

社会人講座 次世代計算基盤に係る調査研究

新計算原理調査研究チームの報告

2024年9月9日

東大dlab 天野英晴

Thanks to:

富士通株式会社 近藤正雄

理研RQC 柚木清司

理研R-CCS 佐藤三久

九州大学 谷本輝夫

東北大学 小松一彦

日本電気株式会社 百瀬真太郎

発表の流れ

- ➡ 新計算原理調査研究とは何か？
 - 量子ゲート型の現状
 - 量子ゲート型とスーパーコンピュータの接続
 - FTQC
 - 量子アニーラーの現状
 - 性能評価とアプリケーション
 - まとめ

次世代計算基盤に係る調査研究 全体概要

- ポスト「富岳」時代の次世代計算基盤の開発にあたり、我が国として独自に開発・維持すべき技術を特定しつつ、要素技術の研究開発等を実施し、具体的な性能・機能等について検討を行う。
- システム、新計算原理、運用技術を対象に調査研究を実施。サイエンス・産業・社会のニーズを明確化し、それを実現可能なシステム等の選択肢を提案する。

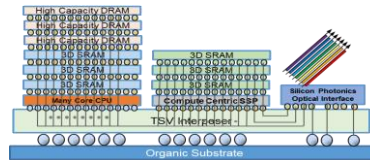
システムチーム 次世代計算基盤として想定されるアーキテクチャ（プロセッサ、メモリ、ストレージ等）、システムソフトウェア、アプリケーションを提案

代表機関：理化学研究所（近藤 正章）

国内外のベンダーを含めたオールジャパン体制のもと、高度なデジタルツイン実現の基盤として、電力制約の下で大規模なデータの移動を高度化・効率化するシステム構築を目指す。

(例)

- ・システム全体や構成要素について技術的可能性や総合性能の調査（3D積層メモリ、チップ間光通信等）
- ・国内で開発すべきソフトウェアを明らかにしつつ、今後の開発ロードマップを策定
- ・アプリ分野において、ポスト富岳時代に必要とされる計算機資源の調査、ベンチマーク構築 等



代表機関：神戸大学（牧野 淳一郎）

世界最高の電力当たり性能を実現している国産アクセラレータ技術、AI応用技術を活用し、従来分野の計算性能とAI利用の両方において高い実行効率を実現できるシステム構築を目指す。

(例)

- ・神戸大学・PFNが開発するMN-Core Xとそれに適合したCPUによる省電力化、効率改善
- ・ソフトウェア制御による実行効率の高度化、高効率コードの自動生成の実現
- ・商用を含めたアプリ性能の調査 等

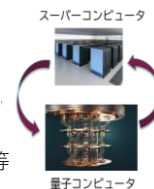


新計算原理チーム 代表機関：慶應義塾大学（天野 英晴）

量子コンピューティング（ゲート型、アニーラ型）とスーパーコンピューティングの融合計算を行うための「量子スーパーコンピューティング」の実現可能性を評価する。

(例)

- ・量子コンピュータの現状調査
- ・スパコンを用いた量子コンピュータのシミュレーション
- ・量子アルゴリズムとスパコンとの融合
- ・量子/疑似量子アニーリングマシンと高性能計算との連携に関する調査 等



運用技術チーム 代表機関：東京大学（埴 敏博）

大学情報基盤センターが多数参画した体制のもと、フラッグシップ、HPCI第二階層システム群や、mdxなどの多様なシステムが有機的に結合し、持続可能な次世代計算基盤の実現に向け、運用関連技術を調査する。

(例)

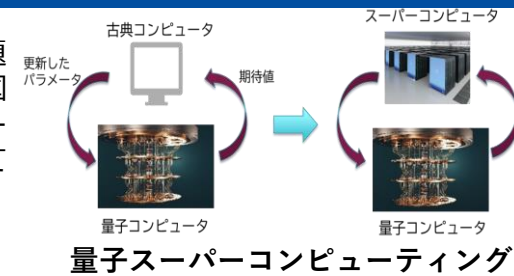
- ・複数のスパコン間のデータ連携、クラウド連携、セキュリティ等の連携技術検討
- ・再エネ活用、蓄電技術、廃熱再利用技術等のカーボンニュートラル実現に資する技術検討
- ・大規模データを効果的・効率的に活用するための仕組みの検討
- ・仮想化技術など、運用に向けた環境整備のための調査検討 等

	2022年度	2023年度
理化学研究所	テクノロジ・アーキ技術の調査・検討 既存ツールや利用動向調査、ベンチマーク設計 等	ベンチマーク性能解析/予測、新規開発ソフト項目検討・定量的評価、ベンチマーク評価に基づく性能分析、要素技術開発 等
神戸大学	独自アーキテクチャ暫定版、フレームワーク仕様検討、アプリ調査 等	グループ共同の性能評価・改良、要素技術開発 等
慶應義塾大学	量子コン、量子アルゴリズム、アニーリング関係の調査 等	スーパーコンピュータとの融合に関する技術実証 等
東京大学	技術調査、要件・課題抽出、ポリシー調査 等	プロトタイプ試作検討、技術要件の詳細化、要素技術の実現可能性検討 等

調査研究の全体概要（慶應義塾大学：新計算原理）

取組概要

量子コンピュータは、量子力学的な現象を用いて、従来のコンピュータでは現実的な時間や規模で解けなかった問題を解くことのできる新しい計算原理に基づくコンピュータで、日本ではすでにアニーリングマシンが各社出そろう一方、国際的には量子ゲート方式が急激に発達を遂げている。本調査研究では、量子コンピューティングとスーパーコンピューティングの融合計算を行う「量子スーパーコンピューティング」のアーキテクチャ、システムソフトウェア、アルゴリズムについて調査し、その実現可能性を評価する。



調査内容

現在の量子コンピュータ、アニーリングマシンのアーキテクチャ、システムソフトウェア、アルゴリズム、利用法、NISQアルゴリズム、量子コンピューティングのシミュレーション技術についてその現状を調査し、スーパーコンピューティングとの融合の方法について検討する。

量子コンピュータの現状調査（慶應義塾大学、富士通、他）

- クラウドを通じた利用調査、ヒアリング調査、実機調査により現在の各種量子コンピュータの現状を調査し、スーパーコンピュータとの融合アーキテクチャを探る

量子アルゴリズムの現状調査とスーパーコンピューティングとの融合（理研RQC）

- 量子変分アルゴリズムを中心に現在の量子アルゴリズムを調査し、変分法を超えたアルゴリズムについて検討する。

量子システムソフトウェアと量子コンピュータのシミュレーション（理研R-CCS）

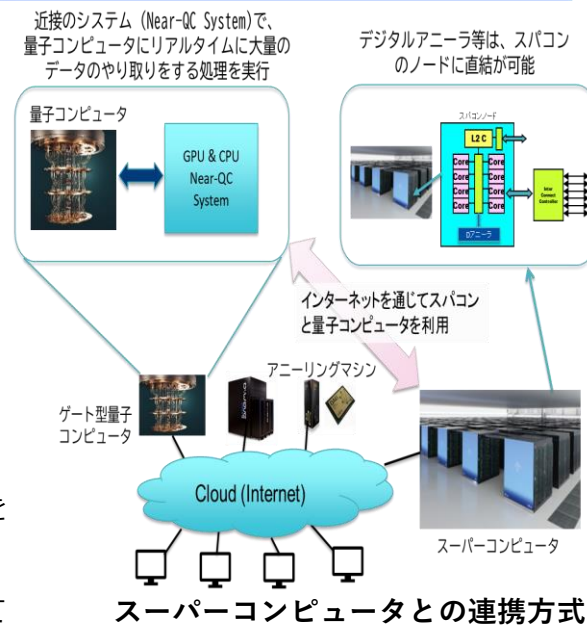
- 量子コンピュータのプログラミング環境、システムソフトウェアを調査し、スーパーコンピュータとの統合環境について検討する。また、スーパーコンピュータによる量子コンピュータのシミュレーションについて調査し、将来の方向性を検討する。

NISQアルゴリズムの調査とスーパーコンピュータとの融合（九州大学）

- 多少のノイズがあっても有用な答えを導き出すNISQアルゴリズムを調査し、スーパーコンピュータの利用技術を検討する。

量子アニーリング、疑似量子アニーリングマシンについての調査（東北大学、NEC）

- 性能評価・性能分析を通じて、アニーリングマシンや高性能計算との連携における課題や実現の制約について評価、研究する

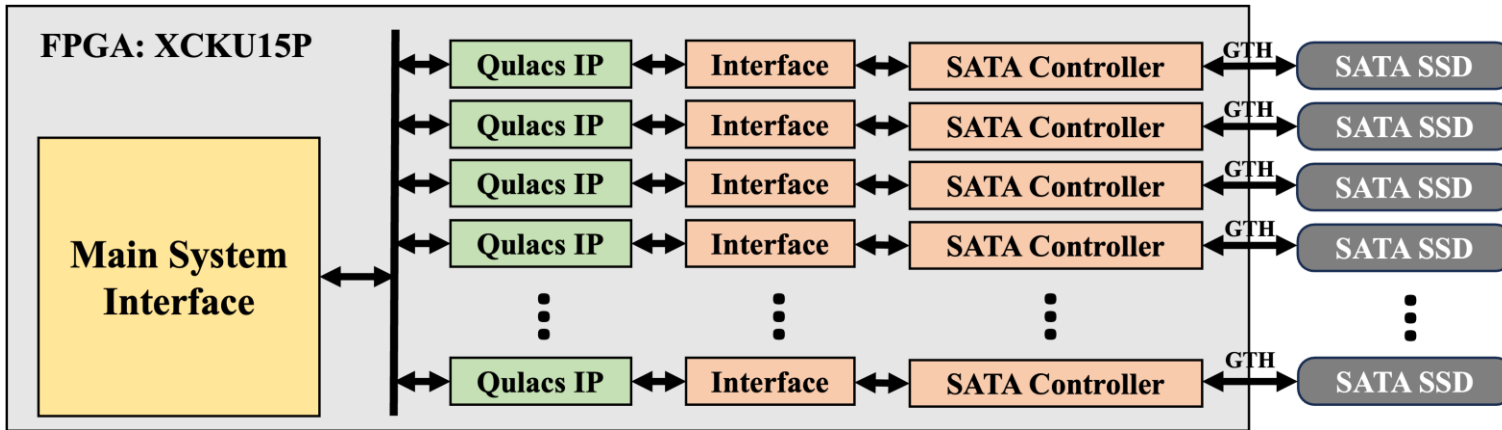


スケジュール

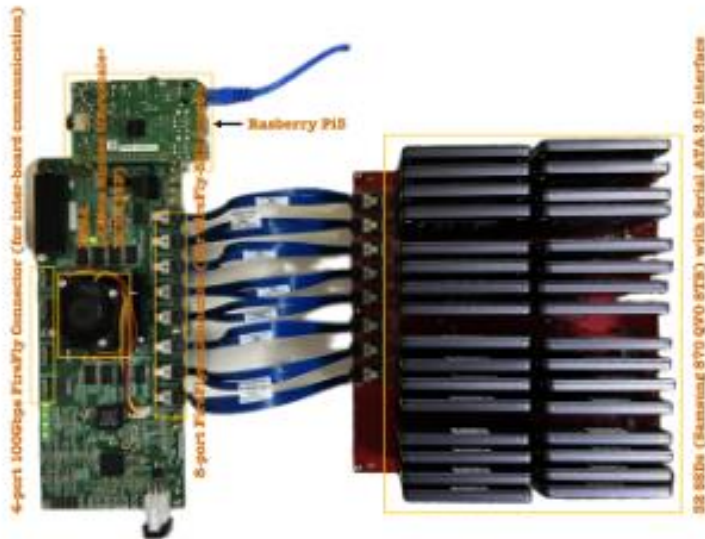
初年度（2022年8月～2023年3月）は現状調査中心、2023年度はスーパーコンピュータとの融合に関する調査研究センター

自分の研究 (FPGA-SATA直結システムQu-Trefoilの開発)

- 32台の8TB SATAディスクをFPGA XCKU15Pボード (Trefoil storage subsystem) に直結
- 最大43qubitの状態ベクトル型シミュレーションが可能



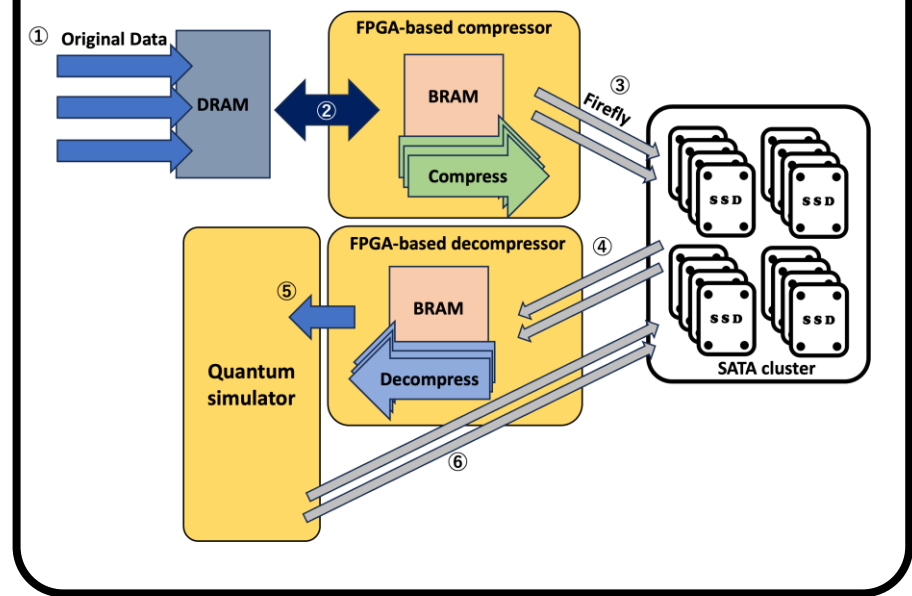
- 同じプラットフォームでHLSを用いてZFPモジュールを設計することにより、約45.76%から71.97%までの圧縮率を達成可能
- Qu-Trefoilシステムの性能向上



43qubitsのシミュレーションに成功

	Time consumption at SATA II (sec)			
	40 qubits	41 qubits	42 qubits	43 qubits
<i>H 0</i>	5051.75	10048.91	21045.13	50630.67
<i>H_chunk</i>	2322.65	4587.63	9145.81	18223.82
<i>H_disk</i>	5801.09	11601.45	23202.64	46443.4
<i>H_system</i>	5662.45	11288.67	22591.53	45236.68
	Time consumption at SATA III (sec)			
	40 qubits	41 qubits	42 qubits	43 qubits
<i>H 0</i>	3758.50	7522.95	17673.06	47017.42
<i>H_chunk</i>	1699.98	3157.74	6279.13	13379.05
<i>H_disk</i>	4421.22	8813.50	17606.29	35198.60
<i>H_system</i>	4249.35	8485.18	16911.20	33786.68

32台のDisk接続したイメージ



量子コンピュータにはアニーラ型と量子ゲート型があり、両方が調査対象

東北大 + NEC

アニーラ型(イジングマシン)



イジングモデル、QUBOモデルによる最適化専用
量子力学的現象の効果が定かでない
現在、実際の役に立っている

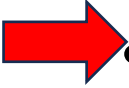
慶應 + 富士通
理研
九州大

ゲート型



量子力学的な現象を利用して、様々な問題を解くことができる汎用コンピュータ
ノイズ、量子操作の精度、コヒーレンス時間などにより、まだ実際の問題では役に立っていない

発表の流れ

- 新計算原理調査研究とは何か？
-  • 量子ゲート型の現状
- 量子ゲート型とスーパーコンピュータの接続
- FTQC
- 量子アニーラーの現状
- 性能評価とアプリケーション
- まとめ

NISQ (Noisy Intermediate Scale Quantum computer) vs. FTQC (Fault Tolerant Quantum Computer)

表面符号を用いた誤り訂正量子計算
FTQC

Googleの路線
AIの利用

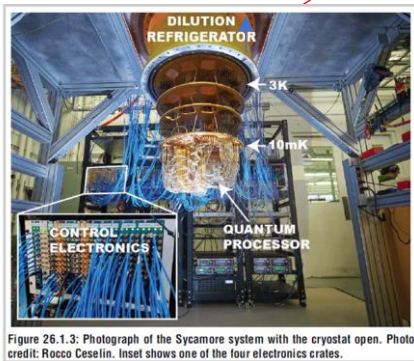


Figure 26.1.3: Photograph of the Sycamore system with the cryostat open. Photo credit: Rocco Ceselin. Inset shows one of the four electronics crates.

