

ムーンショット型研究開発事業

令和7年度プロジェクト外部評価（事後評価）について（目標6）

(1) 目的

プロジェクトの研究開発の実施状況、研究開発成果等を明らかにし、今後の成果の展開及び事業運営の改善に資することを目的とする。

(2) 実施時期

事後評価は、研究終了前の適切な時期に実施する。

(3) 評価項目及び基準

- ムーンショット目標達成等に向けたプロジェクトの目標や内容の妥当性
- プロジェクトの目標に向けた進捗状況(特に国内外とも比較)
- プロジェクトの目標に向けた今後の見通し
- 研究開発体制の構築状況
- PMのプロジェクトマネジメントの状況(機動性、柔軟性等を含む。)
- 研究データの保存、共有及び公開の状況
- 産業界との連携及び橋渡しの状況(民間資金の獲得状況(マッチング)及びスピリアウトを含む。)
- 国際連携による効果的かつ効率的な推進
- 大胆な発想に基づく挑戦的かつ革新的な取組
- 研究資金の効果的・効率的な活用
- 国民との科学・技術対話に関する取組
- その他(1)に定める目的を達成するために必要なこと。

なお、上記に関する詳細については、評価者が決定する。

(4) 評価者

評価者はPDとし、評価にあたってはアドバイザー等の協力を得て行う。

(5) 評価の手続き

プロジェクトごとに、被評価者からの報告及び被評価者との意見交換等により評価を行う。この場合において、必要に応じて研究開発実施場所での調査等又は外部有識者の意見の聴取を行うことができる。評価結果はガバニング委員会に報告する。

※評価対象プロジェクト、評価会実施日、評価者一覧は別紙のとおり

(別紙)

■評価対象プロジェクト

- 小芦プロジェクト
- 小坂プロジェクト
- 高橋プロジェクト
- 古澤プロジェクト
- 水野プロジェクト
- 山本（俊）プロジェクト
- 山本（剛）プロジェクト
- 青木プロジェクト
- 大森プロジェクト
- 小林プロジェクト
- 樽茶プロジェクト
- 永山プロジェクト

■評価会実施日

令和7年7月8日、7月9日、7月10日、7月11日、7月14日、7月15日、8月12日

■評価者一覧

氏名	所属・役職等
北川 勝浩	大阪大学 量子情報・量子生命研究センター センター長
上妻 幹旺	東京科学大学 総合研究院 量子航法研究センター センター長・教授
中村 泰信	東京大学 大学院工学系研究科 教授
山下 茂	立命館大学 情報理工学部 教授
石内 秀美	株式会社先端ナノプロセス基盤開発センター (EIDEC) 元 代表取締役社長
井元 信之	東京大学 特命教授室 特命教授
宇都宮 聖子	OpenAI Japan 合同会社 Go To Market Principal Solutions Engineer
小澤 正直	名古屋大学 大学院情報学研究科 名誉教授
川畑 史郎	法政大学 情報科学部 教授
佐々木 雅英	情報通信研究機構 オープンイノベーション推進本部 主管研究員
茂本 勇	ダイキン工業株式会社 テクノロジー・イノベーションセンター 技師長

