

超省エネルギープロセッサ

Research Unit: Extremely Energy-Efficient Processors

研究ユニットの概要

将来の高性能スーパーコンピュータやデータサーバの実現のためには、エネルギー効率が極めて高い集積回路技術の創成が必要です。我々は、高速性が特徴の超伝導磁束量子回路において、回路をゆっくりと断熱的に動作させることで、熱力学的極限を超える究極の低消費エネルギー集積回路を実現することを目指しています。本研究ユニットでは、計算におけるエネルギー下限値を解明するとともに、断熱的可逆演算回路を用いた超省エネルギープロセッサの研究開発を行います。以上の成果に基づいて、極限的低消費エネルギーで動作する超伝導集積回路を用いたコンピュータシステムを実現します。更に研究成果を量子コンピュータや単一光子検出システム、質量分析システムなどの様々な応用分野に展開します。

超省エネ超伝導コンピュータの開発

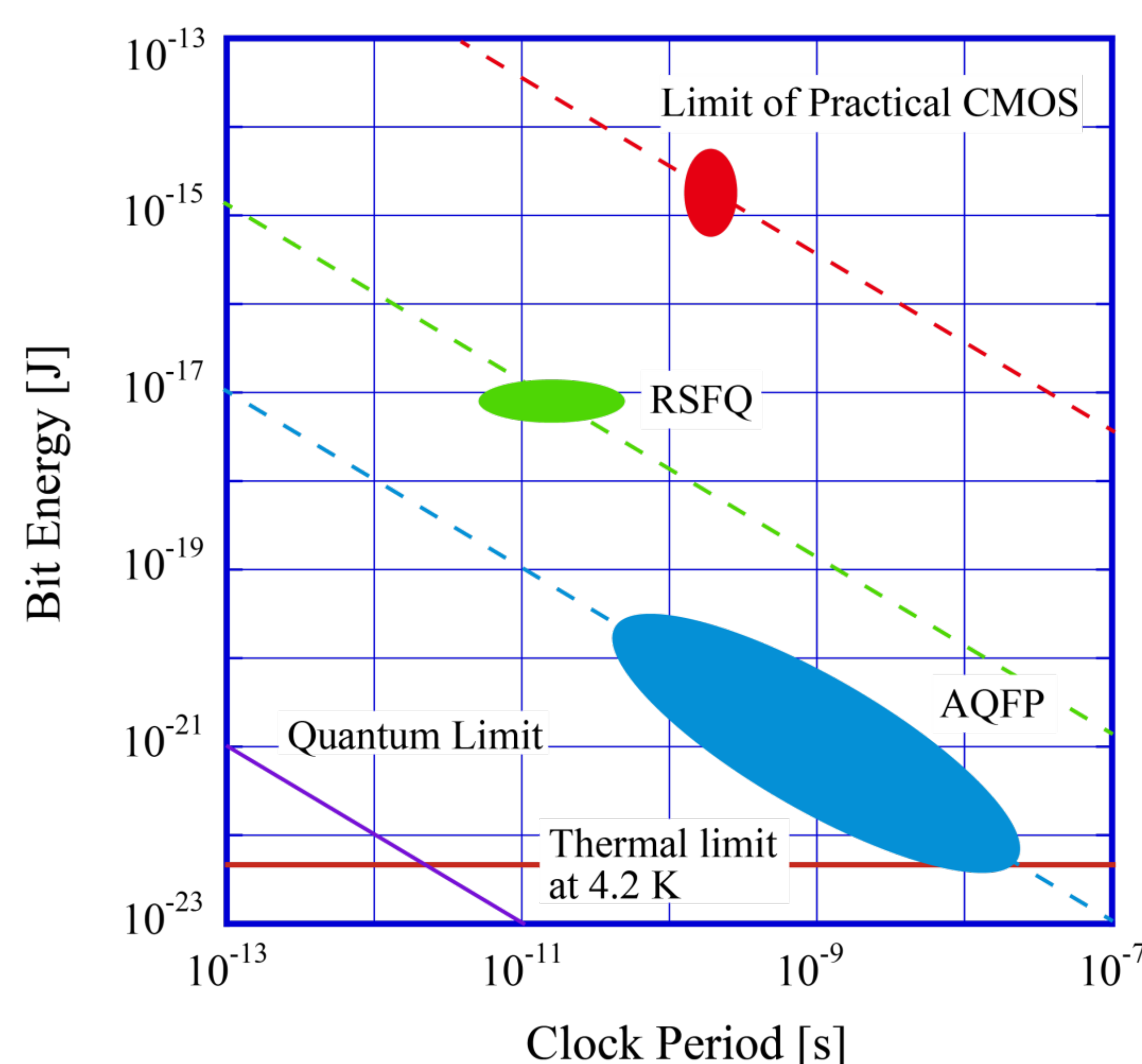
本研究ユニットでは、将来の高性能スーパーコンピュータやデータサーバの省エネ化のために、エネルギー効率が極めて高い集積回路の実現を目指しています。本研究では、高速性が特徴の超伝導磁束量子回路を断熱的に動作させることで、熱力学的に極限的低エネルギーで動作する論理回路 (Adiabatic Quantum Flux Parametron: AQFP) を開発します。これにより従来の半導体集積に対して消費電力を6桁低減します。また、超エネ集積回路技術を用いたコンピュータシステムを開発します。

