



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

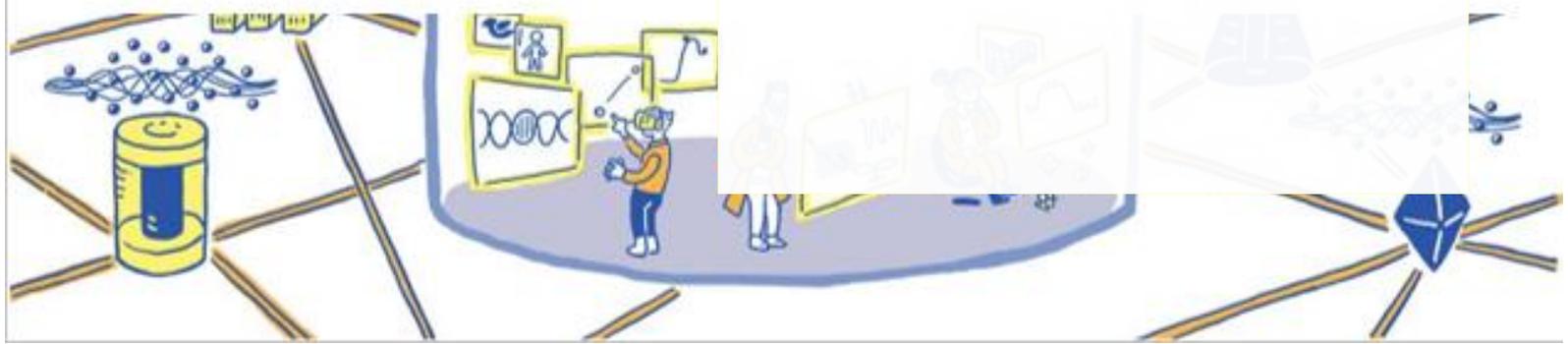
2021年4月～2022年3月

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
越野和樹	東京医科歯科大学 教養部	准教授
吉原文樹	情報通信研究機構未来 ICT 研究所	主任研究員
大館暁	株式会社ニコン 研究開発本部 光技術研究所	技監補
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
萬伸一	理化学研究所 創発物性科学研究センター	コーディネーター
齋藤政通	アルバック・クライオ株式会社 第一技術部	課長
藤原裕也	株式会社アルバック 規格品事業部	主事
鵜澤佳徳	自然科学研究機構 国立天文台	教授
川上彰	情報通信研究機構 未来 ICT 研究所	主任研究員
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 量子情報・量子生命研究センター	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

本年度から当初計画していた全ての研究開発課題の課題推進者が活動を開始した。プロジェクト後半で実施予定の技術融合にむけて、擦り合わせの議論を機関間で行いつつ、個別の技術開発を行った。個々の課題については、概ね計画通り進捗しているが、プロジェクト全体としては、個々の技術を如何に結び付け、連携動作実証するかが重要である。その強化のために2022年2月から九州大学の井上教授を新たに課題推進者として追加し、量子ビット制御機構アーキテクチャの研究開発を開始した。

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に加えて、今年度新たに研究開発課題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の研究開発を開始した。

研究開発課題1では、超伝導量子デバイスの評価系の構築と表面処理による共振器のQ値の向上に取り組んだ。また位相緩和の原因となるサンプル基板表面に存在する常磁性スピンを電子スピン共鳴の手法によって検出するための実験システム構築を行った。また集積化に向けた理論研究として、量子ビット読み出し・制御ラインの一体化の可能性について検討した。研究開発課題2では、AlNの単結晶バリア膜を用いたエピタキシャル Josephson 接合を用いた量子ビットおよびPdNiを磁性体層として用いた π 接合の作製と評価を行った。研究開発課題3では、300mmウエハに対して、ArF液浸露光装置を用いたジョセフソン接合の作製およびその室温抵抗ばらつきの評価を行った。研究開発課題4では、空洞共振器のQ値評価と最適化、Kerrパラメトリック共振器を用いた量子エラー訂正方式の提案、窒化チタン製の超伝導マイクロ波回路と超伝導量子回路の性能向上に取り組んだ。

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に加えて、今年度新たに研究開発課題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開始した。

