

# 富士通が描く 量子コンピューティングのある 未来

2022年11月25日

富士通株式会社

富士通研究所 量子研究所長

佐藤 信太郎



# 本日本話しする内容

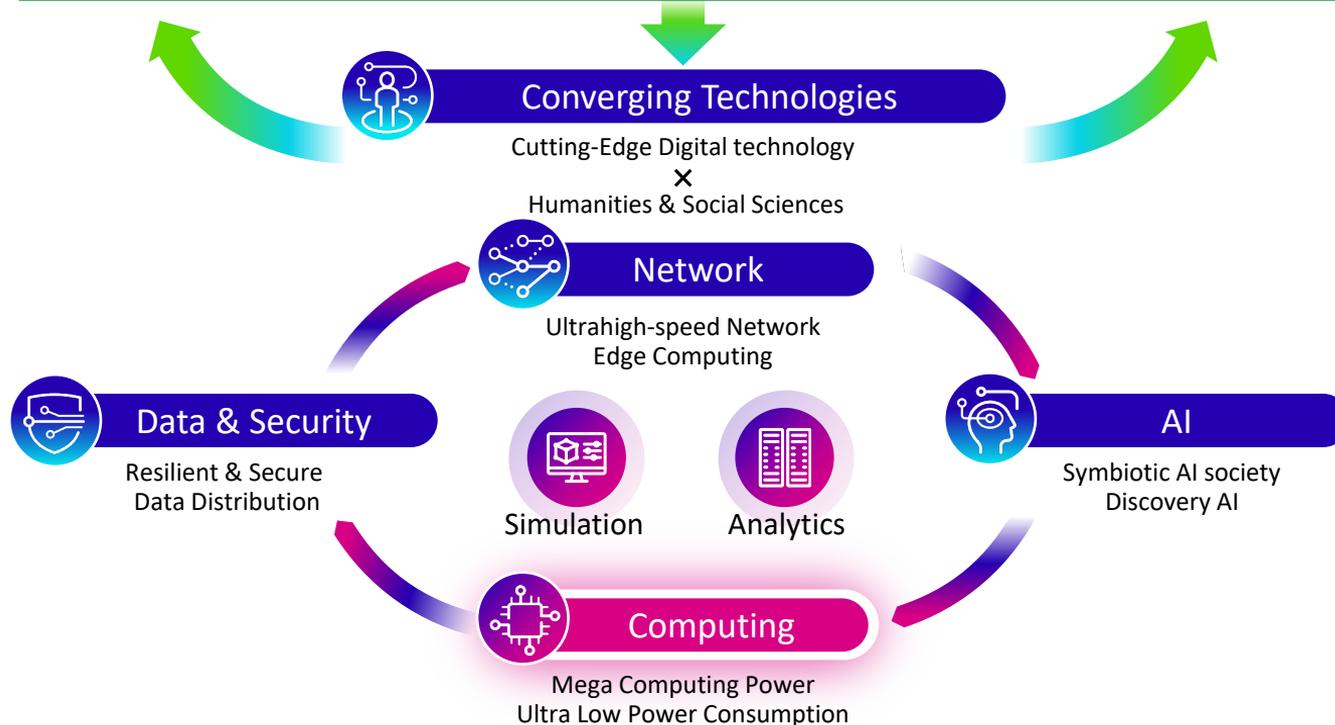
- 研究の背景
  - 量子コンピューティングについて
- 量子インスパイアード技術：デジタルアニーラについて

