

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5年3月24日

プログラムディレクター

北川勝浩

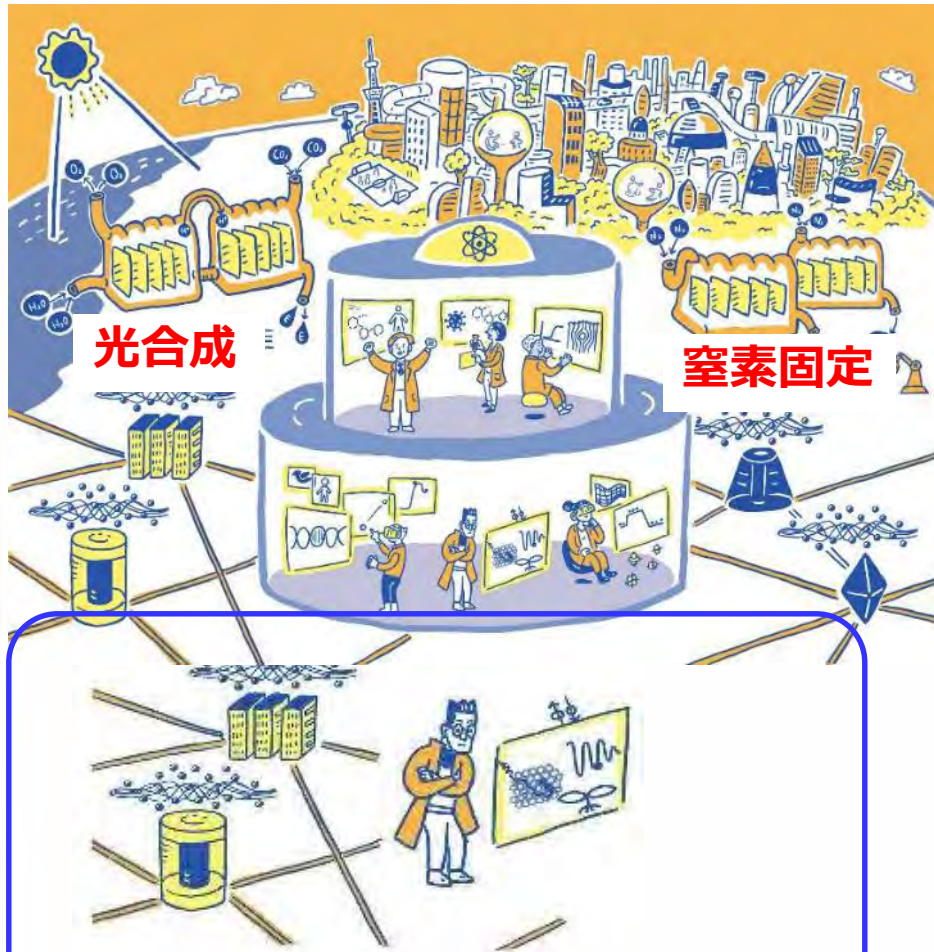
(大阪大学 教授)

目次

1. 目指す社会像
2. 解決すべき課題
3. プログラムの構成
4. プログラムの進捗・成果
5. プログラムマネジメントの状況
6. 今後の方向性
7. 自己評価結果

1. 目指す社会像

「省エネ」な生物の営みを正確に理解し、持続可能な安全で豊かな社会を実現



複数の量子コンピュータをネットワークで連携し大規模な計算を高速で行う

MS6目標

- 生物の営みは「省エネ」かつ持続可能

窒素肥料の生産に使用されるエネルギーは人類の総消費エネルギーの数%

菌は、空気中の窒素分子を高効率で窒素化合物に変換

光合成は、二酸化炭素（温室効果ガス）を減らし、エネルギー・食料になる糖を生成

- 高効率の秘密は、反応に関わる物質の量子のふるまいにある
- スーパーコンピュータをもってしても、複雑に絡み合う量子状態を計算することは困難
- 誤り耐性型汎用量子コンピュータが実現されれば、量子状態の厳密な計算（再現）が可能になる

