



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

2022年度版

拡張性のあるシリコン量子コンピュータ

技術の開発

樽茶 清悟

理化学研究所 創発物性科学研究センター



研究開発プロジェクト概要

シリコン量子コンピュータは産業技術との互換性や集積性の点で優れていますが、まだ大規模化への展開が見えていません。本研究では、スパースな集積化と中距離量子結合により拡張性のある単位構造を作製し、その繰り返しにより量子コンピュータを大規模化します。2030年までに大規模化に適した基盤技術を開発し、その後半導体産業と連携して開発を加速し、2050年には汎用量子コンピュータを実装します。

https://www.jst.go.jp/moonshot/program/goal6/6B_tarucha.html

課題推進者一覧

課題推進者	所属	役職
中島 峻	理化学研究所 創発物性科学研究センター	上級研究員
藤田 高史	大阪大学 産業科学研究所	助教
宮本 聡	名古屋大学 大学院工学研究科	特任講師
山本 倫久	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
高田 真太郎	産業技術総合研究所 物理計測標準研究部門	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

(1) 研究開発プロジェクトの概要

シリコン量子コンピュータは産業技術との互換性や集積性の点で優れていますが、まだ大規模化への展開が見えていません。本研究では、スパースな集積化と中距離量子結合により拡張性のある単位構造を作製し、その繰り返しにより量子コンピュータを大規模化します。2030年までに大規模化に適した基盤技術を開発し、その後半導体産業と連携して開発を加速し、2050年には汎用量子コンピュータを実装します。

(2) 研究開発プロジェクトの実施状況

本年度は、来年度以降の研究計画の本格実施に向けて、実験の準備と立ち上げ、装置購入などを中心に実施した。

研究開発項目1: 拡張性を有する誤り耐性 Si 量子ビットデバイス技術

スパースな周期単位構造の開発に向けて、要素構造となる量子ビット配列の試作を行い、電気的特性を評価した。並行して、より大規模な量子ビット実験に必要な希釈冷凍機およびエレクトロニクス等の実験設備の整備を開始した。

研究開発項目2: 中距離量子結合技術

今後の伝送路開発で活用するための積層ゲート電極構造の開発や、伝送実験のための5重量子ドットの試作を実施した。また、より適切な電子伝送路を作るためのゲート構造を検討した。

研究開発項目3: 誤り耐性を満たす同位体制御 Si/SiGe 基板技術

量産用の同位体成膜装置、移動度評価に必要なプロセス装置と冷凍機などの仕様選定と調達を進めた。並行して、理研と阪大グループと共同で、制御性の良い基板評価用プロセス技術と、高精度な基板評価手法の基本検討を行った。

研究開発項目4: 新原理電子波束量子ビットの開発

電子波束量子ビットを制御するための電子干渉計における2電子干渉の実験、細線中の電子波束の伝搬モード制御実験などを実施した。並行して、希釈冷凍機などの物品調達を行った。

(3) プロジェクトマネジメントの実施状況

研究開発プロジェクトのガバナンス： 代表機関の協力を得て、PM 支援体制を構築した。定例の PM、課題推進者による報告会と運営会議を実施し、課題推進者の研究進捗、装置立ち上げ、問題の対策などについて、状況を把握した。

研究成果の展開： 課題推進者に知財戦略の立案を奨励した。現在1件の基本特許の手続きを進めている。PM と課題推進者間で内外の研究動向について情報交換を行うとともに、2023年度に開催予定の国際会議を本プロジェクトの成果の発信と情報の交換の機会

として準備を進めている。

広報、アウトリーチ： 来年度に向けて、ホームページや広報活動などの企画について準備を開始した。

データマネジメントに関する取り組み： マネージメントプランに沿って、適切にデータ管理を行っている。

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: 拡張性を有する誤り耐性 Si 量子ビットデバイス技術

研究開発課題1: 拡張性を有する誤り耐性 Si 量子ビットデバイス技術の開発

当該年度実施内容: スパースな周期単位構造の開発に向けて、その要素構造となる十字、T 字、直列の量子ビット配列の試作に着手した。これまでに確立した積層表面配線技術を適用しつつ、作製歩留を向上させ、4量子ビットおよび5量子ビット配列の試料を作製した。極低温で量子ドットを形成し、電荷センサーの電荷検出感度、量子ビット間トンネル結合の制御性、試料の電氣的雑音特性および安定性を評価し、試料構造の最適化を図った。これと並行してより大規模な量子ビット実験に必要な希釈冷凍機およびエレクトロニクス等の実験設備の整備を進め、これらの技術情報を課題間で共有した。

課題推進者: 中島 峻(理化学研究所)

