超電導 Web21
Superconductivity

超電導 Web21

財団法人　国際超電導産業技術研究センター　〒135-0062　江東区東雲 1-10-13　Tel: 03-3536-7283　Fax: 03-3536-7318

2011 年 **4** 月号　　2011 年 4 月 1 日発行

掲載内容（サマリー）：

特集：超電導線材技術の進展

○国内外の Y 系超電導線材開発の動向
○Bi 系線材の高性能化の進展
○MgB_2 線材のプロセス技術の進展
○鉄系超電導材料の進展

○超電導関連 2011 年 4-5 月の催し物案内
○新聞ヘッドライン（2/15-3/15）
○超電導速報―世界の動き（1 月、2 月）
○隔月連載記事ーやさしい超電導リニアモーターカーのお話（その 2）
○読者の広場(Q&A)ー最近、高温超伝導体で電子と格子振動が強く結合する仕組みが解明されたと聞きましたが、より高温での超伝導実現の可能性はあるのでしょうか？

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
〒135-0062　東京都江東区東雲 1-10-13
Tel (03) 3536-7283　　Fax(03) 3536-7318
超電導 Web21 トップページ：http://www.istec.or.jp/web21/web21.html
この「超電導 Web21」は、競輪の補助金を受けて作成したものです。
http://ringring-keirin.jp

© ISTEC 2011 All rights reserved.

超電導 Web21
Superconductivity

2011 年 4 月 1 日発行

超電導 Web21

財団法人 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283 Fax: 03-3536-7318

特集：超電導線材技術の進展「国内外の Y 系超電導線材開発の動向」

財団法人国際超電導産業技術研究センター
超電導工学研究所線材研究開発部
部長　和泉輝郎

様々な利点（コスト、磁場中特性、強度、損失等）が謳われ、期待されながらも Bi 系超電導線材に対し開発の遅れをとっていた Y 系超電導線材は、この 10 年間で日米を中心に国家プロジェクトで飛躍的な進歩を遂げた。この間、世界的に I_c（臨界電流）・L（長さ）の積でその開発レベルを競い、常に日米がトップ争いを繰り広げてきた。この開発競争においては、2009 年 8 月に SuperPower 社が I_c・L = 300 kAm（I_c = 282 A/ cm 幅、L = 1062 m）を報告後、暫く更新されていなかったが、2010 年秋久しぶりにフジクラが IBAD-PLD 線材で更新（I_c・L = 375 kAm; 615m-609A/cm 幅）し、今年になって更にこれを伸ばしている（I_c・L = 467 kAm; 816 m-572 A/cm 幅）。

Y 系超電導線材は上記の通りの急速な進展を遂げ、最近では各種の機器開発が始められている。ところが、機器の実用化時期に求められる仕様を考えると、磁場中を含めた特性向上、量産化、高速化、低コスト、加工技術などを含めた歩留向上など、まだまだ開発が必要な要素が多い。夫々の機器に応じて求められる仕様も異なる上に、その求められる仕様は現有レベルを大きく超えるものである。最近の Y 系超電導線材の開発トレンドとしては、これらの機器側からのニーズに応えた要素技術開発に力点をおいた開発が進められている。

まず、モータや SMES などの磁場中応用に適した線材の開発に関しては、以前から短尺ベースで行われている基盤研究が継続して行なわれている。ここでは、PLD 法で BZO ナノロッド（棒状）を分散させる手法や、MOD 法に BZO ナノドット（粒子）に代表される人工ピン止め点を分散させる方法が一つの流れとして行なわれている。この延長線上で、長尺線材で報告されている例はまだ多くはなく、代表的な報告としては、SuperPower 社と Houston 大が MOCVD 法において YGdBCO 超電導相に BZO ロッドを導入する手法で、添加 Zr 量や Y/Gd の適正化を図り、安定した磁場中特性として 75 K で～100 A/cm 幅@1 T、～20 A/cm 幅@3 T を得たとしている。これに対し、日本ではもう一つのアプローチである厚膜高 J_c 化により、ISTEC において、PLD 法による GdBCO 線材で低コスト化との両立を図る高速成膜条件の下で厚膜化を図り、50 m 線材―33A/cm 幅@77 K,3 T の特性を報告しており、先の SuperPower 社線材の 1.5 倍の特性を得ている。

次に、ケーブルや変圧器などの交流応用を目指した低交流損失線材としては細線化線材の開発で日本が大きく進展している。最近では、IBAD-PLD 線材に加えて IBAD-MOD 線材においても 50 m 長で幅方向に 5 分割スクライブした線材で交流損失 1/5 を実証すると共に、コイル形状においても特殊な巻線技術で損失低減を確認している。この分野では、SuperPower 社が短尺での損失低減成果を示しているものの、コイル形状での損失低減の報告は未だ達成されていない。この分野における最近のトピックスとしては、高い配向性を有した Y 系線材でヒステリシス損失が劇的に小さい新たな現象が、ISTEC と九州大学により発見されている。今後、更なる確認実験が必要な余地はあるものの将来の応用に大きな可能性を示唆するものである。

上記の通り、機器に対応した個別要素技術に関しては日本が先行している一方、量産体制の観点では米国が一歩リードしているのが実状である。日本においては、国家プロジェクトの中での提供が中心で、最近事業化に向けた動きが始まったところであるのに対し、米国の AMSC 社や SuperPower 社では量産体制を整え、例えば、AMSC 社では既に年産 700 km 以上の能力を有しているとのことである。更に実用化が迫っていることを感じさせる事象として、最近は線材価格に関

© ISTEC 2011 All rights reserved.

財団法人 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283 Fax: 03-3536-7318

する報告が相次いでおり、SuperPower 社は 2015 年ごろに$50/kAm 程度を目指すとし、フジクラでは、2015 年を目処に 500 A 線材を 3000 円/m（6 円/Am）の価格で供給するとしている。最近の注目株としては韓国の SuNAM 社も線材販売競争に名乗りを上げており、長期ビジョンとして 2015 年には$80/kAm に、2023 年には$25/kAm にする計画を発表している。

以上、Y 系超電導線材の国内外の最近の動向を纏めた。I_c・L 値を指標として続けてきた開発は一区切りを迎え、最近は応用を強く意識した付加機能（磁場中特性や低損失等）技術開発が活発化するとともに、量産化や低価格化の技術開発に移行してきており、実用線材の開発の流れが加速されるものと考えられる。

超電導 Web21 トップページ

© ISTEC 2011 All rights reserved.

超電導 Web21
Superconductivity
超電導 Web21
2011 年 4 月 1 日発行

財団法人 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283 Fax: 03-3536-7318

特集：超電導線材技術の進展「Bi 系線材の高性能化の進展」

住友電気工業株式会社
超電導・エネルギー技術開発部
次長　林 和彦

1. 臨界電流向上の推移

$(Bi,Pb)_2Sr_2Ca_2Cu_3O_y$（Bi2223）高温超電導線材を当社は DI-BSCCO の商品名で販売している。原料粉末を金属パイプに充填して複合加工し、内部の粉末を焼結する PIT（Powder In Tube）法と呼ばれる方法で製造され、幅約 4.3 mm、厚さ約 0.23 mm のテープ状の形状をしている。可とう性を付与するため、セラミックである超電導フィラメントは銀や銀合金で覆われた多芯構造をしている。

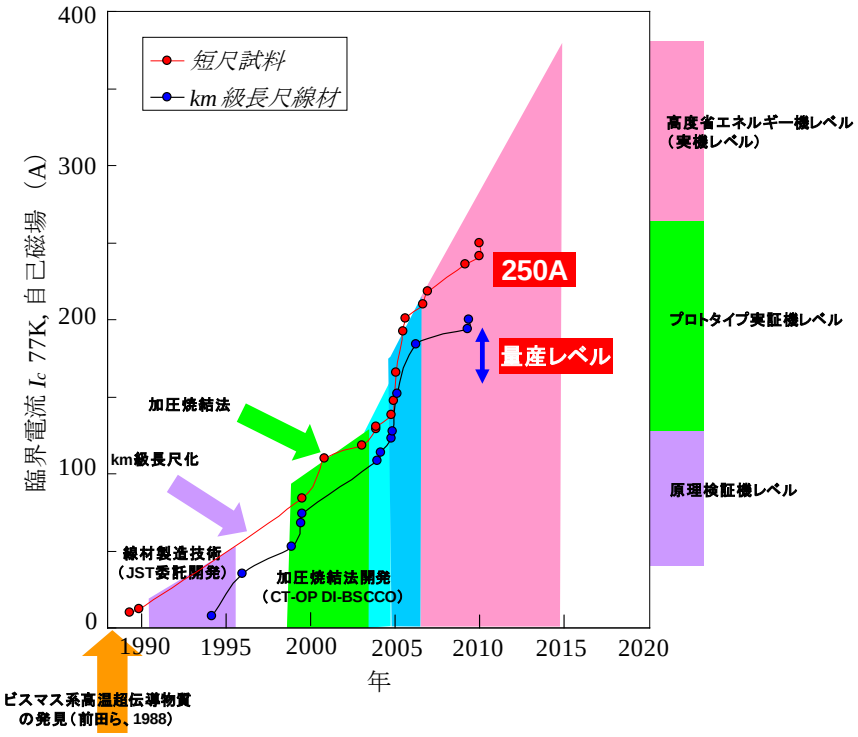


図 1 ビスマス系高温超電導線の性能向上

図 1 に Bi 系線材の臨界電流向上の経緯を示す。1995 年までの初期の段階で銀と複合加工する PIT 法の基本プロセスが確立され 1 km 級の線材が試作された。この間、製造プロセスの最適化が進んで臨界電流特性も徐々に向上し、標準サイズで液体窒素温度、自己磁場下で 100 A に到達したが、線材化が大きく進展したのは加圧焼結法の開発によってであった。加圧焼結法により局所的な欠陥が大幅に低減するなど製造歩留りが向上し、臨界電流、機械強度も改善されるなど、Bi 系線材が工業製品と呼べるレベルに到達した。その後も各製造プロセスの改善、製造条件の最適化が進み、短尺試料では臨界電流（77.3 K、自己磁場下）が 250 A に到達し、15 m で 233 A、km 級長尺線材では、200 A に到達した。現在工業レベルでは 160～180 A の長尺線材が供給可能になっているが、高 I_c が得られているプロセスを量産工程に導入中で、工業レベルでも 200 A 級の長尺線材が近く供給可能になる見込みである。

