

掲載内容 (サマリー):

特集: 超電導産業機器技術の進展

超電導産業・輸送機器技術の動向

高温超電導誘導・同期回転機技術の展望

非接触スピン処理技術の進展 - 超電導磁気浮上の適用による極低塵化 -

鉄道分野への高温超電導材料適用の技術検討

高勾配磁気分離システム技術の進展

超電導関連 3-4月の催し物案内

新聞ヘッドライン (1/19-2/19)

電気学会 超電導応用電力機器研究会

「超電導導体・バルク・薄膜とその応用および関連技術」報告

隔月連載記事 - 粒子加速器と超電導 (その2)

読者の広場(Q&A) - 超電導エレクトロニクス分野における高温超電導体の代表的な応用例を教えてください。

[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

〒105-0004 東京都港区新橋 5-34-3 栄進開発ビル 6F

Tel (03) 3431-4002 Fax(03) 3431-4044

超電導 Web21 トップページ: <http://www.istec.or.jp/Web21/index-J.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>



特集：超電導産業機器技術の進展「超電導産業・輸送機器技術の動向」

東京大学 大学院新領域創成科学研究科
先端エネルギー工学専攻
教授 大崎博之

2007年12月25日、東京圏と名古屋圏を結ぶ中央リニア新幹線を、2025年営業運転開始に向けて自己負担で建設する方針をJR東海は表明した。2006年9月の山梨実験線の設備更新及び全長42.8kmへの延伸の計画発表、2007年4月の上記中央リニア新幹線の営業運転の開始目標を2025年とすることの発表に続き、非常にインパクトのある内容であり、単に超電導応用システムということではなく、将来の基幹高速鉄道の計画として社会の関心は非常に高い。建設費総額5.1兆円と試算された営業線を2025年に開業しようという目標は、長期にわたる新幹線建設を考えると決して余裕のある時期ではなく、すでにシステム検討はもちろん、経済性なども考慮したルート再検討やボーリングによる地質調査などが始まっている。また、Nb-Ti線を用いた超電導磁石は山梨実験線で十分な実績をあげ、営業線用としても問題なく使用できると考えられるが、一方で、高温超電導技術への期待もあり、2005年には山梨実験線でBi2223線材を用いた高温超電導磁石を搭載しての走行試験も行われた。現在はさらにY系線材の適用可能性を検討するために、鉄道総合技術研究所で概念設計やモデルコイル試作などが行われている。高温超電導技術の導入により、システム全体の安定性や信頼性、経済性などいっそうの向上が図られることも期待したい。

産業・輸送機器分野での超電導技術の実用化という視点で、高勾配磁気分離についても触れたい。長年研究開発が行われてきた超電導磁気分離について、西嶋茂宏教授（大阪大学）らの産学連携チームにより、500～2000トン/日レベルの廃水処理システムの研究開発が行われ、その成果を引き継いだMSエンジニアリング社が実際に製紙工場へ超電導磁気分離装置を納入し、その装置は実用されている。環境に対する意識が最近ますます高まっており、廃水処理などに対する社会のニーズも高い。超電導磁気分離はいろいろなグループによって研究開発が進められ、世界市場も含めて今後さらに実用システムの導入が拡大していくことが予想される。

最近国内においても研究開発が拡大している超電導回転機は、ポテンシャルという意味では非常に大きな市場をもつ。米国やドイツでの開発にも刺激され、電気推進船用モータの開発が産学連携で進められ、特にIHI社を中心とする産学グループは365kWの船用超電導モータの開発を行い、試験成果を報告している。現在の400kW級の内航船用を発展させ、MW級の大型化開発も計画しているとのことであり、非常に今後が楽しみな動きである。また、住友電工は、Bi2223線材を用いた超電導モータを搭載した高温超電導自動車の走行デモを行った。高温超電導体発見直後に、輸送分野における超電導技術のいろいろな応用可能性が調査され、自動車用モータもその一つとしてあがっていた。実用へ向けた課題は多いとはいえ、デモ走行を実施したことは、線材、機器、冷却等の技術がそこまで進んだことを物語っている。このようなモータの輸送分野への応用から、さらに大型の一般産業用モータへと用途を拡大できれば、そのインパクトはさらに大きなものとなる。しかし、従来形のモータは非常に手強い競合相手であり、超電導モータの実用化はそれほど容易なことではない。風力発電などの発電機開発とも連携して、実用性の高い技術開発を推進していく必要がある。

材料プロセスも超電導技術の応用対象として注目すべき分野である。その具体的作用の代表が強磁場印加に基づく電磁力の直接作用あるいは駆動である。シリコン単結晶引き上げへの磁場印加もこれに含まれる。様々な可能性が研究され、高品質、高性能材料の開発などへの期待がかかる。また、超電導磁気浮上・磁気軸受技術を利用した非接触スピンドル処理装置なども研究され、不純物等の極めて少ない清浄な空間を実現して高品質製品を作製することが検討されている。

超電導技術の応用分野として、産業・輸送分野は可能性が多岐にわたり、要求仕様に合致すれば今後さらに大きく広がる可能性がある。高温超電導線材の高性能化や低価格化、冷凍機・冷却技術の進歩、超電導コイル化技術の向上などを背景に、高磁場、大電磁力、あるいは高機能を実現可能にする先端技術として、今後さらに実用化へ向けた研究開発を推進することが望まれる。

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：超電導産業機器技術の進展「高温超電導誘導・同期回転機技術の展望」

京都大学大学院
工学研究科電気工学専攻
准教授 中村武恒

筆者の研究室では、高温超電導かご型回転子を適用した HTS-ISM (High T_c Superconducting Induction/Synchronous Machine) について、理論的かつ実験的基礎検討を行っている。^{1,2)} また、ISTEC-SRL や企業研究所にもご協力頂き、基礎データの蓄積やあるいは設計に耐える解析手法も確立されつつある。³⁻⁵⁾ HTS-ISM は、構造が単純でありながら、その機器特性に関しては基本的に一次側情報のみから推察するしかなく、応用研究の立場だけでなく、学術的にも大変興味深い研究対象である。現在では、製作のノウハウも蓄積されつつあり、共同研究者各位からご指導を頂きながら、いよいよ幾つかの実应用到に照準を合わせつつある。

