

SFQ回路を用いた リアルタイム量子誤り訂正

上野のresearchmapおよび個人HP (<https://yuteno.github.io/>)で資料公開
より詳細な発表資料 (英語) : <https://researchmap.jp/y-ueno/presentations/42717344>

理化学研究所量子コンピュータ研究センター
超伝導量子計算システム研究ユニット
基礎科学特別研究員
上野 洋典

自己紹介

● 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RQC 田淵ユニット 基礎特研究員



@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

What is **Computer architecture**?

- “*Computer Architecture* is the science and art of selecting and interconnecting hardware components to create computers that meet **functional**, **performance** and **cost** goals.”

- WWW Computer Architecture Page

建築（アーキテクチャ）とのアナロジー



計算機アーキテクチャ分野の研究対象

高
抽象度
低

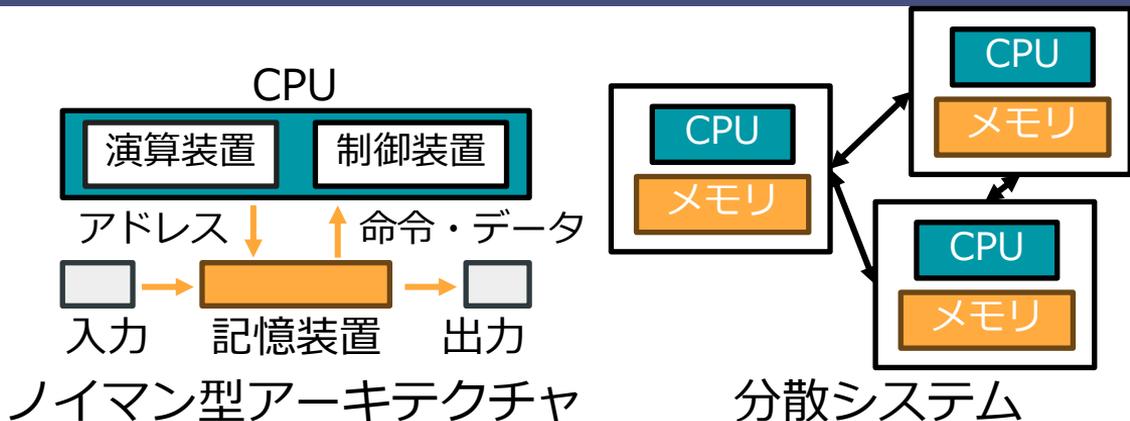
計算機全体の構成
計算機を取り巻く環境

システムアーキテクチャ
ノイマン型アーキテクチャ,
キャッシュ, 分散システム

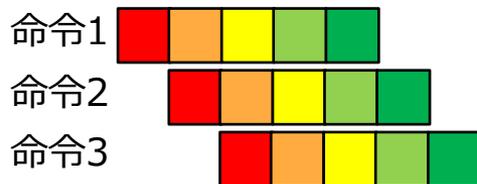
命令セットアーキテクチャ
(ISA)
RISC, CISC, VLIW

計算機の中身

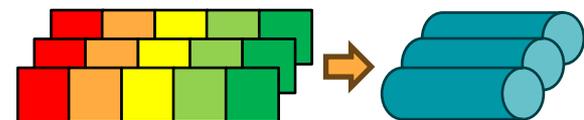
マイクロアーキテクチャ
CPU, パイプライン,
投機的実行



x86 (CISC) vs. RISC-V (RISC)

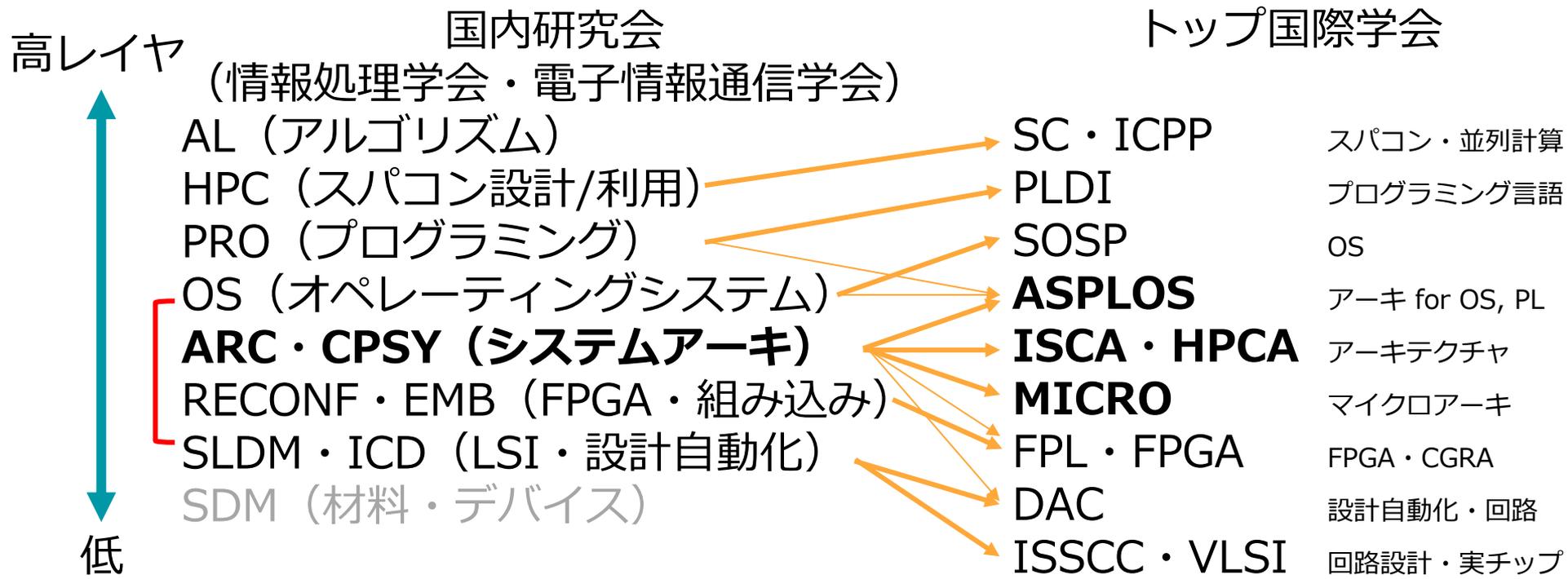


パイプライン



ベクトル演算器

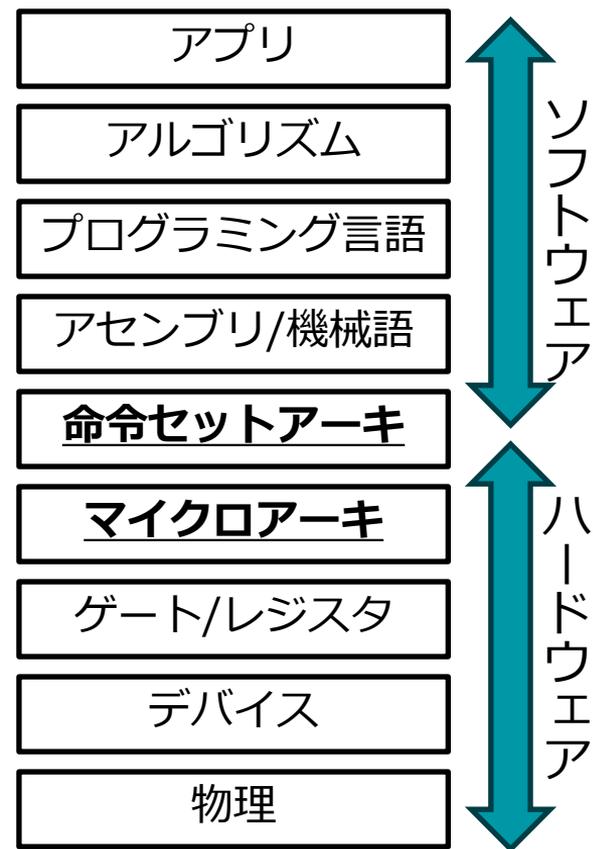
計算機アーキテクチャの隣接分野



上は計算機と不可分なソフトウェアまで
下はビットまで

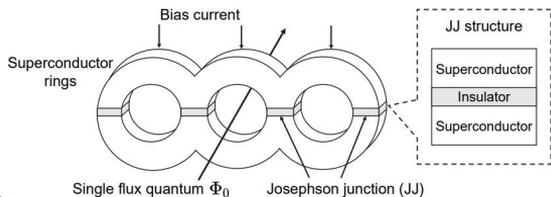
計算機アーキテクチャの役割

- 抽象化のレベルを適切に定める
 - プログラマが何を意識して何を意識しないか
- 上位、下位レイヤの変化に応じてコストを最小化しつつ計算機的设计を更新
- 各コンポーネントを統合して計算機全体としての性能見積もり、フィードバック
 - どこに何を押し付けるか決める
- 計算能力の継続的な向上の展望を示す

