JAEA-Review
2022-070
DOI:10.11484/jaea-review-2022-070

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）

ー令和３年度　英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業ー

Research and Development of the Sample-return Technique for Fuel Debris Using the Unmanned Underwater Vehicle (Contract Research)
-FY2021 Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project-

福島研究開発部門　福島研究開発拠点　廃炉環境国際共同研究センター
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

March 2023
Japan Atomic Energy Agency
日本原子力研究開発機構

JAEA-Review

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

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

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en).
Even if the results of this report (including data) are not copyrighted, they must be used under
the same terms and conditions as CC-BY.
For inquiries regarding this report, please contact Institutional Repository and Utilization Section,
JAEA Innovation Hub, Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2023

JAEA-Review 2022-070

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

（2022 年 11 月 24 日受理）

日本原子力研究開発機構（JAEA）廃炉環境国際共同研究センター（CLADS）では、令和３年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業（以下、「本事業」という）を実施している。

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

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

本研究は、研究課題のうち、令和２年度に採択された「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３年度の研究成果について取りまとめたものである。

本研究は、日英共同研究体制の下、耐放射線性を持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すものである。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う。

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

JAEA-Review 2022-070

Research and Development of the Sample-return Technique for Fuel Debris Using the Unmanned Underwater Vehicle
(Contract Research)
－ FY2021 Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project －

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

National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology

(Received November 24, 2022)

The Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science (CLADS), Japan Atomic Energy Agency (JAEA), had been conducting the Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project (hereafter referred to "the Project") in FY2021.

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

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

Among the adopted proposals in 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 in FY2021.

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.

Keywords: Fuel Debris, Microstructured Semiconductor Neutron Detectors, 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

付録　成果報告書 13

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

Appendix Result Report 13

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	山﨑 信哉	筑波大学
ラドンを代表としたアルファ核種の吸入による内部被ばくの横断的生体影響評価	片岡 隆浩	岡山大学
炉心溶融物の粘性及び表面張力同時測定技術の開発	大石 佑治	大阪大学
iPS 細胞由来組織細胞における放射線依存的突然変異計測系の確立	島田 幹男	東京工業大学
レーザー共鳴イオン化を用いた同位体存在度の低いストロンチウム 90 の迅速分析技術開発	岩田 圭弘	東京大学

共通基盤型原子力研究プログラム

【一般研究】

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

課題解決型廃炉研究プログラム

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

国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

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

3. 令和元年度 採択課題

令和元年度採択課題については以下のとおりである。

課題数：19 課題

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

令和元年度 採択課題一覧

共通基盤型原子力研究プログラム

【若手研究】

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

共通基盤型原子力研究プログラム

【一般研究】

課題名	研究代表者	所属機関
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 号機ペデスタル燃料デブリ深さ方向の性状同定	山路 哲史	早稲田大学
燃料デブリ取出しに伴い発生する廃棄物のフッ化技術を用いた分別方法の研究開発	渡邉 大輔	日立ＧＥニュークリア・エナジー
アパタイトセラミックスによる ALPS 沈殿系廃棄物の安定固化技術の開発	竹下 健二 (～R3.6.30) 塚原 剛彦 (R3.7.1～)	東京工業大学
拡張型スーパードラゴン多関節ロボットアームによる圧力容器内燃料デブリ調査への挑戦	高橋 秀治	東京工業大学

国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

課題名	研究代表者	所属機関
高い流動性および陰イオン核種保持性を有するアルカリ刺激材料の探索と様々な放射性廃棄物の安全で効果的な固化	佐藤 努	北海道大学
再臨界前の中性子線増に即応可能な耐放射線 FPGA システムの開発	渡邊 実	静岡大学 (～R3.3.31) 岡山大学 (R3.4.1～)

国際協力型廃炉研究プログラム（日露共同研究）

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

研究人材育成型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
燃料デブリ取り出し時における炉内状況把握のための遠隔技術に関する研究人材育成	淺間 一	東京大学
化学計測技術とインフォマティックスを融合したデブリ性状把握手法の開発とタイアップ型人材育成	高貝 慶隆	福島大学
放射線・化学・生物的作用の複合効果による燃料デブリ劣化機構の解明	大貫 敏彦 (～R2.3.31) 竹下 健二 (～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	渡邉 豊	東北大学
β、γ、X 線同時解析による迅速・高感度放射性核種分析法の開発	篠原 宏文	日本分析センター
合理的な処分のための実機環境を考慮した汚染鉄筋コンクリート長期状態変化の定量評価	丸山 一平	東京大学
溶脱による変質を考慮した汚染コンクリート廃棄物の合理的処理・処分の検討	小崎 完	北海道大学
マイクロ波重畳 LIBS によるデブリ組成計測の高度化と同位体の直接計測への挑戦	池田 裕二	アイラボ

国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

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

5. 令和 3 年度 採択課題

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

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

課題数：12 課題
課題解決型廃炉研究プログラム　8 課題
国際協力型廃炉研究プログラム　2 課題（日英）、2 課題（日露）

これらの提案について、外部有識者から構成される審査委員会において、書面審査及び面接審査、日英・日露共同研究については二国間の合同審査を実施し、採択候補課題を選定した。
その後、PD（プログラムディレクター）・PO（プログラムオフィサー）会議及びステアリングコミッティでの審議を経て、採択課題を決定した。

令和 3 年度 採択課題一覧

課題解決型廃炉研究プログラム

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

課題名	研究代表者	所属機関
連携計測による線源探査ロボットシステムの開発研究	人見 啓太朗	東北大学
中赤外レーザー分光によるトリチウム水連続モニタリング手法の開発	安原 亮	自然科学研究機構
福島原子力発電所事故由来の難固定核種の新規ハイブリッド固化への挑戦と合理的な処分概念の構築・安全評価	中瀬 正彦	東京工業大学

国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

課題名	研究代表者	所属機関
福島第一原子力発電所の廃止措置における放射性エアロゾル制御及び除染に関する研究	Erkan Nejdet (～R4.1.31) 三輪 修一郎 (R4.2.1～)	東京大学
燃料デブリ取り出しのための機械式マニピュレータのナビゲーションおよび制御	淺間 一	東京大学

国際協力型廃炉研究プログラム（日露共同研究）

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

本報告書は、以下の課題の令和 3 年度の研究成果を取りまとめたものである。

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３年度

日本原子力研究開発機構

英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業

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　R03I043）

成果報告書

令和４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、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 3 年度の研究成果を取りまとめたものです。

目次

概略 vii

1.　はじめに 1

2.　業務計画 3
2.1　全体計画 3
2.2　実施体制 4
2.3　令和 3 年度成果の目標及び業務の実施方法 5

3.　実施内容及び成果 6
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） 6
3.1.1　令和 2 年度実施内容及び成果（概要） 6
3.1.2　令和 3 年度実施内容及び成果 7
3.1.3　まとめ 19
3.2　UUV プラットフォームの開発 20
3.2.1　燃料デブリマッピングツールの開発 20
3.2.2　UUV プラットフォームの開発 22
3.2.3　まとめ 29
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） 31
3.3.1　令和 2 年度実施内容及び成果（概要） 31
3.3.2　令和 3 年度実施内容及び成果 31
3.3.3　ガンマ線及び中性子線における核種別寄与の確認 31
3.3.4　3 次元プラントモデルによる放射線輸送計算 34
3.3.5　積算中性子線量計の特性評価 36
3.3.6　積算中性子線量計のガンマ線に対する応答 37
3.3.7　積算中性子線量計の高速中性子に対する応答 38
3.3.8　まとめ 40
3.4　日英連携 41
3.4.1　令和 2 年度実施内容及び成果（概要） 41
3.4.2　令和 3 年度実施内容及び成果 41
3.4.3　まとめと今後の予定 43
3.5　研究推進 44

4.　結言 45

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	鎌田 創

再委託先代表者

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構	准教授	岸下 徹一

連携先代表者

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	奥村 啓介

分担協力者

高エネルギー加速器研究機構	教授	田中 真伸
高エネルギー加速器研究機構	准技師	大山 隆弘
海上・港湾・航空技術研究所	専門研究員	西村 和哉
日本原子力研究開発機構	主査	寺島 顕一
日本原子力研究開発機構	主査	松村 太伊知

表一覧

表 3.1-1　CMOS プロセスと製作した ASIC の仕様 6
表 3.2-1　加速度と加速度の標準偏差と変化量の標準偏差 25
表 3.3-1　燃料デブリの組成と密度 31
表 3.3-2　FP 放出率 32
表 3.3-3　ベータ崩壊における核種別崩壊熱と寄与率 32
表 3.3-4　陽電子崩壊による放射能と寄与率 33
表 3.3-5　自発核分裂由来の中性子数と寄与率 33
表 3.3-6　（α,n）反応由来の中性子数と寄与率 33
表 3.3-7　バブルディテクター（高速中性子用 BD-PND）の基本仕様 36

図一覧

図 2.1-1　本業務の全体計画図 3
図 2.1-2　英国側の全体計画図 3
図 2.2-1　実施体制図 4
図 3.1-1　試作した ASIC（左図）と ASIC 単体の性能を評価するための試験基板（右図） 6
図 3.1-2　ASIC の回路構成 7
図 3.1-3　左図：試作した ASIC のテストパルス入力（40 fC）に対する出力波形
右図：入力電荷量に対する出力波形のピーク波高値 8
図 3.1-4　左図：ASIC 単体の等価電子雑音（赤が測定点、青がシミュレーションを示す。）
右図：ADC のデジタルデータから再構成したアナログ波形の一例 8
図 3.1-5　MSND と ASIC を接続した際のセットアップ写真 9
図 3.1-6　テストパルス（左図）と ^{60}Co（右図）を入力信号とした際の出力応答波形 ... 9
図 3.1-7　水密容器の外観 10
図 3.1-8　照射試験体系 11
図 3.1-9　水槽中で取得した波高分布 12
図 3.1-10　水槽中における中性子線及びガンマ線のエネルギースペクトル 13
図 3.1-11　水槽中における中性子及びガンマ線量率分布 14
図 3.1-12　電荷積分型センサの外観と回路ブロック図 15
図 3.1-13　Auto Reset モードで取得した電流積分波形 15
図 3.1-14　ガンマ線照射位置 16
図 3.1-15　ガンマ線照射試験の様子 17
図 3.1-16　MSND（パルス計測型）と ^{3}He の比較 18
図 3.1-17　電荷積分型 MSND センサの出力波形 19
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） 20
図 3.2.1-2　中性子センサと IMU を同一水密ポッドに封入する際の信号処理並びに通信
制御回路 22
図 3.2.2-1　NGIMU の外観 24
図 3.2.2-2　加速度計と角速度計の出力時刻歴 24
図 3.2.2-3　モーションキャプチャの画面表示（左）ドローン PG560 の外観（右） 27
図 3.2.2-4　リモコンボートに搭載した IMU の加速度出力（左）ドローンに搭載した IMU の
加速度出力（右） 28
図 3.2.2-5　小型リモコンボートの航跡図（左）ドローンによる航跡図（右） 28
図 3.2.2-6　移動開始から終了まで（静止時間を含めない）積分した位置推定に基づく
航跡図 29
図 3.3-1　3 号機の 3 次元プラントモデル 34
図 3.3-2　3 号機の格納容器内線量率分布予測（2031 年 3 月） 35
図 3.3-3　点 A（図 3.3-2 参照）付近での光子フルエンス率 35
図 3.3-4　バブルディテクター（高速中性子用 BD-PND）の全体写真 36
図 3.3-5　ガンマ線照射試験時の配置図 37
図 3.3-6　^{252}Cf 線源と BD-PND の配置図 38

図 3.3-7　BD-PND のフルエンス率依存性 39
図 3.3-8　積算フルエンスに対するバブル数 39
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. 41
図 3.4-2　再製造されたアルミ製スピンドルとモーターサポートプレートの写真..... 42
図 3.4-3　マニピュレータシステム内の電気系統の接続写真 42

略語一覧

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
ASIC　：Application Specific Integrated Circuit（信号処理用専用集積回路）
ADC　：Analog to Digital Converter
CLADS　：Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science（廃炉環境国際共同研究センター）
FP　：Fission Product（核分裂生成物）
IMU　：Inertial Measurement Unit（慣性測定ユニット）
INS　：Inertial Navigation System（慣性航法システム）
IRID　：International Research Institute for Nuclear Decommissioning（技術研究組合国際廃炉研究開発機構）
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（次世代慣性測定ユニット）
PCV　：Primary Containment Vessel（原子炉格納容器）
PHITS　：Particle and Heavy Ion Transport code System
RDT　：Radiation Detection Technologies, Inc.
RPV　：Reactor Pressure Vessel（原子炉圧力容器）
SAR-ADC　：Successive Approximation Register-ADC
SBL　：Short Base Line（短基線）
SRIM　：Stopping and Range of Ions in Matter
SSBL　：Super Short Base Line（超短基線）
TCP/IP　：Transmission Control Protocol/Internet Protocol
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、事故当初のセシウム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ほかないためである。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（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、日本と英国の二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（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、UUV プラットフォーム開発を通して、中性子センサ等のセンサ類と、英国ランカスター大学が開発するデブリサンプリングツールをプラットフォームで統合する。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 3 年度は 2 年目である。以下に、令和 3 年度の成果のまとめを示す。

前年度までの成果報告書：

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 2 年度英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業, JAEA-Review 2021-049
https://doi.org/10.11484/jaea-review-2021-049

(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 Micro-structured Semiconductor Neutron Detector（以下、MSND と略記。）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、来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る。

(2) UUV プラットフォームの開発

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フォーム間の通信・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フォ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。

②UUV プラットフォームの開発

次世代慣性測定ユニット（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、慣性測定ユニット（Inertial Measurement Unit：以下、IMU と略記。）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、ペデスタル内における線量率、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、ペデスタル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廃炉環境国際共同研究センター(以下､CLADS と略記。)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。

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、東京電力ホールディングス株式会社が掲げた「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」[1]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（以下、デブリと略記。）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めない。そこで、安全かつ早急に取り出される必要がある。

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、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 2 m）では、ペデスタル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 6 m）では、水没しているペデスタル内部における構造材の破損状況や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、ペデスタル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 号機ペデスタル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ウランやプルトニウムを含んだデブリである確証は得られていない。

そこで、デブリの分布状況に加え、複数地点で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、日本と英国の二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 UUV ベースの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、デブリ位置と刻々と変化する可能性があるデブリの状態を連続監視する必要があり、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 2 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 プラットフォームの開発

前項目(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、英国側が開発するデブリ取り出しツールと日本側の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 楢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）

Particle and Heavy Ion Transport code System（以下、PHITS と略記。）等の粒子輸送モンテカルロ計算により、デブリ性状（溶融デブリや MCCI 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) デブリサンプリングツールの開発（英国側担当）

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。

参考文献

[1] 廃炉・汚染水対策関係閣僚等会議, 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 令和元年 12 月 27 日,
https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/20191227.pdf（参照日：2022.3.31）.