窒素固定、光合成を人工的に再現

2. 解決すべき課題

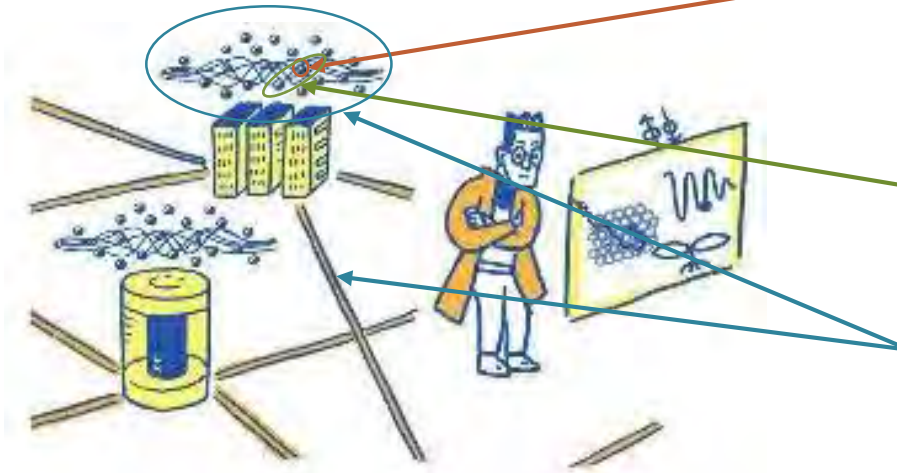
量子技術全体を底上げしつつ、誤り耐性型汎用量子コンピュータを実現する

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 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

目標達成に必要な技術



■ハードウェア

- ・量子ビットの品質
- ・ビット数
- ・接続性

■通信ネットワーク

- ・量子インターフェイス
- ・量子中継器

■誤り耐性

- ・量子誤り訂正符号
- ・量子アルゴリズム
- ・誤り訂正システム

3. プログラムの構成

■ハードウェア：・量子ビットの品質、・ビット数、・接続性

ハードウェア

	超伝導 山本剛 PM	イオン トラップ 高橋優樹 PM	光量子 古澤明 PM	半導体 量子ドットアレイ 水野弘之 PM	半導体 スパースマトリクス 樽茶清悟 PM	中性原子 2次元アレイ 大森賢治 PM	中性原子 ナノファイバー 青木隆朗 PM
通信ネットワーク 小坂英男 PM 山本俊 PM 永山翔太 PM	超伝導と 通信の 連携	分散QCC 連携 光検出器 で連携					
	量子ビット接続で連携						
	量子ネットワークシステム技術						
誤り耐性 小芦雅斗 PM 小林和淑 PM	各ハードの理論検証、新規誤り訂正理論の考案、クラウド公開、シミュレーション開発、人材交流、理論家育成などで連携						
	誤り訂正システム開発(誤り訂正ソフトウェア及び実行システム・装置)						

