

鉄道用フライホイール向け超電導磁気軸受の信頼性評価試験

宮崎 佳樹* 水野 克俊* 小方 正文*
山下 知久** 長嶋 賢**

Development of a Superconducting Magnetic Bearing Able to support Large Loads
in a Flywheel Energy Storage System for its Application to Railways

Yoshiki MIYAZAKI Katsutoshi MIZUNO Masafumi OGATA
Tomohisa YAMASHITA Ken NAGASHIMA

The flywheel energy storage system (FESS) using the high temperature superconducting magnetic bearing (SMB) has been demonstrated at Komekurayama photovoltaic power plant located in Yamanashi Prefecture. Further increase of the storage capacity is required in order for the FESS to be applied to the railways as the system that prevents cancellation of regenerative braking. Therefore, the levitation force test up to 158kN and the creep characteristics test of the levitation force were carried out in order to verify the margin for the levitation force of the SMB. Furthermore, in order to evaluate long-term reliability and durability of the levitation and rotation characteristics of the SMB against repeated change of the rotation speed, a new SMB test apparatus capable of simultaneously experimenting both the levitating state and the rotating one of the SMB is being developed.

キーワード：フライホイール，蓄電システム，高温超電導磁気軸受，鉄道応用，大荷重

1. はじめに

フライホイールは鉄道の電圧降下対策，回生失効対策など，多数回の充放電サイクルが求められる蓄電システムとして有力である。鉄道総研では，フライホイールの軸受として，高温超電導コイルと高温超電導バルク体（以下，超電導コイル，超電導バルク体）を組み合わせた，大荷重を非接触で安定支持可能な高温超電導磁気軸受（以下，SMB）を提唱し，これを用いたフライホイール蓄電システムの開発を進めている¹⁾。非接触軸受である SMB を用いることで，軸受部での摩擦や機械的な損失がなくなるため，従来のフライホイールの課題であったメンテナンス性の向上が期待できる。SMB を実装したフライホイール蓄電システムの実証機として，これまで山梨県米倉山（こめくらやま）における実証試験結果を報告してきた^{2) 3) 4)}。SMB を用いたフライホイール蓄電システム（図 1，以下，米倉山実証機）は，工場試験を含めて試験開始から延べ 9500 時間超の浮上時間を経験したが，現在まで超電導軸受に関するトラブルはなく，SMB の高い安定性を確認している。米倉山実証機では，SMB が支持する荷重は 39kN であったが，超電導フライホイール蓄電システムを鉄道へ適用するには，さらなる蓄電容量の向上が必要である。そのため SMB の大荷重化が求めら

れている。そこで，これまでに SMB の大荷重課を検討してきた結果，SMB 浮上力検証試験装置にて目標荷重である 147kN の浮上力が発生可能なことを実証した⁴⁾。

本報告では，浮上力の裕度確認ならびに浮上力特性確認のため，大荷重対応 SMB の最大 158kN での浮上力試験ならびにクリープ特性試験を実施し，その後，超電導コイルや SMB 低温部材の特性評価を行い劣化のないことを確認したので報告する。さらに，米倉山実証機同様，回転・浮上状態を実現し，超電導コイルや低温部材の長期信頼性・耐久性が評価可能な加速試験装置についても述べる。

2. フライホイール蓄電システム

2.1 フライホイール蓄電の原理・特徴

フライホイール蓄電システムとは，装置に内蔵した大型の円盤（フライホイール）を回転させることで電気エ



図 1 米倉山実証機の外観

* 浮上式鉄道技術研究部 低温システム研究室

** 浮上式鉄道技術研究部

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

エネルギーを運動エネルギーに変換・貯蔵し、必要に応じて再び電気エネルギーに変換する蓄電システムである。化学電池のような繰返し充放電による劣化などが生じず、長寿命で高頻度の充放電が必要な用途向けの蓄電システムとして期待できる。例えば、期待寿命を30年とすると、電気鉄道の回生失効対策向けや太陽光・風力といった再生可能エネルギーの出力平滑化には、数十万回から数百万回以上の充放電サイクルに対応する必要がある。このような用途向けにはフライホイール蓄電システムが選択肢の一つになると考えられる。

