



ムーンショット目標 6

2050年までに、経済・産業・安全保障を飛躍的に発展させる
誤り耐性型汎用量子コンピュータを実現

実施状況報告書

2020年度版

2020年12月～2021年3月

超伝導量子回路の集積化技術の開発

山本 剛

日本電気株式会社 システムプラットフォーム研究所

 **MOONSHOT**
RESEARCH & DEVELOPMENT PROGRAM



研究開発プロジェクト概要

超伝導量子コンピュータの研究開発を加速するため、超伝導量子ビットの大規模化、高集積化に必要とされるハードウェア要素技術を開発します。それにより、2050年には、大規模な超伝導量子コンピュータの実現を目指します。

https://www.jst.go.jp/moonshot/program/goal6/67_yamamoto.html

課題推進者一覧

課題推進者	所属	役職
山本剛	日本電気株式会社 システムプラットフォーム研究所	主席研究員
猪股邦宏	産業技術総合研究所 新原理コンピューティング研究センター	主任研究員
齋藤志郎	日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎研究所	特別研究員
野口篤史	理化学研究所 創発物性科学研究センター	チームリーダー
蔡兆申	東京理科大学 理学部第一部	教授
斎藤政通	アルバック・クライオ株式会社 第一技術部	課長
田中雅光	名古屋大学 大学院工学研究科	助教
多田宗弘	ナノブリッジ・セミコンダクター株式会社 開発製造部	部長
内田建	東京大学 工学部	教授
石黒仁揮	慶應義塾大学 理工学部	教授
根来誠	大阪大学 先導的学際研究機構	特任准教授

1. 当該年度における研究開発プロジェクトの実施概要

本年度は研究プロジェクトの初年度であり、また期間も約 3 か月と短期であったため、各研究開発項目とも次年度以降の研究の本格始動に向けた準備、立上げを中心に実施した。

研究開発項目1: 誤り耐性量子コンピュータ用量子ビット回路の研究開発では、研究開発課題1: 超伝導量子ビットコヒーレンスの改善、研究開発課題4: 超伝導共振器を用いたボゾニックコードの研究開発を開始した。研究開発課題1については、まず共振器の Q 値の改善を念頭に、電磁界シミュレーションによる設計環境を整え、共振器の共振特性が計算できることを確認した。また T2 の改善のために ESR を用いた表面スピンの検出を行うために必要となる磁気回路や超伝導コイルの設計を完了した。研究開発課題4については、高い Q 値を持つ 3次元共振器を実現するために高純度ニオブを用いて共振器を作製し、表面処理前で 3×10^7 の Q 値を得た。またボゾニックコード生成のための超伝導 Kerr パラメトリック共振器および状態検出のためのパラメトリック増幅器の設計と評価を行った。さらに、高い Q 値を持つ平面型マイクロ波共振器と Cubic transmon を用いた GKP コード実現のための予備的な実験を行った。

研究開発項目2: 量子ビット集積ハードウェアシステムの研究開発では、研究開発課題2: 量子計算に特化した冷凍システムの開発を開始した。冷凍機の冷凍能力に関する目標達成のための基盤技術となる熱交換器について、その基礎情報取得のための準備を行った。具体的には、希釈冷凍機への各種センサーの設置と予備的な計測を終え、熱交換器性能測定の実験準備が完了した。

研究開発項目3: 量子誤り訂正用エレクトロニクスの研究開発については、研究開発課題1: 量子ビット制御、読み出し用単一磁束量子回路の研究、研究開発課題2: 量子ビット制御、読み出し用低温制御 LSI の研究開発、研究開発課題3: 超伝導量子コンピュータ制御のためのデジタル・マイクロ波エレクトロニクスの研究を開始した。研究開発課題1では、単一磁束量子回路の 10mK ステージでの動作のために必要となる低臨界電流密度プロセスのデバイスモデルに基づき消費エネルギーと動作速度の解析を行い、次年度から試作する回路の臨界電流密度を決定した。研究開発課題2では、低温動作の高周波アナログ部品や FPGA の開発に向けて、低温特性評価環境を構築した。また、高周波アナログ部品の開発に必要な室温動作仕様の 65nm アナログ用 TEG の仕様を確定し、製造を開始した。研究開発課題3では、スケラブルかつ低レイテンシーな誤り訂正用エレクトロニクス実現に向けて、その基本技術となる単体 RFSoc 及び複数の RFSoc を同期させるための IP コアの設計、開発を行った。

