

2025/03/11

第七回量子ソフトウェア社会人講座

極低温超電導コンピュータ・アーキテクチャの開拓～古典から量子の世界へ～

17:35~17:55

オンライン



ムーンショットプロジェクト「超伝導量子回路の集積化技術の開発」のご紹介

日本電気株式会社

セキュアシステムプラットフォーム研究所

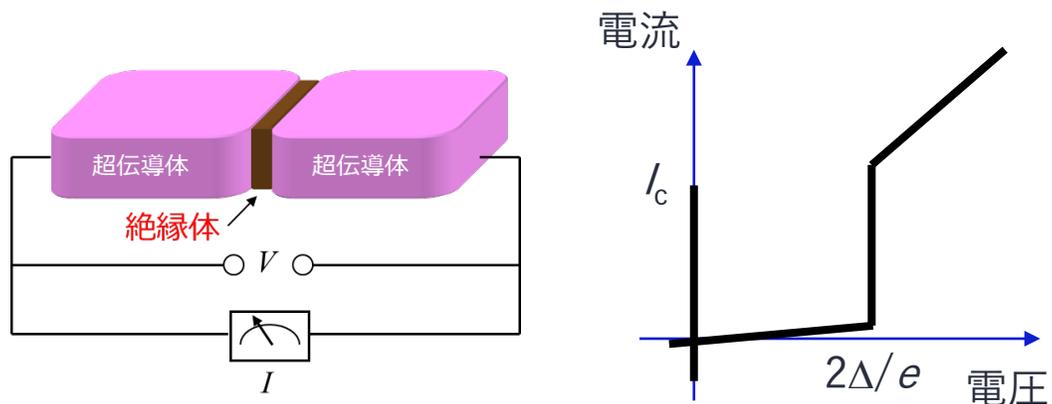
山本剛

超伝導量子回路の集積化技術の開発

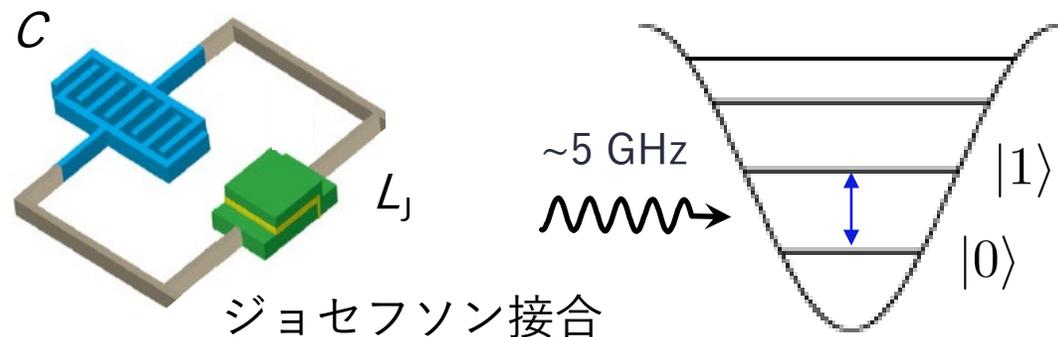
<https://ms-iscqc.jp/>

超伝導量子ビットとは？

- 超伝導体とジョセフソン接合で構成された電気回路
- 5 GHz程度の共振周波数をもつ非線形共振器
- リソグラフィ技術を用いて作製
- 希釈冷凍機を用いて10 mK程度の極低温環境下で動作

