



連携計測による線源探査ロボットシステムの開発研究 (委託研究)

－令和5年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業－

Development of a Cooperative Operation Robot System
for Radiation Source Exploration
(Contract Research)

－ FY2023 Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource
Development Project –

福島廃炉安全工学研究所 廃炉環境国際共同研究センター
東北大学

Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science,
Fukushima Research and Engineering Institute
Tohoku University

August 2025

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 研究開発推進部 科学技術情報課
〒 319-1112 茨城県那珂郡東海村大字村松 4 番地 49
E-mail: ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.

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

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

For inquiries regarding this report, please contact Library, Institutional Repository and INIS Section,
Research and Development Promotion Department, Japan Atomic Energy Agency.

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1112, Japan

E-mail: ird-support@jaea.go.jp

連携計測による線源探査ロボットシステムの開発研究
(委託研究)
ー令和5年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業ー

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

東北大学

(2025年2月28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5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、令和3年度に採択された研究課題のうち、「連携計測による線源探査ロボットシステムの開発研究」の令和3年度から令和5年度分の研究成果について取りまとめたものである。

本研究は、ガンマ線の飛来方向を検出可能な検出器を開発し、これを搭載した複数のロボットの連携により、単一センサーでは得られない広視野・迅速・安価な放射線源探査を実現するロボットシステム(Cooperative Operation Robot system for RAdiation Source Exploration: CORRASE、コラッセ)を開発することを目的とする。

令和5年度は、これまでの研究で得られた成果を結集させて線源探査に関する実証試験を中心に研究を実施した。ガンマ線の飛来方向を検出可能な指向性検出器として、8個のBGOシンチレータと遮蔽体を用いた多面体型指向性検出器を製作した。この検出器とIMU(Inertial Measurement Unit)、LiDAR(Light Detection And Ranging)を多脚ロボットに搭載したシステムを3組構築し、連携計測による線源探査実験を行った。7.8 × 5.3 m²の部屋に障害物及び模擬放射能汚染源として10 MBqの¹³⁷Cs密封線源を配置して線源探査実験のための未知環境とした。本システムを用いて環境地図の作成、探索計画の立案、放射線カウントのヒートマップ作成、計算された最適観測配置からの線源イメージングを行った。得られた環境地図と線源イメージを融合させて表示することに成功し、3台のロボットシステムの連携により模擬放射能汚染源の位置の特定に成功した。以上の成果から、本研究では広視野・迅速・安価な放射線源探査を実現するロボットシステムの開発に成功し、当初の目標は達成されたと結論できる。

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、東北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

Development of a Cooperative Operation Robot System for Radiation Source Exploration
(Contract Research)

— FY2023 Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project —

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

Tohoku University

(Received February 28, 2025)

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 FY2023.

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 FY2021, this report summarizes the research results of the “Development of a cooperative operation robot system for radiation source exploration” conducted from FY2021 to FY2023.

The present study aims to develop a robot system (CORRASE: Cooperative Operation Robot system for RAdiation Source Exploration), realizing radiation source exploration with wide field of view, rapidity, and low cost. In FY2023, our research efforts focused on verification tests for radiation source exploration by summarizing the results of our previous studies. Polyhedral type gamma-ray directional detectors were fabricated from 8 BGO scintillators and shielding bodies. Radiation source exploration experiments were performed by developing a cooperative operation robot system consisting of 3 multi-legged robots carrying the gamma-ray detectors, IMUs (Inertial Measurement Units), and LiDARs (Light Detection And Ranging). An unknown test environment for the radiation source exploration was constructed by placing obstacles and a 10 MBq ^{137}Cs sealed source as a simulated radioactive contamination source in a room measuring $7.8 \times 5.3 \text{ m}^2$. The developed system was used to create the environmental map, to formulate the exploration plan, to create the heatmap of the radiation counts, and to image the radiation source from the calculated optimal observation position. The localization of the simulated radioactive contamination source was successfully performed with the cooperation of the 3 robot systems by displaying the image of the radiation source fused on the environmental map. It can be concluded that the initial goal of this study has been successfully achieved by developing the robot system realizing radiation source exploration.

Keywords: Directional Gamma-ray Detector, Cooperative Operation Robot, Radiation Source Exploration

This work was performed by Tohoku University under contract with Japan Atomic Energy Agency.

目次

1. 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業の概要	1
2. 平成 30 年度 採択課題	2
3. 令和元年度 採択課題	5
4. 令和 2 年度 採択課題	8
5. 令和 3 年度 採択課題	10
6. 令和 4 年度 採択課題	12
7. 令和 5 年度 採択課題	14
付録 成果報告書	17

Contents

1. Outline of Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project	1
2. Accepted Proposal in FY2018.....	2
3. Accepted Proposal in FY2019.....	5
4. Accepted Proposal in FY2020.....	8
5. Accepted Proposal in FY2021.....	10
6. Accepted Proposal in FY2022.....	12
7. Accepted Proposal in FY2023.....	14
Appendix Result Report	17

This is a blank page.

1. 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業の概要

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

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

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

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

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

2. 平成 30 年度 採択課題

平成 30 年度採択課題については以下のとおりである。

課題数：19 課題

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

平成 30 年度 採択課題一覧

共通基盤型原子力研究プログラム

【若手研究】

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

共通基盤型原子力研究プログラム

【一般研究】

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

課題解決型廃炉研究プログラム

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

国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

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

3. 令和元年度 採択課題

令和元年度採択課題については以下のとおりである。

課題数：19 課題

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

課題解決型廃炉研究プログラム 4 課題

国際協力型廃炉研究プログラム 4 課題（日英 2 課題、日露 2 課題）

研究人材育成型廃炉研究プログラム 4 課題

令和元年度 採択課題一覧

共通基盤型原子力研究プログラム

【若手研究】

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

共通基盤型原子力研究プログラム

【一般研究】

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

課題解決型廃炉研究プログラム

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

国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

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

国際協力型廃炉研究プログラム（日露共同研究）

課題名	研究代表者	所属機関
燃料デブリ取出し臨界安全技術の高度化	小原 徹	東京工業大学
微生物生態系による原子炉内物体の腐食・変質に関する評価研究	金井 昭夫	慶應義塾大学

研究人材育成型廃炉研究プログラム

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

4. 令和2年度 採択課題

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

公募期間：令和2年3月17日～令和2年5月14日（課題解決型）

令和2年5月13日～令和2年7月15日（国際協力型）

課題数：10 課題

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

国際協力型廃炉研究プログラム 2 課題（日英）

令和2年度 採択課題一覧

課題解決型廃炉研究プログラム

【若手研究】

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

課題解決型廃炉研究プログラム

【一般研究】

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

国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

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

5. 令和3年度 採択課題

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

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

課題数：12 課題

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

令和3年度 採択課題一覧

課題解決型廃炉研究プログラム

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

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

国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

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

国際協力型廃炉研究プログラム（日露共同研究）

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

6. 令和4年度 採択課題

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

公募期間：令和4年3月1日～令和4年5月6日（課題解決型）

令和4年4月7日～令和4年6月16日（国際協力型 日英共同研究）

課題数：8 課題

課題解決型廃炉研究プログラム 6 課題

国際協力型廃炉研究プログラム 2 課題（日英）

令和4年度 採択課題一覧

課題解決型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
革新的アルファダスト撮像装置と高線量率場モニタの実用化とその応用	黒澤 俊介	東北大学
3次元線量拡散予測法の確立と γ 線透過率差を利用した構造体内調査法の開発	谷森 達	京都大学
α 汚染可視化ハンドフットクロスモニタの要素技術開発	樋口 幹雄	北海道大学
高放射線耐性の低照度用太陽電池を利用した放射線場マッピング観測システム開発	奥野 泰希	京都大学 (～R5.3.31) 理化学研究所 (R5.4.1～)
障害物等による劣悪環境下でも通信可能なパッシブ無線通信方式の開発	新井 宏之	横浜国立大学
無線 UWB とカメラ画像分析を組合せたリアルタイム 3D 位置測位・組込システムの開発・評価	松下 光次郎	岐阜大学

国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

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

7. 令和 5 年度 採択課題

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

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

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

課題数：9 課題

課題解決型廃炉研究プログラム 7 課題

国際協力型廃炉研究プログラム 2 課題（日英）

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 5 年度 採択課題一覧

課題解決型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
遮蔽不要な耐放射線性ダイヤモンド中性子計測システムのプロトタイプ開発	金子 純一	北海道大学
簡易非破壊測定に向けた革新的な $n \cdot \gamma$ シンチレーション検出システムの開発	鎌田 圭	東北大学
ペデスタル部鉄筋コンクリート損傷挙動の把握に向けた構成材料の物理・化学的変質に関する研究	五十嵐 豪	名古屋大学
動画像からの特徴量抽出結果に基づいた高速 3 次元炉内環境モデリング	中村 啓太	札幌大学
放射性コンクリート廃棄物の減容を考慮した合理的処理・処分方法の検討	小崎 完	北海道大学

課題名	研究代表者	所属機関
高バックグラウンド放射線環境における配管内探査技術の開発	鳥居 建男	福井大学
PCV 気相漏洩位置及び漏洩量推定のための遠隔光計測技術の研究開発	椎名 達雄	千葉大学

国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

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

本報告書は、以下の課題の令和 3 年度から令和 5 年度分の研究成果について取りまとめたものである。

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
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

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 5 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

連携計測による線源探査ロボットシステムの開発研究

(契約番号 R05I047)

成果報告書

令和 6 年 3 月

国立大学法人東北大学

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、国立大学法人東北大学が実施した「連携計測による線源探査ロボットシステムの開発研究」の令和3年度から令和5年度分の研究成果を取りまとめたものである。

目次

概略	vi
1. はじめに	1-1
2. 業務計画	2-1
2.1 全体計画	2-1
2.2 実施体制	2-2
2.3 令和5年度の成果の目標および業務の実施方法	2-3
3. 実施内容および成果	3-1
3.1 指向性検出器開発【令和3年度～令和5年度】	3-1
3.1.1 シミュレーションによる検出器設計（連携先：原子力機構）【令和3年度～令和5年度】	3-1
3.1.2 まとめ	3-7
3.1.3 指向性検出器の製作と評価【令和3年度～令和5年度】	3-8
3.1.4 まとめ	3-12
3.2 画像・情報処理技術開発（再委託先：富山高専）【令和3年度～令和5年度】	3-13
3.2.1 画像・情報処理技術開発【令和3年度～令和5年度】	3-13
3.2.2 まとめ	3-17
3.3 ロボット制御システム開発【令和3年度～令和5年度】	3-18
3.3.1 複数台ロボットによる放射線源の探索【令和3年度～令和5年度】	3-18
3.3.2 まとめ	3-22
3.4 実証試験（東北大学、再委託先：福島大学、富山高専、連携先：原子力機構） 【令和3年度～令和5年度】	3-23
3.4.1 実証試験【令和3年度～令和5年度】	3-23
3.4.2 まとめ	3-35
3.5 研究推進【令和5年度】	3-40
4. 結言	4-1
参考文献	5-1

執筆者リスト

事業代表者

国立大学法人東北大学

准教授

人見啓太郎

准教授

田村雄介

助手

野上光博

再委託先

独立行政法人国立高等専門学校機構

富山高等専門学校

教授

高田英治

准教授

金子慎一郎

国立大学法人福島大学

特任教授

鳥居建男

連携先

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

研究系職員

北山佳治

図一覧

図 2. 1-1	全体計画図	....	2-1
図 2. 2-1	実施体制図	....	2-2
図 3. 1-1	3 核種同時イメージングのシミュレーション体系	....	3-1
図 3. 1-2	3 核種同時イメージングのシミュレーション結果	....	3-2
図 3. 1-3	製作したコーデットキューブ型イメージャーによる 3 核種同時 イメージング実験の様子	....	3-2
図 3. 1-4	3 核種同時イメージングの実験の結果	....	3-3
図 3. 1-5	線状線源イメージングシミュレーションの体系	....	3-3
図 3. 1-6	線状線源イメージングシミュレーションの結果	....	3-4
図 3. 1-7	3 核種同時イメージングの再実験結果	....	3-5
図 3. 1-8	線状・面状分布線源のシミュレーション体系	....	3-5
図 3. 1-9	線状線源イメージングシミュレーションの結果	....	3-6
図 3. 1-10	線状線源イメージングのラインプロファイル	....	3-6
図 3. 1-11	面状線源イメージングシミュレーションの結果	....	3-7
図 3. 1-12	ロボットに搭載したイメージング実験の結果	....	3-7
図 3. 1-13	製作した 3 組の多面体型指向性検出器	....	3-9
図 3. 1-14	多面体型指向性検出器の多脚型ロボットへの搭載試験体系	....	3-10
図 3. 1-15	各ポジションでの線源推定位置	....	3-11
図 3. 1-16	線源位置の推定結果 (BG0 シンチレータ多面体型指向性検出器)	....	3-12
図 3. 2-1	Hexapod Robot Loiter2020_ver1.1 の外観	....	3-13
図 3. 2-2	システムの複数ロボットへの対応	....	3-14
図 3. 2-3	移動軌跡を用いた簡易的な線量率ヒートマップ	....	3-15
図 3. 2-4	探索円錐による点群抽出	....	3-15
図 3. 2-5	探索漏れ対策	....	3-15
図 3. 2-6	球面体による疑似円錐探索	....	3-16
図 3. 2-7	複数地点における放射線源分布情報の例	....	3-16
図 3. 2-8	単一ロボットによる反映抽出	....	3-17
図 3. 2-9	複数地点の融合結果	....	3-17
図 3. 3-1	放射線源の探索戦略	....	3-18
図 3. 3-2	6 脚車輪型ロボット Loiter	....	3-19
図 3. 3-3	ロボット制御用 GUI	....	3-19
図 3. 3-4	環境の 2 次元地図 (左) と探索対象領域の分割 (右)	....	3-20
図 3. 3-5	割り当て領域内を探索する経路	....	3-20
図 3. 3-6	粗い探索において生成されたヒートマップの例	....	3-21
図 3. 3-7	詳細計測のためのロボット配置導出	....	3-21
図 3. 3-8	3 台のロボットでの詳細計測の様子	....	3-21
図 3. 4-1	計算した応答関数の値と、線源を用いた実測値の比較結果	....	3-23
図 3. 4-2	シミュレーションでの線源探索の様子 (左: 初期状態、右: 60 分後)	....	3-25
図 3. 4-3	全天球カメラによる 360° の実験場所の空間把握	....	3-25
図 3. 4-4	構築した検出器搭載ロボットシステム (CORRASE)	....	3-26

図 3.4-5	実証試験のフローチャート	....	3-26
図 3.4-6	実証試験のフィールド	....	3-27
図 3.4-7	実証試験フィールドの寸法図	....	3-28
図 3.4-8	先行ロボットの大まかな探索により作成した地図	....	3-28
図 3.4-9	3 台のロボットへのタスクの割り当て結果	....	3-29
図 3.4-10	ロボット 3 台での探索の様子	....	3-30
図 3.4-11	実証試験フィールドの放射線カウントのヒートマップ	....	3-31
図 3.4-12	2 次元地図へ重ね合わせたロボット 3 台の配置計算結果	....	3-32
図 3.4-13	線源イメージングの様子	....	3-33
図 3.4-14	線源イメージングの結果	....	3-34
図 3.4-15	地図と線源イメージングの重ね合わせ結果 (Robo1)	....	3-36
図 3.4-16	地図と線源イメージングの重ね合わせ結果 (Robo2)	....	3-37
図 3.4-17	地図と線源イメージングの重ね合わせ結果 (Robo3)	....	3-38
図 3.4-18	地図と線源イメージングの重ね合わせ結果 (3 台の共通部を抽出)	....	3-39

略語一覧

東北大学	: 国立大学法人東北大学
福島大学	: 国立大学法人福島大学
富山高専	: 独立行政法人国立高等専門学校機構富山高等専門学校
原子力機構	: Japan Atomic Energy Agency (国立研究開発法人日本原子力研究開発機構)
CLADS	: Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science (廃炉環境国際共同研究センター)
1F	: 東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所
VPC	: Virtual Pinhole Camera (バーチャルピンホールカメラ)
CORRASE	: Cooperative Operation Robot system for RAdiation Source Exploration
多脚型 ロボット	: 移動手段として複数本（4本、6本）の脚を用いて動作し、障害物でも乗り越え移動することを目的としたロボット
FWHM	: Full Width at Half Maximum
LiDAR	: Light Detection And Ranging
IMU	: Inertial Measurement Unit
SiPM	: Silicon Photomultiplier
SLAM	: Simultaneous Localization And Mapping
C3-G	: Coded Cube Camera for Gamma-ray
GAGG(Ce)	: $\text{Gd}_3(\text{Ga}, \text{Al})_5\text{O}_{12}(\text{Ce})$
LYSO(Ce)	: $\text{Lu}_{2(1-x)}\text{Y}_{2x}\text{SiO}_5(\text{Ce})$
BGO	: $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$

概略

東京電力ホールディングス（株）福島第一原子力発電所（以下、「1F」という。）の建屋内作業環境で廃炉作業を円滑に進めるためには、高線量率環境下において放射線源の位置分布を詳細に把握する必要がある。しかし、放射線分布を計測する現状のガンマカメラは、厚い遮蔽体を要するため大型で重量物になったり（ピンホールカメラ）、高線量率環境では散乱体検出器と吸収体検出器の偶発同時計数によって線源位置の特定が困難だったり（コンプトンカメラ）と、高線量環境下での線源分布の把握が困難であり、大型重量で迅速性に欠けるものとなっている。このため、従来型のガンマカメラで撮影しても汚染源の特定には至らないことも少なくなかった。

本研究は、ガンマ線の飛来方向を検出可能な検出器を開発し、これを搭載した複数のロボットの連携により、単一センサーでは得られない広視野・迅速・安価な放射線源探査を実現するロボットシステム（Cooperative Operation Robot system for RAdiation Source Exploration: CORRASE、コラッセ）を開発することを目的とする。1F 現場への投入に資することを目的として、線源探査を行う小型ロボットに放射線計測機器を搭載したシステムを 3 年間の計画終了時に完成させるための研究を行った。

令和 3 年度から令和 5 年度の成果概要を以下に記載する。

令和 3 年度は、指向性検出器開発では、シミュレーションにより多面体型検出器とコーデットキューブ型検出器の 2 種類の検出器ジオメトリについて検討を行い、ともに全方向イメージングが可能であることを示した。さらに、多面体型検出器の最小単位の指向性検出器を製作し、その特性評価を行った。画像・情報処理技術開発においては、放射線検出器による測定結果と LiDAR（Light Detection And Ranging）による自己位置推定結果をもとに、対象とする領域の放射線源分布を推定するための基本的な考え方について整理し、測定を 2 段階に分け、1 段階目で環境地図作成と大まかな放射線強度分布を測定し、その結果をもとに絞り込んだ領域において詳細測定することとした。ロボット制御システム開発では、複数台のロボットに探索タスクを割り当てる手法ならびに各ロボットの経路を計画する手法の開発を行った。また、複数台のロボットを遠隔から操作するシステムの構築を行った。実証試験に備え、検出器遮蔽体等のツール類の整備、実証試験に向けて線源位置探査ツールの基本設計解析等を実施した。

令和 4 年度は、検出器開発では、多面体型検出器とコーデットキューブ型検出器の試作機を製作した。それらの検出器の特性評価を行い、ガンマ線イメージャーとして点線源の位置推定が可能であることを示した。画像・情報処理技術開発においては、環境地図生成精度の向上および処理速度の向上、さらに環境色を反映させることによる視認性向上を達成した。環境地図上に放射線源分布推定結果を融合して表示するシステムにおいては、放射線源分布情報の融合反映方法を考案、実装し、サンプルデータを用いて適用を試み、想定通りの融合結果を得た。ロボット制御システム開発では、環境地図と粗い放射線源分布推定結果に基づき、検出器の特性に応じて複数台のロボットが指定した箇所の詳細な測定を行うための観測地点計画手法の開発を行った。実証試験に備え、線源分布の全体像を俯瞰するために、小型軽量の測定器とそれを搭載できる汎用性の高い小型ロボットの開発を行った。また、画像作成に向けて適切な配置にロボットが移動する手法を構築し、いくつかのケースについてシミュレーションにより線源探査を行った。複数の線源がある場合でもほぼ線源位置を特定することができた。

令和 5 年度は、これまでの研究で得られた指向性検出器開発、画像・情報処理技術開発、ロボット制御システム開発の成果を結集させて線源探査に関する実証試験を中心に研究を実施した。自己発光バックグラウンドのない BGO シンチレータを用いた多面体型指向性検出器を製作し、IMU（Inertial Measurement Unit）および 3D-LiDAR とともに多脚ロボットに搭載した。このロボットシステムを 3 組製作し、連携計測による線源探査実験を行った。7.8×5.3 m² の部屋に障害物を

配置し、線源探査実験のための未知環境とした。模擬放射能汚染源として 10 MBq の ^{137}Cs 密封線源を採用した。線源探査の流れは、環境地図の作成、探索計画の立案、放射線カウンターのヒートマップ作成、計算された最適観測配置からの線源イメージング、環境地図と線源イメージの融合による表示である。線源探査の結果、3 台のロボットシステムの連携により模擬放射能汚染源の位置の特定に成功した。以上の結果から、当初目標として掲げていた連携計測による広視野・迅速・安価な放射線源探査を実現するロボットシステムの開発に成功し、本研究の目的は十分に達せられたと結論できる。

前年度までの成果報告書：

1. JAEA-Review 2022-041、連携計測による線源探査ロボットシステムの開発研究
(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
<https://doi.org/10.11484/jaea-review-2022-041>
2. JAEA-Review 2023-030、連携計測による線源探査ロボットシステムの開発研究
(委託研究) 令和 4 年度英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業
<https://doi.org/10.11484/jaea-review-2023-030>

