

## 掲載内容（サマリー）：

- 超電導関連 2012年9-10月の催し物案内
- 新聞ヘッドライン（7/21-8/18）
- 超電導速報—世界の動き（2012年7月）
- 「応用物理学会超伝導分科会第45回研究会」報告
- 「超電導エネルギー貯蔵研究会」報告
- 「電子情報通信学会超伝導エレクトロニクス研究会」報告
- 隔月連載記事—超電導磁石開発のこれまでとこれから（その4）
- 隔月連載記事—やさしい人工ピンのおはなし（その5）
- 読者の広場(Q&A)—「超電導体でイオン検出質量分析装置に应用期待」という新聞記事がありました。超電導体を活用することでどのように検出特性を高めることが出来たのでしょうか。また、どういう応用が期待されるのでしょうか？」

### 超電導 Web21

〈発行者〉

公益財団法人 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) 3536-5717

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 ‘12/9月－10月の催し物案内

8/31-9/1

低温工学・超電導学会  
東北・北海道支部／第17回超伝導・低温若手セミナー  
場所：新潟大学・新潟駅前キャンパスときめいと  
問合せ：<http://csj.or.jp/>

9/11-14

電子情報通信学会  
ソサイエティ大会  
場所：富山大学 五福キャンパス  
問合せ：[http://www.toyoag.co.jp/ieice/S\\_top/s\\_top.html](http://www.toyoag.co.jp/ieice/S_top/s_top.html)

9/11-14

応用物理学会  
2012年秋季 第73回 応用物理学会学術講演会  
場所：愛媛大学・松山大学  
問合せ：<http://www.jsap.or.jp/index.html>

9/11-14

12th Cryogenics 2012  
場所：Dresden, Germany  
問合せ：<http://www.icaris.cz/conf/Cryogenics2012>

9/17

低温工学・超電導学会 九州・西日本支部  
2012年度 若手セミナー・支部研究成果発表会 「低温物性・超電導特性の測定法」  
場所：九州地区九重共同研修所  
問合せ：[http://www.csj.or.jp/kyushu/2012/Jr\\_Seminor\\_0917.pdf](http://www.csj.or.jp/kyushu/2012/Jr_Seminor_0917.pdf)

9/17-19

日本金属学会  
2012年秋季大会  
場所：愛媛大学  
問合せ：[http://jim.or.jp/MEETINGS/2012\\_atmn/2012\\_autumn.html](http://jim.or.jp/MEETINGS/2012_atmn/2012_autumn.html)

9/18-21

日本物理学会  
2012年秋季大会  
場所：横浜国立大学  
問合せ：<http://jps2012au.ynu.ac.jp/index/>

10/7-12

Applied Superconductivity Conference (ASC) 2012

場所：Portland, U.S.A.

問合せ：<http://www.ascinc.org/>

10/25

電子情報通信学会

超伝導エレクトロニクス研究会「超伝導エレクトロニクス基盤技術及び一般」

場所：機械振興会館

問合せ：<http://www.ieice.org/es/sce/jpn/>

(編集局)

[超電導 Web21 トップページ](#)

## 新聞ヘッドライン (7/21-8/18)

- 北九州市、進むスマートグリッド 官民で需給一元管理、料金変動も実験 Fuji Sankei Business i. 7/23
- 超電導送電、実用化へ一歩 電力不足に効果 NTT系など計画 日本経済新聞 7/24
- 海上風力発電機でサムスン重工 世界最大の設置船完成 日経産業新聞 7/26
- 米鉦山、レアアース生産 10月再開 中国に押され閉山→新鉦床発見 朝日新聞 7/26
- 「酒で超電導」の仕組み 東京読売新聞 7/26
- 産学官で再生可能エネ推進 県が研究会 福島大や350社・団体＝福島 東京読売新聞 7/29
- 風力発電が気象を変える 電気新聞 7/30
- 脱レアメタル加速 高性能磁石や次世代電池 国が戦略拠点指定 10年間支援 日本経済新聞 7/31
- 超電導電力貯蔵に脚光 普及へ目標価格設定を研究発表会開催 電気新聞 8/01
- レアメタル回収 再資源化促進法が成立 日本経済新聞夕刊 8/03
- 鉄テルル化合物が酒で煮ると超伝導物質に変化～誘発メカニズムを発見 科学新聞 8/03
- 鉄：酒に浸し超電導状態に 毎日新聞 8/07
- 風力発電の発電量、地形が左右＝九大が模擬実験で実証 日刊工業新聞 8/07
- みらいテクノ(5)「超電導物質」探索の旅―酒の神が微笑んだ 日刊工業新聞 8/08
- みらいテクノ(5)「超電導物質」探索の旅―発見から100年で3000種に 日刊工業新聞 8/08
- 超電導、米雑誌が表彰 高磁場対応を評価／古河電工子会社 電気新聞 8/08
- 「酒で超電導」の仕組み解明 物質・材料研究機構と慶応大 朝日新聞 8/09
- 理研など、レアアース系の磁性体を絶対温度0.21度で超電導 日刊工業新聞 8/09
- 日本を救うか海底レアアース 日経産業新聞 8/13
- 古河電工、超電導子会社が米誌技術百選に 日経産業新聞 8/14
- 超電導蓄電 国が補助 太陽光発電量 平準化 2015年度から実証実験＝山梨 東京読売新聞 8/14

[超電導 Web21 トップページ](#)

## 超電導速報—世界の動き (2012年7月)

公益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  
特別研究員 山田 穰



★ 記事のニュース発信地、関連地

### ▶一般産業応用



#### 電気推進船の線材を受注

AMSC (2012年7月17日)

電気推進船の革新的な設計によって電力の最適化を図り、環境に優しい船舶を目指すヨーロッパの POSE<sup>2</sup>IDON (Power Optimised Ship for Environment with Electric Innovation Designs Onboard) プロジェクトにおいて、AMSC 社が高温超電導 (HTS) 線材のプロバイダーとして選ばれた。欧州連合 (EU) から 2000 万ユーロの資金提供で成り立つこのプロジェクトの目的は、HTS 回転機や流通網を利用してヨーロッパ商船艦隊の効率改善や環境破壊の軽減対策を提案することにある。プロジェクトの一環として、2013 年末までに同社の HTS 線材を用いた大規模なモーターと発電機のデモ装置が製作され、実験が行われる予定である。POSE<sup>2</sup>IDON プロジェクトのコーディネーターである Chris Hodge 氏は、「我々は、海運業界で超電導体がかなり有望であることを見出している。今回のプロジェクトで開発された技術により、二酸化炭素排出量が削減されると同時に、貨物スペースの利用率並びに電気推進船の効率が向上する。弊社は HTS 回転機の草分け的存在であり、次世代超電導線材の世界有数の生産業者である。それゆえ、弊社が POSE<sup>2</sup>IDON プロジェクトの貢献者となるのは論理にかなっている。」と述べた。HTS 線材の電力密度の利点により、同等の定格電力

を使用しても、回転機のサイズと重量を従来の機器の半分以下に減少することができる。同社は長年、36.5 MW の HTS 船舶推進モーターの設計、構築、そして実証試験など、さまざまな超電導機器の開発に携わってきた。同社の社長兼最高経営責任者である Daniel. P. McGahn 氏は、「海運業では、超電導体は、モーター、発電機、電力ケーブル、そして保護システムなど、様々なシステムで適用できる。すなわち、貴重な貨物スペースの増大や、船舶防衛の強化、そしてエネルギー消費量や燃料費、温室効果ガス排出の削減などが実現可能となる。高温超電導が今後の技術変革に大きな影響力があることを認識し、また、POSE<sup>2</sup>IDON プロジェクトのもと、これらソリューションの能力を実証しようとする EU に拍手を送る。」と述べた。

(出典)

Source: "AMSC Superconductor Wire Selected for European Maritime Project"

AMSC press release (July 17, 2012)

URL:

[http://files.shareholder.com/downloads/AMSC/1729988020x0x583343/10e8eb24-8c66-4ca9-8b24-dd7242dfc6b3/AMSC\\_News\\_2012\\_7\\_17\\_Commercial.pdf](http://files.shareholder.com/downloads/AMSC/1729988020x0x583343/10e8eb24-8c66-4ca9-8b24-dd7242dfc6b3/AMSC_News_2012_7_17_Commercial.pdf)

Contact: Jason Fredette, Email: [jason.fredette@amsc.com](mailto:jason.fredette@amsc.com)

## ▶エレクトロニクス



Caltech

### 新しい超電導増幅器を開発

#### California Institute of Technology (2012年7月13日)

California 工科大学 (Caltech) と NASA ジェット推進研究所の研究者たちは、電気信号を増幅するために新しいパラメトリック増幅器を開発した。この新しい機器は、星や銀河そしてブラックホールの研究から量子世界の探索や量子コンピューターの開発に至るまで、様々な分野にて適用できる可能性を秘めている。この機器の重要な特徴の 1 つは超電導体を用いたことである。超電導の窒化チタン (TiN) と窒化ニオブチタン (NbTiN) を使用することで、増幅器のポンプ信号により弱い信号を増幅することができる。この増幅器は、比較的感度の高い他の増幅器と比べても、その 10 倍以上広い周波数範囲で操作が可能であり、歪みのない強力な信号を増幅することができ、避けられないノイズを最小限にとどめることができる。今後、設計のさらなる改善によってこのノイズは究極的な最小値に低減されるはずである。また、数ギガヘルツからテラヘルツまでの周波数範囲で作動する別のタイプの増幅器を設計することもできる。現時点で、グループは、Caltech の Owens Valley 電波観測所で使用されるデバイスを作製している。ここで本装置は、ラジオ波と赤外波長間の信号増幅に使用され、これによって天文学者は、ビッグバンの残光ともいわれる宇宙マイクロ波背景放射を研究できるようになる。また、機器が高感度であることやノイズの導入が最小限であることを考えれば、この増幅器は古典物理学と量子力学の境界で作動する小さな機械装置の動作を測定するなど、量子現象の研究に適用できるものである。この増幅器の設計については、最近のジャーナル *Nature Physics* に掲載されている。

(出典)

Source: "Getting amped"

California Institute of Technology press release (July 13, 2012)

URL: [http://media.caltech.edu/press\\_releases/13533](http://media.caltech.edu/press_releases/13533)

[http://www.eurekalert.org/pub\\_releases/2012-07/ciot-ga071312.php](http://www.eurekalert.org/pub_releases/2012-07/ciot-ga071312.php)

Contact: Deborah Williams-Hedges debwms@caltech.edu

▶基礎



HARVARD  
UNIVERSITY

擬ギャップ相と高温超電導

Harvard University (2012年7月27日)

$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$  (bisco)超電導体での擬ギャップ相を研究するHarvard大学の研究チームは、酸素の欠乏、正確には物質の結晶構造内で酸素の位置が、擬ギャップ状態になるのに強く関連していることを発見した。この発見は、研究者が今後、より高温で超電導体になり得る新しい物質を設計していく上で役立つはずである。物理学の准教授Jenny Hoffman氏は、「この発見で重要なのは、我々がこの局所的な擬ギャップを制御しているものを化学的手段で操作できると確信していることである。目標は、我々が理解したと言える段階まで銅系超電導体を探究し、その後、次の段階であるより高温の超電導体の実現に辿り着くことである。我々はいつか室温超電導体を実現できるというのが私のかかなり楽観的な考えである。しかし、まだ恐らく数十年先のことであると思われる。」と述べた。研究者たちが擬ギャップの理解に興味を示す背景には、二つの理由がある。一つは、擬ギャップはなんらかの方法でその発現を阻止されている超電導現象を実際に反映しているものかもしれないということである。そしてもう一つは、擬ギャップは、実際に超電導を発現するために"敗北"しなければならない競合相であるかもしれないということである。同研究チームは、広いエネルギー範囲において物質中にある酸素ドーパントをより良く観察できるように走査型トンネル顕微鏡を使用した。顕微鏡の先端をサンプルから数オングストローム離れたところに設置し、その先端とサンプルの間に流れる電流を測定することによって、物質の中にある個々の原子の像を映し出すことに成功した。挑戦的とも言えるこの技法を使って、研究者たちは物質の上部3層にある酸素ドーパントの分布図を作成することができたのである。その分布図を擬ギャップの局部的強度を示すデータと比較することにより、研究者たちは、擬ギャップは格子間酸素原子と相関関係があるのではなく、銅原子に隣接する酸素原子の除去に起因する物質内の欠陥と相関しているであろうことを発見した。この実験では、格子間酸素原子と空孔の両方の分析が同時に可能であることがはじめて証明された。これにより、擬ギャップに影響を与えている化学的特性を明らかにすることができるのである。過去15年間追求しつづけて来た研究成果である。同研究チームの研究成果は*Science*で報告されている。

(出典)

Source: "Stages of Superconductivity – Researchers' insight on 'pseudogap' an important advance"

By Peter Reuell Harvard Staff Writer Friday, July 27, 2012

Harvard University press release (July 27, 2012)

URL: <http://news.harvard.edu/gazette/story/2012/07/stages-of-superconductivity/>

Web Content Editor: Ryan Mulcahy ryan\_mulcahy@harvard.edu

▶経営・決算



**Resonant 社への知財投資**

**Superconductor Technologies Inc. (2012年7月12日)**

Superconductor Technologies社(STI)は、Resonant LLCへの少数株主として、経験豊富な経営幹部の指導力並びに技術的専門知識の提供に加え、Reconfigurable Resonance™ (RcR) 技術関連の14個の特許を提供して貢献した。Resonant社は、RcRがモバイル通信製品業界で商業化されることに期待を寄せている。これまでも発表されているが、Resonant社は市場投入に向けたRcR技術を開発するため、モバイル通信製品で世界トップクラスの業者と製品開発の契約を締結している。STI社とは別の新しい会社として、Resonant社はその初期の開発を自己資金で取り組み、開発計画を完了するのに必要な追加資金は後に調達する見通しである。STI社の社長兼最高経営責任者であるJeff Quiram氏は、「以前にも述べたように、STI社には長年培ってきた優れた知的財産ポートフォリオがある。これらの資産によって、さらに前途有望な技術を育て上げ、会社の資本や2G HTS線材の技術的資源に頼ることなく、株主への実質的な利益還元の実現が図れるものと確信している。Resonant社への知財投資は、STI社が商業的ビジネスチャンスを広げることができる絶好の例と言える。我々は、引き続き2G HTS線材プロジェクトに積極的に注力する一方、Resonant社への僅かな投資で開発したRcR 技術を活用することによって、将来のベンチャー資金提供の義務なくモバイル通信機器市場に参入できる。」と述べた。Resonant社の共同創設者であるTerry Lingren氏は、「次世代スマートフォンのモバイルデータの需要が急速に拡大し、デバイスメーカーが製造に追いつくのに苦労している。急速に成長しているモバイル通信業界の世界的なマーケットリーダーとの開発契約を有効に活用すれば、RcR特許取得済みのソリューション並びに高度な専門技術を備えた研究チームの手により、これらの問題に対処できる。Resonant社は、製品を市場投入するために必要な外部からの資金調達を模索すると同時に、主要なターゲット顧客の需要を満たすため直ちに開発活動を開始する所存である。」と付け加えた。

(出典)

Source: "Superconductor Technologies Inc. Successfully Leverages Deep Intellectual Property Portfolio"

Superconductor Technologies Inc. press release (July 12, 2012)

URL:

<http://phx.corporate-ir.net/staging/phoenix.zhtml?c=70847&p=irol-newsArticle&ID=1714098&highlight>

Contacts: STI Investor Relations, invest@suptech.com, Cathy Mattison or Kirsten Chapman of LHA;

