

掲載内容（サマリー）：

トピックス：

- 世界初の Y 系超電導線材を用いた超電導変圧器技術の開発
- Y 系超電導線の交流損失における新現象発見
- "Physica C: Superconductivity and its Applications Top Cited Article 2005-2010" を受賞

特集：超電導デジタルデバイス

- 超電導デジタルデバイスの動向
- 非対称ナノブリッジの作製とその電源回路への応用
- 製造プロセス改善による超電導単一磁束量子（SFQ）回路の低消費電力化
- SFQ 回路動作 1550 nm 帯光 IF モジュールの開発
- 単一磁束量子回路と光導波路の集積

- 超電導関連 10-11 月の催し物案内
- 新聞ヘッドライン（8/19-9/17）
- 超電導速報—世界の動き（2010 年 8 月）
- 隔月連載記事—超電導モータの過去・現在・未来（その 5）
- 読者の広場(Q&A)—お酒や大気が誘起する鉄系超伝導？

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web21

〈発行者〉

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) 3536-7318

超電導 Web21 トップページ：<http://www.istec.or.jp/Web21/index-J.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：世界初の Y 系超電導線材を用いた超電導変圧器技術の開発

- 短絡性能および変圧器巻線による限流機能を実証 -

～ 超電導変圧器の実用化と新たな機能拡大に向けて大きく前進 ～

九州電力株式会社
総合研究所 電力貯蔵技術グループ
グループ長 林 秀美

九州電力は、電力需要増や再生可能エネルギー導入拡大に伴う電力系統への影響に柔軟に対応でき、低炭素社会にも貢献する技術として超電導技術に取組み、超電導変圧器を主体に開発を進めている。今回、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) から受託して進める「イットリウム系超電導電力機器技術開発」¹⁾プロジェクトのうち「Y 系超電導変圧器の技術開発」において、九州大学、国際超電導産業技術研究センター、フジクラ及び昭和電線ケーブルシステムと共同で、世界で初めて Y 系超電導線材 (GdBCO 等) を適用した超電導変圧器を開発した。本変圧器にて短絡性能を実証するとともに、Y 系超電導変圧器の新たな機能である限流機能²⁾についても世界で初めて実証した。

変圧器は超電導線材を適用することにより小型で高効率になる。特に、Y 系超電導線材は臨界電流が大きく、細線化による損失低減や、将来の低コスト化も可能になることから Y 系超電導変圧器の早期実用化が期待されている。特に、配電用変圧器 (66/6.9kV-20MVA) では、Y 系超電導変圧器は既存油入変圧器より重量は約 1/2、体積は約 2/3、損失は約 1/6 になると考えられている。

今回の成果により、Y 系超電導変圧器は実用化に向けて大きく前進するとともに、事故電流を抑制でき、瞬時電圧低下抑制にも有効な「限流機能付超電導変圧器」³⁾の実用化への可能性が高まった。

1. Y 系超電導変圧器における短絡性能の実証

Y 系超電導変圧器 (400 kVA) において電力系統の事故時等に発生する短絡電流と、その大電流に伴う強大な電磁力に耐えうる短絡性能を実証した。同変圧器の短絡対策技術として、①20 MVA 実用変圧器の技術が検証できる最小容量 400 kVA (実用器の約 1/50) とし、線材当たりの短絡電流と電磁力を実用器と同等の 389 A、②Y 系線材は銀と銅による独自構成の安定化層を適用、③線材 (3 層) の二次巻線は電流均一化のために転位 (線材配置を交互に転換)、を独自に適用した (図 1)。

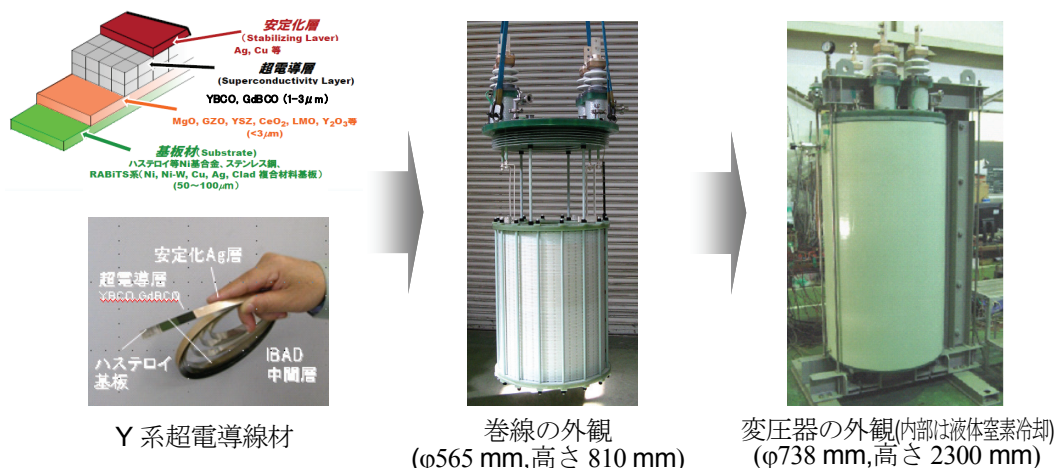


図 1 Y 系超電導変圧器 (400 kVA)

また、実用変圧器は電圧（一次/二次）は 66kV/6.9kV、電流は 175A/1674A、線材は 3 本/24 本の構成に対し、同変圧器の電圧は 6.9kV/2.3kV、電流は 58A/174A、線材は 1 本/3 本とした。

短絡対策技術の実証として、同変圧器をサブクール液体窒素温度（ -207°C ）に冷却し、電圧 6.9 kV を 0.2 秒間印加する短絡試験を実施した。その結果、短絡電流 1040 A（定格電流 174 A の約 6 倍）で良好な動作確認をした（図 2）。また、短絡試験前後の変圧器巻線インピーダンスの測定結果は同等であり、巻線が健全なことも確認した（図 3）。

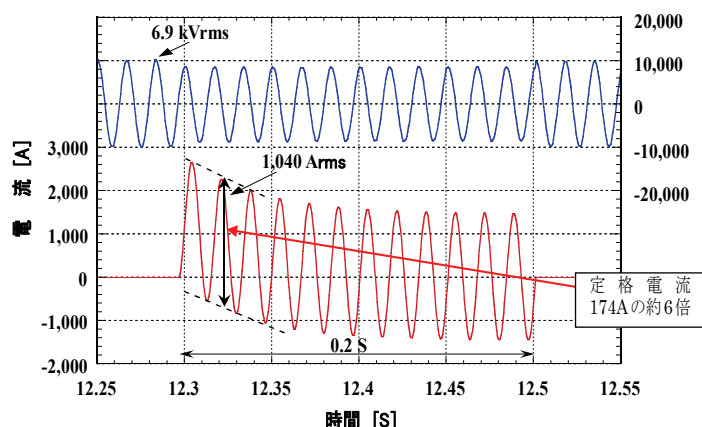


図 2 短絡試験の結果

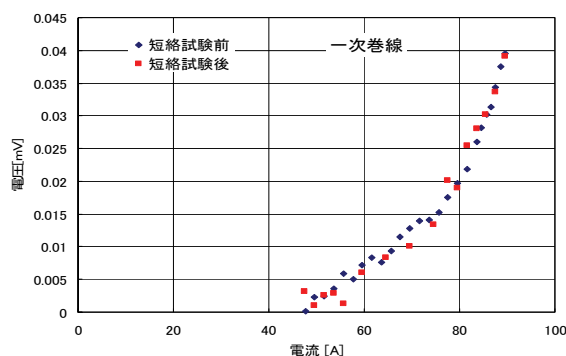


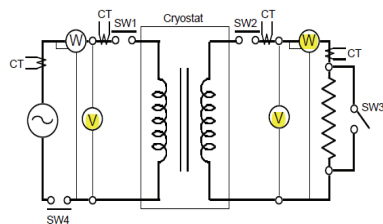
図 3 試験前後の巻線特性評価

2. Y 系小型超電導変圧器による限流機能（新機能）の実証

超電導変圧器の新たな機能である限流機能を、Y 系超電導限流機能付変圧器（10 kVA）の巻線にて実証した。本変圧器は、通常は変圧器として使用するが、事故時には事故電流（大電流）で変圧器の超電導巻線が瞬時に常電導へ転移（電気抵抗が発生）することにより、事故電流と電圧低下を抑制する限流動作が可能なことを実証した。

本変圧器の限流機能技術として、①通常は変圧器として使用し事故時は短絡強度に耐える、②事故電流を変圧器超電導巻線が常電導転移（電気抵抗発生）で抑制するメカニズムを理論的に解明し、その巻線条件を独自に適用した。また、同変圧器の仕様は電圧（一次/二次）400V/400V、電流 25A/25A、巻線 線材 6 層×50 ターンである（図 4）。

限流機能の実証試験にて、① 変圧器としての通常運転特性、②短絡試験で短絡電流を 1/30（1200 A→43 A）に抑制し瞬時電圧低下も抑制する限流動作（図 5）、③常電導転移部分は殆ど電圧に比例して増加しており限流効果の調整が可能、なことを確認した。



変圧器の構成
(試験回路含む)



変圧器の外観
(φ200 mm、高さ 250 mm)

図 4 Y 系小型限流機能付加超電導変圧器（10 kVA）

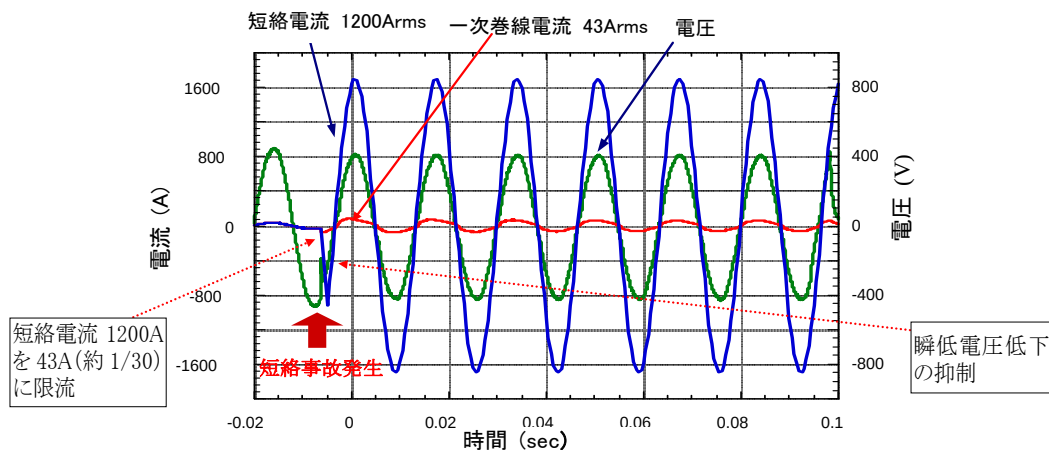


図 5 限流機能の試験結果

今後は、現在進行中の本プロジェクトを着実に進め、2 MVA 超電導変圧器システムの開発と実証を経て、20 MVA 級配電用超電導変圧器の早期実用化を目指す。

1) 「イットリウム系超電導電力機器技術開発」(H20～24 年度：資源エネルギー庁からの NEDO 交付金事業)のうち「Y 系超電導変圧器の技術開発」を九州電力が九州大学、(財) 国際超電導産業技術研究センター、(株) フジクラ及び昭和電線ケーブルシステム(株) と共同で NEDO から受託して開発中である。現在、要素技術は順調に進捗し、今月、中間評価を受けた。なお、本プロジェクトの計画は Web21 の 2009 年 11 月号に掲載済み、進捗は同 2010 年 11 月号に掲載予定である。

