

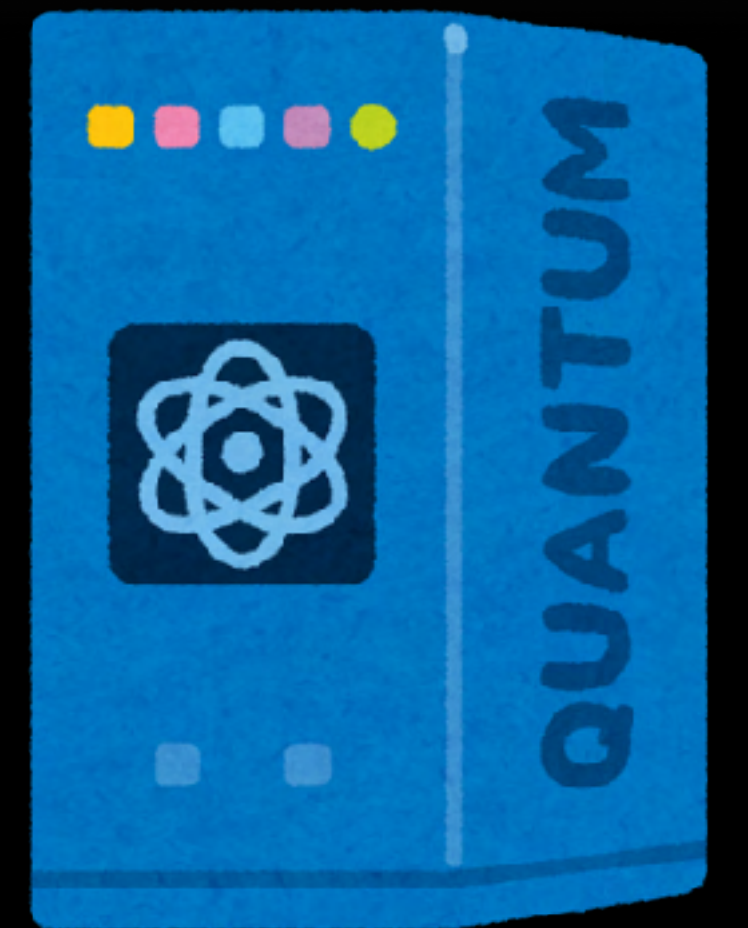
量子コンピュータの基礎と最新動向

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

川畑史郎

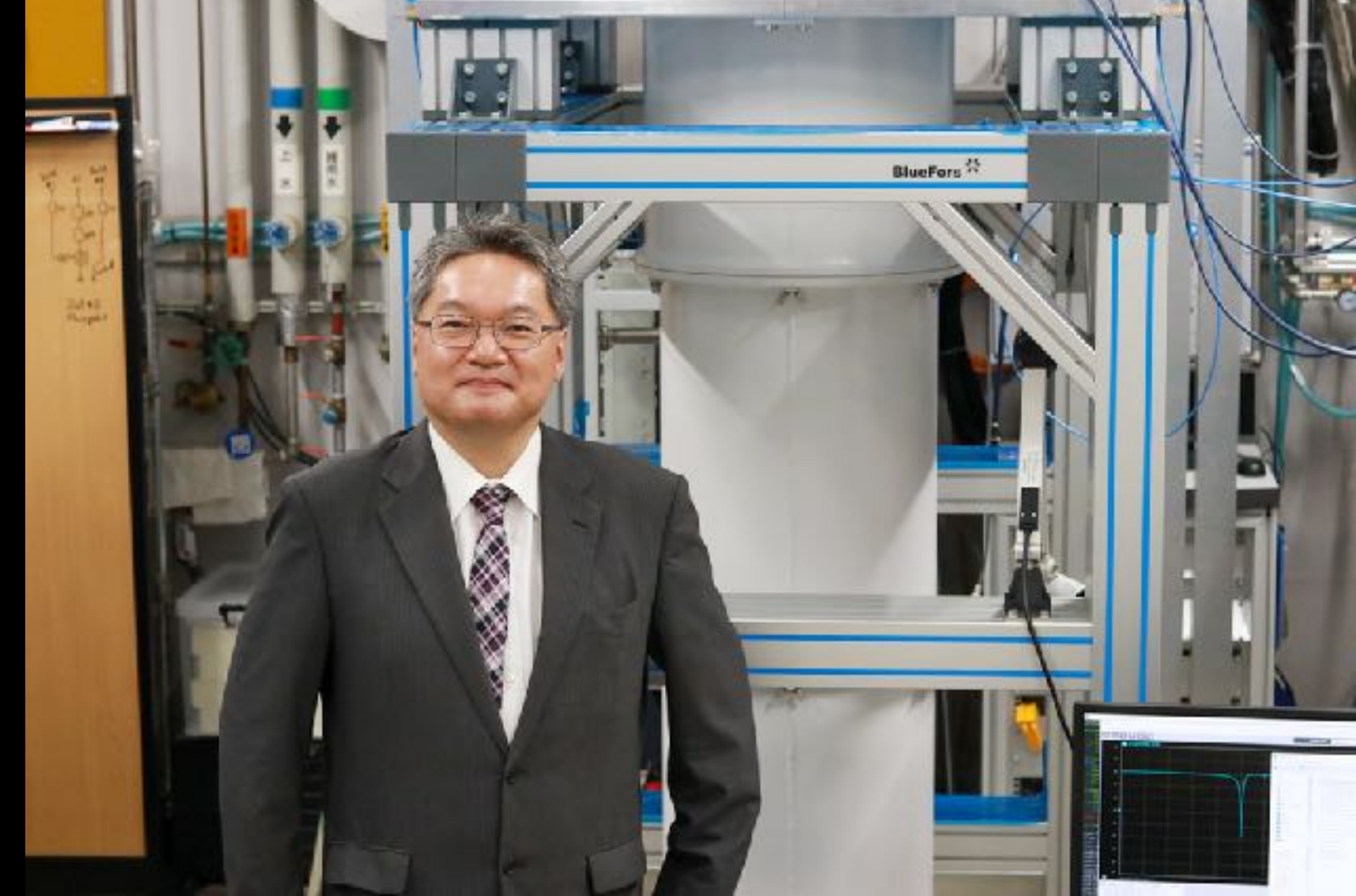


名前: 川畑史郎

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

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



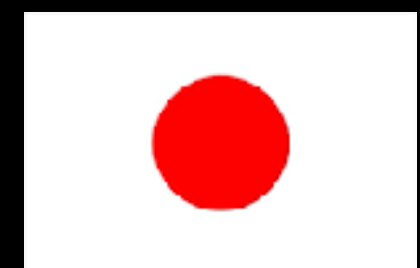
Google **70**量子ビット



中国浙江大学 **68**量子ビット



Quantware **64**量子ビット

