

JAEA-Review 2021-042 DOI:10.11484/jaea-review-2021-042

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)

ー令和 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 Radiation-resistant Sensor for Fuel Debris by Integrating Advanced Measurement Technologies (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 高エネルギー加速器研究機構

> Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science, Fukushima Research Institute, Sector of Fukushima Research and Development High Energy Accelerator Research Organization

January 2022

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

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

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

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency. This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (<u>https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en</u>). Even if the results of this report (including data) are not copyrighted, they must be used under

the same terms and conditions as CC-BY.

For inquiries regarding this report, please contact Institutional Repository and Utilization Section, JAEA Innovation Hub, Japan Atomic Energy Agency.

2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan

Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2022

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-

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

高エネルギー加速器研究機構

(2021年10月5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、平成30年度に採択された「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」の平成30年度から令和2年度の研究成果について取りまと めたものである。本課題は令和2年度が最終年度となるため3年度分の成果を取りまとめた。

本研究は、冠水した燃料デブリの分布状況及び臨界性を「その場」で測定・分析することを目 的として、小型のダイヤモンド中性子センサーと、回路設計により耐放射線性を向上した集積回 路を開発して中性子計測システムを構築し、マルチフェイズドアレイ・ソナーや表層下部音波探 査装置(SBP)とともに、ROV(日英共同研究で開発)に設置し、PCV 模擬水槽で実証試験を行う。

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、高エネルギー加速器研究機構が実施した成果を取りまとめたものである。

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

i

Research and Development of Radiation-resistant Sensor for Fuel Debris by Integrating Advanced Measurement Technologies

(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

High Energy Accelerator Research Organization

(Received October 5, 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 FY2018, this report summarizes the research results of the "Research and development of radiation-resistant sensor for fuel debris by integrating advanced measurement technologies" conducted from FY2018 to FY2020. Since the final year of this proposal was FY2020, the results for three fiscal years were summarized.

The present study aims to in-situ measure and analyze the distribution status and criticality of flooded fuel debris. For this purpose, we construct a neutron measurement system by developing compact diamond neutron sensor and integrated circuit whose radiation resistance was improved by circuit design. Along with the multi-phased array sonar and the acoustic sub-bottom profiling (SBP) system, the neutron measurement system will be installed in the ROV (developed by Japan-UK collaboration) and its demonstration tests will be conducted in a PCV mock-up water tank.

Keywords: Fuel Debris, CVD Diamond Detector, Radiation-resistant Integrated Circuit, Neutron Detection, Remotely Operated Vehicle, Sonar, Virtual Reality Technology

This work was performed by High Energy Accelerator Research Organization 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 | |
|-----|---|---|
| | | |
| 2. | Accepted Proposal in FY2018 2 | ŗ |
| 3. | Accepted Proposal in FY20195 | • |
| 4. | Accepted Proposal in FY2020 | |
| App | pendix Result Report | |

This is a blank page.

1. 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業の概要

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

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

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

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

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

- 1 -

2. 平成 30 年度 採択課題

平成30年度採択課題については以下のとおりである。

課題数:19課題

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

平成 30 年度 採択課題一覧

共通基盤型原子力研究プログラム

【若手研究】

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

共通基盤型原子力研究プログラム

【一般研究】

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

課題解決型廃炉研究プログラム

| 課題名 | 研究代表者 | 所属機関 |
|--|-------|-------------------|
| 合金相を含む燃料デブリの安定性評価のための基 盤研究 | 桐島 陽 | 東北大学 |
| ガンマ線画像スペクトル分光法による高放射線場 環境の画像化による定量的放射能分布解析法 | 谷森 達 | 京都大学 |
| 燃料デブリ取出し時における放射性核種飛散防止 技術の開発 | 鈴木 俊一 | 東京大学 |
| アルファダストの検出を目指した超高位置分解能 イメージング装置の開発 | 黒澤 俊介 | 東北大学 |
| ナノ粒子を用いた透明遮へい材の開発研究 | 渡邊 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 |
|--|---------------------------------------|------------------|
| ー次元光ファイバ放射線センサを用いた原子炉建 屋内放射線源分布計測 | 瓜谷 章 | 名古屋大学 |
| 低線量・低線量率放射線被ばくによる臓器別酸化ス トレス状態の検討 | 鈴木 正敏 | 東北大学 |
| 単一微粒子質量分析法に基づくアルファ微粒子オ ンラインモニタリングに向けた基礎検討 | 豊嶋 厚史 | 大阪大学 |
| 幹細胞動態により放射線発がんを特徴付ける新た な評価系の構築 | 飯塚 大輔 | 量子科学技術 研究開発機構 |
| 耐放射線性ダイヤモンド半導体撮像素子の開発 | 梅沢 仁 ^(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 | 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 | 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 ^(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 |

JAEA-Review 2021-042

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 |

本報告書は、以下の課題の平成30年度から令和2年度の研究成果を取りまとめたものである。本課題は令和2年度が最終年度となるため3年度分の成果を取りまとめている。

課題解決型廃炉研究プログラム

| 課題名 | 研究代表者 | 所属機関 |
|---------------------------------------|-------|-------------------|
| 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 |

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

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 (契約番号 R021029)

成果報告書

令和3年3月

大学共同利用機関法人

高エネルギー加速器研究機構

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、大学共同利用機関法人高エネルギー加 速器研究機構が実施した「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」の平成30年度 から令和2年度の研究成果を取りまとめたものです。本課 題は令和2年度が最終年度となるため3年分の成果を取り まとめています。

目次

| 概略viii |
|---|
| 1. はじめに |
| 1.1 研究の狙い |
| 1.2 背景 |
| 1.3 研究構想 1-2 |
| 2. 業務計画 2.1-1 |
| 2.1 全体計画 2.1-1 |
| 2.1.1 全体計画図 2.1-1 |
| 2.1.2 実施体制図 2.1-2 |
| 2.2 各年度の成果の目標及び業務の実施方法2.2-1 |
| 2.2.1 耐放射線集積回路の研究開発と核分裂中性子測定システムの開発 2.2-1 |
| 2.2.2 中性子検出用ダイヤモンドセンサーの研究開発(再委託先:物材機構)2.2-2 |
| 2.2.3 複合型センサーを搭載した ROV による遠隔計測技術の開発(再委託先:海技研) |
| |
| 2.2.4 研究推進2.2-6 |
| 3. 業務の実施内容及び成果 3.1-1 |
| 3.1 耐放射線集積回路の研究開発と核分裂中性子測定システムの開発【平成 30 年 |
| 度~令和2年度】 3.1-1 |
| 3.1.1 耐放射線トランジスタ及び集積回路の研究開発 |
| 3.1.2 核分裂中性子測定システムの開発【平成 30 年度~令和 2 年度】 3.1-9 |
| 3.2 中性子検出用ダイヤモンドセンサーの研究開発(再委託先:物材機構)【平成 |
| 30年度~令和2年度】3.2-1 |
| 3.2.1 高品質ダイヤモンド成長に関する研究 |
| 3.2.2 センサー形成プロセスに関する研究 3.2-4 |
| 3.2.3 中性子検出用センサー構造に関する研究 中性子検出用センサー構造に関する研究 |
| 3.3 複合型センサーを搭載した ROV による遠隔計測技術の開発(再委託先:海技 |
| 研)【平成 30 年度~令和 2 年度】 3. 3-1 |
| 3.3.1 音響探査装置と中性子センサーを組み合わせた複合型センサーの開発 3.3-1 |
| 3.3.2 原子炉外部から ROV による遠隔計測を可能にする遠隔操作技術の開発 3.3-12 |
| 3.4 研究推進 |
| 4. 結言 |

```
執筆者リスト
```

事業代表者

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 |
|-----|------|
| 教授 | 田中真伸 |
| 准教授 | 岸下徹一 |
| 准教授 | 宮原正也 |
| 技師 | 坂口将尊 |
| 技師 | 庄子正剛 |

分担代表者

国立研究開発法人物質・材料研究機構 グループリーダー 小泉 聡 研究員 嶋岡毅紘 研究員 市川公善

分担代表者

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 |
|-------|------|
| 専門研究員 | 西村和哉 |
| 専門研究員 | 加藤道男 |

表一覧

| 表 3.1.1-1 | 評価したトランジスタ素子のまとめ3.1-2 |
|-----------|---|
| 表 3.1.2-1 | 主な半導体素子に対する物理的特性3.1-11 |
| 表 3.1.2-2 | CIVIDEC Instrumentation GmbH 製熱中性子測定用ダイヤモンド検出器 B6-C |
| | の構造パラメータ3.1-13 |
| 表 3.1.2-3 | Mixed α線源の仕様3.1-14 |
| 表 3.1.2-4 | B6-C検出器のエネルギー分解能 3.1-15 |
| 表 3.1.2-5 | 放射線照射棟で利用可能なγ線源の詳細3.1-18 |
| 表 3.1.2-6 | γ線源と検出器間の距離に対する空気吸収線量と検出器の計数率3.1-24 |
| 表 3.1.2-7 | FRS 中性子校正場の照射条件 3.1-29 |
| 表 3.2.1-1 | CVD ダイヤモンド成長条件(令和元年度) 3.2-2 |
| 表 3.2.1-2 | CVD ダイヤモンド成長条件(令和2年度) 3.2-2 |
| 表 3.3.1-1 | 各種ソナーの仕様比較3.3-9 |
| 表 3.3.2-1 | 2次元画像から3次元画像への変換時間 3.3-17 |

図一覧

| 図 1.1-1 | ROV による遠隔探査技術の概念図 | 1-3 |
|------------|--|---------|
| 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 | 2.1-2 |
| 図 3.1.1-1 | CMOS 65 nm プロセスを使用した耐放射線評価用トランジスタサンプル | 3.1-1 |
| 図 3.1.1-2 | トランジスタ形状についての説明 | 3.1-3 |
| 図 3.1.1-3 | normal トランジスタの1 MGy 照射前後の特性比較 | 3.1-4 |
| 図 3.1.1-4 | H-shape トランジスタの照射前後の特性 | 3.1-4 |
| 図 3.1.1-5 | normal 形状の NMOS、PMOS トランジスタの照射前後の特性 | 3.1-5 |
| 図 3.1.1-6 | 100 MHz 10 bit ADCの照射試験結果 | 3.1-6 |
| 図 3.1.1-7 | 開発した中性子検出素子信号処理集積回路と集積回路を実装した信号処理 | E |
| | ボード | 3.1-7 |
| 図 3.1.1-8 | 中性子検出素子用信号処理集積回路のダイナミックレンジ特性 | 3.1-8 |
| 図 3.1.2-1 | Cに対する質量阻止能と飛程 | 3.1-11 |
| 図 3.1.2-2 | ⁶ LiF に対する質量阻止能と飛程 | 3.1-12 |
| 図 3.1.2-3 | BN に対する質量阻止能と飛程 | 3. 1-12 |
| 図 3.1.2-4 | 熱中性子測定用ダイヤモンド検出器 B6-C の構造 | 3.1-13 |
| 図 3.1.2-5 | 波高分布測定システムの例 | 3. 1-14 |
| 図 3.1.2-6 | B6-C で測定した α 線の波高分布 | 3.1-15 |
| 図 3.1.2-7 | B6-C 検出の I-V 特性(左)と CCE(右) | 3.1-16 |
| 図 3.1.2-8 | 恒温槽を用いた実験体系 | 3. 1-17 |
| 図 3.1.2-9 | 昇温時のエネルギー分解能 | 3. 1-17 |
| 図 3.1.2-10 | 放射線照射棟におけるγ線照射体系 | 3. 1-18 |
| 図 3.1.2-11 | PHITS 描画機能による計算体系のモデル | 3. 1-19 |
| 図 3.1.2-12 | ¹³⁷ Cs γ 線源平行照射による B6-C の波高分布 | 3.1-20 |
| 図 3.1.2-13 | ⁶⁰ Coγ線源平行照射による B6-C の波高分布 | 3.1-20 |
| 図 3.1.2-14 | ⁶⁰ Coγ線源垂直照射による B6-C の波高分布 | 3.1-21 |
| 図 3.1.2-15 | しきいエネルギーに対する B6-C 検出器の γ 線平行照射による応答関数. | 3. 1-21 |
| 図 3.1.2-16 | しきいエネルギーに対する B6-C 検出器の γ 線垂直照射による応答関数. | 3. 1-22 |
| 図 3.1.2-17 | 高線量率γ線照射体系 | 3. 1-23 |
| 図 3.1.2-18 | 高線量率γ線に対する B6-C 検出器の波高分布 | 3.1-25 |
| 図 3.1.2-19 | 空気吸収線量率に対する計数率が 0.1 cps/keV 以上となる最大付与エネル | / |
| | ギー | 3.1-25 |
| 図 3.1.2-20 | 黒鉛パイルの外観と寸法 | 3.1-26 |
| 図 3.1.2-21 | 熱中性子場における B6-C 検出器の波高分布 | 3.1-27 |
| 図 3.1.2-22 | 熱から 20 MeV までの中性子エネルギーに対する B6-C 検出器の応答関数. | 3. 1-28 |
| 図 3.1.2-23 | ⁶ LiF コンバータを Sandwich 構造にした中性子感度と B6-C 検出器の中性 | |
| | 子感度との比較 | 3.1-28 |
| 図 3.1.2-24 | FRS における単色中性子照射体系 | 3.1-29 |
| 図 3.1.2-25 | 速中性子照射時のモデレータ設置体系 | 3.1-30 |
| 図 3.1.2-26 | エネルギーに対する中性子照射時の応答関数 | 3.1-31 |

| 図 3.1.2-27 | ポリエチレン減速材の厚さに対する中性子応答関数のシミュレーション. | 3.1-32 |
|------------|--|----------|
| ⊠ 3.1.2-28 | 京都大学複合原子力科学研究所電子線加速器による実験体系 | 3.1-33 |
| 図 3.1.2-29 | Ta ターゲット周りの水減速材の構造と PHITS で求めた中性子スペクトル | 3.1-33 |
| 図 3.1.2-30 | 電子線加速器を用いた実験で得られた 25 µm 厚さの B6-C 検出器の波高分 | |
| | 布 | 3.1-34 |
| ⊠ 3.1.2-31 | 水中の 2 MeV 中性子の減弱の様子 | 3.1-35 |
| ⊠ 3.1.2-32 | 2 MeV 中性子が水中で減速して生成する熱中性子の減弱の様子 | 3.1-35 |
| 図 3.1.2-33 | 水厚さに対する 2 MeV 中性子束と熱中性子束の減衰曲線 | 3.1-36 |
| 図 3.1.2-34 | γ線エネルギーに対する鉛の半価層、1/10、1/100厚 | 3.1-36 |
| ⊠ 3.1.2-35 | 中性子センサー格納容器兼コリメータ | 3.1-37 |
| 図 3.2.1-1 | CVD システムの概略 | 3.2-1 |
| ⊠ 3.2.1-2 | 酸素添加有無の条件で基板表面に成長したダイヤモンドの表面形態 | 3.2-3 |
| ⊠ 3.2.1-3 | 成長したダイヤモンドの B 濃度の酸素ガス比依存性 | 3.2-3 |
| ⊠ 3.2.2-1 | センサー形成プロセスの概略 | 3.2-4 |
| ⊠ 3.2.2-2 | ダイヤモンド基板表面での pin 積層成長の概略 | 3.2-4 |
| ⊠ 3.2.2-3 | 酸素添加条件により高濃度 B ドープ層に成長した p-層の B 濃度の深さプ | |
| | ロファイル | 3.2-5 |
| 図 3.2.2-4 | ダイヤモンドメサ構造の形成プロセス | 3.2-6 |
| 図 3.2.2-5 | 本事業で作製した(a) 最終的な pin ダイオードの構造概略と(b)メサ加工 | |
| | 後のレーザー顕微鏡像及び(c)断面プロファイル | 3.2-7 |
| 図 3.2.2-6 | 本事業で作製した最終的な pin ダイオードの I-V 特性 | 3.2-8 |
| 図 3.2.2-7 | C-V 特性から算出した pin ダイオードの空乏層幅と印加電圧との関係 | 3.2-8 |
| 図 3.2.3-1 | A1 筐体に取り付けた疑似縦型構造 pin ダイオードの外観(a) と ²⁴¹ Am 線源 | |
| | を用いた α 粒子照射試験の概略(b) | 3.2 - 10 |
| ⊠ 3.2.3-2 | 疑似縦型構造 pin ダイオードの α 線応答スペクトル | 3.2 - 11 |
| ⊠ 3.2.3-3 | Al 箔を付けた疑似縦型構造 pin ダイオードの外観(a)と実験の概略(b) | 3.2-12 |
| 図 3.2.3-4 | Si-pin ダイオードで求めた α 粒子エネルギーの Al 箔厚さ依存性 | 3.2 - 13 |
| 図 3.2.3-5 | 1.3 MeVの α 線に対する応答スペクトル | 3.2-13 |
| 図 3.2.3-6 | (a)中性子照射実験に用いたダイヤモンド pin ダイオード検出器の概略 | |
| | (b)中性子照射の実験系(高エネ研・熱中性子標準棟) | 3.2 - 14 |
| 図 3.2.3-7 | γ線に対する応答スペクトル | 3.2 - 15 |
| 図 3.2.3-8 | 検出器の有感面積と照射時間で規格化したカウント数 | 3.2 - 16 |
| ⊠ 3.2.3-9 | 接続試験を行った(a)ダイヤモンド pin ダイオードと(b)その電流-電圧特 | |
| | 性 | 3.2-16 |
| 図 3.2.3-10 | (a) ROVER 接続用基板に実装された信号処理集積回路とダイヤモンド pin | |
| | ダイオード (b)接続したダイヤモンド pin ダイオードの拡大写真 | 3.2 - 17 |
| 図 3.2.3-11 | ダイヤモンド pin ダイオードと信号処理集積回路を通して検出した 5.5 | |
| | MeVα 線の応答波形の一例 | 3.2 - 17 |
| 図 3.3.1-1 | SBP 探査システムの構成 | 3.3-1 |
| ⊠ 3.3.1-2 | SBP 試験体系図 | 3.3-2 |
| 図 3.3.1-3 | SBP 性能試験の様子 | 3.3-2 |
| 図 3.3.1-4 | パルス幅 83.3 µs と 16.7 µs の場合のハイドロホン信号波形の比較 | 3.3-3 |
| ⊠ 3.3.1-5 | 図 3.3.1-4 の波形の FFT スペクトル | 3.3-3 |

| 図 3.3.1-6 | SBP による断層図(左)、SBP 測定で取得した波形(右) | 3.3-4 |
|--------------|--|---------|
| 図 3.3.1-7 | 受信波の FFT スペクトル | 3.3-5 |
| ⊠ 3.3.1-8 | 水中スピーカと音響レンズの距離 D1 と伝搬距離 D2 の振幅の関係 | 3.3-5 |
| ⊠ 3.3.1-9 | D1=50 mm における音響レンズ後方 D2=70 mm の音響ビーム分布 | 3.3-6 |
| ⊠ 3.3.1-10 | 水槽中のデブリ模擬体と音響レンズ付 SBP 試験治具の外観 | 3.3-6 |
| ⊠ 3.3.1-11 | 音響レンズ付 SBP による音圧分布と SonarWiz の断層図 | 3.3-7 |
| ⊠ 3.3.1-12 | 音響レンズ無し SBP による音圧分布と SonarWiz の断層図 | 3.3-7 |
| ⊠ 3.3.1-13 | 模擬デブリをおいた際の SBP イメージ | 3.3-8 |
| 図 3.3.1-14 | ウェーブレット解析結果(レンズ有り) | 3.3-8 |
| ⊠ 3.3.1-15 | ウェーブレット解析結果(レンズ無し) | 3.3-9 |
| ⊠ 3.3.1-16 | ソナーの外観 | 3.3-9 |
| 図 3.3.1-17 | 模擬デブリ外観 | 3.3-10 |
| 図 3.3.1-18 | ソナーによる 3 次元画像 | 3.3-10 |
| 🗵 3. 3. 1-19 | 照射試験の様子 | 3.3-11 |
| ⊠ 3.3.2-1 | P-ROVの断面図 | 3.3-12 |
| 図 3.3.2-2 | ROV 改良後のセンサー類とその制御系配置 | 3.3-13 |
| 図 3.3.2-3 | センサー類の通信制御とその電源系ブロック図 | 3.3-14 |
| ⊠ 3.3.2-4 | 中性子センサープローブ通信制御回路 | 3. 3-15 |
| ⊠ 3.3.2-5 | 複合センサー及びカメラ等のセンサー類を搭載した ROV | 3.3-16 |
| ⊠ 3.3.2-6 | 3 次元動画変換ソフトで VR 投影用に変換した 3 次元画像 | 3.3-17 |

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 | | | | |
|--------|---------------------------------------|------------------------------|--|--|--|
| AFM | : Atomic Force Microscope | (原子間力顕微鏡) | | | |
| CCE | : Charge Collection Efficiency | (電荷収集効率) | | | |
| CLADS | : Collaborative Laboratories for Adva | nced Decommissioning Science | | | |
| | | (廃炉環境国際共同研究センター) | | | |
| CMOS | : Complementary MOS | (相補型金属酸化膜半導体) | | | |
| CVD | : Chemical Vapor Deposition | (化学気相成長) | | | |
| EB | :Electron Beam | (電子線) | | | |
| ESD | :ElectroStatic Discharge | (静電気放電) | | | |
| FFT | : Fast Fourier Transform | (高速フーリエ変換) | | | |
| FHWM | : Full Width at Half Maximum | (半値全幅) | | | |
| FRS | : Facility of Radiation Standards | (放射線標準施設) | | | |
| IMU | : Inertial Measurement Unit | (慣性測定装置) | | | |
| IRID | : International Research Institute fo | r Nuclear Decommissioning | | | |
| | | (技術研究組合国際廃炉研究開発機構) | | | |
| JAEA | : Japan Atomic Energy Agency | (国立研究開発法人日本原子力研究開発機構) | | | |
| MOS | : Metal Oxide Semiconductor | (金属酸化膜半導体) | | | |
| NMOS | : Negative MOS | (N型金属酸化膜半導体) | | | |
| PCV | : Primary Containment Vessel | (原子炉格納容器) | | | |
| PMOS | : Positive MOS | (P型金属酸化膜半導体) | | | |
| ROV | : Remotely Operated Vehicle | (水中ロボット) | | | |
| SARADC | : Successive Approximation Register A | nalog to Digital Convertor | | | |
| | | (逐次比較型アナログデジタルコンバータ) | | | |
| SBP | : Sub Bottom Profiler | (表層下部音波探査装置) | | | |
| SIMS | : Secondary Ion Mass Spectrometry | (2 次イオン質量分析) | | | |
| VR | : Virtual Reality | (仮想現実) | | | |
| | | | | | |

概略

東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所(以下、「1F」と略す。)の廃炉を加 速するためには、燃料デブリの位置を把握して、通常の原子力発電所にはない放射性物質に起因 するリスクを、継続的、かつ速やかに下げつつ、廃炉工法を決定する必要がある。さらに燃料デ ブリの取り出し時の、作業員の安全を確保するためには、廃炉工法の各工程における燃料デブリ の臨界性をなるべく正確に評価し、迅速に対策を施すことが必要となる。そこで、本業務では冠 水した燃料デブリの分布状況及び臨界性を「その場」で測定・分析することを目的として、マル チフェイズドアレイ・ソナーや表層下部音波探査装置(以下、「SBP」と略す。)とダイヤモンド中 性子センサーからなる複合計測技術の開発を分野横断的な研究体制によって行う。ソナーや SBP による水底形状や水底表層下部構造の情報から燃料デブリの存在が疑われる場所を選定し、燃料 デブリの自発核分裂によって放出される中性子をテレスコープ状コリメータによって中性子検出 用ダイヤモンドセンサーに導き、燃料デブリの位置を特定するシステムを開発する。さらに燃料 デブリから放出される中性子のエネルギー分布と水中の減弱距離から、燃料デブリを検知するた めに必要な近接距離を整理する。高信号対雑音比、高計数率を実現する信号処理集積回路につい ては、超微細の相補型金属酸化膜半導体(以下、「CMOS」と略す。)プロセスを用いた高耐放射線 トランジスタデザインを通じて耐放射線化を図る。また、これらを搭載して所定の位置に配置さ せるための遠隔操作技術の開発・試験を、原子炉格納容器(以下、「PCV」と略す。)を模擬したロ ボット試験用水槽等を用いて実施する。

本研究は国立研究開発法人物質・材料研究機構(以下、「物材機構」と略す。)で行う1.中性子 検出用ダイヤモンドセンサーの研究開発、及び大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機 構(以下、「高エネ研」と略す。)で行う2.高耐放射線信号処理集積回路の研究開発と核分裂中性 子測定システムの開発、及び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 (以下、「海技研」と略す。)で行う3.複合型センサー及び水中ロボット(以下、「ROV」と略す。) による遠隔計測技術の開発の3つの柱からなる。

- 1. 中性子検出用ダイヤモンドセンサーの研究開発は以下の3項目よりなる。
 - ① 高品質ダイヤモンド成長に関する研究

現在、物材機構では量子コンピュータ用の超高品質結晶を開発しており、そのノウハウ を本研究に生かすことで、より効果的に高性能ダイヤモンドセンサーを開発するための結 晶を製作する。平成 30 年度の準備期間を経て、2 年目に高品質結晶を製作し、3 年目には ②と③で最適化されたプロセスと検出器構造を高品質結晶上に実現する。

② センサー開発プロセスに関する研究

ダイヤモンドセンサーを製作するには、p型、n型の半導体薄膜成長プロセスと電極製作 の研究が必須である。平成30年度はダイヤモンド結晶を購入し、それに対してドーピング 濃度、プロファイル、構造加工プロセスの最適化を行い評価する。高品質ダイヤモンド膜 の研究は2年目から開始する。