Resonant LLC, Terry Lingren, TLingren@ResonantWireless.com



**決算情報**

**Bruker Corporation (2012年7月31日)**

Bruker社は、2012年6月30日締め2012年度第2四半期の決算報告を発表した。今四半期の収益は、前年同期の4.012億ドルに対して4.9%増の総額4.207億ドルとなった。過去12ヶ月に行われた買収による影響を除外した通貨調整後収益のオーガニック成長率\*は、前年同期比10.4%であった。また2012年6月30日に終了した6ヶ月間の収益は、前年同期の7.582億ドルに対して9.0%増の8.263億ドルとなった。2012年度上半期における収益のオーガニック成長率は、前年同期比12.0%であった。

Bruker Energy & Supercon Technologies 社 (BEST) に関しては、第 2 四半期の収益は、前年同期の 2810 万ドルに対して 7.5 %減の総額 2600 万ドルとなった。この数字は、前年同期比 3.2 %のオーガニック成長率に相当する。さらに 2012 年 6 月 30 日に終了した 6 ヶ月間の収益は、前年同期の 5210 万ドルに対して 7.5 %増の 5600 万ドルとなった。この数字は、前年同期比 15.7 %のオーガニック成長率に相当する。

Bruker 社の社長兼最高経営責任者である Frank Laukien 氏は、「特にヨーロッパにおいて、弊社の主要エンドマーケットの一部で需要に軟化がみられたものの、我々が 2012 年度上半期にかけて強力な収益のオーガニック成長率を達成できたことは実に喜ばしいことである。また弊社の受注残高は、第 2 四半期末で非常に健全な状態であった。一方、2012 年度第 2 四半期の収益性については失望させられる内容であった。不十分な期末在庫評価や粗利益率の圧力、そしてある事業部門において支出が増加するなど、当社の収益性に悪影響を及ぼした。」と述べた。同社は現在、コスト構造の見直しや新たな戦略実践の目標を掲げるとともに、2012 年度下半期の事業計画を再審査している。その結果、同社がこれまでに公表した 2012 年度の財務目標について通年の収益目標を 17 億ドル～17.5 億ドルに下方修正している。

(出典)

Source: "Bruker Corporation Reports Financial Results for the Second Quarter and First Half of 2012"

Bruker Corporation press release (July 31, 2012)

URL:

<http://phx.corporate-ir.net/phoenix.zhtml?c=121496&p=irol-newsArticle&ID=1720179&highlight>

Contact: Stacey Desrochers, [stacey.desrochers@bruker.com](mailto:stacey.desrochers@bruker.com)

\*編注) オーガニックグロース (有機的成長) とは。

オーガニックグロースは自立的成長で、本来の会社の本業 (商品やサービス、および人材育成も) をそのまま発展させて売上を伸ばす企業戦略です。組織が有機的に増殖して行く成長ということです。京セラそして JAL 再生で使われた稲盛さんのアメーバ戦略も、組織は生き物であるとのとらえ方による同様なニュアンスの言葉です。

対立の言葉として、M&A (吸収合併) グロースがあります。自社にない製品やサービスを買って成長する戦略です。ビジネスのグローバル化、スピード化、また、制度の充実で、こちらの戦略が多用されているのはここ数年、周知のとおりです。当然、両者のドライバーは大きく異なり、最近のグローバル企業では、経営計画立案時に両社を明確に分けて、議論しています。

超電導でも国際的な企業でこうしたワードが意識して使われているのは、短期的経営にありがちな数字的成長率あわせを排除し、実質的な本業での経営努力を見てもらおうとの意識の高まりでしょう。上記 Web サイト上にはそうした記述が見えます。

[超電導 Web21 トップページ](#)

## 「応用物理学会超伝導分科会第 45 回研究会」報告

公益財団法人 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

「多面的に広がる超伝導技術の活用」～宇宙から地中まで～ と題された超伝導分科会研究会が 7 月 5 日、ISTEC 大会議室において約 40 名の参加者を集めて開催された。超伝導現象発見から一世紀、銅酸化物高温超伝導材料が発見されて四半世紀が経過した現在、超伝導の活用はいろいろな分野で着実な広がりを見せている。今回の研究会では、高磁場応用による材料創成、量子情報、資源探査、地球環境観測といった応用に焦点を当てたプログラムが企画された。

まず、東京大学大学院の田之倉氏は、強磁場利用によるタンパク質結晶高品質化の試みについて講演した。X 線結晶構造解析などによるタンパク質の立体構造の決定は、生命現象の解明や医薬品開発にとって非常に重要である。高磁場中でのタンパク質結晶作製では、結晶核形成の抑制、結晶の磁場配向、モザイク性の低下などの効果が期待できるが、東京大学グループは、7-13 T の高磁場中で 16 種類のサンプルの結晶化を試み、数種類のタンパク質において、結晶のクラスター化の抑制、大型化、磁場配向、最高分解能の向上、モザイク性の低下が実際に観測され、結晶品質の改善が確認されているとのことであった。一方、京都大学の木村氏は、動的磁場を利用した微結晶の 3 次元配向技術について講演した。反磁性や常磁性磁化率の結晶方位による異方性のある無機物、有機物、高分子、セラミックス、金属など非磁性材料一般について、楕円磁場などの動的磁場を利用することにより、微結晶を 3 次元配向させることができる。例えば、紫外線硬化性樹脂中に微結晶を分散させ、3 次元磁場配向させた後に硬化することで、構造解析に使えるような擬単結晶試料を得ることも可能である。数 T 程度の磁場を用いる場合、100 nm から 100 μm サイズの粒子に対し磁場配向は特に有効である。木村氏は、ショ糖や無機物の  $\text{LiCoPO}_4$ 、リゾチームなどに対する実験結果を紹介した。

産総研の川畑氏は、量子コンピューティング研究開発の歴史と現状の概要について紹介すると共に、超伝導を用いた量子コンピューティング研究の最近の進展を紹介した。超伝導量子ビットは現状でも 3 ビット集積が最高であるが、高い制御性・スケール性をもつ超電導量子ビットと長いコヒーレンス時間をもつダイヤモンド NV 中心という、いわば CPU とメモリ間の情報転送の実証などの新しい試みが出てきている。また、高温動作の量子ビットが形成できる可能性のある Bi 系固有接合における巨視的量子トンネル現象の研究動向を紹介した。

ISTEC の波頭氏は、JOGMEC の委託により開発している次世代の金属資源探査用 SQUID-TEM 磁力計の開発について講演した。100-200 m 角の送信ループに通電するパルス電流による急峻な磁場変化に追従できる動作安定性、RF ノイズ耐性と誘導電流抑制を両立させた液体窒素容器構造、携行性などの点で従来機に比べ格段に優れた性能が国内の野外試験で実証され、地下 1000 m 以上の探査性能が期待されている。

情報通信研究機構の菊池氏は、2009 年 9 月に打ち上げられ、宇宙ステーションに取り付けられた SIS ミキサを用いた地球大気観測システム SMILES (超伝導サブミリ波リム放射サウンダ) の開発と観測結果について紹介した。2010 年 6 月に起こった冷凍機の不具合から残念ながら定常運用は停止されたが、オゾン減少とオゾン破壊物質の同時測定、BrO のような pptv オーダーの超微量分子の変化解明などの成果が得られ、解析が進んでいるとのことであった。

[超電導 Web21 トップページ](#)

## 「超電導エネルギー貯蔵研究会」報告

公益財団法人 国際超電導産業技術研究センター  
超電導工学研究所  
特別研究員 山田 穰

平成 24 年 7 月 13 日に第 24 回超電導電力貯蔵研究発表会が東海大学校友会館霞ヶ関ビルで開催された。当日は、平成 23 年度の研究報告書が配布され、その説明と下記講演が行われた。

### 技術研究発表

- (1) SMES 研究会における平成 23 年度の研究成果  
秋田 調 (SMES 研究会技術委員長) 電力中央研究所 企画グループ
- (2) メガソーラーなど自然エネルギーの導入状況  
渡久地 政快 (SMES 研究会技術委員) 沖縄電力㈱
- (3) 自然エネルギー有効利用のための先進超電導電力変換システム用 SMES の概要  
新富 孝和 (秋田氏) (SMES 研究会常務理事 技術委員) 日本大学
- (4) SMES 研究開発動向と再生可能エネルギーシステムにおける可能性  
野村 新一 (SMES 研究会技術委員) 明治大学