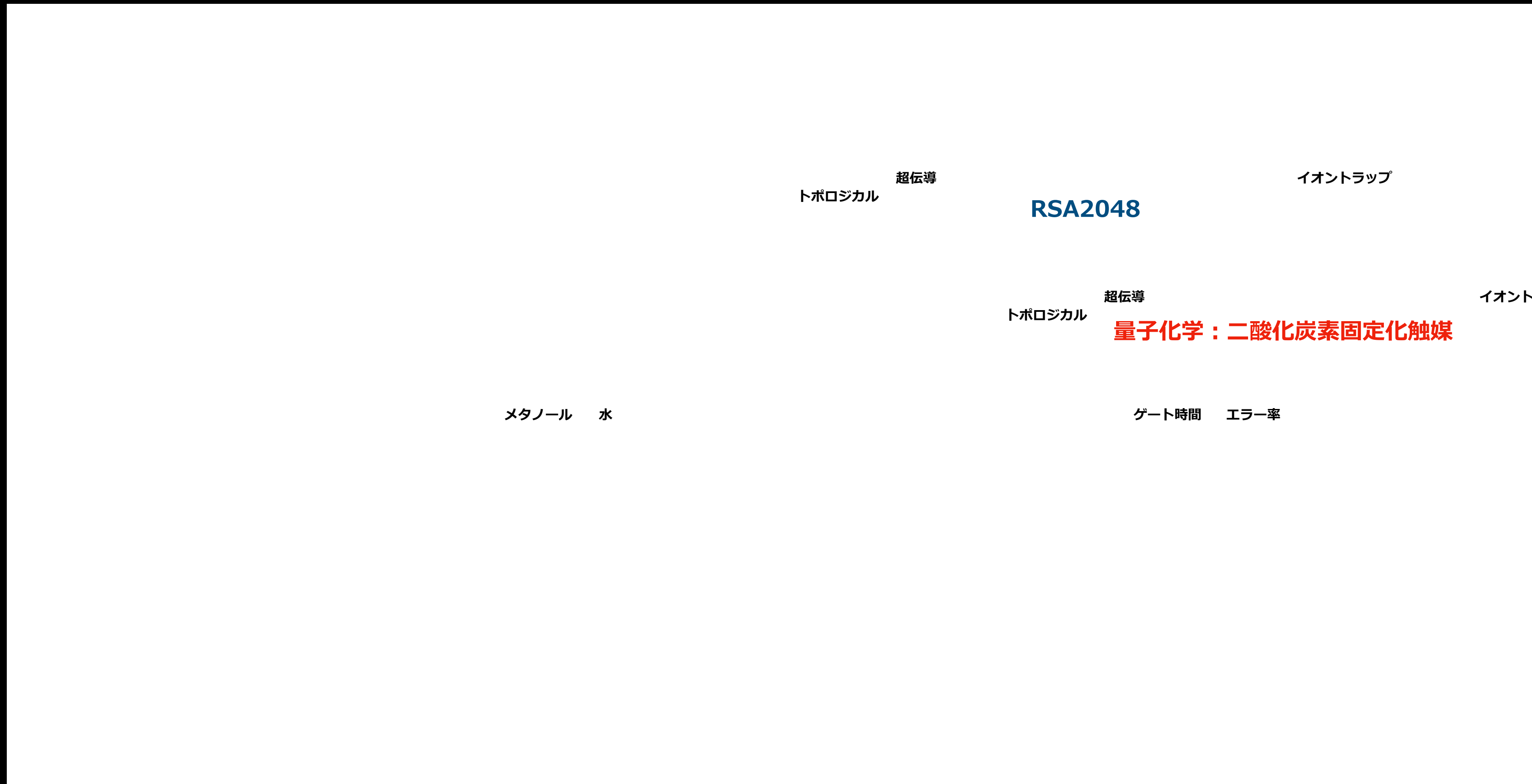


理化学研究所・富士通 **64**量子ビット

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

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

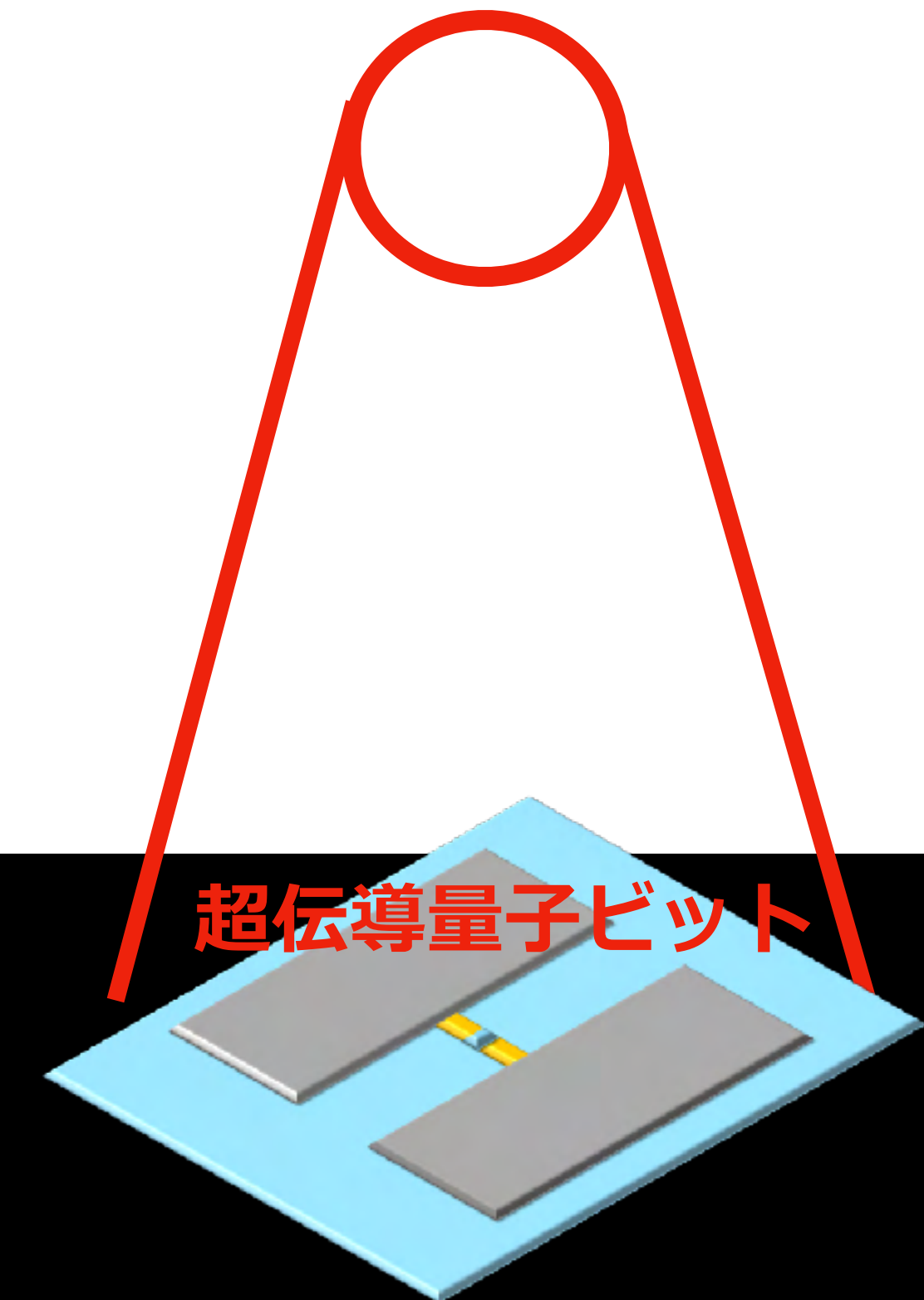
計算時間 (秒)



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-1121-qubit-quantum-chip/>

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, 囃霊量子, 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) 434

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

Nature 598 (2021) 400-405

(不完全な)1~2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

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

プログラムの実行を実現 😊

同じ重なりアルゴリズムを物理重なり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, 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

