

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」**

戦略推進会議

令和8年3月5日

プログラムディレクター（PD）

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）

目次

1. JST5年目外部評価結果
 2. CSTI5年目評価の結果と新たなターゲット
 3. プログラム後半5年の推進方針
 4. CSTI5年目評価付帯事項と対応方針
- 参考（概要および研究開発プログラムの状況）

目次

1. JST5年目外部評価結果

2. CSTI5年目評価の結果と新たなターゲット

3. プログラム後半5年の推進方針

4. CSTI5年目評価付帯事項と対応方針

参考（概要および研究開発プログラムの状況）

1.1 外部評価委員一覧

* 運用評価指針に従い、以下の構成メンバーにより、プログラムおよびプロジェクト評価を実施

●プログラム評価（総合評価）

藤野 陽三	城西大学 学長
石塚 博昭	三菱ケミカル株式会社 シニアエグゼクティブコンサルタント
江村 克己	福島国際研究教育機構（F-REI） 理事
榊 裕之	奈良国立大学機構 理事長
寒川 哲臣	NTT株式会社 先端技術総合研究所 基礎・先端研究プリンシパル
西尾 章治郎	国際高等研究所 所長
濱口 道成	科学技術振興機構 参与
深見 希代子	東京薬科大学 生命医科学科 名誉教授／客員教授

●プログラム評価(主に技術専門的観点)

細谷 暁夫	東京工業大学 名誉教授
今井 浩	明治学院大学 教授
Artur Ekert	Professor, University of Oxford
Isaac Chuang	Professor of Physics, MIT
Michelle Simmons	Professor, University of New South Wales

●プロジェクト評価

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
香取 秀俊	東京大学 大学院工学系研究科物理工学専攻 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
佐藤 三久	順天堂大学 健康データサイエンス学部 特任教授
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

1.2 外部評価結果（1/4）

総合評価：マイルストーン（目標値）の達成あるいは達成への貢献が期待通り見込まれ、成果が得られている。

総合コメント

MS目標達成等に向けたポートフォリオの妥当性（評価項目①）

- 本プログラムでは、「量子誤り訂正に必要な規模まで量子ビット数を増やせる技術の開発」、並びに、「各ハードウェアに適した量子誤り訂正方式の開発」を目標とする研究開発が進められ、世界トップクラスの研究成果を創出し、プログラム全体として順調に進捗している。
- 現状、実機での誤り訂正実験は未達であり、この点では海外の競合者に先行を許しているが、限られたリソースの下で、企業の参画促進や他施策との連携などにより、研究推進、社会実装、人材育成、アウトリーチを効果的に進めている。
- 後半5年に向けて研究体制を再構築している。誤り耐性理論や共通基盤技術の担当が各量子コンピュータシステム開発担当と連携するポートフォリオの採用により、誤り耐性型汎用量子コンピュータ（FTQC）実機の開発が加速することを期待する。また、FTQCの有用性を明らかにするアプリケーション開発プロジェクトの新規導入により、メーカー側やユーザー側との連携が期待される。
- 2030年以降に社会実装を担う人材の不足が懸念されているが、本プログラムの主なプロジェクトでは、プロジェクト間連携のマネジメントを経験させることで、将来のリーダーが育つことを期待したい。

1.3 外部評価結果 (2/4)

1. プログラムの目標に向けた研究開発進捗状況 (評価項目②)

1-1. 大胆な発想に基づく挑戦的かつ革新的な取組み (評価項目⑦)

- 最初から、NISQ(Noisy Intermediate Scale Quantum Computer)ではなくFTQCを目指すことを明確にした。この方針は、世界的な動向を先取りしていただだけでなく、スケーラブルで信頼性の高い量子コンピュータを構築するという長期的なビジョンにも整合している。
- 各ハードウェア方式 (縦串) のシステム化計画とロードマップ、および、方式横断 (横串) 的な共通目標の設定とロードマップの明確化を期待する。

1-2. プログラムの目標に向けた今後の見通し (評価項目③)

- FTQCの研究開発が確実に進捗し、国際的な競争力を獲得している。
- 光量子では、日本の国際的な強みと独自性が顕著に発揮されている。また、理論研究の質の高さは世界トップクラスで、新規の量子誤り訂正手法の提案において世界をリードしている。今後も、これらの研究において、これまでに培われた国際的な強みを発揮し続けることが期待できる。
- 本プログラムの成功は、基礎研究から技術統合への円滑な移行、並びに、プロジェクト並列体制からプロジェクト間連携体制への移行にかかっている。

1-3. その他

- 量子計算の分野は急速に進化している。PDはこれを認識しプログラムの全体を柔軟かつダイナミックに管理することに成功している。取り組むべき当面の目標を、プログラムの本来の目的に適応させる卓越した指導的手腕を高く評価する。
- 野心的な研究開発が求められる本プログラムには参加者の熱意が不可欠であるが、若手研究者の多くが有期雇用で不安定な立場に置かれている点については、改善が求められる。

1.4 外部評価結果 (3/4)

2. PDのプログラムマネジメントの状況 (評価項目④)

2-1. 研究資金の効果的・効率的な活用 (官民の役割分担及びステージゲートを含む) (評価項目⑧、評価項目⑤)	a.産業界との連携・橋渡しの状況 (民間資金の獲得状況 (マッチング) スピンアウトを含む) b.その他	<ul style="list-style-type: none">PMと課題推進者の参加機関には14の企業が参画し、企業の技術を各プロジェクトの強みとして活用している。プログラム内からスタートアップ2社が起業。また、経済安全保障に適う重要装置 (光子検出器、希釈冷凍機など) の国産化も実現している。2030年のマイルストーン達成にフォーカスし必要なシステム開発に絞り込み資源を集中した点は評価できる。各方式の選択は時期尚早とのことだが、現状の限られた予算の中では国際的な競争力を獲得できるか不安視される意見がある。
2-2.国際連携による効果的かつ効率的な推進 (評価項目⑥)		<ul style="list-style-type: none">国際シンポジウム (Quantum Innovation) を量子技術イノベーション拠点などと共催し、国際的な交流の促進に貢献した。優秀人材の確保、オープン・クローズのバランス、および、経済安全保障など国際的な問題は複雑化しており、主要な研究者の負担を軽減し、研究に専念できる環境を作る必要がある。
2-3.国民との科学・技術対話に関する取組み (評価項目⑨)		<ul style="list-style-type: none">万博での展示、並びに、シンポジウムを毎年開催するなど、プログラムの成果を広く一般に公開している。
2-4.その他		<ul style="list-style-type: none">量子技術分野とコンピュータサイエンス分野との異分野連携を強化するため、令和6年度にFTQCアーキテクチャ研究会を開催した。ELSI研究者との交流を促進するため、令和5年度に「量子コンピュータのELSI検討会」を開催した。

●メタデータ件数：138件 (うち、研究データの公開16件、共有40件、非共有・非公開82件)

1.5 外部評価結果 (4/4)

3. 研究推進法人のPD/PM等の活動に対する支援 (評価項目⑩)

今回評価した各目標においては、以下のPD・PMサポートに必要な事柄について工夫をしながら適切に実施したと評価する。

- ① 確実な研究契約の締結・予算管理
- ② MS目標に沿った研究開発計画の作り込み (目標1,2,3,6 : 35プロジェクト)
- ③ PD・ADとPMの議論の場の設定、円滑なコミュニケーションの促進
- ④ プログラムの状況に沿った数理科学分科会やELSI分科会等の運用
- ⑤ 大阪・関西万博への参画を含む積極的な広報活動等

その上で、更なる支援強化として今後期待することや考慮すべき事項は以下の通り。

- ✓ 国内外の学会や展示会への出展等、様々なステークホルダーへのプレゼンスを上げられるように工夫をしてほしい。
- ✓ 幅広い研究分野が関わっているため、PDを支援するスタッフについて体制をより充実させることを期待する。

1.6 プロジェクト評価結果の概要

プロジェクト	評価結果	評価結果の概要
山本剛 PJ (超伝導)	A	<ul style="list-style-type: none">・SFQ回路を用いた制御信号Demultiplexer回路の10mK動作を実証・量子ビット付きの三次元積層チップ構造を製作し実証実験が進捗・民間企業との協力によって、量子コンピュータ専用の希釈冷凍機を国産化
高橋 PJ (イオントラップ)	A	<ul style="list-style-type: none">・中心的な課題であるイオントラップの光接続に関する独自研究構想の立案・国内のイオントラップ研究のエコシステムの立ち上げと整備への貢献
古澤 PJ (光量子)	S	<ul style="list-style-type: none">・100MHzクロックの高速アナログ光量子コンピュータ（誤り訂正導入前）の開発とクラウドでの提供・誤り耐性のある光量子ビットの世界に先駆けた実現
水野 PJ (半導体)	A	<ul style="list-style-type: none">・4 × 4 量子ドットアレイにおける 1 量子ビット操作および隣接 2 量子ビット間のゲート操作の確認
樽茶 PJ (半導体)	A	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。2 量子ビットに対する忠実度99.5%（最高値）の CNOTゲートの操作を達成
大森 PJ (中性原子)	A	<ul style="list-style-type: none">・Rb原子に対する超短パルスレーザー励起による超高速 2 量子ビットゲートの実現・中性原子量子コンピュータのスタートアップYaqumoの起業
青木 PJ (中性原子)	A	<ul style="list-style-type: none">・ナノファイバー共振器による2量子ビット演算実証への取り組み

(続き)

プロジェクト	評価結果	評価結果の概要
小坂 PJ (量子通信)	A	マイクロ波光子を通信波長帯光子に媒体変換するデバイスの各部分；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への媒体変換部、NV中心を含むフォトニック/フォノンニック結晶を用いた音波量子から通信波長帯光子への媒体変換部、光導波による光子の出力部を作製し、高い変換忠実度を達成全体の変換効率を実用レベルにまで高めることが残された課題
山本俊 PJ (量子通信)	A	<ul style="list-style-type: none"> ・2つの中性原子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単一光子検出システムを開発 ・民間企業との協力により多チャンネル超伝導単一光子検出装置を国産化
永山 PJ (量子通信)	B	分散量子コンピューティングに適した拡張性に優れた量子ネットワークのアーキテクチャの提唱
小芦 PJ (誤り訂正理論)	S	<ul style="list-style-type: none"> ・誤り耐性量子計算 (FTQC) のクロスレイヤー協調設計モデルの構築 ・FTQC実現に資する量子誤り訂正の理論と魔法状態蒸留プロトコルの提唱
小林 PJ (誤り訂正システム)	A	<ul style="list-style-type: none"> ・リアルタイム量子誤り訂正に必要なエラーシンδροーム解析を高速に実行する専用古典ハードウェアの開発 ・CryoCMOS量子ビット制御回路用の低温 (4K) 動作可能なDAC/ADCの開発

目次

1. JST5年目外部評価結果
 2. CSTI5年目評価の結果と新たなターゲット
 3. プログラム後半5年の推進方針
 4. CSTI5年目評価付帯事項と対応方針
- 参考（概要および研究開発プログラムの状況）

2. CSTI5年目評価結果と新たなターゲット

ムーンショット目標 6 は、CSTI本会議における5年目評価により研究開発を加速すべく、ターゲット、ポートフォリオ、研究開発体制などを変更した上で、後半5年の「継続」が決定。

【新たなターゲット】

- 2050年頃までに、大規模化を達成し、誤り耐性型汎用量子コンピュータを実現する。
- 2030年までに、小規模又は部分的な誤り耐性をもつ量子コンピュータを実現する。

目次

1. JST5年目外部評価結果
 2. CSTI5年目評価の結果と新たなターゲット
 - 3. プログラム後半5年の推進方針**
 4. CSTI5年目評価付帯事項と対応方針
- 参考（概要および研究開発プログラムの状況）

3.1 プログラム後半の推進方針

研究開発

	主な施策
基本方針	<ul style="list-style-type: none">・ 規模拡大と精度向上が共に期待できる量子コンピュータシステムの開発を、一長一短のある5つの異なる方式【縦串】を互いに競わせながら実施・ 方式横断的な4つの技術【横串】；量子計算ユニットの量子バス接続、効率と実装容易性に優れた量子誤り訂正方式、量子誤り訂正を実行する古典制御システム、誤り耐性量子計算アプリケーションの研究開発を並行して実施・ 上記の縦串5プロジェクトと横串4プロジェクトからマトリクス型のポートフォリオを構成。縦串プロジェクトが必要とする技術を横串プロジェクトが提供して円滑な導入を支援
マネジメント施策	<ul style="list-style-type: none">・ ポートフォリオ上の交点において縦串と横串の連携を強化しマイルストーン達成を促進するために共通のマイルストーン設定と仕様策定に基づくプロジェクト間連携に予算を配分・ 内部全体合宿を定期的に行って、プログラムの目的・目標を共有し、プロジェクト間および個々の研究者間の連携を強化
研究開発の進め方	<ul style="list-style-type: none">・ 横串プロジェクトの前半の成果であるクロスレイヤー協調設計モデルを、縦串プロジェクトの各々に展開することによって、各量子コンピュータシステムの開発を効率化・ 2028年6月までに実機で誤り訂正を実証することを、縦串プロジェクトの中間的な技術水準として設定

(続き)

