

ムーンショット型研究開発事業

令和7年度プログラム外部評価（中間評価）について（目標6）

(1) 目的

プロジェクトの中間評価の結果を受けて、プログラムごとに研究開発の進捗状況や成果を把握し、これを基に適切な予算配分及び研究開発計画の見直し等を行うことにより、事業運営の改善及び機構の支援体制の改善に資することを目的とする。

(2) 実施時期

原則として、プログラムとしての研究開発開始時点から3年目に実施する。

(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ポートフォリオの妥当性
- ムーンショット目標達成等に向けたプログラムの研究開発の進捗状況
- ムーンショット目標達成等に向けたプログラムの研究開発の今後の見通し
- PDのマネジメントの状況(ポートフォリオ管理、PMへの指揮・監督、機動性・柔軟性等を含む。)
- 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(官民の役割分担及びステージゲートを含む。)
- 国民との科学・技術対話に関する取組
- 機構のPD、PM等の活動に対する支援
- 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

プログラムに対する技術専門的な観点からの評価は、外部評価グループが行う。外部評価グループの技術専門的な意見を元に、ガバニング委員会がプログラム全体を評価する。

(5) 評価の手続き

プログラムごとに、外部評価グループ及びガバニング委員会にて、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。

※評価会実施日、評価者一覧は別紙のとおり

(別紙)

■評価会実施日

外部評価グループ：令和7年9月10日、9月18日

ガバニング委員会：令和7年11月18日

■評価者一覧（外部評価グループ）

氏名	所属・役職等
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

※所属・役職等は評価会時点のもの

■評価者一覧（ガバニング委員会）

氏名	所属・役職等
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	日本電信電話株式会社 先端技術総合研究所 常務理事 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

※所属・役職等は評価会時点のもの

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

※プログラム評価公開用にスライド抜粋・入替

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. 概要および研究開発プログラムの状況
2. JST5年目外部評価結果
3. 参考

目次

1. 概要および研究開発プログラムの状況

2. JST5年目外部評価結果

3. 参考

1.1 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



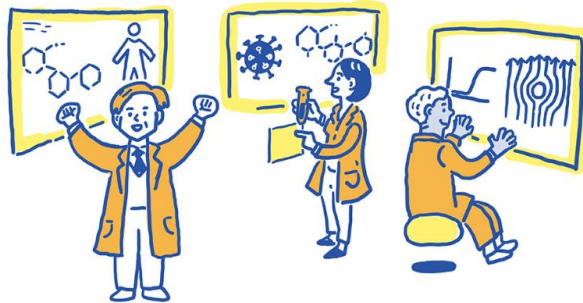
人工光合成の実現。太陽の光と水を使って、地球温暖化の原因となる二酸化炭素を酸素と有機化合物に変える。

様々な反応の量子状態を厳密に計算し、物質の性質を正確に予言することが可能になるため、創薬や室温超伝導物質などの材料開発が飛躍的に加速する。

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)



1.2 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
「誤り耐性型汎用量子コンピュータ」を実現する

2050 大規模化を達成し、誤り耐性型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



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

1.3 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。

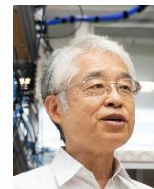
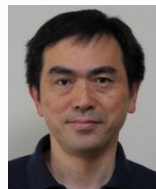
1.4 目標達成に向けた進捗状況

- 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。

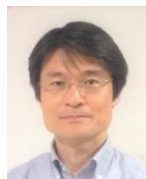
1.5 プログラムの推進体制（前半5年）

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 量子ドットアレイ	半導体 スパースマトリクス	中性原子 2次元アレイ	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	超伝導と 通信の 連携	分散QC 連携 光検出器 で連携					
	小坂PM (横国大)						
	山本俊PM (阪大)						
	永山PM (慶大)						
	量子ネットワークシステム技術						
誤り耐性							
	小芦PM (東大)						
	小林PM (工繊大)						
	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

1.6 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~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、ブレイクイーブン実 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。

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。

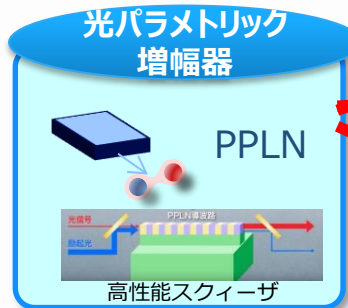
1.7 目標達成に向けた革新的な取組み・成果

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

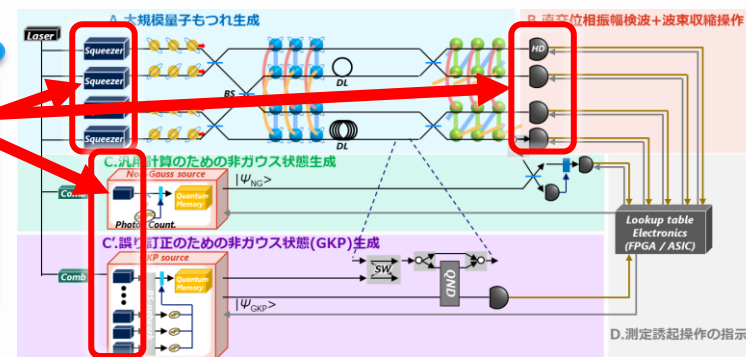
■ 概要

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

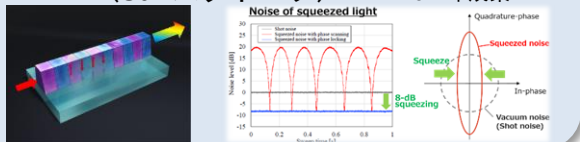


測定誘起型光量子コンピュータの全体像



■ 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スクイーズ)



2022年成果

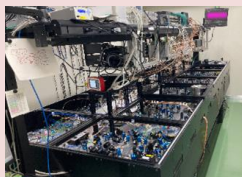
高速量子検出技術
(43GHzホモダイン検波)



