(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

掲載内容(サマリー):

特集:SQUID/医療機器

- ○SQUID 特集にあたって
- ○体内診断に向けた磁気粒子イメージング
- ○HTS-SQUID を磁気特性分布計測装置と太陽電池内部の可視化
- ○超電導コイルを用いた鋼材の減肉評価
- ○超低磁場 MRI(生体応用)
- ○超電導関連 2015 年 8 月 9 月の催し物案内
- ○新聞ヘッドライン (6/20-7/19)
- ○「世界の動き」
- ○「「ISEC2015」会議報告
- ○標準化活動-実用超電導線の特性測定方法に関する通則-
- ○隔月連載記事「鉄道と超電導(その4-超電導き電ケーブルの研究開発②)
- ○研究室紹介 東京農工大学 工学部 物理システム工学科 内藤研究室
- ○読者の広場「電気学会ニュースレターにて米国立強磁場研究所滞在記を読みましたが、 超電導関係者向けに突っ込んだ話や裏話など頂けないでしょうか?」

超電導 Web21 トップページ

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 213-0012 神奈川県川崎区高津区板戸 3 丁目 2 番 1 号 KSP A-9 Tel 044-850-1612 Fax044-850-1613

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

OO

この「超電導Web21」は、公益財団法人JKAの補助金を受けて作成したものです。

http://ringring-keirin.jp



(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

特集: SQUID / 医療機器 「SQUID 特集にあたって」

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 所長 田辺圭一

磁気センサの中で最も高い磁場感度と広帯域特性を併せもつ SQUID に関しては、ニオブ系低温 SQUID と酸化物系高温 SQUID を用いた応用開発が国内外で精力的に続けられている。マルチチャンネルの低温 SQUID を用いた脳磁計は製品化されて久しく、国内でも 20 台程度が稼働している。ただ、臨床応用には普及しておらず、現在は欧州の Elekta AB 社のみが製品を販売している。一方、近年注目されてきたのが超低磁場 NMR/MRI への応用である。超低磁場 MRI は、超電導マグネットを使った高磁場 MRI に比べ画像分解能は劣るが、マグネットシステムが簡易・軽量になる、また緩和時間の違いを利用したガン組織の判別ができるなどの利点がある。最近の開発動向の一部については本誌今月号の「ISEC2015 報告」で紹介している。

国内では、金沢工大グループが自前のニオブ系プロセスにより超高感度 SQUID を作製し、主として生体応用に向けた開発を精力的に行っている。本特集では、超低磁場 MRI 装置、特に神経活動を画像化する機能的 MRI 技術の開発について紹介して頂いた。金沢工大グループは、他にも、ランニングコストを低減し普及を図るための液体へリウム再凝縮装置付脳磁計や、岩石磁気計測のための SQUID 顕微鏡システム(これらは ISEC2015 で発表)など幅広い開発を行っている。

一方、簡易な液体窒素冷却で使用できる高温 SQUID に関しては、資源探査装置など野外使用の応用開発が進んでいる。金属資源用の電磁探査装置については、オーストラリアの CSIRO やドイツの IPHT などの国研が製品化している。国内では、JOGMEC の委託により、ISTEC の薄膜積層型高温 SQUID を用いた電磁探査装置実用機(SQUITEM 3)が開発され、海外での金属資源実探査や国内での地熱資源探査に利用されている。さらに、改良実用機の開発が平成 26 年度から 27 年度にかけて行われている。金属資源探査装置には、磁性体資源による地磁気の乱れを移動しながら計測する磁気探査装置がある。IPHT は低温 SQUID 磁場偏差計(磁場の勾配を計測)を用いたヘリコプター牽引型の磁気探査装置を最近実用化している。ISTEC では、JOGMEC の委託により、平成21 年度から高温 SQUID 磁場偏差計を用いた磁気探査装置の開発を進め、平成26 年度には可搬型の小型探査装置を開発し、旧鉄鉱石鉱山での磁気異常の観測に成功している(7月号の超電導技術動向報告会2015 の記事を参照されたい)。

国内では、その他にも、ISTEC の薄膜積層型高温 SQUID を用いた様々な応用開発が進んでいる。 JOGMEC のプロジェクトでは、石油分野への応用を目指した油層モニタリング技術の開発を、ISTEC が三井金属資源開発と共同で進めている。また、JST の S-イノベプロジェクトでは九州大学、日立、ISTEC が共同で磁気免疫検査プロトタイプ装置の開発を行っている。九州大学、岡山大学は本特集で紹介するように、ISTEC の SQUID を用い、それぞれ体内診断用の磁気粒子イメージングシステム、太陽電池等への適用をねらいとした磁気特性分布計測装置の開発を進めている。 SQUID や MR(磁気抵抗)センサなどの高感度磁気センサを用いた橋梁等の社会インフラ用の非破壊検査装置の開発が、昨年度 JST-SIP プロジェクトの一部としてスタートした。詳細は岡山大学・塚田教

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

授による超電導技術動向報告会 2015 報告(7月号)を参照されたい。本プロジェクトには、岡山大学、ISTEC、発電技検、九大が参画しているが、本特集では九大グループによる超電導コイルを用いた鋼材の減肉評価の試みについて紹介して頂いた。今後は、ISTEC の高温 SQUID と組み合わせた高精度評価装置の開発を進める計画である。国内では、他に、豊橋技科大グループによる食品異物検査装置や阪大グループによる SQUID 顕微鏡/STM 複合評価装置の開発が、海外から購入した高温 rf-SQUID を用い進められており、ISEC2015 でもその進展が報告された。

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

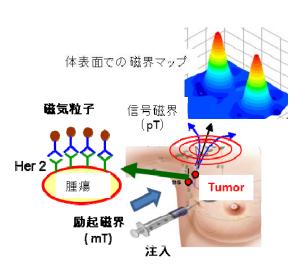
特集:SQUID/医療機器

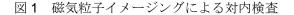
「体内診断に向けた磁気粒子イメージング」

九州大学 超伝導システム科学研究センター センター長 円福敬二

体内診断への応用を目指した磁気粒子イメージング法が近年注目されている。本手法は、従来機器には無い高感度性と検査機能を有しており、新しい診断機器としてその実現が期待されている。磁気粒子イメージングの一例としては、乳癌の体内診断への応用が挙げられる。この応用では、図 1 に示す様に、磁気粒子を体内に注入して癌細胞の表面に発現する蛋白質 (Her 2) に結合させる。その後、励起磁界を印加して患部に集積した磁気粒子から磁気信号を発生させる。磁気信号を体表面で計測し、その結果を解析することにより、患部の位置と疾患の程度を診断する。この応用では、30~50 mm の深さの体内に集積した、1 μ g 程度の微量な磁気粒子を空間分解能 10 mm 程度で検出する必要がある。既に検査システムの開発を目指した研究がなされており、従来の X 線検査(マンモグラフ)に比べて、検査性能を大幅に向上できる可能性が示されている。

図 2 に磁気粒子イメージングのために試作したモデルシステムを示す。システムは励起コイル、検出コイル、傾斜磁場コイルの 3 つのコイルから構成される。励起コイルは周波数 3 kHzで実効値 1.5 mT の交流励起磁界を発生し、磁気粒子を磁化する。磁気粒子からの信号磁界を検出コイルで検出する。磁気粒子からの磁気信号はダイポールフィールドとなり、距離の 3 乗で急激に減衰するため、体内に集積した磁気粒子からの磁界は体表面では pT 程度と極めて微弱になる。このため、検出コイルを液体窒素温度に冷却することによりセンサの高感度化を図っている。さらに、励起磁界の干渉を避けるため、磁気粒子の非線形磁化特性を利用して第 3 高調波を検出する検出法を開発している。開発したセンサシステムの磁界雑音は 12 fT/Hz^{1/2}であり、高感度な計測システムとなっている。





