SEMI量子コンピュータ協議会
半導体量子コンピュータ設計協議会
blueqat株式会社

量子コンピュータを「つくる」と「設計する」

I　製造：SEMI量子コンピュータ協議会

II　設計：半導体量子コンピュータ設計協議会

2026年11月13日　秋の量子コンピューティングEXPO

湊 雄一郎（blueqat株式会社）

本日の内容

SEMI量子コンピュータ協議会
blueqat株式会社

量子コンピュータを「つくる」（製造）と「設計する」の両面から、2つの協議会の取り組みをお話しします。

I
製造：SEMI量子コンピュータ協議会
半導体産業と量子コンピュータ、歩み、製造技術、協議会の活動
p.3–16

II
設計：半導体量子コンピュータ設計協議会
製造の上のレイヤー。EDA・制御・誤り訂正、クライオCMOS・推論エンジン
p.17–30

2つの協議会は役割が別：製造は SEMI（2022年〜）、設計は設計協議会（2026年〜）

I　製造：SEMI量子コンピュータ協議会

量子コンピュータを「つくる」技術を協議

なぜSEMIは量子に関心を持つのか

SEMI量子コンピュータ協議会
blueqat株式会社

世界の半導体サプライチェーン企業 4,000社以上が加盟する国際団体。その目に、量子コンピュータは新しい市場として映っています。

1　国際団体

**世界の半導体サプライチェーン企業
4,000社以上が加盟**

2　半導体が不可欠

**製造や制御など随所で、半導体と
その微細加工技術が不可欠**

3　新市場

量子コンピュータの産業化は、半導体装置・材料・製造産業の新市場を創出

4　いま

実用化へ大きく前進する今こそ、新市場に向けた取り組みの加速が必要

量子コンピュータの中の半導体産業

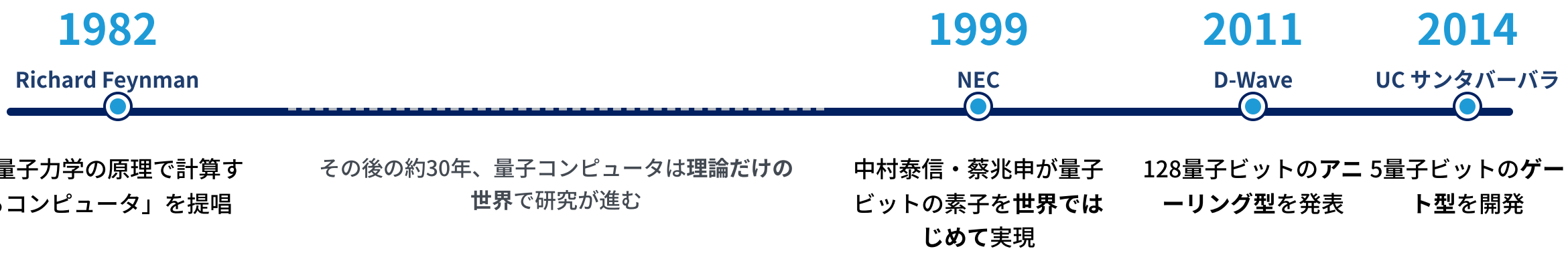
SEMI量子コンピュータ協議会
blueqat株式会社

量子コンピュータを作ると、半導体のサプライチェーンの多くの工程に出番が生まれます。

半導体産業の領域	量子コンピュータでの具体例
材料・ウェハ	Si/SiGe ヘテロ構造、同位体を精製したシリコン（^{28}Si）・ゲルマニウム（^{70}Ge）
微細加工	先端プロセスで作る量子ドット（ピッチ 60nm が目安）
後工程・実装	積層配線、インターポーザー、低温で使えるパッケージ
検査・計測	ウェハのまま極低温（1.6K）で測るプローバ
冷凍・制御装置	希釈冷凍機、冷凍機の中に置く低温コントローラ
設計・ロジック	4K で動くクライオCMOS（デジタル制御・メモリ・DAC）