特別講演 「超電導を巡る周囲情勢の変化と技術への期待」  
北澤 宏一 独立行政法人科学技術振興機構顧問

主な内容は以下のとおりであった。秋田氏から過去 3 回開催した当研究会の内容と本会研究報告書の概要が説明された (上記 1 と 3 の内容)。特に、“自然エネルギー有効利用のための先進超電導電力変換システム用 SMES” は、今話題の太陽光、風力発電と SMES、液体水素を使い、効率的な電力供給体制を構築しようとするもので、昨今の電力需給情勢から非常に興味深い。このシステムでは 20 K の液体水素を使うため、SMES には臨界温度が 39 K の  $MgB_2$  線材を使っている。利点としては、材料が安価、km 級の長尺化がすでに済んでいることがある。

沖縄電力の渡久地氏からは、宮古島マイクログリッド実証研究などの報告があった。沖縄では離島が多く化石燃料を使っているために  $CO_2$  排出量が多い。2010 年度実績で 935 g/kwh であるが、これは全国平均 413 g/kwh の倍以上であり、再生エネルギー化を進める意義は高い。宮古島では、4 MW の太陽光発電設備、4 MW の NAS 電離設備があり、メガソーラ実証研究を進めている (風力も 2 MWx2 機を H25 年に運転開始予定。また、海底ケーブルもすでに 210 km も設置されている)。NAS 電池を入れたシステムで、太陽光発電の系統への影響、出力変動抑制、周波数変動抑制効果を調べているが、いずれも十分な抑制効果が見られている。

明治大学の野村氏からは、SMES の開発経緯、歴史と見通しが紹介された。SMES 開発について長年携わってきたが、初期に提示されていた大型 SMES が、2010 年頃には実用化になっているはずのところ、未だに実現していない。そこに何か根本的な原因があるのではないかとのコメントが印象的であった。大型開発になるほど、より差し迫った市場からのニーズがないと実用化は難しいと感じた。

最後に、北澤先生からは東日本大震災についての講演があった。その後の日本においては、周知のように発電方式、エネルギー需給のあり方など問われているが、先生は東大時代から超電導に携

われており、また、震災後の民間事故調査委員会委員長 (<http://rebuildjpn.org/> RJIF 財団法人日本再建イニシアティブ) の立場から、超電導ケーブル、SMES など超電導技術がこうした震災後のエネルギー問題解決への大きな糸口になることを期待されていた。また、研究開発と実際の役にたつ技術の開発との乖離、困難さにも反省させられたとのコメントには、大いに参加者一同感じいったしだいである。

[超電導 Web21 トップページ](#)

## 「電子情報通信学会超伝導エレクトロニクス研究会」報告

公益財団法人 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

7月19日に機械振興会館（港区）において電子情報通信学会超伝導エレクトロニクス研究会が開催された。

横国大の向山等は、断熱型磁束量子パラメトロン（QFP）回路用直流駆動交流電源の設計と測定結果について報告した。断熱型 QFP 回路は、低消費電力で知られる単一磁束量子（SFQ）回路よりさらに 3 桁低い消費電力が期待できる究極の省電力回路である。一方、この回路には交流電流を供給する必要があり、その供給方法が問題となっていた。向山等は、ジョセフソン接合を用いた直流駆動の弛緩発信回路と共振回路を用いて、オンチップで 4.4 GHz の交流を発生することに成功した。また、この回路 1 個で約 1,200 ゲートの断熱型 QFP へ交流電流を供給できることが示された。

横国大の大坪等は、高速領域における SFQ 回路動作マージン低下の原因の一つにクロックとデータ間の伝搬速度の違いがあることを明らかにし、データ伝搬速度のバイアス電流依存性をクロック伝搬速度と同程度にすることで、マージンを増加できることをシミュレーションと実験両面で示した。

SFQ 演算回路では、SFQ 回路の高速性を活かして回路規模を低減する方法として、データを 1 ビットずつ直列に処理するビットシリアルという方法が一般に用いられている。しかし、この方法は計算のスループットが低下するという欠点があるため、京大高木研究室ではデータをある程度まとめて処理するビットスライスという方法を検討している。大桃等は、浮動小数点加算器についてビットスライスを導入した場合の検討結果を報告した。加算器ではビットスライス幅に比例してスループットが低減でき、しかも回路規模の増加はその効果に比べるとずっと小さいことが示された。一方、成瀬等が報告した浮動小数点乗算器では、スライス幅を 2 とした場合スループットは 2 倍になるが、回路面積が 3 倍になることが報告された。今回レイアウトした回路は最適化が十分なされておらず、これにより回路面積が増大した可能性があることが述べられた。

低電圧駆動 SFQ 回路は、SFQ 回路の消費電力をさらに低減することが可能な回路である。名大の滝波等は、低電圧駆動 SFQ 回路における受動伝送線路（PTL）配線の高速試験でのバイアスマージン、上限動作周波数測定において、タイミングエラーが現れたことを報告した。この原因は、低電圧領域での電流回り込みであることが、シミュレーションより示唆された。

岡山大のサーリ等は、高温超電導 SQUID を用いた小型サンプル振動方式磁化率計感度のサンプル形状依存性を報告した。磁化率計は試料に磁場を印加するため、SQUID とピックアップコイルを離して設置する必要がある。サンプル形状とピックアップコイル配置の最適値を実験とシミュレーション両面から調べ、 $1 \times 10^{-7}$  emu の感度を得ることができ、水の弱い反磁性を測定することに成功した。

SFQ 回路を用いたデジタル SQUID は、アナログ SQUID に比べて高いスループットや広ダイナミックレンジ、多チャンネル化に有利という利点がある。一方、磁束分解能が磁束量子  $\Phi_0$  で制限される、同期式動作の場合スループット上限がクロック周波数となるという問題点があった。横国大の津賀等は、オンチップフィードバックと非同期方式によりこれらの問題点を解決するデジタル SQUID を提案し、実験によりその効果を示した。横国大の青木等は、SFQ アップ・ダウンカウンタを用いた超電導検出器からの出力多重化回路の報告を行った。この回路は時分割多重化（TDM）

とコード分割多重化 (CDM) を行うことができ、32 チャンネルのデジタル SQUID の TDM を行った場合室温と低温を結ぶ配線は 11 本、より高いスルーレートの CDM の場合でも 26 本に抑制できる。実験では、2 チャンネルのデジタル SQUID の TDM 多重化を行い、出力信号から入力波形を正確に再構築できることが示された。

今回の発表で使用されたデバイスは、高温、低温とも全て超電導工学研究所で作製されたものである。超電導工学研究所のデバイスが我が国の超電導エレクトロニクス研究を支える大きな力になっていることが示されていた。

[超電導 Web21 トップページ](#)

【隔月連載記事】

超電導マグネット開発のこれまでとこれから (その4)

独立行政法人 理化学研究所  
生命分子システム基盤研究領域 NMR 装置技術研究チーム  
施設長 前田秀明

これまで超電導マグネットの開発の歴史を簡単に述べてきました。ここからは、最近市販化が始まり、マグネット化が進みつつある高温超電導 REBCO のマグネット技術を述べます。

筆者の属する理化学研究所では、2009年に REBCO 線材が市販化された直後からマグネット開発に取り組み、多くの小型マグネットを製作してきました。この経験によれば、REBCO マグネットは多くの面で、低温超電導 (LTS) マグネットとは異なる振る舞いを示します。それ故、REBCO マグネットについては、LTS マグネットとは異なる独自のマグネット技術を構築する必要があると感じています。ここでは、筆者が日頃感じている REBCO マグネットの技術課題と対処法、今後の方向性について述べてみます。

