

JAEA-Review 2022-017 DOI:10.11484/jaea-review-2022-017

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 (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-

Radiation Tolerant Rapid Criticality Monitoring with Radiation-hardened FPGAs (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 岡山大学

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

August 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

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 (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

岡山大学

(2022年5月2日受理)

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

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

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

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

本研究では集積回路技術に光技術を導入し、1 Grad のトータルドーズ耐性を持つ耐放射線光電 子 FPGA と光技術を用いずに既存の集積回路技術のみで 200 Mrad のトータルドーズ耐性を実現す る耐放射線リペアラブル FPGA の 2 つの開発を行う。

日本の研究チームは耐放射線 FPGA とハードウエア・アクセラレーションの面でイギリスの研究 チームを支援する。イギリスの研究チームは日本の支援を受け、強ガンマ線環境下で使用でき、 再臨界前の中性子線増を瞬時に検知可能な FPGA を用いた中性子線モニタリングシステムを実現 する。この中性子線モニタリングシステムを日本側の耐放射線 FPGA と組み合わせ、再臨界前の中 性子線増に即応できる耐放射線 FPGA システムを実現する。

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、岡山大学が実施した 成果を取りまとめたものである(令和2年度まで:静岡大学、令和3年度から:岡山大学)。 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

JAEA-Review 2022-017

Radiation Tolerant Rapid Criticality Monitoring with Radiation-hardened FPGAs (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

Okayama University

(Received May 2, 2022)

The Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science (CLADS), Japan Atomic Energy Agency (JAEA), had been conducting the Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project (hereafter referred to "the Project") in 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 FY2019, this report summarizes the research results of the "Radiation tolerant rapid criticality monitoring with radiation-hardened FPGAs" conducted in FY2020.

This research is developing a radiation-hardened optoelectronic FPGA with a 1 Grad total-ionizing-dose tolerance on which optical technologies are introduced onto a semiconductor technology and a radiation hardened FPGA with a 200 Mrad total-ionizing-dose tolerance not using any optical component. Moreover, Japanese research group will support hardware acceleration on FPGAs used for neutron-detection system developed by UK team. Finally, we will provide our radiation-hardened FPGA for the UK neutron-detection system.

Keywords: Radiation-hardened Device, Field Programmable Gate Array, Programmable Device, Scintillator, Total-dose Tolerance

This work was performed by Okayama University under contract with Japan Atomic Energy Agency. (Contract with Shizuoka University until FY2020, and with Okayama University from FY2021).

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
3.	Accepted Proposal in FY2019	;
4.	Accepted Proposal in FY2020	3
App	endix 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	渡邉 隆行	九州大学
先端計測技術の融合で実現する高耐放射線燃料デ ブリセンサーの研究開発	萩原 雅之	高エネルギー 加速器研究機構

国際協力型廃炉研究プログラム(日英共同研究)

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

3. 令和元年度 採択課題

令和元年度採択課題については以下のとおりである。

課題数:19課題

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

令和元年度 採択課題一覧

共通基盤型原子力研究プログラム

【若手研究】

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

共通基盤型原子力研究プログラム

【一般研究】

課題名	研究代表者	所属機関
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	岡山大学 (令和2年度まで 静岡大学)

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 2022-017

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、以下の課題の令和2年度の研究成果を取りまとめたものである。

国際協力型廃炉研究プログラム(日英共同研究)

課題名	研究代表者	所属機関
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	岡山大学 (令和2年度まで 静岡大学)

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

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 (契約番号 R021048-2)

成果報告書

令和3年9月 国立大学法人岡山大学

JAEA-Review 2022-017

本報告書は、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構の 「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」によ る委託業務として、国立大学法人岡山大学が実施した「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」の令和2年度の研究成果を取りまとめたものです。

目次

概略・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ vi
 はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
2. 業務計画・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2.1-1
2.1 全体計画・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2.1-1
2.2 実施体制・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2.2-1
2.3 令和2年度の成果の目標及び業務の実施方法・・・・・・・・・・・ 2.3-1
3. 令和2年度の実施内容及び成果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3.1.1-1
3.1 耐放射線光電子 FPGA の開発・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3.1.1-1
3.1.1 光学部の耐放射線化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3.1.1-1
3.1.2 集積回路部の耐放射線化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3.1.2-1
3.1.3 耐放射線試験(令和3年4月~令和3年9月)【岡山大学】・・・・・ 3.1.3-1
3.2 耐放射線リペアラブル FPGA の開発・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3.2.1-1
3.2.1 集積回路開発・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3.2.1-1
3.2.2 耐放射線試験(令和3年4月~令和3年9月)【岡山大学】・・・・・ 3.2.2-1
3.3 耐放射線ホログラムメモリの開発(再委託先:神戸市立工業高等専門学校)・3.3.1-1
3.3.1 液晶複合体を用いた回折光学素子の耐放射線試験・・・・・・・・・ 3.3.1-1
3.3.2 液晶複合体を用いた回折光学素子の光学特性と内部構造評価試験・・・・ 3.3.2-1
3.3.3 液晶複合体を用いた回折光学素子への放射線照射結果・・・・・・・・ 3.3.3-1
3.4 英国(Lancaster 大学)側の研究成果・・・・・・・・・・・・・・・・ 3.4-1
3.5 研究推進・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3.5-1
4. 結言・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 4-1

執筆者リスト

- 事業代表者 国立大学法人岡山大学 教授 渡邊 実
- 再委託先 神戸市立工業高等専門学校 教授 荻原 昭文

表一覧

表 2.1-1	全体計画表・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2.1-1
表 3.1.1-1	照射前のレーザ特性の計測値・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3.1.1-2
表 3.1.1-2	600 Mrad (6 MGy) 照射後のレーザ特性の計測値・・・・・・・・・3.1.1-2
表 3.1.2-1	ORGA VLSI のチップ仕様・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3.1.2-4

図一覧

図 2.2-1	実施体制図・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2.2-1
⊠ 3.1.1-1	耐放射線試験で用いたホログラムメモリの写真・・・・・・・・ 3.1.1-1
⊠ 3.1.1-2	ホログラムメモリからの回折パターン・・・・・・・・・・・ 3.1.1-1
⊠ 3.1.2-1	光電子 FPGA 試作チップ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・3.1.2-1
⊠ 3.1.2-2	ROの構成例・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3.1.2-2
⊠ 3.1.2-3	ROのホログラムメモリパターン・・・・・・・・・・・・・・・・ 3.1.2-2
⊠ 3.1.2-4	RO のコンテキストパターン・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3.1.2-3
図 3.1.2-5	光電子 FPGA の評価試験光学系の写真・・・・・・・・・・・・・・・・3.1.2-3
図 3.1.2-6	光電子 FPGA に回路を実装した状態での放射線照射試験の様子・・・・3.1.2-5
図 3.1.2-7	7 bit シフトレジスタと7段の ROを実装したホログラムパターン・・ 3.1.2-5
図 3.1.2-8	7 bit シフトレジスタと7段の RO のコンテキストパターン・・・・ 3.1.2-6
図 3.1.2-9	4 MBq の ²⁴¹ Am α線源・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3.1.2-7
図 3.1.2-10	2 枚の ²⁴¹ Am を実装したマウンタ・・・・・・・・・・・・ 3.1.2-7
⊠ 3.1.2-11	α線試験向け ORGA の光学系写真・・・・・・・・・・・・・・・ 3.1.2-7
⊠ 3.1.2-12	2 bit 乗算器のホログラムメモリパターン・・・・・・・・・ 3.1.2-8
⊠ 3.1.2-13	ホログラムメモリフィルムの写真・・・・・・・・・・・・・・・3.1.2-8
⊠ 3.1.2-14	2 bit 乗算器の回折光パターン・・・・・・・・・・・・・・・ 3.1.2-8
⊠ 3.1.2-15	デシケーター内での光電子 FPGA の試験の様子・・・・・・・・ 3.1.2-9
⊠ 3.2.1-1	0.18 µm CMOS プロセスを用いた「光並列構成法」と「部分的に並
	列化した構成法」の双方の機能を持つ VLSI チップ・・・・・・・ 3.2.1-1
⊠ 3.2.1-2	放射線照射後の VLSI チップ評価の様子・・・・・・・・・・・3.2.1-2
⊠ 3.3.1-1	石英基板を用いた液晶複合体からなる回折光学素子へのガンマ線の
	伝搬・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3.3.1-1
⊠ 3.3.1-2	サンプルへの放射線照射に用いた格納容器の模式図・・・・・・ 3.3.1-2
⊠ 3.3.2-1	回折効率の偏光角依存性測定光学系・・・・・・・・・・・・ 3.3.2-1
⊠ 3.3.2-2	記録パターン再生光学系・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3.3.2-2
図 3.3.2-3	偏光顕微鏡へのサンプルの設定角度配置・・・・・・・・・・ 3.3.2-3
図 3.3.3-1	放射線照射量が増加した場合の回折効率の偏光角依存性・・・・・ 3.3.3-1
⊠ 3.3.3-2	放射線照射量が増加した場合の全開口パターンの再生結果・・・・ 3.3.3-2
図 3.3.3-3	初期状態(放射線照射無)での偏光顕微鏡観察結果・・・・・・ 3.3.3-3
図 3.3.3-4	100 Mrad 照射後の偏光顕微鏡観察結果・・・・・・・・・・・ 3.3.3-4
図 3.3.3-5	200 Mrad 照射後の偏光顕微鏡観察結果・・・・・・・・・・・・・・ 3.3.3-4
図 3.3.3-6	300 Mrad 照射後の偏光顕微鏡観察結果・・・・・・・・・・・・ 3.3.3-5
🗵 3. 3. 3-7	サンプルに温度変化を与えた際の干渉縞の内部構造比較観察結果・・ 3.3.3-6
図 3.3.3-8	サンプルに温度変化を与えた際の断面輝度分布の変化・・・・・・ 3.3.3-6

