

NIMS

2009年 5月号

NOW

超伝導材料特集

超伝導はどこまで来たか
代表的な超伝導材料とその用途



超伝導材料特集

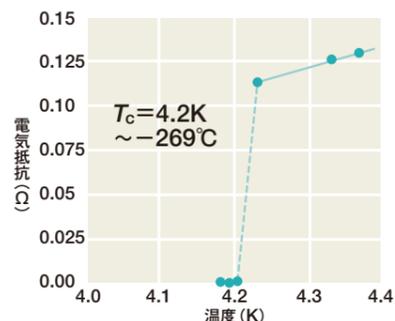
はじめに

超伝導はどこまで来たか

室町 英治 NIMSフェロー
超伝導材料センター 新物質探索グループ
グループリーダー

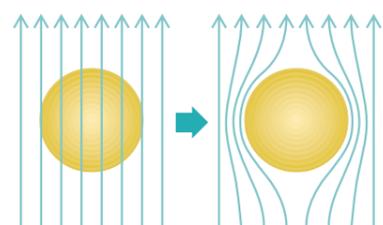
超伝導現象は1911年にオランダの物理学者オネスによってはじめて報告されました。オネスは水銀の電気抵抗を極低温まで測定し、4.2K以下でそれが急激に減少して完全に消失することを発見し、これを「超伝導」と呼びました(図1)。現在のところ、超伝導は極低温でしか認められていません。超伝導の属性には電気抵抗がゼロになることのほかに、完全反磁性という特異な現象があります。超伝導状態への転移が起こる温度を臨界温度(T_c)といいますが、 T_c より高い温度の常伝導状態の物質に磁場をかけ、そのまま冷却して超伝導に転移させると、超伝導体から磁場が出て行ってしまいう「マイスナー効果」が起こります(図2)。

【図1】水銀の電気抵抗が4.2Kで急減し消失する様子



カメルリン・オネス(H. Kamerlingh Onnes) 1911年

【図2】マイスナー効果



超伝導現象は1911年にオランダの物理学者オネスによってはじめて報告されました。オネスは水銀の電気抵抗を極低温まで測定し、4.2K以下でそれが急激に減少して完全に消失することを発見し、これを「超伝導」と呼びました(図1)。現在のところ、超伝導は極低温でしか認められていません。超伝導の属性には電気抵抗がゼロになることのほかに、完全反磁性という特異な現象があります。超伝導状態への転移が起こる温度を臨界温度(T_c)といいますが、 T_c より高い温度の常伝導状態の物質に磁場をかけ、そのまま冷却して超伝導に転移させると、超伝導体から磁場が出て行ってしまいう「マイスナー効果」が起こります(図2)。

超伝導のしくみと特性

超伝導の発見から約50年たった1961年、この現象の基本的なメカニズムが明らかにされました。提唱した3人の研究者の頭文字を並べてBCS理論と呼ばれています。そもそも電気抵抗が生じる原因は、物質中を移動する電子が、結晶が持つ様々な不完全性(不純物原子、構造不整、原子の熱振動(格子振動)など)によって散乱されることにあります。BCS理論は、ある条件下では伝導電子が2つずつで対を作ることによって散乱が起こらなくなり、その結果電気抵抗がゼロになることを示しました。BCS理論の基本的な部分は現在知られているあらゆる超伝導体に適用できますが、より細部にまで踏み込むと未解明のことが多く、特に後に述べる高温超伝導の詳しいしくみは今なおわかっていません。

超伝導体にかかる磁場を強くして

いくと、ある強度で超伝導状態は破綻します。これを臨界磁場(H_c)といいますが、もうひとつ、超伝導材料として重要な特性が臨界電流密度(J_c)です。超伝導体の電気抵抗はゼロなのに流せる電流には限界があります。超伝導材料は図3にある温度・磁場・電流密度の臨界面の内側でしか使うことができません。3つの臨界値の中で、 T_c は物質固有の特性です。 H_c も大幅な改善は期待できません。ところが、 J_c は線材化など材料化のプロセスに依存するところが極めて大きく、材料化プロセスの第1の目的は高い J_c の達成にあるといつてよいでしょう。

広がる超伝導の利用

エネルギー、運輸、医療、環境、科学技術などの広い分野で超伝導の利用が進んでいます。超伝導体は、銅の100~1万倍の密度でロスなしに電流を流すことができます。この性質を利用して大電流を扱うのがパワー応用です。典型的な例は、超伝導線を巻き線とした超伝導マグネットによって発生する強力な磁場を利用したシステムです。病院で使われている核磁気共鳴イメージング(MRI)、超伝導磁気浮上列車、タンパク質の構造解析など化学分析に使う核磁気共鳴(NMR)分析装置

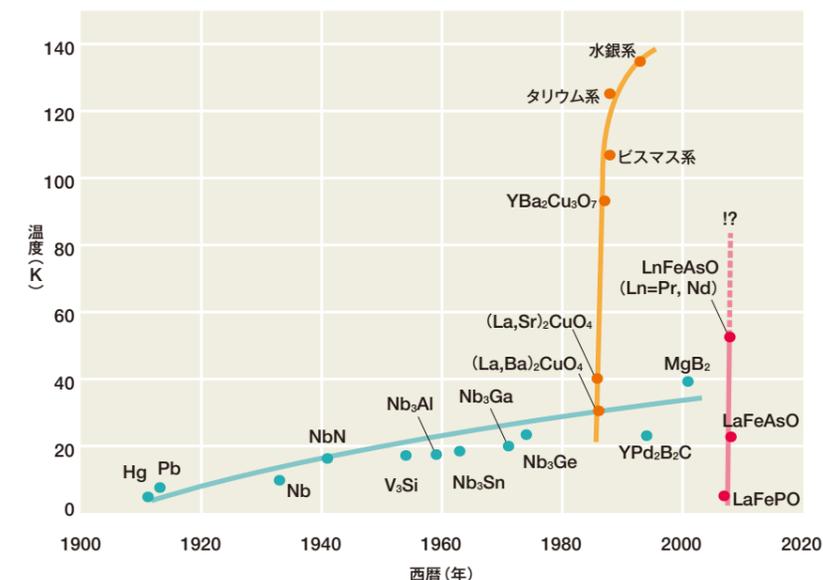
がこの例です。

一方、エレクトロニクスへの応用も重要な分野であり、フィルタ、アンテナ、共振器、磁束計(SQUID)、電圧標準器、演算回路、記憶回路などへの適用が進んでいます。特にSQUIDは極めて微弱な磁場を検出することができるので、物性研究の分野はもちろん、心臓や脳からの微弱磁場の観察などにも活用されています。

