



## 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

## 2023年度版

---

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 セキュアシステムプラットフォーム研究所

 **MOONSHOT**  
RESEARCH & DEVELOPMENT PROGRAM



## 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

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する。それにより、2050年に大規模な超伝導量子コンピュータを実現することを目指す。

現在世界中で取り組まれている100量子ビット級回路をさらにスケールアップするためには、量子ビットチップと制御エレクトロニクス間の配線数爆発の問題を避けては通れない。本プロジェクトでは、単一磁束量子回路やクライオ CMOS などのクライオエレクトロニクスの技術とフリップチップ実装や RoF 等の新しい配線技術を用いて問題解決を目指す。

また、物理量子ビットの数や配線数といった量子コンピュータ実現のためのハードウェア負荷を減らすために、高コヒーレンスな量子ビットの開発やボゾニックコードと呼ばれる新しい量子誤り訂正符号の実装にも取り組む。

### (2) 研究開発プロジェクトの実施状況

本研究開発プロジェクトは、超伝導量子回路において、NISQ マシンをはるかに超える数の量子ビットの集積化技術や物理量子ビットの数を低減するための技術を開発し、誤り耐性量子コンピュータを実現するというプログラムの目標達成に貢献することを目指している。プロジェクト後半で実施予定の技術融合に向けて、本年度も個別の技術開発を着実に進めており、各課題、設定したマイルストーン達成に向けて概ね計画通り進捗している。

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2:エピタキシャル接合を用いた量子ビットの研究開発、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、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実施した。

研究開発課題1では、量子ビットの電磁場環境の改善に取り組み、量子ビットのエネルギー緩和率を大きく改善することが出来た。また、昨年度に引き続き超伝導量子ビットの位相緩和の原因となるサンプル基板表面の常磁性スピン密度を定量的に評価するための電子スピン共鳴システムのセットアップに取り組んだ。また量子ビット測定時間短縮化のために高強度マイクロ波に対する応答を定量的かつ効率的に数値的シミュレートする理論手法を確立し、強度の上限などを理論的に明らかにした。

研究開発課題2では、物理的なサイズの小さな超伝導量子ビットである Merged element transmon をエピタキシャル接合で実現するために、NbN/MgO/NbN のエピタキシャル Josephson 接合作製にも取り組んだ。また高コヒーレンスな  $\pi$  接合量子ビットを実現するために、絶縁層を含んだ強磁性ジョセフソン接合の作製・特性改善や、新しい強磁性絶縁材料を用いた接合作製に取り組んだ。

研究開発課題3では、昨年度までに開発した電子線リソおよび斜め蒸着を用いないジョセフソン接合作製方法の12インチ基板への適用に取り組んだ。

研究開発課題4では、引き続きボゾニックコードの実装に取り組んでいる。3次元共振器を用いた binomial code 実装では、その前段階である、記憶キャビティ中の光子数に応じた補助量子ビットのスペクトル分裂と、記憶キャビティ中の非古典的な光子数状態の生

成に成功した。KPO を用いた cat qubit 実装では、二つの方式でエンタングルした猫状態の生成に成功した。Cubic transmon を用いた GKP code 実装では、Cubic transmon の 2 次の非線形性を利用した高忠実度リセットや量子ビットの状態に依存した共振器の状態制御に成功した。

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1:量子ビットと周辺エレクトロニクスのハイブリッドチップの設計と製作、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、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を実施した。

研究開発課題1では、機能別に最適な製造技術でチップを作成しそれを縦方向に積層実装していく構造の実現を目指し積層構造の基本要素となる同軸 TSV 構造上の量子ビットを設計した。

研究開発課題2では、マイルストーン達成に向け、そのテストベンチとなる希釈冷凍機の試作機の製作を行った。またこれまでの研究開発成果を活用し、冷凍システムを含めた純国産量子計算システムの実現に向けたテストベッドとしての希釈冷凍機開発に着手した。