※所属・役職等は評価会時点のもの

ムーンショット型研究開発事業
研究開発プロジェクト 外部評価（事後評価）結果

1. プログラム

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」

プログラムディレクター 北川 勝浩

2. 研究開発プロジェクト名

量子計算網構築のための量子インターフェース開発

3. プロジェクトマネージャー（機関名・役職は評価時点）

小坂 英男（横浜国立大学 量子情報研究センター センター長／大学院工学研究院・先端科学高等研究院 教授）

4. 研究開発プロジェクト実施期間

令和 2 年 12 月～令和 7 年 11 月

5. 評価結果

評点： A（計画の策定・達成ともに概ね適切である。）

総評：

マイクロ波光子を通信波長帯光子に量子媒体変換するシステムの各部分、つまり超伝導導波路によるマイクロ波光子の入力部、マイクロ波光子から音波量子（フォノン）への媒体変換部（光波長への圧縮）、NV 中心を含んだフォノンニック/フォトニック結晶を用いた音波量子から光子への媒体変換部、光導波による光子の出力部の各々を作製して、各部分で良好な変換忠実度を達成したことは高く評価したい。一方で、全体の量子接続の変換効率はまだ 10^{-10} 程度に留まっており、桁の大幅な改善が必要である。そのためには、3つの周波数、すなわちフォノンニック結晶共振器の音波共振周波数、フォトニック結晶共振器の光共振周波数、NV 中心の光遷移周波数の精密な調整が不可欠となる。作製試料の設計からのずれについては、加工プロセスと材料選択における試行錯誤によって解決策を探っている。5年目のマイルストーンに相当する、プロジェクトが設定した技術目標は全て達成されたが、量子接続を実現するという 5年目のマイルストーンを原理検証する試みは途上にある。難度の高い技術目標とはいえ、3つの周波数の調整というトランスデューサーとしての不可欠な開発要素についても、技術目標として明示しておくべきではなかったかと考える。

以上

ムーンショット型研究開発事業
研究開発プロジェクト 外部評価（事後評価）結果

1. プログラム

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」

プログラムディレクター 北川 勝浩

2. 研究開発プロジェクト名

誤り耐性型量子コンピュータにおける理論・ソフトウェアの研究開発

3. プロジェクトマネージャー（機関名・役職は評価時点）

小芦 雅斗（東京大学 大学院工学系研究科 教授）

4. 研究開発プロジェクト実施期間

令和 2 年 12 月～令和 7 年 11 月

5. 評価結果

評点：S（適切に策定された計画を達成しており、想定以上の成果が得られている。）

総評：

令和 5 年度に構築したクロスレイヤー協調設計の統合的なミニマルモデルを、超伝導方式に対して適用することによってプロジェクト間連携が進み、SFQ（単一磁束量子）回路の低消費電力と制約に基づいた最適設計やロードストア型の量子計算機システムの提案などの具体的な成果が得られるに至った。またイオントラップ方式や中性原子方式に対しても指針を提供している。このように、ポートフォリオにおいて横連携の役割を果たしていることを高く評価する。

量子誤り訂正符号や誤り耐性の理論研究では、誤り耐性量子計算実現の課題である、誤り耐性を持つ非クリフォード演算に対するアプローチとして、ボトルネックである魔法状態の生成コストを大幅に削減するための画期的な魔法状態蒸留を提案している。本提案は世界的にも注目度が高い。その他、誤り耐性量子計算を効率化するために、小さな符号の接続による新たな誤り耐性計算手法等を提案している。

クロスレイヤー協調設計モデルで横串プロジェクトとしての役割を顕著に果たしながら、誤り耐性型汎用量子コンピュータに向けた量子誤り訂正・誤り耐性理論において世界トップレベルの成果を輩出していることを非常に高く評価する。

