

掲載内容（サマリー）：

トピックス：

- 風力熱蓄積発電
- 10月29日、住友電気工業、東京電力、前川製作所は、東電旭変電所で国内初のBi系超電導ケーブルの実証試験を開始した。この実証試験は、NEDOのプロジェクトの一環です。http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100159.html
- 超電導関連 2012年11-12月の催し物案内
- 新聞ヘッドライン（9/21-10/19）
- 超電導速報—世界の動き（2012年9月）
- 「電子情報通信学会 2012年ソサイエティ」報告
- 「応用物理学会」報告
- 隔月連載記事—やさしい人工ピンのおはなし（その6）
- 読者の広場(Q&A)—「古河電工、超電導子会社が米誌技術百選に選ばれた」との新聞記事がありました。どういう技術内容なのでしょう。今後、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>



トピックス：風力熱蓄積発電

公益財団法人 国際超電導産業技術研究センター
普及啓発部 兼 国際部
部長 岡崎 徹

風力発電に限らず多くの自然エネルギーには出力不安定性の課題がある。これを克服し、騒音問題なども解決できる可能性が示された風力熱蓄積発電（Wind Heat Power; WHP）について、電気学会の電力技術／電力系統技術合同研究会にて『風力熱発電』の題名にて発表し一定の評価を得たので紹介する。本技術に超電導を採用するとさらに大幅にコストが下がり、既存のあらゆる発電方式よりも安価に安定発電できる可能性がある。

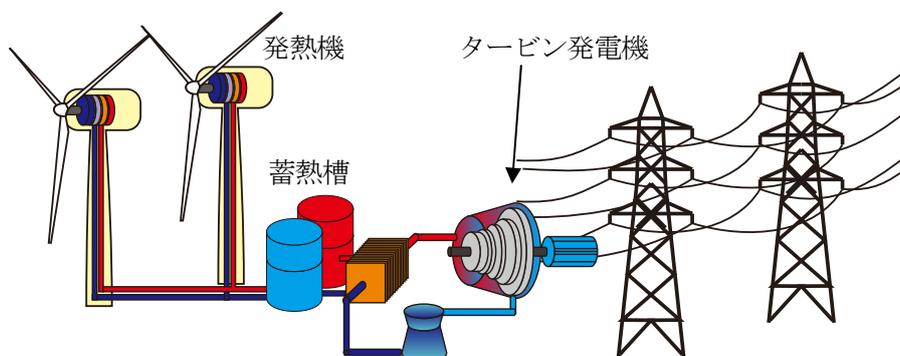


図1 風力熱蓄積発電の構成

風力熱蓄積発電の構成を図1に示す。風力タワーの上部に発熱機という渦電流を利用した電気ブレーキの一種を配置して回転エネルギーを熱エネルギーに直接変換する。電力の形態で出力しないので、発熱機は大幅な軽量化と低コスト化が可能である。発生した熱は熱媒油や熔融塩などにより地上の蓄熱槽に輸送して貯蔵され、必要時に取りだし蒸気タービンにて発電する。後半部分は近年太陽光発電より安定発電が可能なタワー型太陽熱発電と同じである。従来の風力と比べて効率が悪くメリットが無い様に見えるが、**効率と設備コストの観点で定量的に評価すると最も低エネルギーコストとなる**。その理由は、

1. 現状の自然エネルギーの導入は新鋭火力発電所の増設無しには成立しない。
2. 大量導入時には発電抑制も必要となる（全量引き取りは不可能）。
3. 風力に関しては発電機の高コスト化が課題。
4. 従来言われているような蓄電設備は、供給業者から見て導入の可能性は無い。

以上の根拠も含めて詳細は今後の Web21 にて解説していきたいが（2013年隔月連載予定）、安定供給を前提とした場合の電力コストの比較グラフを図2に示す。風力熱蓄積発電のコストはWHPとしており、現状技術の組み合わせの結果と、多少の開発要因を考慮した場合を Optimized として記載している。EU実績ベースでの比較のため日本の現状より安い、中国の現状より高い。

風力熱蓄積発電で用いられる発熱機に超電導を採用すると、**図2以上の低コスト化が期待できる**。通常は、熱エネルギーを運動エネルギーに変換する際に大きなロスがある。しかし作動ガス温度が

高いほど効率は良くなる。発熱機は渦電流の原理で発熱するため金属が溶解する温度まで作動温度を上げられる。しかしその様な高温下で磁性を維持する金属は少なく、大きな起磁力が必要となる。そこで大磁場を大空間に形成する MRI に超電導が必要であるように、高温型の発熱機には超電導が必要となる。発熱機のシステム全体に対するコストは小さく超電導化してもさして全体コストアップが無いのに対して、効率は 1.5~2 倍になることが期待され、結果として大きなエネルギーコストの削減に繋がる。現時点で発熱機の実例は少なく常電導の高温発熱機を完全に否定は出来ないが、少なくとも現存する発熱機に応用できる高温発生装置は超電導しかない。

超電導を利用した発熱機は、導体が溶解する温度まで得られるため別の使い方も考えられる。例えば 1000 °C に近い温度になると、高温水蒸気電解も可能となり、水素の製造によるエネルギー蓄積や、石炭のガス化などのプロセスにも利用することが可能になるなど、超電導化によって様々な技術への裾野も大きくなる。

この風力熱蓄積発電の概念そのものが新規であるため色々な可能性を試みる事が重要であろう。特に注意すべき点として風力発電は総合技術であると言う点で、立地場所、方式、部材構成、調達、輸送、建設、運用など全てを考慮する必要がある。風力熱蓄積発電には実現そのものに大きな課題は見当たらないが、電気機器の側面と熱機械の側面がありこの両方に通暁しての最適化は簡単では無い。まずは幅広く検討し、試作・検討を通じて本格的開発に着手することが重要であろう。

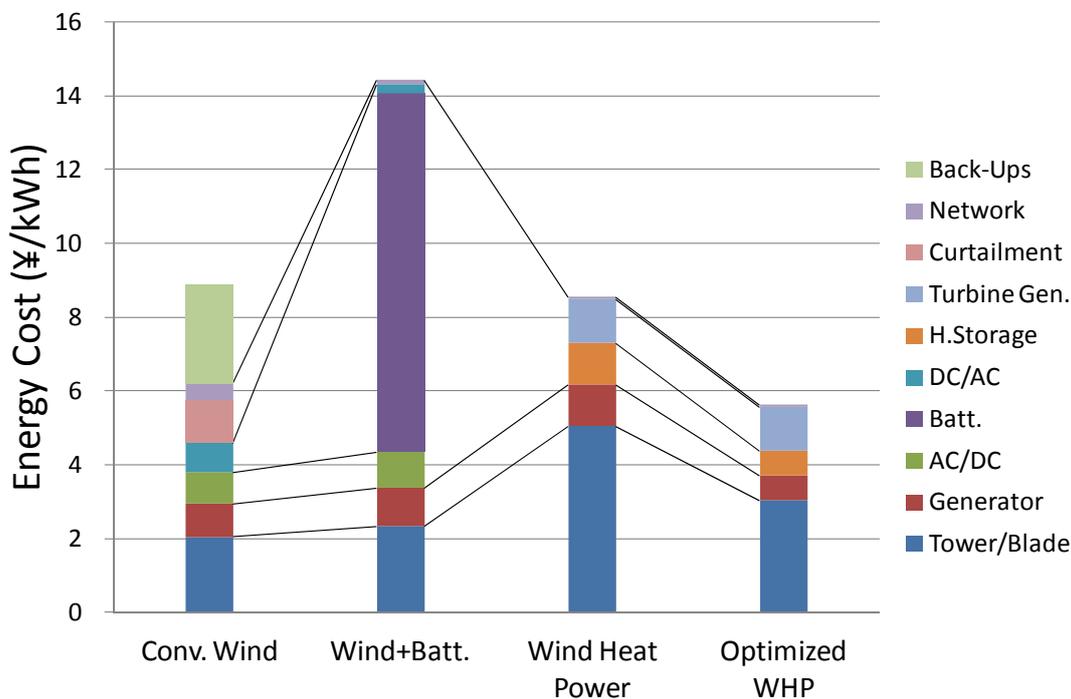


図2 コスト試算結果 (常電導の場合)