演算回路のエネルギー下限値の解明

入力から出力、出力から入力に双方向に論理計算を行える回路を可逆論理回路と言います。可逆論理回路では、論理計算の消費電力をほぼゼロにできることが予言されています。我々は、AQFP論理回路を用いた可逆回路を提案し、その双方向論理動作を実証しました。今後は、本回路を用いて論理計算におけるエネルギー下限値を理論的、実験的に解明します。

超省エネ回路を用いた高性能機器開発

本研究で開発している集積回路は省エネ特性に優れるばかりでなく、高速性、高感度性においても極めて優れた特性を持っています。これらの特徴を生かして、超伝導量子コンピュータとのインターフェイスや単一光子検出器の読出し、飛行時間型質量分析装置の高分解能時間測定など様々な応用分野への展開を目指します。

各種論理ゲートの
クロック周波数とビットエネルギーの比較

本研究で開発している超省エネ集積回路のビットエネルギーは、従来の半導体集積回路に対して約6桁優れています。これにより、冷却電力を見込んでも、コンピュータの消費電力を従来の1000分の1に低減することができます。

ユニット・メンバー

主任研究者	吉川信行 教授
海外主任研究者	トーマス・オートレップ 上席特別教授 (CIS研究所、 Ilmenau University of Technology)
共同研究者	山梨裕希 准教授 竹内尚輝 IAS准教授 クリストファー・アヤラ IAS准教授 徐 秋韻 IAS助教 何 魚行 IAS助教
連携研究者	鈴木秀雄 IAS客員教授



吉川信行

1961年神奈川県生まれ、1989年横浜国立大学大学院工学研究科博士課程修了、1989年横浜国立大学工学部助手、1991年横浜国立大学工学部講師、1993年横浜国立大学工学部助教授、2004年横浜国立大学大学院工学研究科教授、2014年横浜国立大学先端科学高等研究院超省エネルギープロセッサ研究ユニット主任研究者、2000年日本学術振興会大146委員会賞、2004年未踏科学技術協会超伝導科学技術賞