# Our Purpose

わたしたちのパーパスは、  
イノベーションによって社会に  
信頼をもたらし、世界をより  
持続可能にしていくことです。



# Technology Vision



- Human Sensing
- Social Digital Twin



- Open Network
- Intelligent NW Orchestration
- Green Technologies



- AI ethics & Explainable AI
- AI large-scale simulation



- Digital trust technology
- Blockchain

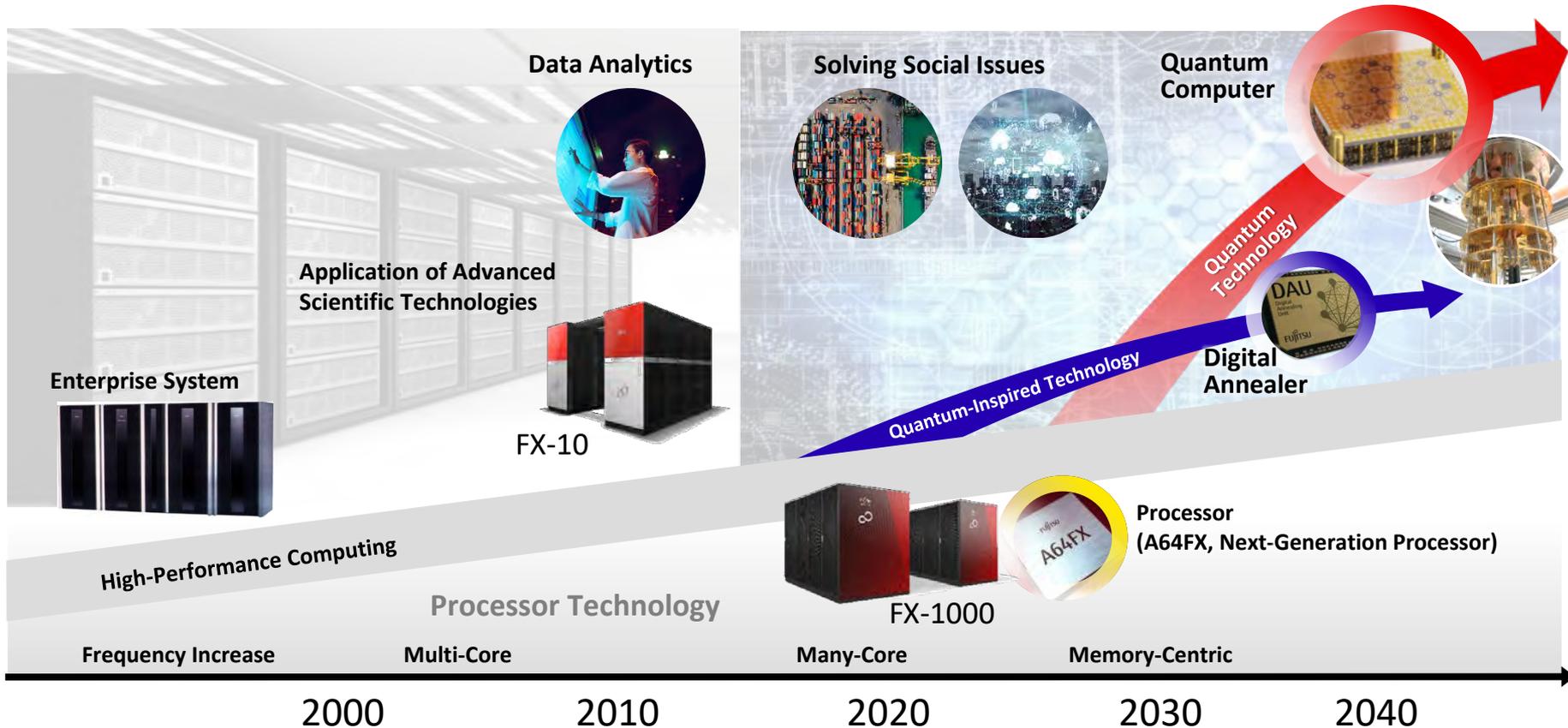


- HPC
- Quantum Inspired
- Quantum Computer

# 富士通のコンピューティングへの取り組み



(By courtesy of RIKEN)



# Computing as a Service Vision



Available on  
Public Cloud  
(Amazon Web Services  
/ Microsoft Azure)