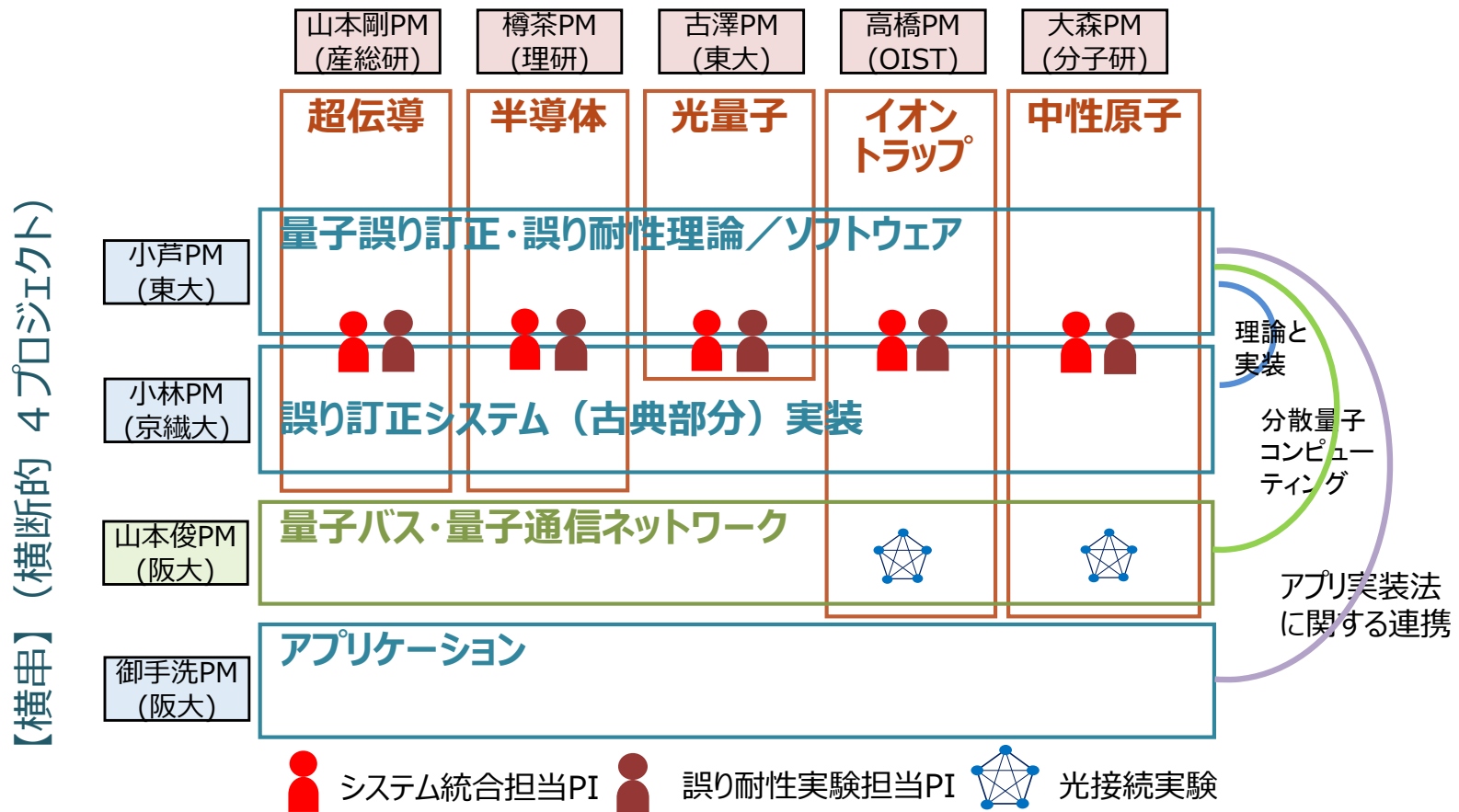
社会的役割

	主な施策
人材育成	<ul style="list-style-type: none">・ 20年後に中心となって活躍する若手や新規研究者の本プログラムへの参入や、産業界からのさらなる参画と協力を促進・ 比較的若い世代のPIにプロジェクト間連携の実働を担わせることで、実機の開発から社会実装に至る一連のマネジメントを経験させて、将来のリーダーを育成・ 将来の研究開発を担う中核的企業を量子コンピュータシステムのプロジェクトに組み込み
社会との連携	<ul style="list-style-type: none">・ 量子コンピュータシステムのプロトタイプ（誤り耐性導入前を含む）のスタートアップ起業やクラウド公開を引き続き支援・ 社会との対話と正確な情報発信を行うアウトリーチ活動を全てのプロジェクトに要請サイエンスコミュニケータの確保を推奨・ 引き続き、プログラムの取り組みや成果を大小のシンポジウム開催によって広く公開
国際連携	<ul style="list-style-type: none">・ 研究者の育成と国際的研究ネットワークの構築のために、海外の研究機関への派遣を実施・ プロジェクトによる海外機関との共同研究を積極的に支援
ELSI	<ul style="list-style-type: none">・ 新設するアプリケーションのプロジェクトにELSI問題の主担当となる課題推進者を配置・ FTQCがアプリケーションを通して社会に与える影響を検討するために、当該プロジェクトを拠点として、プログラム全体のELSIの取り組みを促進・ 当該プロジェクトを拠点として、産業界と意見交換する機会を定期的に設定

3.2 プログラム後半のポートフォリオ

ターゲットや「今後のMS目標達成の見通し」を踏まえたポートフォリオ（プロジェクト構成、資金配分方針など）を策定

【縦串】（量子コンピュータシステム方式別 5プロジェクト）



量子コンピュータシステムの方式毎に、システム統合を担当するPI、および誤り耐性実験を担当するPIを置くことによってミッションを明確にし、縦串横串のプロジェクト間連携を推進

(続き)

各プロジェクトに参画する企業

PM名	方式	企業名
山本(剛)	超伝導	富士通株式会社
		株式会社アルバック
		アルバック・クライオ株式会社
		NTT株式会社
		京セラ株式会社
		ナノブリッジ・セミコンダクター株式会社
樽茶	半導体	株式会社日立製作所
古澤	光量子	OptQC株式会社
		NTT株式会社
高橋	イオントラップ	キュービットコア株式会社
		キューエル株式会社
大森	中性原子	株式会社Yaqumo
小芦	誤り訂正ソフトウェア	NTT株式会社
小林	誤り訂正システム	キューエル株式会社
		株式会社QunaSys
御手洗	アプリケーション	みずほ第一フィナンシャルテクノロジー
		三菱電機株式会社

青字は将来の研究開発の中核を担うと期待される企業

3.3 ロードマップとベンチマークによる進捗管理

開発する技術の水準を国内外で比較できるベンチマークの設定

- ・ 誤り耐性に着目し、物理量子ビット数と誤り率*の双方を方式ごとのベンチマークとして採用し、方式ごとに研究開発のロードマップを作成することをプロジェクトに義務付け
- ・ プログラム全体の研究開発の進捗状況を逐次更新して国際的な立ち位置を可視化

* 物理量子ビット数と誤り率：量子誤り訂正によって保護された論理量子ビットを構成するためには、誤り率の十分に小さい物理量子ビットが一定数必要、そのため技術水準を示すベンチマークとして国際的に広く採用

海外の野心的目標と顕著な進捗

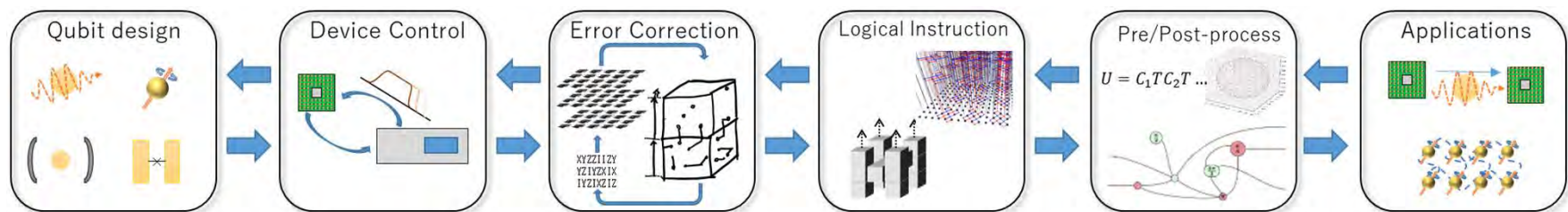
ハード方式	超伝導	イオントラップ	光量子	半導体	中性原子
競合企業 野心的目標 量子ビット数	IBM: 200論理量子ビット Er~10 ⁻⁸ @2029	Quantinuum: >100論理量子ビット Er<10 ⁻⁵ @2029	Xanadu: 1K論理量子ビット FTQC@2029	SQC: 10K 量子ビット QEC@2028	QuEra: 100論理量子ビット @2026
競合企業 現状と評価	Google:105量子ビット チップ上で論理量子ビット 作成、ブレークイーブン実 証	50論理量子ビット Er~2x10 ⁻²	近似GKP量子ビット @2025 スキージング測定値 <2dB@1GHz	SQC:11量子ビット 2ビット操作Er~10 ⁻⁴ Intel:12量子ビット 300mmWafer EUV露光	QuEra:符号長4 96論理量子ビット Er<10 ⁻² AtomComputing :1200量子ビット 製品
本目標の 狙いと現状	量子誤り訂正と大規模集積 化に必要な要素技術を網 羅的に開発する。希釈冷凍 機も含め国産化した実機のク ラウド公開を2025の7月に実 施。	光結合による拡張と高 性能化を狙った先進 的な要素技術に取り 組むが、量子コン ピュータの実現では競 合に立ち後れている。	実機構築クラウド公 開済。世界初近似 GKP量子ビット生成。 スキージング測定値 <10dB@8THz	誤り率<0.01%の5 量子ビットは世界トップ。 独自の2D配列構造 で大規模化を狙う。産 業界の製造技術が必 要。	世界最大レベルの800 原子アレイ、世界最速 の2量子ビット演算実 現、など世界トップレ ベルであるが、量子ゲート の忠実度では遅れ。

(続き)

プログラムにおける8年目及び10年目に目指す具体的な技術水準の設定

- ・ 8年目に目指す技術水準として「量子誤り訂正の実行」*¹を、10年目に目指す技術水準として「量子誤り耐性の原理実証」を各々設定
- ・ 「量子誤り耐性の原理実証」では、論理量子ビット間のユニバーサルなゲート操作*²の実証を目標として設定

- * 1 量子誤り訂正の実行：プログラムの前半5年では、量子誤り訂正の実行が可能になる規模まで量子ビットの数を拡張することができる実装技術の研究開発が進むとともに、これらの量子ビットに適した量子誤り訂正の方式についても顕著な理論的知見が得られている。
- プログラムの後半5年では、同じく前半で構築されたクロスレイヤー協調設計モデル（挿入図参照）のもとに、量子コンピュータ実機の開発指針を具体化し、前半5年で得られた実装と理論の成果を統合して、量子誤り耐性の原理実証を目指す。



- * 2 ユニバーサルなゲート操作：古典計算に対する量子計算の優越性を裏付けるために必須なゲート操作であり、現時点では海外の競合も未到達であって原理実証に向けた方策を探っている状況である。どこかが原理実証に成功すれば、量子コンピュータの研究開発が従来とは質的に全く異なる次元に突入すると考えられる。

目次

1. JST5年目外部評価結果
 2. CSTI5年目評価の結果と新たなターゲット
 3. プログラム後半5年の推進方針
 - 4. CSTI5年目評価付帯事項と対応方針**
- 参考（概要および研究開発プログラムの状況）

4.1 CSTI5年目評価の付帯事項と対応方針（まとめ）

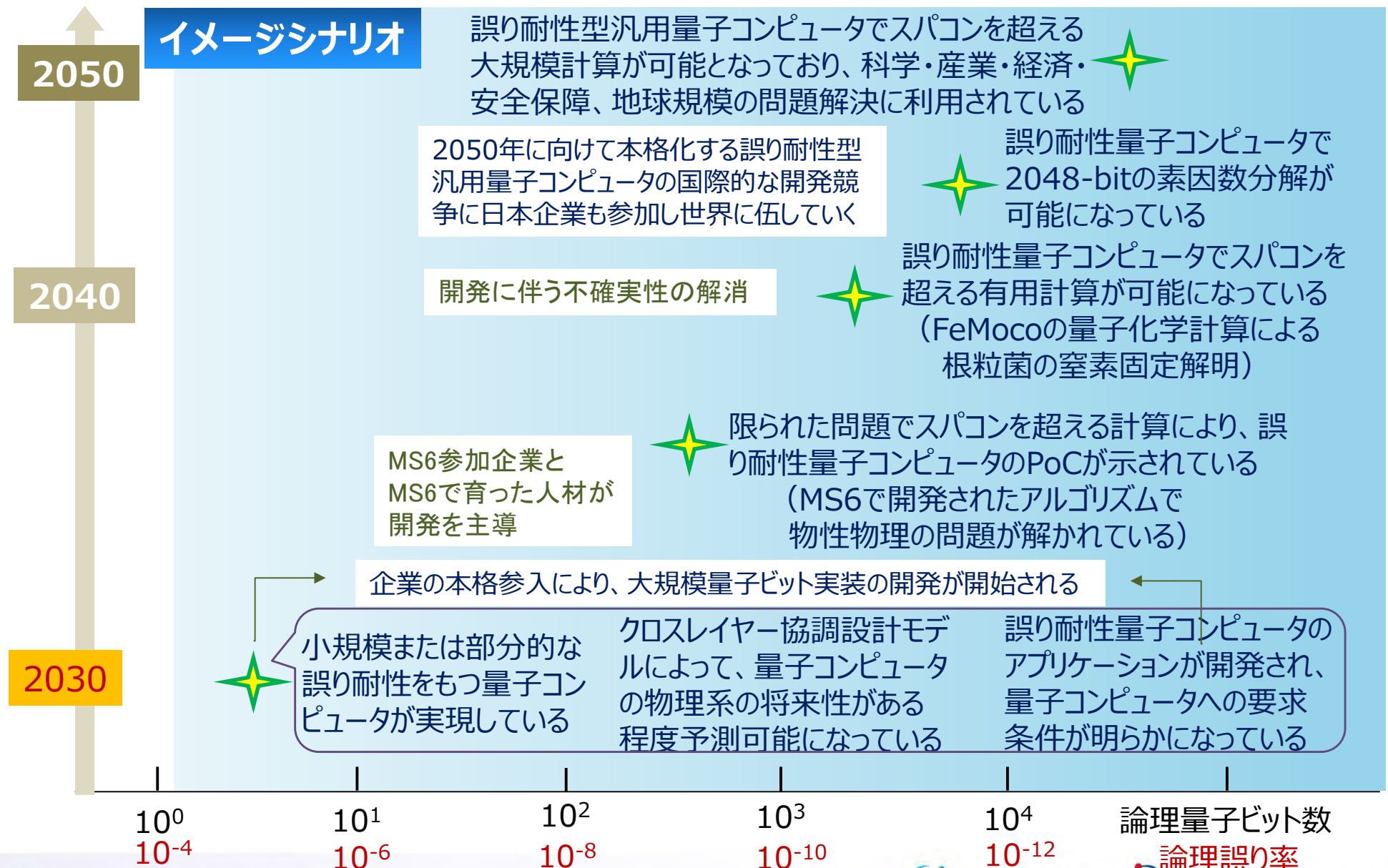
付帯事項	対応方針の概要
<p>1. ターゲットや「今後のMS目標達成の見通し」を踏まえたポートフォリオ（プロジェクト構成、資金配分方針など）の策定</p>	<p>5つの異なる量子コンピュータの方式を、2030年のシステム化を目指して互いに競わせるようにポートフォリオを構成 但し、各方式においては、2030年の実機の実現に直結するように研究課題を絞り込み 詳細は「3.2 プログラム後半のポートフォリオ」を参照</p>
<p>2. 開発する技術の水準を国内外で比較できるベンチマークの設定</p>	<p>誤り耐性に着目し、物理量子ビット数と誤り率の双方をベンチマークとして方式ごとのロードマップを作成することをプロジェクトに義務付け 詳細は「3.3 ロードマップとベンチマークによる進捗管理」を参照</p>
<p>3. プログラムにおける8年目及び10年目に目指す具体的な技術水準の設定</p>	<p>8年目に目指す技術水準として「量子誤り訂正の実行」を、10年目に目指す技術水準として「量子誤り耐性の原理実証」を各々設定 詳細は「3.3 ロードマップとベンチマークによる進捗管理」を参照</p>
<p>4. 2050年の目標達成に向けたプログラムの研究開発の実装シナリオの策定</p>	<p>小規模であっても誤り耐性量子コンピュータシステムを早期に実現し、有用なアプリを示すことで、民間による大規模化を誘引するシナリオを策定 詳細は「4.2 CSTI付帯事項4に関する対応」を参照</p>

