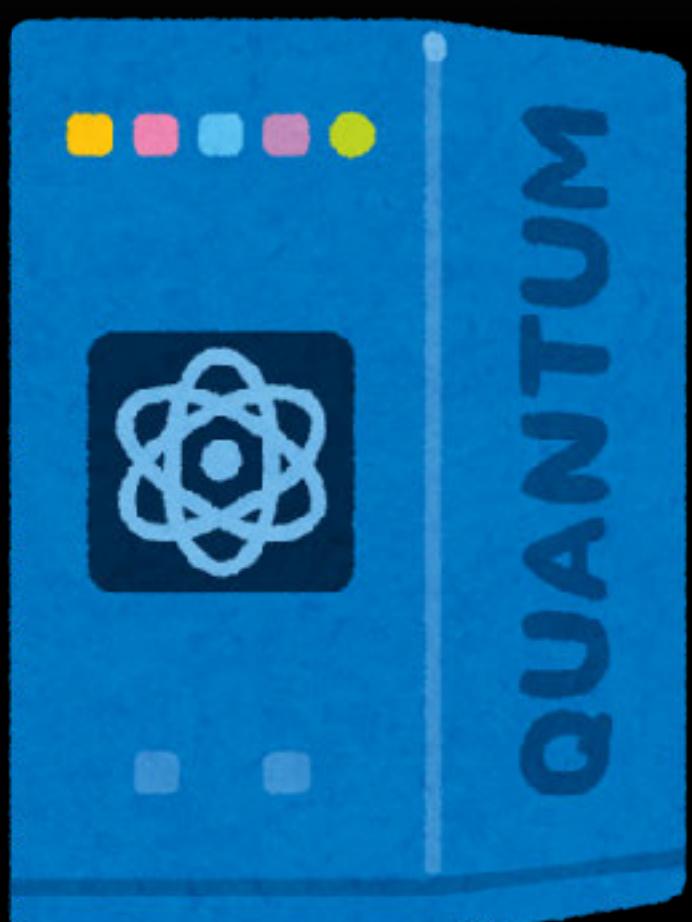
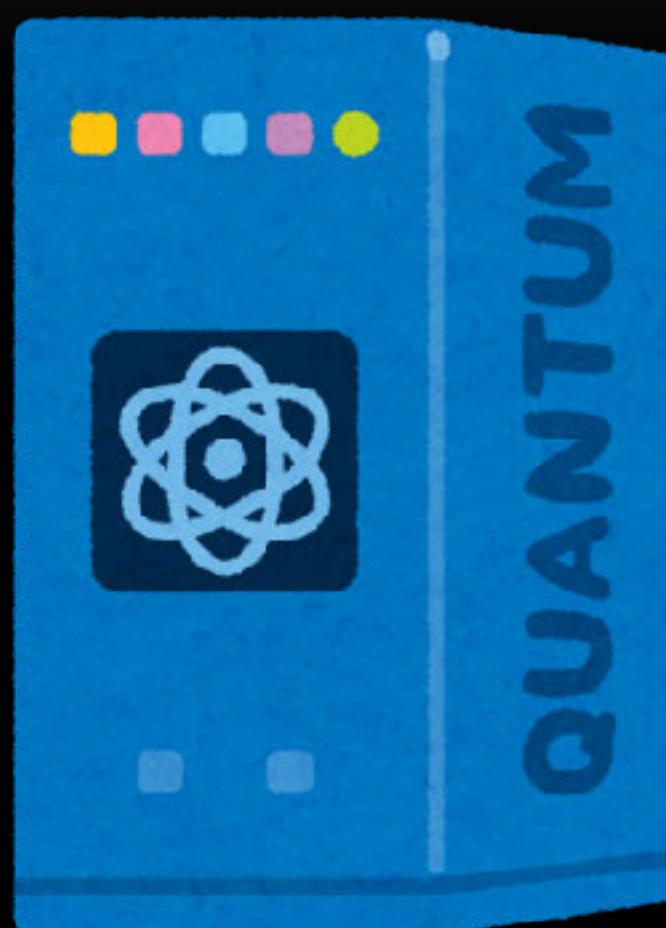