③ センサー構造に関する研究

②と緊密に連携を取りながらセンサーの構造を検討し研究開発する。②で得られたノウ ハウを投入してダイヤモンドセンサーを製作し、放射線照射前の電荷キャリア輸送特性評 価を行う。平成 30 年度の準備期間を経て、2 年目に②で製作された素子評価を開始する。

- 2. 耐放射線センサー信号処理集積回路と核分裂中性子測定システムの開発は以下の 2 項目より なる。
 - ① 耐放射線センサー信号処理集積回路の研究開発

本研究は、主に耐放射線トランジスタ開発とそれをベースとしたセンサー信号処理集積回路の開発からなる。耐放射線トランジスタ開発に関しては、商用 CMOS プロセスを用い異なった構造のトランジスタを製作/開発し耐放射線特性の評価を行う。センサー用信号処理集積回路の研究開発は、高レート y線環境下での信号処理の最適化を中心にデザインを開始し、耐放射線トランジスタの照射試験の結果を基に2年目から製作を始め、令和2年度に完成させる。また、物材機構にて開発されたセンサーと接続し、放射線応答評価を実施する。ダイヤモンドセンサーとの接続試験に関しては、放射線を使用した試験等により、ダイヤモンドセンサーの耐環境特性を詳細に測定し、効率的に開発を進める。

② 核分裂中性子測定システムの開発

入手できるダイヤモンド検出器の特性試験を実施し、PHITS によるシミュレーション評価 を進める。2年目から実施する中性子コリメータや γ 線遮へいの仕様検討を行い、その後核 分裂中性子測定システムのプロトタイプの製作を行う。高エネ研や国立研究開発法人日本原 子力研究開発機構(以下、「JAEA」と略す。)等の中性子校正場を用いて、水中を模擬した実 験体系を構築し、0.025 eV から 14 MeV までの様々なエネルギーに対する中性子応答評価を 行う。

- 3. 複合型センサーを搭載した ROV による遠隔計測技術の開発は以下の2項目よりなる。
 - ① 音響探査装置と中性子センサーを組み合わせた複合型センサーの開発

マルチフェイズドアレイ・ソナーと SBP に対して小型・軽量化に向けた研究開発を進める。 ROV に搭載した場合の物理的、電気的問題点を検討し、実用上の課題を抽出する。外部施設を 利用して γ 線照射試験を行い、耐放射線性を調べる。

② 原子炉外部から ROV による遠隔計測を可能にする遠隔操作技術の開発

ソナーシステムと中性子センサーから構成される複合センサーが搭載可能となるよう、海 技研が所有する ROV を改良する。PCV を模擬した水槽などで ROV による遠隔計測技術の実証 試験を実施し、今後の改良や実用化へとフィードバックする。遠隔制御技術としては、新た に水中位置測位システムや仮想現実(以下、「VR」と略す。)の技術等を検討する。

1. はじめに

1.1 研究の狙い

IFの廃炉を加速するためには、まずは燃料デブリの位置を把握して、通常の原子力発電所 にはない広範囲に汚染した放射性物質に起因するリスクを、継続的、かつ速やかに下げなが ら、廃炉工法を決定する必要がある。さらに燃料デブリの取り出し時における作業員の安全 を確保するためには、廃炉工法の各工程における燃料デブリの臨界性をなるべく正確に評価 し、迅速に対策を施すことが重要となる。本研究では、このような IF の炉内状況の把握、燃 料デブリ取り出しの早期実現、臨界リスク管理に資するため、原子力分野のみならず他分野 の最先端技術を融合させ、これまでの原子力施設での作業環境に比べはるかに高い放射線環 境下においても遠隔で動作する画期的な燃料デブリ探査用複合センサーの技術開発を行う。 冠水した燃料デブリから放出される自発核分裂中性子に着目して、高 γ 線環境下においても 動作するダイヤモンド中性子センサーの研究開発と、マルチフェイズドアレイ・ソナーや SBP による水中探査技術の研究開発を行い、極限放射線環境下での中性子束分布測定技術に応用 する。また、センサーの信号処理アナログ集積回路に用いる耐放射線トランジスタのデザイ ンと照射試験や ROV 試験を通じて、遠隔制御による廃炉作業を支える耐放射線エレクトロニ クスの基盤要素技術を確立させる。

1.2 背景

監視カメラやロボットなどの目に使用される CCD カメラなどのシリコン半導体センサーは 放射線計測にも多く用いられるが、耐放射線性能が高くないため、高放射線環境下の原子炉 内部調査には、不向きである。一方、ダイヤモンドは半導体センサー材料として優れた特性 を持っており、特にワイドギャップ及び低誘電率により、高放射線環境下では他の半導体を しのぐ信号対雑音比を有する優れたセンサー材料である。現在ダイヤモンドを使用した素子 研究は日本が世界をリードしており、世界一の高品質化学気相成長(以下、「CVD」と略す。) ダイヤモンド膜成長技術及びそれを使用した高精細高感度ダイヤモンドセンサー開発用のプ ロセス技術のノウハウは物材機構が保有している。その保有技術によって作成される pin 型 ダイヤモンド素子は、消費電力が低く有感領域の空乏層厚を容易に変えられるなど、汎用的 な min 型ダイヤモンド素子に比べて多くの優位性を持つ。また物材機構の開発したダイオー ド等のデバイスは3 MGy の放射線照射後も故障せず動作することが過去の研究からわかって きている。

高エネ研ではBファクトリー加速器・Large Hadron Collider・大強度陽子加速器施設等世 界最強加速器の高放射線環境下で動作するセンサー信号処理用集積回路開発と実用化を行っ てきた。その経験から、超微細 CMOS プロセスを用い、かつトランジスタ構造を変えることで、 商用シリコン半導体プロセスを使用した集積回路でも4 MGy もの高放射線環境下で安定に動 作することがわかってきた。

一方、超音波や可聴音を利用する水中探査技術は、水中構造物の検査、河川や海底の3次 元地形図の作成などに使用されている成熟度の高い技術であり、事故進展挙動解析等で燃料 デブリの存在が示唆されている水没した PCV ペデスタル底などの堆積層表面の凹凸形状を高 分解能で探索することができる。ただし、ソナー単体では放射線を計測することはできない ため、水中の対象物が燃料デブリか否かの迅速な判別ができない。また、セシウム 137 (¹³⁷Cs) 等の放射性物質で高レベルに汚染された水面下では、燃料デブリから放出される特性γ線の 測定を行ってもバックグラウンドγ線に埋もれてしまい燃料デブリ位置の特定に至らない 可能性がある。 以上の背景から我々は、燃料デブリから放出される自発核分裂中性子の計測に狙いを定め、 高γ線環境下でも安定に動作する小型ダイヤモンドセンサーと中性子コンバータからなる中 性子検出用センサーを開発し、海技研が開発を進めているマルチフェイズドアレイ・ソナー や SBP と組み合わせることで水面下にある燃料デブリの存在とその臨界リスクを迅速に「そ の場」で明らかにする遠隔探査技術の着想に至った。図 1.1-1 に本研究で目指す ROV による 遠隔探査技術の概念図を示す。

- 1.3 研究構想
 - A) 中性子検出用ダイヤモンドセンサーの研究開発

センサーの小型化の限界を見極めるため 200 µm 角を目標としてサイズの最小化を目指 す。また、 γ 線に対する感度を極限まで下げるため、ダイヤモンド結晶の厚さは 5 µm 程 度として製造プロセスの改良を行う。センサーを B)で開発する集積回路と接合し、 α 線 源等を用いて放射線検出器としての動作確認を行う。中性子コンバータと組み合わせて中 性子束が 10² ~10⁸ n/cm²/s の範囲内で動作可能であることを示す。

B) 耐放射線集積回路開発と核分裂中性子測定システムの開発

商用微細 CMOS プロセスを用いて耐放射線構造を持つトランジスタを開発し、1 MGy の γ線照射においても正常に動作することを確認する。また、その技術を高γ線環境下にお いてダイヤモンドセンサーの信号を読み出すための集積回路開発に応用する。また中性子 コリメータや遮へい設計を行うとともに、0.025 eV から 14 MeV のまでの様々なエネルギ ーの中性子を照射して、核分裂中性子測定システムの特性を評価する。

C) 複合型センサーを搭載した ROV による遠隔計測技術の開発

従来の水中ソナーの実用例に比べ狭い閉鎖空間となる 1F PCV への適用性を評価する とともに、水没した PCV ペデスタル底などの堆積層表面の凹凸形状を高分解能で確認で きるようにする。また、燃料デブリが堆積層下部に埋没あるいは岩塊中に含有している可 能性も想定し、複数の周波数帯域のソナーシステムに対して技術開発を行う。ソナーシス テムについても1 kGy 程度の γ線照射を行い、動作可能なことを確認する。これまで行 ってきた ROV 開発の知見等も反映させ、格納容器を模擬したロボット試験用水槽等を使 用した水中試験等により、実用化のための基礎データを取得する。次に ROV にダイヤモン ド中性子センサー、マルチフェイズドアレイ・ソナー及び SBP から構成される複合型セン サーを搭載してデブリを探査・特定するための ROV の遠隔操作技術の開発・試験を実施す る。



図 1.1-1 ROV による遠隔探査技術の概念図

- 2. 業務計画
- 2.1 全体計画

2.1.1 全体計画図
 本業務の全体計画図を図 2.1-1 に示す。

| 年度 | | | |
|---|---------------------------------|-------------------------|------------------------------|
| 項目 | 平成30年度 | 令和元年度 | 令和2年度 |
| | • | 要素研究フェーズ (要素開発、理論検討) | 検証フェーズ (実装、試験、評価) |
| (1)耐放射線集積回路の研究開 発と核分裂中性子測定シス テムの開発 | 耐放射線トランジスタ開発・ | | 高集積回路の製作・実装 |
| ①耐放射線トランジスタ 及び集積回路の研究開発 | 高集積回路デザイン ◀ | トランジスタ製作、照射評価 ◀──── | 及び評価まとめ |
| ②核分裂中性子測定システム | シミュレーションによる システム設計 | システム製作・応答評価 | 照射試験 及び評価まとめ |
| の開発 | | | |
| (2) 中性子検出用ダイヤモンド センサーの研究開発 (物質・材料研究機構) | 高純度·高品質結晶 | | |
| ①高品質ダイヤモンド成長 | 成長条件探索 機器整備 | 高品質結晶開発 | 高純度結晶の成長技術開 発及び評価まとめ |
| に関する研究 ②センサー形成プロセス | 接合構造形成準備 | pin接合形成、最適化、評価 | 高純度i層を用いたpin接合形成、デバイス化、電気特性評 |
| に関する研究 ③中性子検出用センサー構造 | センサー構造設計・ 中性子コンバータの検討 | センサー構造最適化・製作 | センサー作製・実装技術 |
| に関する研究 | | | • • • |
| (3) 複合型センサーを搭載した 水中ロボットによる遠隔計 測技術の開発 (海上・港湾・航空技術研究所) | | | 複合型センサーの |
| ①音響探査装置と中性子 | りナー、SBPの 小型軽量化への検討 | 複合型センサーの開発 | 実証試験 及び評価まとめ |
| センサーを組み合わせた 複合型センサーの開発 | | | ■ PCV模擬水槽での |
| ②原子炉外部からROVによる 遠隔計測を可能にする 遠隔操作技術の開発 | 現有ROV改良の検討、 PCV環境模擬試験準備 ◀ | ◎ 遠隔計測技術の確認 | 実証試験及び評価まとめ |
| (4)研究推進 | 技術評価委員会の開催 | ★ 技術評価委員会の開催 △ △ △ | 技術評価委員会の開催 △ △ |
| | まとめ・評価 | まとめ・評(| ー あまため・評価 ● ● ● |

図 2.1-1 本業務の全体計画図

2.1.2 実施体制図

本業務の実施体制図を図 2.1-2 に示す。



図 2.1-2 本業務の実施体制図

2.1-2 - 28 - 2.2 各年度の成果の目標及び業務の実施方法

各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。

- 2.2.1 耐放射線集積回路の研究開発と核分裂中性子測定システムの開発
- ① 耐放射線トランジスタ及び集積回路の研究開発

平成 30 年度

1 MGy まで動作するトランジスタの開発を目標として、商用 CMOS65 nm 半導体プロセスを 利用して、通常の構造を持つトランジスタと耐放射線性能を高めた構造を持つトランジスタ を開発し、耐放射線試験が可能な評価サンプルを製作した。並行して中性子検出素子の信号 を処理するための高密度集積回路(中性子検出素子用信号処理集積回路)のデザインを開始 した。

マトリックススイッチをトランジスタの耐放射線性能を測定するための装置に組み込み、 評価システムを整備し稼動を確認した。TSMMC65 nm LP-CMOS プロセスを用いて評価用トラン ジスタ、高速信号処理回路、比較器、差動オペアンプ、発振回路、デジタルアナログコンバ ータ、アナログデジタルコンバータ及びデジタル I/O インターフェースのサンプルをデザイ ンし製作した。

令和元年度

1) センサー信号処理集積回路の製造

トランジスタの耐放射線化と並行して信号処理集積回路デザインの最適化を行い、動作 を確認した。また、入手できるダイヤモンド検出器のサンプルと結合させ評価し、令和2年 度に向けた問題点の洗い出しを行った。

2) トランジスタの評価と耐放射線センサー信号処理回路のデザイン

トランジスタ評価を継続し、その結果を取りまとめた後、トランジスタ構造の修正を行 い、平成 30 年度に検討した中性子検出ダイヤモンドセンサー用信号処理集積回路のデザイ ンを開始した。また、1)の評価結果を回路デザインにフィードバックした。

評価用トランジスタ、高速信号処理回路、比較器、差動オペアンプ、発振回路、デジタ ルアナログコンバータ、アナログデジタルコンバータ及びデジタル I/O インターフェース のサンプルに1 MGy まで γ線を照射し、動作確認を行った。またダイヤモンド検出器のサ ンプルと結合させ出力信号を確認した。この結果をもとに中性子検出ダイヤモンドセンサ ー用信号処理集積回路のデザインを開始し、プロトタイプ製造を完了した。さらに ROV へ の実装仕様を議論し、最終年度である令和 2 年度へ向けてデザインを進めた。

令和2年度

1) 耐放射線センサー信号処理集積回路のデザインと製造

耐放射線センサー信号処理集積回路デザインの最適化を行い、動作を確認した。また、 システムへ組み込むための基板を完成させた。

2) トランジスタとセンサー信号処理回路の評価

トランジスタ評価を継続し、その結果を取りまとめた。令和元年度に開発した集積回路 の評価を行い、令和2年度のデザインにフィードバックを行った。

② 核分裂中性子測定システムの開発

平成 30 年度

技術研究組合国際廃炉研究開発機構(以下、「IRID」と略す。)が公表している 1F PCV 内部 の線量環境(数+ Gy/h)下において、燃料デブリから放出される中性子を中性子束が 10²~ 10⁸ n/cm²/sの広ダイナミックレンジで検知可能な核分裂中性子測定システムの開発を目標と して、汎用粒子輸送計算コード PHITS を用いて中性子感度やγ線影響の評価計算を行い、シ ステム設計を開始した。

高エネ研が所有するスーパーコンピューターシステムに汎用粒子輸送計算コード PHITS を インストールし、核分裂中性子測定システム開発に必要なシミュレーション計算を実施する ための環境整備を行った。ダイヤモンド検出器の有感層厚さを1 µm から 500 µm まで変化さ せて、¹³⁷Cs からのγ線による有感層のエネルギー付与を計算し、有感層厚さに対するγ線影 響の評価を行った。システム設計に必要なダイヤモンド検出器について、中性子感度評価の ためのシミュレーション計算を実施した。

令和元年度

IRID が公表している 1F PCV 内部の線量環境(数+ Gy/h)下において、燃料デブリから放 出される中性子を中性子束が 10²~10⁸ n/cm²/s の広ダイナミックレンジで検知可能な核分裂 中性子測定システムの開発を目標として、入手可能なダイヤモンド検出器を用いた中性子感 度やγ線影響の実測と汎用粒子輸送計算コード PHITS によるシミュレーション計算をもとに、 システム設計を行った。さらに、水中を模擬した実験体系により、ダイヤモンド検出器の応 答評価を行った。

140 μm 厚と 25 μm 厚の CVD ダイヤモンド検出器に対して PHITS によるシミュレーション計 算を実施するとともに、自発核分裂中性子測定システムのプロトタイプを構築し、熱中性子 感度やγ線影響の測定を行った。JAEA の放射線標準施設(以下、「FRS」と略す。)において水 中を模擬した実験体系により、ダイヤモンド検出器の応答評価を行った。

令和2年度

高エネ研や京都大学複合研原子力科学研究所が所有する熱中性子場や中性子照射場を用いて、水中を模擬した実験体系を構築し、熱から14 MeVのエネルギーを持つ中性子に対する検 出器の応答試験を行った。シミュレーションも併用して、評価結果を取りまとめた。

2.2.2 中性子検出用ダイヤモンドセンサーの研究開発(再委託先:物材機構)

① 高品質ダイヤモンド成長に関する研究

平成 30 年度

高品質なダイヤモンド pin 構造を作製するために、{111}単結晶基板表面での CVD ダイヤモンド形成を行い、結晶成長品質を評価した。原子間力顕微鏡(以下、「AFM」と略す。)を用い、 原子層ステップ観察でステップフロー成長の完全性を評価した。
{111} 単結晶ダイヤモンド基板表面において、原料気体として 0.05 %で水素希釈された メタンガスを用いて CVD 成長した結果、AFM 観察により明瞭な原子層ステップ(0.2 nm)の形 成を確認した。結晶成長品質の評価は、物材機構に既存の 3 次元ラマンマッピング装置によ り行い、ラマンピーク半値幅の分析から、基板結晶と同等の高い結晶品質が確認された。

令和元年度

pin 構造の内蔵電位による低電圧駆動でキャリアを収集するために、不純物の取り込みを抑 えた高純度ノンドープ層(i層)の成長条件を探索した。不純物の取り込みを抑えるために有 効と考えられるダイヤモンド基板のオフ角制御を実施し、異なるオフ角を持つ複数基板にお いて不純物取り込みのオフ角依存性を評価した。

ダイヤモンド気相成長において意図せず混入する不純物であるホウ素原子に着目し、[111] 単結晶ダイヤモンド CVD 成長中に取り込まれるホウ素の基板オフ角依存性を 2 次イオン質量 分析により定量評価した。その結果、オフ角増大に伴いホウ素の取り込み効率が低下するこ とが分かった。また、[-1-12]オフ方向の基板を使用し、成長条件を最適化することで比較的 平坦な成長表面を持ちかつ不純物濃の取り込みを抑えた高品質な CVD ダイヤモンド {111} 結 晶成長が可能であることが分かった。

令和2年度

令和元年度に得た CVD ダイヤモンド成長の不純物低減に対する指針に基づき、混入不純物 濃度をできるだけ抑えて有感層に用いる高純度ノンドープ層を成長させた。得られたノンド ープ層の結晶評価を行い、成長実験にフィードバックすることで低不純物濃度化を進めた。

② センサー形成プロセスに関する研究

平成 30 年度

センサーに用いるダイヤモンド pin 接合構造を形成するための準備として、反応性イオン エッチングによる構造加工試験を開始した。ダイヤモンド {111} 単結晶及びマスク材料に対 するエッチングレートを実験的に導出した。

エッチング用のマスク材料には A1 を用いた。共焦点顕微鏡により、1) 反応性イオンエッ チング前、2) エッチング後、3) マスク材除去後の3度、A1 マスクの厚みとエッチングされ たダイヤモンドメサ(丘)の深さを計測し、エッチングレートを導出したところ、A1 マスク のエッチングレートは0.1 µm/h、ダイヤモンドは1.3 µm/h であることがわかった。

令和元年度

平成 30 年度に設計した構造をもとにダイオードを試作した。マイクロ波プラズマ CVD によ り p 層、i 層、n 層を絶縁性ダイヤモンド基板上に積層成長させた。反応性イオンエッチング において、平成 30 年度に実験的に求めたエッチング速度、及びマスク/ダイヤモンドのエッ チング速度比を使い、200 µm 程度のメサ(丘状)構造ダイオードを作製した。マスク材には アルミ膜を用い、その形成には物材機構に既存の電子線(以下、「EB」と略す。)蒸着を用い た。化学洗浄によりマスクを除去した後、メサトップ、メサボトムにオーミック電極を EB 蒸 着して pin ダイオード素子形成した。得られた pin ダイオードの静特性、温度依存性を物材 機構に既存のプローバにより測定し、理想特性との比較から実施項目「①高品質ダイヤモン ド成長に関する研究」で行った i 層結晶成長及び本項目の pin ダイオード形成にもフィード バックした。優れた静特性の pin ダイオードを選定し、信号読み出し兼・電圧印可用のワイ ヤ結線を行い、センサー評価に用いた。

ホウ素ドープ p 型、リンドープ n 型の半導体制御及びノンドープ i 層の CVD 成長技術を駆 使し、単結晶 {111} ダイヤモンド基板表面で高品質な i 層(厳密には p-層及び n-層)を有 する pin 積層膜の形成に成功した。反応性イオンエッチングにより、中性子コンバータで発 生する a 粒子の飛程に適した約 4 µm の i 層を持つ疑似縦型構造 pin ダイオード素子のメサ 構造形成に成功した。ダイヤモンド成長条件の最適化により、逆バイアス 20 V で漏れ電流を 1 pA に押さえ、8 桁の整流比を有するダイオードが得られ、センサー評価に用いることが可 能となった。

令和2年度

高純度ノンドープ層を pin 接合構造中に形成した。ノンドープ層は混入する主要不純物で あるホウ素の混入濃度を可能な限り低減し形成した。令和元年度に達成したメサ型構造形成 技術を用い、疑似縦型構造の pin ダイヤモンドダイオードを形成した。ダイオード検出器動 作においては、ノンドープ層を完全空乏化する逆バイアス電圧の低電圧化を目指した。

③ 中性子検出用センサー構造に関する研究

平成 30 年度

中性子コンバータ膜の材料として有効性が期待されるフッ化リチウム(LiF)、窒化ホウ素 (BN)のダイヤモンドセンサーに対する適性を検討するとともに、モンテカルロシミュレー ションを用いて、放出される荷電粒子によるエネルギー付与から中性子コンバータの厚み、 ダイヤモンド pin ダイオードの有感層厚さ指針値を決定した。

中性子コンバータ膜としては、物材機構で超高品質な単結晶合成が可能な六方晶 BN (hBN) を優先的に用いることとした。高品質な単結晶であるが故に精密なシミュレーションが可能 であること、放出核の飛程が小さいため、最終的にセンサーに用いた場合 γ 線感度の低減が 可能であることがその理由である。モンテカルロシミュレーションコードを用い、¹⁰B (n, α)⁷Li 反応で放出される 1) 1.47 MeV α 粒子、2) 0.84 MeV Li イオンについて、BN 及びダイ ヤモンドのそれぞれの荷電粒子に対する阻止能 dE/dx から荷電粒子が全エネルギーを付与す るのに必要な膜厚を求めた。BN で必要な膜厚は、1.47 MeV α 線が 4.8 µm、0.84 MeV Li イオ ンが 1.7 µm であった。ダイヤモンドにおいては、1.47 MeV α 線が 3.0 µm、0.84 MeV Li イ オンが 1.1 µm であった。この結果から、中性子コンバータ膜厚を最大で約5 µm、ダイヤモ ンド pin ダイオードの有感層厚さを約3 µm と見積もった。

令和元年度

中性子コンバータからの放出核種を想定し、高エネ研にてα粒子照射実験を行い、センサ ー性能を左右する i 層の電荷収集効率(以下、「CCE」と略す。)を評価した。それに先立ち、 物材機構に既存のプローバで深紫外光源を用いた光電流評価を行い、その結果を素早く素子 作製工程にフィードバックした。さらに、令和2年度の実装に向け、中性子コンバータとし て物材機構において実績のある高品質六方昌窒化ホウ素(hBN)単結晶を用いたセンサー素子 化試験を開始した。 実施項目「②センサー形成プロセスに関する研究」で作製したいくつかの pin 素子につい て、真空中で紫外光源による光電流計測からスクリーニングを行った。良好なフォトレスポ ンスを示した厚さ3 µmのi層 pin センサーに対し Am-241 線源を用いた 5.5 MeV a 粒子照射 試験を行った。その結果、a 粒子に対する明確なレスポンスが得られ、3 µm 厚から得られる 電荷量で規格化した CCE は 40 %程度であった。一方、CV 特性から評価した空乏層幅は 1 µm であり、部分空乏化した状態であることが分かった。CCE を改善するためには不純物濃度をさ らに低減し、空乏層幅を増加させる必要があることが明らかになった。中性子コンバータと して用いる厚さ 1 µm 程度の hBN 薄片をメサ構造ダイヤモンド表面に分子間力接合すること に成功した。

令和2年度

中性子コンバータとダイヤモンド pin ダイオードを組み合わせ、中性子照射試験を行った。 実施項目「②センサー形成プロセスに関する研究」で作製した pin ダイオードを用いて、熱 中性子コンバータから放出される荷電粒子のエネルギースペクトルを測定した。また、実施 項目「(1)①耐放射線トランジスタ及び集積回路の研究開発」で作製された CMOS 回路とダイ ヤモンド検出器をワイヤボンディングで接続し、回路全体の動作を確認した。将来的な実装 を視野に入れて核分裂中性子測定システム内にダイオードを配置するためのパッケージング 方法も合わせて検討した。

