

掲載内容 (サマリー):

平成 15 年度 ISTEK 事業計画概要

特集: 超電導材料・線材

多芯超電導線とは
实用超電導線材の動向
实用化に近づく Nb₃Al 線材
MgB₂ 線材の展望
YBCO 線材を高速に作製可能
超電導関連製品ガイド・超電導線材・

超電導関連 4-5 月の催し物案内
新聞ヘッドライン (2/18-3/19)
超電導速報・世界の動き (2003 年 2 月)
標準化活動 4 月のトピックス
特許情報
平成 15 年電気学会全国大会シンポジウム報告
米国物理学会 2003 年年次会報告
米国における SMES 関連技術動向調査より
隔月連載記事・やさしい超電導のおはなし (その 2)
読者の広場(Q&A)・酸化物超電導材料はどこに使えるのでしょうか?

[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

〒105-0004 東京都港区新橋 5-34-3 栄進開発ビル 6F

Tel (03) 3431-4002 Fax(03) 3431-4044

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。

平成 15 年度 ISTEC 事業計画概要

(財)国際超電導産業技術研究センター(略称 ISTEC: 理事長 荒木浩)は、平成 15 年 3 月 12 日、経団連会館において第 31 回通常理事会及び第 21 回評議員会を開催し、平成 15 年度 ISTEC 事業計画・収支予算書案、組織規程等の改訂を審議し、次のように決定した。

平成 15 年度事業計画の特徴は、超電導に関する調査研究、具体的応用を目標においた研究開発、国際交流の促進などを行うことにより、超電導研究の円滑な推進を図るとともに、超電導関連産業の健全な伸展に寄与するため、各般の事業を積極的に推進する点にある。なお、平成 15 年度予算としては、受託事業・賛助会費等を含め、約 59 億円を見込んでいる。

また、組織改編については、本年 4 月から、超電導工学研究所(SRL)において研究開発の進展に沿った形に再編・簡素化を図り、従来の 7 研究部、3 研究所体制を、3 研究部、1 研究所体制に改める。(下図参照)

1. 普及・啓発、国際交流事業

(1) 普及・啓発

(イ) 第 16 回国際超電導シンポジウム(ISS2003)の開催【10 月 27～29 日、つくば市 つくば国際会議場(エポカルつくば)】

(ロ) 技術動向報告会の開催【6 月 3 日、東京都 都市センターホテル】

(2) 超電導に関する国際交流

(イ) 第 12 回国際超電導産業サミットの開催【9 月 21～23 日、ドイツ(予定)】

(3) 超電導に関する情報の収集および提供

(イ) “超電導 Web21” の発信

超電導技術開発や実用化等に関する情報をインターネットを通し配信(和文 1 回/月 および英文 1 回/3 ヶ月)

(ロ) SRL Technical Report の発行。

(ハ) 内外の超電導関連情報の収集と提供 (ISTEC 海外情報等)

2. 研究開発・技術開発事業(受託研究)

(1) 超電導応用基盤技術研究開発(第 期: 仮称)(平成 15～19 年度)[公募案件]

(2) 低消費電力型超電導ネットワークデバイス開発(平成 14～18 年度)

(3) 超電導電力貯蔵システム技術開発(平成 11～15 年度)

(4) フライホイール電力貯蔵用超電導軸受技術研究開発(平成 12～16 年度)

(5) 高温超電導利用における交流損失の評価・削減に関する研究開発(平成 14～16 年度)

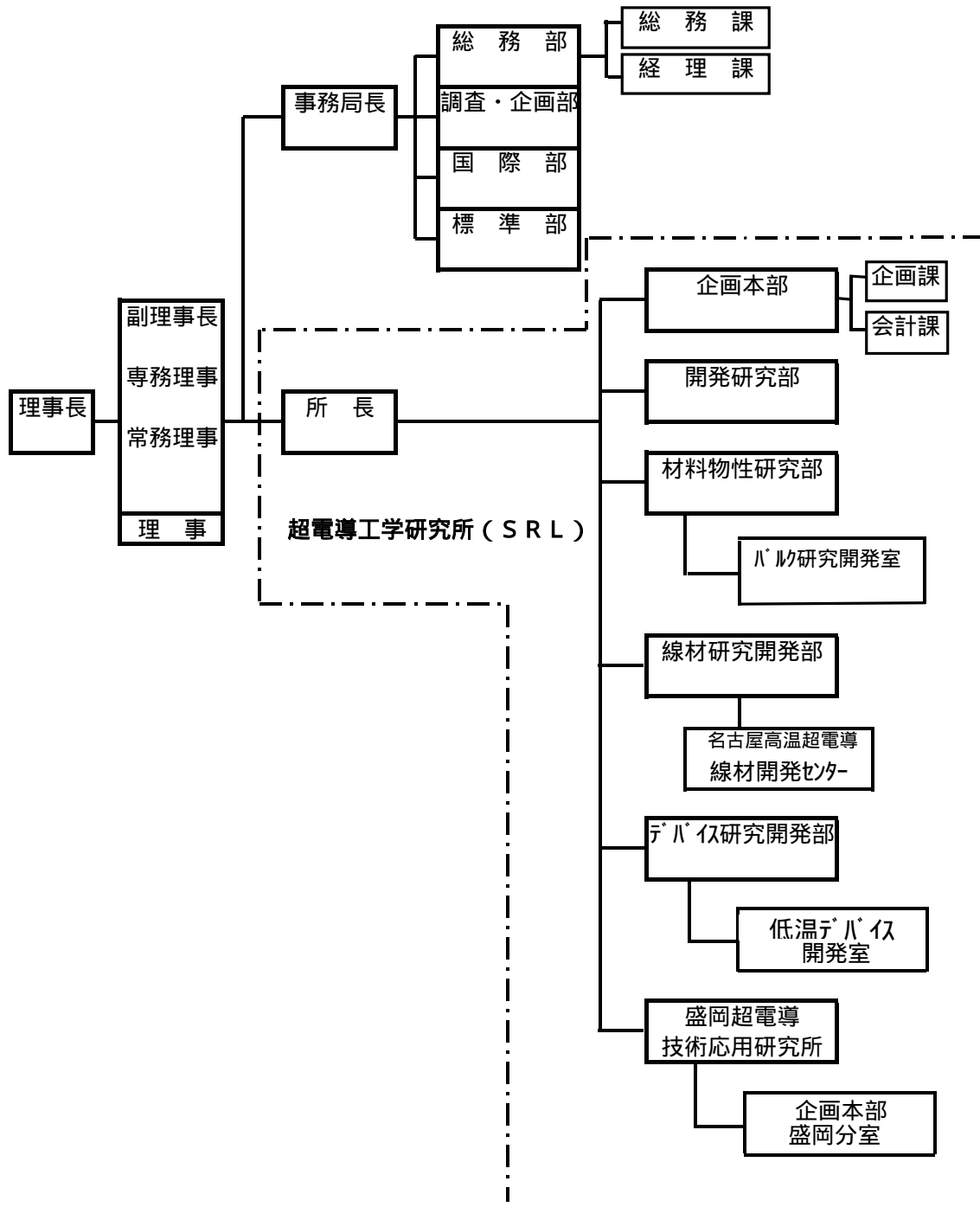
(6) 微小重力環境利用超電導材料製造技術開発(平成 7～15 年度)

3. 国際標準事業

(1) IEC/TC90 国際委員会活動

(2) JIS 規格原案作成活動

【組織図（平成 15 年 4 月 1 日以降）】



(ISTEC 総務部 安住光弘)

[超電導 Web21 トップページ](#)

多芯超電導線とは

京都大学大学院
工学研究科
助教授 松本 要

ピンニング点を有する第2種超電導体の磁化過程においては、磁化の急激な減少が生じる場合がある。これは磁束が試料内に急激に侵入することを意味しており、磁気不安定性と呼ばれ、それに伴う磁束の侵入をフラックスジャンプと呼ぶ。

磁気不安定性は以下の様に説明される。磁化過程において印加磁界 H_a が H_a だけ増加したとき、 H_a の磁束が侵入してヒステリシス損失 Q を生じる。これは磁束が試料内を移動することによる発熱である。発熱 Q は試料周囲の冷媒で冷やされるが、超電導体の熱伝導度が小さいと内部に温度上昇 T がもたらされる。ここで臨界電流密度 J_c は温度とともに減少するので、温度上昇は J_c の低下 ΔJ_c を引き起こす。 J_c の減少は試料内の磁束分布を変化させて新たな磁束侵入、発熱、 T を生じ、こうして一種のフィードバック過程が形成されることになる。

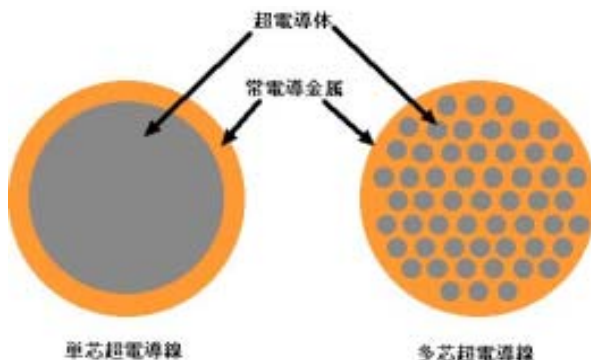
もし $T > T'$ であれば温度は安定化するが、 $T < T'$ であると温度上昇は止まらずフラックスジャンプが発生する。フラックスジャンプは雪崩的な大規模な常電導転移（クエンチ）の引き金になる場合があり、十分な対策がなされていないと超電導コイルの破壊などを引き起こす可能性がある。

このような磁気不安定性を回避するために開発された技術が多芯超電導線である。つまり超電導体中の発熱は磁束が侵入する深さが大きければ増大するので超電導線の線径を細くして磁束の侵入による発熱を小さくするのである。断熱状態、板状超電導体を仮定した場合、フラックスジャンプが起こらない超電導板厚 d は、

$$d < (2/J_c)(2cT_0/\mu_0)^{1/2}, \quad T_0 = J_c/(-dJ_c/dT); \text{ 温度マージンと呼ぶ}$$

となる。ここで c は超電導体の比熱、 μ_0 は真空の透磁率、 dJ_c/dT は J_c の温度変化である。Nb-Ti を例にとると板厚を数 $10 \mu\text{m}$ 以下にすればよい。

