



# 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—

Embedded System Using a Radiation-hardened Processor  
(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  
岡山大学

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

March 2024

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

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 JAEA イノベーションハブ 研究成果利活用課  
〒319-1112 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49  
E-mail: [ird-support@jaea.go.jp](mailto: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](mailto: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)  
—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

岡山大学

(2023年11月27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、そして、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、これまでに無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)

— 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

Okayama University

(Received November 27, 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 FY2022, this report summarizes the research results of the “Embedded system using a radiation-hardened processor” conducted in FY2022.

The present study aims to be developing a radiation-hardened optoelectronic processor with a 10 MGy total-ionizing-dose (TID) tolerance, a radiation-hardened processor without any optical component with a 4 MGy TID tolerance, a radiation-hardened memory with a 4 MGy TID tolerance, and a radiation-hardened power supply unit with a 1 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
付録 成果報告書 .....	15

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
Appendix Result Report .....	15

This is a blank page.

## 1. 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業の概要

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

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

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

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

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

## 2. 平成 30 年度 採択課題

平成 30 年度採択課題については以下のとおりである。

課題数：19 課題

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

## 平成 30 年度 採択課題一覧

共通基盤型原子力研究プログラム

## 【若手研究】

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

## 共通基盤型原子力研究プログラム

## 【一般研究】

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

## 課題解決型廃炉研究プログラム

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

## 国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

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

3. 令和元年度 採択課題

令和元年度採択課題については以下のとおりである。

課題数：19 課題

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

令和元年度 採択課題一覧

共通基盤型原子力研究プログラム

【若手研究】

課題名	研究代表者	所属機関
ウラニル錯体化学に基づくテーラーメイド型新規海水ウラン吸着材開発	鷹尾 康一郎	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	浅間 一	東京大学
化学計測技術とインフォマティクスを融合したデブリ性状把握手法の開発とタイアップ型人材育成	高貝 慶隆	福島大学
放射線・化学・生物的作用の複合効果による燃料デブリ劣化機構の解明	大貫 敏彦 (~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
$\alpha/\beta/\gamma$ 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
$\beta$ 、 $\gamma$ 、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
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）

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 $\gamma$ 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
$\alpha$ 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4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 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

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 R04I127)

成果報告書

令和 5 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4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4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	3-1
3.1.1 小型プロセッサと耐放射線光電子 FPGA の開発	3-1
3.1.2 光学部	3-4
3.1.3 耐放射線試験	3-5
3.2 耐放射線プロセッサの開発	3-6
3.3 耐放射線メモリの開発	3-7
3.4 耐放射線電源ユニットの開発	3-8
3.5 耐放射線ホログラフィックメモリの開発（再委託先：神戸市立工業高等専門学校）	3-9
3.5.1 レーザ干渉に基づく液晶複合体材料への情報記録原理	3-9
3.5.2 複数波長からなるレーザ照射装置の設計開発	3-11
3.5.3 複数波長からなるレーザ照射装置の設計開発のまとめ	3-16
3.6 英国側の研究成果概要	3-17
3.7 研究推進	3-18
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
---------	-------	-------	-----

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	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	...	3-3
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	...	3-4
図 3.1.3-1	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
図 3.2-1	耐放射線プロセッサチップのレイアウト	...	3-6
図 3.5.1-1	レーザー光による干渉縞の形成	...	3-9
図 3.5.2-1	液晶複合体材料への光記録	...	3-11
図 3.5.2-2	レーザーコンバイナを用いた複数波長からなる干渉光学システム	...	3-12
図 3.5.2-3	複数レーザー照射装置の構成	...	3-14
図 3.5.2-4	各種ミラーの波長に対する反射率特性	...	3-15

## 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。	
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	レーザー光を照射して、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。
LUT	: Look-Up Table	プログラマブルに任意の論理関数が実装できる回路。

## 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 1000 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。

これまでの 2019～2021 年度の研究、国立研究開発法人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 国際協力型廃炉研究プログラム (日英) の「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」において、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した耐放射線光電子 FPGA の開発、構成回路を冗長化して耐放射線性能を強化した 7.3 MGy のトータルドーズ耐性を持つ耐放射線 FPGA の開発に成功している。現在、FPGA を使用するロボットが増えてきているが、それでも、ロボットの主要な制御はプロセッサ上のプログラムにより行われることが多く、耐放射線 FPGA に加えて、耐放射線プロセッサの開発も急務となっている。

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、そして、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、これまでになく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。

## 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、そして、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。

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(ホログラムメモリ、レーザアレイ)を設計	光学部(ホログラムメモリ、レーザアレイ)の試作・改良	光学部(ホログラムメモリ、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メモリセルの試作・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		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
(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)		レーザ干渉露光光学システムを構築	耐放射線ホログラムメモリの試作評価	耐放射線光電子プロセッサと融合させた評価試験
(8)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。

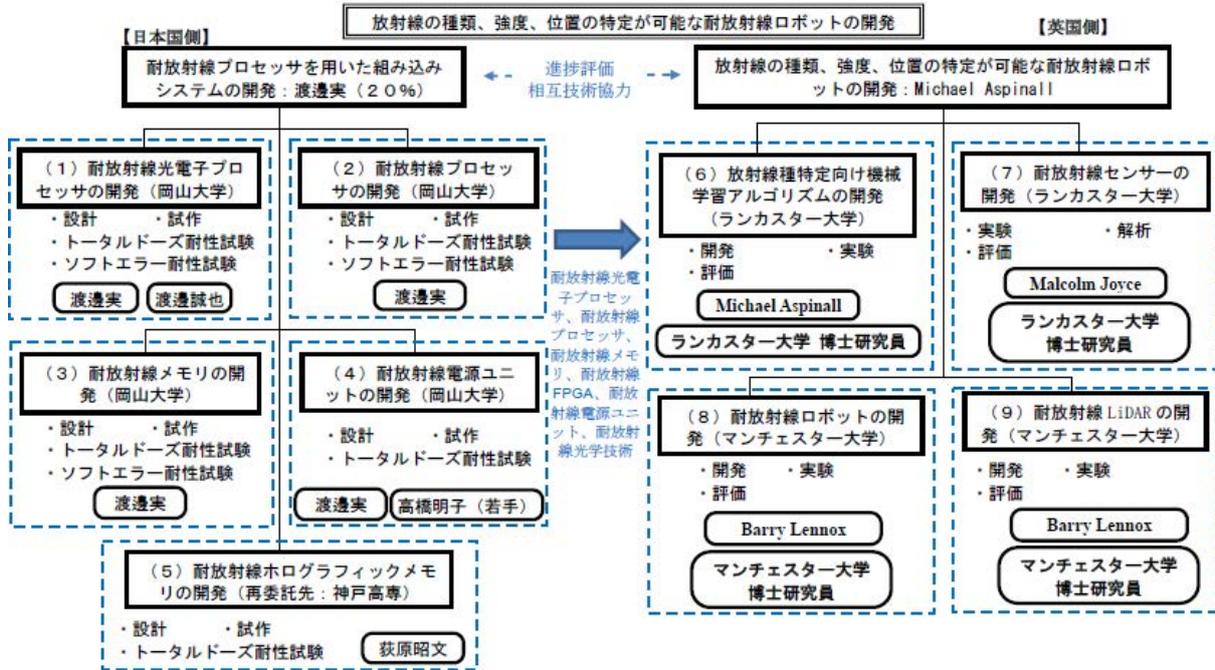


図 2.2-1 実施体制図

## 2.3 令和4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

耐放射線光電子 FPGA 上に実装できる小型プロセッサを設計する。また、粗粒度のプロセッサの実装に適した耐放射線光電子 FPGA を設計する。また、耐放射線光電子 FPGA の改良版に向けて、新しい光学部（ホログラムメモリ、レーザアレイ）を設計する。

