



## 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

## 2021年度版

2021年4月～2022年3月

大規模集積シリコン量子コンピュータの

研究開発

**水野 弘之**

株式会社日立製作所 研究開発グループ



## 研究開発プロジェクト概要

半導体の回路集積化技術を活かし、シリコン量子ビットの大規模化、高集積化を実現します。それにより、2050年には、高集積性・低消費電力を特徴とする大規模な量子コンピュータの実現を目指します。

[https://www.jst.go.jp/moonshot/program/goal6/65\\_mizuno.html](https://www.jst.go.jp/moonshot/program/goal6/65_mizuno.html)

## 課題推進者一覧

課題推進者	所属	役職
水野弘之	株式会社日立製作所 研究開発グループ	主管研究長
永田真	神戸大学 大学院科学技術イノベーション研究科	教授
小寺哲夫	東京工業大学 工学院	准教授
中島峻	理化学研究所 創発物性科学研究センター	研究員

## 1. 当該年度における研究開発プロジェクトの実施概要

本研究開発プロジェクトでは、シリコン電子スピン量子ビットを用いた量子コンピュータの開発、特にシリコン半導体の回路集積化技術を活かした大規模集積シリコン量子コンピュータの開発を行う。当該年度は、令和4年度以降から予定している量子ビットアレイの評価の本格化に備え、各研究開発項目の開発を進める上で必要となる各要素技術の開発を実施した。

研究開発項目1“量子コンピューティングシステム”では、令和4年度に予定している大規模な2次元量子ビットアレイの評価に向けて、64量子ドット以上を集積可能にする2次元量子ドットアレイ構造の設計、および、量子ドットを選択制御するために必要となる直接周辺回路を混載したチップの設計・プロセスフローの仕様を策定した。2次元量子ビットアレイと CMOS 集積回路のプロセス立上げに必要な外部試作ファブを産総研スーパークリーンルーム(SCR)に選定し、実デバイスの試作を開始した。続いて、量子ビット高精度制御・高感度読み出し回路に必要な極低温下で動作するエレクトロニクス回路仕様を策定し、極低温動作検証試験チップの設計(基本デバイス、アナログ要素回路の設計)、および製造を実施した。さらに、他の研究開発項目に対して全体を統括して本システムをコンピュータとして動作させるためのシステムアーキテクチャの検討を行い、希釈冷凍機外に設置するデジタル制御部、希釈冷凍機内に設置するアナログ制御部、量子ビット制御部の3層で構成するアーキテクチャを策定した。

研究開発項目2“極低温複数チップ実装システム”では、量子ビットのフィデリティに影響を与えるノイズを、量子ビット近傍で取得する環境モニタリングシステムの構成を検討した。量子ビット周辺の熱・電氣的ノイズ・制御信号波形を高精度かつ広帯域に取得するサンプリング回路の設計、および、 $1\mu\text{W}$ 以下の超低消費電力で動作可能なセンサー回路の検討を行い、チップ試作を完了した。また、極低温マルチチップパッケージングに向けたアクティブシリコンインタポータの設計開発を行った。量子ビットのフリップチップ実装に加えて量子ビット周辺環境のモニタリング回路を搭載可能な構造を検討し、チップ試作を完了した。

研究開発項目3“ホットシリコン量子ビット”では、量子ビットアレイ構造の一部を用いた「小規模な実験回路」の評価に向け、量子ビット動作温度の高温化実験に対応した測定系を構築した。温度制御を行うことができる無冷媒希釈冷凍機を導入し、量子ビット制御エレクトロニクスからなる測定系と組み合わせ、50mKでの動作を確立した。さらに、高温動作するスピン量子ビットの読み出しに有用と考えられる高周波電荷センサの感度特性の評価、およびスピン操作に関する研究を推進するとともに、量子ビットアレイ構造の一部を用いた「小規模な実験回路」を用いて、高温動作時に問題となる電荷雑音を定量的に評価し、その影響を低減するための適応制御を実現した。