研究開発課題3では、前年度で実証した半導体増幅器と同程度の性能をさらに追及するために、数値計算により SIS ミキサの周波数アップコンバージョン特性の最適化を行った。また前年度から設計・試作を行ってきたジョセフソンアレイ発振器チップを有する SIS ミキサ励起用導波管モジュールの最適化を行い、20 nW の発振電力を導波管で取り出すことに成功した。

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では、研究開発課題1:量子ビット制御、読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、研究開発課題4:量子ビット制御機構アーキテクチャの研究開発を実施した。

研究開発課題1では、開発した低消費電力 SFQ 回路のセルライブラリを用い、信号分配回路の具体的な設計を進め、動作実証実験を行った。また融合実験用の専用冷凍機の立ち上げを行った。

研究開発課題2では、ナノブリッジを用いた低温向け FPGA を含む低温 SoC を設計、製造を行った。またトランジスタ特性の基礎となる MOS 容量特性およびダイオード特性のモデル化を行った。

研究開発課題3では、開発したマイクロ波エレクトロニクスを用いて、様々な量子ビット制御実験を行った。具体的には、アクティブリセットによるフィードバックパルスの効果の実証。周波数多重化による 3 量子ビットの同一制御ラインからの制御実証などである。

研究開発課題 4 では、誤り訂正符号回路アーキテクチャの策定と設計、システムレベル量子コンピュータアーキテクチャ探索環境の構築と評価・分析、冷凍機内マルチステージ間での協調動作の指針策定を行った。

### (3) プロジェクトマネジメントの実施状況

産業技術総合研究所の中川博士を量子計算機向け希釈冷凍機の研究開発を担当する課題推進者として追加した。

研究開発項目ごとの連携促進と進捗把握の目的で、高コヒーレンス量子ビット、ボゾニックコード、集積ハードウェア、クライオエレクトロニクス の 4 テーマについて 1~1.5 か月に一度の頻度で課題推進者会議を実施している。

広報・アウトリーチ活動として、学会、イベント等で本プロジェクトの活動紹介のほか、NEC 産総研連携ラボでのラボツアーを開催した。またプロジェクト成果に関するプレスリリースを 2 件行った。また、プロジェクト宣伝活動の一環として、APS TV によるプロジェクト紹介ビデオの作成、Nature 誌でのプロジェクト紹介を行った。

PM のサイトビジットとして、のべ3機関を訪問し、実験室見学、開発進捗に関する打合せを実施した。

国際連携として、令和 5 年 9 月から、九州大学、ソウル大、NEC で、量子コンピュータのアーキテクチャ設計技術に関する共同研究を開始した。2023 年 12 月 11 日に九州大学井上チーム、名古屋大学田中チーム、山本 PM でソウル大 Kim 教授を訪問し、プロジェクトの活動を紹介するとともに、共同研究内容について議論した。

## 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: 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:

- (1) 令和 5 年度は、まず前年度に引き続き量子デバイス界面のロスファクタの抽出に取り組んだ。前年度の課題として ICP エッチングによる基板表面荒れの問題があったので、エッチング条件を見直し、表面の状態を大きく改善することが出来た。しかし、CPW のデザインによって改善の度合いに差があり、完全な解決には至っていない。今年度導入予定であったスパッタ装置は業者の事情により来年度に納品延期となった。そのため国立天文台より TiN 薄膜の提供を受け、Q 値の評価を行ったが、現在のところ単一光子レベルのプロープパワーでの内部 Q 値は、数 10 万程度に留まっている。量子ビットの設計については、先行文献を参考にして量子ビット全体の participation ratio を計算することが出来るようになった。また並行して理研野口チームよりトランズモン量子ビット試料を提供していただき、量子ビットの電磁場環境の改善を行った。現在のところ、複数のデバイスにおいて安定して 100 us 程度の T1 を実現している。
- (2) 昨年度、ESR マーカーである DPPH から ESR 信号の取得に成功した。今年度この ESR 信号を用いて極低温における磁場の校正を試みたが、DPPH の g 値が添加物によって極低温で変化することが判明し、当初計画していた DPPH の ESR 信号を用いた正確な磁場の校正が困難であるという結論に至った。また、本プロジェクトで構築した極低温 ESR システムに使用している磁気回路の磁束密度 B の応答が、超伝導コイルに流す電流に対して線形ではないこと、また、ヒステリシスを有することが原因で実験サンプルへ再現性の高い磁場の印加が困難であることに気づいた。これらの問題を解

