

# ムーンショット目標 6

## 「2050年までに、経済・産業・安全保障を飛躍的に 発展させる誤り耐性型汎用量子コンピュータを実現」 プログラムの進捗状況（報告）

令和5年11月30日

プログラムディレクター

北川勝浩

（大阪大学 教授）

# 目次

---

1. ムーンショット目標 6 の概要（社会像、体制等）
2. 研究開発の成果、及びその周辺動向
3. プログラムマネジメントの状況
4. 今後の方向性
5. 参考資料

# 1.1 ムーンショット目標6

2050年までに、経済・産業・安全保障を飛躍的に発展させる誤り耐性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\*1を実現する。
- 2030年までに、一定規模のNISQ量子コンピュータ\*2を開発するとともに実効的な量子誤り訂正を実証する。

\*1 誤り耐性型汎用量子コンピュータは、大規模な集積化を実現しつつ、様々な用途に応用する上で十分な精度を保證できる量子コンピュータ。

\*2 NISQ(Noisy Intermediate-Scale Quantum)量子コンピュータは、小中規模で誤りを訂正する機能を持たない量子コンピュータ。

社会を大きく変革させる  
汎用量子コンピュータを実現

2050年までに、経済・産業・安全保障を飛躍的に発展させる大規模で多用途な量子コンピュータを実現。



出典：内閣府 総合科学技術・イノベーション会議 有識者議員懇談会(令和2年1月30日)

# 1.2.1 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測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(→CO<sub>2</sub>削減)

人工窒素固定(→省エネ)

# 1.2.2 目指す社会像

## 食料・エネルギー・環境問題の解決

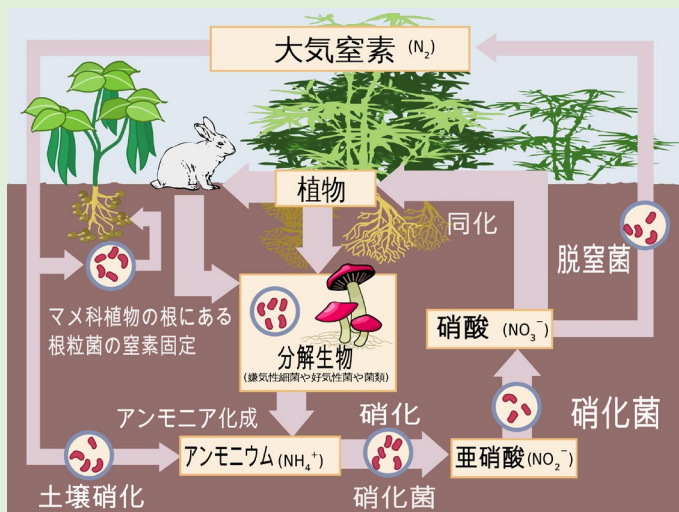
### 窒素固定

化学肥料：アンモニア合成の工業化

百年前～ハーバー・ボッシュ法

高温400～600℃、高圧200～1000気圧

人類の全エネルギー消費の数%占める



出所: Cicle del nitrogen\_de.svg; \*Cicle del nitrogen\_ca.svg; Johann Dréo (User:Nojhan), traduction de Joanjoc d'après Image:Cycle azote fr.svg, derivative work: Burkhard (talk) Nitrogen\_Cycle.jpg; Environmental Protection Agency derivative work: Raeky (talk) (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Nitrogen\_Cycle\_ja.svg), „Nitrogen Cycle ja”, https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/legalcode

### 菌の生物窒素固定

量子コンピュータによる解明に期待

人工的に模倣して省エネルギー化

### 光合成

太陽光をエネルギー源として

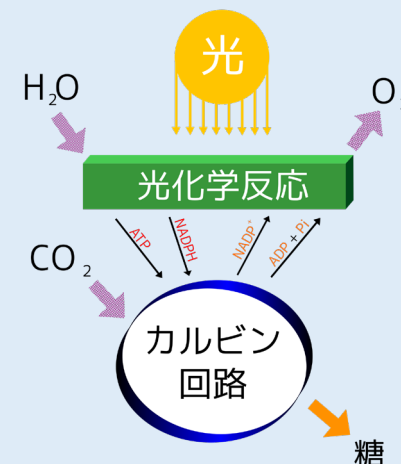
二酸化炭素と水から酸素と糖を生産

二酸化炭素（温室効果ガス）を減らして地球温暖化を緩和

糖はエネルギー・食料に



出所: Jon Sullivan (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Leaf\_1\_web.jpg)



出所: Daniel Mayer (mav) - original imageVector version by Yerpo and 訳/Japanese translation by UkainoADX (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Simple\_photosynthesis\_is\_overview-ja.svg), „Simple photosynthesis overview-ja”, https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/legalcode

