



JAEA-Review

2024-020

DOI:10.11484/jaea-review-2024-020

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
(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—
Research and Development of the Sample-return Technique for Fuel Debris
Using the Unmanned Underwater Vehicle
(Contract Research)
-FY2022 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
海上・港湾・航空技術研究所

Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science,
Fukushima Research Institute, Sector of Fukushima Research and Development
National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology

September 2024

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Review

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

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 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

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
(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—

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

海上・港湾・航空技術研究所

(2024年3月25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(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2年度に採択された研究課題のうち、「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」の令和2年度から令和4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、日英共同研究体制の下、耐放射線性をもちつつ中性子検出効率を向上させた中性子検出器と、強力な切削能と収集能を持ったエンドエフェクタ並びにマニピュレータを融合させた燃料デブリサンプリング装置を開発し、それらを無人航走体へ搭載させた燃料デブリサンプリングシステムを構築することを目指したものである。さらに、システム位置を同定する測位システムと、光学カメラ、ソナー、今回開発する中性子検出器の計数情報を仮想現実システムへ投影させる技術を開発し、遠隔操作技術の向上に貢献する技術開発を行った。

日本側が担当した燃料デブリマッピングツールの開発では、1) 高耐放射線小型高効率中性子センサの開発、2) UUVプラットフォームの開発、3) 放射線環境シミュレーション及び積算中性子線量計の特性評価を実施した。実施項目1)ではシリコン半導体検出器に微細構造を施して中性子の感度を上げ、ガンマ線の感度を下げたMSNDの特性評価と専用集積回路を開発し、小型高効率中性子センサを実現した。実施項目2)では、燃料デブリマッピングツール構成要素(中性子センサ、水中カメラ、ソナー、LiDAR)が連動するための通信制御系とUUVプラットフォームとのインターフェースを完成させた。実施項目3)では、粒子輸送モンテカルロ計算により、燃料デブリ性状を変えたシミュレーションを行い、格納容器内部のガンマ線及び中性子線の特性を予測し、放射線場の情報や有効な燃料デブリ検知方法を、検出器開発者及び遠隔ロボット開発者と共有した。また、積算線量計による中性子検出試験を実施し、現場適用性を評価した。

本報告書は、日本原子力研究開発機構の英知事業における委託業務として、海上・港湾・航空技術研究所が実施した成果を取りまとめたものである。

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

Research and Development of the Sample-return Technique for Fuel Debris
Using the Unmanned Underwater Vehicle
(Contract Research)

— FY2022 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

National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology

(Received March 25, 2024)

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 FY2022.

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 FY2020, this report summarizes the research results of the “Research and development of the sample-return technique for fuel debris using the unmanned underwater vehicle” conducted from FY2020 to FY2022.

The present study aims to develop a fuel debris sampling device that comprises a neutron detector with radiation resistance and enhanced neutron detection efficiency, an end-effector with powerful cutting and collection capabilities, and a manipulator under the Japan-UK joint research team. We will also develop a fuel debris sampling system that can be mounted on an unmanned vehicle. In addition, we will develop a positioning system to identify the system position and a technique to project the counting information of optical cameras, sonar, and neutron detectors to be developed in this project onto a virtual reality system, which will contribute to the improvement of remote-control technology.

In the development of the fuel debris mapping tool that the Japanese side performed, the micro-structured semiconductor neutron detector (MSND) was characterized and a dedicated integrated circuit, ASIC was developed. The interface between the communication control system and the UUV platform was developed to link the fuel debris mapping tool components (neutron sensor, underwater camera, sonar, LiDAR). Gamma rays and neutrons inside the primary containment vessel were simulated using radiation particle transport Monte Carlo calculations by changing the fuel debris characteristics. In addition, a neutron detection test using a time-integrating dosimeter was conducted to confirm its applicability to realistic situations.

Keywords: Fuel Debris, Microstructured Semiconductor Neutron Detector, End Effector, Manipulator, Unmanned Underwater Vehicle, Virtual Reality, PHITS, Bubble Detector

This work was performed by National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology 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
付録 成果報告書	15

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
Appendix Result Report	15

This is a blank page.

1. 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業の概要

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

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

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

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

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

2. 平成 30 年度 採択課題

平成 30 年度採択課題については以下のとおりである。

課題数：19 課題

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

平成 30 年度 採択課題一覧

共通基盤型原子力研究プログラム

【若手研究】

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

共通基盤型原子力研究プログラム

【一般研究】

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

課題解決型廃炉研究プログラム

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

国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

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

3. 令和元年度 採択課題

令和元年度採択課題については以下のとおりである。

課題数：19 課題

- 共通基盤型原子力研究プログラム 7 課題（若手研究 2 課題、一般研究 5 課題）
- 課題解決型廃炉研究プログラム 4 課題
- 国際協力型廃炉研究プログラム 4 課題（日英共同研究 2 課題、日露共同研究 2 課題）
- 研究人材育成型廃炉研究プログラム 4 課題

令和元年度 採択課題一覧

共通基盤型原子力研究プログラム

【若手研究】

課題名	研究代表者	所属機関
ウラニル錯体化学に基づくテーラーメイド型新規海水ウラン吸着材開発	鷹尾 康一朗	東京工業大学
動作不能からの復帰を可能とする多連結移動ロボットの半自律遠隔操作技術の確立	田中 基康	電気通信大学

共通基盤型原子力研究プログラム

【一般研究】

課題名	研究代表者	所属機関
一次元光ファイバ放射線センサを用いた原子炉建屋内放射線源分布計測	瓜谷 章	名古屋大学
低線量・低線量率放射線被ばくによる臓器別酸化ストレス状態の検討	鈴木 正敏	東北大学
単一微粒子質量分析法に基づくアルファ微粒子オンラインモニタリングに向けた基礎検討	豊嶋 厚史	大阪大学
幹細胞動態により放射線発がんを特徴付ける新たな評価系の構築	飯塚 大輔	量子科学技術研究開発機構
耐放射線性ダイヤモンド半導体撮像素子の開発	梅沢 仁 (~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号機ペダ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	渡邊 大輔	日立GE ニュークリア・エナジー
アパタイトセラミックスによるALPS沈殿系廃棄物の安定固化技術の開発	竹下 健二 (~R3. 6. 30) 塚原 剛彦 (R3. 7. 1~)	東京工業大学
拡張型スーパードラゴン多関節ロボットアームによる圧力容器内燃料デブリ調査への挑戦	高橋 秀治	東京工業大学

国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

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

国際協力型廃炉研究プログラム（日露共同研究）

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

研究人材育成型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
燃料デブリ取り出し時における炉内状況把握のための遠隔技術に関する研究人材育成	浅間 一	東京大学
化学計測技術とインフォマティクスを融合したデブリ性状把握手法の開発と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）

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
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）

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
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

課題名	研究代表者	所属機関
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

本報告書は、以下の課題の令和 2 年度から令和 4 年度分の研究成果を取りまとめたものである。

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
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

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4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

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

(契約番号 R04I025)

成果報告書

令和5年3月

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

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、国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所が実施した「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」の令和2年度から令和4年度分の研究成果を取りまとめたものである。

目次

概略	viii
1. はじめに	1-1
2. 業務計画	2-1
2.1 全体計画	2-1
2.2 実施体制	2-2
2.3 令和4年度の成果の目標及び業務の実施方法	2-3
3. 実施内容及び成果	3-1
3.1 高耐放射線小型高効率中性子センサの開発（再委託先：高エネ研） （令和2年度～令和4年度）	3-1
3.2 UUV プラットホームの開発（令和2年度～令和4年度）	3-9
3.2.1 燃料デブリマッピングツールの開発（令和2年度～令和4年度）	3-9
3.2.2 UUV プラットホームの開発（令和2年度～令和4年度）	3-12
3.3 放射線環境シミュレーション及び積算中性子線量計の特性評価（連携先：原子力機構） （令和2年度～令和4年度）	3-21
3.4 日英連携（令和2年度～令和4年度）	3-30
3.5 研究推進	3-39
4. 結言	4-1

執筆者リスト

事業代表者

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

主任研究員
専門研究員

鎌田 創
西村 和哉

再委託先

高エネルギー加速器研究機構

准教授
技師

岸下 徹一
大山 隆弘

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
主査
主査

奥村 啓介
寺島 顕一
松村 太伊知
坂本 雅洋

表一覧

表 3. 1-1	CMOS プロセスの仕様	.....	3-1
表 3. 1-2	LTARS16A の性能のまとめ	.....	3-4
表 3. 3-1	設置位置ごとのフルエンス率	.....	3-24

図一覧

図 2. 1-1	本業務の全体計画図	.....	2-1
図 2. 1-2	英国側の全体計画図 (WP1, 3, 4 を英国が担当、WP2a, b を日本が担当。)	.....	2-1
図 2. 2-1	実施体制図	.....	2-2
図 3. 1-1	LTARS16A のブロックダイアグラム	.....	3-2
図 3. 1-2	LTARS16A の HG のアナログ波形	.....	3-2
図 3. 1-3	LTARS16A の LG のアナログ波形	.....	3-3
図 3. 1-4	LTARS16A チップと評価基板の写真	.....	3-3
図 3. 1-5	UUV に搭載する基板の写真 (左 : ASIC 基板、中 : アダプター基板、右 : FPGA 基板)	.....	3-4
図 3. 1-6	中性子照射体系	.....	3-5
図 3. 1-7	電流型 MSND センサの電荷積分器の出力信号	.....	3-6
図 3. 1-8	MSND 位置における中性子スペクトル計算値	.....	3-7
図 3. 1-9	中性子照射時の電流型 MSND センサの出力 TTL パルス数の推移	.....	3-7
図 3. 2. 1-1	ROV 位置 (左) と ROV 位置に対応したシーンデータ (右)	.....	3-9
図 3. 2. 1-2	水槽中の形状模擬デブリと LiDAR で撮像した 3D 点群データ	.....	3-11
図 3. 2. 1-3	中性子センサ専用ポッドのシステム模式図	.....	3-12
図 3. 2. 2-1	Madgwick のフィルタと EKF による姿勢角 (ロール ϕ 、ピッチ θ 、ヨー ψ) の比較	.....	3-15
図 3. 2. 2-2	プラットフォームの構成	.....	3-16
図 3. 2. 2-3	燃料デブリのサンプリング作業を想定した UUV の操作	.....	3-16
図 3. 2. 2-4	フロート設置位置 (左)、UUV が点②に向かう様子 (右)	.....	3-17
図 3. 2. 2-5	GUI 画面上の UUV の移動航跡	.....	3-17
図 3. 2. 2-6	LiDAR による 3D 点群データ画像	.....	3-18
図 3. 3-1	^{244}Cm と ^{154}Eu の燃焼度と生成量の関係	.....	3-22
図 3. 3-2	^{244}Cm 由来の中性子強度と ^{154}Eu 由来のガンマ線強度の解析フロー	.....	3-22
図 3. 3-3	燃焼度に対する $^{244}\text{Cm}/^{154}\text{Eu}$ の線源強度比	.....	3-23
図 3. 3-4	バブルディテクターの全体写真	.....	3-24
図 3. 3-5	MOX 燃料による中性子検出試験の配置図	.....	3-25
図 3. 3-6	MOX 燃料を用いた検出試験結果	.....	3-25
図 3. 3-7	検出性能検討に関する計算モデル	.....	3-26
図 3. 3-8	エネルギー群ごとの中性子の空間分布	.....	3-27
図 3. 3-9	UUV への BD-PND 搭載位置	.....	3-27
図 3. 3-10	カメラによる BD-PND 観察像	.....	3-28
図 3. 4-1	モーターユニットと追加生産された旧型スピンドルを組み付けた状態の写真	.....	3-30
図 3. 4-2	再製造されたアルミ製スピンドル	.....	3-31
図 3. 4-3	マニピュレータシステム内のモーターサポートプレートの写真	.....	3-31
図 3. 4-4	双腕ロボットの全体構造	.....	3-32
図 3. 4-5	双腕ロボットの詳細モデル	.....	3-32

図 3. 4-6	サンプル取得タスク中に最適化ベースの逆運動学制御アルゴリズムを用いた共同アームの形状パラメータ	.....	3-33
図 3. 4-7	サンプル収集のデモ中の双腕ロボットシステムの実験セットアップ	.....	3-34
図 3. 4-8	双腕ロボットシステムの水中テストの様相	.....	3-34
図 3. 4-9	燃料デブリマッピングツールを搭載した UUV、形状模擬デブリを水中 LiDAR でスキャンする様子	.....	3-36

略語一覧

東電	: 東京電力ホールディングス株式会社
1F	: 東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所
AHRS	: Attitude Heading Reference System : 姿勢・方位参照システム
ASIC	: Application Specific Integrated Circuit : 信号処理用専用集積回路
ADC	: Analog to Digital Converter : アナログ→デジタル変換器
CLADS	: Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science : 廃炉環境国際共同研究センター
CMOS	: Complementary Metal Oxide Semiconductor : 相補性金属酸化膜半導体
DHCP	: Dynamic Host Configuration Protocol : IP アドレス自動設定プロトコル
DoF	Degrees of Freedom : 自由度
EKF	: Extended Kalman Filter : 拡張型カルマンフィルタ
FP	: Fission Product : 核分裂生成物
FPGA	: Field Programmable Gate Array (現場で書き換え可能な大規模集積回路)
GUI	: Graphical User Interface : グラフィカル・ユーザー・インターフェイス
IMU	: Inertial Measurement Unit : 慣性測定ユニット
INS	: Inertial Navigation System : 慣性航法
IRID	: International Research Institute for Nuclear Decommissioning : 技術研究組合国際廃炉研究開発機構
LiDAR	: Light Detection And Ranging : 光による検知と測距
MCCI	: Molten Core Concrete Interaction : 溶融炉心・コンクリート相互作用
MEMS	: Micro Electro Mechanical Systems : 微小電気機械システム
MSND	: Micro-structured Semiconductor Neutron Detector : 微細構造半導体中性子検出器
NGIMU	: Next Generation Inertial Measurement Unit : 慣性測定ユニット
PCV	: Primary Containment Vessel : 原子炉格納容器
PHITS	: Particle and Heavy Ion Transport code System : 粒子・重イオン輸送計算コード
RDT	: Radiation Detection Technologies, Inc. (会社名)
RPV	: Reactor Pressure Vessel : 原子炉圧力容器
ROV	: Remote Operated Vehicle : 遠隔操作無人探査機
SAR-ADC	: Successive Approximation Register-ADC : 逐次比較型アナログ→デジタル変換器
SBL	: Short Base Line : 短基線
SRIM	: Stopping and Range of Ion in Matter (固体中のイオンの飛程をシミュレーションするコードの名称)
SSBL	: Super Short Base Line : 超短基線
TCP/IP	: Transmission Control Protocol/Internet Protocol (インターネット・プロトコル・スイート : 通信プロトコル)
TTL	: Transistor Transistor Logic : トランジスタ・トランジスタ・ロジック

UART	: Universal Asynchronous Receiver/Transmitter : 汎用非同期送受信機
UUV	: Unmanned Underwater Vehicle : 無人航走体
VR	: Virtual Reality : 仮想現実
海技研	: 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所
原子力機構	: 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
高エネ研	: 大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構

概略

福島第一原子力発電所（以下、1F と略記。）の廃炉作業において、「燃料デブリの取り出し」は最も重要な課題の1つに挙げられる。当該課題が困難である理由は、これまでの1F 1号機から3号機までの内部調査からは、原子炉内において構造材の破損状況、大量の堆積物の存在を示す映像と線量率の情報しか得られておらず、燃料デブリの詳細な炉内状況が把握できていないことである。さらに、燃料デブリの分布状況を明らかにするには、事故当初のCsなどの汚染による高ガンマ線量率環境下において、燃料デブリの核燃料物質由来の自発核分裂中性子や(α, n)反応によるわずかな中性子を検出する技術が必要である。ここで、高ガンマ線量下において少量の中性子を測定する技術・検出器の開発と、原子炉格納容器（Primary Containment Vessel：以下、PCV と略記。）内のデブリを多地点で少量サンプリングし、それらの物性や化学特性を明らかにすることができれば、廃炉作業を格段に加速化することができる。

そこで、本研究では、日本と英国の2国間共同研究体制の下、高耐放射線中性子センサとソナー等で構成される燃料デブリマッピングツールを搭載した無人航走体（Unmanned Underwater Vehicle：以下、UUV と略記。）ベースの燃料デブリサンプリング技術を開発することを目的とする。

日本側は、高ガンマ線環境下で局所的な中性子束の変化を観測しながら燃料デブリの位置を特定し、切削対象とする水中試料を選定するための中性子センサを開発する。また、高放射線量環境で作業員が直接アクセスできない作業現場において、作業性と視認性を向上させるためのUUV自己測位システムと仮想現実（Virtual Reality：以下、VR と略記。）技術を駆使した遠隔操作支援技術を開発する。

英国側は、強力な切削能と収集能を有したエンドエフェクタと水中マニピュレータの開発を担当する。また、日英共同で、これらをUUVベースの水中ロボットに搭載・統合することによって「燃料デブリサンプルリターン技術」の確立を目指す。

本研究では、高エネルギー加速器研究機構（以下、高エネ研と略記。）が、高耐放射線小型高効率中性子センサを開発し、海上・港湾・航空技術研究所（以下、海技研と略記。）が、中性子センサ等のセンサ類で構成される燃料デブリマッピングツール、自己測位システム及びVRシステムを統合化したUUVプラットフォームを開発し、英国ランカスター大学が開発する燃料デブリサンプリングツールに運用情報を提供する。さらに、日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構と略記。）が原子炉内放射線環境シミュレーションと積算中性子線量計の特性を評価することで、現場の放射線環境情報を開発側に提供し、高ガンマ線環境下で動作する機器開発をサポートする体制を構築し、シナジー効果を得ながら課題を解決していく。

この課題は、3ヵ年で実施され、令和4年度は3年目である。以下に、令和4年度の成果のまとめを示すとともに、令和3年度までの成果概要についても各年度で示す。

令和2年度の成果報告書は、以下のとおりである。

JAEA-Review 2021-049

URL：<https://doi.org/10.11484/jaea-review-2021-049>

また、令和2年度の成果概要は、以下のとおりである。

(1) 高耐放射線小型高効率中性子センサの開発（再委託先：高エネ研）

中性子センサとして米国 RDT 社の MSND (Micro-structured Semiconductor Neutron Detector：微細構造半導体中性子検出器)を採用し、微弱な MSND 信号の計測に適した信号処理回路の設計を行い、中性子線源等を用いた特性試験を行った。また、MSND の特性試験用に ^{252}Cf 線源からの自発核分裂中性子を用いた中性子照射場を整備した。

なお、入手後に明らかになった MSND の構造上の制約によりアルファ線源を用いた特性試験は行わなかったが、中性子線源等を用いた試験により本業務の目標達成に必要な情報は得ることができた。

(2) UUV プラットホームの開発

① 燃料デブリマッピングツールの開発

開発する中性子センサの運用方法を水中カメラ、ソナーとの連動を考慮に入れて議論した。議論の上、通信・制御回路とインターフェースを設計した。さらに、水中カメラ、ソナーの撮像データを VR に投影するためのツールを検討した。

② UUV プラットホームの開発

PCV 内での UUV の位置を特定する自己測位システムの開発として、従来の自己測位法の PCV 内へ適用した際の課題を抽出し、測位精度向上方策を講じた。

また、日英連携として、英国側が進めるマニピュレータやエンドエフェクタなどのサンプリングツールの設計について、情報交換を行い、UUV の姿勢制御設計に反映した。

(3) 放射線環境シミュレーション及び積算中性子線量計の特性評価（連携先：原子力機構）

東京電力ホールディングス株式会社（以下、東電と略記。）及び IRID（International Research Institute for Nuclear Decommissioning：技術研究組合国際廃炉研究開発機構）により実施された 3 号機の PCV 内部調査結果に基づき、燃料デブリの本格取り出し時期を想定した 3 号機の放射線源モデル（線源強度とエネルギースペクトル）と PHITS コード（Particle and Heavy Ion Transport code System：粒子・重イオン輸送計算コード）による放射線輸送計算のための 3 次元プラントモデルを構築した。これらを用いて、ガンマ線輸送計算の試解析を行い、ペDESTAL 内のガンマ線特性が得られることを確認した。

(4) 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間並びに CLADS（Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science：廃炉環境国際共同研究センター）など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ち合わせや会議等を、英国側実施機関との打ち合わせを含め、開催した。

令和 3 年度の成果報告書は、以下のとおりである。

JAEA-Review 2022-070

<https://doi.org/10.11484/jaea-review-2022-070>

また、令和 3 年度の成果概要は、以下のとおりである。

(1) 高耐放射線小型高効率中性子センサの開発（再委託先：高エネ研）

中性子センサとして MSND を採用し、微弱な MSND 信号の計測に適した信号処理回路の設計及び製作を実施し、国内の中性子照射場を利用してセンサの中性子応答の評価を行った。また、国内の ^{60}Co 照射施設を利用し、高線量下での放射線耐性を確認した。