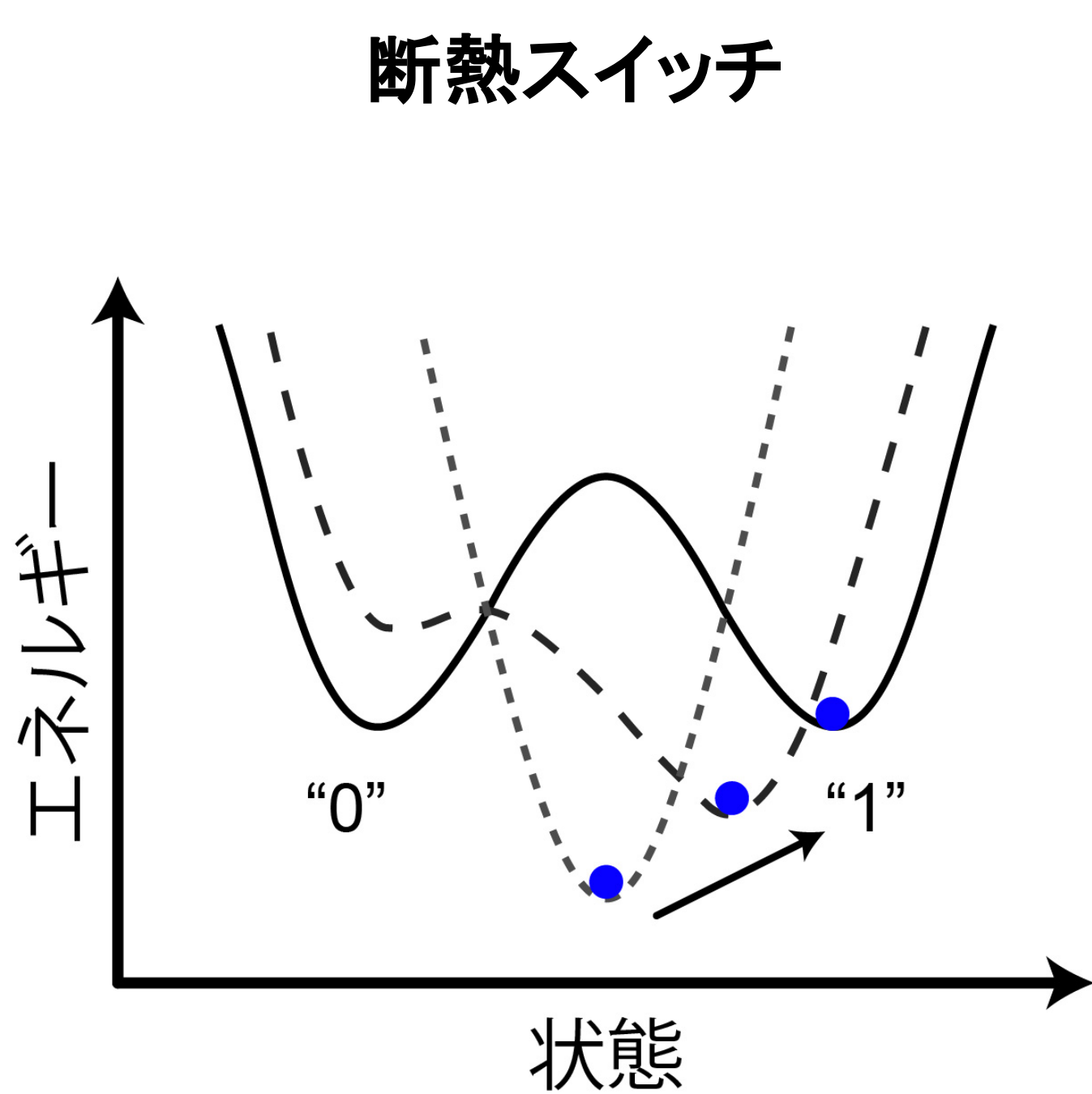
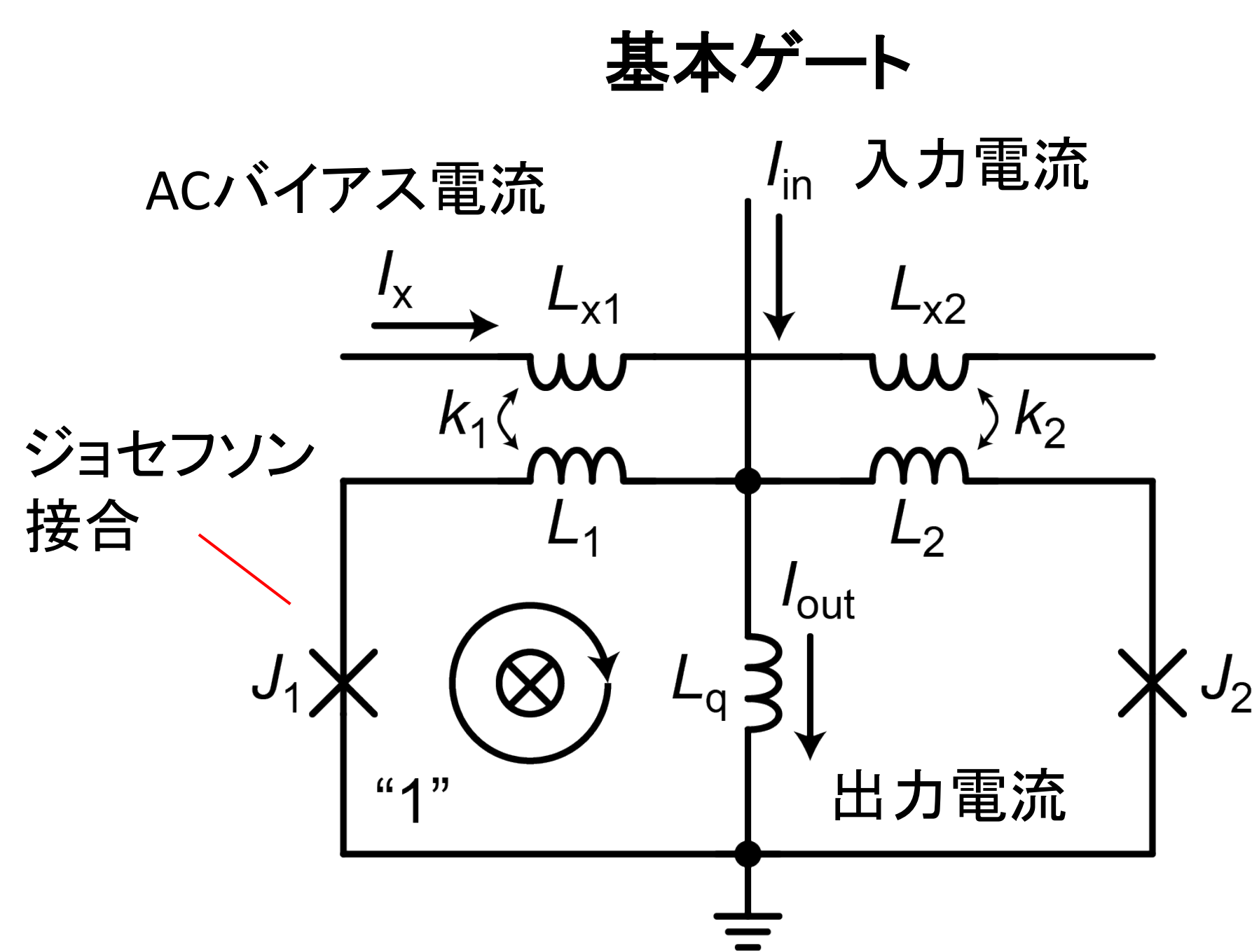
主な研究プログラム

- 2014–2018 熱力学的極限に挑む断熱モード磁束量子プロセッサの研究 (平成27年度科学技術研究助成事業基盤研究 (S))
- 2017–2021 ColdFlux: CAD Methodologies and Tools for Single Flux Quantum Based Superconductive Electronics (米国 IARPA プログラム "SuperTools")
- 2017–2021 Enhance Electronic Design Automation (EDA) Tools in Support of Superconducting Electronics (SCE) (米国 IARPA プログラム "SuperTools")
- 2018–2022 量子磁束回路を用いた量子ビット用制御・読出し回路の研究開発 (NEDO「高効率・高速処理を可能とするAIチップ・次世代コンピューティングの技術開発」)

超省エネルギープロセッサ

Research Unit: Extremely Energy-Efficient Processors

Adiabatic quantum-flux-parametron (AQFP)

