



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—
Research and Development of the Sample-return Technique for Fuel Debris
Using the Unmanned Underwater Vehicle
(Contract Research)
-FY2020 Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource
Development Project-

福島研究開発部門 福島研究開発拠点 廃炉環境国際共同研究センター
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

January 2022

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

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—

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

(2021年10月26日受理)

日本原子力研究開発機構（JAEA）廃炉環境国際共同研究センター（CLADS）では、令和2年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業（以下、「本事業」という）を実施している。

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

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

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

本研究は、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

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

(Contract Research)

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

Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science,
Fukushima Research Institute, Sector of Fukushima Research and Development

Japan Atomic Energy Agency
Tomioka-machi, Futaba-gun, Fukushima-ken

National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology

(Received October 26, 2021)

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

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

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

Among the adopted proposals in 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 FY2020.

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 |
| 付録 成果報告書 | 11 |

Contents

| | |
|--|----|
| 1. Outline of Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project | 1 |
| 2. Accepted Proposal in FY2018..... | 2 |
| 3. Accepted Proposal in FY2019..... | 5 |
| 4. Accepted Proposal in FY2020..... | 8 |
| Appendix Result Report | 11 |

This is a blank page.

1. 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業の概要

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

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

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

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

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

2. 平成 30 年度 採択課題

平成 30 年度採択課題については以下のとおりである。

課題数：19 課題

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

平成 30 年度 採択課題一覧

共通基盤型原子力研究プログラム

【若手研究】

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

共通基盤型原子力研究プログラム

【一般研究】

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

課題解決型廃炉研究プログラム

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

国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

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

3. 令和元年度 採択課題

令和元年度採択課題については以下のとおりである。

課題数：19 課題

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

令和元年度 採択課題一覧

共通基盤型原子力研究プログラム

【若手研究】

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

共通基盤型原子力研究プログラム

【一般研究】

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

課題解決型廃炉研究プログラム

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

国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

| 課題名 | 研究代表者 | 所属機関 |
|--|-------|-------------------------------|
| 高い流動性および陰イオン核種保持性を有するアルカリ刺激材料の探索と様々な放射性廃棄物の安全で効果的な固化 | 佐藤 努 | 北海道大学 |
| 再臨界前の中性子線増に即応可能な耐放射線 FPGA システムの開発 | 渡邊 実 | 静岡大学 (令和2年度 まで) 岡山大学 |

国際協力型廃炉研究プログラム（日露共同研究）

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

研究人材育成型廃炉研究プログラム

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

4. 令和2年度 採択課題

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

公募期間：令和2年3月17日～令和2年5月14日（課題解決型）
令和2年5月13日～令和2年7月15日（国際協力型）

課題数：10 課題

課題解決型廃炉研究プログラム 8 課題（若手研究2 課題、一般研究6 課題）
国際協力型廃炉研究プログラム 2 課題（日英共同研究）

これらの提案について、外部有識者から構成される審査委員会において、書面審査及び面接審査、日英共同研究については二国間の合同審査を実施し、採択候補課題を選定した。

その後、PD（プログラムディレクター）・PO（プログラムオフィサー）会議での審議を経て、採択課題を決定した。

令和2年度 採択課題一覧

課題解決型廃炉研究プログラム

【若手研究】

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

課題解決型廃炉研究プログラム

【一般研究】

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

国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

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

本報告書は、以下の課題の令和2年度の研究成果を取りまとめたものである。

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 2 年度

日本原子力研究開発機構
英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業

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 R02I150)

成果報告書

令和 3 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年度の研究成果を取りまとめたものです。

目次

| | |
|----------------------------------|---------|
| 概略 | vii |
| 1. はじめに | 1. 1-1 |
| 2. 業務計画 | 2. 1-1 |
| 2.1 全体計画 | 2. 1-1 |
| 2.2 令和2年度の成果の目標及び業務の実施方法 | 2. 2-2 |
| 3. 令和2年度の実施内容及び成果 | 3. 1-1 |
| 3.1 高耐放射線小型中性子センサーの開発 | 3. 1-1 |
| 3.1.1 微細構造半導体中性子検出器の特性評価 | 3. 1-1 |
| 3.1.2 耐放射線集積回路の検討 | 3. 1-11 |
| 3.1.3 水中を模擬した中性子照射場の整備 | 3. 1-13 |
| 3.2 UUVプラットフォームの開発 | 3. 2-1 |
| 3.2.1 燃料デブリマッピングツールの開発 | 3. 2-1 |
| 3.2.2 UUVプラットフォームの開発 | 3. 2-3 |
| 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 | 3. 3-1 |
| 3.3.1 はじめに | 3. 3-1 |
| 3.3.2 放射線源モデルの作成 | 3. 3-1 |
| 3.3.3 3次元プラントモデルの構築 | 3. 3-2 |
| 3.3.4 ガンマ線輸送計算の試解析 | 3. 3-3 |
| 3.3.5 まとめ | 3. 3-5 |
| 3.3.6 令和3年度計画 | 3. 3-5 |
| 3.4 研究推進 | 3. 4-1 |
| 3.4.1 日英共同研究 | 3. 4-1 |
| 3.4.2 英国側の令和2年度実施項目の概要 | 3. 4-1 |
| 3.4.3 作業工程における課題 | 3. 4-1 |
| 3.4.4 マニピュレータの概念設計 | 3. 4-1 |
| 3.4.5 今後の予定 | 3. 4-2 |
| 4. 結言 | 4-1 |
| 参考文献 | 5-1 |

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 | 鎌田創 |
| 分担代表者 | 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 | 萩原雅之 |
| 連携代表者 | 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 |
| | 大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構 | 教授 | 田中真伸 |
| | 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 |
| | 大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構 | 技師 | 大山隆弘 |
| | 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 | 専門研究員 | 西村和哉 |
| | 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 | 職員 | 寺島顕一 |

表一覧

| | | |
|-----------|----------------------------------|--------|
| 表 3.1.2-1 | MSND 用線集積回路の開発仕様..... | 3.1-12 |
| 表 3.2.2-1 | 水中測位現状技術の特性比較..... | 3.2-4 |
| 表 3.2.2-2 | AI 出力からの計算角と正解データ作成時の計算角の差 | 3.2-10 |

図一覧

| | | |
|------------|---|--------|
| 図 2.1-1 | 本業務の全体計画図..... | 2.1-1 |
| 図 2.1-2 | 本業務の実施体制図..... | 2.2-1 |
| 図 3.1.1-1 | Si に対する阻止能と飛程..... | 3.1-2 |
| 図 3.1.1-2 | ⁶ LiF に対する阻止能と飛程..... | 3.1-2 |
| 図 3.1.1-3 | 検出器構造の比較..... | 3.1-3 |
| 図 3.1.1-4 | MSND のパッケージ図面..... | 3.1-4 |
| 図 3.1.1-5 | MSND パッケージの写真と多重構造の内部写真..... | 3.1-4 |
| 図 3.1.1-6 | 試験用センサー..... | 3.1-5 |
| 図 3.1.1-7 | MSND の前置増幅器出力信号..... | 3.1-6 |
| 図 3.1.1-8 | 黒鉛パイルの外観と寸法..... | 3.1-7 |
| 図 3.1.1-9 | 波形整形増幅器の時定数に対する熱中性子照射場における波高分布..... | 3.1-8 |
| 図 3.1.1-10 | 速中性子照射体系..... | 3.1-9 |
| 図 3.1.1-11 | ガンマ線、速中性子線照射に対する MSND の波高分布..... | 3.1-10 |
| 図 3.1.2-1 | MSND 用の信号処理集積回路のダイナミックレンジ特性..... | 3.1-12 |
| 図 3.1.2-2 | MSND 用の信号処理集積回路の雑音特性..... | 3.1-12 |
| 図 3.1.2-3 | MSND 用の信号処理集積回路の評価ボード..... | 3.1-13 |
| 図 3.1.3-1 | プロトタイプ中性子センサーの信号処理回路ブロック図..... | 3.1-14 |
| 図 3.1.3-2 | プロトタイプ中性子センサーの筐体寸法と回路写真..... | 3.1-15 |
| 図 3.1.3-3 | PHITS による直径 1 m×長さ 1 m の水槽モデルと熱中性子束分布..... | 3.1-16 |
| 図 3.1.3-4 | PHITS による直径 1 m×長さ 1 m の水槽モデルのガンマ線と全中性子束分布 | 3.1-17 |
| 図 3.1.3-5 | PHITS による直径 30 cm×長さ 1 m の水槽モデルと熱中性子束分布..... | 3.1-17 |
| 図 3.1.3-6 | 製作した直径 30 cm ×長さ 1 m の水槽の写真と使用する ²⁵² Cf 線源の図面..... | 3.1-18 |
| 図 3.2.1-1 | 点群データに変換したソナーデータ..... | 3.2-2 |
| 図 3.2.1-2 | VR コンテンツに投影した点群データ..... | 3.2-2 |
| 図 3.2.2-1 | 天頂カメラとマーカの設置..... | 3.2-4 |
| 図 3.2.2-2 | ROV 内リング状 LED 光源（緑、赤）..... | 3.2-4 |
| 図 3.2.2-3 | 水面上のフロート（左）及び水中のロケータとレスポンドの位置関係（右）..... | 3.2-5 |
| 図 3.2.2-4 | フロートを水槽に設置した様子..... | 3.2-5 |
| 図 3.2.2-5 | モニタに表示されるレスポンドとロケータの位置..... | 3.2-5 |
| 図 3.2.2-6 | 実験体系概念図（上から見た図）..... | 3.2-6 |
| 図 3.2.2-7 | 半円筒状模擬体（左）及びソナー保持材と回転ビームソナー（右）..... | 3.2-6 |
| 図 3.2.2-8 | ペDESTAL 外壁模擬体表面に貼付した配電盤等の模擬材..... | 3.2-7 |
| 図 3.2.2-9 | 角水槽に設置したステンレス製模擬体のソナー出力画像..... | 3.2-7 |
| 図 3.2.2-10 | UVV の位置と Plant North の関係..... | 3.2-8 |
| 図 3.2.2-11 | UVV の位置から円弧までの最短距離方向..... | 3.2-8 |
| 図 3.2.2-12 | 学習用に作成した画像データの例..... | 3.2-9 |
| 図 3.2.2-13 | 学習プロセス概略..... | 3.2-9 |
| 図 3.2.2-14 | テスト用入力データ..... | 3.2-10 |

| | | |
|------------|---|--------|
| 図 3.2.2-15 | 学習済み DeepCrack の出力 | 3.2-10 |
| 図 3.2.2-16 | 欠けた部分が大きく、 θ の計算に支障が出そうなケースの例 | 3.2-11 |
| 図 3.2.2-17 | 画像処理による円弧の抽出プロセス | 3.2-12 |
| 図 3.2.2-18 | 所望の位置に円が抽出できたケース | 3.2-12 |
| 図 3.2.2-19 | 対象円を抽出できたが、それ以外の箇所にも同じ半径を持つ円があるケース | 3.2-13 |
| 図 3.2.2-20 | 対象円を抽出できたが、半径により唯一に絞り込めなかったケース | 3.2-13 |
| 図 3.3-1 | 3号機の3次元プラントモデル | 3.3-2 |
| 図 3.3-2 | 3号機の炉内線量率分布予測(2031年3月) | 3.3-3 |
| 図 3.3-3 | A点(図3.3-2参照)付近での光子フラックス | 3.3-4 |
| 図 3.3-4 | PCV内の水位を変更した3号機の3次元プラントモデル | 3.3-4 |
| 図 3.3-5 | PCV内の水位を(a)4.3mと(b)2.3mに変更した3号機の炉内線量率分布 | 3.3-5 |
| 図 3.4-1 | 連続体のスネーク型マニピュレータを統合したUUVの概念図 | 3.4-1 |

略語一覧

| | |
|-------|---|
| JAEA | : Japan Atomic Energy Agency (国立研究開発法人日本原子力研究開発機構) |
| CLADS | : Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science (廃炉環境国際共同研究センター) |
| 1F | : 東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所 |
| FP | : Fission Product (核分裂生成物) |
| PCV | : Primary Containment Vessel (原子炉格納容器) |
| RPV | : Reactor Pressure Vessel (原子炉圧力容器) |
| S/C | : Suppression Chamber (圧力抑制室) |
| PHITS | : Particle and Heavy Ion Transport code System (粒子・重イオン輸送計算コード) |
| UUV | : Unmanned Underwater Vehicle (無人航走体) |
| MSND | : Micro-structured Semiconductor Neutron Detector (微細構造半導体中性子検出器) |
| VR | : Virtual Reality (仮想現実) |
| NIST | : National Institute of Standards and Technology (アメリカ国立標準技術研究所) |
| SRIM | : the Stopping and Range of Ion in Matter |
| EVLS | : External Vision Localization System Characterization |
| GPS | : Global Positioning System |
| LBL | : Long Base Line (長基線) |
| SBL | : Short Base Line (短基線) |
| SSBL | : Super Short Base Line (超短基線) |
| INS | : Inertial Navigation System (慣性航法) |
| 海技研 | : 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 |
| 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 |
| IRID | : International Research Institute for Nuclear Decommissioning (技術研究組合国際廃炉研究開発機構) |
| 東電HD | : 東京電力ホールディングス株式会社 |
| RDT | : Radiation Detection Technologies, Inc. |

概略

東京電力ホールディングス株式会社（以下、「東電HD」と略す。）福島第一原子力発電所（以下、「1F」と略す。）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等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にないためである。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 (Primary Containment Vessel : 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ー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 : UUV) 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中性子センサーを開発する。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、高エネルギー加速器研究機構（以下、「高エネ研」と略す。）が、高耐放射線小型高効率中性子センサーを開発し、海上・港湾・航空技術研究所（以下、「海技研」と略す。）が、UUVプラットフォーム開発を通して、中性子センサー等のセンサー類と、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、「JAEA」と略す。）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ヶ年で実施され、令和2年度は1年目である。以下に、令和2年度業務を示す。

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（以下、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：RPV）底部のみならず、原子炉格納容器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6 m）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。更に、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ー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ーを開発する。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ーの開発

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、デブリセンサー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微細構造

半導体中性子検出器 (Micro-structured Semiconductor Neutron Detector : 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ーを開発する。

(2) UUV プラットフォーム開発

前項(1)で開発する中性子センサー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、中性子センサーの計数情報を 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、JAEA 楢葉遠隔技術開発センター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

PHITS 等の粒子輸送モンテカルロ計算により、デブリ性状 (熔融デブリや 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、検出器応答等) 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開発

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。

| 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ーの開発 (高エネルギー加速器研究機構) | 中性子源整備 信号処理回路設計 | 中性子検出器特性評価 信号処理回路製作 | 照射試験 ASIC 製作・評価、UUV 搭載検討 |
| 2. UUV プラットフォームの開発 (海上・港湾・航空技術研究所) | マッピングツールとVR 連動ソフト設計 測位システム設計 | マッピングツール・サンプリングツール通信制御設計 測位システム開発・試験とサンプリングツール搭載設計 | 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 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 (JAEA) | γ線輸送試解析 | ガンマ線・中性子線特性解析 積算中性子線量計照射試験 | MOX 燃料由来放射線特性の検討 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

図 2.1-2 に実施体制図を示す。

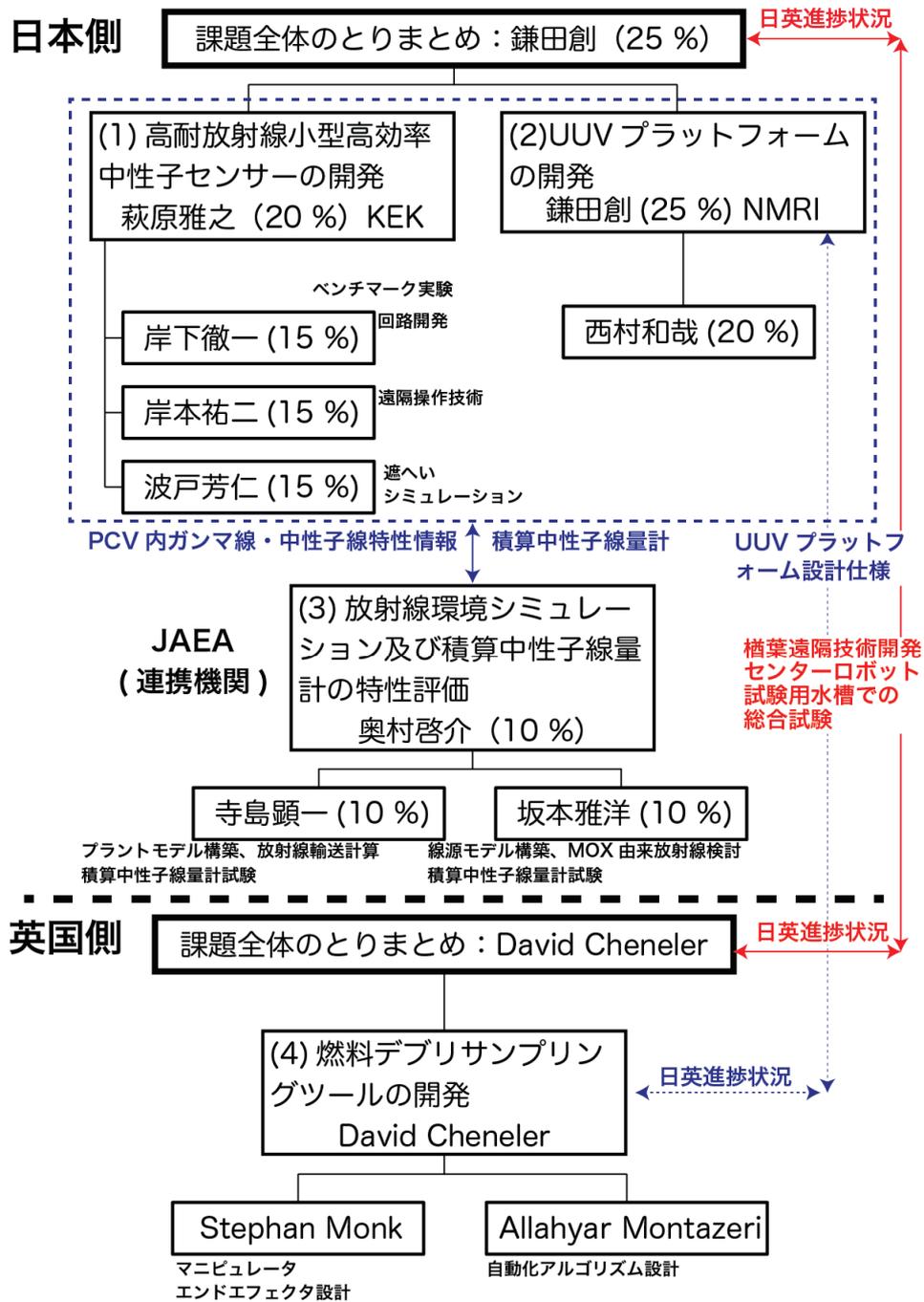


図 2.1-2 本業務の実施体制図

2.2 令和2年度の成果の目標及び業務の実施方法

令和2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ーの開発

中性子センサーとして米国 RDT 社の 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を行い、アルファ線源等を用いた特性試験を行う。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