中性子応答の評価では、MSND と製作した信号処理回路を組み合わせた“検出器”としての動作が確認でき、性能改善に向けた実装方法や回路方式の改善点などについて洗い出しを行った。高線量下での放射線耐性試験においては、信号出力の飽和を避けるための具体的な回路時定数の情報と、より高放射線耐性を実現するための知見が得られた。こうした

情報を基に、令和4年度の信号処理回路では修正・変更を実施し、実機の検出器を完成させた。

(2) UUV プラットホームの開発

① 燃料デブリマッピングツールの開発

令和2年度に引き続き、マッピング構成要素（開発する中性子センサ、水中カメラ、ソナー等）と遠隔操作側のプラットホーム間の通信・制御回路の仕様について検討を実施した。さらに、UUVと遠隔操作側のプラットホーム間における中性子センサの計数データ、水中カメラ及びソナーの撮像データを通信するためのインターフェースを検討した。その結果、各種センサにより、データのポスト処理時間が大幅に異なるため、タイムスタンプの共有化が困難であること及びインターフェースは実際にUUVを運用する手順に沿うのが適切であることが分かった。

② UUV プラットホームの開発

慣性測定ユニット（Next Generation Inertial Measurement Unit：以下、NGIMUと略記。）の出力データを用いて、UUVの移動距離や姿勢を求める慣性航法演算処理プログラムを整備し、各種の移動体にNGIMUを搭載して位置推定の適用性検討を実施した。その結果、IMUを搭載する移動体によって角速度への影響が異なること、測定時間の積分範囲により位置推定の誤差蓄積の影響が変動することが判明し、位置推定の精度向上のための手がかりを得た。

(3) 放射線環境シミュレーション及び積算中性子線量計の特性評価（連携先：原子力機構）

燃料デブリの線源特性を明らかにするため、ベータ崩壊に由来する制動X線及び消滅ガンマ線並びに自発核分裂及び (α, n) 反応に由来する中性子線を導入し、これらの核種別寄与を明らかにした。

また、令和2年度に構築した3号機プラントモデルと、光子及び中性子源モデルを用いた放射線輸送計算を行い、ペDESTAL内における線量率、フルエンス率、エネルギースペクトルに関する情報を取得した。さらに、積算中性子線量計の放射線照射試験を実施し、照射量等の条件を変えた場合のデータを取得した。

結果として、ペDESTAL内で重要となる核種（ ^{137}Cs や ^{154}Eu など）のピークや水素の (n, γ) 反応によるピークなどを確認できた。また、積算中性子線量計の放射線照射試験では、積算線量に大きなフルエンス率依存性がないことや、線量計の事前校正の必要性などを確認することができた。

(4) 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間並びにCLADSなど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ち合わせや会議等を、英国側実施機関との打ち合わせを含め、開催した。

最終年度である令和4年度の業務成果の概要は、以下のとおりである。

(1) 高耐放射線小型高効率中性子センサの開発（再委託先：高エネ研）

微弱な信号を検出する中性子センサMSNDの計測に適した信号処理回路の実機製作を実施し、現実的なUUV搭載に向けた全体のシステムを検討した。また、国内の中性子照射場を利用して検出器システムの中性子応答の評価を行い、最終的な性能結果をまとめた。

(2) UUV プラットホームの開発

① 燃料デブリマッピングツールの開発

デブリマッピングツール（開発する中性子センサ、水中カメラ、ソナー）が連動するための通信制御系を作製した。さらに、UUV プラットホームと操作者間で中性子計数値を含めた燃料デブリマッピングツールの出力データを通信できるようなインターフェースを作製し、動作試験を行った。

② UUV プラットホームの開発

PCV 内での UUV の位置を特定する自己測位システムの精度検証試験を進めた。さらに、得られる位置情報が(2)①の燃料デブリマッピングツールと VR システムで連動するインターフェース系を作製し、動作試験を行った。

なお、日英連携として、燃料デブリサンプリング時の姿勢制御が可能な UUV について英国側と連絡を取りながら実現を目指したが、UUV プラットホームに英国側担当の燃料デブリサンプリングツールを統合することはできなかった。

上記(2)①において、日本側で担当する燃料デブリマッピングツールの動作試験を実施し、UUV プラットホームと操作者間で出力データを共有できるようなインターフェースの動作を確認できた。日英連携として、メール、ウェブ会議を重ねて進捗を共有し、UUV プラットホームに燃料デブリサンプリングシステムを統合できるような運用策定のための議論を重ねたが、英国側担当の燃料デブリサンプリングツールの開発がコロナ禍等の影響により、業務計画として予定した時期までに完了できなかった。このため、燃料デブリサンプリングツールと燃料デブリ探査・マッピング機能を有する UUV プラットホームを統合化した最終段階の総合試験は、実施することができなかった。

(3) 放射線環境シミュレーション及び積算中性子線量計の特性評価（連携先：原子力機構）

事故当時の 1F 3 号機には MOX 燃料（Mixed Oxide Fuel：混合酸化物燃料）が部分装荷されていたことから、MOX 燃料と UO₂ 燃料の燃焼組成（放射線源）の違いに着目し、MOX 燃料由来の燃料デブリを検知する手法の開発を目指した解析的検討を行った。

令和 3 年度に引き続き、積算中性子線量計の照射条件を変更した照射試験を実施した。また、計算による中性子検出性能の検討を行い、その検討結果を踏まえた積算中性子線量計の UUV への搭載方法を決定した。

(4) 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間並びに CLADS 等との連携を密にして、研究を進めた。また、研究実施計画を推進するための打ち合わせや会議等を、英国側実施機関との打ち合わせを含め、開催した。

以上、3 カ年計画の 3 年目である本年度の業務項目のうち、日本側単独で実施できる事項は概ね全て実施した。その一方、国際共同研究として英国側担当事項の実施結果を受けて実施することを予定していた日本側の実施事項については、英国側担当事項がコロナ禍等の影響により当初予定した時期までに完了できなかったために、一部断念せざるを得なかった。委託研究契約の実施期間を延長して所期の目標を達成することも検討したが、英国側が令和 5

年度は対応できないとのことであったため、本年度に完了できた事項をもって本業務を終了とすることにした。なお、国内での実施結果からすると、英国から燃料デブリサンプリングツールが提供されていれば当初の目的を達成できたものと考えられる。

1. はじめに

1Fの事故対応は、事故当初の緊急的対応のフェーズを脱却し、東電HDが掲げた「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」に基づいた中長期的な廃止措置にフェーズが移行してきた。事故時の炉心溶融の際に、原子炉構造材と核燃料が溶け合い、再度固まって生成した燃料デブリは、現在、比較的安定した状態を維持しているが、中長期的視点では、施設の経年劣化からリスクが増大する可能性を否認しない。そこで、安全かつ早急に取り出される必要がある。

燃料デブリの取り出し作業工程に高い安全性と作業効率を持たせて策定するには、炉内の燃料デブリの分布状況を知っておく必要がある。そこで、内部調査、ミュオン測定が実施されたが、燃料デブリが原子炉圧力容器（Reactor Pressure Vessel：以下、RPVと略記。）底部のみならず、PCV下部まで存在していることが推測されている。平成29年3月に実施された1号機の内部調査（わかさぎロボット、水位約2m）では、ペDESTAL外周辺部のグレーチング位置からPCV底部近くまでの調査が行われ、水中底部までのカメラ映像と線量率（約0.1～11 Gy/h）が取得された。他方、平成29年7月に実施された3号機の内部調査（マンボウロボット、水位約6m）では、水没しているペDESTAL内部における構造材の破損状況や燃料デブリらしき大量の堆積物がカメラ映像により確認された。PCVからの冷却水の漏洩が多い2号機では、平成30年1～2月の内部調査（テレスコピック式調査装置、気中）により、ペDESTAL内部の詳細な映像と線量率（約7 Gy/h）が得られた。さらに、平成31年2月の接触調査により2号機ペDESTAL内の堆積物の一部は固着していないことが確認され、アーム型アクセス・調査装置による少量採取とその後の化学分析が計画されている。しかし、これまでの内部調査では、映像で見られたいずれの堆積物もUやPuを含んだ燃料デブリである確証は得られていない。

そこで、燃料デブリの分布状況に加え、複数地点で燃料デブリを少量採取して分析し、物性、化学特性を知ることができれば、取り出し作業を格段に加速化することに貢献できる。

本研究では、日本と英国の2国間共同研究体制の下、高耐放射線中性子センサとソナー等を搭載した無人航走体UUVベースの燃料デブリサンプリング技術を開発する。

日本側では、高ガンマ線環境下で局所的な中性子束の変化を観測しながら燃料デブリの位置を特定し、切削対象とする水中試料を選定するための中性子センサを開発する。また、高放射線量環境で作業員が直接アクセスできない作業現場において、作業性と視認性を向上させるためのUUV自己測位システムとVR技術を駆使した遠隔操作支援技術を開発する。

英国側は、強力な切削能と収集能を有したエンドエフェクタと水中マニピュレータの開発を担当する。また日英共同で、これらをUUVベースの水中ロボットに搭載・統合することによって「燃料デブリサンプルリターン技術」の確立を目指す。

本研究では、上記目的を達成するために以下の要素技術を開発し、それらを日英共同研究体制で統合させる。以下に、各要素技術の達成目標を記載する。

(1) 高耐放射線小型高効率中性子センサの開発（再委託先：高エネ研）

デブリ取り出し作業では、取り出し箇所周辺の局所的な中性子束を測定することで、燃料デブリ位置と刻々と変化する可能性がある燃料デブリの状態を連続監視する必要があり、燃料デブリセンサの中性子に対する感度向上が必要である。そのために、半導体微細加工技術によってガンマ線由来の二次電子に対する感度を低減させ中性子検出効率を大幅に向上させたMSNDと高ガンマ線環境下（～100 Gy/h）でも正常に動作する耐放射線集積回路を組み合わせ、高耐放射線小型高効率中性子センサを開発する。

(2) UUV プラットホームの開発

前項(1)で開発する中性子センサを水中カメラ及びソナーと組み合わせることで、燃料デブリマッピングツールを開発する。さらに、英国側が開発する燃料デブリ取り出しツールと日本側の燃料デブリマッピングツールを UUV ベースのプラットフォームで統合させる。また、UUV の炉内位置を割り出す測位システムを開発し、UUV の目となる光学カメラ、ソナーによる撮像情報、中性子センサの計数情報を VR システムへ投影することによって、作業者の遠隔操作を視覚的に支援する。これらに関連する試験は、原子力機構 檜葉遠隔技術開発センター（以下、NARREC と略記。）のロボット試験用水槽等で実施する。

(3) 放射線環境シミュレーション及び積算中性子線量計の特性評価（連携先：原子力機構）

PHITS 等の粒子輸送モンテカルロ計算により、燃料デブリ性状（熔融デブリや MCCI (Molten Core Concrete Interaction: 熔融炉心・コンクリート相互作用) デブリ) やその配置等を変えたシミュレーションを行い、PCV 内部及び収納管周辺のガンマ線及び中性子線の特性（強度、スペクトル、検出器応答など）を取得し、1F 現場で予想される詳細な放射線場の情報や有効な燃料デブリ検知方法を、英国を含む他機関の検出器開発者及び遠隔ロボット開発者と共有する。

(4) 燃料デブリサンプリングツール開発（英国側担当）

燃料デブリサンプリングツールとして、取り出し並びに回収機構を備えたエンドエフェクタとその位置を制御するマニピュレータをそれぞれ開発する。マニピュレータは、水深 10 m、24 時間駆動可能で、6 自由度を持たせ、折りたたみ機能を有するものを開発する。さらに、サンプリングを半自動化するためのアルゴリズムを設計し、システムに実装する。

2. 業務計画

2.1 全体計画

本業務の全体計画図を図 2.1-1 に示す。また、英国側の全体計画図を図 2.1-2 に示す。

実施項目	令和2年度	令和3年度	令和4年度
1. 高耐放射線小型高効率中性子センサの開発 (高エネ研)	中性子源整備	中性子検出器特性評価	照射試験
	信号処理回路設計	信号処理回路製作	ASIC 製作・評価、UUV 搭載検討
2. UUV プラットホームの開発 (海技研)	マッピングツールと VR 連動ソフト設計	マッピングツール・サンプリングツール通信制御設計	マッピングツール・サンプリングツール統合、水槽並びに放射線照射施設でシステム動作試験
	測位システム設計	測位システム開発・試験とサンプリングツール搭載設計	プラットフォームへの搭載と水槽動作試験
3. 放射線環境シミュレーション及び積算中性子線量計の特性評価 (原子力機構)	ガンマ線輸送試験解析	ガンマ線・中性子線特性解析	MOX 燃料由来放射線特性の検討、取りまとめ
		積算中性子線量計照射試験	積算中性子線量計照射試験、UUV 搭載検討

図 2.1-1 本業務の全体計画図

Tasks	Start date: November 2020. Duration: 30 months									
	Year 1				Year 2				Year 3	
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2
WP1: Development of robotic arm and end effectors										
Design and integration of actuation systems										
Cutting tool development and integration										
End effector development										
Instrumentation development										
WP2a: Development of UUV platform and sonar localisation system										
Integration of ultrasonic transponders into UUV										
Development of VR system and mapping interface										
Validation of localisation system and interface										
WP2b: Development & testing of the integrated probe										
Development and integration of neutron detector										
Testing of detector in high-dose fields										
WP3: Control algorithm development and implementation										
Development of data processing system										
Development of dry test rig										
Development of control algorithms of manipulator										
Development of control algorithms of end effectors										
WP4: Underwater processing implementation										
Integration of manipulator onto UUV										
Testing of arm under realistic conditions										
Integration of arm with interface										
Operation testing of integrated system in NARREC, Japan										
Radiation resistance testing of the integrated system										
Reporting										

図 2.1-2 英国側の全体計画図 (WP1, 3, 4 を英国が担当、WP2a, b を日本が担当。)

2.2 実施体制

実施体制を図 2.2-1 に示す。

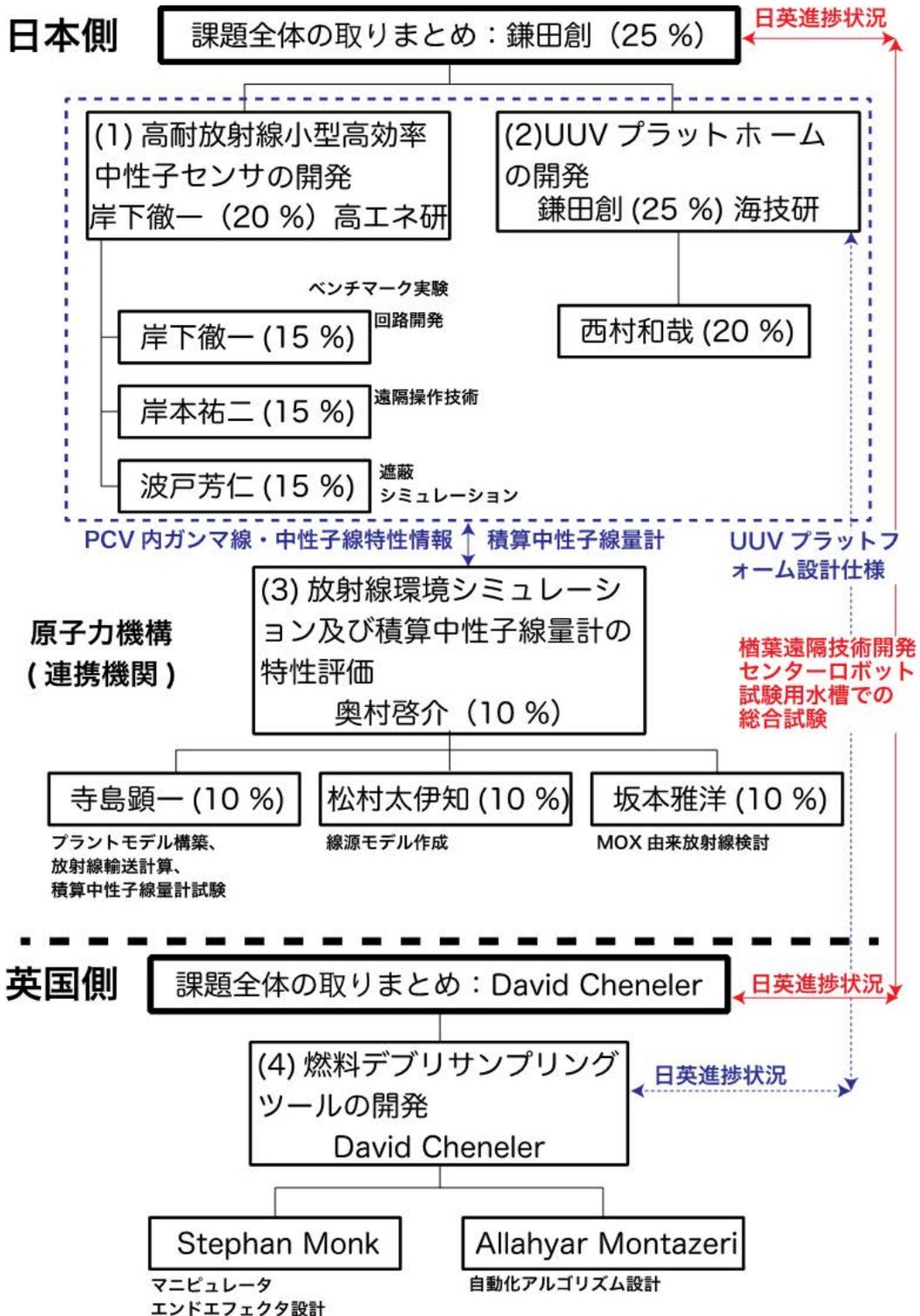


図 2.2-1 実施体制図

2.3 令和4年度の成果の目標及び業務の実施方法

令和4年度の成果の目標及び業務の実施方法の概要を以下に示す。

(1) 高耐放射線小型高効率中性子センサの開発（再委託先：高エネ研）

微弱な信号を検出する中性子センサ MSND の計測に適した信号処理回路の実機製作を実施し、現実的な UUV 搭載に向けた全体のシステムを検討する。また、国内の中性子照射場を利用して検出器システムの中性子応答の評価を行い、最終的な性能結果をまとめる。

(2) UUV プラットホームの開発

① 燃料デブリマッピングツールの開発

燃料デブリマッピング構成要素（開発する中性子センサ、水中カメラ、ソナー）が連動するための通信制御系を作成する。さらに、UUV プラットホームと操作者間で中性子計数値を含めたマッピングツールの出力データを通信できるようなインターフェースを作成し、総合試験を実施する。

② UUV プラットホームの開発

PCV 内での UUV の位置を特定する自己測位システムの精度検証試験を進める。さらに、得られる位置情報が(2)①の燃料デブリマッピングツールと VR システムで連動するインターフェース系を作成し、総合試験を実施する。

また、日英連携として、燃料デブリサンプリング時の姿勢制御が可能な UUV を英国側と連絡を取りながら実現する。

(3) 放射線環境シミュレーション及び積算中性子線量計の特性評価

（連携先：原子力機構）

事故当時の 1F 3 号機には MOX 燃料が部分装荷されていたことから、MOX 燃料と UO₂ 燃料の燃焼組成（放射線源）の違いに着目し、MOX 燃料由来の燃料デブリを検知する手法の開発を目指した解析的検討を行う。

令和3年度に引き続き、積算中性子線量計の照射条件を変更した照射試験を実施する。また、計算による中性子検出性能の検討も踏まえ、積算中性子線量計の UUV への搭載方法を決定する。

(4) 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間並びに CLADS 等との連携を密にして、研究を進める。また、研究実施計画を推進するための打ち合わせや会議等を、英国側実施機関との打ち合わせを含め、開催する。

3. 実施内容及び成果

3.1 高耐放射線小型高効率中性子センサの開発（再委託先：高エネ研）
（令和2年度～令和4年度）

【令和3年度までの概要】

我々は、小型中性子センサとして米国カンザス大学において開発された、薄型 PIN シリコン半導体検出器の表面をストライプ状に微細加工し、その隙間に ${}^6\text{LiF}$ 中性子コンバータを配置した多層 MSND に着目した。令和3年度では、小型の検出器システムを実現するために、微細集積回路プロセスを用いて製作した ASIC (Application Specific Integrated Circuits: 信号処理用専用集積回路) の性能評価を実施し、MSND との接続試験を実施した。それと並行して、国内の中性子照射場を利用してパルス計測型の MSND センサの中性子応答の評価を行った。また、パルス計測方式と比較して、より高線量環境に適用できる可能性のある電荷積分型の MSND センサを開発した。最後に、国内の ${}^{60}\text{Co}$ 照射施設を利用し、高線量下での検出器応答の評価を実施した。

【令和4年度の実施内容及び成果】

令和3年度の ASIC の性能評価結果を基に、水中 ROV (Remote Operated Vehicle: 遠隔操作無人探査機) への搭載を想定した実機 ASIC (LTARS16A) を設計・製作した。表 3.1-1 に今回の設計で使用した CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor: 相補性金属酸化膜半導体) プロセスの仕様をまとめた。令和3年度までの Silterra 社の CMOS プロセスは、新型コロナウイルスの影響に伴う半導体不足の影響で、試作サービスの利用が停止したため、急遽、代替プロセスとして TSMC 社の 180 nm CMOS プロセスを使用して、コアとなるアナログ回路セルに関してはゼロから設計を行った。

