

JAEA-Review 2022-032 DOI:10.11484/jaea-review-2022-032

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3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) -FY2021 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 2022

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

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。(<u>https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja</u>) 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(<u>https://www.jaea.go.jp</u>) 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 (<u>https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en</u>).

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

© Japan Atomic Energy Agency, 2022

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3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

(2022年9月1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3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始めとした原 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3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3年度は、主に令和2年度に取り組んだ基本 設計および要素開発の改良に取り組むとともに、統合実験の準備を行った。

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

i

JAEA-Review 2022-032

Human Resource Development Related to Remote Control Technology for Monitoring Inside RPV Pedestal during Retrieval of Fuel Debris (Contract Research) – FY2021 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 1, 2022)

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 FY2021.

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 FY2021.

The present study aims to construct 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 FY2021, we mainly worked on improving the base design and technology development that we had worked on in the previous year, and we also prepared for integration experiments.

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	, ,
5.	令和3年度 採択課題 10)
付約	録 成果報告書	3

Contents

1.	Outline o	f Nuclear	Energy	Science	& Techn	ology	and	Human	Resource	Developmen	t Proje	ect
		• • • • • • • • • •					••••		•••••		•••••	. 1
2.	Accepted	Proposal	in FY20	18	•••••							. 2
3.	Accepted	Proposal	in FY20	19	•••••							. 5
4.	Accepted	Proposal	in FY20	20	•••••							. 8
5.	Accepted	Proposal	in FY20	21								10

Appendix Result Report 1

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。

- 1 -

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	山﨑 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	渡邉 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
ー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 号機ペデ スタル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	渡邉 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

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	淺間 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 (R2.4.1~)	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

JAEA-Review 2022-032

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 (~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
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	渡邉 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)

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・日露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 ターベースの高度化	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

課題名	研究代表者	所属機関
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 啓太朗	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
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	淺間 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

本報告書は、以下の課題の令和3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	淺間 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3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 R03I030)

成果報告書

令和4年3月 国立大学法人東京大学

JAEA-Review 2022-032

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3年度の研究成果を取り まとめたものです。

目次

概略
1. はじめに 1
2. 業務計画
3. 実施内容および成果
 3.1.1 軌道構造自動施工システム
 3.2.1 映像提示インタフェース
3.3.1 令和2年度までの実施内容および成果(概要) 49 3.3.2 令和3年度実施内容および成果 49
3.3.3 まとめ 54 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 55 3.4.1 令和2年度までの実施内容および成果(概要) 55
3.4.2 令和3年度実施内容および成果 55 3.4.3 まとめ 66 3.5 人材育成の取り組み 68
3.6 研究推進 71 4. 結言 74

執筆者リスト

事業代表者	国立大学法人東京大学	教授 教授 准教授 教授	淺間一 高橋浩之 福井類 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	連結・押出し実験の所要時間13
表 3.1-2	軌道姿勢角調整実験の所要時間14
表 3.1-3	能動関節屈曲試験の所要時間16
表 3.1-4	断熱材の比較19
表 3.1-5	皿リベット用材料の比較20
表 3.1-6	アーム先端のたわみの確認22
表 3.1-7	材料の物性値23
表 3.1-8	金属板の厚さ1 mm のときのたわみ量 23
表 3.1-9	金属板の厚さ2 mm のときのたわみ量 24
表 3.2-1	上段左右画面を見た回数の比較44
表 3.4-1	撮影対象物およびカメラの情報 56
表 3.4-2	検証に使用した画像選択方法およびその画像使用枚数59
表 3.4-3	試作した画像収集・管理システムのハードウェア構成63
表 3.5-1	廃止措置特論 E の概要

义	一覧
---	----

义	1.	1-1	モニタリングプラットフォームを用いたペデスタル内部の計測と可視化1	-
义	2.	1-1	年度別全体計画 3	}
义	2.	2-1	実施体制図4	ŀ
义	3.	1-1	PCV 内部観察用軌道構造体の概念図 6	;
义	3.	1-2	直線軌道部と根元支持部による屈曲軌道の支持7	7
义	3.	1-3	モジュール化した軌道の連結・押出し作業7	7
义	3.	1-4	観察ロボットの貫通孔通過のための空間の確保7	7
义	3.	1-5	間隔を広くとったローラによる軌道の支持8	3
义	3.	1-6	軌道のねじりによる関節軸の傾き8	3
义	3.	1 - 7	PCV 内部観察用軌道構造体の全体図 9)
义	3.	1-8	設計した直線モジュール9)
义	3.	1-9	軌道の横幅と関節駆動トルク・直線モジュール重量との関係10)
义	3.	1-10) 2 台の作業台による軌道モジュールの姿勢調整 11	-
义	3.	1-11	. 万力による軌道連結時のピン挿入の補助11	-
义	3.	1-12	? 根元支持部の全体設計12	2
义	3.	1-13	3 設計したローラ押し付け機構12	2
义	3.	1-14	l 直線モジュール連結・押出し実験の様子13	}
义	3.	1-15	5 根元支持部による軌道姿勢角調整実験の様子14	ŀ
义	3.	1-16	うフレームと関節軸の傾きの時間変化14	ŀ
义	3.	1-17	′観察ロボットの移動性評価実験の様子15	5
义	3.	1-18	3 観察ロボットの姿勢角の時間変化15	5
义	3.	1-19) 指令角度と関節角度の時間変化16	;
义	3.	1-20) 関節部の加熱時間)
叉	3.	1-21	関節部の構造19)
叉	3.	1-22	? 断熱効果の検証実験のための装置 20)
叉	3.	1-23	3 断熱効果の検証実験の結果	
叉	3.	1-24	1 先端集中荷重ならびに分布荷重を受ける片持ち梁	
図	3.	1-25	5 チェーンプレートに金属板を貼り付けた構造22	2
汊	3.	1-26	;金属板厚が1mmのときのたわみ量23	}
図	3.	1-27	′金属板厚が2mmのときのたわみ量24	Ł
汊	3.	1-28	3 伸長済みのアームの関節の角度を変更する機構(構想)25	5
汊	3.	2-1	映像提示インタフェースの概念図	;
汊	3.	2-2	ロボットアームによるリーチング動作のシミュレーション	7
汊	3.	2-3	カメラ位置指定のための角度パラメータ(極座標系) 27	7
汊	3.	2-4	強化学習で使うカメラ視点とリーチング達成までにかかる時間(コンセプト図) 28	3
汊	3.	2-5	オペレータを用いた被験者実験と強化学習の動作獲得の違い29)
义	3.	2-6	World modelsの構造)
汊	3.	2-7	DQN と World models のリーチング動作における報酬の比較)
図	3.	2-8	World models のリーチング動作における報酬の比較 31	L

図 3.2-9 実験環境 31
図 3.2-10 SfM ソフトで構築した 3 次元環境モデル 31
図 3. 2-11 3 次元環境モデルを読み込んだ強化学習用シミュレータ 32
図 3. 2-12 現在のカメラ位置から得られた画像 33
図 3. 2-13 現在のカメラ位置(赤色)および目標のカメラ位置(青色) 33
図 3.2-14 令和 2 年度に開発した複数画面を有する遠隔操縦コックピット 41
図 3.2-15 カメラアーム搭載カメラの Focal Point と作業の注目ポイントとの関係 41
図 3. 2-16 拡張した遠隔操縦プラットフォーム (リモート側) 41
図 3. 2-17 拡張した遠隔操縦プラットフォーム (ローカル側) 42
図 3. 2-18 提案手法におけるコックピットの画面配置と実験の様子42
図 3. 2-19 従来手法におけるコックピットの画面配置と実験の様子 43
図 3.2-20 タスク完了時間の比較 44
図 3. 2-21 左右のスイッチの操作に要した時間の比較 44
図 3.2-22 選択画面に応じた制御モードの切り替え 45
図 3.2-23 検討中のカメラアームのカメラ視点変更法 46
図 3.2-24 軽量高剛性アームのコンフィグレーション計画(令和2年度成果) 47
図 3.2-25 アーム展開時の各関節角に重力の影響によるオフセットとランダム誤差が加わった場
合
図 3.2-26 カメラの仰角誤差をフィードバックした場合のシミュレーション結果 48
図 3.3-1 放射線モニタリングデバイスの利用イメージ 49
図 3.3-2 試作した 4 mm 角 CeBr ₃ 検出器の線量率依存性(上段)とパッケージングの外観例(下
段)
図 3.3-3 試作した高速読出用の ADC-DAQ 基盤 51
図 3.3-4 Ce:LiCAF と光センサでの読出し例と中性子,ガンマ線スペクトル 52
図 3.3-5 ¹⁰ B を成膜した SOI 検出器の構造 52
図 3.3-6 透過イメージング像とガンマ線・中性子による弁別 53
図 3.3-7 位置プローブを用いた放射線イベントと座標の統合 53
図 3.4-1 観察ユニット 55
図 3.4-2 Blender で構築した環境 55
図 3.4-3 カメラの撮影角度(側面図) 56
図 3.4-3 カメラの撮影角度(側面図) 56 図 3.4-4 立体復元結果 57
図 3.4-3 カメラの撮影角度(側面図) 56 図 3.4-4 立体復元結果
図 3.4-3 カメラの撮影角度(側面図)56図 3.4-4 立体復元結果57図 3.4-5 立体復元の傾斜角度58図 3.4-6 カメラの姿勢推定結果58
 図 3.4-3 カメラの撮影角度(側面図)
図 3.4-3 カメラの撮影角度(側面図)56図 3.4-4 立体復元結果57図 3.4-5 立体復元の傾斜角度58図 3.4-6 カメラの姿勢推定結果58図 3.4-7 撮影角度 60 度・70 度の両方を使用した場合の立体復元結果59図 3.4-8 使用画像枚数と SfM-MVS に要した時間の関係(両対数グラフ)60
図 3.4-3 カメラの撮影角度(側面図)56図 3.4-4 立体復元結果57図 3.4-5 立体復元の傾斜角度58図 3.4-6 カメラの姿勢推定結果58図 3.4-7 撮影角度 60 度・70 度の両方を使用した場合の立体復元結果59図 3.4-8 使用画像枚数と SfM-MVS に要した時間の関係(両対数グラフ)60図 3.4-9 立体復元結果例60
図 3. 4-3 カメラの撮影角度(側面図)56図 3. 4-4 立体復元結果57図 3. 4-5 立体復元の傾斜角度58図 3. 4-6 カメラの姿勢推定結果58図 3. 4-6 カメラの姿勢推定結果58図 3. 4-7 撮影角度 60 度・70 度の両方を使用した場合の立体復元結果59図 3. 4-8 使用画像枚数と SfM-MVS に要した時間の関係(両対数グラフ)60図 3. 4-9 立体復元結果例60図 3. 4-10 ICP に基づいた 2 つの点群データのマッチング61
図 3. 4-3 カメラの撮影角度(側面図)56図 3. 4-4 立体復元結果57図 3. 4-5 立体復元の傾斜角度58図 3. 4-6 カメラの姿勢推定結果58図 3. 4-6 カメラの姿勢推定結果58図 3. 4-7 撮影角度 60 度・70 度の両方を使用した場合の立体復元結果59図 3. 4-8 使用画像枚数と SfM-MVS に要した時間の関係(両対数グラフ)60図 3. 4-9 立体復元結果例60図 3. 4-10 ICP に基づいた 2 つの点群データのマッチング61図 3. 4-11 使用画像枚数と立体復元結果の適合率の関係(片対数グラフ)61
図 3. 4-3 カメラの撮影角度(側面図)56図 3. 4-4 立体復元結果.57図 3. 4-5 立体復元の傾斜角度.58図 3. 4-6 カメラの姿勢推定結果.58図 3. 4-7 撮影角度 60 度・70 度の両方を使用した場合の立体復元結果.59図 3. 4-8 使用画像枚数と SfM-MVS に要した時間の関係(両対数グラフ)60図 3. 4-9 立体復元結果例.60図 3. 4-10 ICP に基づいた 2 つの点群データのマッチング61図 3. 4-11 使用画像枚数と立体復元結果の適合率の関係(片対数グラフ)61図 3. 4-12 立体復元処理を適用するための画像収集・管理システムの構成.62

図 3.4-14	試作した画像収集・管理システムによる立体復元結果	64
図 3.4-15	構築した模擬実験環境の外観	65
図 3.4-16	模擬環境内での観察モジュールを用いた画像撮像実験実施の様子	66

略語一覧

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	
PCV	:Primary Containment Vessel(格納容器)	
LMPA	:Low Melting Point Alloys(低融点合金)	
DQN	:Deep Q-Network(深層強化学習の代表的なアルゴリズム)	
ICP	:Iterative Closest Point(2 点群間の位置姿勢を求めるアルゴリズム)	
VAE	: Variational AutoEncoder(変分オートエンコーダと呼ばれる生成モデル)	
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)	
FPGA	:Field Programmable Gate Array(再プログラム可能な集積回路)	
MVS	:Multi-View Stereo(多視点ステレオ)	
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.

NDF (Nuclear Damage Compensation and Decommissioning Facilitation Corporation:原子力 損害賠償・廃炉等支援機構)の技術戦略プラン[1]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 PCV 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 デスタル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3年目である令和3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

軌道構造自動施工システム

令和2年度開発した軌道構造施工システムの要素の改良設計に取り組んだ.具体的には単関 節軌道モジュールおよび観察ユニットの移動機能部の改良に取り組み,軌道構造施工システム を実現するために必要な基盤を整えた.

今回の改良により軌道構造体の剛性が向上した,また観察ユニットも想定している軌道上の 移動が可能となった.それらを組み合わせて軌道構造体システムの基本的な実現性を検証でき たが,軌道構造の支持方法や単関節軌道モジュールの制御などには改良の余地があることが分 かった.

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 Alloys,以下,「LMPA」と略す.)を用いた関節機構につい て、令和2年度までの成果に基づく改良を行った.アームの形状など、アーム自体のたわみを 軽減するための手法を検討した.また、アームの到達範囲を拡張するために関節角度を変更す る機構の開発に取り組んだ.

具体的には、関節の加熱時間の短縮を目指した検討を行い、関節の LMPA が融解するまでの時間を従来の 34 秒から 9 秒へと大幅に短縮することができた.また、アームのたわみを減少させ

る方法として,補強材を入れる方法について検討した.さらに,関節角度を変更するための小 型機構の構想をまとめた.

(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

令和2年度に構築したシミュレーションと簡易な実験用カメラシステムを活用することで, 映像提示インタフェースの構築を行った.具体的には,まずは多視点から撮った映像を元にオ フラインで3次元環境モデルの構築を行い,その3次元環境モデルと現在のオンラインの映像 を用いた映像提示手法を検討した.

アームの動きも考慮したカメラ配置設計のためにアームのリーチング運動と任意のカメラ配 置が可能なシミュレーションを構築した.そして,そのシミュレーション上で強化学習を活用 することでロボットアームによる作業を考慮したカメラ配置手法の提案をした.

② 高臨場感遠隔操縦システム(再委託先:神戸大学)

令和2年度検討した PCV 内での各種作業を想定した遠隔操縦方法を,令和2年度までに開発 した遠隔操縦実験プラットフォームの基本形に実装した.具体的には,様々なカメラ視点から の遠隔操縦を直感的に行えるような遠隔操縦システムの実現を目指した検討を行った.またシ ミュレーション環境下での遠隔操縦手法との統合の検討を開始した.

さらに具体的に述べると、これまでの作業用アームの手先に取り付けたカメラと環境に固定 して設置したカメラに加え、別途用意したカメラ用アームの手先に取り付けた可動式カメラか らの映像が取り扱えるように遠隔操縦プラットフォームを拡張し、可動式カメラの導入によっ て作業性の向上が見られるかを検証した.また、シミュレーション環境下での仮想カメラの視 点変更への応用も考慮に入れ、可動式カメラの直感的な視点変更方法を検討した.

(3) 放射線モニタリングデバイスの開発

3 次元トモグラフィ手法を用いた試作開発品の性能試験および改良を実施した. 模擬体系を 用いたイメージングの性能試験を実施した.

ガンマ線,中性子センサの高線量率下での動作に向けて設計最適化を実施した.また模擬線 源を用いて位置情報取得と放射線モニタリングを組み合わせたイメージング試験を実施し,線 源位置の取得の検証を行った.

(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: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.)

