



耐放射線プロセッサを用いた組み込みシステムの開発 (委託研究)

－令和5年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業－

Embedded System Using a Radiation-hardened Processor
(Contract Research)

－ FY2023 Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource
Development Project –

福島廃炉安全工学研究所 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 and Engineering Institute
Okayama University

October 2025

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

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究開発推進部 科学技術情報課
〒 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 Library, Institutional Repository and INIS Section,
Research and Development Promotion Department, Japan Atomic Energy Agency.

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

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

耐放射線プロセッサを用いた組み込みシステムの開発
(委託研究)
ー令和5年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業ー

日本原子力研究開発機構 福島廃炉安全工学研究所
廃炉環境国際共同研究センター

岡山大学

(2025年4月25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5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、令和4年度に採択された研究課題のうち、「耐放射線プロセッサを用いた組み込みシステムの開発」の令和5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、集積回路に光技術を導入した10 MGyのトータルドーズ耐性を持つ耐放射線光電子プロセッサ、集積回路のみで実現する4 MGyのトータルドーズ耐性を持つ耐放射線プロセッサ、同4 MGyのトータルドーズ耐性の耐放射線メモリ及びそれらに必要となる1 MGyのトータルドーズ耐性を持つ耐放射線電源ユニットの4つを開発する。そして、現在までに10 MGyのトータルドーズ耐性を持つ耐放射線光電子プロセッサ、4 MGyのトータルドーズ耐性の耐放射線メモリの2つの開発に成功した。

マンチェスター大学とはロボットやLiDARに対する耐放射線プロセッサ、耐放射線FPGA、耐放射線メモリ、耐放射線電源ユニットの面で連携し、これまでにない高いトータルドーズ耐性を持つ耐放射線ロボットを実現していく。また、ランカスター大学とは耐放射線FPGA、耐放射線電源ユニットの面で連携し、放射線の種類、強度を正確に特定できるセンサー類を開発していく。

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。

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

Embedded System Using a Radiation-hardened Processor
(Contract Research)

— FY2023 Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project —

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

Okayama University

(Received April 25, 2025)

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 FY2023.

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 FY2022, this report summarizes the research results of the “Embedded system using a radiation-hardened processor” conducted in FY2023.

The present study aims to develop a radiation-hardened optoelectronic processor with 10 MGy total-ionizing-dose (TID) tolerance, a radiation-hardened processor with 4 MGy TID tolerance, a radiation-hardened memory with 4 MGy TID tolerance, and a radiation-hardened power supply unit with 1 MGy TID tolerance. Up to now, we have successfully developed a radiation-hardened optoelectronic processor with 10 MGy TID tolerance, a radiation-hardened memory with 4 MGy TID tolerance. Moreover, Japanese research group will support radiation-hardened field programmable gate arrays, power supply units, and radiation-hardened optical systems for radiation-hardened robot systems and radiation sensor systems developed by UK team. Finally, we will provide our radiation-hardened robot system which can identify the intensity and type of radiation.

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

This work was performed by Okayama University under contract with Japan Atomic Energy Agency.

目次

1. 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業の概要	1
2. 平成 30 年度 採択課題	2
3. 令和元年度 採択課題	5
4. 令和 2 年度 採択課題	8
5. 令和 3 年度 採択課題	10
6. 令和 4 年度 採択課題	12
7. 令和 5 年度 採択課題	14
付録 成果報告書	17

Contents

1. Outline of Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project	1
2. Accepted Proposal in FY2018.....	2
3. Accepted Proposal in FY2019.....	5
4. Accepted Proposal in FY2020.....	8
5. Accepted Proposal in FY2021.....	10
6. Accepted Proposal in FY2022.....	12
7. Accepted Proposal in FY2023.....	14
Appendix Result Report	17

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）

平成 30 年度 採択課題一覧

共通基盤型原子力研究プログラム

【若手研究】

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

共通基盤型原子力研究プログラム

【一般研究】

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

課題解決型廃炉研究プログラム

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

国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

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

3. 令和元年度 採択課題

令和元年度採択課題については以下のとおりである。

課題数：19 課題

共通基盤型原子力研究プログラム 7 課題（若手研究 2 課題、一般研究 5 課題）

課題解決型廃炉研究プログラム 4 課題

国際協力型廃炉研究プログラム 4 課題（日英 2 課題、日露 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 康一郎	東京工業大学
動作不能からの復帰を可能とする多連結移動ロボットの半自律遠隔操作技術の確立	田中 基康	電気通信大学

共通基盤型原子力研究プログラム

【一般研究】

課題名	研究代表者	所属機関
一次元光ファイバ放射線センサを用いた原子炉建屋内放射線源分布計測	瓜谷 章	名古屋大学
低線量・低線量率放射線被ばくによる臓器別酸化ストレス状態の検討	鈴木 正敏	東北大学
単一微粒子質量分析法に基づくアルファ微粒子オンラインモニタリングに向けた基礎検討	豊嶋 厚史	大阪大学
幹細胞動態により放射線発がんを特徴付ける新たな評価系の構築	飯塚 大輔	量子科学技術 研究開発機構
耐放射線性ダイヤモンド半導体撮像素子の開発	梅沢 仁 (～R2. 3. 31) 大曲 新矢 (R2. 4. 1～)	産業技術総合 研究所

課題解決型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
Multi-Physics モデリングによる福島 2・3 号機ペDESTAL燃料デブリ深さ方向の性状同定	山路 哲史	早稲田大学
燃料デブリ取出しに伴い発生する廃棄物のフッ化技術を用いた分別方法の研究開発	渡邊 大輔	日立GE ニュークリア・ エネルギー
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	慶應義塾大学

研究人材育成型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
燃料デブリ取り出し時における炉内状況把握のための遠隔技術に関する研究人材育成	浅間 一	東京大学
化学計測技術とインフォマティ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）

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
$\alpha/\beta/\gamma$ 線ラジオリシス影響下における格納容器系統内広域防食の実現:ナノバブルを用いた新規防食技術の開発	渡邊 豊	東北大学
β 、 γ 、X線同時解析による迅速・高感度放射性核種分析法の開発	篠原 宏文	日本分析 センター
合理的な処分のための実機環境を考慮した汚染鉄筋コンクリート長期状態変化の定量評価	丸山 一平	東京大学
溶脱による変質を考慮した汚染コンクリート廃棄物の合理的処理・処分の検討	小崎 完	北海道大学
マイクロ波重畳 LIBS によるデブリ組成計測の高度化と同位体の直接計測への挑戦	池田 裕二	アイラボ

国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

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

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）

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
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 啓太郎	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

課題名	研究代表者	所属機関
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	浅間 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

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）

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 (～R5.3.31) 理化学研究所 (R5.4.1～)
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
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

7. 令和 5 年度 採択課題

令和 5 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 5 年 3 月 1 日～令和 5 年 4 月 14 日（課題解決型）

令和 5 年 4 月 12 日～令和 5 年 6 月 15 日（国際協力型 日英共同研究）

課題数：9 課題

課題解決型廃炉研究プログラム 7 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 5 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
遮蔽不要な耐放射線性ダイヤモンド中性子計測システムのプロトタイプ開発	金子 純一	北海道大学
簡易非破壊測定に向けた革新的な $n \cdot \gamma$ シンチレーション検出システムの開発	鎌田 圭	東北大学
ペデスタル部鉄筋コンクリート損傷挙動の把握に向けた構成材料の物理・化学的変質に関する研究	五十嵐 豪	名古屋大学
動画像からの特徴量抽出結果に基づいた高速 3 次元炉内環境モデリング	中村 啓太	札幌大学
放射性コンクリート廃棄物の減容を考慮した合理的処理・処分方法の検討	小崎 完	北海道大学

課題名	研究代表者	所属機関
高バックグラウンド放射線環境における配管内探査技術の開発	鳥居 建男	福井大学
PCV 気相漏洩位置及び漏洩量推定のための遠隔光計測技術の研究開発	椎名 達雄	千葉大学

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
革新的分光画像解析による燃料デブリの可視化への挑戦と LIBS による検証	牟田 浩明	大阪大学
燃料デブリ除去に向けた様々な特性をもつメタカオリンベースのジオポリマーの設計と特性評価	Yogarajah Elakneswaran	北海道大学

本報告書は、以下の課題の令和 5 年度分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
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

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 5 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

耐放射線プロセッサを用いた組み込みシステムの開発

(契約番号 R05I060)

成果報告書

令和 6 年 3 月
国立大学法人岡山大学

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「耐放射線プロセッサを用いた組み込みシステムの開発」の令和5年度分の研究成果を取りまとめたものである。

目次

概略	vi
1. はじめに	1-1
2. 業務計画	2-1
2.1 全体計画	2-1
2.2 実施体制	2-2
2.3 令和5年度の成果の目標及び業務の実施方法	2-3
3. 実施内容及び成果	3-1
3.1 耐放射線光電子プロセッサの開発【令和4年度～令和5年度】	3-1
3.1.1 集積回路部の耐放射線化【令和4年度～令和5年度】	3-1
3.1.2 光学部の耐放射線化【令和4年度～令和5年度】	3-5
3.1.3 耐放射線試験【令和5年度】	3-5
3.2 耐放射線プロセッサの開発【令和4年度～令和5年度】	3-6
3.2.1 集積回路部の開発【令和4年度～令和5年度】	3-6
3.2.2 耐放射線試験【令和5年度】	3-7
3.3 耐放射線メモリの開発【令和4年度～令和5年度】	3-8
3.3.1 SRAMメモリの開発【令和4年度～令和5年度】	3-8
3.3.2 耐放射線試験【令和5年度】	3-9
3.4 耐放射線電源ユニットの開発【令和4年度～令和5年度】	3-10
3.5 耐放射線ホログラフィックメモリの開発（再委託先：神戸高専）【令和4年度～令和5年度】	3-11
3.5.1 複数波長からなるレーザ干渉露光装置の構築	3-11
3.5.2 有機複合材料への異なる波長のレーザ干渉露光によるホログラフィックメモリの作製	3-14
3.6 英国側の研究成果概要	3-18
3.7 研究推進	3-19
4. 結言	4-1
参考文献	5-1

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
表 3. 5. 2-1	液晶複合体試料の材料組成	.....	3-14
表 3. 5. 2-2	レーザ波長による記録・再生条件の違い	.....	3-16

図一覧

図 2.2-1	実施体制図	.....	2-2
図 3.1.1-1	耐放射線光電子 FPGA 上に実装できる小型の 4 ビットプロセッサの ALU の配置配線結果	.....	3-1
図 3.1.1-2	耐放射線光電子 FPGA 上に実装できる小型の 4 ビットプロセッサのレジスタファイルの配置配線結果	.....	3-2
図 3.1.1-3	耐放射線光電子 FPGA 上に実装できる小型の 4 ビットプロセッサのプログラムカウンターの配置配線結果	.....	3-2
図 3.1.1-4	耐放射線光電子 FPGA 上に実装した 4 ビット RISC プロセッサの配置配線結果	.....	3-3
図 3.1.1-5	粗粒度のプロセッサの実装に適した耐放射線光電子 FPGA のレイアウト	.....	3-4
図 3.1.1-6	耐放射線光電子 FPGA のチップ写真	.....	3-4
図 3.1.2-1	耐放射線光電子 FPGA の放射線試験向けテストベンチ	.....	3-5
図 3.2.1-1	耐放射線プロセッサチップのレイアウト	.....	3-6
図 3.2.1-2	耐放射線プロセッサのチップ写真	.....	3-7
図 3.3.1-1	耐放射線 SRAM のチップ写真	.....	3-8
図 3.4-1	耐放射線光電子 FPGA のトータルドーズ耐性試験用治具	.....	3-10
図 3.5.1-1	異なる 3 波長レーザに対してレーザコンバイナを導入した干渉光学システムの全体図	.....	3-11
図 3.5.1-2	異なる 3 波長を同一光学軸上で出射するためのレーザコンバイナの構成図	.....	3-12
図 3.5.1-3	実際に構築した異なる 3 波長レーザを用いた干渉光学システムの全体写真	.....	3-13
図 3.5.1-4	有機複合体材料へのレーザ干渉露光による格子形成過程	.....	3-13
図 3.5.1-5	レーザ干渉露光により作製した異なる波長における干渉縞の構造図	.....	3-14
図 3.5.2-1	異なるレーザ波長でのレーザ干渉露光時の照射時間と回折効率の関係	.....	3-15
図 3.5.2-2	各レーザ装置の波長と回折光強度が飽和値に達するまでの時間の関係	.....	3-16
図 3.5.2-3	異なるレーザ波長により作製したホログラフィックメモリからの 2 入力 NAND 回路の再生画像	.....	3-17

