

変化する超高速超電導演算回路の 45GHz 動作実証に成功

— 次世代スーパーコンピュータ用アクセラレータ —

名古屋大学では、科学技術振興機構の戦略的創造研究推進事業（CREST）のもと*1、次世代のスーパーコンピュータでの計算を格段に高速化する演算回路（アクセラレータ）の試作・実証に成功しました。この演算回路は、超電導体であるニオブ薄膜を 9 層重ねて形成される超電導集積回路プロセス*2によって作製されました。同事業のもと、国際超電導産業技術研究センターを中心に開発されたもので、超電導回路としては世界最大の集積密度、世界最高の動作周波数が可能となっています。今回は、このプロセスをもとに、複雑な計算であっても、表現された数式をそのままの形で計算できるように機能が変化する演算回路（再構成可能なプロセッサ*3）を単一磁束量子（SFQ）回路*4によって構成しました。複雑な数式をそのまま計算することで、演算回路とは別の所にあるメモリ（記憶回路）とのデータの通信が大幅に減少し、結果として非常に効率的な計算が可能となります。この演算回路の実現には、高速で動作する算術論理演算ユニット（命令により加算、減算、乗算などが行われる）が多数必要となり、またユニット間の接続を自由に変えるスイッチも複雑になることから、半導体集積回路では発熱が問題となります。それを、ここでは超高速・低消費電力を特長とする SFQ 回路を採用することによって回避しています。

今回は、合計 4 個の算術論理演算ユニットをスイッチでつなぎ合わせ、要求に応じて演算機能を変える再構成可能なプロセッサの動作を実証しました。そこでは、信号である磁束量子の到来のタイミングが様々な原因で時間的にばらつくことも想定に入れ、その状況でも 100GHz 以上の動作周波数での動作を保証する新しい設計法を用いています。実証した演算回路の最高動作周波数は 45GHz、消費電力は 3.4mW でした。11500 個のジョセフソン接合が 5.6mm x 2.8mm の中に収められています。SFQ 回路としては世界で最も複雑な回路に属し、その中では最も高速な動作となっています。

今回の演算回路は大規模化が簡単に行える構成になっていることも特徴のひとつです。したがって、この動作実証により、従来は大型であった 1 秒間に 10 兆回の計算をする計算機が、1/10 の電力でデスクサイドにおけるようになるほか、将来の大規模スーパーコンピュータも 1/100 の電力で実現できるようになります。

*1 領域名「情報システムの超低消費電力化を目指した技術革新と統合化技術」、課題名「単一磁束量子回路による再構成可能な低電力高性能プロセッサ」、代表 高木直史（京都大学大学院情報学研究科）、参画研究機関 京都大学、名古屋大学、九州大学、横浜国立大学、国際超電導産業技術研究センター。

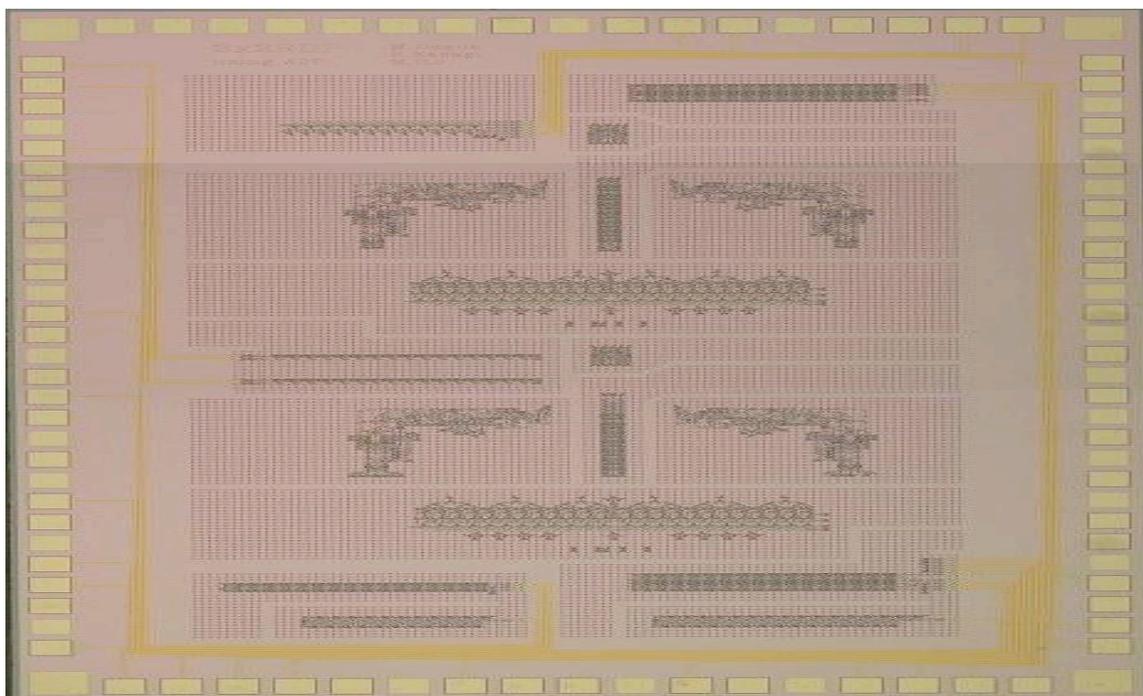
*2 これまでの国内外の超電導集積回路は、ニオブ 4 層からなっていました。しかしながら、これではジョセフソン接合（半導体トランジスタ的な役割をする超電導素子）と配線が同じ層で形成されるため、自由な配線ができませんでした。また、構造上配線幅も太

くなってしまう、それが占有面積を増大させてしまう、すなわち集積密度の低下を招く原因でもありました。新しいプロセスは、配線専用層をジョセフソン接合の層とは別に設け、さらに配線構造を工夫することで、従来の4.5倍の集積密度の向上を可能としました。また、2nm程度の厚さの絶縁体を超電導体で挟む構造を持つジョセフソン接合において、絶縁体の厚さをさらに薄くすることで高速化も実現しました。すでに100GHz程度の動作周波数で加算器など複数の回路が動作実証されています。この周波数での集積回路を実現できるのは、超電導単一磁束量子回路だけで、しかもこれまでのところ、このプロセスを利用した回路でのみ実証されています。

なお、この製造プロセスは、国際超電導産業技術研究センターが、*1に示した全機関との共同で開発したものです。また、この製造に基づく設計技術はCREST高木代表のチーム全体で取り組み完成させたものです。加えて、製造プロセスの一部に産業技術総合研究所のご協力をいただいております。

*3 厳密には「再構成可能なデータパスを持つプロセッサ」と呼ばれます。この計算機構成法自身は、*1のメンバーである九州大学・村上和彰教授らのグループによって提案され、単一磁束量子回路用にCREST高木代表のチーム全体で変更しました。

*4 超電導体でドーナツ状のループを作ると、そこの中に入る磁束は量子化され、1個2個3個と数えられるようになります。この磁束の最小単位を磁束量子と呼びます。単一磁束量子回路は、磁束量子の有無を2値信号の“1”、“0”に対応させて計算を行う回路です。磁束量子は質量をもたないため光の速度で伝わるほか、1回の論理演算に関わるエネルギーが非常に小さく、将来の超高速低電力集積回路として期待されています。



今回試作した単一磁束量子回路による再構成可能なプロセッサ