

掲載内容（サマリー）：

特集：超電導産業機器技術の展開

- 超電導産業機器技術の動向
- 超電導磁気分離装置の進展
- 磁気浮上型超電導免震装置の開発
- 超電導バルク体を用いたアクチュエータの開発
- 超電導磁気浮上搬送装置の開発
- 船舶用超電導モータの技術開発の進展
- 輸送機器応用を目指した高温超電導誘導同期回転機の研究開発
- 超電導磁気式ビレット・ヒーター

○超電導関連 2011 年 3-4 月の催し物案内

- 新聞ヘッドライン（1/17-2/14）
- 隔月連載記事ーイットリウム系超電導線材の開発の道のり（その 2）
- 読者の広場(Q&A)ー超伝導バルク磁石システムを用いた関節軟骨再生とは？

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web21

〈発行者〉

財団法人 国際超電導産業技術研究センター 超電導 Web21 編集局

〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13

Tel (03) 3536-7283 Fax(03) 3536-7318

超電導 Web21 トップページ：<http://www.istec.or.jp/web21/web21.html>

この「超電導 Web21」は、競輪の補助金を受けて作成したものです。

<http://ringring-keirin.jp>



特集：超電導産業機器技術の展開

「超電導産業機器技術の動向」

東京大学大学院
新領域創成科学研究科
教授 大崎博之

超電導技術の産業応用として、シリコン単結晶引き上げ装置用超電導磁石がすでに実用化されている。そこでは金属系超電導線である NbTi 線の磁石が使用されていて、極低温冷却が必要であることは応用機器として大きな負担となるが、高品質、高性能材料の作製、高効率プロセスの実現など、大きなメリットが得られることから 1990 年代中頃より市場で受け入れられ、普及している。高温超電導線材にはまだ低コスト化等の課題があるが、高温超電導磁石は操作性に優れ、省エネルギー効果も大きいと実用化が期待される。

近年話題になり注目されているのが、アルミニウムや銅などの非鉄金属ビレットの押し出し成形のための加熱法として、高磁場中でビレットを回転させて加熱する方法（Magnetic Billet Heating）である。2004 年頃から Zenergy Power 社と Bültmann 社が本格的開発を始め、2008 年にはドイツの WeserAlu 社のアルミニウム押し出し成形工場に加熱装置が導入され、6 インチ径アルミニウムビレットの加熱でその優れた特性を実証した。その後、アルミニウムや銅の加熱のために、その他のドイツやイタリアの企業にも導入されている。ビレット中の温度分布の不均一さが小さく、プロセス速度の向上、生産性の向上につながり、高いシステム効率と、運転・保守コストの低減が実現できている。

高温超電導回転機については、船用あるいは自動車用のモータを中心にわが国でも研究開発が盛んになっていて、今後の進展について大いに注目している。

バルク超電導体は優れた磁束ピンニング特性を有し、それを活かした応用について長年研究されてきたが、なかなか真の実用機器というものが出現されてこなかった。研究開発は各所で様々な目的で継続されているので、実用的な応用機器の実現を期待したい。

さて、世間からも注目されている東京と大阪を結ぶ中央新幹線については、2010 年 2 月に、国土交通大臣から交通政策審議会に対して、中央新幹線の営業主体及び建設主体の指名、並びに整備計画の決定について諮問がなされ、それについて中央新幹線小委員会で審議が行われ、2010 年 12 月に中間とりまとめが提出された。その中で、中央新幹線のルートは、推定される輸送需要量、建設費用などの点から、最短距離を結ぶ南アルプスループの採択が適当であり、また、東海道新幹線との一体経営、超電導リニア技術の開発経緯等から、東京・大阪間の営業主体及び建設主体として、JR 東海が適当と考えられている。超電導リニアの採用が有力な中央新幹線は、2027 年の東京・名古屋間の営業運転開始へ向けて、実用技術・システムの開発と検証、設計等が進行中であり、引き続きコスト低減、省保守性とシステム安全性の向上のための技術開発も進められる。それらが順調に推移すること、そしてさらに大阪までの早期開業が実現することも大いに期待したい。超電導磁石については、高温超電導線材の適用可能性が重要な開発テーマである。

産業応用分野は可能性が多岐にわたり、ニーズにマッチした機器開発を、適切な目標を設定して推進することが重要である。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。

特集：超電導産業機器技術の展開

「超電導磁気分離装置の進展」

大阪大学大学院

工学研究科 環境エネルギー工学専攻

教授 西嶋茂宏

当該分野での産業機器技術は基礎的研究から実用化研究まで幅広い研究開発がおこなわれている。ここでは、産業機器として実際に実用化した機器、2種類を紹介する。それは①土壌・地下水汚染浄化技術への超電導磁気分離法の適用技術と②石炭からの除鉄装置である。

まず、土壌・地下水汚染浄化技術について紹介する。この技術は、鹿島建設株と㈱MSエンジニアリングが共同で開発した技術である。超伝導高勾配磁気分離法を用いて、土壌・地下水浄化工事で還元剤として使用される鉄粉を、泥水中から回収して再利用するものである。高価な機能性鉄粉の回収・再利用を可能としたことで工事コストを大幅に縮減した。その結果、経済に大きなメリットをもたらし、土壌・地下水浄化法（エンバイロジェット工法）の普及を促進するとともに、超伝導磁石の新たな応用分野として確立した。特に、土木工事現場で超伝導磁石を活用したのは日本初の試みであり、超伝導磁石の応用における新たな分野を切り開いた意味がある。

トリクロロエチレン等に代表されるVOC（Volatile Organic Compounds、揮発性有機化合物）による土壌・地下水汚染を原位置（対象となる土壌や地下水を空間的に移動することなく、地下に存在するそのままの位置）で浄化するために、噴射攪拌工法と云う方法が実用化されている。当該方法では還元剤である機能性鉄粉を水と混合し地盤中に噴射する手法であり、任意の深度に鉄粉を移送できるため、源位置で浄化できるメリットがある。しかしながら、地盤に鉄粉を混合する過程で噴射した鉄粉の一部（約50 %）が、地上に泥水と共に排出されてしまいランニングコストを高くする事が課題であった。排出される泥水から鉄粉が回収・再利用ができれば、ランニングコストの低減が図られ、噴射攪拌工法の優位性が示され、結果としてその普及に拍車がかかると想定された。直径100 μm 程度の鉄粉の回収には磁気力を利用した手法が優れている（それ以外の手法は困難と判断されていた）と考えられたが、以下に示される課題があった。1) 処理能力：泥水の排出量は400 L/min 前後であり、泥水中の鉄粉を磁気分離するには、高い処理能力が求められる、2) 回収した鉄粉に付着した土の洗浄：磁気分離で泥水中から鉄粉を回収しても、鉄粉に土が付着しており、鉄粉を再利用する場合の品質管理が困難となる、3) 鉄粉回収率：鉄粉回収率が低いと回収してもコスト縮減効果は小さくなる。以上の問題を解決するため、超伝導磁石を利用した高勾配磁気分離法を利用した。

これらの課題に対して以下のような手法を用いて解決した。1) の課題に関しては、超伝導磁石と磁気フィルターを利用した高勾配磁気分離システムで対応した。実際の泥水を処理したところ、最大500 L/min の高い処理能力が確認された。2) の課題に対しては、磁気力で磁気フィルターに付着している鉄粉をシャワー洗浄し土を洗い落とす工程を導入することで、ほぼ純粋な鉄粉を回収することを可能とした。3) については、実際の工事で発生した泥水を処理したところ、泥水中の鉄粉は98 %以上の回収が可能であることを確認しており、当該システムで工事コストの大幅な縮減に寄与すると云う結果を得た。

続いて、石炭からの除鉄装置について紹介する。この装置は中国科学院高エネルギー物理研究所の朱自安（Zian Zhu）が開発を行った。中国の日照港に設置され2009年から一年間の試験が行われ、

良好な性能を確認後、2010年6月に実用に供された。今後、このような装置を10台作る予定であるとのことである。石炭からの除鉄の装置としては、従来は電磁石性の装置を使用していたが、性能向上を図る必要があったため、超電導磁石を利用した当該装置の開発を行った。この開発の動機となったのは中国の石炭需要の急増である。中国は2009年に石炭純輸入国になったが、それ以降、輸入量は急増しており、今後も中国の石炭需要は増加すると考えられている。電力、鉄鋼、建材、化学工業、等の石炭多消費産業の進展がその背景にある。

このように中国では、石炭の需要が急増しているが、石炭の採掘にはダイナマイトが使用されている。採掘後、その不発の雷管が混入したままで出荷されることがあった。日本でも、愛媛県では中国から輸入したボイラー燃料用石炭の中に、石炭採掘時に混入残存したとみられる不発雷管4本が発見されたと報告されている。そこで、このような雷管も含め、針金や輸送用の配管等の鉄製の夾雑物を石炭の中から除去する必要が認識されるようになった。そこで、超電導磁石を利用した除鉄装置が開発されることになった。前述したように従来は電磁石性の除鉄装置を使用していたが、石炭需要の急増に伴い、性能向上を図る必要があったのである。

製作された除鉄装置では、端部より550 mmの距離を走るベルトコンベア（5 m/s）に載荷された石炭の中から（約500 mmの厚さの石炭層）除鉄を行う。年間一千万トンの石炭を処理する。ベルトコンベアの部位での磁場強度は0.4 T、コイル中心磁場は3 T、最大経験磁場で5.6 Tである。線材はNbTi（銅比は4）、液体ヘリウム浸漬型のコイルで再凝縮冷凍機を装備している。磁石そのものの仕様は、内径900 mm、外径1200 mm、高さ360 mmであり、運転電流165 A、インダクタンス224 Hである。クライオスタットの室温ボアは630 mm、外径1800 mm、高さ2200 mmである。約10日間かけて冷却する。今後、この実績を基に、カオリンの精製も手掛けたいと意欲的であった。

