

## 掲載内容 (サマリー) :

- |            |                 |       |
|------------|-----------------|-------|
| ○年頭挨拶      | 理事長             | 森 詳介  |
| ○2012年を迎えて | 超電導工学研究所長       | 塩原 融  |
| ○2012年のご挨拶 | 経済産業省産業技術環境局審議官 | 中西 宏典 |

## トピックス :

- 2011年を振り返って- 超電導、進むグローバル化と日本の役割
- 「エコプロダクツ 2011」に出展
  
- 超電導関連 2012年 1-2月の催し物案内
- 新聞ヘッドライン (11/19-12/18)
- 超電導速報—世界の動き (2011年 11月)
- 「2011年度秋季低温工学・超電導学会」報告
- 隔月連載記事—やさしい人工ピンのおはなし (その1)
- 読者の広場(Q&A)—世界一複雑な原子配列を持つ高温超電導体を発見、との新聞記事がありました。どのような構造なのでしょう。また、今後どのような研究が進められるのでしょうか?

[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) 3536-5717

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、JKAの補助金を受けて作成したものです。

<http://ringring-keirin.jp>



## 年 頭 挨拶

財団法人 国際超電導産業技術研究センター

理事長 森 詳 介



年頭にあたり、謹んで新年のご挨拶を申し上げます。

昨年は、東日本大震災が、東北地方、関東地方の太平洋側を中心に、かつてない甚大な被害をもたらすとともに、福島第一原子力発電所の事故や、その後の全国的な電力不足を引き起こしました。

当財団におきましても、震災により研究所の設備が一部被災するとともに、電力の使用制限に直面いたしました。このような中、職員が一丸となって、損傷した設備の早期復旧を図るとともに、設備の稼働を平準化する等の節電対策に取り組み、研究開発に支障や遅延を生じさせないよう全力を尽くしてまいりました。

震災以降、電力の安定供給と効率的利用の重要性に対する認識が、改めて高まっておりますが、超電導技術は、電気抵抗をゼロにして高効率の送電等を可能とすることにより、エネルギー利用の効率化や地球温暖化の防止に貢献するのみならず、超電導マグネットや高機能センサー、各種のデバイスへの活用を通じて、医療やエレクトロニクス等を含む幅広い産業分野において、ブレークスルーをもたらす夢の技術です。

当財団は1988年の設立以来、超電導に関するわが国の中核的機関として着実に研究開発を進め、数多くの成果を上げてまいりました。特に本年は、「リチウム系超電導電力機器」プロジェクトが最終年度を迎えますため、実用化に向けた開発目標の達成に全力を傾注する所存でございます。加えて、超電導デバイスやSQUID、新物質探査をはじめ、それ以外のプロジェクトにおきましても、産学官の緊密な連携を図りながら、超電導技術開発全般を一層加速する年にしたいと考えております。また、超電導研究開発における当財団の公益的な役割と責任を明確にするべく、新年度中に新制度の下での公益財団法人への移行を図ってまいります。

皆様におかれましては、本年も引き続きご支援、ご協力を賜りますよう、宜しくお願い申し上げます。新しい年が、皆様にとりまして幸多き一年になるよう祈念いたしまして、年頭のご挨拶とさせていただきます。

[超電導 Web21 トップページ](#)

## 2012年を迎えて

超電導工学研究所  
所長 塩原 融



謹んで新年の御挨拶申し上げます。

昨年3月11日に発生いたしました東日本大震災により、被害に遭われた皆様には謹んでお見舞い申し上げますと共に一日も早い復興を衷心よりお祈り申し上げます。

この大震災において大地震、大津波、原子力発電所の事故が一時に襲う未曾有の国難に遭遇し、我が国にとっては過去に例を見ない非常事態に直面しました。この大震災からの復興が焦眉の急ではありますが、リーマンショック以降の世界的な金融危機に端を発した円高・経済不況が今なお継続し、経済・雇用対策、社会保障、地球環境問題が未解決の状況で2012年を迎えることになりました。

当超電導工学研究所におきましても、損傷被害を受けました研究設備・機器等の早期復旧、シフト勤務等により電力使用平準化・使用制限・節電を実施し、研究開発に遅延・支障を生じさせないよう研究員・職員一丸となって励んでまいりました。

超電導技術に関しては、経済産業省資源エネルギー庁及び独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）が昨年3月に策定した「省エネルギー技術戦略2011」の中で、今後の省エネルギー技術の展開として、我が国の卓越した省エネルギー技術の飛躍に向けて、「世界をリードしている日本の超電導技術をコア技術として、省エネルギーシステムに仕上げるなどの戦略的アプローチが望まれる」と記述されています。このように我が国の超電導技術は省エネルギー革新技術の切り札になるものと大いに期待されており、震災復興にもきっと役立つものと確信しています。

高温超電導フィーバーの火付け役としてよく知られ当超電導研究所の初代所長の田中昭二先生が、昨年11月11日急逝されました。田中先生は高温超電導の物性・材料・新物質探索等の基礎研究の段階から実用化を目指す基盤研究開発で日本が十分な国際貢献を果たすべきことを、常に訴えておられました。今年、超電導臨界温度が液体窒素温度を初めて超えたイットリウム系高温超電導酸化物発見から25周年を迎える記念すべき年になります。田中先生の御遺志を引き継ぎ、今後も、これまでの二十余年の成果を踏まえて、超電導工学研究所が世界の超電導研究開発の中核となり、新超電導物質の探索、高温超電導線材、薄膜電子デバイス、電力機器等エネルギー応用を含めた超電導機器応用の分野で精力的に研究開発を進め、省エネ、環境・エネルギー、地球温暖化対策等、延いては震災復興への導火線になる成果を上げていく所存です。

本年度もこれまで同様、会員企業各位はじめ、皆様方の倍旧の御指導・御支援、御協力を賜りますよう、宜しくお願い申し上げます。

[超電導 Web21 トップページ](#)

## 2012 年のご挨拶

経済産業省産業技術環境局審議官  
(産業技術・環境担当)

中西 宏典



平成 24 年の新春を迎え、謹んでお喜び申し上げます。

世界のエネルギー需要は、新興国を中心に増大し続けており、資源の乏しい日本にとって、エネルギー資源の確保とエネルギー消費の低減が、喫緊の課題になっております。さらに、昨年 3 月の東日本大震災に伴う原子力発電所の事故は、我が国に、電力の安定供給という新たな課題を提起いたしました。

こうした課題の解決に向けて、政府といたしましては、エネルギー政策の大幅な見直し、新たな電力システムの構築、そして「望ましいエネルギーミックス」の実現などに取り組んでまいります。また、これら日本の取組が、同様の課題を抱える世界各国から参考にしていただけるよう、全力を尽くしてまいります。

昨年は、1911 年にオランダのオンネス博士が超電導現象を発見してからちょうど 100 年、1986 年にベドノルツ博士とミュラー博士が高温超電導を発見してから 25 年となる節目の年でありましたが、超電導技術は、送電ロスのない電力輸送を実現する夢の技術として多くの国々で研究開発が行われてきました。

省エネへの期待が高まる中、超電導技術の早期実用化、普及への期待はますます高まっていることと思います。我が国の超電導研究は、世界的にも非常に高い評価を得ており、特に超電導線材の品質、性能は世界最高性能を誇るものです。この高い技術力をもって、国内外の抱えるエネルギー問題の解決に寄与し、更には産業競争力の源泉として、超電導技術が「夢の技術」から大きく飛躍していくことが期待されております。

経済産業省が推進し、財団法人国際超電導産業技術研究センター (ISTEC) が主導的な立場で取り組んでいる「リ튠系超電導電力機器技術開発」プロジェクトはこれまで、着実な成果を挙げ、内外から高い評価を得ていますが、いよいよ平成 24 年度が最終年度となります。本プロジェクトでは、世界最高の超電導性能を持つ超電導線材や世界で初めて限流機能を持つ変圧器技術の開発に成功するなど、大きな成果が得られておりますが、今後は技術開発の集大成として、電力ケーブルシステム性能検証等を行い早期の実用化につなげていただくことを期待しております。

また、経済産業省では、エネルギー・環境制約等の構造的課題の解決に向け、これまでの技術の延長線上にない夢のある「未来開拓技術」の研究開発に取り組んでいく予定です。超電導技術は、エネルギー・環境問題解決のキーテクノロジーとなりうる技術、かつ、我が国が世界最先端をねら

