

# 変分量子アルゴリズム向け 極低温超伝導デジタル回路アーキテクチャ

上野のresearchmapで資料公開中

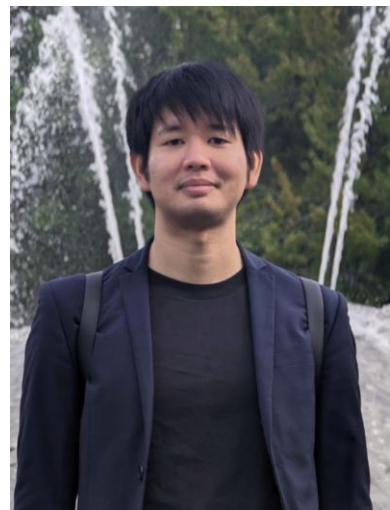
arXiv2409.07847の内容に基づく

理化学研究所 量子コンピュータ研究センター  
基礎科学特別研究員  
上野 洋典

# 上野 洋典 (うえの ようすけ)

## ● 経歴

- 2015.4~2017.3: 東大工学部 計数工学科
- 2017.4~2022.3: 東大情報理工 システム情報学専攻 中村研
  - 計算機アーキテクチャ、省電力計算
  - 博論: 超伝導古典回路を用いた量子誤り訂正
- 2022.5~2023.2: ミュンヘン工科大学 訪問研究員
  - HPC、アーキテクチャ、量子-HPC連携
- 2023.4~現在: 理研量子コンピュータ研究センター  
基礎科学特別研究員



@Quantum week 2024

## ● 研究対象、興味

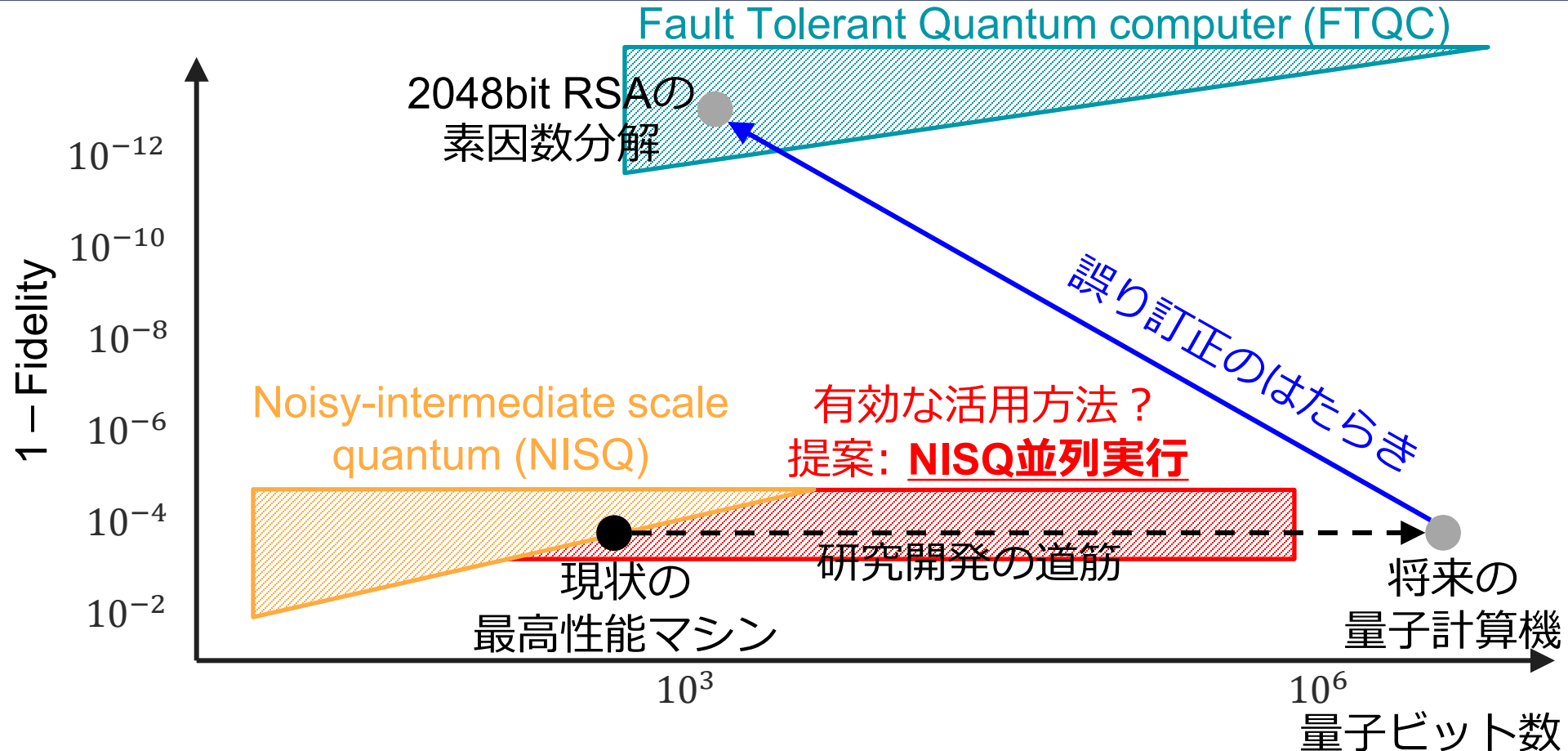
- 計算機アーキテクチャ、超伝導古典 (SFQ) 回路、  
誤り耐性量子計算

## ● 物理の方々に囲まれつつ計算機アーキテクチャやっています

# 発表内容

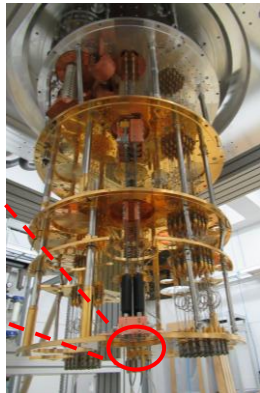
- 発表概要 p3~8
- 背景 p9~11
- 変分量子アルゴリズムの期待値計算 p12~16
- 提案アーキテクチャ p17~20
- 評価結果 p21~25
- まとめ p26~27