しかし実用線材としては数 $10 \mu\text{m}$ サイズでは電流容量が小さすぎるので多数の超電導細線（フィラメント）を銅などの常電導金属に埋め込んだ多芯超電導線が生み出されたのである。細線化は単に磁気安定性に有効だけでなく、ヒステリシス損失の低減にも効果がある。また銅などの金属と複合化すると磁束の侵入速度を抑え温度上昇を小さくする動的安定化の効果もある。現在の実用超電導線材はすべて多芯化の技術が取り入れられている。Bi系の高温超電導線材はすでに多芯化されており、 MgB_2 線材なども多芯化の方向にある。



[超電導 Web21 トップページ](#)

実用超電導線材の動向

古河電気工業株式会社
超電導製品部
部長 目黒 信一郎

現在、実用超電導線として工業ベースで製造されているものは、合金系の Nb-Ti 線材と化合物系の Nb₃Sn 線材の 2 種類である。

前者の Nb-Ti 線材は製造性に優れ、比較的安価なことから民需用の MRI (画像診断装置) 用として大量に使用されており、その需要も年々増加している。MRI 用 Nb-Ti 線材は銅比が大きく簡単な構造 (フィラメント数は数十本) で、特性向上よりもコストダウンの要求が厳しい。一方、量的および技術的難度の観点からは、欧州で建設中の巨大粒子加速器 (LHC) が挙げられる。これには 1200 トンもの Nb-Ti 成形撚線が使用され、導体の要求特性はビーム安定性の観点から非常に厳しく、Ic、銅比、磁化幅等、各種特性に厳格な規格が設けられている。技術内容は今後の加速器用成形撚線の規範となり、またこのような高度な導体を短期間で量産する技術は、今後の核融合炉用等の大型プロジェクトに水平展開されるであろう。また、Nb-Ti 線材はこれら以外にも半導体引き上げ装置や NMR (核磁気共鳴) の外周コイル等、実用化機器に供されている。

後者の Nb₃Sn 線材は製造プロセスが複雑で、最後に約 700 °C で長時間の拡散熱処理を必要とするため、Nb-Ti 線材に比べて用途が限定されるが、Nb-Ti 線材では得られない高磁場 (10T 以上) が必要な機器に広く使用されている。現在、Nb₃Sn 線材市場の大半は NMR 用である。NMR 装置の性能はプロトンの共鳴周波数で表され、高周波数のものほど分解能が高い。本装置はタンパク質解析や医薬品開発にとって不可欠で、高性能化が急激に進んでいる。現在は民需用として 700~800MHz 程度まで市販され、更なる高周波数 (1GHz) を目指した開発が国家プロジェクトで行われている。装置の高性能化 (大型化) に伴い、Nb₃Sn 線材の需要も年々増加している。Nb₃Sn 線材のもう一つのターゲットとして ITER (国際熱核融合炉) がある。ITER は 2013 年にファーストプラズマ点火を目指しており、数百トンの Nb₃Sn 線材が使用される予定である。従って、建設が始まれば、今までに例のない大量の Nb₃Sn 線材を短期間で量産することになる。超電導線材の歴史を振り返ってみると、このような大規模プロジェクトを通じて特性や製造プロセスが大幅に進展した事例が多く、技術展開が大いに期待出来る。

[超電導 Web21 トップページ](#)

実用化に近づく Nb₃Al 線材

物質・材料研究機構
超伝導材料研究センター
アソシエートディレクター 竹内孝夫

Nb₃Sn より優れた耐歪み特性を有することから, Nb₃Al は次世代の高磁界超電導材料として開発されてきた。過飽和固溶体 (bcc 相) をいったん経由することを特徴とする急熱急冷変態 (RHQT) 法 Nb₃Al 線材は、従来と比べて、20T 以上の磁界領域で J_c の向上が顕著で、高磁界 NMR 用導体として実用化が期待されている。その実用化の鍵は、過飽和固溶体を生成するための長尺 Nb/Al 複合多芯線の急加熱急冷 (RHQ) 処理技術にある。reel-to-reel で移動する線の通電加熱温度 (T_{max}) を数% の精度で一定に制御するのは非常に困難だったからである。しかし、急冷条件を詳細に検討した結果、T_{max} が 1900 °C 付近で bcc 相 Nb への Al の固溶限は 25at% 以上に拡張しており、図に示すように、少なくとも Nb-25at%Al の組成ではその固溶域が約 150 °C の温度幅 (緑色) を有しその温度域から急冷する限り過飽和固溶体が単相で生成すること、その結果、変態後の J_c, T_c, B_{c2} がほぼ一定になることが判明した。したがって、その温度域の中間で長尺線を RHQ 処理すれば、途中で加熱温度が多少変動してもその温度域から逸脱せず、J_c 特性がほぼ一定の長尺線の製造が可能になる。実用線材として不可欠な安定化材を複合する問題は、過飽和固溶体の良好な伸展性を利用して、RHQ 処

理後に Cu を線材表面にクラッド加工で圧接する方式で解決した。そのような 250m 長 Cu クラッド RHQ 線材から小コイルをワインド・アンド・リアクト法で試作し、コイル両端から切り出した短尺線の臨界電流 I_c に匹敵する値までコイル通電を行い、14T のバイアス磁場中で 3T の追加磁場の発生に成功した。これにより数百 m レベルの均質長尺線・製造技術が確立し、単位長が 1km を越える実導体開発に向けて大きな一歩を踏み出した。

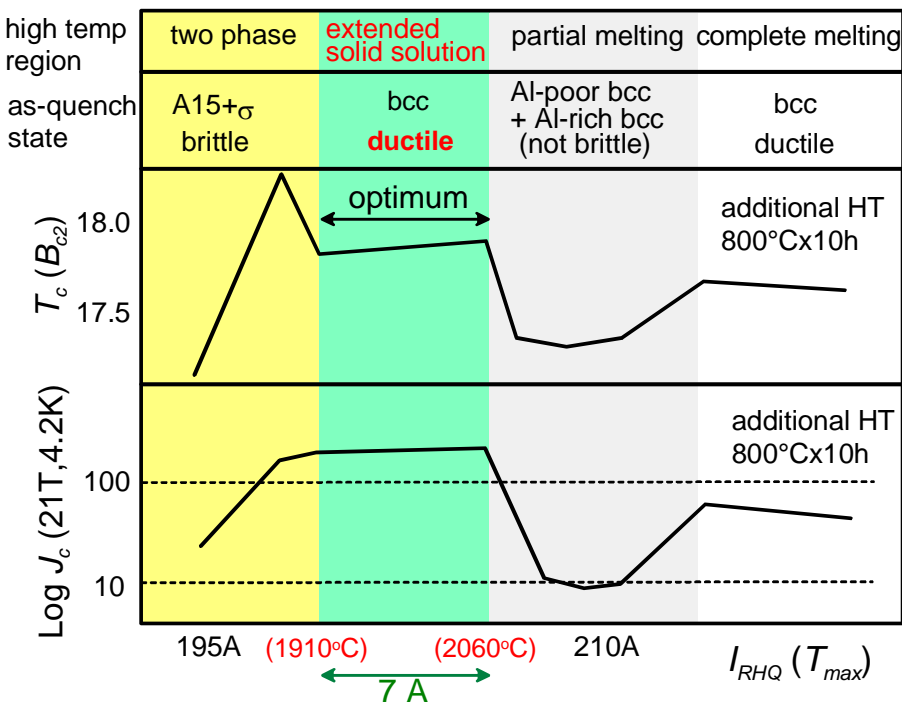


図 T_{max} のパラメーターであるジュール加熱電流 (I_{RHQ}) に対する加熱状態、急冷相、2 次熱処理後の超電導特性の変化。長尺線は、I_{RHQ} をプラトー域 (緑色) の中心に合わせて処理する。

[超電導 Web21 トップページ](#)

MgB₂ 線材の展望

物質・材料研究機構

超伝導材料研究センター

酸化物線材グループ ディレクター 熊倉浩明

MgB₂ 超電導体は発見から 2 年が経過し、¹⁾ 線材化については、Powder-In-Tube(PIT)法を中心として研究開発が進んでおり、J_c 特性も向上してきている。²⁾ MgB₂ の PIT 法には MgB₂ 化合物粉末を金属管に詰めて加工をする Ex-situ 法と、Mg+B の混合粉末を使う In-situ 法がある。図 1 には、最近の MgB₂ 線材の 4.2K における J_c-B 特性を、従来の Nb-Ti 実用線材ならびに Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O_x(Bi-2223)酸化物線材の特性と比較して示す。Ex-situ 法では、熱処理をしなくてもかなり高い J_c が得られるのが大きな特長で、これは線材製造コストの面から非常に有利である。³⁾ 今後、熱処理無しでどこまで J_c を向上させることが可能であるか注目される。一方 In-situ 法では、Ex-situ 法よりも約一桁以上高い J_c が得られているが、熱処理が不可欠であり、Ex-situ 法との優劣は簡単には決められない。この In-situ 法においては、最近 SiC ナノ粒子添加によりピン止め点を導入したテープで高い J_c 値が得られており注目される。⁴⁾

またこれまでの線材化研究の進展を受けて、最近では 10m クラスのテープやそれを用いたコイルの試作も行われるようになった。⁵⁾ 例えば、Ex-situ 法によるテープを用いて熱処理無しで小型のソレノイドコイルが作製され、0.5 テスラの発生磁界が得られている。コイルの I_c は短尺テープの I_c の 80%程度あり、これはこの 10m テープの I_c のバラツキがかなり小さいことを示しており、実用の観点から期待を抱かせる結果である。今後はこのような長尺化やコイル化の研究も大きく進むであろう。

しかしながら、図 1 に示したように現在の MgB₂ 線材の J_c 特性はまだ実用レベルに届いておらず、今後更なる J_c の改善が必要不可欠である。J_c の改善のためには、線材作製に関する数多くのパラメータを最適化して MgB₂ コアの充填密度を上げるとともに、磁束線ピン止め点の導入が重要であろう。MgB₂ におけるピン止め点としては、Nb₃Sn などの A15 型化合物と同様に結晶粒界が示唆されて