現在の量子コンピュータの
利用調査、FTQCの現状 慶大・富士通

現在の実験的
量子コンピュータ

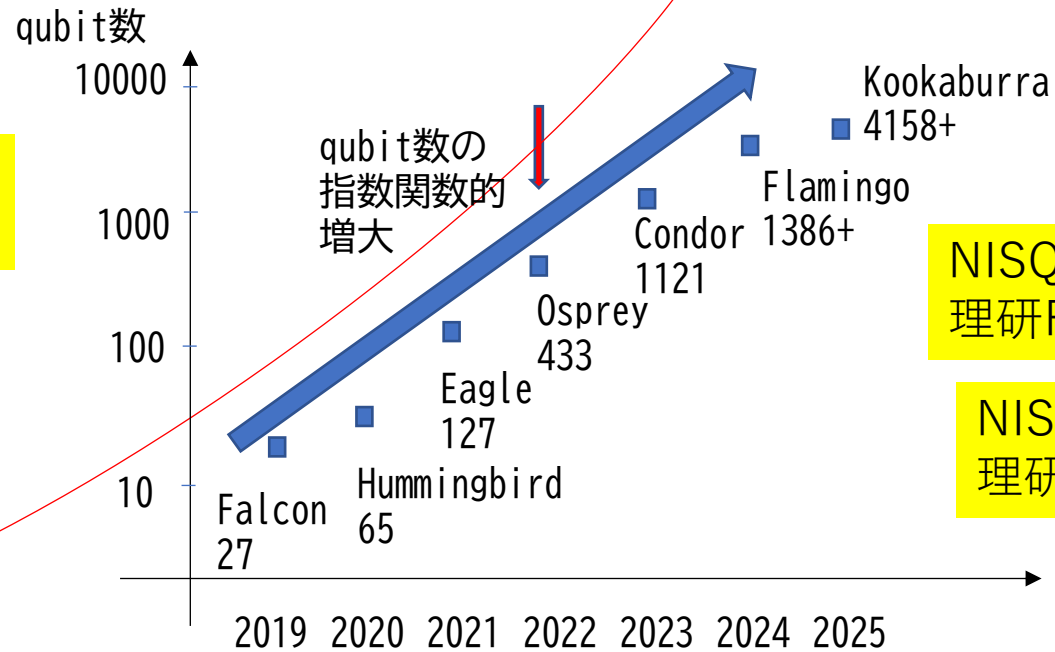
現在の量子コンピュータは
ENIAC以前の実験機のレベル
qubit数が少ない
忠実度が低い