(続き)

付帯事項	対応方針の概要
5. 倫理的・法制度的・社会的な課題への取り組みに係る計画の策定	アプリケーションのプロジェクトを公募によって新設し、アプリがもたらし得るELSI課題の検討にも専門的に取り組むPIを設置 詳細は「4.3 CSTI付帯事項5に関する対応」を参照
6. 関連施策との連携に向けた方針の策定	量子科学技術イノベーション国際シンポジウム（Quantum Innovation）を、量子技術イノベーション拠点等の国内の量子技術関連施策と連携して毎年開催、プログラムの成果報告の場も設定 詳細は「4.4 CSTI付帯事項6に関する対応」を参照
7. プログラムにおける人材育成上の課題の抽出及び2050年の目標達成に向けたプログラムの人材育成方針の策定	20年後に中心となって活躍する若手や 新規研究者の本プログラムへの参入や、産業界からのさらなる参画と協力を促進 詳細は「4.5 CSTI付帯事項7に関する対応」と「3.2 プログラム後半のポートフォリオ（続き）」を参照
8. 国際連携に係る方針並びに国際連携を行う場合における目的の設定及び計画の策定	海外の研究機関と連携して合同ワークショップを開催し、国際的研究ネットワーク構築の端緒を開拓 重要な学術的国際会議を国内に誘致し、プログラムとして開催運営を支援するとともに、海外への成果発表の機会を確保 詳細は「4.6 CSTI付帯事項8に関する対応」を参照

4.2 CSTI5年目評価の付帯事項4に関する対応

[付帯事項4] 2050年の目標達成に向けたプログラムの研究開発の実装シナリオの策定



4.3 CSTI5年目評価の付帯事項5に関する対応

[付帯事項5] 倫理的・法制度的・社会的な課題への取り組みに係る計画の策定

- ・ 新設するアプリケーションのプロジェクトにELSI問題の主担当となる課題推進者を配置
- ・ FTQCがアプリケーションを通して社会に与える影響を検討するために、当該プロジェクトを拠点として、プログラム全体のELSIの取り組みを促進
- ・ 当該プロジェクトを拠点として、産業界と意見交換する機会を定期的に設定



御手洗PM
(阪大)

新設のアプリケーションPJは、ELSI問題も担当する

* 前半5年の主な取り組みの紹介

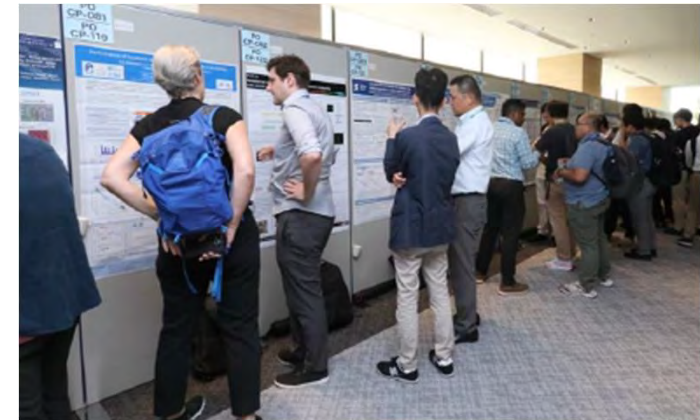
「量子コンピュータのELSI」検討会を開催(令和5年)

大阪大学の量子情報・量子生命研究センター(QIQB)とELSIセンターが共催する「量子コンピュータのELSI」検討会を目標6として後援。11プロジェクトが参加し、量子コンピュータのELSIについて今後取り組むべき課題を検討した

4.4 CSTI5年目評価の付帯事項6に関する対応

[付帯事項6] 関連施策との連携に向けた方針の策定

- 量子科学技術イノベーション国際シンポジウム (QI:Quantum Innovation) を、量子技術イノベーション拠点等の国内の関連施策[※]と連携して毎年開催、プログラムの成果報告の場も設定
- 後半5年では、MS6国際シンポジウムをQIと合同で毎年開催



※関連施策：量子技術の産業化を目指す、量子技術イノベーション拠点（QIH）、Q-LEAP、SIP など、

4.5 CSTI5年目評価の付帯事項7に関する対応

[付帯事項7] プログラムにおける人材育成上の課題の抽出及び2050年の目標達成に向けたプログラムの人材育成方針の策定

- 後半5年では、比較的若い世代のPIにプロジェクト間連携の実働を担わせることによって、実機の開発を通して研究から社会実装に至るマネジメントを経験させ、将来のリーダーを涵養
- 2030年以降の研究開発の中核を担うと期待される企業を、当初から量子コンピュータシステムのプロジェクトに組み込むことによって、開発人材の育成と将来への円滑な技術継承を企図
- 前半5年と同様に、学生、他分野の研究者やエンジニアを対象に、スクール、ワークショップ、ミニシンポジウムなどを企画し、量子情報技術に関わりを持とうとする人材の裾野を拡大



* サマースクールの様子（QIHなどの他の施策との連携で実施）

4.6 CSTI5年目評価の付帯事項8に関する対応

[付帯事項8] 国際連携に係る方針並びに国際連携を行う場合における目的の設定及び計画の策定

- 2030年の量子コンピュータの実機の開発を加速するために、**海外の研究機関で確立された技術を導入し、その基盤のもとにプロジェクトで開発中の国際的優位にある独自の技術を展開**するという大胆な基本戦略も敢えて試みることにした。但し、技術の提供元との連携にあたっては、経済安全保障の観点も踏まえて**技術情報や知的財産**に関して**入念な配慮**を怠らない。
- 国際的な研究開発の現場の息吹に触れることでプログラムの参加者をより**強く動機付けること**、プログラムの国際的な**認知度を一層高めること**、及び海外から**研究人材を惹きつける契機**となることを意図して、以下のような施策に取り組むとともに、海外からの同様の誘いにも条件が合えば呼応する。
 - * 海外の研究機関との連携による**合同ワークショップ**の開催と人材交流
 - * 重要な**学術的国際会議の国内誘致**と開催運営の支援、海外向け成果発表の機会（特に影響力のある研究者に対する**アピール**）の確保
- 前半5年と同様に、引き続き海外の研究機関との共同研究や研究者の派遣や受け入れに積極的に取り組む。

目次

1. JST5年目外部評価結果
 2. CSTI5年目評価の結果と新たなターゲット
 3. プログラム後半5年の推進方針
 4. CSTI5年目評価付帯事項と対応方針
- 参考（概要および研究開発プログラムの状況）

参考 目指す社会像

誤り耐性型汎用量子コンピュータに期待される課題例：
生物が行う複雑な反応中の量子状態を厳密に計算し、現象を解明



人工光合成の実現。太陽の光と水を使って、地球温暖化の原因となる二酸化炭素を酸素と有機化合物に変える。

人工窒素固定の実現。省エネルギーでありながら、空気中の窒素から窒素化合物を効率よく合成できる。

人工光合成(→CO₂削減)

人工窒素固定(→省エネ)



誤り耐性量子計算とは何か

- ・ 現状ベスト 量子ビット数 $n \approx 100$ 、誤り率 $p \approx 10^{-3}$ (0.1%)
- ・ 計算の成功確率 ゲート数
 $(1 - p)^g = 0.999^g = 0.367\dots$ ($g = 10^3$) 有意な確率 37% で成功
 $(1 - p)^g = 0.999^g = 0.000045\dots$ ($g = 10^4$) ゲート数が多いと無理
 $p \leq 1/g$ でないと有意な確率で成功しない

量子ビット、量子ゲートの物理的な改善だけでは埋められないギャップ

- ・ 2048ビットの因数分解
 $n = 6 \times 10^3$ 、 $g \approx 8 \times 10^9$
⇒ 誤り率への要請 $p \approx 10^{-10} \leq 1/g$

- ・ FeMocoの精密量子化学計算
 $n = 2 \times 10^3$ 、 $g \approx 5.3 \times 10^9$
⇒ 誤り率への要請 $p \approx 10^{-10} \leq 1/g$

論理量子ビットの誤り率 $P_L \approx 10^{-10}$ ならば有意な確率で成功



量子誤り訂正 QEC、
誤り耐性量子計算 FTQC



参考 解決すべき課題

スーパーコンピュータでは、複雑に絡み合う量子状態の計算は困難

大規模な量子状態の厳密計算を可能とする
「誤り耐性汎用量子コンピュータ」を実現する

2050 大規模化を達成し、誤り耐性汎用量子コンピュータの実現

2040 中規模な誤り耐性量子コンピュータの実現（スパコンを超える有用計算が可能）

2030 小規模または部分的な誤り耐性をもつ量子コンピュータの実現（PoC）

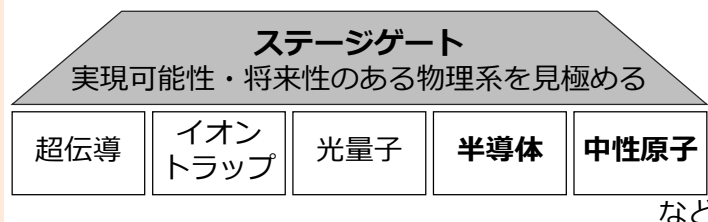
<量子通信ネットワーク>

量子メモリの開発、光子と量子メモリ間の量子インターフェイス技術の確立や量子中継器・量子通信システム・テストベッド構築など

- 光源や検出器
- 量子メモリ
- 量子インターフェイス技術
- 量子中継器
- 量子通信システム
- テストベッド構築

<量子ハードウェア>

量子誤り訂正システムの設計・実装、量子ビット・量子ゲート基盤の確立など



<誤り耐性>

- 理論・ソフトウェア
- 誤り訂正システム

低オーバーヘッド量子誤り訂正符号や量子アルゴリズム、誤り訂正システムの開発など

- 量子誤り訂正理論
- ミドルウェア、コンパイラ
- アルゴリズム、アプリケーション
- 誤り訂正システム

参考 プログラムのマイルストーン（前半5年）

2050

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

2040

2030

量子誤り訂正が可能となる規模の量子コンピュータを開発し、量子誤り訂正を実行して、その有効性を実証する。

2025

量子誤り訂正に必要な規模まで量子ビット数を増やすことのできる技術を開発する。また、その量子ビットに適した量子誤り訂正方式を開発する。

2023

将来増やすことが可能となる量子ビットを作成する。また、その量子ビットに適した量子誤り訂正方式を提案する。

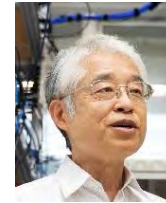
参考 目標達成に向けた進捗状況

- 誤り耐性型汎用量子コンピュータの実現に向けて、量子コンピュータシステム、量子通信ネットワーク、および誤り耐性の3つのカテゴリーで連携して研究開発を推進してきた。
- これまでに、世界トップクラスの研究成果、もしくはプログラムの目標達成に大きく寄与する成果が得られている。特筆すべき成果を以下に記す。
 1. 連続量アナログ光量子コンピュータの開発と世界初となる論理光量子ビット（GKP量子ビット）の実現、
 2. 誤り耐性量子計算（FTQC）のためのクロスレイヤー協調設計モデルの構築と量子コンピュータシステム設計への導入、
 3. 優れた特徴を有する量子誤り訂正符号の新規提案や、FTQCに必要とされる量子ビット数を削減するための魔法状態蒸留の理論提唱
- 研究開発プログラムを構成する幾つかのプロジェクトでは、5年目のマイルストーンが概ね達成され、
 - ・ 拡張性のある誤り耐性量子コンピュータを開発するために取り入れるべき要素技術の検証が進むとともに、
 - ・ 実効性に富む量子誤り訂正方式が明確になりつつあり、研究開発プログラム全体としては順調に進捗している。
しかしながら、実機での誤り訂正実験が未達である点で競合者に先行を許している。