# 量子コンピュータの基礎と最新動向

誤り耐性汎用量子コンピュータ時代の幕開け

法政大学 情報科学部

川畠史郎





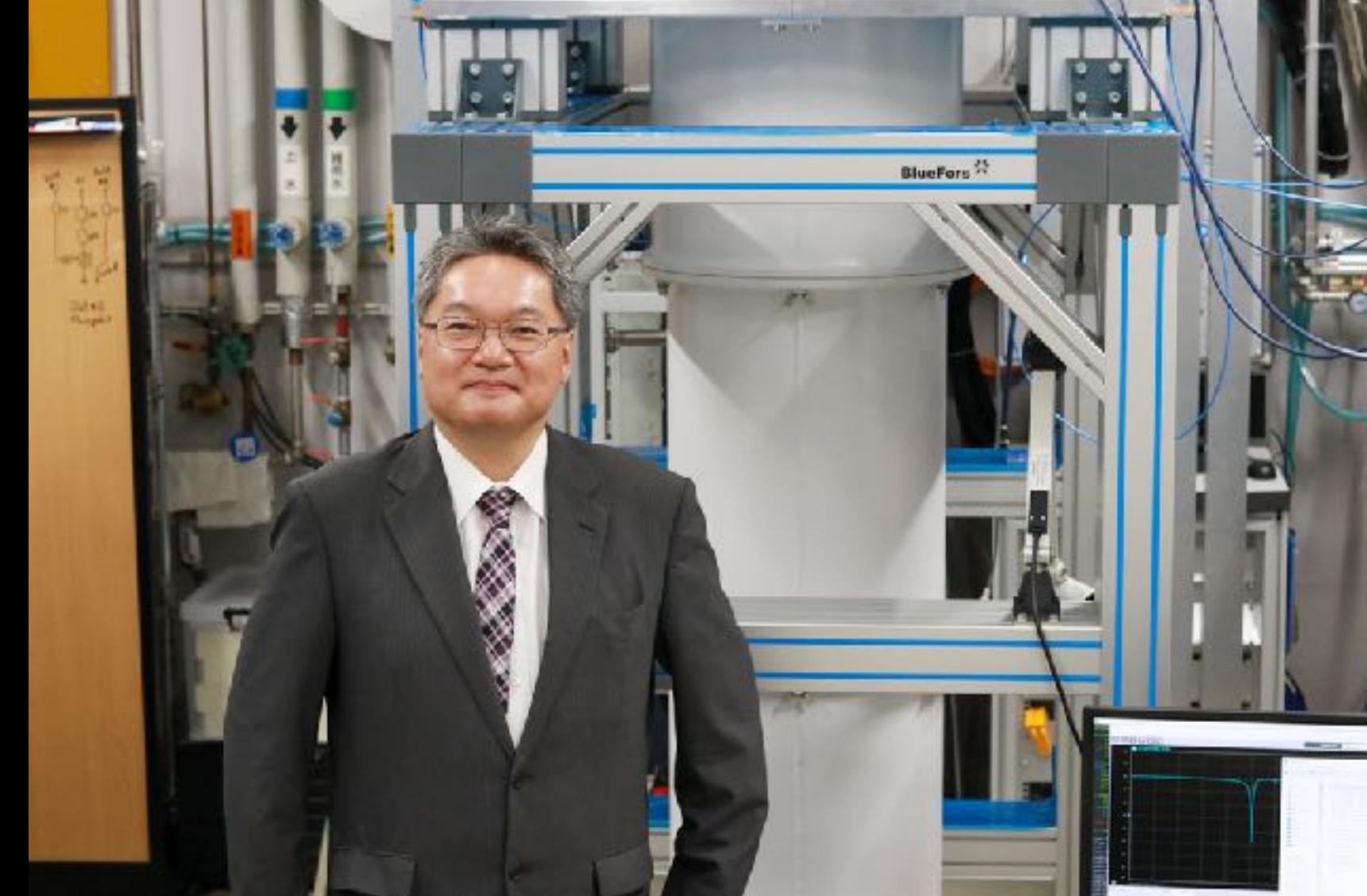
# 自己紹介

名前: 川畠史郎

所属: 法政大学 情報科学部

役職: 教授

専門: 物理学×情報科学×電子工学



- ・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
- ・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
- ・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 特定フェロー
- ・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
- ・JST さきがけ「物質と情報の量子協奏」アドバイザー
- ・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(NISQとFTQC)
2. 量子コンピュータのトレンド
3. 下町量子コンピュータ：中小企業の匠の技

# NISQとFTQC

現実の系においてはエラーが発生→量子エラー訂正の実装

→誤り耐性汎用量子コンピュータ(Fault Tolerant Quantum Computer: FTQC)

現在～近未来の量子コンピュータ=NISQ (Noisy Intermediate Scale Quantum device)

エラー訂正機能を搭載していないノイジーな中規模量子コンピュータ

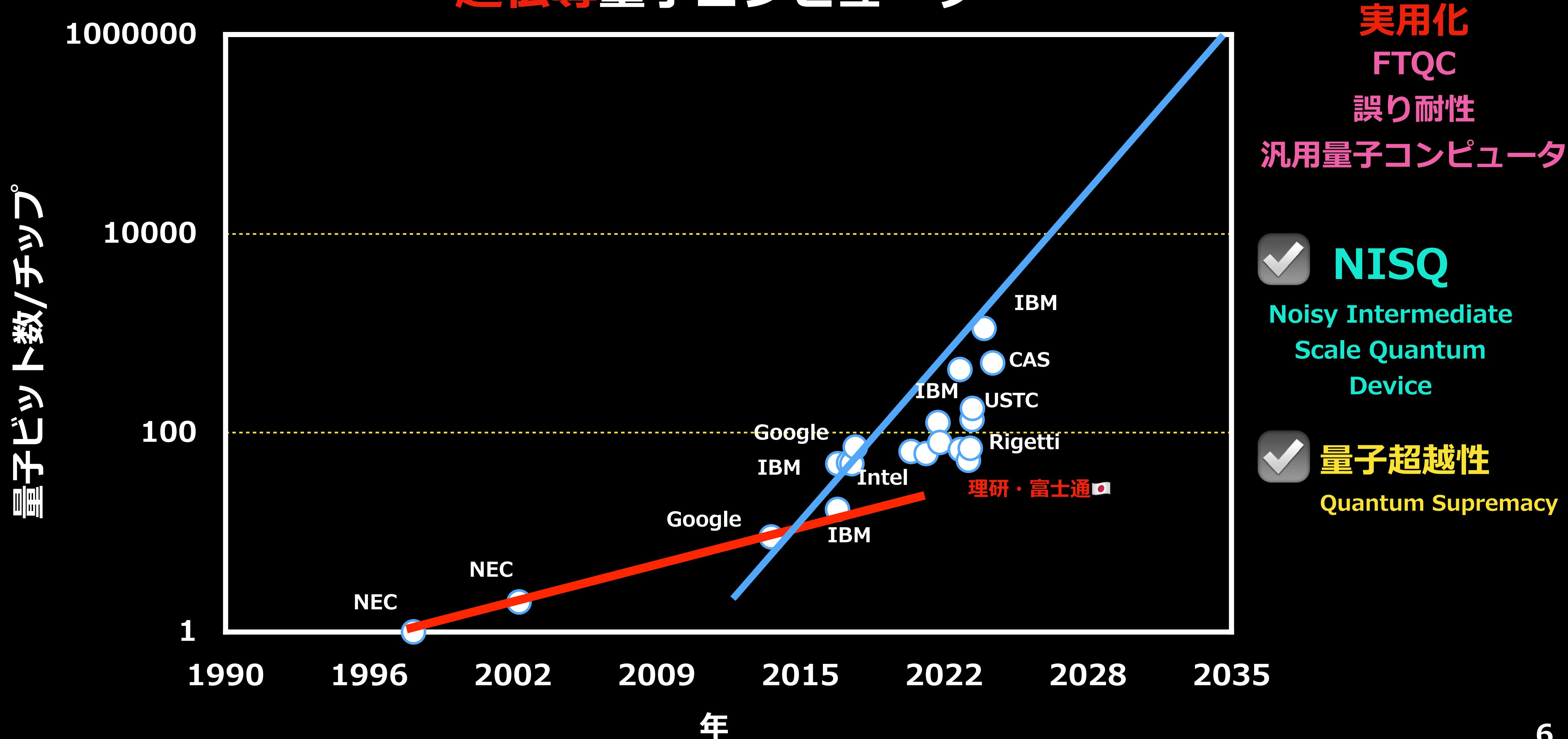
	NISQ	FTQC
物理量子ビット数	10～数1000	>10000
忠実度	99.9%以下	99.9%以上
量子エラー訂正	✗ 😞	○ 😊
アルゴリズム	量子-古典ハイブリッドアルゴリズム	量子アルゴリズム
量子加速	不明 😞	有 😊 ただし100個程度 😞