これまで、HTS ロータバーの通電特性と漏れリアクタンス他の関係から、HTS-ISM の回転特性が具現されるメカニズムを明確化した。²⁾ また、NEDO のプロジェクト「超電導応用基盤技術研究開発」の一環として、ISTEC-SRL と共同で Y 系線材を適用した HTS-ISM の検討を実施し、電界 - 電流密度特性の立ち上がりとトルク特性の関係を明らかにした。³⁾ さらに、住友電工と共同で DI-BSCCO 線材を適用した HTS-ISM を検討し、ロータバーの臨界電流値と最大同期トルクの実証した。⁴⁾ 一方、アプリケーションとして、中部電力と共同で HTS-ISM の発電機応用への検討を⁵⁾、また九州大学と共同で液体水素循環ポンプ用 MgB₂ HTS-ISM の検討を⁶⁾それぞれ実施している。HTS-ISM の発電機応用に関しては、冷却と機器特性の考察から低速同期回転モードに特化して全超電導化を検討しており、近々に実証試験を行う予定である。また、超電導非線形通電特性を適用した可変速制御技術についても開発を行っている。



図：筆者の研究室で開発した HTS-ISM 試験システムの外観写真

以上、本稿では HTS-ISM の研究開発現状について報告した。HTS-ISM は、既存回転機をベースとし、高効率化や高出力密度化だけでなく、簡易な機器構造および制御性の観点から高温超電導技術の最適導入を検討しているものであり、今後従来機との競争に船出させてやることによって産業応用に供されることを期待している。回転機開発の歴史は大雑把に 180 年と古く、技術の蓄積が深い故に新技術の導入に対してハードルが高い。しかしながら、翻って考えると、歴史が古いからこそ新しいイノベーションが常に要求されていることも事実と思われる。そういう意味で、近年の高温超電導材料開発の進展は著しく、既存技術とのインターフェースに注意しながら超電導技術を最適導入することにより、技術革新を起こすことが予感される。そのためには、大型応用はもとより、多くのユーザの目に触れる比較的中容量の回転機に対しても超電導技術の優位性を見出す必要がある。筆者のグループでは、現在この辺りにもターゲットを絞った検討を行っており、世界初の技術として立ち上げようと考えている。近い将来にご報告させて頂くべく、現在精力的検討を実施していることを付記する。

参考文献

- 1) 中村武恒, 超電導 WEB21, 2007 年 3 月号 (2007) pp. 7-8.
- 2) T. Nakamura, Y. Ogama, H. Miyake, K. Nagao and T. Nishimura, Superconductor Science and Technology, vol. 20 (2007) pp. 911-918.
- 3) K. Nagao, T. Nakamura, T. Nishimura, Y. Ogama, N. Kashima, S. Nagaya, K. Suzuki, T. Izumi and Y. Shiohara, Superconductor Science and Technology, vol. 21 (2008) 015022 (5pp).
- 4) T. Nakamura, K. Nagao, T. Nishimura, Y. Ogama, M. Kawamoto, T. Okazaki, N. Ayai and H. Oyama, in review.
- 5) 西村敏治, 長尾和昌, 松村一弘, 廣谷迪, 中村武恒, 鹿島直二, 長屋重夫, 2007 年度秋季低温工学・超電導学会, 宮城県民会館, 仙台市 (2007 年 11 月 20 ~ 22 日) 1B-a10.
- 6) 柁川一弘, 中村武恒, 2007 年度秋季低温工学・超電導学会, 宮城県民会館, 仙台市 (2007 年 11 月 20 ~ 22 日) 1D-a11.

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：超電導産業機器技術の進展

「非接触スピン処理技術の進展 - 超電導磁気浮上の適用による極低塵化 - 」

新潟大学大学院
自然科学系 情報理工学系列
准教授 福井 聡

株式会社 MTC
宮崎 紳介

1. はじめに

国際半導体ロードマップ (ITRS : International Technology Roadmap for Semiconductor) に示されているように、半導体デバイスの微細化の進展は著しく、最近では 32 nm アーキテクチャ構築のための研究開発が積極的に行われている。この半導体デバイスの微細化に対応するため、半導体デバイス製造は勿論のこと、ウェハ上に回路パターンを転写するフォトリソグラフィ工程で用いられるフォトマスク (マスター原版) にも一層厳しいパターン精度が要求されつつある。これらフォトマスクや半導体デバイス製品の製造工程では種々のスピン処理装置が用いられるが、このスピン処理装置の回転軸受から微粒子状ダストの放出が起り、フォトマスク等処理対象物周囲のクリーン度が低下する。その結果、微粒子ダストがパターン間に混入・残留して、最終製品の低品質化或いは生産歩留まり低下の主要原因の一つとして指摘されており、この問題の解決が切望されている。この問題を解決するためには、スピン処理装置のターンテーブル部分をクリーンベンチ内に完全隔離できる非接触スピン処理装置の開発が必要不可欠である。

(株)MTC と新潟大学のグループでは、上記問題点を解決する方法として、高温超電導バルクを用いた磁気浮上に着眼し、これをスピン処理装置に適用するための共同研究開発を行っている。¹⁾ 本稿では、現在製作中の冷凍機直接冷却で 30 K 運転を目標にした要素試験装置による試験結果及び浮上高を向上するための方策について報告する。

2. 要素試験装置の試験結果

半導体関連製造プロセス用非接触スピン処理装置への要求仕様を表 1 に纏め、提案装置の概念図を図 1 に示す。表 1 に示す要求仕様は、フォトマスクやウェハなどを洗浄するために用いるスピン装置に対応するものであり、半導体関連製造プロセスに用いるスピン処理装置としては低回転型のもので、これを本研究の第一ターゲットとする。

表 1 非接触スピン処理の要求仕様と要素試験装置での試験結果のまとめ

	実用装置	要素試験装置
回転数	2000 rpm	2500 rpm
加減速範囲	200-500 rpm/s	50 rpm/s
ターンテーブル直径	400 mm 以上	210 mm
浮上高	10 mm 以上	5 mm
追加重	1 - 2kg	なし
許容振動	外周上で±0.2mm 以下	-
運転温度	制約なし	30K