1. REBCO 系高温超電導のマグネット技術

LTS では既に超電導マグネット技術が確立しています。代表的な教科書である M. N. Wilson の "Superconducting magnets"<sup>1)</sup> や Y. Iwasa の "Case studies in superconducting magnet"<sup>2)</sup> などを精読すれば、必要なマグネット技術が取得できます。LTS マグネットでは、表 1 の様に、安定化、交流ロス、クエンチ保護、超電導接続などが技術課題です。一方、REBCO マグネットでは、技術課題が、まだ十分に抽出されていません。漠然と LTS マグネットのアナロジーでよいのではないかと考えていることが多いと思います。本当に REBCO マグネットにも、LTS の技術体系がそのまま適用できるのでしょうか？ 私達のラボでは、小型の REBCO マグネット (数 cm 位の小さなもの) を数多く製作し、評価試験を通じて知見を積み上げてきました。その結果、REBCO マグネットの技術課題は、LTS マグネットとは大きく異なることが分かってきました。結果をまとめて表 1 に示します。表の上部の 4 つの技術課題について、簡単に説明してみます。

表 1 超電導マグネット技術

LTS マグネット	REBCO マグネット
<ul style="list-style-type: none"> <li>安定化</li> <li>クエンチ保護</li> <li>交流ロス</li> <li>超伝導接続</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>マグネットの特性劣化</li> <li>熱暴走とマグネット保護</li> <li>遮蔽電流磁場と交流ロス</li> <li>超伝導接続</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>構造解析</li> <li>電磁解析</li> <li>冷却</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>構造解析</li> <li>電磁解析</li> <li>冷却</li> </ul>

(1) マグネットの特性劣化

LTS マグネットではクエンチへの安定化が最大の課題です。クエンチは、主として「電磁力による線材の動き」などの機械的擾乱 (入熱) により生じます。REBCO マグネットは温度マージンが

大きいので、「電磁力による線材の動き」の様な小さな入熱ではクエンチに至ることはありません。

一方、REBCO マグネットでは、機械的要因による特性劣化が大きな課題です。REBCO 線材は、図 1 の様にハステロイ、バッファ層、REBCO 層、銅安定化材などからなる多層構造であるために、機械的強度が強い異方性を示します<sup>3)</sup>。例えば、長手方向（軸方向）の引っ張り強度はハステロイのために $\sim 1$  GPa と非常に高いのですが、横方向には強度が  $1/10 \sim 1/100$  (10-100 MPa) に低下します。この方向の力により多層構造が剥離するからです。REBCO 線材は、図 1 の様に、銅安定化材とハステロイが、「REBCO 層+バッファ層」という脆い接着剤で接着された構成として考えることができます。接着面の端部にこじ開け力（劈開力 (cleavage) や引きはがし力 (peel)、図 1) を加えると、端部に横引っ張り応力が集中して少ない力で部分剥離します。剥離と共に応力集中部が横に移動し、部分剥離が進行します。この結果、驚くほど低い応力（たとえば 1 MPa !）で接着面全体が剥離します<sup>4)</sup>。剥離の進展と共に、REBCO 層が徐々に破壊されるので超電導特性が劣化してしまいます。劣化部は数 cm 長しかないのが普通ですが、これが常伝導電圧を発生しマグネット特性を劣化させます。

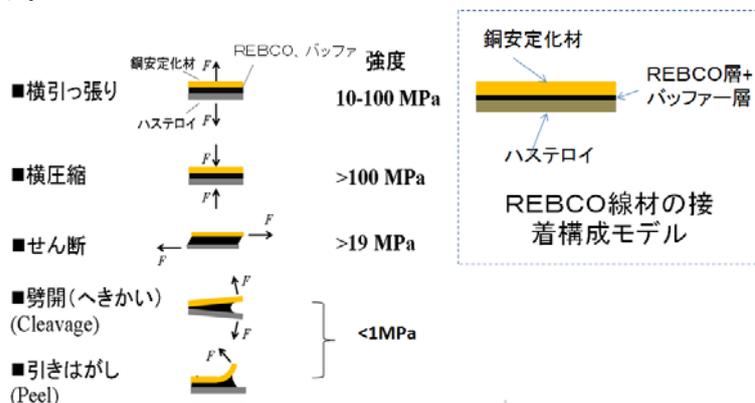


図 1 YBCO コート線材の接着構成も出ると基本応用モード

このように、REBCO 線材の機械的な強度の異方性は 3 桁の幅に及ぶので、有利な方向に力が加わる場合には極めて強靱ですが、不利な方向に力が加わると非常に脆い性質を示します。従って、マグネットの製造・冷却や通電の過程で、この種の不利な方向に力が加わらないようにすることが非常に重要です。

## (2) 熱暴走とマグネット保護

剥離による特性劣化がまったくない健全な REBCO マグネットでは、不可逆的な熱暴走（クエンチ）は生じません。しかし、機械的な要因で線材に部分的な剥離が生じると、通電中に劣化部に発熱が生じ周囲の線材を加熱します（図 2）。電流が低い間は、温度は電流に対して可逆的でコントロール可能ですが、ある限界電流を超えると不可逆的に温度が急上昇して熱暴走に至ります<sup>5)</sup>。REBCO マグネットで熱暴走が生じるのは、 $n$  値が大きく、線材温度が current sharing 温度を超えると、臨界電流密度と温度上昇の間に強いフィード

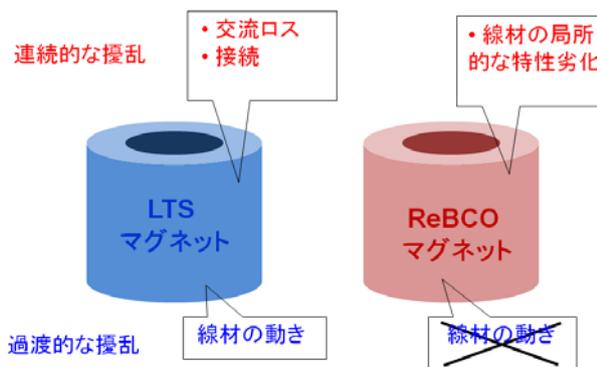


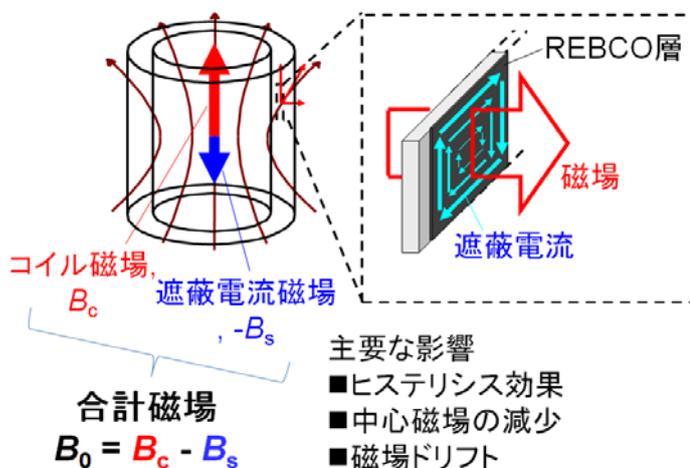
図 2 熱暴走要因の比較

バックが生じるからです。

REBCO マグネットの最大の利点は、線材の高強度を利用したマグネットの高電流密度化にあります。ところが、機械的な要因でマグネットの一部が特性劣化すると、マグネット運転中に熱暴走が生じます。温度上昇は高電流密度ほど急激ですから、高電流密度運転中に熱暴走すると瞬間的にREBCO マグネットが焼損することになります。NIMSの松本氏らが、この種の熱暴走によるマグネット損傷を報告しています<sup>6)</sup>。これまでREBCO マグネットの熱暴走は注目されてきませんでした。安全な高電流密度運転のためには、熱暴走のメカニズムの解明と、温度上昇の低減手法の開発が非常に重要です。

### (3) 遮蔽電流磁場と交流ロス

REBCO マグネットでは、数 mm 幅の平坦な超電導層が径方向磁場に対向しているため、REBCO 層に磁場を遮蔽する遮蔽電流が生じます<sup>7), 8)</sup>。遮蔽電流は径方向磁場が大きいマグネットの両端部に集中し、マグネット中心に逆向きの磁場を作ります(図3)。LTS マグネットでも遮蔽電流磁場が生じますが<sup>9)</sup>、マグネット軸方向磁場を遮蔽するので、遮蔽電流磁場はマグネット磁場と同じ方向を向きます。LTS 線材では超電導フィラメントが数十マイクロンですが、REBCO マグネットではREBCO 層の幅が数 mm あるので、遮蔽電流磁場は LTS マグネットより桁数大きくなります。この遮蔽電流磁場により、(イ) マグネット磁場のヒステリシス、(ロ) 中心磁場の減少 (<10%)、(ハ) 遮蔽電流磁場の時間的な変動など色々な現象が現れます。



