

# 変分量子アルゴリズム向け 極低温SFQアーキテクチャ

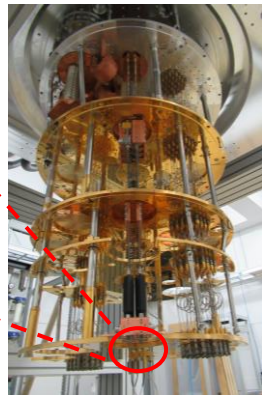
上野 洋典<sup>1</sup> 今村 智史<sup>2</sup> 富田 祐永<sup>3</sup> 谷本 輝夫<sup>4</sup>  
田中 雅光<sup>5</sup> 田渕 豊<sup>1</sup> 井上 弘士<sup>4</sup> 中村 宏<sup>3</sup>

<sup>1</sup>理化学研究所 <sup>2</sup>富士通株式会社 <sup>3</sup>東京大学  
<sup>4</sup>九州大学 <sup>5</sup>名古屋大学

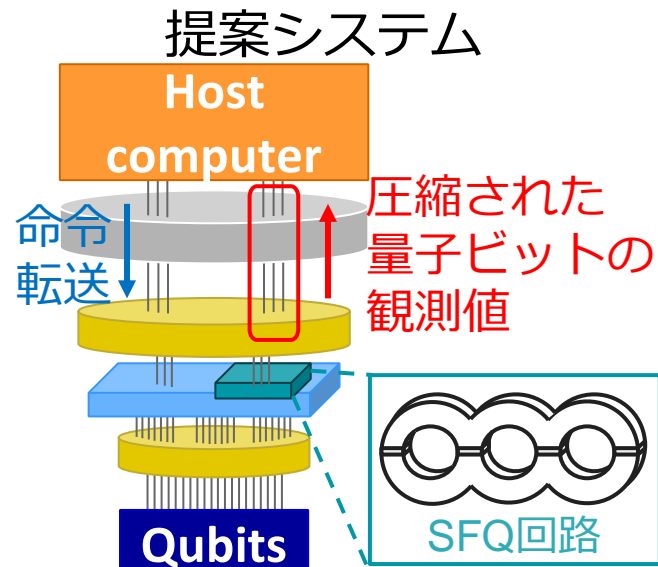
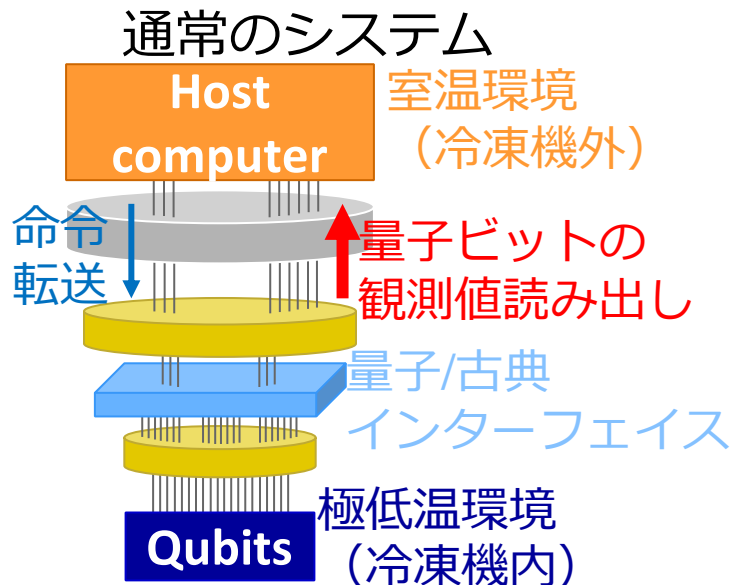
- 発表概要 p2~6
- 背景 p7~9
- 変分量子アルゴリズムの期待値計算 p10~14
- 提案アーキテクチャ p15~17
- 評価結果 p18~21
- まとめ p22~23