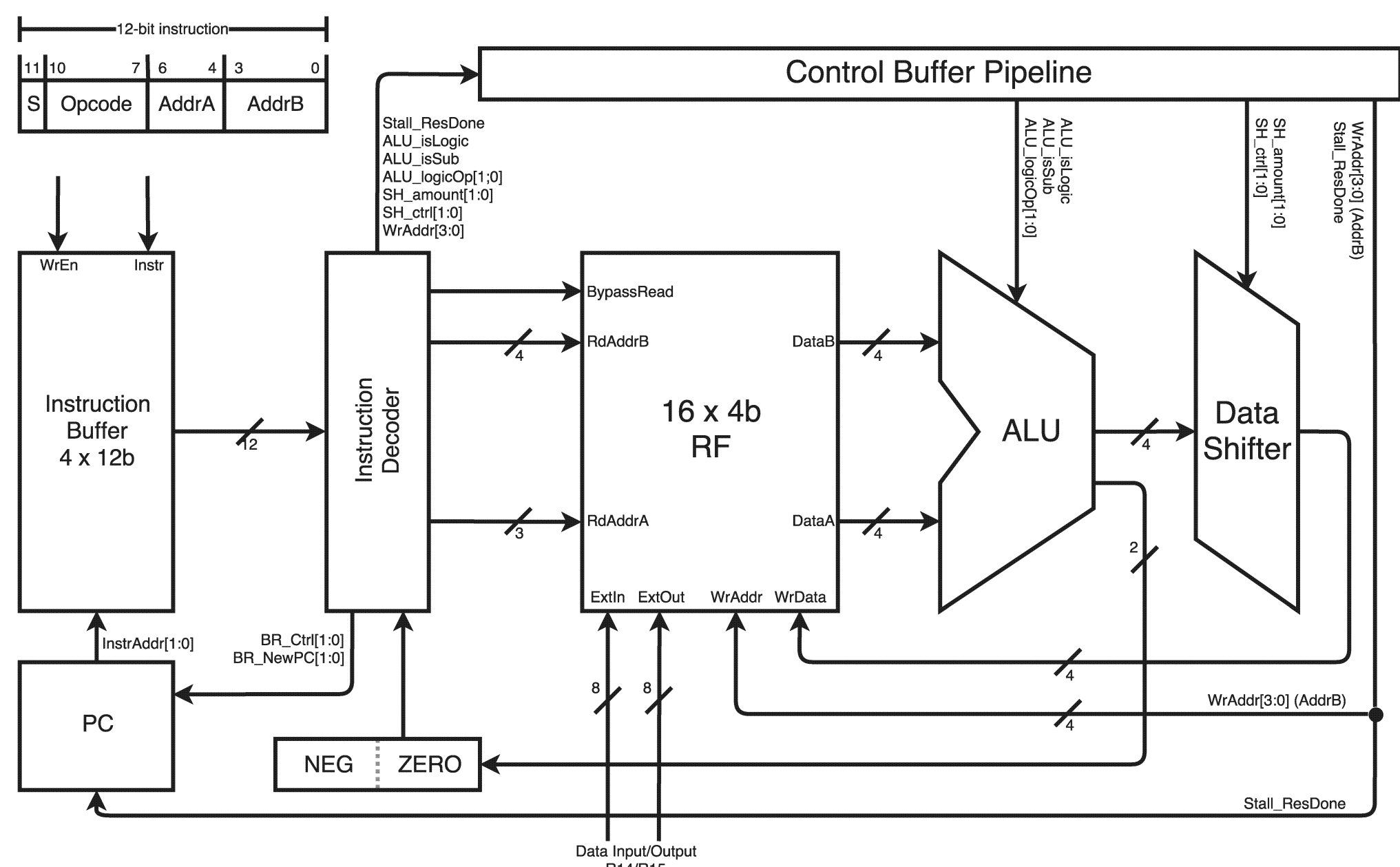


- 80年代に提案されたQFPをベースとした、断熱超伝導ロジック
- 超低電力動作
 - 論理状態を断熱的にスイッチできるため、非常に小さな消費エネルギーで動作が可能; デバイスあたりの消費エネルギー: $\sim 10^{-21}$ J (cf. CMOS: $\sim 10^{-16}$ J)
 - 量子化された磁束を用いて情報をエンコードするため、静的消費電力はゼロ
- 高入力感度 ($\sim \mu\text{A}$)
 - 検出器や量子ビット応用の際に重要
- 低電流駆動 ($\sim \text{mA}$)

