

フライホイール用高温超電導バルク体磁気軸受の基礎検討

清野 寛* 長嶋 賢*
田中 芳親* 中内 正彦*

Study of the Magnetic Bearing Consisting of Coupling of Superconductors Applicable to the Support Bearing of Flywheel Energy Storage System

Hiroshi SEINO Ken NAGASHIMA
Yoshichika TANAKA Masahiko NAKAUCHI

The RTRI conducted a development on superconducting magnetic bearing applicable to the flywheel energy-storage system for railways. In this study, high temperature bulk superconductor (HTS bulk) was combined with superconducting coils to increase the load capacity of the bearing. The flywheel energy-storage system has high energy density, and is excellent in the start/stop operation and the load response. Nevertheless, there are problems in terms of durability and economical aspects. The study has intended to improve the driving efficiency by decrease in the frictional loss and to solve the problems concerning the maintenance by applying the superconducting technology to the bearing part. In this paper, we have reported the basic study of magnetic bearing consisting of coupling of superconductors applicable to the support bearing of flywheel energy storage system.

キーワード：エネルギー貯蔵，フライホイール，磁気軸受，超電導磁石，超電導バルク体，極低温

1. はじめに

近年，地球温暖化対策の必要性が常識化されつつある。このため，他の輸送機関と比べてエネルギー効率が高い鉄道においても，“省エネルギー化”は機器の高性能化という枠組みではなく，環境問題という枠組みで技術開発テーマとなっている。その一例が，電力貯蔵装置を導入して，インバータ電車が制動時に発生する回生電力を有効に再利用するための研究^{1) 2)} などである。本研究では，電力貯蔵装置にフライホイールを選択し，軸受部分に超電導技術を適用することを検討している。フライホイール蓄電装置はエネルギー密度が高く，起動停止と負荷応答性といったシステム運用に優れる一方で，装置の寿命と経済性に課題がある³⁾。超電導技術を導入することで，これらの課題を解決し，運転効率の向上を図ることを目指している。

本報告では，試作した試験用超電導磁気軸受と特性確認試験の結果，回転体冷却方法などの超電導磁気軸受に関する基礎検討について報告する。

2. 超電導磁気軸受を適用したフライホイール

国内では，NEDO（独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構）の委託を受けて，企業や研究機関が超電導磁気軸受を適用したフライホイール蓄電装置の開発

を行っている^{4) 5)}。また海外では，アメリカ⁶⁾とドイツ⁷⁾で開発が進められている。

これらの従来の超電導磁気軸受では，永久磁石と高温超電導バルク体（以下超電導バルク体と略す）との組み合わせ^{4) 6) 7)}や，超電導コイル（超電導磁石）と磁性材の組み合わせ⁵⁾が採用されている。このため，永久磁石の数倍の磁場を発生できる超電導磁石や，高磁場においても高い磁気作用を発揮できる超電導バルク体を使用している。永久磁石の磁化限界や鉄の飽和磁界までの能力で装置を使用することになる。この限界を超えて，従来実現できなかった高荷重容量の超電導磁気軸受を開発することを目指して，超電導磁石と超電導バルク体とを組み合わせる超電導磁気軸受の基礎検討に取り組んでいる。

3. 必要な軸受荷重容量

回生失効対策用のフライホイール蓄電装置用として必要な軸受荷重容量を試算した。必要蓄電容量は，営業電車での回生絞り込みの実態調査の結果⁸⁾から，10kWh（36MJ）と見積もることができる。

一般的な慣性モーメントと角速度から回転慣性エネルギーを求める計算式⁹⁾から，このエネルギーを蓄積するために必要なフライホイールの質量を検討した。図1に地上置きを前提とした検討結果の一例を示す。

