

Supercomputing Japan 2024

量子コンピュータ研究開発の最新動向と技術課題

2024年 3月 13日

NEC セキュアシステムプラットフォーム研究所

ディレクター 白根 昌之

目次

- ◆ 量子技術への期待
- ◆ 世界の開発動向
- ◆ NECの取組み
 - 超伝導技術を利用する量子ゲートおよび量子アニーリングマシン開発
 - 疑似量子アニーリングマシンを活用した事例紹介

量子技術への期待

量子技術とは？

- 量子技術は「量子の持つ特異性質や振る舞いの物理法則」を利用した技術の総称
- 「社会に劇的な変化をもたらすゲームチェンジャー」として注目されている

量子コンピューティング技術

計算単位「量子ビット」が
0でもあり1でもある
「重ね合わせ」の状態等を活用し、
超高速・超並列処理を実現

量子センシング技術

量子状態が環境変化に影響
されやすいことを逆にとり、
時間や物理量(磁気・温度等)の
微小な変化を計測

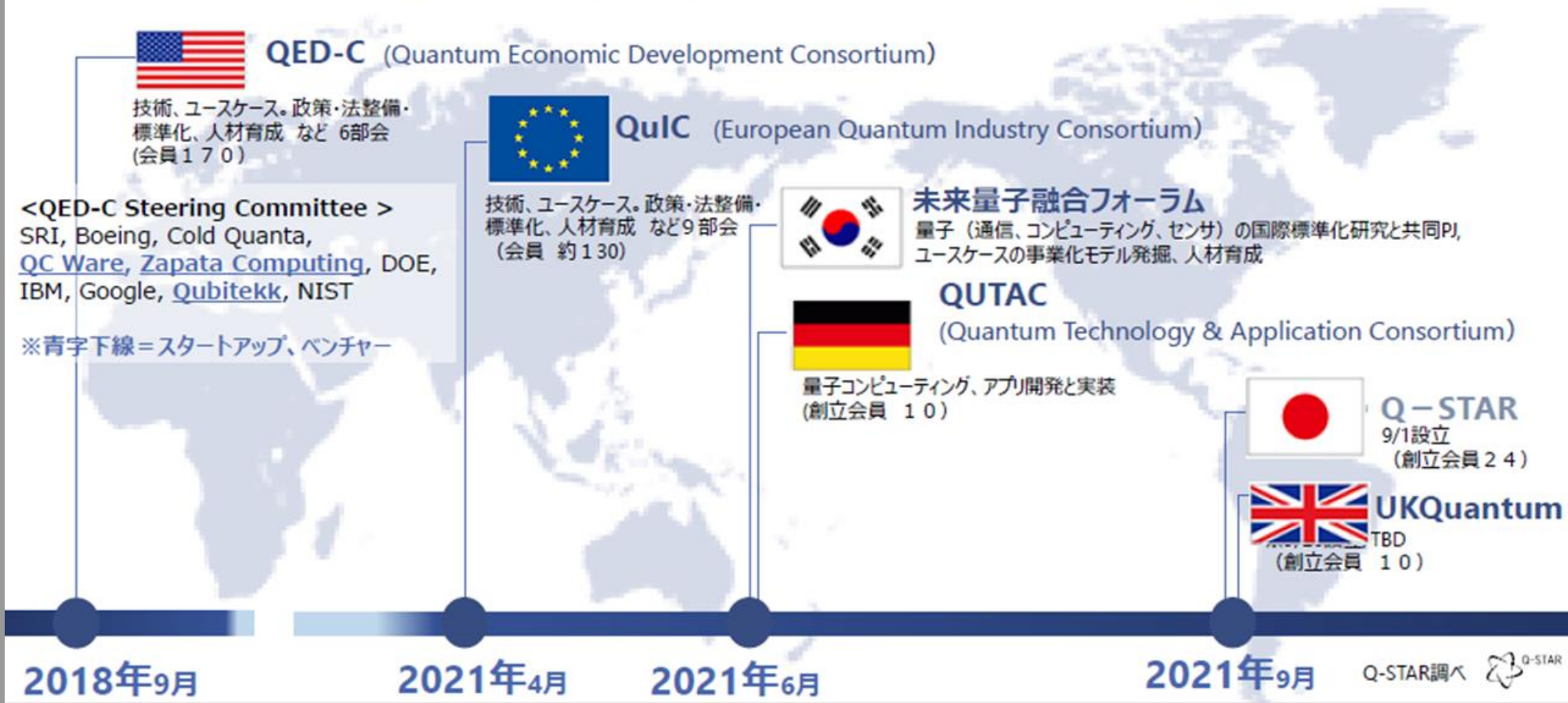
量子通信・量子暗号技術

光の最小単位「光子」が
それ以上分割できない等の
性質を利用し、
絶対安全な暗号化通信を実現

量子技術の産業化をめぐる動向

量子技術をめぐる諸外国の動向 グローバルでの産業化コンソーシアム立上げ状況

米国は既に3年前に設立、現在の運営にはスタートアップやベンチャー代表も参加



出典：Q-STAR公開資料より引用

一般社団法人量子技術による新産業創出協議会(Q-STAR)

2021年9月1日発足後、2022年5月9日一般社団法人となり、量子技術の応用を通じた中長期的な新産業を創出するために、産業及び企業の枠を超え、グローバルな視点での活動を推進中。NECは全部会へ参加し、企業の皆様とユースケースの創出に取り組んでいます。



部会活動

- 量子波動・量子確率論応用部会
- 量子重ね合わせ応用部会 リーダー企業として参加
- 最適化・組合せ問題に関する部会 副リーダー企業として参加
- 量子暗号・量子通信部会
- クオラムシティ推進部会