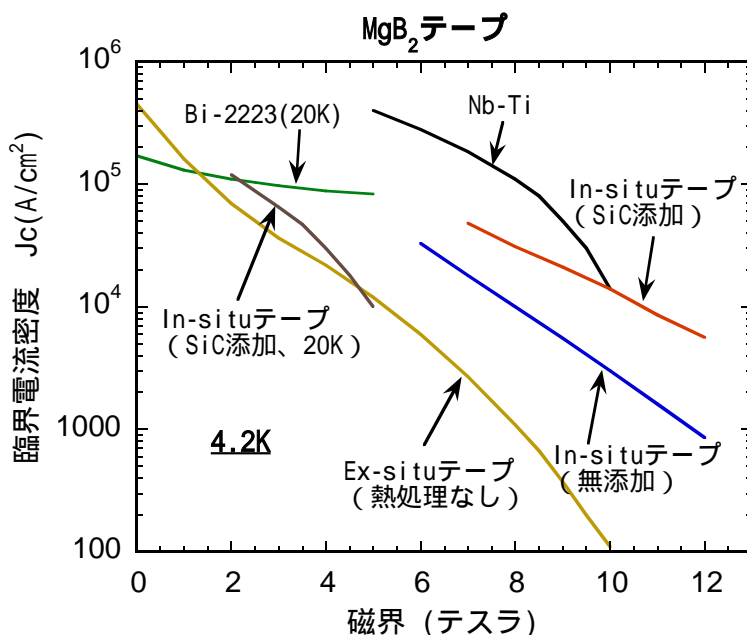


図 1 各種 MgB₂ 線材の臨界電流特性

おり、 MgB_2 結晶粒の微細化が効果的と考えられる。また、上に述べたような、ナノ粒子などを用いたピン止め点導入の研究も今後さらに進むであろう。 MgB_2 応用の一つとして、冷凍機で簡便に得られる 20K 近傍の温度で使用する提案がなされているが、 MgB_2 線材の上部臨界磁界 B_{c2} は、20K において 5T 程度とあまり高くはなく、 MgB_2 線材を冷媒不要の冷凍機冷却によって 20K 近くの温度で使用するためには、 B_{c2} を向上させる必要がある。すでに MgB_2 薄膜ではバルク材に比べて相当高い B_{c2} が報告されており、注目される。^{6), 7)}

MgB_2 の線材化研究は開始されてからまだ日が浅く、今後の研究課題は多い。これまでに開発された実用超電導線材の場合と同様に、地道な息の長い研究の積み重ねが必要であろう。

参考文献

- 1) J. Nagamatsu, N. Nakagawa, Y. Zenitani and J. Akimitsu, Nature 410(2001)63.
- 2) 熊倉浩明、松本明善、北口 仁、岡田道哉、低温工学 37(2002)457.
- 3) H. Kumakura, A. Matsumoto, H. Fujii and K. Togano, Appl. Phys. Lett. 79(2001) 2435.
- 4) S. X. Dou, S. Soltanian, J. Horvat, X. L. Wang, S. H. Zhou, M. Ionescu, H. K. Liu, P. Munroe and M. Tomsic, Appl. Phys. Lett. 81 (2002) 3419.
- 5) K. Tanaka, M. Okada, H. Kumakura, H. Kitaguchi and K. Togano, Physica C382(2002)203.
- 6) Patnaik, L.D. Cooley, A. Gurevich, A.A. Polyanskii, J. Jiang, X.Y. Cai, A.A. Squitieri, M.T. Naus, M.K. Lee, J.H. Choi, L. Belenky, S.D. Bu, J. Letteri, X. Song, D.G. Schlom, S.E. Babcock, C.B. Ecom, E.E. Hellstrom and D.C. Larbalestier, Supercond. Sci. Technol. 14, 315 (2001).
- 7) K. Komori, K. Kawagishi, Y. Takano, H. Fujii, S. Arisawa, H. Kumakura, M. Fukutomi and K. Togano, Appl. Phys. Lett. 81, 1047 (2002).

[超電導 Web21 トップページ](#)

YBCO 線材を高速に作製可能 -PLD-CeO₂ (Self-Epitaxy) で製造速度、配向度が大幅に向上、J_cも 4MA/cm²以上

・ 超電導工学研究所 名古屋高温超電導線材開発センター ・

超電導工学研究所 (SRL 所長 田中昭二) の名古屋高温超電導線材開発センター(2003年4月より改称)において、PLD・CeO₂を中間層に使いYBCO線材の製造速度が大幅に改善された。ISS2002 (2002年11月11-13日パシフィコ横浜)のYamada(ISS2002, WS-4)、Muroga(ISS2002, WSP-4)の発表によれば、IBAD(Ion Beam Assisted Deposition)-Gd₂Zr₂O₇ (GZO) 基板上に PLD 法(Pulsed Laser Deposition)で CeO₂膜を蒸着すると短時間で結晶配向度が大幅に向上する。

IBAD 法と PLD 法による線材化では、(株)フジクラが 46m の長尺化を 2002 年達成しており、欧米でも数 m から 10m の線材が作製されている。実績から最も有望な手法である。問題は製造速度が 0.5・1m/h と遅いことであった。しかし、今回 SRL により見出された手法では、結晶配向度が不十分な薄い IBAD 基板の上でも CeO₂膜を PLD 高速で蒸着して高配向組織が得られ、大幅に製造速度を向上できる。最終到達配向度は単結晶に近いので線材の J_cも大きく向上する。IBAD 法のように蒸着時に Ar イオンによるアシストがいらないため、今回の PLD・CeO₂膜の配向現象を自己配向(Self-Epitaxy)と研究者は呼んでいる。

高速高配向。わずか一分で配向度 10 度に。

本研究は SRL と(株)フジクラ、JFCC((財)ファインセラミックスセンター)の共同で行われた。膜厚の異なる IBAD-GZO (Gd₂Zr₂O₇) 基板上に SRL で PLD 法により CeO₂膜を作製した。図 1 に典型的な結果を IBAD 法と比較した。中間層の面内配向度 () と蒸着時間の関係を示す。一般的に 1MA/cm²以上の J_cを得るには配向度 10 度程度が要求される。この配向度を得るには、IBAD 法のみでは 240 分程度かかる。他方、薄い IBAD 基板上に PLD・CeO₂膜を蒸着すると、図 1 の白丸で示すように、配向度 25 度 (GZO 膜) からわずか 1 分で 10 度になる。6 分間蒸着すると 5.6 度になる。大幅な中間層製造速度の向上が可能である。10-13 度の IBAD-GZO 膜を使えば、最終到達配向度は 2.4 度になり単結晶レベルである (図中灰色の丸)。

SRL で中間層の開発を行っている室賀岳海主任研究員は、「セリア膜は世界中で研究されているが、今回のセリアでは配向条件が微妙であり、良い条件を見つけるのに苦労した。線材の製造速度を大幅に向上でき、長尺化へ寄与できると思う。」と語っている。TEM 観察した(財)ファインセラミックスセンターの加藤主任研究員の結果を図 2 に示す。IBAD・GZO 上の PLD・CeO₂層では、CeO₂膜が

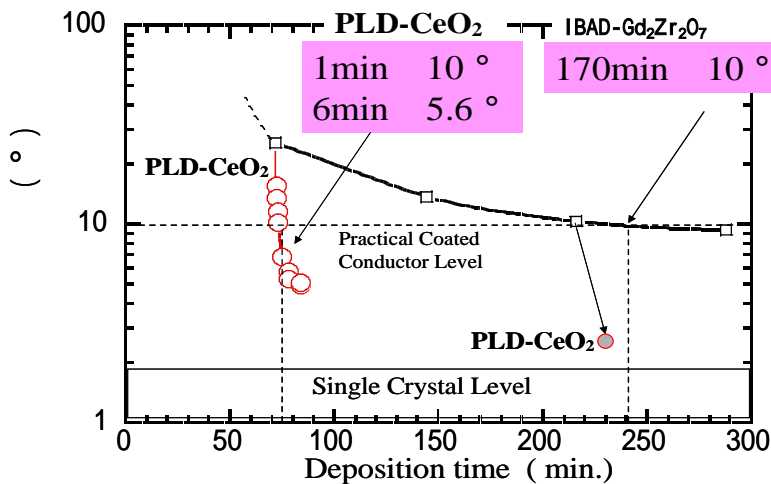
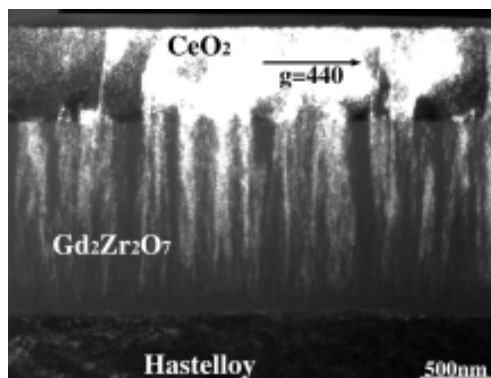


図 1 PLD 法による自己配向 PLD-CeO₂膜の配向度変化。1 分で配向度 10 度、6 分で 5.6 度が得られる。単結晶に近い 2.4 度も可能。

約 100nm 成長した後は、急速に結晶が成長し粒径が 1-2 μm にもなっている。加藤研究員によれば、「回折格子のスポットからは、この部分 (PLD-CeO₂) はほとんど単結晶である。」とのこと。



← IBAD-GZO 膜/PLD-CeO₂ 膜界面

図2 IBAD-GZO 上 PLD-CeO₂ 膜の断面 TEM。
配向度 = 13° の IBAD-GZO 膜に 18 分間 PLD 法で CeO₂ 膜を蒸着した。CeO₂ 膜の配向度は 4.1° である。界面から 100nm 以上で大きく粒成長している。
(ファインセラミックスセンター加藤研究員撮影)

J_c も高い。4.4MA/cm² を記録。

早速この上に PLD 法で YBCO 膜を作製し J_c 特性を測定した岩井研究員によれば、「今回の高配向 CeO₂ 膜を用いれば、従来の膜の 2-3 倍の高い J_c が容易に得られる。我々はすでに従来の YBCO 線材では困難な 4.4MA/cm² を得た。」とのこと。長尺線材の長手方向の J_c の減衰割合にも余裕が生まれ、実用的な意味合いはより大きくなる。

新しい現象か？自己配向 (Self-Epitaxy)