- ミドルウェア
- OS
- ハードウェア

**High Performance Computing (HPC)**

A64FX Technology

**Quantum-Inspired Technology**

Digital Annealer      Quantum Simulator

**Quantum Technology**

Superconducting Qubit  
Diamond Spin Qubit

写真提供：理化学研究所

# 量子コンピュータの分類

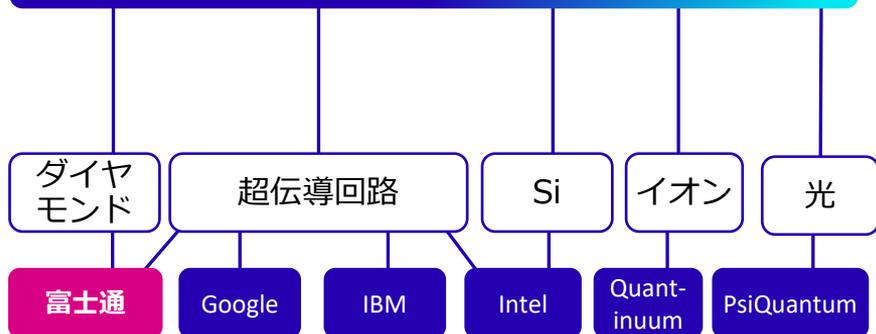
## 動作原理の違いにより、量子ゲート方式とイジングマシン方式に分類

- 量子ゲート方式では超伝導、シリコン、イオントラップなど様々な方式が提案

### 量子 / 量子インスパイアードコンピュータの分類

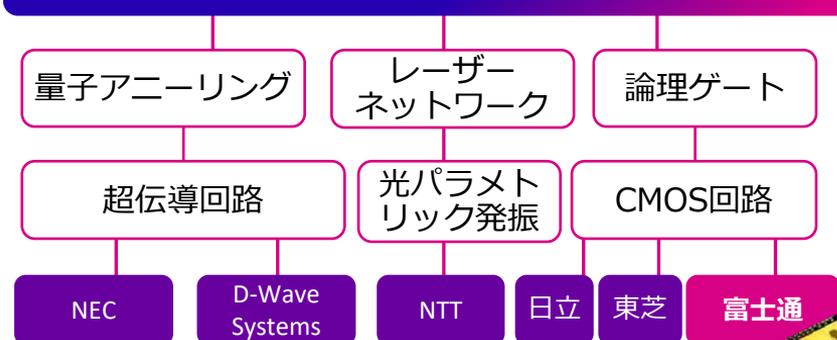
#### 量子ゲート方式

従来のコンピュータのような汎用処理が可能



#### イジングマシン方式

組合せ最適化問題に特化



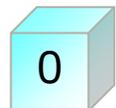
Digital  
Annealer



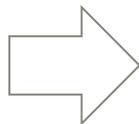
# 量子コンピューティングについて

## 量子力学的効果を利用して、飛躍的な高速化を実現

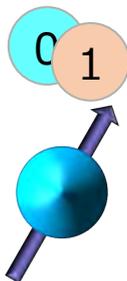
従来の  
ビット



または



量子ビット：0と1の重ね合わせ状態をとれる



Click to add text



Nビット→ $2^N$ の状態

従来： $2^N$ の状態を逐次計算

量子：  
 $2^N$ の状態を同時計算し、量子力学的効果により解をあぶりだすことにより、指数関数的高速化を実現

# 量子コンピュータにより解決が期待される課題

現在のコンピュータでは原理的に高精度 / 高速計算が困難な、量子化学計算や複雑系の計算など

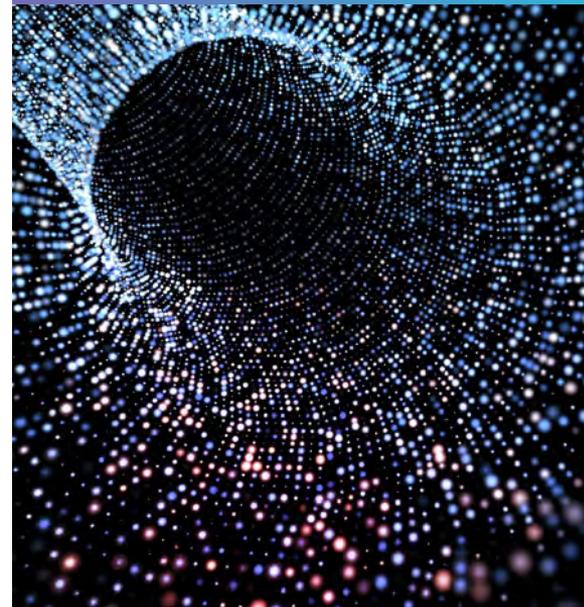
## 新しい材料や医薬の発見



## 金融や経済の動向予測

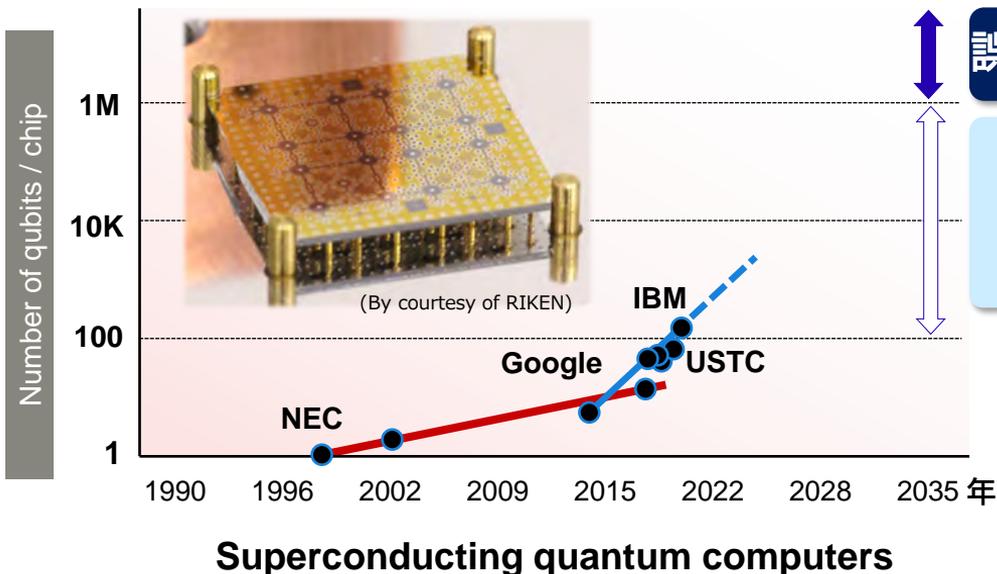


## 産業を変革する新原理の発見



## 誤り耐性量子計算には100万ビット以上が必要だが道筋は不明

- 量子ビット数は近年向上し400ビット超となったがまだ不足、課題は多い
- 当面は少ないビット数で特定アプリへの応用を狙う



誤り耐性量子コンピュータ(100万ビット以上)

