

超電導応用技術開発の進歩と展望

発見後15年を経て、高温超電導の研究開発は、この数年において急速な進歩を示し実用化への展望が開けつつある。その理由として、1988年から1997年まで続いた通産省工業技術院の「超電導材料・素子の研究開発」の後継として1998年に発足した「超電導応用基盤技術研究開発」プロジェクトが、応用開発の目標を明確にし、超電導工学研究所が中心となり、産業界と一体となって開発を推進したことが挙げられよう。そして、これはアメリカやEUにおける開発動向も同様な傾向を示していた。以下で、本プロジェクトで重点的に開発された、(1)超電導バルク、(2)次世代線材、(3)超電導デバイス、(4)超電導応用基礎の4課題について簡潔に述べることにする。

(1)超電導バルクの開発

これ迄、材料として主にYBCOが用いられてきたが、YをNd、Sm、Gd等で置換し、更にこれらの混晶の研究が進められ、GdBCOにおいて77Kで3Tの捕捉磁界が得られたが、これはYBCOのその3倍にも達している。又この開発で特筆すべきことは、超電導バルク体にエポキシ樹脂を真空含浸させることにより、機械的強度が著しく増し、100MPaを超える強度が得られたことである。強磁界を捕捉した場合、磁束の反発力により強い内部応力が発生するが、樹脂含浸により強化されたバルク体は、YBCOでも30Kで実に15Tの強磁界を捕捉することに成功している。更にこれは、室温で保存する場合に発生する劣化を防ぐ役割も果たしている。

このように、超電導バルクは、既に実用化の段階に到達しており、実際にフライホイール電力貯蔵システムや、高効率な磁気分離システムが開発され、水浄化システムに応用されており、今後もこれを用いた新しいシステムの開発が期待される。

(2)次世代線材の開発

YBCOを超電導体とする次世代線材は、第一世代のBi系線材より高性能が期待できる為に速やかに開発されることが期待される。この線材は、金属基板、中間酸化層、そして超電

導層の三層構造を持っているが、それぞれの材質、及びその組み合わせに多くの可能性があり、現在多くの研究機関で様々な試みがなされている。

次世代線材として期待される性能としては、厚さ0.1mm、巾1.0cmで77Kにおける臨界電流が100A以上、64K、5Tで50A以上である。このことは、超電導層の臨界電流密度が77Kで $10^6\text{A}/\text{cm}^2$ 以上であることを意味する。更に、将来価格が問題になることを考慮すれば、製造速度も5m/時以上であることが望ましい。

線材である以上、数百メートルを単位とするが、超電導線材化プロセスにおける困難さは、どこか1ヶ所でも不良の部分があれば、線材としての価値を失ってしまうことにある。従って、製造プロセスの安定性や、自動制御性まで考慮する必要がある。

現在、ニッケル合金の Hastelloy を基板とし、その上に、いわゆる IBAD (Ion Beam Assisted Deposition) 法により GZO を中間層として蒸着させ、更に PLD 法により YBCO をつけた試料で、長さ10m のものが試作されているが、超電導層の臨界電流密度は77Kで $5 \times 10^6\text{A}/\text{cm}^2$ 程度である。IBAD法は中間層の製法としては極めて優れ、既に60mの中間層が試作され、近く50m級の次世代線材が出現するものと期待されている。

最近、超電導層として、TFA-MOD法が注目されている。これはY、Ba、Cuのトリフルオロ酢酸塩を原料溶液として中間層に塗布し、適当な熱処理によりYBCO層を成長させるもので、簡単な装置で製作され、しかも臨界電流密度も77Kで $10^6\text{A}/\text{cm}^2$ という高い値を示している。これが実用化されれば、価格の低減に大きく寄与するものと期待されている。

最近の世界各地の研究成果を展望すると、次世代線材の開発も、世界的に本格化しつつあり、数年後には本格的な実用線材が出現するものと期待される。

(2頁へ続く)



(SRL/ISTEC 田中所長)

超電導関連 10-11月の催し物案内

10/2-5

International Symposium ISSP-Kashiwa 2001

<http://www.issp.u-tokyo.ac.jp/ISSP8>

場所：東京大学柏キャンパス

(主催：東京大学)

10/7-11

ISMST6/6th International Symposium on Magnetic Suspension Technology

<http://www.nsl.go.jp/jpn/new/a20cb201.html>

場所：Turin, Italy

10/12

第2回超電導応用研究会「超電導デジタルデバイスの研究開発」

場所：千葉工業大学、習志野市

(主催：低温工学協会)

11/15-16

APPLICATION OF SUPERCONDUCTORS in Electronics, Communications and Computing

<http://www.knowledgefoundation.com>

場所：Seaport Hotel and Conference Center, Boston, MA, USA

(主催：The Knowledge Foundation)

11/23-25

第65回秋季低温工学・超電導学会

場所：福井工業大学、福井市

(主催：低温工学協会)

11/26-30

MRS Fall Meeting 場所：Boston, MA

(主催：MRS)

目次

超電導応用技術開発の進歩と展望 1

超電導関連 10-11月の催し物案内 1

「超電導応用基盤技術開発」プロジェクトについて 2

バルク超電導体の進捗状況 2

超電導線材開発の進捗状況 3

特許情報 3

超電導素子研究開発の進捗状況 4

高温超電導材料研究の進捗状況 5

第7回超電導標準化国際会議開催 5

超電導速報 - 世界の動き (2001年8月) 5

[隔月連載記事]超電導「超電導」の神秘(その4) 7

第14回国際超電導シンポジウム

(ISS2001)開催速報 8

読者の広場(Q&A) 8

新聞ヘッドライン(8/20-9/13) 8

「超電導応用基盤技術開発」プロジェクトについて

1986年に酸化物系の高温超電導体が発見されて以来、国内外の研究機関で積極的に超電導に関する研究が始まった。それは、高温超電導材料が、将来的には電力システムやエネルギーシステムは当然のこと、輸送、医療、宇宙システムなど幅広い産業分野にバリエーションを与えるからであり、別の表現をすれば、高温超電導体を用いることにより、全く新しい機能を有する機器や飛躍的に高性能な省エネルギー機器の実用化、新規産業の創出が期待できるからである。

わが国では、1988年に経済産業省(当時通商産業省)が「超電導材料・超電導素子の研究開発」プロジェクトを発足させ、新エネルギー産業技術総合開発機構(NEDO)を通して、新設の超電導工学研究所が研究を受託した。10年間の期限付きで研究・開発が進められ、高温超電導体の正体がよく分からない時点でのスタートであったので、基礎研究が主体であった。この間、超電導バルク体や単結晶育成など世界に誇れる成果を数多く挙げてきた。

