
掲載内容（サマリー）：

- 超電導関連 2011 年 5-6 月の催し物案内
- 新聞ヘッドライン（3/11-4/15）
- 超電導速報—世界の動き（3 月）
- 「未踏科学技術協会超伝導科学技術研究会第 77 回ワークショップ」報告
- 「American Physical Society, APS2011」報告
- 「International Workshop on Novel Superconductors and Super Materials 2011 (NS²2011)」報告
- 隔月連載記事—イットリウム系超電導線材の開発の道のり（その 3）
- 読者の広場(Q&A)—磁性材料の高機能化・レアアースフリー化研究開発に用いられる超電導マグネットとは？

[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>



超電導関連 5 -6 月の催し物案内

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

場所 : Providence, RI, USA

問合せ : <http://www.esmoconference2011.com/beta/>



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>

5/23

超電導技術動向報告会 2011

場所 : 都市センターホテル

問合せ : <http://www.istec.or.jp/conference/gijyustudoukou.html>

6/5-10

Gordon Research Conference: Superconductivity / 2011

場所 : Waterville Valley, USA

問合せ : <http://www.grc.org/programs.aspx?year=2011&program=supercon>

6/8-10

24th Space Cryogenics Workshop

場所 : Coeur d'Alene, ID, USA

問合せ : <http://www.spacecryogenicsworkshop.org/>

6/13-17

Cryogenic Engineering Conference and International Cryogenic Materials Conference 2011
(CEC-ICMC 2011)

場所 : Spokane, WA, USA

問合せ : <http://www.cec-icmc.org>

6/24

第 37 回シンポジウム/第 15 回超伝導科学技術賞授賞式

場所 : タワーホール船堀

問合せ : <http://www.sntt.or.jp/~fsst/37thSP.pdf>

(編集局)

[超電導 Web21 トップページ](#)

新聞ヘッドライン (3/11-4/15)

- 新しい鉄系高温超伝導物質 分子研のシンクロトロン光源使って意外な電子構造解明 科学新聞 3/11
- レアメタル、一段と上昇 アンチモニー国際価格 13%高 日本経済新聞 3/23
- 春の学協会大会・講演会など 延期、開催中止相次ぐ 科学新聞 3/25
- 脳磁計用 ヘリウム完全循環装置 東大、新領域技術研が開発 第1号機を名古屋大に納入へ 科学新聞 4/01
- 非整合スピン密度波 鉄系高温超伝導体で発見 東大・瀧川教授グループ 科学新聞 4/01
- 熱力学測定導入し差別化 高機能酸化物を探索 東京理科大学理工学部 日刊工業新聞 4/07
- レアアース価格 1年で6倍に 中国で採掘規制 伸び続ける需要 一段の懸念消えず 日本経済新聞 4/08
- 動きが鈍い電子の直接観測成功 新規な超伝導理解へ前進 科学新聞 4/08
- 鉄系超伝導の仕組みを解明 東大グループ 読売新聞 夕刊 4/08
- 太陽光発電向けレアメタル高騰 原発代替需要見込む 昨年比2~5割 日本経済新聞 夕刊 4/14

(編集局)

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導速報—世界の動き (2011 年 3 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 3 月 14 日)

American Superconductor Corporation (AMSC)は、フィンランドの電力技術企業 Switch Engineering Oy の買収契約に調印した。総額 1 億 9000 万ユーロ (約 2 億 6500 万米ドル) のこの買収は、直ちにその効果が期待でき、また、AMSC 社の将来の成長を支えるものでもある。この買収により、AMSC 社の顧客層や市場へのチャンネルが拡大することになる。特に、AMSC 社は、Switch 社の進んだ同期発電機技術を活用して、ダイレクト・ドライブ SeaTitan™風力発電機向けの超電導発電機の商品化に繋げていきたいと考えている。この買収契約は、2011 年 8 月 31 日発効の予定。

出典:

“AMSC To Significantly Expand Wind Business Through Proposed Acquisition of Power Technologies Company ‘The Switch’”

American Superconductor Corporation press release (March 14, 2011)

[http://www.amsc.com/pdf/AMSC%20TS%20Release%20\(14March2011\)%20-%20Final.pdf](http://www.amsc.com/pdf/AMSC%20TS%20Release%20(14March2011)%20-%20Final.pdf)

Siemens (2011 年 3 月 28 日)

Siemens 社と Karlsruhe Institute of Technology (KIT) は、HTS 技術が通常の発電に適していることを実証するための研究プロジェクトを発足させた。このプロジェクトの目標は、発電機の効率を 0.5 %改善し、99.5 %にまで高めることである。このような効率改善により、大型発電所における燃料の大幅な節約を図り、二酸化炭素排出量を減少させることができる。しかしながら、発電機ローター中においては HTS ケーブル特性が機械的な影響を受けやすいことから、この目標を達成するためには色々な検討項目がある。実際の運転環境下でのローター試験は、KIT で実施される予定である。また、このプロジェクトでは、クライオスタットのコンセプト、熱遮蔽、冷凍プロセスについての検討も行う予定である。このプロジェクトは、ドイツ研究技術省の財政支援を受けており、2014 年まで継続される。その中で、最終的には数百メガワット級の HTS プロトタイプ発電機が開発される。このプロジェクトの全体は、2011 年 4 月 4～8 日に開催される Hannover Fair 期間中、Superconducting City のコーナーで紹介される。

出典:

“New Project: Generator with Superconductors”

