

量子コンピュータ

第2回量子WG 2026.2.16

大阪大学 量子情報・量子生命研究センター長

JSTムーンショット目標6構想ディレクター

北川 勝浩



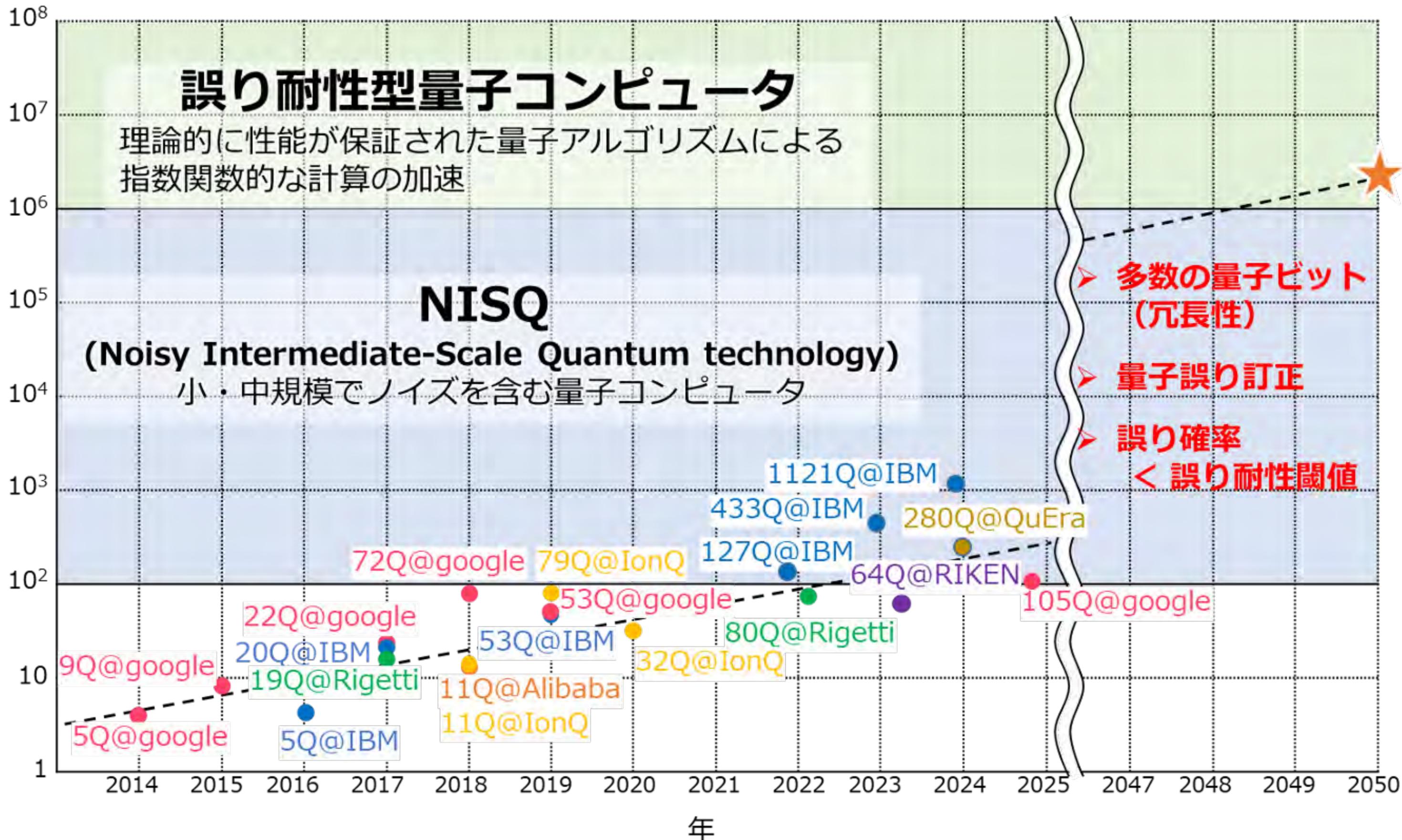
量子コンピュータ サマリー

- 現状：100～数百量子ビット 誤り率 $\sim 0.1\% = 10^{-3}$ 1000ゲートまでの小規模計算のみ
 - 超伝導、イオン、中性原子、光、シリコンの量子ビットで国際的な研究開発競争
- 課題：スパコンを凌駕するアプリ 数千量子ビット・数Gゲート・誤り率 10^{-10} が必要
 - 誤り率を7桁下げるには量子誤り訂正が必要 (誤り耐性量子コンピュータFTQC)
 - 物理誤り率を0.01%まで下げる (物理量子ビットの質を上げる)
 - 物理量子ビット数を10万～100万以上に増やす (物理量子ビットの量を飛躍的に増やす)
 - 量子誤り訂正符号を高効率化する
 - 魔法状態蒸留を高効率化する
- 超伝導(Google, IBM), イオン(Quantinuum), 中性原子(QuEra), 光(OptQC), シリコンなどが開発競争
- どの物理系も一長一短 どれがスパコンを凌駕するFTQCに到達するかまだ分からない
 - 速度、質、サイズ、スケーラビリティが異なり、優位性が時間的に変化
 - 今は超伝導がトップ、質ではイオン、量では中性原子が優位で猛追
 - シリコンは集積性と速度で優位性があるが、超伝導より10年以上遅れている
 - 光は現状アナログであるが、FTQCとして動作すれば速度で優位
 - 将来的にはヘテロも

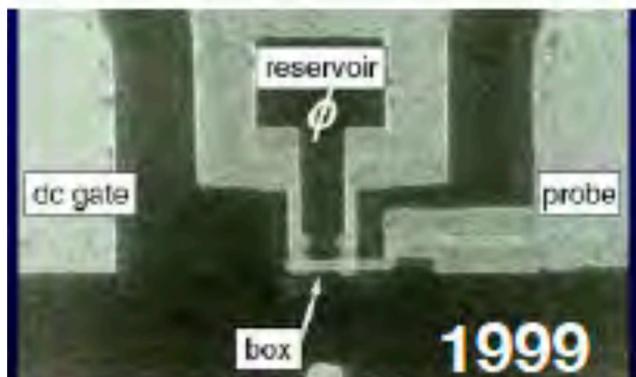
量子コンピュータ 研究開発投資の方向性

- 量子分野は基礎研究とビジネスが近いと言われ、アジャイル性が強いが、
 - 基礎研究に十分な投資（人、時間、金）がされていないところに、ビジネス投資しても無駄になる可能性が高い
 - 長期的な視野に立った基礎研究と人材育成（教育）への投資が必須
 - 日本は、1990年代から基礎研究に投資してきた。多くは5年のプロジェクト。2014年頃、IBMやGoogleが超伝導量子コンピュータの研究開発に参入した時に、日本は「量子コンピュータの実現は難しすぎる」として研究開発投資を縮小し「量子の冬」を迎えた。2016年から中村ERATO、2018年からは10年のQ-LEAPなどでリブート。2019年に量子技術イノベーション会議設置。
- 2020–2025にムーンショット目標6で比較的大きな研究開発投資（1000人、5年、数百億円）を行い、FTQCに必要な要素技術の研究開発を行なった。2030年までしか基金がないので、2026-2030は2030年までに量子コンピュータシステムとしてインテグレートされる技術に集中投資。
 - 2030年までにFTQCのPoCを示し、2040年までにスパコンを凌駕するFTQCを実現する熾烈な国際競争が繰り広げられており、日本も世界に伍してゆく必要がある。
 - 2030年までのFTQC研究開発を加速し、2040年に向けて企業が本格参入する土壌を作る必要がある。

量子ビット数



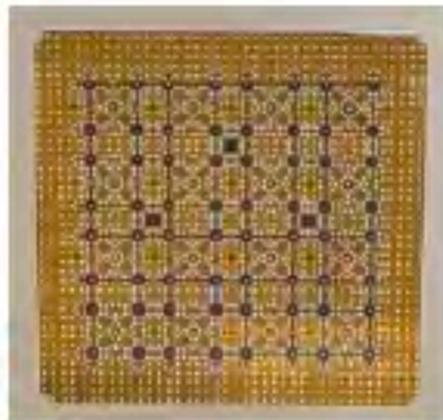
世界初の超伝導 量子ビット



超伝導量子コンピュータ 国産初号機

64-qubit
(53-qubit)

March 27, 2023

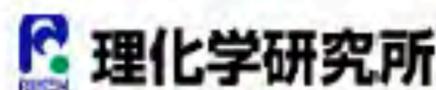


第53回
日本産業技術大賞
内閣総理大臣賞

理化学研究所
産業技術総合研究所
情報通信研究機構
国立大学法人 大阪大学
富士通株式会社
日本電信電話株式会社

企業名	方式	量子ビット
IBM (米)	超電導	433
Rigetti Computing (米)	超電導	84
Google (米)	超電導	72
理化学研究所	超電導	64
百度 (中国)	超電導	36
Oxford Quantum Circuits (英)	超電導	32
IonQ (米)	イオン トラップ	29

(出所: NIKKEI Tech Foresightが作成、23年8月時点)