開発する中性子センサー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する。議論の上、通信・制御回路とインターフェースを設計する。さらに、水中カメラ、ソナーの撮像データを仮想現実 VR に投影するためのツールを検討する。

②UUV 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、測位精度向上方を講じる。

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等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

東電 HD 及び技術研究組合国際廃炉研究開発機構（以下、「IRID」と略す。）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する。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する。

(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（CLADS）等との連携を密にして、研究を進める。また、研究実施計画を推進するための打合せや会議等を、英国側実施機関との打合せを含め、開催する。

3. 令和2年度の実施内容及び成果

3.1 高耐放射線小型中性子センサーの開発

事故時に放出された Cs 等の汚染による高ガンマ線環境（数十 Gy/h）下において、燃料デブリを検知するためには、ガンマ線感度が低いセンサーを用いて燃料デブリに含まれるウランやアクチノイド核種から放出される、自発核分裂反応や（ α , n）反応に起因する僅かな中性子を検出することが有効である。本事業では、水中ロボットに搭載可能な高耐放射線小型中性子センサーの開発を目標として、1) MSND [3.1-2]の特性評価とその信号処理回路の設計、2) 水中を模擬した中性子照射場の整備を行った。

令和2年度は、令和3年度以降に実施する水中を模擬した中性子照射試験の準備期間として位置付け、MSNDや信号処理回路設計に必要な計測器、中性子線源を挿入可能な簡易水槽等を整備するとともに、汎用の信号処理回路を用いて MSND の中性子やガンマ線に対する感度評価を行った。また、粒子輸送モンテカルロ計算用の簡易水槽のモデリングを行い、 ^{252}Cf 線源による応答関数の試解析を行った。以下にその具体的な内容を記述する。

3.1.1 微細構造半導体中性子検出器（MSND）の特性評価

高いガンマ線環境下において、燃料デブリから放出される中性子を検出するためには、中性子起因の信号とガンマ線起因の信号の弁別性を高くすることやガンマ線の感度を小さくすることが重要である。ガンマ線のバックグラウンド信号は、センサー構成物質とガンマ線の相互作用によって生じる二次電子がセンサーの有感層にエネルギーを付与することによって生じる。ガンマ線の相互作用しやすさは物質の原子番号に依存して大きくなるため、ガンマ線のバックグラウンドを抑えるためには、なるべく原子番号の小さい元素でセンサーを構成することが望ましく、半導体検出器をセンサーとして用いる場合はケイ素や炭素で構成されている素子が有効である。中性子の検出には、熱中性子反応断面積（941 barn）と反応後の放出エネルギー（ ^3H ：2.73 MeV、 α ：2.05 MeV）が共に大きい $^6\text{Li}(n, ^3\text{H})\alpha$ 反応等が中性子-荷電粒子換反応として用いられる。図 3.1.1-1 にアメリカ国立標準技術研究所（National Institute of Standards and Technology：NIST）が提供するデータベース[3.1.2-4]から取得したケイ素に対する電子の阻止能と SRIM（the Stopping and Range of Ions in Matter）2013 コードにより計算した ^3H や α 粒子の荷電粒子の阻止能を示すが、0.1~2 MeVの領域において2桁以上の違いがあることが分かる。これら荷電粒子と電子の阻止能の違いを利用して、センサーの有感層を荷電粒子の飛程程度にまで薄くすることで、中性子感度を下げることなく、ガンマ線に対する感度を下げることが可能となる。図 3.1.1-1 と図 3.1.1-2 に SRIM2013 コードにより計算したケイ素（天然組成、密度2.32g/cm³）や ^6LiF （ ^6Li 95%濃縮、密度0.84 g/cm³）に対する ^3H と α 粒子の飛程を示すが、2.73 MeVの ^3H のケイ素中の飛程は43 μm となり、2.05 MeVの α 粒子は7.5 μm と評価される。

近年、米国カンザス州立大学において、世界的に枯渇している ^3He ガスを用いた熱中性子検出器の代替品として、半導体エッチング技術によってシリコン半導体検出器をストライプ状に微細加工し、薄型PIN型シリコン半導体検出器を挟み込むように ^6LiF 中性子コンバータを多層配置することで、中性子検出効率を大幅に向上させたMSNDが開発された。図 3.1.1-3 に従来の単層構造の中性子検出器とMSND構造の模式図と図 3.1.1-4 と図 3.1.1-5 にMSNDパッケージ図面や写真を示す。MSND構造では、 ^6LiF 中性子コンバータに検出器の有感層が接する面積が大きくなり、 ^6LiF から放出される荷電粒子を効率よく検出することができる。また、

有感層の厚さを薄くすることにより、ガンマ線由来の二次電子に対する感度を低減することに成功している。

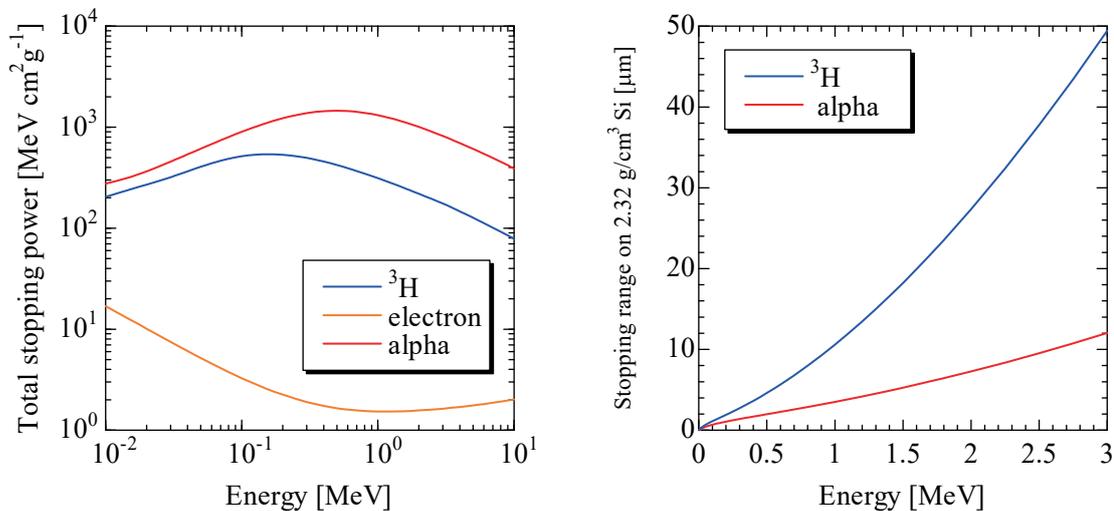


図 3.1.1-1 Si に対する阻止能と飛程
左図が電子と ^3H 、 α の阻止能、右図が ^3H と α の飛程

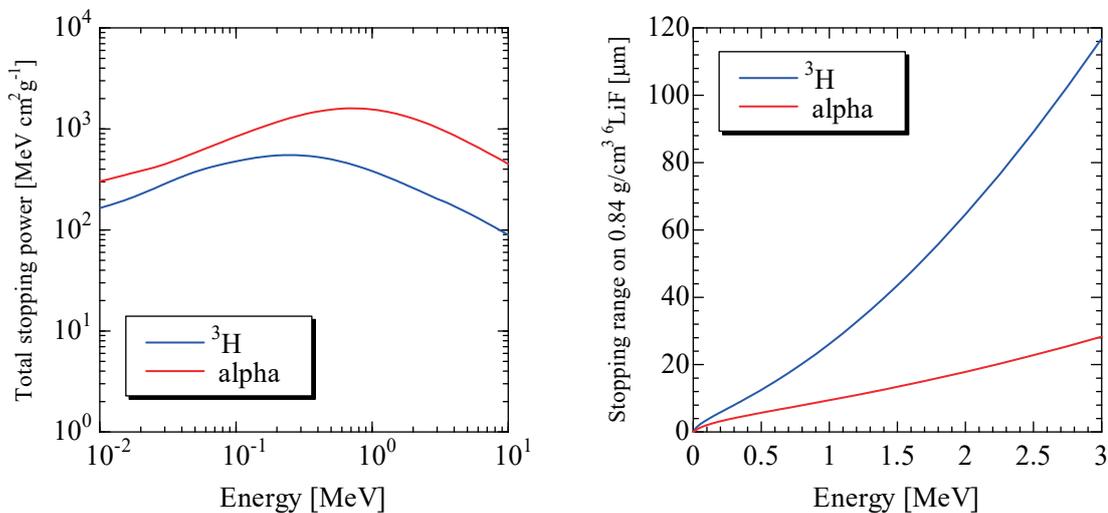


図 3.1.1-2 ^6LiF に対する阻止能と飛程
左図が ^3H と α の阻止能、右図が ^3H と α の飛程

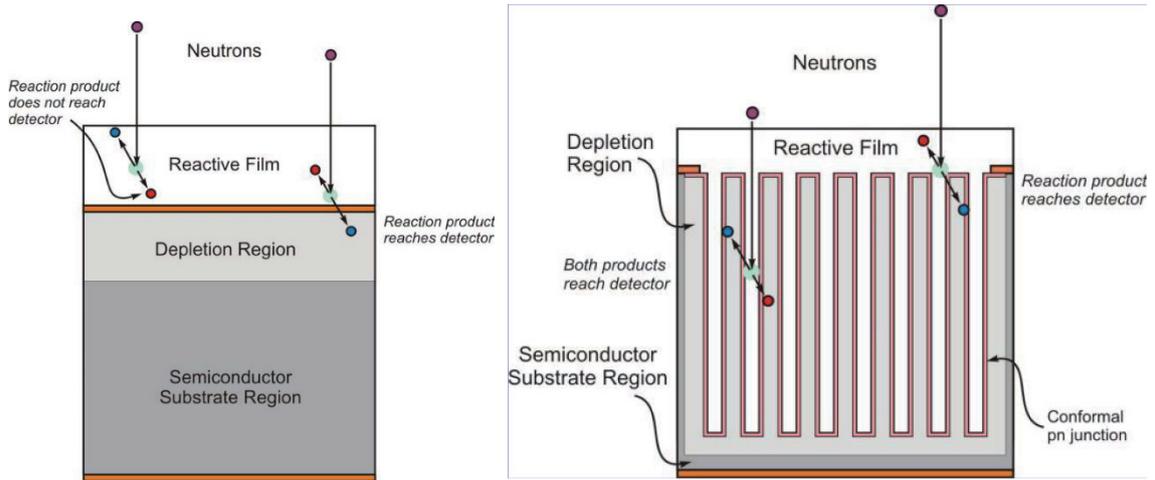
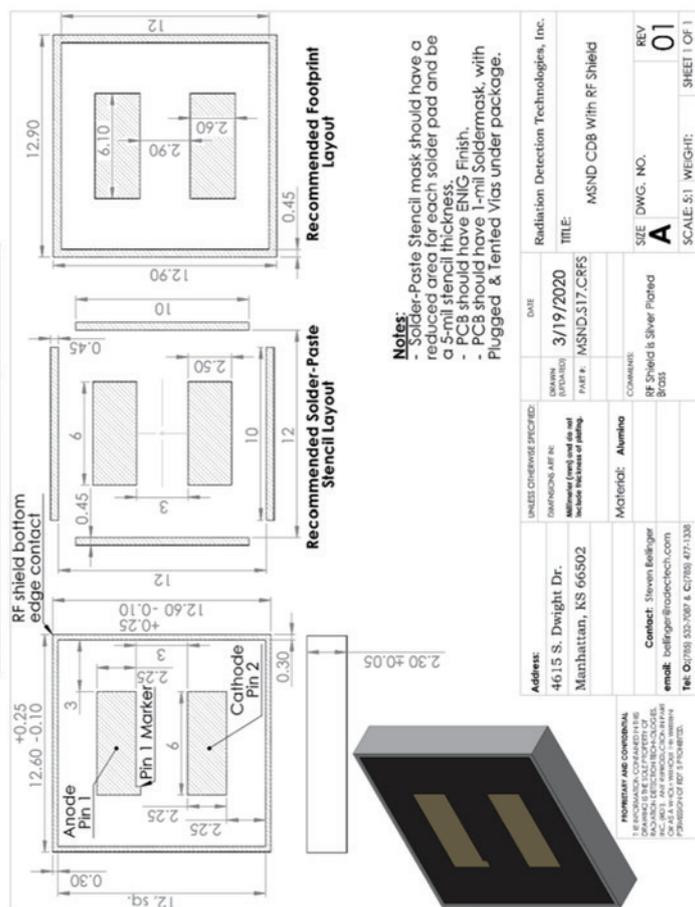


図 3.1.1-3 検出器構造の比較
 左図が従来の単層構造、右図が MSND 構造

AGF-series MSND Package Drawing



Contact us: (785) 532-7087
 123 Ward Hall
 Manhattan, KS 66506
 12/31/2020
 6



図 3.1.1-5 MSND パッケージの写真と多重構造の内部写真

図 3.1.1-4 MSND のパッケージ図面 (Rotunda Scientific Technologies より許諾を得て転載)

(1) MSND 特性評価試験のセットアップ

本事業では、ROV に搭載し高ガンマ線環境 (数十 Gy/h) 下において自発核分裂や (α, n) 反応起因の中性を連続的に検出できる高耐放射線小型中性子センサーを開発することを目標としている。そのため、小型低電力 (12.6×12.6×2.4 mm、定格動作電圧 2.5 V) かつガンマ線起因のバックグラウンド信号に対する中性子起因の信号の比 (S/N 比) が高い MSND をセンサー素子として選択した。中性子イベントとガンマ線イベントは、MSND が出力する信号の大きさの違いを利用して弁別する。中性子起因の信号とガンマ線起因の信号の大きさの隔たりが大きいほど S/N 比は高くなるが、高ガンマ線環境では高計数率になることが予想されパイルアップによる偽計数の影響を考慮すると出力信号の時間幅は短ければ短いほど好ましい。一般的に波形整形の時定数を大きくするとエネルギー分解能は向上するが、出力信号の時間幅は長くなるため、中性子・ガンマ線弁別とパイルアップ影響を考慮した信号処理回路の最適化が必要である。

図 3.1.1-4 や図 3.1.1-5 に示す MSND 素子を汎用信号処理回路に接続するため、図 3.1.1-6 (a) (b) に示すようにプリント基板に取り付けた MSND を BNC コネクタ付きのアルミニウムケース内に格納したものを作製し、試験用センサーとして用いた。MSND に最適な波形整形の時定数を調査するために、試験用センサーを図 3.1.1-6 (c) に示す汎用前置増幅器、波形整形増幅器、波高分析器からなる波高分布測定回路に接続し、中性子線源やガンマ線源を用いた照射試験を行った。図 3.1.1-7 に熱中性子起因の前置増幅器出力信号とガンマ線起因の前置増幅器出力信号の例を示す。典型的な熱中性子起因の信号はガンマ線起因の信号に比べて 4 倍以上の波高値を持っている。