える「強み」を持つ技術であり、経済産業省といたしましても、引き続き実用化に向けての取組を推進してまいりたいと思います。

最後になりましたが、本年も研究開発政策に対するより一層の御支援、御理解を賜りますよう、お願い申し上げますと共に、皆様方のますますの御発展を祈念いたしまして、新年の挨拶とさせていただきます。

[超電導 Web21 トップページ](#)

トピックス：「2011年を振り返って- 超電導、進むグローバル化と日本の役割」

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

2012年の初春を迎え、謹んでお喜びを申し上げます。

昨年 2011 年は、皆様ご承知のとおり、東北地方での 3.11 震災があり、また、ISTEC にとっても 11 月に田中昭二前所長が逝去され、長く記憶に留めるべき年になりました。一方、超電導業界においても、時代を反映したこれまでなかったような大きな流れが生じています。新年にあたり、昨年を振り返って業界トピックスをまとめてみました。

1. 進む RE 系線材事業化

昨年 11 月に金沢で低温工学・超電導学会が開催された。各社の超電導の材料から機器、冷却にわたり、基礎から応用まで幅広く成果が発表されたが、特に、国プロの成果もあり①RE 系線材の事業化、②機器を目指したコイル化検討が進展した。

RE 系線材に関しては国内メーカーにおいて、すでに km オーダーの長尺化が進んでいるが、さらに図 1 に示す様に業界誌において大いに商品化が喧伝され始めた。また、線材から進んで昨今は図 2 に示すような RE 系コイル化検討も盛んである。高磁場コイル、NMR、MRI、リニアモーターカー、発電機、モータ、加速器など超電導の機器応用にはコイル化が欠かせない。そのため、コイルの作製方法、励磁特性、耐電磁力特性、冷却特性、安定性など多くの基礎的特性データの把握が重要であり、図 2 のパンケーキコイルやレーストラック形状コイル、鞍型コイルが幅広い RE 系テープ状線材で可能であることが多数発表され、多様な用途に対応できることがわかってきた（機器応用にむけてコイルなどの要素技術開発と同時に、より先進的な超電導の電力応用であるケーブル、変圧器、SMES など）。

2. 国際化と M&A の波

企業の買収 (Merge&Acquisition) と国際化は、もはや超電導業界でも例外でない。IT 関係では良く聞く話題であったが、近年の円高を反映して超電導業界でもいくつかの動きがあった。M&A や国際的提携など、超電導もこれまでの研究開発段階からいよいよ企業が事業として青写真を描き始めたことを意味する。

例 1：古河電工による SuperPower 社買収

2011 年 10 月 17 日に突然新聞報道がなされ、業界にもかつてない驚きをもたらした。SuperPower 社は、RE 系線材でいち



図 1 商品として PR される RE 系線材 (雑誌の宣伝から) <sup>1)</sup>

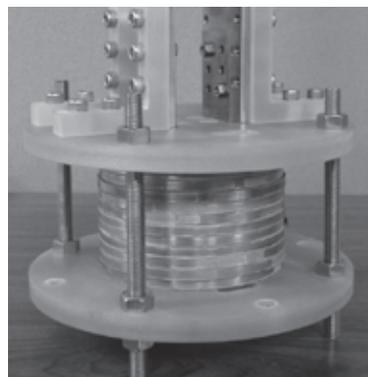
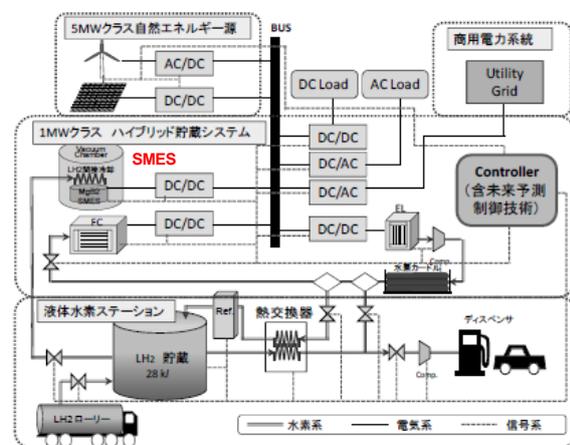


図 2 典型的 RE 系パンケーキ型コイル <sup>2)</sup>



また、震災復興に関連して再生可能エネルギー応用が報道各方面で議論されているが、超電導分野でも震災復興の中心地である東北大から、風力、SMES（超電導エネルギー貯蔵）、燃料電池、水素エネルギーを組み合わせたシステムの提案が発表された（図6）。水素を液体あるいは気体で使い、超電導の冷媒やエネルギー輸送、蓄積に使い、再生エネルギーにおける電力の安定供給を超電導で可能にする案である。超電導が、スマートグリーンエネルギーネットワークに寄与できるチャンスも増えてきそうである。超電導でネックであった冷却部分をシステム全体の中で効率よく、安定に供給させることができれば、社会インフラとしての超電導の信頼性も高くなる。



Advanced Superconducting Power Conditioning System (ASPCS)

図6 超電導を使った再生可能エネルギーシステムの提案<sup>6)</sup>

#### 4. 超電導先進国「日本」

Nb<sub>3</sub>Sn、Bi系、MgB<sub>2</sub>、鉄系、RE系などの材料開発から応用まで日本は超電導の一大先進国である。応用分野では、例えば、世界初の輸送インフラ応用として、2014年にはいよいよ超電導リニアモーターカーの工事が開始される（図7）。遠い将来でなく、もう再来年のことである。さらに、2027年には我々が乗車できる営業運転が始まる。東京一名古屋が40分、品川、相模原、名古屋には地下駅ができる。新たな時代の到来を予感させる。

また、国際協力で進められている核融合ITERの開発においても、日本は図8に示すように多くの部分で重要な役割を担っており、その活躍が期待されている。さらに、先述したRE系では、機器応用にむけてコイルなどの要素技術開発と同時に、より先進的な超電導の電力応用であるケーブル、変圧器、SMESの検討が国プロで行われ、その実用化が期待されている。

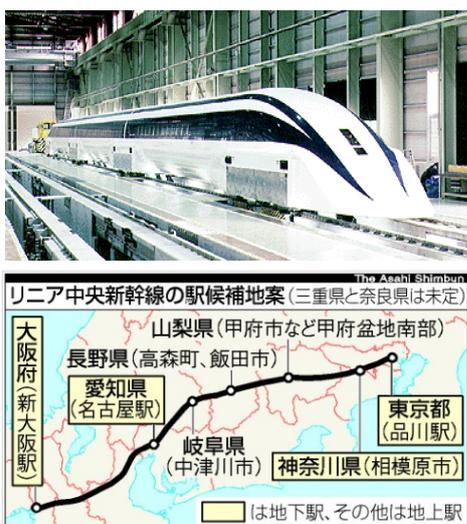


図7 2014年から工事が開始される超電導リニアモーターカーとその路線<sup>7)</sup>

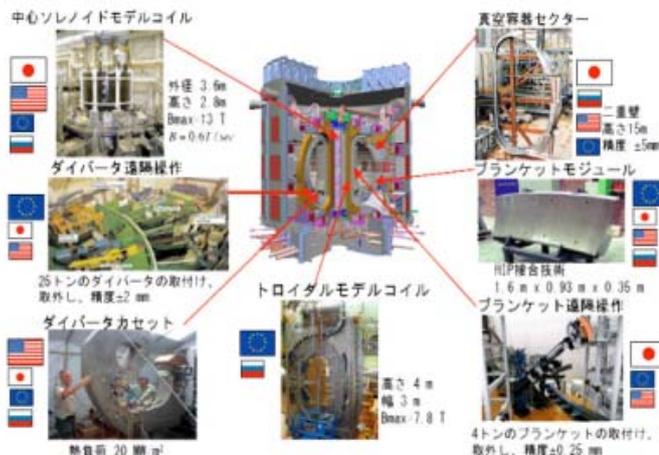


図8 ITER計画における日本の寄与<sup>8)</sup>

## 5. まとめ

昨今、色んな分野で日本の活力低下が危惧されている。しかしながら、今回ピックアップしたように、そうした状況の中でも、超電導は日本が基礎から応用まで世界を大きくリードしている分野である。超電導はハード的な先端技術開発が生かされて、製品としての技術的な差が如実に現れる分野である（コアコンピタンス）。今後の国際社会で、グローバル化は **must** であるが、技術開発を大事にし、育てる固有の国民性、風土が事業の発展性には重要である。上記超電導の例は、まさにこうした因子が重なり、基礎から応用まで世界をリードする状況になったものと思う。その中で産官学いずれの分野でも国家資源の果たした役割は非常に大きい。また、超電導の多くの応用が大がかりなものであるため、これからもそのリード役として期待されている。同時に、不景気な時に企業の開発が目先の製品化目標への短兵急なものになり易い欠点を補うことも可能である。