耐放射線光電子プロセッサ向け耐放射線光電子 FPGA のトータルドーズ耐性試験用治具類を開発する。

### (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を設計する。

### (3) 耐放射線メモリの開発

光再構成機能を持ち、アドレス、データバス及びメモリセルが冗長化された Static Random Access Memory (SRAM) を設計する。

### (4) 耐放射線電源ユニットの開発

活電状態で耐放射線試験が行えるように治具類の開発を行う。また、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を設計する。

### (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）

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する。

### (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

3.1.1 小型プロセッサと耐放射線光電子 FPGA の開発

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。ALU (Arithmetic Logic Unit) 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

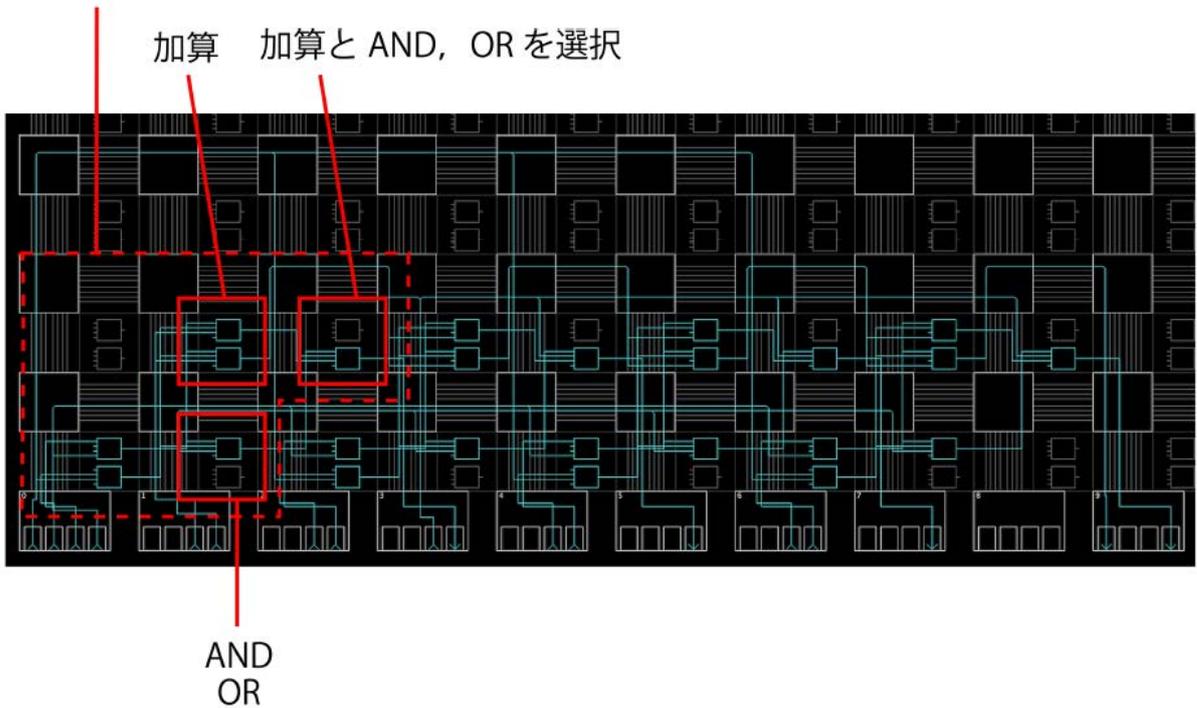


図 3.1.1-1 耐放射線光電子 FPGA 上に実装できる小型の 4 ビットプロセッサの ALU の配置配線結果

