

# FTQC最新動向



九州大学 大学院システム情報科学研究院 准教授  
谷本 輝夫

2024年5月29日



量子コンピューティング  
システム研究センター



九州大学

# 0. 目次

1. 誤り耐性量子計算
2. 量子誤り訂正符号
3. 誤り耐性量子コンピュータ
4. 表面符号の誤り推定器(量子誤りデコーダ)
5. 誤り耐性量子計算機の実現に向けた取り組み
6. Early-FTQCに関する取り組み
7. まとめ

# 1. 誤り耐性量子計算

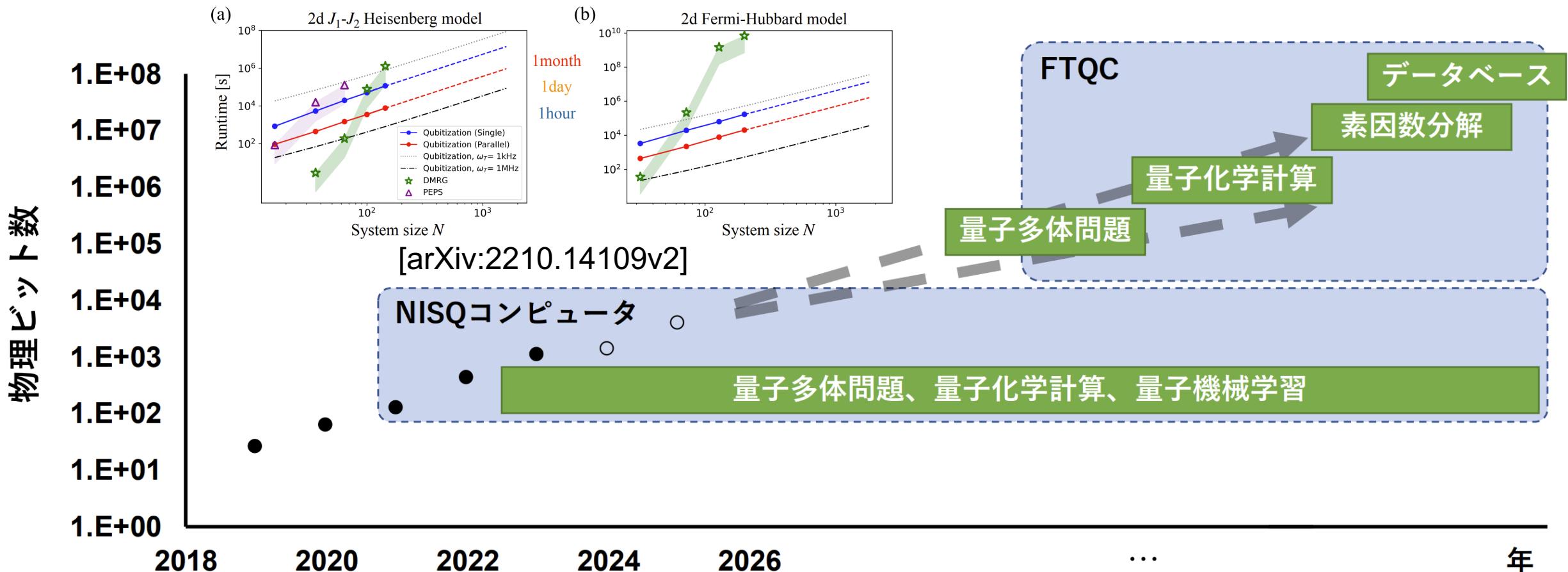
## 量子コンピュータの課題

- 高い物理エラー率(10<sup>-4</sup>~10<sup>-3</sup>)
- 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(指數)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
- 論理エラー率を小さくし、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

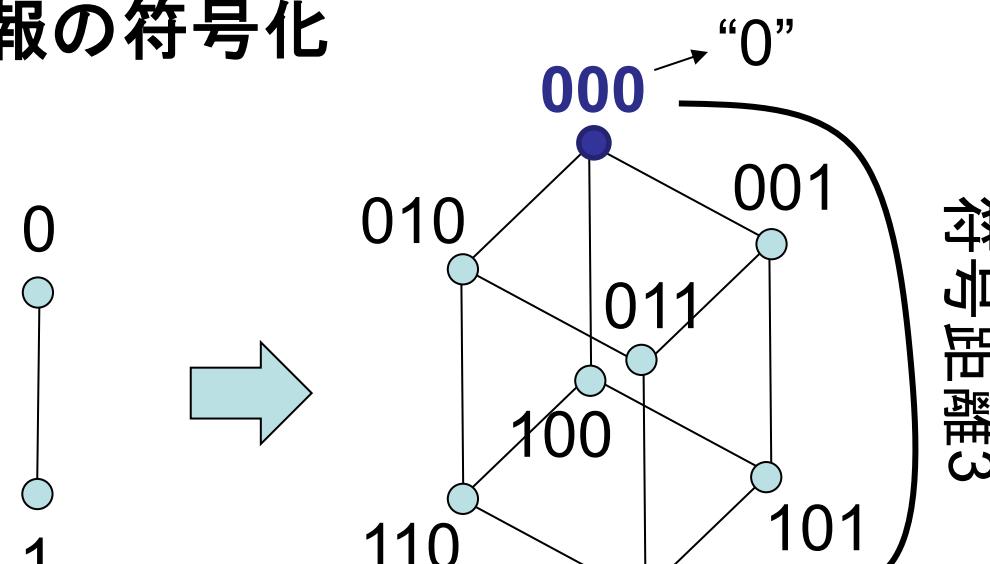


[谷本, 信学会 知識の森 量子コンピュータ]

## 2. 量子誤り訂正符号

### 情報の符号化

1ビットによる  
符号化



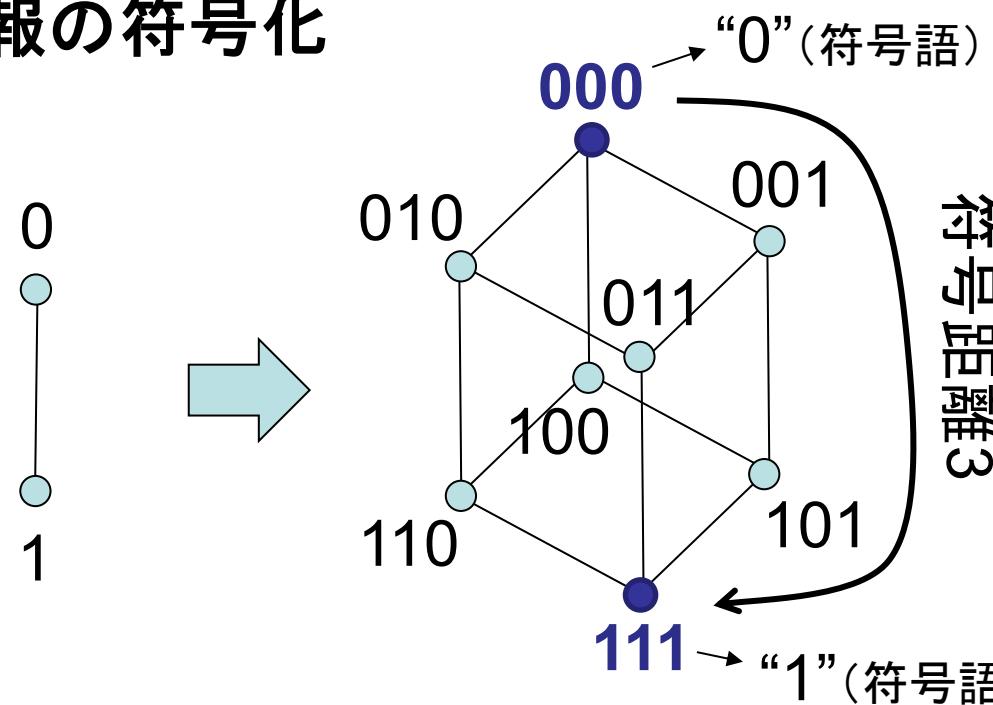
3ビットによる  
符号化  
(1ビット訂正)

### 符号化の効果

- 物理ビットエラーレートが $p$ のとき
  - 1ビットの場合  
論理エラーなし:  $1 - p$   
論理エラーあり:  $p$
  - 3ビットの場合  
論理エラーなし:  $(1 - p)^3 + 3(1 - p)^2 p$   
論理エラーあり:  $p^3 + 3(1 - p)p^2$

## 2. 量子誤り訂正符号

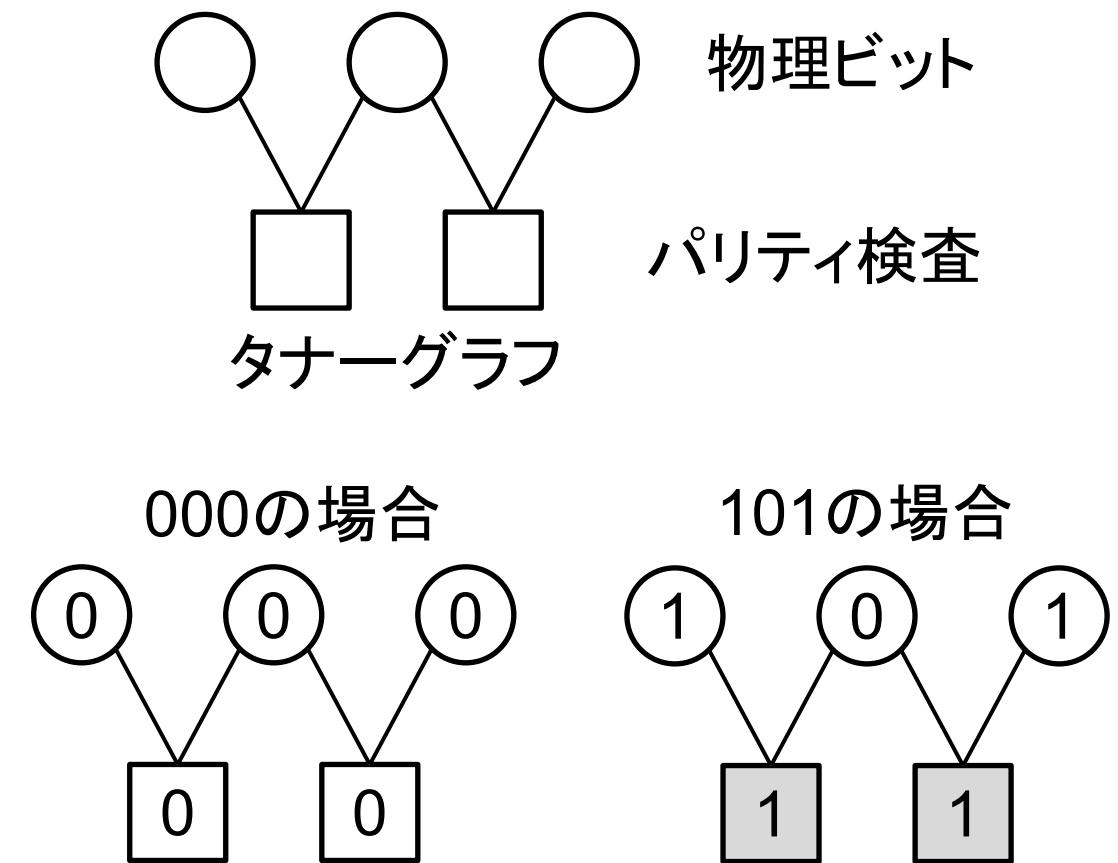
### 情報の符号化



1ビットによる  
符号化

3ビットによる  
符号化  
(1ビット訂正)