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、英国側の全体計画図を図 2.1-2 示す。

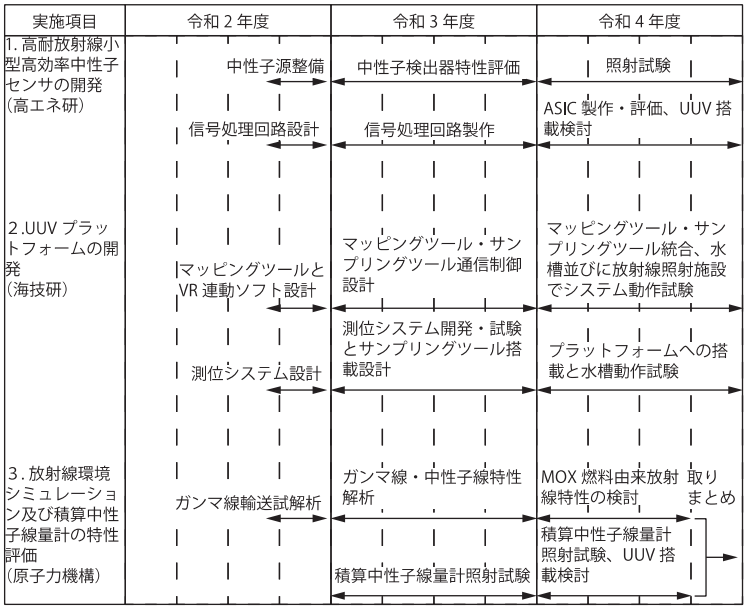

図 2.1-1　本業務の全体計画図

Tasks	Start date: November 2020. Duration: 30 months									
	Year 1				Year2				Year3	
	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、WP2b を日本が担当）

2.2　実施体制

図 2.2-1 に実施体制図を示す。

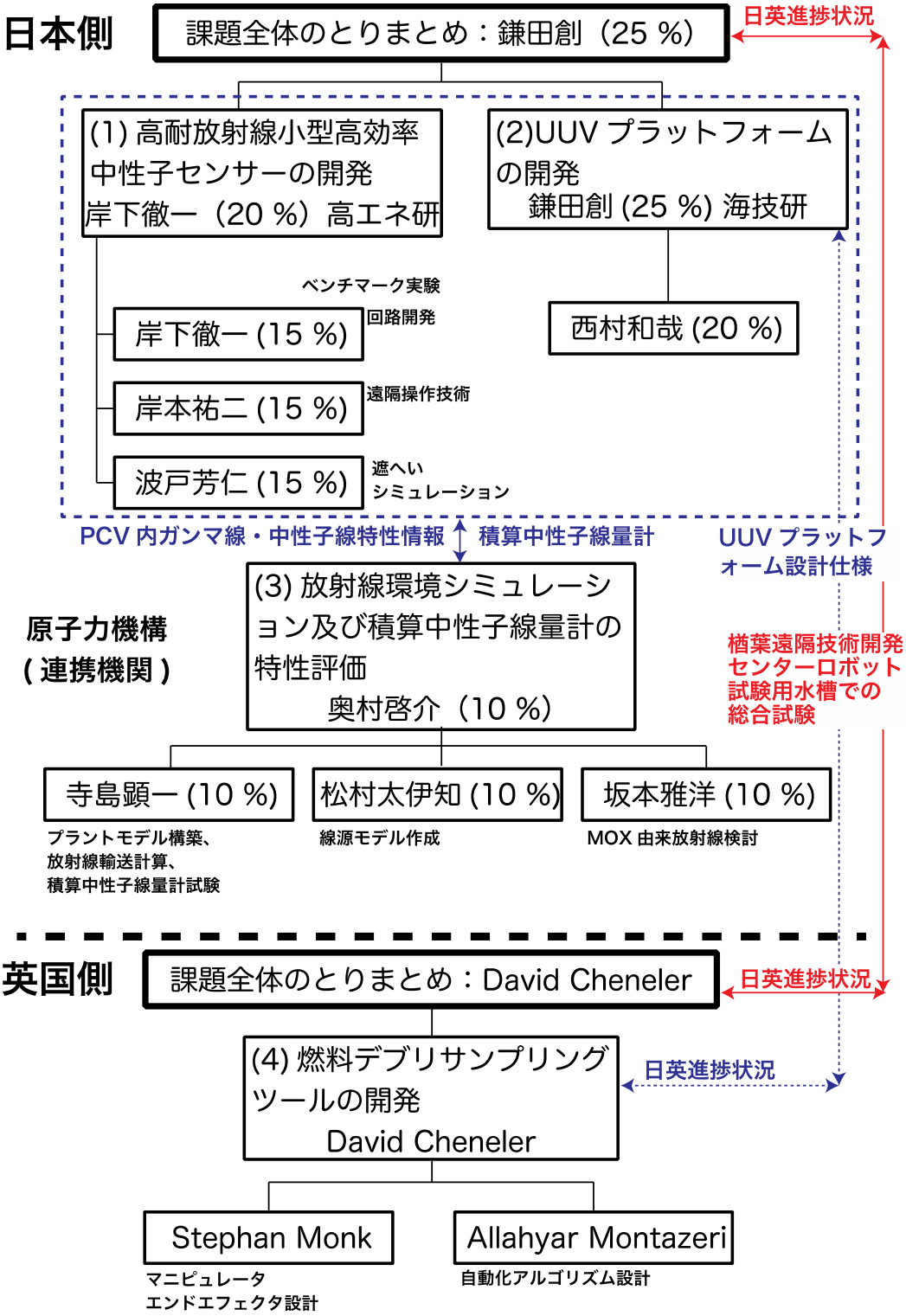

図 2.2-1　実施体制図

2.3　令和 3 年度成果の目標及び業務の実施方法

令和 3 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）

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う。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する。

(2) UUV プラットフォームの開発

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）が連動するための通信制御系を検討する。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フェースを設計する。

②UUV プラットフォームの開発

令和 2 年度に引き続き、PCV 内での UUV の位置を特定する自己測位システム測位向上のための改良を実施し、精度検証試験を進める。さらに、得られる位置情報をマッピングデータと共に VR システムに連動させるインタフェース系を設計する。

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を可能とするための UUV の改良設計を、英国側と連絡を取りながら実施する。

(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）

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する。

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、ペデスタル内における線量率、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する。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）

3.1.1 令和2年度実施内容及び成果（概要）

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}LiF中性子コンバータを配置した多層MSNDに着目した。令和2年度では、試験用MSNDを市販の前置増幅回路、波形整形増幅器、波高分析器からなる放射線計測システムと接続し、その放射線に対する信号応答の評価を行った。この試験により、ガンマ線と中性子からの波形観測から整形時定数を1 μs程度に設定することで高ガンマ線環境下においても中性子起因の信号のみを弁別できるとの知見が得られたため、この時定数の値を用いてより小型の検出器システムを実現するために、信号処理用専用集積回路（Application Specific Integrated Circuit：以下、ASICと略記。）を試作・製作するところまでを実施した。使用したCMOSプロセスはSilTerra Malaysia Sdn.Bhd.社の180 nm CMOSプロセスである。表3.1-1にチップの仕様をまとめた。また、図3.1-1に製作したASICの評価基板を示す。

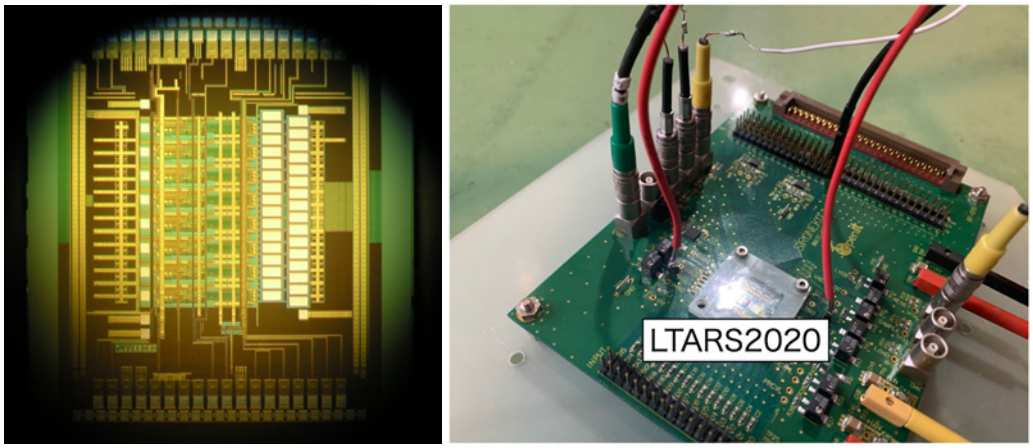

図3.1-1 試作したASIC（左図）とASIC単体の性能を評価するための試験基板（右図）

表3.1-1 CMOSプロセスと製作したASICの仕様

Technology	SilTerra Malaysia Sdn.Bhd. 180 nm CMOS
Chip size	2500 μm×3400 μm
Channels	8
Supply/Power consumption	1.8 V (core & IO), max 2.4 mW/ch
Process options	6 metals, deep N-well, high-R, MIM
Shaping time	1 μs
Dynamic range	±80 fC
ENC	3000 e- @Cdet＝100 pF
Voltage gain	10 mV/fC

3.1.2　令和 3 年度実施内容及び成果

令和 2 年度に製作した ASIC 単体の性能評価を実施し、MSND との接続試験を実施した。また、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。そして、国内の ^{60}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。以下に、その具体的な内容を記述する。

1）ASIC 単体での性能評価、及び MSND との接続試験

図 3.1-2 に、製作した ASIC の回路構成を示す。1 チップには、電荷有感型増幅回路、波形整形回路と Analog to Digital Converter（以下、ADC と略記。）が内蔵されたチャンネルが 8 チャンネル内蔵されており、それぞれのチャンネルのアナログ出力信号をデジタル値へと変換後、シリアライザ回路でデータイベントとして統合し、後段のエレクトロニクスに送る仕様とした。

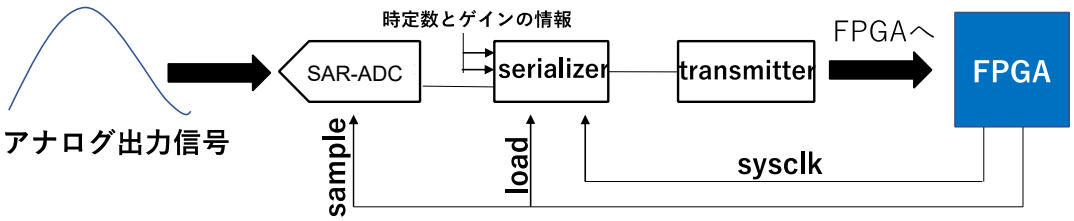

図 3.1-2　ASIC の回路構成

まず、この ASIC に対して最初にチップ単体でのアナログ回路部分の性能評価を実施した。図 3.1-3 の左図に 40 fC のテストパルスの入力に対する出力波形の一例と、右図に波高値のダイナミックレンジを示す。開発の仕様として、アルファ線の放出エネルギーから検出器からの信号は最大 64 fF と見積もられているため、波形整形回路のダイナミックレンジを 80 fF と定め、ピーキングタイムは、令和 2 年度の試験結果で得られた 1 μs 前後を目標とする設計値と定義しており、波形で得られたピーキングタイムは設計値に近い値を示していることが分かる。また、信号極性はセンサに使用するバイアス電圧の極性に依存するため、システム全体の自由度を持たせられるように、どちらの極性でも読み出せる仕様とした。

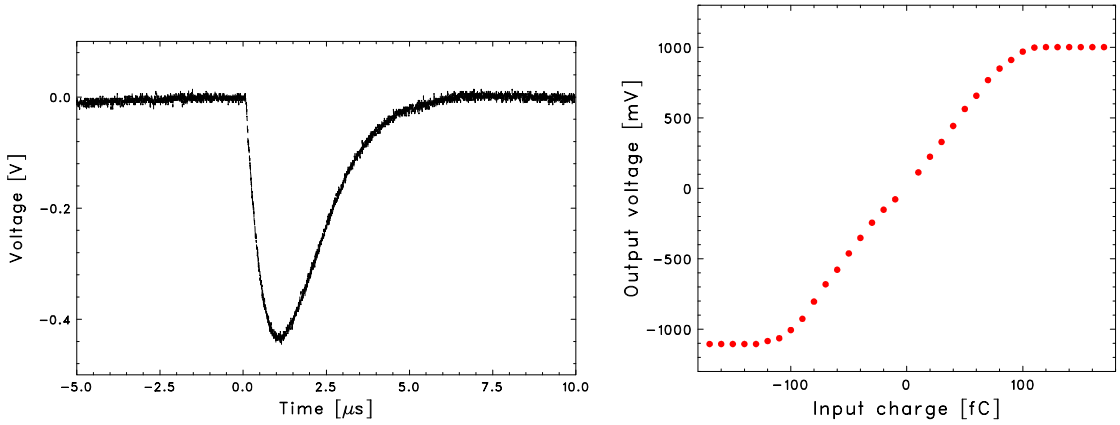

図 3.1-3　左図：試作した ASIC のテストパルス入力（40 fC）に対する出力波形
右図：入力電荷量に対する出力波形のピーク波高値

検出器からの信号を効率良く検出するために、目標の等価雑音電荷として 5000 から 10000 電子以下と設定している。^{6}LiF を中性子コンバータとして使用している MSND 中で生じるアルファ線からの電荷信号が、約 569 ke-と見積もられるため、信号対雑音比として 50～100 を想定して算出している。等価雑音電荷は、検出器容量に依存するため、100 pF から 300 pF を想定している。図 3.1-4（左図）に測定した雑音特性の検出器容量依存性を示す。この結果から雑音特性は要求を満たしていることが分かる。なお、シミュレーションと実測とのずれは、評価基板上で ASIC に容量を接続した際に生じる寄生容量の影響と外部からの雑音の漏れ込みに起因すると考えられる。現実的な配線などによる性能悪化を考慮した場合であっても雑音特性は目標値を十分に満たせると考えているが、実際の使用環境で使用した場合に、外来雑音の混入等が予想以上に大きい場合は、検出器なども含めたシステム全体でのシールドなどを検討する必要性がある。

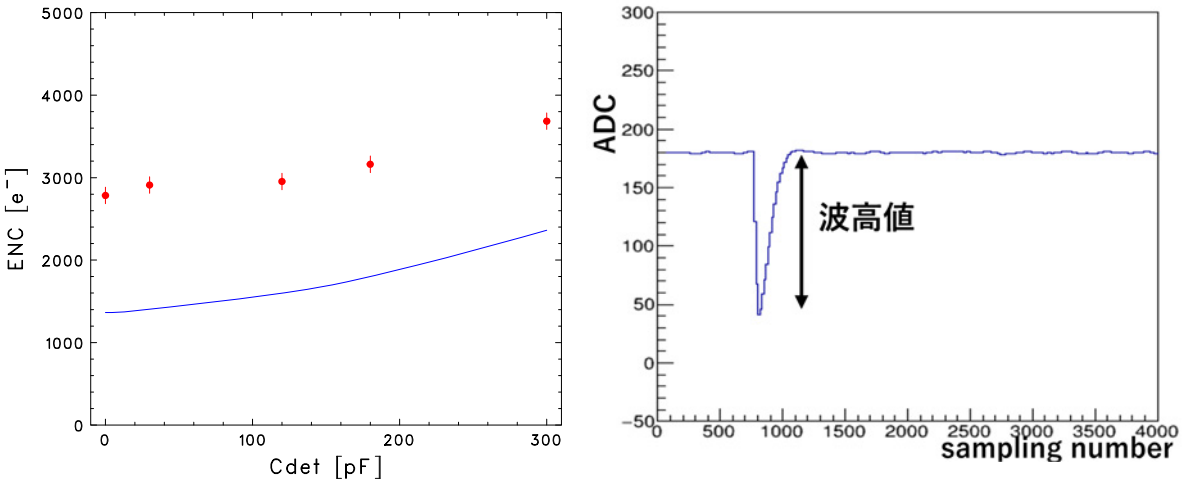

図 3.1-4　左図：ASIC 単体の等価電子雑音（赤が測定点、青がシミュレーションを示す。）
右図：ADC のデジタルデータから再構成したアナログ波形の一例

次に、ADC を含めたデジタル部の性能評価を実施した。デジタル制御のために ROV への搭載も可能な小型の FPGA ボードとして高エネ研で開発した GoSHIK と呼ばれるボードを用いてファームウェアを開発した。GoSHIK と ASIC との通信を確認したのち、ASIC に入力したテストパルスからのアナログ出力を毎秒 10 メガサンプルで ADC でサンプリングし、デジタルデータからアナログ波形を再構成した。40 fC を入力した時の結果を図 3.1-4（右図）に示す。用いた ADC は多チャンネル的な将来の応用を見据えて、消費電力の小さな逐次近似型のアーキテクチャを採用し、変換ビット数を 8 ビットとしている。ADC のビット数やサンプリング速度は、バックグラウンドとなるガンマ線レートや中性子イベントのレートにも依存するため、将来的に再検討が必要となる可能性があるが、令和 3 年度に試作した ASIC においては、アナログ回路とデジタル回路が両方とも動作していることが確認できたと評価した。

ASIC 単体での評価試験ののち、MSND と ASIC を評価基板上で接続し、ガンマ線に対する応答評価を実施した。図 3.1-5 に、セットアップの写真を示す。MSND はアルミケースの筐体に銀ペーストを用いて実装し、10 MΩのバイアス抵抗と 2.2 nF の AC 容量で ASIC の入力部と接続している。図 3.1-6 に、テストパルスを入力した際の応答と、^{60}Co ガンマ線を照射した際の応答波形の比較を示す。黄色がテストパルスの入力で、マゼンタが整形回路のアナログ出力である。雑音は、検出器容量と外部雑音等によって悪化しているもののガンマ線に対する応答は確認できている。今後は、評価基板の改良によって雑音特性の改善を検討する。

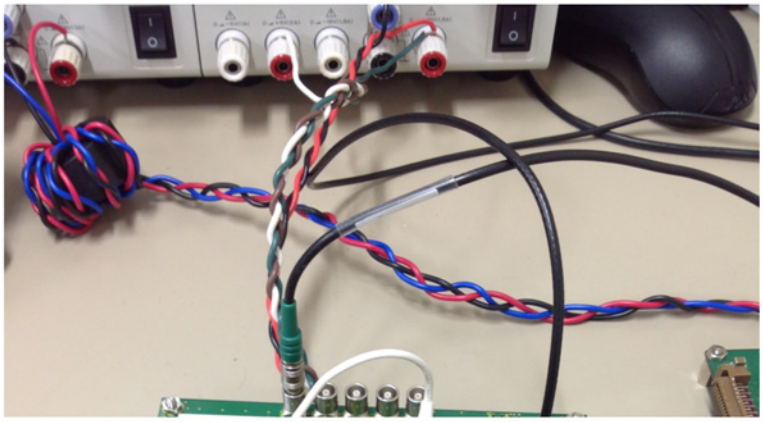

図 3.1-5　MSND と ASIC を接続した際のセットアップ写真

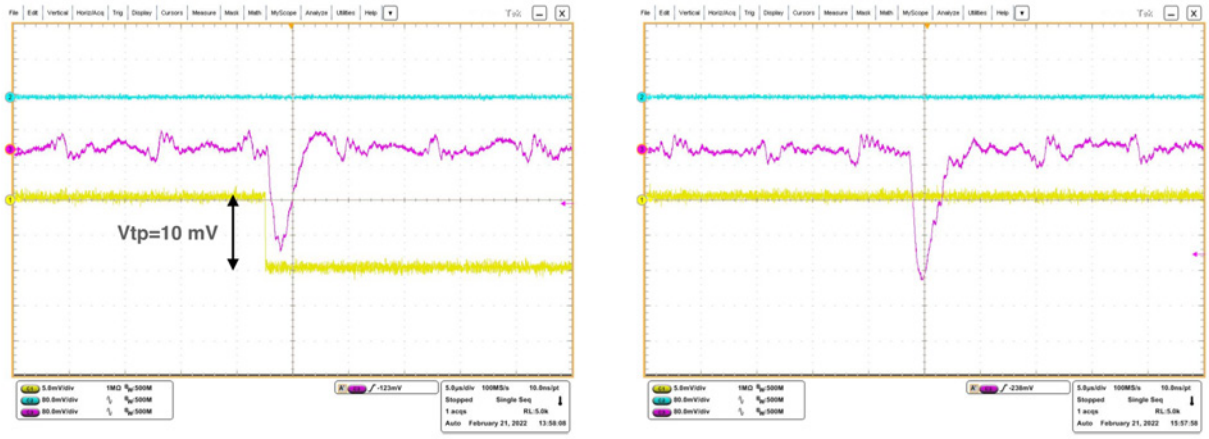

図 3.1-6　テストパルス（左図）と ^{60}Co（右図）を入力信号とした際の出力応答波形

2) 中性子場中でのパルス計測型 MSND センサの応答評価

令和 2 年度に整備した中性子照射試験用簡易水槽を用いて、国立研究開発法人産業技術総合研究所の技術協力の下で ^{252}Cf 線源による中性子照射試験を実施した。