2023年は国産量子コンピュータ元年

国産3号機
December 22, 2023

純国産量子コンピュータ



パルスチューブ冷凍機

アルバック

低雑音電源

NF回路



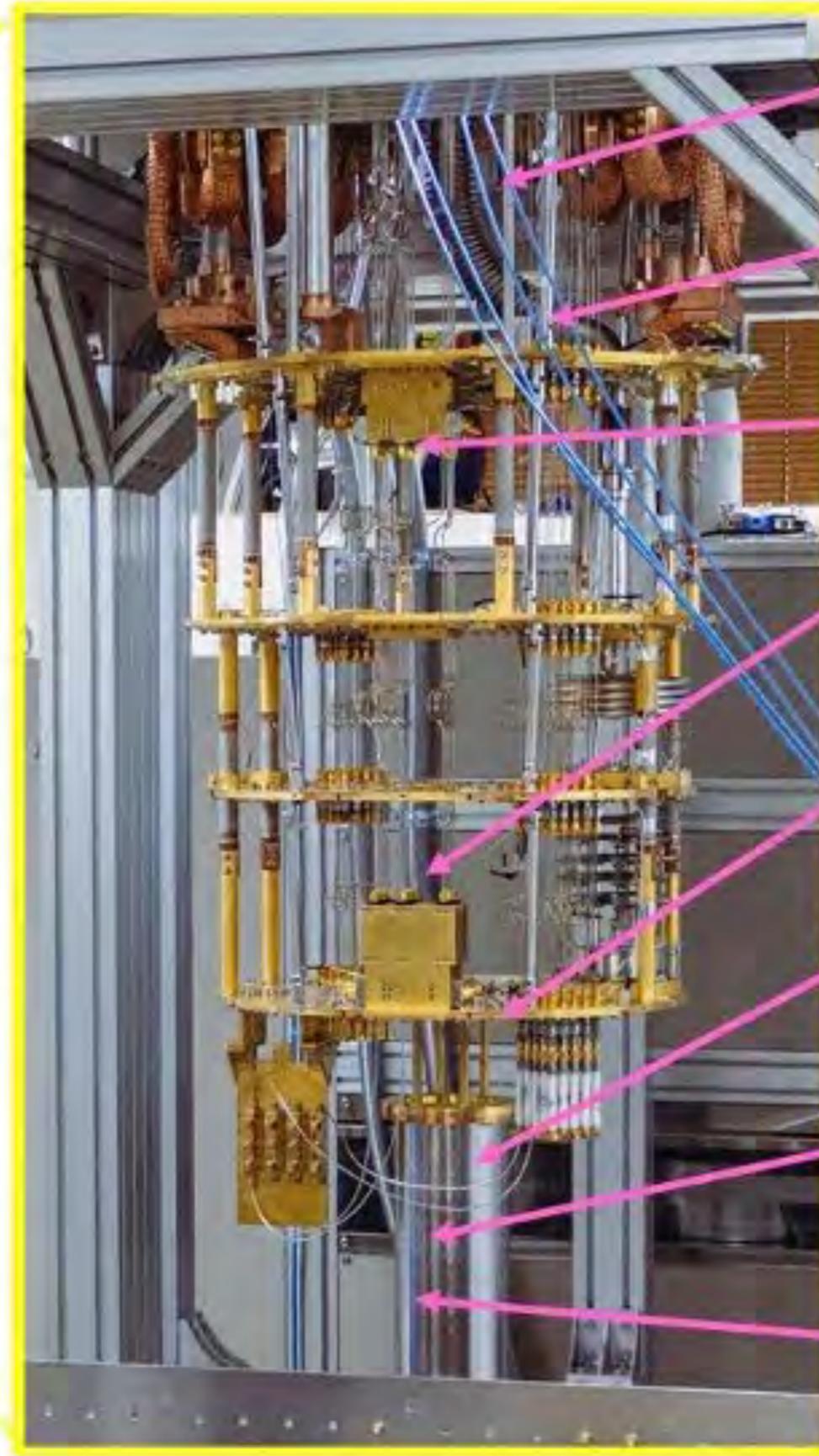
希釈冷凍機

アルバック・クライオ



制御装置

キュエル



室温ケーブル

東京特殊電線

低温ケーブル

コアックス

低雑音増幅器

日通機

バンドパスフィルタ

総合電子

赤外吸収体

川島製作所

磁気シールド

オータマ

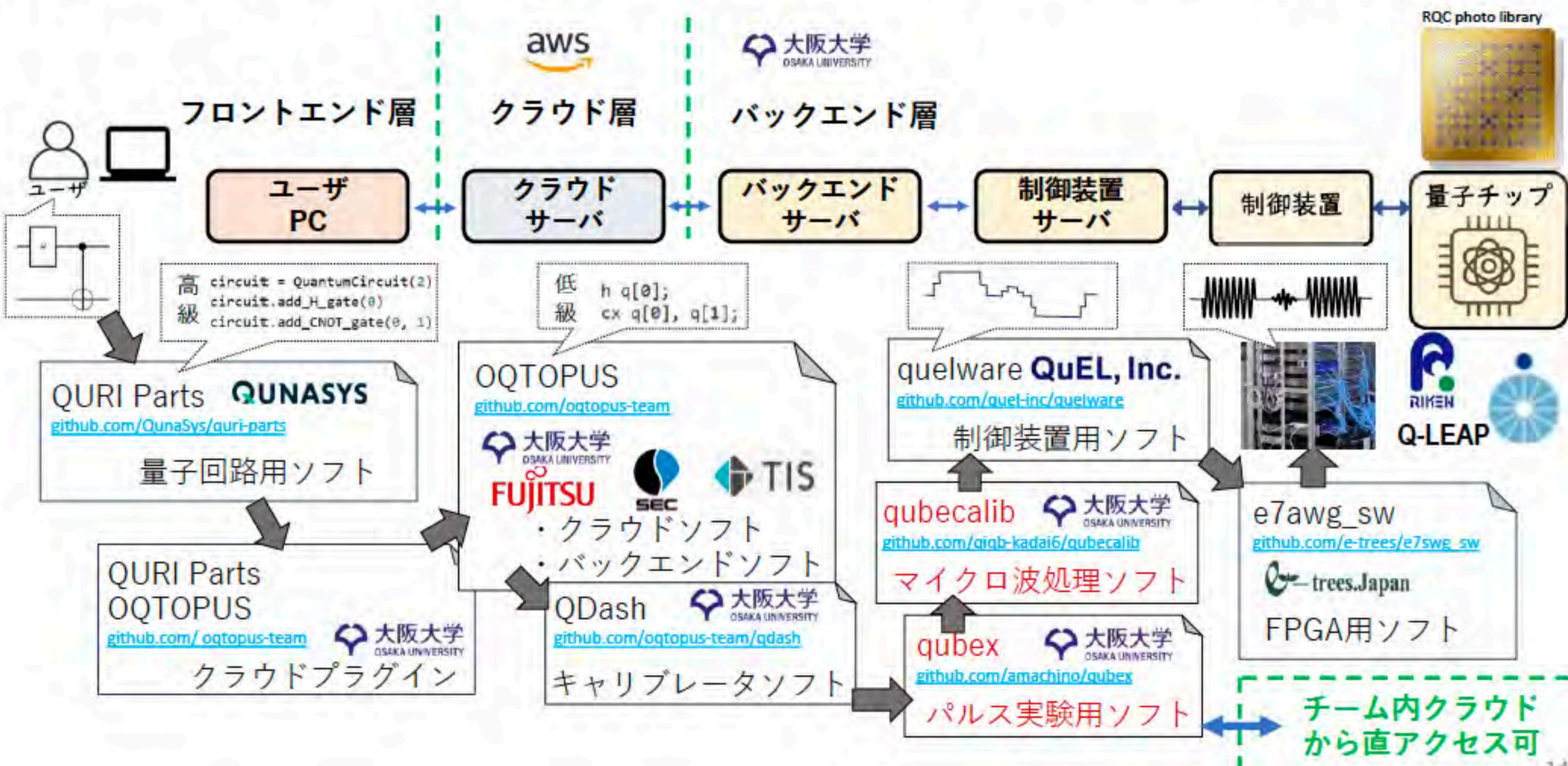
チップパッケージ

精研

量子ビットチップ

理研

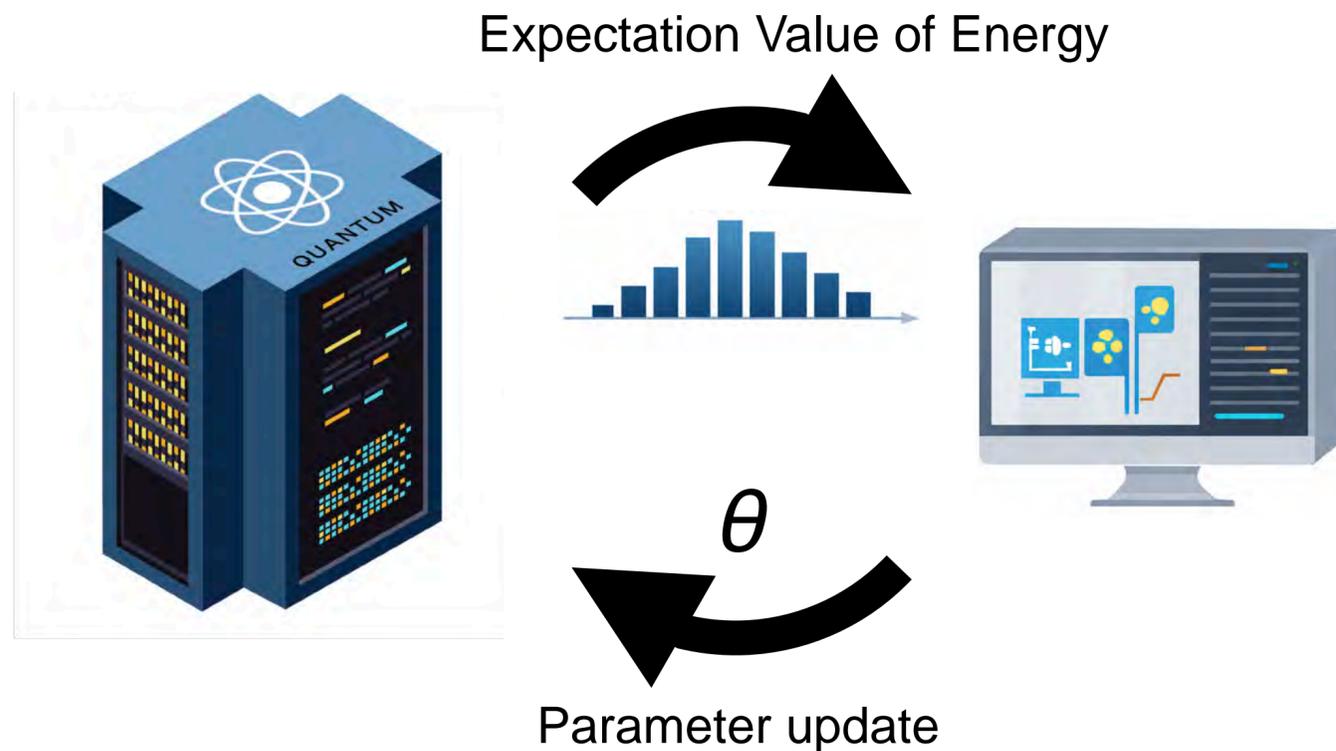
阪大クラウド量子コンピュータスタック2025.5



How to Extract the Maximum Performance from NISQ

Variational Quantum Algorithms (~2017)

Cerezo, Marco, et al. "Variational quantum algorithms."
Nature Reviews Physics (2021)

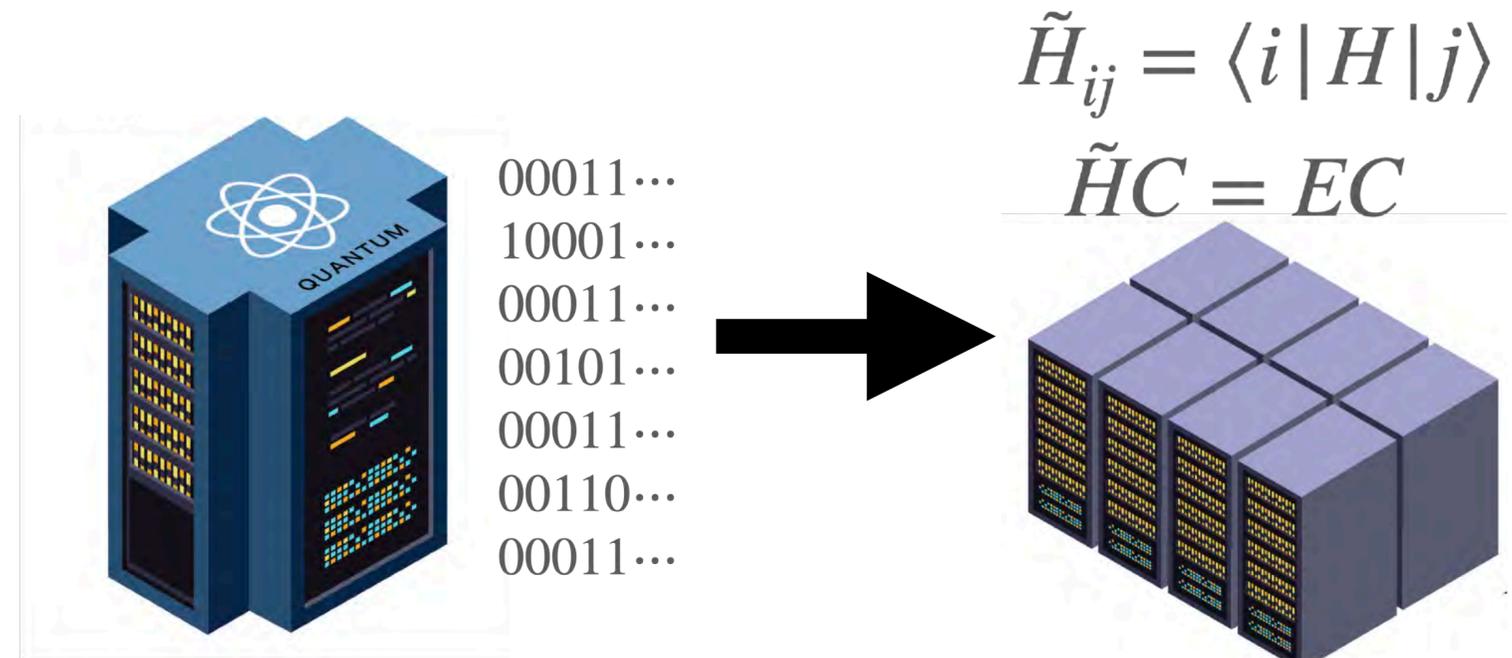