理論から実機へ（〜2014年）

提唱（1982年）から最初の量子ビット素子（1999年）まで17年。小規模なゲート型の機械まで、さらに15年かかりました。



理論 → 素子 → アニーリング型 → ゲート型。ここまでは、物理の研究室の仕事でした

実用化に向けた進展（2019〜2023年）

SEMI量子コンピュータ協議会
blueqat株式会社

2019年に超伝導で**規模と速度**が動き、2023年には**半導体（スピン）と中性原子**が加わりました。

2019

超伝導

IBM

20超伝導量子ビットのシステムを発表

2019

超伝導

Google

53超伝導量子ビットのシステムで**量子超越性**を実証

2023

半導体（電子スピン）

Intel

12電子スピン（半導体）量子ビットのチップを発表

2023

中性原子

QuEra

中性原子量子コンピュータで**誤り訂正**に成功

超伝導が規模と速度で先行し、半導体と中性原子が続いた。次の焦点は「誤りをどこまで抑えられるか」

実用には100万量子ビットが必要

暗号解読や化学計算のような現実の問題を解くには、物理量子ビットで100万個前後が要ると見積もられています。

RSA-2048 を破る

約90万個

物理量子ビット。約5日（2025年の見積り）

2019年の見積りは2,000万個・8時間。**6年で必要数が20分の1以下に**

窒素固定酵素（FeMoco）を解く

約400万個

物理量子ビット。4日未満（見積り）

化学・材料の「役に立つ計算」の代表例

いまの機械

100〜数千

物理量子ビット。超伝導で100〜数百、中性原子で1,000超の製品、実験では3,000原子超

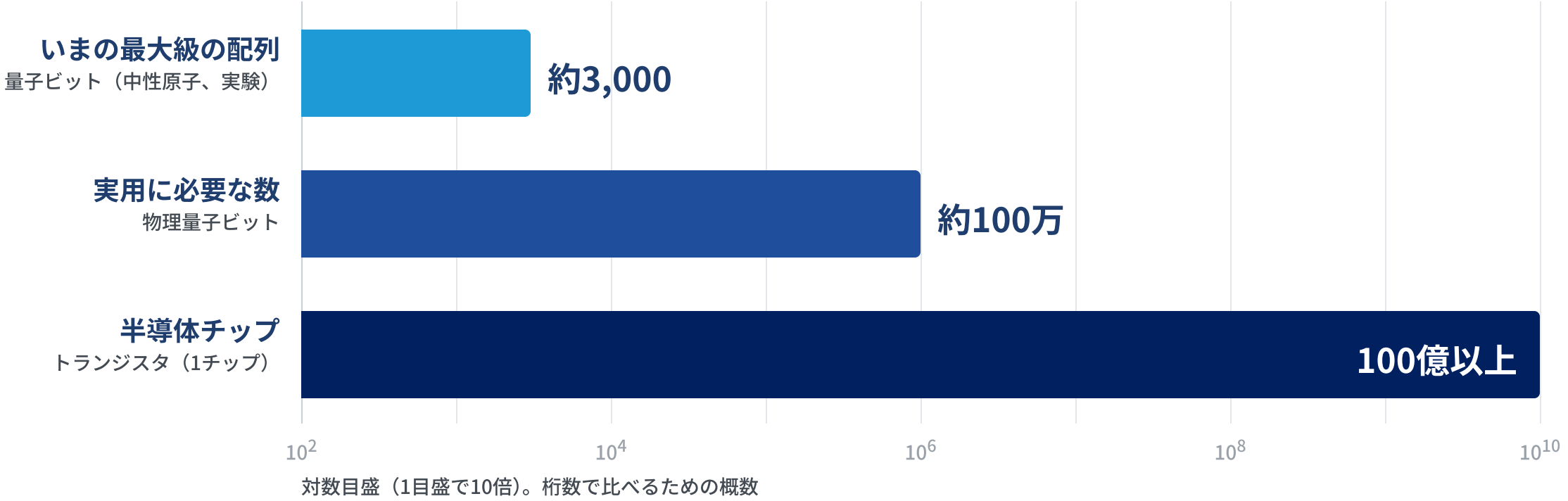
必要数との差は3〜4桁

出典：Gidney「How to factor 2048 bit RSA integers with less than a million noisy qubits」（2025、物理 897,864個・4.96日）／Gidney & Ekerå（2019、2,000万個・8時間）／Lee et al.「FeMoco」PRX Quantum（物理 約400万個・4日未満）／Chiu et al., Nature（2025）／調査レポート「量子コンピュータ主要5方式 統合動向レポート」（調査基準日 2026-09-08）

半導体は100億個を集積している

SEMI量子コンピュータ協議会
blueqat株式会社

半導体チップは100億個以上のトランジスタを集積します。必要な100万量子ビットは、その1万分の1です。



量子ビットを作る側の技術は、すでに半導体産業の手の中にある

出典：本資料 p.8（見積り）／Chiu et al., Nature（2025）／最先端の半導体チップは100億個以上のトランジスタを集積（SEMI量子コンピュータ協議会 紹介資料）

半導体量子とCMOSの親和性

SEMI量子コンピュータ協議会
blueqat株式会社

半導体のスピン量子ビットは、CMOS の工場・装置・検査の流れをそのまま使える可能性があります。2023年から実測が積み上がっています。

実測の積み上げ

- **2023年　Intel：12電子スピン量子ビットのチップ**
- **2026年　HRL：54量子ドット・18量子ビットを 4K の CMOS でデジタル制御（Nature）**
- **2026年　imec×Diraq：300mm CMOS 互換工程で8量子ビットが動作**
- **2026年　Equal1：標準 CMOS プロセスで作るシステムを19インチラックに搭載（RacQ）**

量子ビットの寸法

量子ドットのピッチは 60nm が目安。先端の微細加工が使える大きさ

量子ビット数は、まだ小さい

コヒーレントに動く配列は10個級。他方式より少ない

見方

誤り耐性が最終的に**百万物理量子ビット級**を求めるなら、ファウンドリ・ウェハ検査・EDA・先端パッケージ・極低温 CMOS を使えることが最大の潜在優位。
ただし「CMOS 互換だからスケールする」とは言えず、歩留まりや自動較正を実測で示す段階にある