(2) 研究開発項目2: 中距離量子結合技術

研究開発課題1: 中距離量子結合技術の開発

当該年度実施内容: 当該年度では、今後の伝送路開発で活用するための積層ゲート電極構造の開発や、伝送実験のための5重量子ドットの試作を実施した。また、動作中の量子ドットデバイスを使用して基本的なコヒーレント操作を試み、伝送の評価方法の検討を開始した。デバイス開発においては、効率的に伝送信号を伝えるための直上ゲート構造の導入や、独立電極数を減らすために周期的なゲート構造を今後の設計指針として検討している。

課題推進者: 藤田 高史(大阪大学)

(3) 研究開発項目3: 誤り耐性を満たす同位体制御 Si/SiGe 基板技術

研究開発課題1: 誤り耐性を満たす同位体制御 Si/SiGe 基板技術の開発

当該年度実施内容: 本研究開発課題で利用する、量産用の同位体成膜装置、移動度評価に必要なプロセス装置と冷凍機などの仕様選定と調達を進めた。同時に、現有設備を基にし、次年度以降の界面制御技術の原理検証を目的とした基本検討を開始した。理化学研究所と大阪大学グループと共同で、制御性の良い基板評価用プロセス技術と、高精度な基板評価手法の基本検討を行った。

課題推進者: 宮本 聡(名古屋大学)

(4) 研究開発項目4:新原理電子波束量子ビットの開発

研究開発課題1:ピコ秒電子波束の生成と電子波束量子ビットの高忠実度制御

当該年度実施内容:シフトカレントを利用した光パルス-電気パルス変換を GaAs/AlGaAs ヘテロ構造で実現するための方法を検討し、その実験に向けた備品調達を進めた。また、電子波束量子ビットを制御するための量子回路(電子干渉計)において、2電子干渉の実験に取り組んだ。この実験は、研究開発課題 2 の課題推進者(高田真太郎)と議論を進めながら共同で行った。それと並行して、新しい低温実験のセットアップを立ち上げるために、希釈冷凍機などの調達手続きを進めた。

課題推進者:山本 倫久(理化学研究所)

研究開発課題2:マイクロ波電子波束の量子制御と読み出し

当該年度実施内容:異なる長さの量子細線を形成できる試料において、異なる時間幅を持つ電子波束に対し、電子波束の伝搬モードを制御する実験を行った。その結果、量子細線の長さに対して電子波束の時間幅を適切に選ぶことで、量子ポイントコンタクトによる局所的な閉じ込め制御で電子波束の伝搬モードの制御が可能であることを実証した。この実験は、研究開発課題 1 の課題推進者(山本倫久)と議論を進めながら共同で行った。また、電子波束の読み出し実験を行うための新たなセットアップを立ち上げるため、希釈冷凍機やロックインアンプなどの調達手続きを進めた。

課題推進者:高田 真太郎(産業技術総合研究所)

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(理化学研究所)内にPM支援用の事務処理アシスタントを採用した。研究の管理運営をサポートする常勤のPM補佐を募集したが、適当な人材が見つからなかった。現在は非常勤嘱託での採用を検討している。事務処理に関しては、理化学研究所内の関連部署のサポートを受けている。
- 研究計画、予算計画の調整、関連事項の連絡のシステムを立ち上げ、実施した。
- 定期的(2か月に1度を予定)全体会議を、オンラインで開催し、研究のスタートと進捗、予算執行状況などを把握するとともに、適宜対応策を議論した。同時に課題推進者で構成される運営会議を開催し、知財、アウトリーチ、研究計画などについて議論した。

研究開発プロジェクトの展開

- 各研究課題推進者の計画の全体計画の中での位置づけ、実現性などについて確認し、必要な手直しについて議論を行った。

- ・ 各研究課題推進者とも今年度は、実験装置や技術の立ち上げを行っている。その中には共通するものが少なくないので、課題推進者間での技術共有、技術討論を積極的に進めた。
- ・ 国内外の関連の会議に参加し、競合グループの状況把握に努めた。
- ・ 本プロジェクトでは、企業連携を重視していることから、Intel との定期的な技術打ち合わせを行っている。

(2) 研究成果の展開

- ・ 成果や進捗状況を踏まえて、デバイスレベル、方式レベルでの知財戦略を立てるように各課題推進者に周知した。
- ・ 電子波束を用いた量子コンピュータの構成方法に関する特許の出願準備を進めている。
- ・ 国内外の関連会議に出席し、技術動向に関する情報収集に努めた。シリコン量子コンピュータの最新の研究動向を最も敏感に反映する国際会議 SiQEW について 2023 年開催に応募し、採択された。課題推進者を中心に、ムーンショット内外の関連研究者の協力で会議開催(10月31日—11月2日)の準備を進めている。

