

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7年3月28日

プログラムディレクター

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. 研究開発プログラムの概要
2. 研究開発プログラムの状況
3. 今後の方向性
4. 自己評価結果
5. 参考

目次

1. 研究開発プログラムの概要

2. 研究開発プログラムの状況

3. 今後の方向性

4. 自己評価結果

5. 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



1.2 解決すべき課題: 量子ビット数 n_L

本格的な量子化学計算に必要な量子ビット数 n_L

例1: 根粒菌のニトロゲナーゼによる窒素固定の量子化学計算には
約2,000論理量子ビットの誤り耐性型量子コンピュータが必要
($n_L=2,024$, $g_L \approx 6 \times 10^{16}$)

M. Reiher (ETH Zurich), N. Wiebe, K.M. Svore, and M. Troyer (Microsoft Research)
Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS) 114 (29) 7555–7560, 2017
“Elucidating reaction mechanisms on quantum computers”
<https://doi.org/10.1073/pnas.1619152114>

例2: ニトロゲナーゼの補因子FeMocoの精密量子化学計算には、
約2,000論理量子ビットの誤り耐性型量子コンピュータが必要
($n_L=2,142$, $g_L \approx 5.3 \times 10^9$)

J. Lee (Columbia Univ.), D.W. Berry (Macquarie Univ.)
N. Wiebe (Univ. Washington, Pacific Northwest National Lab.)
C. Gidney, W.J. Huggins, J.R. McClean, R. Babbush (Google Quantum AI)
PRX Quantum 2, 030305, 2021
“Even More Efficient Quantum Computations of Chemistry Through Tensor Hypercontraction”
<https://doi.org/10.1103/PRXQuantum.2.030305>

1.2 解決すべき課題：量子ビット数 n 、ゲート数 g 、誤り率 p

- 現状ベスト $n \approx 100$, $p \approx 0.001$ (0.1%)

- 計算の成功確率

$$(1 - p)^g = 0.999^g = 0.367... (g = 1000) \quad \text{有意な確率37\%で成功}$$

$$(1 - p)^g = 0.999^g = 0.000045... (g = 10000) \quad \text{無理}$$

$p \leq 1/g$ 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

$$n = 6k, g \approx 8G, p \approx 10^{-10} \leq 1/g$$

- FeMocoの精密量子化学計算

$$n = 2k, g \approx 5.3 \times 10^9, p \approx 10^{-10} \leq 1/g$$



量子誤り訂正 QEC
誤り耐性量子計算 FTQC

1.2 解決すべき課題： 論理量子ビット数 n_L 、ゲート数 g_L 、論理誤り率 $P_L < 1/g_L$

FeMocoの精密量子化学計算

$$n_L = 2k, g_L \approx 5.3 \times 10^9, P_L \approx 10^{-10}$$

- $p = 10^{-3}$ (0.1%) の場合

$$d = 15, 2d^2 - 1 = 449 \text{ 物理量子ビット}$$

2k論理量子ビットは100万(1M)物理量子ビット

- $p = 10^{-4}$ (0.01%) の場合

$$d = 7, 2d^2 - 1 = 97 \text{ 物理量子ビット}$$

2k論理量子ビットは20万(200k)物理量子ビット

物理量子ビットは、質(誤り率 p の低さ)
量(ビット数)ともにまだまだ足りない

表面符号

誤り耐性閾値 $p_{th} = 0.01$

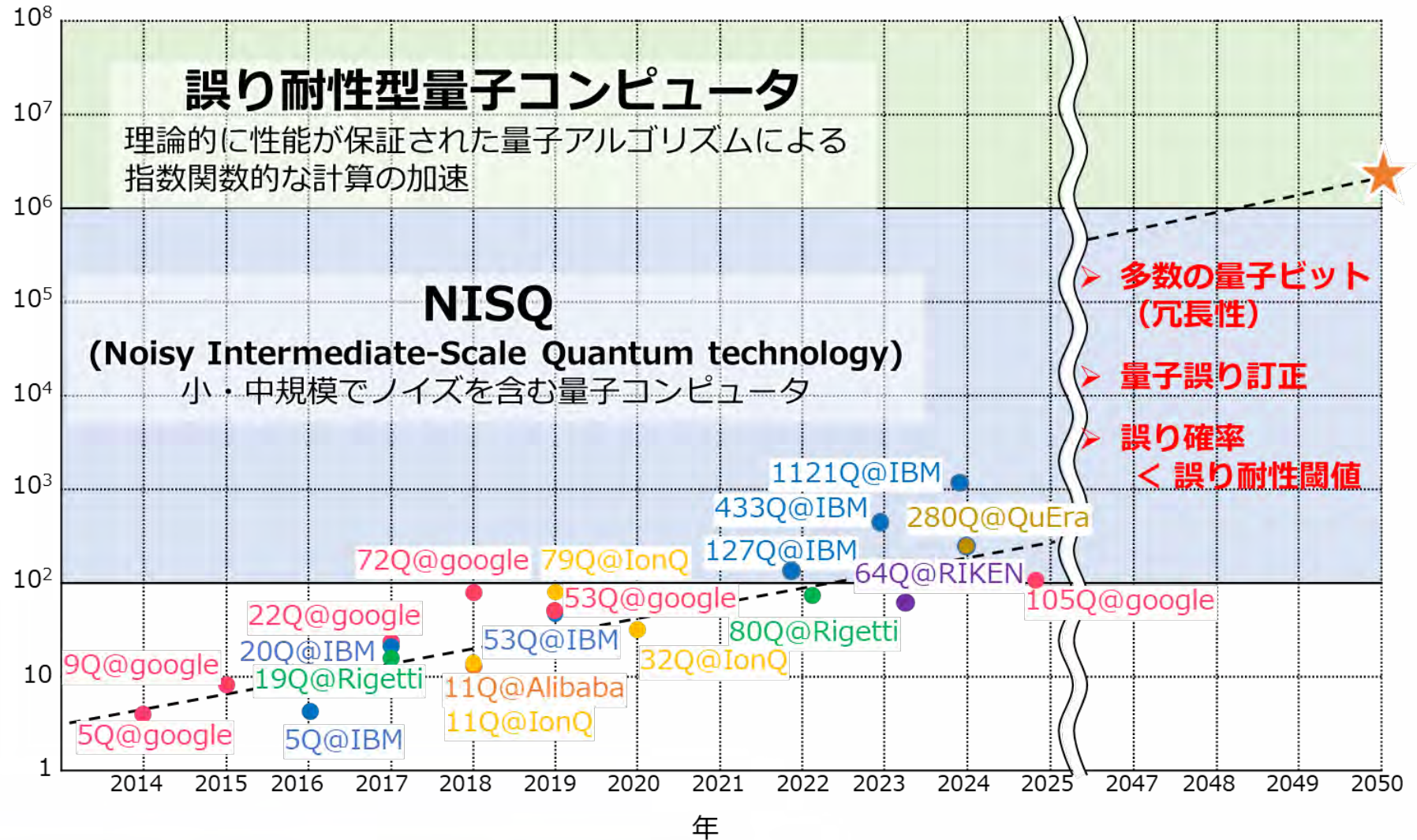
符号距離 d

$$\text{論理誤り率 } P_L = p_{th} \left(\frac{p}{p_{th}} \right)^{\frac{d+1}{2}}$$

$$\frac{\text{物理量子ビット}}{\text{論理量子ビット}} = 2d^2 - 1$$

1.2 解決すべき課題：量子ビット数 n の拡大状況

量子ビット数



1.3 プログラムのマイルストーン

2050

2040

2030

2025

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

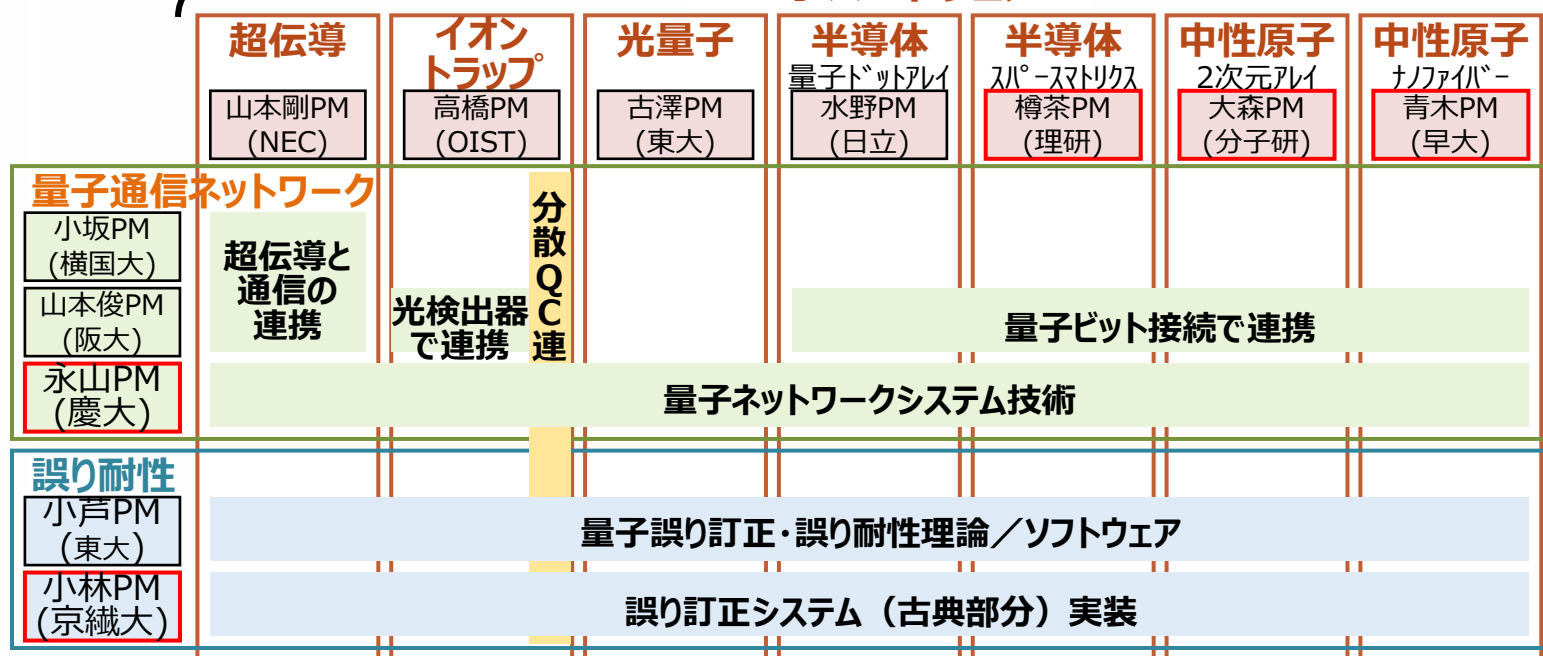
量子誤り訂正が可能となる規模の量子コンピュータを開発し、量子誤り訂正を実行して、その有効性を実証する。

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。

1.4 プログラムの推進体制



量子ハードウェア



研究開発体制図： プログラムポートフォリオ

黒枠は2020年度採択
赤枠は2022年度採択

理論・ソフトウェアプロジェクトにおいて、マルチレイヤー協調設計モデルを構築し、研究開発の指針を得る。
内外の研究開発の活発化に対応し、2022年度にプログラムの強化・アップデートを実施。

目次

1. 研究開発プログラムの概要

2. 研究開発プログラムの状況

3. 今後の方向性

4. 自己評価結果

5. 参考

2.1 国内外の研究開発動向との比較:海外競合動向

量子ビット数拡大状況図 (p.8)に示すように、量子ビット数の拡大は続いており、さらなる野心的なロードマップも発表されているが、技術的な根拠は充分でない。

一方、量子ビット数の拡大に伴い、誤り訂正を用いないNISQコンピュータの限界も見えてきたことから、誤り訂正・誤り耐性を重視した方向に研究開発が転換しつつある。

FTQCを目指した、誤り訂正や論理量子ビット作製の取り組みの例:

Google社:

超伝導量子ビットにおいて量子誤り訂正符号(表面符号)によって
ブレイクイーブンを達成

超伝導105量子ビット素子上で、**表面符号を用いて論理量子ビットを作製し、**
17,49,97量子ビットと拡大する毎に、誤り率が2.14倍低下する結果を得た。
単独の量子ビットの誤り率を下回り、**指数的に誤り率を低減できる傾向を初めて確認した。**

Nature 638, 920–926 (2025) <https://doi.org/10.1038/s41586-024-08449-y>

QuEra社:

中性原子において280量子ビットで**48論理量子ビットを構成**

Nature 626, 58–65 (2024) <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06927-3>