表 3.1-1 CMOS プロセスの仕様

Technology	TSMC 180 nm CMOS
Chip size	5000 μm \times 5000 μm
Supply/Power consumption	1.8 V (core), 3.3 V (IO)
Process options	6 metals, deep N-well, high-R, MIM

(1) 実機チップ (LTARS16A)

図 3.1-1 に、ASIC のブロックダイアグラムを示す。1 チップには、センサからの信号を 16 チャンネル分処理するアナログ部と、その出力をデジタル処理するデジタル部を内蔵する。アナログ部の各チャンネルは電荷有感型増幅回路と 2 種類のゲインを持つ波形整形回路 (HG: High Gain, LG: Low Gain)、そして ADC (Analog to Digital Converter: アナログ-デジタル変換器) で構成されている。信号処理回路のノイズ特性やダイナミックレンジは、令和3年度までに得られたアナログ性能を達成するように設計している。デジタル部では、HG、LG のアナログ波形が時間連続的に 8 bit ADC でデジタル化されたデータをリングバッファへ格納する。データ処理の方法としては、ROV 中での使用を想定し、「トリガーモード」と「連続モード」の 2 種類を実装している。トリガーモードは、ASIC 外部からトリガー信号を入力した場合のみ、読み出し処理が開始され、シリアルライザーブロックがリングバッファからデータを取り出し、シリアル化してデータを出力する。これは、MSND 以外の検出器によるイベント同期や、ROV の位置情報と時間同期することを想定して

いる。連続モードの場合は、16 チャンネルあるうちの選択した 2 チャンネルのみ、時間連続的にデータを常にシリアル化して出力するモードである。

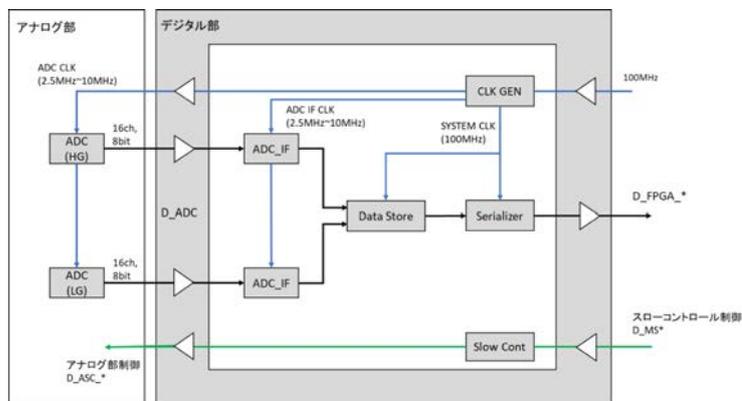


図 3.1-1 LTARS16A のブロックダイアグラム

図 3.1-2、図 3.1-3 に、アナログ部の信号処理波形のシミュレーション結果を示す。図中の typ、fast、slow は半導体の製造過程で生じるデバイス特性のばらつきを考慮したもので、nmos、pmos 両方のトランジスタの動作特性が遅い slow の場合であっても波形のピーキングタイムが 1 μ s 程度に収まるように設計されていることが分かる。HG では 80 fC までの入力電荷に対して波高値の線形性が確保されており、LG では 1600 fC まで確保している。LTARS16A チップでアナログ回路のゲインを 2 種類用意したのは、MSND からの信号が純粋な中性子からのイベントだけでなく、ガンマ線のイベントも含まれるため、波形の形や波高値情報から中性子イベントのみを抽出する必要があるためである。

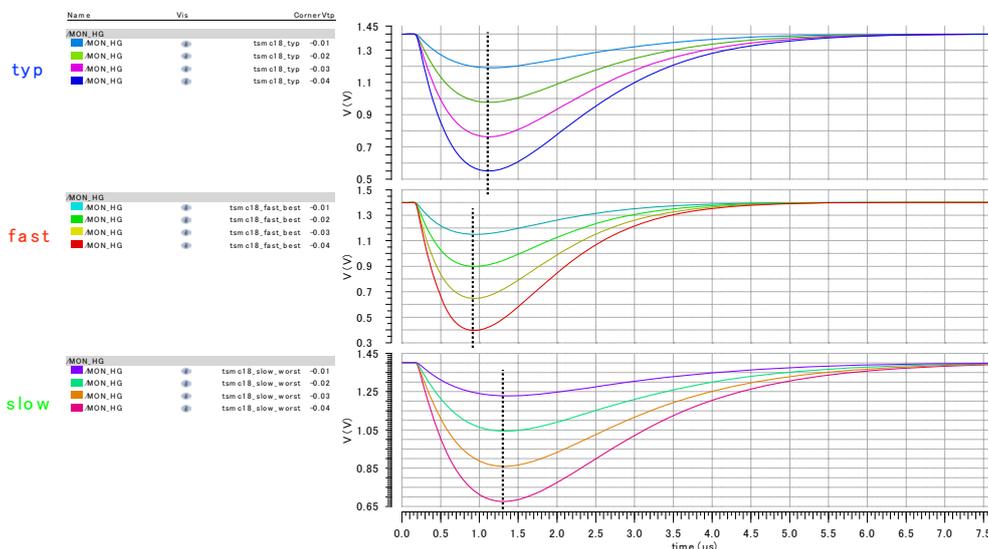


図 3.1-2 LTARS16A の HG のアナログ波形

(入力部には、MSND の検出器容量 300 pF を加えている。シミュレーションは製造ばらつきを考慮したトランジスタパラメータの違いを示しており、それぞれ typical, fast, slow の場合を表す。入力電荷は 4 種類を入力しており、typ を例にとると 20 fC(シアン), 40 fC (緑), 60 fC (マゼンタ), 80 fC (青)を入力している。)

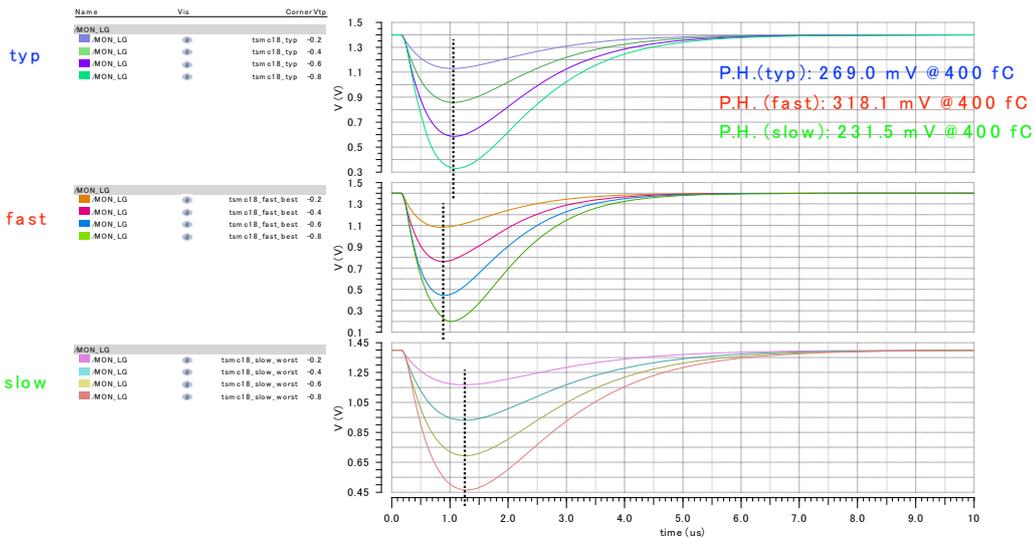


図 3.1-3 LTARS16A の LG のアナログ波形

(入力部には、MSND の検出器容量 300 pF を加えている。入力電荷は 400 fC (薄紫), 800 fC (緑), 1200 fC (紫), 1600 fC (薄緑) を入力している。)

図 3.1-4 に LTARS16A チップと評価基板の写真を示す。評価基板には MSND を 2 枚実装してあり、それぞれ ASIC と DC 結合/AC 結合で接続されている。ASIC に必要なバイアス電圧等はフラットケーブルで接続される FPGA (Field Programmable Gate Array (現場で書き換え可能な大規模集積回路)) ボード及びアダプタボードから供給される。こうした構造によって MSND と ASIC の放射線耐性試験や、ROV に搭載するために要求されるコンパクトさを満たすことができる。図 3.1-5 に、ASIC 基板と FPGA 基板、そして 2 つを接続するアダプター基板を示す。RCV の搭載のためのアクリル容器 (直径 10.14 cmφ、長さ 30 cm) に 3 種類の基板すべてが収まるようになっている。シミュレーションで得られた LTARS16A の性能値に関しては、表 3.1-2 にまとめている。

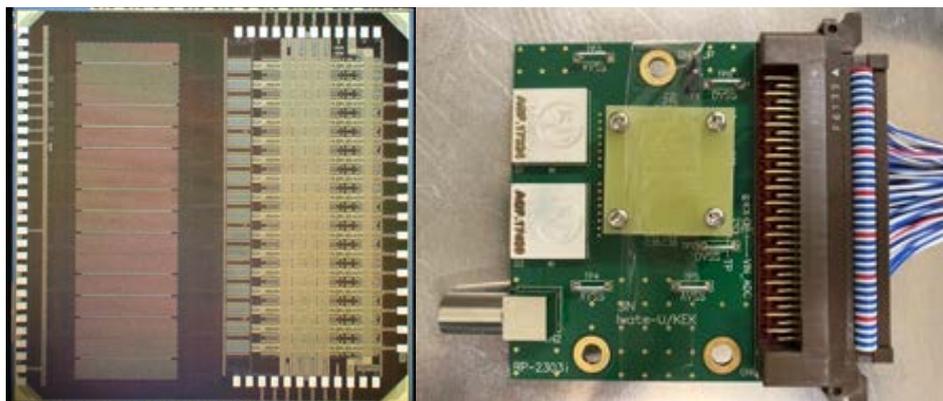


図 3.1-4 LTARS16A チップと評価基板の写真



図 3.1-5 UUV に搭載する基板の写真
(左：ASIC 基板、中：アダプター基板、右：FPGA 基板)

表 3.1-2 LTARS16A の性能のまとめ

Channels	16
Shaping time	1 μ s
Power consumption	4.71 mW/ch
Minimum signal charge	10 fC
Dynamic range	± 80 fC for HG, ± 1600 fC for LG
ENC	3000 e ⁻ for HG, 10000 e ⁻ for LG
Voltage gain	10 mV/fC for HG, 0.5 mV/fC for LG

(2) 電流型 MSND 中性子センサの改造及び ²⁵²Cf 線源を用いた中性子照射試験

令和 3 年度に開発した電流型 MSND 中性子センサの改造を実施した。令和 3 年度に開発した中性子センサは、MSND のリーク電流を除去するために、MSND と積分器間を AC 結合とし、直流成分を通過させない仕様としていた。一方、令和 3 年度の京都大学複合原子力科学研究所 ⁶⁰Co 照射施設での照射試験において、この積分回路系では、1 Sv/h 相当の高線量環境下では、検出器出力がパルス状ではなく直流的な出力となり、リーク電流と同様に除去されるために測定不能になることが判明した。この試験結果を受けて、令和 4 年度には、中性子センサ回路系の AC 結合を DC 結合に変更した。この仕様変更により MSND のリーク電流は除去されなくなるが、リーク電流の寄与分は別途評価することが可能であるため、実用上の問題はないと考えた。

さらに令和 4 年度には、積分型電荷増幅器における積分電荷が設定電荷分増加するごとに、本中性子センサから 1 個のパルス (TTL (Transistor Transistor Logic: トランジスタ・トランジスタ・ロジック)) が出力されるように改造を施した。UUV 搭載できるような仕様の実機を製作し、上記の仕様変更を施した電流型 MSND に対して、産業技術総合研究所 (以下、産総研と略記。) の技術協力の下で ²⁵²Cf 線源による中性子照射試験を実施した。本試験では、改造後の電流型 MSND 中性子センサの中性子照射時における動作確認を行うとともに、出力パルスレートから中性子強度に得るための換算定数の導出を試みた。

図 3.1-6 に、本試験の照射体系の写真を示す。MSND 用信号処理回路をパッケージングした筐体の上部にポリエチレンブロックを載せ、ブロック上に ^{252}Cf 中性子線源を設置した。本ポリエチレンブロックは、核分裂中性子を減速して熱中性子を生成させるために配置した。なお、 ^{252}Cf 中性子線源の中性子放出率は $7.36 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ （令和 5 年 3 月 16 日時点）である。

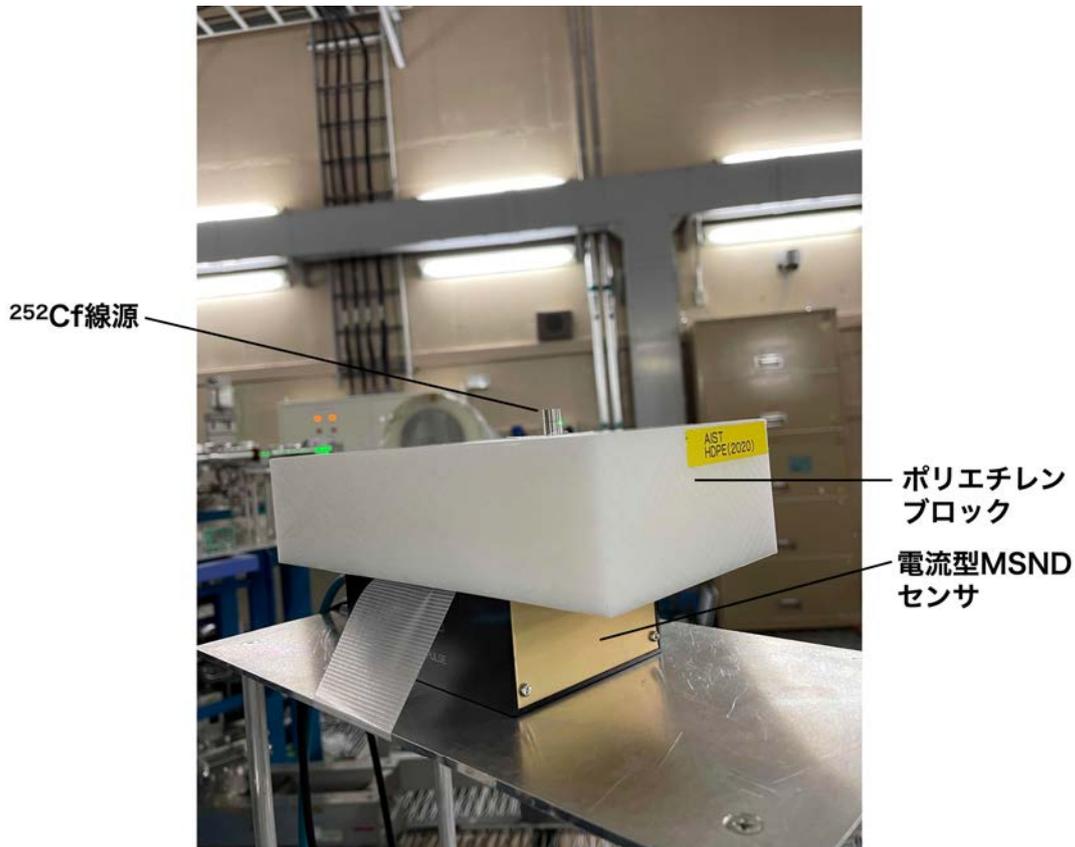


図 3.1-6 中性子照射体系

令和 3 年度成果報告書で述べたように、本中性子センサは、MSND と電荷積分回路を内包するモニター部と、電流積分のリセットと PC へのデータ出力を担うインターフェース部（IF）で構成される。積分型電荷増幅器の出力信号は USB を介して PC に伝送することができる。図 3.1-7 に、中性子照射時における積分型電荷増幅器の出力信号の例を示す。令和 3 年度時点ではアノード読み出しであったが、令和 4 年度の AC 結合への変更に伴いカソード読み出しとなった。これにより、積分形電荷増幅器の出力極性が反転している。本試験では、積分型電荷増幅器にリセット電圧を送る閾値を -4000 mV に設定した。また、積分形電荷増幅器の信号が -2 mV 増加するごとに 1 個の TTL パルスを出力するように設定した。

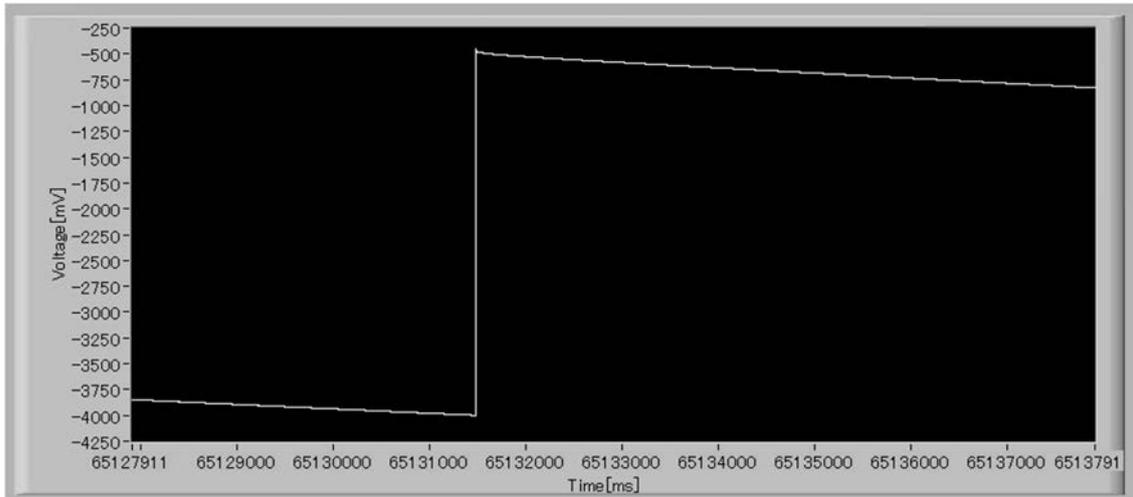


図 3.1-7 電流型 MSND センサの電荷積分器の出力信号

図 3.1-8 に、PHITS で評価した MSND 位置での中性子スペクトルを示す。この中性子スペクトル中の Cd カットオフエネルギー (0.5 eV) 以下の中性子束を積分して、この中性子スペクトルから本試験の熱中性子強度は $8.04 \times 10^4 \text{ cm}^{-1} \text{ s}^{-2}$ と評価された。

図 3.1-9 に、中性子照射時の中性子センサの出力パルス数の推移を示す。熱中性子照射時の出力パルスレートは $4.81 \pm 0.02 \text{ pulse s}^{-1}$ であった。次に、 ^{252}Cf 中性子線源を格納し、中性子線源なしの条件下でリーク電流による出力パルス数を測定したところ、パルスレートは $4.40 \pm 0.03 \text{ pulse s}^{-1}$ であった。このことから、熱中性子照射によるパルスレートは、線源ありなしの条件下で得たパルスレートの差し引きから評価できることが分かった。

また、本試験の機器設定 (積分電荷が -2 mV 増加するごとに 1 個のパルスを出力するという設定) の下では、本中性子センサの出力パルスレートから熱中性子強度を算出するための換算定数は $1.96 \times 10^4 \text{ neutrons/pulse}$ と評価された。この換算定数は、本試験の熱中性子強度 ($8.04 \times 10^4 \text{ cm}^{-1} \text{ s}^{-2}$) を、出力パルスレートへの熱中性子の寄与分 ($0.41 \text{ pulse s}^{-1}$) で除すことで導出した。