# 発表概要：提案するシステムとねらい

## 希釈冷凍機と量子ビット

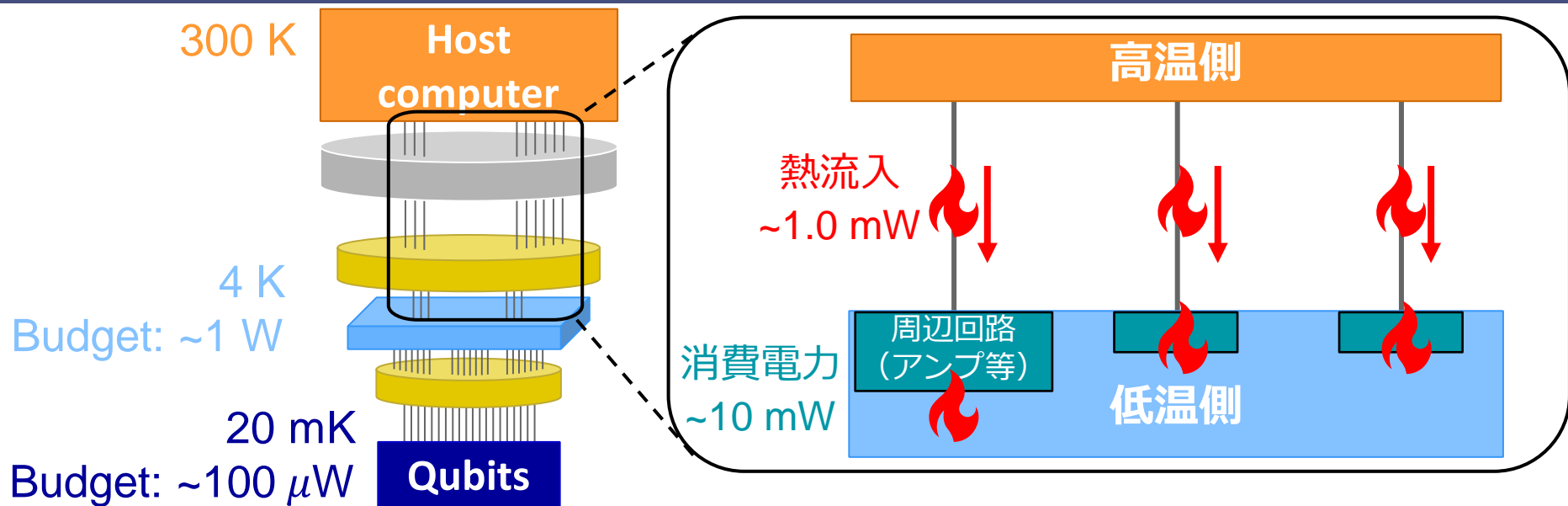


Copyright;  
RIKEN Center for Quantum Computing



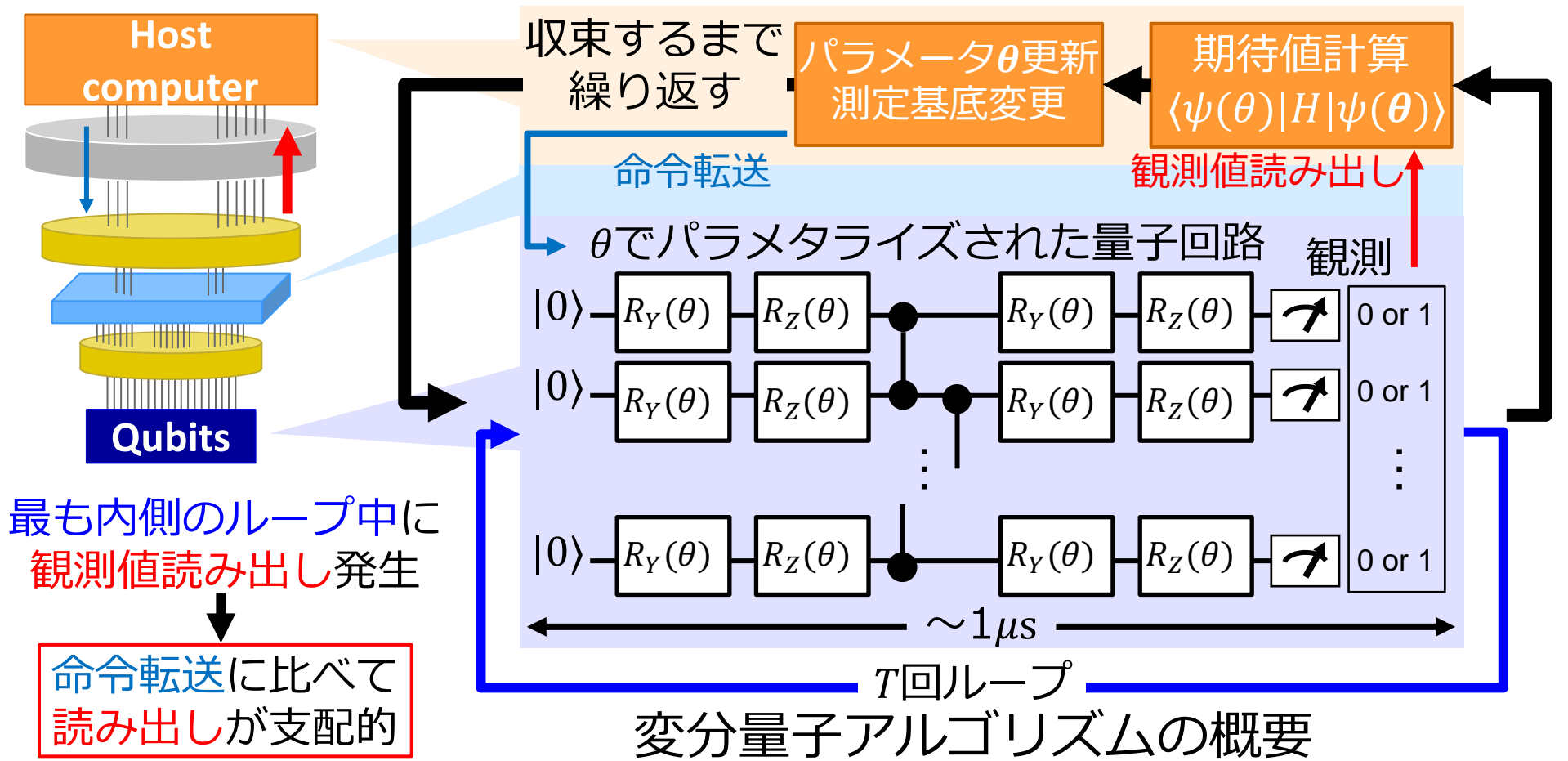
- 超伝導量子計算機は冷凍機内外にまたがる大量の配線を必要とする
- 変分量子アルゴリズムにおいては観測値読み出しのバンド幅が支配的
- 提案: カウンタベースの処理で読み出しバンド幅を減らし、ケーブルを削減
  - 極低温環境で動作する超伝導デジタル回路であるSFQ回路を用いて実装
  - 特に複数の変分量子アルゴリズムを並列実行する場合に有効