出典：Intel（2023）／HRL Quantum Team, Nature（2026）／imec・Diraq「eight silicon MOS spin qubits in 300 mm CMOS-compatible process」（2026）／Equal1 RacQ（2026-05-15）／調査レポート「量子コンピュータ主要5方式 統合動向レポート」（調査基準日 2026-09-08） 第6章

半導体量子のパーツは揃いつつある

SEMI量子コンピュータ協議会
blueqat株式会社

ウェハから制御回路まで、作るための部品はひと通り見えてきました。温度帯ごとに何が置かれるかを示します。

室温
外部は電源と多少の配線のみ

▼

4K 温度帯
デジタル・アナログのクライオCMOS、Exchange-only、低温パッケージ

▼

0.1K 温度帯
量子ドット、超伝導ケーブル、低温パッケージ

部品	いまの姿
ウェハ	Si/SiGe ヘテロ構造。^{28}Si・^{70}Ge の同位体精製
量子ドット	先端プロセス（28nm 世代以降）。ピッチ 60nm が目安
後工程	積層配線、インターポーザー
検査	ウェハスケールの極低温プローバ（1.6K）
冷凍機	100〜150mK。0.3〜1K に上げたいが、精度とのトレードオフ
クライオCMOS	デジタル制御・メモリ・小型DAC・アナログ回路
4K〜150mK の接続	超伝導ニオブ配線が出てきた

2026年、熊本大学・東京科学大学で実機の設置が進み、2027年には岡山大学など複数が続く

出典：SEMI 量子コンピュータ協議会向け資料（2026-05-27 版・2026-07-22 版）

SEMI 量子コンピュータ協議会とは

SEMI 会員企業と量子コンピュータ関係者が、技術交流を通じて事業化を促す場です。

目的

SEMI 会員企業と量子コンピュータ関係者の、技術交流・協力による事業化の促進

委員長

永井 智樹（JSR株式会社）

湊 雄一郎（blueqat株式会社）

発足

2022年

開催

隔月で協議会を開催。SEMICON Japan で情報発信

25
社・団体

12
外部講演者

出典：SEMI 量子コンピュータ協議会 紹介資料

メンバーは25社・団体

SEMI量子コンピュータ協議会
blueqat株式会社

材料・装置・計測・研究機関まで、量子コンピュータの供給網に並ぶ顔ぶれです。

アドバンテスト	Equal1	インテル	キーサイト・テクノロジー	KOKUSAI ELECTRIC
SUMCO	産業技術総合研究所	JSR	JX金属	SCREENホールディングス
住友重機械工業	SEMI	東京エレクトロン	東京エレクトロンデバイス	東北大学
東横化学	日本電子	日本量子コンピューティング協会	ビジュアルテクノロジー	フォームファクター
富士フイルム	blueqat	Boston Consulting Group	レゾナック	ローデ・シュワルツ・ジャパン

出典：SEMI 量子コンピュータ協議会 紹介資料（五十音順）

協議会の活動：講演・見学・発信

外部の専門家を招く講演と、**現場の見学会**、そして SEMICON Japan での発信を続けています。

外部講演者（12）

- Quantinuum
- 理化学研究所
- 経済産業省 技術環境局
- 分子科学研究所
- 富士通
- Equal1

ほか：東京科学大学 工学院／Parity Quantum Computing／Global Quantum Intelligence／Quobly／大阪大学／東北大学

見学会

- 産業技術総合研究所
- IBM
- 理化学研究所
- G-QuAT

SEMICON Japan での発信

- 量子コンピューティングパビリオン
- 量子コンピューティングフォーラム

出典：SEMI 量子コンピュータ協議会 紹介資料（講演は講演日順）

協議会が注目する4つの技術

半導体製造技術が生きるところに絞って、継続的に追いかけています。

Exchange-only

マイクロ波を使わないので、制御ハードウェアを簡略化できる。大集積に有利

実装技術

高集積になったときの、量子ビットの制御、信号の供給・読み出し

クライオCMOS

極低温で動く制御回路。半導体そのものの技術

その他

半導体製造技術が生かせる分野を、継続してフォロー

出典：SEMI 量子コンピュータ協議会 紹介資料

SEMICON Japan 2026

SEMI量子コンピュータ協議会
blueqat株式会社

12月9日(水)〜11日(金)、東京ビッグサイト。量子コンピューティングのパビリオンとフォーラムを開きます。

量子コンピューティングパビリオン

量子コンピュータ	blueqat／産業技術総合研究所／富士通／Equal1
制御装置・冷凍機	キーサイト・テクノロジー／フォームファクター
パネル展示協力	Intel／日立製作所

フォーラム「半導体量子コンピュータ最前線」

- **James Clarke**
  Intel Sr. Director of Quantum Hardware
- **土屋 龍太**
  日立製作所 主管研究員