フライホイール蓄電装置は、二次電池のような、繰返し充放電による劣化の問題がないので、余分な設備の設置や、セル交換の必要がない。また、二次電池やキャパシタは、出力(W)と貯蔵エネルギー量(蓄電容量Wh, J)の関係が一意に決まってしまうため、両者を自由に設定することができない。これに対してフライホイール蓄電装置では、出力を上げるには発電電動機を大型化し、蓄電容量を大きくするには回転体を重くすればよく、用途に応じて各々の仕様を独立して設定することができる。さらに、回転数をモニタすることで貯蔵エネルギーの残量が即時に確認でき、回転を停止すれば貯蔵エネルギーを完全にゼロにすることができるなどの特徴を持っている。

2.2 超電導フライホイール蓄電システムの構成

図2に米倉山実証機の構成を示す。主な構成部品は、SMB、フライホイール、制御型磁気軸受(AMB)、磁性流体シール(MFS)、発電電動機である。エネルギー貯蔵を担うフライホイールはCrMoNi鋼で、直径1.44m、厚さ0.29m、質量4000kgである。フライホイールのスラスト荷重(重量)を支持するのが、超電導コイル(ステータ側)と超電導バルク体(ロータ側)からなるSMBである。発電電動機は、運動エネルギーと電気エネルギーを相互に変換する役割を担う。発電電動機は真空容器の

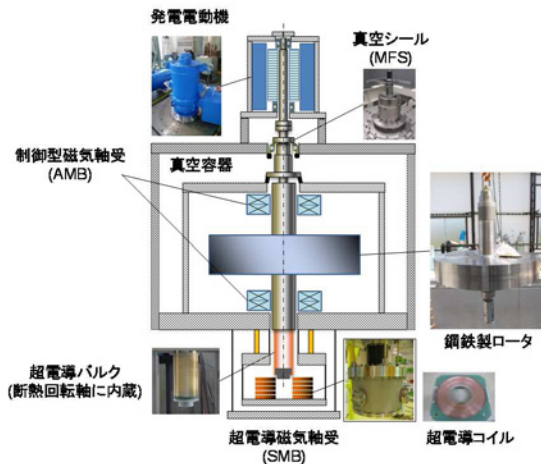


図2 超電導フライホイール蓄電システム (米倉山実証機) の構成

外に設置されているが、高速回転中もMFSの働きにより容器内部は真空が保持できる構造となっている。フライホイールロータの不釣り合い量(残留アンバランス)は、目標値を下回る40gまで低減できており、回転数向上試験では、フィールドでのバランス調整を1度も行わずに最高回転数3000min⁻¹まで到達することができている⁵⁾。

3. 大荷重対応超電導磁気軸受

3.1 超電導磁気軸受の構成と浮上原理

一般に、フライホイール蓄電システムはその原理上、荷重を支える軸受に大きな負担がかかるため、機械式軸受の場合、定期的に軸受メンテナンスを行う必要がある。このため従来のフライホイールは二次電池やキャパシタに対して保守性の面で劣っており、普及にむけ技術的な課題となっていた。この課題を解決したのが、鉄道総研が考案した、強力な磁気反発力を利用してフライホイールを機械的損失なく非接触回転浮上させるSMBである。

図3にSMBの基本構成を示す。ロータに超電導バルク体を、ステータに超電導コイルを配置している。超電導コイルに通電を行わない状態で超電導バルク体を冷却(ゼロ磁場冷却)して超電導状態とし、その後、超電導コイルに通電して励磁することで、超電導バルク体周辺には大きな磁界が発生する。すると超電導バルク体表面にはそれを打ち消すように遮蔽電流が流れて磁力線を排除しようとする。これにより超電導バルク体と超電導コイルの間に大きな斥力が発生する。この斥力、すなわち浮上力は、超電導コイルの通電電流の2乗に比例し、超電導バルク体、超電導コイルとも回転対称であるため、回転方向について理論上は力が働かず、摩擦損失のない、非接触浮上を実現する。