図 3.1-7 に、本試験に供したパルス計測型 MSND センサの外観写真を示す。MSND 用信号処理回路をパッケージングした筐体自体は防水仕様ではないので、水中試験では筐体をさらに水密容器に入れ、この水密容器ごと水中に投入した。この水密容器の上蓋にはセンサの主アンプ信号出力と TTL 信号出力、そして源供給用のケーブルを接続した。また、照射試験中の水密容器の直立を確保するために、容器底面付近に水槽内径と同程度の直径を持つアクリル製ガイドを付した。

試験用簡易水槽の底部裏側の中央部には線源容器を本水槽に嵌め込むための凹み部を設けており、水密容器のセットアップ後に ^{252}Cf 中性子線源をインストールした。本線源は、中性子放出率が 3.19×10^{7} s^{-1}（平成 31 年 1 月 17 日時点）であり、想定される燃料デブリからの中性子束と比較しても十分な量である。照射試験では、図 3.1-8 に示すように、水密容器下部表面と水槽底表面の距離を 0 cm～46.5 cm と変えて、それぞれの位置で ^{252}Cf 線源からの放射線を測定した。この測定では、センサの主アンプ出力を可搬型マルチチャンネルアナライザ（AMPTEK 社製、MCA-8000D）に接続して ^{252}Cf の核分裂によるガンマ線と中性子線による波高分布を取得した。

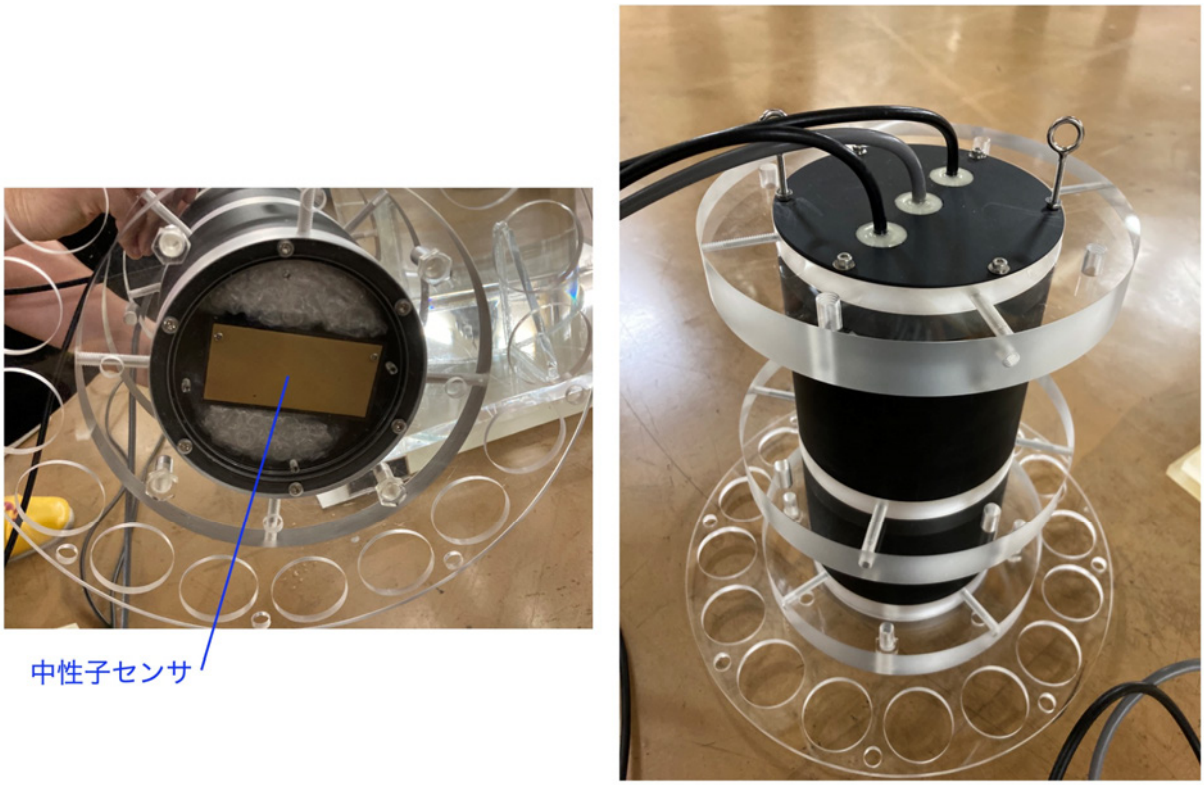

図 3.1-7　水密容器の外観

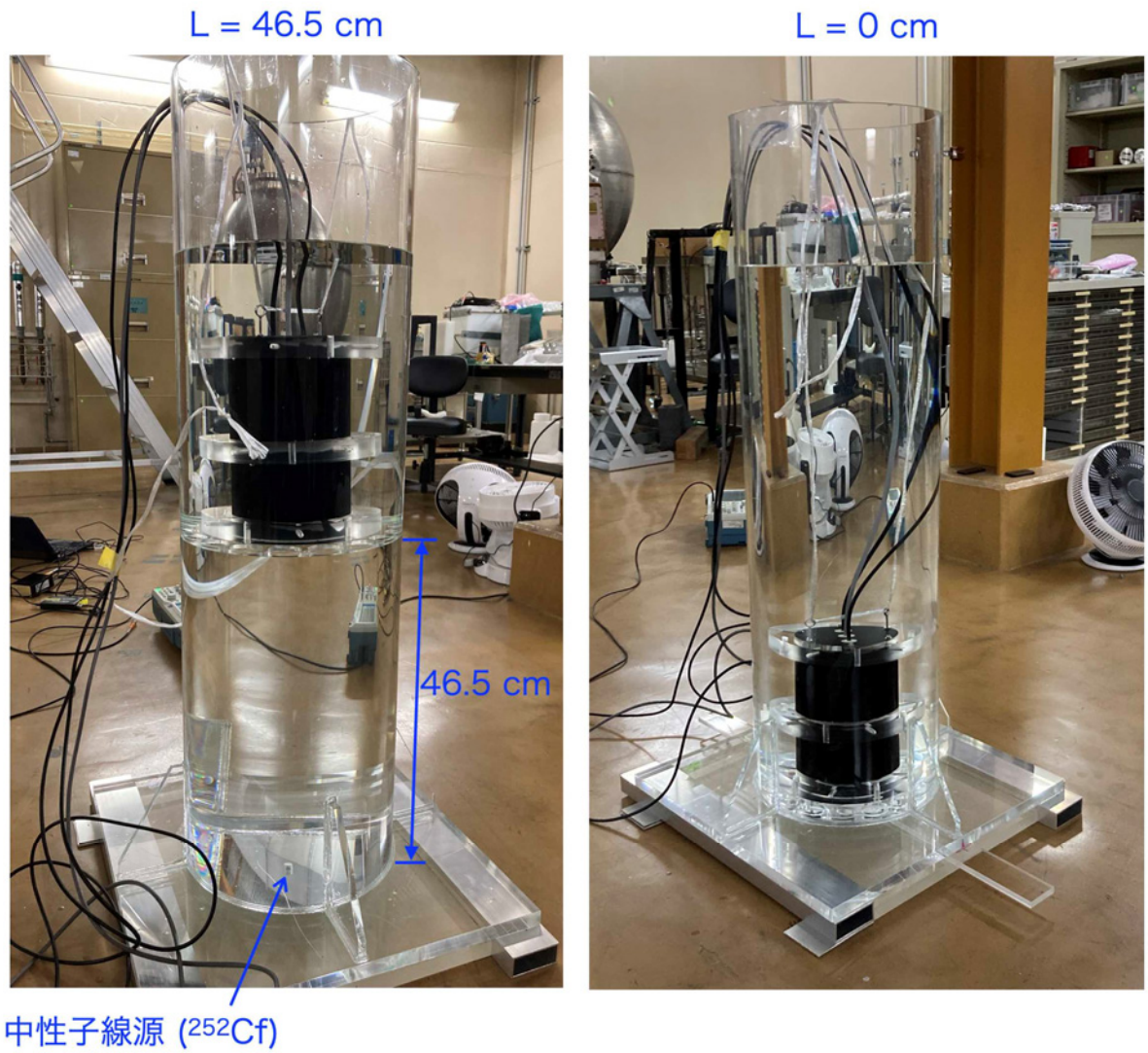

図 3.1-8　照射試験体系

図 3.1-9 に、水槽中で取得した波高分布を示す。水厚 0 cm～27 cm の条件で取得した波高分布中には、ガンマ線による波高分布と中性子線による波高分布の間に明瞭な谷間があり、本センサを用いて水中で減速された核分裂中性子の寄与を抽出することに成功した。一方、このガンマ線と中性子線の識別性は水厚 46 cm の条件では不明瞭になることが分かった。これは、水厚が増えると核分裂中性子の大半がセンサに到達する前に遮蔽され、水で遮蔽されにくいガンマ線寄与の割合が相対的に増えることで、中性子寄与が見えにくくなったものと考えられる。

図 3.1-10 に、モンテカルロ計算コード PHITS を用いて計算した水槽中の各測定点におけるエネルギースペクトルを示す。また、図 3.1-11 に、エネルギースペクトル計算値と線量換算係数データを用いて導出した水槽中での線量率分布を示す。^{252}Cf の核分裂による中性子線量率は水厚が増えると急速に減少し、水厚 46 cm 以上ではガンマ線量率の方が優位になることが分かる。