企業においては、今後増々、グローバル展開がなされ、世界の中での最適分業体制化の試みがなされるであろう。各事業分野とも、その答えはまだ具体化されていないが、超電導のこうした研究開発を重視した流れは各分野においても大きな見本になるのではと思っている。

## 参考文献：

- 1) 2011 年度秋季 低温工学・超電導学会（金沢）予稿集 PR 頁
- 2) 同上 p176. 3B-a07 イットリウム系 12 積層コイル- 宮崎 寛史（東芝）ほか。
- 3) 古河電工ホームページ：[http://www.furukawa.co.jp/what/2011/kenkai\\_111017.htm](http://www.furukawa.co.jp/what/2011/kenkai_111017.htm)  
第 2 世代高温超電導線材メーカー、米 スーパーパワー社を買収
- 4) 昭和電線 HD ホームページ:第 2 四半期決算説明会試料 P20、プレスリリース。  
<http://e-cast.daiwair.co.jp/5805/2861/index.htm>  
[http://www.swcc.co.jp/news/pdf/PRESS\\_RELEASE20110908.pdf](http://www.swcc.co.jp/news/pdf/PRESS_RELEASE20110908.pdf)
- 5) 2011 年度秋季 低温工学・超電導学会（金沢）予稿集 PR 頁 p27. 1B-p03 1GHz 級 NMR 磁石の大震災からの復旧状況- 清水ほか（物材機構）。
- 6) 同上 2B-a01 先進超電導電力変換システム用 MgB<sub>2</sub> 100 MJ SMES トロイダルコイルの概念設計 後村ら（東北大）
- 7) asahi com から。リニア現状  
<http://www.asahi.com/business/update/1119/NGY201111190003.html?ref=recb>  
ウィキペディア [中央新幹線] から  
<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%AD%E5%A4%AE%E6%96%B0%E5%B9%B9%E7%B7%9A>
- 8) 国際熱核融合実験炉 ITER ウェブサイト <http://www.naka.jaea.go.jp/ITER/> および  
<http://www.naka.jaea.go.jp/ITER/iter/index9.html>

[超電導 Web21 トップページ](#)

## トピックス：「エコプロダクツ 2011」に出展

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  
特別研究員 蓮尾信也

日本経済新聞社主催の日本最大級の環境展示会“エコプロダクツ 2011”が、東京都江東区有明のビッグサイトにて平成 23 年 12 月 15 日ー17 日に開催された。三日間の来場者は主催者発表によれば 181,487 人であった。(財) 国際超電導産業技術研究センター (ISTEC) はスマートコミュニティゾーンに出展した。ISTEC ブースへの来場者もたいへん多く盛会であった。

今回はこれまでと趣向を変えて、スマートコミュニティと超電導の関係そして超電導の応用を分かりやすく説明するために漫画を導入した。図 1 に示すように背面パネルは全面を漫画にし、超電導の研究者が中学生に説明する状況を設定してストーリーを展開した。



図 1 ISTEC ブースの展示の様子

漫画の説明だけでは理解が十分でない来場者のために、1 時間に一回のペースで実際の研究者と中学生に扮した女性とが分かりやすい説明と超電導のデモンストレーションを行った (図 2)。超電導磁気浮上やフィッシング効果のデモンストレーションが始まると、通りかかった来場者も足を止めて興味深く見入っていた。



図 2 ISTEC ブースでの説明に聞き入る来場者

主たる展示品としては、現在 NEDO プロジェクトで研究開発を進めている超電導線材、超電導電力ケーブル、変圧器、そして SMES などの実物カットモデルや模型などを並べた。それぞれにフォトフレームによって説明が見られるように配置した。今年の来場者の特徴は、「超電導って何ですか？」という質問をする人が減り、「いつ実用化するの？」という人が増えたことである。これは東京一名古屋間を走る超電導リニアのニュースの影響で超電導に対する一般の人の認識が大きく変わったためと思われる。

そしてもう一つの目玉展示は、超電導磁気浮上列車 SF Train と名付けた模型列車の走行である。長崎県の大村線をイメージしたジオラマの前を磁気浮上列車が往復走行する。JR 東海の超電導リニアとは浮上原理が異なる列車である。強力磁石を敷き詰めた 8 m のレールの上を、四両編成の列車を浮上走行させた。このレールは平坦ではなく、一部は左に 45° 傾け、別の一部は右に 45° 傾けている。マイスナー効果だけではなく、ピン止め効果により滑り落ちないで走行することができる。この列車の中には ISTE C で作成した超電導線材が組み込まれており、それを液体窒素で冷却することにより 5 分以上連続走行させることができた。図 3 に示すように、子供たちはたいへん興奮して列車を追いかけていたが、大人もそれに負けぬほど興味を示し、展示している研究者に質問を連発していた。



図 3 SF Train に見入る子供達



磁気浮上列車の走行 (動画)

超電導の展示は、ISTEC だけではなく ISTEC ブースに近い場所でフジクラ、昭和電線、そして古河電工が展示とデモンストレーションを行っていた。超電導に対して来場者のさらなる理解を得られたものと思われる。

[超電導 Web21 トップページ](#)

## 超電導関連 ‘12/1 月－2 月の催し物案内

1/7

応用物理学会東海支部 第 25 回上田記念講演会「超伝導百周年と日本の科学技術の未来」  
問合せ：<http://www.jsap.or.jp/>

1/17

応用物理学会 超伝導分科会 第 44 回研究会  
ジョセフソン効果 50 周年記念『超伝導エレクトロニクスにおける新しい胎動』  
場所：埼玉大学 東京ステーションカレッジ A1-A3 教室  
問合せ：<http://annex.jsap.or.jp/support/division/super/kenkyukai/44th.pdf>

1/26

超伝導エレクトロニクス研究会 1 月研究会（超伝導センシング基盤技術およびその応用、一般）  
場所：機械振興会館  
問合せ：<http://www.ieice.org/es/sce/jpn/>

2/9

第 4 回超電導応用研究会・第 3 回材料研究会合同シンポジウム/見学会「高品質薄膜と超電導デバイス」  
場所：(財) 国際超電導産業技術研究センター  
問合せ：[http://www.csj.or.jp/application/2012/4th\\_0209.pdf](http://www.csj.or.jp/application/2012/4th_0209.pdf)

2/27－3/2

APS March Meeting

場所：Boston Convention Center, Boston, Massachusetts, USA  
問合せ：<http://www.aps.org/meetings/march/index.cfm>

[超電導 Web21 トップページ](#)

## 新聞ヘッドライン (11/19-12/18)

- 加工製品開発に注力 包鋼稀土 レアアースで優位 先端分野進出狙う 日本経済新聞 11/21
- 医療ルネサンス 続・増える環境過敏症 風車の超低周波音 懸念 読売新聞 11/22
- 風力発電で稼働 NTT系が実験 コンテナ型 日経産業新聞 11/22
- 風力発電 買電量積み増し 東北電、北電 自治体枠など優遇策 Fuji Sankei Business i. 11/23
- 地熱や風力 規制緩和を 自然エネ協議会 孫氏ら環境相に要望 電気新聞 11/24
- 海流発電 実用化へ 風力などより効率高く IHI・東芝・三井物産 日経産業新聞 11/24
- 発電、再生エネで4割可能 検証委試算 採算度外視、実現性薄く 日経経済新聞 11/26
- サイエンス 洋上風力発電の本命登場、ナゾかがく レアアース、なぜ特殊な性質？ 特異な電子配置、磁性強く 日経経済新聞 11/27
- レアアース抽出コスト 3分の1 信越化学が素材量産技術 日刊工業新聞 11/28
- 環境車向け磁石レアアース半減 三菱商事や大同特殊鋼 岐阜で量産中国依存を軽減 日本経済新聞 11/29
- 高騰レアアース商機次々 代行しまとめ買い企業から利息収入 三井住友系 朝日新聞 11/30
- レアアースの使用量 50%削減 三菱商事など3社、高性能磁石で新社 Fuji Sankei Business i. 11/30
- 磁場 730 テスラ、室内で最高 東大、地磁気の1500万倍 電子素子開発などに応用へ 日経産業新聞 12/01
- 家庭用風力発電システム ウィンドレンズ 「太陽光」と同水準 日経産業新聞 12/01
- 東大・北川氏に凝縮系科学賞 科学新聞 12/02
- レアアース読めぬ取引 中国供給削減 日本、安定確保に不安 読売新聞 12/05
- リニア環境アセス開始 JR東海 14年度着工へ自主調査 朝日新聞 12/06
- レアメタル下落続く コバルトやインジウム 液晶TVなど販売不振受け 日本経済新聞 12/08
- レアアース磁石高騰 10~12月出荷価格 前期比2~3倍 今夏の原料高が波及 日本経済新聞 12/13
- タイの風力発電 中部電力が出資 数十億円規模 日本経済新聞 12/13
- 洋上風力発電に参入 コスモ石油 初の大規模商用施設 岩手沖などに20年代初頭 日本経済新聞 12/13
- レアアースの再利用を急げ 社説 日本経済新聞 12/15
- 小型磁石、MRI並み磁力 日立、省電力で寿命1.7年 再生医療に応用期待 日経産業新聞 12/15
- 環境と復興をテーマに「エコプロダクツ2011」きょう開幕 Fuji Sankei Business i. 12/15

