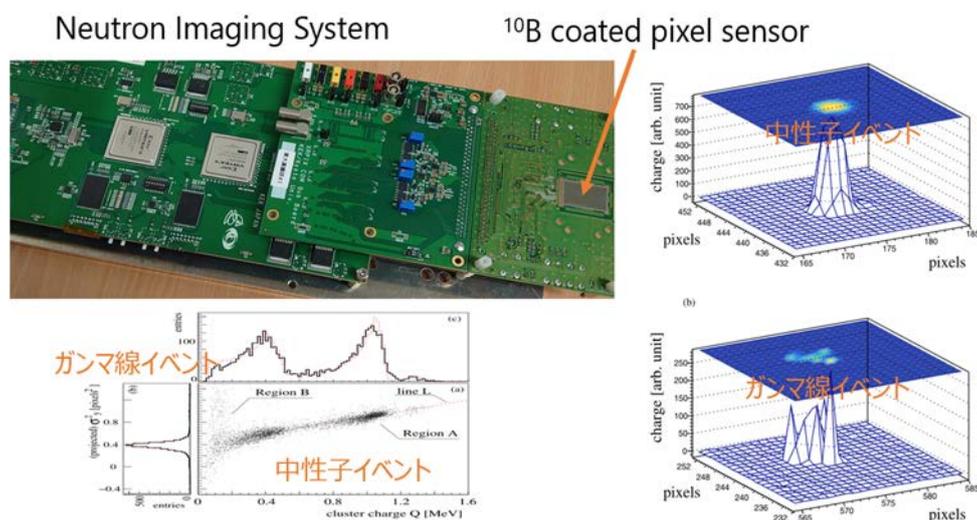


図 3.3-6：中性子イメージングシステムと中性子イベント、ガンマ線イベント弁別 ([3]より許諾を得て転載)

3.3.3 位置情報融合システムの検討

3.3.1 と 3.3.2 で述べた高速ガンマ線検出器や高速の中性子検出器、線種弁別が可能な放射線モニタリングデバイスを最終的に本研究で開発を行うモニタリングプラットフォーム上で利用するためには、モニタリングプラットフォーム上での位置と時刻の情報をセンサ側で得られる位置とエネルギー、時刻の情報と同期させることで、最終的な画像を構築することが必要となる。令和2年度はこのようなセンサの位置とモニタリングプラットフォームを同期させるための概念的な設計を行った。また初期的な同期試験として光学的な位置トラッキング装置を用いたシステムの動作検証を実施した。時間を並列に同期させるDAQ(Data Acquisition)ボードとしてFPGA(Field Programmable Gate Array)を用いた128チャンネル対応の信号処理ボードを開発した(図3.3-7)。DAQの計測時間分解能は62.5ピコ秒から1ナノ秒まで内部プログラムにより可変である。また開発した信号処理システムと放射線モニタリングセンサを用いて、線源のイメージングの検証試験を実施した。図3.3-7右下に光学的なトラッキングマーカーをプローブと台に取り付けた放射線イメージングの体系写真を示す。位置トラッキングシステムから取得した位置情報を放射線モニタリングデバイスの位置情報として用い、画像を再構成することで、配置した線源(^{18}F から放出される511 keV 図中の赤2点)を可視化することに成功した[4][5]。具体的には、放射線イメージングデバイスには、タイムスタンプ、検出エネルギー、検出エネルギー位置の情報が記録されるが、位置トラッキングシステムから得られる開始信号と放射線イメージングデバイスの内部タイムスタンプの時刻を同期させることで絶対空間における位置情報を再構築した。今後、モニタリングプラットフォームからの自己位置推定を含む位置情報と放射線モニタリングデバイスの情報を融合した取得システムの構築を行っていく。

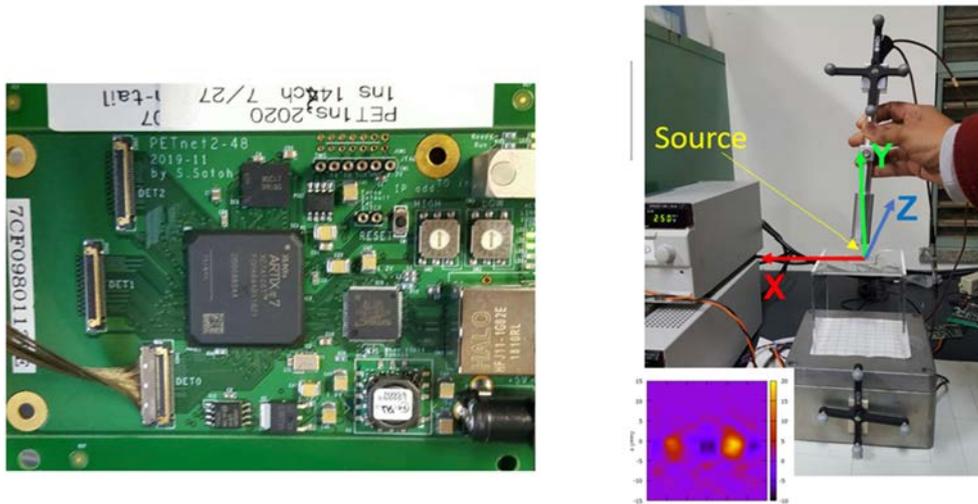


図 3.3-7 : 信号処理ボードと位置トラッキングシステムとの融合画像例

参考文献

- [1] Kaburagi, M., Shimazoe, K., Otaka, Y., Uenomachi, M., Kamada, K., Kim, K. J., Yoshino, M., Shoji, Y., Yoshikawa, A., Takahashi, H., and Torii, T., A Cubic CeBr₃ Gamma-Ray Spectrometer Suitable for the Decommissioning of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, vol. 971, 164118, 2020.
- [2] Kaburagi, M., Shimazoe, K., Kato, M., Kurosawa, T., Kamada, K., Kim, K. J., Yoshino, M., Shoji, Y., Yoshikawa, A., Takahashi, H., and Torii, T., Gamma-ray Spectroscopy with a CeBr₃ Scintillator under Intense γ -ray Fields for Nuclear Decommissioning, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, vol. 988, 164900, 2021.
- [3] Kamiya, Y., T. Miyoshi, H. Iwase, T. Inada, A. Mizushima, Y. Mita, K. Shimazoe, H. Tanaka, I. Kurachi, and Y. Arai, Development of a Neutron Imaging Sensor Using INTPIX4-SOI Pixelated Silicon Devices, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, vol. 979, 164400, 2020.
- [4] Liyanaarachchi, M. R., Shimazoe, K., Takahashi, H., Nakagawa, K., Kobayashi, E., and Sakuma, I., Development and Evaluation of a Prototype Detector for an Intraoperative Laparoscopic Coincidence Imaging System with PET Tracers, International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, vol. 16, no. 1, 2021, pp. 29-39.
- [5] Mukai, A., Tomita, H., Hara, S., Yamagishi, K., Terabayashi, R., Shimoyama, T., and Shimazoe, K., Simplified Image Reconstruction Method in 4 π Compton Imaging for Radioactive Source Identification, IEEE/SICE International Symposium on System Integration, 2021, pp. 105-109.

