



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

2024 年度版

大規模・高コヒーレンスな動的原子アレー型・

誤り耐性量子コンピュータ

大森 賢治

自然科学研究機構 分子科学研究所



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

光ピンセットを用いて大規模に配列させた冷却原子量子ビットの各々を、自在かつ高速に移動させつつゲート操作、誤り検出・訂正を行う動的量子ビットアレーを実装する。さらに、緊密な産学連携の下で全ての構成要素を統合・パッケージ化し、従来に無い高い安定性とユーザビリティを達成する。これらのイノベーションにより、2050年までに経済、産業、安全保障に革新をもたらす誤り耐性量子コンピュータを実現する。

(2) 研究開発プロジェクトの実施状況

研究開発項目1「大規模・高コヒーレンスな動的原子アレー型・誤り耐性量子コンピュータ」の研究開発課題1「スケーラブルな量子コンピュータプラットフォームの開発」では、量子コンピュータプラットフォームの核となる量子プロセッシングユニット(Quantum Processing Unit 以下「QPU」)の設計を完了、組立、試験を実施した。

研究開発課題2「高コヒーレンス・高忠実度量子ゲートの開発」では、光ピンセット形状の最適化・一括初期化技術を開発した。また、イッテルビウム原子の量子ビット検出忠実度においては、既に次年度の目標である99%以上を実現した。

研究開発課題3「冷却原子系に特化した量子誤り検出・訂正アーキテクチャの開発」では、既に昨年度、原理実証に成功していたルビジウム原子量子ビットの非破壊測定に加えて、イッテルビウム原子核スピン量子ビットでも非破壊測定について着実な進展があり、全体を通して想定以上の進展があった。

研究開発課題4「高安定・高強度小型集積レーザーシステム」では、昨年度開発した安定パルスレーザー光源のプロトタイプのパフォーマンスを比較した結果、以前に比べ励起の忠実度が75%から90%に向上した。また、新規レーザー媒質を用いて、高安定性・高輝度レーザーを試作し、データを取得した。

(3) プロジェクトマネジメントの実施状況

昨年度までに構築したヘッドクォーター体制をさらに強化するため、支援員及び専門員を増員し、柔軟で幅広い支援体制の下に各課題推進者との意思疎通をはかり、研究開発を効率的かつ効果的に進めている。令和5年12月から課題推進者として加わった ColdQuanta, Inc. d.b.a. Inflection (以下「Inflection」という) に対しては、対面及びウェブ会議を定期的実施し、開発内容及び進捗状況等を把握、確認、調整等を実施し、研究開発を加速している。また、ムーショット目標6の小林プロジェクトの課題推進者であるキューエル社と量子ビットの制御関連についての共同研究を開始するとともに、小芦プロジェクトの課題推進者である大阪大学の藤井教授とも緊密な協力体制を構築し、日立製作所の吉村 PI とともにユーザーとの接続、量子誤り訂正に関するソフトウェアについて連携しながら研究開発を進めている。さらに、他のムーショットプロジェクトの参加者とのワークショップを開催し、それぞれの研究開発における課題、対応策などについて意見交換、議論し、我が国全体としての冷却原子技術の底上げと人材育成を始めとする多方面から研究開発を推進している。

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:大規模・高コヒーレンスな動的原子アレー型・誤り耐性量子コンピュータ 研究開発課題1:スケーラブルな量子コンピュータプラットフォームの開発

当該年度実施内容:今年度は各モジュールを完了させることを目標として研究開発を実施した。令和5年4月から研究開発に参加する予定であった Inflection 社が同年12月から参加し、Inflection 社の研究者と大森プロジェクト研究者との綿密な調整(対面及びウェブ会議:概ね毎週実施)によって、QPU の細部にわたる設計内容を調整、確認、同定し、QPU モジュール部品の入手、組立、試験を実施した。これにより次年度予定している QPU の稼働の見通しができた。

フルスタックの量子コンピュータはレイヤーとモジュールで構成されており(図1参照)、下層レイヤー(QPU、QCU:Quantum Control Unit)については、2024 年度末までに設計を完了し組立、試験を実施した。また、上層レイヤー(CCU:Classical Control Unit、ソフトウェア)についても 2025 年度に完成し、下層レイヤーと統合される予定である。

