

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)

—令和元年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業—

Radiation Tolerant Rapid Criticality Monitoring with Radiation-hardened FPGAs
(Contract Research)

-FY2019 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
静岡大学

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

January 2021

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Review

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。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<https://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課
〒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.
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Institutional Repository Section,
Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department,
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, 2021

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)

—令和元年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業—

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

静岡大学

(2020年11月18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、令和元年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業 (以下、「本事業」という) を実施している。

本事業は、東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所の廃炉等を始めとした原子力分野の課題解決に貢献するため、国内外の英知を結集し、様々な分野の知見や経験を、従前の機関や分野の壁を越えて緊密に融合・連携させた基礎的・基盤的研究及び人材育成を推進することを目的としている。平成30年度の新規採択課題から実施主体を文部科学省から JAEA に移行することで、JAEA とアカデミアとの連携を強化し、廃炉に資する中長期的な研究開発・人材育成をより安定的かつ継続的に実施する体制を構築した。

本研究は、研究課題のうち、「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」の令和元年度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 とハードウェア・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、静岡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

Radiation Tolerant Rapid Criticality Monitoring with Radiation-hardened FPGAs
(Contract Research)

— FY2019 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

Shizuoka University

(Received November 18, 2020)

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 FY2019.

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”.

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 Shizuoka 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（継続分）.....	2
3. 令和元年度 採択課題.....	5
付録 成果報告書	9

Contents

1. Outline of Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project ..	1
2. Accepted Proposal in FY2018 ~Continued~.....	2
3. Accepted Proposal in FY2019	5
Appendix Result Report.....	9

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)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（継続分）

平成 30 年度採択課題（継続分）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	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

令和元年度は、4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：平成 31 年 4 月 24 日～令和元年 6 月 7 日
令和元年 5 月 30 日～令和元年 7 月 18 日 ※日露共同研究のみ
- ・ 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

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
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	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	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

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	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

本報告書は、採択課題のうち、国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）「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」の令和元年度の研究成果について記したものである。

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.

令和元年度

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 31I136)

成果報告書

令和2年3月

国立大学法人静岡大学

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、国立大学法人静岡大学が実施した「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」の令和元年度の研究成果を取りまとめたものです。

目次

概略	iv
1. はじめに	1-1
2. 業務計画	2. 1-1
2.1 全体計画	2. 1-1
2.2 令和元年度の成果の目標及び業務の実施方法	2. 2-1
3. 令和元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 (^{60}Co , ^{241}Am , ^{252}Cf)	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
3.3 耐放射線ホログラムメモリの開発 (再委託先: 神戸高専)	3. 3. 1-1
3.3.1 液晶複合体を用いた回折光学素子とホログラフィックメモリ	3. 3. 1-1
3.3.2 回路情報マスクパターンの設計	3. 3. 2-1
3.3.3 液晶複合体サンプルの作製方法	3. 3. 3-1
3.3.4 ホログラフィックメモリからの回路情報の再生	3. 3. 4-1
3.4 研究推進	3. 4-1
4. 結言	4-1

表一覧

表 2.1-1	全体計画表	2.1-1
表 2.2-1	令和元年度業務計画表	2.2-1
表 3.1.1-1	VCSEL のトータルドーズに対する出力強度の劣化特性	3.1.1-2
表 3.1.1-2	VCSEL のトータルドーズに対する波長変化	3.1.1-3
表 3.3.2-1	3 入力時における LUT の真理値表	3.3.2-2
表 3.3.3-1	液晶複合体試料の混合内容	3.3.3-2

図一覧

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	3.1.1-1
図 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
図 3.1.1-3	VCSEL レーザ基板	3.1.1-2
図 3.1.1-4	VCSEL レーザ基板の耐放射線試験の様子	3.1.1-3
図 3.1.2-1	非同期光構成回路	3.1.2-1
図 3.1.3-1	光再構成型ゲートアレイ VLSI のトータルドーズに対する Look-Up Table の周波数特性	3.1.3-1
図 3.1.3-2	²⁴¹ Am による耐放射線光電子 FPGA へのソフトエラー耐性試験の様子	3.1.3-3
図 3.1.3-3	リモートでの位置調整が可能な耐放射線光 FPGA システム	3.1.3-4
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	3.2.1-1
図 3.3.1-1	高分子分散型液晶回折格子の微細構造の模式図	3.3.1-1
図 3.3.2-1	CLB (Configurable Logic Block) の構成図	3.3.2-1
図 3.3.3-1	ガラスセルの組み立ての様子	3.3.3-1
図 3.3.3-2	温度制御装置を用いた 2 光束レーザ干渉露光光学系	3.3.3-2
図 3.3.4-1	作製したフォトマスク上の回路パターンの顕微鏡撮影画像	3.3.4-1
図 3.3.4-2	ホログラフィックメモリからの回路情報 (3 入力 AND、入力 NAND 回路) の再生結果	3.3.4-2
図 3.3.4-3	異なる回路パターンを用いて作製したホログラフィックメモリからの回路情報の再生結果	3.3.4-3

略語一覧

- FPGA : Field Programmable Gate Array (プログラマブルゲートアレイ)
- CPLD : Complex Programmable Logic Device (プログラマブルロジックデバイス)
- TMR : Triple Modular Redundancy (3 重回路実装)
- VCSEL : Vertical Cavity Surface Emitting LASER (垂直共振器面発光レーザスクラビング処理)
構成メモリのデータを周期的にリペアする処理。ソフトウェア対策の1つ。

概略

福島第一原子力発電所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 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 もの強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の開発が急務と言える。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ている。

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 に止まる。これでは 1000 Sv/h の放射線下では 10 時間で寿命となる。MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 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 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。

令和元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ウェア耐性試験を実施した。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 チップを設計した。この VLSI チップについては次年度試作する予定である。

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書き込み可能なホログラムメモリを作製した。

1. はじめに

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 とハードウェア・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し、イギリスの研究チームはこの日本の支援を受け、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。最終的に、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

項目	年度	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	ファームウェアの開発：設計、ソフトウェアトレーニング、実装設計、データ取得ソフトウェア、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ー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ー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ー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ーレイの耐放射線試験	ホログラムメモリとレーザーレイの耐放射線試験	ホログラムメモリとレーザー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 集積回路開発		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	電氣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：神戸高専)		耐放射線ホログラムメモリ用レーザー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
		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
(4) 研究推進		まとめ・評価	まとめ・評価	まとめ・評価

2.2 令和元年度の成果の目標及び業務の実施方法

本業務の令和元年度の計画を表 2.2-1 に示す。業務項目別に目標及び実施方法について説明する。

表 2.2-1 令和元年度業務計画表

業務項目	実 施 日 程											
	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
(1) 耐放射線光電子 FPGA の開発							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					
①光学部の耐放射線化												
②集積回路部の耐放射線化												
③耐放射線試験 (⁶⁰ Co, ²⁴¹ Am, ²⁵² Cf)												
(2) 耐放射線リペアラブル FPGA の開発												
①集積回路開発												
(3) 耐放射線ホログラム メモリの開発 (再委託先：神戸高専)												
(4) 研究推進												

(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、800 Mradまでのトータルドーズ耐性の評価を目指す。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トータルドーズ耐性の向上が可能かについての評価を行う。

②集積回路部の耐放射線化

耐放射線光電子FPGAの改良設計を行う。この改良による耐性強化策は耐放射線リペアラブルFPGAの設計によるフィードバックしていく。

③耐放射線試験 (^{60}Co , ^{241}Am , ^{252}Cf)

中性子試験を安全に実施するための治具類の開発を行う。ホログラムメモリ、レーザアレイ、VLSIチップ個別に ^{60}Co を用いたトータルドーズ試験を実施する。 ^{241}Am による耐放射線光電子FPGAへのソフトエラー耐性試験も行う。

(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設計する。

(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の構築と、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の作製を行う。

(4) 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間、イギリスの研究チームならびに廃炉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。