1. はじめに

1F の建屋内作業環境で廃炉作業を円滑に進めるためには、高線量率環境下において放射線源の位置分布を詳細に把握する必要がある。

散乱線が多い環境で線源分布を求めるために、研究代表者らは「高線量率環境下における小型半導体を用いたバーチャルピンホールカメラの開発（文部科学省 国家課題対応型研究開発推進事業 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業：平成 29 年度～令和元年度）」において高指向性検出器を開発し、大型の遮蔽体が不要な放射線イメージャー（バーチャルピンホールカメラ、VPC）の開発を進めてきた。本研究では、VPC を発展させ、ガンマ線の飛来方向を検出可能な検出器を開発し、これを搭載した複数のロボットの連携により、単一センサーでは得られない広視野・迅速・安価な放射線源探査を実現するロボットシステムを開発する。

従来のガンマカメラは全体を覆う大型遮蔽体による重量、偶発同時計数による偽線源分布、長時間の収集時間といった欠点がある。この問題を解決するために本プロジェクトでは先行研究の VPC 用の指向性検出器を 3 次元に拡大し、遮蔽体の窪みに小型検出器を配置する新しい指向性検出器を開発する。本システムでは、センサーの計数比から迅速に線源の方向を求めることができる。1 台の指向性検出器では空間分解能が低い、この検出器を複数台のロボットに搭載し、ロボットが相互に連携しながら作業環境内を移動することで空間分解能を上げ、迅速に線源位置を割り出すことができる。さらに、その移動経路上の計数から線量率のマップも形成できる。本計測システムは比較的単純な計測系の組み合わせで放射線分布のイメージングを実現する画期的なアプローチである。

本研究では、小型多脚ロボットに上記検出器を搭載する。ロボットは現場投入に際し重機や台車を必要とせず、人が持ち運べる重さで、狭隘部へのアクセスも容易な小型のものを採用する。多脚型ロボットは、階段の昇降やその場での回転、ロボット本体の上下動による段差の乗り越えや構造物の潜り抜けが可能な他、クローラー型では難しいガレキの乗り越えも可能である。本研究では、耐荷重 5 kg のロボットを使用し、搭載計測システムを 1.5 kg と軽量にすることでバッテリーの負荷を減らし、長時間の計測が可能なものとするを目標としている。

これまで、放射線イメージャーを搭載したロボット単体での放射線計測は多くの試みがなされてきたが、ロボットを複数台使用した例は多くない。本研究では、センサー自体は小型で単純な機能のものをを使うが、複数台のロボットを用いて連携動作させることで、単体では実現できない広視野で迅速な線源探査と位置認識を可能とするシステムの構築に挑む。

本研究では、VPC の原理を応用した比較的単純な計測系を用いることで、ピンホールカメラやコンプトンカメラと異なりシステムの軽量化と簡素化が図れる。また、開発した指向性検出器を多脚式の小型ロボットに搭載することにより、狭隘部や段差があるところでも計測が可能となる。さらに、複数のロボットを用いて連携走行することにより、これまで計測が困難であった場所でも迅速に線源分布を計測できるという学術的特色がある。

また、本検出器システムは高バックグラウンド環境下での計測という特長を有しており、本研究で培われた技術は、様々な放射線環境で適用可能であると考えている。1F 廃炉作業だけでなく、様々な原子力環境や核セキュリティ分野での放射線計測、人工衛星搭載による宇宙計測にも応用できる可能性がある。

2. 業務計画

2.1 全体計画

全体計画を図 2.1-1 に示す。

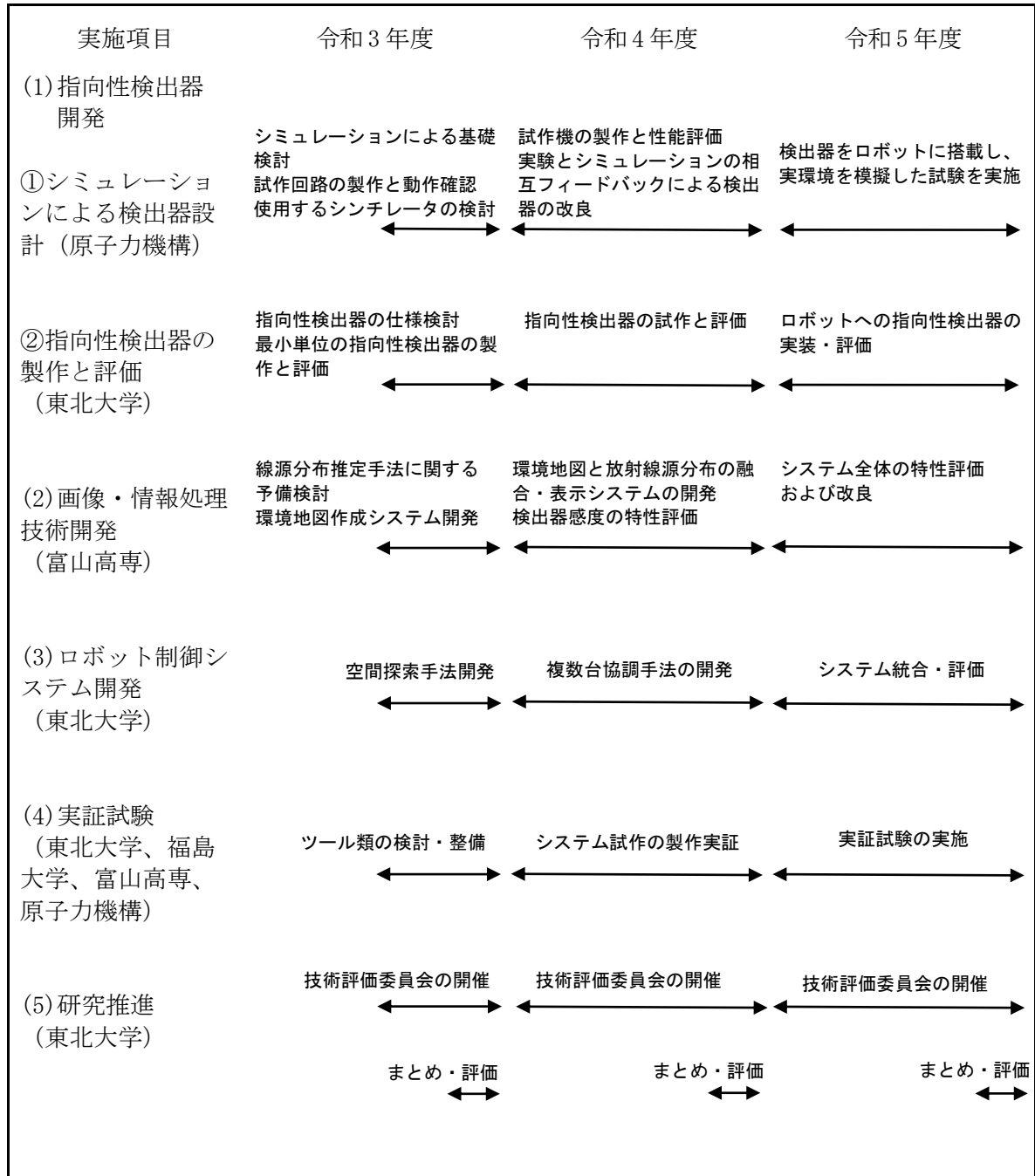


図 2.1-1 全体計画図

2.2 実施体制

実施体制図を図 2.2-1 に示す。

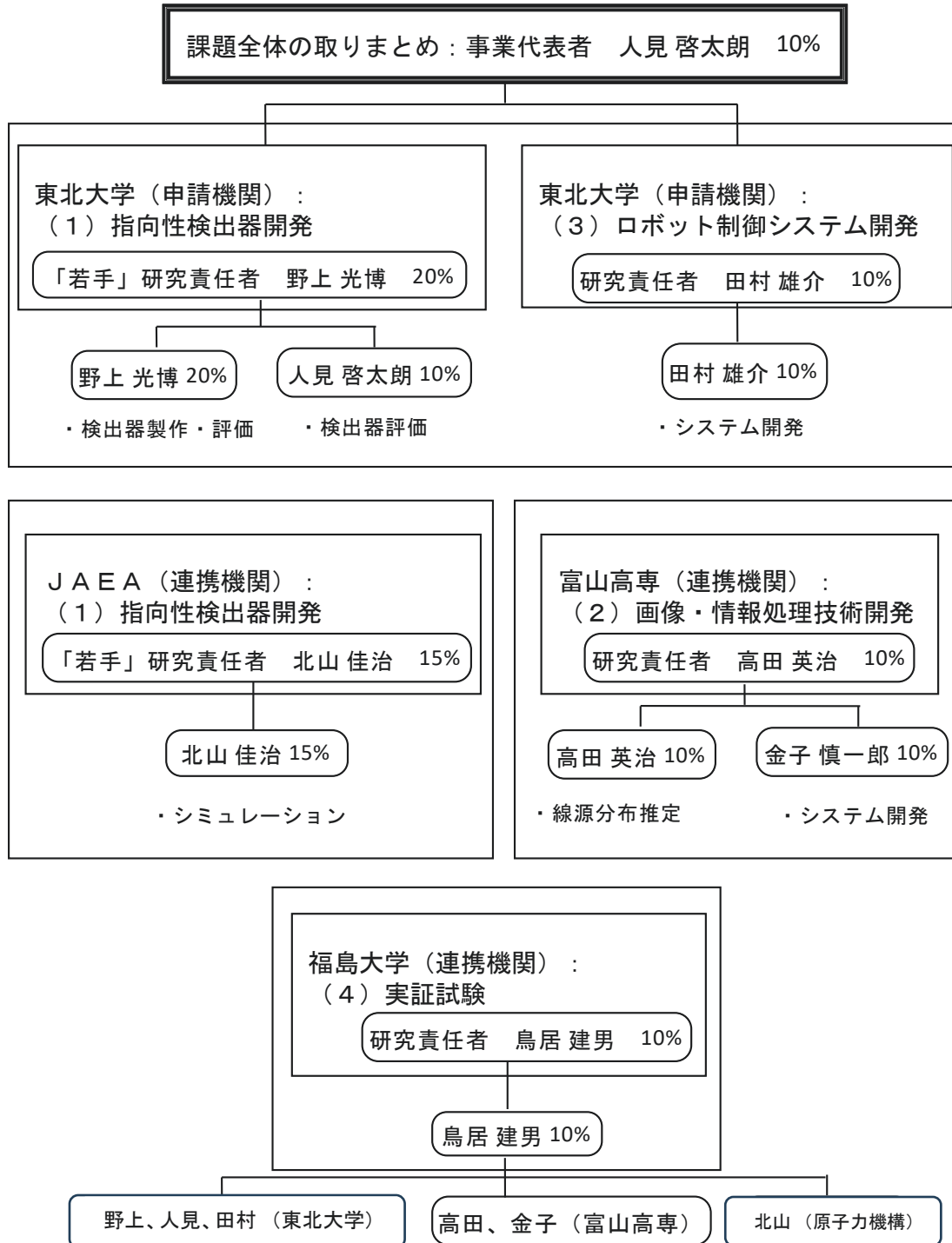


図 2.2-1 実施体制図

2.3 令和5年度の成果の目標および業務の実施方法

(1) 指向性検出器開発

- ① シミュレーションによる検出器設計（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」という。））

令和4年度までの結果をもとにイメージャーの実機を製作し、現場運用を見据えた試験を実施する。ハードウェアの製作および特性評価試験に並行して、画像再構成アルゴリズムの高度化を図る。基礎試験により課題を抽出し、改良後、ロボットに搭載して実証試験を行う。

- ② 指向性検出器の製作と評価

令和4年度に検討した検出器システムの仕様をもとに、ロボットへ搭載する指向性検出器システムの実装とその評価を行う。また、実証試験を行い、指向性検出器システムの最終的な評価および改良に取り組む。

- (2) 画像・情報処理技術開発（再委託先：独立行政法人国立高等専門学校機構富山高等専門学校（以下、「富山高専」という。））

令和4年度までに開発した単一のロボット・センサーによる測定手法を複数台のロボット・センサーに拡張する。また、令和4年度に引き続き、LiDARを用いた環境地図作成システムおよび環境地図上に放射線源分布推定結果を融合表示するシステムを開発するとともに、実フィールド運用に向けて実ロボットの整備調整を行う。

- (3) ロボット制御システム開発

令和3年度に構築した粗い探索のためのタスク割り当て手法および令和4年度に構築した複数台ロボットによる観測地点計画手法を実機ロボットに実装し、(1)②で開発した検出器を搭載して検証実験を行う。

- (4) 実証試験（国立大学法人東北大学（以下、「東北大学」という。）、再委託先：国立大学法人福島大学（以下、「福島大学」という。）、富山高専、連携先：原子力機構）

令和4年度の結果をもとに、システム化に向けて検出器の応答関数と線源を用いた実測値の比較を行う。各実施機関の成果を統合し、検出器搭載ロボットシステムを構築する。システムの運用方法を検討し、現場での線源位置の探査実証試験を行う。また、試験で得られた結果をもとに、課題を抽出して、改造、最適化検討を行う。

- (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、研究を進める。また、研究実施計画を推進するための打合せや会議等を開催する。

3. 実施内容および成果

3.1 指向性検出器開発【令和3年度～令和5年度】

3.1.1 シミュレーションによる検出器設計（連携先：原子力機構）【令和3年度～令和5年度】

【令和4年度までの概要】

令和3年度には、イメージャージオメトリと画像再構成アルゴリズム、また、イメージャーに使用する結晶に関して検討を行った。その結果、回帰分析アルゴリズムを採用した多面体型イメージャーとコーデッドキューブ型イメージャーを並行して開発し、コーデッドキューブ型イメージャーには、GAGG(Ce)シンチレータを採用することとした。また、電源回路と信号読み出し回路といった基本的な回路を開発した。設計したコーデッドキューブ型イメージャーについて、モンテカルロシミュレーションにより特性を評価した結果、角度分解能約 10° で ^{137}Cs 線源をイメージング可能であることを確認した。

令和4年度には、実際にコーデッドキューブ型イメージャー（Coded Cube Camera for Gamma-ray : C3-G）の試作機を製作した。試作したC3-Gは86 mm × 86 mm × 86 mmの筐体に格納され、重量は約600 gである。 ^{137}Cs (10 MBq)線源をC3-Gから3 m離れた位置に置き、10分間の測定を実施した結果、角度分解能約 10° でイメージングが実施できることを実験的に確認した。

【令和5年度実施内容および結果】

令和4年度までに、シミュレーションおよび実験にて手法の特性調査を実施した。令和5年度には、令和4年度までの結果をもとにイメージャーの実機を製作し（多面体型検出器：図3.1-13、コーデッドキューブ型検出器：図3.1-3）、より実用的な運用を見据えた特性評価試験として、多核種、多線源、線状および面状分布線源に対する応答の調査を実施した。

測定対象核種として、広いエネルギー領域での応答を調査するため、 ^{57}Co (122 keV)、 ^{22}Na (511 keV)、 ^{137}Cs (662 keV)を選択した。まず、モンテカルロシミュレーション(GEANT4)によって多核種イメージングに関するシミュレーションを行った。シミュレーション体系を図3.1-1に示す。線源の強度は実験室にある線源強度を模したものである。測定時間は30分間とした。シミュレーション結果を図3.1-2に示す。シミュレーションでは適切な場所に、適切な結像強度でイメージング可能であることが示された。角度分解能はそれぞれ 10° であった。

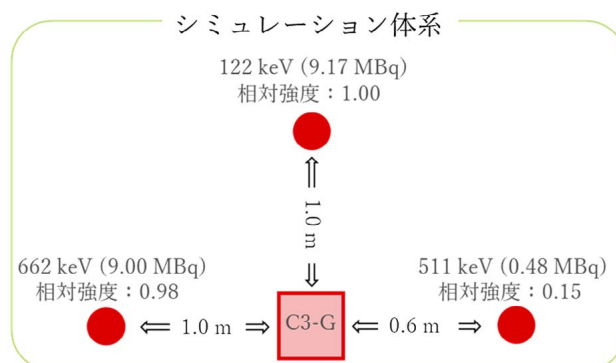


図 3.1-1 3核種同時イメージングのシミュレーション体系

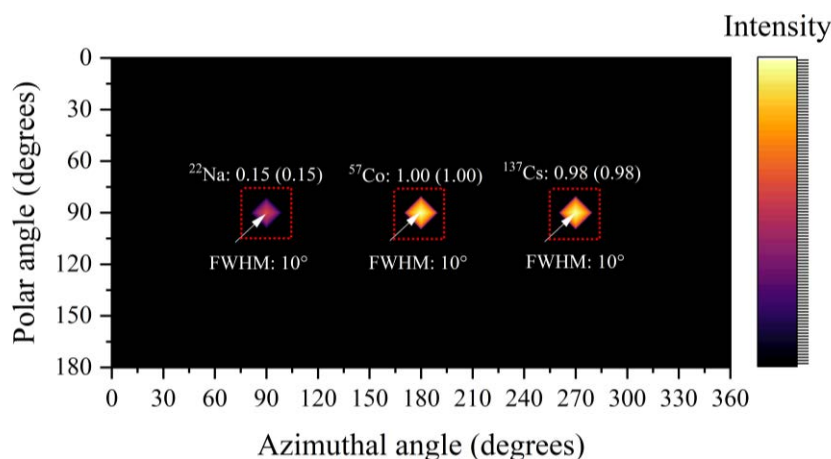


図 3.1-2 3 核種同時イメージングのシミュレーション結果
白矢印の先端が真の線源位置。核種名の右隣に書かれた数字は赤破線で囲った領域の結像強度で、括弧内の数字は線源の真の相対強度を示す。

同様の体系で実験を実施した。実験の様子を図 3.1-3 に示す。C3-G の筐体、線源固定用の治具などは 3D プリンタで印刷した。実験の結果を図 3.1-4 に示す。結像強度は、実際の線源の相対強度から最大で 35% 程度のずれが確認された。使用した線源の放射能が公称値から $\pm 20\%$ ほどの誤差があることを考慮しても大きくずれた結果となった。 ^{57}Co の結像位置が約 10° ずれた。また、真の線源位置以外に疑似結像が見られた。 ^{137}Cs 、 ^{22}Na 、 ^{57}Co の角度分解能はそれぞれ 10° 、 13° 、 15° となり、シミュレーションと比較して良くなかった。

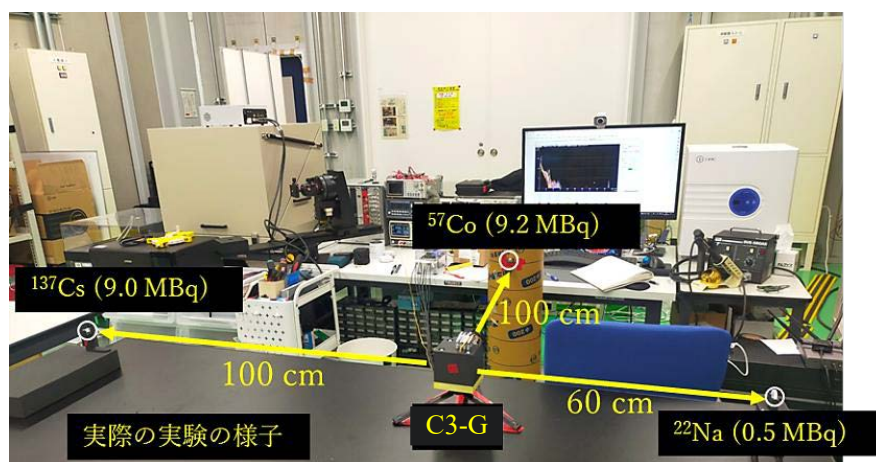


図 3.1-3 製作したコーデットキューブ型イメージャーによる
3 核種同時イメージング実験の様子

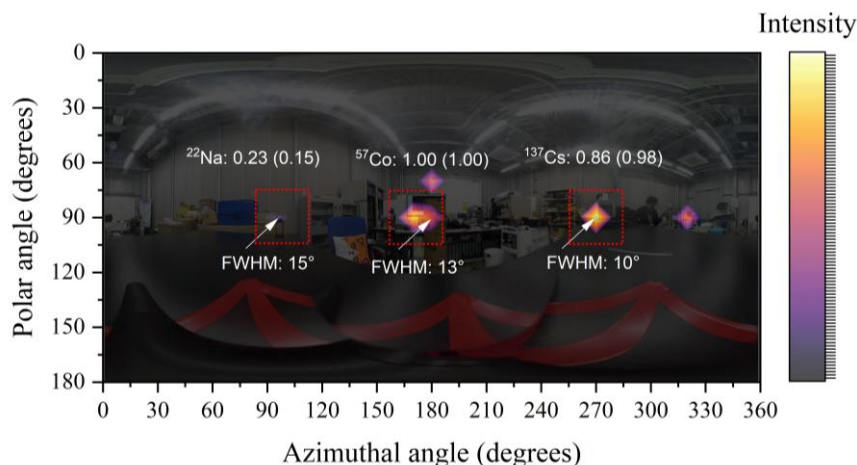


図 3.1-4 3 核種同時イメージングの実験の結果
白矢印の先端が真の線源位置。核種名の右隣の数字は赤破線で囲った領域の結像強度で括弧内の数字は線源の計算上の相対強度を示す。

続いて、線状分布線源に対する応答を調査した。線状線源の応答はシミュレーションで確認した。図 3.1-5 にシミュレーションの体系を示す。分布線源は C3-G から 3 m 離れた点に設置した。線の長さ R は 2 m、4 m、6 m の 3 通りとし、ガンマ線のエネルギーは 662 keV を仮定した。

