

PCCC AI/機械学習技術部会 第4回ワークショップ

# NECにおける超伝導量子コンピューティング技術

2023年 4月 19日

日本電気株式会社 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

# 本日の講演内容

1. 量子コンピューティング技術への期待
2. 量子コンピュータの動作原理
3. NECの研究開発

# 1. 量子コンピューティング技術への期待

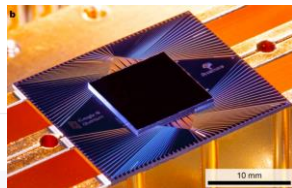
---

# 昨今の報道記事

## 米Googleが「量子超越性」を実証、量子コンピューターの実用化に弾み

中田 敦 日経 xTECH/日経コンピュータ

2019/10



2019.10.23  
有料会員限定



全1188文字

PR

米Google (Google) は2019年10月23日 (米国時間)、量子コンピューターが既存方式のコンピューターでは到達し得ない能力を持つことを示す「量子超越性」を実証したと発表した。54量子ビットを搭載する新量子プロセッサ「Sycamore (シカモア)」が、世界最高のスーパーコンピューターで1年かかる計算を200秒で解いたとする。

### D-Waveが5000量子ビットの「Advantage」発売、トポロジーも強化

中田 敦 日経クロステック/日経コンピュータ

<https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/00001/03061/>

2020.09.30



2020/9



<https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/news/18/08854/>

カナダD-Wave Systems (ディーウエーブシステムズ) は2020年9月30日、量子アニーリング方式の量子コンピューターである「Advantage」を発売した。量子ビットの数が従来の2000個から5000個超に増加し、量子ビット間の結合形態 (トポロジー) も強化した。

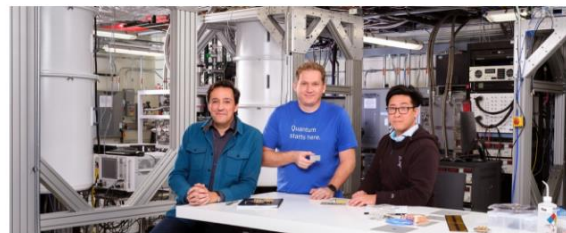


## IBM、400量子ビット超えの量子プロセッサと次世代IBM Quantum System Twoを発表

新たなハードウェア、ソフトウェア、システムの飛躍的な進歩により、量子コンピューターを中心としたスーパー・コンピューティングへの道筋を示す

Nov 10, 2022

2022/11



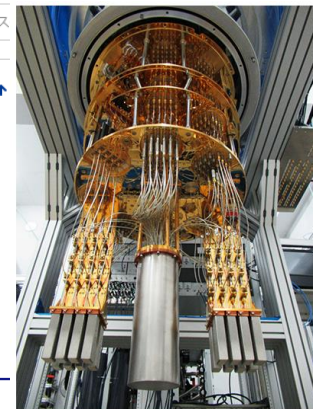
<https://jp.newsroom.ibm.com/2022-11-10-IBM-Unveils-400-Qubit-Plus-Quantum-Processor-and-Next-Generation-IBM-Quantum-System-Two>



2023年3月24日

理化学研究所  
産業技術総合研究所  
情報通信研究機構  
大阪大学  
富士通株式会社  
日本電信電話株式会社

## 量子コンピュータを利用できる「量子計算クラウドサービス」開始 — 国産超伝導量子コンピュータ初号機の公開 —



理化学研究所 (理研) 量子コンピュータ研究センターの中村 泰信 センター長、産業技術総合研究所 3D集積システムグループの菊地 克弥 研究グループ長、情報通信研究機構 超伝導ICT研究室の寺井 弘高 室長、大阪大学 量子情報・量子生命研究センターの北川 勝浩 センター長 (大学院基礎工学研究科 教授)、藤井 啓祐 副センター長 (大学院基礎工学研究科 教授、理研 量子計算理論研究チーム チームリーダー)、富士通株式会社 量子研究所の佐藤 信太郎 所長、日本電信電話株式会社 コンピュータ&データサイエンス研究所の徳永 裕己 特別研究員らの共同研究グループは、2023年3月27日に量子コンピュータ<sup>[1]</sup>をクラウド公開し、外部からの利用を開始します。