決し、極低温における  $g$  値の精確な同定とそれに必須となる磁場の精確な校正を実現するために、ESR マーカーとして超微細構造を有する  $^{31}\text{P}$  を使用すること、磁気回路の磁性材料として飽和磁場が高く B-H 曲線がこれまで使用してきた SUY-1(軟鉄)よりも高い磁場 H まで線形的な応答を示すパーメンジュールを採用し、磁気回路の再設計を行った。

- (3) 制御・測定時間短縮化の理論については、本年度は量子ビットの測定について取り組んだ。測定時間短縮化のナイーブな方法は、分散読み出しの際に用いる読み出しパルスの高強度化であるが、超伝導量子ビット-共振器分散結合系の高強度マイクロ波に対する応答を数値的にシミュレートすることが難しいため、マイクロ波強度の強さに対する反作用が明らかになっていない。本年度は、高強度マイクロ波に対する応答を定量的かつ効率的に数値的シミュレートする手法を確立し、強度の上限などを明らかにした。

課題推進者: (1) 山本剛(日本電気株式会社)、(2) 猪股邦宏(産業技術総合研究所)、(3) 越野和樹(東京医科歯科大学)

#### 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

当該年度実施内容:

- (1) 世界的に広く研究開発が行われている Al、Nb 等の超伝導量子回路において、Josephson 接合のバリア層にはアモルファス  $\text{AlO}_x$  が主に用いられている。この酸化膜は、電極上の酸化膜と同様にデコヒーレンス源となり得る。そこで我々は、窒化物である AlN の単結晶バリア膜を用いたエピタキシャル Josephson 接合の研究開発に取り組んでいる。また、エピタキシャル Josephson 接合の利点を最大限に活かすことの出来る量子ビットとして、電気容量が大きな Josephson 接合を用いることでコンデンサ電極を必要最小限にした Merged element transmon (Mergemon) に着目している。令和 5 年度には、Mergemon の設計・作製・測定を行った。また、VaperHF 装置を用いた  $\text{SiO}_2$  犠牲層エッチング過程の条件探索を行った。さらに、NbN/AlN/NbN と並行してより良い結晶性が期待できる NbN/MgO/NbN のエピタキシャル Josephson 接合作製にも取り組んだ。
- (2) 昨年度までに実施した  $\pi$  接合を含む量子ビットと  $\pi$  接合を含まない量子ビットのコヒーレンス特性の比較により、 $\pi$  接合がコヒーレンス特性を律速している傾向が得られている。そのため本年度は、従来量子ビットにおける位相シフトとして用いてきた、超伝導/強磁性/超伝導構造の金属的な強磁性ジョセフソン接合に替わり、絶縁層を含んだ強磁性ジョセフソン接合の作製・特性改善や、新しい強磁性絶縁材料を用いた接合作製を行った。接合特性評価には、昨年度立ち上げた機械式 GM 冷凍機による接合測定システムを活用するとともに、令和 6 年 1 月に納品した希釈冷凍機システムの構築を開始した。

課題推進者: (1) 吉原文樹(情報通信研究機構)、(2) 山下太郎(東北大学)

### 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

当該年度実施内容:

令和4年度4インチ基板にて、スパッタとドライエッチングを用いてジョセフソン接合(JJ)作製方法を検証した方法を令和5年度は12インチ基板に適用した。産総研SCRの12インチ基板用製造装置と外部の成膜受託会社を用いてJJ作製の条件出しを行い、86,400個のJJ構造を一括して短時間で作製することが出来た。産総研SCRが純Alの成膜装置を持っていなかったために外部の成膜受託会社の装置性能がやや足りておらず、Al膜の平坦性が算術平均粗さRaで12nm程度とかなり悪かった。そのため、Alの線幅が大きくばらついたことや、ドライエッチングの条件出しについて難航した。令和5年の研究開発によって、Al膜の平坦性や多結晶の制御などについて重要性が確認され、令和6年度はその改良を産総研新原理コンピューティング研究センターと共に行う予定である。これによって高品質で室温抵抗値ばらつきが低い、量子誤り耐性向けの大規模なJJが短時間で作製出来るようになると考えている。

課題推進者: 大館暁(株式会社ニコン)

### 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) 当該年度は補助量子ビットのコヒーレンス特性に問題が発生し、ボゾニック量子ビットの実装には至っていない。その前段階である、記憶キャビティ中の光子数に応じた補助量子ビットのスペクトル分裂と、記憶キャビティ中の非古典的な光子数状態の生成に成功した。研究加速施策で購入した無冷媒希釈冷凍機の運用を開始し、補助量子ビットの特性評価を進めている。補助量子ビットのコヒーレンス特性の問題に関しては、原因がレジスト残渣であることを解明した。レジスト残渣を除去するために作製プロセスを改善し、ボゾニック量子ビットの実装に必要なコヒーレンス特性を得ることに成功した。
- (2) 我々はカーパラメトリック共振器(KPO)の独特な特性を利用して二つの方式でエンタングルした猫状態を生成した。第一の方式では、エンタングルしたFock状態(ベル状態)を断熱ポンプ印加によりエンタングルした猫状態に変換した。第二の方式では、二つの独立した猫状態に $\sqrt{i}$ SWAPゲートを加えてエンタングルした猫の状態を生成した。
- (3) 本課題では、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。そのために、Cubic transmonを用いた量子ビットのリセット技術の確立と、GKPコードの実装を目指した。本年度は、Cubic transmonの2次の非線形性を利用したリセットを高忠実度を実現することに成功した。また、同量子ビットを利用することで、量子ビットの状態に依存した共振器の状態制御に成功した。この制御はGKPコードの実装に中心的な役割を果た

しものである。また、この状態制御を利用したモジュラー測定と呼ばれる量子測定を行い、この反作用によってシュレーディンガーの猫状態と呼ばれる量子状態を生成した。これは GKP 誤り訂正操作を一つの方向に対して行ったことに対応する。

課題推進者：(1) 齊藤志郎(日本電信電話株式会社)、(2) 蔡兆申(東京理科大学)、  
(3) 野口篤史(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のハイブリッドチップの設計と製作

当該年度実施内容：

本研究開発課題では、量子誤り訂正をスケーラブルに実現するための量子ビット集積ハードウェアに関し、機能別に最適な製造技術でチップを作成しそれを縦方向に積層実装していく構造の実現を目指している。令和5年度は、積層構造の基本要素となる同軸 TSV 構造上の量子ビット設計に加え、積層基板に集積化可能なサーキュレータフリー読み出し方式の設計に取り組んだ。

課題推進者：萬伸一(理化学研究所)

### 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：

(1) 当該年度は、前年度(令和4年度)の試験結果を踏まえ、令和7年度のマイルストーン(1.5mW@100mK)達成に向け、そのテストベンチとなる希釈冷凍機の試作機の製作を行った。これまでの研究開発結果から、熱交換器に用いる焼結金属の最適化により冷凍性能が大きく向上する可能性が分かったため、1.5mW は 3He 循環型で実現させる方針とした。