Siemens press release (March 28, 2011)

http://www.siemens.com/innovation/en/news_events/ct_pressreleases/e_research_news/2011/e_22_resnews_1109_2.htm

マグネット

Bruker Energy & Supercon Technologies Inc. (2011 年 3 月 28 日)

Bruker Energy & Supercon Technologies, Inc. (BEST) は、欧州の結晶製造メーカーから、半導体向けの単結晶製造用超電導マグネット 3 台の新規発注を受けた。なお、韓国の材料メーカー LG Siltron から 2010 年に受注した BEST 社の単結晶製造用超電導マグネットシステムは、すでに工場受け入れ試験をクリアしている。現在、単結晶製造用超電導マグネットシステムは、マグネットを使った Czochralski プロセスとして知られる手法により単結晶 Si の品質向上のために使われている。BEST 社は、マグネットを使った Czochralski プロセスがいかに熱電変換効率を向上させ、単結晶 Si の歩留まりを改善するかを実証するための努力を続けている。これが達成されれば、結果として太陽発電プラントの費用対効果が改善されることになる。

出典:

“BEST Receives Superconducting Crystal Growth Magnet (SC-GCM) Order and Passes Factory Acceptance Test on Prior SC-CGM Order”

Bruker Energy & Supercon Technologies, Inc. press release (March 28, 2011)

<http://phx.corporate-ir.net/phoenix.zhtml?c=121496&p=irol-newsArticle&ID=1543219&highlight>

Scott Technology Limited, Industrial Research Limited 及び HTS-110 (2011 年 3 月 31 日)

Scott Technology Limited は、HTS-110 Limited 株式の過半数（約 50.65 %、440 万ドル）を取得した。この株式取得は、当初は負債の穴埋めという形で行われ、その後、2011 年 6 月末までに所要の株式が発行されて取引が完了する。今回の合意の下、Industrial Research Limited (IRL) 及び American Superconductor Corporation は持ち株比率の減少に同意しており、Endeavour Capital 社及び他の少数株主は既に持ち株の売却を終えている。Industrial Research Limited は、今後ともその超電導研究プログラムを通じ HTS-110 社の製品開発の支援を継続する。

Scott 社は、株式取得早々、利益及びキャッシュ・フローがプラスに転じ、中長期的には売り上げ、利益ともに大きく伸びるであろうと期待している。また、Scott 社は機器の大型化に専門性を有しており、これによって HTS-110 Limited が製品供給の面でさらに力をつけることが期待されている。HTS-110 社会長 Drew Stein は次のように述べた。「高付加価値製造技術の面で実績を持つニュージーランドの企業が我が社に投資してくれたことを嬉しく思っている。過去数年間 HTS-110 社は大きく成長してきており、この成長路線を維持するためにも更なる投資が必要なことは明らかである。」また、IRL の CEO、Shaun Coffey は次のように述べた。「HTS-110 社は最近数年間、大きく成長してきており、世界の超電導マグネット市場で指導的な位置を確保している。同社の成功と更なる成長の可能性を見れば、今こそ IRL がその世界をリードする技術をこの野心的なニュージーランド企業の HTS-110 社に移転すべき時である。Scott Technology 社は、既に世界的な地位を確立しており、ハイテク、高付加価値製品を開発しニュージーランドや世界でこれを販売するという実績を積んできている。」

出典

“Acquisition of Majority Shareholding in HTS-110 Limited & Proposed Rights Issue”

Scott Technology Limited press release (March 31, 2011)

http://www.scott.co.nz/system/files/NZX_310311_Acquisition+of+Major+Shareholding+in+HTS.pdf

“Investment in IRL associate boon for high-tech manufacturing”

Industrial Research Limited press release (March 31, 2011)

<http://www.irl.cri.nz/newsroom/media-release/investment-irl-associate-boon-high-tech-manufacturing>

“Scott investment in HTS-110 secures leadership for NZ Inc.”

HTS-110 Limited press release (March 31, 2011)

http://www.hts110.co.nz/wp-content/uploads/2011/03/hts-110_scott_release_310311.pdf

量子計算機

National Institute of Standards and Technology (2011 年 3 月 9 日)

National Institute of Standards and Technology (NIST) の研究グループは、マイクロ波を使って振動する機械要素と、従来と比べて 1,000 倍以上の強度で信号のやり取りができる電気・機械回路の実証に成功した。以前の実験に比べ、今回のデバイスの結合強度ははるかに大きく、振動はより長時間継続し、さらにデバイスはずっと加工しやすい。このマイクロ電子回路は、比較的大きな対象物を量子スケールで制御できる可能性を有しており、情報処理の新しいツールとして有用であると考えられる。これは、超電導量子計算機や量子シミュレーションのための NIST のコンポーネント開発という観点からも非常に重要な成果である。研究グループのこの結果は、Nature 3 月 10 日号に掲載された。

出典:

“NIST electromechanical circuit sets record beating microscopic ‘drum’”

National Institute of Standards and Technology (March 9, 2011)

<http://www.nist.gov/pml/quantum/drum-030911.cfm>

基礎

National Institute of Standards and Technology (2011 年 3 月 2 日)

Joint Quantum Institute (JQI) の研究グループは、National Institute of Standards and Technology (NIST) 及び University of Maryland-College Park と共同して、世界で初めて、ガス状の原子を使ったスピン・軌道結合として知られる量子現象を生じさせることに成功した。ここで使われた手法は、基礎物理の研究と解析に新たな可能性を開くものであり、非常に低温に維持された原子を使った量子計算機、次世代スピントロニクス・デバイス、アトム・デバイスの分野での応用の可能性を持っている。さらには、この技術をフェルミ粒子に適用すれば、新しい p 型超電導といった 2 つの粒子間の新たな相互作用の研究が可能になり、これまでずっと追い求められてきたトポロジカル量子計算として知られる量子計算の可能性にも道を開くことになる。