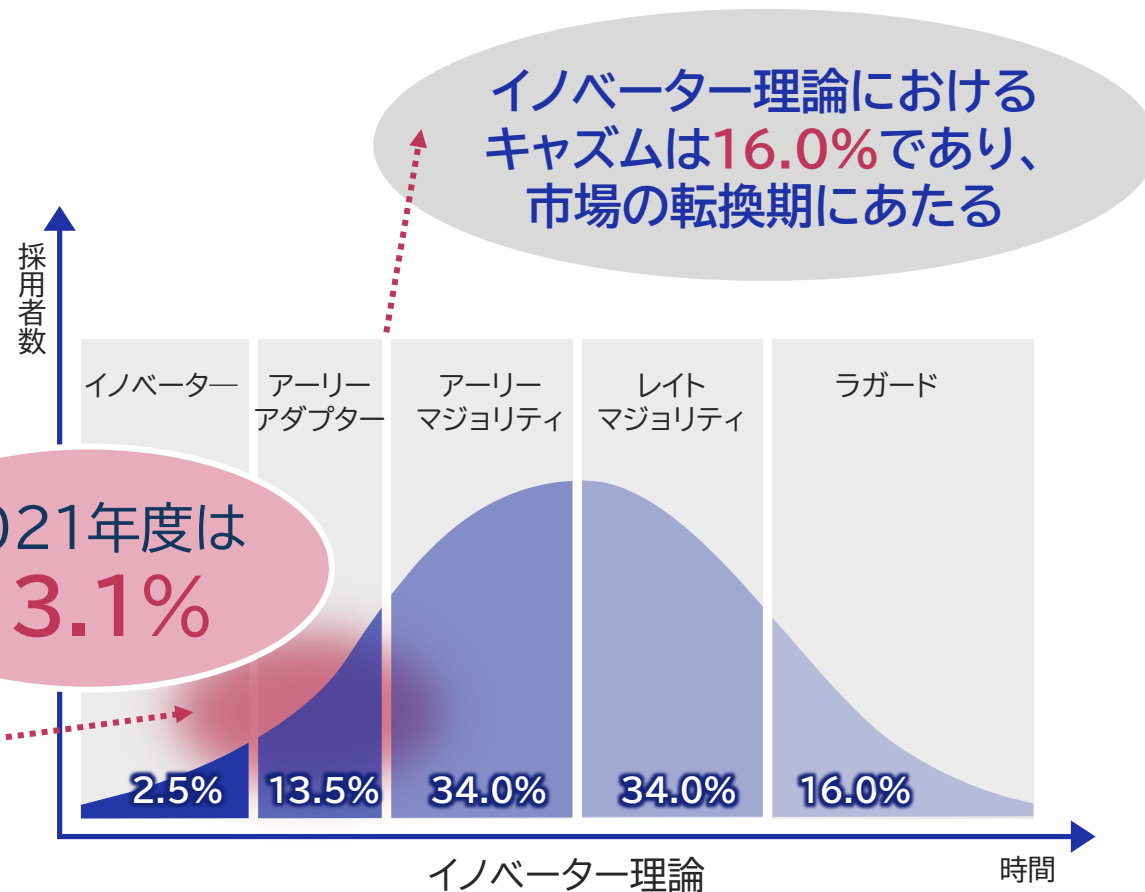
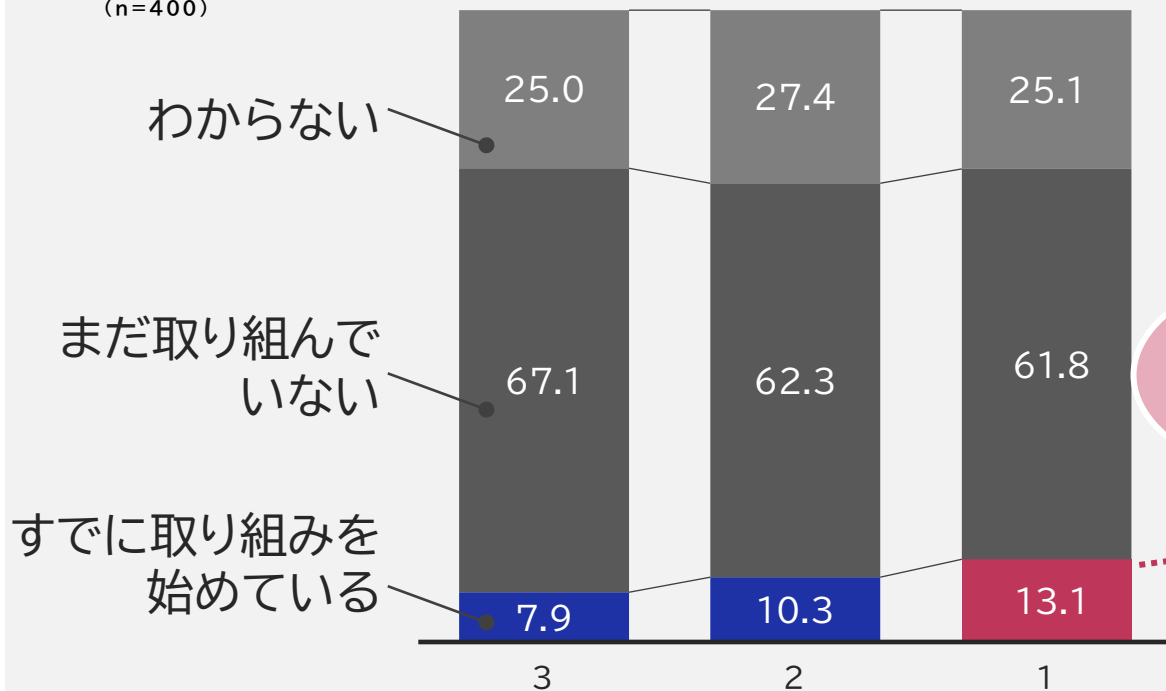
[https://www.riken.jp/pr/news/2023/20230324\\_1/index.html](https://www.riken.jp/pr/news/2023/20230324_1/index.html)

# 現在の量子コンピューティング市場状況

NECは、3年間実施している独自調査から、もうすぐキャズムを越える状況と見ています。皆様が先行者利益を獲得するためには現時点から取り組みを進めることが重要です。

Q, あなたの勤務先では、量子コンピュータの活用のための取り組みを始めていますか。

NEC独自調査結果  
(n=400)



※NEC独自調べ

## 2. 量子コンピュータの動作原理

---

# 量子コンピューティング技術の分類

## 量子コンピューティング技術 (量子の振る舞いを取り入れたものを含む広義)

### ゲート方式

従来のコンピュータのビットを量子ビットで置き換え  
現状、誤り訂正機能無し／計算規模小(NISQ\*)

量子  
(イオントラップ)

光量子

量子(超伝導)

### アニーリング方式

イジングモデルを物理の法則等を利用して解く、  
組合せ最適化に特化(量子アニーリングはサンプリングに利用可能)

量子(超伝導)

デジタル回路(NTTのみ光回路)