2. 当該年度の研究開発プロジェクトの実施内容

(1) 研究開発項目1: 誤り耐性量子コンピュータ用量子ビット回路の研究開発

研究開発課題1: 超伝導量子ビットコヒーレンスの改善

当該年度実施内容:

超伝導共振器の Q 値や量子ビットの寿命を制限する主要因として、基板と超伝導膜との界面や基板表面の誘電損が挙げられる。従って高寿命化のためには、なるべく表面や界面に電磁場が集中しないような設計が必要であり、電磁界シミュレーションによる理解が欠かせない。今年度はそのような電磁界シミュレーション環境を立ち上げ、共振器の固

有モード計算を行った。また超伝導共振器の Q 値や量子ビットの寿命の別の制限要因として、浮遊モードへの結合が挙げられる。こちらについてもデバイスチップや試料ホルダ等周辺の電磁場環境の適切な設計が必要であり、電磁界シミュレーションが有効である。今年度は、試料チップと冷凍機内の同軸ケーブルの間の高周波信号伝送を担うプリント基板の設計を実施した。3層構造の採用により、これまで使用していた2層プリント基板で問題となっていた浮遊モードの影響が低減できることをシミュレーションで確認した。

位相緩和については、電子スピン共鳴 (ESR) により、外部印加磁場によってゼーマン分裂した表面スピンのエネルギーを超伝導共振器によって共鳴的にプローブする計画である。常磁性スピン制御のためには、まず、我々が作製した超伝導回路上に存在する常磁性スピン密度を希釈冷凍機温度の極低温環境で評価する必要がある、今年度は極低温環境において ESR が可能なシステムの設計を行った。具体的には、評価チップにのみ局所的に磁場を印加することが可能となるよう、軟鉄製の磁気回路とそれに取り付ける超伝導コイル、評価チップを格納するための空洞共振器を設計した。これらを組み合わせることで、超伝導コイルに発生した磁場を磁気回路で誘導し、空洞共振器内の評価チップに局所的に磁場を印加することが可能となる。

課題推進者: 山本 剛 (日本電気株式会社)
猪股 邦宏 (産業技術総合研究所)

研究開発課題2: エピタキシャル接合を用いた量子ビットの研究開発
令和3年度より実施

研究開発課題3: 高スループット、低ばらつきな量子ビット作製プロセスの研究開発
令和3年度より実施

研究開発課題4: 超伝導共振器を用いたボゾニックコードの研究開発
当該年度実施内容:

- (1) ボゾニック量子ビットの特性向上を目指し、空洞共振器の Q 値評価を開始した。まず、ボゾニックコード研究用の希釈冷凍機を導入し、最低温度まで冷却できることを確認した。次に、高純度ニオブ製の矩形空洞共振器(共鳴周波数 8.4 GHz)を作製し、表面処理前に 10 mK、強励起条件における共鳴ピークを測定、Q 値 3×10^7 を得た。先行研究において、ニオブ製同軸型空洞共振器の表面処理後に Q 値 1×10^7 が観測されている結果と比較すると、高純度ニオブにより Q 値が向上していると考えられる。
- (2) 猫状態を作り出すための超伝導 Kerr パラメトリック発振器の基本設計を行った。また最適化理論を利用した高忠実度、高速パルスデザインも行った。また SNAIL (superconducting nonlinear asymmetric inductive element) に基づくパラメトリック共振器を製作し、その性能を評価した。
- (3) ボゾニックコードによる誤り訂正機構を実装した量子ビットの実現を目指し、2次元共振器と Cubic transmon を用いたアプローチを進める。特に 2020 年度では、高精度マイクロ波共振器と Cubic transmon を2次元回路に集積し、共振器の量子制御のため

の予備的な実験を行った。

課題推進者: 齊藤 志郎 (日本電信電話株式会社)
蔡 兆申 (学校法人東京理科大学)
野口 篤史 (国立研究開発法人理化学研究所)

(2) 研究開発項目2: 量子ビット集積ハードウェアシステムの研究開発

研究開発課題1: 量子ビットと周辺エレクトロニクスハイブリッドチップの設計と製作
令和3年度より実施

研究開発課題2: 量子計算に特化した冷凍システムの開発
当該年度実施内容:

希釈冷凍機の熱交換器は冷凍性能を大きく左右する重要な要素であり、当該年度は研究開発課題の第一歩として熱交換器の基礎情報取得に取り組んだ。令和2年度は希釈冷凍機への各種センサーの設置と予備的な計測を終え、熱交換器性能測定の試験準備が完了した。

課題推進者: 斎藤 政通 (アルバック・クライオ株式会社)