研究開発課題1では、積層構造の基本要素となる同軸 TSV の基本設計と小型方向性増幅器によるサーキュレータフリーな読み出し方式の探索的研究を行った。研究開発課題2では、従来型冷凍機の高出力化および新方式冷凍機の試作機設計を行った。研究開発課題3では、SIS ミキサ型増幅器評価のため環境構築および作製技術の開発を行った。

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に加えて、今年度新たに研究開発課題4: 量子ビット制御機構アーキテクチャの研究開発を開始した。

研究開発課題1では、低臨界電流密度プロセスによるデバイス構造の決定および第1回目のチップ試作と評価を実施した。研究開発課題2では、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を行うためのデバイス製造を完了し、LSI 設計パラメータを低温測定により抽出し、プロセスデザインキット、およびスタンダードセルライブラリの開発を実施した。研究開発課題3では、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

調回路の開発を行い、FPGA SoC を用いて、1.5GHz 帯域で 8qubit 制御を実現した。研究開発課題4では、誤り訂正符号アルゴリズムに関する調査、および次年度以降の実装対象となる誤り訂正符号アルゴリズムとその基本設計の検討を実施した。

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 本研究開発で用いる専用の希釈冷凍機の立ち上げを行った。並行して、昨年度設計した冷凍機内で使用する3層プリント基板を作製し、マイクロ波伝送特性の評価を行った。これまで使用していた2層プリント基板と比較して、浮遊モードが抑えられていることを確認した。これらを用いて Nb 共振器の評価を行った。バッファードフッ酸を用いた表面処理による Q 値の改善に取り組んだ結果、再現性良く 10^6 以上の内部 Q 値を実現することが出来た。また界面ロスの定量的な抽出のために、Si 基板の等方的エッチングプロセスの開発に取り組み、所望の形状を得るプロセスを確立した。さらに Nb 以外の材料として NbTiN の成膜、エッチング条件出しを行い、12K の超伝導転移温度を得た。
- ② 超伝導量子ビットの位相緩和の原因となる磁気ノイズの起源として、サンプル基板表面に存在する常磁性スピンの存在が近年指摘されており、この常磁性スピンを電子スピン共鳴 (ESR) の手法によって検出するための実験システム構築を行った。通常の ESR 実験では大型マグネットが用いられるケースが多いが、本研究開発では大型マグネットからの漏れ磁場によって他の測定を妨げないように磁気回路を設計し、磁気回路に閉じ込められた磁束を局所的に測定サンプル基板に印加することで、オンチップ ESR を可能とする実験セットアップを設計し作製した。測定サンプル基板上に存在する常磁性スピンは、同一基板上に作製された超伝導二次元共振器周りに発生する高周波磁場によってピックアップする。磁気回路からの磁束は、測定サンプル基板に並行に印加するが、この印加磁束によって二次元共振器の超伝導状態が破壊されないよう、最適な超伝導材料の選択が必要となる。加えて、常磁性スピンの検出感度向上には、高い内部 Q 値が二次元共振器に求められる。これらの要求を満たすために、超伝導材料としてニオブ (Nb) を選択し、二次元共振器作製プロセスの見直しにより、内部 Q 値が大幅に改善された Nb 共振器の作製に成功した。極低温 ESR 実験を行う実験セットアップの構築は概ね順調に進んでいる。
- ③ 量子コンピュータの構成要素である個々の量子ビットには、読み出し用・ゲート操作用の二種類の導波路を結合させる必要があるが、量子コンピュータでは多数の量子ビットを集積化する必要があり、量子ビット間の漏話を避けるために配線数を極力減らすことが望ましい。本年度は、読み出し・制御ラインの一体化可能性を明確にした。

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:

令和3年度には、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 接合を用いた量子ビットを作製し、作製した量子ビットのコヒーレンス特性の測定を行った。また、PdNi を磁性体層として用いた π 接合を作製し、再現性良く超伝導オーダーパラメータの位相差 π が得られることを確認した。さらに、優れたノイズ特性が期待されるエピタキシャル 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 に着目し、設計を開始するとともに材料を含めたエピタキシャル Josephson 接合の作製条件探索に着手した。

課題推進者: 吉原文樹(情報通信研究機構)、田中雅光(名古屋大学)