■通信ネットワーク

- ・量子インターフェイス
- ・量子中継器

■誤り耐性

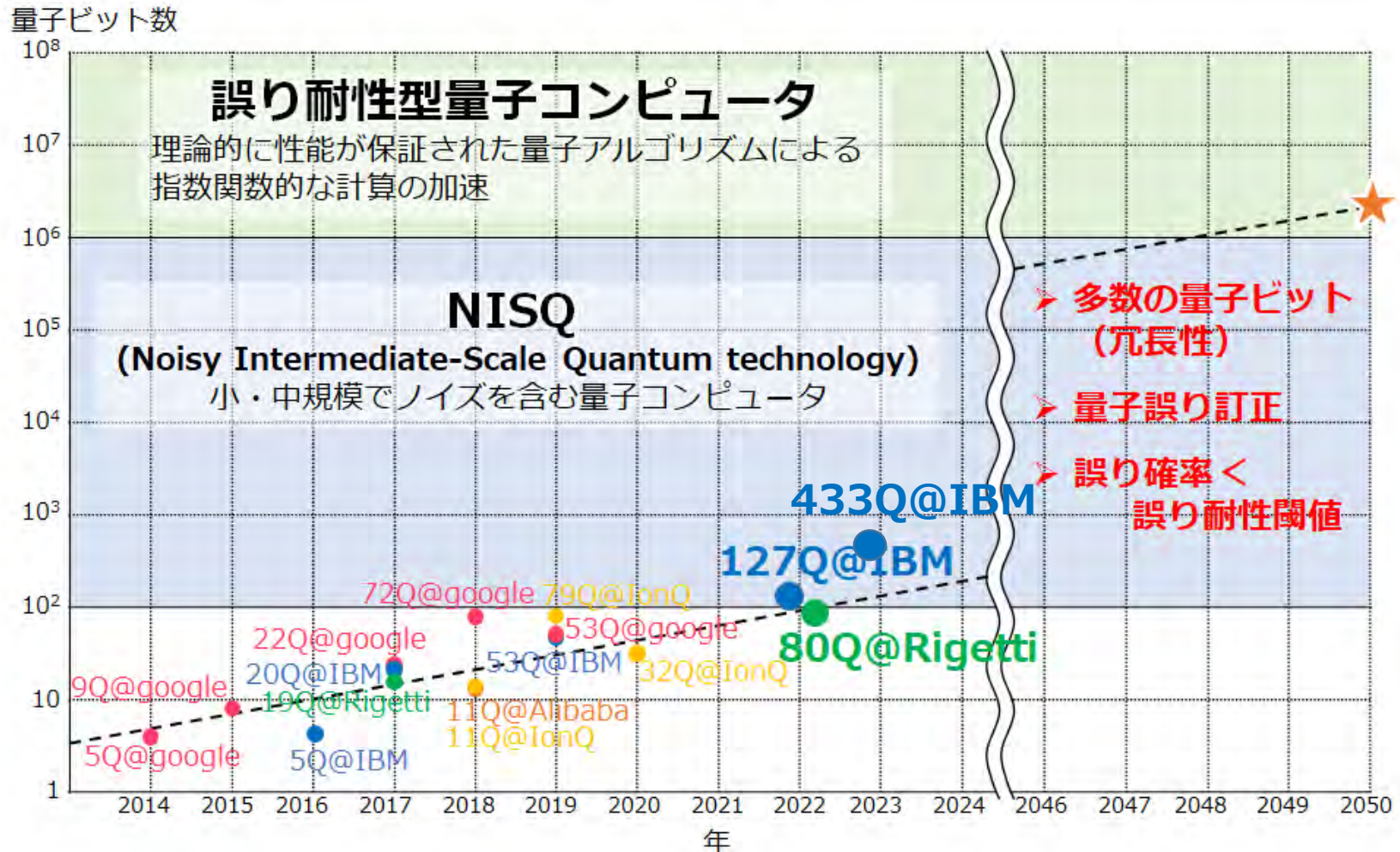
- ・量子誤り訂正符号
- ・量子アルゴリズム
- ・誤り訂正システム

研究開発体制図： プログラムポートフォリオ

2020年度採択プロジェクト

2022年度採択プロジェクト

4. プログラムの進捗・成果(プログラムを取り巻く状況)



海外コンサルティンググループの見方*

2030年まではNISQ

2030年以降は誤り訂正による量子優位性

2040年以降は誤り耐性

* : What Happens When 'If' Turns to 'When' in Quantum Computing?

2021-07-21

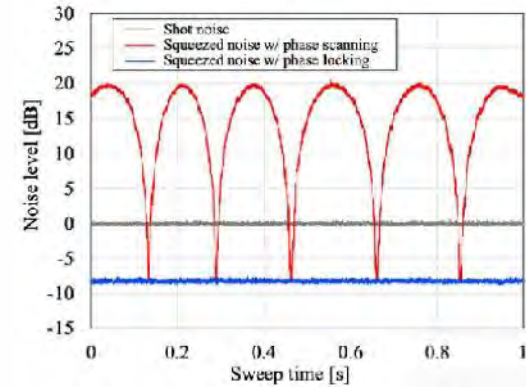
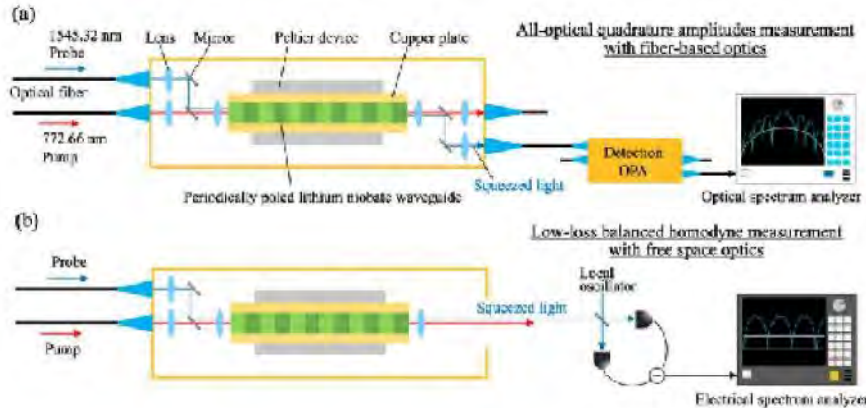
By Jean-François Bobier, Matt Langione, Edward Tao, and Antoine Gourévitch

