

超電導フライホイール実証機における主要技術

山下 知久* 宮崎 佳樹** 小方 正文** 長嶋 賢*
 嶋崎 靖幸*** 谷口 学# 春井 眞二## 原 和弘###

Key Technology of the Superconducting Flywheel Energy Storage Demonstration Machine

Tomohisa YAMASHITA Yoshiki MIYAZAKI Masafumi OGATA Ken NAGASHIMA
 Yasuyuki SHIMAZAKI Manabu TANIGUCHI Shinji HARUI Kazuhiro HARA

The superconducting flywheel energy storage systems (FESS) can stabilize the fluctuation of the output of the solar photovoltaic power generation system. The FESS has been developed as a joint project of five enterprises subsidized by the New Energy and Industrial Technology Development Organization. Four key technology of the FESS are the magnetic fluid seal (MFS) technology for vacuum seal by means of the multi-material shaft, the active magnetic bearing (AMB) technology for non-contact levitated support, the dynamic break resistor (DBR) technology for allowing storage energy to be consumed as heat energy, the touch down bearing (TDB) technology for the safety device in case of the superconducting magnetic bearing's failure. In this paper, the principle and the feature of those technologies are described, and the validity of the design is also described.

キーワード：フライホイール蓄電，磁性流体真空シール，制御型磁気軸受，制動抵抗器，緊急着地軸受

1. はじめに

2015年9月，山梨県米倉山（こめくらやま）の太陽光発電所の電力貯蔵技術研究サイトに超電導フライホイール蓄電システム（FESS）の実証実験施設（図1）が完成し，日照条件に影響されるため不安定な太陽光発電電力の出力平滑化効果検証を目的とした実証実験が開始された¹⁾。現在は，数年後の商用機上市にむけ，米倉山実証機（NEDO 助成事業で開発）を有効活用して，鋼製フライホイールを用いた日の出から日没までの連続運転試験等の実証実験が計画的に進められている²⁾。

本報告では米倉山実証機のフライホイールの鋼製化と併せて，新たに導入された4つのキーテクノロジー「高速回転・磁性流体真空シール（MFS）技術」，「制御型磁気軸受（AMB）技術」，「緊急時用制動抵抗（DBR）技術」，「緊急着地軸受（TDB）技術」に関する，原理・特徴，開発設計上の工夫および米倉山の実証機で確認された知見に基づく設計の妥当性検証結果について述べる。

これら4つの技術はFESSの安定浮上，安定回転に不可欠なキーテクノロジーである。

* 浮上式鉄道技術研究部
 ** 浮上式鉄道技術研究部 低温システム研究室
 *** 理学メカトロニクス株式会社
 # 丸和電機株式会社
 ## 鈴木合金株式会社
 ### 日本精工株式会社

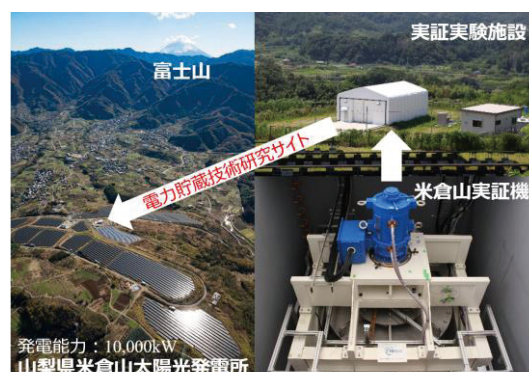


図1 山梨県米倉山実証実験施設と実証機の外観

2. 超電導フライホイール蓄電（FESS）

FESSとは，図2のように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力を運動エネルギーに変換・貯蔵し必要に応じて再び電力に変換可能なシステムである。本稿で記述するFESSは，超電導磁気軸受（SMB）で実現される強力な磁気反発力を利用しフライホイールを非接触支持する機械式蓄電システムで，二次電池のような繰り返し充放電に対する制限はない。電気鉄道の回生失効対策ならびに太陽光や風力等の再生可能エネルギーの発電システムの出力平滑化には，期待寿命の20年間で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，本FESSが選択肢の一つになると考えられる。

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

3. フライホイール蓄電の原理

本章ではフライホイール蓄電の基本原理とその特徴について述べる。

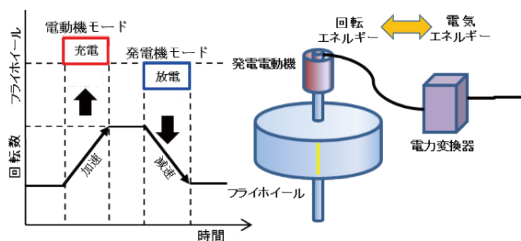


図2 フライホイール蓄電の原理

図2にフライホイール蓄電の原理を示す。質量 $M[\text{kg}]$ 、半径 $r[\text{m}]$ の円盤形状のフライホイールが、回転角速度 $\omega[\text{rad/s}]$ で回転する場合のフライホイールの貯蔵エネルギー量 $E[\text{J}]$ は式(1)のとおり表される。

$$E = (1/4)M(r\omega)^2 \quad (1)$$

すなわち貯蔵エネルギー量 E はフライホイールの質量、半径、回転数で設計できることがわかる。エネルギーの出し入れは、フライホイールの回転数を上昇（加速）させたり下降（減速）させたりする単純な制御により、発電電動機を介して電気エネルギーを充電したり放電したりすることで実現する。

4. 米倉山実証機による新たな技術検証

実証実験の目的は、山梨県米倉山に山梨県が所有する出力 1MW の太陽光発電所に FESS 実証機（以下、米倉山実証機）を併設、連系させ、太陽光の発電電力の出力平滑化効果を検証することである。図3に当該太陽光発電所の出力変動例を示す。

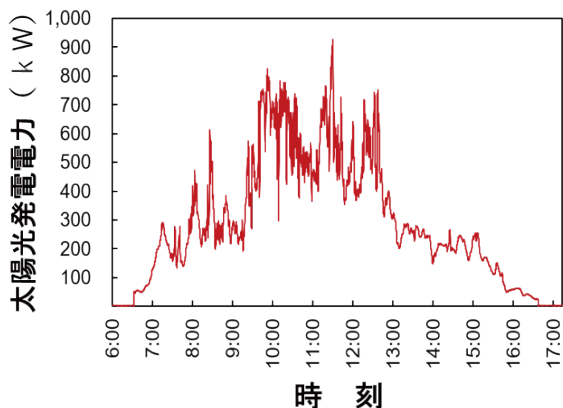


図3 太陽光発電所の出力変動例

同図より日の出から日没まで変化する日照条件に応じて太陽光の発電電力が時々刻々変動し、その変動幅は概ね 300 kW であることが確認されたので、実証機の出力を 300kW と設定した。なお、NEDO 助成事業期間の実証実験実績³⁾ からフライホイールの蓄電容量を 10kWh と設定し、フライホイール材料は鉄道用途で実績のある NiCrMo 合金鋼を採用することとした⁴⁾。