2023年成果

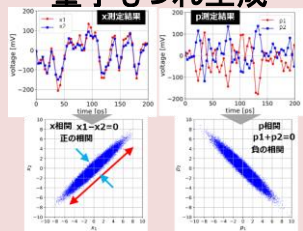
技術展開

実機構築@理研



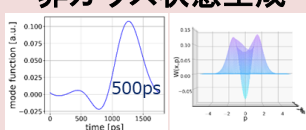
プロセッサ部への導入（2Dクラスター生成）

世界最速
量子もつれ生成



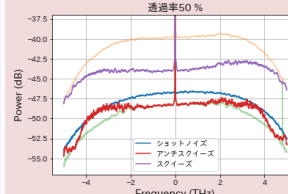
ps級もつれ確認

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



透過率50%
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

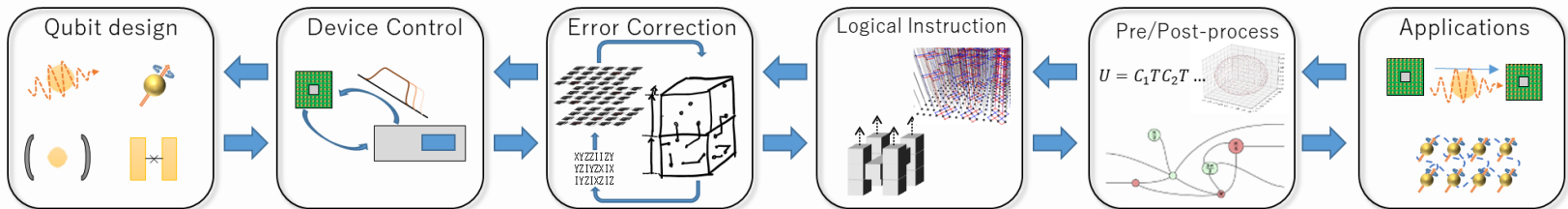


1.7 目標達成に向けた革新的な取組み・成果

- ・ 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

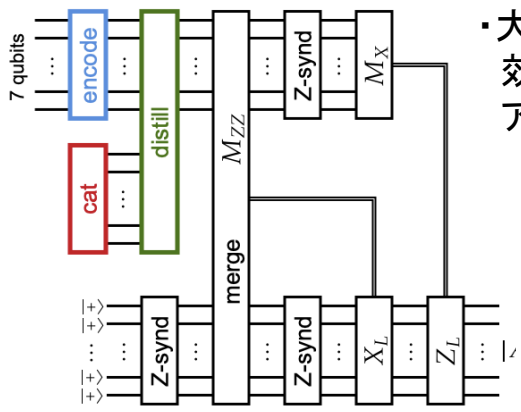
大規模量子コンピュータの開発を加速するクロスレイヤー協調設計ソフトウェアの構築

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

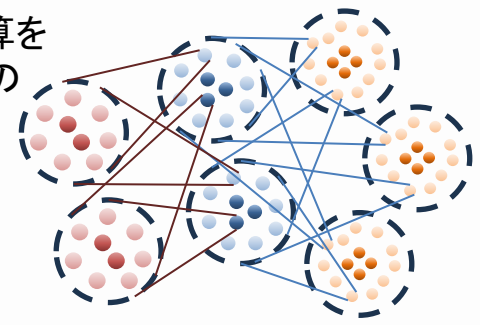


量子コンピュータの性能を引き上げる新しいソフトウェアアプローチの提案

- ・ 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



1.8 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

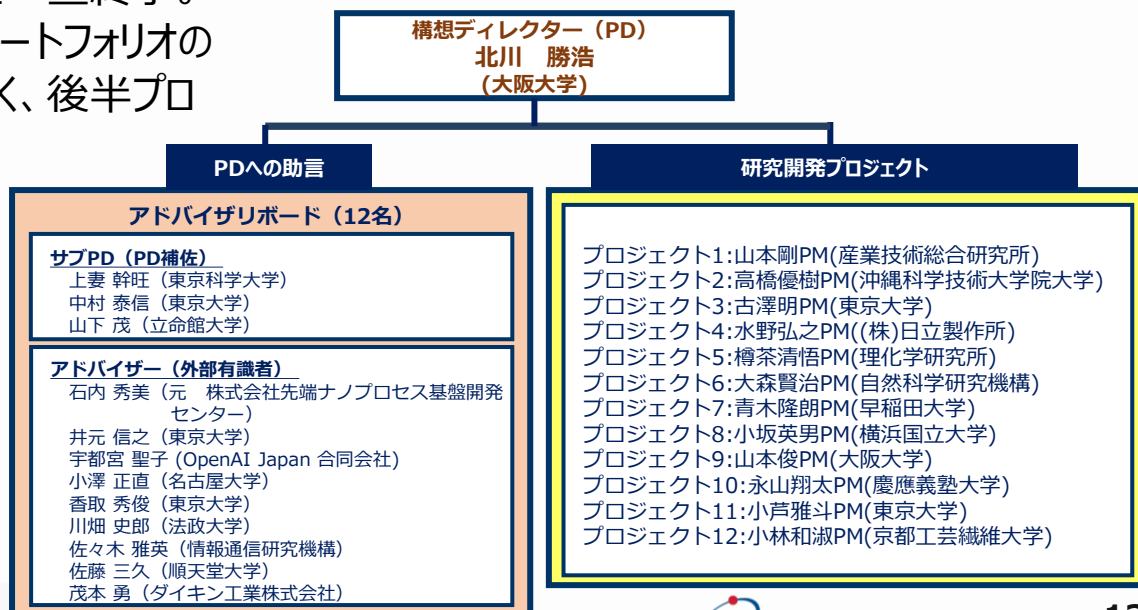


ポートフォリオ見直し

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。



1.8 プログラムマネジメントの状況

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、IQY 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、シャープブルック大、シンガポール南洋理工大、ロイヤルメルボルン工科大

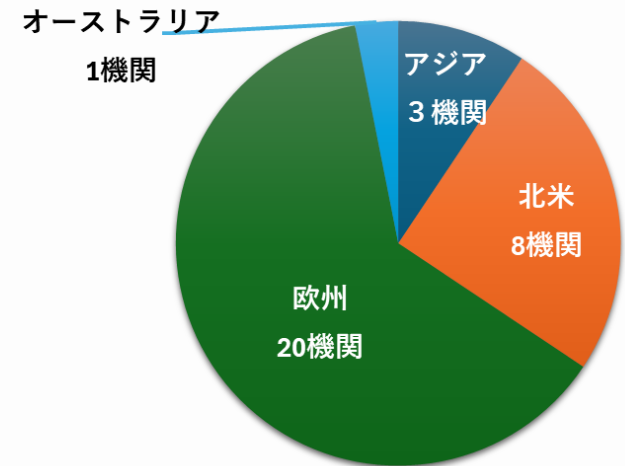
■ 学生や研究員等の派遣

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)

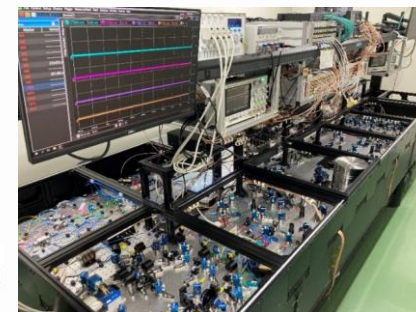
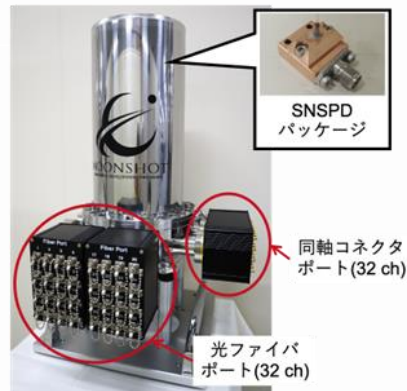