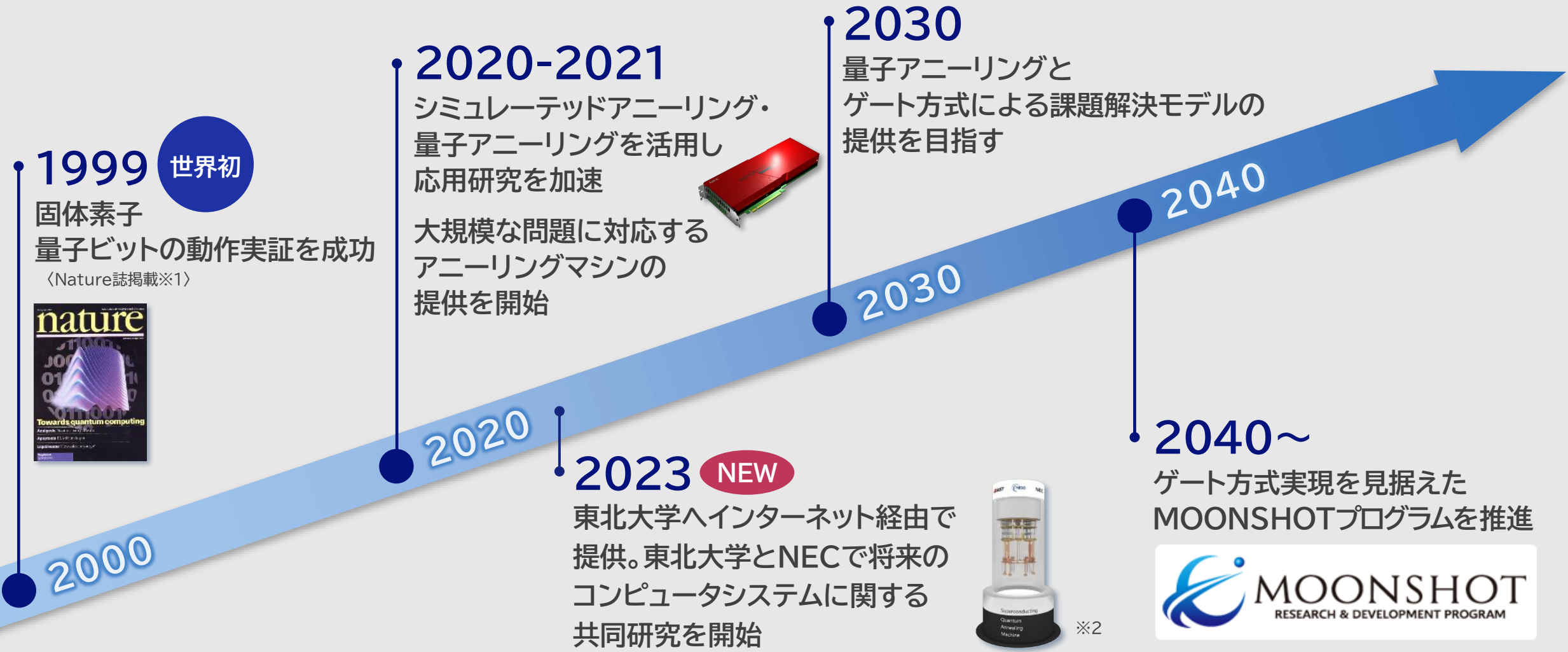
ワーキンググループ

- 政策提言ワーキンググループ
- 標準化連携/提案ワーキンググループ
- テストベッド連携ワーキンググループ リーダー企業として参加 注1
- 研究開発連携ワーキンググループ
- 海外産業連携ワーキンググループ
- 長期ロードマップ策定ワーキンググループ
- リーガル&コンプライアンスワーキンググループ
- 人材育成ワーキンググループ

※Q-STAR HPより引用

注1:富士通と共同

量子コンピューティングの社会実装に向けた取り組み

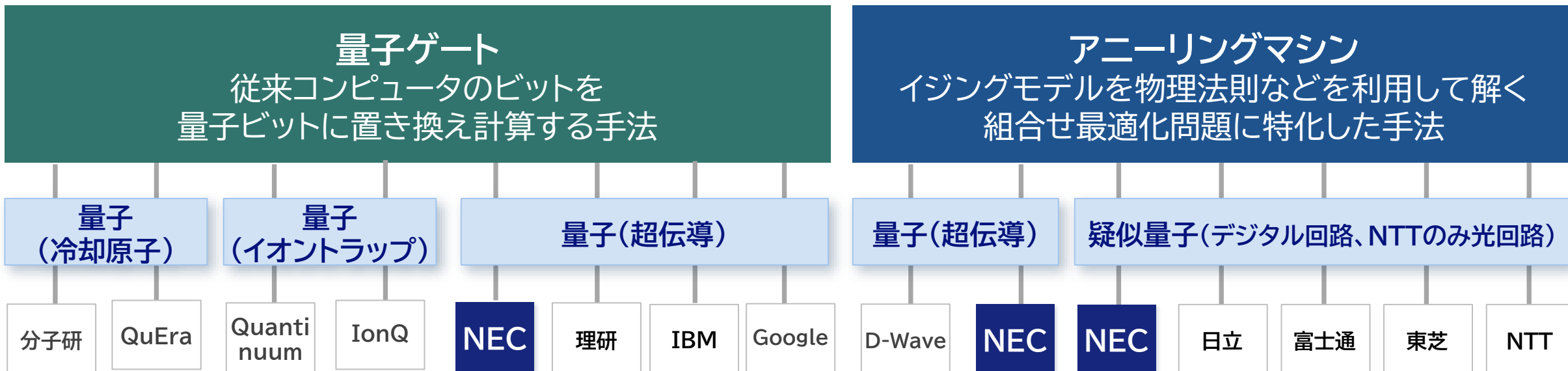


※1: Y. Nakamura et al., Nature 398, 786 (1999) ※2: これは、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務の成果を一部活用しています。

量子コンピューティングの分類

量子コンピューティング

(量子の振る舞いを取り入れたものを含む広義)