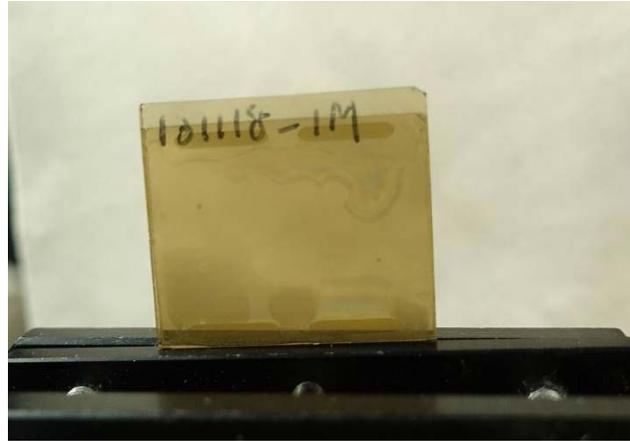
3. 令和元年度の実施内容及び成果

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



(b) 1 Grad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

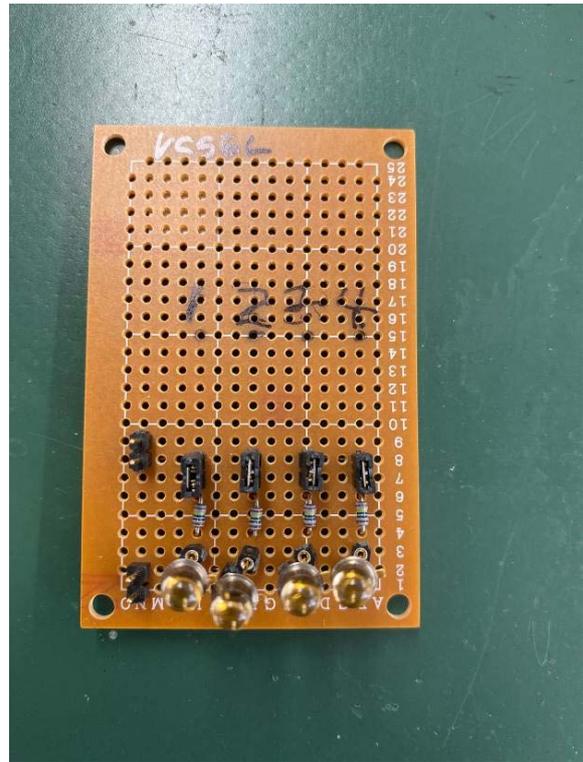
ホログラムメモリに対して、目標であった800 Mradのトータルドーズを超える1 Gradまでトータルドーズ耐性試験を実施した。このトータルドーズ試験に用いた線源は⁶⁰Coである。図3.1.1-1 (a) に放射線照射前のホログラムメモリ、図3.1.1-1 (b) に1 Gradのトータルドーズを与えたホログラムメモリの写真をそれぞれ示す。ホログラムメモリを挟むガラス板は茶褐色に変色しているがホログラムメモリそのものに大きな劣化は見られていない。図3.1.1-2

(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る。ホログラムメモリは放射線に対して非常にロバストであり、その頑強さを実証することができた。耐放射線光電子FPGAでは本ホログラムメモリを用いることで、VLSI部、ホログラムメモリ部で1 Gradトータルドーズ耐性を達成したことになり、レーザアレイのトータルドーズ改善が残された課題となる。



(a) 照射前の VCSEL



(b) 80 Mrad トータルドーズの VCSEL

図 3.1.1-3 VCSEL レーザ基板

表3.1.1-1 VCSELのトータルドーズに対する出力強度の劣化特性 (23.2~24.1 °Cで計測)

トータルドーズ	VCSEL1	VCSEL2	VCSEL3	VCSEL4
0 Mrad	2.9446 mW	3.0058 mW	2.9847 mW	2.9444 mW
20 Mrad	2.9119 mW	2.9797 mW	3.0497 mW	2.9709 mW
40 Mrad	3.0209 mW	3.0664 mW	3.0668 mW	3.0465 mW
60 Mrad	3.0537 mW	2.9415 mW	2.8624 mW	2.9466 mW
80 Mrad	2.9954 mW	2.9957 mW	2.8810 mW	2.9687 mW

3.1.1-2

表3.1.1-2 VCSELのトータルドーズに対する波長変化 (23.2~24.1 °Cで計測)

トータルドーズ	VCSEL1	VCSEL2	VCSEL3	VCSEL4
0 Mrad	848.407 nm	848.407 nm	848.407 nm	848.407 nm
20 Mrad	848.407 nm	848.407 nm	848.407 nm	848.407 nm
40 Mrad	848.407 nm	848.407 nm	848.407 nm	848.407 nm
60 Mrad	848.891 nm	848.891 nm	848.891 nm	848.891 nm
80 Mrad	848.891 nm	848.891 nm	848.891 nm	848.891 nm

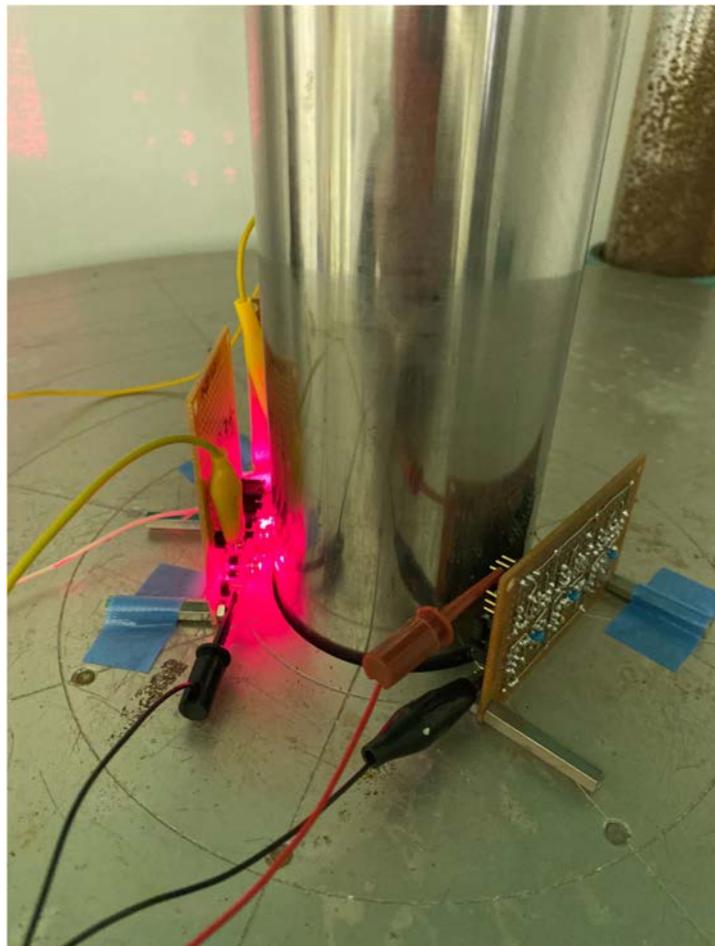


図 3.1.1-4 VCSEL レーザ基板の耐放射線試験の様子

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アレイ化が容易なVCSEL (VC850M-T046GL : Roithner Lasertechnik GmbH社) を用いて実施した。図3.1.1-3に示す4つのVCSELを実装した基板を開発し、それら4つのVCSELに対して、図3.1.1-4に示すような点灯させた状態で、⁶⁰Coによる80 Mradまでのトータルドーズ耐性試験を実施した。20 Mradのト

3.1.1-3

ータルドーズを与える度に、レーザの表面温度を23.2～24.1 °Cの範囲で固定した状態で各レーザの特性を計測した。4つのレーザの各トータルドーズに対する出力パワー値を表3.1.1-1に示す。結果、5 %の範囲内で出力パワーの値が変動していることが確認できるが、レーザは温度変動に敏感であり、概ね誤差範囲内と考えることができ、現状の80 Mradまでのトータルドーズでの劣化は無いものと判断した。また、表3.1.1-2に示す波長の変動についても、0.484 nmの微小な変動が確認できるが、ホログラムメモリの読み出しにおいて影響を及ぼさない範囲内と言える。加えて、V-I特性にも変動は見当たらない。

本研究では一部のレーザが故障する状況下でもそのまま耐放射線光電子デバイスを運用することにより、レーザアレイの通常のトータルドーズ耐性を超えるデバイスの運用を目指している。次年度も引き続き本目的に向け、トータルドーズ耐性試験を継続していく予定である。