1.8 プログラムマネジメントの状況

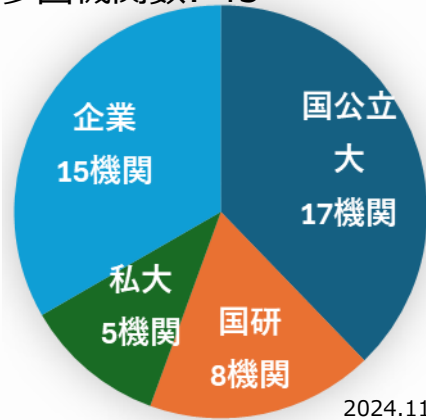
産業連携・社会実装

- **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



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
- ・キューエル、・ソシオネクスト

1.8 プログラムマネジメントの状況

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。

1.8 プログラムマネジメントの状況

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

1.8 プログラムマネジメントの状況

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。

目次

1. 概要および研究開発プログラムの状況

2. JST5年目外部評価結果

3. 参考

2.1 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
神 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

2.2 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。

2.2 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。

2.2 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）

2.2 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。

2.3 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

2.3 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
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ドロ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

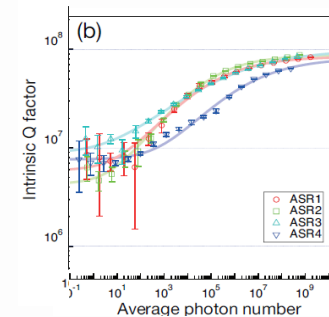
目次

1. 概要および研究開発プログラムの状況
2. JST5年目外部評価結果
3. 参考

参考) 各プロジェクトの進捗・成果 (山本剛PJ)

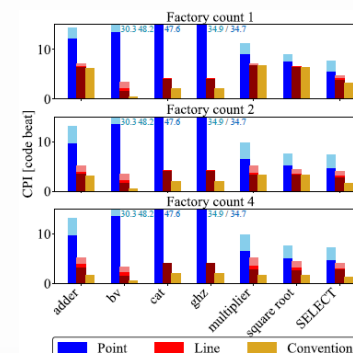
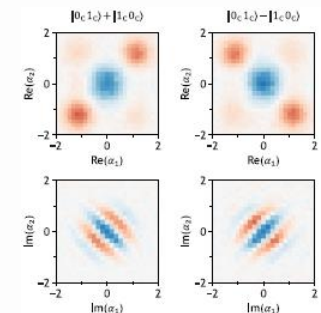
- 純国産による超伝導量子コンピュータのテストベッド機の開発と大阪万博におけるクラウド接続 (大阪大学、Ulvac Cryo社、Ulvac社による共同チーム)
- 単一光子レベルの超微弱なプローブ強度において10Mに達する世界最高Q値を有する超伝導平面共振器の実現 (理研/野口チーム、NICT/吉原チーム)
- 超伝導Kerrパラメトリック共振器を用いたボゾニック量子ビットにおける世界初のユニバーサルゲート動作の実証 (東京理科大学/蔡チーム)
- 初期誤り耐性量子コンピュータ向けロードストア型アーキテクチャの提案 (九州大学/井上チーム (小芦PJおよび永山PJとの共同研究による))

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



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

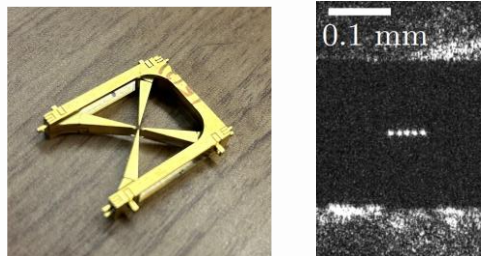
D. Hoshi et al., Nature Commun. **16**, 1309 (2025).



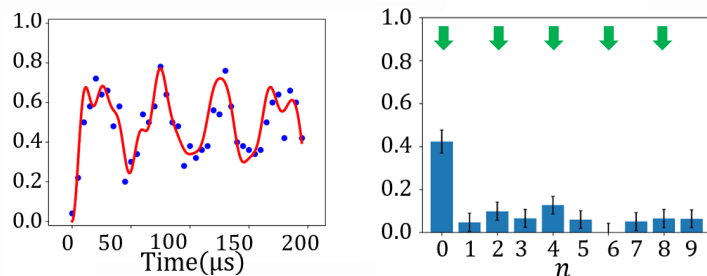
T. Kobori et al., HPCA 2025 arXiv:2412.20486

参考) 各プロジェクトの進捗・成果 (高橋PJ)

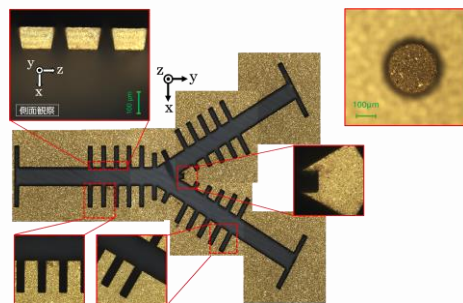
Selective laser etching により作製された
イオントラップと捕捉されたイオン (課題 1 - 1)



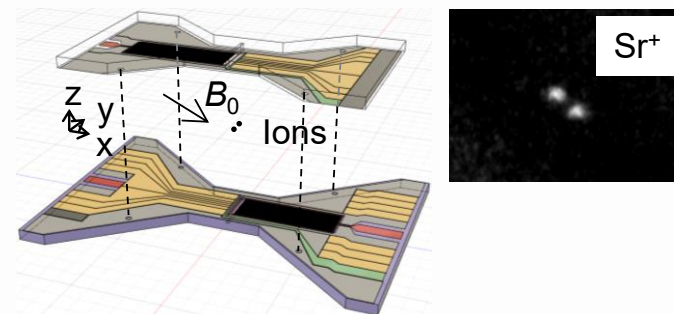
振動スクイズド状態の生成 (課題 3 - 1)



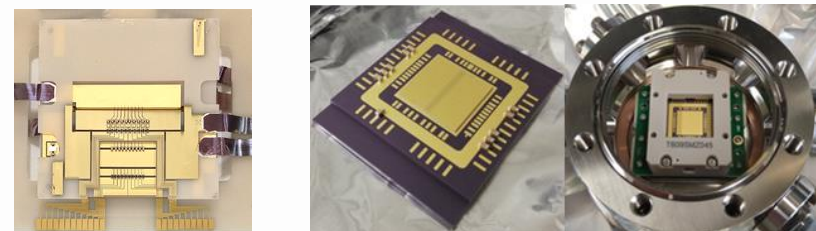
Y字ジャンクション (課題 6 - 1)



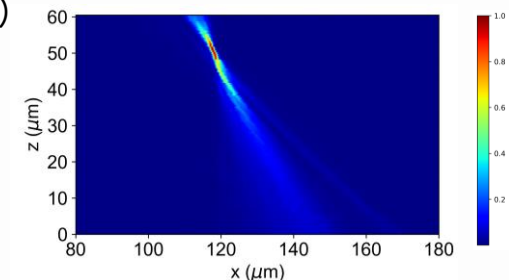
3次元超伝導イオントラップと
超低電力で捕捉されたイオン (課題 2 - 1)