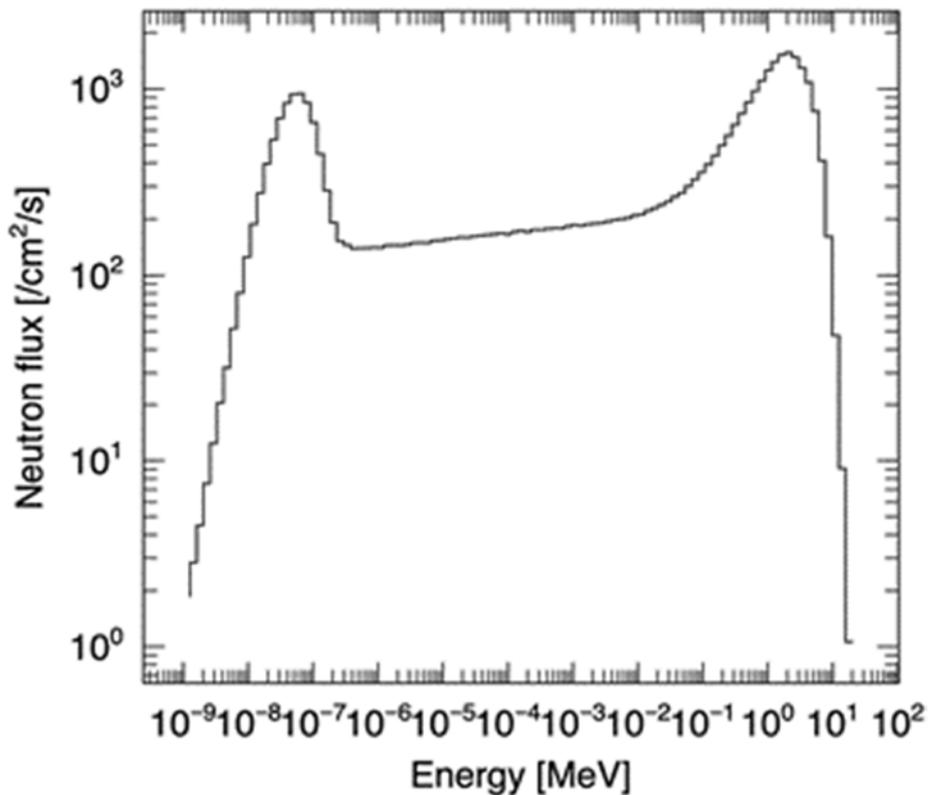


図 3.1-8 MSND 位置における中性子スペクトル計算値

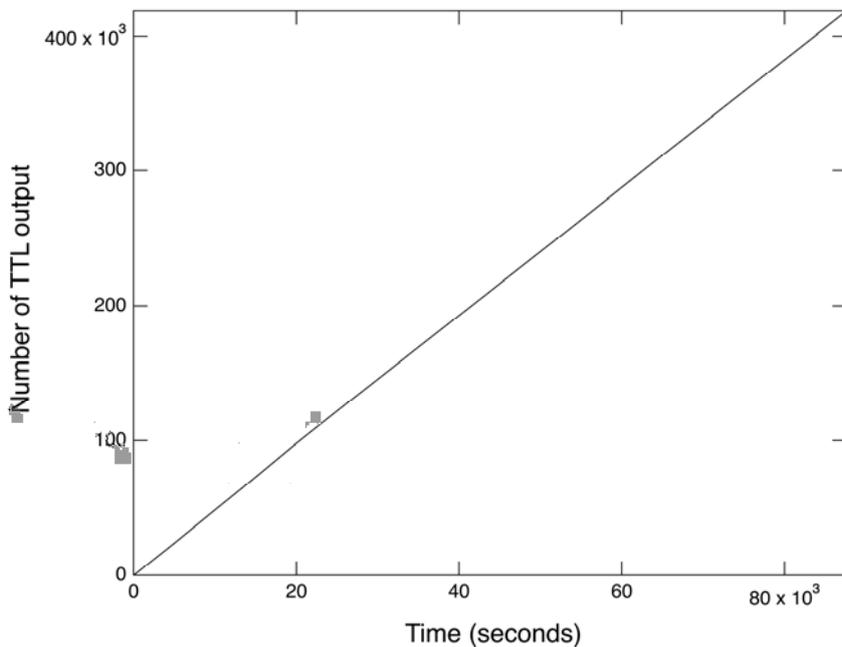


図 3.1-9 中性子照射時の電流型 MSND センサの出力 TTL パルス数の推移

◆ まとめ

微弱な信号を検出する中性子センサ MSND の計測に適した信号処理回路の実機を製作した。さらに、現実的に UUV に搭載できるように設計した。また、MSND 中性子センサの実用を見据えて、一定の精度の中性子束で中性子を供給できる産総研の中性子標準照射施設を

利用して検出器システムの中性子応答を評価し、高線量ガンマ線環境下で有効となる電流モード測定における電流・中性子強度換算係数を導出した。

本研究では、令和2年度に中性子線源とガンマ線源を用いて、従来のアナログ信号処理回路を適用してデータ収集パラメータの最適化並びにMSNDの中性子とガンマ線それぞれに対する応答の基礎データを取得した。また、MSNDの信号処理に特化した耐放射線集積回路を設計した。さらには、MSNDの水中での中性子応答を評価するための水槽を設計・製作した。

令和3年度には、令和2年度の成果から導出した、信号処理回路の整形時定数に基づいて、産総研の ^{252}Cf 線源と設計・製作した水槽を用いてMSNDの中での中性子に対する応答を評価した。さらに、京都大学複合原子力科学研究所の ^{60}Co 照射施設において、1 Gy/h程度のガンマ線線量率下において、中性子線源からの応答を観測し、中性子とガンマ線の弁別可能性を確認した。また、1)水中下でのデブリ中性子測定位置における線量率がシミュレーションにより高々10 Gy/h程度であること、2)MSNDの素子サイズが1.2 cm角であり、 ^{60}Co に対する鉛の1/10 価層が4 cmで、検出器前面 2π 方向に施す場合の遮蔽体重量が70 g程度であるため軽量性を失わないことの2点から、PCV内の水中でのガンマ線環境におけるデブリからの中性子・ガンマ線弁別測定を十分行えることを示した。さらに、MSNDの信号処理に特化した耐放射線集積回路を組み合わせた“検出器”としての動作を確認し、性能改善に向けた実装方法や回路方式の改善点などの課題が抽出され、高線量下での放射線耐性試験においては、信号出力の飽和を避けるための具体的な回路時定数の情報と、より高放射線耐性を実現するための知見を得た。

令和4年度には、さらに高線量になることに備え、MSNDの電流モードによる測定手法についても検討し、回路を設計・製作し、産総研の ^{252}Cf 線源による照射実験から電流・中性子強度換算係数を導出した。一方、耐放射線集積回路については、令和3年度までに得られた知見を基に修正・変更を施す予定であったが、新型コロナウイルスの蔓延による世界的な半導体部品の逼迫によって、令和3年度まで回路製作を請け負った業者から請負業者を変更せざるを得なくなり、さらにゼロからの回路設計をせざるを得なくなったことで納期的大幅な遅れがあった。ただ、基本的な性能確認では、問題なく作動することが確認できたため、開発した小型高効率中性子センサが実現できたと言える。

3.2 UUV プラットホームの開発（令和2年度～令和4年度）

PCV 内での UUV の位置を特定する自己測位システムに関して、候補となる幾つかの自己測位法について PCV 内に適用し、その際の課題抽出結果を基に、測位精度向上方策を講じた。

3.2.1 燃料デブリマッピングツールの開発（令和2年度～令和4年度）

【令和2年度の概要】

令和2年度は、開発する中性子センサの運用方法として水中広角カメラ、ソナーなどとの連動を念頭に、通信・制御回路並びにインターフェースの設計を検討した。実施した項目の概要を以下に示す。

(1) PCV 内状況のマッピングを行うための水中 LiDAR の機器選定

PCV 内の状況をマッピングする構成要素の1つとして、ソナーの他に水中 LiDAR の採用を検討し、機器選定を実施した。

(2) 燃料デブリマッピングツールの通信・制御回路

供給電源については、可能な限り UUV 搭載のバッテリーで対応できるような仕様とした。ツールを構成するセンサの出力信号の通信制御では、操作側と UUV 搭載センサ間で計測データと制御データの双方向通信するために、各装置信号がスイッチングハブを介して操作側の PC で動作できるように、UUV のシステム内で TCP/IP ネットワークを組む仕様とした。中性子センサの検出信号については、高エネ研が開発する中性子検出器用信号処理集積回路との接続を考慮する必要があったため、仕様が決まり次第検討することとした。

(3) インターフェースの設計

令和2年度は、1F のプラント内部の壁、構造物を点群データに変換した VR コンテンツデータを使用し、UUV の位置情報から UUV が位置する周辺の壁や構造物をヘッドマウントディスプレイ上で VR を構築するシステムに、ソナーの出力データを点群データに変換し、投影する機能を追加した。これによって、図 3.2.1-1 に示すように時系列ごとの位置座標を入力した際に、位置座標に対応するシーンデータを読み出して、適切な視野で VR システム上に投影することを可能にした。



図 3.2.1-1 ROV 位置（左）と ROV 位置に対応したシーンデータ（右）^[3.2-1]

【令和3年度の概要】

令和3年度は、燃料デブリマッピングツールの通信・制御回路の仕様について、令和2年度に引き続き設計検討を続けた。

(1) LiDAR スキャン機構の改良並びにスキャンデータからの3D点群データ作成方法の検討

LiDAR (Light Detection And Ranging : 光による検知と測距) スキャン機構に使用している MEMS (Micro Electro Mechanical Systems : 微小電気機械システム) ミラーの共振周波数や位相遅れが温度に伴って変化するため、変化に応じた周波数と位相遅れ調整値の補正が必要になった。そこで、MEMS ミラーの共振周波数・位相遅れの温度特性を評価し、MEMS ミラー内の温度センサから温度を読み取って、温度補正するファームウェアを作成した。

また、測定データの点群データを描画した際に測定対象物がない位置にもゴースト画像が発生したので、LiDAR の制御系に受光信号の立ち上り・立ち下り時間、MEMS の角度情報をメモリに書き込み・読み出しする際のデータ長を修正することで、ゴースト画像を発生させなくした。

(2) 燃料デブリマッピングツールの通信・制御回路の仕様検討

① 電源系

海技研が所有する UUV は、リチウムイオンバッテリー (公称 14.8 V、18 Wh、266.4 Wh) を搭載し、8 つのスラスターから構成される UUV 動力系 (以下、動力系と略記。) とマッピングツールの通信・制御回路系の 2 系統に電力を供給できる仕様になっている。通信・制御回路の動作はバッテリーによる電力供給を基本とした。なお、燃料デブリマッピングツールで使用する水中ソナー、水中カメラは、両方とも最大消費電力 5 W である。一方、動力系の平均消費電力は 18 W で、最大瞬間消費電力は 180 W である。ただし、実作業を想定した場合、スラスターをすべて最大出力にして常時運転することは、ほとんどないと推察されるため、バッテリーからの給電で充分であると判断した。

また、LiDAR の消費電力は 15 W 以下であり、先述のリチウムイオンバッテリーで対応できるものの、動力系と同一にした場合のノイズ混入を避けるため、UUV 動力系と通信制御回路系の 2 系統と切り離して商用電源から給電できる仕様にした。中性子センサについても、高エネ研との協議から、消費電力が高々 20 W であるが LiDAR 系と同様のノイズ混入から別途給電できる仕様とした。

② 通信・制御系

令和3年度の事業年度開始当初、燃料デブリマッピングツールを構成するソナー、中性子センサ、水中カメラ、IMU 及び LiDAR の通信制御系を同一の水密容器に収納して、UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter : 汎用非同期送受信機) ・TCP/IP 変換回路を経て、1 本のテザーケーブルで統合して、PC に送信することを想定していた。しかし、令和3年度事業年度の終了間際、世界的な半導体部品の枯渇が発生し、信号の通信制御をするための FPGA 回路が入手できないリスクが非常に大きくなったことを受け、プラットフォームに搭載するセンサ類は、それぞれ単独の水密容器に格納することにした。中性子センサ並びに処理回路と信号処理用の FPGA を単独の水密容器にまとめて収納し、LiDAR の通信・制御系回路についても、投光・受光部、スキャン部などと一緒の単独の水密ポッドに収納し、それぞれの信号・情報を PC に送信することとした。

(3) インターフェースの設計

令和2年度のインターフェースの設計に基づき、リアルタイム処理について着目したインターフェースを検討した。中性子センサの出力間隔は数秒程度と即応性があるものの、測位システムについては、プログラムによる出力値の計算時間が必要となり、長いものだと1測定点につき出力間隔が10分程度にもなると予測される。このため、センサ間でのタイムスタンプの共有化は非常に難しいことが判明した。水中カメラによる映像、ソナーの反射音響画像については、比較的短時間での撮像が可能であり、中性子センサの出力間隔とも大幅な差がないことから、これらカメラ映像やソナー音響画像と、VR映像の比較により自己測位を調査する運用を可能にすることが現実的であると判断した。また、LiDARに関しては撮像データを送信するためのインターフェースを設計した。

【令和4年度の実施内容及び成果】

令和4年度では、令和3年度の仕様検討に基づき、燃料デブリマッピングツールの通信・制御回路を製作し、UUV用の水密ポッドに封入するとともに、プラットフォームとの通信・電源ケーブルと接続した。

(1) LiDAR スキャンデータから 3D 点群データへの変換ソフト作成

LiDAR との通信（コマンド送信）/データ取得/データ変換/点群表示機能を盛り込んだビューアソフトを作成した。従来はデータ変換する際のオフライン処理で3D点群の表示まで計10分程度を要したが、更新したビューアソフトを用いることで処理時間を大幅に短縮でき、3D点群のリアルタイム表示が可能となった。図3.2.1-2は、小型水槽に形状模擬デブリを設置し、LiDARで撮像した3D点群データを示している。

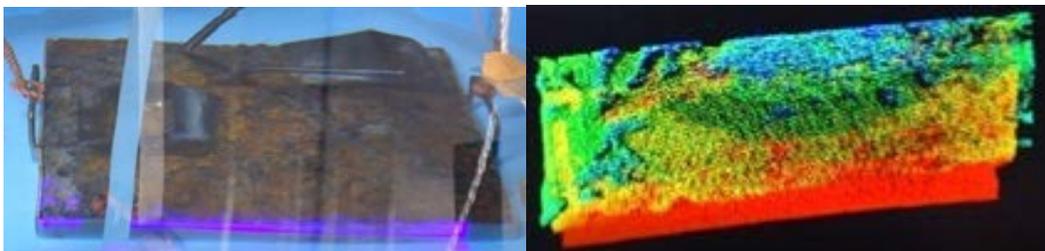


図 3.2.1-2 水槽中の形状模擬デブリと LiDAR で撮像した 3D 点群データ

(2) 燃料デブリマッピングツール構成要素の通信・制御系の製作

燃料デブリマッピングツール構成要素である中性子センサ、水中カメラ、LiDAR、ソナーとUUVプラットフォーム間の通信・制御を行うための通信・制御回路を製作し、UUVプラットフォームとの通信ケーブルを接続した。また、水中カメラはUUV専用の通信・制御ポッドに封入し、UUV専用の通信・制御ポッドには集約せず、付属の専用ケーブルでプラットフォームに接続した。

(3) UUVと遠隔操作するためのUUVプラットフォーム間のインターフェースの製作

大量のデータを送信するLiDARやソナーを除いた他のセンサの送信については、UUV内でLAN(TCP/IP)ネットワークを構築したことにより、スイッチングハブで信号を集約することができた。動作試験については、3.2.2項の(4)において詳述する。

① 慣性測定ユニット(IMU)

IMUは、英国 x-io Technologies 社製の MEMS 型の NGIMU を用い、そのデータ収集では、メーカー純正の処理ソフト^[3.2-2]を使用し、IMU による姿勢角データ、加速度データを測定・記録することとした。

② UUV 操作、積算中性子線量計、カメラ映像など

UUV を操作するためのインターフェースとして Blue Robotics 社の Navigator Flight Controller^[3.2-3]を使用し、ソフトとして QGroundControl^[3.2-4]をインストールした。これにより積算中性子線量計のモニターを兼ねたカメラ映像、深度、温度の情報をプラットフォームとなる PC に送信することができる。

③ LiDAR

LiDAR の通信・制御に TCP/IP を適用できるように、DHCP (Dynamic Host Configuration Protocol : IP アドレス自動設定プロトコル) サーバソフトウェア Open DHCP^[3.2-5]を制御 PC にインストールした。LiDAR スキャンデータから 3D 点群データへ変換し、得られたデータの描画には先述のビューアソフトを用いることとした。さらに、得られた 3D 点群データは、ローカルネットワークを通して、後述のプラットフォーム GUI に送信し、VR 上に投影できるようにシステムを構築した。

④ ソナー

ソナーに関しては、本体が水中仕様になっているため、UUV 専用の通信・制御ポッドには集約せず、独立して付属の専用ケーブルと USB 変換器でターミナル PC に接続した。ビューアソフトは純正の Ping Viewer^[3.2-6]を使用することとした。

⑤ 中性子センサ

中性子センサについては、独立した水密容器に封入することとした。封入したものは、1)センサ素子と信号処理回路を 1 枚の基板に載せた ASIC ボード、2)ASIC からの出力信号と PC とのインターフェースとなる評価ボード、3)ASIC と評価ボードの通信制御・電力供給を ASIC に分配するアダプタボードの 3 種類であり、これらについて、模式的に示したものが図 3.2.1-3 である。中性子センサで得られた情報は、評価ボードからイーサネットケーブルを介して PC と接続することとした。

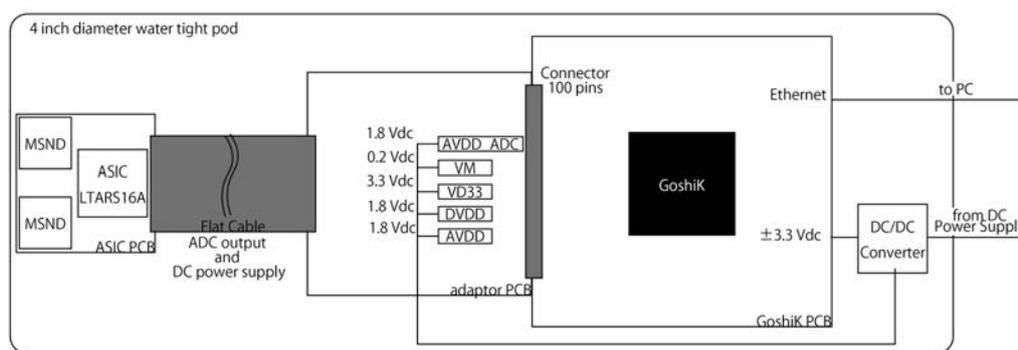


図 3.2.1-3 中性子センサ専用ポッドのシステム模式図

3.2.2 UUV プラットホームの開発 (令和 2 年度～令和 4 年度)

PCV 内での UUV の位置を特定する自己測位システムに関して、幾つかの候補について PCV 内に適用し、その際の課題抽出結果を踏まえて、測位精度向上方策を講じた。

【令和2年度の概要】

令和2年度においては、光学式測位システム^[3.2-2]と海洋で使用される音響測位システムをPCV内へ適用した際の課題を抽出し、測位精度向上方策を検討した。

光学式測位システムは、予測精度が良好であるものの、天頂カメラやマーカの設置等が必要なこと、サンプル取り出し時に周辺の濁度が上昇し、光学的なセンサが使用できないことから、1FのPCV内環境条件への適用が難しいと予測された。一方、海洋で使用される音響測位システムの1つである、SBL (Short Base Line : 短基線) 方式音響測位システムの精度検証試験をNARRECのロボット試験用水槽で実施した。当該水槽は、PCVのサイズを模擬したものであるが、このサイズの空間においては、構造壁などからの反射波によるマルチパス事象によって測位精度が大幅に劣化することが分かった。さらに、PCV内の高ガンマ線量下かつ狭小空間に瓦礫が複雑に散乱した環境では、基準点に受波器(レスポンダ)を設置する作業は困難であることが分かった。

さらに、測位精度向上方策としてAI手法を用いた位置推定並びに画像処理を適用したUUVの位置を予測するシステムの適用性検討を実施した。AI手法を用いた位置推定は学習データ作成としてDeepCrackと呼ばれるモデルを採用し、得られたソナー出力画像からペDESTAL模擬体外壁以外の要素を消去した画像を生成する方法を採用した。PCV内の再現CG画像から、ソナー画像に近いと思われる断面画像を生成し、それを二値化してランダムに切り抜いたものと、対になる円弧の正解画像を300セット作成した。ペDESTAL壁のみを抽出できるようにDeepCrackモデルに学習させた。学習セットとは別に40種類の同様の画像を作成し、それらを入力として与えた結果、余分な構造体の情報はほぼ確実に排除でき、円弧の抽出についても位置はほぼ正解の結果が出ている。学習させたデータはあくまでCGから作成したテスト用のデータであり、実際のソナー出力画像とは異なる。よって、今後実機スケールのペDESTAL外壁模擬体を使用したソナー出力画像を撮像し、学習データを作成することで、実機への適用可能性を見出した。

次にNARRECの角水槽にペDESTAL外壁の半径を約1/4に縮小したステンレス製の半円筒状模擬体を設置して、回転式ビームソナーで2次元画像を撮像した。この2次元画像を基に回転式ビームソナーで撮像した2次元画像は、角水槽の形状と寸法の制約から、対象以外の水槽の壁からの多重反射による虚像(ゴースト)が多数現れ、検知対象のペDESTAL模擬体外壁から反射した超音波の強度が弱く、目視でも判別の困難な画像が見られた。この模擬体を用いた2次元画像を画像処理に用いて模擬体外壁の円を抽出する検討については、所望の位置に円が抽出できたケースもあったが、円を抽出できないケースでは水槽壁からの多重反射によるゴーストの影響でソナー画像の画質に不安定な面が生じていることが分かった。このため、実機に適用するためには、ゴーストを低減する対策を立てて、上記のAI手法と組み合わせた方法を検討する必要がある。

【令和3年度の概要】

令和3年度においては水中でも利用可能な広域性、コストの安価性、キャリブレーションの簡便性、周囲の物理環境や障害物環境に影響されないという慣性航法(Inertial Navigation System: 以下、INSと略記)^[3.2-7]の利点に着目して、適用性検討を実施した。

