

JAEA-Review 2023-020 DOI:10.11484/jaea-review-2023-020

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 (委託研究)

ー令和4年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業-

Technology Development of Diamond-base Neutron Sensors and Radiation-resistive Integrated-circuits for Shielding-free Criticality Approach Monitoring System (Contract Research)

– FY2022 Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource
 Development Project –

福島研究開発部門 福島研究開発拠点 廃炉環境国際共同研究センター 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

December 2023

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 〒 319-1112 茨城県那珂郡東海村大字村松 4 番地 49 E-mail: ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency. This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en).

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

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

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

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

© Japan Atomic Energy Agency, 2023

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 (委託研究) -令和4年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業-

日本原子力研究開発機構 福島研究開発部門 福島研究開発拠点 廃炉環境国際共同研究センター

高エネルギー加速器研究機構

(2023年9月15日受理)

日本原子力研究開発機構(JAEA)廃炉環境国際共同研究センター(CLADS)では、令和4年度英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業(以下、「本事業」という)を実施している。

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

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

本研究は、令和2年度に採択された研究課題のうち、「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」の令和2年度から令和4年度分の研究成果について取 りまとめたものである。

本研究では、高γ線環境下(1 kGy/h)で動作し、高感度中性子検出感度(数 count/nv)を持つ軽 量で遮蔽不要な深い未臨界モニターを実現するための要素技術開発を行った。開発要素はダイヤ モンドを使用した中性子検出素子、耐放射線集積回路 6 種類とそれら要素を搭載するモジュール 複数枚を開発し、目標性能を確認し当初の目的を達成しただけでなく、6cm 径ドライチューブに挿 入可能な中性子検出器のモックアップを開発し中性子測定動作実証も行い、予定通りの性能を確 認した。

まず我々は炉内体系が不明である場合に確実に使用可能な未臨界解析手法としてファインマン α法を選択し、"γ線計測数対中性子計測数の比を1未満に抑えること"を明らかにし、この仕様 を満たす中性子検出器のデザインと要素技術の研究開発を推進した。

この研究開発を通して、ダイヤモンド検出素子は 1kGy/h 環境下でも安定動作すること、中性子 感度も 1cm² あたり 0.015 cps/nv であることを確認し、実用化可能であることを実証した。また 開発した全ての信号処理用集積回路は、積分照射線量 1MGy まで動作確認を行い、これらの要素技 術を組み合わせ 1kGy/h のy線バックグラウンド環境下での動作試験及び中性子検出試験を行い 必要な性能を持っていることも確認した。

本報告書は、日本原子力研究開発機構の英知事業における委託業務として、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

JAEA-Review 2023-020

Technology Development of Diamond-base Neutron Sensors and Radiation-resistive Integrated-circuits for Shielding-free Criticality Approach Monitoring System

(Contract Research)

- FY2022 Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project -

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

High Energy Accelerator Research Organization

(Received September 15, 2023)

The Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science (CLADS), Japan Atomic Energy Agency (JAEA), had been conducting the Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project (hereafter referred to "the Project") in FY2022.

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

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

Among the adopted proposals in FY2020, this report summarizes the research results of the "Technology development of diamond-base neutron sensors and radiation-resistive integrated-circuits for shielding-free criticality approach monitoring system" conducted from FY2020 to FY2022.

The present study aims to develop key components of neutron detection system without a radiation shield for a criticality approach monitoring system with high neutron detection efficiency(a few count/nv) under high gamma ray background(1kGy/h). Developed components are neutron detection devices based on diamond sensors and a high radiation resistive signal-processing data-transfer system based on radiation resistive integrated circuit technologies. Each components satisfied design specifications as well as developed neutron-detector mock-up fitting in 6cm diameter dry tube demonstrated expected performances.

We studied criticality approach monitoring methods to apply developed components in the realistic environment. This feasibility study clarified that the Feynman- α method for the subcriticality measurement can measure the prompt neutron decay constant if the ratio of (γ -ray counts) to (neutron counts) is less than 1. Based on the result we designed the detection system and developed components.

The developed neutron sensor showed 0.015cps/nv for sensing area of 1cm², and stable operation under 1kGy/h. All signal processing ICs work upto 1MGy and the performance of the neutron detection system comprises the neutron sensors and the ICs satisfies requirements for the application.

Keywords: Criticality Approach Monitoring, Neutron Detection, Radiation Tolerant, Diamond Sensor, Integrated Circuit

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	,
5.	令和3年度 採択課題 10	1
6.	令和4年度 採択課題 12	;
付約	録 成果報告書	,)

Contents

1.	Outline of Nuclear	Energy Science & Technology and Human Resource Development P	roject
			1
2.	Accepted Proposal	in FY2018	2
3.	Accepted Proposal	in FY2019	5
4.	Accepted Proposal	in FY2020	8
5.	Accepted Proposal	in FY2021	10
6.	Accepted Proposal	in FY2022	12

Appendix	Result	Report	1	5
----------	--------	--------	---	---

This is a blank page.

1. 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業の概要

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

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

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

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

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

2. 平成 30 年度 採択課題

平成30年度採択課題については以下のとおりである。

課題数:19課題

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

平成 30 年度 採択課題一覧

共通基盤型原子力研究プログラム

【若手研究】

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

共通基盤型原子力研究プログラム

【一般研究】

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

課題解決型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
合金相を含む燃料デブリの安定性評価のための基 盤研究	桐島 陽	東北大学
ガンマ線画像スペクトル分光法による高放射線場 環境の画像化による定量的放射能分布解析法	谷森 達	京都大学
燃料デブリ取出し時における放射性核種飛散防止 技術の開発	鈴木 俊一	東京大学
アルファダストの検出を目指した超高位置分解能 イメージング装置の開発	黒澤 俊介	東北大学
ナノ粒子を用いた透明遮へい材の開発研究	渡邊 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 (~R2.3.31) 大曲 新矢 (R2.4.1~)	産業技術総合 研究所

課題解決型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
Multi-Physics モデリングによる福島 2・3 号機ペデ スタル燃料デブリ深さ方向の性状同定	山路 哲史	早稲田大学
燃料デブリ取出しに伴い発生する廃棄物のフッ化 技術を用いた分別方法の研究開発	渡邉 大輔	日立GE ニュークリ ア・エナジー
アパタイトセラミックスによる ALPS 沈殿系廃棄物 の安定固化技術の開発	竹下 健二 (~R3.6.30) 塚原 剛彦 (R3.7.1~)	東京工業大学
拡張型スーパードラゴン多関節ロボットアームに よる圧力容器内燃料デブリ調査への挑戦	高橋 秀治	東京工業大学

国際協力型廃炉研究プログラム(日英共同研究)

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

国際協力型廃炉研究プログラム(日露共同研究)

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

研究人材育成型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
燃料デブリ取り出し時における炉内状況把握のた めの遠隔技術に関する研究人材育成	淺間 一	東京大学
化学計測技術とインフォマティックスを融合した デブリ性状把握手法の開発とタイアップ型人材育 成	高貝 慶隆	福島大学
放射線・化学・生物的作用の複合効果による燃料デ ブリ劣化機構の解明	大貫 敏彦 (~R2.3.31) 竹下 健二 (~R3.6.30) 塚原 剛彦 (R3.7.1~)	東京工業 大学
燃料デブリ分析のための超微量分析技術の開発	永井 康介	東北大学

4. 令和2年度 採択課題

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

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

課題数:10課題

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

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

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

令和2年度 採択課題一覧

課題解決型廃炉研究プログラム

【若手研究】

課題名	研究代表者	所属機関
燃料デブリにおける特性の経年変化と環境劣化割れ の調査	楊 会龍 (~R4.7.31) 村上 健太 (R4.8.1~)	東京大学
健全性崩壊をもたらす微生物による視認不可腐食の 分子生物・電気化学的診断及び抑制技術の開発	岡本 章玄	物質・材料 研究機構

課題解決型廃炉研究プログラム

【一般研究】

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

国際協力型廃炉研究プログラム(日英共同研究)

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

5. 令和3年度 採択課題

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

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

課題数:12課題

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

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

その後、PD (プログラムディレクター)・PO (プログラムオフィサー) 会議及びステアリ ングコミッティでの審議を経て、採択課題を決定した。

令和3年度 採択課題一覧

課題解決型廃炉研究プログラム

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

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

国際協力型廃炉研究プログラム(日英共同研究)

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

国際協力型廃炉研究プログラム(日露共同研究)

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

JAEA-Review 2023-020

6. 令和4年度 採択課題

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

公募期間: 令和4年3月1日~令和4年5月6日(課題解決型) 令和4年4月7日~令和4年6月16日(国際協力型 日英共同研究)

課題数:8課題

課題解決型廃炉研究プログラム 6 課題

国際協力型廃炉研究プログラム 2課題(日英)

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

その後、PD(プログラムディレクター)・PO(プログラムオフィサー)会議及びステアリ ングコミッティでの審議を経て、採択課題を決定した。

令和4年度 採択課題一覧

課題解決型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
革新的アルファダスト撮像装置と高線量率場モニ タの実用化とその応用	黒澤 俊介	東北大学
3 次元線量拡散予測法の確立と γ 線透過率差を利 用した構造体内調査法の開発	谷森 達	京都大学
α汚染可視化ハンドフットクロスモニタの要素技 術開発	樋口 幹雄	北海道大学
高放射線耐性の低照度用太陽電池を利用した放射 線場マッピング観測システム開発	奥野 泰希	京都大学
障害物等による劣悪環境下でも通信可能なパッシ ブ無線通信方式の開発	新井 宏之	横浜国立 大学

課題名	研究代表者	所属機関
無線 UWB とカメラ画像分析を組合せたリアルタイ ム 3D 位置測位・組込システムの開発・評価	松下 光次郎	岐阜大学

国際協力型廃炉研究プログラム(日英共同研究)

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

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

課題解決型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
遮蔽不要な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

研究成果を取りまとめた成果報告書を付録として添付する。

付録

成果報告書

This is a blank page.

令和4年度

日本原子力研究開発機構

英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業

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

(契約番号 R04I018)

成果報告書

令和5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

JAEA-Review 2023-020

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「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」の令和2 年度から令和4年度分の研究成果を取りまとめたものであ る。

目次

概聞	·	viii
1.	はじめに1	-1
2.	業務計画2	-1
2	1 全体計画2	-1
	2.1.1 高耐放射線スケーラブル中性子検出器 信号読み出しシステム開発2	-2
	2.1.2 ダイヤモンド中性子検出素子の開発	-2
	2.1.3 検出素子、計測要素の性能評価と臨界近接監視手法の検討2	-3
	2.1.4 研究推進	-4
2	2 実施体制	-5
2	3 令和4年度の成果の目標および業務の実施方法	-5
	2.3.1 高耐放射線スケーラブル中性子検出器 信号読み出しシステム開発2	-5
	2.3.2 ダイヤモンド中性子検出素子の開発 2	-6
	2.3.3 検出素子、計測要素の性能評価と臨界近接監視手法の検討2	-6
	2.3.4 研究推進	-6
3.	実施内容および成果	-1
3	1 高耐放射線スケーラブル中性子検出器 信号読み出しシステム開発	
	令和2年度~令和4年度)3.1	-1
	3.1.1 スケーラブルシステム開発(令和2年度~令和4年度)	-1
	3.1.2 フロントエンド集積回路開発(令和2年度~令和4年度)	-7
	3.1.3 バックエンド集積回路開発(令和2年度~令和4年度)	-9
	3.1.4 まとめ	11
3	2 ダイヤモンド中性子検出素子の開発(令和2年度~令和4年度)	-1
	3.2.1 自立	-1
	322 CVD 単結晶ダイヤモンドの自立聴型ダイヤモンド合成基板への利用可能性検証	1
	(令和2年度~令和3年度) 32	-7
	3 9 3 積 岡 ガ イ ヤ モ ン ド 中 性 子 桧 出 表 子 の 関 発 (今 和 9 年 度 ~ 今 和 4 年 度) 3 9	-8
	3.2.5 很信主/++++++++++++++++++++++++++++++++++++	12
	3.2.4 候山来 $1.0 $ 座似 突 夜 () 小元 () 小市 $0 + $ () 小市 $4 + $ () 小市 $4 + $ () · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	15
3	3 給出表子 計測要素の性能評価と臨界近接陸相手注の檢討 (会和9年度~会和4年度)	10
0		_1
	2 3 1 龄出妻子の恍能或価 (1 _1
	3.3.1 候山来 1.00 住船市 Ш (1442 中反 1.00 日本 3.7) 3.3.1 候山来 1.00 住船市 Ш (1442 中反 1.00 日本 3.7) 3.3.1 候山来 1.00 住船市 Ш (1442 中反 1.00 日本 3.7) 3.3.1 候山来 1.00 住船市 Ш (1442 中反 1.00 日本 3.7) 3.3.1 候山来 1.00 住船市 Ш (1442 中反 1.00 日本 3.7) 3.3.1 候山来 1.00 住船市 Ш (1442 中反 1.00 日本 3.7) 3.3.1 候山来 1.00 住船市 Ш (1442 中反 1.00 日本 3.7)	1 _1
	2.3.3	ד ק_
	3.3.5 仮山安赤 / ビットーント未頃回山の住能計画(卫田2十反。卫田4十度)3.3	し 年)
		₹) _0
	2.2.5 防界近接陸相手法に関する検討(今和9年度、今和4年度)	-9 1 โ
	0.0.0	00
	3.3.0 よ <i>と «</i>)	23

3. 4	4 研究	铅推進	••••					 		 		3.4-1
ć	3.4.1	令和2	年度ま	での実	施内容。	および成	戈果	 		 		3.4-1
ć	3.4.2	令和3	年度ま	での実	施内容:	および成	戈果	 		 		3.4-1
ć	3.4.3	令和4	年度ま	での実	施内容:	および成	戈果	 		 		3.4-1
e e	3.4.4	まとめ	••••			••••		 		 		3. 4-1
4.	結言		••••	•••••		••••	•••••	 • • • • • •	• • • • • •	 	••••	4-1
	Int. I. Int.											
参	考文献	• • • • • • •	••••	•••••	• • • • • • •	•••••		 		 	••••	5-1

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	教授	田中真伸
	准教授	宮原正也
	准教授	岸下徹一
再委託先		
国立大学法人北海道大学	准教授	金子純一
国立研究開発法人産業技術総合研究所	主任研究員	梅沢 仁
	研究員	嶋岡毅紘
国立大学法人東海国立大学機構名古屋大学	准教授	遠藤知弘
連携先		
国立研究開発法人日本原子力研究開発機構	課長	谷村嘉彦

表一覧

表 3. 1. 1-1	本課題で開発した耐放射線集積回路群の名称と機能についての		919
	まとめ		5.1-5
表 3.1.2-1	開発したフロントエンド集積回路の諸元		3.1-8
去 391−1	自立型ダイヤモンド検出素子および積層型ダイヤモンド検出素子の		3 2-1
1 3. 2. 1 1	構造とその特徴	••••	5.21
表 3.2.1-2	酸素添加濃度を変化させた各試料の合成条件		3.2-3
表 3.2.1-3	02_0.5, 02_0.8 試料の電荷キャリア輸送特性を示す各種値		3.2-3
表 3.2.1-4	各試料の合成条件		3.2-4
表 3.2.4-1	実装に使用した印刷技術の特徴		3.2-14
表 3.2.4-2	配線抵抗値の照射量依存性		3.2-14
主 2 2 2_1	ダイヤモンド素子を利用した中性子検出素子の中性子感度測定		2 2 7
衣 ふ ふ 3-1	結果		5.5-7

図一覧

図 2.1-1	臨界近接監視システム実機の中性子検出部のイメージ		2-1
区 2.2 ⁻¹	天肥(学術区) 医供参照なる原因に位置相て、日本の一日本の子母ののデザインを	• • • •	2^{-5}
図 3. 1. 1-1 図 3. 1. 1-2	応状が異なる臨外近接監視モニター用中性子検出器のプロックダイアグラム 臨界近接監視モニター用中性子検出器のブロックダイアグラム	· · · · ·	3. 1-2 3. 1-3
図 3.1.1-3	6 cm径ドライチューブに挿入できるようにデザインされた各モ ジュールの写真	••••	3.1-4
⊠ 3.1.1-4	16 cm 径ペネトレーション孔に挿入できるようにデザインされ た各モジュールの写真		3.1-4
図 3.1.1-5	中性子検出器用制御・データ収集ソフトウエア		3.1-5
図 3.1.1-6	ドライチューブ挿入用中性子検出器モックアップ		3.1-6
図 3.1.2-1	フロントエンド集積回路の電気的特性を評価するために開発し たモジュールおよびそれぞれの評価セットアップ時の写真	••••	3.1-8
図 3.1.2-2	フロントエンド集積回路の電気的特性		3.1-9
図 3.1.3-1	開発したバックエンド集積回路群の写真		3.1-10
図 3.1.3-2	132 Mbps、70 mデータ転送の評価について		3.1-11
図 3.2.1-1	購入した HP/HT IIa 型単結晶ダイヤモンド基板		3.2-2
⊠ 3.2.1-2	製作した検出素子用ダイヤモンド単結晶自立膜のレーザー顕微鏡像 例		3.2-2
図 3.2.1-3	製作した検出素子用ダイヤモンド単結晶自立膜のカソードルミネッ センス法による測定例		3.2-3
図 3.2.1-4	酸素添加無しの試料と有りの試料のレーザー顕微鏡像		3.2-4
⊠ 3.2.1-5	各試料の表面粗さ		3.2-4
⊠ 3.2.1-6	γ線最量率環境における各検出器のα線スペクトル		3.2-5
図 3.2.1-7	⁶ LiF を自立膜ダイヤモンド検出素子に実装した中性子検出素子		3.2-5
図 3.2.1-8	Ni エッチングの結果		3.2-6
🗵 3.2.1-9	RIE エッチングの結果		3.2-6
図 3.2.1-10	(左)均一に合成が行えなかった試料、(右)均一な合成を行えた ダイヤモンド		3.2-6
図 3.2.1-11	電極を形成した自立膜(左)Al 電極、(右)TiC/Au 電極		3.2-7
図 3.2.3-1	微分干渉顕微鏡で撮影した結晶成長後の表面の様子		3.2-9
図 3.2.3-2	成長層の2次イオン質量分析(SIMS)プロファイル		3.2-9
図 3.2.3-3	試作した素子(A,B)の顕微鏡像		3.2-10
⊠ 3.2.3-4	素子 A, B における電流電圧特性		3.2-10
⊠ 3.2.3-5	疑似縦型中性子検出素子の研磨欠陥による CCE 劣化の様子		3.2-11
図 3.2.3-6	信号処理回路と組み合わせて取得した信号波形		3.2-12
⊠ 3.2.4-1	印刷装置で製作した実装評価用の金属配線がのったシートの写 真		3. 2-13
⊠ 3.2.4-2	実装に使用した治具の写真		3.2-14
図 3.2.4-3	検出素子実装前後の DSA モジュール写真		3.2-14