希釈冷凍機の運転に不可欠なパルス管冷凍機については高出力化・高効率化に向け、実測とシミュレーション両面でのアプローチを行った。

(2) 令和6年1月より、これまでの研究開発成果を活用し、冷凍システムを含めた純国産量子計算システムの実現に向けたテストベッドとしての希釈冷凍機開発に着手した。

課題推進者：斎藤政通(アルバッククライオ株式会社)、藤原裕也(株式会社アルバック)、中川久司(産業技術総合研究所)

### 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

当該年度実施内容：

本研究開発課題は、現在量子ビットの読み出しに用いられている半導体 HEMT 増幅器を置き換え得る低消費電力の低雑音増幅器として、SIS ミキサを用いたマイクロ波増幅器の開発を行うものである。主な開発項目は、(1) SIS ミキサ型増幅器の設計技術、(2) SIS ミキサ励起用ジョセフソン発振器、(3) 超伝導デバイス作製技術である。令和 5 年度は、前年度に研究開発した成果をベースに、引き続き上記の開発項目 (1)～(3)を実施した。(1)においては、前年度で実証した半導体増幅器と同程度の性能をさらに追及するために、数値計算により SIS ミキサの周波数アップコンバージョン特性の最適化動作条件を探った結果、物理温度 4 K において雑音温度が 1 K 以下で動作可能であることを得た。(2)においては、前年度から設計・試作を行ってきたジョセフソンアレイ発振器チップを有する SIS ミキサ励起用導波管モジュールの最適化を行い、発振器の消費電力がおよそ 6  $\mu$ W において、20 nW の発振電力を導波管で取り出した。(3)においては、上記(1)および(2)に必要な超伝導デバイスの作製技術の開発を行い、作製した超伝導デバイスを提供すると共に、SIS ミキサと発振器のモノリシック集積化に必要な技術開発を開始した。

課題推進者：鶴澤佳徳(国立天文台)、川上彰(情報通信研究機構)

### (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：

今年度は、産業技術総合研究所の低臨界電流密度プロセスを用いて開発している低消費電力 SFQ 回路のセルライブラリを用い、信号分配回路(demultiplexer 回路)の具体的な設計を進め、動作実証実験を行った。また、これを用い、SFQ 回路とナノブリッジ FPGA 等と組み合わせた量子ビット制御システムインターフェイスを決め、量子ビットとを接続する融合実験のための実装準備を完了した。量子ビットの読み出しについては、SFQ 回路及びデジタル信号処理により適した方式を、理論や量子ビット作製を担当する研究グループと協力して探索した。

研究開発は名古屋大学と日本電気株式会社の 2 研究機関で実施した。低臨界電流密度プロセスによるデバイスの試作、融合実験用の専用冷凍機の立ち上げを日本電気株式会社が、その他を名古屋大学が担当した。

課題推進者：田中雅光(名古屋大学)、山本剛(日本電気株式会社)

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:

- (1) 本年度は、ナノブリッジを用いた低温向け FPGA を含む低温 SoC (デジタル・アナログ) を作製し、各部品が低温で常温と同レベルの処理特性を持つことを実証することを目的として、低温向けナノブリッジ FPGA を搭載した低温 SoC のマスクデータが完成し、製造を開始した。当初年度内に完成の計画であったが、能登半島地震の影響で工場が一部被災したため、ウェハ製造が遅延していたが、2024年4月に製造完了見込みである。
- (2) 本年度は、トランジスタ特性の基礎となる MOS 容量特性およびダイオード特性のモデル化を行った。MOS 容量特性から、基板はフリーズアウト効果によって単純に抵抗が高くなるだけではなく、ホッピング伝導のサイトからサイトへのホッピングに伴う時間応答遅れにより、容量成分も重畳されることを明らかにした。また、40nm 技術世代のトランジスタ特性を 4K において評価した。4K では DIBL 特性がやや改善すること、しきい値のばらつきは 4K でやや大きくなるが、オン電流のばらつきは室温と大きな差が無いこと、短チャネル(ゲート長 36nm)の素子では、300K においても 4K においても gm に差は無く、長チャネル(ゲート長 0.36 $\mu$ m)の素子では 4K において gm の改善が見られること、などが分かった。
- (3) 昨年度までに低温動作の回路設計に用いる PDK の開発、および試作 TEG の測定を行った。それらの成果をもとに、本年度は、低温 SoC (デジタル・アナログ) を作製し、各部品が低温で常温と同レベルの処理特性を持つことを実証することを目的として、アナログ・RF 回路である低雑音増幅器、周波数変換器、発振器、AD 変換器を設計し、ナノブリッジ FPGA と混載したテストチップの製造を実施した。高周波回路の発振器では、超伝導配線によるインダクタを用いることで、位相雑音および消費電力の低減を図れるような回路構成とした。