Honeywell

IonQ

中国科学  
技術大学

IBM

Google

理研  
東大

NEC

誤り耐性型

産総研

D-wave

NEC

NEC

日立

富士通

東芝

NTT

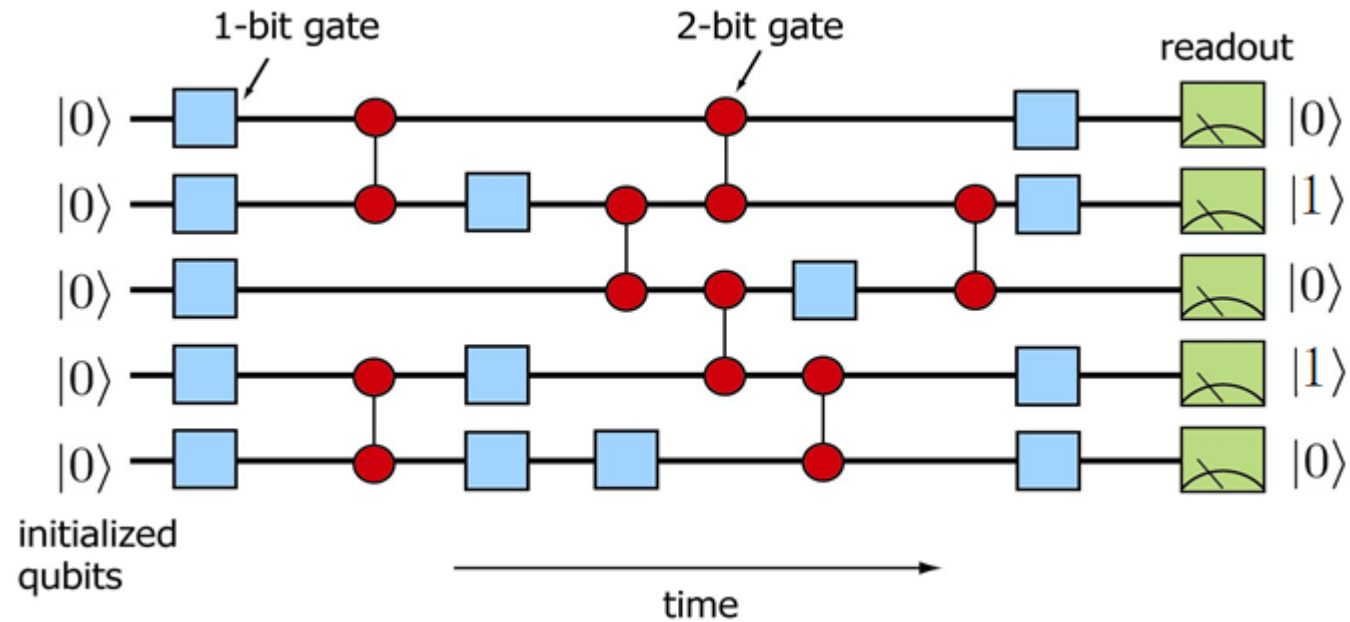
\*)Noisy Intermediate-Scale Quantum computer  
現状発表されているゲート型コンピュータは全てNISQ

(注)NECの調査による。全ての研究開発機関を網羅しているわけではありません。

# ゲート方式の動作原理

量子ビットに対して様々なビット操作(数学的には行列演算)を行うことにより  
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)





# 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

**誤り耐性型の実現は10年以上先と言われており、  
産業化観点では今使えるNISQアプリの探索が急務**

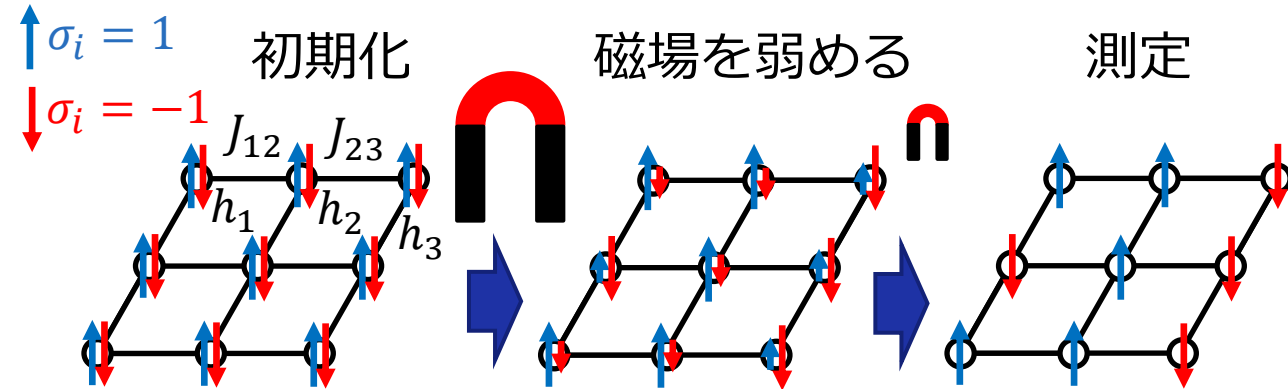
戦略プロポーザル: みんなの量子コンピューター (CRDS-FY2018-SP-04) 表2.3を参照

# 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

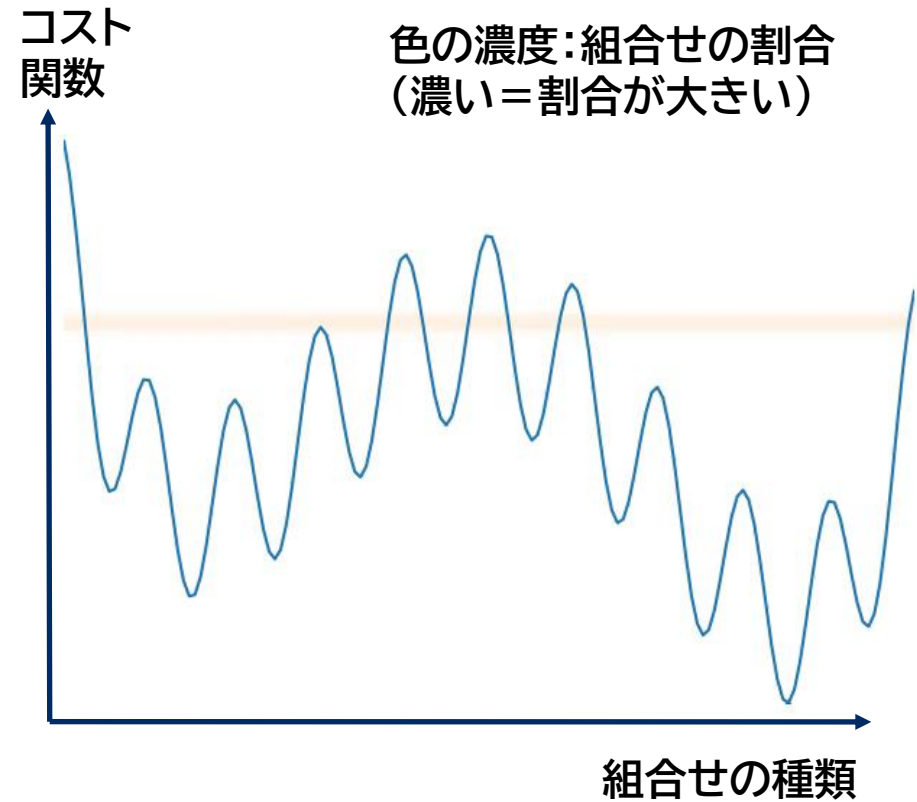
$$H = - \sum_{i < j} J_{ij} \sigma_i \sigma_j - \sum_i h_i \sigma_i$$