NISQ、FTQCシステム
九大

使える
量子コンピュータ

一定のノイズを念頭に置いた量子計算応用
NISQアルゴリズムを極める

Error Mitigation



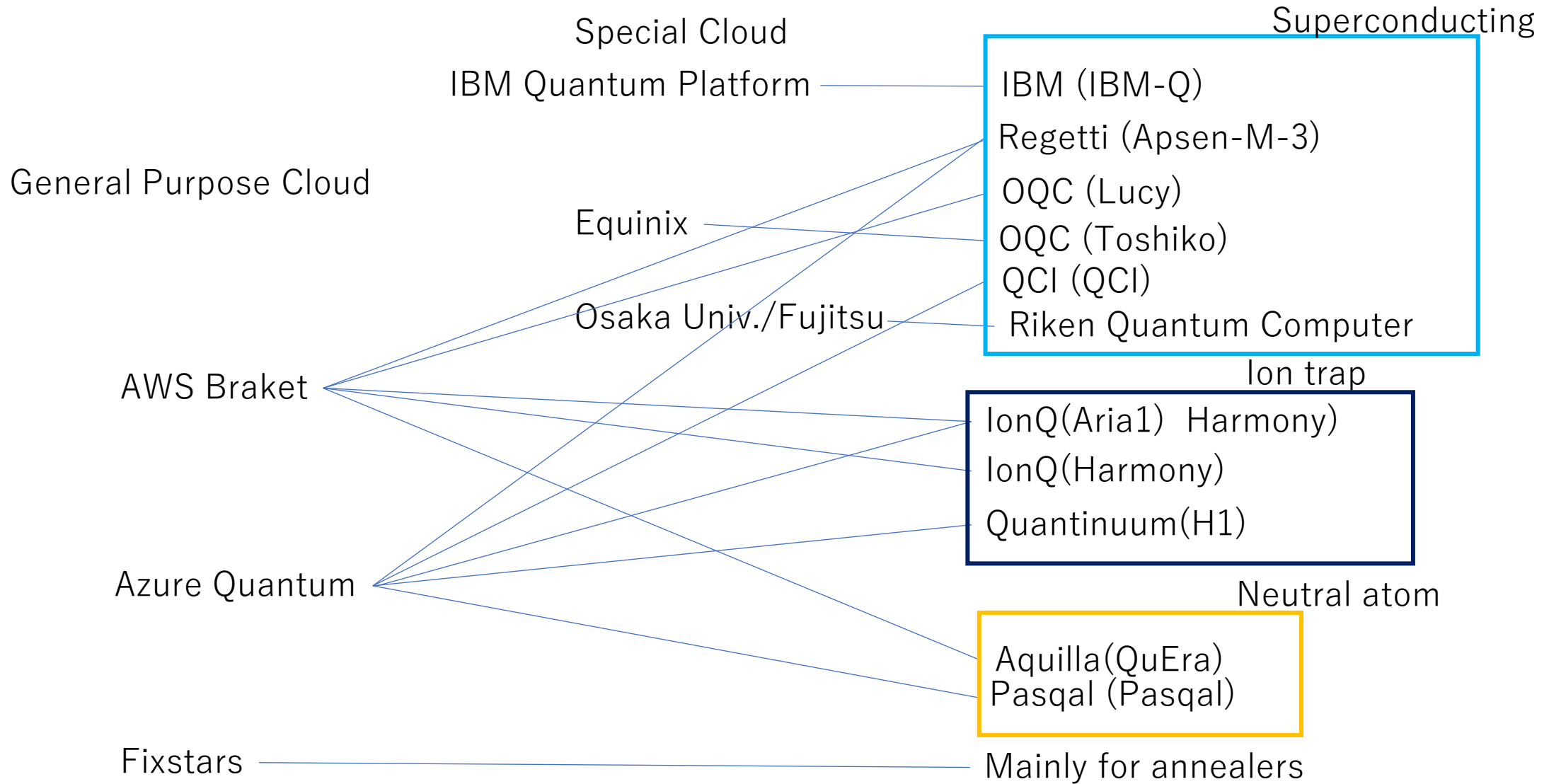
NISQ + スパコン融合
理研R-CCS

NISQアルゴリズム
理研RQC

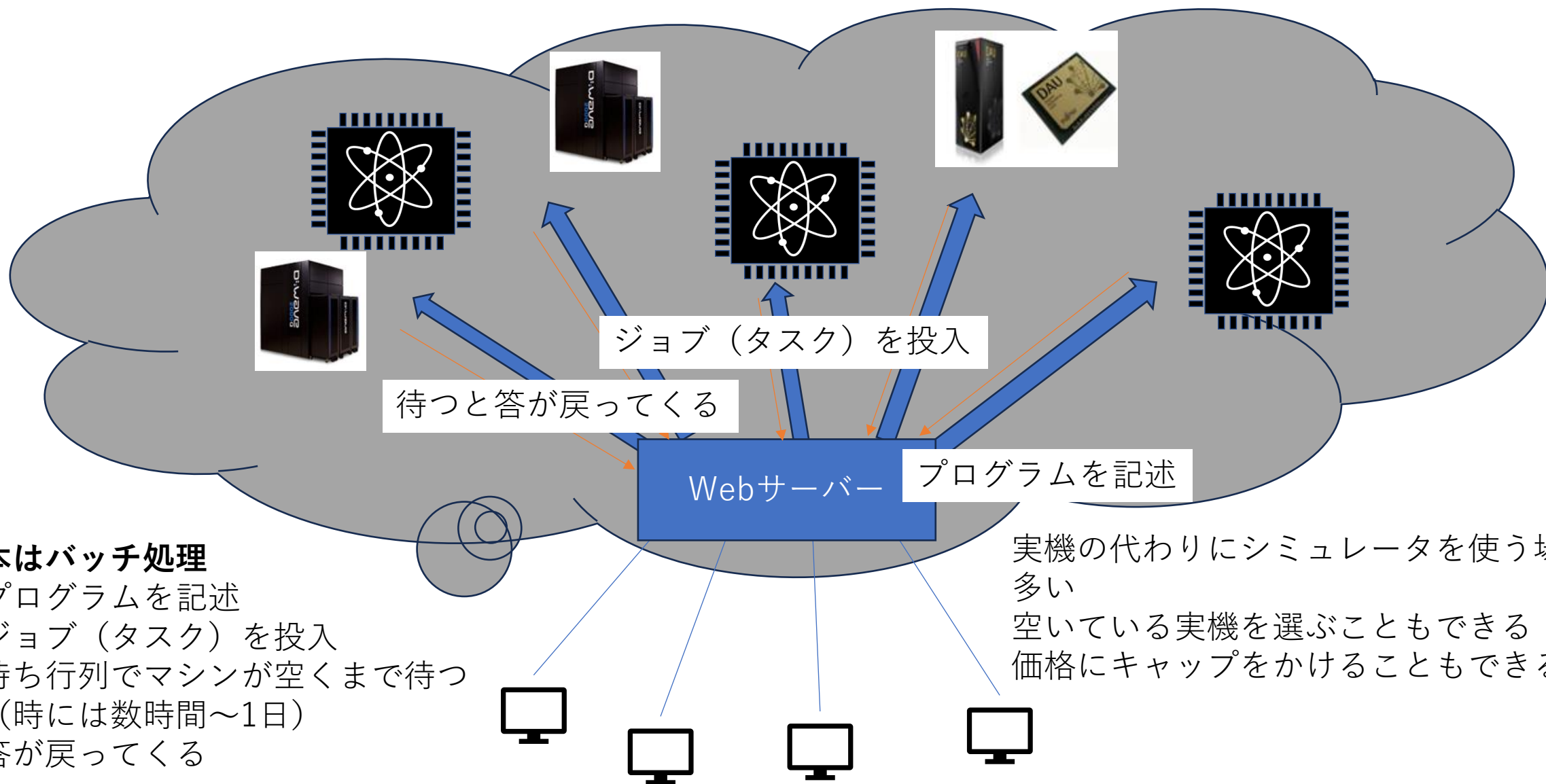
IBMのロードマップ (2022) より

ゲート型量子コンピュータの現在

様々な形のクラウドで利用可能：主として超電導型とIon trap型、中性原子型が登場しつつある



クラウドでの利用は主としてバッチ処理

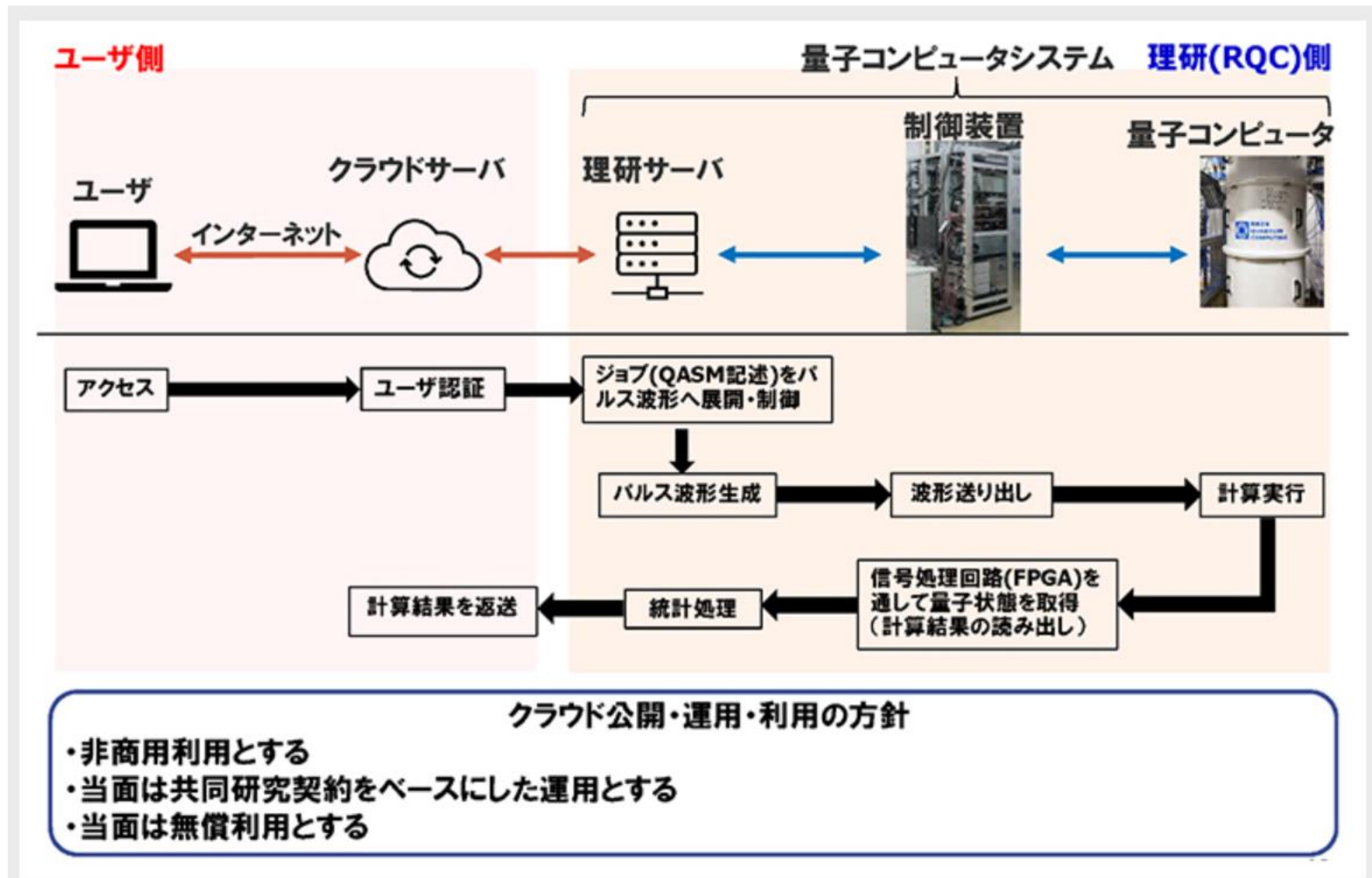


基本はバッチ処理

- プログラムを記述
- ジョブ（タスク）を投入
- 待ち行列でマシンが空くまで待つ
（時には数時間～1日）
- 答が戻ってくる

- 実機の代わりにシミュレータを使う場合も多い
- 空いている実機を選ぶこともできる
- 価格にキャップをかけることもできる

理研での量子コンピュータセンターのクラウド化



11月6日ヒアリング

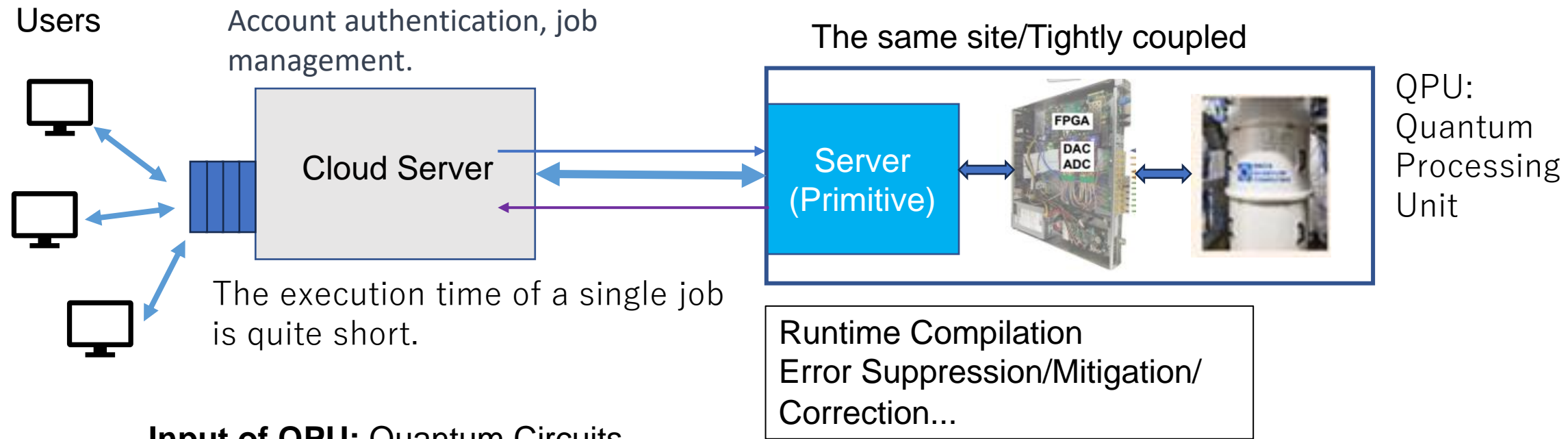
- ・ アカウントはスパコン方式と似ている
- ・ レポートなど特になし
- ・ 現状では良く知った人たちにのみ公開
- ・ FIFOを利用した簡単な管理
- ・ ハイブリッド利用はこれから

OQC/EQUINIXのQCaaS (Quantum Computer As a Service)

- OQC(Oxford Quantum Computing):の超電導型量子コンピュータToshikoを有明に設置
 - OQCは英国オックスフォード発のベンチャーで、LucyをAWSに提供している。
- 独自クラウドでQCaaSを開始
 - データセンターTY11 International Business EXchange (IBX)に配置
 - EQUINIXは米国のInfrastructure企業
- ユーザシステムをToshikoと同じサイトに装備する
 - 従来のクラウドと逆の発想

量子コンピュータの単純なシステム

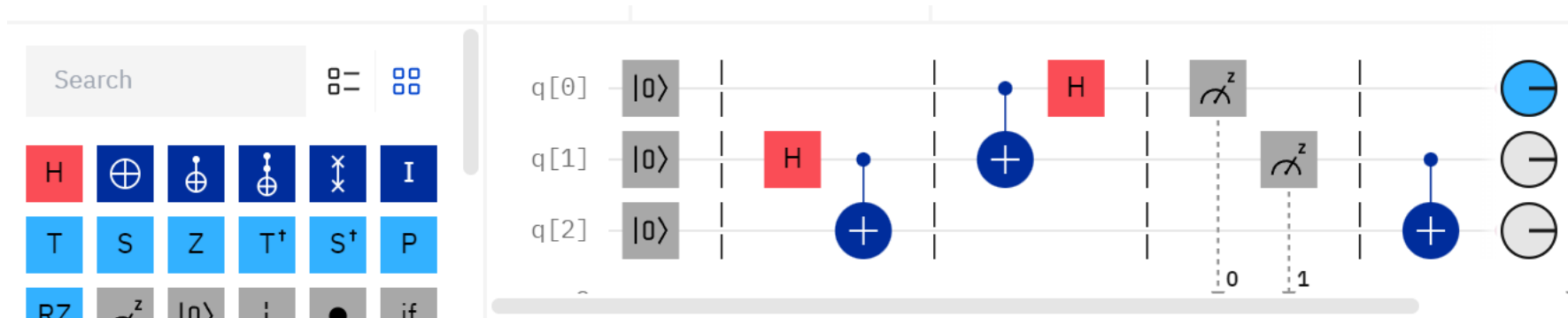
時間的に制約のある処理はPrimitiveで行われる



Input of QPU: Quantum Circuits and parameters.
Output of QPU: Probability distribution of a certain number of shots

Both are not so much, so common Internet is enough for connecting the cloud servers and primitives

プログラムはどうする？



Composer：量子回路を図的に描く

```
from qiskit import QuantumCircuit, QuantumRegister, ClassicalRegister, transpile

control = QuantumRegister(1, name="control")
target = QuantumRegister(1, name="target")
final_measure = ClassicalRegister(1, name="final")

# Creating a Bell circuit
qc_bell = QuantumCircuit(control, target, final_measure)
qc_bell.h(control)
qc_bell.cx(control, target)
qc_bell.measure(control, final_measure)
qc_bell.measure(target, final_measure)
qc_bell.draw(output="mpl", idle_wires=False)
```

Qiskit：多くの研究者が利用している

Open QASM：より低レベルな記述が可能な共通言語

- 量子プログラムの記述言語はpythonのフレームワークが多いが、次第にC++/Rustのフレームワークに移りつつある。これにより、**スパコンで計算科学アプリと組み合わせることが容易になる。**
- GUIによる方法もあるが、…
- 将来的にはさらにハイレベルの記述が必要

```
from qulacs import QuantumState
qc = QuantumCircuit(5)
qc.add_H_gate(0)
for i in range(4):
    qc.add_CNOT_gate(i, i + 1)
```

qulacsの例

```
state = QuantumState(5)
qc.update_quantum_state(state)
print(state)
```

```
from qiskit import QuantumCircuit
qc = QuantumCircuit(5, 5, name="ghz")
qc.h(0)
for i in range(4):
    qc.cx(i, i + 1)
qc.barrier()
for i in range(5):
    qc.measure(i, i)
```

Qiskitの例

```
sim_backend = BasicSimulator()
job = sim_backend.run( \
    transpile(qc, sim_backend), shots=1024)
result = job.result()
print("Basic simulator : ")
print(result.get_counts(qc))
```

- 記述言語から生成され、コントローラで実行される
- OpenQASM や QIRがある。
- トランスパイラ(transpile) – 中間コード上で量子デバイスの制限を満たすコードに変換・最適化
- コンパイル：中間コードでから、コントローラ上の実行コードに変換

```
OPENQASM 3;

qubit[3] q;
bit[3] c;

h q[0];
cnot q[0], q[1];
cnot q[1], q[2];

c = measure q;
```

```
OPENQASM 3;

qubit[4] q;
bit b;
angle[4] theta = 0;
reset q;
h q;
barrier q;

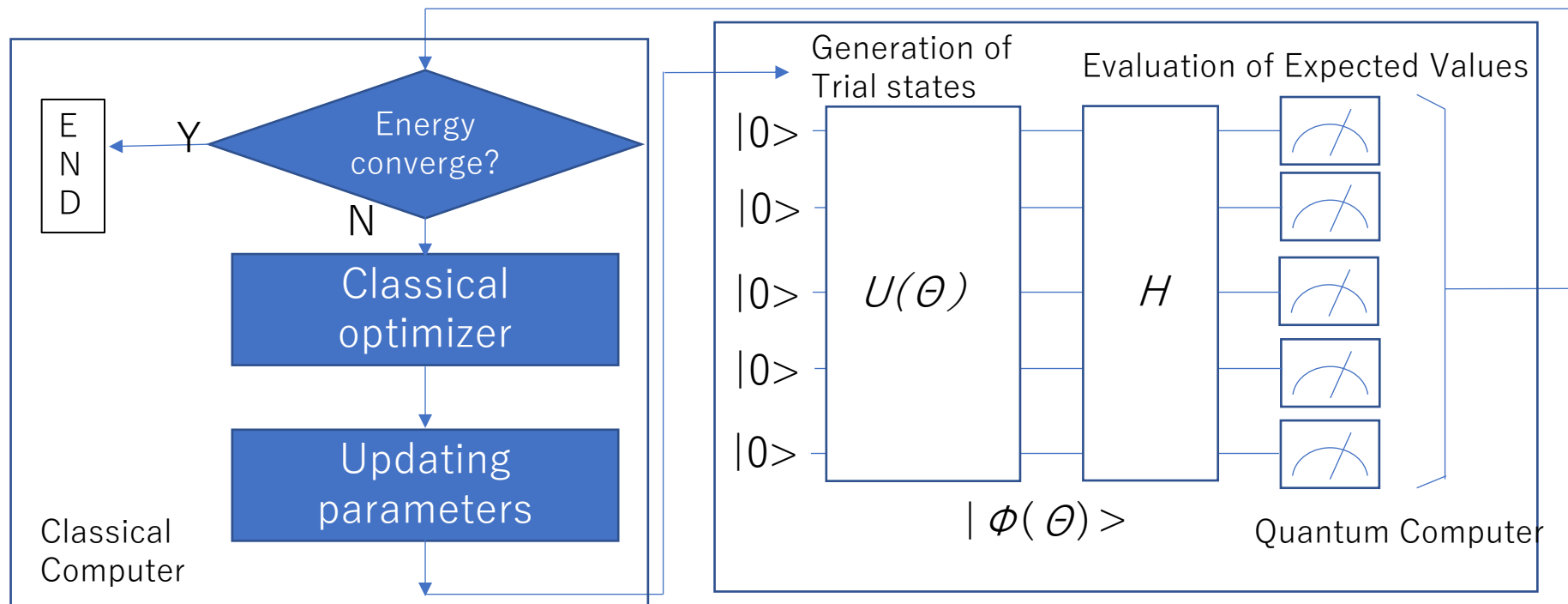
for i in [0:3]{
    theta >>=1;
    p(-theta) q[i];
    h q[i];
    measure q[i]->b;
    theta[3] = b;
}
```

2024年5月報告会より

量子コンピュータと従来型コンピュータのハイブリッド利用

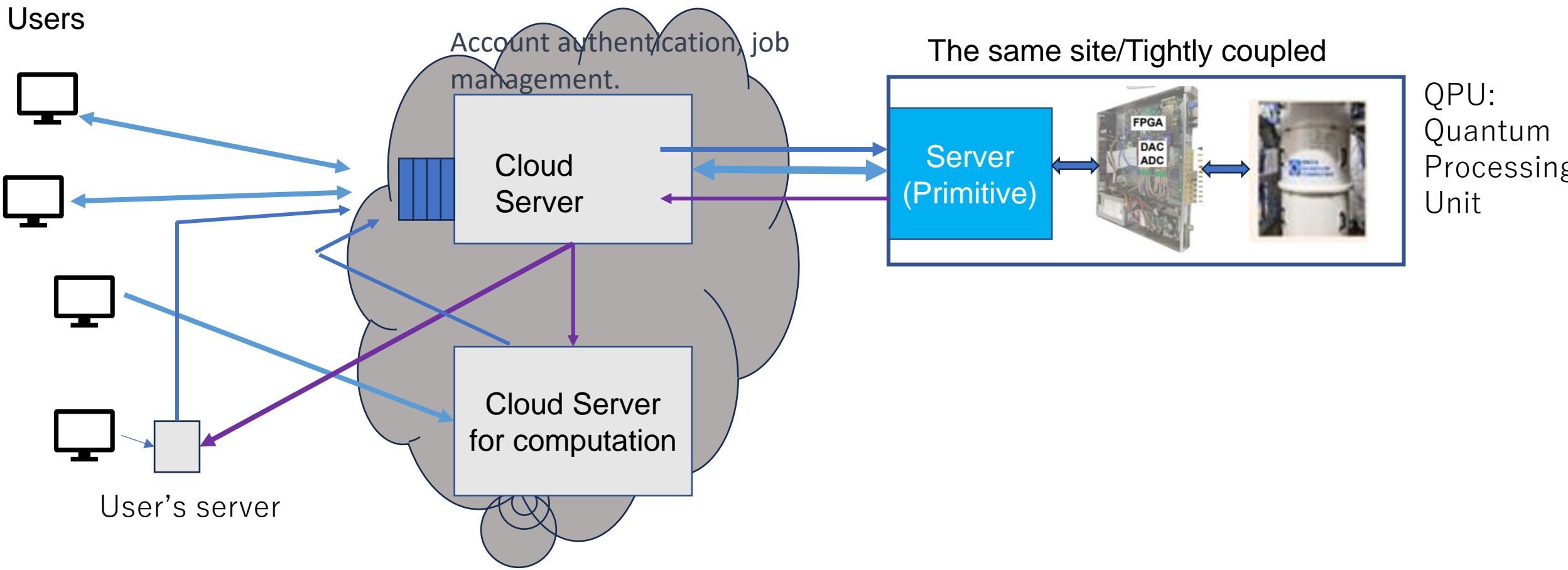
For NISQ, the hybrid computing is commonly used.

For example, VQE (Variational Quantum Eigensolver) searches solution alternatively execution of quantum computing and classical computing. This type of algorithm is popularly used in quantum chemistry computation. Using AI in the classical side is hopeful approach.