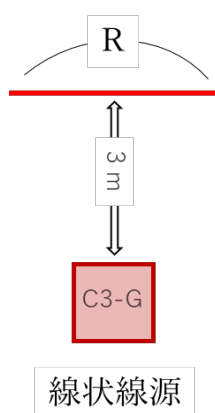


図 3.1-5 線状線源イメージングシミュレーションの体系

線状線源のイメージングシミュレーションの結果を図 3.1-6 に示す。再構成結果がどの程度、真の線源分布の再現しているのかを類似度という量で比較した。画像の各ピクセルの結像強度を要素としたベクトルと考え、再構成結果の画像ベクトル $\mathbf{R}$ と、真の線源分布の画像ベクトル $\mathbf{T}$ と置くと類似度 $Sim(\mathbf{R}, \mathbf{T}) = \frac{\mathbf{R} \cdot \mathbf{T}}{\|\mathbf{R}\| \|\mathbf{T}\|}$ で定義される、二つのベクトルの成す角度 θ に関する量である。両者が完全に一致した場合 $Sim(\mathbf{R}, \mathbf{T}) = 1$ となり、直交する場合は $Sim(\mathbf{R}, \mathbf{T}) = 0$ となる。イメージング結果を見ると、真の位置周辺に結像が確認できた。ラインプロファイルを見ると、ピーク位置と線状線源の終点は概ね一致しているものの、複数のピークで構成された再構成結果となっており、きれいに線状に再構成はできなかった。

再構成結果の精度を向上させるため、再構成アルゴリズムの高度化を図った。各検出器の応答をシミュレーションと実験と比較したところ、シミュレーションでは考慮しきれていなかった鉛の特性 X 線成分が多く測定されていることがわかった。そこで、検出器のキャリブレーション方法を鉛の特性 X 線を考慮した方法に修正した。また、再構成結果アルゴリズムの収束の過程でオーバーフィッティングが発生していることも判明した。そこで、画像再構成アルゴリズムの各種パラメータ（ニューラルネットワークのノード数、レイヤー数、イテレーション回数）を最適化した。改善後のアルゴリズムを用いて 3 核種同時イメージング実験および線状面状分布線源のイメージングシミュレーションを再度実施した。高度化した画像再構成アルゴリズムを用いた 3 核種同時イメージング実験の結果を図 3.1-7 に示す。高度化前の結果（図 3.1-4）と比較して、よりきれいな収束が見られ、角度分解能が向上し、線源強度推定の精度も上がったことが確認できた。

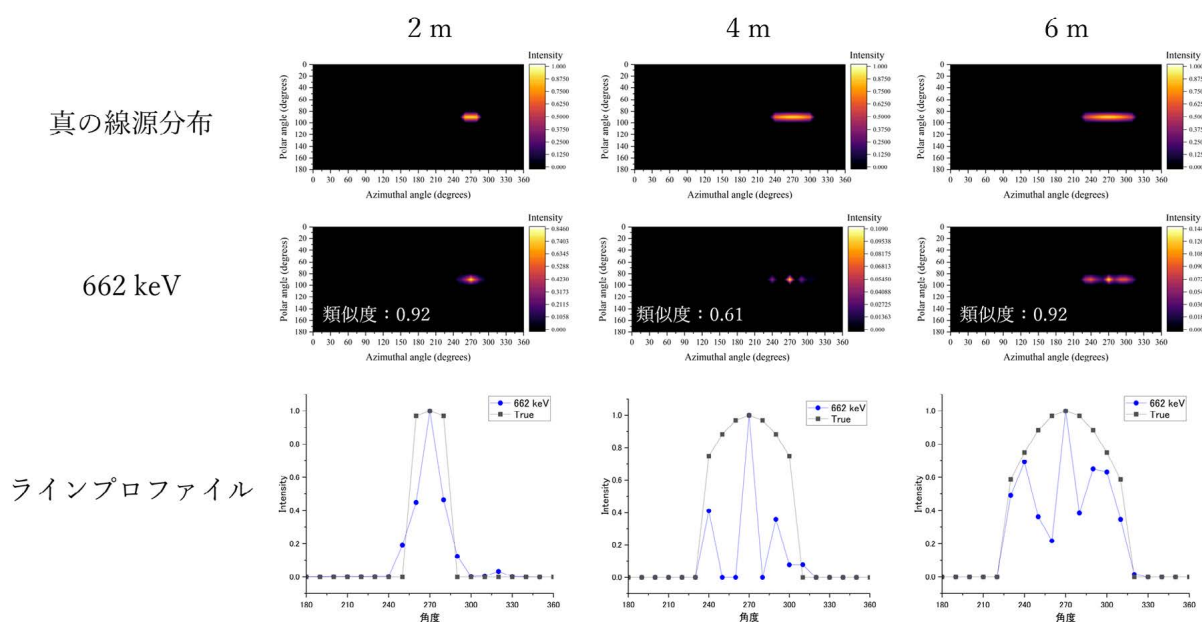


図 3.1-6 線状線源イメージングシミュレーションの結果

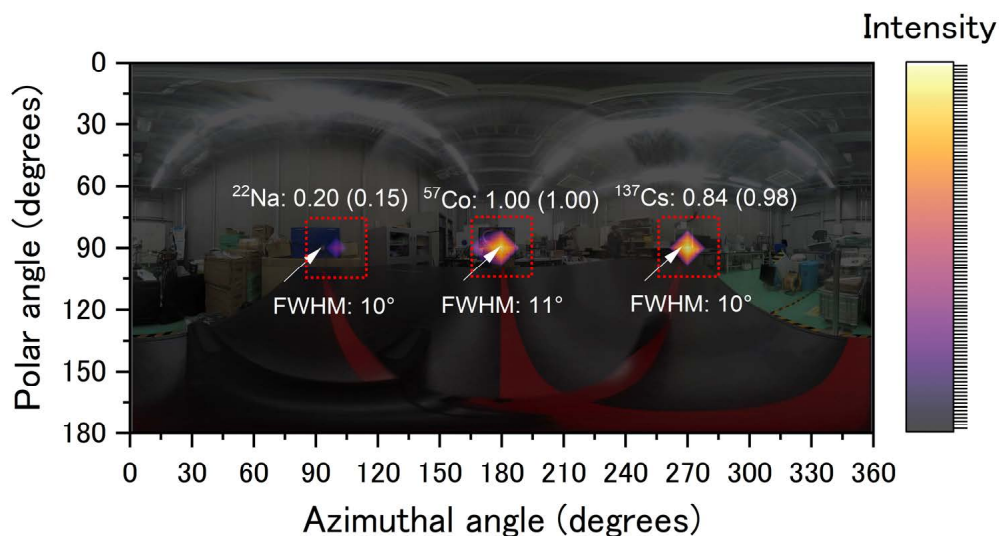


図 3.1-7 3 核種同時イメージングの再実験結果
白矢印の先端が真の線源位置。核種名の右隣の数字は赤破線で囲った領域の結像強度で括弧内の数字は線源の計算上の相対強度を示す。

線状・面状分布線源のシミュレーション体系を図 3.1-8 に示す。線、面の一边の長さ R は 2 m、4 m、6 m の 3 通りとし、ガンマ線のエネルギーは 141 keV と 662 keV を仮定した。

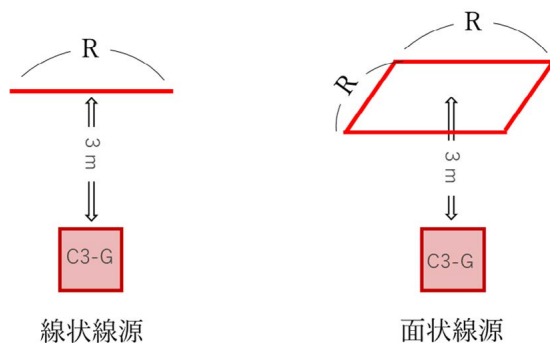


図 3.1-8 線状・面状分布線源のシミュレーション体系

線上分布線源のシミュレーション結果を図 3.1-9 に示す。高度化前（図 3.1-6）と比較して、類似度は大きく向上した。また、141 keV の結果も良好であった。図 3.1-10 にラインプロファイルを示す。6 m の線源については依然として結像の乱れが見えたものの、高度化前と比較すると結像精度は向上した。面状分布線源のシミュレーション結果を図 3.1-11 に示す。白い破線が真の線源分布を表している。線状線源と比較して、再構成精度のエネルギー依存性が強く表れた。141 keV では、類似度は平均すると 0.82 であり、イメージング結果を見ても概ね一致した結果が得られていることがわかる。一方で、662 keV においては、平均類似度は 0.59 で、141 keV と比較して良くなかった。イメージング結果を見ても良くないことがわかる。

基礎実験とシミュレーションにより課題を抽出し、システムの高度化を図ったのち、ロボットにイメージャーを搭載（図 3.1-12）して ^{137}Cs 線源のイメージング実験を実施した。線源までの距離はおよそ 1 m で、測定時間は 5 分とした。図 3.1-12 はロボットに搭載した全天球カメラの画像とイメージング結果を重ね合わせた図である。カメラ画像にはロボットと搭載したコーデットキューブ型イメージャーの一部および線源が存在する対象物が写っている。図からわかるように、適切な位置に放射線源のイメージが結像することを確認した。

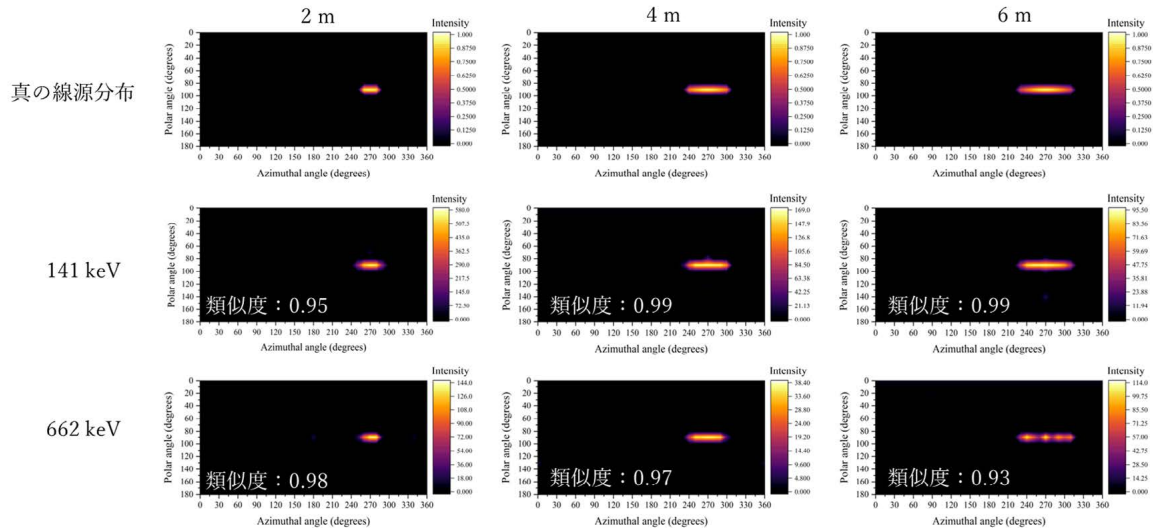


図 3.1-9 線状線源イメージングシミュレーションの結果

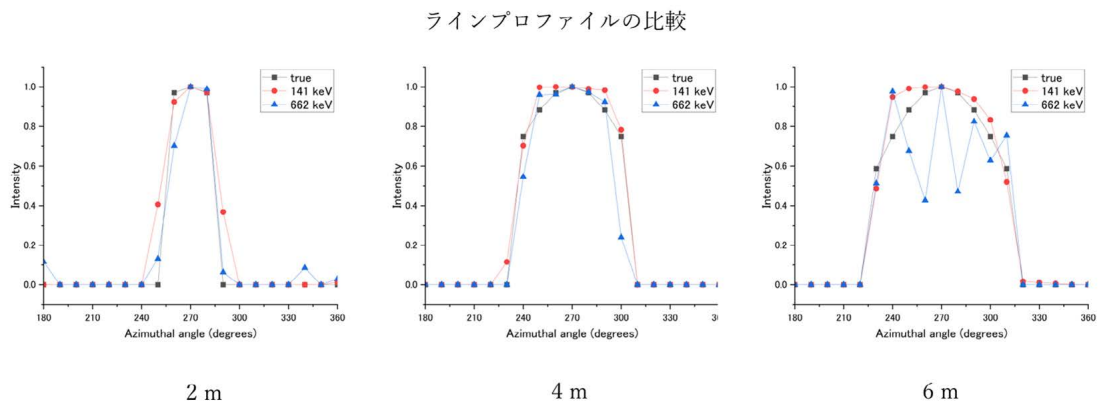


図 3.1-10 線状線源イメージングのラインプロファイル

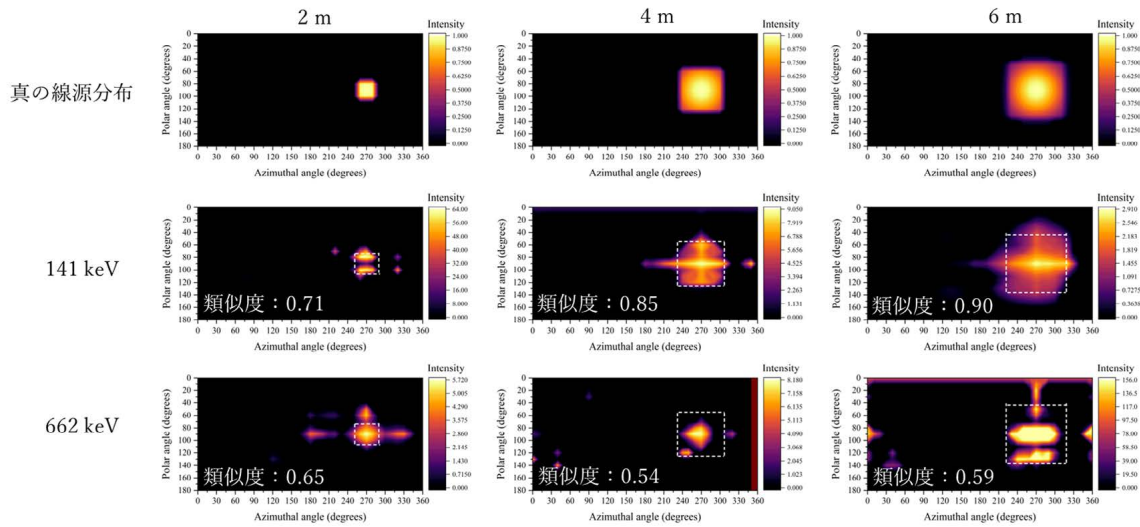


図 3.1-11 面状線源イメージングシミュレーションの結果

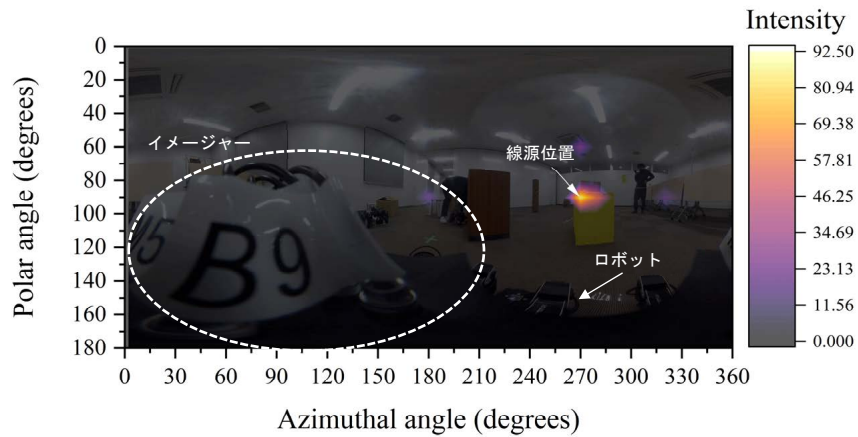


図 3.1-12 ロボットに搭載したイメージング実験の結果

3.1.2 まとめ

令和 4 年度までの結果をもとにイメージャーの実機を製作した。製作した実機は重量 600 g 以下で、大きさ $10 \times 10 \times 10$ cm 以下と、ロボットに搭載可能なサイズである。現場運用を見据えた多核種同時イメージング試験および分布線源イメージングシミュレーションを実施した。特性評価試験の結果をフィードバックし、画像再構成アルゴリズムの高度化を図った。 ^{57}Co (122 keV)、 ^{22}Na (511 keV)、 ^{137}Cs (662 keV) の同時イメージングが角度分解能約 10° で行えることを確認した。また、定量評価の可能性も示された。線状、面状分布線源のイメージングにおいても、真の線源分布に対応したイメージング結果が得られることを確認した。改良されたシステムを用いてロボットに搭載して実証試験を行った。その結果、適切な位置に ^{137}Cs 線源をイメージングできることを確認した。

3.1.3 指向性検出器の製作と評価【令和3年度～令和5年度】

【令和4年度までの概要】

令和3年度には、本プロジェクトで開発を行う CORRASE を構成する指向性検出器の開発を原子力機構と連携して行った。原子力機構とともに検討した結果、多面体型のガンマ線遮蔽体とガンマ線検出器を組み合わせた多面体型指向性検出器の開発を行うことに決まった。令和3年度では、最小単位の多面体型指向性検出器を製作し、その評価を行った。製作した最小単位の多面体型指向性検出器の多面体型ガンマ線遮蔽体には鉛アンチモン、ガンマ線検出器にはシンチレーション検出器をそれぞれ採用した。また、シンチレーション検出器を構成するシンチレータには、高い感度と高い発光量を併せ持ち、かつ減衰時間が42 ns と短く、高線量場での計測に高い適性をもつ LYSO(Ce) シンチレータを用いた。製作した最小単位の多面体型指向性検出器の評価を行うために、 ^{137}Cs (1 MBq) 線源を 10° 刻みで移動させ、それぞれの線源位置でのシンチレーション検出器のピークカウント数を計測した。その結果、シンチレーション検出器と ^{137}Cs 線源の間にガンマ線遮蔽体がある範囲では大きくカウント数が減少することを確認した。この結果より、製作した最小単位の多面体型指向性検出器が設計コンセプトを反映したものであることがわかった。

令和4年度には、令和3年度に引き続き、原子力機構と連携しながらロボットに搭載することを目的とした指向性検出器の製作と開発を行った。令和4年度ではシンチレーション検出器の数を8個に拡張した多面体型指向性検出器の製作と開発に取り組んだ。今回製作した8ch versionの多面体型指向性検出器はロボットに搭載することを意識し、 $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$ のアルミケースに収まるように設計した。製作した多面体型指向性検出器に必要なペイロードエリアは $100 \times 100 \text{ mm}^2$ で、重量は約1.65 kg となった。これらは、ロボット側からの要望であるペイロードエリア最大で $132 \times 150 \text{ mm}$ 、ペイロードは2 kg 以下との要件を満たすものとなった。製作した多面体型指向性検出器の評価を行うために、未知の場所においた ^{137}Cs 線源 (1 MBq) の位置推定実験を行った。その結果、多面体型指向性検出器の推定位置は真の線源位置と近い場所になっているものの、それぞれの位置にはずれがあった。この原因には、LYSO(Ce) の自己発光バックグラウンド (BG) の影響が考えられた。実証試験では、使用する ^{137}Cs 線源を1 MBq から10 MBq に変更するため、より線源位置推定の精度が向上すると考えられた。

【令和5年度実施内容および結果】

令和5年度は、実証試験に向けて、ロボットへ搭載する多面体型指向性検出器を3組製作した。ロボット搭載試験を行い、製作した多面体型指向性検出器の評価を行った。その結果、実証試験に向けて、多面体型指向性検出器を構成するシンチレーション検出器のシンチレータを自己発光BGのあるLYSO(Ce)から自己発光BGのないBGOに変更することとした。また、実証試験に向けて、新たにBGOシンチレータ多面体型指向性検出器を3組製作した。実証試験では、3台のロボットにBGOシンチレータ多面体型指向性検出器をそれぞれ搭載し、指向性検出器システムの評価を行った。

① 3組の多面体型指向性検出器の製作

令和4年度に製作した多面体型指向性検出器を実証試験に向けて3組製作した。多面体型指向性検出器を製作するにあたり、以前に購入した80503型8ch SiPM ケーブルが当時の想定より長さが必要となったため、ケーブル長を30 cm から70 cm へと改造した。

今回製作した 3 組の多面体型指向性検出器を図 3.1-13 に示す。製作した検出器は、多面体型鉛アンチモンガンマ線遮蔽体、LYSO(Ce) シンチレータ、80503 型 8ch SiPM ケーブル、80470 型ロボット搭載用 8ch SiPM 読出回路、アルミケース、3D プリンタで作成した遮光用黒色治具から構成される。今回製作した 3 組の多面体型指向性検出器は、令和 4 年度に開発・製作したものと同様の構成になっており、ロボット側の搭載要件を満たすサイズと重量に収まっている。