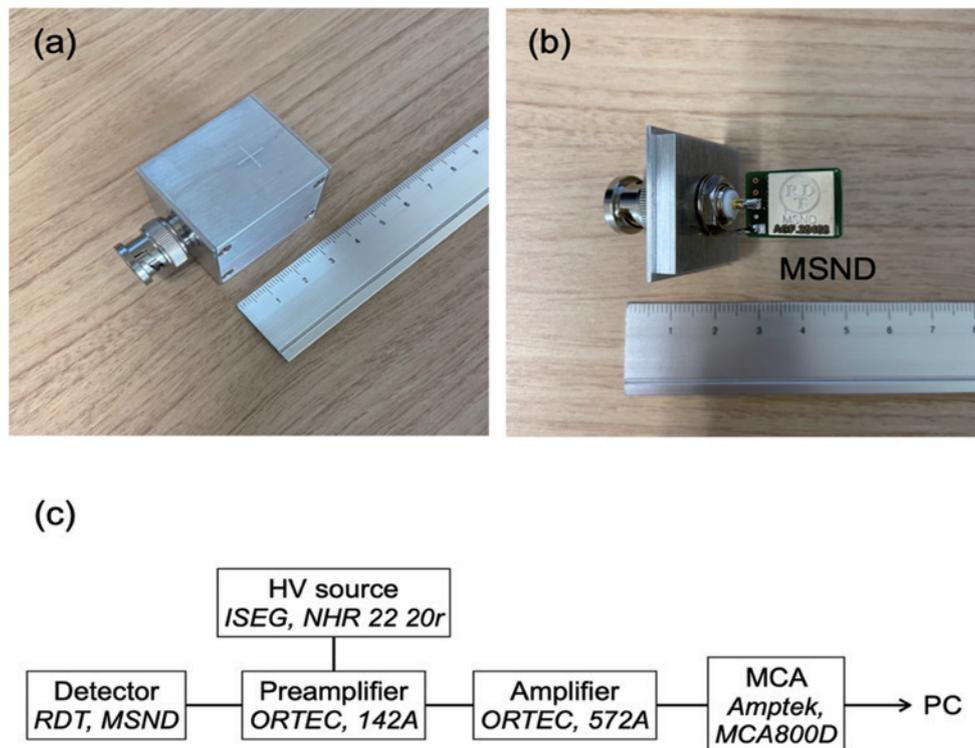


図 3.1.1-6 試験用センサー

(a) 外観、(b) アルミケースを取り外した時の外観、(c) 波高分布測定に用いた測定回路

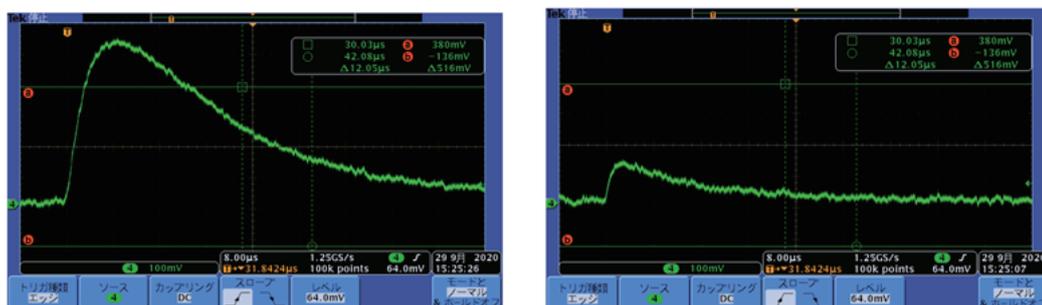


図 3.1.1-7 MSND の前置増幅器出力信号
 左図は熱中性子起因の信号、右図はガンマ線起因の信号

(2) 熱中性子標準場における照射試験

高エネ研の熱中性子標準場（KEK 黒鉛パイル）において熱中性子の照射試験を実施した。図 3.1.1-8 に約 300 個の黒鉛ブロックによって構成された、KEK 黒鉛パイル（高さ約 190×幅約 250×奥行き約 190 cm³）の外観を示す。本試験では、上面の線源孔 S2 に上面から直方体の中心に ²⁴¹Am-Be（37 GBq）中性子線源を挿入して生成される熱中性子場を用いた。

試験用センサーは黒鉛パイル側面から中心に向かう 10×10 cm の検出器挿入孔（Central hole）に挿入し、最奥の位置で照射した。この位置での熱中性子束は PHITS を用いて $1.39 \times 10^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ と評価した。図 3.1.1-9 に波形整形増幅器の時定数を 0.5～10 µs に変えて測定した波高分布を示す。²⁴¹Am-Be（37 GBq）から中性子だけでなく 4.43 MeV のガンマ線も放出されるため、中性子起因の信号だけでなく、低波高部分にガンマ線起因の信号も観測される。波形整形増幅器の時定数を 0.5 µs にして得られた波高分布は低波高側から高波高側へ連続的な分布を示しており、明瞭なガンマ線イベントと中性子イベントの弁別が難しいことが分かる。一方、整形時定数を 1 µs 以上になると、低波高側から高波高側の間に明瞭な谷が見られ、中性子起因の信号の波高値に対して、ガンマ線起因の信号の波高値は小さな値に抑えられている。従って、1 µs 以上の時定数で適切な位置に波高しきい値を設定することで、中性子起因の信号のみを弁別することが可能である。熱中性子束と計数率から MSND の熱中性子検出効率は $1.3 \times 10^{-2} \text{ cps/nv}$ と求められた。

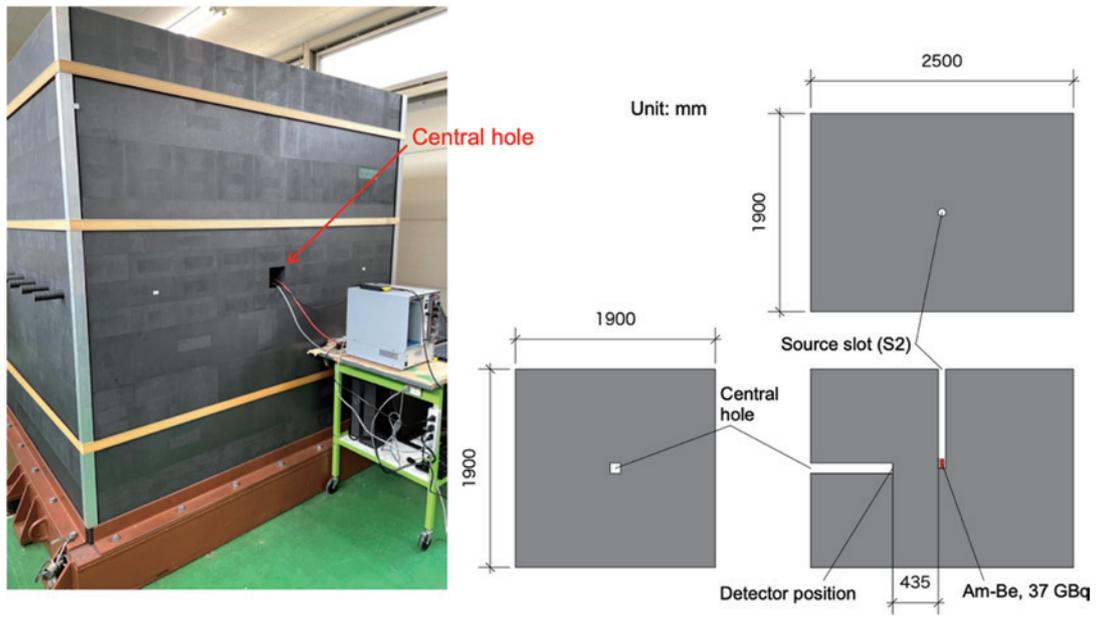


図 3.1.1-8 黒鉛パイルの外観と寸法

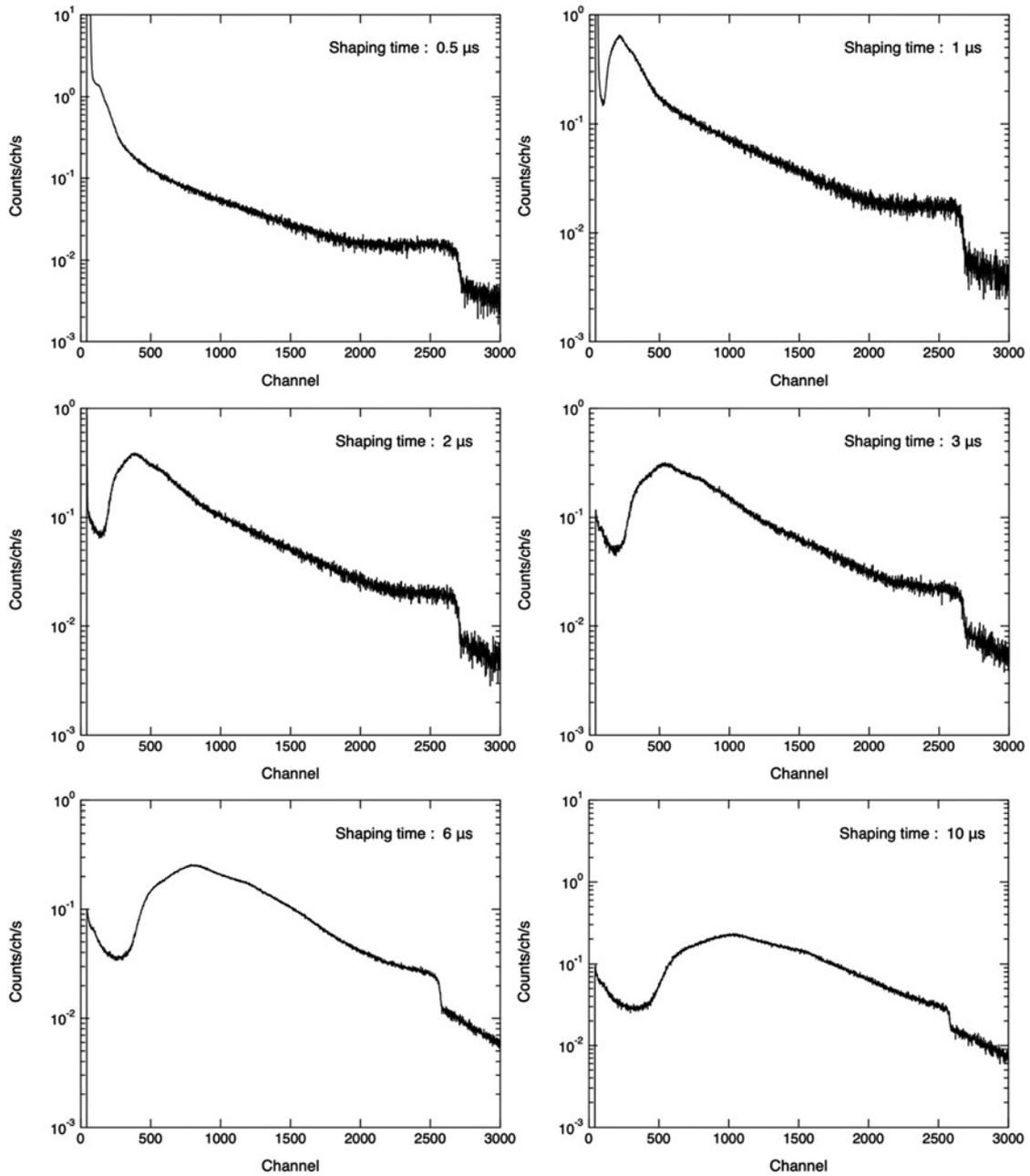


図 3.1.1-9 波形整形増幅器の時定数に対する熱中性子照射場における波高分布

(3) ガンマ線、高速中性子照射試験

MSND のガンマ線に対する応答の評価には ^{137}Cs (1 MBq) 及び ^{60}Co (1 MBq) 線源を、速中性子の応答の評価には、 $^{241}\text{Am-Be}$ (37 GBq) 線源を使用した。

線源と検出器間の距離は、ガンマ線照射の場合で 4 cm、速中性子照射の場合で 74 cm とした。速中性子照射は、室内で散乱されて検出器に入射する中性子の寄与を抑えるために、グレーチング床上で行った。図 3.1.1-10 に中性子照射体系を示す。中性子弁別のための波高しきい値付近でガンマ線の応答関数は約 10^{-7} cm^2 であることが分かった。速中性子の寄与は小さく、ガンマ線と同様に波高弁別が可能であり、 ^{137}Cs と ^{60}Co では、ガンマ線のエネルギーの違い (^{137}Cs : 662 keV と ^{60}Co : 1173 keV, 1333 keV) により、 ^{60}Co の方が高波高側にテールが延びることが分かった (図 3.1.1-11 参照)。

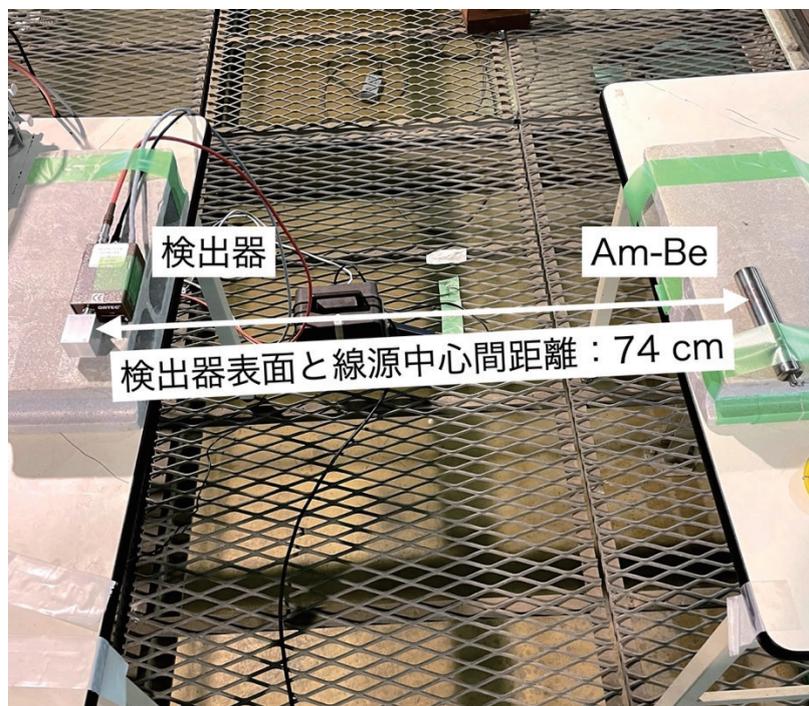


図 3.1.1-10 速中性子照射体系

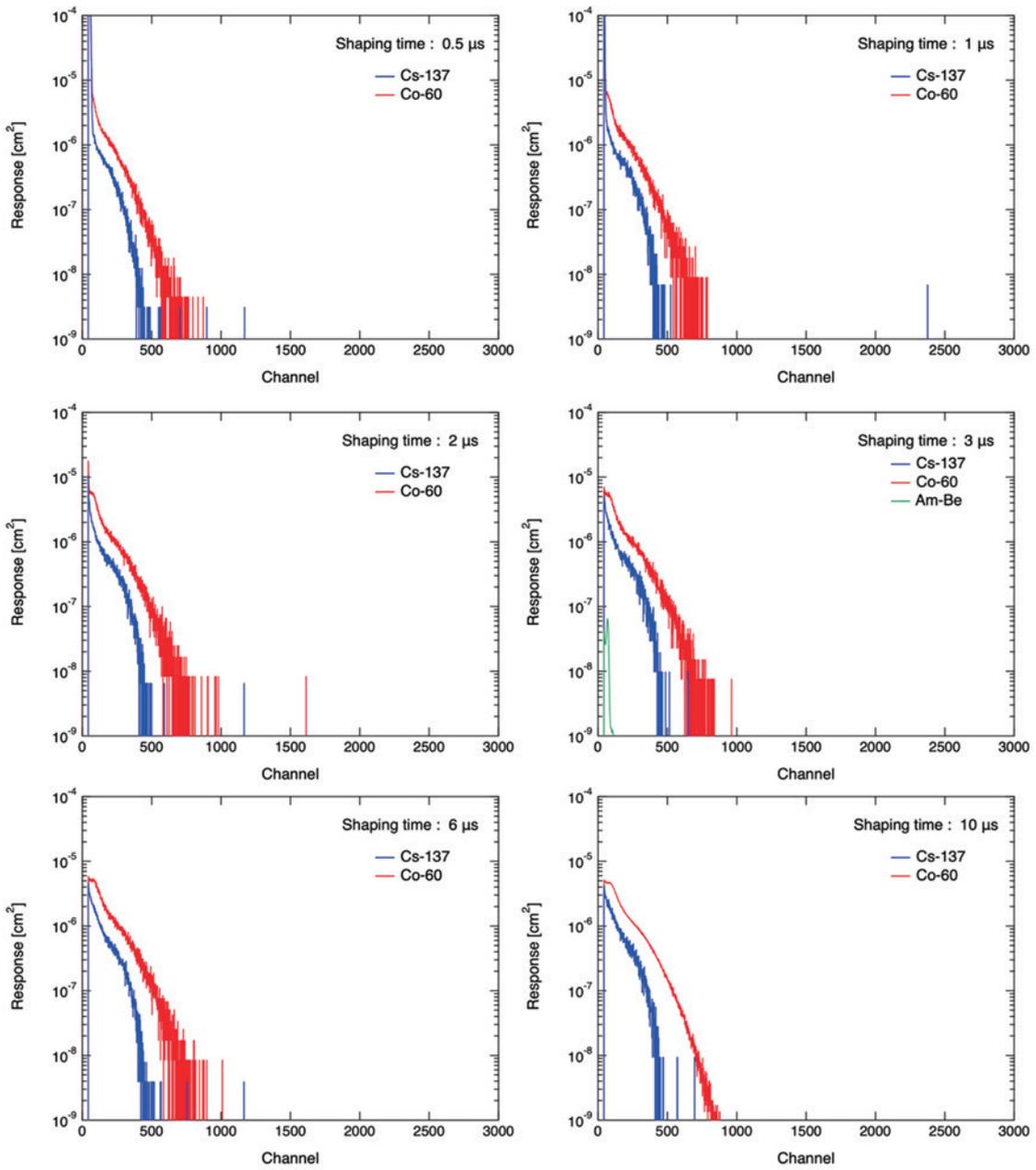


図 3.1.1-11 ガンマ線、速中性子線照射に対する MSND の波高分布

3.1.2 耐放射線集積回路の検討

本事業で使用する米国 RDT 社の MSND は ${}^6\text{LiF}$ を中性子コンバータとした中性子検出器であり、 ${}^6\text{Li}(n, {}^3\text{H})\alpha$ 反応で生成される α 粒子もしくは ${}^3\text{H}$ 粒子をシリコン半導体検出器で検出する。MSND の特徴としては、エッチング技術によって彫ったシリコン半導体検出器の溝に ${}^6\text{LiF}$ を充填させているため、熱中性子の反応率及び ${}^6\text{Li}$ から生成される荷電粒子の検出効率が大きく、中性子検出器としての感度が良い。しかしながら、この構造に起因して検出器容量が大きくなるために信号処理回路の設計には注意を要する。検出器容量の増加はセンサーの信号処理に起因する雑音を増大させ、センサー内に生成された電荷の収集時間を遅らせる。これを解決するために MSND に特化した耐放射線信号処理回路が必要となる。

表 3.1.2-1 に開発仕様を示す。検出器容量は MSND のバイアス電圧に依存しているため 100 pF から 300 pF までの幅を持つ。一方検出器からの信号は α 線の放出エネルギーから最大で 64 fC と見積もられる。この信号を効率よく検出するために、目標雑音を等価雑音電荷として電子数換算で 5000~10000 電子以下と設定した。実際は、中性子コンバータから生成される荷電粒子はセンサーに入射するまでに中性子コンバータ自身等の物質を通過しエネルギー損失をするので、センサーに付与される信号電荷量は表の値より小さくなることが考えられる。また信号極性はセンサー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、ダイナミックレンジも中性子コンバータからの信号が検出でき、かつノイズ評価等も可能なように設定をした。

