

# 次世代計算基盤における 量子コンピュータの位置づけ

伊藤公平

慶應義塾大学 理工学部

慶應義塾大学IBM Q Network Hub @ Keio ファウンダー

内閣府 量子技術イノベーション会議 委員

文科省 光・量子飛躍フラッグシッププログラム (Q-LEAP)

量子情報処理分野プログラムディレクタ (PD)

JSTさきがけ「量子の状態制御と機能化」領域総括

# 学術を担う文科省として 次世代計算基盤で目指すべきこと

- フラッグシップ機: 基礎科学の飛躍的发展、ノーベル賞・フィールズ賞の受賞につながる計算機の開発
  - ・学術分野における学際型ムーンショット
  - ・情報プロジェクトであり情報プロジェクトにあらず
  - ・量子コンピュータ研究者もここに参加
  
- 周辺高性能コンピュータ(HPC): 科学と工学の大きな発展に寄与する実用システム
  - ・コンソリデーション
  - ・データ基盤
  - ・人材育成の環境整備
  - ・量子コンピュータ研究者もここに参加

赤字は前回委員会の喜連川委員発表を参照

# スパコンの科学力

2015年11月12日 行政レビュー「スパコン」 伊藤公平参考人 発言抜粋

“科学者から見て一番可能性を感じることは、今までノーベル賞というのは科学計算結果に与えられていないのです。必ず実験結果または紙と鉛筆の理論結果。計算機の性能がだんだんと上がるにつれて、純粋科学の発展に対する計算機の寄与はどんどん大きくなっています。という意味で、科学者たちにとって、また公開性を持って使えるスパコンができたということは非常に大きいと考えていることは事実です。また、「京」以外に、東工大の「TSUBAME」に代表されるさまざまなスパコン、また長崎大の「DEGIMA」など独特なスパコン、いろいろなものが開発されていて、それをどこに絞るかというのはなかなか難しい問題なのですけれども、申し上げたいのは、科学者のツールとしては可能性を有しているということです。”

“また、文科省の今日の御説明にもありましたけれども、科学的なすばらしい成果を、論文も含めてもっとダイレクトに発表されたほうがいいのではないかと私は昔から思っています。動く心臓を見せるのが悪いとは言いませんけれども、それにどういう科学的成果があるのか全くわかりません。ろう人形館に行って、本物のアートでもなく、何かすごい技術をもって物まねをしたものを見せられているようなところがあるので、そこら辺は科学の迫力ということで示していただいたほうが良いと考えています。”

“ポスト「京」についてです。これは、今度はナンバーワンを狙うのではなく、フロップスを「京」の100倍にするということ。あと汎用性を高める。つまり、科学計算にオープンに使えるようにするということが目標としてしっかりと打ち出していることが非常に評価できると思います。”

# 量子コンピュータの科学的可能性

- 古典情報(いわゆる世間のビッグデータ)を量子状態に変換する(量子コンピュータに読み込ませる)ためには膨大な計算量が必要となる
- 量子力学に基づく情報(素粒子、原子、分子など)を直接量子ビットで担う(量子状態を量子状態で表す)。科学的可能性としてはそのような計算を量子ビットで実行すべき。(金融、最適化といった産業応用は別問題)

QUANTUM COMPUTING

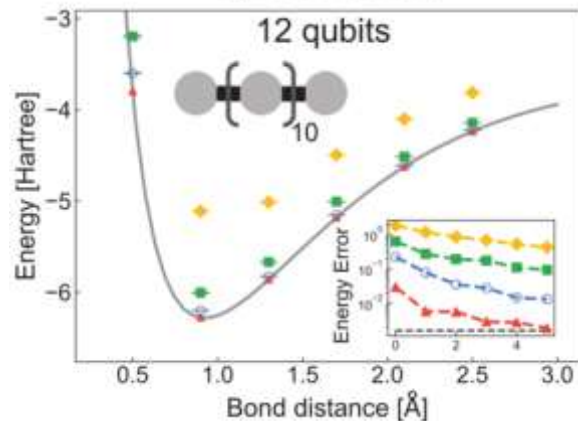
Rubin *et al.*, *Science* **369**, 1084–1089 (2020)

28 August 2020

## Hartree-Fock on a superconducting qubit quantum computer

Google AI Quantum and Collaborators\*†

The simulation of fermionic systems is among the most anticipated applications of quantum computing. We performed several quantum simulations of chemistry with up to one dozen qubits, including modeling the isomerization mechanism of diazene. We also demonstrated error-mitigation strategies based on  $N$ -representability that dramatically improve the effective fidelity of our experiments. Our parameterized