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

# 量子アニーリングの活用事例

金融取引における正常／不正を識別する AI モデル構築において、不正が行われた学習データを量子アニーリングの機能によりオーバーサンプリングを実施。AI モデルの学習にこのデータを適用し、不正検知の再現率向上を確認。

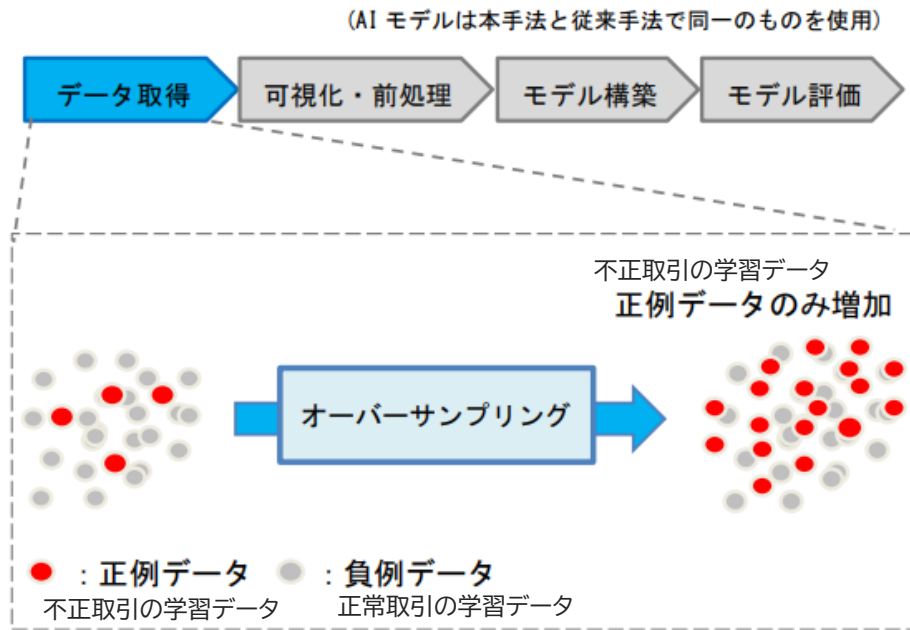


図 1 : オーバーサンプリングのイメージ

※D-wave社の量子アニーリングマシン等を利用

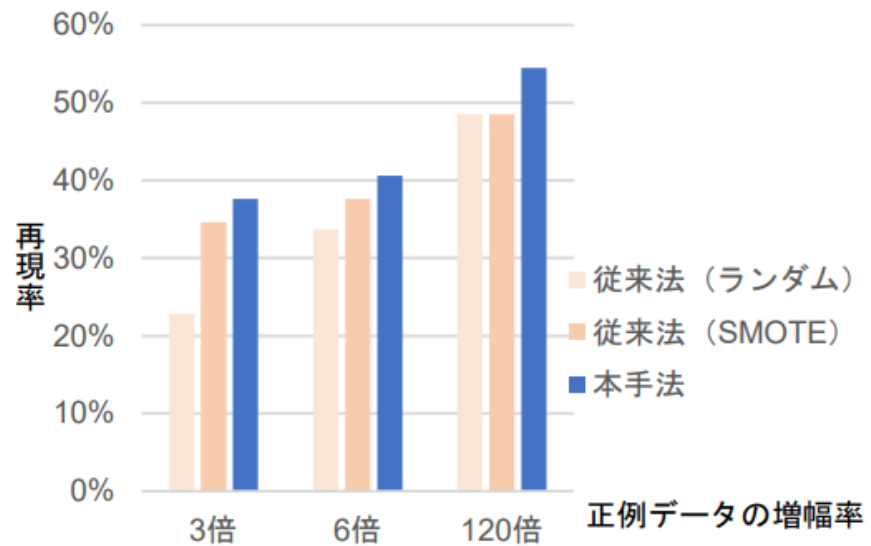


図 2 : 不正検知の再現率の向上効果

三井住友FG、日本総研、NECの共同研究成果

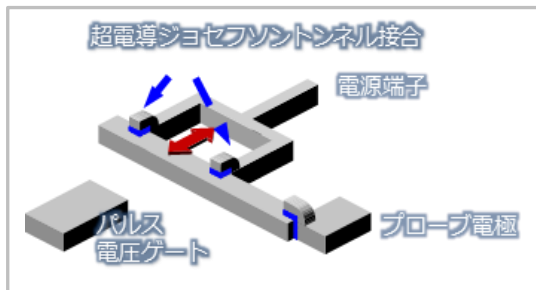
[https://jpn.nec.com/press/202103/20210322\\_01.html](https://jpn.nec.com/press/202103/20210322_01.html)

# 3. NECのHW研究開発

---

# NECの量子コンピューティング研究開発の歴史と未来

## ◆ 集積可能な固体素子量子ビット技術を 世界で初めて実証



実証した量子ビット

世界初

固体素子量子ビットの  
動作を実証  
<Nature誌掲載※1>

1999

2003

世界初

2ビット論理演算  
ゲートの動作を実証  
<Nature誌掲載※2>

2007

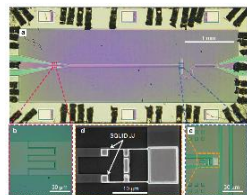
世界初

ビット間結合を  
制御可能な  
量子ビットの実証  
<Science誌掲載※3>

2014

成功

超伝導回路を用いて  
パラメトロンを実現  
<Nature Commun.誌掲載※4>

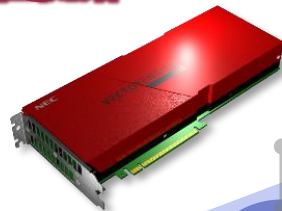


超伝導  
ジョセフソン接合  
パラメトリック発振器

2019

適用  
実証開始

バクトルコンピュータを  
利用したアニーリングマシン



2021

バクトル  
アニーリングの  
クラウド提供開始

2023

超伝導パラメトロンで  
量子アニーリング  
マシンを実現(NEDO)