略語一覧

FPGA	: Field Programmable Gate Array	(プログラマブルゲートアレイ)
SRAM	: Static Random Access Memory	(スタティックランダムアクセスメモリ)
TMR	: Triple Modular Redundancy	(3 重回路実装)
スクラビング処理	: 構成メモリのデータを周期的にリペアする処理。ソフトエラー対策の 1 つ。	
RISC	: Reduced Instruction Set Computer	
ALU	: Arithmetic Logic Unit	(プロセッサの中にある算術論理演算器)
LiDAR	: Light Detection And Ranging	(レーザ光を照射して、その反射光の到達時間から対象物までの距離を測る技術。3 次元的な測定が可能。)
VLSI	: Very Large Scale Integration	(超大規模集積回路)
岡山大学	: 国立大学法人岡山大学	
神戸高専	: 神戸市立工業高等専門学校	

概略

福島第一原子力発電所の一部の原子炉では、スリーマイル島のような水棺封じ込めによる廃炉作業は難しく、サイドアクセスでの廃炉作業が計画されている。この場合、ワーストケース 1,000 Sv/h もの放射線環境下で廃炉作業を進める必要があり、全てのロボットに高い放射線耐性が求められる。東京電力ホールディングス（TEPCO）は、この困難なデブリ取り出し作業を円滑に進める方策として、最も高い放射線源となっているデブリから順に取り出し、後になればなるほど線量の低い作業となるような廃炉作業を計画している。ただ、この実現のためには、放射線の種類、強度、位置を正確に特定できる小型ロボットが必要になる。

本研究では、耐放射線ロボットに使用する耐放射線組み込みシステムの実現を目指し、集積回路に光技術を導入し、10 MGy のトータルドーズ耐性を持つ耐放射線光電子プロセッサ、既存の集積回路のみで 4 MGy のトータルドーズ耐性を持つ耐放射線プロセッサ、同 4 MGy のトータルドーズ耐性の耐放射線メモリ及びそれらに必要となる 1 MGy のトータルドーズ耐性を持つ耐放射線電源ユニットの 4 つを開発する。

マンチェスター大学とは、ロボットや Light Detection And Ranging (LiDAR) に対する耐放射線プロセッサ、耐放射線 Field Programmable Gate Array (FPGA)、耐放射線メモリ、耐放射線電源ユニットの面で連携し、これまでにない高いトータルドーズ耐性を持つ耐放射線ロボットを実現していく。また、ランカスター大学とは耐放射線 FPGA、耐放射線電源ユニットの面で連携し、放射線の種類、強度を正確に特定できるセンサー類を開発していく。

前年度までの成果報告書：

耐放射線プロセッサを用いた組み込みシステムの開発（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

JAEA-Review 2023-038

<https://doi.org/10.11484/jaea-review-2023-038>

1. はじめに

本研究では、集積回路に光技術を導入し、10 MGy のトータルドーズ耐性を持つ耐放射線光電子プロセッサ、既存の集積回路のみで 4 MGy のトータルドーズ耐性を持つ耐放射線プロセッサ、同 4 MGy のトータルドーズ耐性の耐放射線メモリ及びそれらに必要となる 1 MGy のトータルドーズ耐性を持つ耐放射線電源ユニットの 4 つを開発する。

マンチェスター大学とは、ロボットや LiDAR に対する耐放射線プロセッサ、耐放射線 FPGA、耐放射線メモリ、耐放射線電源ユニットの面で連携し、これまでにない高いトータルドーズ耐性を持つ耐放射線ロボットを実現していく。また、ランカスター大学とは耐放射線 FPGA、耐放射線電源ユニットの面で連携し、放射線の種類、強度を正確に特定できるセンサー類を開発していく。

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

項目	年度	令和 4 年度	令和 5 年度	令和 6 年度
(1) 耐放射線光電子プロセッサの開発	小型プロセッサの設計・耐放射線光電子 FPGA の設計	←	プロセッサの評価・耐放射線光電子 FPGA の開発・改良設計	プロセッサの評価・耐放射線光電子 FPGA の開発・改良設計
	光学部(ホログラフィックメモリ、レーザアレイ)を設計	←	光学部(ホログラフィックメモリ、レーザアレイ)の試作・改良	光学部(ホログラフィックメモリ、レーザアレイ)の試作・改良
	耐放射線光電子 FPGA のトータルドーズ耐性試験用治具類の開発	←	ソフトウェア・トータルドーズ耐性試験	ソフトウェア・トータルドーズ耐性試験
(2) 耐放射線プロセッサの開発	光再構成機能を持ち、プロセッサアーキテクチャを冗長化した耐放射線プロセッサの設計	←	耐放射線プロセッサの試作・改良設計	耐放射線プロセッサの試作・改良設計
		←	ソフトウェア・トータルドーズ耐性試験	ソフトウェア・トータルドーズ耐性試験
(3) 耐放射線メモリの開発	光再構成機能を持ち、冗長化された SRAM の設計	←	SRAM メモリセルの試作・改良設計	SRAM の試作・改良設計
		←	ソフトウェア・トータルドーズ耐性試験	ソフトウェア・トータルドーズ耐性試験
(4) 耐放射線電源ユニットの開発 (岡山大学、福井大学 ※) ※令和 6 年度より	活電耐放射線試験向け治具類の開発 耐放射線光電子プロセッサ、耐放射線プロセッサ、耐放射線メモリの放射線試験向けに電源ユニットの設計	←	電源ユニットの試作・改良設計	電源ユニットの試作・改良設計
		←	トータルドーズ耐性試験	トータルドーズ耐性試験
		←	ソフトウェア・トータルドーズ耐性試験	ソフトウェア・トータルドーズ耐性試験
(5) 耐放射線ホログラフィックメモリの開発 (神戸高専)	レーザ干渉露光光学システムを構築	←	耐放射線ホログラフィックメモリの試作評価	耐放射線光電子プロセッサと融合させた評価試験
		←	技術評価委員会の開催	技術評価委員会の開催
(6) 研究推進	技術評価委員会の開催	←	技術評価委員会の開催	技術評価委員会の開催
	まとめ・評価	←	まとめ・評価	まとめ・評価
Lancaster University (UK)		←	Machine learning for mixed radioisotope identification	
University of Manchester (UK)		←	LiDAR system	
		←	Radiation - hardened robot	

2.2 実施体制

実施体制を図 2.2-1 に示す。

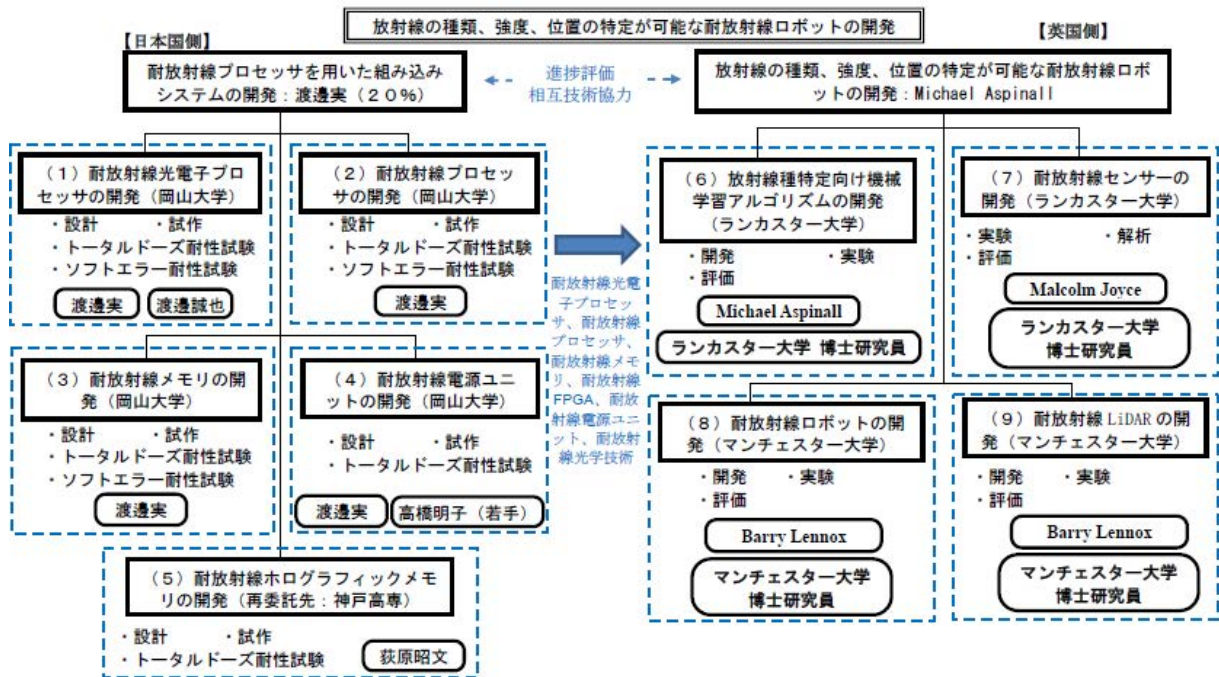


図 2.2-1 実施体制図

2.3 令和5年度の成果の目標及び業務の実施方法

(1) 耐放射線光電子プロセッサの開発

①集積回路部の耐放射線化

令和4年度に設計した耐放射線光電子FPGAを試作する。新しい耐放射線電子FPGAにプロセッサを実装する。

②光学部の耐放射線化

耐放射線光電子FPGA用の光学部を試作する。

③耐放射線試験

試作した耐放射線光電子FPGAにプロセッサを実装し、トータルドーズ耐性試験、ソフトウェア耐性試験を実施する。

(2) 耐放射線プロセッサの開発

①集積回路部の開発

令和4年度に設計した耐放射線プロセッサチップを試作する。放射線試験の結果、脆弱な個所が見つかった場合には改良設計を行う。

②耐放射線試験

試作した耐放射線プロセッサチップのトータルドーズ耐性試験、ソフトウェア耐性試験を実施する。

(3) 耐放射線メモリの開発

①Static Random Access Memory (SRAM) メモリ開発

令和4年度に設計した耐放射線メモリを試作する。また、放射線試験の結果、脆弱な個所が見つかった場合には改良設計を行う。

②耐放射線試験

試作した耐放射線メモリのトータルドーズ耐性試験、ソフトウェア耐性試験を実施する。

(4) 耐放射線電源ユニットの開発

耐放射線光電子プロセッサ、耐放射線プロセッサ、耐放射線メモリの活電評価試験に使用できるように電源ユニット及び治具類の開発を行う。開発を終えた治具類、電源ユニットは放射線試験を実施し、耐放射線性能を確認するとともに、耐放射線光電子プロセッサ、耐放射線プロセッサ、耐放射線メモリの評価試験に活用する。

(5) 耐放射線ホログラフィックメモリの開発（再委託先：神戸市立工業高等専門学校（以下、「神戸高専」と略記。））

複数波長のレーザ照射が可能な露光装置を構築し、有機複合材料に対して異なる波長のレーザ干渉露光を行い、材料中での光硬化反応を有機的に発現させることによるホログラフィックメモリの作製を行う。

(6) 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）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. 実施内容及び成果