立体および平面型イオントラップ (課題4 - 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)

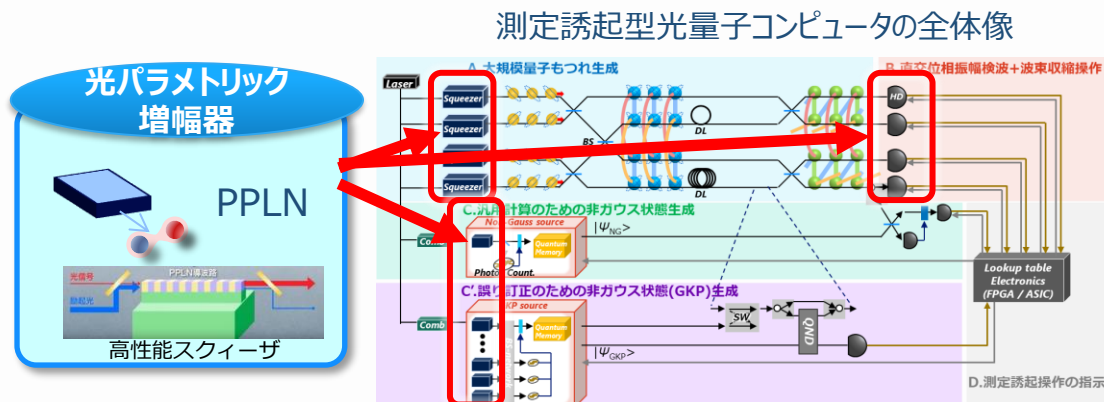


参考) 各プロジェクトの進捗・成果 (古澤PJ)

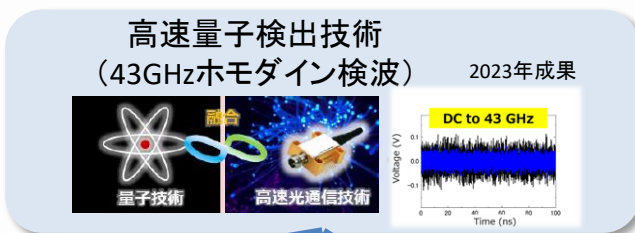
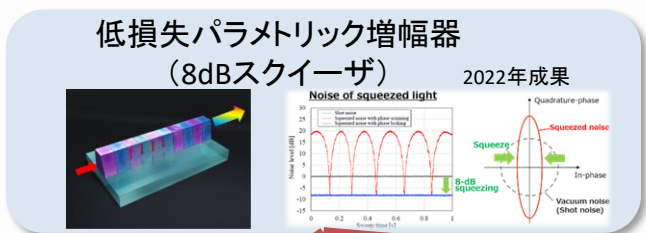
■ 概要

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

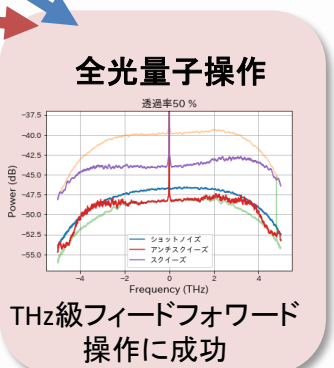
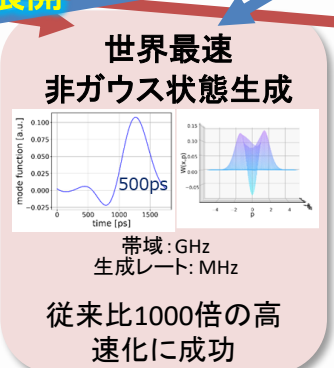
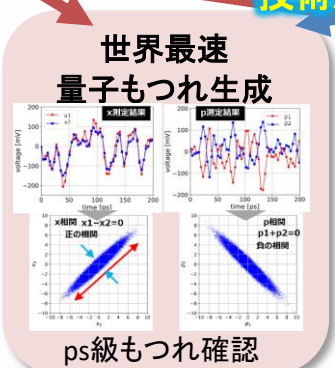


■ 進捗や研究成果 (技術練度向上と展開)



■ GKP量子ビットの生成

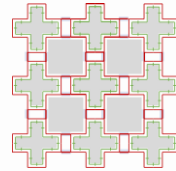
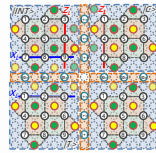
誤り訂正のための非ガウス状態(GKP)生成



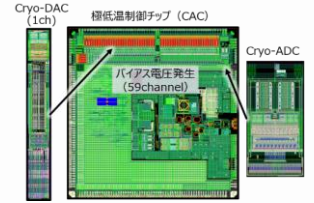
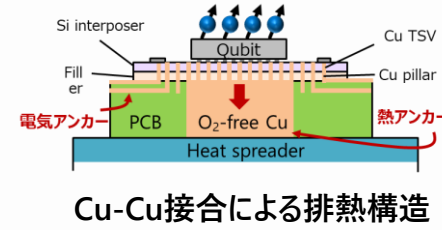
技術展開

参考) 各プロジェクトの進捗・成果 (水野PJ)

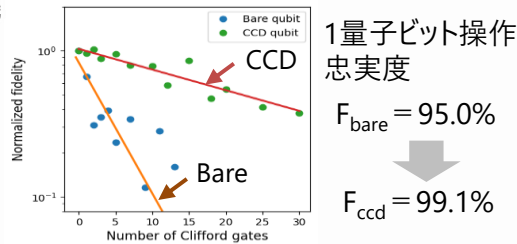
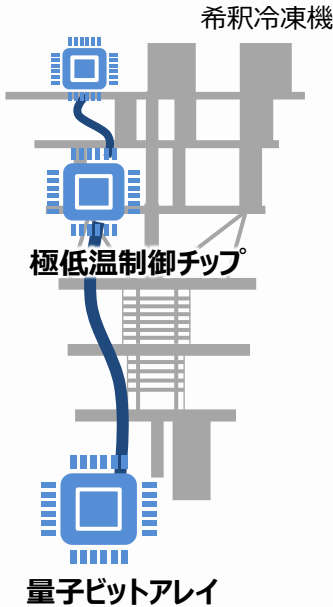
トップダウンとボトムアップを組み合わせ、量子ビットアレイ・制御回路・ソフトウェアに至る量子コンピュータのシステム化を実施