3.1.2 集積回路部の耐放射線化

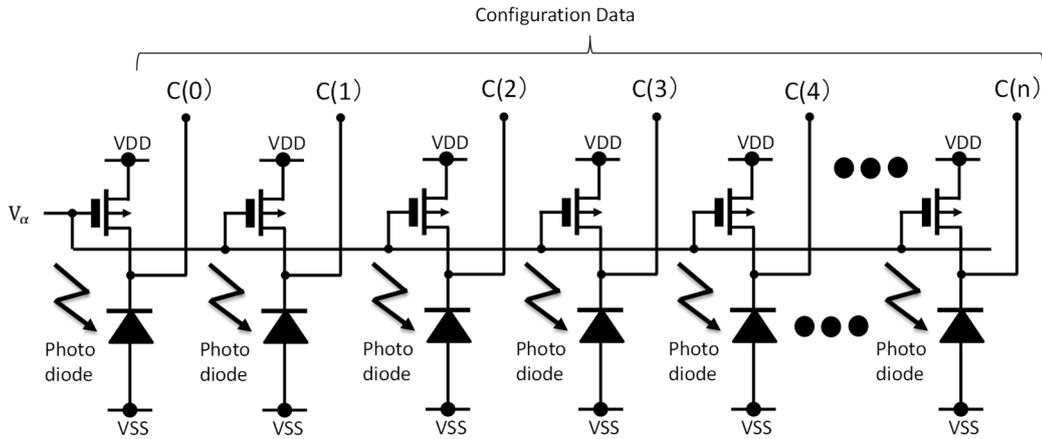


図 3.1.2-1 非同期光構成回路

耐放射線光電子 FPGA の集積回路部の耐放射線性能をさらに改善するために、非同期光構成回路を考案した。従来の耐放射線光電子 FPGA ではコンテキスト（回路情報）をチップ内に蓄えるためにフリップフロップを必要とし、また、それらを制御するためにクロック信号と、もう 1 つグローバルな制御信号を用いてきた。しかし、このクロック信号やグローバルな制御信号はツリー構造上、1 つのバッファが機能しなくなるだけでも全体の構成回路が機能しなくなる可能性があり、光並列構成法の唯一のウイークポイントであった。図 3.1.2-1 に新しい非同期光構成回路を示す。新しい非同期構成回路ではフォトダイオードの出力をプログラマブルゲートアレイのプログラミングポイントに直結する形で運用し、FET (Field Effect Transistor) から供給される電流と光電流とのバランスにより ON、OFF 状態を決定する。この非同期光構成回路にはグローバルな信号は一切存在せず、ただ、リファレンス電圧さえ供給すればよい構造を取っている。リファレンス電圧や電源供給に用いる金属メタルは放射線劣化を無視することができ、事実上、いかなる脆弱な個所も存在しない真の意味での並列構成を実現することができる。本年度は HSPICE シミュレーションを用いて動作確認を行い、この改良による耐性強化策は耐放射線リペアラブル FPGA の設計にフィードバックした。次年度、この非同期光構成回路を実装した光再構成型ゲートアレイ VLSI チップを試作する予定である。

3.1.3 耐放射線試験 (^{60}Co , ^{241}Am , ^{252}Cf)

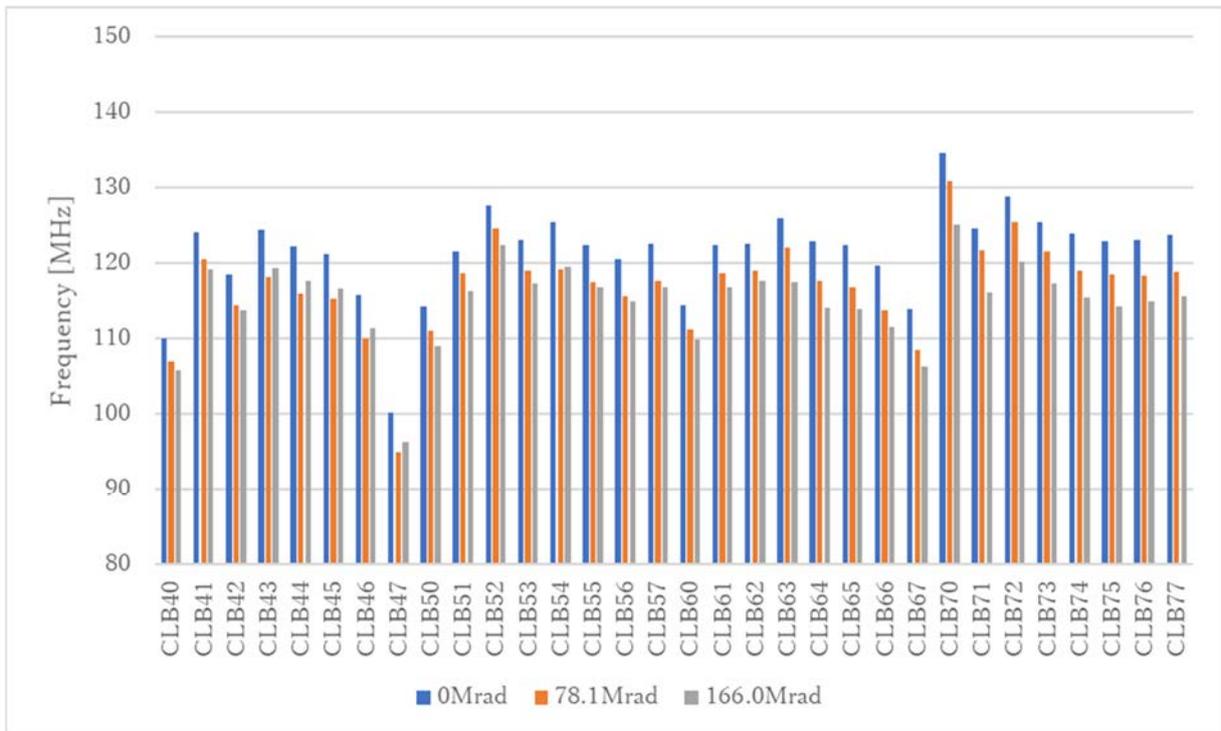
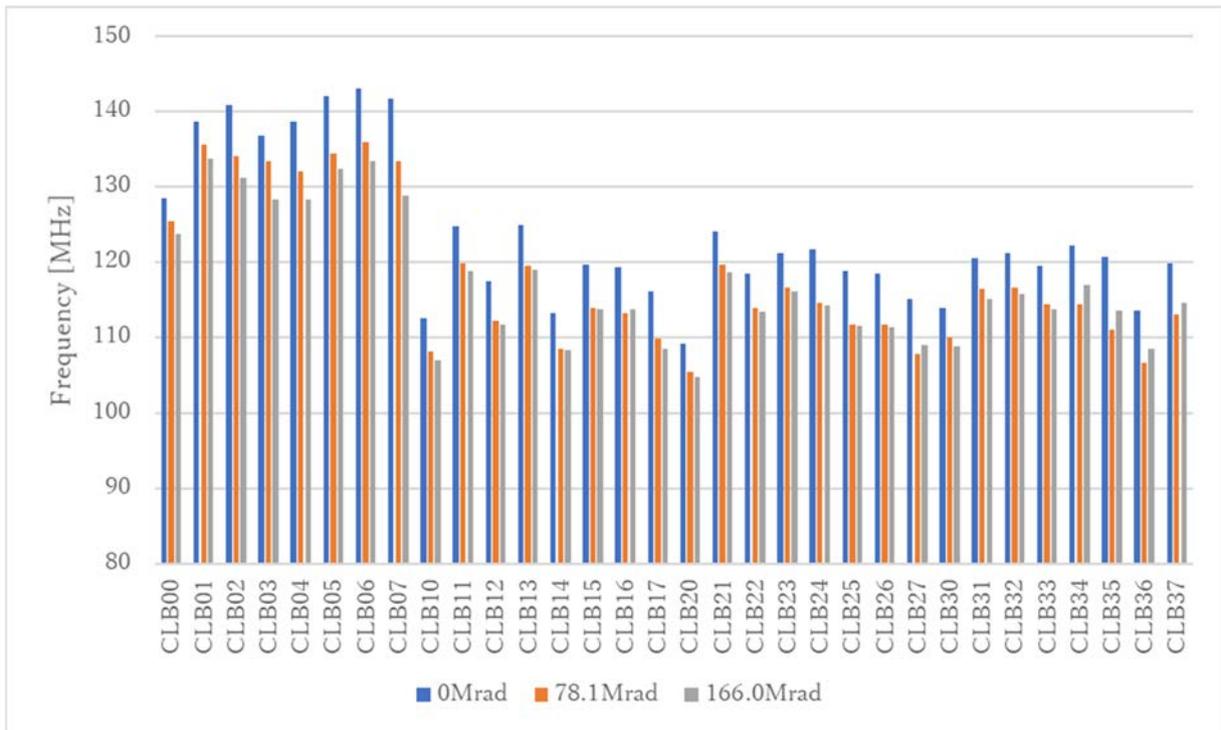