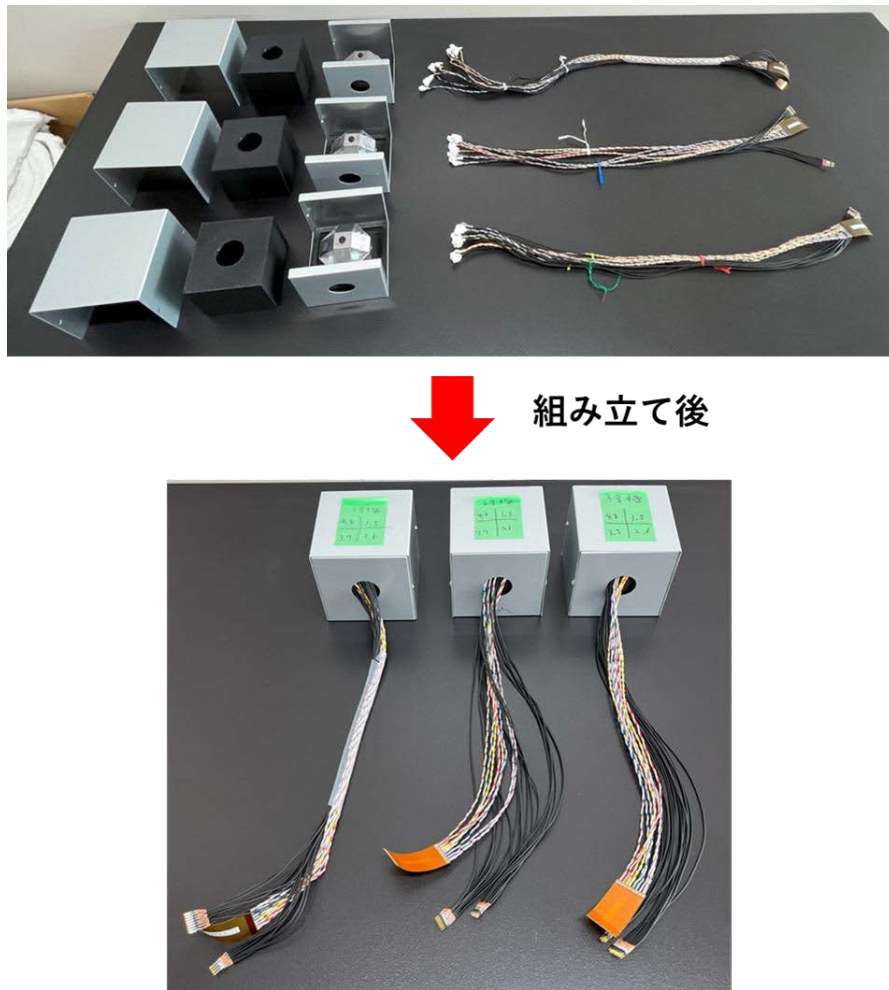


図 3.1-13 製作した 3 組の多面体型指向性検出器

② 多面体型指向性検出器の多脚型ロボットへの搭載試験

富山高専実験室にて、多面体型指向性検出器の多脚型ロボット搭載試験を行った。多面体型指向性検出器は多脚型ロボット中の治具に設置した。多面体型指向性検出器を乗せた状態でロボットの走行試験を行ったところ、タイヤでの走行や足を上げての走行が問題なく可能であることを確認した。また、ロボットに搭載されている制御用 PC の USB ポートでの多面体型指向性検出器の制御および給電を行えることも併せて確認した。

次に、1 組のロボットと多面体型指向性検出器を用いて放射線源イメージング実験を行った。実験体系を図 3.1-14 にまとめる。100×100 cm のフィールドの中心に ^{137}Cs 線源 (2 MBq) を設置し、ロボットは 3 つのポジションに順番に移動させながら、各ポジショ

ンで 1000 秒ずつ計測を行った。それぞれのポジションでの線源位置の推定位置結果を図 3.1-15 にまとめる。図中の赤い矢印の先が真の線源位置である。ポジション 1 とポジション 3 では、線源位置をよく再現する位置に収束する結果が得られた。一方で、ポジション 2 では、真の線源位置と本測定から推定された位置のずれが大きくなった。これは、線源からの距離が他のポジションより遠いためにカウント数が十分に得られなかったことや、令和 4 年度までの概要でも言及した LYSO(Ce) の自己発光 BG の影響が考えられる。LYSO(Ce) シンチレータを当初は高線量場で使用することを想定しており、この自己発光 BG の影響を無視できるとして採用していた。しかし、実証試験では密封線源を使用するため、この BG の影響が無視できないことが本実験によりわかった。このため、実証試験に向けて自己発光 BG のない BGO シンチレータを採用した多面体型指向性検出器を 3 組製作し、それを用いて実証試験に取り組むこととした。

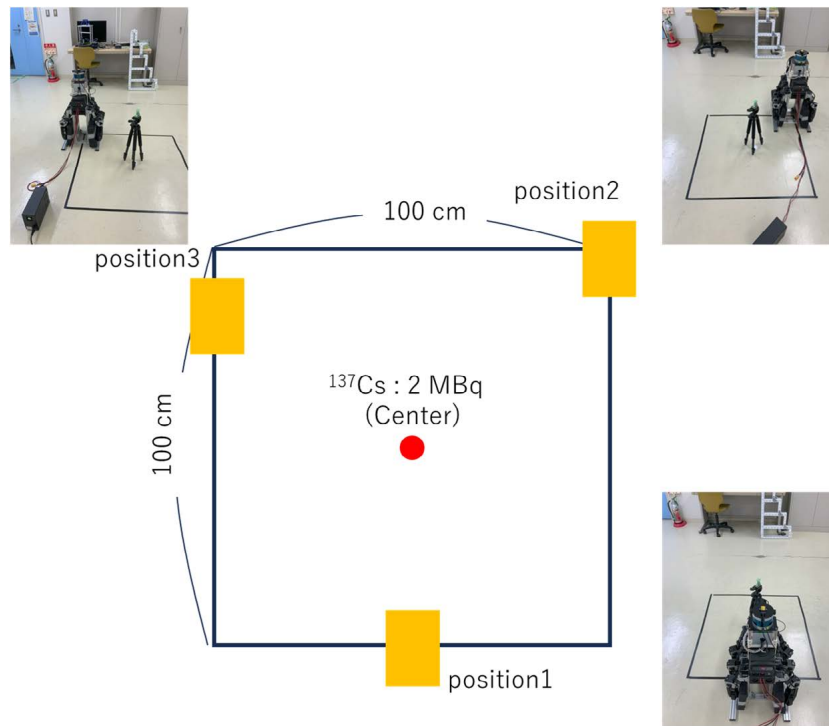


図 3.1-14 多面体型指向性検出器の多脚型ロボットへの搭載試験体系

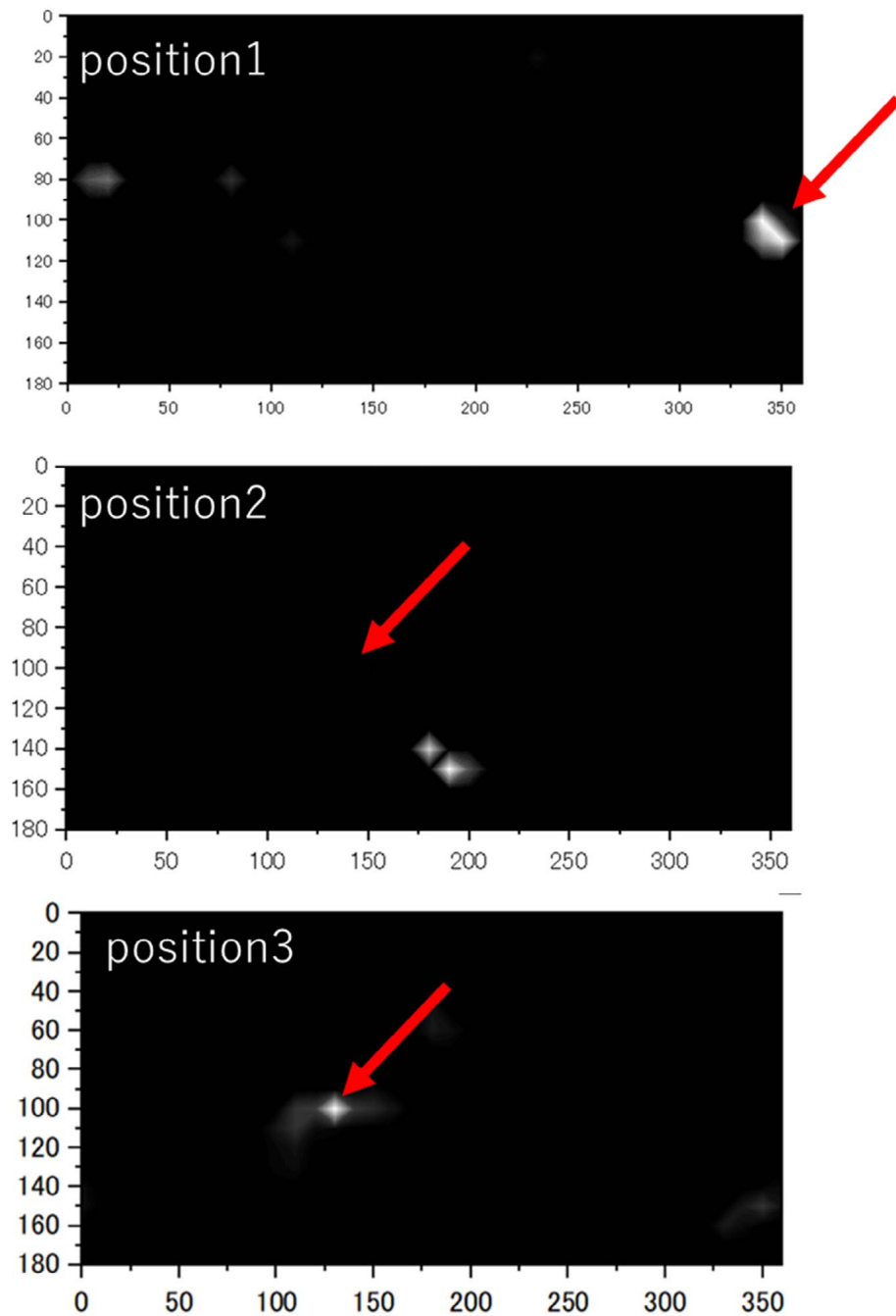


図 3.1-15 各ポジションでの線源推定位置

③ BGO シンチレータ多面体型指向性検出器の製作と評価

BGO シンチレータ多面体型指向性検出器を製作するために、LYSO(Ce) シンチレータ多面体型指向性検出器と共用できる 80470 型ロボット搭載用 8ch SiPM 読出回路以外の構成パーツを新たに調達した。新しく調達したパーツは、鉛アンチモン遮蔽体、SiPM ケーブル、BGO シンチレータ、アルミケース、遮光用治具製作用 3D プリンタモデル材であった。また、LYSO(Ce) と BGO では発光量が違うため、光読み出しには新たに 80503A 型 8ch SiPM ケーブルを採用した。調達したパーツを組み立て、BGO シンチレータ多面体型指向

性検出器を製作した。LYSO(Ce)シンチレータ多面体型指向性検出器からの変更点は、シンチレーション検出器部分のみ（シンチレータと光読み出し部）となっており、外観・サイズ・重量は、LYSO(Ce)多面体型指向性検出器と同様である。製作したBGOシンチレータ多面体型指向性検出器の評価を行うために、線源位置推定実験を行った。実験条件を以下にまとめる。

BGOシンチレータ多面体型指向性検出器評価実験内容

線源位置：仰角 $\theta = 55^\circ$ 、方位角 $\phi = 315^\circ$

線源位置から検出器中心までの距離：約 35 cm

線源： ^{137}Cs (1 MBq)

計測時間：900 sec

BGOシンチレータ多面体型指向性検出器を用いて線源位置を推定した結果を図 3.1-16 に示す。図 3.1-16 中の赤矢印先が真の線源位置である。真の線源位置の付近にホットスポットが確認できる。本実験により、BGOシンチレータを用いた場合でもLYSO(Ce)でも同様に線源イメージングを行えることを確認した。

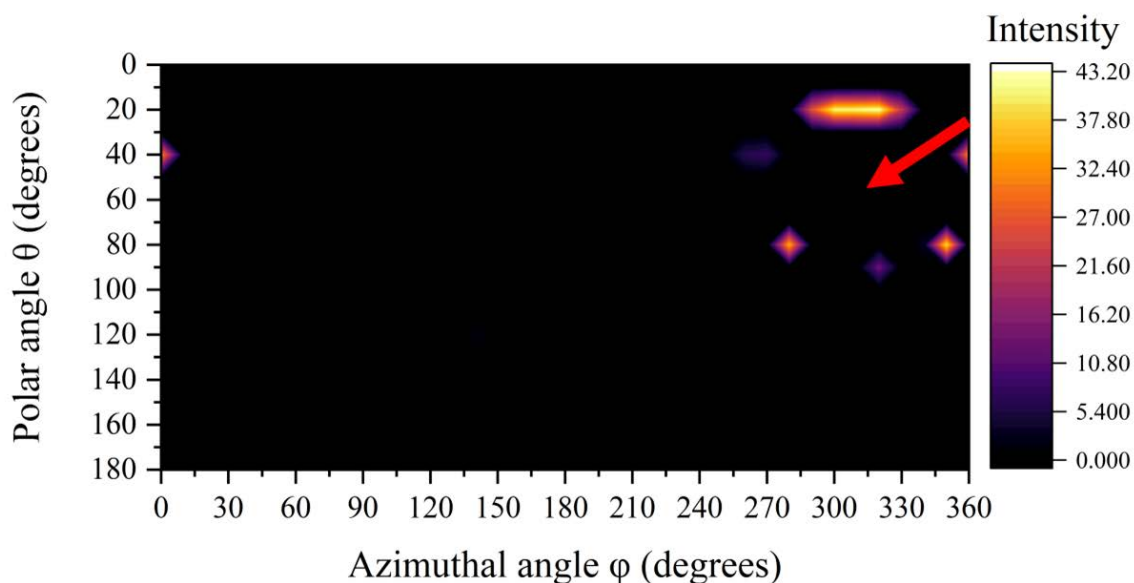


図 3.1-16 線源位置の推定結果（BGOシンチレータ多面体型指向性検出器）

④ 実証試験における多面体型指向性検出器

実証試験を原子力機構 CLADS 国際共同研究棟 2 階会議室で行った。実証試験では、検出器として 3 台の BGOシンチレータ多面体型指向性検出器を用いた。詳細については、3.4 節の実証試験で述べる。

3.1.4 まとめ

多面体型指向性検出器のシンチレーション検出器を構成するシンチレータを自己発光 BG のある LYSO(Ce) から自己発光 BG のない BGO へ変更した。実証試験に向けて 3 組の BGO 多面体型指向性検出器を製作し、その評価を行った。その結果、BGOシンチレータを用いた場合でもLYSO(Ce)でも同様に線源イメージングを行えることを確認した。

3.2 画像・情報処理技術開発（再委託先：富山高専）【令和3年度～令和5年度】

3.2.1 画像・情報処理技術開発【令和3年度～令和5年度】

【令和4年度までの概要】

令和3年度は、3D-LiDARを用いた未知の調査対象領域の環境地図生成と、得られた環境地図を参照して自己位置推定を行うシステムの検討を行った。環境地図生成および自己位置推定システムのソフトウェアを試作し、試験用ロボットにより予備的検証を行った。

令和4年度は、令和3年度において作成した環境地図生成および自己位置推定を行うシステムのソフトウェアについて、次の改良を行った。

- 1) 地図生成精度向上のため、高速サンプリング可能なIMU（慣性計測ユニット、3DM-GX5-AHRS、Lord MicroStrain社製）を追加搭載するとともに、ROS (Robot Operating System) パッケージLIO-SAM[1]を使用して、無線LAN環境下において、良好な環境地図をリアルタイムで生成可能であることを確認した。
- 2) ロボットの自己位置推定について、NDT アルゴリズム[2]のマルチスレッド並列処理を実装することで高速化するとともに、狭隘部における自己位置推定の安定性を向上させた。
- 3) 1)で作成した環境地図に対して、ロボットに搭載した深度カメラのRGB情報付きの点群データを並行してサンプリングし、3D-LiDARによる環境地図生成に同期させることで、環境色付きの環境地図を作成するようにし、視認性を向上させた。

単一ロボットの新型放射線計測器から得られる放射線源分布情報に基づき、環境地図点群をマーキングする手法を考案し、単一ロボットの観測位置から見た放射線源位置を環境地図に反映させるシステムを構築した。その結果、放射線源の存在する方位と位置および分布状況をおおよそ把握できることを確認した。

実証試験用に新たな移動ロボット（図3.2-1、Hexapod Robot Loiter2020_ver1.1、株式会社シマノ製）を導入した。実証試験に向けてロボットの整備調整を行うとともに、開発してきたシステムを実装し、従来と同等の結果が得られることを確認した。

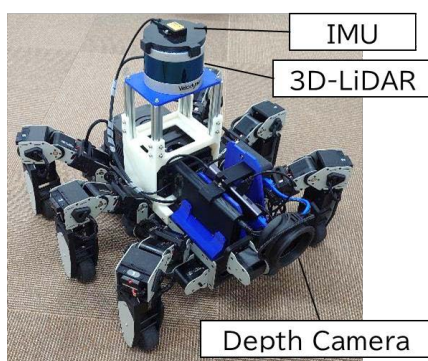


図 3.2-1 Hexapod Robot Loiter2020_ver1.1 の外観

【令和 5 年度実施内容および結果】

① 単一ロボットシステムの複数ロボット対応への拡張

実証試験では、3 台の観測ロボットを運用する計画としているため、令和 4 年度までに単一ロボットを対象として開発したシステムを、複数台管理できるように拡張した（図 3.2-2）。無線 LAN ネットワーク上で 3 台のロボットを同時に手動遠隔操作できることを確認するとともに、個々のロボットの時系列収集データを一元管理できることを確認した。

一方で、3 台同時の運用テストにおいて、1) 約 7 分間での収集データ量が 30 GByte を超える状況があること、2) 無線 LAN ネットワークの帯域を圧迫し通信サイクルが不安定になる場合がある、という問題点が顕在化した。この原因の大半は 3D-LiDAR および深度カメラデータによるものであり、環境地図作成に関わる各デバイスの分解能およびサンプリングレートのバランス調整、また使用しているアクセスポイントのスペック見直しが必要である。

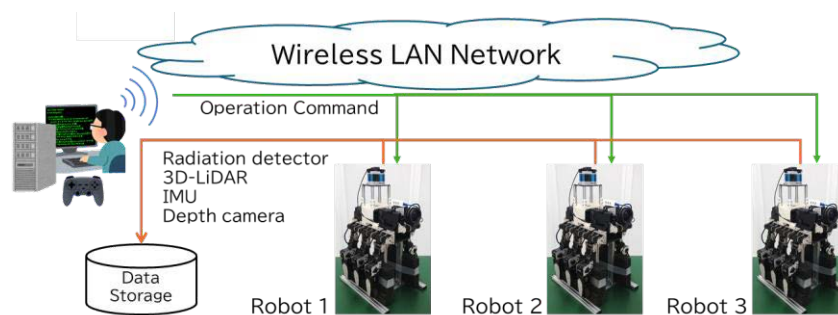


図 3.2-2 システムの複数ロボットへの対応

② 簡易的な線量率ヒートマップ生成機能の実装

未知の探索環境での無闇な探索行動は、稼働時間に制限のある観測ロボットが機能停止に陥るリスクがある。その観点から、ロボットに搭載した放射線検出器の時系列累積データを環境地図上のロボットの移動軌跡に色付きで反映させた簡易的なヒートマップ生成機能を実装した。ロボットに搭載された放射線検出器データの 10 サンプルごとの合計カウント値に応じた色相で表現し、自己位置推定で得られた移動軌跡にほぼリアルタイムで反映できるようにした。図 3.2-3 は放射線検出器のデータを用いて作成した例である。移動経路上における大まかな線量率を把握でき、重点的な探索領域決定の判断に利用可能と考えられる。

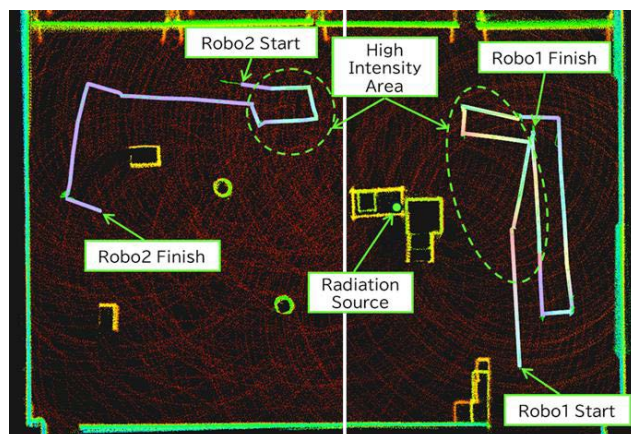


図 3.2-3 移動軌跡を用いた簡易的な線量率ヒートマップ

③ 複数地点で測定した放射線源分布推定結果の環境地図へ融合表示するシステムの開発

各地点における放射線源分布推定結果に基づいて、環境地図から抽出した点群をそれぞれ重ね合わせ、さらに論理積により重複した部分のみ色付けすることで、環境地図上に反映させる方法を基本として開発を行った。

令和4年度における抽出手法では、処理負荷低減の観点から環境地図を構成する点群に対して強いダウンサンプリングを施していたため、誤抽出の発生と得られる環境地図解像度の低下を招いていた。そこで、必要以上のダウンサンプリングを抑制するとともに、抽出処理の速度向上のため、処理アルゴリズムの見直しを行った。

点群抽出は、観測点を頂点として一定の存在強度を超えるデータの方位角・仰角を基軸とする円錐を考え、この円錐を高さ方向に伸展させていくことにより、円錐内に含まれる点群を抽出する（図 3.2-4）。放射線源分布推定データの角度分解能が 10 deg であることから、それに合わせてこの円錐頂角の開きも 10 deg としていた。しかし、図 3.2-5 に示すように探索漏れ領域が生じうることを鑑み、円錐頂角を 14.1 deg に拡張している。