これは，回転速度3000rpmから1500rpmまでの速度変化で放出される蓄積エネルギーが36MJとなるフライホ

* 浮上式鉄道技術研究部 低温システム

特集：浮上式鉄道技術とその応用

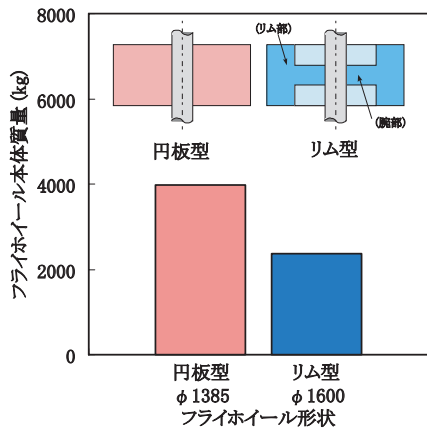


図1 フライホイールの質量の試算結果例

イール質量を算出したもので、材料は高張力鋼を想定している。ホイールの形状によって異なるが、質量2000～4000kg程度のを3000rpmで回転させることで10kWh (36MJ) のエネルギー蓄積が可能である。これが、超電導磁気軸受の荷重容量、回転速度の目標となる。

4. 試験用超電導磁気軸受

4.1 超電導体同士で構成する磁気軸受の電磁力

磁場中に置かれた円板状の超電導バルク体が発生する電磁力は、超電導バルク体の代表形状、バルク体の置かれた空間の磁場の大きさ、その磁場の空間変化率（磁場勾配）の関数として式(1)のように表される¹⁰⁾。

$$F_z = \frac{\pi^2 \left(R_d^4 - \frac{dr}{2} \right)^4}{L_{cyl}(R_d, t, dr)} B_z \frac{\partial B_z}{\partial z} \quad \dots(1)$$

R_d および t はバルク体の半径と厚さである。また、 dr は磁束の径方向侵入深さ、 L_{cyl} は超電導バルク体の形状に沿って流れる超電導シールド電流を1ターンコイルと考えた場合の自己インダクタンスである。 L_{cyl} はバルク体の半径 R_d と厚み t の関数として求められることから、バルク体の形状によって決定される因子と考えるがよい。一方、 $B_z \cdot \partial B_z / \partial z$ は超電導磁石の発生する磁場の大きさと、その変化率で表される因子となる。この因子を「磁気力場」と呼んでいる¹⁰⁾。また、超電導バルク体に流れる超電導シールド電流は臨界密度に支配される¹⁰⁾ことから、冷却温度を下げることで発生する電磁力を大きくすることができる。しかしながら、超電導同士で構成する磁気軸受では、回転体側的高温超電導バルク体を極低温に冷却することが新たな課題となる。

本研究では、基礎試験によって超電導体同士で構成する磁気軸受の電磁力特性の確認¹⁰⁾を行い、回転時の電磁力挙動の変化を把握した¹¹⁾のちに、試験用超電導磁気軸受を製作して電磁力の確認を行った。

4.2 試験用超電導磁気軸受の構成

研究の第一段階では、液体窒素冷却した超電導バルク体を回転体側に配置し、固定側に超電導磁石を配置する構成を採用し、これをスラスト軸受に適用することにした。軸受の目標仕様は、静荷重で10kNの荷重容量、5kNのスラスト荷重負荷で最高回転速度3000rpmを目指した。

表1に試験用超電導磁気軸受の材質・形状および冷却方法をまとめる。また、超電導バルク体を入れた回転試験用デューワーと超電導磁石を組み合わせた試験用超電導磁気軸受を図2に示す。

表1 試験用超電導磁気軸受の材質・形状、冷却方法

ロータ		ステータ	
超電導バルク体		超電導磁石	
材質	GdBCO	線材	Nb-Ti
形状	円板形状、 φ60mm × t20mm 2個二段重ね	形状	室温ボア φ120mm カスプ磁場、 磁束密度 5T (Max)
冷却方法	液体窒素 (77K)	冷却方法	冷凍機直接冷却 (4K)