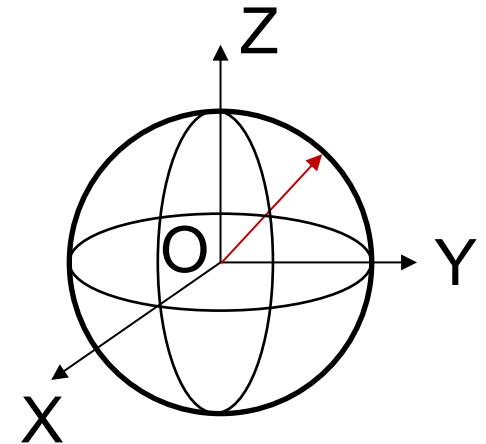
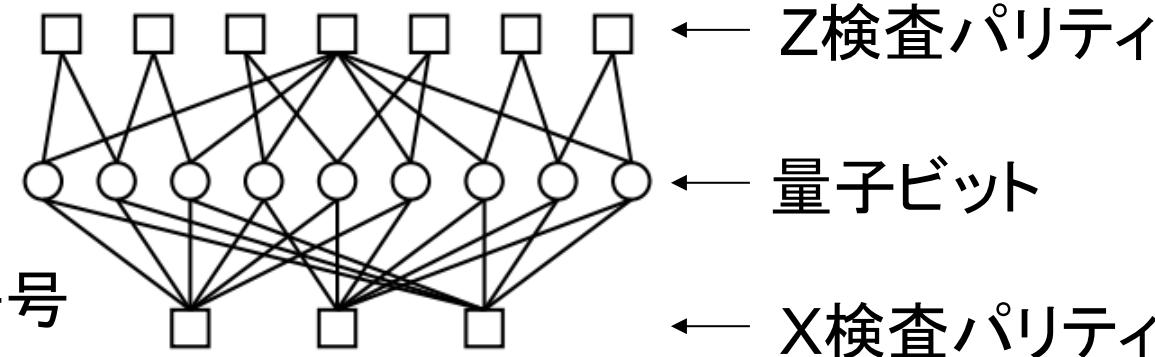
### 符号とパリティ検査



## 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

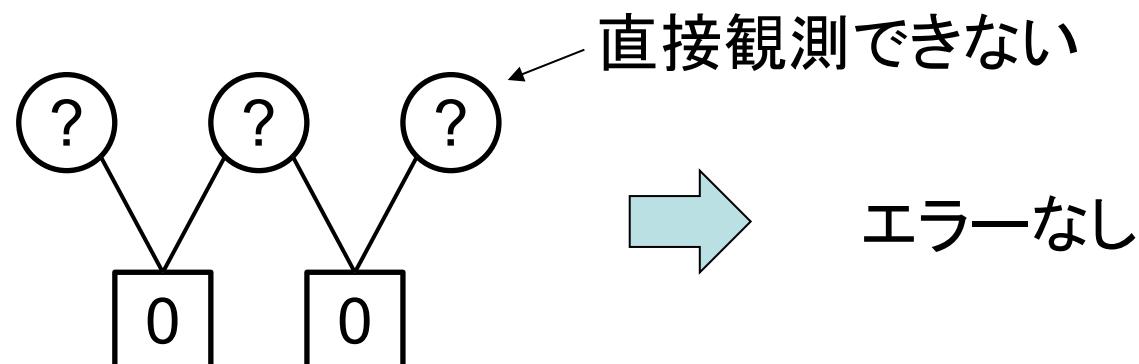


- データを保持している量子ビット自体は計算中は観測できない
  - 量子ビットの情報を破壊しても良いとき(例えば計算終了時)は観測OK
  - 検査用の量子ビットに情報を集めてパリティ値を取得(シンドローム測定)
  - 実行中に生じたエラーはパリティ値から推測

## 2. 量子誤り訂正符号

### 量子誤り推定

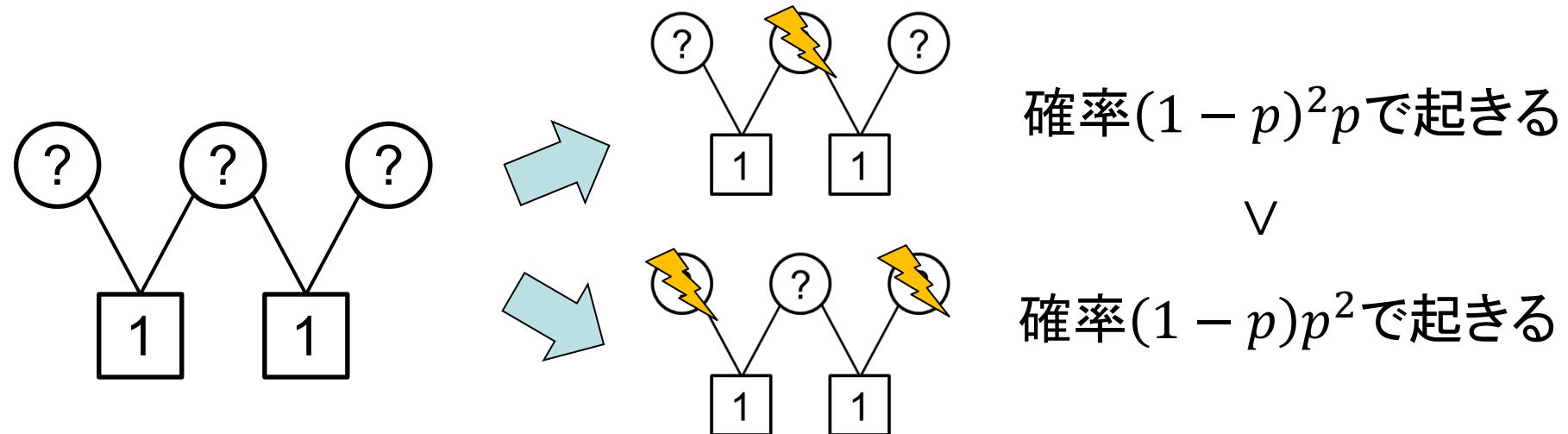
- 初めの3ビットの例でX(またはZ)のエラーについて考える



## 2. 量子誤り訂正符号

### 量子誤り推定

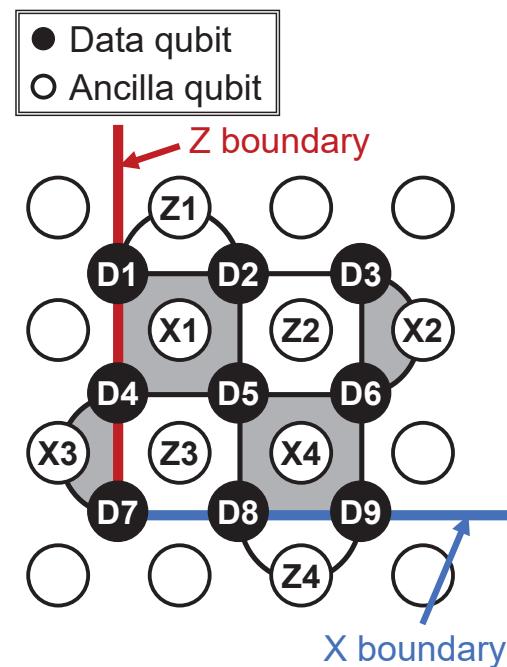
- 初めの3ビットの例でX(またはZ)のエラーについて考える



できるだけ少ない数のエラーでパリティ検査結果を説明するようエラーを推定

## 2. 量子誤り訂正符号

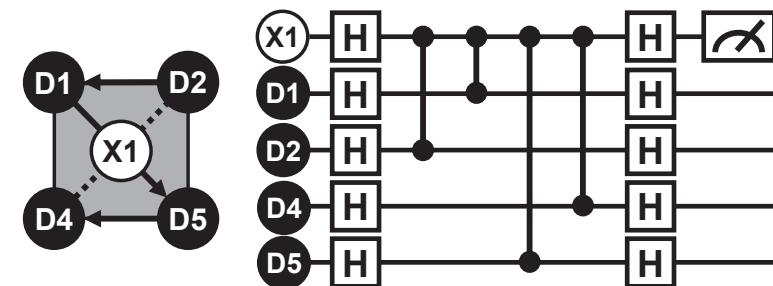
### 表面符号



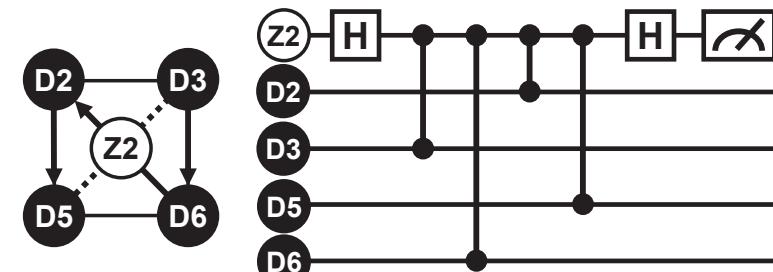
回転表面符号  
(符号距離3)

図[I. Byun+, ISCA'22]

### パリティ値取得(エラーシンドローム測定)



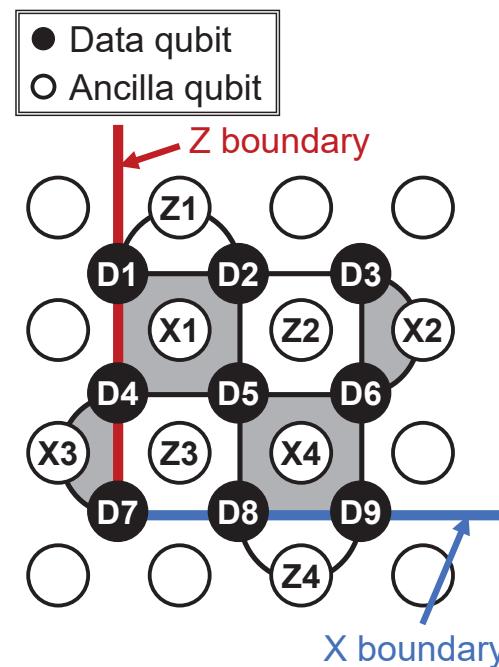
Xエラーシンドローム測定回路



Zエラーシンドローム測定回路

## 2. 量子誤り訂正符号

### 表面符号



回転表面符号  
(符号距離3)

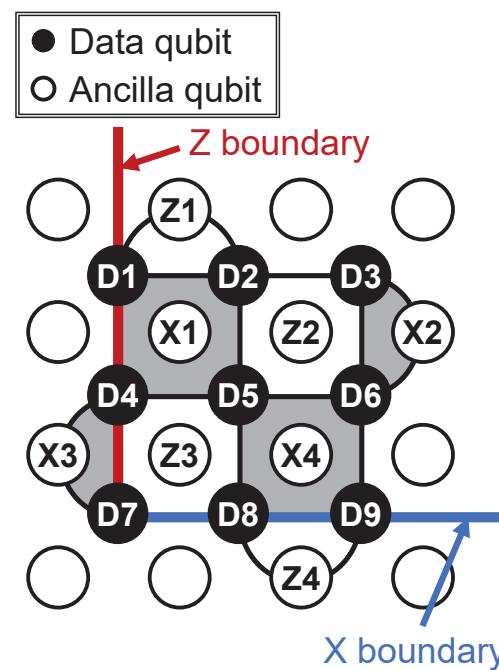
### 表面符号の強み

- 2次元格子上に並んだ量子ビットに埋め込む  
(近接量子ビットとの相互作用のみでシンドローム測定可能)
- 複数論理量子ビット演算方法が見つかっている
- 多項式時間で解けるアルゴリズムで閾値定理が証明できる
- 物理量子ビットのエラーレートを一定以上低くできれば、物理量子ビットを増やすことでいくらでも論理エラーレートを小さくできる  
(ただし、物理量子ビットが増えると、エラー推定の処理はどんどん大変になる)