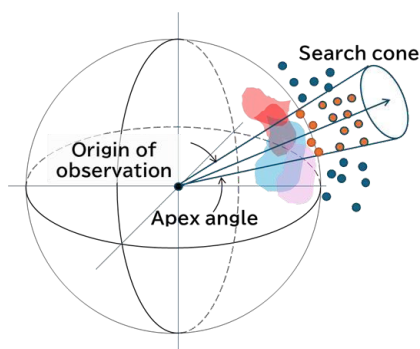


図 3.2-4 探索円錐による点群抽出

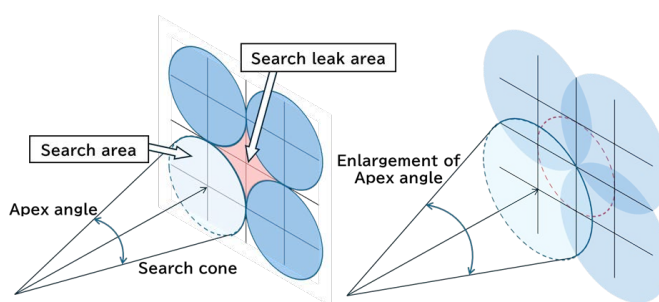


図 3.2-5 探索漏れ対策

使用している開発環境では、円錐領域のダイレクトな点群抽出をサポートしていないため、探索円錐に内接する球面体を考え、基軸方向に逐次探索することで疑似的に円錐領域の抽出を行うこととした（図 3.2-6）。円錐の基軸を等間隔に分割し、円錐に内接する球面体の中心座標を求め、円錐頂角の大きさと中心座標により球面体の半径を決定した。

メモリ上に展開された探索対象となる点群データは、総当たりでの探索となり処理コストが大きい。そのため、再帰的に8分割される立方体で3次元空間を階層的に表現することで、特定の部分空間を効率的に探索できる特徴をもつOctree アルゴリズム[3]を用いて抽出処理負荷を低減した。

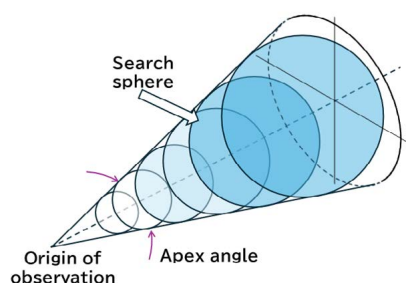


図 3.2-6 球面体による疑似円錐探索

動作テストのため、複数地点で測定した検出器のサンプルデータを用いて、予め取得した実験場所の環境地図に適用した。図 3.2-7 の各サンプルデータは方位角および仰角（天頂を 0 deg とする）で示される 2D マップであり、左手系（方位角はロボットから見て時計回りを正とする）で表現されている。

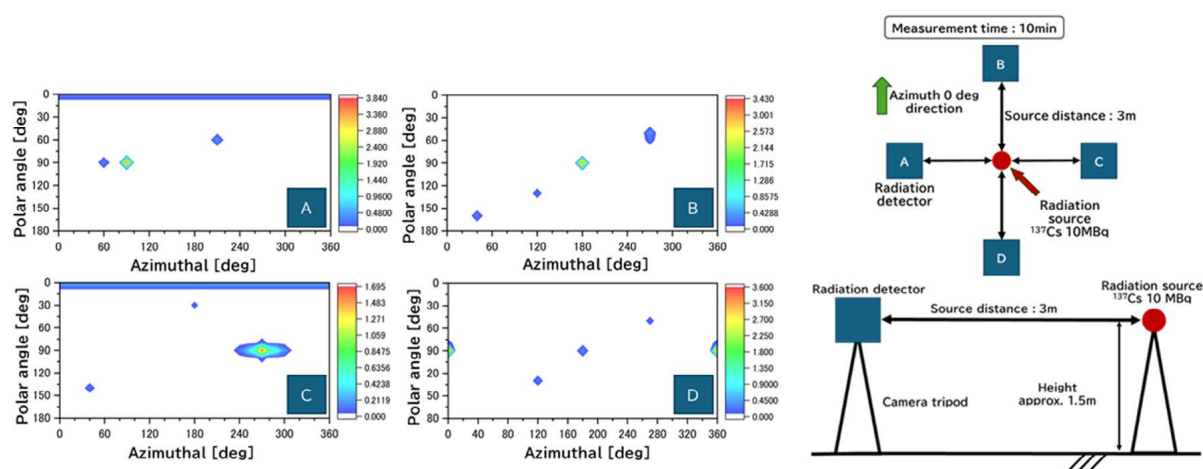


図 3.2-7 複数地点における放射線源分布情報の例

単一ロボットによる抽出結果（図 3.2-8）から、考案した点群の疑似的円錐抽出が想定通りに適用されていることを確認した。続けて、4 地点の融合結果を図 3.2-9 に示す。各地点からの抽出結果重複部分が結像しており、放射線源分布推定結果を融合表示できることを確認した。また、ダウンサンプリングによる環境地図解像度の劣化抑制と、処理時間の短縮を確認した。

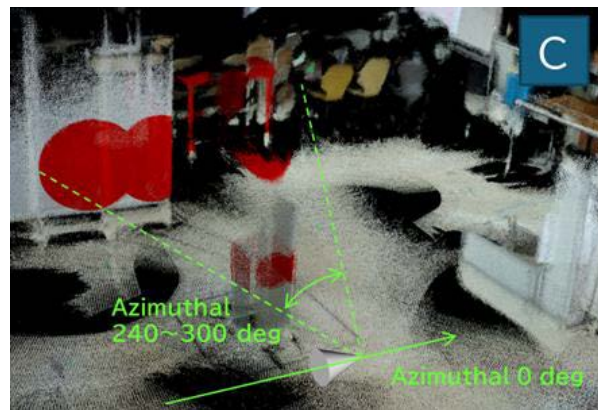


図 3.2-8 単一ロボットによる反映抽出

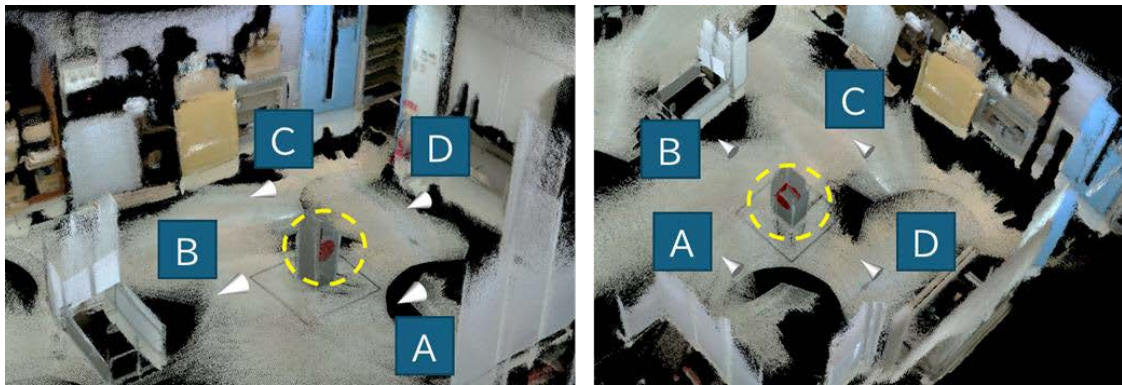


図 3.2-9 複数地点の融合結果

3.2.2 まとめ

単一ロボットシステムを改良し、複数ロボットの手動遠隔操作および収集するデータの一元管理が可能となった。検出器データを環境地図上の移動軌跡に反映させ、簡易な線量率ヒートマップ生成機能を実装した。また、複数地点で測定した検出器のサンプルデータを予め取得した実験場所の環境地図に適用することで、放射線源分布推定結果を融合表示できることを確認した。

3.3 ロボット制御システム開発【令和3年度～令和5年度】

3.3.1 複数台ロボットによる放射線源の探索【令和3年度～令和5年度】

本研究では、対象空間内の放射線源の3次元分布を効率的に推定するための探索手法の構築を行うことを目指している。ここでは、放射線源の探索を、(a)対象空間全体の大まかな探索と、その探索によって得られた予備的な放射線源分布推定結果を利用した、(b)特定箇所の詳細な探索、の2段階で行うというアプローチをとる（図3.3-1）。

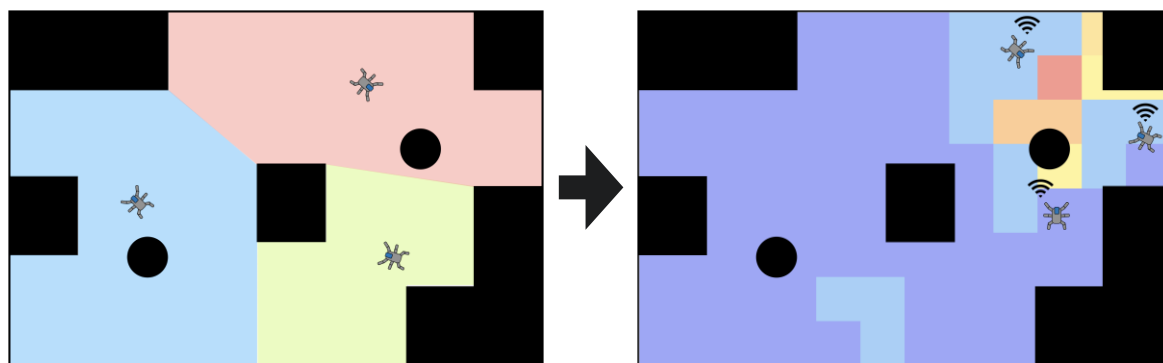


図 3.3-1 放射線源の探索戦略

【令和4年度までの概要】

① 複数台ロボットによる対象空間全体の探索

令和3年度には、複数台のロボットによって対象空間全体を大まかに探索する手法の開発を行った。

提案手法では、LiDARによって得られた環境地図をグリッドマップ化し、そのマップをロボットの台数に応じて分割することで、複数台のロボットに対して各々が探索すべき領域を割り当てる。その後、各ロボットが割り当てられた領域内を探索する経路を生成し、探索を実行する。シミュレーション実験によって提案手法の有効性を示した。

② 詳細測定のための観測地点計画手法の開発

令和4年度は、環境地図において指定した箇所に対して、より詳細な情報を得るための複数台ロボットの配置手法を構築し、その配置に対してロボットが障害物を回避しながら移動する手法を構築・実装した。

【令和5年度実施内容および結果】

令和5年度は、令和3年度に構築した粗い探索のためのタスク割り当て手法および令和4年度に構築した複数台ロボットによる観測地点計画手法を実機ロボットに実装し、検出器を搭載して検証実験を行った。

① アルゴリズムの実機実装

実機ロボットとしては、株式会社シマノ製の6脚車輪型ロボット Loiter を採用した。ロボットには3次元LiDAR (Velodyne、VLP-32C) および指向性検出器を搭載した（図3.3-2）。Loiterは重量15 kg、サイズW490×D490×H250 mmと比較的小型のロボットである。

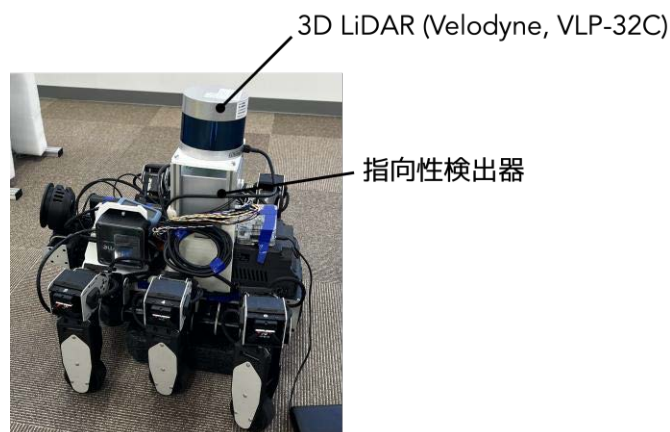


図 3.3-2 6脚車輪型ロボット Loiter

また、ソフトウェアについては、令和 3 年度、令和 4 年度に開発したアルゴリズムをベースとして、ROS を用いて制御できるようにし、ロボットに搭載されたコンピュータ (NUC) と PC の間で無線 LAN 通信によりデータのやり取りを行うこととした。

複数台ロボットへのタスク割り当て手法については、2 次元地図ファイルを読み込むと、指定台数分の探索すべき領域を示した地図を出力するアプリケーションを開発した。ここでは令和 3 年度に提案した、Multilevel k-way Partitioning[4]をベースとしたタスク割り当て手法を実装した。

この地図を入力として経路生成・追従する手法としては、令和 3 年度に構築した掃引経路生成手法と同種のアルゴリズムである、Backtracking Spiral Algorithm[5]を ROS パッケージ化した Full Coverage Path Planner[6]を利用して実機ロボットに実装した。また、探索結果に基づき、詳細測定すべき位置を指定することで、複数台ロボットの観測地点を、令和 4 年度に提案した方法に基づいて導出するアプリケーションを開発するとともに、その観測地点への移動についても、令和 4 年度に提案した方法を、ROS パッケージを用いて実機ロボットに実装した。

さらに、PC 上にはロボットの状態を遠隔から把握できるように、MATLAB Simulink を用いて GUI を構築した (図 3.3-3)。

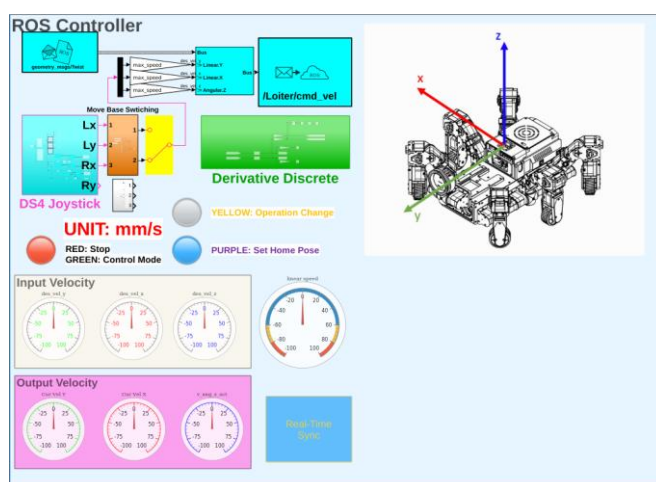


図 3.3-3 ロボット制御用 GUI

② 検証実験

令和 6 年 1 月に 2 台のロボットで、3 月に 3 台のロボットで検証実験を行った。検証実験に用いたロボットは全て①で述べた 6 脚車輪型ロボット Loiter であり、基本的な構成は同一である。全体的な実験の結果等については、実証実験の 3.4 節に記載するため、ここでは令和 6 年 3 月の実験を例に、ロボット制御システムの部分の成果についてのみ述べる。

まず、1 台のロボットが環境中を移動することにより環境の地図を作成した。この地図を 2 次元地図に変換し、変換された 2 次元地図の中で探索すべき範囲を選択したものを入力として、3 台のロボットそれぞれに対して探索領域を割り当てた（図 3.3-4）。図 3.3-4 左の地図で表される環境に対して、3 台のロボットにタスク割り当てをし、探索領域をロボットごとに色分けした結果が図 3.3-4 右の図である。

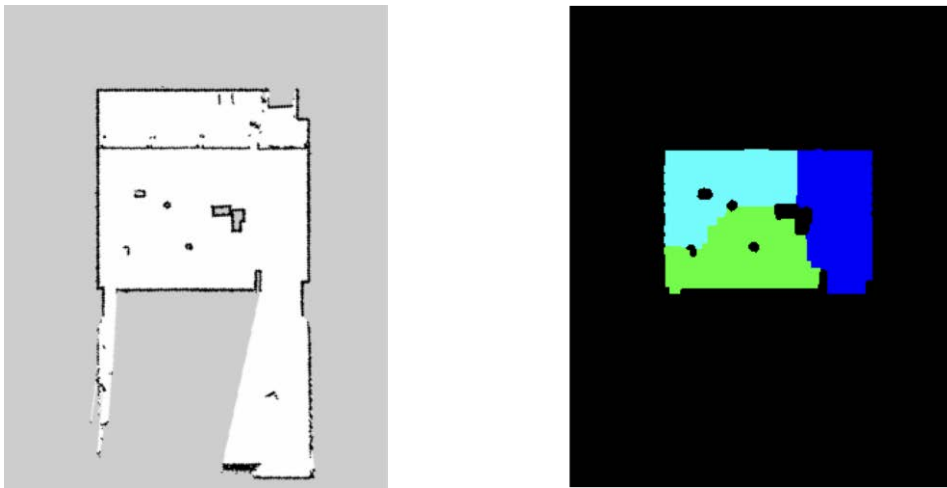


図 3.3-4 環境の 2 次元地図（左）と探索対象領域の分割（右）

図から、対象領域が概ね 3 等分に分割されていることがわかる。

次に、各ロボットは割り当てられた領域の全域を探索する。図 3.3-4 右の各領域に対して生成された経路を図 3.3-5 に示す。

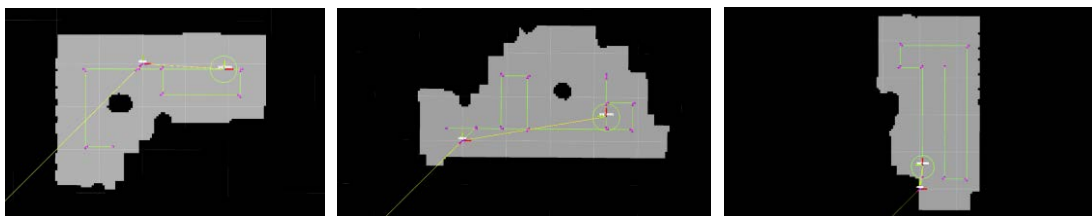


図 3.3-5 割り当て領域内を探索する経路

図から、領域の概ね全域を探索する経路が生成できていることがわかる。

各ロボットが生成された経路を追従し、その際に計測された放射線の情報からヒートマップを生成し、粗い放射線源分布を推定する。例として、1 台のロボットによって生成されたヒートマップを図 3.3-6 に示す。

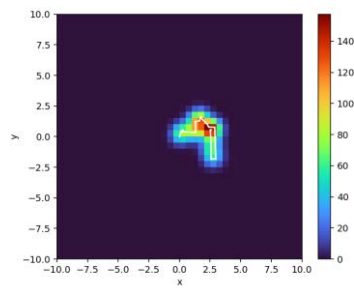


図 3.3-6 粗い探索において生成されたヒートマップの例

これらの情報をもとに詳細に計測すべき地点を決定し、3 台のロボットを配置する。ここでは、令和 4 年度に構築した手法をもとに、配置を計算するアプリケーションを開発した。また、実験においては線源の強さと計測時間を考慮し、詳細計測すべき地点から検出器までの距離が 1 m となるようにロボットを配置することとした。詳細計測のためのロボット配置導出の様子を図 3.3-7 に示す。これは、ロボット 3（図中 R_3 ）の位置を指定した時の、残りの 2 台のロボットの配置を導出した例である。

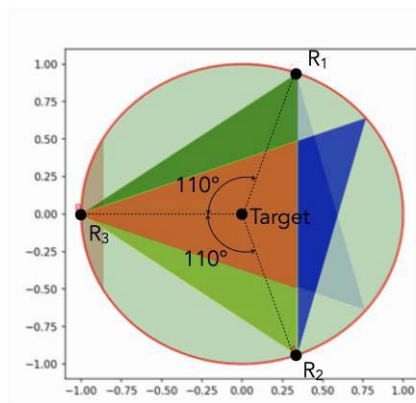


図 3.3-7 詳細計測のためのロボット配置導出

最終的に導出された配置で 3 台のロボットが放射線の計測を行っている様子を図 3.3-8 に示す。

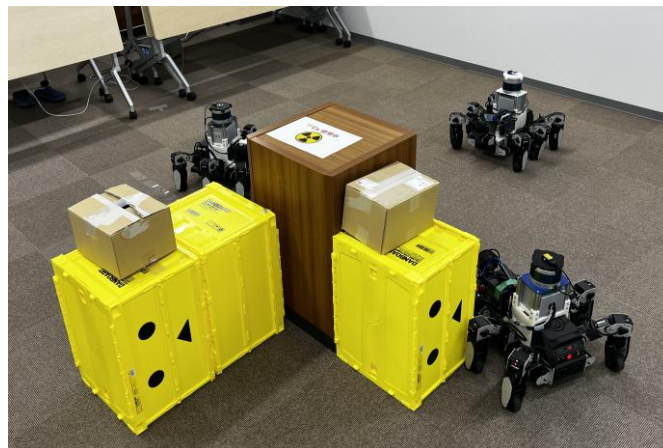


図 3.3-8 3 台のロボットでの詳細計測の様子

3.3.2 まとめ

令和 5 年度は、令和 3 年度に構築した粗い探索のためのタスク割り当て手法および令和 4 年度に構築した複数台ロボットによる観測地点計画手法を実機ロボットに実装し、検出器を搭載して検証実験を行った。

LiDAR によって得られた地図に基づき複数台ロボットへのタスク割り当てを行い、各割り当て領域を掃引する経路を生成・追従する手法を実装し、環境全体を探索することができた。また、この探索結果に基づき、詳細測定すべき位置を指定することで複数台ロボットの観測地点を計画、移動する手法を実装し、実証実験を実施した。

3.4 実証試験（東北大学、再委託先：福島大学、富山高専、連携先：原子力機構）

【令和3年度～令和5年度】

3.4.1 実証試験【令和3年度～令和5年度】

【令和4年度までの概要】

令和3年度は、検出器遮蔽体等のツール類の整備、実証試験に向けて線源位置探索ツールの基本設計解析を中心に実施した。小型ロボットに搭載した指向性検出器の情報により、3次元空間内での線源位置を探索するツールの基本設計の解析を行った。そこでは、 ^{137}Cs を対象とし、662 keVのピークについて解析した結果、線源の方位とカウント数のHigh/Lowの対応付けが明瞭であった。

令和4年度は、線源分布の全体像を俯瞰するために、小型軽量の測定器とそれを搭載できる汎用性の高い小型ロボットの開発を行った。小型ロボットに搭載する放射線測定器の位置・方向を認識するために使用する検出器姿勢自動制御システムを製作した。また、画像作成に向けて適切な配置にロボットが移動する手法を構築し、いくつかのケースについてシミュレーションにより線源探索を行った。複数の線源がある場合でもほぼ線源位置を特定することができた。しかし、バックグラウンド線源が存在する場合には明瞭にはならないことがわかった。これらの研究成果は(1)指向性検出器開発、(2)画像・情報処理技術開発、(3)ロボット制御システム開発を結びつけるものであり、研究目的である連携計測による線源探索の実現可能性を明らかにするものであった。