⊠ 3.2.4-4	ダイヤモンド素子を DSA モジュールに実装しα線で動作確認を 行ったときの写真	 3. 2-15
⊠ 3.3.2-1	トランジスタ、Nuk-CSA、Nuk-TIA それぞれの X 線照射セットア ップ	 3.3-2
⊠ 3.3.2-2	CMOS65 nm トランジスタ、28 nm トランジスタ、22 nm トランジ スタの耐放射線性能の例	 3.3-2
⊠ 3.3.2-3	フロントエンド集積回路1 MGy 照射後の特性	 3.3-3
図 3.3.2-4	バックエンド集積回路 X 線照射セットアップ	 3.3-4
図 3.3.2-5	1 MGy 照射後 Tx-Rx 間通信デジタル信号の状態	 3.3-5
図 3.3.2-6	Tx-Rx 間通信の耐放射線評価とより安定した通信を確保するた めの改良	 3.3-5
図 3.3.3-1	γ線バックグラウンドに対する信号処理回路時定数の影響例 開発した中性子検出素子を使用して取得した中性子スペクトル	 3.3-6
⊠ 3.3.3-2	の例(左)および FRS 熱中性子標準場での中性子感度測定セットアップ(右)	 3.3-7
図 3.3.3-3	QST 高崎での試験結果	 3.3-8
図 3.3.3-4	九州大学でのγ線バックグラウンド測定の結果	 3.3-8
図 3.3.3-5	積層膜ダイヤモンド素子のγ線バックグラウンド耐性評価結果	 3.3-9
図 3.3.4-1	中性子検出器モックアップを完成させ、中性子検出器として動 作を確認するまでの過程	 3.3-10
⊠ 3.3.4-2	九州大学での γ 線照射試験のセットアップ	 3.3-11
図 3.3.4-3	²⁵² Cf 線源からの核分裂スペクトル	 3.3-12
図 3.3.4-4	重水減速 ²⁵² Cf 線源からの中性子スペクトル	 3.3-12
図 3.3.4-5	シミュレーション計算において使用した計算体系の概念図	 3. 3-13
図 3.3.4-6	²⁵² Cf 線源からの核分裂スペクトルに対する検出器の応答波高分布 計算結果	 3. 3-14
図 3.3.4-7	²⁵² Cf 線源からの核分裂スペクトルに対する検出器の応答波高分布 計算結果	 3. 3-15
図 3.3.5-1	未臨界過渡変化実験で測定された中性子計数の時系列データ	 3.3-18
⊠ 3.3.5-2	低い計数率条件と外れ値を模擬した仮想的な中性子計数の時系列デ ータ	 3. 3-18
図 3.3.5-3	改良単純フィードバック法によるドル単位反応度の推定結果	 3.3-19
図 3.3.5-4	確率母関数の比較	 3.3-21
図 3.3.5-5	中性子計数の確率分布の比較	 3.3-22

略語一覧

JAEA	: Japan Atomic Energy Agency (国立研究開発法人日本原子力研究開発機構)
CLADS	Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science : (廃炉環境国際共同研究センター)
東電	: 東京電力ホールディングス株式会社
1F	: 東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所
高工ネ研	: 大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構
産総研	: 国立研究開発法人産業総合技術研究所
北大	: 国立大学法人北海道大学
名大	: 国立大学法人東海国立大学機構名古屋大学
住友電工	: 住友電気工業株式会社
EDP 社	: 株式会社イーディーピー
Element Six	: Element Six Holdings Ltd.
IRID	: 技術研究組合国際廃炉研究開発機構
FRS	: Facility of Radiation Standards(放射線標準施設)

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」という)の炉内状況の 把握、燃料デブリ取出しの早期実現、臨界リスク管理に資することを目的とし、本研究では、遮 蔽不要な臨界近接監視システム用中性子検出器の要素技術を開発した。

具体的な目標設定は、"測定環境体系が不明で中性子低係数率かつ高いγ線バックグラウンドで あっても中性子モニタリングにより深い未臨界が判定できる装置および解析手法であれば、その 要素技術は他の手法でも利用可能である"という理念の基、具体的には遮蔽不要な臨界近接監視 システム用中性子検出器には、軽量かつ最大1 kGy/h の高 γ 線環境下で数 cps/nv の高い中性子 検出感度を満たす仕様とした。これを実現するために炉雑音解析法からの要請を基に、ダイヤモ ンド中性子検出素子と耐放射線性集積回路技術を応用・発展させた信号処理・データ転送用集積 回路を使用した計測要素を試作し、目標を達成したのち、6 cm 径ドライチューブ挿入可能な実機 モックアップを開発し、それを基に実機開発に必要なデータを取得した。また実機の使用を想定 した臨界近接評価手法の検討も並行して行い、体系情報が不明かつ低い中性子計数率でも適用可 能な逆動特性法も開発した。

令和2年度では、耐放射線トランジスタの開発、臨界近接監視システムの設計、信号処理・デ ータ転送用集積回路の設計を行い令和3年度での製作と評価に備えた。中性子検出素子に関して は中性子検出用ダイヤモンド素子の中性子検出効率および高y線環境下での動作について評価を 行った。

令和3年度では、令和2年度の評価を踏まえて目標に対して次の成果を得た。γ線計数/中性子 計数の割合<1の条件であれば、目標とする中性子感度が達成できれば実時間で深い未臨界はモ ニタリング可能であることが示された。この結果を基にシミュレーションにより中性子検出素子 を評価し、目標とする感度を達成するためには、最大で数千個の検出素子および1 MGy まで動作 する信号処理回路が必要であることが明確にした。これらの結果を基に、ダイヤモンド中性子検 出素子の開発、信号処理集積回路とシステムの詳細デザインにフィードバックをかけた。

令和4年度では、前年度までの要素技術を組み合わせ最終試験を行い、1 kGy/h での安定動作 確認、中性子感度の測定および目標値達成の確認を行った。またPO等関係者と議論を行い、実機 相当の仕様を満たすモックアップを開発し実機開発における問題点を洗い出した。並行して、ダ イヤモンド検出素子量産化に向けたベンチャー企業を立ち上げ次のステップに備えた。

今後の検討課題としては、ダイヤモンド素子量産化および中性子感度向上に向けた研究開発、 実機に組み込むための集積回路等実装技術も含めた開発改良最適化、原子炉等のフィールド試験 を経て使用実績を積み重ねることなどが挙げられる。

前年度までの成果報告書:

- JAEA-Review 2021-038, 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(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,65p,2021, URL:https://doi.org/10.11484/jaea-review-2021-038
- ・ JAEA-Review 2022-031, 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(委託研究)令和3年度英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業,89p,2022, URL: https://doi.org/10.11484/jaea-review-2022-031

1. はじめに

IF における燃料デブリ取り出し作業において、燃料デブリ形状や水量の変化による臨界を防止 し、万が一臨界が生じた場合でも一般公衆および作業員に過度の被ばくが生じることのないよう な臨界管理手法の確立が必須である。これに対応するため、技術研究組合国際廃炉研究開発機構 (以下、「IRID」という)では参考文献[1-1]等で公表されている、燃料デブリ臨界管理技術を開 発している。この中で解決すべき課題が最大1 kGy/hの高γ線環境下で燃料デブリからの微弱な 中性子を計測可能とする数 cps/nv の中性子検出感度を持った、軽量な臨界近接監視システムの実 現にある。

初期に使用される臨界近接監視システムは、狭隘なペネトレーションを通して原子炉格納容器 (PCV)内に挿入する必要があり、燃料デブリ取り出し装置のペイロードから重量制限が非常に厳 しく、PCV 詳細調査用アーム型アクセス装置は10 kg 未満[1-2]となっている。また当初は中性子 線源を用いた動的手法の使用は選択肢から外されており、炉雑音解析法の要請から数 cps/nv の中 性子検出感度を持つ必要がある。参考文献[1-1]では1時間の測定で炉雑音法の一種であるファイ マンα法による臨界度評価可能な高感度¹⁰B比例計数管(中性子検出感度:2 cps/nv)の場合、厚 さ2 cm の鉛遮蔽が必要となり総重量が150 kg を超えると試算している。また半導体中性子検出 器の使用に関しては、信号対雑音比を向上させるためには信号処理回路をできるだけ検出器近傍 に置く必要があり市販の集積回路を使用する場合放射線遮蔽が必要となる。ここまでで述べたよ うに、臨界近接監視システムが満たさなくてはならない要求としては、高y線環境下で数 cps/nv の中性子検出感度を持ち、軽量かつ小型であることが必須でありすべての要求を同時に満たすシ ステムを開発することは容易ではないが、学際連携等により原子炉格納容器、さらに原子炉圧力 容器(RPV)内部で使用可能な素子開発からシステム構築までのノウハウを効果的に使用し臨界近 接監視システムの開発を成功させることが、デブリ取り出し作業を遅延なく進める上で急務であ る。

上記の課題を検討していくと一般的には以下のようなことが明らかになる。

- (1) 軽量化の観点からは、y線防護のための遮蔽物の重量をできるだけ少なくする必要がある。 ただしこの場合 y線防護が必要な検出素子は使用不可能になる。
- (2) 高γ線環境下での中性子検出の検出効率の向上に関しては、検出部の材料とγ線バックグ ラウンドとの相互作用を減らすことが重要であり、検出部の材料以外は、RPV 内部もしくは燃 料デブリの近辺に入れない方がよく、また使用する材料も原子番号の小さいものを使用する ことが望ましい。これにより検出部構造体からのコンプトン散乱による電子が減少すること で、中性子検出に対するバックグラウンドも減少する。
- (3)検出素子の信号処理の観点からは、信号処理回路ができるだけ検出素子に近い方が雑音を 減らし高い信号対雑音比で中性子検出が可能となる。現状検出部と人間が滞在可能な空間ま では数 10 m 離れているため、可能な信号処理手法としては信号処理回路を検出素子に近づけ るか、抵抗等で検出素子からの信号を電圧に変換し長距離ケーブルを通して信号を検出する かの 2 種類と考えられる。後者の場合検出素子からの信号が大きい場合は適応可能だが、一 般に半導体およびガスを使用した検出素子からの信号は小さく、ケーブルのインピーダンス マッチングも考えた場合には実用的でない。

つまり、できるだけ原子数の小さい材料を用いて薄いもしくは物質量の小さい検出部を構築し、 信号処理回路は検出素子の近くに置くことが可能であれば開発を推進することができる。ただし 耐放射線性能は1 MGy 以上必要である。この観点から臨界近接監視システムに対してどのような 要件が必要とされるかをさらに詳細に検討する。

ガンマ線バックグラウンド耐性を上げる構造として薄い検出素子を検討した場合、素子の電極 間の距離が近くなるため原理的に検出素子容量は増加する。これは雑音を増加させるため、電極 構造の観点からは読み出し電極を分割することが必須となる。特に半導体を使用した検出素子の 場合は数µmの検出層では、読み出し電極の大きさをセンチメートルオーダーまで広げると検出素 子容量が100 pF 以上に増加し、雑音の増加と信号処理回路の消費電力の増加や設計開発の困難さ が問題となる。よって読み出し電極の細分化は必須となる。一方中性子検出効率を上げるために は検出素子の数を増加させる必要がある。この"検出素子数の増加要求"と上記(3)で述べた"検 出処理信号処理部はできるだけ検出素子に近づけること"を満たすためには、臨界近接監視シス テムに特化した多チャンネル検出素子信号読み出し用集積回路を開発せざるを得ない。このため 臨界近接監視システム開発においては耐放射線検出素子技術と耐放射線集積回路技術は避けて通 ることのできない必須の技術となる。

さて、検出素子として半導体に目を向けてみると、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および低誘電率により、 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。また 原子番号も6であり物質量も小さく前述の要請を満たす。この材料を使用した素子製作技術や評 価に関しては北海道大学(以下、「北大」という)および産業技術総合研究所(以下、「産総研」と いう)は種々の技術蓄積を保有し、世界の中でも開発拠点となっている。

耐放射線電子回路の開発という観点からは使用するトランジスタの耐放射線性能を考慮しなく てはならない。高エネルギー加速器研究機構(以下、「高エネ研」という)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 する数十万チャンネルを超えるセンサーおよび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数 MGy もの高放射線環境下で安定に動作することがわ かっている。

我々は日本が世界に誇るダイヤモンド放射線検出器技術、耐放射線測定装置の開発で培われた 耐放射線性集積回路技術、大規模計測システムの豊富な開発経験に基づき、名古屋大学(以下、 「名大」という)と連携し未臨界度測定の専門家の知見を反映した遮蔽不要な臨界近接監視モニ ターの開発を行う。また開発された技術要素は名大および日本原子力研究開発機構(以下、「JAEA」 という)との連携のもとそれぞれの機関で所有している特色ある評価場を評価に使用する。これ により臨界近接監視システムの実現に必要な計測要素の試作と評価を行い、実機の成立性検証な らびに設計に必要な基本データの取得を行う。これらの知識を実機開発計画につなげることで、 廃炉工程が遅延なく遂行することを目標に本プロジェクトを推進する。また耐放射線性半導体の ような廃炉に関わる基本技術を国内で持つことは安全保障上の観点からも重要な意味を持ち、現 場からの要求に対して柔軟な対応も可能となるため、本プロジェクトで蓄積された技術ノウハウ を生かし他のプロジェクトへの技術還元などを推進していく。

> 1-2 - 28 -

2. 業務計画

2.1 全体計画

本研究の目標は以下の通りである。

- ・1 kGy/hのγ線環境における微弱中性子計測可能な計測要素の実現
- ・炉雑音解析法(ファイマン α 法)で要求される時間幅 1 µs で中性子計数の経時変化を連続測 定可能な信号伝送系の構築
- ・炉雑音解析法で要求される中性子検出感度を達成可能なスケーラブルシステムの構築
- ・主要構成部品の1 MGy 以上の耐放射線性(努力目標4 MGy)

上記を達成することで、実機成立性を実証し、実機開発の設計・開発に必要な要素技術を獲得する。この研究を遂行するにあたり次項から述べる3項目を研究組織(高エネ研、北大、産総研、 名大、JAEA)が連携する。図2.1-1に当初目標とした中性子検出器の概念図を示す。



図 2.1-1 臨界近接監視システム実機の中性子検出部のイメージ(本要素技術開発では ダイヤモンド検出素子一検出素子列・読み出し集積回路一検出素子層制御・読み出し集 積回路—全体制御・読み出し集積回路を基板モジュール上に実装した計測要素を製作 し、1 kGy/h の高y線環境下における中性子計測性能評価試験等を行う。)

2.1.1 高耐放射線スケーラブル中性子検出器 信号読み出しシステム開発

実機では数千チャンネルの中性子検出素子からの信号を処理しデータ転送する必要がある。 また炉雑音解析法による実効増倍率測定を行うためには時間幅1 µs で中性子計数の時間変化の 計測が必要となる。これらを実現するために、積算線量1 MGy 以上、努力目標4 MGy の耐放射線 性を持った中性子検出素子、検出素子からの信号を処理するフロントエンド集積回路、制御なら びに信号伝送を行うバックエンド集積回路を開発し、複数のモジュール(以下、「モジュール」 という)上に実装する。モジュール数を増やすことで必要な中性子検出効率をスケーラブルに達 成可能とするシステムを開発する。

(1) スケーラブルシステム開発

臨界近接監視システムでは必要な中性子検出効率を確保するため数千チャンネルの中性子 検出素子からの信号を処理・伝送する必要がある。これを実現するため、同一モジュール上 に検出素子、信号処理用集積回路、制御・データ転送用集積回路を実装する。さらにモジュ ール単位で計測要素を増やすことで、検出効率向上等の要求に柔軟に対応可能なスケーラブ ルなシステムとなる。これを担保するため、高エネ研で開発してきた半導体ピクセル検出器 の制御読み出し手法を基盤としてスケーラブルシステムの設計・開発を行う。下記に述べる 耐放射線性集積回路群を開発、使用することで、遮蔽不要で十分な検出効率と時間分解能を 有する臨界近接監視システムを実現可能とする。

(2) フロントエンド集積回路開発

検出素子からの信号読み出し用途に使用可能と考えられるCMOS 22 nmおよび28 nmの最先 端半導体プロセスとCMOS 65 nmプロセスの耐放射線性評価を行う。各プロセスで最小線幅の トランジスタを含め数種類の基本デバイスを製作し、アニーリング効果も含め耐放射線性能 を調査する。その結果を中性子検出素子読み出し用集積回路開発へフィードバックする。本 スケーラブルシステムにおいて、トータルドーズ効果による特性劣化はフロントエンド集積 回路で最も顕著に表れる。したがって、集積回路の耐放射線性強化を本項目で行うことでス ケーラブルシステムの開発を円滑に行うことが可能となる。

(3) バックエンド集積回路開発

中性子計測に基づく臨界近接監視システムでは、時間幅1 µsで中性子を計数し、その時間 変化を記録可能とする必要がある。このためには100 ns程度の時間分解能を維持し、検出し た中性子信号を限られた信号線数により送受信する必要がある。さらにフロントエンド集積 回路の制御も行う。これを数千チャンネル規模の検出素子に対して実現するため、機能を分 割した、複数の集積回路を開発する。一つは組み合わせ回路を利用し100 nsの時間分解能を 維持した中性子数計測回路を含むフロントエンド集積回路との信号の送受信を行う集積回路 であり、もう一つは同様の機能を持ちながら情報を多重化し信号線数を減らすために必要な 集積回路である。

2.1.2 ダイヤモンド中性子検出素子の開発

臨界近接監視モニター用中性子検出器の中性子検出素子をダイヤモンド放射線検出素子¹⁰B₄C 等の中性子・荷電粒子変換物質の組み合わせにより試作する。臨界近接監視モニター用中性子検 出器実機では5 mm角のダイヤモンドであれば数百枚~千枚程度が必要となる。本開発では高耐 放射線スケーラブル中性子検出器信号読み出しシステム開発で開発する耐放射線性集積回路群 と組み合わせて最終的に評価する。電極サイズ、結晶厚さの最適化を進め、計測要素試作に必要 な個数の検出素子を製作する。さらにモジュール上への実装技術の開発を高エネ研と共同して 行い、段階的に計測要素を供しながらフィードバックをかけ開発を進める。
(1) 自立膜型ダイヤモンド中性子検出素子の開発

すでに実績のある住友電工製高圧高温(HP/HT) IIa型単結晶基板とマイクロ波プラズマ CVD 法により北大で検出素子用ダイヤモンド単結晶を合成し、産総研が支援するイオン注入・リ フトオフ法により自立膜化する。結晶厚さ、電極面積を変え、S/N 比、y 線応答などを評価し 検出素子の仕様を決定する。検出素子の量産を見据え、7~8 mm 角程度の不定形単結晶基板 からレーザー切断を使用した5 mm 角程度の定型検出素子の製作、複数枚同時合成技術の開発 も行う。1 枚の基板を検出素子用自立膜合成に使用し、次の合成に使用するまで平均3 ヵ月 かかるため、基板数の確保が重要となる。また、基板の繰り返し利用により基板面積が縮小 するため、HP/HT IIa型基板の新規購入に加え、2.1.2(2)で代替基板の開発が必要となる。

産総研はイオン注入・リフトオフ、カソードルミネッセンス法による合成ダイヤモンドの 評価を行う。さらに北大の合成条件では合成面に数µ~10µmの凹凸が発生するため、これを 改善する目的で平滑表面を有するダイヤモンド合成条件の探索も担当する。

- (2) CVD 単結晶ダイヤモンドの自立膜型ダイヤモンド合成基板への利用可能性検証
- 2.1.2(1)で使用する住友電工業製 HP/HT IIa 型単結晶基板は年間生産数量に制限がある。 並行して代替可能なダイヤモンド単結晶基板を探索する。結晶性・純度ともに高いエレメン トシックス社製 CVD 単結晶や自立型単結晶ダイヤモンドの検出素子開発用自立膜合成用基板 としての利用可能性を探る。産総研は 2.1.2(1)同様、イオン注入・リフトオフ、カソードル ミネッセンス法による支援を行う。
- (3) 積層型ダイヤモンド中性子検出素子の開発 産総研が中心となり HP/HT IIa 型基板と比較すると、結晶性に劣るものの1 cm 角以上の大 型単結晶が入手可能なモザイク結晶、ヘテロエピタキシャル結晶を使用した積層型ダイヤモ ンド検出素子の試作を行う。キャパシタンスの問題はあるが中性子検出に必要な膜厚は 20 µm 以下であることから薄膜 i 層/p +層による積層構造を内部に組み込んだ検出素子構造を試作 する。北大はこの試料の検出素子化と評価を担当し、X 線照射試験も行う。
- (4) 検出素子の基板実装技術の開発 検出素子の基板実装法、耐放射線性集積回路との接続方法について、北大が高エネ研と協 力しながら開発を進める。産総研は検出素子用ダイヤモンドの平滑化技術の開発を行う。
- 2.1.3 検出素子、計測要素の性能評価と臨界近接監視手法の検討

北大 LINAC-II、JAEA・放射線標準施設、名大コバルト照射施設を使い、検出素子、計測要素の中性子感度評価、γ線影響評価等性能試験を行い、実機開発に必要なデータを取得する。さらに実機使用を想定した臨界近接監視手法を検討する。

(1) 検出素子の性能評価

試作した検出素子の評価として、I-V、C-V測定、α線を用い電荷キャリア輸送特性を評価 する。さらに¹⁰B₄C等の中性子・荷電粒子変換物質を付与した中性子検出素子を試作し、²⁵²Cf 等中性子源、北大 LINAC-II での動作試験、JAEA FRS 熱中性子標準場での中性子感度評価を 行う。また名大γ線照射施設において検出素子のγ線感度評価を行う。

