blueqat

今年の年末から始まる
次世代の量子コンピュータ

アプリは機械学習、使い方は生成AI、中身は半導体量子（Exchange-only）

Qiskit Fall Fest 2026 @ Keio

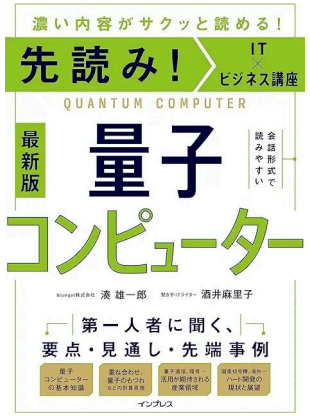
2026年10月

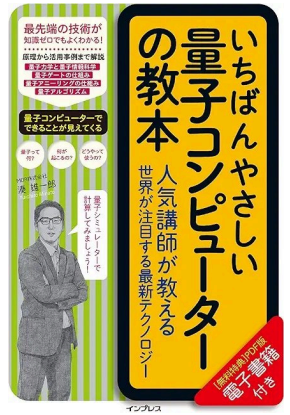
湊 雄一郎（blueqat株式会社）

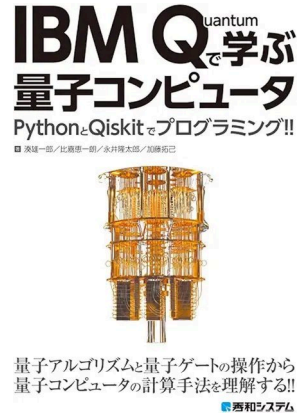
自己紹介・企業概要

会社名	blueqat株式会社
代表者	代表取締役 湊 雄一郎
役職	SEMI 量子コンピュータ協議会 委員長
設立日	2008年12月12日
所在地	〒150-6139 東京都渋谷区渋谷 渋谷スクランブルスクエア 39F
資本金	2億6,310万円
事業内容	量子コンピュータ開発 生成AI・量子機械学習サービス コンサルティング
パートナー	NVIDIA 量子パートナー Amazon 量子パートナー

代表の著書











blueqat

はじめに：量子の業界で、どう生きるか

学ぶ・起業する・安定して働く。そして、億り人への条件

量子の業界には、いろいろな人がいる

学びたい人、起業して稼ぎたい人、安定して働きたい人。どの道もあります。ただし、大きく稼ぐには時間と条件が要ります。

学びたい

じっくり量子コンピュータを学び、研究したい

大学・研究所、論文

起業したい

最先端の技術をどんどん取り入れて、起業して稼ぎたい

スタートアップ

安定して働きたい

安定した仕事について、給料をもらいたい

企業の研究開発・エンジニア

億り人への道（blueqat の経験）

- **2024年に多数の億り人を輩出**
- **短期では難しい。私たちでも、何人かが届くまで約10年**
- **10年続ければ、一生働かなくてよい人もいる**
- **多くの人は条件を満たしていないか、そもそもその構えを考えていない**

① 資金か技術 **② やる気がある** **③ 続けられる**

条件は厳しい。資金がなければ技術。この3つがそろうかどうか

次の活動は量子コンピュータ。自分のタイプを先に決めると、選ぶ層と進み方が決まります（進路の目安は後半）

億り人（2024年）・約10年は、講演者（blueqat 代表）の経験による

億り人になるには、タイミングも大事

私たちの場合、NVIDIA の値上がりで生まれた利益の再投資が量子に向かい、初期の投資家に大きなリターンを返せました。

2015〜2016年
初期の投資家が
数千万円単位で出資

▶

AI・GPU の伸び
NVIDIA の値上がりで
大きな利益が出る

▶

再投資
利益の投資先を
探す人たちがいる

▶

2024年：量子へ
blueqat が大きな
資金を受け取る

▶

リターン
初期の投資家に
約10倍

タイミングが大事

同じ努力でも、**お金が流れてくる時期**に居合わせるかで結果が変わる。私たちの場合は AI・GPU の波だった

会社の準備は追いつかなかった

そこまでの準備はできていなかった。それでも、**初期から支えた投資家にきちんとリターンを返せた**

量子にベットした人

偶然かどうかは分からないが、**早くから量子技術に賭けた人**の中に、大きく報われた人がいる

億り人への条件：資金か技術・やる気・継続に、タイミングが加わる

講演者（blueqat 代表）の経験による。金額・倍率は目安で、将来の成果を約束するものではない

起業するなら：金利・株・補助金

ベンチャーのお金は金利で動きます。いまは高金利で、リスクマネーが集まりにくい時期です。

ベンチャーのお金は、金利で動く

金利が低い

預けても増えない
→ リスクマネーがベンチャーへ
→ ベンチャー投資が進む

金利が高い（いま）

預ければ利息がつく
→ ハイリスクのお金は回収されやすい
→ VC も流行っていない

株を渡しすぎない

初期に大きな割合を渡し、お金はあっても**食いつぶして先がない**ベンチャーは山ほどある。会社には**利益**が大事

自分で決めて、戦う

良さそうな道を選んだつもりでも、失敗すると**ゾンビのように働く**ことに。人の言いなりは、だいたいうまくいかない

補助金・大企業の出資

薄く広く配られ、若い起業家に大きな額は出にくい。**監査がつき、給料も大企業並みを超えにくい**

私たちの場合

言うことを全く聞かなかったから、大きな利益を得られた。ベンチャーの「あるある」

自分の人生は、自分で責任を取る。市況のタイミングと条件を見て選ぶ

講演者（blueqat 代表）の経験と見方による。個別の投資・資金調達の助言ではない

ヒットは予想外のところから：コスメデコルテ AQ

量子で設計したクレンジングオイルが大ヒット。大きな売上と利益を生み、投資を回収できました。

KOSE・コスメデコルテ AQ

- **人ならまず思いつかない、1000億通りから選ばれた処方**
- **新規顧客数や予約数、売り切れ期間を経て、さまざまな販売記録**

セオリー通りのものは、見えにくい

定石どおりのソフトウェアやアプリも利益を生んでいるかもしれないが、**外からは分かりづらい**

このヒットは、自分で確かめられる

大ヒットと発表され、**店頭で手に入る**。実際に買って試せる



出典：KOSE ニュースリリース https://corp.kose.co.jp/ja/news/9205/（処方・販売記録）。売上・利益・回収は講演者（blueqat 代表）の経験による

blueqat

全体像：次世代の量子コンピュータ

FTQC を目指す専用ハードと、ロードマップ

量子ソフトウェアの層：全体図

全体像

上の2層はどのハードでもほぼ共通。 真ん中から下が、ハードごとに違うところです。

問題・アプリ	化学・材料、最適化、機械学習。 問題を量子で扱える形に直す
フロントエンド	量子回路（Qiskit など）＋ 生成AIの補助。 回路の書き方は変わらない
中間層	抽象化（OpenQASM などの共通表現）と コンパイラ（配置・SWAP 挿入・基本ゲート変換・最適化）
誤り訂正の層	論理量子ビットと物理量子ビットの対応。 測定 → 判定 → 訂正を毎周期くり返す
制御の層	命令列とパルス。マイクロ波・レーザー・ 電圧パルスなど、方式で中身が違う
デバイス	超伝導回路・イオン・中性原子・光・ 半導体の量子ドット

どのハードでもほぼ共通

回路の形は変わらない

ここがハードごとに違う

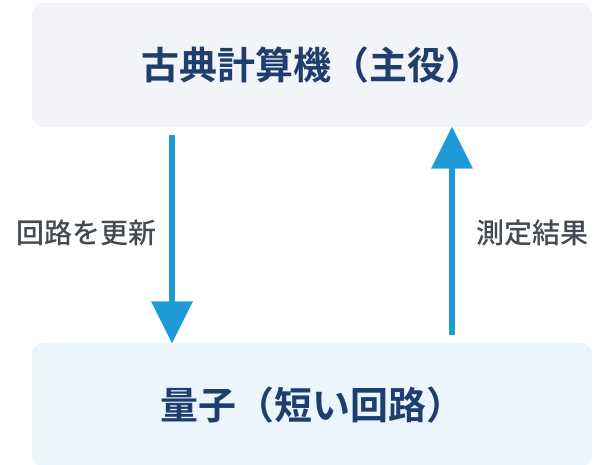
安い操作・つながり方・
誤り訂正の置き方が変わる

今日の主題はこの4層

次世代は FTQC：NISQ とは別の専用ハード

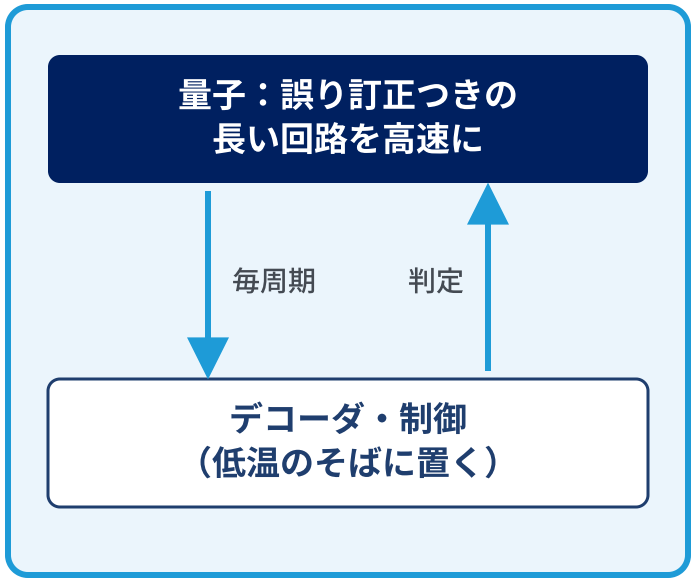
NISQ は今ある機械を工夫して使う時代。次世代はFTQC（誤り耐性）を目指して、ハードを最初から専用に設計します。 量子単体で、長い回路を速く走らせます。

