

目標6における 研究開発の進め方等について

第六回戦略推進会議(令和4年9月9日)

プログラムディレクター 北川勝浩

(大阪大学 教授)

目次

- プログラムディレクター(PD)について
- 研究開発プログラムの概要
- これまでの取組状況
- プログラムを取り巻く状況
- 目標達成に向けた追加公募の狙い
- 追加採択PM・プロジェクト一覧
- 研究開発の進め方等について
- 【参考】公募等に関する基礎情報

プログラムディレクター(PD)について



北川 勝浩

大阪大学大学院基礎工学研究科 教授

大阪大学世界最先端研究機構 量子情報・量子生命研究センター長

量子科学分野にて、世界の研究者から注目される研究成果を出すなどの、中心的研究者。2018年、大阪大学量子情報・量子生命研究部門の初代部門長に就任。

1983年 日本電信電話公社武蔵野電気通信研究所 入所

1993年 大阪大学 助手

1994年 大阪大学 博士(理学)

1996年 大阪大学 講師

1997年 大阪大学 助教授

2003年 大阪大学基礎工学研究科 教授

2021年 大阪大学世界最先端研究機構 量子情報・量子生命研究センター長

電子情報通信学会 量子情報技術研究専門委員会委員長(2011-12)

光・量子飛躍フラッグシッププログラム(Q-LEAP)アドバイザリーボードメンバー

株式会社QunaSys (量子ソフトウェアスタートアップ)創業メンバー(2018.2)

米国物理学会、日本物理学会会員

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

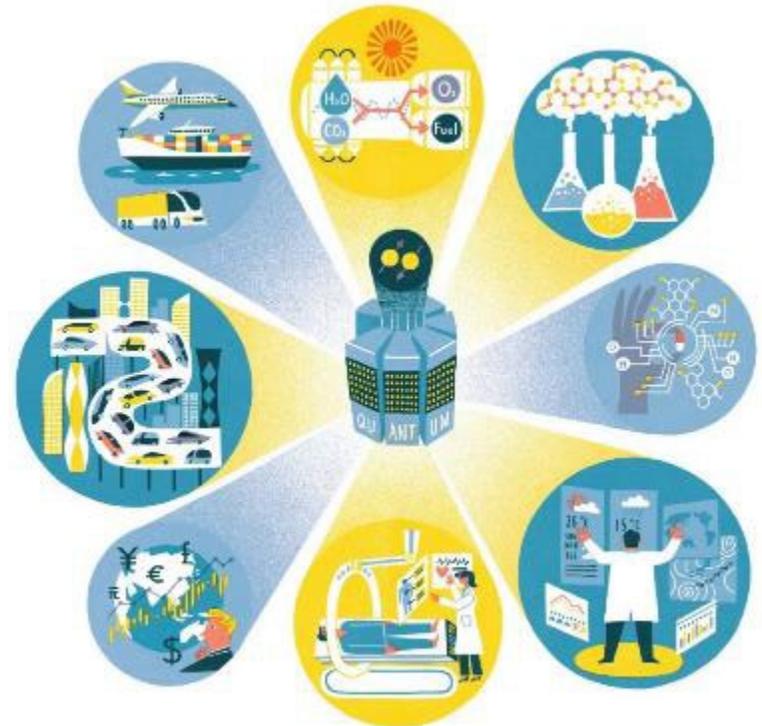
〈ターゲット〉

- 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証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。



参考：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）会議資料

研究開発プログラムの概要(目指す社会像)