2040~

ムーンショットプログラム  
誤り耐性型汎用  
量子コンピュータの  
実現を目指す



※1 Y. Nakamura et al., Nature 398, 786 (1999)  
※2 T. Yamamoto et al., Nature 425, 941 (2003)  
※3 A. O. Niskanen et al., Science 316, 723 (2007)  
※4 Z. R. Lin et al., Nature Commun. 5, 4480 (2014)

# 【ご参考】量子コンピューティング技術開発におけるパートナーシップ

## 誤り耐性型マシンの共同開発

### ムーンショット型 研究開発事業

**NEC**

産業技術総合研究所

東京医科歯科大学

情報通信研究機構(NICT)

名古屋大学

(株)ニコン

NTT

理化学研究所

東京理科大学

アルバック・クライオ(株)

(株)アルバック

国立天文台

ナノブリッジ・セミコンダクター(株)

東京大学

慶応義塾大学

大阪大学

九州大学

東北大学

ゲート方式

Hardware

## 量子アニーリングマシンの共同開発

### LHZ方式、共同研究

Parity Quantum Computing社

大阪大学

### NEDO※委託事業

横浜国立大学

理化学研究所

株式会社東芝

帝京大学

東京大学

金沢工業大学

九州大学

弘前大学

**NEC**

産業技術総合研究所

早稲田大学

東京工業大学

日立製作所

情報・システム研究機構

豊田通商株式会社

FIXSTARS

アニーリング方式

## ソフトウェア開発

**D:wave**  
The Quantum Computing Company™

System,  
Software

## 課題の実証 及び 人材育成

東北大学

Sigma-i

NTT

日本総合研究所

NECプラットフォームズ

Application

※NEDO:国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構

# 量子コンピューティング技術の分類 : NECの取り組み

量子コンピューティング技術  
(量子の振る舞いを取り入れたものを含む広義)

## ゲート方式

従来のコンピュータのビットを量子ビットで置き換え  
現状、誤り訂正機能無し／計算規模小

量子  
(イオントラップ)

光量子

量子(超伝導)

## アニーリング方式

イジングモデルを物理の法則等を利用して解く、組合せ最適化に特化

量子(超伝導)

デジタル回路(NTTのみ光回路)

Honeywell

IonQ

中国科学  
技術大学

IBM

Google

理研  
東大

NEC

誤り耐性型

産総研

D-wave

NEC

NEC

日立

富士通

東芝

NTT

② JSTムーンショットプログラムの支援を受け開発中

商用サービスを展開。  
NECと協業

① NEDOの支援を受け、量子素子を開発中



③ 11月よりベクトルコンピュータベースのサービス提供を開始

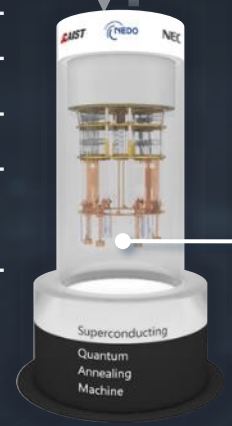


(注) NECの調査による。全ての研究開発機関を網羅しているわけではありません。



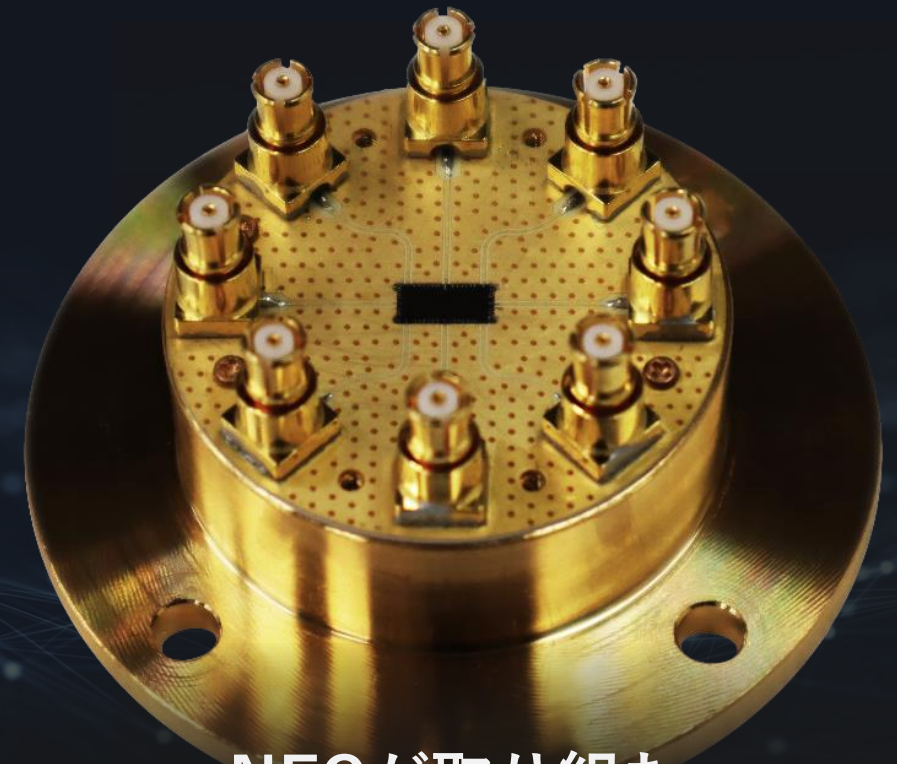
# 2023年の超伝導量子アニーリングマシン実用化に向け 量子アニーリング素子の開発を牽引しています