令和2年度までに研究開発を行った立体復元手法の研究開発を継続して行うとともに,開発 手法による立体復元計算を適用する画像の収集・管理を行うためのシステムの設計および開発 に着手した.また,具体的な検証実験等を行うための模擬実験環境の整備および動作検証実験 を行った.

撮像条件が与える立体復元結果への影響について検証するシミュレータを開発し,実験によって,直線軌道撮影において複数のカメラ姿勢で取得した画像を用いることで1つの固定カメ ラ姿勢で画像取得した場合に対して立体復元精度が向上することが確認された.また,カメラ による画像取得から画像保存,立体復元計算処理までをオンラインで行う画像収集・管理シス テムの設計と基礎的な開発を行い,動作実験を行った.さらに,整備した模擬実験環境を楢葉 遠隔技術開発センターに構築し,軌道構造自動施工システム開発グループと共同で単関節軌道 モジュールおよび観察ユニットによる画像撮影に関する動作検証を実施した.

(5)研究人材育成

福島第一原発の廃炉に向けて,廃止措置に関する講義を実施した.講義内容としては,福島 第一原発廃炉の現状と廃止措置に関する研究開発の取り組み,将来の課題について紹介した. 具体的には,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36人であった.

(6) 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(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,プラントメーカとの議論を行った.

令和元年度の成果報告書:

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) - 令和元年度英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業-, JAEA-Review 2020-028, 2021, 68p.

https://doi.org/10.11484/jaea-review-2020-028

令和2年度の成果報告書

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-, JAEA-Review 2021-030, 2021, 79p.

https://doi.org/10.11484/jaea-review-2021-030

参考文献

 [1] 原子力損害賠償・廃炉等支援機構,技術戦略プラン, https://www.dd.ndf.go.jp/strategic-plan/(参照:2022年3月31日). 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[1]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 PCV 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、作業に応じてペデスタル内部にカメラ 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、ペデスタル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デスタル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
 - 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の構築,(2)遠隔操 作インタフェースの開発,(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,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.

令和3年度 令和4年度 令和5年度
システム開発 モックアップ実験 システム統合実験
周節機構鉱張 システム統合 改良・評価
長提示手法構築 モックアップ実験 システム統合試験 システム統合試験 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
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
#能試験+改良 実証試験 改良-検証試験
▲ 管理システムの研 局所環境モデル結合手法の研究開 環境モデル生成手法の綜合検証実見
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

2.2 実施体制

実施体制を図 2.2-1 に示す.



図 2.2-1 実施体制図
- 3. 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

3.1.1.1 令和2年度までの実施内容および成果(概要)

令和2年度までの取り組みで,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 PCV 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,関節ごとにモジュール分割されている. このモジュール化によって作業者の被ばく量を抑制できる可能性があること,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示された.

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示された.PCV内部へ長距離延伸するための構造の実現, 観察ロボットが関節上を通過できないケースの解決,能動関節の制御を行うことが将来課題であった.

3.1.1.2 令和3年度実施内容および成果

緒論

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[3.1-1].高放射線環境のため人間に 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[3.1-2].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[3.1-3].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.ペデ スタル内部でのロボットの活動も想定する場合、観察用機器は PCV 内に進入する必要がある.し かし、PCV にロボットが進入するための大きな貫通孔を開けることは、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 PCV 内部に進入する 必要がある.

福井ら[3.1-4]は図 3.1-1 のようなロボットが移動可能な軌道を原子炉 PCV 内に挿入し観察を 行う "PCV 内部観察用軌道構造体"の実現を目指している.モジュール化された軌道を連結しなが ら押出すことで観察ロボットが移動するための軌道を施工する.軌道は先端付近に能動関節を持 ち,施工時の障害物の回避が可能である.軌道は作業員による運搬が可能な大きさ・重量である モジュールから成るため原子炉建屋内への搬入が容易である.また,軌道を施工することで,観 察ロボットの同じ箇所へのアクセスが容易になり観察用機器が故障した際の再投入が容易になる. 軌道屈曲部を構成する屈曲モジュールや観察ロボットの駆動部の実現性は検証されているものの 実際の 2 号機への投入を見据えた長距離の延伸は未達成であり,長尺で片持ちな構造物を支持す る要素の開発が必要である.



図 3.1-1 PCV 内部観察用軌道構造体の概念図[3.1-4]

0C Robotics[3.1-5]は原子力発電所で利用可能な観察用蛇型アームロボットを開発している. 蛇型のアームの先端に観察用機器を設けることで PCV 内部の観察が可能である.しかし,アーム の長さが最大8 m 程度であるため,ペデスタル中心部を観察することには適さない.また,アー ムに観察用機器を固定しているため,観察用機器交換のために放射性物質により汚染されたアー ム全体を回収する必要があるという問題がある.

Endo et al. [3.1-6]は PCV 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. ワイヤ駆動方式を採用し,アクチュエータを根元部に置くことで先端部を軽量 化し,長距離伸展を実現している.一方で,上記の蛇型アームロボットと同様にアームに観察用 機器を固定しているため,観察用機器交換のために放射性物質により汚染されたアーム全体を回 収する必要があるという問題がある.

三菱重工業株式会社が開発している原子炉 PCV 内部詳細調査用ロボットアーム[3.1-7]では,折 りたたんだアームを展開することで長距離伸展を実現している.しかし,原子炉建屋内に大型の 構造物を投入することは難しい.

以上のように、高放射線環境での長期運用と原子炉建屋内への搬入を両立した長距離伸展の方法は確立されていない.令和3年度は、PCV内部観察用軌道構造体の長距離伸展を実現するため、 長尺片持ち軌道を支持する要素の設計解を示し、実現性を検証する.

② PCV 内部観察用軌道構造体のペデスタル内部への延伸における要求機能とアプローチ

(ア)要求機能と技術課題

PCV 内部観察用軌道構造体のペデスタル内部への延伸における要求機能は,(1)ペデス タル内部での屈曲モジュールの支持,(2)可搬性と施工時間短縮の両立,(3)PCV 貫通孔 を通じたペデスタルへのアクセス,(4)大モーメント・大荷重の支持と円滑な押出し施 工の両立,(5)常時観察を可能とする振動の小さい能動関節の角度制御の5点である. 以降でそれぞれについて述べる.

- (イ)技術課題に対するアプローチ
 - i ペデスタル内部での屈曲モジュールの支持

観察用軌道は直径 500 mm の貫通孔である X-6 ペネトレーションから PCV 内部に 挿入する必要がある.貫通孔からペデスタルまでの距離は 7 m と長いため、ペデス タル内部でも軌道を支持することが望ましい.しかし、ペデスタル内部では足場と なるグレーチングの脱落が確認されており PCV 内部での軌道の支持は難しい.本シ ステムでは図 3.1-2 に示すように、屈曲軌道部をペデスタル内部に保持するための 直線軌道部と軌道全体を貫通孔外部で支持する根元支持部を設ける.



図 3.1-2 直線軌道部と根元支持部による屈曲軌道の支持[3.1-4]

ii 可搬性と施工時間短縮の両立

軌道を施工する際の作業員の被ばく量を最小限にするため、軌道の施工・運搬に かかる時間は十分短い必要がある.そこで、屈曲軌道部と同様に、直線軌道部が運 搬可能な大きさ・重量であるモジュールから構成することで可搬性を高める.また、 作業失敗のリスクと施工時間を小さくするため、直線軌道部においても図 3.1-3 の 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、押し出すことによって軌 道を施工する.



図 3.1-3 モジュール化した軌道の連結・押出し作業[3.1-4]

iii PCV 貫通孔を通じたペデスタルへのアクセス

観察ロボットの PCV 内部へのアクセスを実現するため,図 3.1-4 のように直径 500 mm 程度の PCV 貫通孔内に観察ロボット通過のための空間を確保する必要がある.本システムでは軌道断面の寸法をパラメータとして構造計算を行うことにより,軌道の外形が最小限の大きさになるようにする.



図 3.1-4 観察ロボットの貫通孔通過のための空間の確保[3.1-4]

iv 大モーメント・大荷重の支持と円滑な押出し施工の両立

長尺で片持ちの軌道を支持するため、根元支持部では大きなモーメントと荷重を 支持する必要がある.また、施工時間短縮のため軌道を円滑に押出せることが必要 である.本システムでは図 3.1-5 のように軌道をローラにより支持することで円滑 な押出し作業を実現する.また、ローラに加わる大きな荷重を小さくするため、ロ ーラ間の距離を大きくとる.ローラ間の距離と根元支持部の可搬性を両立するため、 ローラごとにフレームを分割する.



図 3.1-5 間隔を広くとったローラによる軌道の支持

v 常時観察を可能とする振動の小さい能動関節の角度制御

屈曲モジュールは水平方向に動作可能な関節のみを持つ.図3.1-6のように,軌 道が屈曲すると重力によって軌道にねじりが生じ,関節軸が鉛直方向から傾く.こ れにより関節軸に重力によるトルクが加わり,アクチュエータが出力するトルクが 増加する.そのため,軌道のねじり角が大きくなると屈曲モジュールの関節を駆動 することができなくなる.そこで,直線モジュールをパイプ構造として比剛性を高 めることで関節が駆動できる範囲にねじり角を抑える.また,軌道の根元部が傾か ないよう軌道の側面を支持する傾きの調整が可能なローラを設けることで,軌道の 傾きを調整可能とする.



図 3.1-6 軌道のねじりによる関節軸の傾き

- ③ 直線モジュールと根元支持部の設計と開発
 - (ア)PCV 内部観察用軌道構造体の全体構成

図 3.1-7 に PCV 内部観察用軌道構造体の全体図を示す.軌道直線部と根元支持部を 設けることで、ペデスタル内部の屈曲モジュールを支持する.

図 3.1-8 に示した軌道直線部を構成する直線モジュールは両端に屈曲モジュールと 同様の連結部を持ち,円滑な連結作業を可能にする.また,観察ロボットを支持する ための側面板を設けている.

根元支持部は、3つのフレームから構成される.



図 3.1-7 PCV 内部観察用軌道構造体の全体図



図 3.1-8 設計した直線モジュール

(イ)直線モジュールの構造設計

直線モジュールの要求機能は、(1)運搬可能であるため労働基準法に基づき1モジュ ールが55 kg以下である、(2)十分な剛性のために関節軸の傾きが小さく関節の駆動に 必要なトルクがアクチュエータの定格の80%以下となる、(3)軌道の横幅が125 mmであ る、の3点である.軽量かつねじり剛性の高い構造としてパイプ構造を採用し、関節部 の大きさをもとに直線モジュールの高さを275 mmとした.可搬性を考慮し直線モジュ ール1個の長さを1mとした.材料は比剛性の高いA5052とした.上記の3条件を満た す寸法を求めるため、直線モジュールの横幅と肉厚をパラメータとして直線モジュール の重量と関節の駆動に必要な最大トルクを求めた.屈曲モジュールに搭載しているアク チュエータの定格トルクは 30 Nm であり, 屈曲モジュール1個の重さは 18 kg である. また, 屈曲軌道部は屈曲モジュールを5個連結しており形状はペデスタルに沿った半円 弧であると仮定した.軌道全体が一様なパイプ構造であるとして,軌道のたわみ角とね じり角, 1 モジュールあたりの重量を求めた. 関節の駆動トルクは, アームが向いてい る方向と関節軸が傾いている方向が一致しているときに最大となり, その時のトルクT は, 屈曲モジュールの個数n, 屈曲モジュール 1 個あたりの重さm, 関節と屈曲モジュ ール全体の重心までの距離l, 関節軸の鉛直方向に対する傾きθ, 重力加速度gを用いて 下記の式で表される.

$T = nmglsin\theta$

また,直線モジュール1個あたりの重さMは直線モジュールの高さh,幅b,肉厚t,長さL,A5052の密度 ρ = 2.7 kg/mm³,を用いて下記の式で表される.

$$M = \rho L(hb - (h - 2t)(b - 2t))$$

以上のように求めた直線モジュールの肉厚・横幅と関節駆動トルク・重量との関係を 図 3.1-9 に示す.このグラフをもとに直線モジュールの横幅を 120 mm,肉厚を 20 mm と 決定した.



図 3.1-9 軌道の横幅と関節駆動トルク・直線モジュール重量との関係

(ウ)モジュール連結作業台と連結作業のための治工具

直線モジュールの重さは約38 kg であり,作業員がモジュールを持ったまま連結部の 位置決めをするのは難しい.連結作業を容易に行うためのモジュール連結作業台を設 計・製作した.図3.1-10のように,高さ調整可能な台を2台配置することで連結時の 姿勢の調整を容易にする.また,台の上面にポリアセタール板を取り付けて摩擦係数を 小さくし,台の上での直線モジュールの移動を容易にしている.さらに,図3.1-11の ように連結施工時に2つの万力を用いることで,連結部のピンの挿入を容易にし,速や かな連結作業を可能とする.



図 3.1-10 2 台の作業台による軌道モジュールの姿勢調整



図 3.1-11 万力による軌道連結時のピン挿入の補助

(エ)根元支持部の全体設計

根元支持部の要求機能は、(1)大モーメント・大荷重の支持、(2)可搬性の確保、(3)軌 道の固定の3点である.一体のフレームに全てローラを取り付ける場合、大モーメント によるフレームの変形が想定され、さらにフレームの可搬性も下がる.そのため、ロー ラごとに高剛性なフレームを設けそれぞれをアンカーボルトを用いて地面に固定する ことで、大モーメント・大荷重の支持と可搬性を両立する.また、ローラによる支持で は軌道の固定ができないため、ボルトによってゴムパッドを軌道に押し付けるブレーキ 機構を設けて軌道を固定する.

以上をもとに,図 3.1-12 のような根元支持部の全体設計を行った.根元支持部は上 部大ローラ・側面支持ローラ・下部大ローラという3つの部分から成る.上部大ローラ は上方向への荷重が加わるため,大きな脚部を持ち,床への剛な固定を可能とする.下 部大ローラはアジャスタにより上下移動が可能となっており,軌道のピッチ角の調整を 可能とする.側面支持ローラの設計に関しては後述する.



図 3.1-12 根元支持部の全体設計

(オ)側面支持ローラのローラ押付け機構と角度調整機構の設計

側面支持ローラでは軌道のロール角を調整できる必要がある.そのためには、側面支 持ローラが固定されているフレームの傾き変化と、軌道の傾き変化が等しいことが望ま しい.側面を支持するローラがフレームに対して固定されている場合、加工誤差などに よる軌道の横幅のわずかな変化により円滑な押出し作業ができない恐れがある.そこで、 ローラを軌道に押し付ける機構を設けることで傾き調整を可能にする.以上を踏まえ、 図 3.1-13 のようなローラ押し付け機構を設計した.2本のボルト・ナットを締め上げ、 ばねによってローラを軌道側面に押し付ける.関節角度などにより必要な押付け力が変 わることが想定されるが、ばねの締め上げ具合を調整することにより対応可能である.



図 3.1-13 設計したローラ押し付け機構

④ 直線モジュールと根元支持部の実現性検証実験

(ア)直線モジュールの連結・押出し実験

実際に製作した直線モジュールと根元支持部により、モジュールの連結・押出し作業 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.作業員の被ばく量を小さくするため軌道全体を12時間以内で施工で きることを目標とし、すべての軌道モジュール連結に使える時間を6時間とした.軌道 モジュールは全体で15個であるから1モジュールの連結・押出しは24分以内でできる 必要がある.今回の実験では安全率を考慮し,連結・押出しの合計の目標時間を10分 と設定した.事故現場での作業を想定し、ヘルメット・マスクを装備した著者2名(と もに20代男性)が連結・押出し作業を続けて行い、それぞれの所要時間を計測した. 実験の様子を図3.1-14に示す.



図 3.1-14 直線モジュール連結・押出し実験の様子

作業を3回行ったところ,表3.1-1のような結果となった.連結・押出し作業の所 要時間は平均5分46秒であり,目標の10分より十分短い.これにより,今回設計し た直線モジュール・根元支持部により十分短い時間での連結・押出し作業ができるこ とが分かった.