図 3.1.3-1 光再構成型ゲートアレイ VLSI のトータルドーズに対する Look-Up Table の周波数特性

ホログラムメモリ、レーザアレイの耐放射線試験の結果は3.1.1項の「光学部の耐放射線化」に示したので、ここでは耐放射線光電子FPGAの集積回路部について記載する。本年度、耐放射線光電子FPGAの集積回路部、光再構成型ゲートアレイVLSI部に対して線源⁶⁰Coを用いて166 Mradまでのトータルドーズ耐性試験を実施した。本試験の目的はトータルドーズ量に対するLook-Up Tableの応答速度ばらつきを計測することである。この試験では64個のLook-Up Table上にリングオシレータを実装し、初期、78.1 Mradのトータルドーズ時、166 Mradのトータルドーズ時のそれぞれにおける64個全てのLook-Up Tableの周波数特性を測定した。この結果を図3.1.3-1に示す。まず、これまでの試験と同様にトータルドーズが増えるに従って周波数が下がる傾向が見られるが、我々の耐放射線光電子FPGAでは周波数低下があってもそのままゲートアレイを運用できることから、この周波数低下は問題とはならない。より重要な特性はトータルドーズによるLook-Up Tableの応答速度の分散である。トータルドーズに比例して分散が大きくなり続ける場合、回路実装前に光再構成型ゲートアレイの劣化特性を正確に把握する必要性が生じる。しかし、光再構成型ゲートアレイの全、Look-Up Table、スイッチングマトリックスの劣化を計測するためにはゲートアレイを一時止める必要があり、システム運用のマイナス面となる。しかしながら、この測定結果から、78.1 Mradのトータルドーズの時よりも166 Mradのトータルドーズの時の方が、分散が減っていく傾向がみられ、少なくとも大きく拡大していく傾向が無いことが分かり、劣化した光再構成型ゲートアレイを運用する際に、全部のLook-Up Tableやスイッチングマトリックスの劣化特性を計測しなくても、運用が可能であることを確認した。

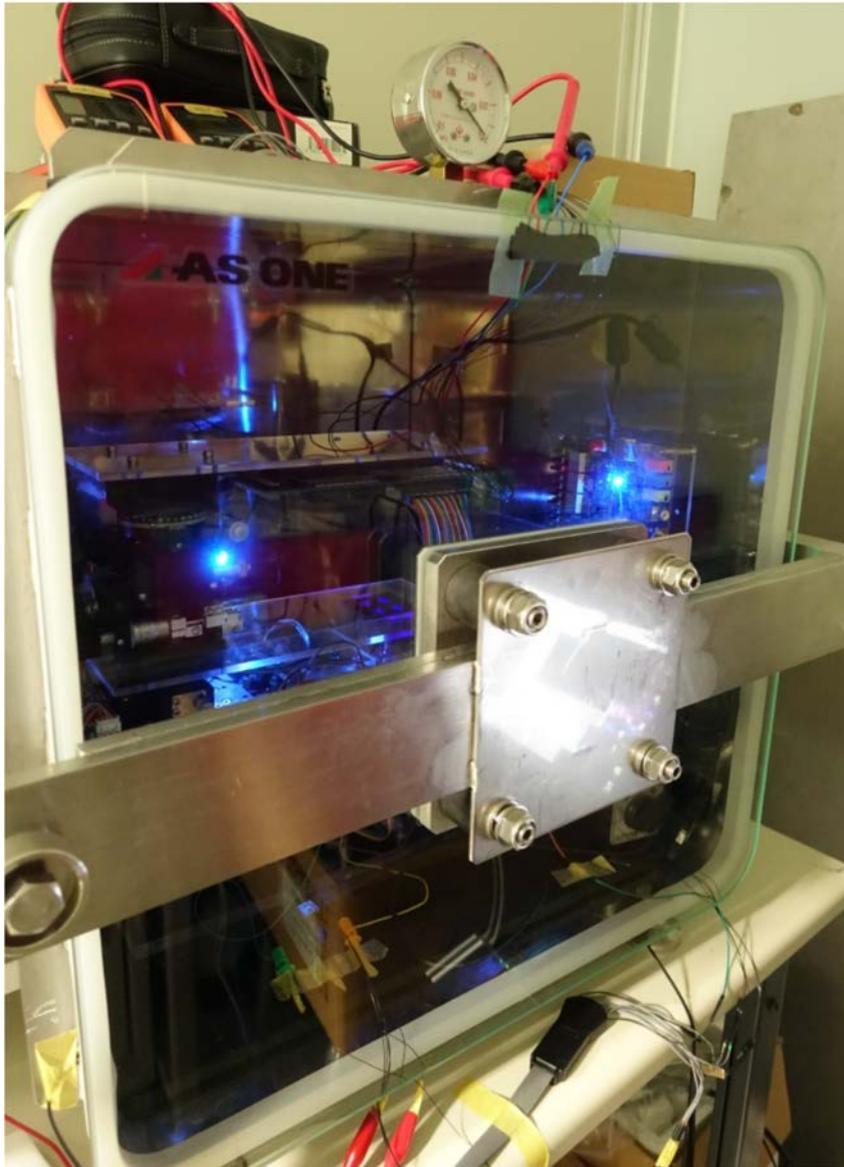


図 3.1.3-2 ^{241}Am による耐放射線光電子 FPGA へのソフトエラー耐性試験の様子

4 MBqの ^{241}Am 2枚を用いて耐放射線光電子FPGAへのソフトエラー耐性試験を実施した（図 3.1.3-2参照）。 α 線は空気中で容易にブロックされることから真空デシケータ内で試験を実施した。4つの回路を実装し、それぞれのMTTR (Mean Time To Repair) を計測した。この結果、MTTRが560 ns以下に抑えられることを確認した。現時点で世界最高スピードと言える。このMTTRのスピードでスクラビング処理を行うことで、ゲートアレイの構成メモリ上で生じるソフトエラーを封じ込めることができる。

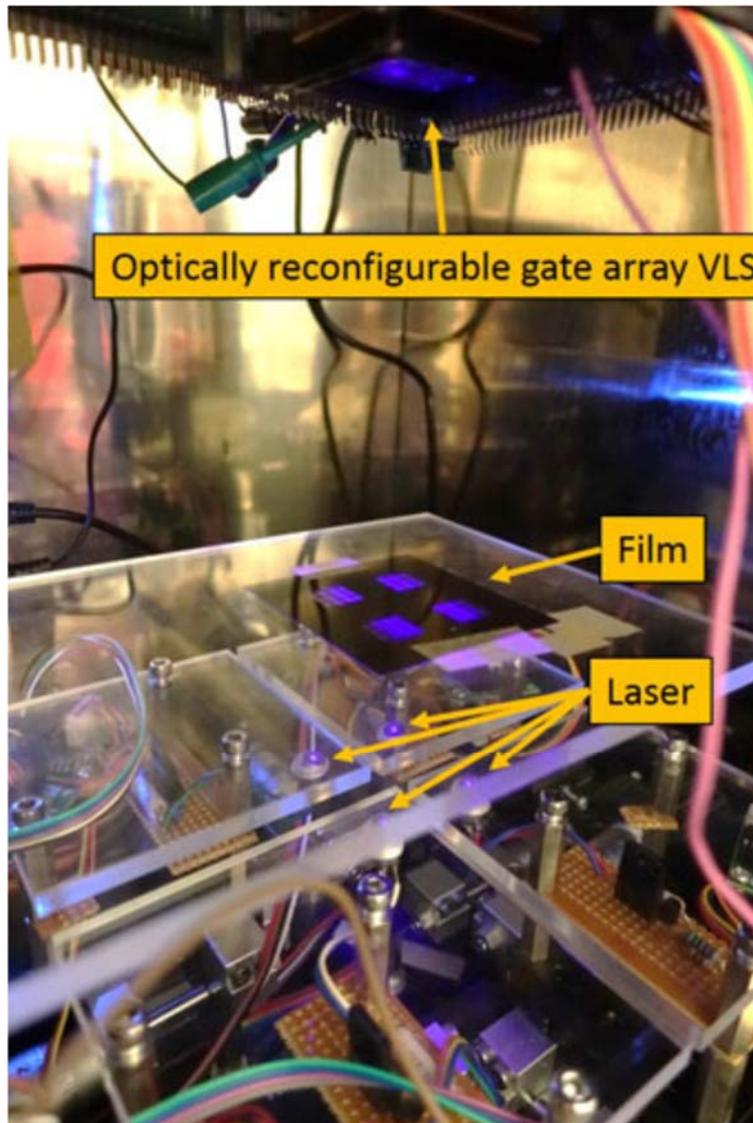
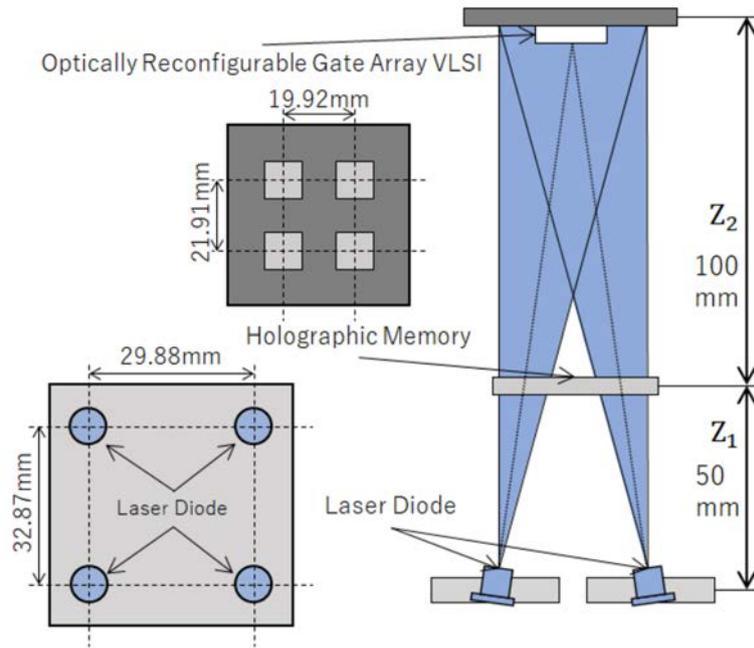