超伝導材料いろいろ

現在、最も広く使われているのはニオブ・チタン合金であるNb-Ti超伝導体です。この物質は T_c が9.8Kと低く、 H_{c2} も高くありませんが、10T以下の比較的低磁場での用途を中心に広範囲に利用されています。合金なので塑性があり加工しやすいのが利点です。10Tを超える強磁場では、たいていニオブとスズの金属間化合物 Nb_3Sn ($T_c=18.2K$)が使われます。 Nb_3Sn は固くもろい物質ですが、原材料の段階で線材に加工し、反応させます。これらの金属系超伝導体は T_c が低いため、高価な液体ヘリウムで冷却する必要があります。これが超伝導を広範に応用する場合の足かせになっています。

一方、金属系に比べると格段に高い T_c をもつ一群の超伝導体があります。これらはいずれも銅を含む酸化物で、高温超伝導体または銅酸化物超伝導体と呼ばれています。代表的な高温超伝導体とその T_c は、 $YBa_2Cu_3O_7$ ($T_c=90K$)、 $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_y$ (ビスマス系 $T_c=110K$)、 $HgBa_2Ca_2Cu_3O_y$ (水銀系 $T_c=135K$)です。最後の水銀系の T_c が現在のところ超伝導体の中で最高の値です。高温超伝導体は従来型超伝導体に比べると T_c や H_c が格段に高く、安価な液体窒素(77K)で冷却できるなどの優れた利点を持っています。し



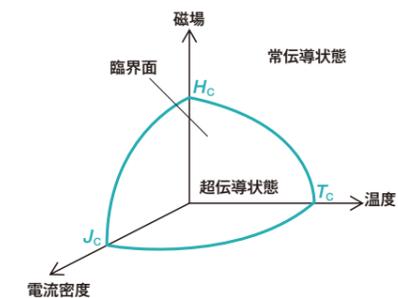
【図4】研究者の夢は室温超伝導体ですが、年々、高い臨界温度をもつ超伝導物質が見つかるようになっていきます。

かし、銅酸化物はセラミックスなので、加工しにくい物質です。この欠点を克服するために、線材にするなど材料化の取り組みが続けられています。さらに、最近鉄系の超伝導体が発見されました。

夢は室温超伝導

超伝導研究者なら誰でも夢見るのは、冷却せずに室温で使える室温超伝導体ができないかということです。室温超伝導体が見つければ、社会を根本的に変えるようなイノベーションが期待できるからです。そんな超伝導体が本当に存在するかどうかは誰にもわかりません。しかし、未知

【図3】超伝導体の臨界面



の超伝導体が多数存在することは疑いのない事実です。図4に超伝導体の T_c が年とともにどのように更新されてきたかを示しました。青色の従来型の金属系超伝導体の T_c はゆっくりと亀の歩みのように、しかし、着実に上昇しています。その最後に位置する MgB_2 は2001年に報告された新しい超伝導体で、 T_c が39Kと金属系としては驚くほど高い値を示すところから、基礎・応用の両面で注目を集めています。黄色で示した高温超伝導体はわずか数年間で T_c が100Kほども上昇しましたが、その後は停滞が続いています。最も新しく発見された超伝導体系列は赤色で示した鉄と砒素等の化合物です。この系列の T_c は現在55Kまで上昇しており、今後のどのくらい上がるか注目されています。

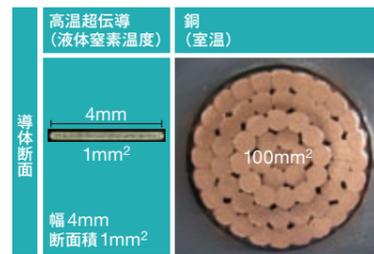
T_c の最高値がいったいどのくらいなのか今のところ分かっていません。このことは逆に言えば、室温超伝導の可能性がまだまだ残されていることを意味します。室温超伝導体を見つけようと現在も世界中でさかんに研究が行われているのです。

代表的な超伝導材料とその用途

ビスマス系超伝導線材 —エネルギー・環境技術の夢に向けて

北口 仁
超伝導材料センター 高温線材グループ
グループリーダー

液体窒素による冷却で超伝導を簡単に実現できる酸化物高温超伝導物質が発見されて20年以上が経過しました。発見された当時の「超伝導フィーバー」をご記憶の読者もおられることと思います。フィーバーは程なく沈静化しましたが、私たちは



送電電流100Aあたりに必要な導体断面積。高温超伝導材料を使用することで、銅を使用する場合に比べて極めて細い電線で同じ容量の電流を運ぶことができ、工事の環境負荷を抑えながら配電容量の増大に対応できます。ここでは、ビスマス酸化物高温超伝導テープ線材は臨界電流（液体窒素温度で200A程度）の50%で運転すると想定しています。

実用化に挑む企業から

ビスマス系で2000メートル級の線材をつくりあげた

住友電気 佐藤 謙一氏

住友電気工業(株) 材料技術研究開発本部 超電導担当技師長



私達が取り組んでいるのは、NIMSの前田弘氏が発見したビスマス系の材料です。すでに線材として長さ2000メートル以上の継ぎ目のない超電導線をつくることに成功しています。ビスマス系は110Kで超伝導になり、液体窒素（77K）で冷却すれば余裕をもって能力を発揮させることができます。またイットリウム系に比べて加工しやすく、長い線材をつくるにも基本的に銅線と同じ方法で加工できます。すでに実用化の段階に入っており、そう遠くないうちに送電線として使えるようになるでしょう。送電線以外にも幅広い応用が考えられます。昨年、小型の超電導モーターを搭載した世界初の超電導電気自動車を試作して公開しましたが、新しい超電導船も期待できますし、さまざまな実験的な分野への進出が考えられます。地球環境やエネルギー問題解決の本命と言ってよいかも知れません。

今も着実に材料開発を進めています。高温超伝導技術は、地球環境問題への取り組みの一環である省エネルギー技術の切り札になる可能性をもち、高温超伝導材料が実際に使われる日が来ることを期して、研究に取り組んでいます。