	First	Second	Third	Mean	SD
Connection	5 min 50 s	5 min	3 min 45 s	4 min 52 s	51 s
Extrusion	56 s	58 s	50 s	55 s	3 s
Total	6 min 46 s	5 min 58 s	4 min 35 s	5 min 46 s	54 s

表 3.1-1 連結・押出し実験の所要時間

(イ)根元支持部による軌道姿勢角調整実験

実際に製作した根元支持部の姿勢角調整機構により,軌道の傾き調整を容易にできる こと,およびローラ押し付け機構による側面支持ローラフレームの傾きと関節軸の傾き の変化への影響を検証するための実験を行った.事故現場での作業を想定し,ヘルメッ ト・マスクを装備した著者1名(20代男性)が姿勢角調整機構を操作し,軌道の傾きを0 度→-0.5 度→0.5 度→0 度と変化させることを2回行い,所要時間を測定した.10 分以 内で作業が完了できた場合,円滑な作業ができたとみなす.また,実験中は側面支持ロー ラフレームと一番根元側の関節軸にマーカーを取り付け,モーションキャプチャによる姿 勢角の計測を行った.実験の様子を図3.1-15 に示す.それぞれの試行における所要時間 は表3.1-2のような結果となった.作業に要した時間は平均7分13秒であり,目標の10 分より十分短い.フレームと関節軸の傾きの時間変化は図3.1-16のようになり,ローラ 押し付け機構によりフレームの傾きと関節軸の傾きの変化が概ね一致していることが分 かった.以上より,実際に製作した根元支持部の姿勢角調整機構により軌道の傾き調整を 短時間でできることが分かった.



図 3.1-15 根元支持部による軌道姿勢角調整実験の様子

表 3.1-2	軌道姿勢角調整実験の所要時間





図 3.1-16 フレームと関節軸の傾きの時間変化

(ウ) 観察ロボットの移動性評価実験

+分な剛性を持つ直線モジュールと、ブレーキ機構により軌道の固定が可能な根元 支持部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、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 0.5 rad と設定)に収まっているか検証した.

直線モジュール5つと屈曲モジュール3つを連結して、根元支持部により支持・固定し、軌道上を観察ロボットに3往復させる.関節角度については、軌道が模擬ペデスタル内壁に沿うよう先端から順に30度、30度、-45度とした.実験中は観察ロボットにマーカーを取り付け、モーションキャプチャにより位置と姿勢を計測した.また、撮影対象としてパイロンを模擬ペデスタルの中心に設置した.実験の様子を図3.1-17に示す.また、姿勢角のうち、ピッチ角とロールの変化を図3.1-18に示す.



図 3.1-17 観察ロボットの移動性評価実験の様子



図 3.1-18 観察ロボットの姿勢角の時間変化

いずれの試行においても観察ロボットの姿勢角に小さな振動は見られたものの,0.2 rad を超える変動は確認されず,根元支持部と直線モジュールによって支持された屈 曲軌道上を観察ロボットは円滑に通行可能であることが分かった.

(エ) 能動関節屈曲試験

+分な剛性を持つ直線モジュールと軌道の傾き調整が可能な根元支持部により,能 動関節の駆動が短時間でできるかを検証した.直線モジュール5つと屈曲モジュール 3つを連結して根元支持部により支持する.能動関節は先端から順に第1,第2,第3 関節とする.実際の施工を想定し,(1)すべての関節がまっすぐな状態,(2)第2関節 の角度を-40度にする,(3)軌道を750 mm ほど押し込み,第3関節の角度を-20度に する,(4)第1関節の角度を30度にする,(5)第2関節の角度を0度にする,(6)軌道 を750 mm ほど押し込み,第3関節の角度を-40度にする,(7)第2関節の角度を30度 にする,という順で操作を行い全体の所要時間を計測した.試行は3回行った.第1, 第2関節については関節制御を行い,関節に設けたポテンショメータにより関節角度 を計測した.第3関節については,モータ取り付け部品の剛性不足により関節制御が できなかったため,人の手により直接角度を調整した.軌道1個分の押出を行うため, 目標時間を直線モジュールの連結実験と同じ10分とした.それぞれの試行の所要時間 は表3.1-3のようになった.

表 3.1-3 能動関節屈曲試験の所要時間

	First	Second	Third	Mean	SD
Time	2 min 11 s	2 min 26 s	1 min 56 s	2 min 11 s	12 s

どの試行においても所要時間は目標時間 10 分よりも十分短かった.第1 関節と第2 関節における指令角度と関節角度の時間変化を図 3.1-19 に示す.先端付近の2 関節に おいては概ね指令角度に追従していることが分かった.一方で,関節角度が振動してい ることも分かり,カメラを安定させた状態での観察のためには制御パラメータの改善 等による制御方法の改善が必要であると考えられる.



図 3.1-19 指令角度と関節角度の時間変化

3.1.1.3 まとめ

PCV 内部観察用軌道構造体における屈曲モジュールのペデスタル内部での支持を実現するため, 直線モジュールと根元支持部の開発を行った.直線モジュールの構造設計では,寸法と重量・寸 法の関係を求めることによって運搬可能な重量・十分な剛性・幅狭な断面という複数の条件を満 たすことができる寸法を求めた.長尺片持ち軌道の円滑な押出しと固定を両立する根元支持部の 設計において,支持するためのローラを離れた位置に置き,固定するためのブレーキ機構を設け ることが設計解の1つであることを示した.根元支持部の設計においては荷重を受けるローラご とにフレームを分割することにより,根元支持部の可搬性が上がり大荷重への対応が容易になる ことが分かった.一人の作業者が人力で運搬可能な重量である直線モジュールとローラによって 軌道を支持する根元支持部に加え,高さの調整が可能で表面の摩擦係数が小さい作業台2つと万 力を用いることにより,軌道の位置・姿勢の調整と連結部のピン挿入が容易になり短時間での連 結作業が可能であることが分かった.軌道のロール角の調整を可能にする側面支持ローラの設計 において,アジャスタを用いた傾き調整機構と,ばね・ボルトによるローラ押し付け機構を設け ることが設計解の1つであることを示した.この傾き調整機構とローラ押し付け機構をで

屈曲モジュールのモータ取り付け部品の剛性が不足しており,能動関節の制御を難しくしていることが分かった.今後設計を改良し,能動関節の角度制御を実現する.

参考文献

- [3.1-1] 東日本震災関連委員会原子力関係記録作成分科会, 原子力ロボット記録と提言, Technical Report, 日本ロボット学会, 2014, 244p.
- [3.1-2] 淺間一, 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.
- [3.1-3] N. Shiroma, N. Sato, Y. Chiu and F. Matsuno, Study on Effective Camera Images for Mobile Robot Teleoperation, In Proceedings of 13th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication, 2004, pp.107-112.
- [3.1-4] 福井類他,事故炉格納容器内部を常時観察するための屈曲可能なモジュール分割型軌道の開発 -施工性の良い能動的に屈曲可能な軌道モジュールの試作と性能評価-, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, 2021, 2A1-004.
- [3.1-5] R. Buckingham and A. Graham, Nuclear Snake-arm Robots, Industrial Robot: An Int. J., vol. 39, no. 1, 2012, pp. 6-11.
- [3.1-6] G. Endo, A. Horigome and A. Takata, Super Dragon: A 10-m-Long-Coupled Tendon-Driven Articulated Manipulator, IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 4, no. 2, 2019, pp. 934-941.
- [3.1-7] 福島第一原子力発電所2号機原子炉格納容器内部詳細調査ならびに試験的燃料デブリ取 り出しアクセス・調査装置(ロボットアーム)の三菱重工業株式会社神戸造船所における 性能確認試験について[開発担当:三菱重工業株式会社],https://irid.or.jp/topics/ 福島第一原子力発電所2号機20220309/(参照:2022年4月2日).

3.1.2 コンパクトに巻き取り可能な高剛性軽量アーム

3.1.2.1 令和2年度までの実施内容および成果(概要)

これまでの研究開発で、LMPA を用いたコンパクトに巻き取り可能な高剛性アームの関節機構の 基本構造設計を行うとともに、試作により、強度・剛性、溶融・凝固時間などの性能評価を実施 してきた.また、関節部の LMPA の溶融に用いる誘導加熱法の基礎的な検討も併せて行ってきた. このアームは"巻き取る"ことを可能にするために多数の関節を有しているが、この部分のガタ を取り除くために、金属を溶融して固定する独自の方式を提案している.そしてその相転移を素 早くかつ容易に行うために、金属として融点の低い合金を使用している.特に令和2年度は、ア ームのたわみ解析、巻き取り装置の開発、関節の LMPA の溶融状態認識のためのセンサレス温度セ ンシング法の開発を行った.この中で、センサレス温度センシングは、センサを用いることなく 関節部の温度を計測することを可能としたもので、高線量下かつ水濡れ状態での運用可能性を高 めることとなった.

一方で,全長4mまで伸長した際に,アームのたわみによる先端部の変位が4.38mに達することが解析により明らかになった(アーム姿勢は水平を仮定).この対処として,根元側半分の部材(チェーンプレート)の厚みおよび幅をそれぞれ2倍とすることで,先端部の変位を0.48mまで小さくすることが可能であることを令和2年度の成果として明らかにしたが,より効果的な手法についての検討をさらに進めることとしていた.また,アームの到達範囲を拡張するために,伸長済みの関節の角度を変更する機構の開発に取り組むとともに,関節のLMPAの溶融時間の短縮にも取り組むこととしていた.

3.1.2.2 令和3年度実施内容および成果

(1) 関節部 LMPA の溶融時間の短縮

これまでの検討で,関節部のLMPAの溶融時間は単体で5秒以下と高速であったが,実関節として組み立てると,約34秒と大幅に長くなってしまうことが問題となっていた(図3.1-20).この 原因を特定するために関節部の構造(図3.1-21)を改めて詳しく検討すると,発熱材であるブリ キ板の熱がチェーンプレート等に逃げることで,関節部の温度上昇速度が低下している可能性が あった.そこで,関節部を構成する部材をひとつずつ付加して,徐々に関節部を組立てながら加 熱時間の計測を行ったところ,発熱材からチェーンプレート,ならびに,発熱材から皿リベット を経由してチェーンプレートの2経路で発熱材の熱が逃げていることが明らかとなった.この対 策として,発熱材とチェーンプレートの間に断熱材を挿入するとともに,皿リベットの材質変更 を試みた.

なお実験前には、真鍮製の関節ピンも熱容量が大きいため、この部材も加熱時間が長くなる原 因の1つとなっていると予想していたが、計測の結果、関節ピンはむしろ加熱時間の短縮化に寄 与していることが分かった.



図 3.1-21 関節部の構造

まず断熱材としては、AES (アルカリアースシリケート)ウール、紙 (コピー用紙)、ウッドファ イバー、セラミックファイバーを比較した.いずれも断熱材として、すでに民生用途ならびに工 業用途に利用されている素材である.AES ウールは、化学組成としてシリカ質、マグネシア質、カ ルシア質を主成分としており、断熱材・シール材・パッキング材・吸音材などとして、鉄鋼をは じめ、非鉄、石油化学、窯業など幅広い分野で利用されている.また、ウッドファイバーは木の チップを線維化・圧縮した断熱材で、グラスウール(住宅用グラスウール24K)と同等の断熱性能 を有するものである.そしてセラミックファイバーは、アルミナとシリカを主成分とした人造鉱 物繊維の総称であり、耐熱性を有する断熱材として、鉄鋼・窯業・石油・化学など高温工業界で 広く使用されている.これらの材料の耐熱温度ならびに熱伝導率を表 3.1-4 にまとめた.この中 で、比較的熱伝導率が小さく、また加工や入手が容易で、発熱材とチェーンプレートの間に入れ る材料として必要な強度を有することなどから最終的に紙を選択した.

	AESウール	紙(コ ピー用 紙)	ウッドファ イバー	セラミック ファイバー
耐熱温度[℃]	1300	約230	170	1260
熱伝導率[W/m・K]	0.08	0.06	0.038	0.09

表 3.1-4 断熱材の比較

続いて、皿リベットの材質について検討した.比較した材料は、PPS(ポリフェニレンサルファ イド樹脂)、PTFE(四フッ化エチレン樹脂;フッ素樹脂)、PEEK(ポリエーテルエーテルケトン樹 脂)、布入りベークライト(フェノール樹脂)である.これらの耐熱温度ならびに熱伝導率を表 3.1-5に示す.なお、皿リベットは、発熱材をチェーンプレートに固定するために強度も重要であるた め、関連する特性値を併せて表に示す.また、比較のため、現行の皿リベットの材料である鉄 (SWCH10R)の特性も表に示した.これらの中で、耐熱性、難燃性、耐放射線性などに優れ、機械 的強度も高いことから、最終的に PEEK 材を選択した.

	鉄 (SWCH10R)	PPS	PTFE	PEEK	布入り ベークラ イト
耐熱温度[℃]		240	260	240	150~180
熱伝導率[W/m・K]	80	0.29	0.23	0.25	0.17~0.29
引張強さ[MPa]	290	66~86	20~35	71~103	24~45
せん断強さ[MPa]	-	58~64	2	-	-

表 3.1-5 皿リベット用材料の比較

以上の検討結果を、実験により検証した.実アーム関節と同じ形状に組み立てを行い、断熱材 および改良した皿リベットの影響を確認する.チェーンプレートはガラスエポキシ材であり、厚 みは4 mm である.断熱材はコピー用紙を12枚重ねて約 1mmの厚さにして使用した.また、皿リ ベットは PEEK 材を用いて、元の鉄製のリベットと同じ形状に加工した.組み立てたアーム関節は、 図 3.1-22 の右図のようにコイルの中に入れて誘導加熱を行う.また、発熱材の温度は、チェーン プレートの一部を切り欠いて窓を作り、そこからサーモグラフィ(日本アビオニクス株式会社製 G550Pro)を用いて計測した.



図 3.1-22 断熱効果の検証実験のための装置

実験結果を,図3.1-23に示す.関節部の温度が合金融点に到達するまでの時間が,断熱処理前の約34秒から約9秒と大幅に速くなり,設計した断熱の有効性が確認できた.



図 3.1-23 断熱効果の検証実験の結果

(2) アームのたわみ量の改善

令和2年度までの検討で、アームを水平方向に4 mまで伸長すると、アームのたわみによる先端部の変位が4.38mに達してしまうことが解析により明らかになった.この対処として、根元側半分の部材(チェーンプレート)の厚みおよび幅をそれぞれ2倍とすることで、先端部の変位を0.48mまで小さくすることが可能であることを令和2年度の成果として明らかにしたが、より効果的な手法についての検討をさらに進めることとしていた.

令和3年度は、新たな構造として、チェーンプレートの曲げ方向に対して上下端面に薄い金属 板を貼ることで剛性を上げて、アームのたわみを抑える方法について検討を行った.

検討には、3 次元 CAD ソフトである SOLIDWORKS に標準で搭載されている有限要素解析機能を使用した.ただし、この有限要素解析機能は、部材の変形量が大きくなると誤差が大きくなり、それによる警告が出るようになる.実際、これまでのアーム構造をそのまま使って4 mの長さで解析を行おうとすると、ソフトウェアが発する警告により解析ができなかった.そこでまず、変形量が比較的小さい2 mまでの長さのアームで解析を行い、その結果を外挿近似することでアーム長4mでの変形量が推定できるか、確認を行った(図3.1-24).基本的な材料力学の解析により、 片持ち梁の先端のたわみ角dy/dxおよびたわみ量yは、それぞれ

$$\frac{dy}{dx} = \frac{Wl^2}{2EI} + \frac{\omega l^2}{6EI}$$
$$y = \frac{Wl^2}{3EI} + \frac{\omega l^4}{8EI}$$

で与えられる.



図 3.1-24 先端集中荷重ならびに分布荷重を受ける片持ち梁

ここで, W:先端荷重[N], l:アーム長さ[m], E:縦弾性係数[Pa], b:チェーンプレート厚さ [m], h:チェーンプレート高さ[m], ω:分布荷重[N/m], l:断面二次モーメント[m⁴], ρ:密度[kg/m³] である.

実際のアームのパラメータを代入して求めた,アーム先端のたわみ量を表 3.1-6 に示す.用いたパラメータは、W = 9.81[N], E = 2.128×10¹⁰[Pa], b = 0.008[m], h = 0.02[m], ω = 2.8224[N/m], I = 5.33×10⁻⁹[m⁴], ρ = 1800[kg/m³]である.