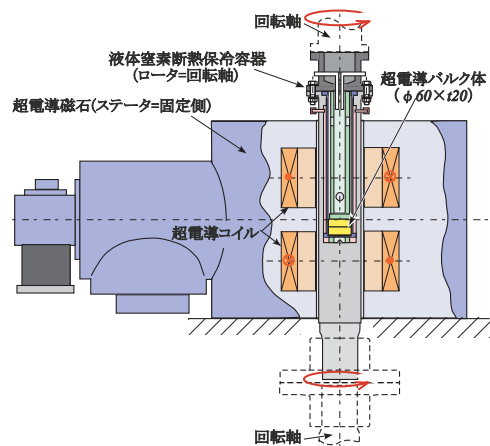


図2 試験用超電導磁気軸受

4.2.1 超電導磁石

使用する超電導バルク体の形状と冷却温度を決定すると、超電導磁気軸受としての発生電磁力を決めるにあたって、残るパラメータは超電導バルク体に印加する磁場の大きさと磁場勾配だけになる。しかしながら、液体窒素温度 (77K) では磁場中での臨界電流密度が著しく低下するために、バルク体に印加する磁場を制限する必要がある。従って、軸受の荷重容量を大きくするために最終的に残ったパラメータは磁場勾配になる。そこで、巻線コイルの形状および配置を工夫して、液体窒素冷却の超電導バルク体に理想的な磁場勾配を提供する超電導磁石を開発した。

図3に超電導磁石とコイル中心軸上の磁場および磁気力場の分布を示す。超電導コイルの中央部分には、クライオスタット (低温容器) を貫通する室温空間 (室温ボア) があり、この中に回転軸となる超電導バルク体を入れた液体窒素断熱保冷容器を配置する。超電導磁石は回

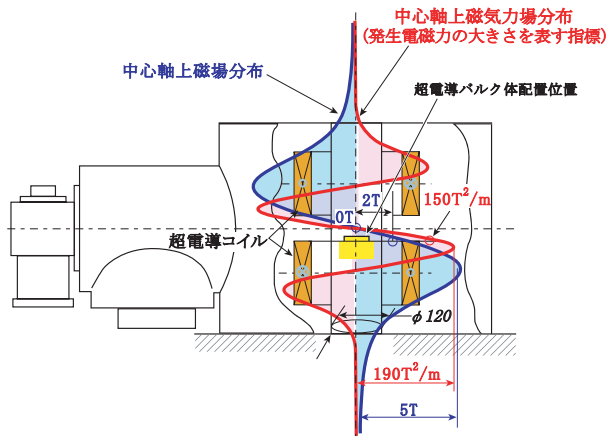


図3 超電導磁石と中心軸上の磁場・磁気力場の分布

回転方向に2個のコイルを配置し、異極に励磁している。このことにより生じるカスプ磁場は、コイル間の空間の磁場を弱め、一方、磁場勾配を大きくする効果があり、バルク体の配置位置（図3の図面中央の黄色部）の磁場の最大値を2T以下に抑制しつつ、磁場勾配（磁気力場）を局部的に大きくして、バルク体に必要な電磁力を付与することができる。また、この超電導磁石は外部への漏洩磁束が小さいといった実使用面で有利な特長も有している¹²⁾。このため、超電導磁石の近傍にも磁性材の部品を配置することが可能になった。

4.2.2 超電導バルク体と液体窒素断熱回転容器

超電導バルク体の冷却方法を液体窒素浸漬としたことから、使用する超電導バルク体には、液体窒素温度（77K）における磁場中の臨界電流特性に優れるGd-Ba-Cu-O系材料を選定した。形状は直径60mm、厚さ20mmで、磁気軸受の研究に特化した専用のものを新規に開発するのではなく、実験用として比較的容易に入手できるもの（新日鐵製QMG[®]）を採用し、電磁力を増強するために2個のバルク体を積み重ねて使用することにした。

次に、この超電導バルク体を超電導磁気軸受のロータ

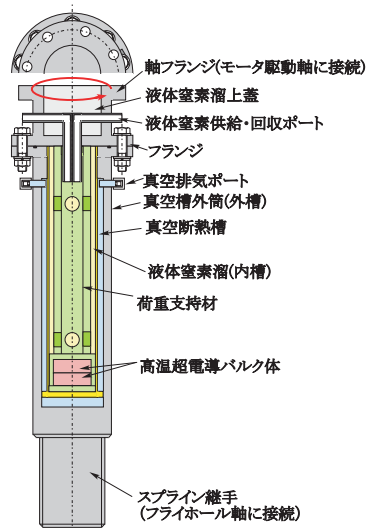


図4 回転試験用デュワー

として使用するために必要な液体窒素断熱保冷容器（回転試験用デュワー）を開発した。回転試験用デュワーは超電導バルク体を収納する液体窒素断熱保冷容器であり、それ自身が回転軸の一部となるものである。