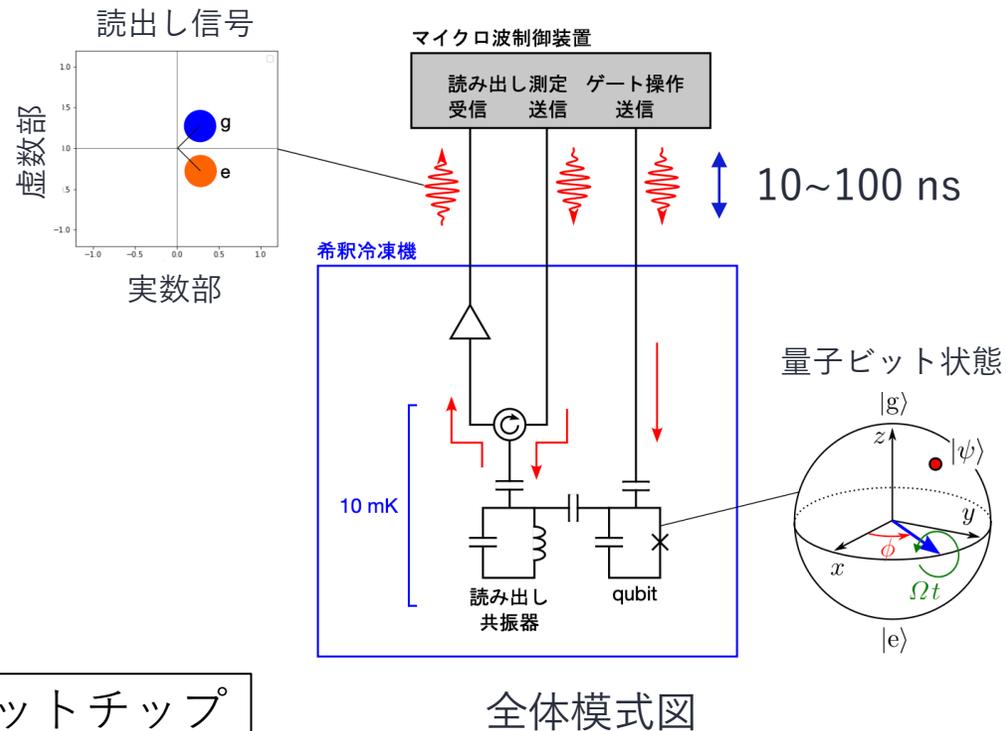
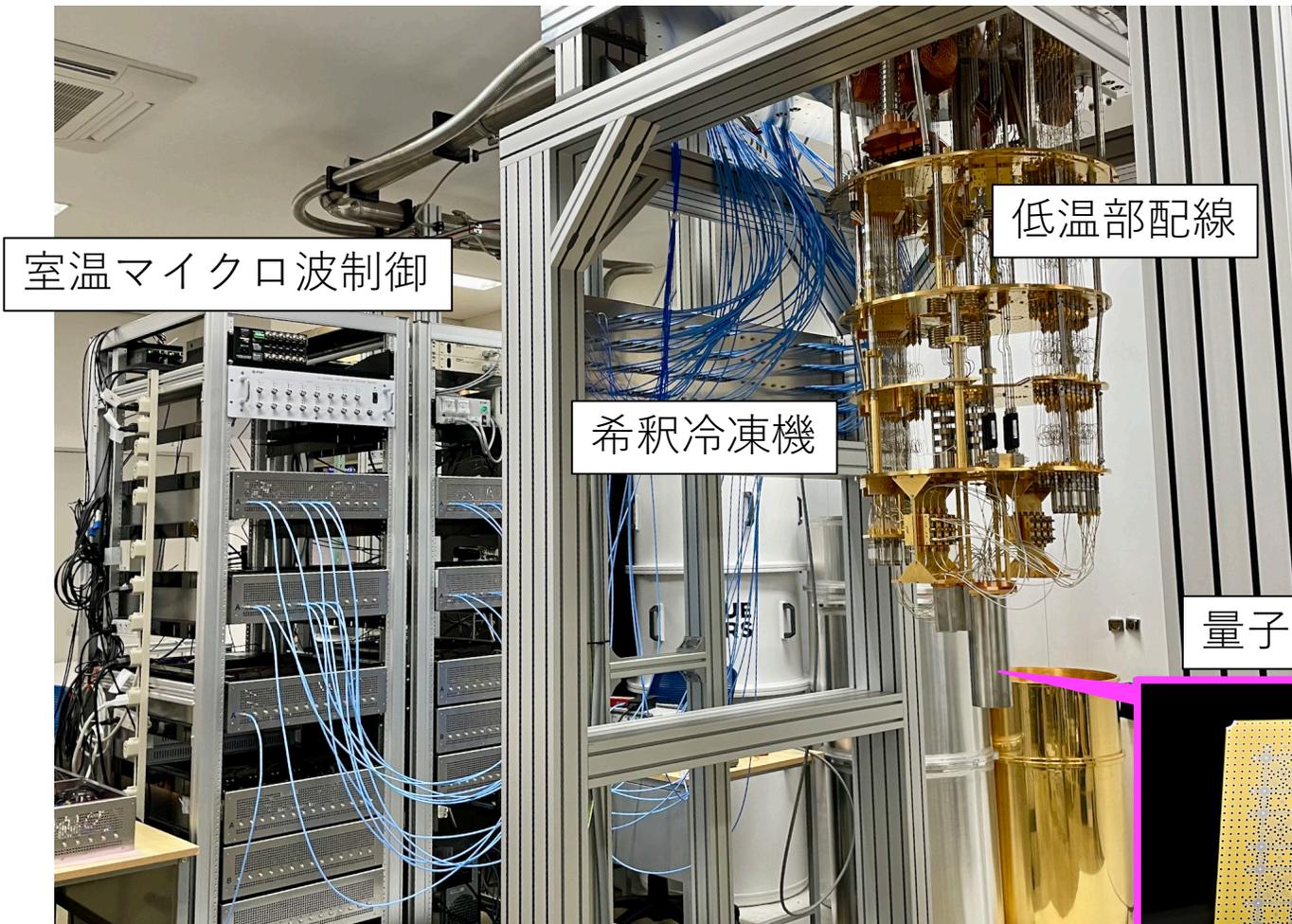