名古屋高温超電導線材開発センターで本研究を指揮している山田穰主管研究員によれば、「3 年前から歴代の研究員と CeO₂ 膜の中間層を研究している。ロスアラモス研での結果、「厚い CeO₂ 膜では配向度が劣化する」に疑問を持ったのが端緒である。特に、Gd や Y などのレアアースが関与すると CeO₂ では酸素拡散、電気伝導度の異常な現象が報告されており、これらと関係があるのではないか。配向度が下地の層よりも良くなっていく本現象は従来のエピタキシャル成長の枠を超える新しい現象である。現象の解明にも精力的に取り組みたい。」と語っている。現在、名古屋高温超電導線材開発センターでは、PLD-CeO₂ による長尺化も進行中である。

関連技術開発全体を指揮している SRL の塩原融線材部長によれば、「実用的には SRL 始まって以来の大きな成果ではないか。今回の CeO₂ 膜ではクラックも生じない。高速化とあわせて量産化の点で大きなメリットがある。国際的にも、日本が一歩リードしたのではないか。名古屋高温超電導線材開発センターを今後も精力的にバックアップしていく。」と語っている。

(SRL/ISTEC 名古屋高温超電導線材開発センター 山田 穰)

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導関連製品ガイド ・ 超電導線材 ・

[Nb-Ti 合金複合超電導線]

日立電線株式会社 土浦工場 素材部
核融合・加速器用導体、パルス磁界用導体
Tel:029-826-7400、Fax:029-823-2442

担当：酒井 修二

古河電気工業株式会社 交通・公共営業部
超電導製品営業課
Tel:03-3286-3161、Fax:03-3286-3686

担当：吉川、清水

金属カンパニー日光伸銅工場 超電導開発部
Tel:0288-54-0504、Fax:0288-54-2216

担当：三好

高エネルギー加速器用導体、変動磁界用導体、
各種銅安定化 Nb-Ti 導体

三菱電機株式会社 電力・産業システム事業
所 原子力部 超電導素線製造プロジェクト
グループ

PVF 被覆超電導線材、ポリイミド被覆平角線材
など

担当：北古賀秀敏（プロジェクトグループマネ
ージャー）

E-mail:hidetoshi.kitakoga@sj.sow.melco.co.jp

Tel:0427-79-5564、Fax:0427-79-5673

[Nb₃Sn 化合物複合超電導線]

ジャパンスーパーコンダクターテクノロジー
株式会社（JASTEC）

NMR 分析器用線材、高磁界マグネット用導体

Tel:093-391-2836、Fax:093-391-2847

担当：村上幸伸

日立電線株式会社 土浦工場 素材部
高磁界マグネット用導体、核融合用導体

Tel:029-826-7400、Fax:029-823-2442

担当：酒井 修二

古河電気工業株式会社 交通・公共営業部
超電導製品営業課

Tel:03-3286-3161、Fax:03-3286-3686

担当：吉川、清水

金属カンパニー日光伸銅工場 超電導開発部
Tel:0288-54-0504、Fax:0288-54-2216

担当：三好

NMR 分析器用線材、高磁界マグネット用導体、
核融合炉用 CICC 素線

三菱電機株式会社 電力・産業システム事業
所 原子力部 超電導素線製造プロジェクト
グループ

核融合炉用低ヒステリシス損失素線、直流用高
臨界電流密度素線

担当：北古賀秀敏（プロジェクトグループマネ
ージャー）

E-mail:hidetoshi.kitakoga@sj.sow.melco.co.jp

Tel:0427-79-5564、Fax:0427-79-5673

[Nb₃Al 化合物複合超電導線]

日立電線株式会社 土浦工場 素材部

高磁界マグネット用導体、核融合用導体

Tel:029-826-7400、Fax:029-823-2442

担当：酒井 修二

[ビスマス系銀シース酸化物超電導線]

昭和電線電纜株式会社 技術開発センター
超電導プロジェクト

銀シース Bi-2212 線材、銀シース Bi-2223 線材、
電流リード

Tel:042-773-7163、Fax:042-773-7291

担当 長谷川隆代

住友電気工業株式会社 エネルギー環境技術
研究所 超電導研究部

銀シース Bi-2223 テープ

Tel:06-6466-5634、Fax:06-6466-5705

担当：林和彦

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導関連 4 - 5 月の催し物案内

4/16

第1回超電導応用研究会「低温工学・超電導応用の裾野・アミューズメントへの適用」

場所：産総研お台場会議室（東京）

<http://akahoshi.nims.go.jp/jcryo/>

（主催 低温工学協会 超電導応用研究会）

4/21-25

2003 MRS Spring Meeting

場所：San Francisco, California, USA

<http://www.mrs.org/meetings/>

4/22-25

International Conference on Cryogenics & Refrigeration, ICCR '2003

場所：Hangzhou, China

4/27-30

105th Annual Meeting & Exposition of the American Ceramic Society

場所：Opryland Hotel, Nashville, Tennessee

5/20

第1回材料研究会「応用分野の広がりを支える超電導材料と関連材料」

場所：物質・材料研究機構 物質研究所（旧 無機材料研究所）共同研究棟 4F409&410 セミナー室（つくば市）

<http://akahoshi.nims.go.jp/jcryo/>

（主催 低温工学協会 材料研究会）

5/25-28

ICMC'03/Topical International Cryogenic Materials Conference

場所：University of Twente, The Netherlands

<http://www-lt.tn.utwente.nl/lt/icmc03/welcome.htm>

5/25-30

M2S-HTSC-VII/7th International Conference on Material and Mechanisms of Superconductivity and High Temperature Superconductors

場所：Rio de Janeiro, Brazil

<http://www.m2srrio.cbpf.br>

[超電導 Web21 トップページ](#)

新聞ヘッドライン (2/18-3/19)

エネ・環境技術標準基盤研究 来年度テーマ 10 件決定 産総研 2/18 日刊工業新聞
世界最大の高温超電導材料、開発 5 月帰還 宇宙製の最強磁石 2/18 毎日新聞
固体 2 量子ビット 絡み合い実験成功 NEC と理研 量子計算機へ前進 2/20 日刊工業新聞、
毎日新聞、日本工業新聞
核融合計画の建設地本格検討 次回政府協議で 2/20 日本経済新聞
米国の参加復帰 ITER 誘致へ予算措置で決断を 2/20 日刊工業新聞
建設地選定は先送り ITER 政府間協議 米、中の加入を確認 2/21 電気新聞、日本工業新聞
イオン温度 8100 万度のプラズマ 0.5 秒封じ込め 核融合研究所 大型ヘリカル装置で 2/21
日本工業新聞
金属入りフラーレン 製造技術を確立 がん治療薬などに応用 2/21 日本経済新聞
中部電力 液晶工場で実地試験 超電導電力貯蔵 瞬低対策で最大規模 2/24 電気新聞 2/25
日刊工業新聞
金沢工業大 技術移転件数、36 件に 収入は 2700 万円 2/26 日経産業新聞
経済活性化の期待になう「神戸医療産業都市構想」先端医療センターを中心に中核施設が次々と
整備 2/26 日本工業新聞
系統連系のトラブル対策 東芝が限流器用超電導素子 均一特性で高電圧実現 05 年度以降
システム実用化 2/27 日刊工業新聞
中部電力 磁気冷凍を高効率化 産業用冷凍庫で活用へ 3/4 電気新聞
住特金 磁界 4 テスラ発生に成功 直方体の磁気回路開発 3/5 日刊工業新聞
心臓疾患診断 高精度に 日立ハイテク 磁場を測定 胎児の検査可能に 服を着たまま 3/5
日経産業新聞
コバルト酸化物系超電導 物材機構が世界初 新物質の探索に期待 3/6 日本工業新聞、日経産
業新聞、毎日新聞、日刊工業新聞
宇宙誕生直後を再現 線形加速器「リニアコライダー」国内建設に実現味 3/11 読売新聞
ナノテクノロジーと求心力 3/11 電気新聞
超伝導物質に コバルト酸化物を合成 3/12 朝日新聞
磁場強度 初の 3 テスラ GE 横河が頭部用 MRI 3/12 日刊工業新聞
最高時速 552 キロ、世界最速の鉄道 山梨・都留市、大月市 3/17 朝日新聞(夕)
マルチスライス断層撮影装置 世界最速 0.4 秒で走査 東芝 鮮明に動脈を撮影 3/17 日刊工
業新聞
超電導磁石 結晶成長実験に成功 5 月末回収 無人宇宙実験システムで 3/18 日本工業新聞



[超電導 Web21 トップページ](#)

【ビジネストレンド】超電導速報 世界の動き (2003年2月)

電力

American Superconductor Corporation (2003年2月4日)

American Superconductor Corporation (AMSC)は、2003年第3四半期(2002年12月31日終了)の収支を発表した。純収入は、前年同期の353万ドルから275万ドルへと減少した。純損失は、前年同期の1088万ドルから1261万ドルへと増加した。しかしながら、2002年12月31日に終了する9ヶ月間の純収入は、前年同期の845万ドルから1009万ドルへと増加している。この9ヶ月間の純損失は、前年同期の2904万ドルから3367万ドルへと増加している。また、この9ヶ月間の操業に係る費用は3449万ドル(前年同期3309万ドル)であった。この間のモーター・発電機部門の操業費用は前年同期と比べて横ばい。一方、パワーエレクトロニクス部門は、収入増やコスト低減努力もあって42%減少した。HTS線材部門は減価償却と新工場の操業費用のため大幅に増加した。2003年度第3四半期の現金の流出は、発注や政府契約の遅れもあって予想より増加している。第4四半期は遅れていた発注を受けることもあり、現金の流出は抑えられる(新規受注や新たな開発契約が予想される)。AMSCは2003年度の総収入を1950~2050万ドル程度と見込んでいる。

(出典)

“American Superconductor Reports Third Quarter Results and Updated Outlook for Fiscal Fourth Quarter”

American Superconductor Corporation Press Release (February 4, 2003)

<http://www.amsuper.com/html/newsEvents/news/104429731361.html>

American Superconductor Corporation and GE Industrial Systems (2003年2月4日)

American Superconductor Corporation (AMSC)とGE Industrial Systemsは、2台のD-VAR™電圧補償システムをRayburn Country Electric Cooperativeに販売した。このシステムは26,000世帯へ電力を供給する138kV電力網の電圧安定問題を緩和することにより電力信頼性を改善することを目的としている。当該送電網により送電サービスを受けている地域の電力需要は年率6%で増加している。このため、電圧低下や停電が心配されているところである。D-VARシステムはこの問題を処理し高価な他の代替手段の導入時期を後ろ倒しにすることができる。D-VARは2003年6月1日運転を開始する予定。