図4に試作した回転試験用デュワーの構造を示す。超電導バルク体に働く電磁力（主に浮上力）は荷重支持材を介して液体窒素溜上蓋に伝達され、フランジによって上蓋に固定された真空槽外筒に伝わる。これにより、外筒に固定されたフライホイールを持ち上げる。また、回転トルクは試験装置側のモータの駆動トルクを軸フランジから真空槽外筒に伝達し、スプラインを介してフライホイールへと伝達する構造になっている。

5. 試験用超電導磁気軸受の電磁力特性

超電導バルク体を組み込んだ回転試験用デュワーと超電導磁石を組み合わせた試験用超電導磁気軸受について、荷重容量とフライホイールを支持した時の保持安定性を静荷重試験で確認したのち、5kNのスラスト荷重を負荷して高速で回転させる試験を行った。

5.1 静荷重試験

静荷重での荷重容量確認と、荷重負荷時の支持安定性を確認するウエイト懸架試験を行った。図5に試験の実施状況を示す。荷重容量確認試験（図5左）では、超電導バルク体の中心位置（2つのバルク体の接触面）が超電導磁石のコイル間中心位置から20mm下がった位置（Z=-20mm）となるよう配置する。その後、回転試験用デュワーを荷重変換器、位置調整用ターンバックルを介して実験棟の床面に固定する。デュワーに液体窒素を注液して、超電導バルク体を冷却した後に超電導磁石を励磁して、回転デュワーに働く電磁力（=浮上力）を測定した。ウエイト懸架試験（図5右）では、回転試験用に製作したフライホイールを超電導磁気軸受で懸架して、浮上位置の変化を測定した。荷重容量の確認同様、超電導バルク体はZ=-20mmに配置して、超電導バルク体を冷却した後に超電導磁石を励磁した。

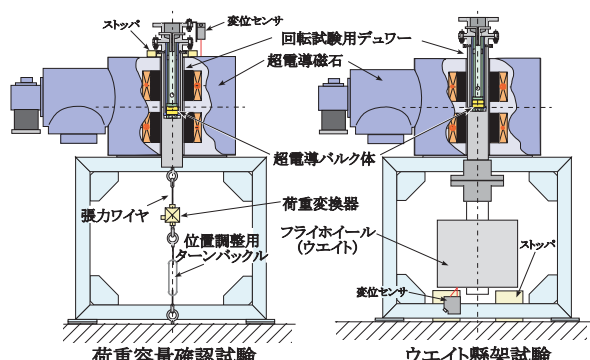


図5 静荷重試験の状況

特集：浮上式鉄道技術とその応用

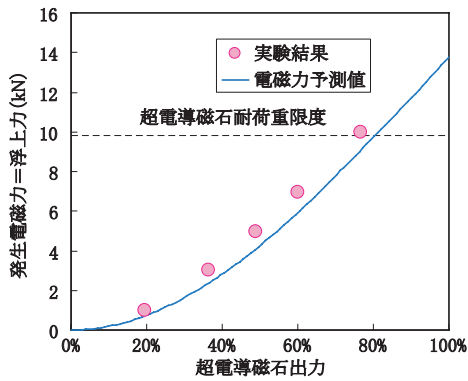


図6 荷重容量確認試験結果

図6に式(1)で計算した電磁力予測値(計算結果)と電磁力の測定結果(実験結果)を示す。両者はよく一致している。超電導磁石の定格出力の78%で、超電導磁石の上下方向耐荷重限度の10kNの電磁力が発生した。従来の液体窒素冷却の超電導バルク体と永久磁石で構成されるスラスト型超電導磁気軸受の単位面積あたりの荷重容量は100kN/m²程度である¹⁶⁾。これに対して、今回開発した試験用超電導磁気軸受の荷重容量を、超電導バルク体のシールド電流の流れる側面の面積(=188.5mm×40mm)で考えると、従来の10倍以上になる。