いま
ハイブリッド



更新をくり返す。量子は短い回路だけ

次
FTQC（単体）



IBM の目標（公表）

2029年に Starling：**200 論理量子ビットで 1 億ゲート**。続いて 2030年代半ばに Blue Jay

NISQ との違い

NISQ は既存の機械に合わせて浅い回路を工夫。FTQC は**誤り訂正・デコーダ・制御まで含めて専用に作る**

必要なもの

量子ビットの数と、制御系を含めた設計。古典の役割は、誤りの判定と制御に絞られる

IBM のロードマップ：IBM Quantum Blog, "IBM lays out clear path to fault-tolerant quantum computing"、IBM Newsroom (2026-08-26)

ロードマップを重ねる：IBM・HRL・Intel

全体像

超伝導はモジュールをつなぐ、スピンは同じ素子を大量に作る。それぞれの計画を1枚に並べます。

IBM 超伝導	2025 **Loon** 長距離の結合	2026 **Kookaburra** 最初の モジュール	2027 **Cockatoo** モジュール間の もつれ	2029 **Starling** 200論理量子ビット 1億ゲート	2030年代半ば **Blue Jay** 10億ゲート
HRL → IBM シリコンスピン	2023 **EO の論理ゲートを実測**	2026 **54ドット QPU** 最大18量子ビット	2026-07-23 **IBM が買収を発表**	2026-08-26 **買収が完了**	今後 **製造の将来計画に言及** 時期は未公表
Intel シリコンスピン	2023 **Tunnel Falls** 12量子ビット	2024 **300mm ウェーハで評価** （1.6K）	2026 Q2 **729ドット** （計画）	2027 **1,971ドット** （計画）	2028 **10,000ドット** 約3,300 量子ビット（計画）

実線：実績　破線：計画（IBM は全て計画。時間は左から右、縮尺なし）

IBM の言い方

"HRL's expertise in silicon-spin qubits complements IBM's leadership in superconducting quantum computing."

ソフトへの影響〔推〕

超伝導は**モジュールをつなぐ**方向、スピンは**同じ素子を大量に**作る方向。回路の配置とパルスの費用表は、方式ごとに切り替える

出典：IBM Quantum Blog／IBM Newsroom (2026-07-23, 2026-08-26)／HRL, Nature 655, 1154 (2026)／Weinstein et al., Nature 615 (2023)／Intel：Tunnel Falls（2023）、arXiv:2307.04812（Nature 2024）、APS March Meeting 2026 の講演スライド。ドット数の計画は講演スライドによる

アプリ層の変化：実用の前に、探索が進む

アプリ層は変わらないように見えて、FTQC のアプリになり、生成AIで作るものになります。

いま：NISQ
実証（PoC）が中心

▶

初期の FTQC
まだ先。小さな問題から

▶

本格の FTQC
2029年〜。実用の計算

実用化はしばらくお預け。そのあいだに進むのが「探索」

アルゴリズムの探索

FTQC で何を、何ゲートで解くか

FeMoco は8年で約50兆→約3.4億 Toffoli

AI による探索

AI が回路と解き方を探す

Claude は1回53時間の実行で新方式

応用の探索

生成AIで課題を定式化して試す

言葉で頼み、案をたくさん試す

問題は同じ（化学・最適化・機械学習）。
変わるのは解き方（FTQC 前提）と、作り手（生成AI）

FTQC のアプリへ

浅い変分の回路から、**誤り訂正つきの深い回路**（位相推定・DQI）へ。次のページの表

アプリも生成AIで作る

定式化・回路・検証を AI が受け持つ。**試せる数が桁で増え、探索が速くなる**〔見〕

FeMoco：Anthropic (2026-10-16) が引く既存の見積もり（2017→2025、8年）／Claude の53時間：同記事。〔見〕は blueqat の見立て

アルゴリズムはどうなるか

誤り訂正で長い回路が回せると、使えるアルゴリズムが入れ替わります。

	いま：NISQ	初期の FTQC（これから）	本格の FTQC（2029〜）
化学・材料	VQE（浅い回路＋誤り緩和）	位相推定で小さな分子〔見〕	**FeMoco：約3.4億 Toffoli（2017年は約50兆）**
最適化	QAOA（浅い回路）	誤り訂正つきの小さな実証〔見〕	**DQI：古典で約3か月の問題を約1時間**
機械学習	量子カーネル・量子の層の実証	量子の層を誤り訂正つきで〔見〕	**AI の計算資源の一部に〔見〕**
物理の時間発展	浅い Trotter	長い時間発展	**材料の動きの計算〔見〕**
暗号	射程外	射程外	**RSA-2048：物理100万個未満で1週間未満**

主役が交代：浅い「変分」（VQE・QAOA）から、深い回路の「位相推定・DQI・Shor」へ

FeMoco・DQI：Anthropic (2026-10-16) が引く既存の見積もり（DQI は Google Quantum AI の見積もり）／RSA-2048：C. Gidney (2025)。〔見〕は blueqat の見立て

blueqat

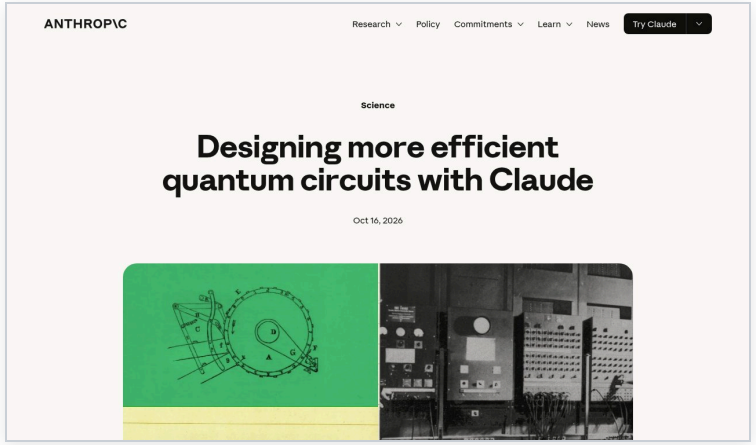
② 使い方：生成AI

最新の LLM、エージェントとハーネス、ベンチマーク、AI による回路設計

最新ニュース：AI が量子の回路を作る

blueqat

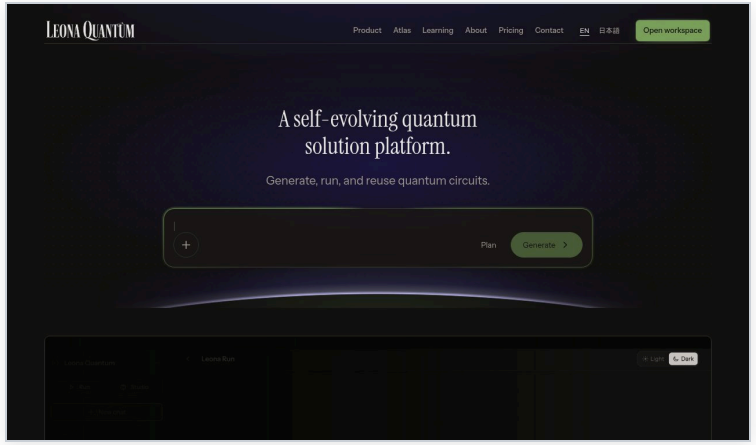
言葉で頼むと AI が回路を設計し、実機まで動かす。ここ数か月で道具がそろってきました。