図 3. 1. 3-3 リモートでの位置調整が可能な耐放射線光 FPGA システム

3.1.3-4

次年度からは耐放射線光電子FPGAの中性子線によるソフトエラー耐性試験を開始する予定である。現在のところ、耐放射線光電子FPGAはテストベンチ上に組み上げられており、マイクログラマーを用いて手動でホログラム、レーザアレイ、集積回路部の位置を調整している。しかし、この中性子線の試験においては耐放射線FPGAそのものも放射化した状態でソフトエラー耐性試験を行う必要があり、人が機器に直接触れて調整することができない。また、放射化した状態でのソフトエラー試験が特に重要であり、中性子試験を安全に実施するためにもリモートでの位置調整が可能な耐放射線FPGAシステムが必須である。そこで、本年度、図3.1.3-3に示すような耐放射線FPGAシステムを開発した。レーザアレイ部、集積回路部にサーボシステムを組み込んでおり、レーザアレイ部、集積回路部個別にリモートで位置調整を行うことが可能である。次年度からの中性子線試験に活用していく。

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

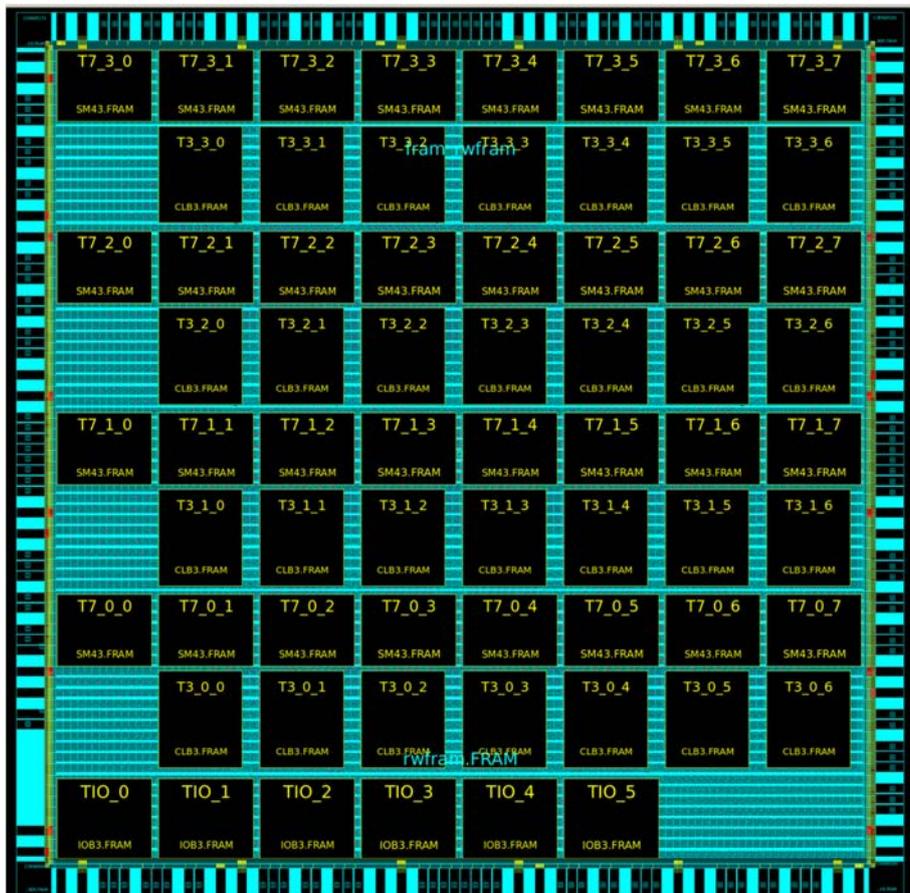


図 3.2.1-1 0.18 μm CMOS プロセスを用いた「光並列構成法」と「部分的に並列化した構成法」の双方の機能を持つ VLSI チップ

「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、図3.2.1-1に示すような「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設計した。チップの大きさは5 mm角であり、用いたプロセスはROHM社の0.18 μm CMOSプロセスである。このチップには224個の4入力Look-Up Tableが実装されており、配線チャンネルは24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重化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設計となっている。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箇所等を特定できるように設計してある。尚、本チップは現在設計のみの段階にあり、実際の試作は次年度実施する予定である。次年度の試作及び評価試験から脆弱な箇所を特定し、さらに頑強な電気構成回路を開発していく予定である。

3.2.1-1

3.3 耐放射線ホログラムメモリの開発（再委託先：神戸高専）

3.3.1 液晶複合体を用いた回折光学素子とホログラフィックメモリ

液晶を用いた回折光学素子は、これまでディスプレイ等に用いられてきた高分子分散型液晶（PDLC）の作製方法に関連している。高分子分散型液晶とは、液晶をマイクロカプセル化する技術などと組み合わせ、液晶以外的高分子物質中に液晶を微小粒として分散させたものである。このような構造を形成することにより、光の透過率の制御が可能となる。この材料系に対して、光照射プロセスとしてレーザ干渉露光を導入することで、内部に微細な格子構造の形成を行うことができる。一様に分布した液晶高分子複合体材料が干渉露光を受けると、光強度の強い領域では、まず光重合性の高い有機複合体の重合による光硬化が始まる。有機複合体材料中のモノマー材料が高分子に変化することにより、分子の体積が収縮するため、隣接する強度の弱い領域からの有機複合体材料の凝縮が進行する。有機複合体材料の重合が進行するにつれて、光重合性の高分子の密度が増加していく。一方、光強度の弱い領域には、光硬化反応を示さない液晶が有機複合体材料の光重合反応から分離された形で集中する。最終的には、光照射強度パターンに対応して、図 3.3.1-1 のように有機複合体材料が光硬化した高分子層と、主に液晶材料からなる屈折率分布型の微細周期構造が形成される。

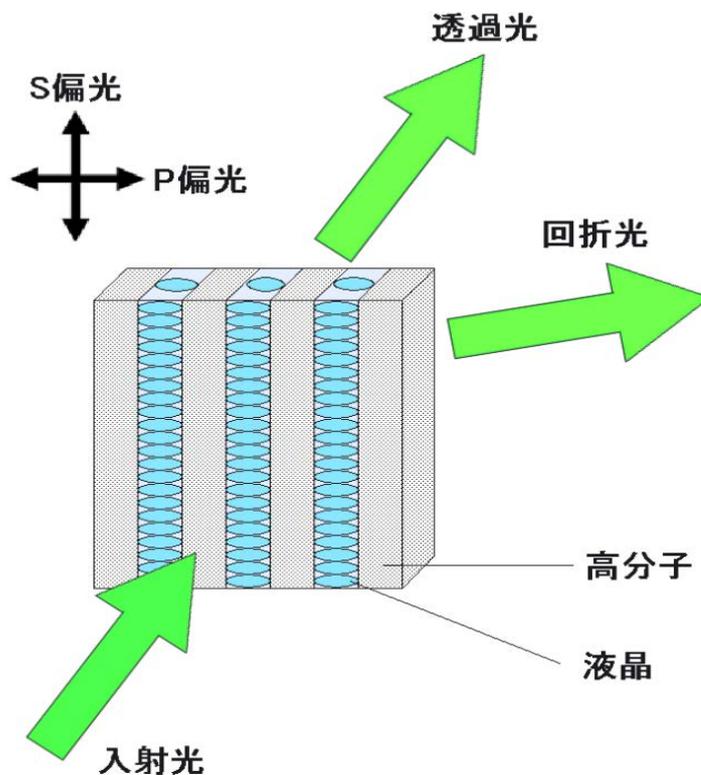


図 3.3.1-1 高分子分散型液晶回折格子の微細構造の模式図

高分子層は等方性を示し偏光状態の影響を受けないのに対し、液晶分子は長軸方向と短軸方向で屈折率が異なるため屈折率異方性を示し偏光状態による影響を受ける。このとき、長軸方向の屈折率が短軸方向に比べ大きくなる。そのため、図 3.3.1-1 で定義された P 偏光を光学素子に照射すると、液晶分子の長軸方向に対して平行の光が照射されることになるため、回折光が大きくなる。一方、S 偏光を光学素子に照射すると、液晶分子の長軸方向に対して垂直の光が照射されることになるため、屈折率が長軸方向と比較して小さくなり、透過光が大きくなる。