- Sensitive to hardware noise and statistical error
- Number of samplings required becomes so huge
- Not fully utilizing the power of classical computers

NISQの性能を最大限に引き出すアルゴリズムQSCIが日本で誕生

Sampling-based Quantum Algorithms (~2023)

"*Quantum-Selected Configuration Interaction: classical diagonalization of Hamiltonians in subspaces selected by quantum computers*" K Kanno, M Kohda, R Imai, S Koh, K Mitarai, W Mizukami, YO Nakagawa,
arXiv:2302.11320

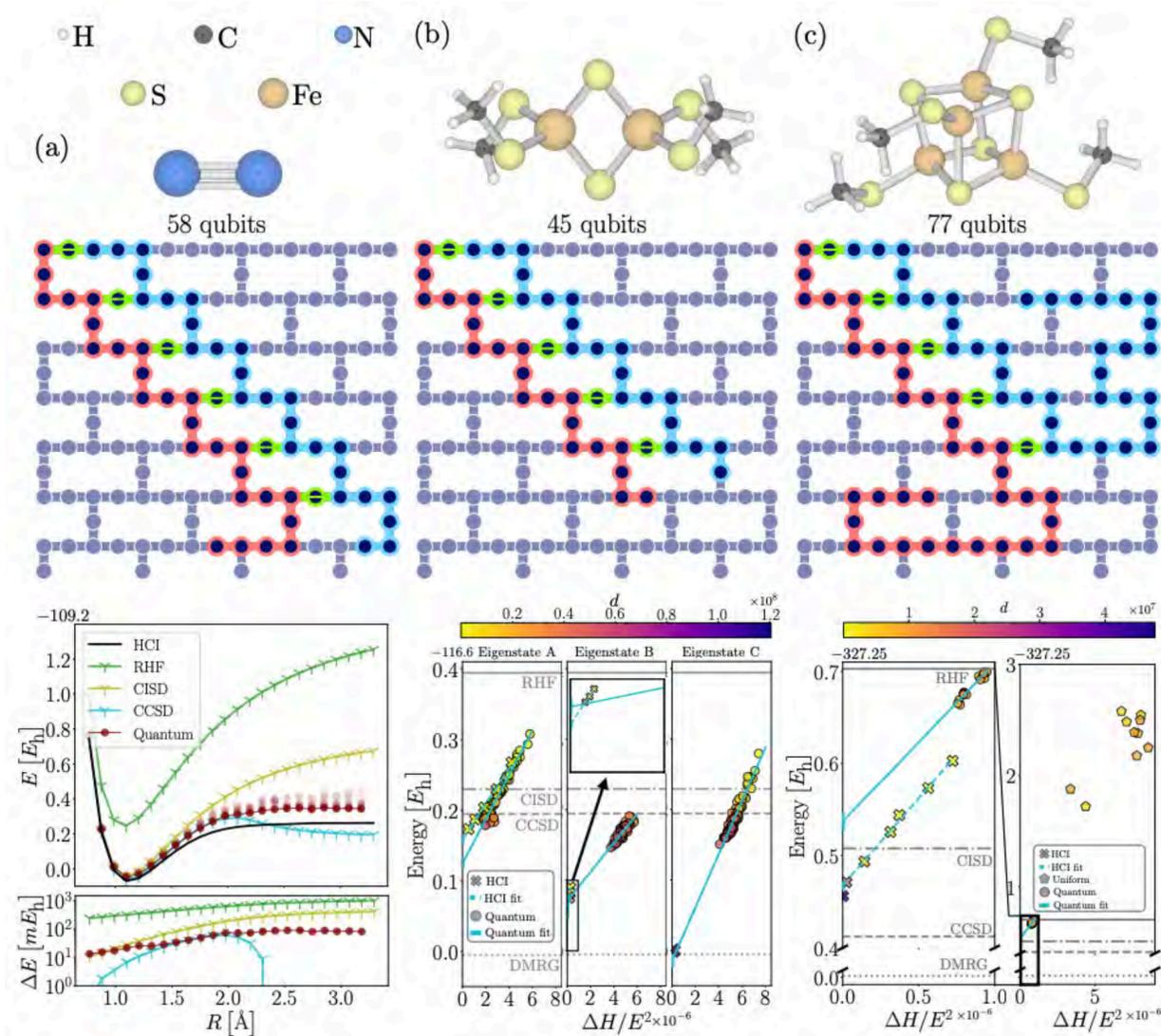


Prof. Wataru
Mizukami at QIQB



QSCI: classical diagonalization of Hamiltonians in subspaces selected by quantum computers