超電導コイルは、熱的に接続された冷凍機により直接冷却することができる。一方超電導バルク体は、回転体であるロータに内蔵されているため、冷凍機による直接冷却ができない。そこで、SMBを収めた内槽容器内にガスヘリウムを充填し、ガスヘリウムによる間接冷却を行っている。充填するガスヘリウムの圧力は、気体摩擦抵抗(風損)が十分小さく、熱伝達は大きくなるような

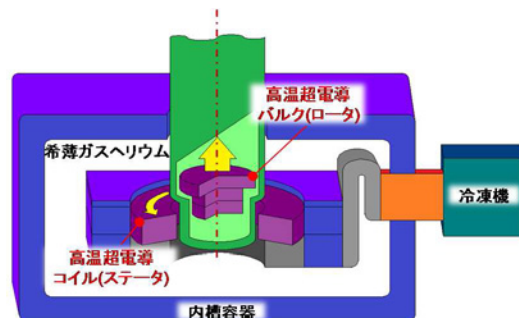


図3 超電導磁気軸受(SMB)の基本構成

圧力領域 (10Pa 程度) に設計されている⁶⁾。このように、本 SMB は液体窒素のような寒剤を用いない簡素な冷却方式を採用した。

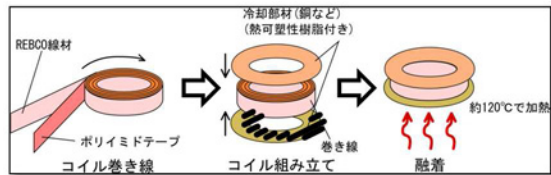
3.2 超電導コイル

表 1 に超電導コイルの設計諸元を示す。ステータ側となる超電導コイルは、幅 6mm、厚さ 0.1mm のテープ状の希土類系高温超電導線材を外径 260mm、内径 120mm の大きさに巻線したユニット (ダブルパンケーキコイル) を 5 個積層した構成となっている。設計にあたっては、最新の線材特性をもとに、超電導コイルへの通電電流の

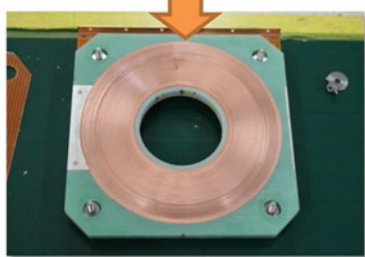
表 1 超電導コイルの設計諸元

項目		主要諸元
線材	高温超電導線材種別	RE-Ba-Cu-O 系 SuperPower 社製
	線材幅	6 mm
	線材厚さ	0.1 mm
コイル	コイル内径	120 mm
	コイル外径	260 mm
	1DP 当たりの厚さ	17.6 mm/DP
	DP コイル数	5 DP/SMB
	インダクタンス	4 H

DP：ダブルパンケーキコイルの略



コイル製造法「融着材法」
(特許番号6355914号)



超電導コイル



超電導磁気軸受用超電導コイル(5個積層)

図 4 融着材法を用いた新型超電導コイルの内製

負荷率を考慮するとともに、製作にあたっては、浮上式鉄道用の実機大高温超電導コイルの開発成果である「融着材法」を導入し、超電導コイルの伝熱性を改善している (図 4)^{4) 7) 8) 9)}。

3.3 超電導バルク体

ロータに内蔵する超電導バルク体は、直径 140mm、厚さ 20mm のバルク体 1 個と直径 90mm、厚さ 20mm のバルク体 2 個を積層した構成となっている (図 5)。超電導バルク体は、QMG (Quench and Melt Growth) 法により作製した第二世代高温超電導物質の大型単結晶体を円盤形状に成形したものである (新日鐵住金製)^{10) 11)}。直径 140mm のバルク体は、主として回転軸を含めたフライホイール本体の自重を非接触支持する浮上力の発生を担い、直径 90mm のバルク体は、主として回転軸の軸中心を保持する力の発生を担っている。

