

FSST NEWS

Forum of Superconductivity	No. 128
Science and Technology News	

(社)未踏科学技術協会
平成 23 年 1 月 20 日発行
〒105-0003
東京都港区西新橋 1-5-10
新橋アマノビル 6 階
Tel : 03-3503-4681
Fax : 03-3597-0535
Email: fsst@sntt.or.jp

<FSST NEWS No.128 目次>

<年頭所感>

「次の 100 年」

超伝導科学技術研究会会長／東京大学 下山 淳一2

<トピックス 1>

「ランプエッジ接合を用いた HTS-SQUID の作製」

国際超伝導産業技術研究センター 安達 成司3

<トピックス 2>

「REBCO 超伝導テープの磁気相転移新現象」

九州大学 岩熊 成卓8

<トピックス 3>

「Bi2223 超伝導線材開発の最近の進展」

住友電気工業 小林 慎一14

<会議報告 1>

第 23 回 ISS 2010 会議報告

(1) Physics and Chemistry

広島大学 杉本 暁18

(2) Bulk

鉄道技術総合研究所 富田 優19

(3) Wires, Tapes and Characterization

昭和電線ケーブルシステム 青木 裕治19

(4) Thin films and devices

国際超伝導産業技術センター 蓮尾 信也20

<会議報告 2>

第 76 回ワークショップ会議報告

日立製作所 和久田 毅21

○第 77 回ワークショップ

..... 23

○研究会の動き

..... 24

○国内超伝導関連会議

..... 25

＜年頭所感＞ 次の100年

Next 100 years

超伝導科学技術研究会会長
東京大学大学院 工学系研究科

下山 淳一

Faculty of Engineering, The University of Tokyo

J. Shimoyama



明けましておめでとうございます。旧年中の当会へのご協力に対しまして皆様方に厚く御礼申し上げます。今年も皆様方と一緒に超伝導科学技術の発展を促す活動を展開してまいり所存ですので、引き続いてご協力、ご意見等を賜りますよう、よろしくお願いします。

さて、超伝導現象が発表されてから100周年にあたる今年は、世界中の数多くの学会や学会誌、雑誌等で記念イベントや特集が企画されています。これらは、超伝導の歩んできた歴史をふり返る良い機会であることはもちろん、異分野の研究者や産業界、社会一般に対して超伝導技術の現状を知っていただく効果の意味でも大いに期待しています。

さらに今年は、6テスラ超のNb₃Snコイル、NbZrコイルが開発されてから50年、さらにBednortz, Müllerによる銅酸化物超伝導体の発見から25年にあたります。前者は、超伝導の高磁場を生かした多様な応用の端緒となり、後者は超伝導の高温応用の道を拓きました。今日の超伝導科学技術のかかなりの部分はこれらの不連続な偉業を契機に発展してきたものです。

超伝導線材を用いた強力電磁石は、高分解能の医療用MRIや研究用NMR、加速器、磁気浮上列車、シリコン単結晶引上げ装置、そして研究用に広く用いられているなど、様々な面から高度な社会の形成や先端科学研究の推進に貢献しています。一方、高温超伝導材料は、冷凍機や液体窒素による超伝導応用を可能にし、液体ヘリウム冷却の呪縛を解いたことから、従来の局所的な数少ない用途、機器での応用という概念を変えつつあります。米国の通信フィルタ応用を皮切りに、最近ではビスマス系、希土類123系の超伝導線材が工業的に生産されるようになり、これらを用いた数多くの大型プロジェクトが世界レベルで展開されています。

国内でも電力応用を中心とした大型プロジェクトが進行中で、なかでも今年秋に実システムでの通電開始が予定されている横浜市旭変電所内の超伝導ケーブル試験は、我が国で初めて超伝導体を経た電力が送り出される、という意味でも大いに注目しています。このほかJSTによる戦略イノベーション研究(S-イノベ)、先端的低炭

素化技術開発事業(ALCA)でも超伝導が主技術分野の一つに挙げられており、2050年頃の遠未来の社会に貢献できる超伝導応用の基盤技術が様々な分野で育つ土俵が用意されました。以上のような多種多様な大型プロジェクト研究は、5年前には考えられなかったものばかりですが、その背景には先述した高温超伝導線材の特性と生産性の向上があります。とにかく現在は確かに好機です。しかし、これらプロジェクトには今後長期にわたる超伝導技術応用の発展の可能性を決める極めて重い圧力と大きな期待がかかっています。できるだけ多くの実績を重ね、高い信頼性を実証し、また超伝導応用の効果を明確に社会に示すこと、これには、第二期(2008年以降)の活動趣旨に“超伝導産業を支える”ことを掲げた本研究会も深くかわり、支援、促進していきます。

本年もこれらプロジェクトや、様々な切り口からのイベントを実施する予定です。特に、周辺分野、類似技術と交流できる場の設定に引き続き重点を置いた企画を検討しています。もちろん、未来の超伝導応用の発展を考えるうえでは、基礎物性研究、新物質探索、デバイス応用などの動向にも注目し、タイムリーな企画を用意する所存です。このほか、4年ぶりに日本で開催する日米先進超伝導ワークショップの開催に向けての準備を始めております。

100周年は過去に学び、現状を再認識する良い機会ですが、次の100年の出発点でもあります。特に、これからの30年間に超伝導技術をいかに広く社会に浸透させられるかが、低炭素、省エネルギー問題に対して超伝導がどれだけ貢献できるか、極論すれば地球を健全な状態に保てるかどうかを決定します。よって、今年を100周年として祝するよりも、“101年目”のスタートを切るという精神で研究会の活動を一層活発に展開していく所存です。

最後に読者の皆様のますますのご繁栄を祈念し、年頭の挨拶を結ぶことにいたします。

<トピックス1>

ランプエッジ接合を用いた HTS-SQUID の作製 Fabrication of HTS-SQUID using ramp-edge Josephson junctions

超電導工学研究所
(財)国際超電導産業技術研究センター
安達成司
Superconductivity Research Laboratory, ISTEC
S. Adachi

1. はじめに

SQUID (超電導量子干渉素子: Superconducting QUantum Interference Device) は、超電導現象を用いたユニークなデバイスである。ジョセフソン接合を含んだ超電導ループがその基本構成であり、超高感度な磁場センサとして応用することができる。低温超電導体を用いたSQUIDシステムは主に脳磁/心磁計測といった医療分野で実用化されている[1-3]。一方、高温超電導体 (High Temperature Superconductor, HTS) では冷媒として安価な液化窒素を利用でき、低温超電導体に比べて冷却コストを低減できる。そのため実現できる感度がやや劣っていてもHTS-SQUIDに対しては簡便なシステムを構築して、より広汎な応用ができるものとして期待されてきた。実際に食品中異物検査、免疫検査、心磁計測、地質探査の応用例が報告されている [4,5]。しかし、デバイス作製の難しさ、実装およびシステム化の開発コスト等の問題で、未だ広く利用されているとは言い難い状況にある。この状況を打破し、HTS-SQUIDによせられる大きな期待を実現するために、ISTECでは高品質なデバイスチップを安定的に作製できるプロセスの構築およびその実用システムへの応用展開を進めている。本稿では、最近の我々の取り組みについて、特に作製プロセスを中心に詳しく紹介したい。

2. HTS-SQUIDチップ作製プロセス

HTS-SQUIDを構成するジョセフソン接合として、これまで単層の超電導薄膜で形成できるバイクリスタル接合やステップエッジ接合が用いられてきた。より複雑な薄膜積層構造を有するSQUIDができれば、感度や磁場耐性の向上など、更なる高性能化が期待できる。そこで我々は以前行っていた単一磁束量子 (SFQ; Single Flux Quantum) デジタル回路開発 [6] で培った薄膜積層化技術およびランプエッジ接合作製技術をHTS-SQUIDに活かすことを考えた。チップ上の任意の場所に複数のSQUIDを並べることができ、乗り越え配線

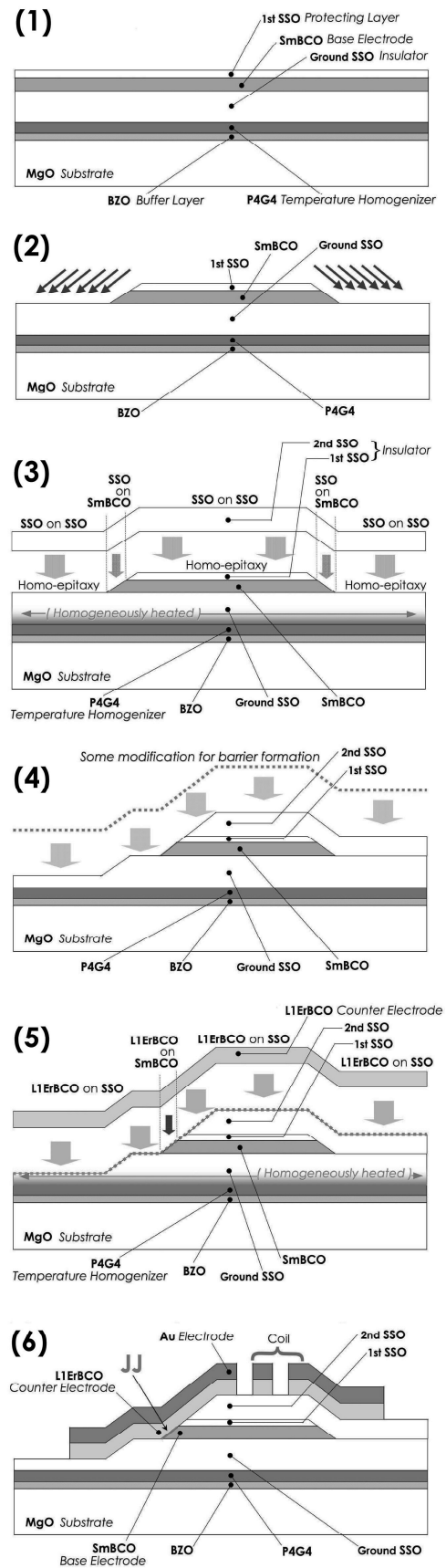


図1 HTS-SQUIDチップ作製プロセス

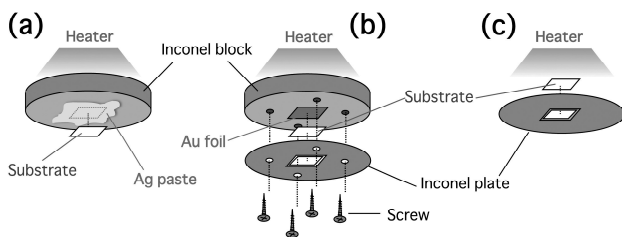


図2 成膜中の基板固定方法

を含む複雑な回路構造も使うことができる。

図1 (1) - (6) に我々のチップ作製プロセスを示す[7]。下部電極材料には $\text{SmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (SmBCO)を採用した(図1 (1))。広く使われている $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (YBCO)と比較して、SmBCOは T_c が若干高く、薄膜化した場合に表面が平坦になり易いといったメリットがある。基板には $15 \times 15 \text{ mm}^2$ の MgO (100)を用いた。基板上に直接SmBCOを成膜するのではなく、まず最下層に黒色の非超電導層 $\text{Pr}_{1.4}\text{Ba}_{1.6}\text{Cu}_{2.6}\text{Ga}_{0.4}\text{O}_y$ (P4G4; BaZrO_3 バッファ付き)を敷いた[8]。上層の成膜時に熱を基板全体に伝える均熱層としての機能を期待した。上下超電導電極層の層間には絶縁体として SrSnO_3 (SSO)を挟むが、そのSSO層成膜の際に、基板上に露出している部分のほとんどがSSOとなるようにP4G4上にSSO層を設け、SmBCO上にもSSO層 (1st SSO)を薄く堆積した。平坦性を確保するために成膜はOff-axisスパッタ法によって行った。各層の成膜終了時には、光学顕微鏡と原子間力顕微鏡によって表面観察を行い、その都度異常が起きていないかを逐一チェックした。 $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ の平均表面粗さ 2.0 nmを目安に良・不良を判定した。

成膜時の基板支持方法の選択はプロセスを安定させる上で重要な検討項目である。これまで我々が試した基板支持方法を図2に示す。最も簡便な方法は加熱したブロックに基板を銀ペーストで貼付ける方法である(図2 (a))。作業によるばらつきや銀粉末による膜面の汚れがデメリットである。銀ペーストを使わずに、基板の縁を枠で押さえて基板を加熱ブロックに押しつける方法も試した(図2 (b))。これによって銀粉末の汚れの問題は解決したが、やはり作業によるばらつきが問題となった。ブロックを介さず、直接基板を裏面から熱輻射で加熱する方法を試した(図2 (c))。これで作業者の違いによる問題も解決した。ただし、基板が熱を吸収する効率は成膜が進むにつれて刻々と変化するので、適切な成膜条件を決めるのがひと苦労であった。しかし、一度決まれば、安定性・再現性は良好である。現在では、熱線を効率よく受け止めて基板全体に散らすために裏面を粗らした基板を用いている。場合によっては、さらに両面を粗らしたサファイア基板を裏側に置くことも

ある。ただし成膜中の基板表面の温度がどうなっているかは不明である。表面温度の絶対値はともかく、少なくとも表面温度の制御は結晶成長にとって重要であることは間違いない。特に成膜初期では極めて重要となる。成膜開始の際にはガス導入やシャッター開閉等のタイミングまで秒単位で管理して行なうことで再現性を確保している[9]。

1st SSO層の成膜に次いで、フォトリソグラフィおよびイオンミリングによる1st SSO/SmBCO層の加工を行なう(図1 (2))。1st SSO層は加工工程中SmBCO層の保護膜として機能する。イオンミリングは緩やかな段差を形成するために入射角を 30° に固定し、基板を回転させて行った。ミリング後はアッシングにより残ったレジストを除去した。さらに層間絶縁層のSSO (2nd SSO)をOff-axisスパッタ法によって成膜し(図1 (3))、また同様にしてフォトリソグラフィ・イオンミリング・アッシングにより2nd SSO/1st SSO/SmBCO層の加工を行った。

次に、露出したSmBCO層の斜面上に上部超電導層成膜後に適当な接合バリアが形成されるような界面処理を施した(図1 (4))。イオンミリング後の斜面表面近傍は少なからずダメージを受けており、選択スパッタリングによって組成が著しくズレていて、形成される接合の特性に大きく影響することが分っている[10-12]。再現性と制御性を確保するために最終的な斜面の処理は毎回揃っていることが望ましい。最終のミリング処理として、入射角 90° (基板面に垂直)でのイオン照射を追加して斜面表面を改質した。