図[I. Byun+, ISCA'22]

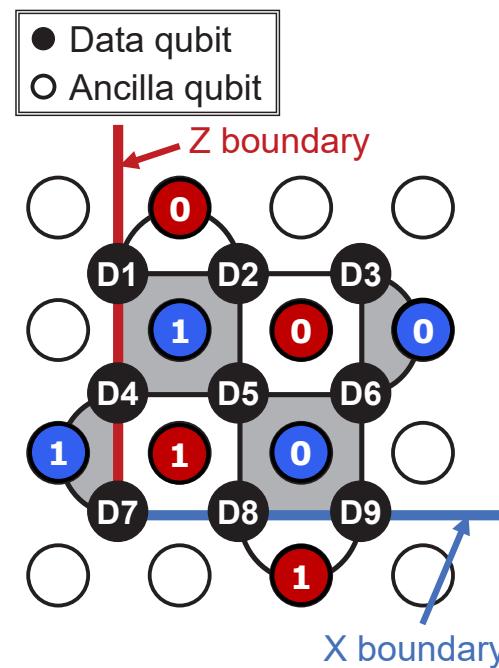
## 2. 量子誤り訂正符号

### 表面符号の量子誤り推定



## 2. 量子誤り訂正符号

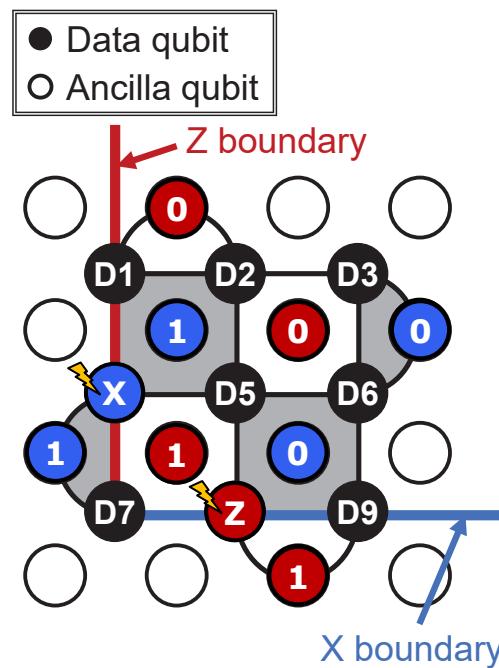
### 表面符号の量子誤り推定



- Step1: エラーシンドrome測定

## 2. 量子誤り訂正符号

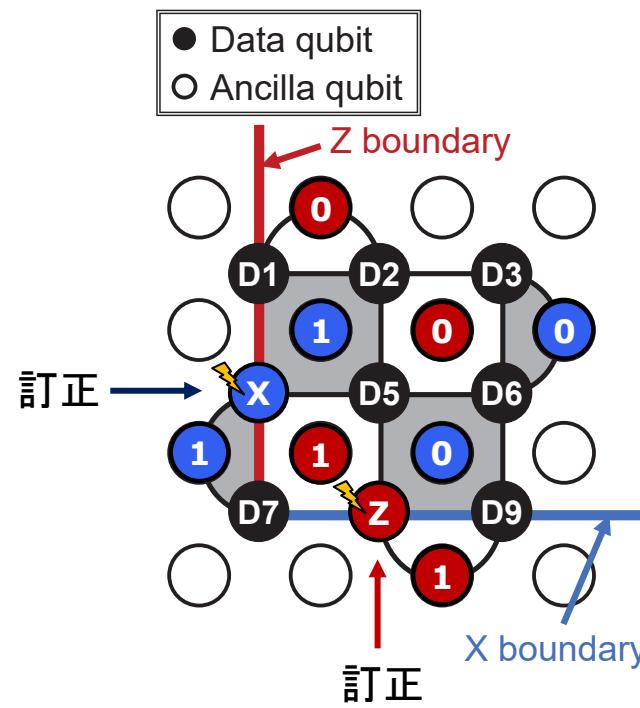
### 表面符号の量子誤り推定



- Step1: エラーシンドローム測定
- Step2: エラー推定
  - アクティブシンドローム("1")のマッチング問題
  - 厳密解法は NP-hard だが、最小重み完全マッチング(MWPM)に帰着して解ける

## 2. 量子誤り訂正符号

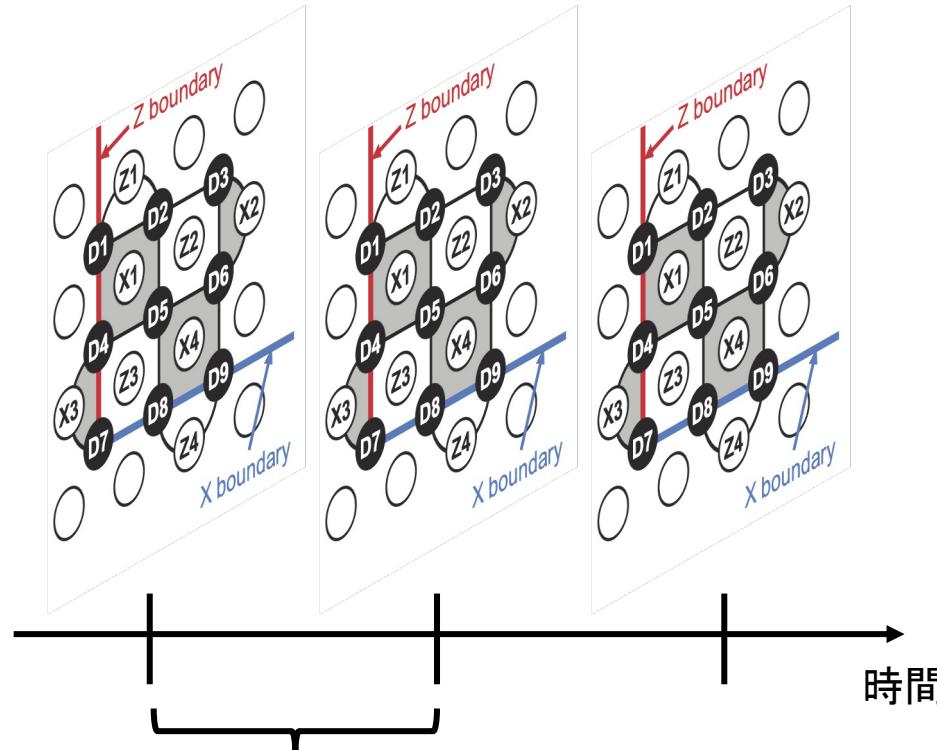
### 表面符号の量子誤り推定



- Step1: エラーシンドローム測定
- Step2: エラー推定
  - アクティブシンドローム("1")のマッチング問題
  - 厳密解法は NP-hard だが、最小重み完全マッチング(MWPM)に帰着して解ける
- Step3: エラー訂正

## 2. 量子誤り訂正符号

### 表面符号の量子誤り推定(より実際的に)



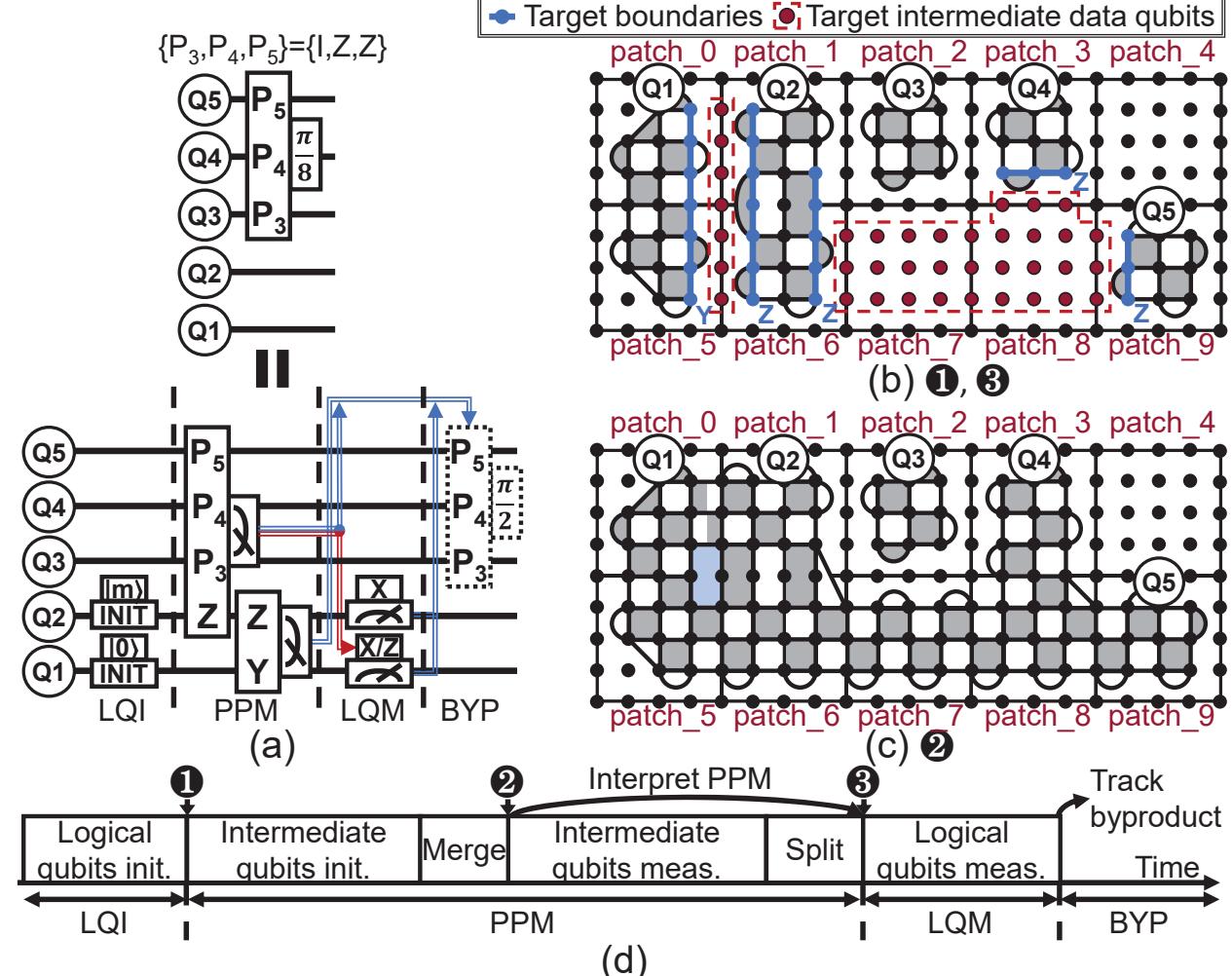
コードサイクル

超伝導量子ビットでは 1us 程度だと考えられている

- Step1: エラーシンドローム測定
  - 「測定エラー」もあり得る→複数回測定
- Step2: エラー推定
  - アクティブシンドローム("1")のマッチング問題
  - 厳密解法は NP-hard だが、最小重み完全マッチング(MWPM)に帰着して解ける
  - 時間方向も含めると、シンドロームは3次元格子
- Step3: エラー訂正
  - 訂正がすぐに必要な場合と、後からで良い場合