2) 「限流機能」とは、電力系統の短絡事故電流が最大となる前 (4 ミリ秒以内) に電流を抑制する機能 (瞬時電圧低下の抑制も可能) で、変圧器を含む電力系統の短絡容量の抑制対策に大きな効果 (機器の電氣的、機械的、熱的ストレスの対策が軽減できれば経済性でも有利) がある。また、その機能を有する「限流器」は既存技術では困難なため、世界中で鎔を削って超電導限流器が開発されている。

3) 「限流機能付加超電導変圧器」とは、超電導変圧器の超電導巻線を変圧器と限流器として利用する変圧器。各機器を個別に併設するより兼用することで小型となり効率や冷却性などで有利。現在まで他に開発例は無い。

[超電導 Web21 トップページ](#)

トピックス： Y 系超電導線の交流損失における新現象発見

九州大学
超伝導システム科学研究センター
准教授 岩熊成卓

(財) 国際超電導産業技術研究センター及び九州大学は、(独) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) からの受託研究「イットリウム系超電導電力機器技術開発」プロジェクトにおいて、Y 系超電導線材の研究開発を共同で行っている。この中で、開発中の Y 系超電導線材において、履歴損失（交流損失の主因）が従来理論から逸脱し大幅に低減することを世界で初めて見出した。この発見は、従来理論に基づく Y 系超電導線材の低損失化の指針を根底から覆し、新たな材料学的開発指針を与えるとともに、各種超電導の応用開発にも革新をもたらすものと期待される。

これまで Y 系超電導線材では、特性向上として臨界電流密度の向上を図ると、その見返りとして履歴損失も増大し、その低減のために細線化（フィラメント化）が唯一の解決策であった。しかしながら、今回見出した新現象は、線材の特性（臨界電流密度及びその均一性）の向上を図るとこの新現象の発現が顕著になり、履歴損失が減少し、従来の概念と真逆のものとなる。

今回の新現象の測定例として、GdBCO テープ線材の 64 K の磁化曲線を図 1 と図 2 に示す。図 1 はテープ面に対し、90, 60, 45, 30, 15° の角度で磁界を印加した場合で、磁界ピークから減磁時のゼロ磁化と磁界方向転換時の磁化減少が特徴である。また図 2 はテープ面に対して 15° バイアス磁界中の磁化曲線で、バイアス磁界が高いほどゼロ磁化が顕著になっている。

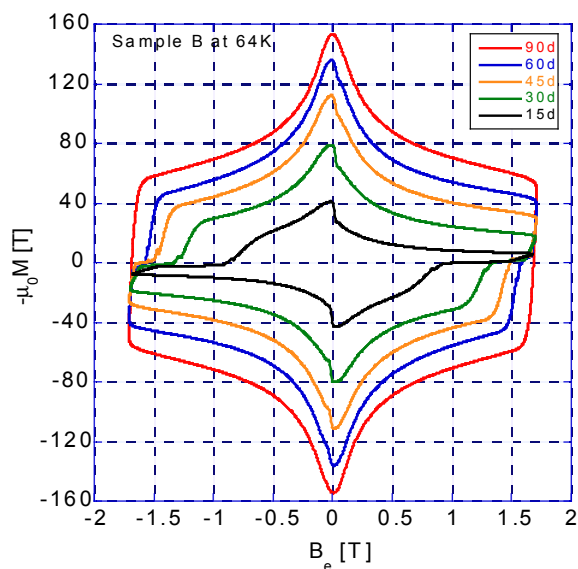


図 1 GdBCO テープ線材の 64 K における磁化曲線（テープ面に対し、90, 60, 45, 30, 15° の角度で磁界を印加した場合）

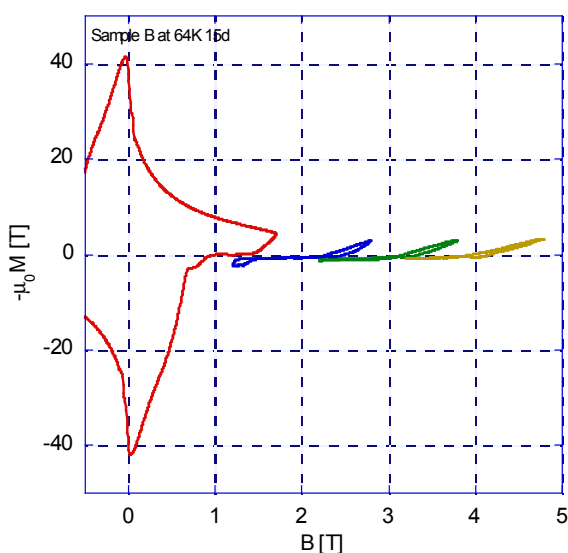


図 2 GdBCO テープ線材の 64 K における磁化曲線（15° バイアス磁界中）

今回の発見は、発電機、モータ、変圧器、SMES（超電導磁気エネルギー貯蔵）システム、ケーブル等の電気機器のみならず、医療用の MRI、癌治療用重粒子線加速器、さらには高分子構造解析用 NMR 等の磁界を用いる直流機器に至るまで、すべてが、Y 系超電導線材を用いて、容易にかつ安価に実現できるようになったことを意味する。

（詳細はプレス発表：<http://www.istec.or.jp/Operation/LateNews/Press-100825-J.html> を参照。）

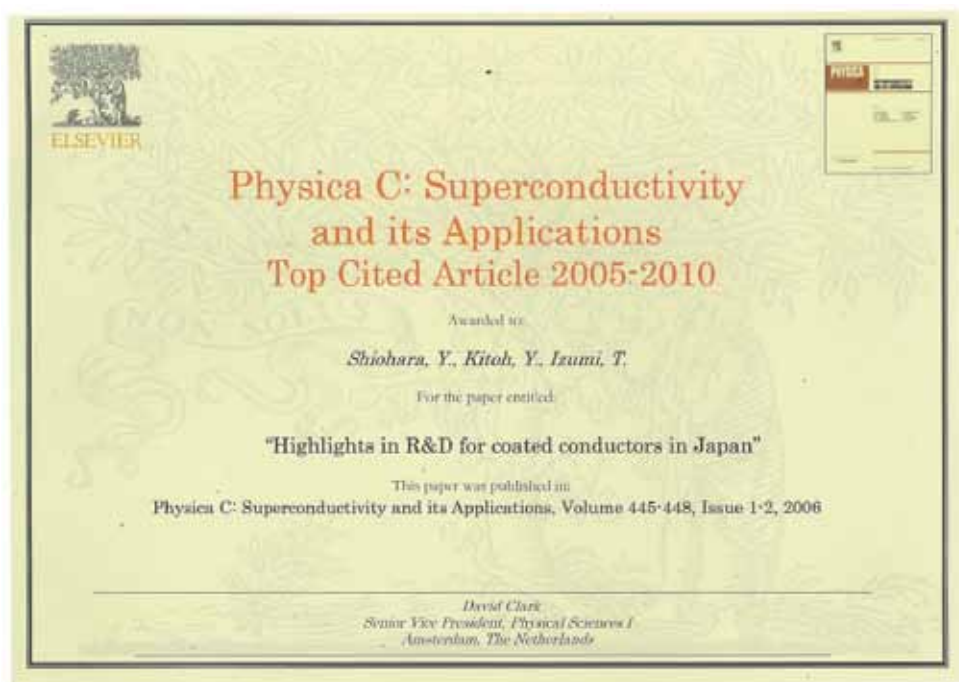
[超電導 Web21 トップページ](#)

トピックス：“Physica C: Superconductivity and its Applications Top Cited Article 2005-2010” を受賞

塩原 融（財団法人国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所所長）は、第 18 回国際超電導シンポジウム（ISS2005）において、招待講演として発表した論文*に対し、エルゼビアより“Physica C: Superconductivity and its Applications Top Cited Article 2005-2010” を受賞した。

* 論文名：“Highlights in R&D for coated conductors in Japan” (Physica C : Superconductivity and its Applications, Volume 445-448, Issue 1~2, 2006)

共著者：鬼頭 豊（現・東京電力株式会社）、和泉輝郎（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 線材研究開発部部长）



Top Cited Certificate

（編集局）

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：超電導デジタルデバイス「超電導デジタルデバイスの動向」

横浜国立大学大学院
工学研究院
教授 吉川信行

最近の超電導デジタルデバイス技術の世界的なトレンドは、低消費電力化である。米国では、現在最速の Peta スケール（一秒間に 10^{15} 回の浮動小数点演算が可能）コンピュータを更に千倍高速にするために Exa スケール（一秒間に 10^{18} 回の浮動小数点演算が可能）コンピュータの検討が始められている。しかしながら、従来技術で Exa スケールコンピュータを構成すると、その消費電力は単純計算で 3000 MW となる。これは大規模な発電所の総電力に匹敵し、Exa スケールコンピュータの実現には低消費電力化のための革新的新技術が必要となる。超電導デバイスを用いた集積回路は、CMOS 回路に対して 1000 倍以上の低消費電力化が可能であり、冷却に必要なエネルギーを見込んでもハイエンド情報機器の電力を大幅に低減できるポテンシャルを持っている。

通常の単一磁束量子（SFQ）回路の消費エネルギーは、バイアス抵抗で消費される静的消費電力と、SFQ パルスが接合を通過する際に消費される動的消費電力に大別される（図 1 参照）。通常の SFQ 回路では、静的消費電力は動的消費電力の 20 倍程度である。SFQ 回路の電力効率（1W あたりの演算量）は CMOS 回路に対して十分に高いため、これまで SFQ 回路の電力効率を高めようとする研究はあまり活発に行なわれてこなかった。しかしながら、近年、米国を中心として、量子コンピュータのインターフェース回路や、Exa スケールのハイエンドコンピュータへの応用を視野に入れ、SFQ 回路の電力効率を CMOS 回路に対して格段に向上させようとする研究が活発になってきた。