🇯🇵 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😞

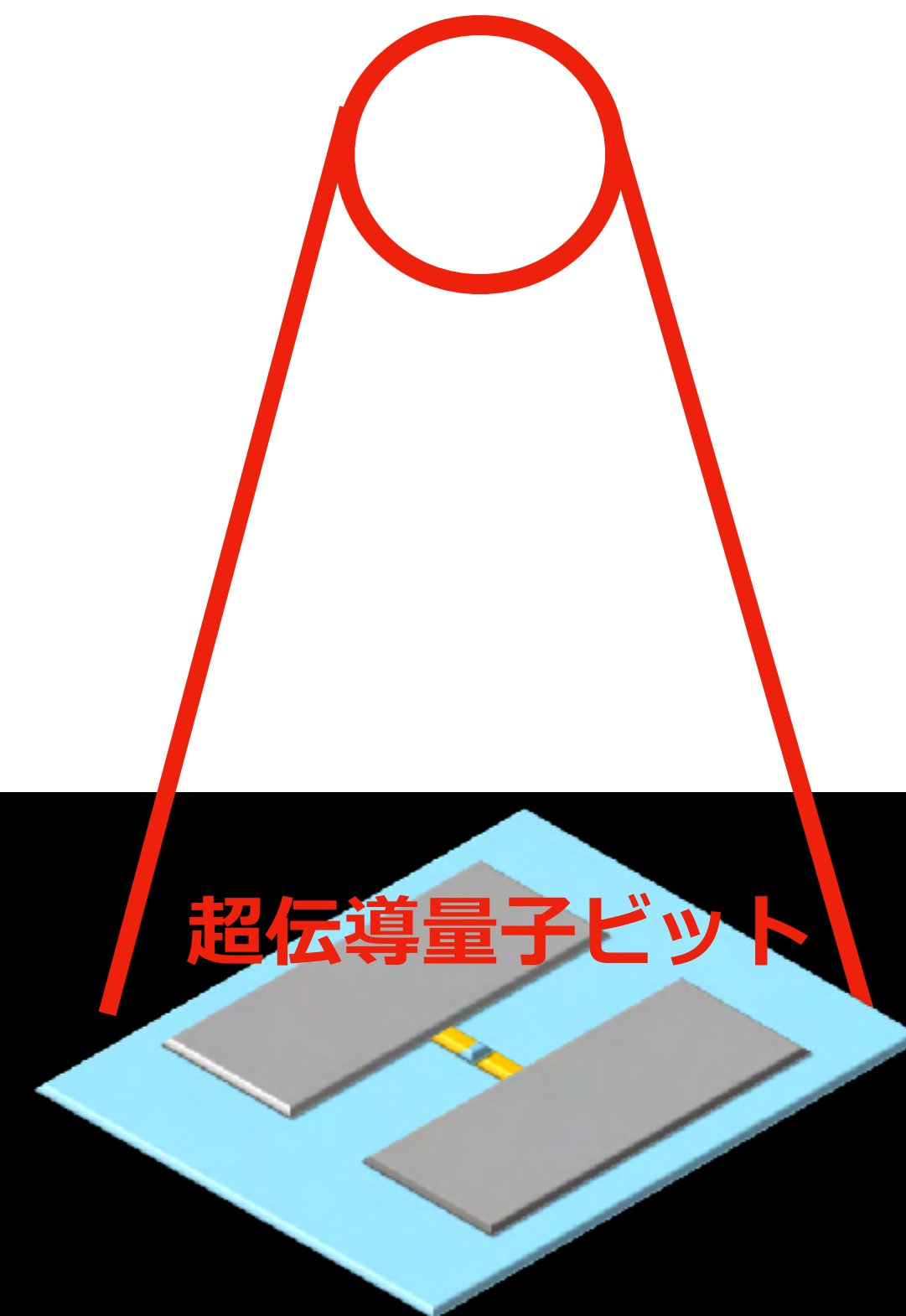
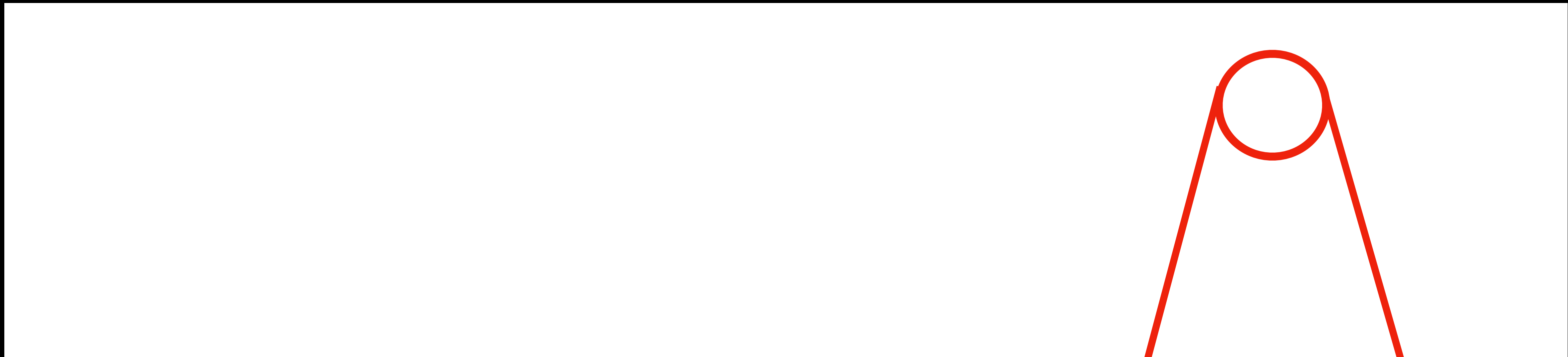