### 3. 誤り耐性量子コンピュータ

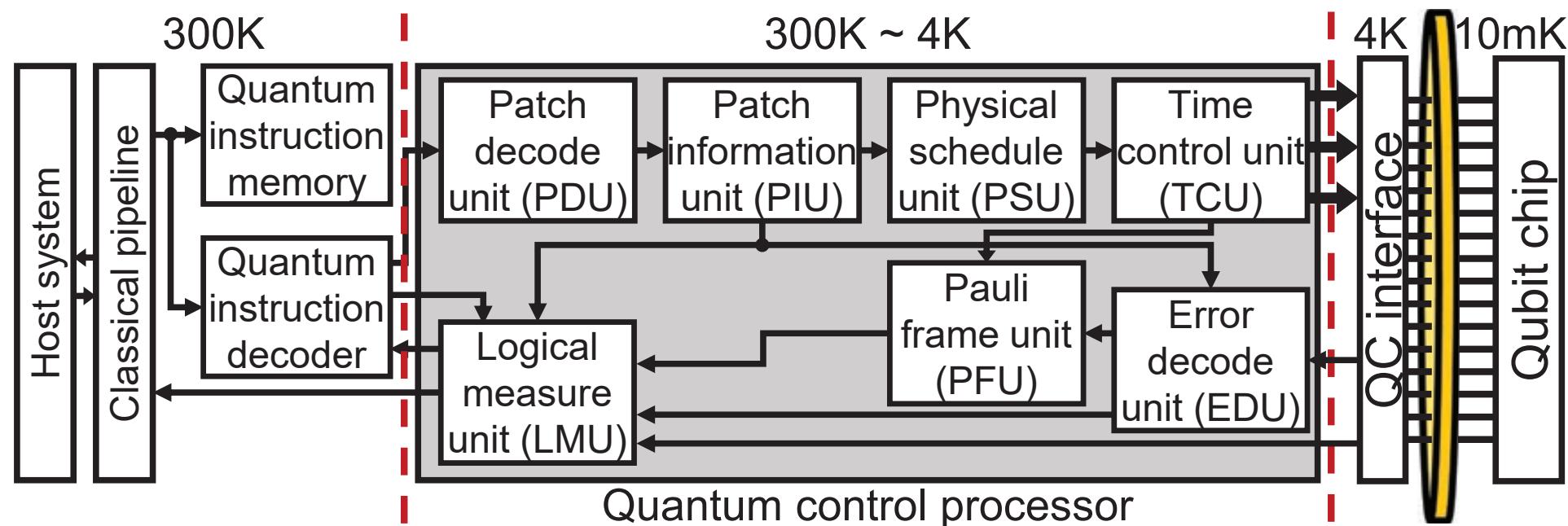
- 論理量子ビットを使った演算
  - 表面符号では「格子手術」
- 格子手術
  - 複数の体系がある
  - Merge, sprit, and logical measurement
  - 論理的な命令  
論理パッチの結合と分離に帰着



[ arXiv:1808.02892][I. Byun+, ISCA'22]

### 3. 誤り耐性量子コンピュータ

超伝導量子ビットを用いたFTQCシステムの例

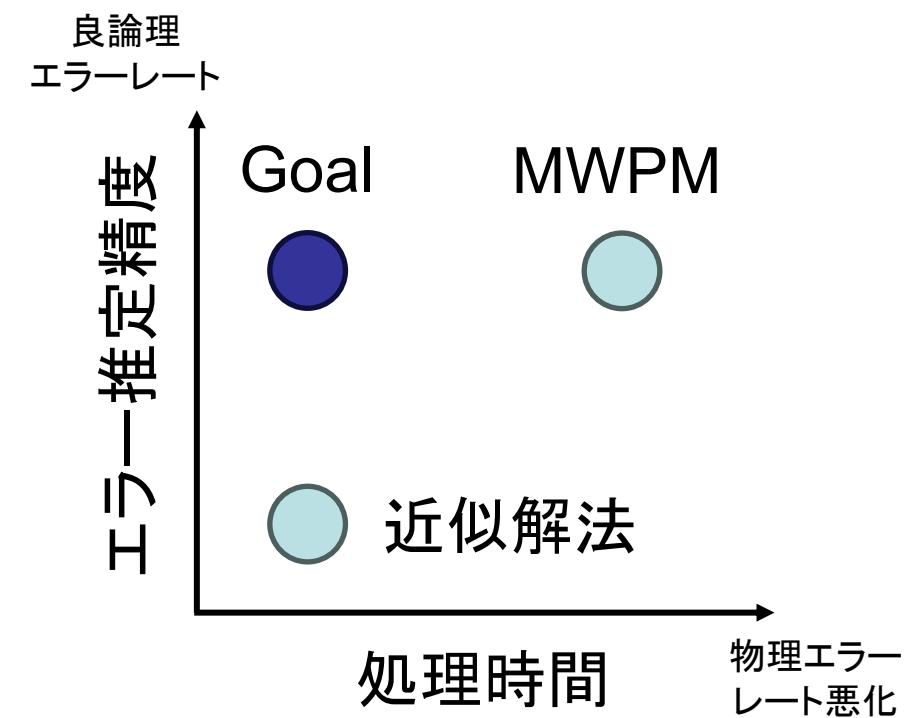


[I. Byun+, ISCA'22]

## 4. 表面符号の誤り推定器(量子誤りデコーダ)

様々なアルゴリズムや実装の提案がある

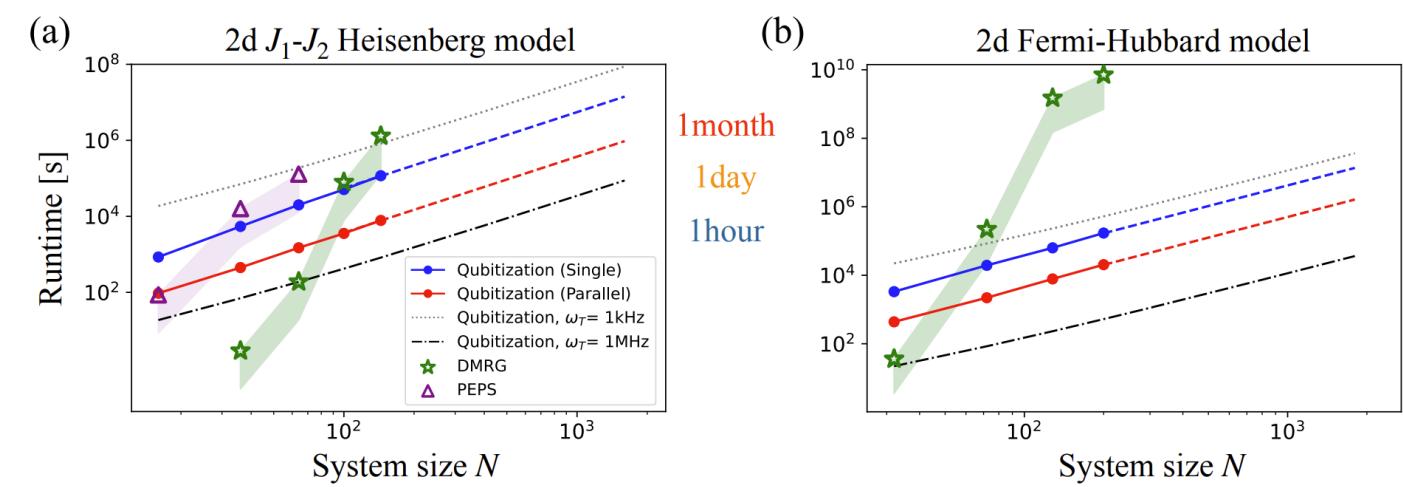
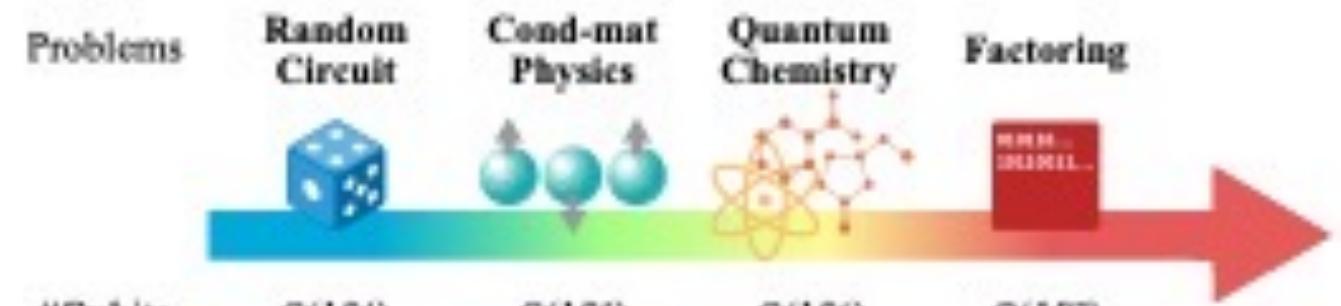
- Lookup Table decoder
- Minimum Weight Perfect Matching decoder
- Machine Learning decoder
- Tensor Network decoder
- Union-Find decoder
- Clique decoder



## 5. 誤り耐性量子計算機の実現に向けた取り組み

### リソース推定

- ユニバーサルゲートセット
  - Clifford + T ゲート
  - T ゲートが圧倒的に高コスト
- 実行時間
  - Tゲート数を使った推定
- 必要な物理量子ビット数
  - アプリケーションの要請
    - 論理量子ビット数
    - 計算精度
  - 物理エラーレート