略語一覧

FPGA	:Field Programmable Gate Array(プログラマブルゲートアレイ)
	工場出荷後にプログラムできる VLSI
CPLD	:Complex Programmable Logic Device(プログラマブルロジックデバイス)
	工場出荷後にプログラムできる不揮発性の VLSI
TMR	:Triple Modular Redundancy(3 重回路実装)
	3 つ同じ回路を実装する。放射線により一時的に発生するソフトエラーに対応
	できる。
VCSEL	:Vertical Cavity Surface Emitting Laser (垂直共振器面発光レーザ)
	アレイ化が容易なレーザ。
MEMS	:Micro Electro Mechanical Systems(微小な電気機械システム)
	微小な電気機械で放射線に強い。
ORGA	:Optically Reconfigurable Gate Array(光再構成型ゲートアレイ)
	研究代表者が世界で唯一研究を進める光電子 FPGA。
RO	:Ring Oscillator (リングオシレータ)
	NOT 回路を奇数段つなげ、最終段の出力を初段の入力に戻す発振回路。
LUT	:Look-Up Table (ルックアップテーブル)
	メモリの1種。ブール関数をプログラマブルに実装できる。

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 炉の専門家はデブリ付近の放射線強度がワーストケースでは1000 Sv/h 近くにも達する可能性 があることを指摘している。今後の廃炉作業においては、1000 Sv/h もの高い放射線環境下で あっても重いシールド材を用いることなく安定的に動作できる組み込みシステムが必要とな る。特に、現状ではγ線が支配的であり、γ線に強い耐放射線組み込みシステムが求められ る。

しかし、既存の集積回路は放射線に脆弱であり、トータルドーズ耐性は1 Mrad (10 kGy) に留まる。これでは 1000 Sv/h の放射線下では 10 時間で寿命となる。Micro Electro Mechanical Systems (以下、「MEMS」と略す。)やSiC等であればより高いトータルドーズ耐 性が実現できるが、素子を小型化し、集積化する研究は未だ途上にあり、既存のコンピュー タシステムを実現することは難しい。

本研究では集積回路技術に光技術を導入し、1 Grad (10 MGy)のトータルドーズ耐性を持つ 耐放射線光電子 FPGA と、光技術を用いずに既存の集積回路技術のみで 200 Mrad (2 MGy)の トータルドーズ耐性を実現する耐放射線 FPGA の1種であるリペアラブル FPGA の2つの開発を 行う。

令和2年度では耐放射線光電子 FPGA の開発において、ホログラムメモリ、レーザアレイの トータルドーズ耐性試験、集積回路部のソフトエラー耐性試験を実施した。また、耐放射線 リペアラブル FPGA の開発においては、「光並列構成法」と「電気的な構成法」の双方の機能 を持つ VLSI チップを試作した。そして、ソフトエラー耐性試験、トータルドーズ耐性試験を 実施した。

また、液晶と高分子材料を用いたホログラムメモリにフォトマスクから回路情報を記録し、 耐放射線光電子 FPGA に回路情報を書き込む検証を行った。 1. はじめに

1Fの廃炉の専門家はデブリ付近の放射線強度がワーストケースでは 1000 Sv/h 近くにも達す る可能性があることを指摘している。今後の廃炉作業においては、1000 Sv/h もの高い放射線 環境下であっても重いシールド材を用いることなく安定的に動作できる組み込みシステムが必 要となる。特に、現状ではγ線が支配的であり、γ線に強い耐放射線組み込みシステムが求め られる。

しかし、既存の集積回路は放射線に脆弱であり、トータルドーズ耐性は1 Mrad (10 kGy) に 留まる。これでは1000 Sv/h の放射線下では10時間で寿命となる。MEMS や SiC 等であればよ り高いトータルドーズ耐性が実現できるが、素子を小型化し、集積化する研究は未だ途上にあ り、既存のコンピュータシステムを実現することは難しい。

本研究では集積回路技術に光技術を導入し、1 Grad (10 MGy)のトータルドーズ耐性を持つ 耐放射線光電子 FPGA と、光技術を用いずに既存の集積回路技術のみで 200 Mrad (2 MGy)のト ータルドーズ耐性を実現する耐放射線リペアラブル FPGA の 2 つの開発を行う。日本の研究チ ームは耐放射線 FPGA とハードウエア・アクセラレーションの面で英国の研究チームを支援し、 英国の研究チームはこの日本の支援を受け、高いガンマ線環境下で使用でき、再臨界前の中性 子線増を瞬時に検知可能な FPGA を用いた中性子線モニタリングシステムを実現する。最終的 に、この中性子線モニタリングシステムを目本側の耐放射線 FPGA と組み合わせ、再臨界前の 中性子線増に即応できる耐放射線 FPGA システムを実現することが本研究の目的である。 2. 業務計画

2.1 全体計画

本業務の全体計画表を表 2.1-1 に示す。

表 2.1-1 全体計画表

年度項目	令和元年度	令和2年度	令和3年度
(英国側スケジュール)	管理、エンドユーザ 業務提携、交流活動	中性子ディテクターの開 発:モデリング、構成要 素の決定、設計・試作、 統合テスト	ファームウエアの開発: 設計、ソフトウエアトレ ーニング、実装設計、デ ータ取得ソフトウエア、 統合テスト
(1) 耐放射線光電子 FPGAの開発①光学部の耐放射線化	ホログラムメモリとレー ザアレイの耐放射線化の 研究・パッケージ開発	ホログラムメモリとレー ザアレイの耐放射線化の 研究・パッケージ開発	ホログラムメモリとレ ーザアレイの耐放射線 化の研究・パッケージ 開発
②集積回路部の耐放射 線化	耐放射線光電子 FPGA の改良設計	耐放射線光電子 FPGA チ ップを試作	耐放射線光電子 FPGA チッ プを試作
③耐放射線試験 (⁶⁰ Co、 ²⁴¹ Am、 ²⁵² Cf)	ホログラムメモリとレー ザアレイの耐放射線試験	ホログラムメモリとレ ーザアレイの耐放射線 試験	ホログラムメモリとレ ーザアレイの耐放射線 試験
 (2) 耐放射線リペアラブ ル FPGA の開発 ①回路開発 	耐放射線リペアラブル FPGA の設計	「光並列構成法」と「部 分的に並列化した構成 法」の双方の機能を持つ チップを試作	電気的に構成可能なチッ プを試作
②耐放射線試験 (⁶⁰ Co、 ²⁴¹ Am、 ²⁵² Cf)	↔	VLSI のトータルドーズ・ ソフトエラー耐性試験	VLSI のトータルドーズ・ ソフトエラー耐性試験
 (3) 耐放射線ホログラム メモリの開発 (再委託先:神戸市立 工業真等専門学校) 	耐放射線ホログラムメ モリ用レーザ光学シス テムの開発	ホログラムメモリへの回 路情報の光記録実験の実 施	回路情報を記録したホロ グラムメモリによる光書 き込み試験を実施
(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 ◆→	◆ よとめ・評価 ◆ ◆ ◆	◆ まとめ・評価