IBM超伝導量子コンピュータ

2023年12月4日

1121量子ビットプロセッサCondor

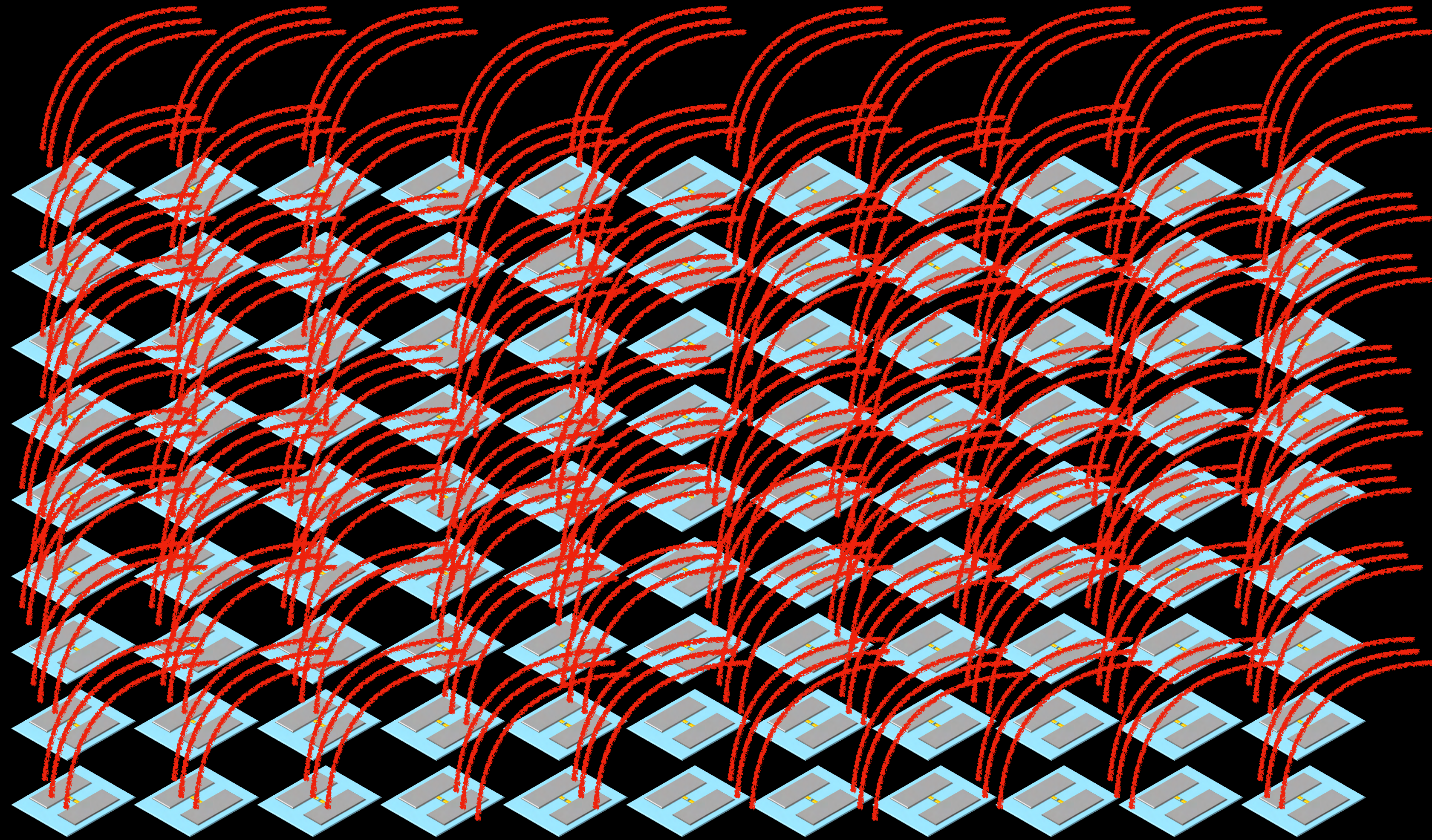


超伝導量子ビット

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 🙄



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.electronicweekly.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

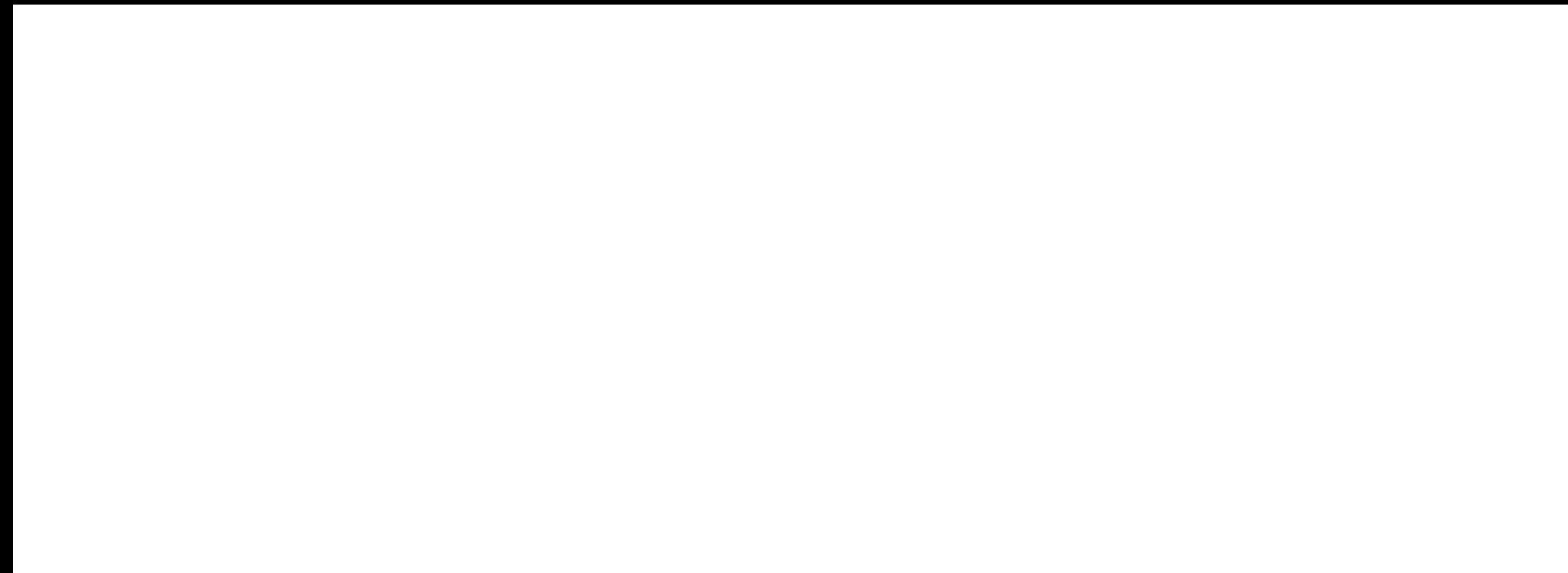
室温から低温ステージへの信号伝送

低温で動作するデジタル混載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

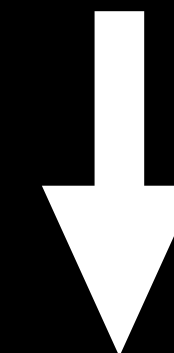
クライオCMOS制御回路ASIC(22nm FinFET)

2量子ビットの制御に成功

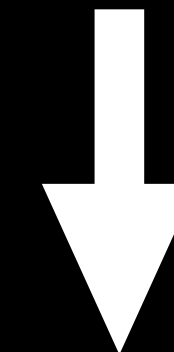
Microsoft、MIT、IBM、Google、Rigetti、Equal1、産総研、日立、
Nanobridge Semiconductor、京都工繊大

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

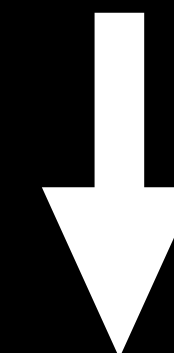
セミリジッド同軸ケーブル



フラットケーブル(高密度伝送)



光ファイバー



無線??