3.1 耐放射線光電子プロセッサの開発【令和4年度～令和5年度】

3.1.1 集積回路部の耐放射線化【令和4年度～令和5年度】

【令和4年度の概要】

令和4年度の研究では、耐放射線光電子FPGA上に実装できる小型の4ビットプロセッサを設計した。4ビットのレジスタを4つ実装し、演算器は4ビットサイズで設計した。Arithmetic Logic Unit (ALU) で実行できる命令数は12命令である。インストラクションメモリのビットサイズは16ビットである。本設計は、現在、配置配線ツールが未整備にあることから手配線で行われた。小型プロセッサとして実装テストを行っているが、将来的には32ビットクラスに容易に拡張可能である。図3.1.1-1に耐放射線光電子FPGA上に実装できる小型の4ビットプロセッサのALUの配置配線結果、図3.1.1-2に耐放射線光電子FPGA上に実装できる小型の4ビットプロセッサのレジスタファイルの配置配線結果、図3.1.1-3に耐放射線光電子FPGA上に実装できる小型の4ビットプロセッサのプログラムカウンターの配置配線結果をそれぞれ示す。

1ビット ALU

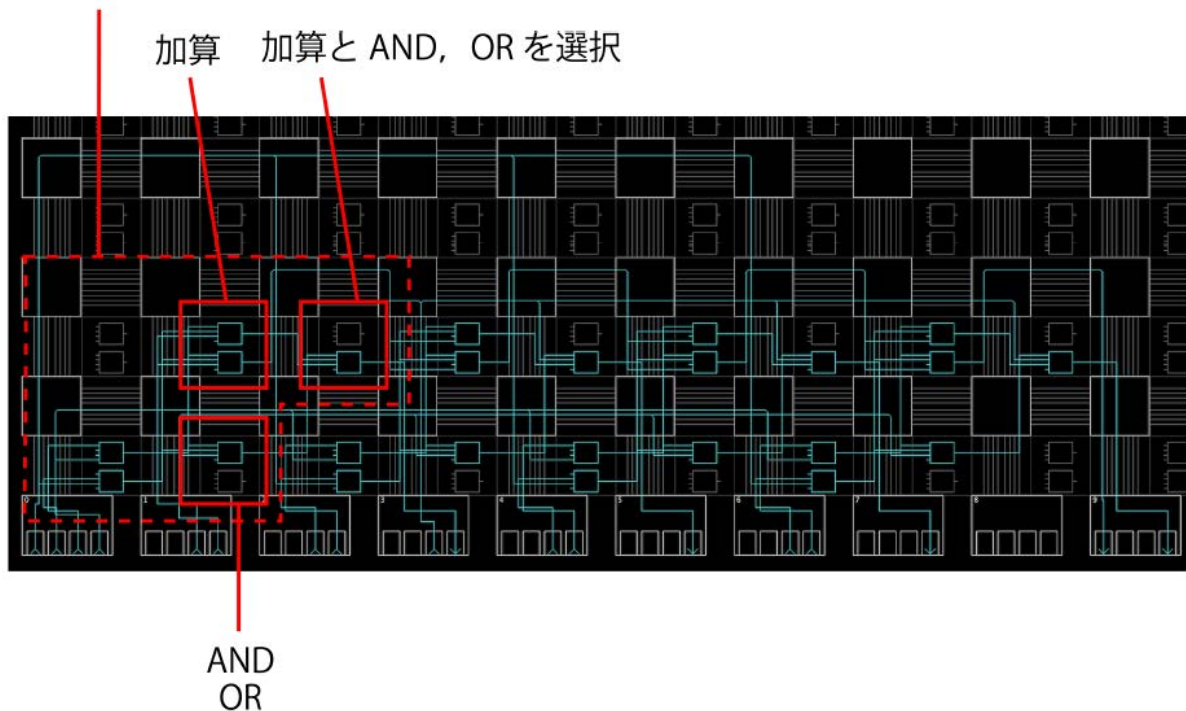


図 3.1.1-1 耐放射線光電子FPGA上に実装できる小型の4ビットプロセッサのALUの配置配線結果

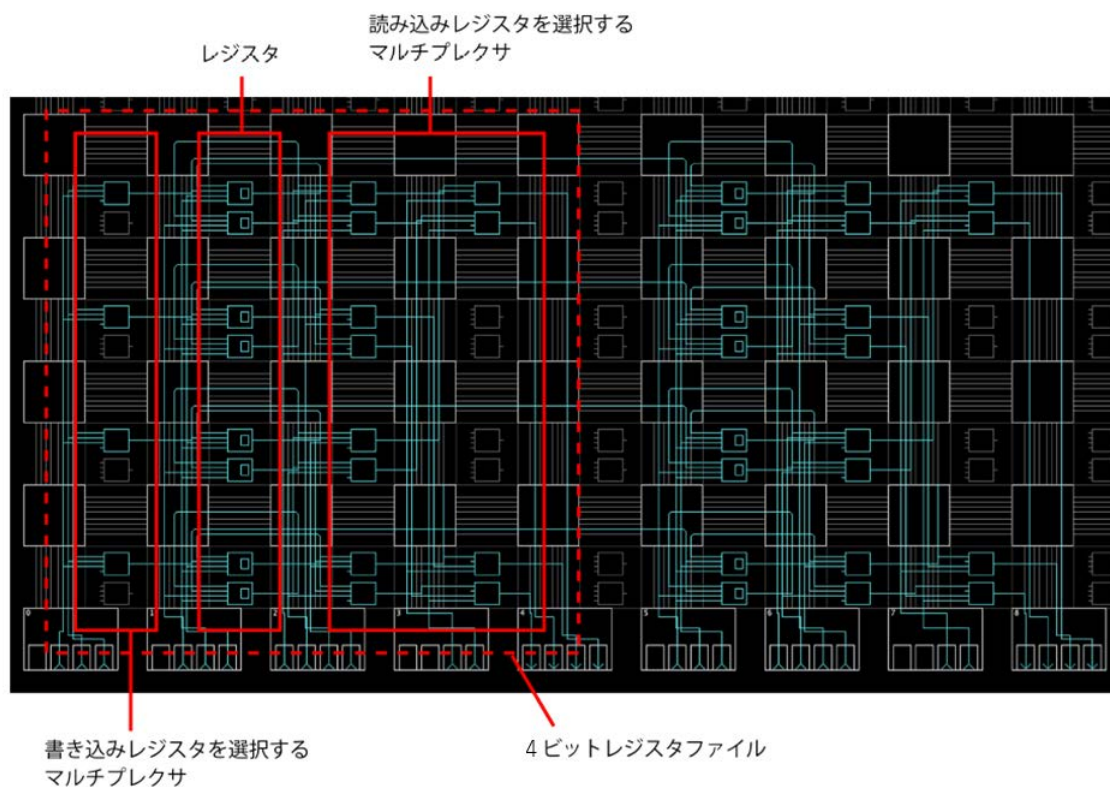


図 3.1.1-2 耐放射線光電子 FPGA 上に実装できる小型の 4 ビットプロセッサの
レジスタファイルの配置配線結果

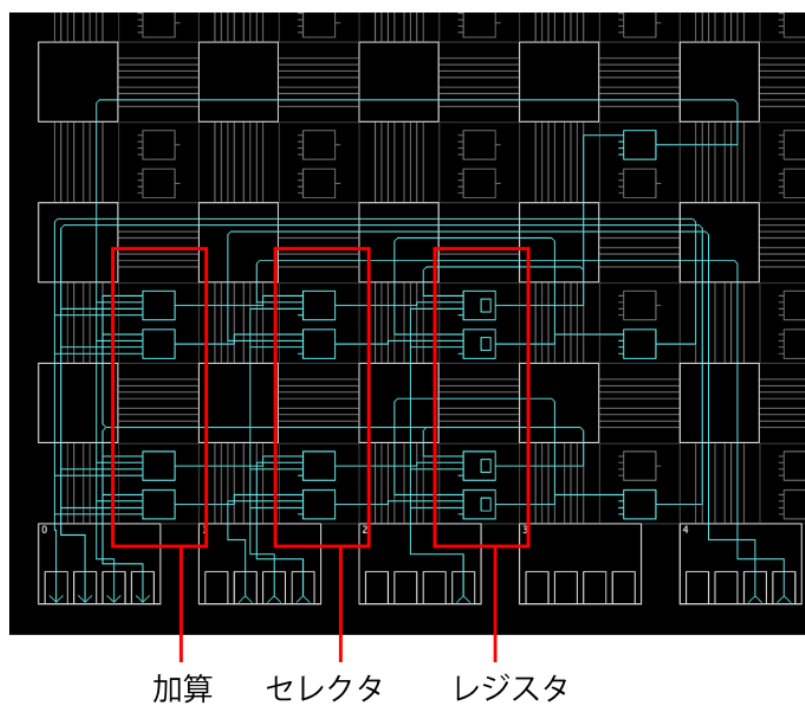


図 3.1.1-3 耐放射線光電子 FPGA 上に実装できる小型の 4 ビットプロセッサの
プログラムカウンターの配置配線結果

【令和 5 年度実施内容及び成果】

令和 5 年度の研究では、論理積、論理和、加算、減算、乗算、除算の 6 種類の命令を持つ 4 ビット ALU を設計した。試作した光再構成型ゲートアレイ VLSI（耐放射線光電子 FPGA）上に実装した 4 ビット ALU（Reduced Instruction Set Computer : RISC プロセッサ）の配置配線結果を図 3.1.1-4 に示す。0.18 μm CMOS プロセスで設計された VLSI に実装し、実装面積、最大動作周波数について評価した。本 ALU の実装に必要な Look-Up Table 数は 117 個、論理ブロック数換算でいえば 59 個であった。最大動作周波数は 74.23 MHz であった。なお、乗算、除算命令も含め、全命令はシングルクロックサイクルで実行可能である。

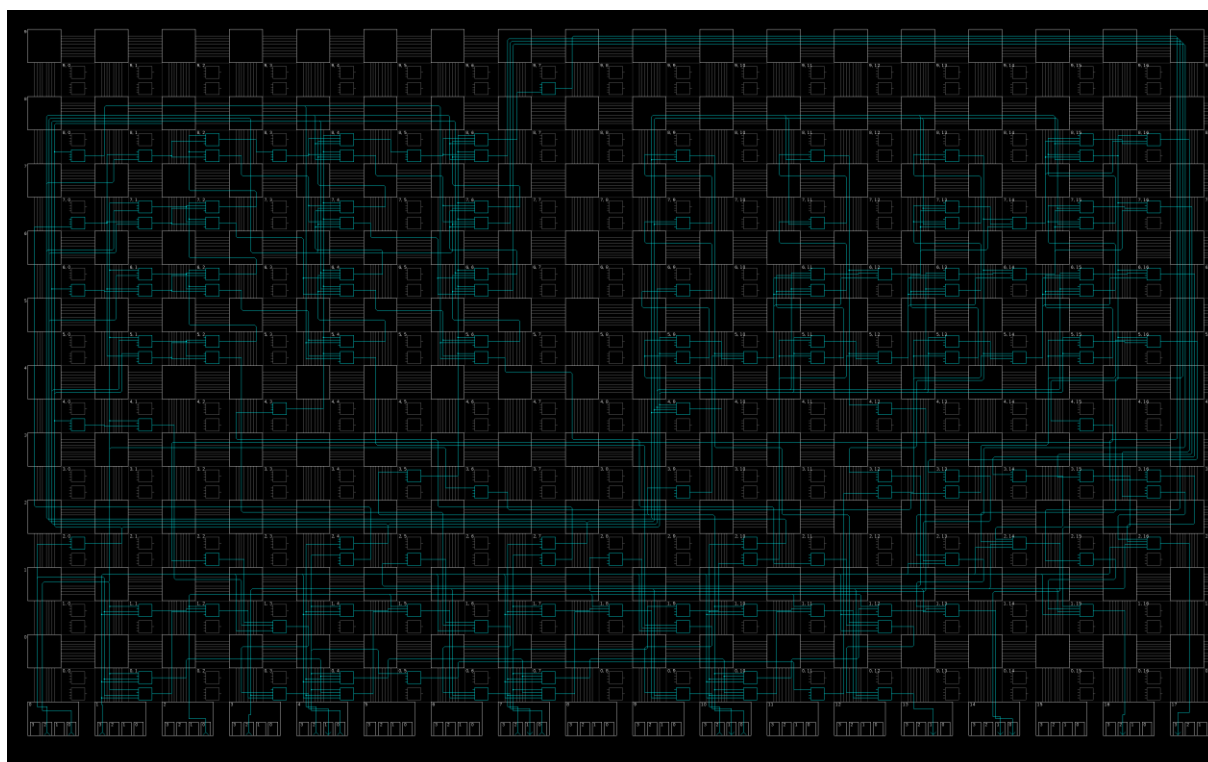


図 3.1.1-4 耐放射線光電子 FPGA 上に実装した 4 ビット RISC プロセッサの配置配線結果

【令和 4 年度の概要】

また、令和 4 年度には、粗粒度のプロセッサの実装に適した耐放射線光電子 FPGA を設計した。図 3.1.1-5 にその CAD レイアウトを示す。プロセッサを効率的にゲートアレイに実装するためには細粒度のゲートアレイに加えて、レジスタ、データメモリ、インストラクションメモリを構成するメモリセルが必要となる。この度の設計では、論理ブロック、スイッチングマトリックス、I/O セルに加えてメモリセルを新規設計し、8 個のメモリセルを追加した耐放射線光電子 FPGA を設計した。チップ右端に実装されているセルがメモリセルである。