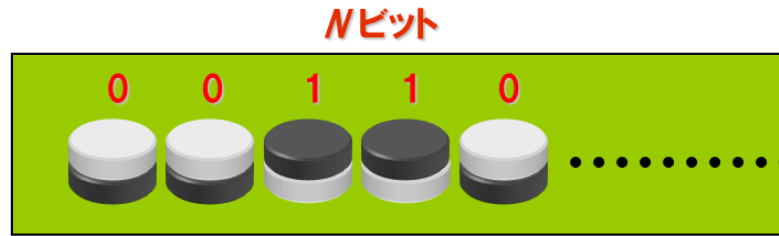
量子ビットとその実現方法

従来コンピュータでは電圧等で0と1を表現。一方で量子コンピュータでは量子重ね合わせが利用できる「量子ビット」を用いて高速処理を実行

古典ビット

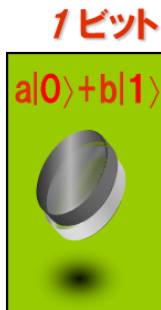


または
0または1の一つ

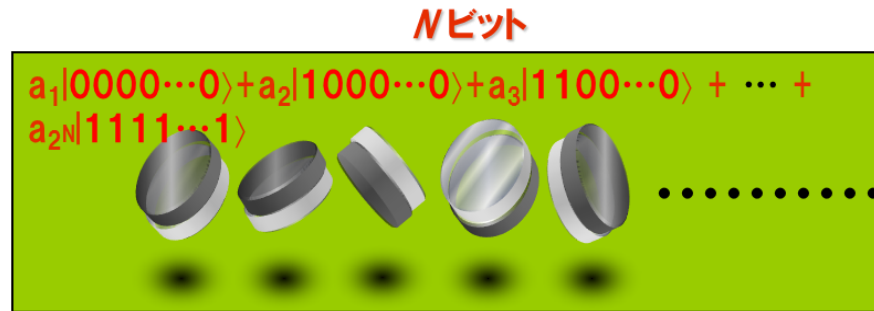


2^N 個の可能な組み合わせの中の一組

量子ビット



同時に0,1を表現



同時に全ての 2^N 個の組み合わせを表現

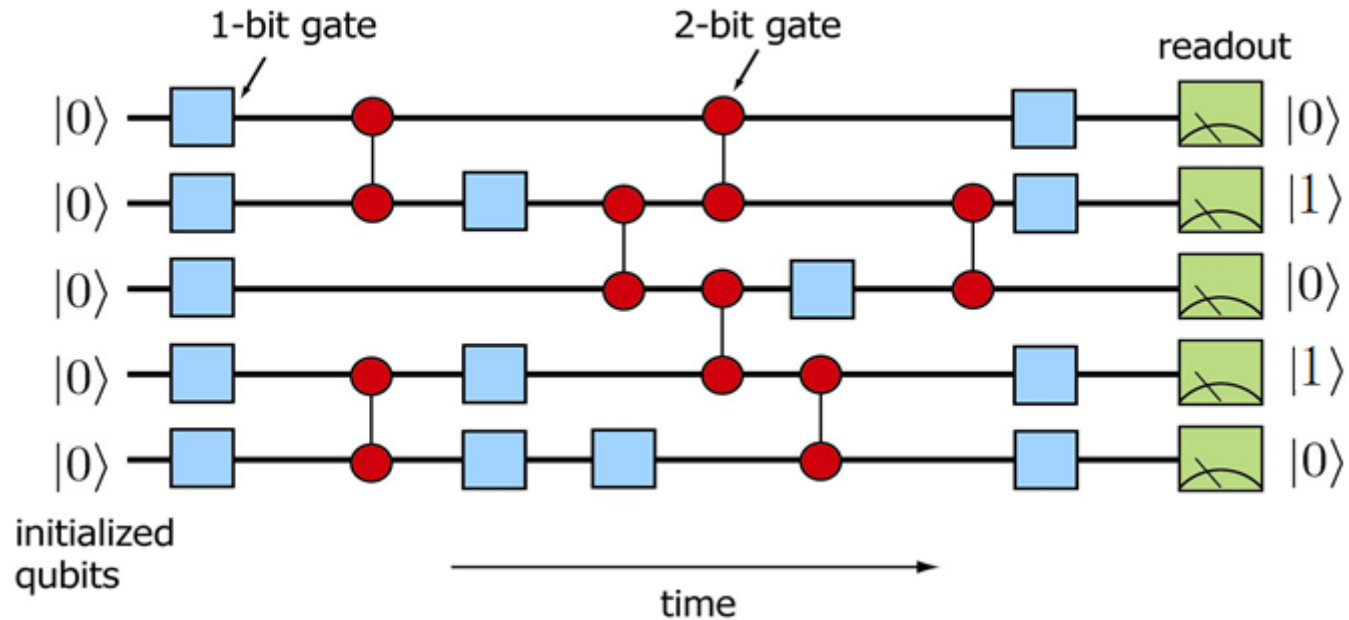
量子ビットはメモリ機能も兼ね備えている
100量子ビットは従来メモリで
 $2^{100} = 10^{30}$ ビット相当

現在のスパコンのメモリは $\sim 2^{50}$

ゲート方式の動作原理

量子ビットに対し、1ビットおよび2ビットゲート動作(数学的には行列演算)を組み合わせることで所望の演算をする方式で、目的に応じたアルゴリズムが存在

計算の流れ
(イメージ)

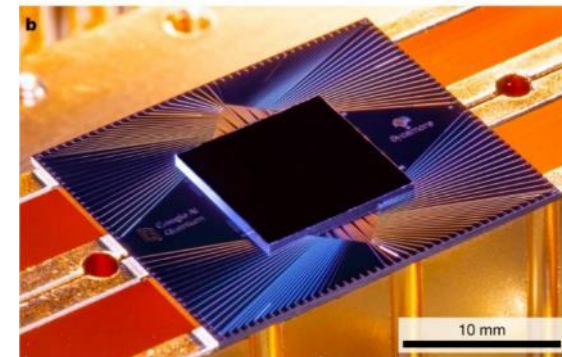
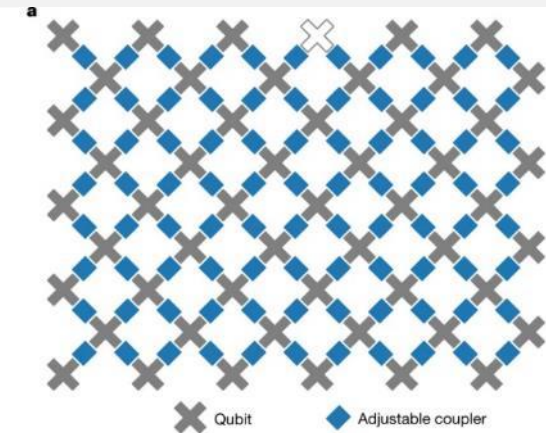
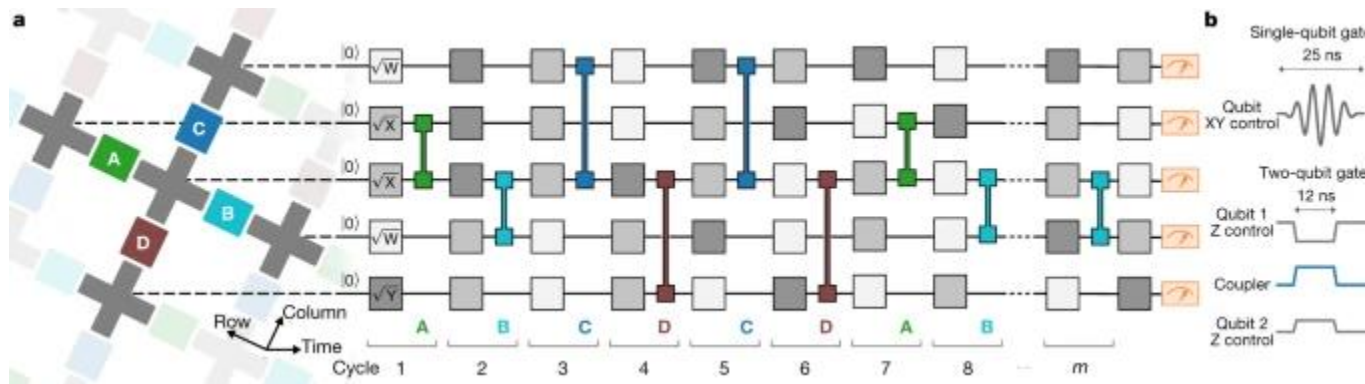


量子コンピュータが注目を浴びる一つの契機

■ Googleによる量子超越性実験(ランダム量子回路サンプリング)

Googleによる量子超越性の実証 (Nature誌)

- 米Googleは2019年10月23日（現地時間）、量子コンピュータの計算能力が古典コンピュータを上回ることを示す「量子超越性」を実証したと発表。
- あるタスクでスーパーコンピュータでは約1万年かかるものを量子コンピュータにより3分20秒で解いた。



Arute, F. et al. Quantum supremacy using a programmable superconducting processor. Nature 574, 505-511 (2019).