送電ケーブルに高温超伝導材料

送電ケーブルに高温超伝導材料を使う場合を考えてみたいと思います。銅やアルミニウムの送電線にはまったく必要のないことですが、超伝導材料を使う場合には冷却が必要です。液体ヘリウムで冷却しなければならないNb-Tiなどの金属系超伝導材料しか知られていなかった頃は、冷却コストのかかる超伝導送配電はとても現実的なものとは考えられていま

せんでした。ところが安価で入手しやすい液体窒素で冷却すればよい高温超伝導材料の開発が進んだ結果、冷却コストを見込んで超伝導送配電が経済的に十分成り立つようになってきています。世界各国で「高温超伝導電力ケーブル」の開発が進められており、電力の実系統（一般家庭や企業に実際に電力を供給している系統）に組み込んだ試験が実施されています。高温超伝導線と銅線に通電する場合の比較を図に示しました。大電力用の銅ケーブルの場合、許容電流は一般に1mm²あたり1A程度です。一方、高温超伝導線材は、液体窒素温度、外部磁場なしの条件で、臨界電流（超伝導体に流せる最大電流）は1mm²あたり200Aにも達します。安全率を見込んで最高性能の半分で運転しても、高温超伝導線材を使用すると銅を使用する場合より2桁も高い電流密度で送電できる可能性があるのです。

電力需要を満たしてコンパクトに

このように、高温超伝導電力ケーブルは、送電損失を低く抑えられるほか、ケーブルのサイズがよりコンパクトになるので省スペースという利点も期待できます。既設の銅ケーブルを同じ断面積の高温超伝導電力ケーブルに交換するだけで、送配電能力を増強できるのです。高温超伝導電力ケーブルを用いれば、ケーブル用地下トンネルやケーブルを保護するパイプの新設などの環境負荷を極力抑えながら、都市中心部で増大する電力需要に対応できるのではないかと期待されています。私たちは、ビスマス系高温超伝導酸化物線材の

臨界電流を現状の1mm²あたり200Aから今後数年で300A、将来的には400Aにすることを目標としています。

超伝導線材の最も重要な性能である臨界電流特性に深く関わるのは、ミクロからマクロにわたる材料組織制御を中心に、原材料粉末の合成、

伸線加工と熱処理、電磁気特性を考慮した線材構成設計など、幅広い材料技術とその基礎になる材料科学です。NIMSにおける材料研究を基盤として超伝導材料技術を大きく発展させ、超伝導を活用した機器がエネルギーや環境の分野で広く社会に浸透する日が来ることを信じています。

のステンレス製コンジットに納められています。ITERでは導体に単位長さあたり最大で約 8×10^5 ニュートン/m（80トン/m）の電磁力が加わります。コンジット内部では、導体素線が隣接する素線との接触点から大きな横圧縮荷重を受けるとともに、曲げひずみも加わります。横荷重やひずみが加わると、Nb₃Sn線材が超伝導を保ったまま流すことができる限界の電流密度（臨界電流密度=J_c）が低下してしまいます。運転磁場と運転電流が大きくなるとともに横荷重とひずみは増大します。

核融合発電の実用化をめざしてITERの次の段階で実施される予定の発電原型炉では、運転磁場が16～20TとITERに比べて強く、また運転電流も80kA以上と大きくなるはず（表1）。したがって超伝導線材に加わる電磁力も大きくなり、こうした巨大な電磁力下ではJ_cの低下が著しく、Nb₃Sn線材ではもはや対応不可能になることが考えられます。

原型炉で使える材料を開発

そこで、NIMSでは急熱急冷変態法ニオブ・アルミ化合物（Nb₃Al）線材の開発を進めてきました。この線材は、Nb₃Sn線材に比べてひずみが増加したときのJ_cの低下が格段に少ないだけでなく（図1）、ひずみフリーの状態でも強磁場まで高いJ_c特性を維持できるという特長を備えています。このため、原型炉における導体の有力な候補線材となっているのです。急冷後にイオンプレーテ

核融合発電に対応するニオブ・アルミ線材

竹内 孝夫

超伝導材料センター 強磁場線材グループ
グループリーダー

低炭素社会においてエネルギー問題の究極の解決策と期待されているのが核融合発電です。この発電システムでは、超伝導マグネットによるプラズマの磁場閉じ込めが不可欠です。銅を導体にした常伝導マグネットによって広い空間に強い磁場を発生させようとすると、それに要する電力が発電電力を上回るという事態が生じるため、これを避けるには超伝導マグネットが是非とも必要にな

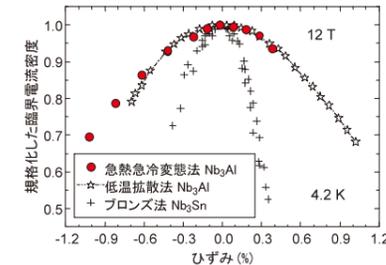
ってくるのです。

ITERの超伝導マグネット

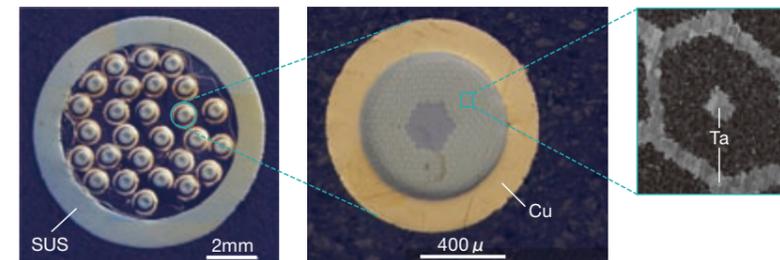
核融合炉用超伝導マグネットには、通常の超伝導マグネットに比べて格段に大きい電磁力と蓄積エネルギーが必要です。安全性を考えて、導体電流を大容量化し、巻き数を減らしてコイルのインダクタンスを小さく抑え、これに対応しています。

2016年に運転開始をめざしている国際熱核融合実験炉（ITER、最大磁場13テスラ（T））では、このためにケーブル・イン・コンジット（CIC：cable in conduit）導体と呼ばれる数十kAを上回る大電流容量導体が開発され、多数の超伝導ニオブ・スズ化合物（Nb₃Sn）素線を何回も撚り合わせた導体が、冷媒の封止と電磁力支持を兼ねた高強度

【図1】核融合炉用に開発された超伝導線材の耐ひずみ性の比較



【図2】試作されたNb₃Al製CIC導体の断面



【表1】核融合発電の実用化をめざして

国際熱核融合実験炉	原型炉	実用炉
(ITER)	発電実証	
7カ国（日、EU、露、米、中、韓、印）共同	日、欧、米で検討中	市場へ導入
2016～2035年	2030年代	2050年以降