【令和 5 年度実施内容及び成果】

令和 5 年度には、令和 4 年度に設計した耐放射線光電子 FPGA を試作した。そして、新しい耐放射線粗光電子 FPGA にプロセッサを実装した。0.18 μm CMOS プロセスを用いて本チップは試作された。チップ写真を図 3.1.1-6 に示す。4 入力 Look-Up Table を 2 個実装した論理ブロックが 77 個、スイッチングマトリックスが 77 個、メモリブロックが 8 個、4 ビットの入出力を担う I/O ブロックが 7 個実装されている。

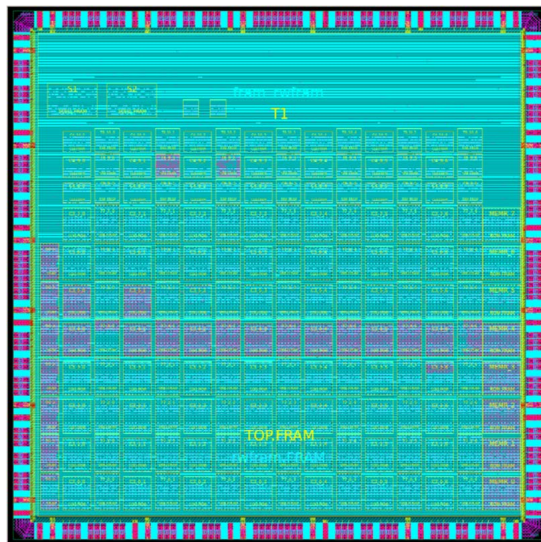


図 3.1.1-5 粗粒度のプロセッサの実装に適した耐放射線光電子 FPGA のレイアウト

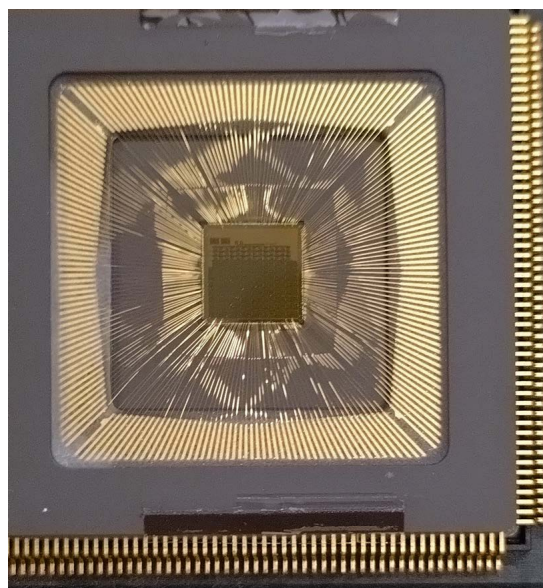


図3.1.1-6 耐放射線光電子FPGAのチップ写真

3.1.2 光学部の耐放射線化【令和4年度～令和5年度】

【令和4年度の概要】

令和4年度に、耐放射線光電子 FPGA の放射線試験に向けてホログラフィックメモリ、レーザアレイ、光再構成型ゲートアレイからなるテストベンチ（トータルドーズ耐性試験用治具類）を設計・試作した。このテストベンチを用いることで光学定盤外での耐放射線光電子 FPGA の運用が可能になる。

【令和5年度実施内容及び成果】

令和5年度には、レーザ駆動部の一部改良設計を行い、耐放射線光電子 FPGA 用の光学部を試作した（図 3.1.2-1）。改良された光再構成システムが正しく動作することを確認した。レーザ部品が絶版となったことに対する対応である。

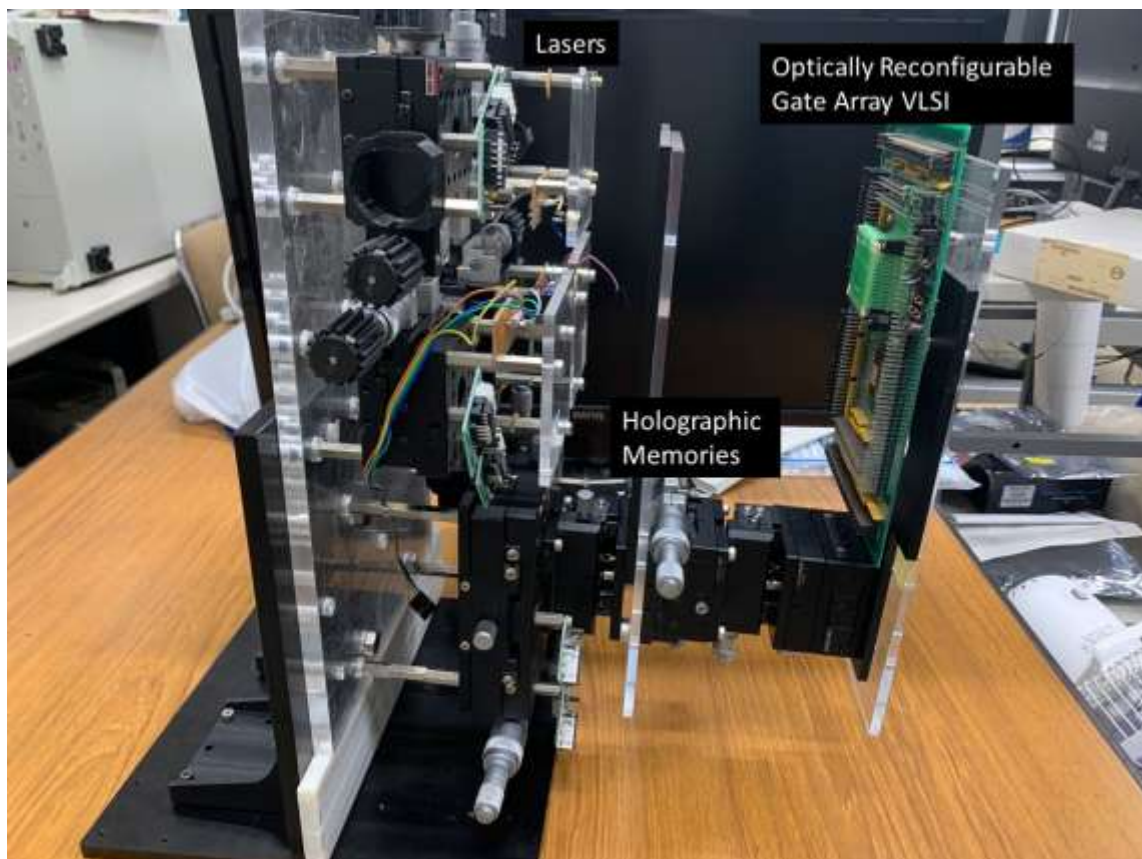


図 3.1.2-1 耐放射線光電子 FPGA の放射線試験向けテストベンチ

3.1.3 耐放射線試験【令和5年度】

試作した耐放射線光電子 FPGA にプロセッサを実装し、ソフトエラー耐性試験を実施した。現状、チップダイ直上に 8 kBq の Am-241 を置き、毎秒約 100 本程度の放射線が入射する放射線環境下において 30 分間、ソフトエラーが発生しないことを確認できており、耐放射線光電子 FPGA が高いソフトエラー耐性を持つことが確認できた。また、高崎量子技術基盤研究所において、約 11 kGy/h の環境下で Co-60 による 404 時間の照射を実施し、4 MGy までのトータルドーズ耐性試験を実施した。プロセッサの加算器を実装し、動作確認を行った結果、正常に動作することが確認できており、トータルドーズ耐性においても十分な耐性があることが確認できた。

3.2 耐放射線プロセッサの開発【令和4年度～令和5年度】

3.2.1 集積回路部の開発【令和4年度～令和5年度】

【令和4年度の概要】

令和4年度には、耐放射線性能を持ち、R3000 プロセッサと等価な命令セットを持つ 32 ビット RISC プロセッサを設計した。ALU 部と 32 ビットレジスタが 32 個実装されたレジスタファイル部、プログラムカウンタ部をそれぞれ個別レイアウトとし、他の機能は分散レイアウトとして実装している。同時に、2 KB のデータメモリと 2 KB のインストラクションメモリを実装している。全ての回路は 3 重化（冗長化）されており、ソフトエラーに耐性がある設計としている。図 3.2.1-1 に 5 mm 角チップへの実装例を示している。

【令和5年度実施内容及び成果】

令和5年度には、0.18 μ m CMOS プロセスにて耐放射線プロセッサチップを試作した。大部分が空き領域であり、メモリの増量、プログラマブルゲートアレイの追加実装が可能であるが、VLSI の I/O ピンの欠如により、余剰スペースの有効活用は見送った。図 3.2.1-2 に試作したプロセッサのチップ写真を示す。3.2.2 項に示す耐放射線試験の結果、脆弱な個所が見つからなかったため改良設計は不要であることがわかった。