## 超伝導量子アニーリングマシン（モックアップ）



※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

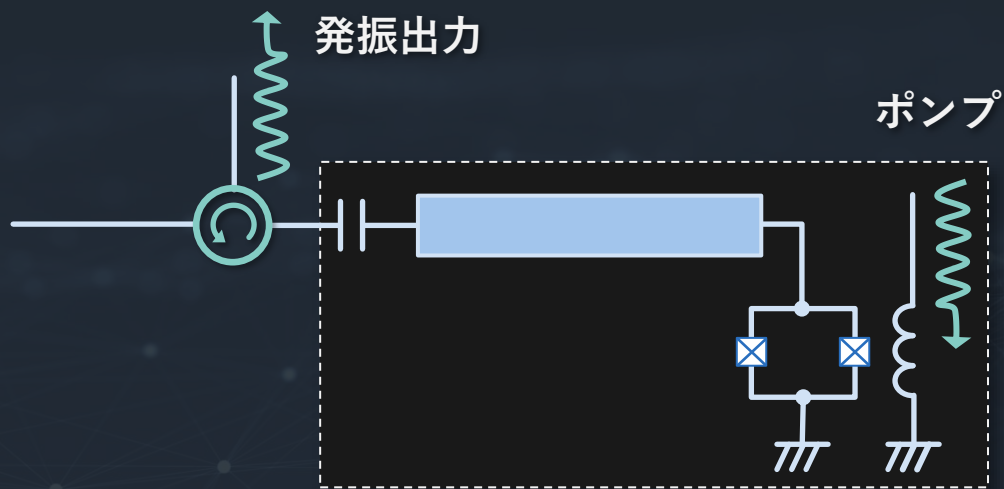


NECが取り組む  
量子アニーリング素子  
（マシンの心臓部）



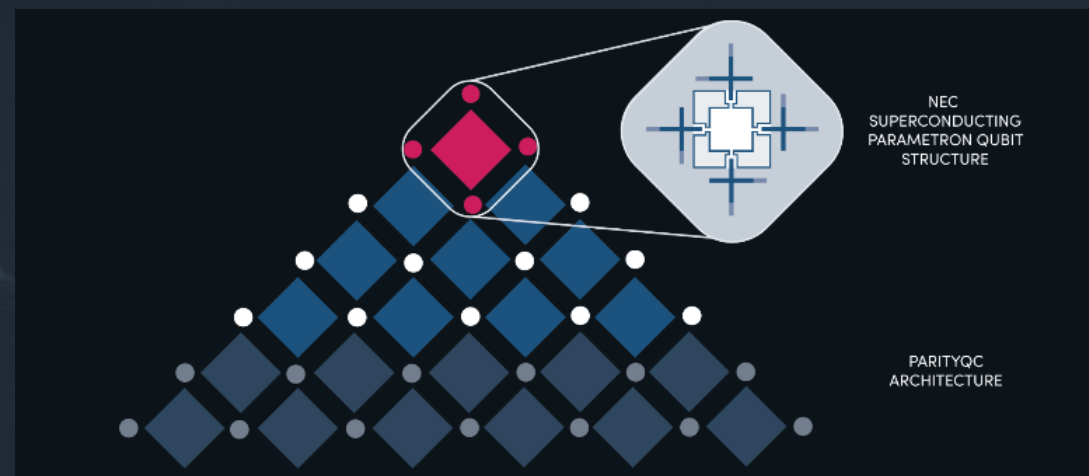
# NECが取り組む量子アニーリング素子の特長

高速・高精度な演算ができる



ノイズに強く、量子の重ね合わせ状態を長く保つ超伝導パラメトロン方式を採用

大規模な問題が解ける



ParityQC社\*と協業し  
多ビット化しやすいアーキテクチャを採用

# 量子アニーリングに関するプレスリリース(2022/3/17)

## 基本ユニットである4ビットの量子アニーリング動作成功と 多ビット化に必須の3次元構造の基本動作実現を発表

NEC、高精度で実用的な量子アニーリングマシンの実現に向け、多ビット化のための基本ユニット動作に世界で初めて成功

### News Room

経営戦略/業績/人事

サステナビリティ

研究開発/新技術

サービス/ソリューション

ハードウェア

事例

イベント・セミナー

2022年3月17日

日本電気株式会社

NECは、量子コンピュータの一種である量子アニーリングマシン(注1)の実現に向けて、高精度な計算を可能とする超伝導パラメトロン(注2)を用いて、多ビット化が容易な方式の基本ユニットを世界で初めて開発し、アニーリング動作の実証に成功しました。本成果により、量子アニーリングマシンの実現に向けてさらに前進しました。

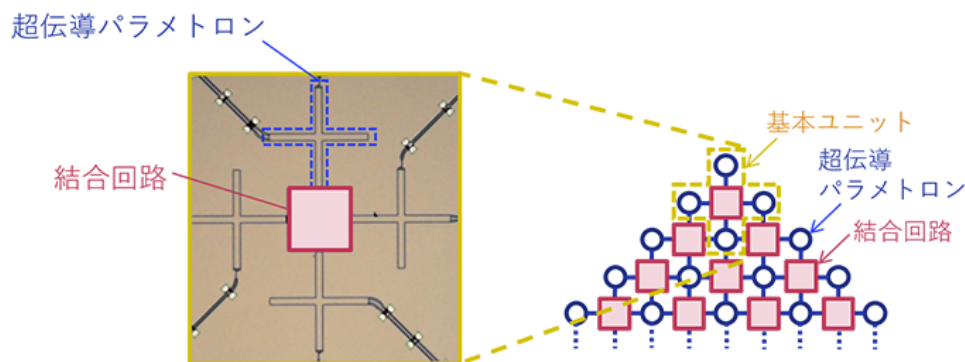


図1：動作実証に成功した基本ユニットの写真(左、一部加工)と、多ビット化時の模式図(右)

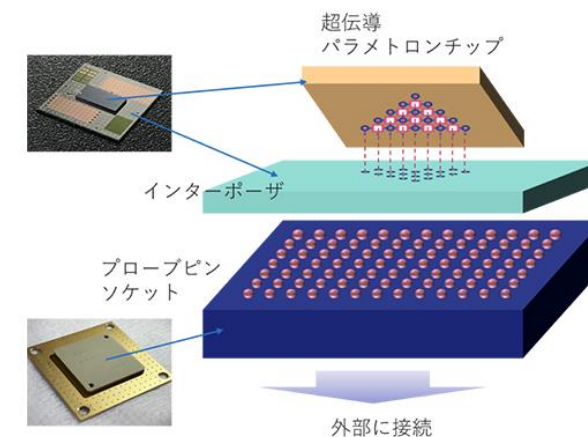


図2：3次元構造の概略図

[https://jpn.nec.com/press/202203/20220317\\_01.html](https://jpn.nec.com/press/202203/20220317_01.html)