2.2 実施体制

本業務の実施体制を図 2.2-1 に示す。



図 2.2-1 実施体制図

2.3 令和2年度の成果の目標及び業務の実施方法

これまでの研究から、耐放射線光電子 FPGA では理論上、高いトータルドーズ耐性が実現で きることが分かっているが、耐放射線リペアラブル FPGA については、既存の集積回路ではこ れまで不可能と考えられてきた耐放射線性能への挑戦であり、普通に単体で試作・研究を進 めても失敗する可能性が高いことが予測された。このことから令和元年度の研究においては 「光並列構成法」と「部分的に並列化した構成法」の双方の機能を持つ耐放射線光電子 FPGA を設計している。耐放射線光電子 FPGA にリペアラブル FPGA の構成機能を追加実装すること で、仮にリペアラブル FPGA の構成機能が放射線により簡単に破壊されてしまったとしても、 耐放射線光電子 FPGA の機能によりゲートアレイの動作を維持し、リペアラブル FPGA 側の構成 機能の脆弱個所の特定や改良が可能となるように設計した。もちろん、この双方の機能を持 つ耐放射線光電子 FPGA により、耐放射線光電子 FPGA の評価試験も実施できる。この設計資産 をベースにして令和2年度の研究を以下のように実施した。

(1) 耐放射線光電子 FPGA の開発

①光学部の耐放射線化

ホログラムメモリに対して、1 Grad (10 MGy) までのトータルドーズ耐性の評価を行う。 レーザ部に関しては、複数のレーザに対して、放射線に対する V-I 特性、パワー効率の評価 を行い、レーザの故障を許容する運用によりどの程度のトータルドーズ耐性の向上が可能か、 600 Mrad (6 MGy) まで耐放射線性の評価を行う。

②集積回路部の耐放射線化

耐放射線光電子 FPGA の改良設計チップを試作し、トータルドーズ耐性、ソフトエラー耐性の両面から評価を行う。

③耐放射線試験(⁶⁰Co、²⁴¹Am、²⁵²Cf)

ホログラムメモリ、レーザアレイ、VLSI チップ個別に⁶⁰Coを用いたトータルドーズ試験を 行う。また、²⁴¹Am、²⁵²Cf による耐放射線光電子 FPGA へのソフトエラー耐性試験を行う。

(2) 耐放射線リペアラブル FPGA の開発

①集積回路開発

「光並列構成法」の耐放射線光電子 FPGA の集積回路部に改良を加え、「光並列構成法」 と「部分的に並列化した構成法」の双方の機能を持つチップを試作する。耐放射線評価試験 を行い、脆弱箇所を改良する。

②耐放射線試験(⁶⁰Co、²⁴¹Am、²⁵²Cf)

(2)①で試作したチップに対して、⁶⁰Coを用いたトータルドーズ耐性試験、²⁴¹Am と²⁵²Cfを用いたソフトエラー耐性試験を行い、ソフトエラー耐性を明らかにする。

(3) 耐放射線ホログラムメモリの開発(再委託先:神戸市立工業高等専門学校)

液晶と高分子材料を用いてフォトマスクからの回路情報を記録したホログラムメモリを作 製する。二次元フォトダイオードアレイからなる耐放射線光電子 FPGA に、作製したホログラ ムメモリからの回路情報の光書き込みによる回路実装についての検証を行う。

(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(CLADS)、英国の 研究チーム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。

- 3. 令和2年度の実施内容及び成果
 - 3.1 耐放射線光電子 FPGA の開発
 - 3.1.1 光学部の耐放射線化



 (a) 初期のホログラムメモリ
 (b) 1 Grad (10 MGy) トータルドーズの ホログラムメモリ
 図 3.1.1-1 耐放射線試験で用いたホログラムメモリの写真



(a) 初期のホログラムメモリ

ラムメモリ (b) 1 Grad (10 MGy) トータルドーズの ホログラムメモリ 図 3.1.1-2 ホログラムメモリからの回折パターン

線源⁶⁰Coを用いて、ホログラムメモリが1 Grad (10 MGy)のトータルドーズに耐えること を実証した[1][2]。図 3.1.1-1(a)に放射線照射前のホログラムメモリ、図 3.1.1-1(b)に 1 Grad (10 MGy)のトータルドーズを与えたホログラムメモリの写真をそれぞれ示す。ホログ ラムメモリを挟むガラス板は茶褐色に変色しているがホログラムメモリそのものに大きな劣 化は見られていない。ノンブラウンニングガラスを用いた試験も行っており、ノンブラウン ニングガラスを使えば、輝度の劣化はより少なくできる。図 3.1.1-2(a)に放射線照射前のホ ログラムメモリからの回折光 (コンテキストパターン:回路パターン)、図 3.1.1-2(b)に 1 Grad (10 MGy)のトータルドーズを与えたホログラムメモリからの回折光を示す。輝度値は 低下しているもののコンテキストパターンに劣化が見られないことが確認でき、光再構成型 ゲートアレイ(以下、「ORGA」と略す。)に組み込み、問題なく使用できることを確認した。 また、耐放射線光電子 FPGA のレーザアレイ部のトータルドーズ耐性試験を 600 Mrad (6 MGy) まで実施した。放射線を照射する前のレーザ特性の計測結果を表 3.1.1-1 に、600 Mrad (6 MGy) 照射後のレーザ特性の計測値を表 3.1.1-2 に示す。現在までレーザダイオードの 故障は確認されていない。

レーザ	パワー	順方向電圧	電流
LD1	2.60 µW	1.851 V	1.49 mA
LD2	1.88 µW	1.849 V	1.55 mA
LD3	2.08 µW	1.851 V	1.61 mA
LD4	1.80 µW	1.852 V	1.61 mA

表 3.1.1-1 照射前のレーザ特性の計測値

表 3.1.1-2 600 Mrad (6 MGy) 照射後のレーザ特性の計測値

レーザ	パワー	順方向電圧	電流
LD1	1.47 μW	1.852 V	1.79 mA
LD2	1.56 µW	1.847 V	1.78 mA
LD3	1.52 µW	1.849 V	1.79 mA
LD4	1.51 μW	1.854 V	1.80 mA

3.1.2 集積回路部の耐放射線化



図 3.1.2-1 光電子 FPGA 試作チップ

フォトダイオードの初期電荷をコントロールするリフレッシュ信号、チップを初期化する ために使用するリセット信号を大幅に冗長化・強化した耐放射線光電子 FPGA の改良チップ を試作した。耐放射線光電子 FPGA 内のリフレッシュ信号、リセット信号が制御できなくな るとチップの構成が不可能になり、耐放射線光電子 FPGA の全ての機能を失うことになる。 新しい耐放射線光電子 FPGAではこの致命傷となる信号をそれぞれ9本に冗長化し、事実上、 故障が生じない状態にまで強化した。この9本は実用化した場合でも最適本数と言える。冗 長化に必要となるセル類は全てカスタム設計しており、チップ面積は従来のものとほぼ変わ らない。この光電子 FPGA 試作チップの写真を図 3.1.2-1 に示す。これまでに本チップの基 本動作の確認を終えている。放射線試験の結果については3.1.2.1 目に記載する。

3.1.2.1 耐放射線試験

耐放射線光電子 FPGA 向け ORGA VLSI のトータルドーズ耐性試験を実施した。ORGA の各論 理ブロックに対してリングオシレータ(以下、「RO」と略す。)を実装し、その動作周波 数を計測することで劣化度合いを評価した。RO は図 3.1.2-2 に示すようにインバータを奇 数個実装して実現され、自己発振する。各インバータは Look-Up Table(以下、「LUT」と 略す。)内に実装される。



図 3.1.2-2 ROの構成例

今回の計測では 1 段の RO を実装し、その発振周波数を Mixed Signal Oscilloscope (MS09254A: Agilent Technologies) で計測した。RO のホログラムメモリパターン、コン テキストパターンをそれぞれ、図 3.1.2-3、図 3.1.2-4 に示す。



図 3.1.2-3 RO のホログラムメモリパターン



図 3.1.2-4 RO のコンテキストパターン



図 3.1.2-5 光電子 FPGA の評価試験光学系の写真

また、試験光学系を図 3.1.2-5 に示す。左から順に、He-Ne レーザ、コリメータ、平凸 レンズ、液晶空間光変調素子(L3B00Z-G84G:セイコーエプソン株式会社)、ORGA VLSIで ある。ORGA VLSI は液晶空間光変調素子から 150 mm の位置に設置してある。液晶空間光変 素子の解像度は 1,920×1,080 ピクセルであり、各ピクセルサイズは 7.0 µm×7.0 µm であ る。この液晶空間光変素子に図 3.1.2-3 のホログラムパターンを実装した。試験に使用し た ORGA VLSI の仕様を表 3.1.2-1 に示す。この 0.18 µm CMOS プロセス ORGA VLSI には 8,832 個のフォトダイオードが実装されている。フォトダイオードの大きさは 4.40 µm×4.45 µm である。このフォトダイオードは横が 30.08 µm、縦が 30.24 µm の間隔で配置されている。 ゲートアレイの構造は既存の FPGA と同じであり、論理ブロックが 512 個、スイッチングマ トリクスが 576 個、入出力ビットが 36 bit 実装されている。LUT は論理ブロックに 2 個実 装されており、トータル 1024 個である。再臨界監視のアルゴリズム実装において、この LUT 数は十分であると考えられる。この試験システムを用いて放射線に対するトータルド ーズ耐性評価を実施した。