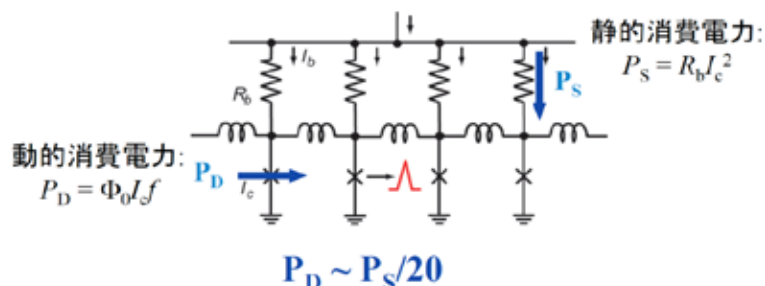


図 1 従来の単一磁束量子（SFQ）回路の消費エネルギー。バイアス回路で消費される静的消費電力とジョセフソン接合自体で消費される動的消費電力からなる。

静的消費電力を削減する方法としては、著者らのグループの LR バイアス法がある。これは、電流バイアス回路の抵抗をインダクタンスと微小な抵抗に置き換えることにより、バイアス回路で消費される電力を低減する方法である。これにより、静的消費電力を動的消費電力と同程度まで低減することができる。

Northrop Grumman の Herr らは Reciprocal Quantum Logic (RQL) と呼ばれる新回路を提案している。本回路では、各ゲートは AC 電源により駆動され、静的消費電力は完全に除去される。AC 電源の立ち上がりとしち下がりに応じて、各ゲートの出力接合は $+2\pi$ と -2π で 2 回スイッチし、各ゲート内の正味の磁束量は保存される。RQL では、沢山の論理ゲートを超電導トランスにより直列に駆動できるため、回路全体のバイアス電流を低減できるという特徴を持つ。

Hypres の Kirichenko らは Energy-Efficient RSFQ (ERSFQ) という回路方式を提案している。本回路は、SFQ 回路の電流バイアス回路の抵抗をジョセフソン接合に置き換えたものである。各ゲートを SFQ パルスが通過すると、それを補う様にバイアス回路の接合でも自動的にスイッチングが生じる。これにより、バイアス回路での消費電力を論理ゲートの動的消費電力と同程度に低減できる。また、ERSFQ は、通常の SFQ 回路の電流バイアス回路を置き換えるだけで作れるので、既存の設計資産を利用できるという特徴を持つ。

以上の方式は、回路の静的消費電力を削減する試みであるが、いずれの回路方式でも、全消費電力は論理ゲートの静的消費電力の約 2 倍程度となる。これに対して、回路の動的消費電力自体を低減しようとする提案もなされている。

Stony Brook 大の Semenov らは negative-inductance SQUID (nSQUID) と呼ばれる SQUID ループ内の 2 つのインダクタンスを逆極性に結合させた特殊な SQUID を用いて、可逆演算が可能な論理ゲートを提案している。これにより、回路の動的消費エネルギーを熱雑音程度まで削減できるとしている。

一方、著者らは、Adiabatic Quantum Flux Parametron (A-QFP) を提案している。本回路は、QFP を断熱的にゆっくりと動作させることで、回路の動的消費電力を熱雑音程度まで低減させることができる。

以上の様に、超電導デジタル回路技術は、集積回路の消費電力を CMOS 回路の千分の一から百万分の一に低減する技術として、近年特に注目される様になってきた。今後の研究動向に大いなる興味を持たれる。

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：超電導デジタルデバイス「非対称ナノブリッジの作製とその電源回路への応用」

名古屋大学大学院
工学研究科
教授 藤巻 朗

単一磁束量子 (SFQ) 集積回路は、Nb 層を従来の 4 層から 9 層へ増やしたアドバンスプロセスが超電導工学研究所 (ISTEC-SRL) によって確立され、集積密度が約 4 倍に増加し、動作周波数も 100 GHz に迫っている。10 万個以上のジョセフソン接合からなる SFQ 集積回路の出現も間近と考えられる。しかし、そこで問題となるのが、SFQ 回路への電力供給方法である。SFQ 回路は、直流電流で駆動される。消費電力は 10 万個のジョセフソン接合からなる回路であっても、たかだか 10 mW 程度であるが、電流値は数 A に達する。この直流電流を直接室温の電源回路から供給すると、その電源回路での消費電力が SFQ 回路の低消費電力特性を帳消しにしてしまう。電源回路の出力インピーダンスが負荷インピーダンス、すなわち SFQ 回路の電源部入力インピーダンスよりも高いためである。これを回避する方法の 1 つとして、変圧器によるインピーダンス変換があげられる。しかし変圧器を使い SFQ 回路用に電源回路を構成するには、1 mV 以下で電圧が発生し始めるダイオードが求められる。そのようなダイオードが存在しなかったため、これまでこの方法は検討されてこなかった。使用の最終形態まで考えると、ダイオードには大きな電流容量、マイクロ波周波数に追従する高速性、小さい占有面積が上記のほかにも求められる。

我々はこれらの条件を満たすダイオードとして、高温超伝導体非対称ナノブリッジを提案、動作実証を進めている。ナノブリッジは、幅を磁場侵入長以下に狭くした細線であり、ボルテックスを 1 個ずつ通すゲートとして機能する。線幅が細いほど高速で動作し、高い電圧が発生する。図 1 が、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 薄膜を用いて作製した非対称ナノブリッジの顕微鏡写真である。ブリッジ幅は 100 nm である。損傷を回復させる新しい加工法を用い、非対称形状に加工することで、ボルテックスがナノブリッジに入るときに感じる障壁高さ (表面バリア) を左右で異なるようにした。これにより、ボルテックスの侵入箇所が固定化される。図 1 の場合には右側のくびれた部分となる。外部直流磁場 B_e を印加することで、ボルテックスの向きと走行方向が決まる。このことは、電流 I -電圧 V 特性上で正方向の臨界電流値と負方向の臨界電流値が異なるといった現象で確認され、ラチェット効果と呼ばれている。これまで線幅や膜厚を変えて実験した結果、磁場印加を行わない状況での臨界電流は 2 - 12 mA、磁場印加によって正方向の臨界電流の低下率 (負方向の増加率も同じ) として最大 16 % を観測している。

言うまでもなく、上述の整流用ダイオードとして用いるには、臨界電流の低下率をほぼ 100 % とする必要がある。それには、非対称ナノブリッジを小さなループを伴った並列アレイとすることが有効と考え、研究を進めている。ラチェット効果はジョセフソン接合では得られない効果であり、今後はより積極的にこの効果を利用した応用を展開しようと考えている。

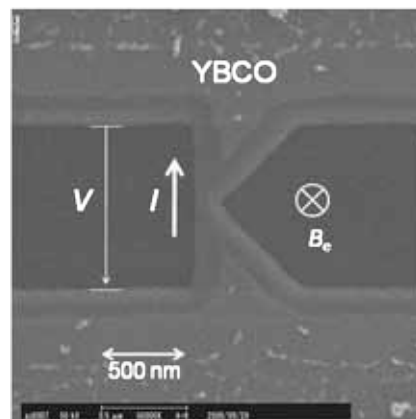


図 1 非対称ナノブリッジの電子顕微鏡写真

特集：超電導デジタルデバイス

「製造プロセス改善による超電導単一磁束量子（SFQ）回路の低消費電力化」

財団法人国際超電導産業技術研究センター

超電導工学研究所低温デバイス開発室

室長 日高睦夫

超電導単一磁束量子（SFQ）回路は、高速性と低消費電力性が両立するデジタルデバイスとして他の技術の追随を許さないものである。しかし、昨今の低消費電力化の流れを受けて、さらなる消費電力の削減が望まれている。さらに、超電導検出器や量子ビットの周辺回路として用いる場合は、現在の SFQ 回路の消費電力でも大きすぎると言われており、低消費電力化への要望は高い。本稿では、ニオブ集積回路作製プロセスの観点から SFQ 回路低消費電力化について考察する。

SFQ 回路の消費電力 P は、次式で表される。

$$P = N(\alpha f \Phi_0 I_c + I_b^2 R_b) \quad (1)$$

ここで、 N はジョセフソン接合（JJ）数、 α はスイッチング確率、 f は動作周波数、 Φ_0 は SFQ の大きさ（ 2.07×10^{-15} Wb）、 I_c は JJ の臨界電流値、 I_b はバイアス電流値、 R_b はバイアス抵抗値である。ただし、実際の SFQ 回路では異なる I_c の JJ が混在しており、1 本のバイアスラインが必ずしも 1 個の JJ に対応しているわけでもないため、(1) 式はラフな見積もりであることをお断りしておく。ここで、第 1 項は SFQ が JJ を通過するたびに消費する動的な消費電力である。第 2 項は、各 JJ にバイアス電流を分配するためのバイアス抵抗により消費する電力であり、SFQ 回路の動作に関係なく常に消費される静的な消費電力である。(1) 式に現在使われている SFQ 回路の典型的な値、 $\alpha=0.5$ 、 $I_c=0.2$ mA、 $I_b=0.14$ mA（ I_c の 70 %）、 $R_b=18$ Ω を代入して $f=40$ GHz における消費電力を見積もると、 $N=100$ 万の大規模 SFQ 回路においても約 360 mW となる。この値は CMOS 等の他のデバイスに比べると格段に小さい。また、動的消費電力と静的消費電力の割合はこの条件では静的消費電力の方が 40 倍以上大きい。動作周波数を落とせばこの比はさらに顕著となる。

SFQ 回路の消費電力をさらに下げするためには、 I_c と R_b を下げる必要があることが (1) 式からわかる。 I_c はその最小値が熱雑音に対して十分大きいという条件から決められている。ニオブデバイスが動作する 4.2 K における熱雑音は約 0.2 μ A であり、現在はその 500 倍の 0.1 mA が最小 I_c 値に設定されている。しかし、この値はまだ下げる余地があり、熱雑音の 100 倍にあたる 0.02 mA に最小 I_c 値を設定しても SFQ 回路動作に大きな影響はないと考えられる。このとき、 I_c を下げるために JJ の臨界電流密度を下げると SFQ 回路の動作速度が低下するため、JJ 面積を縮小して I_c を下げる必要がある。JJ 面積の縮小には、微細加工技術の高度化や微細化された JJ と上部配線との接続等プロセス上の改善が必要である。また、SFQ 回路では I_c と超電導リングのインダクタンス L との積 LI_c を一定に保つ必要があり、 I_c 低下にともない L を大きくする必要が出てくる。この L の増加を回路面積増加に直結させないためには、単位長さあたりの L を増加するプロセス上の改善が有効となる。

R_b は JJ スイッチ時に反射した電流がバイアスラインを介して他の JJ に注入されることを防止する役目を持っている。このため、バイアスラインに大きなインダクタンスを挿入することにより高周波の SFQ パルスが他の JJ に回り込むことを低減できる。実際にはある程度小さな R_b は残す必要があるが、9 割削減は十分可能である。ただし、このためにはかなり大きなインダクタンスを用

いる必要があり、回路面積の大幅な増加が懸念される。この問題の解決には ISTE C が開発した多層プロセスが有効であると考えられる。現在ニオブ 10 層までの多層化に成功しており、バイアスライン用のインダクタンスを SFQ 回路と別層で形成することにより、回路面積の増加を抑制することができる。