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導関連 ‘12/11 月－12 月の催し物案内

11/6

低温工学・超電導学会

第2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

場所：東北大学金属材料研究所

問合せ：http://www.csj.or.jp/application/2012/2nd_1106.pdf

11/7-11/9

低温工学・超電導学会

2012 年度秋季 低温工学・超電導学会研究発表会

場所：アイーナ（岩手県盛岡市）

問合せ：<http://www.csj.or.jp/conference/2012a/index.html>

11/14-11/16

Conference on Coated Conductors for Applications (CCA 2012)

場所：Heidelberg, Germany

問合せ：<http://www.itep.kit.edu/cca2012/64.php>

12/7

低温工学・超電導学会 関西支部 特別講演会

場所：大阪市立大学文化交流センター

問合せ：http://www.csj.or.jp/kansai/2012/11th_1207.pdf

(編集局)

[超電導 Web21 トップページ](#)

新聞ヘッドライン (9/21-10/19)

- レアメタル国際価格、ビスマス、2年ぶり安値圏。 日本経済新聞 9/21
- シーエムシー技術開発、ネオジム磁石リサイクルー安価でレアメタル回収 日刊工業新聞 9/21
- 透明な超電導材を開発、東北大、マイナス260度で実現 微弱光検出など用途 日経産業新聞 9/24
- 世界最大級の風力発電所 伊藤忠、米で運転開始 朝日新聞 9/26
- 鉄道総研、超電導ケーブル実用化へ年度内に走行試験 日刊工業新聞 9/26
- 岡山大など、臨界温度高める新手法、超電導材料、柔らかく 日経産業新聞 9/27
- 北海道電力：風力発電の追加買い取り枠、5事業で実証実験へ /北海道 毎日新聞 9/29
- 熱核融合実験炉に超電導線材、神戸製鋼系、21トン受注。 日経産業新聞 10/03
- リニア見学センター新施設 実物展示 浮上体験 計画概要まとまる＝山梨 東京読売新聞 10/03
- 日米共同スマートグリッド実証プロジェクト～ロスアラモス郡で運転開始 科学新聞 10/05
- 再生可能エネの関連市場、国内、20年度3兆円に、民間予測、長期的には住宅用成長 日経産業新聞 10/11
- ニッポン発素材の未来（上） 下積み50年、技術開花ー住友電工、東レ 日経産業新聞 10/11
- 国際標準化へセミナー 「日の丸パワー半導体」 電気新聞 10/11
- 透明超伝導体の転移温度で東北大が世界記録更新 科学新聞 10/12
- 電気自動車向け超電導モーター、住友電工、開発に着手、来春試作品 日本経済新聞 10/13
- 浮体式洋上風力発電：PR、ミニサイズで紹介ーきょう・あす、中部電力技術開発本部 毎日新聞 10/17
- 蓄電、国際標準化を主導 官民で日本国内委設置へ 電気新聞 10/17
- 再生可能エネルギー（1）全量買い取り、導入加速（よくわかる） 日経産業新聞 10/18
- 首都大など、硫黄・ビスマス使い超電導 日経産業新聞 10/19

(編集局)

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導速報—世界の動き (2012年9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

▶線材



新 EUROTAPES Project 始まる

Bruker Energy & Supercon Technologies, Inc. (2012年9月28日)

Bruker Energy & Supercon Technologies 社 (BEST) は、完全子会社であるドイツの Bruker HTS が、欧州委員会研究・イノベーション総局から、EUROTAPES プロジェクト*のための助成金 230 万ユーロを受けたと発表した。このプロジェクトの目的は、最良の導体設計を見出し、HTS YBCO コート線材の最も効率的な製造方法を特定することで、その高性能化を図ることである。EUROTAPES プロジェクトは欧州 8 カ国から 20 の共同連合体 (企業 8 社、6 大学、研究機関 5 件、そして技術センター 1 件) で実施されている。Bruker HTS は、このプロジェクトを率いる企業パートナーとして、2012 年 9 月 1 日に始まった 54 ヶ月に及ぶプロジェクトへの資金援助のうち、最大のシェアを受け取ったことになる。BEST 社もまた、独自の YBCO HTS テープ線材の開発強化並びにスケールアップに向けて多量の資金 (約 400 万ユーロ) を投資するつもりであり、新技術と製造プロセスの評価、さらに最高品質の材料とプロセス技術をうまく組み合わせ、スケールアップに焦点を当てている。プロジェクト全体の予算は 2,000 万ユーロ相当、そのうち 1,350 万ユーロは欧州連合(EU)が資金を提供することになっている。

(出典)

Source: "BEST Announces \$3 Million EUROTAPES Program Grant from European Union for Further Development and Advancement of Second Generation HTS Tapes"

Bruker Energy & Supercon Technologies, Inc. press release (September 28, 2012)

URL:

<http://www.bruker.com/news-records/single-view/article/best-announces-3-million-eurotapes-program-grant-from-european-union-for-further-development-and-ad.html>

Contact: Dr. Klaus Schlenga of BEST, Klaus.Schlenga@bruker-est.com

*編集部注：EUROTAPES project は、この9月1日から開始されたEUの高温超電導プロジェクトである。予算は2,000万€、期間は54ヶ月。IBAD、RABiTS基板、YBCO線材および製造プロセスの高性能化を行う。目標は、100 €/kAm、丸線化などで、Bruker、Nexans、Theva社など20機関(8企業、6大学、5国研、1技術センター。8か国)が参加する。

▶加速器



トルコの加速器を受注

Bruker Energy & Supercon Technologies, Inc. (2012年9月5日)

Bruker Energy & Supercon Technologies社の子会社であるRI Research Instruments社は、トルコ加速器センター(TAC)から約480万ドル相当の大型契約を獲得した。その契約内容とは、ドイツHelmholtz研究センターのDresden Rossendorf研究所によって開発された設計を基に、2つのターンキー式超電導加速モジュールを建設するというものである。このTACプロジェクトの本来の目標は、トルコ初の加速器をベースにした赤外自由電子レーザー(FEL)の放射光施設を構築し、トルコの科学者たちが先端科学研究基盤にアクセスすることで新たな研究開発活動の機会をもたらすことにある。新施設の立ち上げは2014年に予定されている。

(出典)

Source: "Research Instruments GmbH Awarded Contract for Superconducting Accelerating Modules from Turkey"

Bruker Energy & Supercon Technologies, Inc. press release (September 5, 2012)

URL:

<http://www.bruker.com/news-records/single-view/article/research-instruments-gmbh-awarded-contract-for-superconducting-accelerating-modules-from-turkey.html>

Contact: Hanspeter Vogel of RI, Hanspeter.Vogel@research-instruments.de



米中韓英台から加速器ビームラインを受注

Bruker Energy & Supercon Technologies, Inc. (2012年10月2日)

Bruker Energy & Supercon Technologies社(BEST)は、最先端の中エネルギー電子貯蔵リングで

ある国立シンクロトロン放射光施設 (NSLS-II) で使用されるビームラインのコンポーネント生産のため、Brookhaven 国立研究所 (BNL) から 550 万ドル相当の契約 3 件を請け負った。これらのコンポーネントは、コヒーレント硬 X 線 (CHX) 散乱、サブミクロンクラス高分解能 X 線 (SRX) 分光、そして X 線非弾性散乱 (IXS) というビームラインで使用される。NSLS-II は、米国エネルギー省科学局によって資金提供され、2015 年には操業を開始する見通しである。