図7に回転試験用に製作したフライホイールを試験用超電導磁気軸受で懸架して、浮上位置の変化を測定した結果を示す。

フライホイール支持時の超電導磁石出力は63%であった。3時間のウェイト保持中、上下位置の変化はほとんどなく、安定していることが確認できる。なお、図中のノイズはウェイトを手回して回転させた時の計測データの波形乱れであり、実際に変位が生じたものではない。試験中に液体窒素を断続的に注液することで最長で5時間のウェイト支持を行い、安定した浮上支持を確認した。

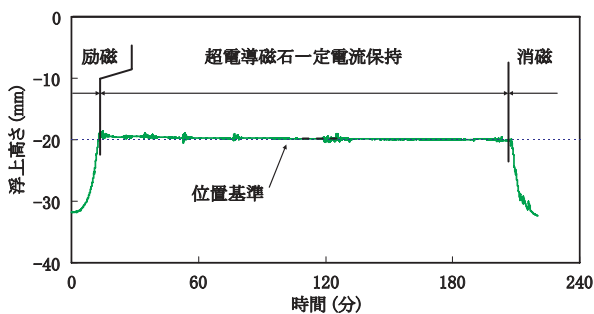


図7 フライホイール懸架による静荷重試験結果

5.2 軸受回転試験

試験用超電導磁気軸受で500kgの回転体を支持して、高速で回転させる試験装置を製作し、超電導体同士で構成する磁気軸受のスラスト荷重負荷での動的特性を確認した。

図8に製作した試験装置の外形図を示す。装置架台中央部の超電導磁石置き台に超電導磁気軸受のステータで

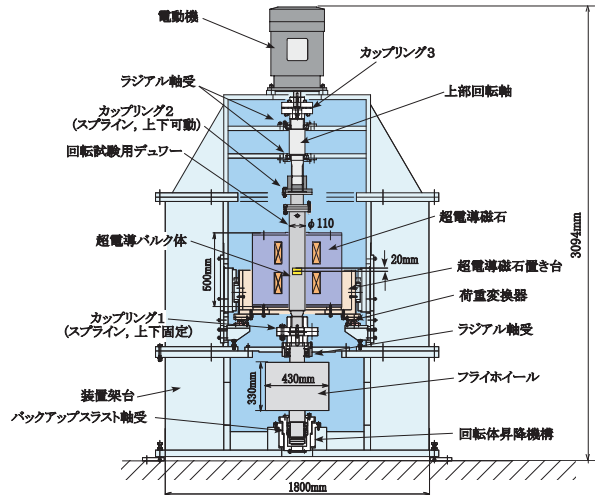


図8 超電導磁気軸受回転試験装置外形図

ある超電導磁石が取り付けられる。超電導磁石置き台は装置架台に対して、水平面のみが拘束されており、軸方向変位を許容する構造としている。この置き台と架台との間に挿入した荷重変換器で超電導磁石に発生する上下方向電磁力を測定した。

回転試験用デュワーを超電導磁石の室温ボア(φ120mm)内に配置し、回転試験用デュワーの下部にはカップリング1を介してフライホイールを取り付ける。インターフェイスは上下方向を拘束したスプライン継手となっている。回転試験用デュワー上部にはカップリング2を介して上部回転軸を接続する。この部分のインターフェイスは、回転体の上下位置の調整代を確保するために上下方向の拘束をしていないスプライン継手とした。上部回転軸はカップリング3によって装置架台に固定された電動機の回転軸に接続される。なお、回転試験用デュワー上下の上部回転軸、フライホイール軸部には回転体の径方向拘束のためのラジアル軸受を配置している。フライホイール軸の最下端には超電導バルク体と超電導磁石の相対的な軸方向位置を調整するための昇降機構を設けている。

徐々に速度向上を行い、最高回転速度3000rpmまでの試験を実施した。試験においては、超電導磁石の支持荷重と支持高さ(浮上高さ)およびフライホイールの回転速度を計測した。

