

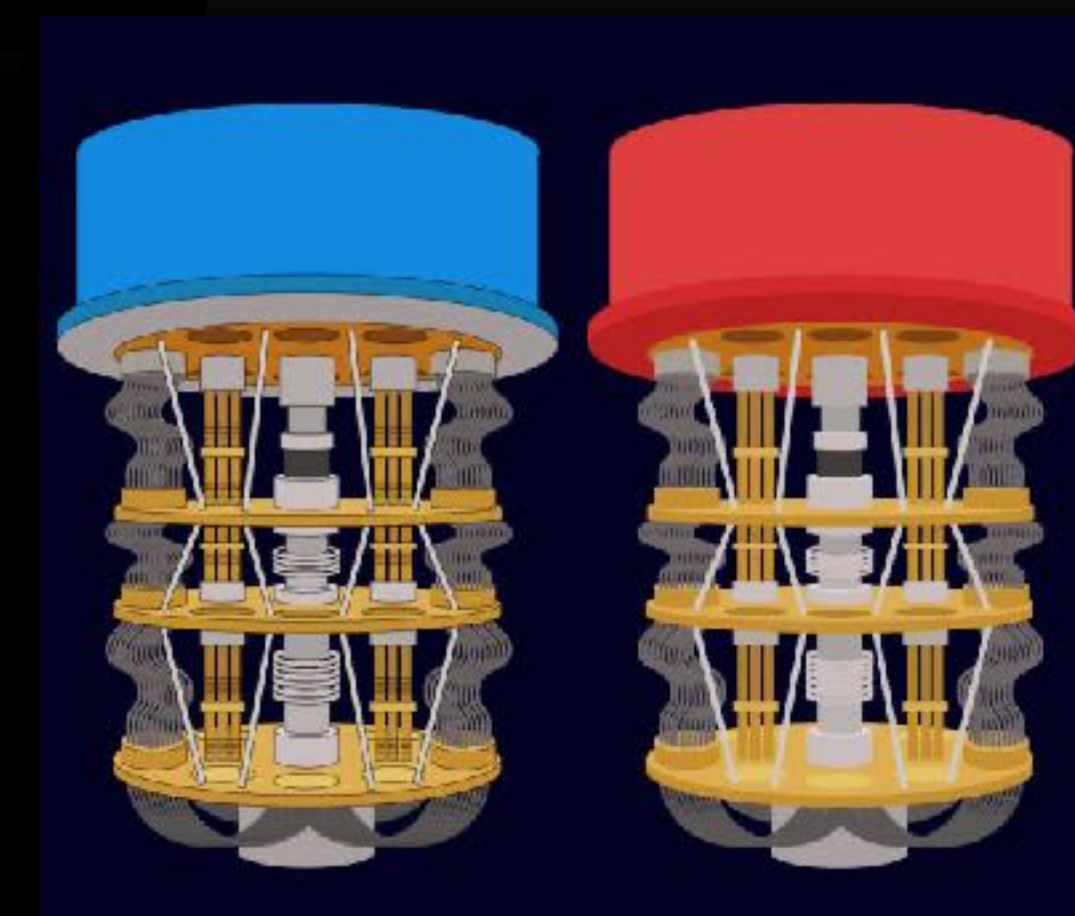
量子コンピュータの研究開発・ビジネス動向

誤り耐性汎用量子コンピュータFTQC時代のはじまり



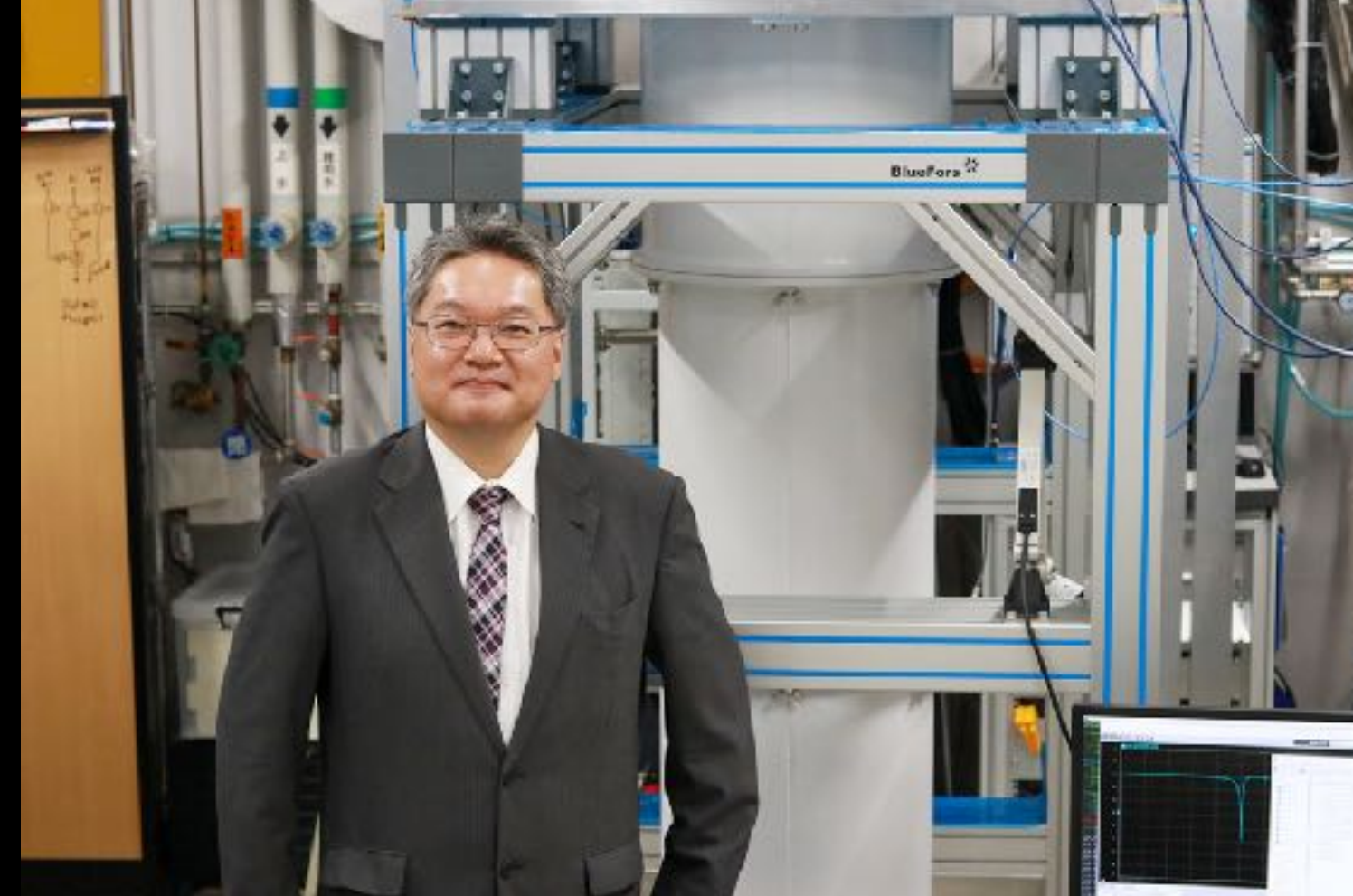
産業技術総合研究所

川畑史郎





自己紹介



名前: 川畑史郎

所属: 産業技術総合研究所 量子・AI融合技術ビジネス開発グローバル研究センター

役職: 副センター長

専門: 理論物理学×情報工学×電子工学

- ・ NEDO 高効率・高速処理を可能とするAIチップ・次世代コンピューティングの技術開発 量子関連コンピューティング技術 プロジェクトリーダー
- ・ 文科省 光・量子飛躍フラッグシッププログラムQ-LEAP 量子情報処理領域 サブプログラムディレクタ
- ・ 文科省 光・量子飛躍フラッグシッププログラムQ-LEAP 人材育成プログラム領域 サブプログラムディレク
- ・ 内閣府 ムーンショット型研究開発事業「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」アドバイザー
- ・ 内閣府 量子技術イノベーション会議 量子技術の実用化推進ワーキンググループ 委員
- ・ JST さきがけ「物質と情報の量子協奏」アドバイザー
- ・ 量子技術イノベーション拠点QIH 国際連携分科会 委員
- ・ 量子ICTフォーラム 量子コンピュータ技術専門委員会 副委員長

内容

1. 量子コンピュータのトレンド
2. 量子コンピュータ最新動向
3. 下町量子コンピュータ：中小企業の匠の技

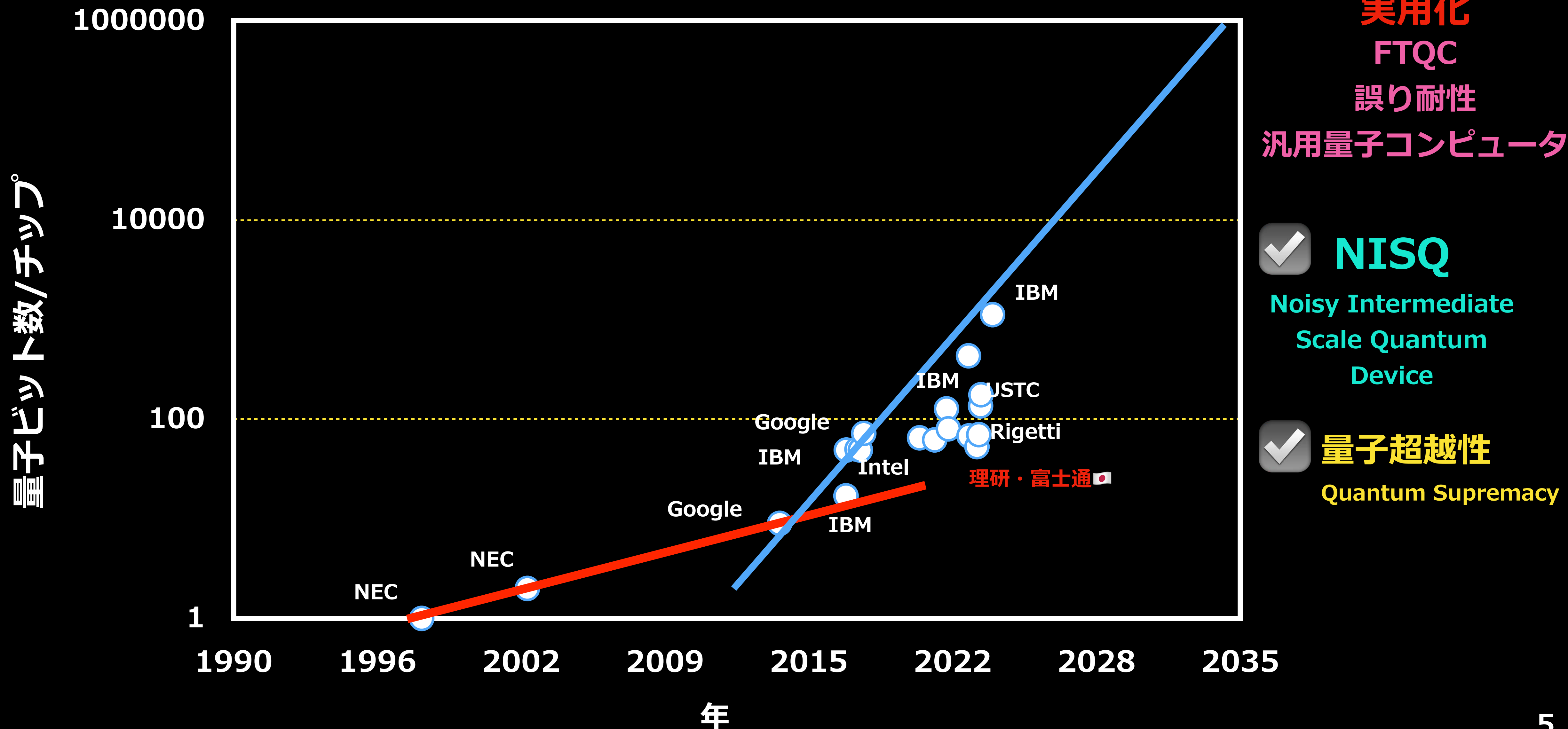
1. 量子コンピュータのトレンド

NISQから**FTQC**へ



量子版ムーアの法則（量子ビットの集積度）

超伝導量子コンピュータ

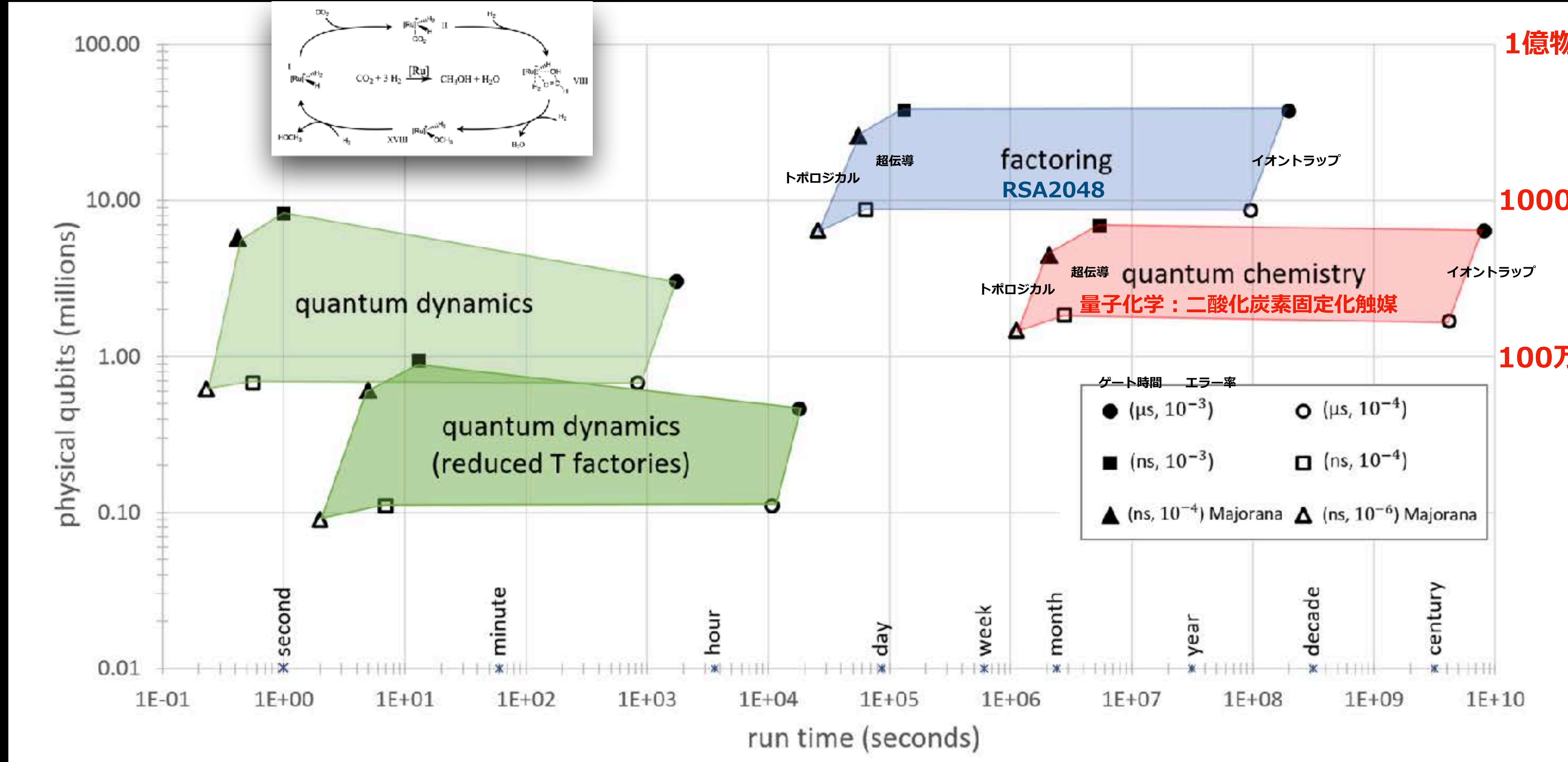


FTQCに必要な物理量子ビット数と計算時間

"Assessing requirements to scale to practical quantum advantage" arXiv:2211.07629 マイクロソフト

