

掲載内容（サマリー）：

トピックス：

- 西安における IEC/TC90 会議の概要報告

特集：超電導デジタルデバイス（低温）

- 超電導デジタルデバイスの技術動向
 - 微小 Al/AIO_x/Al 積層型ジョセフソン接合の作製プロセス開発
 - 超電導フラッシュ型 A/D コンバータの冷凍機システムでの高速動作（動画）
 - 極限的低消費電力動作を可能とする断熱型 QFP 論理回路の研究
 - 質量分析用単一磁束量子時間測定回路の測定
 - SFQ 回路を用いた SSPD からの低ジッタ信号読み出し
 - 量子メモリの原理実験に成功 ～量子コンピュータの実現へ前進～
-
- 超電導関連 2012 年 10-11 月の催し物案内
 - 新聞ヘッドライン（8/19-9/20）
 - 超電導速報—世界の動き（2012 年 8 月）
 - 隔月連載記事—超電導磁石開発のこれまでとこれから（その 5）
 - 読者の広場(Q&A)—「赤ワインで煮込むと超電導体になり易い」と聞きましたが、どのような現象が生じているのでしょうか？」

超電導 Web21

〈発行者〉

公益財団法人 国際超電導産業技術研究センター 超電導 Web21 編集局

〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13

Tel (03) 3536-7283 Fax(03) 3536-5717

超電導 Web21 トップページ：<http://www.istec.or.jp/web21/web21.html>



この「超電導 Web21」は、競輪の補助金を受けて作成したものです。

<http://ringring-keirin.jp>



トピックス：「西安における IEC/TC90 会議の概要報告」

IEC/TC90 国内委員会事務局

公益財団法人 国際超電導産業技術研究センター

常務理事 近藤亮平

電気・電子技術に関する国際規格を開発・発行する国際機関である国際電気標準会議（IEC）の中で、超電導を担当する TC90 会議が去る 8 月 20～22 日、中国西安市のベルタワーホテルにて開催された。この会議には 6 ヶ国から 34 名が出席、WG（作業グループ）等が分科会を持ち、2 日目には相互理解を深めるためのミニシンポジウム、最終日は Plenary 会議を開催した。



鐘楼から望む Bell Tower Hotel Xi'an（右）と南大街

フランスの Bruzek 氏を議長とした事務局（3 名）、日本（松下照男 IEC/TC90 国内委員会委員長・九州工業大学名誉教授ほか 8 名）、中国（11 名）、韓国（5 名）、ドイツ（2 名）、アメリカ（2 名）の 6 ヶ国、および IEC の中央事務局が出席し、非常に熱心な意見が交わされた。以下に、各 WG やミニシンポジウムの検討結果を総括的に議論した Plenary の概要を報告する。

<参考>

- *IEC は 1906 年に創設されて日本は 1910 年に正式加盟。現在、正会員 60 ヶ国、準会員 22 ヶ国が加盟し、175 の専門委員会（TC）と分科委員会（SC）が存在する。
- *TC90 は、超電導材料や機器に関する国際規格を検討するため 1989 年に設置され隔年に会合を開催している。TC90 は 10 ヶ国が参加し日本が幹事国を務めている。（国際幹事は佐藤謙一 住友電気工業㈱フェロー）

IEC の動向

- ・中央事務局 Sebellin 氏から、CDV（投票用委員会原案）の期間を 3 ヶ月に短縮すること（従来は 5 ヶ月）、最近の話題としてスマートグリッド・再生エネルギーが議論されていること等が紹介された。

規格の作成・改訂状況

- ・超電導に関しては用語や測定方法について既に 16 の規格が発行されており、TC90 には 14 の WG 等が設置されている。今回はその内、8 つの WG と 1 つの Ad-hoc グループが分科会を持ち、進捗状況の報告や今後の進め方が議論された。全てのグループのコンビナー（含：共同）は日本からの参加者が務めた。

- ・規格の作成・改定期日に関連して幾つかの見直しがあった。例えば、Bi-2223 超電導線の曲げ I_c 測定については NWIP（新業務項目提案）を 2 年間延期すること、REBCO 線材の I_c 測定については 1 年以内に試験方法のガイドラインを確立した後に RRT (Round Robin Test) を開始すること、77 K における BSCCO と REBCO 線の引張強度測定について 2013 年にガイドラインを用意すること、超電導線材の一般的な特徴に関して提案されている通則 2 件は CDV（投票用委員会原案）の目標期限を 2014 年 4 月に延長し購入者と生産者の視点から CD（委員会原案）を再検討すること、などが合意された。
- ・また、Nb-Ti 線と Nb₃Sn 線の RRR（残留抵抗比）測定法は次の版で統合すること、MgB₂ と BSCCO の複合超電導体における測定は画像処理法を用いた Matrix Composition Ratio について調査を進めて次回の会合で議論すること、などが合意された。
- ・超電導のセンサーに関しては、2013 年中に NWIP を提出することが宣言された。



Plenary 会合の様子

その他

- ・超電導機器の技術調査を行っている CIGRE（国際大電力システム会議）のワーキンググループや電力ケーブル関連の標準化を行う TC20 との協力関係の強化が議論された。
- ・次回の TC90 会合は、2 年後にパリにて 6 月を目途に開催されることとなった。
- ・IEC/TC90 会議に初めて参加し、アジア勢が超電導研究開発と標準化に熱心に取り組んでいる様子を、欧米勢が標準化そのものをリードする姿勢を感じた。そして IEC/TC90 は日本が主導する故にこそ、海外でオープンに開催することの意義を実感した次第である。

今回の TC90 開催に際し、IEC/TC90 の幹事や各 WG を主導して頂いた日本の関係各位のご尽力に心から謝意を表したい。そして、丁重に準備・歓迎して下さった主催地である中国の関係者の皆さまに御礼を申し上げつつ、研究開発など様々なルートを通じた両国友好関係の維持発展を心から望むものである。

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：超電導デジタルデバイス（低温）

「超電導デジタルデバイスの技術動向」

名古屋大学大学院
工学研究科
教授 藤巻 朗

グリーン化という時代の大きな流れの中で、もともと低消費電力を謳っていた超電導デジタル回路にもさらなる低消費電力化が求められるようになった。昨年の本記事で紹介したように、Northrop Grumman の Reciprocal Quantum Logic (RQL)、Hypres の Energy- Efficient Rapid Single Flux Quantum Logic (ERSFQ)、名大の Low-Energy-Consumption RSFQ (LE-RSFQ) の各論理回路方式では、従来の RSFQ 回路における電力消費の大部分を占めていたバイアス電流供給用の抵抗による電力消費を大幅に軽減、あるいは完全に削除することに成功した。既にいずれの回路も小中規模の回路を構成し、数十 GHz 以上での高速動作と、従来の 1/10 以下の消費電力を実証している。

グリーン化の流れは、一時はあまり議論されなくなった Landauer 問題を再燃させた。Landauer 問題とは、古典的な論理回路において演算に必要なエネルギーの下限值は何かという問題である。1 ビット当たりのエネルギーに換算すると、この下限値は $kT \ln 2$ で表わされるとされている。25 年ほど前までは多くの議論がなされたが、これを実験的に検証する技術がなく、また低エネルギー化は低速動作にも繋がることから、次第に研究者の興味の対象からはずれていった。しかしながら、作製技術が向上した超電導デバイスこそが、実験的にこの問題に答を出す唯一の可能性を持つことが再認識された。具体的な回路方式として、横浜国大の Adiabatic Quantum Flux Parametron (A-QFP) や Stony Brook 大学の Negative SQUID (nSQUID) が提唱されている。これらの回路方式は数 GHz で動作させることも可能であり、究極の低消費エネルギー論理回路を構成することも可能となる。

この 1 年、低消費電力化の流れはメモリへと波及した。計算機では、その全体の性能や電力消費とメモリの性能・電力消費量が直結する。したがって、低消費電力超電導高性能計算機の構築のためには、超電導デジタル回路に見合った高速性・低消費電力性を持った大容量メモリが不可欠となる。このことから、米国では低温環境下で動作するメモリの新規提案を公募し、プロジェクトとして支援を開始した。その中の大きなトピックスとして、強磁性体 (F) を超電導電極 (S) の間に挟んだ構造の SFS ジョセフソン接合の利用があげられる。ジョセフソン臨界電流値は、強磁性体の磁化の向きや強さによって変化する。新しいメモリは、強磁性体を記憶媒体として用い、その記憶情報を臨界電流の変化として読み出す。重要な点は、従来の超伝導メモリの原点であった超伝導ループでの磁束量子の保持という概念が捨てられたことである。磁束量子単位の記憶の放棄は名大などからも提唱されていたが、新しいメモリはより一層の高速化・小面積化の可能性を秘めている。このように、新しい物理の導入も始まり、超電導デジタルデバイスは、完全に新しい時代に入ったと考えている。

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：超電導デジタルデバイス（低温）

「微小 $\text{Al}/\text{AlO}_x/\text{Al}$ 積層型ジョセフソン接合の作製プロセス開発」

公益財団法人 国際超電導産業技術研究センター
超電導工学研究所 デバイス研究開発部 低温デバイス開発室
主管研究員 佐藤哲朗

現在我々が使用している「古典的」なコンピュータは汎用コンピュータだが、因数分解や離散対数問題などの特定の計算に対しては効率の良いアルゴリズムが発見されていないため計算時間がかかり、桁数の大きな数を取り扱う場合は事実上計算が不可能となる。量子コンピュータは重ね合わせの原理などの量子力学の原理を計算に用いるコンピュータであり、「古典的」なコンピュータが不得意なこれらの計算を、効率の良い並列処理によりはるかに高速に計算することができると期待されている。

量子コンピュータの実現のためには、その主要な構成要素である量子ビットの実現が不可欠で、そのためにトラップされたイオンや半導体量子ドットなど各種の物理系を量子ビットとして用いるための基礎実験が世界中で活発に研究されている。それらの中でも固体素子量子ビットは、集積化や素子特性の制御が比較的容易であることから、量子コンピュータを実現するうえで工学的に大きな利点を持っていると言える。固体素子量子ビットのひとつであるジョセフソン素子を含む超電導回路も量子ビットの有力な候補の一例である。

超電導量子ビット¹⁾に用いるジョセフソン接合にはサブミクロンの微細な寸法が要求される。従来、微小接合の作製には巧妙な手法で比較的容易に微小接合の作製が可能である斜め蒸着法²⁾が用いられてきた。しかし集積度の高い超電導回路をより柔軟に設計するためには、超電導体/絶縁体バリア/超電導体の三層から成る積層薄膜をもとに作製する積層型で微小接合を作製するためのプロセス技術の確立が望まれる。我々は量子ビットとして優れた特性を示す Al を超電導体に用いた $\text{Al}/\text{AlO}_x/\text{Al}$ 系積層型ジョセフソン接合作製プロセスの確立を目指し、産総研ナノデバイスセンターと共同で開発に取り組んでいる。

微小な Al 系積層型ジョセフソン接合の作製には、まずサブミクロン寸法のレジストパターン形成、およびそのレジストをマスクとして使用した Al エッチングが必要である。このために、電子線描画装置を用いた微小パターン形成、 Cl_2/BCl_3 系反応性イオンエッチング装置を用いた精密な Al エッチングプロセスを開発している。図 1 に直径 $0.1\ \mu\text{m}$ の接合パターンの断面 TEM 像を示す。側壁が水平面に対して 80 度以上の急峻な角度を有する微小接合パターンの作製に成功している。

積層型接合の寸法が微小である場合、接合作製自体に加えて接合上部に形成する超電導コンタクトの作製も困難となる。通常この超電導コンタクトは、接合を被覆した絶縁体層にビアホールを形成してから上部超電導配線層を成長させ、ビアホール内の側壁に超電導体層を堆積させることで超電導コンタクトを形成する。しかしサブミクロン寸法の微小接合の場合は、ビアホールと接合とのアライメント、ビアホールのエッチング、およびビアホール側壁への超電導体層堆積のいずれもが困難であり、従来とは異なる上部コンタクト形成プロセ