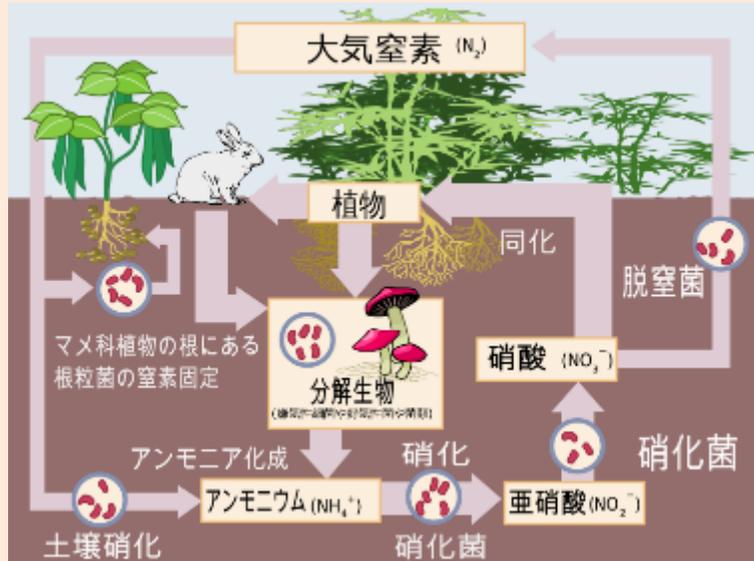


研究開発プログラムの概要(目指す社会像)

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

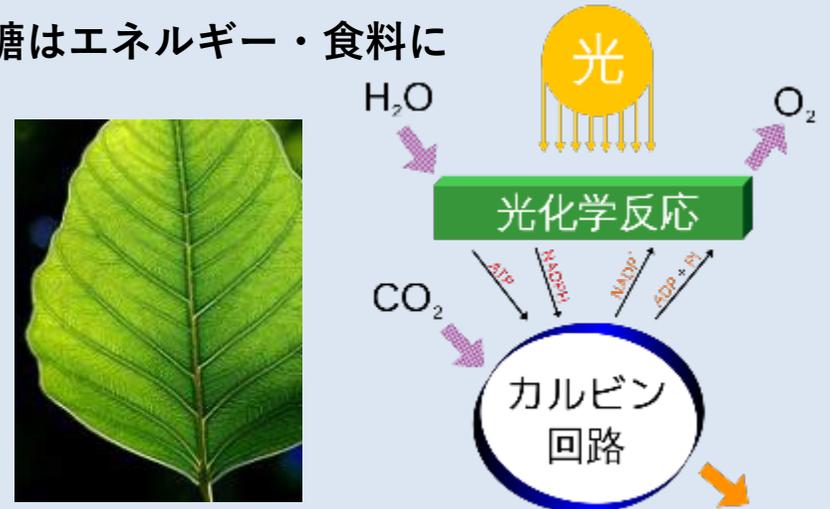


出所: Cicle_del_nitrogen_de.svg; *Cicle_del_nitrogen_ca.svg; Johann Dréo (User:Nojhan), traduction de Joanjoc d'après Image:Cycle azote fr.svg, derivative work: Burkhard (talk) Nitrogen_Cycle.jpg; Environmental Protection Agency derivative work: Raeky (talk) (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Nitrogen_Cycle_ja.svg), „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

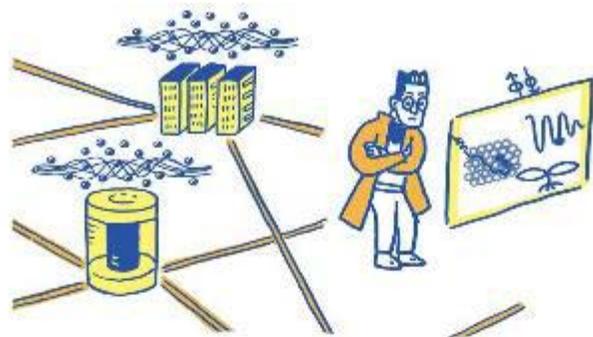


出所: Jon Sullivan (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Leaf_1_web.jpg)

出所: Daniel Mayer (mav) - original imageVector version by Yerpo and訳/Japanese translation by UkainoADX (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Simple_photosynthesis_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

研究開発プログラムの概要(目指す社会像)



複数の量子コンピュータをネットワークで連携させることで、大規模な計算を高速で行う

「省エネ」な生物の営みを正確に理解

20世紀初頭に発明されたハーバー・ボッシュ法は窒素肥料の原料となるアンモニアの工業生産を可能にし、人類の繁栄を支えてきた。しかし現在、窒素肥料の生産には人類が消費する全エネルギーの数が費やされており、地球環境に大きな負担をかけている。

一方で、菌が行う天然の窒素固定（空気中に存在する窒素分子を、窒素化合物に変換する反応）は、ハーバー・ボッシュ法に比べるとはるかに省エネルギー、省資源だ。窒素固定を人工的に再現できれば、エネルギー問題、食料問題、地球温暖化など、私たちが抱える様々な問題の解決につながるだろう。