ホログラフィックメモリの特徴として、まず高い冗長性をもつことが挙げられる。これはホログラフィックメモリのごく一部からでも記録した情報全てが再生できることを意味しており、ホログラフィックメモリは一部に傷がつく、または欠けたとしても情報が失われることはない。なぜなら、物体の各点から反射した光は広がるため、その点の情報はホログラム全面に記録されるからである。そのため、放射線等によりホログラフィックメモリの一部が破損したとしても回路情報を復元できる素子となる。次に、ホログラフィックメモリは多重記録ができるという特徴を持つ。ホログラフィックメモリは 1 枚に多数の異なる情報を重ねて記録することができ、それらを独立に再生することが可能となっている。そのためホログラフィックメモリの記録容量は大容量となる。

3.3.2 回路情報マスクパターンの設計

ゲートアレイ VLSI へ書き込む回路情報は外部メモリのホログラフィックメモリに依存しており、書き込む回路に対応したパターンを設計する必要がある。本項では 3 入力 NAND 回路パターンを例に回路パターンの設計について詳述する。まず、ゲートアレイ VLSI は FPGA と同様のアイランドスタイルとなっており、CLB (Configurable Logic Block)、SM (Switching Matrix)、IOB (Input/Output Block) で構成されている。CLB は、任意の回路を実装するブロックであり、SM は CLB 間の配線を行うブロックである。また、IOB はゲートアレイ VLSI のピンを通して外部信号との入出力を行うブロックとなっている。

3 入力 NAND 回路は CLB と IOB のみで構成されている。図 3.3.2-1 は CLB の構成図を示したものである。1 つの CLB には縦 10.08 μm 、横 17.28 μm のフォトダイオードを用いた光再構成回路が 60 回路実装されており、それぞれ 4 入力 1 出力の LUT (Look up Table) に書き込むための回路、LUT に対応するセクタをプログラムする回路、D-FF に対応する出力セクタをプログラムする回路となっている。3 入力 NAND 回路の場合、CLB number0~6、CLB number33、35、37、52 の 11 点に加え入力用の IOB に 3 点、出力用の IOB に 2 点の明点を入射する必要がある。

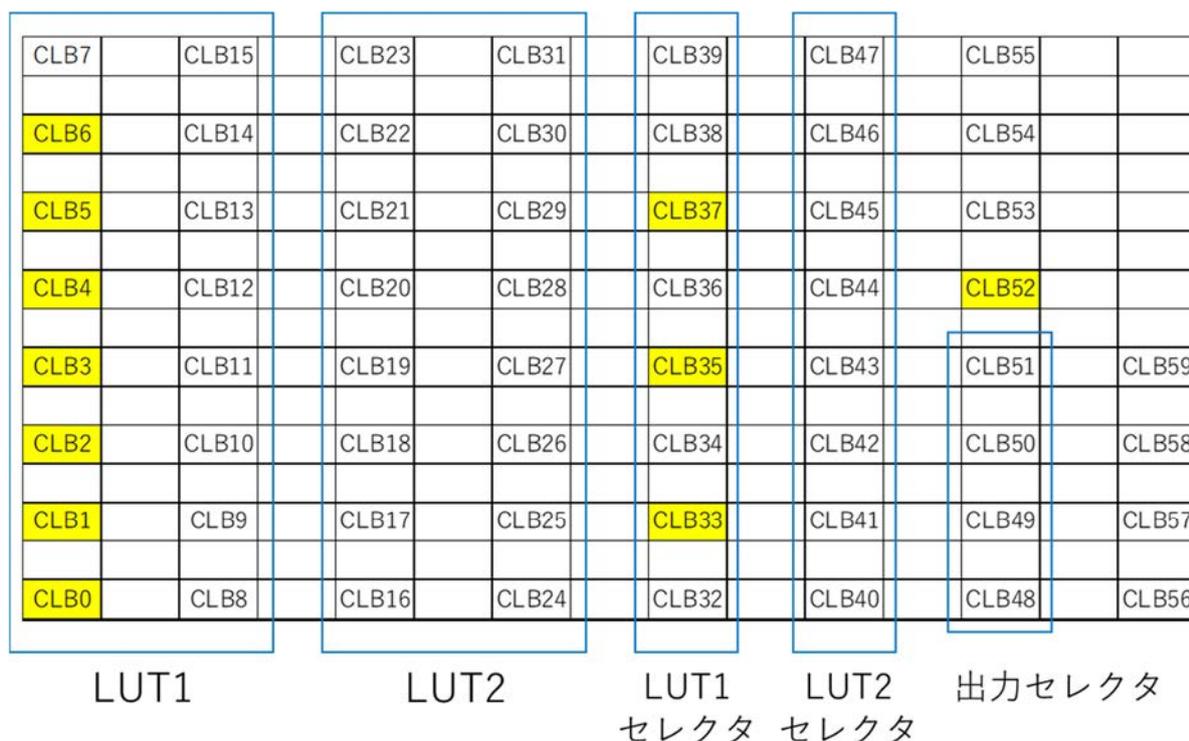


図 3.3.2-1 CLB (Configurable Logic Block) の構成図

表 3.3.2-1 3 入力時における LUT の真理値表

Input2	Input1	Input0	CLB number
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	2
0	1	1	3
1	0	0	4
1	0	1	5
1	1	0	6
1	1	1	7

表 3.3.2-1 は 3 入力として用いた場合の LUT1 の真理値表を示したものである。入力信号が全て 0 の時に LUT に 1 の信号を書き込むためには CLB number0 に対応するフォトダイオードに明点を入射することで条件を満たすことができる。また、暗点が入射されると 0 を書き込む。3 入力 NAND 回路の条件を満たすためには入力信号全てが 1 の時のみ 0 を書き込み、それ以外の信号の時は 1 を書き込む必要がある。そのため、CLB number0~6 にあたるフォトダイオードに明点を入射する。CLB number32~39 は LUT1 の入力側に接続されているセレクタの動作をプログラムするためのものであり、1 つのセレクタには光再構成回路が 2 回路実装されている。3 入力 NAND 回路の場合、入力用の IOB からの信号を LUT1 に入力するために CLB number33、35、37 に対応するフォトダイオードに明点を入射する。CLB number52 は CLB から SM、IOB への配線へと出力するための回路が実装されている。これらの輝点に対応するパターンをホログラフィックメモリに記録し、外部メモリとして用いる。

3.3.3 液晶複合体サンプルの作製方法

サンプルの作製方法は、空セルの作製、液晶複合体試料の混合、ガラスセルへの試料注入、レーザー干渉露光の4工程に主に分類できる。以下にこれらの各工程を詳述する。

- (1) 空セルは、縦20 mm、横25 mm、厚さ1.1 mmの2枚の合成石英基板と厚さ10 μmのスペーサー、12時間硬化タイプの混合接着剤（アラルダイド）を用いて作製した。電子天秤を用いて、混合接着剤とスペーサーの割合が50:1となるように混合したものを細い針の先端につけて、石英ガラス基板端面の上下4箇所ずつに滴下し、図3.3.3-1に示すように二枚の合成石英基板を接着し、空セルを作製した。