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:

今年度我々は、大面積な基板向けとして 300mm ウエハに対して、ArF 液浸露光装置を用いてジョセフソン接合(JJ)用のレジストパターンを作製し、そのウエハを 33mm × 22mm サイズのチップに切り出し、電子ビーム蒸着装置を用いてブリッジレス法によって基板内に JJ を合計 1,170 個作製することが出来るようになった。3次元共振器中に我々の JJ を1つ設置し、コヒーレンス時間を計測したところ、T1, T2*, T2E ともに、約 10us であった。また超伝導量子ビットの量子ビット周波数のばらつき評価のために、室温抵抗値のばらつきを評価したところ、2%以下程度にまで抑えられていることが確認できた。これはこれまで様々な論文などで報告されている抵抗値ばらつきの計測結果に対して、同程度か、やや優れている結果であった。ArF 露光装置(NA0.85)を用いて JJ を作製した報告はこれまで過去にあったが、空間分解能が更に優れている ArF 液浸露光装置(NA1.3)を用いた実験はこれまで報告されておらず、今回初めて実証することが出来た。

課題推進者: 大舘暁(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) 当該年度はボゾニック量子ビットの特性向上を目指し、様々な空洞共振器の Q 値評価を実施した。具体的には、材料(アルミニウム、ニオブ)、形状(矩形、同軸型)、表面処理(エッチング)の有無による Q 値の違いを評価した。最終的には、アルミニウム製の同軸型空洞共振器を適切に表面処理することで、ボゾニックコード実装に向けた目標値である Q 値 10^8 を達成した。この結果を受け、ボゾニックコードを実装するための空洞共振器を作製、アンシラ量子ビットの作製も完了した。
- (2) 当該年度の成果としては大きく三つ挙げられる。第一に、超伝導 Kerr パラメトリック発振器(KPO)を用いた量子エラー訂正方式の提案をした。第二には、高速で忠実な猫状態を生成する素子の製作をした。第三は、高い Kerr 係数を持つシステムの量子 tomography 方式を開発した。
- (3) 窒化チタン製の超伝導マイクロ波回路と超伝導量子回路の性能向上に取り組み、超

伝導マイクロ波共振器の Q 値は 1,000,000 を超えたものが実現し、さらに超伝導量子回路のエネルギー緩和時間は世界最高レベルの約 450 us が実現した。また、**Cubic transmon** とマイクロ波共振器のハイブリッド系を実装し、スピン依存力の観測に用いる、レッドサイドバンド遷移とブルーサイドバンド遷移の観測に成功した。

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 of 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 3 年度は、積層構造の基本要素となる同軸 TSV の基本設計を終了した。また、小型方向性増幅器によるサーキュレータフリーな読み出し方式の探索的研究を行った。

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:

当該年度は量子計算で必要となる希釈冷凍機の高出力化に向け、要素技術の高度化の研究開発を、従来型と抜本的改善型の 2 つのアプローチを軸に研究開発を進めた。従来型アプローチではマイルストーンとして設定した目標に非常に近い性能を達成することができた。抜本的改善型アプローチでは基本設計を行い、実証用試作機の全体設計を完了させた。

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)

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。これまで国立天文台で行ってきた Nb/Al-AlO_x/Nb 接合を用いた増幅器の研究開発実績から、SIS ミキサ励起用 LO 周波数として 100 GHz 程度が適当であり、このため本研究開発開始となる令和 3 年度における(1)においては、SIS ミキサ型増幅器の設計に必要な Nb 接合や回路素子の高周波モデリングを 100 GHz 帯で行うための測定系を整備し、増幅器実験のための SIS ミキサモジュールの設計、試作、測定系の整備を行った。(2)においては、SIS ミキサ励起用ジョセフソン発振器の 100 GHz 帯における発振出力を評価するために、検出器

一体型ジョセフソンアレイ発振器の設計、試作、評価を行った。(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した。情報通信研究機構は開発項目(2)を主担当し、国立天文台と協力して研究開発を実施した。

課題推進者: 鵜澤佳徳(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:

臨界電流密度を 250 A/cm^2 に低減した、本研究用の低臨界電流密度プロセスによるデバイス構造を決定し、第 1 回目のチップ試作を行った。プロセス評価用テストパターン及び単一磁束量子基本回路要素の評価を行い、消費電力を $1/50$ に低減化したジョセフソン伝送路(JTL)などの動作を液体ヘリウム温度(4.2 K)で確認した。また、 ^3He 冷凍機を導入し、1 K 未満での動作を想定し極限まで低消費電力化した単一磁束量子回路の研究開発を行うための測定環境の構築を進めた。

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:

(1) 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を行うためのデバイス製造を完了した。LSI 設計パラメータを低温測定により抽出し、プロセスデザインキット、およびスタンダードセルライブラリの開発を実施した。ナノブリッジ単体の 4K での動作は令和 2 年度にて前倒しで確認済みである。得られた成果を整理し、その一部を SSDM2021 Late news に投稿し、採択、発表を行った。

(2) 量子ビット読み出しに利用する 65nm CMOS トランジスタの低温における動作特性を評価・モデル化し、長期動作上の課題抽出を行った。低温域(4K から 20K)における CMOS トランジスタの動作時温度を評価する手法を開発し、トランジスタの動作時の温度上昇が、動作特性に影響を及ぼす可能性を示唆するデータを取得した。

(3) 低温高周波アナログ回路部品の設計で必要となるプロセスデザインキットの構築のため、特に MOSFET および受動素子の低温における高周波測定のための測定環境を構築し、65nm 世代の CMOS ウェハで設計、製造したモデル抽出用の TEG の評価を行った。また、量子ビットの信号検出用アナログ回路に要求される暫定性能仕様を決定した。

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:

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開発を行った。FPGA SoC を用いて、1.5GHz 帯域で 8qubit 制御を実現した。この時、スケラブルな量子誤り訂正を可能にするため、2 台の FPGA SoC にまたがったシステムで行った。量子フィードバック実験に必要となる単一読み出しを実現した。

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、2021 年度は、誤り訂正符号アルゴリズムに関する調査、および次年度以降の実装対象となる誤り訂正符号アルゴリズムとその基本設計の検討、を実施した。

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
技術補佐を一名追加した。

- 重要事項の連絡・調整(運営会議の実施等)

実施規約改正に移管する運営会議を令和 3 年 12 月 27 日に開催した。「プロジェクト連携の為の実施規約改正(案)」が全会一致で可決された。

新規課題推進者(九州大学井上教授)追加に関するメール合議を実施した。令和 4 年 1 月 6 日に運営会議メンバに連絡。

- 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 3 年 4 月 19 日、11 月 4 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。また課題推進者会議については、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、各テーマごとに 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、年度途中より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 3 年 7 月 27 日に大阪大学根来チーム、7 月 28 日に名古屋大学田中チームを訪問した。また令和 3 年 10 月 29 日に、国立天文台鶴沢チームを訪問した。

研究開発プロジェクトの展開

○ 研究開発課題の追加について

プロジェクトで開発する個々の技術を如何に連携させ、量子計算機システム全体として最適化していくかを検討するために計算機アーキテクチャの専門家が必要と考え、2022年2月から九州大学の井上教授に課題推進者として参加していただき、「量子ビット制御機構アーキテクチャの研究開発」という研究開発課題を追加した。

(2) 研究成果の展開

令和4年3月3日に開催された一般社団法人 量子 ICT フォーラム主催の「量子コンピュータ周辺技術の産学連携イベント」に協賛団体として参加した。量子コンピュータの商用化のためには、様々な周辺技術の開発が必要となるため、周辺技術の研究者・開発者を中心に、量子コンピュータ周辺技術に興味のありそうな企業や研究者を集めて、周辺技術開発の現状・課題・今後の取り組み方について議論を行うというのが企画の趣旨である。当日、大阪大学根来准教授、産総研猪股博士、アルバッククライオ斎藤博士が講演者として登壇した。