3.4 炉内環境把握のための環境モデル立体復元手法の研究開発（連携先：原子力機構）

令和2年度は、画像群から立体復元処理により生成された環境モデル上の欠落部分を抽出、補完のためのカメラ位置を推定する手法の研究開発を行うとともに、立体復元計算に有効な画像を自動的に選定する条件の抽出、設定についても調査およびその検証を行った。また、実験環境整備のために、プラットフォーム開発を行うグループより情報を得て基礎的な設計開発を行った。実施内容の詳細については、以下に記述する。

3.4.1 推定カメラ軌道に基づいた環境モデルの欠落箇所推定手法の開発および検証

画像群から構造物の形状を立体的に復元する技術である SfM[1]は、画像から抽出された特徴点の対応付け処理と三角測量の原理により画像間の相対的な3次元位置関係を推定して対象物の形状を立体的に復元するとともに、各画像の取得位置や軌道の推定も同時に行うことができる。立体モデルの復元精度およびカメラ位置・軌道の推定は、画像間の特徴点对応付けの結果に強く依存することから、良画質で画像間に共通する特徴点を多く含んでいる画像群を収集することが望ましい。しかしながら、原子炉格納容器内での調査は事前に想定が難しいことから、必ずしもこれらの条件を満たすかについては予め保証できるものではなく、条件を満たさなかった場合には立体復元モデルに一部欠落した部分が現れてしまうことが予想される。

ここで、このような立体復元モデルの精度を高めるためには欠落部分を補完するアプローチが考えられるが、補完するための画像を取得すべき位置を推定することができれば、モデリング効率が向上することが期待できる。ここでは令和2年度に研究開発を行った、立体復元処理によって生成されたモデル上の欠落部分を補完する画像を追加的に取得するためのカメラ位置を推定する手法について述べる。

(1) 推定カメラ軌道に基づいた環境モデルの欠落箇所推定手法の開発

本研究では軌道上を連続的に移動するカメラによって時系列で撮像された画像群に基づいて立体復元モデルを生成することを前提としているが、前述したように生成された復元モデル上に欠落部が見られる場合の原因は、画質が悪いため対応づけのための特徴点が十分に抽出されなかった、もしくはカメラの移動速度と画像取得タイミングがミスマッチだった、等が考えられる。つまり、モデルの欠落部分に相当する画像が取得されていない、もしくは画像は取得されているが十分な画質を保持していないために発生するものである。このため、これらの画像がどの位置、どの区間のものであるかを推定することができれば、後に該当する位置もしくは区間での画像再取得を実施する等して、立体復元モデルを補完することが可能になると考えられる。

そこで、ここでは軌道上を移動して取得された時系列画像群に基づいて立体復元されたモデル上にみられる欠落は、立体復元に寄与しない画像が存在する、もしくは画像が取得されていないことに起因すると考え、立体復元処理時に同時に導出されるカメラ推定位置間の移動量に着目して、画像の欠測位置や区間を推定する手法について研究開発を行った。具体的には、推定されたカメラ軌道上での画像間におけるカメラ移動量を求め、その移動量の変容を調べることで欠測箇所を推定する、というものである。ここでは、まず一定速度で直線的に移動しつつ一定のサンプリング間隔でカメラ画像を取得すると仮定して、欠測箇所の推定のための基礎的な検討を行うこととした。一定速度かつ一定のサンプリング間隔で画像を取得した場合、画像間におけるカメラ移動量は等間隔となる。そのため、平均的な単位時間当たりの移動量と比較することにより、移動量の変容規模から欠測箇所の範囲を推定することができると考えられる。

ここで、画像群に基づいた立体復元処理の結果として得られるカメラの位置・軌道は、SfM アルゴリズムの特性のために画素 (pixel) をベースとした座標系で表されることとなる。実寸値ではないものの得られたカメラ軌道より、推定された初期位置から時刻 t における移動量を $|d(t)|$ 、カメラ画像のサンプリング間隔 Δt における移動量を $\Delta d(t)$ 、初期位置から時刻 T_1 における位置までの移動量を $|D|$ とすると、以下の式(1)、式(2)、式(3)のように求めることができる。

$$|d(t)| = \sqrt{(x(t) - x_0)^2 + (y(t) - y_0)^2 + (z(t) - z_0)^2} \quad \text{式(1)}$$

$$\Delta d(t) = |d(t)| - |d(t - \Delta t)| \quad \text{式(2)}$$

$$|D| = \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 + (z_1 - z_0)^2} \quad \text{式(3)}$$

ここで、 $(x(t), y(t), z(t)), (x_0, y_0, z_0), (x_1, y_1, z_1)$ はそれぞれ、時刻 t におけるカメラ位置、カメラ初期位置、時刻 T_1 におけるカメラ位置を表している。

さらに、前述したように得られた各座標値は実寸値ではなく復元処理に用いた画像の解像度に依存する。そこで、一般的な形式で記述するために、式(2)によって得られた $\Delta d(t)$ を $|D|$ によって無次元化を試みる。サンプリング間隔 Δt 毎に導出される全ての無次元化された移動量 $\Delta d(t)/|D|$ から時刻 T_1 までの全移動区間内での平均値 $\Delta d_{\text{mean}}/|D|$ を計算し、サンプリング間隔 Δt 分の移動量と仮定する。この $\Delta d_{\text{mean}}/|D|$ と各時刻の $\Delta d(t)/|D|$ を比較し評価することで画像の欠測箇所を特定し、立体復元モデルの欠落部分を補完するために必要な画像を追加的に取得すべき区間を推定する。

(2) 推定カメラ軌道に基づいた環境モデルの欠落箇所推定手法の検証

カメラ軌道に基づいて立体復元モデルの欠落部分を補完するために必要な画像を取得すべき区間 (欠測箇所) を推定する手法の有効性を検証するための対象として、原子力機構櫛葉遠隔技術開発センター [2] の試験棟南側壁面を用いた。実験は、クローラ型ロボット (株式会社イクシス製、iTs08) を用いて直線軌道上を移動させ、撮影にはロボット進行方向に対して直交した壁側方向に向けてアクションカメラ (GoPro Inc. 製、Hero5 Black、1920 pixels×1080 pixels) を設置した。ロボットは、遠隔操作で壁面に沿って速度 0.1 m/s で移動させた。撮影に要した移動距離、移動時間はそれぞれ約 15 m、 $T_1 =$ 約 143 秒だった。得られた画像の一例を図 3.4-1 に示す。



図 3.4-1 : カメラにより取得された画像の一例

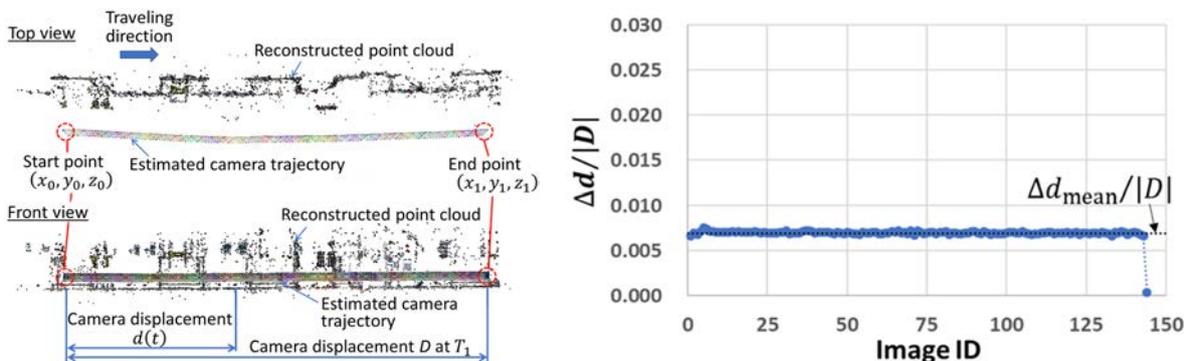
得られた画像からの立体復元処理には、Scale Invariant Feature Transform (SIFT) [3] 特徴量に基づく立体復元計算を行う VisualSfM [4][5] を用いた。そして、サンプリング間隔 $\Delta t = 1.0$ 秒で取得された画像 145 枚の画像を用いて立体復元処理を行った。表 3.4-1 は実験条件を示しており、実験条件 1 は全画像を用いた場合、実験条件 2 は実験条件 1 に対して画像の欠測箇所を模擬するためにランダムに 15 枚の画像を選択して抜き出した場合である。実際の計測時には、画像の欠測箇所は不明であるが、ここではカメラ軌道に基づいて立体復元モデルの欠落部分を補完するために必要な画像を取得すべき区間の推定が可能か検証を行うために、便宜上立体復元処理に用いた画像 145 枚に 0 から 144 の ID を割り付けた。表 3.4-1 の実験条件 2 では、サンプリング