アームの長さ[m]	4	2	1.8	1.5	1.0	0.5
理論値たわみ量[mm]	2640	280.2	200.7	113.0	31.92	3.796
解析値たわみ量[mm]	-	280.3	200.7	113.0	31.92	3.799
近似式から算出 したたわみ[mm]	2640.7	280.3	200.7	113.0	31.92	3.798
近似式/理論値[%]	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.1

表 3.1-6 アーム先端のたわみの確認

表中,理論値たわみ量は,材料力学の解析により得られた式から求めた値である.また,解析 値たわみ量は,SOLIDWORKSに標準で搭載されている有限要素解析機能を使用した値となっている. そして,解析値たわみ量を使って求めた近似式は,以下のようになった.

 $y = 3.1091x^4 + 28.833x^3 - 0.0361x^2 + 0.0169x$

なお x は、アームの長さである. この近似式により求めたx = 4 mにおけるたわみ量は2640.7 mm となり、理論値たわみ量とほぼ一致する. 以上の検討結果から、SOLIDWORKS に標準で搭載されて いる有限要素解析機能を使用した解析では、まず l = 2 m までの計算を行ってそれに基づいて近 似式を求め、それを用いてさらに大きな l に対する値を外挿的に求めることとする.

さて、令和3年度、検討した新たなチェーンプレートの構造を図3.1-25に示す. 図中、赤い線 が取り付けた薄い金属板を表す. 上図は上面のみ、下図は上下面の両方に金属板を貼り付けてい る. チェーンプレートの材料はガラスエポキシ材であり、金属板は軟ステンレス鋼を仮定した. それぞれの物性値を、表3.1-7に示す. その他のパラメータは、上述の表3.1-6を求めた時に用 いたものと同じである. 金属板の厚さは、1 mm と2 mm で検討した.



図 3.1-25 チェーンプレートに金属板を貼り付けた構造

	ガラスエポキシ	軟ステンレス鋼
縦弾性係数[MPa]	21280	207000
ポアソン比	0.16	0.27
引張強さ[MPa]	105	685
降伏強さ[MPa]	58	292
質量密度[kg/m³]	1800	7860

表 3.1-7 材料の物性値

金属板の厚さが1 mm のときの結果を表 3.1-8 に示す. ここから近似式を求めると, 金属板が 1 枚のとき

 $y = 1.8506x^4 + 13.699x^3 + 0.1446x^2 - 0.0423x$

2枚のとき

 $y = 1.2064x^4 + 6.3147x^3 + 0.5296x^2 - 0.1575x$

となった. これら2式をグラフにしたものを図3.1-26に示す. アーム長4mのときの先端のた わみ量は,それぞれ,1352mm,720mmとなった.

アームの長さ[m] 2 1.8 1.5 0.5 なし 280.3 200.7 113.0 31.92 3.799 金属板の 1枚 139.7 99.71 55.87 15.65 1.844 条件 2枚 71.63 50.91 28.39 7.885 0.9218

表 3.1-8 金属板の厚さ1 mm のときのたわみ量



図 3.1-26 金属板厚が1 mm のときのたわみ量

また,金属板の厚さが2mmのときの結果を表3.1-9に示す.ここから近似式を求めると,金属板が1枚のとき

 $y = 1.6543x^4 + 10.092x^3 + 0.201x^2 - 0.0544x$

2枚のとき

 $y = 0.7184x^4 + 3.5757x^3 - 0.0193x^2 + 0.0138x$

となった. これら2式をグラフにしたものを図 3.1-27 に示す. アーム長4 m のときの先端のたわみ量は、それぞれ、1072 mm、412 mm となった.

アームの長さ[m]		2	1.8	1.5	1	0.5
金属板の 条件	なし	280.3	200.7	113.0	31.92	3.799
	1枚	107.9	76.77	42.81	11.89	1.389
	2枚	40.05	28.36	15.68	4.290	0.4934

表 3.1-9 金属板の厚さ 2 mm のときのたわみ量



図 3.1-27 金属板厚が 2 mm のときのたわみ量

以上の検討の結果,板厚2mmの金属板を2枚貼り付けたチェーンプレートを使うことで,アーム長を4mとして,水平に置いた場合の先端のたわみ量を412mmとすることができることが分かった.これは,令和2年度の検討結果である,根元側半分の部材(チェーンプレート)の厚みおよび幅を2倍とすることで,先端部の変位を0.48mとできたことと同等の結果となった.今回の金属板を貼る方法の場合,板厚2mmのものを2枚張ることにより,チェーンプレートの重量がおよそ1.87倍になることが計算により分かっており,令和2年度の根元側を補強する方法では重量が2.5倍になることを考慮すると,より軽量で剛性の高い構造とすることができたと言える.また,上下面にそれぞれ2mmの厚さの金属板を添付するだけなので,寸法についてもほとんど変化しない.一方,チェーンプレートの高さhを大きくすることで,金属板による補強効果をより強めることができるので,より効果的なhの選定も必要であると考えられる.

(3) 伸長済みの関節の角度を変更する機構

本研究で提案している関節機構は,現時点では,一度繰り出すと,途中で関節角度を変えるこ とが難しい.これを解決する方法について可能性検討を行った.図3.1-28に構想図を示す.誘導 加熱コイルで関節のLMPAを溶かし,関節角度調整機構で角度調整を行う.また,移動用スプロケ ットを使ってアーム上を移動する.令和3年度は構想のみであったので,今後,さらに可能性の 検討を進めたい.



図 3.1-28 伸長済みのアームの関節の角度を変更する機構(構想)

3.1.2.3 まとめ

令和3年度は、関節部 LMPA の溶融時間の短縮、アームのたわみ量の改善、ならびに、伸長済みのアームの関節の角度を変更する機構について検討を行った.

関節部 LMPA の溶融時間の短縮では、LMPA の溶融に時間がかかる理由として、発熱材からチェ ーンプレート、ならびに、発熱材から皿リベットを経由してチェーンプレートの2 経路で発熱材 の熱が逃げていることが明らかとなった.この対策として、発熱材とチェーンプレートの間に断 熱材を挿入するとともに、皿リベットの材質変更を試みた.断熱材として紙を使用し、皿リベッ トの材質を鉄から PEEK 材に変更した改良型の関節を試作して実験を行ったところ、対策前は約 34 秒かかっていた LMPA の溶融時間を約9 秒まで短縮することに成功した.

アームのたわみ量の改善では、チェーンプレートの端面に軟ステンレスプレート(厚さ 2 mm) を 2 枚添付する新しい構造を提案し、その効果を、3 次元 CAD ソフトである SOLIDWORKS に標準で 搭載されている有限要素解析機能を使用して確認した。その結果、令和 2 年度の段階で 4.38 m あ った先端部のたわみ量を、0.412 m と約 10%の大きさまで縮小できることを明らかにした。この構 造は、令和 2 年度に検討した、根元側半分の部材の厚みおよび幅を 2 倍とする方法と比較しても、 アームの寸法が大きくなることや重量増を抑えることができるなど、より効果の高い方法である。

最後に,伸長済みの関節の角度を変更する機構の基本構想の検討を行った.その結果,実現可 能性はあるとの感触を得ている.今後,さらなる検討を進める予定である.

- 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

3.2.1.1 令和2年度までの実施内容および成果(概要)

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.本研究では,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,遠隔操作に有効な映像をオペレータへと提示する.



Measurement inside pedestal

図 3.2-1 映像提示インタフェースの概念図

以下に、令和2年度までの実施内容を簡単に示す.

令和元年度には,複数台のカメラによるオペレータへの映像提示方法の概念検討を行った. 燃料デブリ取り出しにおいて想定される炉内状況について検討するとともに,従来の遠隔操作における映像提示方法について調査し,カメラの仕様や台数等についての検討を行った.

令和2年度には、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視認性の高いカメラ配置設計が2次元上で可能になった.視認性としての指標として、以下の3項目で評価し、最も視認性の高いカメラ配置を出力するアルゴリズムを構築した.

- ・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

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. 3.2.1.2 令和3年度実施内容および成果

令和2年度に構築したカメラ配置設計手法は,静的な環境を想定していた.今後ロボットアームを活用した,燃料デブリの取り出しや放射線量計測が行われる際に,環境の動的な変化やロボットアームによる作業を考慮したオペレータへの映像提示が重要になってくることが予想される. したがって,令和3年度の研究では,アームによる作業を考慮した動的環境におけるカメラ配置手法の提案を行った.

まずは、図 3.2-2 に示すように、ロボットアームによるリーチング動作のシミュレーションを 構築した.リーチング動作とは、ロボットアームの先端を目標位置に近づけるタスクで、図 3.2-2 において目標位置を赤い点として示している.本研究でリーチング動作を選んだ理由として、 燃料デブリ取り出しの初期のサンプリングの動作として「吸引」や「こすり取り」が挙げられ、 これらの動作がリーチング動作に近いためである.また、シミュレーション内では、ロボットを 撮影するカメラ位置を自由に変えることができる.カメラ位置は、図 3.2-3 に示すように極座標 系で指定可能である.



図 3.2-2 ロボットアームによるリーチング動作のシミュレーション



図 3.2-3 カメラ位置指定のための角度パラメータ(極座標系)

次に、作成したシミュレーションを活用することで、強化学習を用いたアームの動きも考慮し たカメラ配置設計手法の構築を行った.強化学習とは、あるタスク(ここではリーチング動作) を人間が明示的にロボットに教えることなしに、ロボットが環境で試行錯誤を繰り返すことで、 徐々にタスク解決のための行動を獲得する手法である.強化学習では、非常に数多くの試行錯誤 が求められるため、一般的にシミュレーション上で実行されることが多い. 本来であれば、アームによる作業を考慮したカメラ配置を求めるためには、オペレータに様々 な視点の映像を提示し、ロボット遠隔操作を用いてアームの作業を行ってもらうことで、作業時 間やアンケートによる評価を行うことが必要である.しかし、行うタスク、使用するロボット、 周囲の環境によって適切な視点が異なることが想定される.したがって、それぞれのタスクやロ ボット、周囲環境ごとに被験者実験を行うのは時間がかかり現実的ではないため、オペレータを 用いた被験者実験の必要がない、強化学習を用いた本手法を提案した.また、今回はリーチング 動作で検証を行ったが、別のタスクにおいても強化学習でロボットが試行錯誤的に行動を獲得で きれば、同様の枠組みでカメラ配置の設計が可能である.

提案手法の流れを以下に示す.

(1) ある1視点から見た映像を入力としてロボットアームがリーチング動作を強化学習で獲得.

(2) 強化学習で得られた動作を用いてリーチング達成までにかかる時間を評価値とする.

(3) これを複数視点で繰り返し、最も良い評価値の視点が最適視点とする.

また、コンセプト図を図 3.2-4 に示す. 図 3.2-4 では、例として 3 つの視点、(a)、(b)、(c)で、 それぞれ強化学習を用いてリーチング動作を獲得した様子を示している. 強化学習を用いて得ら れたリーチング動作の評価値として、(a)では 30 秒、(b)では 10 秒、(c)では 20 秒かかったとす ると、リーチング動作のパフォーマンスが最も良いのは、(b)の視点の映像を提示した時というこ とで、(b)の視点がアームによる作業を考慮した際にオペレータへ提示するべき視点である.



図 3.2-4 強化学習で使うカメラ視点とリーチング達成までにかかる時間(コンセプト図)

提案手法は、強化学習によって得られたロボットにとって見やすい視点は、同様にオペレータ が遠隔操作する際にも操作しやすい視点であろうという仮説に基づいた手法である.この仮説の 妥当性を検証するために追加実験を行った.

まずは、オペレータを用いた被験者実験と、強化学習を用いた行動獲得を図 3.2-5 で比較する. 図 3.2-5 で示すように、どちらも画像が入力として、被験者実験においては人間の脳で、強化学 習においては強化学習アルゴリズムで処理され、行動が出力される.したがって、人間の脳の処 理に近い強化学習アルゴリズムを用いることで、「強化学習によって得られたロボットにとって見 やすい視点は、同様にオペレータが遠隔操作する際にも操作しやすい視点であろう」という仮説 が成り立つ結果が得られると予想した.



図 3.2-5 オペレータを用いた被験者実験と強化学習の動作獲得の違い

本研究では、World models[3.2.1-1]とDeep Q-Network[3.2.1-2](以下,「DQN」と略す.)の2 つの強化学習アルゴリズムを比較した.ここで、DQN は画像入力から行動出力の変換を深層学習の ネットワークで学習する一方で、World models は図 3.2-6 に構造を示すように、画像入力を Variational AutoEncoder(以下,「VAE」と略す.)で、次元圧縮の処理を含むのが特徴である. [3.2.1-3]によると、人間の脳においても視覚情報の次元圧縮が行われているという仮説があるた め、DQN と比較して、より人間の脳に近い強化学習アルゴリズムとして World models を選定した.

DQN と World models のリーチング動作における報酬の比較を図 3.2-7 に示す. 図 3.2-7 において,縦軸が報酬であり,高ければ高いほどリーチング動作のパフォーマンスが高いことを示す. 様々な視点の結果を DQN と World models の手法ごとに示しており,グラフから DQN は視点によってパフォーマンスが変わらない一方で,World models を用いた場合は視点によってパフォーマン スに差が出ることが分かる.

World models を用いた場合の視点の違いによる,より詳細な報酬の比較を図 3.2-8 に示す.図 3.2-8 から分かるように, $\phi = 30^{\circ} \diamond \phi = 45^{\circ} \diamond$ 比較した場合, $\phi = 30^{\circ}$ の報酬が高い.したがって,本提案手法を用いることで $\phi = 30^{\circ}$ の画像はオペレータが遠隔操作でリーチング動作を行う際に操作しやすい視点である可能性が高いことが示唆される.提案手法で得られた遠隔操作のためのカメラ視点と同様な結果が,被験者実験を用いた建設機械の遠隔操作の際のカメラ視点の論文 [3.2.1-4]で得られていることから,強化学習を用いて被験者実験の代替が可能であることが示唆されたが,将来的に,さらなる検証が必要だと考えている.



図 3.2-6 World modelsの構造



図 3.2-7 DQN と World models のリーチング動作における報酬の比較



図 3.2-8 World models のリーチング動作における報酬の比較

次に、あらかじめ得られた3次元環境モデルと現在のオンラインの映像を用いた映像提示手法の検討内容について述べる.実験した環境を図3.2-9に示す.まずは、多視点から撮った映像を元にオフラインでSfMのソフトウェアで処理することで、3次元環境モデルの構築を行った.今回は、SfMのソフトウェアとして RealityCapture[3.2.1-5]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.得られた3次元環境モデルを図3.2-10に示す.



図 3.2-9 実験環境



図 3.2-10 SfM ソフトで構築した 3 次元環境モデル



図 3.2-11 3 次元環境モデルを読み込んだ強化学習用シミュレータ

オフラインで得られた3次元環境モデルは,図3.2-11にあるようにシミュレータ上に読み込み 可能である.このシミュレータを用いて強化学習を行うことで,対象となる周囲環境に合わせた 見やすい視点,つまり,カメラ配置の設計が可能であると考えている.

ただ、シミュレータ上で得られた遠隔操作のために見やすい視点が得られたとしても、現在の カメラをどのように動かせばいいか不明であるという問題点がある.この問題は、シミュレータ 上で現在のカメラの位置と目標となるカメラの位置の両方を表示できれば解決可能である.した がって、現在のオンラインの映像を入力すると、シミュレータ上で現在のカメラ位置を表示する 機能の検討を行った.このタスクはコンピュータビジョンの分野でvisual localization と言わ れる一般的なタスクである.

図 3.2-12 に現在のカメラ位置から得られた画像を示した.図 3.2-9 と比較して分かるように, 3 次元環境モデルを作成した環境とロボットの姿勢や机の上の物体の数や位置が異なるといった チャレンジングな状況を模擬した.visual localization には, COLMAP[3.2.1-6]というソフトウ ェアを用いた.現在のカメラ位置を入力して推定された現在のカメラ位置の結果を図 3.2-13 に示 した.図 3.2-13 では,推定された現在のカメラ位置および方向を赤色の矢印で,仮に設定した目 標のカメラ位置および方向を青色の矢印で示している.図 3.2-13 から分かるように,現在のカメ ラ位置がある程度正確な位置にシミュレータ上で示されており,青の矢印で示す目標のカメラ位 置との比較により,現在のカメラ位置を右に動かすことで目標のカメラ位置に近づくことが分か る.今後も,オフラインで得られた 3 次元環境モデルと実環境のオンライン映像の活用方法につ いて引き続き検討を続けていく予定である. JAEA-Review 2022-032



図 3.2-12 現在のカメラ位置から得られた画像



図 3.2-13 現在のカメラ位置(赤色)および目標のカメラ位置(青色)

3.2.1.3 まとめ

令和3年度は.アームの動きも考慮したカメラ配置設計のために,アームのリーチング運動と 任意のカメラ配置が可能なシミュレーションを構築した.そして,そのシミュレーション上で強 化学習を活用することで,ロボットアームによる作業を考慮したカメラ配置手法の提案をした. さらに,実環境のオンライン映像を活用するための手法の検討を行った.