# 発表概要：なぜ冷凍機内外の配線が問題か？



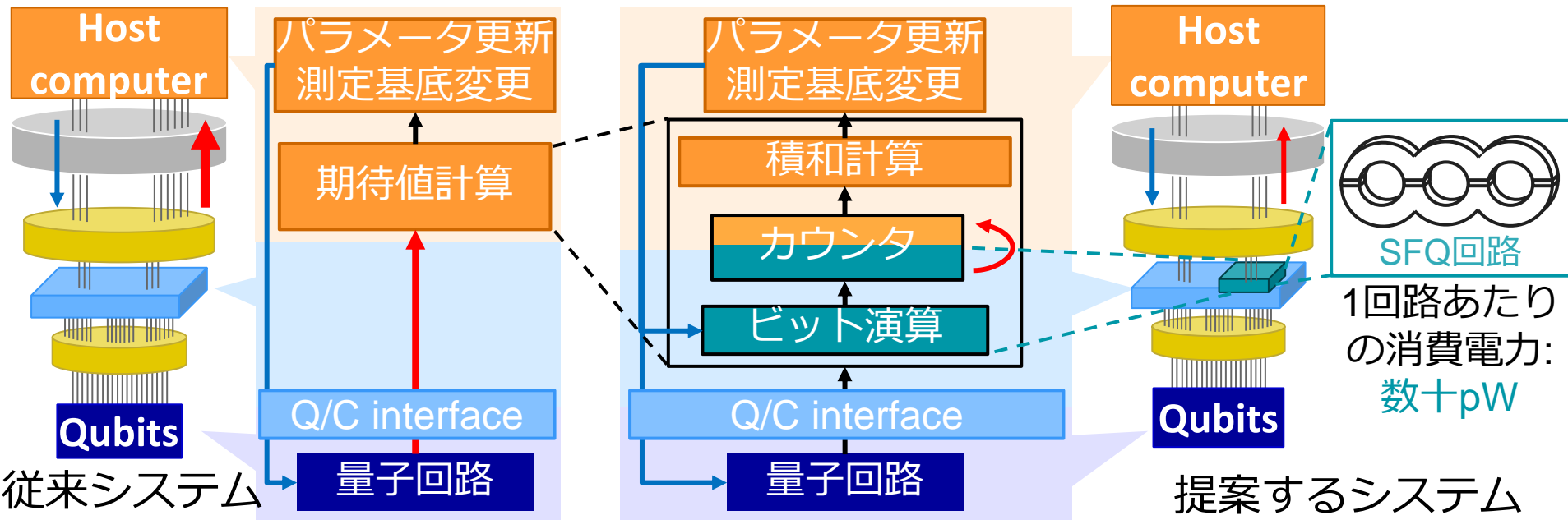
- 希釈冷凍機の冷却能力に限界がある
- 配線により生じる熱がボトルネックと成りうる
  - 配線を通じた極低温環境への熱流入
  - 配線に付随する周辺回路の消費電力（発熱）

# 発表概要：なぜ読み出しバンド幅が支配的か？



## 変分量子アルゴリズムの概要

# 発表概要: なぜカウンタによる情報圧縮が有効か？

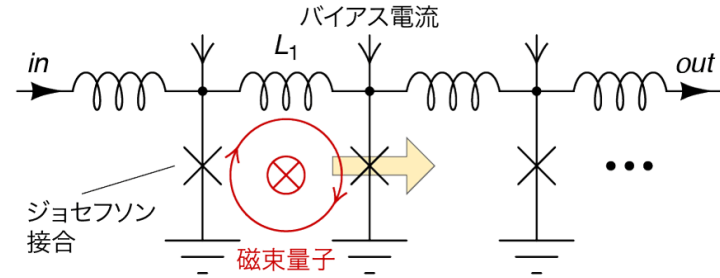
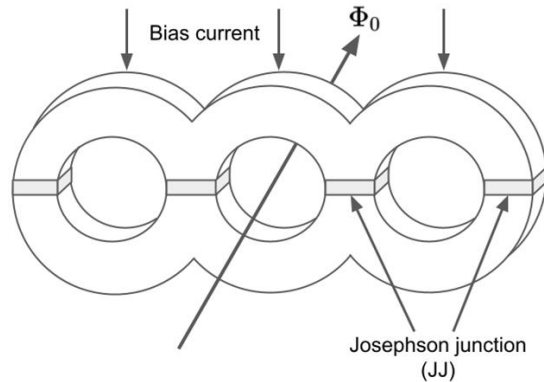


- 期待値計算の一部はビット演算結果のカウンタで実現できる
- 常温環境-極低温環境間にまたがるカウンタで期待値計算
  - 常温環境への通信バンド幅をカウンタの極低温部のビット幅に対して指数的に低減

# 発表内容

- 発表概要 p2~6
- 背景 p7~9
- 変分量子アルゴリズムの期待値計算 p10~14
- 提案アーキテクチャ p15~17
- 評価結果 p18~21
- まとめ p22~23

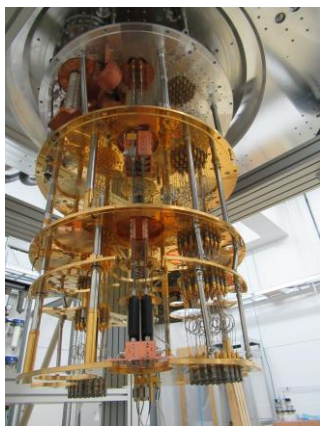
# 単一磁束量子回路 (SFQ回路)



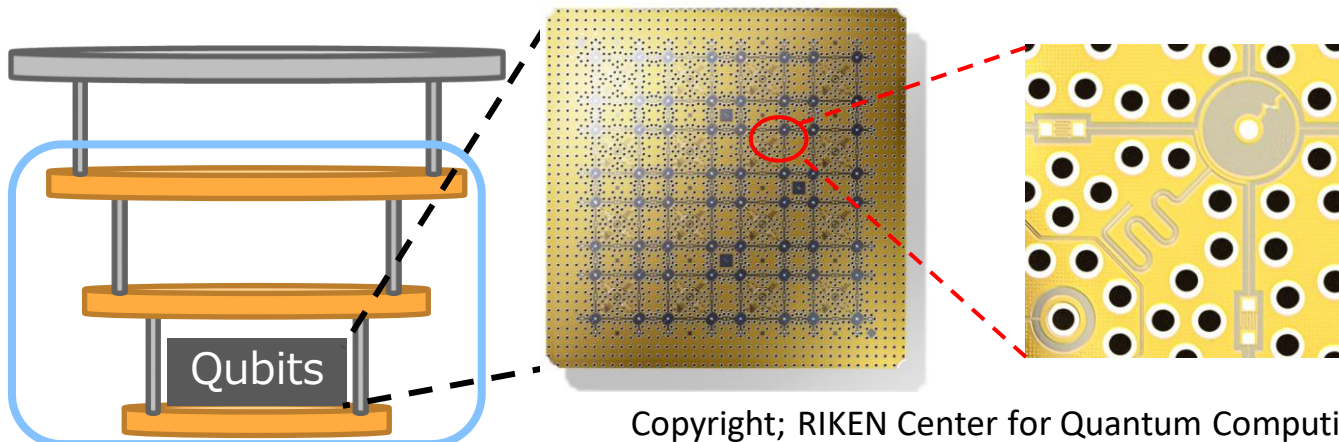
- 超伝導リング内の磁束量子の有無で0 or 1を表現
- 4K程度の極低温環境でのみ動作
- CMOSに比べて高速・低消費電力
- 浮動小数点演算、大規模RAMは高コスト