世界の開発動向

ゲート型量子コンピュータの開発動向

◆ 各方式毎に特徴を示す

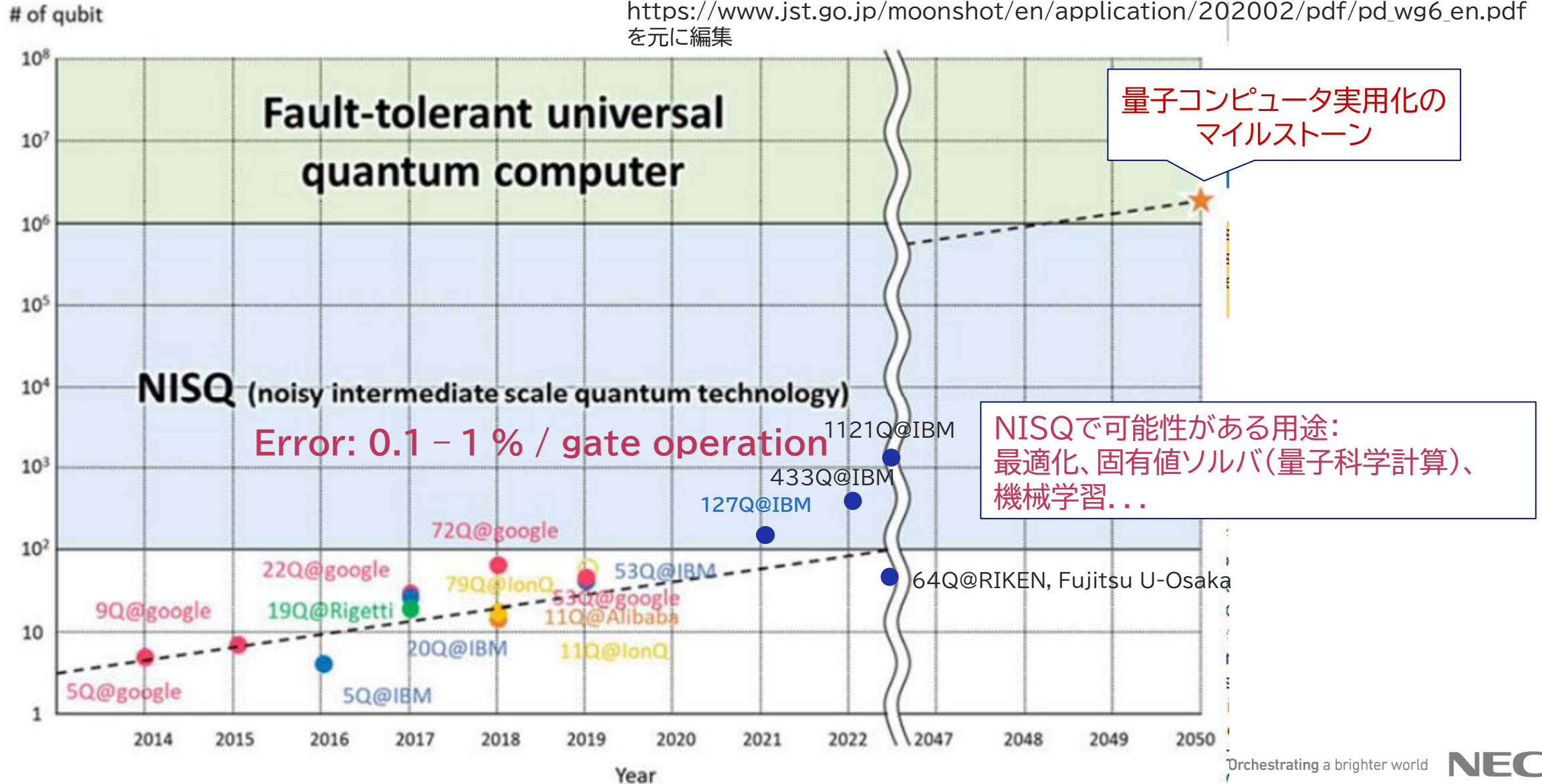
<https://kpmg.com/jp/ja/home/insights/2023/11/fas-deeptech-02.html>
を元にNECにて再編集

量子ビット方式	現時点の最大量子ビット	動作環境	利点(+)/欠点(-)	プレイヤー
超伝導回路	1,121	極低温(-273℃) 超高真空	+量子ビットの動作が早い -希釈冷凍機を必要とする、高集積化で配線が複雑化	IBM/Google/Rigetti/Amazon/本源量子(中国)/中国科技大/中国科学院/富士通/理研/阪大/NEC
イオントラップ	40	常温 超高真空	+量子ビットの精度が高い -量子ビット数の大規模化が困難	IonQ/Quantinuum/AQT(オーストリア)/阪大/OIST(沖縄科学技術大学院大学)
光子	216	常温 常圧	+常温・常圧で動作し、量子ビットの精度が高い -非線形な相互作用を含む制御が困難	Xanadu/PsiQuantum/東大/中国科技大学/NTT
シリコン量子	12	極低温(-273℃) 超高真空	+半導体技術が応用可能で大規模化が期待できる -研究段階でビット数が少ない	Intel/日立/理研/Qutech Silicon quantum computing/HRL/ Photonic Inc.
冷却原子	1,180	常温 超高真空	+イオントラップよりも量子ビットを増やしやすい -量子ビットの動作が遅い	Atom Computing/ColdQuanta/Pasqal(フランス)/QuEra/Inflection/ハーバード大/IMS(分子科学研究所)/OIST

ゲート型量子コンピュータの開発動向(ロードマップ)

- ◆ 現状はエラーのあるNISQ。エラーの無いFTQC実現までまだギャップが大きい

https://www.jst.go.jp/moonshot/en/application/202002/pdf/pd_wg6_en.pdf
を元に編集



量子ゲートマシンができること



暗号解読



創薬・新素材開発



金融シミュレーション



量子機械学習

ゲート方式のアルゴリズム例

◆ 誤り耐性型

アルゴリズム	アプリ・問題
Shorのアルゴリズム	因数分解による暗号解読
Groversのアルゴリズム	探索問題、組合せ最適化
デジタル量子シミュレーション	新薬・新素材開発 (量子化学計算)
HHLアルゴリズム	ポートフォリオ高速最適化
量子推薦システム	推薦
トポロジカルデータ分析	データ分析
量子深層学習	制限ボルツマンマシンの ネットワーク学習

◆ NISQ

アルゴリズム	アプリ・問題
量子近似最適化 (QAOA)	組合せ最適化、教師なし機械学習
変分量子固有値ソルバ (VQE)	新薬・新素材開発 (量子化学計算)
量子回路学習 (QCL)	教師あり機械学習
量子ニューラルネットワーク (QNN)	教師あり機械学習

QAOA: Quantum Approximate Optimization Algorithm
 VQE: Variational Quantum Eigensolver
 QCL: Quantum Circuit Learning
 QNN: Quantum Neural Network

誤り耐性型: 複数の物理ビットを組合わせて作り出される誤りの無い量子ビット(=論理ビット)をベースとする量子コンピュータ

NISQ: Noisy Intermediate Scale Quantum (Computer): 誤りのある中規模量子コンピュータ

戦略プロポーザル: みんなの量子コンピュータ(CRDS-FY2018-SP-04) 表2.3を参照しNECにて再編集

量子ゲート方式の現状と課題：誤り率、アルゴリズムの限定性

■ 量子ゲート方式への期待は高いものの、「万能」ではない

1. ノイズの影響が大：ゲート型量子コンピュータの誤り率

- ゲート型はノイズの影響が大 → 量子ビットの誤り訂正が信頼性向上のカギ
 - たとえば、暗号解析に使われる因数分解のアルゴリズムで正しい結果を得るためにはエラーの無い1論理ビットあたり約1000量子ビットが必要。

2. ゲート型に有効なアルゴリズムと限定性

- 既存コンピュータ性能を上回るかどうかはアルゴリズム次第で、万能ではない。
 - 大学やコミュニティで開拓が進むも、実効性のあるアルゴリズムは限定的(例:素因数分解・DB探索)
 - 誤り耐性ゲート型の実現前のNISQ*の研究はされているものの有効な用途を探索している状況