研究開発課題3: 超伝導 SIS ミキサを用いた低雑音マイクロ波増幅器の開発
令和3年度より実施

(3) 研究開発項目3: 量子誤り訂正用エレクトロニクスの研究開発

研究開発課題1: 量子ビット制御、読み出し用単一磁束量子回路の研究
当該年度実施内容:

単一磁束量子回路を超伝導量子ビットと同じ 10mK ステージで動作させるためには、従来の 4K 動作回路と比較して 1~2 桁の低消費電力化が必要であるが、低臨界電流密度化は動作速度の低下を招くため、適切な回路設計が必要となる。今年度は、低臨界電流密度プロセスのデバイスモデルに基づき消費エネルギーと動作速度の解析を行い、次年度から試作する回路の臨界電流密度を 250 A/cm^2 に決定した。消費電力は、低臨界電流密度プロセスによる低電流化により従来の $1/40$ となり、これと駆動電圧を $1/5$ 以下に低減させる設計技術を併用して目標の低消費電力化を達成する。数値計算により、この低臨界電流密度プロセスで得られる最大動作周波数は、中規模以上の SFQ 回路においても約 10 GHz を確保できる見込みを得た。

課題推進者: 田中 雅光 (名古屋大学)

研究開発課題2:量子ビット制御、読み出し用低温制御 LSI の研究開発

当該年度実施内容:

低温での誤り訂正を行うために、量子ビット読み出しに必要な低温高周波アナログ部品の開発と、開発段階の多様な訂正アルゴリズムに対応するための低温 FPGA の開発を開始した。前者については、低温での CMOS、アナログ部品、ナノブリッジの低温でのデバイス特性評価に必要な測定環境整備を進めた。具体的には、低温域(20K 以下)における CMOS トランジスタの電気特性(低リーク DC 特性、高周波特性)を評価する技術を構築した。また後者については、ナノブリッジの 4K における書き換え動作を確認した。

課題推進者:多田 宗弘 (ナノブリッジ・セミコンダクター株式会社)
内田 建 (東京大学)
石黒 仁揮 (慶応大学)

研究開発課題3:超伝導量子コンピュータ制御のためのデジタル・マイクロ波エレクトロニクスの研究

当該年度実施内容:

本課題は低レイテンシーかつスケーラブルな量子エラー訂正を実現するために超伝導量子ビット用のマイクロ波エレクトロニクスの開発を行うものである。本年度は、低クロストーク、低雑音、低スプリアス、低消費電力なマイクロ波変調回路の設計を行った。RFSoc (RF System on a Chip:プロセッサ、FPGA、DAC が集約されたシステム)を用いて、2GHz 帯域 8qubit 制御を<300ns で読み出し結果に応じて切替え可能であることを確かめた。また、スケーラブルな量子誤り訂正を目指して、2 台の FPGA SoC を同期して処理できるようにした。

課題推進者:根来 誠 (大阪大学)

3. 当該年度のプロジェクトマネジメント実施内容

(1) 研究開発プロジェクトのガバナンス

進捗状況の把握

- 代表機関のPM支援体制チーム

技術参事および事務スタッフを選定した。

- 重要事項の連絡・調整(運営会議の実施等)

3/1に令和3年度から参画予定の機関も含めて、プロジェクトのキックオフ会議を開催した。会議内で運営会議、知財運用会議に関する説明を行った。運営会議については、議長をPMとし、参加者は課題推進者または課題推進者が指名する代理人およびJST議決方法は出席者の過半数の賛成を以って行うこととした。またプロジェクト内でのコミュニケーションツールとして、Microsoft teamsを用いることにした。