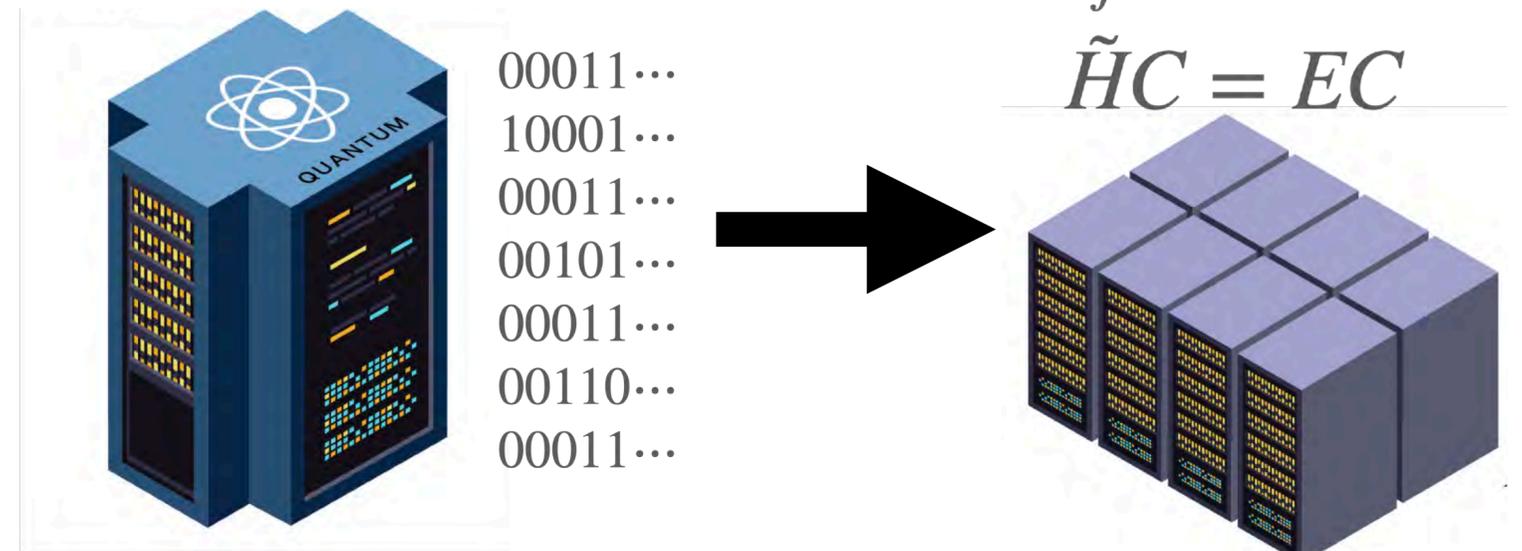
Utility scale demonstration by RIKEN & IBM



J. Robledo-Moreno et al. "Chemistry beyond exact solutions on a quantum-centric supercomputer." *Science Advances* (2025)

Sampling-based Quantum Algorithms (~2023)

"Quantum-Selected Configuration Interaction: classical diagonalization of Hamiltonians in subspaces selected by quantum computers" K Kanno, M Kohda, R Imai, S Koh, K Mitarai, W Mizukami, YO Nakagawa, arXiv:2302.11320



Prof. Wataru Mizukami at QIQB



QSCI: classical diagonalization of Hamiltonians in subspaces selected by quantum computers

Utility scale demonstration by RIKEN & IBM

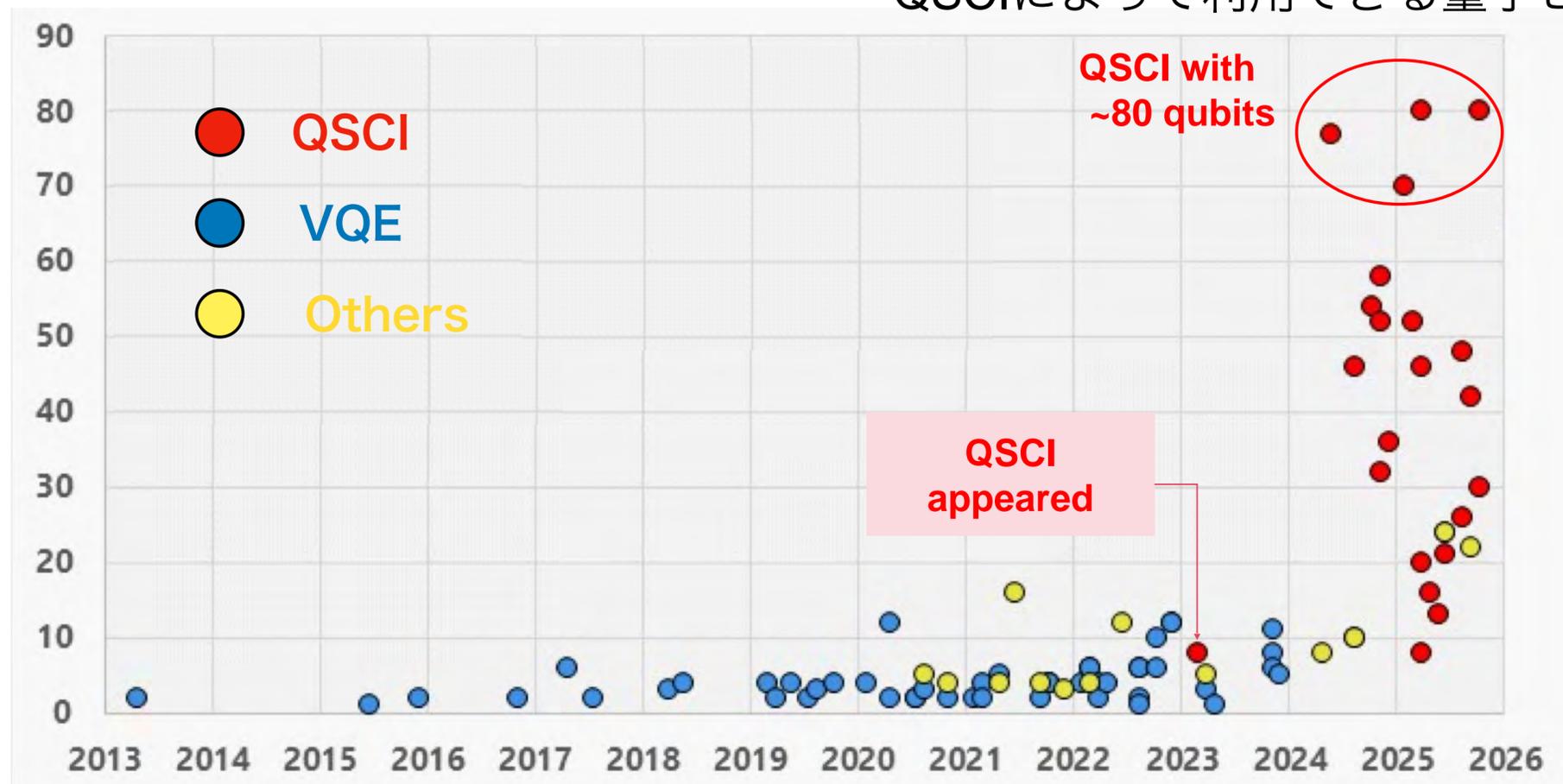


Sampling-based Quantum Algorithms (~2023)

“Quantum-Selected Configuration Interaction: classical diagonalization of Hamiltonians in subspaces selected by quantum computers” K Kanno, M Kohda, R Imai, S Koh, K Mitarai, W Mizukami, YO Nakagawa, arXiv:2302.11320

of qubits

QSCIによって利用できる量子ビット数が急増

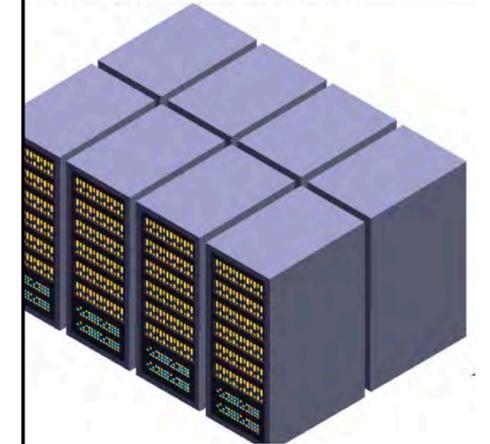


QSCI families of papers:

arxiv:2405.05068, arXiv:2410.09209, arXiv:2411.00468, arXiv:2411.04827, arXiv:2411.09861, arXiv:2412.07218, arXiv:2412.13839, arxiv:2501.09702, arxiv:2502.21081, arxiv:2502.10189, arxiv:2503.02778, arXiv:2503.05967, arXiv:2503.10923, arxiv:2503.10901, arxiv:2503.22221, arxiv:2504.00309, arxiv:2505.16796, arxiv:2506.20825, arxiv:2506.21431, arxiv:2508.02578, arxiv:2508.08229, arxiv:2509.02525, arxiv:2510.25640, arxiv:2510.26951

$$\tilde{H}_{ij} = \langle i | H | j \rangle$$

$$\tilde{H}C = EC$$



ASYS

Quantum Native.