INSでは加速度計や角速度計(ジャイロ)を使用して加速度や角速度を測定し、座標変換を行いながら、積分することで移動距離や姿勢を求めることが可能である。ただし、積分に伴う誤差が蓄積することや、温度や静電容量などの影響を受けてセンサの出力値がず

れるドリフトが問題になる。ドリフト誤差が大きいと、誤差が積分によって蓄積するため、正確な位置同定が困難になることからセンサの測定試験を実施した。

今回は、加速度計や角速度計など単体素子を組み合わせた IMU に英国 x-io Technologies 社製の MEMS 型の NGIMU を採用した。NGIMU は加速度計や角速度計を検出する検出素子部と、検出素子からの信号を増幅、調整して出力する信号処理回路で構成されている。

NGIMU に組み込まれた加速度計と角速度計の特性を調べるために、静止状態で 1 時間の観測を行い、加速度及び角速度が変化するかどうかを調べた。

この結果、加速度計は大きなドリフトは見られなかったこと、角速度計は $0.4 \sim -0.4$ deg/s の振幅で推移していることが判明した。そこで、静止状態のまま観測時間を 30 分に短縮して、加速度と角速度の変化量の標準偏差を求めたところ、角速度の平均値に対する角速度変化量の比は、加速度の平均値に対する加速度の変化量の比に比べて、極めて大きいものとなった。試験の詳細については、令和 3 年度の報告書に示してある。

IMU の基本的な特性評価の結果を踏まえて、INS 演算プログラムを整備した。当該プログラムにおける計算手順は以下のとおりである。

- 1) IMU から時刻、加速度、角速度の 7 つのパラメータを読み込み
- 2) スケーリング
- 3) データの切り出し
- 4) 角速度の 0 点補正
- 5) 角速度を積分して姿勢情報（クォータニオン）の導出
- 6) 加速度の座標変換と加速度の 0 点補正
- 7) ダウンサンプリングとフィルタリング
- 8) 加速度の数値積分による位置の演算
- 9) 画面表示とファイルへの出力

また、移動体に搭載した際の測位試験として、小型 4 輪移動体、小型リモコンボートによる測位試験、モーションキャプチャによるドローンの測位試験を実施した。NARREC において NGIMU をドローンに搭載し、モーションキャプチャによってドローンの飛行における時刻歴の測位データを取得した。一方、ドローンに搭載した NGIMU の出力データから慣性航法の処理を施すことでドローンの位置の時刻歴を推定できる。これらの位置の時系列を比較検討することで、INS による位置の推定精度を調べた。

上記試験の結果から、角速度計は加速度計に比べて感度が高いことを確認した。また INS に関する文献^[3, 2-8]等から、加速度や角速度から位置情報に変換する際の積分による誤差蓄積による影響が大きいことが指摘されている。次に、NGIMU を搭載した移動体の動きに伴う角速度への影響度が少ない小型リモコンボートと、影響度が大きいドローンによる測位試験のデータを比較した。さらに、測定時間の積分範囲による位置推定における誤差蓄積の影響を調査した。

小型リモコンボートによる測位試験において得られた加速度ベクトルとドローンによる測位試験における加速度ベクトルの時系列変化を比較したところ、ドローンの加速度強度はリモコンボートに比べ約 40 倍の大きさであり、NGIMU をドローンに搭載すると移動体の動きに伴う角速度の加速度への影響度が大きいことが分かった。推定した航跡図についても小型リモコンボートとドローンによるものではモーションキャプチャの航跡とかなり差違が生じることが分かった。また、ドローンのホバリングでの振動に着目し、静止時間を含めない積分を行うことで、実際の航跡の再現性が改善されたことを確認したこと

から、移動体自身の振動の影響を差し引くことで測位導出精度を向上できることが分かった。

【令和4年度の実施内容及び成果】

(1) 姿勢角に対する拡張型カルマンフィルタ (EKF) の適用

令和3年度ではUUVの位置を特定する自己測位システムとしてINSを適用した結果、角速度に対する移動体(UUV等)の振動などの影響が大きいと位置推定に対する誤差も拡大することを確認した。UUVの姿勢角はIMUの角速度計で角速度を計測し、それを時間積分するが、姿勢角を積分するだけで誤差が蓄積されていく。そこで、加速度計及び角速度計と複合化することで積分誤差を補正するために、拡張型カルマンフィルタ(Extended Kalman Filter: 以下、EKFと略記。)^{[3.2-9][3.2-10]}を適用し、姿勢角を推定することとした。

IMUの出力である角速度と加速度を用い、EKFを適用してUUVの姿勢角を求めるアルゴリズムをINS演算プログラムに組込んだ。次に、令和3年度に実施したドローンの測位試験データに対して、NGIMUの処理ソフトによる姿勢角とEKFを適用した結果を比較し、EKFの精度を確認した。NGIMUの処理ソフトは姿勢・方位参照システム(Attitude Heading Reference System: 以下、AHRSと略記。)^[3.2-11]にMadgwickが提唱したフィルタを採用しており、EKFを含むカルマンフィルタは状態方程式や観測方程式のモデル構造が不明な場合に高精度を実現するのが難しいのに対して、Madgwickフィルタは同程度の精度を実現しながら高速に処理が可能なフィルタと言われている。

この2種類のフィルタにより、得られた姿勢角(ロール ϕ 、ピッチ θ 、ヨー ψ)を図3.2.2-1に示す。この結果、ヨー角については両者良く一致、ロール角は10度程度の差が見られており、フィルタを適用した姿勢角を用いてドローンの位置を推定した結果、両者の航跡図に大きな違いはない。

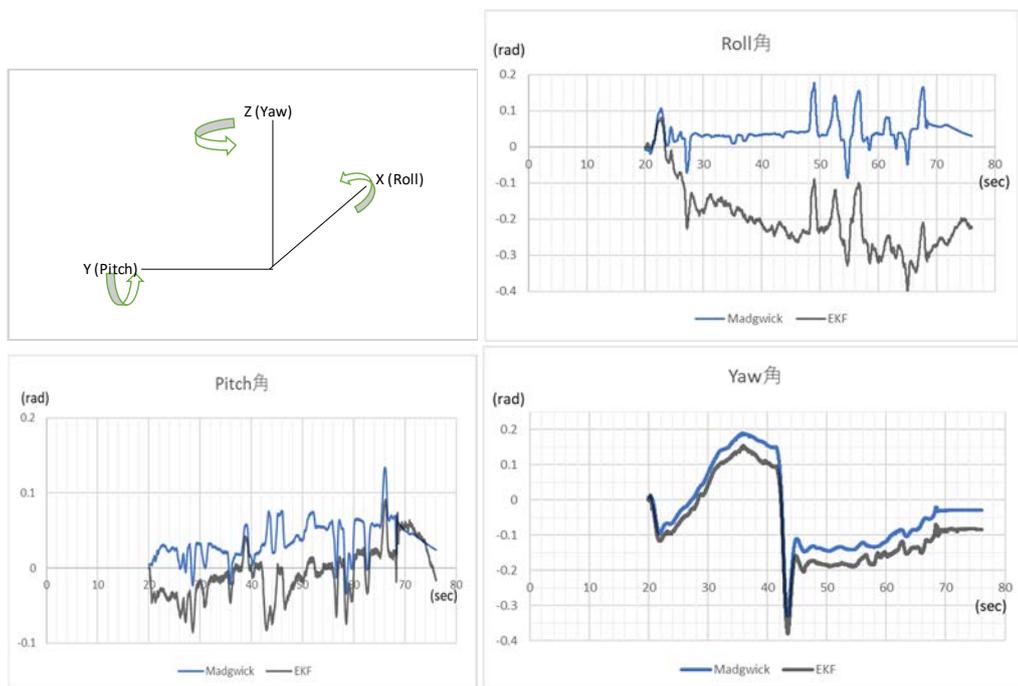


図 3.2.2-1 Madgwick のフィルタと EKF による姿勢角 (ロール ϕ 、ピッチ θ 、ヨー ψ) の比較

(2) UUV プラットホームの構築

UUV に搭載した燃料デブリマッピングツールである中性子センサや IMU からのデータ、積算中性子線量計、カメラ映像、LiDAR、ソナーからの撮像を受信し、処理・表示するためのプラットフォームの構成を図 3.2.2-2 に示す。本研究において、プラットフォームを 3 台のターミナル PC で構成することとした。

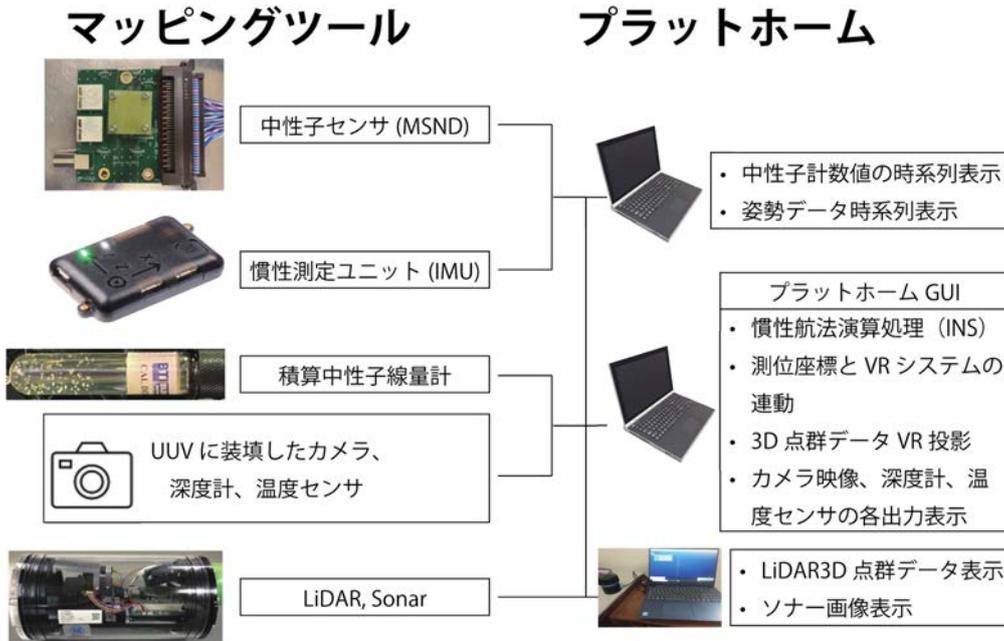


図 3.2.2-2 プラットホームの構成

(3) UUV プラットホーム GUI の作成

UUV を遠隔操作して燃料デブリマッピングツールからのデータを処理するため、IMU からのデータを受信するターミナル PC に、INS 演算のプログラムをインストールし、測位座標と VR システムの連動及び 3D 点群データの VR 投影を行う機能を加えたプラットフォーム GUI を構築した。さらに、実際の燃料デブリのサンプリング作業を想定した UUV の移動開始と停止を繰り返し行う場合の INS 演算の機能を追加した (図 3.2.2-3)。この機能を使うことにより、UUV の移動開始位置と停止位置を結ぶ線が航跡履歴として画面上に表示される。さらに、GUI 全体画面内の右側に、UUV の現在位置に対応する VR コンテンツの画像を見ることができる画面を設けた。その他にプラットフォームのターミナル PC 間をローカルネットワークで結ぶことにより LiDAR の 3D 点群データを VR 上に投影できるように作成した。

航海における移動・停止 (ここでは 3 回の移動・停止を想定)	移動開始前の待機時間	移動開始	第 1 回停止	再移動前の待機時間	再移動開始	第 2 回停止	再移動前の待機時間	再移動開始	第 3 回停止
UUV の運航	黄色の待機バー	緑の移動バー	赤の停止バー	黄色の待機バー	緑の移動バー	赤の停止バー	黄色の待機バー	緑の移動バー	赤の停止バー

図 3.2.2-3 燃料デブリのサンプリング作業を想定した UUV の操作

(4) UUV プラットホーム GUI を使用したマッピングツールと UUV プラットホームの総合試験実施

UUV の位置を推定する自己測位システムの精度検証を行い、推定した位置情報に基づいて VR システムが連動することを確認するため、NARREC のロボット試験用水槽において総合試験を実施した。

水槽の水面に、東西南北の方位に沿ってフロートを設置した (図 3.2.2-4 (左))。UUV を水面から 1 m の深さで中心から北の方向①に向けて移動させて①の点で停止、そこで 20 秒滞留後、西の方向②に向けて移動させ、図 3.2.2-4 (右) の②の点で停止、20 秒程度滞留後、南の方向③に向けて移動させて③の点で停止、20 秒程度滞留後、最初の出発点に戻る経路を想定した。

各経路において移動開始から停止までの IMU データを記録し、INS 演算による位置推定を行うが、UUV の移動開始と停止の推定位置が航跡として GUI (Graphical User Interface: グラフィカル・ユーザー・インターフェイス) の画面上に表示されるため、想定した経路と UUV の航跡を比較できる。

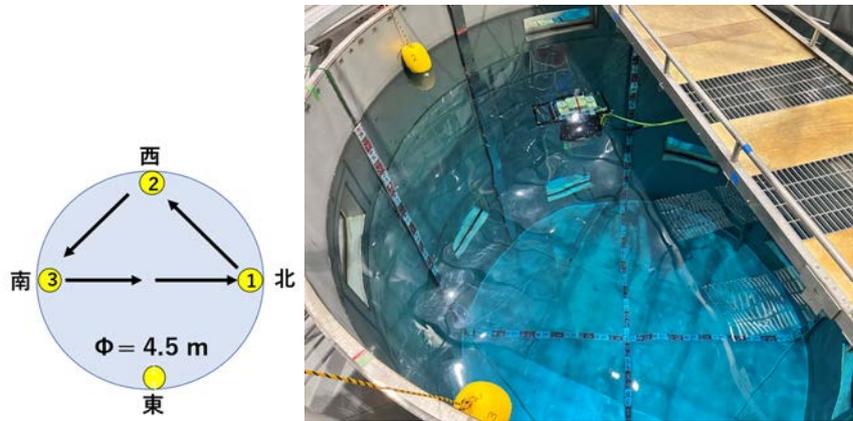


図 3.2.2-4 フロート設置位置 (左)、UUV が点②に向かう様子 (右)

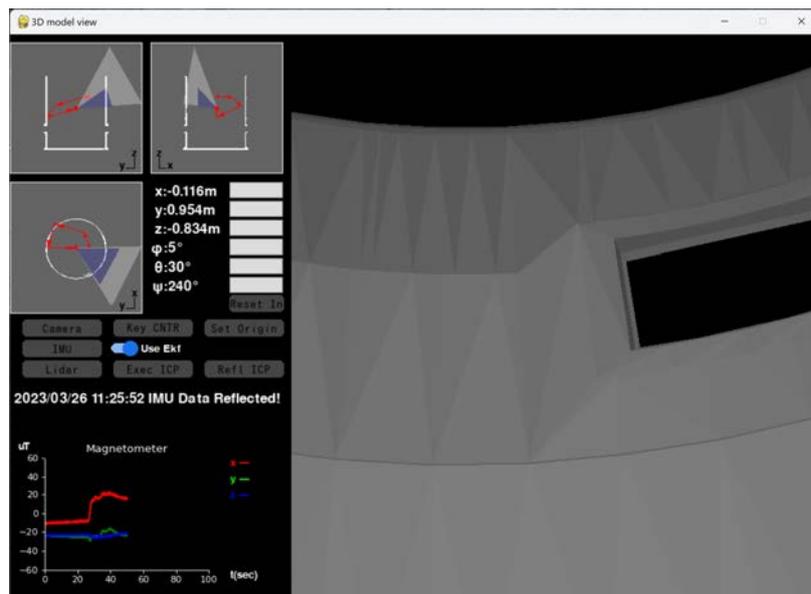


図 3.2.2-5 GUI 画面上の UUV の移動航跡

このUUVの移動経路に沿ったGUIの画面上の航跡を図3.2.2-5に示す。推定したUUVの航跡と想定した経路を比較すると、最大の点で約50 cm～1 m程度の差異を確認した。

この差異の原因として、UUVの実際の動きを目視で観察したが、想定した経路に沿って必ずしも正確に移動していないこと、INS演算においてUUVが一旦停止後、再移動する度にUUVの姿勢角データを再設定する必要があるが、その姿勢角データに伴う影響が大きいと推察されること等が考えられる。

INSにより推定した位置情報に基づいてVRシステムが連動することに関しては、UUVの現在位置で向いている方向に対して、VRコンテンツの画像が表示されていることをGUI上の画面で確認できた。

(5) UUV搭載LiDARの機能試験

プラットフォームGUIを使用した総合試験において、NARRECのロボット試験用水槽に形状模擬デブリを設置し、UUVに搭載したLiDARによるスキャンデータを計測した。このスキャンデータから3D点群データに変換した画像を図3.2.2-6に示す。

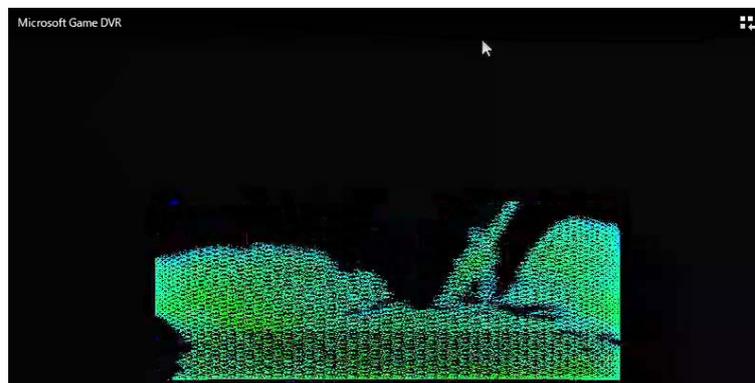


図3.2.2-6 LiDARによる3D点群データ画像

◆ まとめ

(1) 燃料デブリマッピングツールの開発

燃料デブリマッピングツール構成要素（中性子センサ、水中カメラ、ソナー、LiDAR）が連動するための通信制御系の仕様について、令和2年度から3年度にかけて検討した。さらに、UUVプラットフォームと遠隔操作するためのプラットフォーム間で、中性子センサの出力、水中カメラ及びソナーの撮像データを通信するためのインターフェースを設計した。令和4年度においては、センサの仕様が揃ったため、燃料デブリサンプリング操作が効率良く実施できるような仕様を策定し、インターフェースを完成させた。

(2) UUVプラットフォームの開発

令和3年度に整備したINS演算プログラムを使用した検討結果から、NGIMUを搭載する移動体によって角速度への影響が異なること、測定時間の積分範囲により位置推定の誤差蓄積の影響が変動することが分かった。このため、令和4年度においては、下記の検討を行い、INSによる位置推定の精度向上を図った。

- ① IMU を搭載する UUV 等の移動体の振動に起因するノイズを低減し、移動体に与える操作（移動、姿勢制御）信号を抽出する処理法として、EKF を姿勢角に適用し、その精度を確認した。
- ② UUV の移動開始、停止、静止、再移動開始などの操作に対応した INS による位置推定の積分範囲の設定を行う処理をプラットフォーム GUI に取り入れた。
- ③ 1F において UUV を PCV 内に投入する場所の位置、カメラ画像や LiDAR 画像等を利用できる機能をプラットフォーム GUI に取り入れ、これらの情報と INS の位置推定結果から、PCV 内部のペDESTAL 壁等の位置情報からと UUV の相対的な配置を把握して、より詳細な UUV の位置を総合的に予測できるシステムを構築した。
- ④ 日英連携：日英連携として英国側が担当する燃料デブリサンプリングツール、日本側が担当する燃料デブリマッピングツールとプラットフォームの連携に関する問題について英国側と議論を行った。

詳細については、3.4 節で述べる。

参考文献

- [3.2-1] JAEA/CLADS, 海技研, 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 (委託研究) 令和3年度英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進業, JAEA-Review 2022-070, 2023, 70p.
- [3.2-2] x-io Technologies, NGIMU User Manual version 1.5 Public Release 16 October 2019, <https://www.x-io.co.uk> (参照日: 16 October 2019) .
- [3.2-3] Blue Robotics, New Product: The Navigator Flight Controller and BlueOS!, <https://bluerobotics.com/new-product-the-navigator-flight-controller-and-blueos/> (参照日: 1 June 2022) .
- [3.2-4] Blue Robotics Inc, BlueROV2 Software Setup (R3 and Older), <https://bluerobotics.com/learn/bluerov2-software-setup-r3-and-older/> (参照日: 6 June 2022) .
- [3.2-5] Achal Dhir, Open DHCP server, <https://dhcpserver.sourceforge.net/> (参照日: 17 June 2020) .
- [3.2-6] Blue Robotics Inc, Ping Viewer Documentation, <https://docs.bluerobotics.com/ping-viewer/> (参照日: 17 September 2019) .
- [3.2-7] Oliver J. Woodman, An introduction to inertial navigation, UCAM-CL-TR-696, ISSN 1476-2986, 2007.
- [3.2-8] 今村恒彦, GNSS/INS入門, 日本ロボット学会誌, vol. 37, no. 7, pp. 579-584, 2019.
- [3.2-9] 足立修一、丸田一郎, カルマンフィルタの基礎, 東京電機大学出版局, 240p.
- [3.2-10] Sebastian Thrun, Wolfram Burgard and Dieter Fox, 上田隆一訳, 確率ロボティクス プレミアムブックス版, マイナビ出版.
- [3.2-11] Sebastian O.H. Madgwick, AHRS algorithms and calibration solutions to facilitate new applications using low-cost MEMS, Department of Mechanical Engineering of University of BRISTOL, March 2014.