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：超電導産業機器技術の展開

「磁気浮上型超電導免震装置の開発」

東北大学大学院

工学研究科 電気・通信工学専攻

准教授 津田 理

我が国の半導体製造装置業界は、現時点では、世界シェアが 40 %を超える国際競争力の高い業界である。しかし、半導体製造装置の年間売上高の約 8 割を占める台湾、日本、韓国、中国、東南アジア諸国では、大規模地震が発生する可能性が高く、これまでに、2004 年新潟県中越大地震では 700 億円の被害が発生している。半導体製造工場では、地震時に被害抑制および安全確保のため装置を停止させるが、装置停止による損失額は 1 日 10 億円にも及ぶ。このため、装置の停止時間を短くする（究極的には、装置を停止させない）技術の構築が極めて重要であり、地震の振動伝達を抑制する「免震」技術の構築が急務となっている。しかし、半導体製造工場では、常時微振動の伝達を除去するために除振装置が採用されており、免震装置と併用する場合には、免震装置が常時微振動除去に悪影響を及ぼすことから、除振装置と免震装置の併用は困難とされている。この様な課題解決のために考案したのが磁気浮上型超電導免震装置である。本免震装置は、常時微振動から地震動まで、振動の周波数や振幅とは無関係に、水平振動の振動伝達を完全に排除することができる。このため、大規模地震時における工場での作業員の安全・安心の確保および製造ラインの連続運転が可能となる。図 1 に、本免震装置の概略図を示す。本免震装置は基本的に 3 層で構成されており、本モデルの場合、最下層（第 1 層）が永久磁石レール、中間層（第 2 層）がバルク超電導体と永久磁石レール、最上層（第 3 層）がバルク超電導体となっている¹⁾。図 2 に、現在使用しているモデル装置の振動試験時の様子を示す。最下層が斜め（45 度）方向に振動しているのに対し、中間層は左右方向にしか振動しておらず（最下層と中間層間で奥行き方向の振動が除去されている）、最上層は静止している（中間層と最上層間で左右方向の振動が除去されている）。本免震装置では、振動伝達抑制のために、永久磁石長手方向の磁場分布を均一にすることが重要であるが、これはバルク体の浮上力発生源となる磁気勾配が永久磁石長手方向ではゼロとなり、

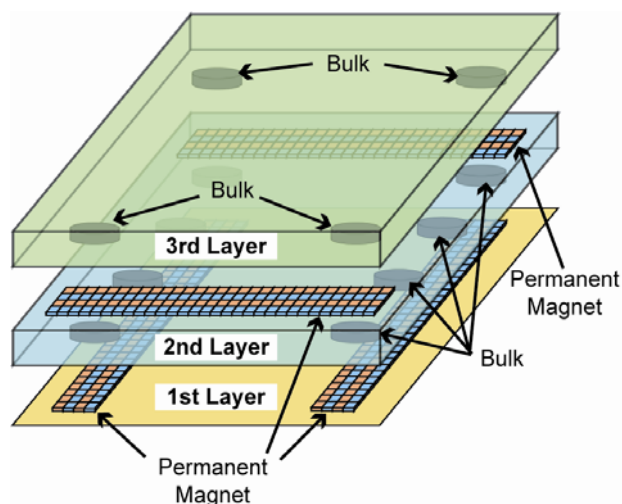


図 1 磁気浮上型超電導免震装置

永久磁石レール幅方向の磁気勾配だけで浮上力を確保しなければならないことを意味している。そこで、大きな浮上力を得るために、永久磁石対向システムとバルク体ー永久磁石システムを併用したハイブリッドシステムや、ハルバッハ配列を用いた永久磁石配列の検討を行っている^{2),3)}。また、これまでにモデル装置を用いて、任意の水平方向振動が最上層には伝達しないこと（ミクロンオーダーの微小振動でも振動伝達率は 1 %以下と除振性能は現用装置と同等以上）を確認している。現在は、静止時の浮上安定性確保と鉛直方向振動対策技術の構築を目指し研究開発を進めている。



図 2 磁気浮上型超電導免震装置の免震効果（動画）

参考文献：

- 1) M. Tsuda, et al.: "Vibration Characteristics in Magnetic Levitation Type Seismic Isolation Device Composed of Multiple HTS Bulks and Permanent Magnets", IEEE Trans. on Applied Superconductivity 17 (2007) 2059-2062
- 2) M. Tsuda, et al.: "Improvement of Levitation Force Characteristics in Magnetic Levitation Type Seismic Isolation Device Composed of HTS Bulk and Permanent Magnet", Journal of Physics 97-012104 (2008) 1-6
- 3) S. Sasaki, et al.: "Suitable Shape and Arrangement of HTS Bulk and Permanent Magnet for Improving Levitation Force in a Magnetic Levitation Type Superconducting Seismic Isolation Device", IEEE Trans. on Applied Superconductivity 20 (2010) 985-988

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：超電導産業機器技術の展開

「超電導バルク体を用いたアクチュエータの開発」

岡山大学大学院
自然科学研究科
准教授 金 錫範

1. 超電導アクチュエータの概念

高温超電導バルク体の臨界電流密度や機械的強度の向上により、磁気ベアリング、フライホイール、搬送装置、モータなどへの応用が期待されている。当研究室では、空間的に隔てた環境における遠隔操作が可能な超電導アクチュエータの開発について実験と数値解析両面からの研究を行ってきた¹⁾⁻³⁾。開発する超電導アクチュエータは、図 1 に示したように移動子である高温超電導バルク体と固定子である平面配列された電磁石群および制御部で構成されている。超電導アクチュエータの動作は、固定子の上部に配置させた高温超電導バルク体を磁場中冷却法（Field Cooling Method）を用いて捕捉させた後、固定子の駆動電流を制御して 3 次元的な磁場分布を発生させることで特定の磁場分布が捕捉されている移動子の鉛直方向・水平方向への移動及び回転を可能としている。

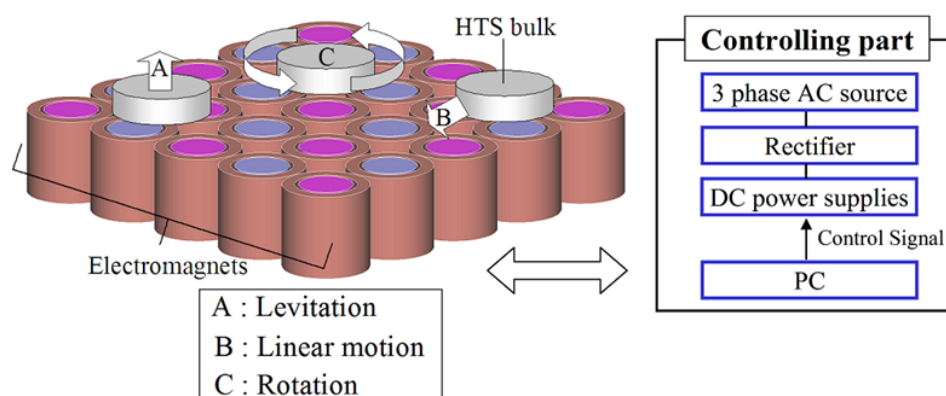


図 1 3次元超電導アクチュエータの概念図

2. 電磁石形状に関する検討

提案する超電導アクチュエータの安定浮上と動作特性を得るためには、固定子である電磁石からの発生磁場分布と磁場強度が非常に重要なパラメータとなる。初期の研究では、円柱状（図 2 の左図）の電磁石を作製して動作特性について検討を行い、移動子の回転角度を細かくさせるために図 2 の右図のような 8 極の電磁石を作製して行った。

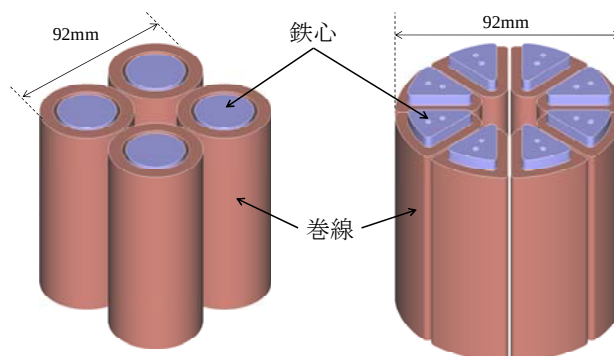


図 2 円柱型の電磁石（左図）と 8 極の電磁石（右図）

8 極電磁石の着磁パターンを NSNSNSNS にした場合の電磁石上部での発生磁場分布と、その磁場分布によって捕捉された高温超電導バルク体の磁場分布を測定した結果を図 3 に示す。また、電磁石の発生磁場分布と強度を向上させるために四角柱形状の電磁石についても検討を行い、鉄心とコイルの形状最適化も図っている。駆動電流が 10 A のときの電磁場解析による円柱型（鉄心直径 28 mm）と四角柱型（鉄心一辺 28 mm）電磁石上部の点線上の磁場分布特性を図 4 に示す。図 4 から分かるように四角柱型にすることによって磁場強度の向上と共に磁場分布が電磁石の内側に拡張されていることが分かる。そこで、実際に鉄心の径をパラメータにした円柱と四角柱電磁石を作製して同条件で高温超電導バルク体の浮上力を測定した結果、円柱電磁石に比べて優れた浮上特性が得られた。