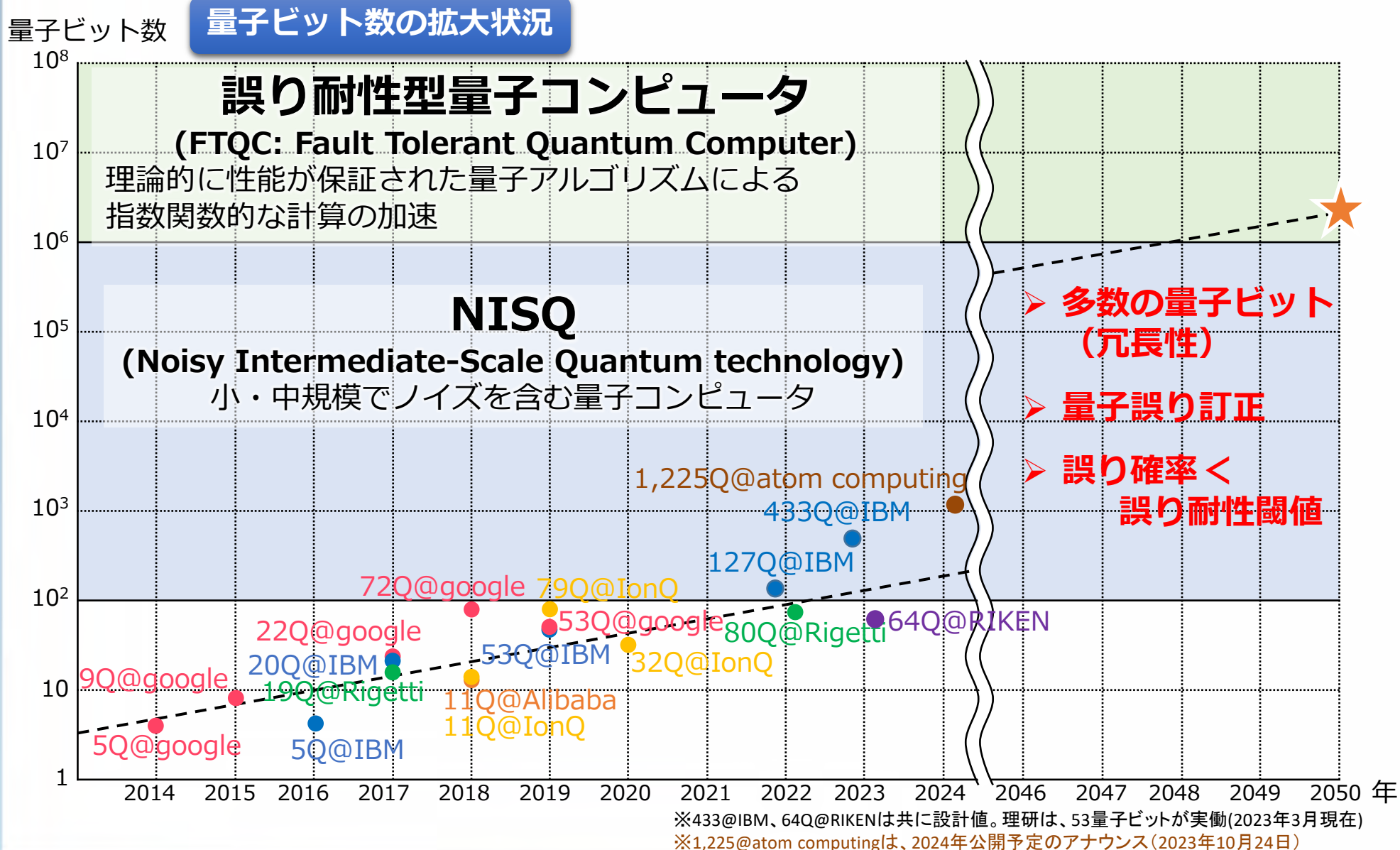
### 天然光合成の高効率の鍵は量子性

量子コンピュータによる解明に期待

模倣してありふれた元素で人工光合成

## 脱炭素の未来へ

# 1.3.1 国内外の研究開発動向と比較



# 1.3.2 国内外の研究開発動向と比較

## 世界の量子コンピュータ開発状況

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	回路構成 マイクロ波帯域	単一原子 理想的な光制御	ノイズ耐性 常温動作	回路構成 高集積性	高集積性 接続性
海外の主な競合会社	Google IBM rigetti OQC (US) (UK)	IONQ (US) AQT (Austria) QUANTINUUM (US)	XANADU (Canada) PsiQuantum (US)	intel QUANTUM MOTION (UK) Silicon Quantum Computing (Australia)	IQEra> PASQAL COMPUTING, INC. (US) (France) ColdQuanta (US)
論理量子ビット数の目標例	Google: 2029年に1000	IONQ: 2028年に1024	PsiQuantum: 2025年に300	SQC: 2028年に100	atom computing (US)
海外の主な競合会社の成果	<ul style="list-style-type: none"> <li>IBM: <b>433</b>量子ビット実機</li> <li>Google: <b>53</b>量子ビット量子超越性提示</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Quantinuum, IonQ: <b>32</b>量子ビット実機</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Xanadu: <b>216</b>量子モード実機</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>TuDelft大: <b>6</b>量子ビット操作</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>QuEra: <b>256</b>量子ビット(量子シミュレータ)</li> </ul>
本プログラムの主な成果	<b>16</b> 量子ビットモジュール	<b>10</b> 量子ビット	連続量量子ビットの生成	<b>3</b> 量子ビット操作(当時世界初)	<b>800</b> 原子アレイ実装
本プログラムの強み	超伝導量子コンピュータの大規模集積化に必要な要素技術開発を網羅	光結合によるインテグレートでスケールアップ	時間領域多重光方式、NTTの光通信の <b>5 G・6 G</b> 技術	3量子ビットでの誤り訂正実証	世界最速量子ビット制御 独自 <b>ナノファイバー共振器</b>

### 量子誤り訂正による論理量子ビットのロードマップ

- 2028年 IonQ 1024論理量子ビット (Algorithmic qubit)  
<https://ionq.com/posts/december-09-2020-scaling-quantum-computer-roadmap>
- 2029年 Google 1000論理量子ビット (100万物理量子ビット)  
<https://blog.google/technology/ai/unveiling-our-new-quantum-ai-campus/>

Googleは**10年以内に誤り訂正された有用な量子コンピューターを作る**ことを目指している

# 1.3.3 国内外の研究開発動向と比較

## 主要国の量子技術政策

	政策動向	内容・予算規模
 米	<ul style="list-style-type: none"> <li>量子情報科学の国家戦略概要 (2018.9)</li> <li>国家量子イニシアティブ法 (2018.12)</li> </ul>	～1,400億円 (\$1.28B) / (2019-24) 「国家量子イニシアティブプログラム」 DOE : 140億円 (\$125M) /年 量子情報研究センター (最大数5) NSF : 56億円 (\$50M) /年 量子研究・教育センター (最大数5) NIST : 89億円 (\$80M) /年 量子情報研究・計量標準、ワークショップ
 中	<ul style="list-style-type: none"> <li>科学技術イノベーション第13次5ヶ年計画 (2016)</li> </ul>	> 1,200億円 / (2016-20) 「国家重点研究計画」 「量子情報科学国家実験室」(合肥市)。第1研究棟完成 (2020年)
 EU	<ul style="list-style-type: none"> <li>Quantum Manifesto (2016.5)</li> </ul>	～1,300億円 (€1B) / (2019-28) 「Quantum Flagship」20課題が採択
 独	<ul style="list-style-type: none"> <li>ハイテク戦略2025 (2018)</li> <li>BMBF「量子技術」(2018.9)</li> <li>未来パッケージ (2021.1)</li> </ul>	～840億円 (€650M) / (2019-22) 量子計算、量子通信、計測、量子分野の技術移転と産業の参画推進 ～2,600億円 (€2B) / (2021-2025) 量子通信、量子コンピューティング、量子センサおよび周辺技術 (電子機器、光源、光学部品、材料、インターフェースなど) の研究開発
 英	<ul style="list-style-type: none"> <li>量子技術国家戦略 (2014.12)</li> </ul>	～600億円 (～£400M) / (2015-19) 「UK National Quantum Technologies Programme」 量子イメージング、量子センシング、量子通信、量子コンピューティング & シミュレーションの4つのhubs構築など
 仏	<ul style="list-style-type: none"> <li>MESRI「国家量子戦略」(2021.1)</li> </ul>	～2,300億円 (€1.8B) / (2021-25?) 量子戦略の7本の柱 (量子コンピュータ、量子センサ、量子暗号通信など) を中心に、産業のバリューチェーン、人材育成・科学研究・技術実験を大幅に強化

(出展：科学技術振興機構・内閣府、2022年)



# 1.4 マイルストーン

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。

# 1.5 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

## 課題解決のアプローチ

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 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 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

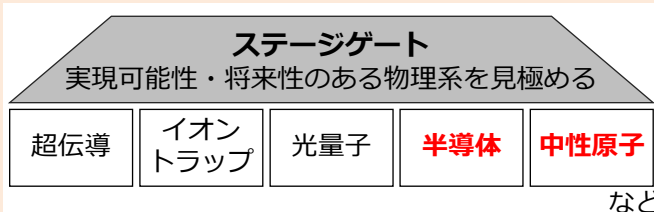
### <量子通信ネットワーク>

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

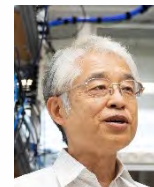
- 量子誤り訂正理論
- ミドルウェア、コンパイラ
- アルゴリズム、アプリケーション
- **誤り訂正システム**

赤色文字は2022年度追加採択プロジェクト

# 1.6 プログラムの推進体制

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 ナノワイヤ
	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

# 1.7 マネジメント体制

PD

## アドバイザーボード (11名)

### サブPD

上妻 幹旺 (東京工業大学)

中村 泰信 (東京大学/理化学研究所)

山下 茂 (立命館大学)

### アドバイザー (外部有識者)

天野 英晴 (慶應義塾大学)

石内 秀美 (元(株)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 (アマゾン ウェブ サービス ジャパン合同会社)

小澤 正直 (中部大学)

川畑 史郎 (産業技術総合研究所)

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)

目標6の各PMを評価

# 2.1.1 目標達成に向けた取組み・革新的な成果

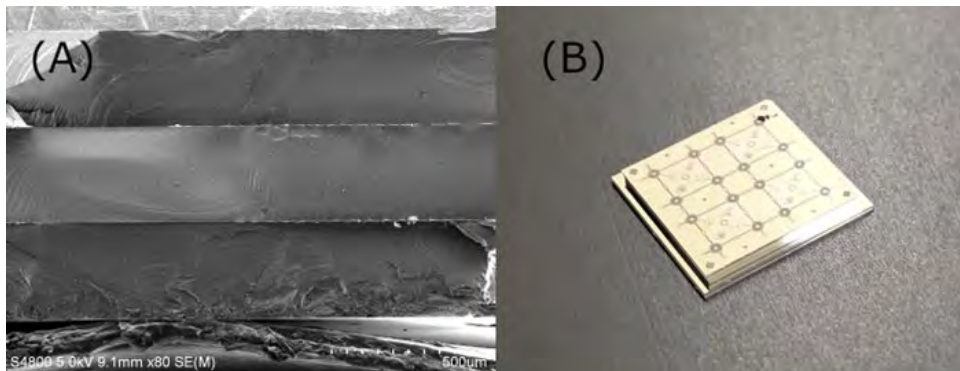
## 超伝導量子回路の集積化技術の開発 (山本剛PM)

2023年度 マイルストーン

- (1) 超伝導量子ビットの高集積化と制御を可能とするための要素技術の実現
- (2) 誤り耐性に必要な物理量子ビット数を低減するための技術開発

目標達成

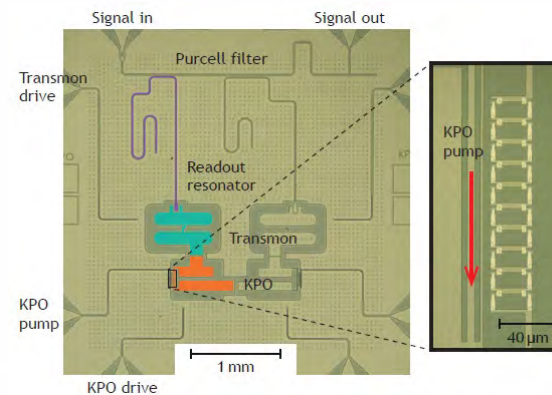
- (1) 積層チップの基本設計、3チップからなる積層構造の作製、伝送特性の確認まで完了



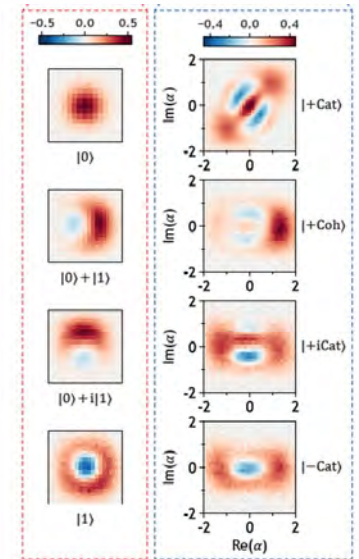
3層積層基板  
(A)断面写真 (B) 外観写真

目標達成

- (2) Kerrパラメトリック発振器を用いて Cat qubit(猫量子ビット)を生成状態トモグラフィにより量子状態の観測に成功



Iyama et al, arXiv:2306.12299.