# 超伝導量子ビット



希釈冷凍機



極低温環境 (20mK~4K)

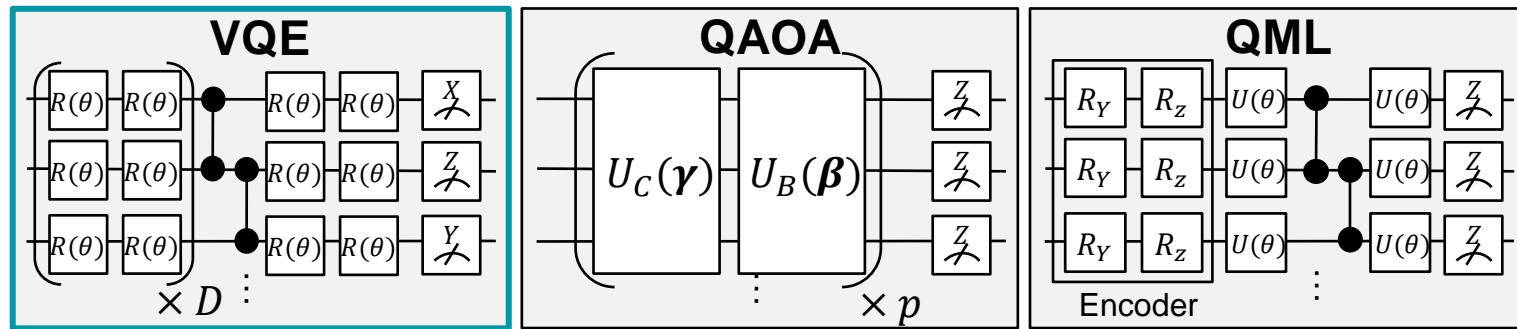
Copyright; RIKEN Center for Quantum Computing

- 20mK程度の極低温環境（希釈冷凍機内）でのみ動作
- エラー率が高い
  - 誤り訂正なしで実行できる量子アルゴリズムの規模が限定される
  - 1000量子ビットマシン vs. 数十量子ビットの変分量子アルゴリズム

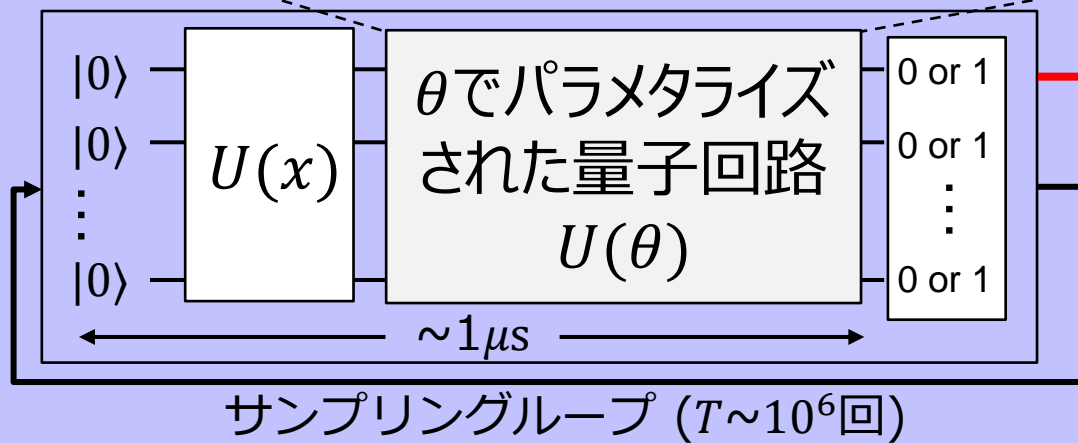
# 発表内容

- 発表概要 p2~6
- 背景 p7~9
- 変分量子アルゴリズムの期待値計算 p10~14
- 提案アーキテクチャ p15~17
- 評価結果 p18~21
- まとめ p22~23

# 変分量子アルゴリズム



## 量子計算



実行する量子回路の情報 ↑

## 古典計算

観測値

期待値計算

パラメータ $\theta$ 更新

収束するまで  
繰り返す

# Variational Quantum Eigensolver (VQE)

## 量子化学計算への応用

ハミルトニアン $H$ の期待値 $\langle\psi(\boldsymbol{\theta})|H|\psi(\boldsymbol{\theta})\rangle$ を  
最小化する量子回路のパラメータ $\boldsymbol{\theta}$ を見つける