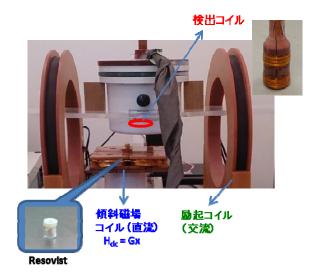


図2 試作した磁気粒子イメージングシステム

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

表 1 に磁気粒子の検出感度を示す。磁気粒子としては、MRI の 造影剤として用いられている Resovist と呼ばれるものを使用した。検出コイルから Z=50 mm 離れた位置に設置した磁気粒子からの信号の測定結果を示している。表 1 に示す様に、1 μg の磁気粒子を SN 比 4 で検出出来ている。

磁気粒子検出の際の空間分解能を高めるため、図2に示す傾斜磁場コイルを用いている。傾斜磁場コイルにより、勾配 G で空間的に変化する直流磁界(傾斜磁場)を発生させる。磁気粒子の非線形磁化特性を利用すれば、直流磁界がゼロになる点(Field Free Point: FFP)の近傍にある磁気粒子からのみ第3高調波信号を選択的に発生することが出来る。これにより、磁気粒子検出の際の空間分解能を高めることが出来る。空間分解能は磁場勾配 G に反比例するが、今回は G=0.3 T/m の磁場勾配を用いた。

表 1. 磁気粒子の重さと検出信号の関係。サンプルと検出コイル底部の間隔は z=50 mm。

サンプ ル量	検出磁 界(pT)	sn比
1 µg	0.23	4.3
5 µg	0.91	17
10 µg	2.08	39
100 µg	21.4	404

実験結果を図 3に示す。実験では、直径 5 mm の容器の中に入れた磁気粒子サンプルを二つ用いた。 二つのサンプルを間隔 Δ = 15 mm で配置し、検出コイルから Z = 50 mm 離れた位置に設置した。図 3(a)は磁界マップの測定結果である。図に示す様に二つのサンプルの位置で大きな磁気信号(赤印)が得られており、二つのサンプルを識別することが出来ている。また、図 3(b)は磁界マップを特異値分解法(SVD 法)とよばれる手法を用いて解析し、磁気粒子の濃度分布を求めた結果である。図に示す様に、重さが 5 μ g の二つの磁気粒子を明瞭に検出出来ている。

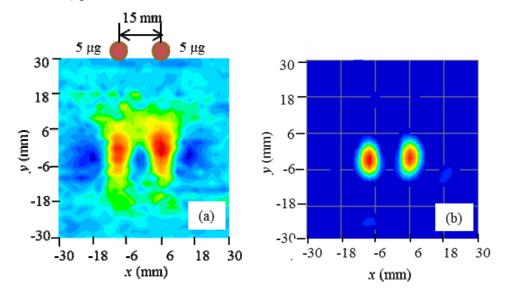


図 3. (a)深さ z = 50 mm の位置で間隔 15 mm 離して配置した二つのサンプルから発生する磁界マップ。(b)SVD 法を用いて再構成した磁気粒子の濃度分布。

上記の様に、試作したモデルシステムの結果は本手法が乳癌の体内検査に応用可能なことを示して おり、測定装置を高度化することにより検査システムの開発へと展開していきたい。

謝辞 本研究は JST の研究成果展開事業・戦略的イノベーション創出推進プログラムで行われた。

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

特集:SQUID/医療機器

「HTS-SQUID を磁気特性分布計測装置と太陽電池内部の可視化」

岡山大学大学院 自然科学研究科 生命医用工学専攻 堺 健司

1. はじめに

太陽電池や二次電池、燃料電池等は現在のエネルギー問題を解決するため、より高性能で耐久性のあるものが求められている。これらの電池を評価するには各電池の端子間に生ずる電圧や電流を測定するのが一般的であるが、高性能な電池を開発するためには、電池内部の電気特性を面分布で評価することが有用である。我々はこれまでに HTS-SQUID を用いた電気特性分布計測システムを開発し太陽電池パネルの計測へ応用することを報告した 1), 2)。今回は、太陽電池パネルの接線方向の磁場を計測して電流の流れを表すアローマップを作成し、太陽電池に人工的な欠陥を作製した場合の評価について紹介する。

2. 計測装置の概要と太陽電池の電気特性分布

我々が開発した電気特性分布計測装置の構成を図 1 に示す。太陽電池面内を流れる電流から発生した 磁場は、ピックアップコイルで検出され、超伝導コ イルに信号が伝達される。超伝導コイルは HTS-SQUID と磁気的に結合しており、これにより、 ピックアップコイルで取得した信号を HTS-SQUID で検出することができる。HTS-SQUID は ISTEC で 開発されたランプエッジ接合を有する SQUID を使 用した³⁾。太陽電池は **XY** 自動ステージに固定し、 PC 制御によりステージを平面内で走査して各点の 信号を取得する自動計測を実現している。ピックア ップコイルは、図1に示すように太陽電池表面と平 行な成分を検出できるよう設置し、2 つのピックア ップコイルを用いて磁場のx 成分Bx およびy 成分 B_vを検出している。実際の太陽電池の測定では交流 電圧を印加し、ロックインアンプを用いて印加電圧 と同じ周波数成分を検波した。この際に取得した信 号は、接線成分磁場 Bx および Bv を印加電圧 V で 微分した dB_x/dV 、 dB_v/dV となる。従って、これ らの信号を合成した大きさはピックアップコイル直

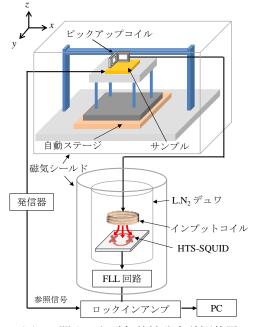


図1 開発した電気特性分布計測装置

下を流れる電流 I に比例するため、ピックアップコイル直下の微分コンダクタンス dl/dV に比例すると考えられ、そのマッピングは太陽電池の電気特性分布を示すこととなる。

この計測装置によりアモルファスシリコン太陽電池の電気特性分布を計測した。2 枚の太陽電池を用意し、一方の太陽電池には裏面電極を約1 mm 角剥離した人工欠陥を作製した。測定は大きさ150 mm×110 mm の太陽電池中心部70 mm×50 mm の範囲で行い、測定間隔は1 mm とした。測

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

定では8.8 V のオフセット電圧と振幅 0.5 V_{pp}、周波数 1.7 kHz の交流信号を太陽電池に印加し、光を与えていない状態でパネルの裏面から計測を行った。欠陥が有る場合の電気特性分布は図 2 (a) に示すように、欠陥部に相当する部分で微分コンダクタンスが大きくなった。またマッピング内のベクトルは、検出した 2 成分の磁場から合成したもので電流の向きを表しているが、欠陥付近で電流の流れが大きく変化していることもわかる。一方、欠陥なしの太陽電池は、マッピングで一部不均一な部分が見られ、欠陥がない場合でも電気特性分布が均一でないことを示唆している。

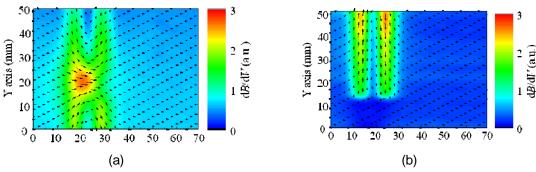


図2 アモルファス太陽電池の電気特性分布 (a) 裏面電極を剥離と (b) 欠陥無し

3. まとめ

2 つのピックアップコイルを使用し、測定対象と平行な磁場成分を検出することで、電気特性分布と電流の向きを測定できる装置を開発した。さらに、本装置を用いて太陽電池内の欠陥付近や健全なパネルの不均一電気特性分布を可視化することにも成功した。今後はピックアップコイルを介さず直接 SQUID により検出する装置や、Si 型太陽電池以外の太陽電池評価へ応用することを検討している.

参考文献:

- 1) T. Kiwa et al., Physica C, vol. 494, no. 21-22, pp. 195-198, 2013.
- 2) T. Kiwa et al., Physica C, vol. 471, no. 21-22, pp. 1238-1241, 2011.
- 3) A. Tsukamoto et al., Supercond. Sci. Technol. vol. 26, 015013, 2013.