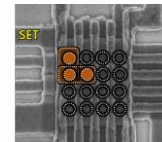
誤り訂正符号
実装可能な
量子ビット集積
アーキテクチャ



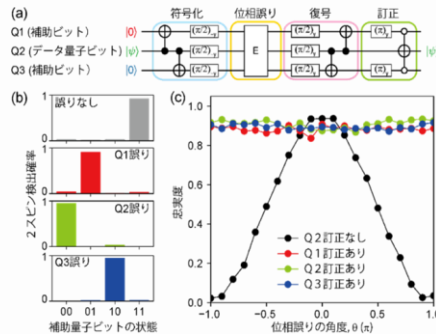
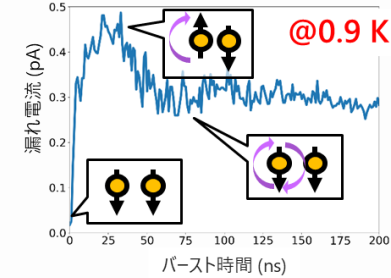
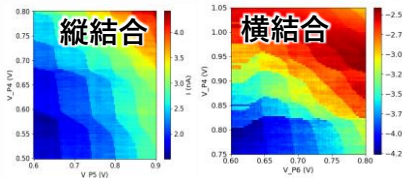
100mK Cryo-DAC & ADC



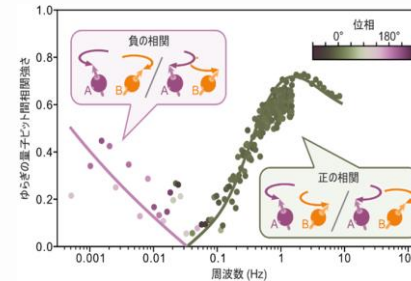
高忠実度量子ビット制御方式の開発



4x4量子ビット
アレイにおける
2量子ビット操作



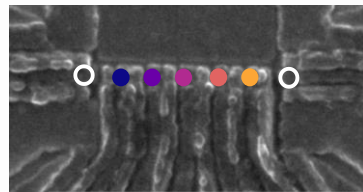
3つのSiGe量子ビットによる位相誤り訂正操作実証



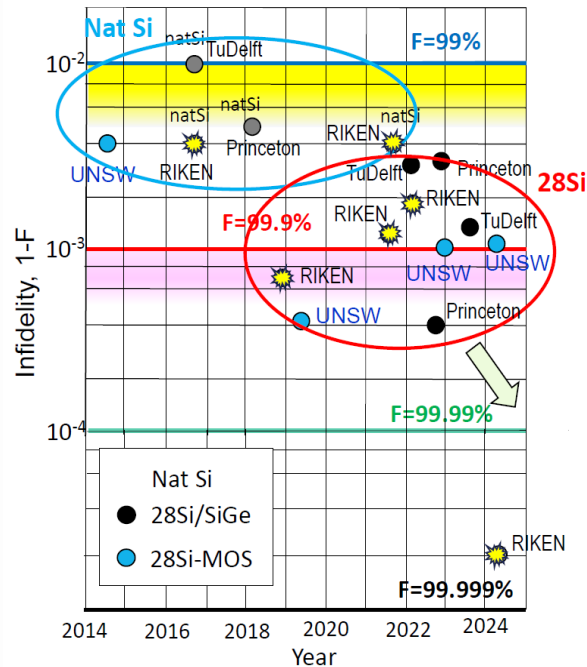
シリコン量子ビット間の誤り相関の発見と、電荷雑音の重要性指摘

参考) 各プロジェクトの進捗・成果 (樽茶PJ)

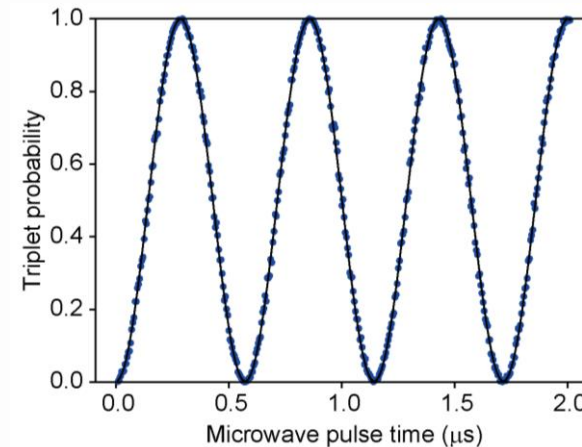
5量子ビットデバイスにおいて全ての忠実度99.99%及び同時制御を達成



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 μ s) 高忠実度 (> 99%) を達成

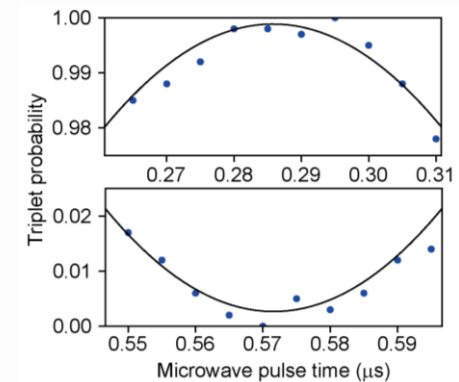


SPAM忠実度 > 99 %

初期化誤り < 0.2%

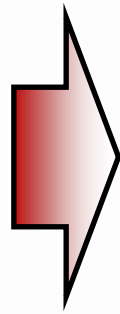
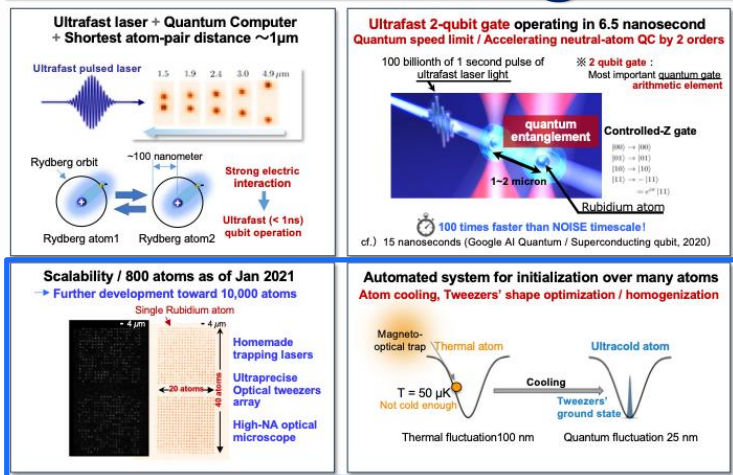
測定時間 < T_2^*

$T_2^* > 8\mu$ s

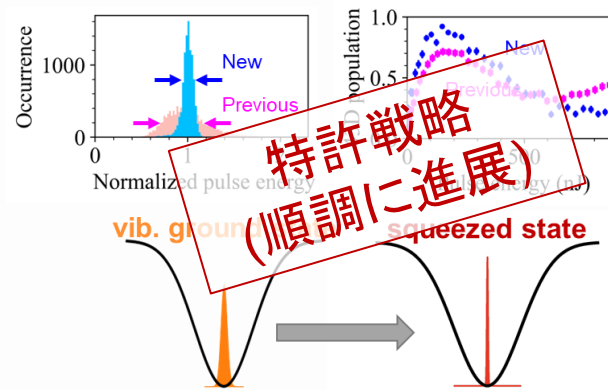


参考) 各プロジェクトの進捗・成果 (大森PJ)

多くのコアコンピタンス@分子研



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)