ジョセフソン接合とその電流-電圧特性



超伝導量子ビット (transmon)

超伝導量子コンピュータの実物



写真提供：大阪大学根来研究室

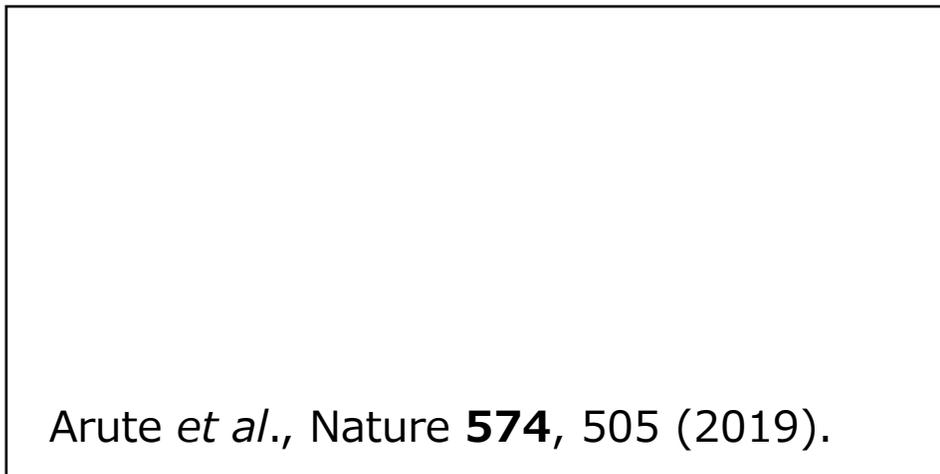
超伝導量子コンピュータ

◆ よいところ

- それなりに低いエラー率 ($\sim 10^{-2}$ for 2-qubit gate)
- ゲート(読出し)速度が速い ~ 10 ns(~ 100 ns)
- 成熟したマイクロ波技術
- 先端半導体プロセス技術の知見を活かせる
- 回路設計自由度が高い
- 量子ビットがいなくなる