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

特集:SQUID/医療機器

「超電導コイルを用いた鋼材の減肉評価」

九州大学大学院 システム情報科学研究院 助教 笹山瑛由

高度経済成長期を中心に整備された橋梁やトンネル、鉄筋コンクリート構造物が老朽化するのに対し、それらの長寿命化を図るための適切な維持管理を行う必要がある。これらの構造物には鉄などの鋼材が多用されており、その鋼材の腐食による減肉を高感度に検知することが要請されている。非破壊検査の手法として、超音波やX線、電磁気などを用いた手法があり、その中の電磁気的な方法は非接触で高速に検査ができ、かつ放射線被ばくの恐れが無いことが長所である。本研究ではその電磁気的な検査手法を減肉検査に応用するための基礎検討を行った 10 。

鉄などの鋼材は高い透磁率を持ち、表皮深さが銅材などに比べて極めて短くなる。このため、厚い鋼材の検査のためには低周波での検査が必要になる。そこで、図 1 に示すように HTS コイルを用いて、コイルの下部に設置した鋼材によるコイルインダクタンス L とコイル抵抗 R の変化を測定した。HTS コイルで作成したコイルは、銅線で作製したコイルに比べてコイル抵抗が微小のため、鋼材による L と R の微小な変化を精度良く測定できる。HTS コイルは幅 3 mm、厚さ 0.3 mm の Bi 系 HTS テープ線材により作製した。

コイルの下 20 mm の位置に鋼材を設置して、板厚による HTS コイルのインピーダンス変化の測定を行った。検査対象の鋼材として構造用鋼材 (SM490A) を用いた。



図1 HTS コイルを用いた鋼材厚さの計測

図 2(a) に鋼材の板厚による L の変化 Δ L を、図 2(b) に R の変化 Δ R を示す。図 2(a) に示すように Δ L は厚さ d とともに微増していることが確認できるが、鉄板が厚くなると飽和の傾向が見られる。一方、図 2(b) に示すように厚さ d とともに Δ R は単調増加し、特に 4 Hz 時には、板厚が約 20 mm のものでも単調増加の傾向が見られる。従って、抵抗 R の変化を計測することで鋼材の厚さを推定できるといえる。

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

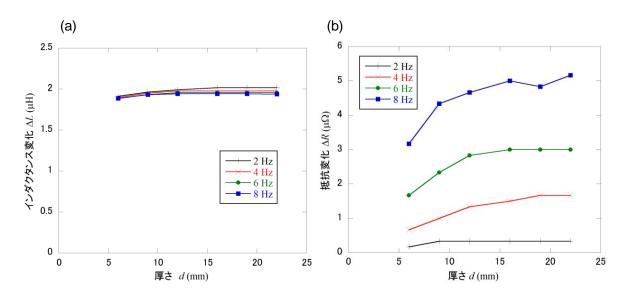


図2 鋼材の板厚に対する(a)インダクタンス変化および(b)抵抗変化

本研究の一部は JST の戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)の助成により行われた。

参考文献:

1) T. Ishida, T. Sasayama, M. Matsuo, and K. Enpuku, "Measurement of Iron-plate Thickness Using HTS Coil," Proc. 15th International Superconductive Electronics Conference (ISEC) 2015.

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

特集:SQUID/医療機器

「超低磁場 MRI(生体応用)」

金沢工業大学 先端電子技術応用研究所 教授 樋口正法

SQUID を用いた MRI 装置は静磁場の大きさが~数百 μ T 程度で、MRI の分類では超低磁場 MRI となる。画像分解能は高磁場 MRI に比べると劣ってしまうが、その有益性が発揮できる応用の一つとして脳磁計との組み合わせがある。脳磁計は脳神経活動によって発生する磁場を計測する装置であるが、その磁場源推定の際に脳画像が必要である。通常は脳磁計とは別の場所に設置された汎用 MRI 装置で脳画像を取得する。これを同一装置で実施することができれば、感便性や位置合わせ精度の向上が期待できる。ヨーロッパの研究グループがその実現に向け開発を行った例があるが、まだ実用化に至っていない。一方、このような脳磁計との組み合わせではなく、MRI 単独でその有用性を示す応用も報告されている。例えば、超低磁場においては T1 緩和時間のコントラストがつきやすい点を生かして、腫瘍組織判別を目的とした MRI である。

実際の超低磁場 MRI の開発例を紹介する。図 1 は私達の研究所で開発された低磁場 MRI 装置と撮影画像例である。本装置は先に述べた脳磁計・MRI 装置の小動物版を目指して開発したものである。超低磁場中においてはスピンの磁化が弱く、そのままでは核磁気共鳴信号が小さくなってしまう。そのため超低磁場 MRI 装置には静磁場コイルとは別にスピンの磁化を大きくするための核磁化コイルが必要である。ただし、大電流を扱うことになるのでその構成および制御には技術的ノウハウが必要である。他に注意点としては、種々のコイルが SQUID 周辺に存在することになるので誘導されるノイズ等に対する対策が必要である。

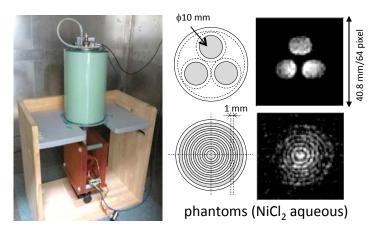


図1 SQUID を用いた超低磁場 MRI 装置の試作例

超低磁場 MRI のチャレンジングな応用として神経活動を画像化する機能的 MRI がある。その原理は神経活動に伴う微弱な磁場が超低磁場における核磁気共鳴現象に影響を与えることによる(図 2 参照)。実現にはまだ多くの課題があるが、従来の高磁場 fMRI や脳磁計では得られなかった画期的な脳機能画像が得られる可能性がある。

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

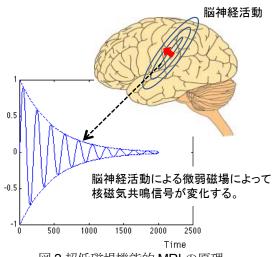


図2超低磁場機能的 MRI の原理

なお、本稿の詳細は以下の文献を参照していただきたい。関連する文献もそちらに記載されている。 小山大介、樋口正法、"超伝導磁気センサを用いた超低磁界 MRI"、電子情報通信学会、Vol.98, No.1, pp40-47, 2015

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

超電導関連 '15/8 月-9 月の催し物案内

8/3-7

低温技術講習会「77K 小型冷凍機を作ろう」 つくば 物質・材料研究機構 桜地区 http://www.csj.or.jp/reitob/2015/summercamp_0803.pdf

8/5-6

医療用超伝導マグネットと超伝導材料 ヒルズサンピア山形 http://www.csj.or.jp/tohoku/2015/joint_0805_1.pdf

8/23-28

Materials & Mechanisms of Superconductivity M²S2015 Geneva, Switzerland http://www.m2s-2015.ch/

8/25-27

電気学会 B 部門大会 愛知県名城大学 天白キャンパス

http://www.iee.jp/pes/?custom_event=%E5%B9%B3%E6%88%9027%E5%B9%B4%E9%9B%BB%E5%8A%9B%E3%83%BB%E3%82%A8%E3%83%8D%E3%83%AB%E3%82%AE%E3%83%BC%E9%83%A8%E9%96%80%E5%A4%A7%E4%BC%9A

8/26-28

低温工学基礎技術講習会 大阪市大および神戸大学 http://www.csj.or.jp/kansai/2015/31th_0826_1.pdf

8/27-28

極低温技術スクール「室温磁気冷凍の最先端、伝導冷却マグネット、強磁場、低温流体と計測技術」明治大学 生田キャンパスおよび筑波大学

http://www.csj.or.jp/seminar/2015/10th_school_0827.pdf

8/31-9/3

Workshop on the two-dimensional chalcogenides: exotic electronic orders, superconductivity and magnetism

IFW Dresden

https://www.ifw-dresden.de/index.php?id=3282

9/1-4

第55回真空夏期大学ヤマハリゾートつま恋

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

http://www.vacuum-jp.org/SUMMER/summerhome.html

9/6-10

12th European Conference on Applied Superconductivity Lyon, France http://www.eucas2015.org/

