



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

2022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



研究開発プロジェクト概要

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します。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します。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の実現を目指します。

https://www.jst.go.jp/moonshot/program/goal6/69_ohmori.html

課題推進者一覧

課題推進者	所属	役職
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 LESELEUC	自然科学研究機構 分子科学研究所	助教
富田 隆文	自然科学研究機構 分子科学研究所	特任助教
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 量子コンピュータ研究センター	チームリーダー

1. 当該年度における研究開発プロジェクトの実施概要

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開発のために、プロジェクト初年度である令和4年度には、装置が達成すべき要求性能・仕様について検討し、それに基づき実験装置・周辺機器の設計及び基礎的な技術開発を進める。

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」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)の設計を行う。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る。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行う。また、状態準備・検出の基礎的な技術開発を行う。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始める。研究開発課題4「高安定・高強度小型レーザーシステム」では、満た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する。

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: 分子研において開発するルビジウム(Rb)原子を用いた QPU システムについて、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。まず、安定かつ運用性の高い QPU のために、大規模原子アレー用小型光学系を各モジュールからなるパッケージ化されたシステムとして設計・開発することとし、モジュールの構成を同定した。レーザー冷却および原子トラップモジュールについては、現在運用している光ピンセット冷却原子系ハードウェアでのテストに着手した。周辺光学系を含む真空チャンバーモジュールについては、必要な要件を策定し具体的な光学系等の検討に着手した。ハードウェアを制御するための電気制御システムについては、その仕様を策定しプロトタイプ構築に必要な機器の発注を完了した。

また、相補的な開発として京都大学で開発を進めるイッテルビウム(Yb)原子を用いた QPU についても、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、基礎的な実証実験にも成功した。同様に相補的な開発として理研で開発を進めるストロンチウム(Sr)原子を用いた QPU についても、真空装置および光源の仕様を確定し設計を行った。

上記の取り組みにより、マイルストーンを達成することに成功した。

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)

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: 本年度は、量子ゲート操作後に状態を適切に測定するため、検出忠実度の向上に取り組んだ。Rb系およびYb系双方において、イメージン

グにおけるレーザー光パラメータ(強度・周波数)およびカメラ光学系を最適化し、原子の検出忠実度 99%以上を達成した。さらに検出忠実度を向上させるため、異なるイメージングカメラの比較実験を行い、低ノイズかつ高速読み出しが可能なカメラを同定した。来年度以降、新規カメラによるさらなる忠実度向上を行う予定である。以上の成果を得たことから、マイルストーンは達成されたといえる。

このほかにも、超高速量子ゲート操作技術の開発において、連続波レーザーからサブナノ秒のレーザーパルスを切り出しルビジウムの第一電子励起状態へと高速かつ状態選択的に励起する手法を開発した。またゲート操作忠実度向上を目的として、原子間の相互作用強度の高精度化に寄与する原子位置不確定性の低減を行った。運動状態のスキューズド状態を配列全体にわたって均質に実現することで、原子の空間波動関数を圧搾し位置不確定性を低減することに成功した。

連続波レーザーによるリュードベリ・ブロッケード型量子ゲート操作開発では、Rb 原子のリュードベリ励起レーザーの仕様を確定した。現在、第一バージョンとなる光学系の開発を進めている。

以上のように、本課題において想定を超える成果を得た。

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: Rb 系において、超微細構造を用いたスピン量子ビットの非破壊測定について、シェルビング法の実現可能性について検討した。具体的な実現手法およびパラメータ領域を同定し、マイクロ波による実装の準備を始めた。また、スピン選択的な非破壊イメージング手法を同定し、統合型レーザーシステムによる実装に着手した。Yb 系においても、準安定電子励起状態を用いたシェルビング法に必要なレーザー光の各種パラメータ領域を明らかにし、励起に必要な超高安定連続波レーザー光源の開発に成功した。

上記の取り組みにより、マイルストーンを達成することに成功した。

課題推進者:

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4: 高安定・高強度小型レーザーシステム

当該年度実施内容: リュードベリ・ブロッケード型量子ゲート操作について、高忠実度操作を実現するために必要な位相ノイズの時間領域およびノイズレベルを同定した。これにもとづき、100 ナノ秒から 1 マイクロ秒の時間スケールで位相ノイズ変動を測定し、100 分の 1 以下に補正できる位相ノイズキャンセルシステムのプロトタイプを完成させた。

また、超高速量子ゲート操作について、忠実度低減の原因となっているパルス強度変動の要因が 780nm のポンプから 1248nm のパルスを生成する光パラメトリック増幅器 (OPA) にあることを突き止め、1248nm の連続波シードレーザーと 2 段増幅器からなるシード注入型 OPA を設計した。また、初段アンプを構築し、シード注入時の性能を明らかにした。その結果、パルス間の揺らぎを十分に低減し、パルス帯域幅を狭めることに成功した。

上記の取り組みにより、マイルストーンを達成することに成功した。

課題推進者:

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・自然科学研究機構に所属する分子科学研究所から、本プロジェクト実施に当たり、実務面で強力な支援を受けた。

人的サポートでは、民間研究所で総合マネジメントの経験を有する人材を研究所で雇用し、サブプロジェクトマネージャ (SPM) として、本プロジェクト専任としている。また、プロジェクトでも特任専門員、事務支援員を雇用。PM を支援する強力なヘッドクォーター体制を構築した。更に R5 年度には、知財管理の強化を目的に新たに 2 名の特任専門員の雇用も内定している。

R4 年度はプロジェクトの立ち上げの時期に相当したため、PM と各課題推進者間個々の計画議論、調整を行い、運営会議等の実施には至らなかった。

研究開発プロジェクトの展開

我々が R4 年度に達成した世界最速の制御量子ゲート (量子コンピューティングに不可欠な条件つき 2 量子ビットゲート) の成果を受けて、大森 PM が、米国を代表する量子技術開発コンソーシアムである Chicago Quantum Exchange (CQE)、シカゴ大学、マサチューセッツ工科大学 (MIT)、ハーバード大学などの米国の量子技術開発の最重要拠点に講演に招かれ、その際に、先方のアカデミアにおける量子コンピュータ開発の最新状況や今後の展望、並びに現地のスタートアップ企業の組織構成、人材、活動状況などを詳細に視察する機会を得た。同様に、国内の量子関連企業や政府系金融機関等とも、今後の量子コンピュータ開発や事業化に関して活発に交流を進めることができた。こういった活動を通じて、今後の研究開発プロジェクトの展開に指針を与える様々な情報を収集することができた。これによって、本プロジェクト内で今後補強すべき技術分野を検討し、その部分の拡充に向けて準備を開始した。具体的には冷却原子型量子コンピュータにおける誤り耐性のための理論、アルゴリズム、アーキテクチャ分野の人材補強について、研究協力者である藤井啓祐教授 (大阪大学) と協議を開始した。

(2) 研究成果の展開

次の項目の知財管理方針を策定した。(1) 現時点で保有している知財の管理 (2) 共同研究で創出される知財の管理 (3) 意図せぬ技術・ノウハウの流出防止策。

更に R5 年度より 4 名からなる知財管理チームを結成し、うち 1 名は独立行政法人工業所有権情報・研修館 (INPIT) から専門家派遣を受けることが決定している。ここでは知財戦略の策定、特許マップの作成、現有技術の特許性評価とオープン、クローズ戦略に即した特

許出願の判断、等を行ってゆく計画である。

(3) 広報、アウトリーチ

2023年1月21日、熊本大学教育学部講堂に於いて、熊本市教育委員会が主催した「Kumamoto Education Week 2023 -みんなの夢が未来を創る-」のオープニングトークにて「ロックミュージシャンだった物理学者」と題して、小中高生を対象に大森 PM がトークショーを実施した。対面:約 100 人(コロナウィルスによる活動自粛下のため人数制限)、オンライン:約 550 人(配信開始後 24 時間);約 1000 人(配信開始後 2 週間:2/5 時点)が参加した。