リングと電解メッキ法で銅安定化材を複合したNb₃Al線について、3次撚り線(3×3×3)をステンレス管に挿入して試作した核融合炉用CIC模擬導体を図2に示しました。これまでのNb₃Al線材は、永久電流モード運転が必要な核磁気共鳴マグネットのために開発が進められて

きたので、超伝導接続が容易なニオブがマトリクス材でした。核融合炉に応用するには、磁界中での安定性が高い必要があり、さらに変動磁場中でもフィラメント間の電気的結合を抑制しなければならないので、マトリクス材をタンタル(Ta)に変えています。

この方法で作製した線材は、MgB₂コアの充填密度があまり高くないためにMgB₂結晶粒のつながり(電流を流すための有効断面積、connectivity)が十分ではなく、実用レベルの臨界電流密度(J_c)はまだ得られていないのが現状です。

拡散法ですぐれた線材をつくる

結晶粒のつながり具合はMgB₂の充填率に大きく依存しており、最近NIMS超伝導材料センターでは、線材におけるMgB₂の充填率を向上させる方法として、次のような工夫をしました(図)。この方法は、Mgをボロン(B)層の外から供給するので拡散法と呼ばれ、この方法によりPIT法で作製したものよりも高い J_c を得ることに成功しています。まず金属管の中心に純Mg棒を配置し、Mg棒と金属管との隙間にアモルファスボロン粉末をなるべく密に充填します。そして、溝ロールやダイス線引きで1mm径程度の線材に加工します。この線材を束ねて金属管に挿入し、さらに加工すれば複数のコアを持った線材を作製することができます。Mgは六方晶で加工性が悪いことで知られる物質ですが、このように扱えば焼鈍せずに断線なく線材に加工することができます。最後に熱処理をすればMgがボロン層に拡散してMgB₂が形成されます。

拡散法によって作製した7芯線材の断面写真を見て下さい。このようにして得られたMgB₂層はPIT法で得られるMgB₂コアよりも充填率が高く、4.2K、10Tの磁界において10⁵A/cm²以上の J_c 値が得られ、実用レベルに達していると評価されます。今後はこの拡散法を発展させてさらに特性の向上をはかるとともに、長い線材をつくるために研究を重ね、実用化に結び付けたいと考えています。

実用化に向けたMgB₂線材の開発

熊倉 浩明
超伝導材料センター 先進線材グループ
グループリーダー

二ホウ化マグネシウム(MgB₂)は、1950年代からすでによく知られた化合物で、粉末試薬も市販されていました。ところが、2001年、この物質が約40Kという金属系化合物としては非常に高い超伝導転移温度(T_c)をもつことが日本で発見されたのです。以来、基礎・応用にわたって多くの研究が進んでいます。

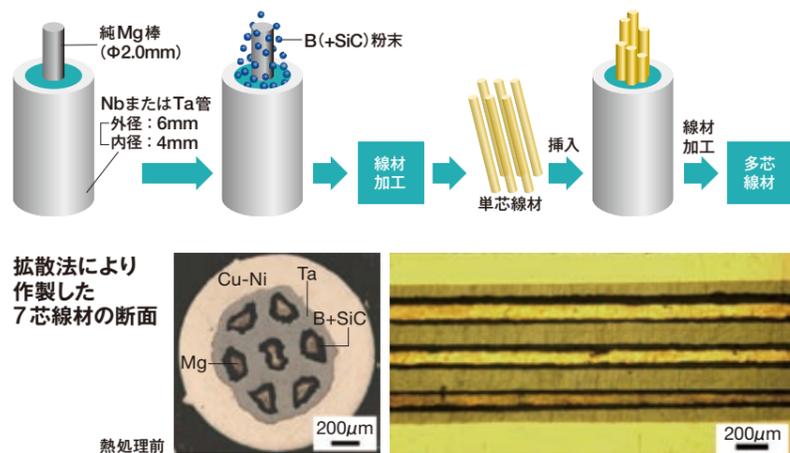
利点の多いMgB₂

マグネットや送電ケーブルなどへの応用では線材化が必要になりますが、MgB₂はその点でさまざまな利点をもっています。 T_c が高いことはもとより大きなメリットですが、

このほかにも、1つの結晶粒から隣の結晶粒へ大きな超伝導電流を流す際に、高温酸化物超伝導体のように結晶粒の向きを揃えること(配向化)が不必要と考えられること、原料が資源として豊富で比較的安価であること、機械的に丈夫なこと、軽量であることなどがあげられます。このため、この物質において超伝導現象が発見されて以来、線材化の研究が世界で活発に行われています。

それではMgB₂をどのように線材にするのでしょうか。原料の粉末を金属管に詰め込んで加工をする、いわゆるPowder-In-Tube(PIT)法が最も一般的な方法です。しかし、

【図】 拡散法による線材作製法



フェイス interview

1986年末に巻き起こった高温超伝導フィーバー、その後の厳しい時代、最近の鉄系超伝導物質の発見に至る激動の時代を、超伝導線材開発の第一線で見つめてきた熊倉センター長。超伝導という量子現象を、材料として生かしていく面白さと大変さを、大きな視野の中で描き出します。

高温超伝導材料のこれまでとこれから

超伝導材料との縁はいつからですか。

1978年に当時の金属材料研究所に入ってからです。「超伝導をやらないか」と上司に言われ、「超」の字面に惹かれて始めました。

当時の実用線材は、臨界温度(T_c)が10KのNb-Tiと18KのNb₃Snだけでした。Nb₃Alもありましたが、線材化が難しい。しかし、強磁場でも高い電流密度(J_c)を保てるので、強磁場磁石には適していました。そこで、この材料に挑戦したのです。

最初は順調でしたが、壁にぶつかっていたところへ、 T_c が30Kを超えるランタン系銅酸化物の高温超伝導体が報告されたのです。チューリッヒIBM研究所のペドノルツとミュラーが発見し、東京大学の田中昭二研究室が間違いなく超伝導が起きていることを確認しました。86年末です。以後、数年にわたり超伝導フィーバーが起こり、私はもちろん、金材研も巻き込まれることになりました。

その一報を聞いてどう思いましたか。

「マズイ！われわれの金属系超伝導体は時代遅れになる」と思いました。銅酸化物系はセラミックスで、金属屋は簡単に手が出せないと思ったのですが、化学者の同僚の助言で簡単に作れて、それからのめり込みました。