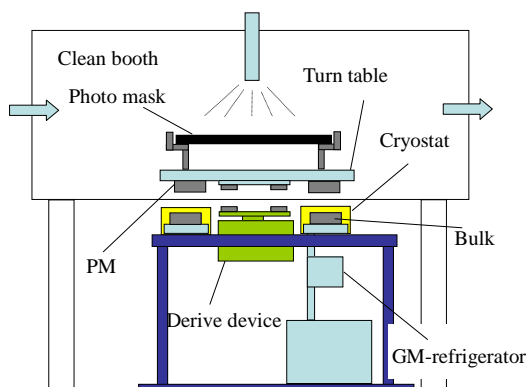


図1 超電導磁気浮上を適用した非接触スピ処理装置の概念図

図2 に試作した要素試験装置の概略図・外観写真を示す。中空同心円筒型のステンレス製チャンパ内に銅製冷却板を設置し、冷却板に HTS バルク (Gd 系 直径 30 mm × 厚さ 10 mm) 8 個を埋め込む。冷却板の一端に一段 GM 冷凍機を接続し、30 K 付近まで冷却して運転する。直径 210 mm のアルミ製ターンテーブルに直径 200 mm のリング型ネオジウム永久磁石を埋め込み、HTS バルクと対向させて磁気浮上系を構成する。ターンテーブル中央部分及びクライオスタット架台に固定した DC サーボモータに連結した回転フランジのそれぞれに、直径 10 mm のネオジウム永久磁石を 12 個取り付け、磁気カップリングにより回転を伝達する。本装置を用いて試験を行なった結果、浮上高 5 mm、回転数 2500 rpm での数分間の安定浮上・定常回転を確認した。

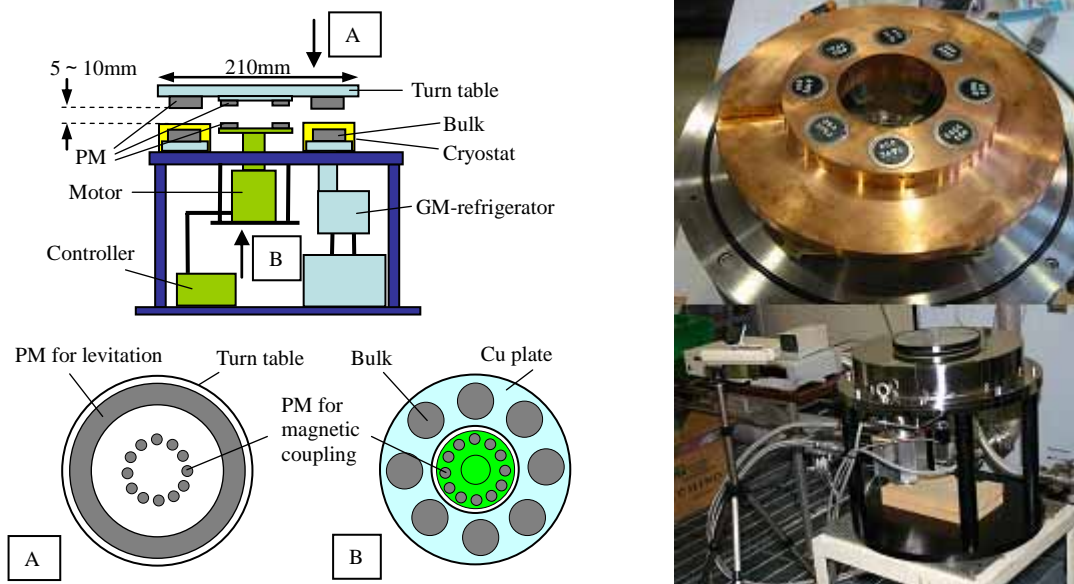


図2 要素試験装置

要素試験装置では安定浮上と定常回転を確認できたものの、浮上高と加減速度については要求仕様を満足できていない。加減速度はターンテーブルの質量に大きく依存するため、磁気浮上用の永久磁石の重量が決定されないと設計できない。よって、浮上高を向上するための改良を施すことにした。浮上高を向上するために、図3に概略図を示すような磁気回路を製作した。これを図2の要

素試験装置のターンテーブルと交換して浮上試験を行なったところ、浮上高 14mm を確認した。

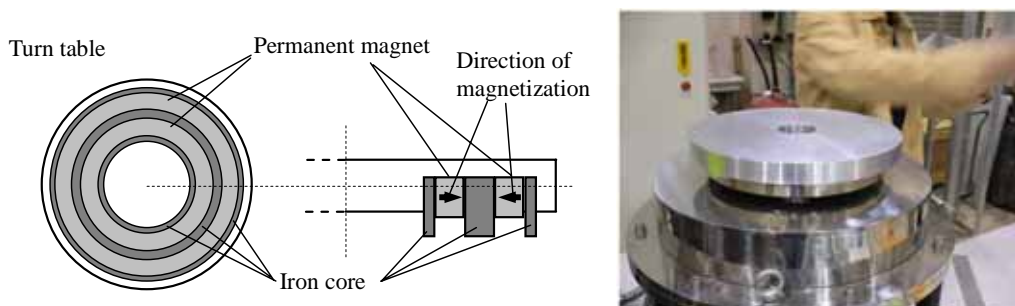


図3 浮上高向上を目指した浮上用永久磁石

3. まとめ

本研究で提案する超電導磁気浮上非接触スピニング装置は、半導体関連製造装置の極低塵化のためのブレークスルー技術になる可能性が高く、早期実用化に向けて積極的に研究開発に取り組んでいる。今後は、低回転型の実用スピニング処理装置で要求されるターンテーブル直径 400 mm、追荷重 1-2 kg、回転数 3000 rpm、浮上高 10 mm (常温部分)、運転温度 20 ~ 30 K の実証試験装置を試作する。実証装置により、高温超電導体の磁場捕捉特性、リップル磁場中の高温超電導体の損失特性、浮上・回転安定性、始動・制動制御特性を評価する。また、ターンテーブルの軽量化/慣性モーメントを低減するための構造設計を検討する。

なお、本研究は科学技術振興機構 (JST) の平成 19 年度「独創的シーズ展開事業 - 委託開発 - 」の課題として選定されていることを付記する。

参考文献

- 1) S. Fukui, R. Sato, J. Ogawa, T. Oka, M. Yamaguchi, T. Sato, S. Miyazaki, T. Sasahara, T. Tamaki, S. Nishiwaki, Y. Yuki, "Study on application of magnetic levitation utilizing HTS bulks to spin processors for photo mask production", Physica C, Vol.463-465, p.1289-1292, 2007.