I_c と R_b をそれぞれ $1/5$ と $1/10$ に低下することによって前述した 40 GHz で動作する 100 万 JJ の SFQ 回路の消費電力は 3 mW と $1/120$ に低減できる。特に静的消費電力は $1/250$ となるため、静的消費電力が支配的な低動作速度領域では効果が顕著であり、例えば動作速度 10 GHz の場合、1.8 mW と低減効果は約 $1/200$ となる。

低消費電力 SFQ 回路の研究は、我が国だけでなく欧米でも盛んに行われており、いくつかの新しい回路形式が提案されている。しかし、本稿で示したようにプロセスを改善することで、実績のある従来の回路方式を用いて SFQ 回路消費電力の大幅削減を動作速度や集積度に負担をかけることなく行うことが可能である。

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：超電導デジタルデバイス

「SFQ 回路動作 1550 nm 帯光 IF モジュールの開発」

情報通信研究機構

神戸未来 ICT 研究センター

寺井弘高

超伝導単一磁束量子 (SFQ) 論理回路は、高速・低消費電力で動作することから、ネットワーク機器をはじめとした様々な応用が期待されている。SFQ 回路は極低温環境で動作するため、信号入出力を含めた実装技術の開発が実用化への鍵を握っている。冷凍機への実装技術はここ数年で大きく進展したが¹⁾、電気信号入出力における信号帯域の限界、同軸ケーブルを介した冷凍機への熱流入といった問題が顕在化してきている。そのため、十分広い信号伝送帯域を持ち、熱伝導率が極めて低い光ファイバを利用した光インターフェースへの注目が高まっている。通信波長帯域 (1550 nm) においては、超電導工学研究所 (ISTEC-SRL) の橋本らによる市販のフォトダイオード (PD) を使用した SFQ 回路への光信号入力の実証事例があるが²⁾、極低温動作専用の多チャンネル光入力を想定した光インターフェースの研究開発事例はこれまでなかった。

情報通信研究機構では、図 1 に示す光入力モジュールの開発を行っている³⁾。PD と超伝導マイクロストリップ線路をマルチチップモジュール (MCM) キャリア上に集積化し、SFQ 回路は MCM キャリアとフリップチップ接続する。多数の PD を MCM キャリア上に集積化することで、冷凍機という限られた実装空間で、コンパクトな多チャンネル信号入力が可能になる。我々は PD として、平面型構造のため光ファイバのアクセスが容易であり、高速応答が可能な金属-半導体-金属型 (MSM) PD を採用し、作製プロセスの開発を行ってきた。半導体基板としては 1550 nm 帯の光検出に適したギャップ波長を持つ $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ エピウェハを用いた。

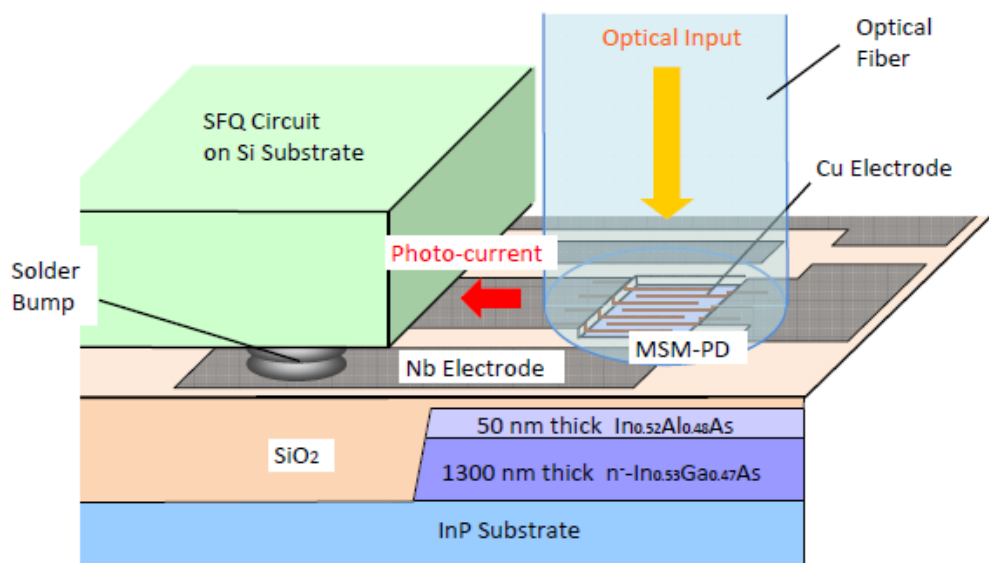
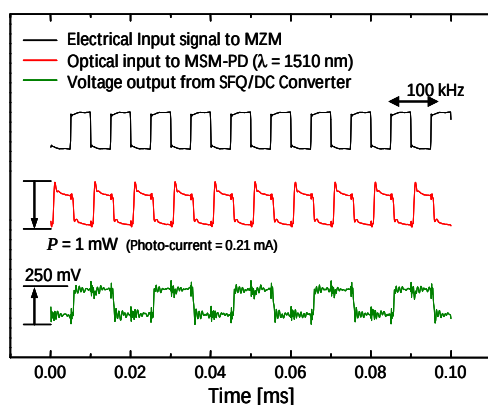
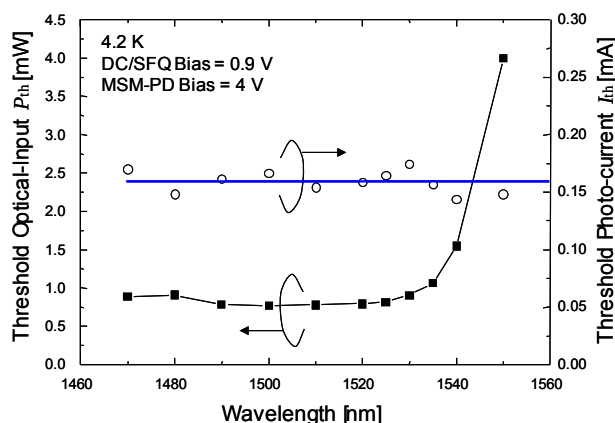


図 1 1550 nm 光 IF モジュールの概略図

図 2 に作製した光モジュールの機能試験結果を示す。図 2 (a) に示すように、繰り返し周波数 100 kHz の矩形光パルス入力に対して、正常な SFQ パルスへの変換動作を確認した。図 2 (b) に SFQ パルスの発生に要した光入力強度（平均パワーではなく光パルスのピーク強度）の光波長依存性を示す。光波長 1530 nm までは SFQ パルスの発生に要する光強度は 0.75 mW 程度であったが、1530 nm 以上では光強度の急激な増大が見られた。これは、MSM-PD の光感度が測定温度 4 K において 1530 nm 以上の光波長に対して急激に低下したためである。極低温における 1530 nm 以上での光感度を改善するため、In 組成を増やした $\text{In}_{0.56}\text{Ga}_{0.44}\text{As}$ を用いた MSM-PD の光感度を調べた結果、1530 nm 以上での光感度が大幅に改善していることが確認でき、DWDM（高密度波長多重）光伝送方式における C バンド（1530-1570 nm）全域で、光感度 0.1 A/W を達成できる見通しがついていた。PD の消費電力は 0.5 mW 以下が見込まれ、同軸ケーブル一本あたりの熱流入 25 mW に対して 50 倍以上のアドバンテージがあるものと考えている。現在、作製した光入力モジュールの高速試験用冷凍機システムを構築している。



(a) 矩形光入力に対する出力波形



(b) SFQ パルス発生に必要な光パルス強度の波長依存性

図 2 光 IF モジュールの機能試験結果

参考文献：

- 1) Y. Hashimoto, S. Yorozu, T. Miyazaki, Y. Kameda, H. Suzuki, and N. Yoshikawa, IEEE Trans. Appl. Supercond., 17, 546 (2007).
- 2) Y. Hashimoto, H. Suzuki, M. Maruyama, K. Fujiwara, and M. Hidaka, Electron. Lett., 45, 87 (2009).
- 2) S. Shinada, H. Terai, N. Wada, and Z. Wang, Appl. Phys. Lett. 96, 182504 (2010).

特集：超電導デジタルデバイス「単一磁束量子回路と光導波路の集積」

横浜国立大学大学院
工学研究院
教授 吉川信行

高速で超低消費電力な情報処理が可能な単一磁束量子 (SFQ) 回路と、超高速で低消費電力なインターコネクションが可能な光回路を組み合わせることにより、将来の爆発的な情報処理量の増大に対応しうる高性能な情報処理システムのための基盤技術が構築できる。

図 1 は、これらの技術を組み合わせた超電導-光集積回路のイメージ図である。光ファイバから光集積回路に入力された光信号は波長分波器などの光デバイスにより処理され、光導波路を用いて各 SFQ チップに分配される。光信号は、光-電気 (O-E) コンバータにより電気信号に変換され SFQ チップに入力される。光回路と超電導回路のそれぞれの長所を融合させたこれらの技術は、将来の光ルータやスーパーコンピュータのための基本技術として期待できる。

これまでに Si 光集積回路技術を用いて、低損失で多機能な様々な光デバイスが研究開発されている。本来、光集積回路は専用の Si プロセスを用いて製作されるが、我々はそれとは異なるアプローチとして超電導集積回路プロセスを用いて光導波路を製作した。

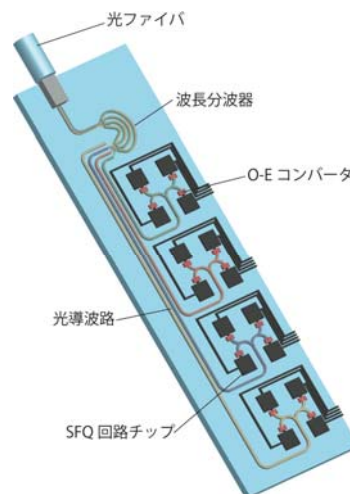


図 1 超電導-光集積回路のイメージ

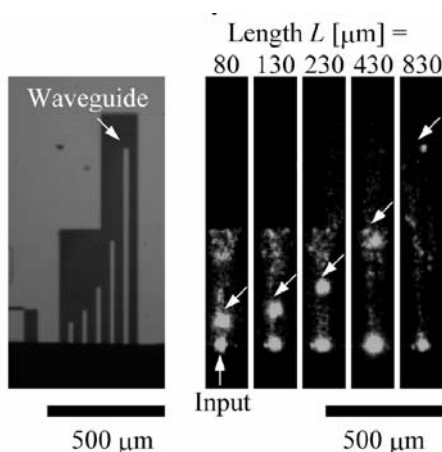


図 2 超電導集積回路プロセスを用いて作成したメタルクラッド光導波路 (左図) とメタルクラッド光導波路の光伝搬の様子 (右図)。光導波路の下から入射された光が、光導波路上部に伝搬している様子が分かる。