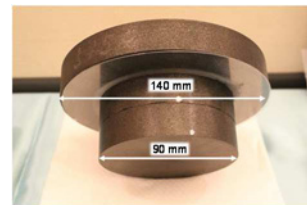


図 5 高温超電導バルク体の外観

4. 大荷重対応超電導磁気軸受の浮上力試験

4.1 浮上力の裕度確認

今回 SMB の浮上力の余裕度を確認するため、157kN までの浮上力検証試験を行った。図 6 に SMB 浮上力検証試験装置^{4) 12)} の概要を示す。超電導コイル、超電導バルク体を格納した断熱回転軸ならびに両者に働く磁気浮上力を支持する断熱荷重支持材、内槽及び外槽など、

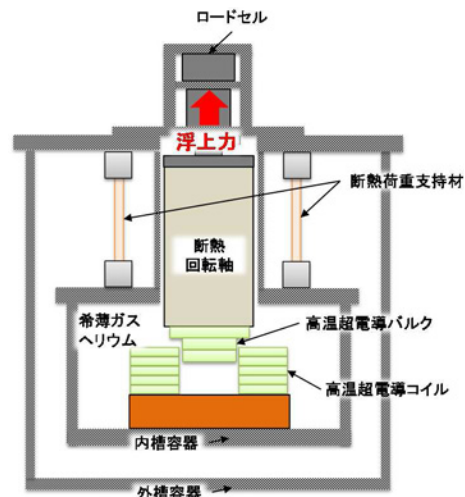


図 6 SMB 浮上力検証試験装置

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

基本構成は実証機 SMB と同じである。ただし、本装置にはフライホイールは実装していないため、発生する浮上力は装置上部（大気側）に設置したロードセルの押し上げ力として測定している。

試験条件は 147kN 浮上試験時⁴⁾と同様であり、希薄ヘリウムガス雰囲気中で冷凍機により超電導コイル、超電導バルク体をマイナス 243℃以下にまで冷却したあと、超電導コイルへの通電を行った。図 7 に大荷重対応 SMB の浮上力検証試験結果を示す。通電電流が 20A を超えたあたりで、発生浮上力が装置に加わる大気圧荷重 0.93kN と均衡し、20A 以上の領域ではほぼ通電電流の 2 乗で浮上力が増加している。通電電流が 156A に達したところで、目標荷重を約 7% 上回る 158kN の大荷重で安定浮上可能なことを確認した。励磁過程と消磁過程で浮上力にヒステリシスがあるのは、励磁過程と消磁過程では超電導バルク体の磁化がわずかに異なるからである。以上の結果から、超電導線材量を増やさずとも、これまでの設計で大荷重に対応可能であることが確認できた。

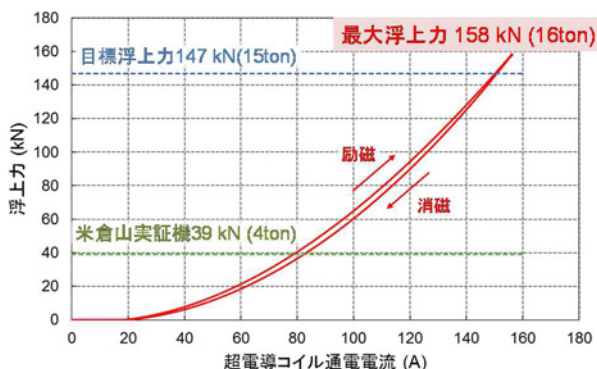


図 7 大荷重対応 SMB の浮上力特性

4.2 8 時間連続通電試験

超電導バルク体に外部から磁場を印加した場合、時間の経過とともに浮上力がわずかに減衰する現象が知られている^{13) 14) 15)}。これはちょうど永久磁石の磁化が時間とともに弱められていく現象に似ており、磁気余効あるいは磁束クリープと呼ばれている。SMB におけるクリー