表1に米倉山実証機の主要仕様を、図4に同機を構成する主要技術の役割を各々示す。

表1 FESS 実証機の主要仕様

項目	仕様
出力	300 kW
蓄電容量	10 kWh
☆フライホイール材質	鋼製 (NiCrMo 合金)
☆フライホイール質量/寸法	4,000 kg / 直径 1.44 m, 高さ 0.29 m
スラスト軸受 (軸方向)	超電導磁気軸受
☆ラジアル軸受 (半径方向)	制御型磁気軸受

☆印 実用機開発にむけた新たな技術検証項目

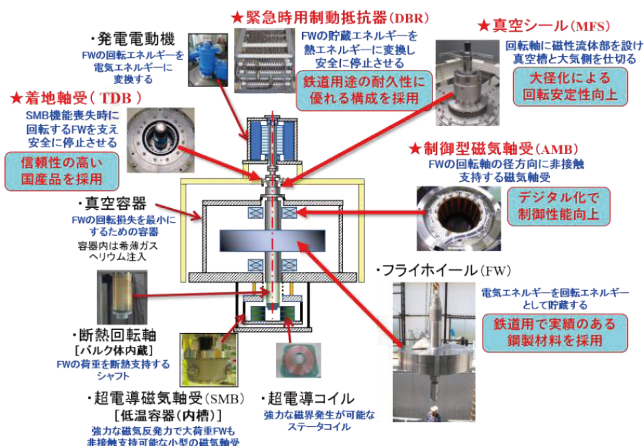


図4 米倉山実証機の主要技術

米倉山実証機のフライホイール材料の鋼製化に併せて新たに導入された「高速回転・磁性流体真空シール (MFS) 技術」、「制御型磁気軸受 (AMB) 技術」、「緊急制動抵抗 (DBR) 技術」、「緊急着地軸受 (TDB) 技術」の4つの主要技術を含む主な開発検証課題は、以下のとおりである。

- 1) 太陽光発電電力の安定化、連続運転特性検証
- 2) 超電導磁気軸受 (SMB) の連続運転・安定性検証
- 3) 低損失化した磁性流体・真空シール (MFS) の信頼性検証
- 4) 大径化した MFS 用回転軸 (複合軸) の信頼性検証
- 5) デジタル化した制御型磁気軸受 (AMB) の信頼性検証
- 6) 鉄道用途の緊急制動抵抗器 (DBR) の信頼性検証
- 7) 国産の緊急着地軸受 (TDB) の信頼性検証

本報告では、米倉山実証機のフライホイール鋼製化に伴って新たに採用された4つの主要技術（MFS、AMB、DBR、TDB）について詳述する。

4.1 高速回転・磁性流体真空シール

米倉山実証機の発電電動機は大気中に設置されるため、その回転軸と真空容器内で高速で回転するフライホイールの回転軸を、鉄道総研が考案した高速回転・真空シールにより気密を保ちながら直結する設計が採用され、フライホイールの回転に必要な動力を伝達する機構となっている⁵⁾。

米倉山実証機のフライホイール鋼製化に伴い使用材料の特性を踏まえ最高回転数が毎分6,000回転から毎分3,000回転に仕様変更された。磁性流体シール用の回転軸の設計は回転数と回転軸の直径の積に比例する周速で決まることから回転軸の直径を従来の100mmから200mmに大径化する設計が可能となった。そこで回転軸の回転安定化のための回転軸の大径化（高剛性化）と高速回転時の低損失（低発熱）化を両立可能な新しい高速回転・磁性流体シール（Magnetic Fluid Seal、略称MFS）の開発に取り組むこととした。

4.1.1 磁性流体真空シール（MFS）

磁性流体とは磁気に応答する酸化鉄の超微粒子と界面活性剤を媒体に混ぜ合わせてコロイド状にし分散させた機能性流体の一種である。図5に磁性流体の構成と磁性流体を用いたMFSの構造を示す。

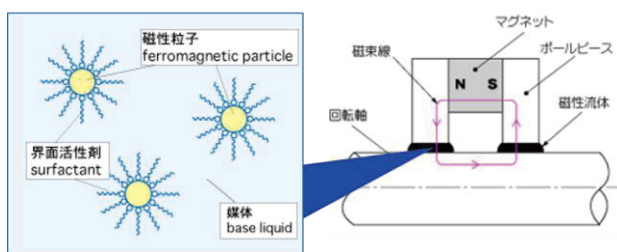


図5 磁性流体とそれをを用いたMFS構造

永久磁石と透磁率の高い磁極片、回転軸によって磁気回路を構成し、磁極と回転軸の間に設けた数十ミクロンの微小隙間に磁性流体を注入すると、隙間の磁束で磁性流体のOリングが形成されて、空気を非接触シールできる回転シールとなる。

このシールの耐圧は、磁極片1段当たり0.2気圧～0.4気圧であるが複数段を持つ多段シールとすることで、1気圧の差圧を保持することが可能な真空シールが設計できる。

従来のMFSは大型X線回転ターゲット向けとして周速が20m/sが限界とされていた。これ以上の周速（回転）では磁性流体の攪拌熱によって磁性流体自身が熱劣化し、短時間で寿命を迎えてしまう。

そこで今回MFSの低損失（低発熱）化による安定化のため、低粘度で耐熱性が高い磁性流体として、ベースオイルを高分子のフッ素系オイルから、耐熱性に優れ低粘度の炭化水素系⁶⁾に変更したものを、米倉山実証機用のMFSに採用した。低粘度の炭化水素系ベースオイルとすることで、MFSの温度が120℃以下に抑えられ、長時間運転可能となった。