(2) 集積回路等の耐放射線性試験

北大の X 線照射施設を使用し、検出素子の一部、耐放射線性集積回路等の照射試験を行う。 これまでの経験から X 線照射はオゾンの発生を伴うことから y 線照射よりも電子デバイスに 対しては過酷な条件となる。集積回路に関しては y 線照射試験を高エネ研が担当して行う。 (3) 検出要素+フロントエンド集積回路の性能評価

2.1.3(1)で開発した中性子検出素子とフロントエンド集積回路を組み合わせた計測要素に 対して²⁵²Cf等中性子源を使用した評価を行う。名大γ線照射施設において中性子検出素子と フロントエンド集積回路を組み合わせた計測要素のγ線影響評価を行う。

- (4) 検出素子+フロントエンド集積回路+バックエンド集積回路の性能評価 中性子検出素子、フロントエンド集積回路、バックエンド集積回路を結合した計測要素を α線、²⁵²Cf、北大 LINAC-II で評価する。さらに JAEA の標準放射線場で中性子感度評価を行 う。最後に1 kGy/hのγ線環境での影響評価ならびに同環境における中性子計測を行う。
- (5) 臨界近接監視手法の検討 上記 2.1.3(1)、2.1.3(3)および 2.1.3(4)で得られたデータをもとに臨界近接監視手法の適 用手法を検討し、実機での予測性能の評価を行う。
- 2.1.4 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間ならびに廃炉環境国際共同研究センター(以下、「CLADS」という)等との連携を密にして、研究を進める。また、研究実施計画を推進するための打合せや会議等を開催する。

2.2 実施体制

実施体制を図 2.2-1 に示す。

課題全体の取りまとめ:高エネルギー加速器研究機構 研究代表者	田中真伸
1.高耐放射線スケーラブル中性子検出器信号読み出しシステム開発 (高エネルギー加速器研究機構)	
(1)スケーラブルシステム開発 (2)フロントエンド集積回路開発	田中真伸 岸下徹一
(3)バックエンド集積回路開発	宮原正也
2.ダイヤモンド中性子検出素子の開発	

金子純一、樋口幹雄
金子純一、茶谷原昭義
梅沢仁、嶋岡毅紘
田中真伸

3.検出素子、計測要素の性能評価と臨界近接監視手法の検討		
(再委託先:北海道大学、名古屋大学 連携機関:日本原子力研究開発機構		
協力機関:九州大学、量子科学技術研究開発機構)、高エネルギー加速器研究機	構	
(1)検出素子の性能評価	金子純一、	谷村嘉彦
(2)集積回路等の耐放射線性試験	田中真伸、	小泉均
(3)検出要素+フロントエンド集積回路の性能評価	金子純一、	渡辺賢一
(4)検出素子+フロントエンド集積回路+バックエンド集積回路の性能評価	田中真伸、	谷村嘉彦
(5)臨界近接監視手法の検討	遠藤知弘、	渡辺賢一

図 2.2-1 実施体制図

- 2.3 令和4年度の成果の目標および業務の実施方法
 - 2.3.1 高耐放射線スケーラブル中性子検出器信号読み出しシステム開発
 - (1) スケーラブルシステム開発

令和3年度までに明確になった改良点を取り入れ、検出器および複数の集積回路が実装 可能なモジュールを設計し、検出器および集積回路の実装を行いスケーラブルな中性子検 出器システムを完成させる。システムの性能は北大、名大、JAEA と連携し評価を行う。 (2) フロントエンド集積回路開発

- 令和3年度までの結果を踏まえたフロントエンド集積回路デザインにフィードバックさせ、他の研究者と連携しシステム評価および放射線評価を行う。
- (3) バックエンド集積回路開発 令和3年度までに明らかになった改良点を基にデザインを決め集積回路を開発する。また他の研究者と連携し、システムの動作評価、耐放射線評価、中性子検出機能評価など行う。

- 2.3.2 ダイヤモンド中性子検出素子の開発
 - (1) 自立膜型ダイヤモンド中性子検出素子の開発
 - 令和3年度に引き続き IP/IT IIa 型単結晶ダイヤモンド基板等を購入し、イオン注入・ リフトオフ法により検出素子用ダイヤモンド単結晶自立膜を製作する。検出素子用ダイヤ モンド単結晶自立膜の結晶性はカソードルミネッセンス法によって評価する。電荷キャリ ア輸送特性向上によるチャージアップ対策ならびに検出器製作時の加工を念頭に置いた表 面平滑化を目的として酸素添加を含め合成条件を探索する。検出器のチャージアップ耐性 の改善を目的として成長層の基板側層の除去を試みる。これらの検出素子に対し B₄C 等を 付加することで中性子検出素子を試作する。また中性子検出効率ならびに信号雑音比向上 を目的として微細加工技術の導入を試みる。
 - (2) 積層型ダイヤモンド中性子検出素子の開発 量産性が期待できる積層型ダイヤモンド検出素子の性能検証を行う。
 - (3)検出素子の基板実装技術の開発 令和3年度の結果に基づき、中性子検出素子、フロントエンド集積回路、バックエンド 集積回路を実装するモジュールを製作し、項目2.3.3で使用する計測要素の製作に供する。
- 2.3.3 検出素子、計測要素の性能評価と臨界近接監視手法の検討
 - (1)集積回路等の耐放射線性試験
 項目 2.3.1 から供される試料に対して X 線を照射する。
 - (2)検出要素+フロントエンド集積回路の性能評価 中性子検出素子、フロントエンド集積回路を組み合わせた測定要素に対して中性子源を
 - 使用した動作試験を行う。またγ線照射試験を行う。
 - (3)検出素子+フロントエンド集積回路+バックエンド集積回路の性能評価 中性子検出素子、フロントエンド集積回路、バックエンド集積回路を結合した計測要素
 - に対して中性子源を使用した動作試験を行う。またγ線照射試験を行う。
 - (4) 臨界近接監視手法の検討

ダイヤモンド中性子検出器を用いて、1Fにおける燃料デブリ取り出し作業時の臨界近接 監視を行うための手法に関する検討を進める。燃料デブリ取り出し作業時の臨界近接監視 手法として、現時点で候補として挙げられている未臨界度測定手法について課題を抽出す る。

2.3.4 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間ならびに CLADS 等との連携を密にし、1F 現場に実機適用すべく、現場との意見/情報交換を行いながら、研究を進める。また、研究実施計画を推進するための打合せや会議等を開催する。

- 3. 実施内容および成果
 - 3.1 高耐放射線スケーラブル中性子検出器 信号読み出しシステム開発(令和2年度~令和4 年度)
 - 3.1.1 スケーラブルシステム開発(令和2年度~令和4年度)
 - (1) 令和3年度までの概要

令和2年度にはシステム評価に必要なモジュール設計の検討を開始し、システムデザ インを進めた。またシステム評価用モジュールを開発した。これらの評価結果を基に次 年度のスケーラブルシステム構築へフィードバックをかけた。

開発目標を明確にし、そのシステム仕様にフィードバックをかけるため、未臨界モニ ターシステムのエミュレータを開発した。

令和3年度には開発した集積回路およびシステム評価に必要なプロトタイプモジュー ルを開発し、システムデザインを進めた。これらの評価結果を基に次年度のスケーラブ ルシステム構築へフィードバックをかけた。

装置設計を開始し、プロトタイプ丸形モジュールを開発し動作の検証を行った。また、 デブリ取出し用ペネトレーション内径等が異なったときの装置デザインも行い、直径 10 cm 対応のデザインを検討した。

(2) 令和4年度実施内容および成果

令和3年度までに明確になった改良点を取り入れ、検出器および複数の集積回路が実 装可能なモジュール(図3.1.1-3~4)を設計し、検出器および集積回路の実装を行いス ケーラブルな中性子検出器システムを構築した。(検出素子を接続しての評価に関しては 3.3を参照のこと)。これらシステムの性能は北大、名大、JAEAおよび九州大学と連携し 評価を行った。また開発したモジュールの接続試験を行うため、コンピュータ用制御ソ フトウエアおよび動作モニタリングソフトウエア(図3.1.1-5)を開発した。

それぞれの要素を接続し動作が確認できたため、6 cm 径のドライチューブに挿入可能 な中性子検出器のモックアップを組み上げ(図 3.1.1-6、検出素子のモジュール実装に ついては 3.2.4 を参照のこと)中性子で動作確認(評価結果等は 3.3.4 を参照のこと) を行った。以下詳細について述べる。

中性子検出器信号読み出しシステムは、3.2 で述べる中性子検出素子と3.1.2 および 3.1.3 で述べる集積回路群を実装した複数の電子基板モジュール(以下、「モジュール」 という)からなる。開発において重要な開発仕様を以下に示す。

- A. 1 kGy/hのγ線照射場中で、中性子感度数 count/nv を達成する。これは耐放射線 性能を有した素子を使用すること、高レートで検出素子に入射するγ線バックグラ ウンドが生成する荷電粒子の生成する微小信号がパイルアップを起こさない高速信 号処理回路の開発および中性子信号とγ線バックグラウンドおよび雑音を分離可能 な適切なモジュール化、さらにはそのモジュールを組み合わせることによる中性子 感度の向上により実現される。
- B. 運搬用ロボットへの重量負荷を減らす。これは耐放射線性能を有する素子を使用 することで遮蔽用シールド材を取り除き軽量化を行う。この要件は主に検出素子お

よび集積回路の耐放射線化により達成される。詳細は 3.1.2、3.1.3、3.2 および 3.3.2 で述べる。

- C. 中性子強度、未臨界モニター挿入穴や設置場所等の環境条件に可能な限り柔軟な 対応ができるシステムとする。詳細は後述するが、これを実現するために検出素子を 信号処理要素を小さい単位でモジュール化し、それらを統合し制御およびデータ収 集可能なシステムを構築することで、環境に応じた中性子感度の増減、形状変更等が 可能にする。
- D. コンピュータまでの 50 m以上の長距離高速信号転送をできるだけ少ない本数のケ ーブルで行う。未臨界モニターで必要な情報は、単位時間当たりの中性子カウント数 (炉雑音法等を適応する場合等は 1 マイクロ秒当たりの中性子カウント数) である ため、信号対雑音比および消費電力を検討した場合、長距離アナログ信号を送るより 検出素子近傍でデジタル信号化した情報を長距離転送すべきである。これは主に 3.1.3 で述べる耐放射線バックエンド集積回路(Tx および Rx) とその搭載モジュー ルにより達成される。



6cm径対応未臨界モニターデザイン

図 3.1.1-1 形状が異なる臨界近接監視モニター用中性子検出器のデザイン例(緑色の部分 はモジュールを表し複数の中性子検出素子と耐放射線信号処理集積回路からなる。中性子 検出素子は、ダイヤモンドを用いた放射線検出素子とリチウムやホウ素同位体を用いた中 性子コンバータより構成される。)

上記 C で述べた仕様を満たすことで、図 3.1.1-1 に示すような、形状が異なる未臨界 モニターを設計することが可能になる。

このデザインを実現するシステムの全体構成および仕様を図 3.1.1-2 と表 3.1.1-1 に 示す。

> **3.1-2** - 36 -



図 3.1.1-2 臨界近接監視モニター用中性子検出器のブロックダイアグラム(構成要素は、 中性子検出素子、フロントエンド集積回路:3.1.2 において説明がある Nuk-CSA および Nuk-TIA の2種類、Column Controller:CC、Array Controller:AC、データ転送集積回路:Tx、デ ータ受信集積回路:Rx より構成される。)

名称		機能	その他	
フロントエンド	Nuk-CSA	電荷有感型前置増幅器、波形整形回路、 コンパレータ、加算器を有する	センサーを8チャンネルまで 接続可能	
集積回路	Nuk-TIA	電流有感型前置増幅器、波形整形回路、 コンパレータ、加算器を有する	センサーを8チャンネルまで 接続可能	
	СС	フロントエンド集積回路から送られてきた中 性子カウントを100nsec毎にサンプルし、AC へ送信する。	フロントエンド集積回路を16 個まで接続可能	
	AC	CCから送られてきた中性子カウント信号を 加算しTxへ送信する。	CCを4個まで接続可能	
バックエンド 集積回路	Тх	Rxへ中性子カウント数を132Mbpsで送信す る。またRxから受信した制御信号を、AC,CC を通してフロントエンド集積回路へ送信す る。	最大8個のACからの中性子カ ウントをRxに送ることが可能	
	Rx	コンピュータ側でTxから送信されてきた 132Mbpsで送信されてきた信号を受信する。 またTxへ制御信号を送信しフロントエンド集 積回路のパラメータ設定を行うことができ る。	Txと対になりデジタルデータ の送受信を行う。	

)まとめ	いて	機能につい	名称と	積回路群の	た耐放射線集	で開発し	本課題	. 1-1	表 3.
--	------	----	-------	-----	-------	--------	------	-----	-------	------



図 3.1.1-3 6 cm 径ドライチューブに挿入できるようにデザインされた各モジュールの写 真(図 3.1.1-1 も参照のこと。)



図 3.1.1-4 16 cm 径ペネトレーション孔に挿入できるようにデザインされた各モジュール の写真(図 3.1.1-1 も参照のこと。)

これらを実現したモジュールの写真を図 3.1.1-3~4 に示す。さらにこれらをコンピュ ータに接続して制御およびデータ取集を行うためのソフトウエアも開発した。そのソフト ウエアのスクリーンショットを図 3.1.1-5 に示す。このソフトウエア[3.1-1]は、どのコン ピュータでも保有するイーサネットポートとの通信を基盤として、ネットワークを通じて 複数の中性子検出器からのデータをモニターできるような構造を持っており、ロボット関 係のソフトウエアプラットフォーム(RT ミドルウエア)[3.1-2]と親和性が高い。



図 3.1.1-5 中性子検出器用制御・データ収集ソフトウエア(このソフトウエアはイー サネット通信をベースに外部機器とのやり取りができるため、他の機器との接続に特別 なボードやソフトウエアの開発は必要がない。また本文中で述べているロボット制御に 使用されるミドルウエアの一つで国際標準となっている RT ミドルウエアとの親和性も 高い。)

+ 100%

| ==[| 📑 | | Average: ; Sum: 0 | - ----

10

Sheet 1 of 1

+ Sheet1

| Default |

我々は、POのレビュー結果を受け、グループ内で議論し、より実機に近いシステムで検 証を行い、次のステージへ確実につなげるために6 cm 径ドライチューブ挿入用モックア ップ(図 3.1.1-6 参照)を開発した。このモックアップを用いて中性子感度の評価を行っ

3.1-5

た結果の詳細は、3.3.3 で述べるが正しく動作し中性子感度も予想している値で、デモンストレーションは成功した。

さらに中性子減速材の厚さについてもシミュレーションで検討を行い、その結果は 3.3.3 で述べる。





図 3.1.1-6 ドライチューブ挿入用中性子検出器モックアップ(電磁シールド ケースは、予算の都合により想定よりも厚いものになっているが、実際は1 mm 未満で良い。)

- 3.1.2 フロントエンド集積回路開発(令和2年度~令和4年度)
 - (1) 令和3年度までの概要

令和2年度には1 MGy までの動作実績がある商用プロセスを用い、1 MGy 以上の放射 線環境での耐性を評価した。並行して、1 MGy まで動作実績のあるプロセスを使用し中 性子検出器用フロントエンド集積回路を設計した。

CMOS65 nm トランジスタの耐放射線評価のために、量子科学技術研究開発機構(以下、「QST」という)において1 MGy 以上の照射を行った。この CMOS65 nm プロセスを用いて ダイヤモンド中性子検出素子用信号処理集積回路を開発した。また CMOS22 nm プロセス の耐放射線性能を評価するために、評価用トランジスタ素子の製造を行った。

令和3年度には1 MGy までの動作実績がある商用プロセスを用い、1 MGy 以上の放射 線環境での耐性を評価した。並行して、1 MGy まで動作実績のあるプロセスを使用し中 性子検出器用フロントエンド集積回路を開発し動作確認した。また、バックエンド集積 回路と合わせて試験を行い、評価結果を踏まえ改良し再試作評価を行った。

フロントエンド集積回路のみの評価モジュールを製作し評価を行い、集積回路の再デザ イン後に、フロントエンド集積回路とバックエンド集積回路の評価モジュールを開発し 評価を行った。

(2) 令和4年度実施内容および成果

令和3年度までの結果を踏まえたフロントエンド集積回路デザインにフィードバック させ、他の研究者と連携しシステム評価(3.3.2~3.3.4参照のこと)および放射線評価 (3.3.1を参照のこと)を行った。

今まで開発を進めてきた高信号対雑音比を持つ集積回路だけでなく、より高バックグ ラウンドにも耐えうる高速応答の可能な信号処理回路も開発し動作確認(図 3.1.2-2)を 行った。以下詳細について述べる。

フロントエンド集積回路は、中性子検出素子からの信号を高い信号対雑音比を保った まま、中性子ッ線弁別を行い、デジタル情報をバックエンド集積回路へ転送する役割を 担う。このとき注意しなくてはいけないのがッ線バックグラウンドによる偽中性子信号 出力である。この偽中性子信号は、信号処理回路の応答時間が遅ければ遅いほど(シェ ーピング時定数が長いほど)大きくなるため、我々が令和3年度に開発した信号処理回 路の時定数は50 nsecとしている。(市販の1µ秒の回路を使用すると中性子信号が判別 できない程度の量の偽中性子信号出力が観測されることは、令和3年度までにわかって いる)一方、現状のッ線バックグラウンドの観測値はわかっておらず、かつバックグラ ウンドの量は検出素子まわりの物質量にも依存するため、プロジェクトグループ内で議 論し、システムをロバストにするため、新たに高速の信号処理集積回路を開発し、どち らでも使用できるようにした。表3.1.2-1にそれぞれの諸元を示す。ここで Nuk-CSA は 令和3年度に開発を行ったフロントエンド集積回路で、Nuk-TIAが令和4年度に開発を 行ったものである。これらを実装し電気的特性試験を行うためにモジュールを開発した。 開発したモジュールおよび評価セットアップの写真を図3.1.2-1に示す。また、それぞ れの電気特性の測定結果を図3.1.2-2に示す。 電気的特性は、当初の仕様を十分に満たしていることは確認できた。検出素子を接続 した評価結果は3.3.2~3.3.4 で述べる。どちらも中性子検出能力に関して十分な機能 を備えることは確認できたが、実際に使用するために閾値の制御等に関して、より使 いやすくするために修正が必要であることも明確になった。

表 3.1.2-1 開発したフロントエンド集積回路の諸元(左の写真は対応する集積回路の写 真であり、大きさは1 mm 角である。)

高信号対雑音比信号処理集積回路(Nuk-CSA)

400	And A Residenties	Contraction of	
書書		Hall Bar	
1金 建樹	fer Mert mellen		
B B B	STREET, BALLARD		2
12 發展	CONTRACTOR OF CALL RESIDENCE		
建設局	THE REPORT OF THE PARTY OF THE		22
1 H H	[1] [1] [1] [1] [1] [1] [1] [1] [1] [1]		
옷물림	(1220年)美を12年1月8日		
称目的	STORE FOR THE PARTY OF THE PART		
包括第	The statistic		쥗
12 Bet	Contraction of the second	金融 司任	
1	and a state of the		

NuK-CSA					
Туре	charge sensitive				
Peaking time	50nsec(t _w ~100nsec)				
Noise	~1500 e @Cdet=5pF				
S/N	~350@Cdet=5pF				

高速応答信号処理集積回路(Nuk-TIA)

	TX BO		1200
	X	-	100
-8	E Bie	- month	
-8			
- 11	- AB-		
	68	-	
	- 66	-	
	Line .	1.1	
-			
Contraction of the			

NuK-TIA						
Туре	current sensitive					
Peaking time	<2nsec@Cdet=5pF					
Noise	0.3uA@Cdet=5pF					
S/N	40@Cdet~5pF					



Nuk-CSA 評価ボード



Nuk-TIA 評価ボード



Nuk-CSA 評価セットアップ 図 3.1.2-1 フロントエンド集積回路の電気的特性を評価するために開発したモジュールお よびそれぞれの評価セットアップ時の写真