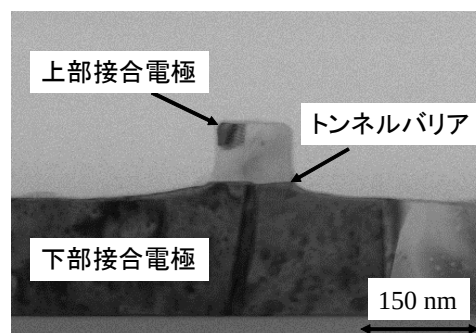


図 1 接合パターンの断面 TEM 像

スの確立が求められる。そこで我々は CMP などの平坦化手法を用いて絶縁体層に覆われた接合上部電極を露出させることにより、この上部超電導コンタクトを形成するプロセスを開発している。

以上のような微小接合作製プロセスとコンタクト形成などの周辺プロセスを統合させて、微小 AI 積層型接合の試作を開始した。今のところ約 $1\ \mu\text{m}$ 径までの接合特性の評価に成功している。約 300 mK で測定した接合の I-V 特性を図 2 に示す。

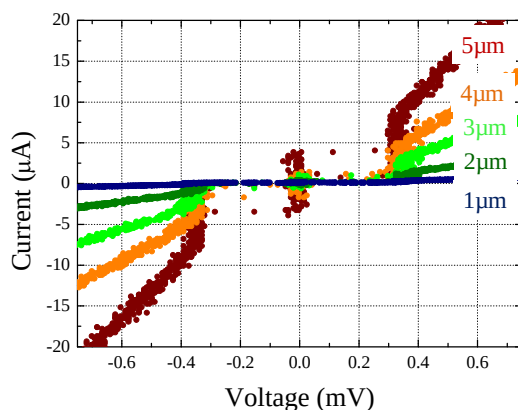


図 2 AI 積層型接合の I-V 特性。測定温度は約 300 mK である。

試作した接合の構造・特性評価結果から、コンタクト形成プロセスや洗浄等の周辺プロセスに最適化の余地が残っていることが明らかになった。これらの課題を解決し、サブミクロン寸法の接合試作および評価へと進みたい。そして微小 AI 積層接合を用いた超電導量子ビットの試作・評価へと展開していく予定である。

謝辞

本研究は、総合科学技術会議により制度設計された最先端研究開発支援プログラムにより、日本学術振興会を通して助成されたものです。

参考文献：

1. 蔡 兆申, 応用物理, 78 (2009), 3.
2. G. J. Dolan, Appl. Phys. Lett., 31 (1977) 337.

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：超電導デジタルデバイス（低温）

「超電導フラッシュ型 A/D コンバータの冷凍機システムでの高速動作」

公益財団法人 国際超電導産業技術研究センター
超電導工学研究所 デバイス研究開発部低温デバイス開発室
主管研究員 鈴木秀雄

超電導 SFQ 回路を用いたフラッシュ型（ナイキスト型とも呼ばれる）A/D コンバータは、量子化現象と SFQ 回路の高速性能を利用することにより半導体回路より小規模でかつ高速性能が期待できる。原理的には N ビットの A/D コンバータは SFQ 回路によれば、N 個のコンパレータで実現できる（半導体回路では、 2^N-1 個必要）。実際には、コンパレータは熱揺らぎやスルーレートに係わる閾値のゆらぎ（グレーゾーン）の問題を解決するためのエラー補正が必要となる。その手法としてルックバックと言われるデジタル的な補正方法が提案され¹⁾、単独での機能試験が行われているが²⁾、コンパレータと組み合わせて高周波測定をした例はこれまで報告されていなかった。

ISTEC では、次世代の 100GbE などの光通信用の高速 A/D コンバータとそれを用いた波形モニタリングへの応用が有望と考えて研究開発を進めてきた³⁾。さらに、高速 A/D コンバータは、各種超電導センサ出力のデジタル信号への変換など科学技術への応用が今後期待される。今回、ISTEC が提案した高周波性能を改善した相補型（CQOS: Complimentary quasi-one-junction SQUID）コンパレータを小型化するとともに、臨界電流密度が 10 kA/cm^2 の Nb/AlOx/Nb 接合プロセス（ISTEC STP3 process）を採用した。5 mm 角のチップにコンパレータとエラー補正回路を集積した 5 bit A/D コンバータチップを設計・試作した（図 1）。冷凍機冷却で安定に動作するシステムを開発するために、チップ内の超電導グラウンドを回路ブロック毎に分離しメインのグラウンドと有限抵抗で接続するなどの新たなアイデアを導入した。この技術により、グラウンドに流れるバイアス電流による磁場の影響を回避し、入出力端子やバイアス端子数を削減できた³⁾。また、冷凍機に実装しての動作実証と試験を行うために超電導集積回路用の 100 GHz 帯域の 32 端子（8 端子×4）パッケージを開発した。A/D コンバータチップは、16 mm 角の MCM キャリアにフリップチップボンディング後、このパッケージにマウントした。図 2 に冷凍機の 4 K ステージに実装した写真を示す。

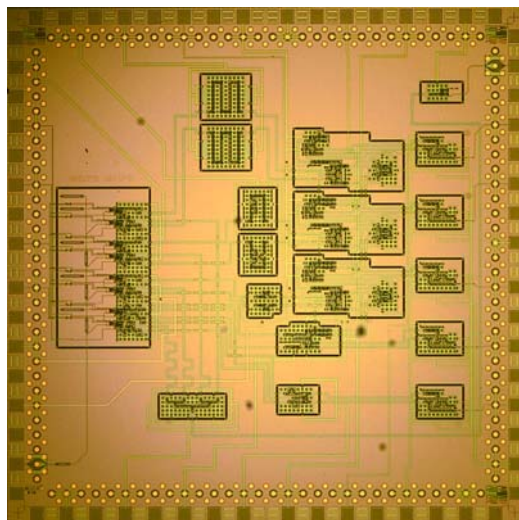


図 1 A/D コンバータのチップ写真

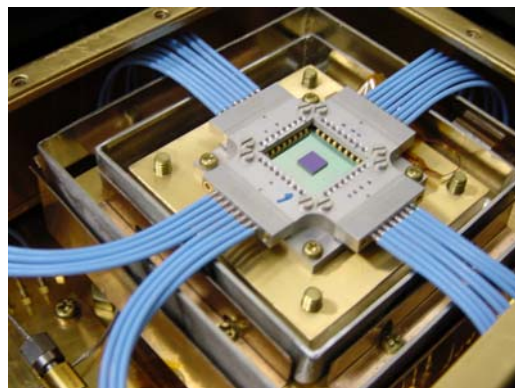


図 2 冷凍機の 4 K ステージに取り付けた A/D コンバータモジュール

このシステムを用いた第 1 の高周波動作実験として、ビート周波数法と呼ばれる方法（信号周波数とサンプリング周波数を Δf だけ変えることにより、出力として Δf の低周波信号として取り出す方法： $\Delta f = 1$ kHz とした）による高周波動作実験を行った。その結果、10 GHz で約 4.5 ビットの動作を確認した。15 GHz では約 3.5 ビットの動作を確認した。また、10 GHz の光信号を、光ファイバーを通して冷却システム内に導入し、4 K 動作の UTC-PD で O/E 変換して A/D 変換する実験にも成功した。第 2 の高周波実験として、信号入力 は 1 kHz の低周波として、高周波でサンプリングする動作実験を行った。その結果、5 ビットで 100 GHz までのサンプリング周波数に対して正常な出力波形が得られており、SFQ 回路が得意とする高速クロック動作が実証できた（図 3）。

その後、この冷凍機に冷却した A/D コンバータは約 2 ヶ月間連続動作実験を行った結果、磁束トラップなどのトラブルもなく連続動作することが確かめられている。

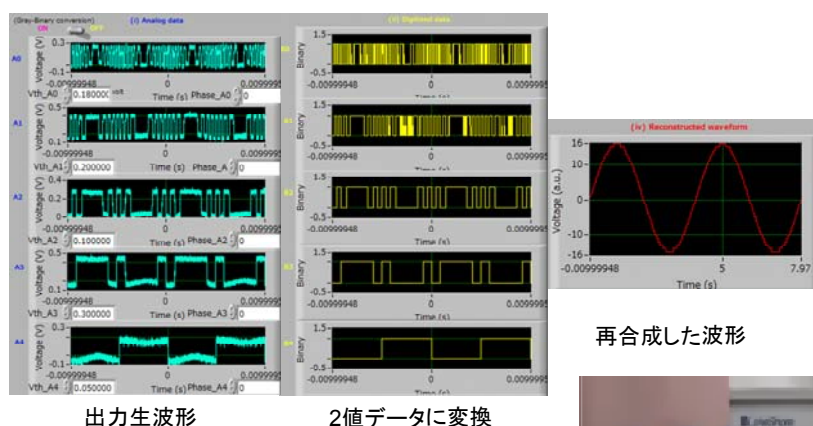


図 3 100 GHz 高速サンプリングによる冷凍機冷却での動作波形（入力信号 $f = 1$ kHz）（左）、動画（右）

本研究は次世代高効率ネットワークデバイス技術開発の研究として、新エネルギー・産業技術総合開発機構の委託により実施したものである。

参考文献

1. C. J. Anderson, IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 3, pp. 2769-2773, 1993.
2. S. B. Kaplan, et.al, IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 7, pp. 2822-2825, Jun. 1997.
3. 鈴木他、2012 年電子情報通信学会ソサイエティ大会、C-8-5.

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：超電導デジタルデバイス（低温）

「極限的低消費電力動作を可能とする断熱型 QFP 論理回路の研究」

横浜国立大学大学院

工学研究院

教授 吉川信行

近年、スーパーコンピュータやハイエンドサーバなど高性能情報機器の消費電力は急激に増大しており、機器からの発熱がシステム全体の性能を制限するようになってきた。特に、エクサスケールのスーパーコンピュータでは、その総消費電力は **100 MW** に達すると予想されており、コスト面でも設備面にも電力供給は限界に達しようとしている。しかしながら、現在の **CMOS** 集積回路の単純な微細化では、将来の高性能情報機器の消費電力を抑えることは非常に困難であり、低消費電力化を可能とする計算原理自体の抜本的な見直しが必要である。一方、量子計算分野でも極低温で量子フィードバック制御をするために、超低消費電力論理回路の開発が強く望まれている。

計算に必要な最小エネルギーの限界値は、熱力学と情報理論に基づいて古くから議論されており、情報の消去を伴う演算に対して **1 ビットあたり $k_B T \ln 2$** となることが **Landauer** らによって予言されている¹⁾。この限界値についてはこれまでに賛否両論の立場があり、まだ決着には至っていないが、最近、この限界値を支持する実験結果が報告されている²⁾。

我々は、量子磁束パラメトロン (**Quantum Flux Palametron; QFP**)³⁾ を断熱的に動作させることにより、このビットエネルギー限界に迫ることを目標として研究に取り組んでいる⁴⁾。図 1 は、断熱型 QFP、RSFQ、CMOS 論理回路のビットエネルギーとゲート遅延の比較を示す。RSFQ は、CMOS よりも数倍高速で動作し、消費電力は 3 ケタ程度小さい。しかしながら、RSFQ は計算において非断熱的なエネルギー消費をとまうため、1 ビットの演算に対して $I_c \Phi_0$ のエネルギーが消費される。ここで、 I_c は **Josephson** 接合の臨界電流値、 Φ_0 は磁束量子である。一方、断熱型 QFP では、非断熱的なエネルギー消費が起こらない様に QFP をゆっくりと断熱的に動作させる。その結果、図 1 に示すように $k_B T \ln 2$ に迫るビットエネルギーの論理演算が可能となる。ゲート遅延は、接合の臨界密度を増して、回路の潜在的スピードを上げることで改善できる。

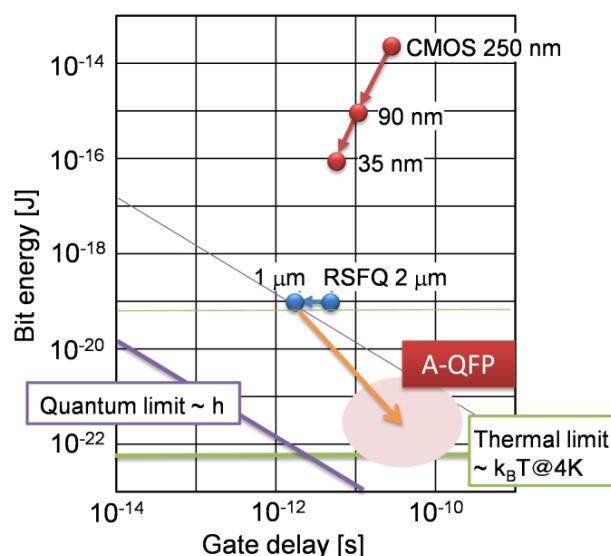


図 1 断熱型 QFP、RSFQ ならびに CMOS 論理回路のビットエネルギーとゲート遅延。

図 2 には、QFP の動作原理を示す。QFP はインダクタンスでシャントされた **SQUID** 構造をしており、励起電流 (**Exciting current**) により外部磁界が印加される。この励起電流により、QFP のポテンシャルはシングルウェル型からダブルウェル型に変化する。最初に微小な入力電流 (**Input current**) を印加しておいて、QFP のポテンシャルをシングルウェル型からダブルウェル型に変化さ