表2に米倉山実証機用MFSの主要仕様を、図6に米倉山実証機用MFSの外観写真を各々示す。

表2 MFSの主要仕様

項目	仕様
最高回転数（周速）	毎分3,000回転（31.4m/s）
圧力（雰囲気）	10Pa（ガスヘリウム）
磁性流体	酸化鉄+炭化水素系オイル
回転軸径	直径200mm
回転軸	MMS法による異種金属複合軸

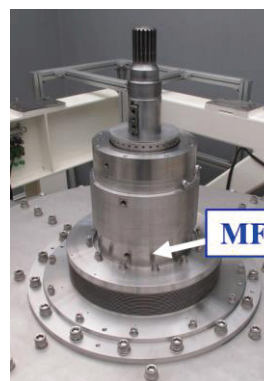


図6 米倉山実証機用MFSの外観

米倉山実証機用MFSは、回転軸の周速が30m/s超の高周速仕様に対応するため磁性流体以外にもベアリングや冷却機構も強化し、回転軸には異種金属複合軸^{7) 8)}を採用し、冷却効率を高め高速回転時の回転軸の温度上昇を許容範囲内に抑える設計とした。

4.1.2 MFS用異種金属複合軸

本項では、米倉山実証機用MFSの回転軸に採用されている、鉄道総研とMMSマツィグループが考案したMMS法[®]（Multi-Material Structure法）⁹⁾による異種金属複合軸について述べる。

米倉山実証機では、発電電動機とフライホイールの間にトルク伝達と真空シールを両立することが可能なMFSとする必要があり、そのためには高速回転時のkW級の摩擦発熱を効率良く大気側に放熱し、温度上昇しにくい回転軸構成とすることが求められた。今回独自の製法（MMS法[®]）を考案し、直径200mmの大径3層（SUS/放熱部材/SUS）の高熱伝導・異種金属複合軸の開発に取り組むことになった。

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

MFS の回転軸（高熱伝導・異種金属複合軸）が満足すべき条件は以下のとおりである。

- ①高速回転に対応するため、高い同心性を有すること
- ②蓄電装置の運用に必要なトルク伝達ができること
- ③摩擦発熱を効率良く放熱できること
- ④異種金属複合軸の接合部に耐真空リーク性を有すること
- ⑤構成部材の硬度低下をきたす加熱を行わないで一体化できること

SUS や銅・アルミを液体窒素温度付近まで冷却すると 0.2～0.3% 程度収縮することが知られている¹⁰⁾。MMS 法の特徴は、パイプ材と軸材の組合せの仕方にあり、軸材のみ液体窒素温度まで冷却して、嵌合に必要な収縮量を確保し、嵌合・一体化するもので冷やし嵌めの考え方をベース接合部分にシール性部材として厚さ数 μm の銀被膜をメッキ法で設けていることが特徴で、これにより高い同心性と耐リーク性を両立する回転軸が実現できる。

表 3 に、米倉山実証機 MFS 用の異種金属複合軸の主要仕様を示す。

表 3 MFS 用異種金属複合軸の主要仕様

項目	仕様
直径	200 mm
長さ	約 300 mm
コア材	SUS403
中間材	クロム銅合金
アウター材	SUS630
許容リーク量	1.0×10^{-9} Pa・m ³ /s 以下
釣り合い良さ [残留アンバランス]	G1.0 @ 毎分 600 回転

MFS 用の異種金属複合軸のアウター材には MFS の磁気回路構成のため磁性を有する SUS630 を、中間材には放熱部材として銅合金（クロム銅）を、コア材には回転力伝達部材として SUS403 を各々選定した。3 層構成の異種金属複合軸は最初にアウター材と中間材を嵌合・一体化した後、コア材を嵌合・一体化する二段階のプロセスで製作する。

図 7 に今回開発した、直径 200mm の大径 3 層（SUS630 / 銅 / SUS403）軸の断面を示す。同芯度は目標の 0.01mm 以下を達成できた。またフード法によるガスヘリウムの漏れ量検査で規定の 1×10^{-9} Pa・m³/s 以下を満足し、耐真空リーク性が要求仕様を満足することを確認した。

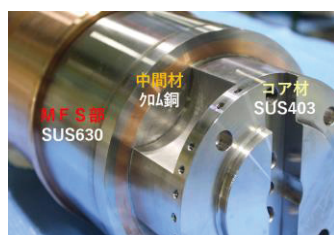


図 7 米倉山実証機 MFS 用異種金属複合軸構成

4.1.3 米倉山で検証された MFS 特性

MFS の寿命は磁性流体、ベアリングの温度によって大きく左右され、その信頼性や耐久性への影響が大きいと考えられるので、高速回転時の温度上昇予測が必要である。

図 8 に米倉山 FESS 実証機が最高回転数で運転された場合を想定し、発熱源として MFS 部に 1.16 kW、軸受部に 0.8 kW を各々入力し、回転軸と MFS 各部の温度上昇熱解析を実施した結果を示す。

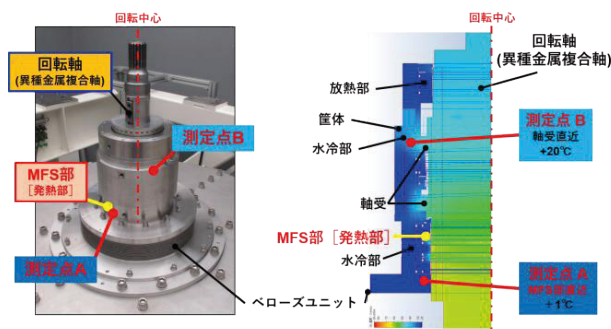


図 8 異種金属複合軸を用いた MFS の熱解析結果

解析結果から米倉山実証機における MFS の 2 つの温度測定点において MFS 部：+1℃上昇、ベアリング部：+20℃上昇と予想された。

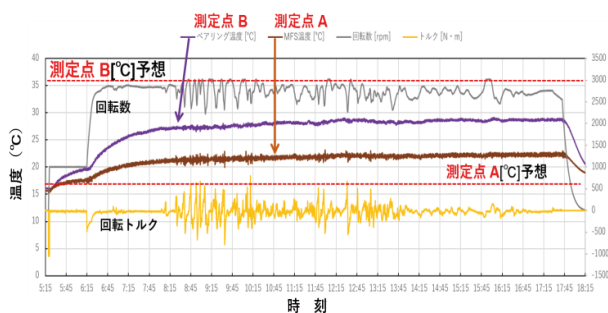


図 9 米倉山実証機の連続運転時の MFS 関連の温度特性

図 9 に米倉山 FESS 実証機の 1 日の充放電試験（連続運転試験）時の MFS 各部の温度の時間変化特性を示す。約 12 時間に渡り 2,100min⁻¹ ⇄ 3,000min⁻¹ の繰り返し充放電試験を実施した結果、温度上昇は水温から MFS 部：+7℃上昇、ベアリング部：+12℃上昇であった。寿命に影響が出る温度は MFS 部：+20℃、ベアリング部：+30℃であり、今回の米倉山実証機の連続運転試験で確認された温度上昇特性から MFS 部の温度マージンは 13℃、ベアリング部の温度マージンは 18℃となり発熱は十分低いとみなせると考えている。