9/13-16

応用物理学会 名古屋国際会議場 http://meeting.jsap.or.jp/

9/16-19

物理学会 関西大学千里山キャンパス http://www.jps.or.jp/activities/meetings/index.php

10/14-16

International Workshop on Cooling-system for HTS applications くにびきメッセ、松江 http://www.asl.kuee.kyoto-u.ac.jp/index(IWC-HTS).html

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

新聞ヘッドライン(6/20-7/19)

- ○物材機構、鉄系超電導線材で世界最高の臨界電流密度を達成-28 テスラの超高磁界実現 日刊工 業新聞 6/22
- ○超電導線材の生産完全復旧、古河電工日光事業所 日経産業新聞 6/25
- ○超電導、リニア実験教室 奈良、高速走行の仕組み再現 朝日新聞 6/29
- ○理研など、もつれ電子対を空間的に離れた量子ドットに分離する新ナノデバイス開発 日刊工業 新聞 7/02
- ○物材機構 神鋼など 世界最高磁場の NMR 超伝導送電線に応用も 日刊産業新聞 7/02
- ○東大研究グループ、はるか高温下でも超電導電子を発見 銅酸化物で 電気新聞 7/09
- ○鉄系超伝導体 微量亜鉛が超伝導対破壊 物材機構、研究で確認 日刊産業新聞 7/10
- ○超電導線材、商用化走り出すーー電線各社の根気、開花へ 日経産業新聞 7/10
- ○超電導、利用温度上昇も、東大など 日経産業新聞 7/16
- ○高温から存在する超伝導電子発見 科学新聞 7/17

(編集局)

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

世界の動き

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 穣



★News sources and related areas in this issue

▶電力応用

Roebel導体で低損失高温超電導変圧器

University of Wellington (2015年5月20日)

ヴィクトリア大学ウェリントン校は、共同業界団体の協力を得て、HTS電力変圧器が従来の変圧器に比べてエネルギー損失を大幅に低減できることを初めて実験的に実証し、超電導変圧器の効率性と信頼性、そして送電網に実質価値を実現できる潜在性を明らかにした。

従来の変圧器よりも小型で軽量な HTS 変圧器は、冷却および絶縁に変圧器油ではなく液体窒素を使用するため、火災や環境上の危険を排除できる。研究者たちは、ニュージーランド産業革新雇用省と共同業界同体から資金を受け、エンジニアリング、アセンブリー、そしてテスト上の管理をCallaghan Innovation に任せ、クライオスタット製造の Fabrum Solutions にも協力を得た。また、地元電力会社 Vector と Northpower、そして Wilson Transformer Company や ETEL Transformers、その上 GCS とも協力して研究を行った。特にオーストラリアのメルボルンを拠点とする Wilson Transformer Company は、変圧器の鉄心を構築し、このプロジェクトでの設計と製造のノウハウに貢献した。

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

HTS 変圧器は現在、クライストチャーチで工場試験を受けており、その初期試験では電流容量 1390 A の通電試験に成功している。また、測定においてそのエネルギー損失は、従来の変圧器に比べて半減することが確認されている。変圧器の追加試験では、実際の負荷プロフィールの長時間模倣が含まれる。変圧器の製造を成功させるには、GCS がニュージーランドで設計製造した高電流二次巻線に、低交流損失の Roebel ケーブルを使用することがきわめて重要となる。Robinson Research Institute のシニア主任科学者 Nick Long 博士は、「GCS は、独自のユニークな HTS Roebel のケーブルを製造している。」と述べている。また Robinson Research Institute の事業部長である Bob Buckley 教授は、多くの業界パートナーと密接な協力関係を推進することで、研究チームはこれまで技術的ハードルを素早く克服してきたと述べる。

研究者たちは現在、このプロジェクトにおける次段階の研究チームを結成し、最初の商用プロトタイプである 2G HTS 変圧器の開発を目指している。

Source: "Transforming power transmission worldwide"

(20 May, 2015) Press Release

http://www.victoria.ac.nz/robinson/about/news Contact: Bob Buckley, bob.buckley@vuw.ac.nz

▶医療応用

超高磁場7TMRI

生理学研究所(2015年5月26日)

生理学研究所 (NIPS) は、7テスラ超高磁場 MRI システムを導入した。このシステムの磁場強度は、病院の一般的な MRI よりも 2~5 倍強く、生体からの信号を感度良く捉え、コントラストのより高い精細な画像を作ることができる。この MRI システムでは、新しいタイプの自己遮蔽型超電導マグネットが採用され、この種のマグネットがヒト生体研究に使用されるのは、日本で初めてのこととなる。このマグネットは、磁気エネルギーの漏洩を減少させるため、安全性や測定の精度において優れた機構を有する。現在、世界で約50台の7テスラ超高磁場 MRI システムが稼動し、そのうち3台は日本で導入されている。

スキャナーでは、脳の生体構造と機能の高精度なビジュアルデータが非侵襲的に取得可能となり、ヒト生体研究の領域を拡大する。この画期的な MRI システムにより、100 ミクロン単位での脳微細構造や、重要な脳の微小血管を描出し、神経線維の複雑な走行について 3 次元再構築が可能になることが期待される。

NIPS は、岩手医科大学医歯薬総合研究所、新潟大学脳研究所、京都大学脳機能総合研究センター、情報通信研究機構脳情報通信融合研究センター、理化学研究所脳科学総合研究センター、そして国立環境研究所といった日本の超高磁場 MRI 研究機関と共に、双方向型連携研究推進委員会を設立した。 NIPS では、超高磁場 MRI 研究の要素基盤技術の強化、MRI 研究者の育成、さらに国内及び海外の大学や研究機関との共同研究を推進する動きである。

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

Source: "NIPS Introduces An Ultra-High-Field 7-Tesla Magnetic Resonance Imaging (MRI) System" (26 May, 2015) Press Release

http://www.nips.ac.jp/eng/release/2015/05/mri_1.html

Public Relations, pub-adm@nips.ac.jp

超低磁場 MRI

Los Alamos National Laboratory (2015年6月1日)

ロスアラモス国立研究所の研究者たちは、戦場や第三世界の野外病院で使用するのに十分軽量で消費電力の少ない超低磁場磁気共鳴画像 (MRI) システムを開発している。このような軽量の MRI システムは、小児脳障害やその他の難病で苦しむ子供たちの治療に非常に有益であることが、第三世界の常勤医師たちの間で意見が一致し、報告されている。病院で使用される MRI 装置の主流は、大型で操作するのに多額の費用がかかり、液体窒素やヘリウムなどかなりの基盤設備を必要とする。

同研究チームは、SQUID で作られた超低磁場を使用することで、十分な品質の画像が生成されるかどうかを詳しく調査した。SQUID の主な障害となってきたのは信号の干渉である。同チームが製作した初代 MRI は、この干渉からの障害を保護するため、大掛かりな金属筐体の中に MRI を構築しなければならなかった。

同チームは現在、この金属筐体の要らないオープン環境システムの構築に取り組んでいる。それは、金属筐体の代わりに一連のワイヤコイルを使用して MRI システムを囲み、地球の磁場を補うという方法である。チームリーダーである Espy 氏は、「この新しいシステムにより、これら MRI システムが、比較的容易で安価に導入されるようになるかもしれない。」と述べた。

Source: "Los Alamos is developing powerful medical tool"

(1 June, 2015) Publications

https://www.lanl.gov/discover/publications/connections/2015-06/science-portable-mri-aid-soldiers.php

Contact: Editor, ute@lanl.gov

陽子線治療用超電導加速器を病院に設置

Mevion Medical Systems 社 (2015年6月29日)

Mevion Medical Systems 社は、独自の MEVION S250 陽子線治療システムに使用される超電導シンクロサイクロトロン加速器を、クリーブランドにある University Hospitals(UH) Seidman がんセンターと UH Rainbow こども病院に納入、設置することを発表した。2016 年春には、がん患者治療のため使用開始となることに期待が寄せられている。 Mevion 社にとって、これは 6 台目の加速器であり、同社は世界で最も効率的且つ運用費用効果に優れた高精度陽子線治療システムを陰で支えるイノベーターである。