# 量子ビットのエラーと誤り訂正

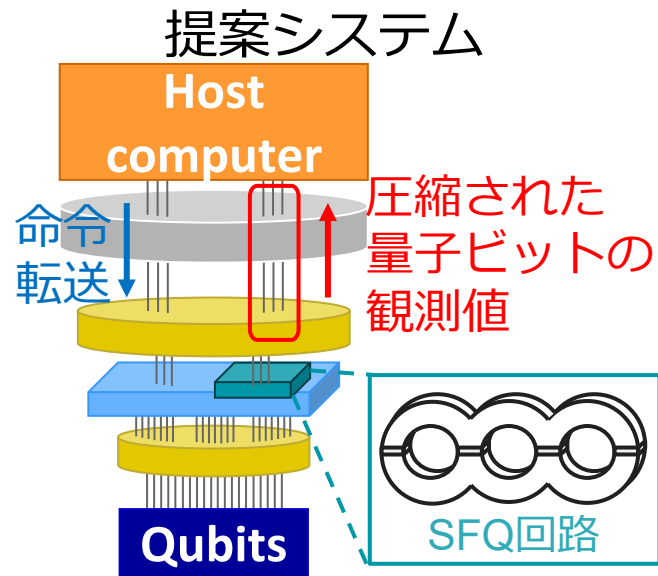
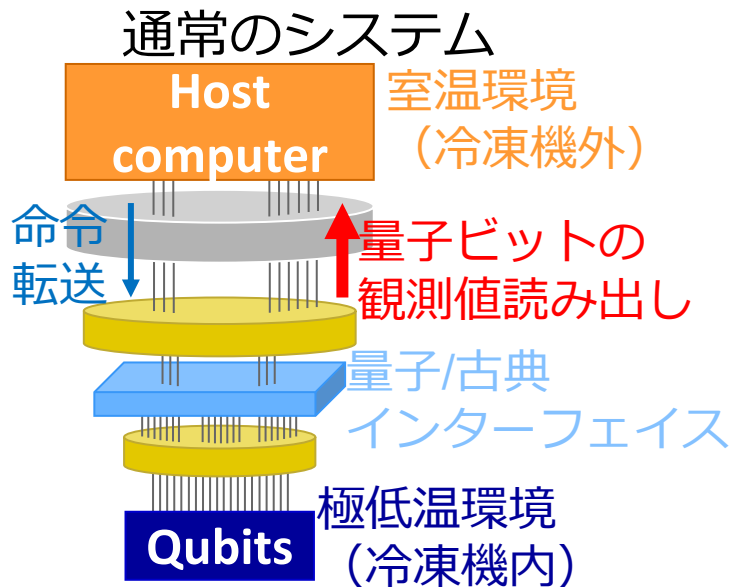


# 発表概要: 提案するシステムとねらい

## 希釈冷凍機と 量子ビット

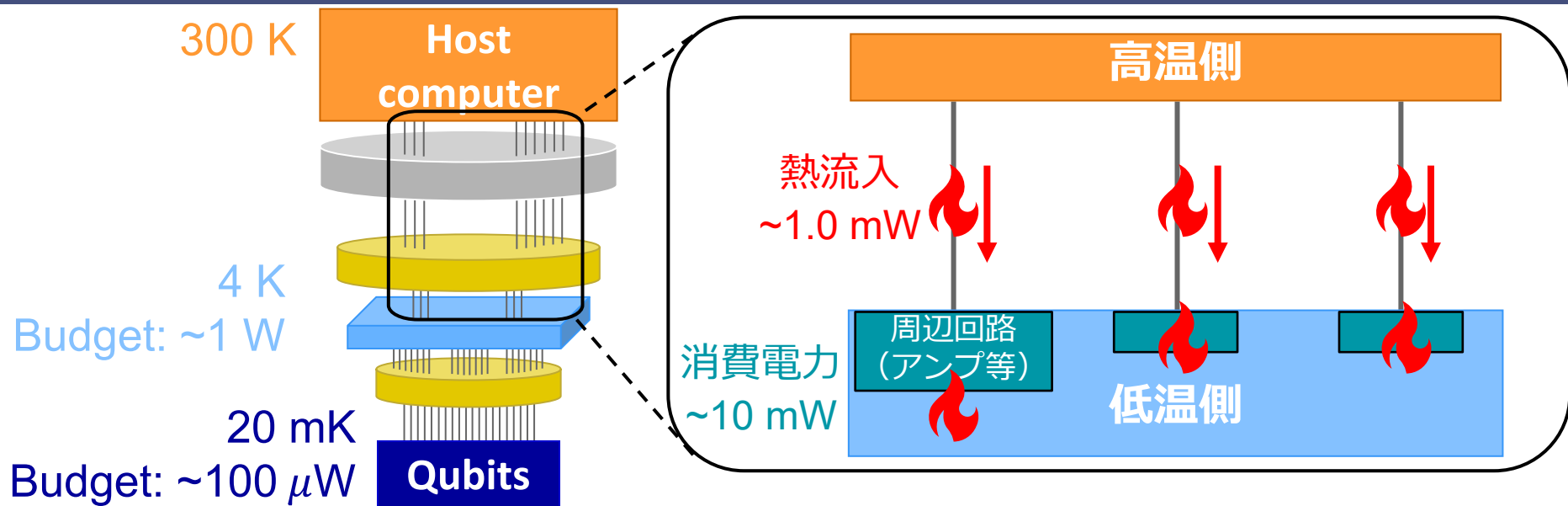


Copyright;  
RIKEN Center for Quantum Computing



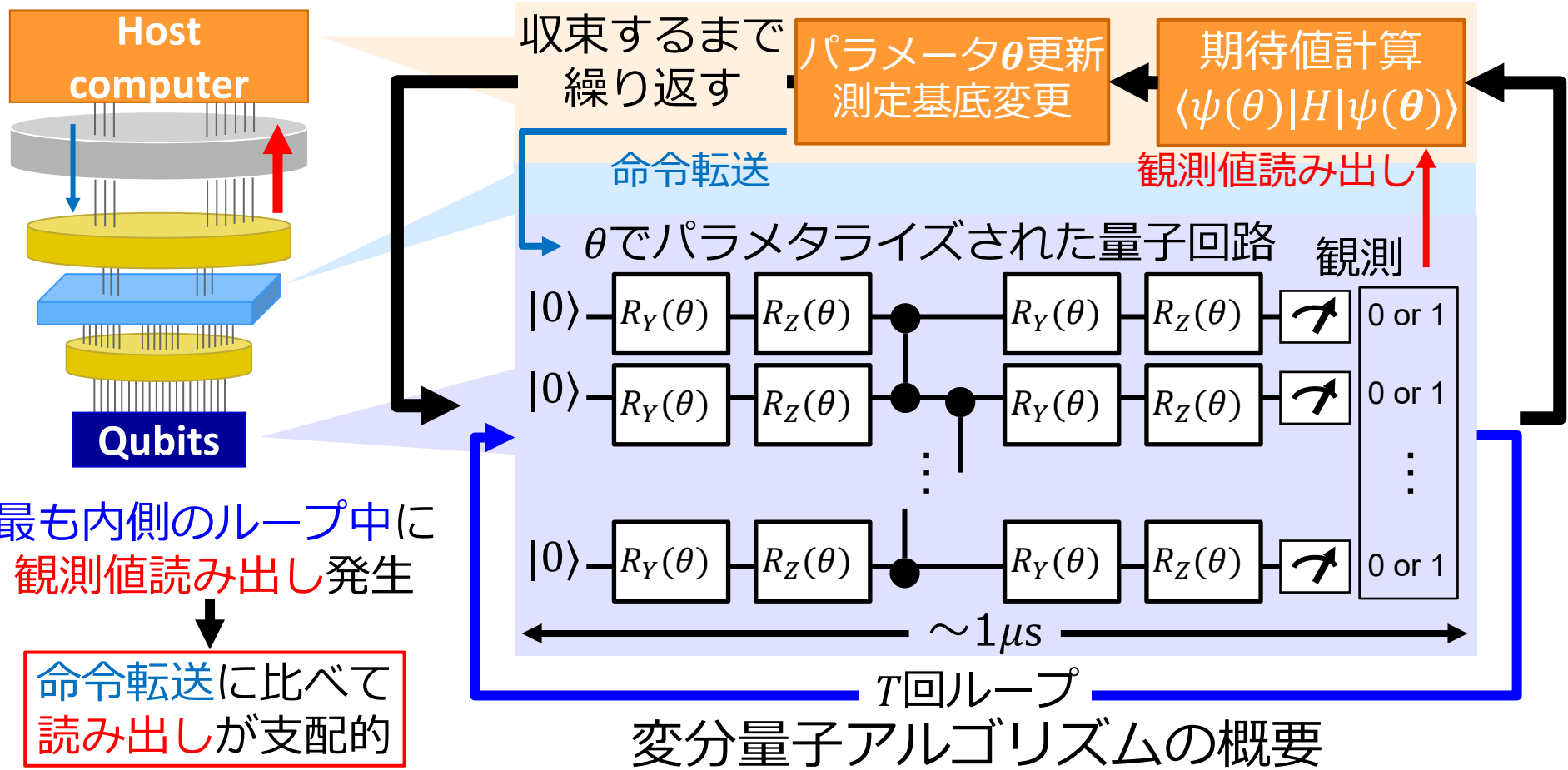
- 超伝導量子計算機は冷凍機内外にまたがる大量の配線を必要とする
- 変分量子アルゴリズムにおいては観測値読み出しのバンド幅が支配的
- 提案: カウンタベースの処理で読み出しバンド幅を減らし、ケーブルを削減
  - 極低温環境で動作する超伝導デジタル回路であるSFQ回路を用いて実装
  - 特に複数の変分量子アルゴリズムを並列実行する場合に有効