H<sub>12</sub>分子の  
結合長

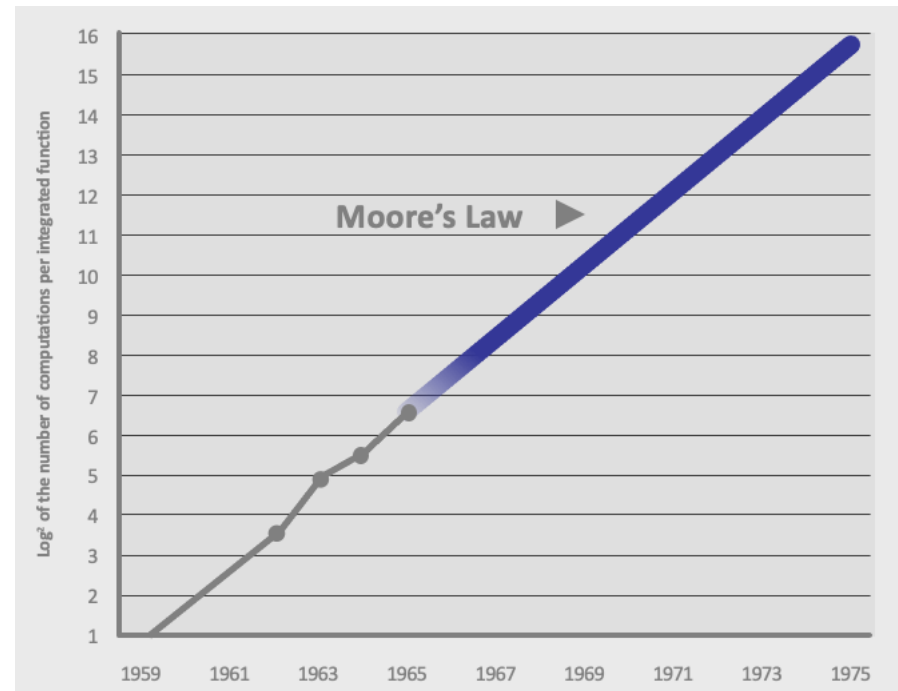
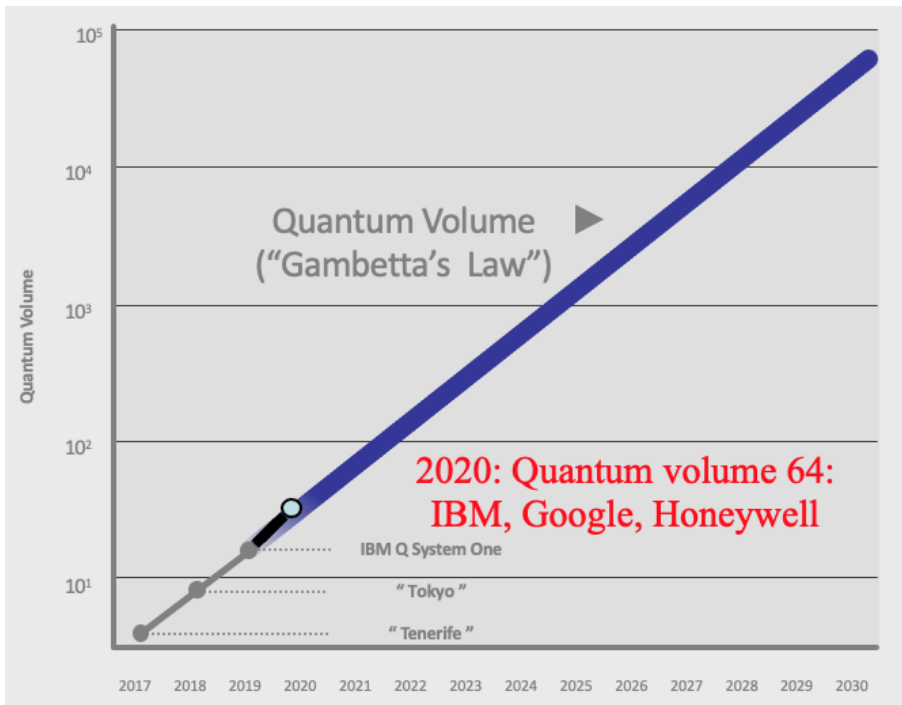


# 量子コンピュータ性能の発展予想

性能指標: Quantum volume

2020年の64は、2の6乗. 6つの量子ビットで6段の高精度計算が可

2021年は128 (?), 2の7乗. 7つの量子ビットで7段の高精度計算が可



# Scaling IBM Quantum technology



IBM Q System One (Released)

(In development)