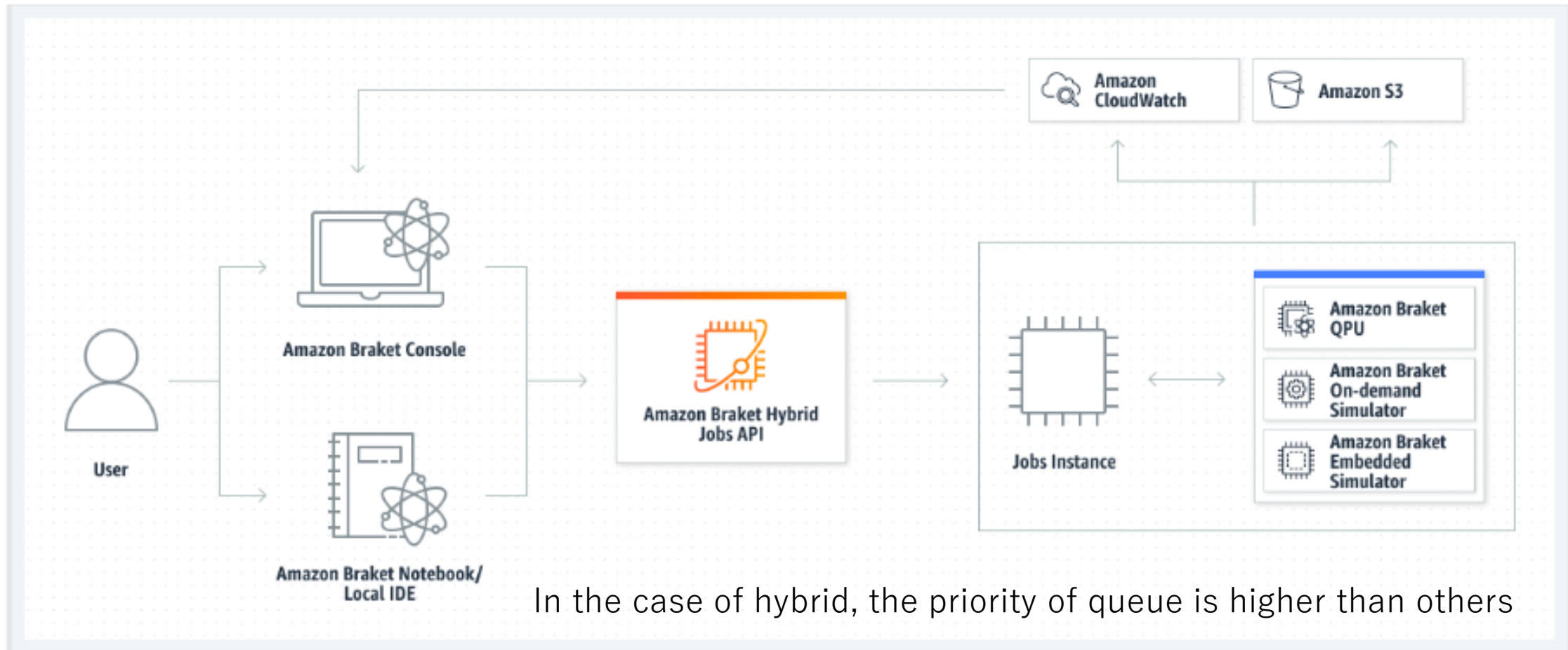
ハイブリッドコンピュータのアーキテクチャ

The loop between Classical computer and Quantum computer is executed automatically.



ハイブリッドジョブの実現例：AWS braket hybrid

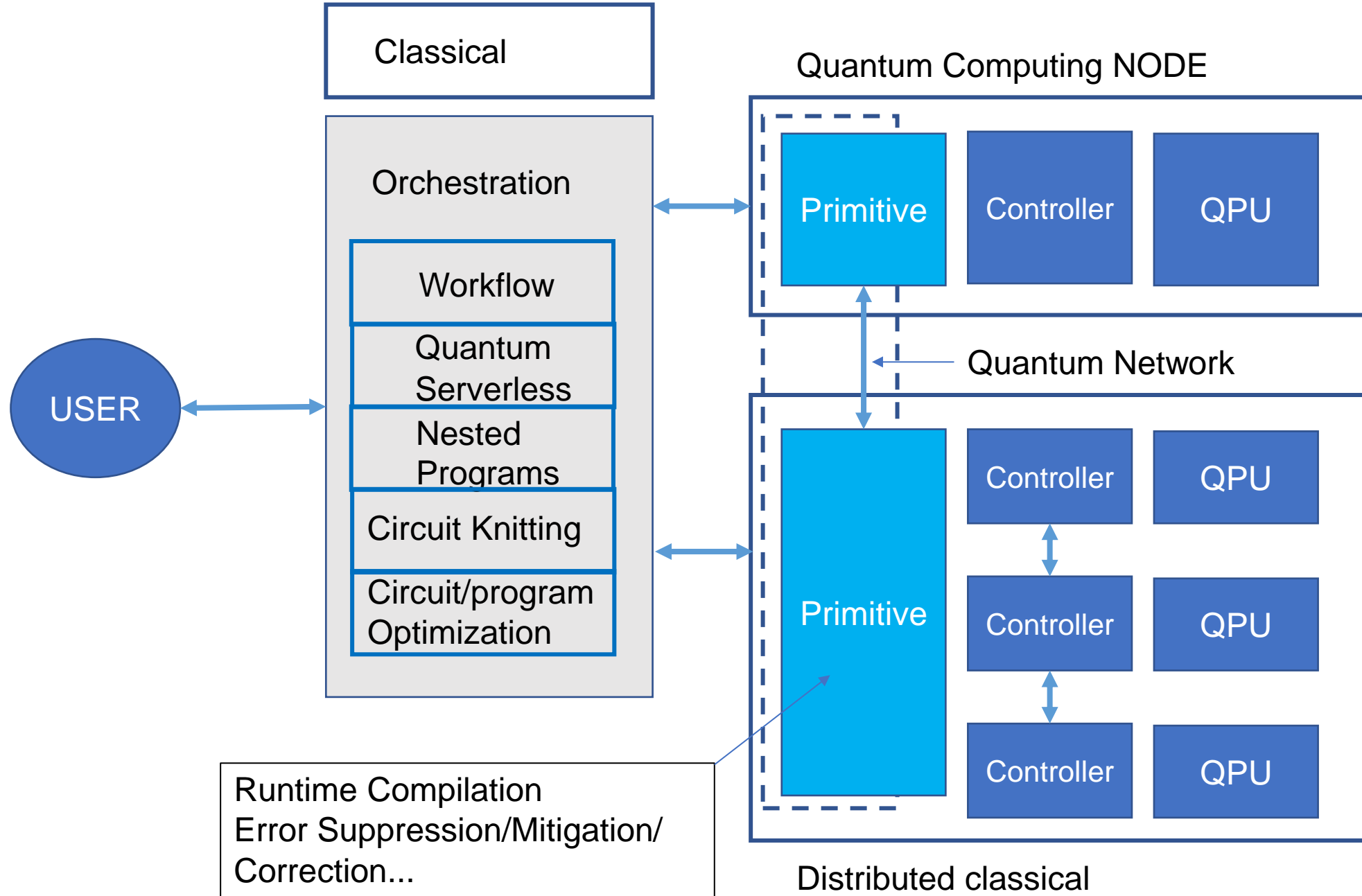
1. Algorithm description (braket SDK/PennyLane)
2. Preparing Docker Container which includes users' program environment (AWS provides some)
3. Job generation, target device selection and setting options.
4. Call QPU or on-demand simulator by APIs. Jobs are pushed into the queue.
5. They are executed alternatively.



In the case of hybrid, the priority of queue is higher than others

The model of
IBM's Quantum-Classical Architecture

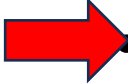
<https://arxiv.org/abs/2209.06841>



ハイブリッド利用の現状

- ベンダ以外の利用者はクラウド経由で利用しているが、利用qubit数はさほど多くない。ハイブリッド利用、多くのqubitを利用しているのはベンダの研究が多い。[arXiv:2307.16130v1]
- ハイブリッドコンピューティングはクラウドでも可能
 - 量子コンピュータと従来型コンピュータの間で自動的にデータ交換させてジョブを動かすことができる。
 - dockerを利用して、ユーザ環境と量子コンピュータの協調が可能
- 一方、商用クラウド上での利用には限界がある
 - ユーザ側
 - 多数の量子ビットを利用する場合は、待ち時間が長く、資金を要する
 - ハイブリッド利用は、待ち行列の待ち時間が短くなるだけ。しかも資金を要する
→ベンダ自体か、ベンダと共同研究を行う環境を持つ研究機関以外、大規模な量子ビットを用いたハイブリッドの利用は困難
 - 量子コンピュータシミュレータは利用可能だが、貧弱
 - 量子コンピュータ開発側
 - 企業を設立しないとAWSクラウドには量子コンピュータを出すことができない
 - Fixtarsのクラウドは簡単らしい

発表の流れ

- 新計算原理調査研究とは何か？
- 量子ゲート型の現状
-  • 量子ゲート型とスーパーコンピュータの接続
- FTQC
- 量子アニーラーの現状
- 性能評価とアプリケーション
- まとめ

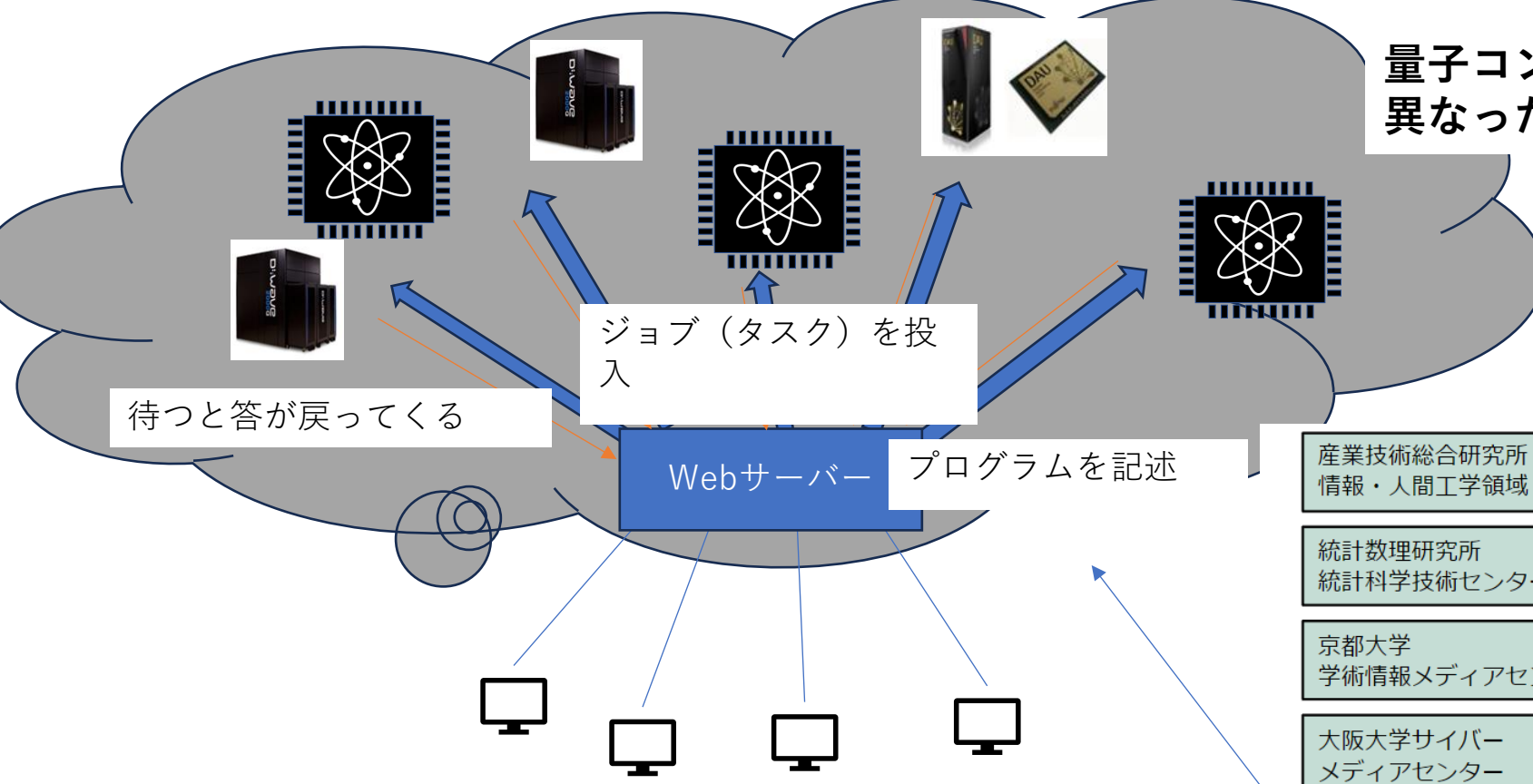
量子コンピュータとHPCとの違い、接続方法

	スーパーコンピュータ	量子コンピュータ
実行時間	ジョブによっては数時間	コヒーレント時間が短いので、本質的に短い。1000shotでも数msec～数秒
入出力データ量	ジョブによっては大量	パラメータと確率密度のみで少量
マルチユーザ	空間分割、時分割利用共に可能	時分割利用のみ

- レイテンシィ:
 - エラー緩和や修正の研究では、レイテンシィは可能な限り小さい方がよい。
 - コヒーレンス時間より短い必要
- **QPUの入出力はPrimitiveと呼ぶ従来型コンピュータ**
 - ネットワークを經由して接続：接続自体が難しいわけではない
- **QPUとHPCは同一のクラウド上でアクセスする必要がある**
- **Open Problems:**
 - QPUとHPCは同一サイトで密結合する必要がある？
 - スーパーコンピュータ(あるいはFlagshipスパコン)がHPCとして必要？