この仕様に基づき MSND 用の信号処理集積回路を設計し、シミュレーション評価を行った結果を図 3.1.2-1 及び図 3.1.2-2 に示す。図 3.1.2-1 は横軸に入力電荷量に対する出力振幅を示したもので ${}^6\text{Li}$ からのアルファ線は線形のダイナミックレンジ内で捉えられることがわかる。図 3.1.2-2 は等価雑音電荷量と検出器容量の関係を示したもので、検出器容量の範囲内で 3000 electrons 以下になっており仕様を十分に満たすと考えられる。実際の使用環境では外来雑音等の混入も考えられるため、今後システム全体で雑音の混入を抑えることも検討する必要がある。

上記に示した設計指針のもと MSND 用の信号処理集積回路の試作を行った。図 3.1.2-3 に評価用のボードの写真を示した。中央部緑色の枠内に今回試作した集積回路が実装されており、左側の入力部に MSND を装着することが可能となっている。右側のコネクタはデータ収集及び制御を行うボードと接続するためのものであり、ここに示されていない制御及びデータ収集用のボードに関しては既存品を使用可能となっている。令和 3 年度、本集積回路の評価を行う。

表 3.1.2-1 MSND 用線集積回路の開発仕様

| | |
|---------------------------|---|
| 中性子コンバータからの α 線の信号 | 400000 electrons, 64 fC |
| 検出器容量 | 100~300 pF |
| 等価雑音電荷 (設計値) | 10000 electrons => S/N~40 5000 electrons => S/N~80 |
| ダイナミックレンジ (設計値) | ± 80 fC |
| 時定数 (S/N をできるだけ最適化) | $\sim 1 \mu\text{s}$ |

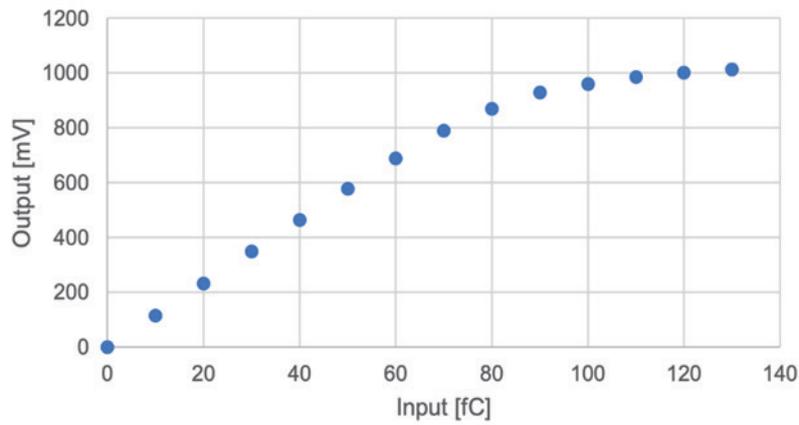


図 3.1.2-1 MSND 用の信号処理集積回路のダイナミックレンジ特性

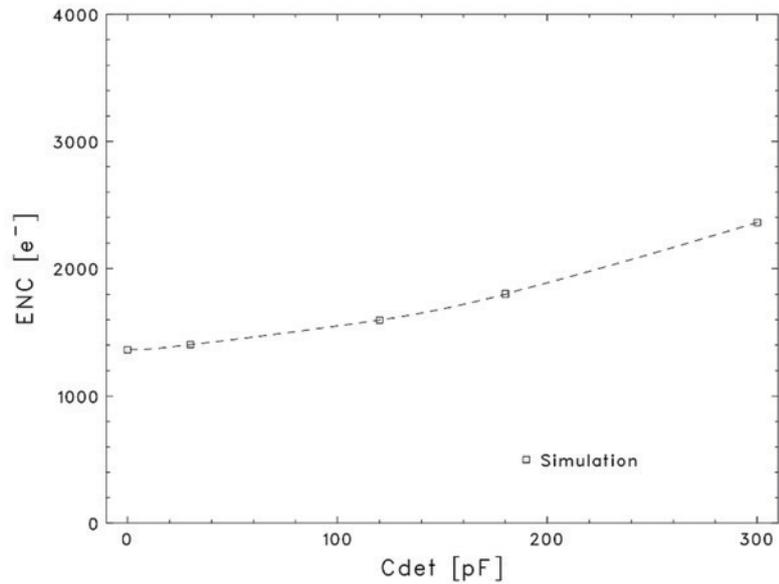


図 3.1.2-2 MSND 用の信号処理集積回路の雑音特性

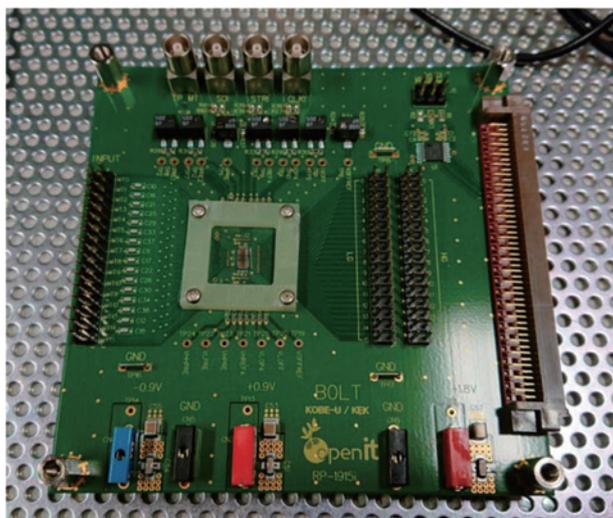


図 3.1.2-3 MSND 用の信号処理集積回路の評価ボード

3.1.3 水中を模擬した中性子照射場の整備

令和 3 年度以降に実施する水中を模擬した中性子照射試験の準備期間として、水中に挿入可能なプロトタイプ中性子センサーの試作、中性子線源を挿入可能な簡易水槽等を整備するとともに、粒子輸送モンテカルロ計算用の簡易水槽のモデリングを行い、 ^{252}Cf 線源による応答関数の試解析を行った。当初は、 ^{252}Cf 線源を新規購入し、高エネ研の放射線照射棟において中性子照射場の整備を実施する予定であったが、 ^{252}Cf 線源の想定外の価格高騰のため、 ^{252}Cf 線源の新規購入は断念し、 ^{252}Cf 線源を保有している国立研究開発法人産業技術総合研究所（以下、「産業技術総合研究所」と略す。）に技術協力を依頼し、産業技術総合研究所の ^{252}Cf 線源を利用することとした。

(1) MSND を実装したプロトタイプ中性子センサーの開発

3.1.1 項で実施した汎用信号処理回路による MSND の特性評価を反映して、水中試験が可能な大きさのプロトタイプ中性子センサーを試作した。プロトタイプ中性子センサーの信号処理回路のブロック図を図 3.1.3-1 に示す。センサー素子は RDT 社製 MSND（型番 MSND.S17.CRFS）を前置増幅器（クリアパルス株式会社製 CS515-2、帰還抵抗 4.7 G Ω 、帰還コンデンサ 0.3 pF）に接続するとともにセンサーの印可電圧は前置増幅器用の入力電源から 2.5 V を分岐させ供給するようにした。波形整形増幅器の時定数は 0.5~10 ms の範囲で内部抵抗を組み替えることで可変とした。予め設定した波形整形増幅器出力の波高しきい値以上の信号をコンパレータで識別して出力信号（負の TTL、遅延時間 7 ns）を生成する。波高しきい値はトリマポテンショメータで調整可能とした。また、回路動作確認用として、前置増幅器や波形整形増幅器の出力も取り出せるようにした。電源は+12 V/57 mA、-12 V/43 mA を D-sub 9 pin ケーブルを介して供給する。図 3.1.3-2 に示すように MSND 用信号処理回路をパッケージングした筐体の寸法は 110×80×40 mm、重量は約 340 g である。筐体自体は防水仕様ではないので、実際的水中試験では、筐体を更に水密容器に入れ、水密容器ごと水中に投入する予定である。

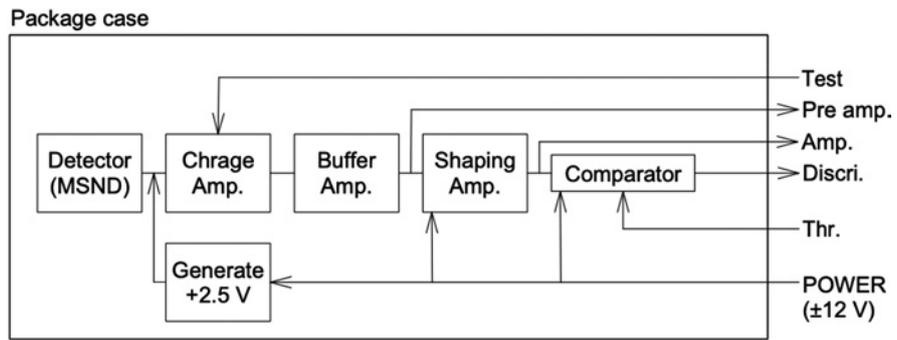


図 3.1.3-1 プロトタイプ中性子センサーの信号処理回路ブロック図

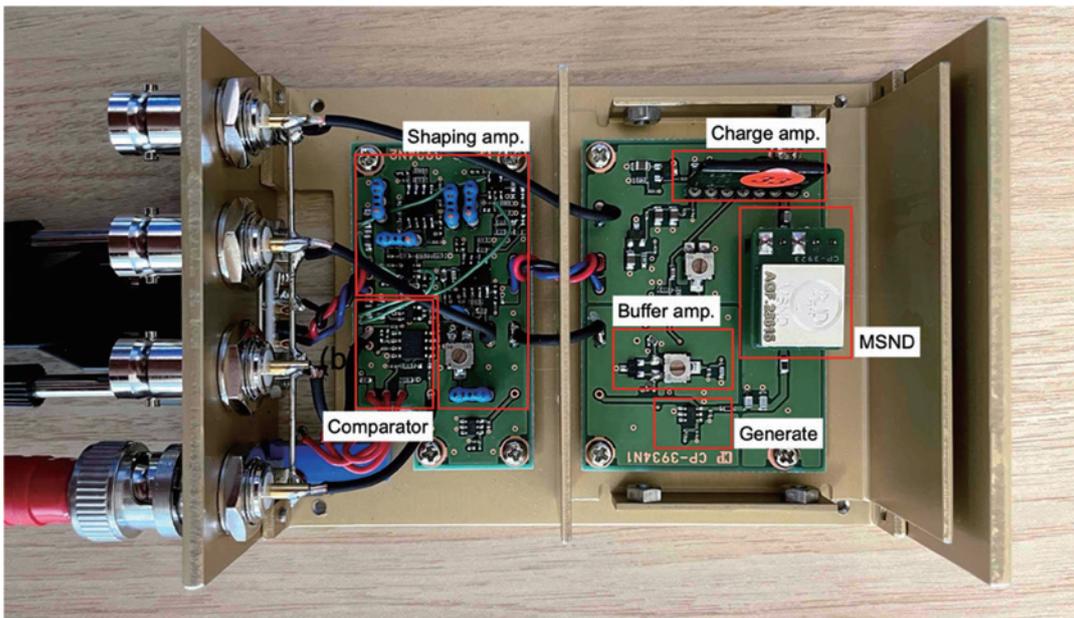
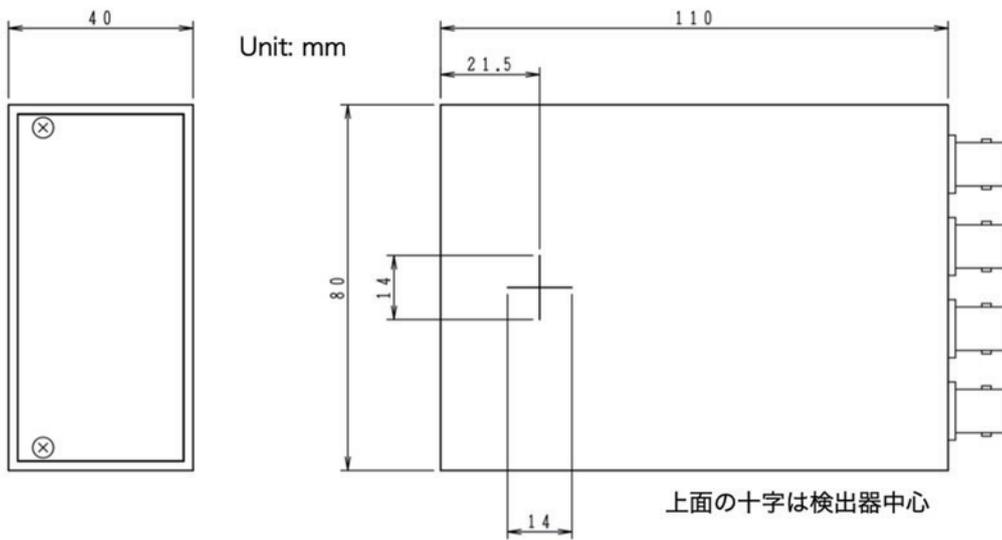
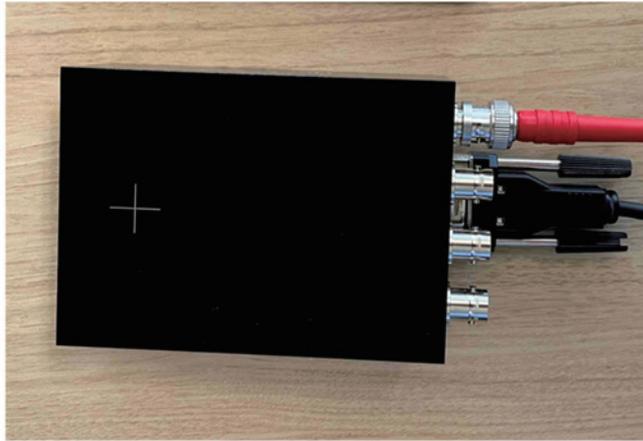
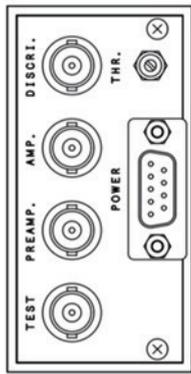


図 3. 1. 3-2 プロトタイプ中性子センサーの筐体寸法と回路写真

(2) 中性子照射試験用簡易水槽の整備

中性子照射試験用簡易水槽の整備は、産業技術総合研究所に技術協力を依頼し、産業技術総合研究所の ^{252}Cf 線源を用いて実施することとした。使用できる ^{252}Cf 線源は、中性子放出率が $3.19 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$ (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。

令和 2 年度は、中性子線源を挿入可能な簡易水槽等を整備するとともに、粒子輸送モンテカルロ計算用の簡易水槽のモデリングを行い、 ^{252}Cf 線源による応答関数の試解析を行った。図 3.1.3-3 に PHITS でモデリングした直径 1 m×長さ 1 m の水槽とその底に ^{252}Cf 線源を配置して計算した水槽内の熱中性子束分布を示す。また、図 3.1.3-4 に同じ体系で計算したガンマ線と速中性子も含めた全中性子の分布を示す。 ^{252}Cf 線源は約 2 MeV にピークをもつマックスウェル分布を示すので、多くの熱中性子は水との散乱によって生成する。図 3.1.3-4 に示すように原子番号の小さい水中では、ガンマ線の減弱は小さいが、中性子の減弱は大きく、線源から約 50 cm の位置で中性子束は 3 桁以上の減弱となる。熱中性子は速中性子の散乱によって生成され、その減弱は速中性子の減弱よりも大きいので、図 3.1.3-3 熱中性子束分布は図 3.1.3-4 の全中性子分布と同様の分布となる。熱中性子の分布は 30 cm の位置で約 2 桁小さいことから、ハンドリングのし易さを考慮し、本事業で作成する簡易水槽の外径は 30 cm とした。図 3.1.3-5 に PHITS でモデリングした直径 30 cm×長さ 1 m の水槽とその底に ^{252}Cf 線源を配置して計算した水槽内の熱中性子束分布を示す。直径 30 cm の水槽でも長さ 1 m 方向の熱中性子束分布は、直径 1 m の水槽と大きく変わらないことを確認できた。実際に製作した水槽の写真と使用する ^{252}Cf 線源の図面を図 3.1.3-6 に示す。水槽の底面に用意された穴に ^{252}Cf 線源を挿入することで、長さ方向 1 m までの水中での中性子照射試験が実施可能になった。