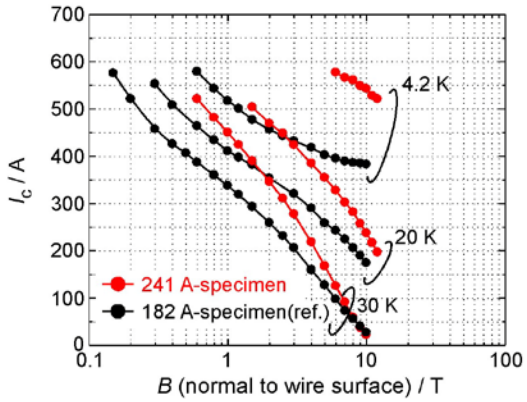
© ISTEC 2011 All rights reserved.

財団法人 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283 Fax: 03-3536-7318

2. その他

生産能力については、大がかりな設備投資を行うことなく現在の 500 km/年から 1,000 km/年に近く倍増できる見込みであり、需要があればそれ以上の生産能力の増強も考えている。

また、超電導線材の臨界電流特性は、液体窒素温度、自己磁場下で議論されることが多いが、これは用途に関わらず比較が可能な指標であり、電力ケーブル応用のように液体窒素の低磁場下では直接の比較も可能なためである。一方、マグネット応用では使用温度は 20～30 K であり、数 T の磁場が線材に垂直方向に印加される。標準的な工程で製造された DI-BSCCO 線材の低温磁場中特性を図 2 に示す。高温超電導体の低温におけるピンニング特性は、キャリア濃度に大きく依存することがこれまで分かっており、同じサンプルを用いてキャリア濃度を調整した場合に、低温磁場特性は図 2 よりも改善される場合がある。現在データをとりまとめ中で、今後は用途に応じて最適化された線材の販売も検討したいと考えている。



	77 K, s.f.	30 K, 3 T	20 K, 3 T
I_c(trial sample)	241 A	277 A	423 A
I_c(standard Type H)	182 A	205 A	320 A

図 2 低温磁場中特性

超電導 Web21 トップページ

© ISTEC 2011 All rights reserved.

超電導 Web21
Superconductivity
超電導 Web21
2011 年 4 月 1 日発行

財団法人 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283 Fax: 03-3536-7318

特集：超電導線材技術の進展「MgB_2線材のプロセス技術の進展」

独立行政法人　物質・材料研究機構
超伝導材料センター
センター長　熊倉浩明

MgB_2は従来の金属系超伝導体に比べてT_cが高く、また結晶粒の結合が比較的強くて配向化が不要と考えられる点で実用上有利であると考えられる。また原材料の価格が低いこともMgB_2の利点である。すでに 1 km を越える長尺線材も企業等で作製されるようになってきており、また最近ではイタリアのグループがMgB_2線材を用いてオープンタイプの冷凍機冷却による MRI システムを完成させ、病院で試験的に運転するなど、応用に向けた研究開発も活発化している。

MgB_2の線材化法としてはいわゆる PIT 法が主流である。Mg と B 粉末を出発原料とする In situ PIT 法によるMgB_2線材では、混合粉末に様々な不純物を添加して超伝導特性を向上させる試みが数多くなされている。最も良く知られた添加物は SiC ナノ粉末であるが、その他にもカーボンナノチューブやフラーレンなどの炭素の添加により、特に高磁界でかなり大きなJ_cの向上が得られている。これらの添加によるJ_cの向上においては、添加によって B サイトの C 置換が起こり、これによってH_{c2}が上昇することが大きく効いていると考えられる。また炭化水素 (C_9H_{12}) や炭水化物 ($C_4H_6O_5$) などの有機物添加でもJ_cの向上が報告されている。これらの場合は B サイトのカーボン置換量は SiC 添加に比べてわずかであるにもかかわらず、かなり大きなJ_cの向上が得られているが、そのメカニズムについてはまだ良く解ってはいない。

In situ 法では、熱処理によって Mg と B が反応してMgB_2が生成する際に体積の収縮が起こるので、一般的に in situ 法による線材のMgB_2コアの充填率は 50 %前後と、かなり低いのが普通であり、充填率を向上させる試みが種々なされている。その一つの方法がホットプレスや Hot Isostatic Press(HIP) を適用して熱処理を行うものであり、ホットプレスでは通常熱処理に比べて 2-3 倍のJ_cの向上が報告されている。しかしながら、これらの方法では長尺線材の作製が難しいという難点がある。これに対して冷間高圧プレス法は、長尺化にも対応できるとされている。平角線材の 4 面を 1.5 GPa の圧力で同時にプレスし、その後通常の熱処理をすることで 60 %程度の充填率が得られ、4.2 K では約 2 倍、20 K、7 T では約 8 倍のJ_cが報告されている。

また、原料混合粉末をメカニカルアロイング法で混合・反応させ、充填率と均一性を向上させる手法も報告されている。この方法ではメカニカルアロイングによって一部微細なMgB_2が生成され、これが核となってMgB_2層が形成されるので熱処理温度を低く設定することが可能となり、微細なMgB_2の結晶粒が得られてピンニング特性の向上も得られるという利点がある。

一方、Mg 粉末の代わりに Mg 棒を用い、この Mg をボロン層に拡散によって供給して密度の高いMgB_2層を得る方法もある。金属管の中心に純 Mg 棒を配置し、Mg 棒と金属管とのすき間にアモルファスボロン粉末を、なるべく密になるように充填する。これを線材に加工し、熱処理をすると Mg がボロン層に拡散して行き、MgB_2が形成される。

このようにして最近では、以前に比べるとかなり高いJ_c値が得られるようになってきている。20 K においては、3 T で実用レベルの目安とされる 100 kA/cm^{2}を越えるJ_c値が得られているが、J_cは磁界と共に急激に低下し、より高い磁場での応用のためには今後の更なる特性改善が必要不可欠である。また線材全断面積あたりの$J_c(J_e)$はまだかなり低い。今後さらなる組織制御や断面構造の改良によるJ_cやJ_eの改善が必須である。

超電導 Web21 トップページ

© ISTEC 2011 All rights reserved.

超電導 Web21
Superconductivity
超電導 Web21
2011 年 4 月 1 日発行

財団法人 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283 Fax: 03-3536-7318

特集：超電導線材技術の進展「鉄系超電導材料の進展」

財団法人国際超電導産業技術研究センター
超電導工学研究所
副所長　田辺圭一

銅酸化物に次ぐ第 2 の高温超電導体群である鉄系超電導材料が東工大の細野教授のグループにより発見されてから 3 年が経過した。東工大グループが発見した T_c が 26 K の LaFeAs(O,F)の論文が 2008 年 2 月に発表されるやいなや国内外の多くのグループが研究に参入し、その 2 ヵ月後には La を Sm に置換した材料で 55 K の T_c が記録された。本材料系は、元素の組み合わせが非常に多く、より高い T_c をもつ材料が発見される可能性があることや、銅酸化物と同様に金属系の超電導材料とは全く異なる特異な物理的性質をもつことから、国内のみならずドイツ、中国など海外においても主に基礎的研究をねらいとした国のプロジェクトがその後立ち上がっている。残念ながら、この 55 K という T_c の記録は現在まで塗り替えられていないが、これまでに約 30 種の鉄系新材料が発見されると共に、その物理的性質がかなり解明されてきた。また、線材や電子デバイスへの応用を目指した研究も徐々にではあるが進展してきている。本稿では、主に応用に関連した最近の研究の進展について紹介する。

これまで発見された鉄系超電導材料は、銅酸化物と同様に層状構造をもち、その層の構成から表 1 に示す 4 種に大きく分類することができる。いずれも超電導を担うのは、鉄とニクトゲン（As や P）あるいはカルコゲン（S, Se, Te）からなる四面体のネットワークである。この鉄を含む層が、RE-O（RE は希土類元素）の四面体からなる層と交互に積層されたのが、最初に発見されたいわゆる 1111 系の材料である。鉄を含む層とアルカリ土類元素（Ca, Sr, Ba）や、アルカリ金属元素（Li, Na 等）の面が交互に積層された材料は、それぞれ 122 系、111 系の材料と呼ばれる。また、鉄とカルコゲンの層のみが積み重なった最もシンプルな材料が 11 系であるが、この 4 種以外にもペロブスカイト構造からなる厚いブロック層を挟む材料も多く見つかっている。これらの材料の中で、特に 1111 系と T_c が最高で 38 K の 122 系の材料は、Y 系などの銅酸化物に匹敵する高い上部臨界磁場 B_{c2} をもつ。また、線材応用にとって重要な異方性パラメータに関しては、1111 系が 5 程度と Y 系銅酸化物とほぼ同じであるが、122 系は 1.5 から 2 と MgB_2 並みに小さいことがわかっている。

表 1　鉄系超電導材料の分類と特性

通称	1111系	122系	111系	11系
結晶構造	ZrCuSiAs型	$ThCr_2Si_2$型	PbFCl型	PbO型
材料及びT_c	LaFeAs(O,F)　28 K La(Fe,Co)AsO　14 K $NdFeAsO_{1-y}$　55 K SmFeAs(O,F) 55 K Ca(Fe,Co)AsF　22 K LaNiBiO　4 K	$(Ba,K)Fe_2As_2$　38 K $(Sr,K)Fe_2As_2$　38 K $Ba(Fe,Co)_2As_2$　23 K $BaFe_2(As,P)_2$　30 K $BaNi_2P_2$　3 K $K_xFe_{2-y}Se_2$　32 K	LiFeAs　18K NaFeAs　15K	FeSe　8 K FeSe(圧力下)27 K Fe(Se,Te)　15 K Fe(Se,Te) (薄膜)21K
異方性 γ	5	1.5 - 2		1 - 2

© ISTEC 2011 All rights reserved.