アレー型量子コンピュータのオペレーティングシステムの開発においては、当該期間では令和5年度に実施した原子の初期配置と動的再配置スケジュールの生成を踏まえて、それらを包含して、ユーザーが記述した量子回路を動的原子アレー上で動作させるための一連のソフトウェアスタックを開発した。具体的には、動的原子アレーのネイティブゲートへ変換するためのトランスパイラを開発し、令和5年度に実施した初期配置生成・動的再配置生成と統合した。また、開発したソフトウェアスタックの検証を量子回路のベンチマークスイートを用いて進めた。アレーにクラウド環境で動的原子アレーを提供することを見据えて、上記のソフトウェアスタックの各段階における単体シミュレータとそれらを連動したシミュレーションを実現する連動シミュレータを開発した。(図2参照)連動シミュレータではソフトウェアスタックの段階毎に異なる抽象化の度合いを関連付けてユーザーが把握できるようにすることでシステム動作の理解やデバッグ効率向上に寄与する。

以上のように研究開発は順調に進んでいる。

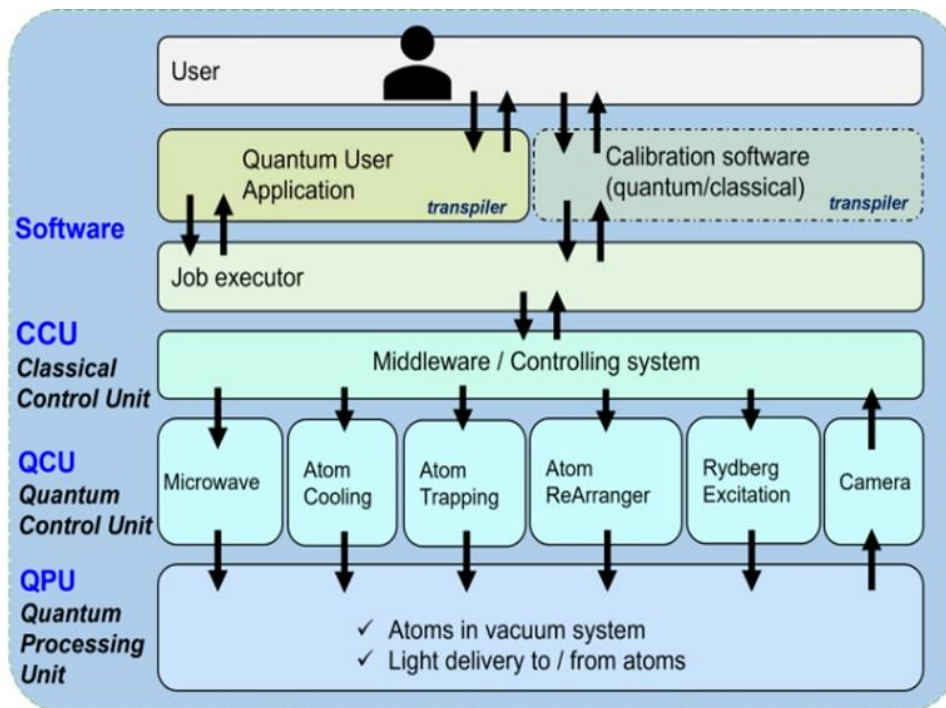


図1. フルスタック量子コンピュータのシステムスタック。レイヤー間の制御・読み出し(黒矢印)を含めて、全体を統合的に開発する。

各レイヤーの開発サブチーム:

Software-分子研、日立、藤井啓祐教授@阪大、QUNASYS

CCU-分子研、三好健文博士@キューエル社

QCU-分子研

QPU-分子研、Inflection

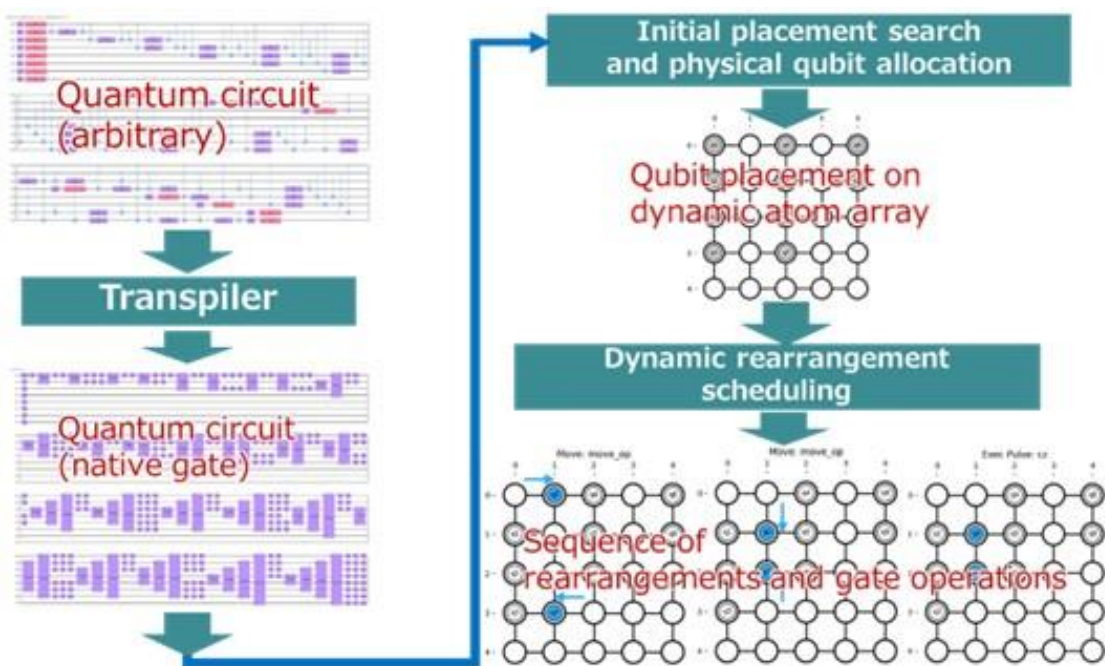


図2 トランスパイラ、初期配置生成、動的再配置スケジュール生成の概要

課題推進者:

大森賢治(自然科学研究機構・分子科学研究所・教授／研究主幹)

Sylvain de Léséleuc(自然科学研究機構・分子科学研究所/理化学研究所)

富田隆文(自然科学研究機構・分子科学研究所)

高橋義朗(京都大学大学院理学研究科・教授)

福原武(理化学研究所/自然科学研究機構・分子科学研究所/早稲田大学)

吉村地尋(株式会社日立製作所)

Thomas Noel (Inflection)

浜松ホトニクス社(研究協力者)と協業

水野 PM プロジェクト/山本俊 PM プロジェクトと連携

研究開発課題2: 高コヒーレンス・高忠実度量子ゲートの開発

当該年度実施内容: ルビジウム原子系において、超高速2量子ビットゲートの高忠実度を達成するためには、2つの原子間の距離を精密に制御することが重要である。我々はこの方向で2つの画期的な成果を得た。第一に、多数の光ピンセットに渡ってピンセット形状を一括・全自動で最適化・均一化する超精密ホログラフィック光ピンセットアレーを開発し(図3, arxiv:2407.20699 (2024))、ピンセットの位置決め誤差を弱軸方向に 150nm から 70nm に改善するとともに、ピンセットの形状の均一性を 5%から 0.5%に劇的に改善した(図4)。第二に、我々は最大 6dB のスクイズド運動状態を生成し、超高速ゲートにおける運動の量子ゆらぎの影響を4分の1に低減した。これらの成果を論文発表するとともに特許出願も完了している。さらに、このような超精密・光ピンセットの強度・偏光形状を単一原子をプローブとして光の回折限界を超えて精密診断する「原子カメラ技術」を開発し論文発表を完了している(図5, arxiv:2410.03241 (2024))。このように、世界的なコアコンピタンスを有する技術開発を次々と精力的に進めている。