昨年の実績



SEMICON Japan 2025 で展示した blueqat の実機

出典：SEMI 量子コンピュータ協議会 紹介資料

II　設計：半導体量子コンピュータ設計協議会

製造の上のレイヤーで、論理設計・制御・アルゴリズム・誤り訂正を

半導体量子コンピュータ設計協議会とは

2026年8月に blueqat が設立。製造（SEMI）の上のレイヤーで、半導体量子コンピュータの論理設計について技術と情報を共有する場です。

量子コンピュータを作る仕事の分担

アプリ・アルゴリズム	何を解くか、どう解くか
誤り訂正	論理量子ビットをつくる符号とデコーダ
制御・パルス列	ゲートをパルスの列に直す
論理設計・EDA	ドット配列・配線・制御回路を描く
製造	ウェハ・装置・材料・検査・冷凍機

設計協議会
（2026年〜）

SEMI 協議会（2022年〜）

設立の背景

業界は急速に拡大。製造は SEMI 量子コンピュータ協議会が担い、**設計の領域を本協議会が担う**

対象

論理設計を実務として手がける大手企業などを中心に

出典：blueqat プレスリリース「半導体量子コンピュータ設計協議会を設立」（2026-08-05）

活動内容と参加条件

半導体量子コンピュータ設計協議会
blueqat株式会社

制御・アルゴリズム・誤り訂正をテーマに隔月で活動。**Exchange Only 方式**を中心に、半導体設計と量子計算の両方を手がける企業が対象です。

活動内容

制御、アルゴリズム、誤り訂正などをテーマに隔月で活動

- 論理設計に関する技術の共有
- 制御・アルゴリズム・誤り訂正をテーマとした検討
- 設計実務で得られた知見と関連情報の交換

参加条件

Exchange Only 方式の半導体量子コンピュータを中心に、既存の半導体設計と量子計算の双方を手がける企業。事前審査あり

お問い合わせ

info@blueqat.co.jp

出典：blueqat プレスリリース（2026-08-05）。参加企業は非公表

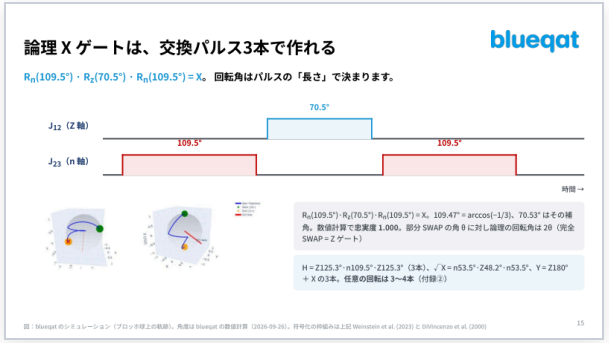
Design Solution Forum 2026 で講演しました

半導体量子コンピュータ設計協議会
blueqat株式会社

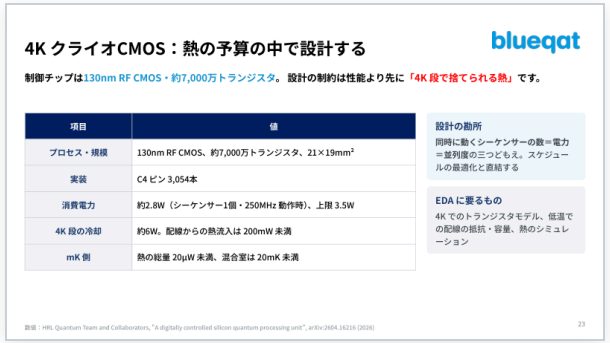
EDA・半導体設計の技術者向けに、半導体量子の**設計・論理合成・制御**をお話ししました（10月6日、パシフィコ横浜）。