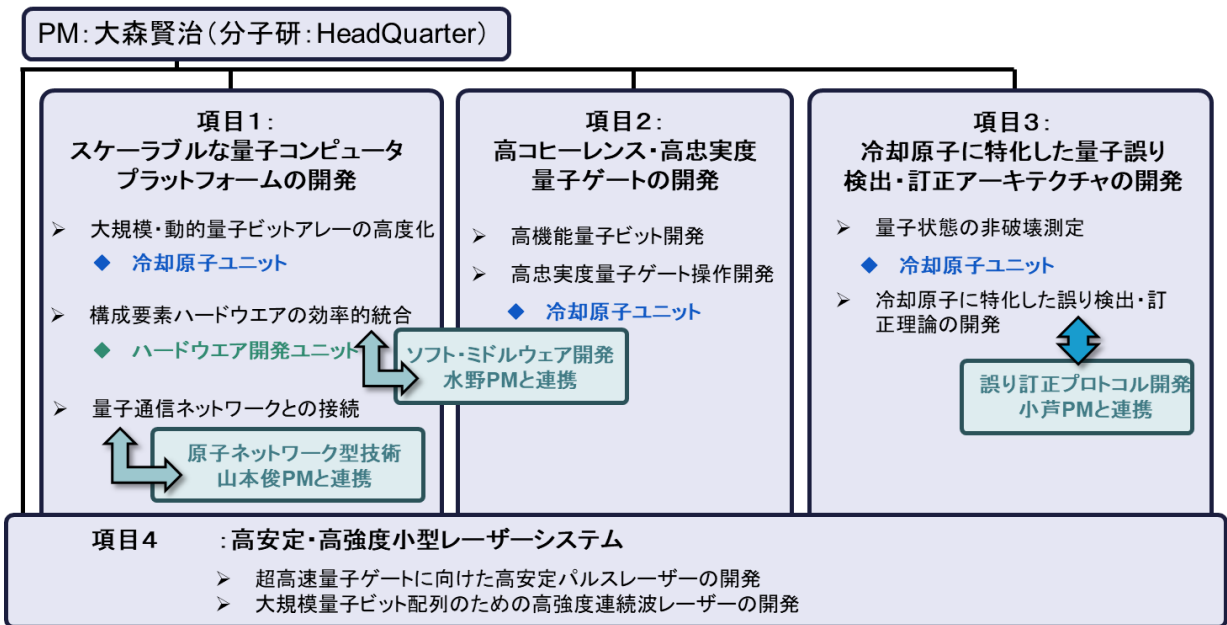
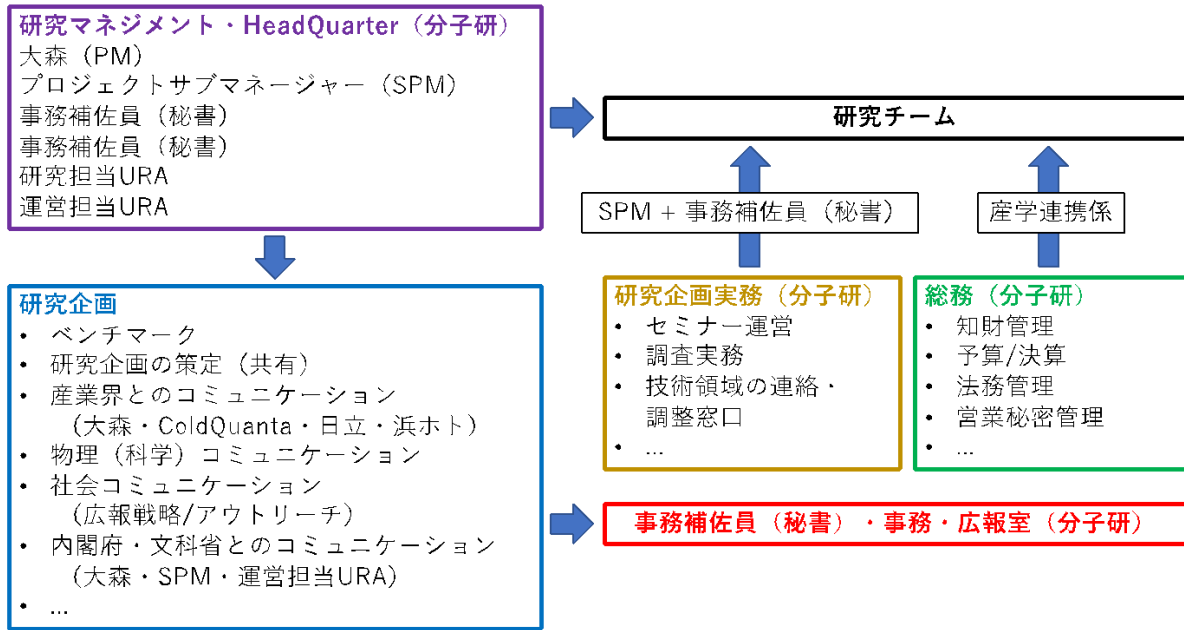
また、2023年3月14日、岡崎カンファレンスセンターに於いて、小・中・高・大学生を対象にした文部科学省主催のアウトリーチイベント「GIGA スクール特別講座～量子力学 100 年の謎と量子コンピュータへの挑戦!～」が開催され、量子についての講義を大森 PM、実験デモを富田特任助教が実施した。対面:約 200 人、オンライン:約 1,200 人が参加した。

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 ページを制作中(6 月末公開予定)。並行して当プロジェクトのアウトリーチ用ツールとしてのロゴ並びに WEB ページのデザインを踏襲したポスターやスライドを制作した。

(4) データマネジメントに関する取り組み

各研究機関ごとにメインサーバーにデータを集約し、かつ、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



研究チーム構成

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

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)

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)

令和 5 年度より吉村地尋 (株式会社日立製作所) 参画予定

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)

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 4 : 高安定・高強度小型レーザーシステム

課題推進者 :

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

令和 5 年度より平等拓範 (理化学研究所 / 自然科学研究機構・分子科学研究所)

参画予定

知財運用会議 構成機関と実施内容

研究開始が令和 4 年 11 月に開始したばかりであり、知財運用会議に諮るまでに至らず未開催。令和 5 年度に知財管理の人材を確保したため、積極的運営を行う。

運営会議 実施内容

知財運用会議と同様、運営会議の開催には至らなかった。令和 5 年度から参加する課題推進者を加え、運営会議を開催する。

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	10	8	18
口頭発表	7	1	8
ポスター発表		7	7
合計	17	16	33

原著論文数(※proceedingsを含む)			
	国内	国際	総数
件数	0	4	4
(うち、査読有)	0	4	4

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	1	1

プレスリリース件数
0

報道件数
24

ワークショップ等、アウトリーチ件数
3