

先端国際共同研究推進事業
2024 年度採択

「Top のための ASPIRE」
半導体分野

2024 年度
年次報告書（公開版）

研究課題名	異種チップ集積による量子古典インタフェースの国際共同 研究
日本側研究代表者	石黒 仁揮 慶應義塾大学 教授
相手側研究代表者	Vadim Issakov, Professor, TU Braunschweig
研究期間	2024 年 12 月 1 日～2030 年 3 月 31 日

1. 研究成果の概要

① 研究構想にかかる成果

＜実施したこと＞ 超伝導方式およびイオントラップ方式の量子コンピュータをモチーフとして、図 1 に示す研究体制を基盤に、異種チップ集積による量子古典インタフェースの実現を目指して国際共同研究を開始した。2024 年度は、各研究機関において整備を進めた研究環境を基盤にして、特に近いレイヤー同士の研究室間における若手研究員の派遣を開始もしくは派遣時期の調整を行い、各レイヤーの要素技術の研究に着手した。併せて、将来の異種チップ集積に向けたシステムの議論を開始した。

＜得られた成果＞ 各要素技術に要求される仕様などの検討を進め、回路設計や実験環境の構築に着手した。

② 国際ネットワーク構築・拡大に関する成果/国際頭脳循環の促進に資する若手研究者の人材育成に関する成果

＜実施したこと＞ 本研究に参画する日本側の研究代表者および主たる共同研究者が、これまでに個々に実施してきた国際頭脳循環を目的とする若手研究者の海外への派遣、海外研究者の招聘、スクール、セミナー、シンポジウムの開催で得られた経験を基盤にして、ドイツ側研究者の日本への招へいを開始した。

また、2025 年 2 月から 3 月にかけて、日本側の研究代表者、主たる共同研究者、若手研究者および学生が、ドイツ側の参画機関である、ブラウンシュバイク工科大学、ドイツ国立理工学研究所（PTB）、ハノーファー大学、フ라운ホーファー研究所（IPMS および IZM）、アーヘン工科大学を歴訪し、共同研究に関して議論を行った。さらに、連携先の拡大のために、ドイツのユーリッヒ研究所、ライプニッツ研究所、マインツ大学、スタートアップの QUDORA、ベルギーの Imec、スイスのローザンヌ工科大学（EPFL）を訪問して議論を行った。

＜得られた成果＞

- ・ドイツ側から大学院生およびポスドク研究員を計 5 名招へいし、CryoCMOS のチップ設計とテストチップの評価を行った。設計した回路に関しては、2025 年度にチップ試作を行う予定である。また、テストチップの評価で得られた成果は 2025 年度に国際会議に投稿する予定である。

- ・日本側研究代表者の石黒が、相手側研究代表者 Issakov 教授の研究室の博士課程学生の学位審査の副査となり審査を実施し、当該学生が学位を取得した。また、当該学生が筆頭著者で、Issakov 教授、石黒が共著の、イオントラップ方式の量子コンピュータにおける極低温動作制御回路に関する論文を、集積回路設計分野でトップの国際会議である ISSCC2025 にて発表した。

- ・2025 年 2～3 月のドイツ研究機関の歴訪における議論を通して、2025 年度から慶應義塾大学とフ라운ホーファー研究所（IPMS）、名古屋大学とドイツ国立理工学研究所（PTB）、東京大学とアーヘン工科大学およびハノーファー大学で新たに共同研究および学生の相互派遣を行う方向で議論が進み、現在、具体的な研究テーマや派遣時期の調整を行っている。また、九州大学とミュンヘン工科大学の間でも、学生の派遣などの調整を進めている。

- ・フ라운ホーファー研究所（IPMS）は 300mm ウエハ用の製造装置を保有しており、来年度以降慶應義塾大学の学生が滞在して装置を利用して良いとの許可を得た。ただし、マシンタイムの問題があり、実際に行うテーマについては今後精査する予定である。次世代半導体の微細配線や、クライオ CMOS 向けの超伝導配線などが候補テーマとしてあがっている。一方、フ라운ホーファー研究所からは、2026 年 2 月から半年間、協業先

のドレスデン大学の博士課程の学生が慶應義塾大学に滞在する計画を立てている。

・PTB ではジョセフソン接合アレイを用いた任意波形生成回路（Josephson Arbitrary Waveform Synthesizer、JAWS）の研究が精力的に行われている。量子ビットの制御等に用いるマイクロ波生成用超伝導回路に向けた研究を進めるため、2025 年 5 月より名古屋大学の修士課程の学生を派遣する準備に着手している。

2. 研究実施体制

研究テーマ	中心となる研究者氏名	所属機関・部署・役職名
テーマ1 極低温半導体集積回路設計の研究	石黒仁揮 Vadim Issakov Viktor Krozer	慶應義塾大学・理工学部・教授 Professor, TU Braunschweig Professor, Univ. Frankfurt
テーマ2 極低温先端半導体デバイスの作製と評価	内田 建 Max Lemme	東京大学大学院・工学系研究科・教授 Professor, RWTH Aachen
テーマ3 極低温回路用製造プロセス	多田宗弘 Mark Bieler Benjamin Lilienthal-Uhlig	慶應義塾大学・理工学部・教授 Director, PTB Manager, Fraunhofer IPMS
テーマ4 超伝導エレクトロニクスの研究	田中雅光 Mark Bieler	名古屋大学大学院・工学研究科・教授 Director, PTB
テーマ5 量子プロセッサの構成要素の研究	野口篤史 Christian Ospelkaus	東京大学大学院・総合文化研究科・准教授 Professor, Univ. Hannover
テーマ6 システムアーキテクチャと異種チップ集積化の研究	井上弘士 Ivan Ndip Martin Schulz	九州大学大学院・システム情報科学研究院・教授 Director, Fraunhofer IZM Professor, TU Munich
テーマ7 異種チップ集積化による量子古典インタフェースの実証	石黒仁揮 Vadim Issakov	慶應義塾大学・理工学部・教授 Professor, TU Braunschweig

3. 代表的な業績（原著論文、プレスリリース、表彰など）

- 1) Peter Toth, "A Cryo-BiCMOS Controller for 9Be+-Trapped-Ion-Based Quantum Computers", International Solid-State Circuits Conference (ISSCC 2025), San Francisco, US, Feb. 16-20, 2025.
- 2) Atsushi Noguchi, "Hybrid Technologies with high-performance superconducting circuits", QSE Quantum Seminar, EPFL, Swiss, 2025.2 (Invited talk)