間隔 1 回分 12 箇所、サンプリング間隔 3 回分 1 箇所の計 13 箇所の欠測箇所が生じている。

表 3.4-1 実験条件

	立体復元処理に 用いた画像枚数	欠測箇所として抜き出した画像 ID
1	145	-
2	130	8, 10, 35, 60, 72, 80, 89, 94, 105, 113, 121, 129, 132, 133, 134 (全 15 枚)

次に、立体復元結果を示す。図 3.4-2(a)は実験条件 1 において生成された立体復元モデル（疎な点群、復元点数 10,824 点）と推定カメラ軌道を上面および前面から俯瞰した結果を示している。これにより、壁面付近の構造物の復元が行われ、壁面に沿って移動したカメラの軌道も推定されていることが確認できる。また、この際、図 3.4-2(b)が示すように、無次元化されたカメラ移動量 $\Delta d(t)/|D|$ の値がほぼ一定となっており、カメラが一定速度で移動していることを示している。この時の $\Delta d(t)/|D|$ の平均値を $\Delta d_{\text{mean}}/|D|$ として、実験条件 2 において推定されたカメラ軌道からカメラ移動量の変容を調べた。



(a) 立体復元モデルとカメラ推定軌道 (b) 無次元化されたカメラ移動量

図 3.4-2：実験条件 1 の立体復元結果

次に、実験条件 2 において立体復元処理を適用した結果、実験条件 1 と同様に立体モデル（疎な点群、復元点数 9,992 点）が生成された。実験条件 1 との比較から、復元点数は画像の欠測箇所の発生により減少していることが確認できる。このことから、実験条件 2 で欠測箇所として抜き出した画像 ID を推定してその箇所の画像を取得することができれば、立体復元モデルの欠落部分を補完することが可能となると考えられる。そこで推定されたカメラ軌道について見てみる（図 3.4-3）と、 $\Delta d(t)/|D|$ の値が高くなる場合があることが確認できる。この $\Delta d(t)/|D|$ の値が大きくなった箇所に対応する画像 ID は、実験条件 2 で抜き出した画像 ID と一致しており、またその位置での $\Delta d(t)/|D|$ が大きくなっていることが確認できる。この $\Delta d(t)/|D|$ の差は、連続的に抜き出した画像枚数によって生じていると考えられる。提案した欠落箇所推定手法によってカメラ軌道に基づいて立体復元モデルの欠落部分を補完するために必要な画像を取得すべき区間を推定が可能であることが確認できた。このことから、立体復元処理時に推定されたカメラ軌道から立体復元モデルの欠落部分の補完に必要な画像を取得すべき区間を提示できることが示された。

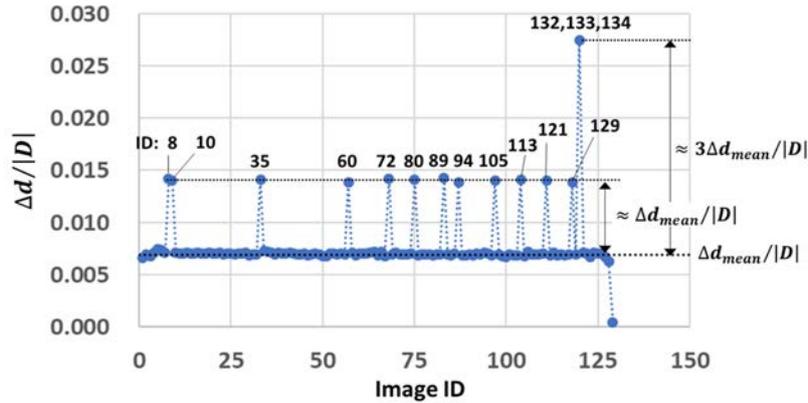


図 3.4-3：無次元化されたカメラ移動量(実験条件 2)

3.4.2 立体復元計算に有効な画像を選定する条件の調査およびその検証

画像からの立体復元計算によく用いられる SFM [1] および Multi-View Stereo (MVS) [6] は、画像間マッチング計算の基盤となる共通する画像特徴量がそれぞれの画像上にどれほど含まれているかが立体復元結果に大きな影響を与えることが研究から明らかとなっている[7]が、画像間で共通する特徴量を得ることを期待して計算に適用する画像枚数を増やすと、一般的に計算負荷が上がることになる。また、『画像が少数の場合においても、対象物の特徴を捉えた角度から対象物が撮影されている画像群であれば、精度が高い立体復元モデルが生成できる』ことも明らかになっている[8]。これらのことから、本研究で取り扱う移動するカメラにより収集された画像群に基づいて精度を維持しつつ効率的に立体復元計算を行うためには、カメラにより収集された画像群の中から立体復元計算に有効な画像の条件について明らかにし、この条件を満たす画像を選定する手法や枠組みを構築する必要がある。このため令和元年度に我々は、ロボット用統合 GUI ソフトウェア Choreonoid[9]や 3 次元コンピュータグラフィクス・ソフトウェアの 1 つである Blender[10]を用いて仮想空間を作成し、撮像条件を変化させることで、立体復元計算に有効な画像を選定する条件の調査のためのテストデータを作成できることを示した。これをうけて令和 2 年度は、立体復元計算に有効な画像を選定する条件の調査およびその検証を行うために、直線レール状の軌道上をカメラが移動して仮想画像を収集するシミュレーション環境を構築するとともに、条件を変更しながら直線的に移動するカメラによって取得した画像から立体復元処理に有効な画像選定条件の調査および検証を行った。以下に実施した内容について具体的に説明する。

(1) 画像取得シミュレータの構築

前述の立体復元処理に有効な画像の選定条件や条件に基づいた復元性能を定性的、定量的に確認するためには、多様な実験条件下で実験を行い立体復元処理の検証を実施する必要がある。そこでここでは計算機上の仮想空間上に実験環境を設置しシミュレーション実験を実施するアプローチをとることとした。

具体的には、Choreonoid を用いて、図 3.4-4 に示すような直線状のレール（以下、「直線レール」と略す。）上をカメラが移動するものとしてシミュレーション環境を構築した（図 3.4-5）。Choreonoid を引き続き採用した理由は、移動カメラ動作についての動力学計算が可能であるとともに標準で視覚センサや光源のデバイスを模擬する機能も備えており、格納容器のような暗闇環境の中で照明を照らしながら画像を取得する（図 3.4-6）といった状況を仮想的に再現、模擬できることである。