# 発表概要：なぜ冷凍機内外の配線が問題か？

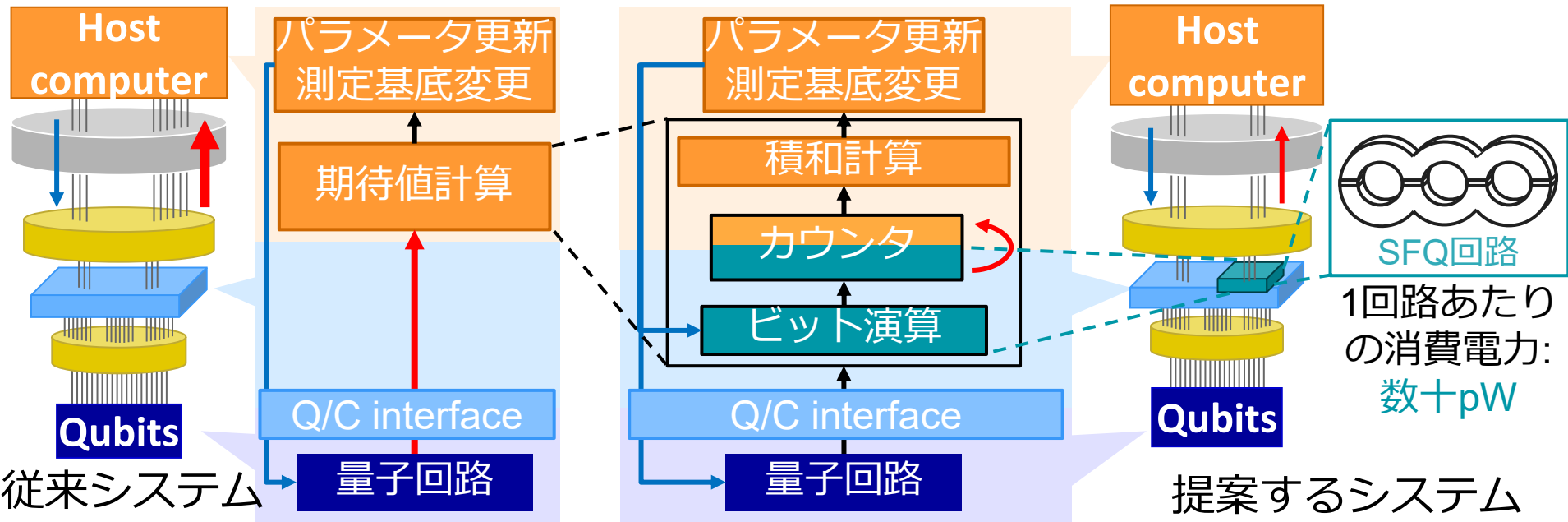


- 希釈冷凍機の冷却能力に限界がある
- 配線により生じる熱がボトルネックと成りうる
  - 配線を通じた極低温環境への熱流入
  - 配線に付随する周辺回路の消費電力（発熱）

# 発表概要：なぜ読み出しバンド幅が支配的か？



# 発表概要: なぜカウンタによる情報圧縮が有効か？



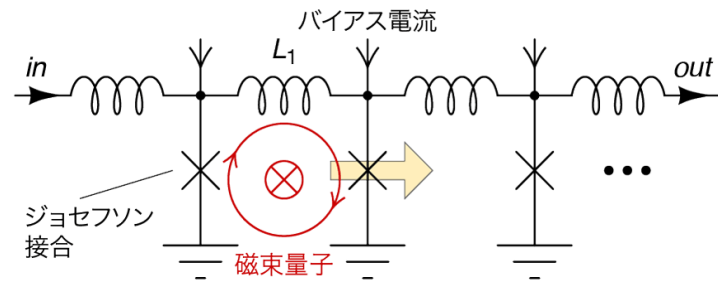
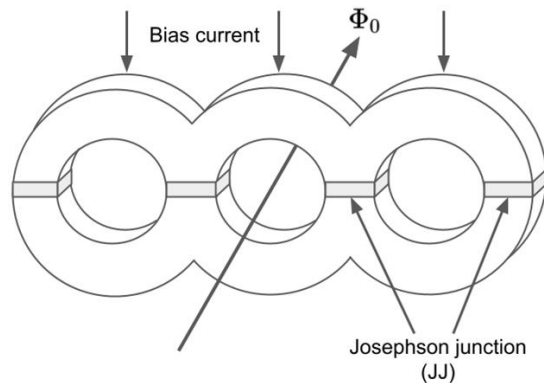
- 期待値計算の一部はビット演算結果のカウントで実現できる
- 常温環境-極低温環境間にまたがるカウンタで期待値計算
  - 常温環境への通信バンド幅をカウンタの極低温部のビット幅に対して指数的に低減