課題推進者: (1) 多田宗弘 (ナノブリッジ・セミコンダクター株式会社)、  
(2) 内田建 (東京大学)、(3) 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。当該年度は、アクティブリセット実験によりフィードバックパルスの効果を示すことができた。量子誤り訂正に必要なデカップリングを数値最適化によってロバストに設計されたものが、従来法よりも優れた性能を示すことができた。周波数多重化による量子制御法を考案し、実際に 3qubit を一つの制御ラインから誤り訂正閾値レベルで制御した。複数回の Mid-circuit measurement を可能にし stabilizer pumping を実装し、量子ビット誤り訂正まで実現した。

課題推進者: 根来誠 (大阪大学)

## 研究開発課題 4: 量子ビット制御機構アーキテクチャの研究開発

当該年度実施内容:

本研究課題では、「冷凍機内マルチステージ・ヘテロジニアス量子制御機構アーキテクチャ」の探索を目的としており、2023 年度は、①誤り訂正符号回路アーキテクチャの策定と設計、②システムレベル量子コンピュータアーキテクチャ探索環境の構築と評価・分析、③冷凍機内マルチステージ(特に、mK と 4K)間での協調動作の指針策定(定量的評価に基づく)を行った。

課題推進者: 井上弘士(九州大学)

### 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  
前年度より体制に変更なし。

- 重要事項の連絡・調整(運営会議の実施等)  
特になし

- 研究開発機関における研究の進捗状況の把握(サイトビジット、課題推進者会議等)

プロジェクトの全体会議を令和 5 年 5 月 11 日、11 月 21 日に開催し、各課題推進者が開発進捗状況について報告を行った。また進捗報告定例会議として、プロジェクト全体を、高コヒーレンス量子ビット、ボゾニックコード、集積ハードウェア、クライオエレクトロニクスの 4 つのサブテーマに分け、テーマごとに 1~1.5 か月に一度、進捗報告や意見交換を行った。このうち集積ハードウェア、クライオエレクトロニクスは、お互いに関連が深いため、合同で会議を実施している。主要課題推進者である産総研猪股博士、NTT 齊藤博士、理研萬博士、名大田中先生にそれぞれのサブテーマ会議のとりまとめをお願いしている。

サイトビジットに関しては、令和 6 年 1 月 9 日に大阪大学根来チーム(集積ハードウェア、クライオエレクトロニクス合同定例会議同時開催)、令和 5 年 11 月 1 日に大阪大学根来チーム(テストベッド設置に関する打合せ)、11 月 2 日に情報通信研究機構吉原チーム(未来 ICT 研究所)を訪問した。

研究開発プロジェクトの展開

令和 5 年 9 月から、九州大学、ソウル大、NEC で、量子コンピュータのアーキテクチャ設計技術に関する共同研究を開始した。2023 年 12 月 11 日に九州大学井上チーム、名古屋大学田中チーム、山本 PM でソウル大 Kim 教授を訪問し、プロジェクトの活動を紹介するとともに、共同研究内容について議論した。