3.1-8 - 42 - 特にγ線バックグラウンドは深い未臨界状態の判定に影響を与えるため、中性子信号 対γ線バックグラウンド信号比を1以上にする必要があることは、すでにわかっている ため(令和3年度成果報告書3.3.2.4を参照)、できるだけ1検出素子当たりのγ線バッ クグラウンド信号を0.001 count/sec 未満に抑えることが重要となる。この測定に関し ては、3.3.2項で述べるが、1kGy/hにおいて、ダイヤモンド検出素子をつけたどちらの フロントエンド集積回路も予定通りの性能を出し、γ線バックグラウンド除去性能は十 分であることが実証された。



図 3.1.2-2 フロントエンド集積回路の電気的特性(左が Nuk-CSA、右が Nuk-TIA の特性である。Nuk-CSA はアナログモニターを備えているためノイズは直接測定を行った。 Nuk-TIA は出力パルスが 100 MHz 帯域を超えているため消費電力を抑えるためにアナロ グモニター出力は備えていない。そのためデジタル出力用コンパレータの閾値を変化さ せることでノイズを評価した。その結果設計仕様と一致していることが確認できた。)

- 3.1.3 バックエンド集積回路開発(令和2年度~令和4年度)
 - (1) 令和3年度までの概要令和2年度には1 MGyまで動作実績のあるプロセスを使用し中性子検出器用バックエ
 - ンド集積回路を設計した。

ダイヤモンド中性子検出素子のデジタルデータを数十 m 離れた未臨界解析用コンピュ ータへ転送するための高速デジタル信号転送素子は、耐放射線性能が最も必要とされる ためヒーリング機構を持ったトランジスタを使用し設計した。

令和3年度には1 MGy まで動作実績のあるプロセスを使用し中性子検出器用バックエンド集積回路を開発し動作確認した。また、フロントエンド集積回路との接続試験を行い、評価結果を踏まえ改良し再試作評価を行った。

装置とコンピュータを接続するための長距離データ転送回路の評価を行った。 また、フロントエンド集積回路とバックエンド集積回路の評価モジュールを開発し評価 を行った。

(2) 令和4年度実施内容および成果

令和 3 年度までに明らかになった改良点を基にデザインを決め集積回路を開発した (開発した集積回路の写真を図 3.1.3−1 に示す)。また北大と連携しシステム評価(3.3.2 ~3.3.4 参照のこと)および放射線評価(3.3.1 を参照のこと)を行った。

デジタル機能の評価確認完了だけでなく、より厳しい環境でもロバストに動作させる ため、1 MGy を超える放射線耐性を持たせるための集積回路の工夫を取り入れ、かつ 132 Mbps で 70 m の長距離高速転送が可能であることを実証した。(図 3.1.3-2)

詳細を以下に示す。



図 3.1.3-1 開発したバックエンド集積回路群の写真(それぞれの機能概要については、表 3.1.1-1 にまとめられている。耐放射線等の試験結果等は 3.3 を参照されたい。)

デジタル集積回路の評価は、コンピュータからの制御が安定して行えるか、またその 制御をもとに正しいデジタルデータがコンピュータに送信されているかを、Tx と Rx 間 のケーブル長を2mおよび70mの2種類で行った。具体的には、フロントエンド集積回 路にテスト用のレジスタを実装してあり、そのレジスタに値を書き込みその出力をコン ピュータで読み取るという作業を繰り返した。その結果 10000 回複数のパターンで評価 を行い誤動作は0回であった。

中性子検出器とコンピュータ間の安定した通信機能の維持は必須であるため、バック エンド集積回路群の評価と並行して Tx-Rx 間の通信安定度を向上させるための改良およ び評価を行った。 放射線耐性については、3.3.1 で詳細を述べるが、3 MGy まで照射してもデジタル機能 に問題は見つからなかったが、さらに通信の安定度を増すため、照射量が増えるにした がって減少するデジタル信号振幅を補償できるように回路構成を修正した。これによっ て3 MGy を大きく超えて使用できるようになるため通信安定度は十分に確保できている と考える。

長時間転送評価時に 30 m以上でエラーを確認したため、Rx 側(コンピュータ側)に イコライザを挿入し改良を行った。その結果 70 m でも長時間にわたって通信エラーが 出ないようなシステムを構築できた。



図 3.1.3-2 132 Mbps、70 mデータ転送の評価について(長時間転送評価時に 30 m以上でエ ラーを確認したため、Rx 側(コンピュータ側)に対策を施し 70 m でも長時間にわたって通 信エラーが出ないようなシステムに改良した。)

- 3.1.4 まとめ
 - (1) スケーラブルシステム開発

臨界近接監視システムで使用する中性子検出器のデザインを複数行い、どのような環 境でもモジュールの形状を変えることで対応できるシステムを開発し、全体動作を確認 した。

当初予定にはなかった6 cm 径中性子検出器(遮蔽不要:重量約1 kg)のモックアップ を開発し、中性子検出機能のデモンストレーションを行い、予定通りの性能を実現して いることを確認した。 (2) フロントエンド集積回路開発

1 kGy/hの γ 線環境下でも使用可能なフロントエンド集積回路 (Nuk-CSA)を開発した。 現状 γ 線環境が不明であるため、当初予定になかったが、より高 γ 線照射環境下でも使 用可能な別のフロントエンド集積回路 (Nuk-TIA)も開発し動作を確認した。積算照射量 1 MGy で動作していることも確認した。

(3) バックエンド集積回路開発

2 種類のデータ収集制御用デジタル集積回路(CC、AC)と中性子検出器からのデジタル 信号をコンピュータへ転送するための送受信集積回路(Tx、Rx)を開発し、70 m ケーブ ル長 132 Mbpsの速度での良好なデジタル転送動作を確認した。また過酷環境下で通信機 能の信頼性を増すために改良を施した。 3.2 ダイヤモンド中性子検出素子の開発(令和2年度~令和4年度)

ダイヤモンド素子については二つの R&D を軸に開発を進めた。一つ目は性能に優れ、動作 実績のある自立型ダイヤモンド素子をベースとした中性子検出素子の開発で、もう一つは量 産性に優れた積層型ダイヤモンド素子の開発である。表 3.2.1-1 にそれぞれの構造図ととも に特徴をまとめた。

表 3.2.1-1 自立型ダイヤモンド検出素子および積層型ダイヤモンド検出素子の構造 とその特徴

	Sch Ohmi i-layer (30-50μm) Ohmic contact	c contact p-layer	<u>sch</u> i-layer 絶縁性基板
	自立型	積層	壐
有感層厚さ	30-50µm	コン	バータに合わせて調整可能
	※上記の膜厚はハンドリング、自立化プロセ	3µn	n (¹ºB₄Cコンバータ)
	スでの割れを防ぐため必要	20µ	m (『LiFコンバータ)
純度	\bigcirc (N_a - N_d : 10 ¹¹ - 10 ¹² cm ⁻³)	0($N_a - N_d$: >10 ¹³ cm ⁻³)
	※100Vで数百μm空乏層が拡がると仮定すると	*C-V	から評価
基板	HPHT IIa基板(> 150万円/枚)	CVD	基板/HPHT Ib基板 (数万円/枚)
	繰り返し使用可能	10	限り
プロセス	>2週間	3日	
	成長:4,5日	成長	:1日
課題	・歩留まり	・歩	留まり
	(基板からの分離やハンドリングによる割れ)	(多	·結晶粒によるリーク)
	ボンディングが困難である。	• 1	Gy/Hr下で使用できるか要検証

3.2.1 自立膜型ダイヤモンド中性子検出素子の開発(令和2年度~令和4年度)

(1) 令和3年度までの概要

令和2年度にはHP/HT IIa 型単結晶ダイヤモンド基板等を購入し、イオン注入・リフトオフ法により検出素子用ダイヤモンド単結晶自立膜を製作した。製作した自立膜の表面構造欠陥を表面構造評価法および透過型偏光顕微鏡法、X線回折法により評価した。評価結果は北大にフィードバックし、成長技術の改善を検討した。

6 mm 角の HP/HT IIa 型単結晶ダイヤモンド基板を住友電工から購入した。産総研において IIa 型基板に対しイオン注入を行い、北大でホモエピタキシャル成長、再度産総研で リフトオフを行った。結晶評価は産総研、北大で協力して行った。

令和3年度には前年度に引き続き HP/HT IIa 型単結晶ダイヤモンド基板等を購入し、 イオン注入・リフトオフ法により検出素子用ダイヤモンド単結晶自立膜を製作した。検 出素子用ダイヤモンド単結晶自立膜の結晶性は、カソードルミネッセンス法によって評 価した。検出器のチャージアップ耐性の改善を目的として成長層の基板側層の除去を試 みた。2次イオン質量分析法 (SIMS) を用いて検出素子用ダイヤモンド単結晶自立膜の残 留不純物を評価し、チャージアップの要因を調査した。γ線影響低減の試みとして、エ ネルギー補償型検出器を試作した。これらの検出素子に対し B₄C を付加することで中性 子検出素子を試作した。

製作したダイヤモンド単結晶自立膜に対し、カソードルミネッセンス法による評価後、 検出器を製作し 3.3 で行う実験に供した。酸素添加によりホウ素不純物が低減する効果 を SIMS を用いて確認した。エネルギー補償型検出器ならびに B₄C を付加した中性子検出 素子の試作も行い、²⁵²Cf 線源中性子を用いた実験により動作を確認した。

(2) 令和4年度実施内容および成果

令和3年度に引き続き HP/HT IIa 型単結晶ダイヤモンド基板等(図3.2.1-1)を購入し、 イオン注入・リフトオフ法により検出素子用ダイヤモンド単結晶自立膜を製作した(図 3.2.1-2)。検出素子用ダイヤモンド単結晶自立膜の結晶性はカソードルミネッセンス法に よって評価した(図3.2.1-3)。電荷キャリア輸送特性向上によるチャージアップ対策なら びに検出器製作時の加工を念頭に置いた表面平滑化を目的として、酸素添加を含め合成条 件を探索した(表3.2.1-2~表3.2.1-3,図3.2.1-4~図3.2.1-5)。検出器のチャージア

ップ耐性の改善を目的として、成長層の基板側層の除 去を試みた(図 3.2.1-6)。これらの検出素子に対し B₄C 等を付加することで中性子検出素子を試作した(図 3.2.1-7)。また、中性子検出効率ならびに信号雑音比 向上を目的として微細加工技術の導入を試みた(図 3.2.1-8~図 3.2.1-9)。

6 mm 角以上の大型ダイヤモンド基板上への均一な ダイヤモンド合成を合成条件の改善により実現した (図 3.2.1-10)。酸素添加を含めた条件で中性子検出素 子用ダイヤモンド単結晶自立膜を製作し、酸素添加に よる表面の平滑化を実証した(図 3.2.1-5)。製作した 自立膜に電極を形成し(図 3.2.1-11)、自立膜型ダイヤ モンド中性子検出素子の動作を実証した(図 3.3.3-2)。 詳細を以下に示す。

HP/HT IIa 型単結晶ダイヤモンド基板(図 3.2.1-1)を住友電工より購入し、イオン注入・リフトオフ法により検出素子用ダイヤモンド単結晶自立膜(図 3.2.1-2)を複数枚製作し中性子検出素子開発に供した。

検出素子用ダイヤモンド単結晶自立膜の結晶品質は カソードルミネッセンス法によって評価した(図 3.2.1-3)。測定の結果から、自由励起子再結合発光(FE 発光)を示す波長が235 nmのところに鋭く強度の高い ピークが現れており、結晶品質が高い結晶であると考 えられる。また、235 nm以外の波長には目立ったピー クが見られないことから、結晶中の不純物や構造欠陥 の含有量も少ないと考えられる。



図 3.2.1-1 購入した HP/HT IIa 型単結晶ダイヤモンド基 板



図 3.2.1-2 製作した検出素子 用ダイヤモンド単結晶自立膜 のレーザー顕微鏡像例

3.2-2 - 48 - 電荷キャリア輸送特性向上によるチ ャージアップ対策ならびに検出器製作 時の加工を念頭に置いた表面平滑化を 目的として、酸素添加を含め合成条件を 探索した。電荷キャリア輸送特性の向上 に関して、表 3.2.1-2 に示すように酸素 添加濃度を 0%から 0.8%まで変化させた 条件で検出素子用ダイヤモンド単結晶 自立膜合成を行った。その後、合成した 各試料の電荷キャリア輸送特性の評価 を行ったところ酸素添加濃度低い 0₂-0, 0₂-0.2 試料は α 線の信号は検出可能で あったが、分析可能なスペクトルが取得 できず、電荷キャリア輸送特性が低いこ



図 3.2.1-3 製作した検出素ナ用タイヤモン ド単結晶自立膜のカソードルミネッセンス 法による測定例(*印のピークは235 nmの ピークの2倍波と3倍波)

とがわかった。酸素添加濃度が高い 0_2 _0.5, 0_2 _0.8 試料の電荷キャリア輸送特性を示す各種値を表 3.2.1-3 に示す。これより電荷収集効率(CCE)とエネルギー分解能は優れた値を示したが、 $\mu \tau$ 積に関しては低い値となっている。以上から酸素添加は電荷キャリア輸送特性向上に寄与するが一部の指標においては効果が見られなかった。

試料名	CH ₄ /H ₂ (%)	O ₂ /H ₂ (%)	圧力 (Torr)	プラズマ 出力(W)	合成時基板 温度(℃)	合成膜厚 (µm)	成長率 (µm/h)
O ₂ _0	1.0	0	110	835-900	870	93.3	1.94
O ₂ _0.2	1.0	0.2	110	1035	870	35.7	0.83
O ₂ _0.5	1.0	0.5	110	780	870	43.5	0.56
O ₂ 0.8	1.0	0.8	110	670-770	870	24.8	0.26

表 3.2.1-2 酸素添加濃度を変化させた各試料の合成条件

表面平滑化に関して酸素添加無しの試料と有りの試料のレーザー顕微鏡像を図 3.2.1-4 に示す。また、これらの試料の合成条件を表 3.2.1-4 に示す。各試料の表面粗さを比較す ると酸素の添加により、表面平滑化を行えていることがわかる(図 3.2.1-5)。

表 3.2.1-3 02_0.5, 02_0.8 試料の電荷キャリア輸送特性を示す各種値

試料名	CCE	CCE	ΔE/E	ΔE/E	μī積	μī積
	正孔	電子	正孔	電子	正孔	電子
O ₂ _0.5	99.96±	100.22±	0.329±	0.334±	(5.1±0.2)×	(7.1±1.7)×
	0.16%	0.17%	0.033%	0.033%	10 ⁻⁵ cm ² /V	10 ⁻⁵ cm ² /V
O ₂ _0.8	99.94±	100.51±	0.353±	0.380±	(3.5±0.1)×	(2.1±0.1)×
	0.18%	0.19%	0.032%	0.034%	10 ⁻⁵ cm ² /V	10 ⁻⁵ cm ² /V



図 3.2.1-4 酸素添加無しの試料と有りの試料のレーザー顕微鏡像

表 3.2.1-4 各試料の合成条件							
試料名	CH ₄ /H ₂ (%)	O ₂ /H ₂ (%)	圧力 (Torr)	プラズマ 出力(W)	合成時基板 温度(℃)	合成膜厚 (µm)	成長率 (µm/h)
酸素添加無し①	0.2	0	110	842	870	61.5	0.39
酸素添加無し②	0.2	0	110	820	870	73.8	0.51
酸素添加有り①	1.0	0.5	110	740	870	67.8	0.59
酸素添加有り②	1.0	0.5	110	689	870	69.7	0.61



図 3.2.1-5 各試料の表面粗さ

検出器のチャージアップ耐性の改善を目的として、成長層の基板側層の除去を試みた。 ほぼ同一の検出器性能を持つ自立膜2枚を用いて、片方の成長層の基板側層をイオンビー ムエッチング(IBE)により、10 μm除去した。その後、同一の条件で検出器を作製し、約 260 Gy/h でのγ線線量率環境においてα線スペクトルを測定することで検出器のチャー ジアップ耐性の評価を行った(図3.2.1-6)。IBE 無しのダイヤモンド検出器と IBE10 μmの ダイヤモンド検出器を比較すると、IBEを10 μm行った検出器の方がγ線由来と考えられ る低エネルギー側の信号量が低下していることから、成長層の基板側層の除去により検出 器のチャージアップ耐性を改善できることがわかった。



図 3.2.1-6 γ線線量率環境における各検出器のα線スペクトル

これらの検出素子に対し⁶LiF を付加 することで中性子検出素子を試作した (図 3.2.1-7)。⁶LiF 膜は焼結により作 成したのち、研磨を行い 150 µm から 200 µm 程度まで膜厚を減らした。膜厚が 100 µm 以下では、⁶LiF 膜が割れやすくなる ため研磨は困難であった。一方膜厚が厚 くなると中性子感度が落ちるため、今後 膜厚の最適化が必要になる。

当初は中性子コンバータとして¹⁰B₄C も検討していたが、令和3年度のシミュ レーションおよび実測結果を含めて検



図 3.2.1-7⁶LiFを自立膜ダイヤモンド検 出素子に実装した中性子検出素子

討し、自立膜ダイヤモンド素子に対しては[®]LiFを使用することを決定した。

一方 ¹⁰B₄C は積層膜ダイヤモンド素子の中性子コンバータとしては有効であるため、引き続き中性子検出効率ならびに信号雑音比向上を目的として微細加工技術の導入を試みた。Ni によるエッチングと反応性イオンエッチング (RIE) による 2 種類の手法による微細加工技術の導入を行った。Ni によるエッチング結果を図 3.2.1-8 に示す。これは 2 μ m ~50 μ m の線幅でそれぞれエッチングを行った結果である。エッチングは台形型に行われており、エッチング深さは 8.5 μ m 程度であった。この結果から Ni エッチングでは 5 μ m の線幅でのエッチングが適切であると考えられる。

RIE によるエッチング結果を図 3.2.1-9 に示す。これ Ni エッチングの結果を踏まえて 5 µm の線幅でエッチングを行った結果である。エッチング深さは 10.2 µm 程度であった。



図 3.2.1-8 Ni エッチングの結果

Ni エッチングと比較するとより長 方形に近い形でエッチングができて いる。以上のように2種類の手法によ るダイヤモンドの微細加工技術の導 入を行った。

6 mm 角以上の大型ダイヤモンド基 板上への均一なダイヤモンド合成を 合成条件の改善により実現した(図 3.2.1-10)。



図 3.2.1-9 RIE エッチングの結果



図 3.2.1-10 (左) 均一に合成が行えなかった試料、(右) 均一な合成を行えた ダイヤモンド

酸素添加を含めた条件で中性子検出素子用ダイヤモンド単結晶自立膜を製作し、製作した自立膜に Al 電極をと TiC/Au 電極を形成した(図 3.2.1-11)。このダイヤモンド検出素子複数枚を使用し、6 cm 径中性子検出器内のモジュールへ実装しモックアップの評価を行った。



図 3.2.1-11 電極を形成した自立膜(左) A1 電極、(右) TiC/Au 電極

- 3.2.2 CVD 単結晶ダイヤモンドの自立膜型ダイヤモンド合成基板への利用可能性検証(令和2年度~令和3年度)
- (1) 令和3年度までの概要

令和2年度にはCVD ダイヤモンド単結晶、HP/HT Ib 型単結晶ダイヤモンドを購入し、 検出素子用ダイヤモンド合成用基板としての使用を試みた。

EDP 社等から入手した CVD ダイヤモンド単結晶等にホモエピタキシャル成長を試みた。

令和3年度には前年度に引き続き CVD ダイヤモンド単結晶等を購入し、検出素子用ダイヤモンド合成用基板としての応用を試みた。中性子検出器としての性能向上の試みとして、微細加工技術を導入した。

購入した CVD ダイヤモンド基板上にダイヤモンドをエピタキシャル成長し、成長層に 対するカソードルミネッセンス測定を行った。微細加工技術では Ni 加工法および反応性 イオンエッチング法の適用可能性検討も進めた。