せることにより、状態はダブルウェルポテンシャルの左右の極小値のどちらかに遷移する。これは、左または右の超伝導ループに単一磁束量子が進入することに対応する。その結果、出力インダクタンスには、終状態に対応する向きの出力電流 (I_{out}) が流れる。接合のパラメータを適切に選択すれば、QFP における非断熱的エネルギー消費を無くし、断熱的に動作させることができる⁴⁾。数値計算によれば、十分な動作マージンを維持しながら、QFP のビットエネルギーを 1 zJ まで低減することが可能である。また、モンテカルロ法を持ちいた数値計算により、4.2 K の動作に対して十分な動作マージンが得られることを示した⁵⁾。

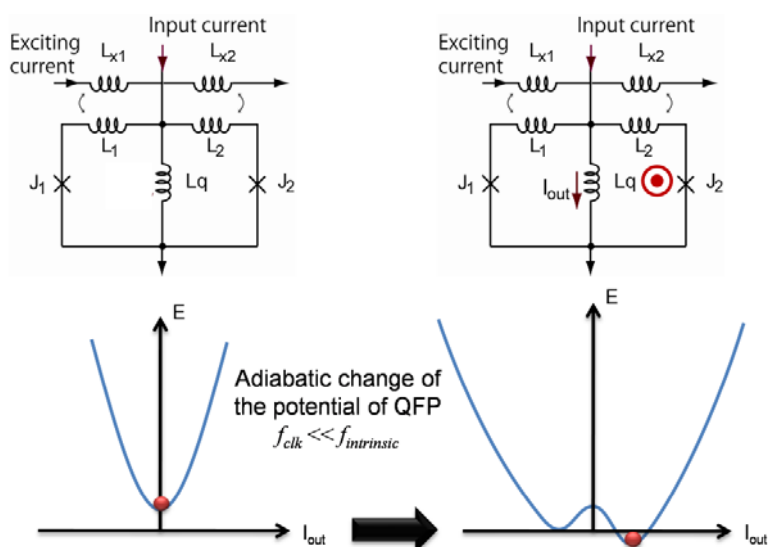


図 2 断熱型 QFP の動作原理

図 3 には、断熱型 QFP を用いた 1 ビット全加算器の回路図と顕微鏡写真を示す。接合数は 46 接合であり、RSFQ 回路を用いた場合に比べて接合数を約 4 分の 1 に低減できた。また、低速の測定において回路の正常動作を確認し、励起電流の動作マージンとして $\pm 26.1\%$ を得た⁶⁾。

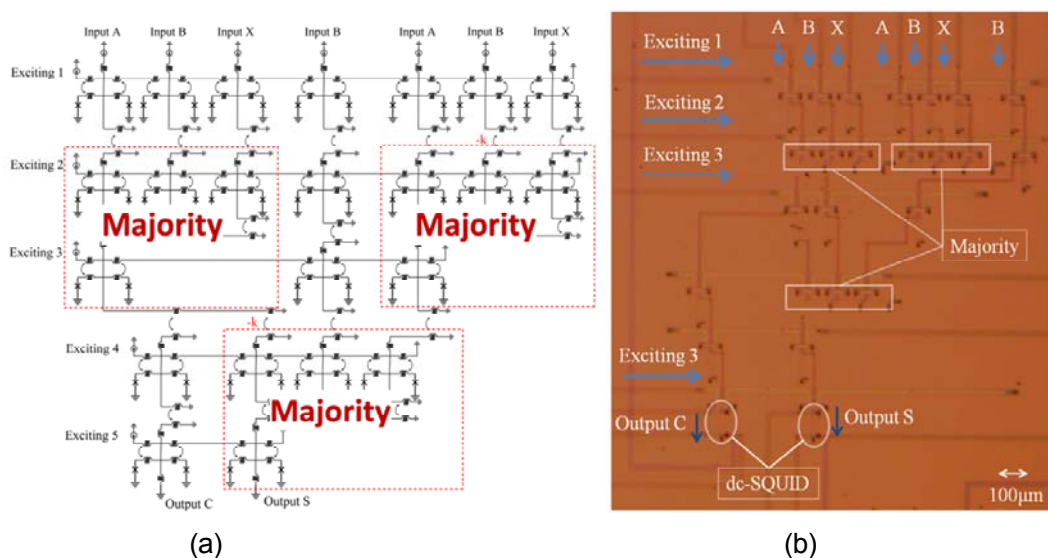


図 3 断熱型 QFP を用いた全加算器の(a)回路図と(b)顕微鏡写真。
回路は ISTE C 標準 2 プロセス(STP2)を用いて試作した。

参考文献：

1. R. Landauer, IBM J. Res. Develop. 5, 183 (1961).
2. A. Bérut, A. Arakelyan, A. Petrosyan, S. Ciliberto, R. Dillenschneider, and E. Lutz, Nature, 483, 187 (2012).
3. M. Hosoya, W. Hioe, J. Casas, R. Kamikawai, Y. Harada, Y. Wada, H. Nakane, R. Suda, and E. Goto, IEEE Trans. Appl. Supercond. 1, 77–89, (1991).
4. N. Yoshikawa, D. Ozawa, Y. Yamanashi, Extended Abstracts of the 2011 International Conference on Solid State Devices and Materials, September 2011, Nagoya, Japan.
5. N. Takeuchi, K. Ehara, K. Inoue, Y. Yamanashi and N. Yoshikawa, Applied Superconductivity Conference 2012, October 2012, Portland, USA.
6. K. Inoue, K. Ehara, N. Takeuchi, Y. Yamanashi and N. Yoshikawa, Applied Superconductivity Conference 2012, October 2012, Portland, USA.

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：超電導デジタルデバイス（低温）

「質量分析用単一磁束量子時間測定回路の測定」

横浜国立大学大学院

工学研究院 知的構造の創生部門

准教授 山梨裕希

質量分析は、試料の質量と電荷の比を測定する分析法である。特にタンパク質などの高分子の質量分析は、その複雑な構造を同定したり、その形成メカニズムを解明したりすることに役立つことから、新しい物質の創生をはじめ、化学および医療の広い分野への応用が期待される。飛行時間型質量分析法は、レーザ照射などによりイオン化させた試料分子を高電界によって加速させ、検出器に到達するまでの飛行時間を測定することによって資料の質量電荷比を求める分析法である。飛行時間型質量分析法に超伝導ストリップライン検出器（Superconducting Strip Detector: SSD）を用いると、従来の検出素子を用いた飛行時間型質量分析法では不可能であったタンパク質複合体などの高分子の正確な質量分析や、同じ質量電荷比を持つ分子の判別が可能になることから、質量分析の新たな可能性を切り開くものとして研究が進められている。

従来素子に比べて高速な検出速度を持つ SSD であるが、より高速な検出速度を実現するには、SSD を並列に分割して多数並べたシステムを構築することが有効である。これは検出速度を上げるだけでなく、SSD の実効的な面積を大きくし、試料の検出効率を向上させることにも有効である。しかし単純に現状の方法で SSD を複数並べる方法では、低温環境に位置する SSD をすべて室温機器で直接測定することになり、配線数の増大による熱流入や雑音の増大のために、システムの構築は容易ではない。そこで低温下に位置する超伝導単一磁束量子（Single Flux Quantum: SFQ）回路を用いたシステム化の研究が進められている。下図に SFQ 回路による超伝導質量分析システムの概要を示す。複数並べられた SSD から分子が検出された際に生じる電流は、SFQ 回路におけるデジタル信号である SFQ 電圧パルスに変換される。SFQ 電圧パルスは SFQ 回路による時間／デジタル変換回路に入力される。SFQ 時間／デジタル変換回路は数十ピコ秒という時間分解能で SFQ パルス入力のタイミングを識別することができるため、極めて正確に試料の飛行時間を測定することができ、高精度の質量分析を行うことができる。また、すべての SSD を SFQ 回路によって測定しているため、SSD を多数並べた場合にも低温と室温機器間の配線数を劇的に減らすことができる。

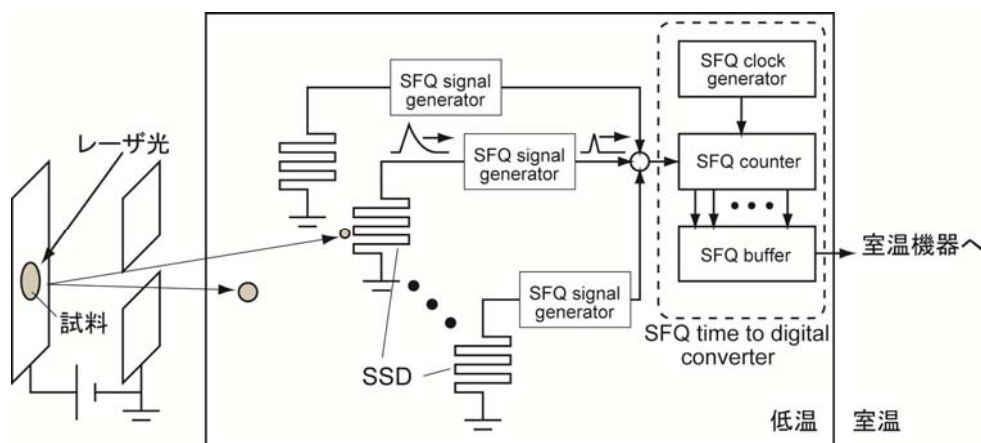


図 超伝導単一磁束量子（SFQ）回路を用いた質量分析システムの概要

これまでに、SSD からの信号を SFQ パルスに変換する回路を開発し、1 つの SSD を接続した状態で試料の飛行時間を測定し、このシステムで高精度な質量分析が可能であることを実証してきた。今後はシステム全体の最適化を行い、より高精度な質量分析を可能にすることや、SFQ 回路によるシステム化の特徴が最大限利用できる SSD を多数用いた質量分析システムを構築し、高効率な検出やイメージングを実証して行く予定である。

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：超電導デジタルデバイス（低温）

「SFQ 回路を用いた SSPD からの低ジッタ信号読み出し」

情報通信研究機構
神戸未来 ICT 研究所
寺井弘高

超伝導単一光子検出器（SSPD）は、広検出波長帯域、高検出効率、高計数率、低暗計数率、低ジッタという特長を有し、アバランシェフォトダイオード（APD）やフォトマルチプライヤー（PMT）の性能を凌駕する光子検出器として注目されている。SSPD の数ある特長の中でも、低ジッタという特長は多くの応用で重要となっている。例えば、すでにフィールド試験でも数多くの採用実績がある量子鍵配布（QKD）システムや、パルス位置変調方式が検討されている衛星間や地上-衛星間の光リンク等の通信応用である。また、暗視野 3D イメージングや LIDAR（Light Detection and Ranging）のように検出器の時間分解能で深さ方向の空間分解能が決まるような計測応用でも、高検出効率かつジッタの小さい検出器が求められる。

SSPD のジッタはバイアス電流の低下に伴って増大する。SSPD の光子検出原理（例えばホットスポットモデル）から考えて、バイアス電流の低下に伴って増大することは容易に予想できるが、もう 1 つの要因として、低ノイズアンプの感度不足による読み出し系のジッタ増大も考えられる。これまでのところ、どちらが支配的か明らかではないが、バイアス電流が大きいほど、つまり臨界電流値の大きい SSPD ほど低ジッタという観点で有利であることがわかっている。一方、高検出効率を実現するためには、超伝導薄膜を薄く、ナノワイアの幅を狭くする必要があるが、これらは臨界電流の小さい SSPD ほど検出効率という観点で有利であることを意味する。つまり、高検出効率と低ジッタの実現は互いに相容れない目標ということになる。小さな臨界電流の SSPD からでも低ジッタで信号を読み出すことができれば、高検出効率と低ジッタの両方を実現できるが、そのためには読み出し回路の高感度化が不可欠である。我々は、このような SSPD からの低ジッタ信号読み出し技術として、単一磁束量子（SFQ）回路に着目した。