[超電導 Web21 トップページ](#)

## 超電導速報—世界の動き (2011年11月)

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 蓮尾信也

### 大型受注

#### Bruker (2011年11月9日)

Bruker社は、チェコ共和国のブルノにある新設 Central European Institute of Technology (CEITEC) から、4台もの超高磁場 AVANCE™ NMR システムという大型注文を受諾した。このシステムがインストールされれば、CEITEC は、中央および東ヨーロッパにおいて最大の生物学 NMR 研究施設となる。このシステムのうち3台には、クライオスタットのサイズ並びに運用コストを大幅に削減できる小型磁気コイルの使用を可能とする超電導技術が採用される。

(出展)

“Bruker Announces Four Ultra-High Field NMR Orders from the Central European Institute of Technology (CEITEC) to Enable Advanced Biological Research”

Bruker press release (November 9, 2011)

<http://www.bruker-biospin.com/pr111108.html>

### 決算

#### AMSC (2011年11月9日)

AMSC社は、2011年9月30日締め2011年度第2四半期の決算報告を発表した。第2四半期の総収益は、前年同期の9810万ドルに比べ大幅に減少し、2080万ドルとなった。この対前年比減を引き起こした理由は、主に当社の元顧客であるSinovel Wind Group社からの売上に不足が生じた事である。今四半期の純損失は4170万ドルとなり、これには既に公表済みである当社のThe Switch Engineering Oy 買収提案に対する終結関連費用、Sinovel社に対する訴訟費用、及び事業リストラ関連費用とその損失費用にかかった約2820万ドルが含まれる。第2四半期末時点で、当社は、現金、現金同等物、有価証券および拘束預金を合わせ、1億830万ドルを保有していた。また受注残高総額は、Sinovel社に関連する契約を除き、約2億9800万ドルであった。当社の社長兼最高経営責任者であるDaniel P. McGahn氏は、「我々は、非GAAPベースの純損失及び現金支出を削減することに努め、前四半期と比べて収益の増加を記録している。この四半期の収益となった主な貢献者は、インドのInox Wind社、韓国のDoosan Heavy Industries社、そして中国のDongfang Turbine社など、風力タービン製造の顧客である。また、我々のグリッド事業に関して言えば、D-VAR®システムによる収入が伸び、最近いくつかのマイルストーンに達したと言える。これらマイルストーンについては、例えば、我々のパートナーであるKorea Electric Power社とLS Cable & System社で成し遂げた韓国初の超電導電力ケーブルシステムの通電、さらには米国エネルギー省と我々のパートナーであるNexans社、Siemens社、そしてAir Liquide社で行った送電電圧限流器の実証試験にも成功したこと、米国国土安全保障省科学技術局と我々のパートナーであるConEdison社とSouthwire社で手がけたニューヨークのHYDRAプロジェクト

トの再開などが含まれる。また、風力とグリッドにおける多様な受注構成によって、弊社の第2四半期の総受注高は連続して30%以上増加するに至った。こうした気運によって、2011年下半期には、収益と最終損益両方の観点において堅調な業績を達成している。今後、引き続き前向きな姿勢で、経費と現金を慎重に管理していく所存である。」とコメントした。

(出展)

“AMSC Reports Second Quarter Fiscal 2011 Financial Results”

AMSC press release (November 9, 2011)

## 新規ブランド

### Superconductor Technologies Inc. (2011年11月11日)

Superconductor Technologies(STI)社は、当社の超電導線材製品群の新しいブランド名である Conductus® Superconducting Wireの導入を発表した。当社マーケティング及び製品管理事業部副社長であるAdam Shelton氏は、「Conductus Superconducting Wireへの関心は着実に拡大している。我々の特許技術と製造ノウハウを駆使して、供給/可用性、価格、そして性能という業界が求める3つの要点に対応できれば、より広範囲な市場への商業化が実現可能であると確信している」とコメントした。現在、当社が使用する技術の多くは、2002年に当社が買収したカリフォルニア州を拠点とした企業Conductusに由来するところから、このConductusという名称には、大きな歴史的意義がある。当社独自のRCE-CDR HTS成膜プロセス（周期的堆積と反応による反応性共蒸着法でできた高温超電導膜）という利点によって、当社のHTS線材がより大規模で且つ新しい市場参入を成し遂げられることに期待が寄せられている。

(出展)

“Superconductor Technologies Inc. Introduces Conductus® Superconducting Wire Product Family”

Superconductor Technologies Inc. press release (November 11, 2011)

## 光検出器

### NIST (2011年11月14日)

National Institute of Standards and Technology (NIST) の科学者たちは、単一光パルス内にある光子数を1000ぐらいまで計数できる高精度な超電導転移端センサー (TES) と呼ばれる超電導検出器の実証を行った。その正確さを制限するのは、主にレーザー光源の量子ノイズが発生するときぐらいと言える。これが達成されなければ、約50以上の光子を正確にカウントすることは不可能であった。今回の実証結果は、最終的に量子情報処理、通信、そして低光レベルでの光計測学に適用されると考えられている。物理計測研究所 (PML) 量子エレクトロニクス&フォトンクス研究部門のThomas Gerrits氏は、「光子数の測定の不確実性がかなり低く検出効率が調和状態に近づくと、光パルスの振幅 (光子数) でコード化された情報を検出で解読することができる。」とコメントした。TESは、絶縁基板の上に成膜した超電導材料の薄層で構成されたものである。その装置全体が超電導薄膜の臨界温度以下に冷却され、小さな電圧がその薄膜全体に印加されると、超電導転移領域 (超電導体でも従来の導電体でもない領域) の中央にわずかな電気抵抗が生じる。入射光子が素子に衝突するたびに、光子のエネルギーが吸収され、それによって超電導薄膜を加熱し抵抗を促すのである。非常に大きな数の光子が吸収されると、熱が素子を飽和させ、転移端を越えて強制的に非超電導領域に到達する。現在、研究チームが焦点をおいているのは、TESがどのぐらいの大きい数の光子を識別することができるか

判断することである。ここで科学者たちが測定したのは抵抗の変化ではなく、熱緩和時間またはTESが熱を流すのに要する時間と転移領域の上端に戻るまでの時間量であった。そしてこの時間間隔内に、最大約1000光子という非常に精度の高い指標が判明したのである。これらの研究結果によって、光の量子状態を探る微弱光ホモダイン検出器のような、実際に役立つアプリケーションが実現可能と言える。

(出展)

“Adding up Photons with a TES”

NIST press release (November 14, 2011)

<http://www.nist.gov/pml/div686/tes.cfm>

## 加速器

### CERN (2011年11月16日)

CERN社はワークショップを組んで高輝度の大型ハドロン加速器(LHC)の研究を開始した。このワークショップには、日本とアメリカ、さらに欧州14機関から科学者やエンジニアが集まり、欧州委員会の第7次研究枠組み計画(FP7)がこのプロジェクトをサポートすることになっている。このプロジェクトの目標は、2010年ごろに予定されていたLHCの輝度を上げるために必要な基盤を準備することである。ワークショップの最初の参加者たちは、プロジェクトの初期設計段階を手がけ、現在の設計値よりも5倍から10倍もLHCの輝度を高めようとしている。この国際的ワークショップは、素粒子物理学分野の代表者たちの集まりで、プロジェクトが成功するのは目に見えている。LHCのアップグレードには、高磁場磁石、高周波空洞、および伝送ラインを含む様々な分野における新技術の開発が必要であり、その全ては超電導技術に基づくものである。