特集：超電導産業機器技術の進展「鉄道分野への高温超電導材料適用の技術検討」

財団法人 鉄道総合技術研究所
浮上式鉄道技術研究部 低温システム研究室
長嶋 賢

鉄道分野への高温超電導材料の適用として、鉄道総研では浮上式鉄道の開発で培った超電導技術を在来方式鉄道へ応用する研究を進めており、開発中の事例を紹介する。

まず「鉄道車両用超電導主変圧器」の開発は、変圧器の重量低減を目標としている。新幹線車両への適用を想定し、ピスマス系高温超電導線材を用いて容量 4 MVA 級の試作機を既に製作している <http://www.rtri.or.jp/rd/openpublic/rd42/02/hennatuki.htm>。現在は巻線部の交流損失低減に関する開発と並行して、超電導変圧器に不可欠な大容量で高効率なパルス管冷凍機の開発も進めている http://www.rtri.or.jp/rd/openpublic/rd77/CS/cs_1.5.html。

また、鉄道の再生電力吸収やピークカット対策等のために「超電導フライホイール電力貯蔵装置」の開発も実施している。高温超電導パルク体と超電導コイルから構成される超電導磁気軸受は小型でも大きな重量を安定して支えられるメリットがある。現在は荷重試験や回転試験によりその効果を検証している段階である http://www.rtri.or.jp/rd/openpublic/rd77/CS/cs_1.6.html。

他に、デバイスの応用例として「高温超電導 SQUID を用いたレール非破壊診断」がある。この研究ではレール破壊の前兆となるレール表面の白色層を SQUID により検出しようとする試みを行っている http://www.rtri.or.jp/rd/openpublic/rd77/CS/cs_1.7.html。

浮上式鉄道の開発に関して、鉄道総研では次世代線材の適用により小型・軽量で信頼性の高い超電導磁石が構成可能であると考えている。そこで、国土交通省の補助金を受けて基礎的な検討を開始したところである。例えばコイルの冷却温度を 50 K 程度まで上げることができれば、

熱容量が増大するのでコイルの安定性が飛躍的に向上する

車載冷凍機が簡素化でき、重量や消費電力が低減できる

断熱構造が簡略化できるので、磁石自体の重量や製造コストの低減が期待できる

といった利点があり、次世代線材を適用することにより磁石構造の簡素化と信頼性向上の実現が期待される場所である。

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：超電導産業機器技術の進展 「高勾配磁気分離システム技術の進展」

独立行政法人 産業技術総合研究所
我妻 洸、淵野修一郎、古瀬充穂

早稲田大学
植田浩史

九州大学
柁川一弘

近年、バイオ・創薬の分野において、マイクロ/ナノビーズを用いた細胞・分子の分離（スクリーニング）技術が日米欧において大きく進歩し、医薬分野ではアフィニティー（Affinity：分子間の親和性）ビーズを用いて、多くの細胞・分子のタンパク質を分離可能にする技術が出来上がりつつある。アメリカにおいては、早くも2ないし4種類のスクリーニングを自動ロボット化した分析装置が市販され始めた。これらのビーズ技術は、ターゲットとするタンパク質と特異的に結合するアフィニティー物質をビーズの表面につけることにより、目的とする細胞・分子の分離・精製を行うものである。この表面活性剤について、米国では酸化鉄等の表面に各種のタンパク質と特異的に結合するものが開発・市販されており、日本でも購入可能である。

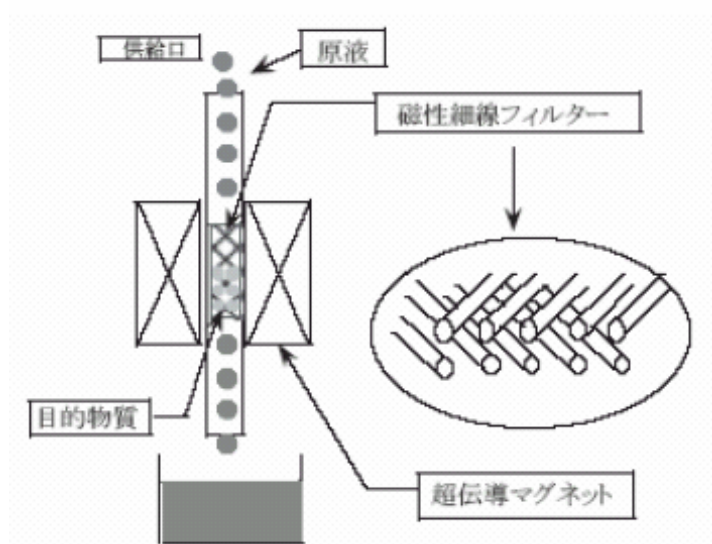
アフィニティービーズを用いた分離技術は反応効率を向上させることが重要で、反応表面積を増大させることが分離効率向上および作業時間短縮になる。そのためサイズを小さくすることが課題である。ビーズのサイズを1/10に出来れば、同じ質量のビーズであれば個数は 10^3 倍になり、微量含有の目的物と結合する確率を飛躍的に大きくし、捕捉反応時間を大幅に短縮することが出来る。