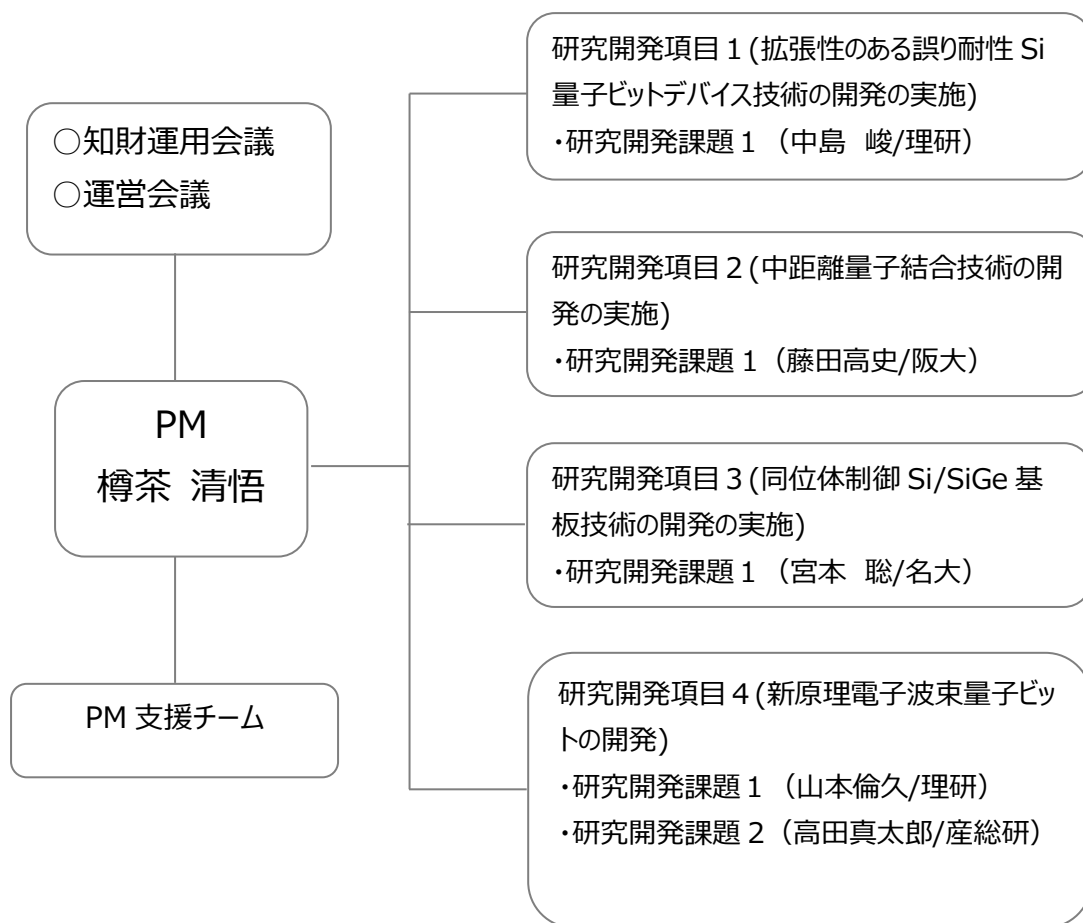
(3) 広報、アウトリーチ

- ・ ホームページ、YouTube などのアウトリーチ活動の準備を開始し、現在人材派遣の候補者と契約手続き中。

(4) データマネジメントに関する取り組み

- ・ 各種実験データ、解析データ、及び量子アルゴリズム実行データなどに関して、マネジメントプランに沿って、適切なデータ管理を行った。また、公開非公開の内容に関して、適切に管理した。

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

会議の構成は議長を PM、参加者は PM、課題推進者、協議の対象となる知財に関する各機関の知財部門、及び JST とする。実施は案件のあるごとに行う。今年度は対象の案件がなかった。

運営会議 実施内容

会議の構成は議長を PM、参加者は PM、課題推進者で、PM と課題推進者による定例の報告会議に合わせて開催する。プロジェクト全体の計画、予算、進捗の管理と修正の協議、情報交換、プロジェクトマネジメントの進め方などを中心に協議する。

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	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	5	8
口頭発表	5	1	6
ポスター発表	1	0	1
合計	9	6	15

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	0	0	0
その他	0	0	0
合計	0	0	0

受賞件数		
国内	国際	総数
4	0	4

プレスリリース件数
0

報道件数
1

ワークショップ等、アウトリーチ件数
0