## $H$ の期待値の計算手順

ハミルトニアン $H$ はPauli項 $P_i$  (Pauli行列 $I, X, Y, Z$ の積) の線形結合で表せる

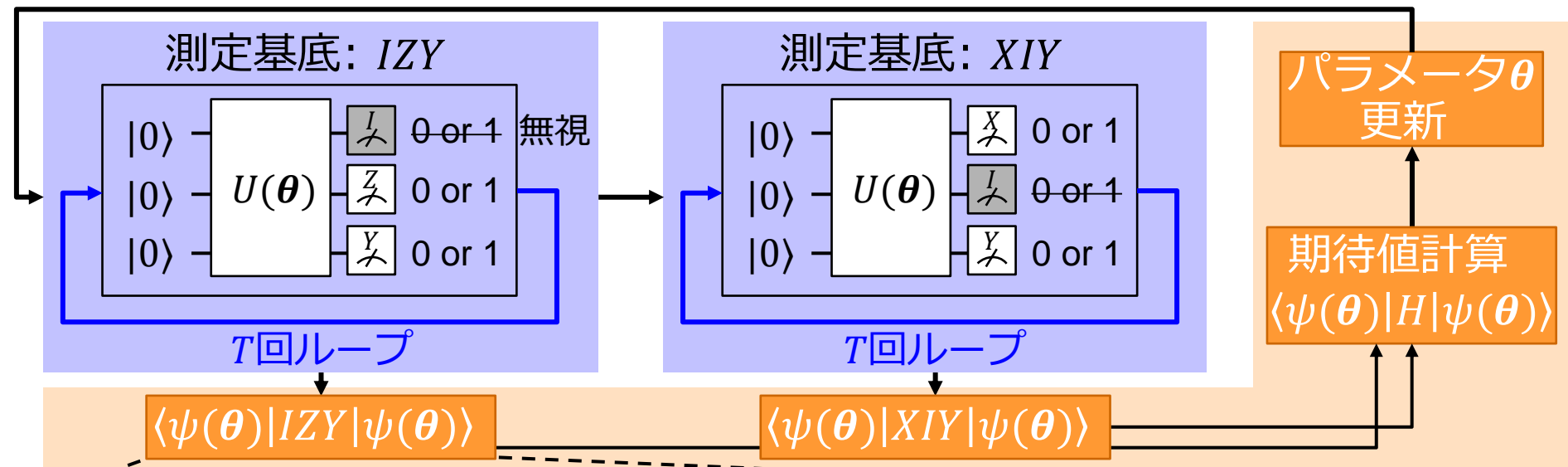
$$H = \sum w_i P_i$$

期待値の線形性から

$$\langle\psi(\boldsymbol{\theta})|H|\psi(\boldsymbol{\theta})\rangle = \sum w_i \langle\psi(\boldsymbol{\theta})|P_i|\psi(\boldsymbol{\theta})\rangle$$

$P_i$ に対応する基底で量子回路実行結果を測定してサンプリング

# VQEの期待値計算 (例: $H = w_1 IZY + w_2 XIY$ )



$$\langle \psi(\theta) | IZY | \psi(\theta) \rangle = 1 - 2C_{\text{odd}}/T$$

$T$  回のうち  
観測値の和が奇数だった回数

観測値

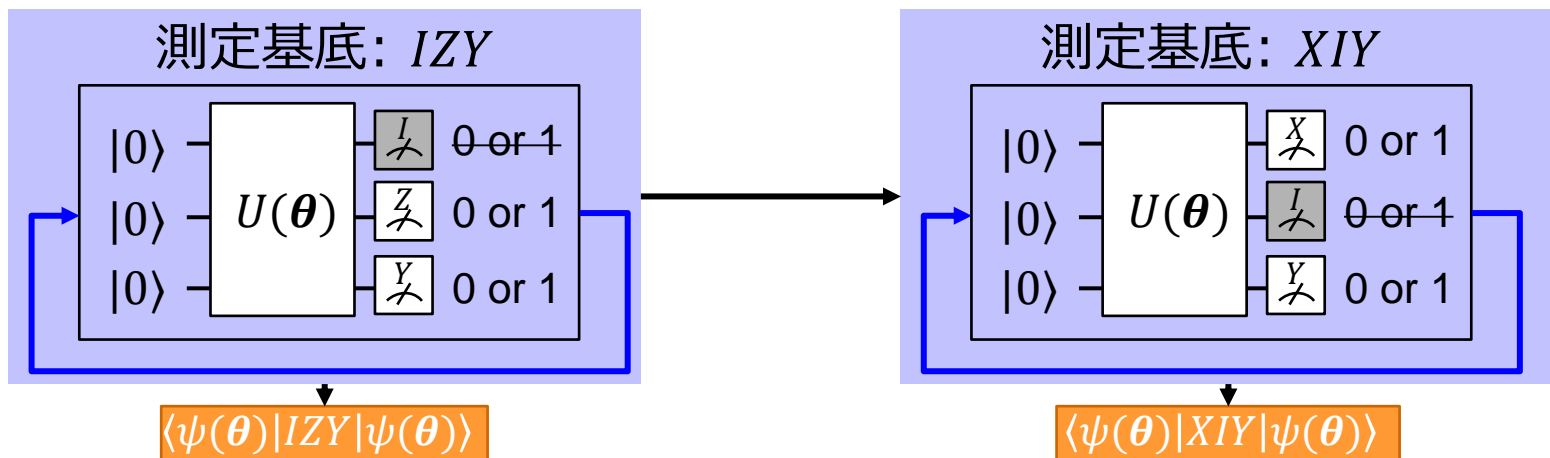
$$C_{\text{odd}} += \begin{pmatrix} 0 \text{ or } 1 \\ 0 \text{ or } 1 \\ 0 \text{ or } 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \% 2$$

