



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汎用量子コンピュータを実現

実施状況報告書

2023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

 **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

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(以下 QPU)の設計を実施した。真空チャンバー、レーザー、イメージングシステムを含む統合的なシステムについて、その要件を検討し設計へ反映させ、必要機器を発注した。

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、高忠実度量子ゲートを実現できるレーザーシステムの性能特定、及びそれを満たす光学系の設計を実施した。また、状態準備・検出の基礎的な技術開発を実施した。

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、理論面では量子誤り検出・訂正の具体的なアルゴリズムの開発をはじめ、実験面では非破壊測定の実験検証としての実験を実施した。

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、満足すべき要件を明らかにし、それに基づきレーザーの種類・媒質・光学系の構成について検討した。

(3) プロジェクトマネジメントの実施状況

昨年度に続きプログラムマネージャーを支援する強力なヘッドクォーター体制を盤石なものとするべく、サポート人員を増員した。また、知財管理関連の人員の増員により、知財に関する会議を実施し、新たな知財の発掘を促進する環境を整えた。

今年度から研究開発に参画した吉村 PI、平等 PI を含めた運用会議などを開催し、相互にコミュニケーションを取り、研究を推進させる体制を構築した。また、12月から研究開発に新たに参画した ColdQuanta, Inc. d.b.a. Infleqtion (以下「Infleqtion」という)社との連携を図るべく定期的に会議を開催し、設計進捗状況などを把握した。

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: 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:

研究開発項目の概要

安定かつ運用性の高いプラットフォームとして、パッケージ化された大規模原子アレー用小型光学系・真空系の開発を行う。産業界との緊密な連携のもと、分子科学研究所に設置されるハードウェアのために個別にパッケージ化されたモジュールを開発し統合する。本研究開発では、量子ビットとしてルビジウム原子 (Rb)、イッテルビウム原子 (Yb)、ストロンチウム原子 (Sr) をそれぞれ使用したプラットフォームを並行して開発する。

令和 5 年度は QPU (Quantum Processing Unit) の仕様の策定が完了した。

分子科学研究所が担当するルビジウム原子 (Rb) を使用した QPU システムにおいては、第二世代装置の真空チャンバー、レーザー、イメージングシステムを含む統合的な仕様を確定した。また、各モジュールの設計、仕様策定が完了するとともにプロトタイプとなる制御システム機器を発注した。Inflection 社においては、小型 QPU を構成するサブシステムの仕様を確定した。

京都大学 (高橋 PI) が進めるイッテルビウム原子 (Yb) の QPU の開発においては、基盤技術となる原子配列の生成、原子冷却手法について仕様を確定するとともに、100 個以上の Yb 原子の二次元任意配列の生成に成功した。

理化学研究所 (福原 PI) が進めるストロンチウム原子 (Sr) の QPU の開発においては、真空槽及び冷却光源の仕様を確定し、それぞれを準備した。また、画像解析により最適化の指標を得た。

日立製作所 (吉村 PI) は、アレー型量子コンピュータのプログラミングモデルの開発において現 QPU 仕様をもとにモデルを作成し、原子移動を中心としてシミュレータを開発した。量子ビットの動的再配置アルゴリズムの開発においてはトランスパイラを併せたフローを整備した。

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)

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)

吉村地尋 (株式会社日立製作所)

Thomas Noel (Inflection 社)

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：

研究開発項目の概要

マイクロ波やレーザー光を用いた高忠実度1・2量子ビットゲート操作および高忠実度状態準備・検出技術の開発を行う。特に、連続波レーザーと超高速パルスレーザー、ルビジウム原子とイッテルビウム原子/ストロンチウム原子など、相補的な手法と原子を組み合わせた開発を進める。

令和5年度は1量子ビットゲート操作時間と比べ100倍長いコヒーレンス時間の観測に成功した。

分子科学研究所においては光ピンセット中の原子量子ビットのコヒーレンス時間を測定。ダイナミカルデカップリングによるコヒーレンス時間の延長に成功し、1量子ビットゲート操作時間と比べ100倍以上のコヒーレンス時間を実現した。また、原子の波動関数スクイーミング、800ピンセット整形・均一化・全自動化に成功した。

京都大学(高橋PI)においてはイッテルビウム原子(Yb)のゲート操作において、高速・高忠実度の核スピンXゲートを実現するとともに、秒スケールのコヒーレンスの実現に成功した。

理化学研究所(福原PI)においてはディスペンサーからストロンチウム原子を供給し、蛍光が見える条件で 2×10^{-9} Torr程度の真空度を達成した。

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)

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)