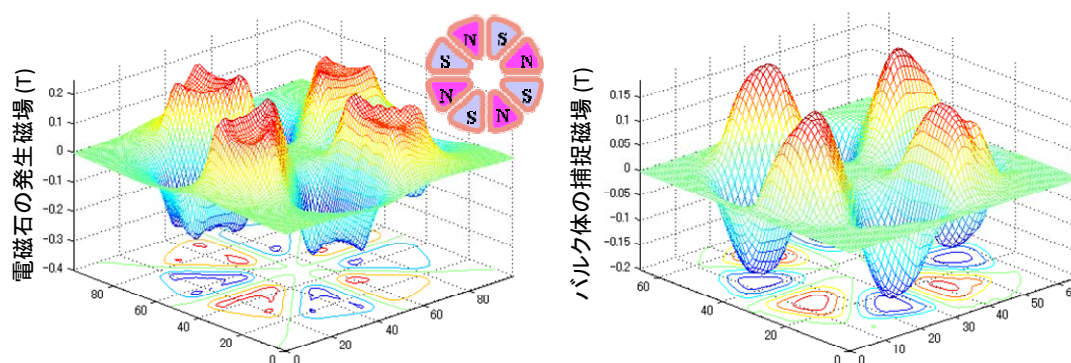


図 3 NSNSNSNS 着磁パターンによる 8 極電磁石の発生磁場分布（左図）と高温超電導バルク体の捕捉磁場分布（右図）

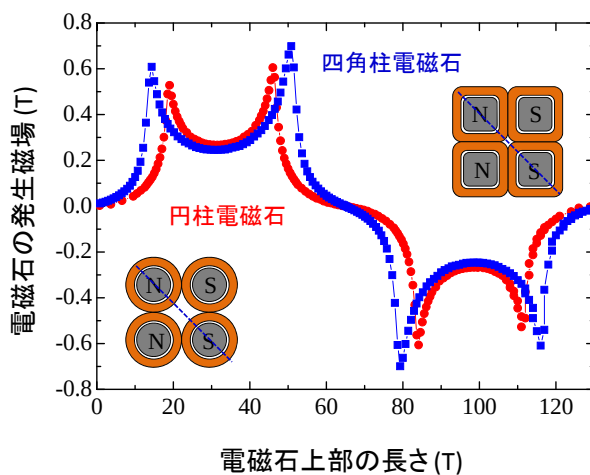


図 4 電磁場数値解析による円柱型と四角柱型電磁石の発生磁場分布特性

3. 駆動電流の制御方法（DC/AC）に関する検討

DC 制御に用いる電磁石の概要図を図 5 に示す。DC 制御では、各電磁石に通電する直流電流値を ON / OFF に切り替えることで水平搬送を実現しており、高温超電導バルク体を用いた浮上力の測定結果を図 6 に示す。図 6 は、異なる着磁電流に対する駆動電流と浮上力の関係を示しており（NSNS 着磁）、NNSS 極パターンに比べて小さい駆動電流で鉄心の飽和が起きている。DC 制御の場合は、電磁石に流す通電電流を ON / OFF するだけで制御できるので制御方法が非常に簡単であるものの速度の制御が難しく、高温超電導バルク体のオーバーシュートなどが問題となる。そこで、移動子

の滑らかな搬送と速度制御を実現させるために AC 制御について検討を行っている。AC 制御に用いる電磁石の概要図を図 7 に示し、バルク体を含めた極性パターンを図 8 に示す。AC 制御に用いる交流電流の波形については、有限要素法に基づく電磁場数値解析を利用して決定し、複数台のバイポーラ電源を用いて周波数依存性や着磁時のギャップ依存性などについて検討している 4),5)。

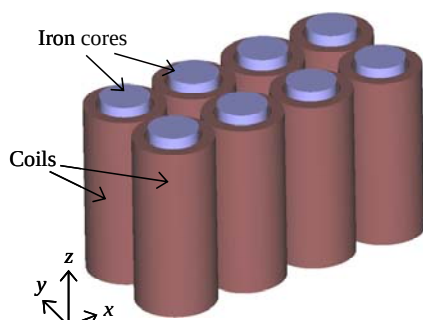


図 5 DC 制御用電磁石の概要図

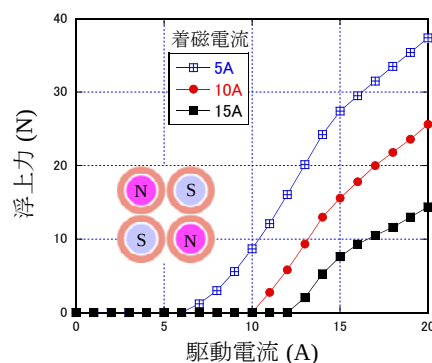


図 6 DC 制御による浮上力測定結果

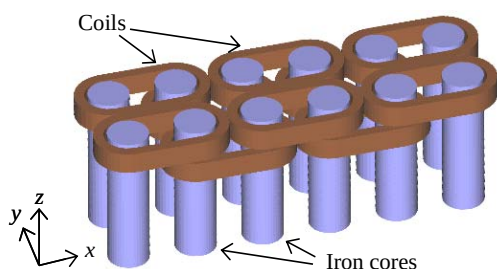


図 7 AC 制御用電磁石の概要図

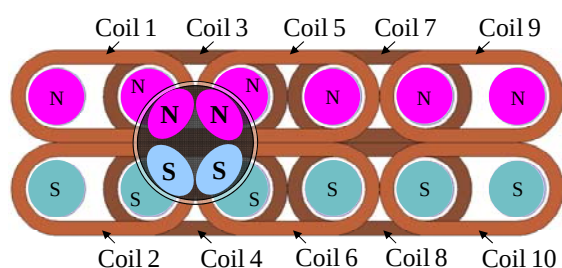


図 8 AC 制御用電磁石上面図と極性パターンの一例

参考文献：

- 1) S.B. Kim, T. Inoue, A. Shimizu, S. Murase, "Development of 3-D superconducting actuator using HTS bulks based on 8 poles electromagnets", Physica C, Vol.463-465, pp. 1346-1351, 2007
- 2) J.H. Joo, S.B. Kim, T. Inoue, A. Shimizu, S. Murase, "Cap core design for high levitation force in 3-D superconducting actuator with HTS bulk", Physica C, Vol.463-465, pp. 420-425, 2007
- 3) S.B. Kim, T. Inoue, A. Shimizu, J.H. Joo, S. Murase, "Characteristics of a on 3-D HTS actuator with various shaped electromagnets", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 17, No. 2, pp. 2327-2330, 2007
- 4) S.B. Kim, D. Inoue, J.H. Joo, and Y. Uwani, "The dynamic characteristics of the HTS bulk superconducting actuator driven with AC electromagnets ", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, in press
- 5) S.B. Kim, Y. Uwani, J.H. Joo, Y.S. Jo, "The decay properties of the trapped magnetic field in HTS bulk superconducting actuator by AC controlled magnetic field", Physica C, in press

特集：超電導産業機器技術の展開

「超電導磁気浮上搬送装置の開発」

九州工業大学

先端機能システム系・総合システム工学科

教授 小森望充

近年のめまぐるしい技術進歩によって、超電導磁気浮上搬送装置の必要性が増している。浮上に電力を消費しないことや複雑な制御をしないで安定浮上できることに注目し、超電導体のピン止め力を用いた浮上搬送装置を開発する。また、超電導体にパルス着磁を行うことで超電導浮上の欠点でもある浮上特性を変えられない点を改善するシステムを構築する。

システムの構成を図 1 に示す。推進にはリニア誘導モータを使用する。電源として、着磁用パルス電源と推進用三相交流電源が必要である。容器内の四隅に配置した超電導体(φ20 mm)を固定し、液体窒素で冷却する。磁場解析により、図 2 のような磁気レールを製作した。永久磁石部では、磁極を向かい合わせることで磁場を強め、鉄心によりレール方向の磁場を均一にすることができる。着磁法(1)では、下部の磁気レールの一部に電磁石を組み込み着磁する方法をとっている。電磁石部ではパルス着磁による発生磁場が永久磁石部の磁場と同様になるようにし、着磁による超電導体の捕捉磁場の乱れを防ぐように設計した。着磁法(2)では、図 1 の着磁用電磁石を使って着磁する。電磁石を大きく設計できるように上から着磁する機構をとり、アーム部分が矢印の方向に動き密着した状態で着磁する。こうすることで、着磁法(1)では電磁石部において着磁用電磁石の部分での磁場の低下は浮上体のギャップを小さくしてしまう結果となっていたが、着磁法(2)ではこれが改善されている。

図 3 には磁気レールの上 1 mm において Z 方向の磁束密度を計測した結果を示す。Y 軸の 0 mm あたりの地点ではリニア誘導モータの鉄心があるが、無視できるほどの影響しかない。磁気レールの x 方向では、あまり変化がないことが分かる。これにより、安定した浮上走行が可能である。

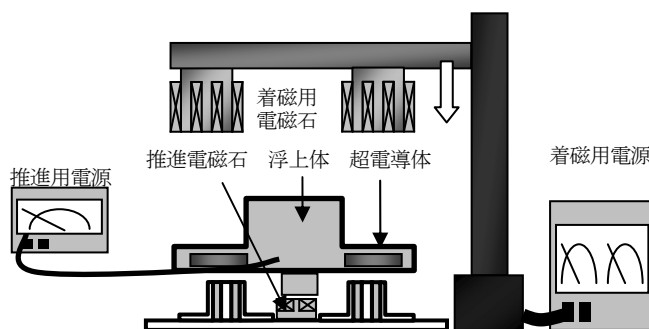


図 1 システム構成

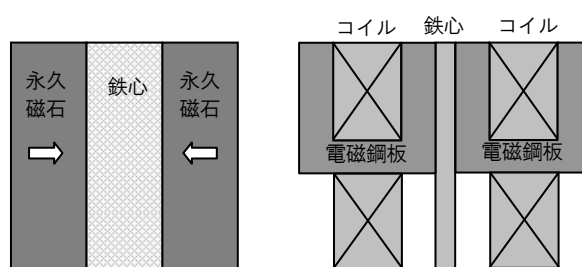


図 2 磁気レール

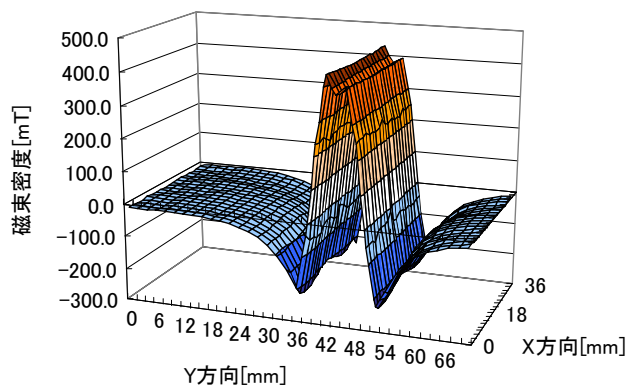


図 3 磁気レールの磁場分布

図 4 にギャップ 3 mm のときの推進力を示す。アルミの冷却により導電率が上がったことで常温よりも約 7 倍もの推進力が得られている。アルミと電磁鋼板を重ねたものを比較すると、電磁鋼板に磁束が集まり、3 倍もの推進力の違いが見られた。