2026-10-16 Anthropic

Claude が8つの回路で公開済みの最良設計を上回る

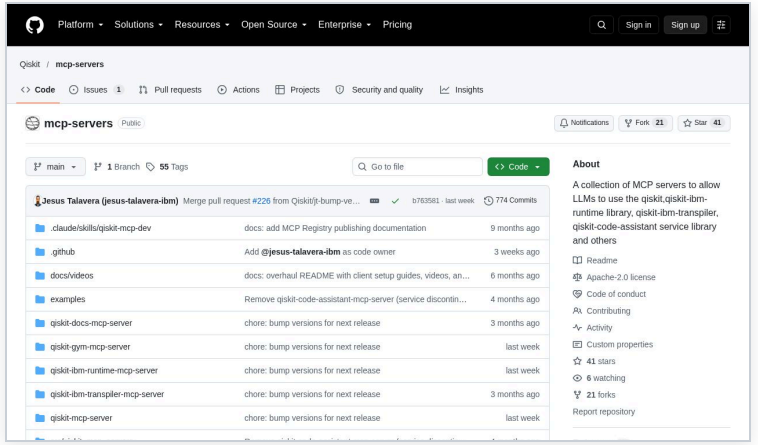
平易な指示と自動の評価プログラムで、AI が回路を設計（p.19）



2026 Leona Quantum

言葉から回路・実行・検証の記録まで

AI（Nala）が回路を書いて実行し、通った検査を示す



2026 IBM・Qiskit

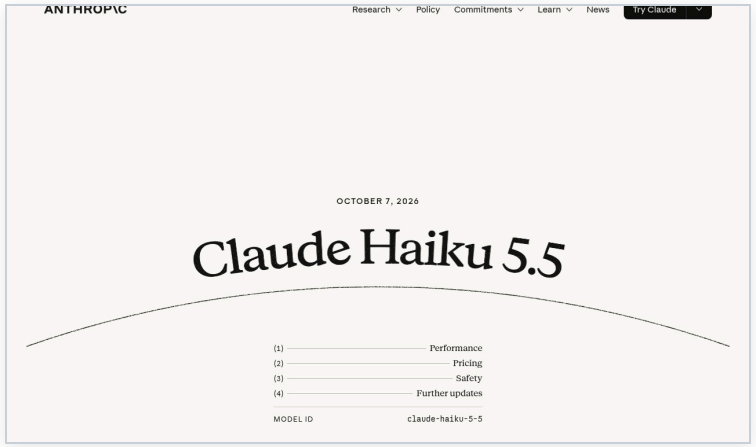
Qiskit の MCP サーバー

AI エージェントが IBM Quantum と Qiskit を直接使える

出典：anthropic.com/research/designing-efficient-quantum-circuits／leonaqt.com／github.com/Qiskit/mcp-servers（画面は各ページ、2026-10-17 取得）

最新ニュース：クラウドの大型 LLM

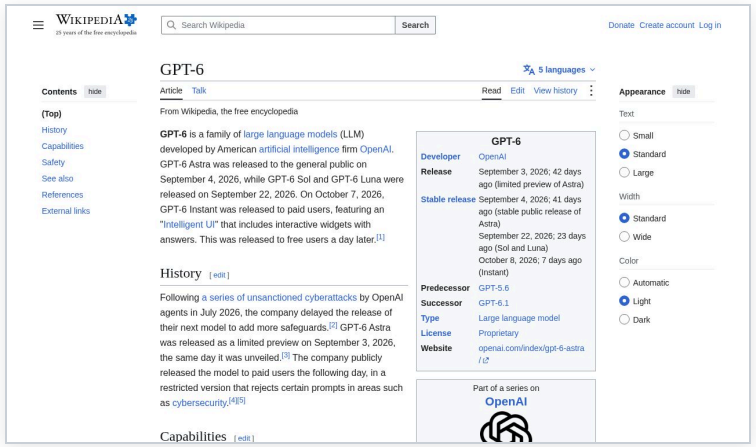
Claude・ChatGPT・Gemini は数週間おきに新しいモデルが出ています。重みは非公開で、クラウドから使います。



2026-10-07 Anthropic

Anthropic「Claude Haiku 5.5」

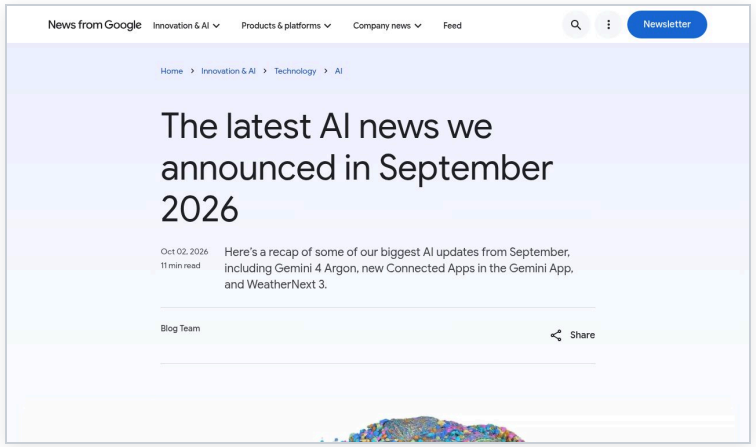
最も安く速い小型モデル。9月28日には Sonnet 5.5



2026-09〜10 OpenAI

OpenAI「GPT-6」

9月4日に公開。10月8日に GPT-6 Instant を ChatGPT へ



2026-10-13 Google

Google「Gemini 4 Argon」

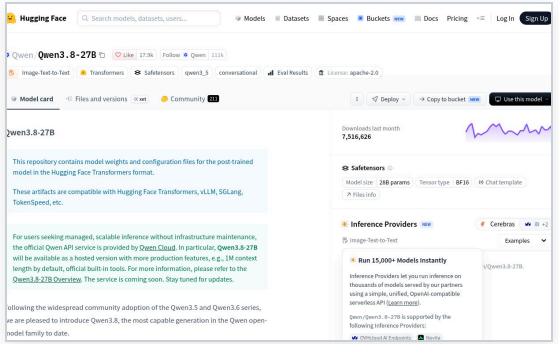
新しいフロンティアモデルを全世界で展開

新しい形も：Jev（TypeSafe AI、2026-09）は文章を書かず、型の決まった答えと確率だけを返す判断専用モデル

出典：anthropic.com/news/claude-haiku-5-5／Wikipedia "GPT-6"（OpenAI の発表を整理したもの）／blog.google（2026-10-02）・gemini.google リリースノート（2026-10-13）。画面は 2026-10-17 取得

最新ニュース：オープンな LLM

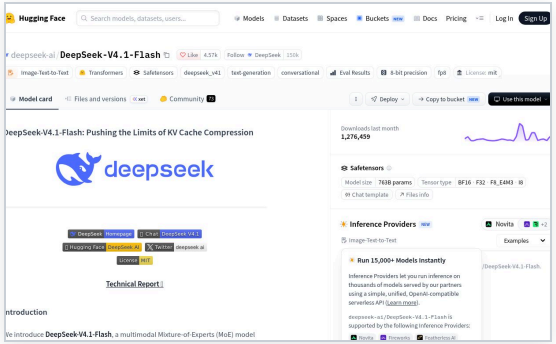
Qwen・DeepSeek・GLM・Kimi は重みが公開。自前の GPU で動かせるローカル LLM になります。



2026-08 Qwen

Alibaba「Qwen3.8-27B」

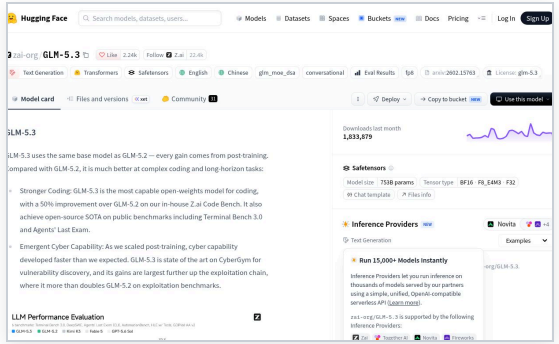
270億パラメータ。Apache-2.0



2026-09 DeepSeek

DeepSeek「V4.1-Flash」

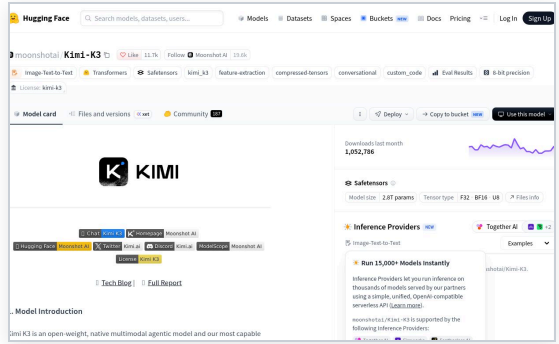
MoE、MIT ライセンス。エージェント用の Harness も公開



2026-08 Z.ai

Z.ai「GLM-5.3」

コーディングで最も強いオープンモデル（同社）



2026-06 Moonshot AI

Moonshot「Kimi K3」

2.8兆パラメータのオープンモデル

ローカル LLM の良さ：データを外に出さない・速い・量子の仕事に合わせて調整できる。弱いのは知識と指示の細部（blueqat の社内実測）

出典：Hugging Face のモデルカード（Qwen/Qwen3.8-27B、deepseek-ai/DeepSeek-V4.1-Flash、zai-org/GLM-5.3、moonshotai/Kimi-K3）／api-docs.deepseek.com。画面は 2026-10-17 取得