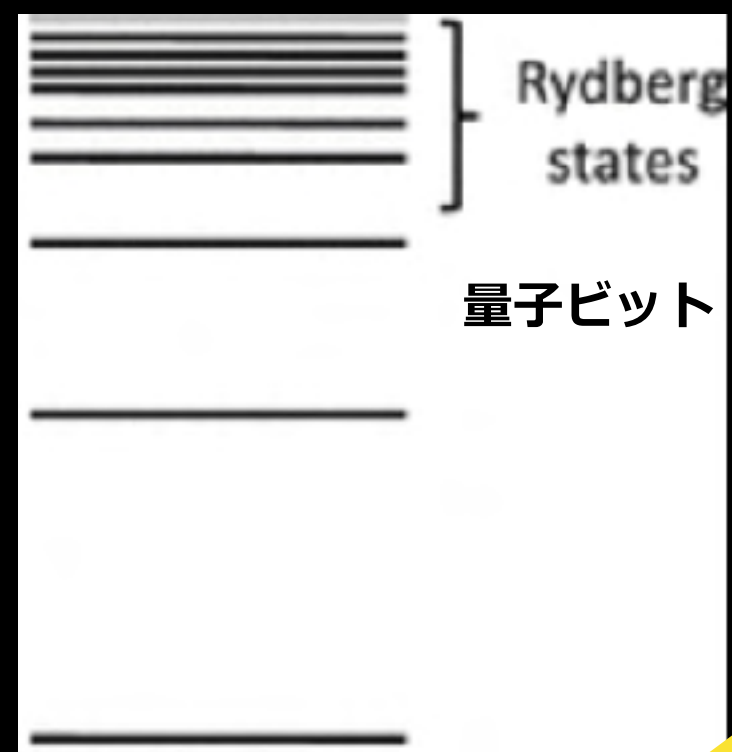
<https://www.maybellquantum.com/>

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

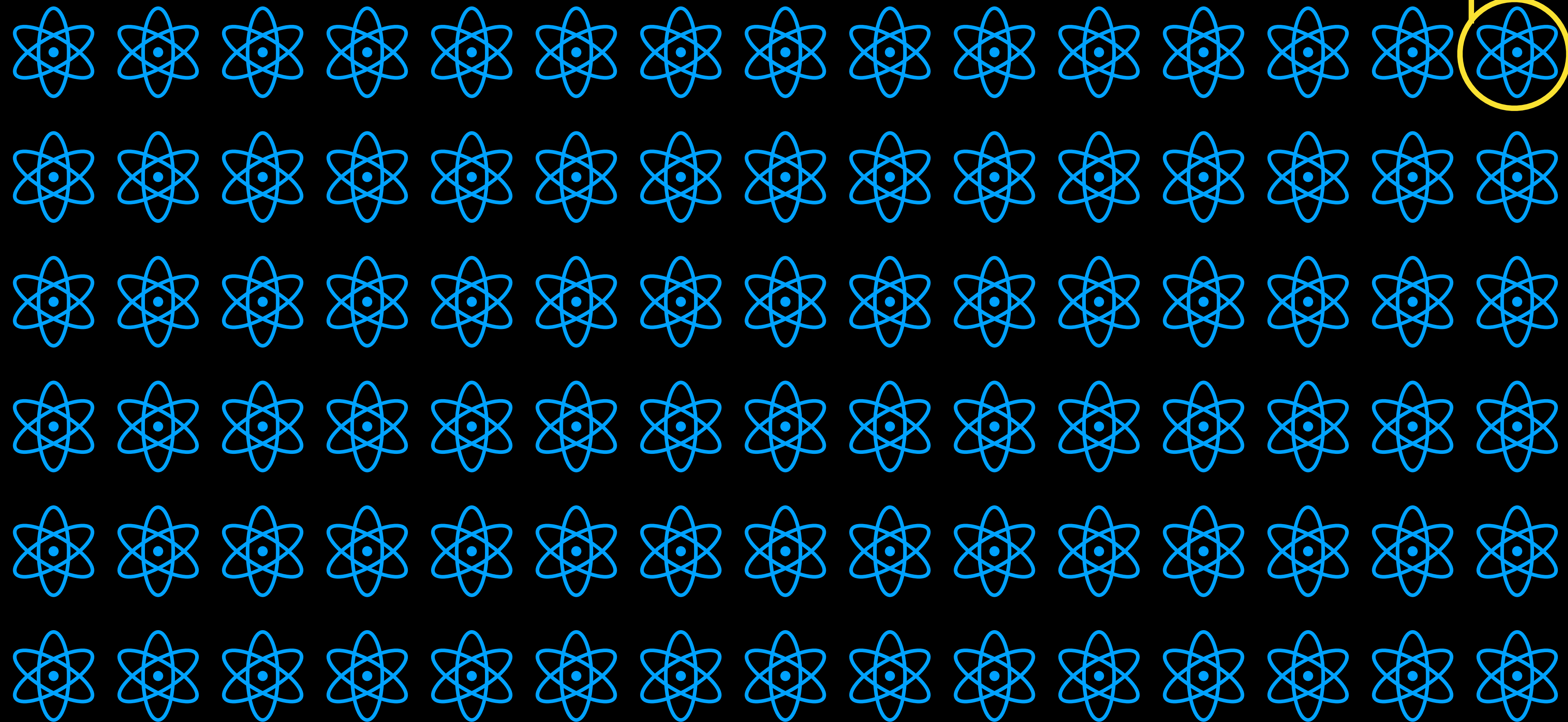
冷却原子方式

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





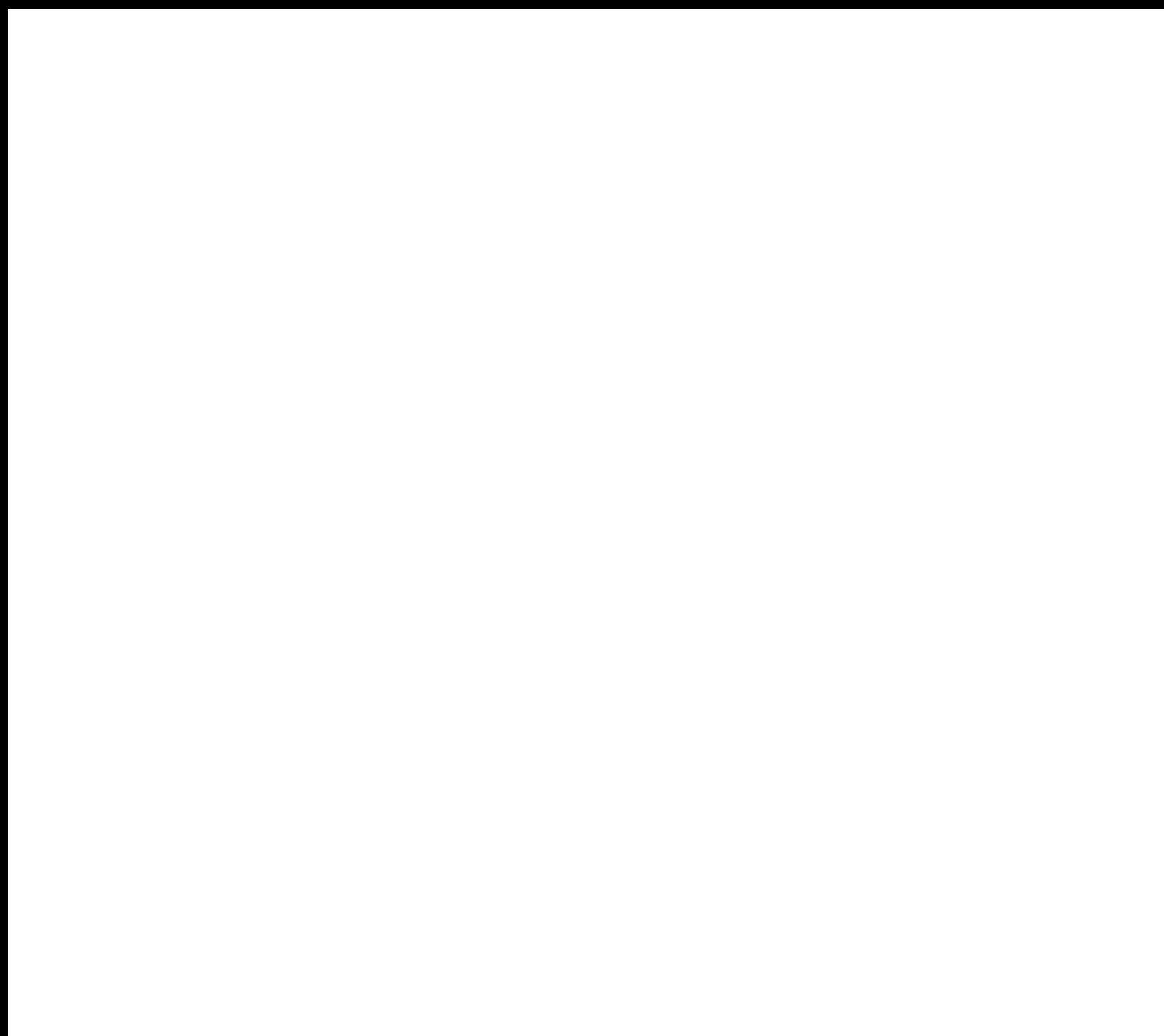
中性原子量子コンピュータ

2023年10月 **Atom Computing**

2024年3月 **Caltech**

1180量子ビットの量子コンピュータ

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

コヒーレンス時間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 😊

様々な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, 囃霊量子, 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。



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]