以上

ムーンショット型研究開発事業
研究開発プロジェクト 外部評価（事後評価）結果

1. プログラム

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」

プログラムディレクター 北川 勝浩

2. 研究開発プロジェクト名

イオントラップによる光接続型誤り耐性量子コンピュータ

3. プロジェクトマネージャー（機関名・役職は評価時点）

高橋 優樹（沖縄科学技術大学院大学 量子情報物理実験ユニット 准教授）

4. 研究開発プロジェクト実施期間

令和 2 年 12 月～令和 7 年 11 月

5. 評価結果

評点： A（計画の策定・達成ともに概ね適切である。）

総評：

中心的な課題であるイオントラップの光接続について新規な着想を得ている。また本プロジェクトの主導によって国内のイオントラップ研究のエコシステムが整ってきた点の評価する。一方、各グループが研究対象とするイオンの種類が統一されておらず、トラップの形状も 2 次元と 3 次元に分かれているため、それぞれのグループで開発された個々の要素技術がボトムアップ的にインテグレーションする姿が見えない。また、5 年目のマイルストーンで掲げた「光接続型誤り耐性量子コンピュータのためのイオントラップモジュールの開発」については、まだ各要素技術の評価や装置開発の段階に留まっている。さらに、光接続が実現したとしても、それによって量子ビット数がスケラブルに増やせる具体的なスキームは明らかでない。早期にプロトタイプとなる実機を実現し、2030 年の次世代実機の姿を描いて要素技術の絞り込みや PJ の再構成を議論することを期待する。

以上

ムーンショット型研究開発事業
研究開発プロジェクト 外部評価（事後評価）結果

1. プログラム

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」

プログラムディレクター 北川 勝浩

2. 研究開発プロジェクト名

誤り耐性型大規模汎用量子コンピュータの研究開発

3. プロジェクトマネージャー（機関名・役職は評価時点）

古澤 明（東京大学 大学院工学系研究科 教授／理化学研究所 量子コンピュータ研究センター 副センター長）

4. 研究開発プロジェクト実施期間

令和 2 年 12 月～令和 7 年 11 月

5. 評価結果

評点： S（適切に策定された計画を達成しており、想定以上の成果が得られている。）

総評：

光量子状態として高レベルのスケーラブル状態を発生させ、量子効率 99%の超伝導光子数識別器を開発し、強い量子性を有する GKP(Gottesman-Kitaev-Preskill)状態の低近似発生に世界で初めて成功した。また、量子光源に超広帯域スケーラブル光を利用し、自己遅延光ループと線形光学系による隣接パルス間での量子もつれ形成によって、時間領域における量子もつれの規模を拡大した上で、測定誘起型の演算処理に基づく光量子コンピュータ実機を世界で初めて組み上げ、クラウド上で公開した。さらに、その技術に基づいたスタートアップを起業した。今後、連続量光量子における誤り耐性を強化するために、スケーラブル光源、光子数識別器、ゲートテレポーテーションの特性向上によって、GKP 状態や非クリフォードゲートの高品質化を進めることを期待するが、GKP 状態だけでは誤り耐性達成に不十分と考えられるので、必要な量子誤り訂正を含めて、誤り耐性型汎用量子コンピュータ実現へのロードマップと研究開発計画を策定することを求める。

以上

ムーンショット型研究開発事業
研究開発プロジェクト 外部評価（事後評価）結果

1. プログラム

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」

プログラムディレクター 北川 勝浩

2. 研究開発プロジェクト名

大規模集積シリコン量子コンピュータの研究開発

3. プロジェクトマネージャー（機関名・役職は評価時点）

水野 弘之（株式会社日立製作所 研究開発グループ 技師長 兼 日立京大 ラボ長）

4. 研究開発プロジェクト実施期間

令和 2 年 12 月～令和 7 年 11 月

5. 評価結果

評点： A（計画の策定・達成ともに概ね適切である。）

総評：

量子ドットアレイについては、imec で試作された 4×4 に配列した 2 次元量子ドットアレイを用いて、縦と横の両方で 2 量子ビット動作を確認した。また、1 量子ビットゲートの高精度操作手法を開発し、コヒーレンス時間 211u 秒、ゲート操作忠実度 99.1%を確認したことを評価する。専用制御回路については低温（4 K）で動作する Si 量子ビット高精度制御および高感度読出しの専用機能チップを開発した。インターフェースについては基板実装方式と低温（4 K）での複数チップ実装方式を開発した。この他、量子誤り訂正のために電子シャトリングの導入を想定した上で、Si 量子ビット配置、配線レイアウト、符号方式の組合せに関してスケール拡張可能な幾つかの推奨アーキテクチャを提唱している。これらは Si 量子コンピュータの統合システム開発に先鞭をつける成果といえる。