87年2月には、 T_c が液体窒素の沸点77Kを超えるイトリウム系高温超伝導体が報告されました。早速作ってみると、 T_c は90K超でした。組成もわかりました。それでプレス発表したら、前日、金材研の別のグループもほぼ同じ内容でプレス発表していたのです。熱い雰囲気でした。でも、私たちは線材研究者なので、これらを線材にする研究にシフトしたのです。

88年1月には、金材研の前田弘さんたちが T_c 110Kのビスマス系銅酸化物超伝導体を発表しました。少し前から、何だか前田さんの様子に変だ、と皆が思っていました。プレス発表前日に所員を集めて報告があり、それ以来、仲間が見つけた T_c の高いビスマス系の線材化に取り組んだのです。

ビスマス系の開発はどう進められていますか。

T_c は高いのですが、強磁場環境では温度が上がると急激に J_c が落ちます。結晶構造に起因した本質的な問題なので、液体窒素温度で作動する強磁界の超伝導磁石には難



超伝導材料センター長
熊倉 浩明 (Hiroaki Kumakura)

しい。私たちは、液体ヘリウム温度で使うのなら、従来のNb₃Snよりもビスマス系が適していると考えました。臨界磁場(B_{c2})が高いからです。

結晶方向を揃えるなどして線材開発を進め、95年に金属系の超伝導磁石の内側にビスマス系の超伝導磁石を入れたもので、世界記録の23.4Tを出しました。実用化のニーズはNMR(Nuclear Magnetic Resonance-核磁気共鳴)分析装置です。磁界が強いほど分解能が高くなるからです。昨年、ビスマス系小型磁石を組み込んだマグネットNMRシグナルの観測に成功しました。銅酸化物系では世界初です。目標は23.5Tで周波数が1GHzを超えることです。

ビスマス系のもう1つの方向は、液体窒素冷却で使う送電ケーブルで世界的に開発が進んでいます。送電ケーブルでは、磁場はほとんどないし、 T_c と液体窒素の沸点に余裕があるのが強みです。

他の高温超伝導体との競合はどうなっていますか。

イトリウム系も頑張っており、特性の良い線材ができつつあります。互いに切磋琢磨するのがよいと思います。銅酸化物超伝導体のフィーバーから10年以上たつと世間や政府の熱も冷めて厳しい時代が続きましたが、2001年には青山学院大学の秋光純教授が T_c 39KのMgB₂を発見しました。私たちも線材化を進めていますが、なかなか丈夫な金属系の材料です。

T_c 、 B_{c2} 、 J_c が高い、加工しやすい、機械的に強い、安い、というのが線材用超伝導材料の条件です。これを完全に満たすものはまだありませんが、鉄系も出たし、また何か出てくるかもしれません。

最後に若い研究者に一言。

自分自身の考えに基づいた「研究スタイル」をもつことです。独自のスタイルで、信念をもって進むしか道はないのだと思います。

新鉄系超伝導体 $\text{FeTe}_{1-x}\text{S}_x$ の発見

超伝導材料センター ナノフロンティア材料グループ

2008年2月、東工大の細野グループは、鉄ヒ素化合物 LaFeAsO が絶対温度26 Kで超伝導転移を示すことを発見しました。磁性があるため超伝導に不利と考えられていた鉄を含むにもかかわらず、非常に高い超伝導転移温度(T_c)を示すことから、世界中の注目を集め、鉄系超伝導ブームが巻き起こりました。この直後、LaをSmで置換した SmFeAsO がさらに高い $T_c = 55$ Kを示し、銅酸化物に続く新高温超伝導体として期待されています。

これまでに発見された主な鉄系超伝導体の結晶構造を図1にまとめます。(a)(b)(c)は共通してFeAs層(超伝導層)を持ち、そこに超伝導が発現します。図1(a)の T_c は55 K、(b)は $T_c = 38$ K、(c)は $T_c = 18$ Kと大きく異なり、 T_c はFeAs層間の結晶構造に強く依存しています。

図1(d) FeSe は、FeAs層と類似した構造を持つ $T_c = 13$ Kの超伝導体です。我々は、鉄系超伝導の中で最も

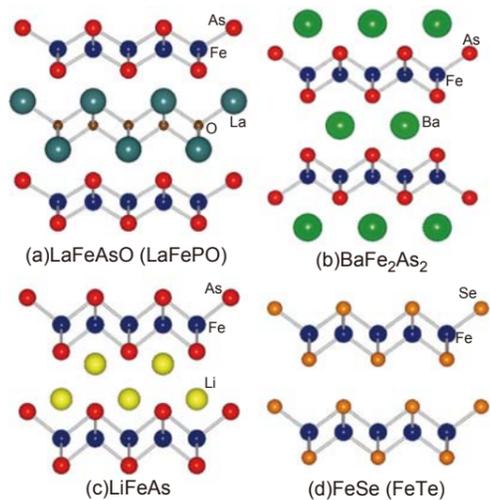
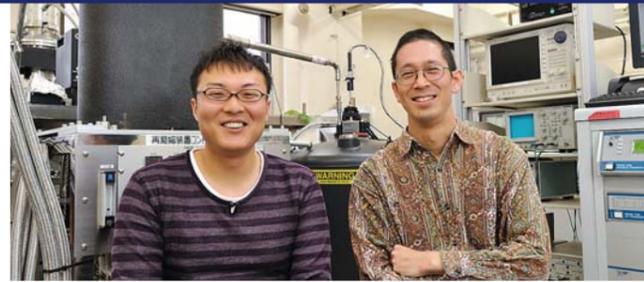


図1 様々な鉄系超伝体の結晶構造。それぞれの T_c は(a)55 K、(b)38 K、(c)18 K、(d) FeSe の T_c は13 Kであるが、圧力下で37 Kに上昇する。



水口 佳一 グループリーダー 高野 義彦

シンプルな結晶構造を持ち、ヒ素を含まない FeSe に注目しました。 FeSe は圧力を加えて格子を縮めると約4万気圧で T_c が37 Kまで上昇することを発見し、2元素物質で最高クラスの T_c を実現しました。さらに FeSe と類似した結晶構造にもかかわらず、超伝導転移を示さない FeTe にも着目しました。Teサイトにイオン半径の小さいSを20%置換し、格子を少し縮めたところ、 $\text{FeTe}_{0.8}\text{S}_{0.2}$ が超伝導を示すことを新たに発見しました(図2)。