我々が、SSPD からの信号読み出し技術として SFQ 回路に着目したそもそもの理由は、SSPD アレイの信号処理回路として SFQ 回路を利用できると考えたからである¹⁾。SSPD をアレイ化することで、更なる高計数率化や光子数識別が可能となるが、出力ケーブル数の増大に伴う冷凍機への熱負荷の増大が問題となる。この問題を解決するには、SSPD の動作環境と同じ極低温での信号処理が必要であり、SFQ 回路はこのような用途に非常に適している。我々は世界に先駆けて SSPD アレイ用の SFQ 信号処理回路を提案し¹⁾、SFQ 回路を用いた SSPD からの信号読み出し動作を実証した^{2,3)}。さらに、SFQ 回路による信号処理まで含めた 4 ピクセル SSPD アレイのクロストークフリー動作にも成功しているが⁴⁾、これまでの回路は電流感度よりもバイアスマージン重視の設計であったため、SFQ 回路を用いない従来の読み出し方法に比べて、ジッタという観点で優位性を示すことはできていなかった。しかし、SFQ 回路自身はジョセフソン接合 1 つ当たり 0.1 ps の低ジッタで動作するため、入力電流感度をさらに改善することで、SSPD からの低ジッタ信号読み出しを実現できると考えられる。今回、電流感度を重視した回路パラメータの見直しを行い、SSPD からの低ジッタ信号読み出しを実証した⁵⁾。SSPD からの微弱信号を SFQ パルスに変換するため、回路入力部に磁気トランスフォーマを設けている。図 1 (a) に SSPD/SFQ 変換回路の等価回路を示す。この磁気トランスフォーマのコイル巻き数を増加すれば電流感度は向上するが、入力信号帯域とのトレードオフが存在する。今回は、磁気トランスフォーマについては、従来回路と同じ設計とし、その他の回路パラメータを最適化することで、電流感度の向上を計った。その結果、入力電流感度

が磁気トランスフォーマのワッシャーコイルに含まれるジョセフソン接合 J1 の臨界電流値に依存していることを見いだした。図 1 (b) に SFQ 読み出し回路のエラーレートを入力電流パルス強度依存性を示す。J1 を従来回路の $100\ \mu\text{A}$ から $140\ \mu\text{A}$ に増大することで、入力電流感度（エラーレートが 10^{-6} となる入力電流パルス強度と定義）が従来回路の $13.8\ \mu\text{A}$ から $8.2\ \mu\text{A}$ に向上していることがわかる。この SFQ 読み出し回路のジッタを、パルスパターン発生器 (PPG)、時間分解能 $1\ \text{ps}$ の TCSPC (Time-Correlated Single-Photon Counting) モジュールを用いて測定した。ジッタの測定系を図 2 (a) に示す。この測定系は、SSPD のジッタ測定における、フェムト秒レーザーを PPG に、SSPD を SFQ 回路に置き換えたものである。ジッタは TCSPC モジュールから得られた出力カウン트의ヒストグラムにおけるピークの半値全幅から求めた。結果を図 2 (b) に示す。J1 の臨界電流が $140\ \mu\text{A}$ では、入力パルス電流値 $15\ \mu\text{A}$ 以上で、SFQ 読み出し回路のジッタは $30\ \text{ps}$ 程度の一定値となっている。この $30\ \text{ps}$ の残留ジッタの起源を探るため、図 2 (a) に示す測定系で SFQ 回路を取り除いてジッタを測定した。図 2 (b) の挿入図に結果を示す。低ノイズアンプへの入力電圧を SFQ 回路の出力電圧相当の $2\ \text{mV}$ とした時、ジッタは $30\ \text{ps}$ 程度であることがわかる。従って、 $30\ \text{ps}$ の残留ジッタは SFQ 回路以外の測定系に起因したものであり、SFQ 読み出し回路のジッタは、 $15\ \mu\text{A}$ 以上の入力パルス電流値では $30\ \text{ps}$ よりもはるかに小さく、この測定系では測定できないことがわかった。

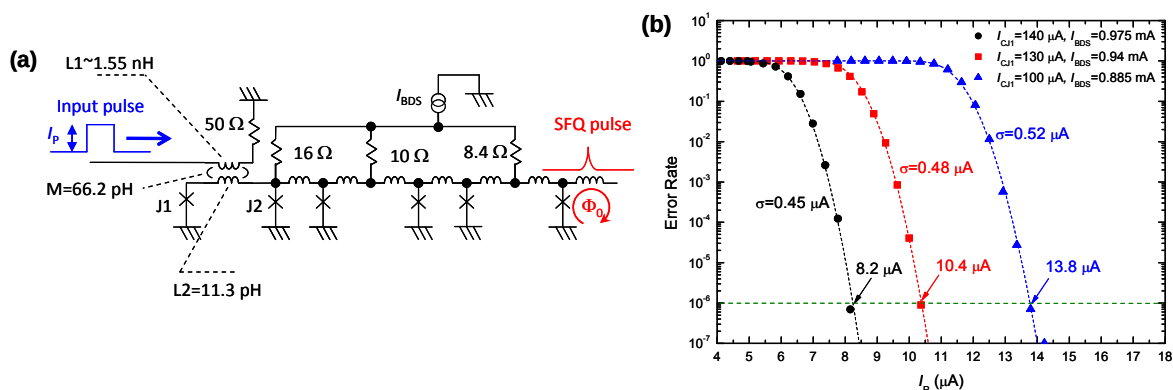


図 1 SFQ 読み出し回路のエラーレートと入力電流パルス強度の関係

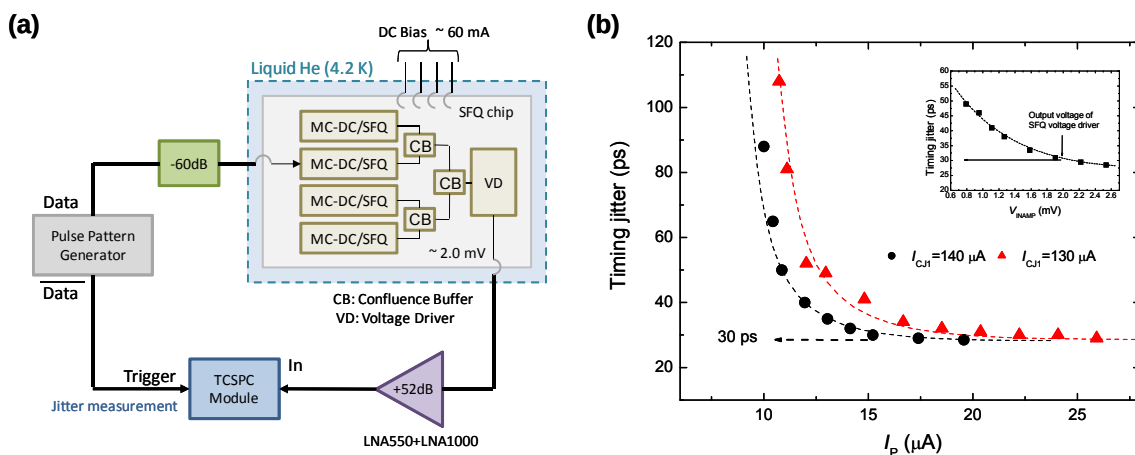


図 2 (a) SFQ 回路のジッタ測定系、(b) SFQ 回路のジッタ測定結果

以上の結果を受けて、実際に SSPD と SFQ 読み出し回路を 0.1 W GM (Gifford-McMahon) 冷凍機に実装し、ジッタ低減効果を確認した。測定には臨界電流値が約 $18 \mu\text{A}$ 、暗計数率 100 Hz における検出効率が 16 % の SSPD を用い、事前に SFQ 回路を用いない従来手法でジッタを評価しておいた。SFQ 読み出し回路を用いた場合の測定系を図 3 (a) に示す。図 3 (a) で得られた検出効率のバイアス電流依存性は、従来測定で得られた結果と一致することはすでに確認済みである³⁾。得られた結果を図 3 (b) に示す。SFQ 読み出し回路を用いない従来手法では、通常 SSPD と並列に 50Ω の抵抗を接続する。直流バイアス電流の逃げ道となり、SSPD を熱暴走 (ラッチ) 状態から回復させる効果がある。図 3 (b) においても、 50Ω のシャント抵抗を接続しない場合には、臨界電流よりもはるかに小さい $14.5 \mu\text{A}$ 以上のバイアス電流で熱暴走により測定不能状態に陥っていることがわかる。このように、 50Ω の並列抵抗は SSPD の動作安定性を高める効果がある一方、接続する低ノイズアンプに流れ込む電流値が半減するため、アンプの感度が原因でジッタが増大する。 50Ω の並列抵抗を接続した場合、バイアス電流 $18 \mu\text{A}$ 付近では約 67 ps のジッタである。一方、SFQ 読み出し回路を用いた場合、得られたジッタは約 37 ps であり、大幅なジッタ低減効果が確認された。SFQ 回路を用いる場合は、バイアスティーを介さず直接 SFQ 回路と SSPD を接続するため、 50Ω のシャント抵抗を接続する必要がない (SFQ 回路側の 50Ω の終端抵抗が並列抵抗の効果を発揮する)。これは、バイアスティーを用いる従来の読み出し方法に比べて大きな優位性だが、仮に従来読み出しで 50Ω の並列抵抗を接続せず、 $18 \mu\text{A}$ まで電流バイアスできたとしても、SFQ 読み出しのほうが優位性を持っていることが図 3 (b) よりわかる。

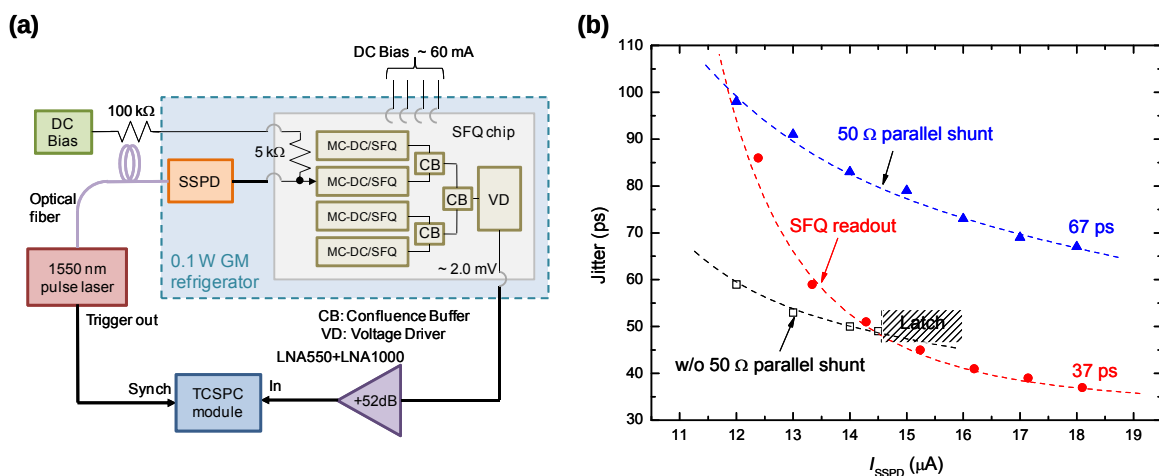


図 3 (a) SFQ 読み出し回路を用いた SSPD のジッタ測定、(b) 従来読み出しと SFQ 読み出しによる SSPD のジッタ比較

今回の結果は、SFQ 読み出し回路が、SSPD アレイを実現するための信号処理回路としてばかりではなく、低ジッタ信号読み出しを実現するためにも有用であることを示している。今後、冒頭でも述べた低ジッタ化が望まれる様々な応用で、ジッタの低減を目的に SFQ 読み出し回路を利用する機会があると考えている。

参考文献：

1. Terai, S. Miki, and Z. Wang, IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 19, 350, 2009.
2. Terai, S. Miki, T. Yamashita, K. Makise, and Z. Wang, Appl. Phys. Lett., Vol. 97, 112510, 2010.

3. S. Miki, H. Terai, T. Yamashita, K. Makise, M. Fujiwara, M. Sasaki, and Z. Wang, Appl. Phys. Lett., Vol. 99, 111108, 2011.
4. T. Yamashita, S. Miki, H. Terai, K. Makise, and Z. Wang, Opt. Lett. Vol. 37, 2982-2984 (2012).
5. H. Terai, T. Yamashita, S. Miki, K. Makise, and Z. Wang, Opt. Express Vol. 20, 20115-20123 (2012).