2.2.3 複合型センサーを搭載した ROV による遠隔計測技術の開発(再委託先:海技研)

① 音響探査装置と中性子センサーを組み合わせた複合型センサーの開発

平成 30 年度

SBP を堆積層厚さが 15 cm より厚い場合においても探査可能となるように改良方法を検討 するとともに、ROV への搭載を想定し、マルチフェイズドアレイ・ソナーと SBP の小型軽量化 を検討した。

音響探査装置と中性子センサーを組み合わせた複合型センサーの開発では、SBP システムの音源の周波数を変化させることによって、堆積層の分析厚さに対応するための見通しがついた。また、SBP システムを形成するデバイスを小型化した。

令和元年度

マルチフェイズドアレイ・ソナーの小型・軽量化の検討結果に基づき、小型化したソナー の性能試験を行い、所定の性能であることを確認後、複合センサーの一部となるよう整備し た。SBP についても同様に小型・軽量化の検討結果に基づき、小型化した SBP の性能試験を行 い、所定の性能であることを確認後、複合センサーの一部となるように整備した。

海技研が所有する水深 1.2 mの水槽の底に形状模擬デブリ試験体を配置し、小型マルチフェイズドアレイ・ソナーの性能試験を行い、所定の性能を確認した。JAEA 楢葉遠隔技術開発 センターロボット試験用水槽の底に SUS ブロック及びコンクリートレンガを設置し、SBP シ ステムとの相対位置を変えて検出精度試験を行い、所定の性能であることを確認した。

令和2年度

組み上がった複合型センサーの耐放射線性を確認するため、⁶⁰Coγ線源照射施設にてγ線照 射試験を実施した。照射試験結果を踏まえて問題点を抽出し、それらに対応するための方策 を検討した。

② 原子炉外部から ROV による遠隔計測を可能にする遠隔操作技術の開発 平成 30 年度

搭載する複合型センサーの形状、重量及び性能を考慮し、現有 ROV の改良方法を検討した。 同時に PCV 環境の模擬に必要となる設備及び治工具類を検討し、一部については設計・製作 した。プラットフォームにおいて、ROV から提供される大量の情報をサンプリングして、効率 的にクラウドに送信するためのソフトウェアとゲートウェイを整備した。

現有 ROV の推進力とその制御性能を改良するための設計・改造を実施した。また、PCV 環境の模擬に必要な治工具類としては、JAEA 楢葉遠隔技術開発センターのロボット試験水槽試験に適合するような形状の治具を検討した。また、ROV から提供されるデータの VR 施設への送信と投影方式について、JAEA 楢葉遠隔技術開発センターと打合せを行い、方針を定めた。

令和元年度

平成 30 年度に行った設計結果を踏まえて、複合センサーを現有 ROV へ搭載できるように改 良した。また平成 30 年度に引き続き、実機 PCV 環境模擬に必要な設備及び治工具類を製作し た。製作した複合センサーを ROV に搭載し、正常に動作ならびに通信できることを確認した。

VR を利用した遠隔計測技術の開発では、ROV から提供される大量の情報を、実際に VR 利用施設へ通信できるかを試験で確認した。問題があった場合は、実用化へ繋げるため、その対策を策定した。

SBP 用機器、ソナー類及びカメラ等センサー類制御系を ROV に搭載し、動作試験と通信性 能試験を行い、正常に作動することを確認した。

ROV に搭載した水中広角カメラの撮像データ(2次元データ)を VR システムに通信し、VR 機器へ投影することができるかどうか調査を実施した。その結果、2次元データを VR 機器に 投影するためには3次元データに再構築する必要があることが分かった。2次元データから3 次元データへの変換に要する時間は広角カメラによる撮像時間と同程度であったことから、 VR 投影データへの変換時間の観点から VR システムはゴーグルタイプを使用し、PCV 内の VR コンテンツデータを投影しながら ROV を操作する方が効率的であることが分かった。ソナー 類及びカメラ等センサー類制御系を ROV に搭載し正常に作動することを確認した。

令和2年度

複合型センサーを搭載したROVをJAEA楢葉遠隔技術開発センターに持ち込み、当該施設のロ ボット試験用水槽にて、遠隔探査、計測試験を実施し性能確認した。また、ROVからの大量撮 影データをVRシステムへ投影する技術に関して令和元年度に判明した結果を基に、ROVの位置 情報とVRコンテンツ内の位置情報の連動ソフトを開発した。

2.2.4 研究推進

平成 30 年度

研究代表者の下で各研究項目間ならびに JAEA 廃炉環境国際共同研究センター(以下、「JAEA/CLADS」と略す。)等との連携を密にして、研究を進めた。また、研究実施計画を推進 するための打合せや会議等を開催した。 10月9日に本研究課題における研究従事者や協力者を集め、キックオフミーティングを高 エネ研にて実施した。また、研究代表者と一部の研究実施者が JAEA/CLADS 報告会に出席し、 ニーズ側の意見を確認した。

令和元年度

本研究課題における研究従事者や協力者による打合せを複数回実施し、連携を取りながら 研究を進めた。また、研究代表者と一部の研究実施者が JAEA/CLADS 主催のワークショップや 報告会に出席し、成果発表等により意見交換を行い、ニーズ側の意見を確認した。

令和2年度

本研究課題における研究従事者や協力者による打合せを複数回実施し、連携を取りながら 研究を進めた。コロナ禍のため、プログラムオフィサー(以下、「PO」と略す。)、JAEA プログ ラムオフィサー(以下、「J-PO」と略す。)による中間フォローを含め、オンラインでの打合 せが主となった。

- 3. 業務の実施内容及び成果
 - 3.1 耐放射線集積回路の研究開発と核分裂中性子測定システムの開発【平成 30 年度~令和 2 年 度】
 - 3.1.1 耐放射線トランジスタ及び集積回路の開発研究
 - (1) CMOS65nm プロセスの耐放射線耐性の実証と設計方針

平成 30 年度は、既存のトランジスタを用いて耐放射線性能の予備的な評価を行うとともに 系統的な評価を行うためのトランジスタサンプルを開発した。令和元年度は、開発したトラン ジスタサンプルの耐放射線性能の評価を行った。令和2年度は令和元年度までの評価を基にし て、標準トランジスタと ELT 形状以外の耐放射線性トランジスタの評価用サンプルを製造し耐 放射線性能の評価を行った。耐放射線耐性といった場合ここでは TID (Total Ionizing Dose) によって引き起こされる恒久的な故障を防ぐことを主目的としており、SEU (Single Event Upset)、SEE (Single Event Transient)、SEL (Single Event Latch up)のような一時的な故 障となるシングルイベント効果や、金属酸化膜半導体(以下、「MOS」と略す。)トランジスタで は比較的起きにくい DDD (Displacement Damage Dose)のような永久損傷については議論しな い。実際廃炉環境では、広範囲に汚染した γ 線放出核種からの γ 線レートが高く、SEU 等の現 象を起こす中性子線などは線量が低いと考えられるためである。



図 3.1.1-1 CMOS 65 nm プロセスを使用した耐放射線評価用トランジスタサンプル

TID による Si MOS トランジスタの動作不良は放射線によって生成された電荷がゲート近傍 の物質にトラップされることで引き起こされていると考えられており、その原因は大きく分け て2つある。1つは電離放射線によりゲート酸化膜(SiO₂)で生成された電子-正孔ペアのうち、 一部は再結合せずに電子はゲートに放出され、正孔は Si との境界付近でトラップされる酸化 膜トラップである。この効果はN型金属酸化膜半導体(以下、「NMOS」と略す。)、P型金属酸化 膜半導体(以下、「PMOS」と略す。)トランジスタのしきい値電圧を負の方向にシフトさせる効 果を持つ。もう1つはSi-H 結合を壊すことでSiO₂とSi との界面に格子ミスマッチが生じ、キ ャリアがトラップされるインターフェーストラップである。インターフェーストラップは、ト ランジスタのしきい値電圧を NMOS においては正の方向に、PMOS トランジスタにおいては負の 方向にそれぞれシフトする効果を持つ。これら2つの効果が重なってTIDによって引き起こさ れる電流特性が決定されるため、NMOSトランジスタの場合は酸化膜トラップとインターフェー ストラップのどちらの効果が大きいかで電流が大きくなる場合と小さくなる場合とが存在す る。PMOSトランジスタについてはどちらの効果も電流を小さくする方向に働く。また高放射線 環境下(トランジスタプロセスによるが、65 nm 程度のプロセスにおいては1 MGyより大きい 放射線量環境下)では、移動度の低下も招くため、ゲートソース電圧対ドレイン電流依存性(今 後 Id-Vgs 曲線と呼ぶ)を見た場合は電流スロープの傾きも小さくなる。

図 3.1.1-1 に評価用トランジスタサンプル(以下、「素子チップ」と略す。)の写真を示す。 ここに写っている正方形の形状をしたものは内部トランジスタ端子と電流電圧供給測定機器 への電気的接続を行うためのボンディングパッドと呼ばれている金属電極で大きさはおよそ 80 ミクロン角である。本素子チップの開発及び実装にあたっては次の点に留意した。

1) 静電破壊

我々が評価を行う CMOS 65 nm プロセスはゲート膜厚が薄く絶縁体性が小さいため、静電破 壊対策を施す必要がある。今までの経験上、180 nm~250 nm プロセスまでは評価時に評価者が 静電気帯電防止対策を十分に行うことで静電破壊を避けることが可能であったが、65 nm では 静電気帯電防止対策を行っても静電破壊による故障率が数割まで上昇してしまった。また照射 前測定時に与えてしまった静電気放電(以下、「ESD」と略す。)によるダメージのため測定値の ばらつきが生じ、正しい結果が得られないケースもあったため、測定の信頼性を向上させるた めには ESD 対策が重要となる。一方 ESD 対策用の素子を入れてしまうと、その ESD 対策用素子 の耐放射線耐性が問題となり、特にゲートリーク電流の測定に悪影響を及ぼす。種々の検討の 結果、ESD 防護用素子をトランジスタへ入れ、ESD 防護用素子の特性変化を分離できるように、 電源端子が異なるボンディングパッドを配置した。さらにこの電源端子には電圧をかけずに照 射試験を行うことにより、ESD 防護用素子の γ線による放射線損傷の影響を低減させた。

2) 実装可能性の事前評価

シリコン半導体のプロセス領域をできるだけ有効に使用でき、またその半導体プロセスがで きるだけ均一に2次元平面領域に行われるようにトランジスタ及びボンディングパッドを均一 に配置した。しかしながらこれらのボンディングパッドを全て同時に外部へ引き出すことはほ ぼ不可能である。一方、測定効率及び種々のトラブルの低減の観点から、測定時には同じセッ トアップを使用する必要があるため、ボンディング仕様及び開発した素子チップを搭載するパ ッケージの選定は実装を発注する会社との連携を密にし、注意深く行った。

| 種別 | 形状等 | トランジスタ幅 | トランジスタ長 |
|------|---------|-----------------|---------------|
| NMOS | normal | 120 nm~1000 nm | 60 nm~1000 nm |
| PMOS | normal | 120 nm∼1000 nm | 60 nm∼1000 nm |
| NMOS | H-shape | 120 nm∼1000 nm | 60 nm∼1000 nm |
| PMOS | H-shape | 120 nm∼1000 nm | 60 nm∼1000 nm |
| NMOS | ELT | 1000 nm∼2000 nm | 60 nm∼120 nm |

表 3.1.1-1 評価したトランジスタ素子のまとめ

3.1-2

- 37 -



水色の部分がゲートになる部分であり、大まかにはゲート長はドレインとソースの距離、ゲ ート幅はドレインもしくはソースに沿ったゲートの長さとなる。

図 3.1.1-2 トランジスタ形状についての説明

表 3.1.1-1 に開発した素子チップ上のトランジスタパラメータを示す。開発した素子のトランジスタ幅とトランジスタ長に関しては、表 3.1.1-1 に示す範囲で値を複数選定した。形状に関して、normal は通常のトランジスタ構造を意味し、H-shape 及び ELT は図 3.1.1-2 に示すトランジスタ形状である。ELT は製造可能なトランジスタ長とトランジスタ幅に制限がある。一方 H-shape はその制限がない。

平成 30 年度、令和元年度に引き続き国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・高崎量 子応用研究所(以下、「高崎量子研」と略す。)にあるガンマ線照射施設(コバルト第1棟2セ ル/第2棟6セル)にて照射線量率3.0~6.8 kGy/hで照射試験を行った。⁶⁰Coからのγ線を 室温においてドレインソース電圧(以下、「Vds」とする。)=ドレインゲート電圧(以下、「Vgs」 とする。)=電源電圧(以下、「Vdd」とする。)=1.2 Vで1 MGyまで照射した。これはトランジ スタに与えるダメージが最も大きい条件である。実際のトランジスタはVgs=0.6~0.8 V、Vds <0.5 Vで使用するため、γ線によって生成された自由電子・自由正孔の、トランジスタ内の 電場によるゲート下チャネルへの移動は、実際の使用環境では緩和される方向となる。

照射前後での normal NMOS トランジスタの典型的なゲートソース電圧対ドレイン電流特性を 図 3.1.1-3 に示す。左図はトランジスタ幅(W)トランジスタ長(L) が最小のトランジスタで、 右図はLが大きいトランジスタの1 MGy 照射前後の比較である。1 MGy の照射後において、ト ランジスタの性能は半導体プロセスばらつき範囲内に収まっているが、L が小さいトランジス タの方が、L が大きいトランジスタよりも大きい性能変化が見られた。L が大きいトランジス タに関しては測定誤差範囲内ですべて同様の特性を示すことから、ゲート直下に存在する γ 線によって生成された電荷の影響と考えられる。トランジスタの閾値変化が電圧の高い方向へ 移動するということは、ゲート直下の表面境界準位に捕獲された電子の影響で閾値電圧が高く なっていることを示し、正孔捕獲の影響は小さいことを示している。図 3.1.1-4 に照射前後で の H-shape NMOS トランジスタの代表的なゲートソース電圧対ドレイン電流特性を示す。トラ ンジスタの閾値変化の傾向は normal トランジスタと同様であるが、その影響は小さくなって いる。当初の目的として1 MGy で動作する集積回路への応用という観点からは normal の商用 トランジスタがそのまま使用できるが、より高レベルの放射線場に対してよりロバストに動作 させるためには、H-shape トランジスタは有用な選択となりうる。



図 3.1.1-3 normal トランジスタの 1MGy 照射前後の特性比較



図 3.1.1-4 H-shape トランジスタの照射前後の特性

Lが小さく照射の影響を受けやすいトランジスタの結果を示している。 トランジスタ閾値が低いトランジスタの照射前後の特性(左) トランジスタ閾値が標準のトランジスタの照射前後の特性(右)

トランジスタ照射試験に関して、トランジスタサイズ(W/L)に対する依存性をまとめる。図 3.1.1-5 は閾値の異なるトランジスタについてトランジスタ長Lが最小の素子に対するWの依 存性を示した図である。特性は照射前後のリーク電流の差(ΔId_leak)、照射前後のトランス コンダクタンス低下割合をドレイン電流の変化割合で定量化したパラメータ(%ΔId_on)、照 射前後での閾値変化割合(%ΔVth)で表している。NMOSトランジスタに関しては、リーク電流 変化は測定誤差の範囲内で変化はなく、他のパラメータも1 MGy 照射後も大きな変化はなくト ランジスタとして良好な動作を示している。NMOSを使った回路設計においては特殊なトランジ スタ形状を使用しなくても問題ないことが明確になった。一方、PMOSトランジスタのトランジ

スタ長が短い素子については、高線量照射後ではトランジスタ製造プロセスによる性能のばら つきの範囲からはずれてくることが分かった。この傾向は L、W が小さい素子に顕著であり、 照射線量が1 MGv までは W 及び L が最小のトランジスタにおいてはコンダクタンスの低下によ り十分な電流を流すことができなくなる。しかしながらWを大きくすることで製造プロセスに よる性能ばらつき範囲内に収めることが可能であるため、商用 PMOS トランジスタもアナログ 集積回路設計において使用可能と考えられる。閾値の異なるトランジスタについても同様な傾 向である。これらの定性的な傾向は従来の γ 線照射による閾値変動モデルで説明できる。









図 3.1.1-5 normal 形状の NMOS, PMOS トランジスタの照射前後の特性

(L=60 nmに固定し低閾値トランジスタ (LVT)、通常閾値トランジスタ (SVT)、高 閾値トランジスタ(HVT)について照射前後のリーク電流の差(ΔId leak)、照射 前後のトランスコンダクタンス低下割合をドレイン電流の変化割合で定量化した パラメータ(%ΔId_on)、照射前後での閾値変化割合(%ΔVth)の特性を示した。)

1 MGy 以上の照射線量に関しては、動作領域での Ids-Vgs 曲線の傾きが小さくなる現象が起 こりトランジスタのコンダクタンスが減少する(%∆Id_onの減少)。この効果はW依存性が見 られ特にWが小さいトランジスタで顕著である。照射によってゲート周りにトラップ電荷が生 成され、₩の実効値が減少したことにより引き起こされていると推測される。

本研究により酸化膜を薄くすることで1 MGyの照射線量まで十分に動作可能なトランジスタ を商用プロセスにより製造できることが示された。さらにトランジスタ構造を改良することに より、より高い放射線耐性を持ったトランジスタが製造できることも実証された。また集積回 路を設計する場合に以下に示す方針を持って開発を進める必要があることも明確になった。 (以下で長いと書いた場合の長さは1 µm 以上で、短いと書いた場合は商用プロセスで作成で きる最小値、つまりLであれば60 nm 近傍の値、W であれば120 nm 近傍の値を意味する)

- ・ゲート長が短いトランジスタを使用する場合は、ゲート幅を長くする。
- ・ゲート幅が短いトランジスタを使用する場合は、できるだけ閾値が標準もしくは高いトランジスタを使用する。
- ・ゲート幅が短いトランジスタを使用する場合、Lを大きくしすぎるとトランジスタ構造に起 因する効果によりリーク電流の増加が起こるため注意を要する。

・NMOS より PMOS の方が照射による特性変化が大きい。

ゲート付近のトランジスタ構造の異方性(特にLに沿った側のトランジスタ構造はWに沿った 側のトランジスタ構造と異なることが推察できる)に依存する効果が閾値の異なるトランジス タ(特にアナログ用途では閾値の低いトランジスタが重要である)に与える影響については別 途詳細な研究が必要となる。

耐放射線トランジスタの研究開発の目的は十分達成されていると考えるが、今後さらにサン プル数を増やし、高線量照射による特性変化を詳細に調べ、トランジスタモデルの構築とトラ ンジスタパラメータの抽出等を行うことでより信頼性のある設計環境を構築できる。また令和 元年度の成果報告書に示したアニーリング効果によるトランジスタ動作回復の研究も併せて 継続することは、高耐放射線環境下でのモニタリング、遠隔制御に対して重要な知見となる。

(2) 回路要素の耐放射線耐性の実証

耐放射線性能を強化したトランジスタを採用した CMOS 半導体プロセスを使用し2 種類のア ナログデジタル変換集積回路及び高速増幅回路等の照射試験を令和元年度に引き続き行った。 令和2年度は逐次比較型 100 MHz 10 bit ADC の評価について報告する。高崎量子研にあるガ ンマ線照射施設(コバルト第1棟2セル)にて照射線量率3.0~6.8 kGy/h で照射試験を行っ た。照射時は常に ADC を動作状態とした。逐次比較型 100 MHz 逐次比較型アナログデジタルコ ンバータ(以下、「SARADC」と略す。)の評価は、γ 線照射後、高エネ研に持ち帰って実施した。 SARADC 有効ビット数等の詳細評価の結果を図 3.1.1-6 に示す。評価は周波数 1 MHz のサイン 波を入力し、入力に対する出力結果を高速フーリエ変換(以下、「FFT」と略す。)して得られた 周波数スペクトルで評価している。有効ビット数は照射前、1 MGy 照射後、3.3 MGy 照射後で 大きな変化は認められなかった。これにより 1 MGy 照射後でも十分な性能を保っていることが 実証できた。



図 3.1.1-6 100 MHz 10 bit ADC の照射試験結果

3.1-6 - 41 -

(3) 中性子検出素子用信号処理集積回路の評価

耐放射線耐性の評価を行った CMOS 65 nm 半導体プロセスを用い中性子検出素子用信号処理 集積回路の開発評価を行った。図 3.1.1-7 に開発した中性子検出素子用信号処理集積回路の写 真を示す。本集積回路は以下の仕様を満たすように設計・製作を行った。



図 3.1.1-7 開発した中性子検出素子信号処理集積回路と集積回路を実装した信号処理ボード

- 中性子レートは一平方センチメートルあたり1カウント/sec
- γ 線レートは1 Mcount/sec のためアナログ信号のパルス幅は100 nsec になるように時定数 を調整する。
- γ 線と中性子の波高弁別を行い、デジタル信号 (LVDS) を出力する。
- センサーからの信号は 100000 electron 相当でありこの信号を飽和せず出力できるようなダ イナミックレンジを持つ。
- センサーからの信号を信号対雑音比が 100 程度となるように等価入力雑音電荷は 1000 electron とする。

信号対雑音比を決める重要なパラメータである検出器の厚さと検出器容量はそれぞれ 5 µm 未満、検出器容量と寄生容量を含んだ検出器容量は大きめに見積もり全体で 5 pF とした。ダ イヤモンドを用いた中性子センサーの大きさが小さいことから、検出効率を向上させるために 多チャンネル化を視野に入れ、4 チャンネルを含めたデザインとし、各チャンネルが独立にセ ンサーからの信号処理が可能となるようになっている。センサーからの信号はまず荷電有感型 増幅器 (CSA) において増幅され、信号対雑音比を改善するためバンドパスフィルター (2 次 CR-RC 波形整形回路) によってセミガウシアン型の波形へと変換される。この波形をディスクリミ ネータ (Disc.) と呼ばれる波高比較器に入力し、ある電圧値と比較することでデジタル情報に 変換し、中性子イベントの判定を行う。ディスクリミネータからのデジタル出力は、高レート

3.1-7

環境下においても動作するように LVDS に変換し、差動信号を出力する。故障評価のためテス トパルスでセンサーの擬似信号を入力できるようにしてあり、波形整形回路の出力も、必要に 応じてオシロスコープなどで確認できるようにアナログバッファ(Buf.)を通してチップの外 に出せるようにした。ディスクリミネータの閾値電圧や、バッファ/ディスクリミネータのイ ネーブル信号、テストパルスのイネーブル信号などは、8 ビットのコントロールレジスタによ って外部の FPGA から設定が可能となっている。設計時中性子検出素子用信号処理集積回路の 動作は、回路シミュレータを用いて確認した。結果については令和元年度の成果報告書に示し てある。

令和2年度は開発した中性子検出素子用信号処理集積回路を中性子検出センサーと接続し評価試験を行った、また ROV との接続も行った。これらの結果は他の章にて報告を行うため、ここでは集積回路のダイナミックレンジについて報告を行う。中性子検出素子用信号処理集積回路は、ダイヤモンド検出器のバイアス条件に柔軟に対応できるように正入力、負入力の両極性入力に対応させて開発してある。図3.1.1-8 は横軸入力電荷で縦軸アナログモニターからの出力信号振幅で、正側・負側とも検出素子からの信号を充分にカバーしている。



図 3.1.1-8 中性子検出素子用信号処理集積回路のダイナミックレンジ特性

(4) まとめ

耐放射線トランジスタ開発に関しては、CMOS 65 nm プロセスを使用しトランジスタの開発を行った。1 MGy までの照射における特性変化を明確にし、通常の構造をもつトランジスタでも1 MGy で動作することを明確にしただけでなく、特殊な構造のトランジスタを製作し耐放射線性能が向上することも確認した。

耐放射線集積回路に関しては、複数の回路要素の開発を行い1 MGy まで動作確認を行った上、 ダイヤモンド検出器の信号処理集積回路を開発し、ダイヤモンド検出器と組み合わせ動作するこ とを確認した。また ROV に搭載するための小型基板を開発し ROV へ搭載した。 3.1.2 核分裂中性子測定システムの開発【平成 30 年度~令和 2 年度】

IRID が公表している 1F PCV 内部の線量環境(数+ Gy/h) [3.1.2-1]下において、燃料デブリ から放出される中性子を中性子束が 10²~10⁸ n/cm²/s のダイナミックレンジで検知可能な核分 裂中性子測定システムの開発を目標として、入手可能なダイヤモンド検出器[3.1.2-2]の中性子 感度や y 線影響の実測を行いつつ、汎用粒子輸送計算コード PHITS[3.1.2-3]によるシミュレー ション計算を基に、システム設計を行った。

平成 30 年度は、核分裂中性子測定システムのモデリングとシミュレーションに必要な計算環 境を整備するとともに、様々な有感層厚さのダイヤモンドのγ線に対する感度評価を行った。 また、CIVIDEC Instrumentation GmbH から CVD ダイヤモンド検出器を購入し、同社から提供を 受けた詳細な検出器構造の情報を基に PHITS によるシミュレーション計算のためのモデリング を行った。

令和元年度は、CIVIDEC Instrumentation GmbH から購入した2種類の有感層厚さ(140 μm 厚 と 25 μm 厚)の CVD ダイヤモンド検出器を用いて、様々なエネルギーのα線を照射し、検出器 のエネルギー分解能や CCE、リーク電流等の特性評価を行った。それぞれの CVD ダイヤモンド 検出器を汎用信号処理回路に接続して自発核分裂中性子測定システムのプロトタイプを構築し、 中性子やγ線に対する検出感度等の実測を行った。また、有感層厚さの異なる CVD ダイヤモン ド検出器に対して PHITS によるシミュレーション計算を実施し、中性子やγ線に対する出力波 高分布の実測値と比較することで、シミュレーションモデルの妥当性の確認を行った。JAEA の FRS [3.1.2-4]において水中を模擬した実験体系を構築し、最大14 MeV のエネルギーを持つ中 性子に対する、水ファントム前後の検出器応答試験を行った。検出器を小型化することで可能 な限りγ線の感度を低減しつつ、高速な信号処理が可能となることから、ROV の重量制限で問題 となる鉛遮へいを用いないコリメータを設計した。