参考文献

- [3.2.1-1] David Ha and Jürgen Schmidhuber, World Models, 2018, DOI:10.48550/arXiv:1803.10122.
- [3.2.1-2] H.V. Hasselt, et al., Deep Reinforcement Learning with Double Q-learning, Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, vol. 30, no. 1, 2016, pp. 2094-2100.
- [3.2.1-3] James J. DiCarlo, et al., How does the Brain Solve Visual Object Recognition?, Neuron, vol. 73, no. 3, 2012, pp. 415-434.
- [3.2.1-4] R. Sato, et al., Environmental Camera Placements for Skilled Operators in Unmanned Construction, Automation in Construction, vol. 119, 103294, 2020.
- [3.2.1-5] RealityCapture, https://www.capturingreality.com (参照:2022年3月31日).
- [3.2.1-6] COLMAP, https://colmap.github.io (参照: 2022年3月31日).

3.2.2 高臨場感遠隔操縦システム

3.2.2.1 令和2年度までの実施内容および成果(概要)

令和2年度までの実施内容としては、まず、本研究プロジェクトで開発予定のプラットフォームや高剛性軽量アームをPCV内に敷設するための作業の分析を行い、IRIDで開発中の燃料デブリ取り出し作業用アームの構想設計も考慮しながら、遠隔操縦システムの基本コンセプトを立案した.そして、プラットフォームや高剛性軽量アームをPCV内に敷設する作業や、PCV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.その成果として、神戸大学におい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(図3.2-14)が開発された[3.2.2-1][3.2.2-2][3.2.2-3].

3.2.2.2 令和3年度実施内容および成果

令和2年度検討した PCV 内での各種作業を想定した遠隔操縦方法を,令和2年度までに開発し た遠隔操縦実験プラットフォームの基本形に実装した.具体的には,様々なカメラ視点からの遠 隔操縦を直感的に行えるような遠隔操縦システムの実現を目指した検討を行った.またシミュレ ーション環境下での遠隔操縦手法との統合の検討を開始した.

以上の成果をさらに具体的に述べると、これまでの作業用アームの手先に取り付けたカメラと 環境に固定して設置したカメラに加え、別途用意したカメラ用アームの手先に取り付けた可動式 カメラからの映像が取り扱えるように遠隔操縦プラットフォームを拡張し、可動式カメラの導入 によって作業性の向上が見られるかを検証した.また、シミュレーション環境下での仮想カメラ の視点変更への応用も考慮に入れ、可動式カメラの直感的な視点変更方法を検討した.

(1) カメラアームによる可動式カメラの追加による遠隔操縦プラットフォームの拡張

令和2年度までに構築した遠隔操縦プラットフォームにおいて残されていた課題として、リモ ート側のカメラが、作業アーム手先に取り付けたカメラ以外はすべて環境に固定されたカメラで あったことが挙げられる.作業用アーム手先に固定された手先カメラは移動可能ではあるものの、 奥行き情報が把握しにくいという問題点があり、別視点からのカメラ映像が必要とされていた. しかし、別視点映像を提供できるカメラが環境に固定されたカメラのみであると、カメラがとら えるアングルが固定されるため、ある作業に最適なアングルに調整したとしても、それが別の作 業にも適したものであるとは言えず、オペレータに適切な視覚提示ができなくなる恐れがある. この問題を解決するため、作業用アームとは別に、自由にカメラ視点の変更が可能なカメラ専用 のカメラアームの導入が必要と考えた.これまで遠隔操縦における複数画面提示を扱った研究は いくつか存在するが[3.2.2-4][3.2.2-5][3.2.2-6]、アーム先端に取り付けた可動式カメラを扱っ た例は少ない[3.2.2-7].

なお,最近では VR 空間内に環境の 3 次元モデルを構築し,VR 空間内の仮想カメラによる自由 視点での 3 次元モデルの視覚情報を提示する試みもある[3.2.2-8].状態が動的に変化しうる作業 環境の場合は,環境の 3 次元モデルの頻繁な更新が必要になるが,本研究でも有効な手法として 今後検討予定である.今回検討するカメラアームによる視点変更法は,VR 環境下での仮想カメラ の視点変更への応用も可能である. 自由な視線変更が可能な可動式カメラの導入においては、(1)直感的なカメラの位置・姿勢の指 定方法、(2)カメラアームの操作に関するオペレータの負担低減、という2つの課題が考えられる. 課題(1)においては、カメラの位置姿勢を変更する際に基準とするポイントを、作業を遂行する 上で注目すべきポイント(注目ポイント)と一致するように設定することが有効であると考えら れる.ここで、カメラアームに搭載したカメラの視線上で、カメラの焦点距離分だけ離れたポイ ントを Focal Point として定義し、この Focal Point を作業によって決まる「注目ポイント」¹と 常に一致させることで、カメラアームからは常に焦点の合った画像が提供できることになる.な お、Focal Point は使用するカメラレンズの被写界深度の範囲内となるが、カメラアームと作業 アームの双方が干渉しないために確保すべき最低距離も考慮して決定する².

図 3.2-15 に、カメラアーム搭載のカメラの Focal Point と作業の注目ポイント(今回は、作業 用アームのエンドエフェクタ先端に設定)との関係を示した図を示す.図には作業アームの手先 に取り付けた手先カメラも示されている.作業中は、左側のカメラアームの姿勢を、注目ポイン ト(Focal Point と一致)を中心として自由に変更することができることが望ましいが、令和3年 度はこの機能は未実装である.

課題(2)においては、オペレータのカメラアームに関する操作の負担を軽減するために、カメラ アームが作業アームに追従する機能を実装した.これは、オペレータが作業用アームをある作業 ポイントから別の作業ポイントへ大きく移動させる場合、同時にカメラアームも操縦することは 困難かつ複雑で危険性を伴うからである.なお、カメラアームには可動域のリミットを設定する ことで、移動中にアームが伸びきって特異点姿勢となって異常停止し、作業が中断してしまうこ とのないようにしている.

(2) PCV 内での作業を想定した遠隔操縦方法の検討

① 移動可能なカメラ視点を有する遠隔操縦ロボットシステムの作業性評価

カメラアームを導入して拡張した遠隔操縦プラットフォームのリモート側の概観を図 3.2-16 に示す.図 3.2-16において、右側が作業アーム、左側がカメラアームとなっている.カメラアー ムの手先に搭載した可動式カメラは、プラットフォームの俯瞰カメラと同じ USB カメラ (オムロ ンセンテック株式会社製 STC-MCS322U3V)を使用した.また、レンズは焦点距離が 4~13 mm の間 で変更可能なバリフォーカルレンズ (TAMRON 製 M118VM413IR)を使用した.また、同図には作業 対象として製作したタスクボードも示されているが、今回の評価実験では矢印で示す 2 つのスイ ッチのみ使用した.これらのスイッチはひねり式のスイッチであり、作業用アームのエンドエフ ェクタのスリット部にスイッチの突起部をうまくはめ込ませ、スリットから突起部が外れないよ うに適度にエンドエフェクタをスイッチに押し付けながら、エンドエフェクタの回転軸をスイッ チの回転軸周りに正確に一致させてエンドエフェクタを回転させることで初めてスイッチを操作 することができる.図 3.2-17 は遠隔操縦プラットフォームのローカル側の概観を示す.複数ある モニターによって各カメラ視点からの画面を提示しており、作業アームの操作には図 3.2-17 中右 下に位置する Haption 社製 6 自由度力覚インターフェースデバイス Virtuose 6D 35-45 を使用し た.

注目ポイントは作業によって変わり得るが、令和3年度実施したカメラアームの追従フェーズに関しては、作業アームのエンドエフェクタ先端を注目ポイントとして設定しても差し支えないので、そのように設定した.
ここで開発したプラットフォームではFocal Pointをカメラから50 cm 先とした.

評価実験は、作業用アームの手先カメラ以外は固定カメラのみとの場合と、カメラアームに搭載した可動式カメラを追加した場合との比較を行った.以後、固定カメラのみとの場合を「従来手法」、カメラアームによる可動式カメラを追加した場合を「提案手法」と呼ぶ.今回は予備的な実験との位置づけにより、被験者は1名のみで行った.被験者には2か所にあるひねりスイッチを右から左の順にひねる作業を手法ごとに6回繰り返してもらった.提案手法の場合の操縦コックピットの画面配置を図3.2-18に示す.上段中央が作業アームの手先カメラ、上段左が作業環境の右側に固定したカメラ、上段右がカメラアームに搭載した可動式カメラ、下段中央が俯瞰カメラ映像である.一方、従来手法の場合の操縦コックピットの画面配置を図3.2-19に示す.従来手法では、上段右の可動式カメラ画像の代わりに、作業環境の左側に固定したもう1つの固定カメラの映像が提示される.

評価実験で計測されたタスク完了時間の比較を図 3.2-20 に示す. 従来手法より提案手法のほう が完了時間のばらつきが少なく,平均値も作業時間の 13%にあたる 30 秒程度短縮されている. 表 3.2-1 に作業中に被験者が見た画面の回数を示す. スイッチ操作時には作業アームの手先カメラ に加え,奥行き情報を把握するために上段左右の画面を随時参照するのであるが,従来手法では 右側スイッチの操作時には主に上段左側の環境右固定カメラの画面を,左側スイッチ操作時には 上段右側の環境左固定カメラを参照すると期待した. しかし実際には,左画面の参照回数が 62 回 であったのに対して右画面の参照回数が 10 回と極端に少なかった. これは,環境左固定カメラの 配置が左側スイッチの操作のためには適当でなく,奥行き情報が得られにくかったのが原因であ ったと思われる. これは,図 3.2-19(b)の左側スイッチ操作時の右画面をみても,カメラのアング ルがやや後ろ向き方向からであることからも納得できる.

一方,提案手法では,環境左固定カメラの代わりに配置した可動式カメラ画像の参照回数が, 23回と従来手法の右画面の参照回数10回よりも上昇しており,左側スイッチ操作時にカメラア ームが奥行き情報の把握に寄与したことが分かる.実際,図3.2-18(b)の右画面をみても,カメラ アームが左スイッチまでの奥行き情報を良くとらえているのが分かる.その一方で,提案手法に おいても上段左画面(環境右固定カメラ)の参照回数は従来法とほぼ同じであり,右側スイッチ を操作する際にあまりカメラアームが参照されていないことが見て取れる.これは図3.2-18(a) の右画面をみても分かるように,カメラアームのアングルが適切でなく,環境固定カメラよりは 右側スイッチに近寄った画像ではあるものの,奥行情報の把握が難しそうであることからも納得 できる.このように提案手法であっても右側スイッチの奥行き情報の把握が困難であったことは, 図3.2-21に示したスイッチをひねり終わるまでの時間からでも説明できる.ここでの完了時間 は,作業用アームがある程度スイッチに接近してから完全にスイッチをひねり終えるまでの時間 と定義した.左側スイッチでは提案手法で約10秒の短縮を達成しているのに対し,可動式カメラ でも奥行き情報の把握が難しかった右側スイッチでは,従来手法と達成時間にほとんど差が見ら れない.

以上のように、カメラアームに搭載した可動式カメラを導入した提案手法は、作業効率の改善 にある程度有効であることが示せたが、今回の実験では左側と右側のスイッチで作業効率向上度 合に差が見られた.これは、可動式カメラのアングルが奥行き情報を把握するには適切でなかっ たことが原因であり、今後カメラアームの姿勢をオペレータが自由に変更可能とする機能を付加 することで解決できると考えている.図3.2-22に、選択画面に応じた制御モードの切り替えを示 す.図3.2-22(a),(b)は既に令和2年度までで実装した制御モードであり、今後、図3.2-22(c)の ように可動式カメラ画面選択時に適した制御モードを検討し実装していく予定である.また、図 3.2-23に現在検討中の可動式カメラの視点変更時の制御モードを示す.前述のとおり、これら実 環境内での可動式カメラによる視点変更の手法は、そのままシミュレーション環境下での仮想カ メラの視点変更への応用も可能である.

② 高剛性軽量アームのコンフィグレーション制御

本研究プロジェクト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, ー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2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実際に プログラム化し掃引空間を可視化できるようにした.

ここでまず令和2年度の成果を図3.2-24に再掲する.MATLABで作成した簡易的なプログラム によって、高剛性軽量アームの掃引空間を可視化している.高剛性軽量アームのサイズは暫定的 に全長10mで長さ1m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 ときにアームが垂直下方に直線となる場合を0[deg]とし、反時計回りの回転を正となるように定 義する.図3.2-24(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1.2mの円1と座標(1,4)[m]半径1.2mの円2を回避で きている.しかし、各セグメントを1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.一方、図3.2-24(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)[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となり、これは実現可能なコンフィグレーションである.

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.しかしながら、実際に アームを展開した際には、実際の関節角度が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を修正することで補正する、ある種のフィードバック補償を行 う必要がある.例えば、図 3.2-25 には図 3.2-24 (b)で示したアームのコンフィグレーションの目 標を(10,10,10,10,10,10,10,10)[deg]として展開したものの、重力の影響を模 擬した-2[deg]のオフセットと共に、1[deg]の標準偏差の正規分布の誤差変動が加わった場合の展 開後のコンフィグレーションの一例を示す.図に示すように、展開時の各関節の誤差が累積し、 展開修了時のコンフィグレーションは目標のそれとは大きく異なっており、障害物との干渉のリ スクも高まっている. このような誤差の累積を抑えるには、展開時にこの誤差を逐次検知してその後の関節を展開す る際にその誤差情報をフィードバックする必要がある.令和3年度は、この誤差フィードバック の可能性を検証するために、以下のような理想的な状態を想定した.すなわち、アーム先端には カメラが備え付けてあり、環境のおよそのモデリングができている前提で、関節を順次展開する 各段階でカメラの計画通りの理想的な仰角でとらえられるべき映像の予測が可能であり、また実 際にカメラがとらえた画像から実際のカメラの仰角も推定可能とする.この時、次のような角度 修正を行う.

$$\theta_{\text{adj}(i)} = \theta_{d(i)} + K \left(\phi_{d(i-1)} - \phi_{(i-1)} \right)$$

ここに、 $\theta_{d(i)}$ はi番目の関節の計画段階で得られた目標角度、 $\phi_{d(i-1)}$ は、計画段階で得られる ひとつ前の i-1番目の関節を展開した時点でのアーム先端のカメラの理想的な仰角、 $\phi_{(i-1)}$ は実際 に i-1番目の関節を展開した後に手先カメラの映像から推定される現在のカメラ仰角、*K*はゲイ ン、 $\theta_{adj(i)}$ は前段の展開時のカメラ仰角誤差を反映した i番目の関節の修正目標角度である.

図 3.2-26(a) に K = 1.0 の場合,図 3.2-26(b) に K = 0.5 の場合の結果を示す.赤色が何も修正 をしなかった場合のコンフィグレーションであり、これは図 3.2-25 に相当するが、毎回関節の誤 差は乱数で発生させるので、コンフィグレーションは図 3.2-25 とは微妙に異なっている. K = 1.0とした場合でも、ランダムな誤差要因のために最終的なコンフィグレーションは完全には理想的 なものとは一致しないが、概ね一致していることが分かる.興味深いことに、K = 0.5 と設定した 場合でも、最終的なコンフィグレーションは理想状態にかなり近い.ただし、最終的に重要であ るカメラの仰角には相応の誤差がある.