プロセステクノロジー	0.18 µm standard five metal CMOS process
チップサイズ	5.0 mm \times 5.0 mm
ゲートアレイ面積	横:4.1 mm、縦:2.2 mm
供給電圧	Core 1.8 V, I/O 3.3 V
フォトダイオードの総数	8,832 個
フォトダイオードサイズ	4.40 µm×4.45 µm
フォトダイオードの間隔	橫:30.08 µm、縦:30.24 µm
論理ブロックの数	512 個
LUT 数	1,024 個
スイッチングマトリックスの数	576 個
配線チャネル数	8本
I/0 のビット数	36 bit

表 3.1.2-1 ORGA VLSI のチップ仕様



図 3.1.2-6 光電子 FPGA に回路を実装した状態での放射線照射試験の様子



図 3.1.2-7 7 bit シフトレジスタと7段の RO を実装したホログラムパターン



図 3.1.2-8 7 bit シフトレジスタと7段の RO のコンテキストパターン

今回の試験では 30 TBq の ⁶⁰Co ガンマ線源を使用し、照射線量率 2.98~2.99 kGy/h にお いて VLSI チップが動作した状態で放射線を照射し、活電状態での耐放射線試験を実施した。 図 3.1.2-6 に光電子 FPGA の活電状態での放射線照射試験の様子を示す[3][4]。累計で 80.0 Mrad (800 kGy)を照射した。中央奥に設置されているのが ORGA VLSI であり、手前にはク ロック信号を供給する水晶発振回路が置かれている。この水晶発振回路は耐放射線性を有 し、300 Mrad (300 kGy)を超えるトータルドーズ耐性を有する。ORGA には 7 bit のシフト レジスタと 7 段の RO を実装し、動作させたままで放射線を照射した。7 bit のシフトレジ スタと 7 段の RO のコンテキスト情報を持つホログラムパターンを図 3.1.2-7 に示す。この ホログラムパターンは空間光変調素子に実装された。図 3.1.2-8 に、空間光変調素子から の回折光、つまりコンテキストパターンを示す。この画像は CMOS カメラで撮影された。最 終的に、このコンテキストパターンがゲートアレイ上に実装される。

動作周波数は放射線照射前が最高 146.72819 MHz、最低 103.15789 MHz、平均 126.44669 MHz で、照射後が最高 142.16422 MHz、最低 100.86496 MHz、平均 123.87621 MHz であった。 また各論理ブロックの遅延時間は放射線照射前が最小 3.407661473 ns、最大 4.846938998 ns、平均 3.969716580 ns で、照射後が最小 3.517059356 ns、最大 4.957122870 ns、平均 4.051761595 ns であった。どの論理ブロックも、照射前に比べて動作周波数が低下しているが、壊れる状況には至っていない。そして、7 bit のシフトレジスタと 7 段の R0 は 80.0 Mrad (800 kGy) 照射後も問題なく動作していることを確認している。R0 の動作周波数は 11.52 MHz から 11.35 MHz にわずかに低下しているが、許容範囲内と言える。結果、耐放射線光電子 FPGA チップの耐放射線性能は非常に高いことが実証され、このままで実使用に耐えうることが確認できた。尚、放射線の影響はあくまでも集積回路部だけに発生し、集積 回路を遠隔から制御する配線等に放射線の影響は一切生じない。

次に、 α 線源である 4 MBq の ²⁴¹Am を 2 つ用いたソフトエラー耐性評価試験の結果を示 す。使用した ²⁴¹Am α 線源を図 3.1.2-9 に示す。ORGA では直上から光によるコンテキスト パターンを供給する必要があり、チップの直上に線源を配置することができない。このた め、図 3.1.2-10 に示すマウンタを用いて斜め上方向から α 線が入射するようにして放射線 試験を行った。 α 線は入射角にあまり影響されず、距離の 2 乗のファクターのみ考慮すれ ば良い。4 MBq の ²⁴¹Am が 2 枚集積回路部から約 3 cm の距離に置かれており、集積回路に入 射する単位時間当たりの α 線の数は約 17700 本/s と見積もれる。



図 3.1.2-9 4 MBq の²⁴¹Am α線源

図 3.1.2-10 2 枚の²⁴¹Am を実装したマウンタ



図 3.1.2-11 α線試験向け ORGA の光学系写真



図 3.1.2-12 2 bit 乗算器のホログラムメモリ パターン

図 3.1.2-13 ホログラムメモリフィルム の写真



図 3.1.2-14 2 bit 乗算器の回折光パターン



図 3.1.2-15 デシケーター内での光電子 FPGA の試験の様子

α線試験向けの 0RGA の光学系を図 3.1.2-11 に示す。この 0RGA は波長 650 nm、5 nW の 半導体レーザ (DL-3247-165; SANYO Electric Co., Ltd. Semiconductor Company) とホロ グラムフィルム (銀塩フォトマスクフィルム; UnnoGiken Co., Ltd.)、そしてローム社 0.18 µm プロセスで試作された 0RGA VLSI で構成される。この評価試験には 2 bit 乗算器を 使用した。この乗算器の回路実装に使用するホログラムメモリのパターンは 2000×2000 ピ クセルで構成され、計算機によって計算された。このホログラムメモリパターンを図 3.1.2-12 に示す。そして、5080 dpi の解像度で銀塩フィルムに描画したものが図 3.1.2-13 に示すホログラムメモリフィルムである。このホログラムメモリフィルムから読み出され た 2 bit 乗算器の回折光パターンを図 3.1.2-14 に示す。半導体レーザとホログラムフィル ムは、アクリルフレームで 3 軸のステッピングモータ駆動ステージ (OSMS26-50 (XYZ); SIGMAKOKI Co., Ltd.) に固定されており、リモートでの位置調整を可能にしている。半導 体レーザとホログラムフィルムの距離は 5 cm、ホログラムフィルムと 0RGA VLSI の距離は 6.5 cm とした。 本試験では α 線のエネルギーの減衰を防ぐ目的のため、図 3.1.2-15 に示すデシケーター (SSVD-450; AS ONE Corporation) と油回転真空ポンプ (AVRI-60; AS ONE Corporation) を使用し、真空状態を調節して試験を行った[5]。 α 線照射試験時の ORGA の光学系写真を図 3.1.2-15 (右図) に示す。本試験では、2 bit 乗算回路の4 bit の出力結果を、放射線が当たらない外部デバイスで計算した 2 bit 乗算器の結果と比較することで、ORGA での出力結果に異常が生じる回数を調べた。スクラビング周期が 30 µs の時、10 分間エラーなしで動作させることに成功した。

中性子線モニタリングシステムや組み込みシステムの制御周期は1 ms 以下である。エラ ーインターバルが 10 分以上のハードウエアシステムを用いることができれば、1 ms 周期 内に 2 回演算を行い、一致していれば正しい結果と認識する時分割多重ソフトウエア処理 を加えるだけで、計算間違いが起きるエラーインターバルを 30 年以上に拡張できる。事実 上、ソフトエラーを封じ込めることができると言える。 3.1.3 耐放射線試験(令和3年4月~令和3年9月)【岡山大学】

ホログラムメモリ部については、⁶⁰Coを用いて1 Grad (10 MGy) までのトータルドーズ耐 性試験を行い、問題なく動作できることを確認した。試験結果は3.1.1項(p. 3.1.1-1)に 記載した。また、レーザアレイについては600 Mrad (6 MGy)までのトータルドーズ耐性試 験を行い、レーザが故障無く使用できることを確認した。この結果は3.1.1項(pp. 3.1.1-1~3.1.1-2)に記載した。耐放射線光電子 FPGA の VLSI 部については、⁶⁰Co ガンマ線源を使 用し、照射線量率2.98~2.99 kGy/h において VLSI チップが動作した状態で放射線を照射す る活電状態での耐放射線試験を実施した。図3.1.2-6 に光電子 FPGA の活電状態での放射線 照射試験の様子を示す。累計で80.0 Mrad (800 kGy)を照射し、動作に問題が生じないこと を確認した。この試験結果は3.1.2.1 目に記載している(pp. 3.1.2-2~3.1.2-6)。