### NISQ\*コンピュータ

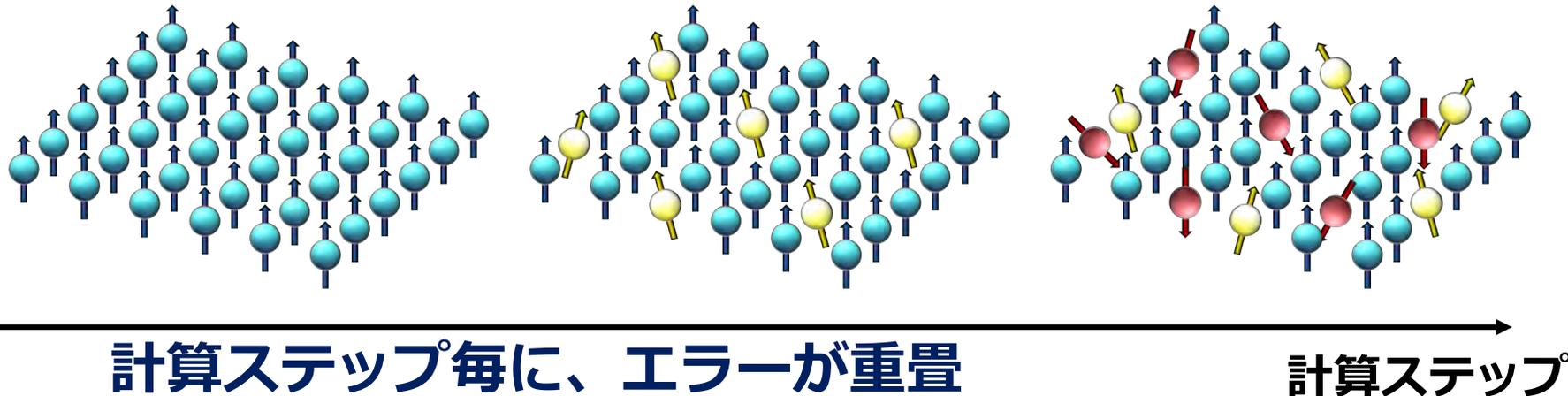
限定アプリケーションでの有用性に期待

\*NISQ : Noisy Intermediate-Scale Quantum

“1000論理ビットを持つ本格的量子コンピュータの実現には、数百万物理量子ビットが必要になるかもしれない”，  
Adrian Cho, Science, 2020/7/9

## エラーによる精度低下の改善にはソフトウェア技術が重要

- 量子ビット操作精度は99%超まで向上したが、計算ステップ毎にエラー重畳
- 当面はエラー緩和アルゴリズムなどによる精度の向上が必要
- 大規模量子コンピュータの実現にはエラー訂正技術が必須

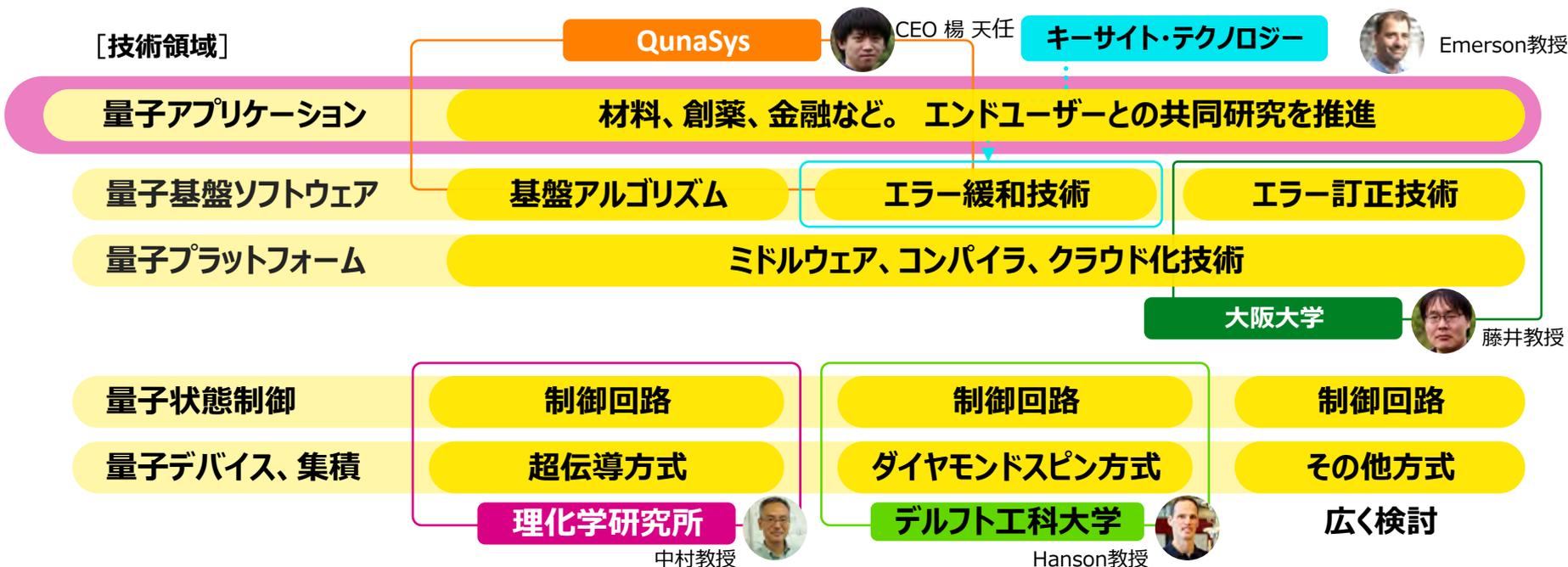


※矢印の向きは理想値からの相対誤差のイメージ

# 富士通の量子コンピューティング研究開発戦略



- 量子デバイスから基盤ソフト、アプリまですべての領域に、世界有数の研究機関と取り組む
- ソフトウェア技術に注力する一方、ハードは幅広く可能性を追求
- 量子シミュレータを活用し、エンドユーザーと早期からアプリケーション開拓に取り組む



# ハードへの取り組み： 超伝導方式とダイヤモンドスピン

## 超伝導

理研RQC – 富士通連携センターを設立

2021 / 4 / 1

### ミッション：量子コンピュータ実用化に向けた基盤技術の確立

- 1000量子ビット級の大規模化を可能にするハードウェア、ソフトウェア技術
- 試作する実機を利用した、エンドユーザーを巻き込んだアプリケーション開発



中村教授

## ダイヤモンドスピン

デルフト工科大学と共同研究

### ダイヤモンド中の窒素-空孔複合体（NVセンター）のスピンを物理量子ビットとして利用

- 超伝導に比較し高温動作（1-10K）が可能
- 光を使って量子ビット間の接続が可能であり、大規模にも期待
- 本量子ビット技術を使ってエラー訂正を実証、Natureに掲載（2022年5月）