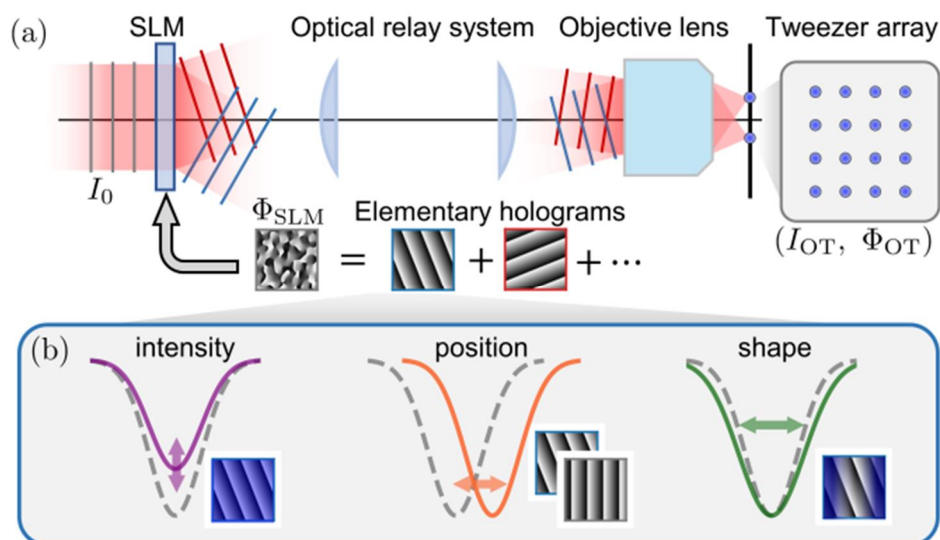


図3. ピンセット形状を一括・全自動で最適化・均一化する超精密ホログラフィック光ピンセットアレーの概念図。ホログラムの適切な設計により、光ピンセット深さ・位置・幅を最適化・均一化できる。

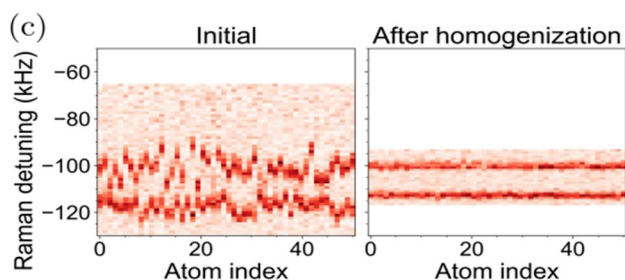


図4. 光ピンセットの形状最適化。光ピンセットの原子位置での曲率に対応するトラップ周波数をラマン分校により評価している(縦軸)。光ピンセットごとのばらつきを 5%から 0.5%以下にまで改善することに成功した。