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：超電導デジタルデバイス（低温）

「量子メモリの原理実験に成功 ～量子コンピュータの実現へ前進～」

日本電信電話株式会社
NTT 物性科学基礎研究所
主任研究員 齊藤志郎

1. はじめに

量子計算・量子情報処理の観点から、量子ビットの候補となりうる量子二準位系における状態操作が注目を集めている。中でも超伝導量子ビットは、人工原子(マクロな量子系)であるが故の制御性の良さ、および超伝導回路の設計自由度の広さによる拡張性が期待され、精力的に研究が進められている。これまでに、複数量子ビットを用いた量子演算や量子状態制御が実現されている^{1),2)}。一方、コヒーレンス時間も、ここ十年ほどで 1 ns から 0.1 ms へと 5 桁も伸びてきている^{3),4)}。しかしながら、天然のミクロな量子系である電子スピンや核スピンのコヒーレンス時間には遙かに及ばない。そこで、近年、電子スピン集団を超伝導量子ビットの量子メモリに応用する研究が注目されている^{5),6)}。

我々は、量子メモリの候補として、ダイヤモンド結晶中の窒素-空孔 (NV) 中心に基づく電子スピンのに着目し研究を進めている (図 1 参照)。本稿では、超伝導・ダイヤモンド複合系における量子メモリの原理実証実験を紹介する⁷⁾。

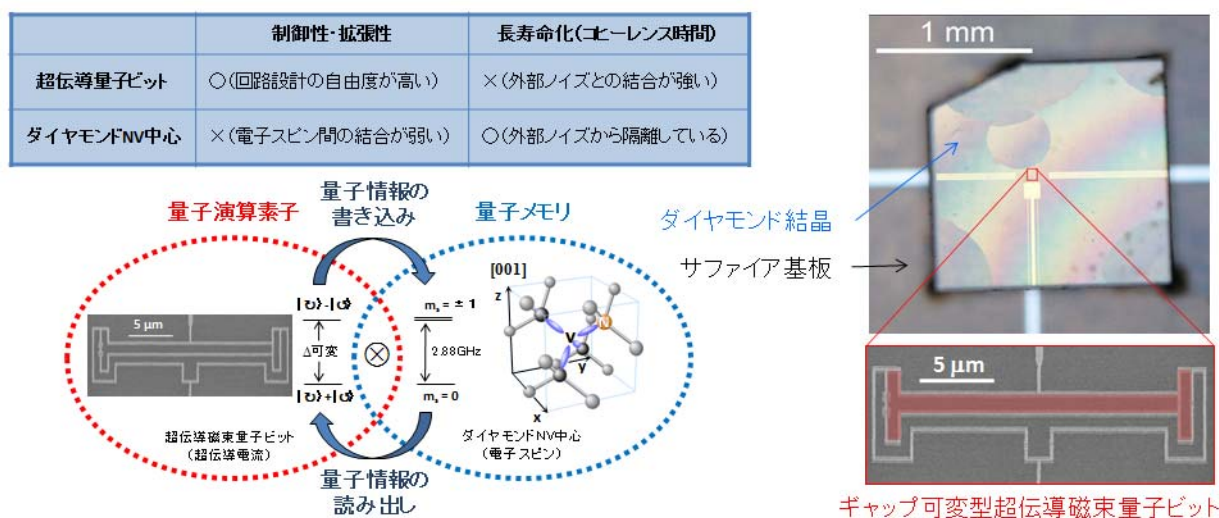


図 1 超伝導・ダイヤモンド複合系

2. ダイヤモンドと超伝導磁束量子ビットの準備

ダイヤモンド結晶中の NV 中心の電子状態は、大きさ 1 のスピンを持ち、ゼロ磁場分裂により、基底状態に 2.88 GHz の分裂が存在する。この分裂に超伝導量子ビットのエネルギーギャップ Δ を一致させるため、我々はギャップ可変型超伝導磁束量子ビットを開発した⁸⁾。さらに、両者間の強結

合を実現するために、高密度の NV-中心を含むダイヤモンド結晶を準備した。これは、量子ビットと単一の電子スピンの結合は 8.8 kHz 程度と小さいが、電子スピン集団が協調的に量子ビットと結合することで、スピン数 N に対して、結合強度が $\sqrt{N}$ 倍に増加するためである。準備したダイヤモンド結晶を、サファイア基板の上に作製した量子ビット試料に注意深く貼り付けることで、超伝導・ダイヤモンド複合系を実現した (図 1 写真)。

3. 量子複合系における実験結果

測定は希釈冷凍機を用い、ベース温度 ~ 12 mK で行った。ダイヤモンド結晶を貼り付けた磁束量子ビット試料のマイクロ波による分光測定では、エネルギーの極小点近傍に 70 MHz のエネルギー分裂が観測された (図 2(a))。分裂の中心周波数 2.878 GHz は、NV-中心のゼロ磁場分裂とよく一致している。一方、ダイヤモンド試料を貼り付ける前の分光測定では、分裂は見られていない (図 2(a) 挿入図)。以上の結果より、観測された分裂は、磁束量子ビットとダイヤモンド中の電子スピン集団との強結合による真空ラビ分裂であると結論付けた。また、分裂幅から、磁束量子ビットと協調的に結合している電子スピンの数は、数千万個と見積もられる。

次に、量子メモリ動作を実証するために時間領域の実験を行った。まず、磁束量子ビットと電子スピン集団が十分分離している状態で、マイクロ波パルスを照射し量子ビットのみを励起状態に準備する。次に、すばやく量子ビットのエネルギーを変化させて、スピン集団と共鳴させる。このとき、エネルギー変化が真空ラビ分裂に比べて十分に早いと非断熱的遷移が起こり、量子ビットとスピン集団間で量子 1 個分のエネルギーの授受を示す真空ラビ振動が生じる (図 2(b))。この振動が、まさに量子ビットからスピン集団への量子情報の書き込み・読み出しの繰り返しを表している。

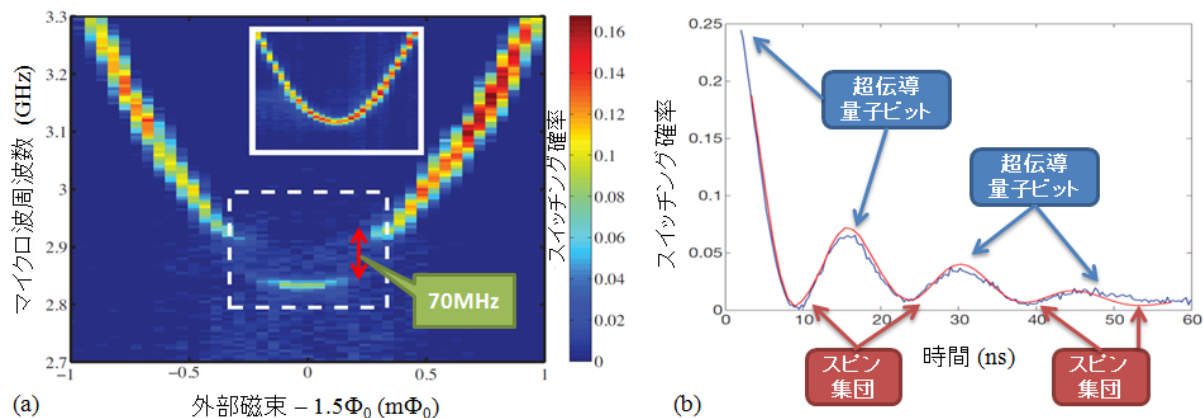


図 2 (a) マイクロ波による分光測定 (b) 超伝導量子ビットとスピン集団間の真空ラビ振動

4. まとめ

ダイヤモンド結晶中の NV-中心からなる電子スピン集団と超伝導磁束量子ビットとのコヒーレントな量子結合を観測することに成功した。これは、超伝導量子ビットの量子状態をダイヤモンド結晶中のスピン集団へと書き込み、再び読み出せることを意味しており、量子通信や量子情報処理に不可欠な量子メモリの実現にとって、ダイヤモンドがきわめて有望な候補である事を示している。

本研究は、大阪大学と国立情報学研究所との共同研究である。また、最先端研究開発支援プログラム (FIRST) 量子情報処理プロジェクト及び 科研費基盤研究 (A)(22241025) の助成を受けて行われた。

参考文献：

1. M. D. Reed, *et al.*, Nature 482, 382 (2012).
2. M. Neeley, *et al.*, Nature 467, 570 (2010).
3. Y. Nakamura, Y. A. Pashkin, and J. S. Tsai, Nature 398, 786 (1999).
4. C. Rigetti, *et al.*, arXiv:1202.5533.
5. D. Marcos, *et al.*, Phys. Rev. Lett. 105, 210501 (2010).
6. Y. Kubo, *et al.*, Phys. Rev. Lett. 105, 140502 (2011).
7. X. Zhu, *et al.*, Nature 478, 221 (2011).
8. X. Zhu, *et al.*, Appl. Phys. Lett. 97, 102503 (2010).

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導関連 ‘12/10 月－11 月’の催し物案内

10/7-12

Applied Superconductivity Conference (ASC) 2012

場所：Portland, U.S.A.

問合せ：<http://www.ascinc.org/>

10/25

電子情報通信学会

超伝導エレクトロニクス研究会「超伝導エレクトロニクス基盤技術及び一般」

場所：機械振興会館

問合せ：<http://www.ieice.org/es/sce/jpn/>

10/26-27

低温工学・超電導学会

2012 年度第 4 回冷凍部会（公開）例会－国際会議報告会「低温工学・超伝導工学における国際情勢と動向について」

場所：KKR 沼津はまゆう

問合せ：http://www.csj.or.jp/reitob/2012/4th_1026_01.pdf

11/6

低温工学・超電導学会

第 2 回超電導応用研究会／第 3 回材料研究会合同シンポジウム

場所：東北大学金属材料研究所

問合せ：http://www.csj.or.jp/application/2012/2nd_1106.pdf

11/7-9

低温工学・超電導学会

2012 年度秋季 低温工学・超電導学会研究発表会

場所：アイーナ（岩手県盛岡市）

問合せ：<http://www.csj.or.jp/conference/2012a/index.html>

11/14-16

Conference on Coated Conductors for Applications (CCA 2012)

場所：Heidelberg, Germany

問合せ：<http://www.itep.kit.edu/cca2012/64.php>

（編集局）

[超電導 Web21 トップページ](#)

新聞ヘッドライン (8/19-9/20)

- 核融合科学研究所が安全性を直接説明 地元理解に手応え 電気新聞 8/24
- (ワールドけいざい) レアアース確保に本腰 米カリフォルニアの鉱山、10 年ぶり再開 朝日新聞 8/26
- 徹底解説「再生可能エネルギー」展望と課題ー太陽光(4) 電気新聞 8/28
- 国内初の浮体式風力 長崎・枕島 来月初め売電開始 電気新聞 8/30
- きょうのことば 洋上風力発電 風が安定、空間も広く有望 日本経済新聞 8/31
- 洋上風力発電、試験機が始動 期待の浮体式「五島から拡大」/長崎県 朝日新聞 8/31
- 再生可能エネルギー：洋上風力、原発 8 基分に 「浮体式」商用化必要ー環境省戦略 毎日新聞 8/31
- 洋上風力発電に 1200 億円 30 万キロワット、国内最大級 東芝など 6 社 日本経済新聞 9/04
- 風力発電、既存施設でどう稼ぐ 保守内製化で復旧迅速に 風況診断で故障の軽減を 日経産業新聞 9/04
- 東芝、仏大手と次世代電力網の協力で覚書 日刊工業新聞 9/04
- 徹底解説「再生可能エネルギー」展望と課題ー風力(5) 電気新聞 9/04
- 潜在力は太陽光の 13 倍、洋上風力発電 日本経済新聞 9/05
- 風力発電普及へ特別会社 経産省方針 北海道、東北 送電網整備 東京読売新聞 9/06
- 小型風力発電ー20 キロワット未満、多様な場所で(仕事に効くキーワード) 日経産業新聞 9/06
- 緊急地震「超速報」に道 超電導研など技術開発 揺れの前、磁気変化キャッチ 日本経済新聞 9/07
- 次世代送電網、提携相次ぐ 電機各社、単独供給困難 ノウハウ融合 Fuji Sankei Business i. 9/07
- 徹底解説「再生可能エネルギー」展望と課題ー風力(6) 電気新聞 9/11
- 風力発電の出力安定 国、開発費を助成 日経産業新聞 9/12
- スマートグリッド 地下鉄電力網で大阪市が実証へ 日本経済新聞 9/12
- 風力発電、洋上にシフト 政府、原発 8 基分目標 「適地」ほぼ無限 朝日新聞 9/12
- 関西電力 京都でメガソーラー 年内に詳細協議 電気新聞 9/12
- がん治療装置小型化 超電導加速器の開発推進 経産省 日刊工業新聞 9/13
- 室温超電導へ一歩 東大物性研が成功 鉄系電子を直接観測 電気新聞 9/14
- 30 年代原子力ゼロ 再処理は当面継続 エネ・環境戦略 電気新聞 9/14
- 原発「ゼロの焦点」 再生エネ普及に時間 課題山積険しい道のり 日刊工業新聞 9/17
- 「電力」「熱」地域でシェア トヨタ、供給する工場に 異業種とも連携 日刊工業新聞 9/17
- レアアース、中国の対日輸出 現段階で影響なし 日本経済新聞 9/19
- 米・次世代網施設が運開 技術、国際標準化へ布石/日米共同実証 電気新聞 9/19