図 2 の左図は、ISTEC の標準 Nb プロセス (STD2) を用いて製作した異なる長さのメタルクラッド光導波路である。光導波路は、Nb の下部クラッド、SiO₂ のコア、空気の上クラッドで構成されている。SiO₂ コアの厚さは 1.2 μm である。これは、集積回路用の 3 つの層間絶縁層 (各 0.3 μm, 0.4 μm, 0.5 μm) をそのまま積み上げることで形成した。

図 2 の右図には、超電導集積回路プロセスを用いて製作したメタルクラッド光導波路の伝搬特性を示す。導波路の下部から導入された光が、導波路の上部に伝搬している様子が分かる。光スポットの大きさは、光出力の大きさを示しており、光導波路の長さが増加するにつれて光出力が小さくなっている。これらの実験結果より、メタルクラッド光導波路の単位長さ当たりの伝搬損失は、16 dB/mm と見積もられた。この伝搬損失は Si をコア、SiO₂ をクラッドとする光導波路より大きい。これは、Nb の屈折率が虚部を持つためである。しかしながら、1 mm 程度までの長さの光導波路には十分に利用可能であり、本技術は超電導デバイスへの光信号の入力などへの応用が期待できる。

超電導関連 10-11 月の催し物案内

9/28-10/2

International Conference on Nanoscale Magnetism

場所：Istanbul, Turkey

問合せ： <http://web.gyte.edu.tr/ICNM/2010/>

10/11-13

IEC 74th GENERAL MEETING

場所：Seattle, USA

問合せ： http://www.iec.ch/about/gm/2010/GM2010_programme_LR.pdf

10/22-23

第 5 回日本磁気科学会年会

場所：開催場所九州大学西新プラザ

主催：日本磁気科学会

問合せ： <http://photochem.cstm.kyushu-u.ac.jp/mssj2010/>

10/28-30

International Workshop on Coated Conductors for Applications 2010 (CCA2010)

場所：Fukuoka, Japan

問合せ： <http://www.cca2010.org/index.html>

11/1-3

第 23 回国際超電導シンポジウム (ISS2010)

場所：エポカルつくば 茨城県つくば市

主催：(財) 国際超電導産業技術研究センター (ISTEC)

問合せ： <http://www.istec.or.jp/ISS/>

11/8-12

APS-Division of Plasma Physics Annual Meeting

場所：Chicago, IL, USA

問合せ： <http://www.apsdpp.org/index.php>

(編集局)



[超電導 Web21 トップページ](#)

新聞ヘッドライン (8/19-9/17)

- マグネシウムを世界の燃料に 太陽光活用 海水から採取 矢部孝教授の夢 (東京工業大学) 8/19 読売新聞 夕刊
- Y 系超電導変圧器を開発 九州電力など 5 者 世界初、実用化に弾み 8/20 電気新聞
- 超電導変圧器 イットリウム系材使用 九電・九大などが開発 8/20 日刊工業新聞
- 中国輸出規制で価格高騰 リサイクル・鉱山開発を加速 安定調達でベトナムに活路 ネオジウム合金メーカー 8/20 日本経済新聞
- 米風力発電、パートナー変更 丸紅、来年から順次稼働 8/20 日刊工業新聞
- 昭和電線、中国生産増強 現地向け価格競争力向上 電力ケーブルの接続部品を生産する山東省の合弁会社 8/20 日刊工業新聞
- 風力発電 いざ海へ 耐久性向上、浮上型も研究 8/20 日本経済新聞
- 次世代送電網 インフラ投資 6000 億円 電力各社 太陽光普及にらむ 電圧安定へ配電網刷新 8/21 日本経済新聞
- スマートグリッド 東電など 28 法人 実証事業開始へ 8/22 朝日新聞
- 経産省 大型蓄電池を開発 再生エネ系統対策で 8/23 電気新聞
- ITER、誘致失敗が幸い? 8/23 日経産業新聞
- 超電導マグネット拡販 神戸製鋼、年間 100 台めざす 8/23 日経産業新聞
- 熱核融合実験炉 日本負担 180 億円増 設計変更で総額 1000 億円弱に 8/23 日経産業新聞
- 経産省 環境省 石油石炭増税を検討 温暖化対策に用途限定 8/24 電気新聞
- CIGRE 系統高度化で低炭素へ 森電事連前会長 日本初の開幕講演 8/24 電気新聞
- 圧力で超電導が変化 米カーネギー協会地球物理学研究所 8/25 日刊工業新聞
- ナノ厚のコンデンサー素子 誘電率で世界最高 物材機構 高誘電体シート開発 8/25 日刊工業新聞
- 海洋発電所 2012 年度に 波力・潮流 産学官で建設 8/26 読売新聞 夕刊
- 核融合はもはや「夢のエネルギー」ではない 核融合科学研究所長 小森章夫氏 8/26 Fuji Sankei Business i.
- がんを息から判別 オーストリア社が研究着手 簡易な診断法開発へ 8/26 日刊工業新聞
- 住友電工 露・超電導実証が進展 ビスマス系 大規模送電に成功 8/26 電気新聞
- ISTEC 九州大 Y 系超電導で新現象 交流損失最大で 100 分の 1 に 8/26 電気新聞
- 沖縄電 広がる離島電力網 宮古島などで自然エネ活用 8/28 Fuji Sankei Business i.
- レアアース進展なく 「枯渇懸念」譲歩引き出せず 日中ハイレベル対話 環境分野で協力確認 8/29 毎日新聞
- 希土類輸出規制で溝 環境・産業振興では協力 日中経済対話 8/29 日本経済新聞
- レアアース輸出枠 日中対話 中国側ゼロ回答 「戦略資源」高価化狙う 8/29 朝日新聞
- 日中 輸出枠で平行線 レアアース ハイレベル経済対話 8/29 読売新聞
- トルク標準機の開発とトルク標準の供給 産業界の需要 7 割カバー 校正方法の規格化不可欠 産総研の R&D 8/30 日刊工業新聞
- 環境対策・輸出拡大 迅速化に道 8/30 Fuji Sankei Business i.
- 文科省 ITER 予算を増額 主要機器類製造段階へ 8/30 電気新聞

- 温暖化ガス 排出量、大企業に上限 取引制度 環境省原案 輸出企業は緩和 企業活動に配慮 8/30 日本経済新聞
- レアアース規制見直さず 中国首相 8/30 日本経済新聞
- 環境・エネで大型施策 11 年度概算要求 経産省 9/01 日刊工業新聞
- ユーラス 北欧で大規模風力発電 ノルウェーに建設 総工費 150 億円 独などへ電力供給 9/01 日本経済新聞
- ネオジウム磁石 保持力向上で新技術 ジスプロシウム不要 物材機構 コスト低減へ 9/02 日刊工業新聞
- 次世代送電網 蓄電池使い実証実験 NEDO など 電力の品質安定狙う 9/02 日経産業新聞
- 東京電力 蓄電池で系統安定化 NAS 活用など研究 9/02 電気新聞
- ネットの膨大な電力問題解決へ 新しい光通信網で実験 1/10 の低消費電力を証明 産総研、NICT 9/03 科学新聞
- IPCC 温暖化データ誇張疑惑 ノーベル受賞者 正念場 パチャウリ議長 9/05 朝日新聞
- 太陽電池の発電効率 シャープ、世界最高に 42.1%、コスト低減に道 「既存電力並み」視野 9/06 日本経済新聞 夕刊
- 日産・日立「走る蓄電池」 EV 電気 家庭での利用目指す 9/07 Fuji Sankei Business i.
- 風力発電 停滞 事業者、投資二の足 全量買い取り、詳細固まらず 受入上限も課題 9/07 朝日新聞
- 電子のスピン直接観察 東北大 次世代素子 研究後押し 9/07 日経産業新聞
- 次世代送電網、電力が本腰 開閉機など大型投資 コスト負担、政策注視 9/07 日経産業新聞
- 希土類開発業者 中国が再編方針 価格統制 強化狙う？ 9/07 日本経済新聞
- 米軍の研究助成 増加 日本技術の軍事応用も視野 米国 急速な技術革新 独自開発に限り 日本の素材開発に注目 9/08 朝日新聞
- レアアース規制 中国、日本の要請拒む 9/08 読売新聞
- 送電損失を大幅削減した超電導線開発 国際超電導産業技術研究センターと九州大 9/09 読売新聞 夕刊
- 潮流でクリーン発電 効率追及 まぐろ型プロペラ 鈴木清美社長の目標（ニヴァエネルギー） 9/09 読売新聞 夕刊
- CREST、さきがけ JST 戦略的研究推進 6 領域の研究総括決定 9/10 科学新聞
- 海洋エネ、再評価の動き 買い取りなど支援策を 9/10 日経産業新聞
- 総合科技会議 「助成金の柔軟利用を」 若手研究者と意見交換 9/10 日経産業新聞
- 来年度概算要求 科技関係 1.9%増 総合科技会議 9/10 日経産業新聞
- JST と産革機構 連携 技術と市場 連動を加速 研究・事業を総合支援 ” 死の谷 ” 越えへ相乗効果 9/10 日刊工業新聞
- 東電、海外に最大 1 兆円 10 年で投資 原発など成長の柱に 新興国向けインフラ輸出 官民のリスク分担課題 9/14 日本経済新聞
- 20 年度までの経営計画策定 東電 海外など 3.5 兆円投資 9/14 Fuji Sankei Business i.
- 「無線給電」12 年実用化 数メートル離れても送電可能に EV への応用視野 富士通 まず携帯・ノート PC 向け 9/14 日経産業新聞
- 電線各社、巻線でこ入れ 自動車・家電向け拡大 9/15 日刊工業新聞

- 東京電力 中長期成長ビジョン 低炭素時代を主導 供給 ゼロエミ電源 5 割目標 需要電化 300 億キロワット時開拓へ 9/15 電気新聞
- 次世代送電網 実験スタート パナ電工 日立 トヨタ 9/15 日経産業新聞
- 次世代送電網 実証実験 日本風力 きょうから六ヶ所村で 9/16 毎日新聞
- 電気自動車充電規格 独 5 社が共通化 ダイムラーなど 国際標準目指す 9/17 日経産業新聞 夕刊

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導速報—世界の動き（8 月）

財団法人国際超電導産業技術研究センター
国際部
部長 津田井昭彦

表彰

SuperPower（2010 年 8 月 2 日）

SuperPower, Oak Ridge National Laboratory (ORNL) 及び University of Houston (UH) は、「R&D 100 Award」を受賞した。受賞理由は、高性能 HTS 線材の製造のための共同開発。この賞は「Research and Development Magazine」が後援する年間の優秀研究開発選考の結果、2010 年の新製品内もっとも技術的に顕著であると認められる 100 の研究開発に授与されるものである。今回 SuperPower 社等の受賞は、超高性能超電導線材の製造を可能とした、3 次元自己組織化プロセスの開発が認められたもの。このプロセスは超電導体中にナノスケールの非超電導柱状欠陥をナノスケールの間隔で作出すもので、これにより高磁場下でも大きな臨界電流が流れるよう超電導体の特性改善を図った。SuperPower 社総支配人 Arthur P. Kazanjian は次のように述べた。「ピン止め力が改善された高磁場特性により、各種モーター、発電機、変圧器、あらゆる高磁場マグネットなど色々な磁場環境下で、また、より低温で運用される HTS 応用機器の使い勝手が格段によくなる。電力機器、医療、輸送、産業、軍事分野での HTS 技術に対する需要は、この製品の重要性を実証するものであり、幅広い商用利用の可能性を示している。」Oak Ridge National Laboratory の超電導プログラムマネージャー Dominic F. Lee はこれに加えて次のように述べた。「チームメンバーの緊密な協力関係は、国立研究所がアカデミアと民間企業の橋渡しの役目を担う研究開発が、いかにあるべきかを示す模範となるものである。SuperPower 社がこのナノテクノロジーを量産プロセスに組み込む速さには感心した。」今回の「R&D 100 Award」は、過去 10 年で SuperPower 社 3 度目の受賞となる。