1998年には、これまでの10年間の成果を踏まえて実用化を念頭においた基盤技術を進めていく必要があるという国、民間のコンセンサスを得て、「超電導応用基盤技術研究開発」プロジェクトが5年間の予定で発足した。

このプロジェクトの目的は、民間では開発リスクが大きすぎる、Y系や希土類元素系(RE:Gd, Sm, Nd等)の酸化物材料を対象として、電力システムへの応用や省エネルギー機器の実現に向け、バルク(超電導の塊)、線材(超電導の電線)、デバイス(超電導の素子開発と集積回路)を作製するための基盤技術の確立を図ることである。さらにこれらの開発に必要な基礎技術開発を加えて次の4つの研究開発テーマでスタートした。

バルク材に関しては目標をほぼ達成しており、これを用いた浄水用磁気分離装置のプロジェクトがISTEC/SRLと日立製作所が共同して開発している。その他にも応用の芽は広がりつつある。

線材については、基板、中間層、超電導層のそれぞれの作製方法がほぼ固まりつつあり、もっとも技術的に困難と考えられていた中間層もすでに60μm程度できるようになった。今後は長尺にわたり特性の均一な線材の製造方法の確立に向けて更なる努力が払われる。

デバイスについては、界面改質型ジョセフソン接合技術の成功を契機に開発が大きく進み、素子の集積度1000で、特性のバラツキが8%以下を目標として開発が進められている。

基礎研究では、磁束の挙動や不純物添加効果等の研究を通じて、上記分野の開発に貢献している。

このように、本プロジェクトは順調に推移しており、プロジェクト終了時点では、当初の目標を達成できる、あるいはそれ以上の成果を上げ得る状況となっている。

(SRL/ISTEC 特別研究員 堀上 徹)

超電導応用技術開発の進歩と展望 (1頁からの続き)

(3) 超電導デバイスの開発

超電導電子デバイスとして、最近注目されているのが、単一磁束量子素子(Single Flux Quantum Device: SFQ)である。これは微細なスクイド素子が量子化された磁束を保持することを利用したもので、1ピコ秒の演算速度(半導体素子の100倍速い)と、1ナノワットという低消費電力(半導体素子の1/100)という特徴をもっており、集積化すれば、超高速演算素子としての可能性が開けるものと期待されている。

低温超電導体であるNbを用いたデバイスでは既に1万素子の集積化が可能であり、今後の展開によっては10万素子以上の集積化が可能となり、超高速演算素子としての可能性は高いが、4Kでの使用が必要であり、ある程度大型機器への応用に止まるものと思われる。

一方、YBCOを用いたSFQ素子は30Kでも使用可能であり、計測用や通信用機器への応用が期待できる。しかし、ここで問題になるのが、スクイドを構成するジョセフソン接合の均質性である。幸い本プロジェクトの初期に、界面改質型ランプエッジ接合が開発され、接合を流れる臨界電流値の分散が100接合で7%以下のものが試作され、10から20接合程度的高速回路の試作に成功した。本プロジェクトの目標である1000接合で分散が8%以下に達すれば、100接合の集積回路(例えばデジタルサンプラー)が出現するものと期待されている。

(4) 超電導応用基礎の研究

高温超電導は、根幹である発現機構を除けば、その物性に関する基礎研究はかなり進展したが、応用の立場から見れば未解決の問題が山積している。例えば、臨界電流を決定する上で重要な磁束のピン止め効果に及ぼす不純物の影響などは、応用からみて非常に重要である。更に超電導電流に及ぼす結晶粒界の影響を正確に理解する必要がある。又純粋な単結晶を製作し、物性を調べることも、物質の限界を知る上で重要な研究であり、今後も長期的視野に立って基礎研究を継続する必要がある。

総括すれば、高温超電導の応用の展望が、ここ数年で急速に開けつつある現在、応用に関する基盤技術開発は、その最も重要な時期に入ったと言える。

(SRL/ISTEC 所長 田中昭二)

バルク超電導体の進捗状況

バルク超電導体の材料開発の課題としては、(1)いかに捕捉磁場の強い材料をつくるかという課題と、(2)大型化をいかに実現するか、(3)また最近では材料の機械特性をいかに改善するかの3点に集約される。

捕捉磁場は臨界電流密度と材料のサイズに比例する。臨界電流に関しては、Nd, Sm, Eu, Gdなどの複数の希土類元素を混合することで、77K、2T(H//c軸)で100,000A/cm²という高い値を得ることに成功している。今後は、この系で大型バルクの製造に挑戦する。

捕捉磁場に関しては、Gd123系において、77Kでの世界最高値3.3Tを達成している。また、Y123系でも30Kまで温度を下げれば15Tに達することが分かった。まさに、従来にない新機能材料であることが確認できた。

これだけバルク超電導体の特性が向上すると、応用にあたってはバルク体に大きな電磁力が働くので、その機械特性が非常に重要となる。すでに、エポキシ樹脂を浸漬する手法で機械強度を100MPa以上に向上することに成功している。さらに、樹脂により耐食性が大きく向上するというメリットもある。

バルク体の特性が大幅に向上したため、その応用開発にも拍車がかかっている。最近の話題は、日立製作所と共同開発した水浄化用の磁気分離装置である。バルク超電導磁石が有する大きな磁気勾配を利用して、フィルターに付着した汚濁粒子をバルク磁石で回収するという、メカニカフリーの磁気分離装置をつくることができる。

また、鉄道総研と共同で、樹脂含浸したY123バルク体を磁気浮上式鉄道に搭載する超電導磁石の電流リードに適用するという開発を行ってきたが、その特性が十分要求仕様を満たすことが分かったため、本格的な実験に取り組むことになった。このように、バルク超電導体の材料開発と応用は同時に進んでおり、すでに実用製品も誕生している。

(SRL/ISTEC 第3研究部長 村上雅人)



超電導線材開発の進捗状況

1. はじめに

近年、液体窒素温度領域（77K）における臨界電流密度（ J_c ）特性の改善が期待される $REBa_2Cu_3O_{7-x}$ （RE123: RE=Y, Sm, Nd, ...）超電導体を用いた線材開発が世界中で進められている。RE123系線材では、高 J_c を得るために超電導相の結晶方位を3次的に揃えて配向させる必要がある。更に実用化のためには長尺化と共に作製速度の向上、線材総断面積あたりの電流密度（ J_c ）の向上等の課題がある。日本では超電導応用基盤技術研究開発プロジェクトの一環としてSRL、線材メーカー、重電、電力会社などにおいて線材技術開発を進めている。本プロジェクト（H11.4～H15.3）では表1に示す値を目標として、基板配向制御型、中間層配向制御型および超電導層高速合成型の3種に大別される線材作製技術を中心に開発を進めている。以下に各技術における主な成果を紹介し、本プロジェクトの進捗状況報告とする。