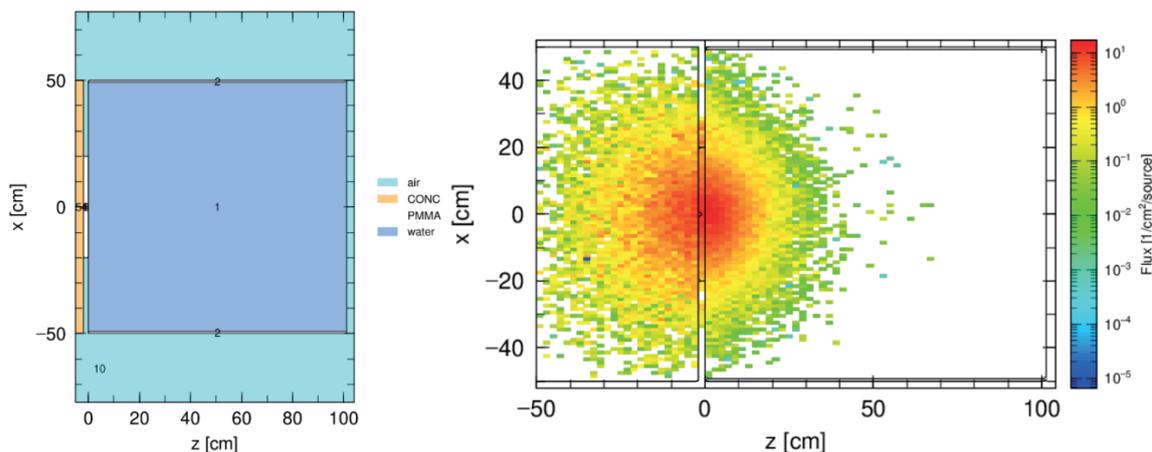


図 3.1.3-3 PHITS による直径 1 m×長さ 1 m の水槽モデルと熱中性子束分布

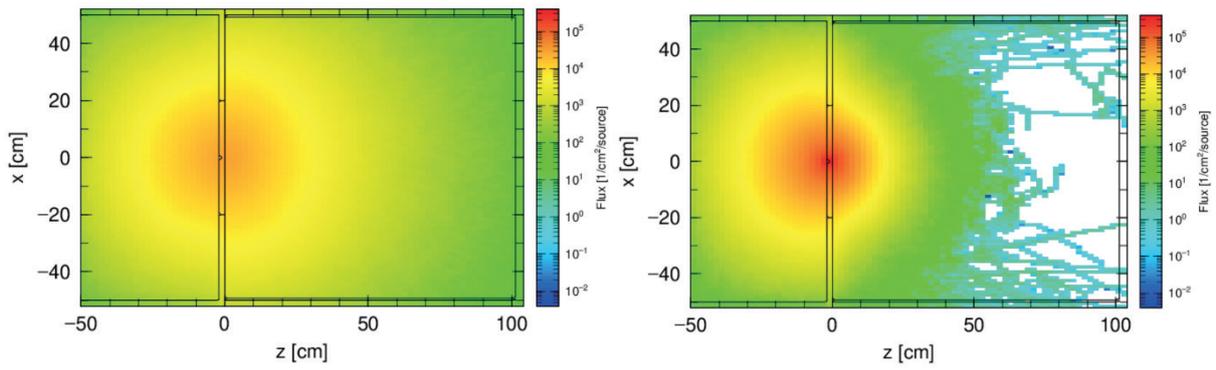


図 3.1.3-4 PHITS による直径 1 m×長さ 1 m の水槽モデルのガンマ線と全中性子束分布
左図がガンマ線、右図が全中性子束分布

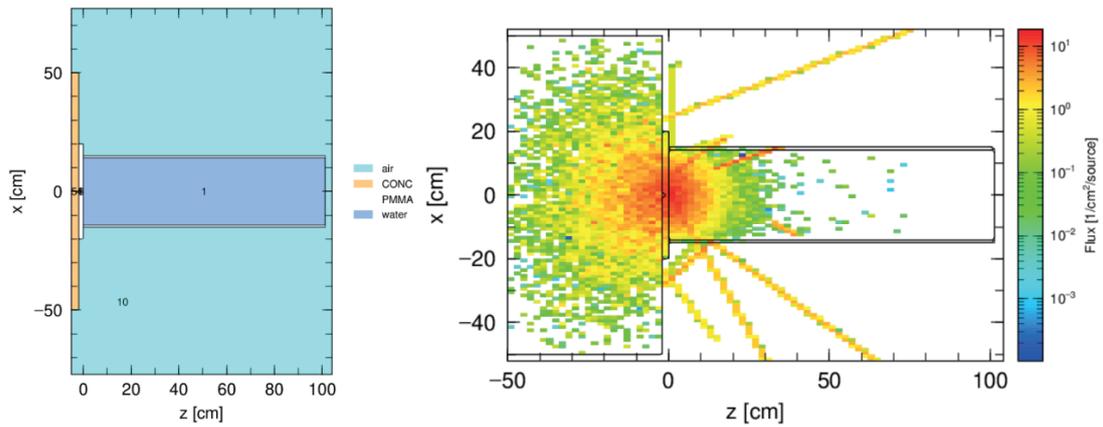


図 3.1.3-5 PHITS による直径 30 cm×長さ 1 m の水槽モデルと熱中性子束分布

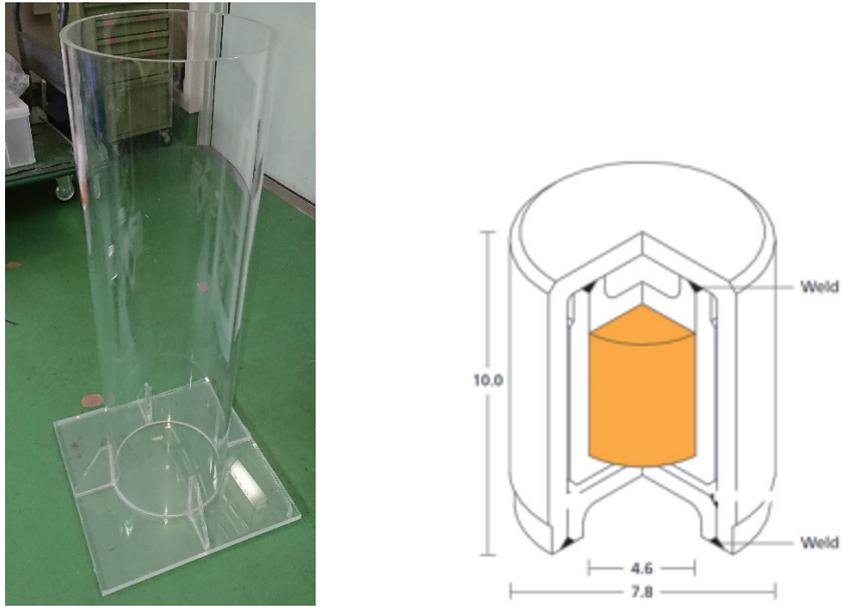


図 3.1.3-6 製作した直径 30 cm ×長さ 1 m の水槽の写真と使用する ^{252}Cf 線源の図面

3.2 UUV プラットフォームの開発

3.2.1 燃料デブリマッピングツールの開発

UUV の目となる水中カメラ、ソナーによる撮像情報、中性子センサーの計数情報を VR システムへ投影するマッピングツールを構築する。さらに、マッピングツールとサンプリングツールが連動するように通信制御システムを整備して UUV に実装することで、デブリサンプリングシステムの操作性を格段に向上させる。

開発する中性子センサーの運用方法を水中広角カメラ、ソナー等との連動を考慮に入れた議論の上、通信・制御回路とインターフェースの設計検討を実施した。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。

(1) マッピングツールの通信・制御回路とインターフェースの設計検討

各センサーの信号ケーブル並びに UUV やサンプリングツール駆動電源用ケーブル類を併せると多数のケーブル類を引きずることになり水中での操作がやりづらい。このため、マッピングツールの計測・制御用電源については、出来るだけ UUV 搭載のバッテリーで対応できるように検討した。設計方針は、平成 30 年度から開始した、英知事業「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」で海技研が令和元年度に担当した内容[3.2.1-1]に基づいている。

① 電力通信系

令和 2 年度は、マッピングツールの内、中性子センサー、水中用カメラ及び光源に関して検討を行った。また、今後、サンプリングの仕様が決定された際に、サンプリングツールを駆動するための電力供給系を検討する必要があるため、令和 3 年度以降検討する。

② センサー用通信系

UUV に搭載可能な通信制御系電子回路基板の候補を選定し、操作側と UUV 搭載センサー間で計測データと制御データの双方向通信するための通信方法を検討した。これらについては、基本的に、UUV のシステム内で LAN (TCP/IP) ネットワークを組み、各装置信号はスイッチングイーサネットハブを通すことで操作側の PC で動作できるような仕様とする。

③ 中性子センサー用信号通信系

中性子センサー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によって波形整形される。これについては、令和 3 年度以降仕様が決まるため、決まり次第検討する。基本的に、計数のために、論理パルスに変換し記録することを考えている。

(2) マッピングツールの開発

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で閲覧可能なソフトを開発する。またヘッドマウントディスプレイを用いた VR コンテンツシーン上に、ソナーあるいは Lidar 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する。

① VR コンテンツの確認

JAEA から借用した 1F 2 号機の VR コンテンツデータを Unity 上へインポートを行い、閲覧可能な状況に整備を行った。インポートを行ったデータは、VR コンテンツ視聴時に立体的に描画できるようシーンデータを構築し、3 次元座標上に配置した。その際、原子炉の

軸方向の確認、PCV 内部の底の高さ等を調べ、データが正常であることを確認した。また、VR コンテンツデータを配置した状況では明暗を把握することができないため、Unity 上で光源（ポイントライト）を配置することにより、明るさを確保した。

② 投影ツールの検討

檜葉遠隔技術開発センターのロボット試験用水槽で実施した模擬デブリのソナーデータを変換し、チェック用の点群データとして用いて検討した（図 3.2.1-1 参照）。

点群データの XYZ 座標を CSV から取得し、RGB カラー（255、255、255）を付与し、Unity にインポートできる形式に変換した。得られた点群データを C# で記述したプログラムでグラフィックカードに描画させる手法で Unity 上に投影した（図 3.2.1-2 参照）。

水中カメラからの画像データについては、Unity の VideoPlayer 機能を用いて投影されることを確認した。

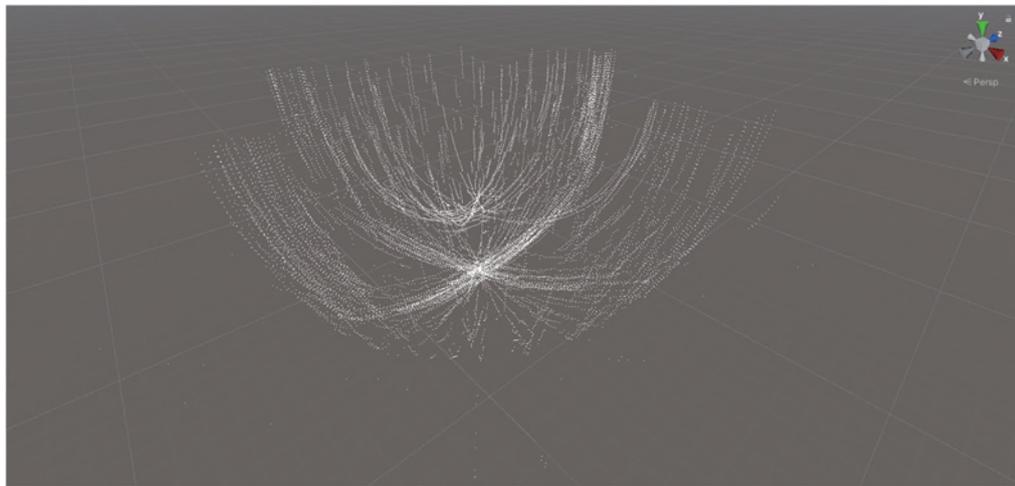


図 3.2.1-1 点群データに変換したソナーデータ

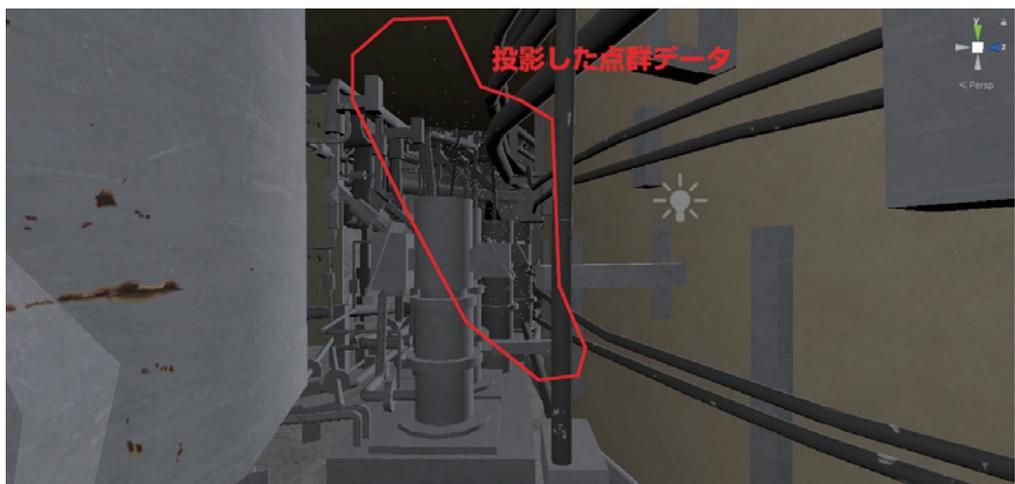


図 3.2.1-2 VR コンテンツに投影した点群データ

JAEA が作成した 1F 2 号機ペDESTAL 開口部付近の原図に点群データを投影した（JAEA 檜葉遠隔技術開発センターの許諾を得て改変し掲載）

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。

(1) 従来の自己測位システムの PCV 内適用課題抽出

① 光学式測位システム

海技研は、英国マンチェスター大学と光学式測位システム (EVLS : External Vision Localization System Characterization) [3.2.2-1]、[3.2.2-2]を共同開発した。当該測位システムは、ロボット試験水槽の頂上に設置したカメラで撮影する鳥瞰図と、ROV 搭載の有色 LED マーカー、水槽のリングに沿って設置したマーカー及び ROV の深度を使用して ROV の 3 次元位置と姿勢を評価する。ROV の水中の位置を確認するため小型カメラを水槽中心の水面より上部に設置し (図 3.2.2-1[3.2.2-2])、小型カメラで ROV の位置を確認出来るように ROV 内にリング状の LED 光源 (緑、赤) を取付けてある (図 3.2.2-2[3.2.2-2])。なお、測位評価の較正点として水面及び水面下 2 m の位置にマーカーを既知の位置にそれぞれ 4 個設置した。

檜葉遠隔技術開発センターの水槽における実証試験の結果、ROV の位置を確認して、予測精度～150 mm で測位できた。しかし、天頂カメラやマーカーの設置等が必要なこと、デブリのサンプル取出しで周辺の濁度が上昇し、光学的なセンサーが使用できないこと等から、光学式測位システムは 1F の PCV 内環境条件への適用が難しい。

② 海洋で使用される音響測位システム

地上や空中の位置計測では GPS (Global Positioning System) の利用が普及している。電波の特性により海中での使用が困難であるため、現在海洋での位置測定は、音波を用いた音響測位が一般的である。基本的な原理は GPS と同様に、基準点を設置することで測位する。基準点の設置と計測方法によって、主に長基線 LBL (Long Base Line)、短基線 SBL (Short Base Line) と超短基線 SSBL (Super Short Base Line) の 3 つの方式がある。LBL は音の伝搬時間を、SSBL は音波の到達位相差を用いるが、SSBL は 2 方法の中心的な特徴を有しており、基準局座標系の下で UUV の固定座標を測定するという共通点がある。基線長の最も長い LBL の測位精度が最も良いが、コストや簡便性が悪い。海洋調査ではこれらの音響測位の予測精度は 10～15 %程度と言われている [3.2.2-2]。

この他に UUV 等の移動体が慣性空間において加速度を受けると、その移動体上の物体には反作用力が生ずるため、この反作用力の測定を行ない、加速度ベクトルを求めることができる。加速度を時間的に 2 回積分して、移動体の位置を求める慣性航法 (INS : Inertial Navigation System) 方式もある。海洋で使用されている音響測位と慣性航法の測位特性の比較を表 3.2.2-1 に示す。慣性航法は広域性、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一方、ドリフト誤差が航走時間と共に積み重なるという短所がある [3.2.2-1]。

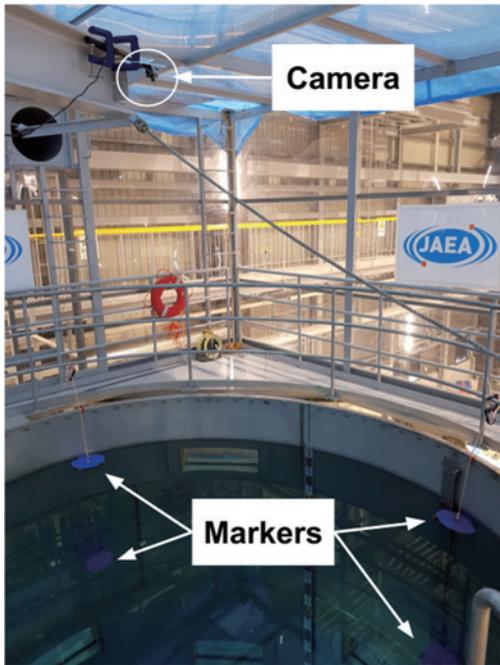


図 3.2.2-1 天頂カメラとマーカの設置
 (出典：[3.2.2-2]、MDPI Japan の
 許諾を得て転載)

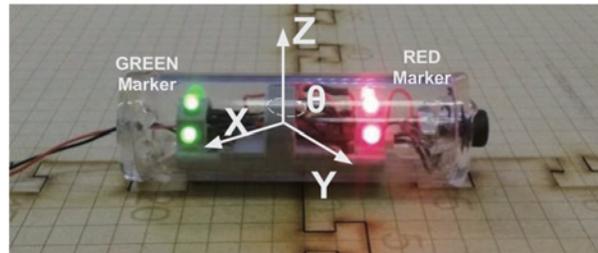


図 3.2.2-2 ROV 内リング状 LED 光源 (緑、赤)
 (出典：[3.2.2-2]、MDPI Japan の許諾を
 得て転載)

表 3.2.2-1 水中測位現状技術の特性比較

| 測位方式 | 精度 | 広域性 | コスト | 簡便性 | 耐障害物 |
|------|----|-----|-----|-----|------|
| LBL | ◎ | △ | △ | △ | △ |
| SBL | ○ | △ | ○ | ○ | ○ |
| SSBL | ○ | △ | △ | △ | ○ |
| INS | △ | ○ | △ | ○ | ○ |