# 2.1.2 目標達成に向けた取組み・革新的な成果

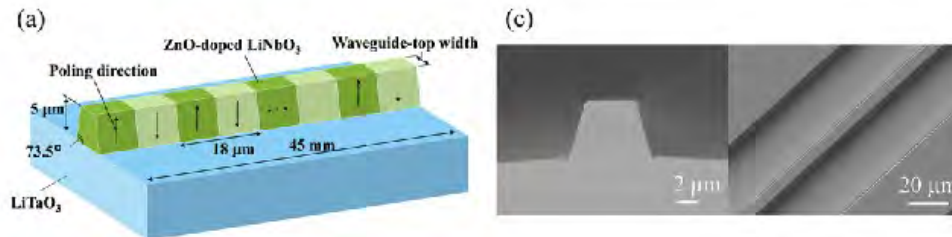
## 誤り耐性型大規模汎用光量子コンピュータの研究開発 (古澤PM)

2023年度 マイルストーン

誤り耐性型全光学式光量子コンピュータ実現に向けて、これまで得られている技術的性能・成果を、波長を光通信波長帯に移して再現

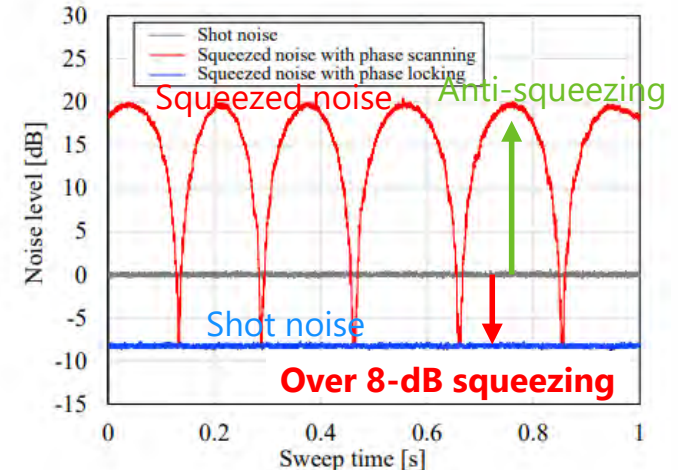
高性能導波路光パラメトリック増幅器および超伝導光子数識別器を開発し、高レベルなスクイーミング光を広帯域で発生し、高速演算の可能性を示した。  
誤り耐性に必要な特殊な量子ビット (GKP量子ビット) 状態の近似的発生に成功し、誤り耐性型汎用光量子コンピュータを実現する端緒が開けた。

目標達成



周期分極反転ニオブ酸リチウム導波路の構造

- 特徴・周期的な分極反転構造の導波路を透過することで高レベルなスクイーミング光を実現
- 共振器が不要のため、帯域制限がなく広帯域化を実現



スクイーミング特性

高性能導波路光パラメトリック増幅器

T. Kashiwazaki, et al., Appl. Phys. Lett. 122, 234003 (2023)

# 2.1.3 目標達成に向けた取組み・革新的な成果

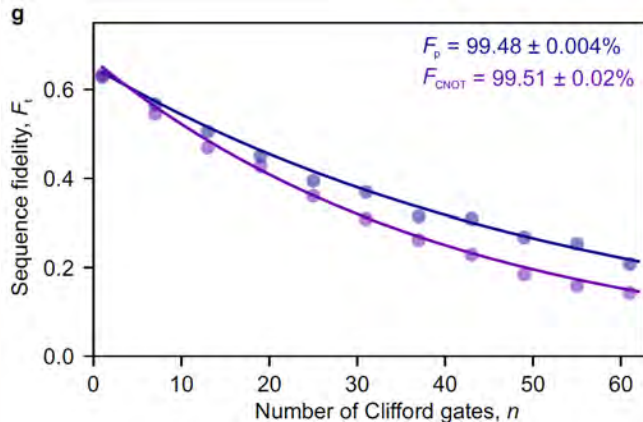
拡張性のあるシリコン量子コンピュータ技術の開発 (樽茶PM) 2022年度採択PJ

量子ドット列の試作と特性評価、結晶評価

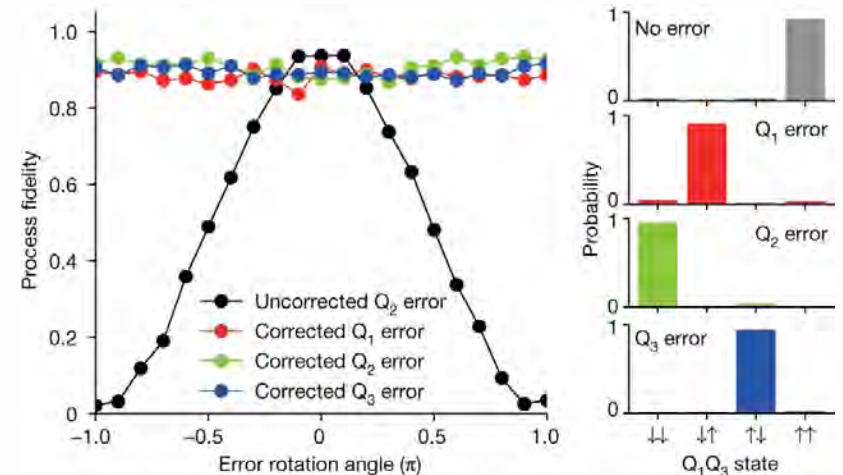
目標達成

高忠実度2ビットゲートを実証

3量子ビットでの位相反転エラー訂正実証



A. Noiri *et al.*, Nature **601**, 338 (2022)



K. Takeda *et al.*, Nature **608**, 682 (2022)

樽茶PM(理研)の採択前に、理研グループが水野PJとして実施した成果

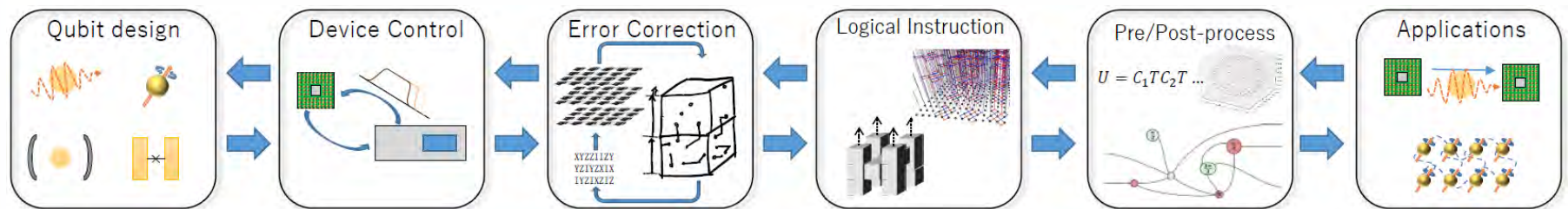
# 2.1.4 目標達成に向けた取組み・革新的な成果

## 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PM)

2023年度 マイルストーン

ハードウェアからソフトウェアまで包含した誤り耐性型量子コンピュータの基本設計指針を定める。

クロスレイヤー協調設計ソフトウェアの雛形として、超伝導量子ビットを表面符号で符号化する主要な方式について、全てのレイヤーを包含、連結したソフトウェア群を構築できた。 **目標達成**



クロスレイヤー協調設計モデル

Ueno, et al. 2021 IEEE International Symposium on HPCA, pp. 274-287 (2022).

Ueno, et al. 2021 58th ACM/IEEE DAC, pp. 451-456 (2021).

Yoshioka, et al. arXiv:2210.14109 (2022).