*"Fault-tolerant operation of a logical qubit in a diamond quantum processor,"*

Abobeih, et al., *Nature* **606**, 884–889 (2022)



ダイヤモンドスピン量子モジュール

# ソフトウェアへの取り組み

## 量子ビットのエラー対策が重要

NISQ用のエラー緩和技術「Randomized Compiling」などと、それを利用したアルゴリズムに関し、カナダQuantum Benchmark社（現キーサイト・テクノロジー社）と共同で研究開発



Emerson教授

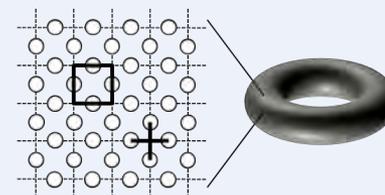
## 大阪大に「富士通量子コンピューティング共同研究部門」を設置

2021 / 10 / 1

誤り耐性量子計算を実現するためのソフトウェアを共同で研究開発

表面符号での量子エラー訂正のシミュレーションをデジタルアニーラを用いて効率的に行うことに成功

Fujisaki et al., arXiv:2203.15304



量子エラー訂正向けトポロジカル表面符号



藤井教授

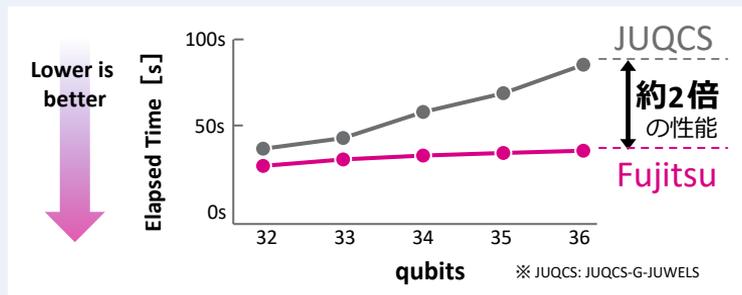
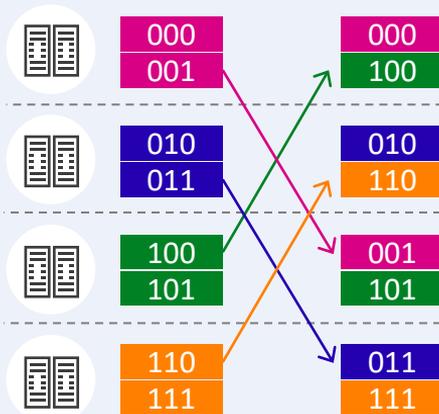
# 世界最速の量子シミュレータの開発に成功

## スーパーコンピュータ「富岳」のプロセッサA64FXの高速性を活かし、 世界最速レベルの36量子ビットの量子コンピュータシミュレータシステムを開発 (22/3)

- 他機関の主要な量子シミュレータの**約2倍の性能**を実現し、世界最高の処理速度を達成  
量子シミュレータを活用して**量子アプリケーション**を先行開発。富士フイルム様と材料分野で共同研究を開始
- この9月には、さらに大規模な世界最大級の39量子ビットのシミュレータを開発

### 量子計算に合わせた データ再配置技術

量子計算の実行順序に  
合わせて並列計算機上の  
データを再配置して  
通信時間を削減



JUQCS (GPU向けシミュレータ) と  
比較し、最大約2倍の速度を実現

# シミュレータを活用し、量子アプリケーション開拓を加速

材料、製造、金融などの各種領域でシミュレータを活用した共同研究を展開

## アプリケーションユーザー

FUJIFILM  
製造関連企業  
金融関連企業



FUJITSU



富士フイルム様をはじめとする  
計算化学領域で共同研究や、  
各種製造、金融領域での  
共同研究を開始

## 量子シミュレータ・ソフトウェア



FUJITSU

Qamuy



QunaSys様との提携により、  
同社の量子化学計算ソフトウェ  
アの利用による高速な量子化  
学計算の実現を目指す

## 将来 量子コンピュータ実機



FUJITSU



将来的には、理研RQC-富士通  
連携センターで開発中の  
量子コンピュータ実機の利用に  
つなげる

写真提供：理化学研究所

# 今後について

## 将来の社会課題解決を目指し、大規模シミュレータ・実機を順次公開



2022.9

世界最大級の39量子ビット量子シミュレータ開発  
その規模と高速性によりアプリ開発を加速

FY2023

理研RQC-富士通連携センターにおいて、  
超伝導量子コンピュータ公開（64量子ビット）  
量子アプリケーションの実機検証を開始

FY2024~

理研RQC-富士通連携センターにおいて、  
さらに大規模な超伝導量子コンピュータ公開  
（100量子ビット以上） & エラー訂正技術の実装

FY2026~

1000量子ビット超の超伝導量子コンピュータ公開

FY 2020

2030

# 量子インスパイアード技術： デジタルアニーラについて

# デジタルアニーラの適用領域

量子インスパイアード技術として量子ゲート方式に先行して実用化

以下のような顧客の様々な課題に適用中



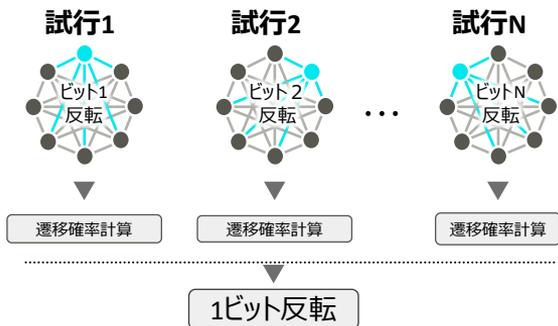
# 富士通デジタルアニーラの強み

## 背景

- 量子コンピューティングの実問題適用までには時間がかかるため、富士通では量子インスパイアード技術としてデジタルアニーラ(DA)を開発
- 2018年の顧客提供開始以来、技術的優位性から多くのユーザーに利用されている