さらに、同社は他にも総額約 600 万ドルに上るビームライン実験ステーション建設の契約を、韓国、台湾、中国、イギリスの顧客から 4 件請け負っている。これらのステーションは、韓国の Pohang 加速器研究所で走査型透過 X 線顕微鏡 (STXM) エンドステーションに、イギリスの国立放射光施設 Diamond Light Source 社で最高仕様の STXM エンドステーションに、中国科学院上海応用物理研究所で 3 つの蛋白質結晶構造解析 (PX) エンドステーションに、そして台湾の国立シンクロトロン放射研究センターで 2 つの PX マイクロ回折装置に使用される。

(出典)

Source: "BEST Awarded Multiple Contracts Worth over \$11 Million from Brookhaven National Lab and Global Beamline Customers"

Bruker Energy & Supercon Technologies, Inc. press release (October 2, 2012)

URL:

<http://www.bruker.com/news-records/single-view/article/best-awarded-multiple-contracts-worth-over-11-million-from-brookhaven-national-lab-and-global-beam.html>

Contact: Dr. Hans-Udo Klein of BEST, udo.klein@bruker-asc.com

▶エレクトロニクス



MRI 応用で助成金

HYPRES, Inc. (2012年9月13日)

HYPRES 社は、米国保険社会福祉省を通じて、14 万 5,821 ドルの中小企業技術革新制度 (SBIR) という助成金を受けた。この助成金の目的は、超電導デジタル回路を利用して、従来の MRI エレクトロニクスを用いたものと比べ解像度がより高く、スキャン時間の高速化をもたらす MRI 装置用の改造モジュールを開発することである。同社は、この開発プロジェクトの第 1 段階において、閉鎖型並びにオープン型の全 MRI 装置に適応できる高ダイナミックレンジの新しい MRI モジュールをデジタル化する技術を開発し、生産に向けて注力していく。デジタル化したこのモジュールの特徴は、起寒剤なしで手軽に使用できる小型冷却システムに組み込まれた Digital-RF™ (アナログ - デジタル変換技術) であり、HYPRES 社特許となっている。HYPRES 社の最高経営責任者 Richard Hitt 氏は、「高性能な MRI 装置を開発する新世代において、我々が主導的役割を果たしていくことに喜びを感じている。我々のデジタル超電導回路の従来にない高速の動作スピード並びに高感度センサーのお陰で、これまでには考えられないような最も要求の厳しい課題に対しても、この革新的且つ高性能な技術を活用して取り組むことができる。」と述べた。

(出典)

Source: "Gillibrand, Lowey Announce \$146K Federal Grant for HYPRES to significantly Improve the Performance of MRI Systems"

Hypres, Inc. press release (September 13, 2012)

URL:

<http://www.hypres.com/newsroom/gillibrand-lowey-announce-146k-federal-grant-for-hypres-to-significantly-improve-the-performance-of-mri-systems/>

Contact: technology@hypres.com

▶ 経営・決算



2012 R&D 100 Award を受賞

SuperPower (2012年9月7日)

古河電気工業株式会社の子会社である SuperPower 社は、Oak Ridge 国立研究所と Houston 大学と共に、高磁場下でもより大きな電流を運ぶことができる希土類系高温超電導線材の実用化に向けた“超電導層中にダブルペロブスカイト型のタンタル酸化物を均一に分散させてピン止め機能を高性能化”する研究開発に関し、R&D Magazine (米国の科学技術雑誌) 主催 2012 R&D 100 Award を受賞した。毎年恒例の R&D 100 Award は、過去一年間にグローバル市場に提供された将来性の高い研究開発成果 100 件に授与されるものである。SuperPower 社ならびに共同研究者は、超電導層中にナノ構造の酸化物を均一に分散させてピン止め機能を改善した。高磁場下でも高電流を運ぶことができる希土類系超電導線材の実用化が高く評価され、今回の受賞に至った。このような超電導線材は、電力貯蔵装置である超電導磁気エネルギー貯蔵 (SMES) システム、風力発電機、MRI、そして医療用加速器など、超電導機器の実現に欠かせない線材である。

(出典)

Source: “SuperPower wins 2012 R&D 100 Award with University of Houston and Oak Ridge National Laboratory for practical application of superconducting wire”

SuperPower press release (September 7, 2012)

URL:

<http://www.superpower-inc.com/content/superpower-wins-2012-rd100-award-uh-and-ornl-practical-application-superconducting-wire>

Contact: Traute F. Lehner, tlehner@superpower-inc.com

[超電導 Web21 トップページ](#)

「電子情報通信学会 2012 年ソサイエティ」報告

独立行政法人 産業技術総合研究所
ナノエレクトロニクス研究部門 超伝導計測デバイスグループ
山田隆宏

2012年9月11日から14日までの4日間、富山大学にて電子情報通信学会ソサイエティ大会が開催された。一般講演 1579 件、シンポジウム講演 141 件であった。超伝導エレクトロニクスのセッションは11日に設定され、午後前半後半7件ずつで計14件の一般講演が行われた。

横国大の室から、ジョセフソン接合 (JJ) の離散エネルギー準位観測のため、JJ の Escape rate 測定実験が報告された。キャパシタンスを従来の15倍に上げ、発振周波数を1.36倍に増やしたが、準位は見られなかった。4.2 K から 1.4 K まで下げることで観測可能とした。電通大の滝口から、Co-Al-Co の二重障壁型単一電子トランジスタの報告があった。設計自由度の高い横型構造、2つの強磁性体電極の幅を変えて、トンネル磁気抵抗比 (MRR) を増やした。MRR は 1.95 K で 1.4 % であったが、0.084 K に下げると 1600 % に上昇し、冷却によるスピン緩和時間の増大が根拠とした。電通大の水柿からは、アルミ JJ を用いた SQUID インダクタンス、JJ キャパシタンス評価を行い、それぞれ 277 pH (2L), 54 fF/ μm^2 とした。臨界電流値が小さくなると、ジョセフソン結合エネルギーに対して帯電エネルギーが無視できず、量子ゆらぎが見えることを示した。産総研の天谷から、プログラマブルジョセフソン交流電圧標準を用いた熱電変換器の評価報告があった。バイアス切り替え時に発生する誤差回避のため、キャリブレータとサンプリング法を導入し、10~62.5 Hz で従来法と同等の不確かさ (3.1~3.3 $\mu\text{V/V}$)、1~10 Hz では従来法より優れた結果となった。ISTEC の鈴木から、フラッシュ型 SFQ ADC の報告があった。バイアス電流のグランド経由戻り分が回路ブロック間で干渉するのを防ぐ工夫がされていた (ブロック間配線を PTL 配線とし、ブロック外周部で超伝導グランド面を切断分離し、代わりにモリブデン抵抗層にて弱接続)。10 GHz 電気・光入力ともに 4~5 ビット動作を確認し、100 GHz サンプリングでの動作にも成功した。横国大の井上からは、断熱型磁束量子パラメロン全加算器の実証、SFQ 方式との比較がされた。JJ 数は 44 (SFQ 方式 206)、集積度で 3 倍向上、バイアスマージン計算値 29.9 % (SFQ 方式 27.8 %)。横国大の高橋からは、SFQ 回路の電流リサイクルのための、インダクタンス結合型送受信回路について報告があった。外部磁場の影響を減らすためグランドホールを除去し、浮遊インダクタンスを抑えるベロ構造を導入した。37 GHz まで動作したが、外部磁場やバイアス電流の影響低減化が課題。