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：

研究開発項目の概要

実験面では、局所的な測定光照射、動的光ピンセットによる原子移動、準安定電子状態を用いたシェルビング法などを用いた、量子状態の非破壊測定技術を開発する。理論面では、小芦PJ藤井啓祐氏(阪大)との連携により、動的量子ビットや任意形状の量子ビット配列などの冷却原子系の特徴を生かし、冷却原子型量子コンピュータに特化した、誤り耐性を有する論理量子ビット間の万能ゲート操作プロトコルを開発する。このプロトコルをハードウェア上に実装し、物理量子ビットに対する量子ゲート操作、および非破壊測定と組み合わせ、誤り訂正プロトコルを実行し、その性能評価を行う。

令和5年度は非破壊測定の実験に成功した。

分子科学研究所においてはRb量子誤り訂正のための非破壊測定において、原理検証実験に成功した。

京都大学(高橋PI)においてはYb量子誤り訂正のための非破壊測定において、基底状態 1S_0 準安定状態 3P_2 間のコヒーレントRabi振動の観測(Shelving用)に成功した。

理化学研究所(福原PI)においてはストロンチウム(Sr)原子を準安定状態に原子を遷移させるための光源(698nm時計遷移レーザー)の構成を決め、発注した。

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)

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)

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:

研究開発項目の概要

課題1~3の研究開発において必要不可欠な、冷却原子型量子コンピュータに特化したレーザー開発を行う。大規模量子ビット配列のための原子トラップレーザー光源の高出力化、超高速量子ゲートのための高安定なパルスレーザー光源の開発等を進める。

令和5年度は新規高安定・高強度小型集積レーザーの設計が完了した。

分子科学研究所においてはDistributed Face Cooling (DFC) 構造による原子トラップ用高出力小型レーザー設計が完了した。また、高速移送ノイズ抑制器のプロトタイプを開発し、原理検証実験に成功した。これらにより、量子制御の根幹となるレーザー光源・制御技術に目途付けができた。

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)

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、実務面での人的サポートを受けた。具体的には助教以上のレベルの研究経験者を、研究者として雇用し、研究開発に従事させた。また、3 名を知的財産管理要員として配するとともに2名の PM 支援員をムーンショット専属として雇用した。新たに雇用する場合、着任までの期間については、支援部局における一時的な支援も確約済み。また、少なくとも本プロジェクト完遂まで定年を超えての PM の雇用と上記のフルサポートを確約する。分子科学研究所長自ら 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積極的にサポートに努めることを確約済み。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分子科学研究所長が確約済み。

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)会議の各々を定期的実施し、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。

以上の進捗状況を、PD、アドバイザーへ報告し、そこでの助言・指導をチーム内にフィードバックし、以降の研究開発方法を検討した。

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が、12 月からさらに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 社が加わり、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、システムの統合化について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、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た。自然科学研究機構で得られた成果を中心に事業化展開を図るための事業化検討プラットフォームにおいて、MS大森プロジェクトの成果もその一つとして検討が行われている。

(3) 広報、アウトリーチ

アウトリーチに関して

青木 PM、NanoQT、大阪大の山本教授、高橋 PI、福原 PI、東大の素川准教授などの研究者を参集して Atoms in optical tweezers に関するワークショップを開催し、情報交換などを実施した。また、一般向けに実施した講演、教育等の例を次に示す。

東京ビッグサイトで開催された第3回量子コンピューティング EXPO(春)(2023年5月11日)において、大森グループの超高速量子コンピュータに関する特別講演を行い、日本の産業界における分子研のプレゼンス向上と研究力アピールに大きく貢献した。

NHK より量子をテーマにした取材を継続的に受け、この過程で大森を主役とした NHK テレビ番組(大森グループの超高速量子コンピュータの開発秘話・特集:2023年6月28日 おはよう東海「愛知発!量子コンピューター」/ 2023年6月20日 まるっと「Google 超え超高速コンピューター 岡崎発!量子コンピューター技術」)に出演するなど、一般社会に対する量子分野の周知や分子研コンピュータ及び研究力アピールに大きく貢献した。

あいちモノづくり EXPO(2023年10月5日)で招待講演(特別講演)を行い、東海地方の産業界における分子研のプレゼンス向上と研究力アピールに大きく貢献した。

熊本市の真和中学校・高等学校で「量子力学 100 年の謎と超高速量子コンピュータへの挑戦」に関する招待講演を行い、中高生世代の啓蒙と分子研の知名度向上に貢献した。

日本表面真空学会と日本真空工業会が主催する VACUUM2023 真空展「真空フォーラム・シンポジウム」(東京ビッグサイト, 2023年12月1日)において招待講演を行い、国内の真空関連業界における分子研のプレゼンス向上と研究力アピールに大きく貢献した。

豊田理研懇話会(2023年12月12日)において招待講演を行い、史上最多の354名の聴講者に対して「量子力学 100 年の謎と超高速量子コンピュータへの挑戦」に関する招待講演を行うことによって、トヨタグループをはじめとする産業界における分子研の知名度向上に大きく貢献した。