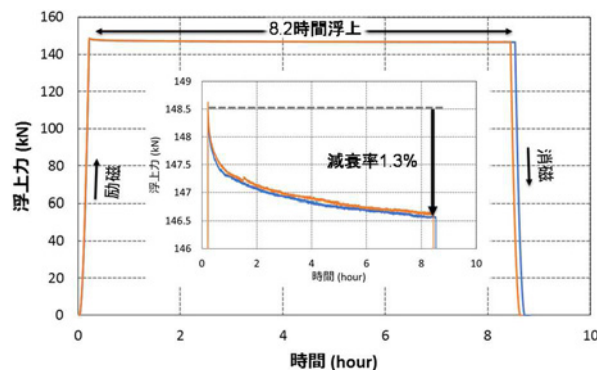


図 8 SMB 浮上力の時間推移

プ現象の初期特性を把握するため、通電電流 151A、発生荷重 148kN 超で開始し、通電電流を 8 時間一定のまま保持する試験を 2 回実施した（図 8）。図 8 より、2 回のクリープ特性は同様な特性を示しており、また、励消磁に伴う浮上力のヒステリシスの影響も見られず、再現性の良いデータが得られていることがわかる。

図中の拡大グラフでもわかるように、8 時間後の荷重減衰は 1% 強であり、時間の経過とともに減少する傾向も確認された。荷重減衰の原因は超電導バルク体に対する磁束侵入と考えられ、磁束侵入と浮上力の関係および超電導バルク体表面に流れる遮蔽電流密度の低下特性を考慮して、長時間の荷重減衰率を予測すると、荷重減衰は 1 ヶ月で 3%、1 年でも 4% 程度と試算された。

米倉山実証機では、このようなクリープ現象が発生することを考慮し、超電導コイルへの通電電流を制御することによって、フライホイールの浮上高さを一定に保持している。米倉山の実績から、大荷重化しても、この程度のクリープ特性であれば、超電導コイルへの通電電流を制御することによって、フライホイールの浮上高さを一定に保持可能であることを確認している。

5. 超電導コイルおよび断熱荷重支持材の健全性確認

5.1 超電導コイルの通電特性試験

超電導コイルについて健全性を評価するため、浮上力検証試験後、内槽からダブルパンケーキコイル 5 枚を取り出し、超電導コイルの臨界電流測定ならびに超電導と



図 9 液体窒素浸漬による測定の様子

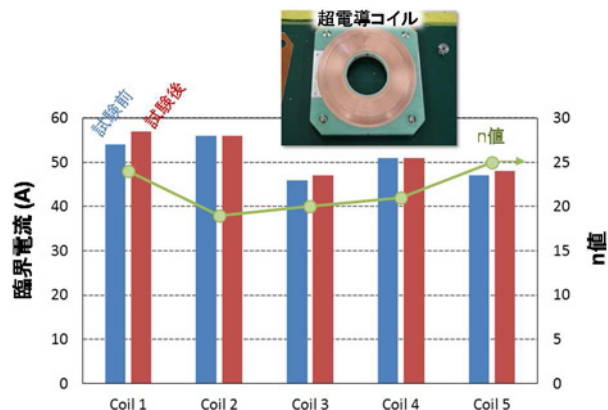


図 10 超電導コイルの健全性確認

しての特性を示す n 値の測定を行った。超電導コイルへの通電電流 (I) とその時のコイル端子の発生電圧 (V) から、 I - V グラフ (log-log) における電圧の立ち上がり曲線を求めた。曲線の指数部を n 値、発生電圧 1mV における電流値を臨界電流値と定義した。試験は超電導コイルを開放容器に入れ、液体窒素の蒸発ガスにより超電導コイルの予冷を行ったあと、液体窒素中にて通電を行った (図9)。

