

資料3



誤り耐性型量子コンピュータ ムーンショット目標6の取り組み

2021年11月8日（月） 10:00-12:00

量子技術イノベーション会議

量子技術イノベーション戦略の戦略見直し検討WG

第2回（量子コンピュータの産業・研究開発の在り方について）

ムーンショット目標6 構想ディレクター

北川 勝浩

（大阪大学 教授）

ムーンショット目標について

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。



1. 目指す社会像（1）

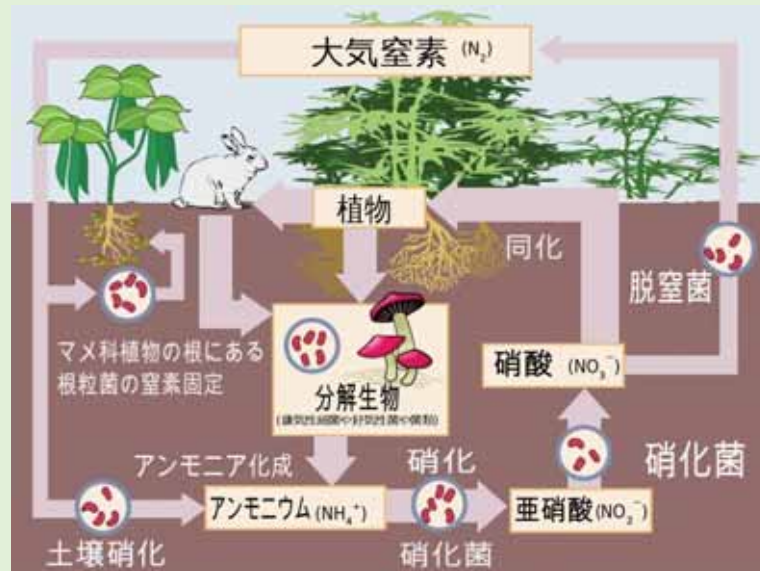


プログラム紹介 <https://www.jst.go.jp/moonshot/program/goal6/index.html>
資料 https://www.jst.go.jp/moonshot/news/pdf/00_20210311_kitagawa.pdf
プレゼン <https://youtu.be/5FIIsUdtKpk>

1. 目指す社会像 (2)