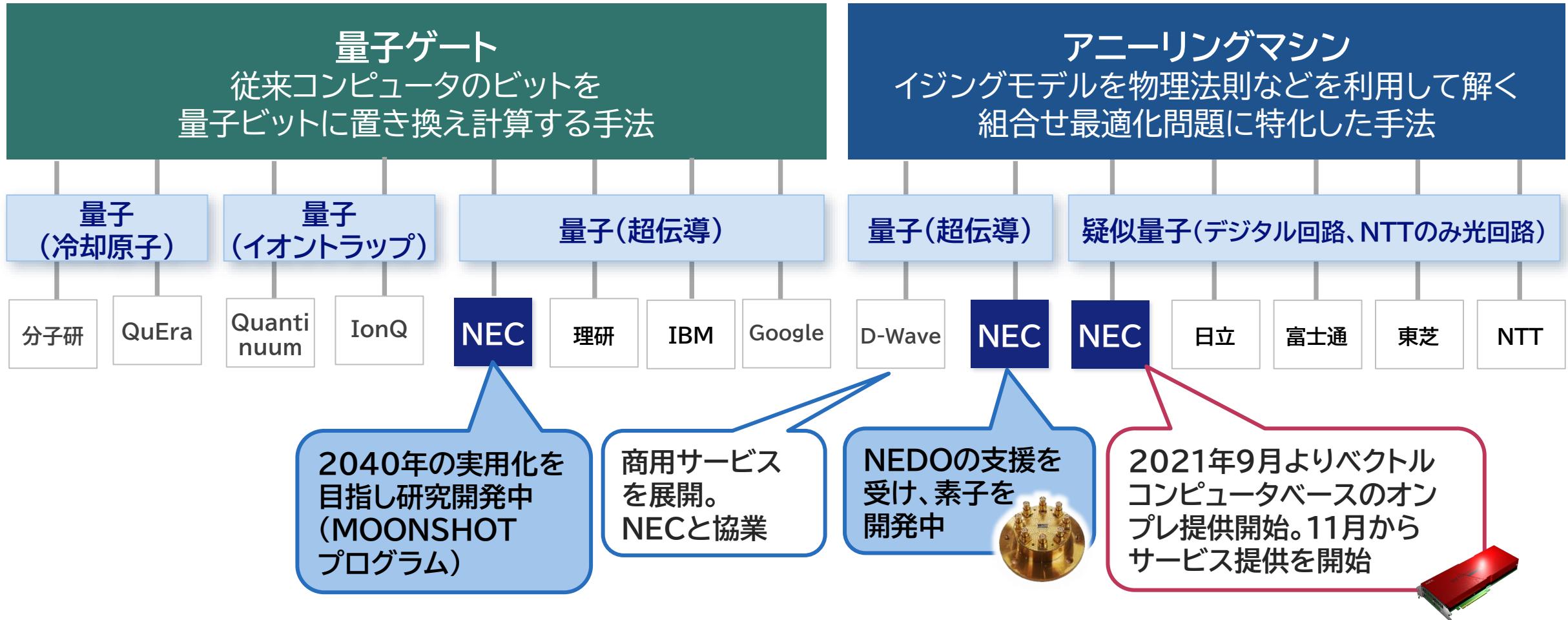
*NISQ: Noisy Intermediate Scale Quantum: 誤り訂正を適用する前のノイズが混在する中規模の量子コンピューター

NECの取組み

超伝導技術を利用する
量子ゲートマシンと量子アニーリングマシン

量子コンピューティングの分類

量子コンピューティング (量子の振る舞いを取り入れたものを含む広義)



※NEC調べ(紙面の都合上、必ずしも全ての研究機関を網羅しているわけではありません)