<https://www.bcg.com/ja-jp/publications/2021/building-quantum-advantage>

4. プログラムの進捗・成果(代表例)

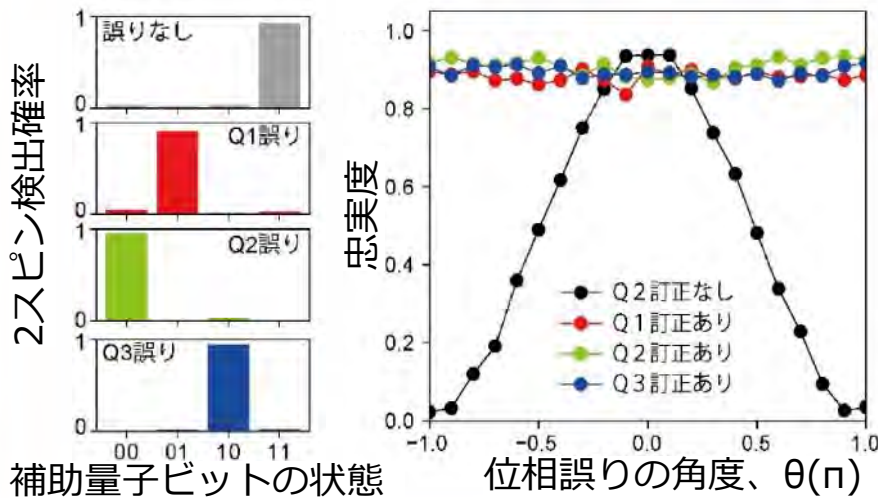
■ **ハードウェア** : ・量子ビットの品質、 ・ビット数、 ・接続性

スクイーミング光を超広帯域で発生 (世界最高レベル)

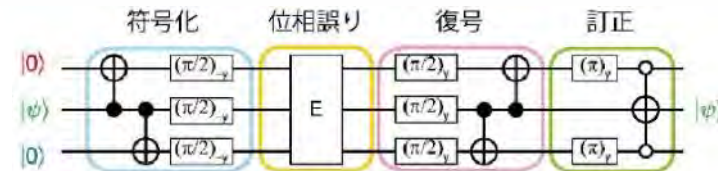


- ・ 5G、Beyond 5Gの高速回路技術応用で高速化に期待
- ・ 超高速 (= 時間単位で大量) の量子ビット生成に期待

小規模な実験回路による3ビット量子誤り訂正回路の実証 (世界初)



Q1(補助ビット)
Q2(データ量子ビット)
Q3(補助ビット)



- ・ 量子ビット誤り率が低く、高精度の処理も実現
- ・ 現実的な誤りに対する誤り訂正を実証

4. プログラムの進捗・成果(代表例)

■通信ネットワーク：・量子インターフェース、・量子中継器

光ランダムアクセス量子メモリの原理実証に成功 (世界初) 2022年7月29日プレス発表
ダイヤモンド中の窒素および複数の炭素同位体からなる量子メモリをゼロ磁場下で制御し、量子誤り訂正に成功



- ・高精度量子メモリとその操作の実現、
- ・超伝導量子ビット環境への適用が可能

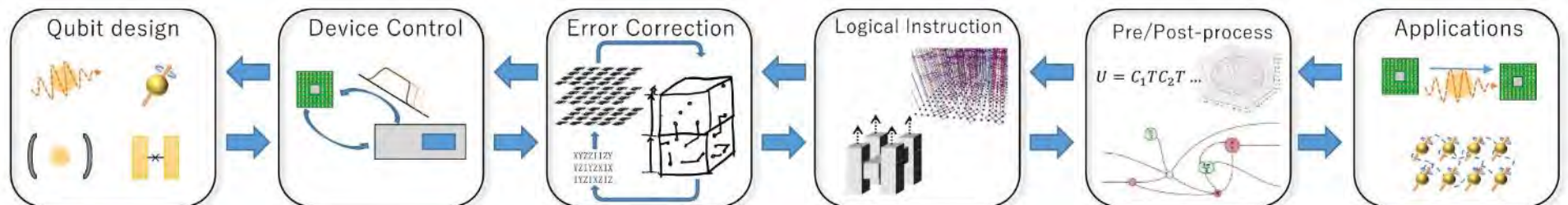
■誤り耐性：・量子誤り訂正符号、・量子アルゴリズム、・誤り訂正システム

ミニマルモデル (必要最小限の簡易モデル) を構築

実際にソフトウェア化・ツール化しシステムの性能をシミュレート (超伝導系)