出典:

“JQI physicists demonstrate coveted ‘spin-orbit coupling’ in atomic gases”

National Institute of Standards and Technology (March 2, 2011)

<http://www.nist.gov/pml/div684/spinorbit-030211.cfm>

University of Illinois College of Engineering (2011 年 3 月 2 日)

University of Illinois College of Engineering の物理研究グループは、荷電ブラック・ホールの概念を使い、いかに従来型ではない超電導体における電子間相互作用をモデル化できるかを示した。ひも理論研究者 Juan Maldacena の成果に基づき、研究グループは荷電ブラック・ホール存在下での湾曲時空の電子の運動をモデル化し、高温超電導体の状態に関する以下の 2 つの驚くべき特徴を示した。1) モット状態における電子の運動を阻害する障壁の存在、2) 通常の金属の抵抗が温度の 4

乗に比例するのに対し、抵抗が温度に比例する奇妙な金属状態。驚くべきことに、荷電ブラック・ホールと弱く相互作用する電子からなる時空の境界領域は、その内部を動く電子の障壁となっており、モット状態と類似したものであった。これは高温超電導体と同じ 2 次元システムにおいてモット問題が初めて解かれた例である。研究グループの結果は *Physical Review Letters* 3 月 1 日オンライン号及び *Physical Review D* 2 月 25 日号に掲載された。

出典:

“Black holes:a model for superconductors?”

University of Illinois College of Engineering press release (March 2, 2011)

<http://physics.illinois.edu/news/story.asp?id=1214>

Lawrence Berkeley National Laboratory 及び SLAC National Accelerator Laboratory (2011 年 3 月 21 日)

Lawrence Berkeley National Laboratory (Berkeley Lab) 及び University of California at Berkeley は、Stanford University 及び SLAC National Accelerator Laboratory と共同で 3 つの異なる実験手法で Pb-Bi2201 の擬ギャップの性質について調べている。まず、角度分解光電子分光法を使い幅広い温度領域で Pb-Bi2201 試料中の放出電子の運動エネルギーと運動量を測定して、低エネルギー電子のバンド構造のマップを作製した。低エネルギー電子のバンド構造を調べることで材料の電気、磁気特性の多くの部分を明らかにすることができる。次に、カー効果測定を行い、異なる温度での試料のネットの磁化を測定した。最後に、時間分解反射率測定により、異なる温度での反射率の変化を調べた。これらの測定結果を総合した結果、Pb-Bi2201 における擬ギャップ相は徐々に超電導状態へ変化していくのではなく、擬ギャップ相と超電導相は擬ギャップ相境界において生じる相変態を伴う異なる相であることが示唆された。この結果は、高温超電導の我々の理解にパラダイムシフトを起こさせるものである。Stanford Institute for Materials and Energy Science の Zhi-Xun Shen は次のように解説した。「今回得られた知見は、新しい超電導体探索のみならず、エネルギー応用向けに新しい超電導体を最適化するための手法として擬ギャップ相をいかに管理・制御するかを示す手がかりを与えるものである。」研究結果は、*Science* 3 月 25 日号に掲載された。

出典

“Closing in on the pseudogap”

Lawrence Berkeley National Laboratory press release (March 21, 2011)

<http://newscenter.lbl.gov/news-releases/2011/03/24/pseudogap/>

“High-temperature superconductor spills secret:A new phase of matter”

SLAC National Accelerator Laboratory press release (March 24, 2011)

<http://home.slac.stanford.edu/pressreleases/2011/20110324.htm>

Massachusetts Institute of Technology (2011 年 3 月 29 日)

Massachusetts Institute of Technology の研究グループは、世界で初めて 2 次元量子スピン液体と思われる結晶を合成した。換言すれば、絶対 0 度でもスピンの動き続ける固体材料である。ハーバートスミス鉱として知られるこの結晶は、亜鉛パラタカマイトとして知られる結晶族に属している。ハーバートスミス鉱は超電導体ではなく、絶縁体であるが、量子スピン液体理論はこの結晶にドーピングすることにより超電導体へと変化することを予言していた。この結晶は自然界に存在するものであるが、実際には不純物を多く含んでおり物理的な評価には向いていない。MIT の研究グループは 1/3 グラムのこの結晶を合成することに成功した。この結晶を使って、研究グループはこれが本当に量子スピン液体であるかどうかを確認するための試験を計画している。量子スピン液体であることが確認され、その大型単結晶を作り出すことができれば、高温超電導体のメカニズムの理解を深

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

める上で大きな助けとなることが期待される。この材料の合成については、Physical Review B.3 月 3 日号に報告されている。

出典:

“A new spin on superconductivity?”