2.1 国内外の研究開発動向との比較:本目標の現状

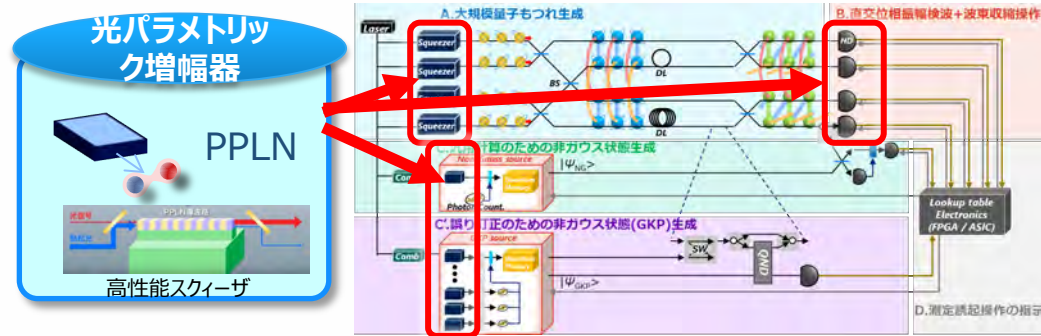
有望な複数のハード方式を競争的に開発し、そこに、量子通信ネットワーク、誤り耐性の開発を横通しして3カテゴリー12プロジェクトを連携させる独自のポートフォリオ体制で運営してきた。当初より誤り訂正・誤り耐性実証を想定しており、量子誤り訂正の理論では世界的な成果が出ている。周辺状況の変化に対応して、2022年度より、半導体と中性原子の量子ビット、誤り訂正システム、大規模ネットワークのプロジェクトを追加採択し、顕著な成果も得られている。研究開発は概ね予定通りだが、実機での誤り訂正実験が未達である点で、競合者に先行を許している。

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
特徴	NISQ動作可能 高速～100ns 極低温～10mK	NISQ動作可能 低速～50μs 均一・全結合	回路構成可能 超高速<ns 室温動作	微細・大規模化 高速～10ns 極低温～1.5K	NISQ動作可能 低速～μs 均一・全結合
競合企業 野心的目標 量子ビット数	Google: 1M/1000論理 @2029年	Quantinuum: 1000/100論理 @2029年	PsiQuantum: 1M/100論理 @2025年	SQC: 10k/誤り訂正実証 @2028年	QuEra: 1000/100論理 @2026年
競合企業 現状と評価	105量子bitチップ上 で誤り訂正実証	56量子bit 直接結合で拡張を計画	1Mチップ未完成 デバイス技術高い Fusion-Based式	SQC:4量子bit Intel:12量子bit供給	280量子bitで48論理 量子bit作製
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前半に予定。	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 立後れている。	独自の光量子方式で実機を構築、 クラウド公開予定。 誤り耐性用GKP量子ビットの 近似生成は世界初。	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、 量子誤り訂正やシステム化では遅れている。

2.2 革新的な取組み・成果(1) 量子ハードウェア領域

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PJ)

測定誘起型光量子コンピュータの全体像



低損失パラメトリック増幅器
(8dBスクイザー)

2022年成果

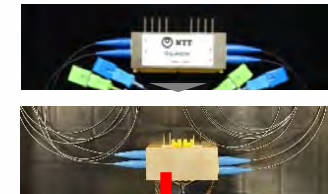


高速量子検出技術
(43GHzホモダイン検波)

2023年成果



量子光特性向上に向けたPPLN短尺化



技術展開

実機構築@理研

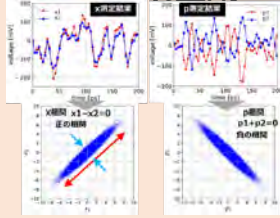


プロセッサ部への導入 (2Dクラスター生成)

クラウド公開

11月1日報道発表

世界最速
量子もつれ生成*1



Nature Photonics

12月5日報道発表予定

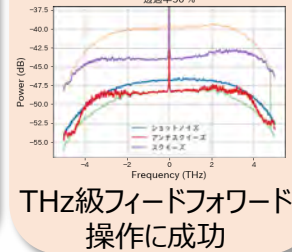
世界最速
非ガウス状態生成*2



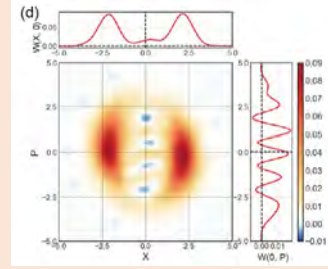
Nature Communications

11月8日報道発表

全光量子操作*3



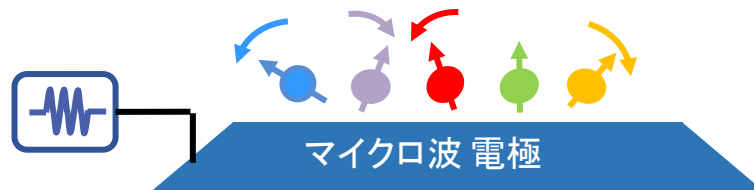
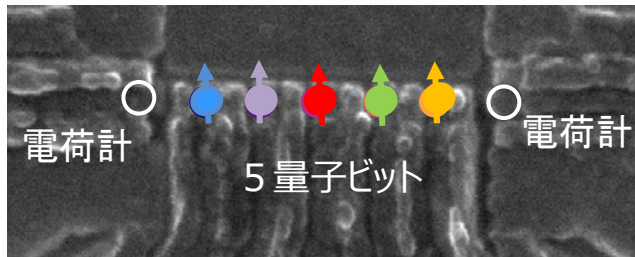
4光子引き取り成功



2.2 革新的な取組み・成果(2) 量子ハードウェア領域

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PJ）

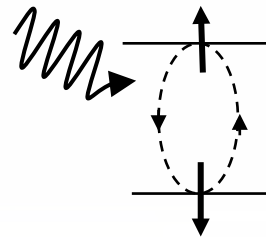
5量子ビットデバイスにおいて初めて、全ての量子ビットで操作誤り率0.01%以下、
および複数量子ビットの同時制御を達成



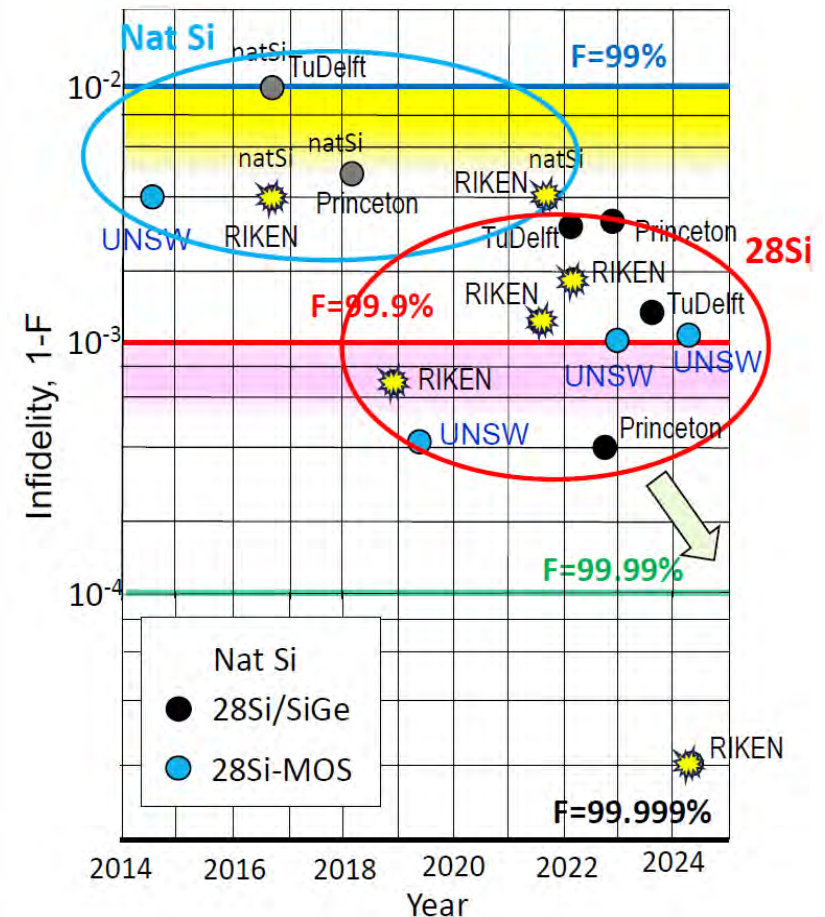
スピン量子ビット操作:

スピンのエネルギーに共鳴するマイクロ波を照射するとスピンは、上向きと下向きの状態間で反転を繰り返す。
＝スピンの回転(量子ビット操作)

スピン回転操作



量子ビット操作誤り率



2.2 革新的な取組み・成果(3) 量子ハードウェア領域

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PJ）

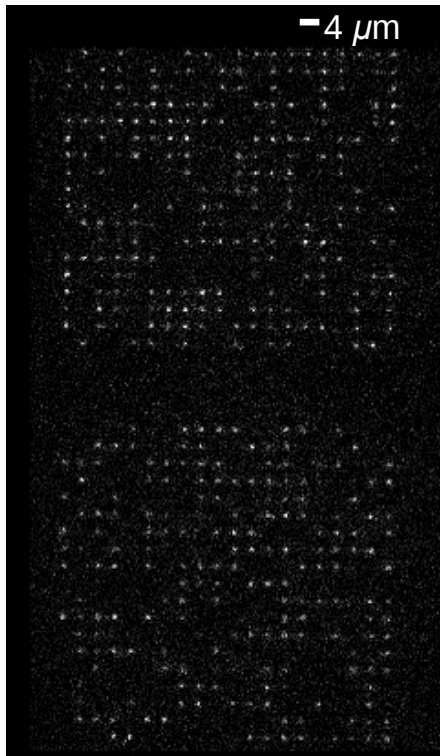
大規模化技術

世界最大規模800原子 / 2021年1月時点

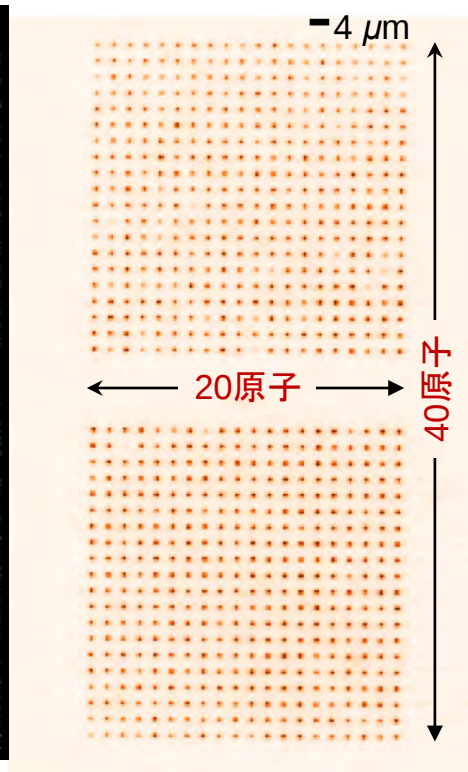
10,000原子に向けて開発継続中

独自トラップレーザー / 超精密光ピンセット / 高開口数顕微鏡

原子蛍光(リアルタイム)

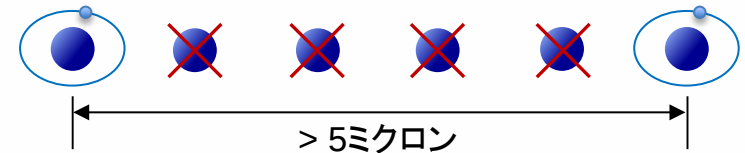


原子蛍光(平均画像)



超高速レーザー技術の導入

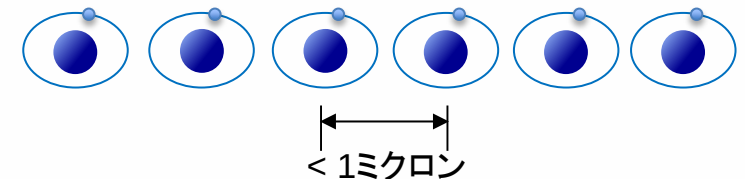
従来手法: 連続発振レーザー



リュードベリ原子の強い電場の影響で
周囲の原子の励起がブロックされる
(リュードベリ・ブロッケード)