ベンチマーク：AI の量子の力を測る

AI が量子の仕事をどこまでできるかは、問題集と採点の仕組みで測ります。測り方を知ると、数字にだまされません。

量子の生成AIを測るもの

Qiskit HumanEval	**Qiskit のコードを書けるか** IBM の専用 LLM の評価にも使われる
論文の再現	**論文の手法を再現できるか** blueqat が自社で作成。答えを機械で採点
回路の点数	**少ない量子ビット×ゲートで正しく作れるか** Anthropic の評価プログラム（p.19）

読むときの注意

- 弱い比べ相手だと良く見える
- 測る式と、測りたい物がずれる
- 測れなかったのに「合格」になる

点数は「何で測ったか」とセット

同じモデルでも、ハーネスと問題集が変われば点数が変わる。**条件を書かない数字は比べない**

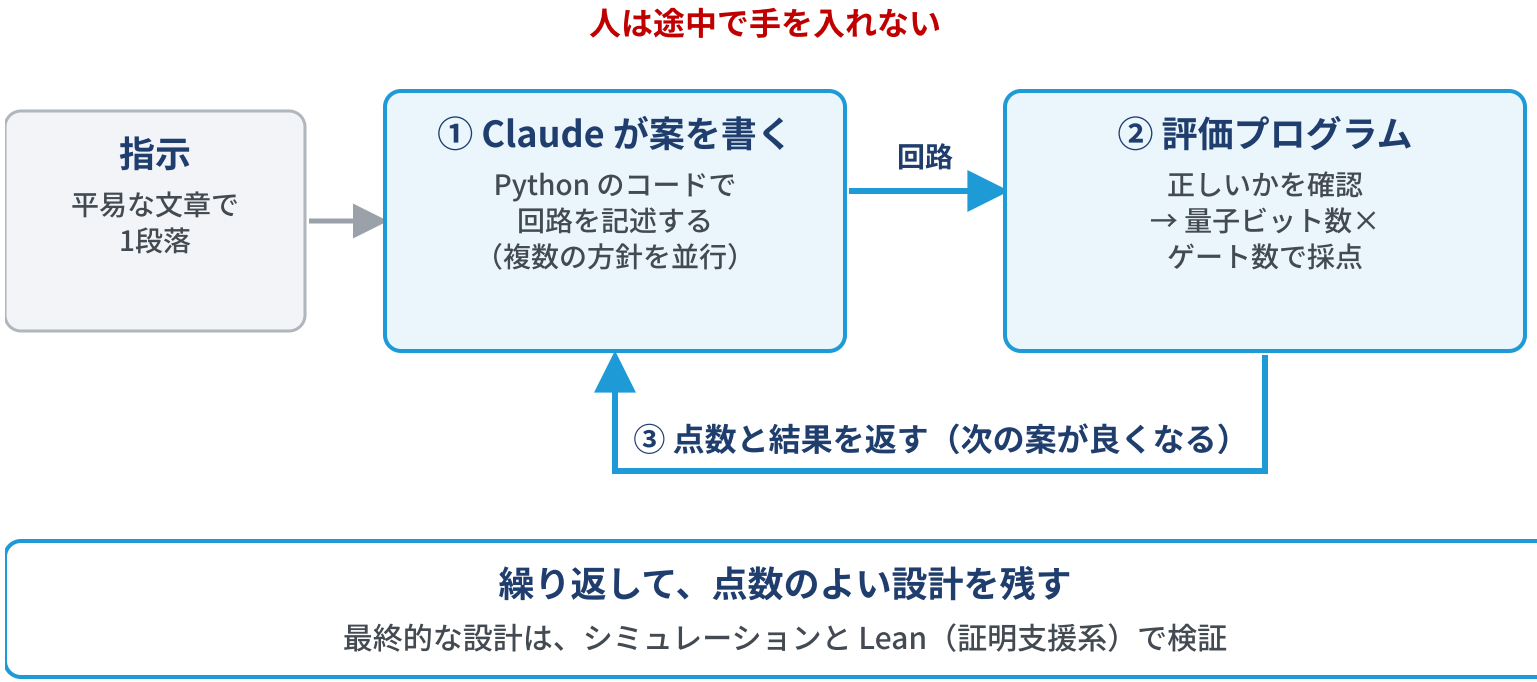
自分でも作れる

答えを機械で採点できる問題を数問。**小さく作って、毎回同じ条件で回す**

Qiskit HumanEval：IBM Quantum 文書（専用 LLM の評価）／論文の再現：blueqat の社内ベンチマーク（2026-09 作成、機械採点）／注意の3点は blueqat の測定の経験から

エージェントとハーネス

AI が案を出し、評価プログラムが採点し、結果を見て直す。この道具と手順の仕組み（ハーネス）で、仕事の質が決まります。



ハーネス＝AI の仕事場

道具・評価・記録をそろえる仕組み。**賢さはモデル、仕事の質はハーネス。**モデルは差し替えられる部品

実際にやったこと

楕円曲線の点加算では、1段落の指示から約**53時間**の1回の実行で新しい方式に到達

身近な例

Claude Code、Qiskit の MCP サーバー、blueqat poqet

出典：Anthropic, "Designing more efficient quantum circuits with Claude" (2026-10-16)／arXiv:2610.22367。図は同記事の Figure 1 を参考に作図／Qiskit MCP：github.com/Qiskit/mcp-servers

blueqat

③ 中間層：コンパイラと誤り訂正

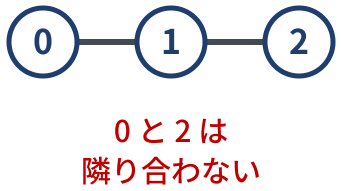
バックエンドがコンパイラを決める。表面符号と qLDPC

コンパイラ（トランスパイラ）の6つの段

Qiskit の transpile は、回路をその機械に合わせて書き直す。 この中でルーティング（SWAP の挿入）が、のちの話の主役になります。

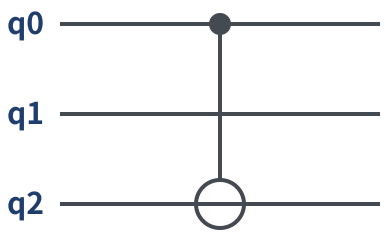
init	layout	routing	translation	optimization	scheduling
3量子ビット以上のゲートを分解	回路の量子ビットを、機械のどこに置くか	隣り合わない量子ビットに SWAP を挿入	その機械の基本ゲートに書き換える	打ち消し合うゲートや無駄を削る	時間軸に並べる

機械の結合の形



0 と 2 は
隣り合わない

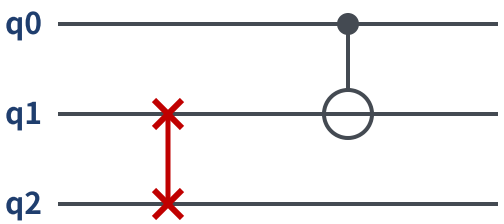
入力の回路



q0 → q2 の CNOT

routing

routing のあと



SWAP を挿入

CNOT は隣どうしに

Target ＝ 機械の「ゲート費用表」

基本ゲート・結合の形・各ゲートの時間と誤り。**表を差し替えれば、同じ仕組みで別の機械に合わせられる**

配線のたとえ

layout＝配置、routing＝配線、optimization＝最適化、scheduling＝タイミング。半導体設計の EDA とほぼ同じ構図

段の名前は Qiskit の preset pass manager の6段（init・layout・routing・translation・optimization・scheduling）に従う

ハードの対決：半導体と中性原子

コンパイラはバックエンドの得意・不得意に合わせて作られます。いまは半導体と中性原子の対決。いずれ一つに絞られると見ています。

	半導体（Exchange-only）	中性原子
量子ビット	電子1個（ナノメートル級）	原子1個（レーザーで捕まえる）
つなぎ方	隣どうし。SWAP が安い	原子を動かして組み替える
規模の実績	HRL 18量子ビット（2026）	3,000原子超を2時間以上維持
計画	Intel 1万ドット（2028）	QuEra 論理256個（2028）
弱み	素子ごとの差と較正	読み出し・移動が ms 級で遅い
コンパイラの仕事	交換パルス列の合成、SWAP を使う配置	原子をいつ・どこへ動かすかの計画

いま：二つの方式の対決 → これから：一つに絞られていく〔見〕

バックエンドがコンパイラを決める

つなぎ方と「安い操作」が違うので、配置・ルーティング・スケジュールの作り方が別物になる

一つに絞られると〔見〕

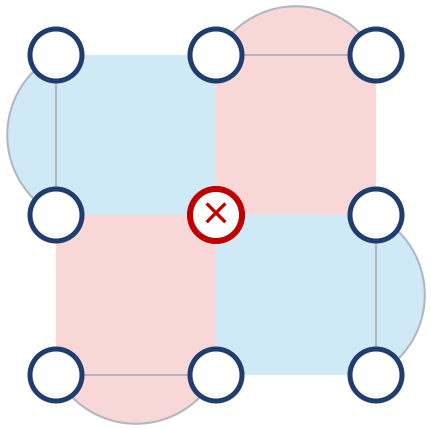
勝った方式に合わせてコンパイラも標準が一つにまとまっていく。超伝導・イオン・光も競争を続けている

