



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

終了報告書

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／
量子コンピュータ研究センター



1. 研究開発プロジェクトの実施期間

令和4年10月1日～令和7年11月30日

2. 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るものの、まだ大規模化への展開が見えていない。本プロジェクトでは、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する。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する。その前段階として、シリコン/シリコンゲルマニウム(Si/SiGe)の高品質基板を用いて拡張性のある多量子ビットデバイスの作製技術を開発し、小～中規模のプロトタイプを実装するとともに、多量子ビットデバイスの特性評価と量子操作の高忠実度化を目指す。これと並行して、革新的な量子ビットの大規模化を提供する可能性のある新原理の量子技術として、伝搬電子波束の状態で定義される量子ビットの制御技術の開発と原理実証を目指す。

(2) 研究開発プロジェクトの実施概要

本プロジェクトの中核を担う研究項目1は5量子ビットの最高忠実度制御と雑音相関の検出、99%を超えるSPAM忠実度(State Preparation and Measurement: SPAM)、多量子ビット作製条件の抽出など予想以上の成果を得ており、世界に先行している。項目2は量子ビット伝送系のシミュレーションによる条件抽出とデバイスの設計・試作、項目3はSi/SiGe基板の高品質化と界面制御技術の評価、巨大バレー分離の観測など目標達成に向けて順調に進捗している。項目4は中心技術となる、波束生成と制御、観測の実験が計画に沿って進んでいる。

研究開発項目1: これまでに99%のSPAM忠実度、99.5%の2ビットゲート忠実度、5量子ビットで99.99%の1ビットゲート忠実度を実証し、最先端の量子制御に成功している。また、誤り訂正に有用なビット間の雑音相関の検出、産業用プロセスで作られたデバイスとの比較、インターポーザや波形制御回路を用いた信号配線実装技術の開発を実施しており、大規模化に向けた技術開発で先行している。これらの結果を基にプロジェクト間連携を通じて誤り訂正に適したスパース構造を考案し、マイルストーンを達成した。

研究開発項目2: 本項目では、量子ドットを一次元的に並べた中距離結合路を対象として、量子ビット伝送方式の検討、原理検証用デバイスの試作、測定環境の整備を進めた。複数の伝送方式を比較した結果、制御電極数を抑えながら拡張しやすい方式として、コンベ이어モード方式を有力候補とした。GaAs7重量子ドット試料では、個別ドット形成、少数電子領域での調整、一部領域での共鳴操作まで到達し、高周波制御を含む多端子測定環境を整備した。一方、試作試料ではポテンシャル不均一性により多重量子ドット結合や電荷伝送を示す明確な条件は得られなかったため、今後はシリコンデバイスへ移行し、伝送路の均一性、電荷伝送、およびスピン状態保持の評価を進める方針を確立した。

研究開発項目3: 本研究開発項目では高品位な同位体 $^{28}\text{Si}/\text{SiGe}$ 基板の開発を推進

し、中程度以上の移動度性能の達成、量産用の同位体制御成膜装置および移動度評価設備の整備、産業レベルの試作ラインへの同位体成膜の技術移転を行った。また軽元素などの導入による界面ステップ制御技術の開発に取り組み、イオン注入法を含む効率的な水素導入法の検討、結晶傾斜効果の構造評価法の確立等、同位体基板の界面制御技術を提案した。大面積基板評価に向けては、デバイス・プロセス基盤技術の確立、少数量子ビットでのバレー分離増大($\sim 200 \mu\text{eV}$ 程度)の実証等、マイルストーンを達成した。

研究開発項目4： 電子波束を用いた新原理の量子計算法の実現可能性に関する調査研究を行った。波束量子ビットの高忠実度操作およびその大規模化には、ムーンショット目標 6 の実施期間より長期に渡る基礎的な研究開発が必要なが判明した一方で、原理的には問題がなく、プラズモン準粒子の高い量子性の実証と新たな量子演算回路の優位性の検証に成功した。量子計算に必要なプラズモン準粒子の構成(モード、エネルギーレンジ)、伝導制御(インピーダンスマッチング、速度制御、隣接回路へのリーク抑制)、量子性(電荷中性が高い量子性)の全てにおいて、想定外の部分も含めて新規且つ重要な知見が得られ、これを用いた将来の量子計算システムの設計指針の主要部分を固めることに成功した。

(3) プロジェクトマネジメントの実施概要

PM 以下補佐と事務支援 2 名により成果のとりまとめや情報発信などを適切に行っている。運営会議では体制の変更や予算調整、2 ヶ月毎の全体会議では研究進捗、知財戦略、共同研究の報告を ZOOM やサイトビジットにより行っている。とくに広報活動、国際連携には力を入れている。プロジェクトの活動の紹介動画を一般公開特設ページや YouTube で配信した。また、量子効果と量子情報の夏期研修会の共催、各種講習会・展示会の参加を行った。国際連携では、当該分野の代表的な国際会議 Silicon Quantum Electronics Workshop 2023 を主催したほか、Intel、imec といった主要半導体産業との共同研究を継続している。また、組織横断の合同会議(MS、Q-Leap)を開催し、意見交換を行った。データマネジメントは、JST 方式に倣って実施している。ELSI は阪大を中心に 2024 年度から取り組んでいる。