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導速報—世界の動き（2012 年 8 月）

公益財団法人国際超電導産業技術研究センター
超電導工学研究所

特別研究員 山田 穰



★ 記事のニュース発信地、関連地

▶ 加速器

さらなる LHC 実験成果

CERN (2012年8月13日)

CERN の大型ハドロン衝突型加速器（略称 LHC）において、ALICE、ATLAS、そして CMS との国際共同実験が、宇宙誕生の瞬間に存在していた可能性が最も高いと思われるある種の物質を新たに測定した。2011 年に実施された鉛イオンを使って LHC を 4 週間稼働させた実験が主にベースとなって、今回の新たな発見に至った。鉛イオンを衝突させ、LHC は宇宙初期の状態である“クォーク・グルーオン・プラズマ”と類似したものを瞬間的に再作製することができた。何十億もの衝突を行い得られたデータを分析することにより、共同研究チームは、これ程までに極端な条件下において物質の性質をより正確に測定することに成功した。Washington D.C.で開かれた Quark Matter 2012 で発表されたこの新しいデータは、密度は中性子星よりも高く、またその温度は太陽内部よりも 10 万倍高いものであり、これまで研究室で研究されたものの中で最も高密度並びに高温と特徴付けられる。

（出典）

Source: “LHC experiments bring new insight into matter of the primordial universe”

CERN press release (August 13, 2012)

<http://press.web.cern.ch/press/PressReleases/Releases2012/PR21.12E.html>

Contact: CERN press office, press.office@cern.ch



シンクロトロン用高磁場磁石

University of Southampton (2012 年 8 月 24 日)

‘隠れた磁場状態’を探索するため、Diamond Light Source 社（イギリスの新しい国立放射光施設）にある新しい高磁場ビームラインが、Southampton 大学の研究チームによってはじめて使用されることとなった。同研究チームは、データ保存に理想的な候補として認識されている一種の磁石を分析しているところである。この磁性膜の組成物は、熱活性化が原因で起こるデータ損失を防ぐために十分なエネルギー障壁を提供し、ハードディスクドライブが現在抱えている記憶密度の限界問題を打開する可能性がある。この磁石については、これまで同研究チームによって少なくとも 3 種類の異なった交換スプリング磁石状態が確認されている。

BLADE (Beamline for Advanced Dichroism Experiments) と呼ばれる Diamond ビームラインは、Southampton 大学を含むイギリスのいくつかの大学との提携により開発され、地球磁場の 30 万倍も強力な磁場を作り出すことができる。このビームラインは、Oxford Instruments 社製 14 T 超電導磁石を使用している。BLADE のシニアサイエンティストである Peter Bencok 博士は、今回の研究成果に関して、「新しい高磁場超電導磁石による最初の研究結果によって、ビームラインだけでなく、Diamond Light Source 社全体にとって重要な節目がもたらされた。14 T という磁場は、純鉄の飽和磁化と比べて約 6 倍も強力なものである。」と述べた。

(出典)

Source: “Southampton physicists join search for hidden magnetic states”

University of Southampton press release (August 24, 2012)

URL: http://www.southampton.ac.uk/mediacentre/news/2012/aug/12_149.shtml

http://www.eurekalert.org/pub_releases/2012-08/uos-spj082412.php

Contact: Glenn Harris g.harris@soton.ac.uk

►基礎



超電導を光で制御

American Friends of Tel Aviv University (2012 年 8 月 27 日)

Tel Aviv 大学物理学部 並びに Nanoscience and Nanotechnology センターの研究チームが、超電導物質を操作するための革新的な方法を発見した。紫外線や可視光線を含む様々な種類の光を操作することにより、超電導物質の臨界温度を変化させることに成功したのである。研究チームは、50 nm の超電導膜の上にわずかに有機分子 1 個分の厚さの薄層を取り付けた。これら分子に光が照らされると、分子はその形状を伸ばしたり変形したりして超電導膜の性質をも変化させた。重要な点は、これら物質特性の変化によって、超電導体の臨界温度に変化がみられたことである。表面層において、3 つの分子が別々に検証された。最初の分子は、ただ超電導膜の臨界温度を上げるだけであったが、2 つ目の分子は、紫外線を照らされている時は臨界温度を上げ、可視光線を照らされている時は臨界温度を下げた。3 つ目の分子の場合、光が点されているときは臨界温度を上げ、消されると下がった。今回の発見によって、超電導物質を制御、改善する上で新たな手段が提供されたことになり、

今後、ケミカルドーピングの代替として役立ち、超電導物質の臨界温度の制御を可能にする“ノブ”として利用できる可能性が高い。中でも可能性の高いアプリケーションとして“非散逸メモリー”が上げられ、熱を発生せずに、エネルギーを無駄にすることなくデータ保存し継続実行が可能となる。同研究チームの研究結果は、*Angewandte Chemie* で公表され、*Nature Nanotechnology* に掲載されている。

(出典)

Source: “Controlling superconductors with light”

American Friends of Tel Aviv University press release (August 27, 2012)

<http://www.aftau.org/site/News2?page=NewsArticle&id=17109>

http://www.eurekalert.org/pub_releases/2012-08/afot-csw082712.php

Contact: George Hunka ghunka@aftau.org

▶ 経営・決算



2012 年第 2 四半期決算

Superconductor Technologies Inc. (2012 年 8 月 9 日)

Superconductor Technologies 社(STI) は、2012 年 6 月 30 日締め第 2 四半期決算報告を発表し、同社の Conductus® HTS 線材が商業化に向けて、技術面で画期的な節目に到達したことを明らかにした。同社の第 2 四半期純収益は、前年同期の 110 万ドルに対して、59.6 万ドルとなった。また、第 2 四半期の純損失は、前年同期の 320 万ドルに対して、340 万ドルとなった。

さらに、同社で引き続き進展が見られる次世代 (2G) HTS 線材プログラムの技術並びにプロセスの開発状況について報告があった。同社の社長兼最高経営責任者である Jeff Quiram 氏は、「大手グローバルケーブルメーカーの独自の検証により、我が社の 2G HTS 線材の性能が証明された。絶対温度 77 K、1 センチメートル幅当たり電流密度 500 A 以上という特性を有する我が社の線材を利用することで、超電導電力機器の性能及び経済性向上が図られる。我が社が現在、注力して取り組んでいるのは、超電導ハイパワー送電ケーブルの実証プロジェクトに供給する 2G HTS 線材である。このケーブルが完成すると、HTS 送電ケーブル業界で新たな性能基準が確立されることが予想される。」と説明した。同社の新施設である Advanced Manufacturing Center of Excellence (AMCE)では、長尺線材の生産に必要な製造設備を導入するための準備が整い、IBAD 法による薄膜作製装置が既に設置され、現在稼働されている。その他追加装置の設置は、第 3 四半期に行われる予定である。2012 年 6 月 30 日締めの 6 ヶ月間における同社純収益総額は、前年同期の 270 万ドルに対して、100 万ドルであった。またこの期間の純損失は、前年同期の 690 万ドルに対して、640 万ドルであった。

(出典)

Source: “Superconductor Technologies Reports Second Quarter 2012 Results”

Superconductor Technologies Inc. press release (August 9, 2012)

Contact: Investor Relations, Cathy Mattison or Becky Herrick, invest@suptech.com;

HTS Wire, info@suptech.com



新ベンチャー設立

HYPRES, Inc. (2012 年 8 月 15 日)

HYPRES 社は、新しいスピノフ会社である +n (PlusN, LLC) を設立し、データ通信における高度な知的能力を備えたマネジメントソリューションの開発に注力していくと発表した。この新しいスピノフ会社は、HYPRES 社の大手投資家たちである Asset Management 社の Franklin “Pitch” Johnson 氏、Vantage Venture Partners 社の Chris Brody 氏、そして HYPRES 社理事長である John Levy 氏によって支援されている。このスピノフ会社では、先駆的なアルゴリズムとソフトウェアに基づく革新的な信号処理手法を活用した製品の開発、製造に引き続き取り組んでいく。一方、HYPRES 社はこれからも、超電導技術に重点的に取り組み、医用画像処理、高性能コンピューティング、そして高性能 RF システムなど前途有望な新規開発を推進する。

(出典)

Source: “Digital Superconductor Leader HYPRES Completes Spinoff of +n, A Developer of Capacity Management Solutions for Data Communications” HYPRES, Inc. press release (August 15, 2012)

Contact: technology@hypres.com

Theva 社への新規投資

Theva Dünnschichttechnik GmbH (2012 年 6 月 28 日)

ミュンヘンに拠点を置くベンチャーキャピタル Target Partners 社* (www.targetpartners.de) は本日、ドイツの Theva 社に対して 7 桁に上るシリーズ A の投資を行うことを発表した。また、BayBG Bayerische Beteiligungsgesellschaft 社 (www.baybg.de) も、ミュンヘンに拠点を置くこのテクノロジー企業への共同出資者として Target Partners に加わった。今回の投資目的は、電力機器アプリケーションに使用される 2G HTS テープ線材の生産ラインを開発、支援するものである。Theva 社は、過去 10 年間にわたり、送電、発電機、そして電気システムなどのアプリケーション用に 2G HTS テープ線材の製造において、専売特許を持つプロセス技術を開発してきた。シンプルでコスト効率が高い Theva のプロセス技術を利用すれば、高品質な製品づくりが保証される。Theva 社最高経営責任者である Werner Prusseit 博士は、「我々は、業界で唯一の自社生産設備及び製造能力を備えた会社でもある。」と述べた。

Target Partners 社パートナーである Kurt Müller 氏は、「Theva のチームは世界トップクラスで、その経歴と適格性は理想的且つ申し分ない。彼らが持つ技術面でのスキル、長年培われた実績、そして優れた産業ネットワークは、企業が今後、成功し続けるための土台である。」と、投資に踏み切った理由を説明した。共同出資者 BayBG のシニアプロジェクトマネージャーである Alexander Ullmann 氏は、「Theva 社を有望な投資先として我々も賛同するに至った理由としては、主要要員の専門知識、良好な市場環境並びに競合環境などが挙げられる。」と付け加えた。

Prusseit 博士は、「戦略的思考の投資企業である Target Partners と BayBG 両社が、長期にわたり当社に投資してくれることを心から喜んでいる。」と述べた。

(出典)

Source: “Target Partners invest s in Theva Dünnschichttechnik GmbH Se ries; A financing for innovative energy technology” Theva GmbH press release (June 28, 2012)

http://www.theva.com/user/eesy.de/theva.biz/dwn/PR_Target_Partners_invests_in_Theva.pdf

Contact: Dr. Werner Prusseit, prusseit@theva.com

*編注) Target Partners 社は、現在 225 億ユーロを使い、ベンチャー育成を行っているドイツの投資会社である。BayBG は、現在 500 の中小規模のビジネスに関して資本投下している Bavarian 市場でのリーダー的投資会社である。

[超電導 Web21 トップページ](#)