(出展)

“CERN has 2020 vision for LHC upgrade”

CERN press release (November 16, 2011)

## 基礎

### University of Toronto (2011年11月6日)

Toronto大学の研究者たちは、遷移金属酸化物におけるエネルギーレベル配列のプロセスの鍵を握るメカニズムを発見し、初めてその実証に成功した。この発見は、色素増感太陽電池や有機発光ダイオード(OLED)など、地球に優しい環境技術の開発にとって重要な突破口を切り開くと考えられている。遷移金属酸化物と有機分子との界面で起こるエネルギー配列の原則を決定的に確立する見取り図も、当研究グループの手によって既にレイアウトされている。この度の発見によって、科学者やエンジニアがより簡素で効率的な有機太陽電池とOLEDの設計が出来るようになり、今後の環境技術の開発推進に期待が寄せられる。当研究グループの研究内容はNature Materialsに掲載されている。

Source: “University of Toronto engineers solve energy puzzle”

University of Toronto press release (November 6, 2011)

<http://media.utoronto.ca/media-releases/engineering/engineers-solve-energy-puzzle/>

**Swedish Research Council (2011年11月18日)**

Chalmers 工科大学の科学者たちは、40年以上も前に予測された効果を観察して、真空から光を生成することに成功した。実験は、真空の中は実際、様々な粒子（仮想粒子として知られる）で満たされ、その存在は絶えず変動しているという、我々の経験ではわかりにくい量子力学上の原理に基づくものである。当大学の科学者たちは、動的カシミール効果と呼ばれる現象を通して、仮想状態の光子を測定可能な光に変えることに成功した。実験では SQUID 素子が使用され、磁場の方向を1秒間に数十億回変えることによって、科学者たちは光速の25%の速さで振動する"ミラー"を作成することができた。"ミラー"は、その運動エネルギーの一部を仮想光子に転送し、仮想光子が目に見える形になるのを助けるのである。その結果、光子は対になって真空から現れて、その対の光子はマイクロ波放射として測定することができる。真空内の変動のような基本的な物理概念の結論に貢献した今回の実験結果により、今後、量子情報の分野に様々な形で適応されるにちがいない。なお、この研究グループの実験結果は、Nature 誌に掲載されている。

(出展)

"Chalmers scientists create light from vacuum"

Swedish Research Council press release (November 18, 2011)

<http://www.chalmers.se/en/news/Pages/Chalmers-scientists-create-light-from-vacuum.aspx>

[超電導 Web21 トップページ](#)

## 「2011 年度秋季低温工学・超電導学会」報告

東京大学大学院工学系研究科 山本明保  
ISTEC-超電導工学研究所 線材開発研究部 飛田浩史 坂井直道  
ISTEC-超電導工学研究所 電力機器研究開発部 山田雄一 山田 穰

### MgB<sub>2</sub>材料関係

東京大学 山本明保

MgB<sub>2</sub>線材の研究開発に関しては、PIT法（パウダー・イン・チューブ法）をベースに従来よりも超伝導相の高密度化を狙える製法の検討が多く報告された。日立製作所の児玉らは、Premix PIT法により作製したMgB<sub>2</sub>単芯線材のJ<sub>c</sub>-B特性について報告した。既製のMgB<sub>2</sub>を50 wt%添加（Premix）した試料においてin-situ法線材と同等のJ<sub>c</sub>が得られたが、現状では微細組織が不均質であるため、今後の作製条件の最適化でさらなるJ<sub>c</sub>の改善が期待できるとのことである。東海大の金田らは、Mg管を使用して作製した外部Mg拡散法MgB<sub>2</sub>線材の微細組織と超伝導特性に及ぼすHIP処理の効果について報告した。HIP処理によりコアとシースの間の空隙が減少し線材断面積が縮小すること、コア部のJ<sub>c</sub>が改善することを報告した。HIP処理後に630°C熱処理を行った試料はJ<sub>c</sub>がさらに改善し4.2 K, 5 Tで2.8×10<sup>5</sup> A/cm<sup>2</sup>に達したことから、HIP前後に適切な熱処理を行うことでさらなるJ<sub>c</sub>改善が期待できると報告した。日大の中山らは、Cold high pressure densification process（CHPD）により作製したMgB<sub>2</sub>/Nb/Monel線材における印加圧力依存性について報告した。in-situ法線材に室温で四方向から最大で2.5 GPaの圧力を印加した後に熱処理するCHPD法の導入により、緻密な線材が得られることを報告した。出発原料における仕込み組成の検討も行い、Mg<sub>0.9</sub>B<sub>2</sub>の組成比とした線材で特にJ<sub>c</sub>の改善が見られ、20 K, 3.5 TのJ<sub>c</sub>が10<sup>4</sup> A/cm<sup>2</sup>に達したことを報告した。

線材特性の評価に関しては、NIMSの西島らから、IMD法（内部Mg拡散法）によって作製したMgB<sub>2</sub>線材の機械特性について報告があった。可逆限界までは歪みの増加とともにI<sub>c</sub>が改善するin-situ法線材と同じ傾向がIMD法線材においても見られたが、IMD法線材のほうが歪みに対する規格化I<sub>c</sub>の増加率が小さく歪感受性が小さいこと、可逆限界歪が大きいことを報告した。

多結晶バルク体を用いた線材高特性化の研究として、東大の田中らは、ex-situ法MgB<sub>2</sub>バルクの臨界電流密度における原料MgB<sub>2</sub>粉末依存性について報告した。ボールミル粉碎した原料MgB<sub>2</sub>粉末を使用することで、高いコネクティビティとJ<sub>c</sub>（20 Kにおいて4.3×10<sup>5</sup> A/cm<sup>2</sup>）をもつex-situ法MgB<sub>2</sub>バルクが得られ、従来結晶粒間の結合が弱いとされていたex-situ法においても高いコネクティビティを実現可能であることを報告した。東大の伊藤らは、MgB<sub>4</sub>を介したMgB<sub>2</sub>バルクの作製について報告した。従来のin-situ法ではMgとBの混合原料を使用するが、この製法ではホウ素源としてMgB<sub>4</sub>を使用することで低密度化の原因となるMgの量を減らすことが可能で、充填率の高いMgB<sub>2</sub>バルクが得られたことを報告した。

MgB<sub>2</sub>バルク磁石の研究として、鉄道総研の富田らは、3テスラ級MgB<sub>2</sub>超伝導バルク磁石の着磁特性について報告した。直径30 mmφ、厚さ10 mmのバルク体2個を対向させた試料について、磁場下冷却により着磁を行ったところ、バルク体間で3.1 T（17.5 K）の捕捉磁場が得られた。また、バルク体に捕捉された磁場の分布はほぼ同心円状であり、超伝導バルクとして均一性に優れることを報告した。岩手大の佐々木らは、カプセル法により作製した大型MgB<sub>2</sub>バルクの捕捉磁場と臨界電流密度について報告した。直径38 mmφのバルクにおいて15.5 Kで1.8 Tの高い捕捉磁場が得られたことを報告し、現状では試料合成中に混入した不純物がJ<sub>c</sub>特性、捕捉磁場を低下させていることを指摘した。

九大の渡辺らは、CuNi シース MgB<sub>2</sub> 線材を用いた液体水素用超伝導式液面計の動作試験について報告した。転移温度約 30 K、線径約 0.1 mm、有効長 260 mm の MgB<sub>2</sub> 線材を使用して液体水素液面計を作製したところ、液位と 1:1 で対応した出力電圧を得ることができ、温度上昇時、下降時を含め再現性は良好であったことを報告した。

## Y 系線材関係

ISTEC-超電導工学研究所 線材開発研究部 飛田浩史 坂井直道

本節では、Y 系線材の作製プロセス及び評価に関し技術トピックスをいくつか紹介する。

作製プロセスとして、日本では MOD (金属有機酸塩塗布) 法と PLD (パルスレーザー堆積) 法を採用している機関が多いことから、両者に関して多くの発表がなされていた。