名古屋大の滝波から、低電圧駆動 SFQ 回路用 PTL 配線についての報告があった。従来の 2.5 mV より低い電源電圧 0.1 mV でも、バイアス線にインダクタンス 15 pH を挿入することで、マージンが 10 % 向上し、15 GHz 動作に成功した。横国大の桑原から、SFQ/CMOS ハイブリッドメモリ実証として、ラッチングドライバ (JLD)、CMOS アンプ、メモリ、JJ 電流検出部までの一連動作が報告された。アクセスタイムは 3.68 ns と、シミュレーション値 (1.3 ns) より大きい (CMOS アンプが原因)。JLD のマージンは最大 12 % だが、複数チャンネル同時動作でのマージン狭まり、モジュールごとのマージンばらつきといった課題がある。名古屋大の田中から、メモリ向け低消費電力・高密度 SFQ シフトレジスタの提案があった。1 ビットあたり 4 JJ で構成され、データ線にクロック線を並走させた構造で、40 μm 角に集積可能。動作確認がなされたが、回路構成・パラメータ最適化によるマージン拡大が必要とのこと。京都大の川口からは、SFQ 回路の静的タイミング解析手法の提案があった。従来手法は、AND, OR, NOT 等論理ゲートで構成される通常の SFQ 回路にのみ適用可能であったが、CB, NDRO, Muller C 等特殊ゲートに対しても広く適用可能なモデルとのこ

と。名古屋大の早川からは、4 並列 4 段 SFQ RDP の検討があった。28528 JJ と最大規模の設計であったが、動作は確認できず課題となった。横国大の加藤から、SFQ 半精度浮動小数点加算器 (11521 JJ, 3.5 mW) の報告があった。要素回路の加減算器はマージン 89~109 %, 66 GHz まで動作。発覚した配線ミスを考慮し直したところ、仮数部、指数部を含めても低速動作に成功した。横国大の彭からは、SFQ 半精度浮動小数点乗算器 (10836 JJ, 3.4 mW) の報告があった。要素回路の指数部演算回路は動作マージン 89~128.5 %, 86 GHz まで動作。仮数部演算回路については、高速では一部が動作せず今後の課題だが、低速では点マージンで完全動作した。

[超電導 Web21 トップページ](#)

「2012年秋季第73回応用物理学会学術講演会」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

材料物性バルク研究部 主管研究員 筑本知子

線材開発研究部 主管研究員 坂井直道

デバイス研究開発部 主管研究員 波頭経裕

低温デバイス開発室 室長 日高睦夫

全体概要／鉄系超電導体関連

材料物性バルク研究部 主管研究員 筑本知子

全体概要

2012年秋季第73回応用物理学会学術講演会は9/11(火)～9/14(金)に愛媛大学キャンパスを会場として、開催された。昨年度から、超伝導分科の活性化のため、いくつかのトピックスを取り上げて分科シンポジウムが企画されており、今回は「高温超伝導マグネット開発の最前線」をテーマとしたシンポジウムが初日の午前中に開催された。一般講演は『基礎物性』、『薄膜、厚膜、テープ作製プロセスおよび結晶成長』、『臨界電流、超伝導パワー応用』、『アナログ応用および関連技術』、『接合、回路作製プロセスおよびデジタル応用』の5つのセッションに分かれて行なわれ、全体で164件の発表があった。



会場となった愛媛大学の正門



会場内の愛媛大学ミュージアム、
昼休み時間帯には多くの学会関係者
で賑わっていた。

鉄系超電導体関連

『基礎物性』、『薄膜・厚膜・テープ作製プロセス、結晶成長』、『臨界電流、超伝導パワー応用』の3つのセッションにおける鉄系超電導体に関する発表について、聴講できた範囲の内で主要なものについて報告する。

『臨界電流、超伝導パワー応用』: 初日の午後に4件の発表があった。

NIMSの藤岡らは、Ex-situ PIT法によるSm1111線材作製において用いるバインダー材SmF₃をInF₃

を変更したところ 4.2 K での J_c が 1.8×10^4 A/cm² から 2.5×10^4 A/cm² に向上するとともに、焼成温度の低温化が可能になることを見いだした。筆者 (ISTEC の筑本) は連続した 2 つの講演を行い、1 つ目の講演では BaFe₂As₂ (Ba122) 系単結晶の磁束クリープ特性に及ぼす Co と P 置換の影響について、Co ドープでは、Co 置換領域が所謂 ΔT_c ピン止め中心として働き、置換量によって collective creep/plastic creep 境界が大きく変化することを報告した。次の講演では、MgO 基板上に PLD 法によって成膜した BaFe₂(As,P)₂ 薄膜の超電導特性について、4.2 K の自己磁場中で、3.5 MA/cm² と比較的高い J_c が得られ、3 T まで 1 MA/cm² の高い J_c 値が得られたことを述べた。東大院工の林らは、Co ドープ Ba122 多結晶バルク体の合成において、従来 1 回の焼成で済ませていたところを、追加焼成を行うとともに、徐冷プロセスを加えることにより粒界のクラック抑制できることを見いだした。

『薄膜・厚膜・テープ作製プロセス、結晶成長』: 鉄系の発表は主に 2 日目の午前中に行なわれ、11 件の報告があった。

物材機構の尾崎らは、FeSe の層間に K をインターカレートした $K_xFe_{2-y}Se_2$ 超伝導体について、新たに one-step 単結晶育成法を開発し、非常に高い特性 ($T_c^{\text{onset}}=32.9$ K, $J_c(B_g/c)=3.4 \times 10^4$ A/cm²) が得られたことを報告した。また Te 置換の超電導特性及び結晶構造に及ぼす影響について調べ、置換量-温度相図を提案した。九工大の算用子らは CaF₂ 基板上に PLD 法で Fe(Te,Se) 膜を作製し、Te-rich ターゲットを用いた方が高い特性が得られることを見いだした。電中研の一瀬らは CaF₂ 基板および LaAlO₃ 基板上に、CaF₂ バッファー層を界して PLD 成膜した Fe(Te_{0.6}Se_{0.4}) の界面付近の TEM 観察を行い、LaAlO₃/CaF₂ 界面にアモルファス層が生成していることを見いだした。ISTEC の三浦らは BaFe₂(As_{1-x}P_x)₂ 薄膜特性の x 依存性について調べ、x=0.33 で最も高い T_c 、 H_{c2} 、最も低い γ 値となることを報告した。ISTEC の石丸らは (Ca,Nd)Fe₂As₂ 薄膜の MBE 成長について、超電導にはならないものの c 軸配向膜 (FWHM=0.06°) が得られていると述べた。東工大の片瀬らは、

(Ba,RE) Fe₂As₂ (RE=Ce, Pr, Nd) の PLD 成膜を行い、希土類元素種類及びドープ量による特性の変化について調べた結果について報告した。Ce 置換では超電導性が確認され x=0.15 で T_c が最高となったのに対し、Pr, Nd 置換はゼロ抵抗及び磁化の反磁性が見られず、その原因について希土類の局在スピンと伝導電子の相互作用が原因と考察した。農工大の高野らは MBE 法による (Ba_{1-x}K_x)Fe₂As₂ (x=0.35) 薄膜について、基板依存性を調べた結果、 T_c は CaF₂ < Al₂O₃ < LaAlO₃ の順で高くなること、また、Al₂O₃ 及び LaAlO₃ の酸化物基板上では成長前に付着物 (K) をつけると c 軸配向の膜が得られるのに対し、酸化物基板ではない CaF₂ では付着物があると特性が悪くなることを見いだした。名大の森らは $\theta_{GB}=24^\circ$ のバイクリスタル基板上に BaFe₂(As_{1-x}P_x)₂ の MBE 成長を行い、4.2 K において 1.1×10^6 A/cm² の高い粒界 J_c が得られたことを報告した。名大の川口らはバイクリスタル基板 ($\theta_{GB}=24^\circ$) を用いて NdFeAs(O,F) の超電導接合を作製し、その接合特性について IV 特性は RSJ 型ジョセフソン電流とフラックスフローを足し合わせた振る舞いで $R_x=13.5$ mΩ であること、また、粒界 J_c は $\theta_{GB}=0^\circ$ より 1 桁低いが、銅酸化物より接合角依存性は小さいことを見いだした。東京理科大の平らは In-situ 法による (Ba,K)Fe₂As₂ 超電導 PIT 線材作製について、いかに K 過剰量をコントロールできるかが J_c 向上の鍵であるとの述べ、組成比 BaAs:KAs:Fe2As = 0.6:0.42:1 で混合した時に最高 T_c の 38 K 得られているが、 J_c 値はまだ 10^3 台であり、線材内のボイドの低減が課題であると報告した。AIST の伊豫らは In-situ 法による (Ca,Na) Fe₂As₂ 超電導 PIT 線材の作製を試みた結果、今のところ $T_c \sim 34$ K が得られているものの、まだまだボイドが多く $J_c \sim 0$ に留まっていると報告した。