Paulimask

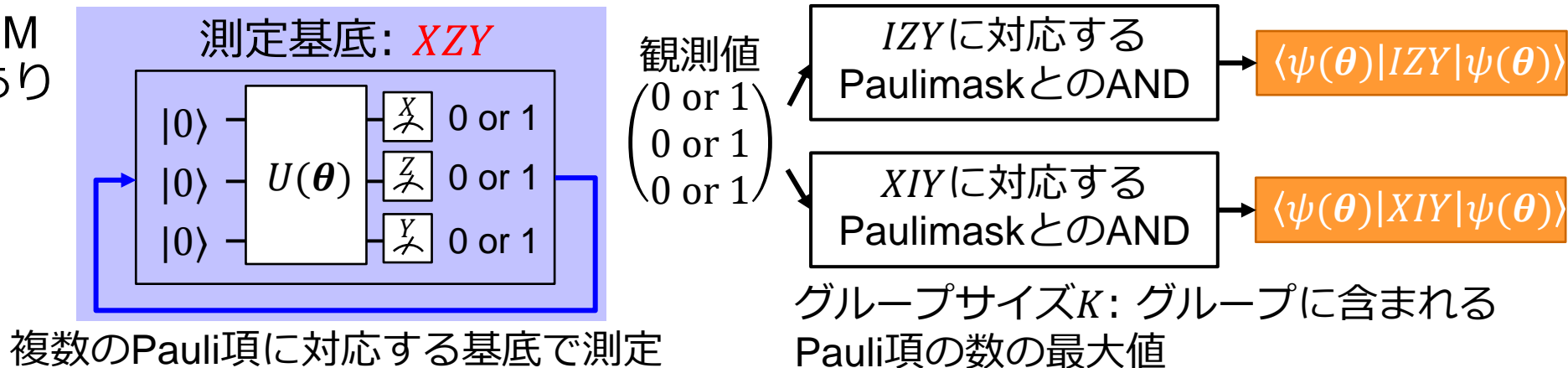
AND・パリティの結果をカウンティング

# Group measurement (GM)

GM  
なし



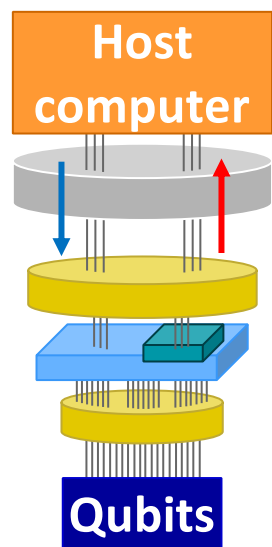
GM  
あり



# 発表内容

- 発表概要 p2~6
- 背景 p7~9
- 変分量子アルゴリズムの期待値計算 p10~14
- 提案アーキテクチャ p15~17
- 評価結果 p18~21
- まとめ p22~23