【令和5年度実施内容および結果】

① システム化に向けた検出器の応答関数と実測値の比較

令和4年度の結果をもとに、システム化に向けて検出器の応答関数と線源を用いた実測値の比較を行った。

令和4年度の結果をもとに、システム化に向けて株式会社ヴィジブルインフォメーションセンターと協力し、C3-G 応答関数計算を実施した。計算したガンマ線のエネルギーは122 keV、511 keV、662 keVの3パターンである。図3.4-1に、計算した応答関数の値と、線源を用いた実測値の比較結果を載せる。この実測値は、3.1節で実施した3核種同時イメージング実験の結果であり、線源配置は図3.1-1の通りである。662 keVと122 keVの検出器応答については実測値を精度よく再現して

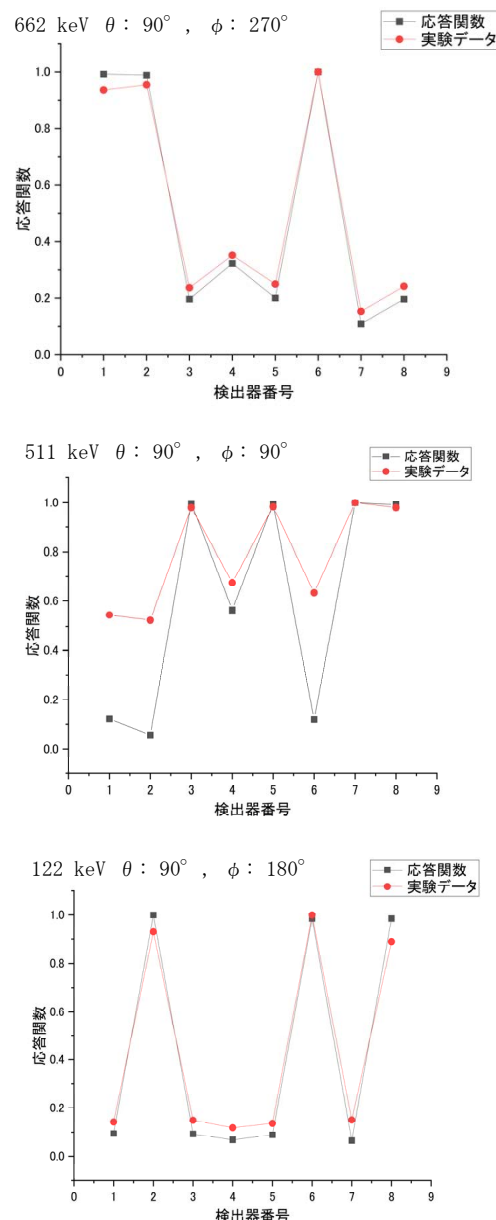


図 3.4-1 計算した応答関数の値と、線源を用いた実測値の比較結果

いることを確認した。511 keV については、実測値は計算結果ほどのコントラストが得られなかった。一方で、図 3.1-7 に示すようにイメージング結果の精度は悪くないため、実測値とのずれが大きくても、応答パターンの傾向さえ捉えることができると正しくイメージングが可能であると考えられる。しかしながら、どの程度の実測値とのずれまでが許容されるかは応答パターンのコントラストなど複数の要因に依存するため、現時点では明らかではない。今後の検討により、この依存性が明らかとなることで検出器ジオメトリの最適化につながるものと考えられる。

② 多視点からの連携計測手法の解析

ロボット型検出器は、シンチレータを組み込んだ指向性検出器を移動用のロボットに搭載したものである。ここでは、複数のロボット型検出器による連携計測のための効率的な探索アルゴリズムおよび条件（台数、移動速度、初期配置等）をシミュレーションにより実証検討した。

図 3.4-2 に示すシミュレーションでは、フロアはバグクロージャ形状（切込みの入ったドーナツ形状）になっている。ロボットは初期状態で左下に集積しているため、右下まで探索が進むまで時間がかかっている。特に、フロアに置かれた線源があるため、そこで反射してしまい、ロボットが奥まで侵入しづらくなっている。これは、右図において、ロボットの軌跡の密度を見るとわかる（線源がある箇所を境にして軌跡の密度が変化している）。これが、今後の課題となる。このようなロボット位置のバイアスをなくすには、帰還ルートを逆にたどってロボットを等間隔に配置したのち探索を開始するといったアルゴリズムが考えられる。しかし、ルート上に高計数領域が存在した場合、その先に行けないのでそのままではうまく機能しない。

本検討では、放射線検出器やロボットを“点状”として扱ったが、空間認識をする上で、光学的な全天球カメラを用いることにより、迅速な空間把握が可能となると考えられた。そこで、全天球カメラとの併用も検討した。試験的に全天球カメラの映像も確認し、連携計測による線源探索に光学的な 3 次元情報の取得も重要であると認識した（図 3.4-3）。全天球カメラの使用により、周辺環境の可視化が可能であり、線源位置の物理的な視認が可能となると考えられた。

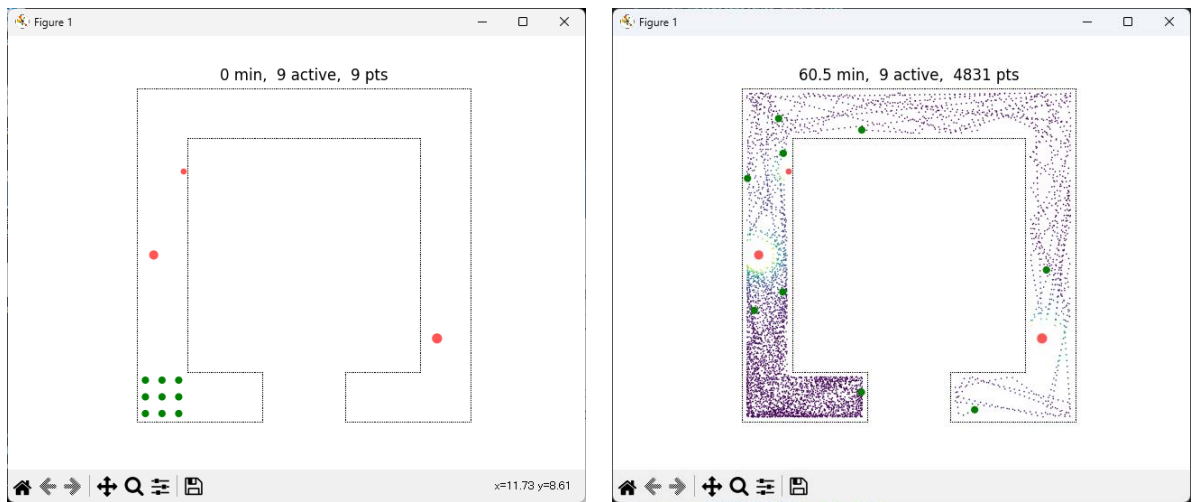


図 3.4-2 シミュレーションでの線源探査の様子（左：初期状態、右：60 分後）

- 緑がロボット、赤が線源。ロボットの軌跡には、計数率に従って色を付けている。
（低計数率だと紫、高計数率だと黄色）
- ロボット：9 体、移動速度 5 cm/s
- フロア：20 m 四方、幅 3 m



図 3.4-3 全天球カメラによる 360° の実験場所の空間把握

③ 実証試験に向けた検出器搭載ロボットシステムの構築および運用方法の検討

実証試験に向けて、検出器搭載ロボットシステムの構築を行った（図 3. 4-4）。多脚型ロボットに 3D プリンタおよびアルミ枠で製作した治具が設置されており、その治具に多面体型指向性検出器、IMU および 3D-LiDAR が固定されている。走行テストの結果、多脚型ロボットは検出器、IMU および 3D-LiDAR を搭載した状態で問題なく動作することを確認した。

実証試験に向けて、指向性検出器開発（東北大学・原子力機構）、画像・情報処理技術開発（富山高専）、ロボット制御システム開発（東北大学）の研究結果を統合して本システムの運用方法を決定した。本システムを用いた線源探査の流れを図 3. 4-5 に示す。

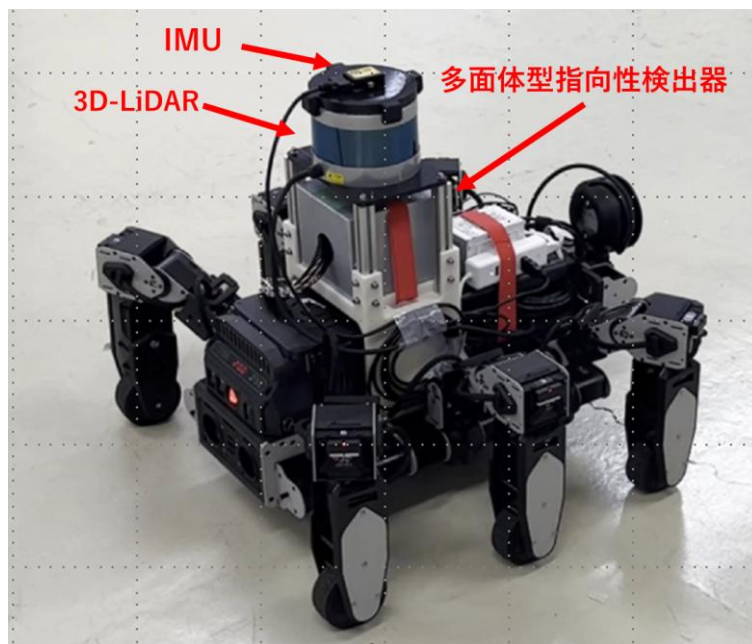


図 3. 4-4 構築した検出器搭載ロボットシステム（CORRASE）

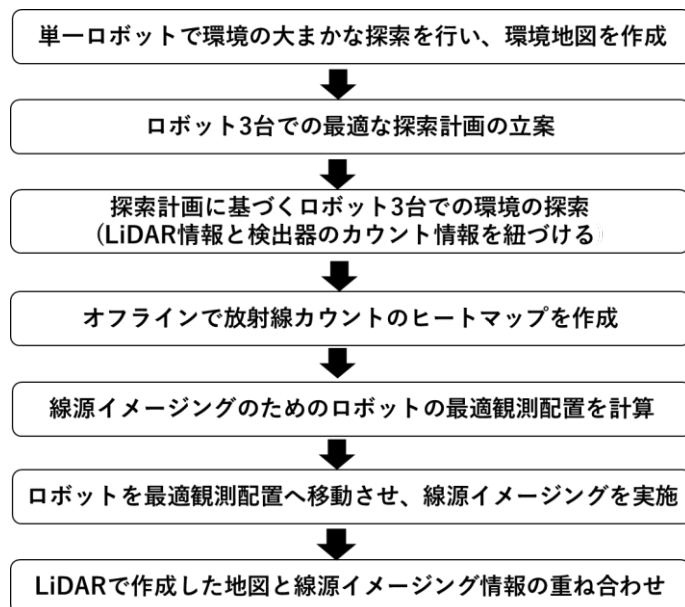


図 3. 4-5 実証試験のフローチャート

④ CORRASE の予備実証試験

令和 6 年 1 月 17 日～18 日に、原子力機構 CLADS 国際共同研究棟 2 階会議室にて CORRASE の予備実証試験を実施した。予備実証試験では、導入済みの 2 台の検出器搭載ロボットシステムを使用して、図 3.4-5 に示したフローチャートに沿って線源探査実験を行った。最終ステップまで試験を実施し、システムの課題抽出を行った。その結果、検出器応答の温度依存性、検出器制御プログラムの不具合、システム間のデータ形式の齟齬が主な課題として挙げられた。

検出器応答の温度依存性に対しては、線源探査中のロボットの排熱により、検出器温度が想定よりも上昇し、検出器応答のゲインが低下することが判明したため、温度補償回路の係数を調整することによりこの問題に対応した。

検出器制御プログラムの不具合は、ソフトウェアバージョンの不整合が原因であることがわかったため、バージョン統一によりこの問題に対応した。

システム間のデータ形式の齟齬は、富山高専と東北大学のシステム開発環境の差により生じたため、データ形式を統一することでこの問題に対応した。

以上のように、検出器搭載ロボットシステムの課題を抽出し、改造、最適化検討を行った。

⑤ CORRASE の実証試験

予備実証試験の結果を受け、令和 6 年 3 月 18 日～19 日に原子力機構 CLADS 国際共同研究棟 2 階会議室で CORRASE の実証試験を行った。

7.8×5.3 m²の会議室に障害物を設置し、線源探査実験のための未知環境を構築した。実証試験のフィールドの写真を図 3.4-6、寸法図を図 3.4-7 にそれぞれ示す。今回の実証試験では、10 MBq の ¹³⁷Cs 線源を模擬放射能汚染源として採用し、障害物上に設置した。

図 3.4-5 に示したフローチャートに沿って、3 台の検出器搭載ロボットシステムを用いて線源探査を実施した。

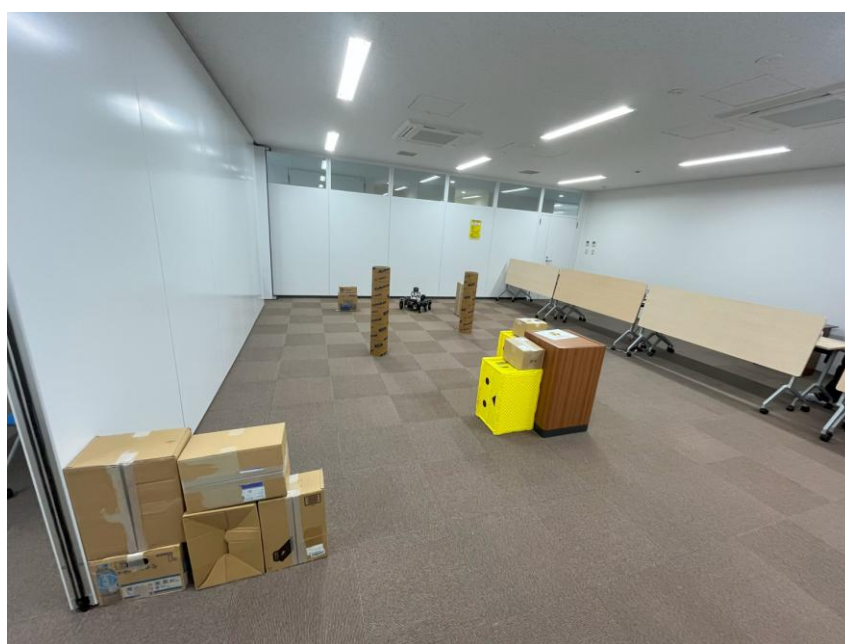


図 3.4-6 実証試験のフィールド

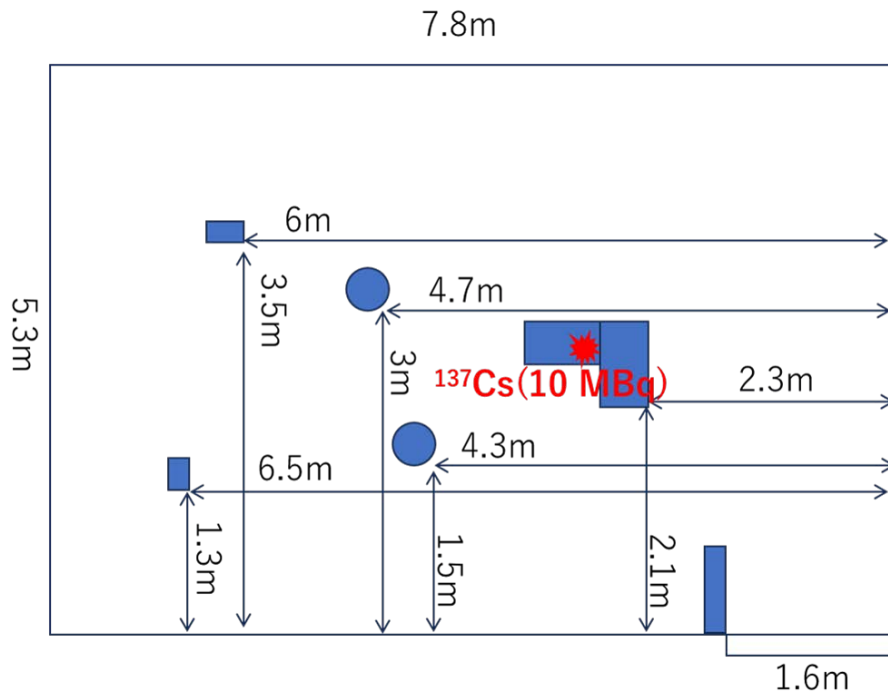


図 3.4-7 実証試験フィールドの寸法図

I. 単一ロボットで環境の大まかな探索を行い、環境地図を作成

本ロボットシステム (CORRASE) は、未知環境を探索することを想定している。そのため、はじめに未知環境の地図を作成する必要がある。そこで、実証試験では最初のステップとして、“画像・情報処理技術開発”で開発した技術を用いて先行ロボットで大まかな探索を手動で行い、未知環境の地図を作成する。地図の作成は、ロボットに搭載してある 3D-LiDAR および RGB カメラを用いて行った。先行ロボットにより、作成した地図を図 3.4-8 に示す。図からわかるように、実証試験フィールド中の段ボールや紙筒などのオブジェクトを地図上に再現できた。尚、先行ロボットによる未知環境の大まかな探索にかかった時間は約 8 分だった。

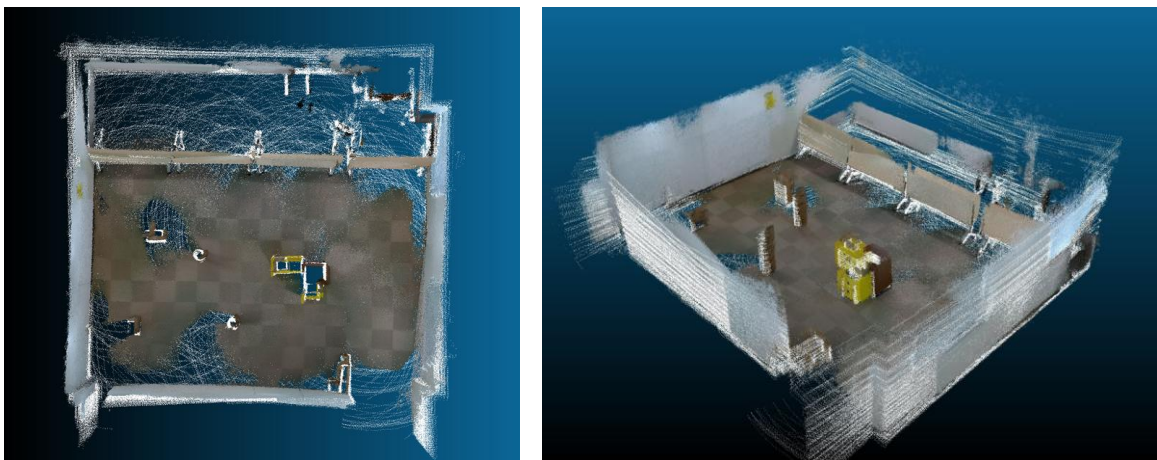
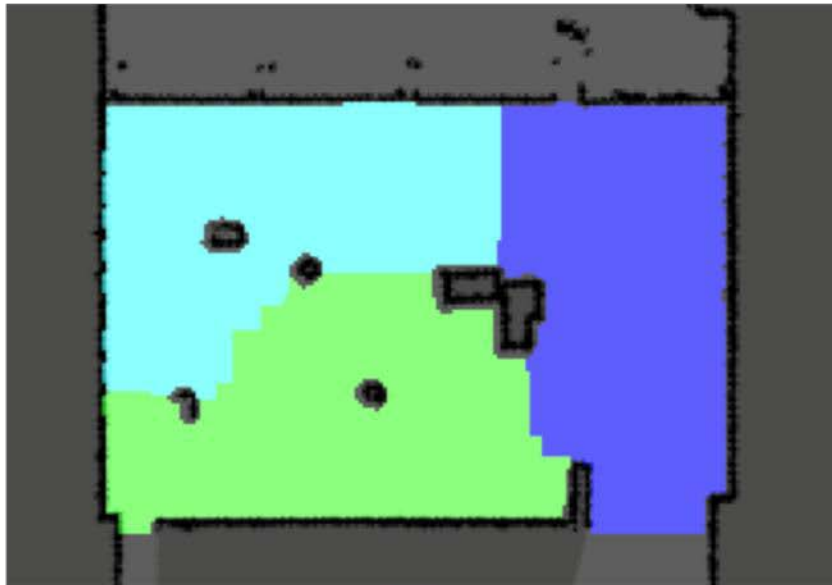


図 3.4-8 先行ロボットの大まかな探索により作成した地図

II. ロボット 3 台での最適な探索計画の立案

“ロボット制御システム”で開発した手法により、3 台のロボットで効率よく実証試験フィールドを探索できるように、タスクの割り当てを行った。3 台のロボットにタスクを割り当てた結果を図 3.4-9 に示す。分割後の図には探索エリアを効率よく探査できるルートが示されている。