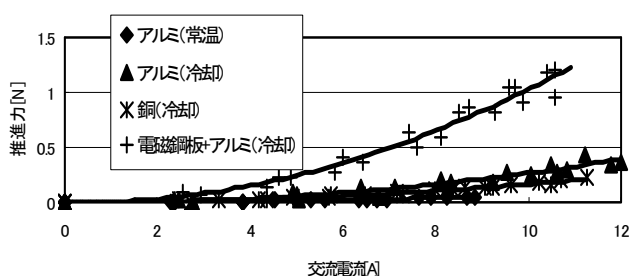


図 4 推進力

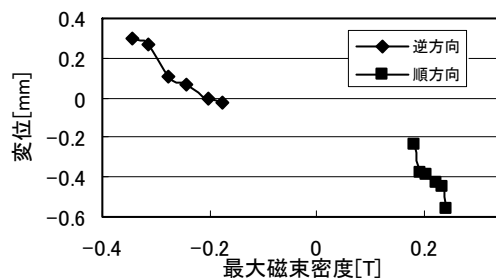


図 5 着磁法(1)の変位

図 5 では着磁法(1)で、着磁する前後の浮上体の変位を示している。初期浮上ギャップは 5 mm であり、着磁法(1)では 200 V、着磁法(2)では 250 V でパルス着磁した。着磁法(1)では、0.2 T 以上では、ほぼ出力磁場に比例するように変位している。

着磁法(2)でパルス着磁した後の超電導体に捕捉されている磁束密度分布を超電導体の上面から 1mm にて測定した。順方向に着磁した場合を図 6 に、逆方向に着磁した場合を図 7 に示す。これらより着磁による捕捉磁場変化が上面で確認できるが、下面では逆方向の変化が微小であった。このことより、浮上高さの変位は上面と比較して、下面の捕捉磁場が大きく関わっていると考えられる。

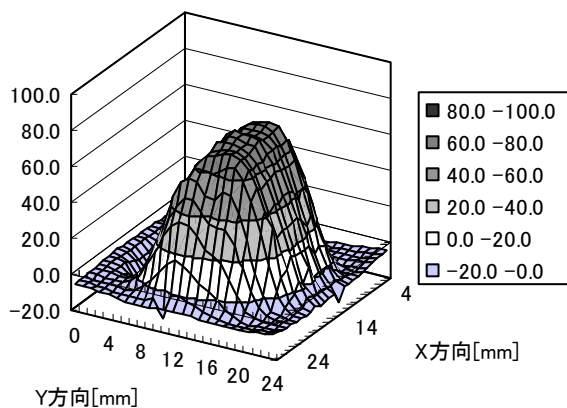


図 6 順方向の捕捉磁場分布

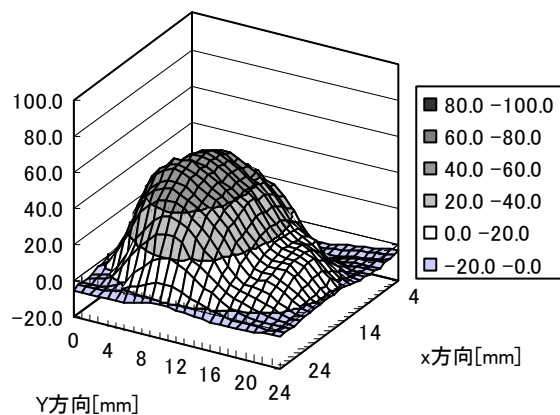


図 7 逆方向の捕捉磁場分布

参照：

1) R. Maruo et al., "Study on magnetically levitated conveying system using hybrid-magnetized high T_c superconductors," IEEE Trans. on Applied Superconductivity, 18, 820, 2008.

特集：超電導産業機器技術の展開 「船舶用超電導モータの技術開発の進展」

川崎重工業株式会社
技術研究所 機械システム研究部
部長 柳本俊之

原油価格の高騰や地球温暖化防止、国際的な排ガス規制強化により、船舶分野においてもより一層の燃費改善や環境負荷低減への対応が迫られています。従来のディーゼル船の推進システムを超電導モータが組み込まれた電気推進システムに置き換えた場合、消費電力の低減に加え、小型化により配置の自由度が増すことから、より水の抵抗の少ない船型への改良が可能となり、さらにプロペラを直接駆動できることで、減速機を介することによるエネルギー損失もなくなります。これら超電導の利点を組み合わせることで、大幅な燃料低減が可能です。

米国にて 36.5 MW 出力の船舶推進用の低速度の超電導モータの全負荷試験成功¹⁾は記憶に新しいですが、その他、欧州、韓国でもメガワット出力の船舶推進用超電導モータの開発²⁾が進行中です。我が国では、回転界磁にバルク超電導体を利用した超電導モータ³⁾や、ビスマス系線材を用いた鉄芯付きコイルを軸方向に並べる超電導モータ⁴⁾の開発などが行われていました。近年は、メガワット級の超電導モータの開発が進展してきており、川崎重工業（株）、（国）東京海洋大学、（独）海上技術安全研究所、（株）超電導機構、及び住友電気工業（株）による開発グループにおいて、1 MW の出力を想定した試作機（下図参照）が製作されました。昨年には、1 極あたり 6 個ある超電導コイルの 2 個を設置して実証試験を行い、450 kW の国内最高出力と非常に高いモータ効率 98 % を達成しました。この結果より、超電導コイルをすべて設置した場合には、1 MW の出力が得られることになります。引き続き、当開発グループでは、NEDO からの助成も受け、2012 年における 3 MW 出力の超電導モータの実現に向け開発を実施中です。



1 MW 級超電導モータ試作機

今後は、超電導モータの長期間運転や負荷変動に対する耐久性の評価を行っていく必要があります。また、併せて高効率で耐動揺性の高い冷却システムの開発や高温超電導線材の大幅な性能向上とコスト低減により、船舶分野における超電導モータの実用化、更に産業用の実用化が今後、大きく進展していくものと期待されます。

参考文献：

- 1) <http://www.amsco.com/products/motorsgenerators/shipPropulsion.html>
- 2) http://www.siemens.com/innovation/en/news_events/innovationnews/innovationnews_articles/energy/ship_propulsion_unit_with_superconducting_coils.htm
http://www.doosan.com/doosanheavybiz/en/services/green_energy/superconducting.page
- 3) <http://www2.kaiyodai.ac.jp/~izumi/pressrelease/PRESSRELEASE060701HP.pdf>
- 4) <http://www.ihl.co.jp/ihl/press/2007/2007-9-03/index.html>
- 5) http://www.khi.co.jp/news/detail/20101101_1.html

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：超電導産業機器技術の展開

「輸送機器応用を目指した高温超電導誘導同期回転機の研究開発」

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

筆者らは、かご形高温超電導巻線を有する輸送機器用高温超電導誘導同期回転機（High Temperature Superconductor Induction/Synchronous Machine: HTS-ISM）の研究開発を実施している¹⁾。本研究開発は、NEDO 委託事業「H21 年度省エネルギー革新技術開発事業（第二次公募）」として実施され、1 年 3 ヶ月程度の短期研究開発期間にもかかわらず、斯界の第一線で活躍しているプロジェクトメンバーの尽力ならびに NEDO 殿のバックアップのもと、次のような成果を挙げることができた。

まず、数 kW 級の小形機を対象とした全高温超電導誘導同期回転機の実証研究を実施した。ラジアルギャップ形回転機に関して、これまで全高温超電導化ならびに 1000 rpm を超える高速回転の成功については世界的に報告が無かったことから、慎重な検討を重ねた。固定子巻線について検討した結果、レーストラックダブルパンケーキコイル構造の採用やその組み合わせ法、あるいは巻線冷却方法に工夫を施すことによって、まず 300 rpm の同期回転に成功後²⁾、同期回転数 1800 rpm における連続回転を達成した³⁾。また、高温超電導かご形巻線の非線形電流輸送特性を巧みに利用することによって、フェールセーフとしてののすべり回転モードの確認、あるいは電圧方程式に基づく過渡特性解析コード開発⁴⁾や安定回転制御性⁵⁾を検証することができた。

次に、上記小形機の成果を受け、20 kW 級プロトタイプ機の開発を実施した。プロトタイプ機の開発に際しては、候補となる市販高温超電導テープ材の鉄心中臨界電流特性³⁾や許容曲げ径の制約条件⁶⁾のもと、固定子体格最小化の目標に対して、電磁界解析とコイル必要起磁力、高温超電導コイルの幾何形状他を多角的に検討して設計を実施した。その後、決定された高温超電導テープ材を利用してコイルを試作し、直流ならびに交流通電特性³⁾や、鉄心内における通電特性⁷⁾など、その再現性を含めて詳細に測定しかつ特性確認を行った。さらには、鉄心コアも低温環境に置かれるため、幾つかの候補材料について低温脆性⁸⁾や鉄損特性⁹⁾を標準的測定法で評価し、その結果選択したケイ素鋼板を使用して固定子ならびに回転子コアを試作した。一方、高温超電導固定子ならびに回転子巻線の制作に際しても、その構成法や施工技術に種々工夫を施した。最終的に、出来上がったコアに高温超電導巻線を施工し、諸工程を経て 20 kW 級機を完成した。上記検討には、かなりの時間と労力を要したが、重要なノウハウや知見が得られた。

また、開発した 20 kW 級プロトタイプ機を設置する小形クライオスタットについて、熱侵入を最小化し、かつ熱応力を吸収する冷却構造を開発し、さらにシャフト周りの構造についても様々な工夫を施した。最終的に、20 kW 級プロトタイプ回転機とクライオスタットを一体化し、駆動システム完成にこぎつけることができた。現在は、各種実証試験を実施しており、今後報告していく予定である。

