

未来社会創造事業 探索加速型  
「地球規模課題である低炭素社会の実現」領域  
年次報告書(探索研究期間)

|                    |
|--------------------|
| 令和3年度<br>研究開発年次報告書 |
|--------------------|

平成30年度採択研究開発代表者

[研究開発代表者名：井上 弘士]

[国立大学法人九州大学大学院システム情報科学研究院・教授]

[研究開発課題名：低炭素 AI 処理基盤のための革新的超伝導コンピューティング]

実施期間：令和3年4月1日～令和4年3月31日

## §1. 研究開発実施体制

### (1)「井上」グループ(九州大学)

① 研究開発代表者:井上 弘士 (九州大学大学院システム情報科学研究院、教授)

#### ② 研究項目

- ・SFQ 向けアーキテクチャ開発
- ・システム・シミュレーション環境の構築
- ・電力性能評価

### (2)「田中」グループ(名古屋大学)

① 主たる共同研究者:田中 雅光 (名古屋大学大学院工学研究科、助教)

#### ② 研究項目

- ・SFQ 主要構成要素の設計・試作
- ・SFQ 回路の特性評価

### (3)「近藤」グループ(東京大学)

① 主たる共同研究者:近藤 正章 (慶應義塾大学理工学部、教授)

#### ② 研究項目

- ・SFQ 向けニューラルネットワーク・モデルの構築
- ・SFQ 向け機械学習アルゴリズムの開発

## §2. 研究開発成果の概要

本研究で達成する POC は、来たるべく AI 社会を支える極低温コンピューティング基盤の実用化を念頭に、その主要構成要素となる AI 処理エンジン SFNuro を開発し、その実現可能性ならびに情報処理インフラとしての CO<sub>2</sub> 排出量削減効果を示すことにある。この目標を達成するためには、SFQ デバイスの特性を最大限に発揮し、その上で欠点を隠蔽するためのシステム構成法を、回路・アーキテクチャ・アルゴリズムの技術レイヤを跨いだ横断的最適化により導き出すことが必要となる。この目標を達成すべく、2021 年度は、①データセンターを想定したシステムレベルでのアーキテクチャ検討と電力効率の評価、②SFQ 演算器やデータパスの設計技術開発と更なる高速化の実現、③SFQ-AI 処理応用の探索、を行った。①においては、既存大規模計算機システム(2,000 ノード規模)を想定し、データセンターを対象としたシステムレベルでのアーキテクチャ検討ならびに消費電力モデリングを実施した。その結果、各種 SFQ 回路技術やアーキテクチャ技術を導入することで目標を達成できる見込みを示すことができた。②においては、これまでの設計技術を更に洗練し、50GHz 可変ビット幅 SIMD 演算器、56GHz 浮動小数点加算器、63GHz 浮動小数点乗算器、100GHz 加算器、の実証に成功し、世界最先端の SFQ 回路設計技術を実証した。また、50GHz プロセッサデータパスに関してはシミュレーションでの動作を確認している。③においては、ゲート型量子計算機の量子誤り訂正への応用を念頭に、2020 年度の成果をベースとして、高効率な Binarized Neural Network (BNN)実行回路への拡張を検討し、その有効性を検証した。

【代表的な原著論文情報】

Koki Ishida, Il-Kwon Byun, Ikki Nagaoka, Kosuke Fukumitsu, Masamitsu Tanaka, Satoshi Kawakami, Teruo Tanimoto, Takatsugu Ono, Jangwoo Kim, and Koji Inoue, "Superconductor Computing for Neural Networks," IEEE Micro, Special Issue on Top Picks from the 2020 Computer Architecture Conferences, May/June 2021.

Ikki Nagaoka, Koki Ishida, Masamitsu Tanaka, Kyosuke Sano, Taro Yamashita, Takatsugu Ono, Koji Inoue, and Akira Fujimaki, "Demonstration of a 52-GHz bit-parallel multiplier using low-voltage rapid single-flux-quantum logic," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 31, no. 5, art. no. 1302505 (5 pages), August 2021.

Yosuke Ueno, Masaaki Kondo, Masamitsu Tanaka, Yasunari Suzuki, Yutaka Tabuchi, "QECool: On-Line Quantum Error Correction with a Superconducting Decoder for Surface Code", 58th ACM/EDAC/IEEE Design Automation Conference (DAC2021), Dec. 2021.