上部電極の超電導材料としては $\text{La}_{0.1}\text{Er}_{0.95}\text{Ba}_{1.95}\text{Cu}_3\text{O}_y$ (L1ErBCO)を用いた。ErBCOの場合、ErとBaは互いの占有サイトを置換できないため、カチオンの化学量論組成が守られなければ容易に不純物を析出してしまう。ErとBaをLaで少量置換しているのは、多少の組成ズレを起こしても基本的なペロブスカイト構造を維持し易く、不純物析出を抑制するためである[13]。LaはErとBa両方のサイトに入ることができるので、組成に柔軟性を持たせることができる。L1ErBCOの T_c はYBCOとほぼ同等である。Laドーピング量が多いと T_c 低下を招いてしまうが、0.1程度の少量であれば顕著に低下することはない[14]。むしろ T_c が上昇する可能性もある。筆者らはL1ErBCO焼結体において94 K以下での急峻な反磁性転移を観測したことがある。ただし残念ながら再現性は低く、多くの場合は91 K程度であった。文献を探したところ、Wagener *et al.*[15]は $\text{La}_{0.1}\text{ErBa}_{1.9}\text{Cu}_3\text{O}_y$ 組成で $T_c=94 \text{ K}$ を報告している。適当な合成条件を探せば再現性が向上するのかもしれない。

L1ErBCO層の成膜にはレーザ蒸着法(PLD; Pulsed Laser Deposition)を用いた。上部電極層の成膜は接合

バリア形成に直結した重要な工程であり、どの成膜手法が適切かは議論の分かれるところである。我々はいかつて進めていたSFQ回路開発時の実績を踏襲してPLD法を採用している [6]。PLD法の特徴として、容易にターゲット組成を薄膜に転写でき、スパッタ法に比べて成膜速度も速いといった利点がある。一方で膜表面にドロップレットやアウトグロースの生成が避けられない欠点もある。それらが運悪く接合部分のような重要な部位に生成すると、得られる接合の特性はまったく制御不可能になってしまう。しかしこれまでの経験上そのようなことはほとんど起こっていない。接合部分の占める面積が非常に狭いことが幸いしているようだ。また、接合が斜面といった結晶が乱れ易い部分に形成されるため、ある程度小さな欠陥の存在を許容して大きな欠陥を生じ難くしているのかもしれない。

適当な接合バリアを形成するために、上部電極層成膜の初期に、組成がCu欠乏になるような成膜条件に変えて成膜を行なった [16]。具体的には基板-ターゲット間距離を離し、成膜雰囲気中のガス圧を下げて成膜する。これによりCu欠乏の膜が堆積される。同時にランプ斜面的方向と基板上の位置によらず、より均等な条件で堆積が行われる [17,18]。適当な厚みを堆積した後、成膜条件を通常の条件に戻してL1ErBCO膜を堆積する。成膜中に、SmBCOとL1ErBCOに挟まれたCu欠乏層には両方の超電導層の構成元素が拡散し次第にCu濃度が増加していく。Cu欠乏層が超電導層に変わる手前で上部電極層の堆積が終了すれば界面にはジョセフソン接合が形成される [19]。故意に組成ズレを起こさせたCu欠乏層を前駆体として、上部電極層堆積時に適当なバリア層に変化させるので、我々はこの手法を『Cu-poor前駆体法』と呼んでいる。

上部電極層を堆積した後、室温で金電極をスパッタ法で堆積した。その後、フォトリソグラフィ・イオンミリング・アッシングによりAu/L1ErBCO層の加工を行ない、チップの形態ができあがる。図3に作製したチップの最も厚い部分の断面写真を示す。各層は上から順にAu(250)/L1ErBCO(250)/SSO(280)/SmBCO(250)/SSO(430)/P4G4(300)/BZO(30) [nm] である。その後、最終工程として酸素アニール処理を行う。下部電極のSmBCOに酸素を充分吸収させるためには比較的低温で長時間アニールする必要がある。SSO層に覆われている部分が多いので、長時間の熱処理が必要となる。酸素気流中で525℃から3日間以上かけて225℃まで徐冷している。酸素の吸収が効率的に行われるようにチップレイアウト設計の際には酸素導入孔をたくさん設けるように工夫した。

プロセス工程表を図4に示す。最短で12日間の日数

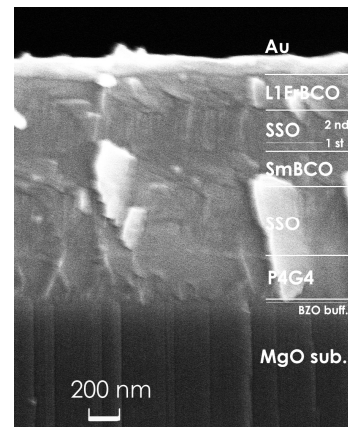


図3 HTS-SQUIDの断面SEM写真

	1日目	2日目	3日目	4日目	5日目	6日目	7日目	8-12日目
P4G4/BZO								
SSO								
SmBCO(下部超電導電極)								
1st SSO								
フォトリソグラフィ・イオンミリング・アッシング								
2nd SSO								
フォトリソグラフィ・イオンミリング・アッシング								
L1ErBCO(上部超電導電極)								
Au電極								
フォトリソグラフィ・イオンミリング・アッシング								
アニール								

図4 HTS-SQUID作製プロセス工程表

を要する。複数のスパッタ成膜装置が準備できない場合は図中▼で示したところで材料をスイッチする必要があるが、高品質な薄膜を堆積するためには成膜チャンバ内の環境を整えるために少なくとも2日間をかけてプレスパッタ等の準備をしたいところである。スパッタ成膜装置が1台の場合はスイッチが3度必要なので、さらに6日間必要となる。チップを作製するのに必要な最短日数は18日となる。

これまで種々のレイアウトデザインのHTS-SQUIDを作製してきたが、チップデザインごとのバリア層形成条件最適化が重要であることがわかってきた。たとえ接合および周辺の配線構造が同じであっても、基板上の配置場所や基板全体にわたるデザインが違っていると最適条件も違ってくる。おそらくは接合が形成される部分の斜面温度が微妙に違っているためと考えられる。デザインごとにチップ作製と特性評価を繰り返し、フィードバックをかけながら作製条件を最適化しなければならない。プロセスが長い分、繰り返しサイクルも遅くなる。プロセスの短縮や効率化も大きな検討課題である。

3. HTS-SQUIDマグネットメータ

前項のプロセスによって図5に示す2種類のマグネットメータを作製した [20]。ピックアップコイル外寸は13.5×13.5 mm²で同一であるが、SQUID部分が違っている。一つはピックアップコイルに誘起される電流が直接

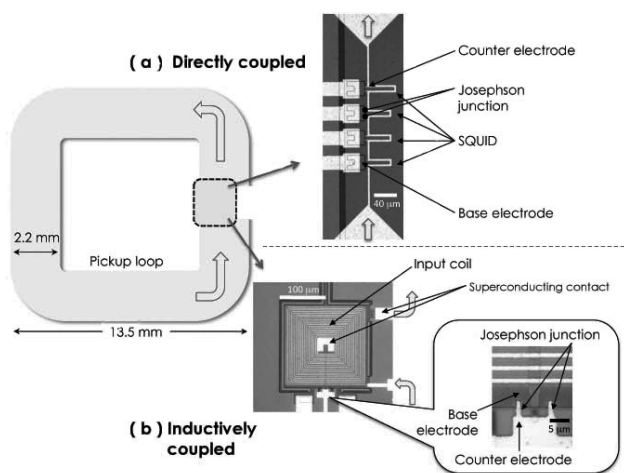


図5 HTS-SQUIDマグネトメータ

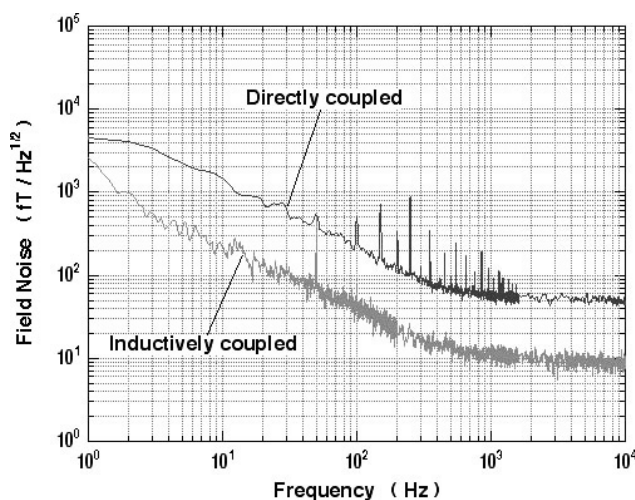


図6 HTS-SQUIDマグネトメータのノイズ特性

SQUIDループの一部を流れる直結型 ((a) Directly Coupled)、他方はピックアップコイルに繋がった小さな入力コイルを積層してSQUIDループに磁場を伝える積層型 ((b) Inductively Coupled) である。直結型のチップでは、SQUIDを4つ並べてあり、いずれか適当な特性のものを選んで使用することができる。それぞれのインダクタンスは一つだけ長細いSQUIDが50 pH、他は40 pHである。積層型は、 $200 \times 200 \text{ mm}^2$ のSmBCOワッシャ上に20ターンのL1ErBCO入力コイルが載せられたKetchen型と呼ばれるタイプのものである。入力コイルの幅と間隔は $2 \mu\text{m}$ である。接合幅はいずれも $2 \sim 3 \mu\text{m}$ である。接合の I_c としては駆動回路の都合上 $5 \sim 100 \mu\text{A}$ 程度になるように作製しなければならないが、この I_c 制御性・再現性が歩留まりを低下させるボトルネックとなっている。現行プロセスの歩留まりは3～4割程度である。

作製したチップはおおむね良好な磁場ノイズ特性を示し、平均的には $20 \sim 80 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}} (@1 \text{ kHz}, 77 \text{ K})$ のものが得られている。図6に得られたノイズ特性の一例を示す。積層型において $10 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}} (@1 \text{ kHz}, 77 \text{ K})$ という、世界最高レベルの低ノイズを実現している点は特筆に値すると思われる。図7に積層型マグネトメータのノイズに関して文献値をまとめた[21-28]。低ノイズの報告としては、MultiloopやAdditional Positive Feedback等の工夫を加えたものであるのに対し、我々のマグネトメータは単純なKetchen型である。今後、新たな工夫を加えることで更なる改善が見込まれる。低周波数側でのノイズレベル上昇が顕著であるが、原因については現在究明中である。正しくチップの実力を評価できる測定系を整えて、新たな工夫を加えて、更なる低ノイズ化を実現していきたい。

4. まとめ

現在、我々はチップの更なる高度化と同時にHTS-SQUIDを応用した実用システムの開発も同時に進めている。一例としては、Y系超電導線材を用いた電力機器開発において必要となる超電導線材の健全性を調べる非破壊検査装置である。実際にシステムまでの開発を行い、現在稼働中である[29]。狭いエリアに小さいグラジオメータ(磁場偏差計)を複数個並べたアレーを作製し、搭載している。超電導線材に磁場を印加して誘起される電流の乱れをHTS-SQUIDで高感度に検知する。リールに巻かれた長尺線材をリーズナブルな速度(80 m/h)で自動的に検査できる。他にも外部の研究機関と共同で様々な分野での応用検討を行っている。先端バイオ・非破壊センシング技術への展開を進めていることは本誌No.125で紹介されているとおりである[30]。

あらためて図7を見ると、積層型マグネトメータの低ノイズ化の報告は15年以上前のものがほとんどであることに気づく。これほどの性能が既に実現されているながら、今日HTS-SQUID応用システムが身近になっていないのは何故だろうか。おそらく15年前は、チャンピオンデータを開陳して実現可能なレベルを探る段階にあったものと推察する。次なる段階として進むべきは、アベレージあるいはミニマムを保証して信頼できる技術を構築する段階であるが、HTS-SQUIDは未だその段階に手が届いていない。本稿で紹介させて頂いた技術を発展させて後者の段階へ進む橋渡しができればと真剣に考えている。

謝辞： 本稿で紹介した研究は超電導工学研究所デバイス研究開発部において田辺圭一、樽谷良信、若菜裕紀（現（株）日立製作所）、畑潔（現 中国電力（株））、波頭経裕、石丸喜康、塚本晃、押久保靖夫と共に行った（敬称略）。内容の一部は、NEDOからの委託を受けて、あるいはJSTの産学イノベーション加速事業の一環として行われたものである。

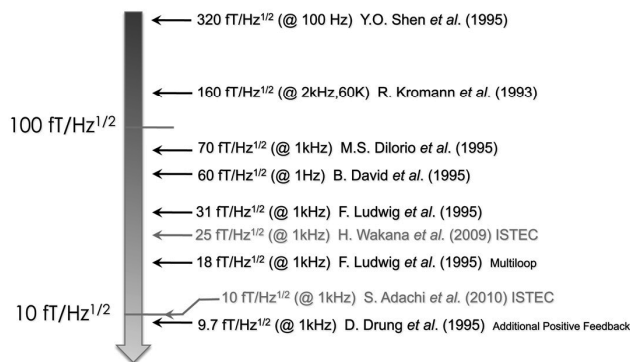


図7 積層型マグネトメータのノイズ

参考文献

- [1] 下川原, 田中, 風見, 春田: 横河技報, 第 48 巻 4 号 (2004) 145-148.
- [2] 浅野: J. Plasma Fusion. Res. **81** (2005) 526-533.
- [3] 掘上: 超電導 Web21 (2009)
<http://www.istec.or.jp/web21/series-articles.html>
- [4] (社)日本応用磁気学会 第 137 回研究会資料, 2004.7/23.
- [5] 糸崎: 超電導 Web21 (2001)
<http://www.istec.or.jp/web21/series-articles.html>
- [6] K. Tanabe *et al.*: IEICE Trans. Electron., **E91-C** (2008) 280-292.
- [7] S. Adachi *et al.*: Physica C, **468** (2008) 1936-1941.
- [8] S. Adachi *et al.*: Physica C, **463-465** (2007) 952-955.
- [9] 森下: ISTEC ジャーナル **10** (1997) 26-27.
- [10] B. H. Moeckly, and K. Char: Appl. Phys. Lett., **71** (1997) 2526-2528.
- [11] J.G. Wen *et al.*: Appl. Phys. Lett., **75** (1999) 2470-2472.
- [12] Y. Ishimaru *et al.*: Physica C, **378-381** (2002) 1327-1333.
- [13] S. Adachi *et al.*: Physica C, **378-381** (2002) 1213-1215.
- [14] K.M. Pansuria, D.G. Kuberkar, and R.G. Kulkarni: Supercond. Sci. Technol., **10** (1997) 831-835.
- [15] D. Wagener, M. Buchgeister, W. Hiller, S.M. Hosseini, and K. Kopitzki: Supercond. Sci. Technol., **4** (1991) S211-S213.
- [16] H. Wakana *et al.*: IEEE Trans. Appl. Supercond., **17** (2007) 233-236.
- [17] D.J. Lichtenwalner, O. Auciello, R. Dat, and A.I. Kingon: J. Appl. Phys., **74** (1993) 7497-7505.
- [18] H. Wakana *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys., **41** (2002) L239-L242.
- [19] S. Adachi *et al.*: IEEE Trans. Appl. Supercond., **13** (2003) 877-880.
- [20] S. Adachi *et al.*: IEEE Trans. Appl. Supercond., *in press*.
- [21] Y.Q. Shen *et al.*: Appl. Phys. Lett., **67** (1995) 2081-2083.
- [22] R. Kromann, J.J. Kingston, A.H. Miklich, L.T. Sagdahl, and J. Clarke: Appl. Phys. Lett., **63** (1993) 559-561.
- [23] M.S. Dilorio, K.-Y. Yang, and S. Yoshizumi: Appl. Phys. Lett., **67** (1995) 1926-1928.
- [24] B. David, D. Grundler, J.-P. Krumme, and O. Doessel: IEEE Trans. Appl. Supercond., **5** (1995) 2935-2938.
- [25] F. Ludwig *et al.*: Appl. Phys. Lett., **66** (1995) 373-375.
- [26] H. Wakana *et al.*: IEEE Trans. Appl. Supercond., **19** (2009) 782-785.
- [27] F. Ludwig *et al.*: IEEE Trans. Appl. Supercond., **5** (1995) 2919-2922.
- [28] D. Drung *et al.*: Appl. Phys. Lett., **68** (1995) 1421-1423.
- [29] T. Hato *et al.*: Physica C, **469** (2009) 1630-1633.
- [30] 圓福: FSST NEWS, No. **125** (2010) 7-9.