【隔月連載記事】

超電導マグネット開発のこれまでとこれから（その 5）

独立行政法人 理化学研究所

生命分子システム基盤研究領域 NMR 装置技術研究チーム

施設長 前田秀明

千葉大学工学研究科 柳澤吉紀

今回は、前報で述べた REBCO マグネットの技術課題の中で、世界的に問題になっているマグネットの特性劣化について解説します。

1. マグネット特性劣化の要因

前報で述べたように、REBCO 線材は薄膜や金属基板を組み合わせた多層構造をもっているため、機械的強度に著しい異方性が生じます。長手方向などの線材に有利なモードの外力には極めて強靱ですが、横引っ張り力や劈開力（cleavage 力）などの線材に不利なモードの力には脆く、多層構造がいつも簡単に剥離して壊れてしまいます。異方性は何と 3 桁の幅に達します。この異方性が原因で、エポキシ樹脂で含浸した REBCO コイルに顕著な特性劣化が生じて問題になっています。

特性劣化の例を図 1 に示します。これは直径 3cm の小さな YBCO コイルを、①非含浸、②パラフィン含浸、③エポキシ含浸の 3 種類の製法で製作し、液体窒素中で通電して特性を比較したものです¹⁾。非含浸コイルやパラフィン含浸コイルには特性劣化がありません。一方、コイルをエポキシで含浸すると、特性が顕著に劣化します。この実験では電磁力は無視できるので、特性劣化は熱応力によるものです。非含浸コイルでは、線材同士がくっついておらず冷却中に横方向の引っ張り応力が生じないので特性劣化が起こりません。一方、パラフィンは熱応力ですぐに壊れるので、冷却により生じる横引っ張り力や劈開力（cleavage 力）が小さなレベルにとどまり、含浸コイルの特性劣化は現れません。パラフィンの様な柔らかいポリマーで含浸する手法は、MRI や NMR などのコイルでは広く使われていますが、この手法により REBCO コイルの特性劣化を抑制できることが明らかです。この観点から、パラフィン含浸は REBCO コイルで多く使用されるようになってきました。

エポキシは強靱なポリマーなので、冷却時にも壊れにくい性質を持ちます。逆に言うと、エポキシが頑張りすぎるので、横引っ張り力や劈開力（cleavage 力）などの不利なモードの力が冷却中に線材に加わることで線材が壊れて劣化してしまいます。2010 年に米国で開催された Applied Superconductivity Conference で我々が図 1 の成果を発表した時には、口頭発表の後に「自分の所

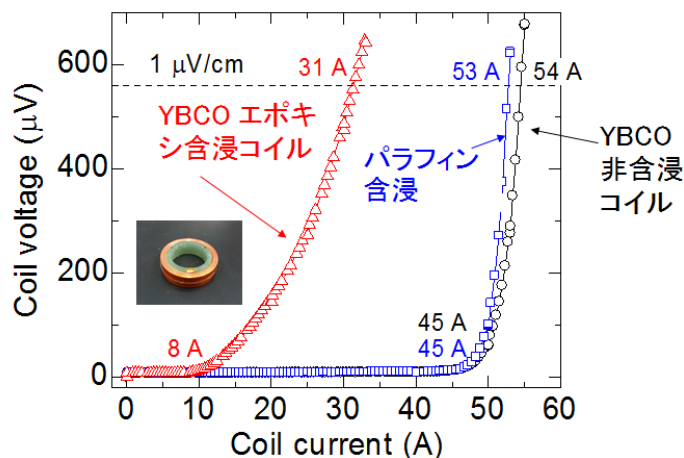


図 1 非含浸、パラフィン含浸、エポキシ含浸による特性比較

でも同じような劣化が生じて困っている」という人が大勢集まってきて驚きました。何となく変だなと思っている人たちが沢山いたところに、私たちの発表が火をつけた形になったのだでしょうね。なお、同じ学会で東芝からも同様の劣化現象に関する発表がありました²⁾。

図 2 は、エポキシ含浸 REBCO コイルの特性劣化の要因をさらに具体的に示すものです。コイルを劣化層まで巻き戻して図 2(a) の電圧タップを取り付け、励磁電圧を計測した結果を図 2(b) に示します。 $V_2 \sim V_4$ ³⁾ に顕著な特性劣化、 V_1 、 V_5 にわずかな特性劣化が見られますが、 V_6 には特性劣化がありません。線材の銅/銀層をエッチングで除去した劣化層の写真を図 2(c) に示します。黒色は YBCO 膜、紫色は YBCO 層が剥離して露出したバッファ層です。特性が顕著に劣化した V_4 には大きな剥離が発生しており、形状から見て剥離は線材上端から下端に伝播しています。特性にわずかな劣化が見られた V_5 では、線材上端に小さな剥離のスポットが生じています。特性劣化のなかった V_6 には剥離がありません。もし剥離が線材横方向の引っ張り応力によるならば、剥離は線材の中央面に生じるはずです。一方、劈開力 (cleavage 力) によるなら、線材の上端または下端から剥離が始まるでしょう。それ故、剥離は劈開力 (cleavage 力) により生じている事が明らかです³⁾。

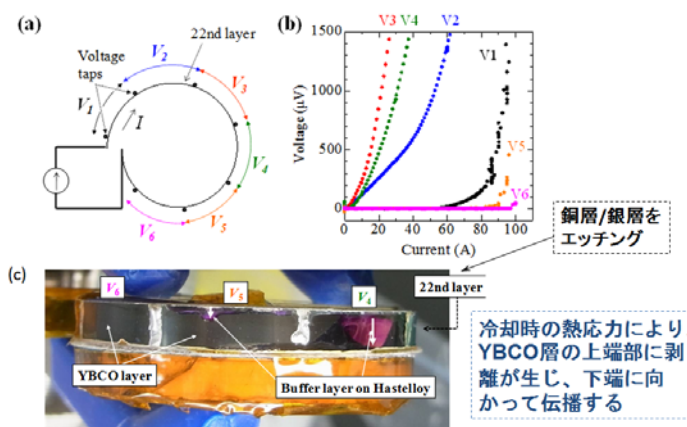


図 2 コイル劣化部の YBCO 層の状態

図 3 は冷却時の図 1 のコイルの変形図と径方向の熱応力 (横方向応力に対応) の等応力線図です。巻き枠や層間にあるエポキシ樹脂の大きな熱収縮により、コイル上下端部に径方向応力 (横方向応力) が集中しています (オレンジ色で表示)。この図から、劈開力

(cleavage 力) が生じていることが明らかです。劈開力は線材端部に集中するので、これが剥離を起こし、それが下側に向かって伝播して特性劣化に至るわけです。

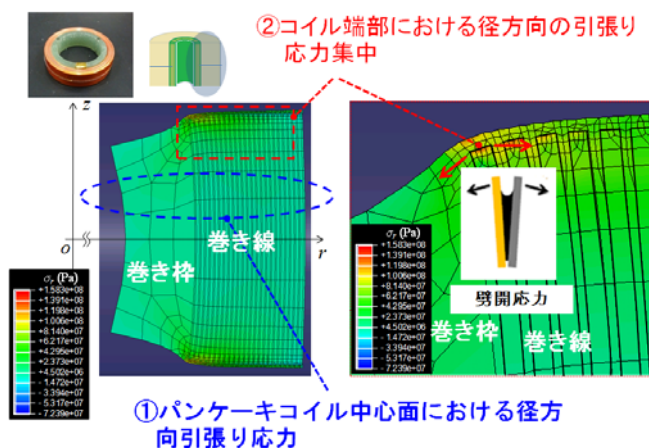


図 3 コイルの熱応力による変形図と径方向応力分布

2. 特性劣化の抑制方法

以上の様に、①非含浸や柔らかいポリマーで含浸すれば REBCO コイルは劣化しないこと、②エポキシの様な硬い樹脂で含浸すると特性劣化が生じること、③この特性劣化は冷却時の熱応力による劈開力 (cleavage 力) であること、などが明らかになりました。最近では、これに基づいて、非含浸方式や柔らかいポリマーで含浸する製法を採用する例が増えています。LTS コイルの場合、クエンチを防止したり、線材フープ応力を低減させたり、非円形コイルの成形や剛性向上を助けるためにコイルをエポキシで含浸することがあります。REBCO コイルでは温度マージンが大きいのでクエンチの心配はありませんし、線材の長手方向の強度が高いのでフープ応力の問題も無視できま

す。従って、円形コイルの場合には、あえてエポキシで含浸する必要はありません。ところが、リニアや加速器で用いられる非円形コイルでは、コイルの成形や剛性の関係で、エポキシで含浸する方が望ましいことが多くあります。このためには、エポキシ含浸しても REBCO コイルの特性が劣化しない手法の開発が必要です。

図 4 は、このような要求を満たすために開発したポリイミド絶縁皮膜を表面に電着した REBCO 線材です⁴⁾。ポリイミドのコロイドの中に線材を通し、両者に電圧を加えることで線材の表面にポリイミド粒子を電着させてから乾燥させます。線材の中央面で約 20 μm 、端部で約 30 μm の厚みです。

図 5 に、この線材を用いて巻いたコイルの通電特性を示します。驚くべきことに、あれだけ劣化が止まなかったエポキシ含浸方式でも、この線材をコイルに巻けば特性劣化がまったく生じていないことが分かります。一見関係のなさそうな線材の絶縁皮膜処理がエポキシ含浸による特性劣化を抑制する機能を持つのは不思議です。これは、冷却によりコイルの上端部に生じる劈開力

(cleavage 力) がポリイミド絶縁皮膜の塑性変形で吸収され、結果として線材に加わる劈開力 (cleavage 力) が低くなり特性劣化が抑制されるのではないかと推測しています。

図 6 にこれまで得られた REBCO コイルの劣化特性に関する知見をまとめました。非含浸や柔らかいポリマーで含浸すれば劣化は生じません。柔らかいポリマーとしては、パラフィン、ワックス、グリスなど

何でも可能です。エポキシで含浸する場合でも、ポリイミドなどで絶縁皮膜された線材を用いれば劣化は抑制できます。最近、米国の高磁場研究所の Trociewitz らは⁵⁾、REBCO 線材を熱収縮チューブに収めコイルに巻いてからエポキシで含浸すれば、エポキシと線材が分離 (mechanical decouple) されて引っ張り応力が伝わらなくなり、線材に加わる横引っ張り応力が消えてコイル特性の劣化がなくなることを示しました。エポキシ樹脂に対する対策としてこの mechanical decoupling の考え方も重要です。線材に剥離剤を塗ってコイルに巻きエポキシで含浸する手法も同じような decoupling 効果を生みますから有効であると思います。以上の様に、現在では REBCO マグネットの特性劣化の要因とそれに対する対策が少しずつ明らかになってきました。REBCO マグネットでエポキシ含浸方式が復活する日も遠くないと思います。