『基礎物性』: 鉄系の発表は 2 日目の午後に集中しており、応用物理学会論文奨励賞受賞記念の招待講演を行った名古屋大の川口氏を含め、8 件の報告があった。セッション冒頭に行われた受賞記

念講演で名大の川口氏は、受賞対象となった MBE 法による NdFeAs(O,F) 薄膜作製プロセス開発についてのレビューを行うとともに、粒界ジョセフソン接合等の最近の成果について紹介した。物材機構の高野らは $\text{FeTe}_{1-x}\text{Se}_x$ (11 系) 超電導体について酸素又は酒アニールによって超電導特性が向上することについて、酸素あるいは酒中の有機酸が、11 系内に存在する過剰鉄に作用し、チャージをキャンセルあるいは除去するためと実験結果をふまえて考察した。山梨大の長尾らは $\text{Fe}(\text{Te},\text{S})$ について、 80°C に温めた 1 % 希硫酸中で 5 時間処理すると超電導が誘起されることを見だし、その際、4 wt% 程度の鉄が硫酸中に溶け出していることから、過剰鉄の除去が超電導化に有効であると結論づけた。物材機構の Denholme らは立方晶 FeS の構造と特性の関連性を調べるために、超高压下の通電特性の評価を行い、2.3 GPa までの印加で圧力とともに抵抗率が低下することを見だした。東大の焼田らは、40 K の超電導が報告されているものの、超電導相が未同定である Ca-RE-Fe-As 系多結晶について、ふるいによる分離や大気中暴露等を試みた結果、20 K 級と 40 K 級の超電導が存在していることを確認できたと報告するとともに、次回までにそれぞれの相の同定を試みる予定であると展望を語った。東北大の小池らは $\text{FeSe}_{0.3}\text{Te}_{0.7}$ について Co、Ni、Zn 等の不純物置換を行い、それらの T_c の抑制効果から、超電導発現機構について、 s^\pm で説明するのは難しいと結論づけた。東工大の佐藤らは $\text{Ba}(\text{Fe},\text{Co})_2\text{As}_2$ 薄膜のホール係数の温度・磁場依存性において他の高温超伝導体では観測された事のない特異なスケールング則を発見したと主張し、その起源について広い液体相と c 軸相関ピンの存在のためと考察した。電中研の塚田らは $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$ ($x=0.5,0.6,0.7$) 超伝導体薄膜のホール効果の x 依存性について調べ、Te 置換が電子をドープし、実効的にフェルミレベルを押し上げる効果があると結論づけた。

臨界電流・超伝導パワー応用および Y 系プロセス関係

線材開発研究部

主管研究員 坂井直道

本節では、臨界電流・超伝導パワー応用分野および薄膜・厚膜・テープ作製プロセスおよび結晶成長分野の報告の内、線材および Y 系材料に関わる発表に関して報告を行う。臨界電流分野では、“高温超電導マグネット開発の最前線” という題でシンポジウムが開催され、マグネット開発やピン力向上に関わる講演がなされ、以後一般講演が続いた。発表内容を分類してみると、臨界電流分野では、全 33 件の発表の内、Y 系が 23 件と多く、Bi 系、 MgB_2 系、Fe 系が各 4 件あった。プロセス関係では、Y 系で 15 件 (全 36 件) の報告がなされた。Y 系では、ナノサイズのピン止め点制御による J_c や不可逆磁場などの特性改善に関わる報告が多くなされた。以下、興味を引いた発表をいくつか報告する。

9/11 “Y 系超伝導マグネットの開発状況” 東芝、田崎氏：

Y 系線材を用いたマグネット開発で一番問題になったのは、エポキシ含浸コイルを冷却した際の特性劣化であった。これは、材料間の熱膨張係数差により線材が剥離したことが原因である。剥離を抑制する手段として、樹脂層に強度が弱い箇所を設けておき、その箇所で割れるようにすることで劣化抑制が可能となったとのこと。その結果、Y 系線材で 5 T 級のマグネットの作製に成功している。また、線材の I_c -B- θ -T 特性からコイル特性を設計する技術が確立しつつある。Y 系線材が、さらなるコストダウンとともに、安定した特性が得られるようになることを期待しているとのこと。

9/11 “Bi-2223 線材・マグネット開発の発展” 物材機構、北口氏：

Bi 系線材は、km を超える長尺線材が市場で手に入ることから、高温超伝導線材応用の先陣を切ることが期待されている。ただし、NbTi にはコストで競合できないことから、低温強磁場のインサー

トコイル、液体窒素温度での利用、20 K 近傍のマグネットなど大きく 3 つの温度磁場範囲においての利用を検討している。Bi 系マグネットの利点は、ヘリウムフリー化が容易なことやスニープレートを早くすることができ便利なことである。これまでに、1.5 T の MRI を作製して断層イメージの取得にも成功している。現在、3 T マグネットを作製し、磁場分布の均一性向上を行っているとのこと。

9/11 “BaHfO₃ 添加による GdBCO 線材の磁場中電流輸送特性の向上とマグネット応用へのインパクト “ 九大、木須氏ら :

BHO の添加は、高磁場での臨界電流を向上させるとともに角度依存性も改善できコイル応用に非常にメリットがある。この線材を用いることで、従来の半分の線材長で同じ磁場を発生するマグネットを制作できることになり、マグネット応用に多大なインパクトがある。

9/11 “BHO ピンを導入した PLD 法 GdBCO 線材における磁界中の臨界電流密度特性の改善 “ 九工大 永水氏ら :

BHO 添加による磁界中の臨界電流密度特性の改善効果は、ピン力の増加と B_{c2} の向上が相補的に効いていることが理由である。

9/11 “BaMnO₃(Mn:Sn,Hf) ナノロッド導入による SmBCO 薄膜の磁場中高 J_c 化 “ 名大 吉田氏ら :

添加材を予め母材と一緒に混合焼結して作製した混合ターゲットを用いた場合は、 T_c が低下するが、母材と添加材を別々に交換しながら成膜する方法を採用することで、 T_c の低下がない薄膜の作製が可能である。また、このようにして作製した膜では、77 K における不可逆磁場が 14 T 以上と非常に高かったとのこと。

9/11 “製造温度に依存しない臨界電流特性を有するナノロッド導入 RE123 薄膜の作製と微細組織評価 “ 高知工大 春田氏ら :

低温で成膜した BNO ナノロッドは短く傾きが大きい。一方、高温で成膜した場合は長く傾きが小さい。ここで、Er 系あるいは Y 系を 840°C ~ 890°C の温度範囲で成膜した場合、この範囲で大きくロッドの形態が変化し、特性が変わってしまう。そこで、Y と Er を混合させた系で膜を作製することで、特性変化がほとんどない膜を作製することが可能となった。