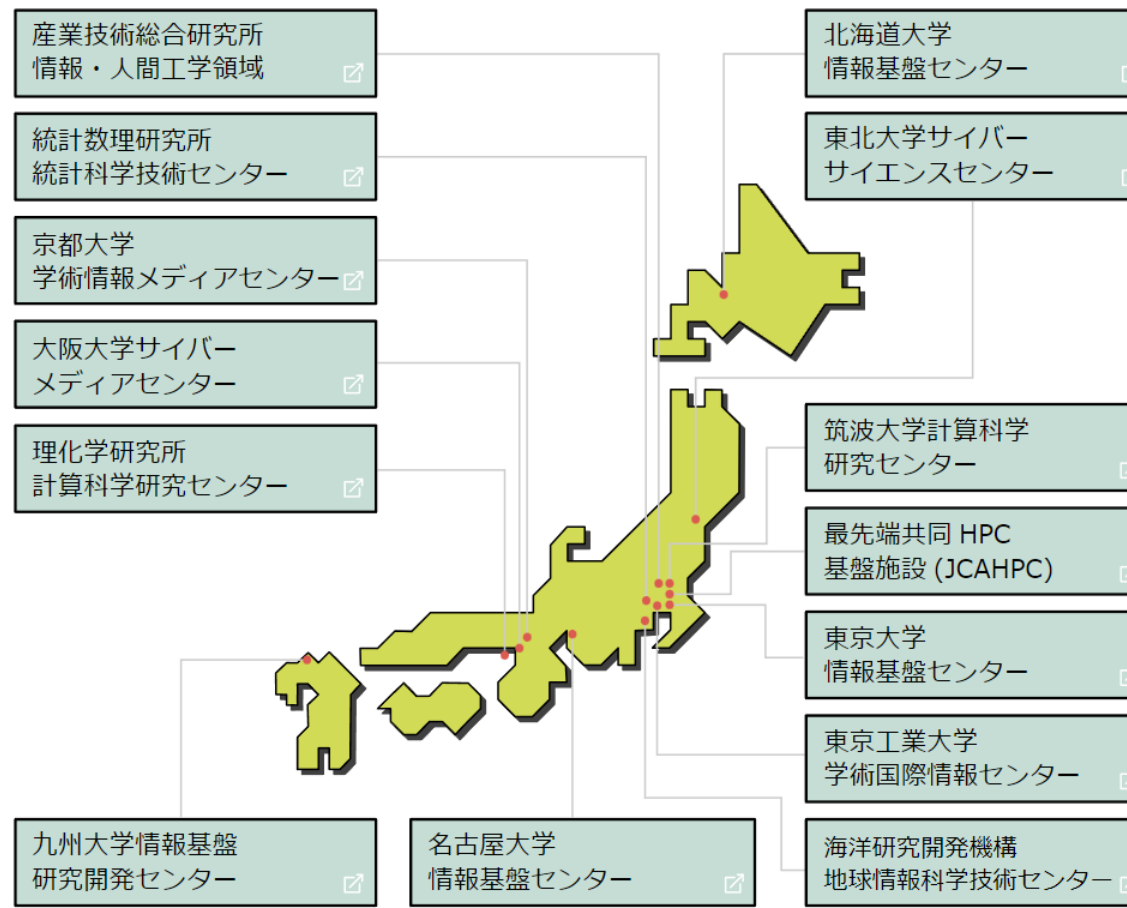
量子コンピュータとスーパーコンピュータは
異なった世界で使われている

スーパーコンピュータは国の支援する
計算センターで運用し、HPCIなどで
利用する



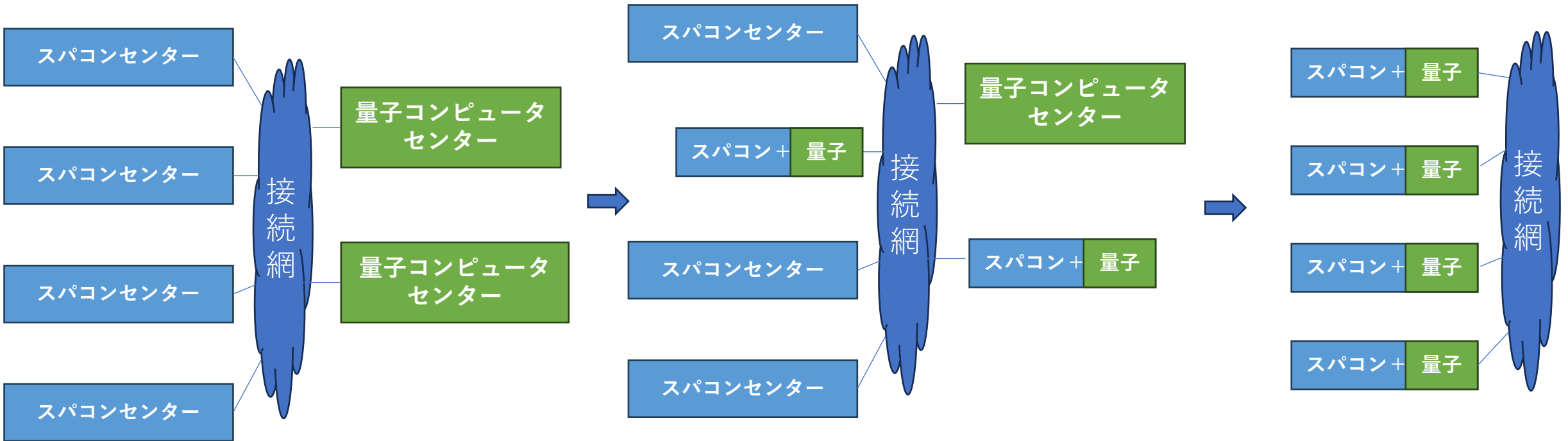
量子コンピュータはIBM、AWS、Microsoft、Fixstarsなどの
一般のクラウドで利用する

現状ではスーパーコンピュータと量子コンピュータの
融合は困難



将来の国の計算基盤（スーパーコンピュータ、量子コンピュータを含む）整備の方向性についての提言

量子コンピュータを計算基盤の一つとして位置づけ、申請、認証、ジョブ管理、APIの方法を統一する



a)独立したセンターを接続
スパコンはスパコン、量子は量子
申請や認証を統一、ジョブ管理、
APIを統一

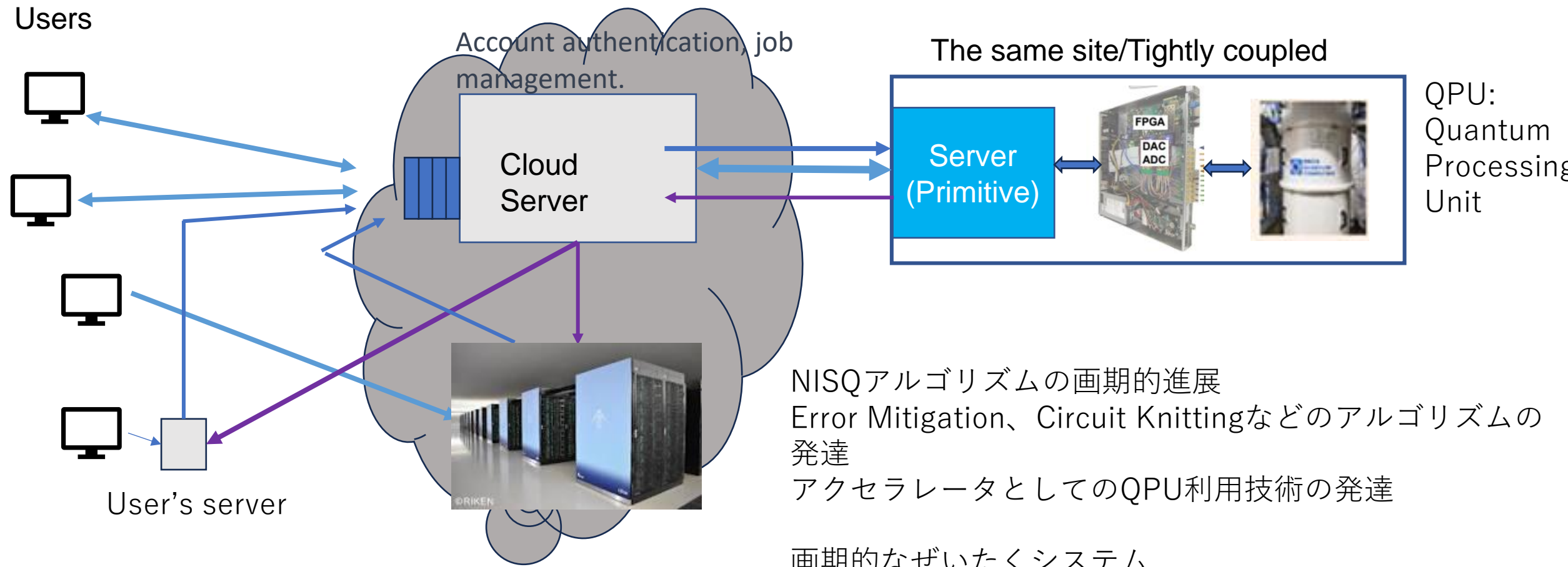
b)様々な構成のセンターを接続

c)統合センター
全ての（多くの）スパコン
センターは計算リソースとし
て量子コンピュータを装備

量子インターネットの利用はさらに未来の話
→複数量子コンピュータの接続に限られる

スパコンと量子コンピュータを直結できたら

The loop between Classical computer and Quantum computer is executed automatically.



スパコン+量子融合クラウドの利点

- 今のままではなぜ良くないか？
 - 量子コンピュータの研究が制約される
 - 量子コンピュータクラウドがなし崩しに実現されていく
- スパコン方式の申請、アカウント管理
 - 量子コンピュータの商用クラウド利用は超混雑が予想されるので資金がモノを言うようになる（混雑は今でも結構ひどい）
 - 広く研究を行うためには現在のスパコン方式は優れている
- スパコンにログインして用いることで、ユーザ環境の整備や量子コンピュータの柔軟な利用が可能
 - 実はクラウドでもdocker環境でAIプラットフォームと連携できたりして割と進んでいる。しかし、スパコンログイン方式の方がより柔軟にできる可能性がある
- 大規模高速なシミュレーションが可能。実機と簡単に入れ替えることができるのが魅力
 - 現在、クラウドでも量子コンピュータシミュレータは使えるが、脆弱
 - 例) AWS 状態ベクトル型 34qubitまで、テンソルネットワーク型50qubitまで
 - 富岳ならば状態ベクトル型 40qubit (46qubit)、テンソルネットワーク型100以上は可能
 - 例) スパコン不老を使っている量子化学計算の専門家杉崎さん (SQAI)のインタビュー (6・30)
- スパコンを既に利用している物理学者、量子化学、天文学等の研究者が自然に量子コンピュータに研究を展開できる
- 本当に量子コンピュータが計算資源として役に立つようになればスパコンセンターに入れるのは自然
- 実験的な量子コンピュータ（ムーンショットG6の成果など）を簡単にクラウドに導入可能
 - 量子コンピュータの研究者にはクラウドへの投入が困難で壁になっている
 - 統一したジョブ管理で、複数量子コンピュータ間の連携も可能になる

JHPC-Quantum: 計算可能領域の開拓のための量子・スパコン連携プラットフォームの研究開発

実施者	国立研究開発法人理化学研究所、ソフトバンク株式会社（共同実施）東京大学、大阪大学
概要	量子コンピュータとスーパーコンピュータ（HPC）を連携するための量子・HPC連携システムソフトウェアを研究開発し、これを用いてこれまでのスパコンのみでは困難だった領域の計算を可能とする量子・スパコン連携プラットフォームを構築する。既存のスパコンのみの計算に対し量子・HPC連携アプリの優位性を実証するとともに、この計算プラットフォームで実行される量子・HPC連携ソフトウェアをポスト5G時代のネットワークで提供されるサービスとして展開する技術を開発する。

1. 開発目的

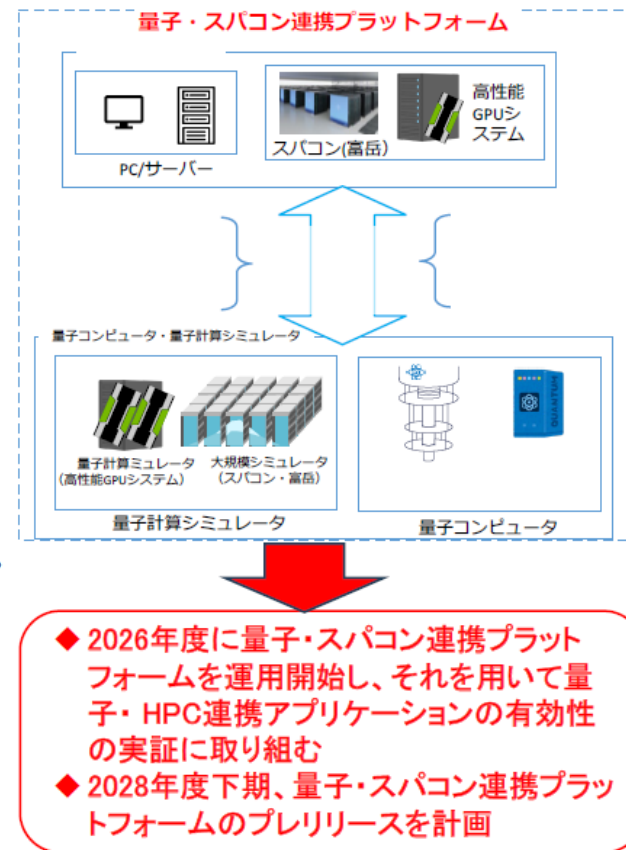
- 量子コンピュータは、従来のコンピュータと全く異なる原理で動作し、情報処理速度の劇的な高速化が期待されるが、現時点では、規模拡大と計算結果の誤り訂正の両立が困難であり、量子コンピュータ単独での実用化には時間を要する見込み。
- 一方で、デジタル化の進展により、情報処理能力の向上が急務であり、量子コンピュータの活用がいち早く求められているところ、古典コンピュータを組み合わせることで活用することが有望視されている。
- 本事業では、世界に先駆けて、量子コンピュータとスパコンを連携利用するためのソフトウェアやプラットフォーム、アプリケーションを開発・構築し、ポスト5G時代で提供されるサービスとして展開する技術としての有効性を実証していく。

2. 開発内容

- 量子・HPC連携ソフトウェア**：スパコンと量子コンピュータを連携させ、最適な計算資源をシームレスかつ効率的に利用するためのシステムソフトウェアを開発。
- モジュール型量子ソフトウェアライブラリ**：アプリ分野に合わせたモジュール型のソフトウェアを整備、量子コンピュータの特性に合わせたエラー緩和処理、回路最適化処理を実現する上位ソフトウェアライブラリを開発。モジュールとして組み合わせることで高度な量子アプリケーションを開発可能とする。
- 量子・スパコン連携PFのクラウド化技術**：事業展開を見据えて、量子アプリケーションの利用を支援するクラウド基盤ソフトウェアを開発。

3. 構築する量子・スパコン連携プラットフォームの構成

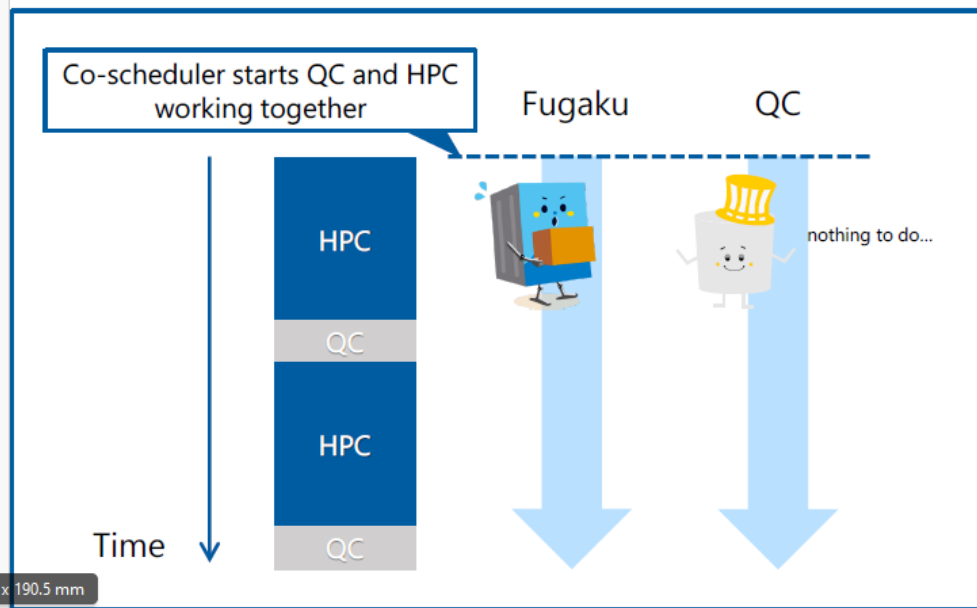
- 理研・計算科学研究センター（神戸）及び（和光）に特性の異なる2種類の量子コンピュータを整備。これらと富岳、及び東大・阪大スパコンと連携したプラットフォームを構築。