(出典)

“AMSC and GE Sell Two D-VAR™ Systems to Texas Utility”

American Superconductor Corporation Press Release (February 4, 2003)

<http://www.amsuper.com/html/newsEvents/news/104429743601.html>

American Superconductor Corporation (2003年2月24日)

American Superconductor Corporation (AMSC)とGE Industrial Systemsは、D-VAR™ユニットとGEの装置から構成される先端的な送電信頼性システムをNortheast Utilities子会社のConnecticut Light & Power Companyに販売した。このシステムは慢性的に混雑の激しい送電網の信頼性向上と送電量の改善を目的としている。電圧の変化をモニターすることにより、既存の送電ラインを用いて100MWの電力を送ることができるようになる。このシステムは2003年夏までに設置され運転を開始する予定。Northeast Utility's Transmission Business UnitのDavid Boguslawski

副社長は、「詳細な検討の結果、D-VAR は近い将来の南西コネティカット地域の電力信頼性確保のための柔軟かつ資金的にも無理のないソリューションである。一方、我々はこの地域の長期的なニーズを満たすための方法について地域の方々とも協力して検討していきたい。」と語った。

(出典)

“Northeast Utilities Boosts Electricity Flow Into Chronically Congested Section of Power Grid with Advanced Transmission Reliability System”

American Superconductor Corporation Press Release (February 24, 2003)

<http://www.amsuper.com/html/newsEvents/news/104609398101.html>

センサー

Bruker Daltonics, Inc. (2003年2月27日)

Bruker Daltonics, Inc.は、たんぱく質学の分野で Mayo Clinic と協力していくと発表した。特に、フーリエ変換質量スペクトロメトリー(FTMS)を使った高度かつ効率的なたんぱく質分析に重点を置いている。協力の一環として Bruker Daltonics, Inc.は Mayo Clinic に測定に対し最適化された 12T-FTMS システムを提供する。このシステムは非常に高精度に質量分析ができ(誤差 1ppm 以下)、高い分解能、広いダイナミックレンジ、自動データ処理などオンライン多次元液体クロマトグラフィシステムと繋いで詳細なキャラクタリゼーションが可能である。12T 超電導磁石を含めこの FTMS システムは 2003 年 3 月までに設置を完了する予定。

(出典)

“Advancing High-Throughput Proteomics with FTMS: Bruker Daltonics Announces Collaboration to Develop Highly Sensitive Protein Analysis Methods with Ultra-high Field FTMS”

Bruker Daltonics, Inc. Press Release (February 27, 2003)

http://ir.bdal.com/ireye/ir_site.zhtml?ticker=bdal&script=412&layout=-6&item_id=386496

通信

Superconductor Technologies Inc. (2003年2月11日)

Superconductor Technologies Inc. (STI)は、2003年の製品売上が4000万ドルになると予想していると発表した。政府契約の1000万ドルを含めれば総収入は5000万ドルになる。この予測は2002年の2200万ドルの2倍(これは2001年の1240万ドルの2倍)である。STIは主要無線事業者に焦点をあわせ、既存顧客の要求を満たし、新規顧客を開拓し、国際市場に打って出ることによりこの目標を達成しようと考えている。STIは年末の結果を3月に発表する予定。

(出典)

“Superconductor Technologies Inc. Supplies Guidance for Fiscal 2003”

Superconductor Technologies Inc. Press Release (February 11, 2003)

<http://ir.thomsonfn.com/InvestorRelations/PubNewsStory.aspx?partner=Mzg0TIRrMU1RPT1QJfKEQUALSTO&product=MzgwU1ZJPVakWQEQALSTOEQUALSTO&storyId=81015>

Superconductor Technologies Inc. (2003年2月26日)

STI 製品管理担当副社長 Neal O. Fenzi は、カリフォルニア州サンノゼで開催された Wireless Systems Design Conference and Expo で発表を行った。その中で、Fenzi は「通信事業者がネット

ワークを最適化し成長を追及していくためには新しい技術というものに目を向けなくてはならない。」と語った。Consumer Reports 最新号によれば、携帯電話事業者に対する全般的顧客満足度は他の分野の企業に比べて低いことが調査から明らかになっている。顧客が不満足な主たる理由はどうかや高いドロップ・コールの比率にあるようだ。1/3 の顧客はプロバイダーを変えようと考えている。HTS フィルターは感度が高くかつ選択性に優れており、バンド間の干渉を除去できる。都市部及び郊外でのフィールドテストの最近の結果によれば、STI の SuperLink Rx 850 極低温レシーバー・フロントエンドを設置したサイトでは通信の混雑している時に 40%ものドロップ・コールの改善を図ることができ、資金のタイトな事業者にとってこれが費用対効果のよいソリューションであることが示された。Fenzi は、「控えめに見積もっても、SuperLink は 6 ヶ月で費用回収ができる。」と語った。

(出典)

“Wireless Carriers Must Learn to 'Do More With Less' If They Are to Continue to Grow in 2003, Says STI Executive”

Superconductor Technologies Inc. Press Release (February 26, 2003)

<http://ir.thomsonfn.com/InvestorRelations/PubNewsStory.aspx?partner=Mzg0TIRrMU1RPT1QJfKEQUALSTO&product=MzgwU1ZJPVakWQEQALSTOEQUALSTO&storyId=82186>

(ISTEC 国際部 津田井 昭彦)

[超電導 Web21 トップページ](#)

標準化活動 4月のトピックス

・国際電気標準第 90 専門委員会 IEC/TC90 第 8 回総会報告・

国際電気標準会議第 90 専門委員会 (IEC/TC90) の第 8 回総会 (略称ウイーン会議) 並びにワーキンググループ会議が 2003 年 2 月 24-26 日ウイーン工科大学にて開催され、7 カ国 20 名が参加し、成功裏に閉幕した。今回の主な議題は、審議中案件の審議、現行規格のメンテナンス並びに今後の新規業務項目についてであった。なお、今回の会議は、IEC とオーストリア電気技術会議 (OEK) とにより運営されたもので、日本から 8 名が派遣された。

L. Goodrich 議長による開会宣言に引き続き、議案が採択された。その後、前回 2001 年 9 月に開催したソウル会議録の確認と L. Goodrich 議長の任期延長 (2006 年 3 月 30 日まで) が承認された。

次に、ソウル会議以降発行された 4 件の国際規格 (表面抵抗試験方法 IEC61788-7、臨界温度試験方法 IEC61788-10、Nb₃Sn の複合比試験方法 IEC61788-12、Nb₃Sn の残留抵抗比試験方法 IEC61788-11) について審議経過が報告された。

現在審議中の 3 件の国際規格案について、つぎの審議が行われた。

ワーキンググループ WG9 において審議中の “ピックアップコイル法による交流損失試験方法” は、最終国際規格案 FDIS 中の図 C.1b を差し替えることが承認され、規定日程 (2003 年 3 月 21 日締切り) で投票を実施する事が確認された。

同 WG9 において審議中の “磁力計法による交流損失試験方法” は、規定日程 (2003 年 4 月 18 日投票締切り) 通り FDIS 投票する事が確認された。

WG10 において審議中の “バルク超電導体の捕捉磁束密度試験方法” は、ラウンドロビン試験 RRT 結果を投票用委員会原案 CDV に反映すべきことが承認され、現在回付中の CDV を一旦キャンセルし、2003 年 11 月を目標に改訂 CDV を再回付する事が承認された。

IEC/TC90 標準化戦略 (Strategic Policy Statement) の改訂に関して、つぎの議論を反映する事となった。

現行規格 IEC61788-1,-2,-3,-4,-5,-6,-7,-10 及び-12 のメンテナンスは、既存ワーキンググループ WG の仕事の一環として実施することが確認された。現在提案されているコメントに対する各国の意見を 3 カ月後にまとめ、メンテナンス回付報告書を作成することとした。また、メンテナンスに際して、P-メンバー国の標準化活動活性化と新規専門家登録が要請された。

参加各国並びに VAMAS における標準化活動報告として、各国における IEC 整合国内規格の整備状況、VAMAS と連携した標準化活動の必要性が報告された。また、米国からニオブの残留抵抗比 RRR 試験方法が、韓国からマイクロ波域表面抵抗試験方法が、日本から超電導市場に適合した製品規格化などの新規業務提案がそれぞれ行われた。

製品規格化を含めた今後の標準化活動に関して、IEEE、ICMC、CIGRE などとの広汎な連携の必要性、並びに公開仕様書 PAS や技術仕様書 TS 発行における R&D プロジェクトとの連携が指摘された。

次回第 9 回 IEC/TC90 総会は、開催時期 2004 年 9 月か 10 月、開催場所米国 (アルゴンヌ国立研究所、ウイスコンシン大学など) の方向で調整する事となった。

[超電導 Web21 トップページ](#)

特許情報

成立特許の紹介

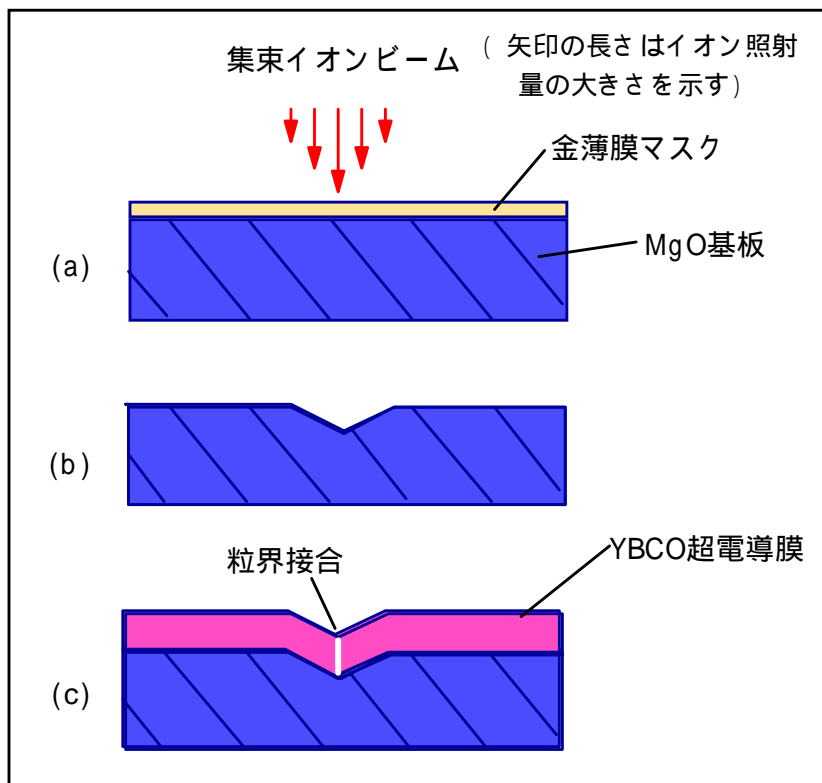
最近成立した特許を紹介します。

特許第 3367878 号「酸化物超電導体素子の製造方法」特開平 11-112044 (平成 9 年出願)