誤り耐性型汎用量子コンピュータ

ムーンショット目標6:2050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

2050 大規模化を達成し、誤り耐性型汎用量子コンピュータの実現



MOONSHOT
RESEARCH & DEVELOPMENT PROGRAM

2040 分散処理型NISQ量子コンピュータの実証 量子誤り訂正下での有用タスク計算

2030 一定規模のNISQ量子コンピュータの開発と量子誤り訂正の有効性実証

<https://www8.cao.go.jp/cstp/moonshot/sub6.html>



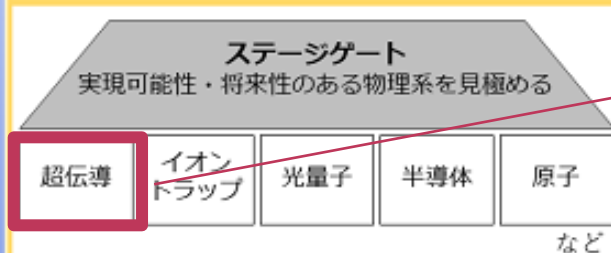
<ネットワーク>

量子メモリの開発、光子と量子メモリ間の量子インターフェイス技術の確立や量子中継器・量子通信システム・テストベッド構築など

- 光源や検出器
- 量子メモリ
- 量子インターフェイス技術
- 量子中継器
- 量子通信システム
- テストベッド構築

<ハードウェア>

量子誤り訂正システムの設計・実装、量子ビット・量子ゲート基盤の確立など



<ソフトウェア>

- 理論・ソフトウェア
- 誤り訂正システム

低オーバーヘッド量子誤り訂正符号や量子アルゴリズム、誤り訂正システムの開発など

- 量子誤り訂正理論
- ミドルウェア、コンパイラ
- アルゴリズム、アプリケーション
- 誤り訂正システム

プロジェクトマネージャ
NECセキュアシステムプラットフォーム研究所
主席研究員 山本 剛

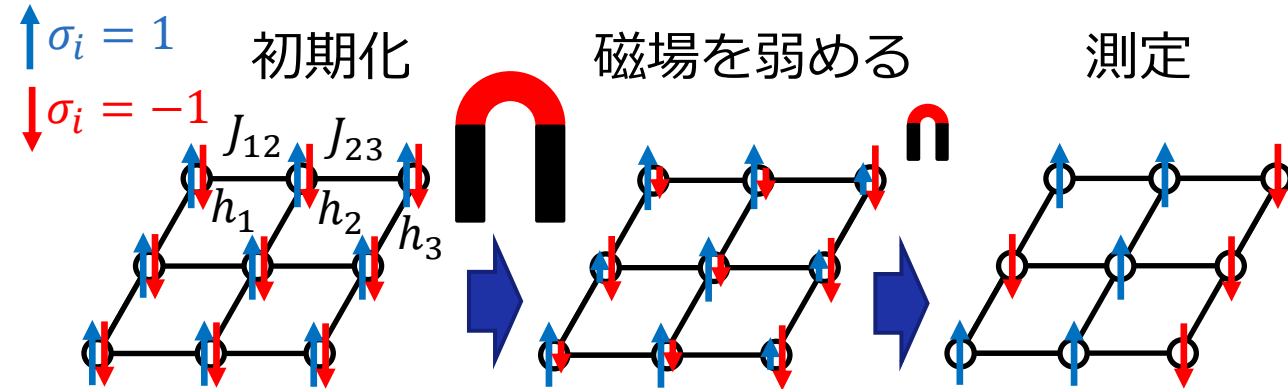
<https://ms-iscac.jp/>

アニーリング方式の動作原理

解きたい問題をイジングモデルに変換。強い磁場で初期化後、徐々に弱め、コスト関数(H)の最小エネルギー状態(最適解)に近づく

イジングモデル
のコスト関数

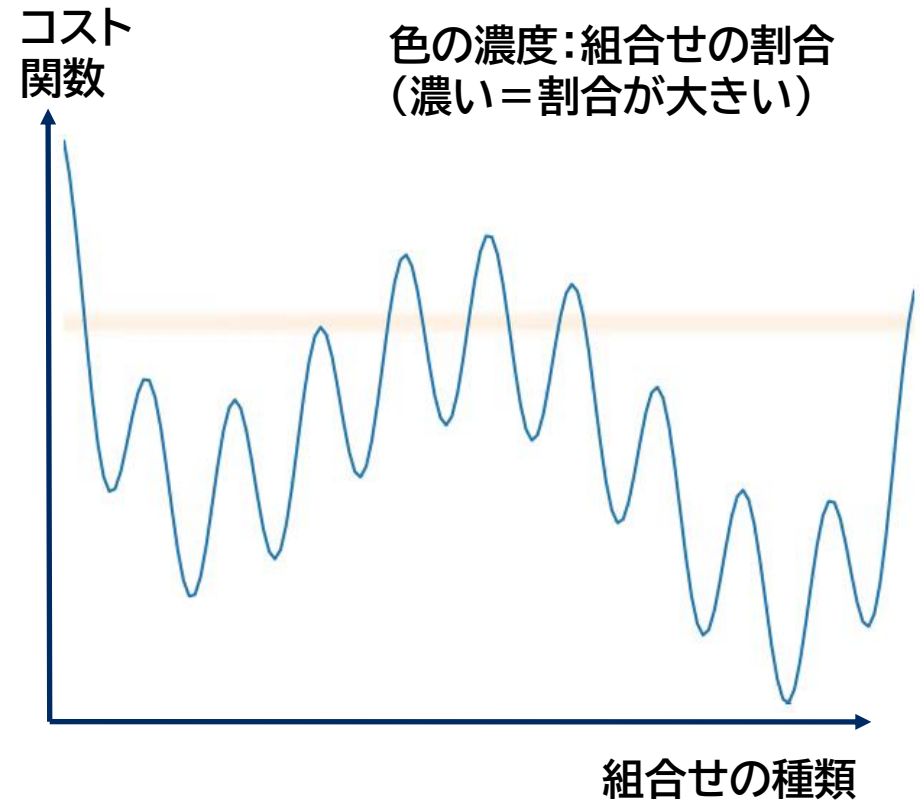
$$H = - \sum_{i < j} J_{ij} \sigma_i \sigma_j - \sum_i h_i \sigma_i$$



量子効果を”ゆっくり弱めて”最小コストの組合せを見つける
コストが低い=より良い組合せ

量子効果

- 強い(前半): それぞれの組合せを均等に扱う
- 弱い(後半): 数少ない組合せのみを扱う



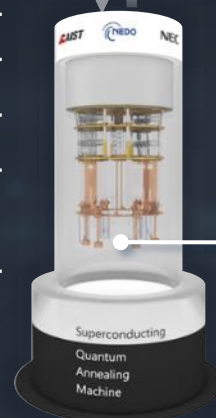
<https://www.smapip.is.tohoku.ac.jp/>
東北大学・田中研究室のサイトより

【量子アニーリング】

超伝導量子アニーリングマシン実用化に向け 量子アニーリング素子の開発を牽引しています

超伝導量子アニーリングマシン（モックアップ）

外部装置 ← 制御入力 → 読み出し出力 → 外部装置



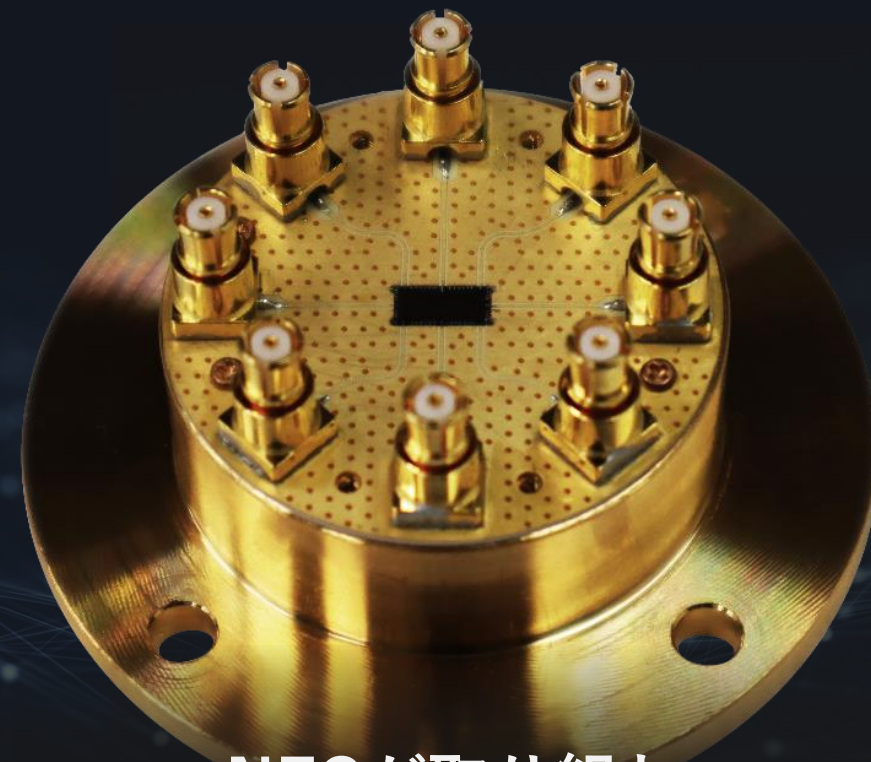
※これは、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務の成果を一部活用しています。

支援

参加団体

NEDO

NEC（副代表、事業化・実用化責任機関）
産業技術総合研究所（代表）
東京工業大学 / 早稲田大学 / 横浜国立大学 他



NECが取り組む
量子アニーリング素子
（マシンの心臓部）

【量子アニーリング】 直近プレスリリース

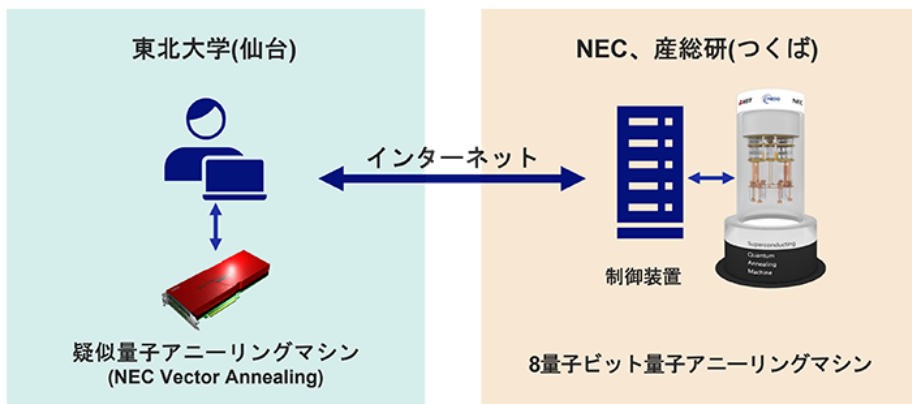
新開発の8量子ビット量子アニーリングマシンを利用して東北大学と NECが将来のコンピュータシステムに関する共同研究を開始

2023年6月28日
国立大学法人東北大学
日本電気株式会社

国立大学法人 東北大学(注1、以下 東北大学)と日本電気株式会社(注2、以下 NEC)は、NECと国立研究開発法人 産業技術総合研究所(注3、以下 産総研)が新たに開発した国産8量子ビット量子アニーリングマシンを利用し、将来のコンピュータシステムに関する共同研究を開始しました。

今回活用する8量子ビット量子アニーリングマシンは超伝導技術を利用し、ノイズに強く、量子重ね合わせ状態を長く維持したまま多量子ビット化が可能な構成を採用した新開発のマシンとなります。