そこで、本研究では、SBL 方式音響測位システムの適用性を検討した。簡便性やコストの観点から SBL 方式の Underwater GPS WL-11001 (Water Linked 社製) を選定し、水槽において性能を調査した。このシステムは超音波発信器 (ロケータ) 1 個、受波器 (レスポнда) 4 個、データ処理用電子回路、データから位置座標を計算するソフト等で構成されている。Underwater GPS の測位では、例えば図 3.2.2-3 に示すように予め位置決めした水面に浮かぶフロートの下に 4 個のレスポндаを設置し、ロケータから水面下にあるレスポндаへの音波の伝搬時間を測定して得られた距離 R1、R2、R3、R4 からロケータ即ち UUV の相対的な位置を算出する。UUV の PCV 内での自己測位システムの測位精度を確認するため、檜葉遠隔技術開発センターのロボット試験用水槽で動作試験を実施した。レスポндаを水槽の任意の 4 点に配置し、ロケータを水槽中心に配置した (図 3.2.2-4 参照)。ロケータ位置を動かしながら、モニタに出力されるロケータの位置情報を確認した。

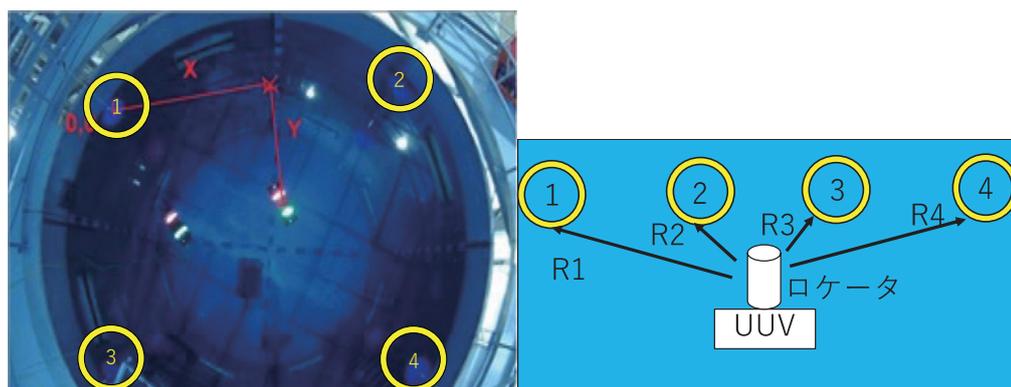


図 3.2.2-3 水面上のフロート（左）及び水中のロケータとレスポンドの位置関係（右）

その結果、ロケータの表示（図 3.2.2-5 参照）は、実際のロケータ位置とは全く異なる方向と位置に現れた。これは、水槽のように壁で囲まれた場所ではレスポンドの配置によって、ロケータから発信し直接到達する音波よりも速く、壁や水面で反射した音波をロケータからの信号と間違えて拾い、ロケータからの正確な飛行時間を測定できなかった可能性が考えられる。そこで、壁からの反射による影響を低減させるため、各レスポンド間の距離を短縮してロケータの位置を測定すると、実際のロケータ位置と 1 m 程度の誤差でロケータ位置が表示されるようになった。以上の超音波を使用した SBL 方式の自己測位システムを PCV 内のような狭小空間部に適用した場合、構造壁等からの反射波により測位精度が劣化する等の課題がロボット試験用水槽を用いた試験によって明確になった。

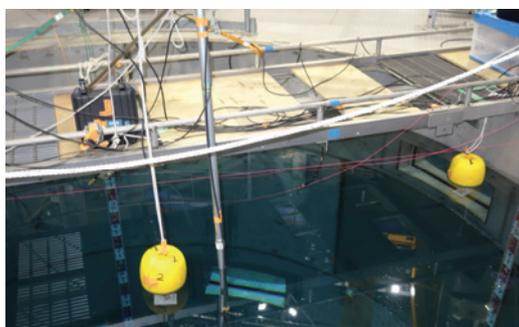


図 3.2.2-4 フロートを水槽に設置した様子

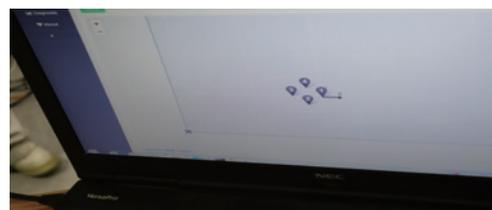


図 3.2.2-5 モニタに表示されるレスポンドとロケータの位置

(2) 測位精度向上方策の検討

3.2.2(1)の検討結果から、光学式測位システムは、天頂カメラやマーカーの設置等が必要であり、デブリのサンプル取出しで周辺の濁度が上昇し光学的なセンサーを使用できない可能性がある。また海洋等で使用されている音響測位システムを PCV 内等狭小部に適用すると、構造壁等からの反射波により測位精度が劣化すること、PCV 内の高ガンマ線量下かつ狭小空間にガレキが複雑に配置された環境では、基準点にレスポンドを設置する作業は困難である。そこで、前項(1)の自己測位システムの外、回転式ビームソナー等で撮像した 2 次元画像とジャイロ計のデータに、画像処理を適用した ROV の位置を予測するシステムの検討を実施した。

① 回転ビームソナーによる2次元画像出力

楡葉遠隔技術開発センターの角水槽に、実際のペ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た (図 3.2.2-6 及び図 3.2.2-7 参照)。さらにソナー保持材に垂直に固定した IMAGENEX Technology Corp. 社製の回転ビームソナー831L を水中に入れて、水平面の2次元画像を撮像した。このペDESTAL外壁の模擬体の表面には、実機の外壁に設置されている配電盤やケーブル等を模擬したステンレス製パンやパイプ等を貼り付けることにした (図 3.2.2-8 参照)。

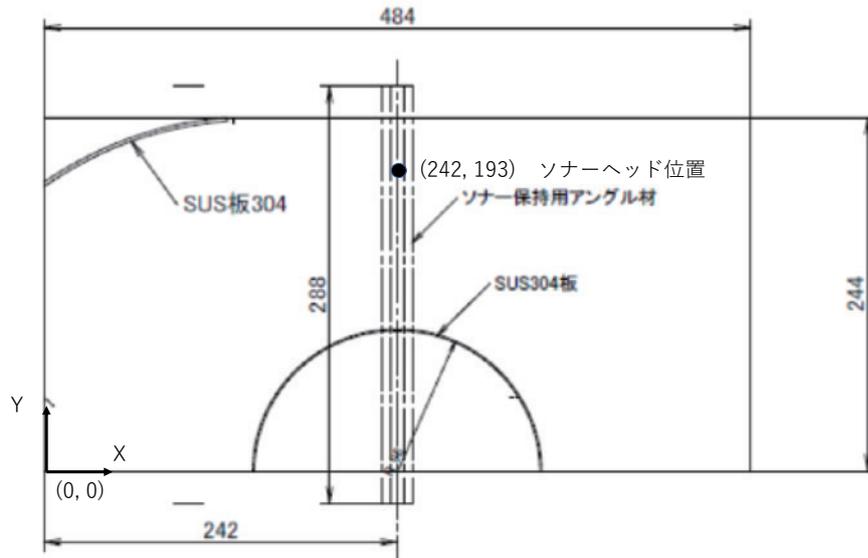


図 3.2.2-6 実験体系概念図 (上から見た図)



図 3.2.2-7 半円筒状模擬体 (左) 及びソナー保持材と回転ビームソナー (右)



図 3.2.2-8 ペDESTAL外壁模擬体表面に貼付した配電盤等の模擬材

回転式ビームソナーで撮像した2次元画像の1例を図3.2.2-9に示す。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（ゴーストと称する）が多数現れている。検知対象のペDESTAL外壁を模したステンレス製模擬体からの反射した超音波の強度が弱く、人の目で見ても判別が困難な画像も多く見られた。

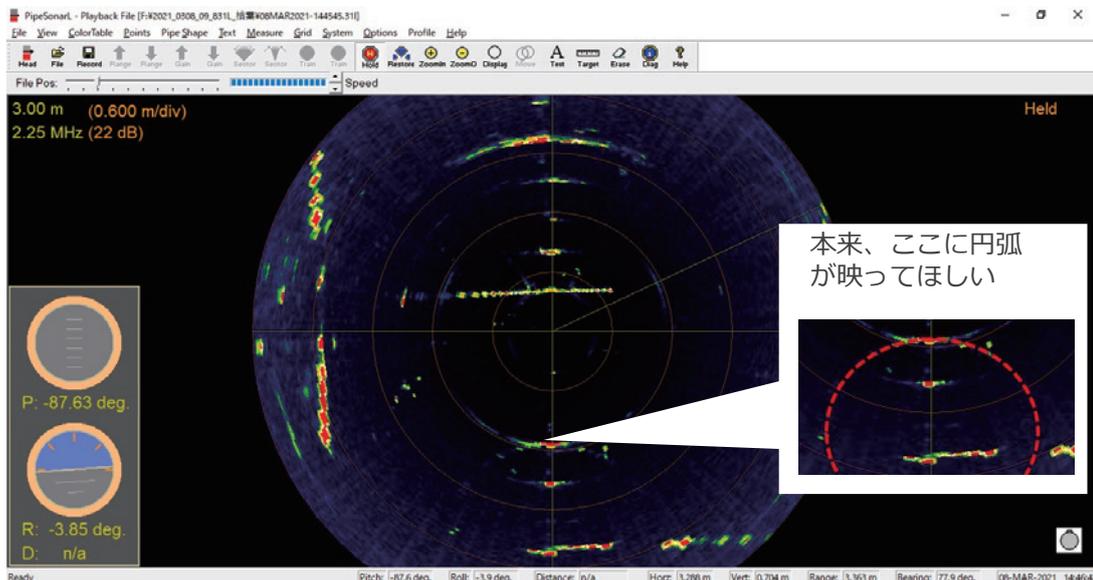


図 3.2.2-9 角水槽に設置したステンレス製模擬体のソナー出力画像

② UUV の位置推定案

UUV が PCV 内のどの位置にいるか推定する場合、ソナー出力画像を基に図 3.2.2-10 における Plant North を基準とした角度 θ と、ペDESTAL 中心から UUV までの距離 r を算定した。すなわち、UUV の位置を極座標で表示する。UUV の水中の深さについては UUV に搭載する深度計で測定することができるため、以降の報告では UUV の深さについては割愛する。

AI手法を用いた位置推定を以下に示す。ソナー出力画像には、実際に壁面以外の様々な構造物が様々なノイズとして映ることが予想されるため、図 3.2.2-11 に示す様に「ノイズを取り除くと、画像内のペDESTAL外壁の円弧はこのようになる」という推定を行うAIを作成し、 θ は図 3.2.2-11 に示すように「UUVの位置（中心）からペDESTAL外壁の円弧までの最短距離方向となる」性質に基づいて画像データから算出する。

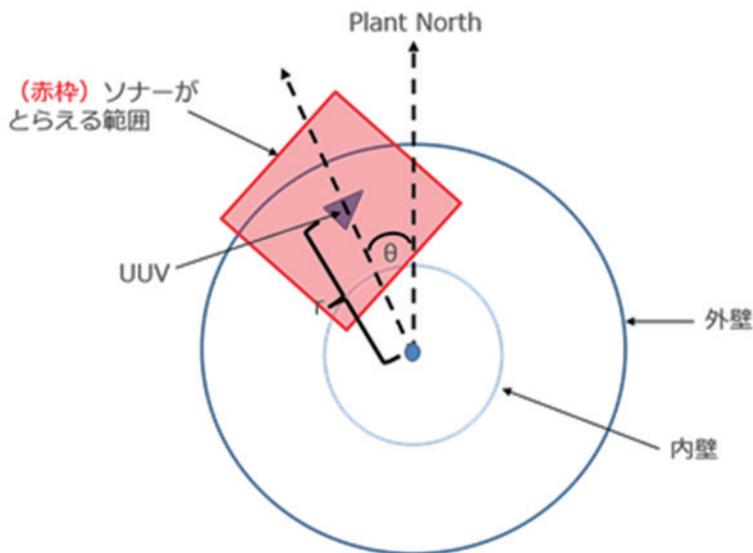


図 3.2.2-10 UUVの位置と Plant North の関係

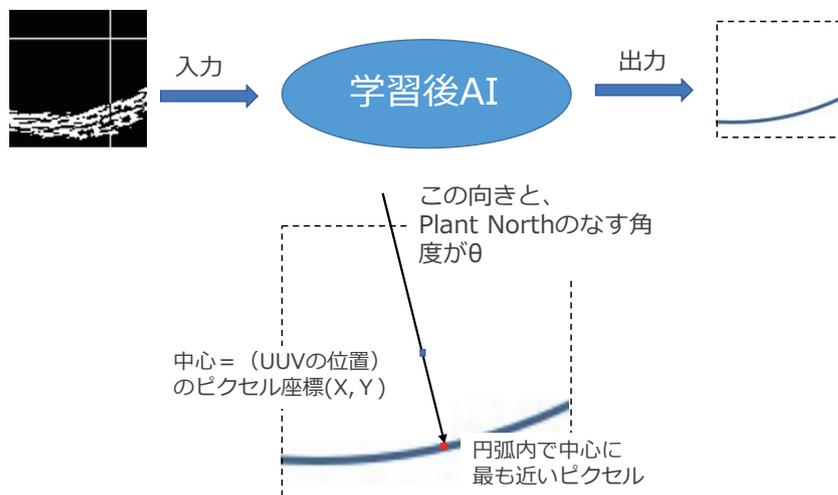


図 3.2.2-11 UUVの位置から円弧までの最短距離方向

次に、学習データ作成として、Efficient Net に類する ‘DeepCrack’ と呼ばれるモデルを採用し[3.2.2-3]、得られたソナー出力画像からペDESTAL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。DeepCrack は、もともとコンクリート壁面等から亀裂部分のみを抽出するため設計された畳み込み深層ニューラルネットワークの一種で、医療用の眼球画像から血管部分のみを抽出する等幅広い応用実績がある。

採用した AI 手法の妥当性を確認するために、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。それらを用いてペDESTAL 壁のみを抽出できるように DeepCrack モデルに学習させた。作成した学習用画像の例を図 3.2.2-12 に、学習プロセスの概略を図 3.2.2-13 に示す。

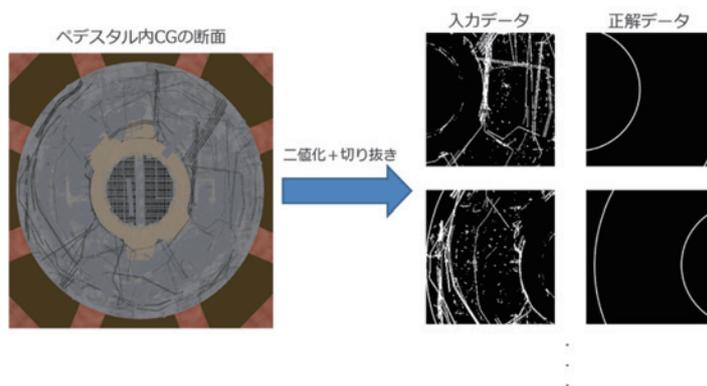


図 3.2.2-12 学習用に作成した画像データの例

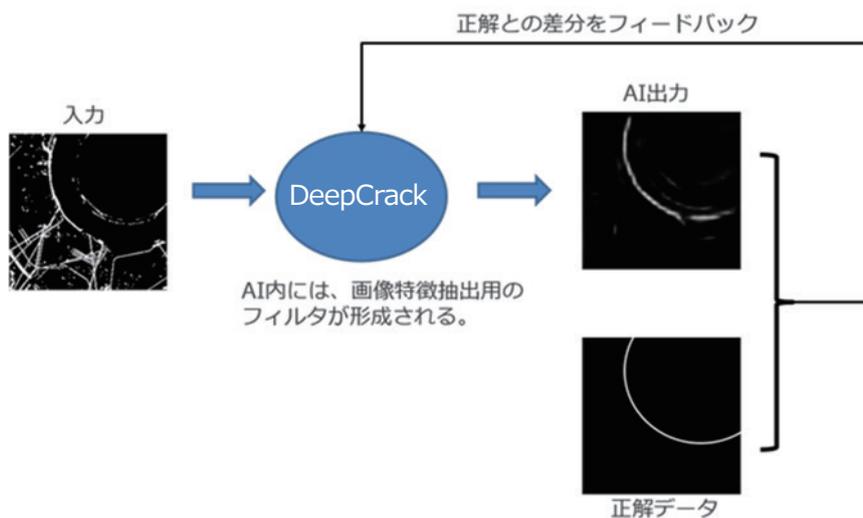


図 3.2.2-13 学習プロセス概略

画像データ 300 セットを学習させたのち、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場合の結果を示す。テスト用に与えた入力データ並びに学習済みの DeepCrack から得た出力データをそれぞれ図 3.2.2-14、図 3.3.2-15 に示す。

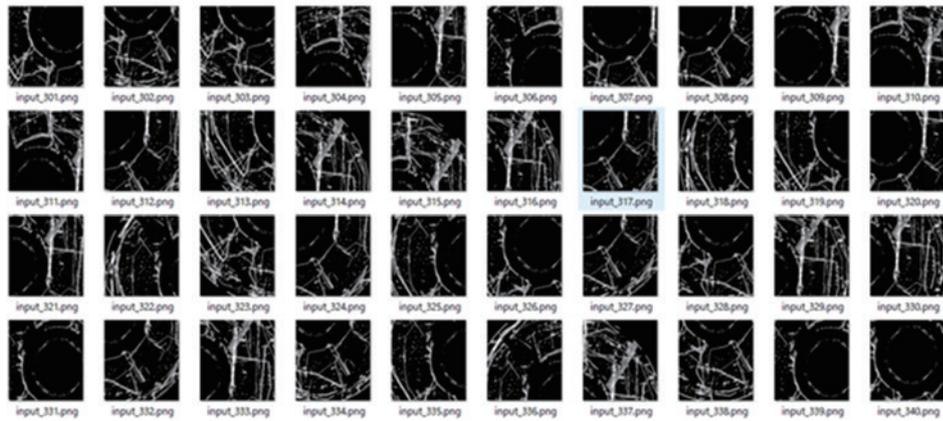


図 3.2.2-14 テスト用入力データ

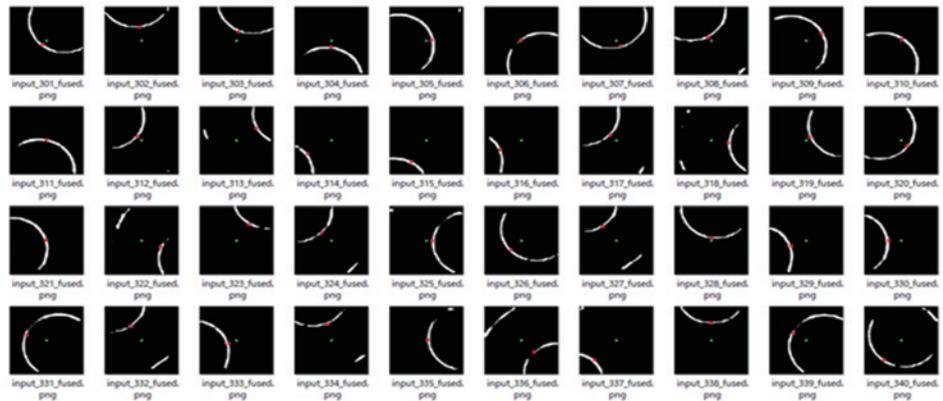


図 3.2.2-15 学習済み DeepCrack の出力

この結果、余分な構造体の情報はほぼ確実に排除できた一方で、円弧の抽出については、位置はほぼ正解と同等のものが出力されたが、太さが均一でない部分や、一部欠けている箇所があるケースが存在した。テスト画像 40 ケースにおいて、AI の出力から画像の中心から最も近い弧と思われる部分への方向と真北がなす角度と、実際の正解データ作成時に計算した角と度の差分の絶対値についての平均、標準偏差、最大値、最小値を表 3.2.2-2 に示す。なお、ジャイロによる姿勢データを考慮していないため、ソナー画像の Y 軸方向と Plant North が一致する条件で評価した。