QIQB collaboration, Nature Rev Phys (2024);
T. Weaving et al npjQI (2025); T. Weaving et al arXiv:2509.02525v2.

量子ビット数 n 、ゲート数 g 、誤り率 p の関係

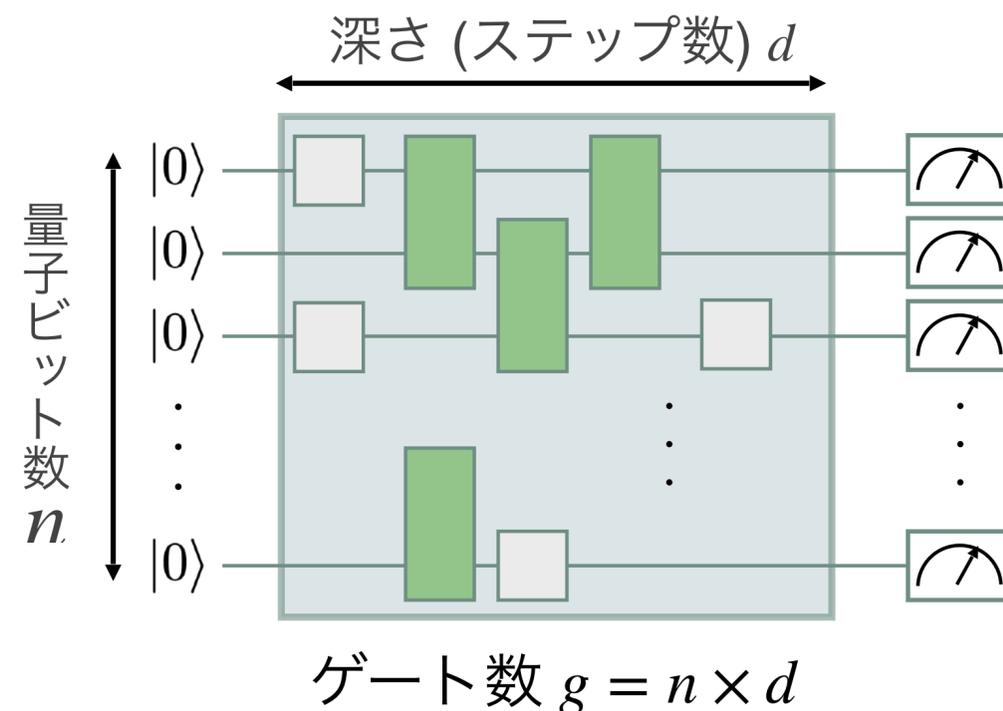
●現状ベスト 量子ビット数 $n \approx 100$, 誤り率 $p \approx 0.001$ (0.1%)

●計算の成功確率 (全ての演算が成功する確率)

$$g = 1000 \quad (1 - p)^g = 0.999^g = 0.367 \dots \quad 37\% \text{成功}$$

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

$p \leq 1/g$ でないと有意な確率で成功しない



●アプリケーションからの要求

●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

誤り率のギャップ



量子誤り訂正 QEC

誤り耐性量子計算 FTQC

(ムーンショット目標6)

FeMocoの精密量子化学計算を実現するには？

● 2k 論理量子ビット、5G 論理量子ゲート、論理誤り率 $P_L \approx 10^{-10}$

● $p = 10^{-3}$ (0.1%) の場合

● $d = 15$, $2d^2 - 1 = 449$ 物理量子ビット

● 1M (100万) 物理量子ビット

● $p = 10^{-4}$ (0.01%) の場合

● $d = 7$, $2d^2 - 1 = 97$ 物理量子ビット

● 200k (20万) 物理量子ビット

表面符号

誤り耐性閾値 $p_{th} = 0.01$

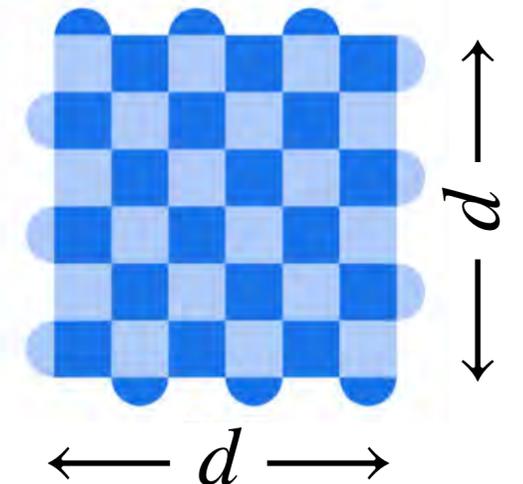
符号距離 d

論理誤り率

$$P_L = p_{th} \left(\frac{p}{p_{th}} \right)^{(d+1)/2}$$

物理量子ビット数/論理量子ビット

$$2d^2 - 1$$



物理量子ビットは質 (誤り率) も量 (ビット数) も全然足りない

FTQCに向けた世界的な競争

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					
競合企業 論理qubit 論理誤り率	IBM 200論理qubit 10 ⁻⁸ @2029	Quantinuum 100論理qubit 10 ⁻⁵ ~ 10 ⁻¹⁰ @2029			QuEra 100論理qubit N/A @2026
競合企業 現状と評価	Google 105物理qubit 1論理qubit	98物理qubit		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

- 巨大IT企業やベンチャーが野心的なロードマップを掲げて競争
- アプリが要求する誤り率10⁻¹⁰の数千論理量子ビットはまだ遠い

ここから、新・未来へ



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

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。



人工光合成(→CO₂削減)

人工窒素固定(→省エネ)

2026-2030

量子コンピュータシステム



山本剛PM
(産総研)



樽茶PM
(理研)



古澤PM
(東大)



高橋PM
(OIST)



大森PM
(分子研)

超伝導

富士通

半導体^{※1}

日立

光量子

OptQC

イオン
トラップ^o

Qubitcore

中性原子^{※2}

Yaqumo

2030年以降中核となる参画企業→

【横軸】(横断的 4プロジェクト)



小芦PM
(東大)

NTT



小林PM
(京織大)

QuEL
QunaSys



山本俊PM
(阪大)

浜松ホトニクス



御手洗PM
(阪大)