> **3.2-7** - 53 -

- 3.2.3 積層型ダイヤモンド中性子検出素子の開発(令和2年度~令和4年度)
 - (1) 令和3年度までの概要

令和2年度には単結晶モザイクダイヤモンド基板およびヘテロエピタキシャルダイヤ モンド基板上にフィラメント CVD 法により超高濃度ホウ素ドープダイヤモンド膜をエピ タキシャル成長し積層ダイヤモンドを形成した。

令和3年度には前年度、北大と産総研と協力製作した積層型ダイヤモンド試料から検 出素子を製作した。検出素子用に5mm角以上の大型ダイヤモンドを用いた。

産総研において積層型ダイヤモンド試料を合成し、北大において性能評価を行った。5 mm 以上の大型のダイヤモンド基板を使用したことによる影響かは不明であるが、漏れ電流が大きくなるケースも見られた。

(2) 令和4年度実施内容および成果

量産性が期待できる積層型ダイヤモンド検出素子の性能検証(図 3.2.3-1~図 3.2.3-4)を行った。

エピタキシャル成長時の欠陥のうち、素子特性を劣化させる「キラー欠陥」の解析に 成功し、キラー欠陥を避けて素子試作することで大面積電極でも性能を損ねずに電極形 成することが可能となった(図 3.2.3-3)。項目 3.1-2 で開発した集積回路と接続し信号 読み出し動作を確認し(図 3.2.3-6)、600 Gy/h での安定動作も確認できた(図 3.3.3-5)。詳細を以下に示す。

臨界監視用中性子検出器には検出信号を改善するために多数の検出素子を搭載する必要がある。現状の超高品質検出素子製造プロセスを用いた場合、量産化のためには装置台数を増やす必要があり、コスト的に非現実的である。このため、将来的な検出素子の量産化と低コスト化を目的として積層型検出器の試作と評価を行った。

疑似縦型検出素子の試作のため、基板にオーミック層となる p+コンタクト層、i 型検出 層を CVD (Chemical Vapor Deposition) 法にて積層成長させた。p+コンタクト層は熱フィ ラメント法による FCVD (Hot Filament CVD) 法を用いた[3.2.3-1]。i 型検出層はマイク ロ波 CVD 法を用いている。前年度までに報告した、積層型中性子検出素子では異常粒子が 素子のリーク電流を増加させることが問題となった。これを低減するため、基板はオフ角、 オフ方向の制御[3.2.3-2] された高圧合成 Ib 型単結晶ダイヤモンド基板を用いた。基板は <110>方向に、2~3°のオフを持ち、窒素がドープされた半絶縁性である。基板サイズは 3 mm×3 mm、厚さ 0.4 mm であった。

微分干渉顕微鏡で撮影した結晶成長後の表面の様子を図 3.2.3-1(a)-(b)に示す(疑似縦 型検出素子の構造模式図は表 3.2.1-1 の右側の図を参照のこと)。試料の大部分で平滑な 膜が得られたが、オフ角制御基板を用いても、10~10² cm⁻²程度のダイヤモンドの異常粒 子が残存した。基板温度を適切に保った場合、3 次元的な成長は伴わず、異常粒子を起点 とし、ステップフロー成長が進行する方向に尾を引くような表面形態が見られた。図 3.2.3-2 には成長層の 2 次イオン質量分析(SIMS)プロファイルを示す。水素、窒素、シ リコン濃度は測定下限であった。ホウ素濃度は p+型コンタクト層で 8×10¹⁸ cm⁻³、i型検 出層で 1×10¹⁵ cm⁻³であった。



図 3.2.3-1 微分干渉顕微鏡で撮影した結晶成長後の表面の様子

次にエピタキシャル成長し た基板に2 mm 角相当の面積を 持つ疑似縦型検出素子を試作 した。異常成長粒子は素子に対 して電気特性を劣化させるキ ラー欠陥でありリーク電流を 上昇させることが報告されて いる[3.2.3-3]。このため、検出 素子側のショットキー電極は 異常成長粒子を避けるように 設計した特殊製造プロセスを 用いた電極(素子 A) と円形電 極(素子B)の2種類の素子を 作製した。図 3.2.3-3 に試作し た素子の顕微鏡像を示す。ま た、図 3.2.3-4 には各素子にお ける電流電圧特性を示す。(a), (b)には角素子の順方向特性 を、(c),(d)には検出器動作を 想定し、50V までの逆方向特性 を示した。エピ欠陥を回避しな





い電極構造を持つ素子 B でも±5 V の電圧領域では良好な整流特性が得られた。数+ V 以 上の電圧を印加した場合、特殊製造プロセスを用いて異常成長粒子欠陥を避けた素子 A で はより高い電界強度で低リーク電流が維持されており、良好な障壁が得られていることが わかる。中性子検出素子として利用する場合、印加電圧は中性子検出に必要な空乏層幅と 不純物濃度によって決まる。B₄C 中性子コンバータから放出された荷電粒子の飛程は 3 µm 以下である。不純物濃度 1×10¹⁵ cm⁻³のダイヤモンドでは、上記の空乏層幅を達成するの に必要な印加電圧は約 15 V である。したがって、今回のケースでは、エピ欠陥を避けな い構造の素子 B であってもサブ nA オーダーにリーク電流を抑えながら、中性子検出に必 要な空乏層幅を持たせることが可能である。一方で、エピ欠陥回避が逆方向のリーク電流 増加を抑制することから、量産性の向上、製造プロセスの簡易化のためには、異常粒子フ リーの積層構造の実現と i 型検出層の不純物濃度の低減が課題となる。



図 3.2.3-4 素子 A, B における電流電圧特性((a), (b)には角素子の順方向特性 を、(c), (d)には検出器動作を想定し、50 V までの逆方向特性を示した。)

3.2-10 - 56 -

また、キラー欠陥である上記エピ欠陥以外の欠陥の影響について、EBIC(電子線励起電 流測定法)を用いて評価を行った。疑似縦型素子において加速電圧を評価した。EBIC はフ ランス国グルノーブルに所在する CNRS/Institute Neel/University Grenoble Alpes の設 備を用いて行った。EBIC は加速電子線により半導体材料中に電子正孔対を形成し、微小プ ローブにて生成電子正孔対を収集する手法である。なお、加速電子線は収束させて所望の 位置に照射することが可能であるため、局所的な電子正孔対収集効率の差を評価すること が可能である。評価した疑似縦型中性子検出器素子にはキラー欠陥であるエピ欠陥が含ま れていない図 3.2.3-3 における素子 A および B の 1/400 の有感面積にあたる直径 100 µm の小型素子を選定した。図 3.2.3-5(a)~(c)にはそれぞれ、小型疑似縦型ダイヤモンド中 性子検出器素子の SEM 像、印加電圧 0 V における EBIC 像、印加電圧 10 V における EBIC 像を示す。EBIC 像においては白色強度が強い場合に高い電荷収集効率(CCE)が得られて いることを示し、白色強度が弱い箇所(黒色箇所)にて低い CCE が得られていることを示 す。図 3.2.3-5(b)に見られる通り 0V 印加状態で縦に直線状の黒い線が入っていることが 見られる。これは研磨欠陥によるものと考えられ、結晶成長する基板の表面に研磨欠陥が 存在し、これが CCE の劣化原因であることを示している。なお CCE の劣化度合いは研磨欠 陥が存在しない箇所と比べて3~10%程度である。また一部の欠陥ではバイアス印加に伴い CCEが100%を超えるものが見られている。これは結晶欠陥に不純物が高濃度にドープされ、 この箇所で電界が上昇しキャリア増倍が起こることで CCE が 100%を超える状態になって いると考えられる。ダイヤモンド中性子検出器素子における欠陥の影響を示す上記知見は これまで検証されておらず、世界で初めての検証結果である。



図 3.2.3-5 疑似縦型中性子検出素子の研磨欠陥による CCE 劣化の様子

最後に、素子 A を用いて、放射線センサーとしての動作確認を行った。動作確認には中 性子コンバーターから放出される荷電粒子の代替として、密封線源²⁴¹Am からのα線を用い た。検出素子と放射線計測用の市販回路および KEK の開発した耐放射線集積回路と組み合 わせて測定を行った。検出器へのバイアスはリーク電流を低く抑えるため5 Vとした。各 回路と組み合わせて取得した信号波形を図 3.2.3-6 に示す。積層型検出素子への荷電粒子 入射に対応した信号波形が得られた。市販アンプを使用した場合、信号の立ち上がり一立 ち下がりに要する時間が 2 μs であるのに対し、開発した集積回路 (Nuk-CSA) と組み合わ せた場合、0.4 μs とより高速に波形が取得できることがわかった。



図 3.2.3-6 信号処理回路と組み合わせて取得した信号波形(検出器へのバイアスはリーク電流を低く抑えるため5Vとした。)

3.2.4 検出素子の基板実装技術の開発(令和3年度~令和4年度)

(1) 令和3年度までの概要

令和2年度には基板実装に関わる技術情報の収集とダイヤモンド素子に対する適用可 能性を検討した。

ダイヤモンド素子をモジュール上へ実装し信号処理集積回路への接続評価と、機能確認を行った。

令和3年度には基板実装に関わる技術情報の収集を継続し、ダイヤモンド素子に対す る適用可能性を検討した。検出素子用ダイヤモンドの平滑化技術の開発として、産総研 に3.2.1で合成したダイヤモンド単結晶を供した。平坦化が可能であるかスカイフ処理、 イオンビーム処理による加工を行い調査した。

γ線照射試験結果等に基づき、北大・高エネ研で協議し、検出素子の仕様とモジュー ル上への実装に関する検討を進めた。基本的にエネルギー補償型を使用しなくてよい目 途が立ったことと、p+層を使う場合は中性子・荷電粒子変換物質の付加は片面となるこ とから、検出効率と必要検出素子数の検討なども議論した。また、平坦化が可能である かを評価するため、成長ラフネスの大きいダイヤモンドにイオンビーム処理による加工 を行い調査した。

(2) 令和4年度実施内容および成果

令和3年度の結果に基づき、中性子検出素子、フロントエンド集積回路、バックエンド 集積回路を実装するモジュールを製作(図3.1.1-3~図3.2.1-4)し、3.3で使用する計測 要素の製作に供した。

自立型ダイヤモンド素子の平 坦化前でも実装可能な印刷技術 および伝導性ペーストを使用し た製造プロセスを改良し(図 3.2.4-1~図 3.2.4-3) 量産化プ ロセスの選択肢を広げた。また、 この製造プロセスを使用し2枚 の実機プロトタイプモジュール に検出素子およびダイヤモンド 素子をそれぞれ2枚(計16チャ ンネル)実装し(図 3.2.4-3)、 すべて動作していることを確認 した(図 3.2.4-4)。実機を製造 する上で本プロジェクトの先の 一つの大きなマイルストーンを 達成できた。



図3.2.4-1 印刷装置で製作した実装評価用の金属 配線がのったシートの写真(金色に光っている部分 が金属配線である。今回は手作業で実装を行い、実 装手順の問題点を洗い出すため、検出器バイアス用 の配線のみ評価を行っている。)

自立膜ダイヤモンド検出素子は表面の凹凸によりモジュールへの実装が困難であるため、3.2.1 で述べた酸素添加を行ったダイヤモンド合成プロセスの研究を行っているが、 平坦化を行わなくても適応できる実装技術について研究開発を行った。今まで使用してき た既存技術としては、ワイヤーボンディングによる手法とインジウムなど軟らかい金属を 使用した接続方法があるが、素子が 40 µm で薄いため強い圧力がかけられず、かつ中性子 コンバータを挟み込むときに金属ワイヤーの強度が低いこと、取り扱いが容易ではないこ とにより、検出素子実装技術として選択が困難であった。

そこで表 3.2.4-1 に示す特徴を持つ印刷技術[3.2.4-1], [3.2.4-2], [3.2.4-3]で製作し た金属配線と導電性接着剤の使用を試みた。印刷装置で製作した実装評価用金属配線がの ったシートの写真を示す(図 3.2.4-1 参照)。実装時はこの金属配線をシートから剥がし、 導電性接着剤にてセンサーおよびフロントエンド集積回路との電気的接続を行う。ここで この金属配線の放射線耐性についても調査し、表 3.2.4-2 の結果となり、想定する放射線 環境下でも安定して使用できることを確認した。

実装技術として十分に使用できるかについては、フロントエンド集積回路が実装された モジュール(図3.1.1-3上図DSAモジュールの写真参照)2種類に2枚ずつ(計16チャン ネル)の自立膜ダイヤモンド素子を実装し、信号が読み出せるかどうかを確認した。実装 に使用した手作りの治具を図3.2.4-2に示す。量産に備えできるだけ簡単に使用でき、正 確に位置合わせが可能な治具を開発し実際に実装した。検出素子が実装前後のモジュール 写真を図3.2.4-3に示す。この写真では、²⁴¹Am α 線源を使用し検出素子の動作を確認する ために、中性子コンバータはまだ実装していない。²⁴¹Am α 線源を使用しすべてのチャンネ ルのアナログ出力を確認した。図3.2.4-4 にその例を示すが、すべてのチャンネルから信 号を確認できた。これにより本実装技術を使用することで、現状の自立膜ダイヤモンド素 子を開発したモジュールに問題なく実装できることが示された。このモジュールを使用し、 中性子コンバータを4 チャンネル分実装し中性子検出試験を行った結果は3.3.4 で述べ る。

表 3.2.4-1 実装に使用した 印刷技術の特徴

今回使用した印	刷技術の特徴
線幅 50 μ	um最小幅
厚さ 10µm	まで調整可能
位置精度	bμm程度
200µm段差	でも配線可能

表 3.2.4-2 配線抵抗値の照射量依存性

積分照射線量	照射前抵抗值	照射後抵抗値
0.1 MGy	0.25Ω	0.25Ω(変化なし)
0.3 MGy	0.25Ω	0.25Ω(変化なし)
5.63 MGy	0.25Ω±0.010Ω	0.36±0.017Ω



図 3.2.4-2 実装に使用した治具の写真



図 3.2.4-3 検出素子実装前後の DSA モジュール写真



図 3.2.4-4 ダイヤモンド素子を DSA モジュールに実装し α 線で動作確認を行ったときの 写真

- 3.2.5 まとめ
 - (1) 自立膜型ダイヤモンド中性子検出素子の開発
 - 6 mm 角以上の大型ダイヤモンド基板上への均一なダイヤモンド合成を合成条件の改善 により実現した。この大型ダイヤモンド基板を使用し複数の電極を持った検出素子を製 作し、本課題で使用可能な検出素子が開発できたことを確認した。また中性子コンバー タとして⁶LiF をこの検出素子上にのせ中性子検出素子を複数個完成させ評価を行った (評価結果等は次項で述べる)。またプロセスを工夫することで1.5 kGy/h でも安定な動 作をするダイヤモンド検出素子の開発に成功した(次項で述べる)。
 - (2) CVD 単結晶ダイヤモンドの自立膜型ダイヤモンド合成基板への利用可能性検証 自立膜ダイヤモンド素子量産のため、CVD 単結晶ダイヤモンド基板上にダイヤモンド をエピタキシャル成長し、成長層に対するカソードルミネッセンス測定を行い、CVD 単 結晶ダイヤモンド基板が自立膜型ダイヤモンド合成基板として検出素子を開発できる性 能を持つことを実証した。
 - (3) 積層型ダイヤモンド中性子検出器素子の開発
 - 積層型ダイヤモンド薄膜を安価なダイヤモンド基板上に製造し、検出素子として動作 することを確認した。この研究中に開発した技術は特許出願中である。開発した検出素 子と本課題で開発した信号処理回路を接続し放射線検出が可能であることを実証した。 さらに高γ線環境下での試験を行い 600 Gy/h での動作が確認でき、γ線バックグラウン ドに強いことを実証した。今後の研究で1 kGy/h以上で安定動作が可能な素子を開発し ていく。
 - (4) 検出素子の基板実装技術の開発
 - 実装時に必要と思われてきた自立型ダイヤモンドの平坦化を必要としない実装技術と して、印刷技術および伝導性ペーストを使用した製造プロセスを開発し検出素子搭載モ ジュール量産化プロセスの選択肢を広げた。また、この製造プロセスを使用し2枚の実 機プロトタイプ基板に検出素子およびダイヤモンド素子を複数枚実装しすべての素子の 信号を読み出すことに成功した。

3.2-15 - 61 -

- 3.3 検出素子、計測要素の性能評価と臨界近接監視手法の検討(令和2年度~令和4年度)
 3.3.1 検出素子の性能評価(令和2年度~令和3年度)
 - (1) 令和3年度までの概要

令和2年度には3.2.1、3.2.3で作製したダイヤモンド検出素子の性能を評価した。さらに ¹⁰B₄C を使用した中性子検出素子の性能評価に必要な中性子照射方法の検討および 照射用治具の準備を行った。

北大で製作したダイヤモンド検出素子に対して、α線により性能を評価した。さらに名 大⁶⁰Co 照射場で 100 Gy/h までの照射影響を評価した。

JAEA 等において、中性子検出性能の評価に必要な中性子照射方法を検討・準備し、標準 熱中性子校正場を利用してダイヤモンドを用いた中性子検出素子が中性子を検出するこ とを確認した。

令和3年度には3.2で作製したダイヤモンド検出素子の性能を評価した。

製作した検出素子に対して北大において I-V、C-V 特性ならびに α 線を使用した電荷収集 効率等を評価した。前年度、JAEA の協力に基づき検出効率を評価した検出器を使用して ²⁵²Cf 線源中性子を使用し簡易的な検出効率評価を可能とした。 γ 線照射試験を名大 ⁶⁰Co 施設で名大・北大が共同して行い、イオンビームエッチングや合成条件の最適化により 1 kGy/h に対応可能な目途を得た。

- 3.3.2 集積回路等の耐放射線性試験(令和2年度~令和4年度)
 - (1) 令和3年度までの概要

令和2年度にはX線照射試験の準備ならびに環境を整備した。

令和3年度には3.1から供される試料に対してX線を照射した。 北大が有するX線照射設備を使用し、高エネ研で試作した評価試料に対して照射試験を 行い、課題抽出を高エネ研・北大が共同して行った。

(2) 令和4年度実施内容および結果

3.1から供される試料に対して X 線を照射した(図 3.3.2-1、図 3.3.2-2)。 開発した 6 種類の集積回路(トランジスタ, Nuk-CSA, Nuk-TIA, CC, AC, TX) すべてに X 線を 1 MGy まで照射し、動作評価を行った(図 3.3.2-3~図 3.3.2-5)。以下に詳細を述べる。

放射線耐性を測定するために、北大のX線照射装置を用いてトランジスタ、フロントエンド集積回路、バックエンド集積回路へ照射を行い照射後の特性を調べた。トランジスタ に関しては過去のデータも含めてまとめて示す。

トランジスタに関しては、CMOS プロセス 22 nm、28 nm、65 nm の 3 種類を照射した。い ずれのプロセスもゲートリーク電流の増加の影響を無視できる用途もしくはトランジス タ形状を変更しリーク電流増加を抑えれば、数 MGy まで使用可であることが明らかになっ た。上記はトランジスタのサイズに依存し、RINCE (Radiation Induced Narrow Channel Effect) と RISCE (Radiation Induced Short Channel Effect)の効果が観測された。特 に RINCE の影響は大きく、最小幅のトランジスタを使用することは避ける必要がある。 RINCE についての定量評価はこのプロジェクトで行えなかったが、最小幅の 2 倍のトラン ジスタサイズを使用することで RINCE の影響は避けられると予想される。RISCE に関して は、使用プロセスに依存するが、場合によっては最小長のトランジスタでも1 MGy までは 通常のトランジスタと同じように動作する。