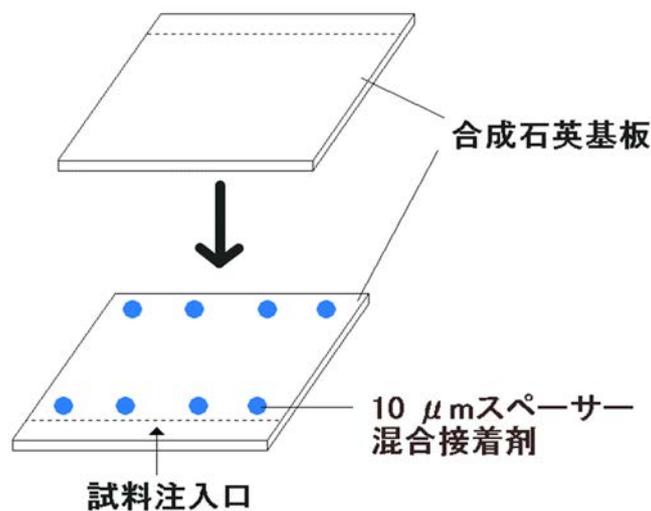


図 3.3.3-1 ガラスセルの組み立ての様子

空セルの作製後は、セルの膜厚測定にとりかかった。分光器（オーシャンフォトニクス：USB4000）を用いてセルの透過光強度を測定後、透過光強度のピークの波長（ λ_1 , λ_2 , λ_3 …）データから、参考文献の方式を用いて(3.1)式より膜厚 d [μm]を測定した。

$$d = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2(\lambda_1 + \lambda_2)} \quad (1)$$

この評価結果を基に、膜厚の違いによる光学特性のバラツキを防ぐため、作製した空セルの膜厚が 10 ± 1 μm 程度内に収まっているセルをデバイス作製用に使用している。

- (2) 液晶複合体試料は表3.3.3-1に示す材料を、電子天秤を用いて計量、混合して作製した。今回用いた液晶（RDP98487）の異常光屈折率 n_e は1.7136、常光屈折率 n_o は1.5306となっている。

3.3.3-1

表 3.3.3-1 液晶複合体試料の混合内容

材料	混合量 [g]
液晶 (RDP98487)	0.4
モノマー (DPHPA)	0.6
光共重合開始剤 (NG)	0.002
光重合開始剤 (DB)	0.001

- (3) 試料の注入過程については、アルミホイルを敷いたホットプレートに 40 °C に加熱し、その上に作製した空セルおよび試料を設置した。試料の注入を促進させる目的で空セルを加熱した状態に維持しながら、液晶複合体試料をスパチュラによって 1 滴程度空セルのエッジに滴下した。
- (4) レーザ干渉露光過程について、まずサンプルを図 3.3.3-2 の光学系に設置した。また、サンプルは温度制御装置を用いて温度制御可能なステージで 25 °C に保持した。光学系の構成としては、まず光源からの入射光 (532 nm) のビーム径を、直径 1 cm 程度にコリメータで拡大し、ハーフミラーを用いて物体光と参照光の交差角が 30° になるよう分割した。その後、サンプルに格子構造を形成させる目的で 89.5 mW/cm² の DPSS レーザ光を 5 分間照射した。レーザ照射後、サンプルの光硬化反応を終端させるために、サンプルを UV チャンバーに入れ、14.0 mW/cm² の紫外線 (365 nm) を 2 分間照射し、回折光学素子を作製した。本研究では、フォトマスクを使用せず回折格子のみを記録したサンプルと、フォトマスクを使用し全開口パターンを記録したホログラフィックメモリ用サンプルを作製した。

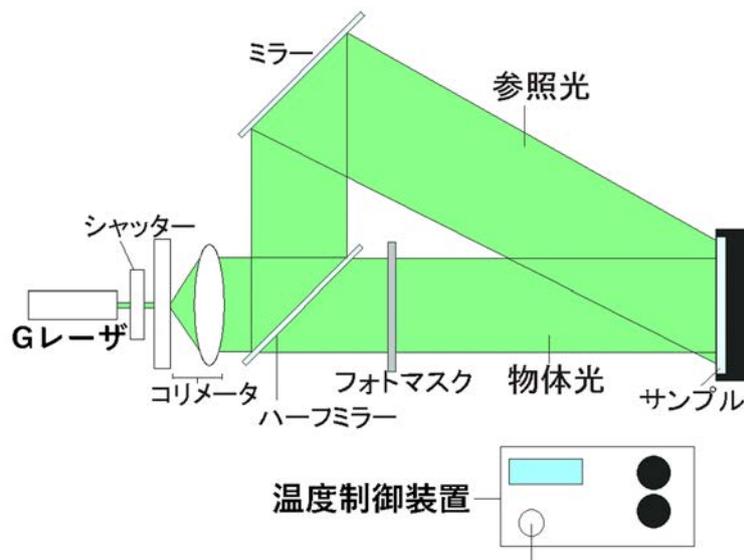


図 3.3.3-2 温度制御装置を用いた 2 光束レーザ干渉露光光学系

3.3.3-2

3.3.4 ホログラフィックメモリからの回路情報の再生

今回設計した回路情報をホログラムメモリに記録するためのフォトマスクを設計し、図 3.3.3-2 の光学系上に配置した。フォトマスク上の異なる領域に複数の回路パターンが設計された。これらの異なる回路パターンは、フォトマスクの位置をそれぞれ変化させながら、レーザ干渉露光記録によりホログラムメモリへと記録される。記録された回路パターンに対応するフォトマスク上に設計された 3 入力 AND と 3 入力 NAND 回路に相当する輝点からなる回路パターンの顕微鏡写真を図 3.3.4-1 (a)、(b) に示す。図 3.3.2-1 で説明したように、図 3.3.4-1 (a) の AND パターンは CLB7 の位置に輝点が設けられている。一方、図 3.3.4-1 (b) の NAND では、CLB0～CLB6 の相当する縦方向の 7 点に連続して輝点に相当する開口が設けられている。

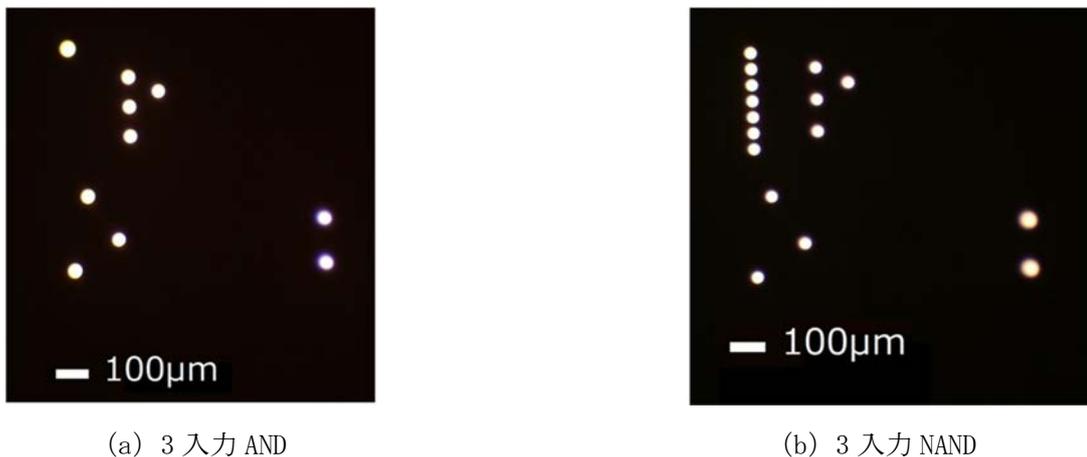
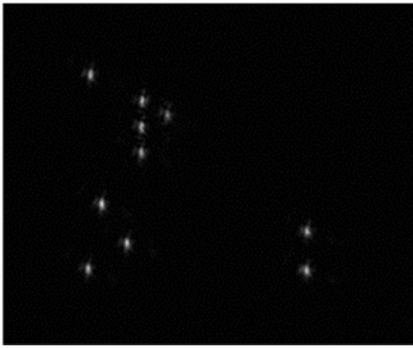
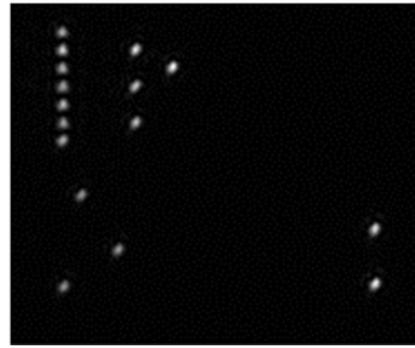


図 3.3.4-1 作製したフォトマスク上の回路パターンの顕微鏡撮影画像

次に図 3.3.3-2 の光学系において、フォトマスクを介した物体光側のレーザビームを遮蔽して、参照光のみを照射して、作製したホログラフィックメモリからの回路情報を再生した結果を図 3.3.4-2 に示す。この再生像は図 3.3.4-1 (a)、(b) の回路パターンを記録したホログラムメモリを用いて行った結果である。各輝点パターン数とその再生されている位置が、フォトマスク上に形成された図 3.3.4-1 (a)、(b) の開口パターンと一致していることが確認できる。これらの結果より、今回フォトマスク上に設計した回路パターンを用いて、液晶・高分子複合体材料からなるホログラムメモリへの記録と再生が正しく行われていることが実証できた。