# 【ご参考】アニーリング適用領域の広がり

NECは量子アニーラに先立ち、シミュレーテッドアニーラを活用して、様々な共創パートナーとの取り組みから、実用が見込める領域が見えてきました。

## 共創パートナーとの取り組み

SMBCグループ 様 / 日本総合研究所 様 / NECプラットフォームズ / NECフィールディング 他



### 広告/公共/インフラ

- ・ マッチング/レコメンド
- ・ 通信基地局制御
- ・ 監視センサー制御



### 製造

- ・ 生産計画
- ・ 部品発注計画



### 交通/物流

- ・ 乗務員シフト
- ・ 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
- ・ リスク計算  
データ補完



### 素材開発/創薬

- ・ スクリーニング
- ・ 実験パラメータ探索

※研究中、顧客実証～実用に至るものが含まれています

Leap Quantum Cloud  
Service

NEC Vector Annealing  
サービス



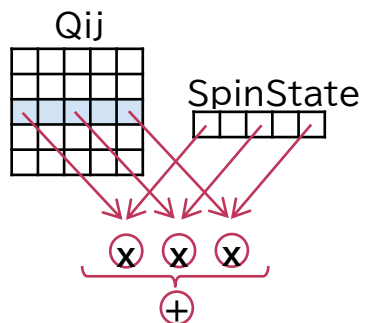
量子コンピューティング適用サービス  
/ 教育サービス

# Vector Annealingの特長

シミュレート  
アニーリング

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しています

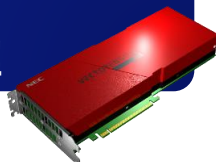
エネルギー計算はベクトル計算  
SX-Aurora TSUBASAで高速求解



```
for(i=0; i<numSpins; i++)  
DeltaEnergy +=  
Qij[FlipSpin][i] x  
SpinState[i]
```

隣のスピンの影響度

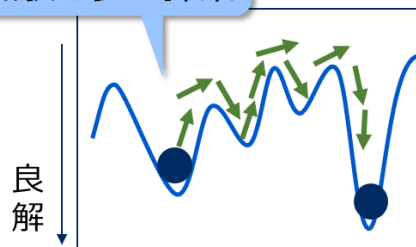
0 or 1



見込みのない探索を省いて効率化したアルゴリズム

従来手法

制約違反含め  
無駄の多い探索



良解

組合せ最適化問題

QUBO定式化

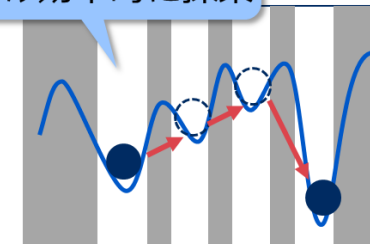
解探索

制約を満たすか確認

制約違反  
→再探索

提案手法

制約を考慮し  
有効解だけ効率的に探索



組合せ最適化問題

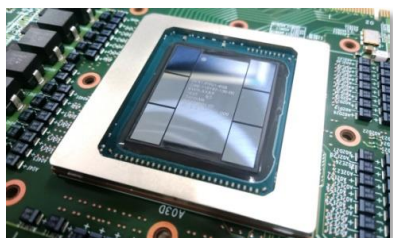
QUBO定式化

制約考慮型解探索

制約条件

定式化の際に失われてしまう  
制約条件をヒントとして与える

1VEカードで10万ビット全結合の問題に対応



- 1VEカードのメモリ容量 48GB
- マルチカードで30万ビットまで拡張



“組合せ最適化問題における制約条件を考慮したQUBOソルバ”,  
[https://ipsj.ixsq.nii.ac.jp/ei/?action=repository\\_uri&item\\_id=200692&file\\_id=1&file\\_no=1](https://ipsj.ixsq.nii.ac.jp/ei/?action=repository_uri&item_id=200692&file_id=1&file_no=1)



# 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

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

量子技術全体を底上げしつつ、目標に向かってオールジャパン体制で研究開発



- 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
- 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
- 2025 量子誤り訂正に必要な規模まで量子ビット数を増やすことのできる技術を開発する。また、その量子ビットに適した量子誤り訂正方式を開発する。
- 2023 将来増やすことが可能となる量子ビットを作成する。また、その量子ビットに適した量子誤り訂正方式を提案する。



**通信ネットワーク**

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

**ハードウェア**

量子誤り訂正システム的设计・実装、量子ビット・量子ゲート基盤の確立など

ステージゲート  
実現可能性・将来性のある物理系を見極める

超伝導	イオントラップ	光量子	シリコン
-----	---------	-----	------

**理論・ソフトウェア**

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

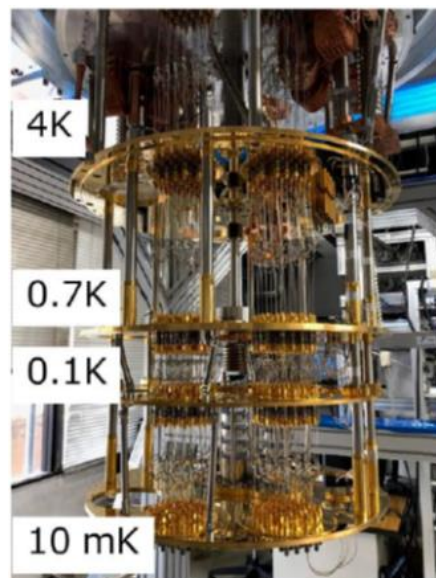
プロジェクトマネージャ  
NECセキュアシステムプラットフォーム研究所  
主席研究員 山本 剛

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

# 超伝導誤り耐性量子コンピュータ実現に向けた課題

## ① 膨大な物理量子ビット数

- 量子誤り訂正を実現するためには、複数の量子ビットを用いて一つの論理量子ビットを構成
- 現状の超伝導量子ビットのエラーレートで、味のある計算をしようとするると～**10<sup>8</sup>**程度の量子ビットが必要