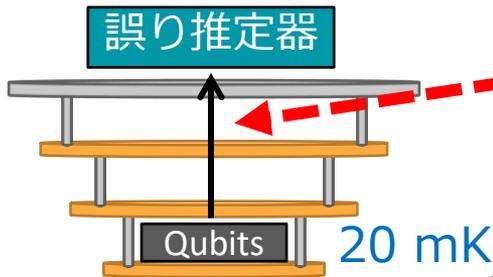


SFQ回路を用いたリアルタイム量子誤り訂正

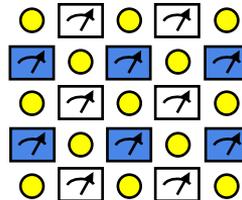
- 高速
- 低消費電力
- 冷凍機内でのみ動作
- メモリが高コスト



- 計算量的優位性
- ~~誤りが多い~~
- 冷凍機内でのみ動作

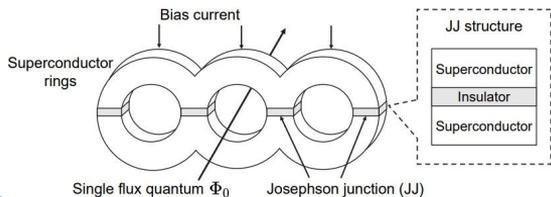


- 多項式のコストで誤りの指数的な低減
- 誤り推定 = グラフ処理
- 冷凍機内外の通信増

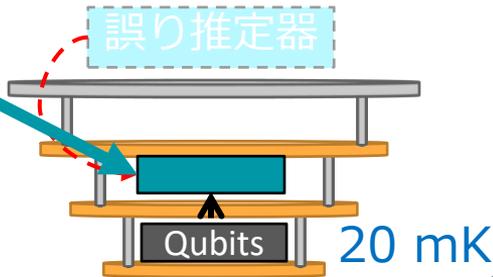


SFQ回路を用いたリアルタイム量子誤り訂正

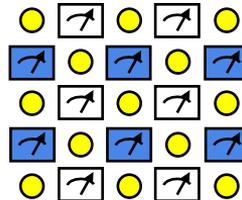
- 高速
- 低消費電力
- ~~冷凍機内でのみ動作~~
- メモリが高コスト



- 計算量的優位性
- ~~誤りが多い~~
- 冷凍機内でのみ動作

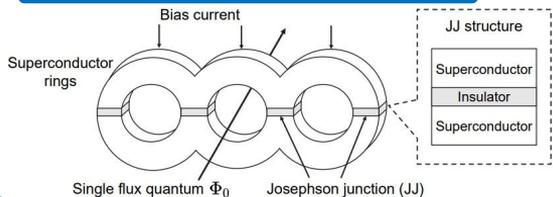


- 多項式のコストで誤りの指数的な低減
- 誤り推定 = グラフ処理
- ~~冷凍機内外の通信増~~

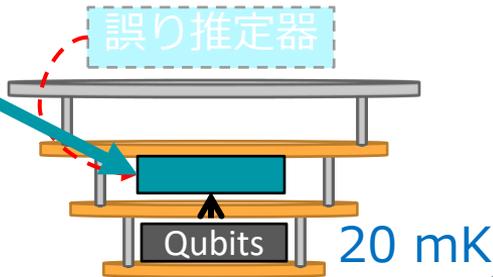


SFQ回路を用いたリアルタイム量子誤り訂正

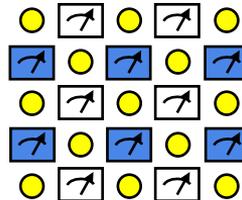
- 高速
- 低消費電力
- ~~冷凍機内でのみ動作~~
- **メモリが高コスト**



- 計算量的優位性
- ~~誤りが多い~~
- 冷凍機内でのみ動作



- 多項式のコストで誤りの指数的な低減
- 誤り推定 = **グラフ処理**
- ~~冷凍機内外の通信増~~

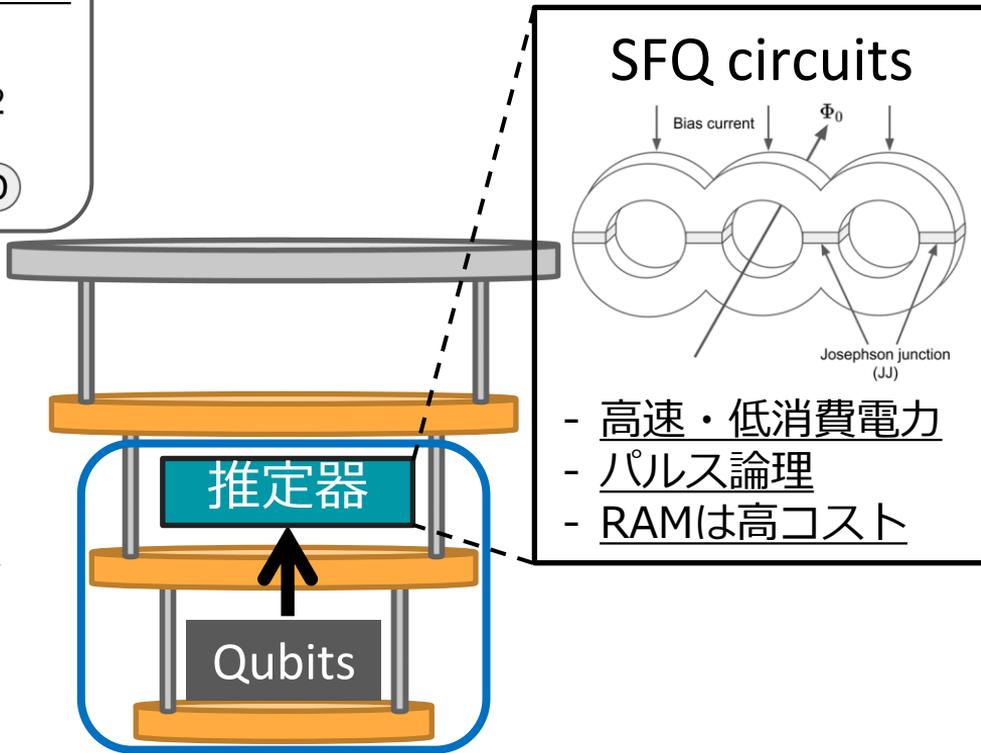
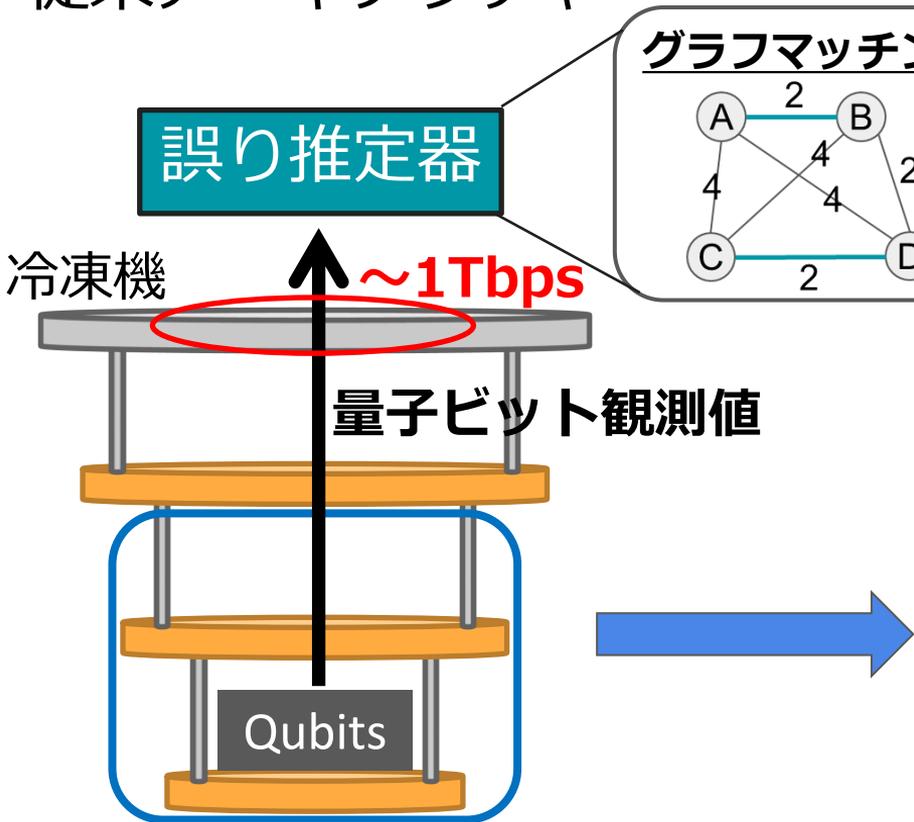


➡ **脳型計算**に着想を得た**分散処理方式の量子誤り推定器**を
アルゴリズム・ハードウェア協調設計により実現

SFQ回路を用いたリアルタイム量子誤り訂正

従来アーキテクチャ

提案アーキテクチャ

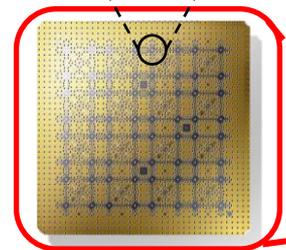
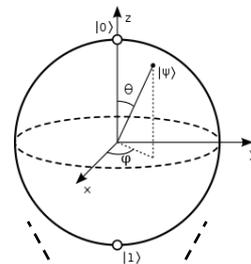


● 背景

- 超伝導誤り耐性量子計算機
- 表面符号
- 実用的な量子誤り訂正機構の満たすべき性質
- QECOOL : SFQ回路を用いた表面符号の誤り推定器
- QECOOLの拡張および最近の関連トピック
- まとめ