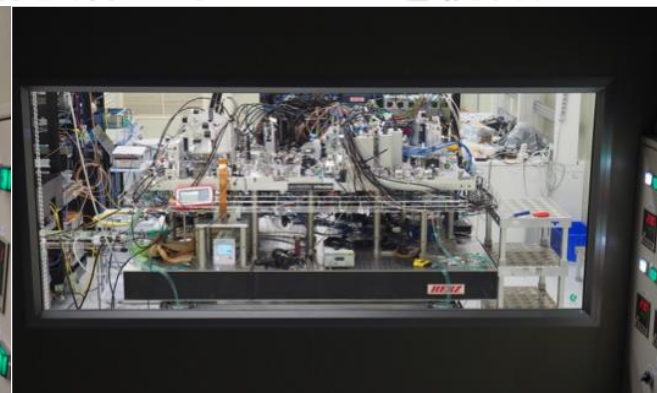
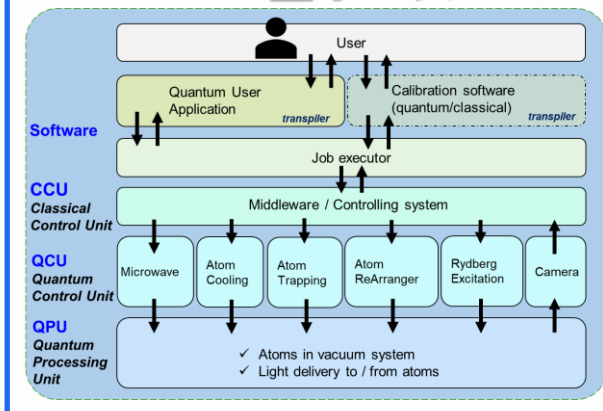
etc. ...



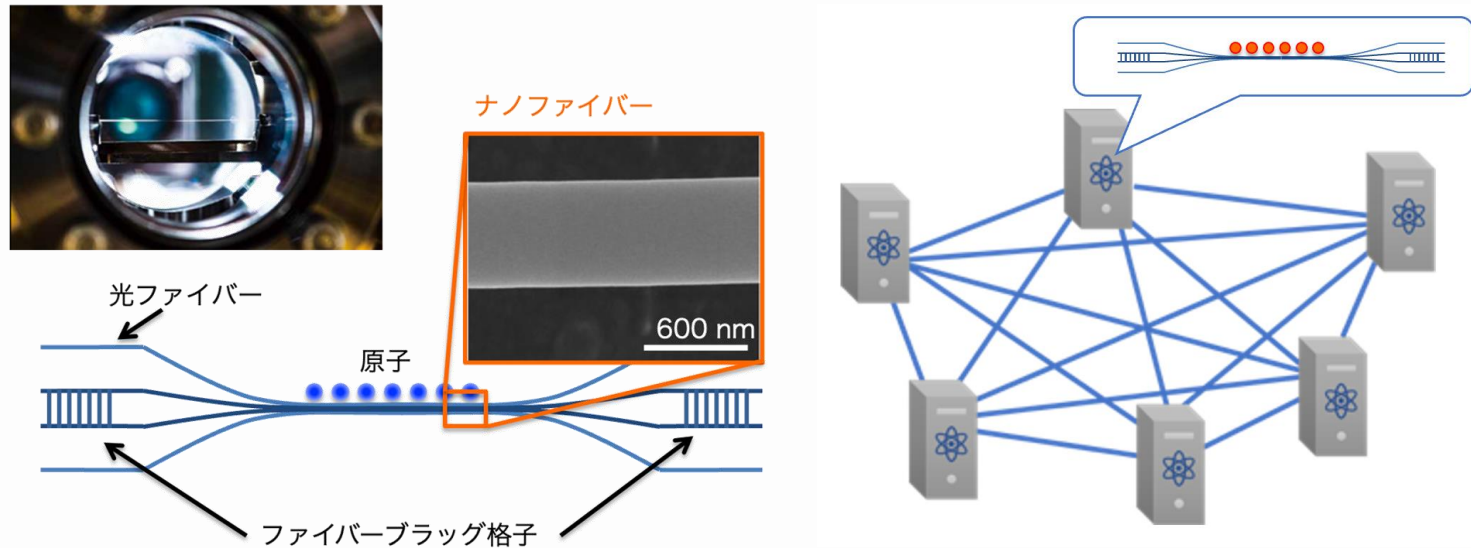
2025年度内に稼働予定



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)



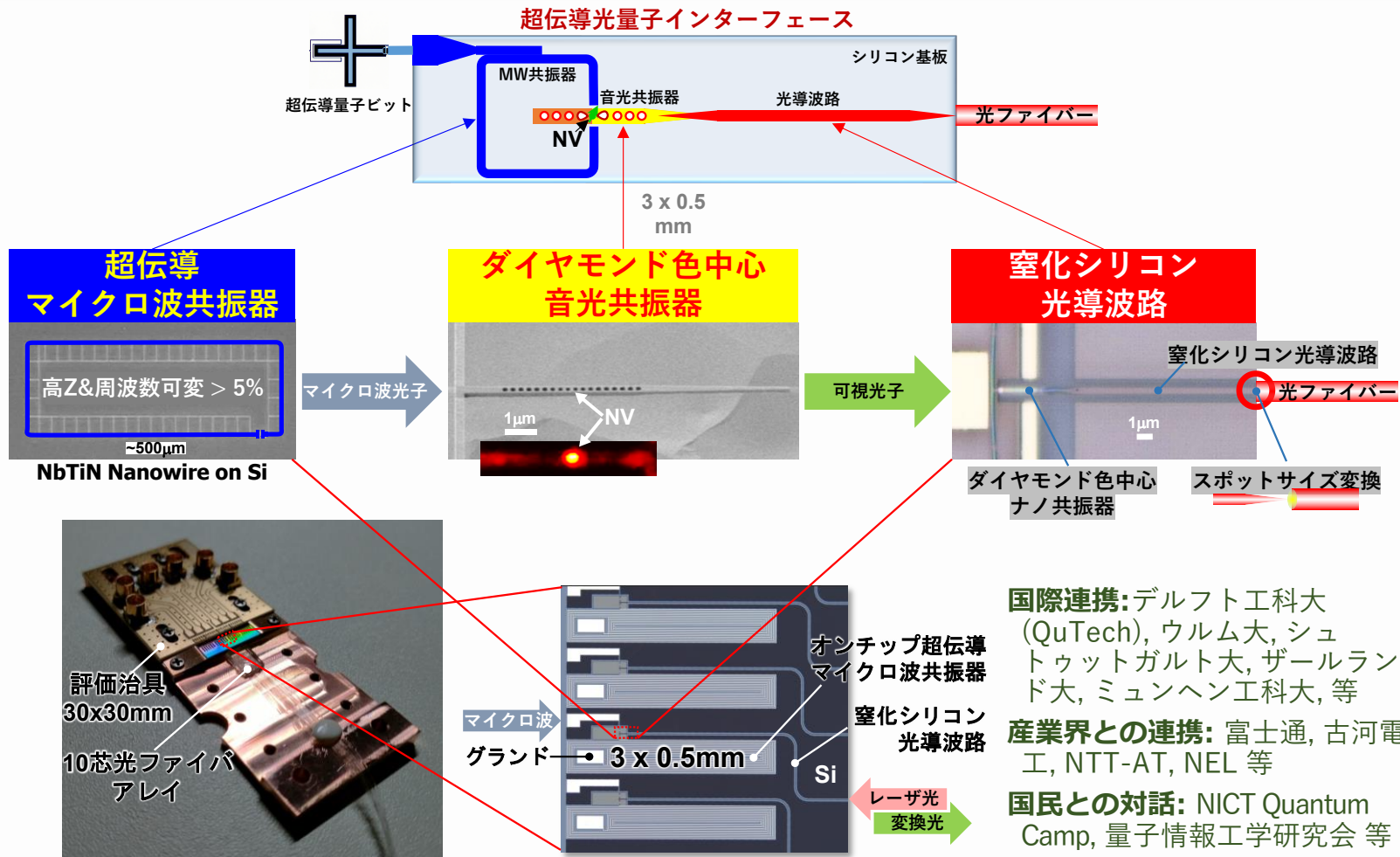
参考) 各プロジェクトの進捗・成果 (青木PJ)