M. Hosoya et al., IEEE TAS 1 (1991).
N. Takeuchi et al., Supercond. Sci. Tech. 26 (2013).

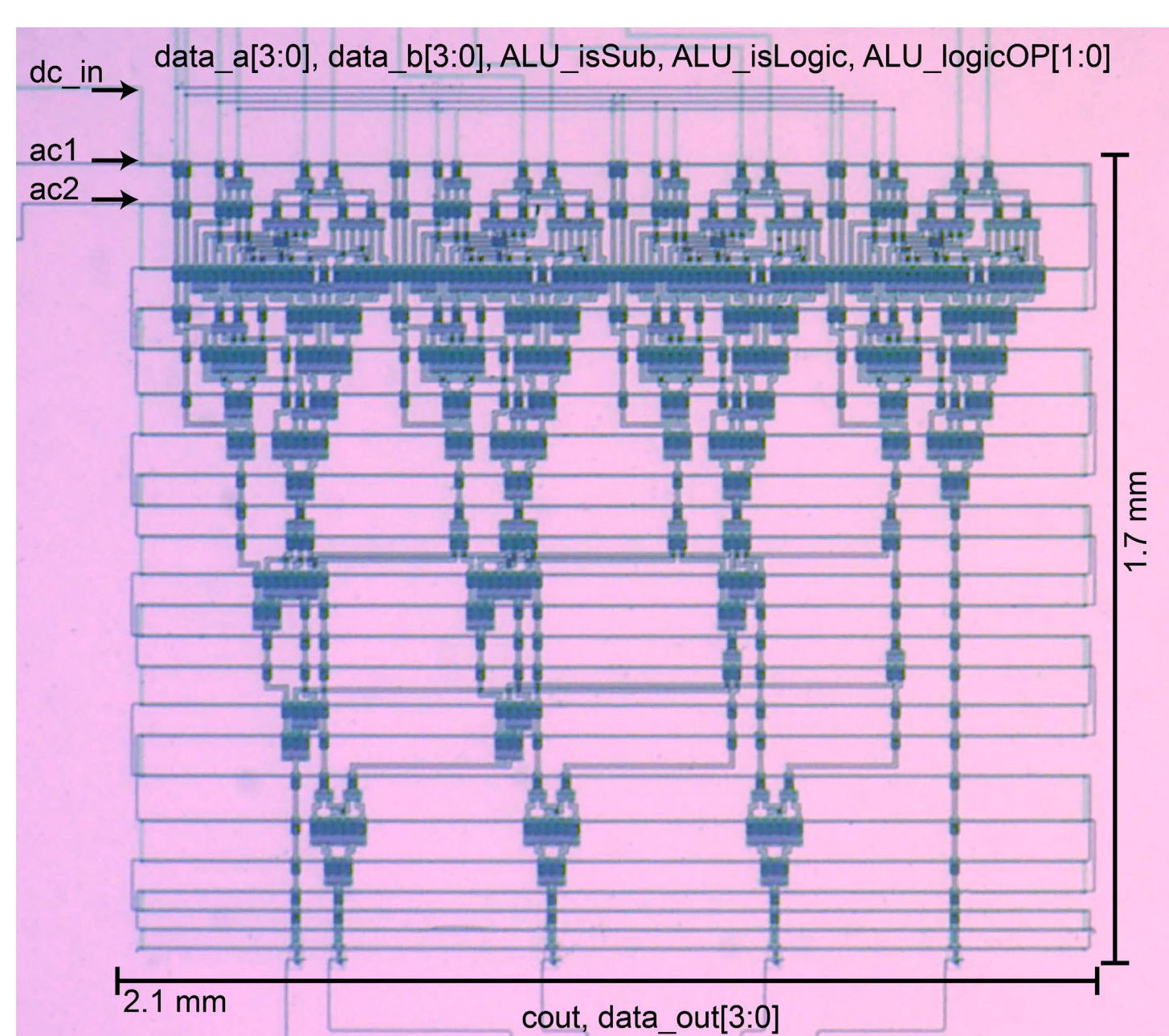
AQFPマイクロプロセッサの開発

Monolithic Adiabatic iNtegration Architecture Processor MANA Processor

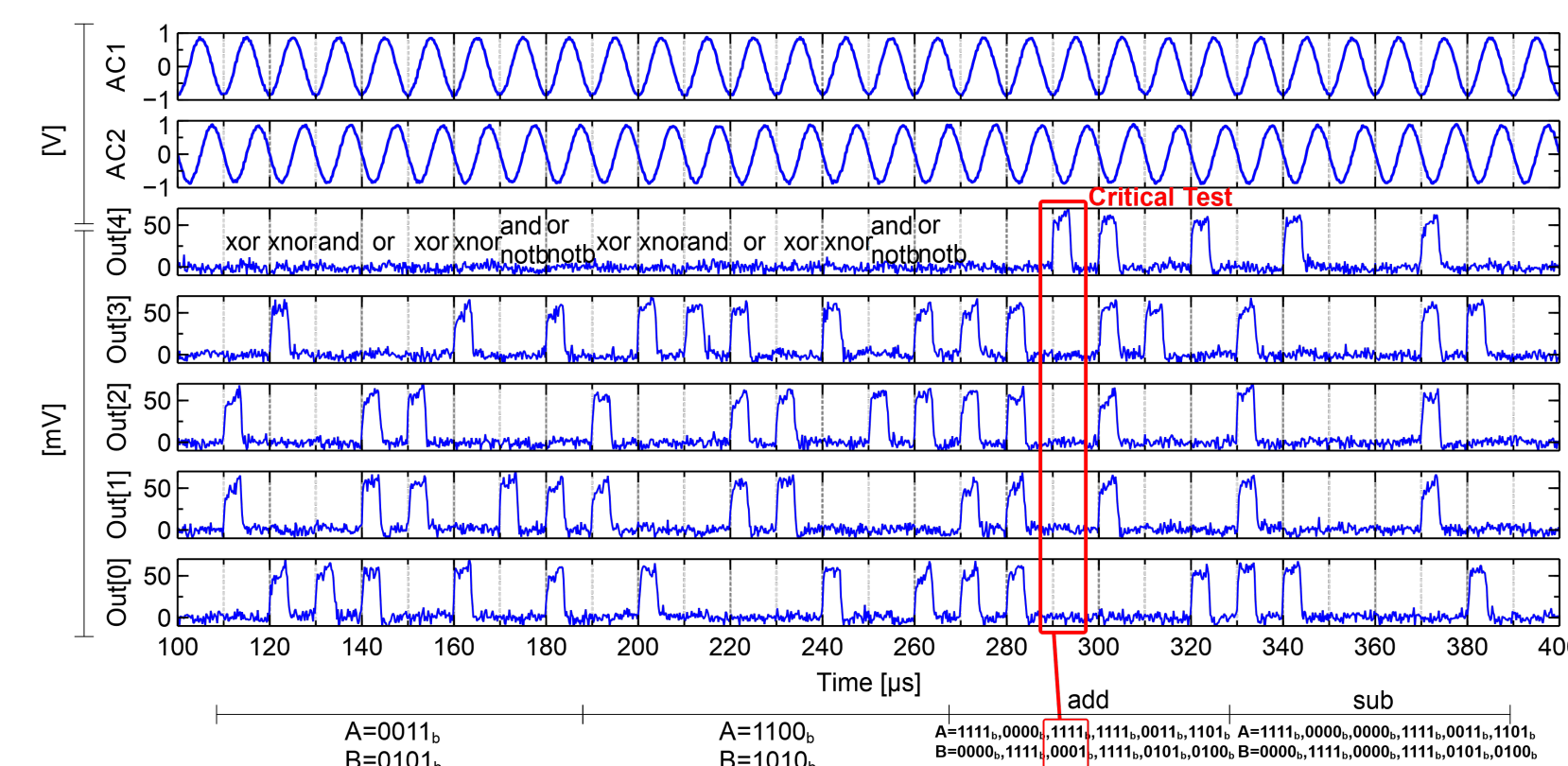