トランジスタ照射

Nuk-CSA照射

図 3.3.2-1 トランジスタ、Nuk-CSA、Nuk-TIA それぞれの X 線照射セットアップ



図 3.3.2-2 CMOS65 nm トランジスタ、28 nm トランジスタ、22 nm トランジスタの耐放射 線性能の例

耐放射線性能に関しては、1 µm を超える大きなトランジスタは10 MGy 照射後でも、静特性への影響は小さい。1 µm 未満のトランジスタに関しては、図 3.3.2-2 からわかるよう に 65 nm プロセスでは、5 MGy 程度まではプロセス製造ばらつき範囲内に収まっているため、通常の設計手法を使用することで対応できる。10 MGy 以上を考えた場合は、65 nm プロセスに関してはヒーリング機構を組み込むなどの手法の検討が必要である。評価サンプル数が少ないため今後の再評価が必要であるが、22 nm、28 nm プロセスに関しては、RINCE の効果が RISCE より大きく図 3.3.2-2 の右図に示すように、トランジスタ長(L)が最小のトランジスタにおいても、10 MGy で照射前と比較し 30%程度の違いしかない。また PMOS の耐放射線耐性は NMOS と比べ原理的に弱いが、28 nm プロセスのデータを見ると 10 MGy までその変化は 30%未満になっている。これらは今後別の研究によって発展させ、より詳細に定量的に理解することで、より過酷環境へ適応させるための半導体技術の発展に重要 な知見を与える。

次に本英知事業にて開発された集積回路の耐放射線耐性について述べる。フロントエン ド集積回路に関しては、Nuk-CSA および Nuk-TIA を 1 MGy まで照射した。セットアップは図 3.3.2-1 に示す。その評価結果は図 3.3.2-3 に示す。この 2 種類のフロントエンド集積回路 は 1 MG まで機能を確認できた。今後はサンプル数を増やし評価を継続することでより詳細 なデータが蓄積され、実機に対してどのような改良が必要かを明確にしていく。

バックエンド集積回路については、1枚のボード上に CC、AC、Tx を実装し、それぞれに ついて X線照射装置により 1 MGy 照射を行った。評価に関しては図 3.3.2-3 に示すように、 照射中にデータ転送を CC から Rx へ、制御信号を Rx から CC へ転送し、送信側のデータと 受信側のデータの違いがないかをリアルタイムに監視した。これを各集積回路に対し 1 MGy 照射時間 16 時間、計 48 時間行いエラーは検出されなかった。よってバックエンド集積回 路は 1 MGy 環境で十分に動作することが確認できた。



図 3.3.2-3 フロントエンド集積回路 1 MGy 照射後の特性

中性子検出器とコントロール室は離れており、モニターデータの転送、中性子検出器の制 御は安定して行われる必要がある。そこで別途1 MGy 照射後デジタル信号通信に使用してい るデジタル信号の振幅が使用している規格を満たしているか確認した。その結果を図 3.3.2-4 に示す。1 MGy 照射後振幅の変化は 10%未満であり規格を満たしていた。さらにロバストな 通信を確保するために、Tx および Rx に使用されている長距離高速転送デジタル信号送受信 回路のみを抜き出し、3 MGy まで照射し通信の安定性を調査した。その結果を図 3.3.2-5 に 示す。3 MGy 照射後でもデジタル信号振幅規格は満たしているため通信は安定して行われて いたが、さらにロバストな通信を行わせるために、照射前後で同じデジタル信号振幅に調整 できるように、送受信回路に振幅調整機能を付加し(図 3.3.2-6 参照のこと)、機能が正常 に動作していることを確認した。これを自動的に行わせることによりさらに安定した長距離 通信手法が構築できる。



照射時のコンピュータ上のモニタリング画面 図 3.3.2-4 バックエンド集積回路 X 線照射セットアップ



照射前

照射後の3日後につくばで測定





図 3.3.2-6 Tx-Rx 間通信の耐放射線評価とより安定した通信を確保するための改良

- 3.3.3 検出要素+フロントエンド集積回路の性能評価(令和2年度~令和4年度)
 - (1) 令和3年度までの概要 令和2年度には次年度から開始する評価試験のための、実験場の整備等を進めた。 ²⁵²Cf 線源中性子を導入し、減速材体系と組み合わせた際の熱中性子束について評価を 行った。さらに、ガンマ照射時に線量率を変更可能とするため、リモート制御可能なス テージを整備した。
加えて、KEK で製作したフロントエンド集積回路に北大製ダイヤモンド素子を実装し、α 線を用い動作を確認した。

令和3年度には3.2.1で製作した検出素子と3.1.2で製作したフロントエンド集積回路を組み合わせた測定要素に対して²⁵²Cf線源中性子等を使用した動作試験を行った。

γ線照射試験を名古屋大学⁶⁰Co施設で行い、検出素子を実装した集積素子の動作試験 を行い、300 Gy/hにおいて安定動作することを確認した。また、²⁵²Cf線源中性子を使用 した動作試験を北大で行った。

(2) 令和4年度実施内容および結果

中性子検出素子、フロントエンド集積回路を組み合わせた測定要素に対して²⁵²Cf 線源中 性子を使用した動作試験を行った。また、γ線照射試験を行った。

ダイヤモンド検出素子 1 チャンネル当たり中性子感度 3.7×10⁻⁴ cps/nv (1 cm² 当たり 0.015 cps/nv)を達成した (表 3.3.3-1)。よって当初の予定通り千個オーダーで検出素子 を使用することで目標の中性子感度を達成できる。また、 γ 線試験も行い 1.5 kGy/h でも安 定動作することを確認した (図 3.3.3-3)。1 kGy/h 相当の照射線量に対し 1 MeV の閾値を設 定することで、必要な中性子感度を得つつ γ 線バックグラウンド計数率を落とすことが確認 できた (図 3.3.3-3~図 3.3.3-4)。以下詳細について述べる。

この項目で重要な評価項目は、単位面積当たり充分な中性子感度を持つか、高 γ 線バック グラウンドでも安定動作できるかであり、令

和3年度までに行った研究開発の結果以下の 方針で開発および評価を進めることとした。

- A. 中性子コンバータに関しては高γ線バッ クグラウンド環境下でもより高い中性子 対γ線信号比を持つ⁶LiF コンバータを使 用する。
- B.高y線バックグラウンド下においては、
 中性子検出素子の空乏層厚(3.2 で述べた)および信号処理回路の時定数(図3.3.3-1参照)が非常に重要であるため、
 IFの状況がわからない現状ではできるだけ多くの選択肢を残しておく。つまり、現状ダイヤモンド検出素子2種類、フロントエンド集積回路2種類の研究開発を可能な限り並行して進める。

まず中性子検出素子の評価について述べる。





⁶LiF 中性子コンバータ(厚さ180 µm)を開発し、有感面積2.53 mm²を持つダイヤモンド 検出素子上に直付けを行った素子に対して Cf を使用し、市販の信号処理回路を使用し測定 した中性子スペクトルを図3.3.3-2 に示す。JAEA の FRS 熱中性子標準場でも測定した(図 3.3.3-2)。中性子スペクトルに対して1 MeV までのカウントを積算し中性子感度を計算した ものを表3.3.3-1 に示す。この表でわかるように、二つの測定結果はコンシステントであっ た。また信号処理回路を本プロジェクトで開発したフロントエンド集積回路(Nuk-CSA)を使 用し測定した結果も同じ表に示す。いずれの結果も約3×10⁻⁴ cps/nv の値を示した。現在の 中性子検出素子のデザインは図 2.1-1 に示すように、中性子コンバータを2枚ダイヤモンド 検出素子(4 mm²の有感領域を持つ4チャンネルを有する)で挟んだ形状をしている。これ を1枚の中性子検出素子とした場合、約100枚程度で目標の数 cps/nv を達成できる。(チャ ンネル数としては1000チャンネルオーダーである)

次に γ 線バックグラウンドへの耐性について述べる。我々は複数の実験により、自立膜ダ イヤモンド検出素子および積層膜検出素子とフロントエンド集積回路を組み合わせ γ 線照 射を九州大学と QST 高崎で耐性を評価した。





図 3.3.3-2 開発した中性子検出素子を使用して取得した中性子スペクトルの例(左)および FRS 熱中性子標準場での中性子感度測定セットアップ(右)

表 3.3.3-1 ダイヤモンド素子を利用した中性子検出素子の中性子感度測定結果(検出素子有 感面積は 2.53 mm² である。)

測定場所	使用信号処理回路	中性子感度 cps/nv
北海道大学中性子源	ORTEC	3.2 x 10 ⁻⁴
FRS中性子源	ORTEC	3.7 x 10 ⁻⁴
北海道大学中性子源	Nuk-CSA	3.0 x 10 ⁻⁴

まず自立型ダイヤモンド検出素子について述べる。 γ 線と中性子を分離する場合、簡単な 方法は、エネルギー閾値を決めエネルギー閾値以下のカウントは γ 線、それ以上は中性子と する方法である。このときに中性子側に対して γ 線の混入率が問題となるが、どの程度に抑 えるかを決めるための数値基準が令和3年度までの3.3.5の研究によって明確になった。結 果は" γ 線計数/中性子計数の割合<1 となるように中性子線を弁別することができれば、 Feynman- α 法により即発中性子減衰定数 α が測定できる"、つまり閾値の設定条件としては γ



図 3.3.3-3 QST 高崎での試験結果 (左図は γ 線バックグラウンドに対する自立型ダイヤモンド 検出素子の応答関数で、エネルギー1 MeV 付近では、0.001 cps 未満になっていることがわか る。右上図は照射時間中の計数率を示しており、1.5 kGy/h まで安定に動作可能なことを示し ている。)

線カウントと中性子カウント の比を1 未満に維持できるよ うな条件を満たす必要がある ということである。すでに述べ たように、実機では1000 チャ ンネルオーダーの素子を使用 するため、少なくとも1kGy/h 環境下で測定の信頼性を確保 するためには、0.001 cps 未満 のエネルギーに閾値をかける ことが必須である。この条件を 満たすエネルギー閾値につい ての評価を九州大学と QST 高 崎にて独立の測定を行いコン システントな結果を得た。以下 に詳細を示す。



線量率による0.001cps閾値の変化

図 3.3.3-4 九州大学での γ 線バックグラウンド測 定の結果

> 3.3-8 - 69 -

図 3.3.3-3 に示すように、表 3.3.1-1 の中性子感度を計算した 1 MeV 以上では 0.001 cps 未満(0.0004)になっており検出素子のサイズ等にも依存するが、1 MeV 以上で中性子と γ 線 弁別を行うことで、1 kGy/h 環境下でも我々の目標である深い未臨界度を測定可能な近接監 視システムが構築可能である。

図 3.3.3-4 に九州大学での試験結果を示す。九州大学では 600 Gy/h までの照射が可能で あるため比較のために γ線バックグラウンドのカウント数が 0.001 count/sec となるエネル ギーを求めた。その結果エネルギーは 0.9 MeV となり、図 3.3.3-3 から得られた値とコンシ ステントであった。

積層型ダイヤモンド素子に関 しては、1.5 kGy/h まで評価を行 った。図 3.3.3-5 に試験結果を示 す。600 Gy/h までは動作し、線量 が増加しても、 γ線計数率はほぼ 変わらず高γ線バックグラウン ド下での測定では、自立膜ダイヤ モンド素子と比較して有利であ ることが実証された。しかしなが ら 600 Gy/h 照射中にチャージア ップによる放電信号と思われる 現象が観測され、1 kGy/h 以上で は動作しなかった。原因は今後の 研究により明らかにしていくが、 仮に、チャージアップが原因の場 合、成膜時にエピタキシャル層の 平滑性を維持できる範囲でメタ



積層型ダイヤモンド検出器+Nuk-CSAのγ線応答関数

図 3.3.3-5 積層膜ダイヤモンド素子の γ 線バック グラウンド耐性評価結果

ン濃度(成長速度)を下げ、不純物の取り込みを抑制させることでµτ積を増加させる等の 対応が考えられる。

3.3.4 検出素子+フロントエンド集積回路+バックエンド集積回路の性能評価(令和4年度) (1) 令和4年度実施内容および結果

中性子検出素子、フロントエンド集積回路、バックエンド集積回路を結合した計測要素 (既出の中性子検出器モックアップ)に対して²⁵²Cf線源中性子を使用した動作試験を行った(図3.3.4-1)。また、y線照射試験も行った(図3.3.4-2)。さらにより現実的な6 cm 径中性子検出器に必要な中性子減速材厚等を検討するために、シミュレーションにより評価を行った。

詳細を以下に述べる。

① システムへの中性子およびy線照射に関して

3.1.1 で述べたように 6 cm 径ドライチューブに挿入可能な中性子検出器のモックア ップのシステム動作を確認できたため(図 3.3.4-1 左上図参照)、3.2.4 で述べた技 術を使用し、4 ch の自立型ダイヤモンド検出素子をモジュールに実装した。まずは ²⁴¹Am線源を使用し、アルファ線信号を確認したのち(図 3.3.4-1 左下図参照)、3.3.3 で述べた⁹LiFを中性子コンバータとして使用した中性子検出素子をモジュール上に 形成した。このモジュールをモックアップ検出器に組み込み北大の²⁵²Cf線源中性子 にて中性子感度の評価を行った。セットアップ写真を図 3.3.4-1 右上部、結果を図 3.3.4-1 右下部に示す。中性子感度の測定は、モックアップ検出器内の中性子信号 読み出しチャンネルの数を2および4にそれぞれ固定し、エネルギー閾値を変化さ せ中性子カウント数の変化を測定した。中性子スペクトルは0.5 MeV~2.5 MeV では ほぼ平坦であるため左肩上がりの直線になっている。またチャンネル数を上げると そのチャンネル数に比例し中性子カウントが増加するのもわかる。参考として、 3.3.3 で評価した中性子検出素子(1 チャンネル分)の中性子カウント数ものせた。 これを見ればわかるように、中性子検出素子1 チャンネルからチャンネル数を増や すごとに比例して中性子カウントが増加していくのがわかる。1 検出素子の場合 を差が2 倍以上になっているのは、モックアップで使用した検出 素子の電極面積が大きいためである。



図 3.3.4-1 中性子検出器モックアップを完成させ、中性子検出器として動作を確認するま での過程(まず検出素子をモジュールに実装し、²⁴¹Am α 線源を用い動作の確認を行う。次に 中性子コンバータをモジュール上の検出素子に実装し、²⁵²Cf 線源中性子で動作を確認する。 LiF を使用した中性子検出器開発について、各段階でのクオリティーアシュアランス(QA) も含め製造手順の一部をこのモックアップ開発において検討した。)

γ線環境でも動作するか確認するため、九州大学で評価し(図 3.3.4-2 参照) 電磁 シールドがない状態でも動作は確認できた。ただし量産化に向けてエネルギー閾値 の調整のための内蔵デジタルアナログコンバータのビット数を増加させること等の 修正点もいくつか明確になり実機開発に向けて準備が進展した。

また今回のモックアップ開発を進めた結果、クオリティーアシュアランス(QA) に関しても、今後の問題点等が明らかになってきた。特に複数個の中性子検出素子 のくみ上げと評価に関しては、手順が明確になり、それぞれの段階での評価手法に ついて今後詳細な検討を行える材料をそろえることができた。

 実機検出器開発に向けた中性子減速材 厚等の検討

A)概要

より現実的な6 cm 径中性子検出器 に必要な中性子減速材厚等を検討す るために、シミュレーションにより 検出器のおおよその中性子感度等の 評価を行った。詳細を以下に述べる。

IF の炉内では、中性子の線源となるデブリがどのような状態で分布しているかは正確に把握されていない。水中ではなく、気中にあるデブリからの中性子を検出することが必要となった場合、熱中性子以外の高速中性子に対しても感度を持たせることが要求される。そこで、6 cm径ドライチューブに装荷可能な厚さの中性子減速材と令和3 年度に開発した額中性子を組み合わせて、必要な感した。



図 3.3.4-2 九州大学での γ 線照射試 験のセットアップ(電磁シールドなし で中性子検出素子を 600 Gy/h で照射 した。)



規定されている、²⁵²Cf線源からの核分裂スペクトルおよび重水減速²⁵²Cf線源のスペクトルを選定して、それぞれの中性子スペクトルについて評価を行った。図3.3.4-3および図3.3.4-4にこれらの中性子スペクトルを示す。²⁵²Cf線源からの核分裂スペクトルは、想定しうる最も硬い(エネルギーが高い)中性子スペクトルとなり、検出器の中性子感度の観点からは最も不利な条件となる。実際の炉内には、水やコンクリートなどの中性子を減速させる物質が大量にあるために、²⁵²Cf線源からの核分裂スペクトルを想定することは非現実であることから、原子力施設等の実際の作業場における中性子スペクトルに近づけた重水減速²⁵²Cf線源のスペクトルを選定対象に加えた。

C) 計算体系



労力を考えると現実的ではない。そこで、本検討においては、図 3.3.4-5 に示すような簡易的な計算体系を作成して、個々の中性子検出器のおおよその感度を評

3.3-12 - 73 -

価することとした。中性子減速材は、密度 0.95 g/cm³で直径 6 cm の球形の高密 度ポリエチレンとした。ダイヤモンド検出器は、多数の2mm角程度の小さな検出 器を減速材中の様々な深さに配置することを考慮して、長さ40mm、幅40mm、厚 さ40 µmの大型の角形検出器とし、減速材の中央に設置した。そして、面積が同 じとなるように補正することにより、個々の中性子検出器の平均感度を求めた。 熱中性子検出器として動作させるために、長さ40 mm、幅40 mm、厚さ100 μmの ⁶LiF コンバータをダイヤモンド検出器の片面に配置した。⁶LiF コンバータは、密 度 2.64 g/cm³ で ⁶Li を 95%濃縮した ⁶LiF 結晶とした。ダイヤモンド検出器の反対 側の面には、電子回路を構築する基盤を模擬して、厚さ2mmのエポキシ基板を配 置した。そして、球形減速材の外側の全方位から等方に減速材に対して平行とな るように中性子を入射させ、単位中性子フルエンス当たりの感度を導出した。シ ミュレーション計算には、中性子の輸送から、⁶LiF コンバータ中の核反応で生成 される荷電粒子の輸送、ダイヤモンド検出器中でのエネルギー沈着までを一貫し て行うことができるモンテカルロシミュレーションコード PHITS 3.24 を使用し た。Event Generator モードを使用することにより、コンバータ中での荷電粒子の 生成量を評価済み核データに基づいて正確に模擬した。中性子の輸送計算には JENDL 4.0 核データライブラリおよび熱中性子散乱データ S(α , β) を使用した。



図 3.3.4-5 シミュレーション計算において使用した計算体系の概念図

D)計算結果

図 3.3.4-6 および図 3.3.4-7 に、シミュレーション計算により得られた²⁵²Cf 線 源からの核分裂スペクトルおよび重水減速²⁵²Cf 線源のスペクトルを持つ中性子 に対する検出器の応答波高分布を示す。検出器の闌エネルギーは、1 kGy/h の高線 量率 γ線の影響を受けない領域とするために、1 MeV に設定した。計算で得られ た応答波高分布にこの闌エネルギーを適用して導出した単位フルエンス当たりの 検出器感度は、²⁵²Cf 線源からの核分裂スペクトルおよび重水減速²⁵²Cf 線源のスペ クトルに対して、それぞれ、約4×10⁻⁵カウントおよび約1.2×10⁻⁴カウントとな った。予想通り、中性子スペクトルが硬い核分裂スペクトルに対しては感度が低 いことがわかった。より現実的な重水減速²⁵²Cf 線源のスペクトルに対する感度か ら、未臨界度の測定に必要な検出器個数を評価したところ、数千チャンネルの検 出器を中性子減速材中に配置すればよいことがわかった。



図 3.3.4-6²⁵²Cf 線源からの核分裂スペクトルに対する検出器の応答波高分布 計算結果(中性子フルエンス:0.0032 n/cm²/source)



図 3.3.4-7²⁵²Cf 線源からの核分裂スペクトルに対する検出器の応答波高分 布計算結果(中性子フルエンス:0.0032 n/cm²/source)

- 3.3.5 臨界近接監視手法の検討(令和2年度~令和4年度)
 - (1) 令和3年度までの概要

ダイヤモンド中性子検出器を用いて、1Fにおける燃料デブリ取り出し作業時の臨界近接監 視を行うための手法に関する検討を進めた。燃料デブリ取り出し作業時の臨界近接監視手法 として、現時点で候補として挙げている未臨界度測定手法[3.3.5-1]について課題を抽出し た。また抽出した課題に関する検討を行うため、過去に国内施設(京都大学臨界集合体実験 装置[3.3.5-2]、[3.3.5-3])で実施した未臨界実験のデータを再利用した仮想的な数値実験 を実施した。