MOD 法については、高木氏及び高橋氏 (ISTEC) より、Y123 の結晶化前に中間熱処理を加えることで、緻密化やピン材料の結晶化が生じ  $J_c$  が向上すること、厚膜化による  $J_c$  低下も抑制できること等が報告された。三浦氏 (成蹊大) らは、ピン材料 BMO (M=Zr, Sn, Nb) の M を変化させることで、ナノ粒子サイズを制御することが可能であると報告した。また、 $J_c$  はこれらピンの種類よりもナノ粒子密度に強く影響されることを示した。

一野氏 (名大) らは、新規ピン止め材料の探索として、PLD 法により BaTbO<sub>3</sub> と Ba<sub>3</sub>In<sub>3</sub>Cu<sub>4</sub>O<sub>12</sub> の添加効果を検討した。77 K では効果は見られなかったが、40 K において磁場中  $J_c$  の改善が見られたとのこと。飛田氏 (ISTEC) らは、PLD 法により Gd 系線材に BaHfO<sub>3</sub> (BHO) の添加を行うことで、3 T 中において膜厚増加に伴う  $I_c$  の低下が少なく、かつ角度依存の小さい線材を作製したと報告した。これにより、77 K、3 T において、2.9 mm の膜厚でも 84.8 A/cm-w と高  $I_c$  線材が得られている。BHO 添加に関する報告は他にも数件あり、井上氏 (九州大) らは、BHO 添加した線材は、高温のみならず低温でもピンが有効に効いていると報告した。また、永水氏 (九工大) らは、BHO 添加線材は、20K においても高い  $J_c$ -B 特性が得られること、また、低温高磁場において緩和しにくいことから、高磁場コイルへの利用に有効であろうと報告した。

機械特性評価関係では、山田 (ISTEC) らは、各種プロセスで作製した線材の曲げ- $I_c$  特性を調べ、100  $\mu$ m 厚基板を用いた線材では、どれも  $I_c$  維持率 95 % となる限界曲げ径が 15-20 mm の範囲にあること、また、基板厚が薄くなると許容曲げ半径が小さくなることを報告した。菅野氏 (高エネ研) らは、様々な RE 系線材の  $I_c$ -歪み特性に関して調べており、フジクラ社製 Gd 系線材が他の線材と比べて歪みによる  $I_c$  低下が少ないことを示した。これは、他の線材が IBAD-MgO 上に LMO を成膜することで Gd123 が長手方向に <100> 配向しているのに対し、フジクラ社製の Gd 線材は LMO を用いていないため、<110> 配向となっており、長手方向に線材を曲げた場合、Gd123 が感じる歪みが低減されたことによるものであると報告した。鈴木氏 (フジクラ) らは、スタッドプル法で Gd 系線材の剥離強度を測定し、41-76 MPa (n=30 以上) の剥離強度があることを報告した。

長尺線材評価として、東川氏 (九州大) らは、リール式磁気顕微鏡による非破壊評価について報告した。この手法は線材の面内均一性を高速で評価でき、一般的に用いられている TapeStar と比較すると、線材幅方向の情報が得られることがメリットだとのこと。

以上の様に、Y 系線材のプロセス及び評価に多くの進展が見られた。

## 電力機器関連-1

ISTEC-超電導工学研究所 電力機器研究開発部 山田雄一

### 送電ケーブル

住友電工の大屋は、ケーブルが大電流化すると、コア外部への漏れ磁場による  $I_c$  低下が無視できな

くなるが、掃引速度を大きくするほど遮蔽電流が流れ、漏れ磁場の影響が少なくなり、ケーブル長が500 mを超えるとほぼ飽和して、本来の $I_c$ とほぼ一致することを報告した。産総研の吾妻は、ケーブル中心の銅フォーマ部に存在する液体窒素を考慮した熱解析を行い、より実験結果に近い温度シミュレーションができたことを報告した。早大の王は、銅メッキ厚さの異常部の厚さと長さをパラメータとして通電・伝熱・応力・ひずみ解析した結果を報告した。京大の李は、4 mm幅線材に対して2 mm幅線材を用いた場合の交流損失の解析を行った。ギャップ長を固定した設計に比べて、直径を固定した設計の方が、4 mm幅線材と2 mm幅線材のロスの違いは大きくなることを報告した。

### SMES/クエンチ保護

東北大の後村は、 $MgB_2$ によるCIC導体を用いたSMES設計を行った。現状線材では2 Tとしたが、線材を5年後の開発目標性能とすることでコンパクトな5 Tコイルが設計できたことを報告した。千葉大の柳澤は、円形コイルでは非含浸もしくは線材の耐剥離力より小さいソフトポリマーの使用で、非円形コイルではポロイミド電着とハードポリマーで固定する方法で劣化を防ぐことができることを報告した。上智大の竹松は、パラフィン含浸に比べて非含浸コイルは、線材に劣化部があっても、液体窒素の冷却によりクエンチをある程度抑制できるが、4.2 Kにおける運転では電流密度が高いため、瞬時に溶段に至ることを報告した。鉄道総研の水野は、マグレブ用コイルの含浸方法としてシアノクリレートの評価した。シアノクリレート含浸+エポキシ含浸コイルの通電試験で劣化が見られず、有効であることを報告した。早大の石山は、4枚積層コイルによる解析で、線材の転流を監視することでクエンチ検出が可能であることを実証、また、数値シミュレーションによって、安定化に必要な銅層の厚さが計算できたことを報告した。

### 特別招待講演

KERIの成による、韓国における超電導開発に関する特別講演があった。現在韓国の発電設備量は約80 GW、2022年には100 GWを超える。DAPASプロジェクトは2010年に終了。2020年に向けてのKEPCOの超電導に関するロードマップが提示された。2018年頃には50 kmの直流超電導ケーブルを目指す。原子力及び再生可能エネルギーによる発電を基本に超電導によるネットワークとスマートグリッドを構築する構想があり、超電導の20 MW風力発電機を50台、総計1 GWの電力を直流超電導ケーブルで送電する「SuperWindPlug」という計画も語られた。

### 電力機器関連-2

ISTEC-超電導工学研究所 電力機器研究開発部 山田 穰

ここでは、主に機器応用関連の報告を行う。

今回の特徴は、以下につきる。

- YBCO 線材の長尺化が各社で進んできており、機器応用が盛んになろうとしている。日産1 kmの声も聞こえてきた。量産に備えたコイル化検討の孵化期である。
- YBCO 線材では剥離特性など、応用を志向した検討が増えてきた。
- 機器応用の主要素であるコイルに関する作製法、その材料検討が盛んになってきた。
- また、応用は、風力、再生可能エネルギーなどが増えてきた。

以下、代表例を紹介する。

### YBCO コイル化検討

東北大、NIMS、東芝、フジクラなど高磁場コイル、加速器コイルなどを試行した先進的コイルの発表が増えてきている。次第にYBCOを使った際の課題とメリットが具体化されつつある。

具体例：

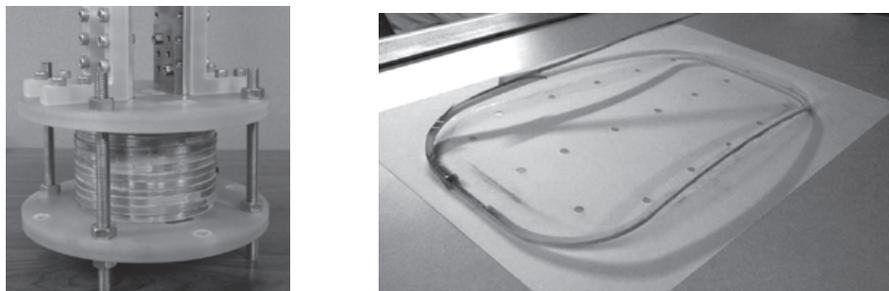
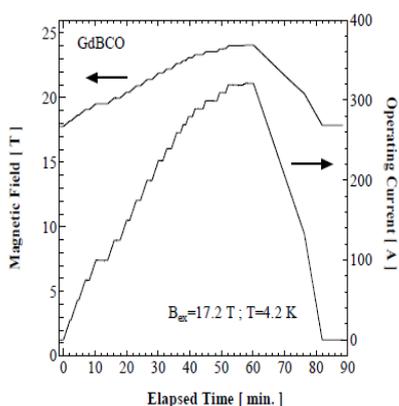


図1 イットリウム系12積層パンケーキコイル（左）と加速器用鞍型コイル（東芝ほか）用途により様々な形状のコイル、その作製方法の検討が必要である。



Operation of the GdBCO insert coil at 4.2 K in an external magnetic field  $B_{or}$  of 17.2 T. The operating current was increased stepwise up to 321 A. The magnetic field at the center of the coil was measured using a hall sensor.