三菱電機
みずほ第一フィナンシャルテクノロジー

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

量子バス・量子通信ネットワーク^{※3}



アプリケーション

理論と
実装

分散量子
コンピューティング

※4

アプリ実装法
に関する連携



システム統合担当PI



誤り耐性実験担当PI



光接続実験

研究開発体制図：プログラムポートフォリオ

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 7 PJ

<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

3 PJ

<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

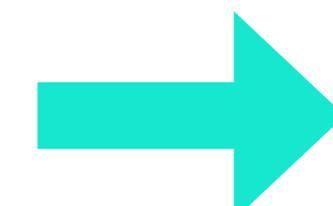
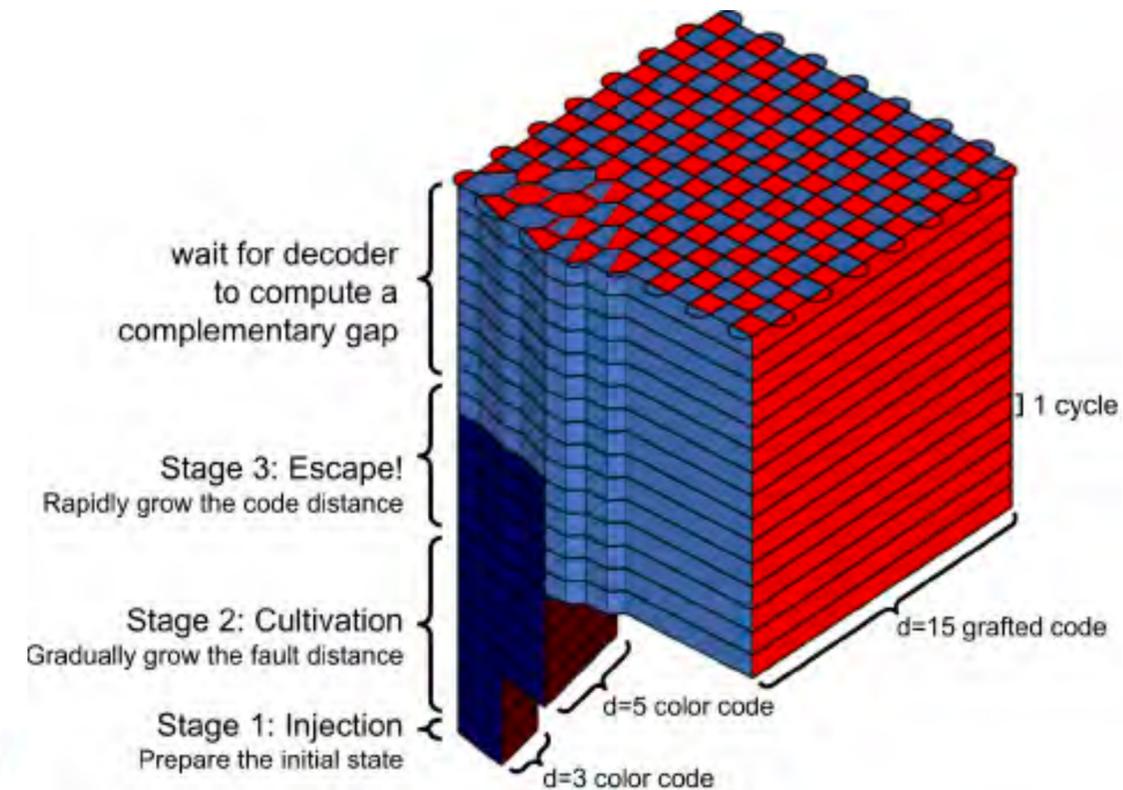
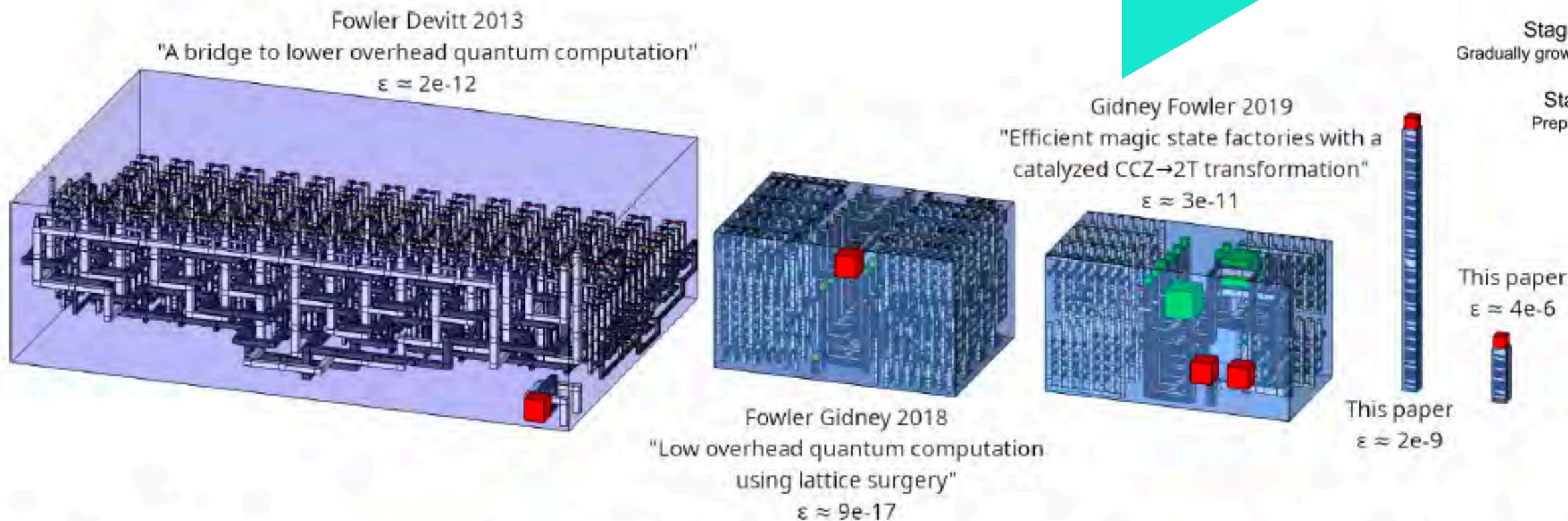
Magic State Cultivation

Magic state cultivation: growing T states as cheap as CNOT gates

Craig Gidney, Noah Shutty, and Cody Jones

Google Quantum AI, California, USA
September 27, 2024

Goto 2014 Itogawa, Fujii 2024



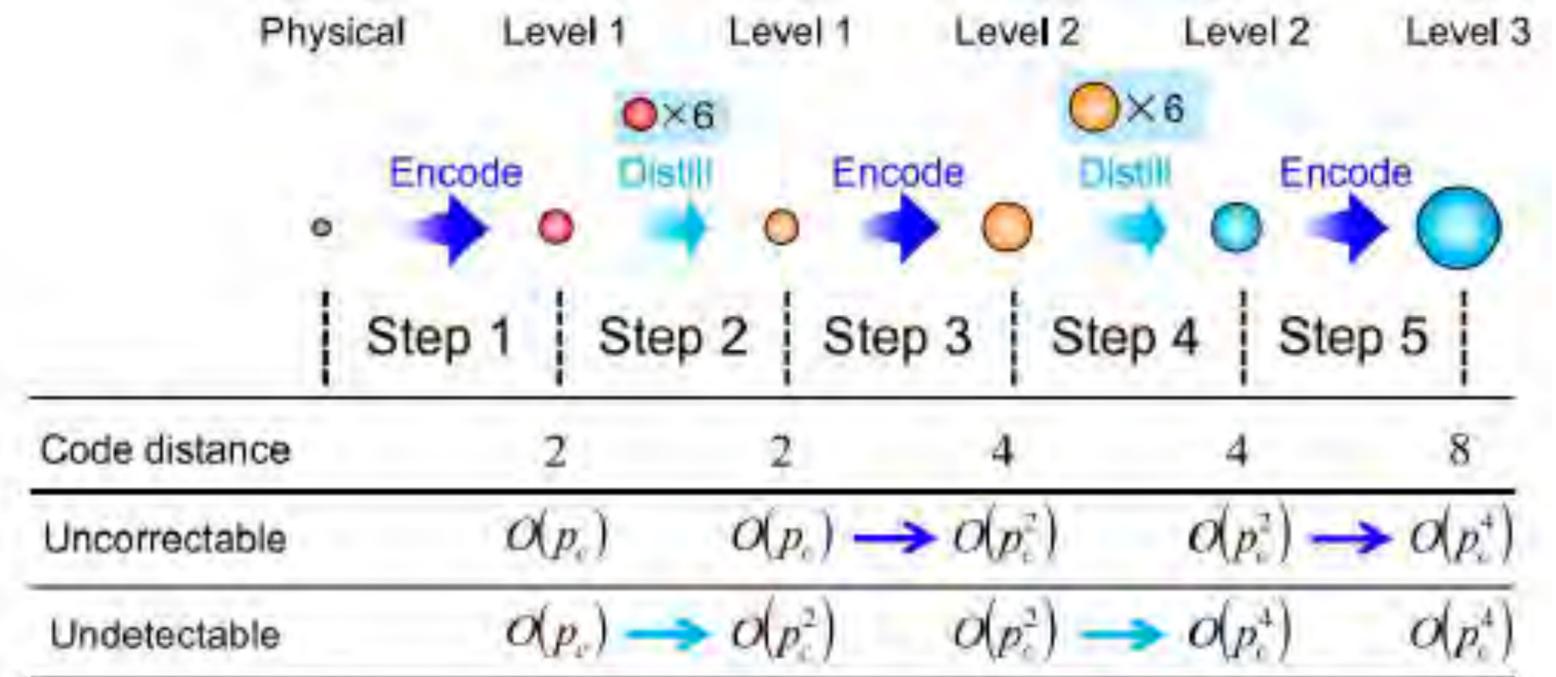
Hirano-Toshio-Itogawa-Fujii
arXiv:2510.24615
UOsaka & Fujitsu

Figure 3: To-scale spacetime defect diagrams of historical constructions for producing $|T\rangle$ states, showing improvement over time. (Limited to papers that included 3d models.) Assumes 10^{-3} uniform depolarizing circuit noise. ϵ annotations indicate logical error rates. Red boxes indicate output locations. Left: the braided

Magic State Cultivation

Step-by-step magic state encoding for efficient fault-tolerant quantum computation