論理レイヤー・物理レイヤーでの処理を考慮した正確な見積もり

物理量子ビット数 (100万量子ビット)



1億物理量子ビット

1000万物理量子ビット

100万物理量子ビット

1秒

1分

1時間

1日

1ヶ月

1年

10年

1世紀

計算時間 (秒)

超伝導量子コンピュータオリンピック



IBM **1121**量子ビット



中国科学技術大学 **176**量子ビット



北京量子情報科学研究所 **126**量子ビット

集積度(量子ビット数)だけでなく
量子コヒーレンスと動作速度も重要



Google **70**量子ビット



中国浙江大学 **68**量子ビット



Quantware **64**量子ビット



理化学研究所・富士通・阪大 **64**量子ビット

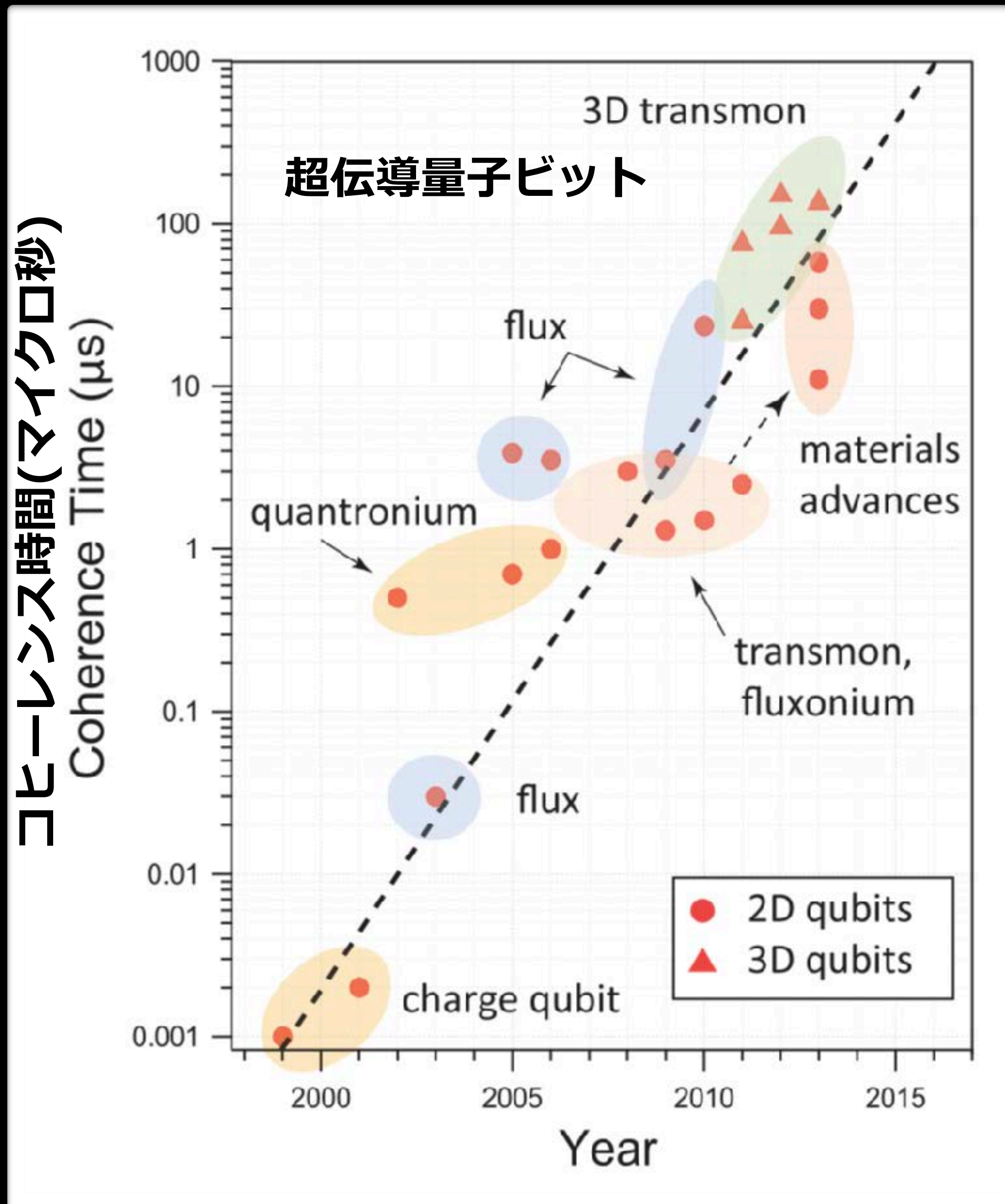
量子コンピュータの性能指標

指標	内容	例
物理指標	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 量子ビットや量子論理回路の物理的性能を表す指標。 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ <u>量子ビット数</u> (集積度) ✓ <u>連結度</u> (Connectivity) ✓ <u>T₁</u> (エネルギー緩和時間) ✓ <u>T₂</u> (位相緩和時間 = コヒーレンス時間) ✓ <u>ゲート忠実度</u> (Gate Fidelity)
計算性能指標	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 量子コンピュータの計算機としての性能指標。 ➤ ランダム量子回路や量子アルゴリズムに基づき評価・推定する。 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ <u>量子体積</u> (Quantum Volume / IBM) ✓ <u>アルゴリズム量子ビット</u> (Algorithmic Qubits / IonQ) ✓ <u>CLOPS</u> & <u>CLOPS_h</u> (Circuit Layer Operations Per Second / IBM) ✓ <u>EPLG</u> (Error Per Layered Gate / IBM)

量子版ムーアの法則 (コヒーレンス時間)

● 世界記録: 34m秒 (Weizmann Institute)

PRX Quantum 4, 030336 (2023)



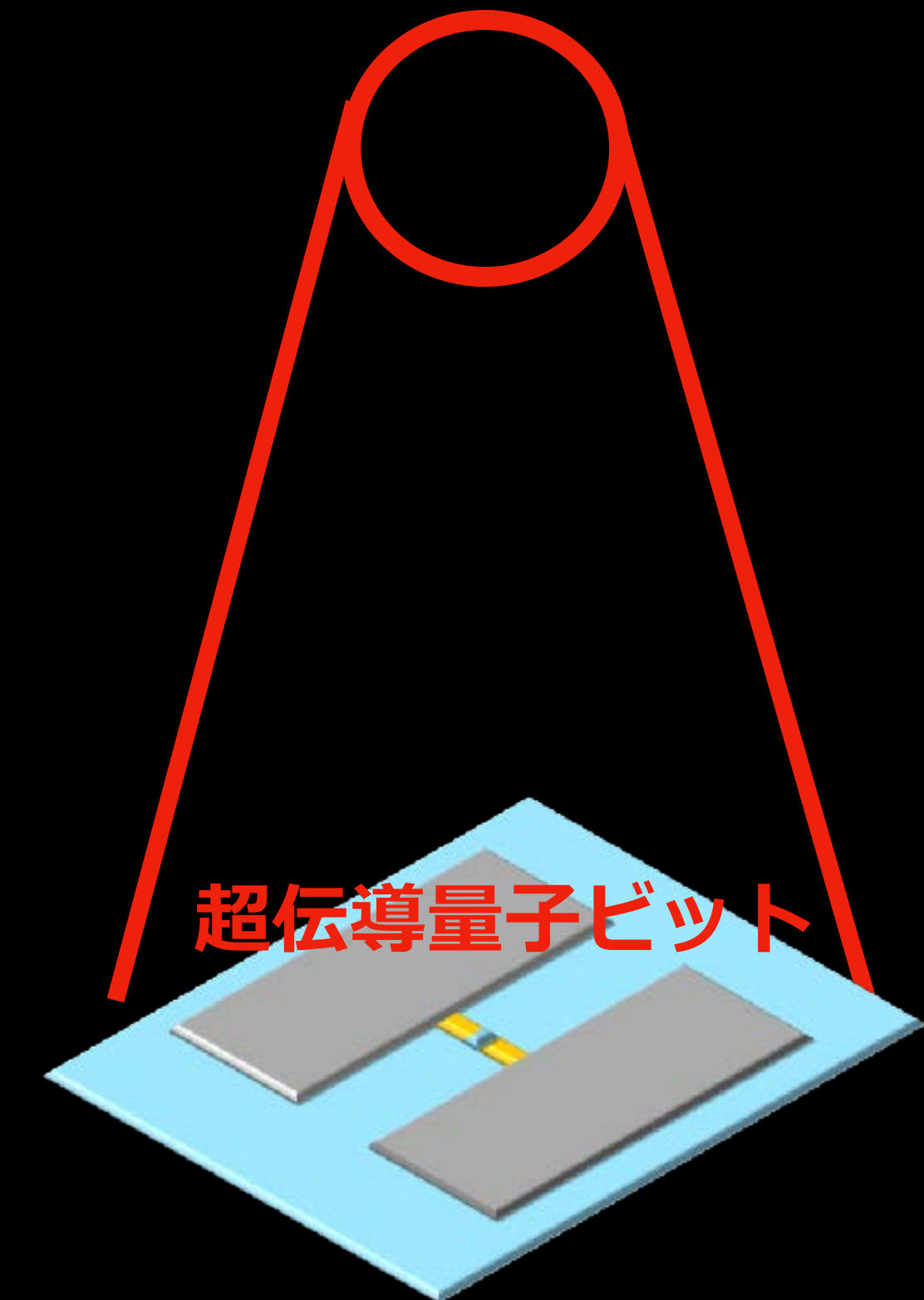
量子ビットが量子力学的コヒーレンス
〔重ね合わせ〕を維持できる時間



IBM超伝導量子コンピュータ

2023年12月4日

1121量子ビットプロセッサCondor



3次元実装・フレキシブル高密度配線など最先端エレクトロニクス技術をフル活用

引用：<https://www.scientificamerican.com/article/ibm-releases-first-ever-1-000-qubit-quantum-chip/>



中性原子量子コンピュータ

2023年10月24日 Atom Computing

1225量子ビットの量子コンピュータを実現

実機公開は2024年

NISQ開発競争の激化(~2023)

イオントラップ量子コンピュータ

- ・量子ビット：イオンの超微細構造準位
- ・ **40量子ビット** (NIST)
量子体積=400000 (IonQ)

引用： <https://ionq.com>

企業： IonQ, Quantinuum, AQT, Universal Quantum, Oxford Ionics

中性原子量子コンピュータ

- ・量子ビット：原子のRydberg準位
- ・ **289量子ビット** (QuEra)
ただし一種類の組合せ最適化問題専用

引用： Ebadi 他, Nature 595 (2021) 227

企業： QuEra, Infleqion, Nanofiber Quantum Technologies

シリコン量子コンピュータ

- ・量子ビット：量子ドット内の単電子スピン
- ・ **12量子ビット** (Intel)

引用： <https://forbesjapan.com/articles/>

企業： Intel, HRL, 日立, Silicon Quantum Computing, Quantum Motion Technologies, Equal 1 Lab, Diarq, Blueqat, SemiQon, Global Foundries

光量子コンピュータ

- ・量子ビット：光子の偏向、モード、経路など
- ・ **216量子ビット** (XANADU)
ただしガウシアンボソンサンプリング専用

引用： Nature 606 (2022) 75

企業： XANADU, PsiQuantum, QuiX, 図霊量子, Quandela, ORCA, NTT

FTQCの芽生え

量子エラー訂正：表面符号

1論理量子ビット=

- データ量子ビット
- 検査用量子ビット

引用：徳永裕己 情報処理 55(2014)695

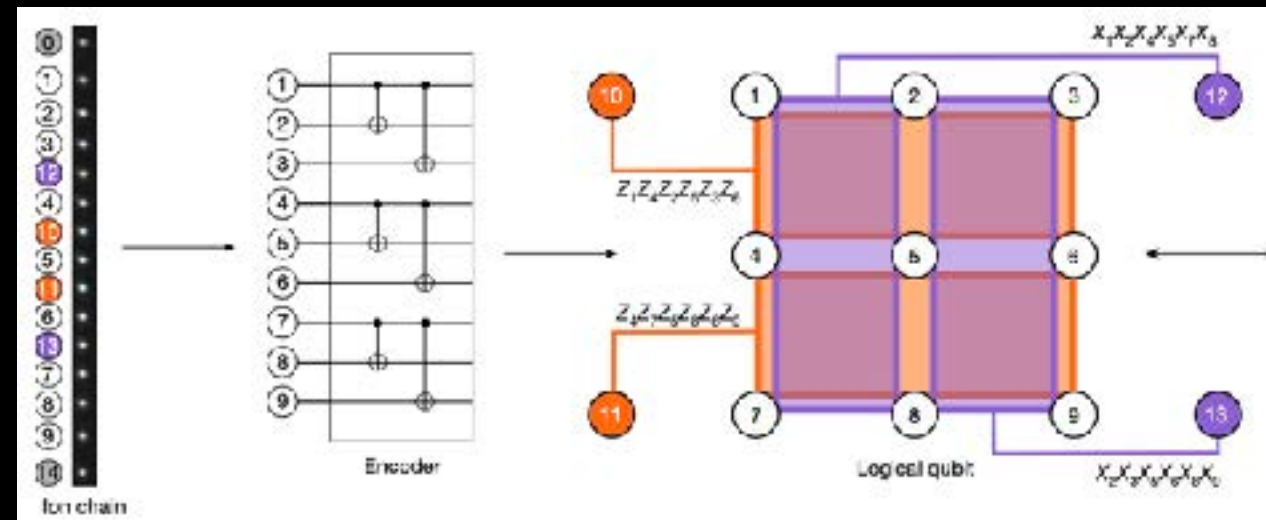
利点：エラー閾値がゆるい（0.001~0.01）。最隣接結合のみでよい。→**Hardware efficient**