Specifications of the GdBCO insert coil.

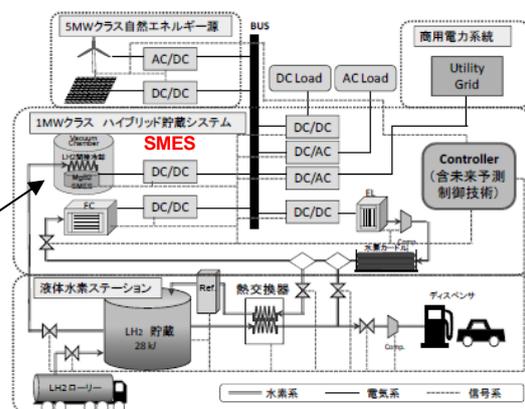
GdBCO insert coil	
Conductor	Fujikura Ltd.
Conductor Width × Thickness [mm]	5.00 × 0.15
Insulated Conductor [mm]	5.10 × 0.25
HASTELLOY® substrate [ $\mu$ m]	100
Inner diameter [mm]	50.27
Outer diameter [mm]	112.80
Coil height [mm]	88.33
Total layers	124
Total turns	2010
Conductor length [m]	515.00
Impregnation	wax
Results under electromagnetic force	
Operating current [A]	321 @ 17.2 T
Maximum $B/R$ [MPa]	408
Current density/conductor [ $A/mm^2$ ]	428.0
Current density/coil [ $A/mm^2$ ]	233.6

図2 GdBCOの25T励磁結果（左）とコイル仕様（右）  
NMR用コイル、500 m長尺使用（物材機構ほか）

再生可能エネルギー適用検討例（東北大）

超電導磁気エネルギー貯蔵装置(SMES), 燃料電池(FC), 電気分解装置(EL), 液体水素ステーション, 自然エネルギー源で構成される先進超電導電力変換システム(ASPCS)である。電源は最大出力 5 MW の風力発電で、風力エネルギーが要求電力よりも不足している場合は FC で発電をして、逆に余剰している場合は EL で水素を製造する。さらに急激な変動に対しては大電力を瞬時に入出力でき充放電効率が高い SMES で補償をする。

MgB<sub>2</sub> を使った検討であるが、YBCO 適用も可能と思われる（筆者）。



Advanced Superconducting Power Conditioning System (ASPCS)

図3 先進超電導電力変換システム(ASPCS)（東北大）

【隔月連載記事】

やさしい人工ピンのおはなし (その1)

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

カメリン・オネスの超電導の発見以降、最初の 100 年が過ぎ去った。発見後、オネスはすぐに超電導体を用いて 10 T の磁場を発生できるコイルの製作を計画する。しかし小さな磁場と小さな電流によって、超電導状態はたやすく消えてしまうことを知ることになる。臨界磁場  $H_c$  と臨界電流密度  $J_c$  の発見である。超電導の歴史は、その後、マイスナー効果の発見、2 つの臨界磁場を持つ第二種超電導体の発見へと続いていく。多くの理論的な発展も同時になされた。最初にロンドン理論によるマイスナー効果の説明、続いてギンツブルグ・ランダウ理論によって第二種超電導体の説明が可能となり、超電導状態には量子力学が深く関わっていることが明らかになっていった。そして超電導の発見から半世紀近くを経て、超電導発現機構を明らかにした微視的理論の決定版、バーディーン、クーパー、シュリーファーらによる BCS 理論が完成する。この理論は 20 世紀物性物理学の金字塔の一つであり、超電導開発を加速するとともに、素粒子物理学へも大きな影響を与えていくことになる。

高温超電導体の発見はそれからさらに 30 年近くたってからのことであった。幾多の技術的ブレークスルーを経て、高温超電導体の線材化は大きく発展した。現在では、液体窒素温度で動作可能な長尺線材が可能となっている。しかし、線材は要求される磁場と温度下において必要な  $J_c$  を提供しなければならない。そこで重要となるのが  $J_c$  の大きさを自在に制御できる人工ピン技術である。本連載では、この人工ピン技術についてやさしく解説してみたい。人工ピンの物理的な背景から製造技術に関わる近年の発展までカバーしていくことをめざしている。連載の内容は、①抵抗ゼロの起源、②渦糸の運動、③さまざまなピンニング機構、④粒界問題と人工ピンの導入、⑤人工ピンの材料科学、そして⑥人工ピンの線材への展開、等々である。

それではまず、抵抗ゼロの起源からはじめよう。

2. 高温超電導体の意義

一般に銅やアルミに電流を流すと電気抵抗による熱損失が発生する。例えば銅線でコイルを作っても、磁場発生のために大電流を流せば発熱のために銅線が溶けてしまうこともある。これに対し超電導体は臨界温度  $T_c$  以下にまで冷却すると抵抗ゼロとなる。この状態で電流を流しても熱損失はほとんど発生しないので、超電導体で作った線材を束ねて抵抗ゼロの長距離送電ケーブルを作ることが可能となる。また同様に超伝導線材を用いてコイルを作り、ひとたびこれに電流を流せば永久に流れ続けるという現象も起こる (永久電流)。さらに、コイルの発生磁場は流す電流値に比例するので、大電流を流すことで超強力な磁場発生コイルにもなる。

1986 年にベドノルツとミュラーによって発見された高温超電導体は、沸点が 77 K ( $-196^\circ\text{C}$ ) の液体窒素に浸すと超電導状態になるという革新的な物質である。通常、従来型超電導体の冷却には液体ヘリウムが用いられていた。ヘリウムは地上では偏在しており希少で高価な物質であるが、窒素は空気中に無尽蔵に存在し、液体窒素の値段はミネラルウォーターなみと大変安い。高温超電導が普及すれば、液体窒素を用いて手軽に抵抗ゼロを利用できるようになるだろう。抵抗ゼロとな

る超電導材料を用いれば、熱損失によるエネルギーの無駄使いを大幅に減らすことができる。地球上のあらゆる国々でエネルギー消費が増えつつある 21 世紀においては、エネルギーの高効率利用は地球環境保護にも直結して大変重要だ。超電導体は本質的にエネルギー損失が極小であることから、この問題を解決する大きな可能性を秘めている。

### 3. 電気抵抗ゼロの起源

電気抵抗ゼロを示す超伝導現象にはミクロな粒子の運動を記述する量子力学が深く関わっている。ここでは量子力学に基づいて、抵抗ゼロの起源に関する考えをおさらいしよう。

#### 1) ミクロな粒子と量子力学

超伝導現象の主角を担う電子は、粒子としての性質と波としての性質の両方を持ち量子力学の法則に従っている。波とみなした場合、電子は波動関数というもので表される。ここでスピンについて簡単に触れてみたい。ウーレンベックとハウスマットは 1925 年に、電子はつねに一定不変の速度で回転していると主張した。これは何らかの理由でたまたまスピン（回転）しているなじみ深い物体のスピンとは違って、電子のスピンは一時的な運動状態ではなく、質量や電荷のような固有な性質だ。この場合、電子は「スピン 1/2」を持っているという。さらにスピンには上向き（+）と下向き（-）の 2 種類がある。1/2 という大きさは大雑把に言って、粒子がどのくらい早く回転するかを示す量子力学的尺度だ。回転していない電子は電子ではない。

その後、他の物質を構成する粒子も電子と同様にスピン 1/2 を持つことが明らかになった。一方、力を伝える光子、弱いゲージボソン、グルーオンなども固有のスピンを備えているが、その大きさは物質粒子の 2 倍の「スピン 1」を持つことが明らかになっている。量子力学によれば、スピンの半整数の粒子をフェルミ粒子、整数の粒子をボーズ粒子とよんで分類する。フェルミ粒子とボーズ粒子の振る舞いは大きく異なる。フェルミ粒子は同一箇所に二つの粒子が存在できないという特徴があるが、ボーズ粒子にはこの制限はない。我々の体はフェルミ粒子でできているが、体がつぶれてしまわないのはこの性質による。