財団法人 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283 Fax: 03-3536-7318

鉄系超電導材料の線材応用に向けた研究開発としては、中国科学院のグループがパウダー・イン・チューブ（PIT）法を用いた線材作製に初期の頃より精力的に取り組んでおり、内部シースに Ag を用いた Fe シース線材（超電導材料は(Ba,K)-122、Ag を添加）で 4.2 K、self-field で最大 37.5 A（J_c > 3750 A/cm^2）の I_c を報告している。ただし、磁場中で I_c は急激に低下しており、結晶粒間の結合が弱いことを示している。国内では物質・材料研究機構（NIMS）が 11 系、122 系、1111 系の PIT 線材作製に取り組んでおり、11 系では 7 芯の多芯線も試作している。また、122 系の Ag シース線材で、self-field I_c が 60 A、J_c が 10^4 A/cm^2 台にまで向上したことを最近報告している。磁場印加により J_c は初め急激に低下するが、18 T 程度の高磁場でも 10^3 A/cm^2 程度の J_c が維持されており、低温・高磁場用の線材としての可能性があることが示された。

線材応用にとって重要な結晶粒界の性質や、またデバイス応用の可能性を調べるためには、高品質のエピタキシャル薄膜の作製が必須となる。Co 置換によりキャリアドープした 122 系材料（T_c は 20-25 K）は薄膜作製が比較的容易で、これまで Wisconsin 大、東工大、ドイツの IFW Dresden などから高品質薄膜作製の報告がなされている。東工大の細野グループと ISTEC は、日本学術振興会の最先端研究開発支援プログラムの枠組みの中で、バイクリスタル基板上に作製した高品質薄膜を用い、結晶粒界における J_c の傾角依存性を詳細に調べた。その結果、傾角が 9° 以下では J_c がほとんど低下しないのに対し、それ以上の傾角では、J_c が指数関数的に低下する、すなわち粒界が弱結合になっていることがわかった。Y 系銅酸化物に比べ、粒界が弱結合となる臨界角は約 2 倍程度大きく、また高傾角での J_c の低下の傾斜もかなり緩くなっている。銅酸化物も鉄系超電導体もキャリアドーピングにより超電導が発現するという共通点があるが、キャリアの欠損した母物質が銅酸化物では絶縁体であるのに対し、鉄系では金属である点が結晶粒界の性質の違いとなって現れているものと解釈している。このことは、Y 系銅酸化物線材で用いられているような配向中間層付き金属基板上には比較的容易に高 J_c 膜が得られる可能性を示している。実際に、IBAD 中間層付き金属基板上の薄膜作製の試みも最近 IFW Dresden などから報告されている。一方、傾角が 30° 以上の結晶粒界は理想的な超電導―常電導―超電導（SNS）型のジョセフソン接合になっており、これを利用した SQUID の動作も東工大と ISTEC との共同研究で実証されている。より T_c の高い 1111 系材料の薄膜については、F 置換によるキャリアドープが困難なため、高品質超電導薄膜の作製が遅れていたが、名大のグループが MBE 法で作製した Nd-1111 薄膜の上に Nd-O-F 薄膜を連続堆積し、F を拡散させることで 50 K を超える T_c を実現している。農工大グループも同様な方法で T_c zero = 53 K の膜を最近得ており、磁場中 J_c などの超電導特性の評価が待たれる。

以上紹介してきたように、鉄系超電導材料は現状では、主に低温・高磁場での特性に応用の可能性が見られるが、やはり T_c がより高く、異方性の小さな新材料の発見が期待される。また、これまで発見された T_c の高いほとんどの材料は有毒な As を含んでいるが、As を含まず 32 K の T_c をもつ材料（$K_xFe_{2-y}Se_2$）も昨年発見されていることを最後に紹介しておく。

超電導 Web21 トップページ

© ISTEC 2011 All rights reserved.

財団法人 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283 Fax: 03-3536-7318

超電導関連 4- 5 月の催し物案内

3/28-4/1
2011 Particle Accelerator Conference (PAC'11)
場所：the New York Marriott Marquis Hotel located in New York City
問合せ：http://www.bnl.gov/pac11/

4/4-8
SuperConductingCity Hannover Messe
場所：Hannover, Germany
問合せ：http://site.hannovermesse.de/scc

4/10-13
IEEE Electric Ship Technologies Symposium
場所：Alexandria, VA, USA
問合せ：
http://www.ieee.org/conferences_events/conferences/conferencedetails/index.html?Conf_ID=17703

4/14-15
超伝導エレクトロニクス研究会　4 月研究会（マイクロ波超伝導／マイクロ波一般 [マイクロ波研究会と共催])
場所：東北大学電気通信研究所
主催：超伝導エレクトロニクス研究会
問合せ：http://www.ieice.org/es/sce/jpn/

4/15-17
IEEE International Conference on Electric Information and Control Engineering (ICEICE)
場所：Wuhan, China
問合せ：
http://www.ieee.org/conferences_events/conferences/conferencedetails/index.html?Conf_ID=17633

4/25-29
2011 MRS Spring Meeting and Exhibit
場所：San Francisco, California
問合せ：http://www.mrs.org/spring2011/

4/30-5/3
American Physical Society　April Meeting 2011
場所：Anaheim, CA
問合せ：http://www.aps.org/meetings/april/index.cfm

5/16-19
ESMO 2011 Conference and Exposition

© ISTEC 2011 All rights reserved.

財団法人 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283 Fax: 03-3536-7318

場所：Providence, RI, USA
問合せ：http://www.esmoconference2011.com

5/18-20
第 84 回（2011 年春季）低温工学・超電導学会
場所：物質・材料研究機構（千現地区）、研究交流センター
問合せ：http://www.csj.or.jp

（編集局）

超電導 Web21 トップページ

© ISTEC 2011 All rights reserved.

財団法人 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283 Fax: 03-3536-7318

新聞ヘッドライン（2/15-3/15）

○フロンティア知恵を絞る㊤ 超電導、交流でも省エネ 国際超電導産業技術研究センター超電導工学研究所 日本経済新聞 2/15
○フロンティア知恵を絞る㊦ 高性能線材、量産化急ぐ 国際超電導産業技術研究センター超電導工学研究所 日本経済新聞 2/16
○時代の変わり目､認識を 関西電力 電力システム技術センター 超電導ケーブルに期待 住友電工と共同で研究 電気新聞 2/16
○JR 東海のリニア事業 5.1 兆円 Fuji Sankei Business i. 2/22
○強力超電導磁石、小型に 鉄道総研が開発 「卓上 MRI」実現へ道開く 日本経済新聞 2/21
○レアアース対策 1100 億円 中国頼み改善へ官民連携 朝日新聞 2/25
○レアアース 脱中国へ 1100 億円投資 110 社 160 事業 輸入 3 割減目標 日本経済新聞 2/25
○超電導材料 鉄系、従来理論で説明 分子研などデータ確認 室温実現の可能性も 日本経済新聞 3/01
○日韓でレアメタル権益 ブラジル鉱山に 1500 億円 新日鉄･JFE･ポスコ連合 日本経済新聞 3/03
○リニア新幹線③ 「超電導」追求した日本 朝日新聞 夕刊 3/03
○レアメタル日韓連携 鉄鋼大手 ブラジル企業に出資 読売新聞 夕刊 3/03
○隠れた技術、利益に転換 20 年越しの超電導離陸 日本経済新聞 3/09
○日韓でレアメタル権益 高級鋼副原料を確保 「ニオブ」強度や耐熱性高める 日経産業新聞 3/07

（編集局）

超電導 Web21 トップページ

© ISTEC 2011 All rights reserved.