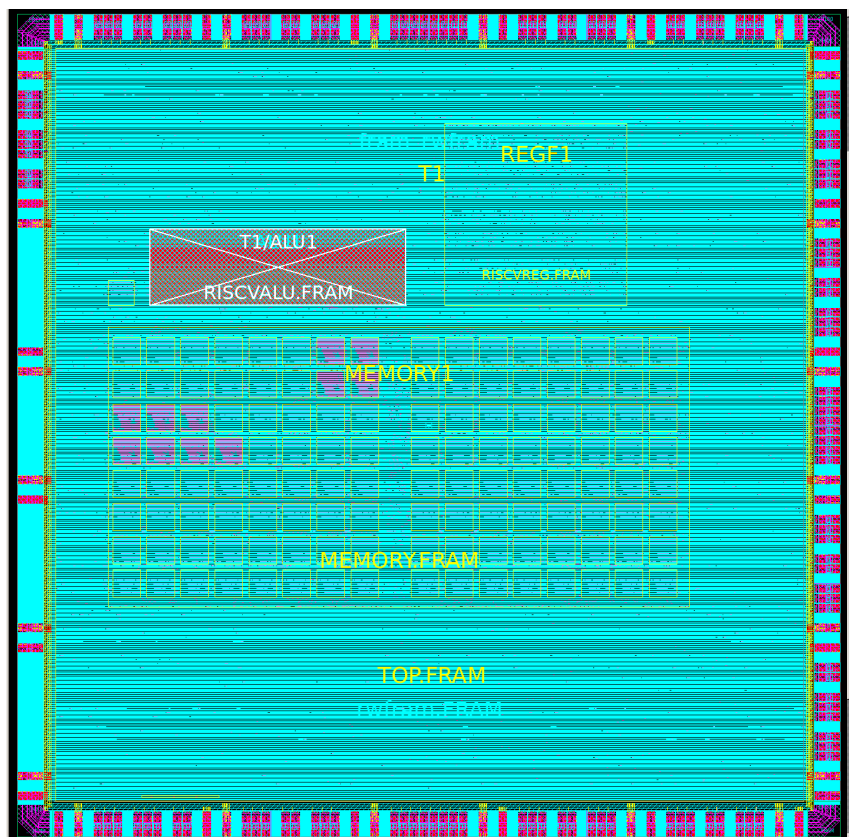


図 3.2.1-1 耐放射線プロセッサチップのレイアウト

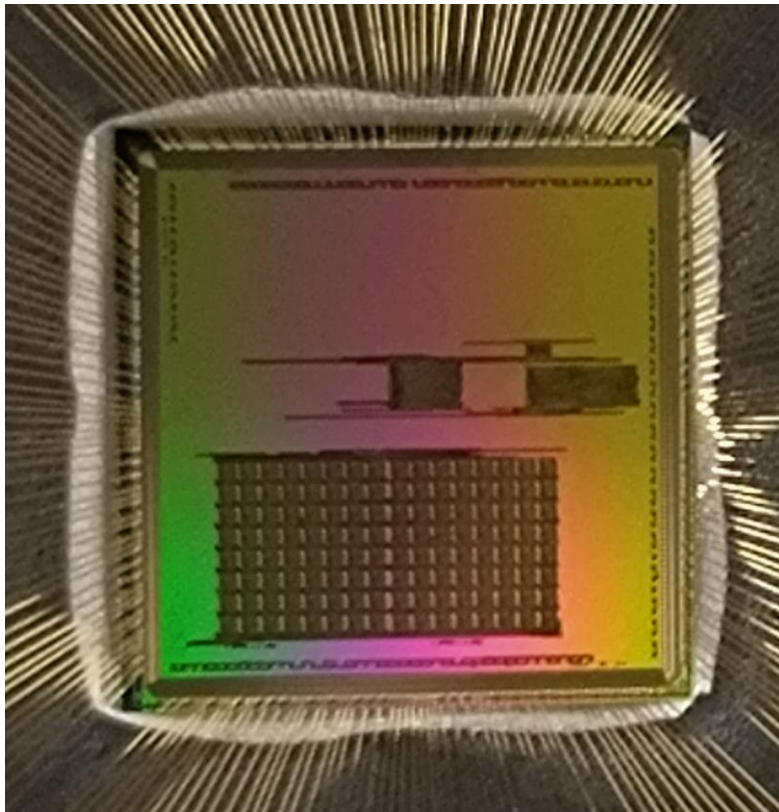


図3.2.1-2 耐放射線プロセッサのチップ写真

3.2.2 耐放射線試験【令和5年度】

試作した 32 bit の R3000 プロセッサとほぼ等価な命令セットを持つ MIPS プロセッサの耐放射線試験を実施した。プロセッサの機能は完全に 3 重化されており、トータルドーズ耐性に加えて、ソフトウェア耐性も高い。現状、チップダイ直上に 8 kBq の Am-241 を置き、毎秒約 100 本程度の放射線が入射する放射線環境下において 30 分間、ソフトウェアが発生しないことを確認できている。また、高崎量子技術基盤研究所において、約 11 kGy/h の環境下で Co-60 による照射を実施し、800 kGy までのトータルドーズ耐性試験を行い、正しく動作することが確認できた。本プロセッサに実装してあるメモリセルの耐放射線性能がまだ十分ではなく、令和 6 年度により耐放射線性能を高めたメモリとともに実装して、プロセッサの耐放射線性能を確認していく。

3.3 耐放射線メモリの開発【令和4年度～令和5年度】

3.3.1 SRAMメモリの開発【令和4年度～令和5年度】

【令和4年度の概要】

令和4年度には、32ビットのバス幅、512ワードの容量を持つ2KBのStatic Random Access Memory (SRAM) セルが2ブロック実装されたSRAMチップを設計した。このSRAMセルは3重化実装、冗長化設計がなされている。

【令和5年度実施内容及び成果】

令和5年度には、0.18 μm CMOS プロセス、5 mm 角チップを用いて本SRAMチップを試作した(図3.3.1-1)。チップ上部には多大な領域が空いているため、セルの実装密度を僅かに改善することで、16 KB程度のメモリサイズにまで拡張することが可能である。当然のことながら、プロセスを進めればより大きなサイズのSRAMが小さなダイ上に実現できるが、本プロジェクトではトータルドーズ耐性の改善が主眼であるため、研究予算の制限からも4 KB程度のメモリサイズまでの実証に留める。3.3.2項に示す耐放射線試験の結果、脆弱な個所が見つからなかったため、改良設計は不要であることがわかった。

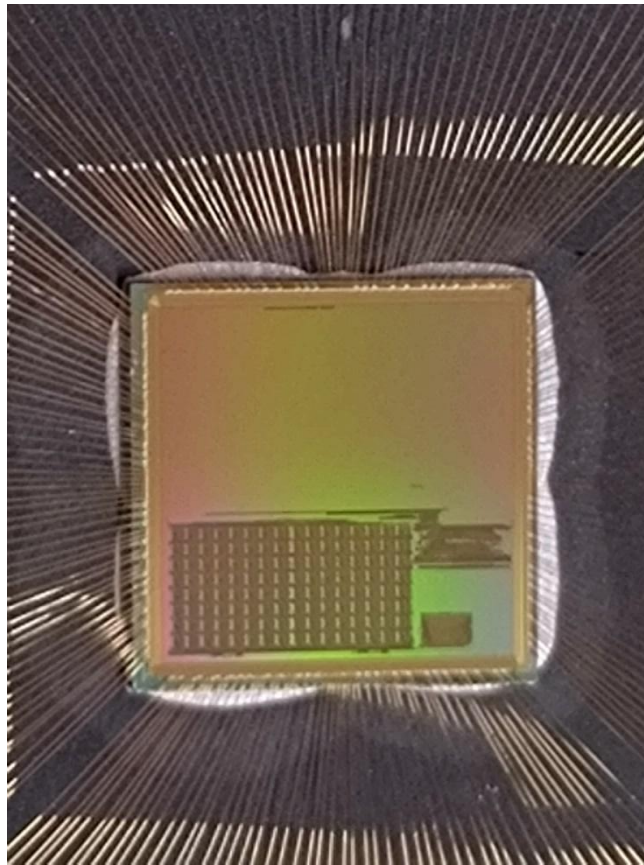


図 3.3.1-1 耐放射線 SRAM のチップ写真

3.3.2 耐放射線試験【令和5年度】

試作した図 3.3.1-1 の耐放射線 SRAM チップの耐放射線試験を実施した。耐放射線 SRAM チップ内の SRAM の機能は完全に 3 重化されており、トータルドーズ耐性に加えて、ソフトエラー耐性も高い。8 kBq の Am-241 を用い、毎秒約 100 本程度の放射線が入射する放射線環境下において 30 分間、ソフトエラーが発生しないことを確認できている。また、高崎量子技術基盤研究所において、約 11 kGy/h の環境下で Co-60 による 404 時間の照射を実施し、4 MGy までのトータルドーズ耐性試験を行い、正しく動作することが確認できた。本プロジェクトでの SRAM の目標トータルドーズ耐性は 4 MGy であり、令和 5 年度の時点でこの目標を達成したことになる。

令和 6 年度からは、より高いトータルドーズ耐性までテストを進め、この SRAM チップの限界となるトータルドーズ耐性を明らかにしてく予定である。また、複数チップに対して放射線耐性試験を実施し、ばらつき等に関する評価も進めていく。

4 MGy のトータルドーズ耐性を持つ耐放射線 SRAM の実現は、SRAM とともに動作確認を行う必要のある耐放射線プロセッサの開発、耐放射線性能の評価に道を開くもので、令和 6 年度中に達成すべき目標値、耐放射線プロセッサのトータルドーズ耐性 4 MGy を達成する土台ができたといえる。令和 6 年度には本耐放射線 SRAM と耐放射線プロセッサとを 1 チップ上に載せた VLSI チップを試作し、評価試験を実施していく。また、今後、市販の FPGA と同様に、耐放射線 FPGA に大規模な SRAM の実装が可能になったことから、耐放射線 FPGA の性能をさらに高めることが可能になる。本プロジェクトにおいては、耐放射線光電子 FPGA に大規模 SRAM を実装し、性能を改善するトライアルも実施していきたい。

3.4 耐放射線電源ユニットの開発【令和4年度～令和5年度】

【令和4年度の概要】

令和4年度には、耐放射線光電子FPGA、耐放射線プロセッサ、耐放射線SRAM等の放射線耐性評価試験に用いるトータルドーズ耐性試験用治具を開発した。基板の写真を図3.4-1に示す。この基板には、耐放射線安定化電源回路3.3V(400mA)、1.8V(400mA)と10MHzのクロック信号生成回路が含まれる。

【令和5年度実施内容及び成果】

令和5年度には、耐放射線光電子プロセッサ、耐放射線プロセッサ、耐放射線メモリの活電評価試験に使用できるように電源ユニット及び治具類の開発を行い、このトータルドーズ耐性試験用治具に対する1MGyまでのトータルドーズ耐性試験を行った。一部基板において、1MGy手前で電源機能が損なわれるものがあり、それが接触不良によるものであることがわかったため、基板配線を強化したものを令和6年度に試作する予定である。クロック発振回路についても1MGyのトータルドーズ耐性まで正常な動作が確認でき、放射線環境下においても安定的にクロック供給が可能になることを確認した。この電源回路の実現は、イギリスが開発するロボットのトータルドーズ耐性の改善にも寄与する。令和6年度には、イギリスチームへの供与を開始して、イギリスチームが開発するロボット、放射線センサーの電源部の耐放射線性能改善に取り組む予定である。

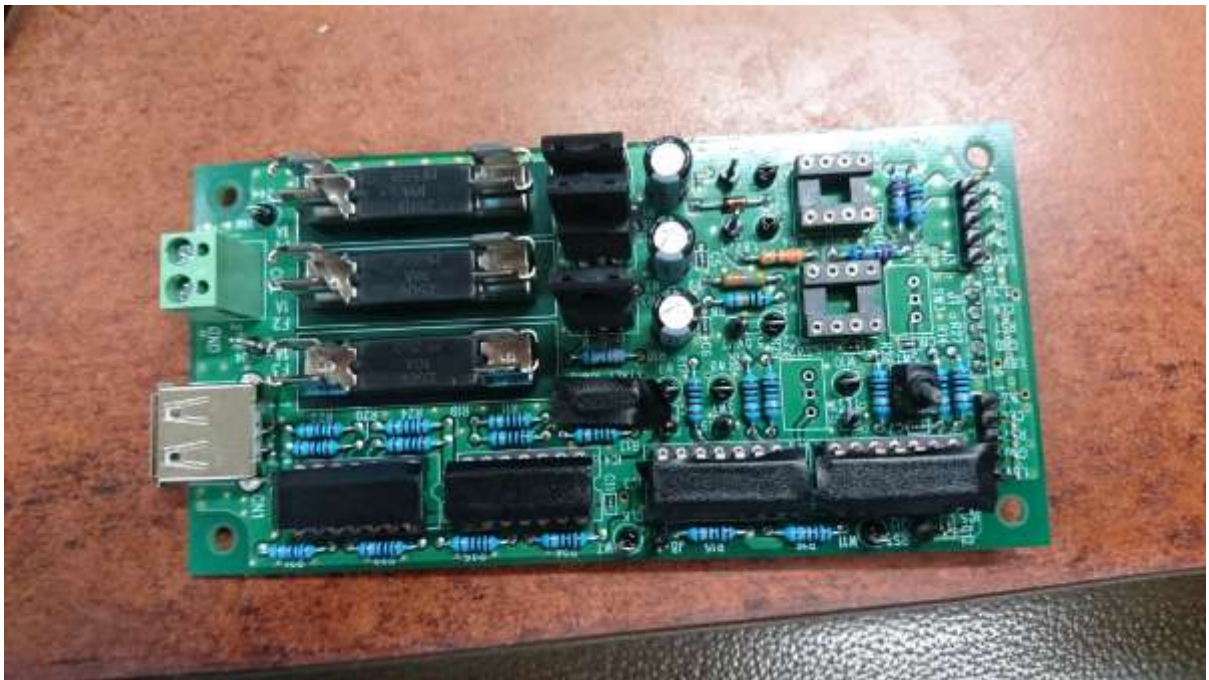


図 3.4-1 耐放射線光電子FPGAのトータルドーズ耐性試験用治具

3.5 耐放射線ホログラフィックメモリの開発(再委託先:神戸高専)【令和4年度～令和5年度】

【令和4年度の概要】

コンピュータ(PC)制御の下、レーザシャッターや光学ミラー等を融合した複数波長からなるレーザ照射装置を設計し、異なる波長のレーザ照射が可能なレーザ干渉露光光学システムを構築した。