Next family of IBM Quantum systems

2019

2020

2021

2022

2023

and beyond

27 qubits

65 qubits

127 qubits

433 qubits

1,121 qubits

Path to 1 million qubits

*Falcon*

*Hummingbird*

*Eagle*

*Osprey*

*Condor*

and beyond

*Large scale systems*



Key advancement

Key advancement

Key advancement

Key advancement

Key advancement

Key advancement

Optimized lattice

Scalable readout

Novel packaging and controls

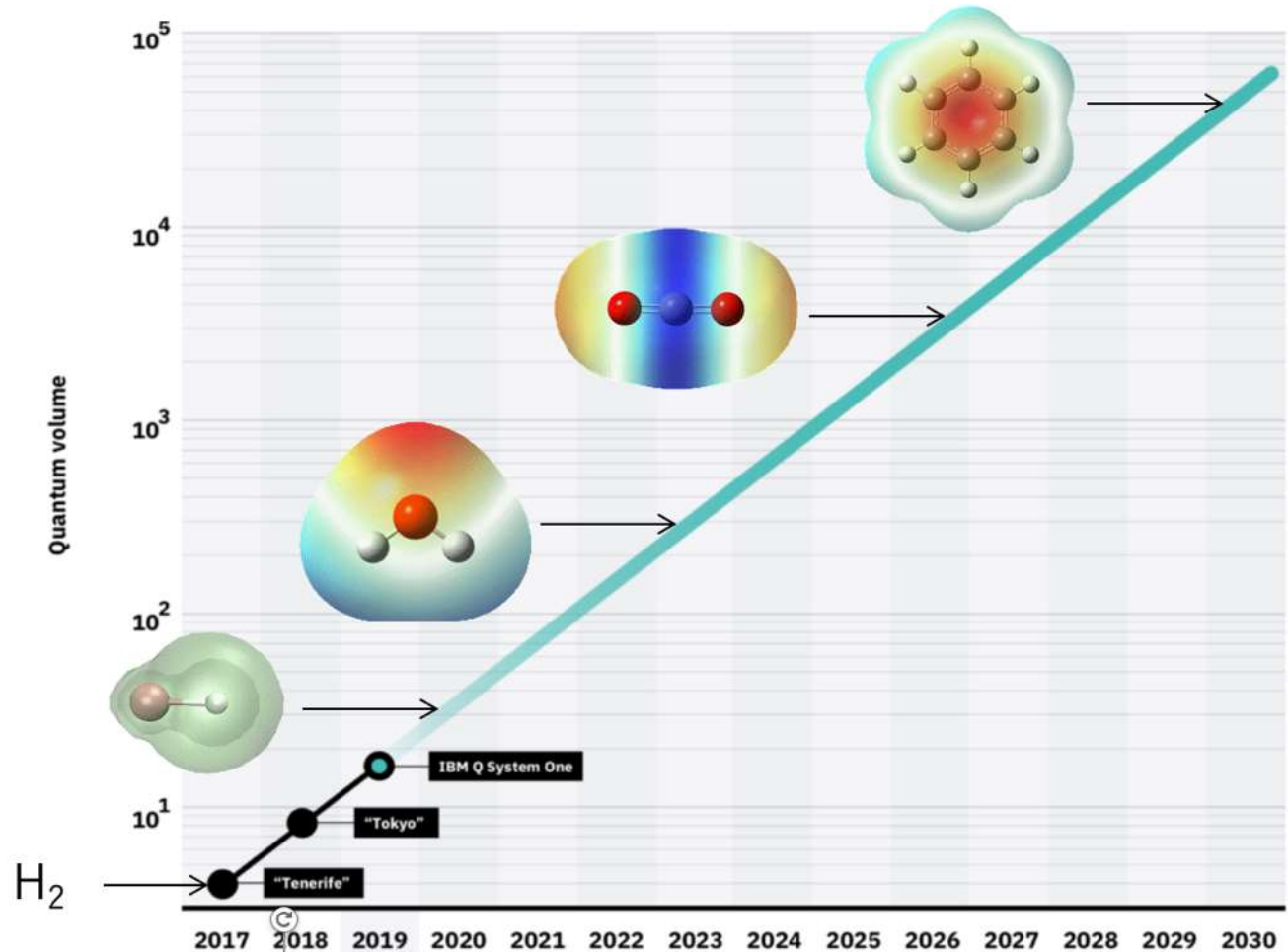
Miniaturization of components

Integration