現在開発されているアフィニティービーズは、磁性ビーズと非磁性ビーズに大別される。非磁性ビーズはポリマービーズなどの有機系と多孔質シリカビーズなどの無機系に分けられ、サイズを小さくすることは比較的容易であり、すでにナノサイズのアフィニティービーズが開発されている。しかし、これらの非磁性ビーズはターゲットを希釈してカラムに導入し、アフィニティークロマトグラフィーによる分離・精製が必要になり、検査・分析用のバッチ処理には適するが、産業応用に必要の高濃度化や高速・大量・連続分離精製には向かない。これに対し、磁性ビーズは磁気力により分離・精製するので高濃度化が容易であり、高速・大量・連続分離精製に向いているため、産業用には磁性ナノビーズによる分離精製技術が囑望される。しかし、現在開発されているものは、永久磁石による高勾配磁気分離で分離・検出するシステムであるため磁気力に限界があり、磁気ビーズを溶液中の粘性抵抗に逆らって引き寄せ磁気回収するためには、ある程度以上の磁気量を体積で稼ぐ必要があるので、ナノサイズの磁性ビーズは使用されていない。小さいものでも直径約1.5～1.0ミクロン程度が使用限界である。

磁気分離以外の利用では、直径数十ナノメートルの磁性ビーズのリゾヒスト（SPIO：Super Paramagnetic Iron Oxide）がMRI造影剤として臨床用に使われている。今や磁性ビーズは医療・メディカルエンジニアリングの発展にとって不可欠なツールとなっている。

我々は医療用たんぱく質のうち特に血清中に微量存在する抗体（免疫グロブリン）の高速・連続の分離・精製に超電導マグネットを用いた高勾配磁気分離システムを応用する検討を行ってきた。免疫グロブリンは糖を2%含むポリペプチドで、約10～15nm程度のY字型をした分子であり、Y字端部のL鎖（Light Chain）先端に、抗体に対して特異的に結合する部位をもつ。グロブリンの

この部位と特異的に結合するアフィニティー物質を磁性ナノ粒子の表面につけることにより、抗体を磁性ナノ粒子の表面に特異的に結合させ、このアフィニティー磁性ナノ粒子を磁気分離技術により捕捉出来ると考えられ、抗体の連続・高速の分離・精製が可能になる。我々は磁性ナノビーズを用いた医療用タンパク質の分離・精製が超電導マグネットを用いた高勾配磁気分離システムで可能であることを基礎実験により立証した。小型冷凍機を採用した伝導冷却式の卓上型小型超電導電磁石を用いて、最大 5 T の磁場を発生させる。電磁石の中心部分に直径約 26 mm の円筒状の室温空間を持たせ、この空間に内径 20 mm 外形 24 mm のガラス管を通し、この管の中に直径数ミクロン程度の細線ステンレスウールから成るフィルターを挿入する。このフィルター（ステンレス細線）の周辺に高勾配磁場を作り出し、磁性ナノビーズをこの高勾配磁気力により捕獲・分離することに成功した。この結果は 2007 年度秋季低温工学・超電導学会で発表された。¹⁾²⁾



免疫グロブリン分離用高勾配磁気分離システムの概念図

参考文献

- 1) K. AGATSUMA *et al*, "Previous Test of High Gradient Magnetic Separation System for trapping Immunoglobulin in Serum", Abstracts of CSJ Conference, vol.77 (2007).
- 2) H. UEDA *et al*, "Design Study on Filter of High Gradient Magnetic Separation System for trapping Immunoglobulin in Serum", Abstracts of CSJ Conference, vol.77 (2007).

超電導関連 3-4月の催し物案内

3/12

「超電導電力ネットワーク制御技術開発」成果報告会

場所：九段会館、千代田区、東京

主催：(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)(予定) 中部電力株式会社、九州電力株式会社、(財)国際超電導産業技術研究センター

問合せ：(財)国際超電導産業技術研究センター、伊東 隆

Tel: 03-3431-4002, Fax: 03-3431-4044、E-mail: takashi_itou@istec.or.jp

3/14

フォーラム「先進超電導線材の進展と今後の課題」

場所：(財)電力中央研究所第一会議室、大手町、東京

主催：電気学会、基礎・材料・共通部門 金属・セラミックス技術委員会

共催：電気学会東京支部

協賛：応用物理学会、低温工学協会

問合せ：(社)電気学会 事業サービス課 油原春江

Tel: 03-3221-7313、Fax: 03-3221-3704、E-mail: yuhara@iee.or.jp

3/14

低温工学超電導応用研究会「大強度陽子加速器設備 J-PARC における超電導応用」・J-PARC 見学会

場所：原子力化学研究所 JRR-1 大会議室 茨城県那珂郡東海村

主催：低温工学協会 超電導応用研究会

問合せ：(株)東芝 電力・社会システム技術開発センター 田崎賢司

Fax: 045-500-1427、Tel: 045-510-6695、E-mail: kenji2.tasaki@toshiba.co.jp

3/19

平成 20 年電気学会全国大会シンポジウム「高温超電導線の高磁界特性と磁気応用指針」

場所：福岡工業大学、福岡

主催：(社)電気学会

問合せ：(社)電気学会、事業サービス課 森 正美

Tel: 03-3221-7313、Fax: 03-3221-3704、E-mail: mori@iee.or.jp、<http://www.iee.or.jp/>

4/6-9

ICC'2008: International Conference on Cryogenics & refrigeration

場所：Shanghai, China

問合せ：<http://www.sjtuirc.sjtu.edu.cn/ICCR2008/home.htm>

4/22-25

10th Cryogenics 2008 – IIR International Conference

場所：Praha, Czech Republic

問合せ：<http://www.icaris.info/Cryogenics2008/>

(編集局)



[超電導 Web21 トップページ](#)

新聞ヘッドライン (1/19-2/19)