クロスレイヤー協調設計モデルの構成：

- ・各レイヤーでパラメータ依存関係を細かく評価するソフトウェア
- ・用途に合わせて評価ソフトウェアを呼び出し最適化計算を行うモジュール
- ・全レイヤーをまたぐ依存関係を扱うため、各レイヤーで代替となる標準的モックアップの構築



- ・要素技術の指標を統合し計算機の性能予測が可能⇒具体的な設計指針を提示し開発の効率向上

5. プログラムマネジメントの状況 (1/2)

国際連携

➤ 国際会議

■ Quantum Innovation 2022

- ・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
- ・目標6のPD、PM、PI等13名が世界に向けて成果を発信、交流

■ JAPAN - NETHERLANDS

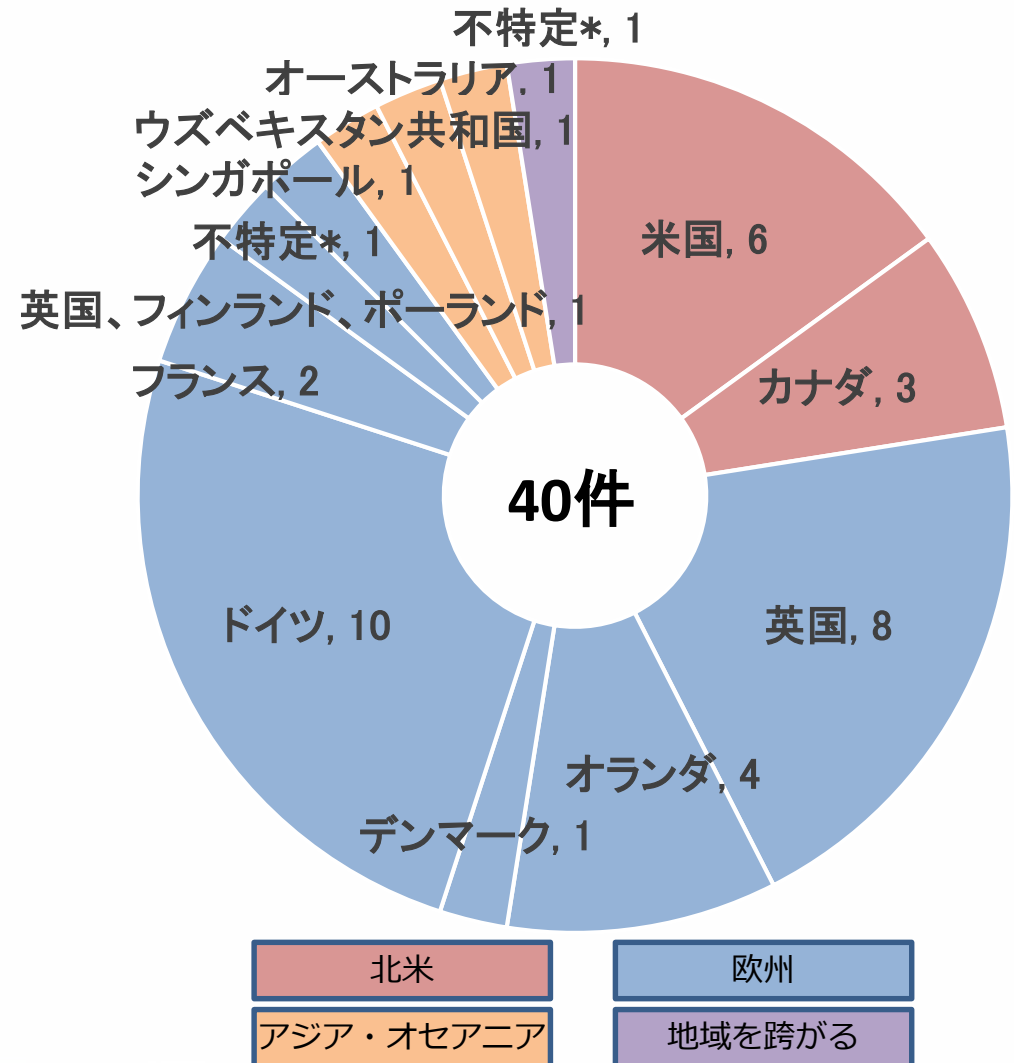
BILATERAL MISSION

(オランダ大使館主催)