- 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、少量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。

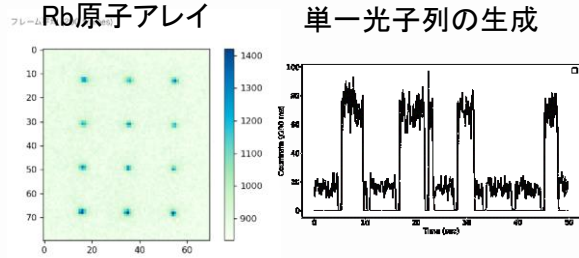
参考) 各プロジェクトの進捗・成果 (小坂PJ)

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

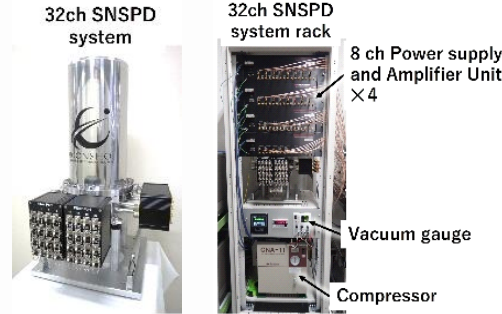


参考) 各プロジェクトの進捗・成果 (山本俊PJ)

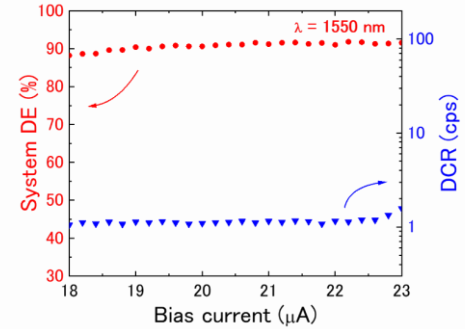
原子-光子インターフェース:
原子アレイからの単一光子生成の確認



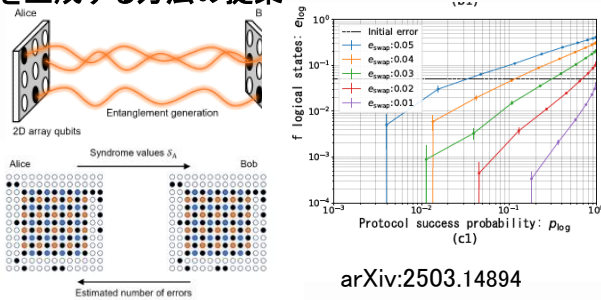
32ch 超伝導ナノワイヤ単一光子検出器システム



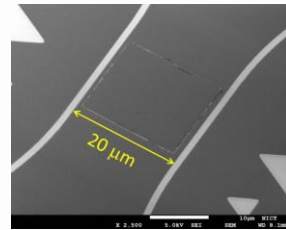
検出効率90%以上、暗計数率 1 cps 以下の
超伝導ナノワイヤ単一光子検出器



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



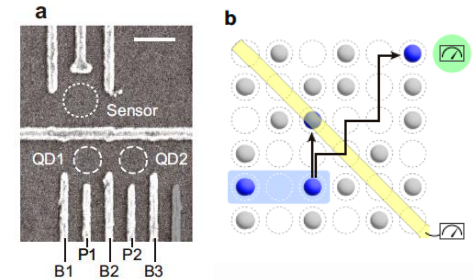
ワイドストリップ型
超伝導単一光子検出器を開発



- 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

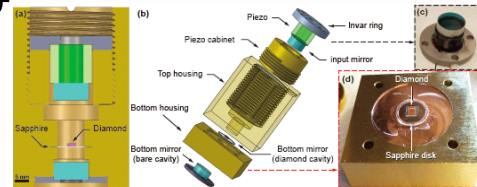
M. Yabuno *et al.* *Optica Quantum* 1, 26 (2023)

電子スピンの高精度読み出し法を開発



npj Quantum Information 10, 95(2024)

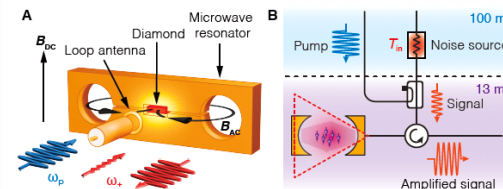
ミリK温度で動作するマイクロ波-光子のトランスデュー
サ



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

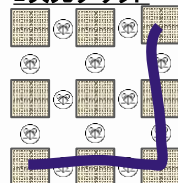
arXiv:2505.05705

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



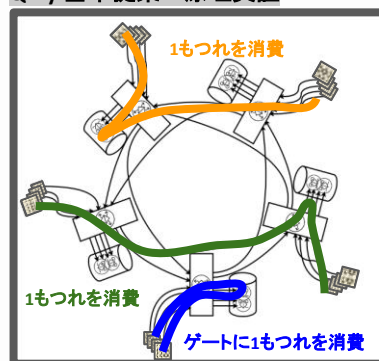
例: ゲートに4もつれを消費

- 光スイッチ (グループスイッチ)
- 量子コンピュータ
- ベル状態測定機 (もつれ生成器)

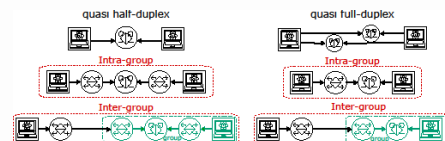
革新

中心的成果：世界初の高効率 量子インターコネクト 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

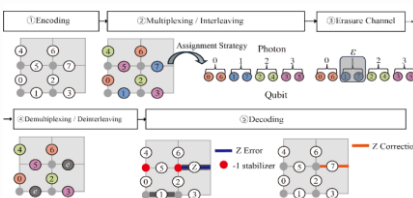
性能の理論見積もり

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

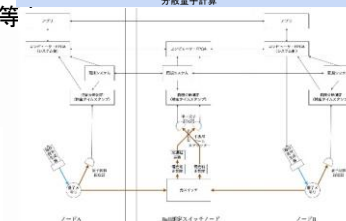
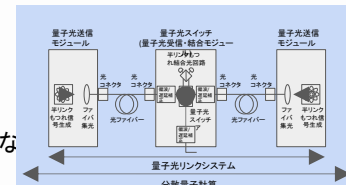


Reproduced from Nishio et al., Quantum 9, 1613 (2025), CC BY 4.0.