Build new infrastructure,  
quantum error correction

# 現状の延長では...

Gate Complexity  $\propto O(N^3)$ の場合

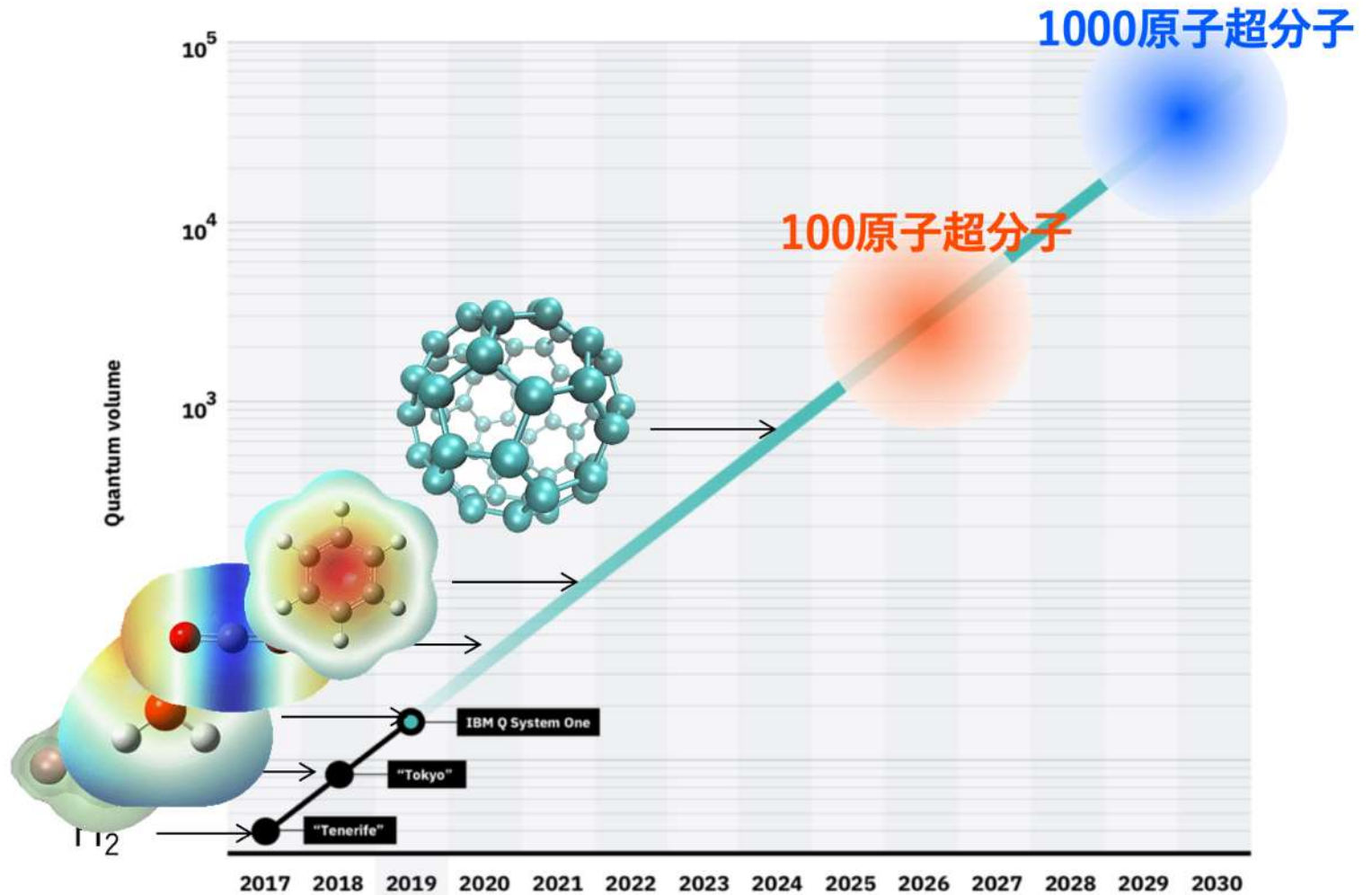


Exponential Forecast for Growth of Quantum Processing Power

出典: <https://www.ibm.com/blogs/research/2019/03/power-quantum-device/>

© IBM Corporation 2019

# 量子ハード・ソフト協調の子育てが必要



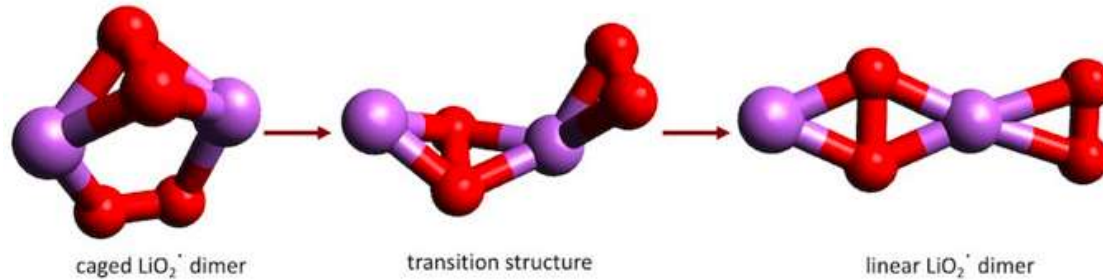
Exponential Forecast for Growth of Quantum Processing Power  
出典: <https://www.ibm.com/blogs/research/2019/03/power-quantum-device/>