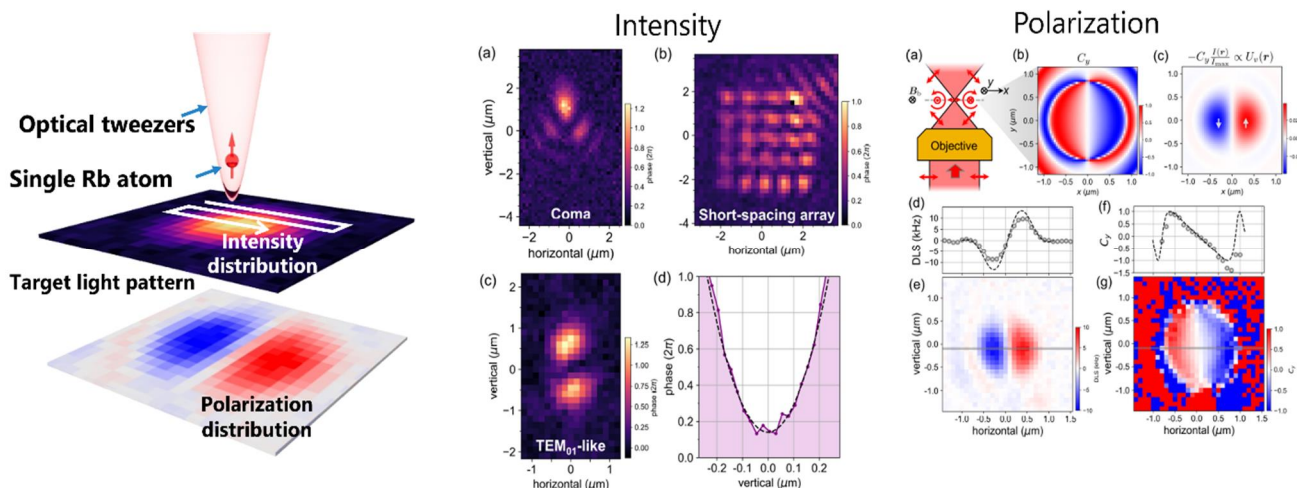


図5. 超精密・光ピンセットの強度・偏光形状を単一原子をプローブとして光の回折限界を超えて精密診断する「原子カメラ技術」の概念図(左)。光強度分布(中央)および偏光分布(右)を光学限界を超えた超解像度で撮像することに成功した。

また、イッテルビウム原子系においては、量子ビット検出忠実度について、リュードベリ状態への励起光源として、325nmの波長の高出力光源を構築した。具体的には1300nmの半導体レーザーをラマンファイバーアンプした後、非線形結晶によりその4倍波を高効率に発生させることに成功した。その結果、現在までに、準安定状態からのリュードベリ状態へのコヒーレント励起に成功しており、励起後に、トラップ光有と無でのリュードベリ状態の寿命を測定することで、令和6年度のマイルストーンであるリュードベリ状態の光トラップを確認することが容易に可能となった。さらに、 ^{171}Yb 核スピンおよび ^{174}Yb 光学量子ビットの操作および検出のパラメーターを最適化することで、現在までに、イッテルビウム量子ビットの検出忠実度は99%以上に達している。また、1量子ビットゲート操作時間と比べ100万倍以上長い核スピンコヒーレンス時間の観測に成功した。

これらによってイッテルビウム原子系におけるゲート開発の目途付けができた。

以上のとおり、研究開発は順調に進んでいる。

課題推進者:

大森賢治(自然科学研究機構・分子科学研究所・教授/研究主幹)

Sylvain de Léséleuc(自然科学研究機構・分子科学研究所/理化学研究所)

富田隆文(自然科学研究機構・分子科学研究所)

高橋義朗(京都大学大学院理学研究科・教授)

福原武(理化学研究所/自然科学研究機構・分子科学研究所/早稲田大学)

研究開発課題3: 冷却原子系に特化した量子誤り検出・訂正アーキテクチャの開発

当該年度実施内容: ルビジウム原子系では、昨年度の原理実証実験を踏まえて、非破壊測定の高忠実度化のために光学系に次の3つを改善した。イメージング用のレーザー光源に対する消光比向上のためのシャッター機構導入、偏光消光比を向上させる光学系の構築、低ノイズ CMOS カメラと専用のイメージング光学系の構築。

イッテルビウム原子系では、高磁場下でのスピン選択的ブラスト法の確立により、着実な進展があり、全体を通して想定以上の進展があった。

以上のように、研究開発は順調に進んでいる。

課題推進者:

大森賢治(自然科学研究機構・分子科学研究所・教授/研究主幹)

Sylvain de Léséleuc(自然科学研究機構・分子科学研究所/理化学研究所)

富田隆文(自然科学研究機構・分子科学研究所)

高橋義朗(京都大学大学院理学研究科・教授)

福原武(理化学研究所/自然科学研究機構・分子科学研究所/早稲田大学)

小芦 PM プロジェクトと連携

研究開発課題4: 高安定・高強度小型集積レーザーシステム

当該年度実施内容: 安定化レーザー光源(図6)を量子コンピュータのハードウェアに統合し、原子励起の忠実度を向上させることができた(図7)。2023 年度に開発したプロトタイプ・レーザー・システムを量子コンピュータのハードウェアに統合し、マイクロ秒の高速タイムスケールとサブナノ秒の超高速タイムスケールの両方で、原子励起の忠実度を高めることができた。