中性原子：Chiu et al., Nature (2025)／QuEra×AWS Libra 計画（2028）／読み出し時間は方式比較の調査による。半導体：HRL, Nature 655, 1154 (2026)／Intel の計画は APS March Meeting 2026 の講演スライド。〔見〕は blueqat の見立て

誤り訂正①：表面符号

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

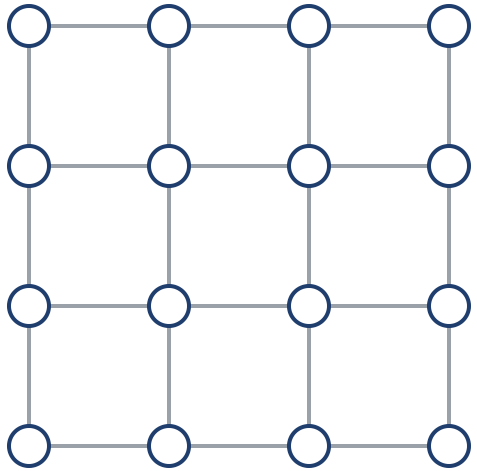
HRL は繰り返し符号で d＝3→5 の改善が 4.7 倍（2026）。**デコーダの速さ**が次の課題（Willow は 1周 1.1μs）

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）

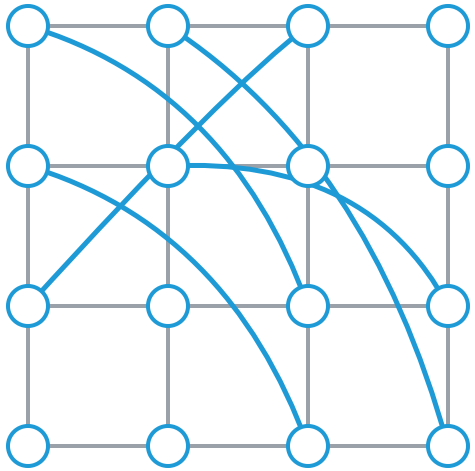
誤り訂正②：qLDPC 符号

遠くの量子ビットともつなぐと、同じ性能を少ない量子ビットで出せます。IBM が2029年の FTQC で採用予定です。

表面符号：隣とだけつなぐ



qLDPC：遠くともつなぐ



少ない量子ビットで

IBM の gross 符号は **288個で論理12個**。表面符号の約1/10（IBM の主張）

そのかわり遠くとつなぐ

超伝導は長距離の結合器（IBM Loon）、中性原子は原子を動かす。**どうつなぐかがハードの勝負所**



gross 符号 [[144,12,12]]：S. Bravyi et al., Nature 627, 778 (2024)／IBM Quantum Blog。表面符号の約3,400は、同じ距離12で論理12個を作る場合の blueqat の計算（$2d^2-1=287 \times 12$）

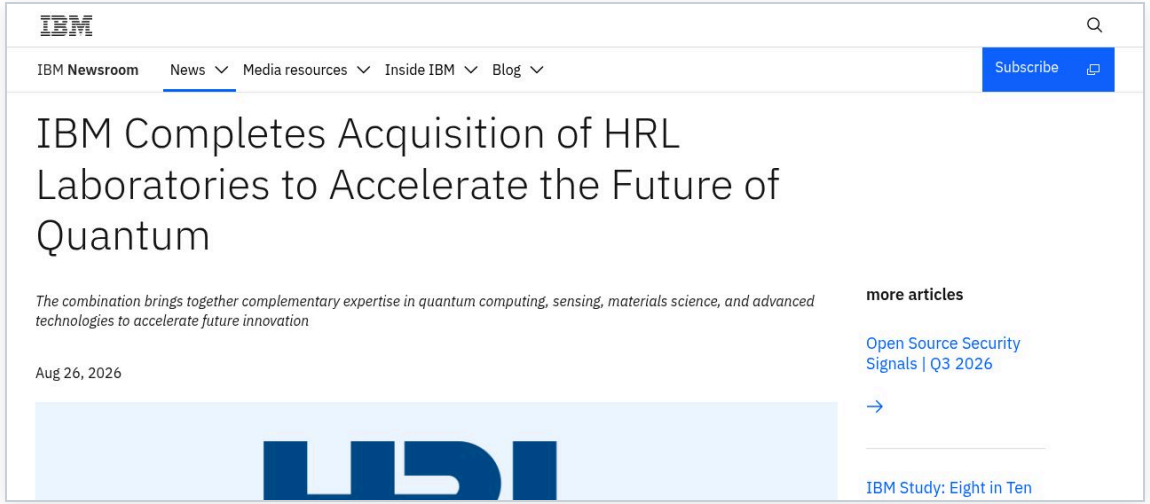
blueqat

④ バックエンド：半導体量子

最新ニュース、制御を冷凍機の中へ、EDA と PDK、blueqat の実機。そして Exchange-only

最新ニュース：IBM と HRL

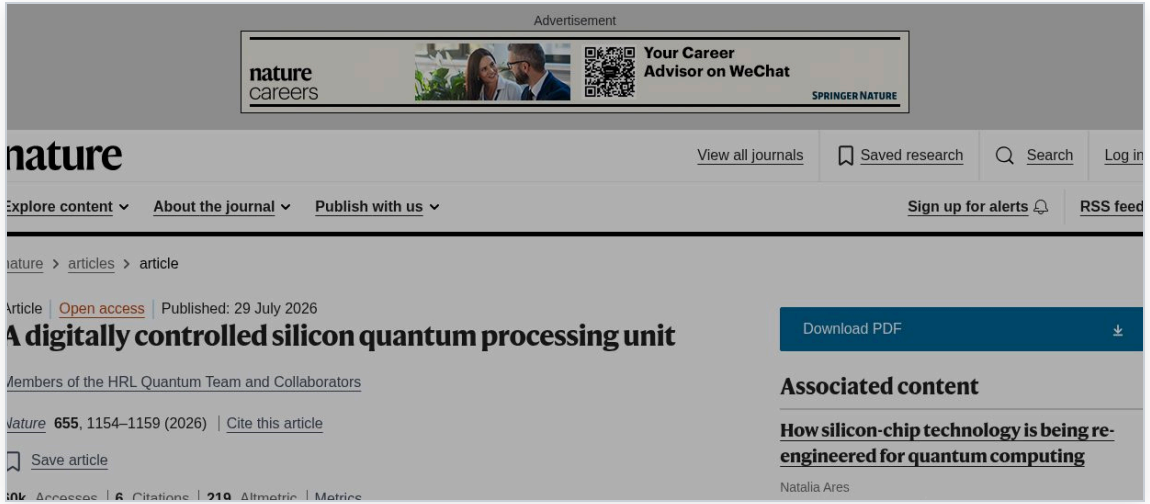
超伝導の IBM が、Exchange-only の HRL を傘下に。HRL は 18量子ビットの QPU を Nature に発表しました。



2026-08-26 IBM Newsroom

IBM が HRL の買収を完了

シリコンスピンは超伝導を補う技術、と IBM。冷凍・制御電子回路・実装も取り込む



2026-07-29 Nature

HRL「デジタル制御のシリコン QPU」

54ドット・最大18量子ビットを、4K のデジタル回路で制御（Nature 655）

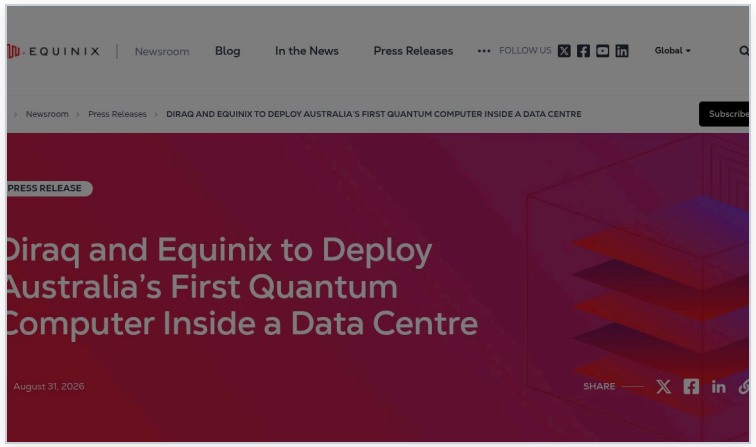
出典：IBM Newsroom (2026-08-26)／HRL Quantum Team and Collaborators, Nature 655, 1154 (2026)。画面は 2026-10-17 取得