# 1.量子コンピュータのトレンド

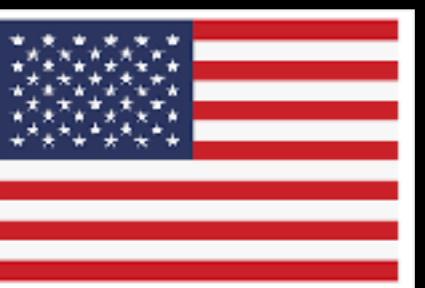
NISQからFTQCへ

# 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



# 超伝導量子コンピュータオリンピック

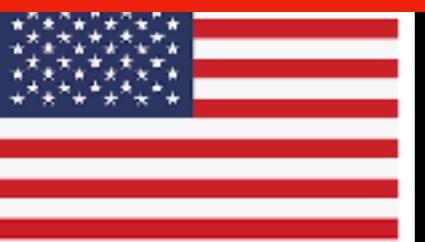


IBM 1121量子ビット



中国科学院物理研究所 504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



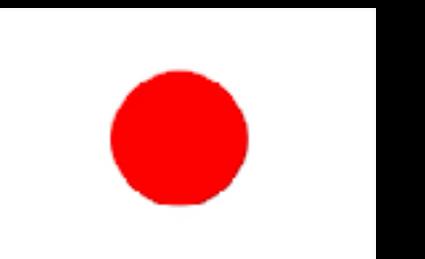
Google 70量子ビット



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 64量子ビット

# FTQCの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

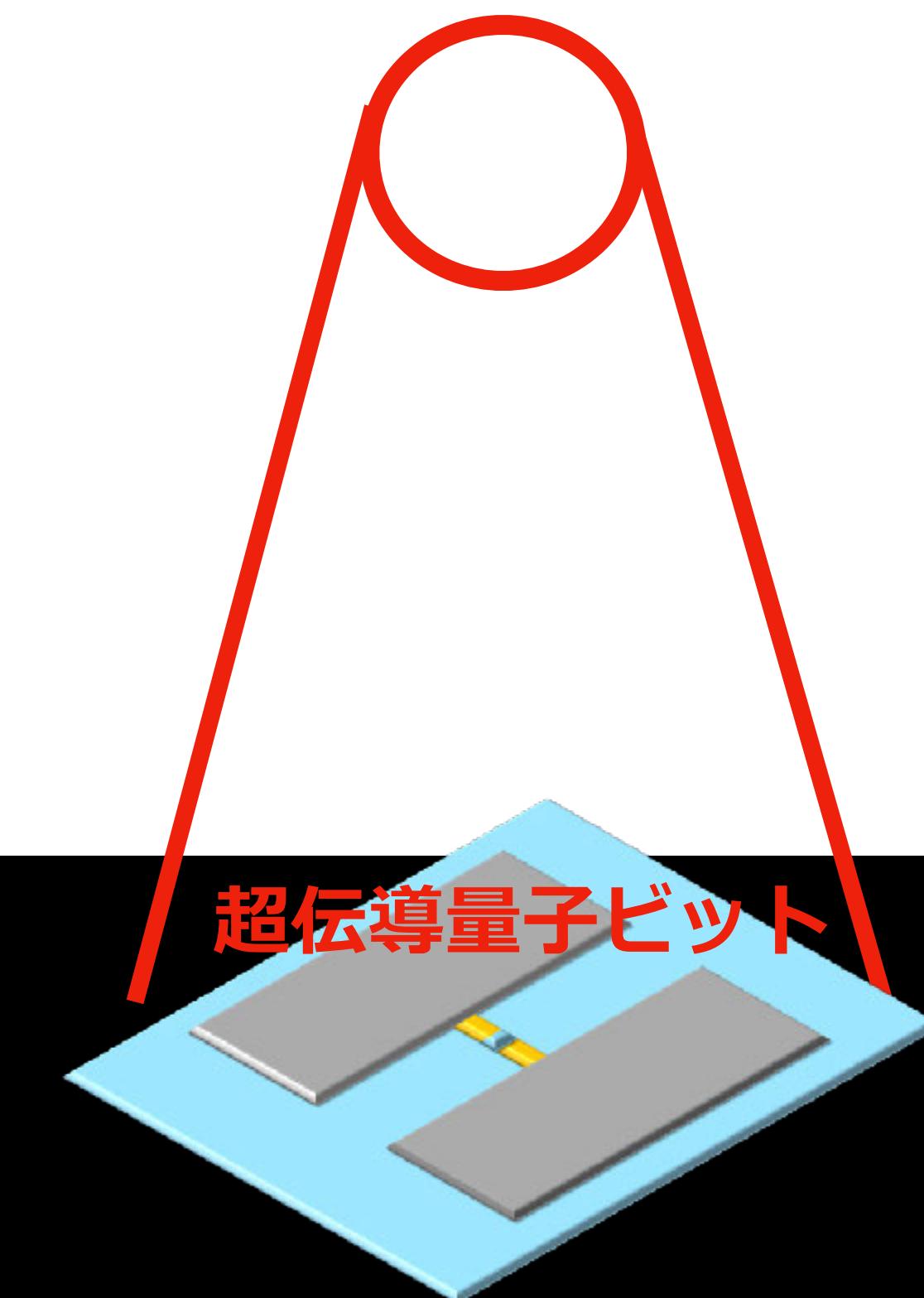




# IBM超伝導量子コンピュータ

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

# 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)

## 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

分子研・早大

世界の中で、日本が高い技術力・競争力を持っている

## 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/>

理研

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

東大・理研

企業：XANADU, PsiQuantum, QuiX, 図靈量子, Quandela, ORCA, NTT

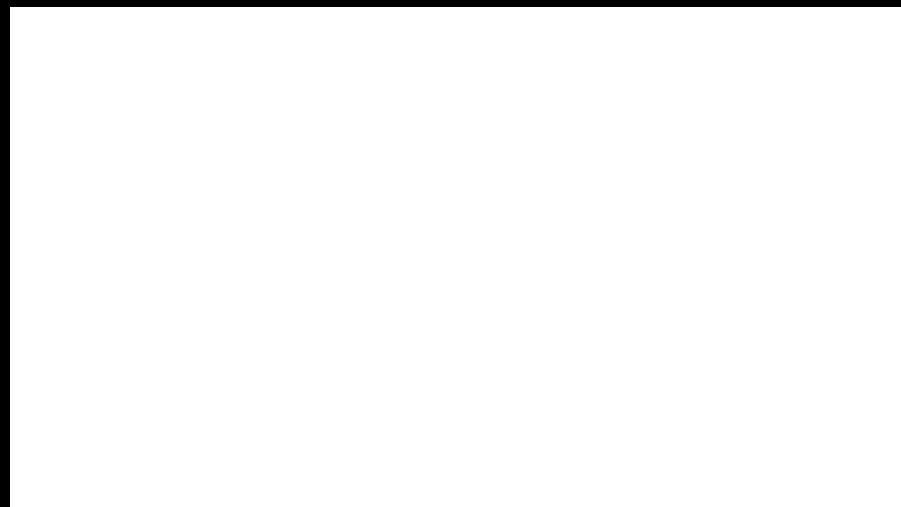
# FTQCの芽生え

## 2021~

# 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) 201

スイスETH

表面符号(17量子ビット)



超伝導

中国USTC

表面符号(17量子ビット)



超伝導

Google

## (不完全な)1~2論理量子ビットの実現

表面符号(49量子ビット)



超伝導

Nature 614 (2023) 676

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  
2023年末～



# 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 😊

配線・冷凍機不要！ 😊

繰り返し量子エラー訂正の実装

課題：動作速度の高速化

アルゴリズムの実行を実現 😊

同じ重ナ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, 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



# 超伝導量子コンピュータ

2024年5月16日 CAS、USTC、本源量子

2論理量子ビット(4物理量子ビット×2)を用いたユニバーサル  
量子論理ゲートの実現



表面符号 (符号距離=2)



悟空プロセッサ(62量子ビット)

トランズモン

損益分岐点を超えを達成！

# 量子コンピュータハードウェア

# 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	1180	1121	216	56	12	7	0
論理量子 ビット集 積度	“48”	“1”	“1”	“4”	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, NEC, NTT	XANADU, PsiQuantum, QuiX, 図靈量子, Quandela, ORCA, NTT	IonQ, AQT, Quantinuum, 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 · · ·