Hayato Goto 2014



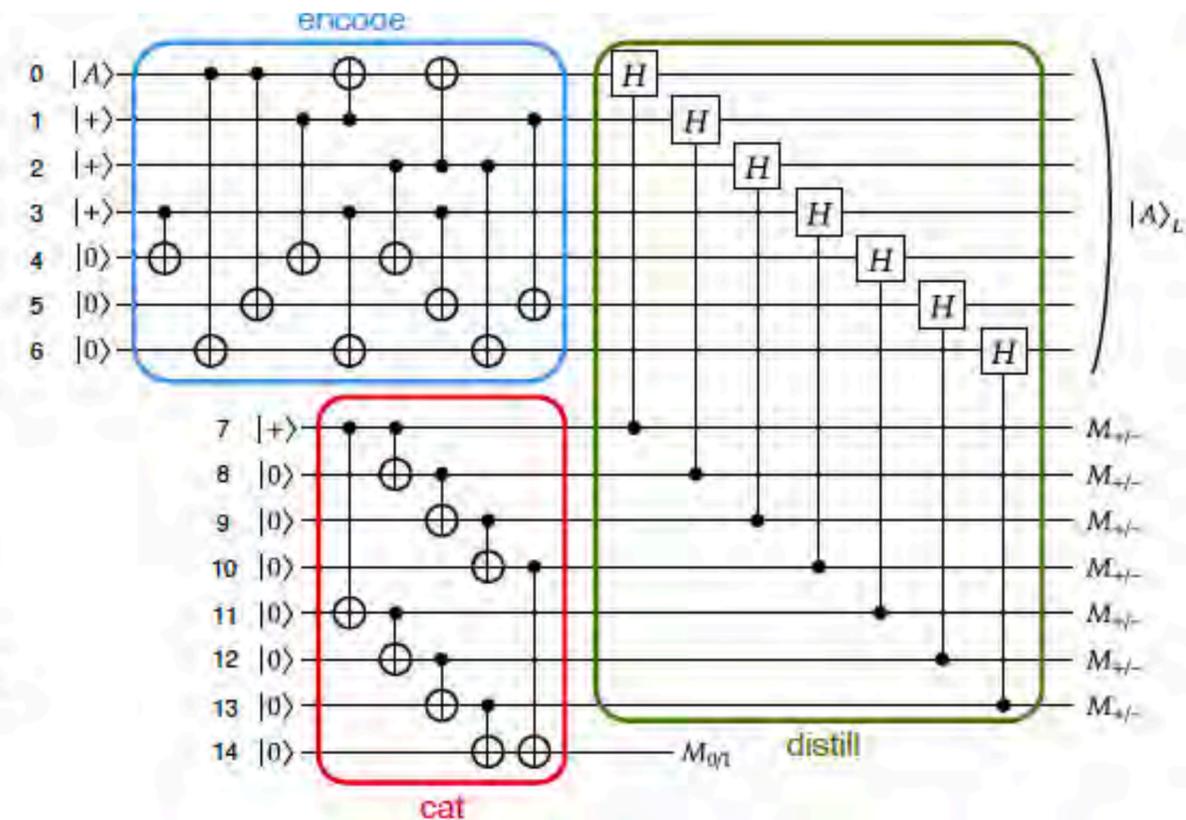
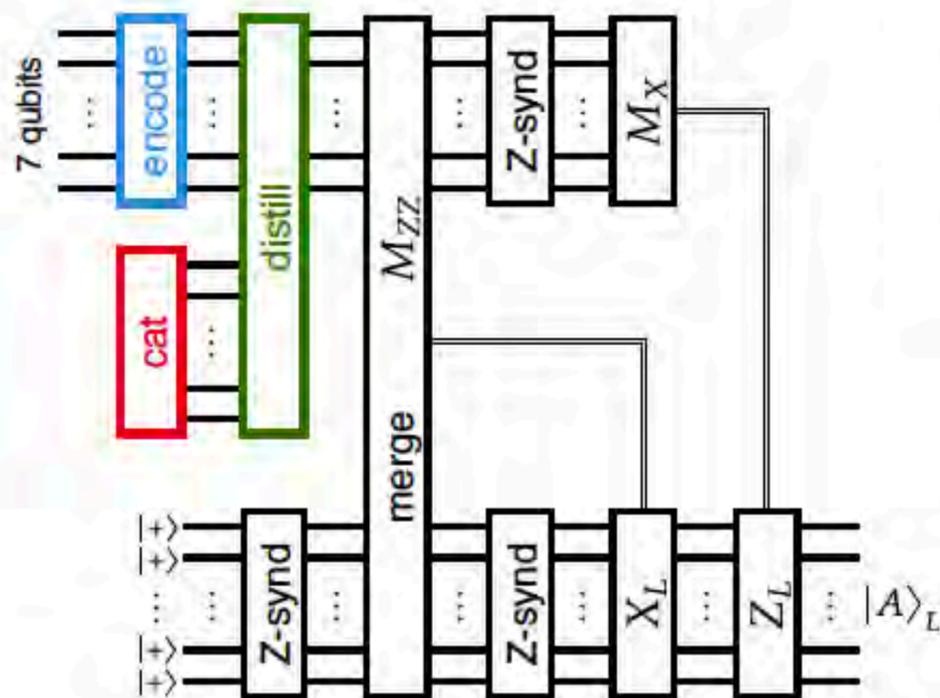
OPEN ACCESS

Efficient Magic State Distillation by Zero-Level Distillation

Tomohiro Itogawa ^{1,*}, Yugo Takada ¹, Yutaka Hirano ¹

Show more

PRX Quantum 6, 020356 - Published 20 June, 2025



イメージシナリオ

2050

誤り耐性型汎用量子コンピュータでスパコンを超える大規模計算が可能となっており、科学・産業・経済・安全保障、地球規模の問題解決に利用されている



2050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世界に伍していく

誤り耐性量子コンピュータで2048-bitの素因数分解が可能になっている



2040

開発に伴う不確実性の解消

誤り耐性量子コンピュータでスパコンを超える有用計算が可能になっている
(FeMocoの量子化学計算による根粒菌の窒素固定解明)



MS6参加企業とMS6で育った人材が開発を主導



限られた問題でスパコンを超える計算により、誤り耐性量子コンピュータのPoCが示されている
(MS6で開発されたアルゴリズムで物性物理の問題が解かれている)

企業の本格参入により、大規模量子ビット実装の開発が開始される

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が実現している



クロスレイヤー協調設計モデルによって、量子コンピュータの物理系の将来性がある程度予測可能になっている

誤り耐性量子コンピュータのアプリケーションが開発され、量子コンピュータへの要求条件が明らかになっている

10^0
 10^{-4}

10^1
 10^{-6}

10^2
 10^{-8}

10^3
 10^{-10}

10^4
 10^{-12}

論理量子ビット数
論理誤り率

日本の国際競争力

●研究開発力

- アカデミックの能力は高いが研究者が少ない
- 産業界の参入少ない（パブリックセクター、水平分業に期待）

●人材供給力

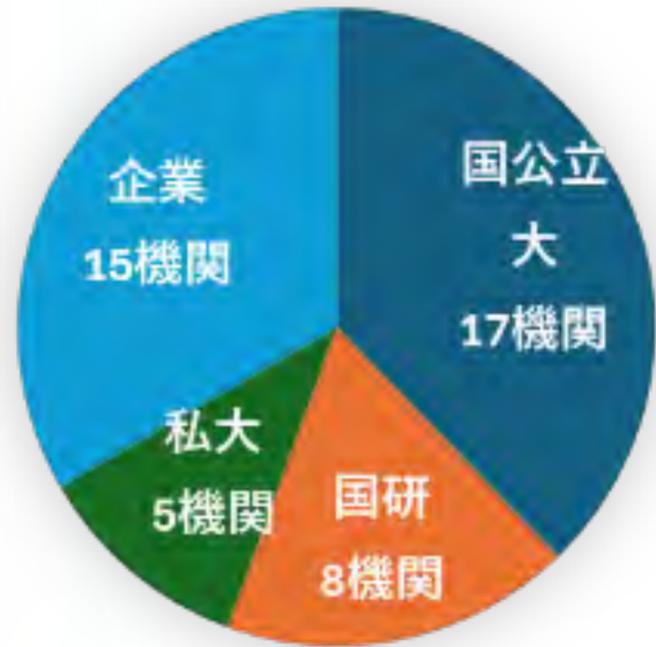
- 供給源である大学の研究室が少なく、増えない
 - 大学の量子情報分野に対する認識低い、人材流動性低い、有期雇用

●産業競争力

- 大企業の本格参入少ない（富士通のみ）
- スタートアップに期待（資金調達が海外より不利）

●国家予算

ムーンショット目標6 参画機関と参加者 (2024年度)