成膜が得られてきている。その結果、従来と同程度の配向性を維持したまま中間層の成膜速度を従来の倍に上げられるようになり、その上に成膜したY123で 1.2×10^5 A/cm²を超える J_c も得られている。更に超電導層の成膜速度の高速化も可能となっており、長尺化対応の新しい成膜チャンバーの導入により長尺線材の高速成膜の実証が期待される。一方、(株)フジクラと中部電力(株)を中心としてIBAD(Ion Beam Assisted Deposition)法による線材開発を進めている。こちらでは大型IBAD装置とGd₂Zr₂O₇中間層の組み合わせにより高配向化、高速成膜化を実現した。その結果10m長で結晶配向度の指標となる半値幅 $\Delta = 10.7^\circ$ の高配向中間層を実現し、8cm長で $J_c = 1.2$ MA/cm² ($I_c = 140$ A) の高特性を得ると共に、 J_c が18°程度の中間層を用いた10m級線材で $J_c = 0.42$ MA/cm² ($I_c = 50$ A)を得た。また中間層としては60m長のものも成膜されている。

表1 次世代線材の各開発タイプにおける開発目標

開発タイプ	長さ(m)	基板厚(μm)	Jc (A/cm ²)	超電導層厚(μm)	作製速度(m/h)
基板配向制御型	10～100	100	10 ⁵ ～10 ⁶		10
中間層配向制御型	100～1000	100	10 ⁴ ～10 ⁵		1
超電導層高速合成型	1～10	100	10 ⁵ ～10 ⁶	5 μm	1

2. 進捗状況

基板配向型線材開発グループは、金属基板を強加工と熱処理により配向させる技術を中心に開発を行っている。古河電工(株)を中心とした高強度Ni基配向テープ材開発においては、高強度化及び低/非磁性化の為にSUSあるいはNi-Cr合金を芯材としたクラッド材を用いた長尺テープ材の開発に成功し、SOE(Surface Oxidation Epitaxy)処理した30mテープ材を作製しており、その上にMgO中間層およびY123層を成膜した短尺試料で約10⁵ A/cm²の J_c が得られている。(株)東芝を中心として開発を進めているAg基テープ材においても、Ni基合金を芯材として高強度化したAg-Cu合金クラッドテープで100mの長尺化に成功するとともに、直接Y123層を成膜した1m長線材で 1.2×10^5 A/cm²を超える J_c を得ている。中間層配向制御型線材開発グループは、無配向高強度金属基材上に中間層を配向させることにより超電導相の配向を得るプロセス開発を進め、特に長尺化における課題を抽出しつつ開発を行っている。住友電工(株)と東京電力(株)を中心に進めているISD(Inclined Substrate Deposition)法を用いた手法では、高出力産業用レーザーの導入により、長時間・高速安定

超電導層高速合成型線材開発グループでは、高 J_c 線材開発を目的として超電導厚膜の高速合成プロセスの開発を目指している。昭和電線(株)とSRLを中心として取り組んでいるTFA(トリフルオロ酢酸)塩を原料とするMOD(Metal Organic Deposition)法は非真空プロセスであり、1MA/cm²を超える J_c が比較的容易に得られることから注目されている。従来、高 J_c を得るための厚膜化が困難であるという課題が指摘されていたが、溶液の多層塗りにより高特性を維持しつつ厚膜化する手法を最近開発し、短尺ではあるがCeO₂/YSZ(IBAD)/ハステロイ基板上で約1 μm厚のY123膜で1.6 MA/cm²の J_c が得られている。今後、長尺焼成炉を用いた長尺化が期待される。最後にSRLが中心となって開発を行っているLPE(Liquid Phase Epitaxy)法は、成膜速度が高く厚膜でも高 J_c が保たれることから高 J_c プロセスとして位置付けられるが、金属基板との反応抑制が大きな課題である。そこで成膜温度の低温化、反応抑制中間層構造の開発などにより金属基板上への成膜は成功しており、低温化LPE法によりIBAD基板上に成膜したY123で1MA/cm²を超える J_c が得られている。今後、連続成膜化による高特性が期待される。

3. まとめ

次世代線材開発プロジェクトの進捗状況について概観したが、いずれの手法においても目標達成に向けて着実に成果が上がっている。しかしながら米国や欧州においても同様の開発プロジェクトが進められており、日米欧の開発競争の様相を呈している。現時点では長尺化に関して日本がややリードしていると言えるものの、米国でも国立研究所を中心として積極的に開発が進められており、油断できない状況にある。本フェーズにおいて100m級の長尺線材化技術を早く確立し次世代線材のポテンシャルをアピールすると共に、実用化を目指したプロセスの複合化による高 J_c 化及び高速成膜化プロセスの開発が期待される。ここで報告した研究成果は超電導応用基盤技術研究体の研究として、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託を受けて実施したものである。(SRL/ISTEC 第4研究部 中村 雄一、第4研究部長 塩原 融)

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。「超伝導体薄膜及びその製造方法」特開平8-133896(平成6年度出願):NdBCO超伝導体薄膜の組成および特性とその作製方法に関する基本的な特許である。超伝導体の電子デバイス分野への応用では、薄膜を多層化することが必須であるが、最も一般的なYBCO薄膜は123組成とは異なる析出物の生成が避けられず、多層化に最適とは言い難い。発明のポイントは、NdBCO薄膜はNdとBaとの間である程度の相互置換が許され、それが析出物の発生を抑制できることにあるが、さらに、活性の高いBa元素がNd元素で置き変わると薄膜表面が化学的により安定となり、平滑性が向上するなど多層化に適した優れた特性を備えている。

この発明は、超電導フィルタや超電導集積回路用のNd123超電導薄膜の形成に広く適用される内容である。

(ISTEC/SRL 開発研究部長 中里克雄)