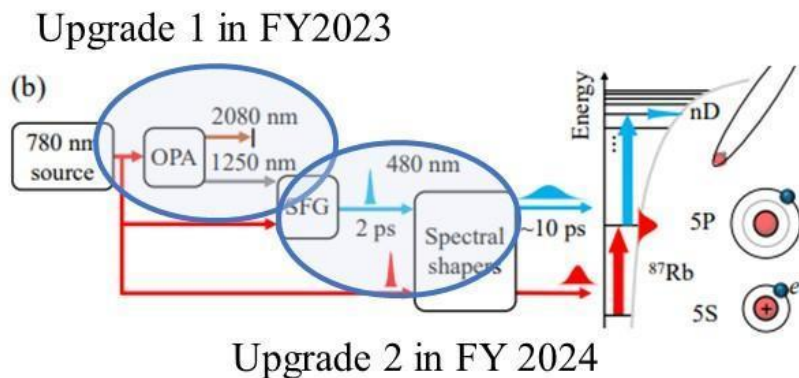


図6. リュードベリ励起用パルスレーザーシステムの概念図。令和5年度に開発した初段励起(左上)および令和6年度に開発した2段階目の励起(右下)によって、原子励起の忠実度を改善した。

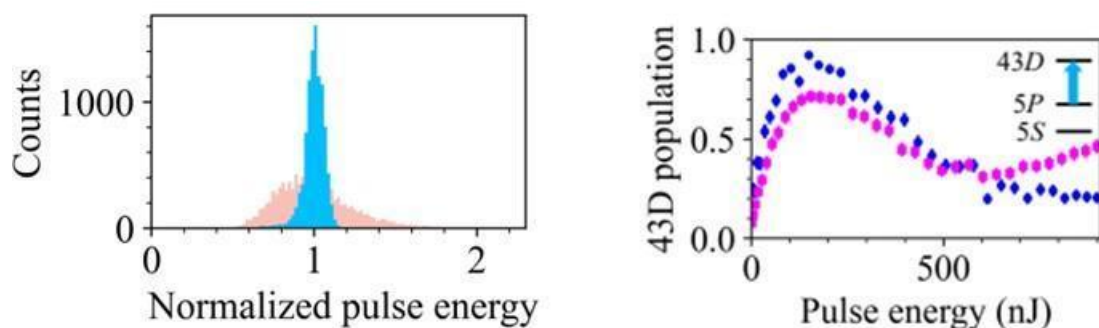


図7. 左:励起用パルスのショットごとのエネルギーのばらつきが 30%程度存在していた(ヒストグラム 赤)のに対して、改善により6%にまで低減することに成功した(ヒストグラム 青)。右:エネルギーのばらつきの改善に伴い、励起効率を75%(赤)から90%(青)に向上させることに成功した。

レーザー光源の要素として、Cr:LiSAF を用いた 1000 量子ビット以上の大規模化、赤外域での高出力連続波波長可変光源を目的としたトラップレーザー及び安定したリュードベリ励起を実現するパルス励起レーザーの研究開発も順調に進捗している。(図8試作したトラップレーザー用 Cr:LiSAF とサファイアの接合チップ)

このような冷却原子型量子コンピュータ用レーザー光源開発に関する成果について特許出願の上、論文発表も行なっている(arxiv:2408.02324 (2024))。

以上のように、研究開発は順調に進んでいる。

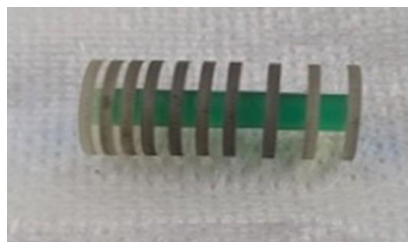


図8.試作したトラップレーザー用 Cr:LiSAF とサファイアの接合チップ

課題推進者：

平等拓範(理化学研究所 / 自然科学研究機構・分子科学研究所)

Sylvain de Léséleuc(自然科学研究機構・分子科学研究所/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・自然科学研究機構の承認を得て実質的なヘッドクォーターを担当する分子科学研究所から、本プロジェクトの研究スペース、オフィススペース、および光熱費の全面的なサポートを受けた。また、マネジメントにおいては、所長自ら PM との緊密な連携のもとに運営面の進捗状況や問題点、および将来展望をリアルタイムで共有し、実務面で的人的サポートを受けた。具体的には民間研究所で総合マネジメントの経験を有する人材がプロジェクトサブマネージャ(SPM)として、および事業化に向けた活動の専任人材も研究所で継続雇用している。更に工業所有権・研修館(INPIT)の制度を利用して、知財の専門家(知財 PD)を特別訪問研究員として受け入れている。知財管理の強化を目的に雇用している特任専門員と知財 PD による知財チームで、知財の創出及び周辺知財の発掘に取り組むと共に、他社の量子関連知財を調査し知財戦略を立案、実行中である。また、プロジェクトでは特任専門員、事務支援員を雇用しマネジメントチームを構成している。以上のように、PM を支援する強力なヘッドクォーター体制を構築し、運営している。