図9および10に回転試験における時系列データの一例を示す。図9は、回転速度1000rpmで2時間の連続回転を行った時の結果である。回転中に浮上位置の変化はなく、安定した浮上支持ができていることが確認できる。図10は最高回転速度3000rpmへ到達後、3000rpmから1500rpmまでの昇降を5回繰り返した後に、0rpmまで回転速度を降下させた試験のデータで、等速での時間は各々約10秒である。およそ20分の試験時間において、加速、等速、減速を繰り返すことで、若干の浮上位置変化

や、磁束クリープによる微量の浮上位置の降下が見られるものの、浮上位置に大きな変化はなかった。液体窒素で冷却したバルク体を使用した磁気軸受においては、すでに磁束クリープによる軸降下の効果的な対策¹⁴⁾が提案されていることから、大きな問題はないと考えている。

実験結果からは、質量保持の負荷状態で高速回転させても、回転させることによる顕著な電磁力低下はなく、浮上位置を安定して保持できることが確認できた。

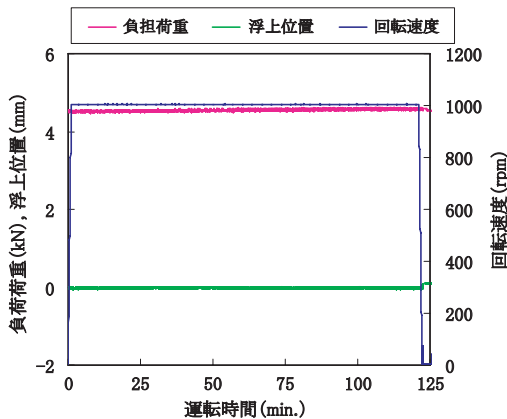


図9 2時間連続回転試験の時系列データ

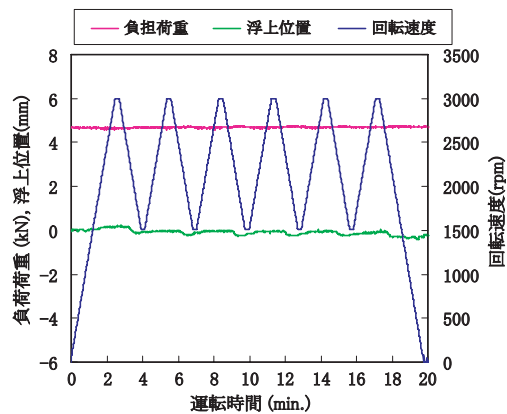


図10 連続昇降回転試験の時系列データ

6. 超電導体の冷却方法に関する基礎検討

超電導同士で構成する磁気軸受では、回転体側の高温超電導バルク体を極低温に冷却することが課題となる。このため、第一段階では液体窒素冷却を選択し、液体窒素デューワーを回転軸に挿入した。しかしながら、4.1節の電磁力算出式の説明でも触れたように、冷却温度を下げることでさらに発生電磁力を大きくできるとともに、臨界電流密度が大きくなることから電磁力の安定化が図られる。このため、最終的には回転体側の超電導バルク体を固定側の超電導コイルとともに、真空容器中に配置して冷却することを目指している。この場合、考えられる冷却手段としては、輻射熱を利用する方法と希薄ガスの熱伝導を利用する方法がある。これら2つの冷却方法の

特性を実験で確認した。

図11に実験装置の模式図を示す。装置は真空槽が二重になっており、断熱を目的とした真空槽の内部にガスを導入できる真空槽（ガス導入槽）がある。このガス導入槽の中に冷却体と被冷却体を設置し、ガス導入槽に封入するヘリウムガス量をパラメータとして、冷却体、被冷却体の温度変化を測定した。

冷却体は冷凍機のコールドヘッド（低温端）に接続されており、冷却体と被冷却体はそれぞれ放射状に配置されたパネルを交互に対向するよう配置されている。また、封入ガス量はガス導入槽の真空度（圧力）として測定した。