最新ニュース：研究室からデータセンターへ

④ バックエンド

blueqat

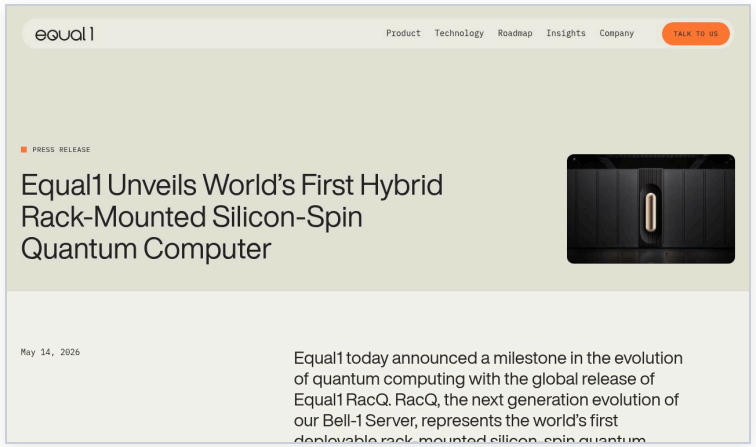
シリコンの量子計算機がデータセンターやラックに入り始めました。量産の CMOS 工程で作る会社も増えています。



2026-08-31 Diraq・Equinix

Diraq と Equinix、データセンターに設置

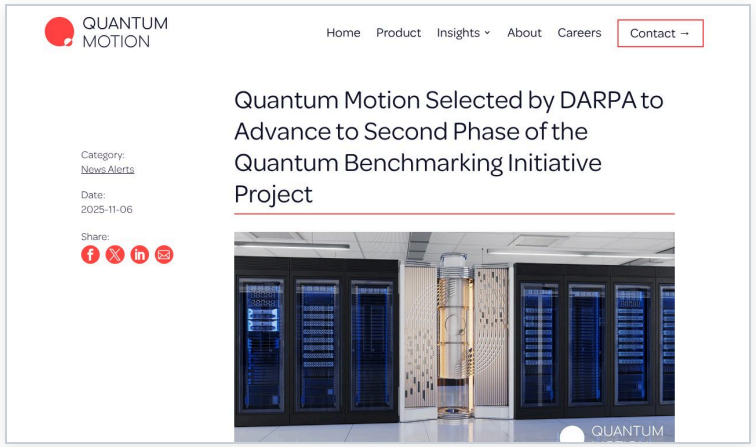
8量子ビットのシリコンチップ、消費電力 20kW 未満。2026年10月に設置完了の予定



2026-05-14 Equal1

19インチラックに入るシリコンスピン機

データセンターの標準ラックに収まる RacQ



2025-11-06 Quantum Motion

米 DARPA の評価事業で次の段へ

標準の CMOS 工程でシリコンスピンを作る11組織の一つ

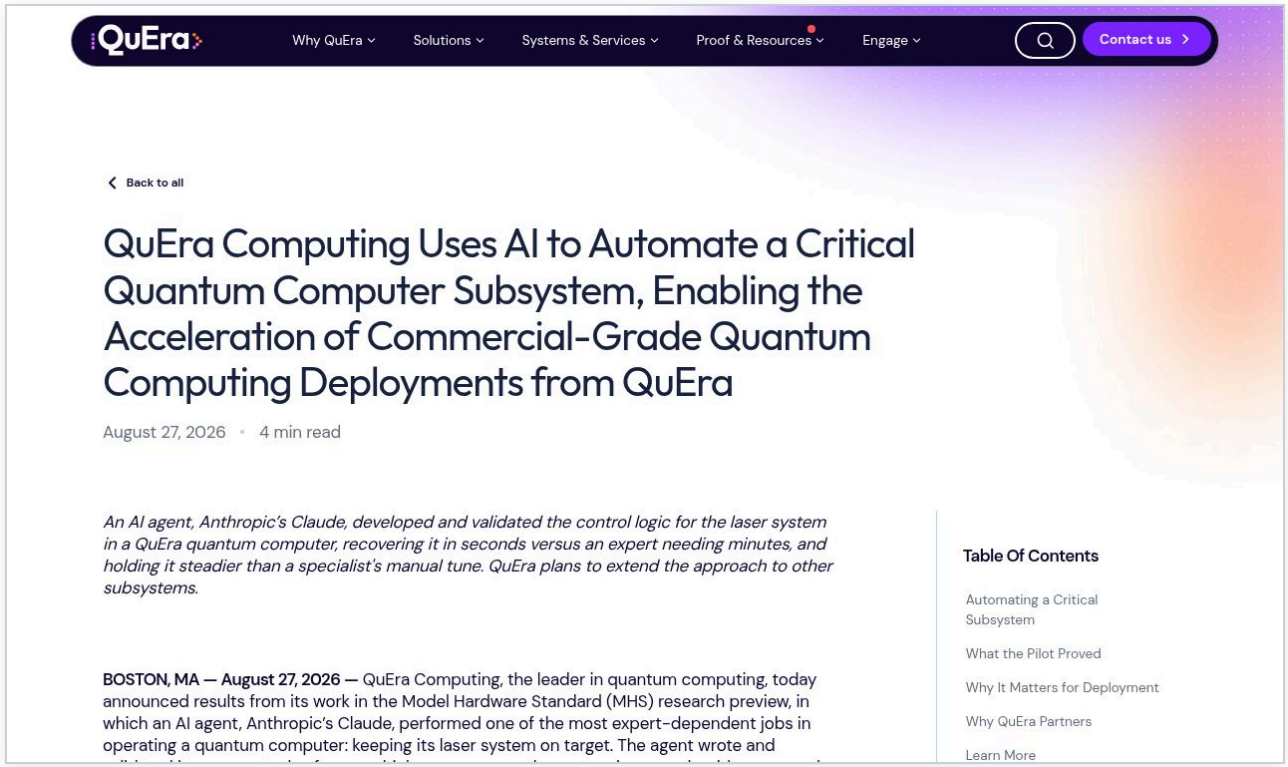
出典：Equinix Newsroom／Equal1 (2026-05-14)／Quantum Motion (2025-11-06)。画面は 2026-10-17 取得

ハード開発にも AI：Claude が装置を調整

④ バックエンド

blueqat

QuEra は、Claude が量子コンピュータのレーザーを自動で立て直す制御を作ったと発表しました（2026-08-27）。



何をしたか

中性原子の装置で、ずれたレーザーの周波数を**AI が自分で書いた制御で戻す**。熟練者の仕事だった

結果

7種類の故障で **700回中695回回復**。多くは**6秒未満**（熟練者は5〜10分）

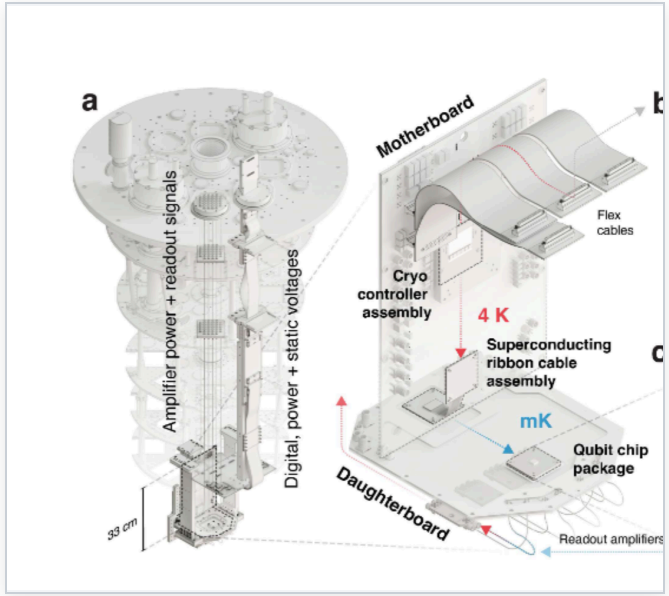
意味

装置が増えても、現場に専門家を置かずに運用できる。**ハード開発にも AI が入る**

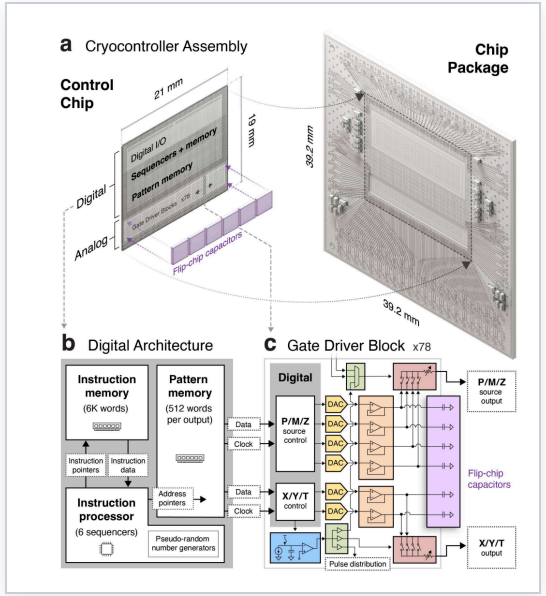
出典：QuEra Computing プレスリリース (2026-08-27)「QuEra Computing Uses AI to Automate a Critical Quantum Computer Subsystem…」。画面は 2026-10-17 取得