超電導素子研究開発の進捗状況

超電導応用基盤技術研究開発プロジェクトの素子研究開発は、将来の超高速・低消費電力の情報処理・ネットワーク機器や超高速計測システムへの応用が期待されている単一磁束量子 (Single Flux Quantum; SFQ) 素子を用いた高温超電導デジタル集積回路の基盤技術の確立を目的としている。超電導の基本現象の一つである磁束量子化により、超電導体からなるループを貫く磁束は、磁束の最小単位である磁束量子 ($\Phi_0 = 2.07 \times 10^{-15} \text{ Wb}$) の整数倍となるが、ループのサイズを数ミクロン程度にすると、磁束量子1個のみが安定に存在するようになる。この磁束量子を、多数の接続した超電導ループに次から次へと転送し、論理・記憶動作を行わせるのがSFQ素子回路であり、超電導ループへの磁束量子の出入りの制御は、半導体のトランジスタに相当するジョイント接合で行う。SFQ素子回路の開発は、これまでは主として、集積回路プロセス技術の進んだ低温超電導Nbを用いて行われてきたが、高温超電導体を適用することにより、素子の一層の高速化やライカータ使用による応用範囲の拡大などのメリットが期待できる。一方、最大の技術課題は、多数のジョイント接合を含む集積回路の作製技術の開発である。本プロジェクトでは、集積回路作製技術に加え、低温系回路との共通課題であるSFQ集積回路の設計・評価技術を開発し、高温超電導SFQ小規模回路の高速、低消費電力での動作を実証することを目標としている。

図1は、高温超電導SFQ集積回路実現のための要素技術と開発課題をまとめたものである。超電導層を3層以上含む超電導薄膜/絶縁体薄膜のエピタキシャル成長技術と臨界電流値 I_c などの特性ばらつきのおおきなジョイント接合の作製技術が最も重要であるが、それ以外にも、超電導コネクタ、超電導配線クロスオーバー、抵抗体などの要素の作製技術の確立が必要となる。最下層の超電導層はグラウンドプレーンと呼ばれ、磁気遮蔽効果により超電導ループのインダクタンスを低減し、単一磁束量子の保持・転送を可能にする重要な働きをする。このグラウンドプレーンには、優れた表面平坦性、結晶性、超電導特性などの条件が要求される。特にSRLでは、これらの点で気相法による薄膜より優れた擬単結晶膜であるRE-123系液相エピタキシャル成長 (LPE) 厚膜の育成と、その上の薄膜積層技術の開発を行っている。最近では、直径50mmの(Y, Yb)-123大面積LPE膜の育成に成功した。また、このLPE膜あるいは気相法による薄膜上に、誘電率が低くRE-123材料との格子マッチングのよいCeO₂やSr₂AlTaO₆ (SAT)、(La, Sr)₂AlTaO₆ (LSAT)などの絶縁層を介してジョイント接合を形成する薄膜積層技術がほぼ確立

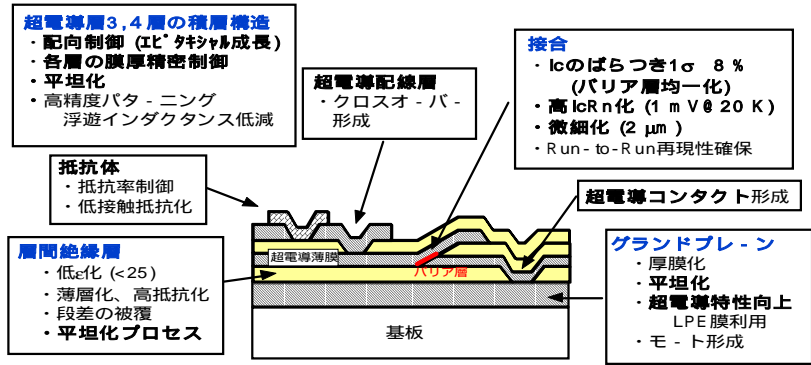


図1 高温超電導SFQ集積回路実現のための要素技術と開発課題

すると共に、超電導コネクタや抵抗体などの回路要素の形成技術も開発されている。ジョイント接合作製技術に関しては、グラウンドプレーン上の1,000個の接合に対する I_c の標準偏差として8%の値をプロジェクト最終年度までの達成目標としている。特に接合特性を決める鍵となるのが、厚さ数nmの非超電導バリア層の形成技術である。プロジェクトでは、従来の非超電導薄膜を堆積する方法ではなく、下部超電導層の表面にイオン照射により薄い非晶質層を一旦形成し、上部超電導膜の積層の際にこれを結晶化させてバリア層とするいわゆる界面改質バリアを有するラップエッジ接合を開発を集中してきた。この種の接合で小さな特性ばらつきを最初に報告したのはNECグループであるが、現在ではプロジェクトに参加している日立、東芝、SRLなど複数の機関で同様の高品質接合が得られるようになってきている。界面改質バリアの組成、構造、生成機構が解明されると共に、特性ばらつきをもたらす要因が明らかにされ、 I_c の標準偏差のトップデータとしては、グラウンドプレーン上の100接合に対し7.9%、グラウンドプレーンがない場合は5から7%の値が得られ、目標の達成は間近となっている。また、上部超電導薄膜として、下層に影響を与えないより低い基板温度での成膜が可能なYb-123などの材料を適用する技術も開発されている。

SFQ回路設計に関しては、数1,000個の接合を含む中規模回路の設計技術の確立を目標として開発を進めている。具体的な回路ターゲットとして、次世代の移動体通信基地局で必要と考えられる、周波数や方式の異なる無線信号を広い帯域にわたり高速にデジタル信号に変換できるAD変換器を選び、設計した回路をNECのNbプロジェクトで試作してもらい、設計技術の検証を行う方針を取っている。これまで、デジタル信号を高速のデジタル信号に変換するジョイント回路がほぼ理論通り動作することを実証すると共に、約500個の接合を含むデジタルフィルタ(高速のデジタル信号を半導体のプロセスに接続するための信号処理を行う論理回路)の動作に成功している。デジタルフィルタの規模を2,000から3,000接合まで拡大することと、ジョイント回路の改良により高いビット精度を達成することが今後の課題である。開発した接合技術を用いた、高温超電導SFQ回路の試作も進められている。図2には、日立が最近開発したAD変換器のジョイント回路の写真を示す。11個の界面改質バリアラップエッジ接合を含むこの回路は、20Kにおいて100GHzの周波数で動作することが確認されている。これ以外にも、リグオレータなどの要素回路や半導体とのインターフェース回路、高速信号波形の観測に使用できるサブ回路などの小規模回路の試作が進められ、最終的には100個程度の接合を含む回路の高速動作と低消費電力性の実証を計画している。(SRL/ISTEC 第6研究部長 田辺 圭一)