ここで、このシミュレーション環境では実環境を想定し、下方、側方、上方に錆が付着している金属画像のテクスチャを貼り付けている。また、仮想カメラの姿勢は直線レールの長手方向に対して直交する矢状面上での水平姿勢を基準とした角度 θ と設定している (図 3.4-7)。さらにここでは、仮想カメラが直線レール上を移動中はカメラ姿勢が変化せず、固定されているものとした。

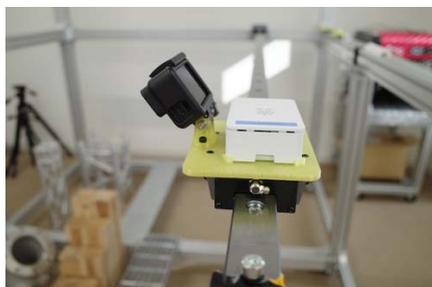


図 3.4-4 : カメラと直線レールの例



図 3.4-5 : シミュレーション環境

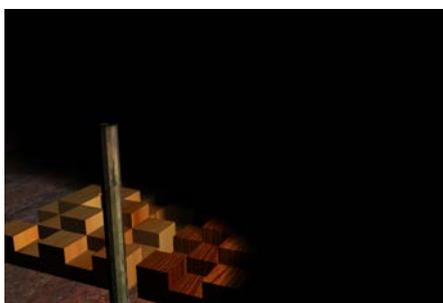


図 3.4-6 : スポットライトデバイスの適用例

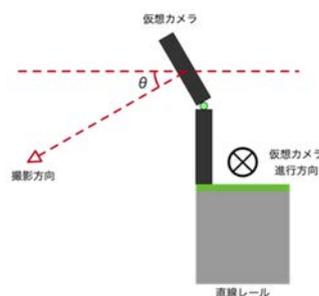


図 3.4-7 : 仮想カメラモデルと姿勢角度

立体復元計算に有効な画像を選定する条件の調査およびその検証を行うために、前述したシミュレーション環境内において直線レール上を移動する仮想カメラによる画像撮影を行い、取得した画像群に対して立体復元処理を適用した。実験条件として、前述のように仮想カメラは姿勢が一定で、地面から 1.0 m の高さで水平に設置された直線レール上を速度 0.1 m/s で 20 秒間移動しながら画像を収集する設定とした。本実験での撮影対象は図 3.4-5、3.4-8 が示すように、同一サイズのステップ状のフィールドパレットを 4 個並べ (文献[11]における Fig.9(a) Flat cross pallet を参考)、ステップ状フィールドパレットの間中央に直線レールと並行する向きに長さ 1.0 m、0.5 m、0.3 m 外形 0.05 m の円柱パイプを縦置きに設置したものとした。直線レールと最も近いフィールド端までの水平距離を 0.15 m である。この撮影対象モデルを作成するにあたり、原子力機構において開発、および公開している Choreonoid 用プラグイン HAIROWorldPlugin[12]を使用した。

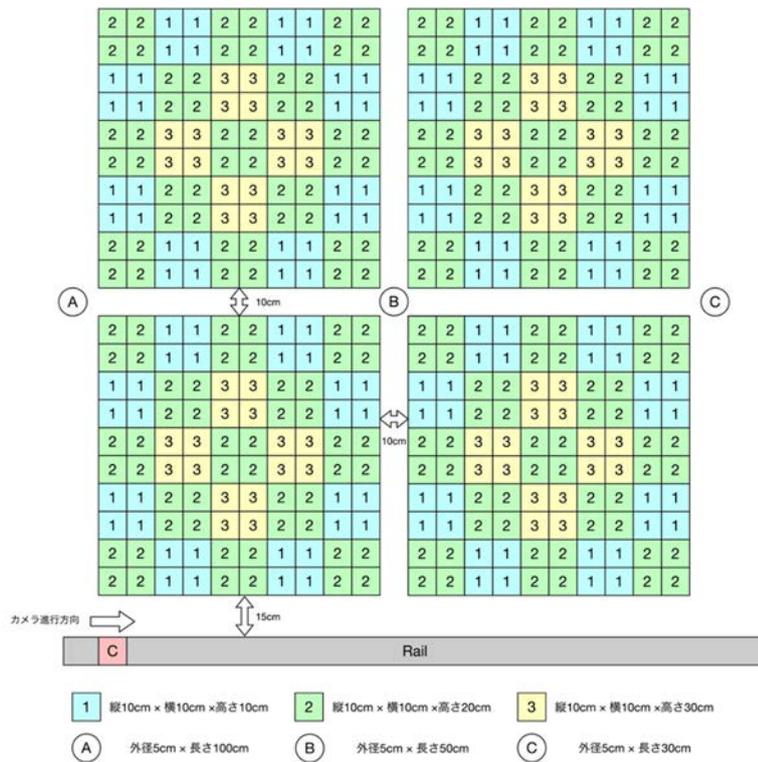


図 3.4-8：仮想環境上面図

実験では、仮想カメラ姿勢角度 θ を 0 度、15 度、30 度、45 度、60 度に設定して画像収集実験を行った。ここで、仮想カメラモデルは RGB (カラー) カメラを模擬したもので、解像度を 640×480 pixels、画像取得フレームレートを 30 fps、画角を 56 度と設定している。また、原子炉格納容器内のような暗所において撮影を行うためには照明が必要となることから、仮想カメラモデルに撮影方向を照らすスポットライトデバイス (最大輝度で光の広がる角度を 24 度、完全に光が遮断される角度を 40 度) を搭載している (図 3.4-6)。各仮想カメラ姿勢角度での初期状態 (0 秒時) における撮影画像を図 3.4-9 に示す。