<トピックス 2>

REBCO 超電導テープの磁気相転移新現象 New phenomenon in magnetic phase transition of REBCO coated conductors

国立大学法人九州大学
岩熊成卓

Kyushu University
M. Iwakuma

(財)国際超電導産業技術研究センター
衣斐頭、和泉輝郎、塩原融

ISTEC

A. Ibi, T. Izumi and Y. Shiohara
(財)ファインセラミックスセンター

加藤丈晴

Japan Fine Ceramics Center
T. Kato

1. はじめに

REBa₂Cu₃O_{7-x} (RE: Rare Earth, Y, Gd等, REBCO) 超電導テープ状線材は、次世代の超電導線材として、世界中で開発が進められている。近年、我々はこのREBCO超電導線材において、超電導技術に変革をもたらし、その応用分野を大きく広げる可能性を秘めた新現象を見出した [1]。従来、線材特性向上として臨界電流密度 J_c を向上させると、 J_c に比例して増加すると考えられていたピンニング損失が逆に減少したのである。本稿では、この新現象の概略を紹介する。

最初に、REBCO超電導線材の開発の現状と、本稿で紹介する新現象の意義について概説する。

図1にIBAD-PLD (Ion-Beam Assisted Deposition, Pulsed Laser Deposition) 法を用いて作製した代表的なREBCO線材の基本構造を示す。厚さ100 μm のNi合金基板(ハステロイ (HastelloyTM) テープ)の上にIBAD法によりGd₂Zr₂O₇等バッファ層、PLD法によりCeO₂等キャップ層、その上にPLD法により1〜数 μm の厚さでREBCO超電導層を積層して、最後に表面に銀の保護・安定化層をスパッタ法により蒸着している。

REBCO超電導体の結晶はペロブスカイト構造 [2]であり、その超電導特性は異方性を有する。そのため、結晶粒の配向性を高め、結晶粒(グレイン)を線材全長に亘って整然と並べなければ高い J_c 値が得られない [3]。REBCO超電導層内では図2に示すようにCuO₂平面がテープ面と平行に幾重にも形成され、これが超電導電流を担っている。CuO₂平面間には、超電導電子の染み出しにより幾分弱いながらも超電導性を持つ。実際には、

図2に示すように結晶粒がきれいに配向した領域は平均粒径が数十から数百 μm のグレイン内に限られ、実際の線材では無数のグレインが互いにある粒界傾角を有して集合した形態となる。これらの結晶軸の面内、面間方向の角度のばらつきの平均値が $\Delta\phi$ 、 $\Delta\omega$ と定義され、線材作製プロセス条件の改善に関しては $\Delta\phi$ 、 $\Delta\omega$ の低減が材料学的指標の一つであり、これまでこの低減により J_c 特性の大幅な向上をもたらしてきた。特に開発当初6-8°以上であった $\Delta\phi$ は、最新のIBAD-PLD法線材では3°程度にまで改善されてきている。一方、 $\Delta\omega$ は3-5°程度であり、 c 軸方向の J_c は a 、 b 面内の J_c に比して数分の一から数十分の一と認識されているが、巨視的 J_c 値にはあまり関与しない。

最近、10 mm幅の線材で臨界電流 $I_c=600$ A (液体窒素温度77 K、自己磁界)、単長600 mの線材が製造可能となり、電流輸送特性面では液体ヘリウム中NbTi低温超電導線材をも凌駕する域に達したREBCO超電導線材であるものの [4]、応用上の最大の問題点は外部印加磁界のテープ面に垂直な成分による磁化および交流損失が大きいことである。交流損失が大きいことと、磁化が大きく、磁化の磁束クリープによる空間的・時間的变化に起因した発生磁界の不均一性が大きいことは等価であり、交流应用のみならず磁界均一度が要求されるNMR、加速器等直流応用でも問題となる。

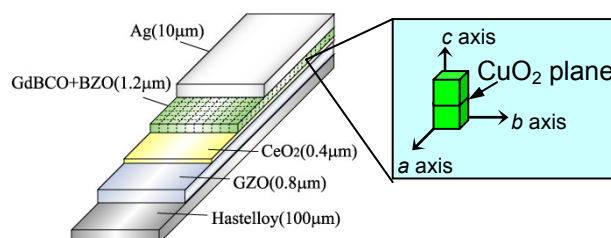


図1 REBCO超電導線材とREBCO超電導体

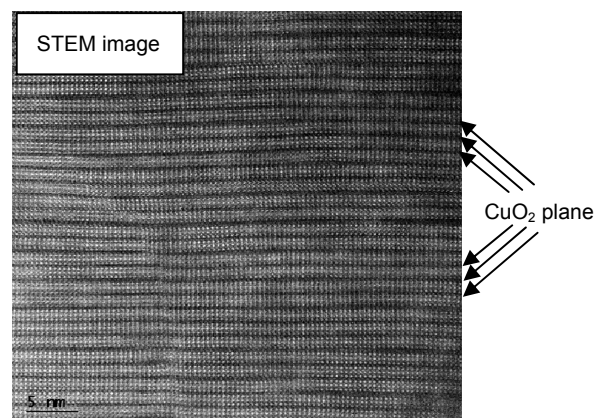


図2 STEM (走査透過型電子顕微鏡) イメージ

超電導体の発見以来、これまで第二種超電導体の交流損失(REBCO線材の場合、結合損失は無視できるので、ピンニング損失)は臨界状態モデル(量子化磁束線に働くローレンツ力とピンニング力の「力の釣り合い」を仮定して電磁現象を記述するモデル。 I_c 、 J_c の定義を包含し、超電導体内の電流密度 J は、ゼロか± J_c に等しい、ということを導く。)により説明され、理論表式も導かれてきた。臨界状態モデルは、ピンニング損失は J_c とフィラメント径(テープ線材の場合には線材幅)の積に比例する、よって J_c パフォーマンスを確保しつつピンニング損失を低減するにはフィラメント径(線材幅)の低減しかない、と説く[5]。この指針に沿って、これまで我々は、テープ線材のマルチフィラメント構造へのスクライビング(溝加工)と特殊巻線工程を提唱し、世界に先駆けて超電導テープ線材を用いたコイルでの低交流損失化を実証してきた[6]。しかしながら、この手法の場合、線材長さ及び幅方向に完全に超電導層の特性均一性が確保されない限り、長さに反比例して、長尺に亘って健全なフィラメント数は減少し、 I_c 値が低下するというジレンマに陥る。

逆説的に言うと、これまで一世紀に亘り超電導界は臨界状態モデルの束縛から逃れることができなかったのである。 J_c 特性の向上に伴ってピンニング損失が増加し、その低減のためには細フィラメント・細線化しなければならなかった。そのために、また新たな不安定性、難加工技術の必要性が派生した。これまで、金属系低温超電導線材を用いて実用化しうる一部の直流システムを除き、超電導機器・システムが目の目を見ていない要因はこれに尽きると言っても過言ではない。

我々は、この状況を打破しようと期待できる新現象を見出した[1]。結晶粒の配向性が高いREBCO超電導テープ線材において、斜め磁界中の磁化およびピンニング損失が従来の臨界状態モデルを用いた理論値より2桁以上も小さくなったのである。この現象は通常の巨視的電磁界の基本法則であるMaxwell方程式では説明できず、我々は第二種超電導体の新しい磁氣的相転移現象であろうと推察している。詳細は文献[1]を参照願いたい。ここでは概要を紹介する。

2. 試料線材

試料線材の諸元を表1に示す。試料は2種類で、いずれもIBAD-PLD法によりISTECで作製されたものである。実験室スケールの小型装置による製造ではあるが、Reel to Reel法を用い、基板テープを長さ方向に移動させながら、中間層、超電導層を形成する極めて工業ラインに近い製法によるものである。線材構造は図1と同様

表1 試料線材の諸元 (括弧内の数値は層厚)

	Sample A	Sample B
Production process	IBAD-PLD Reel to Reel	IBAD-PLD Reel to Reel
Self field I_c at 77K	234 A	254 A
J_c at 77 K	1.02×10^6 A/cm ²	2.12×10^6 A/cm ²
Width	10 mm	10 mm
Stabilizer	Ag (20 μ m)	Ag (10 μ m)
Superconductor	YBCO (2.3 μ m)	GdBCO+BZO (1.2 μ m)
Buffer layer	CeO ₂ (0.4 μ m) Gd ₂ Zr ₂ O ₇ (0.8 μ m)	CeO ₂ (0.4 μ m) Gd ₂ Zr ₂ O ₇ (0.8 μ m)
Substrate	Hastelloy™ (100 μ m)	Hastelloy™ (100 μ m)
$\Delta\phi$	5.4°	3.0°
$\Delta\omega$	2.9°	3.3°

である。試料Aが人工ピンなしのYBCO線材、Bが人工ピンありのGdBCO線材であるが、この現象の発現に関しては人工ピンの有無、YとGdの違いは本質ではない。

試料テープ線材の、テープ面に垂直な磁界中における、臨界電流密度 J_c 特性の磁界 B 依存性(J_c - B 特性)を図3に示す。磁界 B の増加とともに J_c が減少する

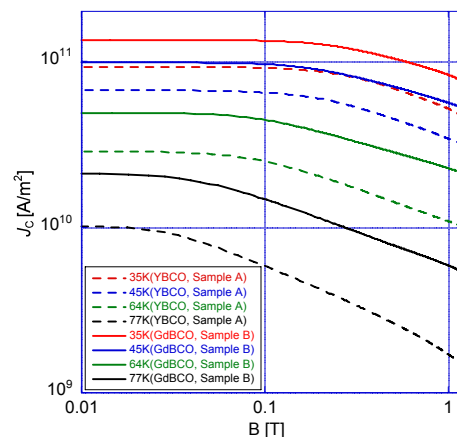


図3 J_c - B 特性

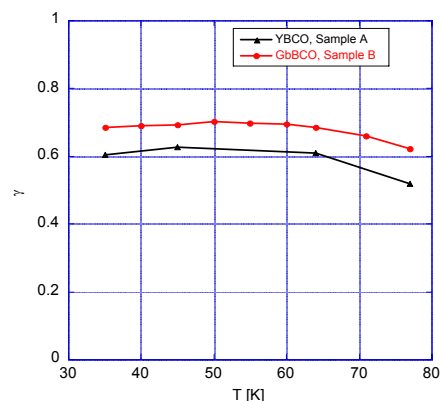


図4 ピンパラメータ γ の温度依存性

領域の J_c 特性をIrie-Yamafujiモデル[7]を用いて $J_c = \alpha B^{1-\gamma}$ と近似した場合のピンパラメータ γ の B 依存性を図4に示している。 γ はほぼ0.6から0.7の範囲であり、これまでのREBCO超電導テープの γ が0.4から0.5であったことを考えると、試料線材の J_c の高磁界特性が人工ピンの有無に関わらず良いことがわかる。

試料Bは試料Aに比し、 J_c はほぼ2倍である。これは、試料Aは4年前に作製された線材、試料Bは昨年作製された線材であり、 $\Delta\phi$ が試料Aで 5.4° であるのに対し、試料Bでは 3.0° と結晶粒の配向性が改善されていることにも起因している。

留意すべきことは、供試線材は、 γ が高いこと以外、あくまで普通の J_c - B 特性を有するという点である。

3. 磁化およびピンニング損失測定

試料線材の磁化およびピンニング損失は、図5に示すような鞍型ピックアップコイルを用いて、変動磁界中で電氣的に測定した。鞍型ピックアップコイルは、任意の試料線材形状・積層枚数、磁界振幅・印加角度、温度に対し、校正無しに高精度に磁化信号を検出できるよう設計・製作している[7]。

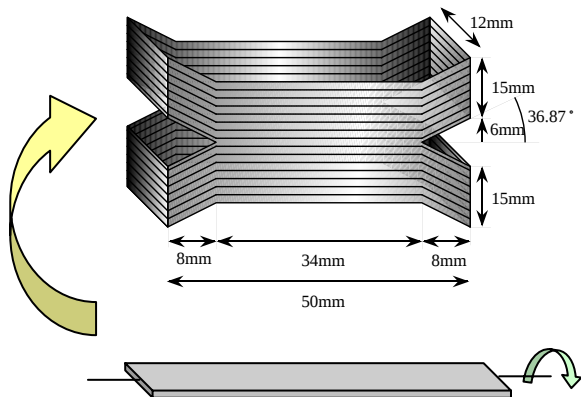


図5 鞍型ピックアップコイル

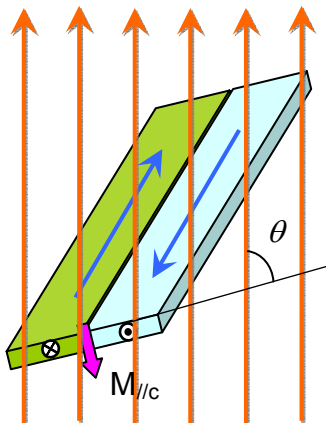


図6 テープ面に垂直な磁化 $M_{//c}$ と遮蔽電流

超電導線材の磁化 M は、図6に示すように、外部磁界を印加した際に誘起される超電導遮蔽電流が作る磁気モーメント m (電流 $\times$ 平均距離、向きは遮蔽電流が作るループの法線方向)を単位体積あたりに換算したものと定義される。等方的な超電導テープ線材に対し外部磁界を斜めに印加する状況を想定すると、通常テープ面が 1° 程度であっても傾けば、図6に示すようなテープ面に垂直方向(c軸方向)の磁化 $M_{//c}$ を作る遮蔽電流がテープ線材ほぼ全面にわたって誘起される。これは、厚さ $1\text{--}2\text{ }\mu\text{m}$ に対し幅 10 mm とアスペクト比が極めて大きいためである。遮蔽電流は線材を二分してループ電流として流れることから、遮蔽電流の大きさは I_c の半分であり磁化 $M_{//c}$ は次式で表される。

$$M_{//c} = \frac{m}{wh} = \frac{\frac{I_c}{2} \frac{w}{2} e_{\perp}}{wh} = \frac{I_c}{4h} e_{\perp} \quad (1)$$