令和 5 年 10 月より、「量子計算に特化した冷凍システムの開発」の開発課題に、産業技術総合研究所の中川久司主任研究員を新たに課題推進者として加えた。これは、ア

ルバッククライオ、アルバックが開発をしている希釈冷凍機で用いるための熱交換器の性能を改善することにより冷凍機の冷凍能力を強化し、開発全体を加速するためである。

令和6年1月より、超伝導プロジェクトで開発する要素技術を超伝導量子コンピュータへ組み込むためのテストベッド立ち上げを開始した。量子ビットチップは Q-Leap で開発している 64 量子ビットチップを用いる。希釈冷凍機はアルバック、アルバッククライオ、産総研合同チームの開発機を使用する。

## (2) 研究成果の展開

○技術移転先、将来的な顧客開拓に向けた対応(試作品頒布、実機デモや展示会への出展等)について

NEC は、Q-STAR(一般社団法人量子技術による新産業創出協議会)において 30 社が参加する「量子重ね合わせ応用部会」をリードし、量子コンピュータのユースケースの検討を進めている。参加企業との議論を通じ、FTQC に対して材料開発では分子軌道計算の高精度化、特に触媒や電池開発で必要となる励起状態の計算や、量子機械学習によるの期待が高いことが分かった。また、量子マシンだけではなく、従来技術(例えば機械学習)と組み合わせで様々な社会課題を解きたいというニーズも高いことも分かった。引き続き情報共有をしていく。

## (3) 広報、アウトリーチ

令和5年5月19日茨城県立並木中等教育学校の中高生23名を招き、産総研においてラボツアーを実施した。超伝導量子コンピュータの研究を含む NEC 産総研量子連携ラボの活動を紹介するとともに、希釈冷凍機等の実験室見学を行った。当日の様子については、NEC 社外向け公式ツイッターでの発信も行った。

令和5年7月4日 国立天文台鶴沢チームが SIS 接合ミキサを用いたマイクロ波アイソレータに関する成果でプレスリリースを行った。

[超小型マイクロ波アイソレータを可能にする新原理の実証に世界で初めて成功 –大規模量子コンピュータや多素子電波カメラへの応用に期待– | 国立天文台\(NAOJ\)](#)

令和5年12月20日 大阪大学根来チームが超伝導量子コンピュータのクラウドサービスに関する成果でプレスリリースを行った。

[大阪大学に設置した超伝導量子コンピュータ国産3号機のクラウドサービスを開始 - ResOU \(osaka-u.ac.jp\)](#)

プロジェクト宣伝活動の一環として、APS TV によるプロジェクト紹介ビデオの作成を行った。製作したビデオは2024年3月のアメリカ物理学会 March meeting の会場で放映されたほか Youtube でも公開されている。

[Toward the Realization of a Superconducting Fault-Tolerant Quantum Computer - Moonshot Goal 6 \(NEC\) \(youtube.com\)](#)