鉄系超伝導の魅力の一つは超伝導層の多様性です。これまでに発見されたFeAs、FeP、FeSe層に加えてFeTe層が超伝導を示すことが分かりました。今後、超伝導層が新規な構造や新規な元素の組み合わせで発見されると、これまでより高い超伝導転移温度が実現するかもしれません。鉄系超伝導研究は正にその可能性を秘めています。

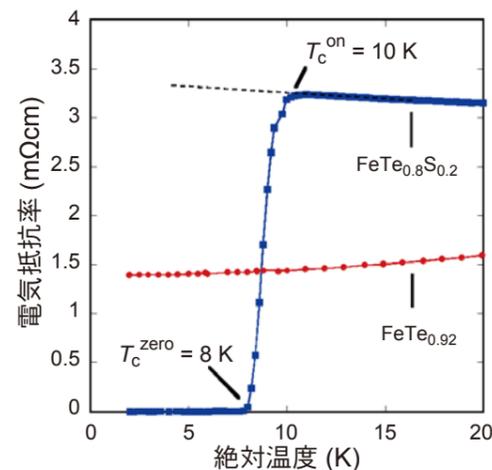
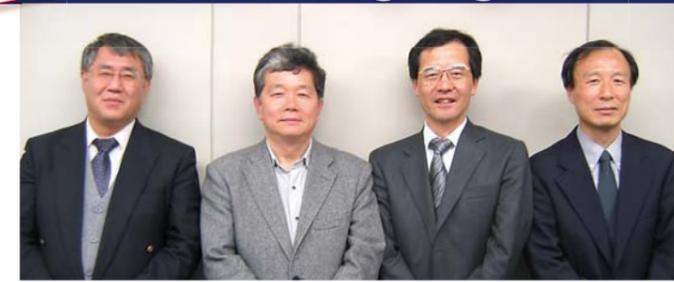


図2 $\text{FeTe}_{0.8}\text{S}_{0.2}$ の電気抵抗率の温度依存性。約8 K以下でゼロ抵抗状態が観測された。

酸化物系超伝導コイルを用いてタンパク質のNMR計測に成功

超伝導材料センター マグネット開発グループ (独)理化学研究所*1、(株)神戸製鋼所*2、日本電子(株)*3



グループリーダー 木吉 司 前田 秀明*1 濱田 衛*2 細野 政美*3

有機化合物の構造決定に威力を発揮する核磁気共鳴(NMR)装置は、超伝導磁石の発生する磁場中で、試料にある周波数の電磁波を加えると、特定の原子核との間で共鳴現象が生じることを利用した分析装置です。共鳴する周波数は磁場に正比例し、水素の場合は磁場23.48T(テスラ)で1GHzになります。

NMR装置は使用する磁場が強くなるほど感度と分解能が向上します。NIMSでは金属系超伝導線材である Nb_3Sn 線材を改良し、920MHz(21.6T)および930MHz(21.8T) NMR装置を開発してきました。しかし Nb_3Sn 線材は既にその臨界磁場近くで使用されており、発生磁場の大幅な増加は困難です。そこで既存のNMR装置の発生磁場よりも遙かに強い30T以上の磁場中でも実用的な電流を流せる酸化物系超伝導線材が期待されており、私達は酸化物系超伝導コイルのNMR装置への適用に取り組んでいます。

従来のNMR装置は磁場の空間的均一度と時間的安定度を保つために、断面が平角または丸の線材を隙間なく整列した状態に巻き、磁石両端を短絡する永久電流モードで運転されていました。しかし、酸化物系超伝導線材で最も実用化が進んでいる、ピスマスを含んだ酸化物系超伝導線材であるBi-2223線材は、テープ形状であるため隙間なく整列に巻くことが困難です。さらに線材自身と線材間の接続部に生

じる抵抗のため、永久電流モードでは磁場の減少が大きくなり、良質なNMR計測ができません。

私達は図中のブロンズ補強Bi-2223線材に示したように、Bi-2223素線の両側面に弱磁性のブロンズ(青銅)を貼り合わせました。これによって機械的強度を向上するとともに、線材の厚みを増して隙間なく整列に巻くことを可能としました。巻線したコイルを既存のNMR磁石の最内層の Nb_3Sn コイルと交換し、通常のもの比べて20倍安定度の高い電源を用いて、永久電流モードを用いずに11.7T(500MHzに対応)で運転しました。安定度の優れた電源を用いても、ノイズや気温で磁場が変動します。またBi-2223線材の磁化により中心磁場が徐々に増加する現象も確認されました。しかし、これらは磁場の変化を検出し、補償する技術によって解決することができました。図中には開発したNMR装置で得られたNMR計測の例を示しています。これはタンパク質であるリゾチームの水溶液サンプルの2次元NMR(2つの核種の相関を測定)の代表例であるNOESY*の結果です。NOESYは、タンパク質の立体構造を求めると最も重要な計測ですが、NMR装置の磁場の時間的な安定度や均一度が悪いと、良い信号を得ることができません。図に示した結果は、金属系超伝導線材を使用した永久電流モードで運転されるNMR装置での測定結果と比較してもほぼ遜色のないものとなっています。

これによりNIMSで発見されたピスマス系超伝導線材の、磁場の条件が最も厳しいとされるNMR装置への適用が実証できました。今後は酸化物系線材の有用性が発揮できる、超強磁場NMR装置の第一歩として超1GHz NMR装置の開発に取り組みます。また、この技術はMRI(核磁気共鳴イメージング)等の計測機器への展開も期待できます。