図10に試験前および試験後の超電導コイルの臨界電流値と n 値の測定結果を示す。同図において「試験前」は製造時の初期特性、「試験後」は今回の 157kN の一連の浮上力試験を行った後の結果を示している。試験後の特性は初期製作時の特性と同等であり、大荷重試験前後での特性変化はないことが確認された。

5.2 断熱荷重支持材の引張試験

158kN の浮上力検証試験後に、SMB の浮上荷重 (反力) を支持する 4 本の断熱荷重支持材の引張試験を行い、製作時の初期荷重特性と比較した。断熱荷重支持材には、熱絶縁性能と引張強度に優れるアルミナ繊維強化プラスチック (AFRP) を用い^{16) 17)}、歪ゲージを断熱荷重支持材中央部に貼付けた。図11に断熱荷重支持材の引張試験結果、図12に引張試験結果から求めた断熱荷重支持材 4 本の弾性率を示す。それぞれの断熱荷重支持材の弾性率

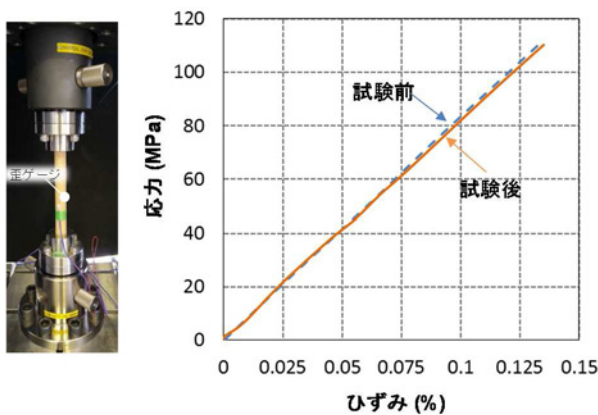


図11 断熱荷重支持材の引張試験結果

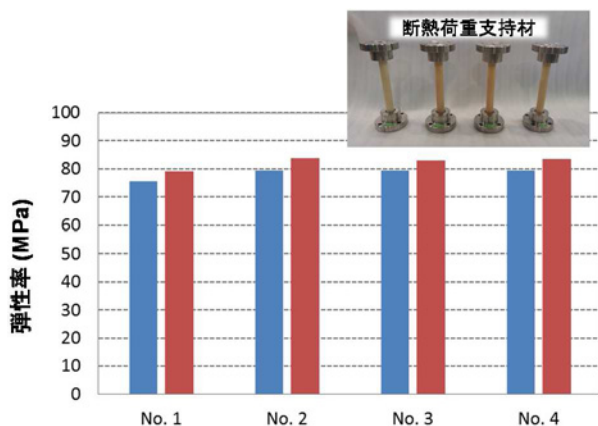


図12 断熱荷重支持材 4 本の弾性率

は初期製造時と比較して有意な変化は見られず、超電導コイル同様、大荷重印加による劣化がないことを確認した。

6. SMB 信頼性・耐久性評価試験装置の設計

鉄道の電圧降下対策、回生失効対策として蓄電システムに求められる充放電回数は、数十万～数百万回と試算されている。4章のSMB浮上力試験は回転を伴わない静的な評価であったが、繰返し回転数の変化に対するSMBの安定浮上・安定回転についても動的な評価が必要である。ここでは、米倉山実証機のように回転・浮上状態を再現し、SMBを構成する超電導コイルや低温部材の長期信頼性・耐久性が評価可能なSMBの加速試験装置について述べる。