超伝導量子ビット

- 量子ビットの有望な実現方法の1つ
 - 極低温環境（希釈冷凍機内）で動作
- 通常の計算機に比べてエラー率が高い
 - 1回の操作で0.1~1%程度
 - X （ビット反転）と Z （位相）の 2種類のエラーが生じる
- 直接観測すると量子状態が破壊される
 - 間接的な測定によるエラー検出・訂正必要



理研RQCの64量子ビットチップ（左）と希釈冷凍機（右）

Copyright; RIKEN Center for Quantum Computing

誤り耐性超伝導量子計算機的主要な構成要素

デジタル
量子計算

論理命令



誤り訂正
プロセス

物理命令

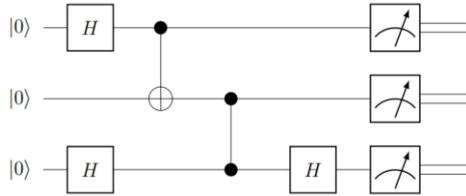


超伝導量子
プロセッサ

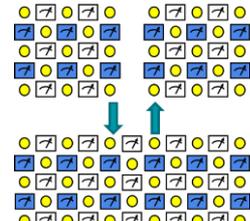
論理測定



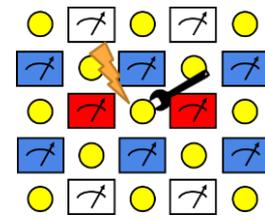
物理測定



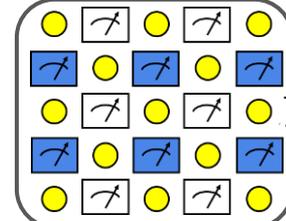
量子回路



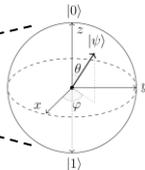
格子手術による
論理演算



表面符号の
誤り推定



表面符号による
符号化



物理量子ビット

要素
技術

素因数分解
量子化学計算

魔法状態蒸留回路

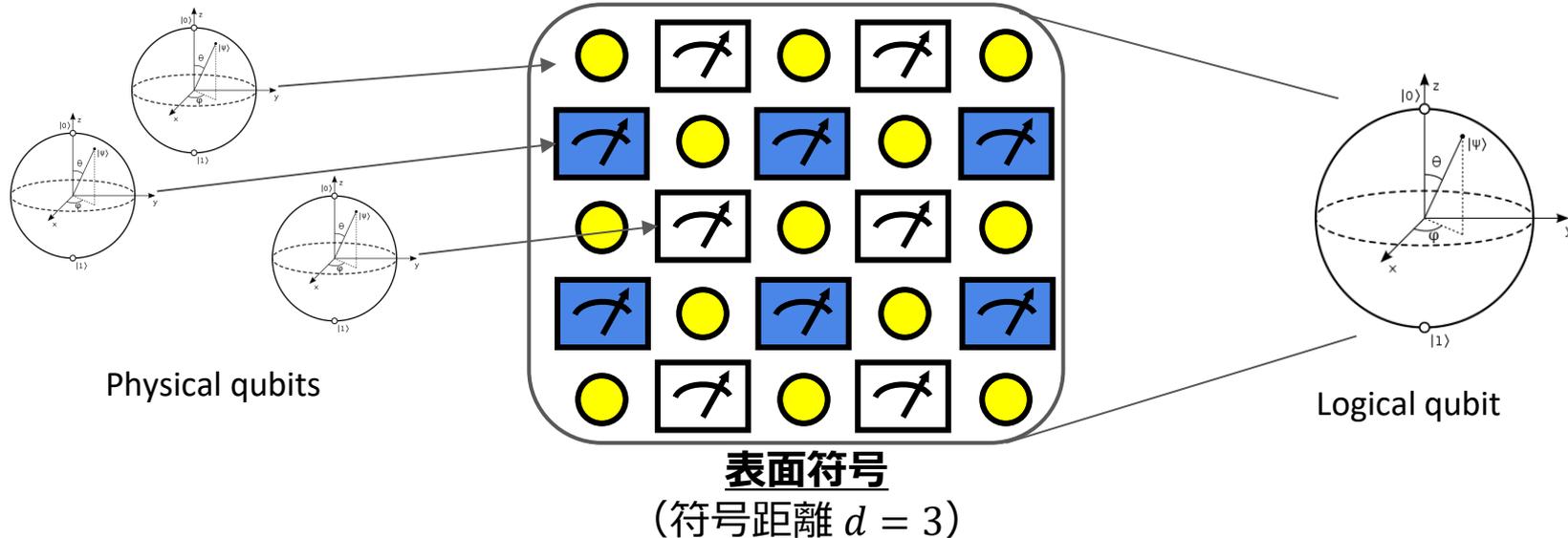
Blossom alg. ($O(n^3)$)
機械学習手法

高効率な符号化

1000+ qubitsマシン

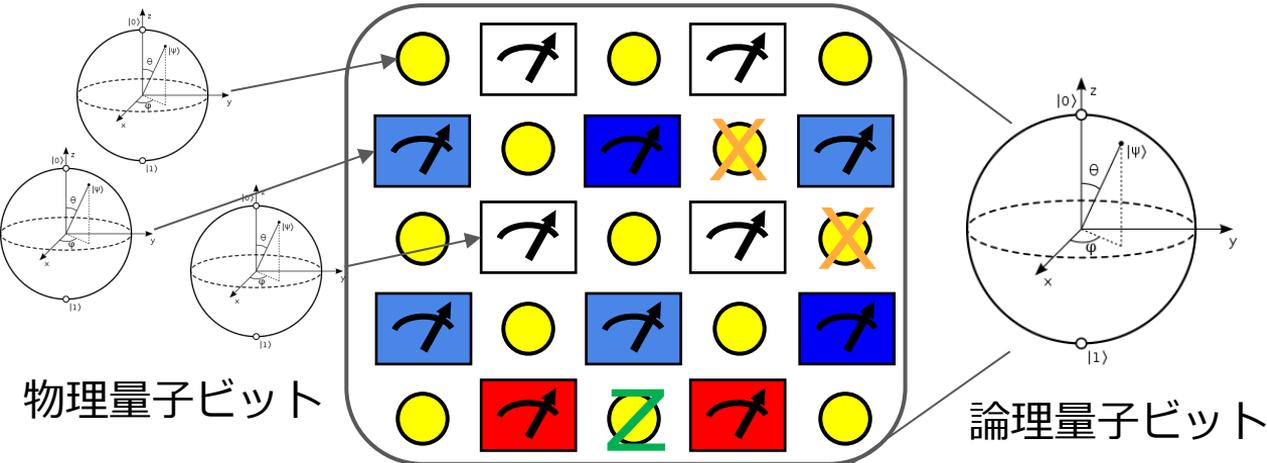
- 「いかにして効率的な誤り訂正プロセスを実現するか」
が誤り耐性量子計算の実現性の決め手
- 表面符号の誤り推定（復号） がボトルネック

量子誤り訂正符号: 表面符号



- 複数の物理量子ビットを冗長に組み合わせて論理量子ビットを表現
- 表面符号の誤り推定はグラフマッチング問題に帰着される
- → 古典計算機のアシストにより量子計算機の誤り耐性を向上！

表面符号の誤り推定の概要、古典との対比



	データ量子ビット	
		X/Zエラー
	補助量子ビット	
	(Zエラー検出)	
	補助量子ビット	
	(Xエラー検出)	

表面符号

(符号距離 $d = 3$)

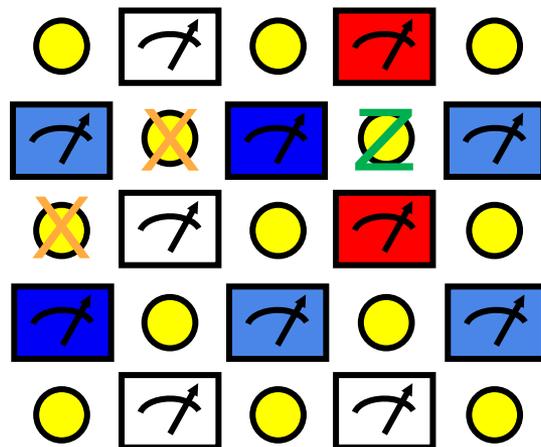
- データ量子ビット (論理状態) + 補助量子ビット (パリティチェック)
- 誤り推定 (復号) = エラーパリティ情報からエラーの種類・位置を推定