本研究はJSTの先端計測分析技術・機器開発事業の支援を受けて実施されています。

* NOESY (nuclear Overhauser effect spectroscopy): 核オーバーハウザー効果相関2次元NMRスペクトル法

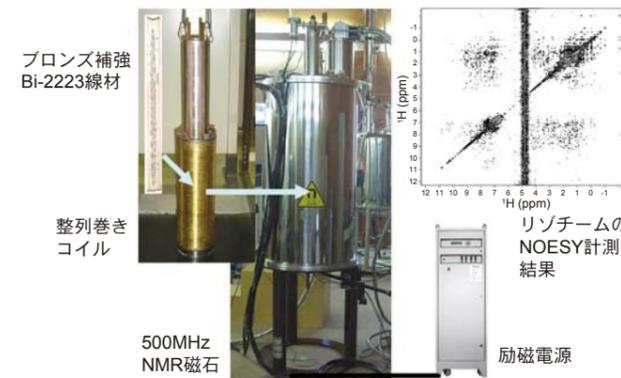


図 酸化物系超伝導コイルを含むNMR磁石とNMR計測例

うずいと 渦系ダイナミクス制御による 整流作用

超伝導材料センター 特性評価グループ

超伝導体は第一種、第二種の二種類に分けられ、第二種の超伝導体には磁力線は量子化された形で侵入します。量子化された磁力線の周りには超伝導電流が渦のように流れているのでその構造から「渦系」と呼んでいます。1986年にベドノルツとミュラーによって発見された銅酸化物系高温超伝導体には多くの種類があり、その大部分は図1に示すように超伝導層と非超伝導層とが層状に積み重なった結晶構造をしています。この超伝導層に垂直に磁場をかけた場合、渦系は上下方向に分離され、あたかもパンケーキが重なっているように見えます(左図)。これをパンケーキ渦系と呼んでいます。一方、超伝導層に平行に磁場をかけると磁力線は超伝導層間に入り(右図)、これをジョセフソン渦系と呼んでいます。ジョセフソン渦系は超伝導層間にあり、層間を移動するため(右図で左右方向)、光速に近い非常に速い速度で移動することができます。

ところで、超伝導体にナノスケールの周期的な空孔を微細加工により導入すると(図2挿入写真)、渦系

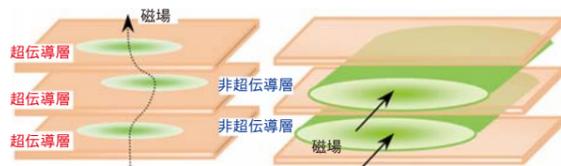


図1 酸化物高温超伝導体内の渦系の様子。磁場が超伝導層に垂直な場合(左図)と平行な場合(右図)。

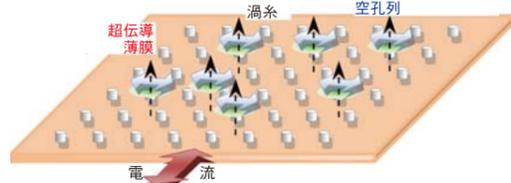
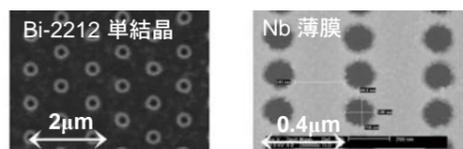


図2 超伝導体薄膜に設けた空孔列(写真参照)の中を電流により駆動され移動する渦系。



グループリーダー
平田 和人 Ajay Thakur 大井 修一 茂筑 高士

と空孔間に働く引力と渦系間の反発力により、渦系は空孔に捕えられたり、空孔間に留まったりします(図2)。これは結晶中の電子が原子に引き寄せられたり、電子同士で反発し合う様子に似ています。今日、半導体が電子素子として用いられている機能の一つとして整流作用があり、その素子はダイオードと呼ばれています。渦系にもこれと同様な機能を持たせることができます。これまで空間的に非対称な空孔列を超伝導体に設け、交流電流で渦系を駆動することで一方方向への整流作用が観測されてきましたが、対称な空孔列(図2写真)でも時間的に非対称な交流電流(図3(a))をかけることで両方向の整流作用を実現することが可能となりました。また、図3に示した銅酸化物高温超伝導体ではパンケーキ渦系とジョセフソン渦系とを共存させることができ、多層構造により、大きな整流電圧(図3(b))を得ることができました。ジョセフソン渦系は非常に高速で移動できるため、ナノ加工技術を駆使してジョセフソン渦系の動きを制御すると、従来の電子素子に比べ非常に高速、かつ、省エネルギー電子素子を実現することが期待できます。

この研究を含めた業績により、2008年末踏科学技術協会「超伝導科学技術賞」を受賞しました。

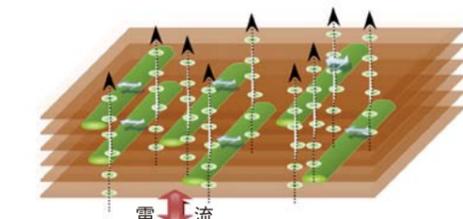
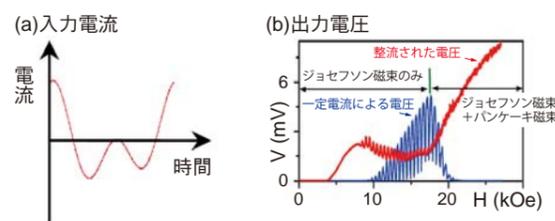


図3 パンケーキ渦系とジョセフソン渦系とが共存。(a)は時間的に非対称な入力電流、(b)整流された出力電圧。

新非常勤監事の紹介



芳賀 研二(はがけんじ)

早稲田大学理工学部機械工学科卒(1969年)。同大学院理工学研究科博士課程修了。(1974年)工学博士(1974年早稲田大学)。現職 NOK株式会社相談役。2009年4月物質・材料研究機構監事(非常勤)に就任。

就任にあたって

企業にて新事業創出のための研究開発および技術行政に30年間携わった後、常勤監査役を4年間経験し、このたびNIMSの非常勤監事に就任いたしました。NIMSはこれまでにない新物質・新材料を創製し、社会に役立つ新製品として人類の発展に寄与していくことが期待されています。民間企業での経験を踏まえ、価値ある実用化への効果的、効率的な研究活動が行われるよう、監事の職務を通じてお役に立ちたいと思います。

新フェローの紹介



室町 英治(むろまち えいじ)

理学博士。東北大学大学院工学研究科修士課程修了。無機材質研究所第11研究グループ主任研究官、同総合研究官、NIMS物質研究所長、同国際ナノアーキテクトニクス研究拠点副拠点長などを経て、同ナノマテリアル分野超伝導材料グループリーダー(2008年)。2009年4月にNIMSフェローに就任。

就任にあたって

研究者になってから、一貫して新しい物質の探索、開発を手がけてきました。特に、ベドノルツとミュラーによる1986年の報告を契機として、高温超伝導体の研究に参画しました。幸いなことにNIMS(及びその前身の無機材質研究所)の高圧合成技術を適用することで、高圧下で安定な高温超伝導体が多数存在することを明らかにすることができました。このたびフェローに任じられましたが、おりしも鉄系超伝導体が世界中の話題となっています。ぜひこのホットな分野も含めて成果をあげたいと考えています。