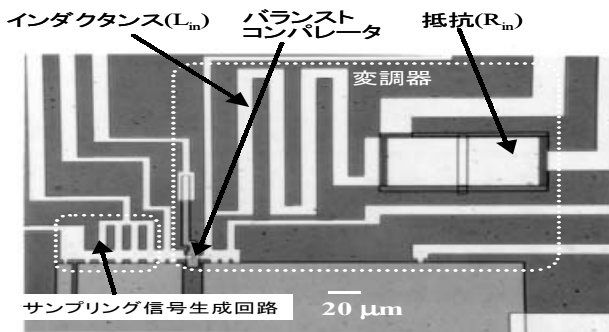


図2 高温超電導AD変換器ジョイント回路

高温超電導メカニズム研究の進捗状況

高温超電導メカニズム解明を目指して取り組んだ異常な常電導状態の性質の内、面間伝導機構と擬ギャップ現象については、電子相関が強く2次元的な電子軌道状態を持つ物質に特有な性質として、統一的理解が進んだ。しかしながら逆に、これらの異常な現象が超電導対形成とは無関係である可能性も出てきた。一方縞状秩序や電荷不均一については、実験データが蓄積されつつあるが、結論を出すのにまだ十分とは言えない。当初一部の高温超電導体だけに見られる現象と考えられていたが、これが高温超電導体共通の性質、引いては対形成に関与している可能性が出てきた。対破壊現象のほとんどは、超電導のd波対称性と超電導相関長が短いことを考慮することで理解できることがわかった。

超電導メカニズム解明そのものにはまだ遠いが、「異常な常電導状態」を示す低キャリアドープの組成領域は、電子状態が大変不安定であるため、材料の実用化に際しては絶対に避けなければいけない領域であるという知見が得られた。磁性不純物以外の不純物や格子欠陥によっても容易に超電導性が劣化するというd波超電導体の特徴ともあいまって、実用化段階で要求される高温超電導体の組成制御の厳しさの程度を示したと言える。その意味で超電導特性向上に資することができた。

プロジェクトの残された期間の課題としてはストライプ秩序や電荷不均一の問題を更に追及する必要があり、光学的測定や磁化特性、トンネル分光、中性子散乱などの実験を通して統一的描像の確立を目指す。また、単位胞中の銅酸素面の数が多い物質の電子状態を光電子分光やラマン散乱分光によって詳細に研究し、これらの物質の超電導転移温度が高い原因を探る予定である。

一方、材料探索に関しては、高圧合成法を用い、ホモロガスシリーズの分類にのっとった新規超電導体の開発には成功したが、超電導転移温度の飛躍的上昇はなかった。銅酸化物高温超電導体の材料探索はほぼ完了したと言える。一方、既存の高温超電導体特性向上はまだ可能である。材料の高純度化やドーピング濃度の精密な制御が、予想よりはるかに特性向上に資することがわかり、高性能材料開発の指針を得ることができた。

また、非銅系材料についても研究を行い、銅酸化物とは異なる超電導メカニズムであろうと考えられる新規非銅系超電導体をいくつか合成することができたが、転移温度が銅酸化物を上回るか或いは上回る可能性のあるものは見つからなかった。有機材料については、

超電導化にとって重要なパラメータがある程度把握することができ、また新たな方法による超電導化の道を見出すことができた。

今度は元素置換などによって更に特性向上を図ると共に、高臨界磁界、高臨界電流材料開発の指針の詳細を確立する予定である。

(SRL/ISTEC 第2研究部長 田島節子)

第7回超電導標準化国際会議開催

-9/19-9/21(2001)、韓国・ソウル市 -

わが国は、IEC(国際電気標準会議)のTC90(第90番技術委員会 超電導)の幹事国を引き受けており、超電導国際標準化活動に貢献している。超電導標準化国際会議は、2年から1.5年間隔で開催されており、第7回超電導標準化国際会議が2001年9月19日から21日まで韓国ソウル市で開催された。過去、超電導標準化国際会議は、第1回東京(90年5月)、第2回パリ(92年11月)、第3回ポルダー(95年4月)、第4回北京(96年10月)、第5回フランクフルト(98年6月)及び第6回ポルダー(00年3月)にて開催された。

第7回超電導標準化国際会議は、韓国ソウル市のシェラトン・ウォルカ・ヒルホテルにて、前半(9/19-20)にワーキンググループ、WG会議(WG4、WG6、WG8、WG9、WG10及びWG11)並びに後半(9/21)にIEC/TC90本会議がそれぞれ開催された。会議参加国は、日本、中国及び韓国の3カ国、また会議参加者数は30人であった。

同会議においては、新たに国際規格、IS*になった(1)ビスマス系銀シース超電導線の直流臨界電流試験方法、IEC61788-3、(2)Nb-Ti複合超電導線の室温引張試験方法、IEC61788-6、(3)Nb-Ti複合超電導線の銅比試験方法、IEC61788-5及び(4)Nb-Ti複合超電導線の残留抵抗比試験方法、IEC61788-4の報告に引き続き、つぎの7件の規格案が審議された。すなわち、(1)超電導体のマイクロ波帯域表面抵抗試験方法、(2)超電導線の臨界温度試験方法、(3)Nb₃Sn複合超電導線の残留抵抗比試験方法、(4)Nb₃Sn複合超電導線の銅比試験方法、(5)Nb-Ti複合超電導線のピックアップコイル法交流損失試験方法、(6)Nb-Ti複合超電導線の磁力計法交流損失試験方法及び(7)バルク超電導体の捕捉磁束密度試験方法である。

また、各国における標準化活動報告がなされ、日本から(財)大阪科学技術センター付属ニューマテリアルセンター、NMCで実施している金属系超電導材料に係わる標準化活動、(社)日本ファインセラミクス協会、JFCAで実施している高温超電導材料に係わる標準化

活動並びに幹事国として実施した超電導製品標準化に関するアンケート結果がそれぞれ報告された。さらに、IEC/TC90とリエゾン関係にあるVAMASから高温超電導体を対象としたバルク、線材、薄膜の電氣的、電磁氣的並びに機械的特性試験方法の開発状況の報告がなされた。

次回第8回超電導標準化国際会議は、2002年春を目標にヨーロッパで開催することが提案された。

*この他にすでに国際規格、IS化されているものとして、(1)超電導関連用語、CEI/IEC60050-815、(2)Nb-Ti複合超電導線の直流臨界電流試験方法、IEC61788-1及び(3)Nb₃Sn複合超電導線の直流臨界電流試験方法、IEC61788-2の3件がある。これらの国際規格、ISは、順次日本工業規格、JIS化のための翻訳作業が進められており、すでに発行済みの(1)超電導関連規格、JISH7005:1999、(2)Nb-Ti複合超電導線の直流臨界電流試験方法、JISH7301:1997及び(3)Nb₃Sn複合超電導線の直流臨界電流試験方法、JISH7302:2000に加え、(4)Nb-Ti複合超電導線の室温引張試験方法、(5)Nb-Ti複合超電導線の銅比試験方法もまもなく発行される。