3. 研究開発プロジェクトの顕著な成果

(1) 目標達成に最も寄与する成果

(項目1課題1) 目標達成に最も寄与した成果は、孤立した量子ビット単体ではなく、拡張性のある構造に集積した量子ビットの制御に関わる技術基盤を実験的に揃えたことである。誤り訂正の実装時には高速・高忠実度の読み出しが不可欠であるが、 T_2^* を下回る $3 \mu\text{s}$ の積算時間で SPAM 忠実度 99.6%の読み出しを実証した。また、2ビット CNOT ゲートでは 99.5%の忠実度を体系的なキャリブレーションによって精度良く再現できることを示した。さらに、5 量子ビット試料においてパルス波形を最適化し、5 ビット全てで 99.99%以上の1ビットゲート忠実度を達成し、複数ビットを同時並行操作できることを実証した。

デバイス面では、多数の量子ビットでこれらの高忠実度制御を再現するため、製造歩留を改善したプロセスを開発し、12 量子ビット試料および分岐構造を含む量子ビット配列の試作・評価を進めるとともに、量子ビット間のノイズ交差相関を測定・解析することで酸化絶縁膜中に分布する電荷双極子欠陥の効果を特定した。

これらの成果を基に、達成すべき目標であった初期化・読み出し・隣接結合を含む 10

量子ビット以上の実装技術開発は計画通りに進捗した。これらの知見を基に、誤り訂正を実行可能なスパースな集積ビット構造のデバイスレベル設計および制御レイヤー設計について、水野プロジェクトおよび日立製作所との議論を進め、2025 年マイルストーンである誤り訂正に適した単位構造の提案を完了した。

(項目1課題2) 本研究課題の目標達成に最も寄与する成果は、シリコンインターポーザに後工程でシリコン貫通電極(Through Si Via: TSV)を形成するビアラストプロセスを開発し、100mK 以下の極低温環境において DC-10GHz 帯域の安定した信号伝送特性を実証したことである。

(項目2課題1) 本研究開発課題では、スパースな量子ビット単位構造の設計に向けた、量子ビットの中距離伝送方式を選定した。複数の伝送方式を比較し、制御電極数を抑えながら拡張できる方式として、コンベ이어モード方式を有力候補とした。

(項目3課題1) 本研究開発課題において目標達成に最も寄与した成果として、高い界面平坦性を有する同位体基板での量子ビット性能の検証を通じて、量子ビット制御性に関わるバレー分離増大を実験的に実証し、この特性を利用した高速な量子ビット操作に貢献する成果が挙げられている[1]。本成果は、界面制御による同位体基板の高品質化に向けた設計指針を強く支持するものであり、本研究開発課題のマイルストーンを達成するうえで重要な成果となった。

(項目4課題1) 中性プラズモン準粒子の高い量子性の実証(結果の一部は、S. Ouacel et al., Nat. Commun. 16, 4632 (2025)に掲載、他に論文を執筆中)

欧州を中心とした量子電子光学分野では、相互作用電子系における単一電子励起などに関する実験が伝統的に行われてきた。電荷励起の伝播速度がプラズモンの速度に一致することから、このような励起は電荷を帯びたプラズモンの一種として理解されていた。当初研究提案では、このような伝統的な理解に基づき、「プラズモンの一種で単一電子励起であるレビトン」はデコヒーレンスがなく安定」を研究計画の根拠としていた。プラズモン準粒子の量子性を実証した実験において、この予測に反し、実際には電荷中性の純粋なプラズモン励起が最も安定で、これは電荷とは独立に伝播すること、電流を注入するための電圧オフセットをかけると、プラズモン励起の大きさとは無関係に DC 成分にのみ緩和が起きることを発見した。これは、電子波束と干渉計を組み合わせた実験で初めて解明できる現象である。従来の理解を覆し、プラズモンが電荷の流れから独立して伝播する真にデコヒーレンス耐性がある集団励起であることを明らかにした点で、学術面で応用面でも先導的で、価値が高いと考えられる。

(項目4課題2) 本研究開発課題において目標達成に最も寄与した成果は、電子波束の量子制御手法を実験的に実証し、その物理的成立性を明らかにした点である。特に、局所的な閉じ込め構造を用いた電子波束の速度制御という新しい概念を提案し、従来とは異なる機構によって電子波束の固有状態制御が可能であることを示した。この成果により、電子波束を量子情報担体として用いる際の基本的な制御指針が確立され、本課題が目標とした feasibility study としての検証に大きく貢献した。

(2) 代表的な論文

[1] Noise-correlation spectrum for a pair of spin qubits in silicon, J. Yoneda, J. S. Rojas-Arias, P. Stano, K. Takeda, A. Noiri, T. Nakajima, D. Loss, and S. Tarucha, Nature Physics 19, 1793 (2023). DOI: 10.1038/s41567-023-02238-6

[2] Inferring Charge-Noise Source Locations from Correlations in Spin Qubits
J. S. Rojas-Arias, A. Noiri, J. Yoneda, P. Stano, T. Nakajima, K. Takeda, T. Kobayashi, G. Scappucci, S. Tarucha, Physical Review Letters 136, 027001 (2026). DOI: 10.1103/glep5-bb5b

上記2件の論文では、シリコン量子ビット間の相関雑音スペクトルを評価し、誤り訂正を導

入する際に無視できない誤り相関の性質を明らかにした。これらの論文では多重量子ドットデバイスにおける相関雑音の測定・解析手法を開発し、雑音源である電荷双極子欠陥の位置およびその性質を推定することに成功した。これにより、誤り耐性量子ビット配列構造を設計するための基礎データを得た。