参考 プログラムの推進体制（前半5年）

2020年度採択

2022年度採択



量子ハードウェア



	超伝導	イオン トラップ	光量子	半導体 量子ドット/レイ	半導体 スパースマトリクス	中性原子 2次元レイ	中性原子 ナノファイバー
	山本剛PM (NEC)	高橋PM (OIST)	古澤PM (東大)	水野PM (日立)	樽茶PM (理研)	大森PM (分子研)	青木PM (早大)
量子通信ネットワーク	小坂PM (横国大)	山本俊PM (阪大)	分散QC連携	量子ビット接続で連携			
	永山PM (慶大)	超伝導と通信の連携		量子ネットワークシステム技術			
誤り耐性	量子誤り訂正・誤り耐性理論/ソフトウェア						
	誤り訂正システム（古典部分）実装						

研究開発体制図： プログラムポートフォリオ

参考 国内外の研究開発動向との比較

ハード方式	超伝導	イオントラップ	光量子	半導体	中性原子
競合企業 野心的目標 量子ビット数	IBM: 200論理量子ビット Er \sim 10 ⁻⁸ @2029	Quantinuum: >100論理量子ビット Er<10 ⁻⁵ @2029	Xanadu: 1K論理量子ビット FTQC@2029	SQC: 10K 量子ビット QEC@2028	QuEra: 100論理量子ビット @2026
競合企業 現状と評価	Google:105量子ビット チップ上で論理量子ビット 作成、ブレークイーブン実 証	50論理量子ビット Er \sim 2x10 ⁻²	近似GKP量子ビット @2025 スキュージング測定値 <2dB@1GHz	SQC:11量子ビット 2ビット操作Er \sim 10 ⁻⁴ Intel:12量子ビット 300mmWafer EUV露光	QuEra:符号長4 96論理量子ビット Er<10 ⁻² AtomComputing :1200量子ビット 製品
本目標の 狙いと現状	量子誤り訂正と大規模集積 化に必要な要素技術を網 羅的に開発する。希釈冷凍 機を含め国産化した実機のク ラウド公開を2025の7月に実 施。	光結合による拡張と高 性能化を狙った先進 的な要素技術に取り 組むが、量子コン ピュータの実現では競 合に立ち後れている。	実機構築クラウド公 開済。世界初近似 GKP量子ビット生成。 スキュージング測定値 <10dB@8THz	誤り率<0.01%の5 量子ビットは世界トップ、 独自の2D配列構造 で大規模化を狙う。産 業界の製造技術が必 要。	世界最大レベルの800 原子アレイ、世界最速 の2量子ビット演算実 現、など世界トップレ ベルであるが、量子ゲート の忠実度では遅れ。

有望な複数のハード方式を競争的に開発し、そこに、量子通信ネットワーク、誤り耐性の開発を横通しして3カテゴリー12プロジェクトを連携させる独自のポートフォリオ体制で運営してきた。当初より誤り訂正・誤り耐性実証を想定しており、量子誤り訂正の理論では世界的な成果が出ている。研究開発は概ね予定通りだが、実機での誤り訂正実験が未達である点で、競合者に先行を許している。

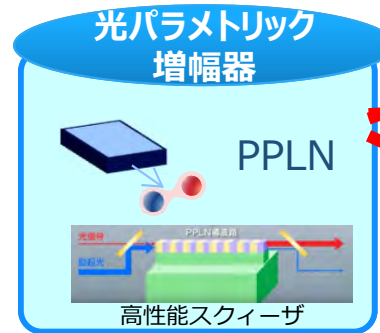
参考 目標達成に向けた革新的な取組み・成果

連続量アナログ光量子コンピュータの開発と光論理量子ビットの世界初の実現

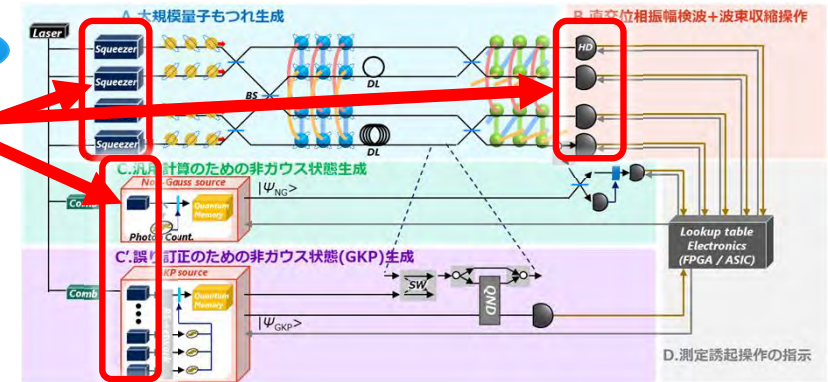
■ 概要

光量子状態生成のキーデバイスとなるPPLN型光パラメトリック増幅器に関して下記に関して取り組んだ。

- ① プロセッサ向けスクイズド光生成
- ② 非ガウス状態のためのもつれ光子生成
- ③ 高速量子信号検出のための信号アンプ

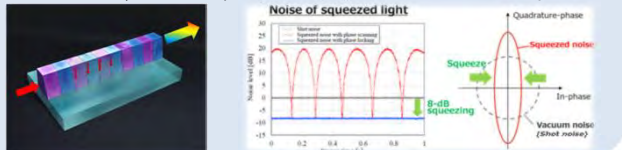


測定誘起型光量子コンピュータの全体像



■ 進捗や研究成果（技術練度向上と展開）

低損失パラメトリック増幅器
(8dBスクィーザ)



2022年成果

高速量子検出技術
(43GHzホモダイン検波)



2023年成果

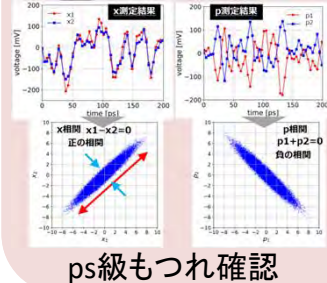
技術展開

実機構築@理研



プロセッサ部への導入（
2Dクラスター生成）

世界最速
量子もつれ生成



ps級もつれ確認

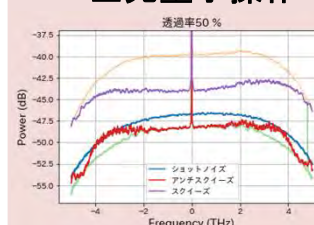
世界最速
非ガウス状態生成



帯域: GHz
生成レート: MHz

従来比1000倍の高
速化に成功

全光量子操作



THz級フィードフォワード
操作に成功

■ GKP量子ビットの生成

誤り訂正のための
非ガウス状態(GKP)生成

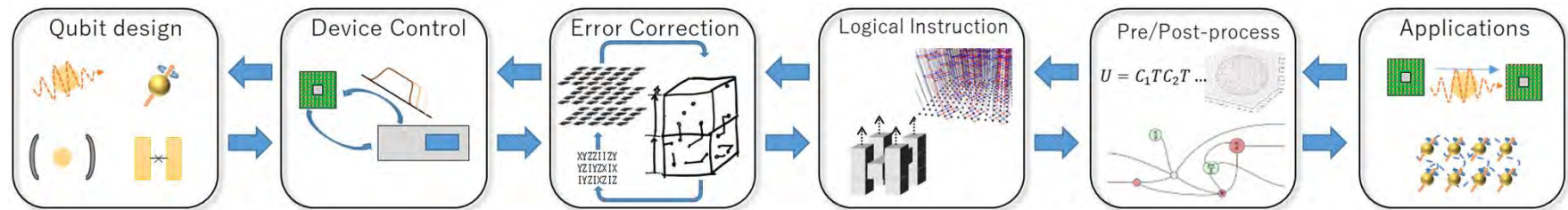
低近似GKP量子ビットの
生成に成功



- ・ 誤り耐性量子計算機 (FTQC) のためのクロスレイヤー協調設計モデルの提唱
- ・ 量子誤り訂正符号の理論とFTQCに要する量子ビットリソースを低減する魔法状態蒸留プロトコル

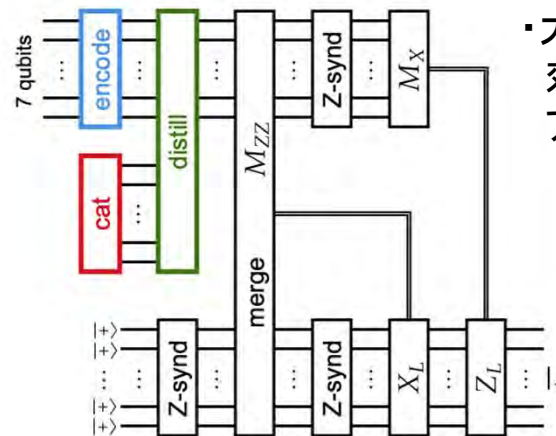
大規模量子コンピュータの開発を加速するクロスレイヤー協調設計ソフトウェアの構築

全ての技術レイヤーを包括した性能予測モデルを構築
 課題の抽出、アイデアの定量的な評価、開発方針策定の支援などで研究開発を加速

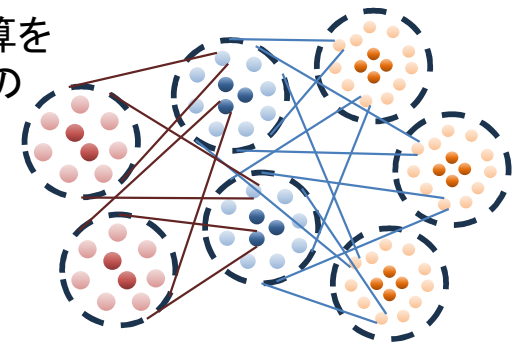


量子コンピュータの性能を引き上げる新しいソフトウェアアプローチの提案

- ・ 従来のリソースコストを大幅に低減する新しい魔法状態蒸留手法の提案



- ・ 大規模な誤り耐性量子計算を効率的に行う入れ子構造のアーキテクチャの提案



- ・ 数万量子ビットで古典コンピュータを凌ぐ誤り耐性量子計算の新アーキテクチャの提案



参考 プログラムマネジメントの状況

PDによるプログラムマネジメント

プロジェクトとの交流

- ・ **内部全体会議** PD、PM、課題推進者他の関係者が参加する会議（毎年3月開催）
- ・ **内部全体合宿** 令和6年度に3日間に渡って開催。約300名が参加。今後の方針などを討議
- ・ **サイトビジット** これまで20サイトを訪問。
- ・ **PD-PM 個別面談** 年2～3回開催。
- ・ **海外視察報告会** 海外状況を共有するため報告

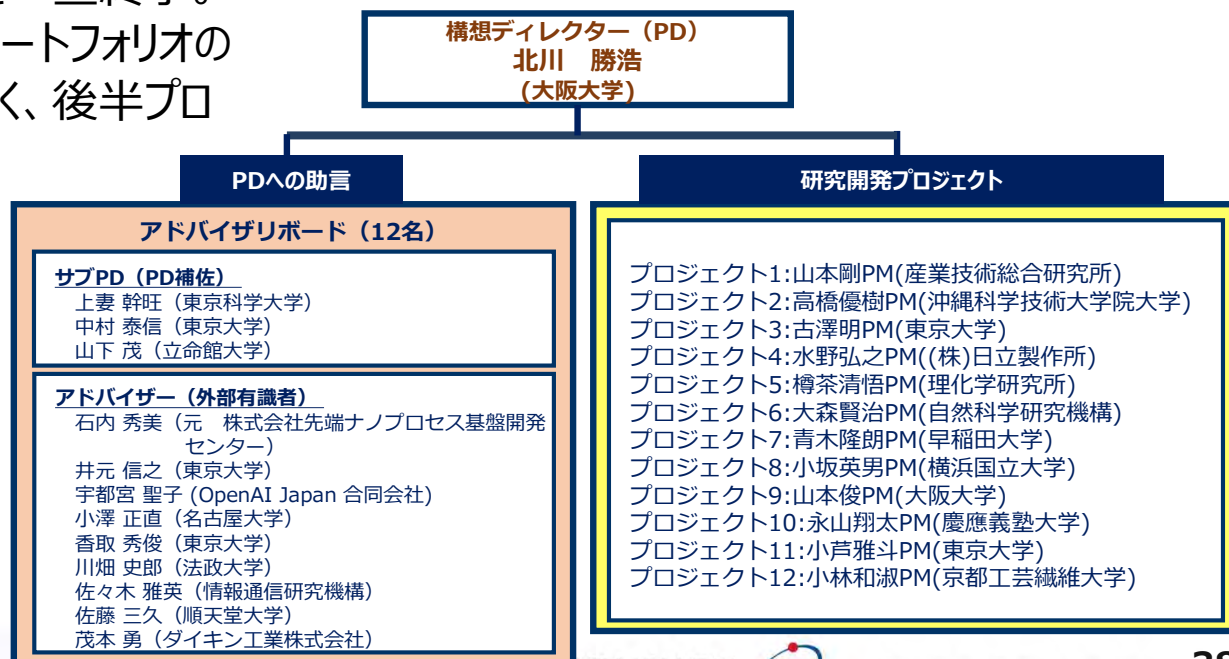


ポートフォリオ見直し

令和7年度に、全てのプロジェクト研究開発を一旦終了。システム開発やアプリケーションの追加など、ポートフォリオの見直しに加え、最適なプロジェクトを構築すべく、後半プロジェクトを率いるPMを公募した。

体制の強化

研究プロジェクトへの参加等の事由によってアドバイザーが退任した場合や新たに専門家が必要になった場合には、PDが中心となって人選を行った。令和7年8月には2名のアドバイザーを新たに任命し、アドバイザーは11月時点で9名となっている。



国際連携

■目標6 国際シンポジウム 2021, 2023, 2025

2025年度は、国際会議 Quantum Innovation 2025 の中でムーンショットセッションとして開催し、各PJの研究開発活動や計画について、外部評価委員と招聘研究者から意見やアドバイスをいただいた。

■Quantum Innovation 2021, 2022, 2023, 2024, 2025

2025年度は、量子科学技術イノベーション拠点、内閣府・省庁、SIP、Q-STAR と共催し、IYQ Global Eventとして開催。

■国際ワークショップ

高橋PJ：イオントラップ国際ワークショップ（2024/9/21-24）
古澤PJ：チェコ-日本ワークショップ（2024/5/21）
樽茶PJ：SiQEW2023(2023/10/31-11/2)