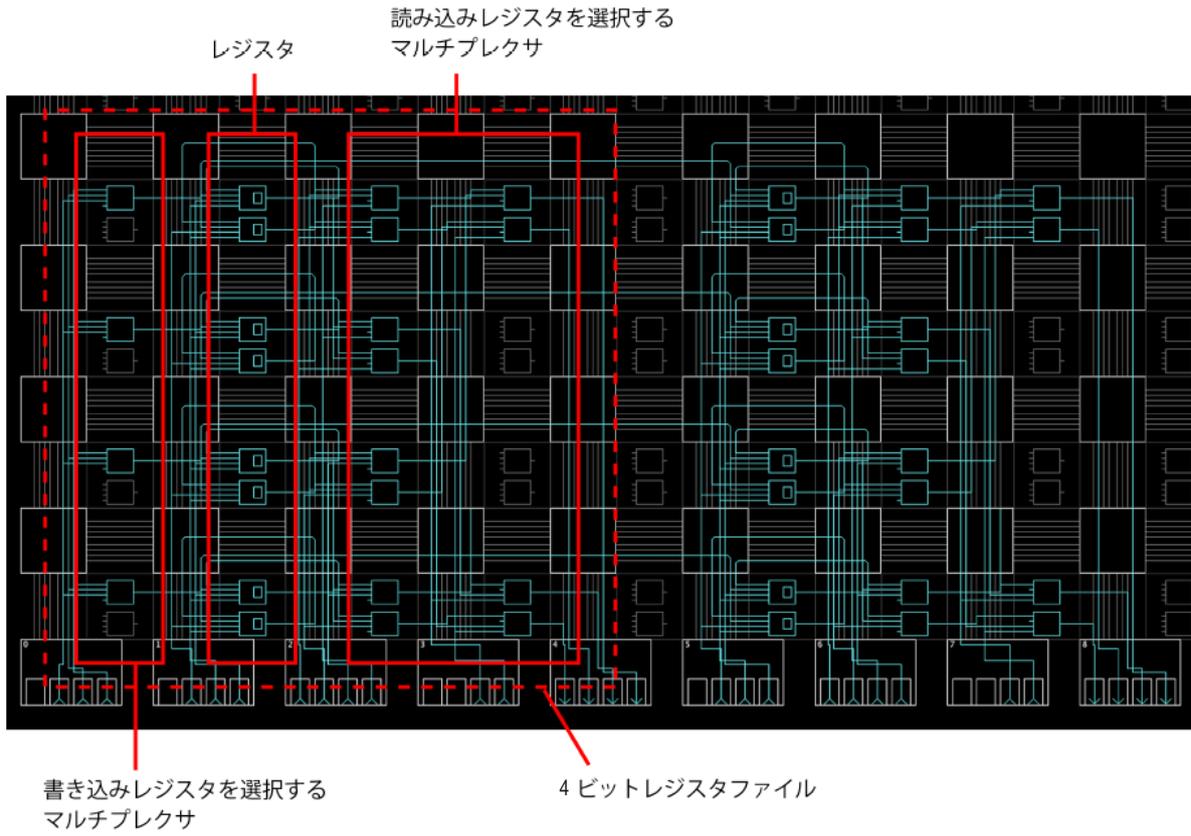


図 3.1.1-2 耐放射線光電子 FPGA 上に実装できる小型の 4 ビットプロセッサのレジスタファイルの配置配線結果

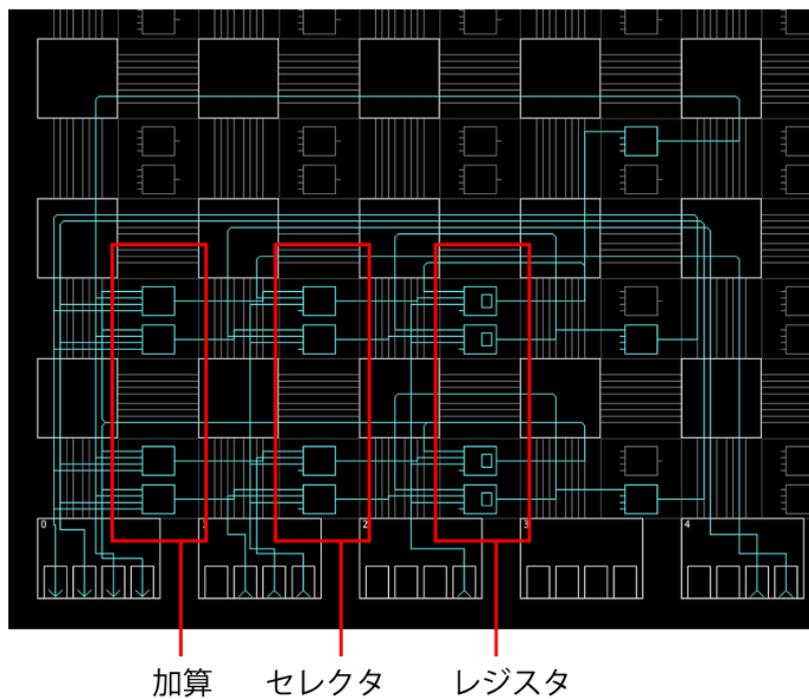


図 3.1.1-3 耐放射線光電子 FPGA 上に実装できる小型の 4 ビットプロセッサのプログラムカウンターの配置配線結果

また、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 3.1.1-4）。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、メモリセルを 8 個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。このチップは令和 5 年度に試作する予定である。

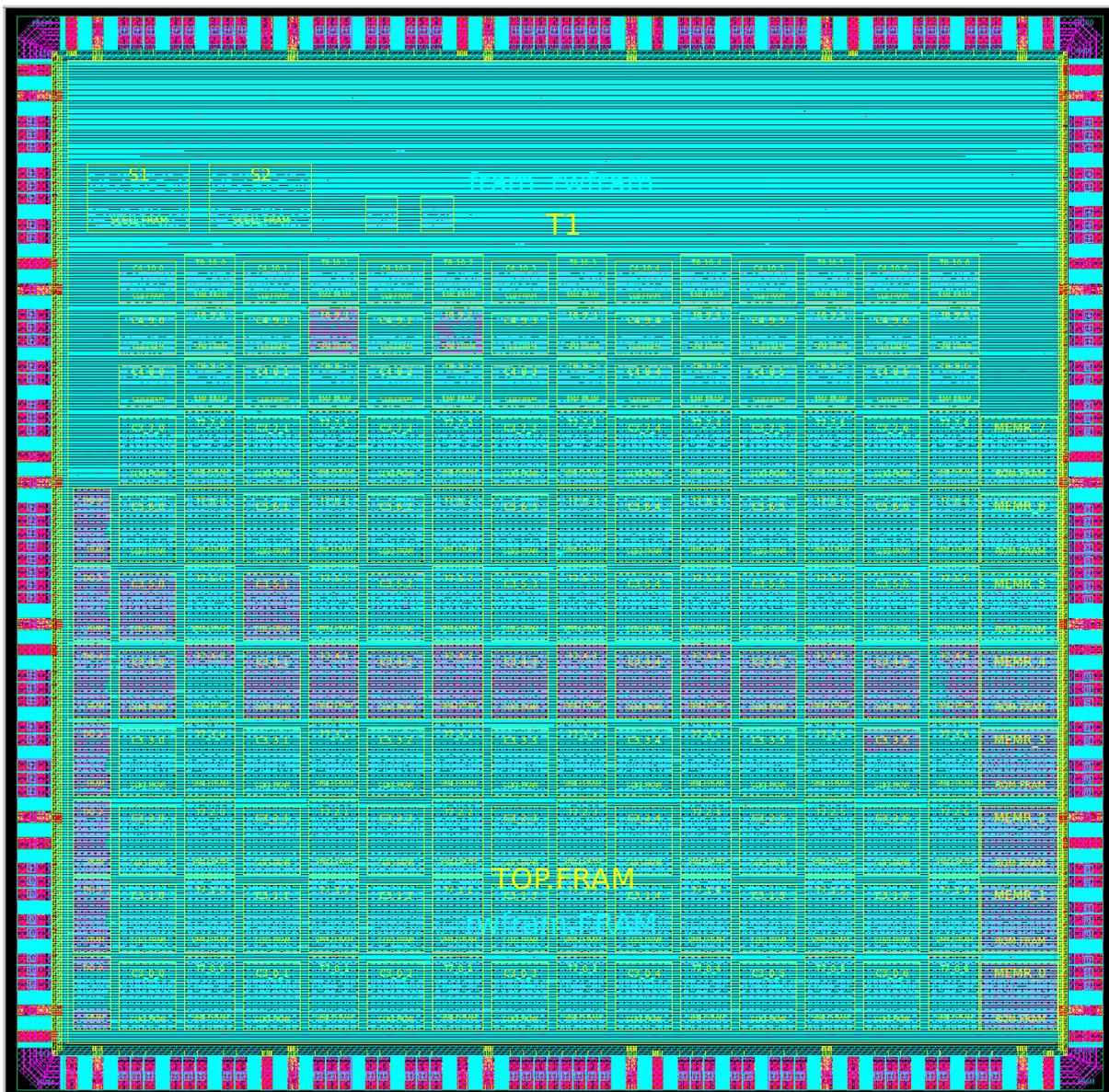


図 3.1.1-4 粗粒度のプロセッサの実装に適した耐放射線光電子 FPGA のレイアウト

### 3.1.2 光学部

耐放射線光電子 FPGA の放射線試験に向けて、ホログラムメモリ、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（図 3.1.2-1）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。今後、中性子線試験、ソフトエラー耐性試験、トータルドーズ耐性試験等に活用していく予定である。