[3] Rapid single-shot parity spin readout in a silicon double quantum dot with fidelity exceeding 99%, K. Takeda, A. Noiri, T. Nakajima, L. C. Camenzind, T. Kobayashi, A. Sammak, G. Scappucci, and S. Tarucha, npj Quantum Information (2024). DOI: 10.1038/s41534-024-00813-0

スピン閉塞現象を用いた高速な単発パリティ読み出しを実証し、99%を超える忠実度を達成した。量子誤り訂正では、量子ビットのコヒーレンス時間内にシンドローム測定を実行し、アーキテクチャに応じて測定結果に基づく条件付き操作や高速な初期化を実行することが必要になる。本成果は、シリコン量子ビット系でこの要件に適う測定性能を実装できることを示し、拡張性のある Si 量子ビットアーキテクチャの重要な要素技術となった。

[4] Simultaneous High-Fidelity Single-Qubit Gates in a Spin Qubit Array, Y.-H. Wu, L. C. Camenzind, P. Büttler, I. K. Jin, A. Noiri, K. Takeda, T. Nakajima, T. Kobayashi, G. Scappucci, H.-S. Goan, and S. Tarucha, arXiv:2507.11918 (2025).

量子ドット配列中の複数量子ビットを、共鳴周波数によって多重化しながら同時かつ高忠実度に操作できることを示した。パルスエンベロープの最適化により、シリコン量子ビットとして世界最高となる 99.99%以上の1ビット制御忠実度を実証した。多数の量子ビットを同時に制御する際のクロストークや熱的なエラーを特定し、これらのエラーを抑制するための信号設計と校正手法を示した。これは忠実度を犠牲にすることなく多量子ビットの集積および制御を実装する上で不可欠の技術基盤を与えるものであり、量子ビット規模拡張に向けた重要な成果である。

[5] Cryogenic Via-Last TSVs for 2.5D Qubit Chip Implementation Demonstrating DC-20 GHz Signal Transmission at Millikelvin Temperatures, M. Taguchi, T. Miki, IEEE Electronic Components and Technology Conference (2026).

シリコン量子ビットの制御配線を高密度に実装するための信号伝送用 TSV を有する多機能インターポーザを開発した。本研究では、シリコン量子ビットが有する高い集積性を活かし、量子ビットチップ、制御回路、および信号配線構造をワンパッケージ内に集積することを目指した。その実現に向けて、制御回路等を実装したシリコンウエハに対し、後工程で TSV を形成するビアラスト TSV プロセスを開発した。さらに、極低温環境における伝送評価を実施し、DC~20GHz の広帯域にわたり安定した信号伝送特性が得られることを確認した。

[6] Accelerated Adiabatic Passage of a Single Electron Spin Qubit in Quantum Dots, Xiao-Fei Liu, et al., Phys. Rev. Lett. **132**, 027002 (2024).

本論文は、量子ドット中の単一電子スピン量子ビットに対して、ビット反転制御の断熱性を保ちながら、その操作時間を短縮する手法を実証したものである。中距離量子結合への応用としては、量子状態の移動速度と忠実度の両立が重要となる。本成果は、スピン転写やシャトルリングに共通する断熱制御の高速化に関する基盤的知見を与えるものであり、本課題で検討したスピン鎖方式や将来の量子結合制御にも応用可能である。

[7] Coherence of a field gradient driven singlet-triplet qubit coupled to multielectron spin states in $^{28}\text{Si}/\text{SiGe}$, Y. Song, J. Yun, J. Kim, W. Jang, H. Jang, J. Park, M.-K. Cho, H. Sohn, N. Usami, S. Miyamoto, K. M. Itoh, and D. Kim, npj Quantum Information 10, 77 (2024).

本論文では、試料提供した界面平坦性の高い同位体 $^{28}\text{Si}/\text{SiGe}$ 基板に対して実装されたオンチップ・マイクロマグネットを有するゲート定義型シリコン量子ビットにおいて、増大したバレー分離を性能評価し、この特性を利用して品質係数(Q 値)が 580 を超える高い

コヒーレンス性能を有する高速な Singlet-Triplet 量子ビット操作を実現した。これにより、制御性の高い量子ビットを集積化するうえで、同位体基板のバレー分離増大と界面均質化の両立が重要であることを明らかにした。

[8] Eigenstate control of plasmon wavepackets with electron-channel blockade, Shintaro Takada, Giorgos, Georgiou, Junliang Wang, Yuma Okazaki, Shuji Nakamura, David Pomaranski, Arne Ludwig, Andreas D. Wieck, Michihisa Yamamoto, Christopher Bäuerle, and Nobu-Hisa Kaneko, Nature Communications **16**, 9942 (2025).

本論文では、マイクロ波領域で生成される電子波束に対し、局所的な閉じ込め構造を用いて伝搬速度を制御する新しい量子制御手法を提案・実証した。また、電子波束は複数の一次元伝導チャンネルが結合した集団励起であるが、本研究では進行方向の自由度を局所的に制御することで、電子波束に寄与するモードを 1 つまで制限できることを示した。これにより、時間領域における電子波束を、単一電子チャンネルの干渉を介して量子的に操作できることを明らかにし、電子波束を量子情報担体として用いるための基盤的成立性を実験的に実証した。

- (3) 代表的な特許
該当なし

4. 研究開発プロジェクトの実施内容および成果

(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

実施内容:

本研究開発課題では、2050 年の誤り耐性型汎用量子コンピュータ実現に向けた中核技術として、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に取り組んだ。2030 年までに量子ビットの大規模化に適した基盤技術を確立するため、量子ビットを格子状に配列したスパースな周期単位構造、電極密集を緩和する三次元配線・信号配線実装、半導体量子ビットに適したバイアス誤り訂正方式の検討を一体的に進めた。

周期単位構造の構成要素となる基本構造の試作、10 量子ビット以上を対象とする制御・測定環境の整備、それらを用いた量子ビットの特性評価実験へと段階的に展開した。特に複数の量子ビットを集積した際の量子ビット読み出し、ゲート操作、エラー相関の検証により、誤り耐性獲得に向けた技術的根拠の確立に取り組んだ。さらに研究開発課題2との連携によりパルス波形の生成・補正装置を開発したほか、水野プロジェクトとの連携により誤り訂正に適したスパースなアレイ構造を考案した。

成果:

量子ビットの読み出しに関しては、誤り訂正に必要とされる量子ビットのコヒーレンス時間を下回る 3 μ s の積算時間で SPAM 忠実度 99.6%を実証した。また、2 ビット CNOT ゲートの忠実度 99.5%、1 ビットゲート忠実度 99.99%を精度よく再現する体系的手法を確立した。また、これらの操作を複数量子ビットに対して同時に実行する際のクロストークエラーおよびエラー相関を解明し、誤り訂正の実装における技術基盤を確立した。これらの成果をとりまとめ、Nature Physics 誌、npj Quantum Information 誌等に報告するとともに、複数の量子ビットアレイ構造および制御パルス整形器に関する特許を申請している。

課題推進者: 中島 峻(理化学研究所)

研究開発課題2:集積 Si 量子ビットに向けた制御信号配線実装技術の開発

実施内容:

集積シリコン量子ビットの制御信号配線実装に向けて、制御信号生成回路および信号配線実装技術の開発を実施した。制御信号生成回路では、希釈冷凍機内で生じるパルス信号波形の劣化を補正するため、アクティブ加算回路を用いたパルス結合回路を開発し、パルス信号生成器として研究開発課題 1-1 および研究開発項目 2 の量子ビット実験環境へ導入した。信号配線実装技術では、制御回路機能を有するシリコンインターポーザにビアラストプロセスで TSV を形成し、高密度な垂直信号配線構造を開発した。100mK 以下の極低温環境で伝送特性を評価し、DC-10GHz 帯域の安定した信号伝送を実証した。

成果:

パルス結合回路に関する特許を研究開発課題 1-1 と共同で出願した。また、信号伝送用 TSV 技術に関する研究成果が国際会議論文として採択された。

課題推進者:三木 拓司(神戸大学)

(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

実施内容:

本課題では、大規模化に適合する中距離量子結合方式の検討、原理検証用デバイスの試作、測定環境の整備を行った。量子ドットアレイを用いる複数の伝送方式を比較し、制御電極数を抑えながら拡張しやすい方式を重点的に検討した。あわせて、GaAs 多重量子ドット試料と周期的電圧操作に向けた積層ゲート構造を試作し、極低温測定と高周波制御を組み合わせた測定環境を構築した。最終年度には、多端子制御と局所的なスピン操作の手順を確認し、中距離伝送実証に向けた実験基盤を整えた。

成果:

時間発展計算やポテンシャル計算を通じて、電子やスピン状態を保ったまま移動させるための操作条件を蓄積した。特に、断熱性を保つ制御要件や、伝送路の電氣的な均一性が重要になる点を整理し、成果発表につなげた。

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

実施内容:

本研究開発課題では、量産用成膜装置や評価設備を整備し、高移動度な高品位同位体 $^{28}\text{Si}/\text{SiGe}$ 基板の開発を推進した。既存設備を用いて中移動度以上($>1 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{Vs}$)の性能を達成し、産業プロセスでの量子ビット実装に向けた試作ラインへ技術移転を行った。軽元素導入による界面ステップ制御技術を開発し、条件最適化によって効率的な水素導入を可能にした。結晶傾斜効果の構造評価手法を確立し、表層エッチング効果を抑えるイオン注入法等による界面制御技術を提案した。大面積基板の評価に必要なデバイス・プロセス技術の確立を進め、実デバイスでの高いバレー分離性能($\sim 200 \text{ } \mu\text{eV}$ 程度)を実証し、

誤り耐性を満たすために必要な同位体基板の技術知見を獲得した。

成果：

高い界面平坦性を有する同位体基板に実装した少数量子ビットにおいて、トップレベルのバレー分離増大を達成し、その成果を npj Quantum Information 誌に報告した。

課題推進者：宮本 聡(産業技術総合研究所)

(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

実施内容：

マイクロ波電気パルスの周波数コム技術や光パルスー電気パルス変換によって電子波束量子ビットをオンデマンドで生成した。特に、高い集積性を得るために、光パルスー電気パルス変換によって幅 1-3ps 程度の短い波束を生成する技術の開発を目指した。また、2 経路干渉計をベースとした量子回路において電子波束量子ビットの操作に関する実験を行った。経路間のトンネル結合を利用した 1 量子ビット操作及び波束間のクーロン結合を利用した2量子ビット演算を高い精度で実現することを目指した。

成果：

プラズモン準粒子の高い量子性の実証と新たな量子演算回路の優位性の検証に成功した。量子計算に必要なプラズモン準粒子の構成、伝導制御、量子性の全てにおいて新規且つ重要な知見が得られ、これを用いた将来の量子計算システムの設計指針の主要部分を固めた。