図12に真空度（圧力）を変数としたときの、熱伝達率実験値（●印）、輻射による伝熱の理論計算値¹⁵⁾（赤色の破線）と分子伝導による伝熱の理論計算値¹⁶⁾（赤色の実線）、および気体摩擦抵抗の理論計算値¹⁷⁾（◆）を示す。熱伝達率実験値はガス導入槽の圧力をパラメータとして、被冷却体の温度変化から冷却熱量を求めて、その時の冷却体・非冷却体の温度差、受熱面積から算出したものである。また、気体摩擦抵抗理論計算値は実用規模のフライホイール形状を想定して、開放空間の条件で計算した目安値である。

実験で求めた熱伝達率は低い圧力では小さく、 $1.72 \times 10^{-1} \text{Pa}$ 付近で急激に大きくなっており、低い圧力域では輻射伝熱の理論値と、圧力が $6.71 \times 10^{-1} \text{Pa}$ より大きな領域では分子伝導による伝熱理論値とほぼ一致している。

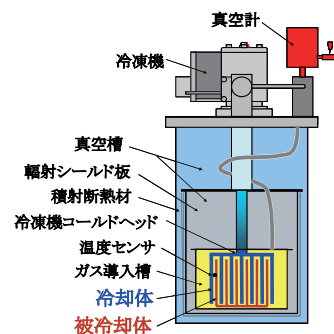


図11 冷却特性確認基礎試験装置

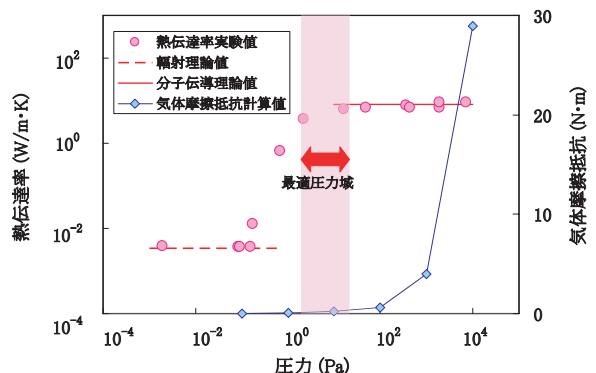


図12 冷却特性確認結果

特集：浮上式鉄道技術とその応用

このことから、低い圧力域においては輻射による伝熱が支配的となるため伝熱量は非常に小さいが、ある圧力以上になると気体分子伝導が支配的となることで大きな伝熱量が得られることがわかる。なお、輻射伝熱と気体分子伝導の境界は気体分子の平均自由行程で決定され¹⁵⁾、実験で得られた $1.72 \sim 6.71 \times 10^{-1} \text{Pa}$ という圧力は、その圧力でのヘリウムガスの平均自由行程と本装置の伝熱距離がほぼ等しくなる値である。一方、気体摩擦抵抗は、圧力 10^{-2}Pa 付近から急激に増加している。このことから、容器内の真空度と、装置の伝熱距離を適切に設定することで、回転時の風損を最低限に抑えて、超電導バルク体を冷却できる最適領域が得られることが確認できた。

7. まとめ

フライホイール蓄電装置の支持軸受に適用する目的で、超電導磁石と超電導バルク体を組み合わせた磁気軸受の基礎検討を行った。その結果を以下にまとめる。

- (1) 研究の第一段階として、回転体側に配置する超電導バルク体を液体窒素冷却としたスラスト軸受用超電導磁気軸受を製作して、静荷重試験とスラスト荷重を付与した回転試験を行った。
- (2) 静荷重試験の結果、超電導磁石の出力78%で10kNの浮上力が発生した。これは、超電導バルク体と永久磁石で構成される従来の超電導磁気軸受¹⁶⁾と単位面積あたりの荷重容量で比較すると10倍以上の能力に相当する。
- (3) 5kNのスラスト荷重を負荷して、最高速度3000rpmで回転させる試験においても、顕著な電磁力の低下はなく、安定した浮上位置が保持できることを確認した。
- (4) システム構成に重要な要素である回転体側のバルク体の冷却方法についても基礎検討を行った。超電導磁気軸受を真空槽に入れて、微量の希薄ガスで冷却する方法を試行し、風損を最低限に抑えて超電導バルク体を冷却できる可能性があることを確認した。