# 2.2 国内外の研究開発動向と比較

◎:世界トップ  
○:世界トップクラス

		主な成果 (取り組みを含む)	世界の研究開発動向
ハードウェア	超伝導	山本剛PJ: <b>16</b> 量子ビットモジュールで試験集積化の要素技術を <b>網羅的</b> に開発中	◎ IBM: <b>433</b> 量子ビット実機 ◎ Google:量子超越性提示
	イオントラップ	高橋PJ: <b>10</b> 量子ビットを作製 <b>光接続</b> を技術開発中	◎ QuantinuumとIonQ: <b>32</b> 量子ビット実機
	光量子	◎ 古澤PJ: <b>連続量量子ビット</b> を生成	Xanadu: <b>216</b> 量子モード実機
	半導体	○ 樽茶・水野PJ: <b>3</b> 量子ビット誤り訂正 水野PJ: <b>64</b> 以上の量子ビット特性を取得	○ TuDelft大: <b>6</b> 量子ビット操作 ○ UNSW大: <b>2</b> 量子ビット操作 ○ Intel: <b>12</b> ビットデバイス試作
量子通信ネットワーク	小坂PJ: <b>ダイヤモンド</b> による超伝導量子ビット間接続技術を開発中 山本俊PJ: <b>32チャンネル</b> (ch)の超伝導ナノワイヤ <b>光子検出器</b> を製作、12ch機を提供	AWS,IBM,ベンチャーのQphoX: 超伝導-光量子インターフェースを開発中 Scontelなど:16ch,24ch製品化 Photec: <b>32ch</b> を製品化	
誤り訂正	◎ 小芦PJ: <b>クロスレイヤー協調設計モデル</b> 構築 ○ バーストエラー対応法を提示	Microsoft:アプリ開発用にマルチレイヤーリソース推定ツールを公開	

# 3.1 プログラムマネジメントの状況

## 国際会議

### ■ 目標6 国際シンポジウム 2021,2023

- 目標6のPD、PM等 14名、海外招聘トップレベル研究者12名が研究開発の進捗・成果を発表



### ■ Quantum Innovation 2021,2022,2023/11

- 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し All Japan体制の量子技術国際会議実施に中核的に参画

### ■ PDが米国大使館、オランダ大使館でMoonshot紹介

## 委託研究・共同研究

古澤PJ： Xanadu(加)の他、パツキー大(チコ)・マイツ大(独)・オーストラリア国立大等と連携

水野PJ： 日立ケンブリッジラボ(英)と産学連携

## 研究交流

山本剛PJ： ブラウンシュヴァイク工科大(独)-慶大-東大-ケンブリッジ・セミコンダクターの4者連携

小芦PJ： オックスフォード大学等の33の海外の大学と研究交流

## 学生や研究員等の派遣

## 若手育成

オックスフォード大、マイツ大、ロイヤルメルボルン工科大、ブリストル大、ヴァージニア大、リボンヌ大、他

※2022年度以降、派遣期間が1ヶ月以上の人数は10名。その派遣期間としては2ヶ月程度が平均的。

# 3.2 プログラムマネジメントの状況

## 産業界との連携・橋渡し



### ■ 参画企業が要素技術を開発

- **浜松ホトニクスが超伝導多光子検出器を開発・提供(G7で展示)**
- アルバックとアルバック・クライオが希釈冷凍機を開発中  
→主要部品を国産で構成することが可能になる（超伝導）

### ■ 「量子技術による新産業創出協議会」Q-STAR（会員法人数：84）と連携

- 新たな企業参画を促すべく、**2023年から合同で検討会開催**  
→産業界、特に製造業との連携を強化していく

### ■ 企業向け展示会等でPD自らが目標6紹介

- Security Days Fall 2022
- 量子コンピューティングEXPO(2022秋)

### ■ 企業活動と連携

- 12プロジェクト中、2名のPMが民間企業所属（NEC、日立）
- 参画企業：  
NEC、日立、NTT(4PJに参加)、浜松ホトニクス、ニコン  
アルバック、アルバック・クライオ、ナノブリッジ・セミコンダクター、  
Nanofiber Quantum Technologies、  
キュエル、ソシオネクスト、メルカリ、LQUOM  
計：13社

# 3.3 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（毎年3月開催）**
  - PM12名が一般向けに研究開発の進捗・成果を発表
- **サマースクール 2021,2022,(2024春予定) 若手育成**
  - Q-LEAP量子技術教育プログラム(QEd)と共催  
多数の若手約300名が参加、課題研究授業にも意欲的であり、対面参加サマースクールによる人材育成に手応え



## ELSI、数理科学等、横断的な取組

- **数理科学ワークショップ開催**
  - 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(2021年)
  - 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(2023年)
- **「量子コンピュータのELSI」検討会開催(2023年)**
  - 大阪大学量子情報・量子生命研究センター（QIQB）とELSIセンターが共催
  - 目標6から11プロジェクトが参加
- **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PDが持続可能な「地球環境」について議論
- **ムーンショット目標間連携に向けた意見交換(2023年)**
  - 目標4(環境)、目標5(農業)PDと意見交換→量子コンピュータで解ける問題を探して行く

## 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公開
- プログラム・プロジェクト内では、Teams、Slack、BOXを活用して情報共有

# 3.4 プロジェクト評価結果と対応方針

PM		評価結果	対応方針	対応方針の概要	* :2022年度採択PJ
山本剛PM (超伝導)	NEC	A	加速	本プロジェクトで開発した希釈冷凍機を用いて要素技術を統合するテストベッドの構築の追加提案は、有意義なので認める。	
高橋PM (イオントラップ)	OIST	A	継続	共振器QEDを用いてイオントラップ間を高効率で光接続するブレークスルーを是非成し遂げること。	
古澤PM (光量子)	東大	S	加速	FTQC達成前の早期のクラウド化と、非線形演算の高速化のためのASIC作製の追加提案を認める。	
水野PM (半導体)	日立	A	継続	小規模の量子ゲート演算を実証することが優先課題。	
樽茶PM* (半導体)	理研	A	継続	大規模までスケラブルな量子ビット系の実現に向けて、そのポテンシャルをフルに発揮すること。	
大森PM* (中性原子)	分子研	A	継続	海外企業との連携を前提としているが、知財や主導権の確保のために、早期に起業してスタートアップの体制を整えること。	
青木PM* (中性原子)	早大	A	継続	提案のPoCを早期に実現すること。	
小坂PM (量子通信ネットワーク)	横国大	A	継続	要素技術をインテグレートして高効率の超伝導量子ビット—通信波長光子の量子インターフェースのPoCを達成すること。	
山本俊PM (量子通信ネットワーク)	阪大	A	継続	積極的に新しい取り組みを推奨する。	
永山PM* (量子通信ネットワーク)	慶大	A	継続	複数の量子コンピュータを量子通信ネットワークで接続してより大きな分散型量子コンピュータとして動作させるPoC達成にフォーカスすること。	
小芦PM (誤り耐性理論・ソフト)	東大	S	加速	超伝導と表面符号以外のより一般的な量子コンピュータについてモデルを拡張すること。	
小林PM* (誤り訂正システム)	京織大	A	継続	ターゲットとして、超伝導よりも早く1000量子ビットを実現する可能性のある中性原子や半導体にも対応可能となること。	

# 3.5 外部評価; プログラム評価の状況

目標6では、国内外の著名な研究者が外部評価(プログラム全体の技術専門的評価)を実施

細谷 暁夫

東京工業大学 大学院 名誉教授

今井 浩

東京大学 大学院 教授

Artur Ekert

Professor, University of Oxford



Isaac Chuang

Professor of Physics, MIT



Michelle Simmons

Professor, UNSW

プログラム全体を評価

# 3.6 外部評価：プログラム評価結果

**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十分見込まれ、想定を大幅に上回る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

- 量子ハードウェアの研究グループが縦糸、量子通信ネットワーク、誤り耐性のグループが横糸になる全体スキームは大胆であり、日本有数の企業が参加してプラットフォームを構成させるというアプローチは、世界的に見てもユニークである。明らかに世界をリードするいくつかの成果が光量子、半導体などの量子ハードウェア、誤り耐性などで得られており、全体として前倒しで研究が進んでいると評価できる。また、国際シンポジウムを開催し、量子科学技術イノベーション国際シンポジウムに参加するなど国際連携に向け積極的に活動していること、人材育成を行っていることなども高く評価できる。
- 誤り耐性型汎用量子コンピュータの適用事例として挙げている窒素固定や光合成などの量子化学分野の研究者と連携しながら開発することが必要である。また、ユーザーインターフェースなど利用するユーザー側から提示される課題を解決しながら、大規模化に向かうようにすべきである。
- ユーザーと議論しながらユースケースを提案し、産業界に示すことを検討して欲しい。
- プログラムとして、6年目以降は資源をある程度集中投資する戦略が必要になると思われる。今後の評価にあたっては、個々の量子ハードウェアの特性事情を考慮した評価軸と定量化可能な指標、同様に量子通信ネットワーク、誤り訂正のプラットフォーム評価についても評価指標を考えていく必要がある。

# 4. 今後の方向性

## ■ 今後の課題

- ① 要素技術開発は順調に進展しているが、それらを統合して形にする必要がある
- ② 横通しは、理論PJ/超伝導PJ間では機能し始めているが、それ以外のPJ間でも進める必要がある
- ③ 量子化学等のアプリケーション/計算機科学の専門家をもっと参加させる必要がある
- ④ 産業界からの参画は10社以上あるが、参画の無いPJもあり、2030年以降を見据えると更なる参画が必要



## ■ 対応策

- ① 各プロジェクトでのインテグレーションを加速
- ② 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
- ③ 量子化学等のアプリケーションと計算機科学の研究者を補強
- ④ Q-STAR、産業界、特に製造業との連携を強化