(編集局 田中靖三)



超電導速報 世界の動き (2001年8月)

電力応用

Superconductive Components, Inc. (2001年8月8日)

Superconductive Components, Inc. は、National Science FoundationとSBIR Bの契約を締結したと発表した。これは、長尺BSCCO-2212銀合金HTSワイヤーの連続製法に関するもの。このプロジェクトは、Bi-2212線材について、そのコストをNb₃Snと対抗できる程度まで低下させると同時に強磁場下での優れた特性を実現することを狙う。同社は、Oxford Instruments, Superconducting Technology (OST), と共同研究を行う予定。

(出典)

"Superconductive Components, Inc. Receives Grant to Develop Advanced Manufacturing Method for HTS Wires" (Superconductive Components Press Release, August 8, 2001)
<http://www.superconductivecomp.com>
詳細は出典を参照。

材料

Superconductive Components, Inc. (2001年8月13日)

Superconductive Components Incは、2001年第2四半期の収入が905,071ドル(昨年同期703,369ドル)であったと発表した。製品販売実績が好調なための増収。また、今年に入り

National Science FoundationとのSBIR-Iの契約にも成功している。グロス・マージンは、昨年同期の155,862ドル(22.2%)に対し、今期は333,168ドル(36.8%)。このグロス・マージンの改善には、これまで手を打ってきた生産能力増強が大きく寄与している。

総務・管理経費は、今期262,360ドル(昨年同期113,316ドル)に増加したが、これは人員増加によるもの。

設備投資は、今期124,585ドル(昨年同期22,114ドル)であったが、これは生産能力増強のためのもの。

(出典)

"Superconductive Components Inc. Reports Second Quarter Results" (Superconductive Components Inc. Press release; August 13, 2001)
<http://www.superconductivecomp.com/>
詳細は出典を参照。

医療応用

4-D Neuroimaging (2001年8月27日)

4-D Neuroimagingは最新のラジアル型の脳撮像装置Magnes3600がミネアポリスの退役軍人医療センターに設置されたと発表した。

このシステムは、脳機能の研究向けに使用されることになる。同システムから得られた情報は、ミネアポリス大学のMRIセンターのデータとともに、知覚、行動神経パルス、知覚行動の他神経疾患の研究にも応用される。

(出典)

"4-D Neuroimaging Announces Opening of Magnes 3600 Facility - Veterans Administration Medical Center in Minneapolis, MN Holds Inauguration of MEG Center" (4-D Neuroimaging Press Release, August, 27, 2001)
<http://www.4dneuroimaging.com>
詳細は出典を参照。

通信

ISCO International (2001年8月9日)

ISCO International Inc. (ISCO)は、8月9日、複数の基地局でのトライアルの後、Verizon Wireless社にフロントエンド・システム(Cryogenic Receiver Front-end (CRFE) Systems)とアダプティブ・ノッチ・フィルター(ANF™)各12セットを販売したと発表した。これらシステムは、シカゴ、オヘア空港周辺の12の基地局の37のCDMAセクターをカバーする。この地域はVerizon Wireless社のネットワークの中で最もトラフィック量の多い地域である。トライアルにおける、干渉除去、切断された回線の回復、人口過密地域におけるトラフィック収容可能量の著しい向上(従来比25~35%増)の実績が認められたもの。これは、2.5Gのみならず、現行2Gにおいても超電導フィルターが著しく通信事業者の収益性を向上させるということを実証したという重要な意義を持つ。

(出典)

"ISCO International Announces Deal With Verizon Wireless." (ISCO International Press Release; August 9, 2001)
<http://www.iscointl.com/>
詳細は出典を参照。

ISCO International (2001年8月14日)

ISCO International Inc.社長George Calhounは、2001年第2四半期に初めて、市場における確固たる地位を確立するような結果が得られたと述べた。同氏はさらに、商業的価値の高いCREFE(Cryogenic Front End System)の米国における基本特許を取得し、競合他社が本特許に抵触する製品を販売していることに対しこれを禁止する特許侵害訴訟を起こしたと述べた。

2001年第2四半期の、総収入は1,374,000ドル(前年同期15,000ドル)に達した。この結果2001年上期の総収入は前年同期187,000ドルに対し、1,886,000ドルに上る。損失は、2001年第2四半期、2001年上期がそれぞれ5,529,000ドル(前年同期3,782,000ドル)、10,276,000ドル(前年同期6,185,000ドル)である。損失の増加は、3Gプロトタイプの開発費及びアジア、北米における2G,2.5Gシステムのフィールドテストの費用のため。

(出典)

ISCO International Reports Substantial Revenue Increase in Second Quarter 2001 Financial Results (ISCO Press release; August 14, 2001)
<http://www.iscointl.com/>
詳細は出典を参照。

フラーレン

香港科学技術大学(2001年7月3日)

香港科学技術大学の物理研究者は、単層のカーボン・ナノチューブが15K以下で超電導性を示すことを発見した。この発見は、2001年6月29日の科学雑誌「サイエンス」に発表され、同号の中で最も注目を集めた論文であった。これは、世界で初めて純炭素が超電導性を持つことを示した。単層カーボン・ナノチューブ(直径0.4nm)は理想的な1次元システムであり、種々の理論計算の確認が可能になった。このナノチューブにより作られるワイアーにより、低損失ナノ回路が実現できるようになる。研究チームのリーダーは、Ping Sheng教授。同教授は物理学部長兼ナノサイエンス・テクノロジー研究所所長。

(出典)

"HKUST Scientists Discover Superconductivity in World's Smallest Single-carbon Nanotubes" (HKUST Press Release, July 3, 2001)
<http://www.ust.hk>
詳細は出典を参照。

Lucent Technologies (2001年8月30日)

ルーセント・テクノロジー社ベル研究所は、bucky ball(発見者は米国のR. Buckminster Fuller)として知られるサッカー・ボール型カーボン分子が117K以下の温度で超電導性を持つことを示した。この分子はクロロフォルム及びプロモフォルムを含んでおり、これにより分子間距離を大きくし、電子及び分子の相互作用を小さくしている。この材料は、銅・オキサイド超電導体に比べて安価になる可能性を持っており、同時にその物理もよく理解されている。この発見は、安価な0ロス有機超電導エレクトロニクスや量子コンピューターのような用途に道を開くことになるかも知れない。

(出典)

"Bell Labs scientists create record-breaking, high-temperature organic superconductor out of carbon bucky balls" (Lucent Technologies Press Release, August 30, 2001)
<http://www.bell-labs.com/news/2001/august/30/1.html>
詳細は出典を参照。