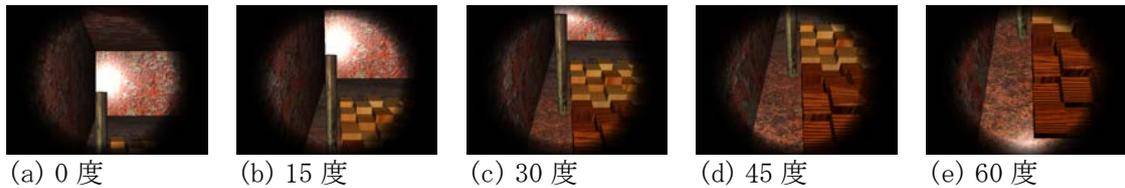
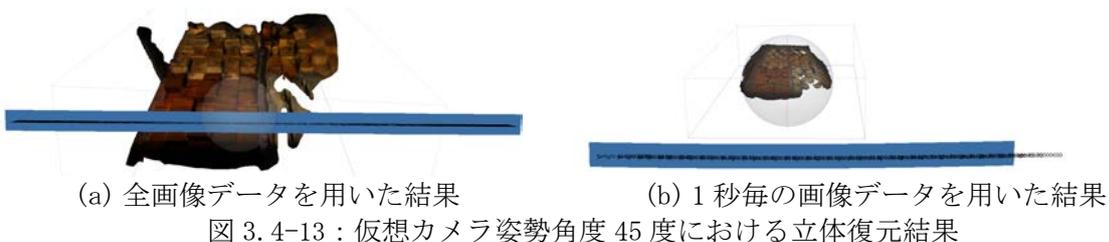
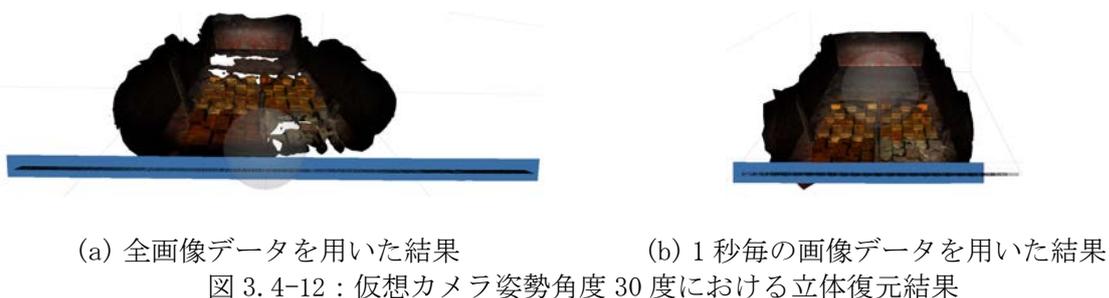
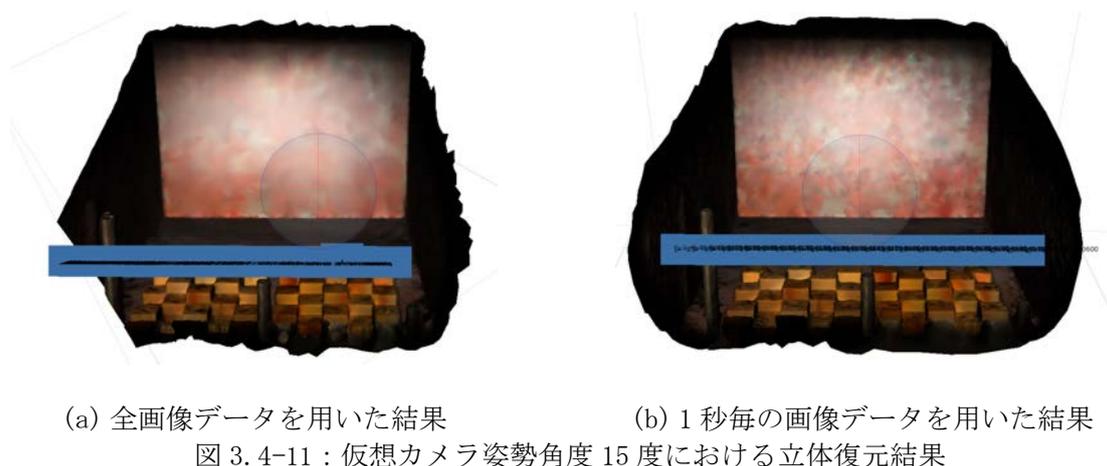
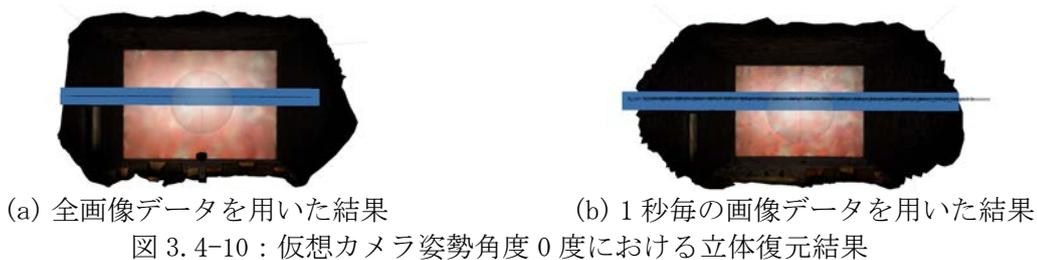


図 3.4-9：各仮想カメラ姿勢角度における初期状態 (0 秒時) における撮影画像

ここで、Choreonoid のシミュレーション計算ステップは 0.001 秒とした。また、立体復元計算については、CPU として Ryzen9 3950X、GPU として GeForce RTX 3090 を持つ計算機上で、市販の立体データ生成ソフトウェアである Metashape [13] による SfM-MVS 処理を適用した。次節以降に今回調査および検証した実験について述べる。

(2) 直線軌道で取得した画像群から立体復元処理に有効な画像を選定する条件の調査および検証

前述したように、仮想カメラ姿勢角度が固定された状態で直線軌道上を移動して画像収集が行われることを想定している。このとき、連続したフレームにおける2画像は類似し、それぞれから得られる画像特徴量の出現パターンは似通っている傾向が高いと考えられる。このため、収集された全ての画像を使用しなくても、一定周期で抽出した画像のみを立体復元に使用したとしても、復元精度を保った立体復元結果が得られると考えられる。そこで、前述した各仮想カメラ姿勢角度において、①シミュレーション実験によって得られた全データ（画像601枚）を使用した場合における立体復元結果と②1秒ごとに抽出した画像21枚を使用した場合における立体復元結果との比較を行った。各仮想カメラ姿勢角度における復元結果の一例を図3.4-10～3.4-14に示す。また表3.4-2に、5試行の立体復元結果に要する平均計算時間を示す。



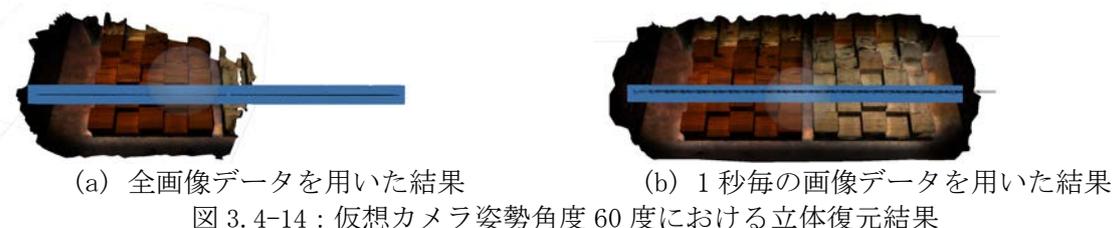


図 3.4-14：仮想カメラ姿勢角度 60 度における立体復元結果

表 3.4-2 5 試行の立体復元結果に要する平均計算時間[秒]

仮想カメラ姿勢角度 θ	全画像データ使用	1 秒毎の画像データ使用
0 度	807.4	21.2
15 度	761.1	19.2
30 度	551.3	24.5
45 度	533.5	23.4
60 度	602.9	22.8

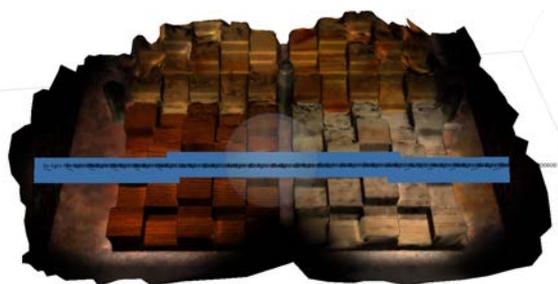
これらの立体復元計算における SfM 処理結果から、どちらの場合においても、直線軌道で撮影したカメラ推定ができていていることが分かる。そして、仮想カメラ姿勢角度が小さい場合は、壁面上の特徴点が多く検出されたため、壁面を中心に立体復元が行われていることが分かる。また、仮想カメラ姿勢角度が大きい場合には、復元対象物に関する特徴点が多く検出されたため、復元対象物を中心に立体復元が行われることが分かる。さらに、全データを使用した場合の復元結果は、1 秒ごとの画像データを使用した場合の復元結果と比較すると、直線軌道で撮影したカメラ位置推定ができていているのにも関わらず、大半の画像間で特徴点のマッチングが充分とれておらず、復元対象物、床面および壁面を復元ができていない結果となった。SfM-MVS の計算処理時間の観点でみれば、1 秒毎の画像データは全画像数の約 3.5 % のみの使用にとどまっておらず、表 3.4-2 の結果から、直線軌道で撮影した領域に対する立体復元に要する時間を約 96 % 削減できることが明らかとなった。これらの結果から、直線軌道で取得した画像群から、一定周期で抽出した画像のみを立体復元に使用することで、復元結果に要する時間を削減、および直線軌道で取得した撮影領域に対する立体復元結果が得られることが明らかになった。