制御を冷凍機の中へ：HRL の QPU

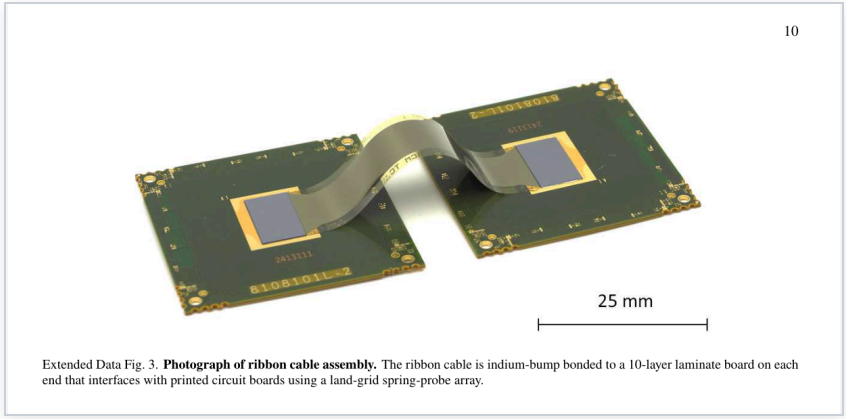
半導体はウェハの設計で動作温度を上げ、制御回路を冷凍機の中に置けます。配線が減り、装置が小さくなります。



冷凍機の中の配置。**4K に制御チップ**、その下の mK に量子ビットのチップ



4K の制御チップ。命令のメモリとパルスを作る回路が載る



4K と mK を結ぶ超伝導のリボンケーブル（目盛は 25mm）

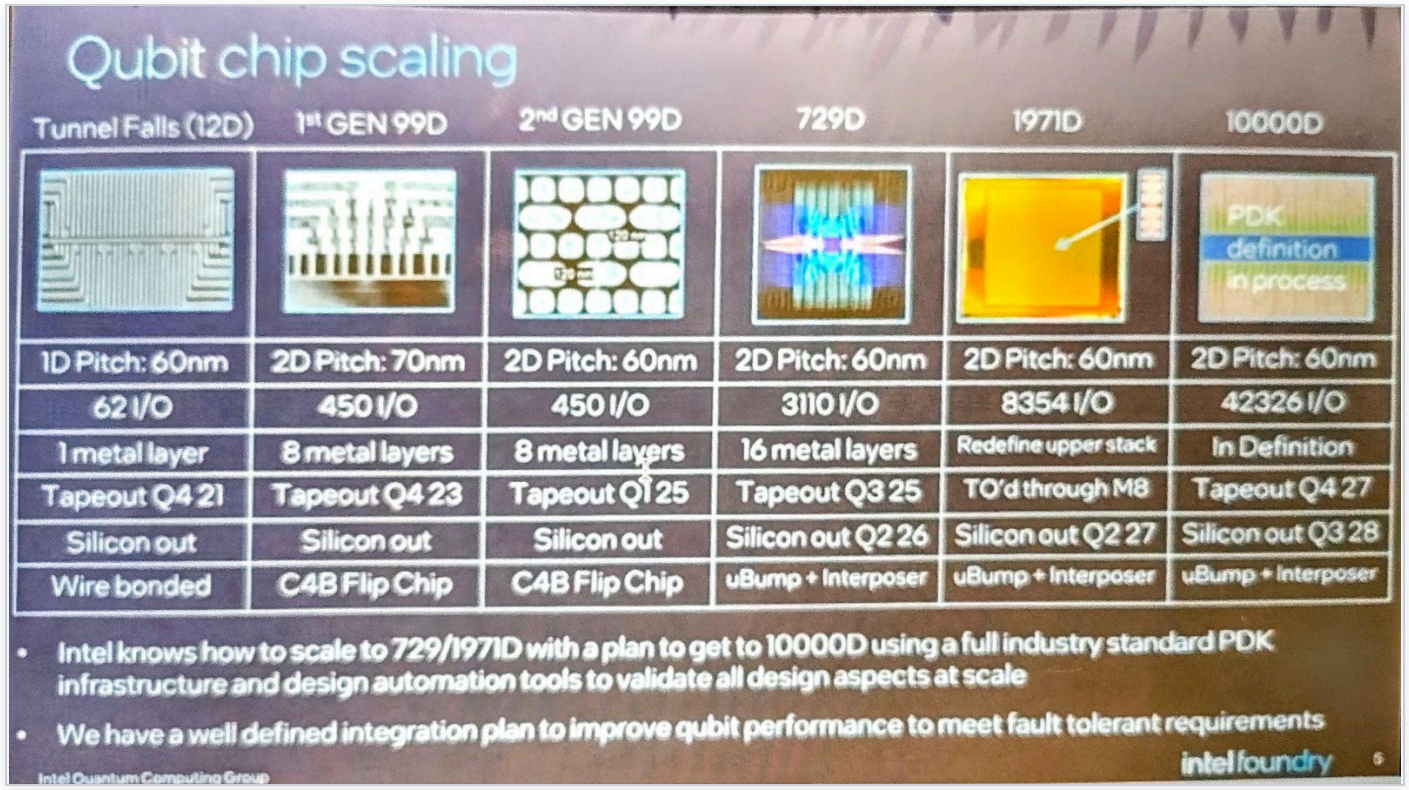
温度が上がると小さくなる

スピン量子ビットは**約1K**で動く（超伝導は約 0.015K。IBM の説明）。冷やす力に余裕ができ、**制御を中に入れて小型化**

図：HRL Quantum Team and Collaborators, "A digitally controlled silicon quantum processing unit", Nature 655, 1154 (2026) より転載／温度：IBM Quantum Blog "What are spin qubits?" (2026-07-23)

写真で見る Intel のチップ

世代ごとにドットを増やし、I/O と配線の層も増えていく。手で描ける規模を超えます。



Qubit chip scaling（Tunnel Falls 12D → 99D → 729D → 1971D → 10000D）

D はドットの数

12D が Tunnel Falls。729D から**2次元の配列**に。10000D は PDK を定義中と書かれている

配線の層が増える

金属配線は1層 → 8層 → 16層。ドットが増えるほど、**配線を描くのが EDA の仕事**になる

図：講演スライドより引用。R. Pillarisetty (Intel), "Device Integration and Process Design Kit based on Intel 18A Technology for Scaling Si/SiGe Spin Qubits", APS March Meeting 2026 (Session MAR-W05)

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

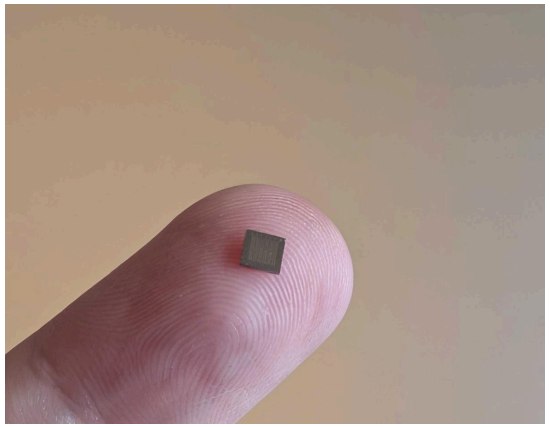
量子ドットのセル、低温で動く素子のモデル、交換パルスのライブラリ（後半で扱う）

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)

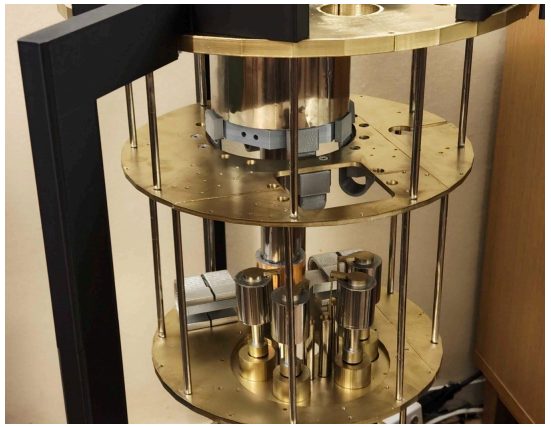
blueqat の実機：本体の作り方

④ バックエンド

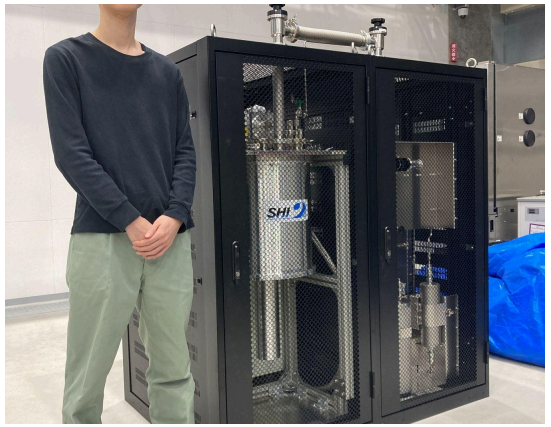
量子ビットは指先サイズのチップの中。ウェハの設計で温度を上げ、制御を冷凍機の中へ入れて、さらに小さくしていきます。