陽子線治療は、がん細胞をより直接的に狙って治療する先端放射線治療であり、心臓や脳近辺の敏感な部位にがんを持つ患者の治療に適している。従来の陽子線治療システムは、構築費に何億ドルもかかり、そのサイズもはるかに大きいものであった。複雑な従来システムとは違い、MEVION

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

S250 は効果的で効率の良い治療を提供する。また、他の陽子システムに比べ、設置面積、スタッフ、そして消費エネルギーが削減されるため、資本コストと運用コストの大幅な軽減が見込まれる。

Source: "Mevion Medical Systems Delivers Proton Accelerator to Seidman Cancer Center at University Hospitals" (29 Jun, 2015) Latest News

http://www.mevion.com/news/1093-mevion-medical-systems-delivers-proton-accelerator-to-seidma n-cancer-center-at-university-hospitals-

Contact: http://www.mevion.com/contact-us

▶基礎

FeSe膜で高Tc60 K

東北大学(2015年6月2日)

高橋隆教授(原子分子材料科学高等研究機構: WPI-AIMR)および中山耕輔助教授(理学研究科)が率いる研究チームは、最大 60 K (- $213 ^{\circ}$ C) という超電導転移温度 (T_{c}) において、FeSe から成る鉄系原子層の高温超電導薄膜を作製することに成功した。さらに、同研究チームはこの T_{c} を制御する方法も確立している。本研究成果は、2015 年 6 月 1 日発行の Nature Materials に掲載されている。

省エネルギーで超高速処理が実現する独特な量子効果により、超電導体は次世代の高度電子機器に明るい見通しを与える。従来の超電導体の T_c は低く、そのため大掛かりで高価な冷却装置が必要になるため、超電導デバイス実用化の障害となってきた。バルク FeSe の T_c はたった 8 K であるが、厚さ 1 層から 20 層の超薄膜は、より高い T_c を持つ物質に変わる。その FeSe の高品質薄膜は分子線エピタキシー (MBE) で作製され、その電子状態は角度分解光電子分光法 (ARPES) を用いて測定された。ARPES を用いることで、研究者たちは、FeSe 薄膜における超電導発現の直接的証拠となる超電導ギャップの開いていることを低温で観察することに成功し、超電導ギャップ温度依存性から T_c が 60 K を超え、バルク FeSe の T_c の 8 倍以上であると推定した。

同研究チームはまた、薄膜表面にアルカリ原子を吸着させて電子量を制御する方法も新たに発見し、非超電導多層 FeSe 薄膜を、 $50 \, \mathrm{K}$ 付近の高い T_c を持つ高温超電導体に変換させることに成功した。本研究で達成した T_c は、銅酸化物高温超電導体の T_c には及ばず低いものであるものの、フラーレン T_c (C60) 超電導体や T_c MgB2 のような他の"高温 T_c 超電導体"の記録を遥かに超えるものである。

液体ヘリウムを使用しない気体ヘリウム循環型の冷却装置を利用して、本研究で達成した 50-60 K においても超電導を実現できることから、今後、原子層数、電子ドーピング量、薄膜成長基盤を調整することで、さらに 7cを上昇させる研究が広がることが期待できる。

本研究は、日本学術振興会 (JSPS) と文部科学省 (MEXT) からの助成金により支援された。

Source: "High-temperature Superconductivity in Atomically Thin Films"

(2 Jun, 2015)Press Release

https://www.tohoku.ac.jp/en/news/research/news20150602_1.html

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

Contact: Takashi Takahashi, t.takahashi@arpes.phys.tohoku.ac.jp

高圧化のFeSe でTc 49 K

岡山大学(2015年6月)

岡山大学の久保園芳博教授率いる研究チームは、高圧下に置かれた物質が著しく高い超電導転移温度 (T_c) を誘発できることを発見した。久保園教授は、 $FeSe((NH_3)yCs_{0.4}FeSe))$ 物質をドープしたアンモニア Cs に高圧を当て、 $0\sim41$ GPa という圧力下でのその抵抗を測定した。

液体アンモニア技法を用いて製造された金属挿入 FeSe では、 $30\sim45$ K という非常に高い T_c が観測された。 T_c は、FeSe の格子面間隔 (d) の変化と共に急激に増加し、二次元での増加が T_c を上昇させることを示唆した。以前から認識されてきた T_c の限界が 45 K である一方、Sun などが行った研究では、金属ドープした 2つの FeSe 物質 ($T_{0.6}$ Rb $_{0.4}$ Fe $_{1.67}$ Se $_2$ と $K_{0.8}$ Fe $_{1.7}$ Se $_2$)が圧力誘起されて高臨界温度超電導相になると、 T_c が 48 K に達すると測定された。しかし、これを検証できる実験を行うのは難しく、このような特性についてはほとんど報告されていない。

 $(NH_3)yCs_{0.4}$ FeSe の T_c (大気圧で 31 K) は、圧力の増加とともに徐々に減少したものの、11~13 GPa という圧力下では、その超電導性が 4.2 K まで下がることはなかった。13 GPa を超えると超電導性 は再現され、U 字状のような圧力依存性が、15~41 GPa という圧力間に見られた。21 GPa では、最大 T_c が 49 K に到達した。

Source: "High-T_c superconductivity found under high pressure" (Jun, 2015) Research Highlights Okayama Univ. e-Bulltin http://www.okayama-u.ac.jp/user/kouhou/ebulletin/research_highlights/vol11/highlights_003.html

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

「ISEC2015」会議報告

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 所長 田辺圭一



名古屋能楽堂における Clarke 教授の基調講演の様子

国際超電導エレクトロニクス会議(International Superconductive Electronics Conference: ISEC2015)が7月6日から9日の4日間、名古屋大学豊田講堂および名古屋能楽堂で開催された。超電導エレクトロニクスにフォーカスした本会議は、1987年に第1回会議が東京で開催されて以来、隔年で日米欧の3極持ち回りで開催され、第15回目となる今回は、例年より若干多い200件余りの発表があった。デバイスの分野別では、6件の基調講演を除くと、デジタル応用、SQUID応用がそれぞれ48件、44件と多く、次いで検出器の33件、高周波応用の28件、量子情報8件の順で、基盤となるデバイス物理と材料、プロセスが合わせて38件となっていた。海外からは、上海や南京に超電導エレクトロニクスの拠点を作っている中国から多くの参加者があり、また高性能コンピュータを目指す大型プロジェクトが走っている米国からの参加者も多かった。以下に、主なトピックスをまとめる。

1. SQUID 応用

昨年は SQUID が誕生して 50 年の記念の年であったが、Clarke (UCB) は基調講演で、ケンブリッジ大学の Pippard 教授の下で与えられた 10⁻¹³ V以下の微小電圧の測定という課題の解決方法として、SnPb ハンダと Nb 線からなる SQUID を利用したという SQUID 黎明期の話から、金属資源探査から超低磁場 MRI、重力波や冷たい暗黒物質の候補である Axion の検出、また宇宙観測用の転移端センサ (TES) アレイの読み出し回路など、直流から GHz という広い帯域での超高感度特性という SQUID の特長を活かした様々な応用の現状について紹介した。SQUID をセンサとして用いる超低磁場 MRI は、緩和時間の違いを利用したガン細胞や外傷性脳損傷のイメージングが特に期待されているが、Dong (UCB) は高磁場 MRI に比べ高周波磁場吸収によるリスクなしに脳損傷イメージングができる可能性をラットの実験で示した。また、Matlashov (LANL) は、軽量なシステムとなる超低磁場 MRI 装置は災害現場や戦場の病院に使用に適していると述べ、開発中の磁気シールドレスの7 ch システムについて報告した。その他、低温超電導 SQUID の応用としては、ドイツの IPHT よる空中磁気探査への適用をねらいとした、磁場の絶対値測定が可能なベクトルマグネトメータの開発が注目された。同一基板上に作製した有効面積(感度)の2 桁以上異なる3 個のマグネトメー