以上のように、高剛性軽量アームにおいて実際にアームを展開した際に、実際の関節角度が事 前に計画した角度からずれた場合、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と いう、ある種のフィードバック補償が有効であることが確認できた.手先カメラのとらえた画像 の理想状態からのずれをフィードバックすることから、一種のビジュアルフィードバックである ということもできよう.ただし今回の検討は、カメラの仰角の計画段階での理想状態からのずれ が正確に測定可能であるとの前提での議論であり、実際にはその推定にもある程度の誤差が含ま れることから、そのような誤差を考慮した検討が必要である.また、アーム先端のカメラ画像で はなく、アーム先端に取り付けた加速度計によって重力方向を検知する方が、正確なカメラ仰角 を推定できる可能性もあるが、高い放射線量のペデスタル内部で、そのようなセンサを想定する のが妥当なのかもよく検討する必要がある.今後は、実際に開発中の高剛性軽量アームの仕様(寸 法、関節数など)に合わせた検証が必要となろう.

3.2.2.3 まとめ

以上述べたように、令和3年度は、まずカメラアームによる可動式カメラの追加による遠隔操 縦プラットフォームの拡張を行い、自由な視線変更を可能とした.カメラアームの導入において は、(1)直感的なカメラの位置・姿勢の指定方法、(2)カメラアームの操作に関するオペレータの 負担低減、という2つの課題が考えられ、カメラアームの直感的な位置・姿勢の指定方法につい て検討を開始するとともに、カメラアームの操作に関するオペレータの負担低減のために、カメ ラアームが作業アームに追従する機能を実装した. PCV 内での作業を想定した遠隔操縦方法の検討に関しては,拡張したプラットフォームを用い て移動可能なカメラ視点を有する遠隔操縦ロボットシステムの作業性評価を行った.カメラアー ムを導入した提案手法は,作業効率の改善にある程度有効であることが示せたが,奥行き情報を 適切に把握するために,カメラアームの姿勢をオペレータが自由に変更可能とする機能を付加す る必要があることが分かった.令和3年度検討した実環境内での可動式カメラによる視点変更の 手法は,そのままシミュレーション環境下での仮想カメラの視点変更への応用も可能である.

高剛性軽量アームのコンフィグレーション制御に関しては,高剛性軽量アームを展開した際に, 実際の関節角度が事前に計画した角度からずれた場合でも,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という,ある種のフィードバック補償が有効であることが確認できた. 後は,実際に開発中の高剛性軽量アームの仕様に合わせた検証を行っていく予定である.

参考文献

- [3.2.2-1] 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 学会学術講演会予稿集, 2A1-01, 2019.
- [3.2.2-2] 辻廣樹, 片山雷太, 永野光, 田崎勇一, 横小路泰義, マスタ・スレーブ型遠隔操縦に おける複数の参照座標系に応じた直感的指令法の提案, ロボティクス・メカトロニクス講演会 講演概要集, 2020, 2P1-P07, オンライン開催(2020/5/27-29).
- [3.2.2-3] H. Tsuji, R. Katayama, H. Nagano, Y. Tazaki, and Y. Yokokohji, Primary-view-Consistent Operation Method of Master Controller in Multiple Screen Teleoperation System, Proc. 2021 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), pp. 110-115, January 11-14, 2021, Iwaki, Fukushima, Japan, 2021.
- [3.2.2-4] B. P. DeJong, J. E. Colgate and M. A. Peshkin, Improving Teleoperation: Reducing Mental Rotations and Translations, Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation 2004 (ICRA' 04), vol. 4, pp. 3708-3714, 2004.
- [3.2.2-5] J. Yang, M. Kamezaki, R. Sato, H. Iwata, and S. Sugano, Inducement of Visual Attention Using Augmented Reality for Multi-display Systems in Advanced Teleoperation, 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2015, pp. 5364-5369.
- [3.2.2-6] R. Sato, M. Kamezaki, S. Niuchi, S. Sugano, H. Iwata, Cognitive Untunneling Multi-view System for Teleoperators of Heavy Machines Based on Visual Momentum and saliency, Automation in Construction, vol. 110, 103047, 2020
- [3. 2. 2-7] D. Rakita, B. Mutlu and M. Gleicher, An Autonomous Dynamic Camera Method for Effective Remote Teleoperation, 2018 13th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI), 2018, pp. 325-333.
- [3.2.2-8] X. Xu, B. Cizmeci, A. Al-Nuaimi and E. Steinbach, Point Cloud-Based Model-Mediated Teleoperation with Dynamic and Perception-Based Model Updating, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol.63, no.11, pp.2558-2569, Nov. 2014, doi: 10.1109/TIM.2014.2323139.
JAEA-Review 2022-032



図 3.2-14 令和 2 年度に開発した複数画面を有する遠隔操縦コックピット



図 3.2-15 カメラアーム搭載カメラの Focal Point と作業の注目ポイントとの関係



図 3.2-16 拡張した遠隔操縦プラットフォーム (リモート側)

JAEA-Review 2022-032



図 3.2-17 拡張した遠隔操縦プラットフォーム (ローカル側)



(a) 右側スイッチ操作時



(b) 左側スイッチ操作時 図 3.2-18 提案手法におけるコックピットの画面配置と実験の様子



(a) 右側スイッチ操作時



(b) 左側スイッチ操作時

図 3.2-19 従来手法におけるコックピットの画面配置と実験の様子



図 3.2-20 タスク完了時間の比較

表 3.2-1 _	上段左右画面を	見た回数の比較
-----------	---------	---------

	上段左画面	上段右画面
従来手法	(環境右固定カメラ)62 回	(環境左固定カメラ)10 回
提案手法	(環境右固定カメラ)63 回	(移動カメラ画面) 23 回



図 3.2-21 左右のスイッチの操作に要した時間の比較







(b) 手先カメラ選択時の制御モード



(c) アームカメラ画面選択時の制御モード

図 3.2-22 選択画面に応じた制御モードの切り替え



図 3.2-23 検討中のカメラアームのカメラ視点変更法



図 3.2-24 軽量高剛性アームのコンフィグレーション計画(令和2年度成果) 赤:セグメントを1つずつ戻した時のコンフィグレーション(a)

関節角度を均等に配分した時のコンフィグレーション(b)

青:障害物

緑:最終コンフィグレーション



図 3.2-25 アーム展開時の各関節角に重力の影響によるオフセットと ランダム誤差が加わった場合



図 3.2-26 カメラの仰角誤差をフィードバックした場合のシミュレーション結果

3.3 放射線モニタリングデバイスの開発

3.3.1 令和2年度までの実施内容および成果(概要)

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,¹³⁷Cs, ⁶⁰Coなどの核種に加えて,核燃料の指標となりうる¹⁵⁴Eu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.令和2年度においては,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.令和3年度は,さらに検出器計上やサイズなどを含めた検討を実施した.

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性があるため、 令和3年度は、高速応答が可能なシンチレーター方式および、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.令和3年度は、さらに中性子照射施設において非同期読出が可能なセンサチップの 評価を実施し、中性子とガンマ線の弁別可能性を検討した.

3.3.2 令和3年度実施内容および成果

3.3.2.1 高速シンチレーターガンマ線・中性子検出器の改良

本研究においては、モニタリングプラットフォーム上で動作する小型軽量の放射線モニタリン グデバイスの研究開発を実施してきた.モニタリングプラットフォーム上および燃料付近での線 量率は、数 Sv 程度以上であることが想定され、このような高線量率下で動作する放射線モニタリ ングデバイス(図 3.3-1)を志向した研究開発を実施してきた.



図 3.3-1 放射線モニタリングデバイスの利用イメージ

高線量率下においては、線量や中性子の有無などを判定するデバイスの開発は行われてきている が、ガンマ線のエネルギースペクトルを同環境で取得するデバイスの開発は発展途上である.ガ ンマ線のエネルギースペクトルを取得するデバイスとしては, CdTe (テルル化カドミウム)や TlBr (臭化タリウム)等の半導体を用いる手法も考えられるが,高線量率下での動作においては,最 終的には計数率が制約条件となり、動作可能な領域までコリメータを用いて計数率を落とす必要 がある. そのため、結果的に今回対象とした小型軽量性を確保できないことが考えられた. 本研 究では、高速の応答性を示しかつ良好なエネルギー分解能を有するシンチレーター型の検出器と 高速の光センサの組み合わせに着目し検討を実施した.特に、ガンマ線の検出器としては自己放 射能がほとんどなく,良好なエネルギー分解能,高速の応答性を有する CeBr₃に着目し開発を実施 した. 国内企業および大学と連携することで小型パッケージングを行った CeBra 結晶を用いた検 出器を製作し,高強度ガンマ線照射場において性能評価を実施した. CeBr3 は減衰時定数およそ 19 ナノ秒、3~4%@662 keVの特性を有しており、本応用に最適であると考えられる.図3.3-2の 上段に、製作した4 mm 角の素子での ⁶⁰Co 照射におけるエネルギースペクトルの線量率依存性を 調べた結果を示す. 1.856 Sv/hの高線量率下においても, 60Coから放出される 1.17 MeV, 1.33 MeVのピーク位置のズレは発生せず動作可能であることが実証された.本検出器を用いることで、 ¹⁵⁴Eu 等の核燃料の指標となるキー核種からのガンマ線スペクトルを高線量率下においても,同定 可能であると考えられる.図 3.3-2の下段には、国内で製作した CeBr3検出器パッケージングの 写真を示している. CeBr₃は潮解性を有するため、精密なパッケージングが必要であるが、研究期 間において目立った劣化がなく長期安定性についても確認した.



図 3.3-2 試作した 4 mm 角 CeBr₃検出器の線量率依存性(上段)と パッケージングの外観例(下段)

さらに小型化(3 mm 角以下)を行うことで、より高い線量率下での動作が可能であると考えられる. 今後、検出器からの信号をディジタル化、高速読出を行う読出基盤の小型化を実施することで、実際の現場への持ち込みを想定したシステムの開発を実施する. 図 3.3-3 に試作した Ethernet 読出型の小型 ADC-DAQ (Analog to Digital Converter-Data Acquisition)の外観を示す.



ADC-DAQ 図 3.3-3 試作した高速読出用の ADC-DAQ 基盤

基盤上には 500 MHz サンプリング, 14 bit 分解能の ADC を搭載し, FPGA により 4 チャネルの信 号処理が可能である.

上記の高線量率下のガンマ線エネルギースペクトル測定に加えて、中性子の検出も放射線モニ タリングにおいては重要である.本研究においては、同様の高速読出シンチレーターのコンセプ トを用いた中性子検出の実証を目的としている.一般的には中性子検出においては発光量に優れ る Eu:LiCAF などが検討されてきたが、本研究における高線量率下での動作には適していない.本 研究では、発光量が小さいが高速性を有する Ce:LiCAF および Li ガラスを対象として検討を実施 してきた. Ce:LiCAF は 40 ナノ秒の減衰時定数を有しており、CeBr₃ に近い計数率での動作が期待 される.図 3.3-4 (左) に Ce:LiCAF でのガンマ線及び中性子に対する応答波形を示す.結晶は中 性子とガンマ線に対して異なる応答波形を示すが、高速の応答を示している.図 3.3-4 (中) に ²⁵²Cf 線源を用いた中性子のエネルギースペクトルを示す.0.5 mm 厚および 0.25 mm 厚のどちらに おいても中性子の明瞭なピークが観測された.検出器の厚みについては検出効率との兼ね合いか ら、今後検討を行っていく.また、ガンマ線存在下での中性子検出可能性について検討を行うた め、⁶⁰Co と ²⁵²Cf に対する応答性を調査した.図 3.3-4 (右) のエネルギースペクトルより、ガン マ線によるスペクトル(黒) は中性子によるエネルギー付与(赤) と比較して有為に低く、中性 子検出が十分可能であることが確認された.



図 3.3-4 Ce:LiCAF と光センサでの読出し例と中性子, ガンマ線スペクトル

今後,ガンマ線信号読出システムと合わせた小型システム化を行うことで,実際の環境で利用 可能なシステムの構築を行っていく.また,高ガンマ線照射環境下での中性子検出試験を予定し ている.

3.3.2.2 シリコン中性子検出器の評価とイメージング試験

前述の高速のパルス計数方式に加えて、中性子の検出においては電荷の付与パターンを用いた 手法の利用可能性を検討してきた. ガンマ線によるコンプトン反跳電子の飛跡と中性子イベント による α および Li の電荷付与の大きさおよびパターンから,識別が可能であると考えられる.本 研究プロジェクトにおいては、中性子の変換材として¹⁰B (200 nm)を表面に塗布した SOI (Silicon On Insulator)による検出器・集積回路一体型デバイスの試作,および評価を実施してきた(図 3.3-5).



図 3.3-5 ¹⁰B を成膜した SOI 検出器の構造

製作したピクセルセンサのピクセルサイズは 36 µm であり, 15~20 mm 角程度の有感面積を有 している.本ピクセルセンサを J-PARC BL10 に置いて照射試験を行い, Gd マスクの透過画像の撮 影を実施した.照射試験においては,中性子を照射中には円形の形をしたエネルギー付与,非照 射時にはガンマ線バックグラウンドの電子飛跡パターンが観測された.またエネルギー付与量も 明瞭な違いが見られた. これらのパターンおよびエネルギー付与を用いて, Gd を用いたマスクの 透過画像を撮像し,中性子とガンマ線の弁別を実施した結果を図 3.3-6 に示す. 一番左の画像は 混在しているときの画像である. ガンマ線様イベントのみ抜き出した場合には Gd の有無に関わら ず一様にイベントが検出された. 一方で中性子様イベントを抜き出した場合には, Gd のマスクの 空きのある部分のみが検出され,ゲージのラインが明瞭に観測された. 観測された空間分解能は 7 μm 程度であった.



図 3.3-6 透過イメージング像とガンマ線・中性子による弁別

また,上記のセンサを実際の現場で使うにあたっては位置情報を常に取得し,そこからの画像 をガンマ線ないし中性子の検出情報と同期して画像化することが必要となる.本研究では検出器 に位置検出マーカーを取り付け,光学的に3次元位置情報を算出することで,得られた放射線検 出信号から画像を3次元的空間に投影,再構成する3次元トモグラフィ手法の開発を行ってきた. 図 3.3-7 に再構成例を示す.本手法により線源が3次元空間に描出されることが確認された.



図 3.3-7 位置プローブを用いた放射線イベントと座標の統合

3.3.3 まとめ

パルス計数方式を用いた高線量率下でのガンマ線エネルギースペクトルの取得に成功した [3.3.3-1][3.3.3-2][3.3.3-3].また,中性子イベントの弁別が可能であることが確認された.また,積分方式を用いた電荷付与パターン識別を用いて中性子透過画像の取得に成功した[3.3.3-4]. 今後,小型化した基盤を用いることでセンサユニットの小型化を行い,実際の現場で利用可能な サイズとし実証を実施していく.また,位置情報と合わせて3次元トモグラフィシステムの実証・ 高度化試験を行っていく.

参考文献

- [3.3.3-1] Kaburagi, M., Shimazoe, K. et al., 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. 3. 3-2] Kaburagi, M., Shimazoe, K. et al., Identification and Quantification of a ⁶⁰Co Radiation Source under an Intense ¹³⁷Cs Radiation Field Using an Application-Specific CeBr₃ Spectrometer Suited for Use in Intense Radiation Fields, Journal of Nuclear Science and Technology, 2022, pp. 1-10.
- [3.3.3-3] Kaburagi, M., Shimazoe, et al., Development of the Multi-Cubic γ -ray Spectrometer and its Performance under Intense ¹³⁷Cs and ⁶⁰Co Radiation Fields, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, vol. 1010, 165544, 2021.
- [3. 3. 3-4] 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.

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

3.4.1 令和2年度までの実施内容および成果(概要)

本研究課題では、原子炉 PCV 内の環境把握のために、カメラ等から得られたデータから環境モ デルを立体復元するための画像処理手法と、軌道上を移動するカメラにより収集される画像に開 発手法を適用する手法について研究開発を行うことを目的としている.これまでに、廃炉現場で 撮影された画像の解析やシミュレーションツールを用いた実験により、立体復元の精度向上のた めの画像取得条件に関する調査や検証、立体復元に有効な画像の選択手法について研究開発を行 ってきた.さらに、炉内モニタリングを想定した検証実験を行うための模擬環境の設計について も行った.

3.4.2 令和3年度実施内容および成果

令和3年度は、令和2年度までに行った立体復元手法の研究開発の継続実施とともに、開発手 法による立体復元処理を適用する画像の収集・管理を行うためのシステムの設計、および開発に 着手した.また、具体的な検証実験等を行うための模擬実験環境の整備を行った.実施内容の詳 細については、以下に記述する.