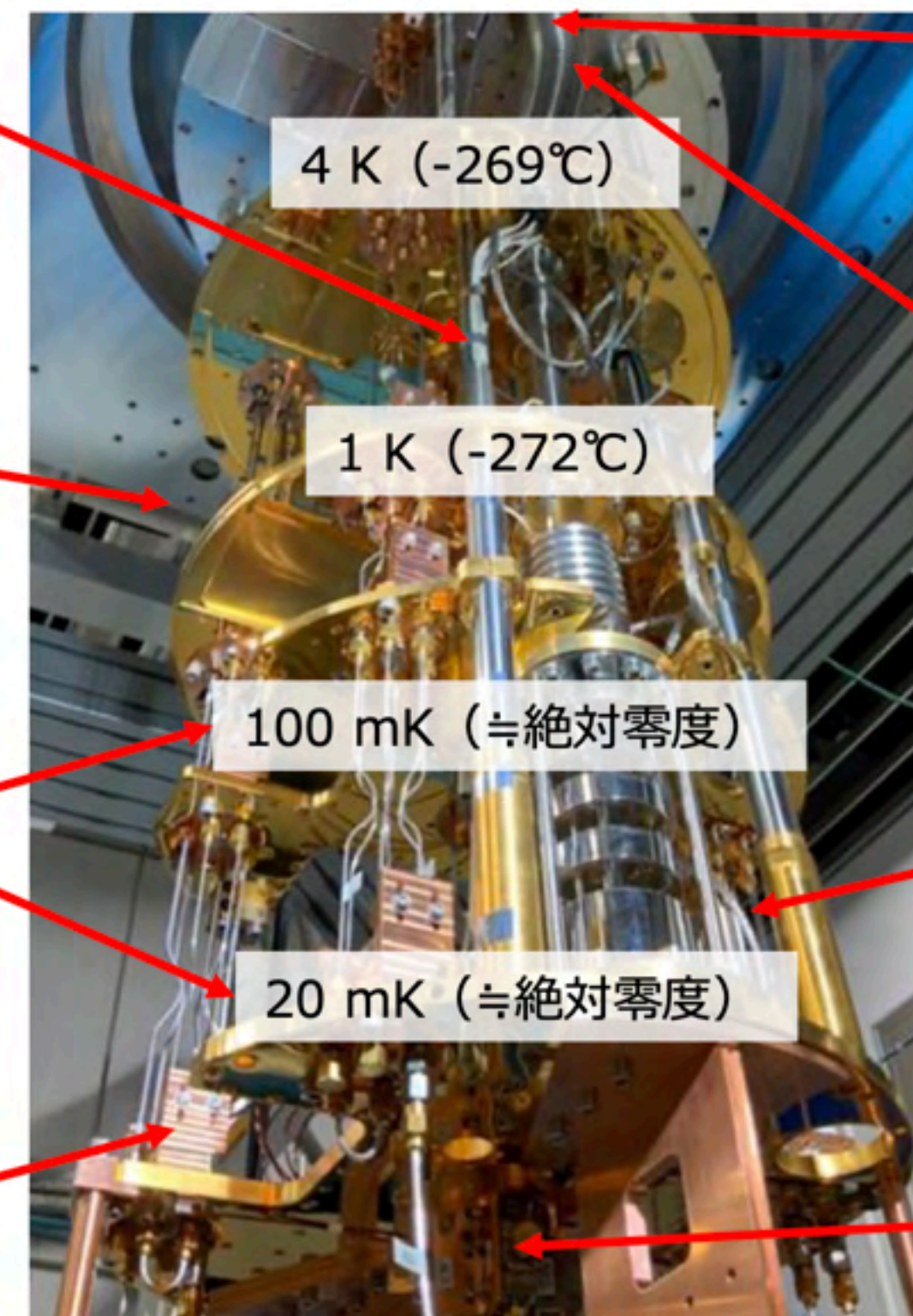
③希釈冷凍機

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]



量子サプライヤー(国内)

勝てる日本企業	量子コン 部品・部材	本社・工場	従業員 数/名	資本金 直近利益	事業内容	特長
① アルバック・クライオ	冷凍機	神奈川県茅ヶ崎市	130	209億円 10.7億円	クライオポンプと極低温機器その周辺機器の製造販売	<ul style="list-style-type: none"> 超伝導量子コン向けの希釈冷凍機でBlueforsが圧倒的な存在感を持つ(IBMやRigettiで採用)。阪大・理研連合はオックスフォード→ブルーフォース。
② キューエル	制御装置	東京都八王子市	7	855万円 非公開	量子コンピューターの制御装置・ミドルウェアの開発、製造、販売	<ul style="list-style-type: none"> 阪大発ベンチャー (CSO (最高科学責任者): 阪大根来誠准教授)。 小型、1台で4Q制御・8Q読み出し、もしくは8Q制御。 高速DAコンバータ搭載、FPGAメモリも高速大容量。 差動伝送線路利用マイクロ波回路 (クロストーク防止)。 64Qを12台で制御。将来1000Q用制御装置を16m³以内に収める。
③ コアックス	低温ケーブル	神奈川県横浜市・北海道池田町	17	1000万円 非公開	計測・通信・レーダー・制御用同軸系ケーブル、接続コネクタの開発・供給	<ul style="list-style-type: none"> IBM等主要量子コンに使われ、世界シェア独占。 Bluefors向けのケーブルでは100%近いシェア。 特殊金型と独自潤滑油を用いて脆いニオブチタンを安定して製造する「引き抜き加工」は他社の追随許さず。 知る人ぞ知るケーブル界の「駆け込み寺」的存在。試行錯誤で特殊で高性能なケーブルを開発・製造する力が強み。
④ 川島製作所	低温ケーブル・配線コネクタ	神奈川県川崎市・福島県福島市	125	5,760万円 116万円	自動車をはじめ光通信や衛星、医療機器用の精密部品	<ul style="list-style-type: none"> 精密加工技術でコネクタ製造 コネクタとケーブルの接続がねじ状 (膨張収縮はんだ割れ回避) コネクタ集積化を研究開発中。
⑤ エヌエフ回路設計ブロック	低雑音電源	神奈川県横浜市	133	30億円 4.4億円	計測・制御の独創技術で未来のテクノロジーを支える。	<ul style="list-style-type: none"> JPAやHEMTアンプ動作の低雑音直流電源を開発。 理研など様々な量子コン研究開発拠点に納入実績あり。 20μV方形波入力時の24dB増幅実験で他社を凌駕。 温度変化の影響を打ち消す特殊回路も新たに開発。 「アクティブ入力インピーダンス方式」と呼ばれる特殊な回路を採用した低雑音アンプ (室温動作) も開発。
⑥ 日本通信機	低雑音増幅器	神奈川県愛川町	88	1億円 121万円	放送用機器、電波天文学向けマイクロ波、ミリ波、サブミリ波の受信機システムを開発・製造	<ul style="list-style-type: none"> 4Kの環境に置くHEMTアンプ開発、国内唯一。 国立天文台などにHEMTアンプを納めた実績あり。 量子コン向けHEMTアンプ「9848XA」は300μm角×3段で、10GHz前後の微弱マイクロ波を10³倍増幅。
⑦ オータマ	磁気シールド	東京都稲城市・東京都八王子市	72	2,000万円 1600万円	パーマロイ・磁気シールド・磁界測定・熱処理・磁場キャンセラー	<ul style="list-style-type: none"> 阪大実機テストヘッドで利用実績。
⑧ アンリツ	計測器	神奈川県厚木市	4,168	192億円 186億円	電子計測器、食品・医薬品の品質保証システム、環境計測機器、デバイスなどの開発・製造・販売	<ul style="list-style-type: none"> 1999年Nature誌発表の中村泰信による量子ビット実験において、12.5 Gbpsの当時最先端のアンリツ(株)のパルスパターン発生器が実験の決め手となった。
⑨ 日本航空電子工業	配線コネクタ	東京都渋谷区・東京都昭島市	9,427	107億円 90億円	コネクタ事業、インターフェース・ソリューション事業、航機事業	<ul style="list-style-type: none"> 文科省『ムーンショット』委託先NECの子会社として同軸コネクタと基板の開発を担う。 非磁性コネクタの知見 配線の省スペース化のための基板開発 (特性インピーダンス・マッチング)

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！