集束イオンビームを用いてV字状溝を形成する技術は、微細化と接合配置の自由度の観点から接合形成技術として有用である。しかし、イオンビームの強度分布によって接合の溝形状が決まるため、装置性能の不安定さがそのまま溝形状に反映され、接合の臨界電流がばらつきの大きくなる要因となっている。

本発明では、集束イオンビームのイオン照射量を変化させることによって、基板に設ける接合形成の溝部分の形状最適化を可能にした。この結果、接合の臨界電流のばらつきが著しく改善され、酸化物超電導集積回路の形成にも応用可能になった。

なお、本発明の詳細は、特許庁のホームページから特許電子図書館 (IPDL) をご利用下さい。



(SRL/ISTEC 開発研究部長 中里克雄)

[超電導 Web21 トップページ](#)

平成 15 年電気学会全国大会シンポジウム報告

平成 15 年電気学会全国大会は、平成 15 年 3 月 17 日から 3 月 19 日まで東北学院大学泉キャンパスにて開催された。同大会は、一般講演 1,538 件、シンポジウム講演 24 セッション、特別講演 3 件、懇親会、附設展示会、田中耕一氏によるノーベル賞受賞記念特別企画学術講演など盛りだくさんの企画のもとで盛大に行われた。

シンポジウム講演 24 セッションのうち、超電導分野に関連するシンポジウムは、S1 環境技術の現状と将来・電気工学の貢献、S2 産業競争力強化のための科学技術研究費の活用方策・エネルギーを例として、S5 ナノテクノロジーと超電導材料の展望、S14 世界の核融合用超電導マグネットの現状、S19 磁気支持応用機器における最近の開発動向並びに S22 ニーズを見据えたセンサの開発とその機能性材料・プロセス技術であった。ここでは、「S5 ナノテクノロジーと超電導材料の展望」について報告する。このセッションにおいて、金属系超電導材料関連 3 件、酸化物系超電導材料関連 3 件及び酸化物超電導デバイス関連 2 件の講演があった。

金属系超電導材料に関して、(1) Nb-Ti 複合超電導線への 30nm から 100nm の人工的なピン止め点導入に際してピンの種類、ピンサイズ、ピン密度並びに適用磁界の選定によってピンニング特性を最適化し得る技術が 2.5T の交流超電導マグネットとしてすでに実証されていること、(2) 内部拡散法 Nb₃Sn 超電導線における臨界電流密度特性は 100nm から 200nm の結晶粒径以下への微細化制御、結晶粒形状の等軸晶化制御並びに DT 法などによる線材構造の工夫によって改善し得る技術レベルにあること並びに(3) Nb₃Al 超電導線の製造工程において、急熱急冷法による体心立方相過飽和固溶体の加工後の変態による結晶粒径 1-2 μm の化学量論 Nb₃Al 形成と高温変態による積層欠陥の抑制によって、1GHz(23.5T)NMR 対応の高磁界マグネット用線材候補材料となり得ることが報告された。

酸化物系超電導材料に関して、(1) 銀シース Bi-2223 線材ではパウダーインチューブ (PIT) 法による ab 面方向への板状結晶組織制御技術によって実用可能な長さ 1km で臨界電流密度 $J_c > 2 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ を達成しているものの、100nm 級の微細組織には板状コロニー間のツイスト粒界や小傾角チルト粒界に起因する弱結合が輸送特性を支配しており、この電氣的並びに機械的課題の解決によって現状の 5 倍程度の高性能線材 (第 3 世代) の実現が可能であること、(2) Y 系線材では粒界弱結合問題を解決する手段として ab 面内配向を達成するための IBAD 法という 10 度の高配向中間層作製技術が確立しつつあり、すでにこの基板 46m 上に形成した結晶粒径数百 nm の Y-123 薄膜では 5 度の高配向超電導テープが作製されたこと並びに(3) TFA-MOD 法という低コスト非真空プロセスにおいては、Y-123 相の前駆体中の CuO を 14nm-23nm のナノ微構造制御することによって CeO₂ 単結晶基板上で 10MA/cm²、金属基板上で 3MA/cm² の高 J_c 特性をそれぞれ達成したことが報告された。

酸化物超電導デバイス関連技術に関して、(1) 集積回路用酸化物超電導ジョセフソン接合としてランプエッジ接合が有望視されており、標準偏差 7%以下の 1000 接合を達成するためには、下部電極の傾斜面にアルゴンなどのイオン照射による界面改質層を形成する過程で、10⁵A/cm² 級高電流密度を狙った数ナノメートル厚のバリア層は Ba を含むペロブスカイト型立方晶のみで構成することが必須であること及び(2) かかる接合を用いた酸化物超電導の単一磁束量子(SFQ)回路は動作温度、出力電圧、高周波動作で金属系 SFQ に優る特徴を有しており、すでにランプエッジ接合を配したトグル・フリップフロップ回路での入力上限周波数 270GHz の確認、SFQ 回路で処理された 20GHz 以上の入力高周波信号を室温回路系に伝送するための SQUID を 5 段積層した昇圧回路の試作などの報告がなされた。

(編集局 田中靖三)

[超電導 Web21 トップページ](#)

米国物理学会 2003 年年次会報告

量子計算機を中心に

2003年3月3日～7日米国テキサス州オースティンで米国物理学会が開催された。超電導関連だけでも非常に多くのセッションがあったが、その中でのトピックスの1つである量子計算機を中心に報告する。

量子計算機は、究極的超並列計算とも言えるもので、計算能力という点では現在のノイマン型計算機をはるかにしのぐポテンシャルを秘めている。どのような素子でこれを実現するかについては多くの提案がなされているが、固体集積デバイスとして量子計算機を実現することを考えれば、超電導デバイスは有力候補の1つと言えよう。これまでショアの因数分解法やグローバーのソーティング・アルゴリズムなどいくつかの量子計算アルゴリズムが提案されており、また、サラリーマン巡回問題のような NP 問題や従来型計算機では実態上不可能な実質規模での強相関多体系の計算にも大きな力を発揮するものと期待は大きい。また、デバイスに関する研究についても、本年2月日本電気と理化学研究所が 2Qbit の絡み合いを初めて超電導デバイスで実現したと報じられており、デバイス技術の進歩も著しい。

今次学会での超電導関連報告は素子技術が中心であった。素子には大きく分けて Qbit を構成しこれに適当な演算を行うものと演算結果を読み出すものからなる。Qbit 素子については、量子状態の重ね合わせを実現するためのラビ振動、絡み合いの実現、単純な操作で位相シフトやユニタリー変換など量子状態を外部から操作する技術の実現、実質的計算時間を確保するためなるべく長いコヒーレント時間を維持することなどが課題であり、読み出し素子については安定にいかに少ない操作で情報を読み出すかなどが課題である。以下、今次米国物理学会における超電導量子計算機についてセッション別に概要を紹介する。

セッション D1 Quantum Computing: Superconductors

発表は全部で5件。超電導 Qbit としては、ジョセフソン接合を用いた磁束素子と微小電極中の電子数を制御する電荷素子が基本であるが、素子に関する研究者の種々の工夫が紹介された。本セッションで紹介された Qbit はラビ振動が観測されたに留まるが(カンザス大学、NIST、デルフト大学) これらの素子は磁束量子の Qbit である。カンザス大学の素子はデコヒーレンス時間が長い。NIST はマルチビット化した時のデコヒーレンスの検討に力を入れており、素子の構成に工夫を加えることにより 20～100 ビットを視野に入れて検討を進めるとしている。デルフト大学は CEA-Sacay 等多くの機関と協力関係にあり、2Qbit の検討段階にある。また、エール大学では電荷素子ながら、その基底状態と励起状態の直交する混合状態 2 状態を Qbit の 2 状態として、これをジョセフソン素子のオン・オフに対応させて読み出すという面白い素子を検討している。この構造を用いること等により Ramsey Fringe 測定から量子コヒーレント Q ファクター (\times 遷移周波数 \times デコヒーレンス率の逆数) として 25,000 を達成している。

セッション G19 Quantum Information Science: Superconductor

Qbit 素子 5 件、素子の機能解析 2 件、素子加工技術 1 件、読み出し技術 2 件、デコヒーレンスを含むノイズ 4 件の発表。この中で IBM の反対称 3 接合直流 SQUID を用いた素子は 1 回の入力で Qbit を生成したりその状態を読み出すことができ、これまでに量子状態の重ね合わせを実際に観測

している。今回の IBM の発表は素子の色々なモードでの動作について実験的に調べた結果を報告したものだ。量子計算機は微弱な信号を取り扱うものであるため、周辺の電磁環境に影響を受けやすくポイズニングの原因である準粒子の発生源にもなり、デコヒーレンスの原因ともなる。SQUID Array を結合して回路インピーダンスを外部磁場により変化させ周辺電磁環境をシミュレートするというアイデアが出された(理研他)。これは逆に用いれば周辺電磁環境の抑制にも使えそうである。また、Qbit 素子としては、ジョセフソン接合四面体素子(ルトガー大学他) やチューナブル共振器を介した 2Qbit 素子(アリゾナ州立大学) が検討されている。

また、 ^{31}P 原子を半導体基板に整列させた Qbit の製造方法として、荷数の極めて大きなイオン(P^{+12}) を使うことにより精度高く原子を配列させることが検討されている(ローレンス・リバモア研他)。