【令和5年度実施内容及び成果】

3.5.1 複数波長からなるレーザ干渉露光装置の構築

令和5年度の研究において、令和4年度までに設計した異なる3波長を用いてレーザ干渉露光照射を可能とする装置の構築を行った。図3.5.1-1に、3波長からなるレーザ装置からの出力ビームを1つの光路上に重ねて出力させるためのレーザコンバイナ[1]からなる光学システムの全体の構成図を示す。

レーザコンバイナから出力されるそれぞれ異なる波長のレーザビームは、同一光学軸上で出射される。これらのビームは、2光束干渉露光光学系に導入され、物体光と参照光に分割され、物体光側に配置されたフォトマスク上の異なる領域にあらかじめ記録された回路情報である輝点パターンを通過する。この後、 30° の角度方向から入射する参照光とサンプルセル上で重ね合わされた結果生じる干渉パターンが、サンプルセル内の有機複合材料中に光誘起相分離反応に基づく屈折率分布として記録されることになる。また、フォトマスク(PM)は、複数の種類の回路情報パターンが10mmの正方形内毎の異なる領域に設計されている。図中では示していないが、このフォトマスクはホログラフィックメモリ作製のために物体光側のビーム上に配置され、自動ステージ上に設置されている。ホログラフィックメモリの作製においては、このフォトマスク上の回路パターンを任意に選択するため自動ステージ位置をPC制御で変化させ、ホログラフィックメモリに記録したい回路パターンの選択が任意に可能となるようなシステムとしている。

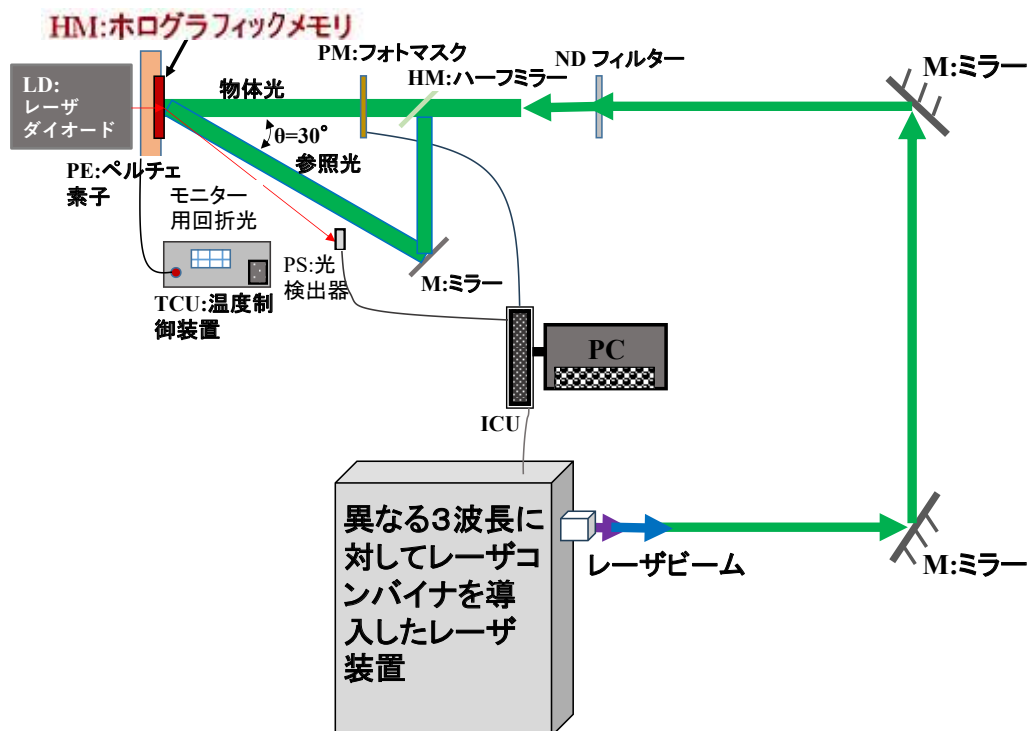


図 3.5.1-1 異なる3波長レーザに対してレーザコンバイナを導入した干渉光学システムの全体図

また、各レーザー装置から出射されるレーザービームを同一光学軸上にアライメントするためのレーザーコンバイナ内の光学素子の構成を図 3.5.1-2 に示す。ここで用いた 3 波長からなるレーザー装置からの出力ビームのそれぞれにビームエキスパンダを接続し、ホログラフィックメモリの作製のためにビーム径を 10~20 mm ϕ 程度に拡大したコリメート光となるようなビーム成型を行っている。さらに、波長の異なるレーザー光に対しては、ビームエキスパンダ内に配置されたレンズ間の距離を精密に調整しながらコリメート性を均一にする必要があるため、レーザービームエキスパンダからのそれぞれのビームをコリメートチェッカに入射させて、その干渉縞の角度を観察しながら、異なる波長のレーザーに対して厳密に平行度が保たれるように調整を行った。

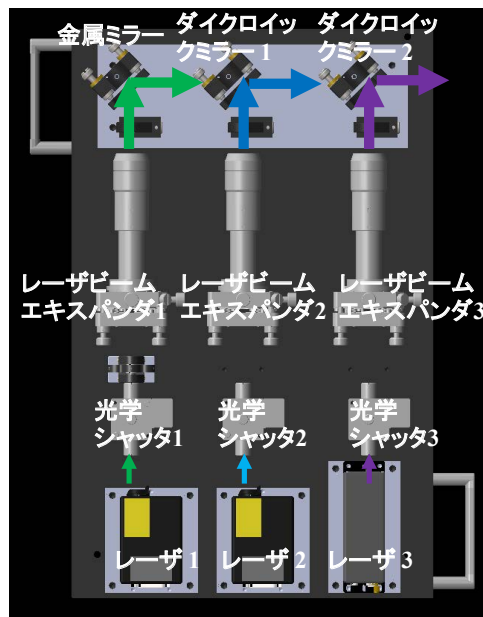


図 3.5.1-2 異なる 3 波長を同一光学軸上で出射するためのレーザーコンバイナの構成図

次に図 3.5.1-3 において、実際に構築した 3 波長レーザーを用いた干渉光学システムの全体写真を基に、3 つのレーザービームを同一光軸上に重ねて出力させ、2 光束干渉によりホログラフィックメモリ作製を行うための光学システムについて説明する。これには、各波長のレーザービームの出射方向が完全に一致するように調整することが重要である。このためには、1 つの全反射ミラーと 2 つのダイクロイックミラーをそれぞれの波長に適応するように特性を調べた上で導入を図った。一番左側に配置されたレーザー 1 に対しては、出射方向を 90° 変化させるだけでよいので、可視光領域全体で、ほぼ均一な反射特性を示す金属全反射ミラーを用いた。レーザー 2 に対しては、473 nm 波長のビームを反射させ、かつ左側から入射してくる 532 nm のレーザーを透過する必要があるため、ダイクロイックミラー 1 として 350~480 nm の波長に対しては 97%以上の反射率を有し、520~1600 nm 波長に対しては、85%以上の透過率を有するダイクロイックミラーを選択した。405 nm 波長のレーザー 3 には、ダイクロイックミラー 2 として 350~430 nm の波長に対しては 97%以上の反射率を有し、470~1600 nm 波長に対しては 85%以上の透過率を有するものを使用した。このように、3 つの異なる波長のレーザービームに対して、同一光軸上で重なって出射可能なレーザーコンバイナを基にした干渉光学システムの構築を行うことができた。このシステムでは、それぞれのレーザーに設置されたシャッターを制御することで 3 つの異なる波長のレーザー（レーザー 1 : 532 nm、レーザー 2 : 473 nm、レーザー 3 : 405 nm）をそれぞれ独立に制御することが可能であり、1 つの波長だけを出力することもできるが、3 つの波長のレーザーを同時に重ねて出力することも可能である[2]。

図 3.5.1-4 に、有機複合体材料にレーザ干渉露光照射を行った時の光誘起相分離過程に基づく作製時の詳細図を示す。図中に示すように、レーザ干渉露光照射によりサンプル上にはレーザ強度分布が生じ、レーザ強度が大きい領域において材料中のモノマーの光硬化が生じ、光強度の小さい部分には、光硬化反応を示さない液晶が押し出されるように凝集する光相分離反応が生じる。この反応過程を経て、内部にはレーザ干渉パターンが転写された構造が形成される。図 3.5.1-5 に 3 つの異なる波長のレーザ（レーザ 1 : 532 nm、レーザ 2 : 473 nm、レーザ 3 : 405 nm）により形成したサンプル内部の格子構造を偏光顕微鏡により観察した画像を示す。図中の(a)～(c)は、レーザ波長 532 nm～473 nm に対応している。これらの干渉縞パターンからレーザ波長が小さくなると干渉縞の間隔も僅かながら変化していく様子が観察された。



図 3.5.1-3 実際に構築した異なる 3 波長レーザを用いた干渉光学システムの全体写真

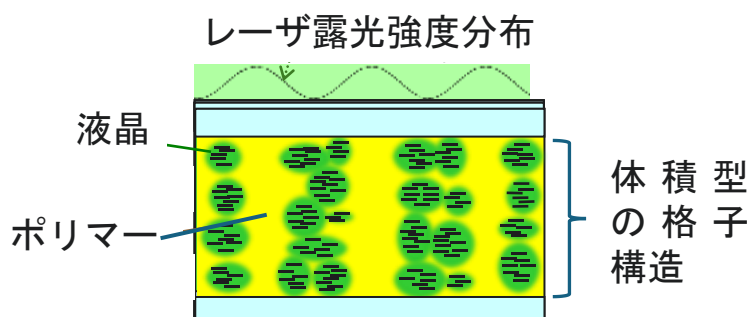


図 3.5.1-4 有機複合体材料へのレーザ干渉露光による格子形成過程

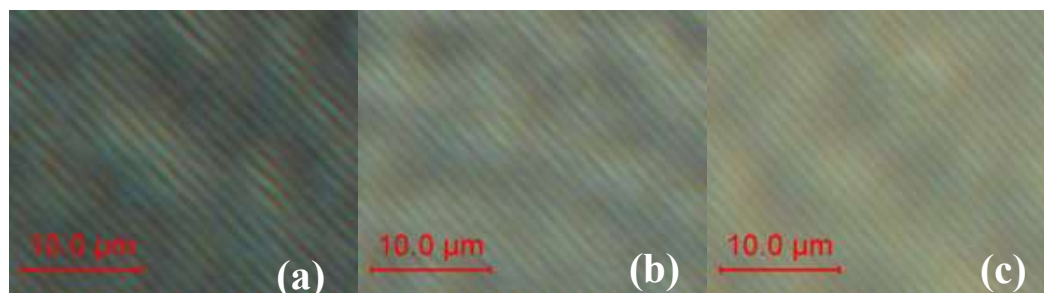


図 3.5.1-5 レーザ干渉露光により作製した異なる波長における干渉縞の構造図

3.5.2 有機複合体材料への異なる波長のレーザ干渉露光によるホログラフィックメモリの作製

有機複合体材料を用いたホログラフィックメモリの作製においては、液晶複合体材料組成設計とこれらの材料のガラスセルへの注入という主に2つのプロセスを経て行われる。以下に、これらのプロセスについて説明する。