⇒ 5ミクロン程度までしか近づけられない

分子研新手法: 超高速パルスレーザー



リュードベリ原子の強い電場の影響が
隣の原子に伝わる前に超高速で励起する

⇒ 1ミクロン以下まで近づけられる

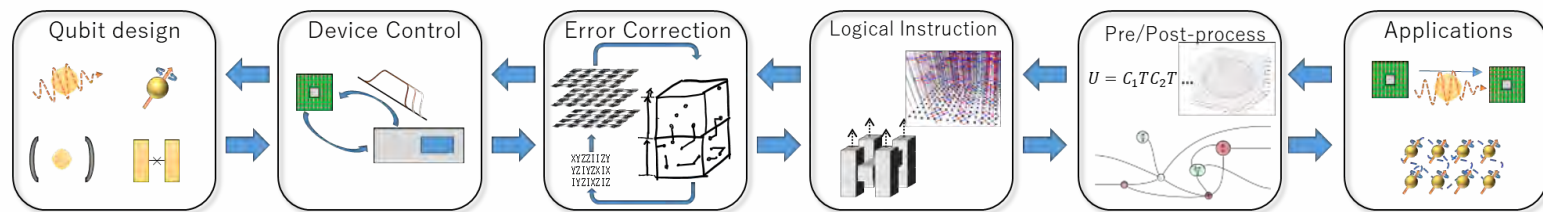
相互作用強 → 超高速量子ビット操作

2.2 革新的な取組み・成果(4) 誤り耐性領域

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）

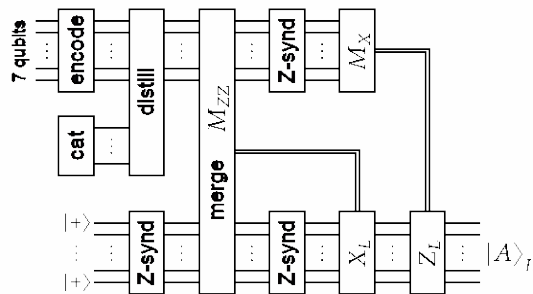
大規模量子コンピュータの開発を加速するクロスレイヤー協調設計ソフトウェアの構築

全ての技術レイヤーを包括した性能予測モデルの拡充を行い、
複数のハードウェアに対応可能に。ベンチマーク対象のアルゴリズムを大幅に拡大。



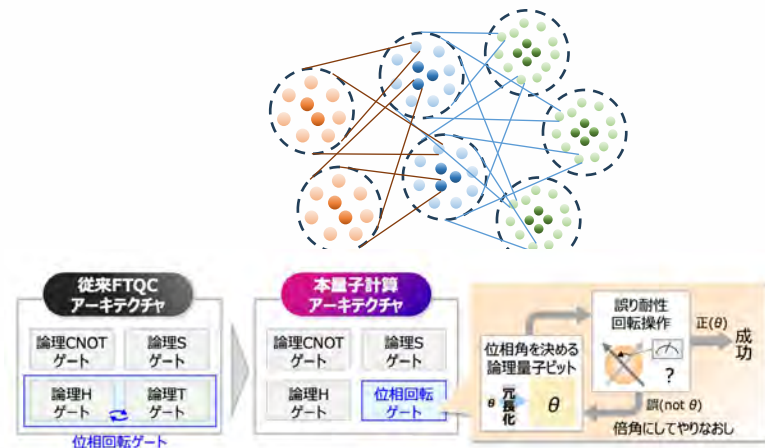
量子コンピュータの性能を引き上げる新しいソフトウェアアプローチの提案

・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



・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

・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



2.3 プログラムマネジメントの状況（1）

PDによるプログラムマネジメント

■プログラム構想・体制:

- ・規模拡大・精度向上がともに期待できる複数の物理量子ビットハードウェアの開発を競争的にを行い、さらなる規模拡大のための量子通信接続の開発と誤り耐性理論・ソフトウェア開発および誤り訂正システム開発からなる3カテゴリー12プロジェクトのポートフォリオにより運営
- ・効率的な量子誤り訂正符号などの要素技術に加えて、多くのレイヤーからなる量子コンピュータの最適設計に必要なマルチレイヤー協調設計モデルの構築を行い、研究開発の指針を得ることが特長
- ・有力コンサルティングファームなどの客観的な将来予測や、NISQ中心だった海外企業が誤り訂正・誤り耐性に向けて方向転換しつつある状況などが、本プログラムの目標設定の妥当性を示唆

■研究実施体制強化

- ・2022年度に半導体と中性原子の有望な物理量子ビット、誤り訂正システム、大規模ネットワークのプロジェクトを追加採択し、プログラムの強化・アップデートを実施
- ・プロジェクト数の増加に伴い、アドバイザーからサブPDを1名増員
- ・アドバイザー3名が辞退したことを受け、新たに3名に委嘱

アドバイザーボード（11名） 令和2年11月

サブPD（PD補佐）

中村 泰信（東京大学）
山下 茂（立命館大学）

アドバイザー（外部有識者）

石内 秀美（元 先端ナノプロセス基盤開発センター）
井元 信之（東京大学）
小澤 正直（中部大学）
川畑 史郎（産業技術総合研究所）
上妻 幹旺（東京工業大学）
佐野 健太郎（理化学研究所）
茂本 勇（東レ株式会社）
村尾 美緒（東京大学）
若山 正人（東京理科大学）

アドバイザーボード（11名） 令和7年3月

サブPD（PD補佐）

上妻 幹旺（東京科学大学）
中村 泰信（東京大学）
山下 茂（立命館大学）

アドバイザー（外部有識者）

天野 英晴（東京大学）
石内 秀美（元 先端ナノプロセス基盤開発センター）
井元 信之（東京大学）
宇都宮 聖子（OpenAI Japan 合同会社）
小澤 正直（中部大学）
川畑 史郎（法政大学）
佐々木 雅英（情報通信研究機構）
茂本 勇（ダイキン工業株式会社）

2.3 プログラムマネジメントの状況（2）

PDによるプログラムマネジメント

■プロジェクトとのコミュニケーション

- ・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）
2024年度には「2030年に何を目指すべきか、2025年までに何をやっておくべきか」をテーマに設定

- ・内部全体合宿：合宿形式で開催（約300名が参加）

コロナ禍のためプログラム開始以降開催を見合わせていた合宿を開催し、関係者が研究成果、今後の進め方などを討議した。ムーンショット研究開発制度やPDとPMの違いを理解していない参加者が居ることも判明し、改めて説明した。最終日には活発な議論の端緒が開かれ、プロジェクトの再編や連携の議論につながった。その後のプロジェクト毎の会議でも、合宿後に急速に議論が深まったことを確認した。合宿の絶大な効果を見て、コロナ禍のため、2020年プログラム開始直後に行えなかったことが悔やまれる。



約300名が参加



PD・サブPD・AD・PMの議論



参加者同士の交流・議論

- ・PD・PM個別会議：プログラム開始当初は2ヶ月に1回開催、2022年度追加採択後は毎年2回開催
サブPD、アドバイザーも交えて、適宜個別実施
- ・サイトビジット：実験系を重点に20サイトを訪問。研究環境、研究実施上の課題などについて意見交換。全PJで実施
- ・海外視察報告会：小林PMが海外状況をプログラム内で共有するため報告

2.3 プログラムマネジメントの状況（3）

国際連携

■国際会議

Quantum Innovation

2021年から毎年、量子科学技術イノベーション拠点他、主要な国内の量子技術関連諸制度と共催
(**QI2024は2024/10/21-23開催**、QI2025は2025/7/29-8/2開催予定)

■MS6国際シンポジウム

2023/7/18-20 開催

2025/8/1-2 開催予定(QI2025内)

■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

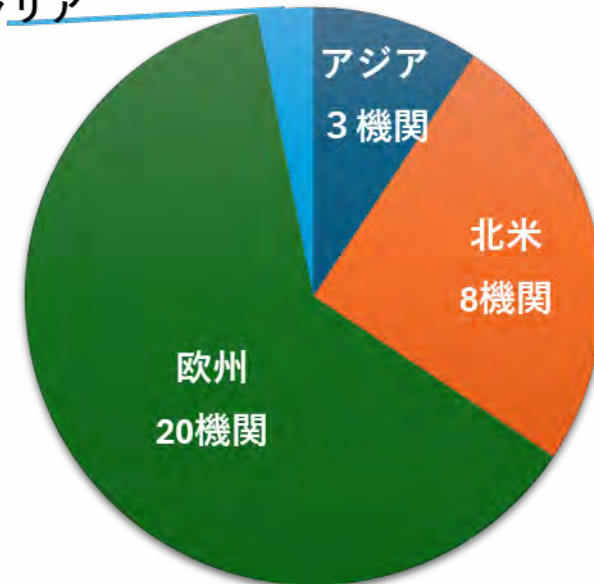
■学生や研究員等の派遣

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、サクレイ研究所、他

国際連携先(研究交流、研究員等派遣など)32機関（延べ）

オーストラリア

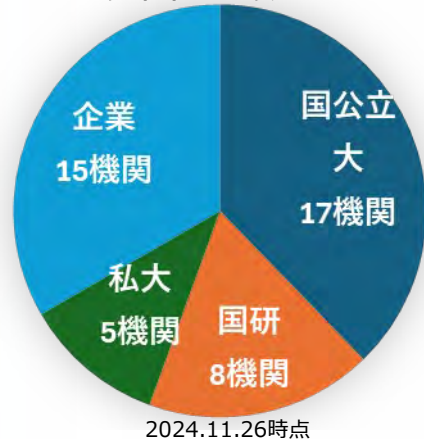
1機関



2.3 プログラムマネジメントの状況（4）

産業界との連携・橋渡し

参加機関数: 45

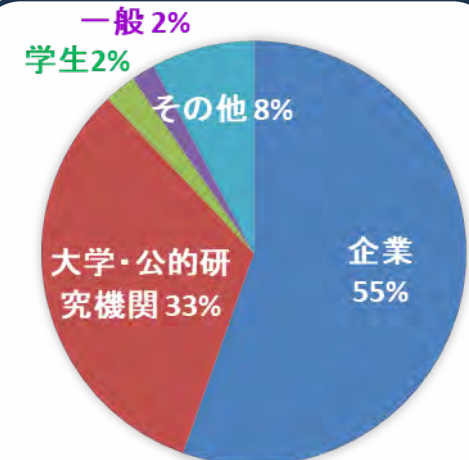


PMの所属民間企業

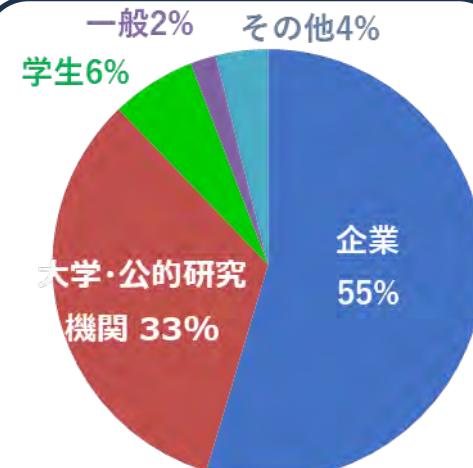
・日本電気、 ・日立製作所、 ・メルカリ

課題推進者の所属民間企業

・日本電気、 ・日本電信電話(4プロジェクトに参加)
・アルバック・クライオ、 ・アルバック、 ・ニコン
・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、
・Nanofiber Quantum Technologies、
・浜松ホトニクス、 ・メルカリ、 ・LQUOM
・キューエル、 ・ソシオネクスト



ミニシンポジウム（2024/10/1）
アンケート回答者の所属(166名)



ミニシンポジウム（2025/1/30）
アンケート回答者の所属(205名)

ミニシンポジウムを開催: FTQCをテーマとし産業界から多くが参加

第一回: 量子コンピュータは、未来をどう変えるか（2024/10/1）

330名参加

～FTQCとそこに至る過程で期待されるアプリケーション～

第二回: 量子誤り訂正最前線（2025/1/30）

390名参加

～FTQCにどれくらい近づいたのか？どれくらい遠いのか？～

浜松ホトニクス：多チャンネル超伝導光子検出器を開発、MS6内に複数提供

日本電信電話：光パラメトリック増幅器を開発

アルバック・クライオ、アルバック：国産希釈冷凍機を開発

古澤PJ：理化学研究所に汎用型光量子計算コンピュータプラットフォーム設置(2024/11)

スタートアップOptQC株式会社を起業（2024/9）

山本剛PJ：超伝導でクラウド公開予定

大森PJ：冷却原子で起業に向け準備中

2.3 プログラムマネジメントの状況（5）

広報・アウトリーチ活動

■ ムーンショット目標 6 公開シンポジウム

2021年以降毎年開催

2025/3/4 参加人数：525名（現地：294名、オンライン：231名）

■ 若手対象スクール

2021/9/27-28 量子教育プログラム オンラインサマースクール

2022/9/23-30 量子教育プログラム サマースクール（合宿）

2024/3/12-16 2023年度QIH-MS6 量子情報技術スプリングスクール（合宿）

2024/9/2-5 QIH・MS6・Q-LEAP サマースクール 2024（合宿）

■ "未来社会の担い手×ムーンショット研究者"交流会

2025/3/10 久留米工業高等専門学校対話会

■ Nature 2024年2月号およびNatureオンライン版に目標 6 の特集記事を掲載

<https://www.nature.com/collections/gieejcdceg>

■ 山本剛PJおよび小林PJがAPS-TVビデオを作製し、2024 APS March Meetingでビデオ放映

2.3 プログラムマネジメントの状況（6）

ELSI、数理科学、プログラム間連携等、横断的な取組

■ ELSI

- ・2023/9/12 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」検討会を後援

■ 数理科学

- ・2023/4/14 数理科学分科会主催の「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ワークショップ」における「ムーンショット目標6からの事例紹介及び質疑応答」セッションで2名が講演
- ・数理科学的アプローチを用いた研究開発の公募採択者を小芦PJの課題推進者として加え、数理物理のコミュニティに量子情報の手法を持ち込む活動を実施

■ プログラム間連携

- ・ムーンショット型研究開発制度合同シンポジウム(2023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(2023年)
目標5(農業)の千葉PDおよび目標4(環境)の山地PDと量子コンピュータで解ける問題に関して意見交換
- ・ミニシンポジウム（2024年）
目標8(気象)PDが、テーマ「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～」にて講演、目標1、5、7、8から9名が参加