# 発表内容

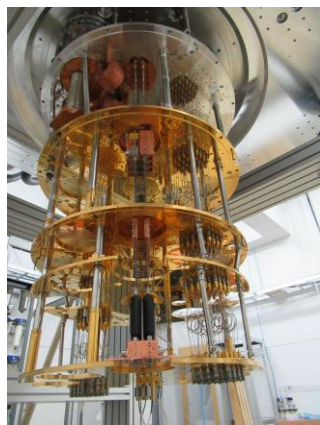
- 発表概要 p3~8
- 背景 p9~11
- 変分量子アルゴリズムの期待値計算 p12~16
- 提案アーキテクチャ p17~20
- 評価結果 p21~25
- まとめ p26~27

# 単一磁束量子回路 (SFQ回路)

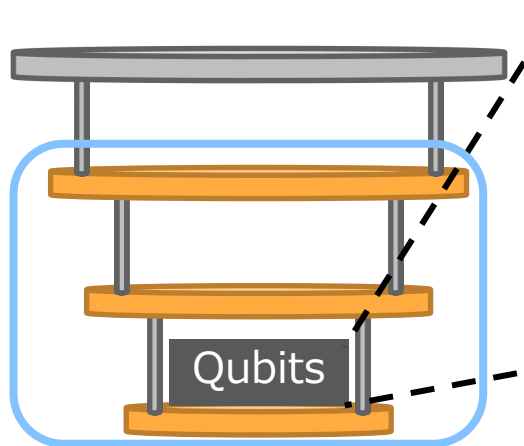


- 超伝導リング内の磁束量子の有無で0 or 1を表現
- 4K程度の極低温環境でのみ動作
- CMOSに比べて高速・低消費電力
- 浮動小数点演算、大規模RAMは高コスト
  - ビット演算およびカウンタ回路であれば低消費電力で実現可能

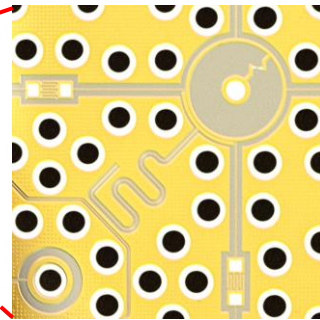
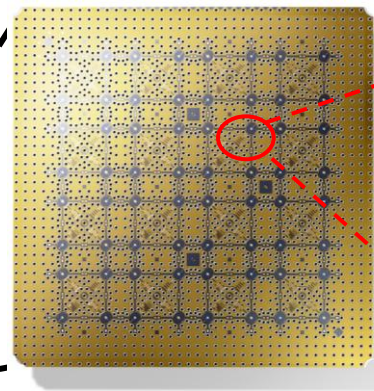
# 超伝導量子ビット



希釈冷凍機



極低温環境 (20mK~4K)



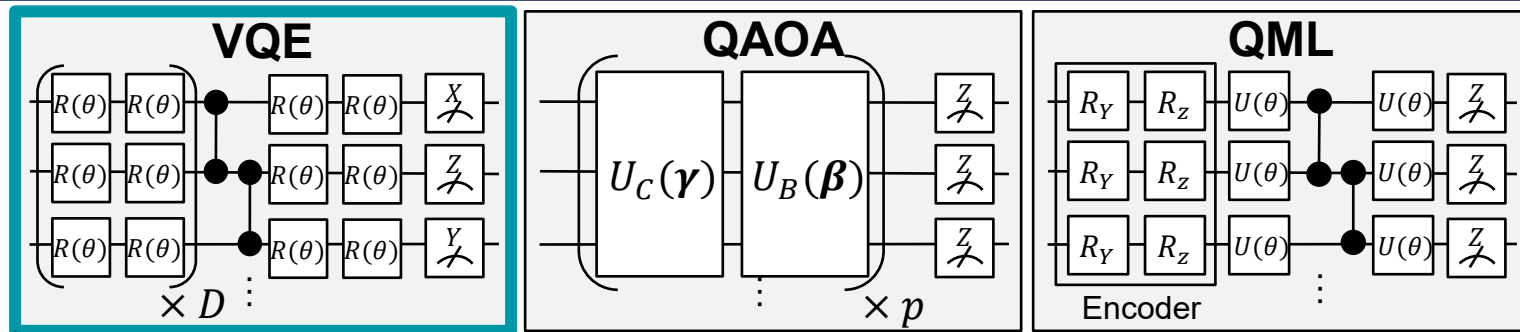
Copyright; RIKEN Center for Quantum Computing

- 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

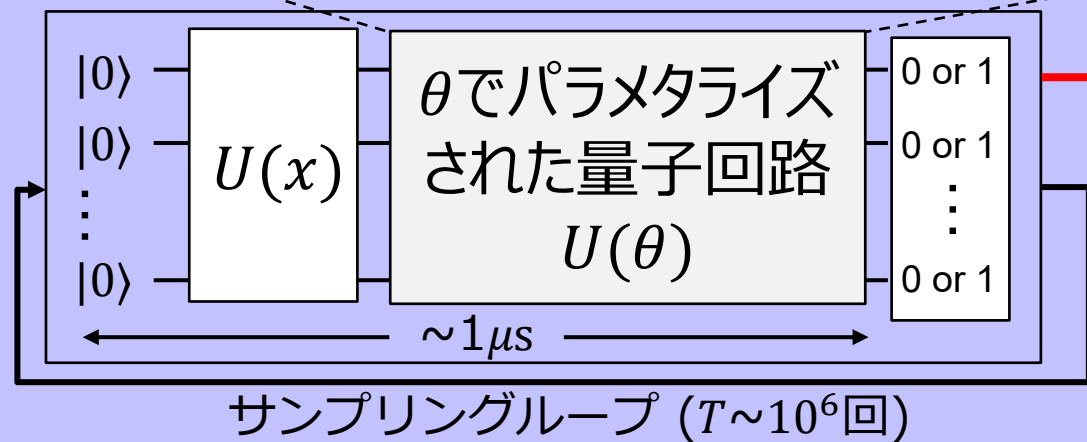
# 発表内容

- 発表概要 p3~8
- 背景 p9~11
- 変分量子アルゴリズムの期待値計算 p12~16
- 提案アーキテクチャ p17~20
- 評価結果 p21~25
- まとめ p26~27