佐々木 高義(ささき たかよし)

理学博士。東京大学大学院理学系研究科修士課程修了。無機材質研究所第7研究グループ研究員、主任研究官、NIMSソフト化学グループディレクター、同ナノスケール物質センター長などを経て、同国際ナノアーキテクトニクス研究拠点ナノマテリアル分野コーディネーター(2008年)。2009年4月にNIMSフェローに就任。

就任にあたって

私は旧無機材質研究所で研究をスタートして以来、層状物質に関連したテーマにずっと携わってきました。様々な層状物質を合成し、構造、特性を調べるという地道な研究の中で、剥離反応やナノシートなど、当初予期していなかった展開に巡り会うことができました。このたびフェローに任ぜられたことを励みとして、これまでの研究をさらに発展させ未知の現象や新しい機能の発見に挑戦するとともに、材料としての応用、実用化の可能性も追求していきたいと考えています。

平成21年度科学技術分野の文部科学大臣表彰を受賞

平成21年4月14日、平成21年度科学技術分野の文部科学大臣表彰の表彰式が行なわれ、NIMSの職員が表彰を受けました。この表彰は科学技術に関する研究開発、理解増進等において顕著な成果を収めた者の功績を讃えることにより、科学技術に携わる者の意欲の向上を図り、我が国の科学技術水準の向上に寄与することを目的とするものです。

受賞部門は、顕著な功績をあげた研究者を対象とした科学技術賞、高度な研究開発能力を有する若手研究者を対象とした若手科学者賞、および優れた創意工夫により職域における技術の改善向上に貢献した者を対象とした創意工夫功労者賞です。

●科学技術賞(研究部門)

業績名:結晶中の原子列を元素毎に可視化する顕微鏡法の研究
木本 浩司 NIMS ナノ計測センター 先端電子顕微鏡グループ 主席研究員
長井 拓郎 NIMS 電子顕微鏡クラスター 主任エンジニア
松井 良夫 NIMS ナノ計測センター 先端電子顕微鏡グループリーダー

業績名:室温原子間力顕微鏡による多元素系ナノ構造体操作組立の研究

森田 清三 国立大学法人大阪大学 大学院工学研究科 教授
杉本 宜昭 国立大学法人大阪大学 大学院工学研究科 特任講師
阿部 真之 国立大学法人大阪大学 大学院工学研究科 准教授
Oscar Custance NIMS ナノ計測センター ナノメカニクスグループリーダー

●若手科学者賞

業績名:金属酸化物におけるナノ構造制御と新規機能創製の研究
長田 実 NIMS 国際ナノアーキテクトニクス研究拠点
ナノマテリアル分野 ソフト化学グループ MANA研究者

●創意工夫功労者賞

業績名:温度計測用R熱電対の運用システムの改善
宮崎 秀子 NIMS データシートステーション 主幹エンジニア

岸理事長、(社)日本鉄鋼協会西山賞を受賞並びに名誉会員に推挙

岸輝雄理事長は鉄鋼に関する学術、技術の研究に卓越した功績のあった者に対して贈られる(社)日本鉄鋼協会の学会賞(西山賞)を受賞し、その授賞式並びに記念講演会が3月28日に行われました。この受賞は、鉄鋼材料の破壊および非破壊評価に関する長年の研究成果が評価されたものです。また、岸理事長はわが国の鉄鋼業に関し功績名望ある方々の中から同協会名誉会員に推挙され、同日その推挙式が行われました。



受賞の様子

NIMSの宇宙関連材料の研究成果に対しJAXAから感謝状

平成21年3月19日、NIMSが行った宇宙関連材料の研究成果がH-IIAロケットの信頼性向上やH-IIBロケットの開発に多大に貢献したことに対し、(独)宇宙航空研究開発機構(JAXA)から感謝状をいただきました。

JAXAは従来、宇宙ロケット設計に使用する材料データについて文献や海外のデータベースを利用していましたが、NIMSが持つ豊富な知見に基づいた液体水素を燃料とするロケットエンジンに使用されている実材料の評価

により設計基準の変更や材料特性の改善などを行った結果、H-IIAロケットの信頼性を大きく向上させ、また試験後の構造材料の残寿命を見積ることによってエンジン燃焼試験回数を削減することができました。

NIMSとJAXAは平成12年より、液体ロケットエンジンの極低温から高温にかけての環境下で実際に使用されている金属材料の強度・靱性・疲労特性データを取得・評価し、これまでに11種のデータシートおよび2種の破面写真集を発行して一般に公開しました。これらはロケットエンジン用材料メーカーおよびロケットエンジン製造メーカーの品質目標の維持にも貢献しています。今後は次期液体ロケットエンジンであるLE-Xエンジン用材料の評価も予定しています。



NIMSおよびJAXAの関係者

平成21年度の年度計画及び予算について

NIMSは、本年4月に平成21年度年度計画を定め、文部科学大臣あて提出いたしました。本計画は、第2期中期計画に定められた事項を達成するため、平成21年度に実施すべき事業内容を定めています。プロジェクト研究開発については、ナノテクノロジーを活用する新物質・新材料を創成するための研究や、社会的ニーズに応える材料を高度化するための研究開発を引き続き推進し、平成21年度から「低コスト次世代太陽電池の高効率化基礎研究」、「未利用熱エネルギー回収のための高温用新規熱電材料の開発」、「次世代高強度耐熱鋼の開発と信頼性の確立」の3つのプロジェクトを新たに実施するとともに、萌芽的研究等も引き続き着実に推進していきます。詳細は、ホームページをご覧ください。http://www.nims.go.jp/nims/disclosure/term02/docs/h21_plan.pdf

(単位:億円)

区 分	予 算 額
運営費交付金	150.4
施設整備費補助金	2.8
受託事業収入等	22.0
自己収入	1.2
計	176.6

注:各欄積算と合計欄の数字は四捨五入の関係で一致しないことがある。

なお、平成21年度の予算は、右の表のとおりです。



開催のお知らせ

第3回世界材料研究所フォーラム Symposium on Materials Challenges for Clean Energy

開催日:平成21年6月21日~25日

開催場所:米国家標準技術局(NIST) Gaithersburg, Maryland(ワシントンD.C.近郊)

詳細: <http://www.e-materials.net/network/WMRIF/modules/wordpress/>

オンラインによる登録の締切:6月15日