目次

1. 研究開発プログラムの概要
2. 研究開発プログラムの状況
3. 今後の方向性
4. 自己評価結果
5. 参考

3.1 課題と対応方針

5年目のマイルストーン：達成可能な見込み

- ・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の開発
- ・量子ビットに適した量子誤り訂正方式の開発

目標達成に向けた現状と課題	課題に対する対応方針
・要素技術をインテグレーションし、量子コンピュータシステムとしての開発の加速が必要 ・量子誤り訂正方式検証が可能となる規模の量子コンピュータ開発の加速が必要	・プロジェクト内でのインテグレーションの促進 ・プロジェクト間競争による開発促進 ・縦軸、横軸両プロジェクトに参加するキーマンによる開発連携強化などによるプロジェクト間連携促進による開発効率向上 ・クロスレイヤ強調設計モデルを超伝導以外に横展し各量子ハードウェアを効率的に開発
・アプリケーションの強化が必要	・アプリケーション分野の講師を招聘し、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～」を開催(2024/10/1)
・コンピュータサイエンス、特にアーキテクチャの強化が必要	・FTQCアーキテクチャ研究会を立ち上げ、キックオフコンピュータサイエンス、特にアーキテクチャと量子分野との連携促進を目的とした講演、パネルディスカッション(2024/11/25) ・ミニシンポジウム「量子誤り訂正最前線～FTQCにどれくらい近づいたのか？どれくらい遠いのか？～」を開催(2025/1/30)

3.2 2030年に向けて

複数の海外機関が次々に量子誤り訂正の研究成果を発表し、意欲的なロードマップを提示している。2030年までに世界に伍する量子コンピュータを開発し量子誤り訂正の有効性を実証するためには

- ①量子誤り訂正が可能となる規模の量子コンピュータの開発を加速する必要がある。
- ②要素技術を早期にインテグレーションして量子コンピュータシステムとしての開発を加速する必要がある。
- ③量子誤り訂正の早期実装のために横通しをさらに推進する必要がある。
- ④誤り耐性型量子コンピュータの社会実装のためにアプリケーションの開発とELSIの研究を行う必要がある。

また、本格的な誤り耐性型量子コンピュータの実現には、10～20年の継続的な開発が必要となるので、

- ⑤20年後に中心となって活躍する若手、新規研究者参入を促進する必要がある。
- ⑥産業界からの更なる参画、協力を促す必要がある。



2026年度～2030年度のポートフォリオの再構成と
プロジェクトマネージャーの公募(2025年度上半期)

3.3 PDのマネジメント方針（1）ポートフォリオ

- これまでのポートフォリオを維持しつつ、新たな研究体制をもって研究を推進する。
- 横通しの要となる研究者を補強するなどして横通しの連携を強化する。
- アプリケーション研究開発を組み込み、ハードが目標とすべき性能の検討も実施する。

量子コンピュータシステム（量子ハードウェア）（例）



- MS予算が担保されている2030年までの期間に、その後にも繋がる成果を創出する。
- 上記観点で、各PJで新しいことに挑戦する**若手PI発掘**を積極的に行うことを推奨する。

3.4 PDのマネジメント方針（2） 研究開発分野

対象となりうる研究開発分野(予算目安は1プロジェクト当たりの5年間総額の想定規模であり確証ではない) (案)

（1）量子コンピュータシステム（予算目安:50億～100億円、採択数:0～5）

- ・物理的なサイズと量子誤りの小さな物理量子ビットを、量子誤り訂正と親和性の高い配置で、物理的な上限サイズまで拡張できる量子コンピュータシステムを開発すること。
- ・2030年のマイルストーン設定が世界に伍したものであること。量子ビット数や誤り率の具体的な目標を明らかにすること。
- ・量子誤り訂正の有効性を早期に実証すること。
- ・プロジェクト体制の中に、将来研究開発の中核となる企業を組み込むこと。
- ・システムインテグレーションを担当するPIと誤り耐性実験を担当するPIを置くこと。
- ・採択数は、各物理系に対して最大1プロジェクトとする。

（2）量子バス・量子通信ネットワーク（予算目安:30億～50億円、採択数:0～1）

- ・分散型の大規模量子コンピュータを実現するための共通基盤技術を実現すること。
- ・横串として、プロジェクト（1）が必要とする量子バス・量子通信ネットワークの研究開発を行い、技術を提供する。必要性・有効性が高く、実装時期が早いものから優先的に実施すること。

（3）量子誤り訂正・誤り耐性理論（予算目安:5億～10億円、採択数:0～1）

- ・誤り耐性型汎用量子コンピュータを実現するための理論・ソフトウェアを研究開発すること。
- ・横串として、プロジェクト(1)の全てに対応する設計手法を開発すること。

（4）量子誤り訂正システム（古典部分）（予算目安:50億～70億円、採択数:0～1）

- ・量子誤り訂正のためのエラーシンドローム解析を大規模かつ高速に行う古典的な情報処理システムを開発すること。
- ・100～1000 論理量子ビットを量子アルゴリズムで利用可能とする量子誤り訂正を実現するシステムを開発すること。ただし、それ以上にスケーラブルな方式であること。
- ・横串として、プロジェクト(1)のうち、プロジェクト(4)を必要とするもの全てに対応すること。

（5）アプリケーション（予算目安:5億～10億円、採択数:0～1）

- ・スパコンでは現実的な時間で解くことが困難、あるいは、必要な計算精度を確保することが困難であるような問題に対して、誤り耐性型量子コンピュータで解決可能とするアプリケーションを研究開発すること。
- ・アプリケーションの実行に必要なリソース（論理量子ビット数、論理量子ゲート数）を見積もり、それを削減すること。
- ・FTQCのアプリケーション開発手法を開拓すること。
- ・FTQCがアプリケーションを通して社会実装され、社会に影響を与えることから、ELSIへの対応を行うこと。
- ・部分的に誤り耐性を持つ量子コンピュータのアプリケーションは含むが、NISQのアプリケーションは除く。

3.5 MS目標達成に向けたイメージ(案)

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
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

2050

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）
~~分散処理型NISQ量子コンピュータの実証 量子誤り訂正下での有用タスク計算~~

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）
~~一定規模のNISQ量子コンピュータの開発と量子誤り訂正の有効性実証~~

<量子コンピュータシステム>

量子ビット、量子ゲート、量子誤り訂正（エラーシンドローム測定等量子部分）を開発し、量子誤り訂正システム（古典部分）と合わせて、誤り耐性量子コンピュータシステムを開発。

公募を通し
実現可能性・将来性
のあるPJを見極める

超伝導・イオントラップ・光量子・半導体・
中性原子などの物理量子ビット7PJ

<量子バス・量子 通信ネットワーク>

ハードウェア単体の物理限界を超えて誤り耐性量子コンピュータの規模を拡大する量子接続技術（量子バス、量子インターフェイス、量子通信ネットワーク等）を開発。

公募を通し
共通基盤技術
開発に絞り込む

3PJ

<量子誤り訂正・ 誤り耐性理論>

誤り耐性量子コンピュータ開発のための理論（量子誤り訂正符号、誤り耐性、アーキテクチャ、モデル化、設計法、指針等）。

<量子誤り訂正システム （古典部分）>

誤り耐性量子コンピュータの量子誤り訂正システム（古典部分）（エラーシンドローム解析、量子ハードウェアとのインターフェース）を開発。

<アプリケーション>

誤り耐性量子コンピュータのアプリケーション（量子アルゴリズム、ソフトウェア）の開発、実行条件（論理量子ビット数・論理誤り率）の緩和、アプリケーション開発環境の開発、ELSI問題の研究。

公募により新規PJ採択

世界に伍する成果に向かって研究開発

目次

1. 研究開発プログラムの概要
2. 研究開発プログラムの状況
3. 今後の方向性
4. 自己評価結果
5. 参考

4. 自己評価結果（1/3）

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）

規模拡大・精度向上がともに期待できる複数の物理量子ビットハードウェアの開発を競争的にを行い、そこに横通しとして、さらなる規模拡大のための量子通信接続の開発と誤り耐性獲得のための理論・ソフトウェア開発および誤り訂正システム開発からなる、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は世界でも類がないとして、外部委員からも高く評価されている。有力コンサルティングファームなどの客観的な将来予測や、NISQ中心だった海外企業が誤り訂正・誤り耐性に向けて方向転換しつつある状況などから、本プログラムの目標設定が妥当であることが示されている。しかし、内外の研究開発の活発化への対応のため、2022年度に新たに半導体と中性原子の有望な物理量子ビット、誤り訂正システム、大規模ネットワークのプロジェクトを追加採択し、プログラムの強化・アップデートを行った。

個々のプロジェクトにおける研究開発は概ね予定通り進捗しており、5年目のマイルストーン達成が見込まれる。国際動向を考慮の上、ハードウェアとソフトウェア系の研究およびそれらの間の連携を強めながら推進するとともに、2026年度以降プロジェクトを再編し連携を強化していくことで、2030年のマイルストーン達成も充分可能である。「2030年に何を目指すべきか、2025年までに何をやっておくべきか」をテーマとして2024年度に行ったプログラムの合宿は、プロジェクトの再編や連携の議論を喚起する効果があった。現在参画している世界的に著名な研究者等が中核になって2050年に向けて次世代の研究者を育てること、また、研究・開発・実装のステージをサステナブルに行うためのメンバーを検討することが必要である。

4. 自己評価結果 (2/3)

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り組み (評価項目⑦)	光量子では測定誘起型で時間領域多重方式のコンピュータを開発し、早期に社会実装を行うためにOptQCを起業した。さらに誤り訂正に必要なGKP量子ビットを世界で初めて生成した。中性原子では2次元中性原子アレイを800個まで拡張済みであり、独自のアイデアにより従来より2桁速い超高速2量子ビットゲートを実現した。半導体では世界トップレベルの1Q忠実度を達成し、大規模化に向けて拡張可能な量子ビット配置を提案している。誤り耐性理論においては、誤り耐性量子コンピュータのアーキテクチャ設計に必要なクロスレイヤー協調設計の基本モデルを超伝導方式に対して完成し、中性原子・イオン方式への展開も開始している。また、論理量子ビットのキー技術である魔法状態蒸留を高効率化する手法を提案し、世界的に注目されている。 今後は、量子誤り耐性理論を実証するために、実機による誤り訂正実験を可能とする体制が必要である。
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)	光量子、中性原子、半導体、誤り訂正理論などの世界トップレベルの成果に加え、拡張可能な誤り訂正システムの開発体制を短期間で構築し、当初のターゲットである超伝導量子ビットだけでなく、中性原子への対応なども進められている。各プロジェクトにおいて活発な研究開発が進展し、今期および5年目のマイルストーンは達成見込みである。 今後は、2030年までに世界に伍する量子コンピュータシステムを創ることが重要であり、2030年までに貢献する技術とそれ以降に貢献する技術への研究開発投資の比率を考える必要がある。また、プロジェクト間連携が必ずしも有効に機能しなかった。これらを解決するため、5年目(2025年度)のステージゲートでは、プログラム後半に向けたプロジェクトの再構築をするための再公募を行う。
1-3.その他	誤り耐性型量子コンピュータ開発には民間企業の本格的な参入が必須であり、研究開発投資を促すには、誤り耐性量子コンピュータの実用的な有効性を示す必要がある。そのため、誤り耐性量子コンピュータがスパコンを凌駕するようなアプリケーションの研究開発をプログラムとして行う必要がある。

4. 自己評価結果 (3/3)

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、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)	12プロジェクトのうち3プロジェクトのPMが民間企業(日本電気、日立製作所、メルカリ)に所属し、課題推進者も、全参画機関45機関のうち15機関が民間企業となっている。企業のもつ技術を各プロジェクトの強みとして活用するとともに、各参画企業の量子情報技術分野への参入も促進できる。主に浜松ホトニクス(超伝導ナノワイヤ単一光子検出器、NTTの10THz帯域の超高速光スクイーズド状態発生器、アルバック・アルバッククライオ社の希釈冷凍機などがある。プログラム参画者からの起業も多数あり、参画前に起業したNanoQT(青木PJ)、LQUOM(永山PJ)、QuEL(山本剛PJ)などは、人材確保、産業界との連携に貢献している。新たにOptQC(古澤PJ)が起業し、中性原子系についても、起業準備を進めている。
	b.その他	製造業比率の高い「科学技術と経済の会」においてムーンショット目標6の取り組みを紹介するなど、産業界との新たな連携を模索している。また、産業界も注目するテーマでミニシンポジウムを開催した。
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)		量子技術イノベーション拠点やQ-LEAP等の国内の量子技術関連諸制度と連携して量子科学技術イノベーション国際シンポジウムを開催(共催)し、国際的な交流を図っている。欧州を中心に32機関(延べ)の大学、研究機関、海外企業との共同研究、研究者派遣、招聘等による交流を行った。また、ColdQuanta(Inflection社)が課題研究者として加わり国際的な連携をとりつつ効率的な研究開発を行っている。
2-3.国民との科学・技術対話に関する取組み(評価項目⑨)		毎年、国内シンポジウムを一般向けに開催し、プログラム全体の成果を広く公開している。また、様々なアプリケーションやアルゴリズムの可能性を議論し、幅広い科学技術分野での誤り耐性量子コンピュータ応用研究の契機とすることを目指したミニシンポジウムを2回開催した。
2-4.その他		数理科学分科会の公募の採択者を課題推進者として加え、数理物理のコミュニティに量子情報分野への参入を促す活動に積極的に取り組んでいる。