上述した様なマグネットやピン導入等の材料特性の改善に関する報告の他、線材接続、加工・細線化、機械特性など、利用の観点からの報告も数件行われていた。

SQUID 応用に関する報告

デバイス研究開発部
主管研究員 波頭経裕

16 件の SQUID 関連講演が行われた。基礎的な検討も含め、明確な応用システムを念頭に置いた研究報告が主流となっている。

超電導工学研究所は、ジョセフソン接合と超電導コンタクトの同一基板上での作り分け技術を利用し、微小な 2 軸グラジオメータを作製し、動作を確認した。こうした作製技術の積み重ねが、高

温超電導 SQUID の品質向上に役立つと期待される。

金沢工業大学の樋口らは、ULF-fMRI に向けた基礎研究として、彼らが提唱している非対称スピエンエコー法のコイルを用いた基礎実験を行っている。低周波の核磁気共鳴信号を検出する方法として注目される。

超電導工学研究所の塚本らは、集積型 SQUID の高い磁場分解能と、直結型 SQUID の高磁場耐性をともに有する、ハイブリッド型高温超電導マグネトメータを開発。高温超電導体を複数層用いる製造技術を活かした有用な構造と期待される。

岡山大学は、電気化学セル内で起こるキャリア輸送を可視化し、電池の開発を支援するための計測システムを開発している。銅製の常温ピックアップコイルを用い、キャリアの輸送によって生じた磁場をとらえ、HTS-SQUID に伝達し、検出に成功している。SQUID の新たな応用フィールドとして期待される。

且立は、検出コイルと計測対象物の距離が最大で 120 mm に達してしまう従来の磁気計測システムの問題を解決するために、室温ボア付きのシステムを開発している。従来の構造では検出コイルの直径分離れると、検出感度は 9 % にまで低下する。室温ボアによって計測対象物との距離が実質ゼロになった事で信号強度は従来の 2~10 倍程度改善した。また、同時に分極磁場コイルの配置も改善されるため、双方の効果で 4~20 倍の改善が可能になった。

九州大学は免疫検査用の SQUID システムの検出効率を改善するため、その検出限界を決めている磁気マーカーの評価と改善を試みている。現在、SQUID 免疫検査装置は、MR センサを用いたシステムの検出感度 5×10^6 個/60 μ l を遥かに越える検出感度 8.5×10^4 個/60 μ l を達成しているが、目標は 1×10^4 個/60 μ l である。

超電導工学研究所は、地震観測用の地磁気観測装置を福島県いわき市に設置し、東京からの遠隔操作で運用を開始した。首都大学東京の大久保先生らが、地震の発生を地磁気の変化として直接観察したのをうけ、さらに高感度 (1 pT) を達成するための装置である。SQUID の問題の課題であるドリフトやノイズの問題を、FLL 回路に変調型を用いる事やスルード性能をあげる事で、所望の性能を実現している。

中国電力は、プラントの配管の検査を外装の断熱材を剥離する事なく行うための非破壊検査装置の基礎実験を行っている。現在、配管に見立てたアルミ板の欠陥を、断熱材に相当する絶縁材 15 mm と外装のアルミを隔てて検出する事に成功している。今後、ロボットアームを用いたシステム化など、実際の検査に向けた応用上の課題を検討する予定である。

九州大学は、液体窒素温度に冷却した銅検出コイルと HTS-SQUID を結合した、検出コイル分離型高感度交流磁場計測システムの開発を行っている。100 mm 離れた磁気マーカーを検出する事を目指しているが、第三高調波を利用し、SQUID を結合する事で、140 mm 程度離れた場合でも観測できる見通しを得た。

豊橋技術科学大学は、HTS-SQUID を用いた超低磁場 NMR/MRI の食品へ混入した異物検査への応用を検討している。金属のみならず、ゴムやシリコンといった非磁性の異物の検出も最終的に目指すためである。現在、アルミを異物に見立てて実験を行っており、アルミの有無の判別が出来る

事を確認した。

豊橋技科大学は、水質検査や腫瘍診断に応用できる地磁気 SQUID-NMR の開発を試みている。地磁気を利用するため、検出部と SQUID を分離する必要があり、銅コイル製磁束トランスと HTS-SQUID を結合させる構造とし、地磁気中で NMR 信号の検出に成功した。

東京電機大と超電導工学研究所は、高磁場耐性の高温超電導グラジオメータの設計を行うため、遮蔽磁場と印加磁場のバランスがとれる位置に SQUID を配置するよう、実験的に検討した。

豊橋技科大は、食品用異物検査装置として、幅 150 mm に対応できるシステムを、3 個の高温超電導 rf-SQUID を並べて実現している。SUS304 の擬似異物では、0.5 φ のものがリフトオフ 74 mm で検知可能である。アルミ包装の影響や、食品のイオン化を起こさない検査方法として有用と期待される。

豊橋技科大は、超低磁場 MRI の次期環境を改善するため、アクティブシールドと Bi 系超電導シールドの検討を行っている。アクティブシールドだけでは困難なシールド性能を二重の Bi 系シールドで実現しようとしている。

金沢工大は、LTS-SQUID を用いた地磁気観測システムの開発を行っている。フィールドでの試験を開始していて、35L で 1 ヶ月の液化ヘリウムを保持能力を有している。スルーレート (9 μT/s)、磁束トランスの I_c 、ドリフトなどの課題が明確になり、今後の改善が期待できる。

岡山大学は、磁気緩和特性を計測して物質の特定や非破壊検査を行うための磁化率計の開発を行っている。また、直流磁化率計では、2 次高調波を利用した検波方法を用い、振動によるノイズを低減して S/N 比を向上し、市販の磁化率計と比較して 2 桁感度の高い高感度な計測を実現している。

接合、回路作製プロセスおよびデジタル応用

低温デバイス開発室
室長 日高睦夫

デジタルのセッションでは、単一磁束量子 (SFQ) 回路の低消費電力化と SFQ 回路の超電導検出器多重読み出しへの適用が目についた。

断熱型 QFP (Quantum-flux-parametron) はスイッチ速度に対してポテンシャルが相対的にゆっくり変化し、断熱的に状態をスイッチさせることができるため、熱雑音限界に迫る低消費電力が期待できる素子である。横国大の竹内等は、断熱型 QFP 回路のビットエネルギー飽和原因についてゲート間相互作用の影響を述べた。断熱型 QFP の駆動には交流電源が必要であるが、これを外部から供給するのは容易ではない。横国大の向山等は、直流駆動オンチップ交流電源により断熱型 QFP の動作実験に成功したことを報告し、1 μW の直流電力で約 2,500 ゲートの断熱型 QFP ゲートを駆動できることを示した。

別の低消費電力 SFQ 回路実現方法として、低バイアス電圧 SFQ 回路がある。これは、バイアス電圧を減少することによって、待機時の静的な消費電力を減らす方法である。名大ではこの方法と臨界電流値減と合わせて、SFQ 回路の消費電力を最大 1/420 に低下することに成功している。しかし、この方法は動作速度低下、ビット誤り率の上昇をもたらす。名大の北山等は、低バイアス SFQ 回路のビット誤り率を測定することで最適なバイアス電圧を検討した。この結果、バイアス電圧

1/10 (消費電力 1/10) であれば、大規模回路においても十分低いビット誤り率が得られることを示した。一方、名大田中等は低バイアス回路において SFQ パルス間の干渉が起りやすく、電源分配に工夫が必要なことをシミュレーションにより示した。

カレントリサイクルはバイアス電流を使いまわす方法であり、SFQ 回路に供給するバイアス電流を大幅に削減できる手法として注目されているが、グランドプレーン分離と信号線インダクティブ結合の必要性から高速動作の報告例はまだなされていなかった。横国大の江原等は、超電導工学研究所のニオブ 9 層プロセスを用いて 3 段カレントリサイクル回路の 50 GHz 動作に成功した。