課題推進者：山本 倫久(理化学研究所、東京大学)

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

実施内容：

本研究開発課題は、電子波束を量子情報担体として用いる新原理量子ビットの実現可能性を検証するために実施した。電子波束は固体中を高速に伝搬する集団励起であり、従来の局在型量子ビットとは異なる自由度を持つ。本課題では、量子制御・量子状態変換・単一波束読み出しの三要素について基盤的成立性を検証した。

研究期間中に、局所閉じ込め構造を用いた電子波束の速度制御という新たな量子制御手法を提案・実証した。また、which-path 状態と time-bin 状態の相互変換に向けた実験基盤を構築した。さらに、スピン量子状態との相互作用を利用した単一波束読み出しの物理的成立性を検証した。

以上により、本課題は feasibility study として目的を達成し、電子波束量子情報処理の技術的可能性と今後の課題を明確化した。

成果：

電子波束の量子制御手法を実験的に実証し、その物理的成立性を明確化した。特に、局所閉じ込め構造による速度制御という新機構を提案し、電子波束の固有状態制御の指針を確立した。

課題推進者：高田 真太郎(大阪大学)

5. 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

- ・ 代表機関である理化学研究所において、PM 事務支援のための事務処理アシスタントと、研究の管理運営をサポートする PM 事務補佐からなる PM 支援チームを編成し、本研究開発プロジェクトの運営・管理を円滑に行った。契約や支払事務に関しては理化学研究所の関連部署のサポートを受けながら、研究計画、予算計画の調整等、関連事項の連絡や問い合わせ窓口としての役割を担うなど、PM 活動の支援体制を構築している。
- ・ 機密情報を含むファイルの共有において、セキュリティの高いクラウドストレージである Box を利用している。プロジェクトメンバーの外部発表やアウトリーチ活動等、成果報告関連様式や発表資料は Box リンクにアップロードされ、PM 承認後に JST へ提出している。Box のリレー機能を活用した受理連絡メールの自動送信を含め、一連の成果をとりまとめる体制を構築している。
- ・ 重要事項の連絡・調整については、運営会議を開催し、協議を行っている。令和 5 年 5 月の運営会議では、東京大学が新たに本プロジェクトに参加する旨、PM から課題推進者に報告した。令和 6 年 1 月には、神戸大学が翌年度より参加する旨報告した。またステージゲート審査や今後の研究計画について討論を行った。令和 6 年 9 月の運営会議では、11 月開催のプロジェクト年次評価会に向けて、翌年度の予算を提案した。またシリコン量子技術分野における研究状況や今後の動向について意見交換するため、シリコン関係の大型プロジェクトの組織横断の合同プロジェクト会議を開催することを提案した。いずれの議案も、メール審議による決議を行った結果、過半数の賛成により承認された。このほか、各種評価会での報告内容の確認、知財戦略、広報・アウトリーチ活動について意見交換を行うなど、研究開発プロジェクトの推進のための協議を行った。
- ・ プロジェクト発足時より、2 ヶ月に一度、定期的にプロジェクト全体会議を開催している。定例会議では研究開発の進捗や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、知財戦略、広報やアウトリーチについて意見交換を行った。大型装置等を導入後の稼働状況等を把握するため、令和 5 年 10 月に理化学研究所、12 月に大阪大学、令和 6 年 4 月に名古屋大学、10 月に神戸大学にてサイトビジットを実施した。

研究開発プロジェクトの展開

研究開発体制の構築：

- ・ 体制の変化に関して、令和 5 年 7 月より、山本課題推進者が理研－東京大学間でクロスアポイントメントを開始、同年 10 月に高田課題推進者が産総研から阪大へ、令和 7 年度から宮本課題推進者が名大から産総研へ異動、令和 6 年度から三木准教授（現教授、神戸大）が項目 1 の課題推進者として新規加入などがあった。三木教授は研究開発項目 1 の研究開発課題 2「集積 Si 量子ビットに向けた制御信号配線実装技術の開発」の研究を開始した。山本教授の大学・理研兼務により項目 4 の戦力が強化され、宮本准教授（現主任研究員、産総研）の異動により産業プロセスによる高品質量子ビットの大規模実装技術の開発に向けて研究環境を整備しやすくなった。三木准教授の新規加入は、項目 1 での多ビット化・高忠実度化の研究の進展により電気制御回路や実装の開発を強化する必

要が出てきたためであり、これにより、配線技術・量子ビット駆動回路構築の研究体制が強化された。

- ・上記宮本課題推進担当者の異動に伴い、複合型薄膜作製装置をはじめとする量子ビット回路に必要な設備を山本グループ(理研、東大)へ譲渡した。また一連の量子回路の試料作製を可能とする装置一式を高田グループ(阪大)へ譲渡した。
- ・課題推進者間で技術情報の交換、及び装置移設による研究資金の効率的な活用を進めている。前者では、共通する実験系に関して、低温装置の高周波ケーブル、コネクタ設置に関するノウハウや選定などの情報交換を行った。後者では、極低温電気測定用の希釈冷凍機を中島グループから山本グループ、一連の量子回路の試料作製装置一式を宮本グループから高田グループへ移管した。
- ・令和 7 年 3 月からステージゲートの戦略に関して、マイルストーンの達成状況と当該分野内での位置づけ、2025 年度、2030 年度の目標・計画を課題ごとに確認し、継続して議論を行っている。その中で、水野 PJ との半導体量子コンピュータに関する今後の研究方針、世界情勢などについて議論を行っている。