超伝導NISQプロセッサ

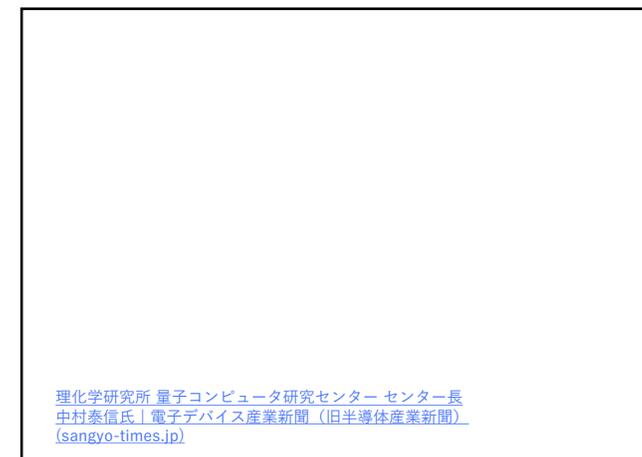
Google



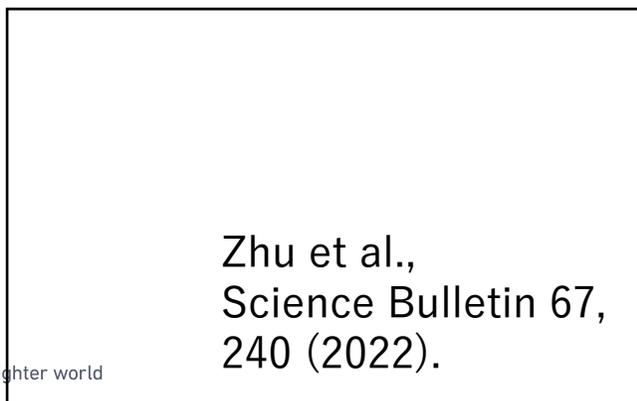
IBM, 433 qubits



RIKEN RQC, 64 qubits



USTC, 66 qubits



Rigetti, 80 qubits



Googleチームによる表面符号の閾値以下動作実証

- ◆ 105個の物理量子ビットを持つ超伝導量子回路を用いて最大符号距離7の表面符号を実装
- ◆ 符号距離に応じた論理エラー率の指数関数的減少を確認（エラー閾値以下動作）
- ◆ 物理量子ビットの最大寿命を2.4倍論理ビットが上回る（損益分岐点越え）
- ◆ leakageエラー対策等により、15時間の連続動作を実現

Nature <https://doi.org/10.1038/s41586-024-08449-y> (2024).

超伝導量子コンピュータ

◆ よいところ

- それなりに低いエラー率 ($\sim 10^{-2}$ for 2-qubit gate)
- ゲート(読出し)速度が速い ~ 10 ns(~ 100 ns)
- 成熟したマイクロ波技術
- 先端半導体プロセス技術の知見を活かせる
- 回路設計自由度が高い
- 量子ビットがいなくなる

◆ よくないところ

- まだまだ高いエラー率
- 量子ビットサイズが大きい (~ 1 mm²/qubit)
- 量子ビットパラメータがばらつく ($\delta f_{01} \sim 1\%$)
- 絶対零度付近に冷やさないといけない
- 高周波配線が必要 (>1 /qubit)
- 量子ビットを動かさない → 最近接結合 → 表面符号
- 光との相性



ABOUT
概要



ムーンショット目標6

2050年までに、経済・産業・安全保障を
飛躍的に発展させる誤り耐性型汎用量子コンピュータを実現

<https://ms-iscqc.jp/>

これまでは何とかなっていたが、
>1M量子ビットの集積化が必要な
FTQC実現には避けて通れない

研究テーマと課題推進者

R&D Target 1: 誤り耐性量子コンピュータ用量子ビット回路の研究開発
 R&D Target 2: 量子ビット集積ハードウェアシステムの研究開発
 R&D Target 3: 量子誤り訂正用エレクトロニクスの研究開発

6 private companies, 4 national laboratories, and 8 universities

M. Negoro



K. Inoue



Kyushu Univ : system design for superconducting FTQC

Y. Uzawa



A. Kawakami



NAOJ, NICT: SIS-mixer-based microwave amplifier

M. Saito Y. Fujiwara H. Nakagawa



ULVAC, ULVAC Cryogenics, AIST : Refrigeration Systems for Quantum Computing

M. Konoto



K. Koshino

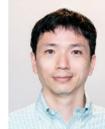


Nagoya Univ., TMDU, RIKEN, NEC: Qubit readout using a single flux quantum circuit

K. Inomata



F. Yoshihara



S. Saito



J. S. Tsai



NEC

S. Odate

ing a bright

T. Yamashita

A. Noguchi

NEC, AIST: Improvement of qubit lifetime and coherence
 Tokyo Medical and Dental University: Theoretical study on the qubit readout
 NICT, Tohoku Univ.: Qubit with epitaxial junction and magnetic junction
 NIKON, AIST: Qubit fabrication using CMOS compatible process
 NTT, Tokyo University of Science, RIKEN: Bosonic code using superconducting circuits

Osaka Univ. : Scalable Electronics for Quantum Computers

M. Tada K. Uchida M. Miyamura



NBS, Univ. of Tokyo, Keio Univ : cryo FPGA

H. Ishikuro



Keio Univ., Univ. of Tokyo: high-frequency analog circuits for low temperature operation