3.3 放射線環境シミュレーション及び積算中性子線量計の特性評価（連携先：原子力機構） （令和2年度～令和4年度）

(1) 放射線環境シミュレーション（令和2年度～令和4年度）

【令和3年度までの概要】

1F 燃料デブリには、号機ごとの事故進展や部位に依存して、燃料デブリ性状（密度、組成、燃焼度など）や環境（Cs 汚染度、水中・気中、散乱物質の有無）の違いがあり、場所によってガンマ線や中性子線の強度とエネルギースペクトルが異なる。そのため、1F 内における放射線特性に応じた機器や遮蔽設計をするためには、PCV 内における任意の部位におけるガンマ線のエネルギースペクトルや強度、中性子線の強度を推定することが求められる。

令和2年度では、今後行われる内部調査や燃料デブリ取り出し、取り出し規模のさらなる拡大に備え、1F 内の任意地点におけるガンマ線と中性子線の線源強度、もしくはエネルギースペクトルを推定するために、3号機のプラントモデルを作成し、ガンマ線輸送計算の試解析を実施した。結果として、ペDESTAL内のガンマ線特性を輸送計算から得られることが確認できた。

令和3年度では、燃料デブリの線源特性を明らかにすることを目的とし、ベータ崩壊由来の制動 X 線と消滅ガンマ線及び自発核分裂と (α , n) 反応に由来する中性子線についての寄与率を推定した。結果として、制動 X 線の光子数は崩壊ガンマ線と合わせたもののうち最大 25 %ほどであり、消滅ガンマ線の強度は崩壊ガンマ線に比べて 8 桁ほど小さい値であることが分かった。また、自発核分裂と (α , n) 反応に由来する中性子を合計すると、そのうち約 94 %が自発核分裂由来であることが分かった。よって、燃料デブリの本格取り出しが開始されると目される 2031 年頃までは、燃料デブリ組成などに起因する不確かさを考慮しても、当面考慮すべき主要な放射線は崩壊ガンマ線と自発核分裂由来の中性子線であると分かった。さらに、令和2年度に構築した3号機プラントモデルと、光子、中性子源モデルを用いて放射線輸送計算を行い、ペDESTAL内における線量率やフルエンス率、エネルギースペクトルなどに関する情報を取得した。

【令和4年度の実施内容及び成果】

① MOX 燃料由来の燃料デブリ検知手法開発のための解析的検討

事故当時の3号機には MOX 燃料が部分装荷されていたことから、MOX 燃料と UO_2 燃料の燃焼組成（放射線源）の違いに着目し、MOX 燃料由来の燃料デブリを検知する手法の開発を目指した解析的検討を行った。MOX 燃料では初期組成に Pu が存在するため ^{244}Cm が早い時期に生成され、同じ燃焼度の UO_2 燃料に比べて ^{244}Cm の生成量が多くなる。しかし、3号機の MOX 燃料は燃焼度が小さく、燃焼度に対して 2 次関数的に生成される ^{154}Eu の生成量は少ないと考えられる。そこで、 ^{244}Cm から放出される中性子強度と ^{154}Eu から放出されるガンマ線強度の比較を行った。図 3.3-1 に、 UO_2 燃料における ^{244}Cm と ^{154}Eu の燃焼度と生成量の関係を示した。MOX 燃料の場合は UO_2 燃料とは異なる核種生成特性が期待されることから、放射線強度の比較により検知が可能であると考えた。

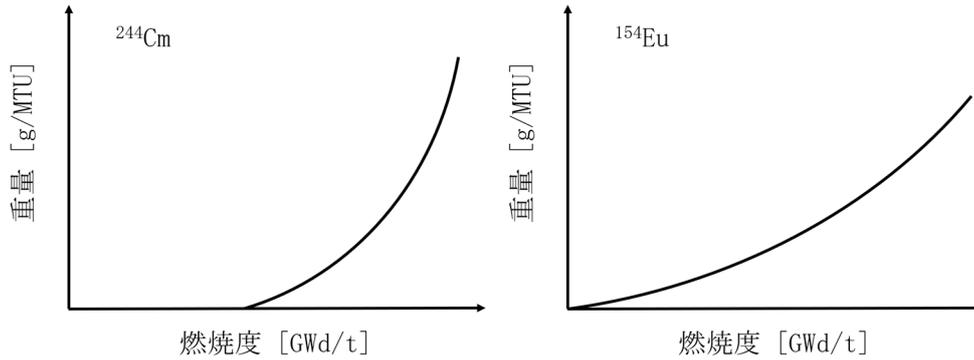


図 3.3-1 ^{244}Cm と ^{154}Eu の燃焼度と生成量の関係

② 解析手法

はじめに 2011 年 3 月 11 日の事故直前における 3 号機の炉内 UO_2 領域平均と炉内 MOX 領域平均、炉内全領域平均の重量データを作成した。そこから、本格取り出しが開始される見込みである 2031 年までの崩壊計算を行う。2031 年時点での核種ごとの重量データから自発核分裂による中性子強度を計算することで、 ^{244}Cm の中性子強度を取得した。また、この重量データから放射能を計算することで ^{154}Eu のガンマ線強度も取得した。 ^{154}Eu が放出するガンマ線は複数存在するが、ここでは、ある程度のエネルギー分解能を有する検出器で検知が可能な 1.27 MeV のガンマ線を検討対象とした。図 3.3-2 に解析フローを示す。

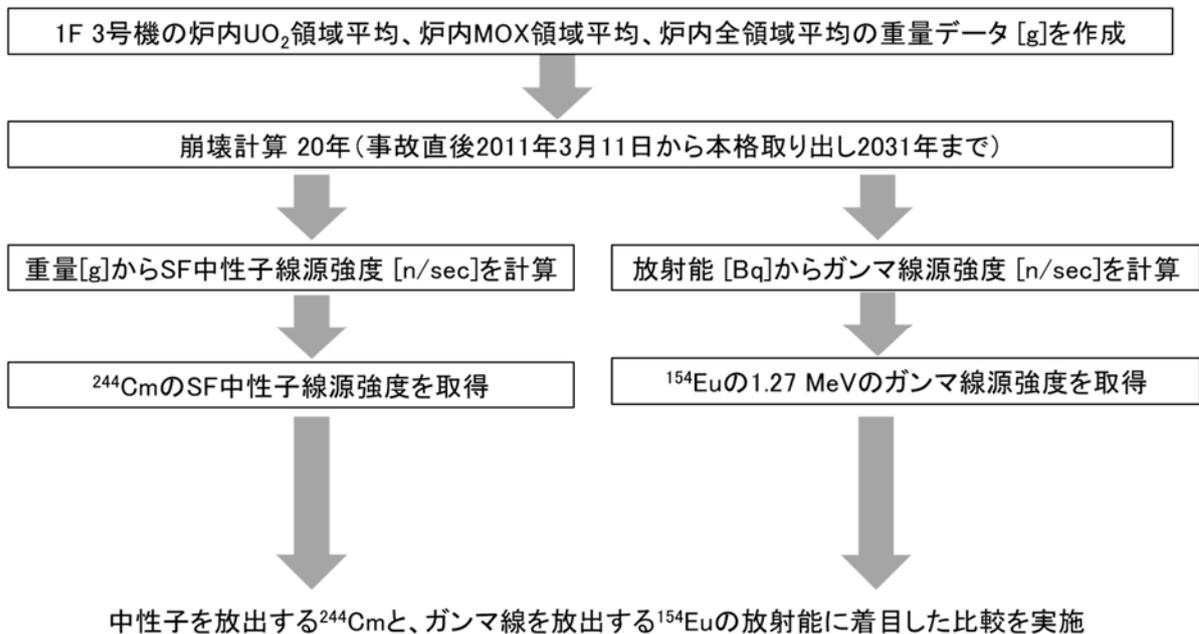


図 3.3-2 ^{244}Cm 由来の中性子強度と ^{154}Eu 由来のガンマ線強度の解析フロー

③ 線源特性の解析結果

図 3.3-3 は燃焼度に対する $^{244}\text{Cm}/^{154}\text{Eu}$ の線源強度比を示したものである。緑でプロットした炉内 UO_2 領域平均の線源強度比は 8.69×10^{-6} であり、炉内全領域平均の 9.00×10^{-6} とほぼ同等の値となった。一方、炉内 MOX 領域平均の線源強度比は 9.12×10^{-5} であり、

1桁ほど大きな値となった。さらに、照射サイクル数を考慮した線源強度比を青でプロットした。1~5サイクルごとの炉内UO₂領域平均の線源強度比は $3.01 \times 10^{-8} \sim 1.31 \times 10^{-5}$ の範囲であり、これらと比較しても炉内MOX領域平均の線源強度比の方が大きくなることが分かった。この結果は、今後取り出される燃料デブリから²⁴⁴Cm/¹⁵⁴Euの線源強度比が得られれば、MOX燃料由来の燃料デブリを検知できる可能性があることを示している。

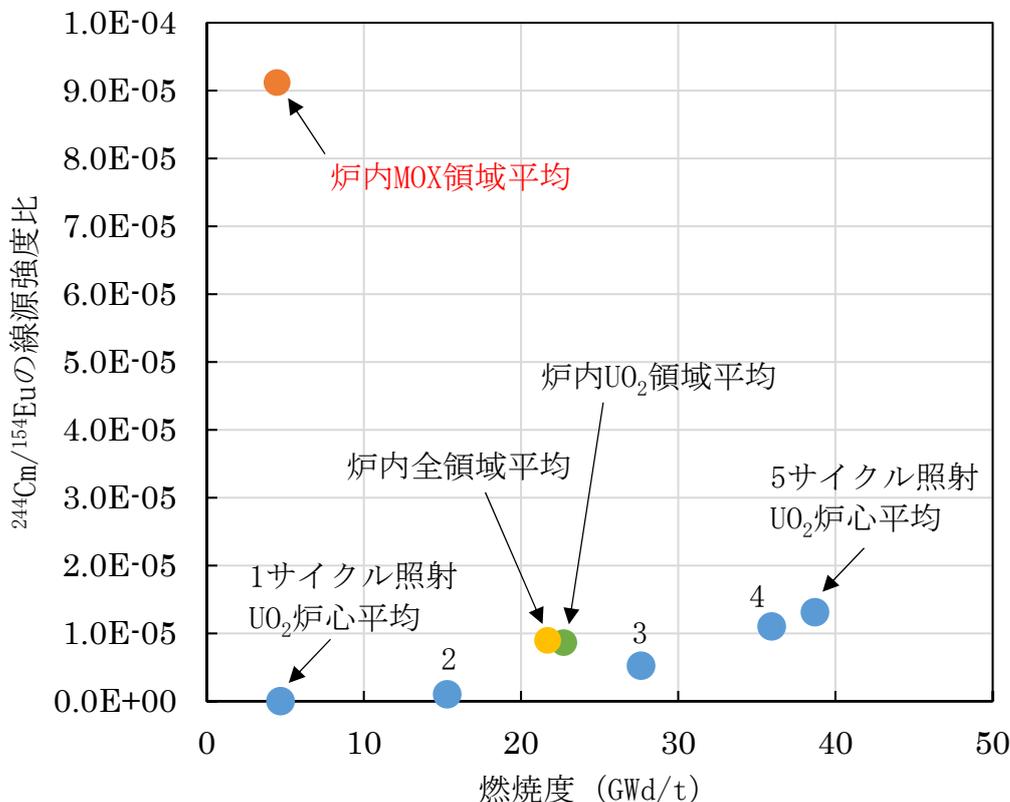


図 3. 3-3 燃焼度に対する ²⁴⁴Cm/¹⁵⁴Eu の線源強度比

(2) 積算中性子線量計の特性評価 (令和3年度~令和4年度)

【令和3年度までの概要】

1F 炉内は高ガンマ線場となっており、内部調査などで使用される電子機器に適切な遮蔽を施す必要がある。一方、今回の検討に用いた積算中性子線量計は、Bubble Technology Industries 社のバブルディテクターという製品であり、仕様上ではガンマ線に対する感度を持っていないため、遮蔽などの対策が不要となるものである^[3.3-1]。同社のバブルディテクターには熱中性子用のBDTと高速中性子用のBD-PNDの2種類がある。図3.3-4にはバブルディテクターの全体写真を示した。BDTとBD-PNDは外観やサイズが同等となっている。図3.3-4の測定部位には、過熱状態の液滴が一様に分散している弾性ポリマーが充填されている。液滴に放射線が当たると気化して弾性ポリマー中にバブルが発生し、そのまま留まることになる。BDTの場合は、弾性ポリマー中にLi化合物が添加されており、⁶Li(n, α)反応により熱中性子を検知できる仕組みとなっている^[3.3-2]。BDTとBD-PNDはともに、発生したバブルの数から入射した中性子量の測定が可能となる。

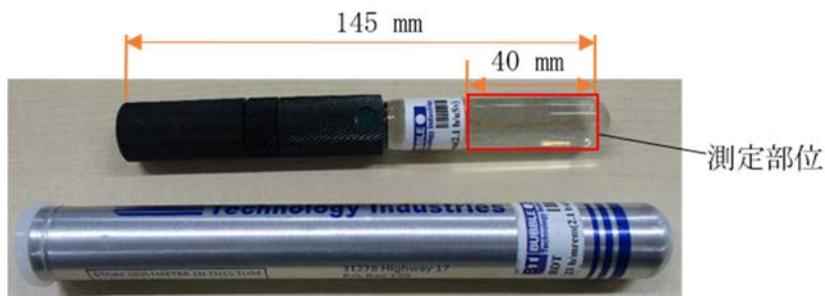


図 3.3-4 バブルディテクターの全体写真

令和 3 年度では、ガンマ線と中性子線に対する応答を試験により確認した。まず、ガンマ線に対する応答試験では ^{60}Co 線源を使用した照射を実施し、BD-PND は 10 Gy まで照射してもバブルはほぼ発生しなかった。一方、BDT は 2 Gy を照射した時点で多数のバブルが発生した。したがって、高ガンマ線場である 1F 環境では BD-PND が適していると言える。

次に、中性子線に対する応答試験を実施した。 ^{252}Cf を線源として用い、フルエンス率依存性の確認を行った。フルエンス率が $55 \text{ n/cm}^2/\text{s}$ 、 $27 \text{ n/cm}^2/\text{s}$ 、 $14 \text{ n/cm}^2/\text{s}$ の位置に BD-PND を設置し、積算フルエンスが $9.8 \times 10^4 \text{ n/cm}^2$ になるように照射を行った。結果として、いずれの BD-PND も 70~80 個のバブルが発生し、フルエンス率の違いが積算フルエンスとバブル数の関係に大きな影響を与えないことが確認できた。さらに、積算フルエンスとバブル数の相関を確認する試験を実施した。フルエンス率が $55 \text{ n/cm}^2/\text{s}$ の地点に BD-PND を設置し、一定時間ごとにバブル数の計測を行った。その結果、積算フルエンスとバブル数の間には相関があることを確認できた。なお、フルエンス範囲が広くなると線形性が悪くなり、検知だけではなく中性子束の定量性を求める場合には、事前に校正曲線を作成しておくことが必要である。

【令和 4 年度の実施内容及び成果】

① 核燃料物質による中性子検出試験の方法

令和 3 年度は、 ^{252}Cf を用いた照射試験で基本的検出特性の試験を行ったが、令和 4 年度では、引き続き、実証の一環として照射条件を変更して、核燃料物質である MOX 燃料による中性子検出試験を実施した。使用した MOX 燃料は SUS 缶に保管されているもので、重量が約 1 kg のものである。BD-PND は SUS 缶から 20~60 cm まで 10 cm ごとに 5 箇所を設置した。表 3.3-1 には設置位置ごとのフルエンス率を示した。フルエンス率は測定により得られた値である。図 3.3-5 に試験時の配置図を示した。計測時間は 2 時間とした。

表 3.3-1 設置位置ごとのフルエンス率

設置位置 (cm)	フルエンス率 ($\text{n/cm}^2/\text{s}$)
20	88.3
30	39.3
40	22.1
50	14.1
60	9.8

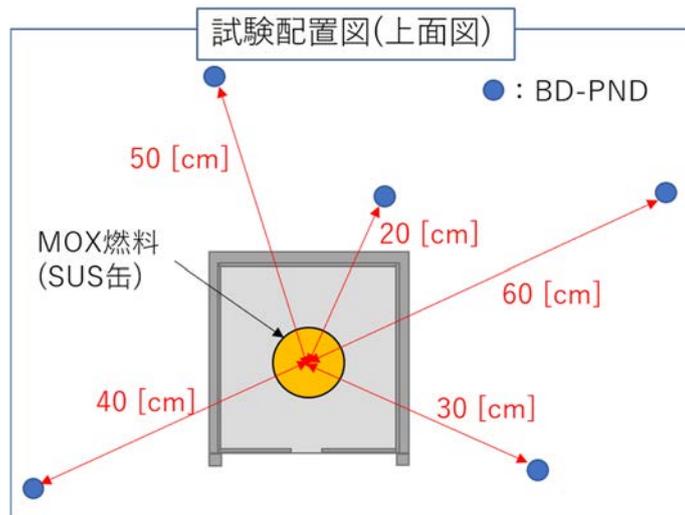


図 3.3-5 MOX 燃料による中性子検出試験の配置図

② 核燃料物質による中性子検出試験の結果

MOX 燃料を用いた試験の結果を図 3.3-6 に示した。気中において約 1 kg の MOX 燃料から放出される中性子を BD-PND で検出できることを確認できた。MOX 燃料における主な中性子は ^{240}Pu の自発核分裂中性子である。この条件において積算フルエンスとバブル数に相関があることも確認できた。得られた相関から、フルエンス率が約 $10 \text{ n/cm}^2/\text{s}$ という微少な場合であっても、約 200 分で 100 個程度のバブルが発生することが期待できる。

また、今回使用した MOX 燃料の中性子発生数は、約 0.018 g の ^{244}Cm が放出する自発核分裂中性子に相当する。これは BD-PND が燃料デブリ中のわずかな ^{244}Cm を検出できる可能性を示すものである。

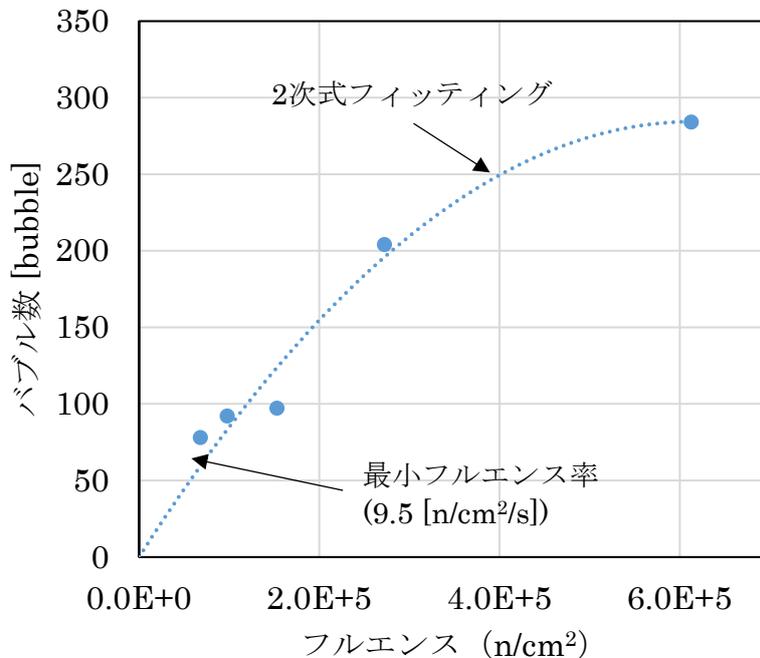


図 3.3-6 MOX 燃料を用いた検出試験結果

(3) 積算中性子線量計のUUVへの搭載方法検討（令和4年度）

【令和4年度の実施内容及び成果】

① 計算による中性子検出性能の検討

これまでの試験から、高速中性子を検出できるBD-PNDであれば1F内でもガンマ線の影響を受けずに中性子検出器として利用できる可能性があることを示した。また、発生するバブルをリアルタイムで観察することで、燃料デブリマッピングなどに有効なデータを取得できると考えた。そのためには、水中でBD-PNDによる中性子検知が可能であり、かつ、UUVの動作に干渉せずカメラで確認が可能な位置にBD-PNDを搭載することが必要となる。