# 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

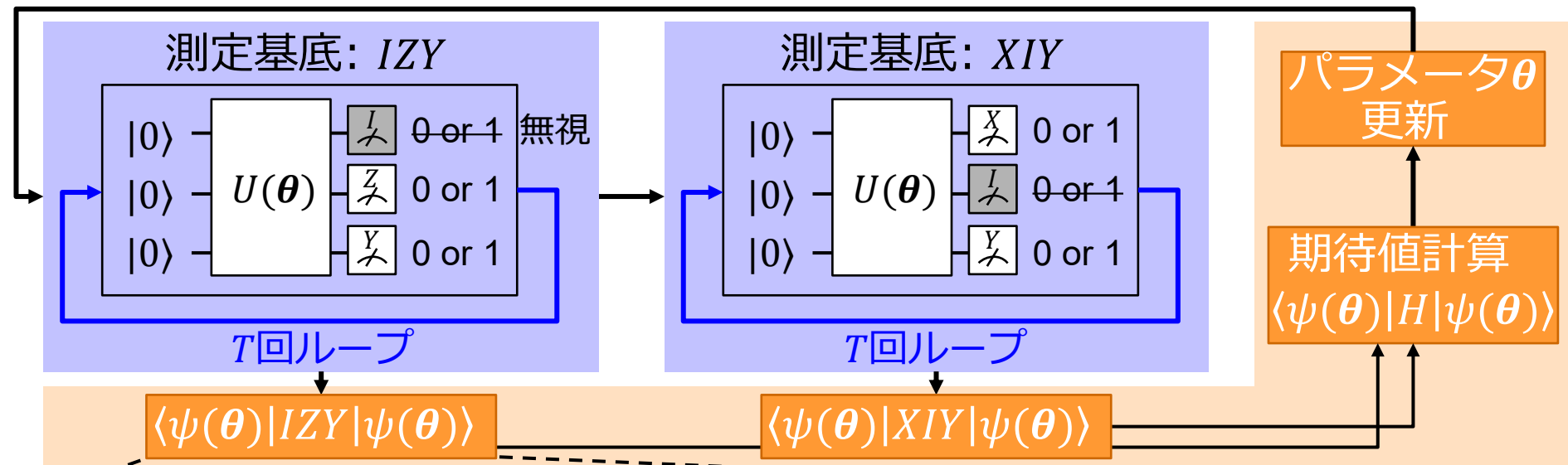
$$H = \sum w_i P_i$$

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: $H = w_1 IZY + w_2 XIY$ )