M. Tanaka T. Yamamoto



Nagoya Univ., NEC: Qubit control using a single flux quantum circuit

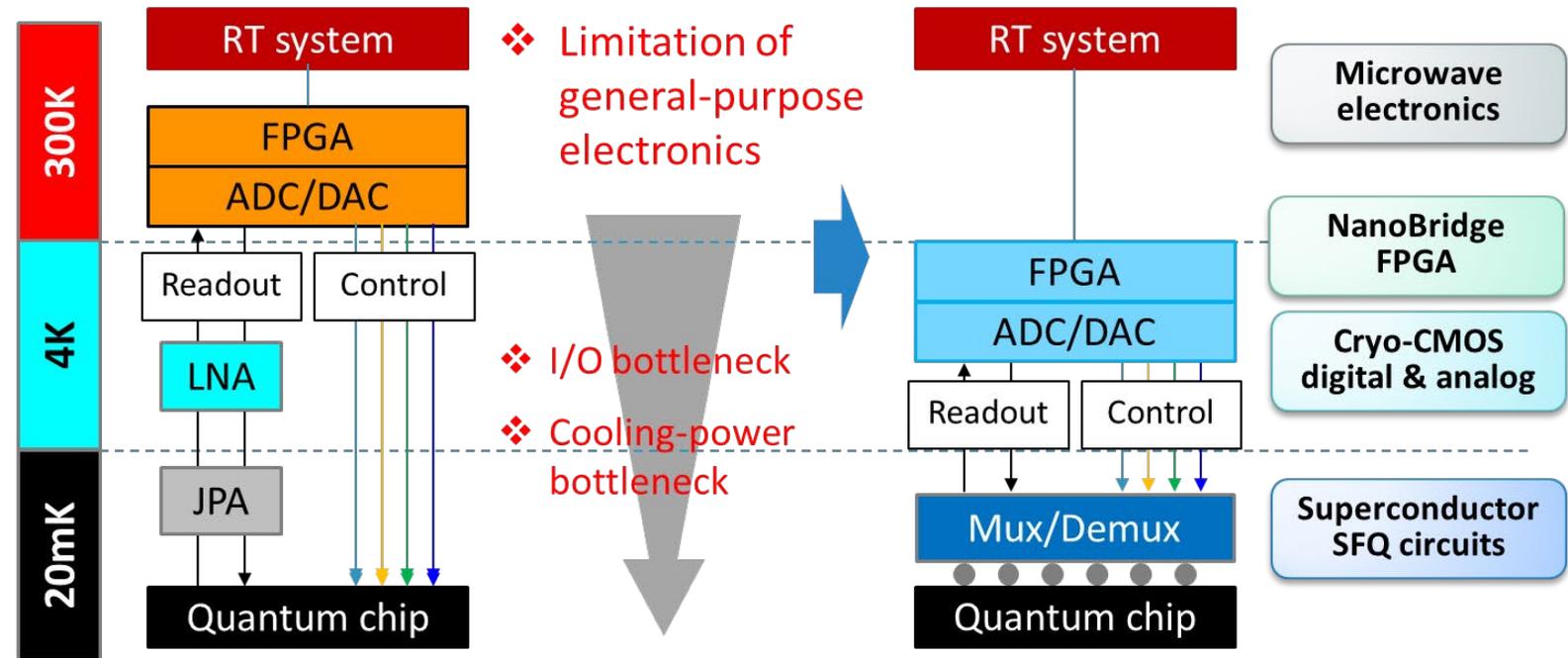
S. Yorozu



RIKEN: Stacked structure of chips with different functions

クライオエレクトロニクス

- ◆ Cryo-CMOS, SFQ, AQFP etc.
- ◆ Potentially reduces the number of physical interconnects (coaxial lines) between the quantum-classical interface and room-temperature electronics