なぜ、生物は当たり前のように複雑な反応を効率よく行うことができるのか。その秘密は反応に関わる物質を構成する量子のふるまいにあると考えられているが、複雑に絡み合う量子状態はスーパーコンピュータを使っても厳密に計算することが難しい。しかし誤り耐性型汎用量子コンピュータがあれば、生物が行う反応中の量子状態を厳密に計算（再現）することができる。

持続可能な安全で豊かな社会

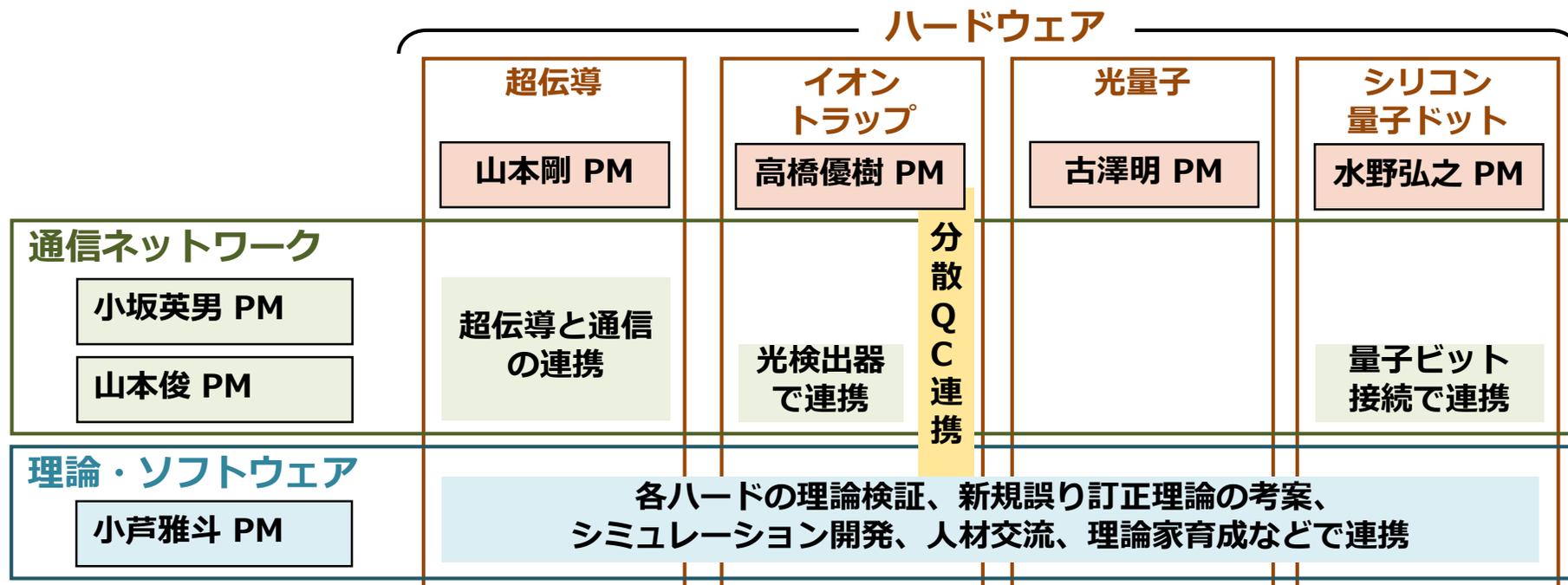


人工光合成の実現。太陽の光と水を使って、地球温暖化の原因となる二酸化炭素を酸素と有機化合物に変える。

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。

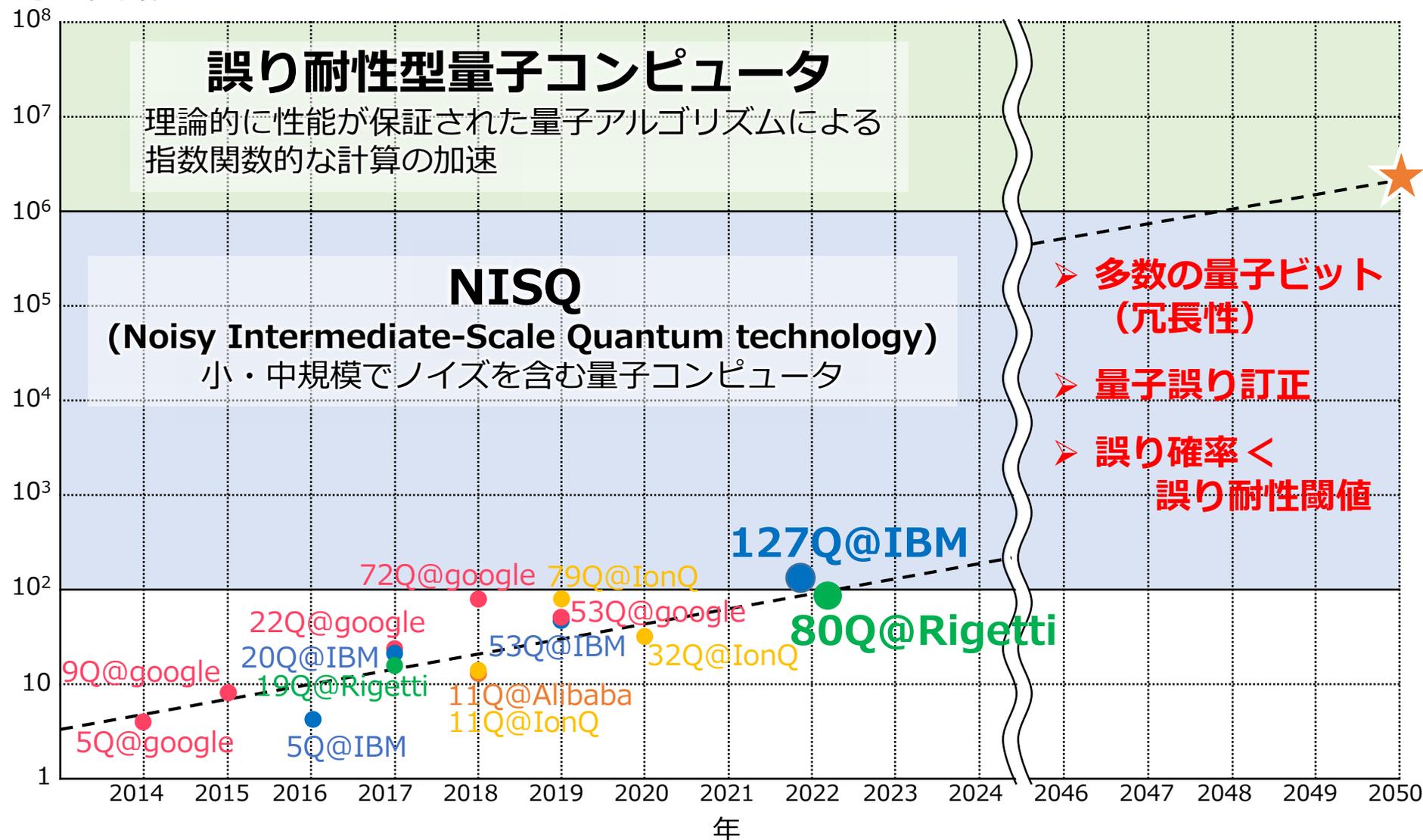
これまでの取組状況(プロジェクト構成)



PM	研究開発プロジェクト
山本 剛 (日本電気株式会社)	超伝導量子回路の集積化技術の開発
高橋 優樹 (沖縄科学技術大学院大学)	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
古澤 明 (東京大学)	誤り耐性型大規模汎用光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)	大規模集積シリコン量子コンピュータの研究開発
小坂 英男 (横浜国立大学)	量子計算網構築のための量子インターフェース開発
山本 俊 (大阪大学)	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
小芦 雅斗 (東京大学)	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

研究開発プログラムを取り巻く状況(研究開発の状況)