欠点：膨大な物理量子ビットが必要（**1論理量子ビット=10000物理量子ビット** for エラー率=0.01）

量子エラー訂正と論理量子ビット実証(2021~)

IonQ & Google

Bacon-Shor符号(9量子ビット)

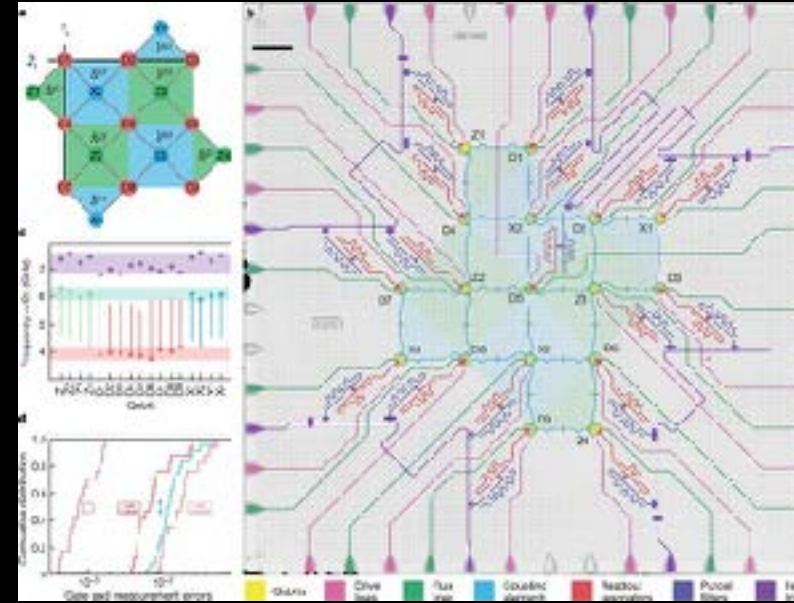


イオントラップ

Nature 598 (2021) 400

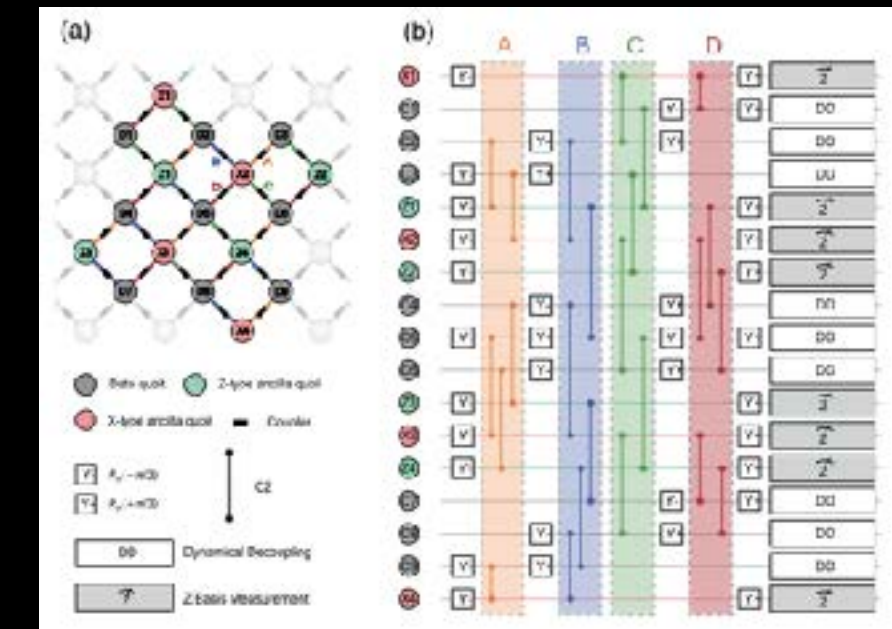
スイスETH

表面符号(17量子ビット)



中国USTC

表面符号(17量子ビット)



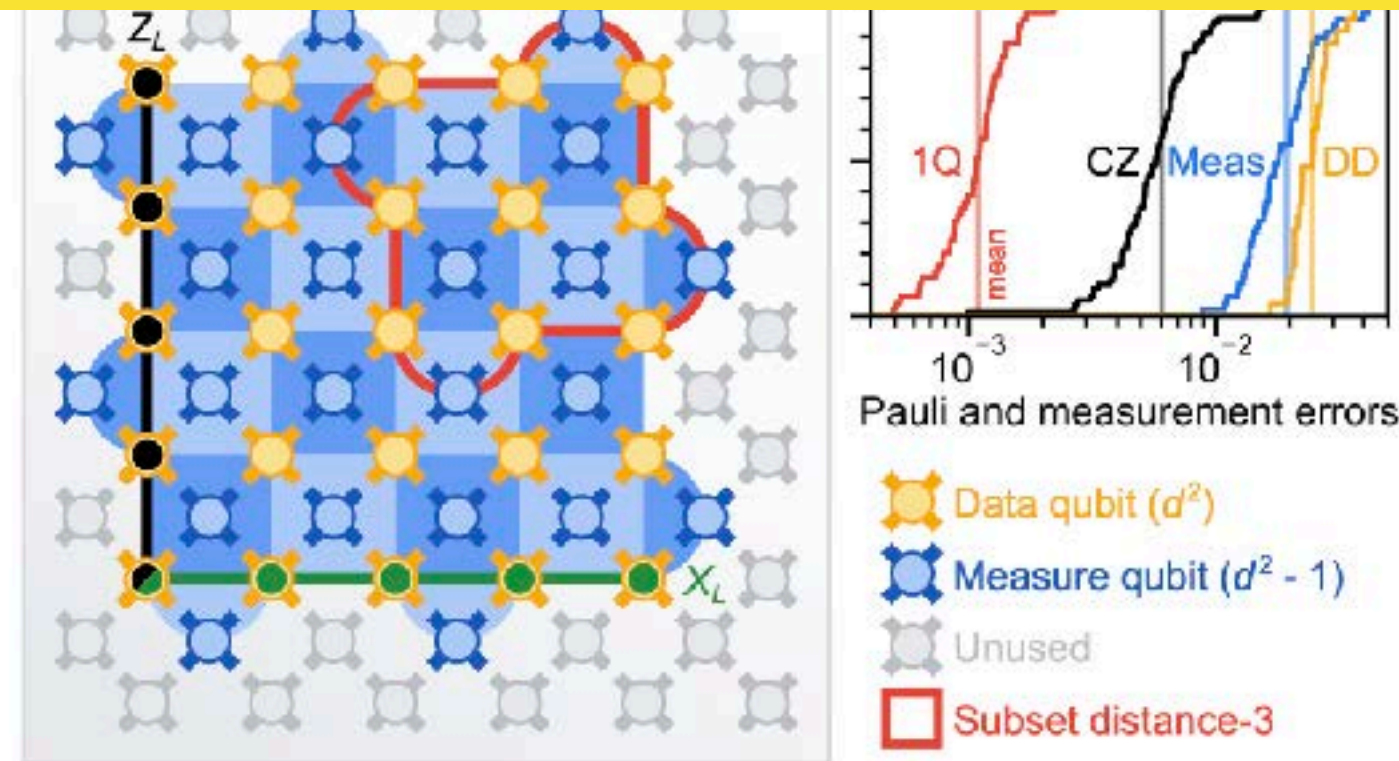
超伝導

Nature 600 (2022) 030501

(不完全な) 1論理量子ビットの実現

Google

表面符号(49量子ビット)

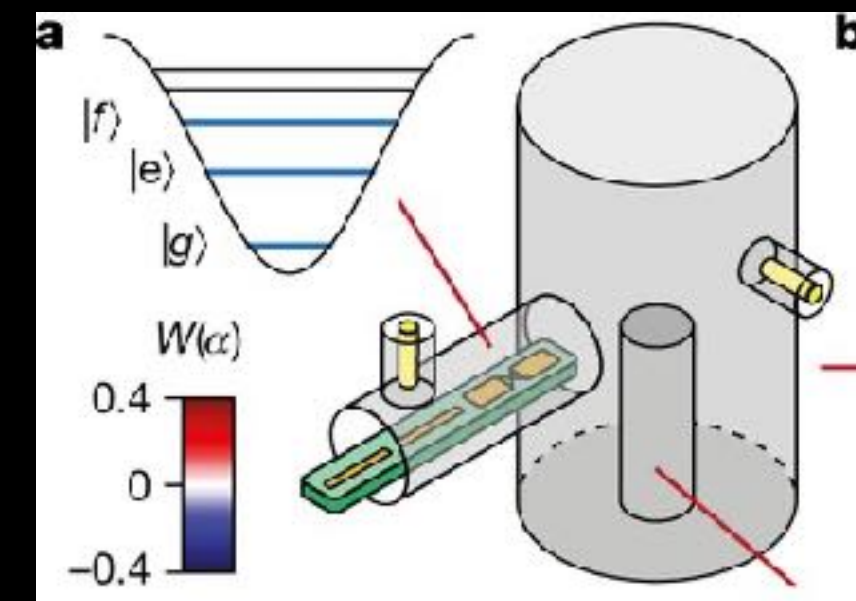


超伝導

Nature 614 (2023) 676

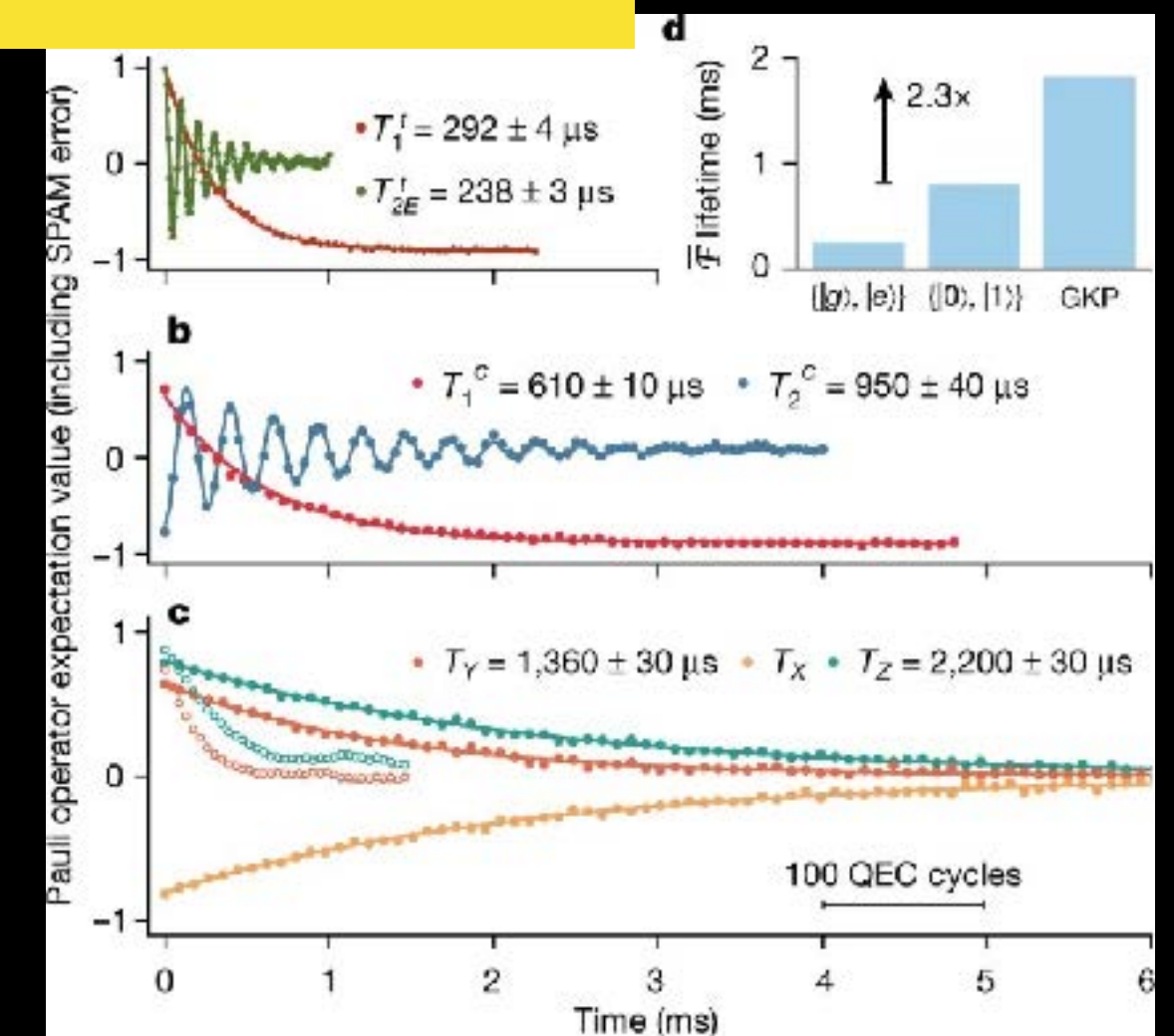
Yale

GKP符号(1量子ビット)



超伝導3Dキャビティ

Nature 616 (2022) 50



損益分岐点超え!