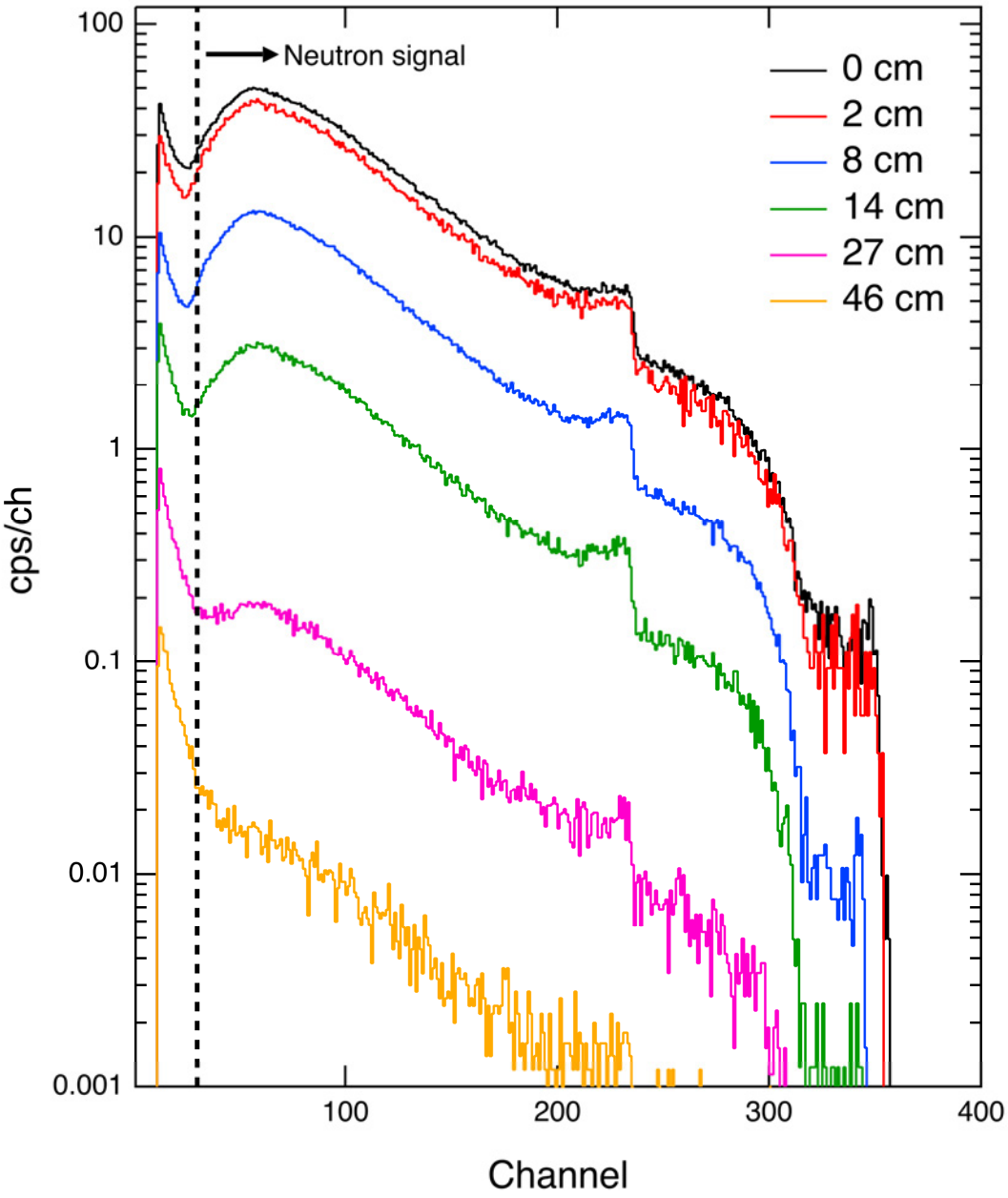

図 3. 1-9　水槽中で取得した波高分布

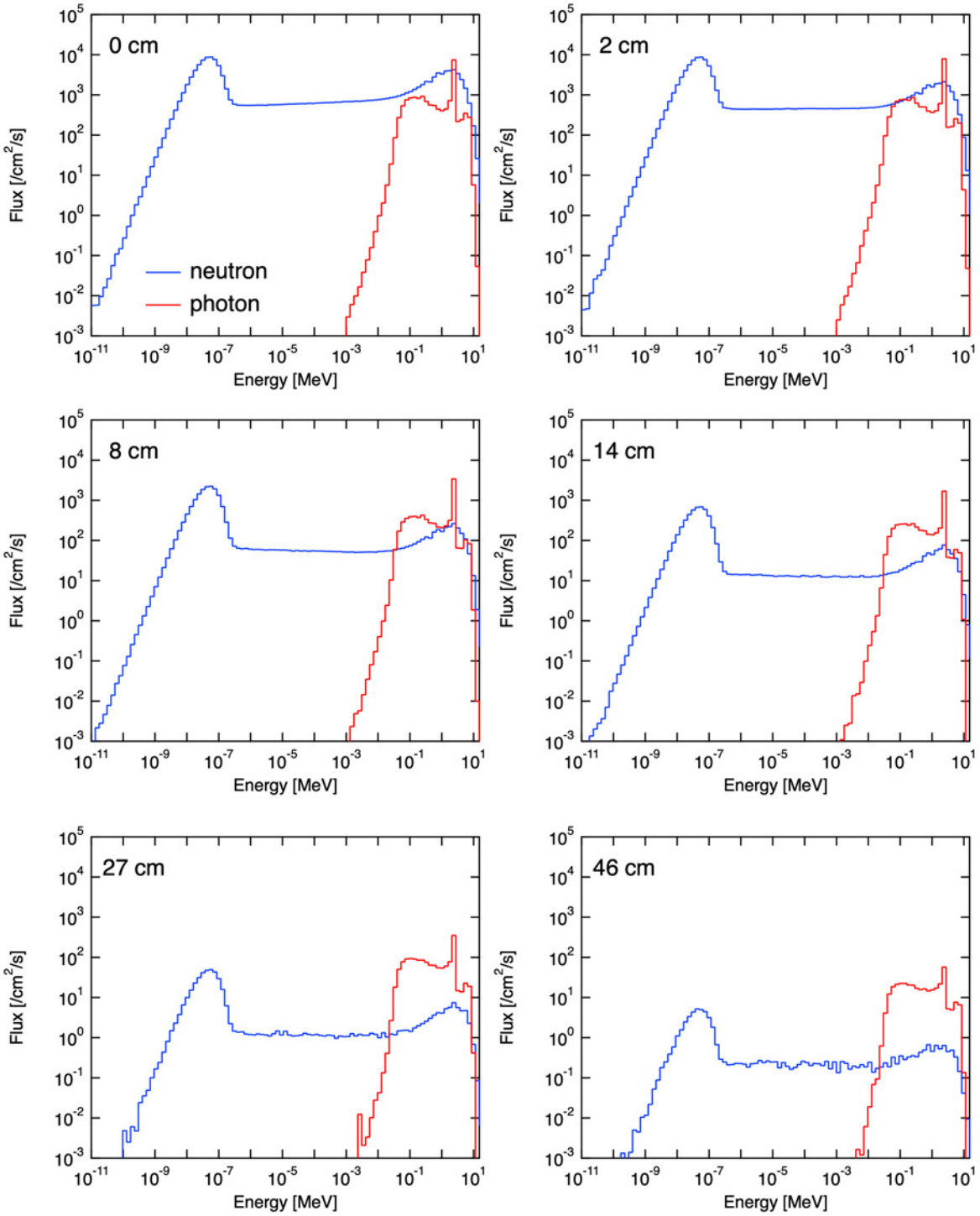

図 3.1-10　水槽中における中性子線及びガンマ線のエネルギースペクトル

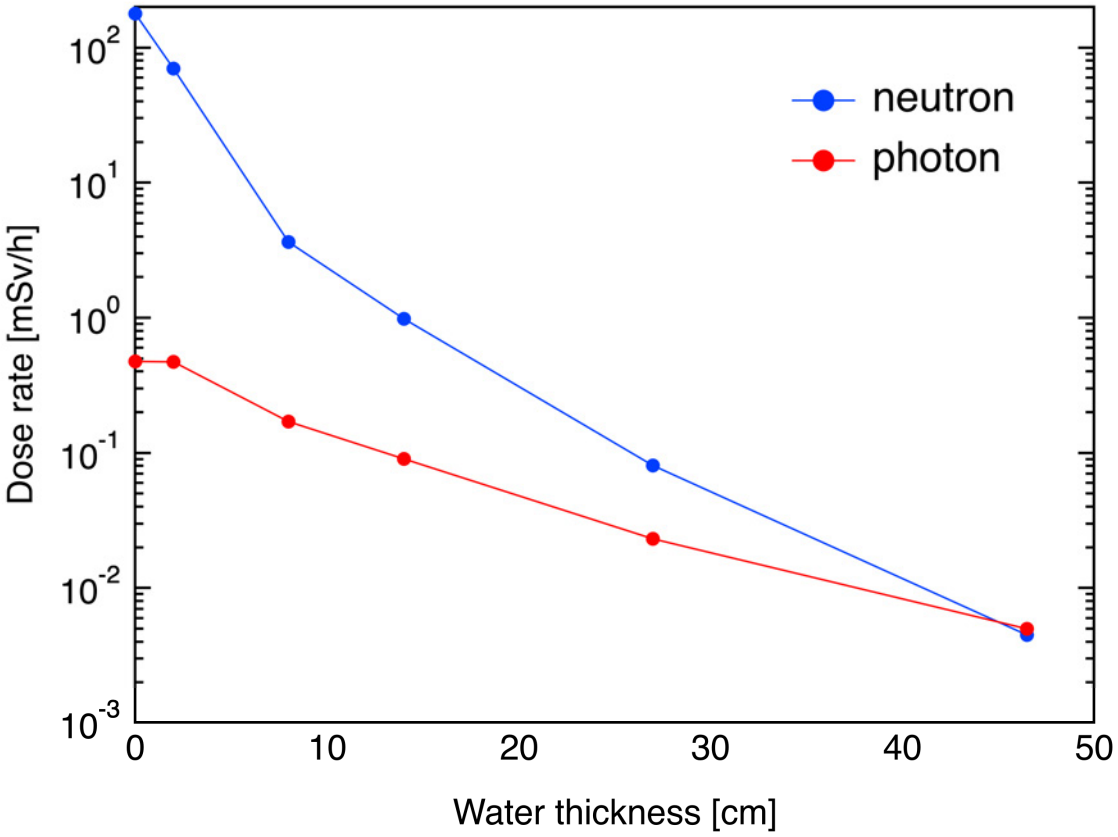

図 3.1-11　水槽中における中性子及びガンマ線量率分布

3）電荷積分型 MSND センサの開発

令和 3 年度は、高線量環境下におけるパルス計測方式のパイルアップ問題への対応を見据えて、電荷積分方式に基づく MSND 中性子センサを開発した。本センサの開発では、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に取り組んだ。

図 3.1-12 に、電荷積分型センサの外観と回路ブロック図を示す。本モニターは、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フェース部（IF）、で構成した。モニター部の形状は 60×80×40 mm、重量は約 270 g である。

モニター部の入出力は、積分型電荷増幅器出力（SLOPE）、コンパレータ出力（RESET OUT）、テスト電流入力（TEST）、積分型電荷増幅器リセット信号入力（RESET IN）及びディスクリミネータレベル（THR）で構成した。また、センサ部の電源は+12 V/20 mA、-12 V/7 mA を D-sub 9 pin ケーブルを介して供給する方式とした。

IF 部の入出力は、ADC 入力（SLOPE）、積分型電荷増幅器リセット信号出力（RESET）及び USB で構成した。USB は PC へのデータ伝送と IF 部への電源供給を担う。

本センサの専用ソフトウェア上では、測定の開始/停止、プリセット時間、積分増幅器へのリセット信号を送る閾値（mV）、の各種設定を GUI 上で行うことを可能とした。リセット閾値の設定可能範囲は-12 V～+12 V である。

図 3.1-13 に、Auto Reset モードで測定した積分波形を示す。Auto Reset モードでは 1 秒ごとにリセット信号が出される。Manual モードでは Reset Threshold の閾値電圧に達した時にリセット信号が出される。例えば Manual モードの場合では、リセット間隔は流入電荷量が大きくなると短くなる。このリセット間隔から線量率を把握することができる。

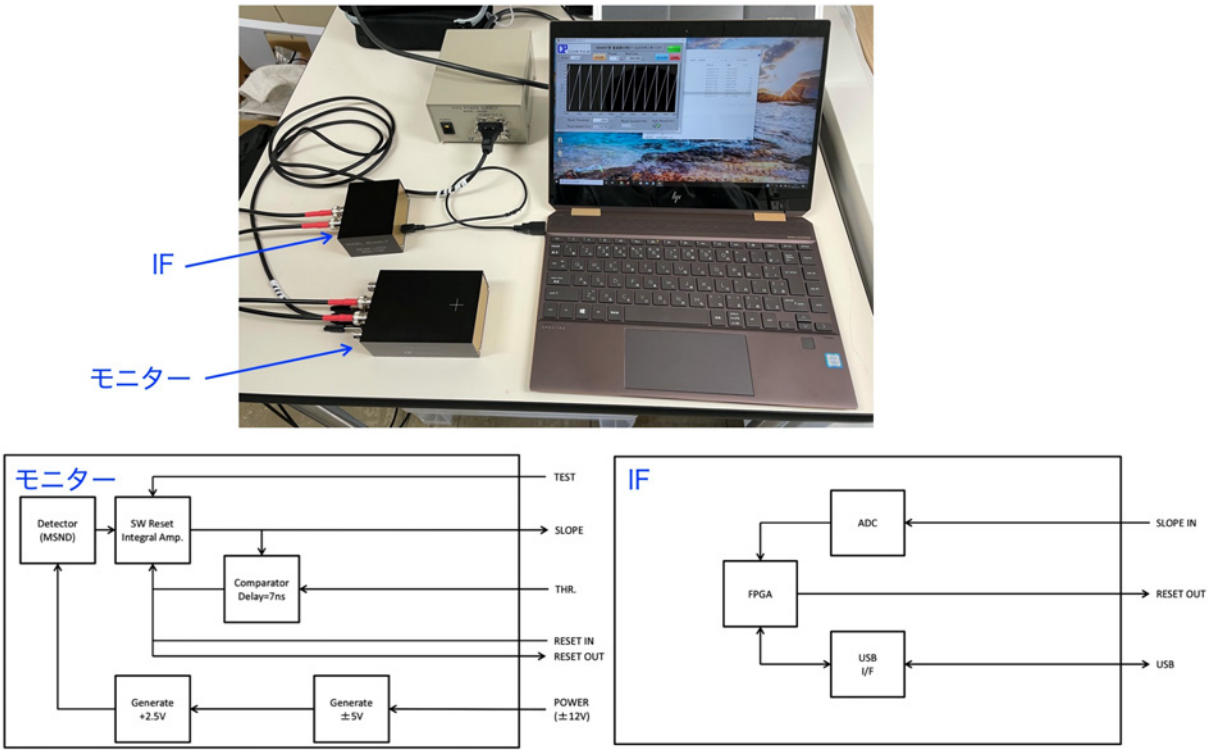

図 3.1-12　電荷積分型センサの外観と回路ブロック図

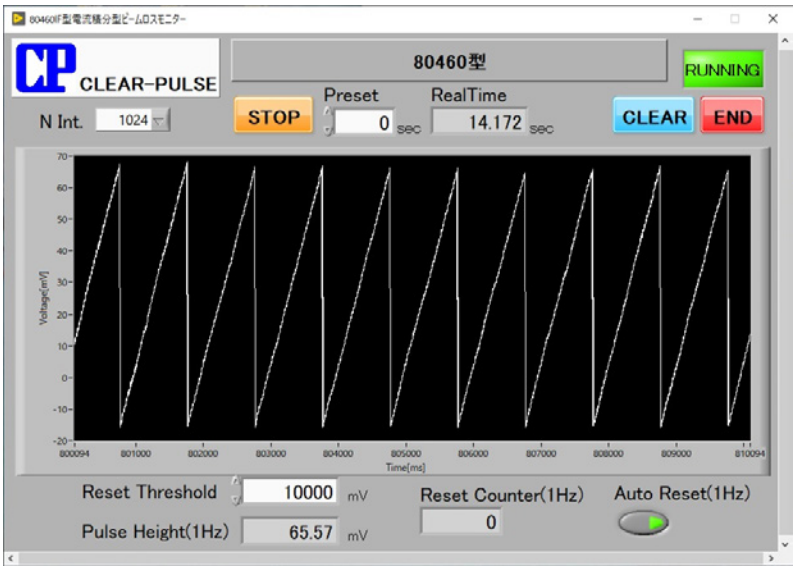

図 3.1-13　Auto Reset モードで取得した電流積分波形

4) ガンマ線照射下での MSND センサの応答評価

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 MSND センサのガンマ線照射試験を行った。

本試験では、^{60}Co ガンマ線源から 4.0 m 離れた位置にパルス計測型 MSND センサ、電流計測型 MSND センサ及び 1.5 インチ球形中性子比例計数管（^{3}He, BF_3）を設置し、0.001 Gy/h オーダー～1 Gy/h オーダーの範囲のガンマ線量率下での検出器応答を確認した。ガンマ線量率の調整は、検出器周囲を Pb ブロックで囲むことで行った。^{60}Co と検出器間の Pb ブロック厚さは 0 cm、5 cm 及び 10 cm の 3 条件とした。図 3.1-14 に、施設における照射位置を、図 3.1-15 に、試験の様子を示す。試験中のセンサ位置での線量率は、同位置に設置した積算線量計（長瀬ランダウア株式会社製、InLight）で測定した。

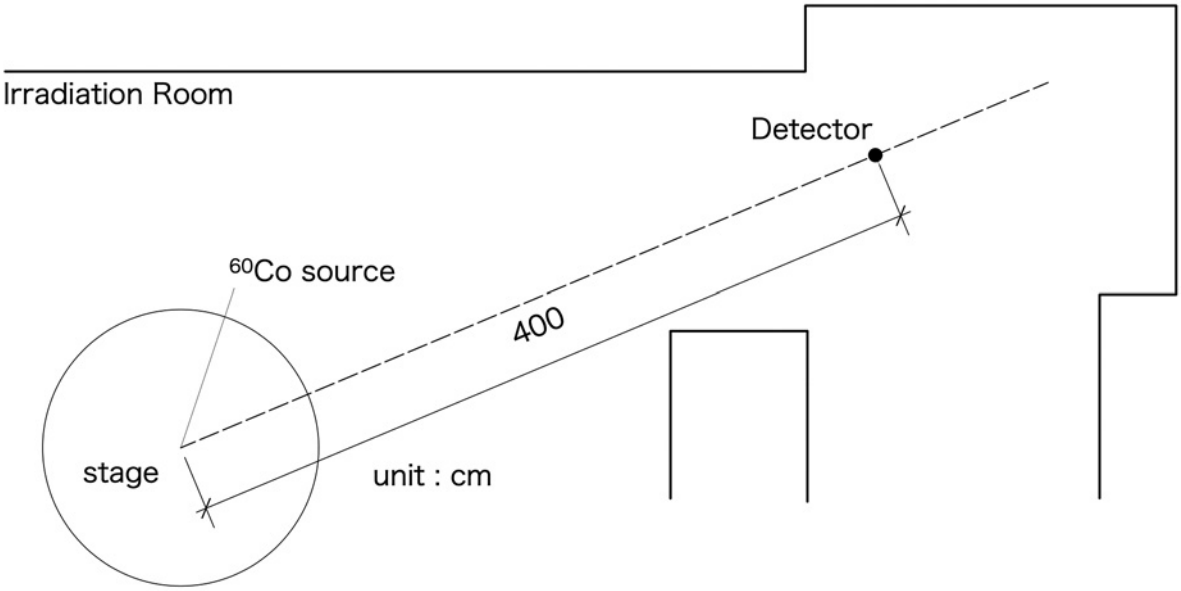

図 3.1-14　ガンマ線照射位置

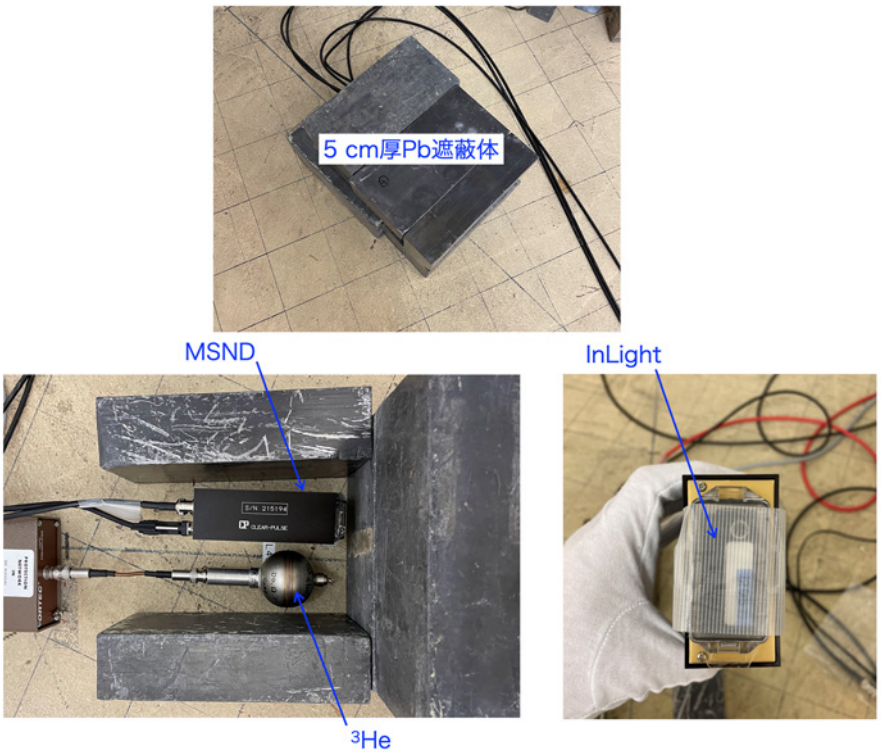

図 3.1-15　ガンマ線照射試験の様子

図 3.1-16 に、パルス計測方式による MSND 中性子センサ（時定数：3 μs）と ^{3}He 比例計数管（時定数：2 μs）の波高分布を示す。パルス計測型 MSND センサでは、Pb 5 cm 程度の厚さ（0.05 Gy/h 相当）までは信号パイルアップの影響は比較的少ないが、遮蔽体無しの条件下（1 Gy/h 相当）ではパイルアップによってガンマ線による波高分布が高波高側に大きくシフトすることが認められた。一方、^{3}He 比例計数管を用いたパルス計測システムでは、1 Gy/h 相当のガンマ線量率下で同様のパイルアップ影響が認められるが、パイルアップした信号の波高は中性子による波高よりも低く、中性子の弁別測定は可能と考えられる。

後述の 3 次元プラントモデルによる放射線輸送計算結果（図 3.3-2）において、本事業の UUV の使用場所として想定される水中（点 A 付近）のガンマ線量率は約 0.01 Sv/h と見積もられている。この放射線輸送計算結果と今回の ^{60}Co 照射試験を通じて、本事業で製作したパルス計測方式 MSND 中性子センサが、想定される放射線環境下で正常動作するための耐放射線性を有すること、実用上ガンマ線と中性子線の弁別性能を有していることを確認できた。