(ISTEC 国際部長 津田井 昭彦)

【隔月連載記事】

超電導エネルギーギャップの神秘(その4)

東京大学大学院
新領域創成科学研究科
教授 内田慎一

8. 超電導電流 - 位相の固さ

前回(その3) 超電導ギャップはクーバー対の位相を「固く」と述べた。止むを得ず数式を使う事になるが、量子力学では、位相を持った荷電粒子が磁場の下で運動するとき、その粒子が運ぶ電流は、 $j = (q/m)(\hbar \nabla - qA)$ と与えられる。qは粒子の電荷、Aは磁場を作るポテンシャル、 ∇ は位相の空間変化を表している。単位体積に n_s 個いるクーバー対が運ぶ電流密度jは、 $j = (2en_s/m)(\hbar \nabla - 2eA)$ となるが、超電導ギャップの存在により、磁場がかかっても位相の一樣性が保たれるので、 $\nabla \cdot j = 0$ である。従って、超電導電流密度は $j_s = (-4e^2 n_s/m)A$ とAに比例することになる。このj_sとAとの比例関係は、ロンドン方程式と呼ばれているもので、超電導体には磁場が $\sim (mc^2/n_s e^2)^{1/2}$ 程度の長さしか侵入できないというマイスナー効果を表すものである。磁場侵入長あるいはロンドン長と呼ばれる長さで、多くの超電導体で0.1~1μmである。

磁場を超電導体内部から排除するというマイスナー効果をもたらしているのは、超電導体表面を流れる電流j_sである。この電流は、試料が超電導状態にある限り永久に流れ続け、しかもそれを駆動しているのは磁場で、電場(起電力)はどこにも存在しない。これがゼロ抵抗の本質である。針金に電流が流れるとその中心の周りに同心円状の磁場が発生する。この針金が超電導状態になると、マイスナー効果により磁場が針金の外に押し出されるが、磁場を排除する電流は針金の表面を針金に沿って流れる。これが超電導電流であり、針金の両端には電圧(起電力)が存在しない。ゼロ抵抗というのは、マイスナー効果の1つの姿なのである。*

の式及びロンドン方程式は、を決め、従って超電導電流を運ぶ能力を表すのはクーバー対密度n_sであることを示している。n_sは超電導ギャップと並ぶ超電導の基本量であることがわかる。「その2」で記した様にはコヒーレンス長 = $\hbar v_F / \Delta$ と結びついており、超電導にはとの2つの特徴的長さスケールがある)

n_sは、また別の意味ももっている。前回、クーバー対の位相が揃うためには、その数がゆらがなければならぬ

と述べた。数のゆらぎは、その母数が大きければ大きい程起こり易い(母数が大きければ多少その数が変動しても系のエネルギー等に与える影響は小さい)。従って、n_sが大きい超電導体程、位相が一樣に揃い易い、すなわち位相のゆらぎが起こり難いといえる。このことからn_sは位相の「固さ」を表すパラメーターでもある。

*電気抵抗がゼロだからマイスナー効果が出てくるわけではない。例えば、不純物や欠陥を含まない理想的な金属は、絶対零度でその電気抵抗はゼロになる。しかし、T=0Kでもマイスナー効果を示さない。電子の位相はバラバラであり、磁場が容易に侵入できるだけでなく、電場がなければ電流は流れない。

9. 高温超電導体の超電導ギャップ

以下、話を高温超電導に移す。すでに、§4(その1)で高温超電導ギャップの特徴、その異常な振舞を列挙した。ここでは、それらをより具体的に述べることにする。先ず、前節(§7、§8)との関連で、高温超電導体でのとn_sの意味を考える。

9.1 超電導ギャップと位相の固さ

高温超電導体のクーバー対では、電子が相手の周りをグルグル回っている(有限の角運動量をもつd波となっている)。通常の超電導体のクーバー対は角運動量ゼロ(s波)の束縛状態で、その重心を中心として、あらゆる方向に行き戻りする2つの電子を思い浮かべればよい。d波クーバー対の超電導ギャップは電子の運動方向により、ゼロから最大値 Δ まで変化するが、超電導状態を特徴づける(例えば Δ の大きさを決める)のは Δ である。

高温超電導体では、予想通り、 Δ はかなり大きい値になっている。一方、クーバー対密度n_sは、その常電導状態のキャリア密度から想像できるように、通常の超電導体より小さな値になっている。高温超電導体の異常さの1つは、 Δ とn_sの役割が入れ替わっているようにみえることである。それを議論するためにn_sの次元を Δ に合わせる。n_sに対応するエネルギーはクーバー対のプラズマ振動エネルギー $\sim (n_s e^2/m)^{1/2}$ である。通常の超電導体では $\Delta > \hbar \omega_{ps}$ であるのに対して、高温超電導体では、特にそのアンダードープ域においては上記の関係が逆転している($\Delta < \hbar \omega_{ps}$)。超電導臨界温度T_cに注目すると、通常の超電導体ではT_cとの間に比例関係(T_c ~ Δ)が成り立っているのに対して、高温超電導体でT_cは、むしろn_sにスケール(T_c ~ n_s)していることが実験で確認されている。

この実験事実を上記のと $\hbar \omega_{ps}$ との大小関係に対応させると、次のような推論が成り立つ。

温度を上昇させて超電導状態がどのように壊れてゆくかを考えてみる。通常の超電導体では $\Delta > \hbar \omega_{ps}$ なので位相は十分に「固い」。それに比べてクーバー対の束縛「力」(Δ)が弱いため、温度上昇により破壊されるのはクーバー対ということになる。クーバー対が完全に解離する温度がT_cである。高温超電導体の場合($\Delta < \hbar \omega_{ps}$)、弱いのは位相を揃える「力」(n_s)である。温度上昇により位相コヒーレンスが破壊されるが、対はそのまま残る可能性が大きい。対は残っても位相が揃わなくなるためマイスナー効果すなわち超電導電流が消える事になる。その温度が高温超電導体のT_cであり、従ってT_cは対よりも位相すなわちn_sに支配されているというのが最近の考え方である。

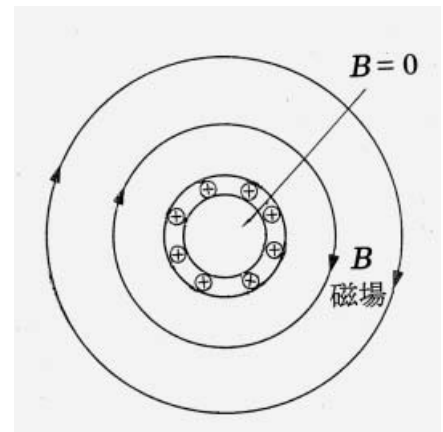


図6. 超電導線の断面。電流と磁場の分布を示す。超電導電流は銅線の表面を紙面に向かって流れ、内部の磁場を排除している。

【これまでの連載記事の内容】 超電導エネルギーギャップの神秘

その1(4月号掲載)