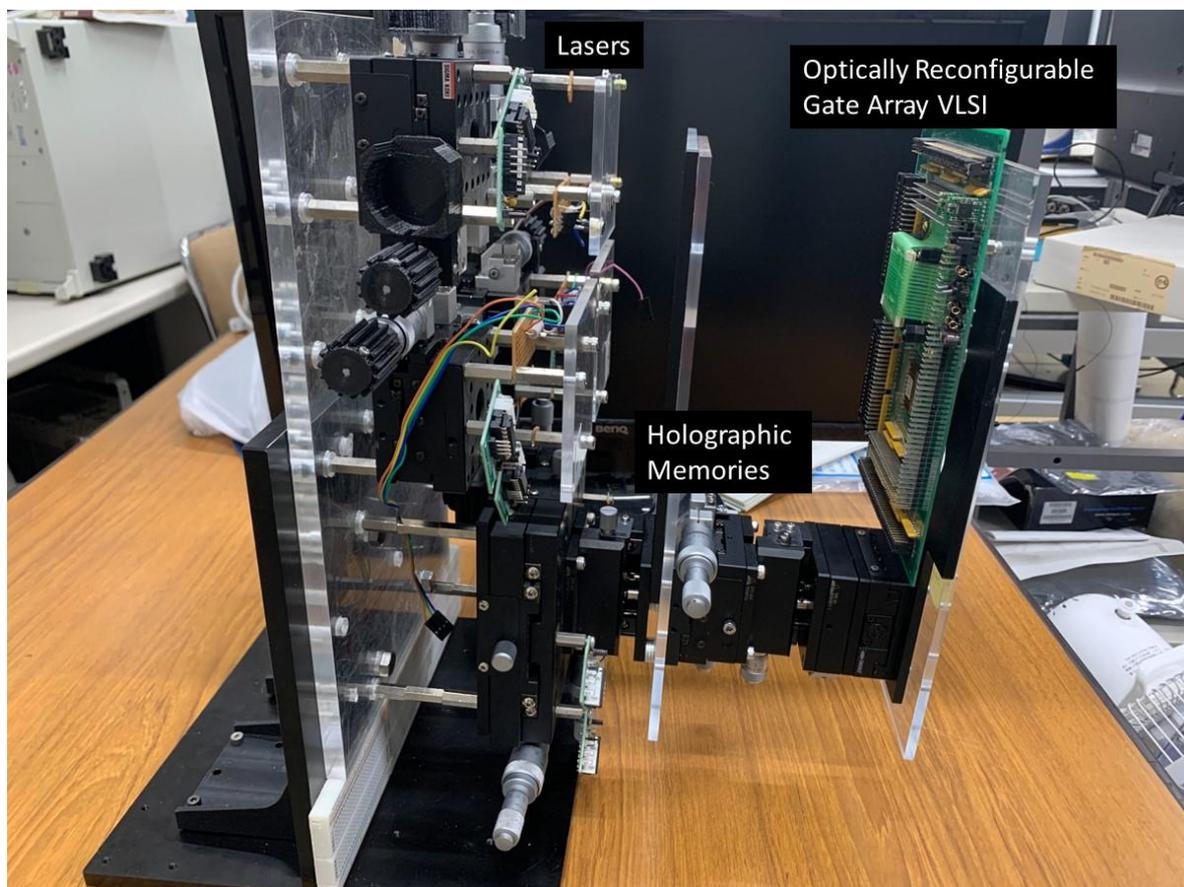


図 3.1.2-1 耐放射線光電子 FPGA の放射線試験向けテストベンチ

### 3.1.3 耐放射線試験

耐放射線光電子プロセッサの実装に用いる耐放射線光電子 FPGA のトータルドーズ耐性試験用治具を開発した。活電状態で耐放射線光電子 FPGA のトータルドーズ耐性試験を行うには、高い放射線に耐えうる安定化電源回路、クロック信号生成回路、その他支援回路が必要になる。これらの機能を単一ボード化したものが図 3.1.3-1 である。令和 4 年度では試作までを完了した。まずは次年度以降、この治具に対する耐放射線試験を開始し、治具そのものの耐放射線性能を明らかにしていく。そして、耐放射線性能が十分である場合には実試験に投入していく予定である。このトータルドーズ耐性試験用治具は鉛シールドと共に使用される予定であり、目標となる耐放射線性能は 1 MGy である。鉛シールドで放射線強度を 1/10 に低下させて使用する予定で、この結果、10 MGy までの連続試験に耐えうる治具として活用していく予定である。

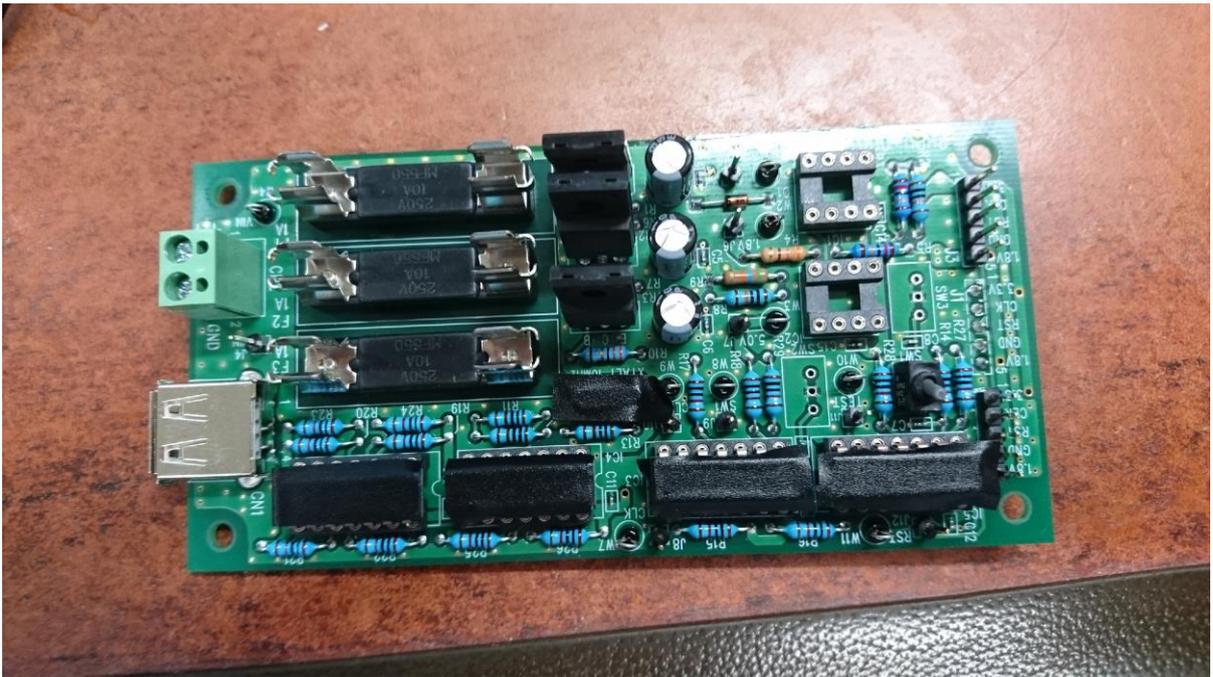


図 3.1.3-1 耐放射線光電子 FPGA のトータルドーズ耐性試験用治具

### 3.2 耐放射線プロセッサの開発

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、後の機能は分散レイアウトとして実装している。同時に、2KBのデータメモリと2KB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なっている。図3.2-1に5mm角チップへの実装例を示している。ダイの大部分は使用されておらず、令和5年度の試作までに空き領域にプログラマブルゲートアレイを実装し、メモリの増量を行う予定である。