3台のロボットでの最適な探索計画を立てる



3台にタスクを割り当てる

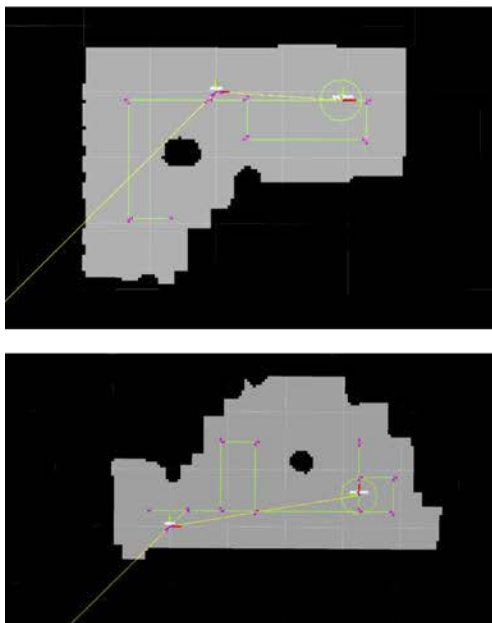


図 3.4-9 3 台のロボットへのタスクの割り当て結果

III. 探索計画に基づくロボット 3 台での環境の探索 (LiDAR 情報と検出器のカウント情報の紐づけ)

II. で計算した 3 台のロボットでの最適な探索計画に沿って、実証試験フィールドの探索を手動で行った。この際、各ロボットに搭載してある検出器の全チャンネルの合計カウントと位置情報を 1 秒ごとに紐づけた。ロボット 3 台での環境を探索の様子を図 3. 4-10 に示す。ロボット 3 台での環境探索に要した時間は約 7 分だった。

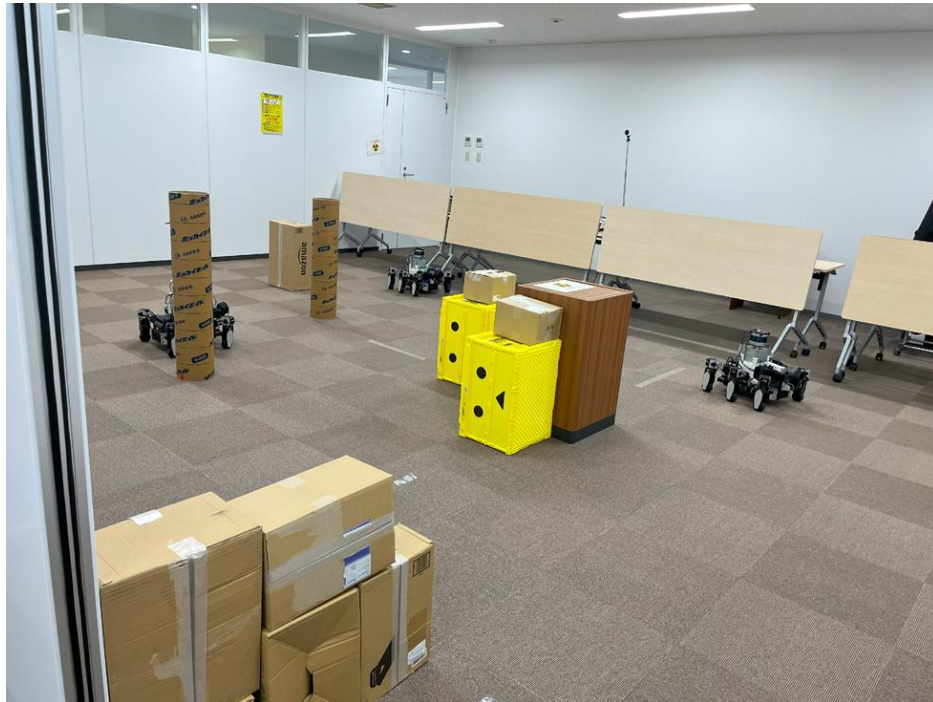
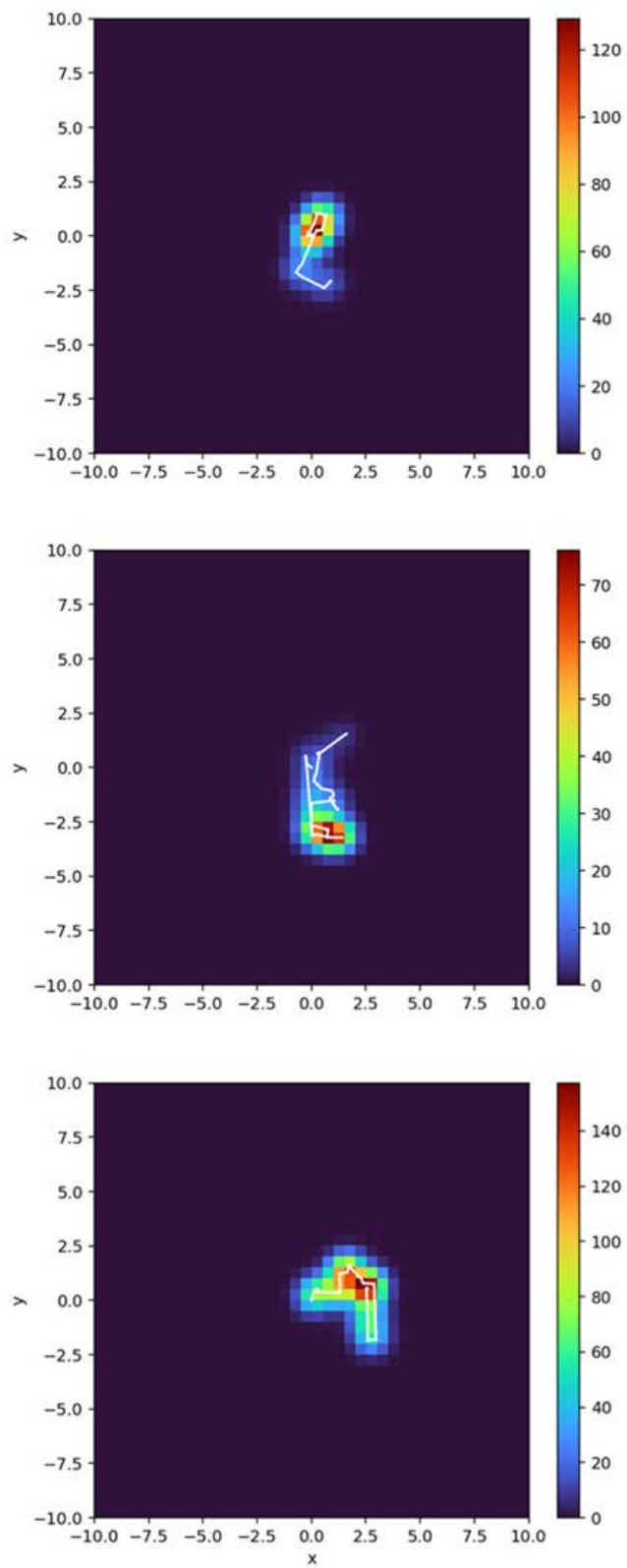


図 3. 4-10 ロボット 3 台での探索の様子

IV. オフラインで放射線カウントのヒートマップを作成

III. で得られた検出器の全チャンネルの合計カウントと位置情報の紐づけ結果から、“ロボット制御システム”で開発した技術を用いてオフラインで実証試験フィールドの放射線カウントのヒートマップを作成した。作成したヒートマップを図 3. 4-11 に示す。作成したヒートマップ中でカウントレートが高かった位置を詳細計測すべき地点とした。



(上 : Robo1、中 : Robo2、下 : Robo3)

図 3.4-11 実証試験フィールドの放射線カウントのヒートマップ

V. 線源イメージングのための最適観測配置を計算

“ロボット制御システム”で開発した複数台ロボットによる観測地点計画手法を用いて、3台のロボットでのイメージングのための最適配置を計算した。配置計算結果と2次元地図を重ねたものが図3.4-12である。放射線カウンターのヒートマップから粗い放射線分布を推定し、最もカウント数が高い点をtargetとしてロボットの最適配置の計算を行った。粗い推定結果を用いているのでtarget点と真の線源位置は異なる。しかし、本試験は未知の線源状況の探索であるため、ロボット3台が真の線源位置を囲んでいるか否かには関わらず線源のイメージングを実施した。ロボットに搭載した指向性検出器は視野が 4π であるため、線源付近にロボットが位置すれば線源のイメージングが可能な設計となっている。

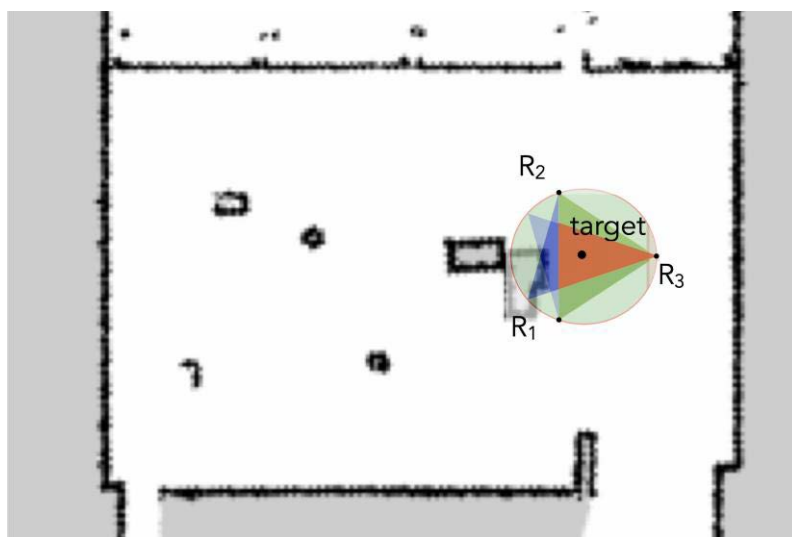


図 3.4-12 2次元地図へ重ね合わせたロボット3台の配置計算結果

VI. ロボットを最適観測配置へ移動させ、線源イメージングを実施

V.で計算された線源イメージングのための最適配置に3台のロボットをそれぞれ手動で移動させた。最適配置後のロボットを図3.4-13に示す。ロボットに搭載した多面体型指向性検出器を用いて900秒間計測を行った。ロボットに搭載された多面体型指向性検出器から得られたピークカウント数を用いて線源位置を再構成した結果を図3.4-14に示す。実証試験では、SLAMの自己位置推定の誤差程度に空間分解能を合わせるように収束条件を緩和して再構成計算を行った。図中の赤矢印の先が真の線源位置である。それぞれのロボットに搭載された多面体型指向性検出器により、真の線源位置を含む範囲で線源イメージングが行えた。

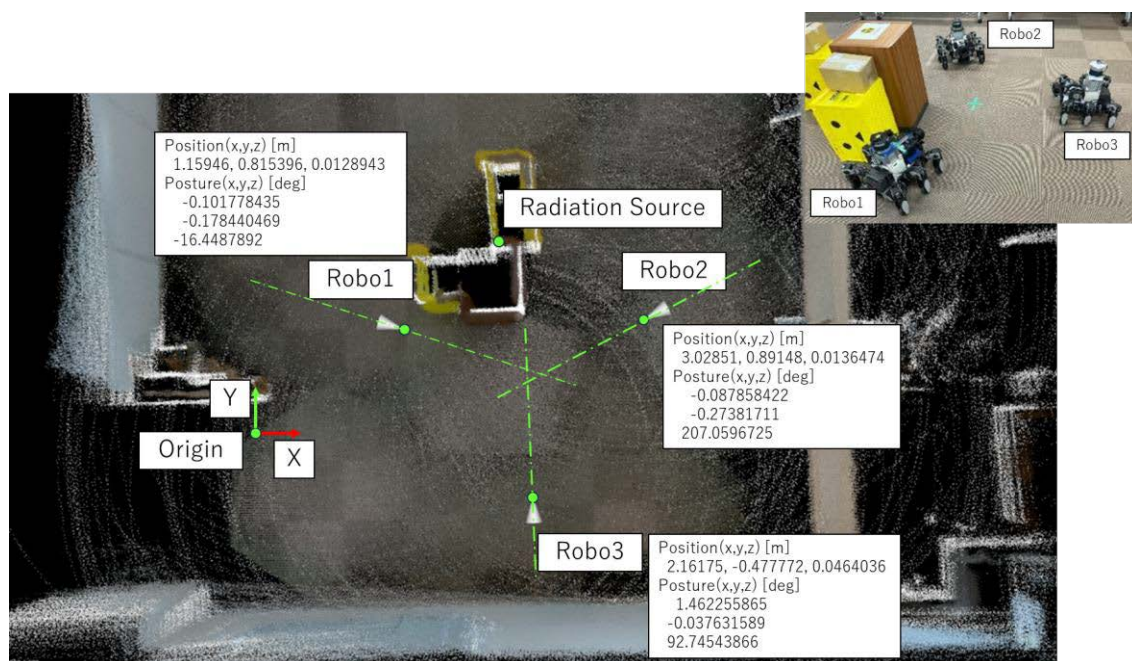
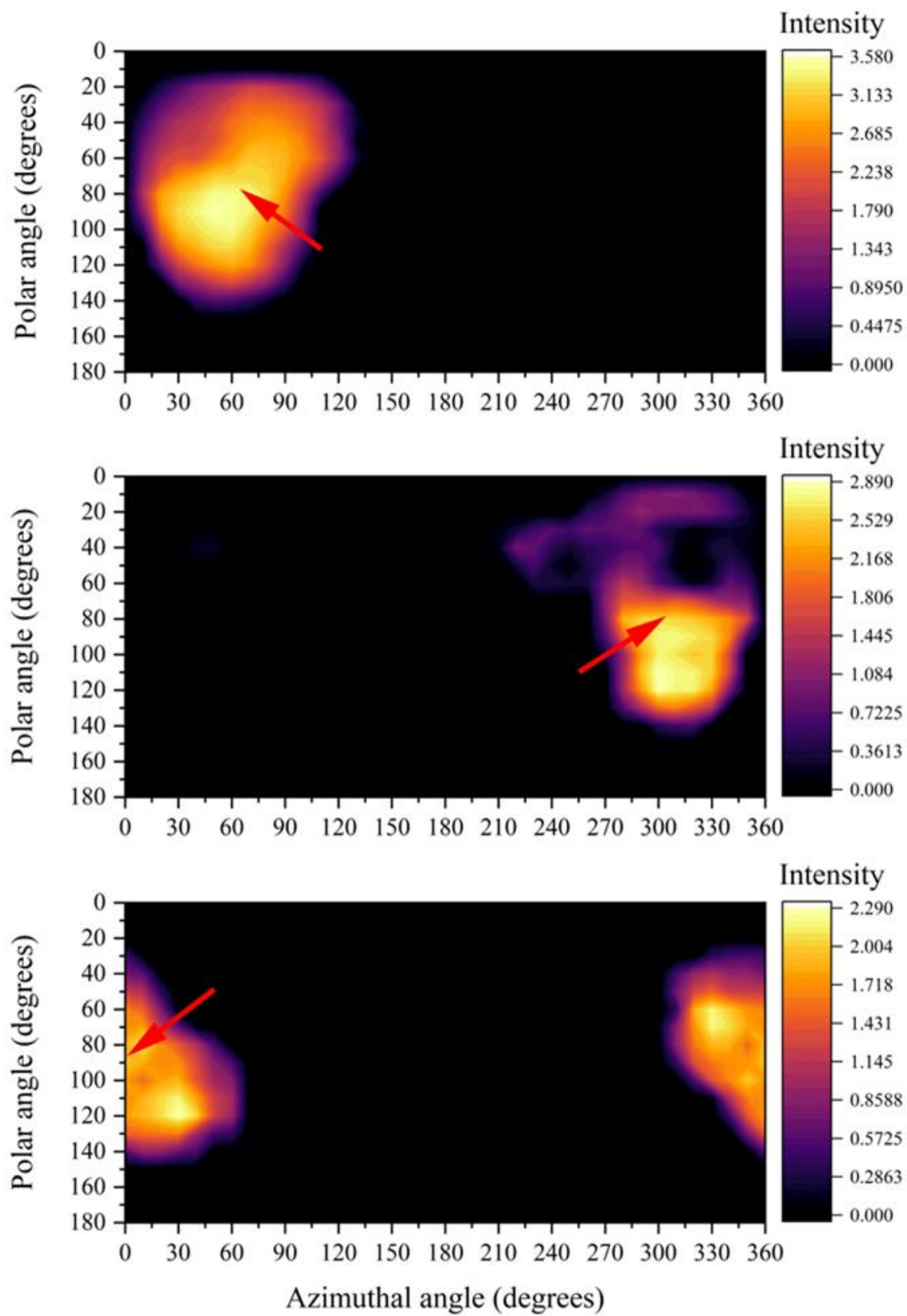


図 3.4-13 線源イメージングの様子



(上 : Robo1、中 : Robo2、下 : Robo3)

図 3.4-14 線源イメージングの結果

VII. LiDAR で作成した地図と線源イメージング情報の重ね合わせ

“画像・情報処理技術開発”で開発した技術を用いて LiDAR および RGB カメラにより作成した環境地図と線源イメージング情報の重ね合わせを行った。各ロボットに搭載された多面体型指向性検出器ごとに、環境地図と線源イメージングの重ね合わせを行った結果を図 3.4-15～図 3.4-17 にそれぞれ示す。各図の上は線源イメージングの結果であり、下は環境地図と線源イメージングの重ね合わせ結果である。重ね合わせには、線源イメージの最大強度付近（図中の赤点線枠）のみを使用した。これは、線源イメージングの結像誤差、ロボットの自己位置の推定誤差などを考慮すると、線源イメージング情報において最大強度付近は誤差の影響が最も少ないためである。図 3.4-17 の Robo3 の重ね合わせ結果が他のものと比べ、重ね合わせ部分が少なくなっているのは、ロボットが線源を見上げているので、線源イメージの大部分が空間に投影されているからである。次に、Robo1～Robo3 から得られた地図上の線源イメージの重なり合った箇所のみを抽出した結果を図 3.4-18 に示す。図中の赤で示されている範囲が線源イメージの重なり合った箇所であり、線源が設置された物体を特定することができていることがわかる。

3.4.2 まとめ

“指向性検出器開発”で開発した多面体型指向性検出器、“画像・情報処理技術開発”で開発した環境地図作成・地図と線源イメージングの重ね合わせ、“ロボット制御システム開発”で開発した 3 台のロボットへのタスク割り当て・線源イメージングのための最適配置を組み合わせた放射線源探査を実現するロボットシステム (CORRASE) の実証試験を行ったところ、 $7.8 \times 5.3 \text{ m}^2$ の実証試験フィールドに設置した 10 MBq の ^{137}Cs 模擬放射能汚染源の位置の特定に成功した。このことにより、当初目標として掲げていた連携計測による広視野・迅速・安価な放射線源探査を実現するロボットシステムを、本研究で開発することに成功したと結論した。

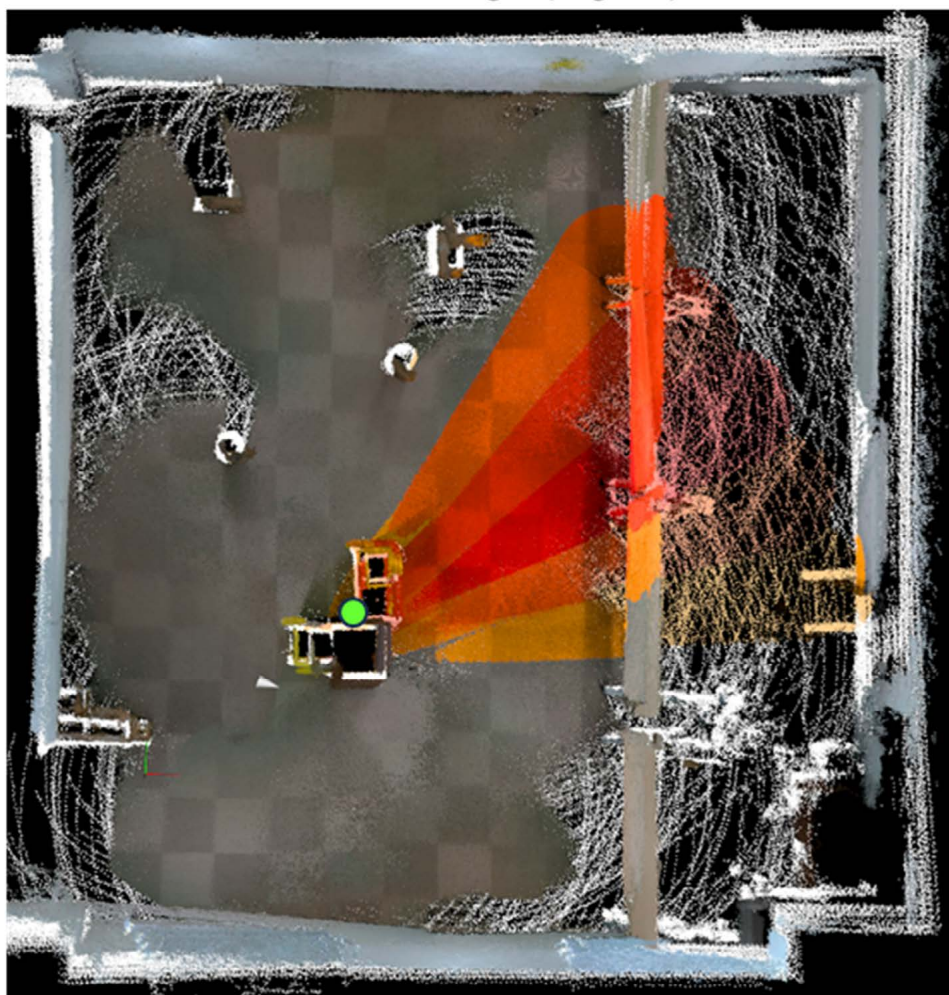
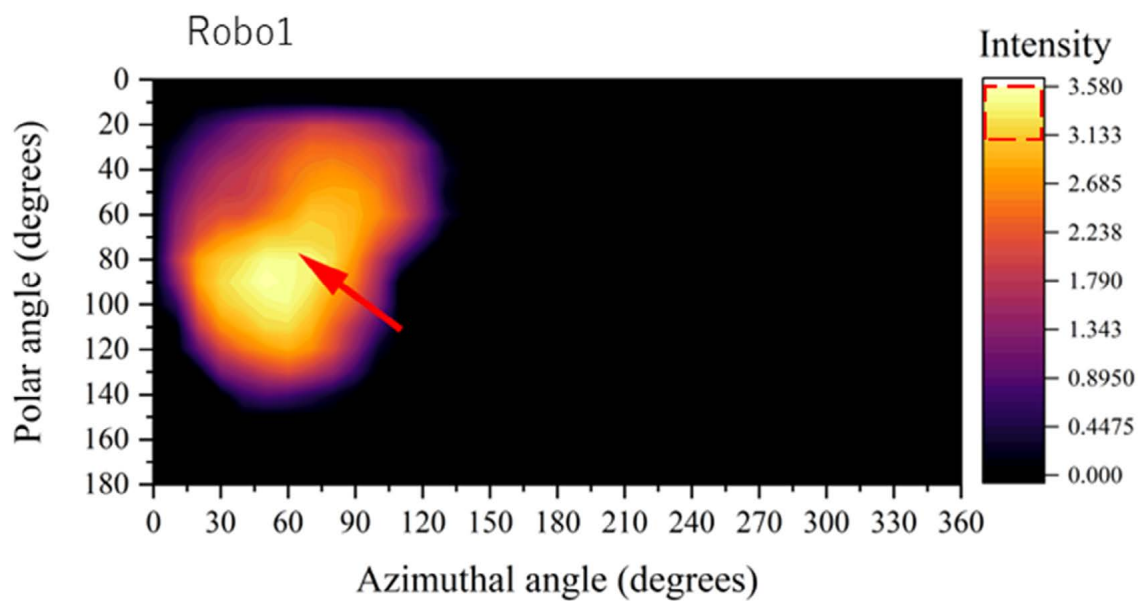