目次

1. 研究開発プログラムの概要
2. 研究開発プログラムの状況
3. 今後の方向性
4. 自己評価結果
5. 参考

5.1 主要ファクトと外部環境変化

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

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、一定規模の量子コンピュータを開発するとともに実効的な量子誤り訂正を実証する。

主要ファクト（実現できていること・できていないこと）		研究開始以降の外部環境変化・国際動向変化
全体	✓ 研究開発体制・ポートフォリオ ：主要な5方式（超伝導、イオントラップ、光量子、半導体、中性原子）の量子ハードウェア(7PJ)、単体の量子ハードウェア限界を超えて規模を拡大するための量子通信ネットワーク(3PJ)、量子誤り訂正・誤り耐性の理論・ソフトウェアおよびシステム(2PJ)の3つのカテゴリーの12PJから成る誤り耐性汎用量子コンピュータの先進的な研究開発体制が実現できている。3カテゴリー間の連携・共同研究による理論的な成果はあるが、実験的な成果はまだ実現できていない。	2020.12 IonQ 2028年に1000論理*量子ビットのイオントラップ量子コンピュータを目指すと発表 (*アルゴリズムック量子ビット) 2021.4 富士通 超伝導量子コンピュータに参入 2021.5 Google 2029年に1000論理量子ビット（100万物理量子ビット）の超伝導量子コンピュータを目指すと発表（ブログ） 2023.3 超伝導ボソニック量子ビットでブレイクイーブン達成報告（米Yale大、中国）
	✓ 産業界の参画 ：12PM中3PMが企業所属、12PJ中9PJに企業が参画、企業15社（うちスタートアップ4社、米国企業1社）が参画、研究開発参加者の約3割が企業所属など、産業界の参画が実現できている。さらに、目標6の成果として光量子コンピュータのスタートアップ起業とシードラウンド調達の実現できている。特に参画企業の顕著な貢献として、超伝導ナノワイヤ光子検出器アレー（浜松ホトニクス）、導波路型光パラメトリック増幅器（NTT）、希釈冷凍機（アルバック、アルバック・クライオ）が実現できている。目標6の成果として中性原子量子コンピュータのスタートアップ起業を予定しているが、まだ実現できていない。大型の誤り耐性型汎用量子コンピュータの実現には、産業界、特に製造業の本格的な参入が必須であるが、まだ実現できていない。	
量子コンピュータシステム	✓ 量子コンピュータ実機クラウド公開 ：誤り耐性型汎用量子コンピュータに至る過程で開発された量子コンピュータ実機のクラウド公開はまだ実現できていないが、超伝導(NISQ)と光量子(連続量)に関しては2025年前半に実現見込みである。	2023.3 超伝導量子コンピュータ国産初号機（理化学研究所 叡）、10月 2号機（富士通）、12月 3号機（大阪大学）クラウド公開 2023.12 QuEra 280物理量子ビットの中性原子量子コンピュータで48論理量子ビット報告 2024.8 Google 105物理量子ビット超伝導量子コンピュータで表面符号による量子誤り訂正でブレイクイーブン達成報告 2024.9 Google 魔法状態培養の理論提案 2024.9 Quantinuum 2029年にイオントラップで100論理量子ビット万能FTQCを目指すと発表
	✓ 量子ビット数を増やす技術 ：積層透過型モジュール(超伝導)、共振器QED光結合(イオントラップ)、2D量子ドットアレイ上シャトリング(半導体)、2Dスパース量子ビット配列(半導体)、ナノファイバー共振器QED(中性原子)は設計レベルまたは実験中でまだ実現できていない。ディレイライン(光量子)100量子ビット、2D中性原子アレー(中性原子)800量子ビットは実現できている。	
	✓ 世界と伍する成果 ：超広帯域スクイーミング、光進行波GKP量子ビット生成、連続量光量子コンピュータ実機(光量子)、世界トップ1Q忠実度99.9%、位相フリップ訂正操作(半導体)、世界最高速2量子ビット演算(中性原子)が実現できている	
通信	✓複数の量子コンピュータを光量子通信で接続して大規模化するために必須の要素技術である超伝導ナノワイヤ光子検出器アレーは実現できているが、高効率の量子インターフェースはまだ実現できていない。	
誤り耐性	✓ 量子誤り訂正方式 ：マイルストーンの各量子ハードウェアに適した量子誤り訂正方式の提案は実現できている。量子誤り訂正の端緒となる実験は、超伝導(猫量子ビット)、光量子(GKP状態)、半導体(位相フリップ誤り訂正操作)などで実現できているが、ブレイクイーブンは実現できていない。理論では、魔法状態蒸留のリソース大幅削減他、世界トップレベルの成果が実現できている。	
	✓ 誤り耐性型汎用量子コンピュータ実現指針 ：クロスレイヤー協調設計モデルが、超伝導と表面符号で実現できている。	

5.2 目標継続した場合の方向性

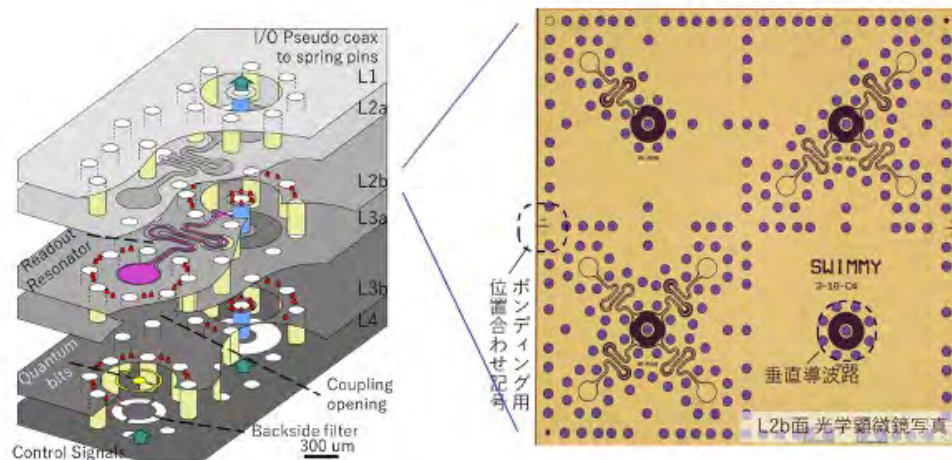
	後半5年の方向と2030年ターゲット	2030年終了後の見通し(2040年に向けて)
プログラム全体	・誤り耐性型汎用量子コンピュータの開発と利用で世界と伍するために、ターゲットを以下のように明確化することとする。 2030年ターゲット: 小規模または部分的な誤り耐性をもつ量子コンピュータの実現 ・以下の方針で再公募を行い、後半5年のポートフォリオを再構成することとする。 ①量子誤り訂正が可能な規模の量子コンピュータの開発を加速する ②要素技術を早期にインテグレーションして量子コンピュータシステムとしての開発を加速する ③量子誤り訂正の早期実装のために横通しをさらに推進する ④誤り耐性型量子コンピュータの社会実装のためにアプリケーションの開発とELSIの研究を行う また、本格的な誤り耐性型量子コンピュータの実現には、10～20年の継続的な開発が必要となるので、 ⑤20年後に中心となって活躍する若手研究者の参入を促進する ⑥コンピュータアーキテクチャ、ソフトウェア、化学や数理など応用分野の研究者の参入を促進する ⑦産業界の本格的参入を促す	・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が実現している ・限られた問題でスパコンを超える計算により、誤り耐性型量子コンピュータのPoCが示されている ・さらなる規模拡大の技術が開発されている ・クロスレイヤー協調設計モデルによって、量子ハードウェアの物理系の将来性が予測可能になっている ・アプリケーションが開発され、社会実装への展望がひらけ、量子コンピュータへの要求条件が明らかになっている ・以上の成果により、企業の本格的参入が促され、民間投資を要する大規模量子ビット実装開発が開始される ・2040年に向けて本格化する誤り耐性型汎用量子コンピュータの国際的な開発競争に日本企業も参加し伍していく
量子コンピュータシステム	・量子ビット数を拡大する(単体の限界を超える場合は量子通信ネットワークPJと連携するか自力で) ・量子誤り率を低減する ・誤り耐性カテゴリのPJと連携するか自力で早期に量子誤り訂正を実現し、誤り耐性量子コンピュータシステムを開発して、クラウド公開する	・誤り耐性型量子コンピュータシステムとしてクラウド公開されている ・さらなる規模拡大の技術が開発されている(量子ビット数拡大、誤り率低減、量子バス)
量子バス・量子通信ネットワーク	・単体のハードウェア限界を超えて分散型で誤り耐性量子コンピュータを大規模化するための技術(量子バス、量子インターフェース、量子通信ネットワーク、アーキテクチャ)を、量子ハードウェアPJの必要に応じて開発して提供する	・単体の量子ハードウェア限界を超えて分散型で規模拡大する技術が開発されており、分散型で大規模化する準備が整っている
量子誤り訂正理論	・誤り耐性型汎用量子コンピュータを実現するための理論・ソフトウェアを研究開発する ・クロスレイヤー協調設計モデルを全ての量子ハードウェアPJに拡張して提供するとともに、量子ハードウェアの将来性を予測・比較する ・量子誤り訂正符号の高効率化・高閾値化、非クリフォード演算の効率化を行う ・誤り耐性型汎用量子コンピュータのアーキテクチャ(分散含む)を開発する	・クロスレイヤー協調設計モデルによって、量子ハードウェアの物理系の将来性が予測可能になっている ・さらなる規模拡大の技術が開発されている ・コンピュータアーキテクチャ専門家が開発に参画している
量子誤り訂正システム(古典部分)	・大規模でスケラブルな誤り訂正システムを開発する ・大規模化を可能とするために装置の小型化、低消費電力化を行う ・必要とする量子ハードウェアに対応した開発を行う	・この時点で世界最大規模の量子誤り訂正、誤り耐性を可能とする誤り訂正装置が実現している
アプリケーション	・スパコンでは解決できない問題に対する量子アルゴリズム・アプリケーションソフトウェアを開発する ・量子アルゴリズムの実行に必要なリソース(論理量子ビット数、論理量子ゲート数)を削減する ・誤り耐性量子コンピュータのソフトウェア開発手法を開発する	・アプリケーションが開発され、ELSIを含む社会実装の展望がひらけている ・アプリケーションからの要求条件が明らかにされている

5.3 各プロジェクトの進捗・成果（山本剛 PJ）

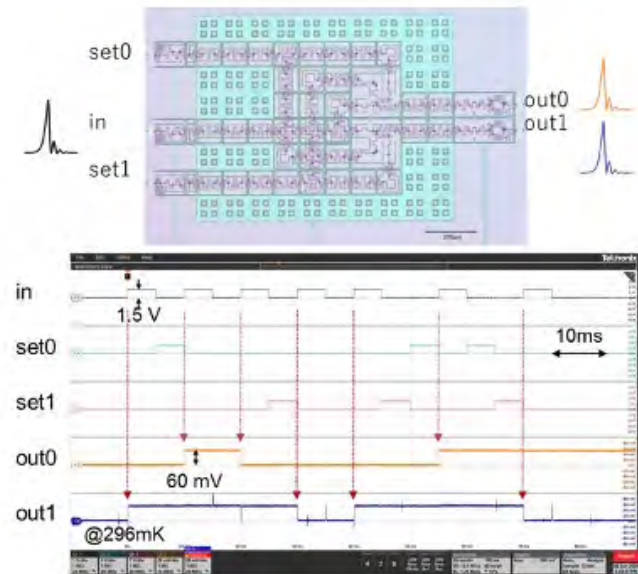
超伝導量子回路の集積化技術の開発

◆ 次世代超伝導量子コンピュータ開発に向けた基盤技術

- 量子ビットの高密度化さらに駆動回路や読み出し回路のシステムインパッケージ化を目指して積層チップ構造の開発を行っている（左下）。今年度は基本構造の設計を行うとともに、読み出し共振器チップの作製まで行った。近日中に特性評価に進む予定。
- 単一磁束量子回路を用いて、量子ビット近傍で動作する量子ビット制御回路の開発を行っている。今年度はこれまでに開発した10mK動作回路設計ライブラリを用いてデマルチプレクサ回路の設計・試作を行い、0.3 Kでの動作に成功した（右下）。



量子ビット-読み出し共振器積層チップ
(田淵ら、2024秋応用物理学会)

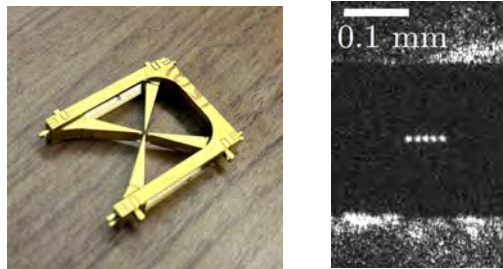


SFQ回路による1:2デマルチプレクサ回路動作実証
(田中ら、ASC 2024)