国際連携による効果的かつ効率的な推進:

- ・本プロジェクトでは、将来的に産業連携による開発を目指しており、当該企業と継続的に技術打ち合わせを行っている。世界の技術レベルの中で、より汎用性の高い技術の方向性を見定めることが重要であるため、国内外の研究者と広く情報交換して、研究開発の計画策定や方針決定を行っている。
- ・前記 Intel、imec のほか、国際連携を積極的に行っている。中島グループでは国立精華大(台湾)とのスピン量子ビットの電気制御の最適化に関する共同研究を開始した(令和 6 年 4 月～8 年 3 月)。藤田グループ(阪大)は imec と EA を継続し、その中で、それぞれ若手研究者の海外育成を促進する協定を結んだ。また、ドイツとのコンソーシアム形成を目的として Aachen 大学、Ruhr 大学 Bochum、Julich 研究センターと合同ワークショップを共催した(令和 6 年 8 月 15,19,21 日オンライン開催、約 40 名)。宮本グループでは、ソウル国立大学(韓国)とのスピン量子ビットのバレー分離増大効果に関する国際連携により、同位体基板の高品質実証に向けた研究を推進した。
- ・山本グループ(理研)と高田グループ(阪大)は、フランス CNRS の NEEL 研究所との連携を強化した。令和 6 年 1 月に CNRS の IRP(International Research Project, “Flying Electron Qubits”, 令和 10 年 12 月まで)にも採択され、令和 6 年 1 月に同プロジェクトを開始した。日本側の参加機関は、理研、阪大及び産総研である。これにより、技術交流に加え、参加機関間でのプラットフォームの共通化が進んでおり、低温実験に用いるプリント基板、コールドフィンガー、パルス生成器、測定プログラムなどを互換性のあるものにしていく。
- ・国際会議 Silicon Quantum Electronics Workshop 2023(令和 5 年 10 月 31 日～11 月 2 日)を主催し、会議事務局として、会場準備や会期中の運営を担当した。合計 22 ヶ国、310 名が参加し、シリコン量子コンピュータについて、広く情報交換した。樽茶 PM が同会議の諮問委員会メンバーに就任し(令和 5 年 11 月)、以来、同会議の方向性や運営方針などの決定に貢献している。

- ・令和6年6月5～7日にスイスと日本の産官学の量子科学技術の専門家を集めて、Swiss-Japan Quantum Symposium 2024 が東京大学で開催され、中島グループ、山本グループが協力した。樽茶 PM はスイス大使館の科学技術部と理化学研究所の量子コンピュータ研究センターで共催する本シンポジウムの実現に協力し、両国間の連携拡大に努めた。
- ・このほか、国内外の学会や研究会などに積極的に参加して、世界の競合グループの状況把握に努めた。
- ・藤田グループ(阪大)では、2025 年度に imec とのデバイス評価契約を更新し、本プロジェクトの進展と並行して量子ドットアレイ評価を進める内容へ更新した。また、大阪大学 QIQB と imec の連携協定を結び、人的交流と、量子情報デバイス分野での共同研究に向けた調整を進めた。imec 側研究者の来訪時には、評価環境の視察、若手研究者との議論、産研でのセミナーを実施した。さらに、imec-Handai 国際シンポジウム等を通じて、シリコン量子ドットデバイス評価や産業レベルでの大規模化プロセスに関する情報交換を行った。

ELSI/数理科学等の取組み:

- ・令和5年度には藤田グループ(阪大)が代表して、社会技術競争研究センター(ELSI センター)が掲載する量子技術の ELSI レビューを基に所内戦略室、共創機構の先生方と「責任ある研究・イノベーション」(RRI)の観点で意見交換を実施した。
- ・欧州では、本プロジェクトと競合する Delft 工科大学 Qutech が発足に貢献したオランダの Quantum Delta が ELSA(欧州の ELSI)対応に力を入れている。量子技術特化のインパクト・アセスメントツール(EQTA)等を公開しており、本プロジェクトでも最新動向を継続的に追っている。
- ・数理科学分科会の講演ファイルを各 PI に配布し、関連する内容を視聴することで数理科学の理解を深めるよう奨励した。

(2) 研究成果の展開

- ・高忠実度 Si 量子ビットの実証実験により得られた Si 量子ビットデバイス構造、制御エレクトロニクス、シリコン貫通電極(Through Si Via: TSV)を用いた信号伝送技術、制御プロトコルに関する知見を、水野プロジェクトおよび参画する日立製作所と共有することにより、大規模量子ビットデバイスを用いた Si 量子コンピュータのシステム化に向けた展開に取り組む。また同技術成果を各大学に共有し、基礎研究も加速させる。
- ・共同で開発した量子ビット制御パルス結合装置については特許を申請し、具体的な技術移転および製品化に向けた準備を進めている。また、水野プロジェクトと共同で考案した誤り訂正符号の実装に適するスパースな量子ビットアレイ構造についても特許を申請し、後期研究開発プロジェクトにおける実装の具体化に展開している。
- ・量子ビット伝送の成果については、光-スピン変換デバイスに応用(MS 山本俊 PM,大岩課題(後期 MS で課題終了))、Ge ホール系への応用(大岩 CREST 等)を進める。
- ・基板成長に関して、水素導入による同位体基板の界面制御技術の開発、実装量子ビットでのバレー分離向上の実証研究で得られた知見は、量子ビット実装向け同位体基板技術としての産業応用を見込み、国内外企業の技術連携に向けた展開に取り組む。バレー分離の巨大化と空間不均一性の改善、電荷トラップの空間分布評価については、後期 MS で