Massachusetts Institute of Technology press release (March 29, 2011)

<http://web.mit.edu/newsoffice/2011/quantum-spin-liquid-0329.html>

[超電導 Web21 トップページ](#)

「未踏科学技術協会超伝導科学技術研究会第 77 回ワークショップ」報告

財団法人国際超電導産業技術研究センター
超電導工学研究所低温デバイス開発室
室長 日高睦夫

3 月 10 日に東京大学武田ホールにおいて「極限を測る超伝導技術の最先端」と題して未踏科学技術協会超伝導科学技術研究会主催のワークショップが開催された。本ワークショップは低温超電導デバイスを用いた計測システムとその応用がテーマであった。

冒頭に産総研の前澤氏による「わかった気になる超伝導検出器」と題した各種超電導計測器の動作原理や応用分野などのわかりやすい解説があり、この分野に不慣れな人でも超電導検出器にはどのような種類があり、どのような特徴を持つのかということに対して予備知識を持つことができたのではないと思われる。

産総研の金子氏からは「量子電気標準における超伝導技術」と題した講演があった。計量標準の世界では量子力学に基礎を置く量子標準の確立が進められており、量子電気標準の分野では超電導デバイスが不可欠なものになっている。既にジョセフソン効果を利用したデバイスが直流の国家標準として用いられており、超電導デバイスを用いた交流電圧標準、電流標準などの研究が進められている。超電導デバイスを用いた標準は、比較的簡単に再現性良く作ることが可能であるため、より生産現場に近いところに置く 2 次標準として用いることもできる。

「高感度 SQUID の医療応用」と題して金沢工大の上原教授から SQUID を用いた脳磁計、脊髄磁場測定、小動物生体磁場計測の紹介があった。SQUID 脳磁計は 1 台数億円する高価な装置であるが、世界で百数十台設置されており、脳手術の事前検査などに力を発揮している。最近では認知症の早期診断や言語能力獲得過程の研究にも適用されている。脊髄における神経伝達異常は MRI などによる画像による診断が難しく、患者に大きな苦痛を与える硬膜外電極による診断に頼らざるを得なかったが、SQUID を用いて非侵襲的な診断が可能となった。小動物の生体磁場計測は、毛を剃らなくても測定できることが特徴である。新薬の心臓への影響測定が義務化される流れの中で、測定のスループットを大きく向上できる方法として注目されている。

SII ナノテクノロジーの八坂氏は「高精度元素分析に向けた超伝導転移端センサー (TES) X 線検出器」の講演を行い、同社で昨年製品化した SEM 搭載 TES システムと、NIMS 等と共同開発を行っている TEM 搭載 TES システムが紹介された。この分析システムはエネルギー分解能と感度の高さが特徴であり、従来の方法では重なり分離できなかったエネルギーピークを明瞭に分離でき、例えば鉄鋼材中に微量に添加されたレアメタルの同定に威力を発揮する。課題として TES 有感面積不足に起因する測定時間の長さが指摘された。これを解決するには TES のアレイ化が必要である。

NICT の藤原氏は「超伝導単一光子検出器を用いた量子鍵配送技術」を紹介した。量子鍵配送は暗号解読に必要な鍵の安全を、完全に保障して伝送する技術であり、単一光子を用いたプロトコルが作られている。この単一光子の受信装置として SSPD と呼ばれる超電導検出器が使用されている。SSPD 受信機は NICT でシステム化がなされており、これを用いて昨年秋には都心の 4 拠点を結んだ量子鍵配布のデモンストレーションが行われた。SSPD アレイ化による高速化や高感度化が今後の課題である。

KEK の羽澄教授から「超伝導検出器によるビッグバン以前の宇宙観測」というスケールの大きな話があった。宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) を観測することで、今まで宇宙の年齢や宇宙の大半は謎の暗黒物質、暗黒エネルギーであることがわかってきた。CMB の偏光マップを知ることができ

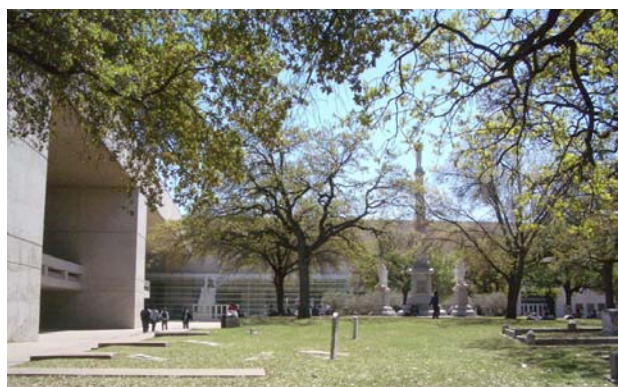
れば、ビッグバン以前の宇宙の急激な膨張（インフレーション）を検証することができる。そのために超電導検出器を用いた地上観測、衛星観測が計画されており、数千ピクセル規模の検出器アレイの開発が進められている。いずれも冷凍能力に限りがあるためアレイ出力の多重化が必須であり、多重化に有利な MKID などの検出器開発が行われている。

「超伝導サブミリ波リム放射サウンダ（SMILES）」と題する講演が JAXA の佐野氏からあった。SMILES は超電導ミキサを搭載した衛星であり、大気成分の高度分布を観測する。各高度における観測時間が 0.5 秒と限られているため、短時間で観測可能な高感度の超電導検出器が必要となる。SMILES はこれまでにない精密な大気放射スペクトルを観測することができたが、残念なことに故障により予定の半分の 6 か月間で観測を終了した。現在取得したデータの分析を行っている。

[超電導 Web21 トップページ](#)