MSND のガンマ線感度は ^{3}He 比例計数管と比較して高いと判断されるため、パルス計測型 MSND 中性子センサを用いて 1 Gy/h オーダー以上の高ガンマ線量率環境下に混在する中性子を弁別測定するには、MSND 素子にガンマ線遮蔽を施して中性子寄与を相対的に大きくする工夫が必要である。MSND は 1.2 cm 角の小型の薄板であるため、比例計数管と比較して検出部の遮蔽は容易に実施可能である。^{60}Co のガンマ線に対する Pb の 1/10 価層は 4 cm 厚であるが、この厚みの Pb 遮蔽を検出部前面 2π 方向に施す場合の遮蔽体重量は 70 g 程度あり、ガンマ線寄与率の低減はセンサの軽量性を損なわずに十分に実現可能である。

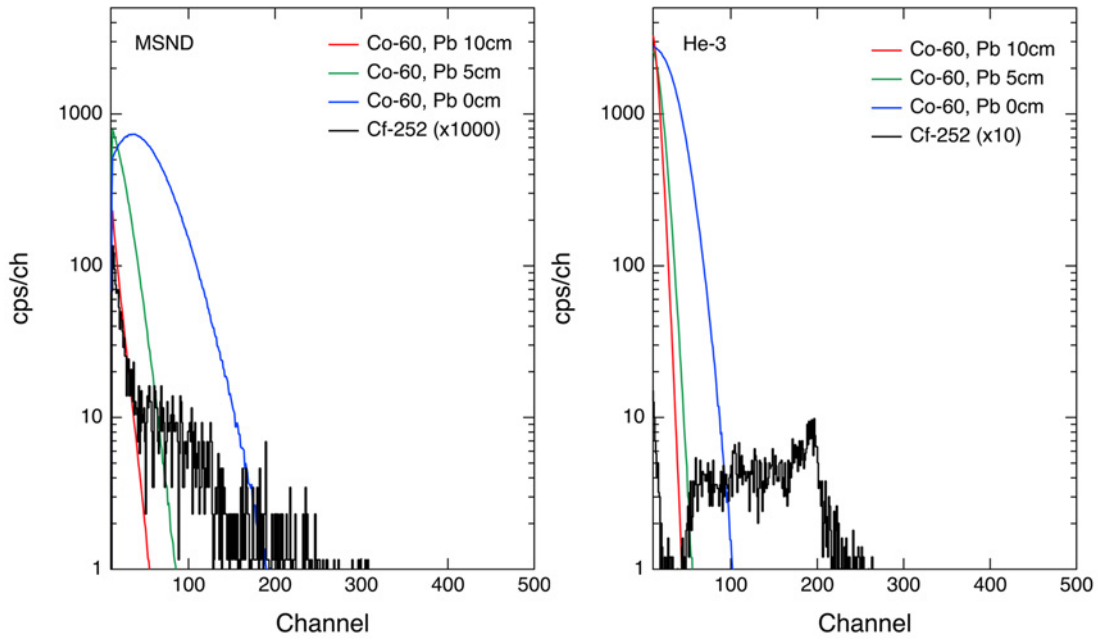

図 3.1-16　MSND（パルス計測型）と ^{3}He の比較

図 3.1-17 に電荷積分型 MSND センサの出力波形を示す。Pb 5 cm 厚（50 mSv/h 相当）の条件下では右肩上がりの積分波形を示しており、MSND の出力電荷を正常に計測できていることを確認した。

一方、遮蔽体無しの条件下（1 Gy/h 相当）では、MSND の出力電荷の積分が正しく行われなかった。本電荷積分センサでは MSND と積分器の間が AC カップルされており、直流成分は通過しない仕様となっている。これは MSND のリーク電流をカットする目的で導入したものである。一方、この積分回路系では、検出器の出力電流がパルス状ではなく直流的な出力となった場合、この出力電流に乗っている交流成分を除いてすべてカットする。今回、1 Gy/h 相当の高線量率下で測定不能になった理由は、MSND からの電荷が直流的に出力されたことに起因していると考えられる。

本試験結果を受けて、積分型センサから AC カップルを除去し、DC カップルに変更する方針とする。

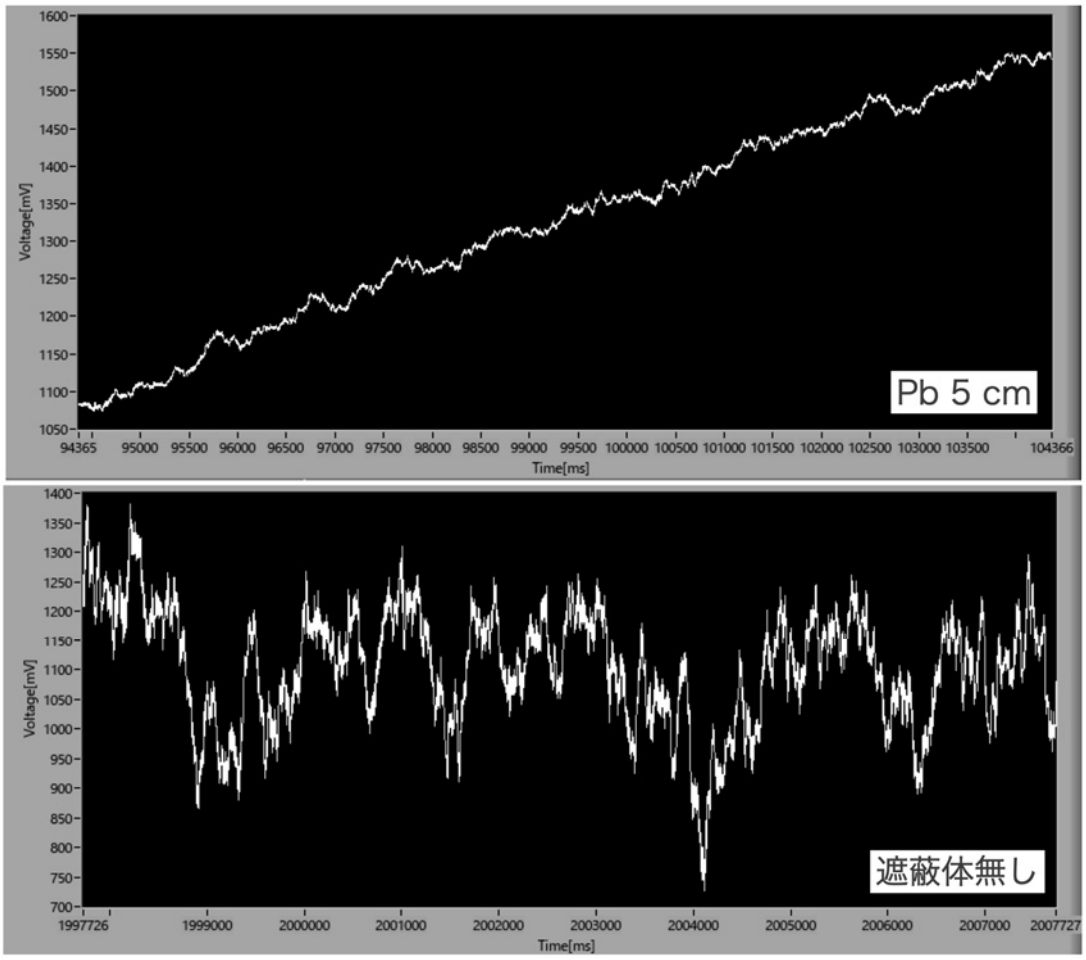

図 3.1-17　電荷積分型 MSND センサの出力波形

3.1.3　まとめ

以上のように令和 3 年度では、MSND をセンサとして、小型化を目指して ASIC 技術を用いた電荷有感型回路方式を製作し、その性能評価を実施すると共に、民生技術を用いて開発したパルス計測回路や電荷積分型回路を実際に MSND と接続して、中性子場、及びガンマ線照射場で動作試験を実施した。

3.2　UUV プラットフォームの開発

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

(1) 令和 2 年度実施内容及び成果（概要）

令和 2 年度は、開発する中性子センサの運用方法を水中広角カメラ、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 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イーサネットハブを通るように操作側の 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る。これについては、令和 3 年度以降に仕様が決まるため、決まり次第検討する。なお、計数のために、論理パルスに変換し記録することを想定している。

② インタフェースの設計

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呼び出して、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。

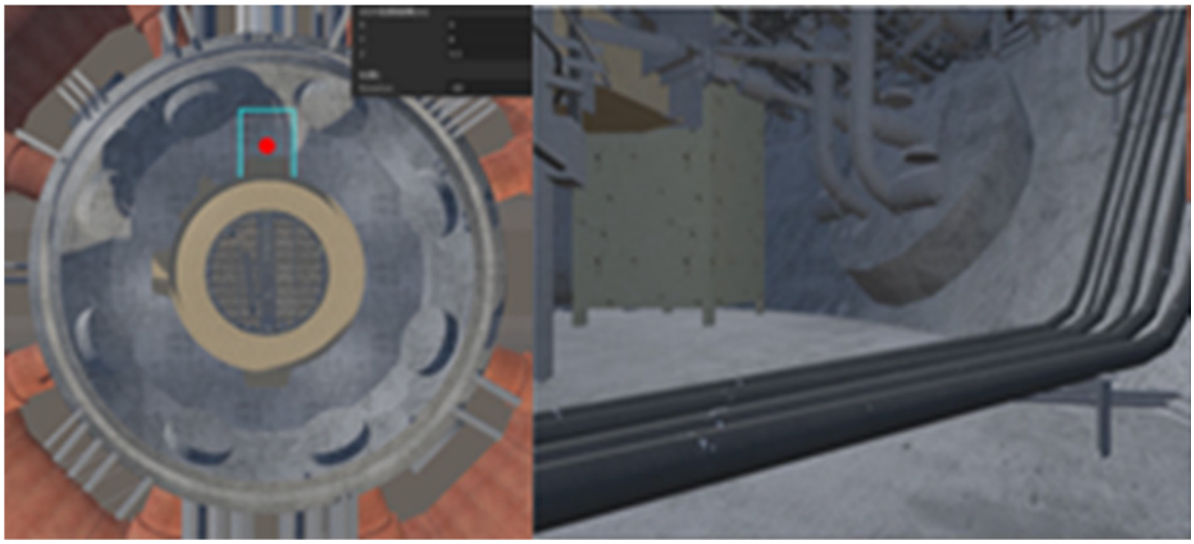

図 3.2.1-1　ROV 位置（左）と ROV 位置に対応したシーンデータ（右）

(2)　令和 3 年度実施内容及び成果

令和 3 年度は、マッピングツールの通信・制御回路の仕様について、引き続き検討を続けた。

① マッピングツールの通信・制御回路の仕様設計検討

1) 電源系

海技研が所有する UUV には、リチウムイオンバッテリー（公称 14.8 V、18 Wh、266.4 Wh）が搭載されており、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となっている。通信・制御回路の動作は、可能な限りバッテリーによる電力供給を基本方針としているが、電力欠損現象で生じる無制御状態を回避できるように商用電源からも給電できる仕様を採用する。これらの設計方針は、以前の高エネ研実施の英知事業[3.2.1]で開発した FPGA 回路設計方針を踏襲した。なお、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、ほとんど無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。

2) 通信・制御系

各センサからの信号は、テザーケーブルを介して、計測用 PC に送信される。これらの仕様の決定は、センサの仕様が揃ってからとなるが、PC でデータを同時処理する。後述の通り、ソナー、中性子センサ、水中カメラ、IMU のうち、中性子センサの処理回路と IMU は、同じ水密容器に封入し、信号処理についても 1 つの FPGA で通信・制御することにした。

3) 中性子センサ用回路との接続

中性子センサは、コンバータと中性子の核反応で発生した荷電粒子のエネルギー付与を介して電流信号を出力する。出力信号は、後段の ASIC にて波形整形されたのちに論理信号に変換される。さらに、ASIC からの出力論理信号は、PC での計測・制御ができるようにレベルシフタと制御信号を通信する FPGA を介して、後段の UART・TCP/IP 変換回路を経て、スイッチングハブにて、IMU の出力信号と信号が整理されて PC に送信される。前節でも示した通り、令和 3 年度で、ASIC の仕様が固まりつつあるため、令和 4 年度に FPGA の仕様を決定し、製作する予定である。なお、中性子センサと IMU は、消費電力が比較的小さく、PC の USB ポートのバスパワーから給電できるため、1 つの水密容器に封入し、通信・制御することとした。これらの検討に関する概念図を図 3.2.1-2 に示す。

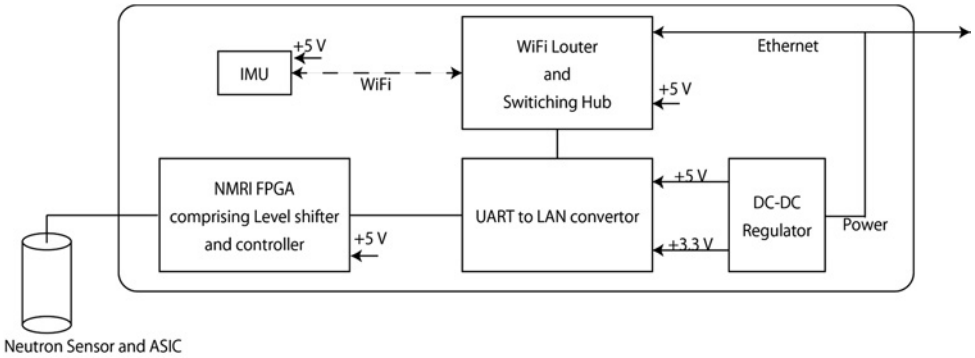

図 3.2.1-2　中性子センサと IMU を同一水密ポッドに封入する際の
信号処理並びに通信制御回路

② インタフェースの設計

先述の通り、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 VR システム上に構築した仮想現実空間に、点群データを投影し、UUV の位置情報を入力すると適切なシーンデータを呼び出せる機能を追加した。令和 3 年度は、それらを受けて、リアルタイム性について検討し、より適切なインタフェースを設計した。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、他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。そ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考えられる。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無い。そこで、これらと VR 映像との比較によって調査する運用が可能となる仕様にすることが現時点では現実的であると考えられる。

3.2.2　UUV プラットフォームの開発

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。

3.2.2.1　令和 2 年度の成果概要

令和 2 年度においては、従来の自己測位法である、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については予測精度が良好であるものの、天頂カメラやマーカー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）方式音響測位システムの精度検証試験を原子力機構 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

下かつ狭小空間にガレキ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判明した。

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デスタル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。ペデスタル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。このため、今後実機スケールのペデスタル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せた。

次に、NARRECの角水槽にペデスタル外壁の半径を約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、検知対象のペデスタル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、ゴーストを低減する対策を立て、上記のAI手法と組み合わせた方法を検討することで、実機に適用できる可能性があると考えている。

3.2.2.2　令和3年度実施内容及び成果

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耐環境性が良いという慣性航法システム（以下、INSと略記。）[3.2.3]の利点に着目して、適用性検討を実施した。

(1) IMUの特性評価

INSでは加速度計や角速度計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、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ことが挙げられる。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。そこで、以上の懸念事項から以下を実施した。

① センサの選定

加速度計や角速度計など単体素子を組み合わせたユニットである IMU を選定し、英国x-io Technologies社製のMEMS（Micro Electro Mechanical Systems）型のNGIMUを採用した。MEMS 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 の外観を図 3.2.2-1 に示す。

図 3.2.2-1　NGIMU の外観

② センサの特性試験

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。

図 3.2.2-2 に加速度計（Accelerometer）と角速度計（Gyroscope）の出力を示す。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～－0.4 deg/s の振幅で推移していることが判明した。そこで、静止状態のままで観測時間を 30 分に短縮して、加速度と加速度の標準偏差と変化量の標準偏差を求め、表 3.2-1 に示した。

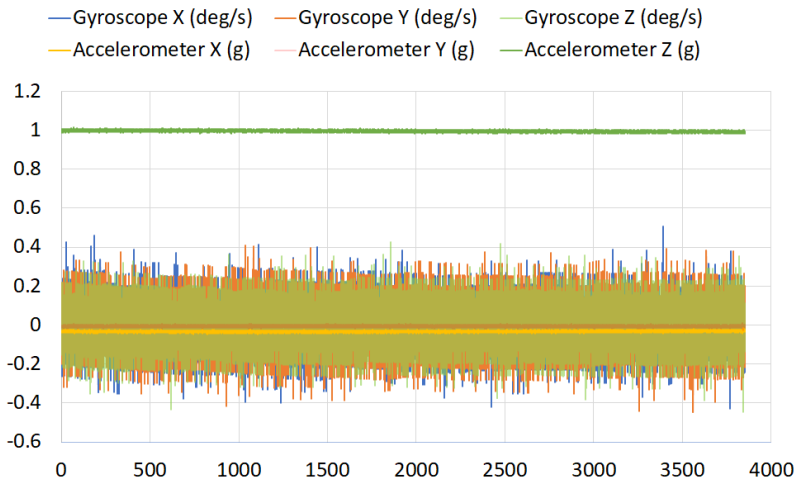

図 3.2.2-2　加速度計と角速度計の出力時刻歴

表 3.2-1　加速度と加速度の標準偏差と変化量の標準偏差

30 分静止した場合の加速度の平均値と標準偏差

	サンプリング率 1 Hz		サンプリング率 10 Hz	
	平均値（g）	標準偏差(g)	平均値（g）	標準偏差(g)
加速度-X	4.22×10^{-5}	0.00244	-2.11×10^{-5}	0.00246
加速度-Y	-3.10×10^{-5}	0.00244	-5.21×10^{-5}	0.00244
加速度-Z	7.68×10^{-3}	0.00288	6.50×10^{-3}	0.00297