FTQC時代の到来

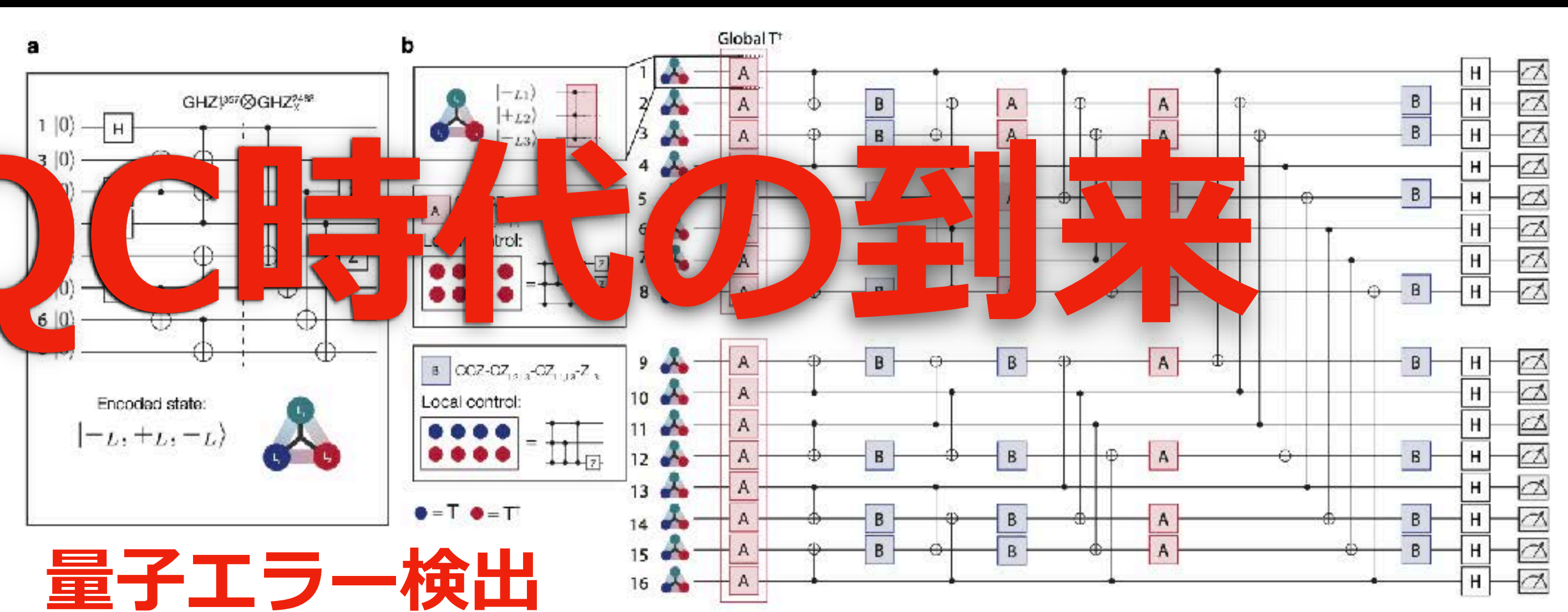
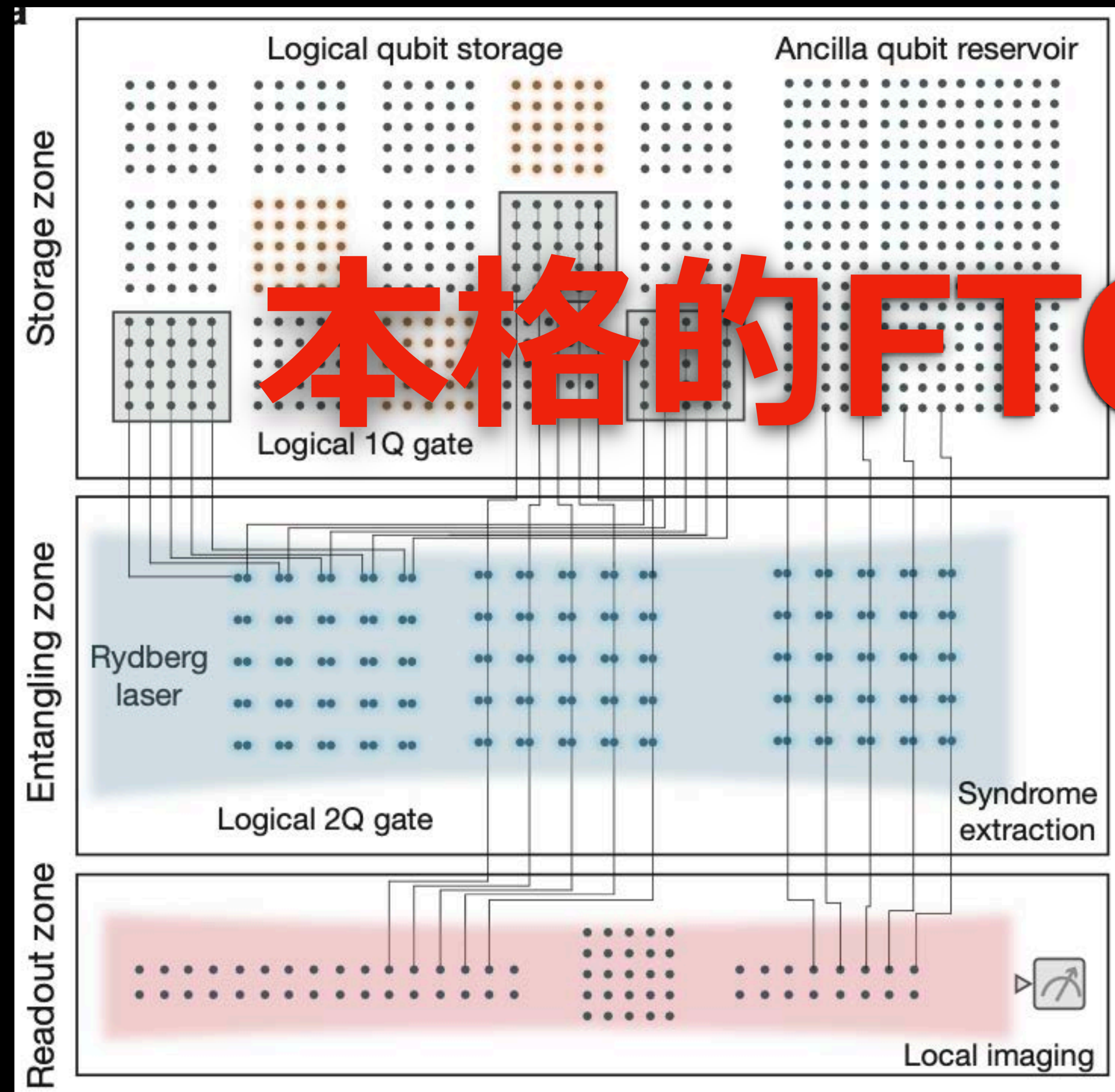


中性原子量子コンピュータ

2023年12月6日 QuEra

280量子ビットの量子コンピュータ

本格的なFTQC時代の到来



量子エラー検出

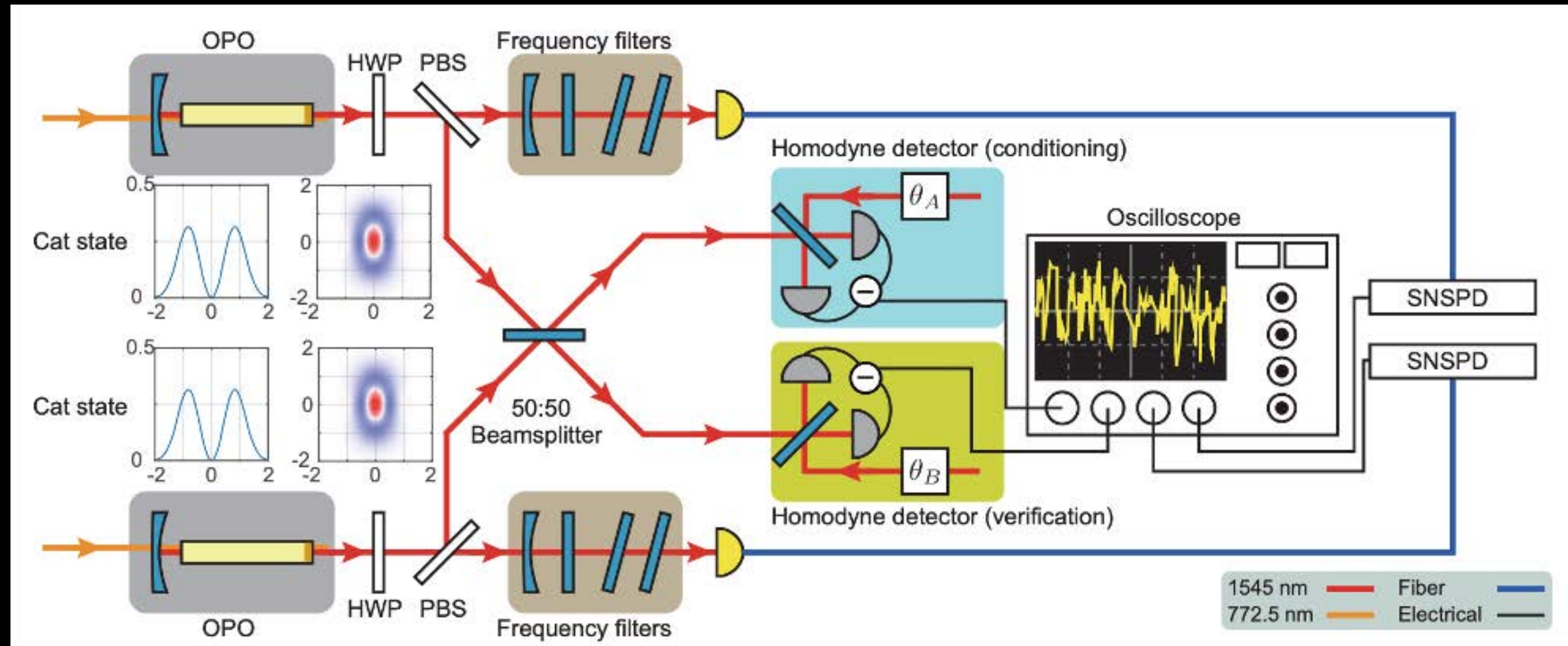
48論理量子ビットで量子アルゴリズムの実行を実現😊

同じ量子アルゴリズムを物理量子ビットで実行した場合の
パフォーマンスを上回る😊



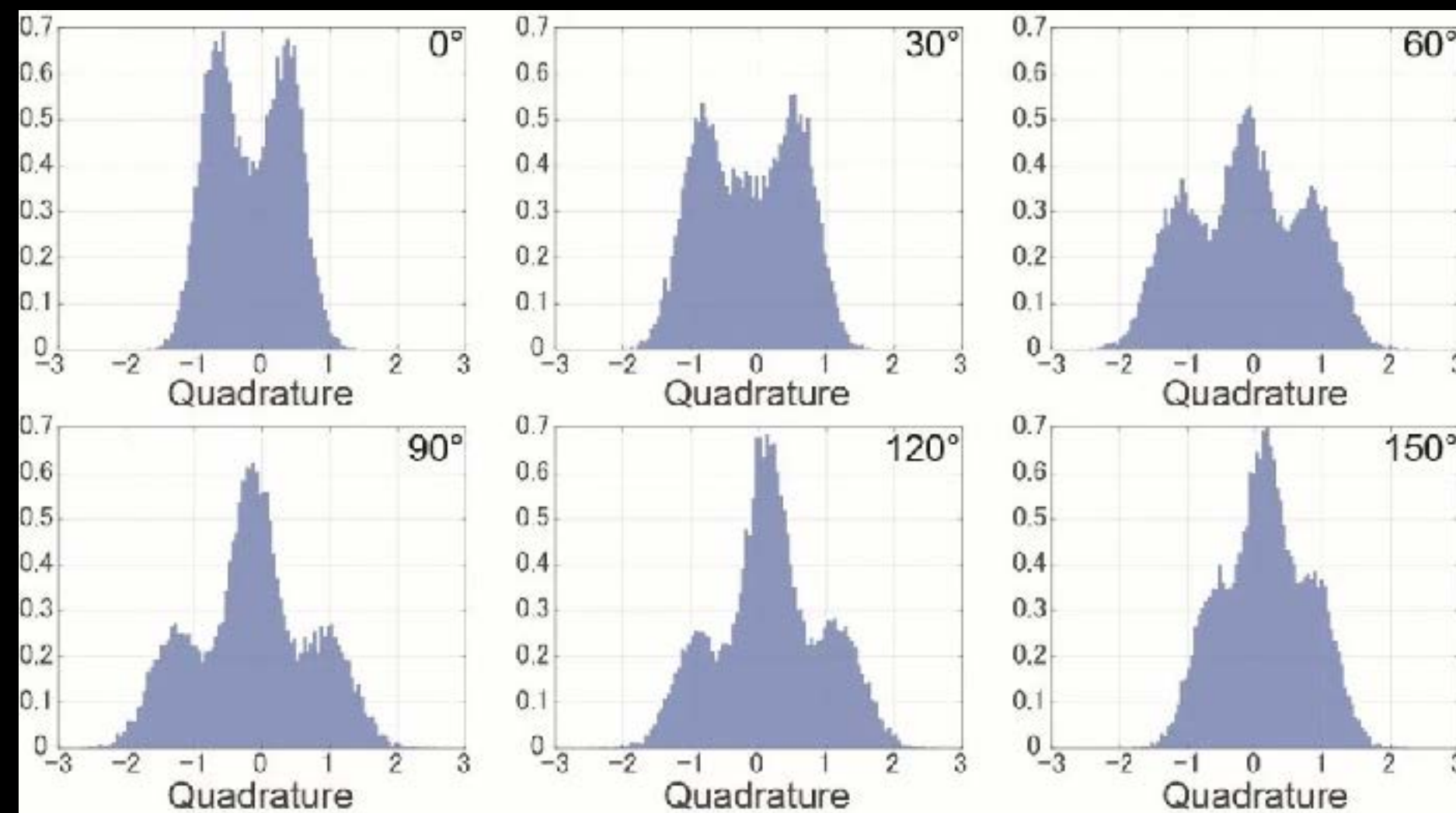
光量子コンピュータ

2024年1月19日 Science 東大, NTT, NICT



エラー訂正機能を内在する堅牢な光パルス型量子ビット: **GKP量子ビット**の実現に成功

ひとつの光パルス = 1論理量子ビット!!!



2024年9月に量子ベンチャーを創業し、ユニコーンを目指す

2. 量子コンピュータの最新動向

量子コンピュータの方式と現状

	原子	超伝導	光	イオントラップ	シリコン	ダイヤモンド	トポロジカル
量子ビット	中性原子	超伝導量子回路	光子	イオン	量子ドット、 CMOS中の電子 スピン	格子欠陥中の 電子・核スピン	マヨラナ粒子
物理量子 ビット集 積度	1225	1121	216	40	12	7	0
論理量子 ビット集 積度	48	1	1	2	0	0	0
企業	QuEra, Atom Computing, Infleqtion, Nanofiber Quantum Technologies	Google, IBM, Amazon, Rigetti Computing, Microsoft, OQC, Alibaba, 本源量子, IQM, SeeQC, QUANTWARE, Alice & Bob, Nord quantique, 富士通, NTT	XANADU, PsiQuantum, QuiX, 囃霊量子, Quandela, ORCA, NTT	IonQ, AQT, Quantinium, Infineon	Intel, Silicon Quantum Computing, HRL, Quantum Motion, Global Foundries, Equal 1, 日立, Blueqat	Quantum Brilliance, 富士通	Microsoft, NOKIA