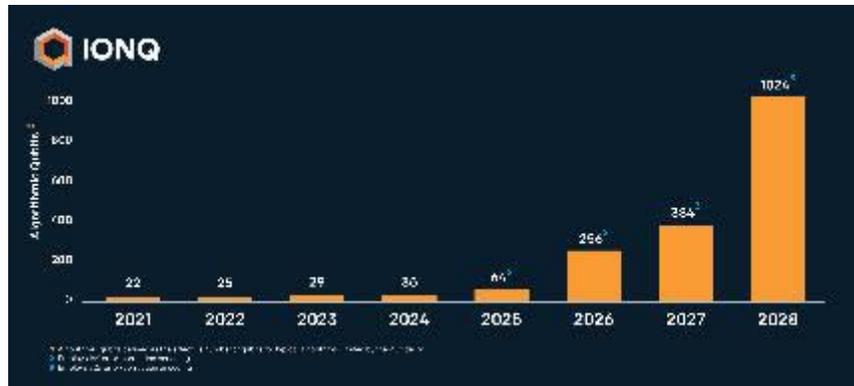
量子ビット数



研究開発プログラムを取り巻く状況

海外企業の野心的ロードマップでは

- 2023年 IBM, Google 1000物理量子ビット
<https://research.ibm.com/blog/ibm-quantum-roadmap>
- 2028年 IonQ 1024論理量子ビット(32:1 error-correcting encoding)
(IonQはAlgorithmic qubitという言葉を使っている)
<https://ionq.com/posts/december-09-2020-scaling-quantum-computer-roadmap>



Within the decade, Google aims to build a useful, error-corrected quantum computer.
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。

- 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/>
1000論理量子ビット：願望、科学的根拠？いくつかのブレークスルーが必要
Quantum Innovation 2021でのIonQ, Honeywell, IBM, Google, PsiQuantumの発表とQ&Aからの感触

研究開発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は？

例えば、ボストンコンサルティンググループ

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>



ハードウェアの現状 (上記URLのExhibit 6. 参照)

超伝導、イオントラップ、光量子、量子ドット、冷却原子の現状比較
どの技術が勝ち残るかは決着がついていない。

量子ビットの品質、接続性、ビット数の競争が続いている。

量子コンピュータの3つの開発ステージによる価値の推移 (Exhibit 8. 参照)

2030年まではNISQ

2030年以降は誤り訂正による量子優位性

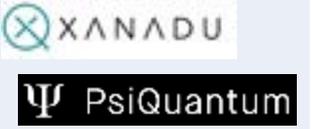
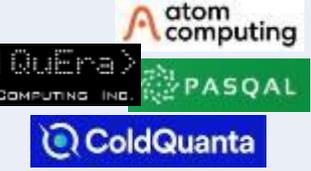
2040年以降は誤り耐性

創造される経済的価値はステージを上がるとともに飛躍的に増大

研究開発プログラムを取り巻く状況(世界の研究開発動向)

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
- ✓ 超伝導、イオントラップはNISQとして提供 (誤り耐性なし)
- ✓ 誤り訂正の初歩的な実験

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

研究開発プログラムを取り巻く状況(主要国の量子技術政策)

	政策動向	内容・予算規模
	<ul style="list-style-type: none"> 量子情報科学の国家戦略概要 (2018.9) 国家量子イニシアティブ法 (2018.12) 	~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
	<ul style="list-style-type: none"> 科学技術イノベーション第13次5ヶ年計画 (2016) 	> 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)
	<ul style="list-style-type: none"> Quantum Manifesto (2016.5) 	~1,300億円 (€1B) / (2019-28) 「Quantum Flagship」20課題が採択
	<ul style="list-style-type: none"> ハイテク戦略2025 (2018) BMBF「量子技術」(2018.9) 未来パッケージ (2021.1) 	~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
	<ul style="list-style-type: none"> 量子技術国家戦略 (2014.12) 	~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
	<ul style="list-style-type: none"> MESRI「国家量子戦略」(2021.1) 	~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