超電導 Web21
Superconductivity
超電導 Web21
2011 年 4 月 1 日発行

財団法人 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283 Fax: 03-3536-7318

超電導速報―世界の動き（2011 年 1 月-2 月）

財団法人国際超電導産業技術研究センター
国際部

部長　津田井昭彦

電力

American Superconductor Corporation（2011 年 1 月 4 日）

American Superconductor Corporation (AMSC) は、韓国 Doosan Heavy Industries and Construction Company, Ltd.から 1,000 万ドルを超える風力発電機制御システムの初の注文を受けた。Doosan 社はこの制御システムを陸上及び海上の 3-MW 風力発電機に適用することを計画している。出荷は、2011 年夏に開始の予定。Doosan 社は、過去 12 ヶ月に AMSC 社風力発電機制御システムや部品の大口発注を行った 7 番目の顧客である。AMSC 社創立者で CEO の Greg Yurek は次のように述べた。「Doosan 社は電力や海上機器の分野では数十年の経験を有している。また、この分野は "Doosan 社がグリーン・エネルギー事業を世界的に展開していく上での柱となるものである。アジアでは海上風力発電市場が急速に成長する市場となり始めているところであり、Doosan 社の WinDS3000 のような数メガワット級の風力発電システムは今後大きな需要が出てくるであろう。」
出典:
“AMSC Receives Volume Wind Turbine Electrical Control System Order from Korea’s Doosan Heavy Industries”
American Superconductor Corporation press release (January 4, 2011)
http://phx.corporate-ir.net/phoenix.zhtml?c=86422&p=irol-newsArticle_Print&ID=1512314&highlight

American Superconductor Corporation（2011 年 1 月 11 日）

American Superconductor Corporation (AMSC)は、子会社 Windtec™の風力発電機設計に関するいくつかの特許を北京の JINGCHENG New Energy Co., Ltd. (JCNE) にライセンスした。同社は 2006 年から風力発電機の生産を行ってきており、年間 2,000 MW 相当の風力発電機の生産能力を有している。AMSC 社から JCNE 社へのライセンスにより、同社は 3-MW SuperGEAR™モデルのほか、Windtec の 2-MW, 3-MW, 5-MW 級コンバーター型風力発電機の製造、販売を行う。この契約の一環として、JCNE 社は AMSC 社から同社の風力発電機向けに電気制御システム及びコア電気部品を購入する。2-MW、3-MW 級コンバーター型風力発電機の生産は 2011 年中に始まる予定であり、その他のタイプの風力発電機についても引き続き生産に入ることになっている。AMSC 社創立者で CEO の Greg Yurek は次のように述べた。「中国の風力エネルギー市場は少なくとも今後 10 年は大きく成長するものと見込まれており、我が社の重点市場でもある。JCNE 社は、風力発電市場参入企業として以前から勢いを持っており、AMSC Windtec の風力発電機の設計、顧客支援、業界最高の電力エレクトロニクスや制御技術を梃子に、数年後には現在よりもずっと重要な役割を果たすようになっているであろう。現在中国には AMSC 社の顧客である風力発電機メーカーが 6 社あり、中国や世界における我が社の風力発電機シェアーは今後とも拡大していくものと考えている。」
出典:
“AMSC Licenses Multiple Wind Turbine Designs to a Sixth Wind Turbine Manufacturing Customer in China”
American Superconductor Corporation press release (January 11, 2011)

© ISTEC 2011 All rights reserved.

http://phx.corporate-ir.net/phoenix.zhtml?c=86422&p=irol-newsArticle_Print&ID=1514827&highlight

American Superconductor Corporation（2011 年 1 月 18 日）

American Superconductor Corporation (AMSC) は、英国 Nordex UK Ltd.から風力発電機向けの D-VAR 無効電力補償システム 2 台の発注を受けた。この 2 台の無効電力補償システムは、スコットランドの風力発電所の拡張に伴い導入されるもので、地域の電力グリッド接続のための要求事項がその導入により満たされる。AMSC 社社長兼 COO の Dan McGahn は次のように述べた。「英国では 2020 年までに総エネルギーの 15 %を再生可能エネルギーでまかなうという目標を達成すべく努めており、同国の風力発電市場は今後とも大きく成長していくものと思われる。我々は、英国がクリーン・エネルギーの目標を達成する一助となればと願っており、これに向けて Nordex UK Ltd.とパートナーが組めて嬉しく思っている。」

AMSC 社の D-VAR システムは、世界 6 カ国で 70 以上もの風力発電所と地域電力グリッドを結合するために使われている。本システムの注文は 2010 年に前年の倍以上に達し、これまでの記録を更新した。AMSC 社は、ゼロエミッション・エネルギーに対する需要の高まりの中で本分野が今後とも継続して成長していくものと考えている。

出典:
“AMSC Announces Additional D-VAR® Orders for Grid Interconnection of Wind Farms in the United Kingdom”
American Superconductor Corporation press release (January 18, 2011)
http://phx.corporate-ir.net/phoenix.zhtml?c=86422&p=irol-newsArticle_Print&ID=1516607&highlight

American Superconductor Corporation（2011 年 1 月 25 日）

American Superconductor Corporation (AMSC)は、インドの Inox Wind Limited から 900 万ドル相当の風力発電制御システムの追加発注を受けた。2010 年 8 月に、AMSC 社は Inox 社から 17 基の風力発電制御システムを受注している。この風力発電制御システムは、AMSC Windtec™のライセンスを受け Inox 社が生産している 2-MW 二重誘導風力発電機に使われている。AMSC 社創立者で CEO の Greg Yurek は次のように述べた。「インドはクリーン・エネルギー技術の大きな市場に成長するものと期待されており、Inox 社は本分野のリーダーとなる大きな可能性を持った企業である。Inox 社は、早くも年間 800 MW 規模の風力発電機生産能力を持つに至っており、今回の 900 万ドルの新規発注もあって、我が社の主要風力発電機メーカー顧客の１つとなっている。」

出典:
“AMSC Announces Additional D-VAR® Orders for Grid Interconnection of Wind Farms in the United Kingdom”
American Superconductor Corporation press release (January 25, 2011)
http://phx.corporate-ir.net/phoenix.zhtml?c=86422&p=irol-newsArticle_Print&ID=1519423&highlight

American Superconductor Corporation（2011 年 2 月 1 日）

American Superconductor Corporation (AMSC) は 2010 年 12 月 31 日に終了する第 3 四半期の収支を発表した。 当期収入は、前年同期 8,070 万ドルに対し 1 億 1,420 万ドルへと 42 %増加した。粗利益率も、前年同期の 37.5 %から 40.7 %に増加した。当期の利益は、前年同期の 520 万ドルに対し、当期は 1,600 万ドルであった。一般会計原則に拠らない（non-GAAP）算定を行った場合 AMSC 社の利益は前年同期の 910 万ドルに対し、当期は 1,980 万ドルとなる。第 3 四半期末時点で、AMSC 社の現金、現金等価物、流通債権、拘束預金総額で 2 億 6,050 万ドルであった。なお前期末（2010 年 9 月 30 日）時点では 1 億 3120 万ドル。この増加は、2010 年 11 月に株式を追加発行したことに

© ISTEC 2011 All rights reserved.

よる。2010 年 12 月 31 日時点での受注残は 8 億 8,300 万ドル。AMSC 社創立者で CEO の Greg Yurek は次のように述べた。「第 3 四半期は 16 期連続での増収を記録したが、当期約 2,000 万ドルの電力グリッド関連の売り上げという記録を達成した。特にアジア向けの風力発電関連の売り上げは、近い将来の成長エンジンとして期待している。また、D-VAR, D-VAR RT, SolarTie, Amperium 線材、超電導ケーブル等の電力グリッド関連商品の売り上げも我が社の成長により大きく寄与してくれるものと期待している。」
出典:
“AMSC Reports Third Quarter Fiscal Year 2010 Financial Results”
American Superconductor Corporation press release (February 1, 2011)
http://phx.corporate-ir.net/phoenix.zhtml?c=86422&p=irol-newsArticle_Print&ID=1522219&highlight

Superconductor Technologies Inc.（2011 年 2 月 1 日）

Superconductor Technologies Inc. (STI) は、HTS 交流電力ケーブル、超電導限流器、HTS 風力発電応用といった顧客の要求事項を満たす Y 系線材の製造に成功した。試験用サンプル線材の顧客への出荷は間もなく始まる見込みである。STI 社の Y 系線材プログラムでは、特殊な HTS 材料処理プロセスと量産のための専門知識を活用し、エネルギー効率が高く、コスト・パフォーマンスが良好で、高特性の HTS 線材を製造している。同社社長兼 CEO の Jeff Quiram は次のように述べた。「競争力ある線材の製造という目標を達成したことは､我が社の Y 系線材開発の大きな成果である。それぞれの応用分野で技術的な要求が異なる。我が社の技術チームはこれら線材仕様を満たすべく長期に亘り大きな努力を払ってきた。我々は今回の技術的成功の上に立ち、顧客との将来の取引関係確立を図っていく考えである。」
出典:
“Superconductor Technologies Inc. Produces 2G HTS Wire Samples for Superconducting High Power Transmission Cable, Fault Current Limiter, and Wind Turbine Generator Applications”
Superconductor Technologies Inc. press release (February 1, 2011)
http://phx.corporate-ir.net/phoenix.zhtml?c=70847&p=irol-newsArticle&ID=1522189&highlight

Superconductor Technologies Inc. (2011 年 2 月 9 日)

Superconductor Technologies Inc. (STI) は、Y 系線材を使った強磁場試験の結果を発表した。STI 社は Los Alamos National Laboratory (LANL)と共同して、優れた磁場特性を有する Y 系線材を製造して、超電導限流器や高出力風力発電機のような応用に必要な仕様を満たす同社線材製造プロセスの有効性を実証した。LANL が開発したテンプレートを用い、STI 社は 65 K、3 T の条件下で最小でも 228 A の臨界電流を示す Y 系線材サンプルを製造した。これは、cm 幅当たり 256 A に相当する。65 K における最高臨界電流値は、線材の表面に対し 3 T の磁場を平行に印加した場合、cm 当たり 404 A であった。なお、この電流値は電源が供給できる限度一杯の値である。5 T、65 K では、この線材の最低臨界電流値が cm 当たり 143 A、最高値が 322 A であった。この測定は LANL で行われた。STI 社材料研究開発部長 Brian Moeckly は次のように述べた。「今回達成した強磁場下での臨界電流は、我が社の Y 系線材開発にとって大きな一歩である。また、今回線材は特段の手を加えずに加工している。今回の結果を得るために超電導層にいわゆる人工ピンのような添加物を加える必要がないということである。今回の測定は短尺で行ったが、我が社線材の優れた特性は長尺 Y 系線材にスケールアップしたとしても維持されるものと確信している。」
出典:
“Superconductor Technologies Announces 2G High Temperature Superconductor Wire Critical Current Performance Achievement”

© ISTEC 2011 All rights reserved.