超電導検出器は他の材料では実現できない高い分解能と感度を有しており、次世代の検出器として注目を集めている。超電導検出器実用化における問題点は、出力の多重化である。超電導検出器の一種である SSPD (Superconductive single photon detector) 出力の SFQ 回路を用いた多重化の試みが行われている。NICT の寺井等は、SFQ 入力回路のパラメータを最適化することで、入力感度を 13.8 μA から 8.2 μA に向上することに成功し、SSPD 出力により SFQ 回路を動作させることに成功した。また、アナログセッションにおいて、NICT の山下等により、冷凍機に実装された NbN-SSPD 出力を Nb-SFQ 回路を用いて多重化する実験に成功したことが報告された。この実験結果は世界的に注目されるものと思われる。横国大の佐野等は、飛行時間型質量分析装置への応用を目的に、SSPD の反応時間を調べるための SFQ 時間測定回路の開発を行っている。

接合、回路測定プロセスでは、NbN/AlN_x/NbN 接合特性の基板材料依存性 (名大船井等)、量子ビット用微小 Al/AlO_x/Al 接合の作製方法 (ISTEC 佐藤等)、高温超電導ランプエッジ接合とコンタクトのイオン照射による作り分けとグラディオメータへの適用 (ISTEC 安達等)、高温超電導非対称ナノブリッジにおよぼす磁束集中効果 (名大山本等) などの発表が行われた。

[超電導 Web21 トップページ](#)

【隔月連載記事】

やさしい人工ピンのおはなし (その6)

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

本連載「やさしい人工ピンのおはなし」も 6 回目を迎え最終回となった。連載の途中でセルン (CERN) の LHC という史上最大の素粒子加速器を用いた高エネルギー実験についてふれたが、2012年夏、ついにヒッグス粒子と思われる新粒子発見の報が新聞紙面を賑わした。二つの検出器グループが独立にほぼ同じエネルギーを持つ新粒子の存在を確認したのだ。LHC では最新の超電導技術が用いられており、超電導の貢献なくして新発見はあり得なかつただろう。LHC はまだ稼働したばかりであるが、今回の新粒子発見はさらに高エネルギー側に未知の粒子が存在する可能性を示唆しているという。つまり物理的に興味深いエネルギー領域が現在の技術の手の届く範囲内で広がっている可能性があるのだ。LHC では磁場強度を 16~20 T に増大させて、最大エネルギーを現状の 5~10 倍にまで引き上げる次期計画の検討をすでに始めている。そこでは高温超電導の利用が不可欠となる。本連載の人工ピン技術も性能向上において一役買うことになるかもしれない。

今回の最終話では人工ピンの線材への応用と展望、および今後の人類社会発展の鍵を握るとされる超電導技術の未来について考えてみたい。

2. 人工ピンの応用

これまでの連載で示したように人工ピンは高温超電導体の J_c 制御の基本技術として花開きつつある。高温超電導体は種々の理由から、最大の J_c を実現するためにはエピタキシャル成長した薄膜形態が最も有効であることが分かっている。量子化された渦糸は超電導体中の結晶欠陥や非超電導相によってピン止めされる。このときピン止め点の密度や空間分布を工学的に設計して超電導体に導入することが重要だ。人工ピンのサイズは小さすぎても大きすぎてもいけないし、また少なすぎても多すぎてもいけない。サイズや空間分布を適切に調整した人工ピンを高温超電導体に導入するには薄膜技術は適している。高温超電導薄膜がエピタキシャル成長するプロセスにおいて、人工ピンとなりうる非超電導物質等を薄膜に導入することで、自己組織化したナノロッドやナノ粒子等を様々なパターンで分布させることができるのだ。

すでに、YBCO 高温超電導薄膜を用いたコーテッドコンダクターでは種々の人工ピンを導入した線材開発が進んでいる。最も進んでいるのは IBAD (ion-beam assisted deposition) 基板や RABiTS (rolling assisted biaxially textured substrate) 基板を用いた YBCO コーテッドコンダクターへのナノロッド導入だろう。ピン止め物質としては $BaZrO_3$ 、 $BaSnO_3$ あるいは $BaHfO_3$ などが用いられており、ナノロッド形成にはパルスレーザー蒸着法や MOCVD 法などの気相法が有効だ。一方、ナノ粒子としては Y_2O_3 や $BaZrO_3$ などが利用され、こちらは MOD 法や電子ビーム蒸着法で YBCO プリカーサ膜を作る段階で予め導入しておき、後熱処理でエピ成長させる時に薄膜中にランダム分布させる。これら人工ピンの効果は大変顕著で、人工ピンなし (つまりピン止め点は自然に導入された転位や双晶など) の場合に比べ 77 K の磁場中において 3~10 倍も J_c が増大する。これらの試料をより低温側、例えば 20~40 K で測定すると従来の金属系超電導線材の 10 倍以上も大きな磁場中 J_c が得られ、高温超電導の面目躍如たるものがある。

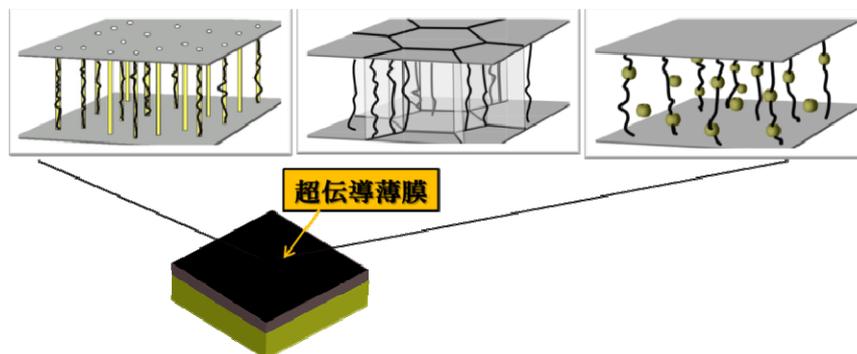


図1 超電導薄膜に導入した各種人工ピンの例

しかし現在の人工ピン技術は始まったばかりであり発展の余地は大いにある。例えば、ナノロッドとナノ粒子のいいとこ取りをした人工ピンのダブルドープ技術は検討すべき課題の一つだ。ナノロッドに加えてナノ粒子をわずかに添加することで、ナノロッドだけでは達成できなかった高磁場側の J_c が実現できるという報告もある。また、現在の人工ピンは主に 77 K 応用を目指して開発されてきた。そのため、 T_c 劣化を起こさない程度の量（体積分率で数%程度）の導入が主に検討されてきた。しかしあまりにも 77 K と T_c が近いことから、本来の人工ピンの性能を十二分に引き出せていない可能性もある。よって T_c が高く、より温度マージンの大きな高温超電導物質の開発も必要となるであろう。また逆に、より低温での利用、例えば 4~20 K 近傍を考えると T_c 劣化の影響はそれほど問題にならないかもしれない。この場合理論的には 20~25 % の人工ピン導入が有望となり、結果としてさらに数倍~10 倍の磁場中 J_c 増大も可能かもしれない。このような J_c を持つ高性能線材は各種電力・輸送応用はもとより、未来の超強磁場加速器コイルのような様々な大型应用到適用されるだろう。

3. 超電導は限界をこえるか?