「American Physical Society, APS2011」 報告

財団法人国際超電導産業技術研究センター
超電導工学研究所材料物性研究部
部長補佐 筑本知子、特別研究員 中尾公一



会場となったコンベンションセンター

APS March meeting は超電導を含む物性物理分野を中心にして毎年一回 3 月に開かれる米国物理学会の会議である。今年は 3 月 21 日から 25 日までテキサス州ダラス市のコンベンションセンターにおいて開催された。この会議は日本を含む国外からの参加者も多く、今回も参加者数が 7500 人をこえる盛況であった。会議では 7000 件以上の発表が 550 のセッションにわかれておこなわれた。また今年は 1911 年に K. Onnes が超電導現象を発見して丁度 100 年目の年であり、今会議においても、3 月 20 日、21 日の二日間に渡って 100 周年を記念する特別イベントが組まれており、J.C.S. Davis 氏 (BNL, Cornell, St. Andrews) が「室温超電導への道」について、高温超電導体である銅酸化物と鉄ニクタイトの電子相図の比較から何が鍵となるのかを議論したのをはじめ、M. Beasley (Stanford 大)、P.M. Grant らが講演を行った。

超電導に関する発表の多くは鉄系超電導体を扱ったもので、19 のセッションを占めていた。鉄系超電導体のオーダーパラメーターの対称性として、初期に日米の研究者から $s_{\pm}$ 波という新しいタイプが提唱され、ほぼコンセンサスを得たかのように思われたが、むしろ最近になって s_{++} 波、即ちすべての関与するフェルミ面でオーダーパラメーターの符号が共通の超電導ではないかという提案があり、議論が続いている。それにも関連して、軌道オーダーリングや電子ネマティック等のキーワードが注目されている。鉄系超電導体の基礎的な特性を明らかにしようとする研究として、今回は ab 面異方性に関するものが目立った。また将来の磁場中応用を念頭に置いて、ピンニング特性を調べる研究も着実に進んでいる。たとえば Maiorov (LANL) らは PLD 法で作製した Co ドープ Fe122 膜の臨界電流の磁界角度依存性から、膜には c 軸相関ピンとナノ粒子ピンが存在し、特に c 軸相関ピンは高磁場まで効いていることを報告した。Chikumoto (ISTEC) らは Co ドープ及び P ドープ Fe122 単結晶のピン特性の比較を行い、前者においてはピーク効果がみられた一方、後者ではみられないこと、またピン力密度のスケーリングから Co ドープ系では Co 置換領域が弱いピンとして寄与している可能性を指摘した。

鉄ニクタイト系以外の新しい超電導体に関する発表も何件かあったが、あまり臨界温度の高いものは無かった。たとえば H. Lei (BNL) らは新しいカルコゲナイド化合物 $\text{La}_2\text{O}_2(\text{Fe,Mn})_2\text{OSe}_2$ を見

いだしその物性を報告した。Mn ドープにより band gap が大きくなりまた磁気エントロピーが増大するとのことであった。

会議が開かれたのは東日本大震災から十日を経たばかりの時期で、日本からの入国者は放射能検査を受けるという噂もあった頃である（実際にはそのようなことはなかった）。そのなかで Hosono（東工大）は自身の講演の冒頭で震災のことに触れ、しかし日本はその科学技術力と団結力で短時日のうちに復興すると宣言し、会場の拍手を受けていた。そのようになることを願うのみである。



会場風景（動画）

[超電導 Web21 トップページ](#)

「International Workshop on Novel Superconductors and Super Materials 2011 (NS²2011)」報告

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

去る 3 月 6-8 日の 3 日間、東京工業大学と科学技術振興機構 (JST) 主催の国際ワークショップ、International Workshop on Novel Superconductors and Super Materials 2011 (NS²2011) が日本科学未来館において開催された。2008 年 2 月の東工大・細野教授グループによる鉄系高温超電導体の発見は、新たな高温超電導材料の探索研究や、超電導発現機構に代表される超電導物理の研究が再び世界的に大いに活発化する契機となった。国内では、2008 年 10 月に科学技術振興機構 (JST) の戦略的創造研究推進事業「新規材料による高温超伝導基盤技術」(TRIP) プロジェクト (リーダーは福山秀敏東京理科大教授) がスタートし、また平成 21 年度の補正予算で国が創設した最先端研究開発支援プログラム (FIRST プログラム) で選定された 30 のプロジェクトの一つである「新超電導および関連機能物質の探索と産業用線材の応用」(Super+α) プロジェクト (リーダーは細野秀雄東工大教授) が 2010 年 3 月に開始されている。本ワークショップでは、細野教授と福山教授が議長を務め、両プロジェクトの成果を中心に 50 件の口頭発表と 85 件のポスター発表が行われた。また、参加者は 200 名を超え (参加登録者 268 名)、非常に盛況であった。発表では、鉄系超電導体を中心とする超電導関連が 120 件程度で、残りはエレクトロイドや触媒などの機能材料関連であった。

ワークショップ初日は、住友電工・佐藤氏による高温超電導線材の応用技術開発の現状に関する基調講演で始まり、鉄系超電導体の応用に向けた研究に関するセッションが午前中に行われた。NIMS グループからは、パウダー・イン・チューブ法による鉄系超電導体の銀シース線材において 10^4 A/cm^2 台の J_c (4.2 K, self-field) が得られたことが報告され、名大グループからは、MBE 法によりバルクに匹敵する高い T_c (> 50 K) をもつエピタキシャル薄膜が作製できたという報告があった。また、東工大・ISTEC グループは、バイクリスタル基板上に作製した薄膜の粒間 J_c を系統的に調べ、粒界での J_c の低下が銅酸化物より小さいという結果を報告した (詳細は筆者による前号の記事を参照していただきたい-超電導 Web21-4 月号)。午後は、鉄系超電導体の超電導発現機構に関わる理論や実験についての発表が行われた。本ワークショップでも招待講演を行った米国 NRL の Mazin 氏は、反強磁性スピン揺らぎを媒体として $s_{\pm}$ という符号反転のあるギャップ対称性をもった超電導が発現する磁氣的機構を提唱しているが、軌道揺らぎを媒体とする機構も最近提唱している。後者の機構では、符号反転のない s_{++} のギャップ対称性となる。弾性常数のソフト化や非磁性不純物置換による T_c 低下が小さいことなど、この機構を支持する実験結果も報告されたが、東大の花栗氏による符号反転の存在を明瞭に示す STM/STS の実験結果が非常に印象的であった。