の開発で発展させ、同位体基板の高品位化を加速させる。

- ・電子波束制御に関して、得られた成果を科研費や創発的研究支援事業など他のプロジェクトに展開している。これにより、電子波束を用いた大規模量子回路の実現に向けて引き続き取り組む。また、得られたデータについては、BOX や研究室のデータサーバーで適切に管理し、重要なデータについては論文として外部に公開していく予定である。
- ・「量子ホール端チャンネルを伝搬するタイムビン量子ビットの量子演算装置」に関する特許出願を完了した。現在開発が進められている固体の量子コンピュータは、すべての量子ビットに個別に配線してそれを独立に制御するために巨大なハードウェアを必要とし、その調達や効率化が課題となっている。一方、本手法では、量子ビットに個別に配線する必要がない伝搬型の電子波束量子ビットを制御するため、多数の量子ビットの制御を簡易な構造で実現でき、スケーラビリティの問題を解決できる可能性がある。また「パルス結合装置」に関する特許出願が進められている。本手法では、極低温環境下で動作するデバイスの制御用のパルス信号の波形の乱れを抑制することができ、高性能の量子コンピュータを提供できる技術として期待される。引き続き、成果や進捗状況をふまえて、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。

(3) 広報、アウトリーチ

- ・プロジェクトのホームページを立ち上げ、令和 5 年 8 月より運用を開始した。研究成果や活動状況などの情報をホームページで公開している。また本プロジェクト全体を紹介する動画コンテンツを制作した。令和 6 年には、5つの研究機関で撮影を行い、CG アニメーションやキャッチ画像を使って、各課題推進者が研究内容について分かりやすく紹介するプロモーション動画を制作した。これらの動画コンテンツは、一般公開特設ページや YouTube で配信し、ホームページ掲載を通じて、量子技術分野の普及に努めた。
- ・令和 5 年 8 月、国際広報誌 RIKEN Research へ研究成果論文「Feedback system could fix quantum-computing errors」の紹介記事を掲載、本記事は全世界に無料配信されている。
- ・令和 6 年 2 月に Nature 冊子および Nature オンライン版に掲載された特集記事“Focal Point on Quantum computing in Japan”の中で、水野プロジェクト(日立製作所)とともに、半導体量子コンピュータ分野の研究開発の進捗や今後のビジョンについて「Making Quantum Computers From Opposite Directions」と題して紹介した。
- ・論文等の掲載に合わせて6件のプレスリリースを行った。このほか受賞や報道などを含めた研究成果は、プロジェクトのホームページにおいて公開した。
- ・令和 6 年 3 月 12～16 日に湘南国際村センターで開催されたワークショップ、令和 5 年度 QIH-MS6 量子情報技術スプリングスクールにおいて、プロジェクトメンバーが講師として参加し、量子技術に関わる大学生、大学院生および若手研究者を対象とした講義およびポスター発表を行った。学生と研究者同士の交流を通じて、次世代の研究者の育成に寄与した。
- ・第 12 回半導体／超電導体量子効果と量子情報の研修会(スピン合宿 2023)を東京工業大学と本プロジェクトで共催した。また第 13 回(スピン合宿 2024)および第 14 回(スピン合宿 2025)同研修会は、東京大学と本プロジェクトが共催した。例年開催している本ワークショップは、半導体におけるスピン効果や半導体・超電導体を用いた量子デバイスなどを研