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

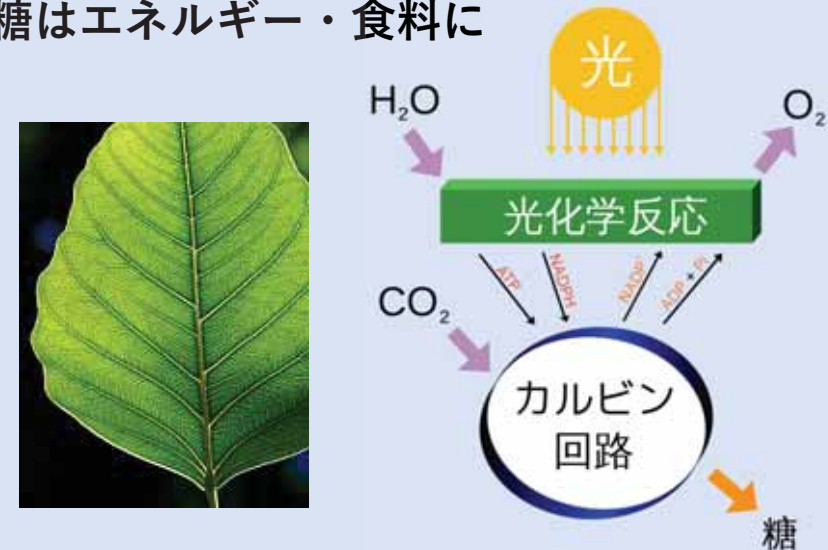


- 菌の生物窒素固定
- 量子コンピュータによる解明に期待
- 人工的に模倣して省エネルギー化

食料・エネルギー・環境問題の解決

- 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

光合成



- 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

1. 目指す社会像（3）



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



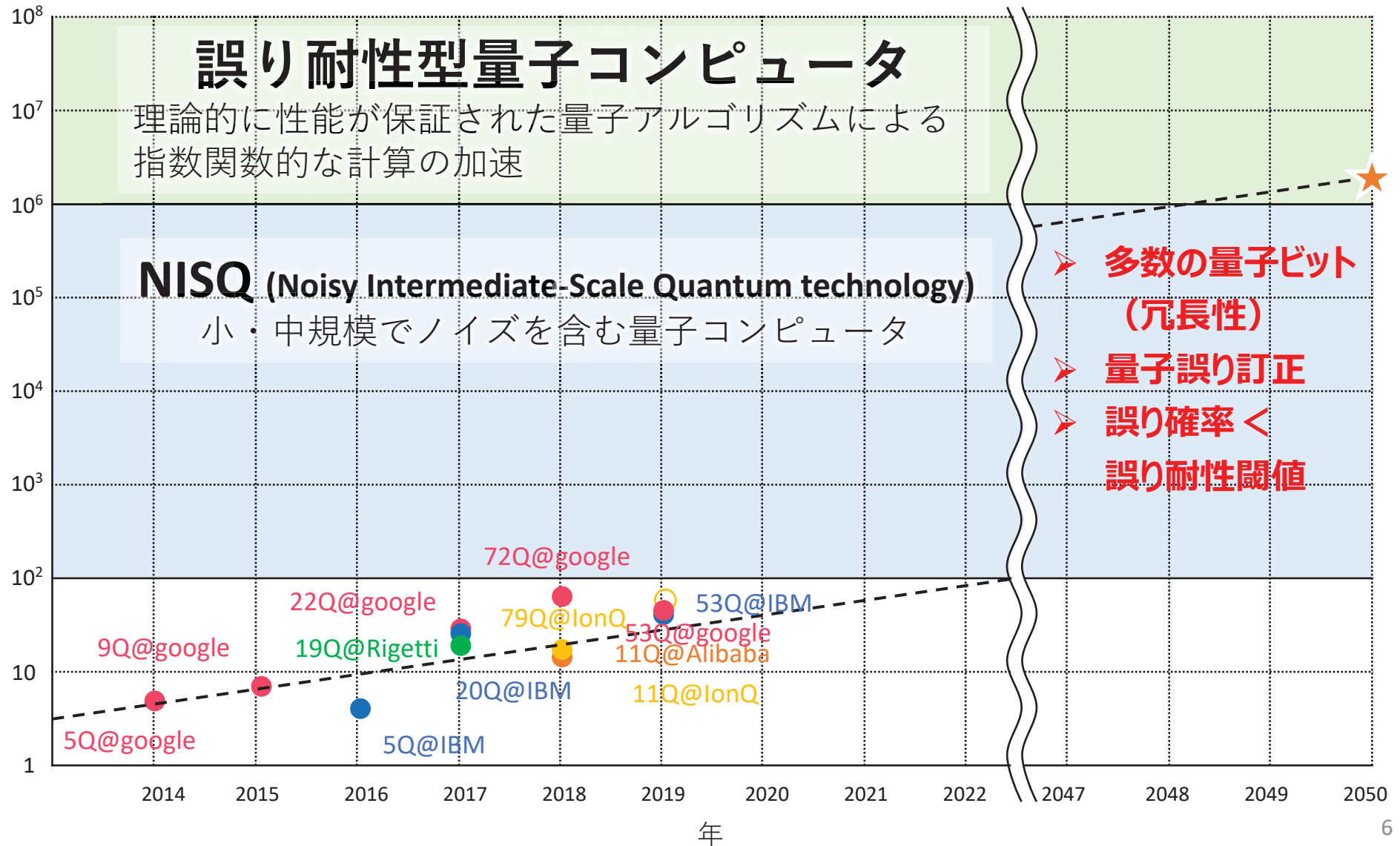
人工光合成の実現。太陽の光と水を使って、地球温暖化の原因となる二酸化炭素を酸素と有機化合物に変える。