---

# 5. 参考資料

## (各プロジェクトの進捗・成果)

# 5.1 各プロジェクトの進捗・成果(山本剛PJ)

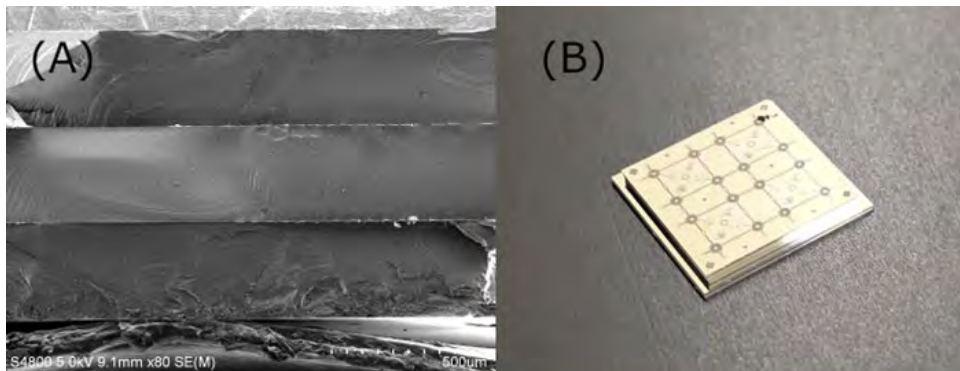
## 超伝導量子回路の集積化技術の開発

2023年度 マイルストーン

- (1) 超伝導量子ビットの高集積化と制御を可能とするための要素技術の実現
- (2) 物理量子ビット数を低減するための技術開発

目標達成

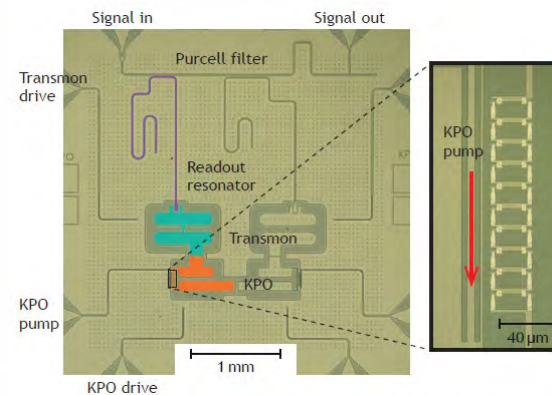
- (1) 積層チップの基本設計、3チップからなる積層構造の作製、伝送特性の確認まで完了



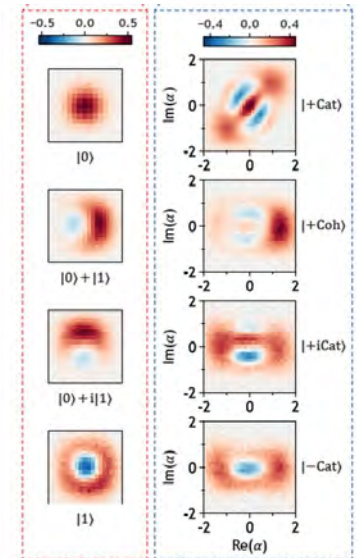
3層積層基板  
(A)断面写真 (B) 外観写真

目標達成

- (2) Kerrパラメトリック発振器を用いて Cat qubitを生成  
状態トモグラフィーにより量子状態の観測に成功



Iyama et al, arXiv:2306.12299.



# 5.2 各プロジェクトの進捗・成果(高橋PJ)

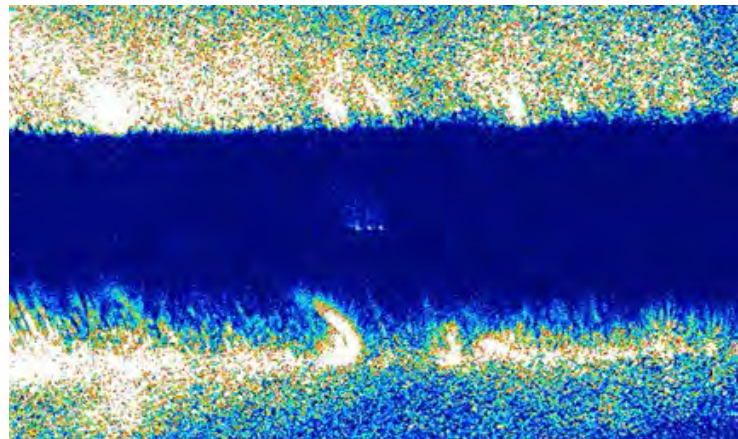
## イオントラップによる光接続型誤り耐性量子コンピュータ

2023年度 マイルストーン

- (1) 微小光共振器を内蔵可能な線形イオントラップの作製・評価
- (2) イオン振動モードを光学的に制御し振動モードの量子的重合せの実現

目標過達(世界初)

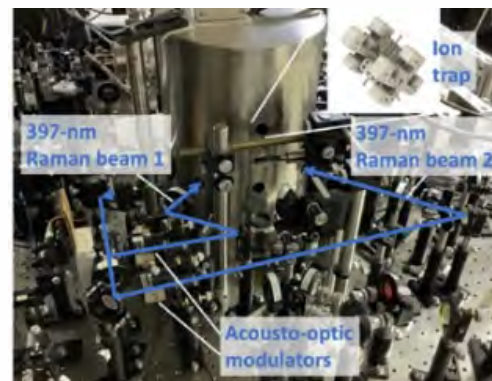
- (1) 3Dプリント技術を用いたイオントラップを作成  
→イオン捕獲に成功



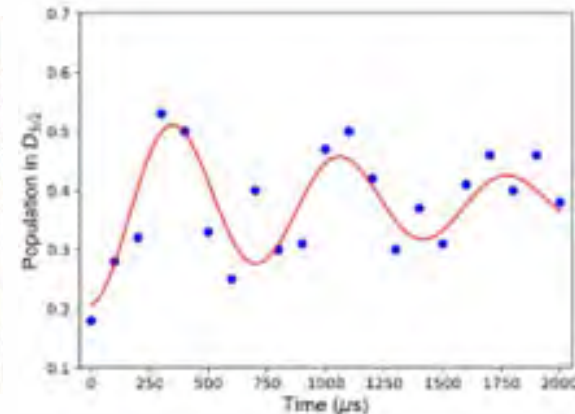
3Dプリント技術で作製したイオントラップでイオンが捕獲されている様子

目標達成

- (2) イオンの振動モード間のビームスプリッタ相互作用の実現に成功  
振動量子状態を用いた量子制御の基本となる成果



誘導ラマン遷移励起用光ビーム系とイオントラップ系



ビームスプリッター相互作用誘起の実験結果

# 5.3 各プロジェクトの進捗・成果(古澤PJ)

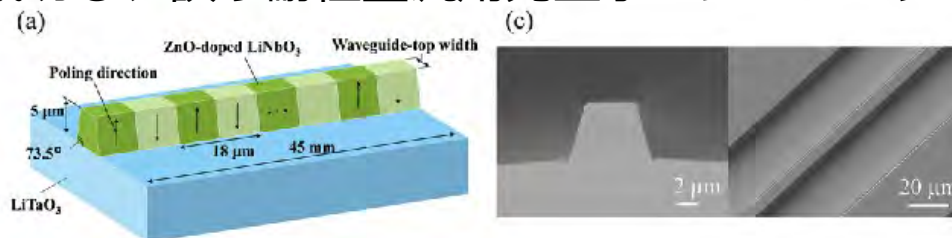
## 誤り耐性型大規模汎用光量子コンピュータの研究開発

2023年度 マイルストーン

誤り耐性型全光学式光量子コンピュータ実現に向けて、これまで得られている技術的性能・成果を、波長を光通信波長帯に移して再現

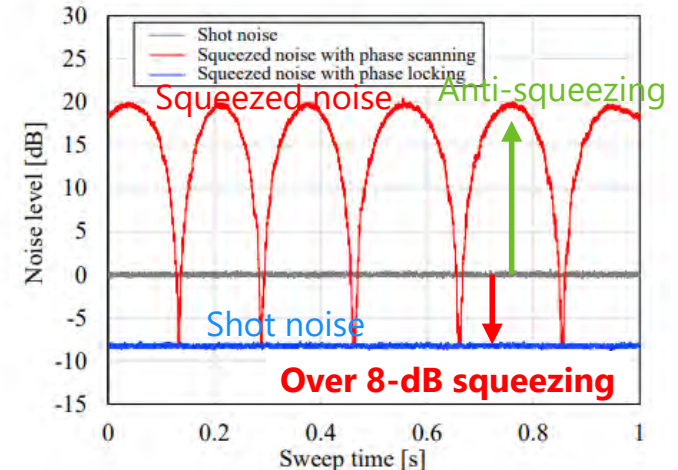
高性能導波路光パラメトリック増幅器および超伝導光子数識別器を開発し、高レベルなスクイーミング光を広帯域で発生し、高速演算の可能性を示した。  
誤り耐性に必要な特殊な量子ビット（GKP量子ビット）状態の近似的発生に成功し、誤り耐性型汎用光量子コンピュータを実現する端緒が開けた。