当初計画よりも量子ドットアレイの規模は大幅に縮小したが、2次元アレイの最小限の PoC に漕ぎ着けたことを評価する。

以上

ムーンショット型研究開発事業
研究開発プロジェクト 外部評価（事後評価）結果

1. プログラム

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」

プログラムディレクター 北川 勝浩

2. 研究開発プロジェクト名

ネットワーク型量子コンピュータによる量子サイバースペース

3. プロジェクトマネージャー（機関名・役職は評価時点）

山本 俊（大阪大学 大学院基礎工学研究科 教授 /
量子情報・量子生命研究センター 副センター長）

4. 研究開発プロジェクト実施期間

令和 2 年 12 月～令和 7 年 11 月

5. 評価結果

評点： A（計画の策定・達成ともに概ね適切である。）

総評：

本プロジェクトでは 2 つの中性原子 2 次元アレイを効率的に一括して量子結合するために多入力多出力の干渉計と多チャンネルの超伝導光子検出システムを開発した。11 月までに、本システムを用いて 2 つの中性原子の間の量子結合を確認できる予定である。量子インターフェースに終始せず、中性原子量子ビット間の接続に着手していることを高く評価する。

さらに、多チャンネル超伝導光子検出器については、イオントラップ方式プロジェクトでも利用されるなど横串としての役割と、民間企業との協力により装置の国産化を実現したことを高く評価したい。

その他、マイクロ波量子と光子の間での量子状態の変換についても、Ge 量子ビットを含んだ半導体微細構造素子によるアプローチと、ダイヤモンド窒素空乏中心を含んだ超伝導体と光の複合共振器によるアプローチの二本立てで実験を進めてきた。それぞれ素子製作や実験系の構築を終えて、基本的な特性の評価を既に始めている。

以上

ムーンショット型研究開発事業
研究開発プロジェクト 外部評価（事後評価）結果

1. プログラム

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」

プログラムディレクター 北川 勝浩

2. 研究開発プロジェクト名

超伝導量子回路の集積化技術の開発

3. プロジェクトマネージャー（機関名・役職は評価時点）

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 主席研究員）

4. 研究開発プロジェクト実施期間

令和 2 年 12 月～令和 7 年 11 月

5. 評価結果

評点： A（計画の策定・達成ともに概ね適切である。）

総評：素子レベルの低電力化では、量子ビットの入出力信号を低温（4K）環境で処理するための技術開発に取り組んできた。特に SFQ 回路を用いた制御信号 Demultiplexer 回路の 10mK 動作を実証済である。ナノブリッジ FPGA とクライオ CMOS を混載したクライオシステムオンチップ（SOC）回路や超伝導 SIS ミキサを用いた極低雑音マイクロ波増幅器についても、11 月には動作実証を終える見込みである。全体システムの検討では、室温から希釈冷凍機温度までを幾つかの温度ステージに分割し、ステージを跨ぐ信号のフローを極力不要とするように各種機能を分散配置するアーキテクチャを明確にした。縦方向の実装の自由度を拡げるために、量子ビットと周辺エレクトロニクスの三次元積層によるハイブリッドチップ化にも取り組んできた。量子ビット付きの三層チップ構造を製作し実証実験を進めている。

これらを含む多角的な取り組みを評価する。民間企業との協力によって、量子コンピュータ用の希釈冷凍機を国産化したことは、顕著な成果であり、産業的なインパクトも大きく、高く評価する。さらに、この希釈冷凍機を使った純国産量子コンピュータ実機を作製してクラウド公開により社会実装し、大阪・関西万博で若年層を含む数万人に利用体験を提供する大規模なアウトリーチを実施したことを高く評価する。