30 分静止した場合の加速度変化量の平均値と標準偏差

	サンプリング率 1 Hz		サンプリング率 10 Hz	
	平均値（g）	標準偏差(g)	平均値（g）	標準偏差(g)
加速度-X	-1.04×10^{-6}	0.00341	1.17×10^{-7}	0.00345
加速度-Y	1.09×10^{-6}	0.00348	-3.87×10^{-7}	0.00344
加速度-Z	-4.73×10^{-6}	0.00388	-5.49×10^{-7}	0.00413

30 分静止した場合の角速度の平均値と標準偏差

	サンプリング率 1 Hz		サンプリング率 10 Hz	
	平均値（度/秒）	標準偏差(度/秒)	平均値（度/秒）	標準偏差（度/秒）
角速度-X	-0.0435	0.129	-0.126	0.0522
角速度-Y	0.139	0.117	-0.173	0.0385
角速度-Z	0.154	0.0246	-0.0480	0.0237

30 分静止した場合の角速度変化量の平均値と標準偏差

	サンプリング率 1 Hz		サンプリング率 10 Hz	
	平均値（g）	標準偏差(g)	平均値（g）	標準偏差(g)
角速度-X	-3.93×10^{-5}	0.127	-5.23×10^{-6}	0.131
角速度-Y	1.49×10^{-5}	0.143	-1.58×10^{-5}	0.143
角速度-Z	-5.70×10^{-6}	0.123	-1.10×10^{-5}	0.130

表 3.2-1 を見ると分かるように、加速度と角速度における平均値と標準偏差に対してサンプリング率による変動は概ね現れていない。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ている。また角速度の平均値と標準偏差の比についても、加速度の平均値と標準偏差の比に比べて、大きい結果となっている。これらのことから、角速度計は加速度計に比べて感度が高いため、出力波形の振幅もより広がっていることを示している。

(2)　慣性航法演算処理プログラムの整備

INS では加速度計や角速度計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した距離を求めることができる。この慣性航法の原理に基づく演算処理フローを検討し、プログラムを整備した。この演算処理の手順を以下に示す。

1) NGIMU からの出力データの読み込み
時刻、加速度計の出力データ（x, y, z)、角速度計の出力データ（x, y, z）の 7 系統のデータの読み込み。

2) 読み込んだデータのスケーリング
1)で読み込んだデータにスケールファクタをかけて、実単位に変換。

3) 必要なデータ範囲の切り出し
解析に必要となるデータを選別して切り出す。

4) 角速度の 0 点補正
角速度は静止時も非 0 出力をする場合がある（バイアス)。このバイアスを除去するために計測初期 20 秒程度は NGIMU を静止させておき、バイアスの平均値を計測し、測定データからその平均値を差し引くことで 0 点補正を行う。

5) 角速度を積分し、姿勢角（クォータニオン）を求める。

6) 加速度の座標変換と加速度の 0 点補正
加速度計による加速度値は、加速度計の座標系の値なので慣性計測で知りたい地球（もしくは空間）に固定された座標系の値である。そこで、手順 5)で求めたクォータニオンを使って加速度を座標変換して、固定座標系での加速度値を求め、重力を差し引く。手順 4)の角速度の 0 点補正と同様に、初期の静止期間の加速度値の計測値を重力として用いる。

7) ダウンサンプルとフィルタリング
角速度のバイアス変動、スケールファクタの誤差により、得られた姿勢角には誤差が生じる。姿勢誤差の影響を減らすために、フィルタリングを行う。フィルタリングにはデジタルフィルタを用い、バイアス変動によるドリフトは一般的に非常にゆっくり起こるため、高域通過フィルタ（HPF）で極低周波成分を除去して、バイアス変動の影響を排除する。非常にゆっくりした成分のみを除去したいが、このような極端なフィルタの適用は困難なため、まずダウンサンプルでデータ点数を減らしたのち、適切なフィルタを適用する。

8) 加速度の数値積分による位置の演算
加速度データを 2 回積分して、位置を求める。画面表示とファイルへの保存。

9) 画面表示とファイルへの出力

(3)　NGIMU を搭載した移動体の測位試験

・小型 4 輪移動体、小型リモコンボートによる測位試験

小型 4 輪移動体及び小型リモコンボートに NGIMU を搭載し、加速度計や角速度計の出力を慣性航法演算処理プログラムで処理し、移動体の測位データを推定した。

・モーションキャプチャによるドローンの測位試験

原子力機構の 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（図 3.2.2-3（左））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計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することができる。これらの位置の時系列を比較検討することにより、INS による位置の推定精度の調査検討を実施した。使用したドローンは enRoute Co., Ltd. 製の PG560（図 3.2.2-3（右））で、重量：2.3 kg、寸法（L×D×H）：804×804×172 mm、最大飛行時間：20 分の仕様である。

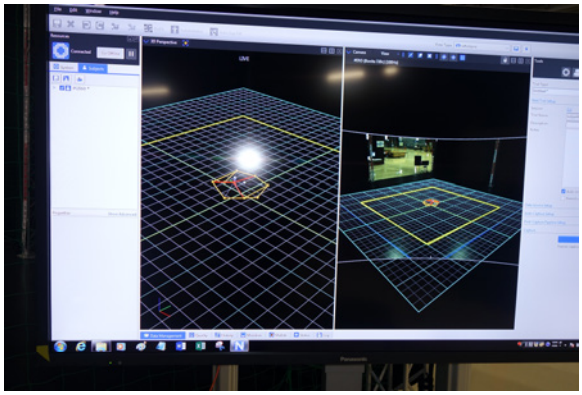

図 3.2.2-3　モーションキャプチャの画面表示（左）　　ドローン PG560 の外観（右）

今回の試験では INS による航跡と比較し易い単純な飛行ルートを設定した。

1）高さ 2 m で 1 辺 8 m の正方形のルート、高さ 2 m で（10 m×10 m）の中心を円の中心とする半径 4 m の円のルート

2）撮影エリア（10 m×10 m）の中心から地上から高さ 2m までの垂直上昇と垂直降下のルート

3）高さ 2 m で 1 辺 8 m の正方形の対角線上のルート

測定時間については、慣性計測システムで処理するデータ量の観点から 3 分以内を想定した。

(4)　INS の適用性検討

NGIMU センサの特性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[3.2.4]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。そこで、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。次に、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。

1）角速度に対する影響

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の時系列変化を図 3.2.2-4（左）に、同様に、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

変化を図 3.2.2-4（右）に示す。これらの図を比較すると、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を表している。推定した航跡図を小型リモコンボートについて図 3.2.2-5（左）に、ドローンについて図 3.2.2-5（右）に示した。ドローンによる結果はモーションキャプチャの航跡とかなり差違が生じている。小型リモコンボートは実際の航跡（目視による確認）に似た結果を示した。この結果、角速度に対する移動体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。

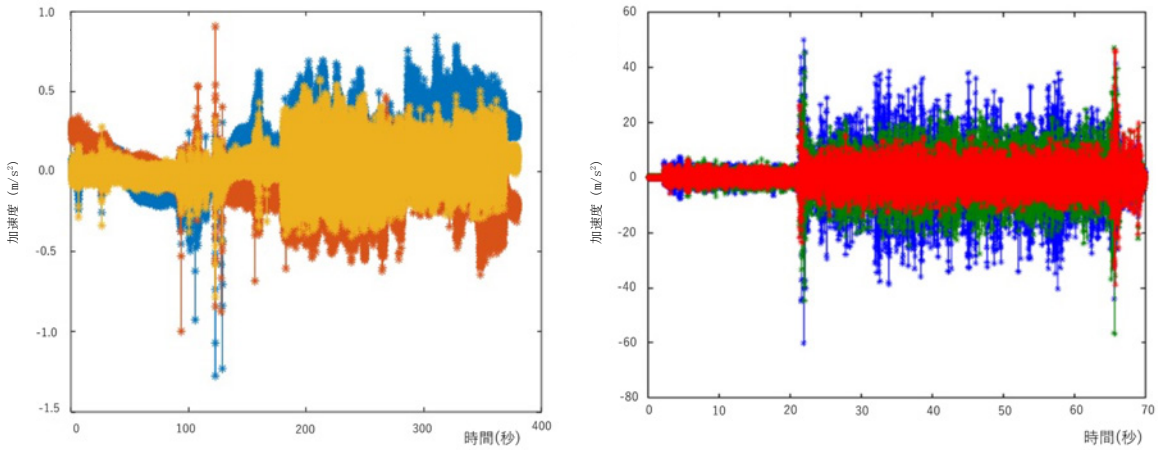

図 3.2.2-4　リモコンボートに搭載した IMU の加速度出力（左）
ドローンに搭載した IMU の加速度出力（右）

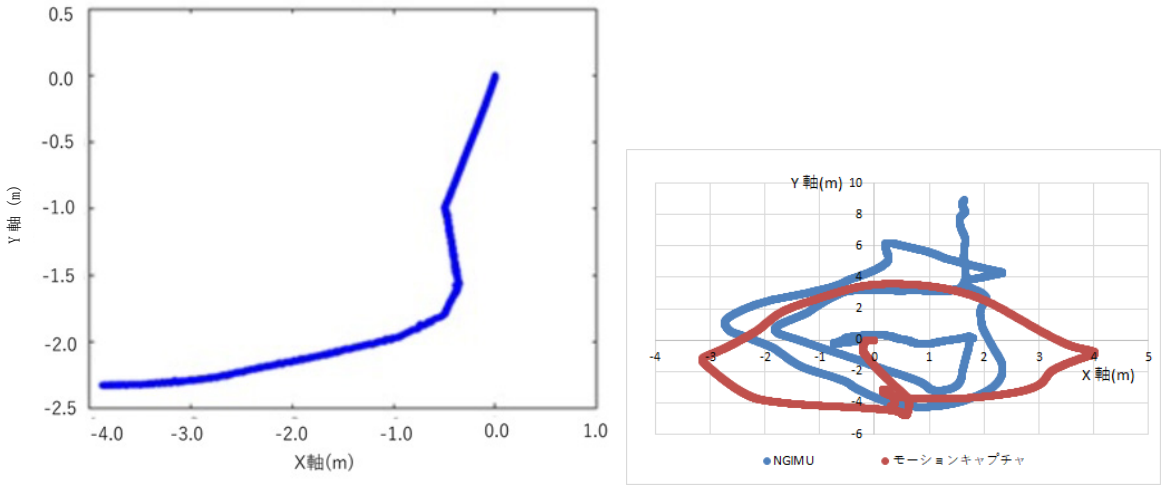

図 3.2.2-5　小型リモコンボートの航跡図（左）ドローンによる航跡図（右）

2）積分範囲の影響

ドローンによる測位試験においては、測定開始から約 20 秒の地上静止から上昇を開始している。NGIMU の出力は、この測定開始から終了まで記録している。そこで、測定開始から終了までを積分した位置推定に基づく航跡図（図 3.2.2-5（右））と、移動開始から終了まで（静止時間を含めない）積分した位置推定に基づく航跡図（図 3.2.2-6）を比較した。積分範囲を変えることで航跡における違いが現れている。

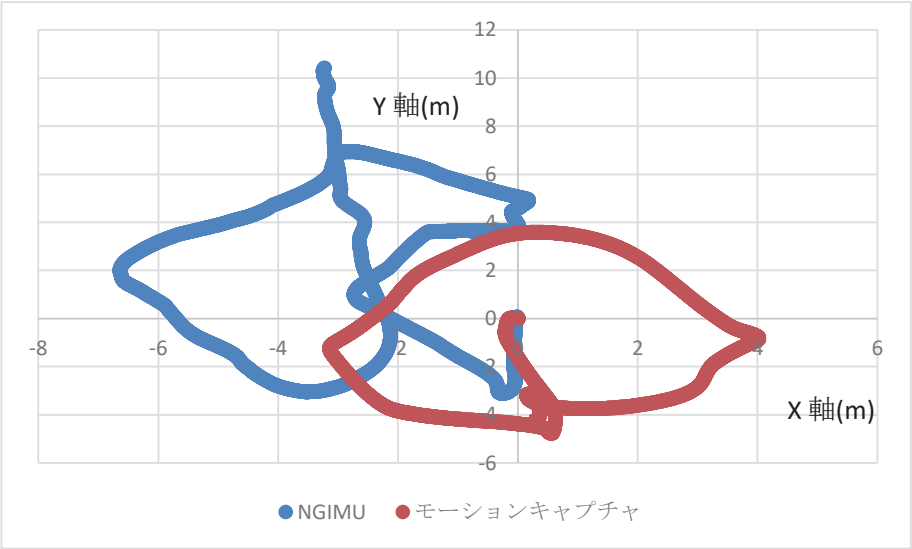

図 3.2.2-6　移動開始から終了まで（静止時間を含めない）積分した位置推定に基づく航跡図

(5) インタフェース系の設計

得られる位置情報をマッピングデータと共に VR システムに連動させるインタフェース系を設計した。

3.2.3　まとめ

(1) 燃料デブリマッピングツールの開発：まとめと今後の課題

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 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、センサの仕様が揃うため、炉内探査が効率良く実施できるような仕様を策定し、インタフェースを完成させる。

(2)UUV プラットフォームの開発：まとめと今後の課題

令和 3 年度に整備した慣性航法演算処理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る。

1) NGIMU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を整備する。
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検討する。
3) 1FにおいてUUVをPCV内に投入する場所の位置やカメラ画像等を利用できるようにする。さらにこれらの情報とINSの位置推定結果から、PCV内部のペデスタル壁等の位置情報からとUUVの相対的な配置を把握するなどして、より詳細なUUVの位置を総合的に予測する方法を検討する。
4) 日英連携：日英連携として、燃料デブリサンプリング時の姿勢制御を可能とするためのUUVの改良設計を英国側と連絡を取りながら実施した。詳細については、3.4節で述べる。

参考文献

[3.2.1] 廃炉環境国際共同研究センター，高エネルギー加速器研究機構，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（委託研究）；令和2年度英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業，JAEA-Review 2021-042，2022，115p，https://doi.org/10.11484/jaea-review-2021-042.

[3.2.2] Matthew Nancekievill et al., Detection of Simulated Fukushima Daiichi Fuel Debris Using a Remotely Operated Vehicle at the Naraha Test Facility, Sensors 2019, vol.19, 4602, 2019.

[3.2.3] Oliver J. Woodman, An Introduction to Inertial Navigation, UCAM-CL-TR-696, ISSN 1476-2986, August 2007.

[3.2.4] 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.

3.3　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）

3.3.1　令和 2 年度実施内容及び成果（概要）

1F における燃料デブリには号機ごとの事故進展や部位に依存して、デブリ性状や環境の違いがある。そのため、部位ごとに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り、検出器の遮蔽最適化が困難となっている。したがって、1F 内における部位ごとの放射線特性に応じた機器や遮蔽設計の最適化が必要となるが、そのためには 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、ペデスタル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。

3.3.2　令和 3 年度実施内容及び成果

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、ベータ崩壊に由来する制動 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することにした。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、ペデステル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。また、積算中性子線量計の放射線照射試験を実施し、照射量などの条件を変えた場合のデータを取得した。

3.3.3　ガンマ線及び中性子線における核種別寄与の確認

燃料デブリには非常に多くの核種が含まれていると推測され、そのため、崩壊ガンマ線、自発核分裂中性子線のほか、制動 X 線や消滅ガンマ線、（α,n）反応に由来する中性子線についても考慮する必要がある。そこで、a）ベータ崩壊に由来する制動 X 線と消滅ガンマ線、b）自発核分裂と（α,n）反応に由来する中性子線を対象とし、それぞれについて核種別寄与を求めることにした。そのためには、まず燃料デブリの組成や密度、評価時期などを設定する必要がある。本件では、3 号機の燃料デブリを想定し、組成と密度を表 3.3-1 のように仮定した。実際の燃料デブリの組成は未だ不明で今後のサンプリング分析の結果等を見ていく必要があるが、ここでは U と Zr 元素のモル比が 1：1 の代表的な溶融燃料デブリ(U, Zr)O_2を想定した。なお、3 号機の事故時には MOX 燃料が含まれていたことから、事故時の炉内装荷量相当の MOX 燃料を考慮している。また、事故時には希ガスや Cs などの揮発性 Fission Product（以下、FP と略記。）の多くが燃料デブリの外部へ放出されていると考えられるため、表 3.3-1 の組成を基に燃焼・放射化計算を行ったのち、Phebus-FPT4 試験[3.3-1]に基づき燃料デブリからの FP 放出率を表 3.3-2 のように仮定して、核種の放出模擬計算を行い、評価時期まで冷却計算を行った。評価時期は燃料デブリ取り出しが本格化すると予想される 2031 年とした。