- 研究開発機関における研究の進捗状況の把握

上記の通り、3/1にプロジェクトのキックオフ会議を実施した。各課題推進者機関へのサイトビジットはコロナの問題もあり、実施できなかった。

研究開発プロジェクトの展開

特になし。

(2) 研究成果の展開

特になし。

(3) 広報、アウトリーチ

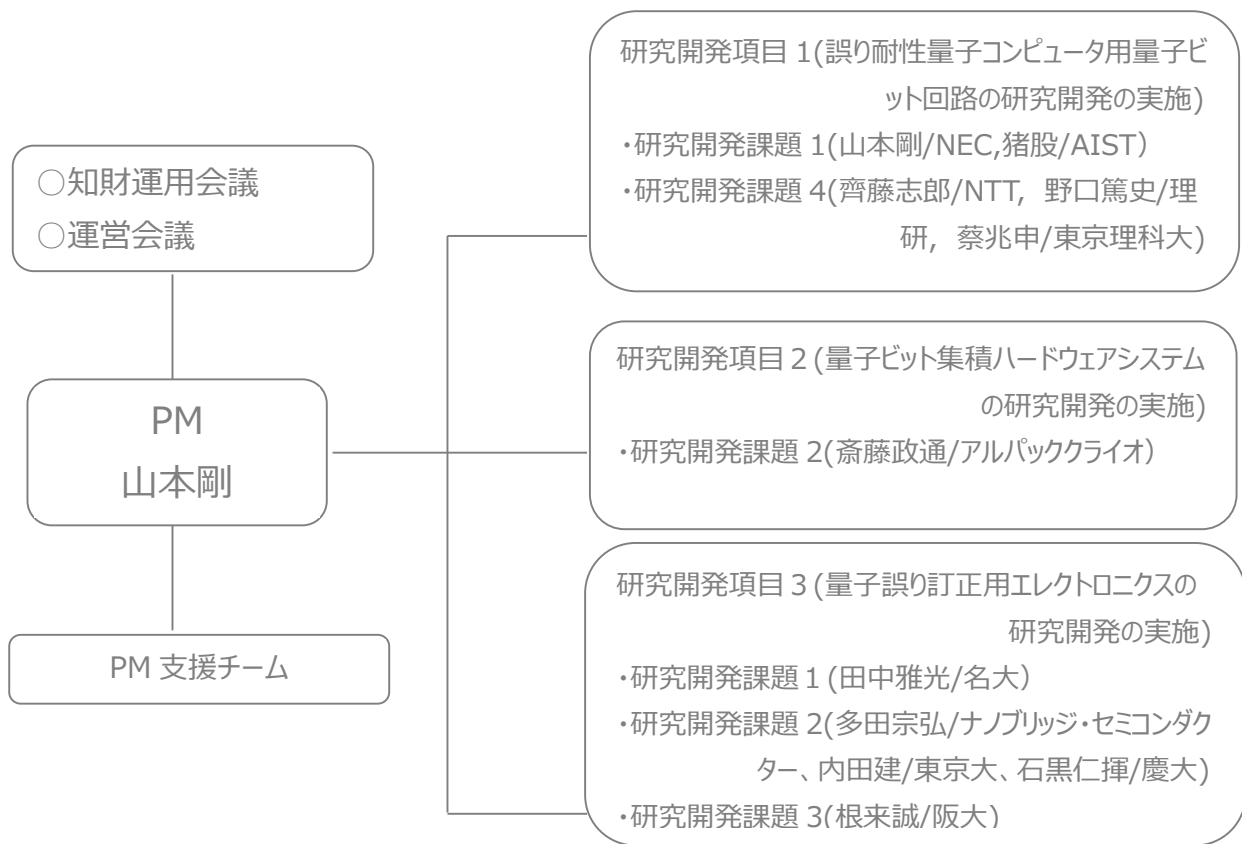
プロジェクトのホームページを作成し、公開した。(https://ms-iscqc.jp/)

(作成日:令和2年3月25日/公開日:令和3年5月11日)

(4) データマネジメントに関する取り組み

プロジェクト内でのコミュニケーションツールとして、Microsoft teamsを立ち上げた。

4. 当該年度の研究開発プロジェクト推進体制図



知財運用会議 構成機関と実施内容

3/1 のキックオフ会議にて、知財運用会議について課題推進者に説明を行った。会議の構成は、議長を PM、参加者は協議の対象となる知財に関係を有する機関および JST とした。

運営会議 実施内容：運営会議を設置した。代表機関および各研究開発機関の運営会議への参加者を決定した。Microsoft teams で運営会議メンバのチャンネルを作成した。

5. 当該年度の成果データ集計

知的財産権件数				
	特許		その他産業財産権	
	国内	国際(PCT含む)	国内	国際
未登録件数	0	0	0	0
登録件数	0	0	0	0
合計(出願件数)	0	0	0	0

会議発表数			
	国内	国際	総数
招待講演	3	0	3
口頭発表 (うち、査読有)	2 (0)	1 (0)	3 (0)
ポスター発表	0	0	0
合計	5	1	6

原著論文数(※proceedingsを含む)			
	国内	国際	総数
件数	0	0	0
(うち、査読有)	0	0	0

その他著作物数(総説、書籍など)			
	国内	国際	総数
総説	0	0	0
書籍	1	0	1
その他	2	0	2
合計	3	0	3

受賞件数		
国内	国際	総数
1	0	1

プレスリリース件数
0

報道件数
0

ワークショップ等、アウトリーチ件数
0