Cf. 古典計算機における
パリティビットを使った誤り訂正

1 0 0 -> 0 0 0
 $\begin{matrix} \vee & \vee \\ 1 & 0 \end{matrix}$

? ? ? -> ? ? ?
 $\begin{matrix} \vee & \vee \\ 1 & 1 \end{matrix}$

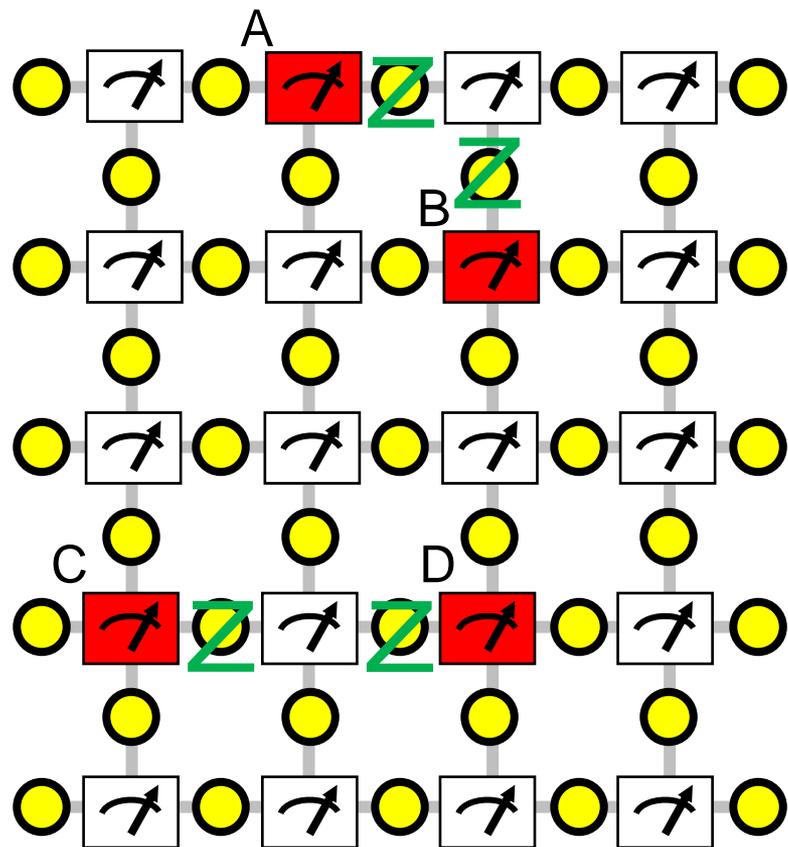
表面符号の機能



	データ量子ビット
	エラー
	補助量子ビット (Zエラー検出)
	補助量子ビット (Xエラー検出)

- 各補助量子ビットは隣接したデータ量子ビットの
パリティチェックに使われる
 - エラー鎖の端点のみが奇パリティ (ホットシンδροーム) になると期待される
- データ量子ビットのエラーを直接の観測なしに検出できる

表面符号の誤り推定 (復号)

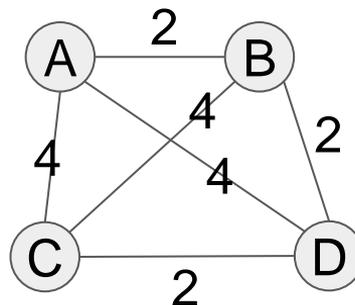


仮定

- XとZのエラーは独立に推定できる
- なるべく短いエラー鎖が生じる



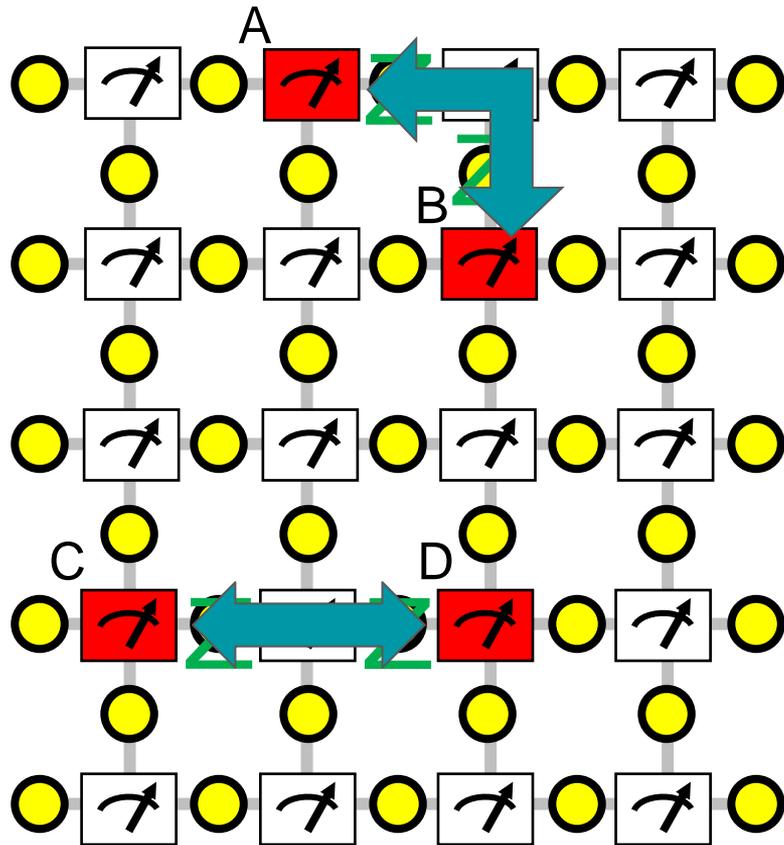
Minimum Weight Perfect Matching (MWPM)



V : Hot syndromes
 W_e : Manhattan distance

Exact solution: **Blossom algorithm ($O(n^3)$)**

表面符号の誤り推定 (復号)

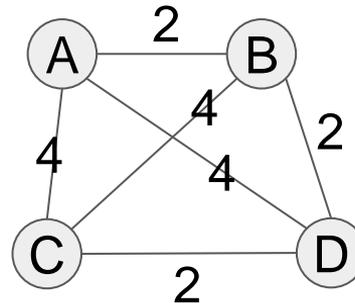


仮定

- XとZのエラーは独立に推定できる
- なるべく短いエラー鎖が生じる



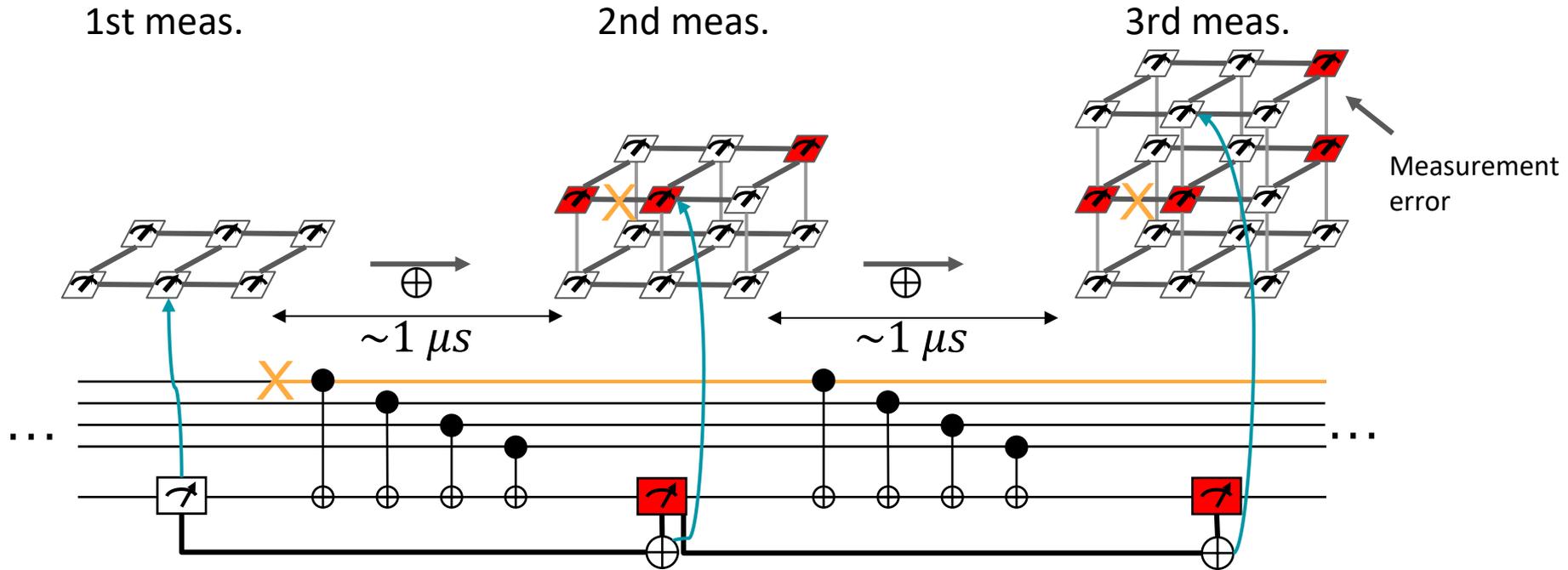
Minimum Weight Perfect Matching (MWPM)