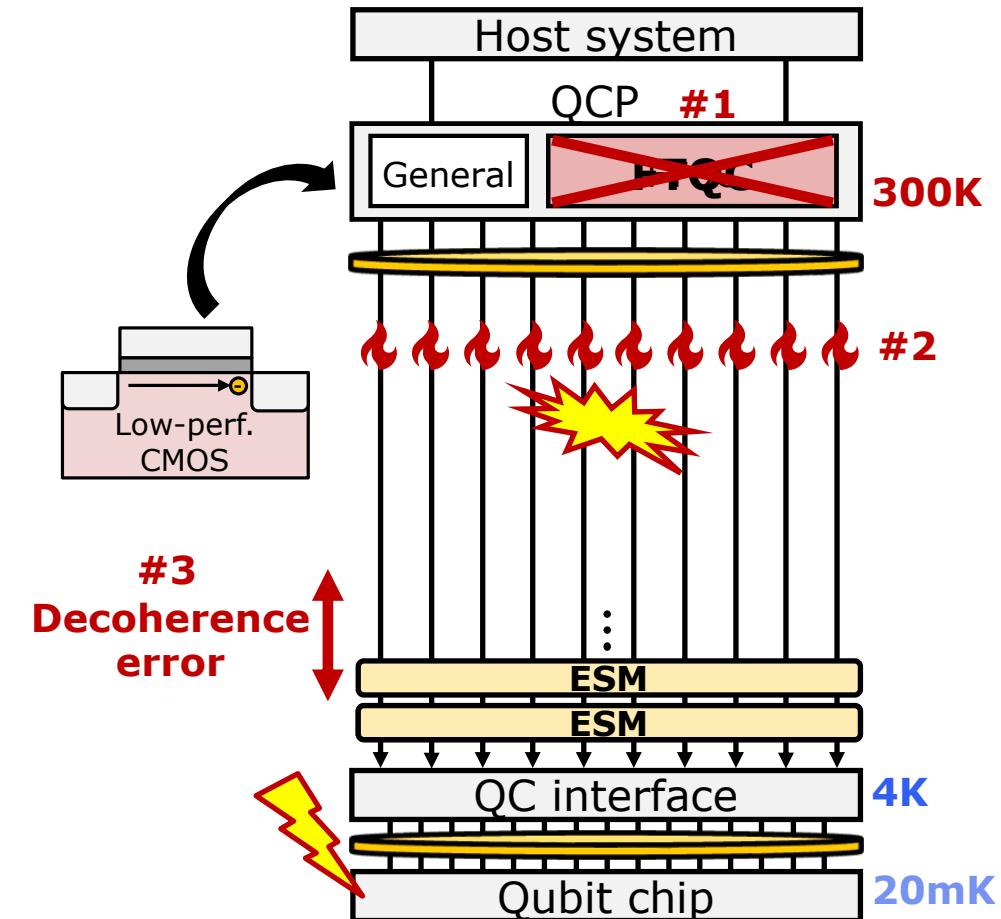


[arXiv:2210.14109v2]

## 5. 誤り耐性量子計算機の実現に向けた取り組み

### システム・レベル・スケーラビリティ分析

- 構成要素内／間のトレードオフが複雑に絡み合っている
  - 例えば、
    - 量子誤り推定の精度 vs. 処理の速さ
    - 極低温ステージへの熱流入 vs. 極低温ステージでの消費電力(発熱)
- システム全体を俯瞰した分析に基づいた設計が不可欠

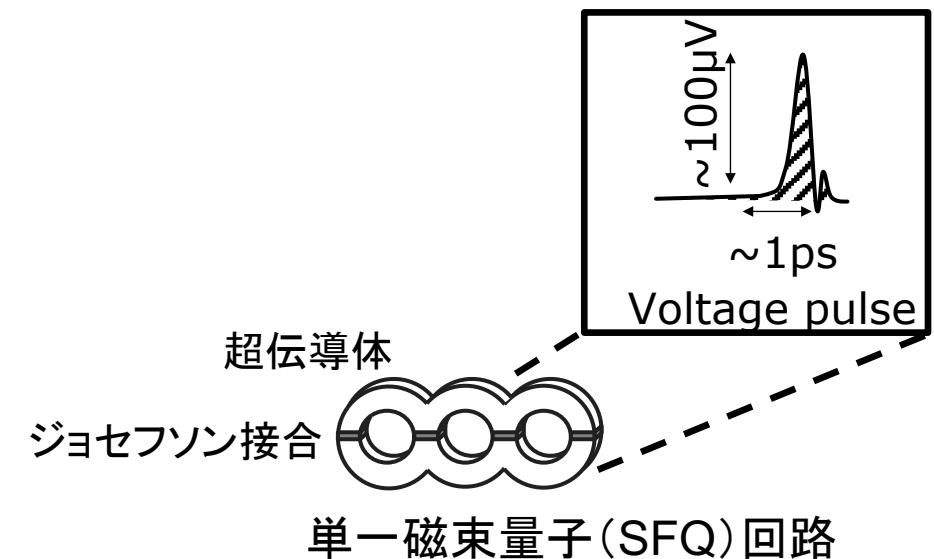


[I. Byun+, ISCA'22]

## 5. 誤り耐性量子計算機の実現に向けた取り組み

### 極低温デジタル情報処理の活用

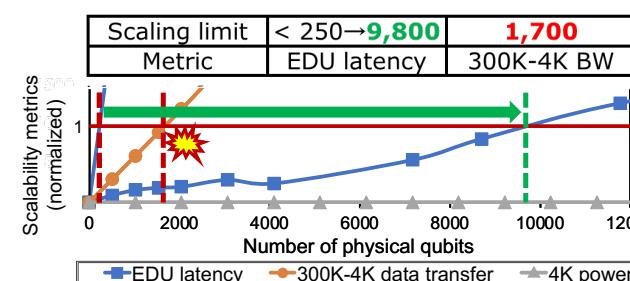
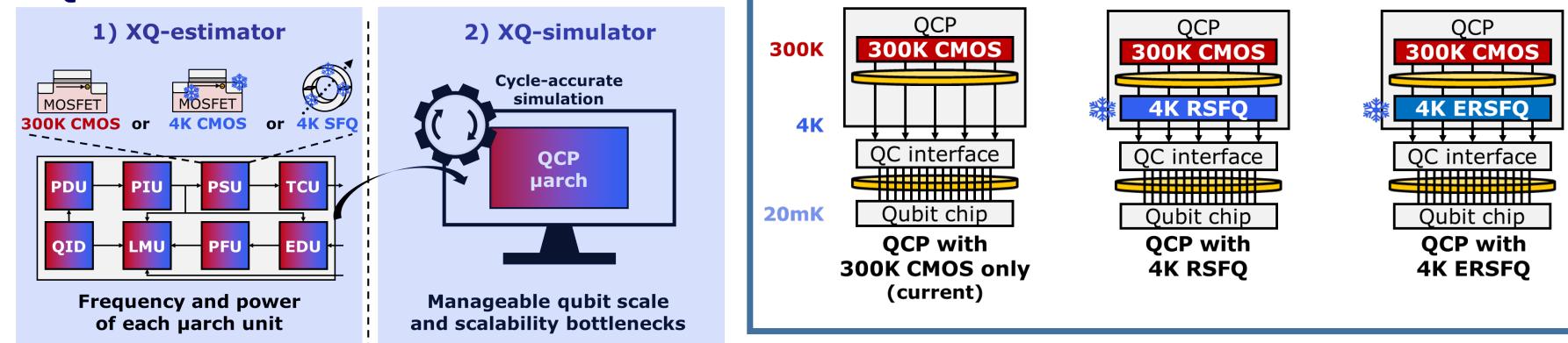
- 極低温デジタル計算(単一磁束量子回路)
  - 超伝導体でジョセフソン接合を挟んだリング構造
  - 4K以下の温度で動作
  - パルス駆動のため非常に高速かつ低消費電力なスイッチングが可能
- 応用例
  - 量子誤り推定器: NISQ+, QECOOL, QULATIS
  - 量子古典インタフェース: QIsim



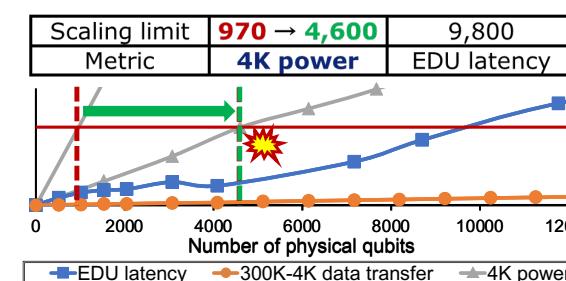
# 5. 誤り耐性量子計算機の実現に向けた取り組み

## システム・レベル・スケーラビリティ分析

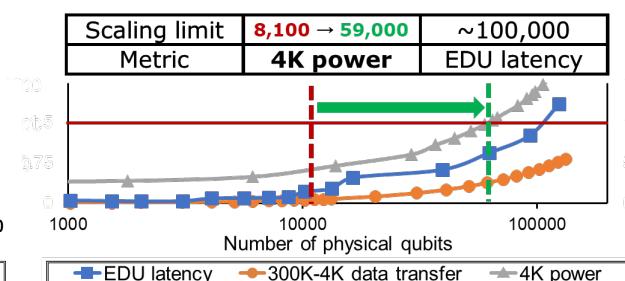
### XQsim: Overview



1) EDU opt.



2) Utilize 4 K processing



3) Low-power 4 K tech. & opt.

[I. Byun+, ISCA'22]

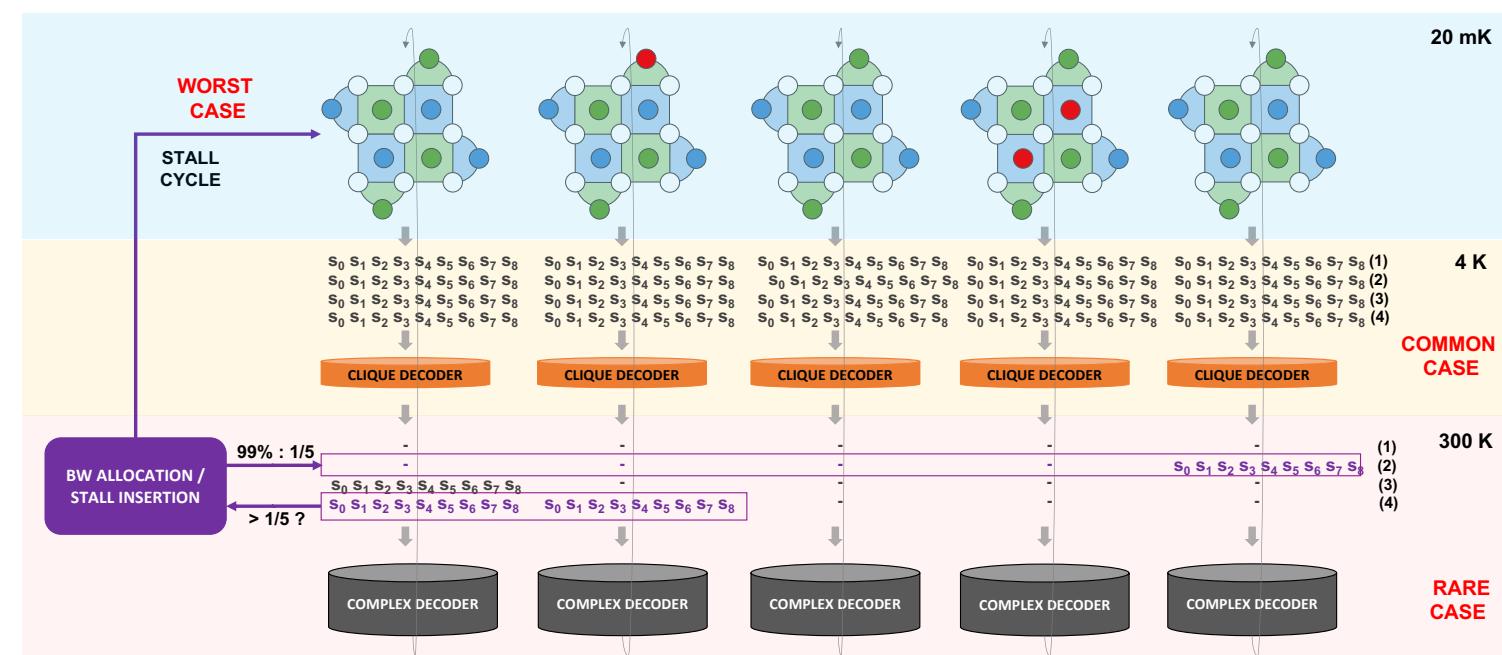
## 5. 誤り耐性量子計算機の実現に向けた取り組み

### 量子誤り推定システム(階層化)

- ・ 極低温(4K)ステージに単純な Clique decoder を配置
- ・ 手に負えない時には室温にある計算機で MWPM を解く

### 推定問題の「難しさ」

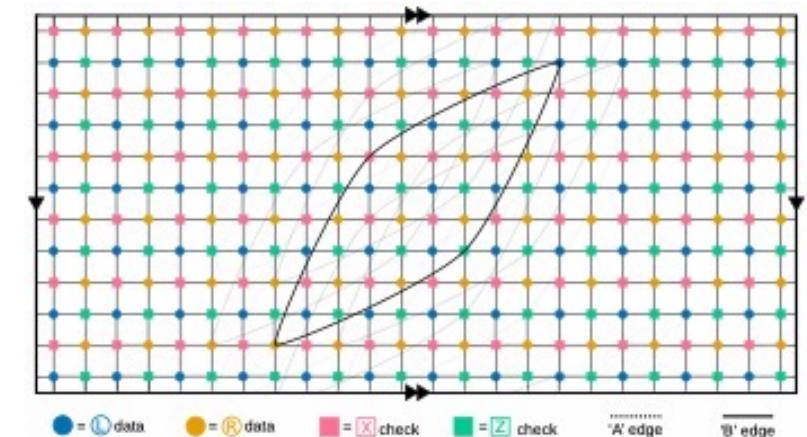
- ・ 確率的
- ・ ほとんどのケースは Clique decoder で十分