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

タカスケードを利用し、次段のより高感度の SQUID がどの電圧-磁東ブランチにロックされているかを割り出していく。地磁気中での磁東トラップを防ぐため、マグネトメータを $6~\mu m$ 以下の線幅で構成しており、一定の効果は得られているが、熱サイクルを伴う長期の再現性等にまだ課題があると述べた。また、Bayer (PTB) は SQUID による金属ブロックのノイズ測定を利用した 1~m K 以下の極低温で使用可能な温度計の開発、Adachi(金沢工大)はランニングコストの低減をねらいとした、パルスチューブ冷凍機によるヘリウム再凝縮機能を持たせた低ノイズの生体磁気計測システムの開発について報告した。

高温超電導 SQUID 応用では、ISTEC の薄膜積層型 SQUID を利用したバイオセンシングシステム (日立)、金属資源探査用の磁気探査システム (ISTEC)、磁気免疫検査システム及び磁気イメージングシステム (九大) の開発や食品検査用の超低磁場 MRI 装置 (豊橋技科大)、電解質中のイオン電流ベクトル測定 (岡山大) など日本の多くのアクティビティーが報告された。また、阪大グループは、ナノメータサイズの先端形状をもつ磁性体プローブを rf-SQUID に磁気的に結合させた STM-SQUID 顕微鏡複合システムにおいて、rf-SQUID の構造を最適化することで 100 nm レベルの空間分解能を実現したことを報告した。海外では、台湾国立大グループによるガン細胞検査用の超低磁場 NMR 装置、光学及び磁気イメージング装置、磁気免疫検査装置の開発などが注目された。

2. デジタル応用

Mukhanov (HYPRES) は基調講演で、超電導デジタル応用技術の最近の進展について紹介した。 現在の世界トップレベルの処理能力 (20-30 PFLOPS) をもつハイエンドコンピュータの消費電力 は約 20 MW と大きく、低消費電力化がさらなる高性能化の鍵となっている。

米国で最近スタートした IARPA C3 (Cryogenic Computing Complexity) プログラムでは、SFQ 回路を用いたハイエンドコンピュータ実現に向けての主要課題である高速メモリの開発と論理回路の規模拡大に取り組んでいる。高速メモリに関しては、ジョセフソン接合とスピンとロニクスを融合した低温磁気メモリの開発に Raytheon-BBN、Northrop Grumman や大学の共同チームが取り組んでいる。一方、論理回路については、従来の RSFQ 回路において主に電力を消費していた直流バイアス抵抗を排除し、よりエネルギー効率を高めた種々の回路(ERSFQ, eSFQ, RQL など)が IBM やNorthrop Grumman のチームにより提案・開発されて来ている。このプログラムでは、MIT Lincoln Laboratory (MIT-LL) が Nb プロセスを担当しており、開発した Nb 8 層からなる完全平坦化プロセスにより、7 万接合規模の RQL シフトレジスタの動作等に成功している。その他、メモリとプロセッサのインターフェース回路として、超電導ナノワイヤの超電導状態をゲート電極からの電流注入により制御する 3 端子デバイス(従来から概念のあったクライオトロンをナノメータサイズにしたもの)が MIT グループにより開発されるなど、プログラムの開発は広範囲に及んでいる。また、米国(及びカナダ)では、D-Wave 社の量子アニーリングプロセッサ(1000 量子ビット、約 13 万接合から構成され、組み合わせ最適化問題用)や量子コンピュータの開発も精力的に行われているが、SFQ 回路は量子回路の制御やデータ読み出し、誤り補正にも適していると考えられている。

一方、MIT-LLでプロセス開発を担当している Tolpygo は基調講演で、冷却に必要な電力を考慮すると SFQ 回路は CMOS 回路に比べエネルギー効率は決して良くはなく、超電導回路としての利点が発揮できるのは、指数関数的な演算効率アップが見込める量子回路、極限まで消費電力を下げられる可逆回路や極低温環境で動作するセンサの入出力回路などであり、これらの実現の鍵になるのは集積度の格段の向上であるという見解を述べた。 SFQ 回路の集積規模は、ここ 10 年はチップ当たり 1 万接合程度で停滞していたが、最近はプロセス技術の進展により 10 万接合レベルまで伸びてきている。 MIT-LL では CMOS と共用の 6400 m^2 のクリーンルームで SFQ プロセスの開発を行っており、193-nm の露光機も利用することができる。現在までに Nb 8 層、接合直径 0.7 $\mathrm{\mu m}$ のプロセスを開発しており、今後 2 年間で Nb 10 層、接合直径 0.5 $\mathrm{\mu m}$ のプロセスを開発する予定で

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

あり、2020年までには100万接合クラスの回路まで実現できる見通しを述べた。

日本では、名大、横国大がそれぞれ低電圧 RSFQ や断熱量子パラメトロン (AQFP) といった超低消費電力回路の開発やマイクロプロセッサ、FFT などの実用回路を、産総研内にある CRAVITY (超電導アナログ及びデジタルデバイス用のクリーンルーム) の Nb プロセスを利用して精力的に開発しており、多くの発表が本会議でもなされた。Ukibe (産総研) は CRAVITY の活動として、超電導トンネル接合 (STJ) 検出器アレイ、2万接合クラス SFQ 回路の 59 GHz 動作、検出器出力用の SFQ 回路などの紹介を行った。

3. 検出器応用

電磁波検出器の開発は世界中で精力的に行われているが、本会議でも、超電導ナノワイヤ単一光子検出器 (SNSPD あるいは SSPD)、転移端センサ (TES)、ホットエレクトロンボロメータ等様々な検出器の報告があった。NbN 極薄膜などを用いた SSPD は、基調講演で Siegel (KIT) が紹介したように、薄膜材料技術の進展やキャビティ、導波路等を用いた光学結合効率の向上によりシステム量子効率が向上し、量子鍵暗号通信試験等に利用されてきているが、マルチピクセル化が最近の一つの流れとなっている。Miki (NICT) は、4 ピクセルの SSPD アレイの信号処理用に SFQ 回路を接続したシステムの動作に成功しており、さらに 64 ピクセルアレイ用の SFQ 回路についても試作し動作を確認したと報告した。中国 SIMIT グループは、キャビティやミラー構造を最適化し、可視から近赤外の波長域に対して 80 %以上の量子効率をもつ SSPD を開発している。また、横国大と産総研のグループは、超電導薄膜ナノワイヤを用いた質量分析検出器に時間読み出し用の SFQ 回路を接続したシステムを開発している。極低温で動作する TES は宇宙観測に広く用いられているが、宇宙の起源を探るために開発した様々なアレイ検出器について Cho (SLAC National Accelerator Laboratory) が紹介した。高温超電導では、Du (CSIRO) がステップエッジ型のジョセフソン接合を用いた THz イメージング用の冷凍機動作検出器について報告していた。

4. 高周波応用、その他

Kayano(東芝)は、気象レーダー用の狭帯域受信フィルタ、高出力ハイブリッド送信フィルタ、電波天文用のマルチバンドフィルタ、フェーズドアレイ用のマルチチャンネルユニットなど同社における無線応用超電導フィルタの最近の開発について紹介した。高出力の送信フィルタができるのが強みで、種々のレーダー応用が今後も期待できる。デバイス物理では、中国 Nanjing University、NIMS、ドイツ Tubingen University らのグループによる、Bi2212 固有接合を用いた THz 発信素子の動作機構の解明が注目された。

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

標準化活動 8月のトピックス

-実用超電導線の特性測定方法に関する通則-

公益財団法人 応用科学研究所 特別研究員 長村光造

世界的な超電導応用技術のマーケットにおける超電導製品の流通のためには世界規模での規格 (標準) が必要になると考えられる。1989 年にスタートした IEC-TC90 ではこれまでに多くの測定 方法の世界標準を制定してきた。これらの複数の標準を体系的に整理するとともに、今後の標準化の方向性も含めて、指針となる通則の制定が必要となる。2010 年に設立された WG13 で実用超電 導線の通則について検討が行われてきた。通則として2つの課題があり、第1には実用超電導線の構造および製品に関するもので、標準化の立場から実用超電導線の詳しい説明が IEC の報告書として成文化された 1)。第2には要求される特性の測定方法に関するもので、今年5月に国際標準になった 2)ので、その概略を紹介する。