会議の様子 (発表者は ISTEC 筑本氏)

2 日目には、電子が陰イオンの役割を担う結晶であるエレクトライドを最初に発見したミシガン州立大の Dye 氏、セメント材料 ($12\text{CaO}\cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$; C12A7) で安定なエレクトライドを実現した東工大・細野教授、高圧合成法で Na のエレクトライドを見つけた中国・吉林大の Ma 氏による招待講演が行われた。細野教授は、C12A7 エレクトライドが、非常に低い仕事関数をもつことから、蛍光灯の省エネ電極として役立つだけでなく、 CO_2 分解やアンモニア合成などの触媒としても有望であると述べた。午後の口頭セッションから夜のポスターセッション、そして 3 日目午前の口頭セッションでは、 LaLiBi_2 、 Ta_2PdS_5 、 $\text{A}(=\text{Ca}, \text{Sr}, \text{La})\text{Pt}_3\text{P}$ やその他多くの新超電導物質の報告がなされたが、 T_c はいずれも 10 K 以下であった。岡山大の Nohara 氏は Ca-Fe-Pt-As の新しい組成で 38 K の T_c を示す物質の報告を昨年の ISS2010 で行っていたが、構造解析の結果、新しいブロック層構造をもつ鉄系超電導体であることがわかったと報告した。また、約 30 K の T_c をもつ As を含まない鉄系超電導体として昨年見つかった $\text{A}_x\text{Fe}_{2-y}\text{Se}_2$ ($\text{A} = \text{K}, \text{Rb}$) は、3 程度と 122 系物質より少し大きな異方性をもつことが報告された。3 日目朝には、プリンストン大の Cava 氏による基調講演があり、ケミストとしての立場で長年物質探索を行ってきた独自の視点が垣間見えた。夕方には、福山教授と中国科学院の Wen 氏によるサマリーがあった。その中で Wen 氏は、鉄系超電導体は反強磁性転移温度が 400 K 以上と高いため、より高い T_c が得られる可能性を示唆し、3 日にわたるワークショップが締めくくられた。



プリンストン大 Cava 氏の講演風景

[超電導 Web21 トップページ](#)

【隔月連載記事】

イットリウム系超電導線材の開発の道のり（その 3）

～ 日米開発競争の幕開け 1992 年-1998 年 ～

株式会社フジクラ
超電導プロジェクト室
グループ長 飯島康裕

IBAD 法線材は単結晶薄膜の機能とフレキシブルな線材の機能を併せ持つ、過去にない新しい構造を実現していた。原理的にはこれで長尺高性能線材の可能性が出来たわけであったが、当時この方法で本当に実用化するのか、道のりが見えていたかと言えば否と言わざるを得なかった。正直なところ、珍奇な方法で面白いサンプルが出来たようだ、というのが一般的な受け止めであったと思う。それでも 2 軸配向テープという構造を作りさえすれば RE-123 系高性能線材の可能性があるとがわかったというインパクトは大きく、このままでは駄目でも、より良い実用線材を考案するチャンスであると、当時線材プロセスに携わっていた多くの研究者を惹きつけることになった¹⁾。

1993 年から 94 年にかけて、IBAD 法に似た方法として、住友電工より ISD 法 (Inclind-Substrate-Deposition)、並びに金材技研 (現 NIMS) より MBS 法 (Modified-Bias- Sputtering) が相次いで提案された。また、東芝及び日立からは Ag テープ基板の圧延再結晶集合組織を用いて、中間層を使わずに 2 軸配向 HTSC 線材を実現する試みが提案された。いずれも当時の IBAD 法中間層膜の欠点であった成膜速度が遅くコスト高な点を改善しようとしたものであるが、配向制御の点では IBAD が優れており、得られる超電導特性についてはいずれも $J_c \sim 10^5 \text{ A/cm}^2$ 程度に留まっていた。IBAD も含めて、これらは当時の電力会社との共同研究や NEDO の Super-GM プロジェクトの線材開発研究のなかで行われたものであるが、こうした日本の研究者の動きは米国を刺激することになる。

米国においては LBL や MIT 等がしばらく初歩的な IBAD 法膜成長の検証試験を実施していたが、やがてロス・アラモス国立研が組織的に IBAD 法の開発に乗り出してきた。これがその後今日に至るまで続く RE123 線材の、日米のトップデータ競争の始まりである。1994 年、彼等は我々よりも早く IBAD 法によって金属基板上における $J_c > 10^6 \text{ A/cm}^2$ を達成し、“スーパーテープを発明”等と大々的にマスコミにアナウンスした。日経や朝日の科学欄などでも“米国で新製法 IBAD 法発明”、などと記事が踊っていたが当方の成果のことは全く触れられていなかった。彼らが参入したお陰で IBAD 法が認知されずに消えてしまうことはなくなったと確信したが、マスコミに出る過程で事実が作られていくことが現実にあることを知った。その後、当方も $J_c > 10^6 \text{ A/cm}^2$ を達成するが、1996 年春の MRS 会議から招待状が届き、超電導シンポジウムで“IBAD”と名打ったセッションの冒頭に講演をすることになった。相前後して ISTEK 出向経験のある Dr.J.O.Willis から日本語で大変丁寧なコンタクトがあり、会議後ロス・アラモスに招待され和解の演出となった。以来当地の研究者達とは IBAD 法線材開発の同志として良きライバル関係となった。