また、耐放射線光電子 FPGA の VLSI 部のソフトエラー耐性についても評価を実施した。ま ず真空チャンバー内に²⁴¹Am を設置し、真空状態にてソフトエラー耐性試験を実施した。結 果を 3.1.1 項 (pp. 3.1.2-6~3.1.2-10) に示す。スクラビング周期を 30 µs としたときに 10分間エラーなしで動作できることを確認し、事実上、ソフトエラーを封じ込めることに成 功した。

また、同様に中性子線を耐放射線光電子 FPGA に照射し、ソフトエラー耐性を評価した。 この結果、ソフトエラーは一切発生せず、こちらでも封じ込めに成功した。 3.2 耐放射線リペアラブル FPGA の開発3.2.1 集積回路開発



図 3.2.1-1 0.18 µm CMOS プロセスを用いた「光並列構成法」と 「部分的に並列化した構成法」の双方の機能を持つ VLSI チップ

光を用いて並列的に構成が可能な「光並列構成法」を用いる耐放射線光電子 FPGA の集積 回路部に改良を加え、図 3.2.1-1 に示すような「光並列構成法」と「シリアル構成を部分的 に並列化した構成法」の双方の機能を持つチップを試作した。チップの大きさは 5 mm 角で あり、用いたプロセスは ROHM Co., Ltd. の 0.18 µm CMOS プロセスである。このチップには 154 個の 4 入力 LUT が実装されており、配線チャネルは 8 本である。これまで通り光による 再構成が可能であることに加え、電気的な構成も可能である。この電気的なシリアル構成回 路は 3 重に冗長化されており、部分的な故障があっても構成が不可能になることは無い。た だ、光再構成に比べると圧倒的に脆弱であり、この設計チップでは電気的な構成が不可能に なった段階から光構成機能を用いて故障個所等を特定できるように設計してある。脆弱な個 所があれば特定し、さらに改良を加える予定であったが、現在までに脆弱な個所は見つかっ ていない。つまり、このまま実用化できると言える。



図 3.2.1-2 放射線照射後の VLSI チップ評価の様子

耐放射線リペアラブル FPGA に対して ⁶⁰Co を用いたトータルドーズ耐性試験を実施し、50 Mrad (0.5 MGy) までの動作確認を終えた。50 Mrad (0.5 MGy)のトータルドーズにおいて、 7 個の I/O ブロック、7 個の論理ブロックをモニタリングし、それらに故障は生じていない ことを確認している。また、電気的な構成機能も正常であり、故障が生じずに動作できてい ることを確認した。加えて、50 Mrad (0.5 MGy) のトータルドーズを与えたチップに対して 2 ビットカウンタ回路を 7 個実装し、24 時間の連続動作を行わせてみたが、問題なく動作で きていることを確認した。現在の 50 Mrad (0.5 MGy) の耐放射線の値は市販 FPGA チップの 1 Mrad (10 kGy) の 50 倍の値であり、現状、最強の耐放射線 FPGA と言える。放射線照射後 の VLSI チップ評価の様子を図 3.2.1-2 に示す。引き続き、トータルドーズ耐性試験を続け ていく予定である。ソフトエラー試験については 3.1.3 項の ²⁴¹Am を用いた試験において、 光電子 FPGA に相乗りして実証した。TMR (3 重回路実装) で 30 分間、ソフトエラーを封じ込 める試験に成功している。 3.2.2 耐放射線試験(令和3年4月~令和3年9月)【岡山大学】

耐放射線リペアラブル FPGA に対して⁶⁰Co を用いたトータルドーズ耐性試験を 100 Mrad (1 MGy) まで実施し、動作確認を実施した。100 Mrad (1 MGy) のトータルドーズにおいて、7 個の 1/0 ブロック、7 個の論理ブロックをモニタリングし、それらに故障は生じていないことを確認している。また、電気的な構成機能も正常であり、故障が生じずに動作できていることを確認した。²⁴¹Am を用いたソフトエラー耐性試験については 3.1.3 項の試験において既に完了している。

また、耐放射線光電子 FPGA と同様に、耐放射線リペアラブル VLSI に対しても中性子線に よるソフトエラー耐性試験を実施した。結果、ソフトエラーは一切発生せず、こちらでも完 全な封じ込めに成功した。

- 3.3 耐放射線ホログラムメモリの開発(再委託先:神戸市立工業高等専門学校)3.3.1 液晶複合体を用いた回折光学素子の耐放射線試験
 - (1) ガンマ線の媒質中の伝搬原理

液晶デバイスへの放射線量を定量化するため、基板を介した透過率の算出過程について 説明する。図 3.3.1-1 のセル内部に形成された液晶デバイスの断面図をもとに、基板を透 過し液晶に照射されるガンマ線の透過率 Tは、ガンマ線に対する吸収係数 α 、基板密度 ρ 、 基板の厚さ tを用いると、(1)式で表わされる[6][7]。

 $T = e^{-\alpha \rho t} \tag{1}$

この透過率が大きいほど基板の影響を受けずに液晶へ放射線が照射できることを表して おり、本研究で用いた合成石英基板の場合、吸収係数 a は 0.1 cm²/g、基板密度 ρ は 2.5 g/cm³、基板の厚さ t が 0.11 cm となっている。これを(1)式に代入した時の透過率 T は 0.97 となるので、ガンマ線の 97 %にあたる大部分が入射側の合成石英基板を透過して液晶複合 体から構成される回折格子層に照射されることになる。



図 3.3.1-1 石英基板を用いた液晶複合体からなる回折光学素子へのガンマ線の伝搬

(2) ガンマ線照射設備と照射方法

本研究では、静岡大学理学部の放射線照射施設を利用することで、⁶⁰Co を用いてガンマ 線の照射実験を行った。1時間当たりの照射エネルギーは 3.5 kGy/h 程度であり、総照射 量は照射時間によって制御した。ここで Gy (グレイ)とは、放射線によって人体や物体な どに与える影響に着目したエネルギー単位である。一方、アメリカなどでよく使用されて いる放射線量を表す単位としては、rad (ラディエーション)が一般的である。この放射 線量について考えると、耐放射線グレードの集積回路でも1 Mrad 程度までの放射線量まで しか使用できないと言われており、ROM や RAM といったメモリは1 Mrad 程度において使用 不能になると考えられている[8][9][10]。ここで、1 rad = 0.01 Gy に相当するため、連続 して照射する 1 サイクルの放射線量の目安として、集積回路の場合より大きい放射線耐性 試験を想定して、100 Mrad = 1000 kGy を設定した。この 1000 kGy までの照射量に到達す るには、およそ 286 時間を要する。この放射線量としてはこれ以後、rad の単位を用いて 記述する。

図 3.3.1-2 に、本実験で利用した放射線照射実験施設の格納容器の模式図を示す。本研 究では、1 サイクルごとに光学特性評価及び内部構造の観察を行い、放射線照射量を増加 させながらガンマ線による影響を調査した。



図 3.3.1-2 サンプルへの放射線照射に用いた格納容器の模式図

3.3.2 液晶複合体を用いた回折光学素子の光学特性と内部構造評価試験

(1)回折効率の偏光角依存性測定

回折光学素子の光学特性としては、入射した光が内部に形成された格子構造により、回 折されて進行方向が変化する割合を回折効率として定義し、光学性能を表す尺度としてい る。この回折効率が高い程、画像等を記録したホログラムメモリ(ホログラムメモリの原 理については 3.3 を参照)では、再生像が明るくなり、ホログラフィックディスプレイの 分野や、ホログラフィック光学素子への応用においても望ましい[11]。



図 3.3.2-1 回折効率の偏光角依存性測定光学系

図 3.3.2-1 に回折効率の偏光角依存性を測定する光学系を示す。まず作製した回折光学 素子サンプルを光学系に設置し、532 nmのレーザ光(最大出力1 mW)をサンプルに照射し た。また、光学系が環境光の影響を受けないよう黒い布を用いて環境光を遮光した。光セ ンサ及び光パワーメータを用いてサンプルへの入射光強度 *I* [µW]、サンプルを透過した光 強度 *I*₀ [µW]、サンプルを透過し、回折した光強度 *I*₁ [µW]を測定し、以下の式より回折効 率を評価した[11]。このとき、入射光強度は図 3.3.2-1 に示すように光センサをサンプル 前に移動して測定した。回折効率は偏光板を用いて偏光角を 0° から 180° まで変更し、 30° ごとの間隔で測定した。

$$\eta_1 = I_1 / I$$
(2)
$$\eta_2 = I_1 / (I_0 + I_1)$$
(3)