出典:

“SUPERPOWER WINS R&D AWARD WITH ORNL AND UH”

SuperPower press release (August 2, 2010)

<http://www.superpower-inc.com/content/superpower-wins-rd-100-award-ornl-and-uh>

電力

American Superconductor Corporation（2010 年 8 月 17 日）

American Superconductor Corporation は、Blade Dynamics Ltd の 25 %の所有権を取得した。Blade Dynamics Ltd は同社が特許を有する材料、構造技術を使った高性能タービン翼の設計、製造を行っている。同社の風力タービン翼は、高出力風力発電機（数メガワット）の効率・性能を向上させるよう設計されており、同時にコスト低減が図られている。Dow Chemical Company も同社の株主である。AMSC 社創立者で CEO の Greg Yurek は次のように述べた。「Blade Dynamics 社は、我が社及び全ての風力発電企業に高性能風力発電機の性能を向上させ、重量とコストを低減させる、まさに市場ルールを変えてしまうような、インパクトのあるタービン翼技術をもたらす。我々がこ

れに投資することは当然であり、AMSC Windtec™のライセンサーを含む多くの風力発電機メーカーがこの技術を取り入れ、競争力を高めてくれるものと期待している。実際に、AMSC Windtec 社と Blade Dynamics 社の技術者は、協力して、AMSC Windtec タービン設計にタービン翼が適合するように検討を進めてきているところである。」AMSC 社は、Blade Dynamics 社の技術が AMSC Windtec 社のライセンサーに差別化されたタービン翼を提供するだけでなく、AMSC 社の 10-MW SeaTitan™超電導風力発電機向けの有力なタービン翼となることを期待している。

出典:

“AMSC Acquires 25 Percent Stake in Blade Dynamics Ltd.”

American Superconductor Corporation press release (August 17, 2010)

<http://www.amscom.com/pdf/Blade%20Dynamics%20-%20Final.pdf>

American Superconductor Corporation (2010 年 8 月 24 日)

American Superconductor Corporation は、インドの Inox Wind Limited から初めて 17 セットの風力発電機電気制御システムの発注を受けた。この制御システムは 2-MW の 2 連誘導風力発電機に組み込まれるもので、この風力発電機は Inox 社が AMSC 社子会社の AMSC Windtec 社のライセンスの下、製造を行っている。Inox 社は、最近、2-MW 風力発電機 1 号機の据付、運開を行ったところであり、既に量産を開始している。

出典:

“AMSC Receives Initial Wind Turbine Electrical Control Systems Order from India's Inox Wind”

American Superconductor Corporation press release (August 24, 2010)

http://www.amscom.com/pdf/inox_ecs_08_24_10.pdf

LS Cable (2010 年 8 月 30 日)

韓国の LS Cable 及び韓国電力は、数ギガワット級の高電圧直流超電導ケーブルの開発を共同で進めている。LS Cable は、韓国政府知識経済部による国家政策タスクの一環である本プロジェクトのため、基本的なコア技術の開発に着手している。特に、LS Cable は、直流 HTS ケーブル、ターミネーション、ジョイント・ボックスを担当する他、システムで使われる全ての絶縁材料の性能評価を行う予定。また、韓国電力は韓国国内で超電導送電線設置サイトの選定を行い、電力コンバーター中の高調波や電力損失の低減に関する解析を担当する。このケーブルシステムは、最初に韓国済州島スマートグリッド実証計画及び米国 Tres-Amigas Project における 80-kV ケーブルに適用されることが見込まれている。LS Cable 社長 Son Jong-ho は次のように述べた。「高電圧直流超電導ケーブルは交流超電導ケーブルに比べ、送電性能が優れている。米国や欧州では、この技術に対する関心が高まっており、新しい電力ネットワーク技術の採用が喫緊の課題となっている。我々は、高電圧直流超電導ケーブルの開発が完了すれば、すぐにでも積極的にこの市場に入っていきたいと考えている。」

出典:

“K-Consortium (KEPCO and LS Cable) to develop a high-voltage DC Superconducting cable system”

LS Cable press release (August 30, 2010)

http://www.lscable.com/pr/news_read.asp?idx=2582&pageno=1&kType=&kWord

SuperPower (2010 年 8 月 31 日)

米国エネルギー省の部局である Advanced Research Projects Agency – Energy (ARPA-E)は、SuperPower 社、University of Houston (UH)、ABB Inc.及び Brookhaven National Laboratory に 420

万ドルを提供し、直結電力インターフェース（電子回路）を持つ高性能超電導磁気エネルギー貯蔵システム（SMES）の開発を行わせることを決定した。この資金は、20-kW 超高磁場 SMES の開発に使われる。この SMES は、3.4 MJ のエネルギーを貯蔵し、磁場は 4.2 K、30 T、瞬時に反応し、ライフサイクルは極めて長期である。SuperPower 社総支配人 Arthur P. Kazanjian は次のように述べた。「この SMES は、停電時のバックアップ電力供給の他、風力発電や太陽発電のような出力変動のある電源の使用時に重要な役割を果たす。我々は、Y 系線材を使ったこの SMES のポテンシャルが風力発電や太陽発電のような用途で遺憾なく発揮されるようにと期待している。」SuperPower 社は 210 万ドルを受け取り、Texas Center for Superconductivity at the University of Houston における研究開発グループの開発業務を支援するとともに、BNL における SMES コイルの加工のための Y 系線材を供給する。また、SuperPower 社は BNL におけるコイル技術の開発及びその加工を支援する。ABB 社はこのプロジェクトのリーダーであり、適切なコストの SMES 装置の開発を担当する。

出典:

“SUPERPOWER WINS ARPA-E AWARD WITH ABB AND BNL”

SuperPower press release (August 31, 2010)

<http://www.superpower-inc.com/content/superpower-wins-arpa-e-award-abb-and-bnl>

量子計算機

University of Pittsburgh (2010 年 8 月 3 日)

University of Pittsburgh 及びその他大学の共同研究グループは、量子コンピューターの開発の障害となっているいくつかの課題に取り組むため、米国国防総省から 5 年間、750 万ドルの研究資金を受け取ることが決まった。この研究資金は Multi-University Research Initiative (MURI) プログラムの一環として支出されるものであり、全米の大学に総額 2 億 2,700 万ドルが配分される。研究チームは、新しいタイプの量子メモリーの開発、量子シミュレーションの実行、異なる媒体間での量子情報のやりとりを行う新しい手法の開発が容易にできるよう、半導体特性と超電導特性を 1 つの材料で実現することを計画している。これら全ての機能は、量子コンピューターの実現に不可欠なものである。

出典:

“Pitt-led researchers to build foundation for quantum supercomputers with \$7.5 million federal grant”

University of Pittsburgh press release (August 3, 2010)

http://www.news.pitt.edu/news/LevyMURI2010_supercomputers

通信

Superconductor Technologies Inc. (2010 年 8 月 3 日)

Superconductor Technologies Inc. (STI) は、2010 年 7 月 3 日に終了する第 2 四半期の収支を発表した。第 2 四半期純収入は、前年同期 260 万ドルに対し、当期は 240 万ドルであった。当期純製品売り上げは、前年同期 180 万ドルに対し、170 万ドルであった。政府契約やその他契約による収入は前年同期 854,000 ドルに対し、当期は 631,000 ドル。STI 社社長兼 CEO の Jeff Quiram は次のように述べた。「第 2 四半期には、顧客である無線事業者が、我が社のコア製品に必要な既存のネットワーク改善のための投資を継続した。SURF 2 プログラムが終了に近づいているため、予想通

り政府からの収入は減少した。新規の電力応用向け Y 系線材プログラムは予定通り進捗している。1 m 長さの線材製造に成功しており、50 m 線材製造のための成膜装置の設計を今年末までには終わることができる見通しである。現在、大型風力発電機、交流電力ケーブル、FCL 応用に必要な特性に対応できる 3 種の HTS 線材の設計に注力しているところである。我々は、年内には顧客の試験のために線材サンプルの提供を開始することができると考えている。」純損失は、前年同期の 410 万ドルに対し、当期は 310 万ドルであった。2010 年 7 月 3 日時点で、STI 社の現金、現金等価資産、受注残は合わせて 679,000 ドルである。

出典:

“Superconductor Technologies Inc. Reports Second Quarter 2010 Results”

Superconductor Technologies Inc. press release (August 3, 2010)

<http://phx.corporate-ir.net/phoenix.zhtml?c=70847&p=irol-newsArticle&ID=1455503&highlight>

Superconductor Technologies Inc. (2010 年 8 月 26 日)

2010 年 8 月 25 日、Superconductor Technologies Inc. (STI) は、1 株当たり 1.5 ドルで 400 万株の一般株式の新規公募を行うと発表した。今回の新規公募は引き受け保障付で、総額 600 万ドル。引き受け保障費用、手数料、公募経費を差し引き、今回の公募で約 530 万ドルの資金を得ることができる見込み。STI 社は今回の公募を 2010 年 8 月 31 日に締め切る。STI 社社長兼 CEO、Jeff Quiram は次のように述べた。「我が社の HTS 線材プログラムは順調に進んでいる。Y 系線材市場の大きなポテンシャルを考えれば、我が社への投資は当然のことであると確信している。我々は今回得られた資金をこの線材研究開発の他、現在の顧客である無線事業者が、現在の無線通信ネットワークの改善のための投資を継続していることから、これに対応する運転資本に振り向ける考えである。」

出典:

“Superconductor Technologies Inc.® (STI) – Press Release”

Superconductor Technologies Inc. press release (August 26, 2010)

<http://phx.corporate-ir.net/phoenix.zhtml?c=70847&p=irol-newsArticle&ID=1455503&highlight>

天文学

Cornell University (2010 年 8 月 17 日)