(1) 有機複合体材料の調整

本研究で用いた液晶材料としては、液晶（RDP98487）、モノマー（DPHPA）、モノマーを光照射によって光誘起相分離反応を生じさせるための光重合開始剤であるジプロモフルオレセイン（DB）とこの反応を促進させる共重合開始剤である N-フェニルグリシン（NG）を使用した。上記の材料を表 3.5.2-1 に示す重量割合で計量した後、混合して調整することでホログラフィックメモリ作製用の材料設計を行った。これらの材料組成については、これまでの有機複合体材料を用いた回折光学素子作製の知見に基づき、回折効率が高くなる条件を設定している[3]。

表 3.5.2-1 液晶複合体試料の材料組成

試料	重量[g]
液晶（RDP98487）	0.4
モノマー（DPHPA）	0.6
共重合開始剤（NG）	0.002
光重合開始剤（DB）	0.001

(2) 有機複合体材料のガラスセルへの注入によるサンプル作製

有機複合体材料は保持された温度により、ガラスセルへの注入状態や光照射による反応が影響したため、材料注入時及びレーザ干渉露光時の温度制御が重要となる。このため、正確な温度制御が可能なホットプレート上で作製した有機複合体材料とガラスセル（膜厚 10 μm）を 40 °C まで加熱した後、少量の試料をガラスセルの間隙となる位置に滴下し、熱伝導性を促進するためのアルミホイルで作製したカバーで覆い、材料がガラスセル内に十分に拡散されるまで 40 °C を保持した状態で注入を行い、サンプルセルを作製した。

ホログラフィックメモリ作製時の実際の干渉露光においては、本研究で用いた 3 種類のレーザ装置はそれぞれ波長が異なるため、有機複合体材料に対する光誘起相分離反応の発現の仕方が違うことが予想され、それぞれの波長でのレーザ干渉露光時の照射エネルギー量と光反応過程について、あらかじめ調査する必要があるが生じた。このためには、レーザ干渉露光時の液晶複合体内部でのホログラフィックメモリの形成状態を回折光強度の時間変化として観測する手法を導入した。図 3.5.1-1 に示すように、ホログラフィックメモリを作製するためにガラスセルを設置

するペルチェ素子台の後方に赤色（635 nm）のレーザダイオード（LD）を設置し、サンプルセルの後方からこのレーザビームを入射させる。この時、レーザコンバイナからの各レーザの2光束干渉露光時において、この赤色のLDビームの回折光強度を光検出器によりモニターすることで、サンプルセル内部の格子の形成状態を回折光強度の時間変化として観測することが可能となる。ここで、導入した赤色のLDの波長 650 nm は、レーザコンバイナから出力されるレーザ波長よりも長波長域に設定されているため、今回ホログラフィックメモリ用に調整した有機複合体材料の光硬化作用に影響を与えず、レーザ干渉露光時のサンプル内部の反応過程のモニターのみの目的で使うことができる。この赤色LDの回折光の光強度が強くなるほど、有機複合体サンプル内部での格子構造の形成が進んでいることを示すと考えることができる。また、光強度がほとんど変化せず一定となった場合、サンプル内の材料に対する構造変化が完了したと捉えることができる。このレーザ干渉露光時のモニター光の観測手法を用いることで、異なる3波長のレーザ装置からの干渉露光照射時に必要となる露光時間を決定することができる。

図 3.5.2-1 に、3 種類の波長の異なるレーザを用いた場合の干渉露光時間とモニター光の回折光強度の時間変化の関係のグラフを示す。図 3.5.2-1 (a)～(c) は、レーザコンバイナ内のレーザ 1 からレーザ 3 の出射ビームをシャッタで切り換えて観測を行った場合の結果を示している。

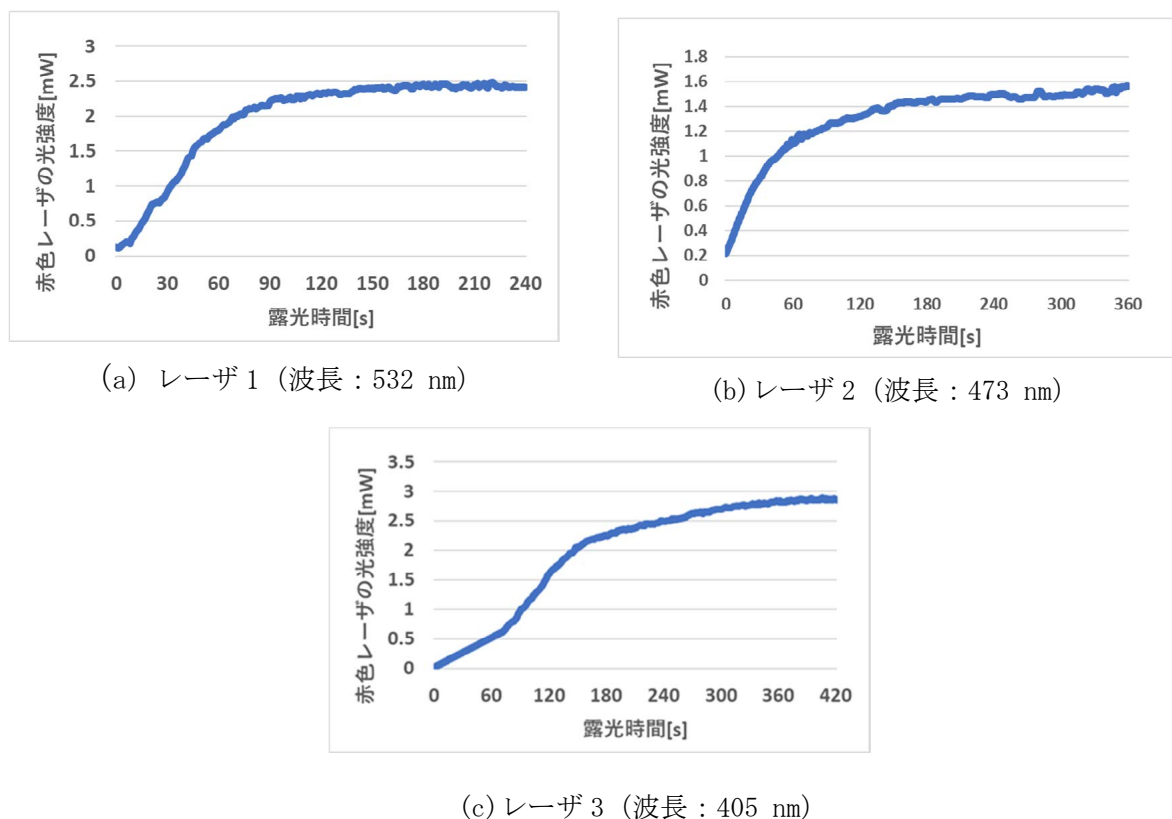


図 3.5.2-1 異なるレーザ波長でのレーザ干渉露光時の照射時間と回折効率の関係

図 3.5.2-1 の観測結果から赤色レーザの回折光の光強度が最も高くなる時、サンプルセル内の有機複合体材料への光照射による反応過程がほぼ終端し、内部構造の形成が完了した状態と考えられる。図 3.5.2-1 (a) のレーザ 1 のグリーンレーザ（波長 : 532 nm）では、露光開始から 120 秒程度で回折効率の値が、ほぼ一定の値に飽和している様子が観察された。強度変化の飽和値への評価としては、およそ 30 秒の時間経過に対して光強度の値の変化が 10%程度以下に収

まった時を飽和値に達したと判断した。次に、図 3.5.2-1(b)のレーザ2のブルーレーザ(473 nm)では、160 秒程度でほぼ飽和値に達しているように見える。これらの2つのレーザ装置の出力光強度は両方とも 50 mW と同じ値となっている。しかしながら、図 3.5.2-1(c)のレーザ3のブルーレーザ(波長：405 nm)は、今回用いた3種類のレーザ中では出力強度が 30 mW であり、他の2つのレーザの出力と比べて小さい。これは、405 nm のような短波長域において、干渉露光照射に適用できるような単一縦モードとなるコヒーレンスが、高いレーザ光を出力させることがまだ技術的に難しいこともあり、この波長域において市販で利用可能な出力の高いレーザ装置は非常に高価であり、入手が難しいという状況も影響している。図 3.5.2-1(c)のレーザ3では、回折光強度が増加する時間変化が7分程度まで緩やかに進んでおり、光強度が概ね一定の飽和値に達するまでに5分程度の長い時間を要していることがわかる。このため、干渉露光照射に必要な照射時間を他の波長のレーザに対して長く設定する必要があることが確認された。

図 3.5.2-1 の結果を基に各波長のレーザ装置において、回折光強度がほぼ一定値となるまでのレーザ干渉露光時間の関係をまとめたグラフを図 3.5.2-2 に示す。

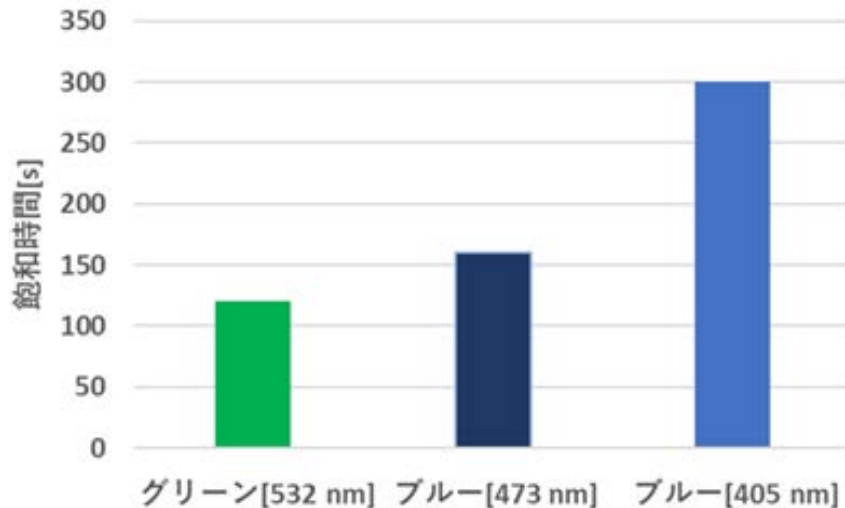


図 3.5.2-2 各レーザ装置の波長と回折光強度が飽和値に達するまでの時間の関係

図 3.5.2-2 の結果を基に、異なる3種類波長のレーザ装置を用いて、図 3.5.1-1 のホログラフィックメモリの作製光学システムにおいて干渉露光照射を行う時の露光条件を表 3.5.2-2 にまとめて示している。この表 3.5.2-2 の作製条件を図 3.5.1-1 の光学システムに適用して、フォトマスク上の2入力 NAND パターンが記録された領域に物体光が照射されるように自動ステージで設定してホログラフィックメモリの作製を行った。表 3.5.2-2 の条件で作製したホログラフィックメモリからの再生画像を図 3.5.2-3 に示す。

表 3.5.2-2 レーザ波長による記録・再生条件の違い

	露光時間[秒]	フォトマスクと サンプル間の距離[cm]	再生像の焦点距離[cm]
レーザ1 (532 nm)	120	20	20
レーザ2 (473 nm)	180	20	20
レーザ3 (405 nm)	300	20	20