© IBM Corporation 2019

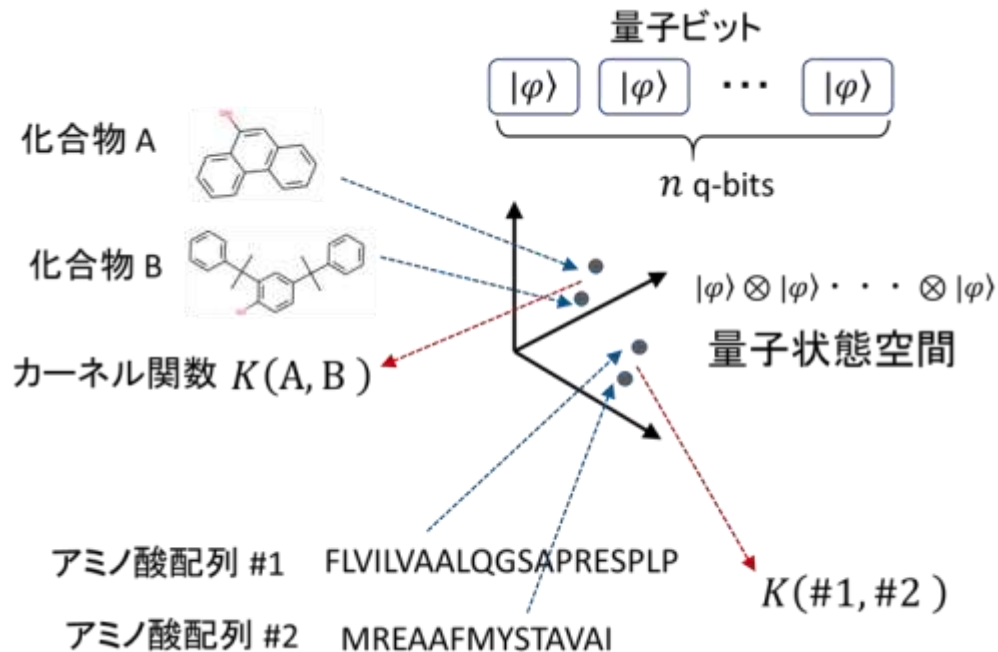


# コンピュータで不可能な問題

## 量子物質の構造・反応計算



## 量子空間での直接的分類分け(機械学習)



# 次世代計算基盤フイージビリティースタディー(FS) における量子コンピュータの関わり方(私案)

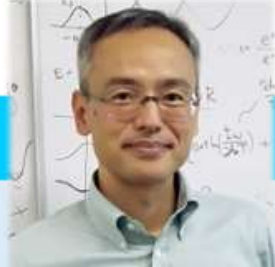
量子情報処理にはすでに多額の国家予算が投入されている  
そして量子コンピュータはまだ幼稚園児程度の子育て状態

- 次世代フラッグシップ機開発は、学術分野における学際型ムーンショットプロジェクトであるべき(はやぶさプロジェクトのようなロマンとドラマが必要)→プロジェクトチーム(若手・中堅)の熱気と結束。ノーベル賞・フィールズ賞を目指す。

FSへの量子コンピュータの関わり方:

- ・スパコン富岳を用いたゲート型量子計算シミュレータ開発を起点とする、将来のスパコン-量子コンピュータのハイブリッド化FS
- ・計算物理学者・計算化学者・数学者・計算機科学者によるスパコン・量子計算・量子シミュレータ(冷却原子集団等)を用いた「ノーベル・フィールズ賞プロジェクト」の特定FS
- 周辺スパコン(HPC): 科学と工学の大きな発展に寄与する実用システム
  - ・HPCを用いた基礎研究の強化と、コンソリデーションとデータ基盤手法の研究に対して、必要に応じてゲート型・アニーリング型量子コンピュータや量子シミュレータを追加

# 文科省 光・量子飛躍フラッグシッププログラム (Q-LEAP)



## 【Flagshipプロジェクト】「量子情報処理 (主に量子シミュレータ・量子コンピュータ)」の採択課題

### 採択課題 超伝導量子コンピュータの研究開発

### 研究代表者 理化学研究所・創発物性科学研究センター 中村 泰信チームリーダー

(共同研究機関) 東京大学、産業技術総合研究所 情報通信研究機構、QunaSys、MDR、東芝、NEC、NTT、京都大学、大阪大学、名古屋大学、東京医科歯科大学

**概要** 超伝導量子ビットを用いた、古典計算機の限界を超える計算を可能にする**量子計算プラットフォーム拠点**を構築  
3次元パッケージング技術を提案し、**100量子ビット以上を実装**  
量子コンピュータ上で優位性を示す**アプリケーション**の開拓、**クラウドサービス**による利