解析結果と連続運転時の温度上昇特性の乖離は MFS 部とベアリング部の発熱量の設定によると考えている。

今後、米倉山 FESS 実証機による実証実験結果を精査し直して熱解析の精度を向上させ、MFS の設計ツールとしての完成度を高めていきたい。

4.2 制御型磁気軸受 (AMB)

本節では、米倉山実証機において高速回転するフライホイールが安定回転を持続可能なように、径方向に非接触支持する磁気軸受 (Active Magnetic Bearing, 略称 AMB) に関して詳述する。

4.2.1 AMB の役割と原理

電磁石によって発生する磁気吸引力によって、回転軸を非接触支持する機械要素 (軸受) が AMB である¹¹⁾。

AMB が果たすべき役割は、以下のとおりである。

- ・ 回転運動に対する軸受の摩擦抵抗を出来るだけ少なくすること
- ・ 回転軸の半径方向や軸方向の所定外の動きを確実に抑制して回転機械の安定な運転を実現すること

図 10 に AMB の原理を示す。

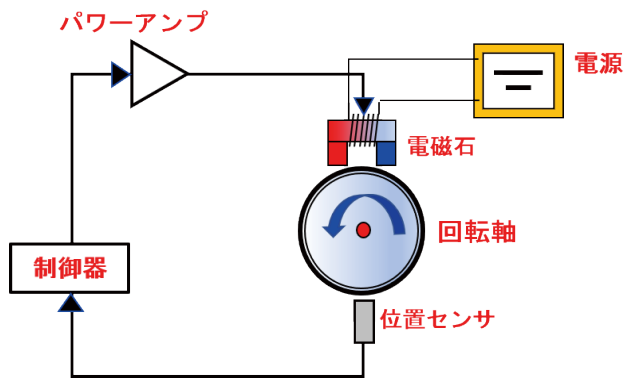


図 10 AMB の原理

AMB は、位置センサ、制御器、パワーアンプ、電磁石および電源から構成される。

位置センサは回転軸とのギャップすなわち回転軸の中心位置を常に計測する役割を担い、釣り合い位置から変位が検出されるとその位置情報から回転軸を釣り合い位置に戻すために必要な磁気吸引力発生を担うのが電磁石、その電磁石に必要な電流を供給するのがパワーアンプである。

パワーアンプに必要な制御信号を送信する役割を担うのが制御器である。

AMB の抵抗はフライホイールの運転圧力が 10Pa と小さいことから風損は無視でき、電磁石による回転抵抗力だけであり、すべり軸受やころがり軸受の摩擦抵抗に比べて極めて小さい特徴がある。

なお、AMB には停電や制御装置が故障した場合に備えて、補助軸受 (緊急着地軸受) と呼ばれるころがり軸受が設けられているのも構成上の大きな特徴である。

4.2.2 米倉山実証機用 AMB について

米倉山実証機のフライホイール本体質量は実証機下部に設置されている SMB が発生する強力な磁気反発力によって非接触支持されているため、米倉山実証機用 AMB の役割は自立するフライホイールの回転軸の径方向の変位を常に計測し、回転軸の中心と回転中心が一致するように電磁石の磁気吸引力を発生させるように制御することである。

表 4 に米倉山実証機用 AMB の主要仕様を、図 11 に米倉山実証機用フライホイールの回転軸と AMB の位置センサと電磁石の配置位置の関係を各々示す。

表 4 米倉山実証機用 AMB の主要仕様

項目	仕様
最高回転数	毎分 3,000 回転
フライホイール質量	4,000 kg
回転軸径	直径 240 mm
釣り合い良さ	G1.0 @ 毎分 800 回転
消費電力	500 W

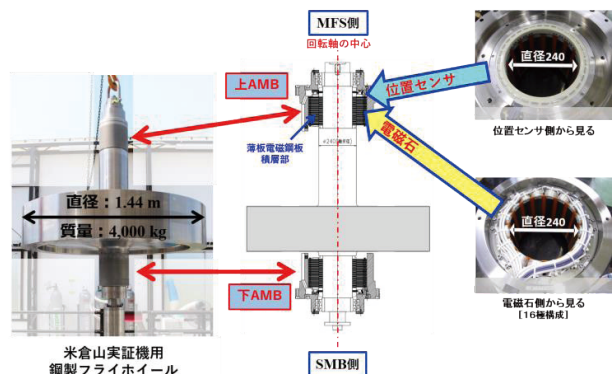


図 11 米倉山実証機における AMB の配置構成

同図に示すように米倉山実証機用の AMB は、フライホイールの回転軸の上部と下部に各々設置され、高速回転するフライホイールの回転軸の径方向を非接触磁気支持する。

4.2.3 米倉山実証機用 AMB の設計

本項では米倉山実証機用 AMB の設計について述べる。

AMB の設計は、表 4 の仕様に基づいてフライホイールの回転時の振れ発生周波数と最大変位および最大発生荷重を動的な解析 (ロータダイナミクス解析) し、AMB の電磁石の具体的な構造検討を行う。

図 12 にフライホイールの回転時の振れ発生周波数と最大変位および最大発生荷重の解析結果を示す。

解析の結果、最大発生荷重は上部 AMB 位置の電磁石で 1,281N、下部 AMB 位置の電磁石で 2,514N であった。最大変位は上部 AMB 位置で 26 μm_{p-p} 、下部 AMB 位置