研究開発プロジェクトの展開

世界最高レベルにある我々の大規模(400 原子)かつ動的な任意配列の冷却原子量子ビットアレー技術を用いて誤り耐性型汎用量子コンピュータを実現するために、国内外から世界最高レベルの人材が既に結集済みである。この個性豊かな課題推進者の個々の発想を最大限に活かしつつ、チーム全体としての推進力を維持するために、サブテーマミーティングと全体(運用)会議の各々を実施し、メンバー全員が常にチーム全体の開発状況を俯瞰・検討できるよう配慮した。また、冷却原子型量子コンピュータに関して固有技術を有する Inflection 社と量子コンピュータ(QPU)の小型化についての研究開発を加速させている。

また、他の MS プロジェクトの課題推進者であるキュエル社が大森プロジェクトで共同研究を行うことについて令和 6 年 7 月に運用会議を実施し、各課題推進者の了解を得ている。

システムの統合化については従来の枠組みにとらわれず、この分野を得意とする企業とのディスカッションを積極的に実施している。

(2) 研究成果の展開

研究開発プロジェクトにおける知財戦略等について

PM 支援チーム内に発足させた知財管理チームが中心となって、保有する知財を掘り起こし、有望案件について出願した。また、昨年度出願した特許を基とした PCT 出願を行った。

また、本研究分野に関連する海外の企業及び大学・研究機関の特許などを調査し、関係案件について内容を検討した。

技術動向調査、市場調査等について

量子コンピュータ関連企業、関係機関について文献・動向調査を実施し、内容を検討した。

事業化戦略、グローバル展開戦略等の立案等

研究成果の事業化を図る目的で、事業化検討プラットフォームを設立し、大森 MS プロジェクトで得られた成果を基にした事業化展開を図るための検討を実施してきた。その結果、プロジェクトの課題推進者が所属する分子研大森研究室、および京都大学高橋研究室の研究グループメンバーが中心となり、2025年4月にスタートアップを立ち上げる方向で活動している。

(3) 広報、アウトリーチ

2024 年 5 月 25 日、日本表面真空学会特別講演会において、大森 PM が「量子力学 100 年の謎と超高速量子コンピュータへの挑戦」と題して講演。オンラインを含め約 180 名が聴講した。

2024 年 5 月 30 日には、Sylvain PI が 岡崎市が主催する「未来型教育推進事業」の「夢への挑戦～自然科学研究機構の研究者・職員から学ぶ～」をテーマにしたオンラインセミナーを行った。市内の小・中学生約 4200 人が視聴し、子供たちの科学に対する関心を高めた。

2024 年 6 月 7 日放送のエフエム EGAO(FM 岡崎)「EGAO FRIDAY SCIENCE LAB.」に Sylvain PI が出演し、視聴者最大 10 万世帯に向けて量子コンピュータに関する研究内容をはじめ、日本での暮らしなどを紹介した。

2024 年 6 月 18 日、公益社団法人新化学技術推進協会主催の JACI/GCS シンポジウムで大森 PM が「量子力学 100 年の謎と超高速量子コンピュータへの挑戦」と題して講演。一般、学生を含め現地とオンラインで 280 名を超える聴講があった。

2024 年 7 月 10 日、神奈川県立相模原中東教育学校を富田 PI 及び Sylvain PI が訪問し、生徒約 120 人に対して「原子で作る量子コンピュータ」についての出張授業を行った。このイベントで、子供たちの量子技術への興味を喚起し、新たな学びと視野を提供することができた。