### 研究開発目標

- ・3次元パッケージングによる**100量子ビット以上**の実装
- ・**クラウドサービス**による**アプリケーション**の利用者への提供

### マイルストーン

- ・5年後：**50量子ビット**実装、**高忠実度\*1**な制御および観測を実現  
50量子ビットシステムの**クラウドサービス**を開始
- ・10年後：**100量子ビット**実装、**高忠実度\*2**な制御および観測を実現  
100量子ビットシステムの**クラウドサービス**を開始、**実利用**に向けた応用

\*1 1量子ビットゲート>99.9%、2量子ビットゲート>99%、読み出し>99%

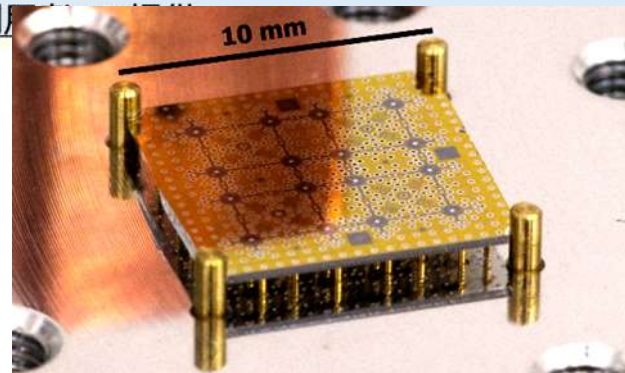
\*2 1量子ビットゲート>99.95%、2量子ビットゲート>99.9%、読み出し>99.9%

### 出口戦略

- ・クラウドシステムの構築運用：**連携企業と協働**
- ・ハードウェア技術：**コンソーシアム**の設置、**連携企業**の開拓により  
**産学共同で開発・実用化**を目指す

### 研究基盤の強化・次世代人材の育成

- ・**次世代のリーダー候補**となる若手研究者を**PI**として採用
- ・博士課程学生を**研究員等**として**雇用**
- ・海外の研究グループと連携、**国際的な人事交流**
- ・研究開発**コンソーシアム**の設立
- ・研究者・学生のキャリアパス確保の支援



20 mm × 20 mm

量子ビット集積チップ (イメージ)



超伝導量子ビット集積回路の性能向上

# 基礎基盤研究 (ハードウェア)

Flagshipに相補的かつ相乗的な効果が期待される研究課題

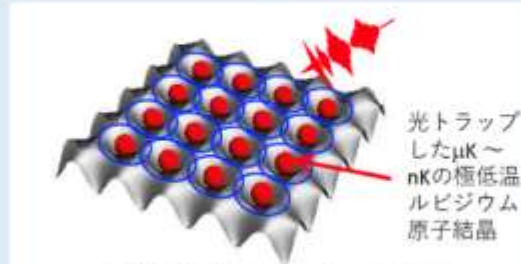
冷却原子量子シミュレータ



**採択課題** アト秒ナノメートル領域の時空間光制御に基づく冷却原子量子シミュレータの開発と量子計算への応用

**研究代表者** 自然科学研究機構分子科学研究所 大森 賢治 教授

**概要** アト秒( $10^{-18}$ 秒)精度の超高速量子シミュレータと、基底状態の短距離相互作用を厳密に制御する高機能ハバート量子シミュレータを開発



アト秒精度のコヒーレント制御

Flagshipプロジェクトとの相補的・相乗の効果:

Flagshipプロジェクトとは異なる手法を発展させ、量子情報処理のプラットフォームの形成に貢献

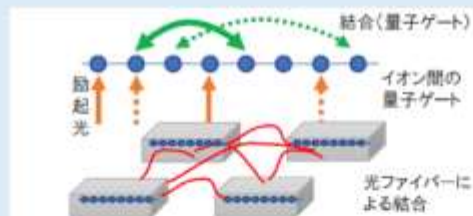
イオントラップ量子シミュレータ



**採択課題** 冷却イオンによる多自由度複合量子シミュレーター

**研究代表者** 大阪大学基礎工学研究科 豊田 健二 助教

**概要** 全結合性が高いと考えられている冷却イオン方式を用いた多自由度複合量子シミュレータの開発を行い、20~100イオンでのアナログ量子シミュレーションを実施



冷却イオンによる量子シミュレータ

Flagshipプロジェクトとの相補的・相乗の効果:

Flagshipプロジェクトとは異なる手法を発展させ、量子情報処理のプラットフォームの形成に貢献

シリコン量子コンピュータ

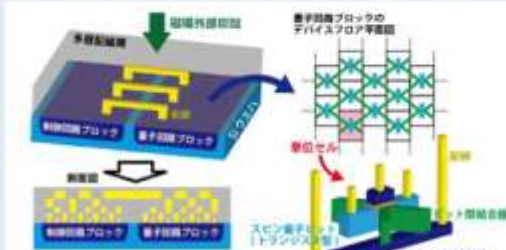


**採択課題** シリコン量子ビットによる量子計算機向け大規模集積回路の実現

**研究代表者** 産業技術総合研究所ナノエレクトロニクス研究部門

森 貴洋 主任研究員

**概要** 高忠実度のシリコン量子ビットをシリコン集積回路技術を用いて集積化し、大規模集積化に適した2量子ビット結合を実現



チップ集積化のイメージ

Flagshipプロジェクトとの相補的・相乗の効果:

Flagshipプロジェクトとは異なる手法を発展させ、量子情報処理のプラットフォームの形成に貢献

# Q-Leap外の量子情報処理関連の実験家(抜粋)

**光:**古澤明(東大)、青木隆朗(早大)、神成文彦(慶大)、武田俊太郎(東大)、  
加藤 真也(早大)、堀切 智之(横国大)、小野貴史(香川大)、  
竹内繁樹(京大)、小坂英男(横国大)、山本喜久(NTT)、早瀬潤子(慶大)、  
その他多数

**原子・イオン:**高橋義朗(京大)、香取秀俊(東大)、上妻幹旺(東工大)、  
田中歌子(阪大)、相川 清隆(東工大)、素川 靖司(分子研)、中島秀太(京大)、  
山口敦史(理研)、その他多数

**分子・磁気共鳴:**北川勝浩(阪大)、根来 誠(阪大)、今田裕(理研)、その他多数

**超伝導:**蔡兆申(理科大)、齊藤志郎(NTT)、仙場浩一(NICT)、野口篤史(東大)、  
山下太郎(名大)、猪俣邦宏(産総研)、不破麻里亜(東大)、久保結丸(OIST)  
阿部英介(理研)、その他多数

**超伝導ヘリウム:**川上恵里加(理研)

**半導体:**樽茶 清悟(理研)、平山祥郎(東北大)、大野圭司(理研)、山本倫久(理研)、  
橋坂 昌幸(NTT)、フレイザー・マイケル(理研)、太田泰友(東大)、  
小寺哲夫(東工大)、森山悟士(電機大)、その他多数

**強相関:**小塚裕介(NIMS)、その他多数

【Flagshipプロジェクト(新規)】

知的量子設計による量子ソフトウェア研究開発と応用

**研究代表者** 大阪大学 先導的学際研究機構 量子情報・量子生命研究センター 藤井啓祐 副センター長  
(共同研究機関) 慶應義塾大学、名古屋大学、東京大学、京都大学、NTT、e-Trees Japanなど

- 概要**
- 量子コンピュータの性能を引き出すためのソフトウェアを開発、アーキテクチャ設計を実施、ベンチャー企業等による実装
  - ハードウェア性能の理論的解析、量子優位性を解析するツールを開発、理論的保証のついた量子アルゴリズムを開発
  - NISQコンピュータを利用した量子回路設計法を開発。データ分類、化学反応シミュレーション、金融工学など実課題へ応用

**研究開発目標**

- NISQの性能を賢く引き出すためのソフトウェア・アーキテクチャの構築。超伝導量子コンピュータへの実装
- 量子優位性を活用したアプリケーションの利用者への提供。量子AIによる実問題の解析

**マイルストーン**

- 5年後：データ分類、化学反応シミュレーション、金融工学解析のアルゴリズムのライブラリ公開  
量子回路解析ツールの開発・クラウド公開、物理エミュレータの構築・クラウド公開
- 10年後：量子AIの物性・機械学習への方法論を実問題へ適用  
NISQコンピュータにおける量子回路設計ツールの開発・クラウド公開  
超伝導量子コンピュータ開発のプロジェクトと連携、実機を動作するソフトウェアの実装

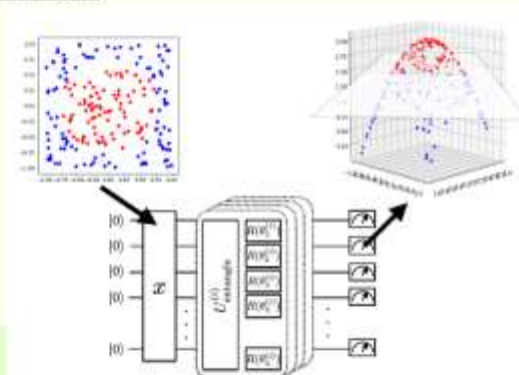
**出口戦略**

ハードウェア・ソフトウェア研究開発機関・企業等による量子コンピュータ開発エコシステムの確立。  
社会的ニーズや実装技術をフィードバック。

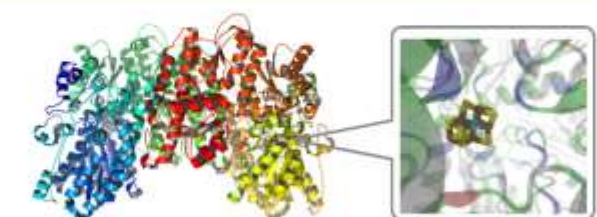
- NISQ動作に向けたソフトウェア・アーキテクチャの構築運用：連携機関・企業が担当
- 公開が難しい技術の実装：起業・事業化など