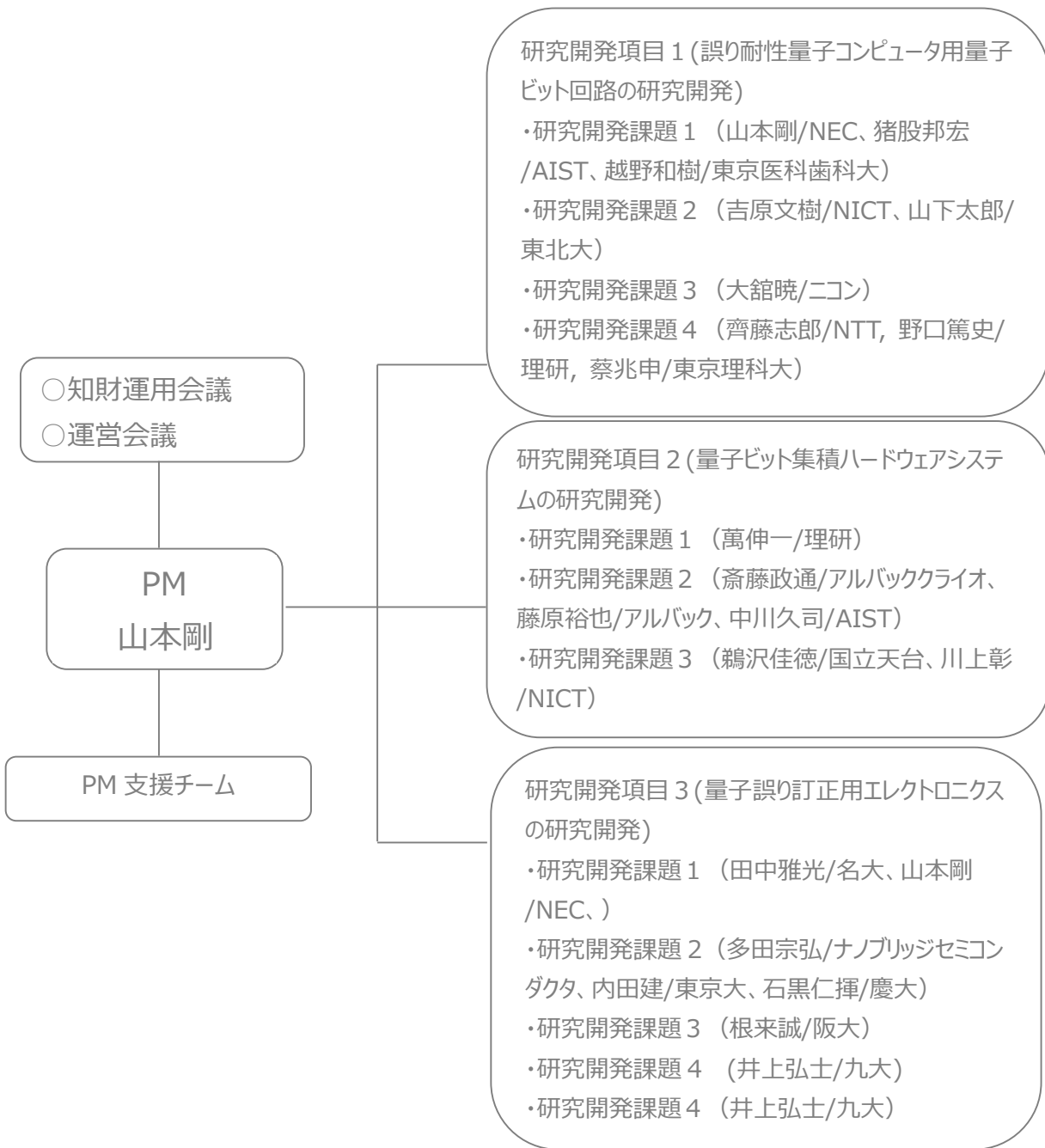
Nature 誌にプロジェクト紹介記事が掲載された。

[Realizing practical quantum computers based on superconductors \(nature.com\)](#)

(4) データマネジメントに関する取り組み

プロジェクト内情報共有ツール teams を利用してデータ管理を行った。

#### 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

令和 5 年において、知財運用会議は開催しなかった。

##### 運営会議 実施内容

令和 5 年において、運営会議は開催しなかった。

## 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	2	1	0	0
登録件数	0	0	0	0
合計(出願件数)	2	1	0	0

会議発表数			
	国内	国際	総数
招待講演	17	12	29
口頭発表	23	18	41
ポスター発表	4	8	12
合計	44	38	82

原著論文数(※proceedingsを含む)			
	国内	国際	総数
件数	0	19	19
(うち、査読有)	0	18	18

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

受賞件数		
国内	国際	総数
0	0	0

プレスリリース件数
4

報道件数
3

ワークショップ等、アウトリーチ件数
9