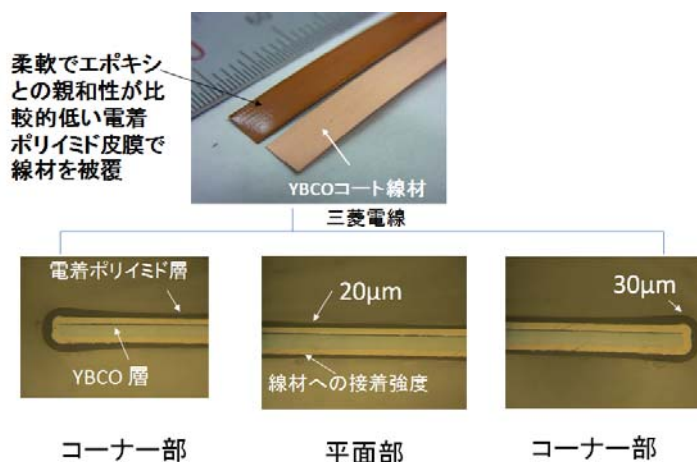


図 4 ポリイミド皮膜処理した YBCO 線材

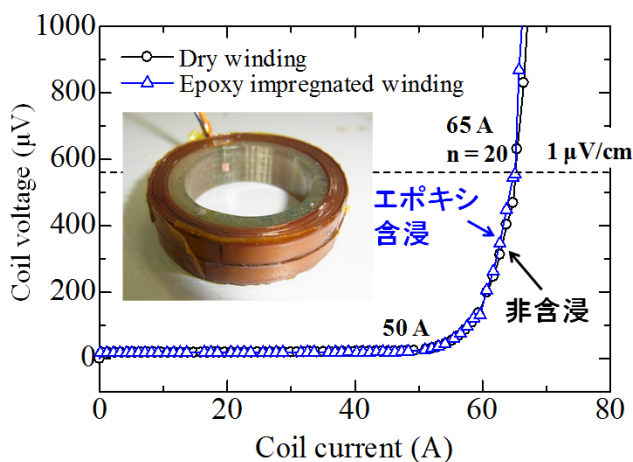


図 5 ポリイミド皮膜処理した YBCO 線材を用いたコイルの特性

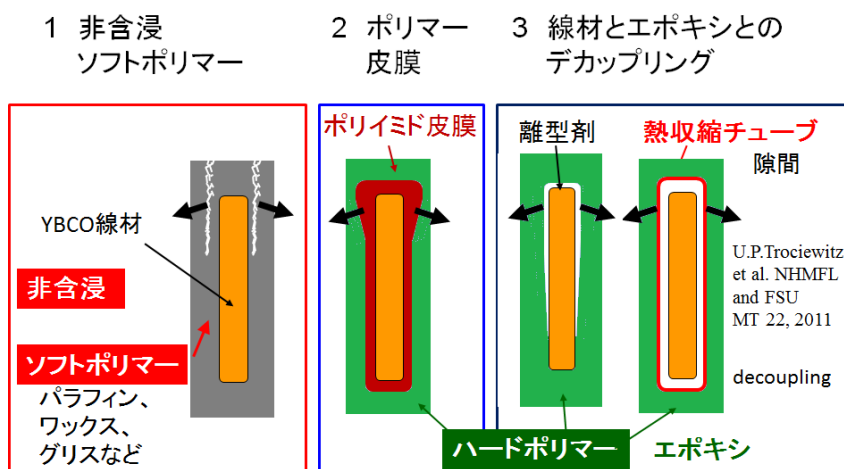


図 6 REBCO コイルの劣化要因と対策のまとめ

ところで、図 4 の絶縁皮膜 REBCO 線材ですが、絶縁厚みを低減し、コイルにおける線材の占積率を向上させる上で非常に有効です。REBCO コイルの大きな欠点は、REBCO 線材が $100\ \mu\text{m}$ から $150\ \mu\text{m}$ と非常に薄いので、絶縁の厚みを極めて薄くしなければ、コイル巻線に占める線材の占積率が極端に悪くなってしまうことです。例えば $25\ \mu\text{m}$ 厚のカプトンテープのダブルラップ巻きを用いると、それだけで占積率が 50 %以下になってしまいます。これでは高電流密度でコンパクトなコイルを実現することが困難になります。図 4 の絶縁皮膜線材を用いれば絶縁厚が薄くても絶縁能力が高いため、コイルにした場合に 70~80 %の線材占積率を得ることが可能です。皮膜がついているので線材の扱いも容易で、エポキシ含浸にも安定であるなど多くのメリットがあるので、今後 LTS におけるホルマール被覆線材の様に、含浸方式、非含浸方式を問わず、幅広く REBCO マグネットに使用されていくのではないかと考えています。

3. まとめ

我々の研究室の最近の成果を中心にして、REBCO コイルの劣化現象のメカニズムと対策をまとめました。エポキシ含浸による REBCO コイルの劣化現象を 2 年前に初めて発表した時には学会から衝撃を持って受けとめられましたが、その後の研究を通じて基本的なメカニズムと対策が明らかになってきています。今後は、様々な形状のマグネットに適用することで、信頼性が高く特性劣化のない REBCO マグネットを製作する技術が徐々に確立していくものと考えています。

参考文献

1. T. Takematsu, R. Hu, T. Takao, Y. Yanagisawa, H. Nakagome, D. Uglietti, T. Kiyoshi, M. Takahashi, and H. Maeda, Degradation of the performance of a YBCO-coated conductor double pancake coil due to epoxy impregnation, Physica C, 470, 674–677 (2010).
2. H. Miyazaki, S. Iwai, T. Tosaka, K. Tasaki, S. Hanai, M. Urata, S. Ioka, and Y. Ishii, Thermal stability of conduction-cooled YBCO pancake coil, IEEE Trans Appl. Supercond. 21, 2453-2457(2011).
3. Y. Yanagisawa, H. Nakagome, T. Takematsu, T. Takao, N. Sato, M. Takahashi, and H. Maeda, Remarkable weakness against cleavage stress for YBCO-coated conductors and its effect on the YBCO coil performance, Physica C 471, 480-485 (2011).

4. Y. Yanagisawa, K. Sato, R. Piao, H. Nakagome, T. Takematsu, T. Takao, H. Kamibayashi, M. Takahashi, and H. Maeda, Removal of degradation in the performance of epoxy impregnated YBCO-coated conductor double pancake, by using an YBCO-coated conductor insulated by polyimide electro-deposition, Physica C 476, 19-22(2012)
5. U. Trociewitz, M. Dalban-Canassy, D. Hilton, J. Jiang, E. Hellstrom, P. Noyes, Y. Viouchkov, H. Weijers, D. Larbalestier, 35.4T field generated using a layer wound superconducting coil made of (RE)Ba₂Cu₃O_{7-x} coated conductor, Appl. Phys. Lett. 99, 202506(2011)

[超電導 Web21 トップページ](#)

読者の広場

Q&A

Q：「赤ワインで煮込むと超電導体になり易い」と聞きましたが、どのような現象が生じているのでしょうか？」

A： 2008 年に鉄を含む超電導体 LaFeAsO 系が発見されて以来、鉄系超電導体は新しい高温超電導体の鉱脈として期待され、積極的に研究開発が進められています¹⁾。鉄系超電導体のなかでも 11 系と呼ばれる化合物は鉄とセレン、テルルが作る二次元構造が積層した結晶構造を取り、層間に数%程度、過剰鉄が存在しています（図 1）。この化合物の一つである $\text{FeTe}_{0.8}\text{S}_{0.2}$ は、空气中で数ヶ月間放置することによって初めて超電導体になるという大変奇妙な性質を示しますが^{2,3)}、超伝導化に非常に長い時間を要することが問題となっていました。そこで短時間で超伝導化する条件を探索したところ、お酒、なかでも赤ワインで試料を煮ると速やかに超電導体になると判明しました⁴⁾。また、純粋な水・エタノール混合液ではそれほど効果がなかったことからお酒に含まれるエタノール以外の成分が超電導誘発の鍵を握っていることが示唆されました。そこで慶應義塾大学 先端生命科学研究所（慶應大先端研）との共同研究で、お酒に含まれる超電導誘発物質を同定し、どのような現象が生じているかを検証しました。

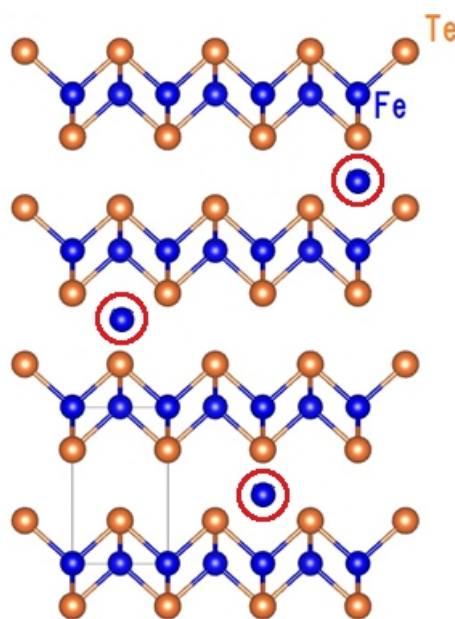


図 1. 11 系化合物 FeTe の結晶構造。
図中の赤丸が過剰鉄。

慶應大先端研が開発したメタボロミクス手法であるキャピラリー電気泳動－飛行時間型質量分析装置 (CE-TOFMS) はイオン性の低分子を数百種類同時に定量することが可能で、医薬品や食品、酒への応用例もあります。この CE-TOFMS を用いて実験に使用した酒に含まれる成分を網羅的に定量し、それと超電導体積率を比較することで超電導を誘発する“候補物質”を絞り込みました。その結果、得られた候補物質がリンゴ酸・クエン酸・ β -アラニンです。実際に超電導誘発作用を持つかを検証する為、これらを溶かした水溶液で $\text{FeTe}_{0.8}\text{S}_{0.2}$ を煮たところ、超電導化することを確認しました（図 2）。

次に、これら候補物質がどんな働きをしているかに着目しました。リンゴ酸・クエン酸・ β -アラニンはいずれも金属イオンを挟み込むように結合するいわゆるキレート作用があります。そこで、これらが試料から金属イオンを奪っていると考え、試料を煮た後の溶液を誘導結合プラズマ発光分析法 (ICP-AES) で定量したところ、層間に存在していた過剰鉄が溶出（デインターカレート）していることが判明しました（図 3）。これまでの 11 系に関する研究報告から、結晶中に過剰鉄が存在すると構造・磁性・伝導に大きな影響を及ぼし、超電導が抑制されることが知られていました。これはつまり、過剰鉄をデインターカレート出来れば抑制されていた超電導を誘発できるということで、今回、キレート作用によりそれを実現することが出来ました。

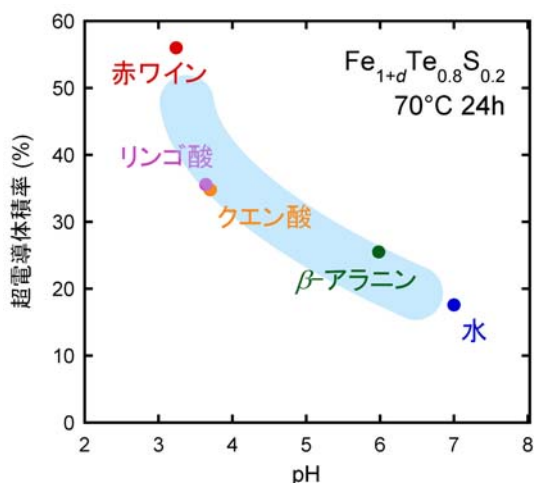


図 2. 赤ワイン及びリンゴ酸・クエン酸・β-アラニン水溶液で煮た $\text{FeTe}_{0.8}\text{S}_{0.2}$ の超電導体積率

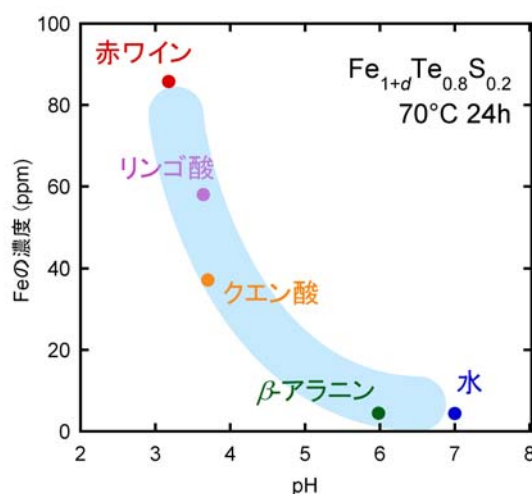


図 3. 赤ワイン及びリンゴ酸・クエン酸・β-アラニン溶液中に溶出した鉄イオン濃度

以上のことから、試料を赤ワインなどで煮込むとキレート作用によって、超電導発現を阻害していた過剰鉄がデインターカレートされるという現象が生じ、その結果、超電導が誘発されたといえます⁵⁾。過剰鉄が超電導に悪影響を与える可能性は、 $\text{FeTe}_{0.8}\text{S}_{0.2}$ に限らず関連する鉄系超電導体すべてに言えることから、これまで超電導体の有力候補でありながら超電導性を示さなかった物質に対しても本成果は応用できる可能性があります。

参考文献：

- 1) Y. Kamihara *et al.*, J. Am. Chem. Soc. 130 (2008) 3296.
- 2) K. Deguchi *et al.*, Physica C 470 (2010) S340.
- 3) Y. Mizuguchi *et al.*, Phys. Rev. B 81 (2010) 214510.
- 4) K. Deguchi *et al.*, Supercond. Sci. Technol. 24 (2011) 055008.
- 5) K. Deguchi *et al.*, Supercond. Sci. Technol. 25 (2012) 084025.

回答者：独立行政法人 物質・材料研究機構 ナノフロンティア材料 出口啓太 様

[超電導 Web21 トップページ](#)

「Web21 についてのご意見・ご感想、「読者の広場」その他で取り上げて欲しい事項、その他のお問い合わせは、超電導 Web21 編集局メール web21@istec.or.jp までお願いします。」