ここで、 w は線材幅、 h は超電導層の厚さ、 $e_{\perp}$ でテープ面に垂直な単位ベクトルある。

一般に、単位体積一周あたりのピンニング損失 Q は、磁化 M の外部印加磁界 $B (= \mu_0 H)$ に関する一周積分として次式で定義され、磁化曲線(M - B カーブ)が囲む面積に等しい。

$$Q = \oint B dM = - \oint M dB \quad (2)$$

斜め磁界中に対し、ピックアップコイルは試料磁化信号の磁界印加方向成分のみしか検出できないが、損失は(2)式のように磁界 B との内積であるため、校正無しに測定される。

4. 新現象の特徴

4.1 磁化曲線

図7(a)に77 Kにおいて磁界印加角度 $\theta=15\text{--}90^\circ$ で測定した試料Aの磁化曲線を示す。ほぼ上下・左右対称であり、通常の超電導体で観測される磁化曲線である。しかしながら、64 Kに温度 T を下げると、図7(b)のように印加磁界を土のピークから下げ始めた際に磁化がゼロを通過して通常の軌跡に戻る現象が観測される。これは θ が小さいほど顕著となる。これを「ゼロ走磁化 (Zero running of $M_{//c}$)」と呼ぶことにする。

「ゼロ走磁化」は、また、磁界が高いほど顕著となる。図8に、試料A、Bの直流バイアス B_{dc} 磁界中での磁化曲線を示す。図8(a)は試料Aの $T=64\text{ K}$ 、 $\theta=15^\circ$ 、図8(b)は試料Bの $T=35\text{ K}$ 、 $\theta=60^\circ$ における測定結果である。垂直磁界に近い $\theta=60^\circ$ でも「ゼロ走磁化」は発現する。また、磁界が高くなるにつれ、「ゼロ走磁化」が発生する磁界幅が大きくなる。この磁界幅を ΔB_r と定義すると、

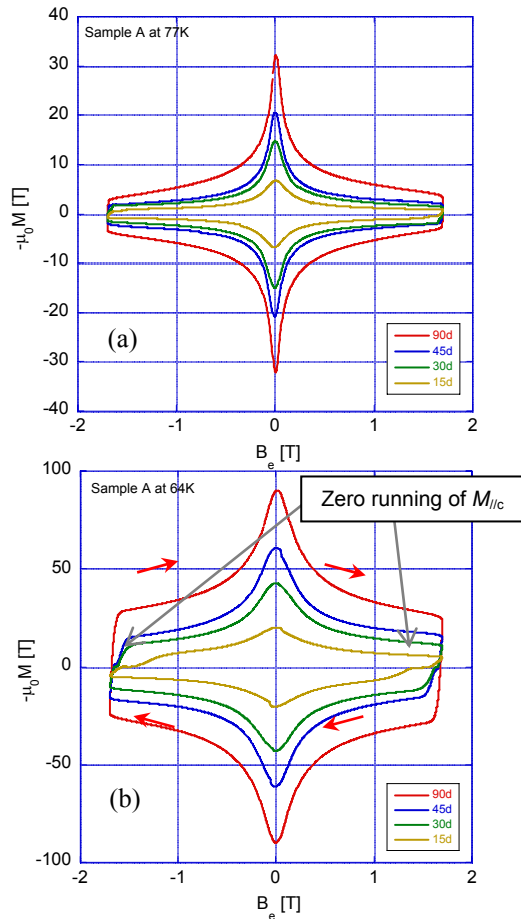


図7 (a) 77 Kと(b) 64 Kにおける磁化曲線

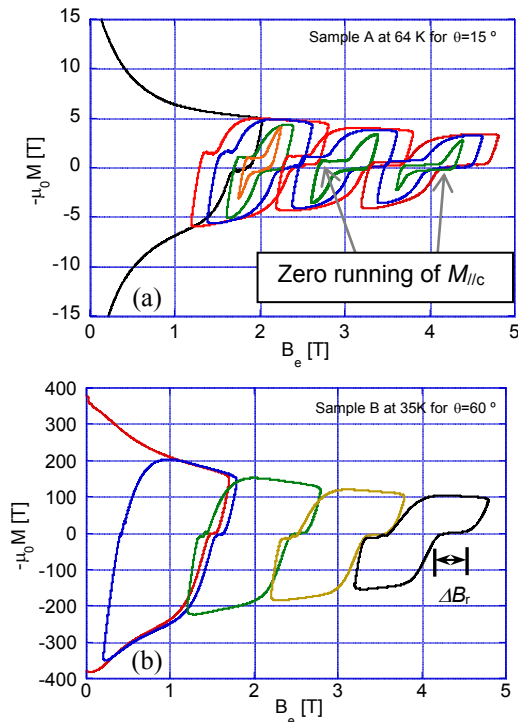


図8 (a) 試料Aの64 K、 $\theta=15^\circ$ 、(b) 試料Bの35 K、 $\theta=60^\circ$ における磁化曲線の測定結果

図8 (b) において、 ΔB_r は磁界 B にほぼ比例しているように見える。

試料Bの $T=77$ K及び64 Kにおける磁化曲線の測定結果を図9 (a) (b) に示す。図7 (a) (b) に示す試料Aに比し、試料Bでは、より高い温度で「ゼロ走磁化」が発現し、 ΔB_r も大きい。また、図9 (b) において、「ゼロ走磁化」に加えて、外部磁界の方向が変わった直後、すなわち $B=0$ 付近で磁化が急激に減少していることがわかる。これを「磁化の急激減少 (Abrupt drop of $M_{//c}$)」、その幅を ΔM_d と呼ぶことにする。温度 T を下げると「ゼロ走磁化」および「磁化の急激減少」はさらに顕著になり、 ΔB_r 、 ΔM_d も大きくなっていく。図10 (a) (b) は $T=45$ K及び35 Kにおける磁化曲線である。 $T=35$ K、 $\theta=10^\circ$ では、磁化曲線がつぶれてしまっていることがわかる。

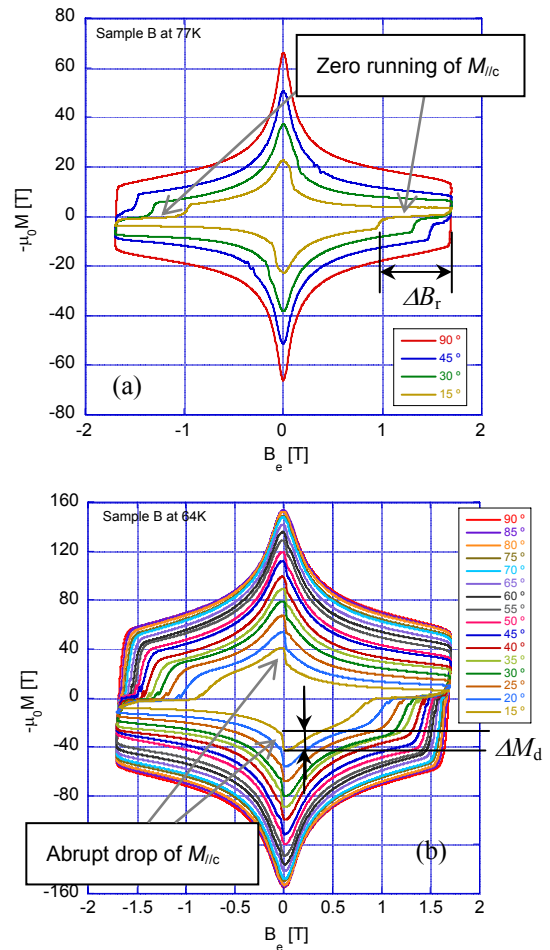


図9 試料Bの(a) 77 K、(b) 64 Kにおける磁化曲線

4.2 ピンニング損失

前述したように、磁化曲線が囲む面積がピンニング損失に相当するから、「ゼロ走磁化」および「磁化の急激減少」による磁化曲線の变形はピンニング損失の低減に直結する。図11 (a)に、図7(a) に示す77 Kにおける試

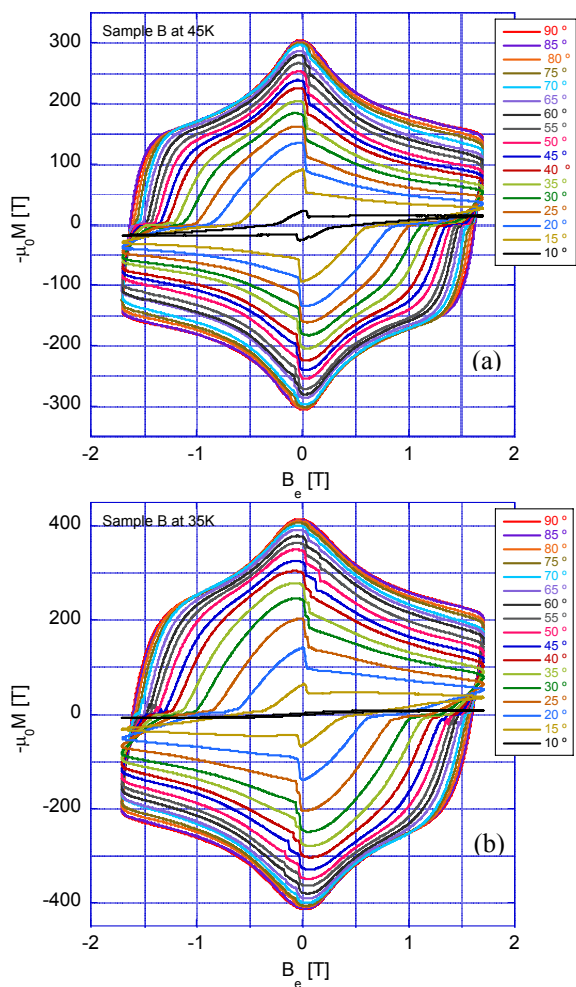


図10 試料Bの(a) 45 K、(b) 35 Kにおける磁化曲線

料Aの磁化曲線に対応するピンニング損失の磁界振幅 B_m 依存性を示す。磁化曲線が「通常」であることに对应して、損失曲線も「通常」である。これに対し、磁化曲線が「ゼロ走磁化」および「磁化の急激減少」により図10 (b) に示すように潰れてしまった試料Bの温度 $T=35$ K におけるピンニング損失は、特に $\theta=10, 15^\circ$ の場合に顕著なように、通常に比べて大きく減少していることがわかる。

5. 新現象の発現機構

「磁化がゼロであるので、原因はわからないが $J_c=0$ である。」と考えるのは早計である。第2章で示したように、これらの試料線材は通常の、かつ、高い J_c 特性を持つ。また、図8、9、10に示す磁化曲線において、メジャー・ループ（磁化が減少していない上下端の軌跡）がその磁界、磁界印加角度、温度等、試料線材が置かれた条件下における J_c に相当するのである。現状の測定システムで精度良く感知できているのは、測定器のダイナミックレンジの観点から、テープ面に垂直な方向の磁化およびこれによるピンニング損失である。これらが減少したか

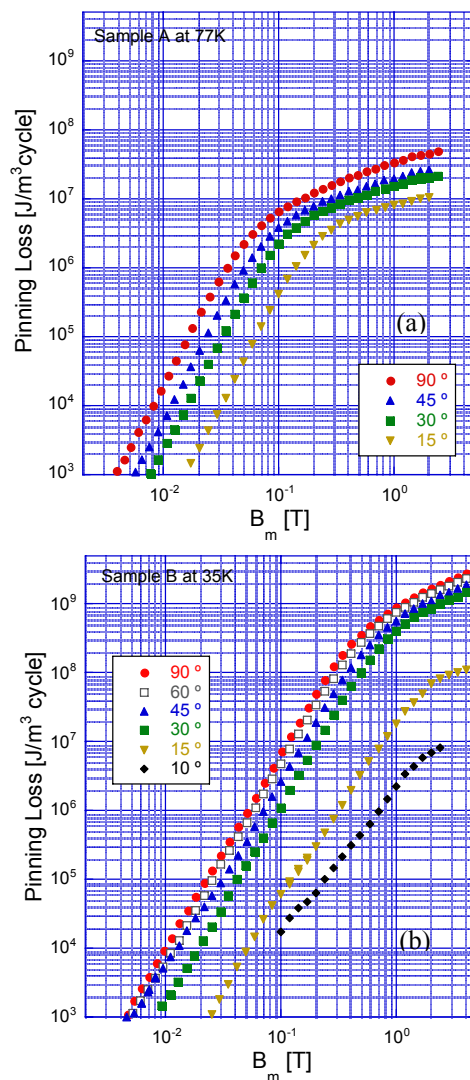


図11 (a) 試料A、(b) 試料Bのピンニング損失

らと言って、これを J_c 減少の証しとするのは間違いである。残念ながら、テープ面に平行な方向の磁化およびこれによるピンニング損失についての知見は現時点では得られておらず、今後の研究を待たなければならない。しかしながら、少なくともこの新現象は、系統的な $B \cdot T \cdot \theta \cdot \Delta\phi$ 依存性を有する。図8 (a) (b) に示すように同じ試料、同じ温度 T で磁界 B が高くなるだけ、あるいは、図7 (a) (b) に示すように同じ磁界 B で温度 T が低くなるだけで発現し、顕著になるのである。他の条件パラメータについても同様である。等方的超電導体についてMaxwell方程式を解く限り、このような現象の発現は説明できない。現象の統合的説明には異方性を考慮した解釈が必要である。

我々は、この現象はREBCO超電導体の結晶構造・超電導特性の異方性に起因する磁氣的相転移現象であろうと考えている。すなわち。外部磁界の変化(増減・印加方向の切替)をトリガーとして、磁束の侵入の仕方(方向)が変わっていると推定している。なぜ変わるのか？