1. はじめに
2. 半導体のエネルギーギャップと超電導ギャップ
3. 超電導ギャップと超電導特性
4. 高温超電導体のギャップ

その2(6月号掲載)

5. 超電導ギャップの起源
6. 臨界温度とコヒーレンス長

その3(8月号掲載)

7. 位相のコヒーレンスと準粒子

その5(12月号予定)で完結。

第14回国際超電導シンポジウム (ISS2001) 開催速報

ISS2001が神戸国際会議場で9月25日(火)から27日(木)まで、国外参加者約100名、国内参加者約500名、合計約600名の研究者・技術者らの参加を得て開催され、無事終了した。

本年度の会議は、予想外の米国同時多発テロ事件の影響もあり、米国政府機関の参加講演者の変更やキャンセル通知が多発したものの、口頭講演とポスター講演も含めた研究報告件数は約390件で事前登録数からの減少は小幅にとどまり、全体は大いに盛況であった。

開会式は、斉藤専務理事 (ISTEC) の司会により、テロ犠牲者への哀悼の言葉で始められ、田中所長 (SRL/ISTEC) により開会の挨拶が行われた。シンポジウムは、ISS2001プログラム委員長の小林教授 (大阪大)、Salama教授 (ヒューストン大) の座長により、特別基調講演・基調講演が行われ、2日目からは、物理・化学、磁束物理、バルク/システム応用、線材・テープ/システム応用、薄膜・接合・デバイスの各セッションに分かれて活発な議論が行われた。

初日夕刻には約200名の出席者を得てバンケットが開かれ、活発な国際的技術交流の場となった。

最終日のクロージングアドレス・セッションでは、物理・化学分野を山田教授 (京都大学)、バルク/システム応用分野を G. J. Schmitz 博士 (Access.eV社)、線材・テープ/システム分野を M. Suenaga 博士 (ブルックヘブン国立研)、薄膜・接合・デバイス分野を P. Seidel 博士 (独固体物理研) の各氏が、今回の会議の主要な成果と今後の見通しをまとめた。

超電導電子構造の解明、 MgB_2 を始めとする超電導新材料、成膜技術、線材と TFA-MOD 製造技術やデバイス・システム技術の各技術分野の着実な進展があったことが述べられた。

この会議の成果や詳細については来月号で改めて報告される予定である。

最後に田中所長の閉会の挨拶と共に、2002年度の横浜での開催計画と研究開発の進展および、超電導産業技術としての実用化への更なる期待が宣言され、盛況裡に終了した。

本年度は同時に神戸国際展示場で、9月26日から28日までISS2001展示会が開催され、新聞社やTV局の取材等も行われ大きな反響があった。今回は、神戸国際産業フェアの一環として特別ブースを設定したので、多数の非専門家の見学者があり超電導基礎研究から産業技術までが紹介され、実用化の現状に多くの関心と好評を得た。

(ISTEC 調査企画部 正畑伸明)

読者の広場

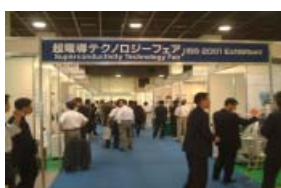
Q&A

Q: 実用超電導材料が実用状態にあるとき、物質中のどれほどの電子が超電導に寄与しているのでしょうか？ (匿名)

A: PbやNbのような金属超電導体を考える。 $T > T_c$ の常電導状態の電気伝導を担うのは 1cm^3 あたり 10^{22} 個程度存在する伝導電子(伝導帯を占有している電子)である。 $T < T_c$ に冷やすとフェルミ準位近くの電子間に引力が働いて、クーパー対が形成される。もとの金属のフェルミ準位近くの電子だけがクーパー対に参加するのではない。金属が常電導部分と超電導部分に相分離しない限り、すべての伝導電子がクーパー対を形成する。

現実の超電導物質あるいは超電導材料で問題となるのは、材料を超電導状態にしたとき、その超電導電流を運ぶ能力である。本号の「超電導ギャップの神秘(その4)」で解説したように、その能力は磁場侵入長 λ の逆2乗 λ^{-2} で測られる。物質パラメーターとしての λ^{-2} はクーパー対の数に対応するものであるが、超電導材料では、不純物、ピン止め中心や材料の表面・界面等の影響で λ^{-2} は物質パラメーターとしての値よりも一般的に長くなる(能力 λ^{-2} は小さくなる)。超電導材料では、必ずしもすべてのクーパー対が有効に超電導電流に寄与しているわけではない。但し、ここでいう能力と臨界電流は別物である。臨界電流は磁束ピン止めの中心や表面などの外的要因によって決まる。超電導材料は超電導物質の能力を多少犠牲にして、実用特性(臨界電流)を稼いでいるのである。

(回答者: 東京大学大学院
新領域創成科学研究科
教授 内田慎一)



国際産業フェア2001
超電導テクノロジーフェア風景

新聞ヘッドライン

(8/20-9/13)

電力貯蔵装置の構造材半減 線材に働く力制御 超電導コイル開発
東工大 8/20 日本経済新聞
東大 室内で世界最強磁場 リニアの100倍 新材料開発に一役
8/20 日本経済新聞、8/21 日刊工業新聞
超電導物質 電子の様子を観察
東大・阪大 材料研究の新手法
8/23 日経産業新聞
研究進む二ホウ化マグネシウム 優れた超電導物質に期待
8/28 日刊工業新聞
マグネオ技研 超伝導磁気力を向上 完全版の製品化を目指す
8/29 日本工業新聞
零下156度で超電導 米ベル研新物質発見
8/31 日本経済新聞、日経産業新聞、読売新聞
ナノテク新材料を初量産 三菱化学・三菱商事
9/8 日本経済新聞(夕)
富士電機 超低温の小型冷凍機 通信機器やセンサー用
9/11 日経産業新聞、電気新聞

「読者の広場」へのご意見ご質問等みなさんの投稿をお待ちしております。



e-mail to:
web21@istec.or.jp

超電導 Web21 10月号

2001年10月発行

< 発行者 >

(財)国際超電導産業技術研究センター
超電導 Web21 編集部
〒105-0004
港区新橋5-34-3 栄進開発ビル6F
Tel 03-3431-4002
Fax 03-3431-4044

ホームページへのリンク

<http://www.istec.or.jp>



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。