超伝導方式

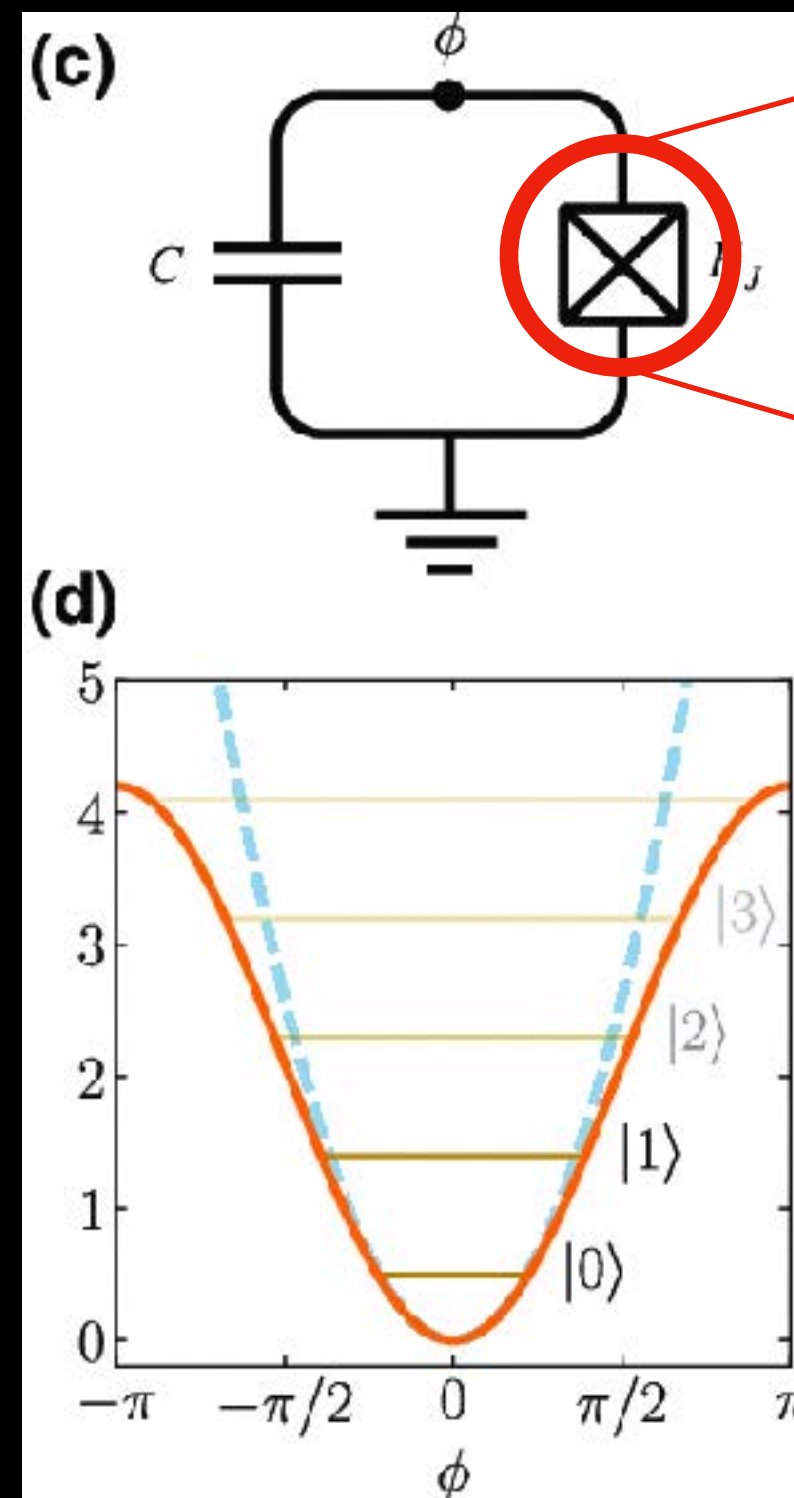
超伝導量子ビット

超伝導体（アルミニウムAlなど）から構成される小さな電気回路

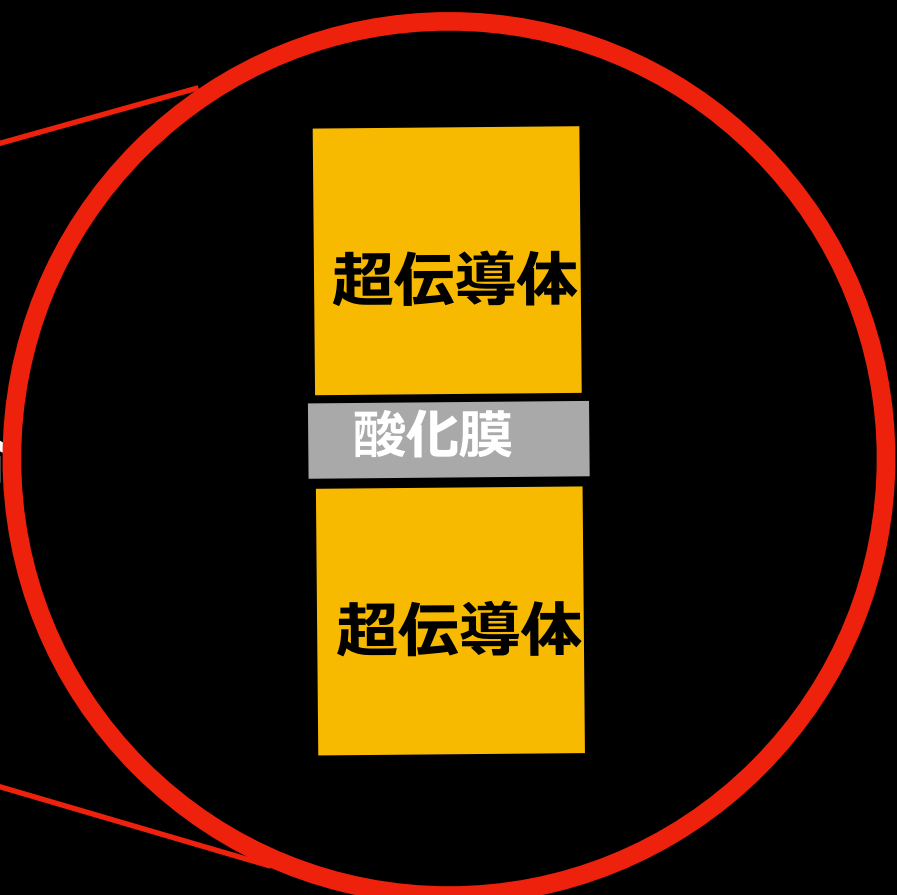
超伝導体：ある温度以下で電気抵抗がゼロになる物質

トランスモン

コンデンサ



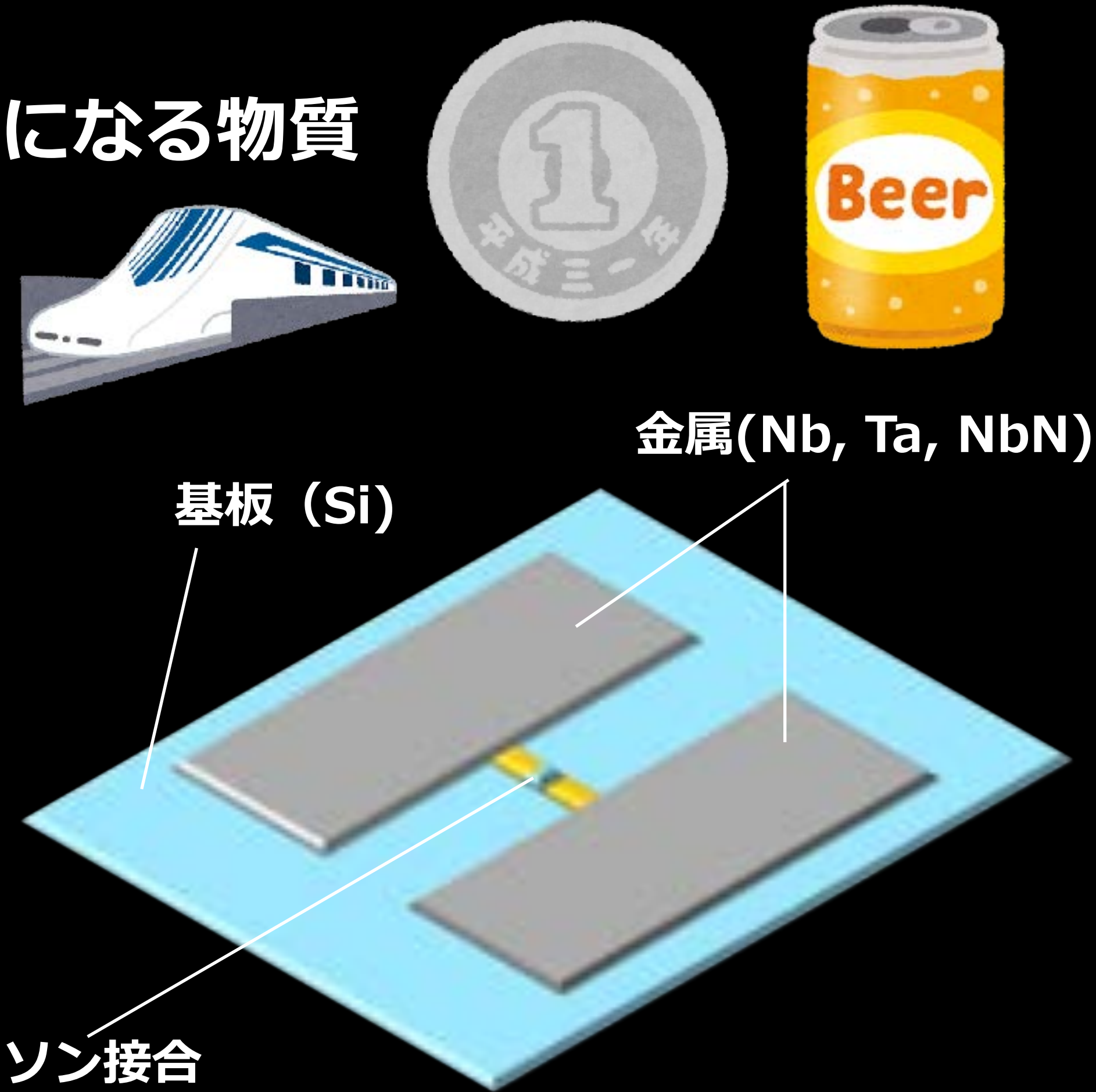
ジョセフソン接合



はやい変動電流=1
ゆっくりな変動電流=0

ジョセフソン接合
(Al/酸化膜/Al)

サイズ：1mm×1mm



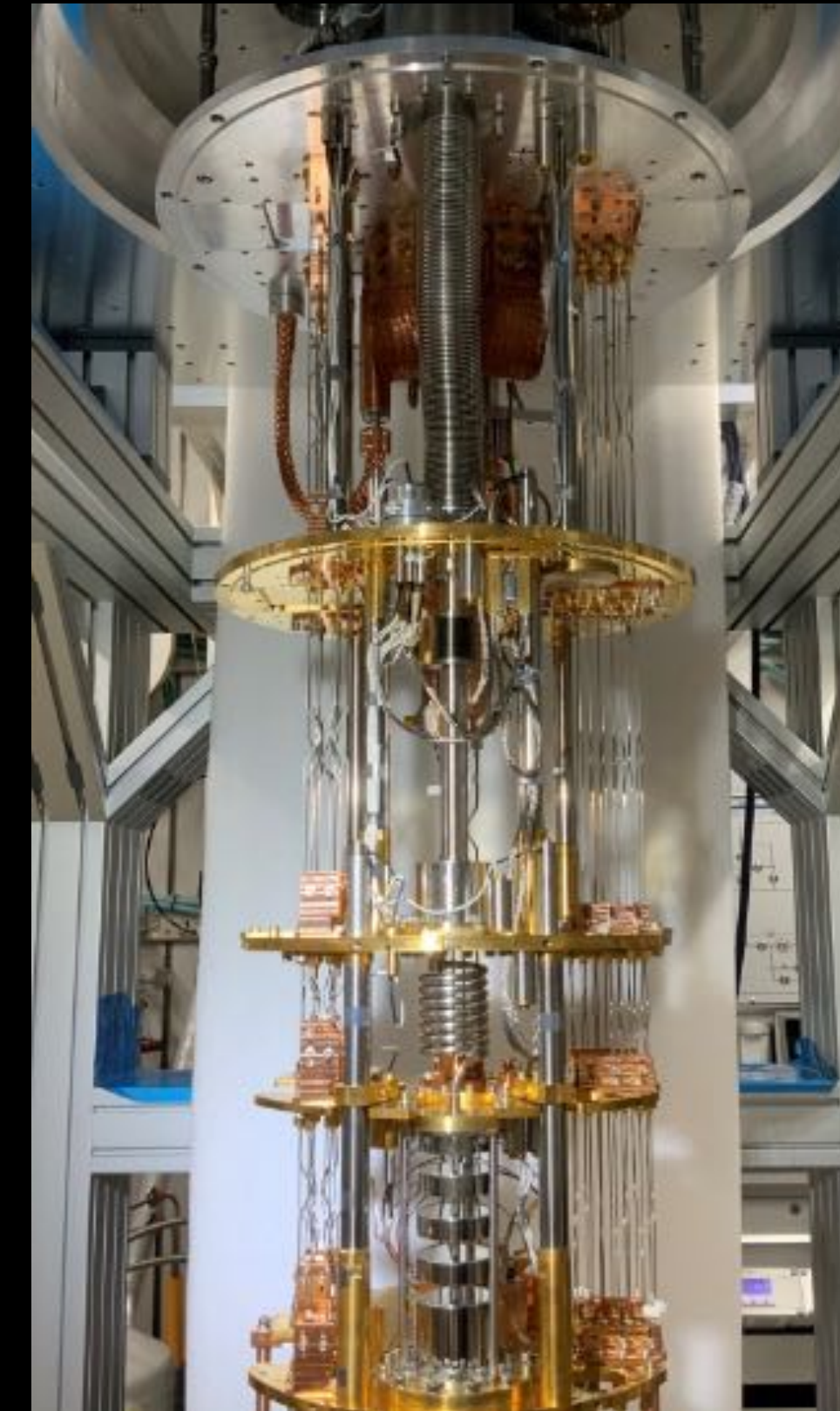
超伝導量子コンピュータ

企業 : Google ・ IBM ・ Intel ・ Rigetti ・ Microsoft ・ Amazon ・ Alibaba ・ . . .