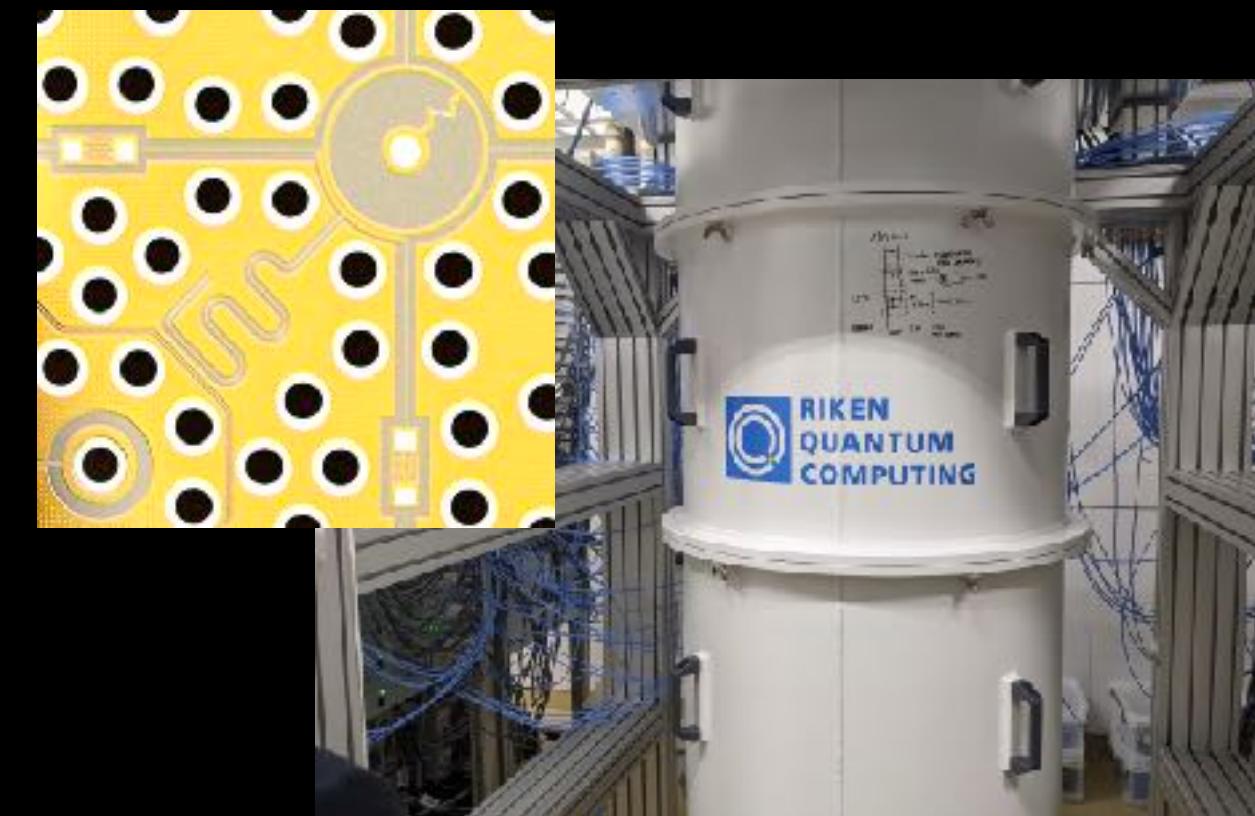
IBM : 1121量子ビット



中国科学院物理研究所 504量子ビット



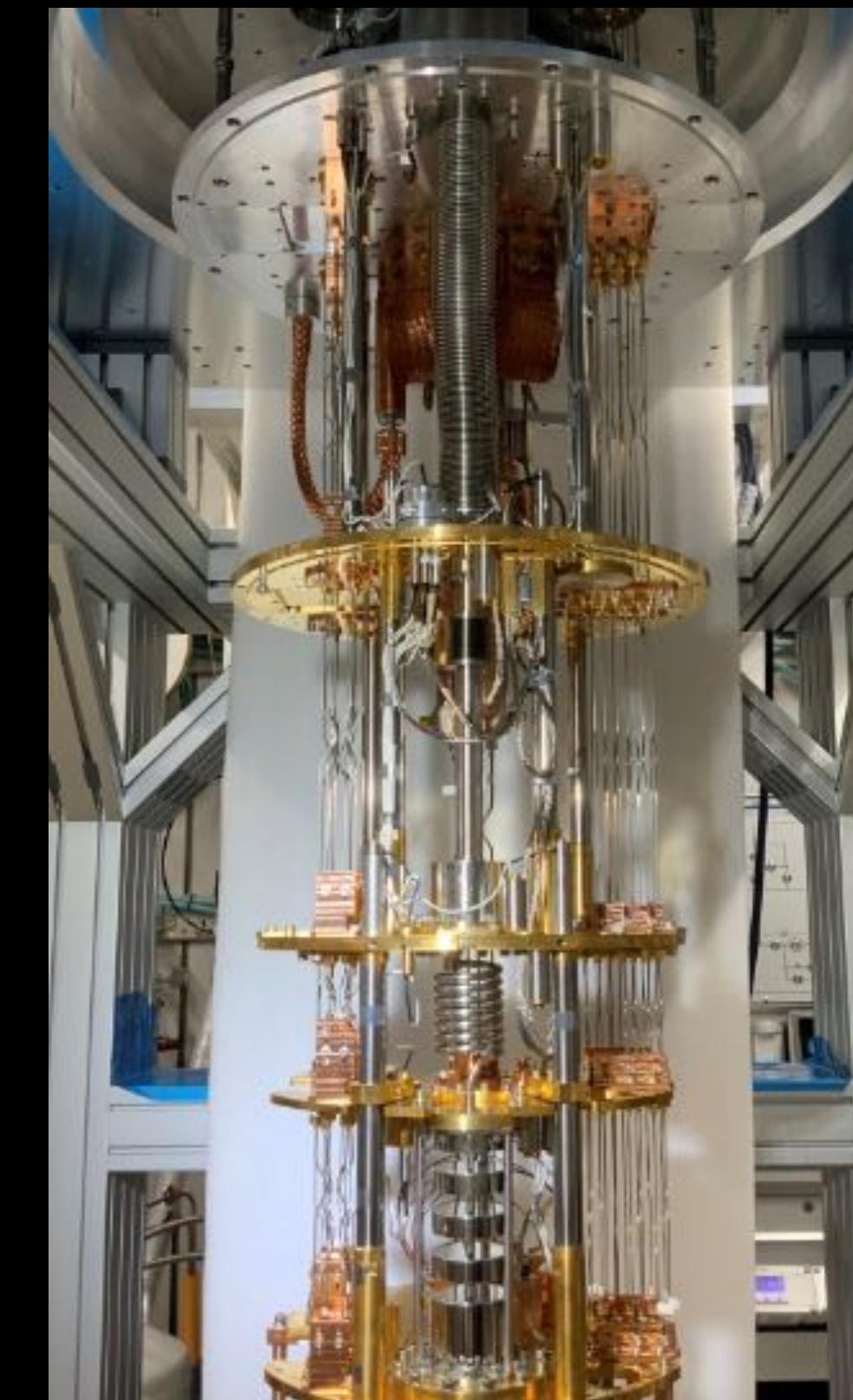
北京量子情報科学研究所 136量子ビット



Copyright: RIKEN Center for Quantum Computing

連携 : 阪大 · NICT · 富士通 · 産総研 · NTT

日本  