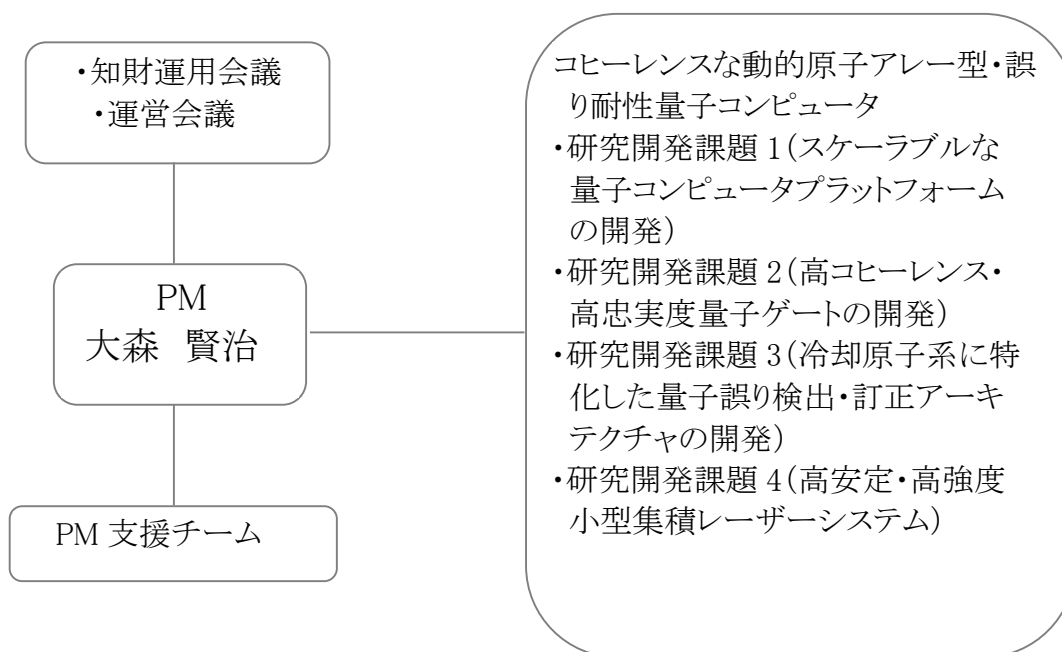
NATURE に「ORCHESTRATING A QUANTUM LEAP USING COLD ATOMS」の記事を掲載し、冷却原子型量子コンピュータの実現に向けた取組を紹介した。

なおムーンショットプロジェクトへの参画を機に、目標6「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」プロジェクト用 WEB ページを作成し、公開中。

(4) データマネジメントに関する取り組み

収集したデータは非公開とし、研究機関ごとにメインサーバーにデータを集約するとともにバックアップ用ハードディスク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



チーム構成

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

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）

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）

吉村地尋（株式会社日立製作所）

Thomas Noel (Infleqtion)

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

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）

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）

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

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)
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)
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

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)

【知財運用会議 構成機関と実施内容】

知財運用会議の構成は、大森 PM 及び各 PI (Inflection を除く)。知財運用会議の開催はなし。

【運営会議 実施内容】

令和 5 年度から新たに参加した平等 PI、吉村 PI を含めた全体 (運用) 会議を開催し、研究の進捗状況、課題の共有、協議等を実施した。Inflection については個別に会議を実施した。

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 | 3 | | | |
| 登録件数 | | | | |
| 合計(出願件数) | 3 | | | |

| 会議発表数 | | | |
|--------|----|----|----|
| | 国内 | 国際 | 総数 |
| 招待講演 | 16 | 13 | 29 |
| 口頭発表 | 17 | 10 | 27 |
| ポスター発表 | 13 | 30 | 43 |
| 合計 | 46 | 53 | 99 |

| 原著論文数(※proceedingsを含む) | | | |
|------------------------|----|----|----|
| | 国内 | 国際 | 総数 |
| 件数 | 1 | 5 | 6 |
| (うち、 査読有) | 1 | 5 | 6 |

| その他著作物数(総説、書籍など) | | | |
|------------------|----|----|----|
| | 国内 | 国際 | 総数 |
| 総説 | 1 | | 1 |
| 書籍 | 1 | 1 | 2 |
| その他 | | | |
| 合計 | 2 | 1 | 3 |

| 受賞件数 | | |
|------|----|----|
| 国内 | 国際 | 総数 |
| 5 | 0 | 5 |

| |
|-----------|
| プレスリリース件数 |
| 7 |

| |
|------|
| 報道件数 |
| 28 |

| |
|-------------------|
| ワークショップ等、アウトリーチ件数 |
| 17 |