目標達成



周期分極反転ニオブ酸リチウム導波路の構造

- 特徴・周期的な分極反転構造の導波路を透過することで高レベルなスクイーミング光を実現
- 共振器が不要のため、帯域制限がなく広帯域化を実現



スクイーミング特性

### 高性能導波路光パラメトリック増幅器

T. Kashiwazaki, et al., Appl. Phys. Lett. 122, 234003 (2023)

# 5.4 各プロジェクトの進捗・成果(水野PJ)

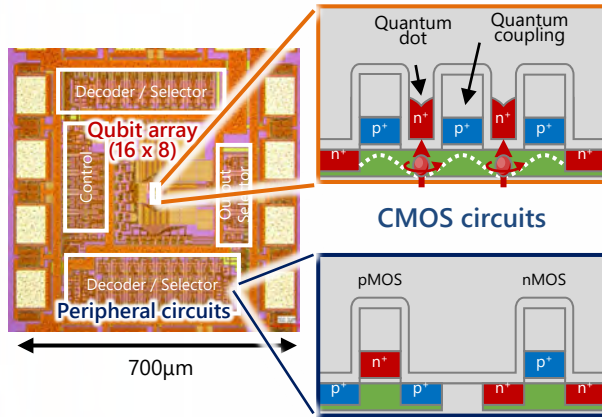
## 大規模集積シリコン量子コンピュータの研究開発

2023年度 マイルストーン

- (1) 64量子ビット以上の量子ビットアレイチップの作製と特性取得
- (2) 小規模実験回路の作製と実験

(1) 64量子ビット以上の量子ドット特性を取得

目標達成

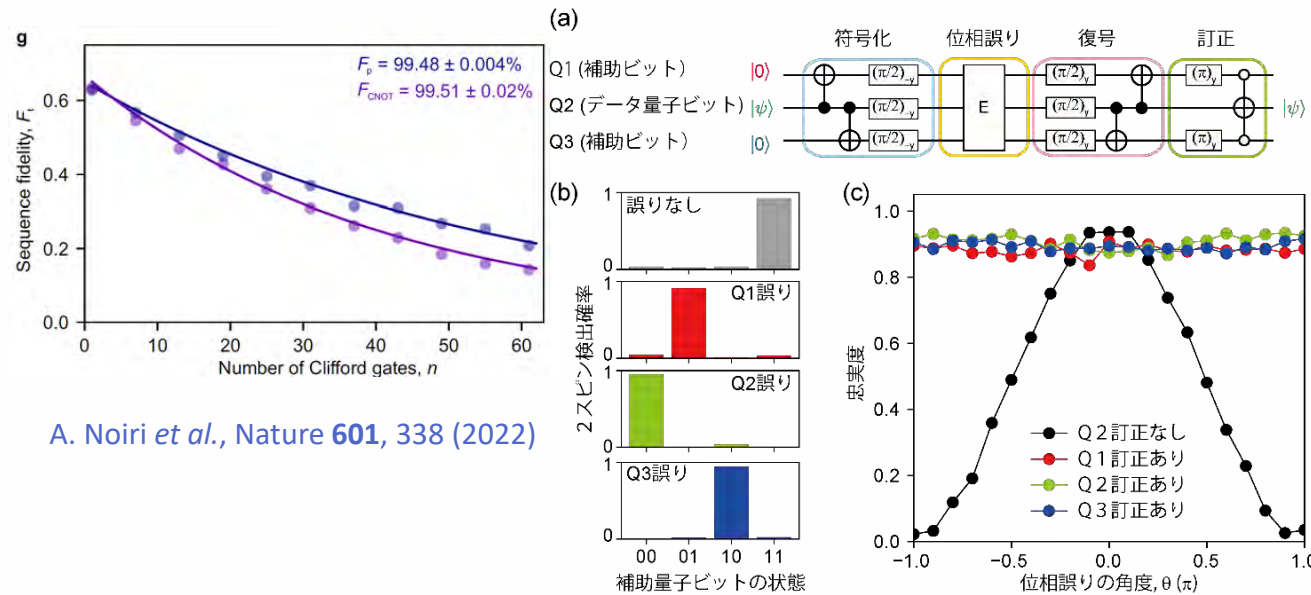


Lee N. et al. 2021 Int. Conf. on SSDM A-1-02 (2021)  
N. Lee et al., Jpn. J. Appl. Phys. 61, SC1040 (2022)

更に、小規模回路でのスピン操作を実験中

(2) 高忠実度 2 ビットゲートを実証  
シリコン位相誤り訂正回路を実証

目標達成(世界初)



A. Noiri et al., Nature 601, 338 (2022)

K. Takeda et al., Nat. Nanotechnol. 16, 969 (2021)  
K. Takeda et al., Nature 608, 684 (2022)

上記(2)は、樽茶PM(理研)の採択前に、理研グループが水野PJとして実施 29

# 5.5 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

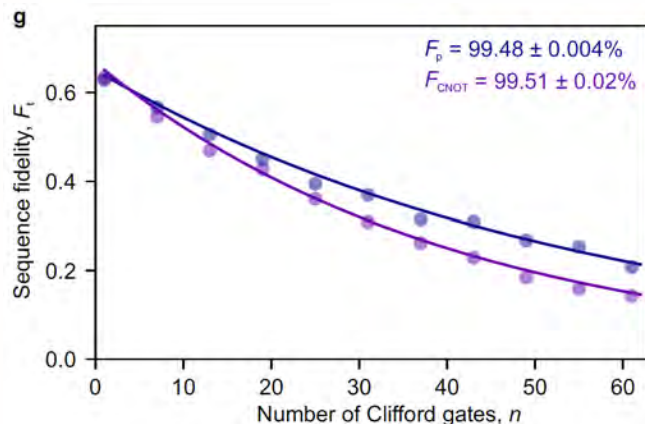
2022年度採択PJ

量子ドット列の試作と特性評価、結晶評価

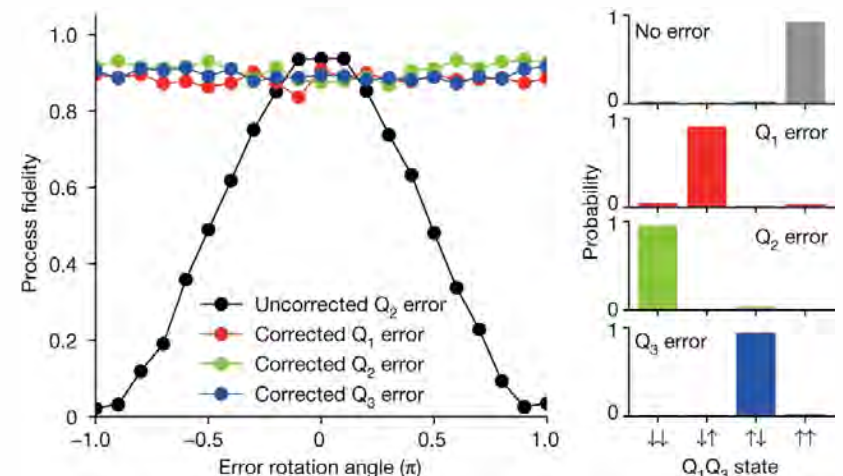
目標達成

高忠実度2ビットゲートを実証

3量子ビットでの位相反転エラー訂正実証



A. Noiri *et al.*, Nature **601**, 338 (2022)



K. Takeda *et al.*, Nature **608**, 682 (2022)

樽茶PM(理研)の採択前に、理研グループが水野PJとして実施した成果

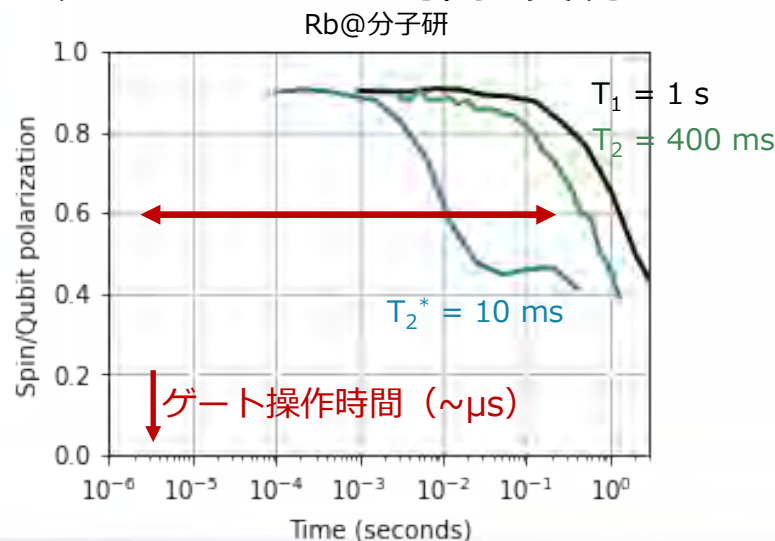
# 5.6 各プロジェクトの進捗・成果(大森PJ)

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 2022年度採択PJ

- (1) 量子ビットゲート操作時間と比べ100倍長いコヒーレンス時間の観測
- (2) QPU (quantum processing unit : 量子処理ユニット)、新規レーザーシステムの設計を完了