一方、輸送機器用の小型高効率冷凍機も並行して開発した。アイシン精機（株）の長年の技術が蓄積されているスターリング型冷凍機を採用し、圧縮機他の詳細な検討を重ねた結果、77 K において世界トップ記録に迫る COP 0.075¹⁰⁾を達成するとともに、同 0.1 達成の目途も立っている。

以上、本稿では筆者らが研究開発している輸送機器用高温超電導誘導同期駆動システムの研究開発状況を報告した。本研究開発は、電気駆動式自動車、電車、船舶他の輸送機器応用を目指してお

り、例えば最も超電導技術にとってハードルの高いアプリケーションである電気駆動式自動車についても、コンピューターを除くミドルクラス以上の自動車についてはその実現可能性を見出している。勿論、それ以外の輸送機器については、さらに実現可能性が高いと考えられる。今後とも研究開発を継続して、高温超電導回転機技術実用化の一端を担えるように努力したいと考えている。

参考文献:

- 1) 中村武恒, 特集: 超電導産業機器技術の展開「電気自動車用超電導モータ技術開発の進展」, 超電導 WEB21 (2010.03) 5
- 2) 全超電導誘導同期機の回転試験に成功! 一車載用高温超電導駆動システムの研究開発にはずみ! __京都大学、イムラ材料開発研究所、応用科学研究所、新潟大学__, 超電導コミュニケーションズ (SUPERCOM), vol. 19, no. 3 (2010.06)
- 3) 中村武恒 他, 投稿準備中
- 4) 松村一弘, 中村武恒, 西村敏治, 浅井力矢, 関口大輔, 雨宮尚之, 高温超伝導誘導/同期回転機の解析モデルによる負荷特性の評価, 2009 年度秋季低温工学・超電導学会, 岡山大学, 岡山市 (2010.11) 1B-p07
- 5) 北野紘生, 中村武恒, 関口大輔, 三澤慎太郎, 川西 勇作, 雨宮尚之, 高温超電導誘導同期機の安定性に関する検討, 平成 23 年電気学会全国大会, 大阪大学, 大阪市 (2011.03) 申込済
- 6) 長村光造, 中村武恒, 伊藤佳孝, 吉川雅章, 寺澤俊久, DI-BSCCO テープにおける低温曲げ歪の臨界電流への影響, 2010 年度秋季低温工学・超電導学会, かごしま県民交流センター, 鹿児島市 (2010.12) 2A-a04
- 7) 二口達壮, 前川達也, 小川純, 福井聡, 岡徹雄, 佐藤孝雄, 中村武恒, 長村光造, 鉄心中における高温超伝導線材の交流損失特性, 2010 年度秋季低温工学・超電導学会, かごしま県民交流センター, 鹿児島市 (2010.12) 1P-p26
- 8) 長村光造 他, 未公表
- 9) M. Miyamoto, T. Matsuo and T. Nakamura, A Measurement of Vector Hysteretic Property of Silicon Steel Sheet at Liquid Nitrogen Temperature, 11th International Workshop on 1 & 2 Dimensional Magnetic Measurement and Testing, Oita, Japan (2010.11)
- 10) 未公表

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：超電導産業機器技術の展開

「超電導磁気式ビレット・ヒーター」

極東貿易株式会社
顧問 小川幸雄

1. AC誘導加熱とその限界

AC誘導加熱は1920年代¹⁾から金属業界で使用されてきました。AC誘導加熱では銅で作られた磁気コイルが押出し用金属ビレットを取巻いています。コイルに交流電源を印加すると方向が変化する磁場を作り出し、この磁場がビレット内に渦電流を誘導しジュールの法則に基づき材料の電気抵抗により材料が加熱されます。コイルが溶けるのを防ぐため、コイルは通常水冷式銅チューブから作られ、この銅コイル自身の加熱がAC誘導加熱に置ける最大のエネルギー損失となっており、アルミ加熱におけるエネルギー効率は40～45 %です。

加熱プロセス自身にも改良の余地があります。一般の電源周波数50-60 Hzを使用したAC誘導加熱では主にビレット表面に渦電流が発生し、ビレット中に熱が均等に広がるのを待つ必要があります。また、ビレット寸法・合金成分・加熱電源を変更する際には、常にAC誘導加熱では調整が必要となります。

2. 新アプローチとしてのDC磁気式加熱

金属加熱にDC電源システムを使用する案は当初1950年代から検討されてきましたが、米国の発明者が1990年²⁾に強力な磁石を使用したDC誘導加熱方法を発表するまで実用化に30年以上掛かりました。この概念は従来式に比べ利点があることは判っていましたが、当時の技術ではその概念を経済的に実現出来ませんでした。今日、産業界で製造されている超電導ワイヤーと進歩したソリッドステート型モーター駆動がDC磁気式ヒーターの商業化を実現³⁾⁻⁶⁾しました。磁気式加熱は技術的に簡単で、エネルギー効率の良い加熱プロセスです。ビレット表面をオーバー加熱することなくビレットを素早く均一な温度に加熱可能です。

2008年7月に最初に商業運転を開始した磁気式加熱では超電導体による抵抗の無い電気の流れにより、コイルは単に10 Wの入力電源で誘導加熱に必要な磁場を作り出します。直流で作られた磁場は変化しないため、渦電流を誘導すべく磁場内でビレットを回転させます。材料内の渦電流は回転と反対に作用し、強力なブレーキ・トルクを発生させます。100～500 kWの電動モーターがこのトルクに打ち勝ちます。従って、磁気式加熱でビレットを加熱するエネルギー源は効率の悪い誘導コイルではなく、高効率モーターです。モーターにより消費されたエネルギーは回転するビレット内で熱に変換されます。図1に示されたように磁気式加熱のヒーターの全エネルギー損失は80 %以上です。

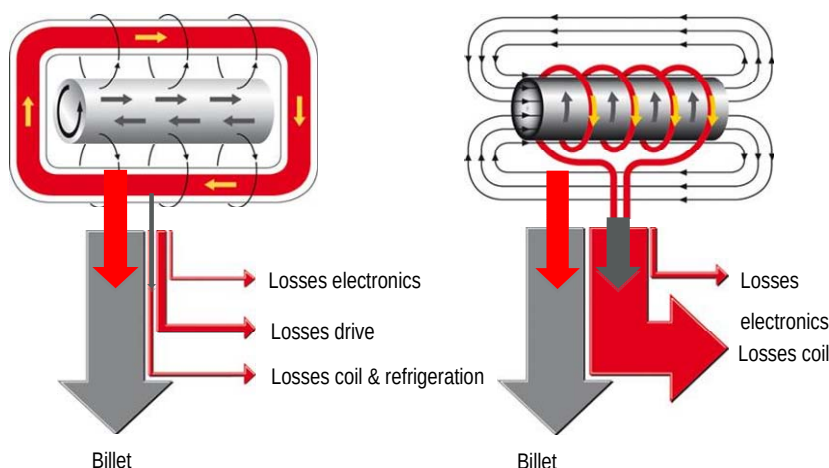


図1 HTS磁気式誘導加熱(図左)とAC誘導加熱(図右)のエネルギー損失

「電氣的」ではなく「機械的」周波数を使った効果として磁気式加熱のエネルギー浸透度はAC誘導加熱装置より約三倍深いため表面効果が無くなり、より均一な加熱が可能になりました。更に、早い加熱プロセスにより材料の部分的な溶融という危険が無くなります。また磁気式加熱ではビレットの内部温度が均一になるまで待つ余分な時間が不要となります。アルミ製ビレットに熱電対とタップホールを使った実験では、片端から反対の端、そして表面から中心までの温度差はAC誘導加熱の±15℃に対し±6℃です。

3. 簡単な技術的設計

図2.に示されたように、磁気式加熱装置の中心となる機器は超電導マグネットです。市販されている機器から構成された冷却システムはマグネットを操作温度内に保ちます。マグネットはビレットが回転する熱的に絶縁された二つの加熱チャンバー内を通過する磁場を発生させます。各チャンバーの電気モーターは回転エネルギーを提供します。モーターは長さの異なるビレットを収納するため摺動し、油圧システムはビレットを駆動システムに固定します。マシンは全ての加熱効果を回転するビレットに集中しています。ガス加熱や誘導加熱と比較して、磁気式ヒーターには極度な温度上昇や機械的な応力が掛かるような機器はありません。

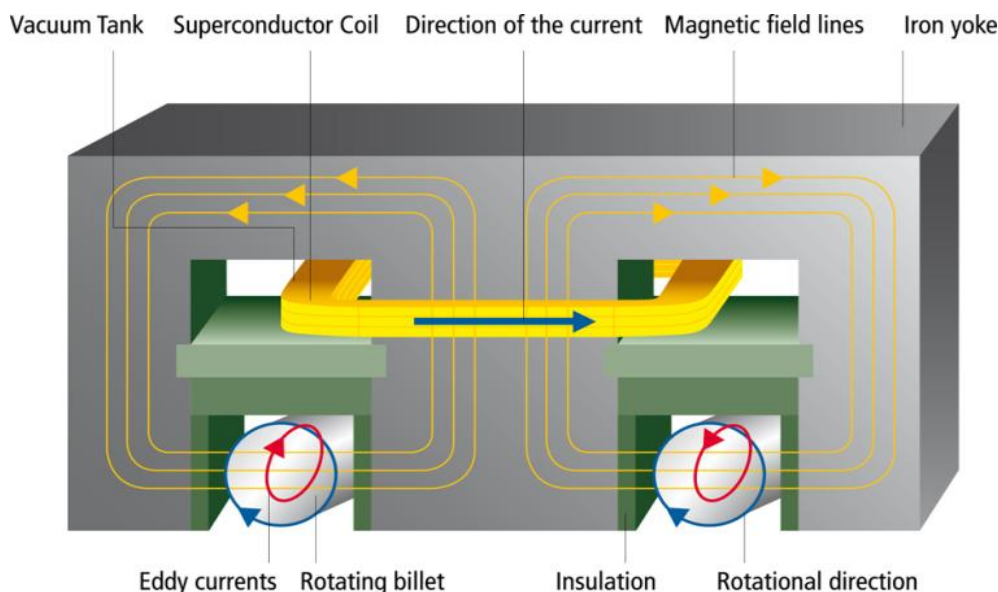


図2 磁気式ビレット・ヒーターの概念図

4. 据付及び運転からの経験

マシンは現地での据付が簡単でしかも短時間で行えるように設計されています。また、既設生産レイアウトにマシンを容易に組入れられるようマシンはコンパクトな寸法になっています。アルミ加熱では温度の均一性からビレットのターゲット温度を30℃以上低くすることが可能で、この低いビレット温度はより複雑で精密な形状のアルミを押出すことを可能にしました。更に、表面性状が改善され、磁気式ビレット・ヒーターはアルミ押出しにおける生産性を平均で25 %増加させました。同時にアルミ製ビレットの加熱費用は従来のAC誘導加熱に比べて約50 %減少しました。

参考文献：

- 1) Tudbury, C.A., Basics of Induction Heating, John F. Rider, Inc., New Rochelle, NY, 1960.
- 2) Mohr, G.R., Industrial Heating Magazine, May, 1990, p. 24.