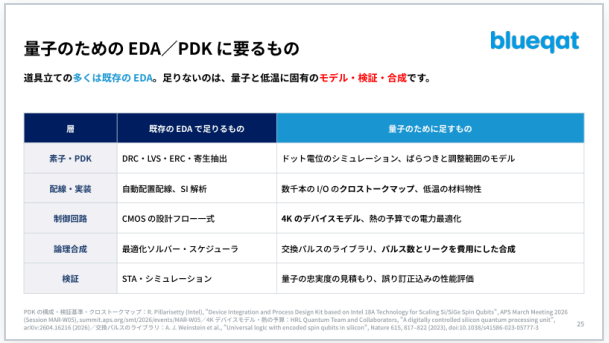
表紙



論理 X ゲートは交換パルス3本



4K クライオCMOS の設計



量子のための EDA／PDK

「半導体量子コンピュータの設計、論理合成、制御の最前線」

論理合成

量子回路を交換パルスの列に落とす。ゲートの角度を理論から導く

配置・経路・制御

最近接の制約、配線の数、4K で使える電力の予算

EDA／PDK

既存の EDA で足りる所と、量子のために足すモデル・検証

設計の話を、EDA の技術者の場へ持ち込む

EDA と PDK：描く道具と工場の決まり

Qiskit で回路を書くように、チップは EDA というソフトで描きます。描くときに守る工場の決まりが PDK です。

PDK：工場がくれる「決まりと部品」

- 層の材料と厚さ
- 設計ルール（線の太さ・間隔）
- 部品（トランジスタ、ドットのセル）
- シミュレーション用のモデル

EDA：設計者が使うソフト

- 回路図とレイアウトを描く
- ルールに合うか検査（DRC・LVS）
- 自動で配置と配線
- シミュレーションで性能を確認

設計の流れ（普通の半導体と同じ）



PDK を守って EDA で描けば、工場で同じものを何個でも作れる

Qiskit にたとえると

Qiskit が回路を書く言語なら、EDA はチップを描く道具。**配置と配線は「チップ版のトランスパイラ」**

量子で足すもの

量子ドットのセル、低温で動く素子のモデル、交換パルスのライブラリ（後半で扱う）

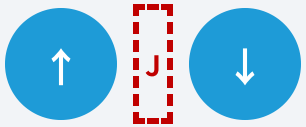
一般的な半導体設計の流れ。Intel の量子向け PDK も DRC／LVS／ERC／寄生抽出／自動配置配線を備える：R. Pillarisetty (Intel), APS March Meeting 2026 (Session MAR-W05)

J だけで動かす：3ドットで1量子ビット

半導体量子コンピュータ設計協議会
blueqat株式会社

障壁を電圧パルスで下げると交換相互作用 J がオン。これが唯一の操作です。3スピンの組み方に情報を載せ、2本の軸の回転でゲートを作ります。

① 操作は J だけ



J をオンにした長さ θ の「部分 SWAP」

$$U(\theta) = \cos\theta \cdot I + i \sin\theta \cdot SWAP$$

- マイクロ波も磁場の勾配も要らない。電圧パルス（約100mV）で障壁を下げる
- $\theta = J \cdot t/h$（パルスの面積）。$\theta = \pi/2$ で完全な SWAP
- パルス幅 約10ns。1本ずつ順番に打ち、列の長さがゲート時間

② 3ドットで1量子ビット



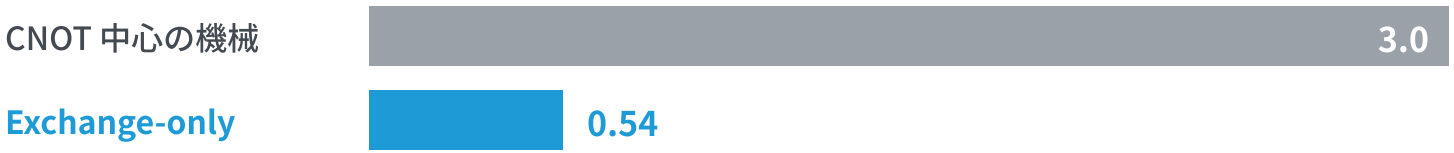
- 3スピンの組み方に論理 0/1 を載せる。一様な磁場の揺らぎに強い
- 回転軸は Z と、120° 傾いた n の2本だけ。X は組み合わせで作る
- S = 3/2 に出るとリーク。ドットは3倍、ゲートはパルスの列

A. J. Weinstein et al., "Universal logic with encoded spin qubits in silicon", Nature 615, 817–822 (2023)／D. P. DiVincenzo et al., Nature 408, 339–342 (2000)

要点：SWAP のコストが、大きく下がる

CNOT を基本にした機械では SWAP は CNOT 3つ分。 Exchange-only では CNOT の約半分。 相対的な費用が約5〜6分の1になります。