PM の優れたマネジメントによって、テーマ間の連携が進み、米国追従ではない独自ビジョンが共有されつつあることも評価する。

以上

ムーンショット型研究開発事業
研究開発プロジェクト 外部評価（事後評価）結果

1. プログラム

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」

プログラムディレクター 北川 勝浩

2. 研究開発プロジェクト名

ナノファイバー共振器 QED による大規模量子ハードウェア

3. プロジェクトマネージャー（機関名・役職は評価時点）

青木 隆朗（早稲田大学 理工学術院 教授）

4. 研究開発プロジェクト実施期間

令和 4 年 10 月～令和 7 年 11 月

5. 評価結果

評点： A（計画の策定・達成ともに概ね適切である。）

総評：

想定外のナノファイバー共振器の劣化への対応で、主要な研究に進捗の遅れが見られるものの、スタートアップと量子誤り訂正理論専門家を含む研究開発体制を整え、PM のリーダーシップの下、レーザー周波数の安定化、ナノファイバー共振器の改良、小規模な量子演算の PoC、多数の原子を 1 次元に配列する PoC のマイルストーン達成に向けて進捗していることを評価する。

本プロジェクトの一員でもある京大の Yb 系では、複数同位体による複雑な原子配列を実現した。これにより、誤り耐性型中性原子量子コンピュータを実現するにあたって、Yb 原子の多様な内部状態や核スピン状態を利用することが可能になる。この点も評価する。

以上

ムーンショット型研究開発事業
研究開発プロジェクト 外部評価（事後評価）結果

1. プログラム

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」

プログラムディレクター 北川 勝浩

2. 研究開発プロジェクト名

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

3. プロジェクトマネージャー（機関名・役職は評価時点）

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）

4. 研究開発プロジェクト実施期間

令和 4 年 10 月～令和 7 年 11 月

5. 評価結果

評点： A（計画の策定・達成ともに概ね適切である。）

総評：

2025 年のマイルストーンはすでに達成、あるいは、12 月までに達成の見込みである。PM 独自のアイデアによる超短パルス光励起は、原子間の強い双極子相互作用で高速な 2 量子ビット演算の可能性を示唆する。しかしながら、原子間の距離の不確定性が演算精度に強く影響する為、高速な 2 量子ビット演算を高い精度で繰り返せることの実証が求められている。2025 年のマイルストーンとする状態準備・検出忠実度はゲート演算の忠実度とは異なる。世界的には、QuEra 社が原子を自在に再配置可能な原子アレイを用いて従来型（ブロッケード方式）2 量子ビット演算の高いゲート忠実度を既の実証している。超高速型、従来型のいずれの方式であれ、今後、再配置可能な原子アレイで高忠実度の 2 量子ビット演算を実現することが、本 PJ の喫緊の課題である。

京大の Yb 原子系では、原子種の特性を活かした技術開発が進み、原子損失のない状態の読み出しに必要な、スピン選択的コヒーレント準安定状態励起など高いレベルの成果が得られていることを評価する。

2030 年に世界に伍すること、並びに、強力な海外スタートアップ企業の勃興を考慮すると、原子種の選択とリソースの集中、各グループの役割を明確化した研究戦略の再構成が強く望まれる。

以上

ムーンショット型研究開発事業
研究開発プロジェクト 外部評価（事後評価）結果

1. プログラム

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」

プログラムディレクター 北川 勝浩

2. 研究開発プロジェクト名

スケーラブルな高集積量子誤り訂正システムの開発

3. プロジェクトマネージャー（機関名・役職は評価時点）

小林 和淑（京都工芸繊維大学 電気電子工学系 教授）

4. 研究開発プロジェクト実施期間

令和 4 年 10 月～令和 7 年 11 月

5. 評価結果

評点： A

（計画の策定・達成ともに概ね適切である。）

総評：

発足からの 3 年間で、誤り訂正用高速 FPGA/SoC の検討、CryoCMOS 量子ビット制御回路用の低温（4K）動作可能な DAC/ADC の検討、物理現象分析に基づいた CryoCMOS 回路中の低電力信号の高品質化に関する検討、低電力・低雑音性に著しく優れた位相同期ループ（PLL）の開発と当該 PLL を用いたフロントエンドアナログ RF 部の統合化の検討など、全ての項目で着実に進捗していることを評価する。なお、量子ビット制御回路の仕様の簡素化による電力低減については、量子ゲート忠実度とトレードオフがあるため、量子コンピュータシステムの各プロジェクトとの議論を深めて慎重に進めて欲しい。