AI 出力から計算した方位角 θ は、正解と比べて平均して約 6 度ずれており、最大では約 17 度のずれが生じている。

表 3.2.2-2 AI 出力からの計算角と正解データ作成時の計算角の差

| AI 出力からの計算角 - 正解データ作成時の計算角 | 値 (度) |
|----------------------------|-------|
| 平均 | 6.05 |
| 標準偏差 | 4.68 |
| 最大値 | 17.4 |
| 最小値 | 0.21 |

余分な構造体の排除はほぼ達成できたが、抽出した壁面部分は若干欠けや不均一さが生じている。今回検討したケースでは、方位角 θ を定めるのに大きな支障が出なかったものの、データによっては欠けがあるために、正確に円弧と中心との最短距離を求めることができない可能性もあると考えられる（図 3.2.2-16 参照）。

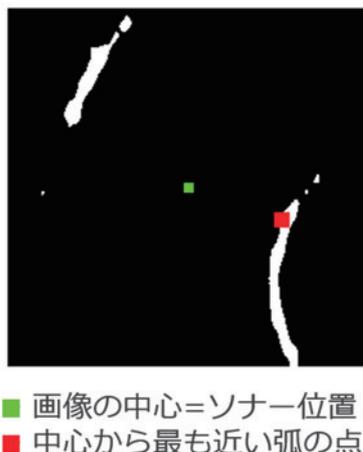


図 3.2.2-16 欠けた部分が大きく、 θ の計算に支障が出そうなケースの例

本検討で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。そこで、ペDESTAL外壁模擬体によるソナー試験で取得したソナー画像に適用したところ、機能しなかった。

その原因として、ゴーストが強く出すぎている（角水槽の形状と狭さに起因）ことと、円弧以外のものを削除しようにも、円弧と認識できるものがソナー出力画像から判別できない（ペDESTAL外壁模擬体から反射する音波の強度が弱い）ことが考えられる。

このため、AI手法を用いた位置推定案についての今後の課題として、実機寸法程度、模擬したペDESTAL外壁試験体でソナー出力画像を撮像し、適用可能性検討を行う必要があり、また使用するソナーに関しても、ペDESTAL外壁からの音波の反射により、強度が低減しない周波数帯を採用している機種を選定を検討する必要がある。

AI手法を用いた位置推定案の課題解決のためには、比較的大規模な適用可能性検討を実施する必要があると予想されるため、ソナー画像出力を処理する手法として代表的な画像処理を選定し、予備的な検討を実施した。

円弧の抽出手順を以下に示す。ペDESTAL外壁の半径は固定であるため、図 3.2.2-17 に示す以下の手順により円弧の抽出を試みた。

- (I) 一定の閾値以上の輝度を持つ点を取りあえず検出
- (II) Canny Edge 法による輪郭抽出[3.2.2-4]
- (III) Hough 法による円弧抽出[3.2.2-5]
- (IV) 設定した半径に近いものだけを絞り込む

事前の検証で正しいと思われる箇所に現れる率が高かった 2 種類のソナー出力画像による抽出を検討した。元画像として、ソナーの Point Only 出力と、画像の輝度を最大にした High Max 出力の 2 種類を使用した。

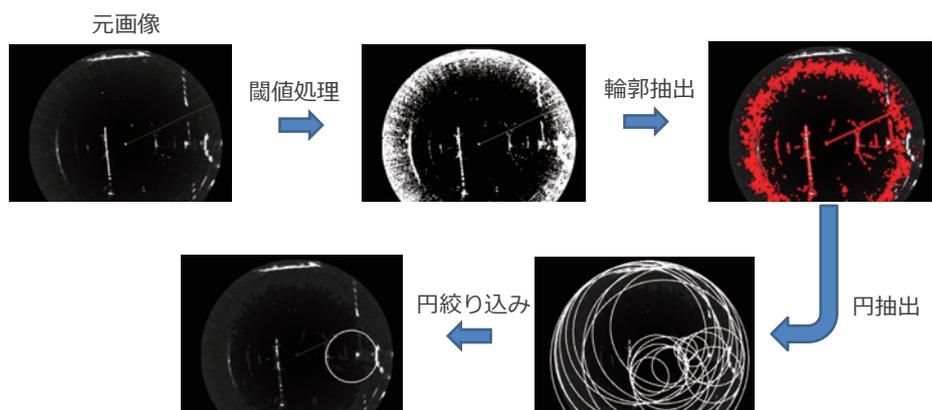


図 3. 2. 2-17 画像処理による円弧の抽出プロセス

所望の位置に円が抽出できたケース（図 3. 2. 2-18）と望ましい円を抽出できたが、それ以外の箇所にも同じ半径を持つ円があるケース（図 3. 2. 2-19）、望ましい位置に円を抽出できたが、半径により唯一に絞り込めなかったケース（図 3. 2. 2-20）等が見られた。

まとめると、完全に同一のパラメータ（閾値、対象の円の半径等）で、ペDESTAL内壁を検出するのは困難だが、半径を少し変えると検出できるケースもあった。ほぼ同じソナー画像でも、結果が大きく変わる等、かなり不安定な面があった（Hough 法による円抽出が安定しない）。ソナーが比較的ゆっくりと動くを仮定し、1ステップ前の分析結果と合わせてベイズ法等により円弧の位置が大きく変わらないとして解析する等工夫が必要である。常に同じパラメータセットで良好な結果が得られるわけではない（円を1つに絞り込めない、そもそも所望の位置に円を検出できない）が、実際の現場では、UUV の初期から見た内壁の位置や、カメラ画像等を生かせると推察されるので、それらと実際に UUV に与えた操作（移動、姿勢制御）を加味して、ペDESTAL壁と UUV の位置を推定する手法が現実的である。

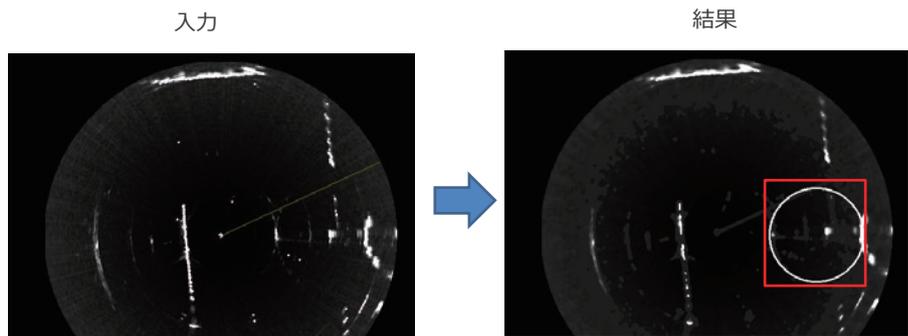


図 3. 2. 2-18 所望の位置に円が抽出できたケース

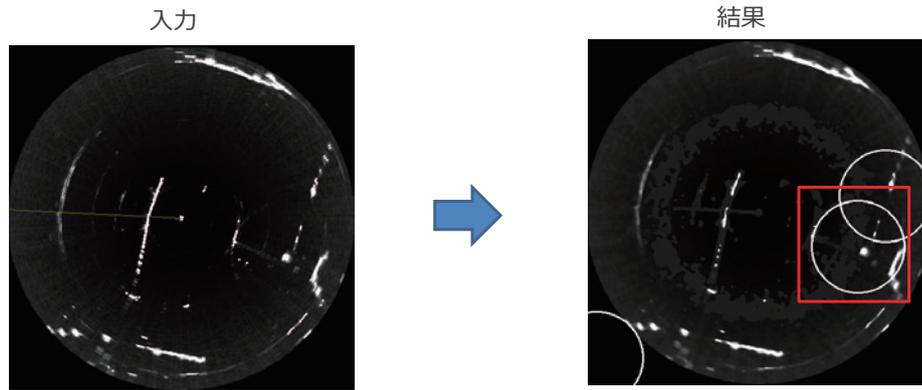


図 3.2.2-19 対象円を抽出できたが、それ以外の箇所にも同じ半径を持つ円があるケース

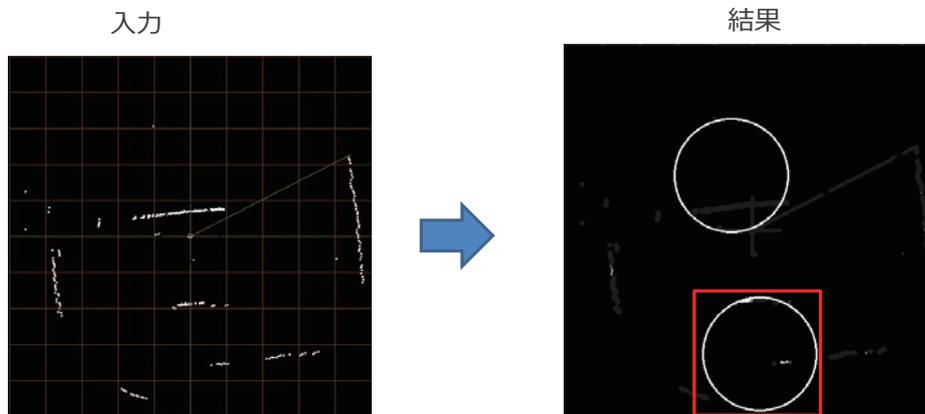


図 3.2.2-20 対象円を抽出できたが、半径により唯一に絞り込めなかったケース

画像処理を用いた位置推定の検討結果から、以下の課題が挙げられた。常に同じパラメータ（閾値、対象の円の半径等）でも、ペDESTAL内壁の円を抽出できておらず、半径を少し変えると検出できるケースもあった。ほぼ同じソナー画像でも、結果が大きく変わる等、かなり不安定な面がある（Hough法による円抽出が安定しない）。ソナーが比較的ゆっくりと動くと仮定し、1ステップ前の分析結果と合わせてベイズ法等により円弧の位置が大きく変わらないとして解析する等のプロセスを追加する工夫が必要である。1FにおいてUUVを初期に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。更にこれらの情報とUUVに与える操作（移動、姿勢制御）を入力とした際のUUVの運航軌跡を推定する慣性誘導システム（INS）等から、UUVの概略的なペDESTAL壁とUUVの相対的な配置を把握して、画像処理を用いた位置推定法により詳細なUUVの位置を総合的に予測する方法が望ましい。

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

3.3.1 はじめに

1F 燃料デブリには号機毎の事故進展や部位に依存して、デブリ性状（密度、組成、燃焼度等）や環境（Cs 汚染度、水中・気中、散乱物質の有無）の違いがある。そのため、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ため、検出器の遮蔽最適化が困難となっている。仮に、遮蔽が不十分であれば機器の損傷やパイルアップの原因となり、反対に遮蔽が過剰であれば、機器の大型化や重量増加につながるだけでなく、狙っていた放射線を遮蔽してしまい検出することができなくなってしまう。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。そこで、本研究では、PCV 内の放射線輸送計算を行い、今後の内部調査が予定される部位において、ガンマ線及び中性子線のエネルギースペクトルと強度を推定することで、調査に用いられる機器の遮蔽設計を支援することを目的とした。燃料デブリの試験的取り出しは 2022 年から 2 号機で行われることになっているが、本格的な取り出し規模の更なる拡大は、2031 年頃から 3 号機を初号機として行われる計画である。そこで、本研究では、2031 年頃の 3 号機を対象とすることとした。

3.3.2 放射線源モデルの作成

内部の放射線特性や線量率分布をシミュレーションから予測するためには、放射線源モデルを作成する必要がある。内部に存在する放射線源としては、(1)燃料デブリに含まれる核分裂生成物（FP）等の放射性核種、(2)事故前の原子炉の運転により構造材が放射化して生成された ^{60}Co 等の放射化生成物、(3)事故時に燃料が溶融して放出された Cs 等の揮発性 FP 核種による構造物の表面汚染の 3 種類が主なものとして挙げられ、それぞれ以下のように評価した。

(1) 燃料デブリに含まれる核分裂生成物（FP）等の放射性核種

燃料デブリに含まれる核種について考慮するためには、事故が発生した 2011 年 3 月 11 日時点での放射性核種量を評価する必要がある。まず、燃料仕様と事故前の原子炉運転履歴に基づき、燃料及び燃料集合体構造材に対する燃焼・放射化計算を行って、炉心平均核種インベントリを評価する（約 1500 核種）[3.3.1]。このインベントリデータには可燃性毒物（ Gd_2O_3 ）や、構造材に含まれている微量不純物も考慮している。この計算データと、FP 放出試験 PHEBUS-FTP4[3.3.2]の結果に基づく FP 放出率を使用し、希ガスや揮発性 FP 核種が放出された組成データを作成する。その後、放射性核種の壊変計算により、評価時期における核種組成を評価する。最終的に作成した核種組成に含まれる全ての放射性核種から放出されるガンマ線を評価した。

(2) ^{60}Co 等の放射化生成物

圧力容器（RPV）内の放射化線源としては、炉心に近接している上部格子板、シュラウド、炉心支持板の 3 ヶ所を対象とし、これらの箇所における原子炉運転中の中性子束とエネルギースペクトルをモンテカルロ法等により評価し、各号機のシュラウド交換時期から事故時までの放射化計算を行って、線源核種を評価する。炉停止数年後のガンマ線量率寄与の観点から、最終的には ^{60}Co のみを線源核種として選定し、評価時期までの壊変計算から線源データを作成した。

(3) 揮発性 FP 核種による表面汚染

事故数年後には、短寿命 FP 核種は消滅し、半減期約 2 年の ^{134}Cs と半減期約 30 年の ^{137}Cs が線量率に寄与する主たるガンマ線源になることから、これらの 2 核種を PCV 内の主要汚染源核種として扱っている。しかし、PCV 内の Cs 汚染分布は現在も不明であり、時間とともに変化することから、IRID による事故進展解析による事故時の PCV 内 Cs 汚染分布を、以下で示す 3 次元プラントモデルに初期値として与えることで評価時期での Cs 分布とした。ただし、汚染水のようにサンプリング分析による実測値が得られている場合には、これを利用する。また、ロボット等を用いた内部調査により、局所的な線量率の実測値が得られている場合には、逆解析により、測定日の線量率と一致するように線源分布を修正する。

3.3.3 3次元プラントモデルの構築

廃炉加速化研究プログラム 日英原子力共同研究「プラント内線量率分布評価と水中デブリ探査に係る技術開発」にて整備された最確線量率分布評価手法では、圧力抑制室 (S/C) 部を除いた 1 号機に対する 3 次元プラントモデルを構築した[3.3.3]。このデータを基に、図 3.3-1 に示すように 3 号機における S/C 部までを含めた 3 次元プラントモデルを作成した。PCV 内の水位は 6.3 m とした。3.3.4 項で説明する放射線輸送計算は、JAEA 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[3.3.4]を使用するため、PHITS の描画機能を使い、図 3.3-1 に示したものだけでなく、様々な角度から 3 次元プラントモデルの確認を行った。このモデルにおいては、PCV 内の滞留水の水位を、0～約 6.5 m の範囲で設定することが可能である。また、ペDESTAL 内における堆積物の形状は、IRID や東電 HD によるこれまでの内部調査の結果を参考にした[3.3.5]。3.3.2 項にて作成した放射線源モデルを、このモデルに適用することで炉内線量率分布を計算することができる。

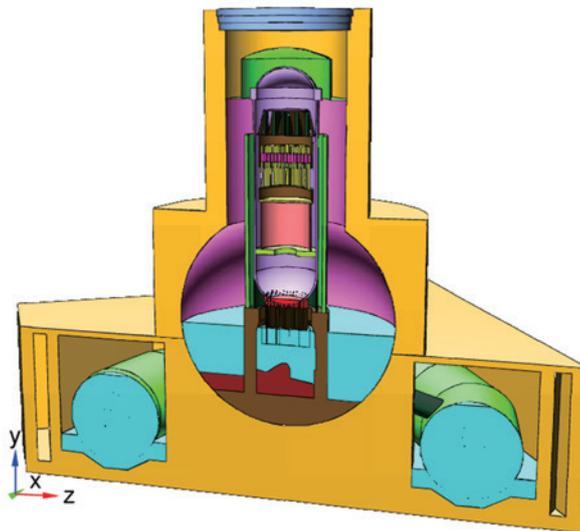


図 3.3-1 3号機の3次元プラントモデル

3.3.4 ガンマ線輸送計算の試解析

上記で説明した放射線源モデルと 3 次元プラントモデルを用いて、PHITS によるガンマ線輸送計算の試解析を行った。まず、作成した放射線源モデルのうち、燃料デブリに含まれる FP 等の放射性核種を、PCV 底部の堆積物等 3 ヶ所に設定した。同様に ^{60}Co 等の放射化生成物は上部格子板、シュラウド、下部炉心支持板の 3 ヶ所に、揮発性 FP 核種として ^{137}Cs と ^{134}Cs を滞留水や S/C 部を含めてそれぞれ 42 ヶ所に設定した。これら 92 ヶ所に線源を設定し光子輸送計算を実行する。その後、得られた結果を足し合わせることで、炉内の線量率分布や任意点でのフルエンス率を求めることができる。