以上の成果から、超電導体磁石と超電導バルク体を組み合わせた新しい超電導磁気軸受を鉄道用フライホイールに適用できる可能性があることを確認した。

今後は、実用規模のエネルギー容量の実現を目指して、軸受容量の向上を図るとともに、ラジアル軸受への適用についても検討を進める予定である。

本研究は国庫補助を受けて実施した。

文 献

1) 小笠正道:特集 ハイブリッド電車のパワーフロー制御—架線集電と車載蓄電のハイブリッド化の実現—, 鉄道車両と

技術, 第118巻, pp. 9-26, 2006

2) 長谷伸一, 小西武史, 中道好信, 奈良秀隆, 上村正:電気二重層キャパシタと蓄電池を併用した電力貯蔵装置の研究, 鉄道総研報告, Vol. 20, No. 9, pp. 11-16, 2006

3) 内山洋司:総論 電力貯蔵技術の現状と展望, 電気評論, 第91巻, 第12号, pp. 7-12, 2006

4) 腰塚直巳:高温超電導軸受を用いたフライホイール, 電気評論, 第91巻, 第12号, pp. 32-35, 2006

5) 内山順仁:超電導フライホイールシステムの開発, 電気評論, 第91巻, 第12号, pp. 36-39, 2006

6) M. Strasik, P. E. Johnson, A. C. Day, J. Mittleider, M. D. Higgins, J. Edwards, J. R. Schindler, K. E. McCrary, C. R. McIver, D. Carlson, J. F. Fonder, J. R. Hull “Design, Fabrication, and Test of a 5-kWh/100-kW Flywheel Energy Storage Utilizing a High-Temperature Superconducting Bearing” IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 17, No. 2, pp. 2133-2137, 2007.

7) F N Werfel, U Floegel-Delor, T Riedel, R Rothfeld, D Wippich, B Goebel, G Reiner, N Wehlau “250 kW Flywheel with HTS Magnetic Bearing for Industrial Use” Journal of Physics Conference Series 97, 012206, 2008.

8) 玉置誠一, 飯島宏康, 真野辰哉, 小笠正道, 泰広:営業電車における回生絞込みの実態把握, 第10回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, No.03-51, pp. 299-300, 2003

9) 日本機械学会:機械工学便覧(新版第4刷), 丸善, B1-p.148, 1990

10) 長嶋賢, 清野寛, 宮崎佳樹, 荒井有気, 坂井直道, 村上雅人:超電導バルク体と超電導コイルを用いた磁気軸受の載荷力密度, 鉄道総研報告, Vol. 21, No.9, pp. 29-34, 2007

11) 清野寛, 長嶋賢, 政家一誠, 出町和之:超電導磁気軸受の回転特性, 第15回MAGDAコンファレンス in 桐生講演論文集, pp. 308-311, 2006

12) 荒井有気, 清野寛, 長嶋賢:超電導コイルと強磁性体間にはたらく電磁力特性, 第19回「電磁力関連ダイナミクス」シンポジウム講演論文集, pp. 372-373, 2007

13) N. Koshizuka, K. Matsunaga, N. Yamauchi, A. Kawaji, H. Hirabayashi, M. Murakami, M. Tomita, S. Une, S. Saito, M. Isono, H. Nasu, T. Maeda, F. Ishikawa, “Construction of the stator installed in the superconducting magnetic bearing for a 10 kWh flywheel” Physica C, Vol. 412-414, pp. 756-760, 2004.

14) 広瀬誠, 磯野正幸, 小西弘恭, 那須秀俊:ラジアル型超電導磁気軸受におけるロータ降下の抑制, 低温工学, Vol. 37, No. 11, pp. 712-717, 2002

15) 吉田 駿:伝熱学の基礎, 理工学社, pp. 4-7, pp. 125-132, 2002

16) 株式会社アルバック編:真空ハンドブック, オーム社, pp. 133-136, 2007

17) 古屋善正, 村上光清, 山田豊:流体工学, 朝倉書店 pp. 197-200, 2005