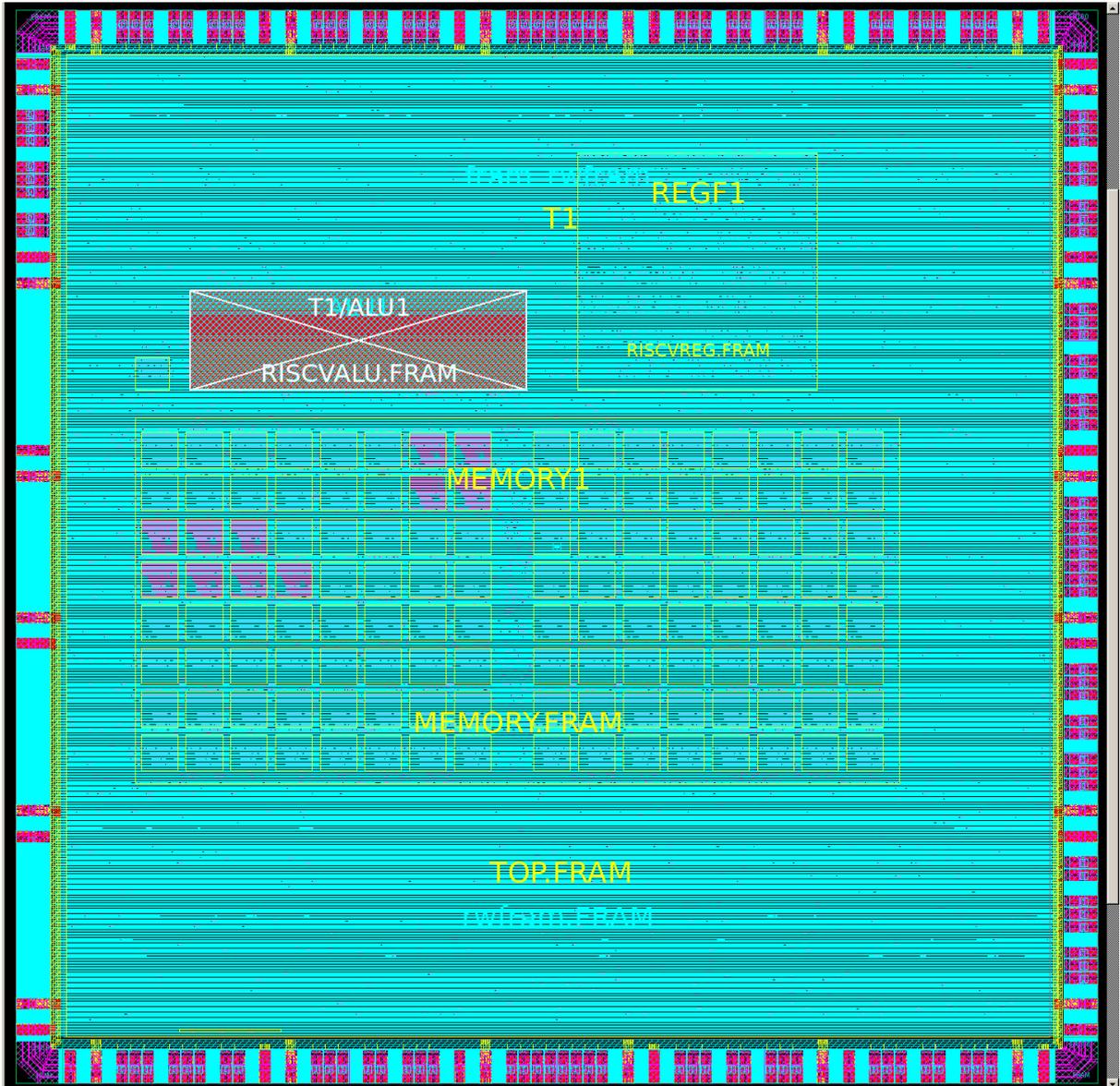


図 3.2-1 耐放射線プロセッサチップのレイアウト

### 3.3 耐放射線メモリの開発

令和4年度には図3.2-1に示す32ビットバス幅、容量2KBの同期式SRAMを開発した。図3.2-1にはプロセッサに加えて、このSRAMセルが2ブロック実装されている。このSRAMセルはアドレス、データバス及びメモリセルが3重化実装、冗長化設計がなされており、トータルドーズ効果により、アドレッシング回路がダメージを受けたとしても継続利用が可能である。本SRAMは次年度に試作していく予定である。同時に放射線試験を実施し、耐放射線性能を評価していく予定である。

### 3.4 耐放射線電源ユニットの開発

令和4年度には耐放射線電源ユニットを設計・試作した。設計時のトータルドーズ耐性値は1 MGyである。この電源回路は図3.1.3-1に示した治具内に実装されている。令和4年度は試作までを行い、令和5年度から耐放射線試験を開始し、電源回路の放射線耐性を明らかにしていく予定である。さらに、耐放射線性能が設計通りである場合、各 Very Large Scale Integration (VLSI) のトータルドーズ耐性試験に使用していく予定である。この電源は鉛シールドと共に使用する予定で、鉛シールドこみで10 MGyまでのトータルドーズ耐性試験に用いる予定である。本研究課題では10 MGyまでのトータルドーズ耐性試験を予定しており、その全時間においてVLSIを活電状態にすることが可能になる。

### 3.5 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）

本研究では耐放射線光電子 FPGA に適用する耐放射線ホログラムメモリを開発する。耐放射線光電子 FPGA では放射線によりゲートアレイの一部が故障した時に故障箇所を回避した別の回路を実装する。よって、ホログラフィックメモリ内に記憶した回路数が多くなればなるほど放射線耐性が向上する。本研究では波長の異なる光源を用い、ホログラフィックメモリに記録する回路数を向上させる研究に取り組む。

#### 3.5.1 レーザ干渉に基づく液晶複合体材料への情報記録原理

光は波の性質を持っているため波長が短い程、空間的なサイズも小さくなり、干渉作用により形成される格子構造もより微細化することになる。図3.5.1-1に光の波を同心円の素元波状の模様を用いて疑似的に表すことで、光による干渉が形成される様子を簡易的に説明する。この図では同心円の中心から光の波が出ているとし、等しい間隔で描かれている実線は、ある瞬間において波の振幅のピーク値（山となる部分）の軌跡を示していると考えられる。また、実線と実線の間隔が光の波長に相当する。このような実線の軌跡は波面とよばれ、波の進行する方向に垂直に振動する横波として生じている[1]。

レーザ光のような干渉性の高い光源を使用することを想定し、この光源からのビームを途中で、ハーフミラーなどで2つのビームに分割し、1つのビームを記録したい情報を有するフォトマスクなどを通過させて物体光とする。もう一方のビームは、そのまま参照光として用いてミラーなどで方向を変えることで物体光と重なるように調整する。このようにして図中に示す参照光と物体光のように進行方向の角度が異なる2つの波の模様を重ねると、実線が重なる部分の軌跡が一連のパターンに見える。これはモアレ縞とよばれるもので、ホログラフィックメモリ内に記録される干渉縞に相当する。干渉縞は2つの光が重ね合わさり、互いに強めあったり、弱めあったりする干渉という現象によって生じる。実際には黒い線の部分は、振幅が大きな明るい部分を示しており、これらの部分が記録材料として用いる媒質内に格子構造として記録されることになる。