(3) 立体復元結果を補完する代替画像選定条件の調査およびその検証

原子炉格納容器での実運用を考慮すると、撮影条件および撮影環境は過酷な環境であり、直線レール上をカメラが移動して撮影している際に、場合によっては、放射線の影響によるカメラ破壊等に起因して画像が得られない状態が発生すると考えられる。この場合、あるフレーム間で画像が取得できなかったことが原因で、復元結果に欠落部分が発生する可能性が高い。しかしながら、違う条件での試行時に取得できた画像群の中から、欠落部分を補完してくれそうな箇所を撮影している画像を抽出して、立体復元に使用すれば、画像間マッチングを行うことができるため、欠落部分を補完した立体復元ができると考えられる。そこで、3.4.1-2(2)節の結果を踏まえて、仮想カメラ姿勢角度を 60 度に固定し、1 秒毎に抽出した画像 21 枚 (0~20 秒) から、10 秒間 (6~15 秒) に対する画像 10 枚が欠落した状態において、仮想カメラ姿勢角度 0 度、15 度、30 度、45 度において欠落した画像と同時刻で撮影した画像データを代替使用して、復元結果を補完する実験を行った。各仮想カメラの直線移動速度は同一としている。欠落しなかった画像 11 枚における立体復元結果を図 3.4-15 に示す。この結果は、10 秒間の欠落時間があるため、最初の 5 秒間 (0~5 秒) の画像 6 枚のみを使った復元となっている。各仮想カメラ姿勢角度データを代替使用して立体復元を補完した結果を図 3.4-16 に示す。



図 3.4-15：仮想カメラ姿勢角度 60 度（0～5 秒、16 秒～20 秒のみ使用）における立体復元結果



(a) 仮想カメラ姿勢角度 45 度



(b) 仮想カメラ姿勢角度 30 度



(c) 仮想カメラ姿勢角度 15 度



(d) 仮想カメラ姿勢角度 0 度

図 3.4-16：代替データ（6～10 秒）を使用した立体復元の補完結果

これらの結果から、欠落した状態の仮想カメラ姿勢角度 60 度に近いカメラ姿勢角度 45 度、30 度で撮影した画像データを代替使用すれば、直線軌道のカメラ撮影位置推定ができ、欠落した立体復元結果の補完ができていることが分かる。これは、仮想カメラ姿勢角度 60 度に映し出されている対象物がカメラ姿勢角度 45 度、30 度においても映し出されており、画像のマッチングができていると考えられる。カメラ姿勢角度 15 度、0 度で撮影したデータを代替使用した場合、画像のマッチングができないため、カメラ姿勢角度 60 度（0～5 秒、16～20 秒のみ使用）における復元結果と同様になり、欠落部分の補完ができないことが分かる。また、カメラ姿勢角度 45 度のデータを代替使用した場合、復元対象物が主に映っているため、復元対象物を中心とした補完となることが分かる。そして、カメラ姿勢角度 30 度のデータを代替使用した場合、復元対象物だけでなく壁面も映っているため、壁面も含めた補完となることが分かる。これらの補完結果から、代替データを用いて立体復元が可能な場合、代替データによる立体復元結果の特徴を持つ補完結果になることが分かる。

3.4.3 実験環境の整備

現在、東京大学において研究開発が実施されているプラットフォームのプロトタイプを用いた模擬実験や検証実験を実施するための実験環境を令和 3 年度に構築する計画になっており、令和 2 年度はこの実験環境についての基礎的な設計を実施した。図 3.4-17 はペDESTAL内を模擬した

部分およびプラットフォームの挿入口を模擬した部分についての設計図を示している。また、設計時の議論の結果、製作する際に用いる主要な部材には加工の容易さや設置重量軽減の観点から木を用いることとした。

模擬環境の設置場所は、連携ラボが設置されている原子力機構櫛葉遠隔技術開発センターの試験棟内を想定しており、前述の模擬環境を設置する場所や方法等について設計情報をもとに施設担当者を含めた議論を実施し、令和3年度の具現化のための道筋をつけた。