令和2年度は、熱から14 MeV までのエネルギーをもつ中性子に対するダイヤモンド検出器の 応答関数を PHITS によるシミュレーションによって評価した。京都大学複合研原子力科学研究 所の電子線型加速器施設を用いて、光核反応により核分裂スペクトルに近いエネルギースペク トルを持つ中性子を水中で生成させ、熱から14 MeV までのエネルギーを持つ中性子に対する検 出器応答試験を行った。

また、1F PCV 内部で予想される温度環境を考慮して、検出器の温度を最大 60 ℃まで上昇さ せた状態での特性評価を行った。また、自発核分裂中性子測定システムの気中燃料デブリ検出 への応用を検討するためポリエチレン減速体を作製し、その応答関数を評価した。

以下にその具体的な内容を記述する。

(1) 核分裂中性子測定システムの設計方針

高いッ線環境下において、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 因の信号とッ線起因の信号の弁別性を高くすることやッ線の感度を小さくすることが重要で ある。ッ線のバックグラウンド信号は、センサーの構成物質とッ線の相互作用によって生じる 2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。ッ線の相互作用し やすさは物質の原子番号に依存して大きくなるため、ッ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い。既存の放射線セン サーとしては、放射線による物質の励起発光作用からセンサーへのエネルギー付与を検出する シンチレーション検出器や、放射線による物質の電離作用からエネルギー付与を検出する電離 箱や比例計数管、半導体検出器がよく用いられる。センサー素子として気体を利用する電離箱 や比例計数管は、気体を封入するための金属容器とッ線の相互作用から生じる2次電子がバッ

クグラウンド源になってしまうことや、核分裂電離箱においてはその取扱に使用許可申請が必 要なウラン等の核燃料物質を利用するため、柔軟なシステム設計が困難となっている。また、 励起発光作用を利用するシンチレーション検出器は、一般的に消光(クエンチング)効果によ り α 線等の荷電粒子の励起発光量は光子・電子による励起発光量よりも小さくなることが知ら れており、発光量の違いによってそれらのイベントを弁別することは難しい。有機シンチレー タでは遅い発光(テイル)成分の違いを利用して光子・電子によるイベントとα線等の荷電粒 子のイベントを波形弁別することが可能であるが、高計数下においては、信号のテイル成分が パイルアップしてしまうため、波形弁別も困難となる。一方、半導体検出器は気密金属容器も 不要であるため、小さいセンサーを作ることが可能である。表 3.1.2-1 に主な半導体素子の物 理的特性を示すが、高温、高ν線量の極限環境下で使用する放射線センサーとしては、バンド ギャップが大きく、電子・ホール移動度が高いダイヤモンドが有望である。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⁶Li(n,³H) α 反応や熱中性子反応断面積(3841 barn)と反応後の α 線の放出エネ ルギーが 1.47、1.78 MeV である ¹⁰B(n, α)⁷Li 反応等が中性子→荷電粒子変換反応として用い られる。図 3.1.2-1 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[3.1.2-5]から取得した炭素に対する電子の質量阻 止能と SRIM (the Stopping and Range of Ions in Matter) 2013 コード[3.1.2-6]により計 算した³Hや α 粒子の荷電粒子の質量阻止能を示すが、0.1~2 MeV の領域において 2 桁以上の 違いがあることがわかる。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、荷電粒子のエネルギー付与量を下げることな く、γ線に対する感度を下げることが可能となる。図 3.1.2-1 に SRIM 2013 コードにより計算 した炭素(天然組成、密度3.5 g/cm³)に対する³Hと α 粒子の飛程を示すが、2.73 MeV の³H の炭素中の飛程は 21 μm となり、2.05 MeV の α 粒子は 3.6 μm と評価される。図 3.1.2-2 と図 3.1.2-3 に中性子→荷電粒子変換に用いられるコンバータ材料の⁶LiF(⁶Li 95 %濃縮、密度 2.64 g/cm³)とBN(天然組成、密度2.1 g/cm³)に対する³Hとα粒子の質量阻止能と飛程、³Liと α 粒子の質量阻止能と飛程をそれぞれ示す。荷電粒子の飛程は荷電粒子の原子番号に依存する ため、α粒子や ⁷Li は ³Hに比べて質量阻止能が大きく、中性子コンバータ自身においても大き なエネルギー損失をしてしまうため、通常中性子コンバータは検出する荷電粒子の飛程未満の 厚さで検出器の表面に薄く塗布する構造となる。

以上の考察から、本事業では放射線センサーとして薄いダイヤモンド検出器を、中性子コン バータとして⁶LiF と¹⁰BN を採用して、³H やα粒子の飛程等を目安にγ線感度をなるべく小さ くするようにセンサー厚さ等の検出器構造を検討することとした。

| Semiconductor device | Si | Diamond | SiC(4H) | GaN | GaAs |
|--------------------------------|------|---------|---------|------|------|
| Bandgap(eV) | 1.12 | 5.48 | 3.27 | 3.39 | 1.42 |
| ε value (eV) | 3.6 | 13 | 7.8 | 8.9 | 4.6 |
| Electron mobility (cm²/Vs) | 1500 | 1800 | 1000 | 1200 | 9200 |
| hole mobility (cm²/Vs) | 450 | 1500 | 115 | ~30 | 320 |
| Dielectric constant | 11.9 | 5.7 | 9.7 | 8.9 | 12.4 |
| Thermal conductivity (W/cm/°C) | 1.5 | 20.9 | 4.9 | 1.3 | 0.46 |

表 3.1.2-1 主な半導体素子に対する物理的特性



図 3.1.2-1 Cに対する質量阻止能と飛程 電子と³H、α粒子の質量阻止能(左)、³Hとα粒子の飛程(右)



図 3.1.2-2 ⁶LiF に対する質量阻止能と飛程 ³H と α 粒子の質量阻止能(左)、³H と α 粒子の飛程(右)



図 3.1.2-3 BN に対する質量阻止能と飛程 ⁷Li と α 粒子の質量阻止能(左)、⁷Li と α 粒子の飛程(右)

(2) CVD ダイヤモンド検出器の特性評価

本事業で購入した CIVIDEC Instrumentation GmbH 製熱中性子測定用ダイヤモンド検出器 (B6-C)の構造パラメータを表 3.1.2-2 に、詳細図面を図 3.1.2-4 に示す。有感層厚の違いに よる検出器特性を評価するため、メーカー標準の有感層厚が 140 µm の製品の他に、特注で有 感層厚 25 µm 厚の B6-C 検出器を製作した。表 3.1.2-2 に示すように、これらの検出器は有感 層厚が異なるだけで、ダイヤモンドの材質や有感面積のサイズ、中性子コンバータやパッケー ジは同じ仕様である。放射線検出器としての動作電圧は半導体内部の電界強度によるので、厚 みが薄くなった分小さくなる。また、キャパシタンス:C(F)は半導体検出器容量計(クリア パルス株式会社製 7500型)を用いて計測した。

表 3.1.2-2 CIVIDEC Instrumentation GmbH 製熱中性子測定用ダイヤモンド検出器

B6-Cの構造パラメータ

| Detector type | Compact Thermal-Neutron Diamond Detector |
|---------------------|--|
| Substrate material | sCVD diamond (size: 4.5 mm $	imes$ 4.5 mm) |
| Substrate thickness | 25 μm, 140 μm |
| Active area | 10 mm^2 |
| Capacitance | 44.2 pF (25 µm)、13.6 pF (140 µm) |
| Neutron converter | ⁶ LiF 95 % enriched in ⁶ Li、thickness 1.9 µm |
| Operation voltage | 20 V (25 µm)、 80 V (140 µm) |
| Packaging | RF tight |
| | |



図 3.1.2-4 熱中性子測定用ダイヤモンド検出器 B6-C の構造 (CIVIDEC Instrumentation GmbH より許諾を得て転載)

B6-C 検出器に対して、放射線検出器としての特性試験を、表 3.1.2-3 に示す¹⁴⁸Gd、²⁴¹Am、 ²⁴⁴Cm から構成される 3 種混合 α 線源を用いて行った。 α 線照射によって行った特性試験は、 ①エネルギー分解能、②電流-電圧特性(漏れ電流特性)、③CCE である。 α 線の照射は室温に おいて真空チャンバー内で行い、直径 1 mm のキャリブレーション用貫通孔を通じて行った。 ①と③の特性試験で使用した測定回路の例を図 3.1.2-5 に示す。①については 1F 炉内環境を 想定して、恒温槽(EYELA 社製 LTE-510)を用いて動作環境温度を 20 ℃から 60 ℃まで昇温さ せた測定も行った。②については、B6-C に直接 Keithley Instruments 製 2450 ソースメータを 接続し、印可電圧を変えながら漏れ電流の測定を行った。

表 3.1.2-3 Mixed α 線源の仕様

| 核種 | α線エネルギー (keV) | 放出率 (%) | 半減期 (y) | カタログ値 Peak | 直(keV) FWHM | 基準日の放射能 (Bq) | 基準日 |
|---------------------|------------------|------------|------------|---------------|----------------|-----------------|----------|
| ¹⁴⁸ Gd | 3182.8 | 100 | 74.6 | 3153.7 | 19.2 | 292 ± 10 | 2019/8/1 |
| | 5388.2 | 1.6 | | | | | |
| $^{241}\mathrm{Am}$ | 5442.8 | 13 | 432.2 | 5465.5 | 19.3 | 367 ± 13 | 2019/8/1 |
| | 5485.6 | 84.5 | | | | | |
| ²⁴⁴ Cm | 5762.7 | 23.6 | 18 1 | 5780.4 | 10.7 | 325 ± 11 | 2019/8/1 |
| | 5804.8 | 76.4 | 18.1 | | 19.7 | | |

Size: 25.4 in diameter (Active Diameter: 5 mm), 3.18 thick Nature of Active Deposit: Electrodeposited and diffusion bonded oxide Cover: Approximately 100 µg Au/cm², Backing: Platinum



図 3.1.2-5 波高分布測定システムの例

B6-C 検出器で測定した 3 種混合 α 線源 (¹⁴⁸Gd、²⁴¹Am、²⁴⁴Cm)の波高分布を 25 µm 厚と 140 µm 厚それぞれ図 3.1.2-6 に示す。検出器のエネルギー校正は、前置増幅器のテスト入力につないだリニアパルサー (419 Precision Pulse Generator)の出力と 3 種混合 α 線源のエネルギー値から評価した。検出器の測定値から評価した半値全幅 (以下、「FWHM」と略す。)をエネルギー分解能 (keV) として表 3.1.2-4 にまとめるが、25 µm 厚、140 µm 厚ともに FWHM で 51~65 keV (FWHM とピークエネルギーの比で 1.8 %未満)となり、低波高領域に 40 keV 相当の電気的なノイズが混在していることを考慮すると、本検出器は線源自体が持つ放出エネルギーのばらつき (カタログ値で FWHM が~20 keV) に近いばらつきで測定できており、中性子イベントと γ 線イベントを波高分布によって弁別測定するための十分なエネルギー分解能を有していることがわかった。



25 μm厚(上)、140 μm厚(下)

表 3.1.2-4 B6-C 検出器のエネルギー分解能

| 核種 | 主要α線エネルギー (keV) | 25 µm 厚 FWHM (keV) | 140 µm 厚 FWHM (keV) |
|---------------------|--------------------|-----------------------|------------------------|
| ¹⁴⁸ Gd | 3182.8 | 51 | 53 |
| $^{241}\mathrm{Am}$ | 5485.6 | 56 | 57 |
| 244 Cm | 5804.8 | 65 | 65 |

図 3.1.2-7 に B6-C 検出器の②電流-電圧特性(漏れ電流特性)と③CCE の測定結果を示す。 ②について、漏れ電流は、25 µm 厚、140 µm 厚ともに大よそ有感領域にかかる電界強度に比例 して増加する傾向があるが、電界強度が±0.5 V/µm の領域では高々数 pA であり、放射線検出 器として問題ないことがわかった。一方、140 µm 厚では -0.5 V/µm 以下の電界強度で漏れ電 流量が急激に変化することもわかった。③については、3 種混合 α 線源(¹⁴⁸Gd、²⁴¹Am、²⁴⁴Cm) について B6-C 検出器とシリコン pin ダイオードで測定された波高分布を基に、以下の式を用 いて評価した。

$$CCE_{dia} = \frac{Peak_{ch_{dia}} - c_{dia}}{Peak_{ch_{ci}} - c_{si}} \times \frac{\varepsilon_{dia}}{\varepsilon_{si}} \times \frac{m_{si}}{m_{dia}} \times \frac{E_{\alpha} - E_{loss_si}}{E_{\alpha} - E_{loss_dia}} \times 100\%$$

ここで、Peak_{ch}は3種混合 α 線源 (148Gd、241Am、244Cm)のピーク波高値の測定値、c はリニ アパルサーを用いて評価したオフセット値、 ϵ はダイヤモンド (式中は添え字 dia で示す)で 13 eV、シリコン (式中は添え字 si で示す) で 3.62 eV とした。m はエネルギー校正で評価し たチャンネルあたりのエネルギー値であり、 α 線の付与エネルギーとしては検出器に入射する 前に通過する電極等によるエネルギーロスを SRIM2013 コードにより評価した。図 3.1.2-7 の 右図に示すように、241Am、244Cm については 0.1 V/µm 以上の電界強度で 25 µm 厚、140 µm 厚と もに 95 %以上の高い CCE で飽和しており、有感層厚さの違いはあまり見られなかった。¹⁴⁸Gd に ついても 0.3 V/µm 以上の電界強度で 25 µm 厚、140 µm 厚ともに、91 %で CCE が飽和しており、 立ち上がりと飽和値が 241Am、244Cm に比べて小さいものの有感層厚さの違いは大きくなかった。 ¹⁴⁸Gd と 241Am、244Cm では、エネルギーが3 MeV、5~6 MeV と異なることから、ダイヤモンド中 の α 線の飛程が 6 µm、13~15 µm と異なるため、誘起される電荷密度分布の違いが CCE 曲線 に影響していると考えられる。いずれにしても、0.4 V/µm 以上の電界強度では 25 µm 厚、140 µm 厚ともに CCE が 90 %を超える高い値で飽和しており、漏れ電流も低いことから、B6-C 検出 器の動作電圧を、25 µm 厚、140 µm 厚それぞれ 20 V、80 V と決定して、他の照射試験を行う ことにした。



図 3.1.2-7 B6-C 検出の I-V 特性(左)と CCE(右)

3.1-16

1F 炉内環境を想定すると、検出器の動作環境温度が最大 60 °Cに達する可能性があるため、 恒温槽を用いて 25 µm 厚さの B6-C 検出器の動作環境温度を 20 °Cから 60 °Cまで昇温させ、① エネルギー分解能、②電流-電圧特性(漏れ電流特性)の特性試験を実施した。実験体系を図 3.1.2-8 に示す。25 µm 厚さのダイヤモンド検出器のプローブ分のみ側壁貫通孔から恒温槽内 部に挿入して、20 °C、40 °C、60 °Cの動作環境温度において 3 種混合 α 線源(¹⁴⁸Gd、²⁴¹Am、 ²⁴⁴Cm)の照射を行った。

図 3.1.2-9 にそれぞれの α 線ピークの FWHM から導出したエネルギー分解能(%)を検出器の 動作環境温度に対して示す。照射は真空中ではなく空気中で直径 1 mm、深さ~2 mm のキャリ ブレーション用貫通孔を通じて行ったため、α 線が空気を通過する際のストラグリング効果に より室温近くの 20 ℃においてもエネルギー分解能が表 3.1.2-4 の測定値より低くなっている が、動作環境温度による劣化は見られないことが分かった。また、漏れ電流についても、エネ ルギー分解能と同様に動作環境温度によって有意な変化は見られなかったことから、1F 炉内の ように周辺温度が 60 ℃に達するような環境でも B6-C 検出器は放射線検出器として問題なく 動作することが確認された。



図 3.1.2-8 恒温槽を用いた実験体系 (検出器のプローブ分のみ側壁貫通孔から 恒温槽内部に挿入した。)



図 3.1.2-9 昇温時のエネルギー分解能 (3 種混合 α 線源(¹⁴⁸Gd、²⁴¹Am、²⁴⁴Cm)の ピーク値の FWHM からエネルギー分解能を 動作環境温度に対してプロットした。)

(3) γ 線感度評価

本課題で提案する核分裂中性子測定システムは、数十 Gy/h という極限放射線環境下において、燃料デブリから放出される自発核分裂中性子を検出することを目標としている。その目標を達成するために特に重要なのは、低い計数率が予想される中性子起因の信号と非常に高い計数率が予想される γ 線起因の信号の弁別である。中性子イベントと γ 線イベントは、ダイヤモンド検出器の信号出力の大きさの違いを利用して弁別するため、パイルアップの影響を考慮するとその信号の大きさの隔たりが大きいほど好ましい。中性子検出には ⁶Li (n, t) α 反応や

¹⁰B(n, α)⁷Li 反応等を中性子→荷電粒子変換反応として用い、ダイヤモンド検出器の有感層の 厚みを中性子→荷電粒子変換反応から放出される荷電粒子の飛程程度に薄くすることで、荷電 粒子の信号出力の大きさを低下させることなく、γ線に対する感度や信号出力の大きさを低減 させることが有効である。

平成 30 年度の成果報告書において、ダイヤモンド検出器の有感領域が小さければ小さいほ ど、原理的にγ線に対する感度を低下させることができることを PHITS コードによるシミュレ ーションによって示し、⁶Li(n,t)α反応によって放出される³H を中性子イベントとして検出 する場合は、ダイヤモンド検出器中の飛程から有感層を 21 µm 程度まで薄くすることが有効で あり、¹⁰B(n, α)⁷Li反応によって放出される α 粒子を利用する場合は 3.1 µm 程度まで有感層 を薄くすることが有効であることを示した。令和元年度は、高エネ研の検出器校正場である放 射線照射棟において、表 3.1.2-5 に示す強度の⁶⁰Co線源や¹³⁷Cs線源の γ 線を B6-C 検出器に 照射し、波高分布測定を行い、PHITS コード (EGS5 モード[3.1.2-7])によるシミュレーション との比較を行った。照射体系を図 3.1.2-10 に示す。線源と検出器間の距離は~50 cm とし、検 出器に入射する散乱線をなるべく抑えるため、ハッチ状の床に木材や発泡スチロール等を設置 して照射位置の調整を行い、室温においてダイヤモンド検出器の電極面に対して水平方向と垂 直方向から 17~35 分程度照射を行った。測定回路は図 3.1.2-5 と同じものを用いた。

| 核種 | γ線エネルギー (MeV) | 放出率 (%) | 半減期 (y) | 基準日の放射能 (GBq) | 基準日 |
|-------------------|------------------|------------|------------|------------------|------------|
| ⁶⁰ Co | 1173.2 | 99.97 | 5.27 - | 18.5 ± 3.7 | 2017/11/16 |
| | 1332.5 | 99.99 | | 14.2 ± 2.8 | 2019/11/11 |
| ¹³⁷ Cs | 661 7 | 85 1 | 30.07 | 37.4 \pm 7.5 | 1985/2/28 |
| 05 | 001.7 | 00.1 | 50.01 - | 16.8 ± 3.4 | 2019/11/8 |

表 3.1.2-5 放射線照射棟で利用可能なγ線源の詳細



図 3.1.2-10 放射線照射棟におけるγ線照射体系

PHITS コードによるシミュレーション計算を行うため、図 3.1.2-4の詳細図面に基づき、B6-C 検出器の 3 次元体系モデルを作成した。PHITS コードの描画機能を用いてプロットした形状を図 3.1.2-11 に示すが、概ね詳細図面を再現できていることが確認できる。シミュレーション計算では、図 3.1.2-10 に示す検出器と線源~検出器間の空気のみ物質として考慮して、床や支持台等の構造物は省略した。





図 3.1.2-12、図 3.1.2-13 に ¹³⁷Cs や ⁶⁰Co の γ 線を B6-C の電極面に対し水平方向から照射 した際の波高分布の測定結果を PHITS コードによるシミュレーション結果とともに示す。PHITS コードのシミュレーション結果は、25 µm 厚に対して若干の過大評価が見られるが、概ね実験 結果を再現している。CIVIDEC Instrumentation GmbH 製標準の有感層厚 140 µm の B6-C 検出 器は、最大波高値が γ 線のエネルギー (¹³⁷Cs: 662 keV、⁶⁰Co: 1332 keV) 付近までのびてい るが、新規に製作した有感層厚 25 µm の B6-C 検出器は最大波高が 500 keV 以下に抑えられて いる。図 3.1.2-14 に ¹³⁷Cs や ⁶⁰Co の γ 線を B6-C の電極面に対し垂直方向から照射した際の波 高分布の測定結果を PHITS コードによるシミュレーション結果とともに示すが、25 µm 厚につ いては γ 線感度や最大波高値について照射方向による差異は見られなかったが、140 µm 厚に ついては垂直入射の最大波高値が水平入射よりも小さくなる結果となった。B6-C 検出器は主と して原子番号が小さい物質で構成されており、1 MeV 程度のエネルギーを持つ γ 線の反応と しては、コンプトン散乱が支配的となる。コンプトン散乱によって弾き出される 2 次電子のエ ネルギーは反跳される角度によって異なり、0°方向が最大になる。そのため、 γ 線の入射方 向に最大エネルギーを持つ 2 次電子が生成し、その領域が大きいと最大エネルギーを付与でき る確率が上がるため、最大波高値が高くなると考えられ、水平照射が最も波高値が高くなる照 射体系であると考えられる。25 µm 厚に関しては照射方向による差異が小さいことから、生成 した2次電子は最大エネルギー付与する前に有感領域外へ抜けてしまうと考えられる。



25 μm厚(左)、140 μm厚(右)



図 3.1.2-14 ⁶⁰Coγ線源垂直照射による B6-C の波高分布 25 μm 厚(左)、140 μm 厚(右)

図 3.1.2-15 に¹³⁷Cs や⁶⁰Co の γ 線を B6-C の電極面に対し水平方向から照射した際のしきい エネルギーに対する γ 線感度を、図 3.1.2-16 に電極面に対し垂直方向から照射した際のしき いエネルギーに対する γ 線感度を PHITS コードによるシミュレーション結果とともに示す。 PHITS コードにシミュレーション結果は、概ね実験結果を再現している。25 µm 厚に関しては、 しきいエネルギーを 400 keV 以上にすることで γ 線エネルギーや照射方向にかかわらず、 γ 線感度を 10⁻⁵ cm²以下にすることが可能であることがわかった。



図 3.1.2-15 しきいエネルギーに対する B6-C 検出器の y 線平行照射による応答関数 ¹³⁷Cs y 線に対するプロット(左)、⁶⁰Co y 線に対するプロット(右)



図 3.1.2-16 しきいエネルギーに対する B6-C 検出器の γ 線垂直照射による応答関数 (⁶⁰Coγ 線に対するプロット)

(4) 高線量率γ線照射試験

燃料デブリ探索では、数十 Gy/h という極限放射線環境下においてセンサーを動作させるこ とが必要である。数十 Gy/h の線量率領域では、10° cm⁻²s⁻¹程度のフラックスでγ線がセンサー に入射することに等価であるので、y線感度が低いことに加えて、時間応答の早い検出器が求 められる。一方で、燃料デブリからの中性子フラックスはγ線フラックスに比べて高くないこ とが想定され、γ線起因の信号のパイルアップによる誤計数の可能性を考慮するとγ線起因の 信号と中性子起因の信号の大きさの隔たりが大きいほど好ましい。前述の(3)γ線影響評価か ら、25 μm 厚に関しては、しきいエネルギーを 0.4 MeV 以上にすることで γ 線感度を 10⁻⁵ cm² 以下にすることが可能であることから、10° cm⁻²s⁻¹程度の y 線フラックスとしきいエネルギー を 0.4 MeV に設定した γ線感度を考慮すると最大 10⁴ cps の γ線計数率となり、統計的に有意 な計数をためるだけの現実的な測定時間から燃料デブリ検出のための中性子計数率の下限値 を 0.1 cps と仮定すると、γ線と中性子の計数率比は 10⁵程度になり得る。25 μm 厚の B6-C 検 出器のγ線の最大エネルギー付与 0.4 MeV と ⁶Li (n, t) α 反応から放出される ³H のエネルギー 2.73 MeV に比べると6倍以上の開きがある。一方、¹⁰B(n, α)⁷Li 反応によって放出される α 粒 子を利用する場合は 3.1 um 程度まで有感層を薄くすることが可能である。5 um 厚のダイヤモ ンド検出器の y 線のエネルギー付与の最大値は大よそ 0.1 MeV であることから、コンバータ-検出器間のエネルギー損失にも依存するが、α 粒子によるエネルギー付与と比べると 4 倍以 上の開きがある。

後段の信号処理回路にもよるが、高集積回路を用いることでダイヤモンド検出器は1 µs 以下の時間分解能が期待できる。この時間分解能で下記に示す Blatt の式[3.1.2-8]を用いてパイルアップ事象の評価を行った。

$$N_n = \frac{N_1}{n} (1 - e^{-N\tau_p}) \left(1 - e^{-N\tau_p/2}\right)^{n-2}, \qquad \dots \qquad [n > 1]$$