理研 · 富士通 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





# IBM超伝導量子コンピュータ

2023年12月4日

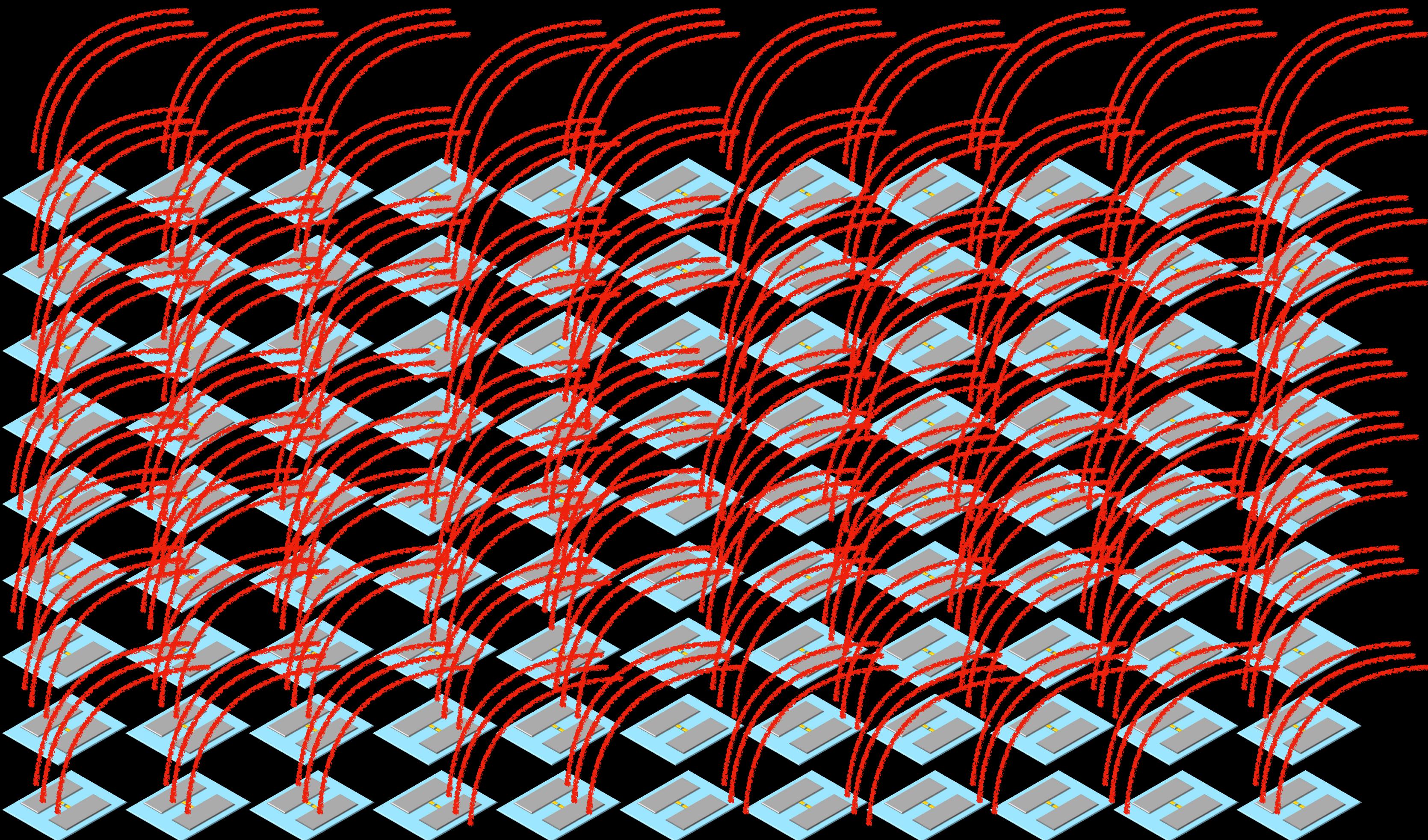
1121量子ビットプロセッサCondor



**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

<https://www.science.org/content/article/quantum-computers-take-key-step-toward-curbing-errors>