V : Hot syndromes
 W_e : Manhattan distance

Exact solution: **Blossom algorithm ($O(n^3)$)**

補助量子ビットの観測エラー



- 補助量子ビットに観測エラーが生じる場合は複数回観測を繰り返して3次元のシンδροーム格子を構築

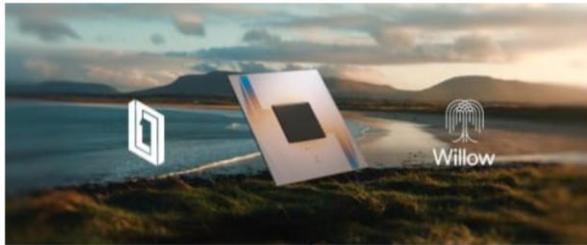
参考 : Google Willow

ニュース

Googleの量子チップ「Willow」、閾値以下の量子エラー訂正
世界初

清宮信志 2024年12月10日 13:21

X | ポスト | リスト | f | シェア | BI | はてブ | note | in | LinkedIn

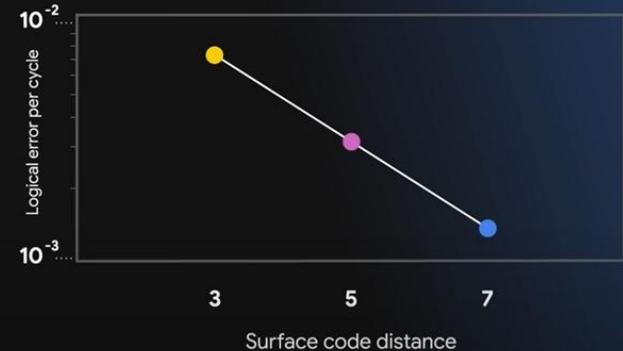


Googleは、新型量子チップ「Willow」を発表した。量子ビット数を増やしてスケールアップするにつれ、エラーを指数関数的に削減出来る画期的な技術を採用。30年にわたる課題を解決したとしており、最新のスーパーコンピュータで10の25乗と

出典: Impress watch

<https://www.watch.impress.co.jp/docs/news/1646267.html>

Quantum Error
Correction (QEC)
Below Threshold



出典: Google

<https://blog.google/technology/research/google-willow-quantum-chip/>

- 超伝導量子ビット + 表面符号で論理エラー率の低減を確認
- 誤り推定は事後的にソフトウェアで実行している

発表内容

- 背景
 - 超伝導誤り耐性量子計算機
 - 表面符号
- 実用的な量子誤り訂正機構の満たすべき性質
- QECOOL : SFQ回路を用いた表面符号の誤り推定器
- QECOOLの拡張および最近の関連トピック
- まとめ

実用的な誤り推定器の満たすべき性質

性質

1. 消費電力
 - 許容消費電力の限られた極低温環境で動作してほしい
2. レイテンシ QECOOL, DAC'21
 - 誤り訂正が遅いとエラーが蓄積し、量子計算全体の低速化につながる
3. 機能性 QULATIS, HPCA'22
 - 単一論理ビットだけでなく、論理演算実行時の誤り推定も行いたい
4. 精度 NEO-QEC, arXiv:2208.05758
 - 高いしきい値を持つことが好ましい

解決策

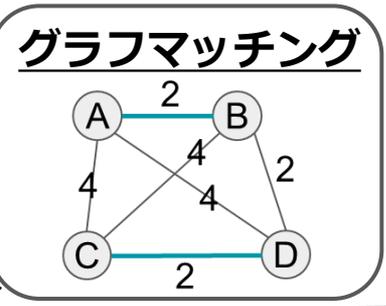
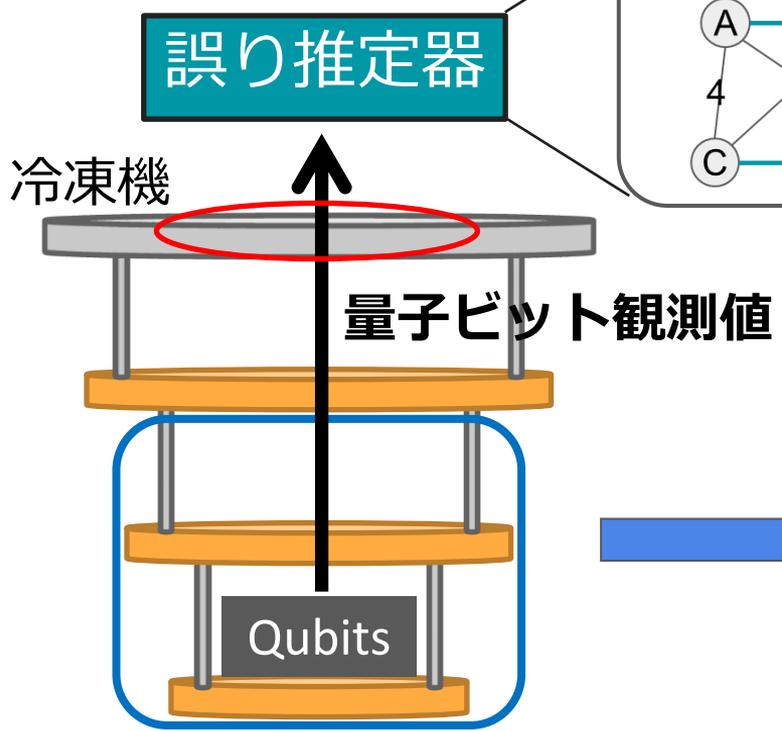
超伝導古典回路を用いた設計

オンライン誤り推定

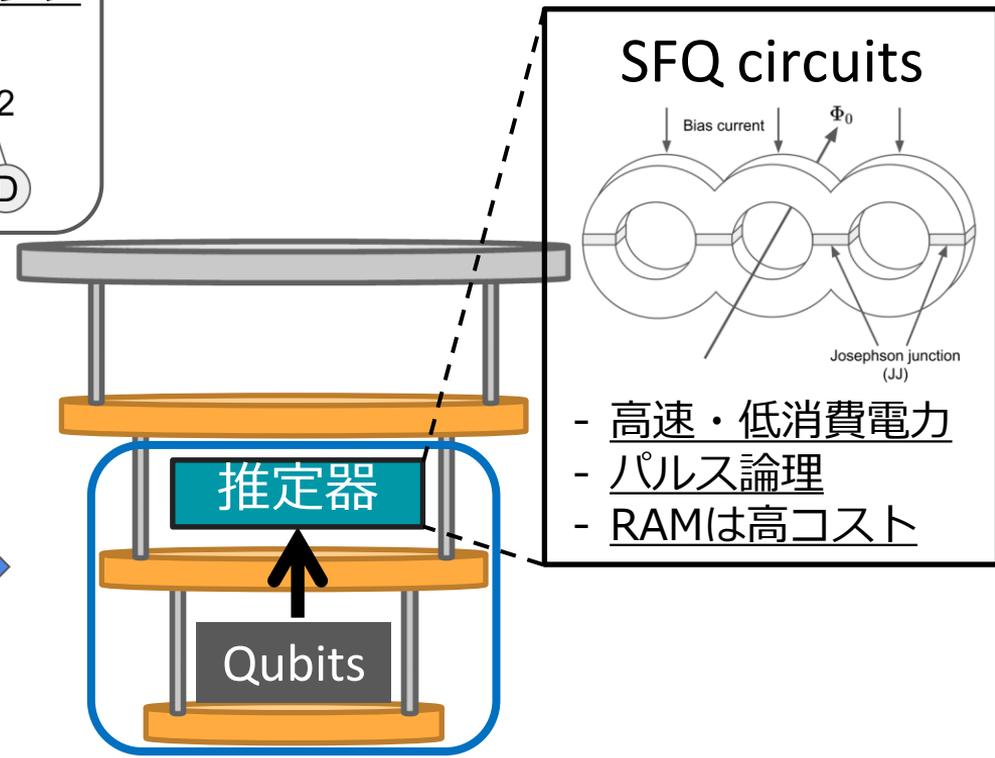
2値化
ニューラルネット

極低温で動作するQECアーキテクチャ

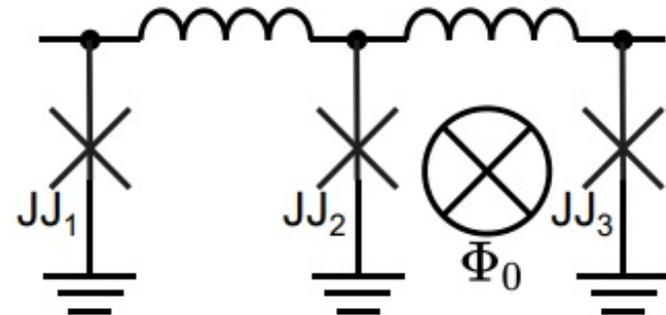
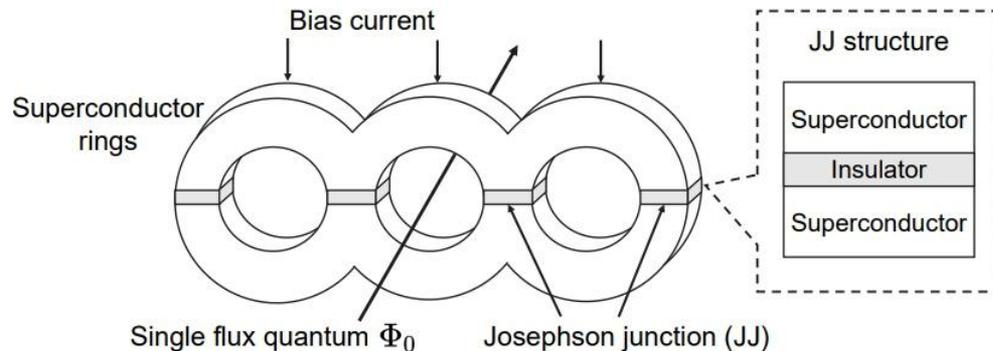
従来アーキテクチャ