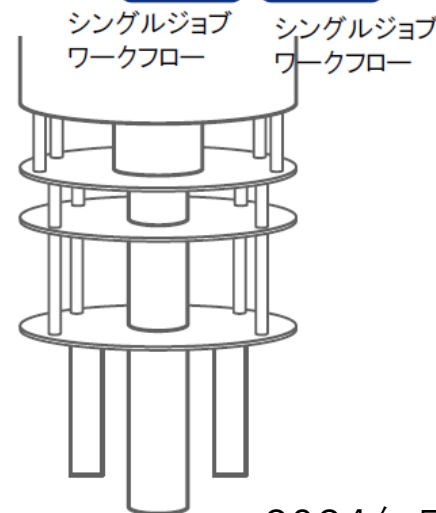
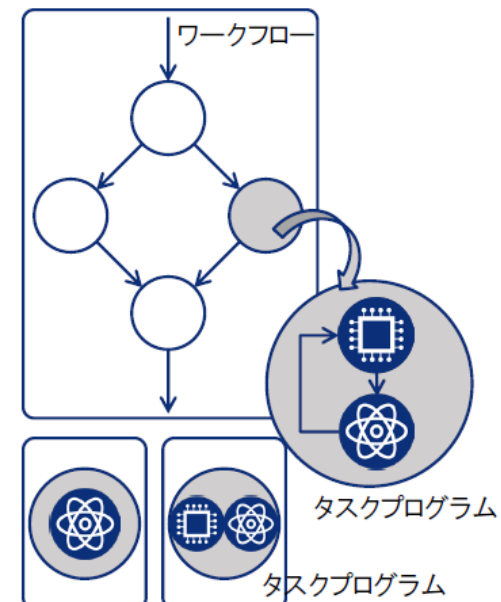
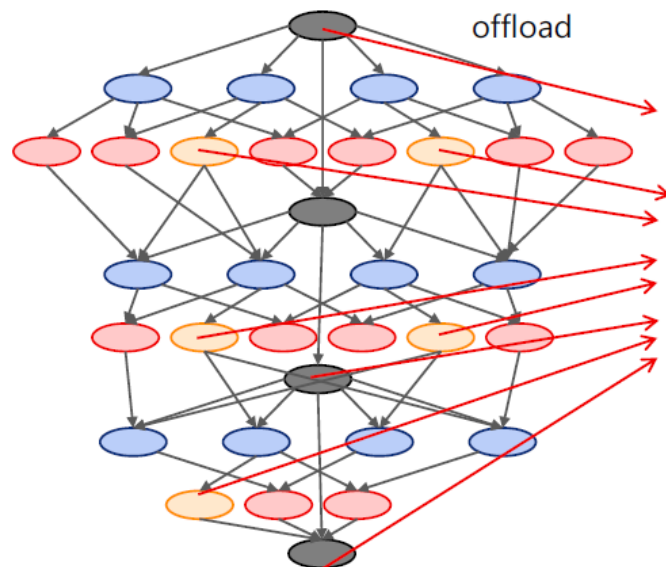
量子HPC連携プログラミングモデルとスケジューリング

- 量子HPC連携のための二階層プログラミングモデルとスケジューリング
 - (第一階層)スパコンおよび量子コンピュータのジョブをタスクとするワークフロー
 - 各々のジョブスケジューラにより各々のシステムの高い利用率が期待される
 - (第二階層)ジョブの内部での細粒度タスクプログラミング
 - 量子とHPCのより密な連携が必要な場合
 - こちらから量子コンピュータに投入されるジョブは最優先とする

粗粒度タスクの場合、コスケジューリング等でQC HPCを同時に開始するよりも個々のシステムのスケジューラに任せた方が高いスループットが期待できる(第一階層)

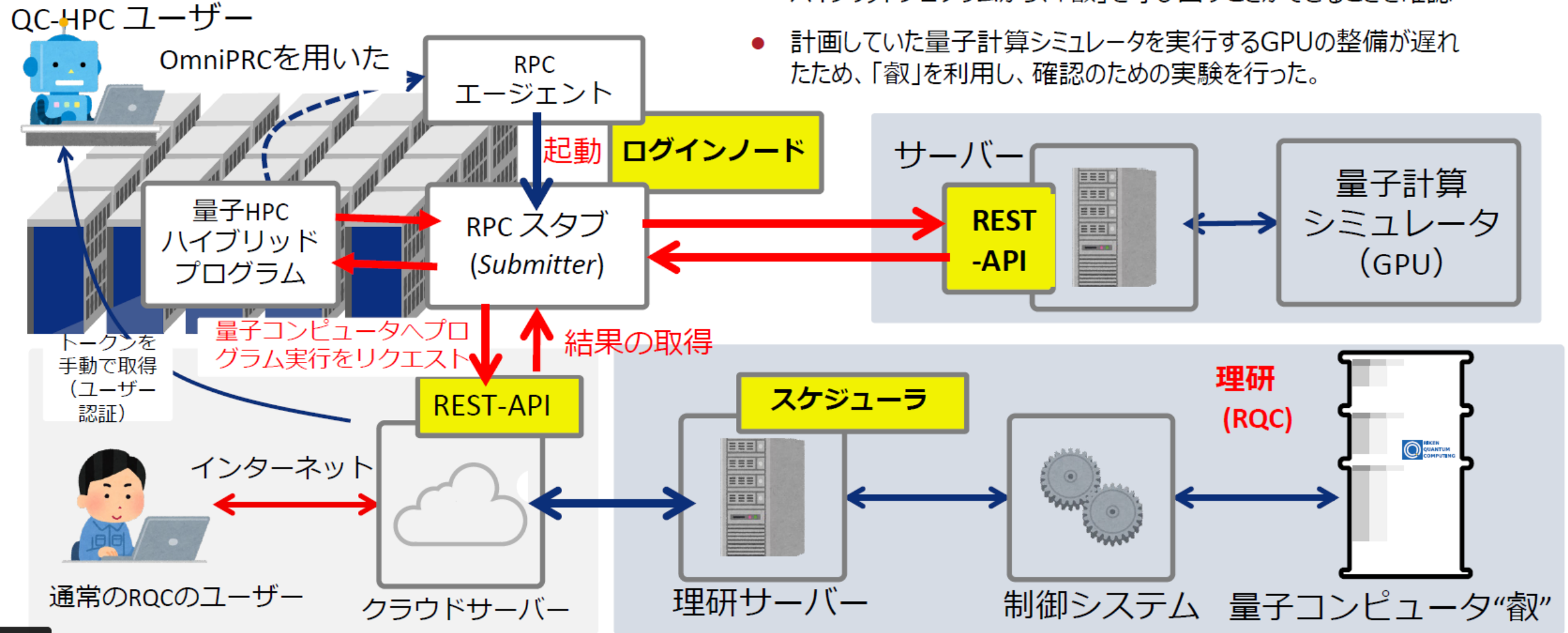


依存関係が複雑な細粒度タスクの場合、総実行時間やHPC側の待ち時間を軽減するため量子コンピュータへのオフロードは最優先で実行される

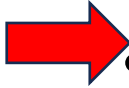


- 量子HPCハイブリッドプログラムのための遠隔呼び出しの試作を完了した。理研・筑波大が開発した遠隔呼び出しライブラリ(OmniRPC)を利用。

- 試作したライブラリを用いて、理研の量子コンピュータ「叡」の量子回路の実行ジョブを起動するためのREST API(web URLを用いたインターフェース)に接続し、富岳の計算ノードで実行した量子HPCハイブリッドプログラムから、「叡」を呼び出すことができることを確認
- 計画していた量子計算シミュレータを実行するGPUの整備が遅れたため、「叡」を利用し、確認のための実験を行った。



発表の流れ

- 新計算原理調査研究とは何か？
- 量子ゲート型の現状
- 量子ゲート型とスーパーコンピュータの接続
-  • FTQC
- 量子アニーラーの現状
- 性能評価とアプリケーション
- まとめ

1. 誤り耐性量子計算

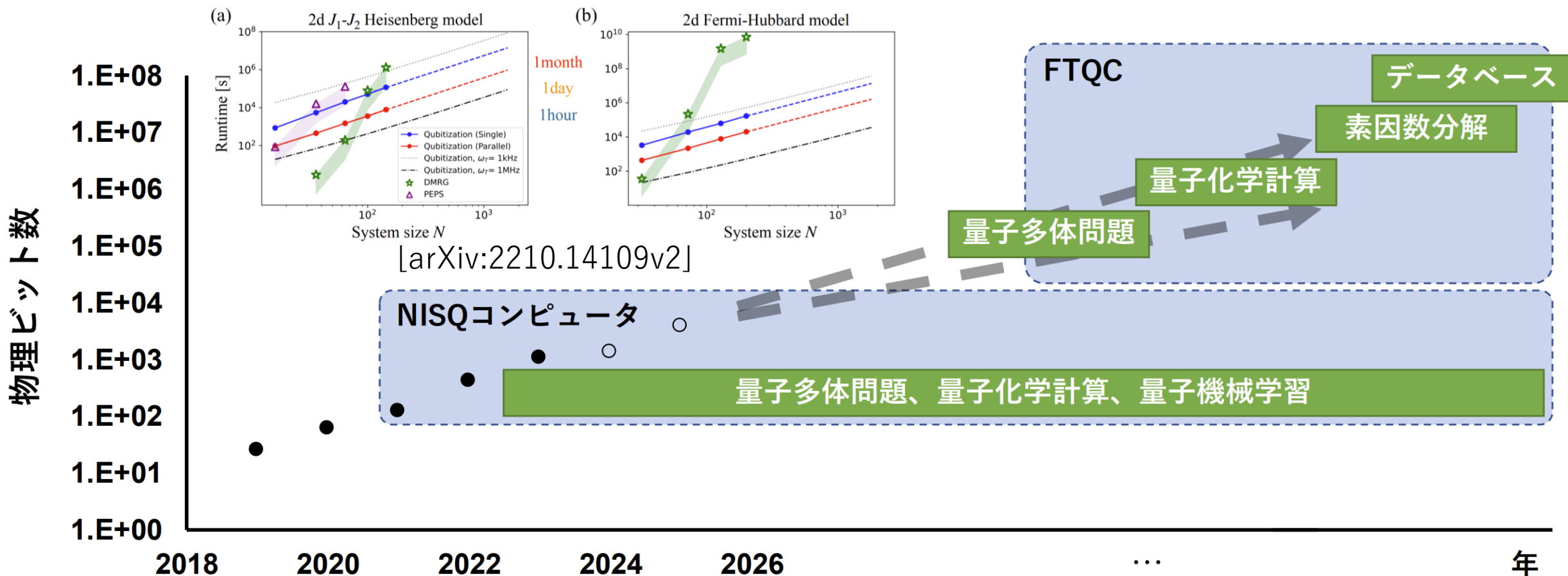
- **量子コンピュータの課題**

- 高い物理エラーレート ($10^{-4} \sim 10^{-3}$)
- NISQコンピュータによる量子誤り緩和 (error mitigation) の限界
 - 量子回路の規模 (量子ビット数、量子回路の深さ) の制限
 - 量子アルゴリズムによる加速 vs. 誤り緩和の (指数) コスト

- **誤り耐性量子コンピュータ (FTQC) による量子誤り訂正を用いた計算**

- 多数の物理量子ビットを用いた**誤り訂正符号**により論理量子ビットを構成
- 論理エラーレートを小さくし、大規模量子計算が可能に
- Shorのアルゴリズム (素因数分解) やGroverのアルゴリズム (データベース) には誤り耐性量子計算が必要だと考えられている

NISQコンピュータとFTQCのアプリケーション



[arXiv:2210.14109v2]

[谷本, 信学会 知識の森 量子コンピュータ]

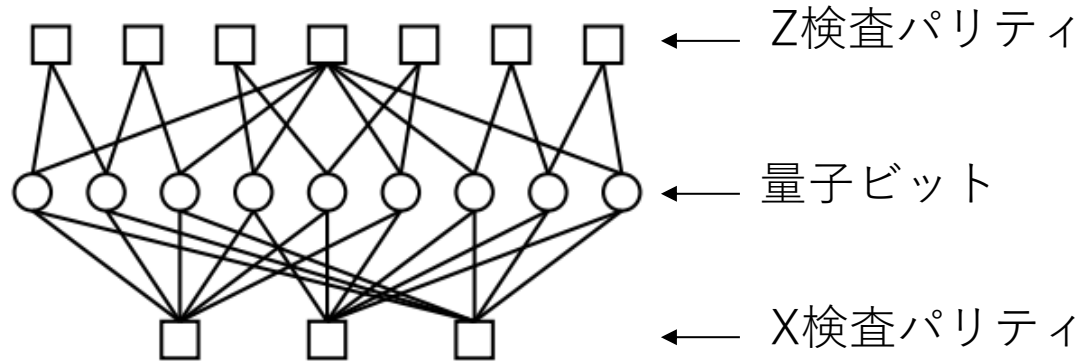
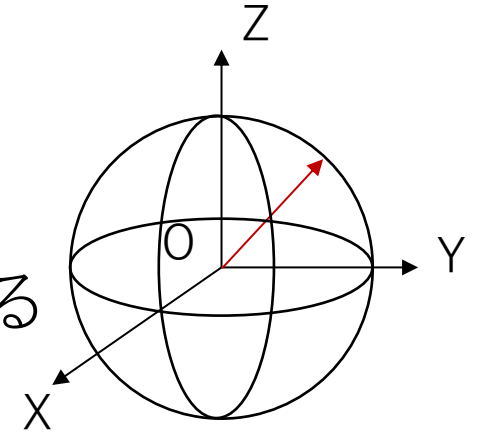
次世代計算基盤に係る調査研究 新計算原理チーム報告会

2024/5/29

2. 量子誤り訂正符号

- 量子誤り訂正符号

- 量子ビット：振幅 (Z) と位相 (X) の情報を持っている



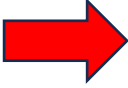
Shorの9qubit符号

- データを保持している量子ビット自体は計算中は観測できない
 - 量子ビットの情報を破壊しても良いとき（例えば計算終了時）は観測OK
 - 検査用の量子ビットに情報を集めてパリティ値を取得（シンδροーム測定）
 - 実行中に生じたエラーはパリティ値から**推測**

ここから先の説明はここでは無理

- 表面符号による量子誤り推定
 - Data qubitの周辺に数多くのAncilla qubitを置いてエラー推定
 - 最小重み完全マッチング (MWPM) に帰着して解く
 - しかし時間方向を含めるとシンδροームが3次元格子になる
- 回路通りに演算を行うには「格子手術」が必要
- ここまではClifford gateしか実現できない
 - 非Clifford gateであるTゲートがないと量子超越ができるかあぶない
 - しかし、圧倒的に高コスト（魔法状態蒸留が必要）
- とりあえずClifford gateまで、Tゲートの代わりにアナログ回転ゲートを使う
 - Early-FTQC
- 数ビットのFTQCを実現するのに1万以上の物理qubitが必要
- ムーンショットG6で多方面からアプローチしている

発表の流れ

- 新計算原理調査研究とは何か？
- 量子ゲート型の現状
- 量子ゲート型とスーパーコンピュータの接続
- FTQC
-  • 量子アニーラーの現状
- 性能評価とアプリケーション
- まとめ