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。

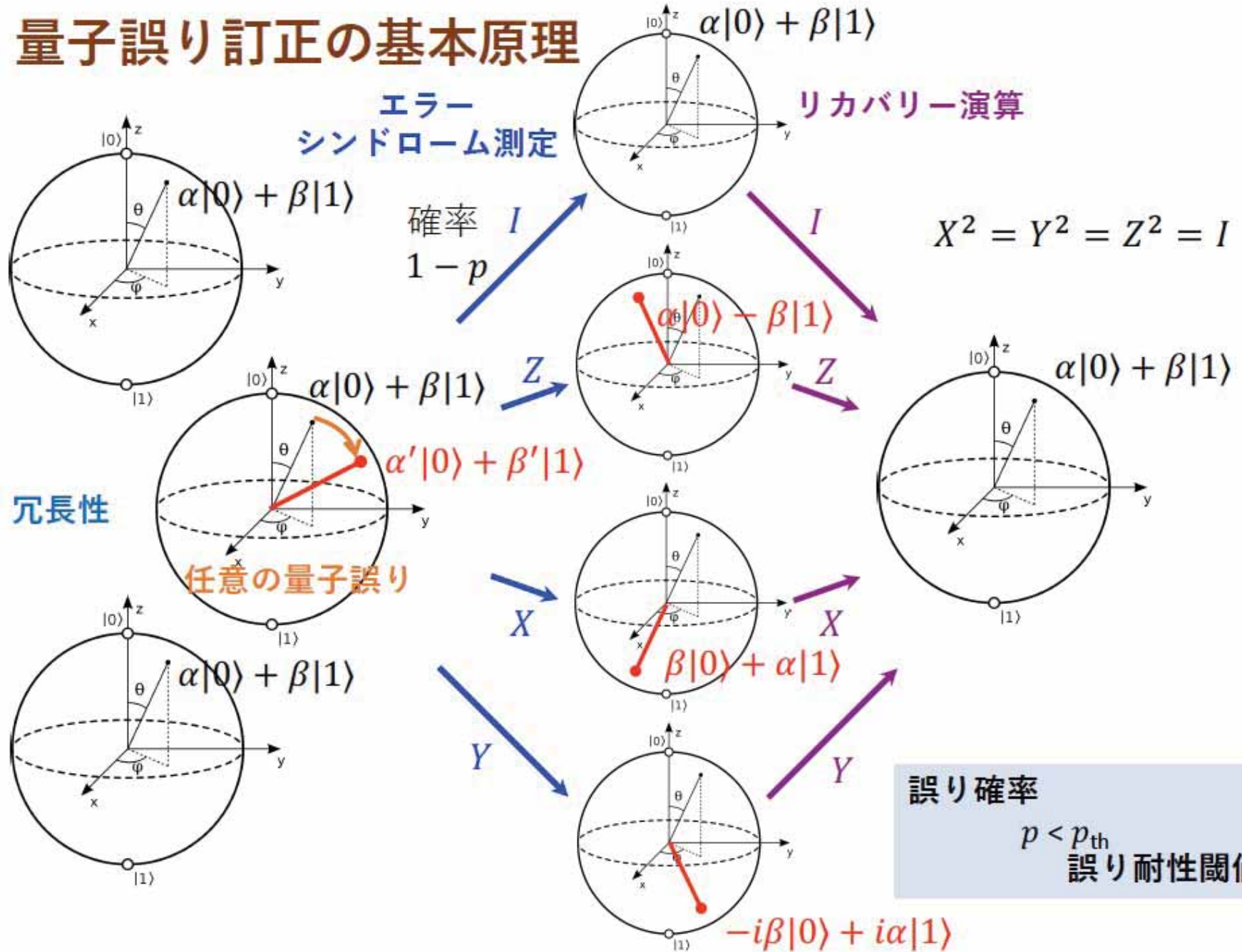
人工窒素固定の実現。省エネルギーでありながら、空気中の窒素から窒素化合物を効率よく合成できる。