(a) 3 入力 AND



(b) 3 入力 NAND

図 3.3.4-2 ホログラフィックメモリからの回路情報

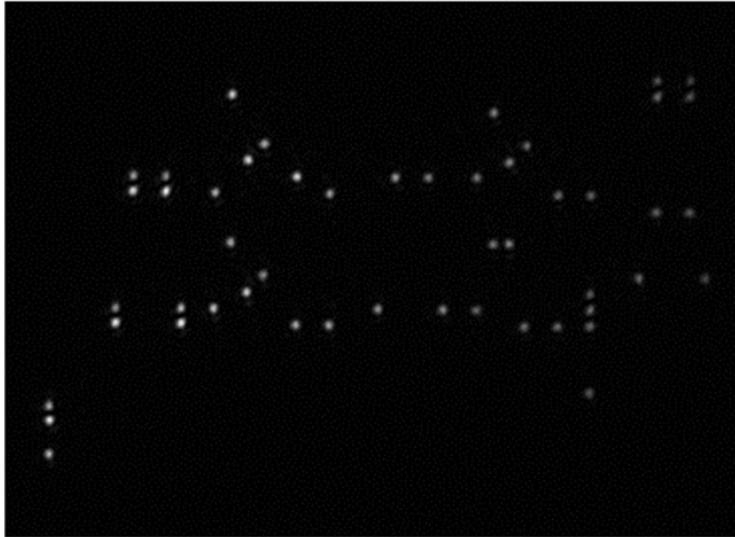
(3 入力 AND、3 入力 NAND 回路) の再生結果

さらに、より複雑な回路の実装も想定した他のいくつかの回路パターンを記録したホログラムメモリからの再生像を図 3.3.4-3 に示す。図 3.3.4-3 (a)、(b) は組合せの段数が異なるリングオシレータに相当する回路パターンを記録したホログラムメモリからの再生像であり、図 3.3.4-3 (a) は、輝点数 50、(b) は、輝点数 791 からなる再生像である。これらの結果から、光再構成を行う場合に必要となる輝点の数と位置の複雑な組合せに対しても適応可能なホログラムメモリの開発を行うことができたと考えられる。

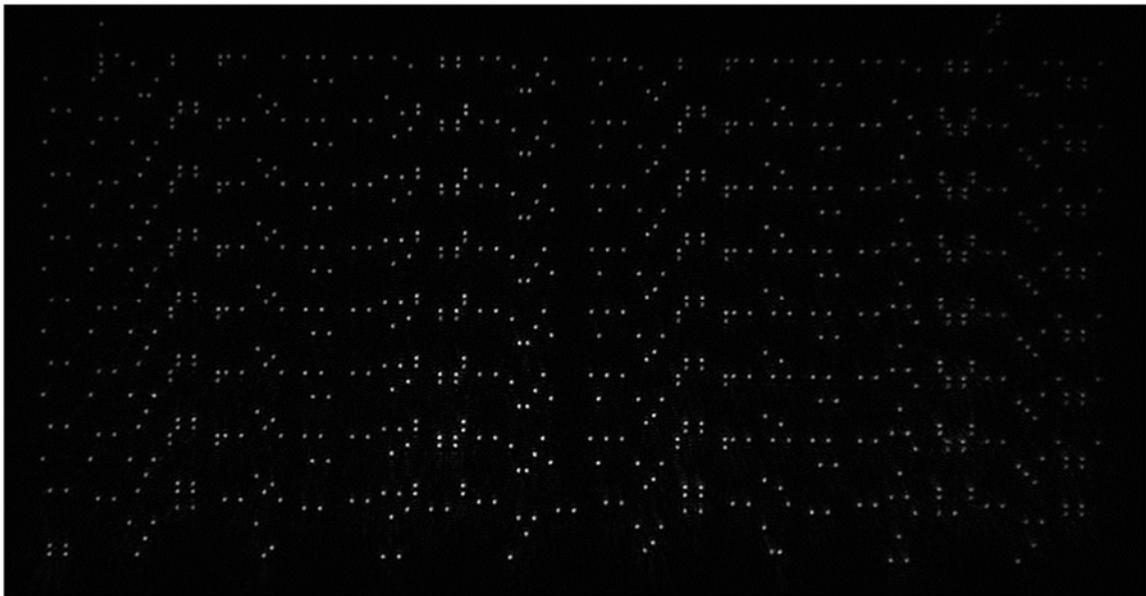
以上、液晶と高分子材料にフォトマスクを用いてレーザ干渉露光可能な光学システムの構築と、二次元フォトダイオードアレイへの回路情報を記録可能なホログラムメモリの作製を行った。

参考文献

日本液晶学会, 「液晶科学実験入門」, シグマ出版, p.43, 2007.



(a) リングオシレー:2×2×2



(b) リングオシレータ:8×8×2

図 3.3.4-3 異なる回路パターンを用いて作製したホログラフィックメモリからの回路情報の再生結果

3.4 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。令和元年 12 月 5 日に神戸市立工業高等専門学校に研究代表者、荻原生、研究補助員の 5 名が集まり、静岡大学・神戸市立工業高等専門学校間の研究打ち合わせを実施した。加えて令和 2 年 2 月 19 日に再度、神戸市立工業高等専門学校で 4 名による静岡大学・神戸市立工業高等専門学校間の研究打ち合わせを実施している。そして前述の研究打ち合わせに加えて、静岡大学・神戸市立工業高等専門学校間では Skype による研究打ち合わせを複数回実施している。

一方、イギリスのランカスター大学の Michael Aspinall 先生とは主にメールを使用して研究打ち合わせを実施した。令和元年度の当初の計画では、これらメールでの打ち合わせに加えて、イギリスのランカスター大学で研究代表者とイギリスの研究グループ間で打ち合わせを実施する予定であったが、COVID-19 の影響により、リモートでの打ち合わせに切り替えることとなった。この決定を受けて、令和 2 年 3 月 30 日に Skype を用いて研究代表者とイギリスの研究グループ研究代表者の Michael Aspinall 先生との間でミーティングを実施した。ここで、令和 2 年 1 月 24 日の会議において P0 の寺井先生から頂いたアドバイスの内、イギリスの研究チームに関する内容は、この Skype ミーティングで Michael Aspinall 先生に伝え、今後の研究の進め方について検討している。COVID-19 の影響はあったが、このようにイギリスの研究グループとも密に連携することができた。

令和 2 年 3 月 24 日には CLADS の田川先生に今年度の研究進捗の状況を説明し、今後の研究方向についてアドバイスを頂いている。このような密な連携の下に研究を進めることで当初の計画通り、研究を進めることができた。

4. 結言

本研究では集積回路技術に光技術を導入し、1 Grad 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 つの開発を進めている。

令和元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ウェア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 のトータルドーズ耐性を実証した。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。これにより、耐放射線光電子 FPGA の集積回路部の放射線耐性はさらに向上することが見込まれ、次年度試作する予定である。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「電氣的な構成法」の双方の機能を持つ VLSI チップを設計した。この VLSI チップについても次年度試作する予定である。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。

この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や再臨界時の中性子線の急増を検知するセンサー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寄与できる。

国際単位系 (SI)

表1. SI基本単位

基本量	SI基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質량	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI組立単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の)	1
比透磁率 ^(b)	(数字の)	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(e)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m ² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光照射量	ルーメン	lm	cd sr ^(e)	cd
放射線量	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性化	カタール	kat		s ⁻¹ mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g) 単位シーベルト (PV, 2002, 70, 205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI組立単位		
	名称	記号	SI基本単位による表し方
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ = s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² = s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電荷密度	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電表面電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ = m ² kg s ⁻³
酵素活性濃度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ² m ⁻² kg s ⁻³ = kg s ⁻³
	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ³ s ⁻¹ mol

表5. SI接頭語

乗数	名称	記号	乗数	名称	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	zepto	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	yocto	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値
分	min	1 min=60 s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10 800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm ² =(10 ¹² cm ²) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的関係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	B	
デシベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s
ストークス	St	1 St=1cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フオト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(a)	Oe	1 Oe _e =(10 ³ /4π)A m ⁻¹

(a) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「△」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 メートル系カラット=0.2 g=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858J (「15°C」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ), 4.184J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