目標達成

- (1) ダイナミカルデカップリングによるコヒーレンス時間の延長に成功し、1量子ビットゲート操作時間と比べ100倍以上のコヒーレンス時間を実現

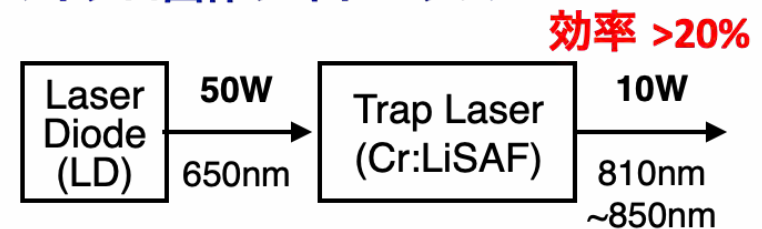


目標過達

- (2) QPUの設計完了見込み  
新規レーザーシステムの設計を完了見込み  
(ゲート操作用パルスレーザー、原子トラップレーザー)

小型高出力化 ▶ 量子効率の改善

- LD励起固体 (Cr:LiSAF) レーザー, 他
- マイクロ固体フォトニクス



平等PI: トラップレーザー仕様(常温接合によりCr:LiSAFの熱伝導率を実効的に高めトラップレーザーの高安定・高輝度小型化を図る)

\* LD : 半導体レーザー (Laser Diode)

# 5.7 各プロジェクトの進捗・成果(青木PJ)

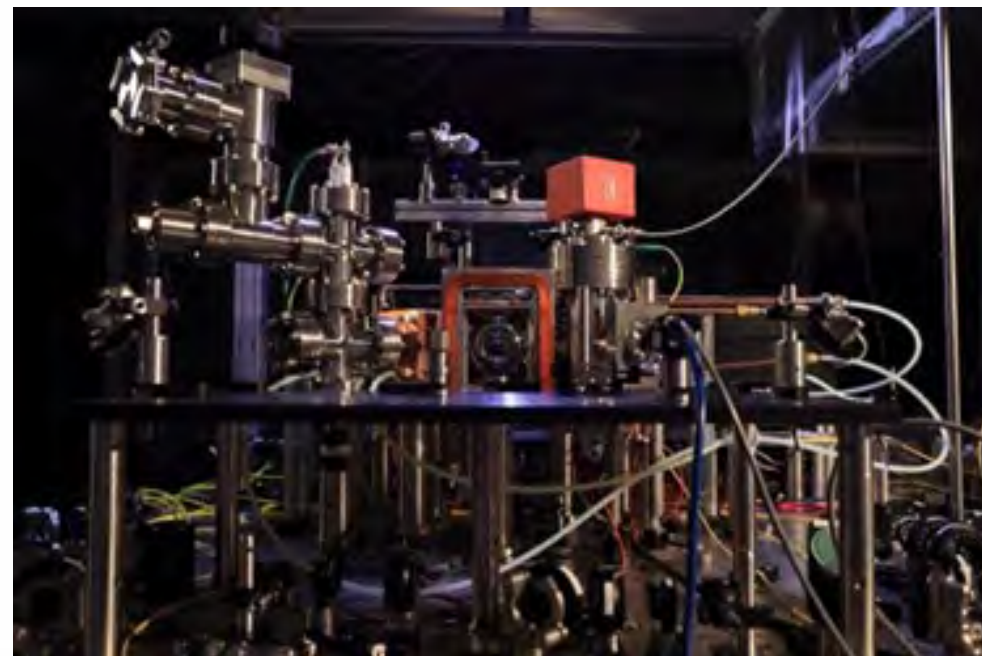
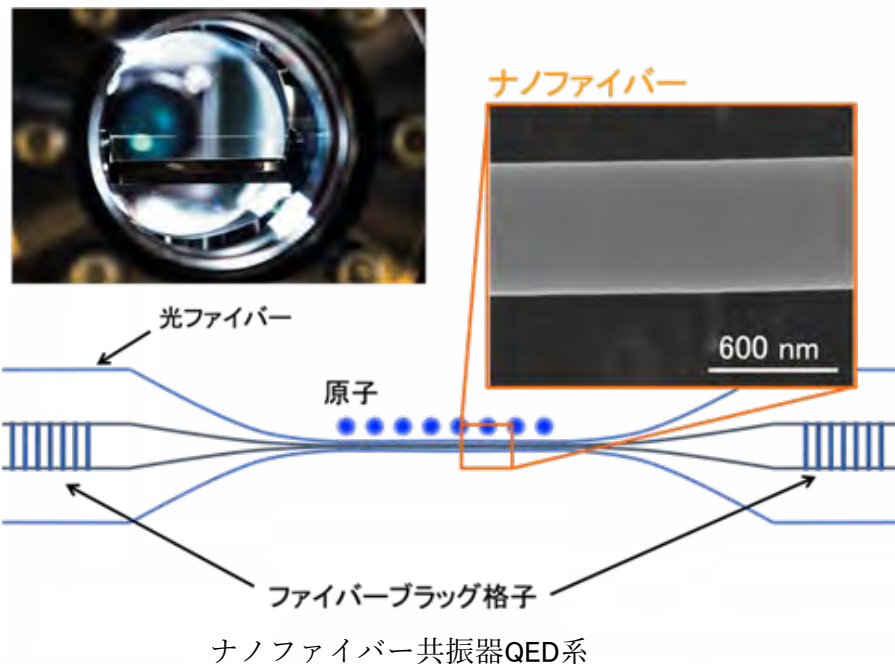
ナノファイバー共振器QEDによる大規模量子ハードウェア

2022年度採択PJ

ナノファイバー共振器QED系 原理実証用ユニットの立ち上げ

目標達成

(1) 原理実証用ユニットの設計完了  
立ち上げ開始



原理実証機



# 5.8 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

2023年度 マイルストーン

多数の量子ビットを接続させるためのハイブリッド量子インターフェースの要素技術を開発

### 1. ダイヤモンド量子メモリ

目標達成

- 量子もつれ光源開発  
ダイヤモンド中の窒素空孔 (NV) 中心を用い、光子と電子の間の量子もつれ生成を、目標とした85%以上を大きく上回る98%の忠実度で実現 (図1)
- 量子メモリの誤り耐性万能量子ゲート操作  
NV中心の電子スピンに対し幾何学的量子操作を行い、誤り耐性のある万能量子ゲート操作を、目標とした99.6%以上を大きく上回る99.97%の忠実度で実現
- 量子メモリ内での完全ベル測定  
二つの炭素核スピン間の完全ベル測定を、目標とした87%以上を上回る90%の忠実度で実現

### 2. オプトメカニカル共振器

目標(前倒し)達成

- エアブリッジ型ダイヤモンドフォトニック結晶ナノビーム共振器構造の実現に成功(図2)
- NV中心およびフォノン(音子)を介したマイクロ波-光変換の基礎実証に成功