2. シナリオ及び克服すべき課題（1）

量子ビット数



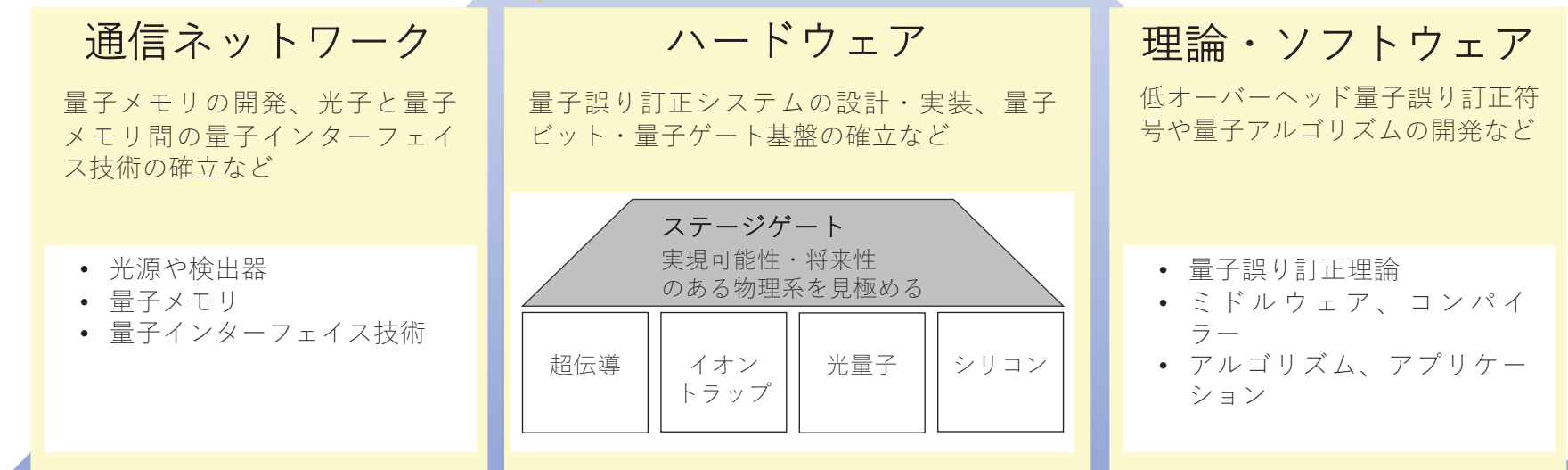
量子誤り訂正の基本原理



2. シナリオ及び克服すべき課題（2）





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



3. 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による研究開発
- ✓ 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、半導体以外は量子回路まで実現
- ✓ ただし**誤り耐性なし**

ハードウェア方式	超伝導	イオントラップ	光量子	半導体
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
世界的競争状況 (海外のみ)				
波及効果、 スピアウト	超高感度磁気センサー、光子検出器	超高精度時計、ジャイロセンサー	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
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

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

海外企業の野心的ロードマップ

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>

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/>

科学的根拠？

希望、願望

いくつもの今見えてないブレークスルーが必要

海外のコンサルティングファームはどう見ているか

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>

進んでいる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

本格的な量子化学計算に必要な量子コンピュータ

例えば、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必要な量子コンピュータのリソースを見積もった論文

Elucidating reaction mechanisms on quantum computers

Markus Reiher, Nathan Wiebe, Krysta M. Svore, Dave Wecker, and Matthias Troyer
(ETH ZurichとMicrosoft Researchの共同研究)

<https://www.pnas.org/content/114/29/7555>

2000論理量子ビットの誤り耐性型量子コンピュータが必要

4. ポートフォリオとプロジェクト紹介

PM	研究開発プロジェクトと概要
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