■共同研究・共同開発

山本剛PJ：ソウル大
古澤PJ：マサチューセッツ大、パラツキー大
水野PJ：日立ケンブリッジラボ、Imec
樽茶PJ：Intel、Imec、国立精華大、NEEL研究所
小坂PJ：デルフト工科大、シュトゥットガルト大
永山PJ：ローレンス・バークレー国立研究所、カリフォルニア大
小芦PJ：オックスフォード大、アベリストウィス大、デルフト工科大、アーヘン工科大、デューク大、
ニューヨーク市立大、シャールブルック大、シンガポール南洋理工大、ロイヤルメルボルン工科大

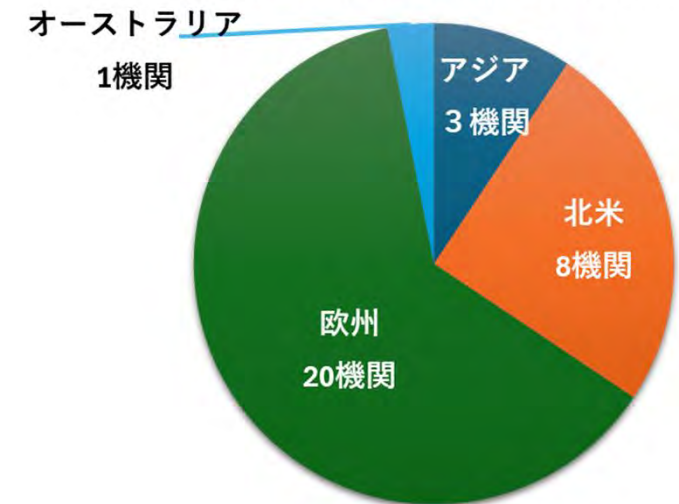
■学生や研究員等の派遣

マインツ大、マサチューセッツ大、クイーンズランド大、ウィーン大、ミュンヘン大、サクレー研究所、他



INTERNATIONAL YEAR OF
Quantum Science
and Technology

国際連携先(研究交流、研究員等派遣など)32機関 (延べ)



産業連携・社会実装

■ 理化学研究所（古澤PJ）

汎用型光量子計算コンピュータプラットフォーム設置
OptQC 株式会社を設立起業（令和6年9月）

■ アルバック・クライオ、アルバック（山本剛PJ）

国産希釈冷凍機を開発

■ 浜松ホトニクス（山本俊PJ）

世界最大級32チャンネルの超伝導単一光子検出器を開発

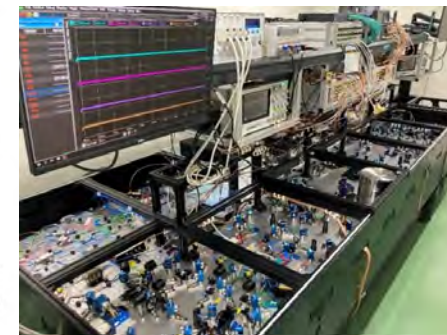
■ 中性原子量子コンピュータでYaqumo社を起業（大森PJ）

■ 万博でバーチャル展示 Future of Quantum

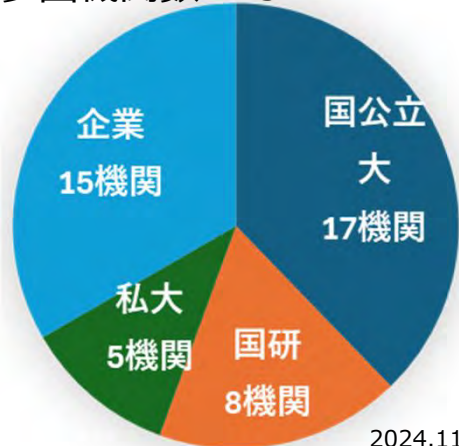
■ 万博で純国産超伝導量子コンピュータ実機をクラウド公開

山本剛PJとQ-LEAP、阪大COI-NEXTなどの協業で実施

32 ch SNSPDシステム外観



参画機関数: 45



2024.11.26時点

PMの所属民間企業

- ・日立製作所

課題推進者の所属民間企業

- ・NTT(4プロジェクトに参加) ・アルバック・クライオ
- ・アルバック、・ナノブリッジ・セミコンダクター、・Fixstars Amplify
- ・日立製作所（2プロジェクトに参加）、・Inflection、・浜松ホトニクス、
- ・Nanofiber Quantum Technologies、・メルカリ、・LQUOM
- ・キュエル、・ソシオネクスト

広報・アウトリーチ活動

目標6 公開シンポジウム 令和3, 4, 5, 6, 7年

令和6年は、3月にハイブリッド形式にて開催し、12名のPMから研究開発の捗状況をわかりやすく発表。スライドと動画をWeb公開中。

若手対象スクール 令和3, 4, 6年（春、秋）

令和3年9月（オンライン）、令和4年9月、令和6年3月、令和6年9月に実施。
令和6年3月と9月は、QIHなどの他の制度と合同で開催。
3月のスクールではプログラム参加メンバー10名が講師を務めた。



“未来社会の担い手 × ムーンショット研究者” 交流会

令和7年3月10日に、久留米工業高等専門学校との対話会を開催した。

目標6 ミニシンポジウム 2024、2025

ミニシンポジウム「量子コンピュータは、未来をどう変えるか～FTQCとそこに至る過程で期待されるアプリケーション」を令和6年10月に開催した。令和7年1月に、第2回オンライン公開ミニシンポジウム「量子誤り訂正最前線～我々はFTQCにどれだけ近づいたのか？どれくらい遠いのか？～」を開催した。

ELSI、数理科学等、横断的な取組、データマネジメント

ELSI 検討会

「量子コンピュータのELSI」検討会を開催(令和5年)

大阪大学の量子情報・量子生命研究センター（QIQB）とELSIセンターが共催する「量子コンピュータのELSI」検討会に、目標6として後援し11プロジェクトが参加し、量子コンピュータのELSIについて今後取り組むべき課題を検討。

PDがモデレーターとして、社会実装の課題、インパクト・ベネフィットの推定、Hype・疑似科学のリスクを討議し、Hypeを減らすために、開かれた議論の場を作っていくべきことが議論された。

ELSI 分科会からのコメントと対応状況

- 継続的な科学コミュニケーションの専門家の参画
- 次世代の学生を対象にした活動を面的に拡大
- 具体的な便益を議論する機会をさらに増やす
- HYPEに対して研究者からコミュニケーションをとる
- HYPE以外のELSI課題をこれから発見していく
- 常に、ELSIを捉える眼（人的手当）を研究チームの近くまたは内部に置く

▶ 後半プロジェクトでは、各プロジェクトに社会との対話と正確な情報発信を行うアウトリーチ活動を積極に行うことを求めるとともに、アプリケーションのプロジェクトではELSI問題にも取り組む予定

数理科学ワークショップ

誤り耐性型汎用量子コンピュータを支える理論と数理科学の視点(令和3年)
数理分野の公募に合わせて開催、小芦PJに新たな課題推進者を採択。

誤り耐性型汎用量子コンピュータの実現に向けた数理科学WS(令和5年)
数理科学分科会が主催。小芦PJから2件発表。講演の動画を公開中。

プログラム間の横断的連携

ムーンショット型研究開発制度合同シンポジウム(令和5年)
目標4(環境)、目標6(量子)、目標8(気象)の計3名のPDが、
持続可能な「地球環境」についてパネルディスカッション。

ムーンショット目標間連携に向けた意見交換(令和5年)
目標5(農業)の千葉PDおよび目標 4(環境)の山地PDと意見交換し、
量子コンピュータで解ける問題を探していくことにした。

データマネジメント

Quantum Toolbox in Python(QuTiP)関連のプログラムコードは公開。
プログラム・プロジェクト内では、Teams、Slack、およびBOXを活用して情報共有。

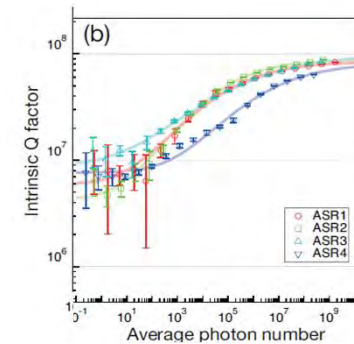
参考) 各プロジェクトの進捗・成果 (山本剛PJ)

- 純国産による超伝導量子コンピュータのテストベッド機の開発と大阪万博におけるクラウド接続 (大阪大学、Ulvac Cryo社、Ulvac社による共同チーム)
- 単一光子レベルの超微弱なプローブ強度において10Mに達する世界最高Q値を有する超伝導平面共振器の実現 (理研/野口チーム、NICT/吉原チーム)
- 超伝導Kerrパラメトリック共振器を用いたボゾニック量子ビットにおける世界初のユニバーサルゲート動作の実証 (東京理科大学/蔡チーム)
- 初期誤り耐性量子コンピュータ向けロードストア型アーキテクチャの提案 (九州大学/井上チーム (小芦PJおよび永山PJとの共同研究による))

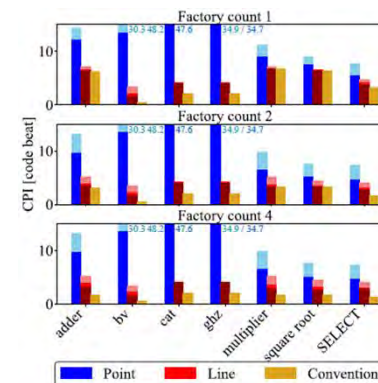
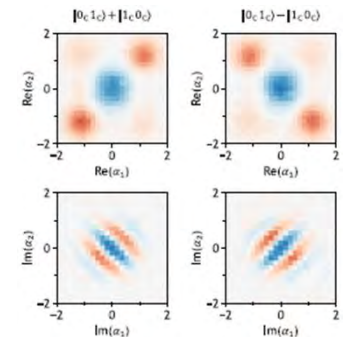
<https://qiqb.osaka-u.ac.jp/newstopics/pr20250414>



Y. Tominaga et al., EPJ Quantum Technol. **12**, 60 (2025).



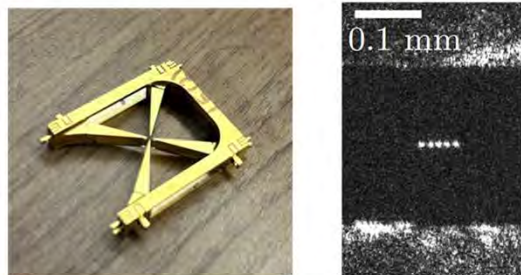
D. Hoshi et al., Nature Commun. **16**, 1309 (2025).



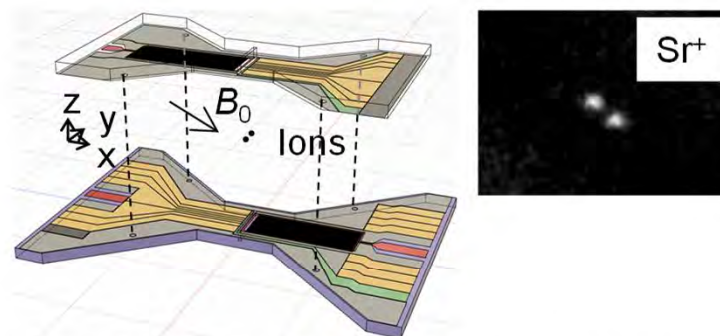
T. Kobori et al., HPCA 2025 arXiv:2412.20486

参考) 各プロジェクトの進捗・成果 (高橋PJ)

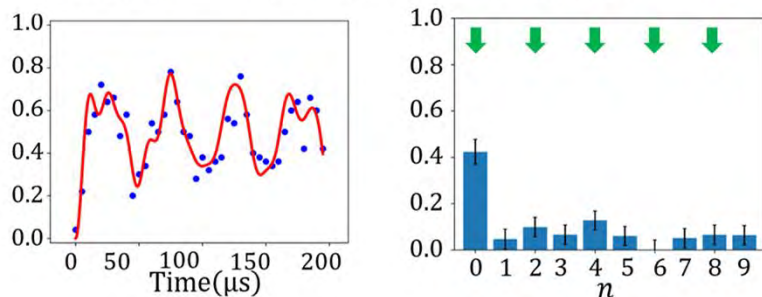
Selective laser etching により作製された
イオントラップと捕捉されたイオン (課題 1 - 1)



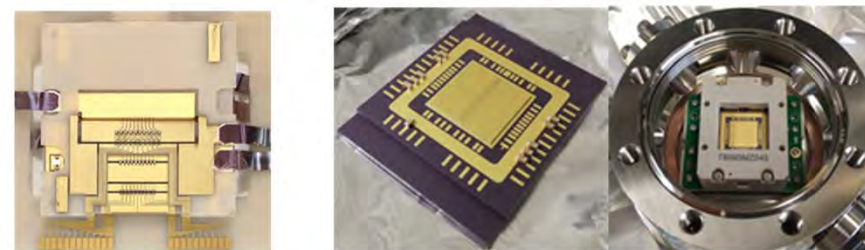
3次元超伝導イオントラップと
超低電力で捕捉されたイオン (課題 2 - 1)



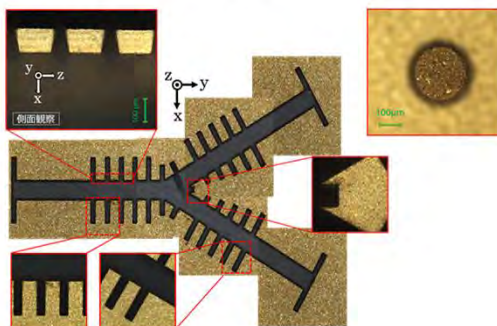
振動スクイズド状態の生成 (課題 3 - 1)