# 提案アーキテクチャの概要

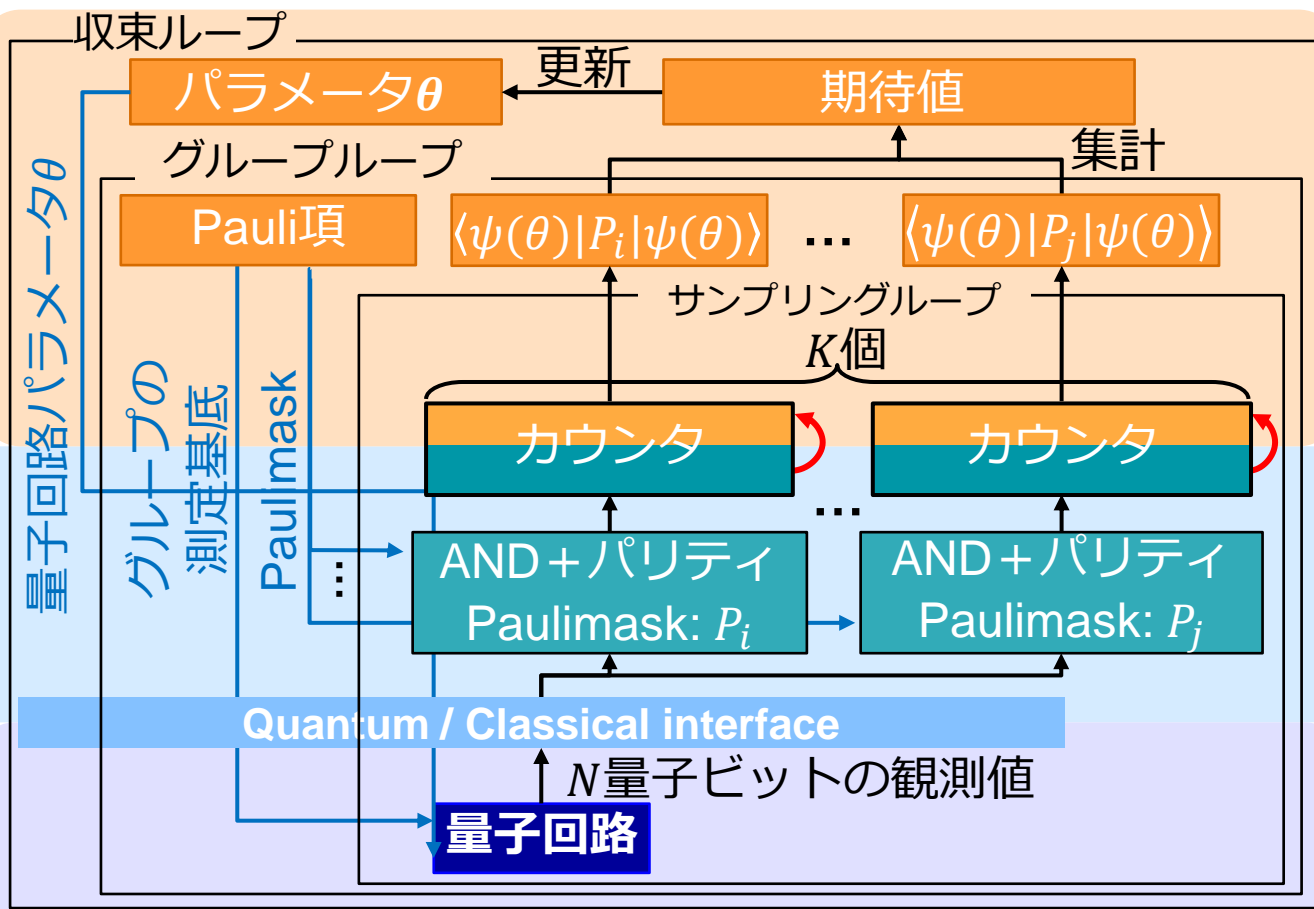


メリット

冷凍機外への通信バンド幅  
を  $b$  に対して指数的に低減

デメリット

Paulimaskにより冷凍機内  
への通信バンド幅増加



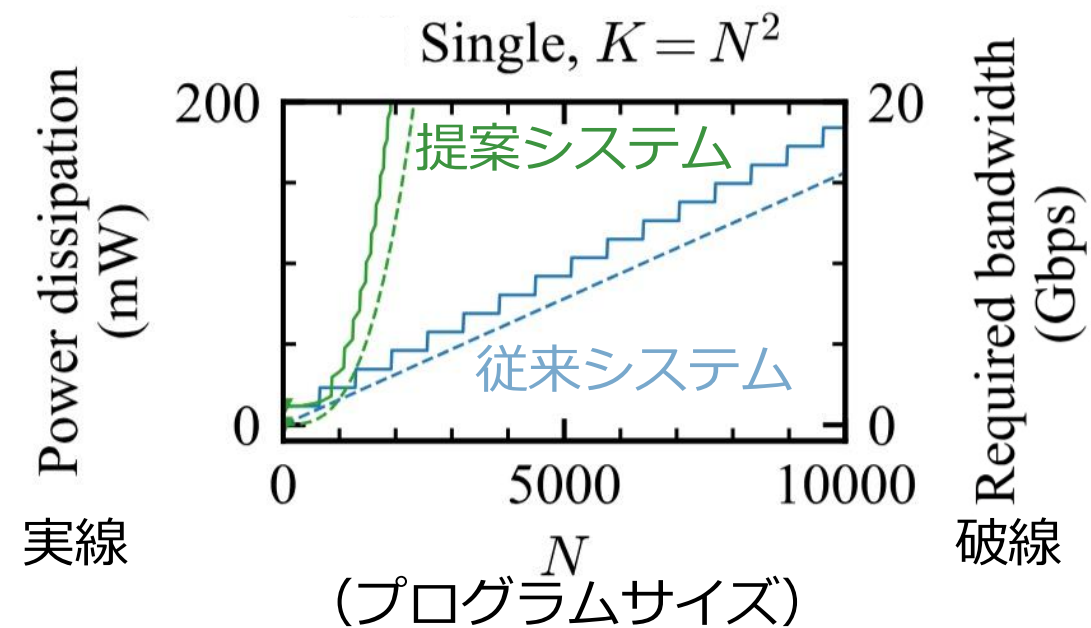




# 発表内容

- 発表概要 p2~6
- 背景 p7~9
- 変分量子アルゴリズムの期待値計算 p10~14
- 提案アーキテクチャ p15~17
- 評価結果 p18~21
- まとめ p22~23

# バンド幅と極低温環境の熱収支 (単一実行)



ケーブルのパラメータ

バンド幅: 1.0 Gbps / 本

熱流入: 1.0 mW / 本

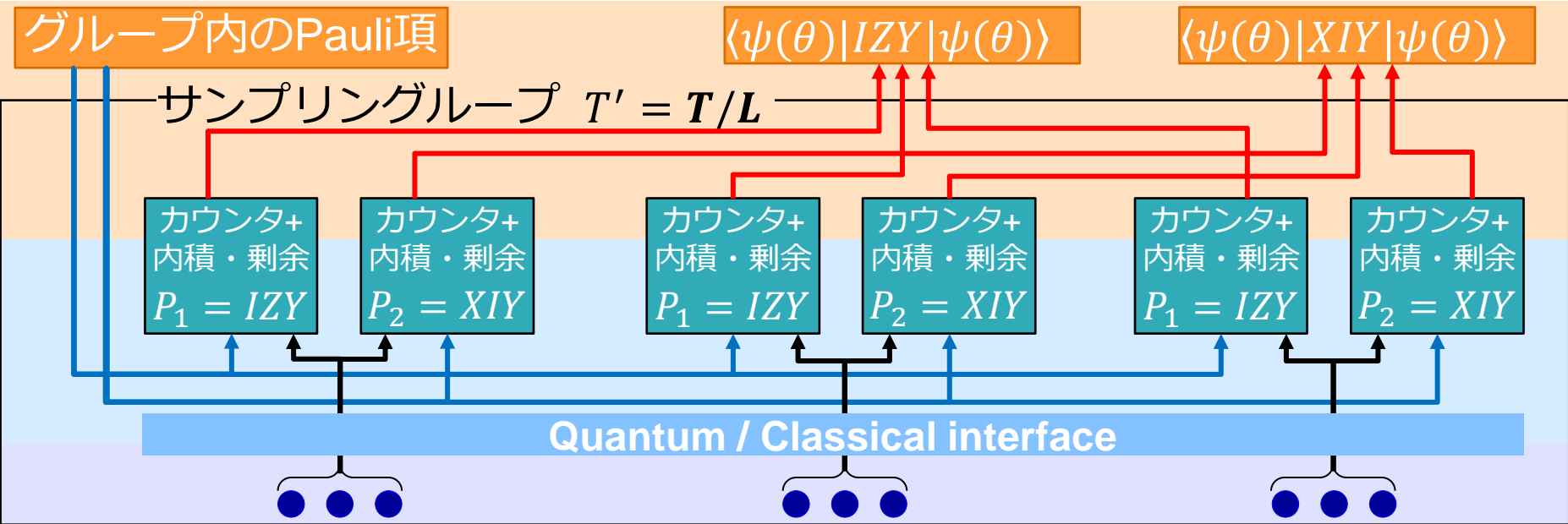
アンプ消費電力: 10.5 mW / 本

極低温カウンタのパラメータ

ビット幅  $b$ :  $\log K = 2 \log N$

- Paulimask送信にかかる通信バンド幅の影響大
- アーキテクチャ全体の消費電力も  $O(KN^2/T) \sim O(N^4/T)$  でスケール
- エラー率の観点から  $N > 100$  のVQEの実行は現実的でない