なお、インターネットを介して外部利用可能な国産量子アニーリングマシンは本マシンが国内初となります。また、それを活用した共同研究も今回が初となります。



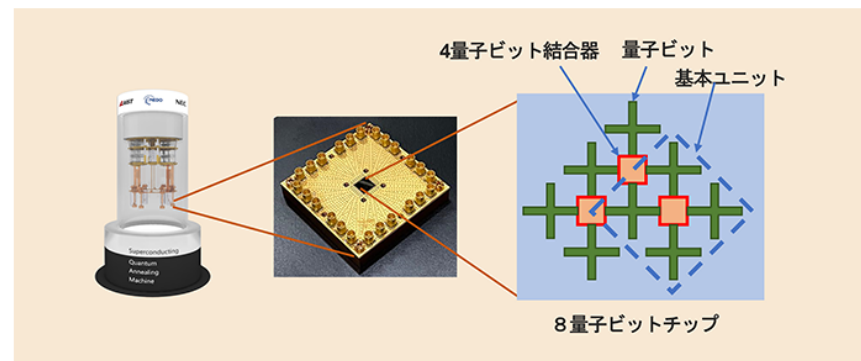
新開発の8量子ビット量子アニーリングマシンを利用した共同研究

今回活用する国産量子アニーリングマシンについて

複雑な社会課題の解決には、膨大な選択肢から最適な組合せの導出(組合せ最適化問題の解決)が重要です。この組合せ最適化問題を高速・高精度に解くため、NECは産総研と共同で超伝導パラメトロン素子(注4)を用いた量子アニーリングマシンの開発を進めています(注5)。

本量子アニーリングマシンは、超伝導パラメトロン素子を用いることでノイズに強く、量子重ね合わせ状態を保つ時間(コヒーレンス時間)が長いという特長を有します(注6)。一般的に、多量子ビット化するとコヒーレンス時間が短くなりますが、ノイズに強いという超伝導パラメトロン素子自身の特長に加え、本素子と親和性の高い量子ビット間結合技術である「ParityQCアーキテクチャ」(注7)の採用により、多量子ビット化時でも長いコヒーレンス時間を保持可能です。その結果、実社会における組合せ最適化問題を高速・高精度に演算することができるようになります。

これら2つの技術に関しては、すでに2022年3月には4量子ビットからなる基本ユニットの動作実証に成功しており(注8)、さらに今回、基本ユニットを並べることで8量子ビットからなる量子アニーリングマシンの開発に成功しました。



長コヒーレンス時間タイプの基本ユニットをベースに新開発した8量子ビットチップ

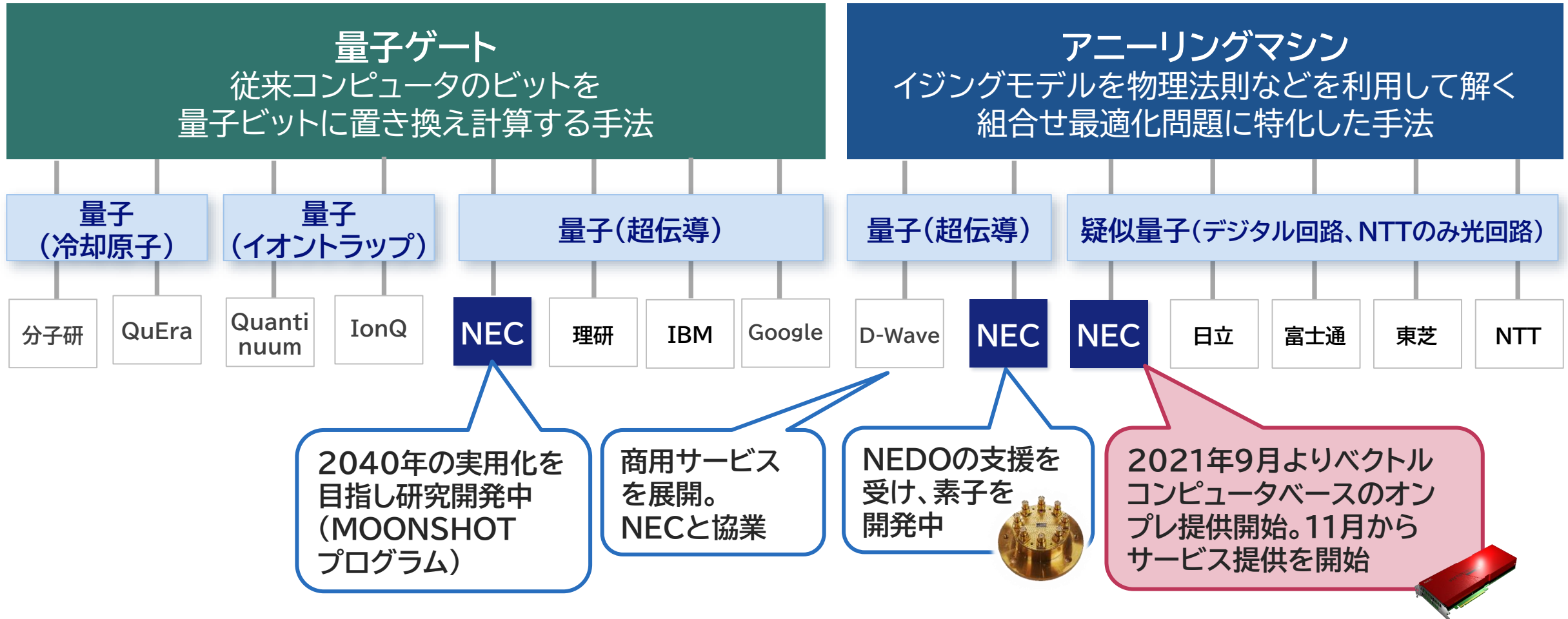
https://jpn.nec.com/press/202306/20230628_01.html

NECの取組み

疑似量子アニーリングマシンを活用した事例、
提供サービス

量子コンピューティングの分類

量子コンピューティング (量子の振る舞いを取り入れたものを含む広義)



数理最適化ソルバとの使い分け(1/2)

組合せ最適化問題をイジングモデルに変換し
コスト最小な組合せを求める

モデル化について

$$H = \sum_{i \neq j} J_{ij} \sigma_i \sigma_j + \sum_i h_i \sigma_i \quad (\sigma = \pm 1)$$

	数理最適化ソルバ	量子アニーリング
次数	基本1次	基本2次※1
式の形	等式、不等式	等式（不等式は補助変数を用いるなどして対応）
決定変数	連続値、離散値	離散値（連続値は離散化して対応）
制約条件の扱い	制約条件を利用して解を絞り込む（制約条件式が多いと計算時間がかかる）	制約条件は目的項の一つとして取扱う（罰金法）※2

※1 次数については、一般に補助変数を用いた次数下げテクニックを用いて、高次の式に対応することが可能だが、**量子アニーリングの方が高次の問題に比較的強い**。また、数理最適化ソルバでも凸型であれば2次式を効率的に扱うことができるものがある。

※2 量子アニーリングによっては、制約条件を最適化プロセスで用いることで、求解効率を上げているものもある。

数理最適化ソルバとの使い分け(2/2)

解の性質、精度、品質、速度等について

	数理最適化ソルバ	量子アニーリング
再現性	毎回同じ解が得られる	解くたびに異なる解が得られる。※3式に含まれる重みパラメータを調整することで、解の傾向を調整することも可能
品質保証	解ける問題では厳密解が得られる	絶対的な解の品質保証はできない。ただし、解の検算や比較は容易に実装可
解が無い場合	「解無し」になる。この場合、モデルを見直し、制約条件を緩めて次善の解を求めることが多い。	なるべく制約や目的を満たす次善の解を出力
最適化処理時間	問題の規模による。制約条件の数が大きくなると計算時間が長くなる。計算時間を指定して打ち切って途中の解を得ることは可能。	問題の規模による。制約条件の数には影響されにくい。計算時間を指定することができるものもある。