図1 ダイヤモンドNV中心に内蔵された量子システム

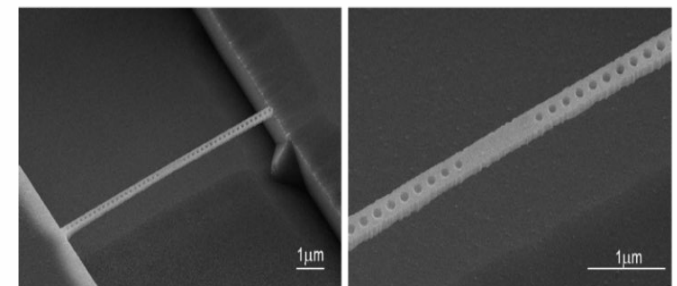


図2 ダイヤモンドエアブリッジ型フォトニック結晶ナノビーム共振器構造のSEM写真

# 5.9 各プロジェクトの進捗・成果(山本俊PJ)

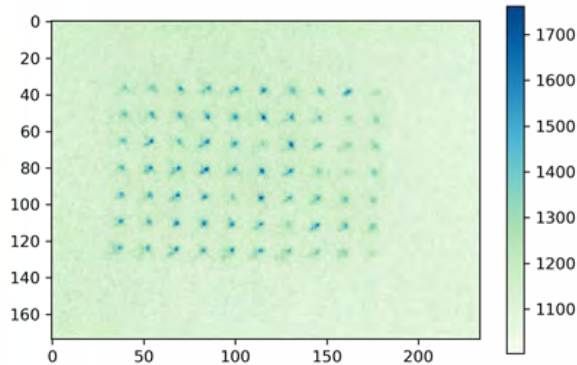
## ネットワーク型量子コンピュータによる量子サイバースペース

2023年度 マイルストーン

- (1) 「各物理系と光との量子インターフェース」の基礎原理の実証
- (2) 10ch以上で量子効率90%以上の光子検出器の実現

目標達成

(1)原子アレイからの単一光子の生成

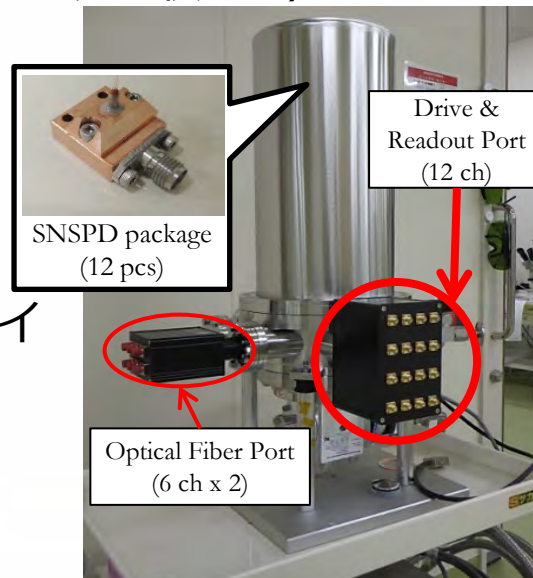


7×10サイトの単一原子アレイ

原子アレイと光のエンタングルメント生成

目標達成

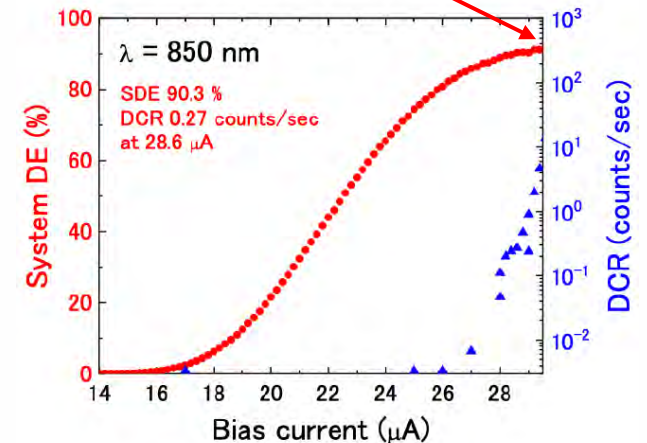
(2-1)12チャンネルのSNSPD  
(超伝導ナノワイア単一  
光子検出器)



目標達成

(2-2)量子効率90%  
850nm用SNSPD素子

検出効率 : 90.3%



システム検出効率・暗計数率の  
バイアス電流依存性

# 5.10 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

2022年度採択PJ

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：全体設計や量子通信における基本プロトコル研究
- (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

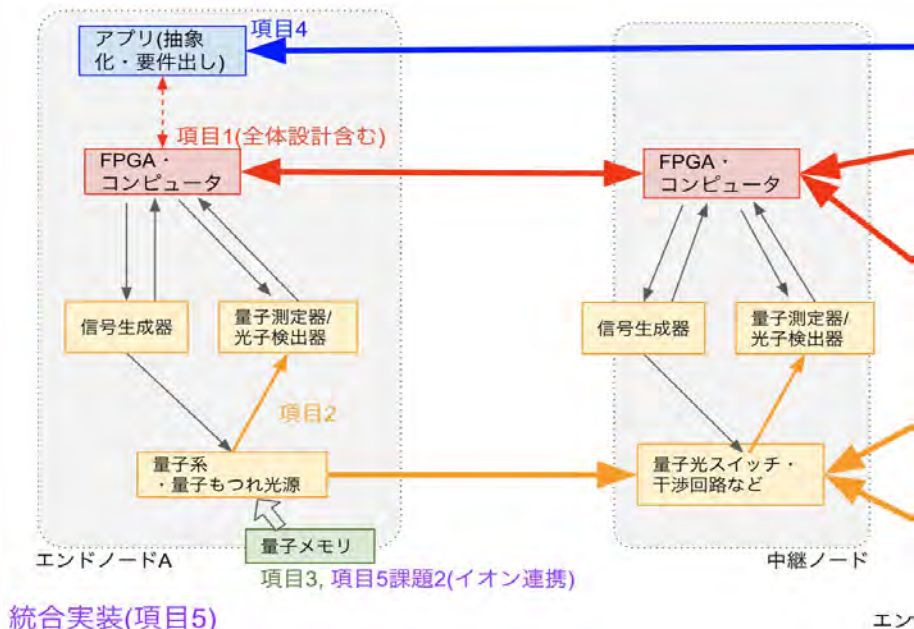


図1: 実装システムの完成イメージ図

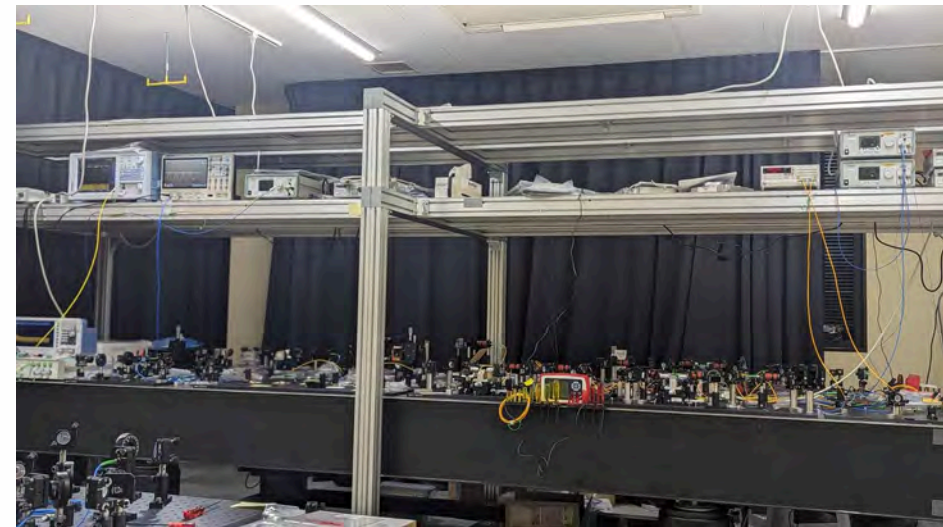


図2: テストベッドとして用いる量子光学系  
光学定盤右手前に1ノード分の光学系を構築済

前倒し実施

# 5.11 各プロジェクトの進捗・成果(小芦PJ)

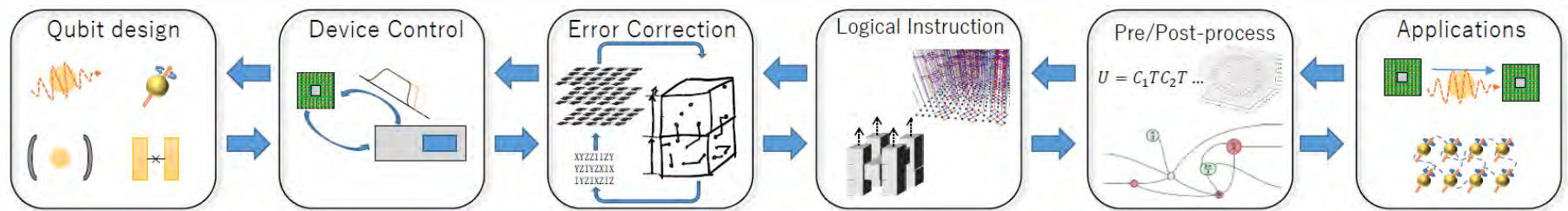
## 誤り耐性型量子コンピュータにおける理論・ソフトウェアの研究開発

2023年度 マイルストーン

ハードウェアからソフトウェアまで包含した誤り耐性型量子コンピュータの基本設計指針を定める。

クロスレイヤー協調設計ソフトウェアの雛形として、超伝導量子ビットを表面符号で符号化する主流の方式について、全てのレイヤーを包含、連結したソフトウェア群を構築できた。

目標達成



クロスレイヤー協調設計モデル

Ueno, et al. 2021 IEEE International Symposium on HPCA, pp. 274-287 (2022).

Ueno, et al. 2021 58th ACM/IEEE DAC, pp. 451-456 (2021).

Yoshioka, et al. arXiv:2210.14109 (2022).

# 5.12 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

2022年度採択PJ

## 研究項目

- (1)エラー訂正バックエンド
- (2)量子ビット制御フロントエンドの先鋭化
- (3)光/Cryo CMOS集積回路によるスケーラブルな古典-量子インターフェース
- (4)フロントエンド・バックエンドのCryo CMOS化
- (5)常温で動作するフロントエンドアナログRF部のLSI化

- (1)調査、予備検討を実施
- (2)現行の性能評価、構成要素の洗い出し、デジタル化による目標設定、要素技術の検討
- (3)極低温環境の構築、光集積回路チップの試作、トランジスタアレイの試作評価、SPICEシミュレーションによるフリップフロップや標準論理ゲートの動作特性評価
- (4)デジタル回路のRTL化とSoCの基本仕様検討、RFにおける高周波でのデバイスモデルの設計手法の検討、ADCにおけインターリーブ動作に適した単体や変換アーキテクチャの検討、DACにおける4倍アップサンプリングに必要な要素回路の設計と性能評価
- (5)フロントエンドアナログRF部回路の設計開始