- 3) Masur, L.J., J. Kellers, S. Kalsi, C. Thieme, and E. Harley, "Industrial HTS Conductors: Status and Applications," 2004 Institute of Physics Conference Series, 2004, pp. 181, 219.
- 4) Runde, M. & N. Magnusson, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2003, 13 1612.
- 5) Magnusson, N., European Patent 1582091 B1.
- 6) Magnusson, N. and M. Runde, "A 200 kW MgB₂ Induction Heater Project," Journal of Physics: Conference Series 43, 2006, pp. 1019–1022.

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導関連 3-4 月の催し物案内

3/3-5

Lunar Superconductor Applications (LSA), 1st International Workshop

場所：Houston, TX, USA

問合せ：<http://lsa2011.org/>

3/6-8

International Workshop on Novel Superconductors and Super Materials 2011 (NS2 2011)

主催：東京工業大学，科学技術振興機構，他

問合せ：<http://www.supera.titech.ac.jp/ns22011/index.html>

3/10

第 77 回超伝導科学技術研究会ワークショップ「極限を測る超伝導技術の最前線」

主催：未踏科学技術協会 超伝導科学技術研究会

問合せ：<http://www.sntt.or.jp/~fsst/20110310.html>

3/11

先端的極低温冷却技術調査研究会

場所：高エネルギー加速器研究機構 研究本館 1 階 会議室 1

主催：低温工学協会

問合せ：http://www.csj.or.jp/survey/2011/cryogenic_0311.pdf

3/16-18

平成 23 年 電気学会全国大会

場所：大阪大学

主催：電気学会

問合せ：<http://www2.iee.or.jp/ver2/honbu/03-conference/index.html>

3/20-23

Power Systems Conference and Exposition (PSCE)

場所：Phoenix, AZ, USA

問合せ：<http://www.pscexpo.com/>

3/21-25

American Physical Society March Meeting 2011

場所：Dallas, Texas

問合せ：<http://www.aps.org/meetings/march/index.cfm>

3/24-27

2011 年春季 第 58 回 応用物理学関係連合講演会

場所：神奈川工科大学

主催：応用物理学会

問合せ : <http://www.jsap.or.jp/activities/annualmeetings/index.html>

3/25-28

日本物理学会 第 66 回年次大会

場所 : 新潟大学

主催 : 日本物理学会

問合せ : <http://www.soc.nii.ac.jp/jps/jps/bbs/meetings.html>

3/25-27

日本金属学会 2011 年春期 (第 148 回) 大会

場所 : 東京都市大学

主催 : 日本金属学会

問合せ : http://www.sendai.kopas.co.jp/METAL/MEETINGS/2011_spr/2011-spr02.html

3/28-4/1

2011 Particle Accelerator Conference (PAC'11)

場所 : the New York Marriott Marquis Hotel located in New York City

問合せ : <http://www.bnl.gov/pac11/>

4/4-8

SuperConductingCity Hannover Messe

場所 : Hannover, Germany

問合せ : <http://site.hannovermesse.de/scc>

4/10-13

IEEE Electric Ship Technologies Symposium

場所 : Alexandria, VA, USA

問合せ :

http://www.ieee.org/conferences_events/conferences/conferencedetails/index.html?Conf_ID=17703

4/14-4/15

超伝導エレクトロニクス研究会 4 月研究会 (マイクロ波超伝導/マイクロ波一般 [マイクロ波研究会と共催])

場所 : 東北大学電気通信研究所

主催 : 超伝導エレクトロニクス研究会

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

4/15-17

IEEE International Conference on Electric Information and Control Engineering (ICEICE)

場所 : Wuhan, China

問合せ :

http://www.ieee.org/conferences_events/conferences/conferencedetails/index.html?Conf_ID=17633

4/25-29

2011 MRS Spring Meeting and Exhibit

場所：San Francisco, California

問合せ：<http://www.mrs.org/spring2011/>

4/30-5/3

American Physical Society April Meeting 2011

場所：Anaheim, CA

問合せ：<http://www.aps.org/meetings/april/index.cfm>

(編集局)

[超電導 Web21 トップページ](#)



新聞ヘッドライン (1/18-2/14)

- 脳測定、子供も正確に 横河電機 体動かしても補正 日経産業新聞 1/18
- 超電導線で産機に参入 住友電工 アルミ・銅の加熱装置向け 量産へ用途拡大狙う 日刊工業新聞 1/19
- メガ太陽光発電続々 工場屋根、製油所跡地を活用 読売新聞 1/20
- 住友電工超電導線 独社加熱装置に採用 電流量や強度など評価 電気新聞 1/20
- マヨラナフェルミ粒子 超流動ヘリウム 3 表面で実現 東工大、広島大のグループ成功 量子計算の基本素子へ応用も 科学新聞 1/21
- 金属「第 3 の状態」発見 東大など、高温超電導へ道 日本経済新聞 1/21
- レアアース、先高観強まる 中国の輸出枠削減が直撃 日本経済新聞 1/22
- 極低温「超電導」室温でも可能性 新潟大、計算で予測 日本経済新聞 1/24
- 超電導使った「究極の電線」 読売新聞 1/24
- ニッポン産業 いざ反転攻勢 電機 投資始まるスマートグリッド 日刊工業新聞 1/28
- 住友電工 超電導線で電磁石 磁力検査 時間・冷却コスト 1/10 日刊工業新聞 1/28
- 新しい金属相の可能性示唆 Yb を含む化合物の特異点 東大”実質的にゼロ磁場”で発見 科学新聞 1/28
- レアアースで協力 日本：代替材料の開発 EU：リサイクル研究 毎日新聞 1/28
- 高温超電導材使い安く 微弱磁気センサー 超電導工学研 医療機器を小型化 日経産業新聞 1/28
- ウラン化合物 「隠れた秩序」解明 京大 極低温、電子軌道に変化 日経産業新聞 1/28
- バイオ医薬太陽電池 官民で研究機関 産業革新機構、知財を集約 日本経済新聞 1/31
- 住友電工 磁石検査に超電導 測定時間約 10 分の 1 に 電気新聞 1/31
- レアアース回収で新技術 廃棄物・使用エネ削減 横浜国大 イオン液体を溶媒に 日刊工業新聞 1/31
- 挑戦スマートグリッド 送配電網のスマート化技術 適切な組合せで効率的・経済的に 電気新聞 2/01
- 超電導の新材料 東工大教授ら開発 超高速演算素子に道 日本経済新聞 夕刊 2/02
- 超電導材 反強磁性層と積層に 東工大発見 ビスマス・希土類で 日経産業新聞 2/03
- 反強磁性と超電導が共存 東工大、超電導体を発見 日刊工業新聞 2/03
- 豊洲の街、環境に優しく 江東区が協議会 自然エネルギー導入 東ガスなどと 日本経済新聞 2/03
- レアアース特需に沸く豪州 中国の輸出制限で世界が注目 Fuji Sankei Business i. 2/07
- 国際標準化に 13 テーマ 経産省、トップダウンで決定 日刊工業新聞 2/07
- 瞬間的な電圧低下防ぐ 高温超電導膜使用 古河電工が限流器 日刊工業新聞 2/08
- レアメタルが一段高 自動車向け排ガス用触媒 ジルコニウム 6 割 日本経済新聞 2/09
- 超電導線、高性能化進む 住友電工：電流値 1 割高め量産へ フジクラ：安価で臨界電流が最高 日刊工業新聞 2/10
- フジクラ 長さ 816 メートル超電導線材 全体を加熱し均質な膜 日経産業新聞 2/11
- 日本電子が NMR 分野を分社化 産業革新機構など出資 事業強化へ 科学新聞 2/11
- レアアース 中国が「国家鉱区」指定 違法業者を排除 日本経済新聞 2/12
- 住友電工 フジクラ 超電導線の性能向上 応用機器、実用化に弾み 電気新聞 2/14

(編集局)

[超電導 Web21 トップページ](#)

【隔月連載記事】

イットリウム系超電導線材の開発の道のり（その 2）

～ IBAD 法の発見 1990 年-1992 年 ～

株式会社フジクラ
超電導プロジェクト室
グループ長 飯島康裕

今日製造されている Y 系線材はいずれも 2 軸配向構造（Biaxially Textured Structure：単結晶のように全ての結晶軸が一樣に配向した構造）を有するテープ状薄膜積層体で構成されている。その構成法には大きく 2 種のアプローチがあり、①機械的・熱的強度が充分な金属テープ上に人工的な異方的結晶成長によって配向組織を導入する方法、②冶金学的に配向組織を導入し易い金属を用いて基板を構成する方法、に分けられる。後から振り返ってみれば、既存の材料技術の延長で探索可能と思える②が先に開発されるのが素直な道のりであるが、実際には逆の展開となり、既存技術から導きにくい①の範疇に入る IBAD 法（Ion-Beam-Assisted deposition）が先に開発されることになった。