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

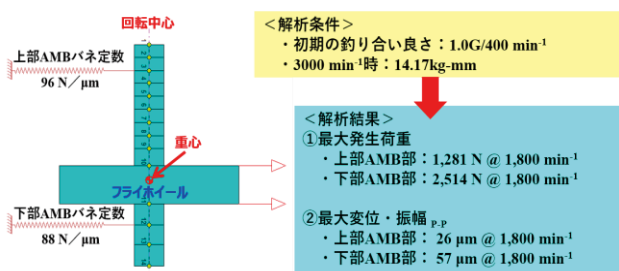


図 12 米倉山実証機用 AMB の最大荷重と変位の試算結果

で $57\mu\text{m}_{p-p}$ という結果が各々得られた。この値は運転上限の $150\mu\text{m}_{p-p}$ に対して十分小さく安全に回転制御可能なことを意味する。

米倉山実証機用 AMB の電磁石の設計では、基準電流 5A で最大発生荷重 2,514N を支える磁気吸引力を発生させ、さらに基準電流の二倍の最大電流 10A で 8,000N の磁気吸引力が発生可能な特性が求められる。

表 5 に米倉山実証機用 AMB の電磁石の設計諸元を、図 13 に設計した米倉山実証機用 AMB の電磁石のコイル通電電流と磁気吸引力の設計曲線を各々示す。

表 5 米倉山実証機用 AMB の電磁石の設計諸元

項目	設計諸元
電磁石の回路構成	ヘテロポラ 16 極
電磁石の内径	内径 240 mm
電磁石の高さ	約 184 mm
電磁鋼板の厚さ×枚数	t 0.35 × 526 枚
最大出力	8,200 N @ 10A

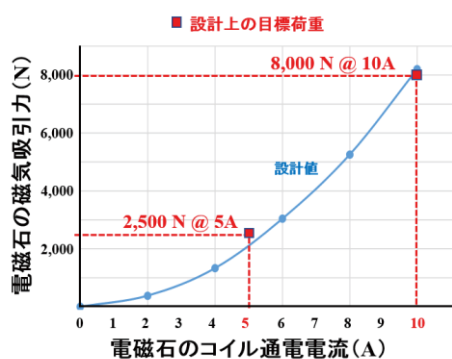


図 13 米倉山実証機用 AMB の磁気吸引力特性

図 13 のグラフより電磁石の設計曲線は基準電流 5A では目標荷重 2,500N をやや下回るものの、最大電流 10A では目標荷重 8,000N を上回る磁気吸引力の発生が可能であることがわかる。従って電磁石の設計諸元の設定が妥当なものであると考えられる。

4.2.4 米倉山実証機用 AMB の運転特性

図 14 に鋼製フライホイール化した米倉山実証機における回転数向上試験の時刻歴を示す。

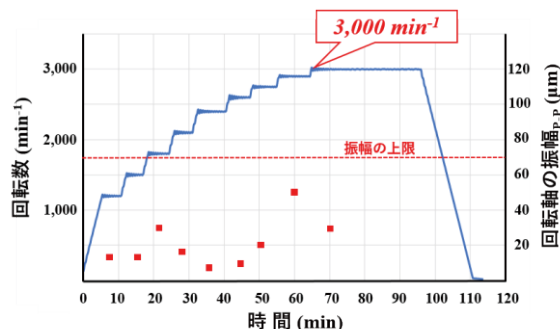


図 14 米倉山実証機の回転数向上試験の時刻歴

図 14 のように、 $1,200\text{min}^{-1}$ での安定回転確認に続き、約 300min^{-1} 毎に回転数を段階的に上昇させ、試験開始から約 65 分経過したところで目標の最高回転数 $3,000\text{min}^{-1}$ に到達した。

最高回転数 $3,000\text{min}^{-1}$ に到達するまでに確認された回転軸の最大変位は $50\mu\text{m}_{p-p}$ であり、事前の解析で予測された大きさと概ね一致する結果であった。ちなみに最高回転数 $3,000\text{min}^{-1}$ での回転軸の変位は $30\mu\text{m}_{p-p}$ であった。

このことと図 12, 13 から米倉山実証機用 AMB は、運用回転数域 (回転停止から $3,000\text{min}^{-1}$ の間) で基準電流 5A より低い電流域で安定回転制御できること、消費電力が仕様 (500W) より低いレベルで運用可能なことが確認できたと考えている。

今後、米倉山実証機による充放電試験結果を精査する等により AMB の特性検証に取り組んでいく予定である。

4.3 緊急時用制動抵抗 (DBR)

本節では、毎分 3,000 回転で高速回転する質量 4,000 kg のフライホイールの蓄積エネルギー 10kWh (36MJ) を、発電電動機により電気エネルギーに変換後、抵抗器に通電して熱エネルギーとして消費し、フライホイールを安全に減速、停止させるブレーキの役割を担う制動抵抗器 (Dynamic Break Resistor, 略称 DBR) に関して詳述する。

図 15 に米倉山実証機用 DBR の役割を、表 6 にその要求仕様を示す。

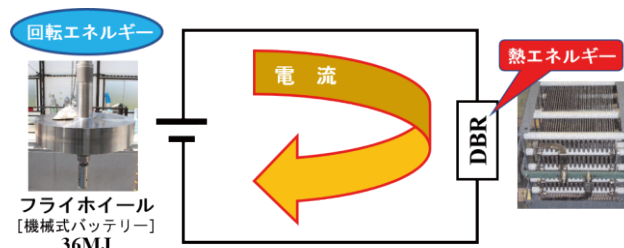


図 15 米倉山実証機用 DBR の役割

表6 米倉山実証機用 DBR の要求仕様

項目	仕様
フライホイール本体質量	4,000 kg
最高回転数	毎分 3,000 回転
蓄積エネルギー	36 MJ (10 kWh)
回転停止までの時間	30 分間