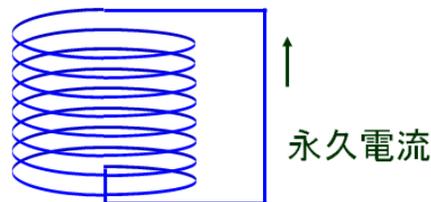
- 主要な影響
- ヒステリシス効果
  - 中心磁場の減少
  - 磁場ドリフト

図3 遮蔽電流による磁場

遮蔽電流は中心磁場に影響を与えるだけでなく、励磁時や消磁時に線材の交流ロスを生じます。交流ロスは LTS マグネットより桁数大きい値ですから、注意が必要です。

### (4) 超電導接続

図4の様に、NMR や MRI では永久電流モードでマグネットを運転します。このためには、(a) 高い n 値を持つ超電導線材と、(b) 線材間の超電導接続 (<math>10^{-12}</math> Ω) が必要です。REBCO 線材は n 値が高いので(a) は容易にクリアできますが、(b) は容易ではありません。LTS 線材の代表的な超電導接続法として、「線材を半田槽で加熱することでマトリクスを除去すると共に、超電導フィラメントを半田メッキしてから、線材同士を接続する」方法があります<sup>10)</sup>。REBCO マグネットにこの手法を適用するには、REBCO 面に半田メッキする必要がありますが、現時点ではこの種の技術のめどは立っていません。更に、REBCO と金属を直接接



永久電流で運転

磁場の減衰は1時間で10ppb( $10^{-8}$ )

図4 NMRに必要な永久電流モード

触させると、REBCO の酸素原子が金属側に吸収され、REBCO 側の酸素原子が減少するために REBCO 表面抵抗が増加するという報告もあります<sup>11)</sup>。いずれにしても、現時点では  $10^{-8} \Omega$  程度が技術の限界であり、NMR や MRI で要求されるレベルの永久電流の実現は不可能な状態です。

## 2. まとめ

以上、私たちのラボでの経験に基づき、REBCO マグネットの技術課題をまとめました。次回以降は、このうちのいくつかの技術課題について、実際のデータをベースに述べたいと思います。

### 参考文献：

1. Martin N. Wilson, Superconducting Magnets, Clarendon Press Oxford (1983).
2. Yukikazu Iwasa, Case Studies in Superconducting Magnets, Springer (2009).
3. D. C. van der Laan, J. W. Ekin, C.C. Clickner, T. C. Stauffer, "Delamination strength of YBCO coated conductors under transverse tensile stress", Supercond. Sci. Technol., 20, 765-770(2007).
4. Y. Yanagisawa, H. Nakagome, T. Takematsu, T. Takao, N. Sato, M. Takahashi, and H. Maeda, "Remarkable weakness against cleavage stress for YBCO-coated conductors and its effect on the YBCO coil performance", Physica C 471, 480-485 (2011).
5. Y. Yanagisawa, E. Okuyama, H. Nakagome, T. Takematsu, T. Takao, M. Hamada, S. Matsumoto, T. Kiyoshi, A Takizawa, M. Takahashi and H. Maeda<sup>1</sup>, "The mechanism of thermal runaway due to continuous local disturbances in the YBCO-coated conductor coil winding", Supercond. Sci. Technol. 25, 075014 (10pp) (2012).
6. S. Matsumoto, S. Choi, T. Kiyoshi, A. Otsuka, M. Hamada, H. Maeda, Y. Yanagisawa, H. Nakagome and H. Suematsu, "REBCO layer-wound coil tests under electromagnetic forces in an external magnetic field of up to 17.2 T", IEEE Trans. Appl. Supercond. in press(2012).
7. Y. Koyama, T. Takao, Y. Yanagisawa, H. Nakagome, M. Hamada, T. Kiyoshi, M. Takahashi and H. Maeda, "Towards beyond 1GHz NMR: mechanism of the long term drift of screening current-induced magnetic field in a Bi-2223 coil, Physica C, 469, 694-701 (2009).
8. Yoshinori Yanagisawa, Hideki Nakagome, Davide Uglietti, Tsukasa Kiyoshi, Ruixin Hu, Takuya Takematsu, Tomoaki Takao, Masato Takahashi, and Hideaki Maeda, "Effect of YBCO-Coil Shape on the Screening Current-Induced Magnetic Field Intensity", IEEE Trans. Appl. Supercond., 20, 744-747 (2010).
9. L. Cesnak and J. Kokavec, "Magnetic field stability of superconducting magnets", Cryogenics, 107-110 (1977).
10. T. Fukuzaki, H. Maeda, S. Matsumoto, S. Yokoyama and T. Kiyoshi, "Study of Joint resistance in Nb<sub>3</sub>Al-NbTi Superconducting Joint for High Field NMR", IEEE Trans. Appl. Superconductivity, 17, p1435-1437(2007).
11. Katsutoshi Oka and Takeo Irie, Jap. J. Appl. Phys., 31, 2689-2691 (1992).

【隔月連載記事】

やさしい人工ピンのおはなし (その5)

九州工業大学  
大学院物質工学専攻  
教授 松本 要

1. はじめに

1990年代半ばからの10年間は、高温超電導体を用いた線材開発が大きく飛躍する大切な時期であった。この間、先行したBi系銀シース線材は臨界電流も大幅に向上し、応用が見渡せる長尺化製造プロセスが確立しつつあった。一方、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  (YBCO) の線材化には粒界問題という大きな壁が立ちはだかっており先が見通せない状態にあった。しかしながら1 cmサイズのYBCO薄膜の研究によれば、この物質は本質的に磁場中において高い臨界電流を実現できる潜在力を有していることは分かっていた。そのため、日米を中心とした世界中の研究者たちは77 Kでの磁場中応用という夢の実現を真剣に語りつつ、この物質をいかにして長尺化するかそのブレークスルー技術の確立に心血を注いでいた。YBCO コーテッドコンダクターにとってはまさに産みの苦しみの時代であったが、2000年を過ぎたあたりから1 km級の線材開発がおぼろげではあるが見えてきた。このような背景の元、次の開発ターゲットとして磁場中  $J_c$  の向上が注目されるようになった。そこで登場したのが人工ピン技術である。

2. 人工ピン技術

YBCO はBi系に比べて結晶異方性が小さく、磁束の融解温度が高いので77 Kの磁場中での特性に優れていることが知られている。この違いは図1に示す結晶構造に由来する。

(Bi系の方がYBCOに比べてc軸方向の格子定数が長い。) しかし線材化にはYBCOを長尺に渡って均一に形成することが必要であるが、YBCOはBi系のように劈開することは難しいため圧延加工が使えない。また粒界問題を除去するためにはどうしてもYBCOのエピタキシャル薄膜が必要となる。こうして必然的に金属テープを用いたコーテッドコンダクター形式をとらざるを得ないわけだが、工業的に金属基板上にkm長のエピ膜が作製された例はかつてなく、極めてハードルの高い技術的課題であった。これがYBCOの線材開発に手間取った理由である。しかし、エピタキシャル薄膜を使う手法は多くのメリットも生んだ。すなわち薄膜は結晶配向性を維持しながら微細な結晶欠陥を導入することに適している。こうして初期に注目されたのは転位や双晶などの格子欠陥であった。2000年頃には転位が通常の