回転・浮上を行うSMB信頼性・耐久性評価試験装置に求められる主な機能は、(1)回転を考慮した動的検証のため、回転・浮上を同時に実現できること。(2)SMB構成部材の加速試験のため、短時間で加減速ができること。(3)耐振性能評価のため、回転軸に強制振動を付与することである。SMB信頼性・耐久性評価試験装置では、回転軸に対してSMBを上下対称に配置し、回転軸に力の大きさは等しく、逆向きの力を発生させて相殺することとした (図13)。こうすることで、回転軸の質量が小さくても、試験に必要な浮上力を発生した状態を作り出すことができる。回転軸の駆動モータは装置中央に配置する構成とし、ラジアル方向用に制御型磁気軸受 (AMB) を併設している。(3)に対応する強制振動はAMBにより付与することができる。現在、147kNを载荷した状態で最高回転数 3600min^{-1} まで加減速可能で、想定される 10^5 回程度の充放電回数を模擬するオフライン加速試験が、約一年間で実施可能な評価装置の製作を進めている。

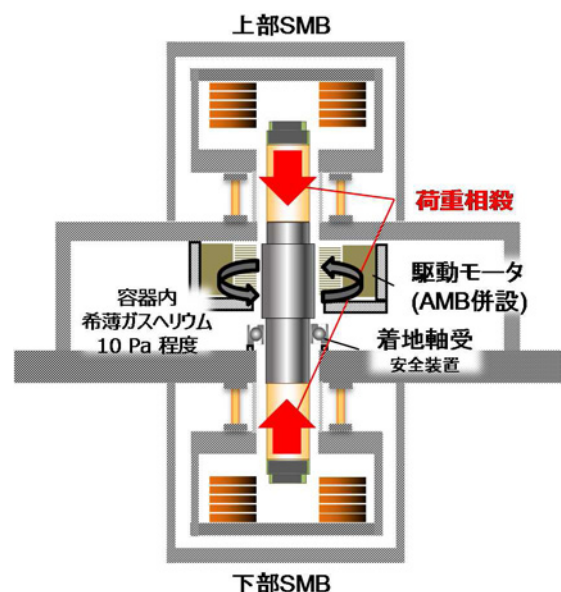


図13 SMB 信頼性・耐久性評価試験装置

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

また、この評価装置では、フライホイール蓄電システムの安全装置である着地軸受の性能評価も合わせて実施可能である。

7. まとめ

鉄道用フライホイール向け大荷重超電導磁気軸受の浮上力の裕度確認ならびに浮上力特性確認のため、最大158kNの浮上力検証試験ならびにクリープ特性試験を実施した。浮上力の裕度確認では、目標荷重を約7%上回る158kNの大荷重で安定浮上可能なことを確認した。また、クリープ特性試験では、8時間の連続浮上試験で、浮上力の減衰は1.3%程度であり、1年間でも4%程度と推定された。この程度のクリープ特性であれば、超電導コイルへの通電電流を制御することによって、フライホイールの浮上高さを一定に保持可能である。

上記SMB大荷重試験後、超電導コイルの臨界電流、 n 値、SMB低温部材である断熱荷重支持材の引張試験を行い、初期特性と比較し、劣化のないことを確認した。以上の結果から、超電導線材量を増やさずとも、これまでのSMB設計で大荷重に対応可能であることが確認できた。

また、回転数の繰返し変動に対するSMBの安定浮上・安定回転についても動的な評価が行えるよう、回転・浮上状態を再現し、SMBを構成する超電導コイルや低温部材の長期信頼性・耐久性を加速評価するためのSMB信頼性・耐久性評価試験装置の製作を進めている。

謝辞

米倉山実証機の開発はNEDOの助成事業「次世代フライホイール蓄電システムの開発」で開発した実証機の開発成果を有効活用する形で実施してきたものである。

なお、鉄道用フライホイール向け大荷重対応超電導磁気軸受の開発は、(株)ミラプロ、古河電気工業(株)、松井鋼材(株)をはじめとする関係各社の多大な協力を得て成し得たものであり、ここに改めて深く御礼申し上げます。