ここで、n はパイルアップ度数、N₁はパイルアップがない場合の信号の数、N_nは n 重にパイ ルアップした場合の信号の数、N は真の計数率、 τ_p は信号の時間幅を表す。検出器の信号を 10⁴ cps、1 µs の時間幅とするとパイルアップ度数が 4 のパイルアップ割合 (N₄/N₁) は 6.2×10⁻⁸ と なる。この結果から中性子起因の信号と γ 線起因の信号の計数率が 10⁶程度の差があっても、 波高比が 4 倍以上あれば、 γ 線起因の信号のパイルアップ信号と中性子起因の信号の計数率 比は 1 対 0.062 となり、95 %以上の確率で弁別が可能と推測され、一般的な定量限界を判断す るためのノイズに対する信号比 (S/N) =10 を満足できる。

令和 2 年度は、京都大学複合原子力科学研究所の⁶⁰Co γ線照射装置[3.1.2-9]を利用して、 最大 107 Gy/h の高線量率γ線を B6-C 検出器に照射し、波高分布のパイルアップ影響を調査し た。照射体系を図 3.1.2-17 に示す。



⁶⁰Coγ線照射装置

(Stage の写真)



図 3.1.2-17 高線量率γ線照射体系

この装置は地下の線源格納容器内に格納された 60 Co γ 線源を遠隔操作で床上まで押し上げ ることによって γ 線照射を行う押上式の γ 線照射装置であり、平成 27 年 4 月 1 日時点で、 最高線量率 14 kGy/h での照射が可能となっている。照射室は 30 m²程度の面積を有しており、 線源と検出器間の距離を変えることで広範な線量率の γ 線照射を行うことができる。また、照 射室と測定室の間には湾曲した貫通孔があり、信号ケーブルを通すことで、実験データの収集 や照射中の実験装置のコントロールが可能である。0.693~107 Gy/h の広範な線量率での実験 データを取得するため、 γ 線源と検出器間の距離を 30、50、70、110、170、260、350、500 cm に変えて、 γ 線ステージから 72.5 cm の高さで、室温においてダイヤモンド検出器の電極面に 対して垂直方向から 5 分程度照射を行った。測定回路は図 3.1.2-5 と同様のものを用いた。

3 種混合 α 線源を用いた検出器のエネルギー校正により、MCA のしきい値レベルを 0.5 MeV に設定した。線源と検出器間の距離とその空気吸収線量率と MCA の計数率の関係を表 3.1.2-6 に示す。

| Distance from the ⁶⁰ Co source [cm] | Air absorbed dose rate [Gy/h] | Count rate of the 25-µm-thick detector [cps] | Count rate of the 140-µm-thick detector [cps] |
|---|-------------------------------------|---|--|
| 30 | 107 | 2.13 \times 10 ⁵ | 4.30 \times 10 ⁵ |
| 50 | 52.1 | 1.39×10^{5} | 3.42×10^5 |
| 70 | 29.9 | 1.01×10^{5} | 3.07×10^{5} |
| 110 | 13.0 | 5.16 \times 10 ⁴ | 2.52 \times 10 ⁵ |
| 170 | 5.73 | 2.63 \times 10 ⁴ | 1.93×10^5 |
| 260 | 2.72 | 1.31×10^4 | 1.23×10^{5} |
| 350 | 1.51 | 7. 42 \times 10 ³ | 8.07×10^4 |
| 500 | 0.69 | 3.58×10^{3} | 4.28 \times 10 ⁴ |

表 3.1.2-6 γ線源と検出器間の距離に対する空気吸収線量と検出器の計数率

また図 3.1.2-18 に、線量率毎に測定された検出器の波高分布を示すが、波高分布の最大値 は線量率とともに出力信号のパイルアップによって増加し、25 µm 厚の検出器よりも 140 µm 厚 の検出器の方が、その影響が顕著であることが分かる。図 3.1.2-19 は、0.1 cps/keV 以上の計 数率となる波高分布の最大値を示す。140 µm 厚の検出器の 0.1 cps/keV を以上の計数率とな る波高分布の最大値は、30 Gy/h を超える線量率で ⁶Li (n, ³H) α 反応で生成される ³H のエネル ギー (2.73 MeV)を超え、S/N>10 を満たすことが難しくなるが、25 µm 厚の検出器の場合、107 Gy/h の線量率においても、⁶Li (n, ³H) α 反応で生成される ³H のエネルギー (2.73 MeV)を下回 っており、S/N>10 を満たすことが可能であることが分かる。今回用いた測定回路は図 3.1.2-5 と同様のもので波形整形増幅器の時定数を 0.5 µs とし、信号の処理速度よりもエネルギー分 解能を優先した信号処理回路のため、あまり出力信号のパイルアップには強くないが、最終的 な高集積回路による信号処理回路では 100 ns 程度の信号幅を想定しているため、より高計数 率まで対応が可能と思われる。



図 3.1.2-18 高線量率γ線に対する B6-C 検出器の波高分布 25 μm 厚の検出器の結果(左)、140 μm 厚の検出器の結果(右)



図 3.1.2-19 空気吸収線量率に対する計数率が 0.1 cps/keV 以上となる最大付与エネルギー (破線は 2 次多項式関数を使用したフィッティングラインを示している。)

(5) 熱中性子感度評価

B6-C検出器の熱中性子に対する検出感度を調べるため、高エネ研・熱中性子標準棟の黒鉛パイルを用いて照射試験を行った。図 3.1.2-20 に約 300 個の黒鉛ブロックによって構成された、 黒鉛パイル(約高さ 190×幅 250×奥行き 190 cm³)の外観を示す。



図 3.1.2-20 黒鉛パイルの外観と寸法

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。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) から、B6-C 検出器を線源から 47 cm の位置に配置し、室温において 22 ~23 時間の照射を行った。測定回路は図 3.1.2-5 と同じものを用いた。

照射位置の熱中性子束は、過去に実施した黒鉛パイルの特性評価[3.1.2-10]から 1370 ± 27.4 cm⁻²s⁻¹と評価した。この値は PHITS によるシミュレーション結果の 1.39×10³ cm⁻² s⁻¹と 誤差範囲内で一致している。測定された波高分布を PHITS によるシミュレーション結果ととも に図 3.1.2-21 に示す。



図 3.1.2-21 熱中性子場における B6-C 検出器の波高分布 25 µm (左)、140 µm (右)

PHITS によるシミュレーションでは 0.025 eV の熱中性子を 1.9 µm 厚の ⁶LiF コンバータに入 射させ、⁶Li(n,³H)α反応等で生成された荷電粒子毎にダイヤモンド検出器の有感層に付与した エネルギー分布を計算した。シミュレーション計算は実測されたエネルギー付与分布を良く再 現し、実測値では低波高側から電気ノイズ、γ線イベント、中性子起因のα線イベント、中性 子起因の³Hピークが確認された。 y線によるエネルギー付与は精々³Hピークの10~20 %にと どまり、25 µm 厚、140 µm 厚ともに γ線イベントと中性子起因のイベントは十分弁別可能で あることがわかる。³H ピークの FWHM とピークエネルギーの比は、25 µm 厚で 4.4 %、140 µm 厚 で 5.8 %となり、真空中でα線源を照射して得られた FWHM とピークエネルギーの比(1.8 %未 満)に比べると悪化しているように見えるが、空気中を 別が通ることで生じるエネルギースト ラグリングによって FWHM が広がったためであり、問題はない。³H のピーク面積から算出され た熱中性子感度は、25 μm 厚で 8.9×10⁻⁵ ±2×10⁻⁶ cm²、140 μm 厚で 8.6×10⁻⁵ ±2×10⁻⁶ cm² で あり 25 µm 厚と 140 µm 厚は誤差の範囲内で一致した。図 3.1.2-22 に PHITS で計算した熱から 20 MeV のエネルギーに対する B6-C 検出器の応答関数を示すが、熱から熱外領域に感度のピー クを持っていることがわかる。中性子感度は ⁶Li (n, ⁸H) α 反応の断面積の他に中性子コンバー タの厚さとダイヤモンド検出器がコンバータを見込む立体角で決まり、B6-C検出器はエネルギ 一分解能を重視した体系であり立体角が必ずしも大きくはないため、ダイヤモンド検出器をコ ンバータに近接させ立体角を大きくすることができれば感度の向上が見込める。また検出器の 数を増やすか、中性子コンバータの両面を検出器で挟むような構造にすることができれば更な る感度向上が期待できる。図 3.1.2-23 に B6-C 検出器のダイヤモンド検出器の両面に直接⁶LiF コンバータを配置した構造 (Sandwich 構造)の中性子感度を PHITS によるシミュレーションで 求めた波高分布を 25 μm 厚の B6-C 検出器のシミュレーション結果とともに示す。B6-C 検出器 のコリメータ深さ1 mm、直径 2.5 mm のコリメータをなくしても、γ線イベント、中性子起因 のα線イベント、中性子起因の³H ピークからなる波形分布に大きな違いは見られず、γ線イ ベントと中性子起因のイベントは十分弁別可能であることがわかる。また、⁶LiF コンバータを ダイヤモンド検出器に近づけ、両面に配置することで、中性感度は~13倍に向上する可能性が あること示唆される。燃料デブリの定量限界を中性子束測定の統計精度10%、S/N≧10で評価 すると、B6-C検出器では 10⁶ cm⁻²s⁻¹の中性子東環境では約 1.1 秒で燃料デブリを検出可能であ り、10² cm⁻²s⁻¹の中性子東環境では約 3 時間で燃料デブリを検出可能と評価される。もし⁶LiF コンバータを Sandwich 構造とすると、 γ 線感度は変えず、中性子感度だけ約 13 倍に向上する ので 10² cm⁻²s⁻¹の中性子東環境でも約 14 分で燃料デブリを検出できると推測される。



図 3.1.2-22 熱から 20 MeV までの中性子エネルギーに対する B6-C 検出器の応答関数



図 3.1.2-23 ⁶LiF コンバータを Sandwich 構造にした中性子感度と B6-C 検出器の中性子感度との比較

(6) 水体系における速中性子照射試験

JAEA の標準校正場である FRS において、表 3.1.2-7 に示す強度の単色エネルギー中性子線 を B6-C 検出器に照射し、波高分布測定を行った。照射体系の例を図 3.1.2-24 に示す。線源と 検出器間の距離は 1.1~1.3 m とし、水体系を模擬するため 30 cm×30 cm×15 cm 厚の水ファ ントムを 2 セット用いて図 3.1.2-25 に示すように B6-C 検出器を水ファントムの前面 (Albedo 体系)と水ファントムの間 (Sandwich 体系) に配置し、室温においてダイヤモンド検出器の電 極面に対して垂直方向から 1~2 時間の照射を行った。測定回路は図 3.1-2 と同様のものを用 いた。

| E_n (MeV) | Fluence | e (n/cm ²) | Geometry | Irradiation time (s) | Distance (cm) | Reaction |
|-------------|----------|------------------------|----------|-------------------------|------------------|----------|
| 0.144 | 3.07E+06 | $\pm 1.12E+05$ | Albedo | 3640 | 130.36 | p-Li |
| | 3.38E+06 | $\pm 1.24E+05$ | Sandwich | 3761 | | |
| 0 565 | 7.63E+06 | $\pm 2.07E+05$ | Albedo | 3629 | 130. 36 | p-Li |
| 0. 565 | 7.11E+06 | $\pm 1.92E+05$ | Sandwich | 3619 | | |
| 1.2 | 1.89E+06 | $\pm 7.36E+04$ | Albedo | 6014 | 110. 31 | р-Т |
| | 1.42E+06 | $\pm 5.54E+04$ | Sandwich | 4225 | | |
| 5 | 9.47E+06 | $\pm 3.45E+05$ | Albedo | 4444 | 120.85 | d-D |
| | 7.58E+06 | $\pm 2.76E+05$ | Sandwich | 3616 | 130.05 | u D |
| 14.8 | 7.05E+06 | \pm 4.29E+05 | Albedo | 4594 | 110 21 | d-T |
| | 4.81E+06 | $\pm 2.92E+05$ | Sandwich | 3631 | 110.21 | u I |

表 3.1.2-7 FRS 中性子校正場の照射条件



図 3.1.2-24 FRS における単色中性子照射体系



図 3.1.2-25 速中性子照射時のモデレータ設置体系

25 µm 厚と 140 µm 厚の B6-C 検出器それぞれで測定された波高分布は 1.2 MeV 以下の入射エネルギーについては、熱中性子照射の結果と同様な波高分布が得られた。入射エネルギーが 5 MeV 以上になると中性子が水ファントムによって減速して B6-C 検出器に入射する成分の他に 直接ダイヤモンドの炭素と弾性散乱し、反跳した炭素がエネルギー付与する成分が波高分布に おいて確認された。また、14.8 MeV においては 9 MeV 付近に ¹²C (n, α)⁹Be 反応 (しきいエネル ギー: 5.7 MeV) のピークが 2.73 MeV 付近の熱中性子に起因する ³H ピークの他に確認された。 中性子と炭素の直接反応の成分は 140 µm 厚の波高分布に顕著に見られたが、25 µm 厚ではそ の効果は小さく、自発核分裂反応から発生する中性子のエネルギーは 2 MeV 付近を中心とした Maxwell 分布なので、²C (n, α)⁹Be 反応のしきいエネルギー5.7 MeV 以上のエネルギーを持つ中 性子は多くない。

図 3.1.2-26 に照射体系毎に 25 µm 厚と 140 µm 厚の B6-C 検出器それぞれで測定された³H ピーク成分を積分して導出した応答関数を示す。



図 3.1.2-26 エネルギーに対する中性子照射時の応答関数 Albedo 体系(左)、Sandwich 体系(右)

Albedo 体系では、エネルギーが高くなるほど B6-C 検出器の感度は低くなるが、Sandwich 体 系では数 MeV 付近の感度が高くなる結果となった。これは数 MeV の中性子が 15 cm 厚の水ファ ントムに含まれる水素との散乱によって減速されて熱化されていることを示している。一方 Albedo の効果はエネルギーが高くなるほど小さくなるので、核分裂反応からの速中性子の計測 には減速の効果を考慮する必要がある。

燃料デブリが水中にある場合は核分裂反応からの速中性子は水によって減速され熱化され るために熱中性子に感度がある検出器のみで計測が可能であるが、気中においても、水素を含 むポリエチレン等の減速材を利用することで、自発核分裂反応から発生する2 MeV 付近にピー クを持つ中性子を熱中性子検出器で計測することが可能である。気中での燃料デブリ計測を想 定し、ポリエチレン減速材の中心に B6-C 検出器を配置した体系について、PHITS シミュレーシ ョン計算を行った。PHITS では、図 3.1.2-27 に示すように熱から 20 MeV の中性子を直径 40~ 190 mm のポリエチレン減速材に照射して、その中心に配置した B6-C 検出器の応答関数を評価 した。シミュレーション計算の結果を図 3.1.2-27 に示すが、ポリエチレン減速材の厚さを変 えることで B6-C 検出器の感度のピークを速中性子のエネルギーに合わすことが可能であり、 直径 190 mm 程度のポリエチレン減速材を用いることで自発核分裂反応から発生する 2 MeV 付 近にピークを持つ速中性子に高感度な検出器を作製することができることがわかった。

3.1-31


図 3.1.2-27 ポリエチレン減速材の厚さに対する中性子応答関数のシミュレーション 計算体系(左)、応答関数の結果(右)

京都大学複合研原子力科学研究所の電子線型加速器施設[3.1.2-11]を用いて、光核反応によ り核分裂スペクトルに近いエネルギースペクトルを持つ中性子を水中で生成させ、熱から 14 MeV までのエネルギーを持つ中性子に対する検出器応答試験を行った。実験体系図を図 3.1.2-28 に示す。電子を直線加速器で 30 MeV まで加速し、図 3.1.2-29 に示す直径 19 cm、深さ 35 cmの水槽の中でTaターゲットに照射し、疑似核分裂中性子スペクトルを持つ中性子を生成さ せた。25 um 厚の B6-C 検出器を用い、水槽で減速した疑似核分裂中性子をターゲットから 95.5 cmの位置で測定した。測定時の繰り返し周波数は10 Hz でピーク電流が4 A、パルス幅が約 0.1 µs、平均電流が 3.5 µA であった。PHITS を用いて計算した典型的な中性子スペクトルを図 3.1.2-29 に示す。測定位置での熱中性子束は、厚さ100 µm の金箔とカドミウム箔を被せた金 箔を用いた放射化法によって、1.4×10⁶ cm⁻²s⁻¹と評価した。ターゲットからは中性子の他に、 瞬間強度の強いγ線(γフラッシュ)が発生し、検出器と測定回路に入射する。用いた測定回 路は図 3.1-2 と同様のものであり、放射線耐性の強い回路ではないため、回路の誤動作防止の 観点で、ターゲットと検出器の間に厚さ5 cmの鉛を配置した。測定位置での平均的なv線の 線量は長瀬ランダウア社のインライト線量計によって測定し、0.25 Sv/hと評価した。図 3.1.2-30 に 30 分の計測時間で得られた 25 µm 厚の B6-C 検出器の波高分布を示す。熱から 14 MeV ま でのエネルギーを持つ中性子に対してもγ線イベント、中性子起因のα線イベント、中性子起 因の ³H ピークからなる波形分布に大きな違いは見られず、γ 線イベントと中性子起因のイベ ントは十分弁別可能であることがわかる。金箔を用いた放射化法によって導出した B6-C 検出 器の中性子感度は~1.4×10⁻⁴ cps/nv と評価され、高エネ研の黒鉛パイル(図 3.1.2-20)を用 いて導出した感度よりも5割ほど大きい値になったが、これは熱中性子の他に熱外中性子を余 計に計数していることによると思われる。

JAEA-Review 2021-042



図 3.1.2-28 京都大学複合原子力科学研究所電子線加速器による実験体系



図 3.1.2-29 Ta ターゲット周りの水減速材の構造と PHITS で求めた中性子スペクトル

3.1-33 - 68 -

JAEA-Review 2021-042



図 3.1.2-30 電子線加速器を用いた実験で得られた 25 µm 厚さの B6-C 検出器の波高分布

(7) コリメータ設計

自発核分裂中性子測定システムでは、2 MeV 付近を中心とした Maxwell 分布のエネルギーを 持つ自発核分裂中性子が水中で減速して熱化することを使用して、水中において熱中性子を検 出することで燃料デブリの位置を推定する。図 3.1.2-31、図 3.1.2-32 に半径 100 cm の球状の 水の中央から2 MeVの中性子を発生させて、中性子が減弱する様子を JENDL4.0 中性子断面積 データ[3.1.2-12]を用いて PHITS でシミュレーションし、全エネルギー範囲について積分した 中性子束の結果と 0.5 eV 以下の熱中性子に着目した中性子束の結果をそれぞれ示す。速中性 子を含めた中性子束は 100 cm 以上まで分布が広がっていることが確認できるが、熱中性子は 水中で精々50 cm 程度までしか到達しないことがわかる。すなわち水中での熱中性子の検出に よって、検出位置から±50 cmの位置で燃料デブリの存在を示唆することなる。図 3.1.2-31 と 図 3.1.2-32 の中性子束を横軸に水厚さをとって、プロットしたものを図 3.1.2-33 に示す。熱 中性子束においては、水厚さ~6 cmまでは中性子束がほぼフラットであり、~数 cm厚の水で 効果的に減速されることがわかる。従って自発核分裂中性子測定システムはでは中性子源から 数 cm の位置まで近づけて測定することが必要である。そのため、コリメータの寸法は直径~5 cmで設計することにした。燃料デブリに近づけることから、y線影響を強く受ける可能性があ るが、図 3.1.2-34 に密度 11.34 g/cm³の鉛の 662 keVγ線の半価層と 1/10 価層、1/100 価層 を示すが、1/10に減衰させるだけでも数 cmの厚さの鉛が必要であり、検出器を搭載する ROV の重量制限を満たせないことから、本システムでは γ 線の感度を落し、高速で処理すること で γ線の遮へいは実施しないこととし、中性子センサーの格納容器を兼ねたコリメータとして 図 3.1.2-35 に示すシステムを設計した。



図 3.1.2-31 水中の 2 MeV 中性子の減弱の様子



図 3.1.2-32 2 MeV 中性子が水中で減速して生成する熱中性子の減弱の様子

3.1-35 - 70 -



図 3.1.2-33 水厚さに対する 2 MeV 中性子束と熱中性子束の減衰曲線



図 3.1.2-34 y線エネルギーに対する鉛の半価層、1/10、1/100厚

3.1-36 - 71 -



図 3.1.2-35 中性子センサー格納容器兼コリメータ

(8) まとめ

IRID が公表している 1F PCV 内部の線量環境(数十 Gy/h)下において、燃料デブリから放出さ れる中性子を中性子束が 10²~10⁸ n/cm²/s のダイナミックレンジで検知可能な核分裂中性子測定 システムの開発を目標として、入手可能な2種類の有感層厚さ(140 µm 厚と25 µm 厚)の CVD ダ イヤモンド検出器を用いて、中性子感度や y 線影響の実測を行いつつ、汎用粒子輸送計算コード PHITS によるシミュレーション計算を基に、システム設計を行った。エネルギー分解能や CCE、リ ーク電流等の特性評価を行った CVD ダイヤモンド検出器を汎用信号処理回路に接続して自発核分 裂中性子測定システムのプロトタイプを構築し、単色中性子や核分裂スペクトルに近いエネルギ ースペクトルを持つ中性子を水減速体系で生成させ、熱から 14 MeV までのエネルギーを持つ中性 子に対する検出器応答試験を行った。また、PHITS シミュレーション計算により、⁶LiF コンバータ をダイヤモンド検出器に近づけ、両面に配置することで、中性感度は~13倍に向上する可能性が あること示唆され、燃料デブリの定量限界を中性子束測定の統計精度10%、S/N≥10で評価する と、B6-C 検出器では 10⁶ cm⁻²s⁻¹の中性子束環境では約 1.1 秒で燃料デブリを検出可能であり、10² cm⁻²s⁻¹の中性子束環境では約3時間で燃料デブリを検出可能と評価された。⁶LiF コンバータをダ イヤモンド検出器の両面に配置した Sandwich 構造を適用とすれば、 y 線感度は変えず、中性子 感度だけ約 13 倍に向上するため 10² cm⁻²s⁻¹の中性子束環境でも約 14 分で燃料デブリを検出でき ると推測される。また、検出器を小型化することで可能な限り γ線の感度を低減しつつ、高速な 信号処理が可能となることから分かり、ROV の重量制限で問題となる鉛遮へいを用いないコリメ ータを設計した。また、1F PCV 内部で予想される温度環境を考慮して、検出器の温度を最大 60 ℃ まで上昇させた状態での特性評価を行い、60 ℃の温度環境でも正常に動作することを確認した。 自発核分裂中性子測定システムを気中燃料デブリ探査に応用するため、新たにポリエチレン減速 体を作製し、その応答関数を評価した。

参考文献

- [3.1.2-1] 経済産業省、1号機原子炉格納容器(PCV)内部調査の結果について、政府・東京電力中長期対策会議運営会議(第11回会合)資料 3-1、平成24年10月22日、 https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/121022/121022_01h.pdf.(参照日:平成31年1月31日).
- [3.1.2-2] Cividec Instrumentation, B6-C COMPACT THERMAL-NEUTRON DIAMOND DETECTOR, https://cividec.at/index.php?module=public.product&idProduct=17&scr=0(参照 日:令和3年3月31日).
- [3.1.2-3] 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. and 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.
- [3.1.2-4] Shikaze, Y., Tanimura, Y., Saegusa, J., Tsutsumi, M., Shimizu, S., Yoshizawa,
 M., and Yamaguchi, Y., Development of the Neutron Calibration Fields using
 Accelerators at FRS and TIARA of JAEA, J. Nucl. Sci. Technol., vol. 45,
 2008, pp. 209-212.
- [3.1.2-5] 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.
- [3.1.2-6] Ziegler, J. F., Ziegler M. D., and Biersack, J. P., SRIM-The Stopping and Range of Ions in Matter (2010), Nucl. Instrum. Meth. B, vol. 268, no. 11, 2010, pp. 1818-1823.
- [3.1.2-7] Hirayama, H., Namito, Y., Bielajew, A. F., Wilderman, S. J., and Nelson, W. R., The EGS5 Code System, KEK Report2005-8, SLAC-R-730, 2005.
- [3.1.2-8] Blatt, S. L., Characteristics of Random-sum Peaks in Nuclear Radiation Spectra, Nuclear Instruments and Methods, vol. 128, no. 2, 1975, pp. 277-281.
- [3.1.2-9] 京都大学複合原子力科学研究所, コバルト 60 ガンマ線照射装置, https://www.rri.kyoto-u.ac.jp/facilities/gamma (参照日:令和3年3月31日).
- [3.1.2-10] Michikawa, T., Sanami, T., Hagiwara, M., Sasaki, S., and 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.
- [3.1.2-11] 京都大学複合原子力科学研究所, 電子線型加速器, https://www.rri.kyotou.ac.jp/facilities/ela(参照日:令和3年3月31日).
- [3.1.2-12] Shibata, K., Iwamoto, O., Nakagawa, T., Iwamoto, N., Ichihara, A., Kunieda, S., Chiba, S., Furutaka, K., Otuka, N., Ohsawa, T., Murata, T., Matsunobu, H., Zukeran, A., Kamada, S., and Katakura, J., JENDL-4.0: A New Library for Nuclear Science and Engineering, J. Nucl. Sci. Technol., vol. 48, no. 1, 2011, pp. 1-30.