出典：内閣府「第10回量子技術イノベーション会議」資料

目標達成に向けた追加公募の狙い

量子技術全体を底上げしつつ、目標に向かってオールジャパン体制で研究開発

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

<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**

<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**

新規PJの追加や計画前倒し等により、各カテゴリの研究開発を加速・強化

追加採択PM・プロジェクト一覧

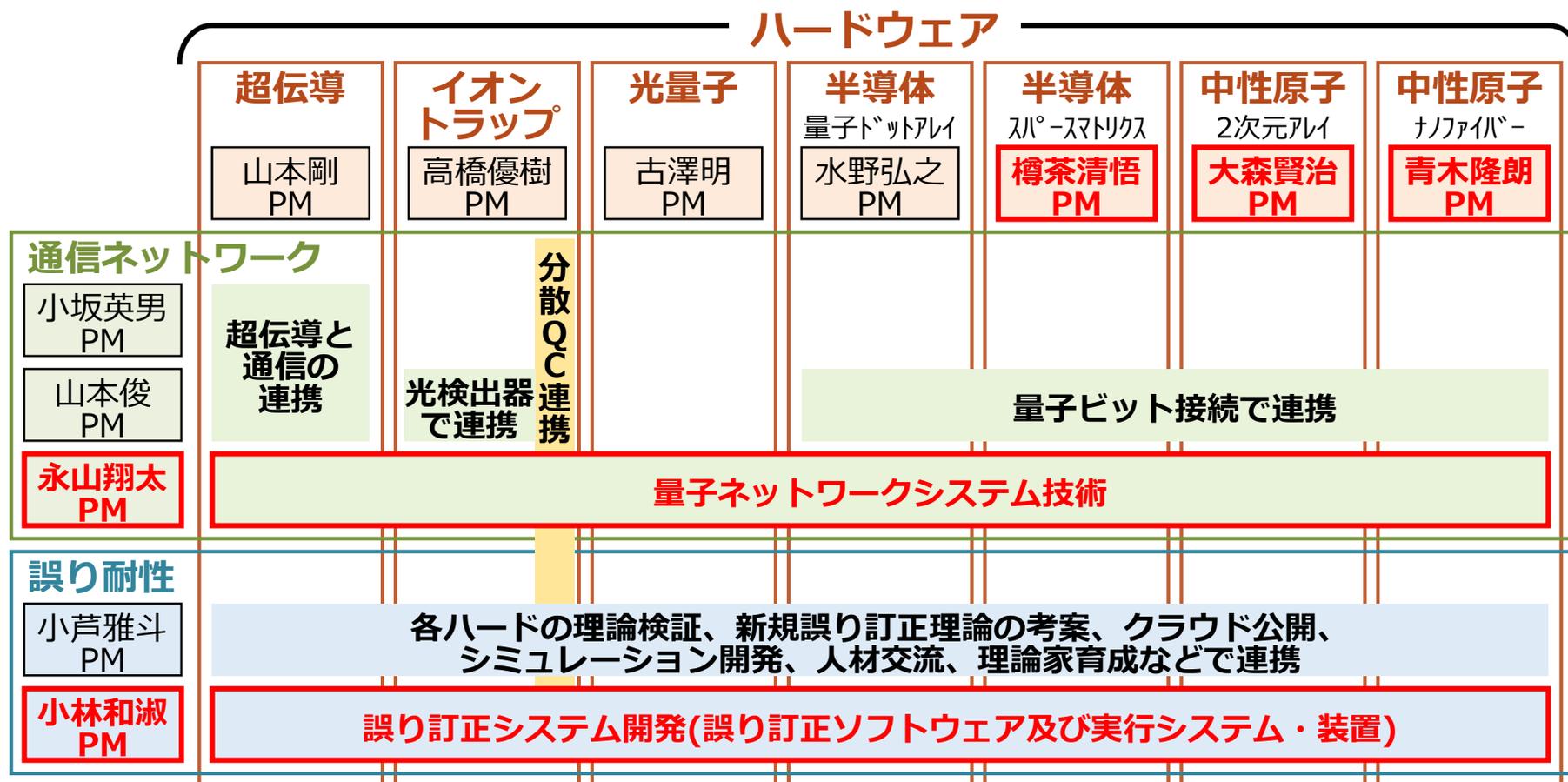
	PM	研究開発プロジェクト名	研究開発プロジェクト概要
ハードウェア (半導体)	樽茶 清悟 (理化学研究所グループディレクター)	拡張性のあるシリコン量子コンピュータ技術の開発	シリコン量子コンピュータは産業技術との互換性や集積性の点で優れていますが、まだ大規模化への展開が見えていません。本研究では、 スパースな集積化と中距離量子結合により拡張性のある単位構造を作製 し、その繰り返しにより量子コンピュータを大規模化します。2030年までに大規模化に適した基盤技術を開発し、その後半導体産業と連携して開発を加速し、2050年には汎用量子コンピュータを実装します。
ハードウェア (中性原子)	大森 賢治 (自然科学研究機構分子科学研究所 教授/研究主幹)	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	光ピンセットを用いて大規模に配列させた 冷却原子量子ビット の各々を、 自在かつ高速に移動させつつゲート操作、誤り検出・訂正を行う動的量子ビットアレーを実装 します。さらに、緊密な産学連携の下で全ての構成要素を統合・パッケージ化し、従来に無い高い安定性とユーザビリティを達成します。これらのイノベーションにより、2050年までに経済、産業、安全保障に革新をもたらす誤り耐性量子コンピュータの実現を目指します。
ハードウェア (中性原子)	青木 隆朗 (早稲田大学 教授)	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	日本発の独自技術である ナノファイバー共振器QEDに基づく新方式の量子コンピューターハードウェアを開発 します。単ユニットの10,000物理量子ビット程度までの大規模化とその分散化、さらに最終的な社会実装までを推進します。それにより、2050年には、圧倒的に大規模な量子ビット数を持つ分散型の誤り耐性汎用量子コンピューターと量子インターネットの実現を目指します。
量子ネットワーク	永山 翔太 (慶應義塾大学 特任准教授 / (株)メルカリ シニアリサーチャー)	スケーラブルで強靱な統合的量子通信システム	分散型大規模量子コンピュータの主要技術である汎用量子通信ネットワークのテストベッドを構築し、実運用を見据えた 通信アーキテクチャやプロトコル等の原理・技術実証にハードウェア・ソフトウェアを統合して取り組みます 。本プロジェクトの成果は分散型大規模量子コンピュータのみならず量子インターネットにも繋がり、両者を両輪とする、量子情報を自在に生成・流通・分散処理する世界の実現に貢献します。
誤り耐性 (誤り訂正システム)	小林 和淑 (京都工芸繊維大学 教授)	スケーラブルな高集積量子誤り訂正システムの開発	誤り耐性汎用量子コンピュータを実現するために、 エラー訂正のための古典ハードウェア向けアルゴリズムとスケーラブルバックエンド、スケーラブルな量子-古典間入出力フロントエンド 、それらのLSI化、量子-古典入出力の高帯域・低電力化のための極低温動作光集積回路の技術課題に取り組みます。それにより2050年に100万物理量子ビット規模の汎用量子コンピュータの誤り訂正システムを実現します。