SWAP 1回の費用（CNOT 1回 = 1）



CNOT 中心の機械：SWAP ＝ CNOT 3つ（標準の分解）。Exchange-only：15本 ÷ 28本

Exchange-only のパルス本数



なぜ起きるか

交換相互作用の1パルスは**部分 SWAP**そのもの。SWAP が機械の「母語」に近い

読むときの注意

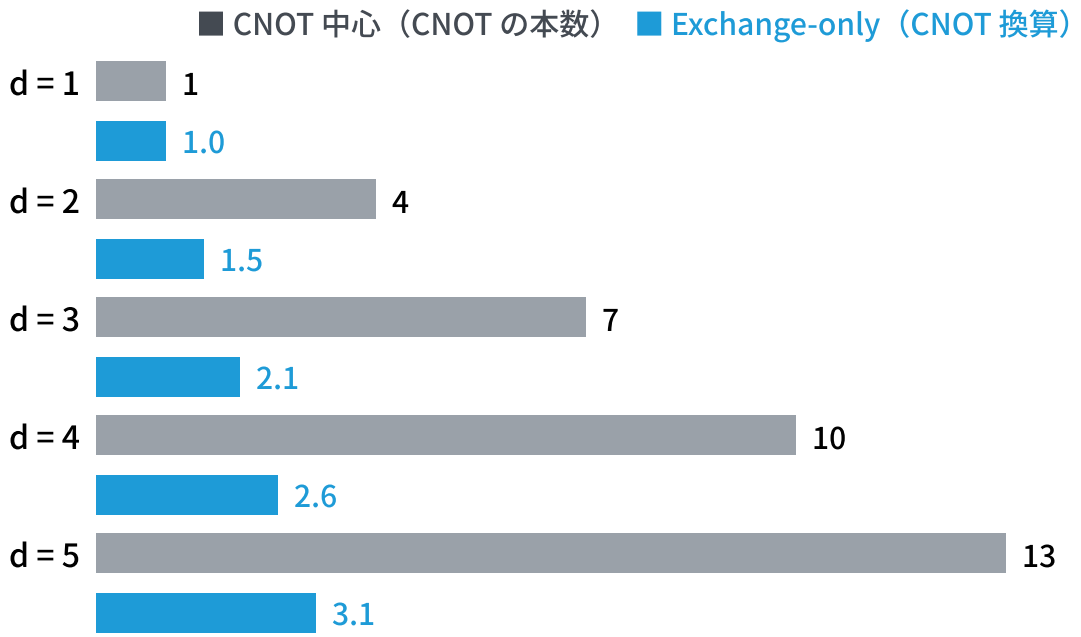
比べているのは**同じ機械の中での相対費用**。絶対時間は方式ごとに桁が違う

パルス数：A. J. Weinstein et al., Nature 615, 817–822 (2023)（CNOT 28本・符号化 SWAP 15本）。「SWAP ＝ CNOT 3つ」は標準の分解（Nielsen & Chuang）。比と 84本・約5.6分の1（84÷15）は blueqat の計算〔推〕。iSWAP 系の結合を持つ機械は別

ルーティング：離れるほど、差が開く

半導体量子コンピュータ設計協議会
blueqat株式会社

直線上で距離 d 離れた2量子ビットに CNOT を打つ費用。 距離が1つ増えるごとに、CNOT 中心の機械はCNOT 3本分、Exchange-only は0.54本分しか増えません。



d = 5 で約4倍の差

13 本 対 3.1 本分（パルスでは 28＋15×4 ＝ 88本）

数式

CNOT 中心：1＋3(d−1)
Exchange-only：(28＋15(d−1)) ÷ 28

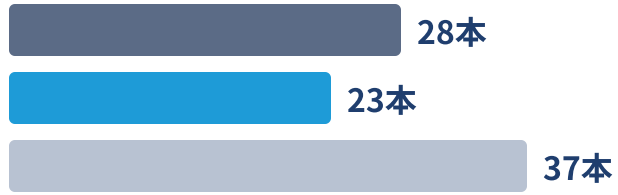
単純なモデル：直線配置で、(d−1) 回の SWAP で近づけてから CNOT を1回。運び戻しは数えない。パルス数は Weinstein et al., Nature 615, 817–822 (2023)、計算は blueqat〔推〕。実機の配置や並列化で値は変わる

実装の更新：パルス列は短くなっている

Intel は並列化で SWAP を 9本 → 5ステップに。SWAP が安い傾向は、新しい列でも続きます。

パルス本数（論文が示した列）

CNOT



SWAP

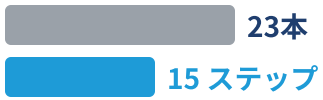


HRL 2026　（本数の記載は確認できず）

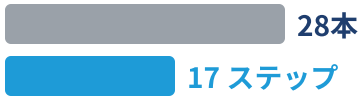
HRL の CNOT は45ステップ。配置と定義は論文ごとに違うので、傾向として読む

Intel：並列化したあと

CNOT



iSWAP



SWAP



灰：パルス本数
青：並列化後のステップ数

SWAP の相対費用〔推〕

CNOT に対する SWAP の本数は、Weinstein の列で 15/28 ＝ **0.54**、Intel の列で 9/23 ＝ **0.39**。どちらでも半分前後以下

列の自動生成も進む

Intel は450通りの6ドット配置でパルス列を**自動生成**。列の長さは配置で最大43%違い、Tunnel Falls で実験検証

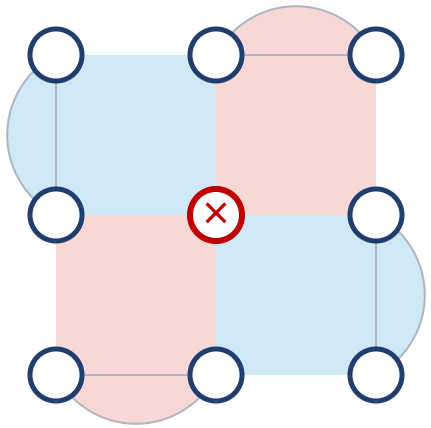
出典：Mądzik et al. (Intel), arXiv:2504.01191／HRL, Nature 655, 1154 (2026)／Chadwick et al., arXiv:2412.14918／Weinstein et al., Nature 615 (2023)。比は blueqat の計算