- 3.2 中性子検出用ダイヤモンドセンサーの研究開発(再委託先:物材機構) 【平成 30 年度~ 令和2年度】
- 3.2.1 高品質ダイヤモンド成長に関する研究

平成30年度~令和2年度にかけて、高純度・高品質ダイヤモンド{111}成長条件の探索を行った。令和2年度は、令和元年度に得たCVDダイヤモンド成長の不純物低減に対する指針に基づき有感層に用いる高純度ノンドープ層を成長させた。このとき混入不純物濃度を1×10¹⁶ cm⁻³以下に抑える結晶成長を目標とした。

(1) 高純度・高品質ダイヤモンド {111} 成長条件の探索

ダイヤモンド薄膜成長には物材機構に既存のマイクロ波プラズマ CVD 装置を用いた。図 3.2.1-1 に CVD システムの概略を示す。本装置では、リークレートを低減させることで意図し ない不純物混入を押さえた高品質かつ高純度の CVD ダイヤモンドの成長が可能である。



平成 30 年度~令和元年度にかけて、不純物取り込みの基板オフ角依存性を調べるため、同 一基板面内に異なるオフ角を形成した多段オフ {111} 単結晶ダイヤモンド(2 mm×2 mm×0.5 mm)基板表面へホモエピタキシャル成長を行った。本実験では、ダイヤモンド中の不純物とし て意図せず混入しやすいホウ素(B)に着目した。各オフ角基板表面に成長したダイヤモンド中 の不純物は、一般財団法人材料科学技術振興財団にて、2 次イオン質量分析(以下、「SIMS」と 略す。)を用いて定量を行った。依頼分析費用は本事業予算から支出した。結果の傾向として、 オフ角が大きくなるにつれて、取り込まれる B 濃度が減少し、オフ角が 3 度程度で飽和傾向と なった。

また、pin 接合において表面・界面の平坦性が重要であるため、令和元年度においては、比較的平坦な成長表面を持ちかつ不純物の取り込みを抑えられる高品質なCVDダイヤモンド{111}の成長条件を調べた。上記の実験結果を基にオフ角を3度とし、表面形態の制御に有効な(111)面内の基板オフ方向を[112]方向と[112]方向へ変化させ、結晶成長を行った。成長条件を表3.2.1-1に示す。その結果、[112]方向のオフ基板を用いて成長を行うことで、比較的平坦な成

3.2-1

長表面を持ちかつ不純物の取り込みを抑えられることがわかった。しかしながら、表 3.2.1-1 の成長条件では、意図せず混入した B の濃度が 1.6~3.2×10¹⁶ cm⁻³となり、ダイヤモンド検出 器の有感層として用いるには、更なる高純度化が必要であることがわかった。

| 原料ガス比 | CH ₄ /H ₂ : 0.05 % |
|---------|--|
| ガス圧 | 140 Torr |
| マイクロ波出力 | 1000 W |
| 成長温度 | 1050 °C |
| 成長時間 | 3~6 h |

表 3.2.1-1 CVD ダイヤモンド成長条件(令和元年度)

令和2年度においては、令和元年度に得た CVD ダイヤモンド成長の不純物低減に対する指針 に加え、成長雰囲気に酸素を添加することで、有感層に用いるノンドープ層の更なる高純度化 を試みた。成長条件を表 3.2.1-2 に示す。原料ガス比 CH4 /H2 を固定し、酸素ガス比を 2.5~ 50%まで変化させ成長を行った。成長したダイヤモンドの表面形態は、微分干渉顕微鏡と本事 業で購入した AFM (株式会社日立ハイテク製 AFM5200S)により観察した。不純物 (B) 濃度は、 SIMS により定量を行った。

| 原料ガス比 | CH ₄ /H ₂ : 0.1 % |
|---------|---|
| 酸素ガス比 | O_2/CH_4 : 2.5, 10, 25, 50 % |
| ガス圧 | 140 Torr |
| マイクロ波出力 | 1000 W |
| 成長温度 | 950 °C |
| 成長時間 | 0.5~3 h |

表 3.2.1-2 CVD ダイヤモンド成長条件(令和2年度)

図 3.2.1-2 に酸素添加有無の条件で基板表面に成長したダイヤモンドの表面形態を示す。図 3.2.1-2 の(a) 及び(b) は、それぞれ酸素添加なし(令和元年度の条件, CH₄/H₂: 0.05 %)と酸素添加あり(令和 2 年度の条件、CH₄/H₂: 0.1 %、0₂/CH₄: 50 %)で成長したものである。いずれも、単一方向に稜線を有するバンチングステップが観察される。また、3 時間成長後のダイヤモンドの表面を AFM により評価したところ、バンチングステップの高さは、酸素添加なしで 50 nm 程度であり、酸素添加ありでも 40 nm 程度の凹凸であることがわかった。一般に酸素はダイヤモンドをエッチングすることが知られており、表面荒れが懸念されるが、酸素添加し

ないものと比較しても、同等の平坦性を有するダイヤモンドの成長が可能であることがわかった。



図 3.2.1-2 酸素添加有無の条件で基板表面に成長したダイヤモンドの表面形態

図 3.2.1-3 に SIMS を用いて定量した B 濃度の酸素ガス比依存性を示す。試料は、同一の絶縁性単結晶ダイヤモンド基板上に酸素ガス比のみを変化させ、各 0.5 時間の成長を行ったものである。B 濃度は、酸素ガス比 2.5 %で 9×10^{16} cm⁻³、50 %で 3×10^{14} cm⁻³ となり、2 桁以上減少することがわかった。混入不純物濃度の目標を 1×10^{16} cm⁻³ 以下としていたが、絶縁性ダイヤモンド基板上では、成長雰囲気に酸素を添加することで 10^{14} cm⁻³ 台まで減少できることがわかり、目標を達成した。



図 3.2.1-3 成長したダイヤモンドの B 濃度の酸素ガス比依存性

3.2-3

(2) まとめ

高品質なダイヤモンド pin 接合を作製するために、{111}単結晶基板表面で CVD ダイヤモン ド薄膜形成を行った。実験パラメータとして基板オフ角及びオフ方向、成長時の炭素(メタン) 濃度等を変化させ、結晶完全性の向上を図った。結晶評価には AFM、3 次元ラマン分光法、SIMS 分析を組み合わせて行った。その結果、低炭素濃度でかつ酸素を原料ガスに加えた特殊な成長 条件において結晶成長面が原子レベルで平坦かつ結晶内ホウ素不純物濃度が 3×10¹⁴ cm⁻³と極 めて低い高品質 {111} ダイヤモンド薄膜の成長に成功した。

3.2.2 センサー形成プロセスに関する研究

図 3.2.2-1 にセンサー形成プロセスの概略を示す。本稿では、主に1及び2のプロセスの 最適化を行った。平成30年度~令和元年度にかけて、単結晶 {111} ダイヤモンド基板表面で のp層、i層、n層の積層成長、及び擬似縦型構造pinダイオードのメサ構造形成プロセスの 最適化を行った。令和2年度は、高純度ノンドープ層をpin接合構造中に形成した。ノンドー プ層は混入する主要不純物であるホウ素の混入濃度を1×10¹⁶ cm⁻³以下に低減し、膜厚は3 µm 以上とした。平成30年度~令和元年度に達成したメサ型構造形成技術を用い、疑似縦型構造 のpinダイヤモンドダイオードを形成した。ダイオード検出器動作においては、ASICの供給最 大電圧20 Vを逆バイアスとして印加した場合に3 µmのi層を空乏化することを目標とした。



図 3.2.2-1 センサー形成プロセスの概略

(1) pin 接合構造中への高純度ノンドープ層の形成

擬似縦型構造の pin ダイオードを作製するため、絶縁性単結晶 {111} ダイヤモンド基板上 で p 層、i 層、n 層の積層成長を行った。その概略を図 3.2.2-2 に示す。それぞれ異なるマイ クロ波プラズマ CVD 装置を用いて、合計 4 層の成長を行った。最初に、単結晶基板表面に B 濃



図 3.2.2-2 ダイヤモンド基板表面での pin 積層成長の概略

3.2-4 - 77 - 度 10^{19} cm⁻³ 程度の p 層の成長を行った。p 層の膜厚は、2 μ m 程度である。その後、p 層表面に p-層と n-層の成長を行った。本事業では、この 2 層をまとめて i 層としている。この i 層の膜 厚や不純物濃度は、作製した pin ダイオードの静特性を評価後、適宜最適化を行い、3.2.1 で 行った i 層結晶成長及び本項目の pin ダイオード形成にフィードバックした。n-層の成長後、 リン (P) 濃度 10^{19} cm⁻³ 程度の n 層成長を行った。n 層の膜厚は、0.1 μ m 程度である。

平成 30 年度~令和元年度にかけて、積層膜の成長と種々の評価を行った。その結果、計4回の成長プロセスを経ても異常成長などなく、積層膜の成長ができていることがわかった。また、pin 積層膜の結晶性を共焦点ラマン分光により評価したところ、i層のピーク幅が基板やp層に比べて狭くなっていることから、p層表面においても高品質なi層が成長していることがわかった。しかしながら、p-層の成長を前項の表 3.2.1-1 に示す条件で行っていたため、p-層のB 濃度が 10¹⁶ cm⁻³ 台となり、pin 接合の空乏層が逆バイアス 20 V時に 1.5 µm 程度であった。そのため、中性子センサーとして用いるには、i層の膜厚が 3 µm 程度あるいはそれ以上で、i層の B の混入濃度を 1×10¹⁶ cm⁻³ 以下に低減する必要があることわかった。

令和2年度は、上記の問題を解決するため、3.2.1 で最適化した酸素添加の成長条件により、 高純度ノンドープ層をpin 接合構造中に形成した。単結晶基板表面にB濃度10¹⁹ cm⁻³、膜厚2 µm 程度のp層(高濃度Bドープ層)の成長を行った。その後、p層表面に前項の表3.2.1-2 に 示す酸素添加条件でp-層の成長を行った。p-層のB濃度と膜厚は、SIMSを用いて定量した。

図 3.2.2-3 に、酸素添加条件により高濃度 B ドープ層表面に成長した p-層の B 濃度の深さ プロファイルを示す。p-層の B 濃度と膜厚は、それぞれ 3×10^{15} cm⁻³、3.2 µm であった。3.2.1 の絶縁性ダイヤモンド基板上での結果と比較して、B 濃度が 1 桁程度増加したのは、下地の高 濃度 B 層 $(3 \times 10^{19}$ cm⁻³) が影響しているものと考えられる。i 層に混入する主要不純物である B を 3×10^{15} cm⁻³に低減し、膜厚 3 µm 以上の成長に成功した。



図 3.2.2-3 酸素添加条件により高濃度 B ドープ層に成長した p-層の B 濃度の深さプロファイル

(2) 擬似縦型構造 pin ダイオードの形成

作製した pin 積層膜は、絶縁性ダイヤモンド基板表面に成長を行っているため、pin ダイオ ードとして動作させるには、エッチングにより p 層を部分的に露出させ、メサ構造を形成する 必要がある。図 3.2.2-4 にダイヤモンドメサ構造の形成プロセスを示す。まず pin 積層膜上に EB 蒸着により A1 マスクを形成した。その後、反応性イオンエッチングにより、直径 250 µm 程 度のメサ構造を形成した。pin ダイオードのメサ構造形成に用いたドライエッチング装置は、 物材機構の技術・開発共用部門ナノテクノロジー融合ステーション内にある並木ファウンドリ により運用されている。最後に、化学洗浄によりマスクを除去した後、レーザー顕微鏡により 表面形態を観察した。



図 3.2.2-4 ダイヤモンドメサ構造の形成プロセス

膜厚3 µm以上のi層を削りp層を部分的に露出させるためには、4~5 µmの高さを有する メサ構造を作る必要がある。平成30年度~令和元年度にかけては、主にAlマスクの蒸着と反 応性イオンエッチングの条件最適化を行い、5 µmの高さを有するメサ構造の形成に成功した。 令和2年度は、3.2.2の(1)で最終的に作製した高純度i層を含むpin積層膜を、最適化した メサ加工条件を用いて、構造加工を行った。図3.2.2-5の(a)に本事業で作製した最終的な pinダイオードの構造概略を示す。i層の膜厚は4.2 µmであり、酸素添加の成長条件により高 純度化させた p-層を含む構造となっている。図3.2.2-5の(b)及び(c)にメサ加工後のレー

ザー顕微鏡像と断面プロファイルを示す。p層及びn層の表面やメサの側面において表面粗れ などなく、4.8 µmの高さを有するメサ構造の形成に成功した。



図 3.2.2-5 本事業で作製した(a) 最終的な pin ダイオードの構造概略と (b) メサ加工後のレーザー顕微鏡像及び(c) 断面プロファイル

(3) pin ダイオードの静特性

(1)で述べたように、作製した pin ダイオードの静特性を評価後、適宜最適化を行い、3.2.1 で行った i 層結晶成長及び本項の pin ダイオード形成にフィードバックした。ここでは、(2) で示した構造を有する pin ダイオードの静特性の一例を示す。

(2) で形成したメサトップ(n層表面)とボトム(p層表面)に、物材機構に既存の EB 蒸着 装置を用いて、オーミック電極を成膜した。電気特性の評価には、物材機構に既存の真空プロ ーバ、アジレント・テクノロジー株式会社製パワーデバイスアナライザ B1505A、及び本事業の 予算で購入した Keithley Instruments 製 2450 ソースメータを用いた。電気特性は、電流一電 圧(I-V)特性と容量-電圧(C-V)特性を調べた。評価は真空中(1×10⁻¹⁰ Torr 以下)、室温 で行った。

得られた I-V 曲線の一例を図 3.2.2-6 に示す。順方向特性では 4 V 付近から順方向電流の立 ち上がりが観察され、ダイヤモンドの pn 接合による内蔵電位に概ね一致した。整流比は-10 V から+20 V の範囲で 8 桁が得られた。逆方向特性では、中性子センサーシステムの最大印加電 圧 20 V 印可時で漏れ電流は 10 pA と非常に低く抑えられた。



図 3.2.2-6 本事業で作製した最終的な pin ダイオードの I-V 特性

図 3.2.2-7 に C-V 特性から算出した pin ダイオードの空乏層幅と印加電圧との関係を示す。 空乏層幅は、0 V で 3.5 µm、逆バイアス 20 V で 4.0 µm であった。また、SIMS 分析から算出さ れた pin ダイオードの i 層の膜厚は 4.2 µm (n-層: 1.0 µm、p-層: 3.2 µm) である。これを考 慮すると、0 V 時点で p-層は全空乏しており、20 V においても i 層はほぼ空乏化していること がわかる。



図 3.2.2-7 C-V 特性から算出した pin ダイオードの空乏層幅と印加電圧との関係

3.2-8 - 81 - 令和元年度に作製した pin ダイオードでは、i 層の膜厚が 4.0 μm であっても、p-層の不純物 (B) 濃度の影響により、空乏層幅は逆バイアス 20 V印加時に 1.5 μm 程度で部分空乏した状態であった。これらの結果から、ダイヤモンド成長条件の最適化により、ASIC の供給最大電圧 20 V を逆バイアスとして印加した場合に、中性子コンバータで発生するα粒子の飛程に適した有感層厚さを有する疑似縦型構造 pin ダイオードの作製に成功し、目標を達成した。

(4) まとめ

熱中性子センサーに用いるダイヤモンド pin 接合構造を形成するため、核種変換で発生する α 粒子を効率的に検出可能な 3.2 µm (3.2.3 で試算)の感受層 (ノンドープ層)をもつ疑似縦 型構造 pin 素子のメサ構造加工、ホウ素、リンをドープした p 型及び n 型層で挟まれたノンド ープ層の低不純物化を実現した。作製した pin ダイヤモンドダイオードの電流-電圧特性、容 量-電圧特性評価から、外部印加電圧無しにおいてもノンドープ層を完全空乏化できることを 確認した。 3.2.3 中性子検出用センサー構造に関する研究

平成 30 年度~令和元年度にかけて、中性子コンバータの材料やダイヤモンド pin ダイオードの有感層厚さの指針策定、中性子コンバータからの放出核種を想定した a 粒子照射実験とセンサー素子化を行った。令和 2 年度は、引き続き a 粒子照射実験にてセンサー特性を評価し、最終的に中性子コンバータとダイヤモンド pin ダイオードを組み合わせ、中性子照射試験を行い熱中性子コンバータから放出される荷電粒子を検出した。また、前述の 3.1.1 項で作製したCMOS 回路とダイヤモンド検出器を接続し回路全体の動作を確認した。

α線照射実験

前項3.2.2 で作製した疑似縦型構造 pin ダイオードに対し、高エネ研にてα線照射実験を行い i 層の CCE を評価した。図3.2.3-1 (a) に A1 筐体に取り付けた疑似縦型構造 pin ダイオードの外観を示す。疑似縦型構造 pin ダイオードはメサトップ (n 層)、メサボトム (p 層) をワイヤボンディングし、それぞれ SMA レセクタプル (バイアス印可)、A1 筐体 (グラウンド) に結線した。SMA レセクタプルで読み出した信号は電荷有感型前置増幅器、パルス波高分析器を通じて誘導電荷量分布を評価した。エネルギー校正には Si-pin ダイオードを用い、シリコン、ダイヤモンド放射線検出器の平均電離エネルギーと Si-pin ダイオードで得られたピークチャネルから校正を行った。上記の測定回路を用いて²⁴¹Am 線源から発生する 5.5 MeV α 粒子の照射試験を行った(図3.2.3-1 (b))。



図 3.2.3-1 A1 筐体に取り付けた疑似縦型構造 pin ダイオードの外観 (a) と ²⁴¹Am 線源を用いた α 粒子照射試験の概略 (b)

図3.2.3-2に疑似縦型構造 pin ダイオードの α 線応答スペクトルを示す。横軸に、校正した エネルギーを示している。また、赤及び黒の実線は、それぞれ逆バイアス 20 V と 0 V 時のも のである。いずれの場合にも、誘導電荷量分布から α 粒子に対する明確なレスポンスが得られ た。疑似縦型 pin ダイオードで得られたスペクトルにはスプリットした 2 つのピーク成分が観 察された。例として逆バイアス 20 V 印加時、1330 keV 及び 1780 keV に見られる 2 つのピーク は今回作製した疑似縦型 pin ダイオードの構造に由来すると考えられる。逆バイアス 20 V を 印加した時の試料の空乏層幅は 4.0 µm である。5.5 MeV α 線のダイヤモンド中での飛程は約 13 µm であり、α 線は試料の有感層(空乏層)を通過し、そのエネルギーの一部を付与するこ ととなる。一方、ワイヤボンディングを行ったメサ上にはボンディングボールが形成されてお り、²⁴¹Am から放出された α 線はメサに直接入射するものとボンディングボールで損失し、長さ当たりの エネルギー付与が、メサに直接入射するものよりも大きくなったため、高チャンネル側にもピ ークが現れたものと考えられる。

次に、同試料の CCE を見積もった。モンテカルロシミュレーションコードから、約4 µm 厚 のダイヤモンドに 5.486 MeV α 線が垂直に入射したとき、ダイヤモンドに付与されるエネルギ ーは約 1160 keV であった。メサに直接入射するものを α 線によるエネルギー付与とし、空乏 層幅から予想されるエネルギーデポジットで電荷量を規格化した本試料の CCE は約 114 %であ った。CCE が、100 %以上となった原因は、キャリア生成を空乏層に限定して計算したためだと 考えられる。逆バイアス 0 V (無バイアス) においても、CCE は 40 %を超えており、pin 接合 の内蔵電位のみでキャリア収集できることから、i 層の結晶高品質化を実証した。



図 3.2.3-2 疑似縦型構造 pin ダイオードの α 線応答スペクトル

3.2-11 - 84 - 次に、同試料において、中性子コンバータからの放出核種を想定した α 粒子照射実験を行った。 平成 30 年度に中性子コンバータ膜としては、六方晶窒化ホウ素(hBN)を優先的に用いる事とした。 hBN 中の ¹⁰B は、熱中性子と ¹⁰B(n, α)⁷Li 反応を持ち、放出核のエネルギーは E_{α}=1.47 MeV、 E_{Li} = 0.84 MeV である。中性子コンバータからの放出核種を想定した場合、E_{$\alpha}=1.47 MeV に近い$ $放射線源がないため、²⁴¹Am 線源から発生する 5.5 MeV <math>\alpha$ 粒子を A1 箔により減衰させ、中性子コンバータからの放出核種に近いエネルギーの α 粒子を照射した。図 3.2.3-3 (a) 及び (b) に A1 箔を付けた疑似縦型構造 pin ダイオードの外観と実験の概略を示す。</sub>



図 3.2.3-3 A1 箔を付けた疑似縦型構造 pin ダイオードの外観 (a) と実験の概略(b)

Si-pin ダイオードを用いて、A1 箔の膜厚を変化させ、減衰後の α 粒子のエネルギーを求めた。図 3.2.3-4 に Si-pin ダイオードで求めた α 粒子のエネルギーを示す。A1 箔なし (0 µm) の場合を 5.5 MeV 基準として、膜厚 17.5 µm の時に 1.3 MeV 程度となり、中性子コンバータからの放出核種に近いエネルギーであることがわかった。同一の膜厚 17.5 µm の A1 箔をダイヤモンド pin ダイオード検出器に取り付け、 α 粒子照射実験を行った。図 3.2.3-5 に Si-pin ダイオード及びダイヤモンド pin ダイオードの 1.3 MeV 程度の α 線に対する応答スペクトルを示す。ダイヤモンド pin ダイオードにおいても、中性子コンバータからの放出核種に近いエネルギー1.3 MeV 程度の α 線を検出できることがわかった。



図 3.2.3-4 Si-pin ダイオードで求めた α 粒子エネルギーの Al 箔厚さ依存性



図 3.2.3-5 1.3 MeVのα線に対する応答スペクトル

(2) 中性子照射試験

中性子コンバータとダイヤモンド pin ダイオードを組み合わせ、高エネ研にて中性子照射試験を行った。図 3.2.3-6 の(a) に中性子照射実験に用いたダイヤモンド pin ダイオード検出器の概略を示す。前項 3.2.2 で作製した疑似縦型構造 pin ダイオードに、中性子コンバータとして物材機構製 ¹⁰B 同位体濃縮の hBN パウダーを基板全体に積層した。hBN パウダーは粒径が数 µm 程度のもので、hBN の粒子間に空隙があることから、¹⁰B で変換された α 線は十分 pin ダイオードの有感層に届くと考え、数十 µm 程度の厚さに積層した。

高エネ研・熱中性子標準棟の黒鉛パイルを用いて熱中性子照射試験を行った。実際の熱中性 子照射の実験系を図 3.2.3-6 の(b) に示す。中性子コンバータと組み合わせたダイヤモンド pin ダイオード検出器を導入部から黒鉛パイルに挿入した。黒鉛パイルの中心部には、²⁴¹Am-Be 中性子線源を配置しており、線源から出た~5 MeV 程度の中性子が黒鉛パイル中で散乱し熱化 する。熱化した中性子を中性子コンバータによりα線に変換し、ダイヤモンド pin ダイオード 検出器で検出した。測定回路は、3.2.3 の(1)と同じである。照射時間は、7 日間とした。その 結果、カウント数は 12 カウント程度であったが、熱中性子を検出できた。黒鉛パイルの実験 では、熱中性子のフラックスが 10²~10³ n/cm²/s 程度と小さく、かつ pin ダイオード検出器の 有感面積が直径 250 µm のメサ部分に制限されたため、明確な波高値分布を示すほどのカウン トが得られなかった。実際のデブリから発生している熱中性子のフラックスは 10²~10⁶ n/cm²/s と考えられており、フラックスが高い所での使用や有感面積を増やすことで実用的な 熱中性子センサーとして期待できる。

(a)





図 3. 2. 3-6 (a) 中性子照射実験に用いたダイヤモンド pin ダイオード検出器の概略
 (b) 中性子照射の実験系(高エネ研・熱中性子標準棟)

(3) γ線照射試験

実際のデブリ調査においては、高γ線量下での中性子検出が想定されており、γ線と中性子 との弁別性が重要となっている。そのため中性子照射試験と並行してγ線照射実験を行い、ダ イヤモンド pin ダイオードのγ線に対する感度を評価した。

ダイヤモンド pin ダイオードの比較試料として、3.1.2 で使用した CIVIDEC Instrumentation GmbH 製ダイヤモンド検出器 (有感層厚さ:25 µm、140 µm)を使用した。 γ 線源は¹³⁷Cs を用い、 線源と検出器の距離は 50 cm とした。この距離での γ 線線量は、1.6 mSv/h である。測定回路 は、3.2.3 の(1)と同じものを用いた。

図 3.2.3-7 に γ線に対する応答スペクトルを示す。CIVIDEC Instrumentation GmbH 製ダイ ヤモンド検出器においては、有感層厚さが厚くなるほど γ線に対する信号が大きくなってい ることがわかる。一方、ダイヤモンド pin ダイオードは、有感層が空乏層に限定されるため、 信号はほぼノイズレベルであることがわかる。図 3.2.3-8 にそれぞれの検出器の有感面積と照 射時間で規格化したカウント数を示す。CIVIDEC Instrumentation GmbH 製ダイヤモンド検出器 と比較すると、ダイヤモンド pin ダイオードは、有感面積にかかわらず γ線に対する感度が非 常に低いことがわかる。以上のことから、ダイヤモンド pin ダイオードを検出器として用いる 際には、 γ線を遮蔽するための特別なパッケージングは必要ないことが明らかになった。



図 3.2.3-7 γ 線に対する応答スペクトル



図 3.2.3-8 検出器の有感面積と照射時間で規格化したカウント数

(4) ROV 接続用基板に実装された信号処理集積回路とダイヤモンド検出器との接続試験

令和2年度において、3.1.1で作製した信号処理集積回路と3.2.2で作製したダイヤモンpin ダイオードを ROV 接続用基板に実装し、回路全体の動作の確認を行った。