"実用超電導線"と呼ぶにはやはり超電導機器を製作するめに必要・十分な長さを持つことが前提になるが、さらに超電導特性のみならず機械特性等の工学的要件を満たすことが求められる。そのため実用超電導線は超電導を取りまくようにマトリックス、バリヤー、安定化層、強化層、絶縁層等々が配置するようにした典型的な"連続繊維型"複合材料の構成をもつ。現状ではこのような実用化の域に達した超電導線として Nb-Ti 合金系、Nb₃Sn, Nb₃Al を含む A15 型金属間化合物系、Bi2223, Bi2212 を含む Bi 酸化物系、REBCO 酸化物系および MgB_2 金属間化合物系の 5 系統であると考えられる。

実用超電導線は銅線と同じように電流を運ぶことが主目的であるが、同じ径であっても百倍から 千倍の電流を流すことができる。その通電可能容量、つまり臨界電流の測定方法の制定が必要とな り、またそれに関連して磁場中の特性、熱的および機械的特性の測定方法の制定も必要となる。超 電導線の商取引においては様々な特性の仕様の取り決めが必要となるが、そのため製造者、販売者、 消費者が合意できるような試験方法の制定が求められる。それではどのような特性が必要になるで あろうか。図1に示すように大別して (1) 超電導線の動作に必要な特性、つまり動作温度まで冷却 し、安定して動作を維持すること、さらに超電導状態が破れない条件等に関する特性、(2) 工業材 料に求められる一般的なデバイス製造および据付に関連する特性に分類される。

図中に黒抜きに白地の部分は既に国際標準が制定されているか、審議中の測定方法である。一方白抜きに黒字の測定方法は国際ワーキンググループで検討されているものである。図 1 の系統図からわかるように測定方法の体系としてはまだまだ不十分であることが一目瞭然であり、今後の超電導産業の発展に資する国際標準をどのように構築して行くか、その方策を考えるための資料として本通則が役立てられることが望まれる。

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

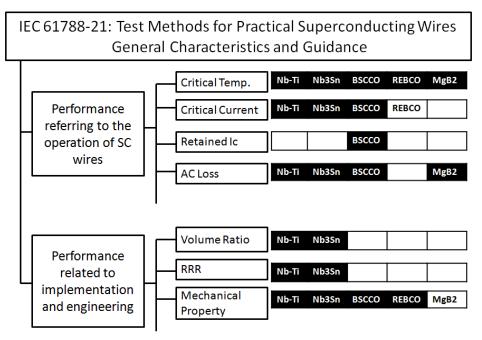


図1 実用超電導線の特性測定方法に関する国際標準の現状

参考文献:

- 1) IEC TR 61788-20:2014 Ed. 1.0A: Part 20: Superconducting Wires Categories of Practical Superconducting wires –General Characteristics and Guidance
- 2) IEC 61788-21: 2015 Ed. 1.0.: Part 21: Superconducting Wires Test Methods for Practical Superconducting Wires –General Characteristics and Guidance

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

【隔月連載記事】

鉄道と超電導(その4)

~超電導き電ケーブルの研究開発②~

公益財団法人 鉄道総合技術研究所 研究開発推進室 担当部長 超電導き電ケーブル課長 超電導応用研究室長 富田 優

はじめに

鉄道総研では、超電導ケーブルを鉄道き電線に適用することを想定し開発を始め、超電導線材の製作および特性評価、それらの結果に基づいた超電導ケーブルのプロトタイプを製作し、各種の特性評価試験を行っている ^{1,2)}。超電導ケーブルをき電線へ導入すると、回生効率の向上、電力損失の低減、変電所間の負荷平準化や電圧降下抑制による変電所の集約化等が期待できる。また、レールに流れる帰線電流を超電導ケーブルに流すことで双方向通電となり、漏洩磁場が低減できるとともに、レールから大地への漏れ電流もなくなりレール電位の抑制が可能であることから、電食の問題も解決できると期待される。

30 m級超電導き電ケーブルの開発

これまでの材料評価試験を超電導ケーブルの設計に反映し、鉄道車両を用いた実証試験向けの鉄道用超電導ケーブルの仕様を決定し、製作した。30 m 級超電導き電ケーブルの構造を図 1 に示す。 製作した 30 m 級超電導き電ケーブルは、鉄道総研にある構内試験線に敷設した。

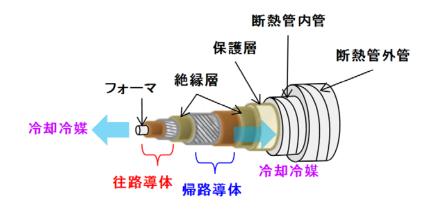


図1. 超電導き電ケーブルの構造

電流端末端部にロードセルを設置し、冷却時に超電導ケーブルに働く冷却応力について測定を行った(図 2)。初期冷却は冷却ガス温度を管理しながら、往路と復路に同方向で流す並流式で冷却を行い、ケーブルをクリート固定した場合と、固定しない場合のそれぞれについて測定を行った(図 3)。クリート固定した場合では、最大張力は約 700 kgf であったが、クリートを外すことで 200 kgf 以下まで低減し、超電導ケーブルにかかる応力は許容範囲内であることを確認した。

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612



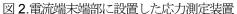




図3. 超電導ケーブルのクリート

次に通電試験を行い、発生電圧が電界基準($1 \mu V/cm$)に達した電流値を I_c とした結果、77 K に おける I_c は、約 6960 A であることを確認した。一連の超電導ケーブル敷設・試験の過程を経て、 当初の超電導線材の電流値に変化がないことが分かった。

冷却・通電試験により健常性を確認した後、30 m 級超電導ケーブルを用いて、鉄道車両の走行実験を行った。超電導き電ケーブルを介し、2 両編成の車両に電力を供給し走行試験を行った結果、電車の速度の増加とともに、電流値の上昇を確認し、最大速度約 45 km/h で走行した。超電導ケーブルを介して電車に電力を送る、国内外で初めての試験に成功した。

300 m 級超電導き電ケーブルの開発

次に、より実用に近い、長尺の $300 \, m$ 級超電導ケーブルを製作した $300 \, m$ 級超電導き電ケーブルの仕様を表 1 に示す。製作した $300 \, m$ 級超電導き電ケーブルは、図 4 に示すドラムにより搬送し、図 5 に示すケーブル延線機を用いて構内試験線に敷設した。今回の $300 \, m$ 級超電導き電ケーブルの敷設においては、実路線を想定し、敷設経路上に線路跨ぎや踏切跨ぎ箇所を設け、また、複数の曲がり箇所を有している(図 6)。

表 1 300 m 級超電導き電ケーブルの仕様

項目	仕 様
定格電圧	1.5 kV
定格電流	1 kA
フォーマ	SUS コルゲート管
断熱管	アルミ製
ケーブルコア外径	55.9 mm
断熱管最外径	133.1 mm
ケーブル長	310 m

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612





図 4.300 m 級超電導き電ケーブルの搬送の様子

図 5.300 m 級超電導き電ケーブルの延線の様子

次に、敷設した 300 m 級超電導ケーブルの冷却試験を行った。冷却方式は、従来の直接冷却方式に加え、軌道横断部、踏切横断部といった曲線箇所における熱侵入の増加が予想されたため、間接冷却方式であるサブクーラも設置した(図 6)。内蔵する光ファイバーにより冷却過程の温度分布を測定した。冷媒の注液は直接冷却システム側(0 m 地点)から行い、急激な温度変化を与えないように、蒸発器により液体窒素をガス化、温度調整し、徐々に温度を低下させ、約 60 時間で初期冷却が完了し、その後 16 日間において冷却状態を安定維持した。次に、超電導き電ケーブルの通電試験を行った結果、臨界電流値 1110 A を確認し、問題なく超電導ケーブルが敷設できていることを確認した。