図 3.3-2 には、3 号機の炉内線量率分布予測を示した。評価時期は、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 3 月である。図 3.3-2 に示した A、B、C の 3 点における線量率は、それぞれ、およそ 0.03 Sv/h、50 Sv/h、310 Sv/h である。図 3.3-3 には PHITS の機能であるポイントタリーを使用して得られた A 点付近における光子フラックス [$\text{n}/\text{cm}^2/\text{sec}$]を示す。図 3.3-3 から ^{137}Cs と ^{60}Co 、 ^{154}Eu のガンマ線ピークが確認できる。また、542 keV や 66 keV 付近にもピークがみられるが、これらは統計誤差による疑似ピークである。

3 号機における燃料デブリ取り出しの際には、PCV 内の水位を段階的に低下することが提案されている[3.3.6]。これを受けて、今回作成した 3 次元プラントモデルは PCV 内の水位を任意に変更することが可能になっている。例として水位を 4.3 m と 2.3 m にした 3 次元モデルを図 3.3-4(a) (b)に示す。また、図 3.3-5(a) (b)には水位を 4.3 m と 2.3 m にした場合の、2031 年 3 月時点での炉内線量率予測を示す。水位を変更した場合でも、同様の手法により炉内線量率分布を計算することが可能であることが確認できた。加えて、ポイントタリーを用いることでペDESTAL 内の任意点における光子フラックスを得ることができると見込んでいる。

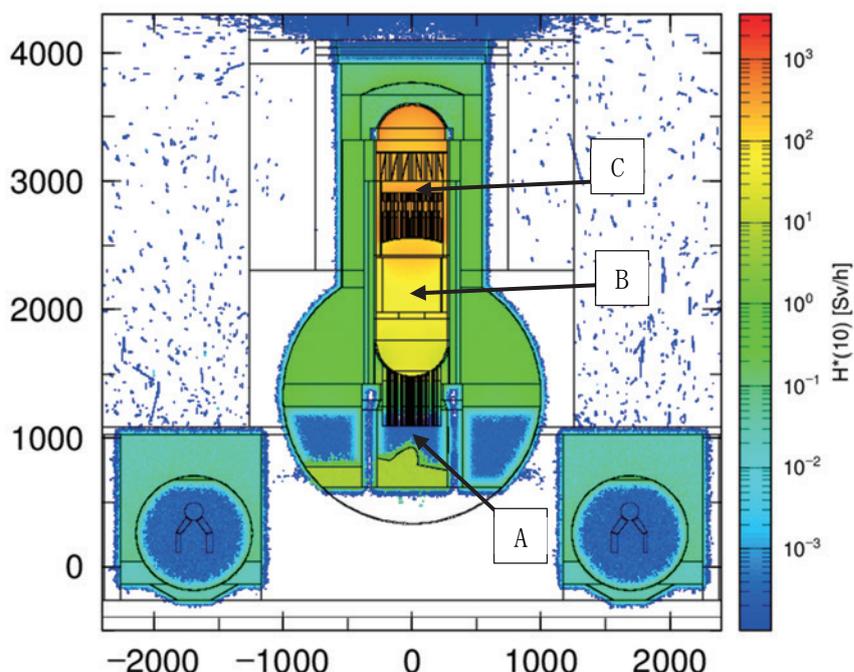


図 3.3-2 3 号機の炉内線量率分布予測 (2031 年 3 月)

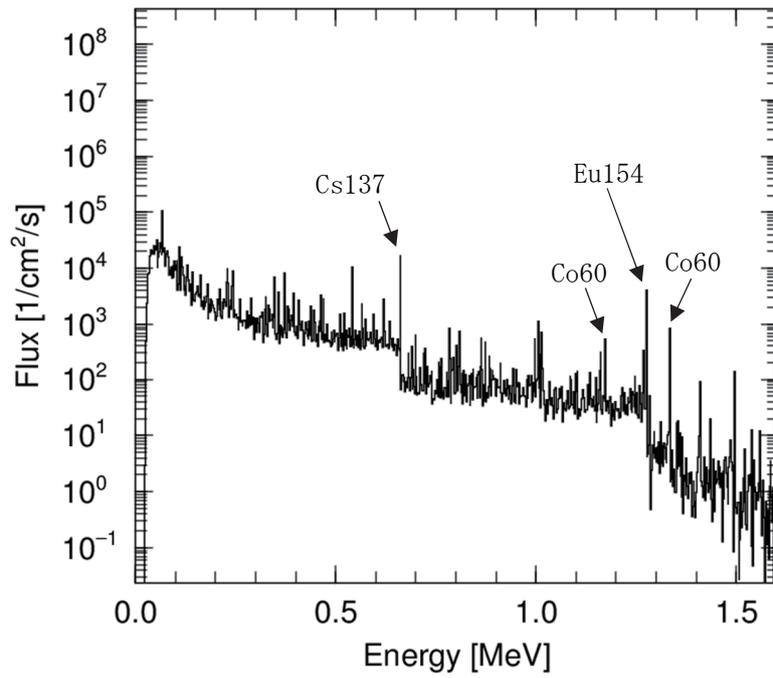


図 3.3-3 A 点 (図 3.3-2 参照) 付近での光子フラックス

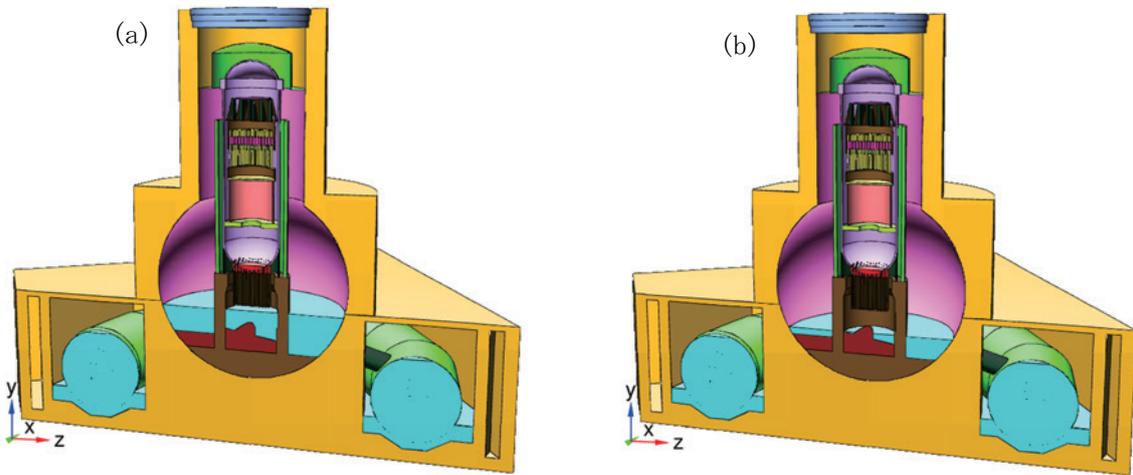


図 3.3-4 PCV 内の水位を変更した 3 号機の 3 次元プラントモデル
(a) 4.3 m (b) 2.3 m

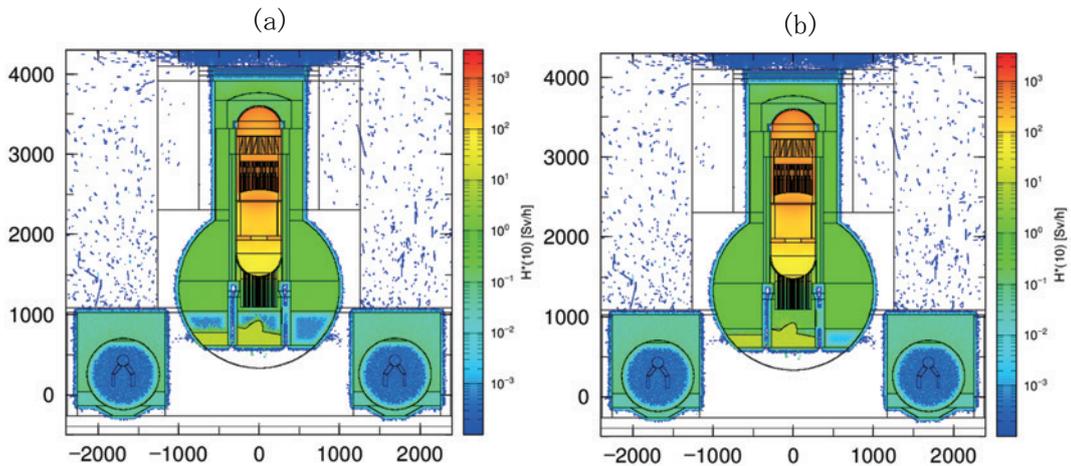


図 3.3-5 PCV 内の水位を(a)4.3 m と(b)2.3 m に変更した 3 号機の炉内線量率分布
(2031 年 3 月)

3.3.5 まとめ

東電 HD 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。

3.3.6 令和 3 年度計画

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DESTAL 内における線量率、フルーエンス率、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。

3.4 研究推進

3.4.1 日英共同研究

日本側研究参画機関と英国ランカスター大学の研究分担者の連携を取るために、Microsoft Teams を利用して Web 会議形式でキックオフミーティングを開催した。その後、Email にて、数回進捗状況を双方で確認した。

3.4.2 英国側の令和 2 年度実施項目の概況

作業計画に従い、英国チームは主にサンプリングツールの設計に焦点を当てている。マニピュレータ開発の試験に必要なスチュワード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する。人的資源についてはフルタイムのポスドク研究助手を採用している。マニピュレータの設計を実行しており、いく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。

3.4.3 作業工程における課題

当初の作業計画では、「作動システムの設計と統合」タスクをプロジェクトの最初の半年以内に完了することを計画していたが、残念ながら COVID-19 による予期せぬ制約のため不可能となった。ロックダウンによりオフィスと実験室へのアクセスが非常に制限された。またスタッフの解雇による管理支援が減ると共にリードタイムが大幅に増加し、大学の研究者が遠隔教育を実施する必要が生じたため、学術的作業負荷が増加した。とはいえ、これらの制限のほとんどは緩和されており、次の 3 か月で作業の進捗を加速できるはずであるが、サンプリングツールの設計の成果が予想より 3~6 か月遅れる見込みである。しかしながら作業工程の最終テストフェーズに柔軟性を組み込んでおり、これによって包括的なプロジェクトの進展が遅れたり縮小したりすることはないと考えている。

3.4.4 マニピュレータの概念設計

エンドエフェクタとマッピングツールを制御及び支援するために、UUV に統合したロボットマニピュレータを開発する。いくつかの概念設計を行った。調査したマニピュレータは主に 2 種類に分類される。1 つは独自のアクチュエータを備え、アクチュエータの長手方向に沿って 6 つの回転ジョイントで硬く結合した 6R マニピュレータであり、もう 1 つはケーブルで作動する連続体のスネーク型マニピュレータである (図 3.4-1 参照)。



図 3.4-1 連続体のスネーク型マニピュレータを統合した UUV の概念図

連続体のスネーク型マニピュレータを選択した理由は以下の通りである。

(1) 重量

標準の 6R マニピュレータは、その長さに依ってアクチュエータが配分されるという制限がある。後続のアクチュエータの重量により、各ジョイントで達成可能な有効荷重が減少するため、より大きなアクチュエータが必要となってくる。連続体のマニピュレータでは、アクチュエータは根元にあるので、この問題は解決され、妥当な有効荷重を維持しながら全体の重量を減らすことができる。

(2) バランス

上記に関連して、連続体のマニピュレータではアクチュエータの質量のほとんどが UUV の中心内に配置されるため、システム全体のより良いバランスを実現できる。

(3) 防水

モーターと対応する制御ハードワイヤーはジョイント毎ではなく、連続体のマニピュレータの中央作動システム内に配置できるため、マニピュレータの防水対策が容易となる。

(4) 安定性

連続体のマニピュレータの剛性は従来の剛性ロボットアームと比較してはるかに低いため、燃料デブリ等を除去している際の振動は UUV ではなく連続体のマニピュレータにより吸収される。

3.4.5 今後の予定

次のステップは、最初のタスクである「作動システムの設計と統合」を完了することに焦点を当てている。このタスクはモーターユニットシステムとケーブル接続が各ジョイント用に開発されているモジュール方式で実現する予定である。スネーク型マニピュレータへの各ジョイントを統合するためジョイントの設計を行い、スネーク型マニピュレータの全体的な剛性と構造の最適化を計る。エンドエフェクタの検討は制御の問題を最小限に抑え、燃料デブリ等の切断と掴むことに伴う問題を克服するという観点から始めるが、これがタスクの焦点になる。前述の COVID-19 による遅延により、最初のタスクは第 3 四半期の終わり、場合によっては第 4 四半期に終了すると予想される。

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ーとソナー等を水中ロボットに搭載・統合し、日英二国間の共同研究体制の下、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 ヶ年計画の 1 年目である令和 2 年度の業務実績を述べる。

(1) 高耐放射線小型中性子センサーの開発

中性子センサーとして米国 RDT 社の 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 プラットフォームの開発

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ー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。

②UUV 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等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

東電 HD 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。

(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合せや会議等を、英国側実施機関との打合せを含め、開催した。

以上、3 ヶ年計画の 1 年目である令和 2 年度の業務項目を実施し、所期の目標を達成した。

参考文献

- [3.1-1] 東京電力ホールディングス株式会社, 1号機原子炉格納容器内部調査について, 2017年3月27日,
https://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/handouts/2017/images1/handouts_170327_14-j.pdf (参照日: 令和2年10月6日).
- [3.1-2] Radiation Detection Technologies, Inc.,
https://radectech.com/msnd_technology (参照日: 令和2年10月6日).
- [3.1-3] Berger, M.J., ESTAR, PSTAR, ASTAR - A PC Package for Calculating Stopping Powers and Ranges of Electrons, Protons and Helium Ions, Version 2, 1993, IAEA-NDS-144.
- [3.1-4] Ziegler, J. F., Ziegler, M. D., and Biersack, J. P., SRIM - The Stopping and Range of Ions in Matter, Nucl. Instrum. Meth. B, vol.268, no.11-12, 2010, pp.1818-1823.
- [3.1-5] Michikawa, T., Sanami, T., Hagiwara, M., Sasaki, S.-i., Kadotani, H., Absolute Calibration of Radioactive Neutron Source Strength by Geometrical Integration of Thermal Neutrons in Graphite Pile, Jpn. J. Appl. Phys., vol.47, no.5, 2008, pp.3635-3637.
- [3.1-6] Sato, T., Niita, K., Matsuda, N., Hashimoto, S., Iwamoto, Y., Noda, S., Ogawa, T., Iwase, H., Nakashima, H., Fukahori, T., Okumura, K., Kai, T., Chiba, S., Furuta, T., Sihver, L., Particle and Heavy Ion Transport Code System PHITS Version 2.52, J. Nucl. Sci. Technol., vol.50, no.9, 2013, pp.913-923.
- [3.2.1-1] 廃炉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) -平成30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 2019-040, 2020, 77p.
- [3.2.2-1] 長岡技術科学大学, 平成29年度 文部科学省 国家課題対応型研究開発推進事業 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業「プラント内線量率分布評価と水中デブリ探査に係る技術開発」成果報告書, 2019, 84p.
- [3.2.2-2] Nancekievill, M. et al., Detection of Simulated Fukushima Daiichi Fuel Debris Using a Remotely Operated Vehicle at the Naraha Test Facility, Sensors, vol.19, no.20, 2019, pp.4602_1-4602_16.
- [3.2.2-3] Liu, Y. et al., DeepCrack:A Deep Hierarchical Feature Learning Architecture for Crack Segmentation, Neurocomputing, vol.338, no.21, 2019, pp.139-153.
- [3.2.2-4] Canny, J., A Computational Approach to Edge Detection, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol.8, no.6, 1986, pp.679-698.
- [3.2.2-5] Ballard, D. H., Generalizing the Hough Transform to Detect Arbitrary Shapes, Pattern Recognition, vol.13, no.2, 1981, pp.111-122.
- [3.3.1] 奥村啓介, 坂本雅洋, 多田健一 他, 東京電力福島第一原子力発電所の全炉心3次元核種インベントリ計算, 日本原子力学会 2021年春の年会予稿集, 2021, 3B01, 3B02.

- [3.3.2] Bottommley, P. D. W., Gregoire, A-C., Carbol, P. 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, Nuclear Engineering and Technology, vol.38, no.2, 2006, pp.163-174.
- [3.3.3] Okumura, K., Riyana, E. S., Sato, W., Maeda, H., Katakura, J., Kamada, S., Joyce, M. J., Lennox, B., A Method for the Prediction of the Dose Rate Distribution in a Primary Containment Vessel of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, Progress in Nuclear Science and Technology, vol.6, 2019, pp.108-112.
- [3.3.4] Sato, T., Iwamoto, Y., Hashimoto, S. 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.
- [3.3.5] 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 3号機 原子炉格納容器内部調査 映像からの3次元復元結果, 2018年4月26日,
<https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/decommissioning/committee/osensuitaisakuteam/2018/05/3-03-03.pdf> (参照日: 令和2年10月6日) .
- [3.3.6] 原子力損害賠償・廃炉等支援機構, 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のための技術戦略プラン2020,
https://www.dd.ndf.go.jp/files/user/pdf/strategic-plan/book/20201006_SP2020FT.pdf (参照日: 令和2年11月9日) .

This is a blank page.