量子アニーラーはisingモデル、QUBOモデルに特化した方式

isingモデル

重み付き無向グラフ $G = (V, E)$ について

$$H(S) = \sum_{(i,j) \in E} J_{i,j} s_i s_j + \sum_{i \in V} h_i s_i$$

ハミルトニアン H を最小にするSpinベクトルを
求める

S は-1, 1のどちらかを取る

QUBOモデル

Quadratic Unconstraint Binary Optimization

重み付き無向グラフ $G = (V, E)$ について

$$E(X) = \sum_{(i,j) \in E \cup V \times V} W_{i,j} x_i x_j$$

X のエネルギーを最小にする X ベクトルを
求める

X は0, 1のどちらかを取る

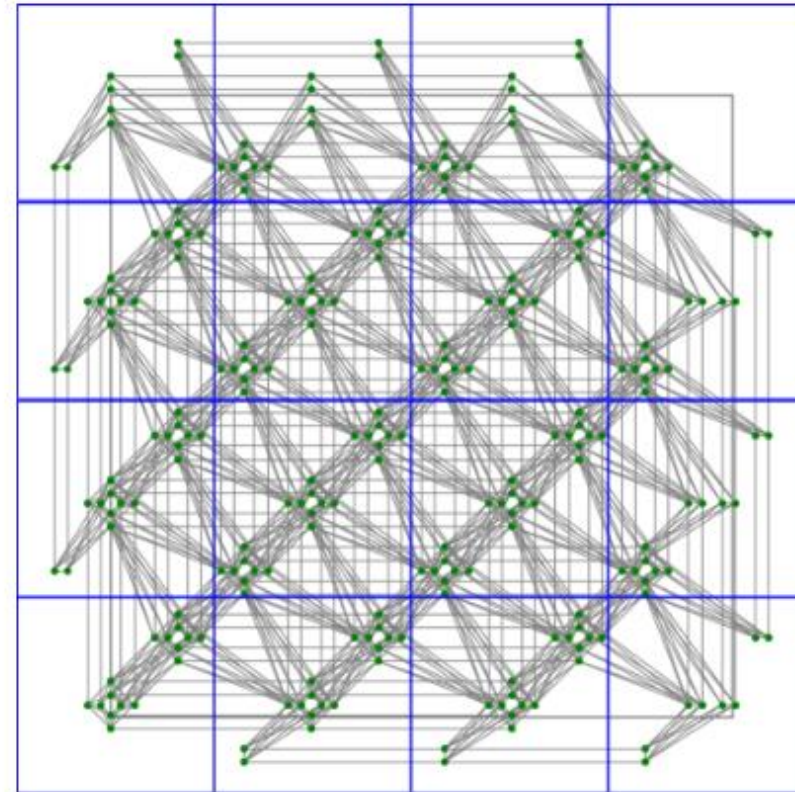
- isingモデル、QUBOモデルは共にNP完全
- 両者は互いに変換可能
- 量子アニーラーで直接扱えるのはIsingモデルだが、QUBOモデルの方がアルゴリズム設計がしやすい
- 量子アニーラーは、実際の量子間のグラフにこの式を埋め込んで直接アニーリング（焼きなまし）をすることにより、解を求める一種のアナログ計算機
- 量子現象を用いて局所解から脱却→効果は実証されていない
- しかし、ノイズの問題はあり、量子化誤差もあるので得られるのは近似解

実際の量子アニーラで、一般的に利用可能なのはD-Waveのみ

- D-Wave 2000Q : Chimera Graph
- D-Wave Advantage: Pegasus Graph
- D-Wave Leap Hybrid

- 問題のグラフをPegasus Graphに埋め込む
- 一般的にはこの操作はNP完全だが、Pegasus Graphは177ノードの完全グラフの埋め込み可能→177ノードまでならば問題ごとに埋め込みを求める必要はない
- 重みは、6ビットに丸める
- 100-1000ショットのアニーリング
- それぞれは20 μ 秒程度で終わる
- 最も良い近似解を出力

擬似量子アニーラーは、QUBOソルバーであり、GPUやベクトル計算機で、これに対応する処理を行う→詳細アルゴリズムは各社それぞれ



Pegasus Graph

https://docs.dwavesys.com/docs/latest/c_gs_4.html

量子アニーリング方式のスペック

東北大+NECチームによる国内・国外の量子および疑似量子アニーリングマシンの調査

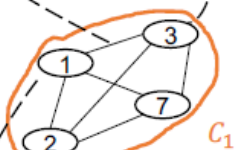
Machines	Hardware	Max # bits	# bits fully	Connectivity	Bit precision	Services
D-wave 2000Q	Quantum circuit QPU	2,048	64	Chimera graph	Analog 5 bits	Cloud
D-wave Advantage	Quantum circuit QPU	5,760	124	Pegasus graph	Analog 5 bits	Cloud
D-wave Advantage2	Quantum circuit QPU	563		Zephyr graph	Analog 5 bits	Cloud
D-wave Leap Hybrid	QPU + Digital circuit	N/A	N/A	N/A	N/A	Cloud
D-wave Neal	CPU	N/A	N/A	Fully	Digital 64 bits	Local
NEC Vector Annealer	VE Type 20B	100,000+	100,000+	Fully	Digital 32 bits	Local
Fixstars Amplify Annealing Engine	Nvidia A100	262,144	131,072	Fully	Digital	Cloud
Hitachi CMOS Annealer	GPU	61,952	176	King graph	Digital 3bits	Cloud
Toshiba SBM	GPUs	10,000,000	10,000,000	Fully	Digital	Cloud

発表の流れ

- 新計算原理調査研究とは何か？
- 量子ゲート型の現状
- 量子ゲート型とスーパーコンピュータの接続
- FTQC
- 量子アニーラーの現状
- • 性能評価とアプリケーション
- まとめ

評価ベンチマーク: 組合せクラスタリング

The distance between x_1 and x_3 $C(x_3) = C_1$
: $d(x_1, x_3)$



x_1 belonging to cluster 1
: $C(x_1) = C_1$

- 組合せクラスタリングの目的関数

$$H = \frac{1}{2} \sum_{a=1}^K \sum_{C(i)=C_a} \sum_{C(i')=C_a} d(x_i, x_{i'})$$

- QUBO関数

$$H = \sum_{i < j} a_{i,j} q_i q_j + \sum_i b_i q_i^2$$

$q_i = 0$ or 1

全ての項が2バイナリ変数積

- 組合せクラスタリングのQUBO関数^{[1][2]}

$$H = \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^N d(x_i, x_j) \sum_{a=1}^K q_a^i q_a^j + \sum_{i=1}^N \lambda_i \left(\sum_{a=1}^K q_a^i - 1 \right)^2$$

目的関数

制約関数

$$q_a^i = \begin{cases} 1 & (C(i) = C_a) \\ 0 & (C(i) \neq C_a) \end{cases}$$

- λ_i はラグランジュの未定乗数法により決定

- $d(x_i, x_{i'})$ は正規化する時, $\lambda_i = (N - K)$

		i								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
a	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1
	2	0	0	0	1	1	1	0	0	0
	3	0	0	1	0	0	0	1	0	0

[1] Vaibhaw Kumar, Gideon Bass, Casey Tomlin, and Joseph Dulny. Quantum annealing for combinatorial clustering. Quantum Information Processing, 17(2):39, 2018.
[2] Kumagai, M., Komatsu, K., Takano, F., Araki, T., Sato, M. and Kobayashi, H.: An External Definition of the One-Hot Constraint and Fast QUBO Generation for High-Performance Combinatorial Clustering, International Journal of Networking and Computing, Vol. 11, No. 2, pp. 463–491 (2021).

評価指標

TTS(Time to solution)

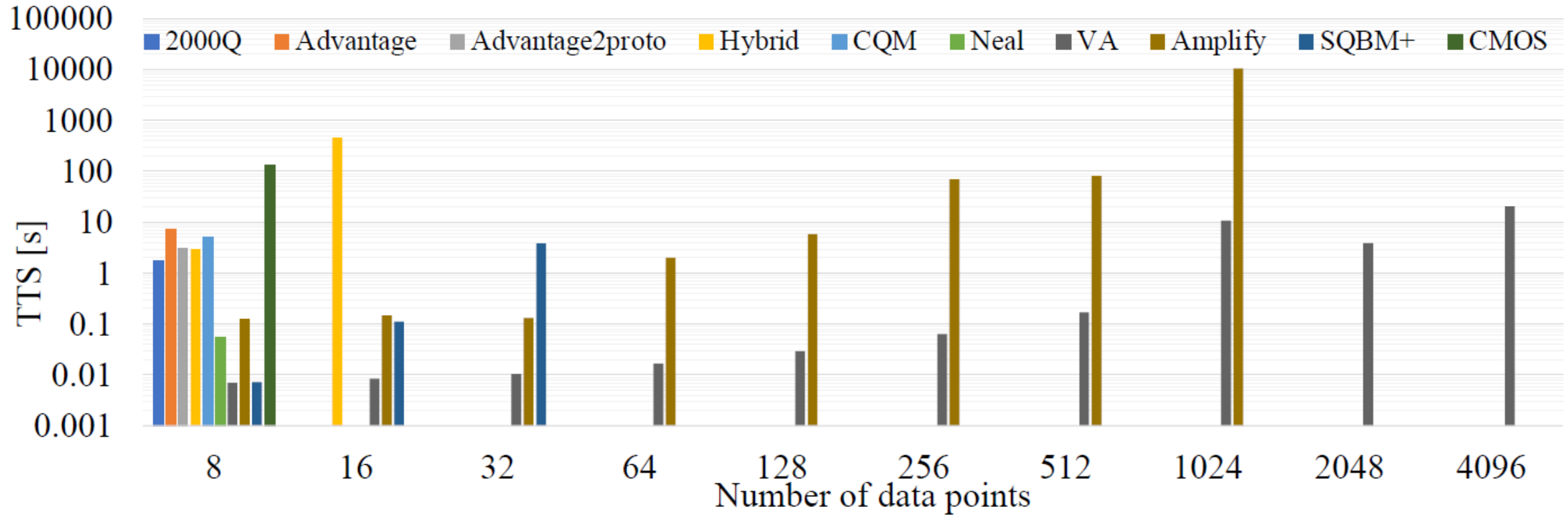
- 同じ精度の解に到達するまでの実行時間
 - $TTS = \gamma_{anneal}R + T_{others}$
 - γ_{anneal} : 1回のアニーリング時間
 - R : 基準解を得るまでのアニーリング回数 $R = \frac{\ln(1-p_R)}{\ln(1-p_{success})}$
 - $p_{success}$: 1回で基準解以上の品質の解が得られる確率
 - 100回の試行のうち, 基準解以上の品質の解を得た回数で計算
 - p_R : R 回のうち少なくとも1回基準解以上の品質の解を得る確率 (一般に0.99)
 - T_{others} : QUBO生成などアニーリング以外にかかる時間
 - 本実験では基準解は得られた解のうち最良の物

Cost (精度)

- 同一クラスタ内距離総和を全てのクラスタでたしあわせた値
- 値が低いほど解の品質が高い

実行時間

TTS

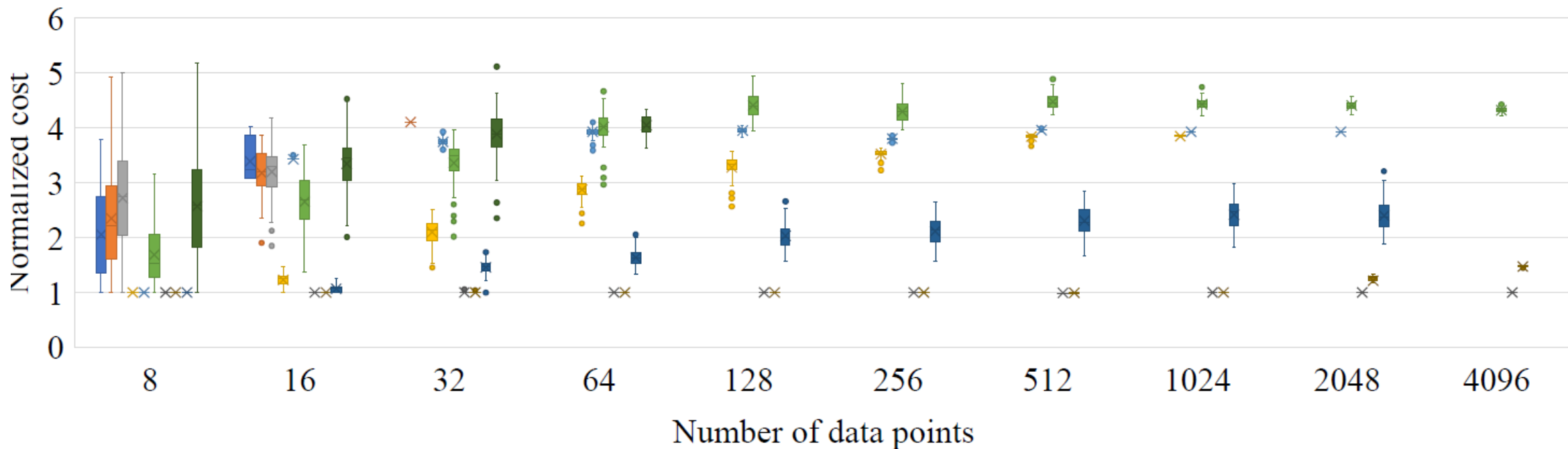


- VA < AE < Neal < 2000Q < Leap < Advantage < CMOS
 - 高い精度のクラスタリングと速い実行時間

- データ数が多い場合、TTSが算出不可
 - ビット数の不足 (2000Q, Advantage, CMOS)
 - 解の精度不足 (Leap, Neal)

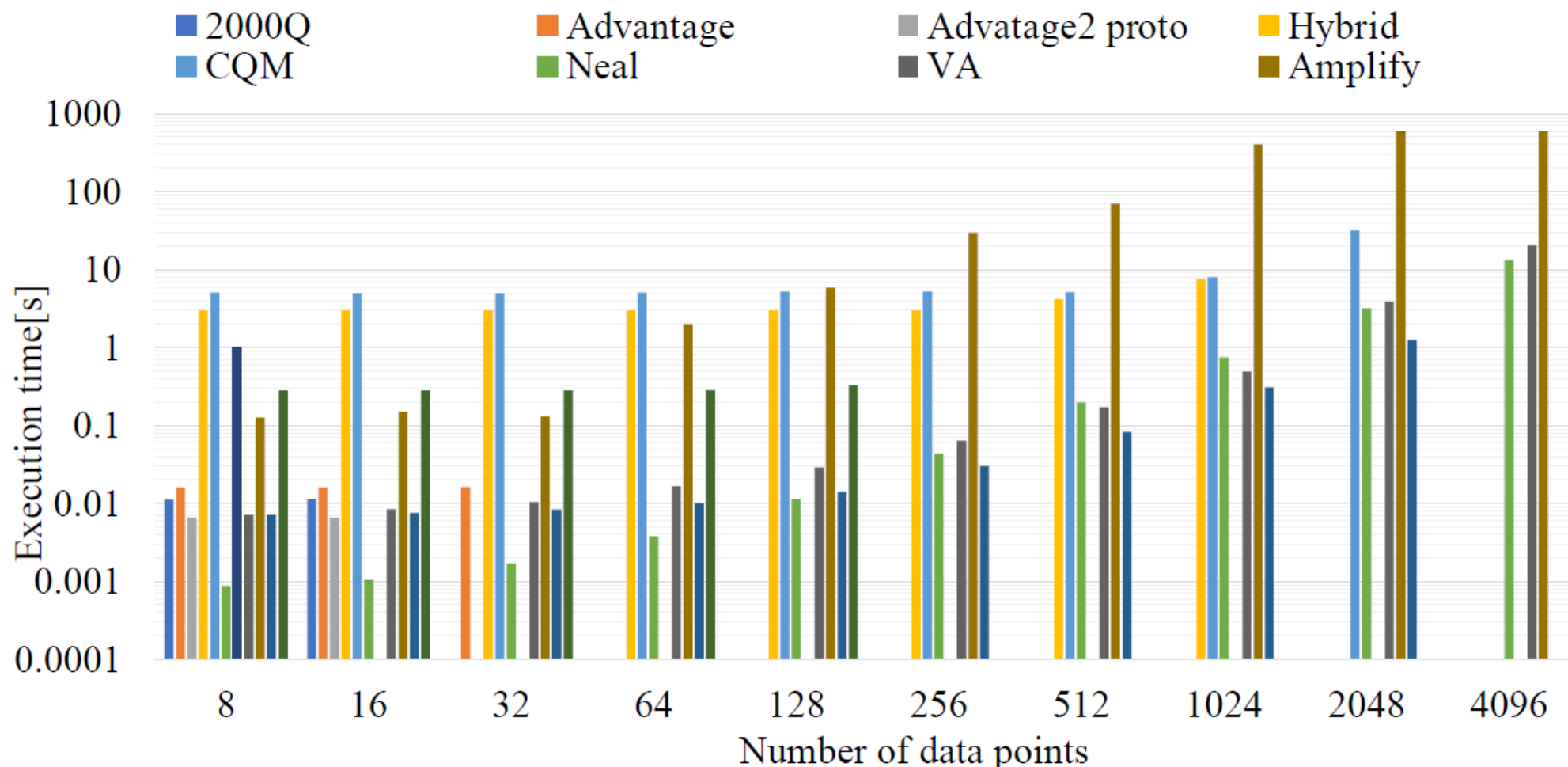
正規化コスト

■ 2000Q ■ Advantage ■ Advatage2 proto ■ Hybrid ■ CQM ■ Neal ■ VA ■ Amplify ■ SQBM+ ■ CMOS