1 軸配向構造の Y 系線材では原理的に高特性が望めないことが明らかになった 1990 年頃の時点で、単結晶のように全軸配向した構造をどのように長尺で実現するべきか、Y 系で線材を目指していたグループは一樣に頭を抱えることになったが、線材として求められるフレキシビリティを考えると結晶引き上げ法等の熔融バルクからのアプローチは考えにくく、薄膜コーティングの範疇で何が出来るか、様々なアイデアが試されることになった。

当時を思い返して見ると、Y 系酸化物薄膜をコーティングするだけでかなりのハードルがあり、使える基板が根本的に限られていた。上記②に示した方法に使われる圧延・再結晶集合組織を構成し易い純 Ni 等の金属基板については、機械的・熱的に弱いほか、表面酸化に対する弱さを克服するノウハウが多く、基板として使えることが明らかになるのは 90 年代の後半以降、多数の研究者が精力的に Y 系線材の開発に参加するようになってからであって、1990 年頃の当時フレキシブルなテープ基板として成膜実験に耐えるものとしては、酸化物超電導体と直接反応を起こさないセラミックス薄板や銀等の貴金属、及び拡散防止酸化物膜を蒸着したハステロイ等の耐熱合金など、無配向の多結晶基板だけであった。

ではどうしたら無秩序な多結晶テープ上に面内秩序を持つ超電導膜を形成できるだろうか。既存の技術を見回してみると、薄膜を形成してからレーザ光を照射し方向性凝固によって面内配向を実現する方法などが有り得るが、膜の温度を熔融温度以上にすることが必要であることから中間層を介しても金属基板上の反応抑制が厳しいと考えられた。また液晶基板等の基礎技術として知られていた“グラフォエピタキシー”と呼ばれる基板表面に機械的に形成した微細段差構造を用いる方法も若干試されたが効果は見出されなかった。¹⁾

それでは膜の成長中に何等かの異方的な物理的作用で選択成長が起きないだろうか、と考えて実験室を見回してみても目に止まったのが、多元イオンビームスパッタ装置であった。この装置はもともと良質な多元系酸化物薄膜作製のために設計されたもので、当時の先端的な真空技術の一つであった。Y, Ba, Cu の金属元素ターゲットを別々にイオンビームを照射して組成を調整し、膜面にも別途イオンアシストを加えて低温での結晶成長を狙うというものであったが、イオンビームを出すために必要な真空の圧力領域が低すぎ、酸素イオンの結合が弱い Y 系薄膜にとっては安定に結晶構造を組むために必要な環境を提供できなかった。このため充分高い臨界温度を得ること自体が大変

に難しく、2 年間の苦闘の末超電導膜の研究には向かないと判定され、中間層や保護膜等の成膜のための補助装置として使われていた。そこで、当初の目的とは異なるが、デリケートでない中間層膜の結晶配向制御であればイオンアシストが有効に使えるのではないかと考えたのである。

方向の揃ったイオン衝撃を斜めから当てながら膜を成長させれば面内で秩序が現れるのではないか、という漠然とした直感を頼りに、超電導膜のヘテロエピ成長の土台に使える面内配向構造を作るために様々な金属や酸化物の薄膜の組合せを試し始めた。単結晶 Y 系薄膜の基板として使われる SrTiO₃ や MgO 等の酸化物材料の薄膜を使って、とにかく特定の結晶軸が強く基板に垂直に立った構造が作ればこの直感を試すことが出来るわけであるが、大半が等法的な材料であるため強い配向膜は簡単に見付からなかった。あまりにも直感に頼った作業だったので、正直何故そのような実験をしているのかを説明するのに苦労した。Bi 系線材の進捗が伝えられる中、決して風当たりは小さくなかったけれども、傍から見れば遊んでいるとしか思えないような実験を「興味が向くから、面白いから」という一点だけで結局は許してくださった当時の河野室長には深く感謝している。

1990 年の末頃のある日、上記装置で安定化ジルコニアの薄膜を室温で作製していたところ、300 eV 以下の低エネルギーのイオン衝撃下で<100>軸が非常に強く垂直配向した構造が得られることを見出した。この材料も等方的なので、イオン衝撃無しでは加熱しても無配向結晶になることが多く、低エネルギーで方位の揃ったイオン衝撃が加わると何故はっきりと<100>配向するのか大変不思議であった。最初はイオンの入射方向に YSZ の<100>軸が向く現象と考えたが、基板を傾けてイオンの入射方向を変えても垂直軸は鋭く<100>配向のまま動かず、垂直軸配向についてはイオンの向きに依存していないことがわかった。この垂直軸配向のメカニズムについては現在でもはっきりとした説明は出来ていないが、蛍石系構造の酸化物材料に広く見出されている現象である。ここで、もし目論見通り斜めイオン衝撃で面内方向で何か秩序が現れていれば、求めていた目的の薄膜を得た可能性がある。当時は極点測定装置や RHEED など保有していなかったが、この試料の面内結晶軸の情報がどうしても知りたかったので、通常の X 線試料台にセットした薄膜のφ軸を数度回転させてはロッキングカーブをとる、言わば人間ゴニオメーターを実行した。その結果、90 度おきに信号が現れるサンプルがあることを見つけた時は大変驚くとともに嬉しかった。この配向中間層をシードとして 3 次元的に配向した超電導膜を合金テープ上に構成する方法で、予想通り臨界電流密度は 10⁵ A/cm² を大きく越え、Y 系線材の可能性を初めて示すことになった。²⁾

IBAD-YSZ を最初に発表したのは 1991 年の M₂S 国際会議及び ISS 会議であったが、前述の D.T.Shaw 教授を初め、MIT の M.J.Cima 教授、Wisconsin 大の D.C.Larbarestier 教授、Siemens の Dr. H-W Neumueller など、多くの先生方にご評価をいただいた。当時の試料は長さが数 cm にも満たないものであり、あくまで線材の可能性を示しただけであって、面白い、と思って聞いてくれる人がいる一方、何の意味があるのか、と厳しい言葉を頂くことも多かったので、海外の先生方に好意的に評価してもらえたのはとても嬉しく励みになることであった。翌年、若輩の身にとっては大変名誉なことであるが、Chicago で開催された ASC1992 会議にて招待講演をさせていただいた。講演を終えて、自分の仕事が認知され、少なくとも誰かが続きをやってくれる、という安堵感が広がったことが強く印象に残っている。

このように、超電導線材への適用の有効性を示した IBAD 法 YSZ 中間層膜は、全く直感と幸運によって見出されたものであった。今から思えば高温超電導ブームという特殊な環境下でのみ成立する出来事だったのかも知れないが、何か全く新しいものを作り出して見たいという好奇心と、このままでは先行きがないという危機感と、目的の構造だけは合理的に思い描き、その方向に向けてチャンスを見逃さなかったこと等、研究成果を得るために必要な要素がうまくシンクロしていたと言えるかも知れない。未知のものを創造する楽しさと、自分自身によって身を駆り立てられる苦しみ、これらは今でも続いてはいるが、当時ほどそれが凝縮した時期はなかった。

後日談であるが、論文や特許を書く段になって、斜めイオン衝撃によって薄膜に弱い面内秩序が

現れる現象が 5 年ほど前にガラス基板上の金属 Nb 膜にて報告されていることを知った。³⁾ 本来であれば、実験の前に文献検索を充分やって知っておくべき情報だったと思うが、同論文の X 線信号はいかにも弱く、もし読んでいたら逆に気が進まなかったかも知れなかった。また、5 年ほど後にスタンフォード大学から斜め IBAD による極薄 MgO で高配向膜が報告されるが、MgO は 1990 年当時も散々試していた材料であり、これを見逃したのは残念であった。⁴⁾ これは、MgO 等の岩塩系材料の場合非常に薄い膜でのみ配向する特徴があるためで、電子線回折の設備がなかった我々のグループでは極薄い段階で現れる現象を積極的に追いかけることが出来なかった。

今日の主流の IBAD 中間層はこの MgO となっており、YSZ とその系列材料は膜厚を必要とするため製造コストが高くほとんど使われていない。しかしながら、IBAD-YSZ 膜の発見は下火となっていた Y 系線材開発に大きなインパクトを与え、90 年代を通じて同様の線材構造を作るため多数の製法が日米主導で次々と提案されるきっかけを作った。もしあの時情熱に駆られて走っていなければ IBAD という技術は生まれずに終わり、Y 系線材の開発もかなり遅れたものと思う。

参考文献:

- 1) N. Yoshida, M. Kubota, S. Takano, M. Nagata, T. Hara, H. Ishii, T. Yamamoto and K. Maekawa: Physica C 185-189, 1943 (1991)
- 2) Y. Iijima, N. Tanabe, O. Kohno and Y. Ikeno: Appl. Phys. Lett. 60, 769 (1992)
- 3) L. S. Yu, J. M. E. Harper, J. J. Cuomo, and D. A. Smith: Appl. Phys. Lett. 47, 932 (1985)
- 4) C.P. Wang, K.B. Do, M.R. Beasley, T.H. Geballe, and R.H. Hammond, Appl. Phys. Lett. 71, 2955 (1997).