図 3.2.3-9に接続試験を行った(a) ダイヤモンド pin ダイオードと(b) その電流-電圧特性を示す。疑似縦型構造 pin ダイオードのメサボトム(p層) 1箇所をバイアス印可用(図中HV)に、メサトップ(n層)4箇所を信号取得用(図中Pad#2,4,6,8)に、ワイヤボンディングを用いて金線を接続した。図 3.2.3-9の(b)から、いずれの pin ダイオードも-20 Vから 10 V の範囲で整流比が8桁以上となり、逆バイアス20 V 時には数 pA の漏れ電流に抑えられていることがわかる。



図 3.2.3-9 接続試験を行った(a)ダイヤモンド pin ダイオードと(b) その電流-電圧特性

図 3.2.3-10 に (a) ROVER 接続用基板に実装した信号処理集積回路とダイヤモンド pin ダイオードの全体写真と (b) ダイヤモンド pin ダイオード部分の拡大写真を示す。ダイヤモンド pin ダイオードにワイヤボンディングした金線と ROVER 接続用基板の電極パッドとは銀ペーストにより接続した。このダイヤモンド pin ダイオードの 2 cm 上方に ²⁴¹Am 線源を配置し、信号処理集積回路の出力側にオシロスコープを接続して、5.5 MeV α 線の応答波形を観察した。ダイヤモンド pin ダイオードに印加した逆バイアスは、ROVER 接続用基板の最大供給電圧 20 V である。図 3.2.3-11 にダイヤモンド pin ダイオードと信号処理集積回路を通して検出した 5.5 MeV α 線の応答波形の一例を示す。いずれのダイヤモンド pin ダイオードにおいても 5.5 MeV α 線の応答を確認でき、信号処理集積回路と実際のダイヤモンド検出器との接続動作を実証した。

 (a) ダイヤモンド pinダイオード
 (b) ダイヤモンド pinダイオード
 (b) ダイヤモンド pinダイオード
 (c) アコロ(#21A-HV) 「P (ASIC)
 (c) アコロ(#21A-HV) 「P (ASIC)
 (c) アコロ(#21A-HV) 「P (C) P (C

図 3.2.3-10 (a) ROVER 接続用基板に実装された信号処理集積回路とダイヤモンド pin ダイ オード (b) 接続したダイヤモンド pin ダイオードの拡大写真



図 3.2.3-11 ダイヤモンド pin ダイオードと信号処理集積回路を通して検出した 5.5 MeV α 線の応答波形の一例

(5) まとめ

ダイヤモンド pin ダイオードの α 線応答試験では、低逆バイアス電圧 20 V においても α 粒子に対する明確なレスポンスが得られ 100 %に至る高い CCE を得た。実装試験として、「3.1.1 耐放射線トランジスタ及び集積回路の研究開発」にて作製された CMOS 回路とダイヤモンド検 出器をワイヤボンディングで接続し、 α 粒子検出動作を確認した。さらに、中性子コンバータ として物材機構において合成実績のある ¹⁰B 同位体純化した高品質六方昌窒化ホウ素 (hBN) を 用いて検出器を形成した。中性子検出時にコンバータから放出される α 粒子によるエネルギー 付与のモンテカルロシミュレーションから、感受層の厚さは 3 µm 程度が最適と見積もった。 ノイズとなる γ 線感度を低減するためにも感受層を薄くすることは重要と考えた。高エネ研・ 熱中性子標準棟の黒鉛パイルを用いて熱中性子照射試験を行った結果、非常に低感度であった ものの熱中性子に対するレスポンスを確認した。

- 3.3 複合型センサーを搭載した ROV による遠隔計測技術の開発(再委託先:海技研)【平成 30 年度~令和2年度】
 - 3.3.1 音響探査装置と中性子センサーを組み合わせた複合型センサーの開発
 - (1) SBP 探査システムの開発
 - SBP 探査システムの構成

平成 29 年 3 月に実施された東京電力ホールディングス株式会社による 1F の PCV 内部調査 において、砂礫の堆積層や岩塊の存在が確認された[3.3.1-1][3.3.1-2][3.3.1-3]。そのため、 海技研では、SBP を用いた堆積物分布測定への適用検討をした。

SBP は音響探査手法の一種で、海底及び海底下からの反射音との時間差ならびに、音圧の 違いを利用して地質断面イメージを連続的に得る。海底表層付近での砂泥等の堆積作用、埋 設物探査及び断層活動等の把握に使用される[3.3.1-4]。

SBP システムは図 3.3.1-1 に示すように、対象物に向けて音波を発信する水中スピーカ、 対象物からの反射波を受信するハイドロホンで構成される。今回は、ハイドロホンで受信し た音圧をデジタル化し、発信時刻と反射音波の到達時間差から導出した深度を図示化するソ フト "SonarWiz 7" (Chesapeake Technology, Inc. 製:以下「SonarWiz」という。)[3.3.1-5]を用いて、得られたイメージを PC に表示した。



水中マイク 又は ハイドロフォン

図 3.3.1-1 SBP 探査システムの構成

② 試験条件

本研究では、SBP システムの適用検討試験を楢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。試験体系図を図 3.3.1-2 に示す。SBP システムの音源として水中スピーカ (ウエタックス株式会社製 UA-50 型)、受波器としてハイドロホン(株式会社アクアサウンド 製 AQH-020 型)を水面直下に置き、水底面に木枠、その上に供試体(図 3.3.1-3)を設置する 形式とした。また、ファンクションジェネレータとパワー・アンプによって発生させた矩形 パルスを水中スピーカに印加して音波を生成した。

本研究での供試体の選定では、TMI 事故での燃料デブリの固有音響インピーダンス[3.3.1-2]がステンレス[3.3.1-3]のそれに近かったことを受けて、燃料デブリの模擬にステンレスブロック(密度7.9 g/cm³、L:15 cm、W:10 cm、T:5 cm)を用いた。合計 18 個のステンレスブロックをステンレスパン(底板厚さ1 nm)に2枚積層で配列した。また、内部調査において、水中カメラによる観測から堆積物が砂利状のものに類似していたため砂礫層の模擬としてコンクリート製レンガ(密度:2.0~2.4 g/cm³と推定、L:20 cm、W:10 cm、T:6 cm)を用いることにした。合計 15 個のコンクリート製レンガをステンレスパン(底板厚さ1 nm)に2枚積層で配列した状態にし、これをステンレスパンに入れたステンレスブロック上に乗せた。図 3.3.1-3 に試験の様子を示す。

コンクリート

図 3.3.1-3 SBP 性能試験の様子 燃料デブリと砂礫層の模擬(左)、水槽試験の様子(中)、試験治具(右)

音響探査では、周波数が大きいほど解像度が向上する。他方、媒質境界にて反射しやすく なるため、SBP が物質透過を利用する特性を考えた場合、測定に適したパラメータ設定が必 要である。そこで、発信するパルス幅を変化させることで音波の周波数を変化させ、測定パ ラメータの解像度への影響を調べた。 本試験では、矩形パルス幅の変化が音波の周波数スペクトルへどう影響するか確認した。 パルス幅は、ファンクションジェネレータで変化させた。また、ハイドロホンで受信した波 の変化をオシロスコープで観察した。試験においては、パルス発振周波数を4 Hz(周期 250 ms)に固定し、パルス幅を1 ms、0.333 ms、83.3 µs、16.7 µs と変化させ、受信波形及び周 波数スペクトルの変化を調べた。

試験結果

例として、模擬デブリを水槽に設置した場合のパルス幅 83.3 μs、16.7 μs の受信波形の比較を図 3.3.1-4 に示す。

図 3.3.1-4 パルス幅 83.3 µs と 16.7 µs の場合のハイドロホン信号波形の比較

図 3.3.1-5 図 3.3.1-4 の波形の FFT スペクトル

受信波データを FFT パワースペクトルに変換して図 3.3.1-5 に示した。この結果、パルス 幅 83.3 µs、パルス幅 16.7 µs のそれぞれのスペクトルについて SBP 測定で有効である 20 kHz から 50 kHz の周波数帯の積分値と周波数全体の積分値の比をとったところ、 それぞれ

> **3.3-3** - 94 -

50 %と 18 %でありパルス幅 83.3 µs の方が SBP に有効な周波数成分(20 kHz 程度)が多く含まれている。そのため、この系においてパルス幅 83.3 µs の条件下で SBP 試験をした方が有利であることがわかった。

評価・検討

図 3.3.1-6 に示すような断層図を描くためにハイドロホンの受信波を設定した周期(今回 は 50 kHz)でサンプリングした。パルス幅については上記 3)項の検討結果を踏まえ、20 kHz 周辺の周波数の割合が最も高くなる 83.3 µs を採用した。これらからコンクリートブロック とステンレスブロック境界面は、識別できている。ロボット試験水槽で SBP システム試験を 実施し、SBP システムの断層図の解像度を向上させるための有用な情報を得た。今回の試験 では、パルス幅は 83.3 µs が最適だった。

図 3.3.1-6 SBP による断層図(左)、SBP 測定で取得した波形(右)

- (2) 音響レンズの開発

IF における調査は狭い空間で実施されるため、水中スピーカの指向性による解像度への影響を考える必要がある。そこで、海技研の落下試験水槽において、水中スピーカの指向性を 調べた。水中スピーカから前方、横方向、後方にハイドロホンを1 mの距離に設置し、さら に 45°斜め方向には 1.4 mの距離に設置して水中スピーカから発信した音波を受信した。こ の受信波データから FFT 変換を行い、FFT スペクトルを図 3.3.1-7 に示す。この結果、ハイ ドロホン受信波の 0~2 kHz の範囲における FFT スペクトルは 45°斜め方向を除き、ほぼ同 様なスペクトルを示しており、水中スピーカから発振する音の特徴的な指向性は殆どないこ とがわかった。

図 3.3.1-7 受信波の FFT スペクトル (左上:前方、右上:45 度斜め前方、左下:横方向、右下:後ろ方向)

そこで、水中スピーカから発振する音を音波集束用音響レンズで集束させて指向性を持た せる検討を実施した。音波伝播計算コードWave2000[3.3.1-6]を用いて、音響レンズの設計解 析を実施し、音波が集束するかどうか、及び集束するビームの幅を評価した。Wave2000はFDTD 法(Finite difference time domain method:計算対象領域を規則的な格子に分割し、差分 法を用いて微分方程式を変形して計算する方法)を用いた音波の伝播を計算するコードであ る。ROV に搭載する際の重量を考慮して材質にポリスチレンを採用し、音波の集束性に影響 する曲率半径、形状、焦点距離などのパラメータを調査した。この結果から、音波の集束性 に優れた曲率半径 300 mm、両凹面形状の音響レンズを選定した。

② 音響レンズの距離検討

水中スピーカと音響レンズ間の距離をパラメータにして、Wave2000を用いて計算し、音響 レンズの音波集束性を検討した。水中スピーカと音響レンズの距離をD1、音響レンズ後方の 距離をD2とし、距離を変えて計算した。水中スピーカと音響レンズの距離D1を50~200 mm の範囲で変化させながら、中心軸上伝搬距離D2での振幅を計算した。この結果、D1=50 mmの 場合にD2=70 mm付近に焦点が発生し、他の条件では音波が伝搬するとともに波の振幅は低下 している(図3.3.1-8 参照)。

図 3.3.1-8 水中スピーカと音響レンズの距離 D1 と伝搬距離 D2 の振幅の関係

焦点が発生している D1=50 mm の場合について、焦点が発生している音響レンズ後方 70 mm について音響ビームの幅を図 3.3.1-9 に示す。

図 3.3.1-9 D1=50 mm における音響レンズ後方 D2=70 mm の音響ビーム分布

③音響レンズの性能試験

SBP システムの測定パラメータ影響調査試験において使用したデブリ模擬体を楢葉遠隔技術開発センターのロボット試験水槽の底に設置して、音響レンズ付きの水中スピーカを音源 とした反射波のハイドロホンによる測定を実施した。

a) 試験方法

SBP システムの測定パラメータは、測定パラメータ影響調査試験結果より水中スピーカから発振するパルス幅を83.3 µs に、デブリ模擬体とハイドロホン垂直間距離を7 cm、30 cm、50 cm に、ハイドロホンと水中スピーカとの水平距離を20 cm に設定した。水槽中のデブリ 模擬体の試験状況を図3.3.1-10 に示す。

図 3.3.1-10 水槽中のデブリ模擬体と音響レンズ付 SBP 試験治具の外観

b) 試験結果

デブリ模擬体とハイドロホン間垂直距離を 50 cm に設定した場合について、得られたハ イドロホンに到達している反射音の音圧分布と SonarWiz による断層図をそれぞれ図 3.3.1-11、図 3.3.1-12 に示す。同じ距離での音響レンズを取り付けた場合(図 3.3.1-11)に、デ ブリ模擬体境界での音圧のピーク数が 3 ヵ所現れているのに対し、音響レンズを取り付け ない場合(図 3.3.1-12)は 2 ヵ所しか現れていない。つまり音響レンズを取り付けること で、ステンレスブロックとその下部層との境界から反射波を捉えられたと推察できる。また、 図 3.3.1-13 に音響レンズ有無それぞれの場合における断層図を示すが、音響レンズを取り 付けたことによって断層図が明瞭に得られることがわかった。

図 3.3.1-11 音響レンズ付 SBP による音圧分布と SonarWiz の断層図

JAEA-Review 2021-042

図 3.3.1-13 模擬デブリをおいた際の SBP イメージ 音響レンズ無し(左)、音響レンズ有り(右)

c) 音響レンズ影響の検討

音響レンズを取り付けたことによりステンレスブロックとその下部層との境界から反射 波を捉えられた理由の一因として音波の周波数成分割合が関係していると推察される。SBP は、音波が物質層の境界で音響インピーダンスが変わる際に反射することを利用して、その 飛行時間と音波の強度を測定し、その違いから物質層を識別する方法である。観測した音波 を連続ウェーブレット変換することで物質層に入射する周波数成分の割合を評価すること にした。

ウェーブレット変換[3.3.1-7]は、基底関数と分析する信号との畳み込み積分で表すこと ができ、この変換を実行することにより、信号を構成する周波数成分の時間的変動を抽出す ることができる。ウェーブレット変換をデブリ模擬体・ハイドロホン間の距離を約50 cm に した場合の音圧データに適用した結果を図3.3.1-14、図3.3.1-15 に示す。図において横軸 は音波発信後の経過時間[ms]、縦軸は振幅[a.u.]を示す。なお、今回用いたウェーブレット 関数は Moret 関数である。この結果、音響レンズを取り付けた場合は2 kHz~7 kHz 間の周 波数成分が音響レンズを取り付けない場合に比べ、増加していることがわかった。すなわち、 低い周波数成分の割合が増加したことで、透過する成分が増加したことを示している。

図 3.3.1-14 ウェーブレット解析結果(レンズ有り)

3.3-8 - 99 -

図 3.3.1-15 ウェーブレット解析結果(レンズ無し)

(3) マッピング技術の開発

① マッピング用ソナー性能試験概要

ソナーを用いたマッピング技術は海洋における海底探査で広く使用されているが、PCVのように海洋に比べて非常に狭い空間の使用では多重反射によるノイズの問題がある。また、ROVに搭載するために、大きさに制限がある。そこで、市販の魚群探知機用ソナーの中では、マルチフェイズドアレイ方式をとり、比較的コンパクトな Garmin Inc. 製ソナーPS-31を選定した。図 3.3.1-16 に Garmin Inc. 製ソナーPS-31[3.3.1-8]の外観を示し、表 3.3.1-1 に 2 種類のソナー仕様を示す。

表 3.3.1-1 各種ソナーの仕様比較

| 型番 | メーカー | スキャン方式 | 探查距離 | 発振子周波数 |
|--------|--------|----------|-------|-------------|
| PS-31 | GARMIN | フェイズドアレイ | 150 m | 455/800 kHz |
| GT-51M | GARMIN | シングルビーム | 240 m | 150-240 kHz |

図 3.3.1-16 ソナーの外観

3.3-9 - 100 -

JAEA-Review 2021-042

図 3.3.1-17 模擬デブリ外観

本研究では、小型ソナーの性能試験を実施した。今回はマルチフェイズドアレイ・ソナー (Garmin Inc. 製 PS-31) とシングルビームソナー (Garmin Inc. 製 GT-51) を同時に動かし、 PS-31 で前方の視野(動径 r と方位角 θ)、GT-51 で下方の視野(深さ z) を確保した。図 3.3.1-16 に示すように PS-31 を水底に対して 45°の角度で治具に取り付け、GT-51 を下側に 取り付けた形の治具を用意し、これを回転型アームに取り付け、海技研の落下試験水槽で試 験した。マッピング性能を評価するために、図 3.3.1-17 に示すような水槽中の位置に形状模 擬デブリを設置した。ソナーを取り付けたアームを連続的に移動させることによって、ソナ ーと模擬デブリとの相対距離を変えて観測した。模擬デブリの主要部分(山状部分)は銅ス ラグを主原料として製作され、その上部の箱状に見えるのが実機 BWR 燃料と同一外形で短尺 にしたチャンネルボックス(ジルカロイ-2)である。また突き刺されているパイプ状の管は 実機燃料と同一外径の燃料被覆管(ジルカロイ-2)である。

② マッピング用ソナー性能試験結果

収録したソナー画像の3次元画像を図3.3.1-18に示す。画像は図3.3.1-17の模擬デブリ 外観における凹凸状の銅スラグ上に存在するジルカロイ-2製の角筒形状のチャンネルボック スを捉えている。またパイプ状の燃料被覆管(ジルカロイ-2)も垣間見られる。模擬デブリ より上部斜め方向から画像を撮像しているため、得られた画像から模擬デブリ外枠上面から チャンネルボックス頂部までの高さを評価すると、模擬デブリの高さをほぼ満足している。 またこのソナーはリアルタイムで所定角度の扇状ビームを左右にスキャンして対象物を捉え、 その対象物の位置を円柱座標で表示する。以上から、この小型ソナー(Garmin Inc. 製 PS-31) の性能が仕様通りであることが確認できた。

図 3.3.1-18 ソナーによる 3 次元画像

3.3-10 - 101 - (4) 複合型センサーの耐放射線性

各センサーの通信制御を一括で行う電子回路の耐放射線性を調べるため、⁶⁰Coγ線源による 照射試験を実施した。

試験方法

照射試験は、京都大学複合原子力科学研究所の 60Co γ 線照射装置を用いた。評価には、中 性子センサーからの計数情報の代わりにファンクションジェネレータから1秒毎に 800 個の 矩形波を電子回路に入力し、回路で計数した結果をシリアル通信で PC に入力し、PC での計 数情報を1秒毎にモニタする評価システムを用意した。照射試験では評価システムを動作さ せながら γ 線を照射した。回路は、線源中心から 33.5 cm の位置に設置し、線量率は 1.13 kGy/h だった。図 3.3.1-19 は照射試験の様子を示す写真である。

図 3.3.1-19 照射試験の様子

② 試験結果

照射線量は積算で1.86 kGy となった。照射中、照射後も評価システムは、問題なく動作した。水中での作業では十分耐えられるだけの強度を持っていたことが示された。

また、ROV、ROV 搭載機材については、平成 27 年度から平成 29 年度に実施した「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」[3.3.1-9]にて、⁶⁰Co γ線源を用いた照 射試験を実施したが、少なくとも 200 Gy 程度の線量には耐えられる。また、その事業におい て得られた水中の線量率、デブリ直近の線量率の予想値はそれぞれ 10 Gy/h(令和 2 年)、30 ~50 Gy/h とあり、デブリ探査に十分利用できるレベルである。

(5) まとめ

音響探査装置と中性子センサーを組み合わせた複合型センサーの開発のうち、海技研は、音響探査装置の開発を担当した。SBP システムの音源の周波数を変化させることで、堆積層の分析厚さに対応させることを示し、測定に必要なパラメータを取得した。また、SBP システムを構成するデバイスを小型化した。さらに、マルチフェイズドアレイ・ソナーを小型・軽量化した。海技研が所有する水深1.2mの水槽の底に形状模擬デブリ試験体を配置し、小型マルチフェイズドアレイ・ソナーの性能試験を行い、所定の性能を確認した。また、JAEA 楢葉遠隔技術開発センターロボット試験用水槽の底に SUS ブロック及びコンクリートレンガを設置し、SBP システムが所定の性能であることを確認した。また、高エネ研と物材機構が共同で開発した中性子センサー系と音響探査装置を組み合わせ、ROV 内で通信・制御できるように回路(詳細は第3.3.2項に記載。)を設計・製作した。さらに、組み上がった複合型センサーの耐放射線性を確認するため、京都大学複合原子力科学研究所の 60Co y線源照射施設にて、複合センサーの通信制御回路の照射試験を実施した。照射試験結果を、内部調査、以前の研究のシミュレーシ
ョンによる線量推定値と比較し、ROV を用いた探査においては、十分適用できるレベルである ことを示した。

3.3.2 原子炉外部から ROV による遠隔計測を可能にする遠隔操作技術の開発

- (1) ROV の改良
 - ① 事業開始当時の ROV

事業開始当初、海技研が所有していた ROV(以下、「P-ROV」という。図 3.3.2-1) 側に搭載 されていた電源は、スラスターを動作させるのみだった。また、P-ROVの水中における上昇・ 下降性能は、自重で下降、スラスターの推進力で上昇するのみだった[3.3.1-9]。そこで、本 事業では複合型センサーが搭載した場合を想定した運動性能の向上を図るとともに、計測制 御用電源についてもできるだけ ROV 搭載の電源で対応できるよう電力系統についても改良し た。



図 3.3.2-1 P-ROV の断面図

② 運動性能改良

改良後 ROV には複合センサーを搭載するため、系全体の重量が増加する。さらに、複合センサーを用いた測定を実現するには、一定時間センサーと対象物の距離を保つ必要があることが研究分担者との議論からわかった。そこで、ホバリング機能を持たせることにしたので、スラスター機種を従来の100 W型から200 W型に変更し、機数も6機から8機へ増加させて 推進力を増強した。

③ 電源系の改良

改良後 ROV に搭載した電気機器類には、ROV スラスター駆動系(以下、「動力系」という。) と電流消費型ソナードライブ系(以下、「センサー系」という。)の2系統ある。これらを、 ROV 搭載のバッテリー(2次リチウム電池、14.8 V出力)と昇圧コンバータで駆動させるこ とにした。また、バックアップとして地表から電力供給し、動力系及びセンサー系の電力欠 損現象で生じる無制御状態を回避させることにした。採用した ROV 内部バッテリーの電力容 量は定格 266.4 Wh である。

最も電力を消費する計8機の各スラスターの消費電力は、瞬間で最大180 Wとなるものの、 平常時は水中駆動時の平均で、最大の1/10程度の約18 Wである。よって、スラスター駆動 力として十分対応可能である。また、制御電気系ユニット及び水中カメラ電力で5 W以下で あり十分対応可能である。

④ センサーの物理的配置

改良後 ROV には、中性子センサーと音響探査装置を組み合わせた複合型センサーの他、プ ラットフォームでの改良後 ROV の制御を補助する水中カメラ、慣性測定装置(以下、「IMU」 と略す。)を搭載した。複合型センサーのうち、中性子センサーとその信号処理回路は、専用 の容器に封入した。音響探査装置(SBP システムとソナー)自体は他のセンサー類に比べて大 きいことと姿勢の安定化のため、改良後 ROV の下部に配置することとした。IMU については、 次に述べるように改良後 ROV の内部に配置した。各センサーの配置とプラットフォームとの 関係を図 3.3.2-2 に示す。



3.3.2-2 ROV 改良後のセンサー類とその制御系配 (INTERTECHNO CO., LTD.の許諾を得て転載)

⑤ センサー類の通信制御系、電力供給系回路

改良後 ROV へ搭載した複合型センサーの通信制御系と電力供給系の関係を図 3.3.2-3 に示 す。中性子センサーと IMU 用の計測・制御系は、専用の容器(中性子回路ポッド)に収納し、 SBP 用水中スピーカの制御系は、同様に別の専用ポッド(SBP 回路ポッド)に収納した。これ ら 2 体のポッドへの電力供給は 2 本のテザーケーブルにより地上から供給する。一方ソナー は、プラットフォームと直接通信制御と電力供給をすることとした。また、改良後 ROV 搭載 の各センサーとの双方向通信のために、改良後 ROV 内で LAN (TCP/IP) ネットワークを構築 し、スイッチングハブで信号を集約した。



図 3.3.2-3 センサー類の通信制御とその電源系ブロック図 (INTERTECHNO CO., LTD.の許諾を得て転載)

⑥ 中性子センサー計測・制御回路

海技研では、改良後 ROV 内に複合センサーを用いた計測・制御するための集積回路を製作 した。中性子センサーは、中性子が入射した際に核反応で発生する電荷を収集して検出信号 とする。この検出信号は、信号処理回路によって波形整形され、計数のために論理信号に変 換される。海技研では、信号処理回路から出力される論理信号を後段の回路で処理できるよ うに、1)レベルシフタならびに制御信号を通信する回路、2)複合センサーの計測・制御及び 通信回路を設計・製作した。1)の回路は、中性子センサー、信号処理集積回路及びプローブ モジュール側回路で構成され、耐圧容器に格納される。一方、2)の回路は ROV 内に収納され、 中性子センサー収納容器と改良後 ROV の間は水中ケーブル接続した。中性子センサープロー ブから改良後 ROV 側回路までの通信を、図 3.3.2-4 に示す。また、詳細な仕様は、[3.3.2-1] に記載してある。