## 優位性を持つ独自技術

- 階層的な並列化技術
- 制約係数・アニール温度の自動調整技術
- 実問題の制約条件を探索空間の削減に活用した高速化技術

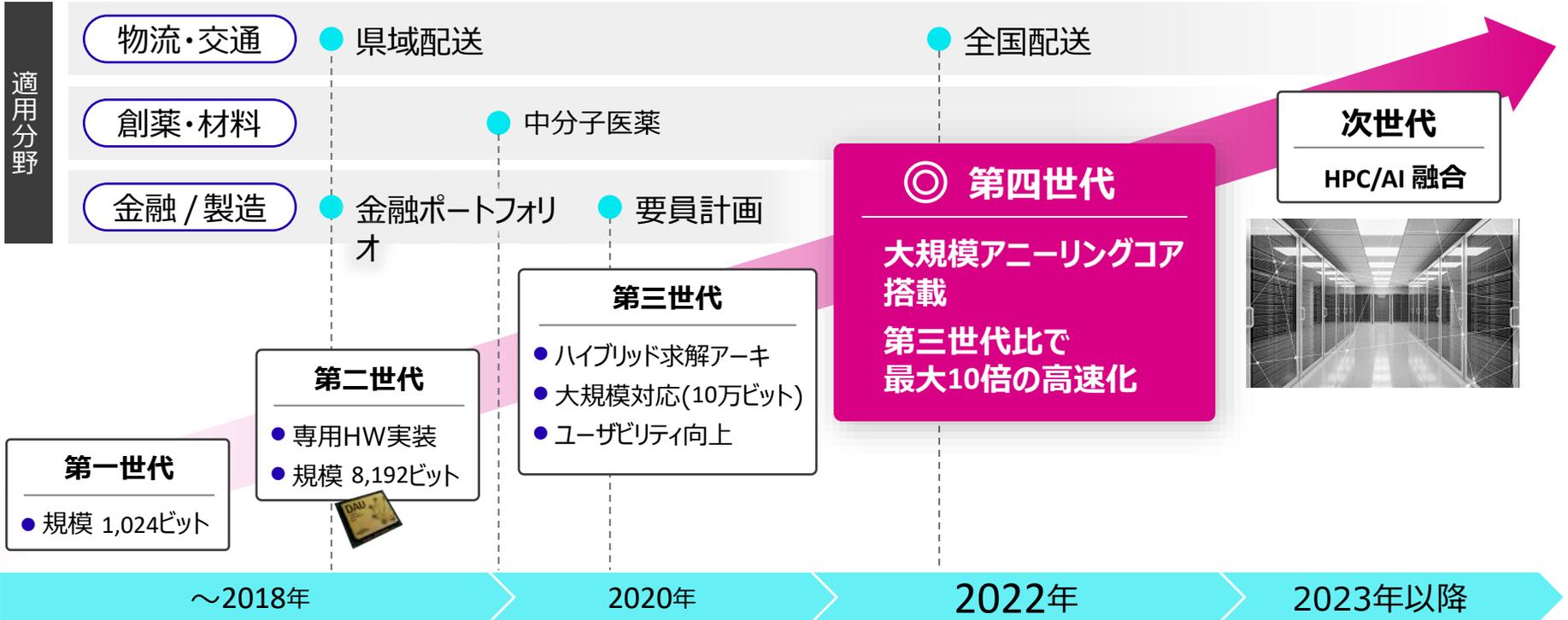


## 実績

- クラウド契約数：131件(国内)、55件(海外)。製造、金融、配送計画などの多くの分野でビジネス適用を開始
- 34件のプレスリリース、うち10件の顧客プレスリリース
- 顧客プレスリリース事例
  - KDDI様：基地局設定の最適化で通信品質を改善
  - 昭和電工様：半導体材料の最適配合探索の大幅な高速化を実現