提案アーキテクチャ



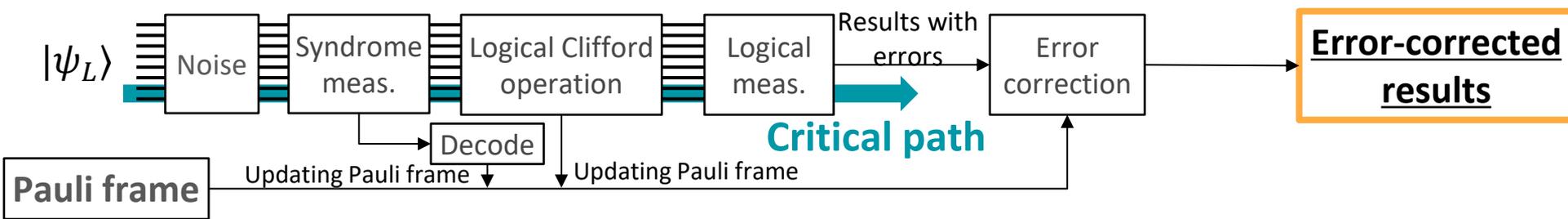
超伝導古典回路による誤り推定



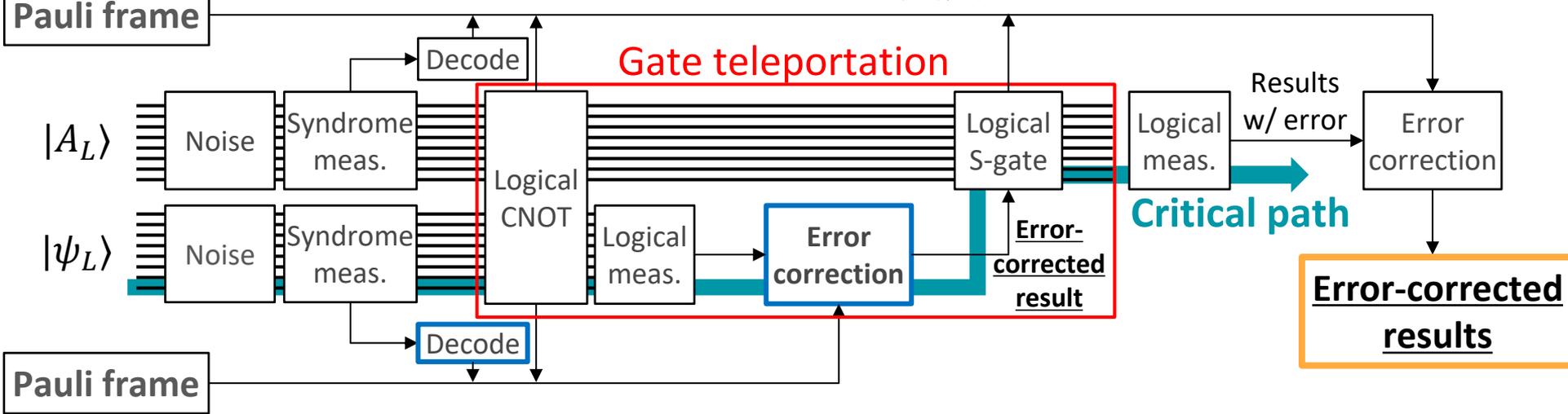
- 単一磁束量子 (SFQ: Single Flux Quantum) 回路
- 超伝導リング内の磁束量子の有無で0 or 1を表現
- 4K程度の極低温環境でのみ動作
- CMOSに比べて高速・低消費電力
- 大規模なメモリの構築は難しい
 - MWPMをSFQで実行するのは現実的でない

誤り訂正レイテンシの影響

論理Clifford演算

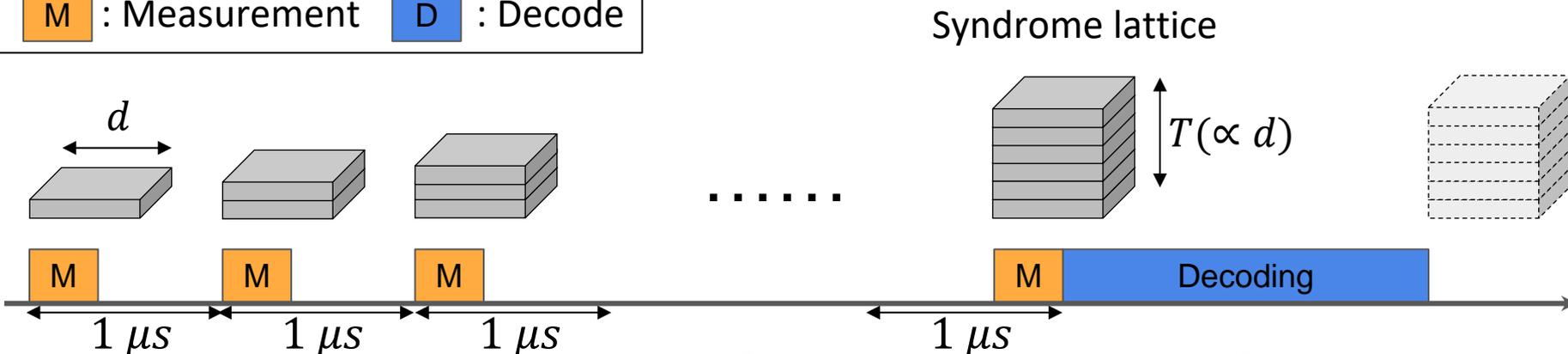


論理非Clifford演算



MWPMが実用的でない理由

M : Measurement D : Decode



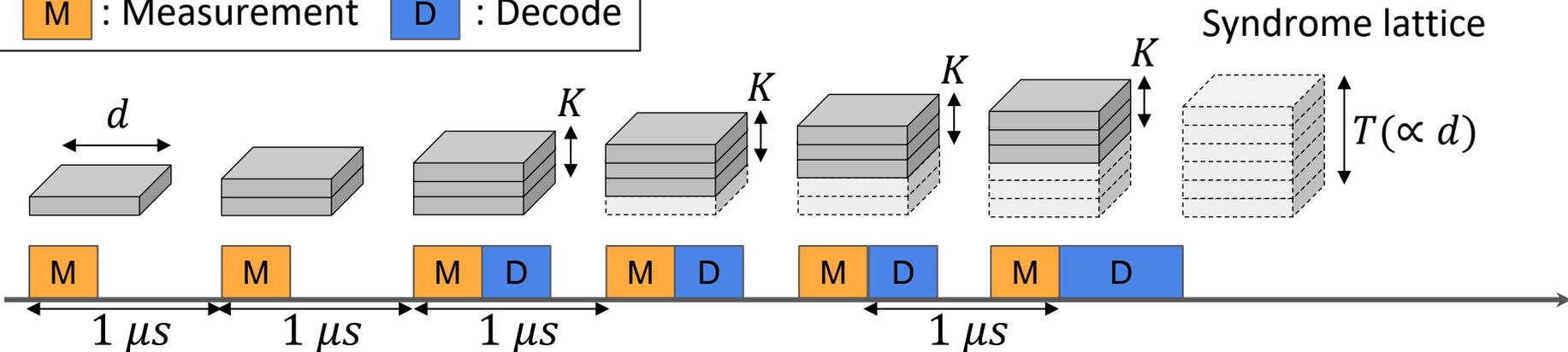
MWPM実行時の観測プロセスと誤り推定プロセス

バッチ処理方式

- + 誤り推定精度は高い
- レイテンシが大きい
- $O(d^3)$ のシンδροームを保持

オンライン誤り推定

M : Measurement D : Decode



提案手法の観測プロセスと誤り推定プロセス

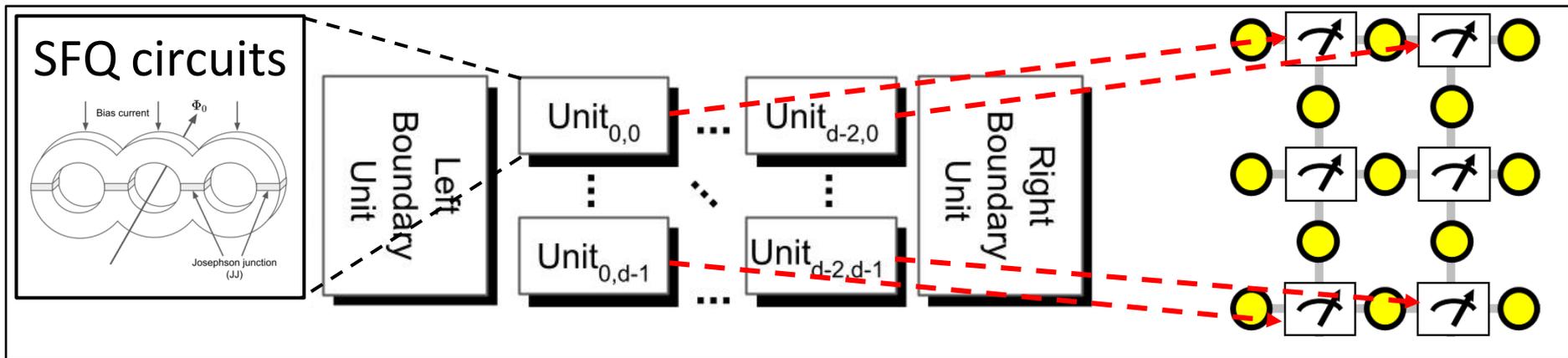
オンライン処理方式

- バッチ処理に比べて低精度
- + 低レイテンシ
- + $O(Kd^2)$ のシンδροームを保持

発表内容

- 背景
 - 超伝導誤り耐性量子計算機
 - 表面符号
- 実用的な量子誤り訂正機構の満たすべき性質
- QECOOL : SFQ回路を用いた表面符号の誤り推定器
- QECOOLの拡張および最近の関連トピック
- まとめ