なお米倉山実証機用 DBR の仕様検討では発電電動機とインバータの最大通電電流 (792A, 1 分間) の過負荷耐量も制約条件となる。

図 16 に DBR の抵抗を 0.5Ω とした場合の回転数と電流の減衰特性を計算した結果を示す。

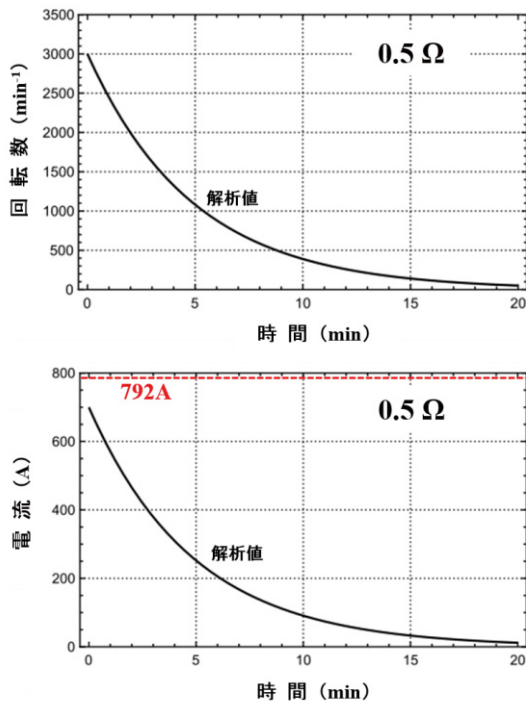


図 16 DBR 抵抗 0.5Ω の場合の回転数と電流の減衰特性

同図より DBR 抵抗を 0.5Ω と設定すれば最高回転数 (毎分 3,000 回転) から 20 分程度でほぼ停止できること、発生電流の最大値が発電電動機の過負荷耐量 (792A) の制約以下で電流減衰できることがわかる。

以上の検討から、米倉山実証機用 DBR の抵抗は 0.5Ω として設計することとした。

4.3.1 米倉山実証機用 DBR の設計

DBR の役割は、鉄道車両が走行中に持つ位置エネルギー (高低差由来) や運動エネルギーを熱エネルギーで消費する役割を担う車載のブレーキ抵抗器と基本的に同じである¹²⁾。そこで今回の米倉山実証機用 DBR の設計については、高い信頼性と耐久性が求められる鉄道用のものをベースに詳細検討を行うことにした。

表 7 に米倉山実証機用 DBR の主要仕様を、図 17 に米倉山実証機用 DBR の内部構成と外観の写真を示す。

表7 米倉山実証機用 DBR の主要仕様

項目	仕様
負荷エネルギー	36 MJ
最大電圧	400 V
最大電流	700 A
停止時間	30 分間
抵抗値	0.5 Ω
絶縁強度	AC 2.5 kV @ 1 分間
温度上昇限度	450 K

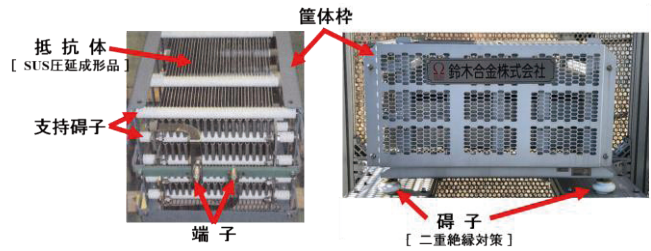


図 17 米倉山実証機用 DBR の内部構成と外観

米倉山実証機用 DBR は、電気エネルギーを熱エネルギーとして消費する抵抗体、それを電氣的・熱的に絶縁して支える支持碍子、外部からの侵入物 (小動物等) から抵抗体を保護する筐体枠、抵抗器ユニット全体を二重絶縁する役割の碍子等から構成されている。

最も重要な役割を担う抵抗体は、厚さ数 mm、幅数十 mm に圧延した SUS 系非磁性材料製帯板をジグザグに折り曲げて成形した構成で、コンパクト化と所定の抵抗値確保を両立する設計である。支持碍子には抵抗体の通電時発熱による高温状態と非通電時の室温状態を繰り返す運用環境を考慮し、耐熱衝撃性が 450℃ と高耐久なジルコニウム酸ジルコニウム (ZrO₂・SiO₂) を採用している。筐体枠にパンチングメタルを用いているのは通気性を確保するため、DBR 通電時の放熱性を考慮した設計となっている。

4.3.2 米倉山実証機用 DBR の通電試験

表 8 に米倉山実証機用 DBR の試験諸元を示す。

表8 米倉山実証機用 DBR の試験諸元

項目	試験諸元
負荷エネルギー	36 MJ
抵抗値	0.5 Ω
試験時の印加電圧	400 V
試験時の通電電流	200 A
通電時間	30 min (1,800 s)
温度上昇限度	450 K

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

計算によると米倉山実証機用 DBR は、図 16 のように最大電流 700A から時間の経過に伴い電流減衰する特性を示すが、DBR 単体通電試験では電源設備の制約もあり忠実にトレースすることが出来ない。そこで今回の通電試験ではフライホイールの要求仕様である 30 分間で回転停止できること、すなわち蓄積エネルギー 36MJ を 30 分間ですべて消費できることを検証する意味合いから、200A で 30 分間通電し続ける試験を行うことで本 DBR の温度余裕を確認した。

図 18 に本 DBR の通電試験時の電流値および、抵抗体上部中央の温度測定結果を解析結果と共に示す。

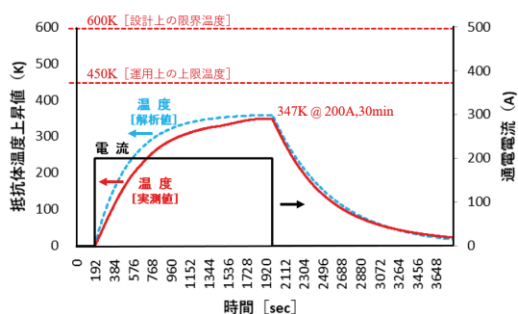


図 18 米倉山実証機用 DBR の通電試験結果

同図において規定の 200A で 30 分間通電し続けた時の温度上昇カーブは解析結果より遅れて上昇し 200A 通電開始から約 26 分 (1560 秒) 経過時点でほぼ一定温度に達した。このときの温度上昇は上限温度 (450K) を下回る 347K に留まる。このことから米倉山実証機用 DBR は所定の蓄積エネルギー 36MJ を 30 分間ですべて消費可能であり、構造的にも熱的な余裕を持った設計になっていることが確認できたと考えている。

4.4 緊急着地軸受 (TDB)

本節では、米倉山実証機において高速回転するフライホイール本体荷重を非接触浮上支持する SMB が機能喪失した場合でも、フライホイールが安全に停止するまでフライホイール本体の荷重を回転支持可能な緊急着地軸受 (Touch Down Bearing, 略称 TDB) に関して詳述する。