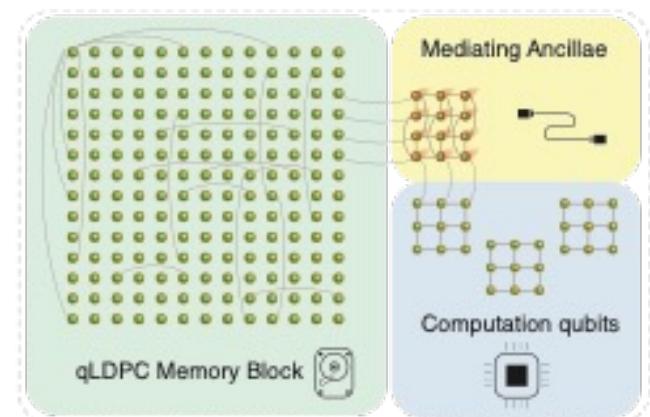
## 5. 誤り耐性量子計算機の実現に向けた取り組み

### 符号化効率の良い符号の提案(1): 量子LDPC符号

- $[[n, k, d]]$ 
  - $n$ : 物理量子ビット数
  - $k$ : 論理量子ビット数
  - $d$ : 符号距離
  - $k/d$ : 符号化効率
- 表面符号
  - $[[2d^2 - 1, 1, d]] \rightarrow$  符号化効率  $O(1/d^2)$
- Low Density Parity Check 符号の量子版
  - より良い符号化効率を目指す
  - ただし、表面符号の利点を失う(遠隔 CNOT が必要など)



[S. Bravyi+, Nature '24]

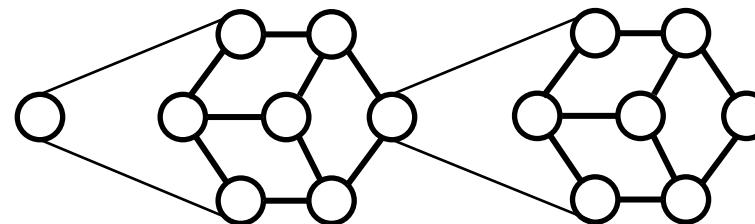


[ArXiv:2308.08648v1]

## 5. 誤り耐性量子計算機の実現に向けた取り組み

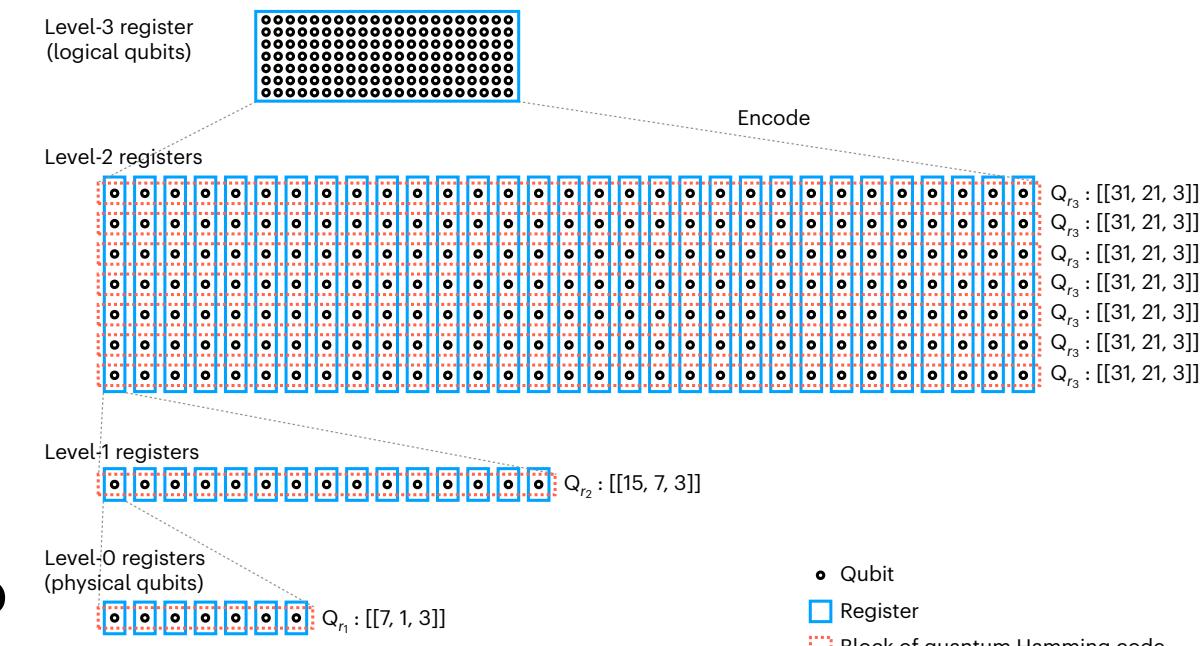
### 符号化効率の良い符号の提案(2) : 連接符号

- 多段の符号化により論理エラーレートの良い論理量子ビットを作る



連接符号の例

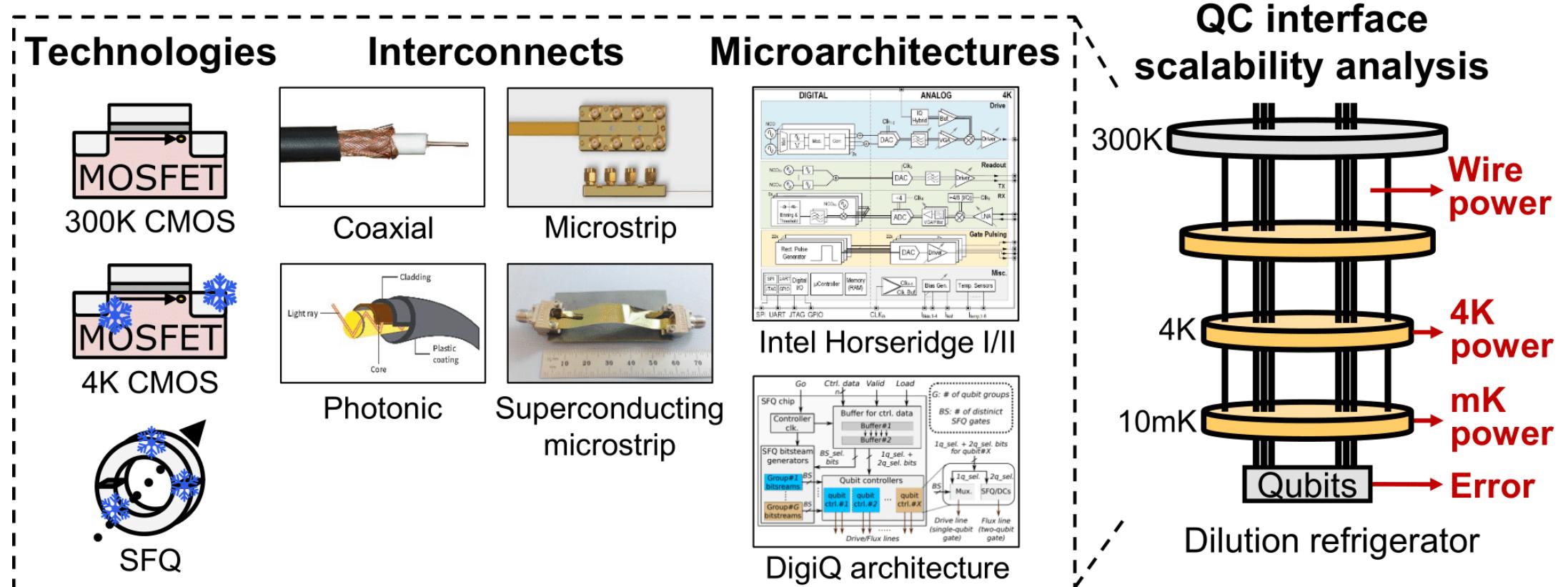
- 「モジュール化」の考え方と親和性が高い
- 階層が上がるにつれ、符号を大きくすることで符号化効率を改善できる



[H. Yamasaki+, Nature Physics '23]

## 5. 誤り耐性量子計算機の実現に向けた取り組み

### スケーラブルな量子古典インタフェースの構想



## 5. 誤り耐性量子計算機の実現に向けた取り組み

### スケーラブルな量子古典インタフェースの構想

**HPCS** High Performance Computer System Lab

### Challenges: Complex scalability trade-offs

- Temperature and technology choices

Trend #1: 300K QCI

QCIs

QCP

Drive Pulse TX RX

300K

4K

QCI

Qubit chip

20mK

(+) No 4K device power  
(-) Huge wire power

Trend #2: 4K CMOS QCI

QCIs

QCP

4K CMOS

Drive Pulse TX RX

300K

4K

QCI

Qubit chip

20mK

(+) Low wire power  
(-) Huge 4K device power

Trend #3: 4K SFQ QCI

QCIs

QCP

4K SFQ

Drive Pulse TX RX

300K

4K

JPM readout

QCI

Qubit chip

20mK

(+) Low 4K device, wire power  
(-) Huge mK device power

- Microarchitecture choices

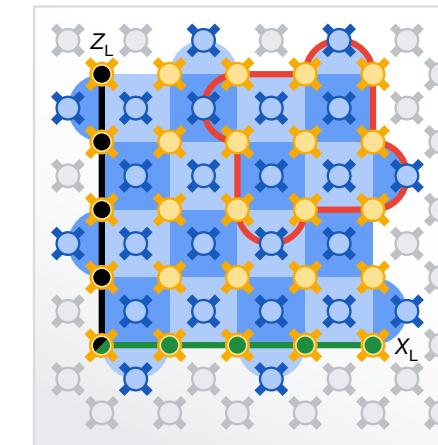
Every architectural decision has tradeoffs between device power and logical-error rate