🏆 IBM : 1121量子ビット

🥈 中国科学技術大学 176量子ビット

🥉 北京量子情報科学研究所 136量子ビット



Copyright: RIKEN Center for Quantum Computing
連携 : 阪大 ・ NICT ・ 富士通 ・ 産総研 ・ NTT

🇯🇵 理研 ・ 富士通 ・ 阪大 64量子ビット



弱点 : 10mK(ほぼ絶対温度零度-273°C)で動作
→高価で大きな冷凍機「希釈冷凍機」が必要😞





国産超伝導量子コンピュータ

初号機 **理化学研究所**

2023年3月27日

2号機 **富士通**

<https://eetimes.itmedia.co.jp/ee/articles/2312/05/news117.html>

3号機 **阪大**

64量子ビット

クラウド公開

https://www.riken.jp/pr/news/2023/20231005_1/index.html

<https://www3.nhk.or.jp/kansai-news/20231220/2000080595.html>



超伝導量子コンピュータチップ販売

オランダQUANTWARE社

デルフト工科大発ベンチャー

TENOR

64量子ビット

CONTRALTO

25量子ビット

SOPRANO

5量子ビット

独自の3Dアーキテクチャを採用

ファウンドリサービスも提供



超伝導量子コンピュータチップ販売

中国SpinQ社

<https://www.spinq.cn/>

量子コンピュータチップShaowei

25量子ビット

自社工場で製造

WebベースEDAツールTiny

超伝導量子コンピュータ制御システム

2023年4月15日に発表

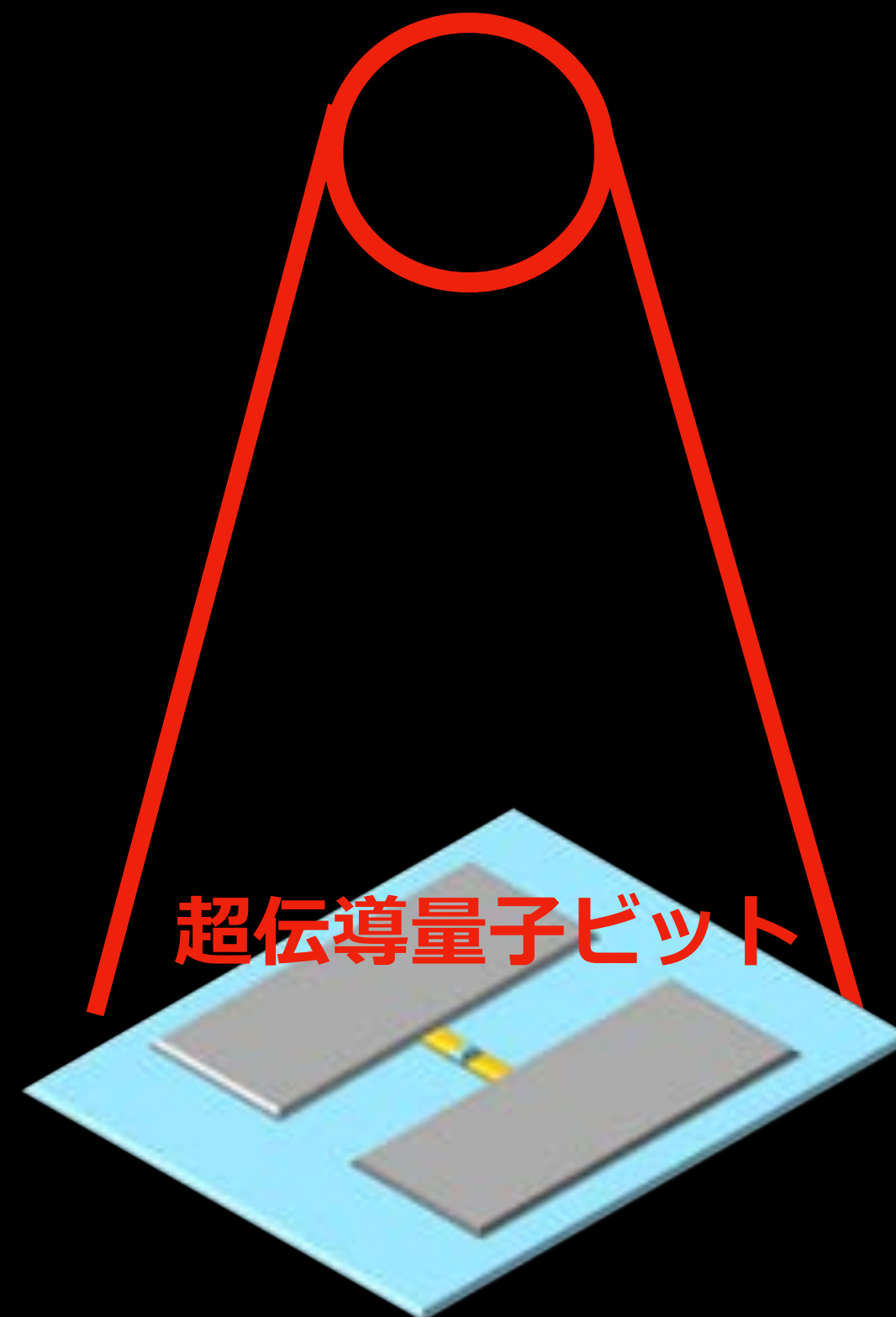
<https://www.linkedin.com/pulse/spinq-releases-20-qubit-superconducting-system-chip-eda-ma/>



IBM超伝導量子コンピュータ

2023年12月4日

1121量子ビットプロセッサCondor





IBMの改訂版ロードマップ：集積度から回路深さへ

<https://newsroom.ibm.com/2023-12-04-IBM-Debuts-Next-Generation-Quantum-Processor-IBM-Quantum-System-Two,-Extends-Roadmap-to-Advance-Era-of-Quantum-Utility>

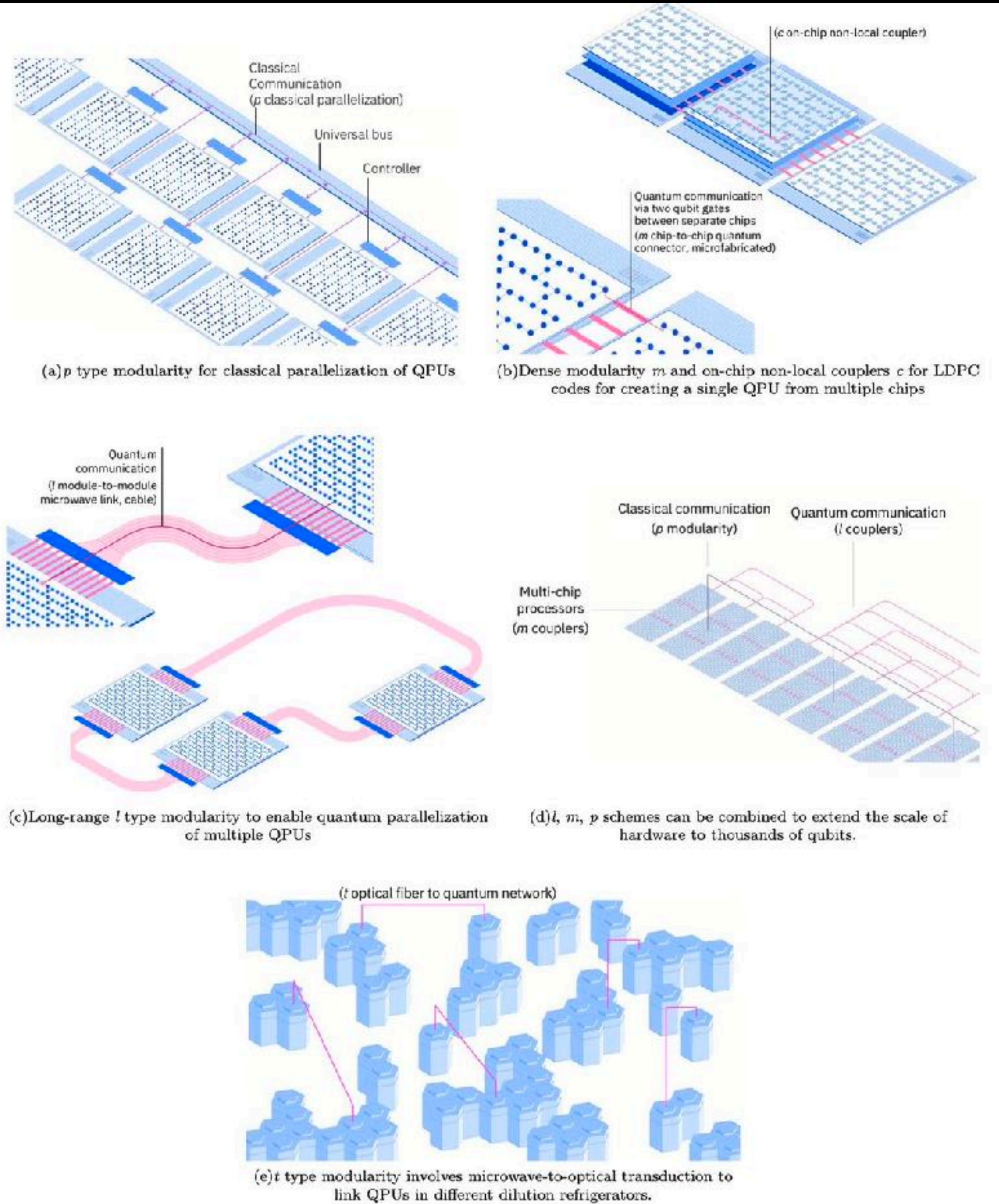
集積度は2033年まで1000~2000量子ビットで一旦打ち止め⚠

忠実度（回路深さ~高忠実度）の向上に集中→FTQCへの布石

☹️残された課題：集積プロセス・マルチチップ実装・量子CPU間の量子接続・冷凍機の大型化・クライオCMOS・部素材・・・
→装置・システムインテグレーション



IBMの100万量子ビットFTQCへ向けた青写真

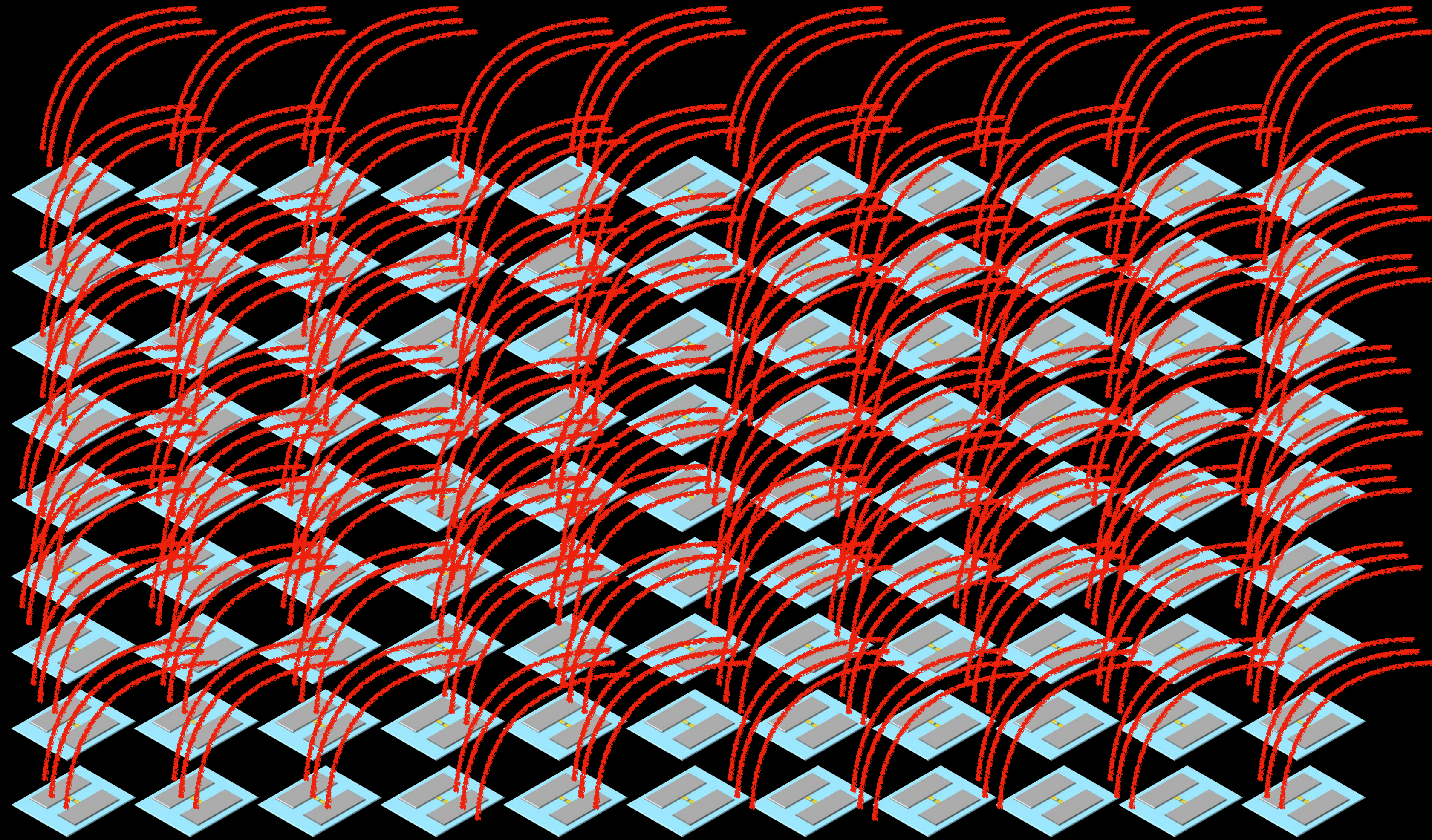


3次元積層構造
 量子チップレット
 量子チップ間高密度配線
 大型希釈冷凍機
 モジュール型希釈冷凍機

今後必要な技術：部素材・冷凍機など周辺技術

超伝導量子コンピュータ

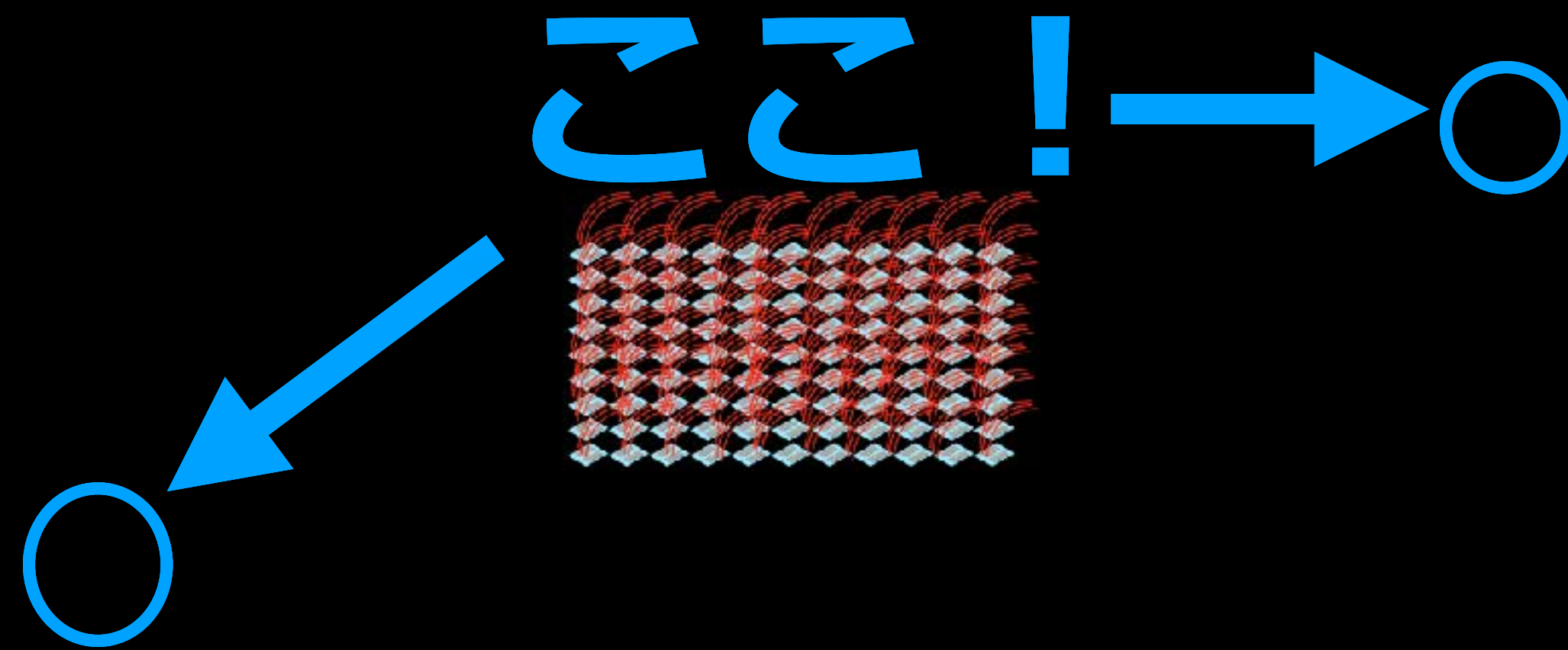
超伝導量子ビットの集積回路



配線問題 🙄

配線問題 🤔

超伝導量子コンピュータはどこ？



大型・モジュール型希釈冷凍機

巨大モジュール型冷凍器(IBM)