(2)式は入射光強度 Iに対する回折光強度 I₁の割合を示し、サンプルによる光の吸収損失 を含んだ場合の定義となっている。(2)式では、母材としての石英基板からの反射や放射 線による透過率の変化も併せて含まれることになる。一方、(3)式は透過光強度 I₀と回折 光強度 I₁の和に対する回折光強度の割合を示し、サンプル透過後の光強度のみを用いて評 価しているため、石英基板やサンプルによる光の反射や吸収損失を含まず、内部の回折格 子の光学特性の影響が評価される。 (2)ホログラムメモリの記録と再生方法

ガンマ線を照射することで、サンプルに記録した情報の再生にどのような影響が生じる かを検証するための評価を行った。図 3.3.2-2 にサンプルに記録したパターンを再生する ために使用した光学系を示す。20×17 個からなる 20 µm々直径の円が記録された全開ロパ ターンのフォトマスクを用いてレーザ干渉によりホログラムメモリを作製した。この全開 ロパターンを記録したサンプルを図 3.3.2-2 に示す光学系に設置した後、遮光板を用いて 物体光を遮断し参照光のみをサンプルに照射することで元の全開ロに相当する輝点のパタ ーンを再生することができる。全開ロパターンとは、光再構成用に設計されたゲートアレ イ内に設置されているフォトダイオードの 2 次元配置位置に対応した輝点のパターンであ る[7]。直径20 µmの円形開ロが90 µmピッチで、横方向と縦方向にそれぞれ20×17 (340) 個並んだパターンに相当する。光再構成システムにおいては、令和元年度の報告書におい て説明したように回路情報を輝点の数と位置からなるパターンとして設計して記録する。 今回、ゲートアレイ内に配置されている全てのフォトダイオードに光照射を行うことが可 能かを確かめるため、全開ロパターンを記録したホログラムメモリを作製した。このサン プルからの再生像は、CCD カメラを用いて検出してパターン観察を行うことで放射線照射 に対する影響を評価した。



(3)回折光学素子の内部構造評価方法

ガンマ線照射によるサンプルの内部構造への影響を評価するために偏光顕微鏡を用いた 観察を行った。本研究では、ガンマ線照射実験後の評価に加えて、回折光学素子内部の液 晶分子の配向状態の変化に対応すると考えられる構造変化について詳細に調査した。図 3.3.2-3 にサンプルを偏光顕微鏡に設置した際のサンプルの設定角度の状態を示す。



入射光側の偏光板を偏光子、光が透過する側の偏光板を検光子と呼ぶ。図 3.3.2-3(a)で は偏光子を透過した光は直線偏光となり液晶の長軸方向に平行の異常光となるが、常光成 分は存在しない。この結果、サンプルを透過する光の偏光方向が変わらないため、サンプ ルを透過した光の偏光方向と検光子の方向は 90°になり、光は検光子により遮断される。 一方、図 3.3.2-3(b)ではサンプルを45°傾けているため、偏光子を透過した光の偏光方向 と液晶の長軸方向が異なり、サンプルを透過した光の偏光状態は楕円偏光となり、光の一 部が検光子を透過する。このことから、設定角度が 45°の時では液晶複合体を用いた回折 光学素子における高分子層と液晶層での光の透過割合が大きく異なるため、明暗からなる 格子構造が観察できる[12][13]。

ガンマ線照射後の内部構造の観察方法としてはまず、対物レンズの倍率を 10 倍または 100 倍に設定し、接眼レンズを 10 倍に固定した偏光顕微鏡に図 3.3.2-3 に示すようにサン プルを設置した後、白色光をサンプルに照射した。その後、接眼レンズをのぞきながらピ ントを合わせ、あらかじめ偏光顕微鏡に接続されていたデジタルカメラを用いて内部構造 の画像データを取り込んだ。

- 3.3.3 液晶複合体を用いた回折光学素子への放射線照射結果
 - (1) 放射線照射量の光学特性への影響

レーザ露光により回折格子のみを記録したサンプルを作製し、この初期状態における回 折効率から放射線照射量を100 Mrad ずつ増加させた場合の放射線量に対する回折光学特性 としての偏光角依存性を測定した結果を図3.3.3-1 に示す。図3.3.3-1(a)より偏光角0° において P 偏光(電磁波の振動面が入射面に平行な偏光)を入射すると、液晶分子中では 最も屈折率の高い長軸方向に平行光が入射され、回折光が大きくなるので回折効率も大き く生じることになる。偏光角を変化させながら S 偏光 (P 偏向に対して垂直な直線偏向) に近づけると、液晶の屈折率は低下するため回折効率は減少し、S 偏光入射時に回折効率 は最も小さくなる。初期状態において P 偏光を入射した際は、サンプルによる光の吸収ロ スを考慮した ŋ1の場合は75 %以上、サンプルによる光の吸収ロスを考慮しない ŋ2の場合 では80 %以上を有することが確認でき、高い回折効率を有する回折光学素子を用いた放射 線試験が可能になっている。



図 3.3.3-1(b)は、サンプルに 100 Mrad のガンマ線を照射した後の回折効率の偏光角依存性を示している。P 偏光を入射した場合の回折効率は、 η_1 が 73 %、 η_2 が 84 %となり、 図 3.3.3-1(a)と比較すると若干の回折効率の低下は見られるものの、高い回折効率を保持しているといえる。図 3.3.3-1(c)はサンプルに 200 Mrad のガンマ線を照射した後の回折効率の偏光角依存性を示すものである。P 偏光を入射した場合の回折効率は、 η_1 が 71 %、 η_2 が 84 %となっており、200 Mrad を照射後であっても高い回折効率を保持していることがわかる。図 3.3.3-1(d)はサンプルに 300 Mrad のガンマ線を照射した後の回折効率の偏光角依存性を示すものである。P 偏光入射時の回折効率は、 η_1 が 64 %、 η_2 が 78 %となった。図 3.3.3-1(a)の放射線を照射していない場合と比較すると、初期状態では η_1 の場合 でも 75 %を越える回折効率を有していたが、ガンマ線を 300 Mrad 照射することで回折効率 は 64 %に低下し、放射線照射の増加による影響は見られるが、回折効率としては高い値を 有していることが確認できた。

(2) 放射線照射量のホログラムメモリの再生結果への影響

図 3.3.3-2 に初期状態での放射線を照射していない状態から、放射線を 300 Mrad まで段 階的に増加させた場合の全開口パターンを記録したサンプルからの再生結果を示す。



図 3.3.3-2 放射線照射量が増加した場合の全開ロパターンの再生結果

図 3.3.3-2(a) は図 3.3.2-2 の再生光学系よりサンプルに記録された直径 20 µm の 20×17 の配列の円形開口パターンを再生し、CCD カメラを用いて検出した結果である。フォトマ スクで設計したゲートアレイ上のフォトダイオード配列に対応した輝点が全て高輝度で再 生されていることが確認できる。図 3.3.3-2(b) は、サンプルに 100 Mrad のガンマ線を照 射した後の再生結果を示したものである。この図より、100 Mrad のガンマ線を照射した場 合においても記録したパターンの再生に成功していることが確認できる。しかしながら、 初期状態と比較すると、その再生輝度は若干低下しているようにも観察される。

図3.3.3-2(c)は、サンプルに200 Mradのガンマ線を照射した後の再生結果を示したものである。この図より、ガンマ線を200 Mrad 照射した後でも全ての記録パターンの再生は可能であることが確認できた。また、図3.3.3-2(b)と比較しても再生輝度に大きな変化はないように見える。図3.3.3-2(d)は、サンプルに300 Mradのガンマ線を照射した後の再生結果である。この図では、ガンマ線を300 Mrad 照射した後でも20×17 配列の輝点が全て再生できていることが確認できる。しかしながら、図3.3.3-2(a)の放射線を照射していない場合と比較すると、全体の輝点が少し暗く観察され、各輝点の再生輝度は低下しているように見える。回折光学素子の回折効率は、放射線照射の増加により若干の低下が生じたが、記録されたパターンの再生輝度にも影響が生じている可能性が考えられる。

(3) 放射線照射量の内部構造への影響

図 3.3.3-3~3.3.3-6 に放射線照射量を増加した場合における回折光学素子の内部構造について、偏光顕微鏡を用いて倍率等を変化させながら、いくつかの領域を観察した結果を示す。図 3.3.3-3 は放射線を照射していない初期状態について比較のために観察を行った結果を示す。