- ・オランダ王室・産業界からの訪問団に向けPD自らがプログラム紹介。PM(小坂・山本俊・永山)も参加し、国際連携を模索

➤ 研究交流、研究員等の派遣等

- ・研究室単位の研究交流、学生を中心とした長期・短期の研究者派遣、海外でのワークショップの開催など



* : 複数の国に跨がる場合
共同研究、研究者交流などの状況

5. プログラムマネジメントの状況 (2/2)

産業界との連携・橋渡し

■ 要素技術開発を目指した課題

- ・ 超伝導多光子検出器をNICT、阪大、浜松ホトニクスが連携し作成
さらに、試作機を目標内で連携提供
- ・ 希釈冷凍機（アルバック、アルバッククライオ）を開発中。
上記達成により主要部品を国産製で構成することが可能になる（超伝導）

■ 企業向け展示会等でPD自らが目標6紹介

- ・ Security Days Fall 2022 (10/7)
- ・ 量子コンピューティングEXPO(秋) (10/22)

広報・アウトリーチ活動

■ 毎年3月に公開シンポジウムを開催

- ・ 多くの参加者から高い関心

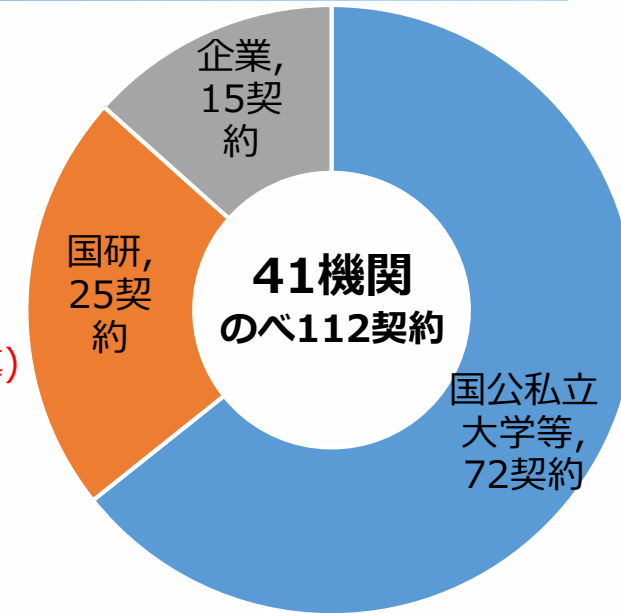
■ Q-LEAP量子技術教育プログラム(QEd)とサマースクールを共催

- ・ 講師としてPM,PIが参加（29名中19名）
- ・ 高校生を含む若手参加者 課題研究授業にも意欲的で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

■ 数理科学分科会の横断的支援を受け数理分野向けワークショップを開催

- ・ 他分野から新たなPIが参画



研究機関の分類・件数

6. 今後の方向性

見えてきた課題

➤ 現行の目標

- ・ 2030年に量子誤り訂正の有効性を実証

➤ 海外企業のロードマップ

- ・ 現行の目標よりも野心的なロードマップを公表

例 2028年 IonQ 1024論理量子ビット(32:1 error-correcting encoding)
2029年 Google 1000論理量子ビット(100万物理量子ビット)
(技術的根拠が不明で、いくつかのブレークスルーが必要と推測)

目標達成に向けた新たな取組み

世界の最先端グループの中で競争できる量子コンピュータ開発を加速するべく、

➤ プロジェクト間の連携強化を主導

- ・ 異なるハードウェア間で共通技術の効果的な開発
- ・ ハードウェアと通信ネットワーク、ハードウェアと誤り訂正間で初期から連携して開発

➤ 大規模化に備えた産学官連携土壌の醸成、アウトリーチ

- ・ Q-STAR「量子技術による新産業創出協議会」と目標6との連携セミナーを4月から企画
- ・ 3月28日（火）に公開シンポジウムを開催
- ・ 7月18（火）～20（木）に国際シンポジウムを開催

➤ 2050年を見据えた若手技術者育成、アウトリーチ

- ・ 息の長い挑戦を支える若手人材を育成すべくサマースクール開催継続を計画

7. 自己評価結果 (1/3)

総括：
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目標達成に向けたポートフォリオの妥当性（評価項目①）