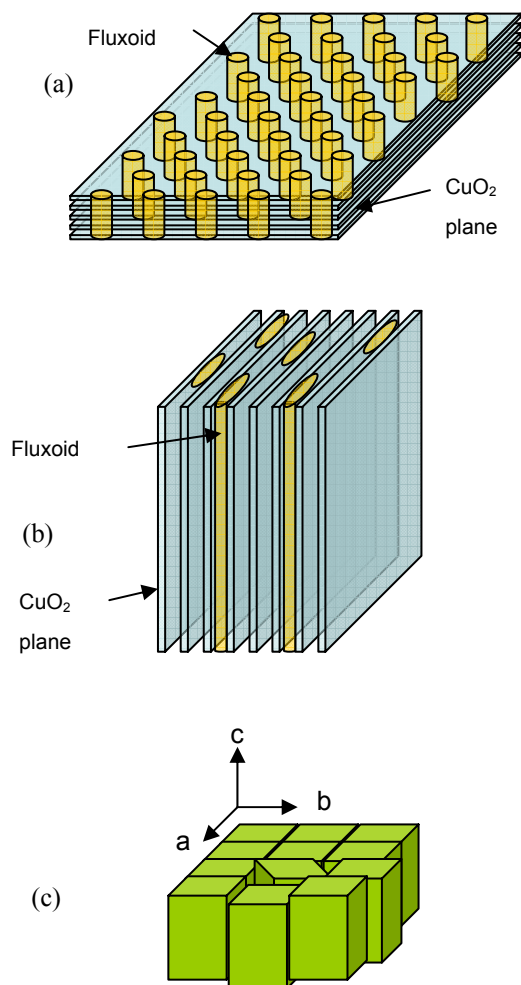


図12 磁束線がテープ面に (a) 垂直に侵入する場合、(b) 平行に侵入する場合の概念図。(c) 結晶軸がずれた結晶粒が存在する場合の概念図。

ここにREBCO超電導体の構造・超電導特性の異方性が介在する。

図12 (a) に示すように、テープ面に垂直に磁束が侵入する場合、量子化された磁束線はCuO₂超電導層を幾重にも貫く。磁束線は、中心において超電導電子密度がゼロである常電導コアであるから、この部分の超電導性を破壊する。超電導体は、臨界温度 T_c 以下の温度において超電導状態に遷移するほうが凝縮エネルギーの分だけエネルギーが低く、より安定であるので超電導状態になるのであるから、磁束線の侵入により部分的に常電導状態になれば、その分だけエネルギーが上昇し、不安定になる。これに対し、図12 (b) のようにCuO₂超電導層に平行に侵入する場合には、幾分かの影響はあるにしても、磁束線は超電導性を壊さずエネルギーは上昇しない。この磁束線の侵入方向によるエネルギー差は、磁界が高ければ高いほど(磁束線の本数が増えることから)、また温度が低ければ低いほど(凝縮エネルギーの差が大きくなることから)、大きくなる。磁界が高いほ

ど、温度が低いほど、磁束はCuO₂平面すなわちテープ平面に平行に侵入しやすいのである。これは新現象の傾向をよく説明できる。

新現象の θ 依存性は言うまでもないが、 $\Delta\phi$ 依存性は下記のように説明される。図12 (c) に示すように結晶軸がずれている部分がある場合、この周囲には超電導特性、 J_c 特性が低い部分が存在し、ここを磁束線が透過しやすくなる。すなわち、 $\Delta\phi$ が大きく、図12 (c) に示すような部分が多い場合には、磁束線がテープ面に垂直に侵入しやすいのである。これも新現象の傾向をよく説明できる。

6. まとめ

現在は、まだ、新現象の発現およびこれによる磁化・ピンニング損失の低減に関して、磁界、温度、磁界印加角度等環境パラメータについての制約があるが、現在3°程度の $\Delta\phi$ をより小さくすることにより、新現象はより広い条件下で発現するようになるものと期待される。「1世紀に亘る臨界状態モデルの束縛」からの解放は、「超電導」に高電流密度性とともに真の極低損失性をもたらし、超電導線材・システムの設計の自由度を飛躍的に高め、次世紀における超電導技術の爆発的導入・普及を推進するものと考えられる。

参考文献

- [1] M. Iwakuma, A. Ibi, T. Izumi and Y. Shiohara: Supercond. Sci. Technol. **23** No.7 (2010) Article No. 075009.
- [2] 下山淳一:「とことんやさしい超伝導の本」日刊工業新聞社 (2003).
- [3] G. Calestani: "High Temperature Superconductivity Models and Measurements", Singapore: World Scientific (1996) pp.1-40.
- [4] Y. Shiohara et al: Physica C **463-465** (2007) 1-6.
- [5] 船木和夫、住吉文夫:「多芯線と導体」産業図書 (1995).
- [6] M. Iwakuma et al: Physica C **469** (2009) 1726-1732.
- [7] F. Irie and K. Yamafuji: J. Phys. Soc. Japan **23** (1967) 255.
- [8] M. Iwakuma et al: Supercond. Sci. Technol. **16** (2003) 545-556.

<トピックス 3>

Bi2223 超電導線材開発の最近の進展

Progress in the development of Bi2223
superconducting long length wires

住友電気工業株式会社
超電導・エネルギー技術開発部

小林 慎一

Sumitomo Electric Industries, Ltd
Superconductivity & Energy technology Division
S. Kobayashi

1. はじめに

Bi系超電導体が発見されてから22年余の歳月が過ぎており[1]、この間、様々な角度から研究が進められてきた。我々のグループでは、Bi系超電導体の中で最も臨界温度 T_c が高いBi2223 ($\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$) 超電導体を工業的に利用するための線材化開発を1988年の材料発見当初より進めており、高温超電導線材の先陣を切って、送電線、各種超電導磁石、超電導モータなどの開発、実証デモに供給を行っている[2-5]。

Bi系超電導体を始めとする高温超電導体を線材化するにあたって、最も考慮すべきポイントは、高温超電導線材の超電導フィラメントは多結晶集合組織で構成され、超電導電流は結晶粒界で抑制されるということである。結晶粒界の影響は、結晶粒界傾角が大きくなるにともない、臨界電流密度 J_c が指数関数的に低下する[6-8]。つまり、結晶粒界において、超電導電流のブロックをどのように改善するかが重要であり、高温超電導材料の特徴に合せた製法を使って、ランダムに成長する結晶方位を整えることと、結晶粒界に析出する不純物相の生成を抑制することと考える。Bi2223超電導体の場合、PIT (Powder-in-tube) 法で比較的容易に配向組織を得ることができる[9]。このプロセスは、ある仕込組成で混合した粉末を金属パイプ (Bi2223の場合は銀を使用。) に充填し、線引き加工することで線材化するプロセスである。Bi2223超電導線材の構造は、幅 4.3 ± 0.3 mm、厚み 0.23 ± 0.03 mmのテープ形状をしており、銀テープ線内部に約120本のBi2223超電導フィラメントを配置する。線材単長は最大2 kmまで製造可能であり、フラットな臨界電流 I_c 分布を持つ[10]。Bi系超電導体の結晶構造はアスペクト比が大きい板状結晶である利点により、Y系超電導体を線材化利用する際に必要とされる2軸配向制御なしでも、現状液体窒素中で最高 I_c が250 Aの高温超電導線材の製造を可能にする。さらに、Bi2223超電導体の生成反応はBi2212からの包晶反応

で進むことも材料的な特徴で、超電導フィラメント周囲の銀界面に沿って1軸方位に高配向化した組織として成長しやすい。一方、東大下山グループとの共同研究の成果からは、Bi2223の金属組成制御を進めると、 T_c が117.8 Kまで上昇することが判っている[11]。さらにBi2212単結晶では、金属組成を定比組成に近づけると T_c の上昇とともに J_c が改善されることが報告[12]されており、Bi系超電導体は電氣的磁氣的異方性が大きいため、本質的に磁場下での臨界電流特性に優れない物質と言われるが、材料に合わせた製造条件の最適化は、まだまだBi2223線材の超電導特性を改善するはずである。特にBi2223線材における金属組成や酸素量の制御は、Bi2223多結晶体の結晶粒間電流特性を改善し、超電導電流特性のさらなる向上を期待させる。本稿では、Bi2223超電導線材の最近の開発トピックスについて紹介する。

2. Bi2223線材の I_c 記録の変遷

図1に液体窒素温度 (77 K)、自己磁場中でのBi2223線材の臨界電流 I_c の最高記録の変遷を示す。我々のグループの線材開発の歴史でもある。 I_c の向上の跳びは製造技術のブレークスルーによるもので、2000年までにはkm級の長尺化の基本技術が確立し、2003年には加圧焼結法 (Controlled Over Pressure sintering : CT-OP) を開発した[13]ことで、特に長尺線において飛躍的に I_c が向上した。最近の成果では、短尺線では最高250 Aに達し、km級長尺線では200 Aに到達している。また、量産レベルとしては、160~180 A級の長尺線材の供給が可能である。

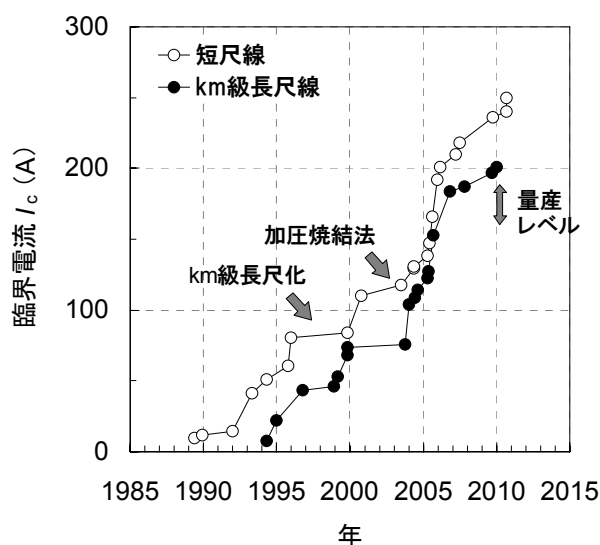


図1. Bi2223線材の臨界電流向上の推移

Bi2223超電導線材の I_c 特性の向上および長尺均一化を実現した加圧焼結法は、約300気圧のガス圧のもとで2次焼成を行うため、線材内の超電導フィラメントに空隙がほぼ無い状態を作ることができる。Bi2212超電導体の板状結晶をベースに包晶反応によりBi2223結晶が生成するので、大気焼結法では、ランダムに成長するBi2223結晶同士が干渉して、線材フィラメントは隙間の多い組織となる。対して、加圧焼結法は、Bi2223生成反応中に線材外側から外圧を約300気圧掛けるため、結晶成長方位もある程度拘束することができ、線材内に緻密な超電導フィラメントを得ることができる。図2に線材フィラメントのSEM観察像を示す。従来の大気圧下で焼結した場合と、加圧焼結した場合では組織に大きな違いが出る。 I_c 特性の向上は、結晶粒間電流特性が改善しているためと考えられ、さらに機械的な特性も改善する。これは線材をセラミックスのBi2223フィラメントと銀との複合材料と考えた時に、フィラメントの機械強度が改善されることに対応する。液体窒素中での使用によりフィラメントに液体窒素が浸み込んで急速昇温時に線材が膨れ、局部的に臨界電流が低下するといった現象も防止する効果もある。また製造中の欠陥発生も抑制できることから長尺線材の製造歩留まりも改善され、工業的な生

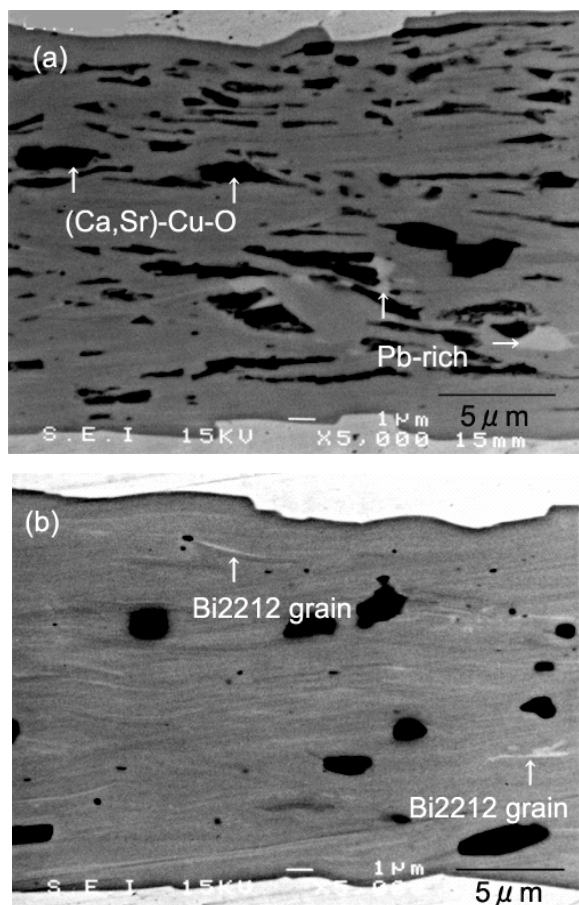


図2. Bi2223線材フィラメントのSEM像。
(a) 大気焼成、(b) 加圧焼成。 [13]

産手法として加圧焼結線材(DI-BSCCO線材)を確立した。しかしながら、線材フィラメント内には依然として多くの不純物(SEMの黒い部分は、アルカリ土類金属と銅の酸化物。白い層はBi2212など)が残っており、線材内のBi2223の化学組成は仕込組成よりもずれていることが推測できる。このように線材製造の観点から、更なる性能向上の可能性が多く残されていると考えているが、 I_c はどこまで伸びるかという興味がある。九州大学の木須グループでは、走査型ホール素子磁気顕微鏡システムを用いた200 A (77 K、自己磁場中)線材の幅方向の特性分布を測定した結果、線材中央に臨界電流密度のピーク値が存在し、この部分の臨界電流密度が線材幅方向に均一に分布すると仮定すれば、現状の組織レベルでも臨界電流値は300 Aに上昇すると報告している[14]。

3. 化学的組成制御と物性

前節でも述べたようにBi2223線材にとって、加圧焼結法の確立は、従来の大気焼結法に比べて超電導特性の均一性に優れた線材の開発を可能にした。しかしながら、図2からも判る様に、フィラメント内に多くの不純物相が残っている。Bi系超電導体における金属組成の不定比性が臨界電流特性に影響し、定比金属組成近傍で J_c が急激に高くなる[11]特性は、キャリアドープ状態や電氣的磁氣的異方性に直接影響する不定比酸素量やPbドープ量などの制御の重要性を認識させる。東大との共同研究においてもBi2223超伝導線材の T_c が117.8 Kまで上昇することが判明している。大気中ポストアニールで進むこのBi2223超電導体の高 T_c 化は、結晶粒界にPb3221相が析出する副作用があり、現時点では T_c 向上が直接 I_c 向上に生かせていない。図3に T_c と I_c が直線的に変化する領域のデータを示した。特に T_c が106 Kから112 Kの範囲で I_c の上昇と比例関係を示している。 T_c はSQUID磁束計によるZFC (1 Oe) 磁化の温度依存性測定により調べた。さらにポストアニールを追加すると T_c は上昇するが、Pb3221相のBi2223結晶粒界への生成も同時に起こり、粒間電流特性の劣化により I_c は低下する。ただし、Pb3221相が生成した後のBi2223の T_c はさらに上昇を示すことから、 T_c が高いBi2223の金属組成は、仕込組成からずれていることが予測でき、線材化前のBi2223仕込組成の改善が重要であることに気づかされる。今後、Bi2223線材の粒間電流密度特性を損なわずに、 T_c を上昇させることができれば、図3の T_c と I_c の比例関係を延長させることができるはずである。

また、図4には酸素量を調整したときの液体窒素中自己磁場下での I_c 変化と20 K、3 T下での I_c の変化を示している。アニール条件を変えることで、Bi2223の酸素量の

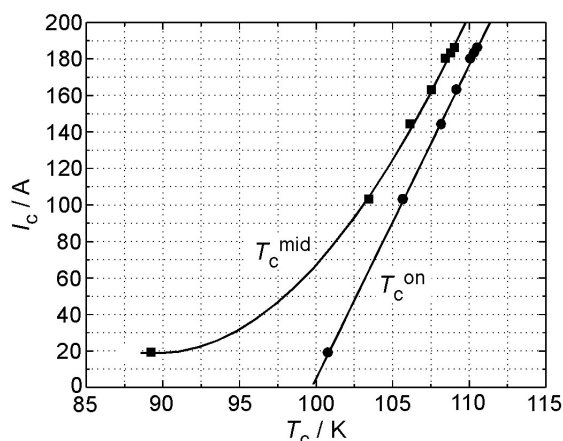


図3. Bi2223線材の T_c と液体窒素中、自己磁場下での I_c の関係 [10].