※研究開発プロジェクト名及び概要は作り込みを経て変更される場合があります。

研究開発の進め方等について(1)

(プロジェクト構成の考え方、資金配分方針【助言・承認】)

- 世界最先端グループの中で競争できる**統合的な**量子コンピュータ開発を加速。
- 量子誤り訂正に必要な規模まで量子ビット数を増やす**技術**を開発し、適した**量子誤り訂正方式の開発**を目指す。
- 量子通信を用いた**分散型**など量子コンピュータの大規模化を可能にする**技術を開拓**する。
- 誤り耐性に必要な**技術**を先回りして**研究開発**に取り組んでいく。
- 国内外の研究開発動向やプロジェクトの進展を踏まえ、**民間、その他の研究開発投資の活用**も含め、進め方を判断。



研究開発の進め方等について(2)

(社会実装に向けた方策・国際連携促進等【助言】)

- ✓ 可能な限り早期に**クラウド公開**※など、外部への公開を検討し、**社会実装の早期実現**を目指す。
- ✓ **数理科学分野の研究者と連携**し、研究者層の充実・強化と、理論研究の更なる発展を促す。
- ✓ 2050年までの息の長い研究開発に相応しい、若手PMがイニシアティブを取れる**未来志向の研究体制を構築**する。
- ✓ タイムリーな情報発信、アウトリーチにつとめ、量子ネイティブな人材育成を行うとともに、産業界との協業も広く求めていく。
- ✓ **日米欧国際会議**を通じた、国際連携と国際競争。
- ✓ 各PMの作成するデータマネジメントプランに基づき、適切な研究データの管理・利活用を図るようプロジェクトの実施体制を整備する。

※クラウド公開: 量子コンピュータにインターネットからアクセスして利用できるようにするサービス