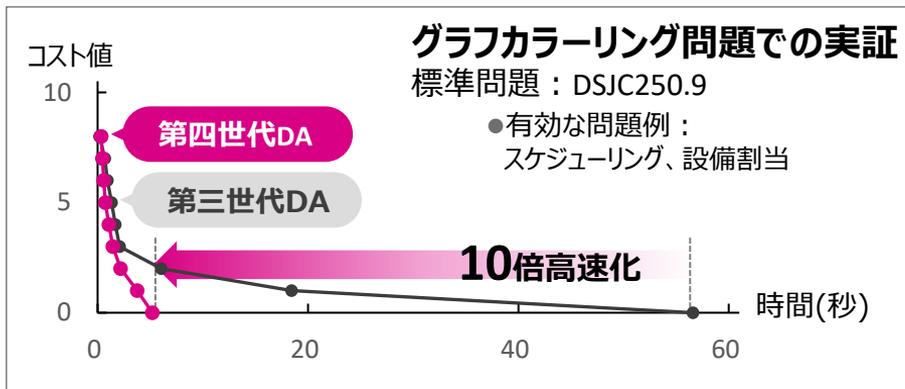


## 第四世代DAサービスを5月にリリース

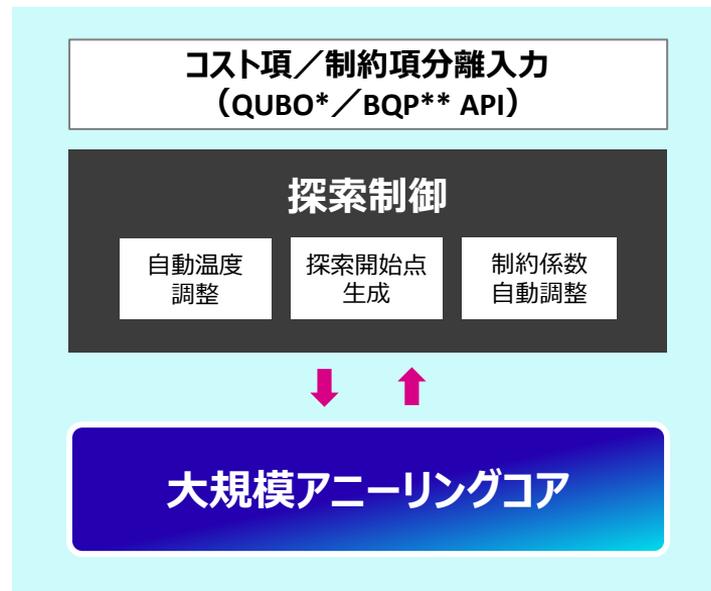


## 第三世代DAの優れた利便性をそのままに更なる高速化を実現

- アニーリングコアの特徴
  - 対応問題サイズを分割不要で**10万ビット**に拡大
  - **制約処理技術の搭載**
- 効果：第三世代DA比で**最大10倍**の高速化



### 第四世代DA構成図



\* : Quadratic Unconstrained Binary Optimization

\*\* : Binary Quadratic Programming

## 大規模アニーリングコアにより実問題求解性能で優位に

	富士通 <sup>[1]</sup>	D-Wave <sup>[3]</sup>	東芝 <sup>[4]</sup>	日立 <sup>[6]</sup>	NEC <sup>[7,8]</sup>
プロセッサ	Digital Annealing Units (DAU), マルチGPU	Quantum Processing Unit	FPGA, GPU	GPU	汎用ベクトル プロセッサ
求解方式	MCMC** Parallel Tempering	Quantum Annealing	Simulated Bifurcation	Momentum Annealing	Simulated Annealing
ビット/スピン数	10万 (サーバ並列で100万ビット <sup>[2]</sup> )	約5000	100万	10万	10万
結合度	全結合	疎結合	全結合	全結合	全結合
結合強度階調	64ビット	アナログ(5ビット程度)	2~32ビット <sup>[5]</sup>	未公表	未公表
制約処理技術	<b>実制約ハンドリング</b> 等式制約(1way-1hot, 2way-1hot), 不等式制約, 係数自動調整	-	-	-	等式制約 (1way-1hot)

\*\* MCMC: Markov-Chain Monte Carlo

\*1 <https://www.fujitsu.com/jp/group/labs/en/about/resources/tech/techintro.html>

\*2 <https://pr.fujitsu.com/jp/news/2020/11/9.html>

\*3 <https://www.dwavesys.com/solutions-and-products/systems/>

\*4 <https://www.global.toshiba/jp/products-solutions/ai-iot/sbm.html>

\*5 [https://www.itmedia.co.jp/news/articles/1907/30/news030\\_3.html](https://www.itmedia.co.jp/news/articles/1907/30/news030_3.html)

\*6 <https://www.hitachi.co.jp/rd/news/topics/2019/0830.html>

\*7 <https://jpn.nec.com/nec-vector-annealing-service/index.html?nid=jpntop211051>

\*8 鷹野ら、IEICE Technical Report CAS2019-47, MSS2019-26

※富士通調べ

# 応用：IT創薬への適用

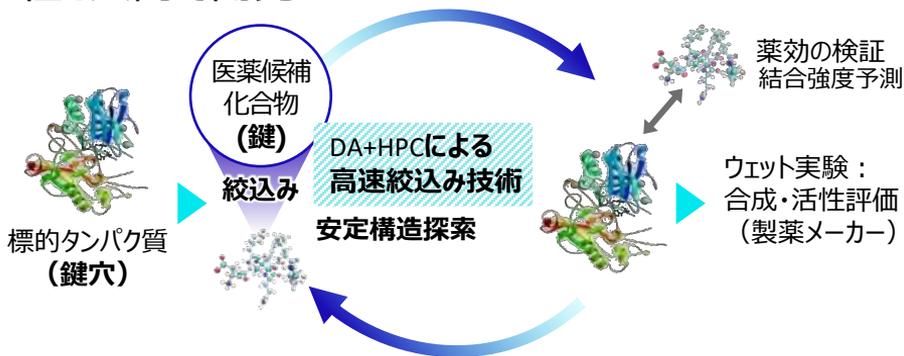
## IT創薬

- 新薬の実験的な探索には、膨大な数の試行錯誤が必要
- コンピュータ上で医薬候補を設計、評価することにより、新薬開発にかかる時間とコストを大幅に短縮することが可能