はじめに、計算によるBD-PNDの水中における検出性能の検討を行った。図3.3-7に計算モデルを示す。Z軸方向に40 cmの燃料デブリを配置し、その上に10 cmの水を6層重ねた。X-Y軸方向は反射境界により無限体系とし、線源には²⁴⁴Cmを設定した。計算は原子力機構が中心となって開発した粒子・重イオン輸送計算コードPHITSを用いた^[3.3-3]。PHITSによる中性子の輸送計算を行い、燃料デブリ表面と水の層ごとのエネルギースペクトルを取得した。得られたスペクトルを、熱中性子と熱外中性子、高速中性子の3群に縮約し、燃料デブリ表面からの中性子スペクトルの空間分布を評価した。ここで、熱中性子は4 eV未満、熱外中性子は4 eV以上100 keV未満、高速中性子は100 keV以上とした。

得られた空間分布を図3.3-8に示す。燃料デブリ表面からの距離が0 cmでは高速中性子が支配的だが、5 cm程度距離が離れると熱中性子が支配的となる。さらに距離が離れるといずれのフルエンス率も低下する。しかし、BD-PNDは微少な中性子を検出可能であるため、燃料デブリから離れている位置でも適用可能である。図3.3-8を確認すると、燃料デブリ表面から40 cmの位置であっても、高速中性子のフルエンス率が約10 n/cm²/s程度あるため、BD-PNDであれば検出できると期待できる。

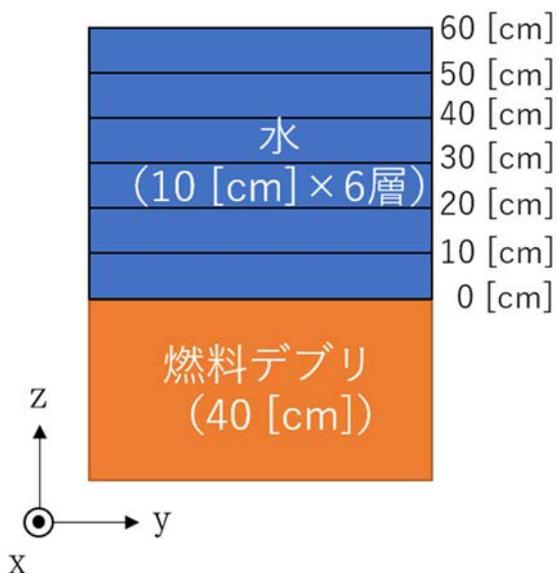


図 3.3-7 検出性能検討に関する計算モデル

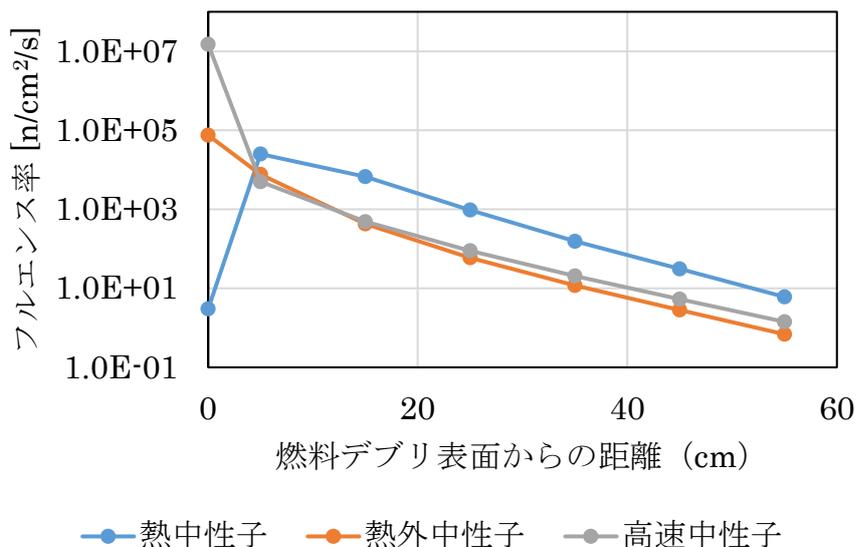


図 3.3-8 エネルギー群ごとの中性子の空間分布

② UUV への搭載方法の検討

これまでの結果から、燃料デブリから 40 cm 以内の距離であれば BD-PND による中性子検知が期待できる。この条件を踏まえ、UUV のカメラで観察が可能であり、UUV の動作に干渉しない位置に取り付ける必要がある。結論として、図 3.3-9 に示すように、UUV 底部から約 27 cm ほどの位置に、治具などを用いて搭載することとした。この位置であれば UUV の動作へ干渉することなく、図 3.3-10 のようにカメラで BD-PND を観察することが可能であると確認できた。なお、UUV のカメラ位置の設計に自由度がある場合には、BD-PND をなるべく底部に近い位置に配置することが高速中性子検知の観点から望ましいと言える。

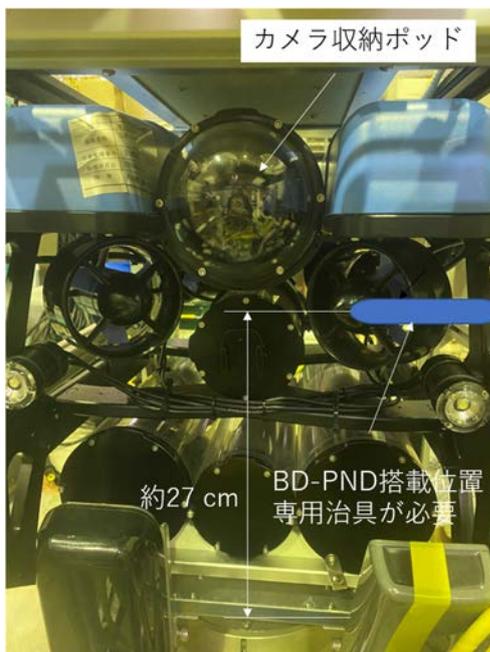


図 3.3-9 UUV への BD-PND 搭載位置

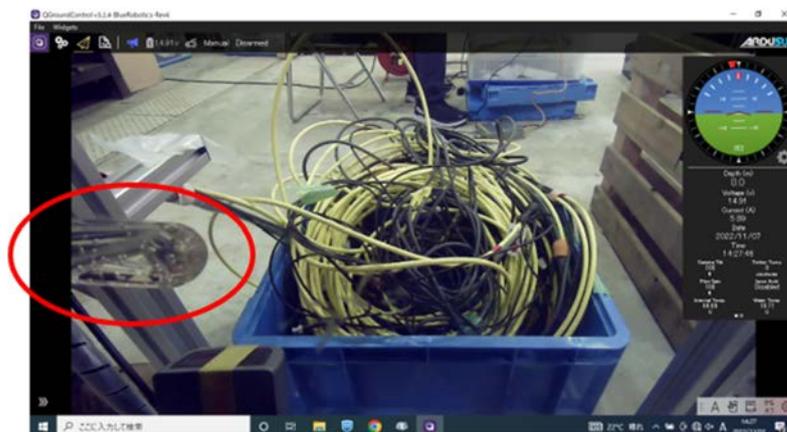


図 3.3-10 カメラによる BD-PND 観察像
(BD-PND は赤い丸で囲ってある)

◆ まとめ

3号機におけるMOX燃料由来の燃料デブリを検知する手法の開発を目指した解析的検討を実施した。主な自発核分裂中性子源として ^{244}Cm の中性子線と、高エネルギー崩壊ガンマ線源として ^{154}Eu の1.27 MeVのガンマ線に着目して、 UO_2 燃料とMOX燃料の放射線特性を検討した。これら2つの放射線特性から ^{154}Eu に対する ^{244}Cm の線源強度比を整理すると、炉内MOX領域平均では 9.12×10^{-5} であるのに対し、炉内 UO_2 領域平均では照射サイクル数を考慮しても $3.01 \times 10^{-8} \sim 1.31 \times 10^{-5}$ の範囲であった。これは当初予想したとおり、MOX燃料における ^{244}Cm の生成量が多くなり、一方で燃焼が進んでいないため ^{154}Eu の生成量が少なくなったことに起因する。以上のことから、 ^{154}Eu に対する ^{244}Cm の線源強度比が得られれば、MOX燃料由来の燃料デブリを検知できる可能性がある。

MOX燃料が放出する中性子計測試験を行い、高速中性子用の積算中性子線量計 BD-PNDが未燃焼MOXの検知に有効であることを実証した。また、バブル数とフルエンスに相関があることを確認した。さらに、約 $10 \text{ n/cm}^2/\text{s}$ という微少なフルエンス率でも計測が可能であることが確認でき、このような微少中性子の場合でも約200分で100個程度の有意なバブル数が発生することが期待できる。

積算中性子線量計のUUVへの搭載方法を決定するため、ガンマ線には感度がない高速中性子用のBD-PNDの利用を想定し、燃料デブリ表面近傍での中性子線強度とエネルギースペクトルの計算検討を行った。水中の燃料デブリが放出する ^{244}Cm 由来の高速中性子は、燃料デブリ表面が最も大きい 40 cm 程度の位置でも約 $10 \text{ n/cm}^2/\text{s}$ のフルエンス率を持つことが分かった。これにより、UUVの底部から 40 cm 以内の高さにBD-PNDを設置できれば約 $10 \text{ n/cm}^2/\text{s}$ までの高速中性子を検知可能である見込みを得た。本研究で検討対象としたUUVの動作に干渉せず、カメラで観察を可能にすることを考慮して、UUV底部から約 27 cm ほどの位置にBD-PNDを搭載することとした。ただし、BD-PNDの検出効率の観点からは、なるべくUUV底部に近い位置に配置することが最も適していると言える。

参考文献

- [3.3-1] J. Schulze, W. Rosenstock and H. L. Kronholz, Measurements of Fast Neutrons Bubble Detectors, Radiat. Prot. Dosimetry, vol.44, nos.1-4, 1992, pp.351-354.
- [3.3-2] H. Ing, R. A. Noulty and T. D. McLean, Bubble Detectors -A Maturing Technology, Radiat. Meas., vol.27, no.1, 1997, pp.1-11.
- [3.3-3] T. Sato, et al., Features of Particle and Heavy Ion Transport Code System (PHITS) version 3.02, J. Nucl. Sci. Technol., vol.55, no.6, 2018, pp.684-690.

3.4 日英連携（令和2年度～令和4年度）

本研究は、英国ランカスター大学（以下英国チーム）との日英共同研究である。英国チームは、以下の Work Package（WP）を担当した。

WP1 : Development of robotic manipulator and end effectors (UK Team - months 1-12)

WP3 : Control algorithm development and implementation (UK Team - months 6-21)

WP4 : Underwater processing implementation (Japanese and UK Team - months 12-30)

なお、WP2（図 2.1-1 参照）は日本側独自で担当する部分である。

【令和2年度の実施内容及び成果（概要）】

マニピュレータ開発の試験に必要なスチュワートプラットホームと、UUV (Blue ROV2) を調達し、組み立てた。これらはマニピュレータと制御システムを統合するために使用した。マニピュレータを設計し、幾つかの概念設計の開発と評価を実行した結果、重要な設計仕様とともに、予備的なアクチュエータ、部品の選択と製造に係る設計図を作成した。

【令和3年度の実施内容及び成果（概要）】

WP1 において、3D プリンタで製造 (additive manufacturing) したスピンドル（図 3.4-1）は、強度が不十分であることが分かり、アルミニウムを用いて切削加工 (Subtractive manufacturing) した（図 3.4-2）。モーターを支持するプレートもアルミニウムで切削加工することで、モーターの位置合わせの精度が向上し、システムに統合した。また、FPGA、モータードライバー及び関連回路の配線も完了した（図 3.4-3）。



図 3.4-1 モーターユニットと追加生産された旧型スピンドルを組み付けた状態の写真



図 3.4-2 再製造されたアルミ製スピンドル

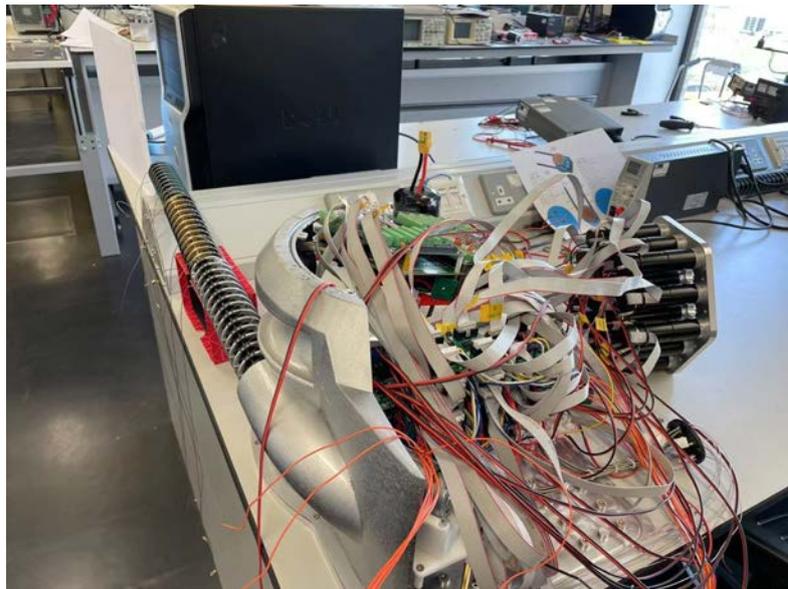


図 3.4-3 マニピュレータシステム内のモーターサポートプレートの写真

WP1 では、連続体マニピュレータシステムの可動域と剛性の特性評価に焦点を当て、システムに対して幾つかの初期テストを実施し、問題なく動作することを確認した。また、すべての機械部品について、十分な強度を持っていることを確認した。次の工程においては、主に気中でのベンチテストを実施する。

一方、WP3 では制御システムの開発に注力した。この制御システムは LabView ベースであり、当該システムによって、マニピュレータの目的の形状、あるいはエンドエフェクタの位置と方向に基づいて、個々のモーター角度を決定できる。現在のところ、システムはフィードフォワード制御（各々のモーターは PID 制御）であるが、最初にマニピュレータを作動させてから、制御システムの高度化を図ることとした。

【令和4年度の実施内容及び成果】

WP1：英国チームは双腕マニピュレータとエンドエフェクタの開発を完了した。ロボットは、商用の水中 UUV に搭載できるアームのケーブル駆動のマニピュレータシステムで構成される（図 3.4-4、図 3.4-5）。アームの1つにグリッパー機構を組み込み、片方のアームには回転切削工具を取り付けている。このシステムは、双腕アームとそれぞれのエンドエフェクタを水中でのタスクでお互いに動作できるように設計が行われた。

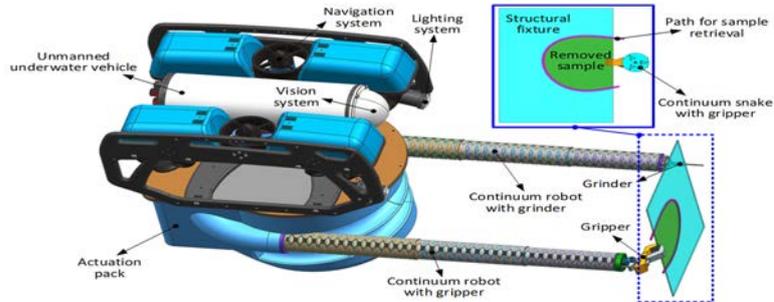


図 3.4-4 双腕ロボットの全体構造
 (UUV にカメラと光源を装備し、駆動ケーブル作動システム用のモーター（図 3.4-2）はエンコーダと統合されている。)

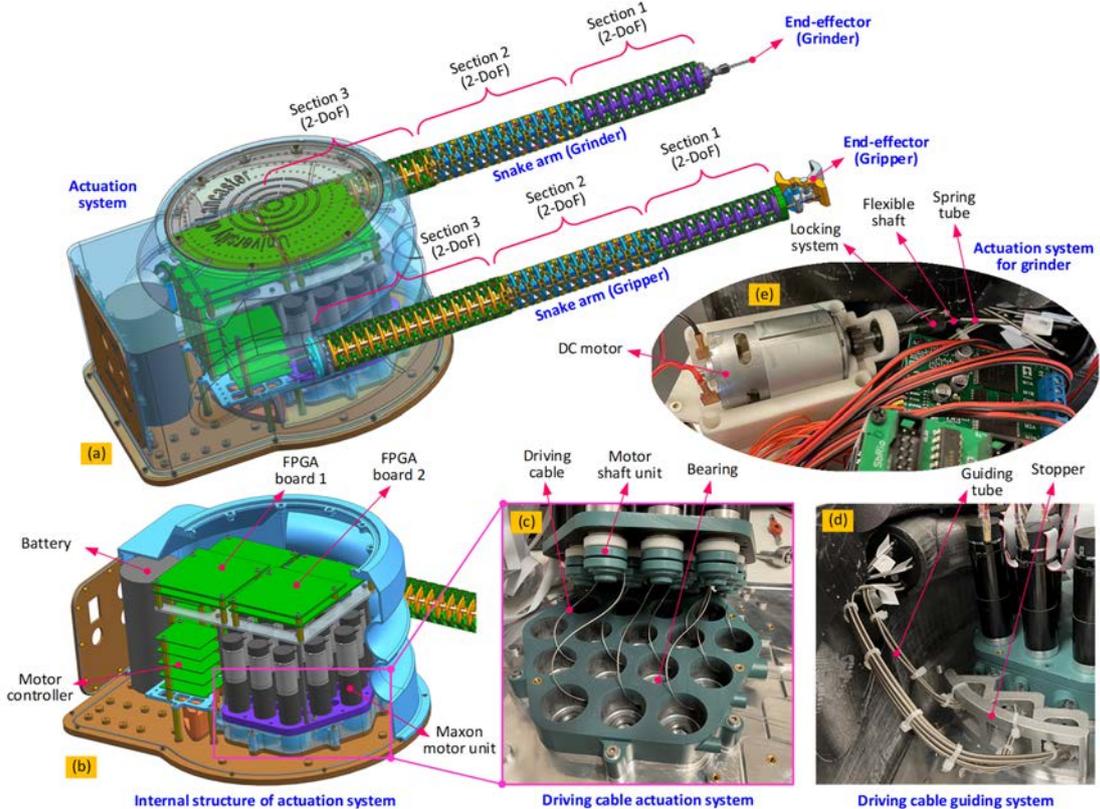


図 3.4-5 双腕ロボットの詳細モデル
 (全体構造(a)、駆動系の内部構造(b)、駆動ケーブル作動系(c)、
 駆動ケーブルガイド系(d)、エンドエフェクタの作動系(e))

WP3：制御アルゴリズムと実装の一環として、地上の実験室でロボットの特性評価を実施した。マニピュレータ用に LabView の制御システムが実装され、テストが行われた。順運動学制御システムと最適化ベースの逆運動学制御システムの両方で構成されている (図 3.4-6)。

順運動学モデルは、システムの運動学を徹底的に分析し、連続アームに統合された新しいヒンジ構造の力学を組み込んで、堅牢性、精度、強度及び内部摩擦の影響を向上させている^[3.4-1]。各アームは3つのセクション (図 3.4-5) で構成され、それぞれが2自由度 (Degrees of Freedom: 以下、DoF と略記。) であり、システム全体では12 DoFがある。ケーブルで駆動するため、各セクションは負荷がかかっている間は一定の曲率を持ち、その形状2つの角度によって定義される。このため、エンドエフェクタの位置と方向は、各セクションの角度の複雑な関数となる。このため、エンドエフェクタの位置と方向を時間の関数として取り込んだ最適化ベースの逆運動学制御アルゴリズム^[3.4-2]を開発し、連続アームに必要な形状を計算する。次に、この形状を使用してケーブルの長さ、つまり必要なモーター位置を計算し、モーター・エンコーダ・データを使用した閉ループ制御システムを作成する。

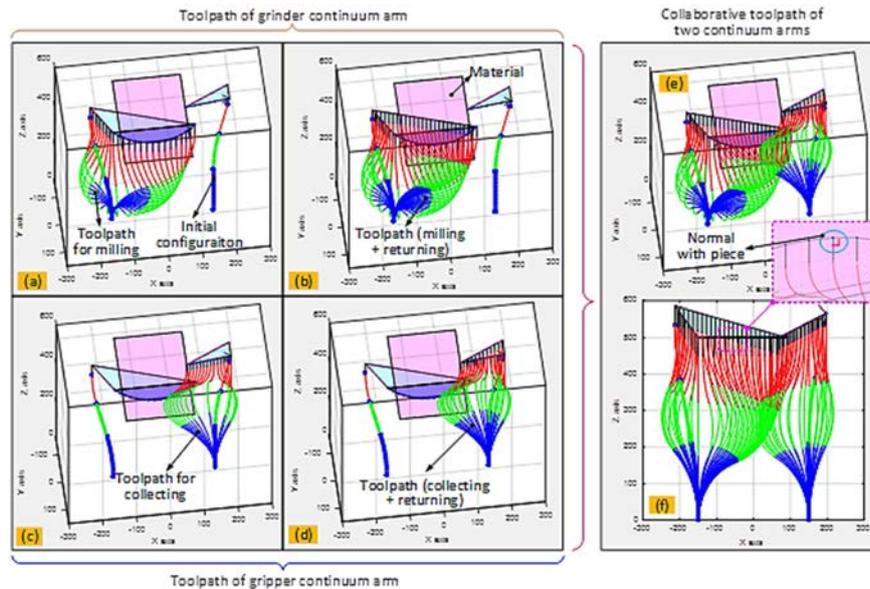


図 3.4-6 サンプル取得タスク中に最適化ベースの逆運動学制御アルゴリズムを用いた共同アームの形状パラメータ

(a)と(b)はアームの形状変化、(c)と(d)はグリッパーアームの形状変化、(e)と(f)は2つのアームの形状変化を組み合わせたもの

双腕アームを自律的に駆動させて複雑なタスクを実行するために LabView の制御システムを使用した試験は成功した。デモとして、図 3.4-6 に示す切断経路を用いた制御システムをプログラムした。目的のモーター構成を時間の関数として計算して、左側のアームがサンプリング対象の材料に近付き、それを掴んだ。次に右側のアームが近付き、切断ツールを作動させ、材料から少量のサンプルを取り出し、サンプルは左側アームのグリッパー内に残った (図 3.4-7 参照)。このシステムは、外部負荷に応答できることを示している。