複合粒子の場合は大変興味深い。この場合、フェルミ粒子が奇数個集まった場合はスピンの合計は半整数なのでやはりフェルミ粒子になるが、偶数個の場合はボーズ粒子になるのだ。例えばヘリウム 4 原子 ( ${}^4\text{He}$ ) は中性子 2 個、陽子 2 個、電子 2 個を持つ原子なのでボーズ粒子になるが、同位体であるヘリウム 3 ( ${}^3\text{He}$ ) は中性子 1 個、陽子 2 個、電子 2 個からなるのでフェルミ粒子となる。

#### 2) ボーズ・アインシュタイン凝縮

金属の中の、アボガドロ数 ( $6.02 \times 10^{23}$ ) 個の電子のように、多数の粒子の集団の性質を調べる場合に量子力学に基づく量子統計が重要になるが、フェルミ粒子とボーズ粒子の統計には本質的に大きな違いがある。小さな箱の中に詰め込んだ多数のフェルミ粒子、例えば電子はパウリの排他律にしたがって反発しあうので一つのエネルギー準位を正負のスピンの向きを考慮しても 2 個までしか占められないのに対し、ボーズ粒子の場合はその様な事はなく同一のエネルギー準位を無制限に占めることができる。絶対零度におけるそれぞれの粒子のエネルギー分布を図 1 に示す。ボーズ粒子において、最低エネルギー状態に多数の粒子が落ち込んだ現象はボーズ・アインシュタイン凝縮とよばれる。同一のエネルギー準位を多

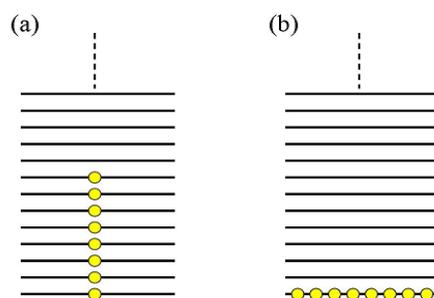


図 1 絶対零度におけるミクロ粒子のエネルギー準位分布図。(a)フェルミ粒子の場合。ひとつのレベルに、スピンの上向きと下向きの 2 個まで入ることができる。(b)ボーズ粒子の場合。最低レベルにすべての粒子が落ち込んでいる。

数の粒子が占めるということは、これら粒子が同一の運動量とエネルギーを持った波動関数を持つことを意味し、それらが位相をあわせて重なり合うことで巨視的波動関数というもので表される状態になっている。実際にボーズ粒子であるヘリウム4原子の集団（液体）は2.2Kでボーズ・アインシュタイン凝縮を起こし、超流動とよばれる不思議な現象を引き起こす。このとき液体状のヘリウムの粘性は完全にゼロになる。

### 3) クーパー対の形成

さて、電子はフェルミ粒子であるので、小さな箱の中に多数の電子を詰めていくと最低エネルギー準位から高いエネルギー準位の広い範囲に分布し、全体のエネルギー状態も高くなってしまふ。しかし自然は低いエネルギー状態を好むので、何らかの方法で電子をボーズ粒子に変えることができれば、全体のエネルギー状態を下げるができる。

ここで、箱の中のアボガドロ数程度の多数の電子の中から、運動の方向は逆向きだけれども同じ運動量を持ちスピンの向きも逆である2個の電子を選び出し、短い時間ではあるがペアを組ませたとする。ペアを結合させる引力は熱に弱いので温度が下がることによって初めてペアができるでしょう。先の議論からこの電子のペアは短時間の間はボーズ粒子として分類されることが分かる。アボガドロ数の電子の集団の中には条件を満たすものは無数にあるので、温度を下げることでこのような電子のペアは大量に形成されるはずだ。この電子のペアのことをクーパー対という。

個々のクーパー対は短時間でペアを解消し、またどこかでペアを組むということを繰り返すが、平均的には電子の集団の中に無数のクーパー対が同時に存在することになり、クーパー対の集団はある温度以下でボーズ・アインシュタイン凝縮を起こし、電子系はよりエネルギーの低い状態に転移する。この温度が臨界温度  $T_c$  である。クーパー対の集団は同一の波動関数を持つので、波動関数は位相を合わせて重なり合って巨視的な波動関数というものになる。この状態が超伝導状態だ。極めて量子力学的な状態だ。以上がBCSが示す超電導の起源である。これは先のヘリウム4の超流動状態とよく似ているが、ヘリウム原子は電荷を持たないのに対し、クーパー対は電荷を持っている。そのためヘリウム4では粘性がゼロになるのに対し、超伝導では電気抵抗ゼロの状態が現れてくるのだ。

以上が、ゼロ抵抗に関わる物理的な背景である。今回は、人工ピンにおいて重要な渦糸の運動について考える。

[超電導 Web21 トップページ](#)

## 読者の広場

### Q&A

**Q** : 「世界一複雑な原子配列を持つ高温超電導体を発見、との新聞記事がありました。どのような構造なのでしょう。また、今後どのような研究が進められるのでしょうか?」

**A** : 私はよく銅酸化物や鉄系高温超伝導体の構造をサンドイッチに例えています。銅酸化物高温超伝導体では  $\text{CuO}_2$  面が、鉄系では  $\text{FeAs}$  面がサンドイッチのパンに相当します。今のところ 2 種類のパンしかないの、おいしいサンドイッチを作るには (超伝導転移温度を高くするには) その間に挟む具材 (層間物質) を工夫するしかありません。これまでに鉄系超伝導体で見つかった具材は大きく 3 種類に分類できます。第一がアルカリ金属やアルカリ土類金属で、 $\text{LiFeAs}$  の  $\text{Li}$  や  $\text{BaFe}_2\text{As}_2$  の  $\text{Ba}$  がこれに該当します。この具材は素材が限られているので物質のバリエーションは出尽くした感があります。この仲間では  $(\text{Ba}_{0.6}\text{K}_{0.4})\text{Fe}_2\text{As}_2$  が最高の転移温度 38 K を示します。第二は蛍石構造から派生する層間物質で、 $\text{LaFeAsO}$  の  $\text{LaO}$  や  $\text{CaFeAsF}$  の  $\text{CaF}$  があります。このグループで鉄系最高の転移温度 56 K が得られています。この具材も素材が希土類やアルカリ土類金属に限られるので、物質探索は尽くされたといえます。第三が金属酸化物からなる具材で、 $\text{Ca}_4(\text{Mg}, \text{Ti})_3\text{O}_8$  を挟んだときに 47 K で超伝導を示します。このグループは素材のバリエーションが豊富で、東大グループが積極的に物質開発を進めています。今回新聞で報道された 38 K で超伝導を示す  $\text{Ca}_{10}(\text{Pt}_4\text{As}_8)(\text{Fe}_{2-x}\text{Pt}_x\text{As}_2)_5$  は、これらのどれにも属さない第四の層間物質  $\text{Ca}_{10}(\text{Pt}_4\text{As}_8)$  — ヒ素化合物 — を含んでいます。このような共有結合性の強い具材は、銅酸化物高温超伝導体には無かったもので、鉄系超伝導体の物質としてのポテンシャルの高さを示すものと言えます。結晶構造は  $\text{FeAs}$  面と  $\text{Pt}_4\text{As}_8$  面が交互に積層し、それらの間に  $\text{Ca}$  イオンが挿入されたものです。単斜晶と対称性が低く、また単位胞に含まれる原子数も多いので「世界一複雑な」といういささかジャーナリスティックな報道になってしまいました。構造のもう一つの特徴として  $\text{Pt}_4\text{As}_8$  面が分子状のヒ素  $\text{As}_2$  からできていることが挙げられます。ヒ素の化学は面白くて、福井謙一とノーベル化学賞を共同受賞したロアルド・ホフマンが、固体中での分子状ヒ素  $\text{As}_2$  の形成と解離の理論を提唱しています。 $\text{As}_2$  分子の反結合分子軌道  $s^*$  と遷移金属の  $d$  バンドのエネルギー的な拮抗が重要です。 $\text{Ca}_{10}(\text{Pt}_4\text{As}_8)(\text{Fe}_{2-x}\text{Pt}_x\text{As}_2)_5$  の複雑な原子配列 - 分子状ヒ素  $\text{As}_2$  の形成 - もホフマン流の理論から理解できそうです。今後は、このようなヒ素の化学を積極的に利用した物質開発を進めていく予定です。特に、分子状ヒ素の形成・解離のきわにある物質が、電子状態の揺らぎも相まって、高い温度で超伝導を示すのではないかと想像しています。

回答者：岡山大学大学院自然科学研究科 教授 野原 実 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。」