研究開発項目4“小規模回路による量子演算”では、「小規模な実験回路」を用いて各量子ビットの基本操作、特に両交換結合の制御性の評価を実施した。直列三重量子ドットデバイスを用いて3つの量子ビット間の交換相互作用を制御することで、高精度なユニバーサル量子制御を試みた。これにより3つのシリコンスピン量子ビットの量子もつれ状態(GHZ 状態)の生成、および、誤り耐性閾値を上回る高忠実度2ビット制御を実証した。また、4~12量子ビットの「小規模量子演算実験」を実施するために必要となる新たな測定系の仕様を選定し、環境整備と性能試験に着手した。

## 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:量子コンピューティングシステム

#### 研究開発課題1:2次元量子ビットアレイ

##### 当該年度実施内容:

令和4年度以降から予定している量子ビットアレイの評価に向けて、64量子ドット以上を集積可能にする2次元量子ドットアレイ構造の設計、および、量子ドットを選択制御するために必要となる直接周辺回路を混載したチップの設計・プロセスフローの仕様を策定した。2次元量子ビットアレイとCMOS集積回路のプロセス立上げに必要な外部試作ファブを産総研スーパークリーンルーム(SCR)に選定し、実デバイスの試作を開始した。また、量子ドットアレイと直接CMOS周辺回路を混載したチップ(QCMOS)を設計・試作し、混載したCMOS周辺回路に搭載したセレクター回路を介した量子ドットの動作確認を行うとともに、量子ビット演算の実証実験に着手した。

課題推進者:水野 弘之(日立製作所)

#### 研究開発課題2:量子ビット高精度制御・高感度読み出し回路

##### 当該年度実施内容:

量子ビット高精度制御・高感度読み出し回路に必要な極低温下で動作するエレクトロニクス回路の仕様を策定した。極低温動作検証試験チップの詳細設計を行い、TSMC社40nmプロセスを用いて動作検証試験チップの製造を実施した。上記のチップは、本プロジェクトにて新たに導入した極低温プローバにて計測を開始した。

課題推進者:水野 弘之(日立製作所)

#### 研究開発課題3:システムアーキテクチャ

##### 当該年度実施内容:

他の研究開発項目に対して全体を統括して本システムをコンピュータとして動作させるためのシステムアーキテクチャの検討を行い、希釈冷凍機外に設置するデジタル制御部、希釈冷凍機内に設置するアナログ制御部、量子ビット制御部の3層で構成するアーキテクチャを策定した。上記のようなシステムを実現していく上で必要となる、低温プローバや希釈冷凍機など極低温測定環境の構築を行った。低温プローバにおいては、LSIの冷却を確保しつつ、安定した針当てが可能となるような、台座治具を独自に開発し、安定した低温条件下での特性取得できる測り環境を構築した。

課題推進者:水野 弘之(日立製作所)

### (2) 研究開発項目2:極低温複数チップ実装システム

#### 研究開発課題4:極低温複数チップ実装

##### 当該年度実施内容:

極低温アナログ・デジタル混載集積回路コアおよびそのテストチップを設計開発した。とくに、量子ドットの形成や量子ビットの操作・読み出し機構の構築に不可欠な高分解能アナログ・デジタル(AD/DA)変換回路を設計し、また、極低温環境における自己テスト機構および自己調整機構を構築して8Kにおける動作確認を行った。また、極低温マル

チップパッケージングに向けたアクティブシリコンインタポーザの設計開発を行った。量子ビットのフリップチップ実装に加えて量子ビット周辺環境のモニタリング回路を搭載可能な構造を検討し、チップ試作を完了した。

課題推進者:永田 真(神戸大学)

#### 研究開発課題5:環境モニタリング手法

当該年度実施内容:

量子ビットのフィデリティに影響を与えるノイズを、量子ビット近傍で取得する環境モニタリングシステムの構成を検討した。量子ビット周辺の熱・電氣的ノイズ・制御信号波形を高精度かつ広帯域に取得するサンプリング回路の設計、および、 $1\mu\text{W}$ 以下の超低消費電力で動作可能なセンサ回路の検討を行い、チップ試作を完了した。

課題推進者:永田 真(神戸大学)

### (3) 研究開発項目3:ホットシリコン量子ビット

#### 研究開発課題6:シリコン量子ビットの高温動作

当該年度実施内容:

量子ビットアレイ構造の一部を用いた「小規模な実験回路」を用いた実験に適しており、かつ動作温度の高温化実験に対応した測定系を構築した。温度制御を行うことができる無冷媒希釈冷凍機を導入し、量子ビット制御エレクトロニクスからなる測定系と組み合わせ、 $50\text{mK}$ での動作を確立した。さらに、高温動作するスピン量子ビットの読み出しに有用と考えられる高周波電荷センサの感度特性の評価、およびスピン操作に関する研究を推進した。さらに、量子ビットアレイ構造の一部を用いた「小規模な実験回路」を用いて、高温動作時に問題となる電荷雑音を定量的に評価し、その影響を低減するための適応制御を実現した。

課題推進者:小寺 哲夫(東京工業大学)

### (4) 研究開発項目4:小規模回路による量子演算

#### 研究開発課題7:シリコン量子ビットの高温動作

当該年度実施内容:

「小規模な実験回路」を用いて各量子ビットの基本操作、特に両交換結合の制御性の評価を実施した。具体的には、直列三重量子ドットデバイスを用いて3つの量子ビット間の交換相互作用を制御することで、高精度なユニバーサル量子制御を試みた。これにより3つのシリコンスピン量子ビットの量子もつれ状態(GHZ 状態)の生成に初めて成功した。他、誤り耐性閾値を上回る高忠実度2ビット制御を実証した。これらの結果から得られた結合制御用ゲート電極の幅・ピッチに関する知見を元に、多ビット構造の検討を開始した。これらと並行して、4~12量子ビットの「小規模量子演算実験」を実施するために必要となる新たな測定系の仕様を選定し、環境整備と性能試験に着手した。

課題推進者:中島 峻(理化学研究所)

### 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

- 代表機関にて、PM支援体制チームの編成を行った。具体的には、株式会社日立製作所の産学連携部門、広報部門、知財担当部門等の本プロジェクトの運営に必要となるアシスタントスタッフによる支援体制を構築した。研究開発プロジェクトのマネジメント業務、JSTとの連絡(PD等への報告、研究開発機関、JSTとの実施規約他実施管理上の各種調整業務)を産学連携部門が、研究開発成果の広報アウトリーチ活動を広報部門が、知財戦略、および、知財の取り扱い方針の策定を知財担当部門が担当する。加えて、各担当部門が密接に連携して本研究開発プロジェクトの推進・管理・支援を円滑に行うための体制を構築済みである。
- プロジェクト全体定例会議を原則として、1か月に一度開催する会議体を設計、運用を開始した。本定例会議では、重要事項の連絡・調整、各課題推進者の進捗状況・課題の把握、および共有等を行っており、各課題推進者一体となった研究開発体制の構築に大きく貢献している。また、サイトビジットなどを通じ、課題推進者のアセットなどの正確な状況把握を行うとともに、研究開発課題の詳細議論・深耕、および、具体的な対策案の詳細議論を実施した。コロナ状況にも依存するが、令和4度以降も積極的にサイトビジットの機会を増やし、プロジェクト実現に向け、課題推進者間連携による詳細議論、および、円滑な運営に努めていく。

##### 研究開発プロジェクトの展開

本プロジェクトでは、上述した通り、目標である大規模集積シリコン量子コンピュータの開発に向け、トップダウン、および、ボトムアップの2つのアプローチを採用する。本プロジェクトを推進するにあたり、トップダウン的なアプローチに必要となる半導体プロセス技術やCMOS回路・システム技術、さらにはマイクロプロセッサおよびコンピュータ技術に関して広範な技術開発の経験を有する学术界・産業界からの課題推進者(トップダウン的アプローチ)と、量子物理に精通しシリコン量子ビット操作の高精度化に関して世界最先端の位置にある学术界からの課題推進者(ボトムアップ的アプローチ)からなる研究開発体制を構築した。2つのアプローチに長けた各課題推進者が密接に連携することで、産業化と互換性のある大規模量子コンピュータの開発を強力に推進できると考える。また、山本 俊PM、小芦PM(阪大藤井教授)のムーンショット目標6内プロジェクト間連携体制を構築し、具体的な進め方に関して議論を開始した。翌年度以降、本活動も本格化させる予定である。