巨大モジュール型冷凍器(Bluefors)

<https://www.ibm.com/blogs/think/jp-ja/ibm-quantum-roadmap/>

<https://www.electronicweeky.com/news/business/ibm-pan-to-build-100000-qubit-quantum-computer-2023-05/>

<https://bluefors.com/blog/introducing-kide-large-scale-cryogenic-platform/>

巨大冷凍機(Maybell quantum)

巨大冷凍(Google)

超巨大冷凍器(Linde&BlueFors)

<https://www.maybellquantum.com/>

<https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/00001/05594/>

<https://chemengonline.com/linde-and-bluefors-jointly-develop-cryogenic-cooling-solutions-for-large-scale-quantum-computing-technology/>



Blueforsの巨大希釈冷凍機 **KIDE**

1000量子ビット対応

9台のパルスチューブ冷凍機

冷凍能力3mW@100mK [通常0.03mW@20mK]

フレキシブル低温ケーブル

冷凍機内配線：セミリジッド同軸ケーブル→大規模化に伴い熱流入問題と空間不足問題😞

フレキシブル低温ケーブル：高密度伝送・低熱伝導・低価格・信号処理回路の集積化😊

Cri/oFlex® 3

Polyimide & Silver (Ag) or NbTi

Flexcable

Flexlines



Delft computing



IBM



Maybell quantum

<https://delft-circuits.com/product-overview/cf3/>

<https://japan.zdnet.com/article/35195845/>

<https://www.maybellquantum.com/>

クライオCMOSとマイクロ波信号伝送

クライオCMOS制御回路

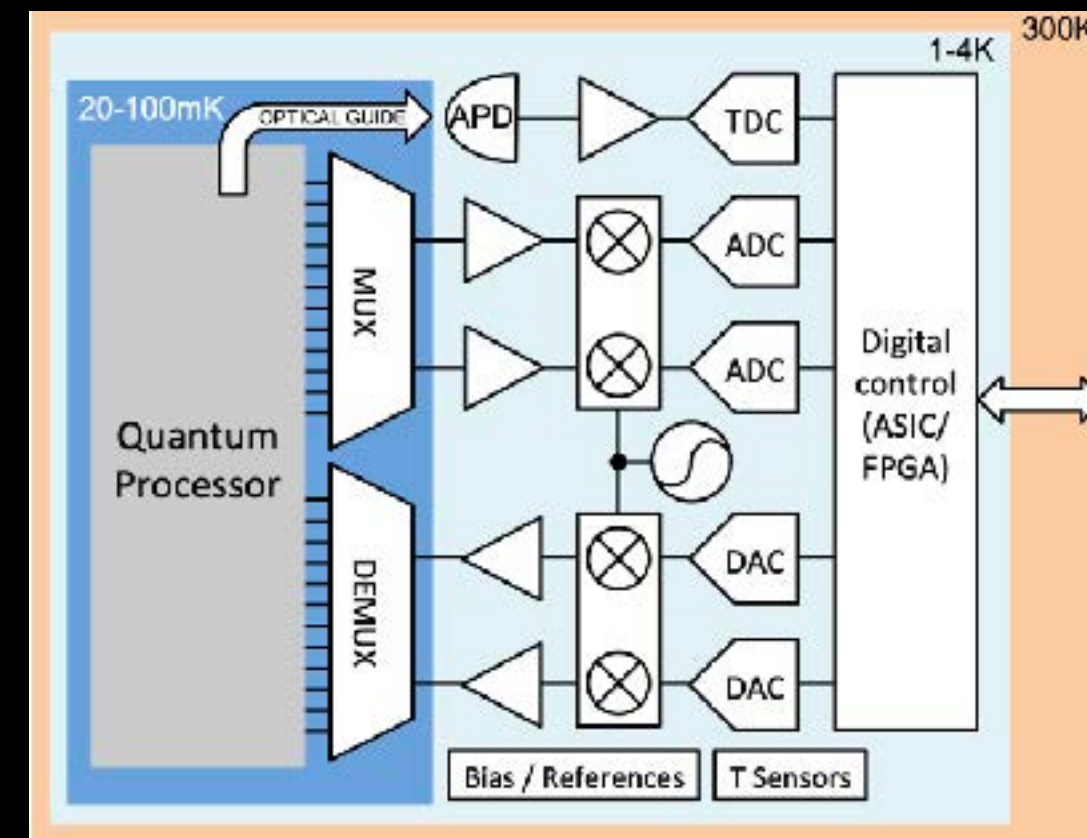
室温から低温ステージへの信号伝送

低温で動作するデジアナ混載CMOS集積回路



Horse Ridge II

Intel



セミリジッド同軸ケーブル

フラットケーブル(高密度伝送)

光ファイバー

無線??



<https://newsroom.intel.com/news/intel-qutech-unveil-details-first-cryogenic-quantum-computing-control-chip-horse-ridge/>

https://indico.physics.lbl.gov/event/837/attachments/1780/2309/Edoardo_Charbon_Berkeley19_released-compressed.pdf

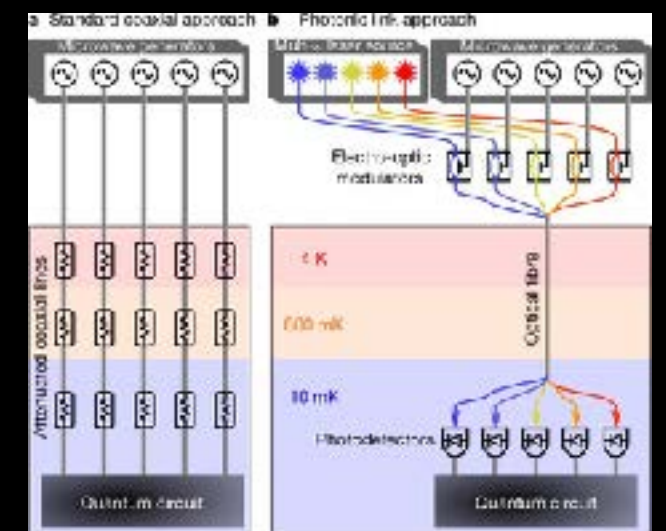
クライオCMOS制御回路ASIC(22nm FinFET)