11 / 54

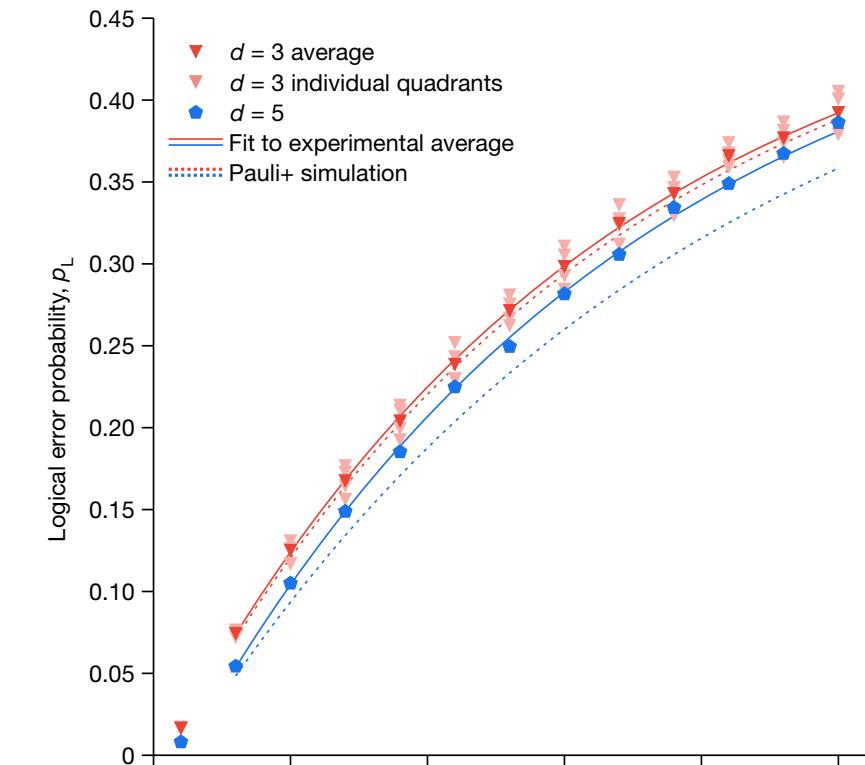
## 5. 誤り耐性量子計算機の実現に向けた取り組み

### 誤り訂正のデモンストレーション(1)

- 72 qubit の(チューナブル)超伝導量子コンピュータを使って表面符号を動かした
- コードサイズ 3 と 5 を実験し、コードサイズ 5 の方が 3 よりも論理エラーレートが改善することを実証



■ Data qubit ( $d^2$ )  
■ Measure qubit ( $d^2 - 1$ )  
■ Unused  
□ Subset distance-3

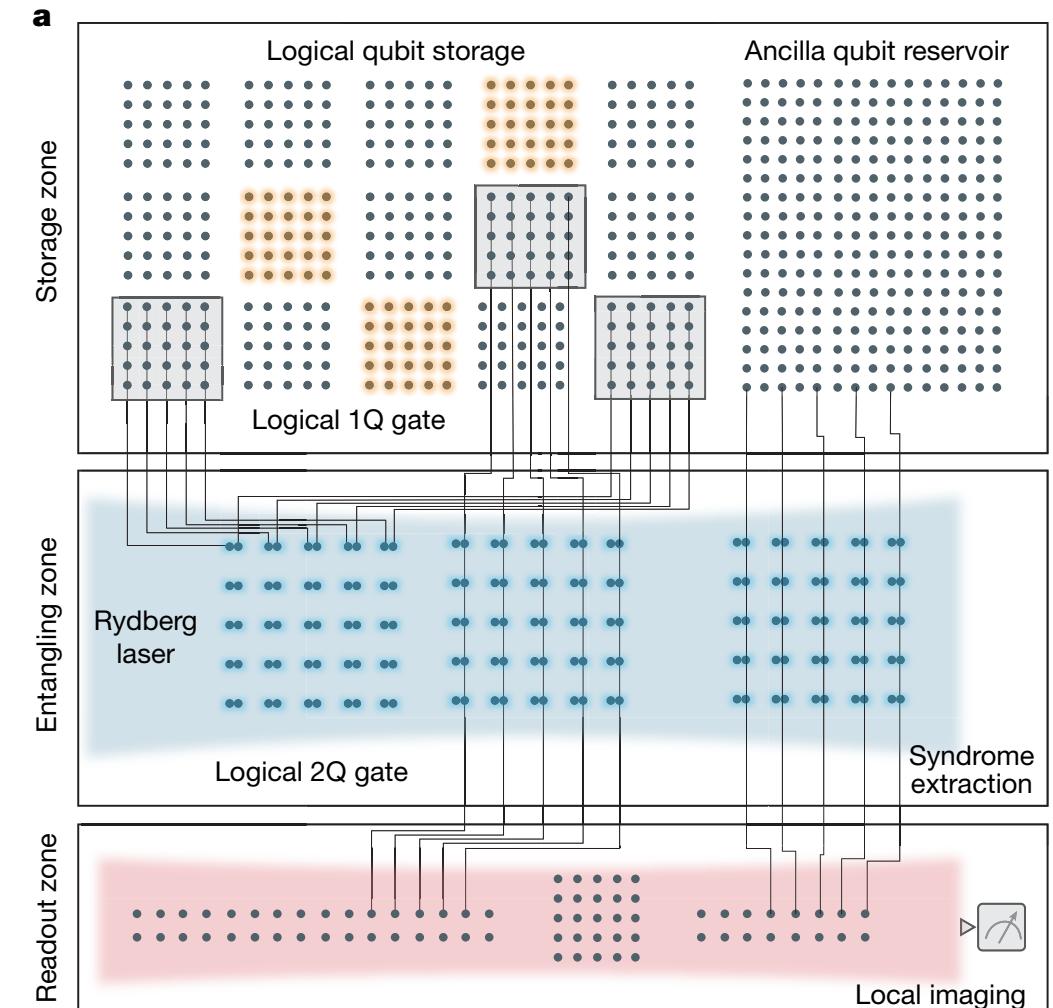


[Google, Nature '23]

## 5. 誤り耐性量子計算機の実現に向けた取り組み

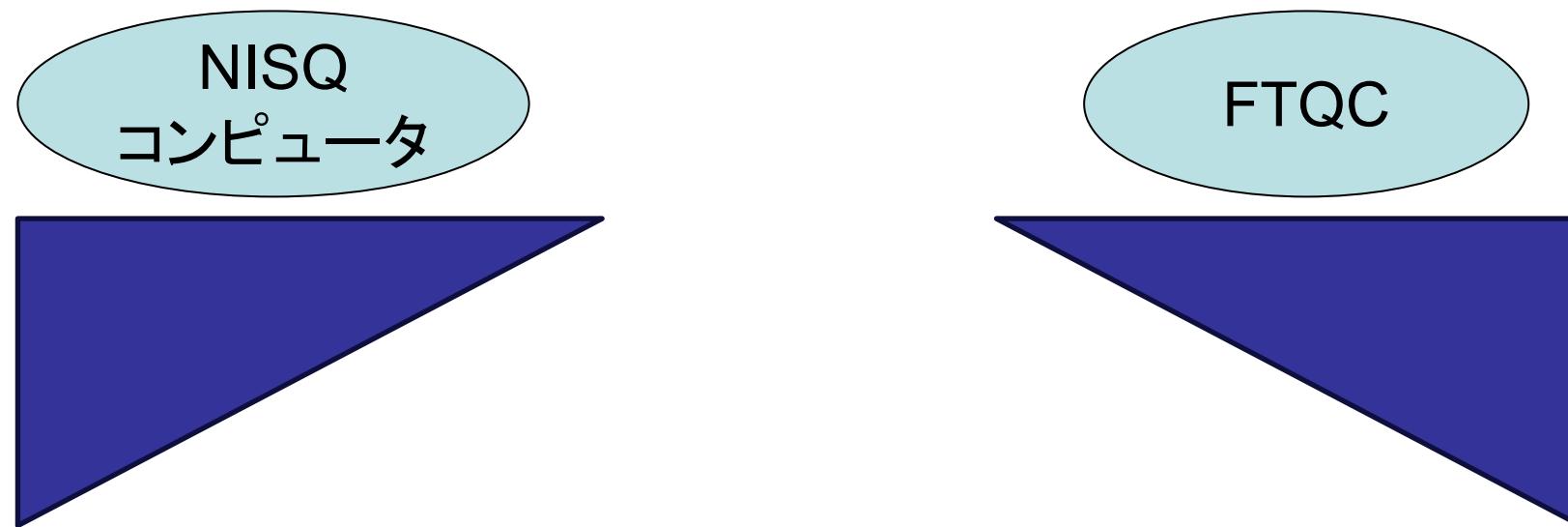
### 誤り訂正のデモンストレーション(2)

- 冷却原子を使ったデモンストレーション
  - 表面符号(コードサイズ 3 ~ 7)
  - $[[8, 3, 2]]$  の符号で 48 論理量子ビットまで実証
  - 超伝導量子ビットとは操作の制約が異なる  
(物理的に移動できる)
- $[[8, 3, 2]]$  の符号でユニバーサルなゲートを用意できるかはまだ分かっていない