National Research Council は、今後 10 年間の中規模、地上望遠鏡プロジェクトの中からチリに建設が計画されている総額 1 億 1,000 万ドルの望遠鏡を最優先プロジェクトに指定した。CCAT として知られる 25 m の赤外及びサブミリ波望遠鏡は、現在 Cornell University と California Institute of Technology の 2 大パートナー、米国のその他 3 大学、カナダ、ドイツの大学によって建設が進められている。この望遠鏡は、完成すれば、世界で最大かつ最も精度の高い望遠鏡となる。また、設置場所は約 5,600 m の高度であり、最も高地に設置される天文施設となる。この望遠鏡に必要な技術は、2,400 の超電導検知器を並べた最先端カメラも含め、既に開発が進められている。この望遠鏡の建設費用の調達は現在進められているところである。

出典:

“Telescope project involving CU-Boulder selected as top priority for construction”

Cornell University press release (August 17, 2010)

<http://www.pressoffice.cornell.edu/releases/release.cfm?r=49313&y=2010&m=8>

基礎

Oak Ridge National Laboratory (2010 年 8 月 9 日)

Oak Ridge National Laboratory の研究グループは、超電導体のナノスケールの不均一性を調べるためのスーパーコンピュータ・プログラムを開発した。このプログラムは、従来個別の原子の電子密度は同じとしていたハバードモデル数値解析プログラムを書き換えたもの。2 年前、このプログラムに対し「Association for Computing Machinery Gordon Bell Prize」が授与された。このプログラムは、現在、以前から知られていたがうまく説明ができなかったナノスケールの不均一性を調べるために使われている。Office of Institutional Planning 部長で、前 Computational Materials Sciences グループ・リーダー、Jack Wells は次のように述べた。「Gordon Bell Prize 受賞後の我々の目標は、このプログラムを使って、不均一なストライプが超電導転移温度を上げるか下げるかを調べることであった。今回、ストライプが臨界温度を上昇させるということを見出し、最適な不均一性というものが存在するのかという問題に解答を与えることができた。」この研究グループの結果は Physical Review Letters に掲載された。

出典:

“Award-winning supercomputer application solves superconductor puzzle”

Oak Ridge National Laboratory press release (August 9, 2010)

http://www.ornl.gov/info/press_releases/get_press_release.cfm?ReleaseNumber=mr20100809-00

Carnegie Institution (2010 年 8 月 18 日)

Carnegie Institution の Geophysical Laboratory の研究グループは、中国の South China University of Technology 及びドイツの Max Plank Institute for Solid State Research と共同研究を行い、2 つの異なる圧力下で Bi2223 が異なる超電導転移温度を示し、特に、より高圧化ではより高い転移温度を示すという予想外の発見をした。この異常な現象は、Bi2223 結晶中の異なる銅レーヤー間の電子が競合する結果生じたものと考えられる。常圧下では、最適ドーピング Bi2223 の転移温度は 108 K である。今回の研究で、研究グループは、Bi2223 結晶に 36.4 GPa までの圧力を加え、10.2 GPa で第 1 の転移温度上昇を観測した。さらに圧力を上げていくと、転移温度は低下を始め、24 GPa で超電導は消滅した。さらに圧力を加えると、36.5 GPa (研究グループの装置で測定できる最も高い圧力) において、転移温度は 136 K に達した。他の研究によれば、Bi2223 のような多層超電導結晶は層毎に異なる電子の振る舞いと格子振動を示すことから、研究グループでは、24 GPa という圧力は特定の効果を抑制し、一方で超電導現象を強化する臨界点であると考えている。今回の結果は、多層銅超電導酸化物の転移温度改善に向けた展望を示すものである。今回の研究結果は、Nature 2010 年 8 月 19 日号に掲載された。

出典:

“Roller coaster superconductivity discovered”

Carnegie Institution press release (August 18, 2010)

http://carnegiescience.edu/news/roller_coaster_superconductivity_discovered

National Institute of Standards and Technology (2010 年 8 月 31 日)

YLBICO として知られる新材料を National Institute of Standards and Technology の中性子回折装置を使って測定し、この材料が 2 極性材料であることを見出した。2 極性材料とは、ホール濃度を上げることによってのみ超電導が生じるが、電子濃度を上げた場合でも、電子過剰状態で超電導を示す物質でのみ見られるのと同様のいくつかの性質を示す材料のことである。この材料は、従来の超電導体がホールの追加又は電子の追加のいずれかの場合で超電導現象を示し、双方向性が見られ

なかったという意味で特異である。今回の測定結果は、高温超電導のより明確な理解という意味で助けになるものと思われる。研究グループのこの結果について、Nature Physics 2010 年 8 月号の「News and Views」に解説記事が掲載された。

出典:

“New Material May Reveal Inner Workings of Hi-temp Superconductors”

National Institute of Standards and Technology press release (August 31, 2010)

http://www.nist.gov/ncnr/htc_083110.cfm

[超電導 Web21 トップページ](#)

【隔月連載記事】

超電導モータの過去・現在・未来（その 5）

京都大学大学院
工学研究科電気工学専攻
准教授 中村武恒

高温超電導回転機の応用は、主として輸送機器応用と産業・電力応用に分けられる。高温超電導輸送機器開発の主流は、前号¹⁾で説明したように船舶推進であり、数百 kW 級機から数十 MW 級機まで広範な容量の回転機が研究開発されている。船舶推進用超電導モータは、産学連携の研究開発によって、高温超電導回転機として最も早期の実用化が期待される。一方、その他の超電導利用輸送機器としては超電導磁気浮上式列車（Super-MAGLEV）が挙げられる。東海旅客鉄道（株）は、低温超電導マグネットを適用したリニア同期モータによって着々と実用化への検討を進めているだけでなく²⁾、高温超電導マグネット³⁾を適用した走行試験にも成功している（本連載では、回転機に焦点を絞っていることから詳細な説明は割愛する）。なお、鉄車輪－鉄レール方式列車に高温超電導回転機を適用する研究は、諸事情によって現在ほとんど検討されておらず、直流電車について回生との関係から解析的検討結果が報告されている程度である⁴⁾。

一方、最も多くかつ身近な輸送機器は自動車であり、今後の電気駆動化率向上を鑑み、パワートレインの最適構造が検討途上の現状において、高温超電導技術を含めて新技術を導入するチャンスと思われる。車載用モータに要求される制約条件の一つは、限られた空間に冷却系を含めて高効率な駆動系を収納しなければならないことであり、俄かな高温超電導モータの導入は難しいものの、最近になって積極的な検討が進められている。住友電気工業（株）は、クローポール形の界磁高温超電導直流直巻モータを搭載し、実用的乗用車として世界初の走行試験に成功した⁵⁾。DI-BSCCO パンケーキマグネットが液体窒素で浸漬冷却されており、同コイルが経験する最大磁束密度は 2 T を超えるということであった。筆者も乗車させて頂く機会があったが、完全な電気駆動のため勿論エンジン音は無く、高温超電導モータで動いているという感慨に耽ることができ、開発者の努力に敬意の念を禁じ得なかった。上記成功は、超電導電気自動車実現の重要なマイルストーンと位置づけられ、同社では現在も研究開発を続けているということであった。また、京都大学・アイシン精機（株）を中心とする産学グループは、NEDO の「H21 年度省エネルギー革新技術開発事業（第二次公募）」として、自動車を含む輸送機器用冷凍機一体型高温超電導誘導同期モータの研究開発を進めている⁶⁾。本プロジェクトでは、京都大学のグループが高温超電導回転機ならびに同ドライブ技術開発を実施し、アイシン精機（株）のグループが高効率小形冷凍機ならびに冷却構造の研究開発を担当している。H22 年度中にパイロット機の開発ならびに試験を予定している。

Florida state University（米）のグループは、航空機用の高温超電導モータを検討しており⁷⁾、様々なアイデアによってその可能性を追求している（但し、未だ基礎検討段階のようである）。超電導飛行機については、国内でも（独）産業技術総合研究所において検討されている⁸⁾。

産業・電力用高温超電導モータとしては、まず AMSC 社（米）が、電力系統の力率改善用 8 MVAR 級高温超電導同期調相機（13.8 kV）を開発している⁹⁾。同期調相機は、既存機としても存在し、巻線界磁形同期機をモータとして無負荷運転し、界磁電流によって電機子電流の位相を、進みから遅れまで自由に変化できる電力機器である。上記特性を利用することによって、電力系統の力率を改善することが可能となる。AMSC 社では、開発機を Tennessee Valley Authority（TVA）に実際に設置し、試験を順調に実施した。University of Southampton（英）のグループは、ビスマス系高温超

電導線材を適用した 100 kW 級の界磁超電導モータを研究開発しており、電力系統や産業応用への適用を目指している。これまで、コア付界磁巻線を使用したモータ開発に成功すると共に、減圧液体窒素や液体空気浸漬条件で各種試験を実施している¹⁰⁾。また、コアレス界磁巻線を適用した 2 極モータの設計・制作も終了し、現在は各種試験を開始している¹¹⁾。なお、コアレスにすることにより、総重量がほぼ半減する結果が報告されている¹¹⁾。Korea Electrotechnology Research Institute (KERI) (韓) と DOOSAN heavy industry (韓) のグループは、産業応用への投入を目指して、ビスマス系線材を適用した 1 MW 級 (3,600 rpm, 2 極) 高温超電導モータの研究開発を実施している¹²⁾。九州大学・京都大学のグループは、NEDO の「産業技術研究助成事業費 (若手グラント)」の助成によって、日立研究所協力のもとで液体水素循環移送ポンプ用高効率モータの研究開発を実施している。液体水素の大気圧沸点が 20 K 程度であることから、MgB₂ 単芯線材を使用して低価格化を指向し、京都大学で開発している超電導誘導同期機の構造を採用している¹³⁾。これまでに、MgB₂ 回転子の開発ならびに試験に成功し、現在は MgB₂ 固定子巻線の開発を進めている。最終的には、九州大学が上記モータと MgB₂ 液面計を統合したシステムを完成する予定である。なお、MgB₂ 固定子巻線には交流電圧に伴って交流損失の発生が懸念されるが、九州大学を中心として同特性の詳細な検討が実施され、20 K 冷却銅巻線に比較して十分低くなることが解析的に示されており¹⁴⁾、さらなる低減法も提案されている¹⁵⁾。

以上、今回は船舶以外の輸送機器応用ならびに産業・電力応用にターゲットを絞り、高温超電導巻線形モータの研究開発現状を紹介した。上記は、これからの低炭素かつ持続的発展社会の実現を担う重要な技術開発の一つと位置付けられ、高温超電導回転機技術の導入が強く期待される。今後とも、継続的かつ着実な研究開発によって、その実用化が切望される。