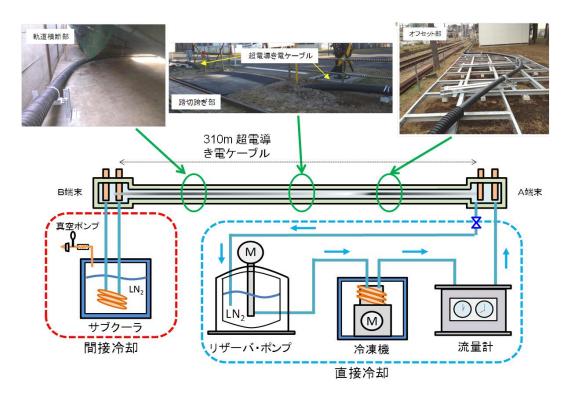


図 6. 敷設した 300 m 級超電導き電ケーブル

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

おわりに

これまでの評価試験結果をもとに、30 m、300 m級の超電導ケーブルを製作し、鉄道総研の構内 試験線に敷設した。現在は、超電導き電ケーブルを用い、冷却・通電の繰り返し試験や車両走行試 験を行っている。また実証試験と並行し、実路線を対象としたシミュレーションによる確認を進め ており、実証試験の結果と合わせて導入効果について明らかにし、鉄道事業用として適用可能な超 電導ケーブルの実現を目指していく。

謝辞

本研究の一部は、国土交通省からの補助金および(独)科学技術振興機構 (JST)の「戦略的イノベーション創出推進プログラム (S-イノベ)」の支援を受けて実施している。

参考文献:

- 1) M. Tomita *et al.*: "Next generation of prototype direct current superconducting cable for railway system", J. Appl. Phys. 109, 063909 (2011).
- 2) M. Tomita *et al.*: "Development of 10 kA high temperature superconducting power cable for railway systems", J. Appl. Phys. 111, 063910 (2012).
- 3) 富田 優 他:低温工学・超電導学会概要集,Vol.90,p.25,2014.

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

研究室紹介

「東京農工大学 工学部 物理システム工学科 内藤研究室」

研究室メンバー

スタッフ:内藤方夫(教授)、迫田將仁(助教) 学生:修士課程大学院生 5名、学部4年生 4名

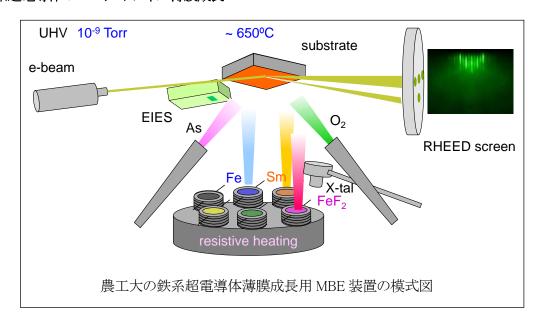
研究室ホームページ: http://www.tuat.ac.jp/~naitolab/

私たちの研究室では、分子線エピタキシー(Molecular Beam Epitaxy、MBE)成長を用いて、新規超電導材料の薄膜成長を行っています。既知の銅酸化物・ MgB_2 ・鉄系超電導体の高品質薄膜の成長を行うだけでなく、従来のバルク合成では作れない未知の高温超電導材料(最終ゴールは「室温超電導体」)の探索をしています。MBE は半導体の薄膜成長に用いられてきた技術ですが、この技術を四・五元素からなり、かつ、複雑な構造を持つ化合物の超電導体に応用するには、各元素の分子線流量を精密に制御する必要があります。私たちのグループは、分子線流量を原子分光(発光・吸光)にもつづいて精密に制御しており、これにより高品質薄膜を再現性良く成長することが可能になっています。私たちが現在手がけている研究を以下に紹介します。

1. ノンドープ銅酸化物超電導体

現在までに最高の T_c ~140 K を持つ銅酸化物超電導体については、モット絶縁体へのキャリア注入が重要であるとする「強相関モデル」が定説でした。しかし、私たちはキャリア注入なしで超電導となる一群の銅酸化物を発見し、この定説を覆しました。キャリア注入なしで超電導化した物質は、酸素が銅に対して平面四配位した Nd_2CuO_4 構造の RE_2CuO_4 (RE = La~Gd) です。 ノンドープ銅酸化物の超電導発現には、非正規の頂点酸素を丁寧に除去する必要があり、超電導となることは四半世紀近く見過ごされてきました。この発見により超電導発現機構に新しい展開が期待されます。

2. 鉄系超電導体のエピタキシャル薄膜成長



(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

2008 年に、東工大・細野教授らのグループが磁性元素の鉄を含む超電導材料を発見しました。従来、磁性と超電導は「犬猿の仲」でしたから、この発見は世界中を驚かせました。基礎研究の側面からの興味だけでなく、応用面でも鉄系超電導体は強磁場中でも超電導が壊れないなど実用上の利点を有することが報告されています。現在までの鉄系超電導体の T_c の最高値は SmFeAs(O,F) の 56 Kです。SmFeAs(O,F) はカチオン 2元素、アニオン 3元素、計 5元素の化合物で、バルク単結晶成長は困難な材料です。私たちは MBE 法により、 T_c がバルク値を超える 58K の SmFeAs(O,F)のエピタキシャル薄膜の成長をいち早く達成しました。現在、SmFeAs(O,F)薄膜の基礎物性評価がいくつかの共同研究グループと進行中です。

3. MgB₂超電導デバイス

超電導素子は市場こそ大きくないものの、SQUID や STJ は極微弱な磁場・電流・電磁波を検出する用途には欠かせない素子である。例えば、SQUID は脳磁界計測・非破壊検査・資源探査等に用いられており、STJ (Superconducting Tunnel Junction) ははるかかなたの宇宙から飛来する電波を観測する電波天文学には欠かせない素子です。従来の超電導素子は液体 He 温度(4.2 K)で動作していますが、He は希少元素で 21 世紀中には枯渇すると言われています。我々は、液体 H_2 温度(20 K)で動作する MgB_2 (T_c ~40 K)素子の開発を行っています。

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

読者の広場

Q&A

Q. 「電気学会ニュースレターにて米国立強磁場研究所滞在記を読みましたが、超電導関係者向けに突っ込んだ話や裏話など頂けないでしょうか?」

A: ニュースレターで綴りました通り米国立強磁場研究所の大きな特色の一つは、応用超伝導センター (ASC) で研究開発された超伝導線材が、ハイブリッド磁石などの強磁場発生装置の設計にそのまま生かされている事です。その観点から、線材の研究開発、もしくは強磁場発生装置の磁石に用いるコイル設計の、どちらか片方だけを行っていてはなかなか気づきにくい超伝導線材の側面についてお伝えしようと思います。(もしかしたら一部の読者の方には当たり前の話かもしれませんが、超伝導研究者で線材自体の研究開発と、応用の現場両方を知っている方は少数ではないかと思います。)

線材の研究開発は主に J_c などの超伝導特性に着目してなされていますが、いざ現場でコイルを巻くとなると他に注意すべき点がいくつかあります。

一つは線材自体の機械的強度の問題です。強磁場発生用のコイルは径の小さいものが多いため、線材を実際に巻きつけたときには意外にp大きな応力が発生します。そのため、例えばテープ線材などでは積層構造のはがれなどが起きることもあります。また、外見上の問題は無くても、超伝導体に応力が掛かってしまうことにより J_c 低下などを引き起こし、予想した特性が得られないことなどもありえます。

もう一つは線材自体が持つ復元力による問題です。小径コイル状に巻きつけた線材は大きな復元力を持つため、場合によってはそれ自身がほどけてしまいます。また、コイルの形を保っていたとしても、局所的に大きな復元力が働き、線材同士を絶縁しているセメントなどが破壊され、設計不良の原因となる事もあります。この問題は、前述した線材自体の機械的強度によるトラブルを防ぐために、母材に硬い金属などを使用すると逆に起きてしまうものでもあります。

現在応用研究が進んでいる物質では、テープ線材を用いる必要のあるものが多く、その積層構造 も超伝導特性向上のため複雑化する傾向にあるため、ここで述べた 2 つの問題と衝突する可能性を 常に考える必要があると思われます。

回答者:一般財団法人 電力中央研究所 材料科学研究所 機能材料領域 花輪雅史 様