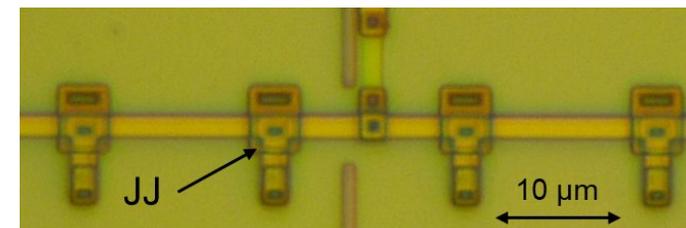
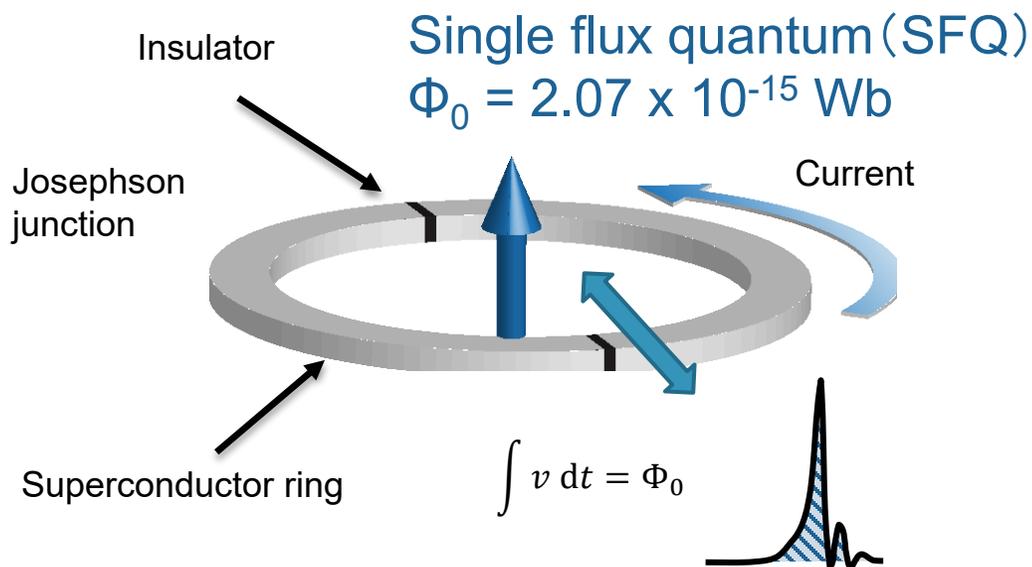
單一磁束量子回路



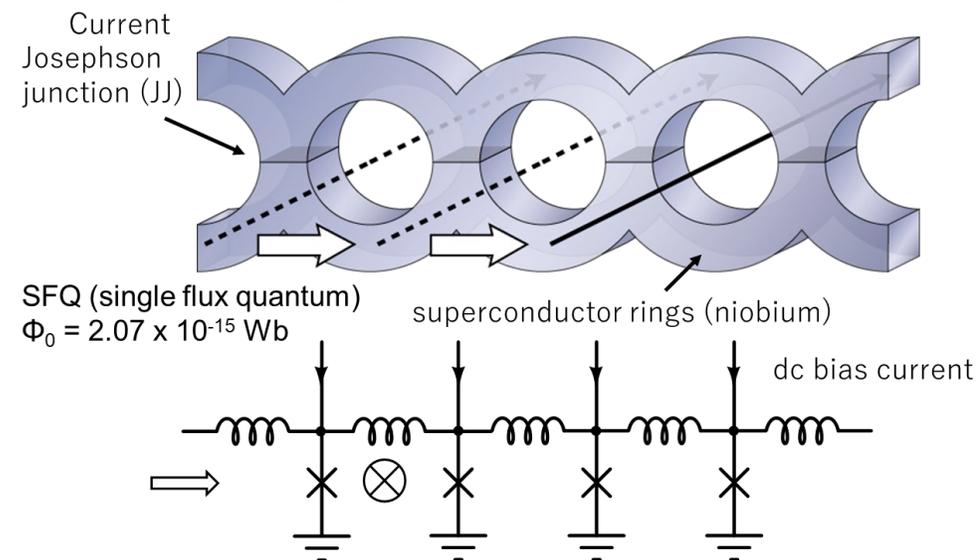
M. Tanaka



T. Yamamoto



Josephson transmission line (JTL)



High-speed digital LSIs using quantized magnetic flux

- ❖ Voltage pulse-driven logic
- ❖ 10+ GHz, low-power operation
- ❖ Transmission line interconnects