(a) 設定角度 0°・倍率 100 倍
 (b) 設定角度 45°・倍率 100 倍
 図 3. 3. 3-3 初期状態(放射線照射無)での偏光顕微鏡観察結果

図 3.3.3-3 より設定角度が 0°の時は、液晶を透過した光の偏光方向と検光子の角度が 90°となるために光をほとんど透過せず、全体が暗いパターンとして観察されている。一 方、設定角度が 45°の時は液晶分子の密度が高い領域の層は、配列方向と光の入射方向が 45°異なるために複屈折性が生じるが、高分子の密度が高い層では複屈折性がほとんど生 じない。このため、回折光学素子内部の液晶層では楕円偏光となった光が検光子を通過す るが、複屈折性を有さない高分子層からの光は遮断され暗くなる。この結果、図 3.3.3-3 (b)に示すような液晶層と高分子層の形成状態に対応した周期的な格子構造が観察される ことになる。図 3.3.3-3(b)の倍率を拡大した挿入図から、これらの明暗の周期パターンか らなる格子構造を明瞭に観察することができる。この図中のスケールメモリから、これら の格子間隔はおよそ 1 µm 程度であり、レーザ干渉露光時のレーザの交角として設定した 30°の設計値と良く対応していることを確認することができた。

図 3.3.3-4 は 100 Mrad のガンマ線を照射した後のサンプルの内部構造を示したものである。図 3.3.3-4 (a) と (b) は対物レンズの倍率を 100 倍としたときの高倍率での観察結果であり、図 3.3.3-4 (c) と (d) は対物レンズの倍率を 10 倍としてサンプルの観察領域を広げた場合の結果を示している。

図 3.3.3-3(b)と図 3.3.3-4(b)を比較すると、設定角度が 45°の際には本来、格子構造 の周期パターンでは明るく観察される液晶分子の密度が高い液晶層部分に、左斜め 45°方 向の格子の形成方向に沿って黒いライン状の領域が生じているのが観察される。これらの 液晶層においては、初期に一様に整列して配向していたはずの液晶分子が、ガンマ線を照 射することにより影響を受け配向性に変化が生じたのではないかと思われる。回折光学素 子内部に形成された液晶層中において配向性が低下すると、偏光顕微鏡下で偏光子を通過 した直線偏光の光がサンプル内の液晶層を通過する際の複屈折性が低下し、直線偏光から 楕円偏光への変調量が低下する。この結果、液晶分子の配向性が低下した液晶層の特定領 域では、画像が暗く観察されると考えられる。図 3.3.3-4(d)では液晶の配向性の変化につ いて調査するため、偏光顕微鏡の対物レンズの倍率を 10 倍に下げ、観察範囲を広げて観察 したものである。図 3.3.3-5 に 200 Mrad のガンマ線を照射した後のサンプルの内部構 造についての観察結果を示す。



図 3.3.3-5 200 Mrad 照射後の偏光顕微鏡観察結果

図 3.3.3-5(a)、(c)の設定角度が 0°の際は、図 3.3.3-4(a)、(c)の初期状態と比較して もあまり変化は無いように見える。図 3.3.3-5(b)、(d)と図 3.3.3-4(b)、(d)を比較すると、 黒い線状に観察される箇所が増加しており、200 Mradへと放射線量が増加した場合は内部 に形成された液晶層での液晶分子への配向性への影響が徐々に増えているように思われる。 図 3.3.3-6 は、300 Mradのガンマ線を照射した後のサンプルについて、同様に偏光顕微 鏡を用いて内部構造を観察した結果を示したものである。



図 3.3.3-6(b)より内部に形成された液晶層に存在する液晶分子の配向性が変化したこと に基づくと考えられる線状の黒いラインの領域が、図 3.3.3-5 と比べて増加して部分的に

はラインの幅が拡がっているように見える。また図 3.3.3-6(d)では、液晶の配向性が変化 したと考えられる黒い線状の領域が広い範囲に渡っていることが確認される。

内部に形成された液晶と高分子層からなる格子構造への放射線照射に対する影響は、サ ンプルによるバラツキも見られ、同じ量の放射線を照射したサンプル間でも黒い線状の領 域が観察される場所や面積等には違いがあった。しかしながら、放射線量が大きくなるに つれて偏光顕微鏡を用いると黒い線状の部分は観察されるようになった。このため、これ らのサンプルに対して室温から温度を変化させて液晶の相転移以上の温度に上げてから、 再び元の室温に戻しながら、温度変化に対する液晶の相転移の様子を偏光顕微鏡により観 察することを試みた[14]。この結果を図 3.3.3-7 に示す。

これらの図 3.3.3-7 は、具体的には、ガンマ線を照射することでサンプルに生じた線状 の暗い線が含まれている領域を選択し、25 ℃から 60 ℃までの温度変化を与え素子の輝度 の変化を観察した。これらの図では、顕微鏡観察画像からの輝度変化の情報を基にさらに 詳細な定量評価をするため、後に示す断面強度分布を比較しやすいように干渉縞の角度を 45°回転させて縦方向にした状態で評価を行っている。これらの画像は顕微鏡観察画像の 各画素の位置の輝度値を基に強度の値に変換して、黒い線状の領域との強度分布を比較・ 解析した結果を示したものである。また図 3.3.3-8 は温度変化させた場合について、これ らの画像データの中央部分の断面強度分布の比較を示したものである。



図 3.3.3-8 サンプルに温度変化を与えた際の断面輝度分布の変化(100 pixel=3 µm)

この図 3.3.3-8 より、左側の山と谷状に輝度値の分布が観察されている領域は、通常の 正常な干渉縞の領域である。これより右側の部分では、山と谷のような変化は見られず輝 度値がなだらかに減少したカーブだけが観察されている。この領域は、先の顕微鏡画像で 観察された放射線照射の影響で生じた黒い線状に見える領域に対応している。

しかしながら、この黒い線状の領域においても温度を増加させると輝度値は低下してい く。これは、液晶材料の相転移以上の温度においては、液晶材料はアイソトロピック状態 になり液晶の配向がランダムになるため、複屈折性が低下した結果として偏光顕微鏡下で 観察される強度が低下することに起因していると考えられる。このサンプルについて、温 度増加後に元の室温に戻すと、輝度値は基の値と一致し、配向性も復元されることが確認 できた。このように温度変化に対応して輝度値は変化しており、黒い線状の部分において も温度変化による輝度値の増減による液晶の配向状態の変化は観察された。これに対応す る結果として、偏光顕微鏡観察画像においても、温度の増加後に元の室温に戻した場合は 同じ位置に黒い線状の領域が観察された。

これらの実験結果からは液晶材料は放射線照射により劣化等はしておらず、ネマティッ クやアイソトロピックのような状態変化の機能は有している。以上の結果から室温におい て観察される黒い線状パターンは、液晶が存在する液晶密度の高い領域に形成されている 高分子ネットワークからなるドロプレットの形状等が変化し、内部の液晶の配向性に影響 を与えているのではないかと考えられる。

放射線量が増加するにつれて、このような内部の液晶への配向性の変化などの影響はあ るが、図 3.3.3-1 や図 3.3.3-2 で示したように回折光学素子に対する P 偏光入射時の回折 効率は、この状態でも 60 %以上有しており、さらに記録した全開ロパターンの再生も可能 であった。今回行った 300 Mrad という放射線量の大きさから考えると、液晶複合体を用い たホログラムメモリは光再構成システムにおいて重要となる回路情報を記録・再生するた めに必要な放射線耐性を有していると考えられる。 3.4 英国 (Lancaster 大学) の研究成果

英国チームは 1F の廃炉現場で使用できる中性子モニタリングシステムの研究を進めた。 1Fの廃炉現場では非常に低い確率ではあるが、廃炉作業中に再臨界が起きる可能性があると 考えられている。もし、廃炉現場で再臨界が起きた場合には速やかに再臨界の原因を特定、 除去し、再臨界を止める必要がある。この再臨界時には中性子線が急増するため、この兆候 をいち早くとらえる中性子線のモニタリングシステムが求められている。英国チームはこの 中性子線の急増を検知するモニタリングシステムの開発を担当している。