LED 超電導で光 20 倍強く 北大など量子暗号通信に応用 1/21 日経産業新聞
大口径化へ 進む開発 ウエハー 「450 ミリ」研究着々 SUMCO、新拠点 移行に懐疑的な見方も装置コストなどメリット少なく 1/21 日経産業新聞
放射光で元素分析 「毛髪 1 本ががん発見」現実味 1/21 フジサンケイビジネスアイ
系統ゼミナール 「全面プール市場」の仕組み 系統運用者が電力量を微調整 1/22 電気新聞
日本原子力研究開発機構 理事長 岡崎俊雄氏 日本に大きな責任 ITER 計画 最高の舞台に感謝 1/22 電気新聞
エネルギー独立・安全保障法 低炭素社会の道描くも 排出抑制手法巡り混沌 1/23 電気新聞
次世代型高性能モーター開発へ 電磁力を使い高効率高出力化 「ベクトル磁気特性理論」活用 最適な材料選びに反映 大分大中心にプロジェクト 2010 年度めどに試作器 1/28 日刊工業新聞
最も真っ黒な物質 米チーム開発、ギネスに申請 太陽発電効率アップなどに応用 1/28 日本経済新聞(夕)
たんぱく質と薬の相互作用 NMR で高精度解析 MCRC 1/29 フジサンケイビジネスアイ
系統ゼミナール 全面プール市場の失敗とは 発電事業者に価格操作の余地 1/29 電気新聞
Y 系超電導線材開発(上)「500 メートル 300 アンペア」実用化目前 1/29 日経産業新聞
東芝など 4 者 イットリウム系線材利用 超電導限流器の実用開発 今月末から 6600V 実系統で実験 1/30 電気新聞、日刊工業新聞、日経産業新聞
Y 系超電導線材開発(下)モーター部品に利用へ 1/30 日経産業新聞
液体ヘリウム不要 産総研が標準電圧発生装置 1/30 フジサンケイビジネスアイ
コイル 電気抵抗 3 割減 東光 業界最高の変換効率 平面状銅線で巻きムラ少なく 1/31 日刊工業新聞
高温超電導に小型冷凍機 2/1 朝日新聞
高精度放射線治療装置を公開 実機使い操作説明 先端医療振興財団 2/1 日刊工業新聞
系統ゼミナール 英国自由化、得をしたのは・・・ 価格高止まり、事業者利益に 2/5 電気新聞
文科省 IAEA 核融合エネ会議で発表 研究論文の募集開始 2/5 電気新聞
核融合炉実用化の技術マップ案報告 核融合エネフォーラム 2/7 日刊工業新聞
超電導スイッチ開発 毎秒 40 ギガビットの動作確認 超電導産業研 消費電力 10 分の 1 2016 年めど 大容量ルーター実用化へ 2/8 日刊工業新聞
ウエーブ 水素は電気に勝てるか 山地憲治 2/8 電気新聞
系統ゼミナール カリフォルニア州でも失敗 インバタンス市場に欠陥あり 2/12 電気新聞
鉛フリーガラス封着材向け パナジウム使い電導性 日立と日立粉末冶金 2/13 日刊工業新聞
超電導ケーブル 電力系統連系で実証 住友電工と東電 国内初、2010 年度実施 2/14 日刊工業新聞、電気新聞、日経産業新聞、日本経済新聞
高温超電導線材 臨界電流密度 400 A へ 住友電工 11 年度達成を目標 2/15 電気新聞
コード使わず充電 羽田空港のハイブリッドバス 2/16 フジサンケイビジネスアイ、2/18 電気新聞
2 輪車マフラーの廃熱利用 熱電発ユニット開発 名工大など 2/18 日刊工業新聞
高温超電導の新物質発見 東工大 磁性系、鉄が主成分、絶対 32 度 2/19 日刊工業新聞、日本経済新聞、朝日新聞、日経産業新聞、毎日新聞
系統ゼミナール 全面プールと TPA の相違点 「供給責任」の取り方で違い 2/19 電気新聞

(編集局)

[超電導 Web21 トップページ](#)

電気学会 超電導応用電力機器研究会「超電導導体・バルク・薄膜とその応用および関連技術」報告

独立行政法人 産業技術総合研究所
エネルギー技術研究部門
エネルギーネットワークグループ長 山口 浩

標記研究会は、(社)電気学会の超電導応用電力機器技術委員会(濱島委員長(東北大学))の主催により、平成20年1月24日~25日の2日間に渡り、産業技術総合研究所臨海副都心センターにて開催された。2日間で約40名の参加者を集め、計18件の発表が行われた。今回の研究会は、「超電導導体・バルク・薄膜とその応用および関連技術」をテーマとし、発表内容を電力機器に限定しないプログラム編成とした。

研究会初日は、前半で「電力系統における超電導電力機器特性調査専門委員会」(谷口委員長(電力中央研究所) 設置期間:平成15年6月~平成18年5月)により作成された電気学会技術報告1088号に関連して、各種超電導電力機器の解析モデルや試験報告など、計5件の報告が行われた。一連の発表は、超電導電力機器の開発状況に関する情報をまとめて入手する大変良い機会となった。後半では、「物質の磁気特性を活用した精密磁気制御応用技術調査専門委員会」(西嶋委員長(大阪大学) 設置期間:平成18年6月~平成20年5月)の活動に関連



研究会会場の様子

して磁気分離技術の動向や適用例の報告など、計3件の発表が行われた。これらの発表では、研究開発の状況や競合技術との関係が明瞭に示されるなど、大変有益なものであった。

研究会2日目は、

周辺技術 : 高温超電導機器用電流リード、DFRP 巻棒超電導コイル

線材・導体 : 急速急冷処理 Nb₃Al 線材、Nb₃Sn 素線 CIC 導体

バルク応用 : YBCO バルク磁気浮上

ケーブル : YBCO ケーブル、三相同一軸ケーブル、交流損失最小化

交流損失 : 磁性基板上の薄膜導体の交流損失特性、非接触交流損失測定法

といった内容で計10件の発表が行われた。各発表とも、最新の研究成果が報告されるとともに、様々な視点からの質疑応答が行われ、活発な意見交換がなされた。

今回の研究会では発表領域が多岐に渡っていたものの、座長ならびに参加者の方々のご協力の結果、それぞれの発表に対して活発な意見交換や議論が行われ、大変に有意義な研究会となりました。この場をお借りして、深く感謝申し上げます。

なお、次回の超電導応用電力機器研究会は、平成 20 年 6 月中旬頃に琉球大学にて開催すべく計画中です。開催日程や講演申込期限等の詳細は、電気学会のホームページ (<http://www.iee.or.jp> から「大会・研究会・行事」「研究会」と進んで下さい。)にて、適宜お知らせする予定です。概ね、開催日の 2~3 ヶ月前が講演申込書の提出期限、1 ヶ月前が原稿提出期限です。幅広い参加を期待していますので、是非とも参加をご検討下さい。

[超電導 Web21 トップページ](#)