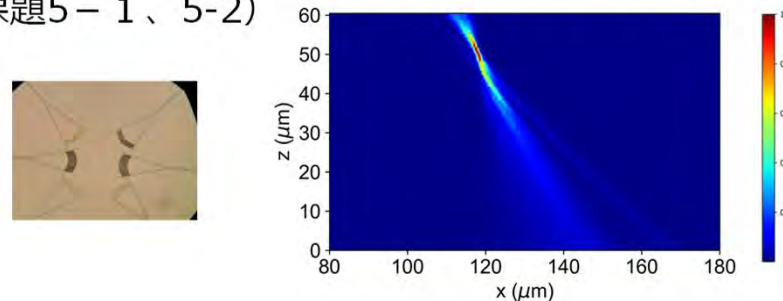
立体および平面型イオントラップ (課題4 - 1)



Y字ジャンクション (課題 6 - 1)



イオントラップに統合されたグレーティングカップラ
(課題5 - 1、5-2)

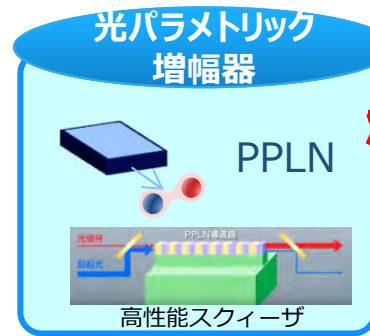


参考) 各プロジェクトの進捗・成果 (古澤PJ)

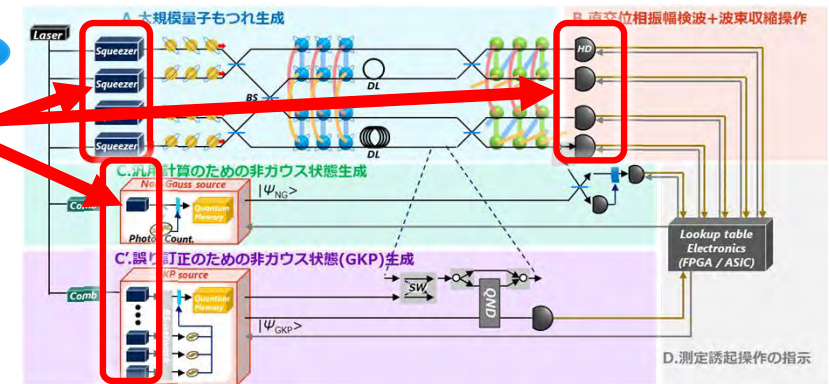
■ 概要

光量子状態生成のキーデバイスとなるPPLN型光パラメトリック増幅器に関して下記に関して取り組んだ。

- ① プロセッサ向けスクイズド光生成
- ② 非ガウス状態のためのもつれ光子生成
- ③ 高速量子信号検出のための信号アンプ

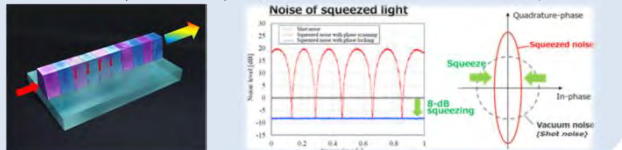


測定誘起型光量子コンピュータの全体像



■ 進捗や研究成果 (技術練度向上と展開)

低損失パラメトリック増幅器
(8dBスクィーズ)

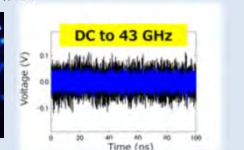


2022年成果

高速量子検出技術
(43GHzホモダイン検波)



2023年成果

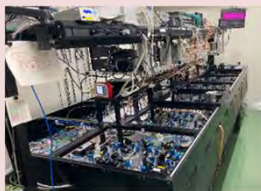


■ GKP量子ビットの生成

誤り訂正のための
非ガウス状態(GKP)生成

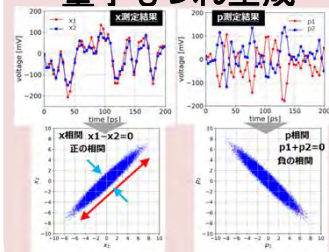
技術展開

実機構築@理研



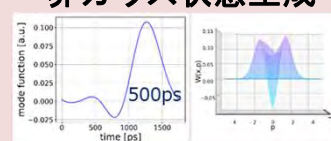
プロセッサ部への導入(
2Dクラスター生成)

世界最速
量子もつれ生成



ps級もつれ確認

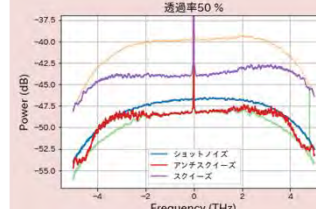
世界最速
非ガウス状態生成



帯域: GHz
生成レート: MHz

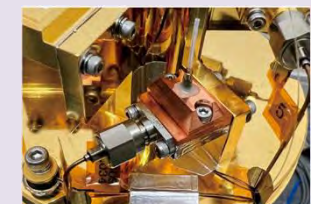
従来比1000倍の高
速化に成功

全光量子操作



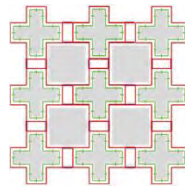
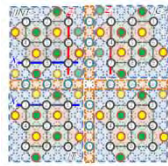
THz級フィードフォワード
操作に成功

低近似GKP量子ビットの
生成に成功

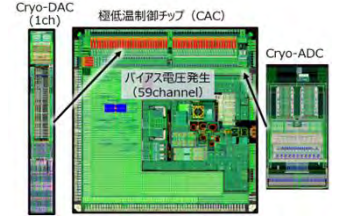
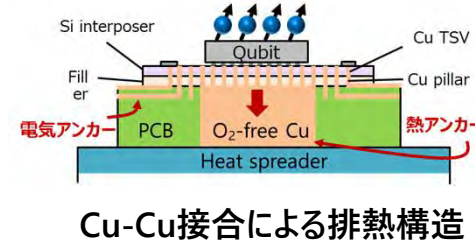


参考) 各プロジェクトの進捗・成果 (水野PJ)

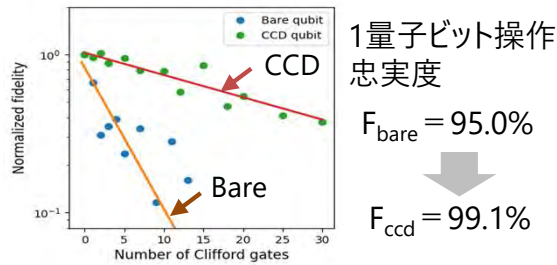
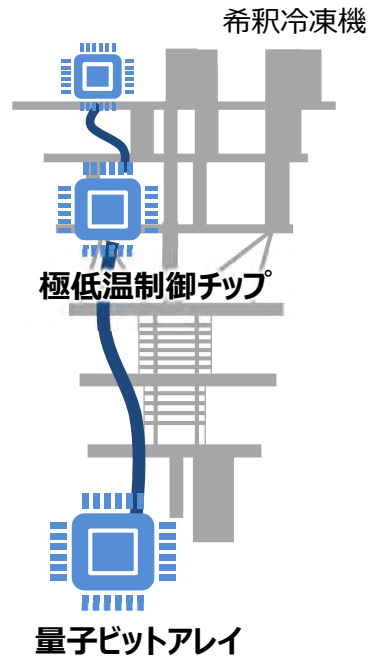
トップダウンとボトムアップを組み合わせ、量子ビットアレイ・制御回路・ソフトウェアに至る量子コンピュータのシステム化を実施



誤り訂正符号
実装可能な
量子ビット集積
アーキテクチャ



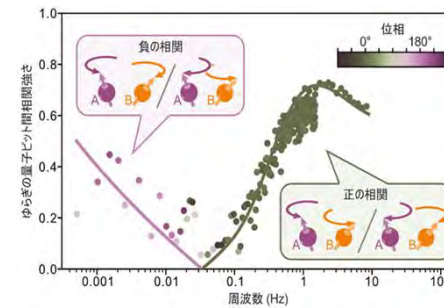
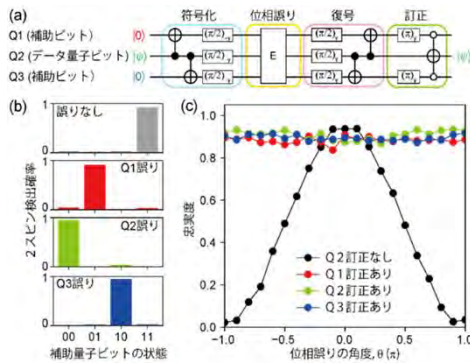
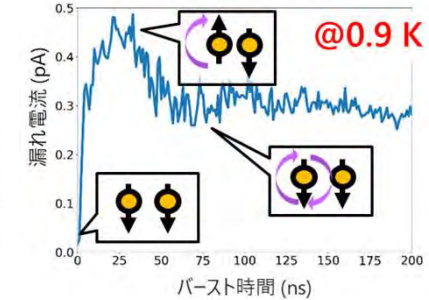
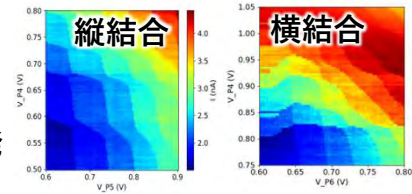
100mK Cryo-DAC & ADC



高忠実度量子ビット制御方式の開発

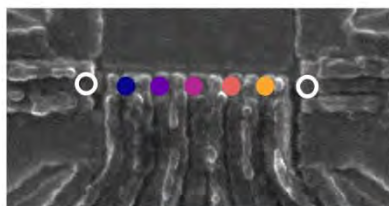


4x4量子ビット
アレイにおける
2量子ビット操作

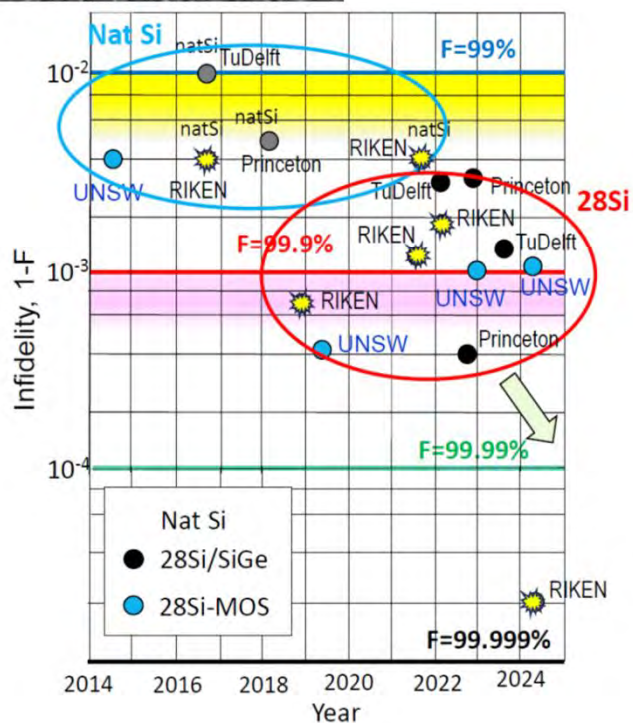


参考) 各プロジェクトの進捗・成果 (樽茶PJ)

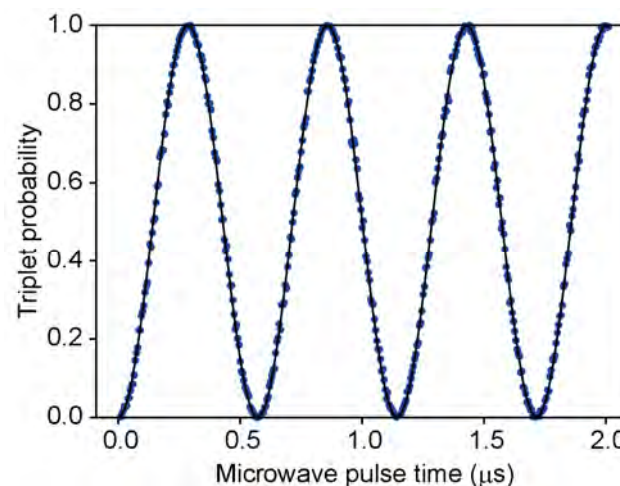
5量子ビットデバイスにおいて全ての忠実度99.99%及び同時制御を達成



量子ビット操作忠実度



2量子ビットのパリティ読み出しで短時間($< 1 \mu s$)高忠実度($> 99\%$)を達成

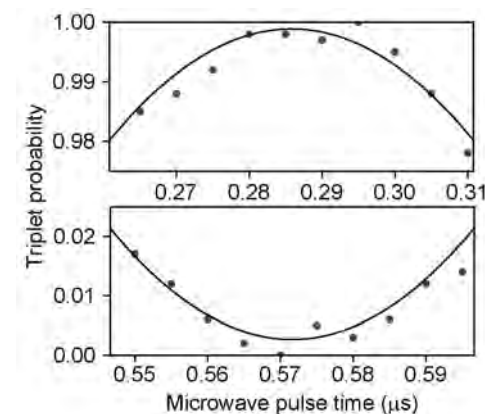


SPAM忠実度
 $> 99\%$

初期化誤り
 $< 0.2\%$

測定時間 $< T_2^*$

$T_2^* > 8 \mu s$



参考) 各プロジェクトの進捗・成果 (大森PJ)

多くのコアコンピタンス@ 分子研

Ultrafast laser + Quantum Computer
+ Shortest atom-pair distance $\sim 1\mu\text{m}$

Ultrafast pulsed laser: 1.5, 1.9, 2.4, 3.0, 4.9 μm

Rydberg orbit: ~ 100 nanometer

Strong electric interaction

Ultrafast ($< 1\text{ns}$) qubit operation

Ultrafast 2-qubit gate operating in 6.5 nanosecond
Quantum speed limit / Accelerating neutral-atom QC by 2 orders

100 billionth of 1 second pulse of ultrafast laser light

※ 2 qubit gate : Most important quantum gate arithmetic element

Controlled-Z gate

quantum entanglement

1-2 micron

Rubidium atom

100 times faster than NOISE timescale!