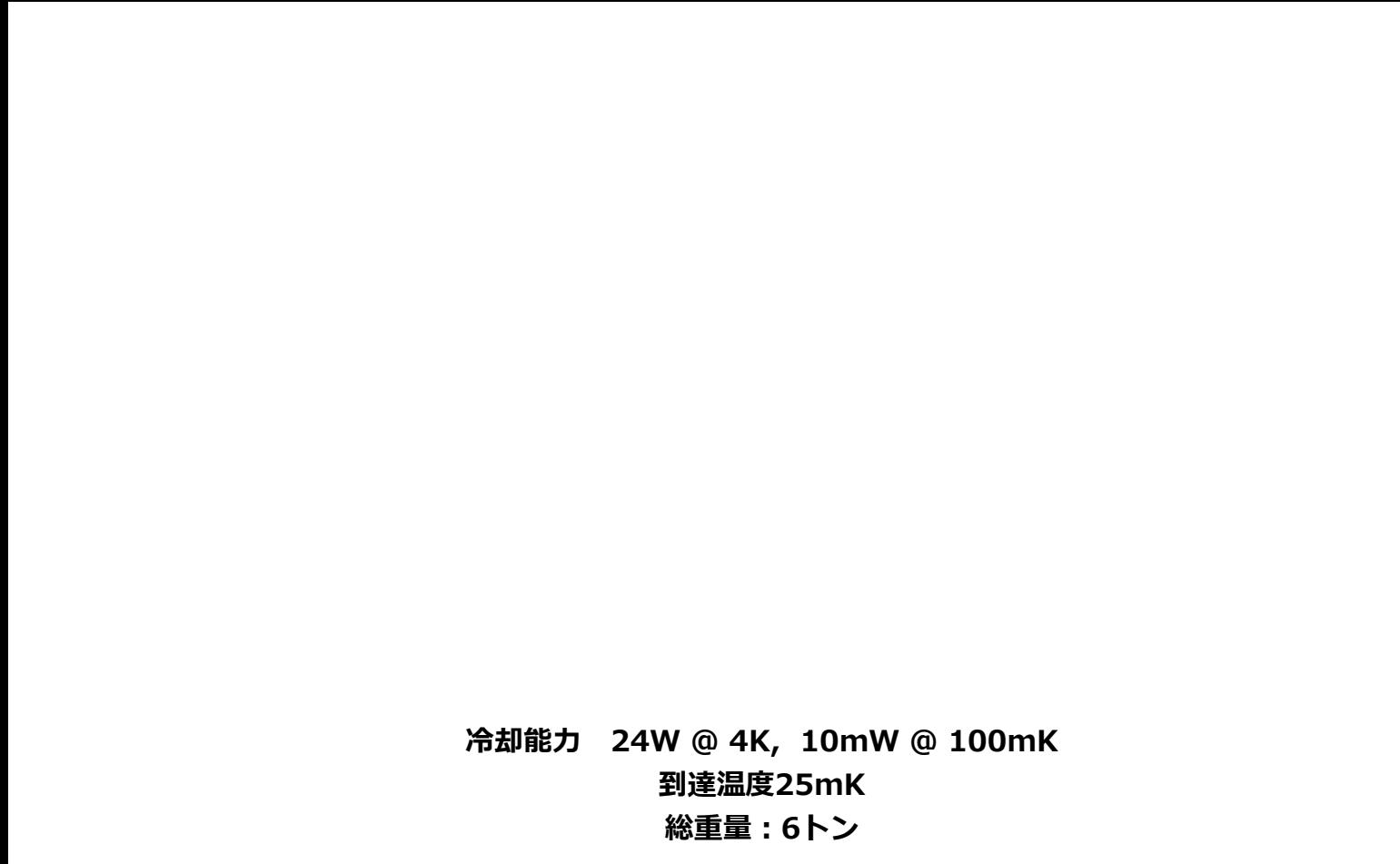
[https://www.reddit.com/r/cablefail/comments/2531uc/ancient cable fail eniac xpost rmachineborn/](https://www.reddit.com/r/cablefail/comments/2531uc/ancient_cable_fail_eniac_xpost_rmachineborn/)