【隔月連載記事】

粒子加速器と超電導 (その2)

日本大学
大学院総合科学研究科
教授 新富孝和

3. 超電導加速器シンクロトロン

3.1 高エネルギー加速器と超電導

シンクロトロンでは、加速粒子は磁場によるローレンツ力と遠心力が平衡した軌道を通る。すなわち、加速粒子の運動量を p [GeV/c]、磁束密度を B [T]、軌道の曲率半径を ρ [m] とすると、次式を満たす軌道半径を周回する。

$$B\rho[T \cdot m] = 3.336 p [GeV/c]$$

完成間近の LHC のパラメータである $B = 8.33$ [T]、 $\rho = 2804$ [m] を入れると、粒子の最大加速運動量として $p = 7000$ [GeV/c] が得られる。入射運動量は 450 [GeV/c] であるので、 $B = 0.535$ [T] の磁束密度となる。加速に同期して 0.535 [T] から 8.33 [T] まで電磁石の磁場を上げていく。

式から分かるように、強い磁場を発生できる電磁石を用い、軌道半径の大きな加速器を作れば、高いエネルギーまで粒子を加速できる。だが、軌道半径を大きくするには長いトンネルを必要とし、比例して建設費が上がるので、強い磁場を発生できる超電導磁石を用いることになる。

常伝導磁石では、発生できる磁場は 2 T が限界である（実際には、鉄の飽和を考えると 1.8 T 程度）。如何にして強い磁場を発生できるかが高エネルギー加速器開発の鍵である。加速器用超電導磁石の開発は、1970 年代初め頃より世界の主だった研究所で開始されている。我が国でも KEK のトリスタン加速器用として 5 T 級の超電導磁石の開発が 1970 年代に行われている。アメリカでは、BNL が ISABELLE 計画を開始し、FNAL では Energy Saver (今の Tevatron) 計画^{注1)} が提案され、夫々独自に超電導磁石の開発を手がけた。加速器用超電導磁石としては、FNAL が開発したカラーと呼ばれる非磁性鋼構造材による電磁力保持方式が技術的に優れており、結果的に ISABELLE 計画はキャンセルされ、Energy Saver 計画が生き残った。ただ、ISABELLE 計画の時に作られたインフラストラクチャは、現在の RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider) に活用されている。基本的に FNAL で開発された超電導磁石の概念が、その後の超電導加速器に踏襲されている。

超電導磁石を用いるもう一つの利点は、省エネルギーであることである。超電導磁石を用いることによって数十分の一の電力ですむといわれている。運転経費の大幅な削減になる。LHC 加速器用超電導磁石の運転に要する平均電力は 23 MVA である。これを常伝導磁石で作れば、その運転には数十倍の電力が必要になると考えられている。原子力発電所が必要な電力である。

3.2 これまでの超電導シンクロトロン

3.1 で述べたように、限られた敷地で高いエネルギーまで加速するためには高磁場が必要である。そのためには、超電導磁石が必須である。今までに完成あるいは計画された高エネルギー超電導シンクロトロンの一覧を表 3-1 に示す。

高エネルギー加速器用超電導磁石の基本技術は Tevatron によって完成されたが、夫々の超電導シンクロトロンに用いられている共通技術は以下の通りである。

- ・ 10 kA 級の大電流を流すことができ、機械的に堅固なラザフォード・ケーブルを用いる。

- ・ 加速器に要求される高い磁場精度を得るために、電流分布が $\cos\theta$ (双極電磁石) 近似になるようなコイルの導体配置にする。
- ・ 導体の動きを抑え、安定な電磁石とするために、カラーと呼ばれる非磁性鋼を用いて電磁力を支える。

表 3-1 高エネルギー超電導シンクロトロンのパラメータ

加速器名		Tevatron	HERA	RHIC	LHC	SSC***
研究所 (国)		FNAL(米)	DESY(独)	BNL(米)	CERN(スイ)	SSCL(米)
粒子エネルギー	[TeV]	0.9	0.82	0.1/amu*	7	20
加速器周長	[km]	6.3	6.3	3.8	26.7	87.1
加速器数		1	1	1	2	2
主二極磁石	磁界 [T]	4.4	4.7	3.5	8.3	6.6
	長さ [m]	6.1	8.8	9.7	14.2	15.8/13.3
	個数	774	416	288	1232**	7956/504
主四極磁石	コイル内径 [cm]	7.5	7.5	8	5.6	5
	磁場勾配 [T/m]	76	91	72	223	205
	長さ [m]	1.7	1.5~1.9	1.1	3.1	5.9/7.7
	個数	216	256	276	386**	1664/72
超電導体		Nb-Ti	Nb-Ti	Nb-Ti	Nb-Ti	Nb-Ti
冷却温度		4.5	4.5	4.5	1.9	4.4
完成年度		1985	1990****	1998	2008	中止

* 核子当りのエネルギー

** 1台のヨークに2個のコイルの入った two-in-one 型

*** 計画は中止されたが、超電導磁石技術開発に貢献があった。

**** 2007年に運転停止

図 3-1 に実物の超電導磁石のカットアウト写真を示す。



図 3-1 加速器用超電導磁石の例 (SSC 双極電磁石)

超電導双極電磁石の断面比較図を図 3-2 に示す。

開発に際して、(1) Tevatron は、開発研究から製作・組立全部を FNAL で行った。(2) HERA のマグネットは企業で製作された最初の量産である。(3) SSC は計画が中止になったが、導体開発や安定性などに関する技術開発研究は、LHC の磁石開発に影響を与えた。(4) LHC では、企業での量産効果を見ることができた。