参考文献：

- 1) 中村武恒, 超電導 WEB21, 2010 年 8 月 (2010) 25
- 2) 東海旅客鉄道(株)ホームページ : <http://linear.jr-central.co.jp/index.html>
- 3) 五十嵐基仁 他, 低温工学, vol. 39, no. 12 (2004) 651
- 4) T. Konishi, T. Nakamura, *et al.*, presented at ASC'10 (1LPE-07), Aug. 1-6, Washington DC (2010)
- 5) 尾山仁 他, SEI テクニカルレビュー, vol. 173 (2008) 59
- 6) 中村武恒, 超電導 WEB21, 2010 年 3 月 (2010) 5
- 7) P.J. Masson and C.A. Luongo, Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE, (2007) 6 pages
- 8) 岩田拓也, 松本治, 第 57 回応用物理学関係連合講演会 超伝導分科会企画「超伝導で”進む”未来技術の最新動向～超伝導の物流・交通への展開～」(3 月 17 日), 17p-ZM - 5 (2010)
- 9) S.S. Kalsi, *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond., vol.17, no.2 (2007) 2026
- 10) H. Wen *et al.*, presented at ASC'10 (1LPG-05), Aug. 1-6, Washington DC (2010)
- 11) W. Bailey *et al.*, presented at ASC'10 (1LPG-04), Aug. 1-6, Washington DC (2010)
- 12) Y. K. Kwon, *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond., vol.17, no.2 (2007) 1587
- 13) K. Kajikawa and T. Nakamura, IEEE Trans. Appl. Supercond., vol.19, no.3 (2009) 1669
- 14) K. Kajikawa *et al.*, Superconductor Science and Technology, vol.23, no.4 (2010) 045026
- 15) 久家広嗣 他, 第 63 回電気関係学会九州支部連合大会(9 月 25-26 日), 06-1A-13 (2010)

読者の広場

Q&A

Q:「お酒や大気が誘起する鉄系超伝導？」

A: 2008 年に発見された鉄系超伝導は、第二の高温超伝導体として期待されている¹⁾⁻³⁾。最近この発見を契機に、新超伝導体の探索が活発に行われている。我々が注目しているのは、鉄系超伝導体の中でもっともシンプルな結晶構造を持つ 11 系と呼ばれる物質である。図 1 に 11 系の相図を示す。FeSe は超伝導体であり、常圧での T_c は 10 K 前後であるが、興味深いことに高圧下では 37 K まで上昇する⁴⁾⁻⁸⁾。一方、FeTe は、FeSe と結晶構造がほぼ同じであるにもかかわらず超伝導は示さず、反強磁性体である。即ち、monoclinic 相に入ると反強磁性磁気秩序が安定し、超伝導は発現しないのである⁹⁾。

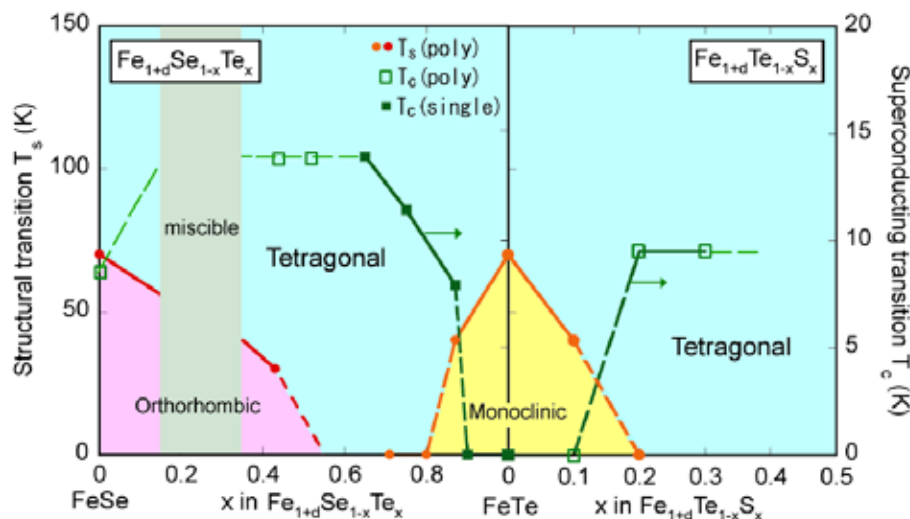


図 1 鉄系超伝導体 11 系の相図

そこで、我々は FeTe の磁気秩序を抑制し超伝導を発現させることに挑戦した¹⁰⁾。まず、硫黄 S をドーピングした FeTe を固相反応法で作成したところ、反強磁性磁気秩序が抑制されることが分かった。仕込量で 20 % S をドーピングした FeTe_{0.8}S_{0.2} は、期待通り磁気秩序は消失したが、超伝導は発現しなかった。ところが驚いたことに、一週間後、同じ試料を測定したところ、試料は超伝導体になっていることが分かった¹¹⁾。即ち、この試料は大気に暴露することによって超伝導が発現したのである。図 2 に、磁化の温度変化を示す。大気暴露時間が増加するにしたがい超伝導体積率が增加することが分かる。

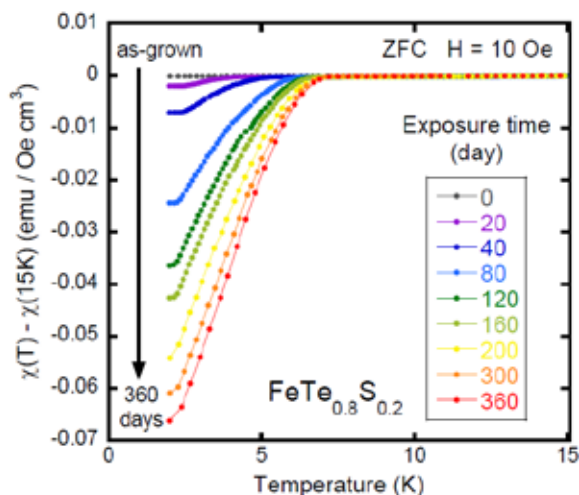


図 2 さまざまな大気暴露期間における磁化の温度依存性

この大気が誘発する不思議な現象を解明すべく、試料を酸素、窒素、水など、さまざまな環境に置いて、超伝導発現の有無を調べた。その結果、室温では水分と酸素が共存するとき超伝導が発現することが分かった^{11),12)}。その他の研究結果に鑑みて、水が触媒のような効果をもたらす試料に酸素を送り届け、超伝導が発現したものと考えられる。さらに我々は、超伝導発現に有効な触媒を求め様々な液体を試験した。例えば、水酸基 HO-を持つ液体は有効ではないかと考えメタノールやエタノールなどを用いたところ、期待に反して超伝導発現量は水と同程度であった^{13),14)}。

そこで、お酒で同様の実験を行ってみた^{13),14)}。なぜならば、お酒も水エタノール水溶液であり、お酒は酸素と反応する成分を含んでいるためである。実験に用いたお酒は、赤ワイン、白ワイン、ビール、日本酒、ウイスキー、焼酎の6種類であり、それぞれのお酒と、純水、水エタノール混合溶液、無水エタノールに試料を浸し、70 度で 24 時間保持した。得られた試料を磁化測定し、超伝導体積率を見積もったところ、驚いたことに、赤ワインに浸した試料は、水エタノール混合溶液の場合に比べて 6-7 倍大きく、最も小さかった焼酎でも 2-3 倍もあった(図 3)。これらのことから、お酒に含まれる水エタノール以外の不純物が、超伝導発現に寄与したことが分かる。現在、お酒の成分を分析し、超伝導発現の鍵となる物質の解明に取り組んでいる。

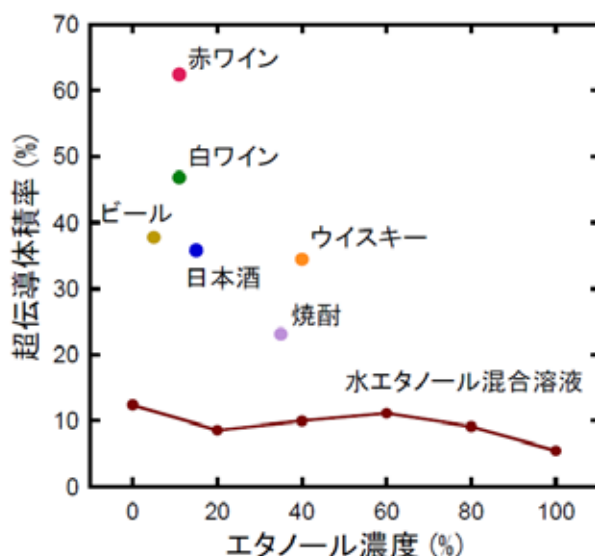


図 3 70 °C 24 時間さまざまなお酒に浸した試料の超伝導体積率

参考論文：

- 1) Y. Kamihara, T. Watanabe, M. Hirano and H. Hosono, J. Am. Chem. Soc. 130, 3296 (2008).
- 2) K. Ishida, Y. Nakai and H. Hosono, J. Phys. Soc. Jpn. 78, 062001 (2009).
- 3) Y. Mizuguchi and Y. Takano, J. Phys. Soc. Jpn., in printing. (arXiv: 1003.2696)
- 4) F. C. Hsu, J. Y. Luo, K. W. The, T. K. Chen, T. W. Huang, P. M. Wu, Y. C. Lee, Y. L. Huang, Y. Y. Chu, D. C. Yan and M. K. Wu, Proc. Nat. Acad. Sci. 105, 14262 (2008).
- 5) Y. Mizuguchi, F. Tomioka, S. Tsuda, T. Yamaguchi and Y. Takano, Appl. Phys. Lett. 93, 152505 (2008).
- 6) S. Margadonna, Y. Takabayashi, Y. Oishi, Y. Mizuguchi, Y. Takano, T. Kagayama, T. Nakagawa, M. Takata and K. Prassides, Phys. Rev. B 80, 064506 (2009).
- 7) S. Medvedev, T. M. McQueen, I. Trojan, T. Palasyuk, M. I. Erements, R. J. Cava, S. Naghavi, F. Casper, V. Ksenofontov, G. Wortmann and C. Felser, Nature Mater. 8, 630 (2009).
- 8) S. Masaki, H. Kotegawa, Y. Hara, H. Tou, K. Murata, Y. Mizuguchi and Y. Takano, J. Phys. Soc. Jpn. 78, 063704 (2009).
- 9) K. W. Yeh, T. W. Huang, Y. L. Huang, T. K. Chen, F. C. Hsu, P. M. Wu, Y. C. Lee, Y. Y. Chu, C. L. Chen, J. Y. Luo, D. C. Yan and M. K. Wu, Europhys. Lett. 84, 37002 (2008).
- 10) Y. Mizuguchi, F. Tomioka, S. Tsuda, T. Yamaguchi and Y. Takano, Appl. Phys. Lett. 94, 012503 (2009).
- 11) Y. Mizuguchi, K. Deguchi, S. Tsuda, T. Yamaguchi and Y. Takano, Phys. Rev. B 81, 214510 (2010).

- 12) Y. Mizuguchi, K. Deguchi, S. Tsuda, T. Yamaguchi and Y. Takano, Europhys. Lett. 90, 57002 (2010).
13) K. Deguchi, Y. Mizuguchi, T. Ozaki, S. Tsuda, T. Yamaguchi and Y. Takano, arXiv:1008.0666.
14) <http://sc-smn.jst.go.jp/sciencenews/frontier.html> こちらで実験の動画がご覧になれます。

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グループ 高野義彦 様

[超電導 Web21 トップページ](#)