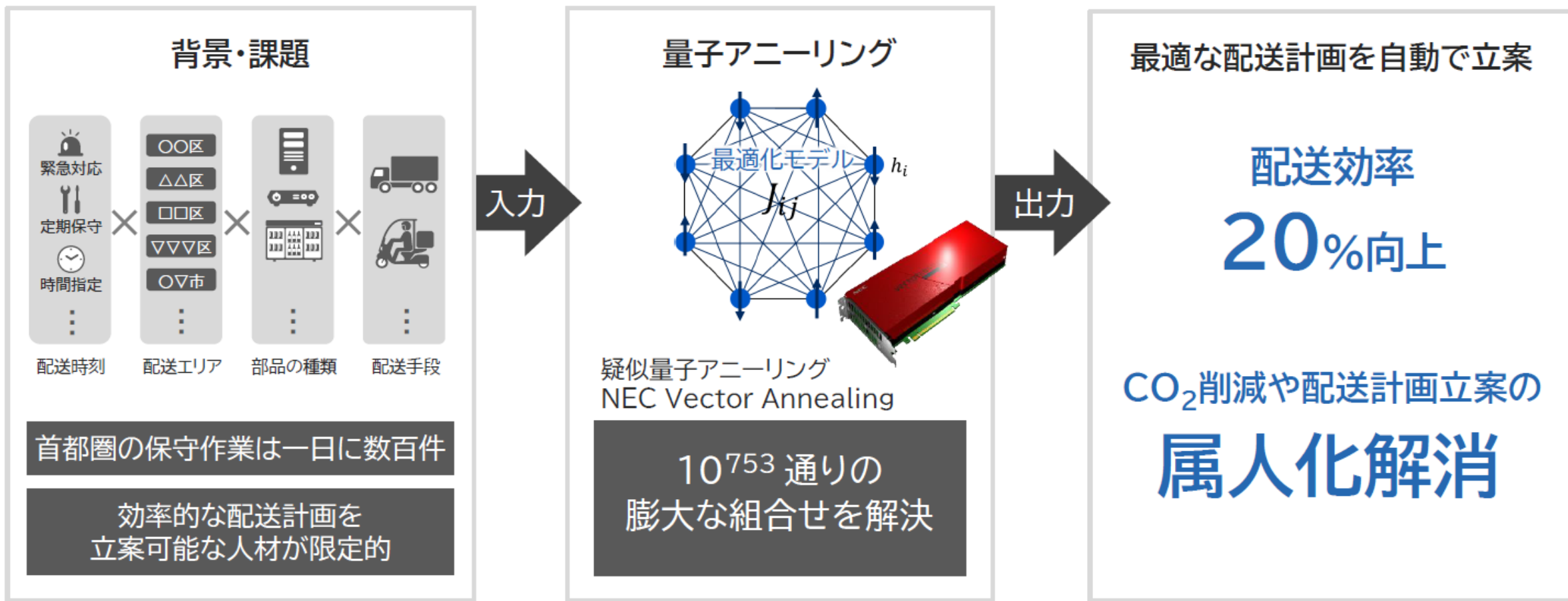
- VA, AE: 基準解と同等のCostかつ少ないバラツキ
- 他: バラツキが大きい
- データ点数16以上
 - 基準解Answerに達成しない
 - ビット不足による実行不可のため、プロットなし

実行時間



アニーリング活用事例（配送最適化）

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



量子アニーリング・疑似量子アニーリング技術の活用調査まとめ

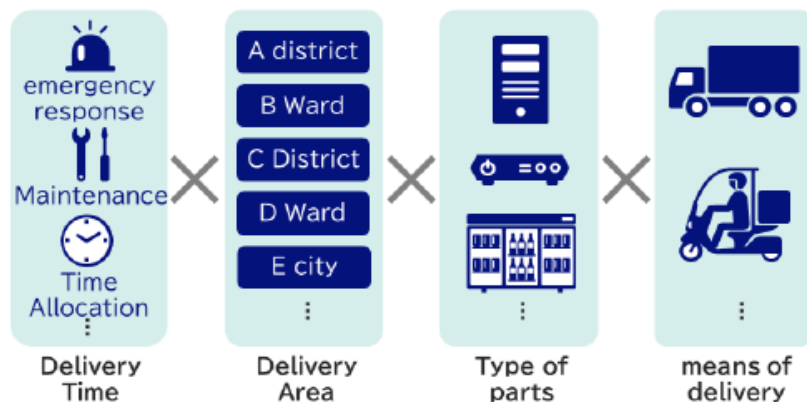
アカデミック領域

- 日米欧において、HPCの加速目的利用は期待が大きいもののユースケースが多くないこと、及びアニーリング利用にはイジングモデルの理解が必要であり**広く利用されるに至っていない**
- HPCの大規模化に伴うジョブマッピングやロードバランシングの最適化にアニーリングを用いる研究が米国で始まっている。**HPCの効率化にアニーリング技術を活用できる可能性が高い**

民間利用領域

- 物流・製造などNP困難な組み合わせ最適化問題が多く、アニーリングによる最適化が注目されている
- 物流や金融の分野において、**アニーリングによる組み合わせ最適化が使われ始めている**
- 一方で、アニーリングの利活用は一般の企業には難易度が高く、**解決すべき課題とそれを解くアニーリング技術適用に大きなギャップがある**

Optimal delivery plans are formulated from a vast number of combinations.

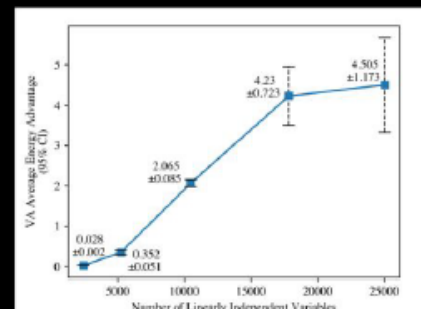


物流最適化のユースケース

人手で行っていた配送最適化にアニーリングを適用。
12倍の高速化、及び20%の効率化を実現

Quantum-Inspired Scaling Advantage

Press release & paper coming out with major NEC Vector Annealer



We optimized portfolios with over 25,000 equities, beyond what's available by current methods.

- Over 800 non-convex problems tested, with 340,000 samples generated
- Problem sizes: 2430, 5243, 10486, 17833, 25034
- Paper will include other metrics, such as planted solutions
- Plan to scale >100K variables

金融ポートフォリオ最適化のユースケース

25,000の株式ポートフォリオ最適化をアニーリングにより実現。
実際の株式市場データを用いた検証で従来手法よりも良好な結果

アニーラーの調査：まとめ

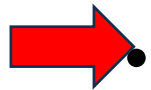
D-Wave型量子アニーラ vs. 擬似量子アニーラ

- ビット数
 - 量子アニーリングマシンD-wave 2000QやAdvantageは数千ビット
 - 擬似量子アニーリングマシンは数万~1千万ビットまで達成
 - ビット精度
 - 量子アニーリングマシンは数ビット程度(と言われている)
 - 擬似量子アニーリングマシンは32ビットや64ビットが主流
 - グラフ埋め込みの問題
 - 実用の観点では、擬似量子アニーリングマシンが優勢
 - QUBOモデル以外に量子アニーラの利用可能な分野を見つけられるか？
 - D-Wave方式以外のアニーラは？ Edgeで使う専用チップは？

 - 擬似量子アニーラは、アクセラレータ上のQUBOソルバー
 - 現実の問題をQUBO問題に落とし込む必要がある
 - それぞれカスタマイズが必要、これは研究としては面白いし、ビジネスの種にもなる
 - TSPなどの決まった問題になってしまうと専用ソルバーという敵がいる
- スーパーコンピュータとの接続
- スーパーコンピュータ上のアクセラレータで動作するソルバーとしては意味がある
 - 大量の並列擬似量子アニーラに意味があるのか？
- アニーラを貶めているわけではない→「最適化革命により社会コストを大幅に削減」

発表の流れ

- 新計算原理調査研究とは何か？
- 量子ゲート型の現状
- 量子ゲート型とスーパーコンピュータの接続
- FTQC
- 量子アニーラーの現状
- 性能評価とアプリケーション



- まとめ

調査全体の概要

目標：量子コンピュータは、量子力学的な現象を用いて、従来のコンピュータでは現実的な時間や規模で解けなかった問題を解くことのできる新しい 計算原理に基づくコンピュータである。本調査研究では、量子コンピューティングとスーパーコンピューティングの融合計算を行う「量子スーパーコンピューティング」のアーキテクチャ、システムソフトウェア、アルゴリズムについて調査し、その実現可能性を評価する。

実施内容：量子コンピュータは、量子揺らぎを利用してイジングモデルの最適解を求めるイジングマシン（アニーラ）と、量子重ね合わせ、量子もつれ現象を利用し、量子ビットを操作することによってアルゴリズムを実行する量子ゲート型に大別される。量子ゲート型は、現在のノイズを含む量子コンピュータを最大限に利用するNISQと、誤り訂正技術を用いて多数の物理量子ビットから少数の理想的量子ビットを生成するFTQCの2つの路線で研究開発が進んでいる。このため、我々は2022年に引き続き、以下のように担当を分けて調査を行った。

- ①慶應義塾大学と富士通は、クラウドを通じた利用調査、ハイブリッド環境の実行調査、ヒアリング調査により現在の各種量子コンピュータの現状を調査し、スーパーコンピュータとの融合アーキテクチャを探る
- ②理研RQCは、量子変分アルゴリズムを中心に現在の量子アルゴリズムを調査し、変分法を超えたアルゴリズムについて検討する。
- ③理研R-CCSは、量子コンピュータのプログラミング環境、システムソフトウェアを調査し、スーパーコンピュータとの統合環境について検討する。
- ④九州大学は、誤り訂正技術と、FTQCのアーキテクチャとスーパーコンピュータの融合を探る。
- ⑤東北大学とNECは、実マシンに基づく性能評価・性能分析を通じて、量子アニーラ、疑似量子アニーラについてスーパーコンピュータとの融合アーキテクチャを探る

成果：上記項目に関して以下の成果が得られた：①③実際に量子コンピュータを利用している研究者のヒアリングと論文調査により、利用している量子ビット数はあまり多くないこと、古典コンピュータとの融合計算を行う場合も、従来型のコンピュータ部への性能要求は現在のところあまり高くないことがわかった。また、量子コンピュータと従来型コンピュータのそれぞれの処理を自動的に組み合わせるハイブリッド実行はクラウドで可能である。しかし、クラウドの混雑により、実行時間が長くなる場合や、多額な利用料が発生する可能性がある。②④量子変分アルゴリズムは、様々な弱点を抱えており、これを超える研究が活発に行われており、実際のIBM-QとIonQの利用により、変分アルゴリズムを超える手法を実装し、効果を評価した。①②現在の量子ゲート型の量子コンピュータをクラウドで利用する場合のコスト、時間、性能を明らかにした。①③量子コンピュータシミュレータの調査を行い、この分野でのスーパーコンピュータの優位性を明らかにした。③量子コンピュータシミュレータと高性能の従来型コンピュータを接続した環境上で、プログラミング、タスク割り付けの手法を検討した。⑤実際の利用を通じて、D-Wave社の量子アニーラと代表的疑似量子アニーラの性能とアプリケーションの制約を調査した。現状では疑似量子アニーラが有利であり、疑似量子アニーラのアルゴリズムはスーパーコンピュータに付随するアクセラレータでも効率良く実行できることを明らかにした。最後に2023年度までの調査成果を踏まえて将来の量子コンピュータと従来型コンピュータの接続について提言を行った。

次年度に向けた課題：量子ゲート型は、ポスト富岳に接続して実質的に動作するのは時期的に難しいが、将来の接続のためのAPI、言語、スケジューラの研究は、理研R-CCSおよび理研RQCによりNEDOプロジェクトの枠組みで行われる。富士通も理研と共に国産量子コンピュータの開発を進めている。また、誤り訂正技術も内閣府ムーンショットプロジェクトで行われ、九州大学もこれに参加している。このため、本プロジェクトは、一応その役目を終えたと考え、①-④のグループは、2023年度で解散することにした。一方で⑤の対象の量子アニーラはポスト富岳のアプリケーションとして非常に重要と考えられるので、引き続き2024年度も調査を行うこととした

量子コンピュータを巡る誤解（意図的？）

大規模なスケジューリング問題が量子コンピュータで解けた！

実際のビジネスに量子コンピュータを使おう

量子コンピュータは、古典コンピュータが1年かけても解けない問題が数秒で解ける

量子コンピュータは創薬、化学計算探索問題、素因数分解など多様な用途に使える

量子コンピュータのqubit数は指数的に増加している

経済効果はX X兆円

上記は全て間違いではないが、正確ではない

量子ゲート型がビジネスで使えるのは最短2030年

疑似量子アニーラは量子現象は使っておらず古典コンピュータ上で動く最適化アルゴリズムの一種
本物の量子アニーラは疑似量子アニーラに比べて数多くの弱点を持つ

量子コンピュータ

量子アニーラと量子ゲート型の量子コンピュータは全く違ったコンピュータ、量子アニーラがいくら発展しても量子ゲート型にはならない

量子コンピュータを巡る誤解（意図的？）

大規模なスケジュール問題が量子コンピュータで解けた！

実際のビジネスに量子コンピュータを使おう

量子コンピュータは、古典コンピュータが1年かけても解けない問題が数秒で解ける

量子コンピュータは創薬、化学計算探索問題、素因数分解など多様な用途に使える

量子コンピュータのqubit数は指数的に増加している

経済効果はX X兆円

上記は全て間違いではないが、正確ではない

量子ゲート型がビジネスで使えるのは最短2030年

疑似量子アニーラは量子現象は使っておらず古典コンピュータ上で動く最適化アルゴリズムの一種
本物の量子アニーラは疑似量子アニーラに比べて数多くの弱点を持つ

本物の量子アニーラ
疑似量子アニーラ

量子ゲート型量子コンピュータ

量子アニーラと量子ゲート型の量子コンピュータは全く違ったコンピュータ、量子アニーラがいくら発展しても量子ゲート型にはならない