**研究基盤の強化・次世代人材の育成**

- 高校生、高専生へのアウトリーチ、大学生や他分野の研究者を対象とするスクール。一般参加者を含めたチュートリアルやハッカソンにより、量子計算分野の普及を目指す。
- 博士課程学生をRAとして経済的に支援
- 若手研究者の海外研究機関への派遣、海外研究機関からの研究者の受入れを支援
- 共同研究機関からの社会人ドクター・研究員の受入れ。企業等からビジター、インターンの受入れによる量子技術の底上げを図る。



量子回路をモデルとして用いる量子機械学習



M. Reiher et al. PNAS 114, 7555-7560 (2017)  
量子コンピュータの活用が期待される触媒(酵素)  
窒素固定酵素(左)とその心臓部(右)

# 基礎基盤研究(アーキテクチャ・ソフト・アプリ)

Flagshipに相補的かつ相乗的な効果が期待される研究課題

**採択課題** アーキテクチャを中心とした量子ソフトウェアの理論と実践

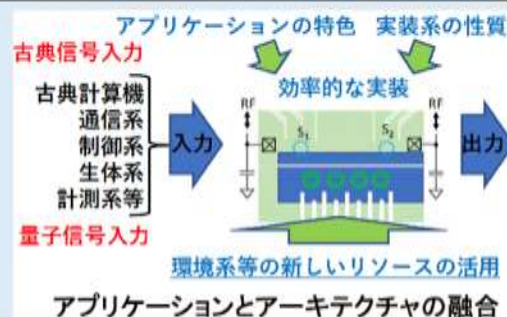
**研究代表者** 情報・システム研究機構国立情報学研究所

情報学プリンシプル研究系 根本 香絵 教授

**概要** 少数量子ビット量子情報処理に特化したアプリケーション、量子的なポテンシャルを最大限引き出す実装方法をアーキテクチャとして開発

Flagshipプロジェクトとの相補的・相乗的効果:

ゲート型量子コンピュータのポテンシャルを最大限に引き出すアーキテクチャを解明し、ゲート型量子コンピュータの社会実装を加速



アーキテクチャ・アプリケーション



**採択課題** 量子コンピュータのための高速シミュレーション環境構築と量子ソフトウェア研究の展開

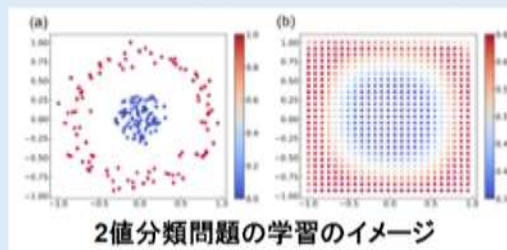
**研究代表者** 京都大学大学院理学研究科物理学・宇宙物理学専攻

**研究代表者** 藤井 啓祐 特定准教授

**概要** 古典コンピュータを用いた量子コンピュータのシミュレーション環境の構築と、量子加速に基づいた機械学習・量子化学アルゴリズムの構築

Flagshipプロジェクトとの相補的・相乗的効果:

ゲート型量子コンピュータのソフトウェアを開発し、ゲート型量子コンピュータの社会実装を加速



2値分類問題の学習のイメージ

シミュレーション環境・アプリケーション



**採択課題** 量子ソフトウェア

**研究代表者** 慶應義塾大学理工学部 山本 直樹 准教授

**概要** 中規模ゲート型量子コンピュータの実機 IBM Q を活用し、実社会の問題を解決するための量子アルゴリズムの理論整備および実機実装のためのソフトウェア開発を実施

Flagshipプロジェクトとの相補的・相乗的効果:

ゲート型量子コンピュータのソフトウェアを開発し、ゲート型量子コンピュータの社会実装を加速



慶應義塾大学 量子コンピューティングセンター

ソフトウェア・アプリケーション



# 文科省 光・量子飛躍フラッグシッププログラム(Q-LEAP)

採択課題名:

## 【共通のコアプログラム】

課題名:量子技術高等教育拠点標準プログラムの開発

機関及び代表者名:大学共同利用機関法人情報・システム研究機構国立情報学研究所 根本 香絵

## 【独創的サブプログラム】

課題名:実践的研究開発による全国的量子ネイティブの育成

機関及び代表者名:東北大学 大関 真之

課題名:量子技術教育のためのオンラインコース・サマースクール開発プログラム

機関及び代表者名:東京大学 野口 篤史