超電導体の発見から最初の 1 世紀が、そして高温超電導体の発見から最初の 1/4 世紀が過ぎ去った。現在の超電導の T_c 到達点は、水銀系高温超電導体の高圧下での 164~166 K が最高であり、グラファイト表面の室温超電導の可能性などが報告されてはいるものの、その後より高い T_c の報告はない。多くの研究者は、より高い T_c の超電導物質は存在するもののまだ発見されていないという立場を取っている（と思う）。確かに YBCO 超電導体やビスマス系超電導体が理想的な化学量論比ですでに自然界のどこかで存在していたかどうかは疑わしい。すなわちこれらの化合物は人間の手によって初めてこの世に生み出された可能性が高いのだ。この観点からすれば、近い将来、人為的な手段によってより高い T_c を持つ物質が創造される可能性は十分にあるはずだ。

理論家としても有名なミチオカクは彼の啓蒙書の中で、20 世紀は電気の時代の始まりであったが、21 世紀末は室温超電導の発見によって磁場の時代の始まりになるという。未来の道路網には超電導コイルが敷かれ、人や車も磁場によって浮上し高速移動することができる。摩擦やエネルギー損失のない時代の幕開けである。室温超電導体がどのようなものであるか現時点では予想が困難であるが、これまでの超電導発見の歴史から第二種超電導体である可能性が高い。重量物を浮上させるほどの力を発揮するには、渦糸は固くかつ渦糸の中心部分にはクーパー対の存在しない穴がしっかりと開いていることが必要だ。そうであれば本連載の人工ピンも効果的なピン止めとして十分な機能を発揮できよう。

金属系超電導体は BCS 理論によって理解できたが、高温超電導体をうまく説明できる理論はま

だ確立していないと言われる。これは高温超電導体では電子間に働くクーロン力が大きいいため摂動論が使えず理論的な取り扱いが難しいからだ（強相関電子系と呼ばれる）。このような理由もあって室温超電導に至る予測は現在でも困難となっている。しかし解決策は予想外の方向からやってくるかもしれない。それはゲージ重力対応と呼ばれる深淵な意味を持つ理論的枠組だ。この考えは強く相互作用する粒子系の解析が重力理論を用いて調べることができると主張する。実際、重イオン衝突加速器 RHIC で行われた「クォーク・グルーオン・プラズマ」という強い相互作用の実験結果がゲージ重力対応による予測と見事に一致したという実績がある。それ以来、この枠組みを高温超電導のような凝縮系に適用しようという試みが始まっている。もしこの方法で強相関にある高温超電導が理解できれば、「超電導 (BCS) → 素粒子物理 (高エネルギー物理) → 超電導 (コイル) → 素粒子・・・」というお互い刺激し合う良い循環が続くことになる。そういう意味でも今後の展開に大いに期待したい。

4. 超電導技術と未来

ここでは期待される未来の超電導技術の役割について述べてみたい。現在は世界中で化石エネルギーの消費が増大しており、二酸化炭素排出量の増大とともに、燃料枯渇の不安が高まってきている。2008年の世界中の全エネルギー消費量はワット換算で 15 TW と見積もることができる。未来のエネルギー消費量を予測するのは難しいが、世界の GDP とエネルギー消費が比例するならば算出も可能だ。仮に世界の経済成長率を年率 3% として今後 50 年間続くとすれば $1.03^{50} = 4.4$ となり 4 倍以上のエネルギー消費量 (61 TW) となる。これは現在の技術でとても賄いきれるものではない。原子力には廃棄物の問題があり、また地上の風・波によるエネルギー資源は 350 TW、地熱は 23 TW くらいであり、環境に影響を与えずこれらを利用するには限界がある。

したがって最終的な答えはやはり核融合となるだろう。それもふたつのオプションがある。宇宙の核融合と地上の核融合だ。太陽 (核融合) から地球面積にそそぐエネルギーは 174,000 TW あり、砂漠に十分な数の太陽光発電システムを配置して世界中に超電導ケーブルで供給するという GENESIS 計画は有名だ。地上の核融合においても超電導強磁場コイルを使って高温のプラズマを制御する ITER 計画が進んでいる。ここでは 3 重水素の反応 ${}^2\text{H} + {}^3\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + n$ (中性子) を用いるが、将来的にはヘリウムの同位体を用いる ${}^2\text{H} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + p$ (陽子) の方が有利だ。放出される高エネルギー中性子より高エネルギー陽子の方が扱いやすく格段にクリーンなためだ。月面には太陽風で運ばれてきた ${}^3\text{He}$ が豊富にあり、25 トンの ${}^3\text{He}$ 燃料を運んでくれば米国の 1 年間分のエネルギーを賄うことができるという。

月面ではルナリングという計画もある。月赤道上に幅 400 km の太陽光発電システムをリング状に敷き詰めて超電導ケーブルで接続し、集めた電力をマイクロ波などで地球に送るという壮大な計画だ。太陽光は月面では安定で地上に比べて効率は格段にいい。これは宇宙太陽光発電の月面版といえる。さらに宇宙利用では VASIMIR というプラズマ推進ロケットの研究も進められている。これは高温のプラズマを超電導強磁場コイルで絞って推力として利用するもので長期間の加速を可能とし、火星まで数週間で行けるといふ優れた惑星間宇宙機だ。核融合技術の応用でもある。

このように改めて見直してみても、未来の超電導技術には活躍の場が多数用意されている。超電導技術は今世紀中に切り札の技術として花開くのだろう。

5. おわりに

電子がある温度以下でペアを組んで集団的に振る舞う超電導という現象が自然界の低温領域に用意されていたことに不思議さを感じる。しかしながら粒子がペアを組んでエネルギーを下げる類似の機構は超高温・高密度の中にも見いだせ、宇宙の中では実はごくありふれた現象なのかもしれない。中でもわれわれに身近な超電導現象を理解し使いこなすことが、将来の人類が抱える諸問題を

解決する鍵でもある。切り札技術としての超電導の今後の発展に大いに期待したい。

参考文献：

1. ルナリング構想は <http://www.shimz.co.jp/theme/dream/lunaring.html>
2. VASIMIR は http://www.nasa.gov/vision/space/travelinginspace/future_propulsion.html

[超電導 Web21 トップページ](#)

読者の広場

Q&A

Q: 「古河電工、超電導子会社が米誌技術百選に選ばれた」との新聞記事がありました。どのような技術内容なのでしょう。今後、どのような応用が期待されるのでしょうか?

A: 古河電工の米国の子会社である米国スーパーパワー社は、オークリッジ国立研究所とヒューズトン大学とともに、3者で共同して実施した「高磁場対応イットリウム系超電導線材」の開発が、米国の科学技術雑誌/R&D マガジン（米国）が主催する「2012年 R&D 100」に選ばれた。この賞は、前年の世界市場に提供された新たな、製品、プロセス、材料、ソフトウェアから、100の最も有望な研究開発業績に与えられる賞です。

一般にイットリウム系線材（REBCO 線材）は、液体窒素温度で超電導になる材料ですが、抵抗ゼロ（超電導状態）で流れる電流には制限があります。それは材料中の磁気フラックスが、電流を上げることにより生成する高い磁場で、ローレンツ力を受けて移動して超電導状態を破壊するためでした。今回の選定理由の超電導線は、超電導層中にナノスケール間隔でダブルのペロブスカイト構造のタンタル酸塩のナノ・カラムを導入することで、磁気フラックス格子を動けなくするピンの役割を果たし、このピン止め力が非常に高いことに帰着するものです。この結果、高磁場下でもより大きな電流を運ぶことができるイットリウム系超電導線材の実用化ができました。本件について、スーパーパワー社の開発部長である Dr. T.Fukushima に話を伺ったところ、「ピン止め中心の導入としていろいろな物質を調べているところで、タンタル酸塩はそのひとつである。高磁界領域での超電導線の性能向上は、重要な技術であると考えている。」と説明していた。

この技術によるイットリウム系超電導線材は、電力貯蔵 SMES や風力発電機、MRI や医療用加速器など、高い磁場が発生する超電導マグネットの実現に欠かせない線材となります。また、高い磁場が出せることで、超電導機器としての高性能化、小型・軽量化、また高い電流が流せることで同じ磁場を少ない線材量で発生できるのでより低コスト化が図れるなど、実用化を目指すうえでも有用な技術であります。

回答者：古河電気工業株式会社 超電導応用開発部 向山晋一 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 までお願いします。」