光源として用いるレーザ光は単一波長を持つコヒーレントな光であり干渉性が高く、参照光と入射光を重ね合わせた際に安定した干渉縞を得ることができる。また再生光としても記録に用いたものと同様の単一波長を持つレーザ光でなければ再生像の再現性を含めた鮮明さなどに影響を及ぼす。

以上の理由からホログラフィックメモリを記録する際には、コヒーレンスが高いレーザ光を使用することが重要である[2]。さらに、波長の異なるレーザ光を用いた場合、干渉縞の間隔も変化する。特に短波長のレーザを使用すれば、より細かな干渉縞が発生し、微細化された格子構造の記録が可能となるため、媒質内における情報の記録密度を向上させることが期待できる。

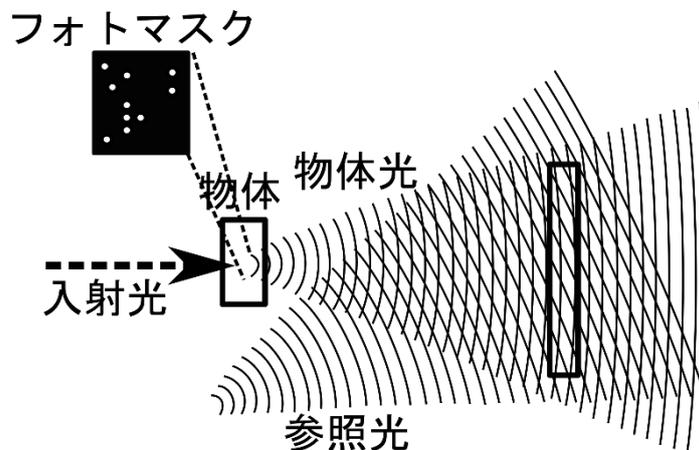


図3.5.1-1 レーザ光による干渉縞の形成

次に、レーザ干渉に基づく干渉縞などを記録するための材料について説明する。図3.5.2-1には、これまで使われてきた有機材料を用いた場合の回折光学素子の作製過程を示している[1, 3]。ホログラフィー用記録材料としてはフォトポリマーを用いると、高い回折効率を持ったホログラフィックメモリを得ることが期待できる。フォトポリマーには、基本的に光重合反応性のあるモノマーと光重合性のないマトリックスとして機能するバインダーポリマーから構成される。フォトポリマーに対して図3.5.1-1で示したように2つのレーザ光（参照光と物体光）で干渉露光を行うことにより、光強度の明暗のパターン（干渉縞）に対応して、明部のモノマーは光重合反応がより促進されることでポリマー化され、それに伴い明部と暗部でのモノマーの密度差が生じることになる。この結果、モノマーは暗部から明部への拡散が促進されることになる。このため、明部と暗部でのポリマーとバインダーポリマーとの密度比の違いが顕著になり、各場所での屈折率はポリマー、モノマー、バインダーポリマーが持つ屈折率と数密度により決定される。従って、全てのモノマーが完全に重合した定常状態では、光重合後のポリマーの屈折率がバインダーポリマーのそれより高い場合には干渉縞の明部は暗部に比べて屈折率が高くなり、屈折率差が周期的に変調された位相ホログラムが形成される。この時、物体光に回路情報などを記録したフォトマスクを用いれば、このフォトマスクにあらかじめ設計・記録した輝点情報が屈折率分布として重畳されたホログラフィックメモリが作製可能である[3]。

3.5.2 複数波長からなるレーザー照射装置の設計開発

本研究では、バインダーポリマーの代わりに光硬化性を有さない液晶を用いた液晶・高分子複合体材料を用いて、レーザーによる光誘起相分離反応に基づくデバイス作製を行っている（図3.5.2-1）。この反応過程では、液晶・高分子複合体材料を封入したガラスセルの厚さ方向において均一に光相分離反応が誘起されるため、微細な3次元構造を有する体積型の格子構造を精度よく形成可能である。さらに、液晶の配向特性を活かした大きな複屈折性の利用も可能であるため、高効率な光機能デバイスとしての性能の発揮を期待することができる[4]。

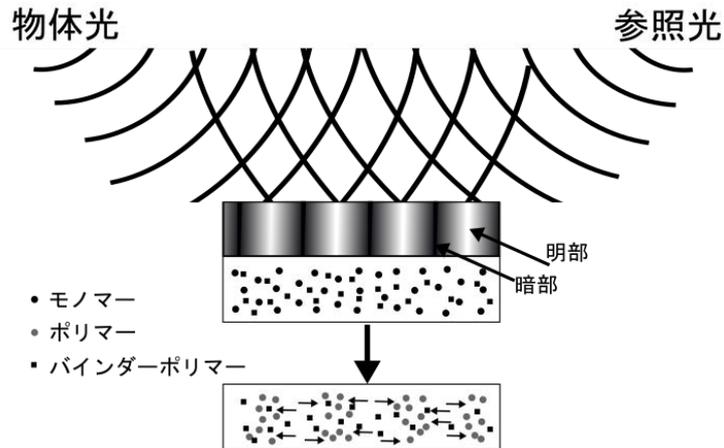


図3.5.2-1 液晶複合体材料への光記録

これまでホログラフィックメモリの作製には、532 nm 波長のレーザを用いたレーザ干渉システムを構成して行ってきた。これに対して、さらに短波長となるレーザ波長を導入することで、より微細な格子構造の形成が可能となり、回路情報等の高密度記録性能を有するホログラムメモリの作製が期待できる。

先にも述べたように、高分子複合体材料には、外部からのレーザ照射強度の大きさに応じて、内部に微細ネットワーク構造を3次元的に形成する光誘起相分離とよばれる自己形成反応が適応される。本研究テーマの再委託先機関の代表者は、これまで高分子複合体材料の材料設計に基づき、レーザ光学系の種類により異なる干渉強度分布を用いた高分子複合体材料の設計と素子作製に取り組んだ研究実績を有している。これらの研究知見を活かして、今回、図 3.5.2-2 に示すような波長の異なるレーザを複数導入し、図中に示すように 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の設計・開発に取り組んだ。波長を変えてホログラフィックメモリに書き込みを行う場合、波長ごとに光学系を組み、別々に書き込むことが多いが、本光学系を用いることで一度に全ての波長の書き込みを行うことができる。これらの異なる波長のレーザ照射を各レーザに配置したレーザ用のシャッターで制御することで、ホログラフィックメモリ作製の液晶・高分子複合体材料に照射するレーザ波長の連続的な切り換えが可能となる干渉露光光学システムを構築している。このような光プロセスを有機複合体材料が封入されたガラスサンプルに適用すると、厚さ方向に沿って分離した 0.5  $\mu\text{m}$ ~1  $\mu\text{m}$  範囲の3次元微細構造の形成が可能となる。この結果、素子内部に形成された体積型格子構造に応じて入射したレーザ光は光制御され、レーザビームの高精度な空間的位置制御技術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。