表 3.3-1　燃料デブリの組成と密度

気孔率［vol%］	21.5
ZrO_2［vol%］	50.0
UO_2［vol%］	47.2
MOX［vol%］	2.8
密度［g/cm^3］	6.23

表 3.3-2　FP 放出率

希ガス	He	99
	Ne	99
	Ar	99
	Kr	99
	Xe	99
	Rn	99
揮発性 FP	I	97
	Cs	84
	Te	80
	Mo	77
	Rb	53
	Cd	44
	Ba	35
	Sb	30
	Pd	27
	Ag	9.2
	Tc	7.1
	Ru	1.8
	Sr	1.4

a)　ベータ崩壊に由来する制動 X 線と消滅ガンマ線

制動 X 線が発生する制動放射はエネルギー依存性があり、ベータ線による放射収率はエネルギーが高いほど高くなる。言い換えると、低エネルギーのベータ線であれば放射能が高くても制動 X 線は発生しにくい。そのため、制動 X 線の寄与は放射能で評価することが難しい。そこで、単位体積当たりにおけるベータ崩壊の崩壊熱を求めた。崩壊熱が大きい核種を並べたものを表 3.3-3 に示す。崩壊熱の総和のうち、^{90}Y が 79.02 %を占めることが分かった。^{90}Y は ^{90}Sr の娘核種であり、これらは放射平衡の関係にあることから、^{90}Sr がベータ崩壊熱の約 96 %を占めることになる。また、無限体系にて発生させた制動 X 線の光子数は、崩壊ガンマ線と合わせたもののうち 25 %ほどであった。

次に、消滅ガンマ線の寄与を調べるために、陽電子崩壊による核種ごとの放射能を求めた。陽電子崩壊による放射能が大きい核種を表 3.3-4 に示す。結果として、^{152}Eu がほとんどを占めることが分かった。しかしながら、発生する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から、消滅ガンマ線の効果は無視することができる。

表 3.3-3　ベータ崩壊における核種別崩壊熱と寄与率

核種	崩壊熱[W/cm^3]	寄与率[%]
^{90}Y	6.29E-04	79.02
^{90}Sr	1.32E-04	16.58
^{137}Cs	2.66E-05	3.33
^{154}Eu	3.71E-06	0.47
^{241}Pu	3.25E-06	0.41

表 3.3-4　陽電子崩壊による放射能と寄与率

核種	放射能[Bq/cm^3]	寄与率[%]
^{152}Eu	1.09E+01	99.82
^{59}Ni	1.51E-02	0.14
^{36}Cl	4.13E-03	0.04

b) 自発核分裂と（α,n）反応に由来する中性子線

燃料デブリの組成割合と密度から、単位体積当たりにおける自発核分裂由来の中性子発生数を、計算コード SOURCES 4C[3.3-2]を用いて求めた。その結果から中性子発生数の割合が大きい核種を並べたものを表 3.3-5 に示す。同表に示したように、発生する中性子のうち、95.62 %が ^{244}Cm 由来となっている。

次に、（α,n）反応由来の中性子数を SOURCES 4C を用いて求めた。表 3.3-1 から分かるように、燃料デブリ中には酸素原子が多量に含まれているため、計算時のターゲット核種は ^{17}O と ^{18}O とした。得られた中性子発生数のうち、割合が大きい核種を表 3.3-6 に示す。^{241}Am と ^{238}Pu で約 76 %を占めていることが分かる。しかしながら、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 94.19 %が自発核分裂由来であることが分かった。^{244}Cm の半減期はおよそ 18.1 年であるため、事故からかなり長時間経過した場合や酸素以外の核種との（α,n）反応の寄与がある場合を除き、（α,n）反応由来の中性子は無視することができる。

表 3.3-5　自発核分裂由来の中性子数と寄与率

核種	中性子数[n/cm^3/s]	寄与率[%]
^{244}Cm	2.687E+02	95.62
^{240}Pu	6.962E+00	2.48
^{246}Cm	3.193E+00	1.14
^{242}Pu	2.150E+00	0.77

表 3.3-6　（α,n）反応由来の中性子数と寄与率

核種	中性子数[n/cm^3/s]	寄与率[%]
^{241}Am	6.614E+00	37.99
^{238}Pu	6.589E+00	37.85
^{244}Cm	2.263E+00	13.00
^{240}Pu	1.129E+00	6.48
^{239}Pu	8.154E-01	4.68

以上のことから、燃料デブリの本格取り出しが開始されると目される2031年ころまでは、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言える。

3.3.4　3次元プラントモデルによる放射線輸送計算

令和2年度に構築した3号機の試解析用の3次元プラントモデルに対して、より実機の形状を再現するように細かな修正を行った。令和3年度に構築したプラントモデルのうち、ペデスタル底部から水位が6.3 mのものを図3.3-1に示す。燃料デブリにおける中性子線の線源モデルは、表3.3-5に示した4核種、つまり ^{244}Cm、^{240}Pu、^{246}Cm、^{242}Puの自発核分裂由来の中性子スペクトルを用いた。この中性子スペクトルは、2031年時点での4核種それぞれの自発核分裂による中性子発生数を重みとした上で、それぞれの中性子スペクトルを合成することで得た。

ガンマ線の線源モデルは、事故直後のインベントリデータを2031年まで崩壊させ作成したガンマ線スペクトルデータを用いた。しかし、そのままではスペクトル本数が3万本を超えるため、主要なピーク以外は47群に群縮約したものを使用した。他の線源モデルは令和2年度に実施した方法に従った。これらの線源モデルと、修正した3号機3次元プラントモデルを使用して2031年3月を想定した線量率分布を求めた。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[3.3-3]を用いた。結果を図3.3-2に示す。図3.3-2における点A、B、Cでの線量率はそれぞれ約0.01 Sv/h、50 Sv/h、310 Sv/hと推定された。図3.3-3には点A付近で得られた光子フルエンス率のエネルギー分布を示す。0.662 MeVに ^{137}Csの大きなピークが確認できる。また、1.173 MeVと1.332 MeVには ^{60}Coのピークが確認できる。^{60}Coはタイプレート部などに使用されているステンレスの放射化によって生成される。同時に1.274 MeVなどに ^{154}Euのピークも見られる。2.2 MeVのピークは水素の（n, γ）反応により発生するガンマ線である。

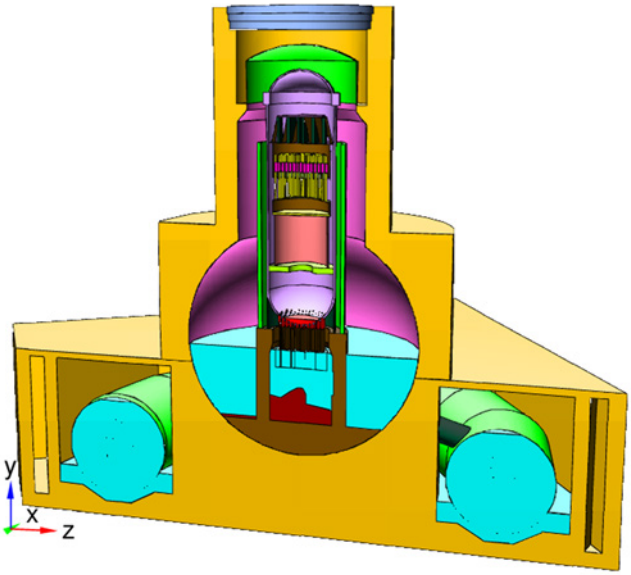

図3.3-1　3号機の3次元プラントモデル

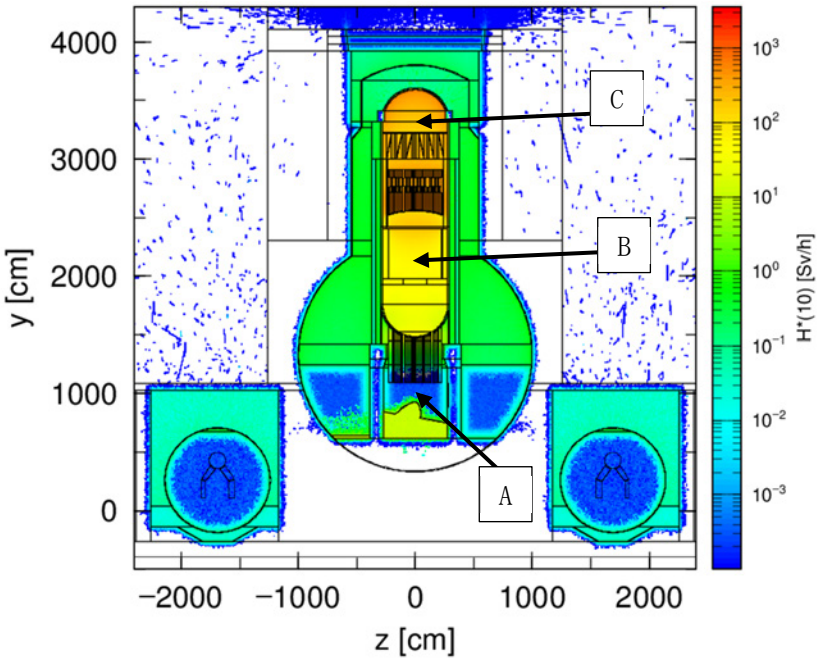

図 3.3-2　3 号機の格納容器内線量率分布予測（2031 年 3 月）

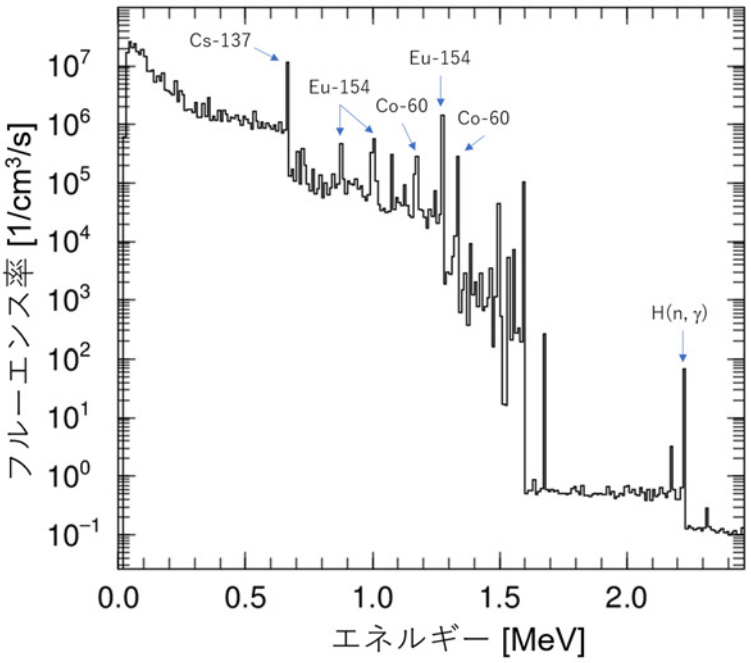

図 3.3-3　点 A（図 3.3-2 参照）付近での光子フルエンス率

3.3.5　積算中性子線量計の特性評価

図 3.3-2 からも分かるように 1F の炉内は高ガンマ線場となっており、内部調査などで使用す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[3.3-4]。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 種類があり、図 3.3-4 に BD-PND の全体写真を示した。BDT と BD-PND は外観やサイズがほぼ同等となっている。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粘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、ポリマー中に泡が発生し、そのまま留まることになる。BDT の場合は、粘性ポリマー中にリチウム化合物が添加されており、^{6}Li（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[3.3-5]。BDT と BD-PND はともに、発生した泡の数から入射した放射線量の測定が可能となる。表 3.3-7 に BD-PND の基本仕様を示す。

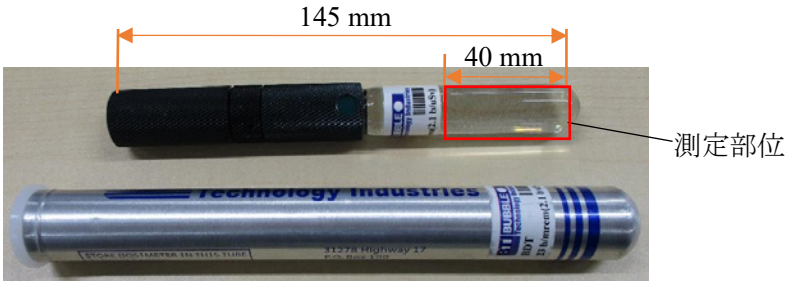

図 3.3-4　バブルディテクター（高速中性子用 BD-PND）の全体写真

表 3.3-7　バブルディテクター（高速中性子用 BD-PND）の基本仕様

エネルギー範囲	200 keV～15 MeV
中性子の測定範囲	1～5350 μSv
感度	0.03～3.0 [bubble/μSv]
推奨温度範囲	20～37 ℃
大きさ	19 mmφ×145 mm（測定部 40 mm）
重量	58 g

バブルディテクターの特長として、ガンマ線にほぼ感度が無い、感度[bubble/μSv]に対するエネルギー依存性はほぼ無い、外部電源やケーブルが不要で小型軽量、目視確認が可能、気泡を圧縮して再使用することが可能、といった点が挙げられる。これらの特長から内部調査をする際にロボットなどに取り付けることが、他の中性子センサに比べて比較的容易に可能であると考えられる。

3.3.6　積算中性子線量計のガンマ線に対する応答

バブルディテクターは原理的に中性子束の時間積分量を計測するものであるが、高ガンマ線場でも利用できることが確認できれば、ロボットへの搭載に限らず、狭隘空間が多い今後の 1F 現場での様々な応用に目途を与えることができる。そこで実際のガンマ線に対する応答を確認するため、量子科学技術研究開発機構高崎量子応用研究所において ^{60}Co を用いたガンマ線照射試験を実施した。

照射時の配置図を図 3.3-5 に示す。^{60}Co 線源から線源強度が 5 kGy/h、3 kGy/h、1 kGy/h の位置に BDT と BD-PND を 2 本ずつ設置した。同時に液体線量計を設置し、実際の照射量を測定した。照射時間は 30 分と 1 時間 30 分の合計 2 時間とした。結果として、BDT には数十個から 100 個以上の泡が発生した。一方、BD-PND には泡が発生しないか、発生しても 1 つだけであった。このことから、1F の強ガンマ線場で使用できるのは高速中性子用の BD-PND の方であると言える。高速中性子は平均自由行程が熱中性子に比べて長いため、BD-PND の利用は、水中デブリ探査において燃料デブリにロボットが過度に近付かなくても中性子を検出できるメリットがあるほか、中性子の熱化が期待できない気中での利用の可能性もある点で、望ましいものと言える。

本試験により、BD-PND は、1 kGy/h 程度の高ガンマ線場であっても、積算で 2 kGy 程度までの範囲で利用できる見込みを得た。これは、図 3.3-2 で示した PCV 内の大部分の領域への適用の可能性を示唆するものである。

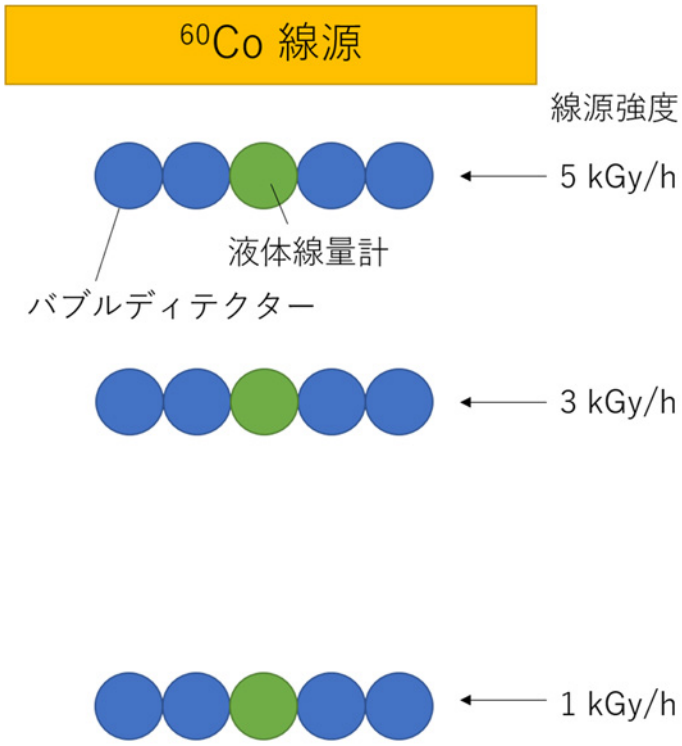

図 3.3-5　ガンマ線照射試験時の配置図

3.3.7　積算中性子線量計の高速中性子に対する応答

BD-PND に対して高速中性子の照射試験を、原子力機構原子力科学研究所の放射線標準施設にて実施した。線源には ^{252}Cf を用いた。まず、フルエンス率が異なる 3 地点にて、フルエンスが同等となるように照射し、フルエンス率依存性の確認を行った。図 3.3-6 には線源、及び BD-PND の配置図を示した。線源からの距離は 100 cm、141 cm、200 cm とし、フルエンス率はそれぞれ 55 n/cm^2/s、27 n/cm^2/s、14 n/cm^2/s である。照射時間を 0.5～2 時間とし、フルエンスを約 9.8×10^4 n/cm^2 に揃えた。結果を図 3.3-7 に示す。いずれもバブル数は 70～80 個の範囲に収まっており、大きな差は見られなかった。つまり、低フルエンス率である 14～55 n/cm^2/s の範囲では、フルエンス率の違いが時間積分された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。

次に、線源から距離 100 cm、フルエンス率が 55 n/cm^2/s の地点に BD-PND を、F08 と F11 の 2 本設置して照射を行った。F08 と F11 の差異はメーカーによる製造時期の違いである。照射時間は 0.5、1、2、3、4 h とした。結果を図 3.3-8 に示す。積算フルエンスに対するバブル数に差が確認できるが、これは製造時期が異なることによる個体差である。また、フルエンス範囲が広くなると線形性が悪くなっており、事前に校正曲線を作成する必要がある。本件の場合、F08 を例として、100 n/cm^2/s 程度の中性子場であれば、30 分で 100 個程度のバブルが発生する見込みである。