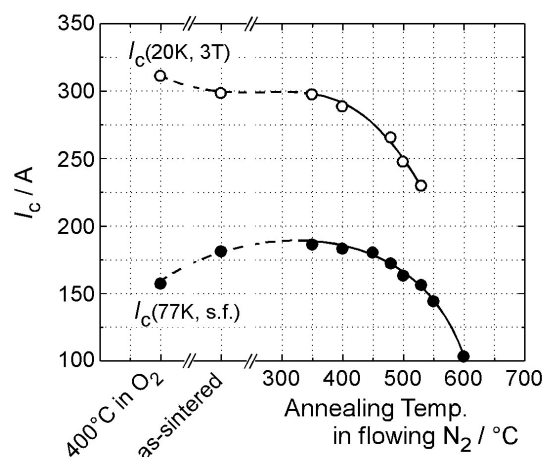


図4. ポストアニールによりBi2223線材の酸素量を調整した場合の I_c 変化 [10].

調整を行っており、 I_c に変化が起こる。400 °C、 O_2 (100%) 気流中でアニールしたBi2223のオーバードープ状態では、液体窒素中 I_c は低下する傾向を示すが、20 K、3 T下での I_c はむしろ上昇する傾向を示す。Bi2223線材では77 Kにおける臨界電流の磁場依存性が大きいので、例えば77 K近傍でのコイル、モータ応用は鉄心と組み合わせることが多く、空気で大きな磁場を発生させる場合は20 K程度まで冷却することが多い。使用環境によってはBi2223の酸素量をオーバードープ状態にした方が、Bi2223線材の I_c 特性を最大限引き出せることがわかる。

4. Bi2223線材の応用例

Bi2223超電導線材を使った電力用ケーブルへの供給では、これまでに東京電力との100 m級ケーブルの共同開発・長期試験[2,3]、米国エネルギー省のAlbanyプロジェクトに参画し、世界で初めて実系統に接続しての長期運転の成功[4,5]を経て、新エネルギー・産業技術総

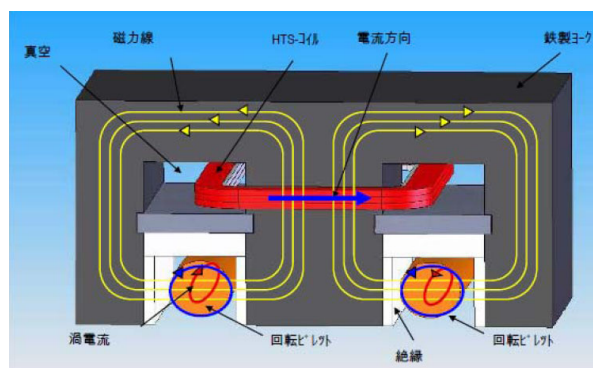


図5. 磁気ビレットヒータの動作原理

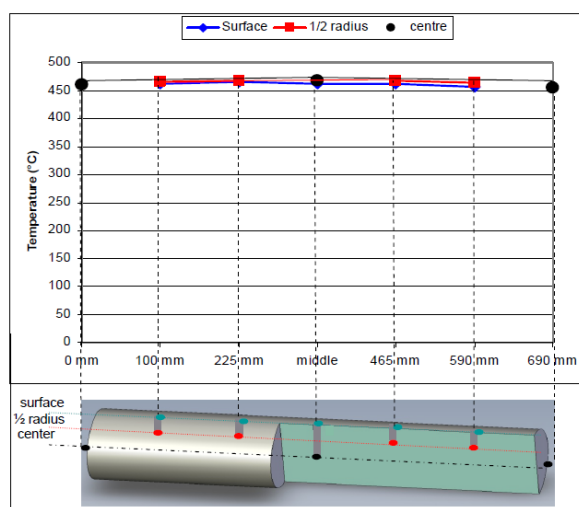


図6. 磁気ビレットヒータによる材料温度分布

合開発機構 (New Energy and Industrial Technology Development Organization : NEDO) プロジェクトとして、東京電力・住友電工・前川製作所が参画し、東京電力の旭変電所 (横浜市鶴見区) で送電実証試験およびシステム運用、運転、保守の実証を行う計画にBi2223線材を供給している。ケーブル容量は300 MVA (66 kV、3 kA)。系統容量は200 MVA) で中間ジョイントを有する200～300 mの線路である。旭変電所は1次側154 kV、2次側66 kVであり、2次側の66 kVのラインに超電導ケーブルが挿入される。実運転は2011～2012年にかけて実施される予定で、事前検証として本番と同一設計、構造の中間ジョイント付き30 mケーブルの試験を成功裏に終了し、本番のケーブル製造を開始した。その他、ロシア・中国での実証ケーブルプロジェクトへの線材供給も行っている。

超電導モータ応用では、最近川崎重工との450 kWモータ共同開発に成功するなどの実績がある。また、独Zenenergy社への線材供給を進めている。同社では、現時

点で高温超電導線材を使って唯一実用化が進んでいる押し出しビレットの誘導加熱装置(磁気ビレットヒータ)が開発されている。アルミ合金や銅合金などの押し出し加工においては、押し出し前に、電気炉、雰囲気炉、高周波誘導加熱等によってビレットの予熱が行われる。このうち誘導加熱方式は生産性が高く、広く用いられているが、高周波の表皮効果により、ビレットの表面と中心部に温度差ができやすく、合金種によっては採用困難な場合があった。これに対し、直流磁場中でビレットを回転させることによって誘導加熱すれば表皮効果が無くビレットの均一加熱が可能である(図5)。しかし、銅コイルでは電力消費が大きすぎ、実用化には至らなかったが、最近になって、コイルを超電導化することにより、消費電力を半減できる装置が開発され、欧州の大手アルミ合金、銅合金押し出し材メーカーで採用が始まり、実操業現場で稼働し始めている。温度分布の実測例を図6に示す。

5. まとめ

Bi2223線材の開発状況と応用例について述べた。 I_c 向上の変遷では、特に加圧焼結法開発以降、短尺線、km級長尺線の最高 I_c は急速に向上しており、さらに、Bi2223線材の金属組成や酸素量の調整が、Bi2223の高 T_c 化と粒間電流特性を改善し、 I_c の向上を持続させると考える。

I_c の向上は、電力用ケーブル、モータ、発電機、誘導加熱装置、高磁場マグネット等の応用製品において、電力品質やエネルギー効率の向上を可能とし、応用製品に必要な超電導線の使用量の削減も可能とするため、製品のコスト低減と小型・軽量化を実現し、高温超電導応用の可能性を広げるものと期待する。

謝辞

本稿で述べた研究はビスマス系超電導体の発見者である前田博士を初め多くの方々との共同研究によるものである。また、新技術事業団(現科学技術振興機構)やNEDOからの援助によるプロジェクトの成果も多く含まれる。共同研究者の方々の氏名を記して謝意を表したい。

物質・材料研究機構:前田博士、熊倉センター長、北口博士、東京大学:下山准教授、九州大学:木須教授、井上助教、東京電力:本庄リーダー初め関係各位

参考文献

- [1] H. Maeda, Y. Tanaka, M. Fukutomi, and T. Asano: Jpn. J. Appl. Phys. **27** (1988) L209-210.
- [2] S. Honjo, M. Shimodate, Y. Takahashi, T. Masuda, H. Yumura, C. Suzawa, S. Isojima and H. Suzuki : IEEE Trans. Applied. Superconductivity **13** (2003) 1952
- [3] T. Masuda, T. Kato, M. Hirose and K. Sato : IEEJ Transaction on Power and Energy B **126** (2006) 827
- [4] H. Yumura, T. Masuda, M. Watanabe, H. Takigawa, Y. Ashibe, H. Ito, M. Hirose, K. Yatasuka, K. Sato and R. Hata : SEI TECHNICAL REVIEW, No. **64** (2007) 27
- [5] T. Masuda, H. Yumura, M. Watanabe, H. Takigawa, Y. Ashibe, C. Suzawa, H. Ito, M. Hirose, K. Sato, S. Isojima, C. Weber, R. Lee and J. Moscovici : IEEE Trans. Applied Superconductivity **17** (2007) 1648
- [6] D. Dimos, P. Chaudhari, and F. K. LeGoues: Phys. Rev. Lett. **61** (1988) 219-222.
- [7] D. C. Larbalestier, A. Gurevich, D. M. Feldmann, and A. Polyanskii: Nature **414** (2001) 368.
- [8] R. Held, C. W. Schneider, and J. Marnnhart: Phys. Rev. B **79** (2009) 014515.
- [9] 林和彦: 応用物理 **79** (2010) 3-13.
- [10] T. Nakashima, S. Kobayashi, T. Kagiya, K. Yamazaki, M. Kikuchi, S. Yamade, K. Hayashi, K. Sato, J. Shimoyama, H. Kitaguchi, H. Kumakura: Proc. of ISS2010 (to be published).
- [11] J. Shimoyama, T. Kato, S. Kobayashi, K. Yamazaki, K. Hayashi and K. Sato: Jpn. J. Appl. Phys. **44** (2005) L1525-L1528.
- [12] S. Uchida, J. Shimoyama, T. Makise, S. Horii and K. Kishio: J. Phys. Conf. Series **43** (2006) 231-234.
- [13] S. Kobayashi, T. Kato, K. Yamazaki, K. Ohkura, K. Fujino, J. Fujikami, E. Ueno, N. Ayai, M. Kikuchi, K. Hayashi, K. Sato and R. Hata: IEEE Trans. Appl. Supercond. **15** (2005) 2534-2537.
- [14] Y. Honda, K. Higashikawa, M. Inoue, T. Kiss, N. Ayai, M. Kikuchi, K. Hayashi and K. Sato : Physica C **470** (2010) 1377-1379.

<会議報告 1>

第23回超電導国際会議 (ISS2010) 会議報告 Report on the 23rd International Symposium on Superconductivity

(1) Physics and Chemistry

広島大学 総合科学研究科
杉本 暁

Graduate school of Integrated Arts and Sciences,
Hiroshima University
A. Sugimoto

今年で23回目を迎えた超電導国際会議 (International Symposium on Superconductivity, ISS2010) は、平成22年11月1日から3日まで、昨年までと同様、茨城県つくば市の国際会議場エポカルつくばで行われた。

PC (Physics and Chemistry) 分野は主に(新)物質合成や物性測定、理論などのジャンルがこのセッションにあたる。PC分野の講演数は、口頭25件、ポスター65件であった。この分野の特徴的なことは、中心の話題が、2008年に東工大の細野教授らのグループによって発見された鉄系超伝導体の話題へと、ここ2、3年で大きくシフトしている点である。口頭発表された講演での対象物質をカウントしてみると、(多少の重複もあるが)鉄系超伝導体17件、銅酸化物3件、その他の物質(新物質、Ru系その他)が7件であった。25件の口頭発表のうち鉄系超伝導体が約7割弱を占めていることになり、注目の高さが伺われる。一方、ポスターセッション(PC分野)では65件の講演があったが、そのうち鉄系が26件、銅酸化物23件、その他の物質(トポロジカル超伝導、Nb系など従来超伝導体、硼化物、Ru酸化物など)が13件であった。それでも銅酸化物に関する研究も多く行われていることがわかり、地道な研究成果が披露されていたことがわかる。大学院生をはじめとする若い研究者の発表も多く、活発な意見交換がなされていたようだ。アジア、欧米等海外からの講演者も比較的多くみられ、国内学会とは一味違った発表の場を得られていることは、研究を始めたばかりの大学院生等には非常に良い機会であったと思われる。こういった意味でも本会議が毎年行われている意義は非常に大きいだろう。以下、紙面の都合上全ては紹介しきれないのが心苦しいが、いくつかの講演を紹介する。

口頭発表は2日目より始まり、主として鉄系超伝導の話題が中心であった。最初は鉄系超伝導発見者の一人であるKamihara (慶大) の招待講演で、鉄砒素超伝導体の発見の経緯から鉄系超伝導体ファミリーのレビュー

一的解説まで、ユーモアを交えて興味深く語られた。つづいて鉄系の不純物効果を中心とした理論と実験の成果が紹介された。実験では、Nakajima (東大) らの H^+ によるポイント欠陥、J.J. Li (NIMS) らのZn非磁性の不純物効果等の研究結果が報告された。理論においては5バンドモデル等に基づいた不純物効果の成果が、Onari (名大) ら及びNagai (原研) らによって紹介され、実験等との類似点や相違点などが議論された。Hirschfeld (フロリダ大) の招待講演では、FeAs系の5バンド計算などにより鮮やかなフェルミ面形状が紹介され、またCarrington (ブリストル大) はFeAsのドハースファンアルフェン効果による実験からのフェルミ面描像を示した。そのほかには、Fe (SeTe) 薄膜のホール特性 (Tsukada (電中研) ら) とテラヘルツ表面電気伝導の実験 (Nakamura (東大) ら) が紹介された。また、鉄系における中性子散乱実験 (Shamoto (原研) ら)、NMR実験 (Ishida (京大) ら) 等の最新の研究成果も報告された。Yanagisawa (産総研) らは、GLマルチバンドによる理論計算により異符号ギャップによるフラクショナル磁束が生成される可能性があるという興味深い結果を紹介した。Machida (原研) らは、1111系の第一原理計算によるspin-orbital couplingを紹介した。