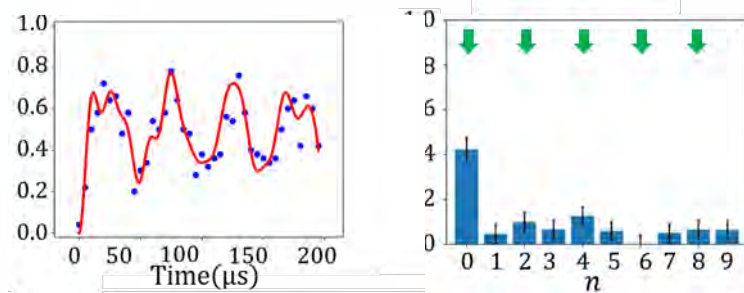
5.3 各プロジェクトの進捗・成果（高橋 PJ）

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

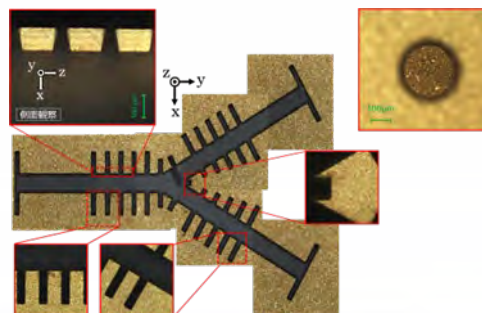
Selective laser etching により作製された
イオントラップと捕捉されたイオン



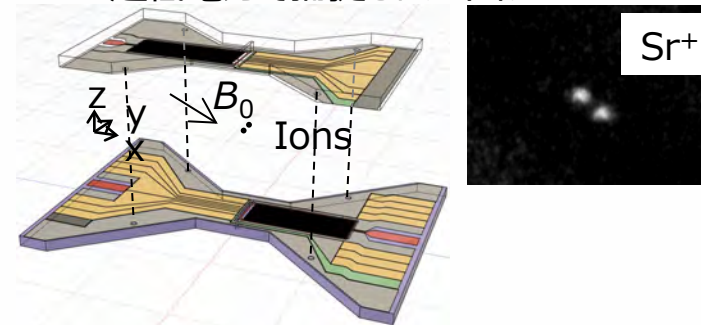
振動スクイズド状態の生成（課題 3 - 1）



Y字ジャンクション（課題 6 - 1）



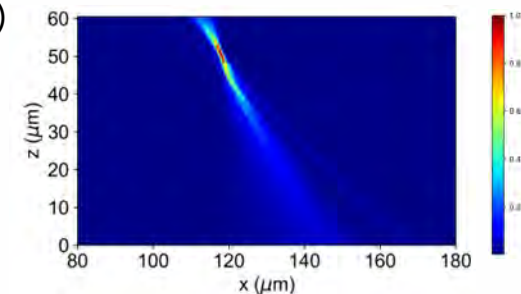
3次元超伝導イオントラップと
超低電力で捕捉されたイオン



立体および平面型イオントラップ（課題4 - 1）



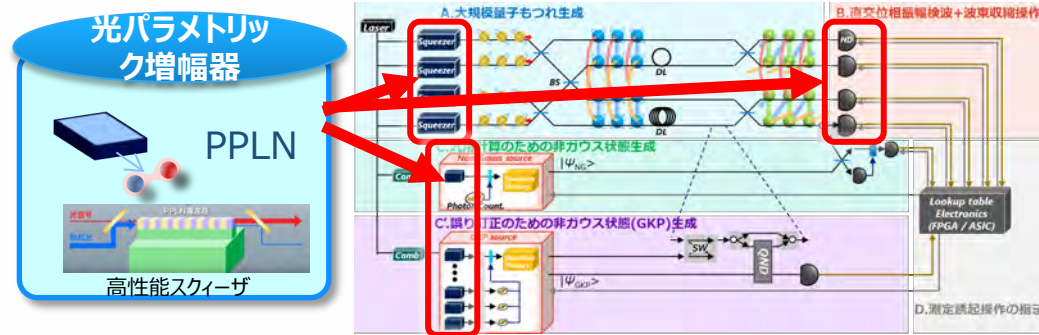
イオントラップに統合されたグレーティングカップラ
（課題5 - 1、5-2）



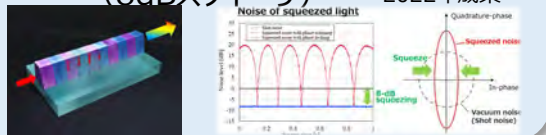
5.3 各プロジェクトの進捗・成果（古澤 PJ）

誤り耐性型大規模汎用光量子コンピュータの研究開発

測定誘起型光量子コンピュータの全体像



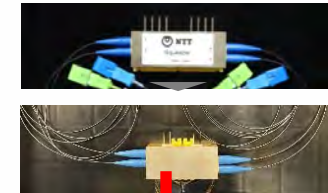
低損失パラメトリック増幅器
(8dBスクイーズ)



高速量子検出技術
(43GHzホモダイン検波)



量子光特性向上に向けたPPLN短尺化



技術展開

実機構築@理研

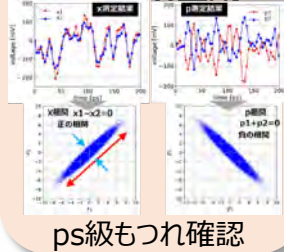


プロセッサ部への導入（
2Dクラスター生成）

クラウド公開

11月1日報道発表

世界最速
量子もつれ生成*1



ps級もつれ確認

Nature Photonics

12月5日報道発表予定

世界最速
非ガウス状態生成*2

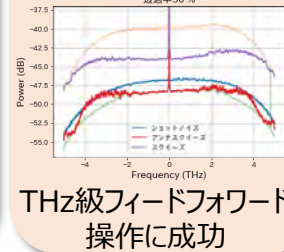


帯域: GHz
生成レート: MHz
従来比1000倍の
高速化に成功

Nature Communications

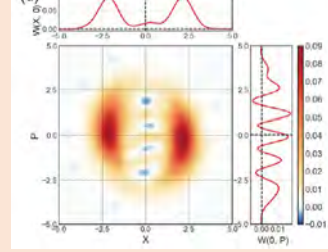
11月8日報道発表

全光量子操作*3



THz級フィードフォワード
操作に成功

4光子引き取り成功

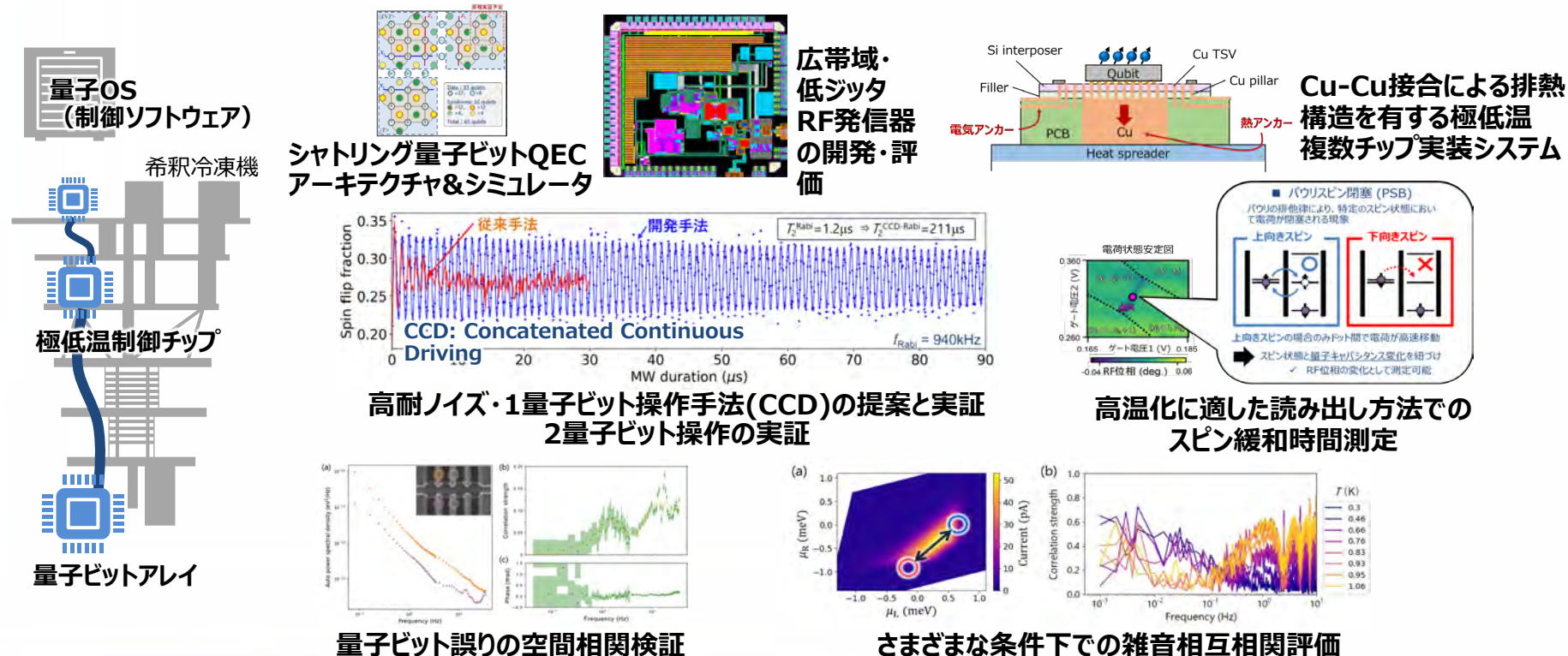


5.3 各プロジェクトの進捗・成果（水野 PJ）

大規模集積シリコン量子コンピュータの研究開発

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

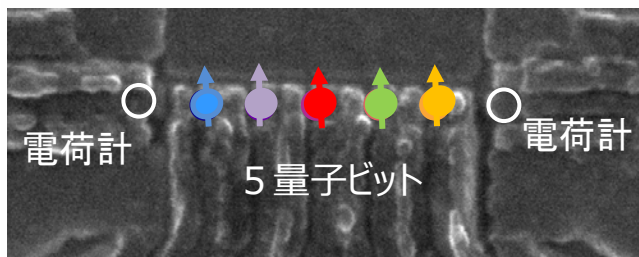
研究開発項目	課題推進者	研究開発課題
1 量子コンピューティングシステム	日立/水野弘之	1 2次元量子ビットアレイ 2 量子ビット高精度制御・高感度読み出し回路 3 システムアーキテクチャ
2 極低温複数チップ実装システム	神戸大/永田真教授	4 極低温複数チップ実装 5 環境モニタリング手法
3 ホットシリコン量子ビット	東京科学大/小寺哲夫准教授	6 シリコン量子ビットの高温動作
4 小規模回路による量子演算	東京大/米田淳准教授 理研/中島峻上級研究員	7 アレイ化と量子ビット基本演算の両立 8 量子ビットの量子制御性の検証



5.3 各プロジェクトの進捗・成果（樽茶 PJ）

拡張性のあるシリコン量子コンピュータ技術の開発

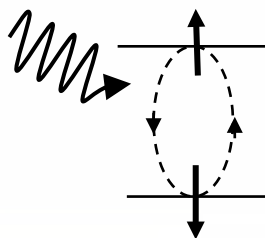
5 量子ビットデバイスにおいて初めて、全ての量子ビットで操作誤り率0.01%以下、
および複数量子ビットの同時制御を達成



スピン量子ビット操作:

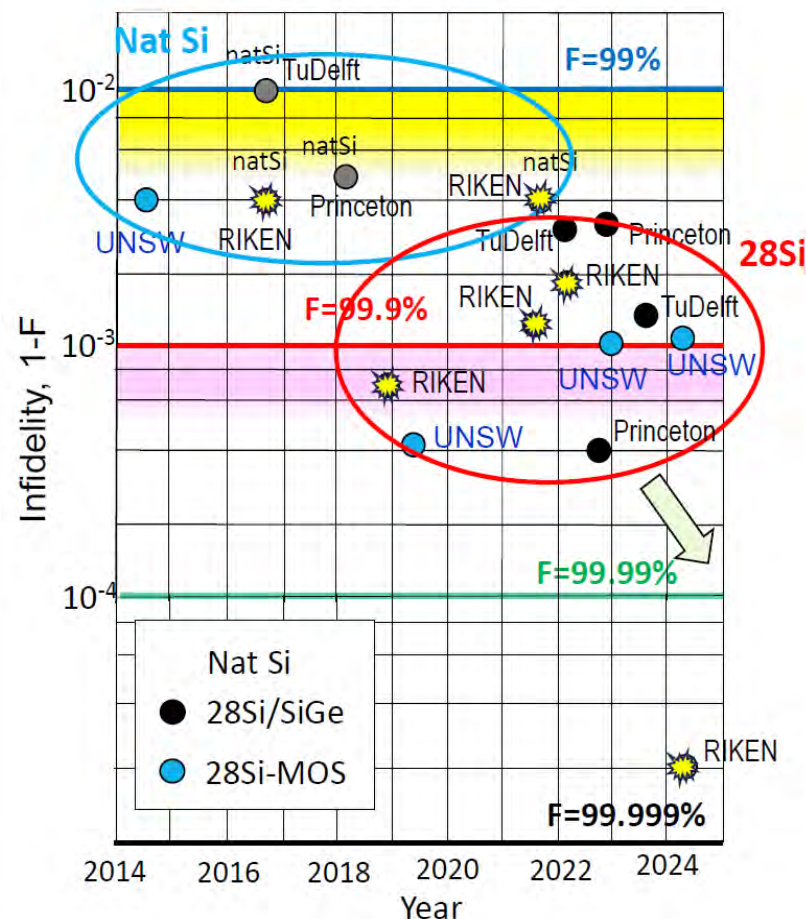
スピンのエネルギーに共鳴するマイクロ波を照射するとスピンは、上向きと下向きの状態間で反転を繰り返す。
＝スピンの回転(量子ビット操作)