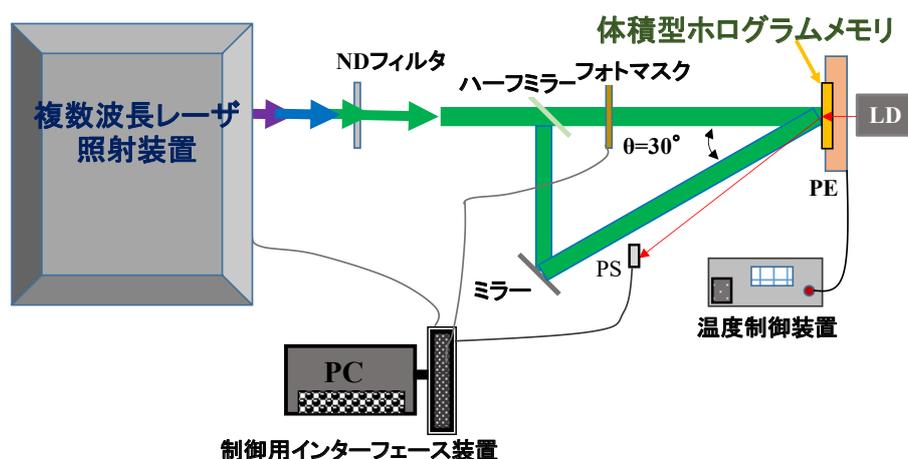


図 3.5.2-2 レーザコンバイナを用いた複数波長からなる干渉光学システム

図 3.5.2-3 は、図 3.5.2-2 の中に示した複数のレーザ照射装置の詳細な構成を説明したものであり、レーザ 1~3 の 3 つの異なるレーザを配置可能な構成とした。今回用いたレーザの波長としては、レーザ 1 に 532 nm の従来から用いてきたものを利用し、レーザ 2 には 473 nm を使い、そしてレーザ 3 には 405 nm のより短波長のレーザを配置した。これらのレーザビームの出射をそれぞれ独立に切り換えるために、それぞれのレーザ装置に併せてレーザシャッターを設置している。これらのレーザシャッターは 1 台のシャッターコントローラ装置を介して PC に接続され、開閉のタイミングをプログラム上から制御することも可能な構成としている。

ここで用いた3波長からなるレーザ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 mmφ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。波長の異なるレーザ光に対しては、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。これには、レーザ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クに入射させて、その干渉縞の角度を観察しながら、それぞれの波長のレーザに対して厳密に平行度が保たれるような調整を繰り返し行うことでコリメート性の精度がどのレーザ波長に対しても均一となるようなシステム構築を行った。

次に、光軸上の1つの光路上に3つのレーザビームを重ねて出力させるためのレーザコンバイナの構成について説明する。これには、各波長のレーザ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。これらのミラーの各波長に対する反射率特性のグラフを図3.5.2-4に示す。一番左側に配置されたレーザ1に対しては、出射方向を90°変化させるだけでよいため、可視光領域全体でほぼ均一な反射率特性を示す図3.5.2-4(a)に示した特性を有する全反射ミラーを用いた。レーザ2に対しては、473 nm波長のビームを反射させ、且つ左側から入射してくる532 nmのレーザを透過する必要があるため、ダイクロイックミラー1を配置しており、このダイクロイックミラー1の反射率特性は、図3.5.2-4の(b)に示している。この図から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することでレーザ2からのビームは反射させ、レーザ1からのビームは透過して同じ方向に出射するようにしている。さらに、405 nm波長のレーザ3用には、図3.5.2-4(c)に示す反射率特性を示すダイクロイックミラー2を選択している。このダイクロイックミラーは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ため、レーザ3のビームは反射するが、左方向から入射するレーザ1及びレーザ2のビームは、透過して、3つのレーザビームが同じ光軸上で重なって出射可能なレーザコンバイナ構成をとることができる設計となっている。

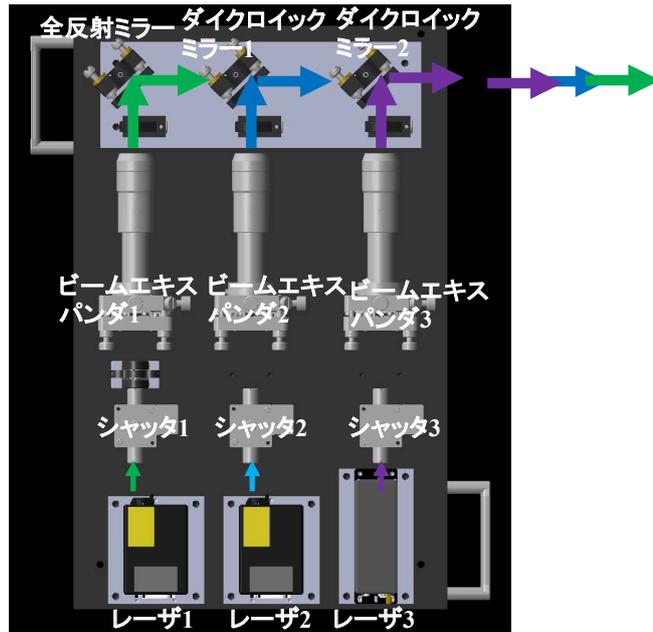
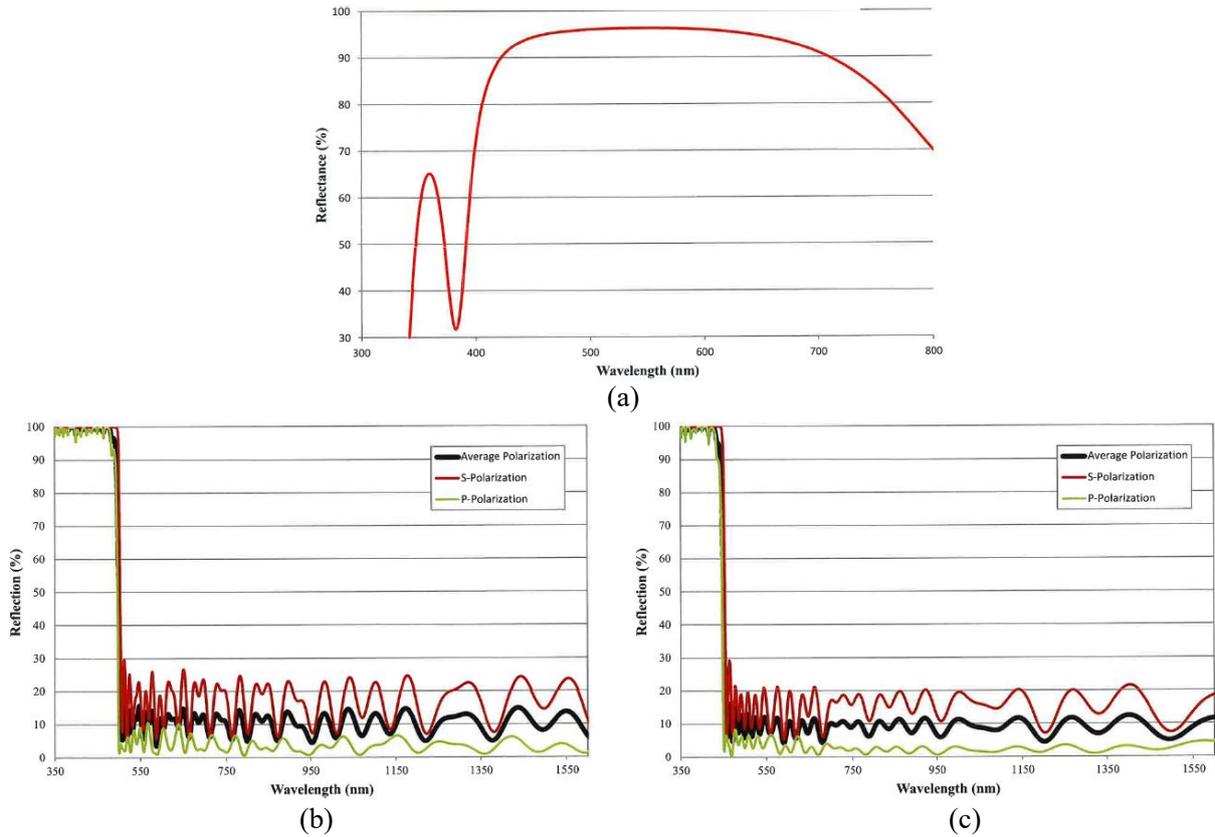