しかしながら、1Fの廃炉現場は高いガンマ線環境下にあり、ワーストケース1000 Sv/h もの高いガンマ線を想定する必要がある。この高いガンマ線環境下で中性子線を検出することは簡単ではない。高いガンマ線環境下で放射線をセンシングすると、中性子線とガンマ線の双方が検出され、多数を占めるガンマ線に中性子線の検出が埋もれてしまい、特に微弱な中性子線の検出は困難になる。英国側は放射線を検出するセンサからの信号の波形解析をすることで、中性子線とガンマ線を分離する手法を提案している。本研究ではこの高性能化を目指した。

令和2年度の研究において、各種材料により制作されたセンサの感度、γ線除去能力について評価した[15]。センサの材料はダイヤモンド、シリコンカーバイド(SiC)、酸化ガリウム(Ga₂O₃)、窒化ガリウム(GaN)、変換層の材料に炭化ホウ素(B₄C)、フッ化リチウム(LiF)を用いた。最終的に、変換層に炭化ホウ素(B₄C)、センシング層にダイヤモンドを用いるものが最も高いγ線除去能力があることを確認した。

本センサからの信号解析に日本チームが開発した耐放射線 FPGA を使用することで、γ線 と中性子線の分離が可能な中性子線モニタリングシステムが実現できる。 参考文献

- J. Ishido, M. Watanabe and A. Ogiwara, Optically Reconfigurable Gate Array with a 1 Grad Total-ionizing-dose Tolerant Holographic Memory, IEEE Photonics Conference, 2 p., Oct., 2021, DOI:10.1109/IPC48725.2021.9592957.
- [2] J. Ishido and M. Watanabe, Radiation-hardened Optically Reconfigurable Gate Array Using a Multi-wavelength Holographic Memory, IEEE Workshop on Silicon Errors in Logic - System Effects, Stanford University, CA, USA, Feb., 2020.
- [3] H. Ito and M. Watanabe, Total-ionizing-dose Tolerance Evaluation of an Optoelectronic Field Programmable Gate Array VLSI during Operation, International Conference on Field-Programmable Technology, Dec., 2021, DOI: 10.1109/ICFPT52863.2021.9609910.
- [4] H. Shinba and M. Watanabe, Radiation-hardened Configuration-context Realization for Field Programmable Gate Arrays, Applied Optics, Vol. 59, Issue 19, 2020, pp. 5680-5686, DOI: 10.1364/A0.396525.
- [5] Y. Takaki and M. Watanabe, Optical Multi-Context Blind Scrubbing for Field Programmable Gate Arrays, IEEE Photonics Journal, Vol. 12, Issue 6, 2020, pp. 1-11, DOI: 10.1109/JPHOT.2020.3038900.
- [6] G. Sharma, K. S. Thind, Manupriya, H. S. Klare, S. B. Narang, L. Gerward and V. K. Dangwal, Effects of Gamma-ray Irradiation on Optical Properties of ZnO-PbO-B₂O₃ Glasses, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B:Beam Int. Mat. Atoms, Vol. 243, Issue 2, 2006, pp. 345-348, https://doi.org/10.1016/j.nimb.2005.08.157.
- [7] A. Ogiwara, M. Watanabe and Y. Ito, Tolerance of Holographic Polymer-dispersed Liquid Crystal Memory for Gamma-ray Irradiation, Appl. Opt., Vol. 56, Issue 16, 2017, pp. 4854-4860, https://doi.org/10.1364/A0.56.004854.
- [8] A. Bacchini, G. Furano, M. Rovatti and M. Ottavi, Total Ionizing Dose Effects on DRAM Data Retention Time, IEEE Trans. on Nucl. Sci., Vol. 61, Issue 6, 2014, pp. 3690-3693, DOI: 10.1109/TNS.2014.2365532.
- [9] L. T. Clark, K. E. Holbert, J. W. Adams, H. Navale and B. C. Anderson, Evaluation of 1.5-T Cell Flash Memory Total Ionizing Dose Response, IEEE Trans. on Nucl. Sci., Vol. 62, Issue 6, 2015, pp. 2431-2439, DOI: 10.1109/TNS.2015.2488539.
- [10] T. Fujimori and M. Watanabe, Parallel Light Configuration that Increases the Radiation Tolerance of Integrated Circuits, Opt. Express, Vol. 25, Issue 23, 2017, pp. 28136-28145, https://doi.org/10.1364/0E.25.028136.
- [11] 久保田敏弘, ホログラフィ入門-原理と実際-(新版), 朝倉書店, 2010, 209p.
- [12] 佐藤進, 液晶とその応用, 産業図書株式会社, 1984, 212p.
- [13] 日本液晶学会,液晶科学実験入門,シグマ出版,2007,231p.
- [14] A. Ogiwara, M. Toda, J. Ishido, M., Watanabe and H. Kakiuchida, Effects of a Radiation Dose in Gamma-ray Irradiation Fields on Holographic Gratings Formed by Liquid Crystal Composites, OSA Continuum, Vol. 4, Issue 2, 2021, pp. 514-528, https://doi.org/10.1364/OSAC.415702.

[15] Z. Zhang and M. D. Aspinall, Comparison of Neutron Detection Performance of Four Thin-Film Semiconductor Neutron Detectors Based on Geant4, Sensors, 21, 7930, 2021, 15p., https://doi.org/10.3390/s21237930. 3.5 研究推進

研究代表者の下で研究項目間における連携を密にして研究を進めた。COVID-19の影響により、大学間の往来は出来なかったが、令和2年11月16日、令和2年11月25日、令和2年 12月21日、令和3年1月14日に神戸市立工業高等専門学校と静岡大学でオンラインミーティングを実施し、また、令和3年7月7日に神戸市立工業高等専門学校と岡山大学間でオン ラインミーティングを実施した。連携を密にして共同で研究を遂行した。

一方、英国のLancaster 大学のMichael Aspinall 先生、及び共同研究者のAndrew Parker 博士とは令和2年6月17日、令和2年12月15日に研究代表者、神戸市立工業高等専門学 校の荻原先生とオンラインミーティングを実施した。令和3年4月1日~9月30日の間につ いては Michael Aspinall 先生とメールでお互いの研究状況を確認しつつ、連携し研究を進 めた。COVID-19の影響により、物理的に双方の大学に行き、双方の施設を利用した共同研究 は展開できなかったが、英国の研究グループとも密に連携して共同研究を進めた。

このような密な連携の下に研究を進めることで令和2年度に予定されていた試験項目、試験目標は全て達成できた。

4. 結言

本研究では集積回路技術に光技術を導入し、1 Grad (10 MGy)のトータルドーズ耐性を持つ 耐放射線光電子 FPGA と光技術を用いずに既存の集積回路技術のみで 200 Mrad (2 MGy)のトー タルドーズ耐性を実現する耐放射線リペアラブル FPGA の 2 つの開発を進めてきた。

令和2年度の研究では耐放射線光電子 FPGA の開発において、ホログラムメモリ、レーザアレ イ、集積回路部のトータルドーズ耐性試験、集積回路部のソフトエラー耐性試験を実施した。 集積回路部とホログラムメモリ部では1 Grad (10 MGy)のトータルドーズ耐性を実証し、レー ザアレイ部については 600 Mrad (6 MGy)までの耐性を実証した。現状、耐放射線光電子 FPGA は 600 Mrad (6 MGy)のトータルドーズまで使用できると言える。また、耐放射線光電子 FPGA の集積回路部の改良設計を実施した。耐放射線リペアラブル FPGAの開発においては「光並列構 成法」と「電気的な構成法」の双方の機能を持つ VLSI チップを試作した。トータルドーズ耐性 試験の結果、リペアラブル FPGA が最低でも 100 Mrad (1 MGy)のトータルドーズ耐性を持つこ とを確認した。また、耐放射線ホログラムメモリの開発を推進し、液晶と高分子材料にフォト マスクを用いてレーザ干渉露光可能な光学システムを構築し、二次元フォトダイオードアレイ への回路情報を記録可能なホログラムメモリを作製した。

英国側の研究では中性子線とγ線を分離するセンサの製造条件を確定させることに成功した。 本センサからの信号解析に日本チームが開発した耐放射線 FPGA を使用することで、γ線と中性 子線の分離が可能な中性子線モニタリングシステムが実現できる。

この研究の成果は 1F の廃炉作業や、その他原子力発電所で稼働するロボットや再臨界時の中 性子線の急増を検知するセンサに用いることができるだけでなく、ロケット、衛星、探査機等 の宇宙システムにも使用が期待できる。本デバイスを宇宙システムに適用した場合には、高い トータルドーズ耐性と、ソフトエラー耐性により、組込みシステムからシールド材を全廃する ことができ、打ち上げコストを大幅に低減することができる。原子力分野だけでなく、日本の 宇宙産業の国際競争力の向上に寄与できる。