

フライホイール用超電導バルク体磁気軸受の基礎技術開発

浮上式鉄道技術研究部 低温システム

主任研究員 清野 寛

1. はじめに

地球温暖化対策の必要性から”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の技術開発テーマのひとつになっている。他の輸送機関と比べてエネルギー効率が低い鉄道技術の分野も同様である。その一例が、電力貯蔵装置の導入である。実用装置としては、フライホイール式装置¹⁾と電気二重層キャパシタを用いた装置などが挙げられる²⁾。本研究では、前者のフライホイールへの適用を念頭において、超電導コイルと超電導バルク体を組み合わせ、荷重容量の大きな磁気軸受の開発を進めている。超電導磁気軸受を使用することで保守性や運転効率に優れた電力貯蔵装置の開発につなげることを目指している。

本報告では、超電導コイルと高温超電導バルク体(以下超電導バルク体と略す)を組み合わせた試験用超電導磁気軸受の概要を紹介するとともに、その電磁力特性確認試験結果について報告する。

2. 本研究の目指す超電導磁気軸受の基本コンセプト

日本における超電導磁気軸受を適用したフライホイールの開発は、NEDO(独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構)の委託で実施されている^{3,4)}。また、海外では、アメリカ⁵⁾とドイツ⁶⁾で開発が進められている。

これら従来の超電導磁気軸受では、永久磁石と超電導バルク体との組み合わせ^{3,5,6)}や、超電導コイル(超電導磁石)と磁性材の組み合わせ⁴⁾が採用されている。超電導バルク体を適用することで、その磁束のピン止め効果で「磁界中での安定浮上」が可能となる。また、超電導磁石を適用することで、「大きな空間での高磁界発生」、「永久電流による安定した高磁界供給」ができる。このような特徴を有する超電導体を磁気軸受に適用することで、軸受部の損失を極小化できるとともに、従来の能動型磁気軸受では難しい軸受の大型化や、低消費電力化が可能となる。しかしながら、従来の開発では、永久磁石の数倍の磁界を発生できる超電導磁石や、高磁界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ても、永久磁石の磁化限界や鉄の飽和磁束密度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むこととした。

3. 試験用超電導磁気軸受

超電導体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新たな課題となる。このため、研究の第一段階では、液体窒素に浸漬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 とした。

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に関する仕様を示す。また、試験用超電導磁気軸受の概略形状を図 1 に示す。超電導バルク体には、液体窒素温度(77K)における磁界中の臨界電流特性に優れる Gd-Ba-Cu-O 系材料を選定した。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。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。超電導磁石は、2 個のコイルを配置し、異極に励磁してカスプ磁界を発生させるものを開発した。カスプ磁界とすることで、コイル間の空間の磁界を弱めあう一方、空間における磁界の変化率を大きくする効果があり、バルク体の配置位置において最適な磁界環境を付与することができる。超電導磁石の中央部分には、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(回転試験用デュワー)を配置して、軸受を構成する。

表 1 試験用超電導磁気軸受の仕様

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)

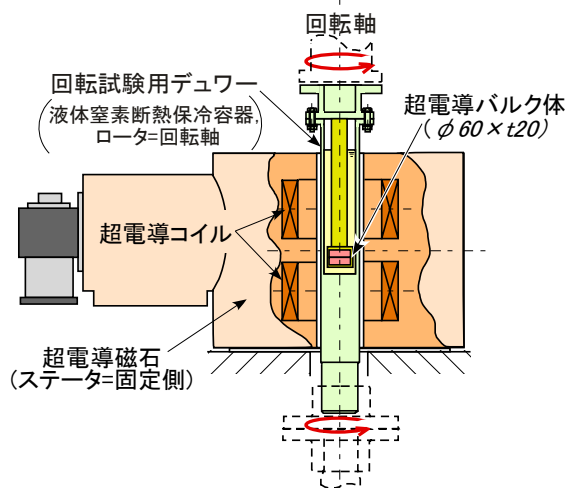


図 1 試験用超電導磁気軸受

4. 実験結果

試験用超電導磁気軸受について、静荷重試験を行ったのち、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。

4. 1 静荷重試験結果

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し、バルク体をゼロ磁場冷却(磁界無印加冷却)で十分冷却したのち、超電導磁石を励磁して、発生浮上力を測定した。図 2 に静荷重試験の状況を示す。また、図 3 に電磁力予測値(電磁界解析結果)と電磁力の測定結果(実験結果)の比較を示す。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 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⁷⁾。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はその 10 倍以上に相当する。