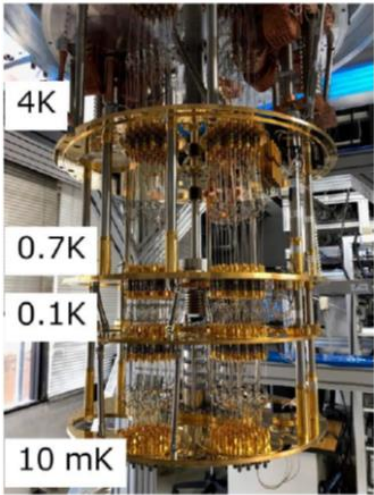
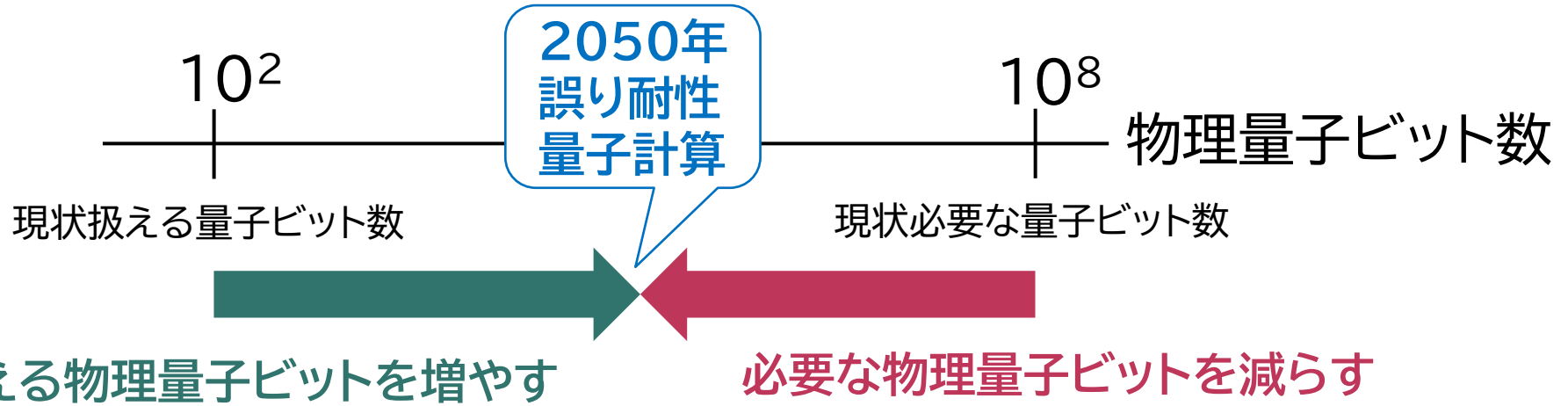


希釈冷凍機内部の写真

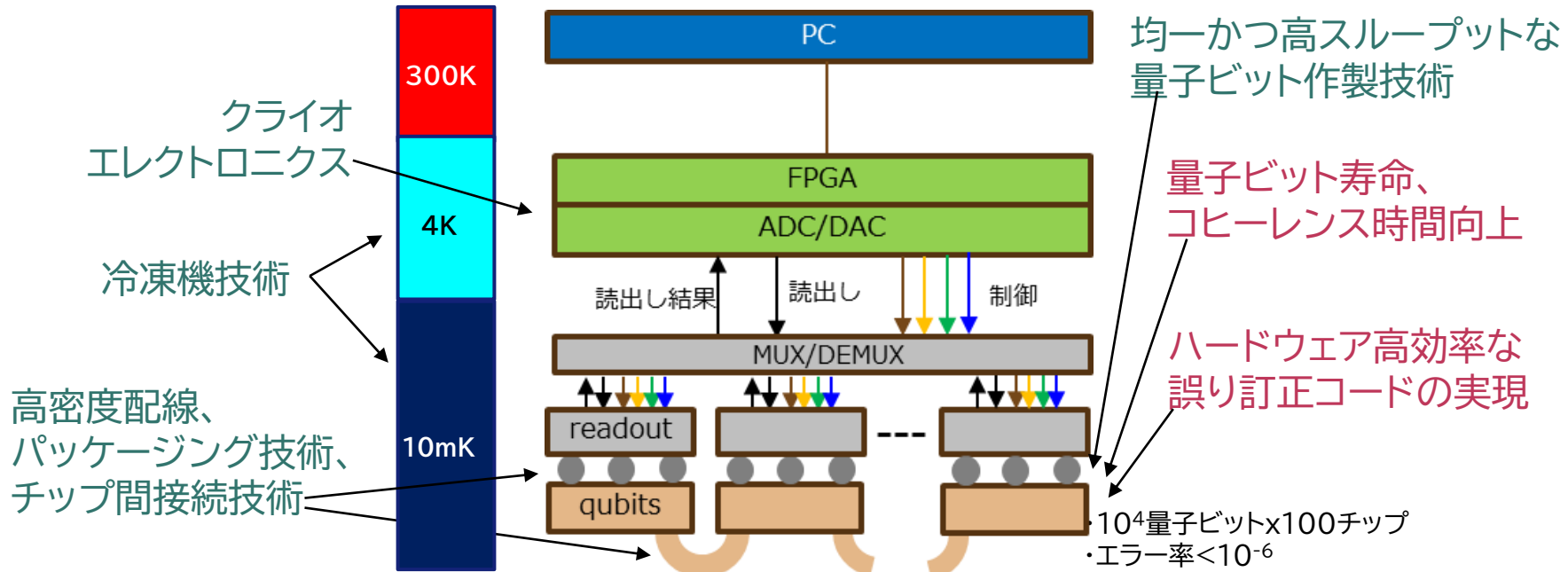
## ② 量子ビット制御/読出の配線数

- 超伝導量子ビットは、希釈冷凍機を用いてほぼ絶対零度(約-273℃)に冷却が必要
- 量子ビット制御/読出のためのGHz帯マイクロ波信号を、室温と-273℃の間で同軸ケーブルで繋いでやりとりをしている
- 現行方式では物理ビット数×2程度と同軸ケーブルが必要だが、冷凍機内スペースは冷凍能力の制限で**数100ビットが限界**

# ムーンショットプログラムで取り組む課題と目指すシステム



希釈冷凍機内部の写真



\ Orchestrating a brighter world

**NEC**