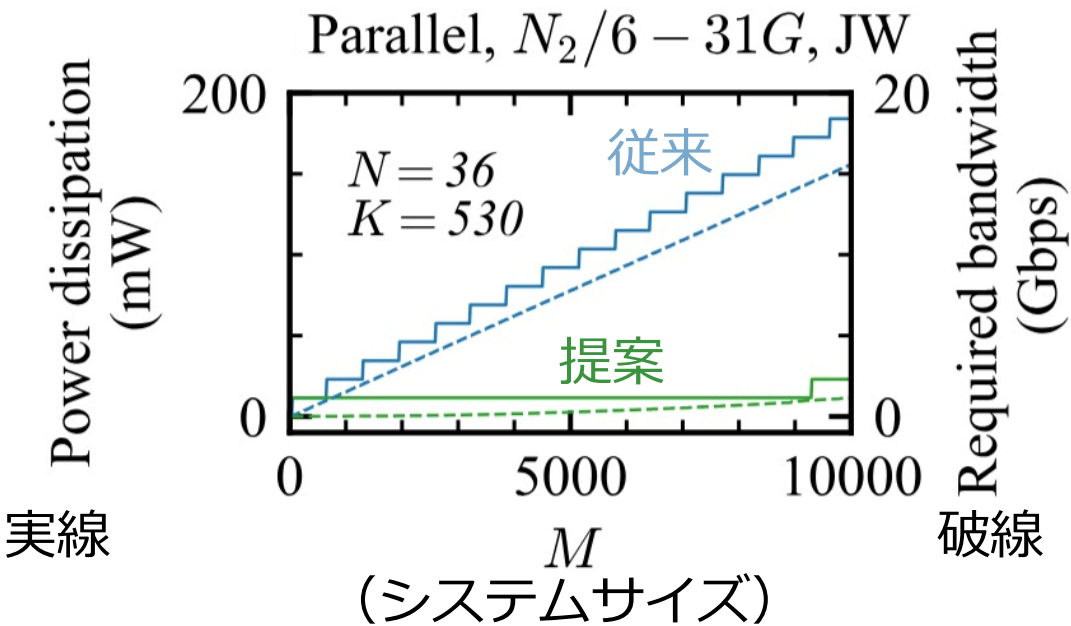
# VQEの並列実行



ハミルトニアン  $H = IZY + XIY$  ( $N = 3, K = 2$ ),  $M = 9, L = 3$  の例

- $M (> N)$  ビットのマシンで  $N$  ビットの VQE を  $L = M/N$  並列で実行
- 各サンプリンググループの繰り返し回数が  $T \rightarrow T' = T/L$  と減少
- 送信される Pauli mask は共通

# バンド幅と極低温環境の熱収支 (並列実行)



ケーブルのパラメータ

バンド幅:	1.0 Gbps / 本
熱流入:	1.0 mW / 本
アンプ消費電力:	10.5 mW / 本

極低温カウンタのパラメータ

ビット幅  $b$ :  $\log K$

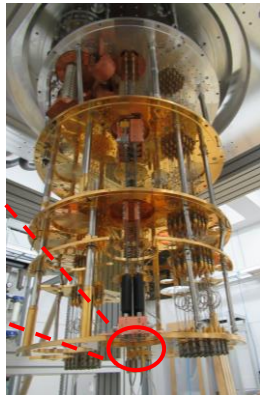
- 送信されるPaulimaskは共通なので  
冷凍機内への通信バンド幅は $M$ に非依存
- アーキテクチャ全体の消費電力は $O(L \times KN^2/T') \sim O(M^2/T)$ でスケール

# 発表内容

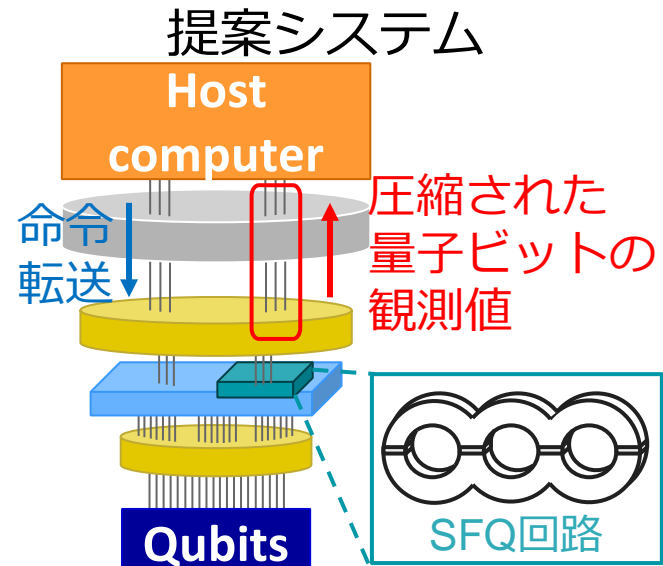
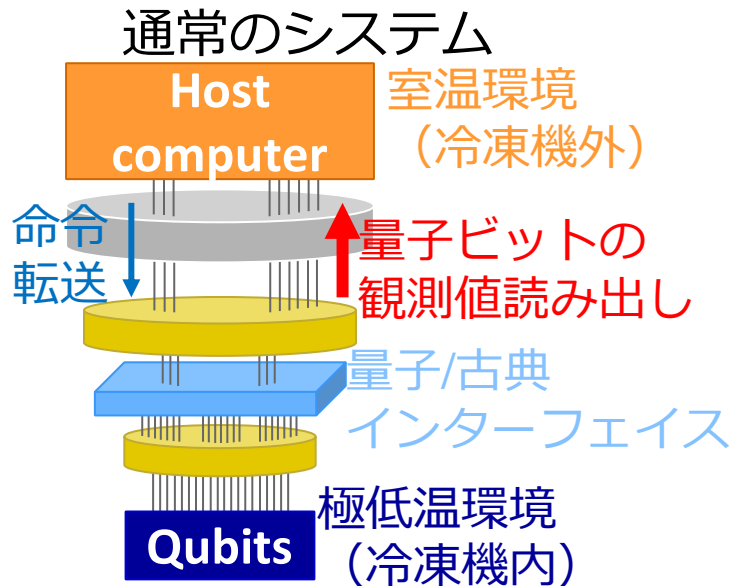
- 発表概要 p2~6
- 背景 p7~9
- 変分量子アルゴリズムの期待値計算 p10~14
- 提案アーキテクチャ p15~17
- 評価結果 p18~21
- まとめ p22~23

# 発表内容まとめ

## 希釈冷凍機と量子ビット



Copyright;  
RIKEN Center for Quantum Computing



- 超伝導量子計算機は冷凍機内外にまたがる大量の配線を必要とする
- 変分量子アルゴリズムにおいては観測値読み出しのバンド幅が支配的
- 提案: カウンタベースの処理で読み出しバンド幅を減らし、ケーブルを削減
  - 極低温環境で動作する超伝導デジタル回路であるSFQ回路を用いて実装
  - 特に複数の変分量子アルゴリズムを並列実行する場合に有効