[超電導 Web21 トップページ](#)

読者の広場

Q&A

Q：「超伝導バルク磁石システムを用いた関節軟骨再生とは？」

A：関節軟骨は一旦損傷を受けると自然治癒は困難であり、放置されると二次的に周囲の軟骨変性を生じ、変形性関節症に進展していく。現在、関節軟骨損傷に対する治療としては、骨穿孔術（drilling 法、microfracture 法：軟骨欠損部に 1～2 mm の骨孔を作成して出血を促し、骨髄細胞を軟骨欠損部に誘導して治療する方法）、骨軟骨柱移植術（膝関節の非荷重部から骨と軟骨を一塊に採取し、軟骨欠損部に移植する方法）などが一般的な方法として広く行われ、^{1), 2)} 限られた施設であるが、培養軟骨移植術も施行されてきている^{3), 4)}。しかし、現在のところ、損傷した関節軟骨を確実に硝子軟骨で修復できるような golden standard となるような方法はない。近年、自己の細胞や組織を用いて失われた組織を再生しようとする再生医療の研究やその臨床応用が進んでおり、軟骨再生においても組織工学的手法を用いた関節軟骨修復の基礎研究、臨床応用が報告されている⁵⁾⁻⁷⁾。Pittenger らがヒト骨髄から幹細胞を抽出し、in vitro でさまざまな間葉系細胞に分化することを証明して以来、骨髄は間葉系組織修復における有力な細胞源として注目されている。現在までに、間葉系幹細胞を関節内に注入し、軟骨修復を得られたとする様々な報告があるが、幹細胞を関節内に注入するのみでは、欠損部に効率的に細胞を集めることは困難であり、軟骨再生のためにはより多くの細胞を必要とする。しかし、関節内に注入する細胞数が多くなると癒痕を生じるなどの合併症が報告されている。そのため、私達は骨髄間葉系幹細胞を MRI 造影剤にて磁気標識した後に関節内に注入し、外磁場装置を用いて効率的に軟骨欠損部に細胞を誘導・集積させることにより、軟骨を再生させることを目指し研究を行っているので紹介したい。

広島大学整形外科では、直径 40 cm の円盤状の装置に最大 0.6 Tesla の磁場を発生させることが可能で、流す電流を変化させることで発生する磁場の強さを変えることが可能な外磁場装置を開発し、研究を行ってきた。当科の Kobayashi らは日本白色家兎の膝蓋骨に（φ 3 mm × 深さ 2 mm）の骨軟骨欠損を作製し、磁場（0.6 T）をかけた状態で、Ferumoxide（MRI 造影剤）で磁気標識した骨髄間葉系幹細胞を関節内に注入して 4 時間後に固定し、肉眼的・組織学的に評価した。磁場をかけなかった群では、磁気標識した幹細胞は関節内に散在していたが、磁場をかけた群では磁気標識した幹細胞は骨軟骨欠損部に集積していた。また、組織学的には骨軟骨欠損部に集積していた細胞は鉄染色陽性であり、磁気標識した幹細胞であることを証明した。さらに Kobayashi らは、豚の凍結膝関節を用いて、関節鏡下に骨髄間葉系幹細胞のデリバリーが可能かどうかの検討を行い、磁気標識した幹細胞が軟骨欠損部に集積する様子を確認し、また 90 分経過した後の関節鏡所見でも注入時に集積した幹細胞が軟骨欠損部位に接着している様子を確認した。関節鏡下に細胞を関節内に注入し、外磁場をかけ

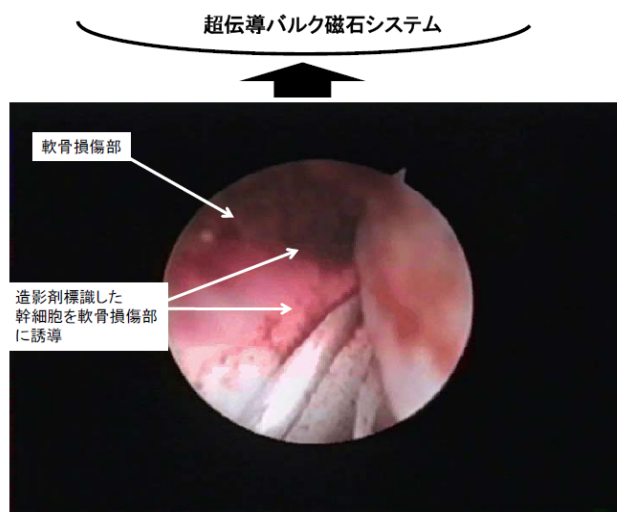


図 1 外磁場下に造影剤標識した幹細胞を軟骨損傷部に誘導

ることにより軟骨欠損部へ効率的に細胞を誘導し、欠損部に細胞をとどめることが可能であることを証明した⁸⁾。しかし、臨床応用を考えた場合、上記の外磁場装置のサイズは大きく、また細胞を確実に集積させるためには磁場が弱いように思われた(磁場発生部位がφ40 cmの円盤全体であり、最高磁場強度が中心から8 cmの同心円上で0.6 Tである)。現在は、超伝導バルク磁石システムにより、先端直径10 cmと小型化に成功しており、また最高磁場が約6 Tと強力になり、操作性も向上しているため、関節軟骨欠損部位に特異的に誘導させることが可能となってきた(図1)。本システムは、超伝導バルク体冷却用冷凍機を備えた磁石本体と、制御ボックス及び、冷凍機ガス圧縮部冷却用の小型チラーで構成されており、外部磁場にて超伝導体を着磁させ、冷凍機で冷却しながら着磁された磁束を保持する超伝導バルク磁石システムである。最大磁束密度は約6.0 T、磁束密度分布は中央が最も強く、中心から離れるにつれ急激に減少し、また、5 Gaussラインが先端から長軸に対して50 cm、短軸に対し35 cmの範囲であり、中心部に磁性体を誘導しやすい構造になり、また周囲に与える影響はかなり少ないものとなっている(図2-4)。ただし、このバルク磁石システムにも欠点があり、常に磁場を発生しており、ON/OFFの切り替えができないこと、また磁石本体の先端部は10 cmと小さくなっているが、磁束を保持するために冷凍機、真空ポンプを必要とし、装置全体としては大型になることが挙げられる。現在、我々は、装置全体、また磁石本体のさらなる小型化に取り組み、臨床応用を目指している。

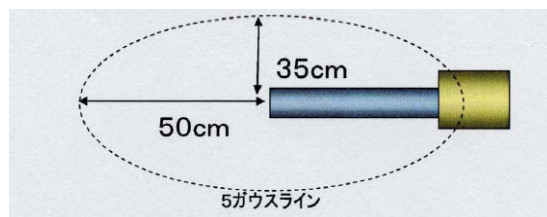
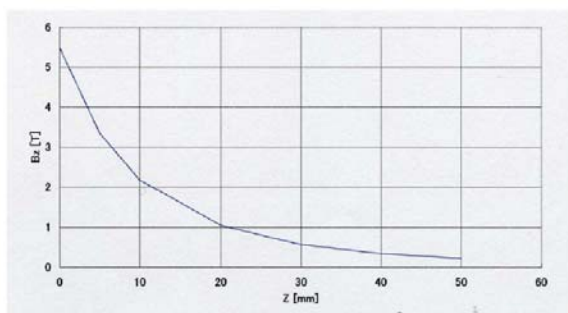
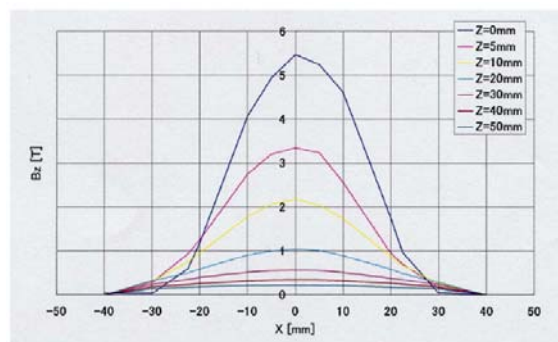


図2 表面中心上の鉛直距離 Z と磁束密度 Bz 分布



表面中心上の鉛直距離 Z と磁束密度 Bz 分布



表面上の中心からの距離 X と磁束密度 Bz 分布

図3 表面上の中心からの距離 X と磁束密度 Bz 分布

図4 5 Gaussライン

現在、ミニブタを用いて動物実験を行っている(図5)。関節鏡下に軟骨損傷部を確認し、外部から軟骨損傷部に向けて磁場をあて、磁気標識した細胞を注射し、約10分間磁場をあて細胞を集積させ、その後は磁場を除去しても細胞が欠損部から離れないことを確認している。細胞移植後3か月、6か月で再生組織を評価し、肉眼的には良好な再生組織が得られており、今後さらに組織学的な評価を行っていく予定である。また、本システムは、他分野にも応用可能と考えており、骨、筋、脊髄再生についても現在研究を進め、一部はすでに報告済みである⁹⁾。



図5 関節鏡視下に磁場を当て、細胞を注射

文献：

- 1) Steadman, J.R. *et al*, Outcome of microfracture for traumatic chondral defects of the knee: average 11 year follow-up, *Arthroscopy*, 19, 477-484 (2003)
- 2) Matsuue *et al*, Arthroscopic multiple osteochondraltransplantation to the chondraldefect in the knee associated with anterior cruciate ligament disruption, *Arthroscopy*, 9, 318-321 (1993)
- 3) Brittberg *et al*, Treatment of deep cartilage defects in the knee with autologous chondrocyte transplantation, *N Engl J Med*, 331, 889-895 (1994)
- 4) Ochi M, *et al*, Current concepts in tissue engineering technique for repair of cartilage defect, *Artif Organs*, 25, 172-179 (2001)
- 5) Peterson, L., *et al*, Two-to 9-year outcome after autologous chondrocytes transplantation of the knee, *ClinOrthop*, 374, 212-234 (2000)
- 6) Nakamura N, *et al*, Cell-based therapy in articular cartilage lesions of the knee, *Arthroscopy*, 25, 531-552 (2009)
- 7) Pei, M, *et al*, Repair of full thickness femoral condyle cartilage defects using allogenic synovial cell-engineered tissue constructs, *Osteoarthritis Cartilage*, 17(6), 714-722 (2009)
- 8) Kobayashi T, Ochi M, *et al*, A novel cell delivery system using magnetically labeled mesenchymal stem cells and an external magnetic device for clinical cartilage repair, *Arthroscopy*, 24, 69-76 (2008)
- 9) Oshima S, *et al*, Enhancement of bone formation in an experimental bony defect using ferumoxide-labelled mesenchymal stromal cells and a magnetic targeting system, *JBJS Br*, 92, 1606-13 (2010)

回答者：広島大学大学院医歯薬総合研究科

展開医科学専攻病態制御医科学講座 整形外科学 亀井豪器様 越智光夫様

(Eメール：go_k_0127@yahoo.co.jp、tel：082-257-5233)

[超電導 Web21 トップページ](#)