誤り訂正①：表面符号

半導体量子コンピュータ設計協議会
blueqat株式会社

量子ビットを格子に並べ、隣どうしの組を測り続けて誤りを見つけます。いちばん研究が進んだ符号です。

表面符号（距離 d＝3 の例）



○ データ量子ビット（9個）
色の面 ＝ 測る組（青：Z、赤：X）
× 誤り → 周りの面の結果が変わる

① 測る
面ごとに「偶奇」を測り続ける（シンドローム）

② 推定
デコーダが、誤りの場所を推定する

③ 記録
直すかわりに記録し、最後の結果を読み替える

論理1個に $2d^2-1$ 個の物理量子ビット
（d＝3 で 17個、d＝7 で 97個、d＝11 で 241個）

しきい値の下へ

物理の誤りが十分小さいと、**d を上げるほど論理の誤りが減る**。Google Willow は d＝3→5→7 で1段ごとに 1/2.14（2024）

半導体でも

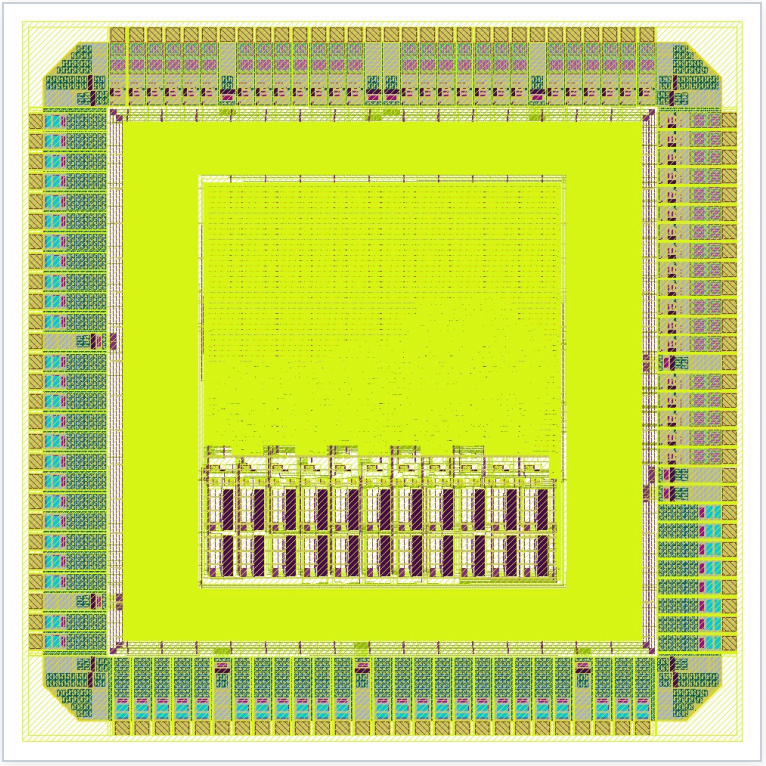
HRL は繰り返し符号で d＝3→5 の改善が 4.7 倍（2026）。**デコーダの速さ**が次の課題（Willow は 1周 1.1μs）

Google Willow：Google Quantum AI, Nature (2024-12)／HRL：Nature 655, 1154 (2026)。$2d^2-1$ は回転表面符号の物理量子ビット数（データ＋測定用）

クライオCMOS を AI で設計：4日でレイアウトまで

半導体量子コンピュータ設計協議会
blueqat株式会社

量子ビットを極低温で制御するチップを、オープン PDK と AI エージェントで、論理設計からレイアウトまで設計しました。



設計したチップ（3.2mm 角、パッド113個）

中身

量子ドット6個（2量子ビット）分。シーケンサ、6ビット DAC 22個、パルス幅を約20〜30ps 刻みで変えるゲートドライバ11本

道具

GlobalFoundries の 180nm オープン PDK「GF180MCU」。Yosys・OpenROAD・Magic・KLayout・ngspice など全部オープンソース

AI の役割

人が方針を決め、論文の読み込み・RTL・シミュレーション・レイアウト・誤りの原因探しと修正を AI が進めた。DRC・LVS は通過

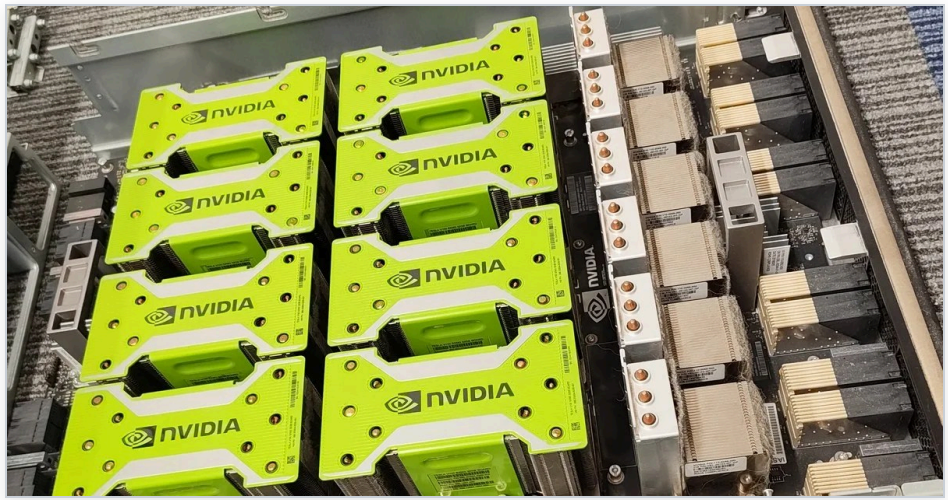
11月4日に始め、11月7日にレイアウト完成。製造・実測はまだ

制御方式の参考：HRL Laboratories, "A digitally controlled silicon quantum processing unit", Nature 655, 1154 (2026)。4K のふるまいは PDK のモデル（−40℃まで）からの近似