#### (2) 研究成果の展開

- 各課題推進者間の連携やプロジェクト関連を円滑に行うべく、知財をはじめとした契約内容の改定案の議論を、各課題推進機関の研究者、産学連携部門、知財担当部門、および、JSTの関係部門で開始した。議論した内容は、実施規約の改訂に反映させた(オープン量子)。オープン量子開発戦略を策定することで、シリコンを用いた大規模量子システムの研究開発コミュニティの拡大、および、社会実装のさらなる促進をめざす。
- 学会・論文投稿、招待講演、および、学術誌への総説の寄稿を通じ、研究成果の情報公開を行った。これまでの活動に加え、展示会での成果発表による積極的なプレゼンス向上に努めるとともに、各課題推進者の所属する学生、および、関係者に向けた講義活動等を通じ、若手の人材育成に向けた取り組みを強化した。事業化戦略、グローバル展開戦略等の立案等

- ・ 海外拠点となる日立ケンブリッジ研究所と、本PJで連携して検討を進めるために必要となる環境・契約の整備を行った。日立ケンブリッジ研究所は、ケンブリッジ大学のキャンベディッシュ研究所内に設置された研究所で、量子基礎物理に強みを持つ。当該年度は、コロナ禍であったため、具体的な連携はリモート会議にとどまったが、翌年度以降は、コロナ状況も加味しながら、サイトビジットを含め日立ケンブリッジラボとの連携を本格化させる予定である。

### (3) 広報、アウトリーチ

日立製作所の既存広報部門の支援も得て、ホームページの作成を行った。

<https://www.hitachi.co.jp/rd/sc/qc/index.html>

なお、上記ホームページは、日立製作所での量子関連研究に関する取り組みの紹介を目的に、弊社ホームページ内に作成されたものである。

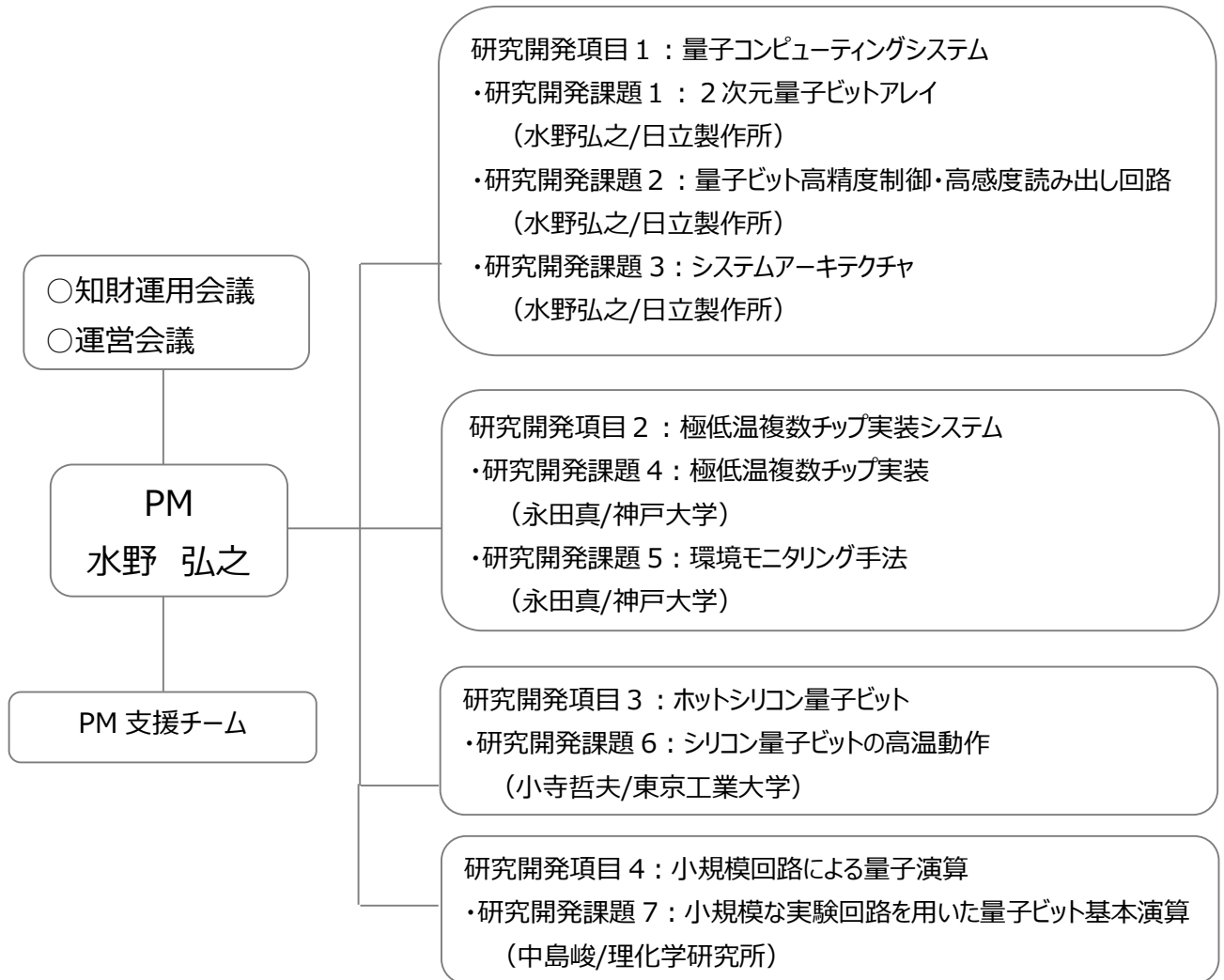
さらに、本研究開発プロジェクト活動に関するプレゼンス向上を目的に、外部識者、株式会社日立製作所の広報部門らからなる検討体制を構築し、“量子デザインコミュニケーションプロジェクト”を発足させた。本プロジェクトにて、広報、アウトリーチ活動を最大化する具体的な戦略を策定するとともに、それを令和4年度以降の実行に移す。また、本活動を通じ、本プロジェクト独自のホームページの立上げも行っていく予定である。