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

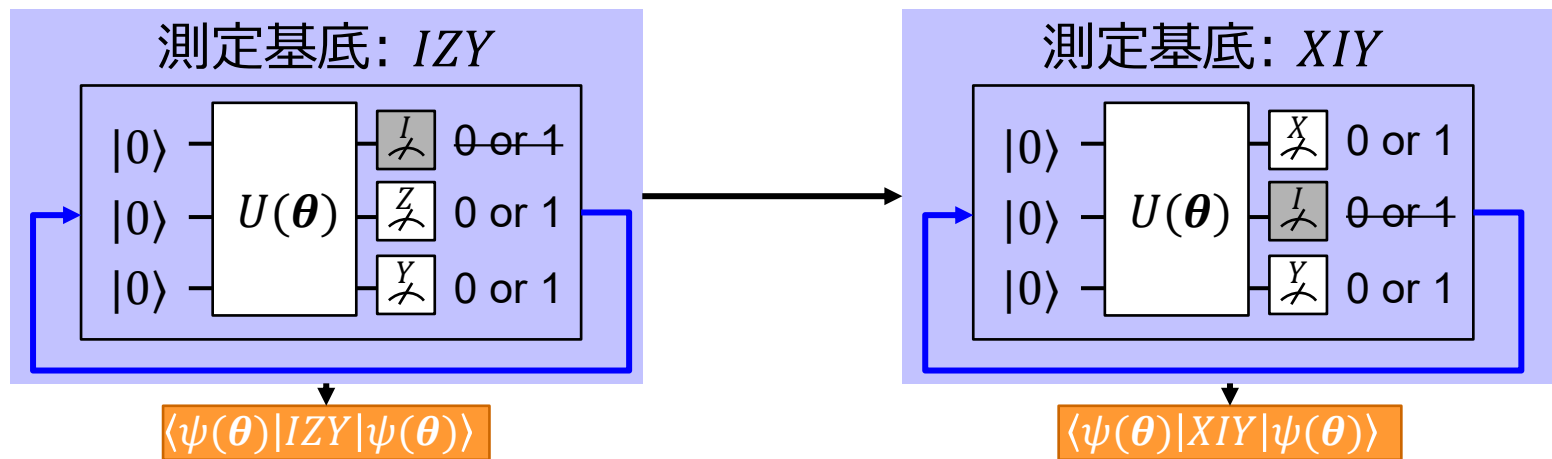
$T$ 回のうち  
観測値の和が奇数だった回数

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

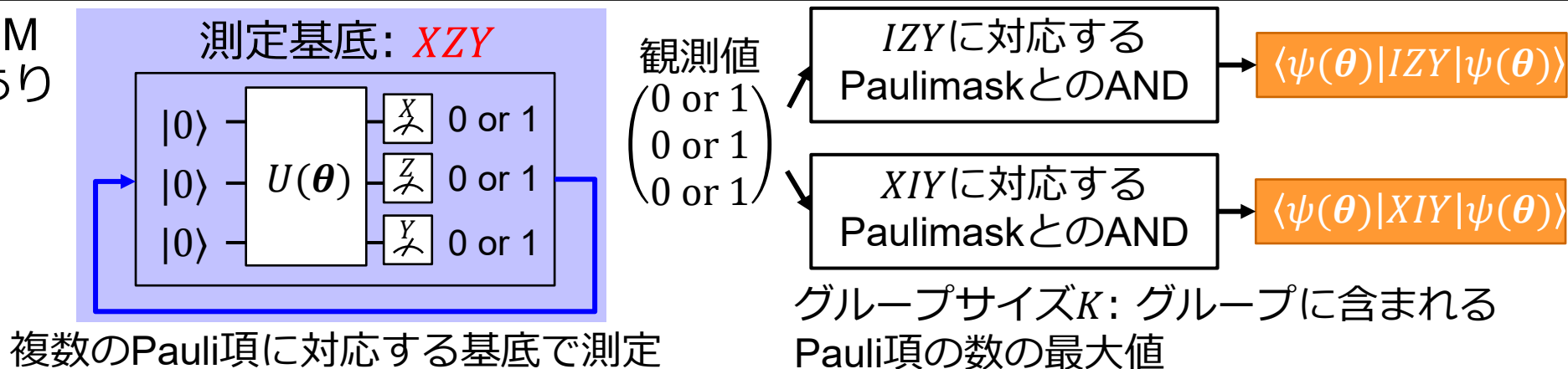
ドット積・剰余の結果をカウンティング

# Group measurement (GM)

GM  
なし



GM  
あり

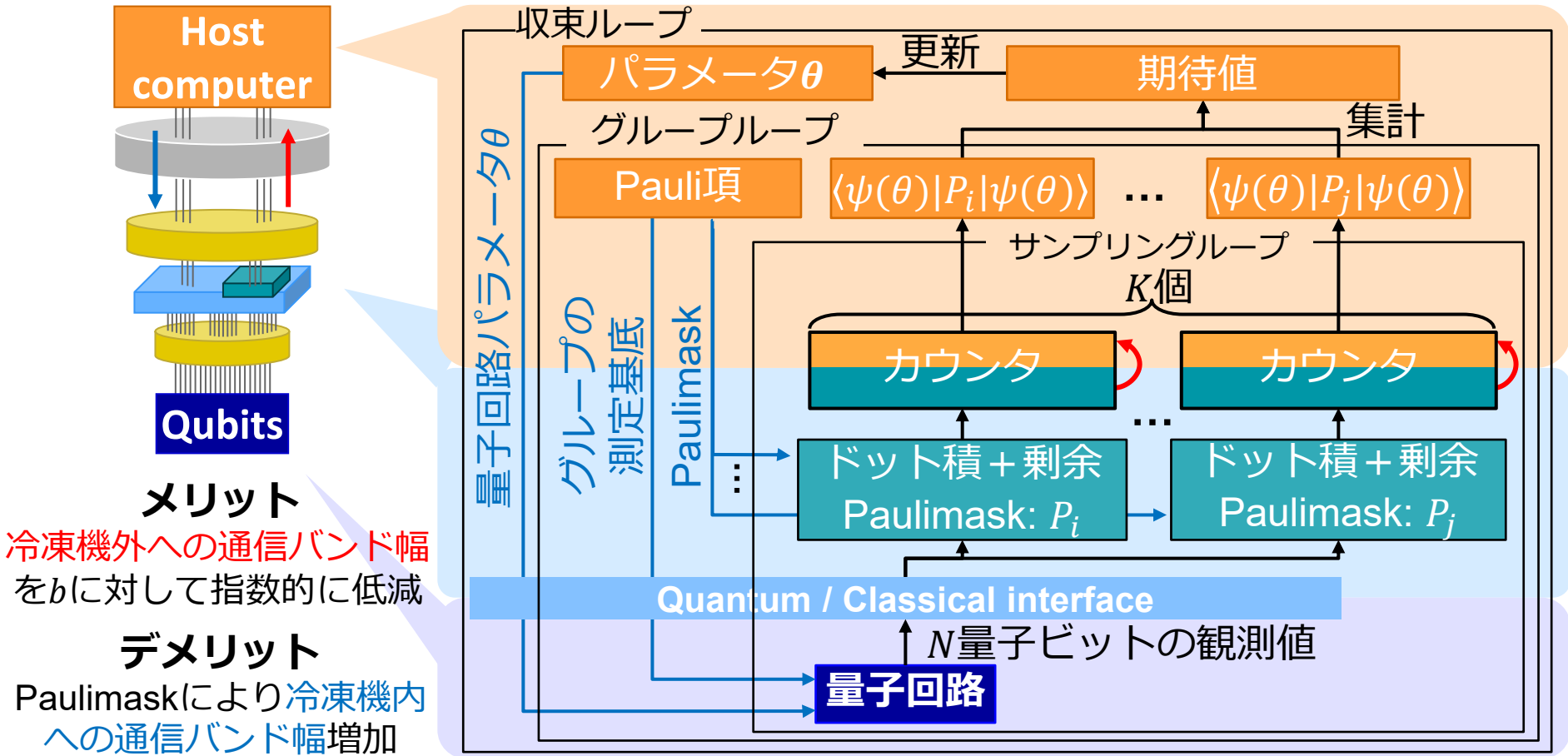




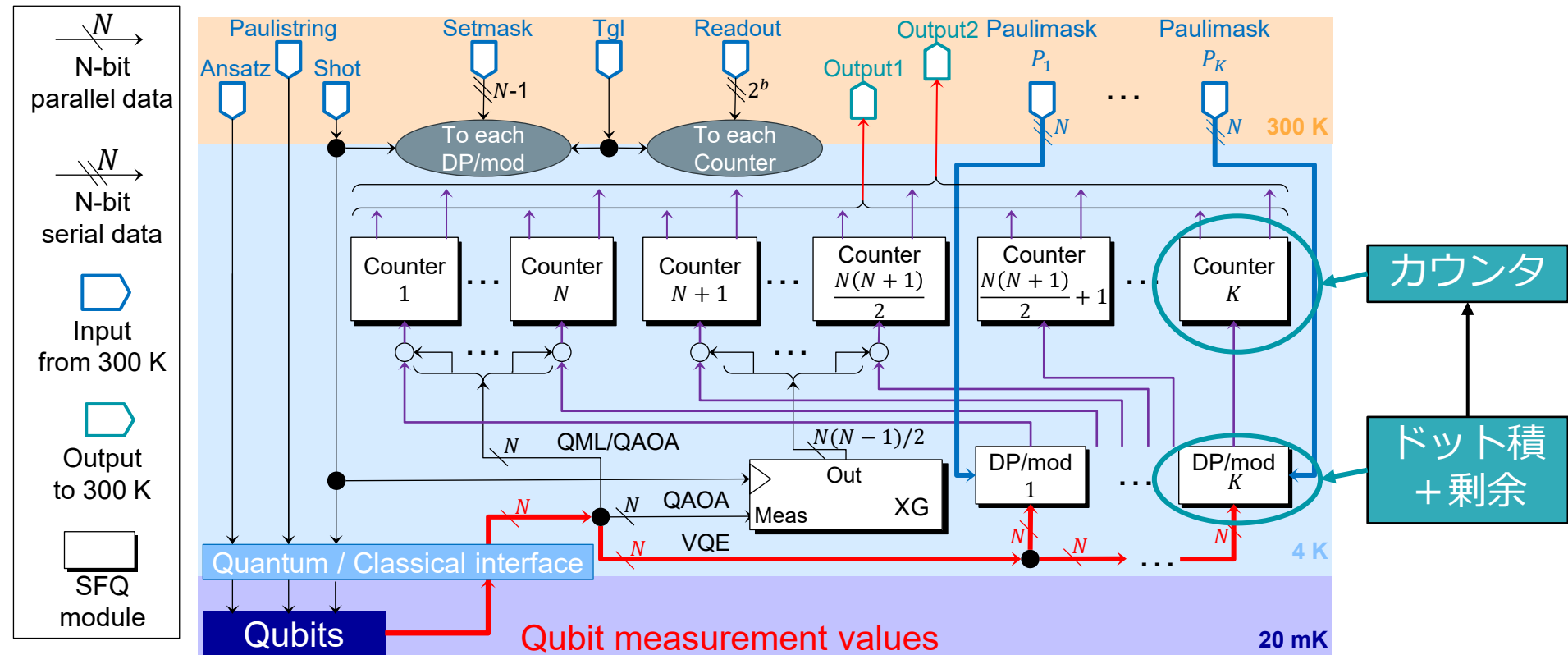
# 発表内容

- 発表概要 p3~8
- 背景 p9~11
- 変分量子アルゴリズムの期待値計算 p12~16
- 提案アーキテクチャ p17~20
- 評価結果 p21~25
- まとめ p26~27