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

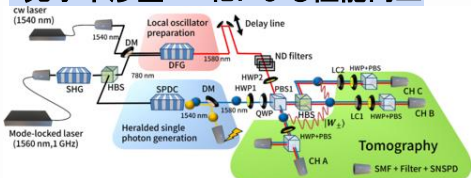
2光子干渉型Network (NW) Hardware・Software統合実装



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

量子インターコネクト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

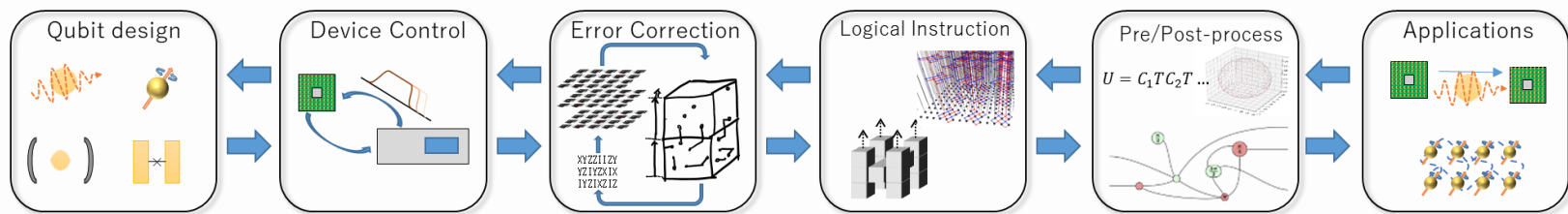
1光子干渉型NW化による性能向上



参考) 各プロジェクトの進捗・成果 (小芦PJ)

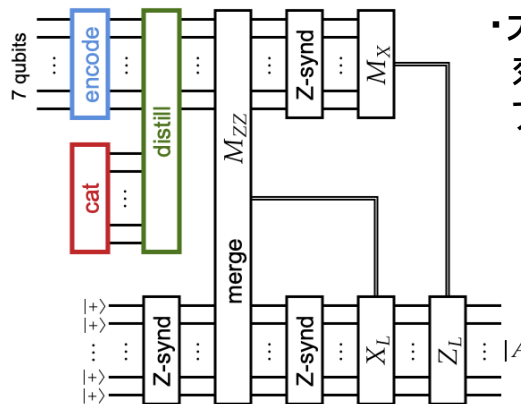
大規模量子コンピュータの開発を加速するクロスレイヤー協調設計ソフトウェアの構築

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

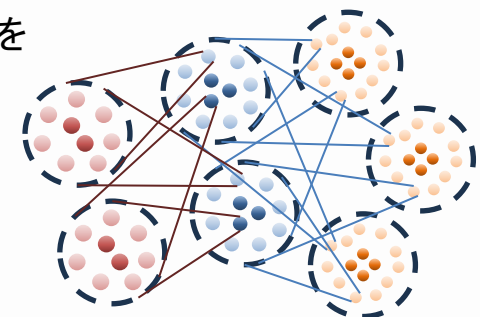


量子コンピュータの性能を引き上げる新しいソフトウェアアプローチの提案

・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

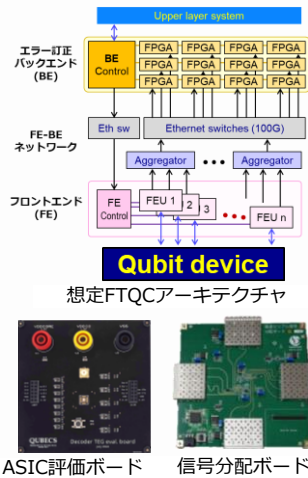


参考) 各プロジェクトの進捗・成果 (小林PJ)

Qubitより上位の古典エレクトロニクスにフォーカス

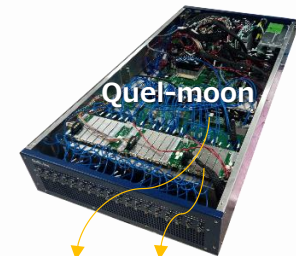
項目1 (エラー訂正)

- 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



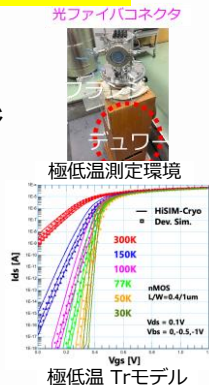
イオントラップ向けプロトタイプ

FPGA+ADC/DACx3

小型RFモジュール

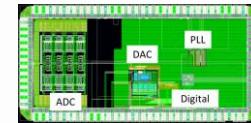
項目3 (光IF+制御器簡素化)

- 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



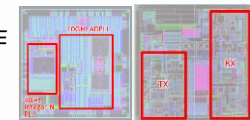
SoCレイアウトと評価ボード

極低温での性能

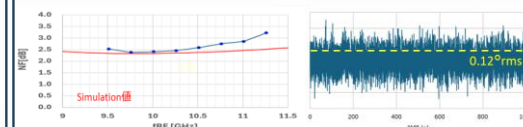
SNR	SFDR	SNDR	ENOB
39.2dB	44.1dB	39.2dB	6.2bit

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



PLL、送受信回路チップ



CMOS Low-noise Amp Noise PLL位相揺らぎ測定結果 Figure

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

付属資料

目標6 前半5年間の実施プロジェクト一覧

プロジェクト名	プロジェクトマネジャー (PM)	研究費 (億円)
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	小芦 雅斗 (東京大学 大学院工学系研究科 教授)	7.0
量子計算網構築のための量子インターフェース開発	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)	44.6
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	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)	43.6
誤り耐性型大規模汎用光量子コンピュータの研究開発	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)	78.3
大規模集積シリコン量子コンピュータの研究開発	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)	39.7
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	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)	47.8

※研究費：委託研究費の合計額

目標6 前半5年間の実施プロジェクト一覧

プロジェクト名	プロジェクトマネジャー (PM)	研究費 (億円)
超伝導量子回路の集積化技術の開発	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)	55.5
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	青木 隆朗 (早稲田大学 理工学術院 教授)	36.7
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 教授/研究主幹)	53.0
スケーラブルな高集積量子誤り訂正システムの開発	小林 和淑 (京都工芸繊維大学 電気電子工学系 教授)	25.5
拡張性のあるシリコン量子コンピュータ技術の開発	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)	46.8
スケーラブルで強靱な統合的量子通信システム	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)	31.8

※研究費：委託研究費の合計額