(cf.) 15 nanoseconds (Google AI Quantum / Superconducting qubit, 2020)

Scalability / 800 atoms as of Jan 2021
→ Further development toward 10,000 atoms

Single Rubidium atom

Homemade trapping lasers

Ultraprecise Optical tweezers array

High-NA optical microscope

Automated system for initialization over many atoms
Atom cooling, Tweezers' shape optimization / homogenization

Magneto-optical trap

Thermal atom

Ultracold atom

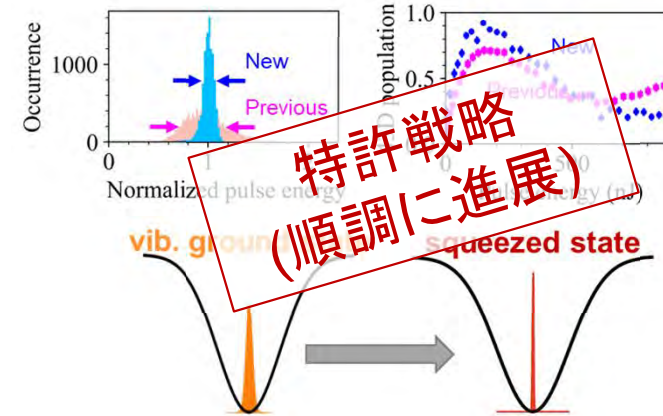
Cooling

Tweezers' ground state

Thermal fluctuation 100 nm

Quantum fluctuation 25 nm

超高速2量子ビットゲートの高忠実度化など 世界最先端の要素技術開発



Phys. Rev. Lett.,
in press.

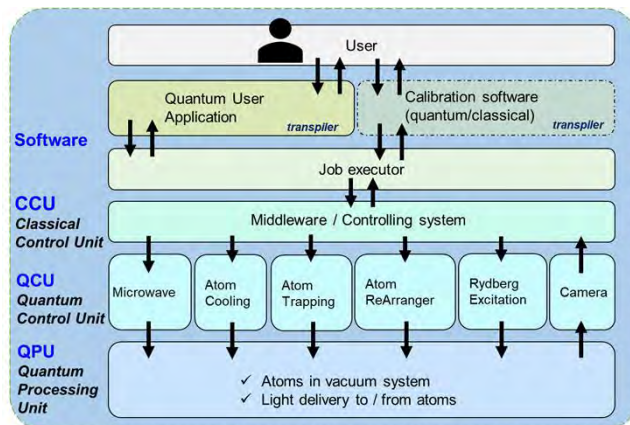
Phys. Rev. A
111, 042614
(2025)
Opt. Lett. **50**,
403 (2025)

Phys. Rev. A
110, 053518
(2024)
arXiv:2410.03241
(2024)

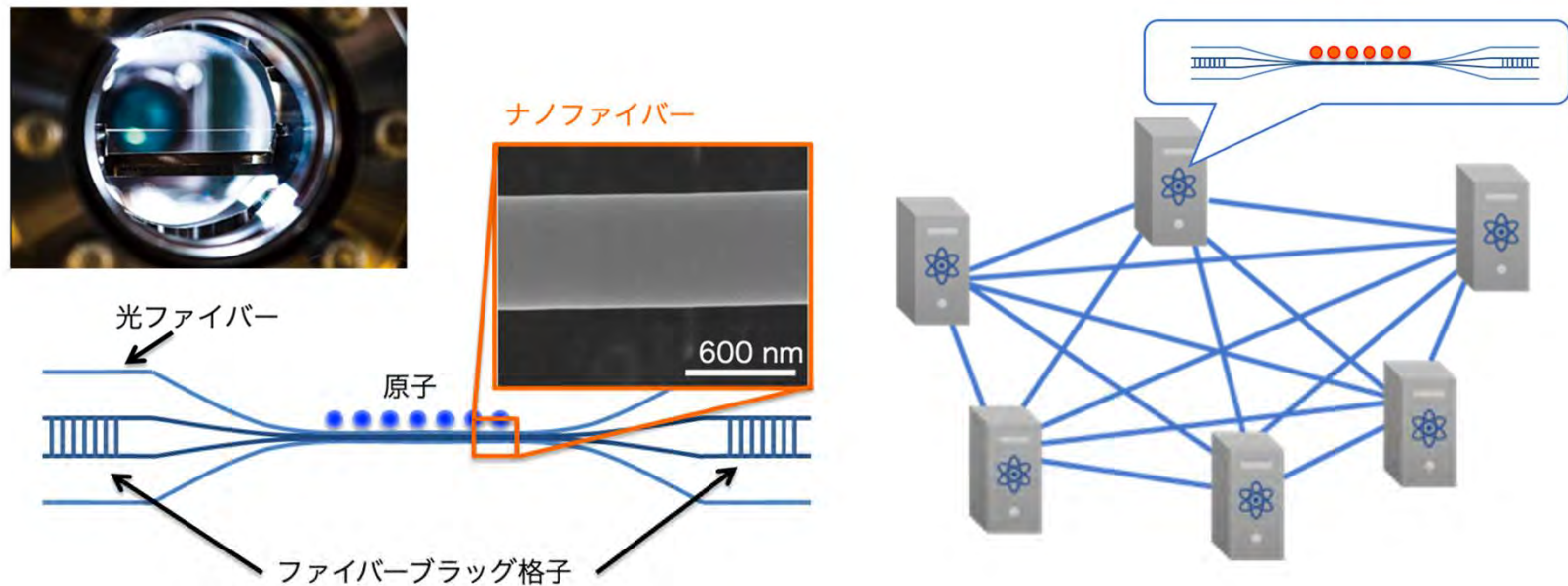
etc. ...

2025年度内に稼働予定

500 量子ビット・フルスタック量子コンピュータ開発 (様々なレイヤーを統合)



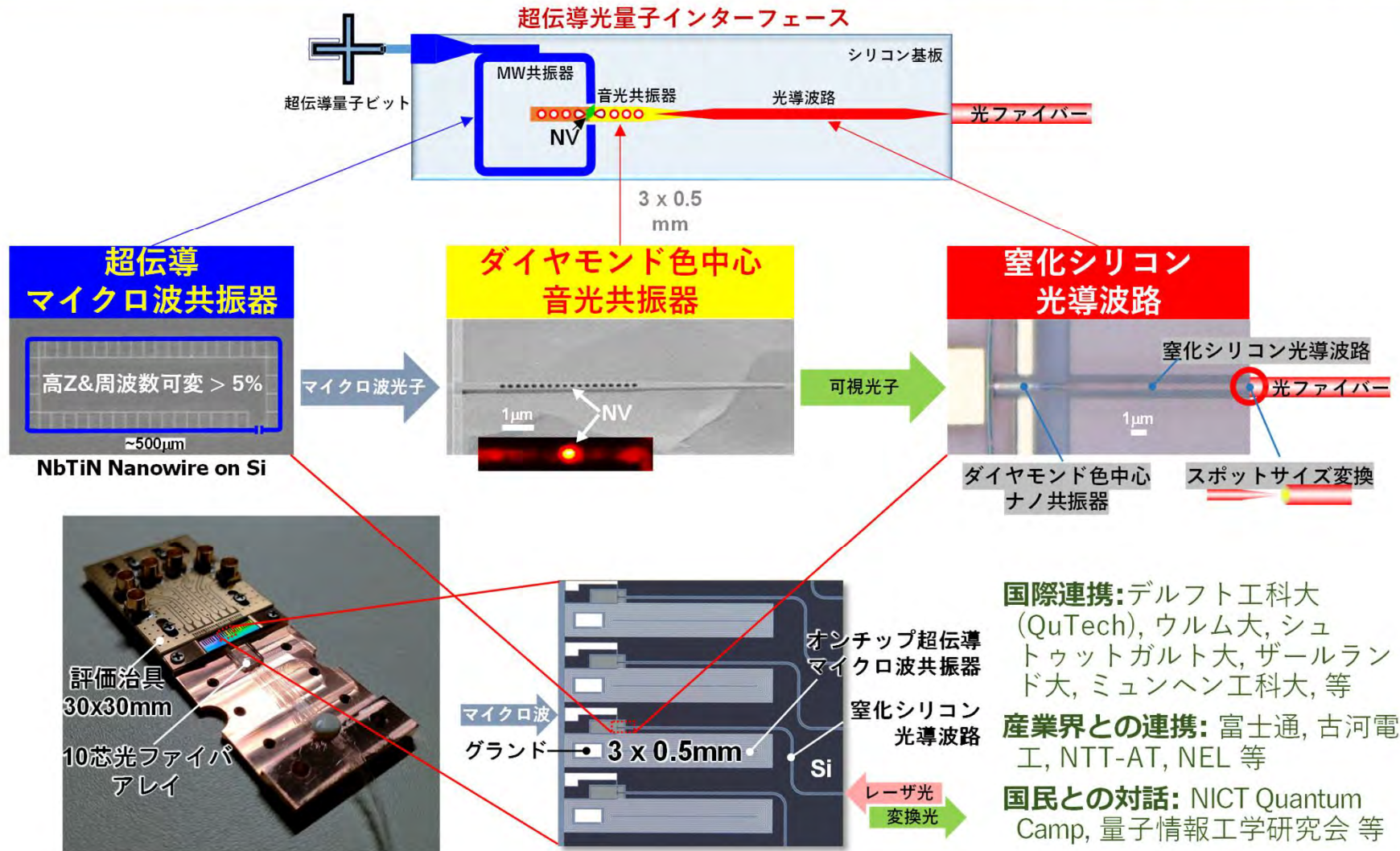
参考) 各プロジェクトの進捗・成果 (青木PJ)



- 独自のナノファイバー共振器QED技術に基づき、大規模化と分散化が可能な新方式の量子コンピュータハードウェアの開発を進めた。
- 原子量子ビットの基本原子種であるセシウムおよび次世代原子種であるイッテルビウムについて、少数量子ビット原理実証機各2台(合計4台)を並行して立ち上げ、量子ゲート等の原理実証実験を進めるとともに、分散化のための複数ユニット接続技術の開発を進めた。
- 共振器QEDを用いた光子生成、量子ゲートなどの要素技術の提案を完成させるとともに、精度の良い量子ゲート方式提案を完成させた。
- ECDL光源を光コムに位相同期した周波数安定化光源を開発した。
- 多数の原子量子ビットを一つの共振器に収容する大規模化技術を開発した。
- ハード・ミドル・ソフトウェアを一体化したクラウドシステム試作機を用いた基礎性能評価を実施した。
- イッテルビウムデュアル同位体原子アレーを実現した。
- 高帯域性能と高フィネス性能を両立する次世代ナノファイバー共振器を開発した。

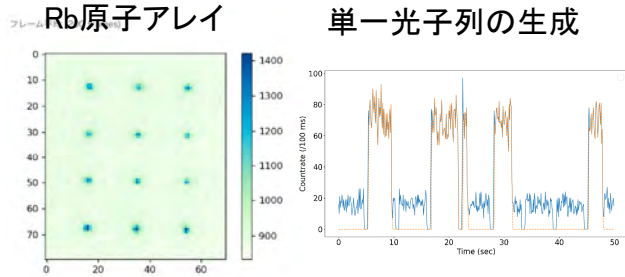
参考) 各プロジェクトの進捗・成果 (小坂PJ)

超伝導光ハイブリッド量子コンピュータに必須の超伝導光量子インターフェースを開発

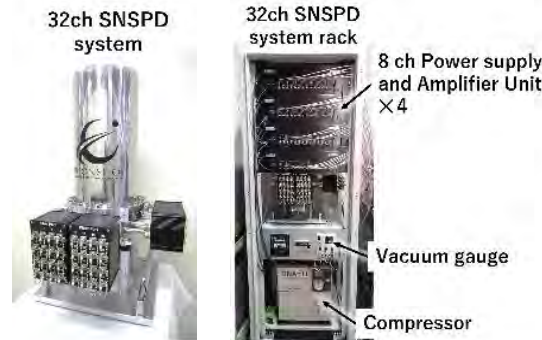


参考) 各プロジェクトの進捗・成果 (山本俊PJ)

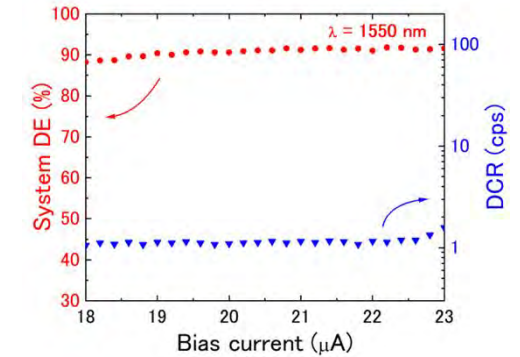
原子-光子インターフェース:
原子アレイからの単一光子生成の確認



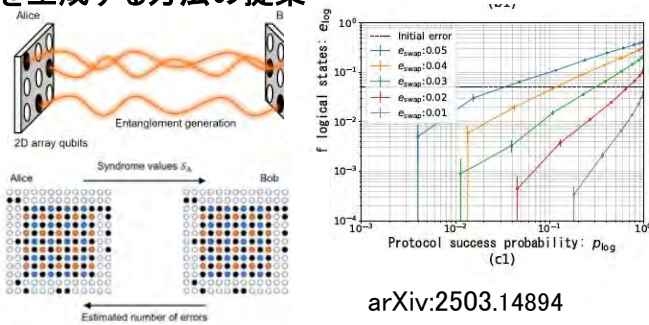
32ch 超伝導ナノワイヤ単一光子検出器システム



検出効率90%以上、暗計数率 1 cps 以下の
超伝導ナノワイヤ単一光子検出器

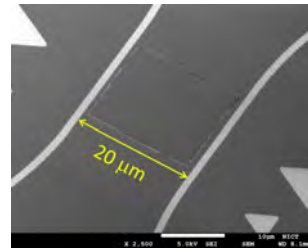


フォールトトレントな分散量子計算を目指して:
2D原子アレイの間にエンタングルした論理量子
ビットを生成する方法の提案



arXiv:2503.14894

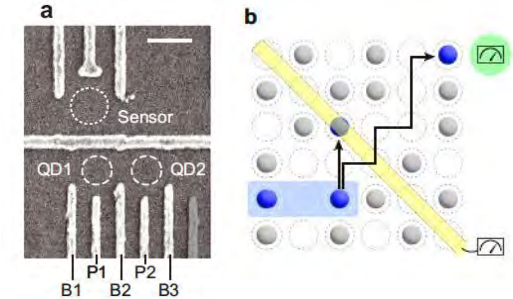
ワイドストリップ型
超伝導単一光子検出器を開発



- 高検出効率
- 低暗計数率
- 偏光無依存性
- 低コストな
ファブリケーション

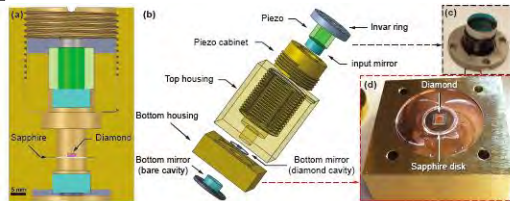
M. Yabuno *et al.* Optica Quantum 1, 26 (2023)