C. L. Ayala et al., ASC 2018.

4ビットALU

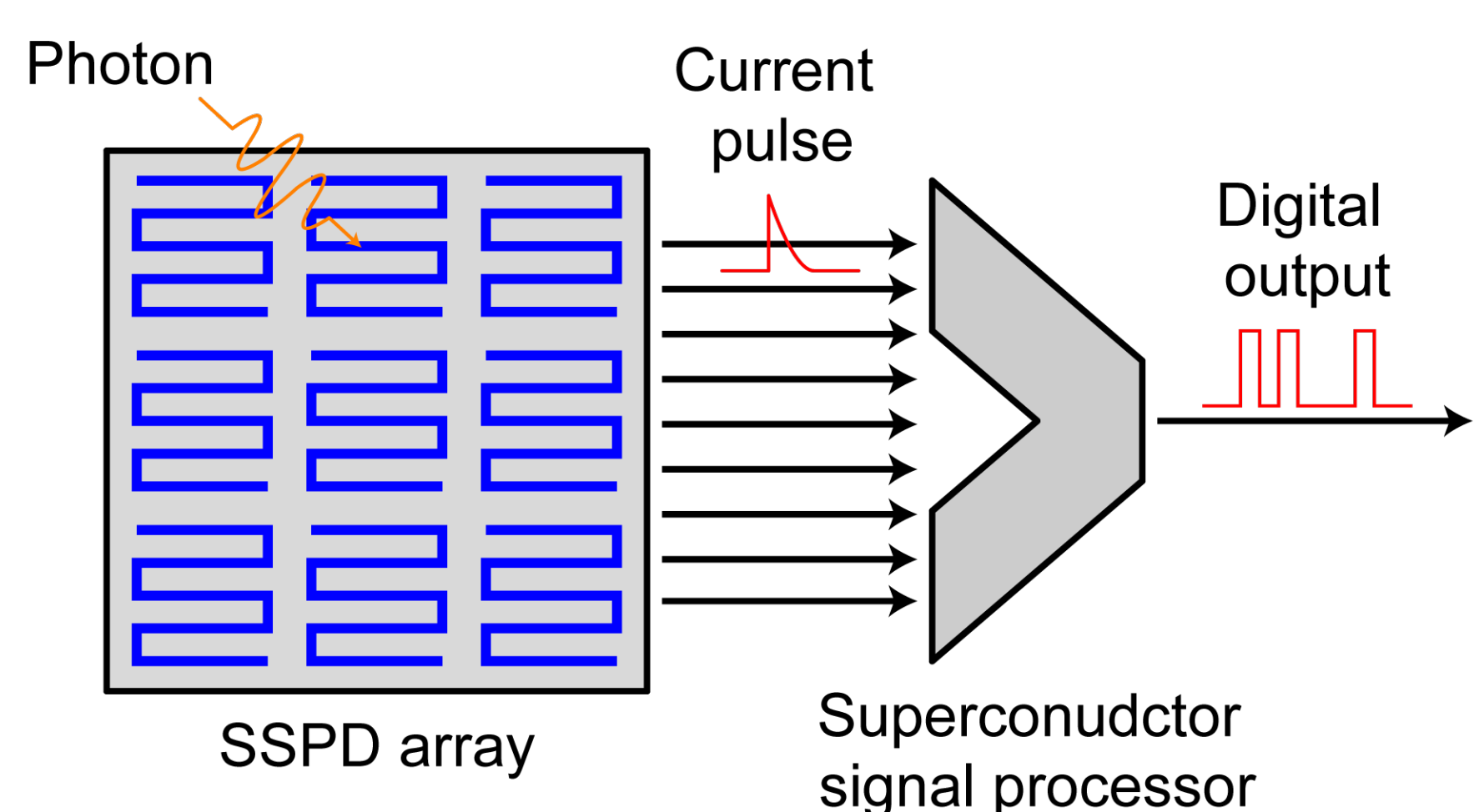


- AQFPロジックを用いた、低電力マイクロプロセッサを開発中
- Monolithic Adiabatic iNtegration Architecture (MANA) Processor: AQFPプロセッサのプロトタイプ
 - $\sim 20,000$ 接合
 - 4ビットデータワードサイズ
 - 5 GHz動作
- 4ビットALUを設計・作製 \rightarrow 動作実証に成功