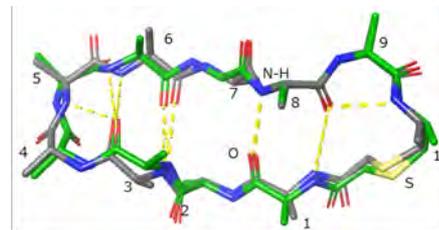


中分子医薬候補であるペプチドの安定構造探索は、計算量の爆発的な増加により困難

→ DA+HPCによる高速絞り込み技術をペプチドリーム社と共同で開発\*



- DA+HPCを環状ペプチドの安定構造探索に適用
- 平均二乗誤差が0.73 Åという驚異的な精度で実験構造と計算構造が一致
- 計算にかかった時間を従来より大幅に削減



灰色：実験結果  
緑色：計算結果

環状ペプチドの実験構造と計算構造の比較

# お客様事例

## 金融

メルコインベストメンツ株式会社様

### 運用資産の着実な成長に貢献する ポートフォリオのリスクとリターン分析

- 従来のコンピューティングでは膨大な計算量のため事実上不可能であった数百銘柄の組合せを10分で計算



## 物流

株式会社トヨタシステムズ様

### 自動車製造に必要な部品の 物流ネットワーク最適化を追求

- 300万以上のルート候補群の中から要件を満たすルートの組合せを高速探索
- 総物流コストを2～5%削減可能性



## 観客席割当

ベルリンオリンピックスタジアム様  
ニュルブルクリンク様

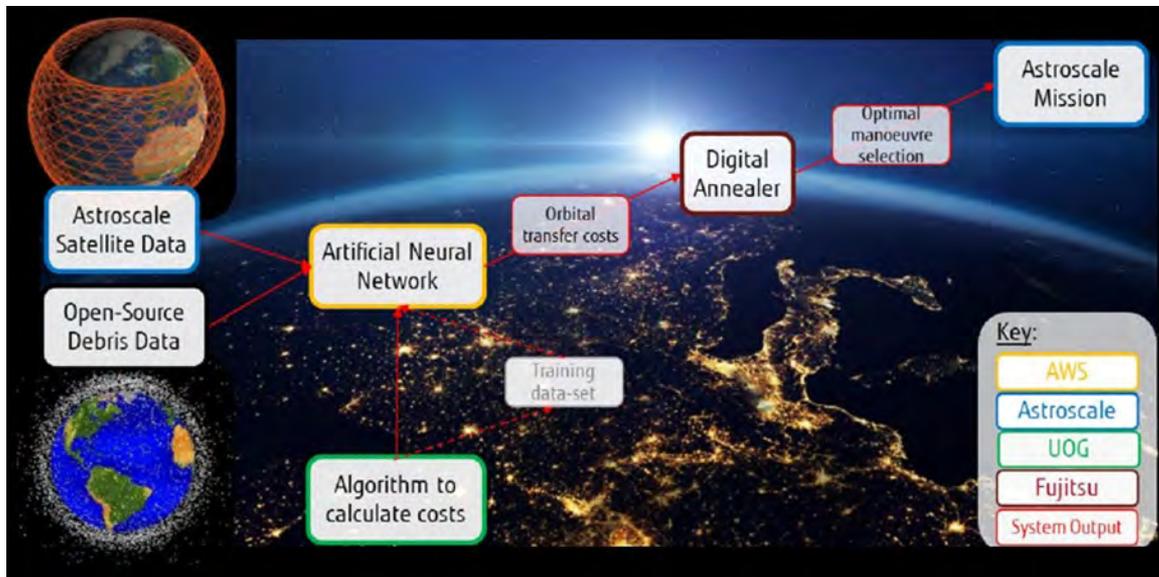
### 観客席配置を高速に最適化 コロナ禍のスポーツイベントの 安全運営と収益性向上に寄与

- イベントに応じて1～4人のグループ席をソーシャルディスタンスを保って観客席割当
- 観客席割当数60%増が可能なことを確認



# スペースデブリ回収用宇宙船の運航計画の最適化

- デジタルアニメーションを用いることで、専門の技術者が手作業で立案した計画と比較して、計画立案までの時間が1/170000となり、回収宇宙船の燃料消費を18%、運用時間を25%削減可能な計画が得られた。



出典 : <https://conference.sdo.esoc.esa.int/proceedings/sdc8/paper/284/>

DAの有効性検証結果

Optimiser	Expert	Beta
Satellite Options	100	100
No. of Captures	4	4
Capture Sequence	24, 1, 29, 54	64, 1, 100, 44
Compute Time (Seconds)	14400	0.083
Fuel Use (Kg)	30.7	24.9
MissionTime (Days)	2307	1717

富士通では将来の社会課題解決のため、  
量子コンピューティングの研究開発に取り組んでいます

量子コンピュータが実用レベルに達するまでにはまだ時間が必要です。  
実用化に向けた技術開発に取り組む一方、  
量子シミュレータも活用しながら、お客様とアプリ開拓に早期から取り組んでいきます

量子インスパイアード技術であるデジタルアニーラは既に実用化されており、  
たくさんのユースケースがあります。  
まずはこの技術とHPC技術を活用し、お客様の実問題の解決に取り組んでいきます

**Thank you**