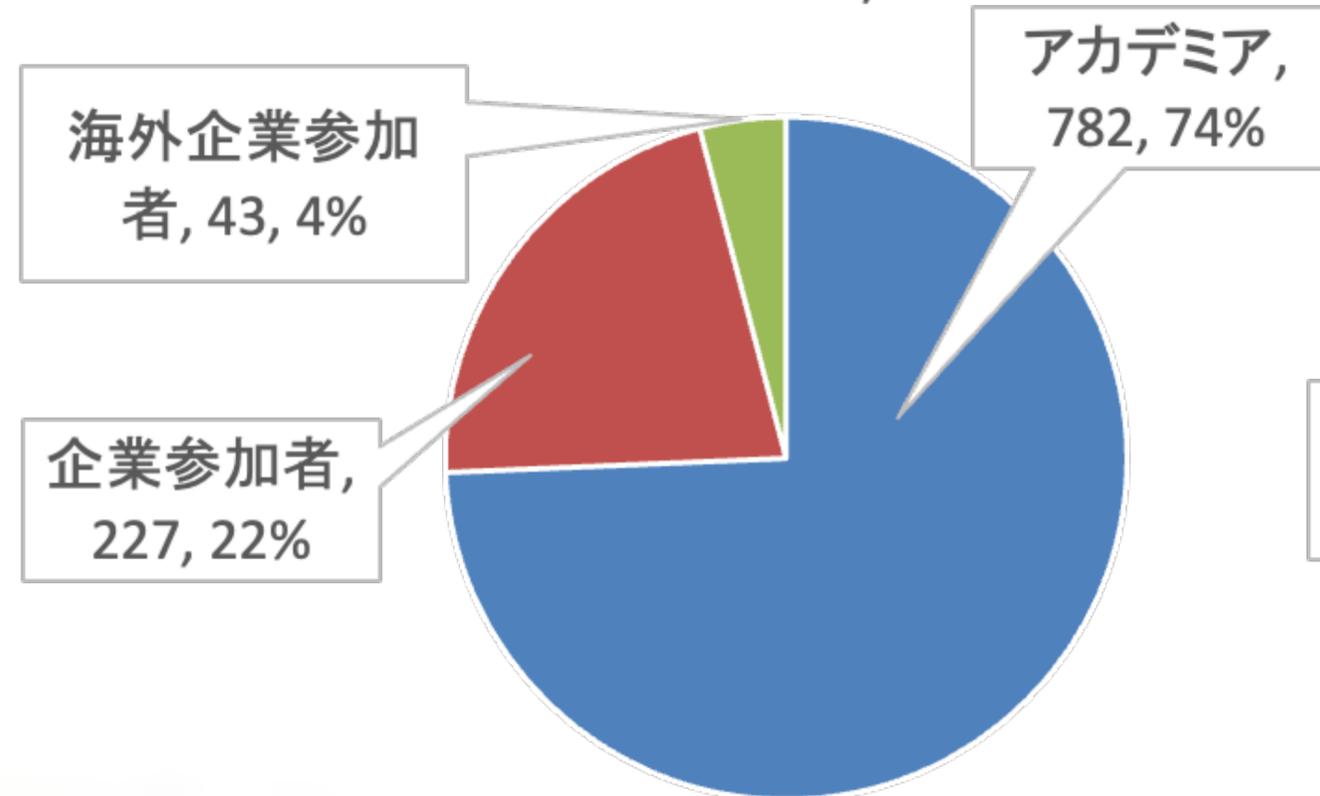


45参画機関の1/3が企業

- ・日本電気 ・日本電信電話(4PJ) ・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 (2PJ)
- ・**Infleqtion (米国)** ・浜松ホトニクス ・**Nanofiber Quantum Technologies**
- ・メルカリ ・**LQUOM** ・**キュエル** ・ソシオネクスト (量子スタートアップ)

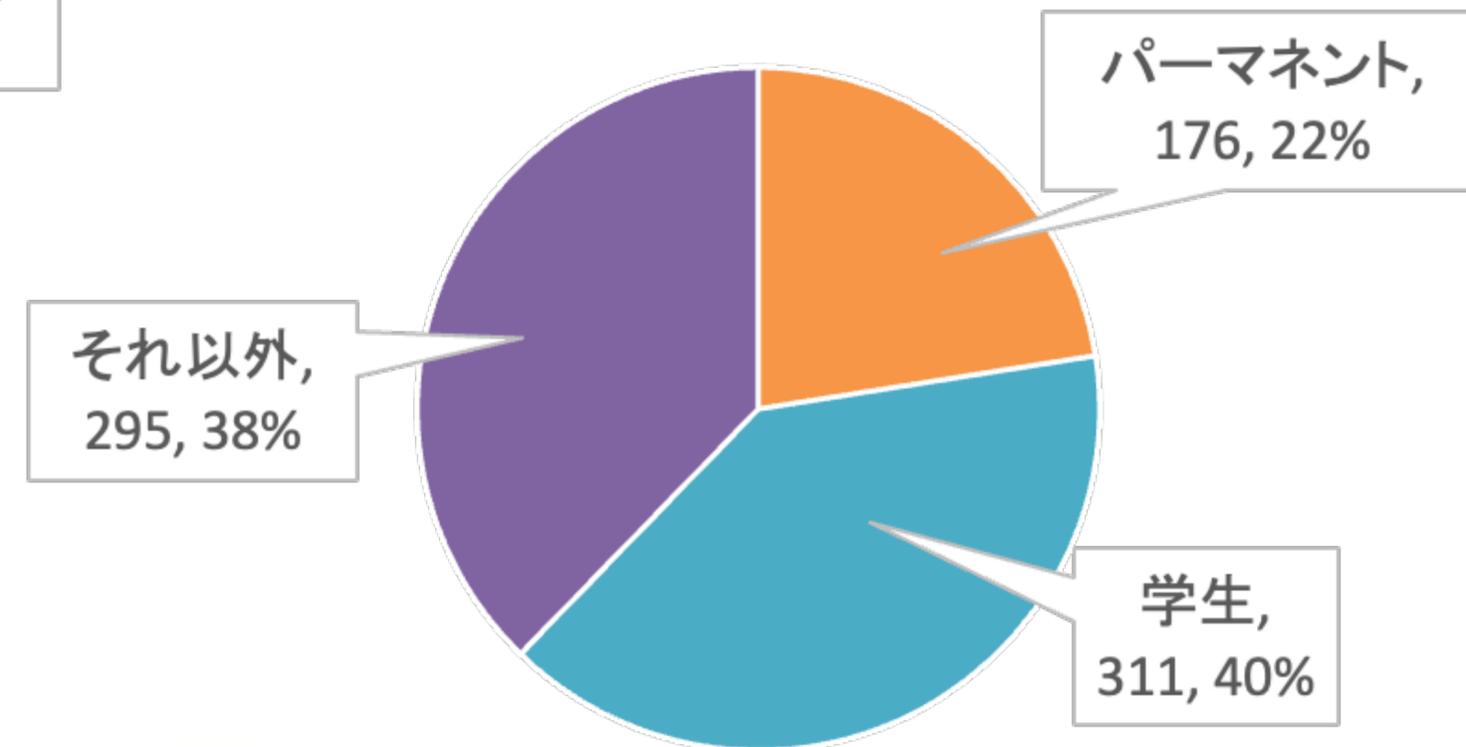
参加者の3/4がアカデミア

MS6参加者 (1,052名)



アカデミア研究者 (学生除く) の6割強が有期雇用

アカデミア参加者属性 (782名)



(参考) 世界各国等の量子技術の政策動向

アメリカ National Quantum Initiative Reauthorization Act (2024.12 上院提出 審議中)

予算：2018年に法制化されたNQIAを改正し、2029年までの5年間で総額27億ドル（約4,050億円）の予算規模

拠点：NISTに量子センシング・計測センターを設立、NASAを新たに量子機関に認定し傘下に量子研究所を設立

重点施策（産業化）：DOEにおいて量子コンピュータ商業化戦略を策定

QED-C（量子経済開発コンソーシアム）との連携を全省庁に拡大

イギリス National Quantum Strategy (2023.3)

予算：2024年から10年間で25億ポンド（約4,750億円）を投資し、さらに10億ポンドの民間投資を呼び込む

11月には、量子分野を含む科学・技術産業を支援する5億ポンドの予算増額措置を発表

重点施策（産業化）：量子分野について2030年代をターゲットにした量子技術の実装に関する

5つのミッション（予算措置、民間投資呼び込み、人材育成強化、海外企業誘致、規制改革）を新たに提示

ドイツ Quantum technologies action concept (2023.4)

予算：2023年から2026年までの省庁横断的な計画を発表、4年間で総額約30億ユーロ（4,800億円）を拠出

重点施策（産業化）：行動分野として製品開発による国際優位性確保、重点的な技術開発や将来市場の確保に向けた取組

産業連携等の強力なエコシステムの構築

韓国 South Korea's Quantum Science and Technology Strategy (2023.6)

予算：2035年までに官民協力で最低でも量子技術に3兆韓国ウォン（約3,300億円）以上を投資

重点施策（産業化）：量子関連産業の世界市場シェア10%、量子技術を供給・活用する企業が1,200社程度を目指す

量子技術のハイレベル人材を2,500人に（現在の7倍）、量子関連事業への従事者を1万人以上に増加

日本 Quantum Technology and Innovation Strategy (2020.1)

予算：量子関連予算は、2024年度約1,000億円、5年間（2020～2024年度）約3,300億円の実績

拠点：QIHを整備。産総研G-QuATには複数方式の量子コンピュータを導入し、HPCと併せたテストベッド環境を整備

重点施策（産業化）：3つの戦略と2つの推進方策を策定。量子エコシステム構築に向け、ユースケース創出、技術開発を加速

注：各通貨は2024年3月18日時点のレートで日本円に換算(米ドル：約150円、英ポンド：約190円、ユーロ：約160円、デンマーククローネ：約21.8円、ウォン：約0.11円)

その他にも、国家規模から見て
量子技術に集中投資している

国が目立つ

オランダ

スイス

デンマーク

フィンランド

量子エコシステム構築に向けた
推進方策概要

令和7年5月30日

量子技術イノベーション会議

より抜粋