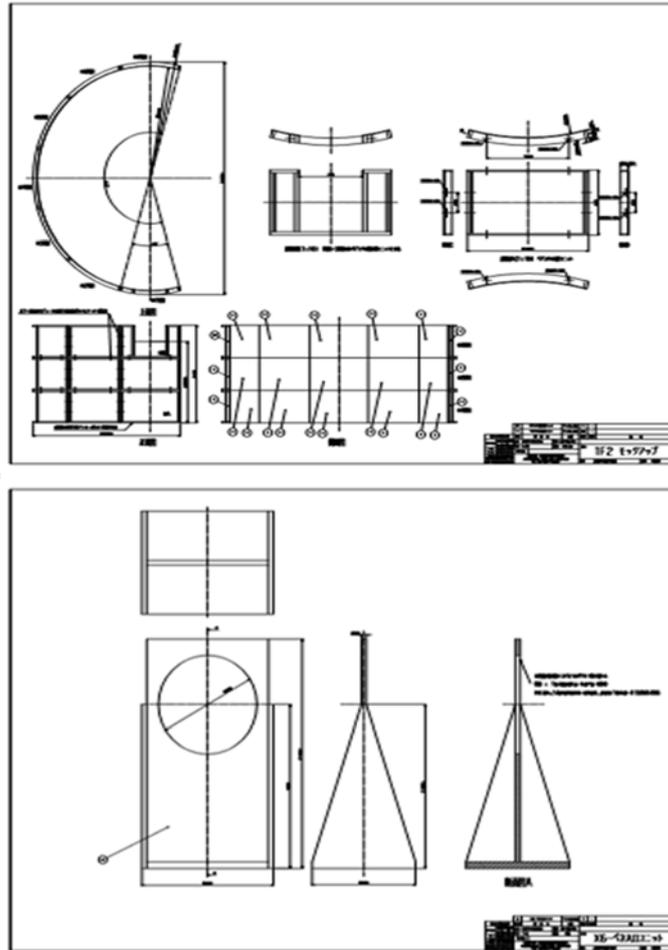


図 3.4-17：実験環境の設計図

参考文献

- [1] Ullman, S., The Interpretation of Structure from Motion, Proceedings of the Royal Society of London, Series B, vol. 203, no. 1153, 1979, pp. 405-426.
- [2] 檜葉遠隔技術開発センター, 2017年度檜葉遠隔技術開発センター年報, JAEA-Review 2018-029, 2019, 51p.
- [3] Lowe, D. G., Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints, International Journal of Computer Vision, vol. 60, 2004, pp. 91-110.
- [4] Wu, C., Towards Linear-Time Incremental Structure from Motion, 2013 International Conference on 3D Vision, 2013.
- [5] Wu, C., Agarwal, S., Curless, B. and Seitz, S. M., Multicore Bundle Adjustment, CVPR2011, 2011, pp. 3057-3064.
- [6] Seitz, S. M., Curless, B., Diebel, J., Scharstein D. and Szeliski, R., A Comparison and Evaluation of Multi-View Stereo Reconstruction Algorithms, 2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2006, pp. 519-528.
- [7] Nakamura, K., Mineta, K., Naruse, K., Investigation of 3D Reconstruction from Time-Series Images by Towing Camera, IFAC-PapersOnLine, vol. 50, no. 1, 2017, pp. 10317-10322.
- [8] 中村啓太, 小川純, 成瀬継太郎, 立体復元に対して望ましい画像の選定条件に対する一考察, 第19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, 1C2-05, 2018.
- [9] コレオノイド, Choreonoid, <https://choreonoid.org/ja/> (参照: 2021年3月27日) .
- [10] Blender. org, Blender, <https://www.blender.org> (参照: 2021年3月27日) .
- [11] Jacoff, A. S., Downs, A. J., Virts, A. M., and Messina, E. R., Stepfield Pallets: Repeatable Terrain for Evaluating Robot Mobility, 8th Workshop on Performance Metrics for Intelligent Systems Workshop, 2008, pp. 29-34.
- [12] 檜葉遠隔技術開発センター, HAIROWorldPlugin, <https://github.com/k38-suzuki/hairo-world-plugin> (参照: 2021年3月27日) .
- [13] Agisoft LLC, Agisoft Metashape, <https://www.agisoft.com> (参照: 2021年3月27日) .

3.5 研究推進

毎月1回程度のプロジェクト会議を実施するとともに、研究項目間での議論、プラントメーカーとの議論を行った。

- 第5回プロジェクト会議
開催日：令和2年4月7日
場所：オンライン（Zoom）
出席者：連携ラボ（東京大学）10名、連携ラボ（原子力機構）4名、再委託（福島大学、神戸大学）3名
主な議題：
 - ◇ 新メンバー挨拶
 - ◇ 令和2年度におけるプロジェクトの進め方について

- 第6回プロジェクト会議
開催日：令和2年5月12日
場所：オンライン（Zoom）
出席者：連携ラボ（東京大学）9名、連携ラボ（原子力機構）4名、再委託（福島大学、神戸大学）3名
主な議題：
 - ◇ ROBOMECH2021の廃炉セッションについて
 - ◇ モノレール搬送システムについて
 - ◇ 新型コロナウイルスの影響について

- 第7回プロジェクト会議
開催日：令和2年6月16日
場所：オンライン（Zoom）
出席者：連携ラボ（東京大学）10名、連携ラボ（原子力機構）4名、再委託（福島大学、神戸大学）3名
主な議題：
 - ◇ 新型コロナウイルスの影響による経費の振替について
 - ◇ SII2021の廃炉セッションについて
 - ◇ 各研究項目の実施状況報告

- 第8回プロジェクト会議
開催日：令和2年7月14日
場所：オンライン（Zoom）
出席者：連携ラボ（東京大学）8名、連携ラボ（原子力機構）4名、再委託（福島大学、神戸大学）3名
主な議題：
 - ◇ モニタリングプラットフォームについて
 - ◇ SI2020の廃炉セッションについて
 - ◇ 各研究項目の実施状況報告

● 第9回プロジェクト会議

開催日：令和2年8月18日

場所：オンライン（Zoom）

出席者：連携ラボ（東京大学）9名、連携ラボ（原子力機構）4名、再委託（福島大学、神戸大学）3名

主な議題：

- ◇ 東京電力との連携について
- ◇ 第2回連携ラボ推進会議について
- ◇ 各研究項目の実施状況報告

● 第10回プロジェクト会議

開催日：令和2年9月15日

場所：オンライン（Zoom）

出席者：連携ラボ（東京大学）10名、連携ラボ（原子力機構）4名、再委託（福島大学、神戸大学）3名

主な議題：

- ◇ 第2回連携ラボ推進会議について
- ◇ 企業との連携について
- ◇ 新型コロナウイルスの影響について
- ◇ 各研究項目の実施状況報告

● 第11回プロジェクト会議

開催日：令和2年10月16日

場所：オンライン（Zoom）

出席者：連携ラボ（東京大学）12名、連携ラボ（原子力機構）4名、再委託（福島大学、神戸大学）3名、東電1名

主な議題：

- ◇ 三菱重工との意見交換会について
- ◇ モニタリングプラットフォームの設計案について
- ◇ 各研究項目の実施状況報告

● 第12回プロジェクト会議

開催日：令和2年11月18日

場所：オンライン（Zoom）

出席者：連携ラボ（東京大学）9名、連携ラボ（原子力機構）2名、再委託（福島大学、神戸大学）3名、東電1名

主な議題：

- ◇ NDFの戦略ワークショップについて
- ◇ 各研究項目の実施状況報告

- 三菱重工との意見交換会
開催日：令和2年12月4日
場所：オンライン（Zoom）
主な議題：
 - ◇ お互いの研究紹介
 - ◇ 段階的取り出し状況について

- 第13回プロジェクト会議
開催日：令和2年12月14日
場所：オンライン（Zoom）
出席者：連携ラボ（東京大学）9名、連携ラボ（原子力機構）2名、再委託（福島大学、神戸大学）3名、東電1名
主な議題：
 - ◇ 中間フォローについて
 - ◇ 予算執行等の確認
 - ◇ 各研究項目の実施状況報告

- 第14回プロジェクト会議
開催日：令和3年1月19日
場所：オンライン（Zoom）
出席者：連携ラボ（東京大学）9名、連携ラボ（原子力機構）2名、再委託（福島大学、神戸大学）3名、東電1名
主な議題：
 - ◇ R3 業務計画および積算について
 - ◇ 檜葉での実験計画について
 - ◇ 各研究項目の実施状況報告

- 東芝との意見交換会
開催日：令和3年2月15日
場所：オンライン（Zoom）
主な議題：
 - ◇ お互いの研究紹介
 - ◇ PCV 内部調査について

● 第15回プロジェクト会議

開催日：令和3年2月22日

場所：オンライン（Zoom）

出席者：連携ラボ（東京大学）7名、連携ラボ（原子力機構）2名、再委託（福島大学、神戸大学）3名

主な議題：

- ◇ モノレール搬送システムについて
- ◇ R3 業務計画について
- ◇ 各研究項目の実施状況報告

● 第16回プロジェクト会議

開催日：令和3年3月15日

場所：オンライン（Zoom）

出席者：連携ラボ（東京大学）8名、連携ラボ（原子力機構）2名、再委託（福島大学、神戸大学）3名、東電1名

主な議題：

- ◇ R2 成果報告書の作成について
- ◇ 学生の教育および情報共有について

3.6 教育

本業務では、産学連携講座として「統合廃炉工学講座」を開設しており、その一環として福島第一原発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、受講者数は37人であった。講義内容としては、福島第一原発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した講義を実施した。具体的には、福島第一原発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、現在および将来行われる福島第一原発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3.6-1に示す。

表 3.6-1 廃止措置特論Eの概要

月日	時間	担当教官	講義内容
9月30日	14:55～16:40	岡本教授	福島第一原発事故概要
10月7日	同上	岡本教授	通常発電所の廃止措置
10月14日	同上	鈴木特任教授	福島第一原発の廃止措置概要(1)
10月21日	同上	鈴木特任教授	福島第一原発の廃止措置概要(2)
10月28日	同上	鈴木特任教授	燃料デブリ管理技術
11月4日	同上	長谷川教授	核種分析技術
11月11日	同上	高橋教授	放射線計測技術
11月25日	同上	松崎教授	環境影響評価（オフサイト含み）
12月2日	同上	浅間教授	廃止措置のためのロボット技術の応用
12月9日	同上	禹特任講師	ロボット技術と遠隔操作技術
12月16日	同上	岡本教授	リスク評価とリスク管理
12月23日	同上	斉藤准教授	廃棄物管理
1月16日	同上	寿楽准教授	リスクコミュニケーションと社会的リスクの影響