(3) 広報、アウトリーチ

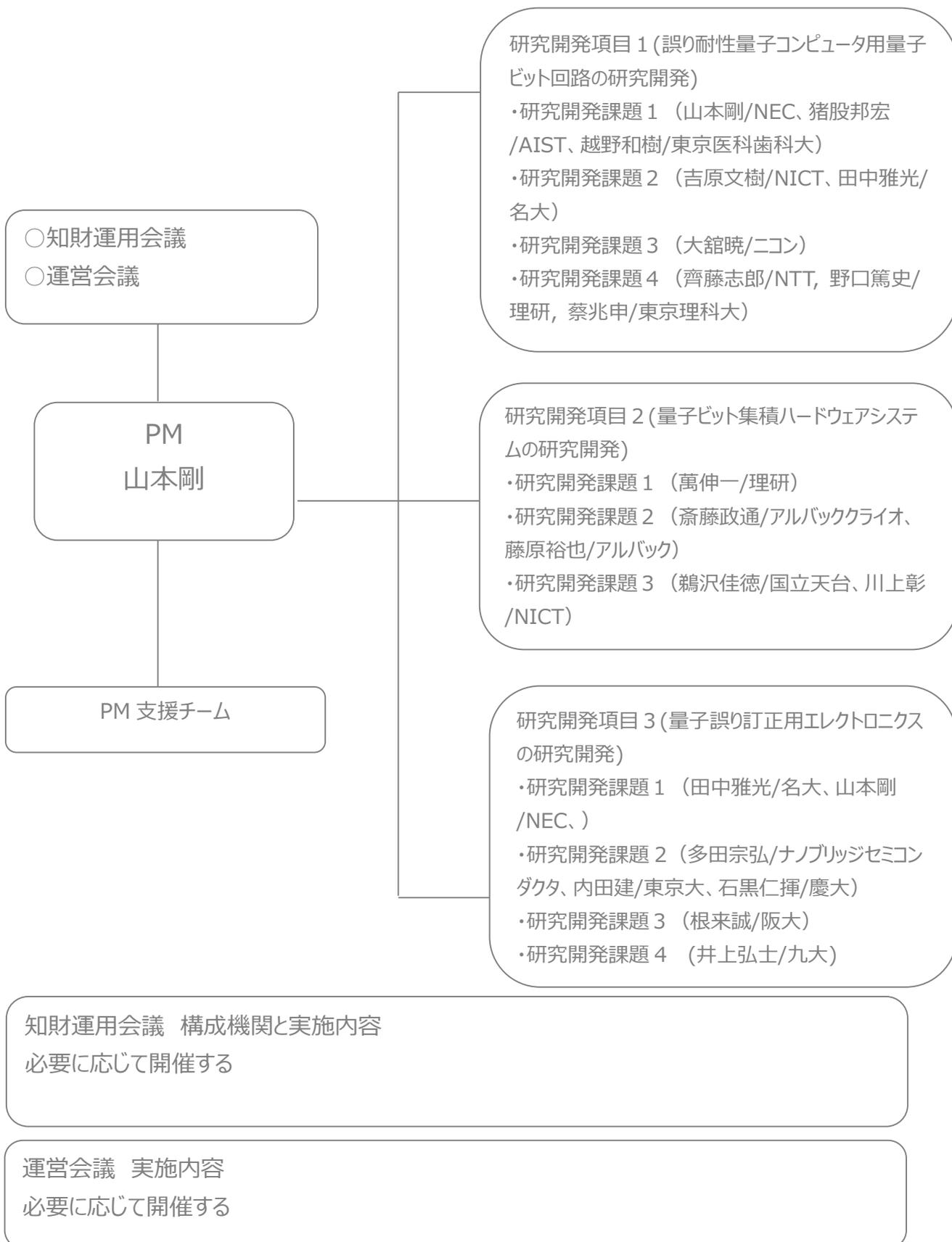
令和3年10月16日「2021年度東京大学物理工学科ホームカミングデー」において、山本PMがプロジェクトの紹介を行った。

令和3年12月17日「NEC Innovation Day」において、代表機関である日本電気株式会社の西原執行役員がプロジェクトの紹介を行った。

(4) データマネジメントに関する取り組み

令和2年度に立ち上げ予定のプロジェクト内情報共有ツール teams を利用して主に会議での発表資料の共有、整理を行った。

4. 当該年度の研究開発プロジェクト推進体制図



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	6	7	13
口頭発表	11	8	19
ポスター発表	1	3	4
合計	18	18	36

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	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
0	0	0

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
4