スピン回転操作



(2024年度内に投稿予定)

量子ビット操作誤り率



5.3 各プロジェクトの進捗・成果（大森 PJ）

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

大規模化技術

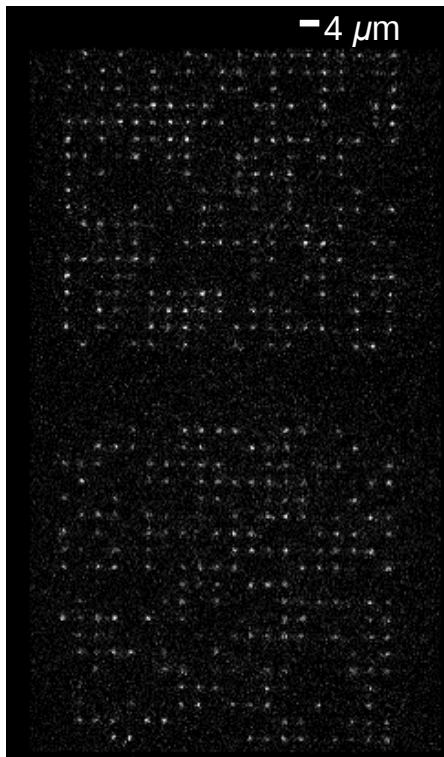
世界最大規模800原子 / 2021年1月時点

10,000原子に向けて開発継続中

独自トラップレーザー / 超精密光ピンセット / 高開口数顕微鏡

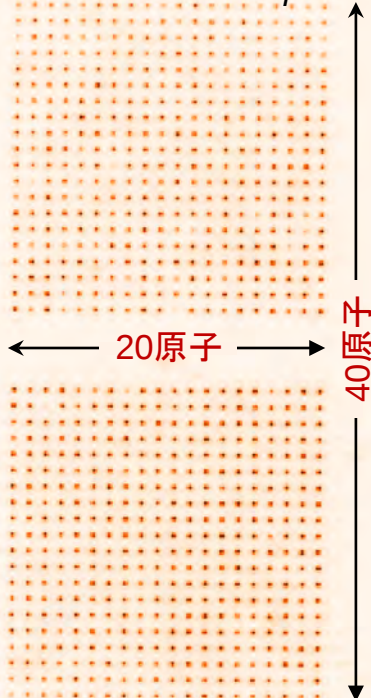
原子蛍光(リアルタイム)

4 μm



原子蛍光(平均画像)

4 μm

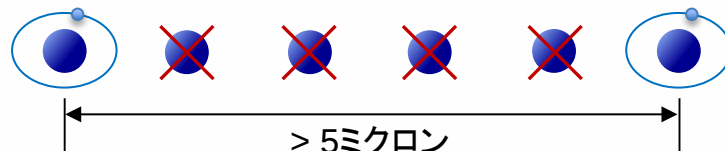


20原子

40原子

超高速レーザー技術の導入

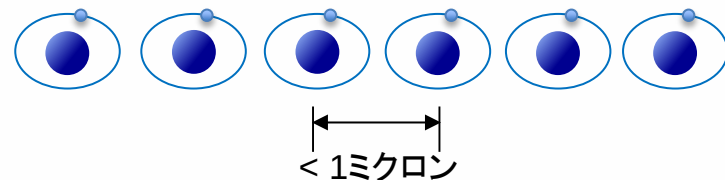
従来手法: 連続発振レーザー



リュードベリ原子の強い電場の影響で
周囲の原子の励起がブロックされる
(リュードベリ・ブロッケード)

⇒ 5ミクロン程度までしか近づけられない

分子研新手法: 超高速パルスレーザー



リュードベリ原子の強い電場の影響が
隣の原子に伝わる前に超高速で励起する

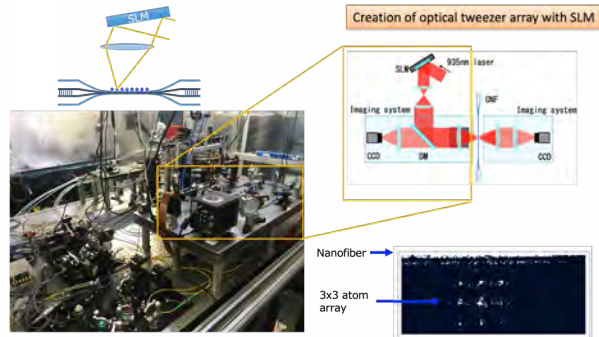
⇒ 1ミクロン以下まで近づけられる

相互作用強 → 超高速量子ビット操作

5.3 各プロジェクトの進捗・成果（青木 PJ）

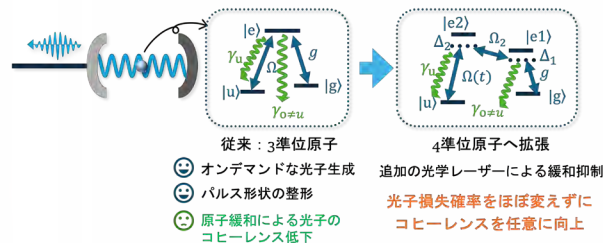
ナノファイバー共振器QED による大規模量子ハードウェア

- 研究開発課題 1：ナノファイバー共振器QED方式ハードウェアの原理実証



- ナノファイバー共振器近傍に2次元原子アレーを形成
- 二重チャンバー化による共振器劣化制御
- 高フィネス共振器の保管技術
- Ybシステムの立ち上げ

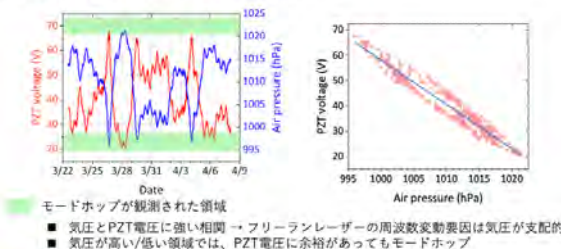
- 研究開発課題 2：ナノファイバー共振器QED方式に適した量子誤り訂正理論



- 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・評価
- 多準位原子エンジニアリングによる光子生成性能向上
[arXiv:2403.00072, S. Kikura et al.]

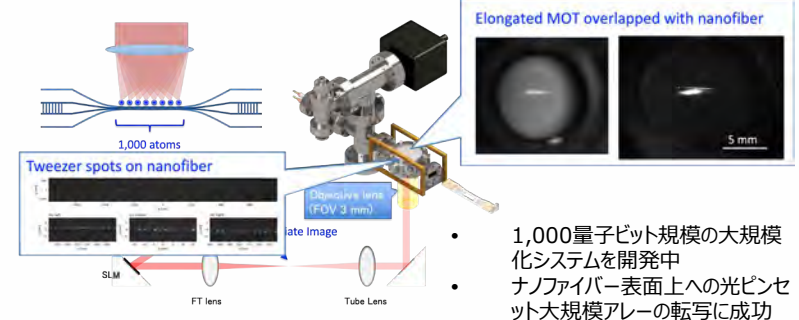
- 研究開発課題 3：周波数安定化光源システム

光コムに位相同期したECDLの長期モニタリング

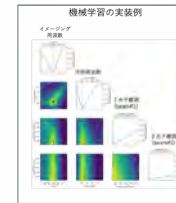


- 気圧変化が長期稼働を制限していることを突き止めた。より長期間安定に動作させるため、気密構造の筐体を準備中
- 自動制御復元システムを実装し、評価中

- 研究開発課題 4：大規模化・分散化



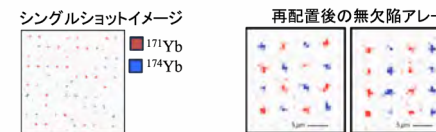
- 研究開発課題 5：社会実装



LabScript環境を基盤としてデバイス管理の統一を図り、クラウドシステム用ミドルウェアの試作開発：

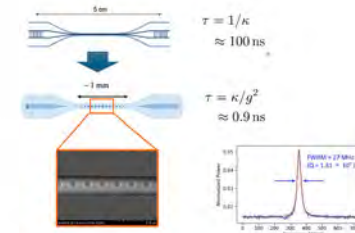
- 機械学習を組み合わせた最適化技術を実装し、原子ローディング・イメージング精度の向上を達成（例：左図）。
- 試作機開発の段階で得られた知見を活用し、今後の課題である光ピンセットのアライメント等の精密な配置調整にも対応可能な拡張性を持たせた設計を実現

- 研究開発課題 6：大規模イッテルビウム原子系技術



- 2つの同位体を光ピンセットアレーにランダムにトラップ
- 同位体ごとの再配列アルゴリズムにより、決定論的に欠陥のないハイブリッド原子アレーを生成

- 研究開発課題 7：次世代共振器開発



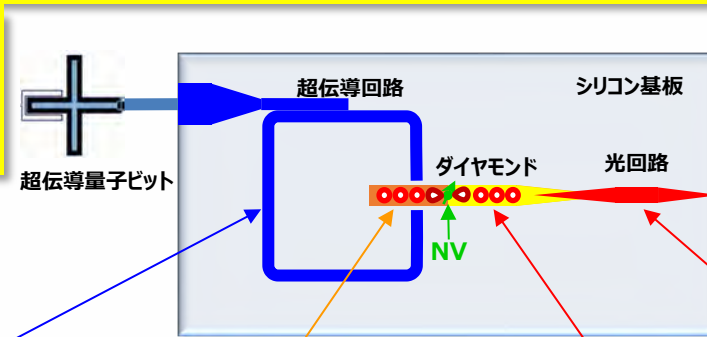
- 従来型ナノファイバー共振器と比較して大幅な高速化が期待される、ナノファイバー-PhC共振器を開発
- 10^7 を超えるQ値を達成

5. 各プロジェクトの進捗・成果 (小坂 PJ)

量子計算網構築のための量子インターフェース開発

光・超伝導ハイブリッド量子コンピュータのコア技術となる超伝導－光量子インターフェースの要素部品を開発

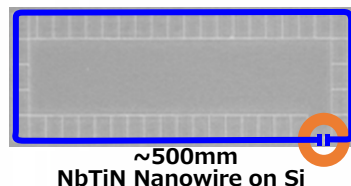
計画通りの性能を達成
前倒して**3次元実装**開始



国際連携: ウルム大, ザールランド大, シュツットガルト大, ミュンヘン工科大, デルフト工科大 (QuTech) 等
産業界との連携: 東芝, NEC, 古河電工, NTT-AT, NEL 等
国民との対話: NICT Quantum Camp, 量子情報工学研究会 等

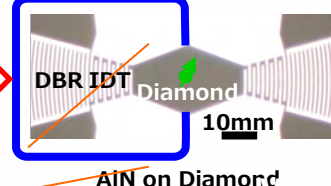
超伝導－光量子インターフェース

超伝導
マイクロ波共振器



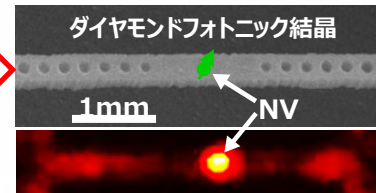
~500nm
NbTiN Nanowire on Si
周波数可変 > 5%
 $Q_{MW} > 20,000$

ダイヤモンド
音 (機械) 共振器



$Q_m = 20,000$

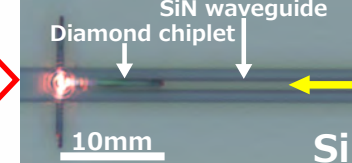
ダイヤモンド
光共振器



Ishida et al., 15p-A501-2, Oubutsu 2023S

$Q_{opt} = 2,000$

シリコン(SiN)
光導波路



結合損失 < 5.5dB

年次目標
達成



Hirotaka Terai



Toshiharu Makino Hiromitsu Kato Satoshi Iwamoto Masahiro Nomura Shinobu Onoda



Toshihiko Baba

5. 各プロジェクトの進捗・成果（山本俊 PJ）

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

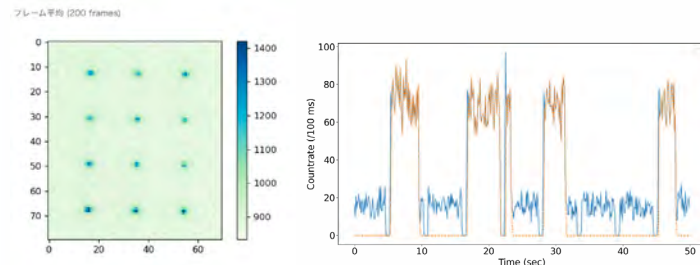
当初目標を順調に達成中：量子インターフェース・多重光子検出の要素技術が揃う

(1) 原子アレイからの単一光子の生成
(量子インターフェース要素技術実証)