2量子ビットの制御に成功

Microsoft、MIT、IBM、Google、Rigetti、Equal1、産総研、日立、Nanobridge Semiconductor、京都工繊大

超伝導制御回路(SFQ) : SeeQC、NIST、Wisconsin大、産総研、横国大、名大

<https://www.maybellquantum.com/>

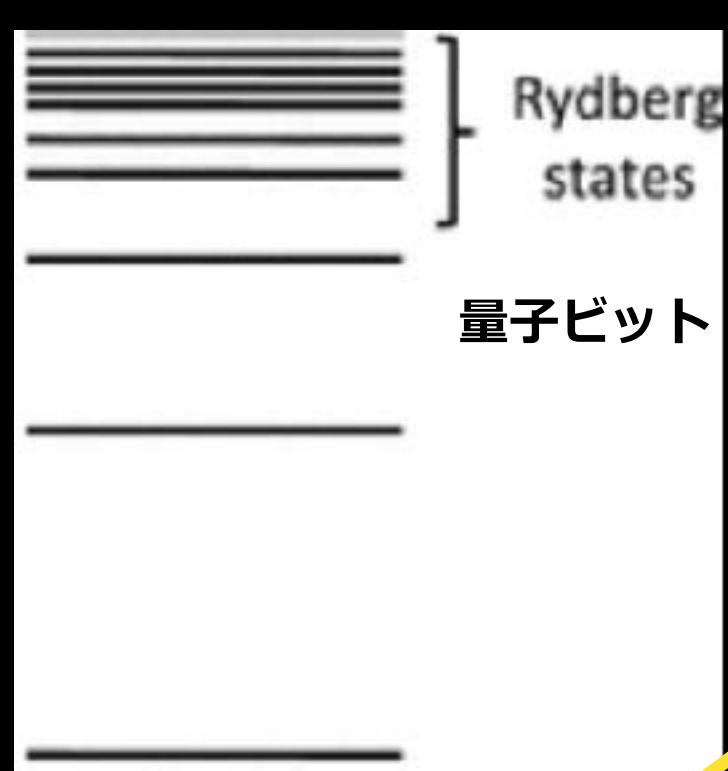


<https://www.nature.com/articles/s41586-021-03268-x>

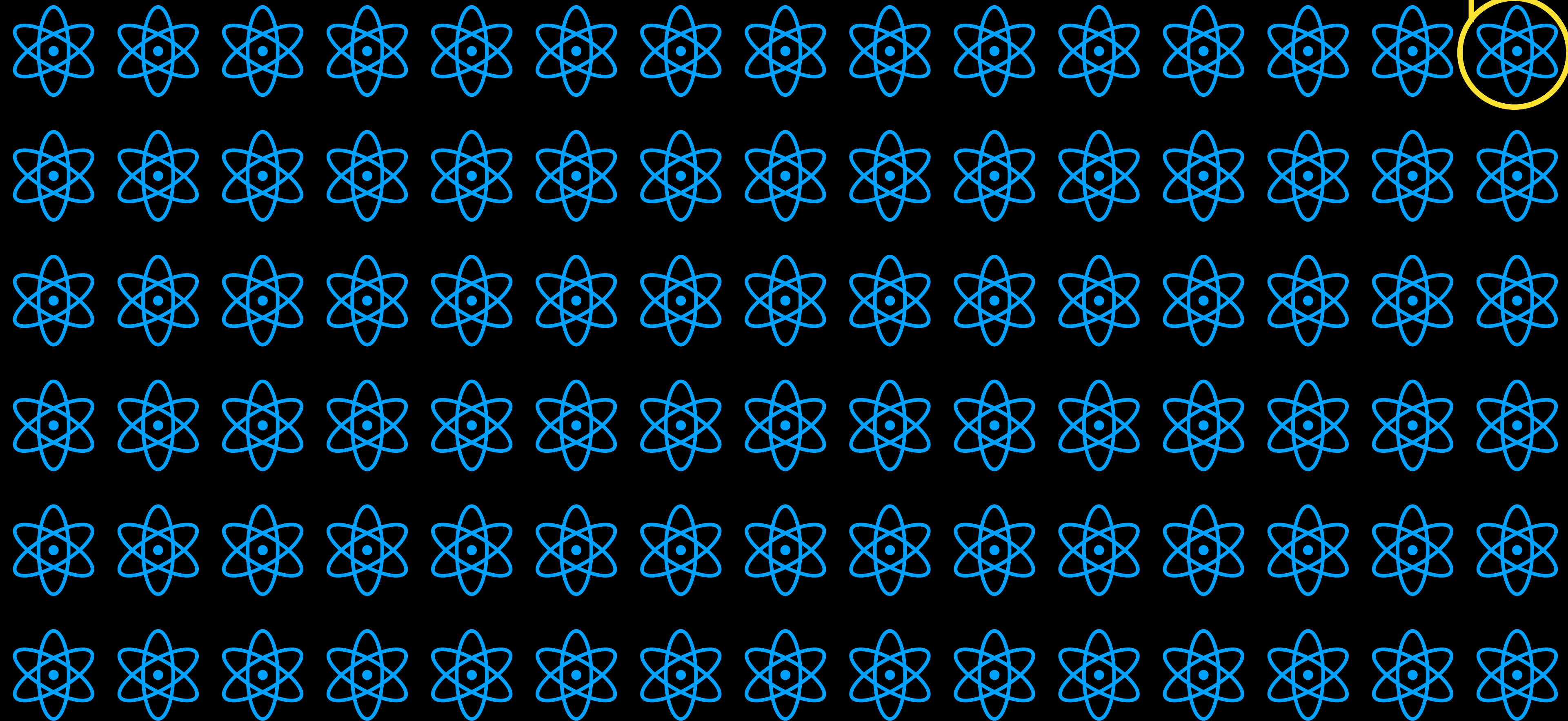
冷却原子方式

中性原子量子コンピュータ

エネルギー



光ピンセット：レーザーを用いてたくさんの原子を真空中に捕獲・移動する技術





中性原子量子コンピュータ

2023年10月24日 **Atom Computing**

1225量子ビットの量子コンピュータを実現

実機公開は2024年

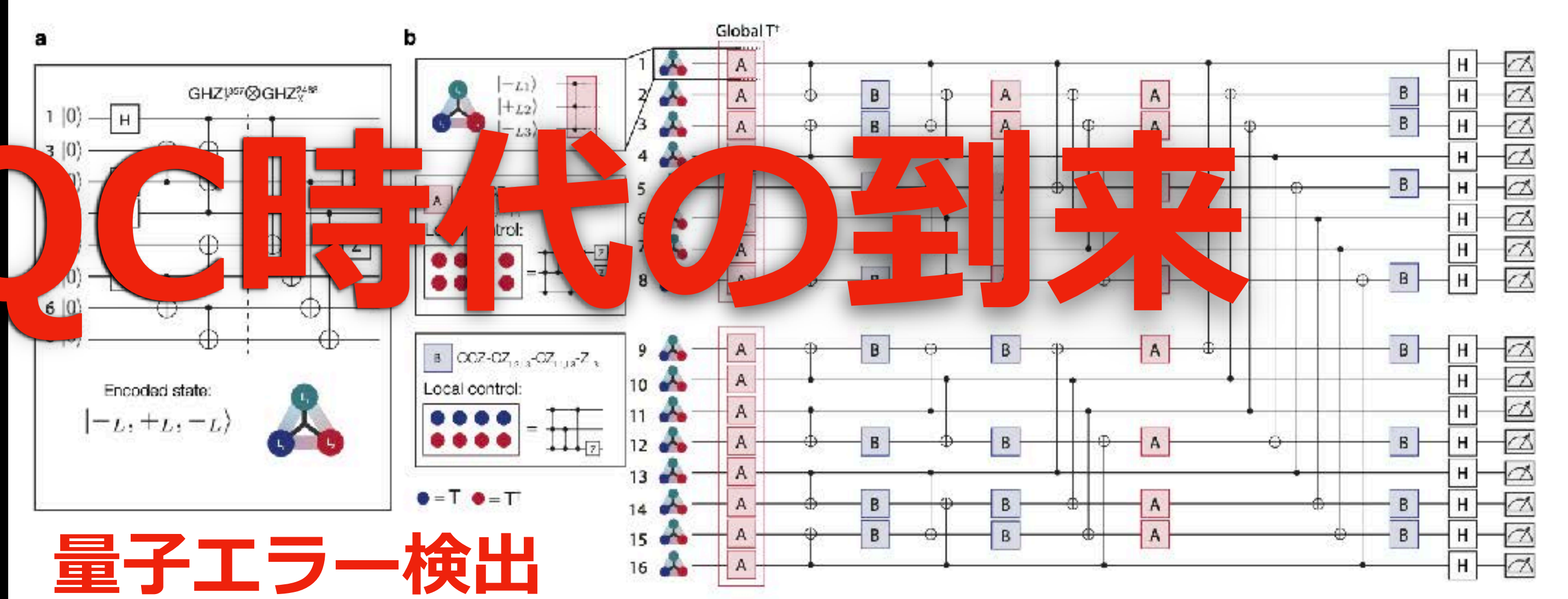
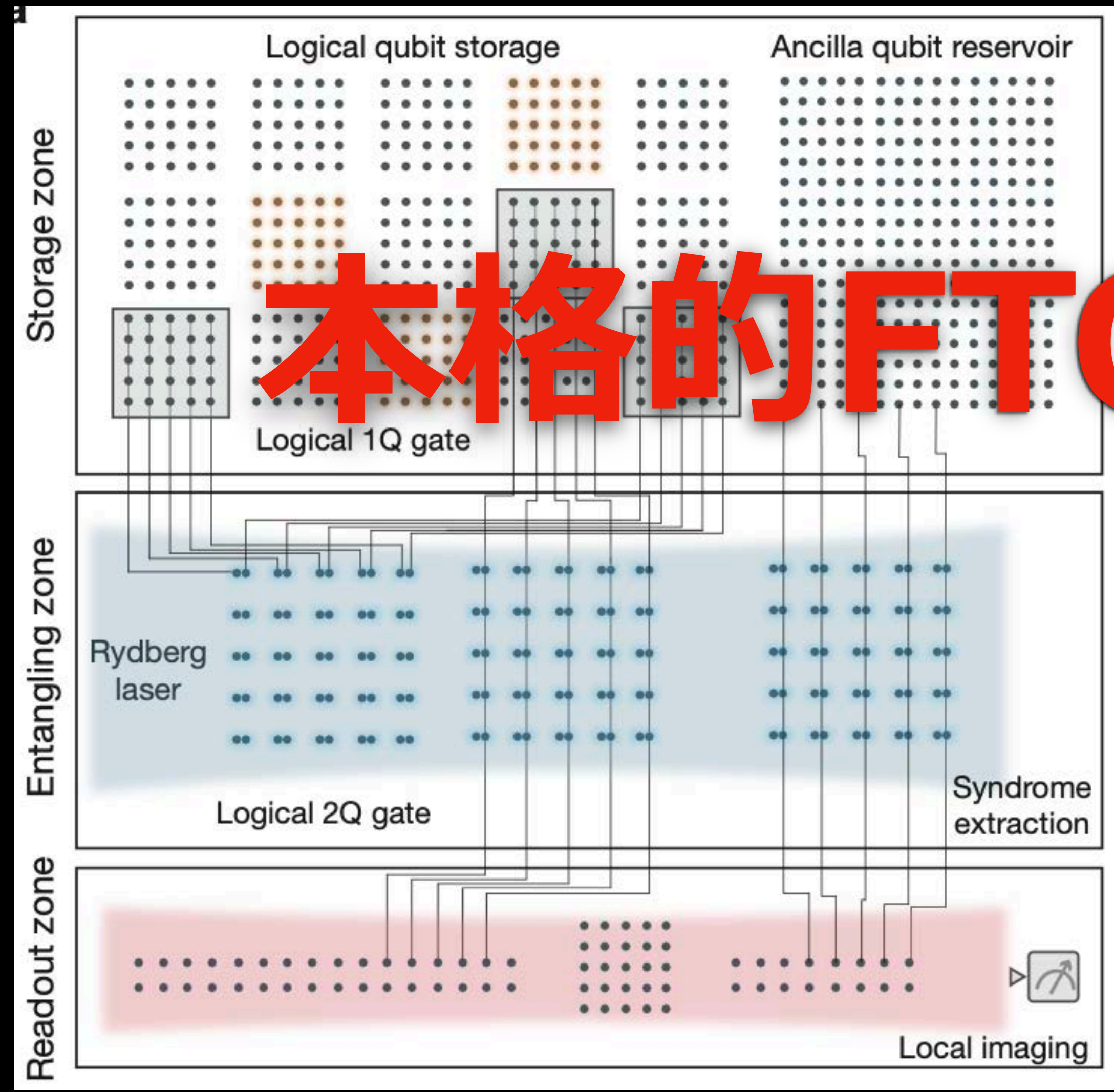


中性原子量子コンピュータ

2023年12月6日 QuEra

280量子ビットの量子コンピュータ

本格的なFTQC時代の到来



量子エラー検出

48論理量子ビットで量子アルゴリズムの実行を実現😊

同じ量子アルゴリズムを物理量子ビットで実行した場合の
パフォーマンスを上回る😊

下町量子コンピュータ

日本中小企業の匠の技

超伝導量子コンピュータの部品：日本中小企業の匠の技

- 量子コンピュータの産業化には、極低温冷凍技術等、古典コンピュータとは全く異なる部品技術が必要となり、サプライチェーンの構造転換が必要。
- 日本に強みのあるハードウェア技術が数多く存在し、海外企業・研究機関も注目。



①低温動作低雑音増幅器 (アンプ)
 10K以下の低温環境で高周波信号を増幅する部品
 Low Noise Factory(スウェーデン)[写真]



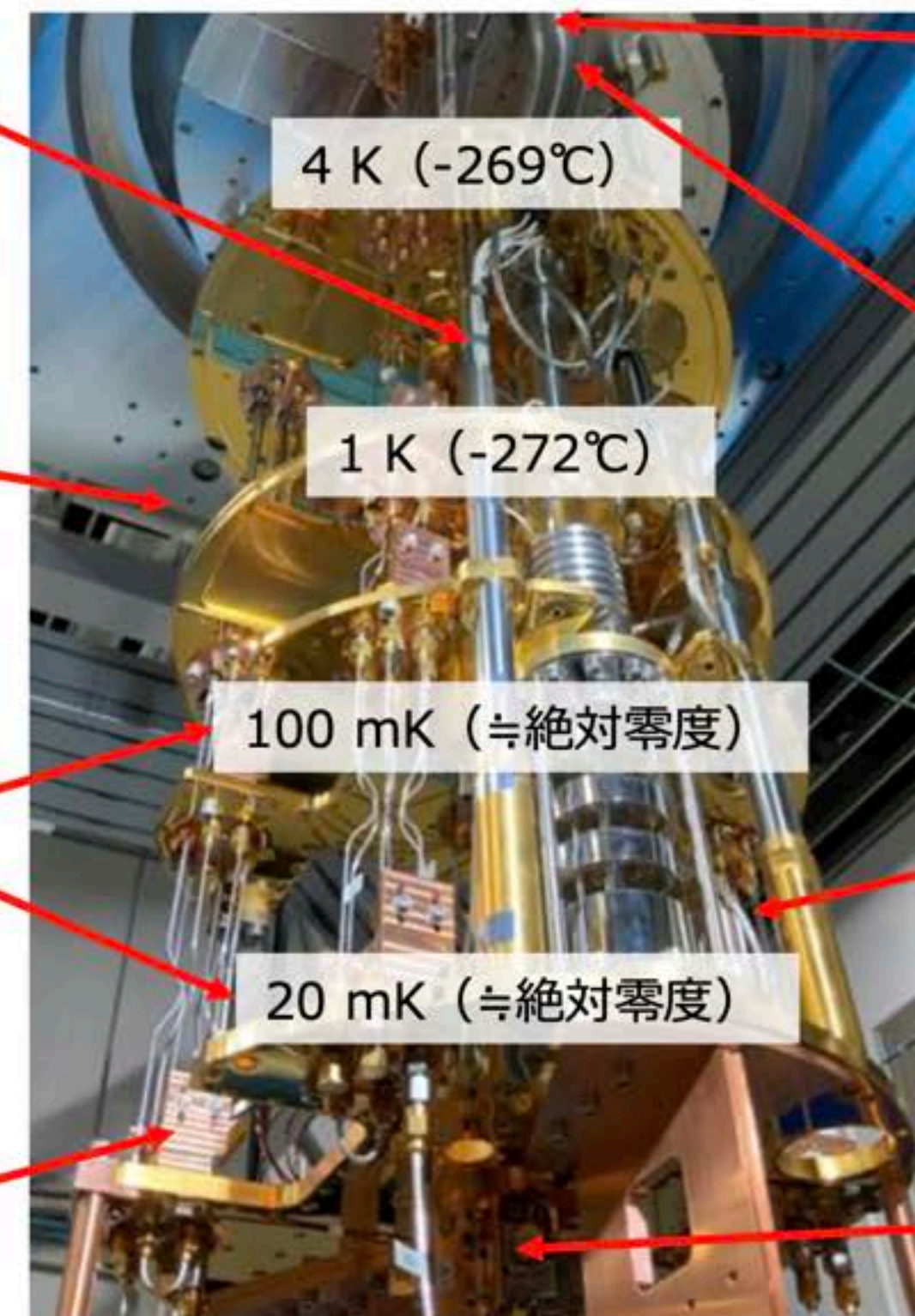
②高周波コネクタ
 量子ビットの制御、出力信号を伝達する信号線を繋ぐ部品
 川島製作所 (日本) [写真]



③希釈冷凍機
 ヘリウムガスとその気化熱で絶対零度付近の極低温まで冷却する装置
 Bluefors (フィンランド)、Oxford Instruments (UK)

④低温高周波部品
 大規模化の際に必要な低温環境下で量子ビット制御のための高周波信号を生成・検出するための部品
 Semiwise (UK)

超伝導回路のサプライチェーン



※赤字は、日本企業 写真：産業技術総合研究所 提供

⑤制御装置・ソフトウェア
 量子ビットを制御するソフトとその情報に基づいた命令を送信する制御装置
 Keysight Tech(アメリカ)[写真]、QuEL (日本)



⑥高周波入力線
 量子ビットの制御、信号読み取りを行うマイクロ波を伝える信号線
 KEYCOM (日本) 潤工社(日本)[写真]



⑦超伝導同軸ケーブル
 極低温下でマイクロ波の信号を伝える信号線
 コアックス (日本) [写真]



⑧チップ実装用ソケット
 量子チップの配線と信号線を低温環境下でも良好に接続する部品
 精研 (日本) [写真]

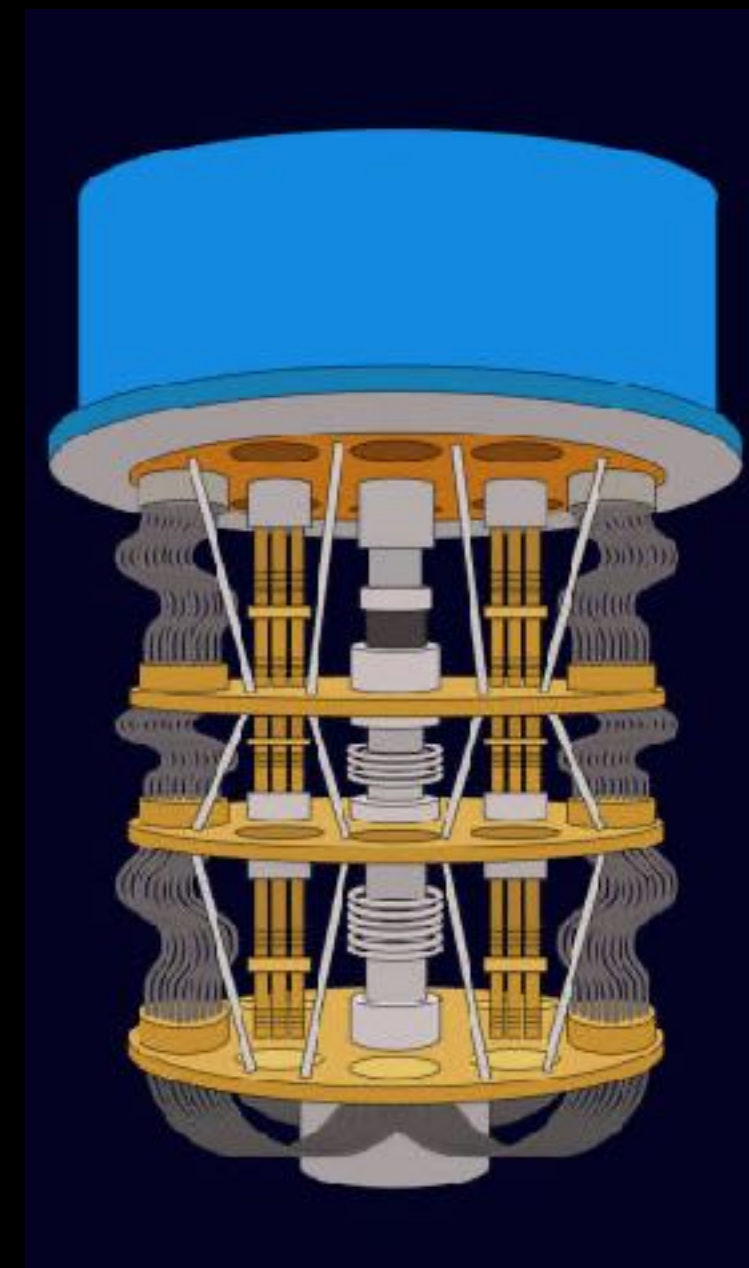




極低温用超伝導同軸ケーブル：コアックス社

<http://www.coax.co.jp/>

コアックス社(横浜)の超伝導同軸ケーブルは**世界シェア100%**



引用：<https://active.nikkeibp.co.jp/atcl/act/19/00443/022200004/>

匠の技：

脆い超伝導材料(NbTi)を均質な線材に加工する「引き抜き加工技術」

まとめ

● 量子コンピュータのR&D・ビジネストレンド

2024年度はFTQC元年→トレンドはNISQからFTQCへ

大企業だけでなくスタートアップが牽引



● 課題が山積み🤔🤔🤔🤔🤔🤔🤔

課題：配線・冷凍機・製造・小型化・低電力化・高速化・・・

総力戦：物理×化学×機械×情報×電子×電気×通信×材料×・・・



● 日本中小企業の匠の技

部品・素材は日本中小企業の匠の技🇯🇵

日本の強みを活かせる！→ビジネスチャンス