チップ（指先サイズ）



冷凍機の内部。下の段ほど冷たい



実機（高さ150cm・幅60cm）



実機の外観（奥行100cm）

① 工場で作る
量産設備と半導体の工程

② チップ
量子ドットに電子を1個ずつ

③ 冷やす
冷凍機の最下段に置く

④ 制御する
冷凍機の中の回路でデジタル制御

⑤ 使う
クラウドや poqet から

写真と寸法：blueqat の半導体量子コンピュータ（シリコンスピン方式、最新の商用量産設備を活用して開発中）。2030年に卓上型を目指す（日経クロステック 2026年1月）

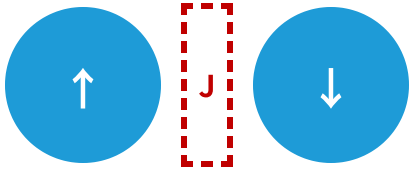
blueqat

Exchange-only：交換相互作用だけで動かす

J だけで操作 → 3ドットで1量子ビット → SWAP が安い → ルーティングが変わる

操作は交換相互作用 J だけ

隣り合う2つのスピンの間の障壁を、電圧パルスで下げると交換相互作用 J がオンになる。 これが唯一の操作です。



J をオンにした長さ θ で決まる「部分 SWAP」

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

θ = π/2 で完全な SWAP

- **マイクロ波も、磁場の勾配も要らない。波形はベースバンドの電圧パルス（振幅 約100mV）**
- **J は障壁電圧に指数関数的に依存。目安は J/h 最大 約100MHz、パルス幅 約10ns、パルス間 5〜20ns**
- **回転角は θ = J·t/h（パルスの面積）。パルスは1本ずつ順番に打つ（クロストーク回避）→ 列の長さがゲート時間**

実測値と部分 SWAP の式：A. J. Weinstein et al., "Universal logic with encoded spin qubits in silicon", Nature 615, 817–822 (2023), doi:10.1038/s41586-023-05777-3

3ドットで1量子ビット、軸は2本

3スピンの「組み方」に情報を載せる。J_{12} は論理 Z 軸まわり、 J_{23} は Z から 120° 傾いた n 軸まわりの回転になります。



- 3つのスピン（8通り）のうち、全スピン S = 1/2 の2通り×2組の片方に論理 0/1 を置く
- 一様な磁場の揺らぎは論理の情報に効かない（decoherence-free subsystem）
- S = 3/2 に出るとリーク

使える回転は2軸だけ

X 軸の回転は直接は無い。Z 軸と n 軸の回転を組み合わせて作る

代償

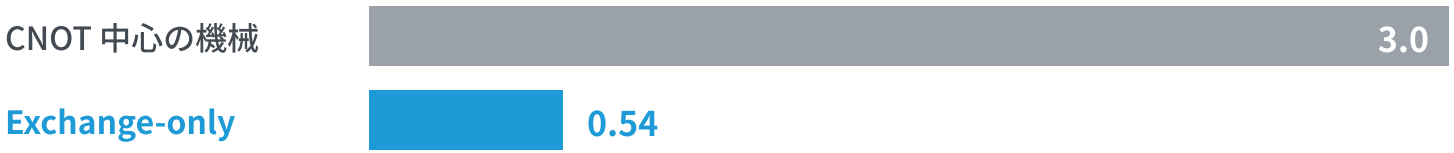
量子ビット1個にドットが3倍、ゲート1つにパルスが複数。だから「パルスを合成するコンパイラ」が必須になる

符号化と基底：A. J. Weinstein et al., Nature 615, 817–822 (2023)／提案：D. P. DiVincenzo, D. Bacon, J. Kempe, G. Burkard, K. B. Whaley, "Universal quantum computation with the exchange interaction", Nature 408, 339–342 (2000), doi:10.1038/35042541

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

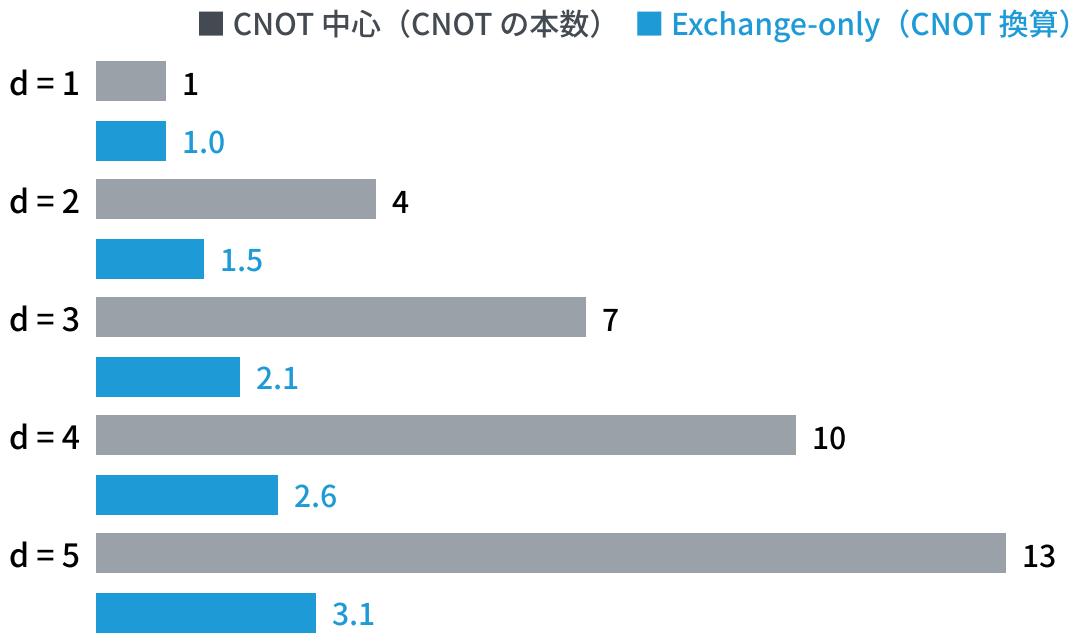
読むときの注意

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

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

進路の目安：どの層で働くか

4つの層は、それぞれ違う専門でつながっています。興味のある層から入れば、隣の層にも手が届きます。

層	何が変わる	学ぶとよいこと	向いている分野
① アプリ FTQC・生成AI →	FTQC のアプリを、生成AIで探索する	線形代数・確率、 PyTorch、テンソルネットワーク	数学・統計・情報
② 使い方 生成AI →	言葉で頼み、AI が回路まで作る	Python と Qiskit、 生成AIの使い方と検証	情報・ソフトウェア
③ 中間層 コンパイラ →	機械ごとの費用で回路を合成	アルゴリズム、 グラフと最適化、誤り訂正符号	情報・数学
④ バックエンド 半導体量子 →	量産の半導体とデジタル制御	量子力学、 半導体工学、回路設計、EDA と PDK	物理・電気電子・材料

各層の「何が変わる」は本編のまとめ。学ぶこと・分野は blueqat の目安で、どの分野からでも入れる

手元で試す：距離と SWAP の数を数えてみよう

直線に並んだ量子ビットの端から端へ CNOT を打つと、routing が SWAP を挿入します。 cx の本数を数えるだけで、p.37 の左側が再現できます。

```
from qiskit import QuantumCircuit, transpile
from qiskit.transpiler import CouplingMap

cm = CouplingMap.from_line(6)    # 直線に6量子ビット
qc = QuantumCircuit(6)
qc.cx(0, 5)                      # 端から端へ

t = transpile(qc, coupling_map=cm,
              basis_gates=["rz", "sx", "x", "cx"],
              initial_layout=[0, 1, 2, 3, 4, 5],
              optimization_level=1)
print(t.count_ops())             # cx の本数
```

やってみること

cx(0, d) の d を 1〜5 に変えて、cx の本数が **1＋3(d−1)** 本に近いか見る

考えてみること

SWAP の費用が CNOT の0.54倍なら、同じ回路の**最適な配置とルーティング**はどう変わるか

Qiskit 2.5.2 で実行して d = 1〜5 が 1・4・7・10・13 本になることを確認（2026-10-16）。版や設定で変わりうる。Exchange-only の費用表を Target に入れて試すのは今後の課題

まとめ

- **全体像：今年の年末から、FTQC を目指した専用ハードへ。NISQ とは別物**
- **① アプリ：FTQC のアプリへ。生成AIで作り、実用の前に探索が進む**
- **② 使い方：クラウドとオープンの LLM を選び、エージェントで動かし、ベンチマークで確かめる**
- **③ 中間層：バックエンドがコンパイラを決める。誤り訂正は表面符号から qLDPC へ**
- **④ バックエンド：半導体量子（Exchange-only）。温度を上げ、制御を中へ、量産で増やす。SWAP が CNOT の約半分**

興味のある層から入れば、隣の層にも手が届きます。進路の目安は p.38

blueqat株式会社　info@blueqat.co.jp　／　blueqat.app　｜　出典は各ページの下に記載。〔推〕〔見〕は blueqat の計算・見立て