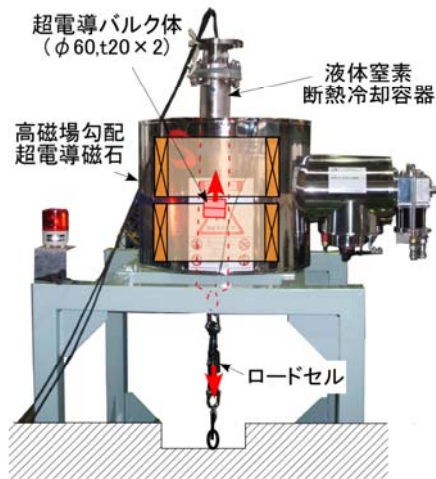


図2 静荷重試験の実施状況

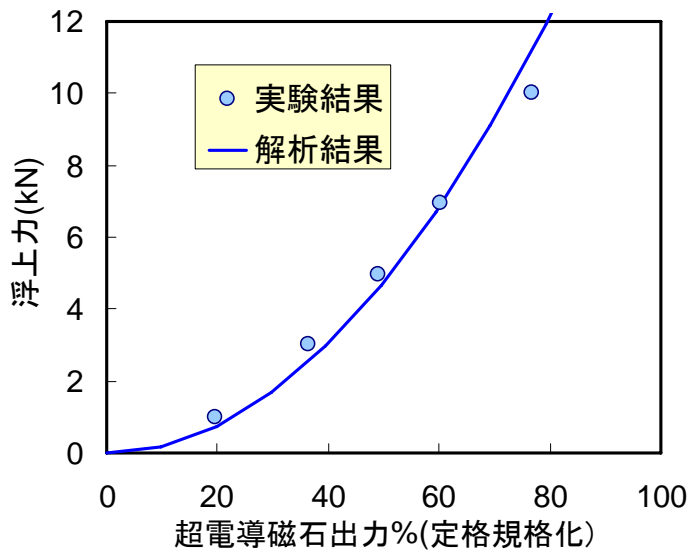


図3 超電導磁石出力と発生浮上力の関係

4. 2 5kN 負荷の軸受回転試験結果

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4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コイル置き台に超電導磁気軸受のステータで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。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。また、フライホイール軸の最下端にはバックアップのスラスト軸受を設けている。

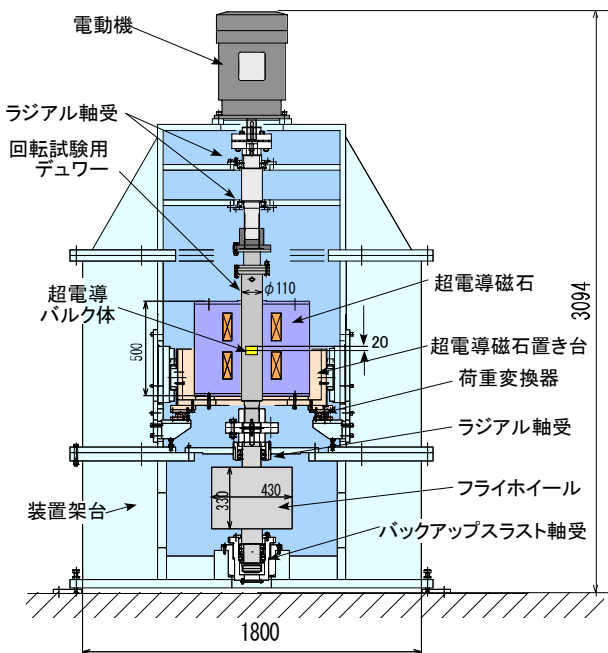


図4 軸受回転試験装置

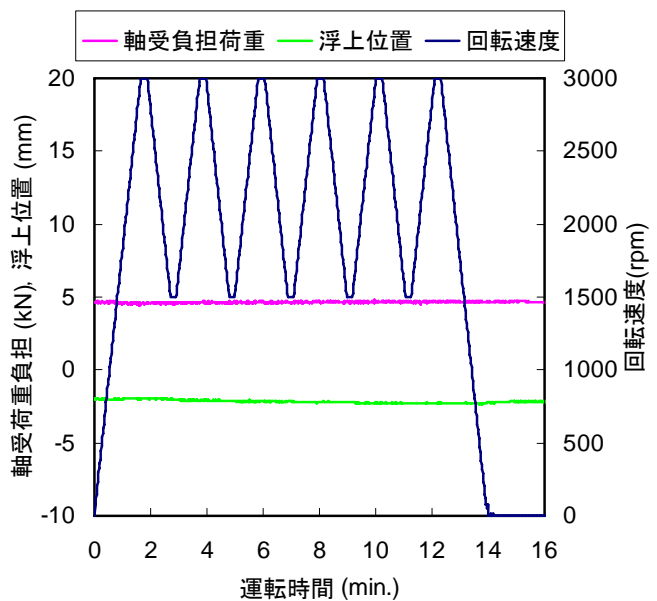


図5 軸受回転試験結果の一例

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、超電導コイル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 5 に回転試験における時系列データの一例を示す。これは、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 まで回転速度を低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。顕著な電磁力の低下はなく、安定して浮上位置が保持できることが確認できる。

5. 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技術開発を進めている。今回の報告を以下にまとめる。

- (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負荷を付与した回転試験を行った。
- (2) 静荷重試験の結果、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、安定して浮上位置が保持できることを確認した。

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。さらに、ラジアル軸受への適用についても検討を進めるとともに、回転体側に配置する超電導体の冷却方法や、周辺要素機器についても技術開発を進める予定である。

本研究の一部は国庫補助を受けて実施した。

6. 参考文献

- 1) 島津登志成 他：京浜急行電鉄(株)納め電車専用フライホイール発電電動機，三菱電機技報，Vol.63, No. 8, pp. 662-665, 1989
- 2) 清水孝浩 他：電気二重層キャパシタを用いた電力回生吸収装置(キャパポスト)の導入，JREA，Vol. 51, No. 6, pp. 33423-33425, 2008
- 3) 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
- 4) 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
- 5) M. Strasik, P. et al., "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
- 6) F N Werfel et al., "250 kW Flywheel with HTS Magnetic Bearing for Industrial Use" Journal of Physics Conference Series 97, 012206, 2008
- 7) Koshizuka, K. et al., "Construction of the stator installed in the superconducting magnetic bearing for a 10 kWh flywheel" Physica C, Vol. 412-414, pp. 756-760 (2004)