図 3.5.2-3 複数レーザー照射装置の構成

このように図 3.5.2-3 のレーザーコンバイナは 3 つの異なる波長のレーザーを 1 ヶ所の光軸上で一致したビームとして出射させることができる。また、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 2 : 473 nm, レーザ 3 : 405 nm）をそれぞれ独立に制御することを可能にしている。このため、1 つの波長だけを出射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 [4]。

また、図 3.5.2-2 に示した干渉光学システムには、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複数の種類の回路情報パターンが設計されたフォトマスクを配置している。このフォトマスク上の回路パターンを任意に選択できるように自動 X-Y ステージ上にフォトマスクを配置し、このステージ位置を PC 制御で変化させることにより、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。



(a)全反射ミラー、(b)473 nm用ダイクロイックミラー、(c)405 nm用ダイクロイックミラー  
 図 3.5.2-4 各種ミラーの波長に対する反射率特性

以上のような複数レーザー照射装置の構成についてレーザーコンバイナを構築することで、異なるレーザー波長を任意に選択して同じ光路上に重ねたレーザー光束を用いた干渉系を構成可能なシステムとした。この結果、ホログラフィックメモリ作製に対して異なる波長のレーザーを、その仕様において選択して利用することができ、作製上の自由度が高いシステムの構築を実現することができた。

### 3.5.3 複数波長からなるレーザ照射装置の設計開発のまとめ

令和4年度における本研究においては、これまでの光デバイス作製に関する研究業績の知見を有効活用し、耐放射線光電子プロセッサと融合可能なホログラムメモリを開発することを目的として、PC制御の下に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・開発した。この研究成果により、異なる波長のレーザ照射が可能な作製時の自由度を向上したレーザ干渉露光光学システムを構築することができた。今回の研究成果を令和5年度のホログラフィックメモリの作製の研究へと展開することで、耐放射線光電子プロセッサと融合可能なホログラムメモリの開発を促進できると考える[4-6]。

### 3.6 英国側の研究成果概要

令和 4 年度、ランカスター大学は放射線センサーに使用するセンサー材料の研究と線種を特定する AI の研究を進め、AI の応答速度の評価を終えている。また、マンチェスター大学は LiDAR に使用するエンコーダ、モーターコントローラ、電源の耐放射線試験を実施し、個別に放射線耐性を高める研究を進めた。

### 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。

令和4年10月19日に研究代表者、荻原教授（神戸市立工業高等専門学校）、高橋准教授（岡山大学）、渡邊誠也助教（岡山大学）、Barry Lennox 教授（マンチェスター大学）、研究補助員17名が岡山大学に集まり、研究プロジェクト開始前の事前研究打ち合わせを実施した。

加えて令和4年12月14日に研究代表者、Malcolm Joyce 教授（ランカスター大学）、Michael Aspinall 講師（ランカスター大学）、Barry Lennox 教授（マンチェスター大学）、ポストドク研究員（ランカスター大学）、ポストドク研究員2名（マンチェスター大学）、荻原教授（神戸市立工業高等専門学校）により、研究プロジェクト開始後初となるオンラインミーティングを開いた。各研究チームが他チームに要求する仕様、研究計画、研究進捗について相互確認を行った。

令和5年2月8日には研究代表者、Malcolm Joyce 教授（ランカスター大学）、Michael Aspinall 講師（ランカスター大学）、Barry Lennox 教授（マンチェスター大学）、ポストドク研究員（ランカスター大学）、ポストドク研究員2名（マンチェスター大学）でオンラインミーティングを実施した。互いに2か月の間に進んだ研究成果・進捗を報告し合い、共同研究における諸問題について打ち合わせを行った。

令和5年3月12日から16日の期間、研究代表者と高橋准教授がマンチェスター大学とランカスター大学の研究室を視察し、研究打ち合わせを行った。ただ、訪問の直前にランカスター大学でボヤがあり、研究棟への立ち入りができなくなり、ランカスター大学の研究室や研究機材（センサー類）を直接見ることができなかった。この点は次回の訪問時に実施する予定である。

COVID-19の影響は残るが、イギリスの研究グループと密に連携し、研究を進めることができた。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ている。このような密な連携の下に研究を進め、当初の計画通り、研究課題を達成することができた。

#### 4. 結言

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、そして、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。

令和 4 年度の研究では集積回路技術に光技術を導入し、10 MGy のトータルドーズ耐性を持つ耐放射線光電子 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。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、放射線試験が活電状態で行えるようにトータルドーズ耐性試験用治具類を開発した。

光技術を用いない耐放射線プロセッサ、メモリの研究においてはプロトタイプチップの設計を終えている。これらは次年度に試作し、評価していく予定である。

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] 久保田敏弘, 「ホログラフィ入門」, 朝倉書店, 1999.
- [2] P. ハリハラン, 吉川浩・羽倉弘之 訳, 「ホログラフィーの原理」, オプトロニクス社, 2004.
- [3] J. F. V. Manríquez, M. O. Gutiérrez, M. P. Cortés, J. C. Ibarra-Torres, A. O. Pérez, Holographic gratings recorded in PDLC mixed with crystal violet dye, *Optik*, 144 (2017) pp.219–223. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2017.06.089>
- [4] A. Ogiwara and M. Watanabe, Optical reconfiguration by anisotropic diffraction in holographic polymer-dispersed liquid crystal memory, *Appl. Opt.* 51 (2012) pp.5168–5177. <https://doi.org/10.1364/AO.51.005168>
- [5] A. Ogiwara and M. Watanabe, Holographic gratings formed by wavelength multiplexing in liquid crystal composites, *Microoptics Conference (MOC2021)*, PO-23, Hamamatsu (Online), Japan, Sep.28, (2021) pp.188–189. <https://doi.org/10.23919/moc52031.2021.9598095>
- [6] H. Kakiuchida, A. Matsuyama, E. Kobayashi, A. Ogiwara, Thermoresponsive mobility of liquid crystals and reactive mesogens during photopolymerization-induced phase separation, *Physical Review E* 106, 044704 (2022) 10p. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.106.044704>