電子スピンの高精度読み出し法を開発



npj Quantum Information 10, 95(2024)

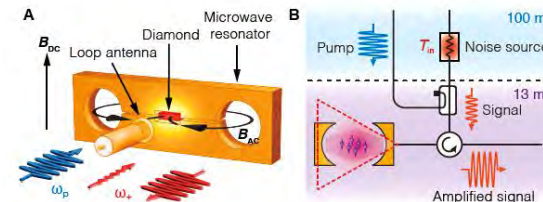
ミリK温度で動作するマイクロ波-光子のトランスデュー
サ



マイクロ波Q値 10^4
周波数上方変換の確認

Appl. Phys. Lett. 124, 234001 (2024), Rev. Sci. Instrum. 96, 085201 (2025)

量子限界近くで動作する超低雑音ダイヤモンドマイクロ波メーザー増幅器



ジョセフソンパラメトリック増幅と同等
な超低雑音マイクロ波増幅

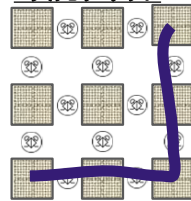
arXiv:2505.05705

参考) 各プロジェクトの進捗・成果 (永山PJ)

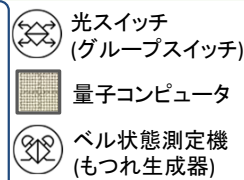
スケーラブルで強靱な統合的量子通信システム(永山PJ)

- ①量子通信における基本メカニズム(EthernetやTCP/IP等)・全体設計
- ②量子コンピュータ間を高効率に接続する光技術
- ③バッファリング、多重化による高性能化を実現する量子メモリ技術
- ④量子コンピュータネットワーク上で分散処理アプリ
- ⑤統合実装

既存アイデア 2次元グリッド

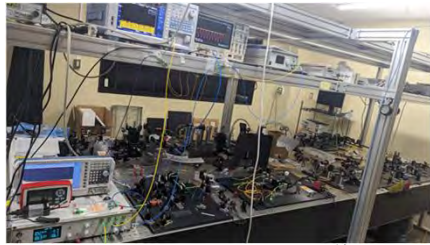


例: ゲートに4もつれを消費



革新

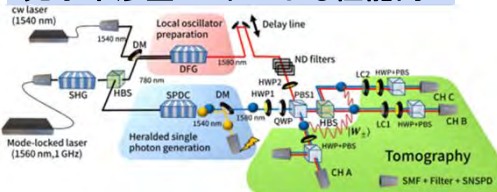
2光子干渉型Network (NW) Hardware・Software統合実装



Sakuma et al., arXiv:2412.09299 (2024) 等

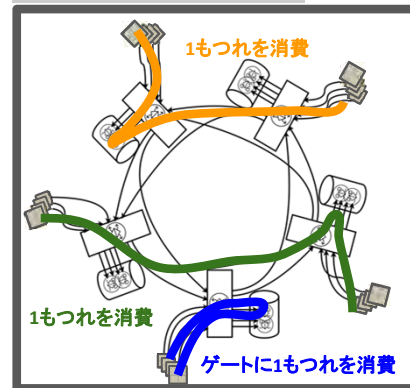
量子インターコネクティブプロトタイプとして3ノード分+1スイッチノードの光学系・制御系を構築

1光子干渉型NW化による性能向上

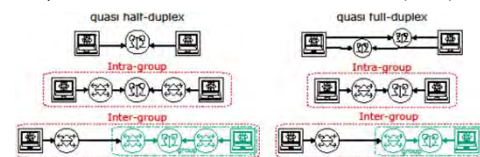


中心的成果: 世界初の高効率 量子インターコネクティブ Q-flyの発明

Q-fly 基本提案・原理実証



Adapted from Sakuma et al., arXiv:2412.09299 (2024)



Sakuma et al., arXiv:2412.09299v2(2024)

ネットワーク上リソース発見プロトコル

Taherkhani et al. *IEEE QCE (Quantum Week) 2025*.
ベストペーパーアワード2位受賞.

多量子ビット状態の効率的初期生成・効率的計測手法の開発等を達成。

Reproduced from Shimizu et al., Physical Review A 111, 022619 (2025). Copyright © 2025 by the American Physical Society. 等

性能の理論見積もり

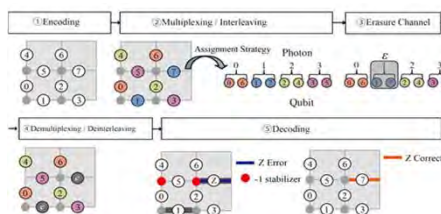
量子フーリエ変換に必要なノード間論理ベルペア数の見積もりを比較

•FTQCに利用する論理qubit数に依らずQ-flyが顕著にリソース有利(特に1台あたりの論理量子ビット数が少ない構成=near futureにおいて。)

希土類量子メモリによる多重化量子通信

多重度30以上 / 十分なり時間 / 異波長間ベル測定等

多重化量子通信による分散誤り訂正符号の効率化

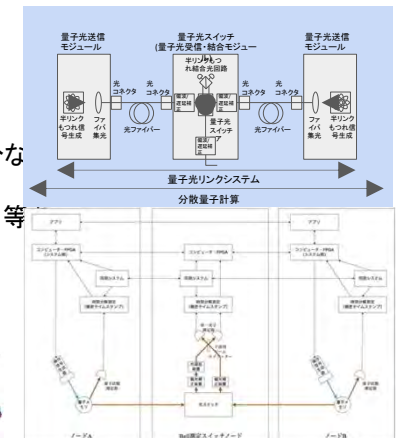


Reproduced from Nishio et al., Quantum 9, 1613 (2025), CC BY 4.0.

性能の異なる複数の量子通信で分散誤り訂正符号を成立

Piparo et al., Physical Review A 110, 032613 (2024). Copyright © 2024 by the American Physical Society. 等

全体設計



Hardware・Softwareを統合した全体設計を実施。仕様を公開・標準化へ。

Reproduced from Nagayama, Information Processing Society of Japan Magazine 66(1), e39-e47 (2025). © 2025 Information Processing Society of Japan. 等

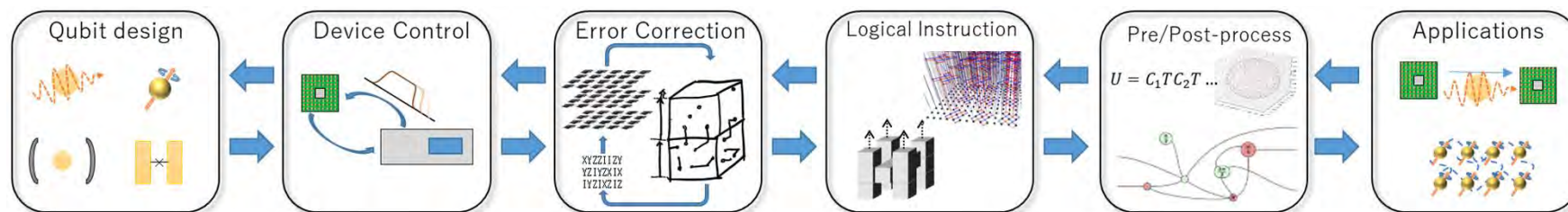
以上を始めとし、発表済み成果数:

原著論文数: 60件(発行前含む)、口頭・ポスター発表: 155件
招待講演: 73件、ワークショップ等開催: 15件、受賞: 4件
プロジェクトからスタートアップを設立

参考) 各プロジェクトの進捗・成果 (小芦PJ)

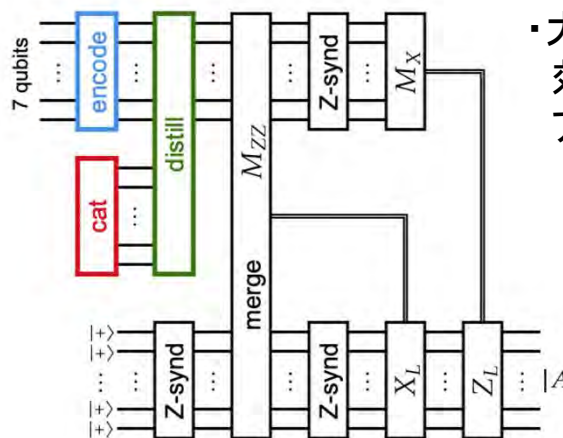
大規模量子コンピュータの開発を加速するクロスレイヤー協調設計ソフトウェアの構築

全ての技術レイヤーを包括した性能予測モデルを構築
 課題の抽出、アイデアの定量的な評価、開発方針策定の支援などで研究開発を加速

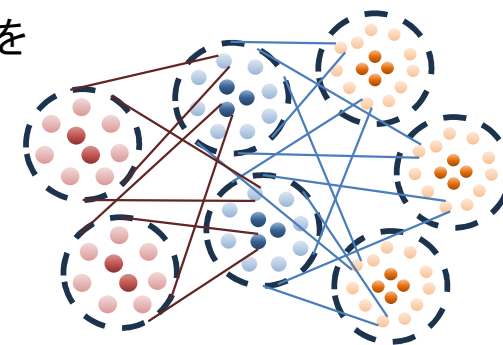


量子コンピュータの性能を引き上げる新しいソフトウェアアプローチの提案

・従来のリソースコストを大幅に低減する新しい魔法状態蒸留手法の提案



・大規模な誤り耐性量子計算を効率的に行う入れ子構造のアーキテクチャの提案



・数万量子ビットで古典コンピュータを凌ぐ誤り耐性量子計算の新アーキテクチャの提案

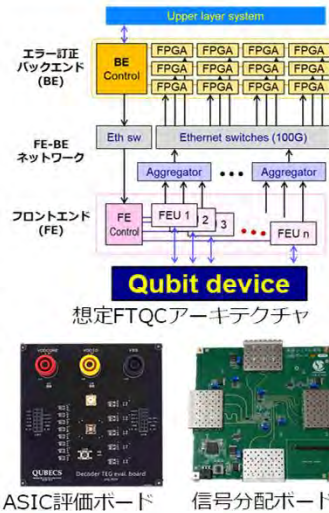


参考) 各プロジェクトの進捗・成果 (小林PJ)

Qubitより上位の古典エレクトロニクスにフォーカス

項目1 (エラー訂正)

- 100物理量子ビットのエラー訂正を行うFPGAクラスタ構築
 - 300超の物理Qubitのエラー訂正可能
- エラー訂正ASICの試作
 - Union Find decoderとプロセッサを集積
- Ethernetによるフロントエンド(制御器)-バックエンド(エラー訂正)間結合
 - エラーを含んだFEエミュレータ
- 独自プロトコルの低レイテンシ相互結合網
 - Ethernetの数分の1の通信遅延



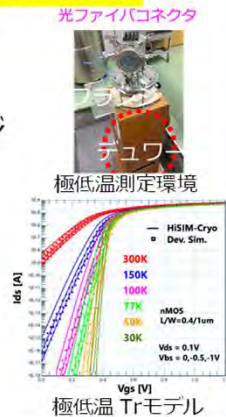
項目2 (Qubit制御器)

- 従来比1.5倍の実装密度のQuel-moonを開発
 - 100+ Qubitの制御向け
- イオントラップ、中性原子向け制御装置
 - 大森PJ、高橋PJと連携



項目3 (光IF+制御器簡素化)

- 光スイッチの77K動作
 - 4.2K動作も構築中
- 180nm 極低温トランジスタ(Tr)モデルの構築
 - 22nmは鋭意構築中
- 極低温でデバイス特性評価
 - ばらつき、信頼性を評価



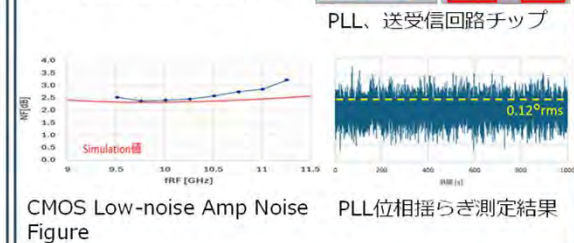
項目4 (Cryo CMOS)

- SoCの試作
 - デジタル・DAC・ADC・PLLを集積
 - 極低温での性能低下
 - 改良版を設計中
- 各ブロックの個別評価
 - 分解能10bのADC、RFモデリング用TEG他
- Gain Cell DRAM
 - SRAMの半分の面積



項目5 (制御器用常温LSI)

- 常温動作のPLL、送受信回路の試作
 - Qubit研究者から絶賛される性能を達成



FPGA: Field Programmable Gate Array, SoC: System on a Chip, DAC: Digital-to-Analog Converter, ADC: Analog-to-Digital Converter, PLL: Phase-Locked Loop, TEG: Test Element Group, S/DRAM: Static/Dynamic Random Access Memory, SNR: Signal-to-Noise Ratio, SFDR: Spurious-free Dynamic Range, SNDR: Signal-to-Noise Distortion Ratio, ENOB: Effective Number Of Bits