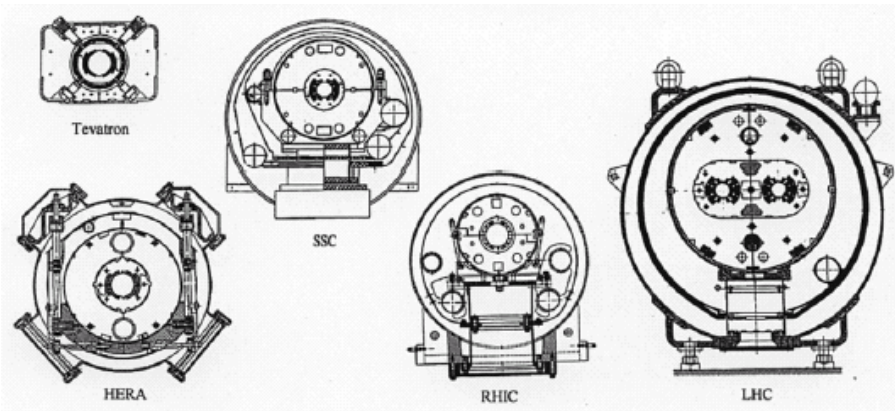


図 3-2 これまでの高エネルギー超電導加速器の超電導磁石の断面比較（同一縮尺）

夫々の計画における超電導技術の特徴を述べると、

- (1)Tevatron は鉄ヨークが室温である。コイルと鉄ヨークとの間隔が短いので、断熱支持方法に工夫をしているが、入熱量は大きい。
- (2)HERA のマグネット以降に製作された超電導磁石は鉄ヨークも低温に冷却する方式である。コールドマスは増えるが、真空容器の設計に自由度がある。また、鉄ヨークを電磁力支持材に併用できるので、より強固な支持が可能となり、鉄ヨークの磁場への寄与がある。
- (3)RHIC のコイルは、磁場が低いので単層コイルである。また、プラスチック・カラーを用いることで、対地絶縁を確保し、製作法を簡素化している。
- (4)コールドマスの支持方法は、HERA が吊り下げ方式で、他は下から同心円状の FRP 断熱支持材で支持している。
- (5)SSC では、内コイルと外コイルで異なるケーブルを用い（グレーディング）材料費を節約した。
- (6)LHC の電磁石は、1 ヨークに 2 つのコイルが組み込まれている。これは、トンネル断面の制限による。また、8.3 T と Nb-Ti の限界に近い磁場を要求しているため、1.9 K の He II を用いて冷却する。

これまでの計画遂行において以上のような特徴があるが、どの計画においても、R&D は研究所主体で行われ、それで開発された技術を企業に移転して生産を行っているところに大きな特長がある。最先端技術を必要とするので、計画を遂行する側が技術保証に責任を持つことである。

注 1) その頃、高エネルギー物理の管轄が DOE になり、その関係から Energy Saver 計画と呼ばれていた。最終的に、加速粒子のエネルギーが 1 TeV になることから、Tevatron と名付けられた。

出典

図 3-1 : SSC パンフレット “To the Heart of Matter – The Superconducting Super Collider”.

図 3-2 : N.N. Wilson, IEEE Trans. Appl. Supercond. vol. 9, pp. 111-121, 1999.

読者の広場

Q&A

Q：超電導エレクトロニクス分野における高温超電導体の代表的な応用例を教えてください。

A：超電導体をエレクトロニクスに応用する場合に、その応用分野は大きく二つに分類されます。受動デバイスと能動デバイスです。

受動デバイスというのは、外部からエネルギーを与えなくても必要な役割を果たすことのできるデバイスです。抵抗器やコンデンサーなどはその典型です。超電導受動デバイスには、超電導アンテナやマイクロ波共振器、あるいは磁気シールドなどへの応用がありますが、代表的な応用としてはすでに実用化されている超電導フィルタをあげることができます。携帯電話基地局でほかの電波帯域との区切りを明確にする目的で超電導フィルタが使われます。

日本では富士通と東芝の2社が超電導フィルタシステムの開発を行っています。マイクロ波電力が小さい受信用フィルタについてはほぼ開発が終わり、現在大電力のマイクロ波に耐える送信用フィルタの開発が行われています。米国ではSTI社がビジネス展開をしています。STI社の受信用超電導フィルタシステムは、米国の携帯電話基地局に7,000台以上が導入されています。中国では精華大学の関連会社である綜芸超導科技有限公司が超電導フィルタシステムの長期間に亘る現場試験を行っています。また、STI社は中国において、琿春宝力(HunChunBaoLi)社と合併して超電導フィルタの製造販売会社を設立しました。

一方、能動デバイスというのは、外部からエネルギーを供給することにより信号を増幅したり、新しい信号を作り出したりするもので、トランジスタがその典型です。超電導体の場合はジョセフソンデバイスが能動デバイスの典型といえます。ジョセフソンデバイスはトランジスタと同様に非常に多くの分野に応用することができます。電磁波検出器や磁界検出器へ応用することができます。超高速論理回路や電圧標準発生回路への応用も重要な分野です。低温の超電導体ではこれらの応用の多くが実現されていますが、高温超電導体の場合には性能の優れたジョセフソンデバイスを作ることが難しく、現在実現されている代表的な応用は磁界検出器です。ジョセフソン素子の臨界電流が外部の磁界に敏感に反応する性質を用いることにより、人体に触れないで心臓の鼓動が作る磁界を計測したり、脳に電流が流れることによって発生する磁界を検出したりする非常に感度のよい磁界検出器を作ることができます。これはSQUID(スクイッド)と呼ばれます。英和辞書で引くと「烏賊(いか)」とありますが、これは全く関係なく、超電導量子干渉デバイスという長い名前の英文の頭文字を取ったものです。

SQUIDは他の磁気センサーをはるかにしのぐ高感度な性能を示します。このため、心臓から磁界を測定する心磁計や、材料の外から内部の亀裂を発見する非破壊検査などに用いられています。心磁計はこれまでの心電計では発見できない虚血性心疾患の発見などに有効であり、また胎児の心磁図から期外収縮や頻脈性不整脈などの心疾患も見つかっています。各種非破壊検査、LSIの故障診断、免疫診断などへの応用研究も進んでいます。日本ではアドバンストフードテック(株)が、食品に混入した異物(例えば食肉に混入した予防接種用の注射針など)を発見するためのSQUID異物検査装置を販売しており、実際に工場稼働しています。米国では多くのベンチャー企業がSQUIDシステムの販売を行っています。心磁計を製造販売しているCardiomag Imaging、LSI試験検査装置を製造販売しているNeoceraなどがあります。

回答者：SRL 特別研究員 蓮尾信也

[超電導 Web21 トップページ](#)