3.3-15 - 106 -

(2) ROV 搭載時のセンサー類動作試験及び通信機能確認

複合センサー及びカメラ等のセンサー類を搭載した改良後 ROV を図 3.3.2-5 に示す。この改 良後 ROV の運動性能を確認するため JAEA 楢葉遠隔技術開発センターのロボット試験用水槽を 利用して運動性能試験を行った。



図 3.3.2-5 複合センサー及びカメラ等のセンサー類を搭載した ROV

その結果、水中における前進、後進、及び左右方向とも操作者の運転通り推進できることを 確認した。また、今回の一連の運動性能試験の結果、水中における探査中はスラスターによる ノイズ発生を避けるためホバリングは行わず、浮力材を用いて改良後 ROV を静止状態にする方 が効率的であることがわかった。このため改良後 ROV 上部に浮力材を搭載し、その個数を変え ることで浮力調整することにした。

ソナーの送信性能については、前項3.3.1(2)③に記載したように屋外水槽での探査性能試験 で確認済みである。なおソナー画像計測・収録部に専用コードを直接接続すればビットマップ (bmp)としても保存でき、データの移動は可能である。

SBP については、前章から計測制御通信性能について確認できている。

撮影中の映像は、広角及び標準レンズの場合ともテザーケーブルを介して改良後 ROV と接続 しているパソコンで確認できた。また、画像変換して送信し、VR 用 3 次元画像を HMD 型で観察 できた。

(3) VR を利用した遠隔計測技術の開発

PCV 内部調査や燃料デブリ取り出し時に設定される遠隔操作場所(プラットフォーム)は、 例えば 1F の 1 号機 X-2 ペネトレーション(以下、「X-2 ペネ」と略す。)からの PCV 内部調査の ためのアクセスルート構築作業時に、X-2 ペネに近接する低線量エリア(約 0.03 mSv/v~0.1 mSv/h) に設置することが検討されている[3.3.2-2]。

PCV 中心から、少なくとも 20 m 以上距離が離れているプラットフォームで、広角カメラで撮影する 2 次元画像を見ながら、ROV の運転操作、複合センサーによる計測も可能だが、PCV 内部の構造や機器はもちろん、落下物、堆積物の状況や燃料デブリの広がり等の情報を正確に把握するためには、3 次元画像を見る方が作業の正確性や効率性の観点から効果的であることから、VR を利用した遠隔計測技術開発に着手した。

まず、改良後 ROV に搭載した広角カメラで撮影した 2 次元画像を VR 機器へ投影するために、 3 次元動画変換ソフト "Leawo HD 動画変換プロ" [3.3.2-3]を使用して、3 次元画像(図 3.3.2-6 参照)に変換する時間を調べた結果、表 3.3.2-1 に示したようにカメラによる撮影時間の約 1/4 程度の時間を要した。広角カメラによる撮影は、25 FPS (Frame per second:1秒間の動 画で見せる静止画の枚数)の条件で実施した。



図 3.3.2-6 3 次元動画変換ソフトで VR 投影用に変換した 3 次元画像

| | うりいれ国家 ジ炎氏所 |
|-------|-------------|
| 撮影時間 | 3次元画像変換時間 |
| 41 秒 | 9 秒 |
| 240 秒 | 60 秒 |
| | |

表 3.3.2-1 2 次元画像から 3 次元画像への変換時間

改良後 ROV の遠隔操作は複合センサーによる計測や、構造物、機器、落下物等の障害物を避 ける操作には即時性が要求されるが、現状においては、改良後 ROV 搭載の広角カメラで撮映す る 2 次元画像を 3 次元変換し、VR 機器で見ながら同時に遠隔操作を行うことは難しい。代わり に、1F の PCV 内部の VR コンテンツデータと測定データを Head Mounted Display (以下、「HMD」 という。)型の表示装置に投影して操作するのが有効である[3.3.2-4]。この VR コンテンツデ ータは PCV 内部の構造や機器に関する設計データをもとに、JAEA で作成されたもので借用で きる。

本研究では、当該 VR コンテンツデータを JAEA から借用し、ゲーム開発ツール Unity を用い て VR 表示装置で閲覧できるように整備した。これによって VR コンテンツ視聴時に立体的に描 画できるようにした。配置を行う際、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。なお、改良後 ROV の位置情報と VR コンテンツデータの 位置情報を連動させて、改良後 ROV 位置情報を VR 機器に投影するための連動ソフトに関して は、PCV 内部の VR コンテンツデータも変化して投影されること HMD 型の表示装置で確認した。

(4) まとめ

PCV 中心から離れたプラットフォームにおいて、改良後 ROV を遠隔計測することを目指して、 複合センサーを構成する中性子センサープローブの製作、音響探査装置の小型化検討、及び配 置検討を実施した。さらに、ソナーデータの収録と通信、広角カメラ映像の通信、及び中性子 センサープローブの模擬信号を用いた動作確認等、一連の試験を通して問題ないことを確認し た。 また、VR を利用した遠隔計測技術の開発について、HMD 型の表示装置に PCV 内部の VR コン テンツデータを投影して操作する方法を提案した。また、改良後 ROV の位置情報と VR コンテ ンツデータの位置情報から、それらを VR 機器に投影するための連動ソフトを作成し、動作確 認することができた。今後、IRID 等による PCV 内部の詳細調査が進めば、構造物や機器、落下 物、堆積物の状況や燃料デブリの広がり等の情報[3.3.2-5]を反映した 3 次元点群データなど [3.3.2-4]を取得できる可能性があり、この 3 次元点群データを反映した VR コンテンツデータ を作成することで、燃料デブリ取り出し作業時の遠隔操作に活用されることが期待できる。

参考文献

- [3.3.1-1] IRID, 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~映像データ及び線量データの分析結果~, 2017年7月27日廃炉・汚染水対策チーム会合/事務局会議(第44回)報告資料, 2017.
- [3.3.1-2] IRID, 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2号機原子炉格 納容器内部調査実施結果, 2018年4月26日廃炉・汚染水対策チーム会合/事務局 会議(第53回)報告資料, 2018.
- [3.3.1-3] IRID, 東京電力ホールディングス株式会社,3 号機原子炉格納容器内部調査について、2017 年 11 月 30 日廃炉・汚染水対策チーム会合/事務局会議(第 48 回)報告 資料、2017.
- [3.3.1-4] Tian, W. M., Integrated Method for the Detection and location of Underwater Pipelines, Aool. Acoust., vol. 69, 2008, pp. 387-398.
- [3.3.1-5] CHESAPEAKE TECHNOLOGY, USA, https://chesapeaketech.com/(参照日:令和3年3 月 31 日).
- [3.3.1-6] CuberLogic, inc., Wave2000/Wave2000 Plus, https://www.cyberlogic.org/wave2000.html(参照日:令和2年10月31日).
- [3.3.1-7] Kumar, P. and Foufoula-Georgiou, E., Wavelet, Analysis for Geophysical Applications, Reviews of Geophysics, vol. 35, no. 4, 1997, pp. 385-412.
- [3.3.1-8] Garmin, Panoptix[™] PS31, https://buy.garmin.com/en-US/US/p/503830(参照日: 令和3年3月31日).
- [3.3.1-9] 国立大学法人長岡技術科学大学,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,平成29年度文部科学省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・人材育成推進事業成果報告書,2017.
- [3.3.2-1] JAEA/CLADS, 高エネ研, 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), JAEA-Review 2020-058, 2021, 101p.
- [3.3.2-2] IRID, 東京電力ホールディングス株式会社,1号機 X-2ペネトレーションからの原子炉格納容器内部調査アクセスルート構築作業について、2019年5月30日廃炉・汚染水対策チーム会合/事務局会議(第66回)報告資料,2019.
- [3.3.2-3] Leawo Software Co., Ltd., Leawo HD 動画変換プロ, https://www.leawo.org/jp/video-converter/(参照日:令和3年3月31日).
- [3.3.2-4] IRID, 平成 28 年度補正予算廃炉・汚染水対策事業費補助金「原子炉格納容器内部詳 細調査技術の開発」平成 30 年度分成果報告, 2019.
- [3.3.2-5] IRID, 平成 27 年度補正予算廃炉・汚染水対策事業費補助金「原子炉格納容器内部詳 細調査技術の開発」中間報告, 2019.

3.4 研究推進

本研究を推進するにあたり、研究代表者の下で各研究項目間ならびに JAEA/CLADS 等との連携 はメールベースで情報交換を行うとともに、定期的に研究実施計画を推進するための打合せや 会議等を開催した。

平成 30 年 10 月 9 日に本研究課題における研究従事者や協力者を集め、キックオフミーティ ングを高エネ研にて実施し、JAEA/CLADS から廃炉研究の現状を紹介して頂くとともに参加者全 員で意見交換を行った。また、研究代表者と一部の研究実施者が平成 30 年 11 月 9 日に開催さ れた JAEA/CLADS 報告会に出席し、ニーズ側の意見を確認した。令和元年 11 月 16 日には、高エ ネ研にてトランジスタの耐放射線評価に関する打合せを行った。令和元年 1 月 31 日には高エネ 研にて P0 中間フォローが実施され、研究代表者と各機関代表者が各研究項目間の進捗状況を説 明し、P0 から適切な助言を頂いた。令和元年 2 月 4 日には物材機構において、物材機構が担当 するダイヤモンド検出器と高エネ研が担当する集積回路、海技研が担当する ROV 間のインター フェースの仕様について打合せを行った。令和元年 2 月 14 日には海技研において、ROV の仕様 について打合せを行った。

令和元年4月1日に、高エネ研にて高崎量子研で行うトランジスタ等の放射線耐性試験に関 する打合せを行い、令和元年4月26日に研究代表者と高エネ研の研究分担者が高崎量子研を訪 問し、γ線照射施設の施設供用申請について打合せを行った。令和元年5月24日~26日に福 島県楢葉町にて開催された福島廃炉研究国際会議(FDR2019)に研究代表者が参加し、廃炉に関 する最新情報の収集を行った。令和元年9月9日、10月17日、11月22日、令和2年1月17 日に高エネ研において、高崎量子研にて実施する放射線耐性試験の進め方について打合せを行 った。令和元年9月14日には、富山市において開催された「第5回福島第一原子力発電所の廃 「炉に関する戦略ワークショップ」に研究代表者と海技研の研究分担者が参加し、NDF 等が実施す る廃炉の進め方について情報収集を行った。令和元年10月2日に研究代表者の下、高エネ研、 物材機構、海技研の研究分担者が海技研に集合し、ROV に実装する中性子センサーの仕様の確認 を行った。また、令和元年11月6日に高エネ研において、中性子センサーに用いる集積回路に 関する打合せを行い、令和元年 12 月 16 日に高エネ研において、ROV に実装する中性子センサ ーのデザインについて協議を行った。11月18日に富岡町において JAEA/CLADS 主催のワークシ ョップに参加し、平成 30 年度の事業成果を発表するとともに意見交換を行った。令和元年 12 月 24 日には物材機構にて PO 中間フォローが実施され、研究代表者と各機関代表者が各研究項 目間の進捗状況を説明し、POから適切な助言を頂いた。令和2年1月28日には、秋葉原にて 開催された令和元年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業 成果報告会に研究 代表者が出席し、平成 30 年度の成果報告を行うと共に意見交換を行い、ニーズ側の意見を確認 した。また、令和2年2月19日には、東京大学において画期的なアプローチによる放射線計測 技術に関する分科会に研究分担者が出席し、平成 30 年度の成果報告を行うと共に意見交換を行 った。

令和2年度はコロナ禍のため随時メールや電話を用いて連絡を取り合い、研究項目間や公益 財団法人原子力安全研究協会、JAEA/CLADSとの連携を密にして研究を進めた。令和2年4月16 日に高エネ研において、本事業で作成したトランジスタの放射線耐性試験結果についての打合 せを行い、今後の方針を議論した。令和2年6月22日にP0及びJ-P0とリモートで打合せを行 い、事業の進捗状況の確認と新型コロナウィルス等による懸案事項等について意見交換を行っ た。令和2年6月30日にFPGA等への実装についてリモートで打合せを行った。令和2年9月 24日に放射線耐性試験の評価についてリモートで打合せを行った。令和2年11月5日の令和

> **3.4-1** - 110 -

2 年度第1回英知事業ワークショップに参加し、廃炉に関する最新の情報の収集を行った。令和3年1月7日に高エネ研においてトランジスタの放射線耐性評価に関する打合せを行った。 令和3年1月20日~22日に開催された JAEA 主催の廃炉人材育成研修に参加登録し、最新の廃 炉の情報を収集した。令和3年3月11日にはオンライン上でP0中間フォローが実施され、研 究代表者と各機関代表者が各研究項目間の進捗状況を説明し、P0と J-P0から適切な助言を頂 いた。 4. 結言

本業務では、1Fの炉内状況の把握、燃料デブリ取り出しの早期実現、臨界リスク管理に資する ため、燃料デブリから放出される自発核分裂中性子の計測に狙いを定め、高 γ 線環境下でも安定 に動作する小型ダイヤモンドセンサーと中性子コンバータからなる中性子検出用センサーを開発 し、マルチフェイズドアレイ・ソナーや SBP を利用した水中音響探査技術や VR システムなどによ る遠隔操作技術と組み合わせることで水面下にある燃料デブリの存在を「その場」で明らかにす る遠隔デブリ探査技術を整備することを実施している。

以下に、3カ年計画の業務実績を述べる。

- (1) 耐放射線集積回路の研究開発と核分裂中性子測定システムの開発
 - ① 耐放射線トランジスタ及び集積回路の研究開発

1 MGy まで動作するトランジスタの開発を目標として、マトリックススイッチを組み込ん だトランジスタの耐放射線性能評価システムを整備した。TSMMC65 nm LP-CMOS プロセスを用 いて評価用トランジスタ、高速信号処理回路、比較器、差動オペアンプ、発振回路、デジタ ルアナログコンバータ、アナログデジタルコンバータ及びデジタル I/O インターフェースを デザインしッ線照射用サンプルを製作した。高崎量子研のコバルト施設においてッ線を1 MGy まで照射し、製作したサンプルの動作確認を行った。複数のトランジスタ構造において、系 統的に耐放射線性能を評価した。トランジスタの耐放射線化と並行して信号処理集積回路の デザインを開始し、既存のダイヤモンド検出器のサンプルと結合させ出力信号を確認した。 この結果を基に中性子検出ダイヤモンドをンサー用信号処理集積回路のデザインを最適化し、 プロトタイプを作製した。さらに水 ROV への実装仕様を議論し、システムへ組み込むための 基板を含めたデザインを進めた。開発した集積回路の評価を行い、最終年度(令和2年度) のデザインにフィードバックを行った。

② 核分裂中性子測定システムの開発

IRID が公表している 1F PCV 内部の線量環境(数+ Gy/h)下において、燃料デブリから放 出される中性子を中性子束が 10²~10⁸ n/cm²/sの広ダイナミックレンジで検知可能な核分裂 中性子測定システムの開発を目標として、高エネ研が所有するスーパーコンピューターシス テムに汎用粒子輸送計算コード PHITS をインストールし、核分裂中性子測定システム開発に 必要なシミュレーション計算を実施するための環境整備を行った。ダイヤモンド検出器の有 感層厚さを1 µm から 500 µm まで変化させて、¹³⁷Cs からの γ線による有感層のエネルギー付 与を計算し、有感層厚さに対する γ線影響の評価を行った。システム設計に必要なダイヤモ ンド検出器について、中性子感度評価のためのシミュレーション計算を実施した。

CIVIDEC Instrumentation GmbH から購入した 140 µm 厚と 25 µm 厚の CVD ダイヤモンド検 出器に対して PHITS によるシミュレーション計算を実施するとともに、自発核分裂中性子測 定システムのプロトタイプを構築し、熱中性子感度や γ 線影響の測定を行った。JAEA の FRS において水中を模擬した実験体系により、ダイヤモンド検出器の応答評価を行った。

高エネ研や京都大学複合研原子力科学研究所が所有する熱中性子場や中性子照射場を用いて、水中を模擬した実験体系を構築し、熱から14 MeVのエネルギーを持つ中性子に対する検 出器の応答試験を行った。シミュレーションも併用して、評価結果を取りまとめた。

- (2) 中性子検出用ダイヤモンドセンサーの研究開発(再委託先:物材機構)
 - ① 高品質ダイヤモンド成長に関する研究

高品質なダイヤモンド pin 構造を作製するために、{111} 単結晶ダイヤモンド基板表面に おいて、原料気体として 0.05 %で水素希釈されたメタンガスを用いて CVD 成長した結果、AFM 観察により明瞭な原子層ステップ(0.2 nm)の形成を確認した。結晶成長品質の評価は、物 材機構に既存の 3 次元ラマンマッピング装置により行い、ラマンピーク半値幅の分析から、 基板結晶と同等の高い結晶品質が確認された。

pin 構造の内蔵電位による低電圧駆動でキャリアを収集するために、ダイヤモンド気相成 長において意図せず混入する不純物であるホウ素原子の取り込みを抑えた高純度ノンドープ 層(i層)の成長条件として有効と考えられるダイヤモンド基板のオフ角制御を実施し、{111} 単結晶ダイヤモンド CVD 成長中に取り込まれるホウ素の基板オフ角依存性を2次イオン質量 分析により定量評価した。異なるオフ角を持つ複数基板において不純物取り込みのオフ角依 存性を評価した結果、オフ角増大に伴いホウ素の取り込み効率が低下することがわかった。 また、[-1-12]オフ方向の基板を使用し、成長条件を最適化することで比較的平坦な成長表面 を持ちかつ不純物濃の取り込みを抑えた高品質な CVD ダイヤモンド {111} 結晶成長が可能で あることがわかった。得られた CVD ダイヤモンド成長の不純物低減に対する指針に基づき、 混入不純物濃度をできるだけ抑えて有感層に用いる高純度ノンドープ層を成長させた。得ら れたノンドープ層の結晶評価を行い、成長実験にフィードバックすることで低不純物濃度化 を進めることができた。

② センサー形成プロセスに関する研究

センサーに用いるダイヤモンド pin 接合構造を形成するための反応性イオンエッチングに よる構造加工試験をエッチング用のマスク材料として A1 を用いて実施し、1)反応性イオンエ ッチング前、2)エッチング後、3)マスク材除去後の 3 度、A1 マスクの厚みとエッチングされ たダイヤモンドメサ(丘)の深さを共焦点顕微鏡により計測し、A1 マスクとダイヤモンドの エッチングレートとしてそれぞれ 0.1 µm/h、1.3 µm/h を導出した。

ホウ素ドープ p 型、リンドープ n 型の半導体制御及びノンドープ i 層の CVD 成長技術を駆 使し、単結晶 {111} ダイヤモンド基板表面で高品質な i 層(厳密には p-層及び n-層)を有 する pin 積層膜の形成に成功した。反応性イオンエッチングにおいて、実験的に求めたエッ チング速度、及びマスク/ダイヤモンドのエッチング速度比を使い、200 µm 程度のメサ(丘 状)構造ダイオードを作製した。マスク材にはアルミ膜を用い、その形成には物材機構に既 存の EB 蒸着を用いた。化学洗浄によりマスクを除去した後、メサトップ、メサボトムにオー ミック電極を EB 蒸着して pin ダイオード素子形成し、中性子コンバータで発生する a 粒子の 飛程に適した約 4 µm の i 層を持つ疑似縦型構造 pin ダイオード素子のメサ構造形成に成功 した。得られた pin ダイオードの静特性、温度依存性を物材機構に既存のプローバにより測 定し、①で行う i 層結晶成長及び本項目の pin ダイオード形成にもフィードバックを行った。 ダイヤモンド成長条件の最適化により、逆バイアス 20 V で漏れ電流を1 pA に押さえ、8 桁 の整流比を有するダイオードが得られ、信号読み出し兼電圧印可用のワイヤ結線を行い、セ ンサー評価に用いることが可能となった。

③ 中性子検出用センサー構造に関する研究

中性子コンバータ材料として、物材機構で超高品質な単結晶合成が可能な六方晶 BN (hBN) を検討した。高品質な単結晶であるが故に精密なシミュレーションが可能であること、放出 核の飛程が小さいため、最終的にセンサーに用いた場合 γ 線感度の低減が可能であることが その理由である。モンテカルロシミュレーションコードを用い、¹⁰B(n, α)⁷Li 反応で放出され る 1) 1.47 MeV α 粒子、2) 0.84 MeV Li イオンについて、BN 及びダイヤモンドのそれぞれの 荷電粒子に対する阻止能 dE/dx から荷電粒子が全エネルギーを付与するのに必要な膜厚を求 めた。BN で必要な膜厚は、1.47 MeV α 線が 4.7 µm、0.84 MeV Li イオンが 1.9 µm であった。 ダイヤモンドにおいては、1.47 MeV α 線が 3.0 µm、0.84 MeV Li イオンが 1.3 µm であった。 この結果から、中性子コンバータ膜厚を最大で約5 µm、ダイヤモンド pin ダイオードの有感 層厚さを約3 µm と見積もった。

実施項目「②センサー形成プロセスに関する研究」で作製したいくつかの pin 素子につい て、真空中で紫外光源による光電流計測からスクリーニングを行った。良好なフォトレスポ ンスを示した厚さ3 µmのi層 pin センサーに対し高エネ研にて 241 Am 線源を用いた 5.5 MeV α粒子照射試験を行った。その結果、中性子コンバータからの放出核種である α粒子に対す る明確なレスポンスが得られ、3 µm 厚から得られる電荷量で規格化した CCE は 40 %程度であ った。一方、CV 特性から評価した空乏層幅は 1 µm であり、部分空乏化した状態であることが わかった。CCE を改善するためには不純物濃度をさらに低減し、空乏層幅を増加させる必要が あることが明らかになった。中性子コンバータとして用いる厚さ 1 µm 程度の hBN 薄片をメサ 構造ダイヤモンド表面に分子間力接合することに成功した。

中性子コンバータとダイヤモンド pin ダイオードを組み合わせ、中性子照射試験を行った。 実施項目「②センサー形成プロセスに関する研究」で作製した pin ダイオードを用いて、熱 中性子コンバータから放出される荷電粒子の測定を行った。その結果、ダイヤモンド pin セ ンサーによる熱中性子検出に成功した。また、実施項目「耐放射線トランジスタ及び集積回 路の研究開発」で作製された CMOS 回路とダイヤモンド pin センサーをワイヤボンディングで 接続し、回路全体の動作を確認した。将来的な実装を視野に入れて核分裂中性子測定システ ム内にセンサーを配置するためのパッケージング方法も合わせて検討した。

- (3) 複合型センサーを搭載した ROV による遠隔計測技術の開発(再委託先:海技研)
 - ① 音響探査装置と中性子センサーを組み合わせた複合型センサーの開発
 - 音響探査装置と中性子センサーを組み合わせた複合型センサーの開発では、SBP システム の音源の周波数を変化させることで、堆積層の分析厚さに対応させることを示し、測定に必 要なパラメータを取得した。また、SBP システムを形成するデバイスを小型化した。さらに、 マルチフェイズドアレイ・ソナーを小型・軽量化した。海技研が所有する水深1.2 mの水槽 の底に形状模擬デブリ試験体を配置し、小型マルチフェイズドアレイ・ソナーの性能試験を 行い、所定の性能を確認した。また、JAEA 楢葉遠隔技術開発センターロボット試験用水槽の 底に SUS ブロック及びコンクリートレンガを設置し、SBP システムが所定の性能であること を確認した。さらに、組み上がった複合型センサーの耐放射線性を確認するため、⁶⁰Co γ線 源照射施設にて、複合センサーの通信制御回路の照射試験を実施した。照射試験結果を、内 部調査、以前の研究のシミュレーションによる線量推定値と比較し、ROV を用いた探査におい ては、十分適用できるレベルであることを示した。
 - ② 原子炉外部から ROV による遠隔計測を可能にする遠隔操作技術の開発 搭載する複合型センサーの形状、重量及び性能を考慮し、ROV の推進力とその制御性能を改 良するための設計・改造を実施した。また、PCV 環境の模擬に必要な治工具類としては、JAEA

楢葉遠隔技術開発センターのロボット試験水槽試験に適合するような形状の治具を検討した。 SBP 用機器、ソナー類及びカメラ等センサー類制御系を ROV に搭載し、動作試験と通信性能 試験を行い、正常に作動することを確認した。ROV に搭載した水中広角カメラの撮像データ (2次元データ)をVRシステムに通信し、VR 機器へ投影することができるかどうか調査を実 施した。その結果、2次元データをVR 機器に投影するためには3次元データに再構築する必 要があることがわかった。2次元データから3次元データへの変換に要する時間は広角カメ ラによる撮像時間と同程度であったことから、VR 投影データへの変換時間の観点から VR シ ステムはゴーグルタイプを使用し、PCV 内の VR コンテンツデータを投影しながら ROV を操作 する方が効率的であることがわかった。ソナー類及びカメラ等センサー類制御系を ROV に搭 載し正常に作動することを確認した。

複合型センサーを搭載した ROV を楢葉遠隔技術開発センターに持ち込み、当該施設のロボ ット試験用水槽にて、遠隔探査、計測試験を実施し性能確認した。また、ROV からの大量撮影 データを VR システムへ投影する技術に関して、ROV の位置情報と VR コンテンツ内の位置情 報の連動ソフトを開発した。

(4) 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間ならびに JAEA/CLADS 等との連携はメールベースで情報交換を行うとともに、定期的に研究実施計画を推進するための打合せや会議等を開催した。また、研究代表者と一部の研究実施者が JAEA/CLADS 主催のワークショップや報告会に出席し、成果発表等により意見交換を行い、ニーズ側の意見を確認した。

以上、3カ年計画の3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。

This is a blank page.