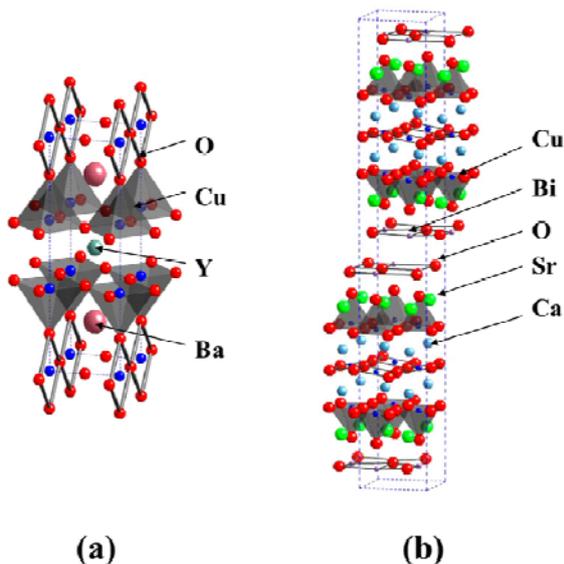


図1 (a) YBCO と(b) Bi2223 の結晶構造

YBCO 薄膜における有効なピン止めであることはかなりはっきりしてきており、薄膜成長をコントロールして転位密度を増大させることによって  $J_c$  の向上が図られたりした。転位の芯の直径 (1~2 nm) は絶対零度でのコヒーレンス長と同等かやや小さいサイズであるが、絶縁体となっており渦糸を強くピン止めできるのだ。

われわれが YBCO に対して人工ピン (artificial pinning center, artificial pin) ということばを使いだしたのは 2002 年頃からであり、論文としては 2004 年に発表したものが最初である。これはあらかじめ基板表面にナノアイランドを形成することで薄膜中に転位を高密度に導入し、YBCO の磁場中  $J_c$  を増大させるものであった。ナノアイランドの面密度を増大させることが  $J_c$  増大に直結しており、人工的な  $J_c$  制御を強く意識したものであった。人工ピンの名称は 1990 年代初頭に、実用 NbTi 超電導線材へのピン止め導入において使われた技術に端を発する。本来、NbTi のピン止め点は加工と熱処理で冶金学的に導入される Ti 析出物であるが、これを Nb に置き換えて線材ビレット作製時に NbTi 中に配置し一緒に加工することで人工的なピン止め導入が可能となっていた。冶金学的な自然にまかせた手法に比べて、よりデザイン性、工学性を強調した名称であった。

一方、2004 年にドリスコルは BaZrO<sub>3</sub> (BZO) を YBCO ターゲット中に混合し、そのターゲットを用いて薄膜形成することで微細な BZO ナノ粒子を YBCO 中に導入した。この手法によって  $J_c$  の増大が確認された。我々も同時期に BZO の導入に成功している。また同年、ホーガンは YBCO ターゲットと Y<sub>2</sub>BaCuO<sub>5</sub> (211) ターゲットを交互に用いる PLD 法によって微細な 211 相ナノ粒子を YBCO 薄膜中に分散導入することに成功した。これによっても大幅な  $J_c$  向上が報告された。211 相は超電導バルク体のピン止め点としてすでに有名であり、BZO に至っては YBCO 単結晶育成のためにるつぼ材として使用されていたものだ。これらは密度やサイズの調整が可変であり人工ピンと見なすことができる。2003 年~2004 年は人工ピンの萌芽時代でありおよそのパターンが出そろった。

### 3. 人工ピンによるピン止めの特徴

人工ピンの特徴は次元性で分類される。すなわち、① 0 次元人工ピン—コヒーレンス長より小さいピン止め点、② 1 次元人工ピン—転位や前述のナノロッドなどの線状ピン、③ 2 次元人工ピン—結晶粒界や大きな析出物の表面、④ 3 次元人工ピン—コヒーレンス長と同等かそれよりも大きなピン、等々だ。現在の人工ピン技術では、②と④が多用されており、これらピン止め点の空間分布や体積分率を設計して YBCO 薄膜の中に形成することが可能となっている。転位は 1 次元ピンであり、BZO も YBCO 薄膜中ではナノロッド状に成長することが確認されている。特にナノロッドは後述するように基板表面に垂直に成長する特徴がある。一方、211 相は粒状で空間的にランダムに分散するため 3 次元的なピン止め点に分類できる。

YBCO エピタキシャル薄膜は通常、結晶構造の c 軸方向が基板表面に対して直方を向いている。転位も 1 次元のピンといえるが、前述のようにその芯の直径は小さい。一方、BZO に代表されるナノロッドは基板表面に垂直で、直径が 6~10 nm あって太い。このためそのピン止めポテンシャルもかなり深いと予想される。ここで渦糸をゴム紐のようなものと考えよう。ゴム紐を引っ張ったり折れ曲げたりするとゴム紐は長くなるのでその分エネルギーが増える。渦糸も同じように考えることができ、増えた分は自己形成エネルギーに相当する。ここで、特に磁場が c 軸に平行に加えられた場合、渦糸はナノロッドと重なる体積 (鎖交体積) は最大となり、渦糸にローレンツ力が加わってもなかなかピン止めから引きはがすことができない。

しかし、図 2 に示すように、磁場をナノロッドから徐々に傾けていくと、渦糸の一部はナノロッドにしっかりとピン止めされているが、それ以外の部分はピンからはずれ、全体的な渦糸の長さも長くなる。また磁場が強い場合は周辺の渦糸から弾性エネルギーによる反発を受ける。さらには、77 K では熱ゆらぎによって渦糸をピン止めからはずそうという力も働いている。こうしてピン止め

のエネルギー、自己形成エネルギー、弾性エネルギーおよび熱エネルギーがバランスすることで渦糸のピン止め状態が決まる。この状態でローレンツ力を加えると、渦糸がナノロッドと鎖交する体積はすでに小さくなっているのにピン止めがはずれやすくなってしまふ。こうして、ナノロッドは  $c$  軸方向に磁場を与えたときに  $J_c$  が大きく、角度を傾けるにしたがって  $J_c$  は徐々に弱くなっていく。一方、211 相などのナノ粒子の場合（球状とする）、図 2 に示すように渦糸を  $c$  軸から傾けていくと異方性のため渦糸の断面積は円から楕円に変わるが、鎖交する部分の長さは変わらずピン止めエネルギーは異方性分だけ変化する。この場合、異方性は  $c$  軸に垂直な時に最大になるので  $J_c$  のピークもその方向に現れることになる。

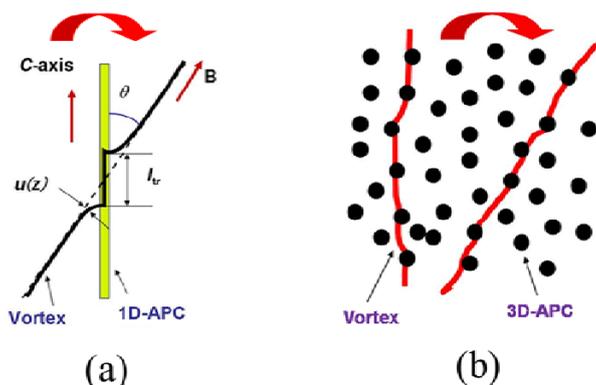


図 2 ピン止めの状態。(a) 1次元ピン、(b) 3次元ピン

#### 4. 人工ピンの形成機構

薄膜中にナノロッドが形成される詳しい形成機構については必ずしも明らかにはなっていない。ただし、MOD 法のようなアモルファスからの固相エピタキシャル法では、粒状ピンは観察されているがロッド状ピンの形成は難しい。基本的に固相法は、結晶成長のフロント部に大量の原料がすでに存在する濃厚環境下において熱平衡に近い環境でゆっくりと成長する方法である。このため MOD 法で YBCO への BZO の導入が試みられているが、YBCO と混ざり合うことはなく独立に結晶化し薄膜中にナノ粒子として分散する。一方、PLD 法や MOCVD 法などの気相蒸着法によれば、作製条件や物質を選択することでロッド状ピンと粒状ピンの作り分けが可能だ。気相法で YBCO やピン止め物質原料を供給すると基板表面にそれら構成原子からなる希薄環境が形成され、徐々に薄膜に取り込まれて薄膜成長が進む。ピン止め物質をナノロッド状に成長させるためにはその成長のカイネティックスの理解が重要だ。たとえば BZO は、Ba をふくむペロブスカイト構造を有し、YBCO の結晶構造によく似ていて化学的親和性が高い。このような物質は YBCO と親和性を保ちながら薄膜成長時に取り込まれ、異方的な界面エネルギーや歪エネルギーを最小化する方向に成長することでナノロッド状になっていく。一方、 $Y_2O_3$  などは結晶構造も大きく異なり、界面エネルギーも等方的で YBCO の中ではナノ粒子状に成長する。温度や原料供給速度も重要であり、健全で真っ直ぐなナノロッドの形成のためには成長条件の細かな調整も必要とされる。現在では、一方向に成長したナノロッド利用は太陽電池材料における量子ドットや、磁性と誘電性を兼ね備えたマルチフェロイック材料においても見ることができる。