銅酸化物超伝導体については、Bollinger (ブルックヘブン国立研究所) らのMBEによるLSCO薄膜、Yamamoto (NTT) らのMBEによる Pr_2CuO_4 T' 構造薄膜の2ステップアニールを用いた作製、そしてUykur (阪大) らによるY/Ca123系の in-plane 光学スペクトル研究の講演があった。その他の超伝導体の中では、Ru酸化物などp波対称性に関連するものが目立った。Kashiwaya (産総研) らによる Sr_2RuO_4 のステップエッジ接合のトンネルスペクトル研究、Niwa (阪府大) らによるRu酸化物等におけるp波の半整数量子化磁束に関する理論が紹介された。J. Lee (ブルックヘブン国立研究所) はSTM/Sにより $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ 及び (Ba,Ca) (Fe,Co) $_2\text{As}_2$ のネマティックな振舞いやツインバウンダリ1次元鎖などを鮮やかに示した。Morinari (京大) らは、ディラックフェルミオンの理論を紹介し、グラフェンとの関連性を発表した。新超伝導物質の報告も目立った。Nohara (岡山大) らは、電子ドープ CaFe_2As_2 ($T_{\text{cmax}} \sim 38$ K) を、Takayama (東大) らは (Sr/Ca/La) Pt_3P ($T_{\text{cmax}} = 8.4$ K) を、Kubozono (岡山大) らは、有機伝導体パイシン ($\text{C}_{22}\text{H}_{14}$) にアルカリ金属をドープした物質で $T_{\text{cmax}} = 18$ Kを、各々興味深い物性を持つ新物質として報告した。

最終日の3日午後には、PC分野のポスターセッションが開かれた。Deguchi (NIMS) らのFe (Te,S) のアニールによる T_c 上昇に関する研究は、アルコールによる T_c 上昇効果と関連して、11月2日付け朝日新聞に“赤ワイン

効果”超伝導と題され話題を提供した。広く世間にアピールするという意味でも非常に意義深いといえる。そのほかには、Huehne (IFW Dresden) らのピエゾ素子基板上におけるLSCO薄膜、122薄膜の T_c 上昇(圧力効果)の試み等、国内学会では味わえない多様性に富んだ興味深いトピックスも多く見られた。ポスター全体をしてみるだけでも昨今の研究傾向が伺い知ることができ、専門外の研究者にも興味深いものであったと思われる。今回のISSは久しぶりに会場が変わるそうで、タワーホール船堀(東京)において2011年10月24日～26日開催予定とのことである。盛大に開催されることを期待したい。

(2) Bulk

鉄道総合技術研究所
富田 優
Railway Technical Research Institute
M. Tomita

バルクセッションの発表件数は40件(招待講演5件、口頭発表4件、ポスター発表31件)であった。発表内容の内訳としては、RE123が30件、RE124が2件、RE214が1件、 MgB_2 が3件、FeAs系が3件、Tl1223が1件であった。

会議全体の印象としては、バルクの基礎特性向上から各種応用検討まで様々な発表があり、着実に実用化への道のりを歩んでいるように感じられた。今後は如何にバルク体をアプリケーションに展開していくか、アプリケーションの試作に関する発表が増えていくことだろう(今回の発表ではアプリケーションの試作は2件)。

以下、発表の概要をいくつか紹介する。

バルクとして最も盛んに研究されているRE123バルクでは、基礎理論に関する発表が2件(RE211相と量子化磁束の位置関係、表皮効果による表皮抵抗と、ロンドンの侵入長や磁束線の粘性との関係)、基礎物性測定(破壊靱性測定、熱伝導率測定、実効活性化エネルギー測定)に関する発表が3件行われた。また基礎物性向上に関する発表が9件行われた。主に粒径制御、ナノ粒子添加などによる J_c 、捕捉磁場、 H_{irr} 、機械強度向上を目指した研究であり、添加物としては $Y_2Ba_4CuMO_y$ 、 Y_2O_3 、Ca、PVA、バリウム化合物などが用いられていた。一方で、RE123バルクの作製法の改良に関する発表も4件行われた。鉄道総研のMiryalaらはバッチ方式による高性能バルク作製に関する研究を報告した。1台の電気炉で複数のバルク材が製作できることから、製造コストの削減に期待される。名古屋大のOginoらはRE123で問題となる種結晶について、Superheating 効果を用いてcooled-seedingで作製可能となる手法を報告した。韓

国原子力研究所のLeeらは種結晶と母相($RE_{123} + Ba_3Cu_5O_8$)との反応を抑制する方法として、種結晶と母相の間にRE211のペレットを入れる手法を報告した。陝西師範大学のYang氏らは母相として $RE_2BaCuO_5 + 9BaCuO_2 + 6CuO$ や $RE_2O_3 + 10BaCuO_2 + 6CuO$ が用いられることを報告した。また着磁法に関する発表も3件あり、パルス着磁や永久磁石+パルス着磁などの検討結果が報告された。

RE123バルクのアプリケーションに向けた研究としては9件発表があり、特にリエージュ大学のVanderbemdenらは残留磁化についてモデル化を行い、実験結果との比較を報告した。残留磁化は機器の稼働時間に影響を与えることが知られており、今後のバルク体のアプリケーションに向けて重要な示唆を与える講演であった。その他、応用では、東北大のTsudaらの超電導免振装置や鉄道総研のTomitaらの大型の高温超電導バルク材を使用した、ポータブルな簡易型超電導マグネット装置の開発等があった。マグネット装置は直径80 mm、内径50 mm、厚さ20 mmのリング状バルク材に樹脂含浸補強を施し、10個積層した構造で、液体窒素冷却により、半径45 mmの作業空間に2 T以上磁場(中心2.59 T)を発生できる。NMR、MRI装置の他、バルク体の捕捉用マグネットとしても使用でき、発表では実際に30 mm ϕ のバルク体の着磁例を示した。

RE124バルクでは RE^{3+} イオンの磁気異方性を利用し、回転変調磁場を用いた3軸配向が可能であると報告があった。回転変調磁場を用いた3軸配向は京大のKimuraらによって考案された方法であり、新たな結晶配向手法として高温超電導体への応用が期待される。

MgB_2 バルクでは J_c 向上のためにW、Co、ナノSiC、ポリアクリル亜鉛化合物などの添加効果に関する報告が2件あった。また、東京大学のYamamotoらは MgB_2 超電導磁石の開発を行い、20 mm ϕ 、1.3 T(@13 K)の捕捉磁場を報告した。RE123と比べ動作温度領域は低いが、 MgB_2 を超電導磁石として用いることによって、これまでにない均一な磁場発生が得られる可能性もあり、今後の展開に期待される。

(3) Wires, Tapes and Characterization

昭和電線ケーブルシステム株式会社
青木 裕治
SWCC Showa Cable Systems Co., Ltd.
Y. Aoki

国際超電導シンポジウム(ISS2010)が(財)国際超電導産業技術研究センター(ISTEC)によって、平成22年11月1日～3日の3日間にわたりエポカルつくば(茨城県

つくば市)において開催された。今回のシンポジウムは23各国から総勢681名の参加者を集め、その内訳は海外192名、国内489名というものだった。発表件数も、口頭発表120件、ポスター発表374件、計494件(前年比46件増)と盛況なものとなった。

Wires, Tapes and Characterizationのカテゴリーの中で扱われた発表は口答発表25件、ポスター発表105件であり、総計で130件の発表が行われた。その内訳はMgB₂線材17件、BSCCO線材13件、コーテッドコンダクターが97件、その他3件となっており、他の線材に比べて圧倒的な発表件数となっている。以下、コーテッドコンダクターについて筆者の印象に残った講演について記述する。

特別基調講演においてSeong氏(KERI)が韓国における最近の線材開発の動向と応用研究について紹介した。基調講演ではフジクラの飯島氏(PL-4)とSuper Power社のSelvamanickam氏(ヒューストン大所属)(PL-5)から熾烈な国際開発競争の現場について報告がなされた。コーテッドコンダクターの比較に用いられる数値として $I_c \cdot L$ 積であるが、これまでは2009年8月にSuper Power社によって報告されたIBAD-MOCVD線材の1,065 m $\times$ 282 A/cm幅、 $I_c \cdot L=300$ kAmが世界最高の記録となっていた。今回、フジクラではIBAD-MgO基板の適用とHot-Wall型基板加熱システムの開発により厚膜高 I_c 化に成功し、IBAD-PLD線材で615 m $\times$ 609 A/cm幅の $I_c \cdot L=375$ kAmの記録を達成したことを報告した。久しぶりの記録更新であり、今回のISSの大きなトピックスとなった。また低コストプロセスとして期待されているTFA-MOD線材ではAMSC社が配向金属基板(RABiTS)上において540 m $\times$ 466 A/cm幅の $I_c \cdot L=252$ kAmの作製に成功したことを同社のRupich氏が報告(WT-1)した。

また韓国からは、KERIから技術移転を受けたベンチャー企業であるSuNAM社がIBAD-MgO基板上に共蒸着法で長尺の超電導薄膜を形成するプロセスで500 m $\times$ 310 A/cm幅、 $I_c \cdot L=155$ kAmの線材作製に成功したとして、Moon氏が報告(WT-3)した。SuNAM社における線材開発の進捗は急ピッチであり、これまでの日米による線材開発競争の構造に第3極が誕生した事を示している。

以前より短尺試料において人工ピン止め点の導入など、磁場中特性の改善が行われてきたが、機器応用を見据えた開発が進められている。Selvamanickam氏(PL-5)によると、SuperPower社とヒューストン大の共同研究では、MOCVD法においてYGdBCO超電導層にBZOロッドを導入し、添加Zr量とY/Gdの適正化を図り、 $I_c = \sim 100$ A/cm幅(@75 K, 1 T)、 $I_c = \sim 20$ A/cm幅(@75

K, 3 T)を達成した。ISTEC(WT-8)の報告では、GdBCO線材(PLD)で $I_c = 33$ A/cm幅(@77 K, 3 T)を50 m線材で達成したとのことであり、国内でも人工ピン導入線材の長尺化が進展していることを印象づけた。

交流応用の観点からは、低交流損失線材の研究が進められており、京都大の雨宮氏による細線化線材(WT-16)KITのGoldacker氏によるローベル導体などについても活発な議論がなされた。九州大学の岩熊氏は低損失化について注目すべき発表(WT-14)をした。高い配向性を持つコーテッドコンダクターはヒステリシス損失が劇的に小さくなるというものであり、その発現条件は現在のところ限られているものの、将来の応用に向けて可能性を示唆する新たな現象とのことである。

今回のISSで顕著であったことは、線材開発を担当する機関から線材価格を含めた長期ビジョンが語られ始めたことである。SuperPower社は2015年に現在の\$400 kA/mを\$50 kA/mまでのコストダウンを目指すとしており、フジクラも2015年に同レベルの3,000円/mで500 Aの線材を提供するとしている。SuNAM社2015年に\$80 kA/m、2023年に\$25 kA/mにする計画を示しており、世界規模でコーテッドコンダクターの実用化に向けた動きが新たなフェイズに変わりつつあることを意識させる会議となった。

(4) Thin films and devices

(財)国際超電導産業技術研究センター

蓮尾 信也

International Superconductivity Technology Center

S. Hasuo

薄膜・デバイス関係の発表から主なものを紹介する。この関連では、特別基調講演まで含めると、約60件の発表があった。このうち、鉄系薄膜に関する発表が12件と多かった。デバイス関係では、SQUID関連が11件、センサ関連が8件、デジタル関連が6件であった。世界的な動向ではあるが、例年に比べるとセンサ関係が増えてきている。

特別基調講演として、ISTECの田辺氏から「ジョセフソン接合技術の進歩と日本の超電導エレクトロニクス現状」というタイトルで、歴史から現状、将来展望にわたる幅広い内容が紹介された。各種ジョセフソン素子の紹介、SQUID応用、デジタル回路、SISなどのほかに、TES(転移端センサ)、STJ(超電導トンネル接合)、SSPD(超電導単一光子検出器)、SSLD(超電導ストリッブ線路検出器)などが紹介された。とくに、集積回路技術を応用した高温超電導体SQUIDは検出コイルまで一体化して作れるので、いろいろな非破壊検査に利用で

きることが示された。

基調講演の一つとして、米国の国立標準技術研究所 (NIST) の Irwin 氏が、ミリ波・サブミリ波検出器の現状を紹介した。直接検出器として TES, STJ, MKID (Microwave Kinetic Inductance Detector), ナノブリッジなどがあり、コヒーレント検出器として SIS (Superconductor/Insulator/Superconductor) や HEB (Hot Electron Bolometer) があることが紹介された。それらのうち主に TES と MKID の性能比較を詳細に行った。通常の TES アレイは 10,000 ピクセル以上のものを作るのは難しいが、低雑音 SQUID 増幅器と組み合わせることにより信号多重が容易になり、大規模アレイを可能にする。また、MKID は長波長領域で感度が悪くなるが、量子限界増幅器と組み合わせることにより解決できると述べた。

CNR の Casaburi 氏は、並列接続による SSLD の性能改善について報告した。超電導ストリップ線路を用いた光子検出器では、線路の長さを長くすると感度は上がるが、インダクタンスが増えるために応答時間が遅くなる。そこで、ストリップ線路を並列接続し、感度も落とさず応答時間も高速にすることを試みた。9 nm 厚で 100 nm 幅の NbN 薄膜を用いて、立ち上がり時間 3 ns、立下り時間 19 ns の高速応答を実現した。

産総研の志岐氏は STJ を用いた X 線検出の報告をした。軟 X 線を用いて軽元素 (Li, Br, B, C, N, O など) の X 線吸収スペクトルを調べている。酸素の $K\alpha$ スペクトルを 525 eV 領域で 13 eV 程度のエネルギー分解能が得られている。現在は 1 ピクセルであるが、100 ピクセル素子も開発中である。

産総研の鈴木氏は SSLD を用いた生体高分子質量分析について報告した。超電導の細い (1 μm 程度) ストリップ線路を用いて SSLD を作り、高分子の質量分析を行っている。通常では質量が 2 M で電荷が 2 価の高分子は、質量が M で電荷が 1 価のものと区別が付かない。しかし、SSLD のバイアス電流を変えることにより、この識別ができることを見出した。現在は感度を高めて、かつ応答時間を短くするために、SSLD を小さくし、それを多数個並列接続することを進めている。

PTB の Burghoff 氏は SQUID を用いた低磁界 MRI の報告をした。地磁気程度の弱い磁界で NMR 共鳴を観測すると、その緩和時間が癌細胞と正常細胞で異なることが知られている。46 μT の磁界で脳の MRI 像を撮影した。3 $\times$ 3 mm^2 の空間分解能を持っている。同じ被験者で、通常の 1.5 T の MRI 像を撮影し、低磁界 MRI と比較すると明らかに違う像が見えている。これが何を意味するものかは現在検討中である。