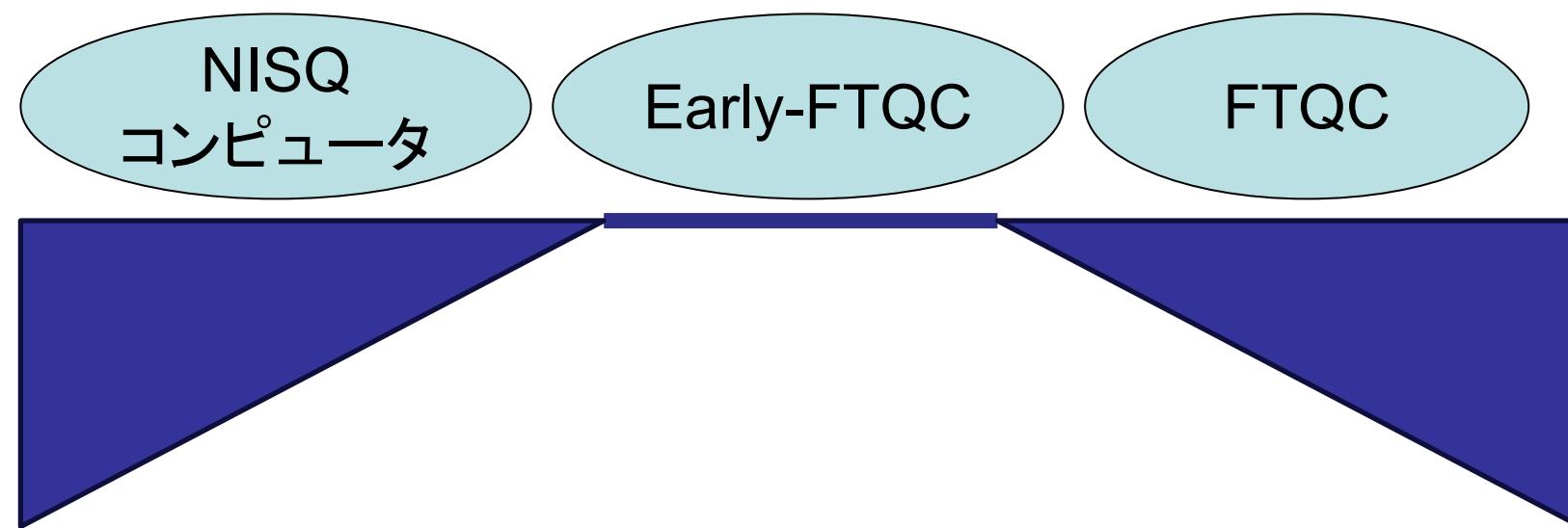
## 6. Early-FTQCに向けた取り組み

- NISQコンピュータ → FTQC の大きなギャップ



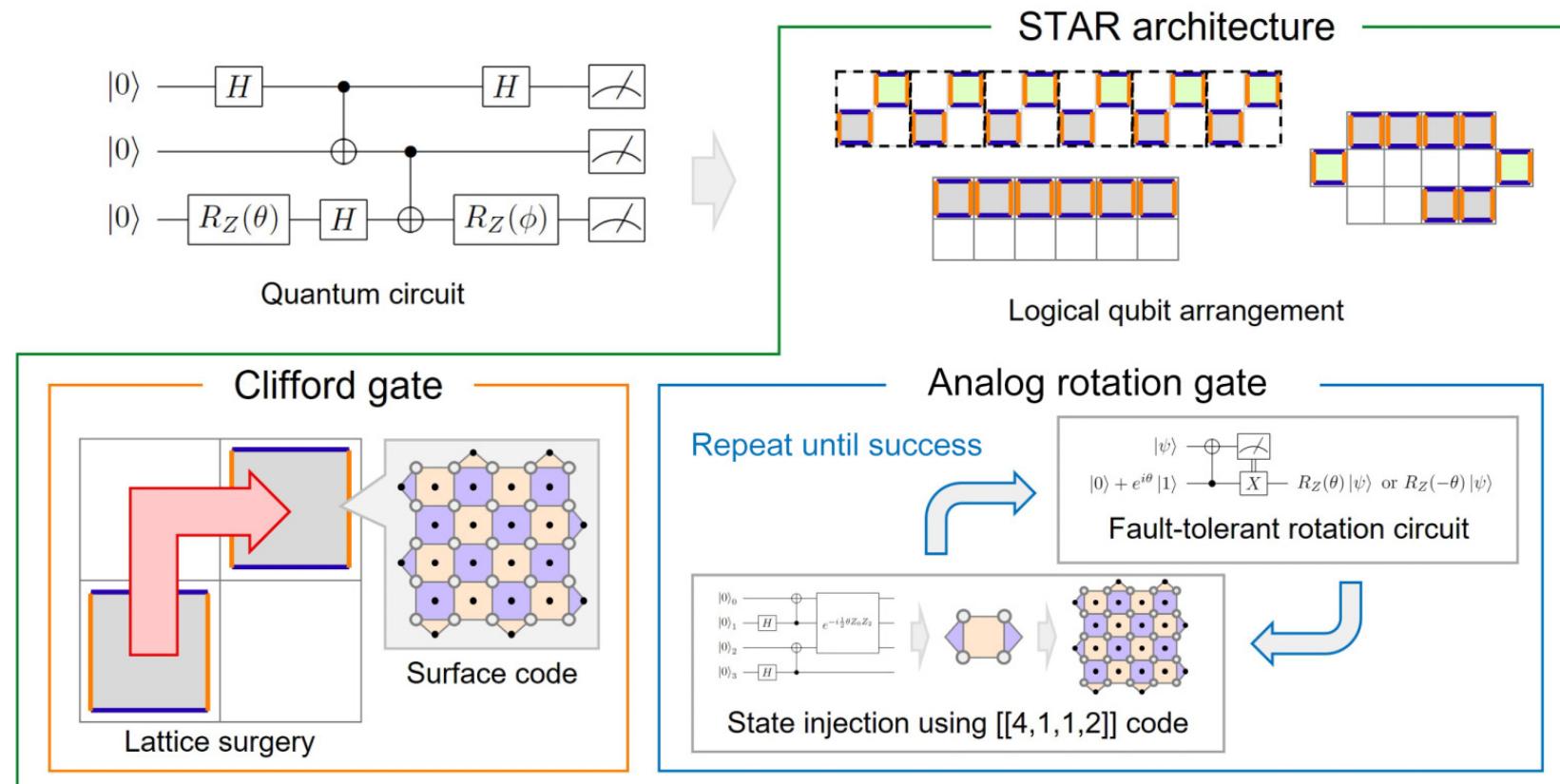
## 6. Early-FTQCに向けた取り組み

- NISQコンピュータ → FTQC の大きなギャップ
  - Early-FTQC により埋める



## 6. Early-FTQCに向けた取り組み

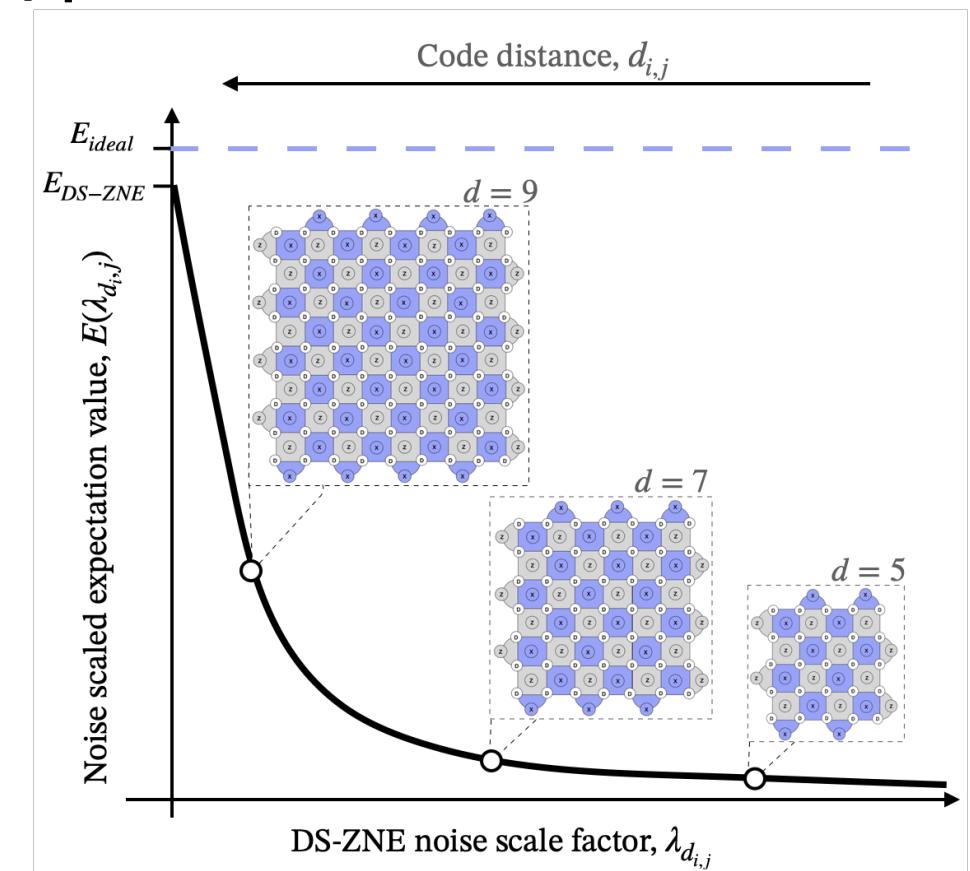
例1:Tゲートの代わりにアナログ回転ゲートを使う → 必要なリソースの削減



## 6. Early-FTQCに向けた取り組み

### 例2: 誤り訂正と誤り緩和技術(ZNE<sup>\*1</sup>)の組み合わせ

- ZNEはノイズファクタを変えて実行した結果から、ノイズがない場合の計算結果を推定する誤り緩和技術
- 誤り耐性量子計算に十分なシステム規模がなくても、符号距離を変えて実行することでノイズファクタをえることができる
- 符号距離をえると論理エラー率は大きく変化するためZNEに良い

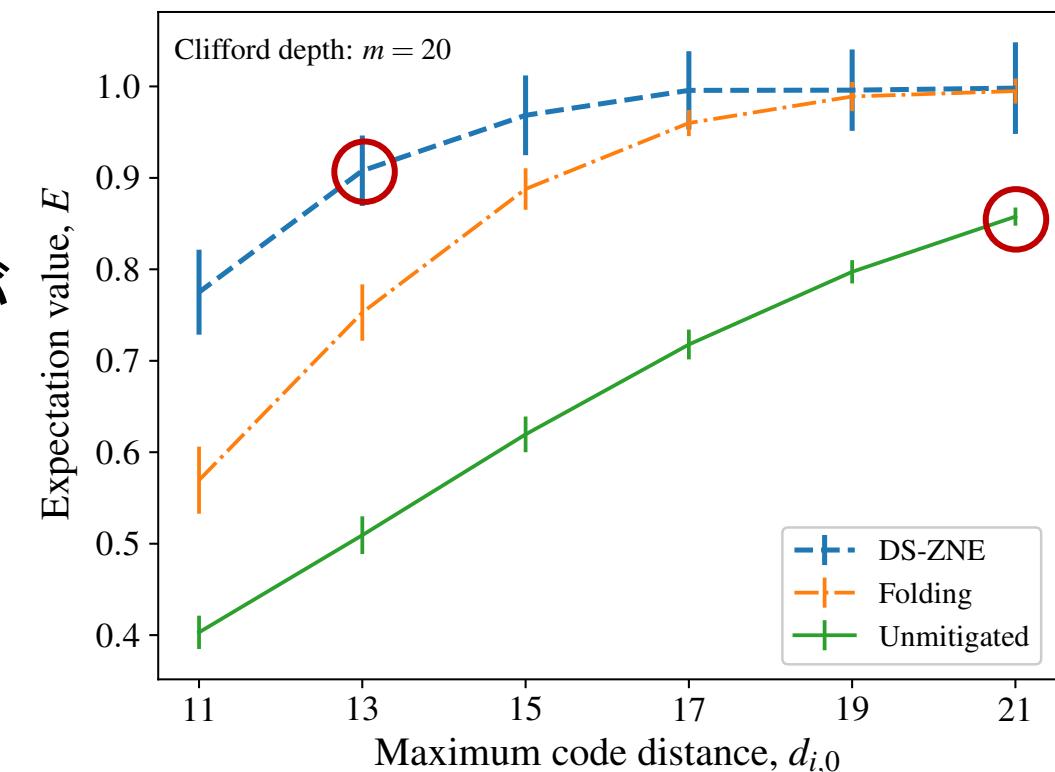


<sup>\*1</sup> Zero Noise Extrapolation [M. A. Wahl+, QCE '23]

## 6. Early-FTQCに向けた取り組み

### 例2: 誤り訂正と誤り緩和技術(ZNE<sup>\*1</sup>)の組み合わせ

- ZNEはノイズファクタを変えて実行した結果から、ノイズがない場合の計算結果を推定する誤り緩和技術
- 誤り耐性量子計算に十分なシステム規模がなくても、符号距離を変えて実行することでノイズファクタを変えることができる
- 符号距離を変えると論理エラー率は大きく変化するためZNEに良い



<sup>\*1</sup> Zero Noise Extrapolation [M. A. Wahl+, QCE '23]

## 7. まとめ

- 誤り耐性量子コンピュータ(FTQC)に関して研究動向を紹介
  - 特にコンピュータの観点から
- FTQCによる量子加速の実現には長期的な取り組みが必要
- 2つの方向性
  - システム大規模化のための研究
  - 必要なリソース規模を小さくする研究
- 抽象化とモジュール化が鍵になるのではないか
  - プログラミング→論理ビットレベル表現→物理ビット操作
  - 量子インタコネクトでモジュールを接続