図 3. 4-15 地図と線源イメージングの重ね合わせ結果 (Robo1)

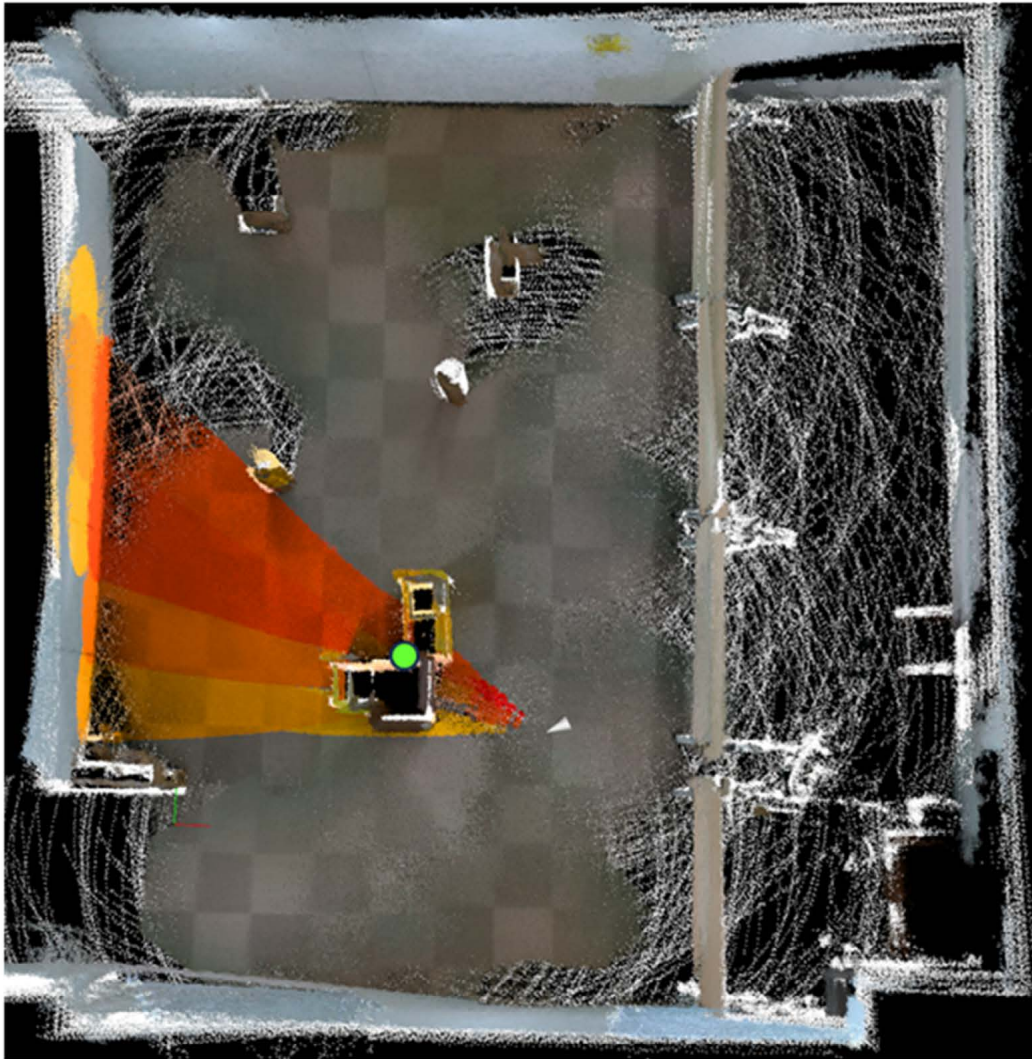
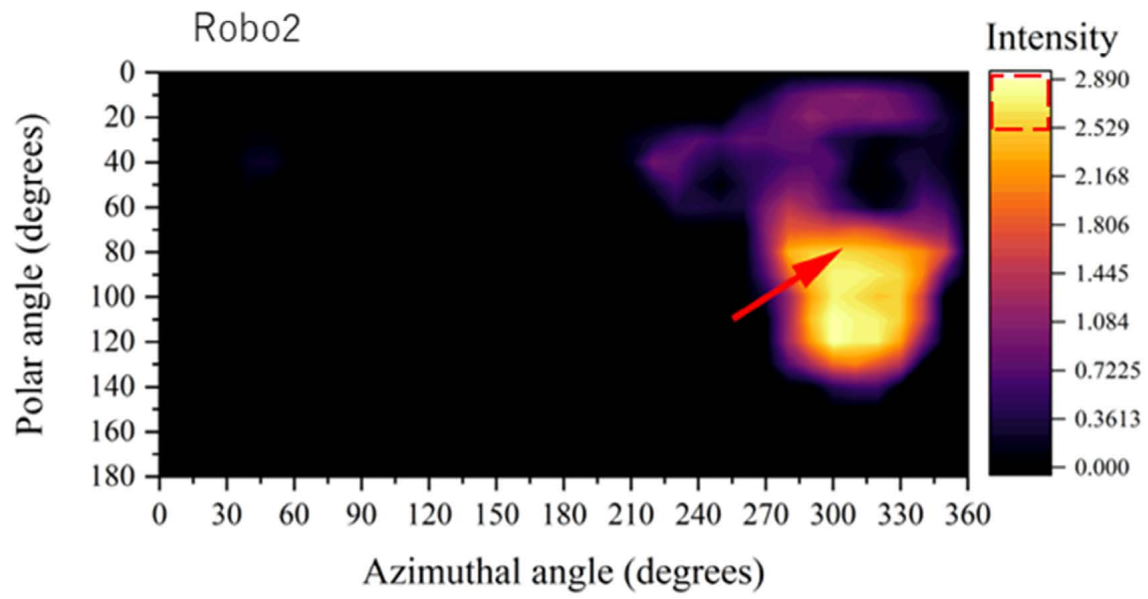


図 3.4-16 地図と線源イメージングの重ね合わせ結果 (Robo2)

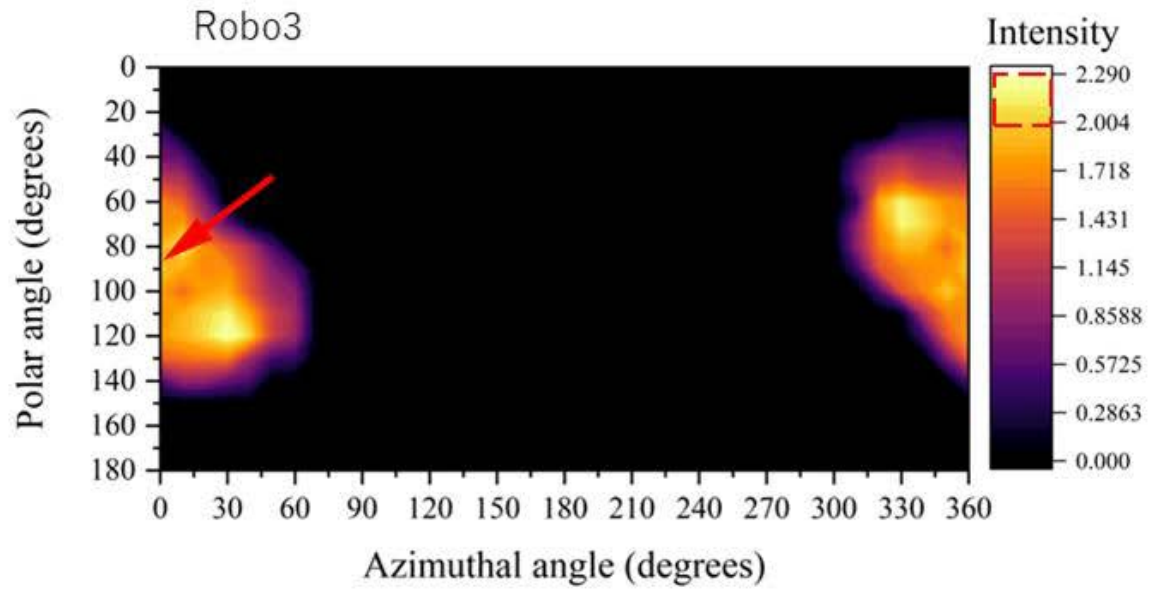


図 3.4-17 地図と線源イメージングの重ね合わせ結果 (Robo3)

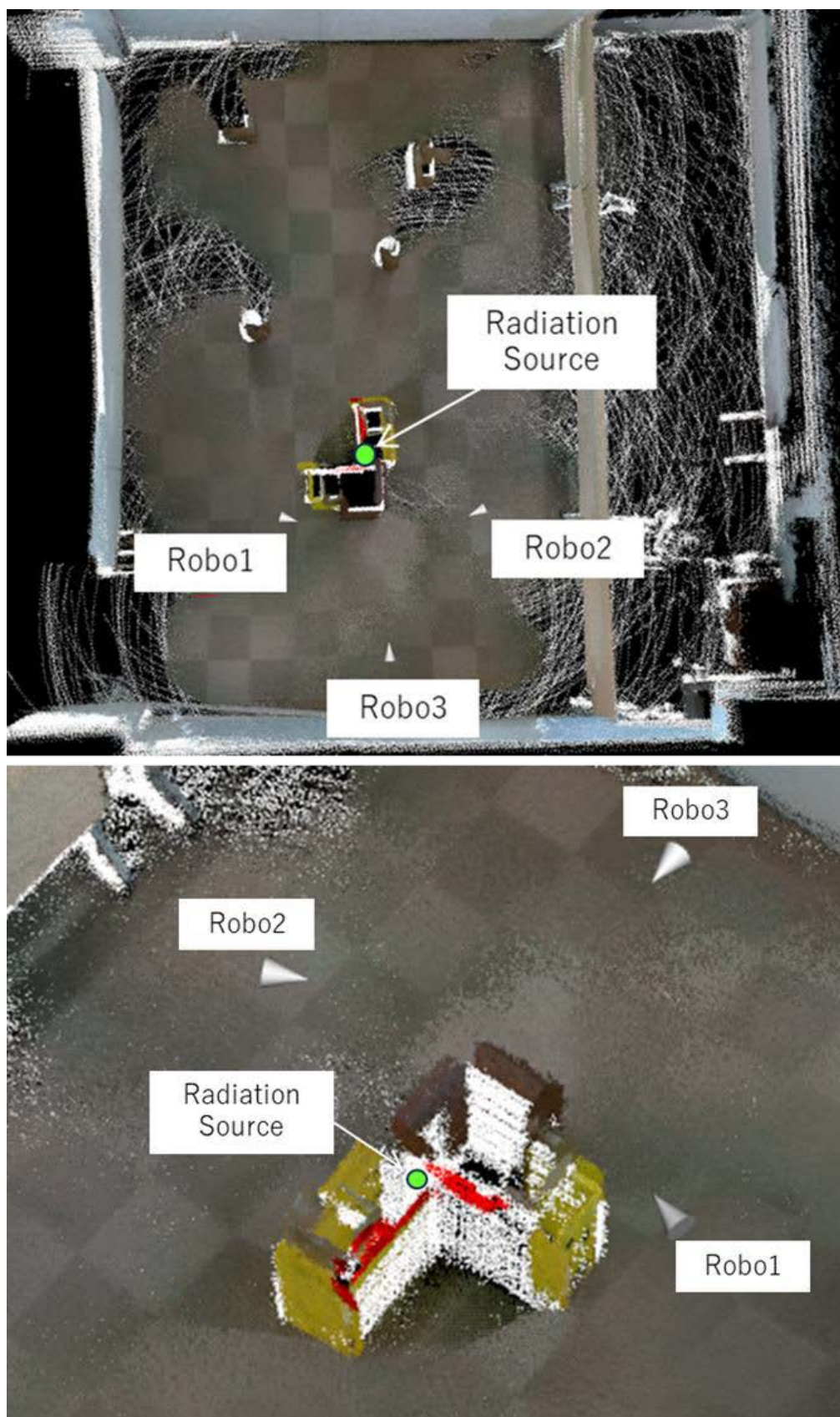


図 3.4-18 地図と線源イメージングの重ね合わせ結果（3 台の共通部を抽出）

3.5 研究推進【令和5年度】

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。

3.5.1 会議の開催

① 研究推進会議

日時：令和5年6月5日

場所：オンライン

内容：各研究項目の研究進捗に関する報告および検討。今後の研究計画検討。

② 研究推進会議

日時：令和5年6月23日

場所：富山高専

内容：実証試験に向けた実験。研究に関する報告および検討。今後の研究計画検討。

③ 研究推進会議

日時：令和5年8月10日

場所：富山高専

内容：実証試験に向けた実験。研究に関する報告および検討。今後の研究計画検討。

④ 研究推進会議

日時：令和5年11月21日

場所：富山高専

内容：中間フォローを受け、今後の研究計画を検討。

⑤ 研究推進会議

日時：令和6年1月17日～18日

場所：原子力機構 CLADS 国際共同研究棟

内容：予備実証試験を行い、今後の研究計画を検討。

3.5.2 受賞

若手研究責任者である原子力機構 北山佳治が、令和5年11月4日から11日までカナダ、バンクーバーで開催された、国際会議 2023 IEEE NSS MIC RTSD において“Experimental Evaluation of a Novel 4π Field of View Gamma-ray Imaging Method”と題して発表を行い、Student Paper Awardを受賞した。

4. 結言

本研究では、ガンマ線の飛来方向を検出可能な検出器を開発し、これを搭載した複数のロボットの連携により、単一センサーでは得られない広視野・迅速・安価な放射線源探査を実現するロボットシステム（CORRASE）を開発することを目的として研究を実施した。

以下に、3カ年計画の最終年度である令和5年度の結果をまとめる。

(1) 指向性検出器開発

① シミュレーションによる検出器設計

イメージャーの実機を製作し、測定結果をシミュレーションにフィードバックすることで、システムの高度化を図った。その結果、コンプトンカメラでは測定が難しい低エネルギーガンマ線（122 keV）から 1F 環境における重要核種の ^{137}Cs (662 keV) まで、同時にイメージングが行えることを確認した。また、線状や面状に分布した線源に対してもイメージングが行えることをシミュレーションで確認した。また、実際にロボットに搭載してイメージングが行えることを実験的に確認した。以上より、現場運用を見据えた実機の製作と性能評価、再構成アルゴリズムの高度化、実証試験という目的を達成した。限定的に 1F 実機適用を考えた場合、現状でも技術移転が可能と考えられる。しかしながら、システムの取り扱いには予備知識が必要となる。このため、今後の課題としてシステムの汎用性の向上が考えられる。そのためには、その場解析が可能となるデータの迅速評価ソフトウェアの整備および GUI ソフトウェアの開発が求められる。

② 指向性検出器の製作と評価

多面体型指向性検出器を構成するシンチレーション検出器のシンチレータを自己発光 BG のある $\text{LYSO}(\text{Ce})$ から自己発光 BG のない BG0 に変更した。実証試験に向けて 3 組の BG0 多面体型指向性検出器を製作し、その評価を行った。その結果、BG0 シンチレータを用いた場合でも、 $\text{LYSO}(\text{Ce})$ でも、同様に線源イメージングを行えることを確認した。実証試験を通して、多面体型指向性検出器が CORRASE を構成する検出器に適した特性をもつことがわかった。今後の課題としては、多面体型指向性検出器の高線量場への適用に向け詳細な検討を行うことが挙げられる。実証試験では、10 MBq の密封線源に適した 5 mm 角の BG0 シンチレータを採用したが、高線量場での運用を考えた場合シンチレータの種類およびサイズを最適化する必要がある。例えば、10 mm 角の $\text{GAGG}(\text{Ce})$ シンチレータを用いたイメージャーの場合、パイルアップを考慮しても 100 mSv/h での動作が可能である。このため、さらに小型、高速なシンチレータを用いた場合、多面体型指向性検出器の 100 mSv/h 以上の高線量場での適用も可能であると考えられる。放射線照射施設において高線量場を再現し、検出器の応答評価により検討が行えるものと考えられる。

本研究で開発したガンマ線イメージング検出器は、廃止措置以外での一般放射線計測装置としても広範な応用が期待できる。検出器に関する基本的な要素技術の開発は、本研究により完了している。現在個別に行われている測定・データ評価・結果表示を統合する開発を行うことで、本研究の民生化が可能であると考えられる。

(2) 画像・情報処理技術開発

単一ロボットシステムを改良し、複数ロボットの手動遠隔操作および収集するデータの一元管理が可能となった。検出器データを環境地図上の移動軌跡に反映させ、簡易な線量率ヒートマップ生成機能を実装した。また、複数地点で測定した検出器のサンプルデータを予め取得した実験場所の環境地図に適用することで、放射線源分布推定結果を融合表示できることを確認した。

(3) ロボット制御システム開発

LiDAR によって得られた地図に基づき複数台ロボットへのタスク割り当てを行い、各割り当て領域を掃引する経路を生成・追従する手法を実機ロボットに実装した。また、詳細測定すべき位置を指定することで複数台ロボットの観測地点を計画、移動する手法を実装した。実機ロボットを用いた検証実験により、タスク割り当て、経路生成、観測地点計画が適切に行われることを確認した。

(4) 実証試験

本研究で開発した指向性検出器および多脚ロボット 3 台を連携させたシステムを用いて、実証試験フィールド ($7.8 \times 5.3 \text{ m}^2$) において線源探査試験を実施し、10 MBq の ^{137}Cs 模擬放射能汚染源の位置の特定に成功した。このことにより、当初目標として掲げていた連携計測による広視野・迅速・安価な放射線源探査を実現するロボットシステムの開発に成功したと結論した。

1F 建屋内の高線量場、狭隘という過酷な環境における線源探査を実現するために、本研究では比較的単純な指向性検出器と多脚ロボットの組み合わせを連携させるという、従来にはない新しい線源探査システムを開発した。指向性検出器は読み出しチャンネル数が僅か 8 個と従来のカメラに比べて非常に少ないにもかかわらず、放射線イメージが可能であることが本研究により示された。さらに、本研究では 3 台のロボットシステムで連携計測を行うことにより、対象領域を迅速に探索し、線源位置を特定するシステムの開発に成功した。本研究の目的は、1F 現場への投入に資することを目的として、線源探査を行う小型ロボットに放射線計測機器を搭載したシステムを 3 年間の計画終了時に完成させるための研究を行うことであり、上記の結果から本研究の目的は十分に達せられたと結論できる。

今後は、本研究の成果を現場適用することが取り組むべき課題と考えられる。本研究では、10 MBq の ^{137}Cs 密封線源を用いて実証試験を行ったが、1F 建屋内などの高線量場への本システムの適用が望まれる。さらに、本研究で検討を行った分布線源のイメージングについても実フィールドでその効果が発揮できるものと考えられる。

また、本研究および他の 1F 探査研究に共通した課題として、建屋内での通信環境の構築、電源環境の構築が今後の課題として考えられる。

参考文献

- [1] T. Shan, B. Englot, D. Meyers, W. Wang, C. Ratti, D. Rus, LIO-SAM: Tightly-coupled LiDAR Inertial Odometry via Smoothing and Mapping, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2020, pp.5135-5142.
- [2] 田窪朋仁, 上撫琢也, 前泰志, 新井健生, 大原賢一, 高解像度 NDT グリッドマップを用いた環境地図生成, 日本機械学会論文集 (C 編), vol.78, no.793, 2012, pp.83-98.
- [3] H. Samet, The Design and Analysis of Spatial Data Structures, Addison-Wesley, 1990.
- [4] G. Karypis, V. Kumar, Multilevel k-way Partitioning Scheme for Irregular Graphs, Journal of Parallel and Distributed Computing, vol.48, no.1, 1998, pp.96-129.
<https://doi.org/10.1006/jpdc.1997.1404>
- [5] Enrique González, Oscar Álvarez, Yul Díaz, Carlos Parra, Ceasar Bustacara, BSA: A Complete Coverage Algorithm, Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2005, pp.2040-2044.
<https://doi.org/10.1109/ROBOT.2005.1570413>
- [6] Full Coverage Path Planner (FCPP),
https://github.com/nobleo/full_coverage_path_planner (参照：令和6年4月15日)。