立体復元手法の研究開発においては、シミュレータを活用した直線軌道撮影における計算時間 短縮を考慮した立体復元、および立体復元結果の精度検証を行った.具体的には、令和2年度に 引き続き、カメラが直線状のレール上を移動して画像を取得する場合に着目し、3Dコンピュータ グラフィックスソフトを用いたシミュレーションにより、立体復元用のテストデータを作成し、 この条件に対する SfM (Structure from Motion) と MVS (Multi-View Stereo) 使用時における計 算時間短縮を考慮した立体復元の有効な画像選択条件調査、および得られた立体復元結果につい て精度の検証を行った.精度検証にあたり、撮影条件を調節可能である必要があることから、カ メラ設定(位置、向き、焦点距離、画像の解像度など)、光源設定(位置、方向、明るさ(単位: ワット)、光の色など)を、自由に変更可能な 3D コンピュータグラフィックスソフト Blender [3.4-1]を用いて立体復元用のテストデータの作成を行った.特に令和3年度は、Blender による仮想 空間内に、現在開発中である軌道構造自動施工システムで用いる観察ユニット(図3.4-1)による 撮影を模擬する実験環境を構築した(図3.4-2).







図 3.4-2 Blender で構築した環境

ここで立体復元を行うために,撮影対象物は,木目のテクスチャを貼り付けた高さの異なる直 方体(図3.4-2および表3.4-1)とし,上方,下方,側方,前方に錆が付着している金属画像のデ クスチャを貼り付けている.軌道構造自動施工システムの1リンク分上を観察ユニットが移動し て画像撮影する状況を模擬して,直線状レール上をカメラの撮影角度が固定された状態(図3.4-3)で横方向に移動している間に画像撮影を行った.この環境における立体復元のための対象物の 寸法と位置,カメラの初期位置,カメラの移動方向を表3.4-1に示す.カメラモデルは,焦点距 離を50 mm,画像解像度を1280 px×960 pxとし,高さ2.5 mに設置した直線状レール・モデル 上を,図3.4-2 の左から右方向へ0.01 m移動するごとに1枚の画像を取得するものとした.ま た,カメラの撮影角度は固定とし,60度および70度の場合に対し,各撮影角度において701枚 を作成した.シミュレーションの様子をURL[3.4-2]にアップロードした.

直方体 ID	寸法(縦×横×高さ)	重心位置
Box 1	0.50 m×0.50 m×0.50 m	(-3.00, 2.00, 0.25)
Box 2	$0.50 \text{ m} \times 0.50 \text{ m} \times 0.60 \text{ m}$	(-2.00, 2.00, 0.30)
Box 3	0.50 m \times 0.50 m \times 0.70 m	(-1.00, 2.00, 0.35)
Box 4	$0.50 \text{ m} \times 0.50 \text{ m} \times 0.80 \text{ m}$	(0.00, 2.00, 0.40)
Box 5	$0.50 \text{ m} \times 0.50 \text{ m} \times 0.90 \text{ m}$	(1.00, 2.00, 0.45)
Box 6	$0.50 \text{ m} \times 0.50 \text{ m} \times 1.00 \text{ m}$	(2.00, 2.00, 0.50)
Box 7	0.50 m×0.50 m×1.10 m	(3.00, 2.00, 0.55)

表 3.4-1 撮影対象物およびカメラの情報 直方体情報

カメラ情報

カメラ ID	カメラ初期中心位置	進行方向
Camera	(-3.5, 1.00, 2.50)	+Х



図 3.4-3 カメラの撮影角度(側面図)

前述の条件にて仮想空間で撮影した画像に対して SfM-MVS 処理を適用することで,配置された 対象物の立体復元精度について検証を行った.この実験では,SfM-MVS 手法として立体復元手法の ベンチマーク[3.4-3][3.4-4]で紹介されている,OpenSfM[3.4-5]と OpenMVS[3.4-6]を用いた.図 3.4-4 は,立体復元の結果を示しており,1つの撮影角度で得られた画像のみから復元されたモデ ルは,実際の対象物と比べて全体的に傾いた状態になっており,鉛直下向き方向と撮影方向の角 度 ϕ (図 3.4-3)が大きくなるにつれ,その傾斜角度が大きくなることを確認できた(図 3.4-5).

また,図 3.4-6 は OpenSfM で得られたカメラ姿勢(位置および向き)推定結果を示す.この結果から,直線軌道撮影の推定はできているものの,カメラの高さ情報の推定はできないことが分かった.つまり,直線軌道撮影した画像群による立体復元において,単一角度での撮影した画像の適用だけでは復元限界があると言える.



(a) 撮影角度 60 度のみを使用した場合



(b) 撮影角度 70 度のみを使用した場合図 3.4-4 立体復元結果



図 3.4-5 立体復元の傾斜角度



(a) 撮影角度: 60 度



(b) 撮影角度: 70 度

図 3.4-6 カメラの姿勢推定結果

SfMを用いた立体復元計算では、撮影条件として、平行移動を含み視差角度が15度前後とする ことが有効である[3.4-7]と一般的に言われており、別角度で撮影した画像群を用いることで、擬 似的なステレオ視となって立体復元精度が上がる可能性があると考えられる.そこで、直線軌道 撮影した画像群による立体復元におけるカメラ姿勢推定を改善するために、撮影角度が15度以内 の2種類の撮影角度で生成した画像を用いて立体復元を行い、カメラの高さ情報の推定ができる かどうかを検証した.図3.4-7 に、撮影角度60度および70度の両方で撮影された画像(画像枚 数:1402枚)を使用した場合の復元結果を示す.



(a) 俯瞰図

(b) カメラの姿勢推定

図 3.4-7 撮影角度 60 度・70 度の両方を使用した場合の立体復元結果

この結果から,複数の撮影角度で撮影した画像を使用することで,立体復元モデルおよびカメ ラの姿勢推定の精度が改善されることが分かった.

また、直線軌道撮影の場合、連続した数フレームの画像群は類似しているため、画像特徴量も 類似していると考えられる.2つの画像間の対応関係を求める SfM の計算を行う場合、画像特徴 量が類似している画像を SfM に適用する必要がないと考えられる.そこで、一定周期で抽出した 画像のみを SfM に使用したとしても、立体復元に要する時間を削減しつつ、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、一定周期で抽出した画像枚数での計算時間削減お よび復元精度の検証を行った.この実験では、前述と同様に撮影角度を 60 度・70 度の 2 種類に 設定し、使用する立体復元手法も前節と同様とした.表 3.4-2 に示す 13 個のデータセットを適用 して、この実験を行った.

画像選択方法(抽出間隔)	画像枚数
すべての画像を使用	1402
2 フレーム間隔(0.02 mごと)撮影の画像を使用	702
4 フレーム間隔(0.04 mごと)撮影の画像を使用	352
5 フレーム間隔(0.05 mごと)撮影の画像を使用	282
7 フレーム間隔(0.07 mごと)撮影の画像を使用	202
10 フレーム間隔(0.1 mごと)撮影の画像を使用	142
14 フレーム間隔(0.14 mごと)撮影の画像を使用	102
20 フレーム間隔(0.2 mごと)撮影の画像を使用	72
25 フレーム間隔(0.25 mごと)撮影の画像を使用	58
28 フレーム間隔(0.28 mごと)撮影の画像を使用	52
35 フレーム間隔(0.35 mごと)撮影の画像を使用	42
50 フレーム間隔(0.5 mごと)撮影の画像を使用	30
70 フレーム間隔(0.7 mごと)撮影の画像を使用	22

表 3.4-2 検証に使用した画像選択方法およびその画像使用枚数

図 3.4-8 に立体復元に使用した画像枚数と復元結果に要した時間との関係を両対数グラフで表 したものを示す、この結果から、立体復元に使用した画像枚数と復元結果に要した時間の関係は べき乗則になっていることが分かる. さらに、すべての画像を使用時(画像枚数: 1402枚), 14フ レーム間隔(0.14 mごと)撮影の画像を使用時(画像枚数:102 枚),70 フレーム間隔(0.7 mご と) 撮影の画像を使用時(画像枚数:22枚)の立体復元結果を図3.4-9に示す.



図 3.4-8 使用画像枚数と SfM-MVS に要した時間の関係(両対数グラフ)



(b) 102 枚 図 3.4-9 立体復元結果例

(c) 22 枚

この結果から、直線軌道で撮影すれば、ある程度時間間隔で選択した画像のみを使用すること で、立体復元結果を得ることができることが分かる.しかしながら、画像枚数が少なすぎると、 対象物の立体復元結果を得ることができないことが分かった.

さらに、得られた立体復元結果を定量的に評価するために、ICP(Iterative Closest Point) アルゴリズム[3.4-8]に基づいて精度評価を行った. [Blender で生成した復元対象物を点群変換 したデータ』と『MVS で得られた密な点群データ』を ICP アルゴリズムに基づいてマッチングを行 い、データ間の差異、ずれ量に基づいて、立体復元結果の精度を計算する(図3.4-10).



図 3.4-10 ICP に基づいた 2 つの点群データのマッチング

このマッチングでは、対応点ペア距離の最大値を5 cm として、SfM-MVS で得られた高密度点群 データのうち、Blender で生成したオブジェクトを点群変換したデータと5 cm 以内に収まってい る点群の数の比率を適合率として評価を行う. 立体復元に使用した画像枚数と復元結果の適合率 の関係を片対数グラフで表したものを図 3.4-11 に示す.



図 3.4-11 使用画像枚数と立体復元結果の適合率の関係(片対数グラフ)

この結果から、画像の枚数が多くても、適合率が一番高くならないため、復元結果に要する時 間や精度を考慮すると、直線軌道撮影においてある程度の間隔で画像選択を行った方が望ましい ということが分かった.

また,立体復元処理を適用する画像の収集・管理を行うためのシステムの設計および開発として,システムの構成要素の検討およびプロトタイプの試作を行った.具体的な内容を以下に述べる.

立体復元手法を炉内環境モニタリングシステムに適用するためには、カメラから画像をオンラ インで収集して蓄積し、一定の画像枚数に達した時点で立体復元手法を適用して復元モデルを生 成するというプロセスが必要不可欠である.また、取得した画像や生成したモデルを保存、管理 して必要に応じた呼び出しを行える必要がある.ここでは、オンラインで画像データを時系列で 収集して蓄積し,指定した枚数が蓄積された際に立体復元処理を適用してモデル生成,提示を行 うという一連のプロセスを自動的に実行するための画像収集・管理システムの基本設計とプロト タイプの開発を行った.

まず,開発したシステムの構成や各プロセスについて述べる.図 3.4-12 に画像収集・管理システムの構成を示す.



図 3.4-12 立体復元処理を適用するための画像収集・管理システムの構成

このシステムのハードウェアは、画像を取得するカメラ、画像の蓄積・管理を行うストレージ および立体復元処理を行う計算機で構成されている.まず、カメラにより取得された画像はスト レージに保存され、蓄積されていく.同時に、画像の取得開始からストレージのモニタリングを 行う(画像の収集・管理).そして、蓄積された画像枚数が設定された既定値に達すると、計算機 上で立体復元計算を開始する(立体復元処理).

立体復元計算には、SfM-MVS を用いた. この SfM-MVS 処理の実行により、疎な点群データおよび テクスチャ付きメッシュデータが生成される. 最後に、SfM-MVS 処理によって生成された立体復元 モデルをディスプレイ上に描画する. この時、SfM 処理で生成された点群データから MVS 処理に よるテクスチャ付きメッシュデータの生成までの計算に時間を要するため、それぞれの復元結果 を逐次的にディスプレイ上に描画することとした. この画像取得から立体復元モデルの提示まで の一連のプロセスを統合的に実行するシステムのプロトタイプを試作し、基本的な動作実験を行 った.

試作したプロトタイプのハードウェア構成は表 3.4-3 のとおりである.

表 3.4-3	試作し	、た画像収集	•	管理シス	テム	のハー	・ド	ウェ	アオ	構成
---------	-----	--------	---	------	----	-----	----	----	----	----

ハードウェア	品名・型式					
カメラ	GoPro Hero7(ストリーミングレート: 3 fps, 解像度:640 px×480 px)					
計算機	Dell G5 (CPU:Core i7 2.2GHz, メモリ:16 GB RAM, OS:Ubuntu 16.04 LTS)					
ストレージ	内蔵 HDD/SATA 接続 1 TB (G5)					

このシステムは、ロボット用のオープンソースミドルウェアである Robot Operating System (ROS) [3.4-9]を用いて構築した.プログラミング言語は Python2.7 を用いて、画像の収集・管 理、復元計算開始のトリガー発生タイミングの管理、立体復元処理の実行を行った.

次に、開発したプロトタイプにおける画像の取得から立体復元モデルの提示までの一連のプロ セスを示す.まず、カメラと計算機は無線LANのアドホックモードで接続され、カメラからスト リーミングされた画像は計算機の内蔵 HDD に保存される.画像が保存されたストレージ内のディ レクトリは、画像取得開始時よりモニタリングされており、既定値(本実験では 100 枚に設定) に達すると立体復元計算開始のトリガーを発生させる.トリガーにより、SfM-MVS 処理が実行され る.SfM-MVS 処理には、OpenSfM および OpenMVS を使用した.SfM-MVS 処理の実行は python2.7 か らの外部コマンドの実行(subprocess モジュール)により行った.SfM-MVS 処理による復元結果 の疎な点群およびテクスチャ付きメッシュデータは計算が終わりしだい、OpenMVS の Viewer[3.4-6]を用いてディスプレイ上に逐次描画することとした.

次に試作したプロトタイプの基本的な動作実験について述べる.復元対象は、0.1 m 角の木製 ブロック(高さ0.3,0.4,0.5 m)を幅1.2 m,奥行1.0 m の範囲に並べたステップ状のフィール ドとした.このフィールドおよび実験装置を図3.4-13 に示す.このフィールドを、レール(ASK 社製トラックシステム,全周長さ約6.7 m)上に設置された台車にカメラを設置して撮影を行っ た.カメラの設置高さは、約1.2 mとした.このレール上の台車を移動させることによって、フ ィールドの撮影を行った.今回、トリガータイミングである画像枚数100枚で台車がレール上を ほぼ一周する速度となるように手動で台車の移動を行った.カメラからのストリーミング画像の ストレージへの保存の開始に合わせて、カメラが設置された台車を移動させてフィールドの全方 位からの画像を取得した.画像の保存枚数が100枚に達すると、外部コマンドとして OpenSfM が 自動的に実行され、立体復元計算が開始されたことを確認した.SfM 処理により得られた復元結果 である疎な点群および推定されたカメラ軌道を図3.4-14(a)に示す.復元された疎な点群ととも に、推定されたカメラ軌道がレール配置と同様に長円形になっていることが確認できる.画面上 で SfM 処理の結果が描画された後も、バックグランドでは MVS 処理が実行された.得られた MVS 処理の復元結果であるテクスチャ付きメッシュデータを図3.4-14(b)に示す.SfM 処理の復元結果 と比べて MVS 処理の復元結果は視認性が向上していることが確認できる.



図 3.4-13 木製ブロックのフィールドおよび実験装置



(a) SfMによる疎な点群データ
 (b) MVS によるテクスチャ付きメッシュデータ
 図 3.4-14 試作した画像収集・管理システムによる立体復元結果

このことから、開発した立体復元処理を適用するための画像収集・管理システムのプロトタイ プが、画像取得から立体復元モデル提示までの一連のプロセスを統合的に実行可能であることが 確認できた.ここで、SfM 処理および MVS 処理の計算時間はそれぞれ約 668 秒および約 641 秒で あり、計算時間の合計は約 1309 秒(約 22 分)となった.作業現場においてオペレータのニーズ に合わせて、オンデマンドで生成された立体復元モデルを参照するためには立体復元処理の高速 化が課題となる.この課題の解決のため,立体復元処理にかかる計算負荷の低減や計算アルゴリズムの高速化等を検討する必要がある.そこで、本実験ではSfM-MVS処理にOpenSfM,OpenMVSを使用したが、リアルタイムで自己の位置を推定しつつ同時に空間の地図を作成する Visual SLAMの一手法である ORB-SLAM[3.4-10]と OpenMVS を組み合わせた手法[3.4-11]や REMODE[3.4-12]等の代替手法の検討も進めていく.今後は作業現場において生成された立体復元モデルのオンデマンド参照を可能とすることを目標に、SfM 処理に用いる立体復元計算のアルゴリズムの違いが計算時間や復元精度にどのような影響を及ぼすかについて検証を行っていく.