Superconductor Technologies Inc. press release (February 9, 2011)
http://phx.corporate-ir.net/phoenix.zhtml?c=70847&p=irol-newsArticle&ID=1526771&highlight

National Institute of Standards and Technology（2011 年 2 月 10 日）

National Institute of Standards and Technology (NIST) の研究グループは、現在電力グリッドに実証試験のために設置されているものより薄くて可塑性のある HTS 電力ケーブルを製造する手法を見出した。この新しい電力ケーブルは現在の実証試験用ケーブルに比べ同等か、又はそれ以上の電流を流すことができる。このようなコンパクトなケーブルは、科学、医療用途のみならず、電力グリッドにおいても応用の可能性を持っている。この新しい製造方法では、銅フォーマーを多重化したコアの回りに交互に Y 系線材を巻いていくという手法が取られている。プロトタイプ・ケーブルの 1 つは、外径 6.5 mm で 1,200 A の電流を流し、また、もう 1 つのケーブルは外径 7.5 mm で 2,800 A もの電流を流すことができる。これらケーブルは、現在電力グリッドで実証試験に供されている従来の HTS ケーブルに比べ直径が 1/10 である。このケーブルの大きな利点は、超電導線材の圧縮応力に対する尤度の大きさであり、銅フォーマーを非常に小さなものにすることができる。今回のプロトタイプ・ケーブルは手巻きであるが、いくつかのケーブル・メーカーは量産も可能であるとしている。NIST の研究グループは、現在軍用のコンパクト HTS ケーブルの開発を進めているところである。
出典:
“Compact high-temperature superconducting cables demonstrated at NIST”
National Institute of Standards and Technology press release (February 10, 2011)
http://www.nist.gov/pml/electromagnetics/htc-021011.cfm

Zenergy Power plc（2011 年 2 月 11 日）

Zenergy Power plc は、同社事業及び主要事業に関する戦略オプションについての見直しや全体戦略の長期的な可能性に関する評価を完了した。同社は、磁気加熱装置や超電導限流器などの多くの工業製品に適用されている高温超電導分野における一連の特許を保有している。同社取締役会は、保有する超電導技術は非常に大きな価値を持っているという結論に達した。しかしながら、同社独自の資金のみで HTS 線材プロセス（連続化学プロセス）商業化に必要なスケールアップ技術開発のための投資を行うことは荷が重いとの考え方も一方にある。また、限流器市場は長期的にはポテンシャルのある市場ではあるが、限流器市場への参入には長い年月が必要になる。磁気加熱装置の売り上げも低いレベルに止まっており、当初の予想よりかなり長い時間が必要になりそうである。これらを総合的に考えると、同社が超電導技術を商業化するまでの期間における資金需要を満たすための資金供給が必須であると思われる。このため、取締役会は同社事業がより大きなビジネス・グループの一員として所要の資金が得られ、また、同社特許の商業化を可能とするビジネスパートナーとの関係が構築できるよう、新たな買い手を捜すことを決定した。
出典:
“Review of Group’s business, strategic options and commencement of offer period”
Zenergy Power plc press release (February 11, 2011)
http://www.zenergypower.com/images/press_releases/2011/2011-02-11-zenergy-power-strategic-review-clean.pdf

Converteam（2011 年 2 月 21 日）及び Zenergy Power（2011 年 2 月 22 日）

Converteam は、世界初の HTS 水力発電機である 1.7-MW HYDROGENIE 発電機を構成する主要コンポーネントの静的試験を成功裏に完了した。Converteam は現在 Zenergy Power 社が供給した

© ISTEC 2011 All rights reserved.

28 個の HTS コイルを使い、発電機の製作を行っている。これは、EU 資金によるプロジェクトの一環として進められているものであり、ドイツ、バイエルン州にある E.ON Wasserkraft GmbH の水力発電プラントに商用 HTS 発電機を設置することを目指している。この超電導発電機 HYDROGENIE により、従来の発電機に比して効率の大幅向上が図られるとともに、大きさ及び重量を 70 %程度まで減少させることが可能となる。Converteam 技術部長 Derek Grieve は次のように述べた。「今回の HYDROGENIE に関する試験の最重要ポイントは、ローター・コイルを超電導状態にした時にここに所定の電流が流れること（今回の場合は 70 A）にあった。この目標はコイルに対する冷凍パワーが当初予定の半分でも達成され、コイルの熱及び電気設計、冷凍システム、絶縁システムの機能を確認することができた。HYDROGENIE は、99 %にも達する発電効率を有しており、再生可能エネルギー産業のエネルギー経済を根本的に変える力を持っていそうである。」この HYDROGENIE 発電機は 2011 年夏に運転開始予定である。

出典

“Converteam’s HYDROGENIE superconducting generator successfully completes landmark testing in the quest for clean energy sources”
Converteam press release (February 21, 2011)
http://www.converteam.com/converteam/4/doc/News_2011/20110221_6_HYDROGENIE_tests.pdf
“Superconducting coils from Zenergy Power successfully operating in the landmark testing at Converteam for the E.ON Wasserkraft hydro generator”
Zenergy Power press release (February 22, 2011)
http://www.zenergypower.com/images/press_releases/2011/2011-02-22-hydrogenie-static-test.pdf

Superconductor Technologies Inc.（2011 年 2 月 16 日）

Superconductor Technologies Inc. (STI) は、同社 Y 系線材サンプルが大型回転機用線材に必要とされる所定温度での電流容量、磁場特性についての顧客仕様を満たすものであると発表した。同社製品管理及びマーケッティング担当役員 Adam Shelton は次のように述べた。「顧客による今回の線材仕様の確認は、我が社 Y 系線材が市場に受け入れられるという目標実現に向けた大きな一歩である。我々は、高性能かつ経済性に優れた Y 系線材を使うことによって実現される超電導回転機などの大型新規市場への参入に向け注力しているところである。我が社の HTS 材料開発チームは、顧客からの厳しい仕様を満たすべくこれまで非常な努力を払ってきている。強磁場下における優れた電流特性を実証できたことは、我が社が Y 系線材を商品化するに当たっての大きな前進である。」

出典:

“Superconductor Technologies Inc. Meets Customer Current Carrying Performance Requirements of 2G HTS Wire for Superconducting Applications in High Magnetic Field”
Superconductor Technologies Inc. press release (February 16, 2011)
http://phx.corporate-ir.net/phoenix.zhtml?c=70847&p=irol-newsArticle&ID=1529456&highlight

NMR

Bruker（2011 年 1 月 12 日）

Bruker 社は、University of Minnesota から超強磁場 NMR、Avance™ III 900 と Avance™ III 850 を受注した。受注総額は 750 万ドル。この 2 台の NMR は、同大学の NMR 研究所に設置され、各種バイオ医療研究に使われる主要機器として活用される予定。Avance™ III 850 NMR は、Bruker 社の 850-MHz Ascend™マグネットが組み込まれている。このマグネットは先端超電導技術を採用

© ISTEC 2011 All rights reserved.

しており、漏れ磁場を大きく低減し、従来よりもずっと小型のクライオスタットでの稼動を可能としている。
出典:
“ Bruker Announces Large Ultra-high Field NMR Order from the University of Minnesota”
Bruker press release (January 12, 2011)
http://www.bruker-biospin.com/pr110112.html

量子計算機

National Institute of Standards and Technology（2011 年 2 月 23 日）

National Institute of Standards and Technology (NIST) の研究グループは、初めて 2 個のベリリウム原子を離れた場所に置いて、両原子間でエネルギー量子の交換を行いつつ交互に振動させることに成功した。2 つの物理的に孤立した原子の動きを直接結びつけるというこの技術は、将来の量子計算機における情報処理やこれを使ったシミュレーションをより簡単にする可能性を秘めている。この原子間のカップリングを調整すれば、エネルギー交換速度や交換されるエネルギー量を変えることができる。単一エネルギー量子の交換も可能である。この実験は、新しく開発した、液体ヘリウムバス中で-269°C にまで冷却したワン・レイヤー・イオン・トラップにより可能となった。今回の実験は、実証した相互作用が異なるタイプの量子系を結合するのにも利用できる可能性を示唆するものであり、例えば、捕捉されたイオンを超電導 qubit と光子からなる qubit との間を繋ぐ量子変圧器として作動させることが可能になるかもしれない。研究グループのこの結果は、Nature 2 月 23 日号に掲載された。
出典:“Quantum hot potato:NIST researchers entice 2 atoms to swap smallest energy units”
National Institute of Science and Technology press release (February 10, 2011)
http://www.nist.gov/pml/div688/quantum-022311.cfm

核融合

Oak Ridge National Laboratory（2011 年 1 月 14 日）

Oak Ridge National Laboratory (ORNL) の研究者及びエンジニアーは、核融合実験施設 ITER の重要機器に関する課題解決に向け、ORNL の U.S. ITER Project Office、日本原子力研究機構及び ITER Organization と共同で作業を進めている。ORNL の Spallation Neutron Source (SNS) に設置されている VULCAN 中性子回折装置を使い、ITER の中央ソレノイド・マグネット用ケーブルの検査を行っているのだ。この中央ソレノイド・マグネットは炉内のプラズマ閉じ込めとその形状維持に必要な電流をプラズマ内に生み出すために使われる。研究グループは、超電導ケーブル中の超電導線束の劣化を少なくして、ケーブルの性能の改善を図ろうと努めている。2010 年末ころのサンプル試験の結果、超電導ケーブルは以前の ITER モデルコイル試験で見られたよりも激しく電流特性が劣化していることが明らかになった。ケーブルによって生成される強磁場と電磁力は磁場サイクルの間に、ある種の特性劣化を引き起こすことが知られている。しかしながら、導体サンプルの正確な劣化原因は明らかになっていない。導体製造過程や負荷に対する導体のある種の感受性といったものが劣化の原因として考えられる。この原因を調べるために、ケーブルの一部を切り取った試料を準備しており、今後 SNS の中性子回折装置を使ってこれを調べる予定。このような検査により、破壊や変形なしにケーブル断面の構造に関する詳細データが明らかになるであろう。VULCAN

© ISTEC 2011 All rights reserved.