セッション H19 Quantum Information Science: Superconductor

Qbit 素子 4 件、読み出し 5 件、デコヒーレンスを含むノイズ 5 件、その他 1 件の発表。本セッションのトップ 2 件(メリーランド大学) はいずれもキャパシタにより接続された Qbit の発表であり、これは量子絡み合い実現に向けた重要技術である。しかしながら、本年 2 月の時点で既に NEC、理研のグループが世界で初めてキャパシタ接合超電導 2Qbit において量子絡み合いを実現したと報告しており、日本が一步先行している。読み出しに関しては、実用化に向けてのワンショット読み出しに力が注がれている(エール大学他及び NTT 基礎研究所他)。ノイズ関連で興味を引いたのは、ジョセフソン接合(Nb/AlO/Nb) の準粒子電流の測定を行った実験(IBM)。準粒子はデコヒーレンス抑制上大きな要素である。今回の発表では、IBM は準粒子電流のみを抽出するには至っていないが、臨界電流を減少させることで、デコヒーレンスの原因となる準粒子を大幅に減らせることができると報告している。その他、本セッションにおいても共振器結合 2Qbit に関する発表があった(エール大学)。

セッション K4 Quantum Computing and Superconductors

このセッションはいささか難解である。ジョセフソン接合アレーに適当なトポロジータを持つことにより外部擾乱に非常に強い量子計算機が実現できるいわゆる Topologically Protected Quantum Computation に関する発表が全発表件数 5 件のうちの 2 件(カリフォルニア工科大学、ルトガス大学) を占める。また、CNRS からは特異な局在現象が現れるアハラノフ・ケージ 2 次元格子に関する発表があった。これらはいずれもノイズ、デコヒーレンスの抑制を目指したものだ。

現在、量子計算機は基礎的な段階にあり、その実現に向けては多くの課題がある。超電導量子計算機に限って言えば、量子重ね合わせ、2Qbit の絡み合いについてはすでに実現されているが、これは最小の要素技術の機能確認ができたにすぎない。また同時に、超電導以外の方法で量子計算機を構成する提案がなされており、必ずしも超電導量子計算機技術が先んじているわけではなく競争は激しい。超電導量子計算機について、今後、有意なデコヒーレンス時間の確保、Qbit の集積化等が進み、一日も早く演算機能の実証段階に進むことを心から期待している。

(ISTE 国際部長 津田井昭彦)

[超電導 Web21 トップページ](#)

米国における SMES 関連技術動向調査より

平成 15 年 2 月 9 日～16 日にかけてフロリダ州立大学内にある CAPS(Center for Advanced Power Systems)並びに NHMFL(National High Magnetic Field Laboratory)及び AMSC 社 (American Superconductor Corporation)、Super Power 社などの超電導関連の研究機関やメーカを訪問し、SMES 関連の技術開発動向の調査を行った。

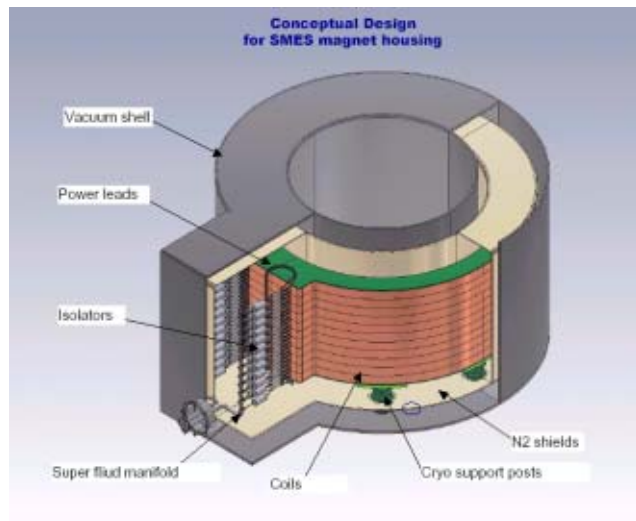
ここでは、まず 100MJ、100MW SMES を開発中である CAPS についての最新情報を紹介する。

CAPS は、オール電化船の基礎研究開発を通して電力技術に関する調査研究と教育を行うことを目的に、フロリダ州立大学内に ONR(Office of Naval Research)からの年間 6 百万ドルの補助金により設立された組織である。現在 NHMFL に隣接した Tallahassee Electric 社 Levy 変電所(100MVA)横の約 3,600m²のスペースに SMES などの超電導機器の実証試験をできる設備と CAPS の研究所及び事務所を建設中である。建屋はほぼ完成しており、試験設備も 2003 年の 8 月～9 月には完成する予定である。なお、試験設備としては 5MW までの試験をできる能力と米国では最大級のリアルタイムのデジタルシミュレータを有している。また、SMES コイルについては、2003 年 8 月に完成する予定で、SMES システムとしての現地での試験開始は、当初予定より遅れ気味で 2004 年の後半から 2005 年前半となる見込みである。

以下に同 SMES の仕様と鳥瞰図を示す。

SMES の仕様

コイル形状	ソレノイド
コイル寸法	外径 3.58m×高さ 1.32m
定格電流	4kA
定格電圧	24kV
運転温度	4.5K
定格出力	±50MW (最大出力は 96MW)
貯蔵容量	100MJ (28kWh)
巻線方式	ダブルパンケーキ方式 (44 個)
導体	CICC,Nb-Ti (6 本×3 次撚り)
銅比	2.9



鳥瞰図

次に高温超電導線材の開発動向について紹介する。

AMSC 社は、Boston 郊外の Devens に約 8 千万ドルをかけて単長 3.6km のビスマス 2223 系高温超電導線材を最終的には年間 20,000km 製造できる広大な工場 (100m×350m 程度) を昨年建設し

ており、2003年1月現在で900m/年の製造が可能なラインが完成している。一方、次世代Y系線材については、製造コストの安いMOD法にて開発中で、2002年の6月から10月にかけて大きなブレークスルーがあり、10m長で96.5A～121A（end-to-endで107A）の線材が試作できている。これは、DOEの計画より1年以上も前倒しで達成したものとのことであり、今後2～3年でパイロット製造ラインをつくり、4年後には供給開始できる見込みとしている。ひところの「Y系線材は2005年にマーケット・イン。」が、ここへ来て現実味を帯びてきたという言いぶりであった。

(ISTEC 調査企画部 高祖聖一)

[超電導 Web21 トップページ](#)

【隔月連載記事】

やさしい超電導のおはなし (その2)

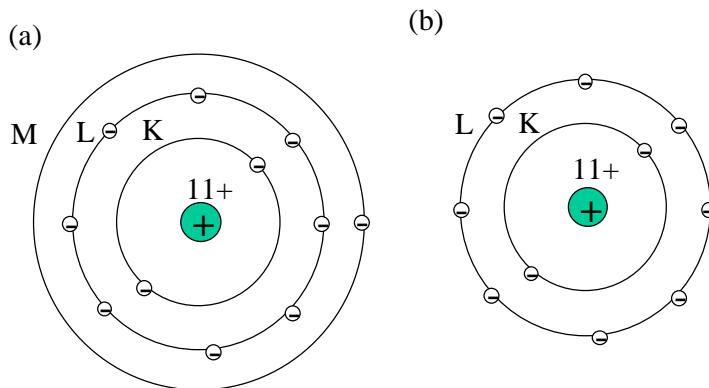
超電導工学研究所
芝浦工業大学
村上雅人

前回紹介したように超電導の特徴のひとつは、電気抵抗が完全にゼロになることである。ところで、電気抵抗がゼロということを理解するためには、そもそも電気抵抗の原因がいったい何なのかを知る必要がある。そこで、今回は電気のもととはいったい何であるのか、また電子の運動のじゃまをする電気抵抗の原因は一体何であるのかに迫ってみる。

1 自由電子とは

電気の正体は、導体中の電子の流れ、つまり電流である。導体として有名な銅やアルミニウムなどの金属は正に帯電した格子と呼ばれる骨格と、そのまわりに自由に動ける無数の電子が存在する。この自由に動ける電子を自由電子と呼んでいる。金属には、自由電子が存在するので電圧（電位差つまり自由電子の濃度差）を加えると、電子が動き出すのである。

少し回り道であるが、この自由電子の存在を理解するために、原子の構造を簡単に復習してみよう。例えば金属原子であるナトリウムは図 1(a)のような構造を有している。Na の原子番号は 11 で、原子核に 11 個の中性子と陽子があり、陽子が正に帯電している。そのまわりを 11 個の電子が 3 種の軌道をまわって運動している。ここで、電気特性に関しては、原子殻の +



11 と電子の・ 11 が互いに打ち消し合って、電気的に中性の状態が保たれている。

ところで、ナトリウム原子の最外郭 (M 殻) の電子は 8 個で飽和するのであるが、この軌道には、たった 1 個の電子しか居ない。最外殻の電子は、正に帯電した原子核の影響 (ク

図 1(a) Na の原子構造 ; (b) Na⁺イオンの構造。Na 原子では最外殻の M 殻に電子が 1 個ある。この電子は、原子核からの距離が最も遠く、クーロン力が小さいので、放出されやすい。Na が電子を放出すると、(b)のようにすべての電子軌道が埋まった安定な電子構造となる。この電子構造は原子核の電荷と重量が異なるが、不活性元素の Ne と同じものとなる。

ーロン力) が小さいうえ、すぐ内部の L 殻は飽和状態にあるので、何らかの外乱が働くと、図 1(b)のように、この電子が原子から離れる場合がある。それがイオン化と呼ばれるもので、イオンになると、すべての電子軌道が飽和状態となり、電子構造としては安定となる。しかし、その一方で電荷の均衡がなくなり正に帯電する。これを Na⁺のように表記する。原子番号 12 のマグネシウムは、

M 殻に 2 個の電子があるので、これら電子が遊離して 2+ に帯電した Mg^{2+} のイオンとなる。

ここで、Na 原子どうしが十分近づいた状態を考えてみよう。すると最外殻の電子は、もともと原子核からの束縛が小さいうえ、原子間の距離が小さくなると、すぐ隣の原子核からの影響も無視できないようになる。この結果、図 2 に示すように、最外殻の電子はひとつの原子核からの束縛を逃れて、自由に運動できるようになる。これを自由電子と呼んでいる。一方、骨格をつくっている格子は、ちょうど Na^+ イオンの構造をもったものとなる。

よって、金属では正に帯電した格子（金属イオンの格子）の中を負に帯電した電子が自由に動き回っているのである。ただし、格子の正電荷と自由電子の負電荷の総和は等しく、電気的な中性が保たれているのである。