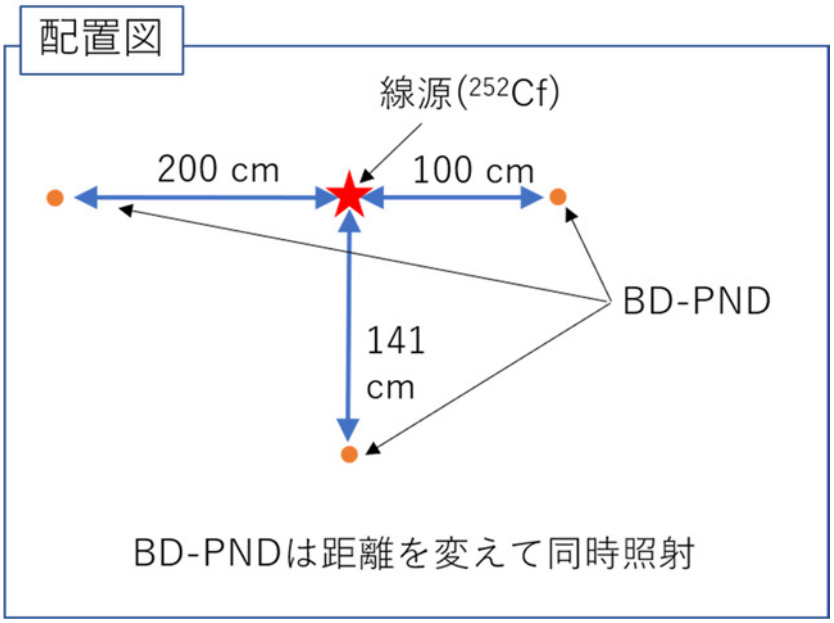

図 3.3-6　^{252}Cf 線源と BD-PND の配置図

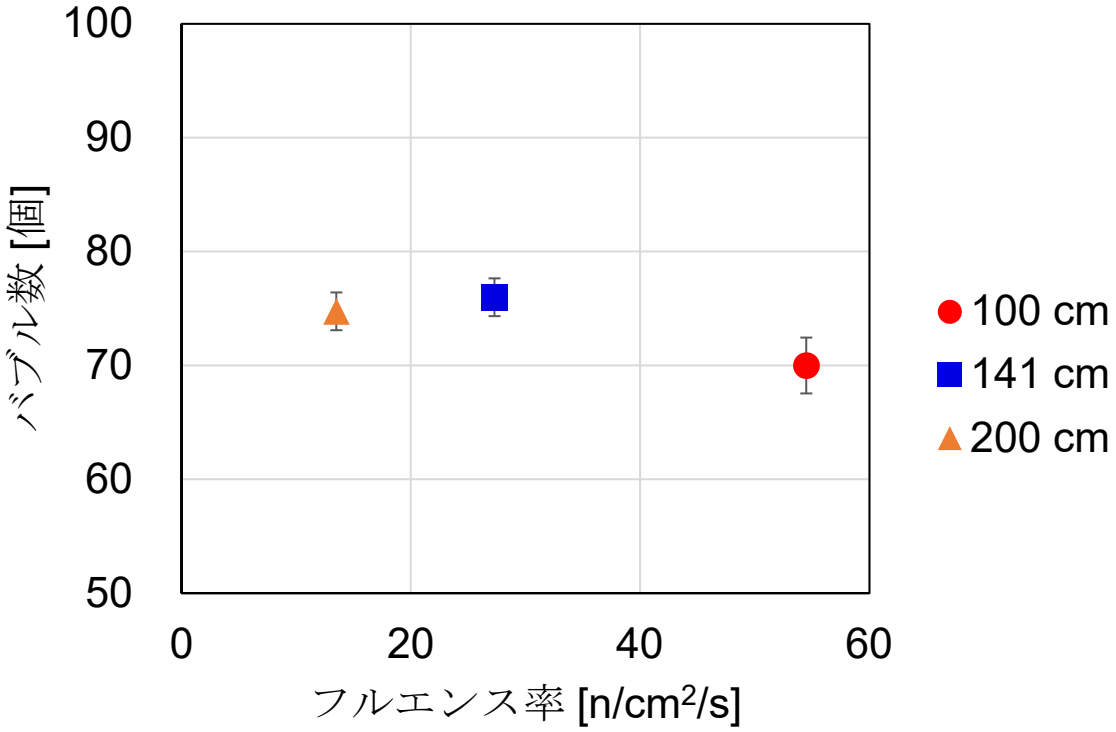

図 3.3-7　BD-PND のフルエンス率依存性

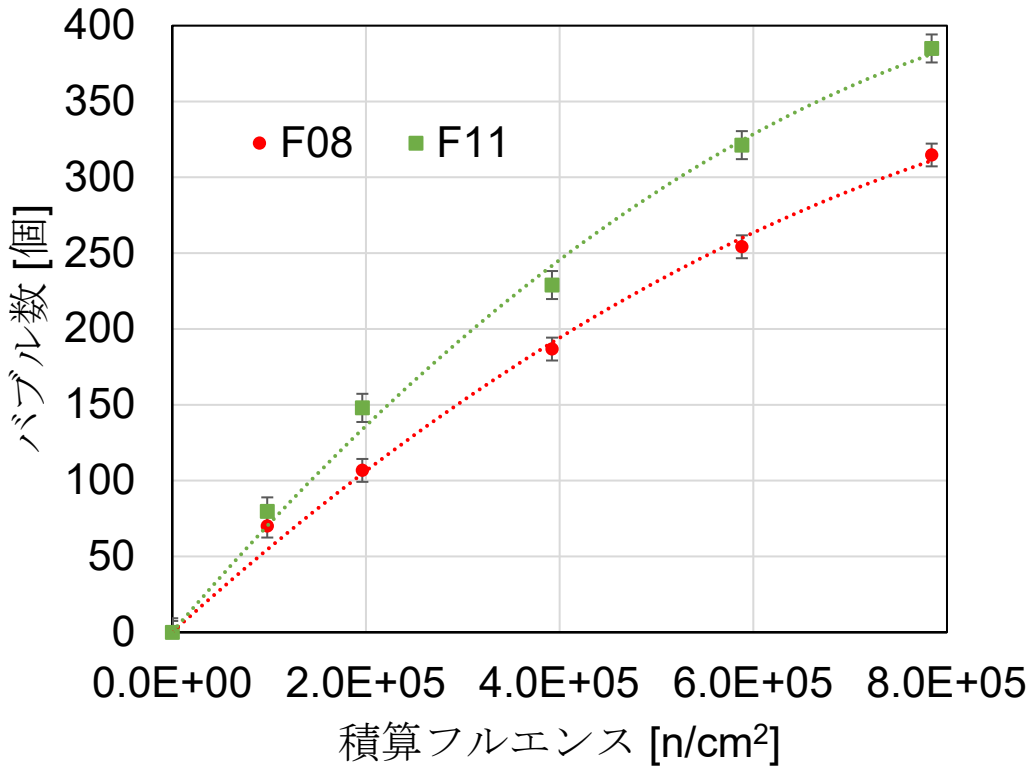

図 3.3-8　積算フルエンスに対するバブル数

3.3.8　まとめ

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、2031 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、ペデステル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。

参考文献

[3.3-1] P. D. W. Bottomley et al., Fission Product and Actinide Release from The Debris Bed Test PHEBUS FPT4: Synthesis of The Post Test Analyses and of The Revaporisation Testing of The Plenum Samples, Nucl. Eng. and Technol., 2006, vol.38, no.2, pp.163-174.

[3.3-2] W. B. Wilson et al., SOURCES 4C: A Code for Calculating (alpha,n), Spontaneous Fission, and Delayed Neutron Sources and Spectra, Los Alamos National Laboratory Report LA-UR-02-1839.

[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.

[3.3-4] J. Schulze. W. Rosenstock and H. L. Kronholz, Measurements of Fast Neutrons Bubble Detectors, Radiat. Prot. Dosimetry., vol.44, no.1-4, 1992, pp.351-354.

[3.3-5] H. Ing, R. A. Noulty and T. D. McLean, Bubble Detectors -A Maturing Technology, Radiat. Meas., vol.27, No.1, 1997, pp.1-11.

3.4　日英連携

本事業は、英国ランカスター大学（以下、英国チームと略記。）との日英共同研究である。英国チームは、以下の Work Package（WP）を担当する。

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 は日本側独自で担当する部分である。

3.4.1　令和 2 年度実施内容及び成果（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フォームと、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、重要な設計仕様と共に、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。

3.4.2　令和 3 年度実施内容及び成果

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）。

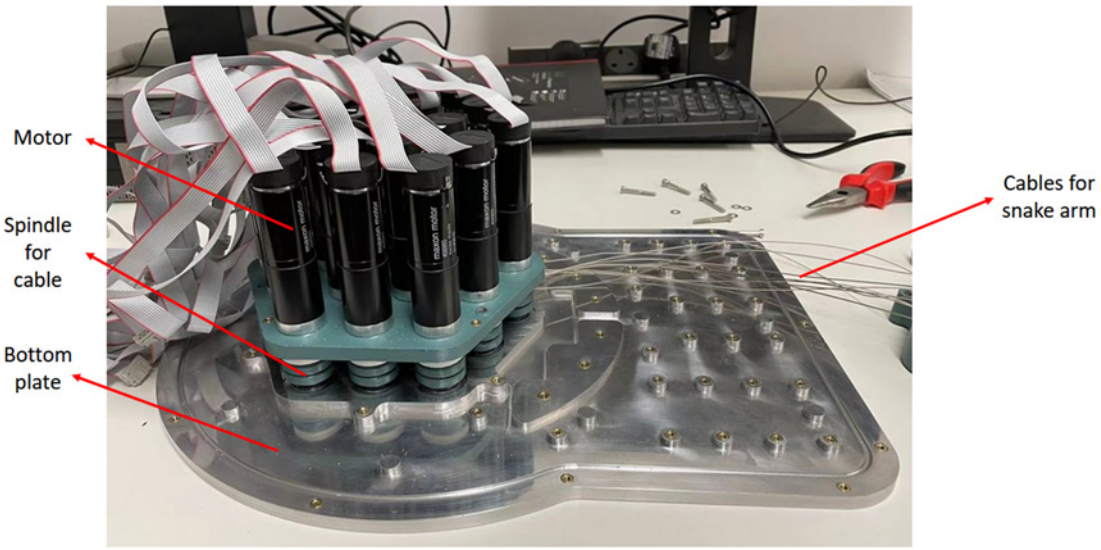

図 3.4-1　モーターユニットと追加生産された旧型スピンドルを
組み付けた状態の写真

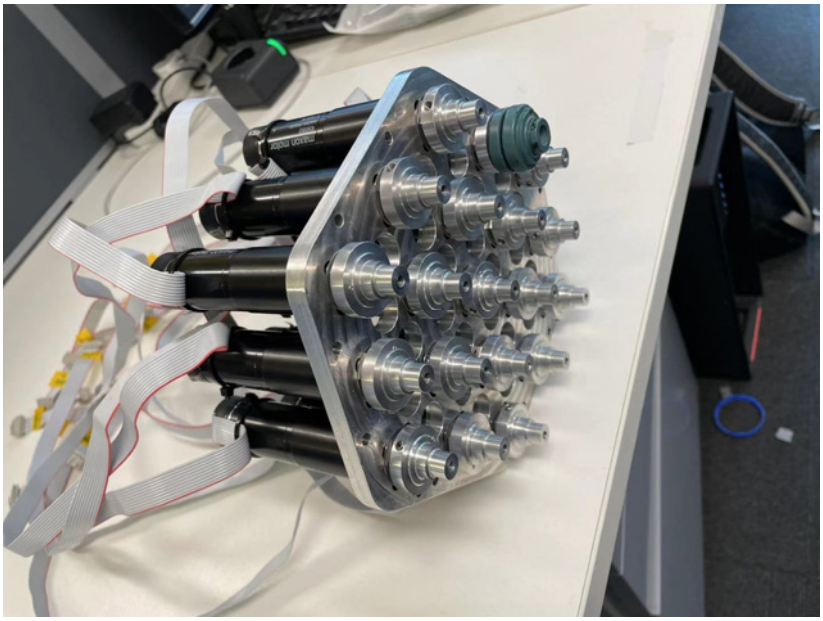

図 3.4-2　再製造されたアルミ製スピンドルとモーターサポートプレートの写真

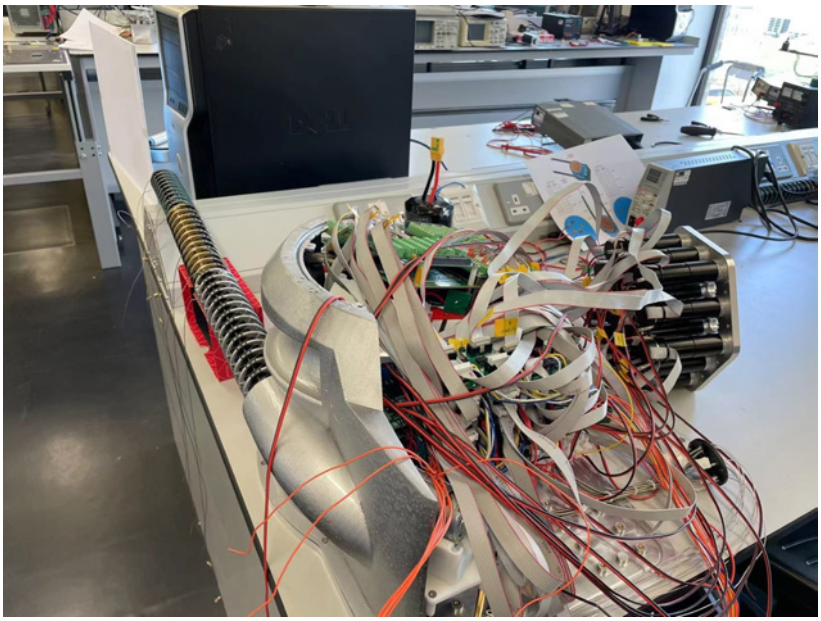

図 3.4-3　マニピュレータシステム内の電気系統の接続写真

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、問題無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、主に空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。

3.4.3　まとめと今後の予定

3D プリンタで製造したスピンドルの強度不足が判明したため、一部の部品をアルミニウムで再製造する必要が生じた。それらは切削加工で製造することになり、再設計作業と部品製造によって 1 ヵ月を超えたため、工期にわずかに遅れが生じたが、挽回可能であると判断した。一方、この再製造によってマニピュレータは、はるかに堅牢で信頼性が高くなったと言える。アウターケーシングは、必要な資材の調達に時間を要しているが事態は改善されており、ケーシングはまもなく完成する。

マニピュレータとエンドエフェクタは完成に近付いたタイミングで、制御アルゴリズムのテストと開発に焦点を移す。テストは最初、スチュワートプラットフォームを利用して、UUV と同様の移動ベースの効果をシミュレートする空中でのベンチトップテストで構成する。これは、WP3：制御アルゴリズムの開発と実装の一部として新しい制御システムを開発するのに役立ち、WP4：水中処理の実装の一部としてマニピュレータを UUV に統合することにつながるが、後者のアクティビティは 5～6 ヵ月かかる。ベンチトップテストには、「計装開発」タスクまたは WP1 の一部としての IMU や画像分析などの計装の検討も含まれ、他に外部からの遅延が無ければ、3～6 ヵ月以内にそのタスクが完了すると見込んでいる。

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。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、COVID-19 の影響による半導体部品の枯渇の問題の対応策について確認した。また、プログラムオフィサー（PO）中間フォローを同年 12 月 13 日に海技研にて、対面とウェブ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、英国側との連絡については、令和 2 年度、3 年度の 2 ヵ年間、COVID-19 の蔓延により日英双方で直接訪問できなかったため、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 日にウェブ会議を実施し、進捗の確認、COVID-19 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 Email で情報を補完した。

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、日本と英国の二国間共同研究体制の下、UUV ベースの「燃料デブリサンプルリターン技術」の開発を実施している。

以下に、3 ヵ年計画の 2 年目である令和 3 年度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）

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る。

(2) UUV プラットフォームの開発

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）が連動するための通信制御系を検討した。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フェースを設計した。

② UUV プラットフォームの開発

令和 2 年度に引き続き、PCV 内での UUV の位置を特定する自己測位システム測位向上のための改良を実施し、精度検証試験を進めた。さらに、得られる位置情報をマッピングデータと共に VR システムに連動させるインタフェース系を設計した。

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を可能とするための UUV の改良設計を英国側と連絡を取りながら実施した。

1) マッピングツールの開発では、高エネ研より中性子センサの仕様の情報を得て通信制御系の検討を進めた。水中カメラ及びソナーの撮像データ通信のためのインタフェースの設計では、仕様を策定した。

2) UUV プラットフォームの開発では、海技研と英国でウェブ会議を開催し姿勢制御の改良設計について議論したと共に、サンプリングに使うエンドエフェクタの選定について協議した。また、自己測位システムの開発として、IMU センサの性能試験を NARREC で実施し、問題点を抽出した。

(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）

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、ペデスタル内における線量率、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、ペデスタル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無いことや、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 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 ヵ年計画の 2 年目である本年度の業務項目を実施し、所期の目標を達成した。