4方式の量子ビットハードウェア、量子ビット同士を繋ぐ通信ネットワーク2方式および、理論・ソフトウェアの7研究開発プロジェクトを競争、連携させて進めるポートフォリオ戦略を当初より行い、適切な採択、マネジメントを行った結果、順調に研究開発は立ち上がり、今年度は、各要素技術の一層の進展が見られ、一部では、想定以上の結果、前倒しのマイルストーン達成も見られている。多数の世界トップレベルの学術的発表が行われ、プレスリリースも伴い、広く社会に情報発信を行っている。また、プロジェクト間連携に基づき、要素技術を統合システム化する実機開発に繋がる研究開発も立ち上がっている。複数の海外企業が量子誤り訂正を早期に実現する野心的なロードマップを発表し開始時からの状況が変化したため、既存のプロジェクトの加速・強化と、新規プロジェクト採択も含めた研究実施体制強化を図った。

今後は目標実現に向けたロードマップが社会に向けてより分かりやすく示されること、および、先行きが不透明な中でも技術の進展状況に応じながら、研究体制や研究資源の最適な活用の見直しを意識したマネジメントをPDに期待する。また国の重要な施策としてプログラムの研究開発を着実に進めていくためにも、量子コンピュータが社会にもたらす影響や利益を広く社会へ浸透するための積極的な情報発信をこれまで以上に期待する。

7. 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. 大胆な挑戦的取り組み (評価項目⑦)

計画当初から、超伝導、イオントラップ、光量子、シリコン量子ドットの4方式の量子ビットハードウェア、量子ビット同士を繋ぐ通信ネットワーク2方式および、理論・ソフトウェアの7研究開発プロジェクト研究開発をポートフォリオとして一体的に推進しており、ムーンショットにふさわしいものである。適切な採択、マネジメントにより、順調に研究開発は立ち上がり、今年度は、各要素技術の一層の進展が見られ、以下のような顕著な成果が得られている。

「誤り耐性型大規模汎用光量子コンピュータの研究開発」プロジェクトにおいては、大規模光量子計算に有用な波形を発生する、世界初の量子任意波形発生器 (Q-AWG) を開発したことで、光量子コンピュータのゲート操作の高忠実度化を実現する道が開け、「大規模集積シリコン量子コンピュータの研究開発」プロジェクトでは、Si/Ge系小規模回路において、3つのシリコン量子ビットを用いた世界初の位相反転エラー訂正の実証実験に成功した。これは、他の固体素子に出遅れていたシリコン量子ビットのPoCを示したことになる。「量子計算網構築のための量子インターフェース開発」プロジェクトでは、ダイヤモンド中の窒素および複数の炭素同位体からなる量子メモリをゼロ磁場下で制御し、量子誤り訂正に世界で初めて成功した。これは、超伝導下での量子メモリの利用が可能となることを意味し、超伝導量子インターフェース開発に大きな寄与となる。「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」プロジェクトでは、バーストエラーに耐性のある量子コンピュータのアーキテクチャを世界で初めて提案した。これは、高エネルギー宇宙線による超伝導量子コンピュータの障害耐性を示す大きな成果であるが、超伝導量子コンピュータのリソースの定量的評価としての成果でもある。

最終的に要素技術を統合した目標をより明確に示すとともに、バックキャストした要素技術の関連付け (各プロジェクトの役割) や国際的な研究開発動向・海外競合者や他方式に対する立ち位置を示していく。

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)

各研究開発プロジェクトが順調に立ち上がり、量子ビット数拡張の実現のための実験ができる体制および物理系毎に対応した誤り訂正法の検討体制が構築され、一部予想以上の成果もでてきている。

当該年度のマイルストーンは、評価方法に照らし、十分達成されている。3年目、5年目のマイルストーンにおいても達成は十分可能と考えられる。

複数の海外企業が量子誤り訂正を早期に実現する野心的なロードマップを発表しムーンショット開始時から変化した状況に対応すべく、量子ビットの規模を拡大し、量子誤り訂正の実証を行うという目標のより早い達成を目指して、既存のプロジェクトの加速・強化と、新規プロジェクト採択も含めた研究実施体制強化が図られている。

なお、今後、要素技術を統合した実機開発に必要な技術、体制などの準備も進めていく。

1-3. その他

山本俊PMが、量子情報技術 科学技術に関する調査プロジェクト報告書 (Quantum Information Technologies) を刊行した。国立国会図書館調査及び立法考査局による出版であり、政府、議員等からの認知も高く、また、以下リンクより公開されており、国民理解の助けになると期待できる。

https://dl.ndl.go.jp/view/download/digidepo_12213085_po_20210601.pdf?contentNo=1

7. 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)