提案手法: QECOOOL

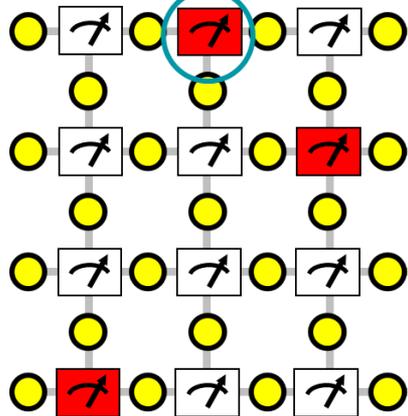


QECOOOLのアーキテクチャ

- Quantum Error COrrrection by On-Line decoding algorithm
- 脳型計算に触発された分散型のアーキテクチャ
 - 大規模RAMが不要
 - 補助量子ビットに1対1に対応するUnitを導入
 - Unit同士の3種類の信号伝播によりマッチング問題を解く

QECCOOLの処理の概要

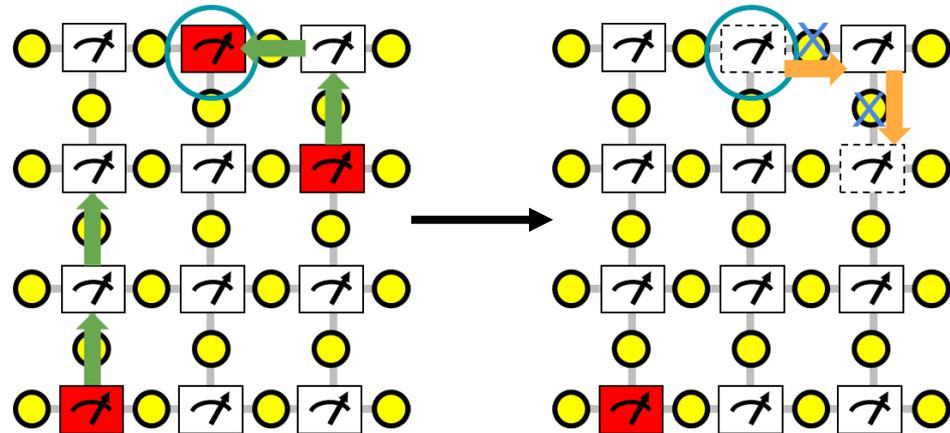
Step 1



ホットシンδροームのペアを探す起点を決定



Step 2

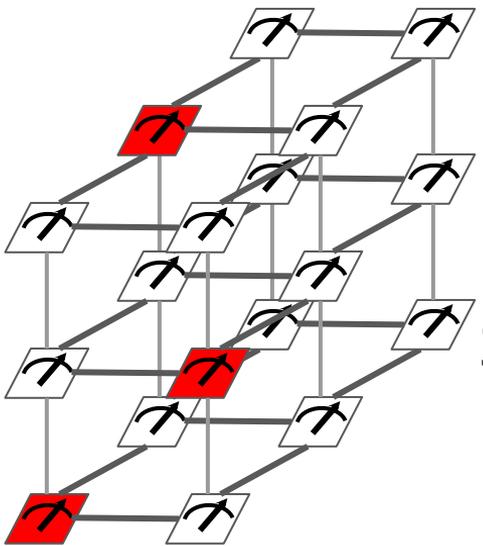


2種類の信号の伝播により最近傍のホットシンδροームを見つける

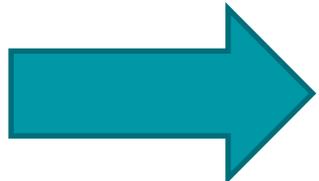
MWPMの貪欲な近似アルゴリズム

$O(n^2)$, 近似度 1/2

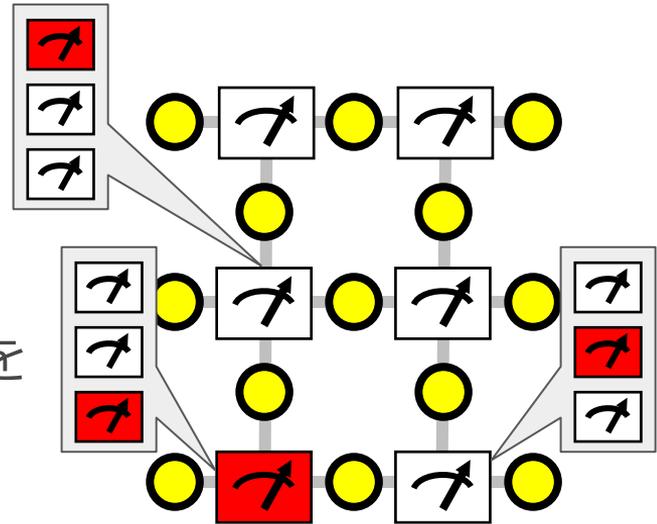
観測エラーへの対応



3-D syndrome lattice



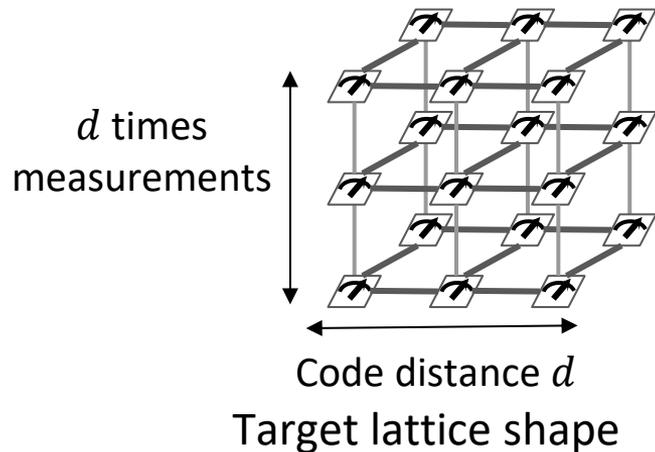
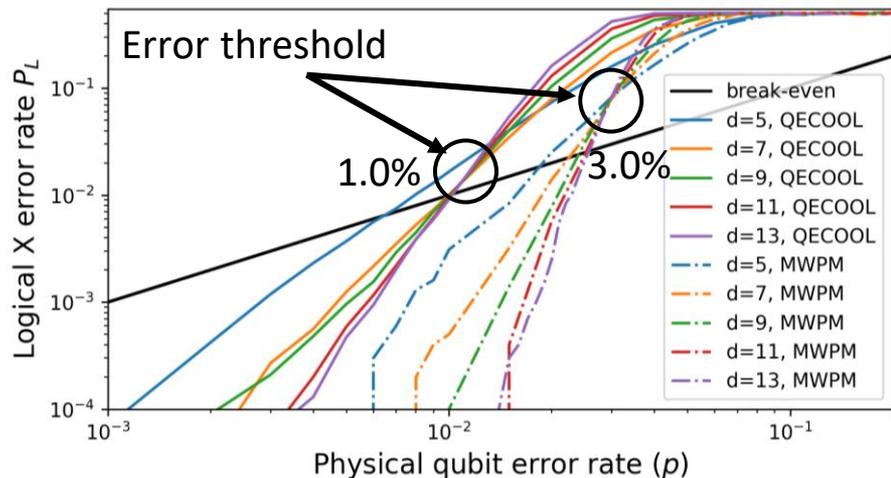
3次元のシンδροーム格子を
2次元グリッド状のUnitに
マッピング