# 提案アーキテクチャの概要



# 提案アーキテクチャのSFQ回路による実装



# セルライブラリを用いたSFQ回路による設計

$N$ : 量子ビット数  $K$ : グループサイズ  $T$ : サンプリング回数  $b$ : カウンタのビット幅

Cell	JJs	BC (mA)	DP/mod		Counter		XG (for QAOA)	Other		
			SP	DM	SB	TC (×2)		VQE	QAOA	QML
Splitter	3	0.30	$2(N-1)$	$N-1$	4	$2(b-1)$	$3N(N-1)/2$	$K(N+3)$	$N+1$	$N$
Merger	7	0.88		$N-1$	2	$2b$			$N(N+1)/2$	$N$
RTFF	13	0.808		1	1					
T1	12	0.74			1					
NDRO	11	1.112			$N$					
NDROC2	33	3.464	$N$	2	$N(N-1)/2$					
D2FF	12	0.944								
XOR	11	1.068								
Total BC (mA)			$1.5N-0.6$	$2.2N-0.44$	10.7	$2.2b-0.60$	$0.98N(N-1)$	$0.3K(N+3)$	$(N+1)(0.44N+0.3)$	$1.2N$

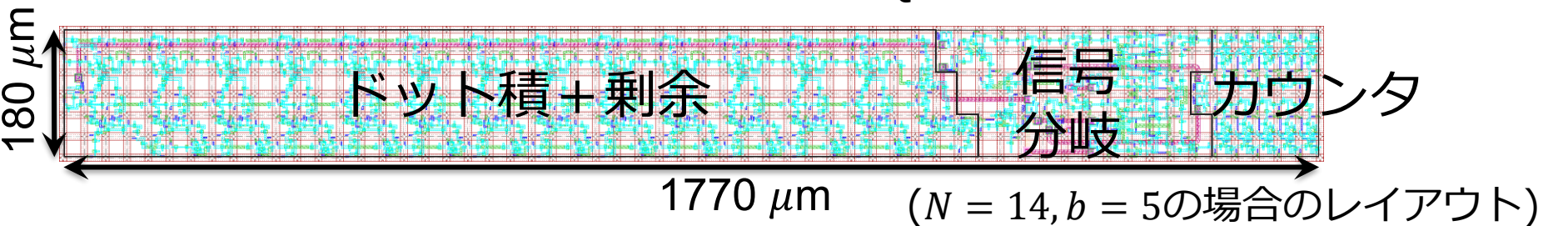
カウンタ+ドット積・剰余1つの消費電力

$$P_{unit} \approx 6.5N(1.5N - 0.6)/T \text{ (pW)}$$

アーキテクチャ全体の消費電力

$$P_{all} \approx P_{unit} \times K \sim O(KN^2/T)$$

ERSFQ、動作周波数1.56MHzを想定

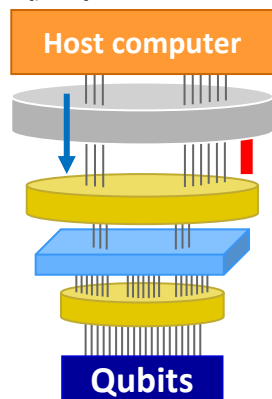


# 発表内容

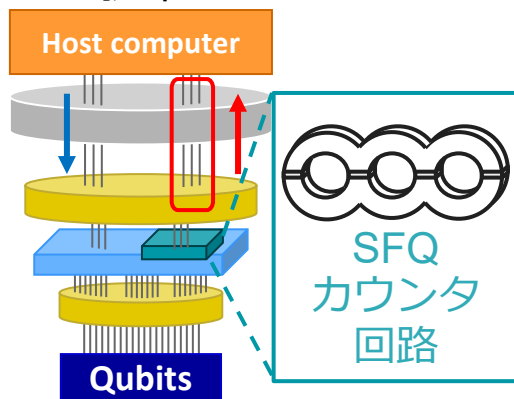
- 発表概要 p3~8
- 背景 p9~11
- 変分量子アルゴリズムの期待値計算 p12~16
- 提案アーキテクチャ p17~20
- 評価結果 p21~25
- まとめ p26~27

# 評価方法

従来システム



提案システム



## ケーブルのパラメータ

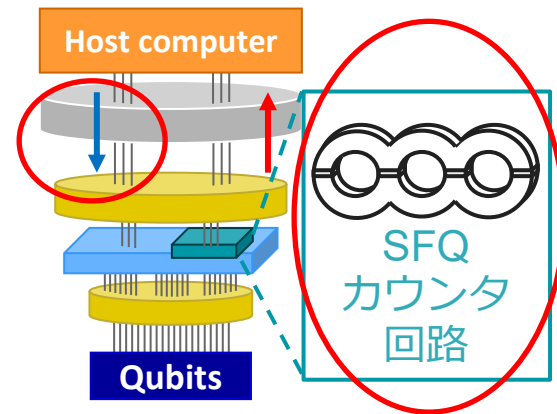
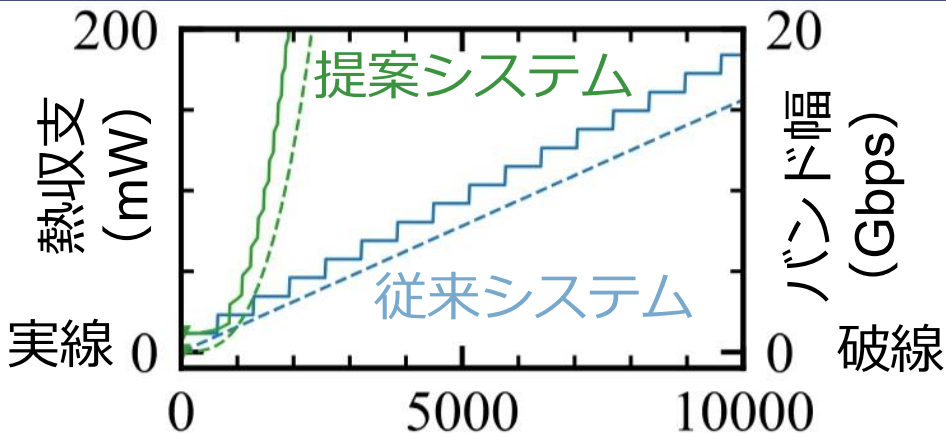
バンド幅: 1.0 Gbps / 本

熱流入: 1.0 mW / 本

アンプ消費電力: 10.5 mW / 本

- 各システムで通信バンド幅と熱収支を比較
- 通信バンド幅
  - 従来: **量子ビット観測値読み出し**
  - 提案: **Paulimask送信** + **圧縮された量子ビット観測値読み出し**
- 熱収支
  - 従来: ケーブルによる熱流入 + アンプ消費電力
  - 提案: ケーブルによる熱流入 + アンプ消費電力 + **カウンタ回路消費電力**

# バンド幅と極低温環境の熱収支（単一実行）



マシンの量子ビット数（=実行するVQEのサイズ $N$ ）

- $N$ 量子ビットのマシン上で $N$ 量子ビットのVQEを実行する場合
  - グループサイズ $K$ は $K = N^2$ を想定
  - エラー率の観点から $N > 100$ のVQEの実行は現実的でない
- Paulimask送信にかかる通信バンド幅の影響大
- 提案アーキの消費電力も $O(KN^2/T) \sim O(N^4/T)$ でスケール