<https://spectrum.ieee.org/qooale-team-builds-circuit-to-solve-one-of-aquantum-computings-biggest-problems>

<http://www.infonet.co.jp/uevama/ip/episode/computer.html>

# 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)



冷却能力 24W @ 4K, 10mW @ 100mK  
到達温度25mK  
総重量：6トン

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

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

巨大モジュール型冷凍器(Bluefors)



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

巨大冷凍機(Maybell quantum)



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

巨大冷凍(Google)



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

超巨大冷凍器(Linde&BlueFors)



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

# クライオCMOSとマイクロ波伝送

クライオCMOS制御回路

低温で動作するデジアナ混載CMOS集積回路



Horse Ridge II



Intel

<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](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)

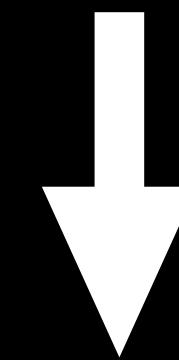
2量子ビットの制御に成功

Microsoft、MIT、IBM、Google、Rigetti、Equal1、産総研、日立、  
Nanobridge Semiconductor、京都工織大

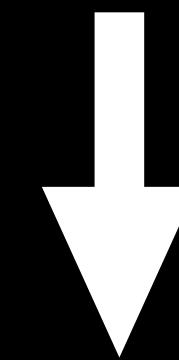
超伝導制御回路(SFQ・AQFP) : SeeQC、NIST、Wisconsin大、産総研、横国大、名大

室温から低温ステージへの信号伝送

セミリジット同軸ケーブル

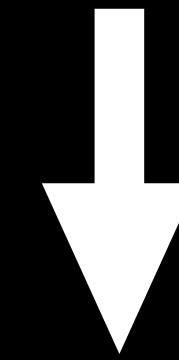


フラットケーブル(高密度伝送)



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

光ファイバー



無線？？



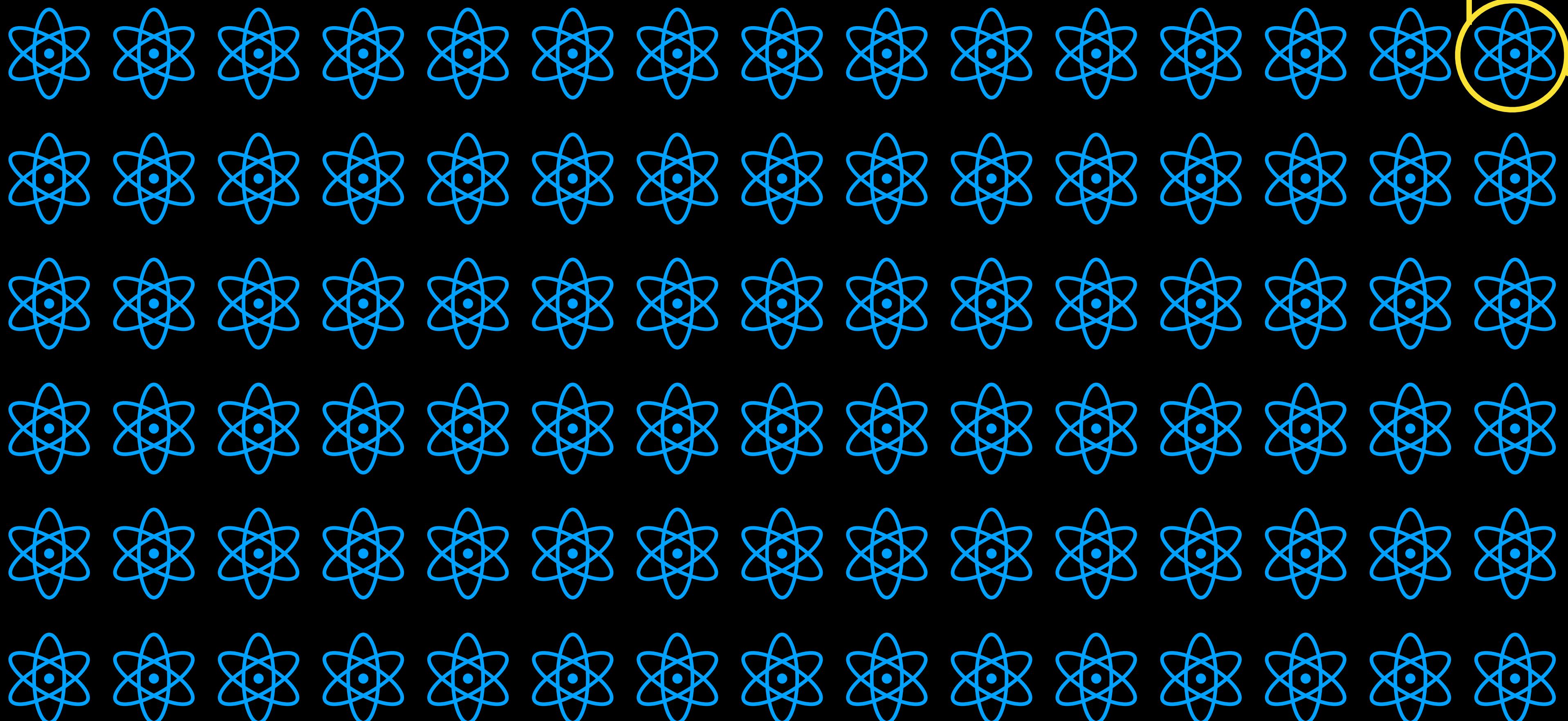
<https://www.nature.com/articles/s41586-021-03268-x>