自作の推論エンジン「Tachyon」

半導体量子コンピュータ設計協議会
blueqat株式会社

Rust と CUDA で一から書きました。何世代か前の V100 1枚で、27B のモデルを1人あたり毎秒75トークン。



古い GPU に無いものは自分で作る

int8・fp8 の Tensor Core や FlashAttention が無い分を fp16 の自前部品で。3語の下書き（MTP）、CUDA Graph など

llama.cpp（llama-server）との比較：V100 1枚、27B のモデル（4ビット）

	Tachyon	llama-server 下書きなし	llama-server MTP あり
1人の出力（トークン/秒）	75	37	53
最初の1語（入力550）	0.70秒	1.0秒	
最初の1語（入力8K）	7.9秒	11.4秒	

下書きなしの約2倍、MTP ありの約1.4倍。答えは742か所中740か所で一致

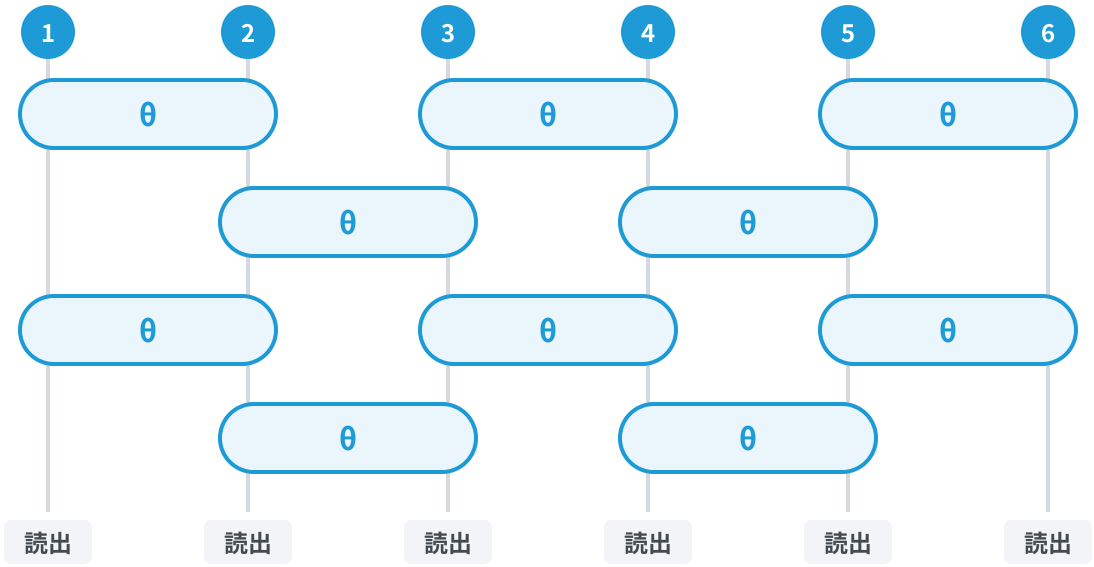
2026年11月10〜11日、社内で同じ V100 1枚で測定。同時に複数人が使う場合はまだ測っていない。出典：blueqat ニュース（2026-11-11）。写真：湊

研究紹介：バブルソート交換網

半導体量子コンピュータ設計協議会
blueqat株式会社

Exchange-only ではSWAP を並べるだけの回路がそのまま動く。それを機械学習の模型にして、LLM の分布を写しました。

バブルソート交換網（偶奇の入れ替え。1パルスに1つのパラメータ）



完全な SWAP になるパルスなら並べ替え。ほかの長さなら、配線ともつれが一つになる

LLM の分布を蒸留

GPT-2 の次単語の分布を、この網に写す。6論理量子ビットで KL **0.011**（深さ N）→ **0.004**（2N）。χ=4 の MPS より小さい

選択則

交換は全スピンを保存。届く分布は**初期状態で決まる**。Néel 状態なら何も禁止しない

リークは資源

終状態の多くは符号空間の外。**リークは誤りではなく資源**。10〜14論理量子ビット（30ドット）まで計算

Y. Minato, "Bubble-Sort Exchange Networks…on Exchange-Only Spin Chains", arXiv:2610.22093 (2026-10-15)。数値は雑音なしの計算

まとめ・お問い合わせ

量子コンピュータは、半導体産業が「つくる」だけでなく「設計する」側にも回る段階に入りつつあります。

製造：SEMI量子コンピュータ協議会

25社・団体が参加。ウェハから制御回路まで、供給網をつくる。12月は SEMICON Japan で

設計：半導体量子コンピュータ設計協議会

Exchange Only 方式を中心に、論理設計・制御・アルゴリズム・誤り訂正を隔月で

SEMI量子コンピュータ協議会
SEMIジャパン　安藤　yando@semi.org

半導体量子コンピュータ設計協議会
blueqat株式会社　info@blueqat.co.jp