さらに、模擬実験環境の整備として、令和2年度に基礎設計を行った東京大学において研究開 発が実施されている軌道構造自動施工システムのプロトタイプを用いた模擬実験や画像収集に関 する検証実験を実施するための実験環境の具体的な設計および構築を行った.図3.4-15は、本プ ロジェクトの連携ラボが設置されている、原子力機構楢葉遠隔技術開発センターの試験棟内に構 築した木製実験環境のうちペデスタルを模擬した部分についての外観を示している.軌道構造自 動施工システムのプロトタイプとして開発された単関節軌道モジュールを模擬実験環境の開口部 分から展開する試験、また、展開した単関節軌道モジュール上を移動させた観察ユニットによっ て画像撮影実験を行い(図3.4-16)、動作確認を行うとともに、課題の抽出を行った.



図 3.4-15 構築した模擬実験環境の外観



図 3.4-16 模擬環境内での観察モジュールを用いた画像撮像実験実施の様子

3.4.3 まとめ

本研究課題では、令和2年度までに研究開発を行った立体復元手法の研究開発を継続して行う とともに、開発手法による立体復元処理を適用する画像の収集・管理を行うためのシステムの設 計および開発に着手した.また、具体的な検証実験等を行うための模擬実験環境の整備および動 作検証実験を行った.撮像条件が与える立体復元結果への影響について検証するシミュレータを 開発し、実験によって直線軌道撮影において複数のカメラ姿勢で取得した画像を用いることで1 つの固定カメラ姿勢で画像取得した場合に対して立体復元精度が向上することが確認された.ま た、カメラによる画像取得から保存、立体復元処理までをオンラインで行う画像収集・管理シス テムの設計と基礎的な開発を行い、動作実験を行った.さらに、整備した模擬実験環境を楢葉遠 隔技術開発センターに構築し、軌道構造自動施工システム開発グループと共同で単関節軌道モジ ュールおよび観察ユニットによる画像撮影に関する動作検証を実施した.

参考文献

- [3.4-1] Blender, https://www.blender.org(参照:2022年4月8日).
- [3.4-2] Blender による直線軌道映像シミュレーションの様子,

https://www.youtube.com/watch?v=sgYxvPkP01o(参照:2022年4月8日).

- [3.4-3] Stathopoulou E.-K., Welponer M., Remondino F., Open-source Image-based 3D Reconstruction Pipelines: Review, Comparison and Evaluation, 6th International Workshop LowCost 3D-Sensors, Algorithms, Applications, 2019, pp. 331-338.
- [3.4-4] Kataria R., DeGol J., Hoiem D., Improving Structure from Motion with Reliable Resectioning, 2020 International Conference on 3D Vision (3DV), 2020, pp.41-50.
- [3.4-5] OpenSfM, https://github.com/mapillary/OpenSfM(参照:2022年4月8日).
- [3.4-6] OpenMVS, https://github.com/cdcseacave/openMVS(参照:2022年4月8日).
- [3.4-7] 松下康之他(著), 八木康史, 斎藤英雄(編), コンピュータビジョン 最先端ガイド5 -CVIM チュートリアルシリーズー, アドコム・メディア, 2012, 97p.
- [3.4-8] Besl P. J. and McKay N. D., A Method for Registration of 3-D Shapes, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI), vol.14, no.2, 1992, pp.239-256.
- [3.4-9] Robot Operating System, https://www.ros.org (参照: 2022年4月8日).
- [3.4-10] Mur-Artal R., Montiel J. M. M. and Tardós J. D., ORB-SLAM: A Versatile and Accurate Monocular SLAM System, IEEE Transactions on Robotics, vol. 31, no. 5, 2015, pp. 1147-1163.
- [3.4-11] Wright T., Hanari T., Kawabata K., Lennox B., Fast In-situ Mesh Generation Using Orb-SLAM2 and OpenMVS, Proceedings of 17th International Conference on Ubiquitous Robots (UR), 2020, pp. 315-321.
- [3.4-12] Pizzoli M., Forster C. and Scaramuzza D., REMODE: Probabilistic, Monocular Dense Reconstruction in Real Time, 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2014, pp.2609-2616.

3.5 人材育成の取り組み

本研究課題では、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36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堀した 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 3.5-1 に示す.

月日	時間	担当教官	講義内容
10月6日	14:55-16:40	岡本教授	福島第一原発事故概要
10月13日	同上	岡本教授	通常発電所の廃止措置
10月20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27日	同上	鈴木特任教授	福島第一原発の廃止措置概要(2)
11月10日	同上	鈴木特任教授	燃料デブリ管理技術
11月17日	同上	松崎教授	環境影響評価(オフサイト含み)
11月24日	同上	高橋教授	放射線計測技術
12月1日	同上	長谷川教授	核種分析技術
12月8日	同上	禹特任講師	ロボット技術と遠隔操作技術
12月15日	同上	淺間教授	廃止措置のためのロボット技術の 応用
12月22日	同上	斉藤准教授	廃棄物管理
1月5日	同上	寿楽教授	リスクコミュニケーションと社会 的リスクの影響
1月12日	同上	岡本教授	リスク評価とリスク管理

表 3.5-1 廃止措置特論 E の概要

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.

また,学生を対象とした福島第一原発および楢葉遠隔技術開発センターの見学を計画している. 本来であれば,令和3年度の3月22日に見学を実施する予定であったが,新型コロナウイルス蔓 延防止対策により実施を延期した.今のところ,令和4年9月16日の実施を予定している. 本研究は、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.その成果として、 学術雑誌3本、国際発表3件、国内発表7件の論文の第一著者が学生となっている.以下に各研 究項目の学生の研究業績を示す.

・モニタリングプラットフォームの構築

- Ryota Yokomura, et.al, Automated Construction System of a Modularized Rail Structure for Locomotion and Operation in Hazardous Environments: Realization of Stable Transfer Operation of Different Modules in Multiple Load Directions, the Proceeding of the IEEE/SICE International Symposium on System Integration, 2022.
- ・横村亮太ら、モジュール分割型軌道構造体のための多様なロボット姿勢条件での3次元施工
 -状態遷移図に基づく課題の発見とロボット動作が把持部の姿勢に与える影響の分析-、第27
 回ロボティクスシンポジア、2022.
- ・横村亮太ら,モジュール分割型軌道構造体のための多様なロボット姿勢条件での3次元施工, 第7回次世代イニシアティブ廃炉技術カンファレンス(NDEC-7), 2022.
- ・寺島玄ら,相対位置姿勢・接触状態の可視化による軌道構造体の遠隔施工支援,第7回次世代イニシアティブ廃炉技術カンファレンス(NDEC-7),2022.
- ・後藤雅貴ら、事故炉格納容器内部を常時観察するための屈曲可能なモジュール分割型軌道の 開発、第7回次世代イニシアティブ廃炉技術カンファレンス(NDEC-7), 2022.
- ・鈴木悠太ら,原子炉内部調査用モニタリングアームの開発~コンパクトなアーム巻取装置の 試作と実アーム関節の非接触温度推定~,日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演 会 2021, 2021.
- ・遠隔操作インタフェースの開発
 - Haoxiang Liu, et.al., Viewpoint Selection without Subject Experiments for Teleoperation of Robot Arm in Reaching Task Using Reinforcement Learning, the Proceeding of the IEEE/SICE International Symposium on System Integration, 2022.
 - Ziheng Chao, et.al., Estimation of Radiation Source Distribution Using Structure Information for Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Reactor, the Proceeding of the IEEE/SICE International Symposium on System Integration, 2022.
 - Ziheng Chao, et.al., Radiation Distribution Estimation with Non-directional Detector Using Plane Source Model, Advanced Robotics, 2022.
 - Hao Xu, et.al., Leakage Position Estimation of Cooling Water Using a Stereo Camera for Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, Applied Sciences, 2021.
 - Takuya Kishimoto, et.al., Path Planning for Localization of Radiation Sources Based on Principal Component Analysis, Applied Sciences, 2021.

・放射線モニタリングデバイスの開発

・Agus Nur Rachman, et.al, Characterization of Time of Flight Compton Camera for Radiation monitoring, 日本原子力学会, 2022 年春の年会, 2022.

・Agus Nur Rachman, et.al., Study on Time-of-Flight Compton Imaging System for Environmental Monitoring, 日本原子力学会, 2021 年秋の大会, 2021.

・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

原子力機構は指導学生がいないため、令和3年度の発表はないが、クロスアポイントメントの成果として令和4年度は中村先生の学生が発表予定.

研究を進めるために必要な研究会として、東京電力との意見交換会(令和3年9月21日)を 開いた.具体的には、本研究課題の取り組みと現在までの研究成果を紹介し、ペデスタル内部の モニタリングが必要な領域といった現場からのニーズ等についての意見やコメントを収集した. 3.6 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 との議論を行った.

- 第17回プロジェクト会議
 開催日:令和3年4月12日
 場所:オンライン (Zoom)
 出席者:連携ラボ(東京大学)11名,連携ラボ(原子力機構)4名,再委託(福島大学,神戸大学)2名
 主な議題:
 - ◆ 令和2年度におけるプロジェクトの進め方について
 - ◆ 基礎基盤的研究成果の現場適用について
- 第18回プロジェクト会議
 開催日:令和3年5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)2名
 主な議題:
 - ◆ 軌道構造システムの開発状況について
- 第19回プロジェクト会議
 開催日:令和3年6月15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)2名
 主な議題:
 - ◆ R4 年度統合検証実験について
 - ◆ 内部モニタリングにおける問題設定およびシナリオの検討について
- 第 20 回プロジェクト会議
 開催日:令和3年7月15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)2名
 主な議題:
 ◆ 内部モニタリングにおける問題設定およびシナリオの検討について
 - ♦ SII2022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21回プロジェクト会議
 開催日:令和3年9月13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)2名
 主な議題:

- ◆ 連携ラボ推進会議の報告について
- ◆ 各研究項目の実施状況報告
- ◆ 研究成果の学会発表について
- 東電との意見交換会
 開催日:令和3年9月21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)2名
 主な議題:
 - ◆ 各研究項目の紹介
 - ◆ 研究成果の現場適用のための意見交換

第22回プロジェクト会議
 開催日:令和3年10月11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:

- ◆ 各研究項目の実施状況報告
- ◆ 中間評価の報告について
- 第23回プロジェクト会議
 開催日:令和3年11月17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)2名
 主な議題:
 - ◆ 各研究項目の実施状況報告
 - ◆ 中間評価の振り返りおよび今後の進め方について
 - ◆ 楢葉実証実験について
- 第24回プロジェクト会議 開催日:令和3年12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)2名,再委託(福島大学,神戸大学)2名

主な議題:

- ◆ 各研究項目の実施状況報告
- ◆ 中間フォローについて
- ◆ 福島第一見学ツアーについて
- ♦ Sony 社の Spresense カメラの検討について
- 第25回プロジェクト会議
 - 開催日:令和4年1月13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)2名,再委託(福島大学,神戸大学)2名,東電1名

- 主な議題:
 - ◆ 各研究項目の実施状況報告
 - ◆ 令和4年度業務計画書および積算について
 - ◆ 軌道構造システムの楢葉検証実験について
- 第26回プロジェクト会議
 開催日:令和4年2月21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)2名
 主な議題:
 - ◆ 各研究項目の実施状況報告
 - ◆ 福島第一見学ツアーについて
 - ◆ カメラモジュールの照射実験の結果報告
- 第27回プロジェクト会議
 開催日:令和4年3月18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)2名
 主な議題:
 - ◆ 令和3年度成果報告書の作成について
 - ◆ 福島第一見学ツアーについて
 - ◆ 人事異動について

4. 結言

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 育成することを実施している.

以下に、5カ年計画の3年目である令和3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

軌道構造自動施工システム

令和2年度開発した軌道構造施工システムの要素の改良設計に取り組んだ.具体的には単関 節軌道モジュールおよび観察ユニットの移動機能部の改良に取り組み,軌道構造施工システム を実現するために必要な基盤を整えた.

今回の改良により軌道構造体の剛性が向上した,また観察ユニットも想定している軌道上の 移動が可能となった.それらを組み合わせて軌道構造体システムの基本的な実現性を検証でき たが,軌道構造の支持方法や単関節軌道モジュールの制御などには改良の余地があることが分 かった.

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2年度までの成果に基づく改良を行った.アームの形 状など,アーム自体のたわみを軽減するための手法を検討した.また,アームの到達範囲を拡 張するために関節角度を変更する機構の開発に取り組んだ.

具体的には、関節の加熱時間の短縮を目指した検討を行い、関節の LMPA が融解するまでの時間を従来の 34 秒から 9 秒へと大幅に短縮することができた.また、アームのたわみを減少させる方法として、補強材を入れる方法について検討した.さらに、関節角度を変更するための小型機構の構想をまとめた.

(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

令和2年度に構築したシミュレーションと簡易な実験用カメラシステムを活用することで, 映像提示インタフェースの構築を行った.具体的には,まずは多視点から撮った映像を元にオ フラインで3次元環境モデルの構築を行い,その3次元環境モデルと現在のオンラインの映像 を用いた映像提示手法を検討した.

アームの動きも考慮したカメラ配置設計のためにアームのリーチング運動と任意のカメラ配 置が可能なシミュレーションを構築した.そして,そのシミュレーション上で強化学習を活用 することでロボットアームによる作業を考慮したカメラ配置手法の提案をした.

② 高臨場感遠隔操縦システム(再委託先:神戸大学)

令和2年度検討した PCV 内での各種作業を想定した遠隔操縦方法を,令和2年度までに開発 した遠隔操縦実験プラットフォームの基本形に実装した.具体的には,様々なカメラ視点から の遠隔操縦を直感的に行えるような遠隔操縦システムの実現を目指した検討を行った.またシ ミュレーション環境下での遠隔操縦手法との統合の検討を開始した. さらに具体的に述べると、これまでの作業用アームの手先に取り付けたカメラと環境に固定 して設置したカメラに加え、別途用意したカメラ用アームの手先に取り付けた可動式カメラか らの映像が取り扱えるように遠隔操縦プラットフォームを拡張し、可動式カメラの導入によっ て作業性の向上が見られるかを検証した.また、シミュレーション環境下での仮想カメラの視 点変更への応用も考慮に入れ、可動式カメラの直感的な視点変更方法を検討した.

(3) 放射線モニタリングデバイスの開発

3 次元トモグラフィ手法を用いた試作開発品の性能試験および改良を実施した. 模擬体系を 用いたイメージングの性能試験を実施した.

ガンマ線,中性子センサの高線量率下での動作に向けて設計最適化を実施した.また模擬線 源を用いて位置情報取得と放射線モニタリングを組み合わせたイメージング試験を実施し,線 源位置の取得の検証を行った.

(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)

令和2年度までに研究開発を行った立体復元手法の研究開発を継続して行うとともに、開発 手法による立体復元計算を適用する画像の収集・管理を行うためのシステムの設計および開発 に着手した.また、具体的な検証実験等を行うための模擬実験環境の整備および動作検証実験 を行った.

撮像条件が与える立体復元結果への影響について検証するシミュレータを開発し,実験によって,直線軌道撮影において複数のカメラ姿勢で取得した画像を用いることで1つの固定カメ ラ姿勢で画像取得した場合に対して立体復元精度が向上することが確認された.また,カメラ による画像取得から画像保存,立体復元計算処理までをオンラインで行う画像収集・管理シス テムの設計と基礎的な開発を行い,動作実験を行った.さらに,整備した模擬実験環境を楢葉 遠隔技術開発センターに構築し,軌道構造自動施工システム開発グループと共同で単関節軌道 モジュールおよび観察ユニットによる画像撮影に関する動作検証を実施した.

(5)研究人材育成

福島第一原発の廃炉に向けて,廃止措置に関する講義を実施した.講義内容としては,福島 第一原発廃炉の現状と廃止措置に関する研究開発の取り組み,将来の課題について紹介した. 具体的には,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36人であった.

本研究は、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た.

(6) 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(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

トメーカとの議論を行った.

本研究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、楢葉遠隔技術開発センターで評価実験を行う予定である.