# 冷却原子方式

# 中性原子量子コンピュータ



光ピンセット：レーザーを用いてたくさんの原子を真空に捕獲・移動する技術





# 中性原子量子コンピュータ

2023年10月 Atom Computing

1180量子ビットの量子コンピュータ

2024年3月 Caltech

6100原子量子ビットの光トラップアレイ



<https://arxiv.org/abs/2403.12021>

実機公開は2024年を予定

コピーレンス時間12.6秒



# 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 😊

配線・冷凍機不要！ 😊

課題：繰り返し量子エラー訂正の実装

課題：動作速度の高速化

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 😊

# 様々の方式の量子コンピュータ

## 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
- ・**56量子ビット**  
(Quantinuum)
- ✓**量子エラー訂正**

引用：<https://ionq.com>

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

## 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)

理研

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

東大・理研

<https://www.t.u-tokyo.ac.jp/press/pr2024-01-19-001>

企業：XANADU, PsiQuantum, QuiX, 図靈量子, Quandela, ORCA, NTT

# 下町量子コンピュータ

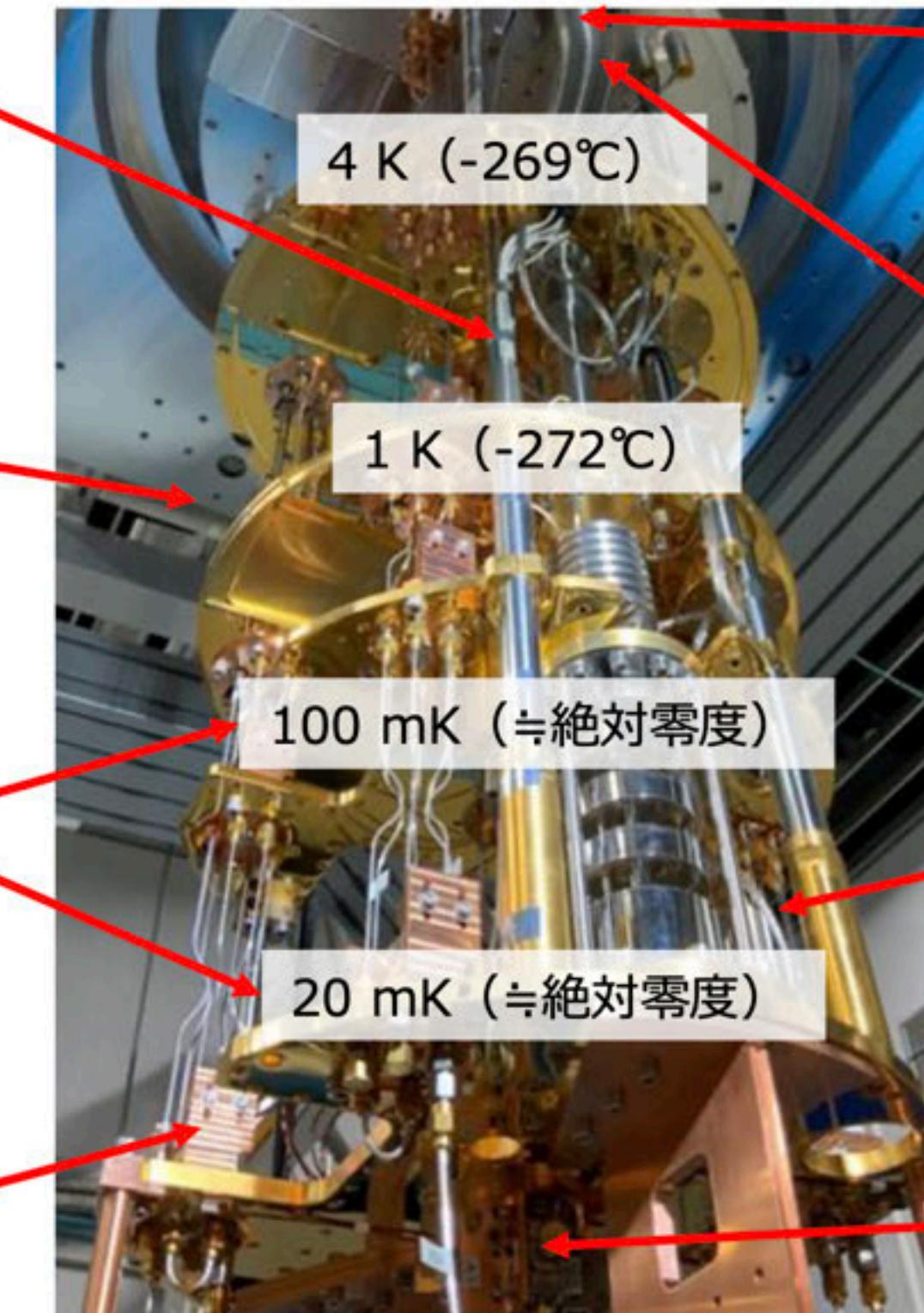
## 日本中小企業の匠の技

# 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。



## 超電導回路のサプライチェーン



### 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增幅する部品



### 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



### 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となる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)

### 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



### 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



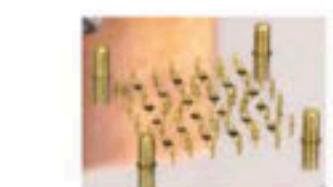
### ⑦超電導同軸ケーブル

極低温下でマイクロ波の信号を伝える信号線



### 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



※赤字は、日本企業

写真：産業技術総合研究所 提供



# 量子サプライヤー(国内)



# 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

国産量子コンピュータの実現



## ●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



長期の研究開発と多くのブレークスルーが必要！