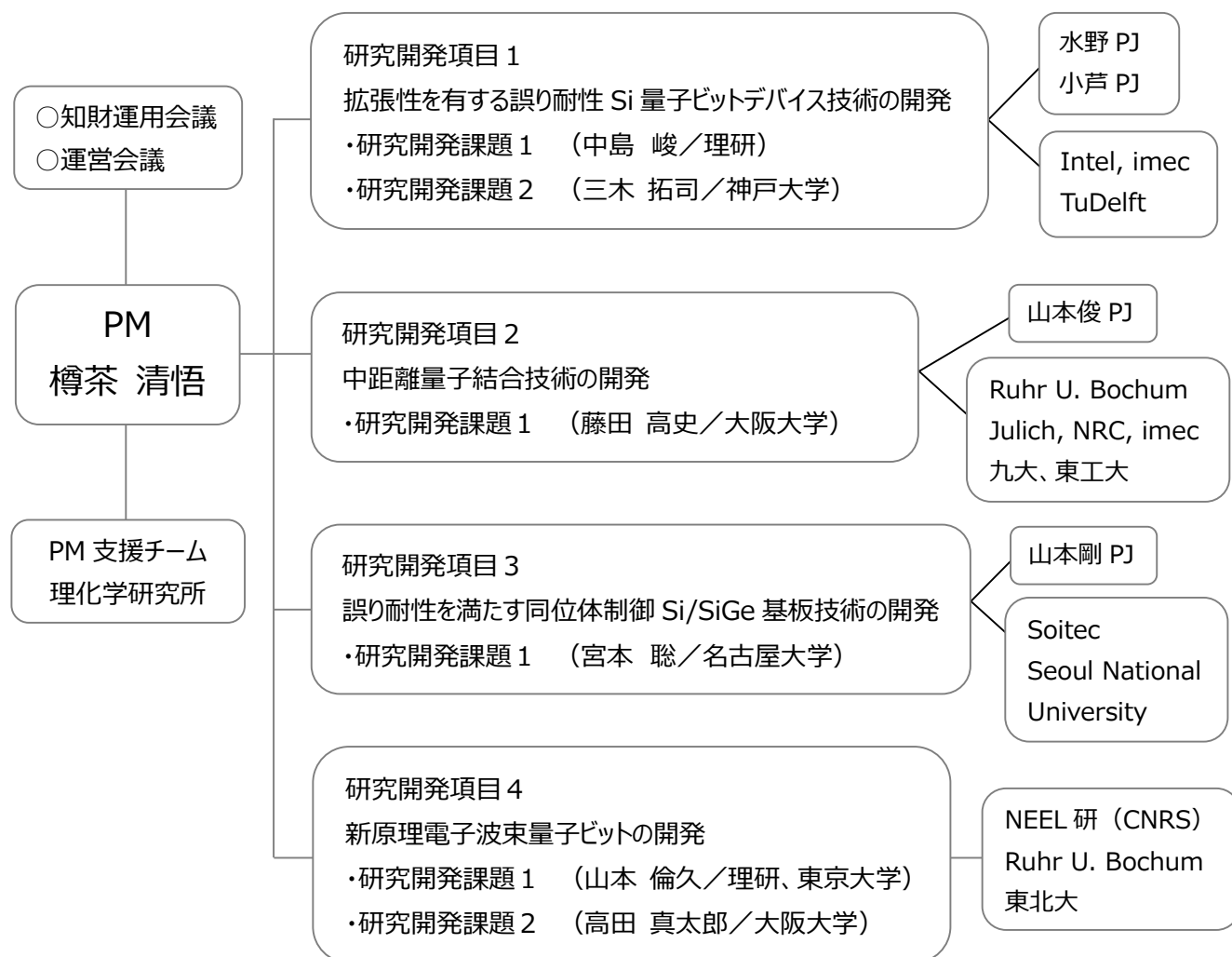
究している大学院生や若手研究者が情報共有し、活発な意見交換を行う機会となっている。

- ・行政機関等の見学には、例年丁寧に対応している。中島グループ(理研)において、令和 6 年 8 月に経済産業省、9 月に内閣府、10 月に英国政府関係者、令和 7 年 9 月に経団連による研究設備の視察を受け、研究内容を紹介した。
- ・藤田グループ(阪大)では大阪大学 SEEDS プログラムの中で、体感科学研究「ナノの世界と量子情報」を体験してみよう、に参加し高校 1、2 年生(参加者 8 名)を受入れた(令和 6 年 8/24~9/28 に週 1 回で全 3 回)。
- ・令和 7 年 1 月に、高田グループ(阪大)において、ベトナム国家大学ハノイ校科学大学附属高等学校(JST 招聘プログラムに参加)および兵庫高校の生徒を受け入れるなど、各研究機関において、ラボツアーや科学技術イベントを実施し、広報活動を行った。
- ・令和 7 年大阪万博の量子コンピュータメディアサイトに PJ 関連記事を掲載した(理研)。

(4) データマネジメントに関する取り組み

- ・プロジェクト内では、ZOOM, Slack, Box を活用して情報共有している。これにより各種実験データ、解析データ、及び量子アルゴリズム実行データなどは、マネジメントプランに沿って、適切なデータ管理を行っている。とくに機密情報を含むファイルの共有では、セキュリティの高いクラウドストレージである Box の機能を積極的に利用した。また公開非公開の内容に関しては、パスワードを付与するなど、適切なデータ管理に努めている。
- ・中島グループ(理研)では実験データ、プログラム、コードは独立のサーバーで一元管理しており、NDA 誓約をしている所属研究員のみがアクセスできるようになっている。論文投稿時には、元になる実験データ、計算データなどを所属センターで一元管理しており、関係者以外はアクセスできず、正式の要請に対してのみ確認できるようになっている。
- ・藤田グループ(阪大)では、リソースを産研が管理する研究室ごとの閉じたネットワーク内で、アカウント管理された研究室内サーバーを経由して共有している。また、リソースの公開は産研がアカウント管理する Teams を経由して指定したユーザーのみ共有している。
- ・理研では、情報インテグリティのシステムが強化され、論文投稿や海外発表はもとより、見学対応、外部討論、訪問などに至るまで、すべての外部対応について、事前申請で許可を得ることが必要になった。
- ・令和 6 年 4 月より、中島グループ(理研)の実験室が、セキュリティ区域に指定され、顔認証端末とビデオ監視システムによって部外者の入室が制限されている。
- ・研究開発プロジェクトの成果として生じる各種実験データ、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、管理対象データの範囲等を定め、データマネジメントプランに基づいて、保存・管理・公開等適切なデータ管理を行った。また論文等のエビデンスとなる研究データを適切に管理した。

6. 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

構成機関：理化学研究所、大阪大学、名古屋大学、東京大学、神戸大学

実施内容：まず、各研究機関に対して、知財に関する共同研究契約を締結する。下記運営会議において知財戦略を協議し、方針を定める。本研究開発では、外国研究機関との共同研究を予定しており、JST とも相談しながら知財に関する共同研究契約を締結する。

運営会議 実施内容

課題推進者、研究参加者を対象に定期的に全体会議を開催し、各課題推進者の研究状況を把握するとともに、内外の研究状況について情報を共有する。同時に課題推進者のみを対象とする運営会議を開催し、予算や研究の方向性、また、各種会議の企画、広報活動などについて相談する。