※3 量子アニーリングの解の再現性について、どちらが好適かはアプリケーションによる。

身近なところで始まっている取り組み



広告/公共/インフラ

通信基地局制御

監視センサー制御



製造

生産計画



交通/物流

配送計画

積荷配置



金融

カード不正検知

モンテカルロ・シミュレーション



素材開発/創薬

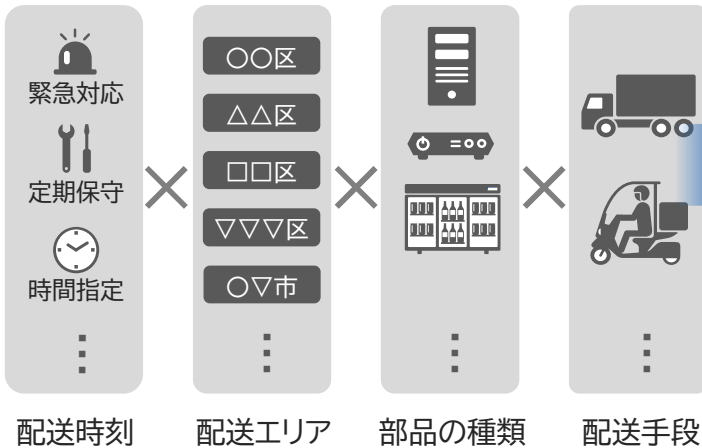
実験パラメータ探索

保守部品の配送効率最適化の取り組み

NECフィールドディング

配送時刻やエリア、手段など膨大な組み合わせから、最適な配送計画を自動で立案

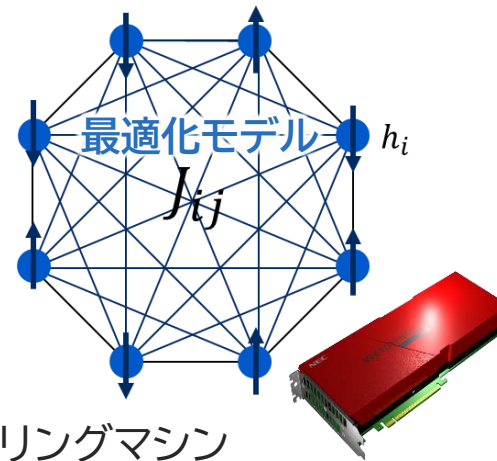
背景・課題



首都圏の保守作業は一日に数百件

効率的な配送計画を立案可能な人材が限定的

量子アニーリング



10⁷⁵³通りの膨大な組合せを解決

最適な配送計画を自動で立案

配送効率を
約 **20%向上**



CO₂削減や配送計画立案の
属人化解消

生産計画最適化の取り組み

NECプラットフォームズ

複雑な生産計画立案の自動化に成功

生産条件

- 部品
- 設備設定
- 納期
- さまざまな制約条件
- **1ラインで1日**

30 品種の生産計画

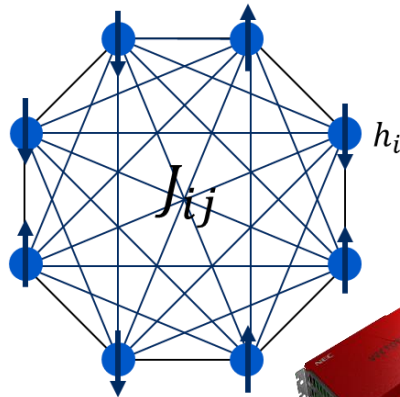
多品種少量生産

組合せ多数

属人化

入力

量子アニーリング

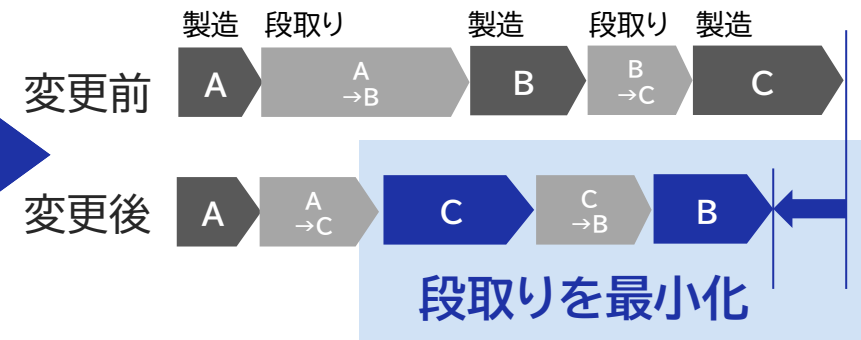


出力

アニーリングマシン
NEC Vector Annealingサービス

4×10^{30} 通りの
膨大な組合せを解決

生産順をナビ



段取り工数 **50%削減**

設備稼働率 **15%向上**

立案工数 **90%削減**

2023年3月より本格導入

NECの提供サービス

Gurobi OptimizerのSIパートナーシップ契約を締結(2023/11/8)
意思決定のボトルネックに対して、プロフェッショナルによる問題分析や、
問題に合った最適化ツール選定も適用サービスの魅力の一つです。

https://jpn.nec.com/press/202311/20231108_01.html

お客様の「現場のお困りごと」をヒアリングする段階からお客様の課題解決をトータルにサポートします。

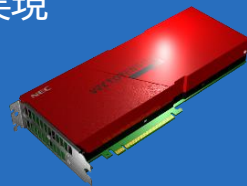
オンプレミス

クラウドサービス

NEC Vector Annealingサービス

NECのベクトルプロセッサ(高速行列計算・高速メモリアクセス)と、
独自アニーリングアルゴリズムにより
大規模アニーリング最適化の高速処理を実現

NEC Vector Annealing 3.0



Gurobi Optimizer

Gurobi社※1の
Gurobi Optimizerを、
NECによる
日本語サポート含めて提供※2

Leap Quantum Cloud Service

D-Wave社※3の
Leap Quantum Cloud Serviceを、NECによる
日本語サポート含めて提供

※1 Gurobi社の正式名は、Gurobi Optimization, LLC です。
※2 Gurobi Optimizerは、製品単品での提供はございません。
量子コンピューティング適用サービスとセットでの提供となります。
※3 D-Wave社の正式名は、D-Wave Systems, Inc. です。

量子コンピューティング 適用サービス

お客様の経営課題、業務課題に対して
技術検証などトータルにサポート

経営・業務最適化
コンサルティングサービス

SCMアセスメント
課題の見える化・分析

構想策定支援
ありたい姿・対策の明確化

業務課題抽出
テーマ検討

最適化方式検討
仮説設定

定式化・机上検証
プロトタイプ開発

現場適用検証
チューンアップ

量子コンピューティング 教育サービス

DX化やAI活用を加速する
量子コンピューティング
人材育成を支援

基礎編

量子コンピューティングとは何か、
どのような課題が解決できるのか、
短時間で学べるプログラム

実践編

量子アニーリングによる
課題解決のプログラミングスキルを
獲得できるサービス

実践編2

アニーリングの特長を活かす問題
および、数理最適化技術との
使い分けが学べるプログラム

\ Orchestrating a brighter world

NEC