超伝導方式のみならず中性原子方式にも検討を広げていることも評価したいが、超伝導はじめ量子コンピュータシステムの各プロジェクトとの連携をより密接に行い、実際に量子誤り訂正に使えるシステムにする必要がある。

以上

ムーンショット型研究開発事業
研究開発プロジェクト 外部評価（事後評価）結果

1. プログラム

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」

プログラムディレクター 北川 勝浩

2. 研究開発プロジェクト名

拡張性のあるシリコン量子コンピュータ技術の開発

3. プロジェクトマネージャー（機関名・役職は評価時点）

樽茶 清悟（理化学研究所 創発物性科学研究センター グループディレクター／量子コンピュータ研究センター チームディレクター）

4. 研究開発プロジェクト実施期間

令和 4 年 10 月～令和 7 年 11 月

5. 評価結果

評点： A（計画の策定・達成ともに概ね適切である。）

総評：

これまでに、1次元に配列され同時制御可能な5個の量子ビットの全てについて1量子ビットに対する忠実度99.99%のゲート操作を達成した。また、バレー分離の影響を回避することにより2量子ビットに対する忠実度99.5%のCNOTゲートの操作を達成した。高品質な1次元量子ビット配列の作製技術と制御技術が確立されたことは世界的な成果である。

現在は12個の量子ビットからなる1次元量子ビット配列を試作して検証を開始している。拡張性の鍵となる1次元量子ビット配列間の伝送チャンネルについても、忠実度を保持したまま量子ビットを高速に伝送するために、電子伝送方式の最適な設計（コンベヤー方式）と素子材料レベルでのチャンネルの高品質化の両面から検討を進めてきた。今後、伝送チャンネルについても早期に要素技術を確認することを強く期待する。

シリコン量子ビットの忠実度において世界トップレベルにあることを高く評価するが、シリコン量子ビットそのものが未だ超伝導のように数十量子ビット以上で自在に量子回路が組める状態に至っていないので、世界に先駆けてそのレベルに到達することを期待する。

以上

ムーンショット型研究開発事業
研究開発プロジェクト 外部評価（事後評価）結果

1. プログラム

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」

プログラムディレクター 北川 勝浩

2. 研究開発プロジェクト名

スケーラブルで強靱な統合的量子通信システム

3. プロジェクトマネージャー（機関名・役職は評価時点）

永山 翔太（慶應義塾大学 大学院 メディアデザイン研究科 准教授）

4. 研究開発プロジェクト実施期間

令和 4 年 10 月～令和 7 年 11 月

5. 評価結果

評点： B（計画の策定又はその達成状況が一部不十分である。）

総評：

本プロジェクトは、少数ノード（量子ビット）と量子リンクを組み合わせた小規模なテストベッドシステムの構築と量子リンク確立機構の専用装置化を目標として掲げていた。しかし、やや過大な計画にリソースが分散され、必ずしもこの目標に最適な体制ではなかったことは否めない。通信対応型量子コンピュータのエミュレーションとしての量子もつれ光子対の利用や 2 光子結合測定を用いた従来型の量子光学実験の範囲ではシステム構築の進捗と一定の成果が見られたが、作り込みで合意された目標として掲げていた物理量子メモリをノードとするテストベッドシステムの構築までには至らなかった。理論的には多くの優れた成果を挙げており、特に、ノードを階層的にクラスター化するよりも、各々が小規模な全結合クラスターである複数の基本ブロックの間にさらに全結合型の量子リンクを導入する方が、高速制御性、拡張性、堅牢性に優れることを発見したことは興味深く、国際的にも高く評価された。

以上