<p>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)</p>	<p>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)</p>	<p>既存7プロジェクトのうち2つ、新規採択の5プロジェクトのうち1つのPMの所属機関が民間企業であり、また課題推進者としても、NTT、浜松ホトニクス、アルバック、ニコン、ナノブリッジ・セミコンダクタ等が参画するとともに、新規プロジェクトにおいても新たな企業の参画を見込むなど、企業のもつ技術を活かして効率的に研究を進めている。特に、通信プロジェクトでは、情報通信研究機構、浜松ホトニクス、大阪大学による産官学連携により、多チャンネル超伝導光子検出器の製品化開発を進めるとともに、他プロジェクトで試験的に導入するなどプロジェクト間連携により開発を加速する取組みを行っている。また、超伝導プロジェクトでは、アルバック、アルバック・クライオ社による大型冷凍機および新型高性能冷凍機の製品化開発に取り組むほか、光量子プロジェクトでは、NTTとの連携により、光通信技術、5G6G超高速電子回路技術をコア技術として用いて研究を効率化するとともに世界をリードしている。企業連携の窓口として、「量子技術による新産業創出協議会」Q-STAR (https://qstar.jp/) を通して継続的に連携を図っている。なお、知財戦略をしっかりと練って、競争力・商用化の源泉となる「基本特許」を出願し、経済安全保障も考慮しつつ、海外企業も含めた産学連携に取り組んで頂きたい。</p>
<p>(評価項目⑧、評価項目⑤)</p>	<p>b. その他</p>	<p>高額な研究設備については、共用利用や外部設備の利用を積極的に進め効率的運用を行ってきた。つくば地区、東京、神奈川の各プロジェクト課題推進者に対するサイトビジットを集中的に行った。その後、関東地区以外にも、神戸大学、および、沖縄(OIST)にもサイトビジットを行い、6プロジェクト、20サイトを訪れた。また、7プロジェクト (当該時点) の参加メンバーは300名以上となったため、プロジェクト間のコミュニケーション促進を醸成する施策として、Slack運営を開始した。なお、半導体量子ビットの試作の工期が長いというアドバイザーからの指摘を受け、試作環境の整備など調査調整を働きかけ、オールジャパンとして、より有効な公的資金利用に努めることとする。</p>
<p>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)</p>		<p>量子技術イノベーション拠点、Q-LEAP等の国内の量子技術関連諸制度と一体となってQuantum Innovation 2022を開催 (共催) し、国際的な交流の一層の促進を図った。各研究開発プロジェクトにおいては、MOC締結などの適切な管理の下、共同研究、人材交流を促進している。各プロジェクトの成果やプログラムとしてのプレゼンスを世界に示すため、令和5年7月18-20日、国際会議を開催するべく準備を行っているが、世界の主要研究者も招待し、最新の情報を交換すると同時に、世界における立ち位置を確認することを念頭において計画を進めている。</p>
<p>2-3. 国民との科学・技術対話に関する取組み (評価項目⑨)</p>		<p>令和4年3月11日に公開シンポジウムを開催した。参加者460名を集め、キックオフ同様に、高い関心が伺え、アンケートでも高評価であった。また、量子技術教育プログラムのサマースクールを開催した (Q-LEAP Qed共催)。令和3年度はオンライン開催であったが、令和4年度は高橋プロジェクトが中心となり現地開催を実現した。対面参加者のレベルと育成効果は質問内容やグループワークの成果から極めて高く、人材育成として有効であることが再確認された。</p>


●メタデータ件数：92件 (うち、研究データの公開7件、共有34件、非共有・非公開51件)

参考スライド

プログラムを取り巻く状況

世界の量子コンピュータ開発状況

- ✓ 国益と情報セキュリティを念頭にした政府系資金の研究開発
- ✓ 先行者利益確保を狙う民間投資による開発競争
- ✓ 有望な4方式で量子ゲートが実現、半導体・中性原子以外は量子回路まで実現
- ✓ ただし誤り耐性なし

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
海外の状況					
波及効果、スピンアウト	超高感度磁気センサ、光子検出器	超高精度時計、ジャイロセンサ	量子ネットワーク、量子セキュリティ	量子ドットアレイセンサー	量子メモリ、量子シミュレータ
日本の強み	世界初の実現 (1999年; 蔡, 中村)	光結合技術 光格子時計など周辺	光量子計算創始者 (1998年; 古澤)	量子ドット制御、集積回路技術	量子シミュレータ、光格子時計

NISQの範囲でさえ

- 世界的に Winning方式が決まっていない
- 世界が、どの方式でも、しのぎを削っている