一方、1995 年にスタンフォード大の Hammond らが、数 nm 程度の極く薄い領域で鋭く 2 軸配向する MgO を用いた新しい IBAD 中間層膜を報告した。これは YSZ による IBAD 中間層の成膜速度が遅くコスト高であった点を抜本的に改良するものであった。YSZ 等の蛍石系酸化物材料の IBAD による 2 軸配向成長は、膜成長中にイオン衝撃によって選択成長が進むメカニズムに特徴がある。基板表面直上に堆積する際はランダムで無配向に近いが、イオン衝撃を伴う成長につれて基板に垂直に<100>軸が、イオン進行方向に<111>軸が徐々に選択されていく。このため、十分な配

向を得るのに数 100 nm の膜厚を必要とした。

これに対して MgO の場合は結晶が基板表面に堆積を始めた時から鋭く垂直に<100>軸が配向し、このときイオン衝撃方向が<110>軸になるように、面内結晶軸の選択が急速に進む。IBAD 法の実用化にあたっては後者の開発が望ましいことは明らかであった。しかしながら、金属基板と MgO の間に特定のアモルファス層が必要であるほか、MgO 膜を 30 nm 以上に厚くすると配向が崩れてしまうため、中間層として機能させるために複数の酸化物膜を最適配置する必要があるなど、YSZ と違って試料作りのハードルはかなり高く、良質な超電導膜を形成するに至るのに数年の検討期間を要することになる。

続いて、米オークリッジ国立研から新たに $J_c > 10^6$ A/cm² を達成した製法として、Ni 配向基板を用いた有望な方法 “RABiTS (Rolling-Assisted-Bitextured-Substrate)” 法 が発表される。同種の方法として日本で既に試されていた Ag 配向基板を用いる方法に比べると若干の時間を要したものの、Ni 表面上の酸化や膜剥離を防ぐノウハウの確立に成功した結果、適当な酸化物薄膜を中間層としてエピ成長させることによって、銀や IBAD よりも低コストで、超電導膜との界面整合性に優れる基板を構成することに成功した。

しかしながら、基板金属の集合組織を用いる RABiTS 法の場合、結晶粒界の影響が中間層を超えて超電導層に反映され、ゼロ抵抗通電可能な断面積を小さくする可能性に加え、鋭い集合組織を形成可能なのは比較的塑性変形し易い単体金属が多いという問題があった。即ち、基板の強度が低いために、高温酸素雰囲気中で張力に晒される超電導層の成膜時に膜面に歪みを与える可能性があり、このことが線材性能向上の足枷となり続けたものと思われる。この問題が徐々に明らかになるにつれて、RABiTS 法基板の機械強度を増すために W や Cr 等を添加した合金にする、或いはステンレス等の高強度基板とのクラッド構造にする、等の工夫がされるようになり今日に至っている。

アメリカから提案されたこの RABiTS 法と MgO-IBAD 中間層は、高特性が得られ、かつ製造コストが比較的低いことから線材構成の本命構造としてやがて各地で採用されていくことになるが、しばらくの間は上述したような欠点を克服するのに時間を要した。当時これらの基板上に成膜する超電導層を連続的に長尺合成する技術が未完成であり、超電導層長尺化技術が充分に進歩するまでの間、基板に起因する問題を切り分けるために元祖 IBAD である信頼性の高い YSZ 系列中間層が礎の役目を果たすことになる。

ここで超電導層成膜に目を向けて見る。初稿に記したように、RE123 薄膜合成にあたってはいくつかのハードルがあり、金属基板の使用を許す温度である 700 °C 前後での成膜が可能で、その間十分高い酸素雰囲気気を維持し得て、長時間にわたって一定の条件で決まった組成比の多元の蒸着粒子を堆積し続けること、これらのいずれが欠けても線材開発に適したプロセスにはならなかった。これを単純な熱蒸着法やスパッタで実現するのは至難の業であった。気相法として有力な手法として生き残ったのは、米国で Y123 膜に最初に適用されたエキシマレーザを用いた Pulsed-Laser-Deposition(PLD)法と、東北大の平井教授等が先駆的に手掛けた Y,Ba,Cu の MO 原料を用いる Chemical-Vapor-Deposition (CVD) であった。PLD についてはとくに組成の制御性に優れること、高酸素雰囲気が可能で、比較的蒸発レートが早いことが決め手となった。CVD については、重金属の MO 原料が常温で固体のため、組成を保った状態での気化、搬送、堆積が当初は困難であったが、有機溶媒に定組成比で溶かし込んで気化させる方法により解決した。これらの 2 プロセスは当初日本で m 長の長尺線材化が進み、これを米国が追随し、やがて J_c 値、 I_c 値、長さ、等、線材の性能を現す指標において抜きつ抜かれつのシーソーゲームがはじまる。