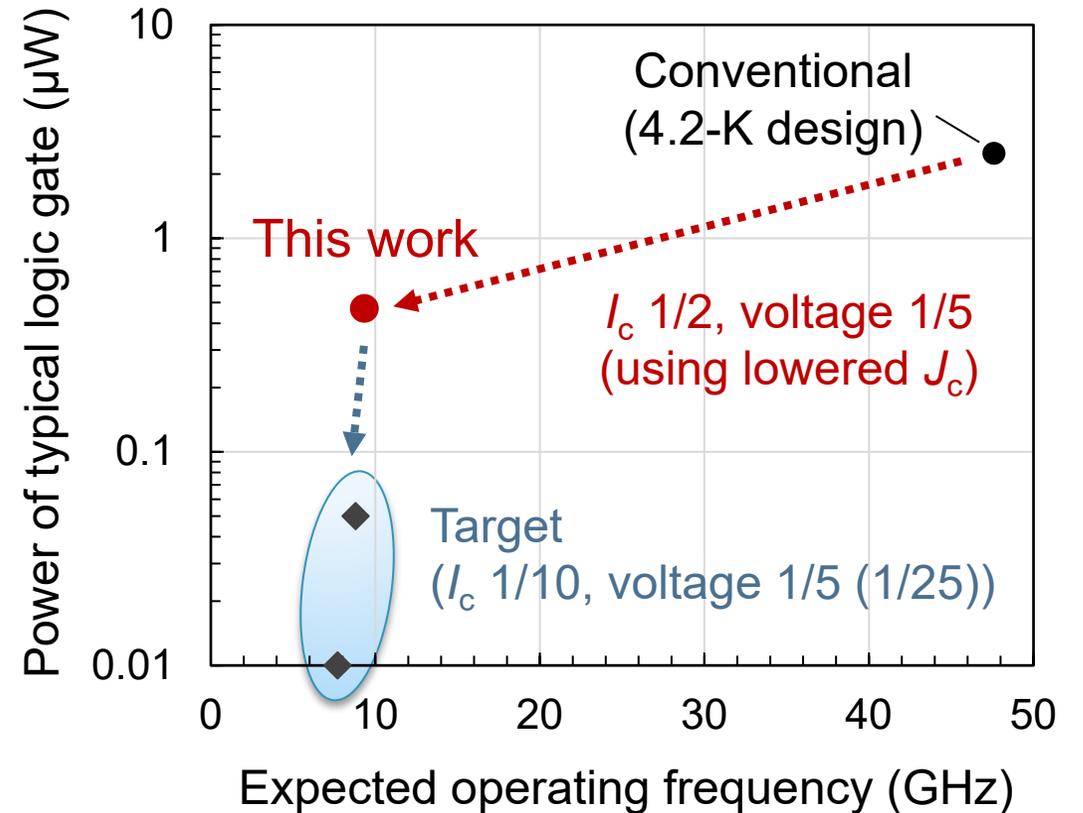
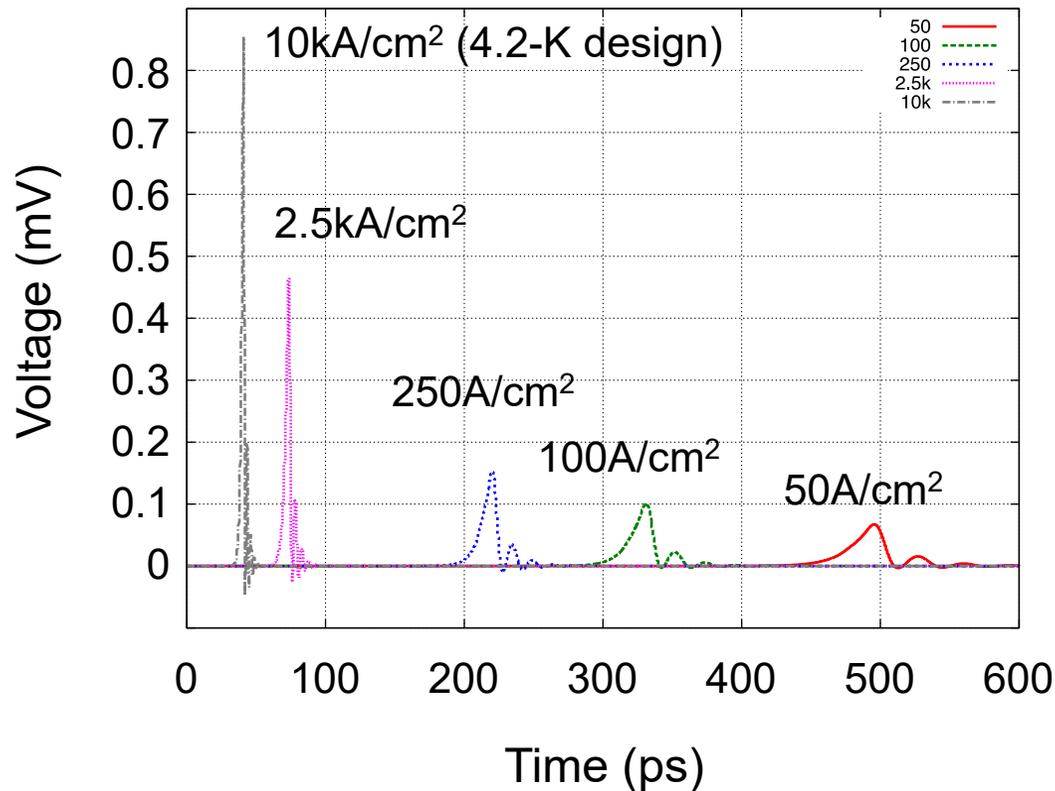
K. K. Likharev and V. K. Semenov, IEEE Trans. Appl. Supercond. 1 (1991).