自由電子の存在によって、金属は電気や熱をよく伝えることができる。金属に電圧を加えると自由電子の移動が起こる。これが電流であり、これら自由電子を伝導電子と呼んでいる。ただし、金属を構成する原子には伝導には寄与しない束縛電子が多数存在することも忘れてはならない。

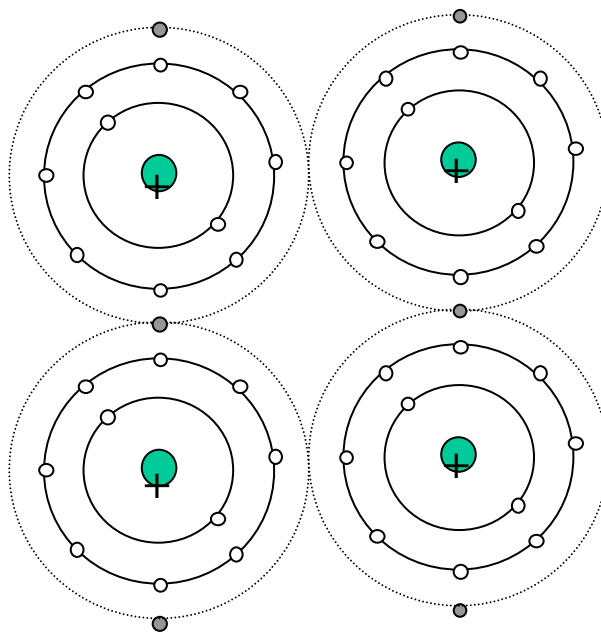


図 2 Na 金属の構造。最外殻電子は個々の原子核からの束縛から逃れ、自由に動くことができる。

2. 電気抵抗の正体

前回紹介したように、伝導電子の運動を支配するオームの法則によると、電子はつねに力を受けているにも関わらず、等加速度運動ではなく、等速度運動を続けていることになる。

多くの研究者は、この問題に悩まされた。結論として、金属内では電子の運動を妨げるもの、あるいは直截的には衝突するものが存在し、ミクロには電子が加速度運動をしていても、

ちょうど、もぐらたたきのように衝突のたびに減速させられ、平均すると、見かけ上速度が一定に見えるという結論に達したのである。もちろん、電子が衝突する相手こそが電気抵抗のもとである。

それでは、金属内で電子が衝突する相手とはいったい何であろうか。まず、考えられるのが、金属を構成している格子（金属イオン）である。金属と真空の違いは、金属原子がたまっているかどうかである。

ところが、実験を進めていくうちに、電子は格子間隔、つまり金属イオン間の距離の数 10 倍もの距離を自由に動けるということが分かったのである。専門的には、この距離を電子の平均自由行程（mean free path）と呼んでいる。（前回のオームの法則を説明した図 1 では、衝突から衝突までの距離に相当する。）電子が自由に動ける距離が格子間隔よりもはるかに長いのでは、金属イオンと電子の衝突が電気抵抗の主原因とは考えられない。

そこで、つぎに候補が上がったのが、金属内に存在する不純物であった。どんなに精密につくったとしても純度 100% の金属をつくることは不可能である。そこで、不純物濃度を変えて金属の電気抵抗を測定する実験を行ったところ、確かに不純物量が減ると電気抵抗が減ることが確かめられた。しかし、あるレベルから相関がなくなるのである。これは、不純物では説明できない電気抵抗の本質的な原因が存在することを示している。

結局、物理学者たちが電気抵抗の犯人として特定したのは格子振動であった。電気抵抗の温度依存性を測定すると、あらゆる金属で温度の低下とともに電気抵抗が低下する現象が観察される。それでは、温度の正体は何であろうか。それは、金属原子や分子の運動（あるいは振動）である。この格子振動をフォノンと呼んでいる。フォノン（phonon）は音である phone が語源となったもので音子と訳される場合もある。音が伝わるのも格子や空気を構成している気体分子の振動によるので、格子振動にこのような呼び名がついている。

有限温度では、金属を構成している格子（金属イオンの配列）は常に振動している。その大きさは温度上昇とともに大きくなる。ところで、すでに自由電子の項で説明したように、金属の格子は正つまり、+に帯電している。この+の格子が熱運動で揺れ動くと、負つまり・に帯電している電子はクーロン相互作用により、影響を受ける。つまり、負に帯電した電子が自由に動こうとしても、そのまわりで正に帯電している格子が振動していたのでは、その自由な動きが封じられる。この振動は温度とともに大きくなるから、電気抵抗も温度の上昇とともに大きくなる傾向になる。

それでは、絶対零度ではどうであろうか。この温度では、格子振動が無くなるはずであるから、電気抵抗はゼロとなって超電導になるのであろうか。答えはノーである。なぜなら、図3のように、・の電子が+の電荷の海の中を動こうとすると、必ず影響を受けるからである。この相互作用を専門的には電子格子相互作用（あるいは電子フォノン相互作用）と呼んでいる。言い換えると、格子が振動していなくとも、電子の運動が、格子振動を誘導してしまうのである。つまり、電子がある格子位置に移動すると、・に帯電した電子と+に帯電した格子の間にクーロン力が働くため、わずかではあるが、格子が電子に引き寄せられて歪むのである。電子が、この位置から移動すると格子はもとの位置に戻ろうとするが、慣性で振動が起こる。つまり、電子が格子振動を誘導しているのである。ただし、実際にこの振動を実験で観察することはできないので、virtual phonon（仮想フォノン）と呼ばれている。

結局、絶対零度であっても、電子格子相互作用が存在する限り、電気抵抗が生ずるのである。これでは、超電導現象を説明することができない。つまり、電気抵抗の正体が分かったのに、電気抵抗をゼロにするメカニズムが分からないのである。この超電導問題は数多くの研究者を悩ませることになる。しかし、意外なところに電気抵抗がゼロになる秘密が隠されていた。なんと、電気抵抗の原因となる電子格子相互作用が、電気抵抗をゼロにする鍵を握っていたのである。

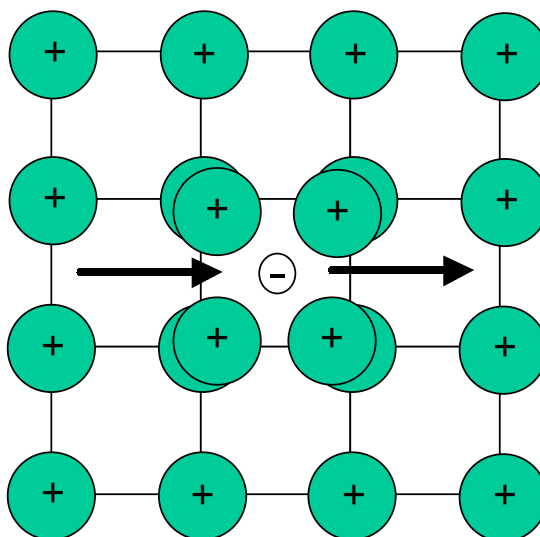


図3 絶対零度で金属格子が振動していない場合でも、負に帯電した電子が運動すると、図のように正に帯電した格子がクーロン力で変形し、振動する。この振動を仮想振動（仮想フォノン）と呼んでいる。このため、電子の運動エネルギーが格子に奪われることになる。つまり、絶対零度でも電気抵抗はゼロにはならないのである。

読者の広場

Q&A

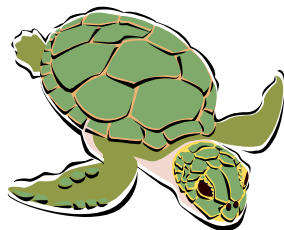
Q: 酸化物超電導材料はどこに使えるのでしょうか？

A: 酸化物超電導材料は、Li-Ti-O 系、Ba-Pb-Bi-O 系など 1970 年代からすでに知られていましたが、ベトナム・ミューラーにとって 1986 年に発見された M(Ba,Sr,Ca)-La-Cu-O 系の他 Y-Ba-Cu-O 系、Bi(Pb)-Sr-Ca-Cu-O 系などのいわゆる銅系酸化物超電導材料がよく知られています。特に、銅系酸化物超電導材料は、その臨界温度が金属系超電導材料よりも 80 度以上高いことから金属系超電導材料よりも広い用途が期待されています。

酸化物超電導材料の特徴は、臨界温度が金属系超電導材料よりも 80 度以上高いためより広い温度範囲で利用できる、比熱が大きいためクエンチなどの熱的に不安定性の心配がない、超電導状態を維持する温度が金属系超電導材料の液体ヘリウム温度（マイナス 269 度）より 70 度以上高くできるため冷凍機の負荷が大幅に軽減される、高温かつ高周波帯域での表面抵抗が低いためマイクロ波ミリ波通信に適用できる、接合の電流・電圧特性にヒステリシスがないため超電導ギャップが大きいことと相俟ってジョセフソン接合のスイッチング速度が 1 桁速くできることです。

これらの特徴を生かす様々な用途開発が活発になされており、一部ではすでに実用されているものもあります。すでに実用されているものとして、酸化物超電導電流リード、電流リードを装着した冷凍機冷却型超電導マグネット、移動体通信（携帯電話）基地局用超電導フィルタなどがあります。特に、国内において冷凍機冷却型超電導マグネットがすでに 140 台以上稼働していること、米国では超電導フィルタがすでに 2000 基以上稼働しているなど、急速に市場拡大がなされています。また、開発中のものとして、超電導磁気エネルギー貯蔵装置（SMES）、超電導電動機（モータ）、超電導バルク磁石、磁気分離装置、発電機、電力ケーブル、限流器、変圧器、磁気浮上列車、電磁ブレーキ、A/D 変換器、情報通信用交換機（ATM 交換機、ルーターなど）などがあります。一方、これら酸化物超電導材料の応用による省エネルギー効果は勿論のこと、CO₂削減など環境に対する貢献に大きな期待が寄せられています。

これらの応用を促進するためには、今後、酸化物超電導材料技術とその応用技術が一層高度かつ利用者にとって安価で扱いやすいものにしなければなりません。たとえば、より長くかつより安価な線材の製造技術、コンパクトな酸化物超電導コイルの製作技術、大面積で高均質な酸化物超電導基板の製造技術、ジョセフソン接合の高度集積化技術などが挙げられ、日夜研究開発が続けられています。



[超電導 Web21 トップページ](#)