さらに、超電導層の成膜方法においても、真空装置を要する気相法に変わる低コスト製法がこの時期に米国で誕生する。開発の黎明期にアモルファス状に堆積させた酸化物組成の薄膜を 900 °C のポストアニールによって超電導膜に結晶化させる方法があったことを記したが、その後 BaF₂ を蒸発源として用いてアモルファス膜を形成し、これを水蒸気雰囲気下で加水分解反応させて 700 °C 前

後で超電導体を結晶成長させる方法がオークリッジ、及びブルックヘブン等で開発されつつあった。この温度領域であれば、IBAD や RABiTS 等の線材用基板上への成膜も充分可能であった。この方法はさらに MIT の Cima らによって、トリフルオロ酢酸塩を用いた塗布熱分解法 (TFA-MOD 法) へと発展し、最終的に真空装置を用いずに金属基板上に超電導膜を成長させ得る画期的製法となる。当時はまだフッ酸ガス処理を伴う長尺均一生成条件を得るのが困難で、しばらく短尺基礎検討に留まっていたが、本方法はやがて気相法に続いて有力長尺線材プロセスに発展していく。

このように、Y 系線材開発は 2 軸配向薄膜線材という過去に例のない開発として日本からスタートしたものであったが、その動きは米国を大いに刺激し、同じゴールに向けて有力な低コストプロセスが次々と提案されるに至った。ついには米国エネルギー省が動き、ロスアラモス、オークリッジの 2 つの国立研究所を中心に、それぞれ有力な線材構成方法である IBAD 陣営と RABiTS 陣営に分かれ、Y 系線材をモノにするために国をあげての本格的な開発体制が形成されていったのである。

参考文献:

- 1) Y. Iijima and K. Matsumoto: Supercond. Sci. & Tech, 13 [1], 68 (2000)

[超電導 Web21 トップページ](#)

読者の広場

Q&A

Q：「磁性材料の高機能化・レアアースフリー化研究開発に用いられる超電導マグネットとは？」

A：近年、ますます資源争奪合戦が激しくなっており、特に希土類元素など、産出国が限られ、かつハイテク機器に必須の元素については戦略物資に指定され、政治の道具にまで使用されるなど、供給面での不安が高まっている。

一方、炭酸ガス排出量削減のための自動車の電導化や、各種電気機器の高度化には、モータの高性能化が必須である。モータの高性能化には磁性材料の高性能化が重要な役割を果たすが、これまでその高性能化には稀少物質を用いて行われてきた。しかし、前述の様に希土類元素に代表される稀少物質の供給不安がある中、これらを使用しない高性能磁性材料の開発が喫緊の課題となっている。

従来のネオジム系に代表される永久磁石は、表面最大磁場が 2 テスラ弱であり、通常の磁性材料開発であれば 2 テスラ程度までの磁化特性曲線を測定すれば十分であった。しかし、前記希土類元素の需給逼迫が予測されているため、色々な手法により希土類フリー化も含めた高性能永久磁石の開発が必要とされてきている。その開発手法の 1 つとして、従来よりも高い磁場下での特性を計測することにより磁性材料開発を進めるという動きもある。この要求に応えるため、住友電気工業では高速励減磁マグネットを開発し、日本電磁測器殿に納入した（図 1）。



図 1 開発したマグネット

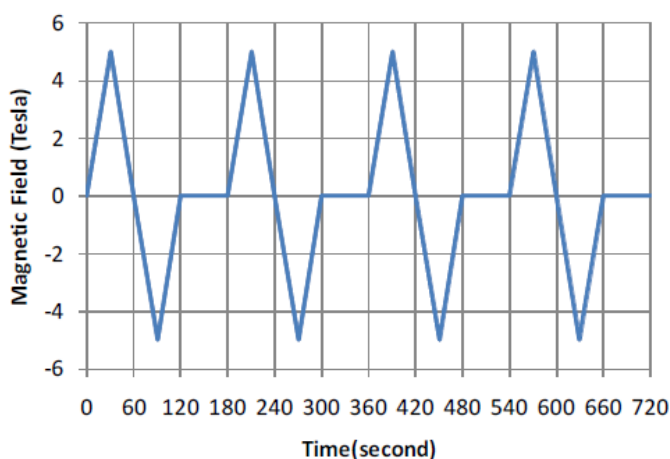


図 2 マグネット励磁パターンの一例

このマグネットの特徴は、素早い特性測定を行い作業効率を上げるため、酸化物超電導体（高温超電導体）の中でもビスマス系超電導線 DI-BSCCO を採用し、 $\pm 5 \text{ T}$ の励減磁を 120 秒にて実施できる点にある（図 2）。室温ボアは 100 mm を確保しており、大きなサンプルでも無理なく計測できる。また今回の使用目的では 120 秒での励減磁時間としたが、より早い励減磁を可能としたり、よ

り大きな室温ボアへの設計変更も可能である。既に別用途であるが、±10 T 近い仕様のマグネット試設計も完了している。

当社の DI-BSCCO 超電導線材は現在も性能向上を続けており、直近では臨界電流値 200 A を越える線材の量産試作も開始している。理論上の性能限界にはまだまだ達しておらず、さらに数倍の性能改善余地もある。その高性能化の一方、世界各国で検討されている超電導ケーブル開発プロジェクトなどへの線材大量供給を通じて低コスト化を鋭意進めている。今後もさらなる高性能化・低コスト化も通じてより安価な高性能マグネットの製品化を図っていく。

回答者：住友電気工業株式会社 超電導・エネルギー技術開発部 応用開発部主幹 岡崎 徹 様

[超電導 Web21 トップページ](#)