### (4) データマネジメントに関する取り組み

データマネジメントの一環として、BOX、および、Slack の運用を継続している。セキュリティ保護の必要となるファイル共有には、高度なセキュリティ対策が施された BOX を活用する一方で、Slack は、研究課題推進者間での議論、情報共有を行う場として利用している。アクセス権に関しても制限を適正化することで、セキュアな情報管理と、課題推進者間での円滑な情報共有とを両立するデータマネジメント環境を構築した (BOX: 各研究課題機関の取り纏め層のみにアクセス権を付与、Slack: 各研究課題を行う参加者全員にアクセス権を付与)。

#### 4. 当該年度の研究開発プロジェクト推進体制図

PM を中心とした当該年度の研究開発プロジェクトの推進体制を以下に示す。



##### 知財運用会議 構成機関と実施内容

構成機関について、議長は PM、参加者は PM、課題推進者、同機関の知財部門、JST など関係部門が考えられるが、案件ごとに PM が機構と協議のうえ決定する。また、必要に応じて、本規約の遵守に同意した外部有識者を加える。実施内容は、本研究開発プロジェクトに関連する知的財産権の実施許諾条件等の運用に関し必要な事項について協議する。実施方法は、PM の判断により書面等による協議で代替できるものとする。

##### 運営会議 実施内容

構成機関について、議長は PM、参加者は PM、課題推進者、PM が必要と認めた外部有識者、JST 等から構成する。実施内容については、実施規約に記載された以下の内容を中心に協議する場とする。PM による新たな研究開発機関の参加、参加機関等以外からの本研究開発プロジェクトへの新たな関与者、実施規約の改正、課題推進者間の情報交換・助言等も協議の上行えるようにする。



## 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	1	0	0	0
登録件数	0	0	0	0
合計(出願件数)	1	0	0	0

会議発表数			
	国内	国際	総数
招待講演	15	0	15
口頭発表	13	4	17
ポスター発表	1	0	1
合計	29	4	33

原著論文数(※proceedingsを含む)			
	国内	国際	総数
件数	0	6	6
(うち、査読有)	0	6	6

その他著作物数(総説、書籍など)			
	国内	国際	総数
総説	5	0	5
書籍	0	0	0
その他	0	0	0
合計	5	0	5

受賞件数		
国内	国際	総数
5	0	5

プレスリリース件数
2

報道件数
16

ワークショップ等、アウトリーチ件数
5