の装置担当研究者 Xun-Li Wang は次のように述べた。「中性子回折は工学材料における荷重や応力をマッピングするためのよく知られた手法である。VULCAN を使えば、ローレンツ力による変形を明確にすることができるであろう。基礎的な観点からは、超電導線材の臨界電流と印加荷重との詳細な関係を明らかにし、線材特性の予測モデルを開発できるものと考えている。」日本原子力研究機構及び ITER Organization は、今後の研究計画の策定を進めている。
出典:"Neighbor lends a hand"
Oak Ridge National Laboratory press release (January 14, 2011)
http://www.ornl.gov/info/features/get_feature.cfm?FeatureNumber=f20110114-00

加速器

CERN（2011 年 1 月 31 日）

CERN は、2012 年末の短期的な装置停止を除き Large Hadron Collider (LHC) を 2012 年末まで運転する予定であると発表した。また、2011 年中のビーム・エネルギーは 3.5 TeV とする。2 年後には 2014 年からのより高いエネルギーでの運転準備のために長期間装置が停止されるが、それ以前、今後 2 年間の運転は新しい物理現象発見の好機である。CERN 加速器・技術部長 Steve Myers は次のように述べた。「LHC の改良が 2011 年も 2010 年同様に順調に進めば、物理研究にとって非常に興味深い 1 年となろう。今年 1 年は従来に比べ少なくとも 3 桁多い量のデータ取得ができるのではないかと思っている。」現在の LHC のエネルギー・レベルでの新たな物理現象の発見がなかったとしても、2012 年末までの運転を通じ、少なくともより高エネルギーでの実験が開始される前の現行エネルギー・レベルをフルに活用したデータ蓄積を図ることができる。
出典:
"CERN announces LHC to run in 2012"
CERN press release (January 31, 2011)
http://public.web.cern.ch/press/pressreleases/Releases2011/PR01.11E.html

基礎

University of Illinois at Urbana-Champaign（2011 年 1 月 13 日）

University of Illinois at Urbana-Champaign の研究グループは、従来型ではない超電導体（ストロンチウム・ルテニウム・オキサイド）において、新しいタイプのフラクショナル渦流を発見した。これは 30 年前に理論的に予測されていた半量子渦流として知られる全く新しい状態を初めて実験的に捉えたものである。この状態は、超電導オーダー・パラメーターのスピン・フェーズから生じた「テクスチャー」と考えることができる。このような状態は新しいタイプの量子計算への応用も考えることができる。今回の半量子渦流の観察は、最先端のナノ加工技術と超高感度カンチレバーを使った磁気測定技術を使って実現した。この技術を使うことにより、ストロンチウム・ルテニウム・オキサイドの微小リングの磁気的なゆらぎの観察が可能となった。特に、この微小リングの加工が今回の実験実現に不可欠なものであった。著名な物理学教授 Anthony J. Leggett は次のように述べた。「ストロンチウム・ルテニウム・オキサイドは特異かつ魅力的な材料である。この物質中に存在すると考えられる半量子渦流は特に興味深い。ストロンチウム・ルテニウム・オキサイド中の半量子渦流はトポロジカル量子計算の基礎となる可能性がある。この新しい量子計算が今後実現されれば、今回の実験はそこに到達するための非常に大きな成果と見なされることになろう。」研究グ

© ISTEC 2011 All rights reserved.

ループの今回結果は、Science 1 月 14 日号に掲載された。
出典:
“U of I physicists observe exotic state in an unconventional superconductor”
University of Illinois at Urbana-Champaign (January 13, 2011)
http://engineering.illinois.edu/news/2011/01/10/researchers-observe-half-height-magnetization-steps-sr2ruo4

University of Oxford（2011 年 1 月 14 日）

University of Oxford の研究グループは、ドイツ及び日本の研究者と共同で強力な赤外レーザー照射を行うことにより非超電導体を超電導体へと変換させることに成功した。使われた非超電導体は銅酸化物高温超電導体と密接な関係のある物質であるが、電子及び原子の配列が電子の流れを阻害している。レーザー照射によりいくつかの原子位置がずれ、物質が瞬時に超電導体になり、その状態が数分の 1 秒継続した後非超電導体へと復帰する。Oxford University 物理学科兼 Max Planck 研究所構造ダイナミックス部門（ハンブルグ）Andrea Cavalleri 教授は次のように述べた。「この物質においては、超電導状態と非超電導状態は大きく異なっていない。このため、数ピコ秒で電子がコヒーレント状態になり、超電導状態に転移する。このことは、非超電導状態においても電子はすでに基本的にはコヒーレント状態にあり、何らかの要因で超電導状態が妨げられている可能性が大きい。正確に調整されたレーザー光はこの障害を取り除き、超電導状態を生み出す。」今回の発見は、高温超電導体中でいかに超電導状態が生じているかを調べる新しい道筋を示したものである。研究結果は Science に掲載された。
出典:
“Light touch transforms material into a superconductor”
University of Oxford press release (January 14, 2011)
http://www.ox.ac.uk/media/news_stories/2011/111401.html

Rutgers University（2011 年 1 月 20 日）

Rutgers University と東京大学の研究グループは、特殊な性質を持つ新しいイッテルビウム・ベースの超電導体（YbAlB4 又は YBAL）が通常であれば競合するような磁気的及び電子的特性が共存するような状態を取りうることを報告した。量子臨界状態として知られるこのような状態が、圧力、磁場、不純物といった状態の大幅な変更なくこの物質では実現できる。この新しい物質は自然な状態で量子臨界状態を示す初めてのものである。Rutgers University 物理天文学科教授 Piers Coleman は次のように述べた。「今回の結果は全く予期せざるものであった。これは、物理学者が奇妙な金属相と呼んでいる状態で、特性に変更を加えず、自発的に発生した初めての例であろう。」YBAL のベータ構造は「クリティカル・ストレンジ・メタル」相として知られる新しい相を示しているようであり、興味深い。この相では、物質は通常の電子状態と超電導状態との間の遷移が可能であるが、どちらの状態とも異なる状態（奇妙な金属相）にある。奇妙な金属状態は超電導材料の中でも見出されているが、それが量子臨界点近傍でのみ起こるのか、より広い条件下でも起こるのか（もしそうであれば 1 つの物質相といってもよい。）が明らかになっていない。奇妙な金属相という概念は議論のあるところではあるが、今回の実験はこれに対する証拠を提供していると言えるのかも知れず、ひいては、我々の物質に対する基本理解を変える可能性を秘めているのかも知れない。
出典:
“University of Tokyo, Rutgers physicists unveil unexpected properties in superconducting material”
Rutgers University press release (January 20, 2011)
http://news.rutgers.edu/medrel/research/rutgers-researchers-20110120

© ISTEC 2011 All rights reserved.

財団法人 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283 Fax: 03-3536-7318

University of Texas at Dallas（2011 年 1 月 24 日）

University of Texas at Dallas の研究グループは、通常は糸にできない粉末を多量に含む、編んだり、縫ったり、結んだりできる糸を製造する新しい技術を開発した。この技術を使えば、少量の網状カーボン・ナノチューブが通常は糸にできない粉末を保持し、その特性を変えることなく非常に伝導性のよい糸を作ることができる。電子繊維から超電導ケーブルまで幅広いハイテク応用の可能性がある。バイスクローリング（bi-scrolling）として知られるこの技術では、網目状のカーボン・ナノチューブ上に原料粉末をひきつめ、これを撚って糸にする。網状のカーボン・ナノチューブは極めて高強度で軽量である。使用する原料粉末の種類に応じ、マグネットや送電への応用が可能な超電導糸等幅広い応用が見込まれる。研究結果は、Science 1 月 7 日号に掲載された。

出典:

“UT Dallas Researchers Spin Nanotech Breakthrough”

University of Texas at Dallas press release (January 24, 2011)

http://www.utdallas.edu/news/2011/1/24-8251_UT-Dallas-Researchers-Spin-Nanotech-Breakthrough_article.html