以上のように、本講義では、福島第一原発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、様々の視点から幅広く盛り込まれて議論され、福島第一原発廃止措置に対する学生の理解度を深めることができた。

研究を進めるために必要な研究会として、三菱重工との意見交換会（令和2年12月4日）、株式会社東芝との意見交換会（令和3年2月15日）を開いた。お互いの研究開発実績を紹介し、意見と情報の共有を行った。具体的には、三菱重工から燃料デブリの段階的に規模を拡大した取り出し技術について紹介してもらった。株式会社東芝との意見交換会では、PCV内部調査の開発実績についての紹介があった。本事業からは、研究内容および現在までの実績を紹介し、両社からの意見やコメントを収集した。

本事業のアウトカムとしては、PCV 上部空間に新たに設置するプラットフォーム上に遠隔モニタリング装置を配置することにより、遠隔機能と取り出し作業とを機能分離し、継続的なモニタリングを可能とする本技術のコンセプトを廃炉関連企業に広く情報提供するとともに、本コンセプトの活用を希望する企業と将来的にはタイアップすることを想定している。研究成果のアウトプットとしては、学術誌への投稿を検討している。各連携ラボの研究成果をモニタリングプラットフォーム上に実装し、檜葉遠隔技術開発センターで評価実験を行う予定である。

4. 結言

本業務では、福島第一原発の廃炉に向けて、遠隔技術分野を中心とした研究人材の育成を行う。燃料デブリ取り出し時における炉内状況把握のためのモニタリングプラットフォームの構築、およびプラットフォーム上を移動するセンサによる計測・可視化についての研究を行う。このような研究課題に参画することによる研究教育、講義等の座学、施設見学、の3つの柱で研究人材を育成することを実施している。

以下に、5カ年計画の2年目である令和2年度の業務実績を述べる。

(1) モニタリングプラットフォームの構築

① 軌道構造自動施工システム

軌道構造施工システムの基本設計および要素開発に取り組んだ。具体的には軌道構造の基本構成要素である単関節軌道モジュールおよび観察ユニットの移動機能部の開発に取り組んだ。

単関節軌道モジュールおよび観察ユニットの移動機能部の試作および性能評価実験を通じて要求機能の基本的な実現性は確認できたが、要求機能を完全に実現するためには、アクチュエータの再選定や機構の改良が必要なことが明らかになった。

② コンパクトに巻き取り可能な高剛性軽量アーム（再委託先：福島大学）

LMPAを用いた関節機構について、令和元年度の成果を用いて複数関節のアームを試作し、性能評価ならびに改良を行った。誘導加熱を用いた関節機構の加熱システムについて、加熱部の電子回路、コイル配置等の試作検討を行い、加熱システムの基本的な設計を行った。上記の検討結果に基づき、プラットフォーム軌道上を走行する台車を想定した、アームシステムの構想設計を行った。

LMPAを用いた複数関節のアームにおける、アーム手先のたわみについて解析を行った。解析の結果、アームの根元側を太くしてアームの先端側を細くする構造にすることで、アームのたわみを大きく軽減することができることを確認した。令和元年度開発した誘導加熱装置の共振周波数を用いた温度センシングについて、令和2年度はアーム構造に対して十分な温度センシングが可能か実験から調査を行い、関節の状態を十分観察できることを確認した。ペダスタル内にアームを入れ、内部でアームを展開することを想定した、アーム巻き取り装置の構造を考案した。簡単な装置を作成して想定する巻き取りと繰り出し動作ができることを確認した。

(2) 遠隔操作インタフェースの開発

① 映像提示インタフェース

オペレータへの映像提示のために、令和元年度に検討したカメラの仕様や台数等に基づきカメラ配置手法の検討を行った。原子炉建屋内の3次元モデルを活用し、そのモデルに基づき作業領域を撮像可能なカメラ配置手法の検討を行った。また、簡易的な実験用カメラシステムの構築を行った。

具体的には、環境の3次元モデルを与えられた時に、ある1つの対象物を指定したときのカメラ配置設計が2次元上で可能になった。実環境においても検証を行っており、カメラと三脚を用いた簡易なカメラシステムを構築し、円周上にカメラを動かして撮影した映像から環境の3次元モデルを復元することでカメラ配置を設計した。

② 高臨場感遠隔操縦システム（再委託先：神戸大学）

プラットフォームや高剛性軽量アームを格納容器内に敷設する作業や格納容器内での高剛性軽量アームを用いた各種作業を想定した遠隔操縦方法を検討した。令和元年度に神戸大学で開発した実験用ロボットプラットフォームを活用し、連携ラボ内での映像提示インタフェース検討の結果を取り入れて、遠隔操縦方法の検証が可能な遠隔操縦実験プラットフォームの基本形の開発を行った。

具体的には、高剛性軽量アームについては、超多自由度のチェーン構造となる高剛性軽量アームを作業空間内に展開する際の空間掃引領域を視覚化し、アームのコンフィグレーションの計画に関する知見を得た。また令和元年度に引き続き複数画面を有する遠隔操縦システムの直感的なインタフェースの構成法を提案し、予備の実験を行った。同時に遠隔操縦実験プラットフォームの基本形となる複数画面を有する遠隔操縦用コックピットを開発した。

(3) 放射線モニタリングデバイスの開発

令和元年度に設計開発した高速の応答性能を有する中性子、ガンマ線検出器を、模擬線源等を用いて光センサ、信号読み出し回路と合わせてスペクトロスコピー性能の改良を行った。また、トモグラフィ手法実装のための試作開発およびプラットフォームからの位置情報と放射線センサデバイスとの同期の設計開発を実施した。

具体的には模擬線源を利用した数 Sv/h の高線量率下において設計開発したガンマ線検出器の動作検証を行い、該当のスペクトル性能が達成できることを確認した。また開発した中性子検出器のスペクトル弁別機能を確認した。位置同期については光位置 3 次元トラッキング技術とイメージング技術を組み合わせた性能試験を実施し、模擬線源を特定可能であることを確認した。

(4) 炉内環境把握のための環境モデル立体復元手法の研究開発（連携先：原子力機構）

画像から立体復元処理により生成された環境モデル上の欠落部分を抽出し、補完のためのカメラ位置を推定する手法の研究開発を行うとともに、立体復元計算に有効な画像を自動的に選定する条件の抽出、設定についての調査およびその検証を行った。また、実験環境整備のために、プラットフォーム開発を行うグループより情報を得て基礎的な設計開発を行った。

モデル復元計算とともに得られるカメラ軌道から、復元モデルの欠落部分を補完するためのカメラ位置推定手法を開発し、実験により検証を行った。また、ロボットシミュレータ Choreonoid を使用して、模擬環境モデルを撮影するシミュレーションを行い、立体復元計算に有効な画像を選定する条件の調査を行うとともに、検証実験を行った。さらに、開発中であるプラットフォームを用いた実験を行うための模擬環境について基礎的な設計を行い、檜葉遠隔技術開発センターにおいて設置方法等の具現化についての議論を行った。

(5) 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間ならびに 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。具体的には、毎月 1 回のプロジェクト会議を実施するとともに、研究項目間での議論、プラントメーカーとの議論を行った。

(6) 教育

福島第一原発の廃炉に向けて、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。福島第一原発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。

This is a blank page.