2024 年 10 月 13 日、中日文化センターが主催する一般向け講演会「名古屋大学総長がナビゲートする科学最前線-知の地平線 未来への挑戦」において、大森 PM が「量子力学 100 年の謎と超高速量子コンピュータへの挑戦」と題する講演、及び杉山総長との対談を行った。聴講者約 80 名が熱心に聴講し、一般市民の関心と理解を深めることができた。

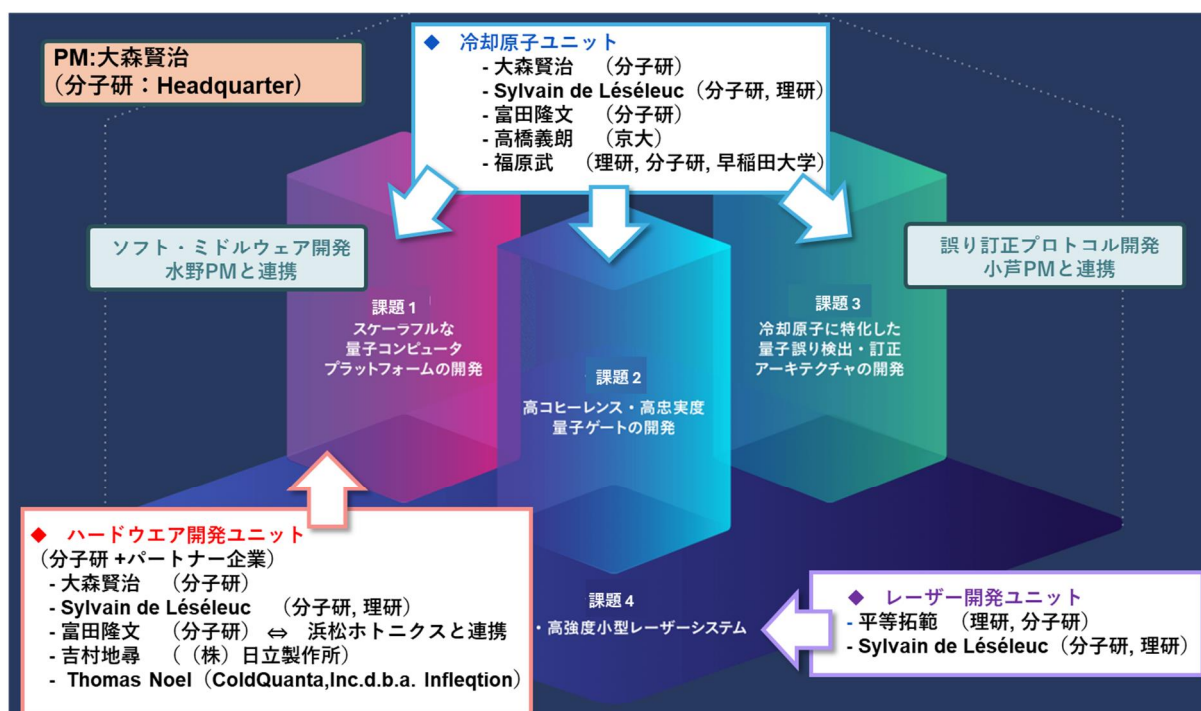
2024 年 11 月 21 日には RX Japan 主催の量子コンピューティング EXPO において「量子コンピューティングの最新研究開発の状況と今後の展望」というテーマで、講演とディスカッションを実施した。

また、2025 年 3 月 13 日、米国テキサス州オースチンで開催された世界最大級のビッグテックイベント SXSW の量子セッションにおいて大森 PM が”Ultrafast Quantum Computing with Ultracold Atom Arrays at Quantum Speed Limit”と題して講演を実施した。

(4) データマネジメントに関する取り組み

研究機関ごとにメインサーバーにデータ集約するとともにバックアップ用 HD にバックアップを作成した。

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

会議発表数			
	国内	国際	総数
招待講演	26	33	59
口頭発表	13	8	21
ポスター発表	10	23	33
合計	49	64	113

原著論文数(※proceedings を含む)			
	国内	国際	総数
件数	0	11	11
(うち、査読有)	0	11	11

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
1	0	1

プレスリリース件数
3

報道件数
10

ワークショップ等、アウトリーチ件数
5