令和2年度は、中性子源増倍法[3.3.5-4]による未臨界度測定について、中性子計数率の オーダーを変化させた仮想的な数値実験を実施した。結果として、計数率が低くなるにつれ て未臨界度推定結果の統計精度が悪化する課題を抽出し、入力となる中性子計数時系列デー タに対して移動平均フィルタのような前処理を行うことで、問題点を改善できる見込みを得 た。

令和3年度は、炉雑音解析手法 (Feynman- α 法[3.3.5-5])による未臨界度測定について、 γ 線ノイズを模擬したポアソンノイズの大きさを変化させた仮想的な数値実験を実施した。 結果として、炉雑音測定データに含まれる γ 線計数/中性子計数の割合が大きくなるにつれ て、Feynman- α 法による即発中性子減衰定数の測定誤差が大きくなる課題を抽出した。また、 中性子検出器の検出効率 (cps/nv)をできる限り高く保ちつつ、 γ 線計数/中性子計数の割合 <1 となるように中性子線を弁別することができれば、Feynman- α 法により即発中性子減衰 定数 α が測定できる見込みを得ることができた。 (2) 令和4年度実施内容および結果

令和2年度、3年度の検討内容として、燃料デブリ取り出し作業時の臨界近接監視手法とし て現時点で候補として挙げている2つの手法(a)中性子源増倍法と(b)炉雑音解析手法 (Feynman-α法)に関して課題を抽出し、それぞれ検討を実施した。

令和4年度の検討では、燃料デブリ取り出し作業時の臨界近接監視手法として適用可能な別 の手法として、逆動特性法に関して検討を行うこととした。

① 一点炉動特性パラメータを陽に利用しない逆動特性法に関する検討

逆動特性法[3.3.5-6]とは、動的手法(過渡変化時における中性子計数率の時間変化から、 未臨界度を推定する手法)の一種であり、原子炉における反応度計の測定原理としても有 効活用されている手法である。逆動特性法は、反応度ρあるいは未臨界度(-ρ)の実時間監視 に適した手法であるが、燃料デブリ取り出し作業時の臨界近接監視技術として活用するた めには、以下で挙げる点が課題となる。

- ✓ 反応度 ρの絶対値を逆推定する際に、一点炉動特性パラメータ(中性子生成時間Λや実効 遅発中性子割合β_{eff})が必要となる。したがって、対象とする体系の情報(寸法・幾何形 状、核種組成)の不確かさが大きい場合、事前の数値解析によるΛやβ_{eff}推定結果の不確か さも大きくならざるを得ない。
- ✓ 対象体系における中性子計数率が低い場合、 逆動特性法の入力信号(検出時間幅∆t当たりに検出された中性子計数の時系列データP)におけるノイズ・外れ値が反応度ρの逆推定結果に大きな影響を与える。

以上で挙げた課題を解決するため、本研究では、先行研究[3.3.5-7]で提案された逆動特性 法に対する効果的なノイズフィルタリング手法(単純フィードバック法、Simplest Reactivity Estimator, SRE)に注目した。単純フィードバック法を用いた場合、例えば、ス テップ状の過渡変化が起こった場合に、反応度の逆推定結果においてオーバーシュートが発 生し難い、といった頑健なフィルタリング特性がある。ただし、先行研究[3.3.5-7]で提案さ れた単純フィードバック法の測定原理をそのまま利用した場合、従来の逆動特性法と同様に、 ー点炉動特性パラメータAや β_{eff} が必要とならざるを得ない。そこで本研究では、臨界近接監 視技術で測定対象する量を、ドル単位の反応度 ρ/β_{eff} あるいはドル単位の未臨界度 $(-\rho)/\beta_{eff}$ とすることで、一点炉動特性パラメータAや β_{eff} を陽に利用しない方法を新たに考案した。以 下、本研究で考案した手法を「改良単純フィードバック法」と呼ぶこととする。

改良単純フィードバック法によるドル単位の反応度 ρ/β_{eff} の逆推定手順を以下に示す。ただし、各記号における下添字nはn番目の時間ステップの量、下添字iは第i群の遅発中性子先行核に関する量、をそれぞれ意味する。

- 1. 渡変化前の定常状態 (n = 0)の測定体系について、別の方法により、ドル単位の反応度 ρ/β_{eff} の初期値 (ρ/β_{eff})₀を求めておく。
- 過渡変化前の定常状態の測定体系に対して、十分な時間かけて中性子計数の測定を行うことで、過渡変化前の定常状態における中性子計数の初期値P₀(検出時間幅Δt当たりの中性子計数の平均値)を求める。
- 手順1と手順2で得られた初期値(ρ/β_{eff})₀とP₀を用いて、規格化された外部中性子源強度S₀ および第i群の遅発中性子先行核数の初期値A_{i,0}をそれぞれ(3.3.5-1)式、(3.3.5-2)式のよう に設定する。

$$S_0 = -(\rho/\beta_{\rm eff})_0 P_0 \tag{3.3.5-1}$$

$$A_{i,0} = P_0 \tag{3.3.5-2}$$

なお、上式における $S_0 \ge A_{i,0}$ の定義は、通常の逆動特性法における外部中性子源強度 Q_0 および第i群の遅発中性子先行核数の $C_{i,0}$ とは異なっており、提案手法の推定手順において一点炉動特性パラメータ $\Lambda \diamond \beta_{eff}$ を陽に用いる必要が無いように、便宜上、以下のように規格化した量に対応している。

$$S_0 \equiv \frac{\Lambda}{\beta_{\rm eff}} Q_0 \tag{3. 3. 5-3}$$

$$A_{i,0} \equiv \frac{\lambda_i}{a_i} \frac{\Lambda}{\beta_{\text{eff}}} C_{i,0} \quad (1 \le i \le 6)$$

$$(3.3.5-4)$$

上式において、 $\lambda_i \geq a_i$ は第*i*群の遅発中性子先行核の崩壊定数および相対収率 $a_i = \beta_i / (\sum_{i=1}^6 \beta_i)$ をそれぞれ意味する[3.3.5-8]。

- 4. 検出時間幅 Δt 当たりの中性子計数 P_n の時系列データを測定開始する (n = 1)。
- 5. 現在の時間ステップnにおける中性子計数 P_n を測定し、前の時間ステップ(n-1)における値 $A_{i,n-1}$ から、規格化した遅発中性子先行核数 $A_{i,n}$ を以下のように更新する。

$$A_{i,n} = A_{i,n-1} e^{-\lambda_i \Delta t} + (1 - e^{-\lambda_i \Delta t}) P_n$$
(3. 3. 5-5)

6. 即発跳躍近似に基づくことで、次の時間ステップnにおける中性子計数の推定値Pestを求める。

$$P_{\text{est}} = \frac{\left(\sum_{i=1}^{6} a_i A_{i,n}\right) + S_0}{1 - (\rho/\beta_{\text{eff}})_{n-1}}$$
(3. 3. 5-6)

7. 時間ステップ*n*における中性子計数の測定値 P_n と手順 6. で推定した中性子計数の推定値 P_{est} の差異($P_n - P_{est}$)より、(3.3.5-7)式および(3.3.5-8)式に基づいて時間ステップ*n*におけるドル単位の反応度(ρ/β_{eff})_nを更新する。

$$(\rho/\beta_{\rm eff})_n = (\rho/\beta_{\rm eff})_{n-1} + K(P_n - P_{\rm est})$$
(3. 3. 5-7)

$$K = \frac{1 - (\rho/\beta_{\rm eff})_{n-1}}{P_n}$$
(3.3.5-8)

8. 次の時間ステップ $n \to n + 1$ に移って、手順5から手順7を繰り返す。

以上で考案した改良単純フィードバック法の有効性について検討するため、仮想的な数値実 験として、国内実験施設(京都大学臨界集合体実験装置)において過去に実施した未臨界過渡 変化実験で測定された中性子計数率の時系列データ[3.3.5-2]を再活用することとした。本実験 では、D-T パルス中性子源を用いた加速器駆動の未臨界炉心において、制御棒挿入や中心架台落 下(3×3 領域の燃料集合体および反射体引抜操作)といった負の反応度が加わる操作により、 未臨界体系の反応度p(t)を時間とともに変化させている。ここで、炉心周りのポリエチレン反 射体領域内に設定された BF₃検出器により、中性子検出時刻情報のリストモードデータが取得 されているため、例えば図 3.3.5-1 で示したように、検出時間幅 $\Delta t = 1$ s当たりの中性子計数の 時系列データに変換することができる。

本研究では、この中性子検出時刻の測定データに対して、低い計数率条件を模擬した仮想数 値実験として、検出確率 ε を設定し、各中性子検出イベントに対して一様乱数 $0 \le \xi_j \le 1$ を用い て、 $\xi_j < \varepsilon$ となった中性子検出イベントjのみが検出されたとして、中性子計数の時系列データ P_n を仮想的に生成した。さらに、実際の体系で測定される中性子計数の時系列データ P_n には、中

性子検出信号とは無関係な要因(例えば、機械的振動などに起因したノイズなど)によって、 意図しない外れ値が混入することも想定される。そこで、乱数を用いてランダムに選択した複 数個の時間ステップmについて $P_m = 10000$ を設定することで、外れ値を仮想的に模擬した。以 上の手順で生成した、低い計数率条件と外れ値を模擬した仮想的な中性子計数の時系列データ P_n を図 3.3.5-2 に示す。



図 3.3.5-1 未臨界過渡変化実験で測定された中性子計数の時系列データ



図 3.3.5-2 低い計数率条件と外れ値を模擬した仮想的な中性子計数の時系列データ

図 3.3.5-2 で示した中性子計数の時系列データ P_n に対して、本研究で考案した改良単純フィードバック法を適用した。ここで、入力時系列データ P_n における外れ値影響を軽減するための前処理についても検討するため、各時間ステップnの前後±10ステップ分の連続した時系列データ、すなわち P_{n-10} ,…, P_{n-1} , P_n , P_{n+1} ,…, P_{n+10} に対して(i)移動平均フィルタと(ii)メディアンフィルタの2 通りの手法を適用することとした。なお、改良単純フィードバック法により反応度を推定するにあたって、ドル単位反応度の初期値(ρ/β_{eff})₀については、連続エネルギー中性子輸送モンテカルロ計算コード MCNP6.2[3.3.5-9]を用いて事前に計算した推定値を利用した。また、過渡変化前

の定常状態における 500 s の中性子計数から初期値P₀を求めることで、(3.3.5-1)式および(3.3.5-2) 式によりS₀とA_{i,0}を設定した。

前処理として(i)移動平均フィルタおよび(ii)メディアンフィルタを適用した、改良単純フィー ドバック法によるドル単位反応度(ρ/β_{eff})_nの推定結果を図 3.3.5-3 に示す。図 3.3.5-3 からわか るように、外れ値が生じていない時間領域については(i)移動平均フィルタおよび(ii)メディアン フィルタともに同等の反応度推定が可能である。しかし、中性子計数の時系列データ P_n に外れ値 が含まれる場合には、(i)移動平均フィルタの場合には外れ値が生じた時間ステップ近傍でスパイ ク状にドル単位反応度(ρ/β_{eff})_nが推定されることとなり、深い未臨界体系であるにもかかわらず (ρ/β_{eff})_n ≥ 0、すなわち誤った臨界近接を検知することに繋がる。一方、(ii)メディアンフィルタ の場合には、時系列データ P_{n-10} ,…, P_{n-1} , P_n , P_{n+1} ,…, P_{n+10} の中央値(昇順に並べた際にちょうど真 ん中に位置する値)を求めた上で反応度を推定することにより、外れ値が(ρ/β_{eff})_n推定結果に与 える影響を大きく軽減でき、臨界近接の誤検知を防ぐことができる。

以上より、本研究で提案した改良単純フィードバック法とメディアンフィルタを組み合わせる ことで、低い中性子計数率の条件下でも頑健にドル単位反応度を推定できることを確認した。



a) ε = 0.1 b) ε = 0.02 g) 3. 3. 5-3 改良単純フィードバック法によるドル単位反応度の推定結果

② 極めて低い中性子計数率条件下における臨界判定に関する検討

本研究で提案した改良単純フィードバック法とメディアンフィルタの併用により、低い中性 子計数率の条件下でも頑健に未臨界監視が可能であると期待できる。しかし、極めて中性子計 数率が低い状況を想定すると、中性子計数の時系列データ P_n に対してメディアンフィルタ適用 した後の中央値がゼロ ($P_n = 0$)となる場合も起こり得る。この場合、改良単純フィードバック 法の推定式(3.3.5-7)式および(3.3.5-8)式においてゼロ除算が発生し得ることで、数値計算上 の不安定性の問題も発生し得る。この場合には、体系の未臨界度を統計精度良く推定すること は困難となる。そこで、極めて低い中性子計数率条件下において臨界近傍の状態であるか判定 する方法として、臨界時の中性子計数が従う確率分布の統計的性質に着目した方法について追 加検討を実施した。

外部中性子源を含んだ未臨界体系について、ある検出時間幅Tの間にC個の中性子が検出される確率をP(C)とすると、その確率母関数G(Z)は以下のように定義できる。

$$G(Z) \equiv \sum_{C=0}^{\infty} P(C) \times Z^C$$
(3. 3. 5-9)

(3.3.5-9)式で定義された確率母関数*G*(*Z*)を求めることができれば、以下の演算を行うことで *G*(*Z*)から確率*P*(*C*)の数値を計算することができる。

$$\left(C! \times \frac{\partial^C G}{\partial Z^C}\right)\Big|_{Z=0} = P(C)$$
(3. 3. 5-10)

ここで、仮に対象体系が臨界近傍の条件だった場合には、中性子計数の確率分布P(C)が Pal-Mogil'ner-Zolotukhin-Bell-Babala (PMZBB)分布と呼ばれる固有の確率分布に従うこととなる[3.3.5-10]。例えば、検出時間幅 $T \gg (1/$ 即発中性子減衰定数 α)を考えた場合、PMZBB分布の確率母関数G(Z)の解析解は以下のように導出することができる[3.3.5-10]。

$$G(Z) = e^{-\frac{\langle C \rangle}{Y_{\infty}} (1+\delta(-\rho)) \left(\sqrt{1+2\frac{Y_{\infty}}{1+\delta(-\rho)}(1-Z)} - 1\right) \left(1 - \frac{1}{2}\delta(-\rho) \left(\sqrt{1+2\frac{Y_{\infty}}{1+\delta(-\rho)}(1-Z)} - 1\right)\right)}$$
(3. 3. 5-11)
$$Y_{\infty} = \frac{\langle C \rangle^2 - \langle C \rangle^2}{\langle c \rangle} - 1$$
(3. 3. 5-12)

$$\delta = \frac{\langle v \rangle \langle q(q-1) \rangle}{\langle q \rangle \langle v(v-1) \rangle}$$
(3. 3. 5-13)

上式において、ブラケット()は期待値、 Y_{∞} は $T \gg (1/\alpha)$ における二次中性子相関量 Y 値の飽和 値、 ν は1核分裂当たりに放出される中性子数、qは外部中性子源1崩壊当たりに放出される中 性子数、 $(-\rho)$ は体系の未臨界度をそれぞれ表す。さらに、式(3.3.5-11)において $(-\rho) \rightarrow 0$ の極 限を考えることで、臨界時における PMZBB 分布の確率母関数G(Z)の解析解を以下のように求め ることができる。

$$G(Z) = e^{-\frac{\langle C \rangle}{Y_{\infty}} \left(\sqrt{1 + 2Y_{\infty}(1 - Z)} - 1\right)}$$
(3. 3. 5-14)

中性子計数率が極めて低い条件の一例として、平均(*C*) = 0.1の場合について、(i) 臨界時の PMZBB 分布、(ii) ポアソン分布、(iii) 負の二項分布それぞれの確率母関数の形状を比較した結

果を図 3.3.5-4 に示す。なお、中性子計数の確率分布P(C)がポアソン分布に従う場合には、その確率母関数 $G_P(Z)$ は1つの母数(平均(C))のみを用いて以下のように表現できる形となる。

$$G_{\rm P}(Z) = e^{-(C)(1-Z)} \tag{3.3.5-15}$$

また、中性子計数の確率分布P(C)が負の二項分布に従う場合には、その確率母関数 $G_{NB}(Z)$ は2つの母数($\langle C \rangle$ と Y_{∞})を用いて以下のように表現できる形となる。

$$G_{\rm NB}(Z) = \{1 + (1 - Z)Y_{\infty}\}^{-\frac{(C)}{Y_{\infty}}}$$
(3. 3. 5-16)

図 3.3.5-4 からわかるように、臨界時の PMZBB 分布の確率母関数(3.3.5-11)式は、ポアソン分 布(3.3.5-15)式とは大きく異なっている。また、二次中性子相関量Y_∞が小さい場合には、臨界 時の PMZBB 分布の確率母関数(3.3.5-11)式は負の二項分布(3.3.5-16)式に比較的近いが、Y_∞が 大きくなるにつれて両者の差が大きくなる、すなわち、臨界時の PMZBB 分布は負の二項分布で 近似し難い固有の分布形状となることもわかる。



次に、確率母関数の性質(3.3.5-10)式に基づいて、Mathematica を利用して PMZBB 分布に従う中性子計数の確率P(C)の数値解を求めた。本検討では、中性子計数率が極めて低い条件を模擬したP(C)の計算例として、平均 $\langle C \rangle = 0.1$ とし、二次中性子相関量 Y_{∞} は一点炉近似に基づいて以下のように与えた。

$$Y_{\infty} \approx Y_{\infty, \text{crit}} \left(\frac{\beta_{\text{eff}}}{\beta_{\text{eff}} - \rho}\right)^2 \left(1 + \delta(-\rho)\right)$$
(3. 3. 5-17)

上式において $Y_{\infty,crit}$ は臨界時の Y_{∞} を意味し、本検討では仮想的に $Y_{\infty,crit} = 1$ とした。また、燃料デブリ取り出し作業時の状況を踏まえ、²⁴⁴Cm 自発核分裂源を含んだ²³⁵U燃料体系を想定する ことで $\beta_{eff} = 0.007$ 、 $\delta = (\langle v \rangle \langle q(q-1) \rangle)/(\langle q \rangle \langle v(v-1) \rangle) = 1.14$ と設定した[3.3.5-11]、[3.3.5-12]。以上の条件に基づいて、3つの確率分布 i) $\langle C \rangle = 0.1$ の時のポアソン分布、ii)深い未臨界 時 ($k_{eff} = 0.8, -\rho = 25$ [%dk/k])の PMZBB 分布、iii)臨界時 ($\rho = 0$)の PMZBB 分布について、 それぞれの確率分布P(C)を図 3.3.5-5 に比較して示す。図 3.3.5-5 からわかるように、深い未 臨界時における PMZBB 分布のP(C)はポアソン分布に比較的近い形状となる。一方、臨界時 PMZBB 分布の場合には、たとえ同じ平均(C)であったとしても確率分布の裾が重くなっている。例えば、

中性子が1個も検出されない確率P(0)に注目すると、ポアソン分布と深い未臨界時の PMZBB 分 布の場合にはそれぞれP(0) = 90.5%, 90.6%と極めて近い値となるが、臨界時の PMZBB 分布の場 合には布P(0) = 92.9%と有意な差がある。

以上の追加検討により、中性子計数率が極めて低い条件であったとしても、仮に対象体系が 臨界状態となっている場合には、中性子計数の確率分布が臨界状態固有の分布(臨界時の PMZBB 分布)に従う性質があるため、測定された中性子計数の頻度分布とポアソン分布あるいは臨界 時 PMZBB 分布の有意差を統計的に分析することで臨界状態を判定できる可能性があると考えら れる。



- 3.3.6 まとめ
 - (1) 検出素子の性能評価

イオンビームエッチングや合成条件の最適化により1 kGy/h に対応可能なダイヤモン ド検出素子製造プロセスを開発し、¹⁰B₄C、⁶LiF 等を中性子コンバータとして使用しシミ ュレーションおよび実測で評価を行った。

(2) 集積回路等の耐放射線性試験

22 nm、28 nm、65 nm 商用 CMOS プロセスを使用しトランジスタの 10 MGy 未満の放射 線耐性を調査した。微細化による耐放射線性能向上の効果は 22 nm までは観測できた。 サンプル数が少ないためさらに今後の研究によって詳細を明らかにしていく予定である。 本課題で開発した集積回路は 1MGy まで照射し動作を確認した。