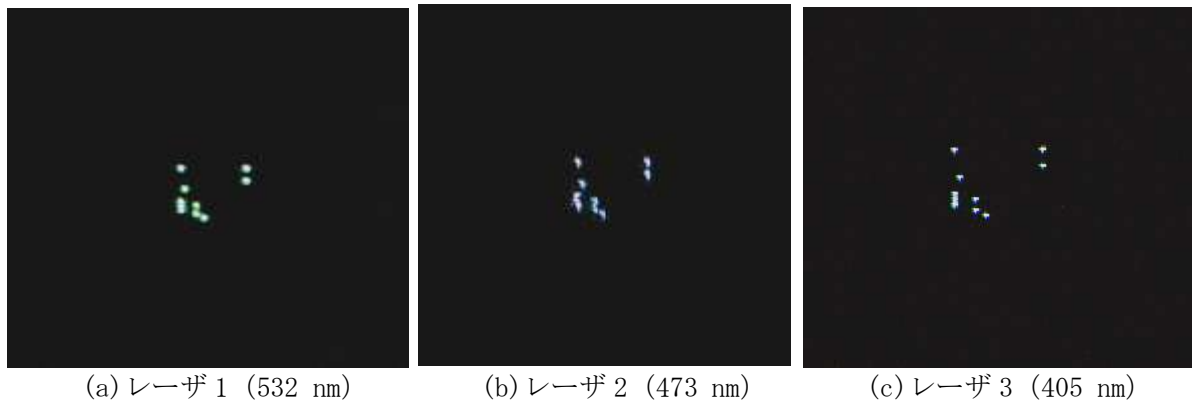


図 3.5.2-3 異なるレーザー波長により作製したホログラフィックメモリからの
2 入力 NAND 回路の再生画像

2 入力 NAND 回路は、入出力ブロックと論理演算ブロックを含めて 10 点からなる輝点パターンから構成される[4][5]。図 3.5.2-3(a)～(c)の結果を見ると、異なる波長において作製したそれぞれのホログラフィックメモリから、これら 10 点の輝点からなるパターンが明瞭に再生されていることがわかる。今回の 3 波長の異なるレーザー装置を導入した、レーザーコンバイナからなるレーザー干渉露光照射システムを用いてレーザー照射条件を確立することができ、有機複合体材料中での光誘起相分離反応に基づく、3 次元的な屈折率分布の円滑な形成によるホログラフィックメモリが作成できたことを確認することができた。これらの結果は、ホログラフィックメモリの素子内部に形成された体積型格子構造にレーザー光を入射すると、レーザー光がその構造に対応して光制御され、レーザービームの高精度な空間的位置制御機能による耐放射線光電子プロセッサへの応用展開が期待できると考えられる。

ホログラフィックメモリは、図 3.5.1-1 のレーザー干渉光学システムでも示したように、フォトマスク上に記録された回路情報からなる物体光ビームと参照光ビームの干渉強度分布が有機複合体材料への光誘起相分離過程を経て転写されることで形成される。回路情報はフォトマスクを通過することで、それぞれの輝点に対応する開口パターンからの回折光成分が重畳されてサンプルセル全体に拡散され、サンプル全面に照射される参照光との干渉パターンとして記録される。このように回路情報はサンプルセル全体に分散されて記録されているため、放射線等の外乱の影響で作製したホログラフィックメモリ内の一部分がダメージを受けた場合でも、他の領域からの光情報により補完され、回路パターンの全体情報を欠けることなく再生することができる。さらに、ホログラフィックメモリから再生された回路情報は空間的な光配線として耐放射線光電子プロセッサへと伝達することができる。このため、もしも光電子プロセッサ内の一部の論理ブロックにダメージを受けた場合は、空間的な光配線機能に基づき他の領域のブロックへと機能に移すことも可能となる。これらのことより、ホログラフィックメモリの外乱に強い特性と耐放射線光電子プロセッサとの融合により、より一層の耐放射線性能の向上が期待できる。

3.6 英国側の研究成果概要

令和5年度にランカスター大学の研究チームは、放射線の強度、種類を特定可能な放射線センサーの研究を進め、放射線センサー自体の開発とその放射線センサーを用いた放射線センシングの試験に取り組んだ。中性子の線源として Cf-252 を用い、開発したセンサーの中性子線に対する検出機能の確認を行った。また、サンプリングされた波形データから線種を特定する AI システムの研究開発を進め、AI を用いることで γ 線と中性子線が分離できることを確認した。令和6年度には、日本チーム、日本の大学とランカスター大学とが連携し、Cf-252 とは異なるエネルギーの中性子線による放射線計測試験を検討する予定である。また、令和6年度からは日本チームから耐放射線電源ユニットを供給し、放射線センサー全体の耐放射線化を進める予定である。

一方、マンチェスター大学のチームは、LiDAR と耐放射線ロボットの開発を進めた。LiDAR は市販品を部品単位で分解し、光源、シールドガラス、受光器等に分けてトータルドーズ耐性を評価した。現状、市販の LiDAR は 1 MGy よりもはるかに低いトータルドーズ耐性しか持たないことがわかっている。今後、日本チームも協力して LiDAR の耐放射線化、ロボットに使用するエンコーダ、モーターコントローラ、電源の耐放射線化を進めていく。令和5年度は、ほぼ2か月に1回、リモートミーティングにより、イギリスチームの開発アイテムと日本チームの開発アイテムの仕様を詳細にすり合わせてきた。令和6年度の5月～6月には、約1か月の間、マンチェスター大学の Matthew Hale 助教が国立大学法人岡山大学（以下、「岡山大学」と略記。）に来校し、岡山大学チームと共同で、日本国内でロボットの研究を進める予定である。具体的には、岡山大学で開発された耐放射線 FPGA と耐放射線電源ユニットとをマンチェスター大学のロボットに組み込む開発を行う。これにより、耐放射線ロボットの耐放射線性能が飛躍的に改善されることになる。また、計測機材の豊富な岡山大学において、Matthew Hale 助教と共に電子工学の観点から LiDAR 部分の耐放射線性能の問題点を深く共有することで、LiDAR 部分の耐放射線化の研究を加速させる予定である。

3.7 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。

マンチェスター大学、ランカスター大学、岡山大学、神戸高専との間で令和5年5月15日、令和5年7月17日、令和5年8月21日、令和5年9月18日、令和5年11月30日、令和6年2月26日、令和6年3月25日の合計7回、teamsによるオンラインミーティングを実施した。マンチェスター大学からはBarry Lennox 教授、Andrew West 研究員、Matthew Hale 助教、ランカスター大学からはMichael Aspinall 講師、Saed Alrawash 研究員、岡山大学からは渡邊実教授、神戸高専からは荻原昭文教授が参加した。毎回のミーティングでは各研究チームの研究進捗を報告し合うと同時に、各チームが直面している諸問題について議論し、総合的な知見により解決に導いた。

岡山大学と神戸高専の間では、研究に参加する学生と教員の全てがSlackを用いて、いつでも討論できる場を作り研究を進めた。Slackで解決できない問題に対しては、teamsを用いてのオンラインミーティングにより、相互の試験環境を確認しつつ問題点を解決に導いた。これらが有効に機能したことから、令和5年度の神戸高専と岡山大学間の研究者の往来は、11月29日の1回のみで十分であった。このように、日本間及び日本、イギリス間で密に連携することで当初の計画通り、全ての研究課題を達成することができた。

CLADS とは、耐放射線 FPGA 技術を中心に実用化の面で連携を深めた。

4. 結言

本研究では「①集積回路に光技術を導入することで 10 MGy のトータルドーズ耐性を達成する耐放射線光電子プロセッサ」、「②既存の集積回路のみで 4 MGy のトータルドーズ耐性を実現する耐放射線プロセッサ」、「③既存の集積回路のみで 4 MGy のトータルドーズ耐性を実現する耐放射線メモリ」及びそれらに必要となる「④1 MGy のトータルドーズ耐性を持つ耐放射線電源ユニット」の 4 つを開発する。

マンチェスター大学とは、ロボットや LiDAR に対する耐放射線プロセッサ、耐放射線 FPGA、耐放射線メモリ、耐放射線電源ユニットの面で連携し、これまでにない高いトータルドーズ耐性を持つ耐放射線ロボットを開発している。また、ランカスター大学とは耐放射線 FPGA、耐放射線電源ユニットの面で連携し、放射線の種類、強度を正確に特定できるセンサー類を開発している。

令和 4 年度の研究では、集積回路技術に光技術を導入することで 10 MGy のトータルドーズ耐性を実現する耐放射線光電子 FPGA に小型プロセッサを実装する研究を行い、4 ビットのプロセッサ実装が可能であることを実証した。これにより、まず「①10 MGy のトータルドーズ耐性を持つ耐放射線光電子プロセッサ」の研究目標を達成した。また、これまでの耐放射線光電子 FPGA にメモリを加え、粗粒度のプロセッサの実装に適した耐放射線光電子 FPGA を設計し、光学部、ホログラフィックメモリ部の開発も進めた。また、トータルドーズ耐性試験用治具類を開発している。

令和 5 年度の研究では、令和 4 年度の間に設計を進めていた耐放射線プロセッサ、耐放射線 SRAM のチップを試作し、ソフトウェア耐性試験、トータルドーズ耐性評価を実施した。これらの評価試験において、耐放射線プロセッサの基本機能を確認した。また、耐放射線 SRAM のチップについては「③既存の集積回路のみで 4 MGy のトータルドーズ耐性の耐放射線メモリ」の研究目標を達成した。また、トータルドーズ耐性試験用治具類の放射線試験も実施した。

また、耐放射線ホログラフィックメモリの開発においては、複数波長のレーザ照射が可能な露光装置を構築し、有機複合体材料に対して異なる波長のレーザ干渉露光を行い、材料中での光硬化反応を有機的に発現させることによるホログラフィックメモリの作製を行った。このホログラフィックメモリの素子内部に形成された体積型格子構造にレーザ光を入射すると、レーザ光がその構造に対応して光制御され、回路情報に対応する輝点パターンの再生が確認できた。

このように令和 5 年度までに、研究目標「①集積回路に光技術を導入することで 10 MGy のトータルドーズ耐性を達成する耐放射線光電子プロセッサ」、「③既存の集積回路のみで 4 MGy のトータルドーズ耐性を実現する耐放射線メモリ」を達成したことから、令和 6 年度には「②既存の集積回路のみで 4 MGy のトータルドーズ耐性を実現する耐放射線プロセッサ」と「④1 MGy のトータルドーズ耐性を持つ耐放射線電源ユニット」の研究に注力していく。そして、最終的に全ての研究目標の達成を目指していく。

なお、これら研究成果は、福島第一原子力発電所の廃炉作業やその他原子力発電所で稼働するロボットだけでなく、ロケット、衛星、探査機等の宇宙システムにも応用が期待できる。本組み込みシステム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ウェア耐性により、組み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も寄与できる。

参考文献

- [1] BeamCombiner システム Type-S シリーズ
https://www.pneum.co.jp/pdf/Beam_Combiner.pdf (参照 : 2023 年 4 月 1 日)
- [2] A. Ogiwara and M. Watanabe, Construction of Laser Interferometer Consisting of Different Wavelengths Using Laser Combiner System for Fabrication of Holographic Memory for Optically Reconfigurable Gate Array, Micro Optics Conference (MOC2023) Technical Digest, P0-8, pp.1-2, Miyazaki, Japan, Sep. 25, (2023).
<https://doi.org/10.23919/MOC58607.2023.10302885>
- [3] A. Ogiwara and M. Watanabe, Analysis of optical properties and internal structures of γ -ray-irradiated holographic devices formed using liquid crystal Composites, Optical Materials 123, 111932, (2022), pp.1-8.
<https://doi.org/10.1016/j.optmat.2021.111932>
- [4] A. Ogiwara and M. Watanabe, Holographic Memory Formed by Different Laser Wavelengths in Laser Combiner System for Optically Reconfigurable Gate Array, IEEE International Conference on Consumer Electronics, Jan. 7, (2024), pp.1-4. Las Vegas, Nevada, USA Online.
<https://doi.org/10.1109/ICCE59016.2024.10444496>
- [5] S. Goto, M. Watanabe, A. Ogiwara and N. Watanabe, Parallel Configuration Experiment for a Radiation-Hardened Optically Reconfigurable Gate Array with a Holographic Polymer-Dispersed Liquid Crystal Memory, IEEE International Conference on Consumer Electronics, Jan. 7, pp.1-2, Las Vegas, Nevada, USA (2024).
<https://doi.org/10.1109/ICCE59016.2024.10444214>

This is a blank page.