4.4.1 TDB の役割

タッチダウンとは航空機が着陸することを意味する言葉として知られている。軸受の分野では回転軸が宙に浮いている状態から短時間で着地して衝撃荷重を受けるのをそれになぞらえ、当該部位を緊急着地軸受ないしはタッチダウン軸受 (TDB) と呼んでいる¹³⁾。

米倉山実証機の場合、TDB は真空シールと発電電動機の中に設置され、SMB および AMB から構成される磁気軸受が正常に運転されている間は回転軸と接触しない (回転停止) 状態であるが、停電や地震などによりそれら磁気軸受とその制御系が制御不能になった場合に

高速回転する回転軸と TDB 内輪が接触し、回転荷重を負担して安全に減速、停止させる役割を担っている。

4.4.2 TDB の設計思想

一般的な軸受では、転動体 (玉) の公転径は外輪外径と内輪内径の中央に設定され、転動体に対向する部分の表面積は外輪の方が内輪より大きくなるので、大気中で一定回転する軸受の外内輪の温度差は一定値に収束し、その温度で内部すき間を確保できる設計を行うのに対して、TDB の設計では緊急着地が発生した際に内輪の方が外輪よりも急激に発熱し膨張する。その際に TDB 内輪と球のすき間がゼロとなると、非常に大きな内部荷重が発生して剥離損傷や焼付き、それに伴う摩耗現象を引き起こす。

そこで TDB 内輪の急激な温度上昇を回避するために、図 19 のように球を小径化し公転径を大きくすることで内輪の表面積を外輪と同等以上にでき、その分熱容量 (体積) のマージンが大きく設定できるので、緊急着地時のような急激な発熱に対しても膨張量を抑えることが可能となる。このことは球と内輪および外輪との間のすき間を確保する設計が TDB でも可能なことを意味するものであり、米倉山実証機用 TDB もこの設計思想で設計されている。

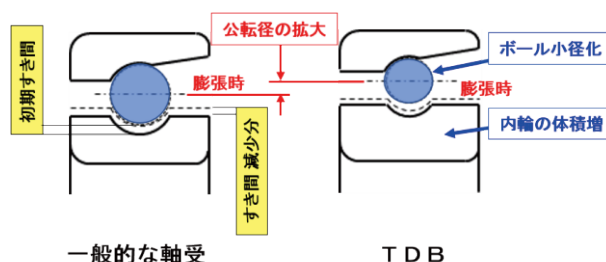


図 19 TDB の設計思想

米倉山実証機用 TDB に採用されている「材質」と「潤滑」の技術的な特徴は以下のとおりである。

- ・緊急着地時の急加速による発熱を考慮し、外内輪には耐熱軸受鋼である M50 材 (AMS6491) を採用した。
- ・転動体の玉には、耐摩耗性向上と熱膨張係数を考慮し、セラミクスである窒化ケイ素製のものを採用した。
- ・米倉山の設置環境 (大気中、高湿度) を考慮し、一般的な潤滑材である二硫化モリブデンは水分により酸化変質することから使用を避け、グリース潤滑を基本とした。なお内輪には低摩擦のダイヤモンドライクカーボン (DLC) コーティングを採用した。

4.4.3 米倉山実証機用 TDB の設計

表 9 に米倉山実証機用 TDB の主要仕様を、図 20 に米倉山実証機用 TDB の断面構成と設置状況写真を示す。

米倉山実証機の TDB は、図のように直径 22.2mm の窒化ケイ素製のセラミクス玉を組み込んだアンギュラ玉

表9 米倉山実証機用 TDB の主要仕様

項目	仕様
最高回転数	毎分 3,000 回転
負担荷重	40 kN @ 軸方向
軌道輪材質	耐熱軸受鋼 M50 (AMS6491)
内径	200 mm
外径	280 mm
玉の材質と直径	Si ₃ N ₄ 直径 22.2 mm

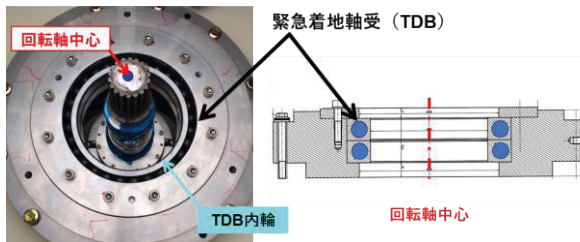


図20 米倉山実証機の TDB の設置状況と断面構成

軸受を二段積みする構成（並列組合せ）となっている。ちなみに窒化ケイ素製のセラミクス玉 1 個あたりの圧砕荷重は、100kN 程度であり、負担荷重 40kN に対して、十分な強度余裕を確保した設計となっている。

回転軸と TDB 内輪の間には、特殊鋼製のタッチダウンリングと呼ばれる回転軸に付属する部品が設置されている。

SMB や AMB の磁気軸受が制御不能になると高速回転しているタッチダウンリングと TDB 内輪のすき間約 1mm がなくなり TDB 内輪と接触、すべりを伴いながら TDB 内輪が急激に加速する。その摩擦により瞬間的に発熱するので、TDB は高温状態に曝されながら一定時間、回転荷重を支え続ける必要がある。

4.4.4 米倉山実証機による緊急着地試験

本項では、米倉山実証機の異常時想定試験として毎分 1,050 回転から、緊急着地させた TDB について分解調査を行い得られた知見について述べる。

表 10 に米倉山実証機で実施した異常時想定・緊急着地の試験条件をまとめたものを示す。

表 10 TDB の緊急着地試験条件

項目	試験条件
TDB 負担荷重	39.2 kN
試験回転数	毎分 1,050 回転
環境条件	大気中
温度	室温
湿度	推定 100 %

今回の緊急着地試験は、真空破壊による圧力異常を検知して SMB が強制消磁した場合を想定した条件で実施した。図 21 に緊急着地試験を経験した TDB を分解調査した結果を示す。