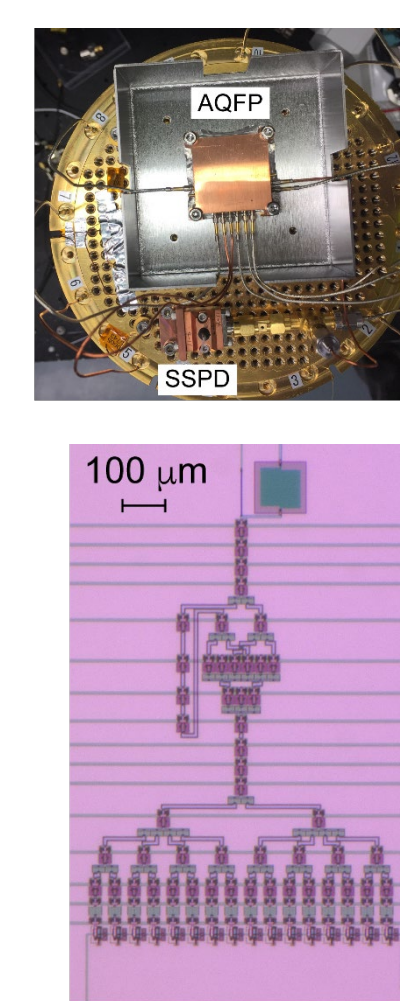
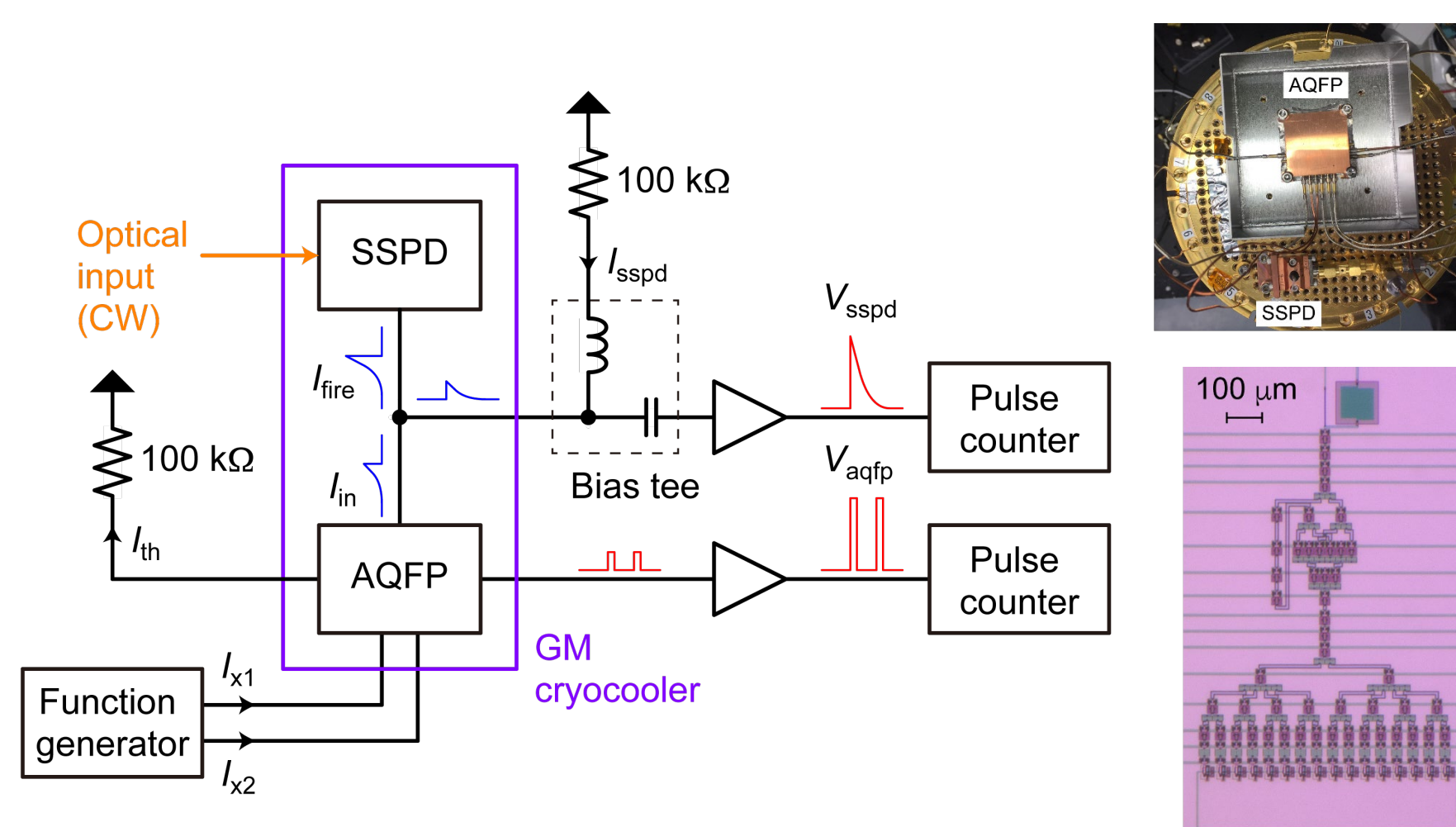