#### 5. その後の展開

ナノロッドやナノ粒子を用いた人工ピンの研究報告は、2005 年頃から急に増え、現在でも活発に議論されている。超電導研究の中でも、渦糸のピン止め分野は基礎から応用に直結しており、大変

興味深い領域であるとともに最も重要なものの一つだ。超電導体の中にデザインしたナノ構造を導入し、その結果として  $J_c$  が大きく引き上げられることを知ると、さらに工夫をして性能を引き出そうとする。現在では次元の異なる人工ピンを導入して  $J_c$  の理論的限界に向けた挑戦も始まっている。人工ピン技術は、開発者の具体的なイメージを超電導性能に直結させるための工学的なツールであり、また未解明の磁束物理の開拓のためのツールとなりうる可能性も秘めている。

次回、最終話では、人工ピンの線材応用と将来展望について述べる。

#### 参考文献：

人工ピンの現状を記したのものとして以下をあげておく。

1. 松本 要, "ナノテクで量子化磁束を制御する—人工ピンの導入—", 応用物理 77, pp. 19, 2008.

[超電導 Web21 トップページ](#)

## 読者の広場

### Q&A

**Q:**「超電導体でイオン検出 質量分析装置に応用期待」という新聞記事がありました。超電導体を活用することでどのように検出特性を高めることが出来たのでしょうか。また、どういった応用が期待されるのでしょうか？」

### A:

#### 概要

飛行時間型質量分析装置は、ライフサイエンス分野などで使われる重要な分析装置の1つである。原子や分子をイオン化した後に数キロボルトの電圧で加速して、一定距離を飛行させイオン検出器で検出し、飛行時間から原子や分子の同定、構造解析などを行う。十分な質量分解能を得るため、イオン検出器にはナノ秒の高速応答が必要である。しかし、ナノ秒の高速応答を示すイオン検出器は、質量が 4,000 程度を超えると検出感度が低下するため、分析可能な質量範囲が限られていた。また、質量分析は、質量/電荷数比 ( $m/z$ ) が同じイオンを識別できず電荷数に不確定性が伴うため、質量を直接決定できないといった限界があった。今回、産総研、横浜国大、イタリア学術会議サイバネティクス研究所は、共同で、超伝導体をナノ構造にすることにより、ナノ秒の時間分解能と電荷数の識別を実現した。

従来、質量分解能 10,000 程度以上の高い質量分解能での測定は、ペプチド（アミノ酸が数個から数十個の少数つながった生体分子で、ホルモン作用、神経伝達作用などを示す）程度の分子にしかな対応できなかったが、超伝導ストリップ検出器により、タンパク質（個数に厳密な定義はないが、アミノ酸が数 10 個以上つながり、複雑な立体構造をもつ生体高分子）やタンパク質複合体にまで拡大できる道が拓けた。

[産総研プレス発表：[http://www.aist.go.jp/aist\\_j/press\\_release/pr2012/pr20120518/pr20120518.html](http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2012/pr20120518/pr20120518.html)]

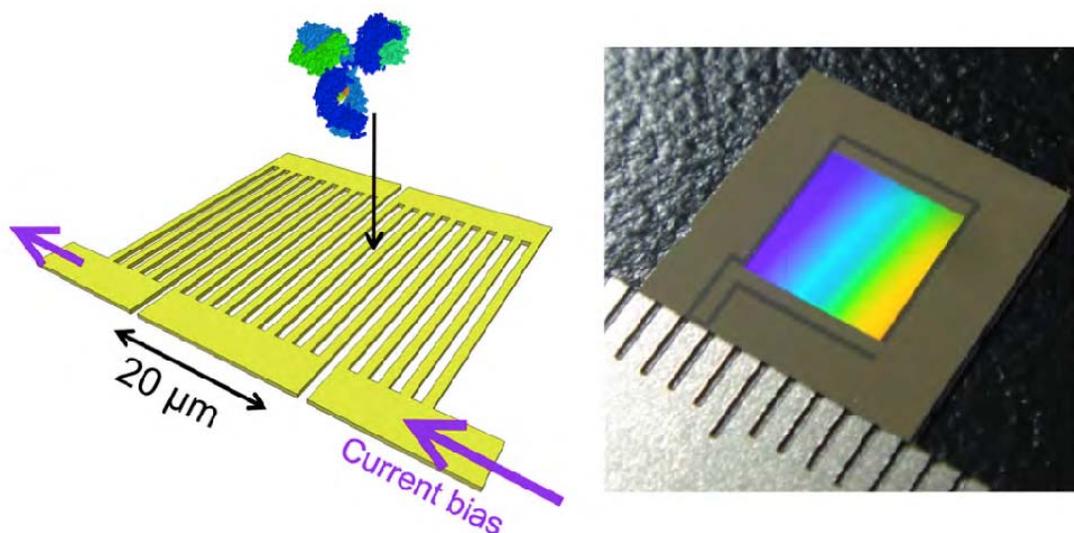
### 超伝導ストリップイオン検出器

この検出器は超伝導体に電流バイアスをかけておき、イオンが衝突したときに生じる音であるフォノンにより超伝導状態が壊れることを利用してイオンを検出する。厚みが数 10 ナノメートル、線幅が数 100 ナノメートルの超伝導体（ニオブあるいは窒化ニオブ）のストリップ線を、数ミリメートルの領域に直並列に配置することにより、従来型のイオン検出器と同等のナノ秒の高速応答と、質量が大きいイオンでも低下しない検出特性が得られた。また、高速の超伝導デジタル回路を用いてナノ秒の信号を読み出すことに成功した。さらに、この検出器は動作条件を変えることによってイオンの電荷数を識別できる。飛行時間型質量分析装置の性能向上が期待される。

なお、この技術の詳細は、2012年5月20~24日にカナダ、バンクーバーで開催される第60回アメリカ質量分析学会にて発表された (<http://www.asms.org/>)。発表の様子は、会議終了後にウェブ放送された。関連する代表的論文は以下の通りである。

- A. Casaburi, *et al.*, Appl. Phys. Lett. 98, 023702 (2011), DOI: 10.1063/1.3537808.
- K. Suzuki, *et al.*, Appl. Phys. Express 4, 083101 (2011), DOI: 10.1143/APEX.4.083101.
- K. Suzuki, *et al.*, Rapid Commun. Mass Spectrom. 24, 3290 (2010), DOI: 10.1002/rcm.4780.
- N. Zen, *et al.*, Appl. Phys. Lett. 95, 172508 (2009), DOI: 10.1063/1.3256220.
- A. Casaburi, *et al.*, Appl. Phys. Lett. 94, 212502 (2009), DOI: 10.1063/1.3142419.

なお、微細な超伝導線は、光子検出、電子検出にも使用されている。現在、他の超電導検出器も含めて、国際電気標準会議（IEC-TC90）に、検出器の名称や性能試験方法などについての標準化を検討する臨時グループが設置されている。



回答者：独立行政法人 産業技術総合研究所  
計測フロンティア研究部門 研究部門長 大久保雅隆 様

[超電導 Web21 トップページ](#)

「Web21 についてのご意見・ご感想、「読者の広場」その他で取り上げて欲しい事項、その他のお問い合わせは、超電導 Web21 編集局メール [web21@istec.or.jp](mailto:web21@istec.or.jp) までお願いします。」