文献

- 1) 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
- 2) 長谷川均, 松江 仁, 長嶋 賢, 山下知久: 実証試験用超電導フライホイール蓄電装置の開発, 鉄道総研報告, Vol.29, No.11, pp.41-46, 2014
- 3) 山下知久, 小方正文, 松江 仁, 宮崎佳樹, 杉野元彦, 長嶋 賢: 超電導フライホイール蓄電システムの信頼性検証と鉄道への応用, 鉄道総研報告, Vol. 31, No. 1, pp.47-52, 2017
- 4) 宮崎佳樹, 水野克俊, 山下知久, 長嶋 賢, 中尾健吾, 向山晋一, 松岡太郎: 鉄道用フライホイール向け大荷重対応超電導磁気軸受の開発, 鉄道総研報告, Vol. 32, No. 3, pp.35-40, 2018
- 5) 清水秀樹, 澤村秀次, 小澤幸仁, 宮崎和也, 向山晋一, 長嶋 賢, 山下知久, 小方正文: 超電導フライホイール蓄電装置実証機の状況 - 米倉山 2017-, 低温工学・超電導学会講演概要集, Vol.95, p.165 (2017)
- 6) 清野 寛, 長嶋 賢, 田中芳親, 中内正彦: 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, 鉄道総研報告, Vol.22, No.11, pp.35-40, 2008
- 7) 水野克俊, 杉野元彦, 小方正文: 希土類系高温超電導磁石のための要素コイル製作と評価, 鉄道総研報告, Vol. 29, No. 11, pp. 11-16, 2015
- 8) 水野克俊, 杉野元彦, 田中 実, 小方正文: 希土類系高温超電導線材を用いた起磁力 700 kA 実機大コイルの開発, 鉄道総研報告, Vol. 31, No. 1, pp. 5-10, 2017
- 9) 水野克俊, 山下知久, 宮崎佳樹, 坂本久樹, 中尾健吾, 松井 義, 土肥哲也: 大荷重対応高温超電導磁気軸受の開発～冷却と低発熱化が両立可能な新しいコイル構造～, 2017年春季低温工学会講演概要集, Vol. 95, p.128, 2017
- 10) 中尾健吾, 坂本久樹, 水野克俊, 山下知久, 宮崎佳樹: 大荷重対応高温超電導磁気軸受の開発(1)ー融着材法を適用した新型コイルの設計ー, 2017年秋季低温工学会講演概要集, Vol. 96, p.166, 2017
- 11) 手嶋英一, 森田 充: 性能・技術の向上が進むRE系高温超電導バルク材料の開発現状, 低温工学, Vol. 46, pp. 73-80, 2011
- 12) 森田 充: 溶融法によるバルク作製, 応用物理, Vol. 62, pp.72-73, 1993
- 13) 水野克俊, 宮崎佳樹, 山下知久, 中尾健吾, 坂本久樹, 清水秀樹, 澤村秀次, 小澤孝仁, 松井 義, 土肥哲也, 上島史生: 大荷重対応高温超電導磁気軸受の開発(2)ー大荷重試験結果ー, 2017年秋季低温工学会講演概要集, Vol. 95, p.167, 2017
- 14) 山藤 馨: 超電導体における磁束クリープ, 低温工学, Vol. 25, No. 1, pp. 2-11, 1990
- 15) 船木和夫: 高Tc超電導体バルク材の基礎と応用研究, 低温工学, Vol. 28, No. 4, pp. 183-190, 1993
- 16) 村上雅人: 高温超電導の材料科学, 内田老鶴圃, pp. 171-176, 1999
- 17) 宮崎佳樹, 山下知久, 水野克俊, 松井 義, 土肥哲也, 浅野幸雄, 風間竜也, 中尾健吾, 坂本久樹: 大荷重対応高温超電導磁気軸受の開発ー断熱荷重支持材ー, 2017年春季低温工学会講演概要集, Vol. 95, p.127, 2017
- 18) 宮崎佳樹, 山下知久, 水野克俊, 松井 義, 土肥哲也, 浅野幸雄, 風間竜也, 中尾健吾, 坂本久樹: 大荷重対応高温超電導磁気軸受の開発ー断熱荷重支持材ー, 2017年秋季低温工学会講演概要集, Vol. 96, p.168, 2017