Selection of Critical Current Density

M. Tanaka et al.,
IEEE Trans. Appl. Supercond. 33, 1700805 (2023).

- ◆ Easy to fabricated small I_c JJs (2–10 μA)
- ◆ Acceptable operating frequency (10GHz)

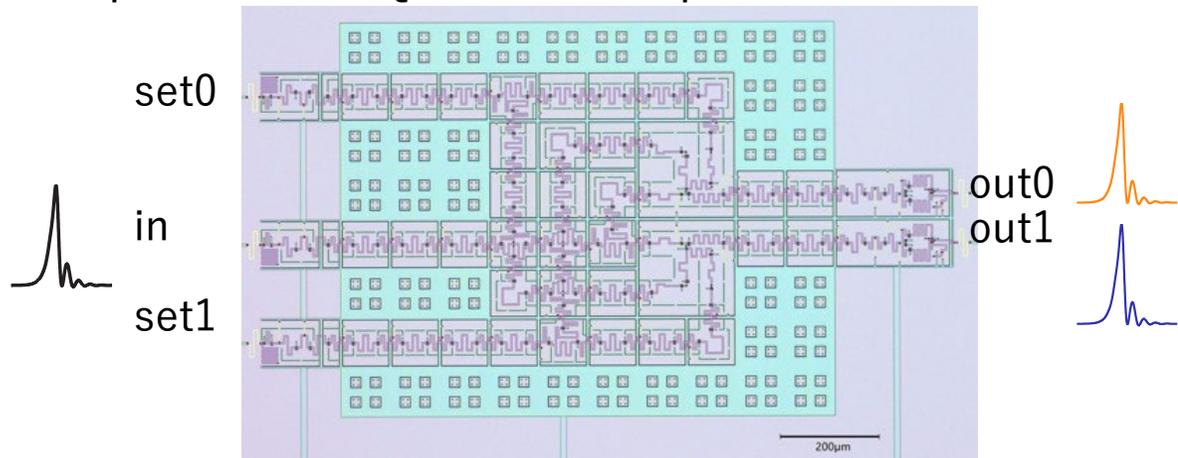
➔ **$J_c = 250 \text{ A/cm}^2$**



単一磁束量子回路を用いた量子ビットの制御

M. Tanaka et al.,
IEEE Trans. Appl. Supercond. 35, 1700405 (2025).

Development of SFQ 1:2 Demultiplexer



- ✓ JJ count: 101
- ✓ Bias current: 1,368 μA
- ✓ Circuit Area: 0.80 mm²
- ✓ Power (0.1-mV cells): 136.8 nW
- ✓ Latency (0.1-mV cells): 326.7 ps

Monolithic integration
of SFQ demux and
AI-based two qubits

to be tested soon!

まとめ

- ~1M物理量子ビットが必要とされるFTQC実現のためには、量子ビットコヒーレンス等の基盤技術の継続的な改善とともに、スケーラビリティの阻害要因を打破する新しい技術、それを活用する全体アーキテクチャ設計が必要

NEC

\Orchestrating a brighter world