Oak Ridge National Laboratory（2011 年 2 月 7 日）

Oak Ridge National Laboratory (ORNL) の研究グループは、鉄基高温超電導体の超電導現象の鍵となる磁気相互作用は最近接原子間ではなく、第 2 近接原子間で生じている可能性かあると報告した。研究グループのこの結論は、磁気オーダーを持つ鉄カルコゲナイドのスピン波を調べ、磁気的オーダーを持つニクタイドや他の鉄基超電導体とのデータ比較を行うために実施した中性子回折データに基づいている。ORNL の中性子科学部門と University of Tennessee の兼任研究者である Pengcheng Dai は次のように述べた。「超電導を生み出しているのは第 2 近接原子であるとするいくつかの理論がある。今回調べた鉄基超電導体における上記理論と同様の第 2 近接結合の重要性に関する発見は、ある種の超電導は共通の磁気的な起源を有することを示唆している。」今回の研究は、世界最強の中性子源である ORNL の Spallation Neutron Source (SNS) 高強度中性子線により可能になった。

出典:

“Neutron analysis reveals ‘2 doors down’ superconductivity link”

Oak Ridge National Laboratory press release (February 7, 2011)

http://www.ornl.gov/info/press_releases/get_press_release.cfm?ReleaseNumber=mr20110207-00

Brookhaven National Laboratory（2011 年 2 月 13 日）

Johns Hopkins University 及び Brookhaven National Laboratory の研究グループは、テラヘルツ分光を使って、広範な温度域で超電導体中のゆらぎを測定した。この技術を使えばピコ秒オーダーのゆらぎを可視化することができる。今回の測定の結果、銅酸化物においては、通常の超電導体の場合と異なり、臨界温度より 10 -15 K 高い温度でこのゆらぎが消滅することが明らかになった。 この結果は、非超電導状態がクーパー対のコヒーレンスが失われたことにより生じることを示唆している。Brookhaven National Laboratory の物理研究者 Ivan Bozovic は本件について次のように述べた。「従来の超電導体と異なり、銅酸化物における転移は電子対の分解（又は結合）によって起こるのではなく、電子対の位相のゆらぎに起因している。この過程をつぶさに理解すれば、高温超電導の謎の解明に向けさらなる前進を図ることができるだろう。」この研究グループの結果は Nature Physic 2011 年 2 月 13 日号に掲載された。

出典:

“Fleeting fluctuations in superconductivity disappear close to transition temperature”

© ISTEC 2011 All rights reserved.

財団法人 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283 Fax: 03-3536-7318

Brookhaven National Laboratory press release (February 13, 2011)
http://www.bnl.gov/bnlweb/pubaf/pr/PR_display.asp?prID=1231

University of Illinois at Urbana-Champaign（2011 年 2 月 14 日）

University of Illinois at Urbana-Champaign の研究グループは、超電導体とグラフェンを結合した時の特異な物理現象を発見したと報告した。研究グループは、小さな量子ドット（ナノスケールのグラフェン）と超電導プローブを結合させ、Andreev 束縛状態として知られる常伝導金属中の電子・ホール対を個別に分離する手法を開発した。この手法を使うことにより、Andreev 束縛状態の電子・ホール対を量子ドット中のディスクリートなエネルギー・レベルに置くことができるため、個々のエネルギー状態にある電子・ホール対の測定や操作が可能になる。Andreev 束縛状態の電子・ホール対をより深く理解することは、超電導トランジスターや量子計算機といった応用展開に資することが期待される。この結果は Nature Physics に掲載された。

出典:
“Physicists isolate bound states in graphene-superconductor junctions”
University of Illinois at Urbana-Champaign (February 14, 2011)
http://news.illinois.edu/news/11/0214conductivity_NadyaMason.html

超電導 Web21 トップページ

© ISTEC 2011 All rights reserved.

超電導 Web21
Superconductivity
超電導 Web21
2011 年 4 月 1 日発行

財団法人 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283 Fax: 03-3536-7318

【隔月連載記事】

やさしい超電導リニアモーターカーのお話（その 2）
～JR-Maglev の原理～

公益財団法人 鉄道総合技術研究所
浮上式鉄道技術研究部
低温システム研究室長　長嶋 賢

1. システムの基本構成

前回は、既に実用化された、あるいは実用化間近のリニアモーターカーの分類について紹介した。今回はそれらのリニアモーターカーの中で唯一、超電導技術を用いた JR-Maglev の原理について紹介したい。リニアモーターカーの基本構成を図 1 に示す。車両に超電導コイルを内蔵した磁石を搭載し、地上側のガイドウェイ（軌道）に地上コイルが配置されている。地上コイルには推進コイルと、浮上・案内兼用コイルの 2 種類があるが、どちらも超電導線材ではなく、アルミニウム導体製のコイルである。推進コイルは車両から見て外側に設置されており、ケーブルを介して電力変換変電所と接続され、車両を推進させる役割を担っている。浮上・案内兼用コイルは 8 の字型をした短絡コイル（両端をつないで閉回路としたコイル）で車両から見て内側に設置されている。図では一つのパネルに二つの 8 の字型コイルが設置されているので「田」の字型に見える。このコイルが車両の磁気浮上と案内（鉄道では車両の左右方向の支持のことを「案内」と呼んでいる）の役割を担っている。

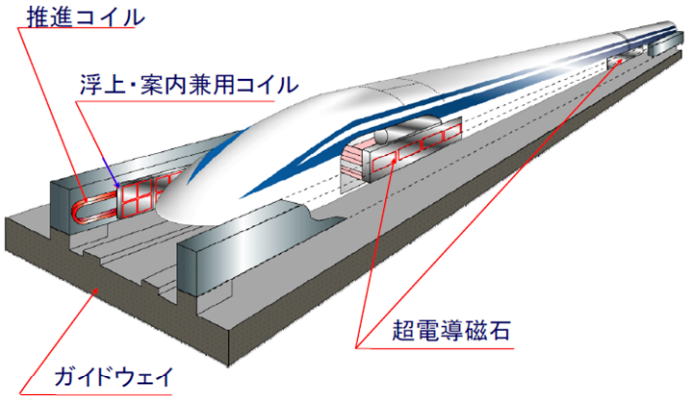


図 1 JR-Maglev の基本構成

2. 推進の原理

JR-Maglev は前回述べたように、推進方式として、リニア同期モータを採用している。ガイドウェイ上に並んだ推進コイルに、電力変換変電所から電流（三相交流）を流すと、ガイドウェイに沿って移動する磁界の波が発生する。車上の超電導磁石は、サーフボードが波に乗って進むように、この移動磁界の波に乗って（同期して）進むわけである。この様子を図 2 では動画で示している。逆に電力変換変電所側の視点で言うと、インバータで推進コイルに流す電流の周波数を、車両の速度に応じて比例変化させることにより、移動磁界の波を移動する車上の超電導磁石と常に向かい合うように調整している。また、車両の駆動力は電流の大きさと比例関係にあるので、これによって

© ISTEC 2011 All rights reserved.

財団法人 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283 Fax: 03-3536-7318

調整できる。電流の流し方を変えることにより、車両にブレーキもかけられる仕組みである。

このように JR-Maglev では、電力会社からの一定の電圧と周波数の電力を、地上の電力変換変電所でその大きさと周波数を変えた電力に変換し、推進コイルに供給することで、直接、車両を駆動している。通常の鉄道とは異なり、速度制御と電力供給とがすべて地上で行われるので、自動運転システムとなっている。

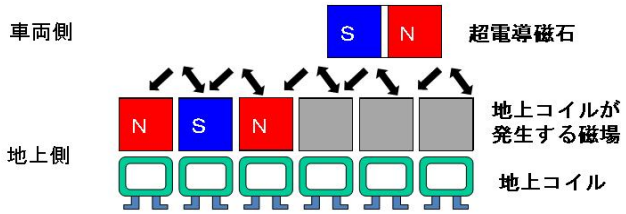


図2 推進の原理【動画】

3. 浮上の原理

ファラデーが発見した「電磁誘導現象」は「1 つの閉じた回路（2 次回路）の近くで、電流の流れている他の回路（1 次回路）または磁石を動かすとき 2 次回路に電流（誘導電流）が流れる」現象であるが、JR-Maglev の浮上ではまさにこの現象を利用している。

図 3 に示すように、ガイドウェイの浮上コイルは、上下二つのコイルが 8 の字型に接続されるとともに、垂直な側壁に配置されている。この方式を「側壁浮上方式」、または「ヌルフラックス方式」と呼んでいる。車両の超電導磁石が浮上コイルに近づく場合、上下のコイルは 8 の字型に接続されているので、それぞれ逆向きの誘導電圧（電磁誘導によって誘起される電圧）が生じる仕組みとなっている。そこで、超電導磁石が浮上コイルの中心を通る場合、上下二つのコイルに発生する誘導電圧は打ち消しあい、結局、浮上コイルに誘導電流は流れず、当然浮上力も発生しない。あるいは、8 の字コイルに鎖交する磁束（フラックス）が上コイルと下コイルで打ち消し合い、ゼロ（ヌル）になる（ヌルフラックス）から結果として誘導電流がゼロになるという説明もできる。一方、超電導磁石が浮上コイルの中心より下方を通ると、上側のコイルよりも下側のコイルに発生する誘導電圧が大きくなる。その結果、浮上コイル全体に誘導電流が流れ、下側のコイルは超電導磁石と同極に、上側のコイルは異極になる。そのため、超電導磁石と浮上コイルの間に上側のコイルでは吸引力、下側のコイルでは反発力が発生し、結局、車両に浮上力が働くことになる。この浮上力は超電導磁石と浮上コイルの高さのずれ量に応じて大きくなり、車両の重量に釣り合ったずれ量の位置で車両は浮上走行する。逆に、超電導磁石が浮上コイルの中心より上方を通ると車両には下側に引き戻す力が働くことになり、ガイドウェイから飛び出してしまうことのない安定した浮上システムとなっている。動作の様子を図 3 では動画で示している。

© ISTEC 2011 All rights reserved.