# VQEの並列実行

グループ内のPauli項

$\langle \psi(\theta) | IZY | \psi(\theta) \rangle$

$\langle \psi(\theta) | XIY | \psi(\theta) \rangle$

サンプリンググループ  $T' = T/L$

カウンタ+  
内積・剰余  
 $P_1 = IZY$

カウンタ+  
内積・剰余  
 $P_2 = XIY$

カウンタ+  
内積・剰余  
 $P_1 = IZY$

カウンタ+  
内積・剰余  
 $P_2 = XIY$

カウンタ+  
内積・剰余  
 $P_1 = IZY$

カウンタ+  
内積・剰余  
 $P_2 = XIY$

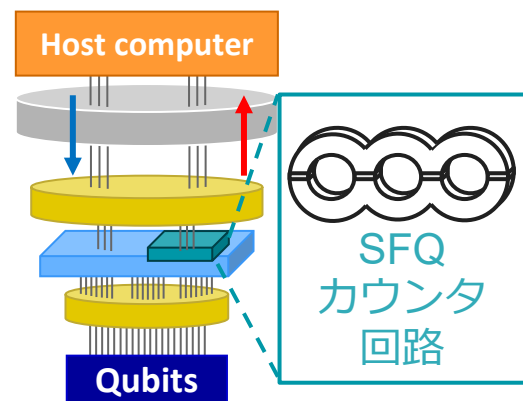
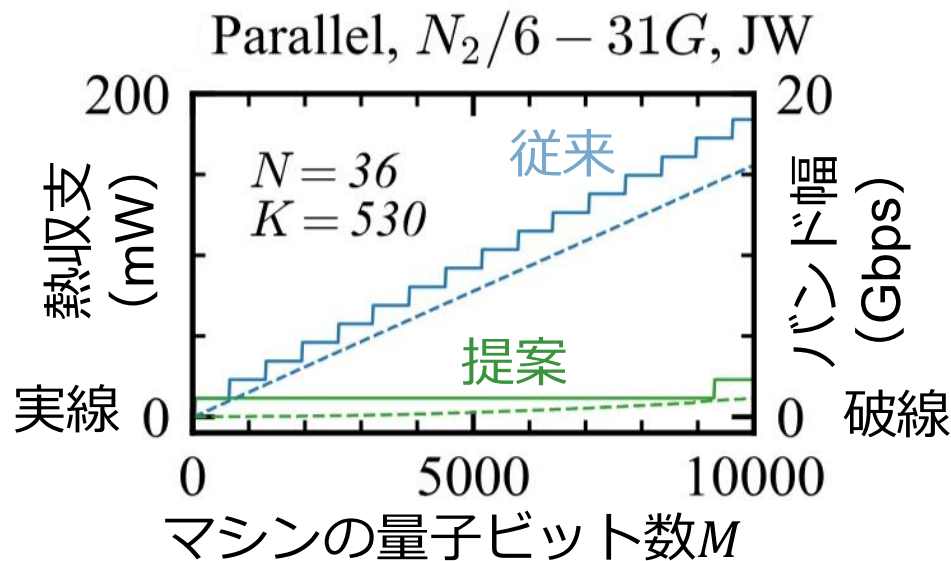
Quantum / Classical interface

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 Paulimask は共通



# バンド幅と極低温環境の熱収支（並列実行）



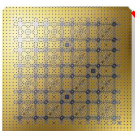
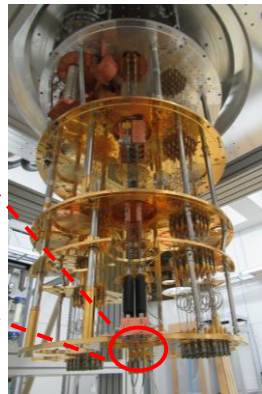
- 窒素分子  $N_2$  のVQE ( $N = 36, K = 530$ ) を並列実行する場合
- 送信されるPaulimaskは共通  $\rightarrow$  通信バンド幅は  $M$  に非依存
- 提案アーキの消費電力は  $O(L \times KN^2/T') \sim O(M^2/T)$  でスケール

# 発表内容

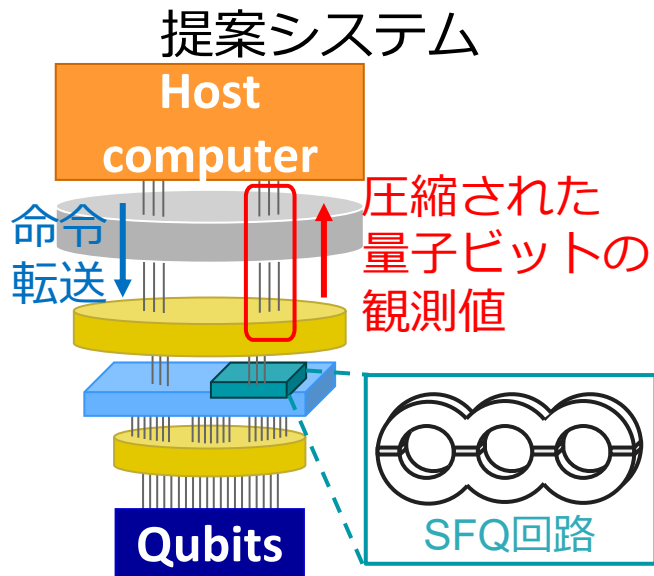
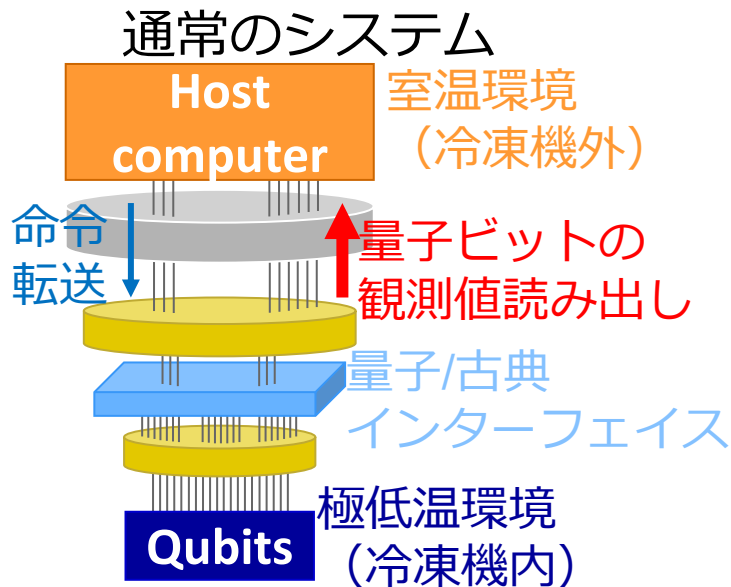
- 発表概要 p3~8
- 背景 p9~11
- 変分量子アルゴリズムの期待値計算 p12~16
- 提案アーキテクチャ p17~20
- 評価結果 p21~25
- まとめ p26~27

# 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