Units with $O(K)$ memory

- 各Unitは複数のシンδροームを保持する $O(K)$ のバッファを持つ
- バッファの読み出し順を工夫する以外は2次元の場合と同じ処理

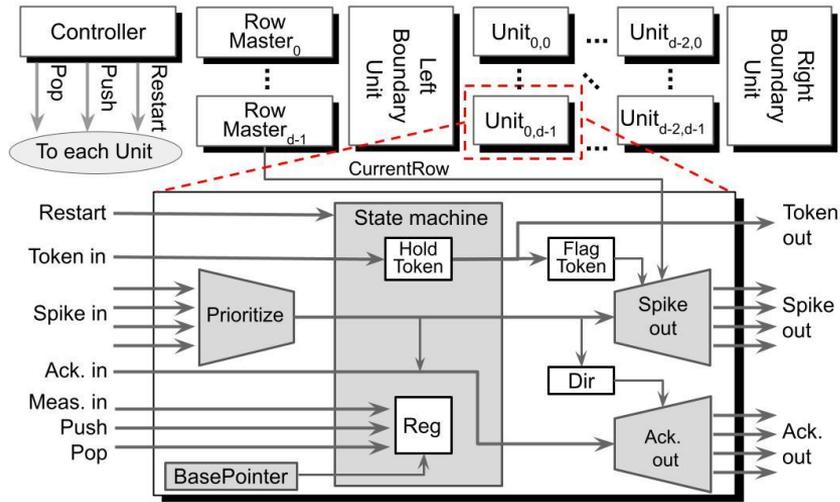
QECOOLの誤り訂正性能



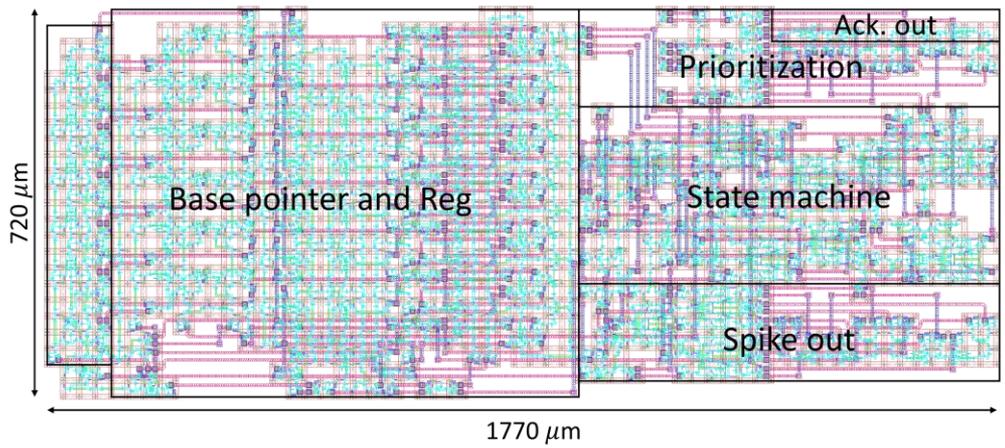
Experimental condition

- Measurement process is performed **once every 1 μ s**
- Each QECCOL Unit has a **7-bit** buffer to store syndrome values
- If buffer entry size is greater than $K = 3$, QECCOL is performed; otherwise, each Unit waits for measurement process
- MWPM operates with batch-QEC manner
- しきい値: QECCOL $p = 0.01$, MWPM $p = 0.03$

QECool誤り推定器のSFQ回路による実装



Architecture overview of QECool



SFQ design layout of QECool Unit

JJs: 3177	Area: 1.274 mm ²	Latency: 215 ps	Power cons.: 2.78 μW
-----------	-----------------------------	-----------------	-----------------------------

Required power per logical qubit on 4-K environment

Suppose $d = 9$,

$$(9 \times 8 \times 2 \times 2.78_{[\mu W]}) = 400_{[\mu W]}$$

QECOOOLまとめ

- 極低温環境でのオンライン処理はスケーラブルな超伝導 FTQCの実現のために必須
- SFQ回路で実装したQECOOOL誤り推定器はレイテンシ制約を満たしつつ極低温環境で動作する
- QECOOOLはデータ・観測エラーが生じる場合の単一論理ビットを保護できる

誤り推定器の満たすべき性質

✓ 消費電力

✓ レイテンシ

機能性

精度

発表内容

- 背景
 - 超伝導誤り耐性量子計算機
 - 表面符号
- 実用的な量子誤り訂正機構の満たすべき性質
- QECOOL : SFQ回路を用いた表面符号の誤り推定器
- QECOOLの拡張および最近の関連トピック
- まとめ

極低温環境での復号器の関連研究

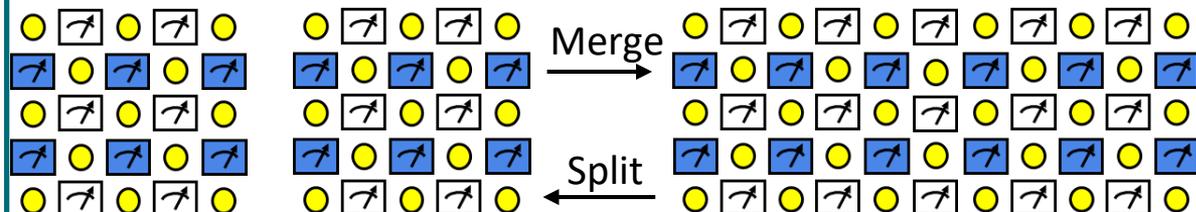
Table 1. Comparison of Cryo-CMOS and SFQ decoders. The area, power consumption and throughput are per distance-9 logical qubit.

	NN [32]	AQEC [38]	QECOOL [39]	QULATIS [40]	NEO-QEC [84]	Clique [103]
Platform	CMOS	SFQ	SFQ	SFQ	SFQ	SFQ
Meas. errors			✓	✓	✓	✓
Lattice surgery				✓	✓	
Area (mm ²)	10	369	183	16.4	N/A	14.4
Power consumpt. (μW)	20 000	3780	400.3	417.4	614.9	99
Throughput Max/Avg. (ns)	28	19.2/3.8	364/9.15	82/2.12	N/A	0.24
	TQE	ISCA 2020	<u>DAC</u> <u>2021</u>	<u>HPCA</u> <u>2022</u>	<u>2022.</u> <u>05758</u>	ASPLOS 2023

Francesco Battistel, Christopher Chamberland, Kauser Johar, Ramon W. J. Overwater, Fabio Sebastiano, Luka Skoric, Yosuke Ueno, Muhammad Usman, “Real-Time Decoding for Fault-Tolerant Quantum Computing: Progress, Challenges and Outlook”, Nano Futures, Vol. 7, Num. 3, pp. 032003.

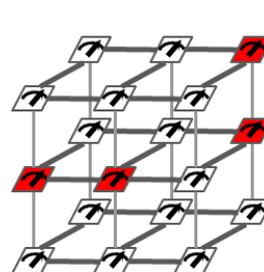
QECOOLの格子手術向け拡張

Lattice surgery

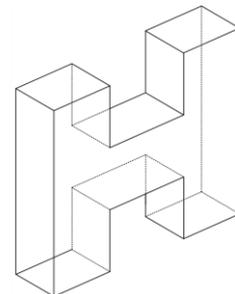


Framework to perform logical operations
with SC-based QEC

Target lattice shape



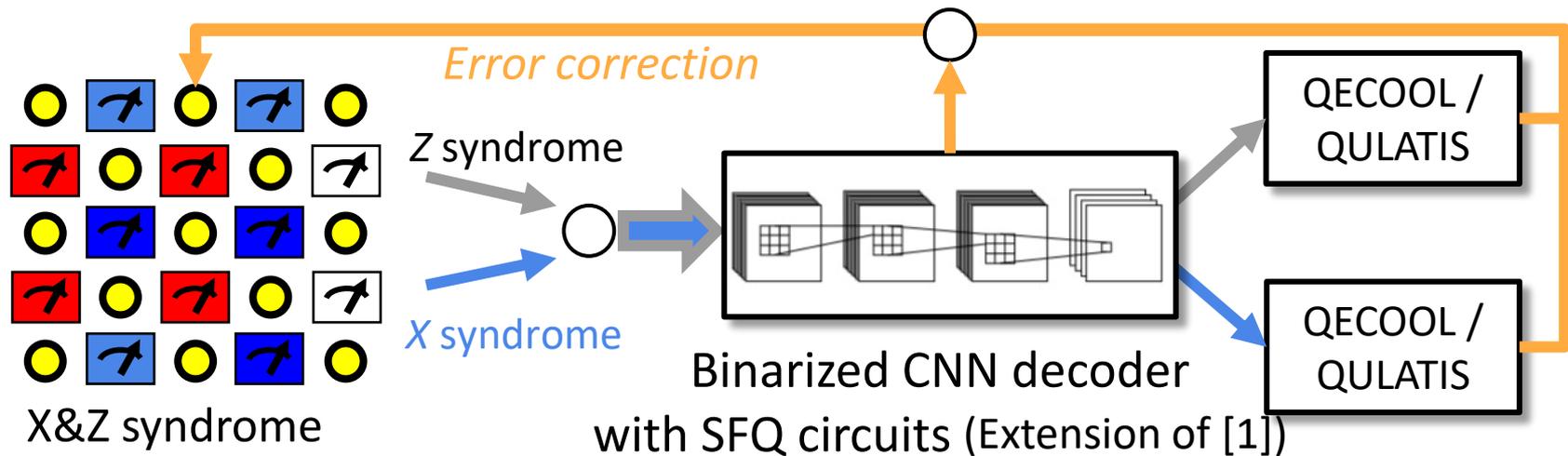
Single logical qubit
(QECOOL)



Lattice surgery
(QULATIS)

- Extension of QECOOL for decoding of lattice surgery
 - Supporting logical operations of the universal quantum gate set $\{H, \text{CNOT}, T\}$
- SFQ circuit design of QULATIS decoder is suitable for online decoding in a cryogenic environment

2値化NNをQECCOOLの精度向上



- A two-stage decoder with binarized CNN and QECCOOL/QULATIS
 - Improve threshold values of QECCOOL/QULATIS
- SFQ design of Neural Processing Unit for binarized CNN
 - Suitable for online decoding in a cryogenic environment

[1] S. Gicev, L. C. Hollenberg, and M. Usman, A scalable and fast artificial neural network syndrome decoder for surface codes, arXiv preprint arXiv:2110.05854 (2021).

発表内容

- 背景
 - 超伝導誤り耐性量子計算機
 - 表面符号
- 実用的な量子誤り訂正機構の満たすべき性質
- QECOOL : SFQ回路を用いた表面符号の誤り推定器
- QECOOLの拡張および最近の関連トピック
- まとめ

まとめ・今後の展望

- SFQ回路を用いた量子誤り訂正機構を提案
 - 極低温環境での誤り訂正により量子計算機のスケーラビリティを向上
- 脳型計算に触発されたアルゴリズムとハードウェアの協調設計により高効率な回路を実現