財団法人 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283 Fax: 03-3536-7318

ところで、このような電磁誘導はその原理からも明らかなように、超電導磁石が浮上コイルの側を通過するときのみ発生し、止まっているときには発生しない。また、低速では誘導電流が小さいので浮上力も小さい。したがって、停止中および低速のときは、飛行機のように支持車輪での走行となり、ある程度の速度になってから車両に車輪を格納し、浮上走行を行う。

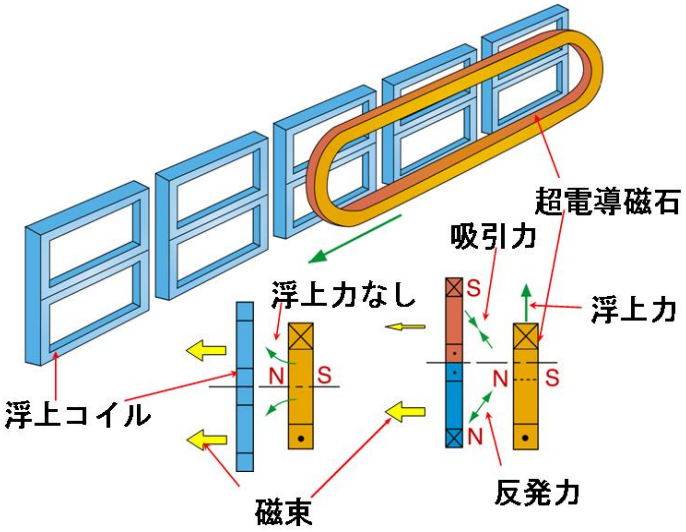


図3 浮上の原理【動画】

4. 案内の原理

磁石を上下に並べて同極同士向かい合わせ、反発浮上させようとすると、そのままでは必ず上側の磁石は、ずれて落ちてしまう。このように浮上力のみを与えただけでは車両は安定して浮上することができない。このため、左右方向にずれないように車両を「案内」する仕組みが必要となってくる。

浮上させるには、車両の重量を支持する力を、常に発揮する必要があるが、案内させるには、車両が横にずれそうなときだけ力を加えて中央に戻してやればよい。必要のない場合はできるだけ電流を流さず、電力の消費を減らす方が経済的である。

このような要求に適合した方法として、浮上の原理と同じく左右のコイルを「ヌルフラックス」接続する方式がある。この方式の基本原理は、浮上と同じく電磁誘導現象を用いたものである。具体的には左右の案内のために浮上コイルを、図 4 のように接続しておく（これにより浮上・案内兼用コイルとなる)。まず、車両がガイドウェイの中央を走っている場合には、右側の案内コイルと左側の案内コイルとは電磁誘導によって発生する電圧が等しいため電流は流れず、力の発生も損失の発生も起こらない。しかし、車両が左右どちらかに片寄った場合には、近づいた側と遠ざかった側で案内コイルに発生する誘導電圧に差が生じて電流が流れる。その結果、近づいた側の案内コイルと超電導磁石との間に反発力、遠ざかった側のコイルとの間には吸引力が発生して、超電導磁石を中央に押し戻す力となる。こうして、常に車両は中央を走るように案内される。この案内力も浮上力と同様、速度とともに大きくなり、高速では車両の姿勢はより安定する。また、案内力が不足する低速走行では、支持車輪と同様に案内車輪を左右に張り出して車両を案内させ、高速では車輪を格納して電磁力のみで車両を案内させているのも同様である。

© ISTEC 2011 All rights reserved.

財団法人 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283 Fax: 03-3536-7318

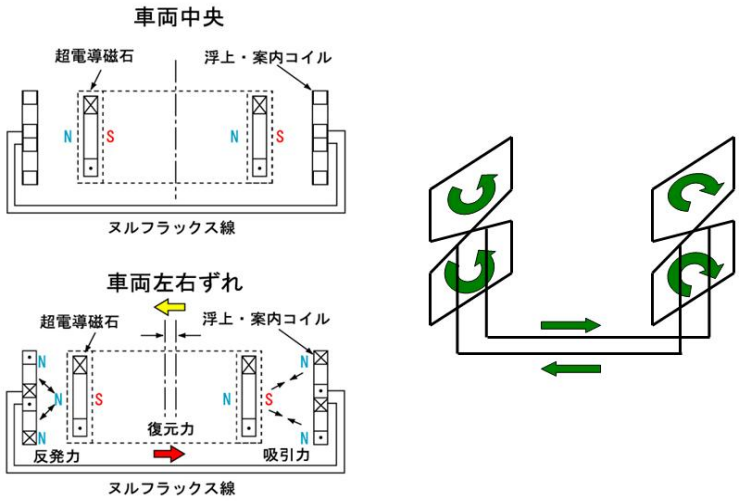


図4 案内の原理【動画】

以上説明してきたように、JR-Maglev は、推進については電力変換変電所から推進コイルに提供する電流をコントロールする必要があるが、浮上および案内については電磁誘導により「自然に」一定の浮上高さでガイドウェイの中央を走行するように電磁力が働くので、コントロールの必要が無い、非常に信頼性の高いシステムとなっている。

鉄道総研では、地上コイルのコスト削減のため、推進・浮上・案内のすべての機能を一種類のコイルで兼用し、地上コイルの数を減らすことが可能な「PLG 方式」（Propulsion：推進・Levitation：浮上・Guidance：案内　兼用方式）と称する地上コイルも開発している。

（http://www.rtri.or.jp/rd/openpublic/rd77/EGT/egt_1.4.html）

次回は JR-Maglev の開発のあゆみについて紹介する。

超電導 Web21 トップページ

© ISTEC 2011 All rights reserved.

超電導 Web21
Superconductivity
超電導 Web21
2011 年 4 月 1 日発行

財団法人 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283 Fax: 03-3536-7318

読者の広場

Q&A

Q：「最近、高温超伝導体で電子と格子振動が強く結合する仕組みが解明されたと聞きましたが、より高温での超伝導実現の可能性はあるのでしょうか？」

A: 一般に、超伝導は、電子と電子の間に何らかの引力がはたらいて電子対が形成され、その電子対が凝縮することで発現します。鉛やニオブなどの通常の超伝導体では、格子振動が電子と電子をつなぐ「のり」の役割をしていることが判明しています。銅酸化物系の超伝導体でも、格子振動は「のり」の有力候補と考えられていますが、もしそうだとすると、電子と格子振動が通常の数倍の強さで結合していないかぎり、超伝導転移温度の「高さ」を説明できません。

図 1　広島大学放射光科学センター (HiSOR)

そこで私たちは、角度分解光電子分光という手法で、銅酸化物系の高温超伝導体 $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ から直接電子を取り出して分析し、電子と結合する振動の周波数分布を調べました。光源として、広島大学放射光科学センターの高輝度シンクロトロン放射光を利用することで、従来より格段に高い精度で実験することができました（図 1）。その結果、キャリヤー濃度が低下して絶縁体相に近づくとともに、格子振動の低周波成分と電子の結合が、急激に増大し十分な強さに達することがわかりました。図 2 に示すように、通常の金属では、電荷が周りの電子の素早い動きによってほとんど遮蔽されてしまうため格子振動との結合は弱いですが、高温超伝導体では、絶縁体相の近くで電子による遮蔽が急減することが観測され、これが電子と低周波格子振動が強く結合する原因であると解明されました。

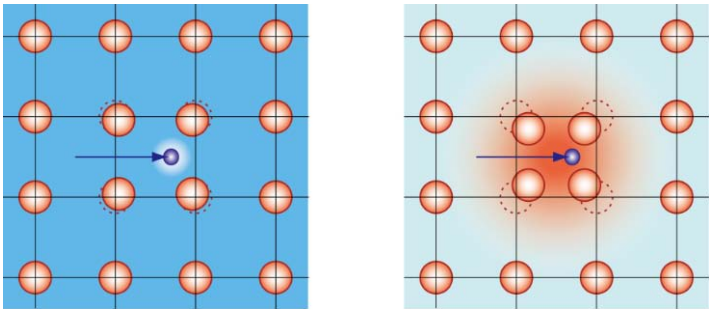


図 2　電子と格子振動の結合の模式図。 (左) 通常の金属の場合。(右) キャリヤー濃度が低い場合。

© ISTEC 2011 All rights reserved.

財団法人 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283 Fax: 03-3536-7318

さて、より高温での超伝導実現についてです。今回、電子と格子振動の結合強度は、キャリヤー濃度を下げるほど大きくなることがわかりました。しかし、実際の超伝導転移温度は、キャリヤー濃度が銅原子当たり 16 %くらいで最大となり、それ以下の濃度では逆に転移温度が下がってしまいます。電子格子結合は十分に強いのですから、他に超伝導発現を阻害している要因があるはずで、それを取り除くことができれば転移温度は上がるはずです。今のところ、電子対の密度の不足が原因で凝縮できないという説が有力です。そうなると、低いキャリヤー濃度で実現する強い電子格子結合を残しつつ、電子対の密度を増やそうというのは、非常に難しい課題です。しかし、個人的には、これらを両立できる可能性はあると思います。具体的には、例えば、強結合層と高濃度電子対層を組み合わせたヘテロ接合を、エピタキシャル多層膜などの形で作製することができれば、より高温での超伝導実現が期待できると考えています。

回答者：広島大学 大学院理学研究科　助教　井野明洋　様

超電導 Web21 トップページ

© ISTEC 2011 All rights reserved.