名大の田中氏は SFQ 回路を用いた再構築可能なデータパス回路について報告した。SFQ 回路を用いた大

規模回路の開発に取り組んでいる。再構築可能なデータパス回路を設計し、その正常動作を確認した。この回路で 10,000 個以上のジョセフソン素子を含んでいる。これ以上の規模の回路を手で設計するのは困難なので、SFQ 回路に適した自動設計ツールの開発を行っている。

名大の藤巻氏は超電導センサの読み出しに SFQ 回路を用いるために、消費電力をさらに小さく方法を提案した。電源電圧を従来の 2.5 mV から 0.1 mV に下げても正常に動作することを示した。

ISTEC の佐藤氏は、低温超電導材料である Nb の集積回路技術を用いた極低温電流比較器 (CCC) の作製について報告した。CCC は標準電流と高精度に比較できる装置であるが、これまでは一つずつ手作りされていた。Nb のジョセフソン集積回路技術で用いられている多層配線技術を用いれば、集積回路を作るのと同じプロセスで CCC が作れることを示し、CCC としての動作を確認した。

名大の生田氏は、鉄系超電導体 $\text{LnFeAs}(\text{O}, \text{F})$ (Ln はランタノイド) の 1111 型の薄膜成長について報告した。GaAs および MgO 基板の Ln が Nd と La の場合についていずれも超電導になることを確認した。また CaF_2 基盤を用いて、鉄薄膜としてはこれまで報告された中で最も高い $T_c = 52 \text{ K}$ を得た。また、東工大の片瀬氏は、鉄系薄膜の粒界接合を用いて SQUID を作製した。初めての鉄系 SQUID である。

PTB の Khabipov 氏は、Nb 薄膜の間に強磁性体の CuNi をバリヤとして挟んだ π 接合の報告があった。この接合を用いて SFQ 回路を構成すれば、従来大きなインダクタンスを必要としていた SFQ ループに π 接合を挿入することにより、回路が小型化できるというメリットがある。そのほかにも、量子ビット回路や SQUID への応用が考えられる。

UCSB の Martinis 氏は量子ビット間の結合に共振器を用いることを提案した。この方法を用いれば、量子ビットの数を拡張することができる。

<会議報告 2>

第 76 回ワークショップ会議報告

Report on the 76th Workshop

(株)日立製作所 日立研究所

和久田 毅

Hitachi, Ltd., Hitachi Research Laboratory

T. Wakuda

昨年 12 月 15 日、合同ワークショップ「省エネ・低炭素

社会を目指す取り組みと超伝導」が、(社)応用物理学会超伝導分科会、(社)未踏科学技術協会超伝導科学技術研究会の主催および(社)低温工学協会の協賛にて開催された。場所は東京駅に隣接する埼玉大学東京ステーションカレッジで非常に利便性のよいところであった。注目されているテーマということもあり、ワークショップ参加者数は71人で会場はほぼ満席状態であった。

ワークショップのプログラムは6人の講師の講演形式であったが、前半の3件はまさに省エネ・低炭素社会実現に取り組んでいる現場サイドから、後半はそれに関連する超伝導実用化研究・開発に携わっているサイドからの講演であった。

「省エネ・低炭素社会に向けた次世代グリッド(TIPS)開発の取り組み」というタイトルで、(財)電力中央研究所の小林広武氏から、太陽光発電が系統に大量導入(戸建住宅の1/3~1/2に導入)された場合の課題や、それに対応するための需要地系統技術、需給一体形運用・制御技術についての説明がなされた。その中でヒートポンプ式給湯器の年中運転による余剰電力の活用が紹介され、これにより蓄電池等を含め系統制御機器の容量を2/3程度に削減できるとのことであった。

「省エネ・低炭素社会に向けた鉄道インフラの取り組み」というタイトルで、(財)鉄道総合技術研究所の奥井明伸氏から、鉄道における様々な省エネルギー技術についての説明があった。直流電気鉄道に関しては電圧降下対策と回生失効対策が必須、交流電気鉄道に関しては電源品質の維持が重要になるとのことであった。回生電力貯蔵装置はその制御手法が課題であるとのこと。学会等で耳にする超伝導フライホイールによる電力貯蔵や超伝導き電線についての話はなくちょっと意外であった。

「低炭素社会に向けたエコテクノロジーの取り組み」というタイトルで、(株)東芝の小林英樹氏により、低炭素社会へ向けた課題そしてそれを実現する技術を広く全般にわたって解説いただいた。蓄電装置についても触れられ、現時点ではリチウムイオン二次電池の価格は高すぎて現実的でないが、将来ロードマップ通りに性能が向上すればこれが主流になるであろうとのことであった。価格的にはSMESと競合するようになるとのこと。質疑応答で「超伝導はどうしたらスマートグリッドへ組み込まれるか?」という質問が出たが、コストと信頼性が重要とのこと。また、新興国、発展途上国で運転・保守ができるかどうか重要になるとのことであった。

前半の講演ではほとんど超伝導機器については触れられず、質疑応答では「超伝導という言葉が一回も出てきませんでしたね」というコメントも飛び出すほどであった。おそらく現在のところ省エネ・低炭素社会という分野

において超伝導は重要な役割を果たしておらず、また、超伝導機器はまだ現実的なものでないと認識されているのであろう。

後半は、超伝導開発サイドからの講演であり、(財)国際超伝導産業技術研究センターの和泉輝郎氏からは「電力応用に向けた超伝導材料開発の現状」でコーテッドコンダクタが実用化、普及に向けて着実に開発が進められていることが報告された。単にパフォーマンス向上だけではなく低コスト化・歩留向上技術にも取り組んでおり、最終目標の3円/Amのコストで線材ができるようになってきたとのこと。早期の普及に期待したい。

九州大学の岩熊成卓先生の「変電システムと超伝導応用機器」では、系統に組み込まれる超伝導変圧器は、低温超伝導線材は雷・開閉サージでクエンチするため不可、Bi系線材は交流損失が大きすぎて現実的でなく、コーテッドコンダクタのみで成立しようとのことであった。また、交流損失が劇的に減少するIwakuma効果にも触れ、今後、コーテッドコンダクタの性能向上により交流応用機器のみならずNMR、MRIなどの永久電流応用の可能性もあるとのことであった。

古河電気工業(株)の向山晋一氏から「次世代電力系統における超伝導送電システムの開発」で超伝導ケーブルの開発状況について説明があった。日本では地下敷設のための建設コストや送電ロスを考慮すると超伝導ケーブルにはメリットがあること。また、海外では長距離送電による系統連携がターゲットで開発加速中とのことであった。現在開発中の275 kV-3 kA超伝導ケーブルの状況について説明され、絶縁技術と交流損失低減がポイントということであった。

ワークショップで最も印象的であったのは、質疑応答の際、新エネルギーの開発・普及の障壁はコストという話におよんだ時の、JST北澤理事長の“日本の電力市場は15兆円、パチンコ産業は30兆円、コストパフォーマンスは重要だが安い電力を作りパチンコ産業を育成している”という旨のコメントであった。もともと先行していたはずの太陽光発電パネルは、国を挙げてPV(太陽電池)の育成・普及を推進しているドイツ、中国などの後塵を拝することになっている。未来に対する先行投資という考えを決して忘れてはならないのであろう。

省エネ・低炭素社会を実現しようとするとき、超伝導機器を含め単独の機器の開発だけでそれが実現できるはずがない。全体の舵取りと個々の技術の連携・統合が必要不可欠であろう。今回、超伝導普及のための素材は揃いつつあるも、超伝導業界と外部との対話が十分ではないことを考えさせられたワークショップであった。

社団法人未踏科学技術協会超伝導科学技術研究会
第 77 回ワークショップのご案内

「極限を測る超伝導技術の最前線」

先端科学技術は検出技術の進歩によって支えられています。超伝導検出器は他のデバイスでは実現できない究極の性能を有しているため、様々な先端科学技術分野でなくてはならないツールとして使われています。

本ワークショップでは、超伝導デバイスを用いた極限計測技術について第一線で活躍されている研究者の方々に話をさせていただきます。最初に、超伝導極限計測とは何かということを理解していただくためのチュートリアル講演を行います。続いて、全ての電気量の基準となる国家標準において用いられる超伝導量子標準について、最高感度の磁束計であるSQUID(超伝導量子干渉計)の医療応用について、それぞれ開発者の立場から講演を行ってまいります。また、表面に析出したレアアースなどの検出困難な物質を対象としたX線材料分析において、絶対的な安全が保障されている量子暗号通信において、ビッグバン以前のインフレーションの痕跡を探るCMB(宇宙マイクロ波背景輻射)の観測において、衛星を利用した地球環境測定において、それぞれユーザーの立場から超伝導検出器がなぜ必要で、どのように使われているのかについて述べていただきます。

これらの講演を通して、超伝導検出器の必要性をご理解いただき、今後の開発の方向性を議論したいと考えています。

日 時：平成 23 年 3 月 10 日(木) 13:30-17:45

場 所：東京大学 本郷キャンパス 武田ホール (武田先端知ビル)

〒113-0032 東京都文京区弥生 2-11-16 http://www.u-tokyo.ac.jp/campusmap/cam01_04_16_j.html

参加費：■未踏科学技術協会員/超伝導科学技術研究会員：参加費無料、資料代 2,000 円

■協賛学会：参加費 4,000 円、資料代 2,000 円

■一 般：参加費 5,000 円、資料代 2,000 円

■学 生：参加費無料、資料代 2,000 円

プログラム：

13:30-13:35	開会の挨拶	下山 淳一(東京大学)
13:35-14:20	わかったつもりになる超伝導検出器	前澤 正明(産業技術総合研究所)
14:20-14:50	超伝導技術を用いた量子電気標準の進展	金子 晋久(産業技術総合研究所)
14:50-15:20	高感度 SQUID の医療応用	上原 弦(金沢工業大学)
15:20-15:50	透過型電子顕微鏡の X 線分析装置としての 超伝導遷移端センサの応用	原 徹(物質・材料研究機構)
15:50-16:10	休憩	
16:10-16:40	超伝導単一光子検出器を用いた量子鍵配送技術	藤原 幹生(情報通信研究機構)
16:40-17:10	超伝導検出器によるビッグバン以前の宇宙観測	羽澄 昌史(高エネルギー加速器研究機構)
17:10-17:40	超伝導サブミリ波リム放射サウンダ(SMILES) ー超伝導技術が実現した、地球を見つめる目ー	佐野 琢己(宇宙航空研究開発機構)
17:40-17:45	閉会の挨拶	木村 茂行(未踏科学技術協会)

参加申込はこちらから：

<http://www.sntt.or.jp/~fsst/event.html>

問い合わせ先：社団法人 未踏科学技術協会 超伝導科学技術研究会

担当: 大貫 Phone: 03-3503-4681 Fax: 03-3597-0535

e-mail: fsst@sntt.or.jp

研究会の動き

〔平成 22 年 (2010 年) 10 月 1 日～平成 22 年 (2010 年) 12 月 31 日〕

幹事会

平成 22 年度第 4 回

日 時：平成 22 年 11 月 8 日 (月) 15:00～17:00

場 所：NIMS 東京事務所 会議室

出席者：幹事 8 名 事務局 1 名

議 事：

- (1) 第 76 回ワークショップについて
- (2) 第 77 回ワークショップについて
- (3) 第 37 回シンポジウムについて
- (4) 第 15 回超伝導科学技術賞について
- (5) 第 15 回日米ワークショップについて

第 76 回ワークショップ(応物超伝導分科会と合同開催)

日 時：平成 22 年 12 月 15 日 (水) 13:00～17:15

場 所：埼玉大学 東京ステーションカレッジ

テーマ：「省エネ・低炭素社会を目指す取り組み
と超伝導」

出席者数：71 名

プログラム：

13:00-13:10 「研究会開会の挨拶・趣旨説明」

下山淳一 (東京大学)

13:10-13:45 「省エネ・低炭素社会に向けた次世代
グリッド (TIPS) 開発の取り組み」

小林 広武

((財)電力中央研究所)

13:45-14:20 「省エネ・低炭素社会に向けた鉄道
インフラの取り組み」

奥井 明伸

((財)鉄道総合技術研究所)

14:20-14:55 「低炭素社会に向けたエコテクノロジー
の取り組み」

小林 英樹 ((株)東芝)

15:10-15:45 「電力応用に向けた超伝導材料開発の
現状」

和泉 輝郎

((財)国際超伝導産業技術研究センター)

15:45-16:20 「変電システムと超伝導応用機器」

岩熊 成卓 (九州大学)

16:20-16:55 「次世代電力系統における超伝導送電
システムの開発」

向山 晋一 (古河電工(株))

16:55-17:00 「閉会の挨拶」

木村 茂行 (未踏科学技術協会)

第 15 回超伝導科学技術賞審査委員会

平成 22 年度第 1 回

日 時：平成 22 年 12 月 16 日 (木) 13:00～15:50

場 所：NIMS 東京事務所 会議室

出席者：委員 10 名 事務局 1 名

議 事：

- (1) 第 15 回超伝導科学技術賞授賞者選考

幹事会

平成 22 年度第 5 回

日 時：平成 22 年 12 月 16 日 (木) 16:00～17:30

場 所：NIMS 東京事務所 会議室

出席者：幹事 9 名 事務局 1 名

議 事：

- (1) 第 76 回ワークショップ開催報告
- (2) 第 77 回ワークショップについて
- (3) 第 37 回シンポジウムについて
- (4) 第 15 回超伝導科学技術賞について
- (5) 第 15 回日米ワークショップについて

国内超伝導関連会議

Conferences related to Superconductivity (Domestic)

会 議 名	日 付	開催場所	主催及び問合せ先
日本物理学会／春季	H 23.3.25～3.28	新潟大学 五十嵐キャンパス (新潟市西区)	日本物理学会
日本金属学会／春期	H 23.3.25～3.27	東京都市大学 (東京都世田谷区)	日本金属学会
応用物理学会／春季	H 23.3.24～3.27	神奈川工科大学 (神奈川県厚木市)	応用物理学会
春季低温工学・超電導学会	H 23.5.18～5.20	物質・材料研究機構他 (茨城県つくば市)	低温工学協会

超伝導科学技術研究会 編集委員会 委員

松本 明善	(独) 物質・材料研究機構 超伝導材料センター 主任研究員	小泉 勉	昭和電線ケーブルシステム(株) 技術開発センター 超電導技術開発室 主査
荒井 有気	(財) 鉄道総合技術研究所 浮上式鉄道技術研究部 低温システム研究員	日高 睦夫	(独) 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
伊豫 彰	(独) 産業技術総合研究所 エレクトロニクス研究部門 超伝導材料グループ グループ長	木村 茂行	(社) 未踏科学技術協会 理事長
		大貫留美子	(社) 未踏科学技術協会