(2) 世界最大級32チャンネルの超伝導光子検出器完成

(3) 量子効率90%以上
暗計数1カウント/秒達成

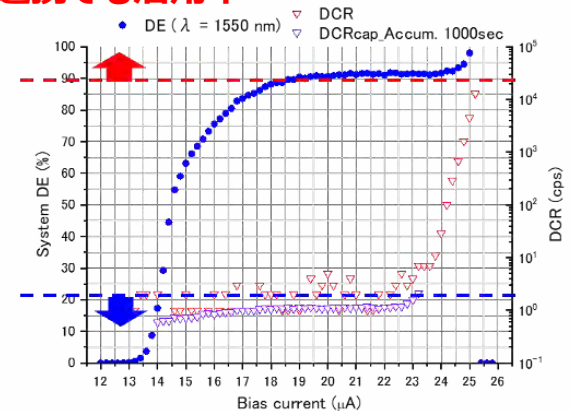
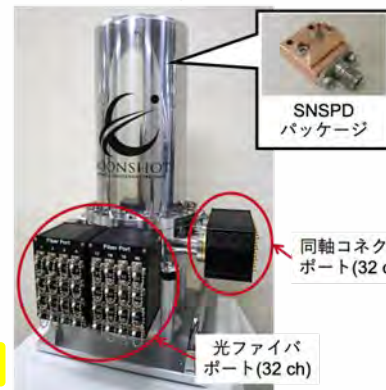
複数のPJ間連携でも活用中



原子アレイ

単一光子列

32 ch SNSPDシステム外観



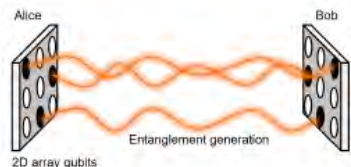
予期せぬ成果：

(4) 論理量子ビット
接続プロトコル提案

(5) 世界初超伝導ワイド
ストリップ光子検出器に成功

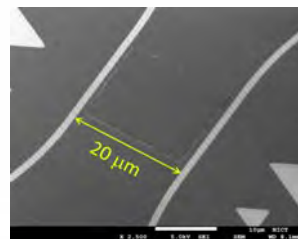
(6) 半導体量子ドットで忠実度99.9%以上の
読み出しを実現。従来法の課題を解決

理論PJとの連携



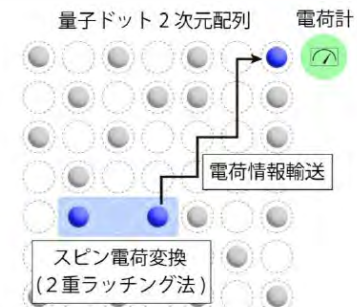
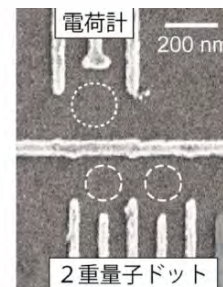
ネットワーク型量子コンピュータの基本アルゴリズム提案

プレスリリース



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

・高効率化
・無偏光依存化
・生産性の向上
などに期待大



H. Kiyama, AO, npj Quantum Information 10, 95 (2024)

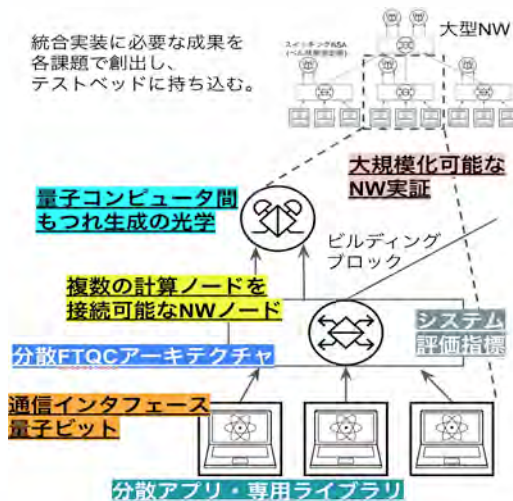
5.3 各プロジェクトの進捗・成果（永山 PJ）

スケーラブルで強靱な統合的量子通信システム

具体的なプロトタイプの開発と実証を行うテストベッドを活用しながら、下記研究開発項目に注力

1. ネットワークアーキテクチャ・プロトコル：量子通信におけるEthernetやTCP/IP等・全体設計
2. 量子光通信技術：量子コンピュータ間を高効率に接続する技術
3. 通信性能を引き出す量子メモリ技術：中継やキューイング・バッファリング、多重化等
4. 量子コンピュータネットワーク上で実行可能なアプリケーション：分散処理の可能性を広げる

・必要な機能分野



・重要カンファレンス発表

米国物理学会3月会議：3件(招待講演含む)
IEEE Quantum Week：9件(受賞含む)
など。

・今年度の主要な成果（NW：ネットワーク）

項目1: アーキテクチャ・プロトコル

Elkouss PI: 実質的に量子的なコスト0で量子通信におけるノイズを計測する手法を提案。

大野PI: 光子NWの同期の有望方式を明確化。

Van Meter PI: 量子NWに最適な接続切り替えのコアモジュール(スイッチファブリック)構造を提案。

永山PI: 誤り耐性型量子コンピュータのNW化に適した量子リンクアーキテクチャの検証と選択。

項目2: 量子光通信技術

生田PI: 量子通信チャンネルで宛先制御する手法を提案・実証。

武岡PI: 信号減衰に強い多量子状態生成NWの提案。

項目3: 量子メモリ・量子中継技術

堀切PI: 希土類量子リンク実証目前。

項目4: 分散量子アプリ

添田PI: 分散処理可能な量子コンピュータの効率的な検証手法を提案。量産に貢献。

佐藤PI: 量子分散処理ライブラリに繋がるアプリ用プロトコルの設計。

項目5: テストベッド・プロトタイプ実装

永山PI: 3ノード+1スイッチノード(中継ノード)の構築。

長田PI: 分散量子計算実証用のイオントラップ構築。

・テストベッド状況

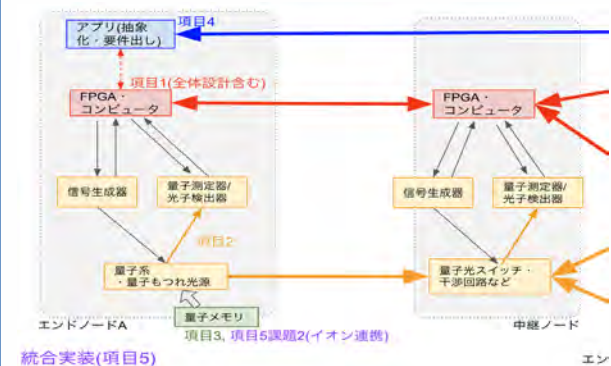


図1: 実装システムの完成イメージ図



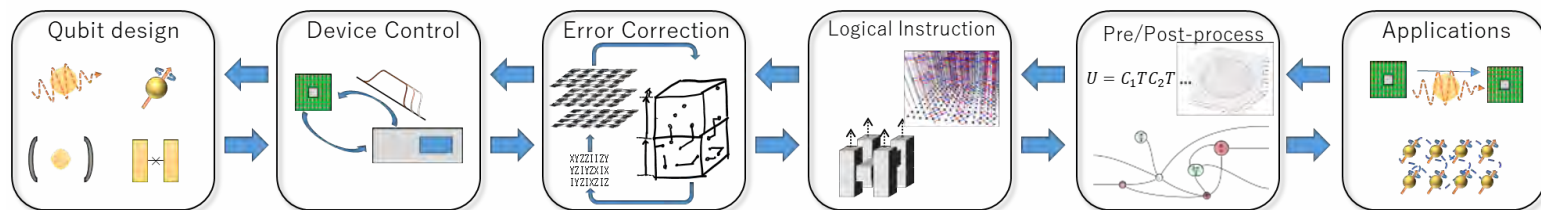
図2: 量子NWプロトタイプとなる3ノード分+1スイッチノードの光学系・制御系を構築済み

5.3 各プロジェクトの進捗・成果（小芦 PJ）

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

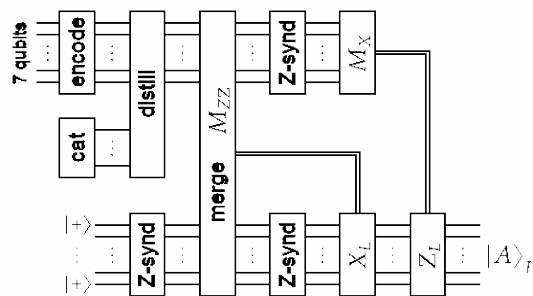
大規模量子コンピュータの開発を加速するクロスレイヤー協調設計ソフトウェアの構築

全ての技術レイヤーを包括した性能予測モデルの拡充を行い、
複数のハードウェアに対応可能に。ベンチマーク対象のアルゴリズムを大幅に拡大。



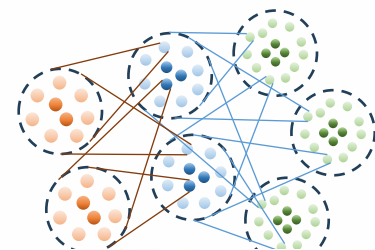
量子コンピュータの性能を引き上げる新しいソフトウェアアプローチの提案

・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



・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

・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



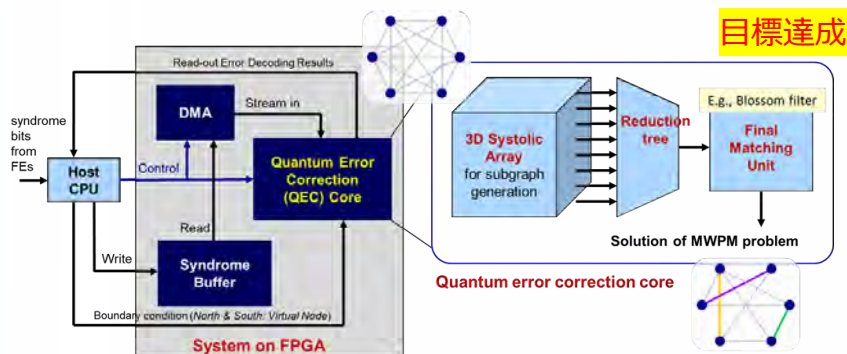
5.3 各プロジェクトの進捗・成果（小林 PJ）

スケーラブルな高集積量子誤り訂正システムの開発

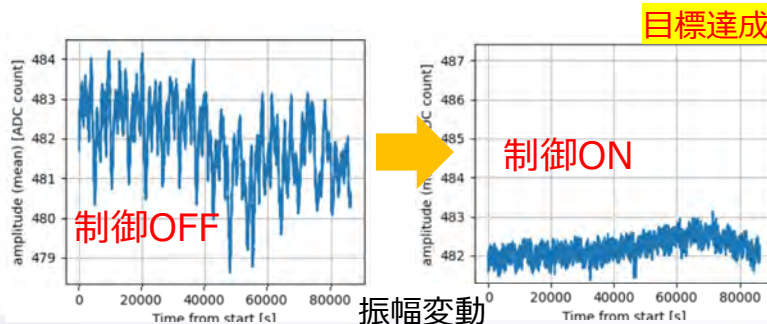
2024年度目標

- (1) バックエンドのハードウェアに適した量子誤り訂正アルゴリズムの設計と評価
- (2) フロントエンドの性能向上と小型化を図るための信号品質補償技術を確立
- (3) 極低温動作評価環境の構築とフロントエンドのSoCに向けた各種機能の設計

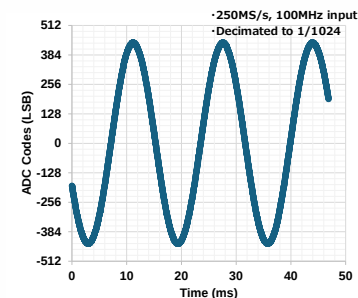
(1) シンドローム部分グラフアルゴリズムを開発Qubitエラー訂正評価環境を構築し、検証や評価を実施



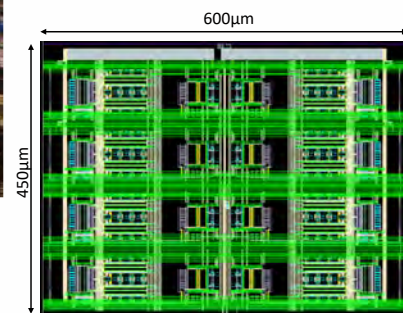
(2) デジタル信号処理を活用した信号補正技術を確立し、小型化しながらも信号品質の向上を実現



(3) 10bit 250MS/s で動作する単体 ADC の設計・試作を完了し、極低温環境において ADC の正常動作を確認



極低温でのサイン波入力時のADCの応答波形



8xインターリーブADCのレイアウト