超伝導単一光子イメージセンサの開発

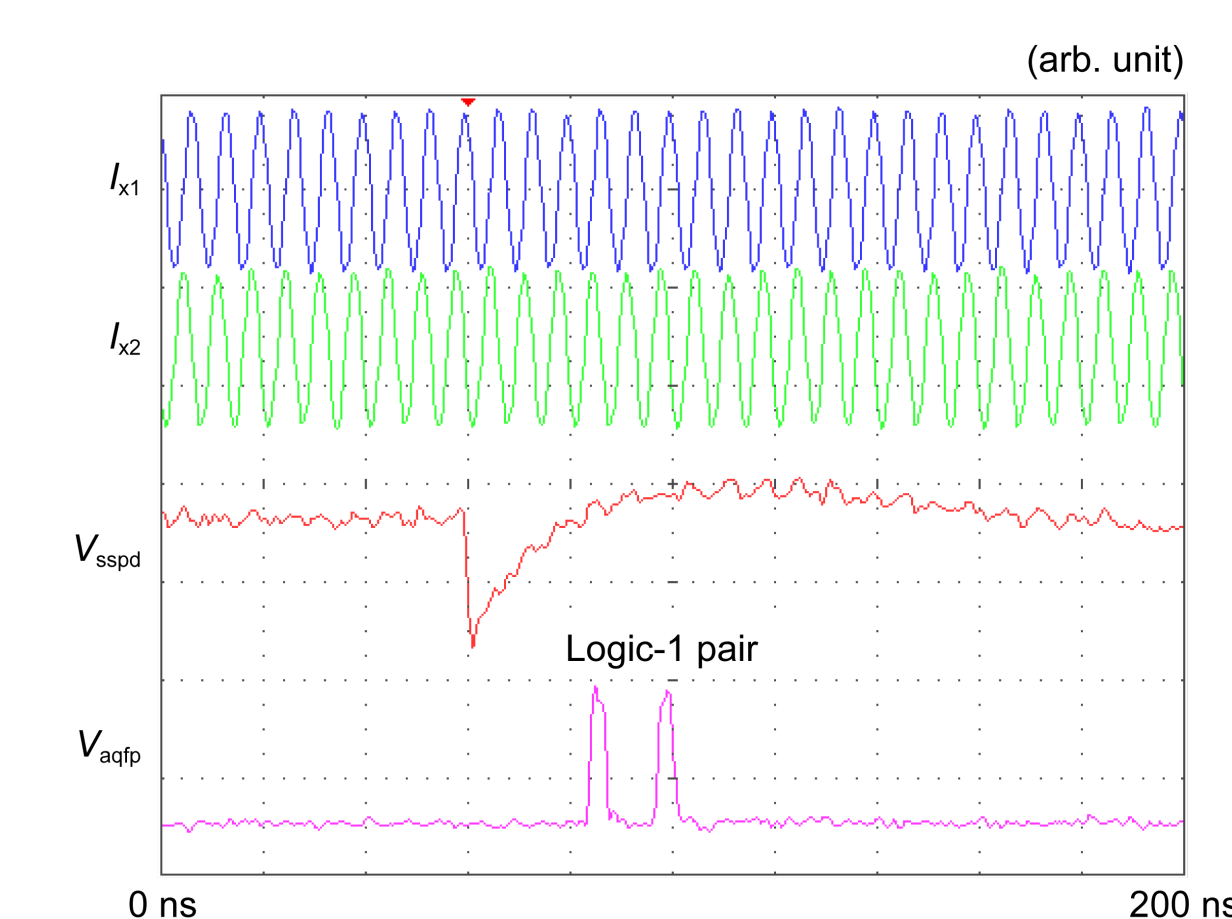
超伝導イメージセンサ



シングルピクセルを用いた原理実証



- AQFP回路と超伝導単一光子検出器 (SSPD)を組み合わせた、超伝導イメージセンサを開発中
- AQFP回路がSSPDの情報をエンコード
- シングルピクセルのSSPDを用いた原理実証に成功



N. Takeuchi et al., ASC 2018.

今年度の主な成果

- T. Yamae, N. Takeuchi, and N. Yoshikawa, "A reversible full adder using adiabatic superconductor logic," *Superconductor Science and Technology*, in press.
- N. Takeuchi et al., "An adiabatic superconductor 8-bit adder with $24k_B T$ energy dissipation per junction," *Applied Physics Letters*, in press.
- Y. Yamanashi, S. Nakaishi, A. Sugiyama, N. Takeuchi, and N. Yoshikawa, "Design methodology of single-flux-quantum flip-flops composed of both 0- and π -shifted Josephson junctions," *Superconductor Science and Technology*, vol. 31, no. 10, p.105003 (7pp), Aug. 2018.
- N. Takeuchi, Y. Yamanashi, and N. Yoshikawa, "Recent progress on reversible quantum-flux-parametron for superconductor reversible computing," *IEICE Transactions on Electronics*, vol. E101.C, no. 5, pp. 352–358, May 2018.