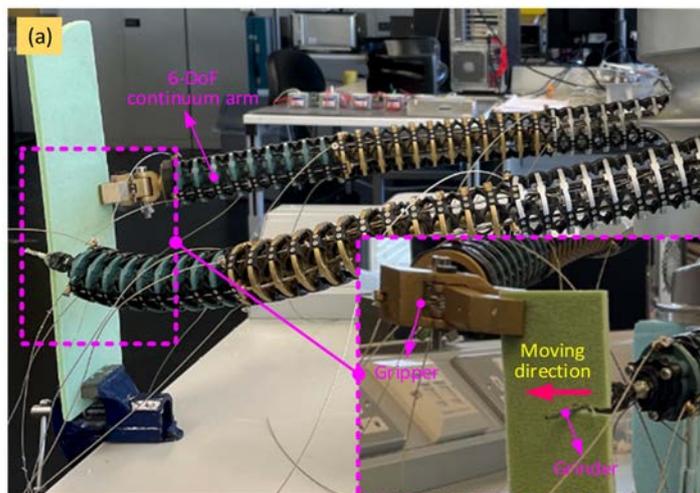


図 3.4-7 サンプル収集のデモ中の双腕ロボットシステムの実験セットアップ
(一方のアームが環境構造を保持し、他方のアームが材料除去に向けて作業している
システムのスナップショット)

WP4：水中における作動テストが行われた（図 3.4-8）。ランカスター大学の水槽で実施したテストにおいて、双腕ロボットシステムの防水性を確認し、適度な浮力のあることが確認された。

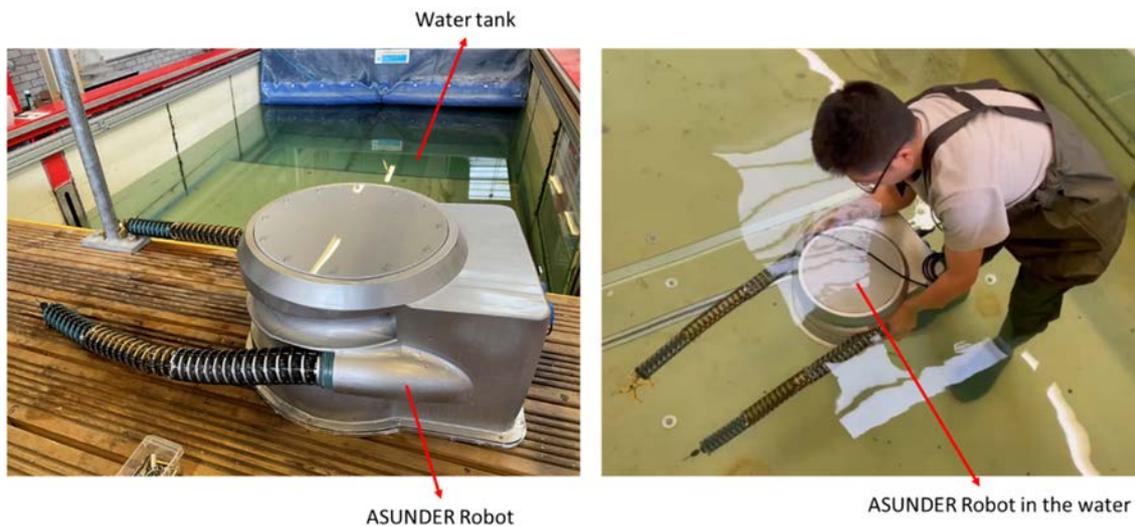


図 3.4-8 双腕ロボットシステムの水中テストの様相

- (1) 燃料デブリサンプリングツールと UUV プラットホームのインターフェースの連携
英国チームが開発した双腕マニピュレータとエンドエフェクタから構成される燃料デブリサンプリングツールは、実際に燃料デブリをサンプリングする際に LabView の制御システムを使用して実行されるが、この制御システムの入力として、エンドエフェクタの位

置と方向を必要としている。これらの情報は UUV とサンプリング対象の相対位置に基づくものであり、日本側が構築した燃料デブリマッピングツールを含む UUV プラットホームと共有できるデータである。したがって、英国チームが WP4（ロボットを UUV に搭載した水中での性能評価）を完了した後、燃料デブリサンプリングツールを日本の試験水槽に輸送できていれば、UUV プラットホームとの統合試験は実施できる状態であったと言える。

(2) 将来的に実機で実装するための課題

英国チームが開発した燃料デブリサンプリングツールと日本側が開発した UUV プラットホームを統合して、実装するためには、以下の課題が残っている。

① 双腕アームの機能

英国チームは、燃料デブリサンプリングツールの特性評価試験において、アームの 1 つにグリッパー機構を組み込み、片方のアームには回転切削工具を取り付けている。しかしながら、実機においてはコンクリート瓦礫、MCCI の塊などから構成される堆積層を対象とするため、堆積層から燃料デブリを掴んで取り出す機能が必要であると推察される。

② UUV プラットホームと燃料デブリサンプリングツールのインターフェース

UUV プラットホームでは IMU からのデータを受信して、INS 演算により UUV の自己位置を評価する。また、燃料デブリマッピングツールの LiDAR の出力から UUV からサンプリング対象までの距離を測定する。これらの情報から、燃料デブリサンプリングツールの制御システムの入力となるエンドエフェクタの位置と方向を評価するためのインターフェースを作成することが必要である。

③ 燃料デブリサンプリングツールのサンプリング精度向上

燃料デブリサンプリングツールと UUV プラットホームを統合化して、サンプリング精度を向上させるためには、UUV プラットホームの自己測位システムの精度を向上させて、燃料デブリサンプリングツールの制御システムと UUV プラットホームから提供する情報の精度を向上させる必要がある。本研究で開発した自己測位システムで適用した INS 演算を用いた位置推定は、UUV の移動距離の増加に伴って大きくなる加速度の蓄積誤差の影響が大きいと一般的に言われているが、実機においては UUV の航続距離は短いことが推測されることを考慮すると、3.2.2 項の UUV プラットホームの開発の【令和 3 年度の概要】で報告したように、INS 演算に使用するデータのダウンサンプリングやフィルタリングの設定を最適化できれば、妥当な精度で位置推定できると考えられる。

④ 燃料デブリサンプリングツールと燃料マッピングツールの統合化に向けて

現状、燃料マッピングツールを搭載した UUV（図 3.4-9）からは、4 本的水中ケーブルが UUV プラットホームと結ばれている。さらに、燃料デブリサンプリングツールからの水中ケーブルも追加される。実機において PCV 貫通孔から、ROV を PCV 内に挿入して運用した場合、ケーブルが障害物に絡む、あるいは、ケーブルの巻き上げ装置によりケーブル被膜にしわが発生するなど、ケーブルが損傷することが 1 号機の PCV 内部調査で報告されていることから、使用する水中ケーブルを極力少なくし、ケーブルの損傷防止対策を検討する必要がある。



図 3.4-9 燃料デブリマッピングツールを搭載した UUV、形状模擬デブリを水中 LiDAR でスキャンする様子

◆ まとめ

英国チームは、担当した WP1（ロボットのマニピュレータとエンドエフェクタの開発）と WP3（ロボットの制御アルゴリズムの開発と実装）を完了し、ロボットの性能試験を実施した。

WP4（ロボットを UUV に搭載した水中での性能評価と日本の試験水槽における統合試験）については、社会的条件（コロナ禍に伴う英国における試験水槽の利用不可やランカスター大学で発生した事故による実験施設への立入り禁止等）により、プロジェクトの大幅な遅延が発生した。このため、現状においても英国における試験水槽における性能評価試験を実施するに至っていないが、英国チームの代表者はこの性能評価を実施したい旨の意志を表明している。

当初計画していた英国チームのサンプリングツールの制御系と日本チームの UUV の姿勢制御系の統合化は各々の設計が異なることや時間的、予算的な制約等の理由により断念せざるを得ない結果となった。そこで、UUV プラットホームで同時に制御できるように、日英で議論し、英国チームはマニピュレータの設計仕様を以下に示すように変更した。

1. 重量の軽減化：当初計画していた剛性ロボットアーム型のマニピュレータは、ジョイント数が増えると各ジョイントで達成可能なペイロードが減少し、より大きなアクチュエータが必要となる。設計変更した連続体マニピュレータではアクチュエータをサンプリングツール中央に設置するため、この問題は解消され、適切なペイロードを維持しながら全体の重量が軽減される。

2. バランス：上記に関連するが、連続体マニピュレータのアクチュエータの質量の大部分が UUV の中心に集中されるため、システムのより良いバランスを実現できる。

3. 安定性：連続体マニピュレータの剛性は従来の剛性ロボットアーム型に比べてはるかに低いため、デブリサンプリング時の振動は UUV ではなく連続体マニピュレータによって吸収される。

4. 英国チームは主に連続体マニピュレータの可動域と剛性の特性評価に焦点を当て、サンプリングツールに対して幾つかの試験を実施したが、結果は非常に有望だった。

以上の仕様変更によって、英国チームのサンプリングツールは、重量が軽減化され、バランスが取れた、サンプリング時でも安定性の良いものとなり、日本チームが開発したマッピングツールと共通のUUVに搭載できるような設計となった。

参考文献

- [3.4-1] N. Ma, S. Monk and D. Cheneler, Modelling and Analysis of the Spital Branched Flexure-Hinge Adjustable-Stiffness Continuum Robot, *Robotics*, vol.11, no.5, 97 (2022).
- [3.4-2] N. Ma, S. Monk and D. Cheneler, Collaborative Continuum Robots for Remote Engineering Operations, *Biomimetics*, vol.8, no.1, 4 (2022).

3.5 研究推進

本研究は、日英共同研究体制で遂行するものである。CLADS を含めた日本国内での連携については、Web 会議を開催すること並びにメールで連絡を取るることによって進捗を相互確認した。

令和3年6月8日、同年10月18日に、進捗状況の確認、新型コロナウイルスの影響による半導体部品の調達難の問題の対応策について確認した。また、PO 中間フォローを同年12月13日に海技研にて対面と Web 会議のハイブリッド方式により開催し、研究代表者並びに機関代表者が進捗を報告し、適切な助言を得た。

一方、英国チームとの連絡については、事業期間の3年間すべてにわたって、新型コロナウイルスの蔓延により日英双方で直接訪問できなかつたため、Web 会議形式でお互いの進捗を確認した。令和3年7月8日、同年12月3日に Web 会議を実施し、進捗の確認、新型コロナウイルスによる進捗への影響、バックアップを確認した。それ以外にも E-mail で情報を補完した。

さらに、令和4年6月28日、同年11月1日に Web 会議を実施し、①マニピュレータ姿勢制御用の IMU と UUV の共用、②拡張カルマンフィルタのアルゴリズムのレビューを英国チームに依頼すること、③燃料デブリサンプリングツールを UUV に搭載した場合の UUV の運航性能に関すること、④燃料デブリサンプリングツールの CAD データ (shell data) を入手して水中での浮力を評価すること、⑤燃料デブリサンプリングツールと UUV の統合試験を日本で実施すること、について協議した。特に、④のサンプリングツールの水中での浮力の評価結果は約 200 N であり、燃料デブリサンプリングツールの気中の重力約 120 N に比べてかなりの浮力を受けることが分かった。

また、令和4年度 PO 中間フォローが令和5年1月26日に Web 会議で開催され、研究代表者並びに機関代表者が進捗を報告し、最終報告書の作成に伴う提言や助言を得た。

4. 結言

本業務では、PCV 内のデブリを多地点で少量サンプリングし、それらの物性や化学特性を明らかにしながら作業工程を策定することによって 1F 事故のデブリ取り出し作業を加速させるために、高耐放射線小型中性子センサとソナー等を水中ロボットに搭載・統合し、日英 2 国間の共同研究体制の下、「燃料デブリサンプルリターン技術」の開発を実施した。

以下に、3 カ年計画の業務実績を述べる。

(1) 高耐放射線小型高効率中性子センサの開発（再委託先：高エネ研）

令和 2 年度に中性子線源とガンマ線源を用いて、従来のアナログ信号処理回路を適用してデータ収集パラメータの最適化並びに MSND の中性子とガンマ線それぞれに対する応答の基礎データを取得した。また、MSND の信号処理に特化した耐放射線集積回路を設計し、さらには MSND の水中での中性子応答を評価するための水槽を設計・製作した。

令和 3 年度には、令和 2 年度の成果から導出した、信号処理回路の整形時定数に基づいて、産総研の ^{252}Cf 線源と設計・製作した水槽を用いて MSND の中で中性子に対する応答を評価した。さらに、京都大学複合原子力科学研究所の ^{60}Co 照射施設において、1 Gy/h 程度のガンマ線線量率下において、中性子線源からの応答を観測し、中性子とガンマ線の弁別可能性を確認した。また、1) 水中下でのデブリ中性子測定位置における線量率がシミュレーションにより高々 10 Gy/h 程度であること、2) MSND の素子サイズが 1.2 cm 角であり、 ^{60}Co に対する鉛の 1/10 価層が 4 cm で、検出器前面 2π 方向に施す場合の遮蔽体重量が 70 g 程度であるため軽量性を失わないことの 2 点から、PCV 内の水中でのガンマ線環境におけるデブリからの中性子・ガンマ線弁別測定を十分行えることを示した。さらに、MSND の信号処理に特化した耐放射線集積回路を組み合わせた“検出器”としての動作を確認し、性能改善に向けた実装方法や回路方式の改善点などの課題が抽出され、高線量下での放射線耐性試験においては、信号出力の飽和を避けるための具体的な回路時定数の情報と、より高放射線耐性を実現するための知見を得た。

令和 4 年度には、さらに高線量になることに備え、MSND の電流モードによる測定手法についても検討し、回路を設計・製作し、産総研の ^{252}Cf 線源による照射実験から電流・中性子強度換算係数を導出した。一方、耐放射線集積回路については、令和 3 年度までに得られた知見を基に修正・変更を施す予定であったが、新型コロナウイルスの蔓延による世界的な半導体部品の逼迫によって、令和 3 年度まで回路製作を請け負った業者から請負業者の変更を余儀なくされ、ゼロからの回路設計をせざるを得なくなったことと納期の大幅な遅れがあった。ただ、基本的な性能確認では、問題なく作動することが確認できた。

(2) UUV プラットホームの開発

① 燃料デブリマッピングツールの開発

燃料デブリマッピングツール構成要素（中性子センサ、水中カメラ、ソナー、LiDAR）が連動するための通信制御系の仕様について、令和 2 年度から 3 年度にかけて検討した。さらに、UUV と遠隔操作するための UUV プラットホーム間で、中性子センサの出力、水中カメラ及びソナーの撮像データを通信するためのインターフェースを設計した。令和 4 年度においては、センサの仕様が揃ったため、燃料デブリサンプリング操作が効率良く実施できるような仕様を策定し、インターフェースを完成させた。

また、PCV といった狭い空間では、音波と構造物との反射のために水中音響探査機器のゴースト映像が測定に大きく影響することから、これを克服するために水中 LiDAR を導入し、ゴースト映像の混入が避けられることを確認できた。

② UUV プラットホームの開発

令和 2 年度は、PCV 内での UUV の位置を特定する自己測位システムの開発として、従来の自己測位法の PCV 内へ適用した際の課題を抽出し、測位精度向上方策を講じた。

令和 3 年度は、令和 2 年度に抽出した UUV の PCV 内自己測位法の課題から、INS を用いた自己測位手法の適用性検討を実施し、一定の精度で自己測位できることを示した。また、マッピング構成要素（開発する中性子センサ、水中カメラ、ソナー）が連動するための通信・制御系の仕様について、令和 2 年度に引き続いて検討した。さらに、UUV と遠隔操作するための UUV プラットホーム間で、中性子センサの計数データ、水中カメラ及びソナーの撮像データを通信するためのインターフェースを設計した。

令和 4 年度は、UUV の位置を特定する自己測位システムとして INS システムを適用し UUV の姿勢角の計算に EKF を導入して位置推定の精度向上を図った。また、UUV を遠隔操作して燃料デブリマッピングツールからのデータを処理するため、IMU からのデータを受信するターミナル PC に INS 演算のプログラムをインストールし、測位座標と VR システムの連動及び 3D 点群データの VR 投影を行う機能を加えた UUV プラットホーム GUI を構築した。

(3) 放射線環境シミュレーション及び積算中性子線量計の特性評価（連携先：原子力機構）

令和 2 年度は、東電及び IRID により実施された 3 号機の PCV 内部調査結果に基づき、燃料デブリの本格取り出し時期を想定した 3 号機の放射線源モデル（線源強度とエネルギースペクトル）と PHITS コードによる放射線輸送計算のための 3 次元プラントモデルを構築した。これらを用いて、ガンマ線輸送計算の試解析を行い、ペDESTAL 内のガンマ線特性が得られることを確認した。

令和 3 年度はガンマ線と中性子線における核種ごとの寄与率を求めた。結果として、令和 3 年時点では崩壊ガンマ線と自発核分裂由来の中性子線が支配的であった。また、3 号機プラントモデルにて、光子、中性子源モデルを用いて放射線輸送計算を行い、ペDESTAL 内における線量率やフルエンス率などに関する情報を取得した。さらに、積算中性子線量計にガンマ線や中性子線の照射試験を実施し、1F 現場で使用できる見込みを得た。

令和 4 年度は、MOX 燃料と UO₂ 燃料の燃焼組成（放射線源）の違いに着目し、MOX 燃料由来の燃料デブリを検知する手法の開発を目指した解析的検討を行った。その結果、自発核分裂中性子と FP ガンマ線の比で MOX を区別できる可能性を示した。

積算中性子線量計に対して新たに ⁶⁰Co ガンマ線照射試験を行い、気泡発生応答を確認した。さらに、MOX 燃料による中性子検出試験に成功した。また、水中デブリ近傍での中性子スペクトル計算を行い、積算中性子線量計の搭載方法を決定した。

(4) 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間並びに CLADS 等との連携を密にして、研究を進めた。また、研究実施計画を推進するための打ち合わせや会議等を、英国側実施機関との打ち合わせを含め、開催した。

以上、3カ年計画の3年目である本年度の業務項目のうち、日本側単独で実施できる事項は概ね全て実施した。その一方、国際共同研究として英国側担当事項の実施結果を受けて実施することを予定していた日本側の実施事項については、英国側担当事項がコロナ禍等の影響により当初予定した時期までに完了できなかったために、一部断念せざるを得なかった。委託研究契約の実施期間を延長して所期の目標を達成することも検討したが、英国側が令和5年度は対応できないとのことであったため、本年度に完了できた事項をもって本業務を終了とすることにした。なお、国内での実施結果からすると、英国から燃料デブリサンプリングツールが提供されていれば当初の目的を達成できたものと考えられる。

(5) 現場適用のための今後の研究課題の設定と研究開発の展開

本研究では、PCV 内での冠水した燃料デブリを少量採取し、燃料デブリの性状を把握することが目的であった。前述のとおり、日本側が開発する燃料デブリマッピングツールと英国側の燃料デブリサンプリングツールの統合試験は叶わなかったが、それぞれ有用であることは示された。実機への適用を考えた上での日本側の課題は、UUV の PCV 内自己測位手法の確立が挙げられる。本研究課題では、慣性航法を適用した自己測位手法の適用可能性を検討したが、水中 LiDAR を用いてソナーといった水中音響探査機器の弱点をカバーすることでも精度向上が期待できる。また、今回開発した複合センサから構成されるマッピングツールを用いて、単独のセンサの弱点を補い合うことで、精度良く、炉内の状況把握が可能になると期待される。そのためには、マッピングツール出力のリアルタイム描画といったグラフィック性能の向上が今後の課題になると予想される。また、今回の日英システム統合が成功したと仮定した場合、燃料デブリの少量採取作業における、マッピングツールとサンプリングツールの連動として、マッピングツールの出力（水中での LiDAR やカメラ画像、UUV の位置情報、中性子の計数率、ガンマ線量）を、サンプリングツールの採取位置の初期値を決定し、作業軌道を最適化するように連動させることが今後の課題になると予測される。

This is a blank page.