(3) 検出要素+フロントエンド集積回路の性能評価

上記(1)にて開発されたダイヤモンド検出素子と上記(2)で1 MGy まで動作可能な耐放 射線信号処理集積回路を接続し、中性子感度と γ 線バックグラウンド耐性の評価を行っ た。1 kGy/h の環境で中性子感度が 3.7×10⁻⁴ cps/nv を達成可能であることを確認した。 評価を行った中性子検出素子の有感面積は 2.53 mm²であり、6 cm 径中性子モックアップ に使用したダイヤモンド検出素子は、2 mm 角の電極を 4 チャンネル有することから、今 後容易に 6 倍以上の中性子感度を達成できる。さらに中性子コンバータの薄膜化や信号 処理回路等の改良によりさらに高感度化できるため、今後も研究を推進する。

- (4) 検出素子+フロントエンド集積回路+バックエンド集積回路の性能評価
- 開発した要素(中性子検出素子および集積回路が実装されたモジュール)を使用しア ルファ放射線源および中性子線源を使用し動作を確認した。さらに6 cm 径ドライチュー ブ挿入可能な中性子検出器のモックアップを開発し、中性子および γ線を照射し動作を 確認した。中性子感度については、検出素子の数に比例し中性子感度が向上することを 確認した。実機プロトタイプを開発するにあたって重要となる中性子減速材厚について のシミュレーションを行った。
- (5) 臨界近接監視手法に関する検討

ー点炉動特性パラメータを陽に利用することなく臨界近接監視ができるように、本研 究では既存の頑健な手法(改良単純フィードバック法)を改良した。また、入力となる 中性子計数の時系列データに外れ値が含まれる場合には、メディアンフィルタを利用す ることで頑健にドル単位反応度を推定できることを確認した。さらに、極めて低い中性 子計数率条件下における臨界判定法として、臨界時の中性子計数が従う確率分布(臨界 時 PMZBB 分布)の統計的性質に着目した方法について検討した。

3.4 研究推進

3.4.1 令和2年度までの実施内容および成果

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 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。COVID-19の蔓延防止対策としてプロジェクトグループ全体会議や組織間をまた がる会議を開催した。組織内では適宜リモートと対面を用い、組織内関係者間で意思疎通が円 滑になるよう会議を開催した。これらミーティング以外に、関係者間で活発な議論を行うため、 メールでの情報のやり取りだけでなく情報セキュリティーに注意をはらいつつ、リアルタイム 性を持たせたビジネス用メッセージングアプリケーションを用い本プロジェクト関係者内で の議論を促進した。

3.4.2 令和3年度までの実施内容および成果

組織代表者間連携のための会議、各組織内での開発会議だけでなく、密に連携が必要な場合 にはその都度関係者で打ち合わせを開くことで、プロジェクト内の意思疎通を良好に保った。 また 10 月 9 日には福島廃炉の状況を把握するために技術戦略ワークショップに出席し当該プ ロジェクトの進歩状況も説明した。P0、J-P0 へはメール等を通じ研究方針や発表資料等に対し 助言をいただきつつ開発するべき装置仕様も含めた目標を修正し、より 1F 応用に対応できる 研究開発を行った。

3.4.3 令和4年度までの実施内容および成果

令和4年度は最終年度となるため、事業代表者が必要に応じて各組織のグループ打ち合わせ に出席し組織間の連携を強化し、前年度以上に情報共有を図り現場中心でプロジェクトの強力 な推進が可能になる環境を構築した。最終年度は内部開発レビューを行い、開発方針、技術選 択等に関して、プロジェクト内でフィードバックをかけつつ外部の識者との連携により、成功 に向けたプロジェクト運営を推進した。

学会等での発表だけでなく、2022 廃炉国際フォーラムでのポスター発表[3.4-1]や環境活動 報告[3.4-2]にも本プロジェクトの解説を行うなど幅広く本プロジェクトのアピールを行った。 また第 26 回目の開催となる LSI とシステムのワークショップ 2023 (https://www.gakkaiweb.net/gakkai/ieice/icd/) にて、本事業の結果を、"スケーラブルな高耐放射線 中性子検 出システム用 ASIC の開発"にてまとめて発表し、最優秀ポスター賞を受賞した。

3.4.4 まとめ

COVID-19 によって研究環境が変化したが、頻繁に TV 会議を行うなど柔軟に対応し、研究者 間で開発目標や現状等の情報共有を行った。特に開発者レイヤー、組織代表者レイヤーの複数 のレイヤーで組織間を超えた情報共有を行いプロジェクト内での意思統一を図った。この中で 内部レビュー等も行い、開発組織内で技術選択等の修正を行いつつ、P0 などと打ち合わせを持 ち、現状に即した開発を進め実機開発のための改良を推進した。それ以外では積極的にプロジ ェクト外の専門家を招聘し意見を聞きプロジェクト推進に役立て、リスクの少ないプロジェク ト推進を積極的に進めた。

> **3.4-1** - 85 -

4. 結言

本研究では高γ線環境下(1 kGy/h)で動作する中性子検出による深い未臨界モニターを実現 するため、中性子検出器の感度として数 cps/nvの性能を持つ実時間でのモニタリングを目標と して要素開発を進め目標を達成した。開発した要素技術は、ダイヤモンドを使用した中性子検出 素子、耐放射線集積回路6種類とそれら要素を搭載するモジュール複数枚である。さらにP0も 含めて議論を行い、予定になかった6 cm径ドライチューブに挿入可能な中性子検出器のモック アップを開発し中性子測定動作実証も行い、予定通りの性能を確認した。

本プロジェクトの開始にあたっては、"不確定な部分が多い炉内環境でも使用可能な臨界近接 監視手法使用可能な中性子モニターを開発すれば、成果は他の応用にも使用可能である"と考え、 現状考えられる困難な環境(1 kGy/h)下で、できるだけ高い中性子感度(数 cps/nv)を持つ装 置開発に取り組んだ。まず我々は炉内体系が不明である場合に確実に使用可能な未臨界解析手 法として炉雑音法を選択し、実際に使用可能な中性子検出器の仕様である"γ線計測数対中性子 計測数の比を1未満に抑えること"を明確にし(詳細は3.3.5参照)、その仕様を満たすための システムデザインと要素開発を推進した。この解析結果は他の深い未臨界モニターに対しても 必要な普遍的な条件であることは本プロジェクトの成果である。

中性子感度に関しては、中性子コンバータとして⁶LiFを採用し、 γ 線-中性子分離エネルギー を 1MeV に設定した場合、JAEA の FRS 熱中性子標準場等にて 3.7×10⁻⁴ cps/nv を得た。この測定 時の検出素子の有感面積は 2.53 mm²であり、この検出素子を使用する場合数千チャンネルで目 標を十分に達成できる。結論としては、中性子感度は 1 平方センチメートルあたり 0.015 cps/nv の中性子検出素子が使用可能であるため、100 cm²のダイヤモンド素子を製造することで目標は 達成されることになる。また中性子を γ 線バックグラウンドから分離するためのエネルギー閾 値を 1 MeV 閾値に設定した理由は、1 kGy/h でも前述の" γ 線計測数対中性子計測数の比を 1 未 満に抑えること"を要請した場合であるため、 γ 線バックグラウンドが 1 kGy/h より低い場合や 中性子感度が向上できた場合では、 γ 線と中性子分離用エネルギー閾値を下げることができ、フ アクター程度中性子感度を向上させられるため、より少ない枚数で中性子検出器が構成可能で ある。また中性子感度は、同じ閾値エネルギーを用いてもシミュレーションで検討した結果や信 号処理の工夫によりさらに上げられるため、これらも今後の検討事項となる。

γ線バックグラウンドに関しては、ダイヤモンド検出素子の安定動作およびコンプトン散乱 電子コインシデンス数の増加による波高の大きい疑似信号の排除の2点を解決する必要がある。 最初の点に関しては、ダイヤモンド自立膜素子製造プロセスの見直しにより1.5 kGy/hまで、検 出素子の安定動作を確認できた。2番目に関しては、後述する耐放射線信号処理集積回路の開発 によって1.5 kGy/hまで動作可能であることを実証した。また積層型素子は600 Gy/hまでの動 作およびγ線バックグラウンドに強いことが確認できた。

中性子検出器を実機で動作させるためには多数の検出素子の信号を処理し、高速長距離転送 を行う必要がある。このため、耐放射線信号処理集積回路の開発を行い、6種類の集積回路の開 発を行った。すべての集積回路を組み込みシステム動作は確認でき、また集積回路は1 MGy まで 正常に動作することも確認した。すでに述べたようにこれらの集積回路およびそれらを実装し たモジュールは検出素子の評価に使用している。

上記により本課題で目標とした研究開発は終了したが、実機開発を推進する観点から P0 との 議論を行い、ドライチューブに挿入可能な6 cm 径の中性子検出器モックアップ開発も行った。 このモックアップを開発するにあたり、複数枚のダイヤモンド検出素子を利用した中性子検出 素子の製造およびモジュールへの実装を行い、実装したすべての素子の動作を確認でき、中性子 検出のデモンストレーションも完了し、正しく動作していることが実証できた。以下詳細につい て各項で述べる。

(1) 高耐放射線スケーラブル中性子検出器信号読み出しシステム開発

臨界近接監視システムで使用する中性子検出器の設計開発を複数行い種々のモジュ ールを完成させ動作の確認を行った。そのデザインのうち6 cm 径中性子検出器をドラ イチューブ挿入用中性子検出器として位置付け、次のフェーズで検討している実機プロ トタイプ開発のために、モックアップの開発を行い動作試験を完了した。このモジュー ルに搭載するための集積回路は CMOS65 nm プロセスを用いて開発され、すべての集積回 路に対して1 MGy まで耐放射線性能が確認されている。

この開発においては、耐放射線性能による軽量化以外に、使用環境の変化に対し中性 子検出器の形状等を変更する際に容易であること、中性子感度の向上に関して拡張性が あることを考慮し設計がなされた。また信号対雑音比を検討しすべてのアナログ信号は、 検出器内でデジタル信号に変換され100 nsec ごとに中性子のカウント数を70 m 程度離 れたコンピュータまで132 Mbps で転送でき、放射線耐性は数 MGy 以上を有する。さら に信号処理集積回路に関しては、高信号対雑音比を有する集積回路と高速応答が可能で 高 y 線環境下でもロバストに動作可能な集積回路の2種類を開発し、どのような環境に も耐えられるシステム開発を行った。

(2) ダイヤモンド中性子検出素子の開発

ダイヤモンド中性子検出素子の実現および量産化の観点で、実現に関して高い可能 性を持つ自立膜型ダイヤモンド素子と量産化時に有利な積層型ダイヤモンド素子の2 種類の開発研究を行い、それぞれ当初の目標を達成した。

自立膜型素子に関しては、新たに6 mm 角以上の大型ダイヤモンド基板を利用した複数の電極を持った検出素子を製作し、本課題で使用可能な検出素子が開発できた。また中性子コンバータとして ⁰LiF を使用し中性子検出素子を複数個完成させ評価を行った。これらの素子はプロセスの工夫により 1.5 kGy/h 環境下でも安定な動作をすることを確認した。

積層型素子は現在まで動作実績がなかったが、問題となる表面欠陥を排除し検出素 子を製作する手法を見出し検出素子として動作を確認した。この手法は特許申請中で ある。さらに本課題で開発した信号処理集積回路と接続し 600 Gy/h まで動作すること も確認し、γ線バックグラウンドエネルギースペクトルがγ線強度に対し大きな依存 性がないことを実証した。

量産時にコストアップとなる検出素子のプロセスを簡略化し量産化プロセスの選択 肢を広げるため、新たに開発した実装技術の導入と複数の素子実装に成功し実装評価 に供した。この実装プロセスは印刷技術を使用しており、耐放射線性能に関しても数 MGy まで照射実験で良好な結果を示している。

(3) 検出素子、計測要素の性能評価

中性子検出器の満たすべき仕様を、炉雑音法により定量化し検出器開発方針を明確にし ただけでなく、一点炉動特性パラメータを陽に利用することなく臨界近接監視ができるよ うに既存の手法を改良し、良好な結果を得た。

検出素子が1 kGy/h 環境で動作するためには、ダイヤモンド基板内の欠陥だけでなく電 極表面の欠陥等によるチャージアップを減らすことで実現できることを明らかにし、実際 にイオンビームエッチングや合成条件の最適化により1 kGy/h に対応可能なダイヤモンド 検出素子製造プロセスを開発した。また信号処理集積回路開発においては、22 nm、28 nm、 65 nm 商用 CMOS プロセスを使用しトランジスタの10 MGy 未満の放射線耐性を調査し、量 産時の費用等も考え 65 nm プロセスを使用し、1 MGy まで動作する6種類の集積回路を開 発した。このプロセスにより開発した自立膜ダイヤモンド検出素子を用いた中性子検出素 子とこれらの耐放射線集積回路を使用し中性子感度とγ線バックグラウンド耐性の評価 を行った。1 kGy/hの環境で中性子感度が1 cm²当たり0.015 cps/nvを達成可能であるこ とを確認しかつ複数の検出素子を使用し中性子信号の読み出しを成功させた。さらに実機 プロトタイプ開発を進めるにあたっての事前研究を推進するために、中性子減速材厚につ いてのシミュレーションを行いつつ、6 cm 径ドライチューブ挿入可能な中性子検出器のモ ックアップの中性子感度評価も行い実機プロトタイプ開発における重要な研究開発項目 を抽出した。

今後の課題は以下の点である。

- ・中性子検出素子の量産に関するプロセスの最適化と実施体制の確立
- ・中性子感度向上と y 線バックグラウンド耐性向上のための信号処理特性ばらつきのチャンネル間補正手法の開発
- ・要素(検出素子および集積回路)をモジュールにするための実装技術の改良と量産用実装プロ セスの検討
- ・中性子感度を向上させるために、中性子コンバータの改良、信号処理手法の研究

・フィールド試験

上記を主軸として量産プロトタイプ開発研究を行うことで、実機製造を推進する。

参考文献

- [1-1] 技術研究組合国際廃炉研究開発機構, 平成 28 年度補正予算 廃炉・汚染水対策事業費補助金 (燃料デブリ・炉内構造物の取り出しに向けたサンプリング技術の開発), 平成 30 年度実 施分最終報告, 令和元年 7 月, https://irid.or.jp/_pdf/20180000_07.pdf (最終参照日: 2023 年 4 月 1 日).
- [1-2] 技術研究組合国際廃炉研究開発機構, 平成 29 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(X-6 ペネトレーションを用いた内部詳細調査 技術の現場実証)」,

https://irid.or.jp/_pdf/20180000_11.pdf(最終参照日:2023年4月1日).

- [3.1-1] DAQ-Middleware, https://daqmw.kek.jp/ (最終参照日 2023 年 4 月 1 日).
- [3.1-2] AIST, RT-Middleware, https://openrtm.org/openrtm/(最終参照日 2023 年 4 月 1 日).
- [3.2.3-1] S. Ohmagari, H. Yamada, N. Tsubouchi, H. Umezawa, A. Chayahara, A. Seki,
 F. Kawaii, H. Saitoh and Y. Mokuno, Schottky barrier diodes fabricated on diamond mosaic wafers: Dislocation reduction to mitigate the effect of coalescence boundaries, Appl. Phys. Lett., 114 (2019) 082104.
- [3.2.3-2] N. Tokuda, H. Umezawa, K. Yamabe, H. Ohkushi, S. Yamasaki, Hillock-Free Heavily Boron-Doped Homoepitaxial Diamond Films on Misoriented (001) Substrates, Jpn. J. Appl. Phys., 46 (2007) pp. 1469-1470.
- [3.2.3-3] H. Umezawa, N. Tokuda, M. Ogura, S.G. Ri and S. Shikata, Characterization of leakage current on diamond Schottky barrier diodes using thermionicfield emission modeling, Diamond Relat. Mater., 15 (2006) pp. 1949-1953.
- [3.2.4-1] 庄子正剛,内田智久,野村健一,堀井美徳,牛島洋史 "粘接着型フィルムコネク タ用印刷配線のアンペア級電流耐性の評価", Mate2018 第24回「エレクトロニク スにおけるマイクロ接合・実装技術」シンポジウム, pp. 145-148 (2018).
- [3.2.4-2] K. Nomura, Y. Horii, H. Ushijima, H. Ikedo, and K. Nagase, "Advanced screen-offset printing for fabricating thick electrodes on the concave surface of cylindrically curved glass", Microelectron. Eng., 197, pp.23-27 (2018).
- [3.2.4-3] K. Nomura, H. Ushijima, R. Mitsui, S. Takahashi, and S. Nakajima, "Screenoffset printing for fine conductive patterns", Microelectron. Eng., 123, pp. 58-61 (2014).
- [3.3.5-1] 林大和,加納慎也,和田怜志,基礎からわかる未臨界:第5回 1F 燃料デブリの臨界 近接監視手法の開発,日本原子力学会誌 ATOMO Σ, vol. 62, no. 2, 2020, pp. 89-93.
- [3.3.5-2] T.Endo, et al., Subcriticality Estimation Using Unscented Kalman Filter for Reactivity- and Source-Transients, Trans. Am. Nucl. Soc., vol.123, 2020, pp. 841-844.
- [3.3.5-3] T. Endo, A. Yamamoto, Comparison of Theoretical Formulae and Bootstrap Method for Statistical Error Estimation of Feynman-α Method, Ann. Nucl. Energy, vol. 124, 2019, pp. 606-615.
- [3.3.5-4] W. Naing, M. Tsuji, Y. Shimazu, Subcriticality Measurement of Pressurized Water Reactors by the Modified Neutron Source Multiplication Method, J. Nucl. Sci. Technol., vol. 40, no. 12, 2003, pp. 983-988.
- [3.3.5-5] R. P. Feynman, F. de Hoffmann, R. Serber, Dispersion of the Neutron Emission in U-235 Fission, J. Nucl. Energy, vol.3, no.1-2, 1956, pp. 64-69.

- [3.3.5-6] C. A. Sastre, The Measurement of Reactivity, Nucl. Sci. Eng., vol.8, no.5, 1960, pp.443-447.
- [3.3.5-7] Y. Shimazu, A Simple Procedure to Estimate Reactivity with Good Noise Filtering Characteristics, Ann. Nucl. Energy, vol. 73, 2014, pp. 392-397.
- [3.3.5-8] Keepin, G.R., Physics of Nuclear Kinetics, Addison-Wesley Pub. Co., 1965, 435p.
- [3.3.5-9] C. J. Werner, (Ed.), MCNP User's Manual Code Version 6.2, LA-UR-17-29981, 2017, 746p.
- [3.3.5-10] T. Endo, et al., Theoretical Derivation of a Unique Combination Number Hidden in the Higher-Order Neutron Correlation Factors Using the Pál-Bell Equation, Nucl. Sci. Eng., vol. 197, no. 2, 2023, pp. 176-188.
- [3. 3. 5-11] N. E. Holden, M. S. Zucker, Prompt Neutron Emission Multiplicity Distribution and Average Values (Nubar) at 2200 m/s for the Fissile Nuclides, Nucl. Sci. Eng., vol.98, no.2, 1988, pp. 174-181.
- [3.3.5-12] T. E. Valentine, MCNP-DSP Users Manual, ORNL/TM-13334-R2, 2001, 123p.
- [3.4-1] M. M. Tanaka, T. Endo, J. Kaneko, Y. Tanimura, H. Umezawa, K. Watanabe, Y. Fujita, E. Hamada, Y. Kobayakawa, T. Kishishita, M. Miyahara, K. Oda, H. Sendai, M. Sakaguchi, M. Shoji, T. Shimaoka and K. Tauchi, Neutron detection system without radiation protection for criticality approach monitoring based on diamond sensors and radiation-resistive integrated-circuits, 第6回福島 第一廃炉国際フォーラム 技術ポスターセッション, 2022年8月29日, いわき芸術 文化交流館アリオス.
- [3.4-2] 高エネルギー加速器研究機構,環境報告 2022, https://www.kek.jp/wpcontent/uploads/2022/10/ER2022.pdf (最終参照日:2023年4月1日).