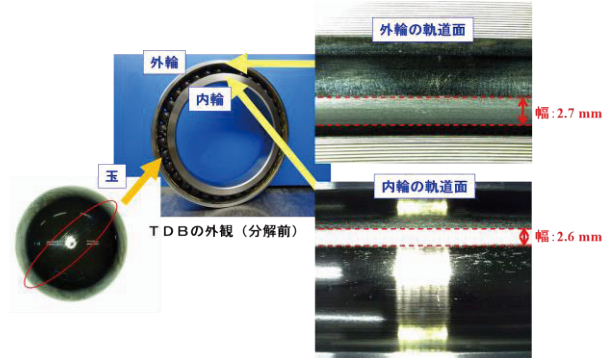


図 21 緊急着地試験を実施した TDB の分解調査例

今回の TDB 分解調査結果で確認された事柄・知見は以下の通りである。

- ・外輪および内輪の軌道面には周状の均一な玉の走行跡が確認された。このことは安定してアキシャル荷重が負担されたことを示すものと考えられる。
- ・内輪軌道面に施工された DLC コーティングは剥がれていることが確認されたが、内輪母材の粗さの変化は軽微であり、劣化の目安となる摩耗痕は認められなかった。
- ・玉の赤道上に薄い線状の傷が一周分発生しているのが認められたが、これは隣接する玉との接触を意味するもので想定内の事象と考えられる。

今回の調査結果をまとめると、顕著な損傷は見当たらず、当該 TDB は劣化なく機能したものと考えている。

4.4.5 TDB の設計の妥当性検証

本項では、緊急着地試験を行った TDB の分解調査結果と解析予測を比較検討し、設計の妥当性について述べる。

図 22 に米倉山実証機仕様の TDB について、内輪の膨張を想定した径方向のすき間減少量が最大 0.1mm 発生した場合のすき間減少量と内・外輪の走行跡幅（球の当たり面の幅）を解析したグラフを示す。

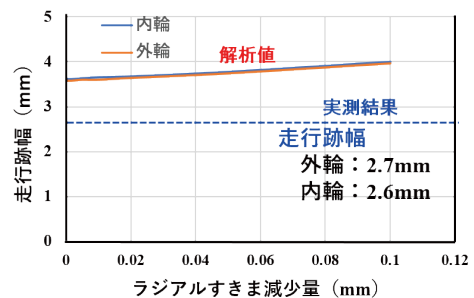


図 22 緊急着地を想定したすき間減少量と走行跡幅の関係

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

同図より分解調査で確認された走行幅（実測値）より解析値の方が3～4割大きいことがわかる。TDBが緊急着地すると内輪が摩擦熱で温度上昇・熱膨張し玉を外輪に押し付けるので緊急着地時の発熱の大小と外輪の走行跡幅の大小に相関があることから、解析の設定よりも実際の発熱が小さかったことを示す知見が得られた。

今回の解析ではタッチダウンリングや筐体等のTDB周辺部材への熱伝導を考慮しないモデルとしたこともあり、実測より解析の方が高い特性を示したものと思われる。

以上のことから、米倉山実証機用TDBの設計で採用した内輪の熱容量のみ考慮して緊急着地時の発熱によるすき間変化を計算する設計手法は、周辺部材への放熱を考慮しない分、熱マージンを向上させる結果が得られ、安全側かつ実用的な設計手法であると考えている。

今回得られた知見と別途行った設計検討から、最高回転数の毎分3,000回転からの緊急着地に対して、このTDB構成で対応可能な見通しが得られたと考えている。

5. まとめ

山梨県米倉山太陽光発電所の電力貯蔵技術研究サイトで、実証実験が進む超電導フライホイール蓄電システムの安定浮上、安定回転に必要な不可欠な4つのキーテクノロジー「高速回転・磁性流体真空シール(MFS)技術」、「制御型磁気軸受(AMB)技術」、「緊急時用制動抵抗(DBR)技術」、「緊急着地軸受(TDB)技術」について、その原理・特徴、米倉山実証機むけの設計および米倉山での実証試験で確認された知見についてまとめる形で紹介した。

- ①MFS技術に関しては最高3,000min⁻¹で高速回転する回転軸において10Paの希薄ガスヘリウム雰囲気と大気との分離が可能な低損失型の磁性流体真空シールの設計の要点とその安定性検証について述べた。
- ②AMB技術に関しては質量4,000kgの鋼製フライホイールを最高3,000min⁻¹まで非接触支持可能なAMBの設計の要諦と米倉山実証機での安定回転と低消費電力を実現したことを述べた。
- ③DBR技術に関しては質量4,000kgの鋼製フライホイールが3,000min⁻¹から30分間で停止可能な抵抗器の設計の要諦とフライホイールの蓄積エネルギーを熱エネルギーに変換するベンチ試験結果について述べた。
- ④TDB技術に関しては1,050min⁻¹から緊急着地させたTDBの分解調査結果から得た知見に基づき最高3,000min⁻¹用TDBの設計の考え方の妥当性について述べた。

この研究開発は、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」にて、(公財)鉄道総研、クボテック株式会社、古河電気工業株式会社、株式会社

ミラプロ、山梨県企業局の5者共同で実施してきたもので、本論文記載の内容はその実証機を有効活用する形でフライホイールを鋼製化して得た開発成果である。

謝辞

本論文執筆にあたり、MMS株式会社をはじめとする松井鋼材グループ各社ならびに一般社団法人摩擦接合技術協会、NTN株式会社、三立機工有限会社に多大なご協力を得ました。ここに改めて深く御礼申し上げます。

文献

- 1) 山下 知久, 小方 正文, 長嶋 賢: 実証実験が進む超電導フライホイール蓄電, Japan Railway Engineers' Association, Vol.59, No.9, pp40649-40652, 2016
- 2) 山下 知久, 長嶋 賢, 小方 正文, 清水 秀樹, 澤村 秀次, 小澤 孝仁, 向山 晋一, 宮崎 和也: 超電導フライホイールの開発①-米倉山実証機 2018 春-, 2018 年春季低温工学会講演概要集, Vol.96, p139, 2018
- 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, pp47-52, 2017
- 4) 秋元 利之, 藤田 敬喜: 鉄道電力供給における蓄電装置の応用(8), 鉄道と電気技術, Vol.25, No.5, pp63-66, 2014
- 5) <http://www.rtri.or.jp/press/pdf/20141031.pdf>
(参照日: 2019年3月11日)
- 6) 嶋崎 靖幸, 和田 高広, 小林 徹, 松井 義, 土肥 哲也, 清水 秀樹, 澤村 秀次, 山下 知久, 小方 正文: 超電導フライホイールの開発②-大口径高速回転磁性流体シール-, 2018 年春季低温工学会講演概要集, Vol.96, p141, 2018
- 7) 山下 知久, 小方 正文, 荒井 有気, 長谷川 均, 松井 義, 土肥 哲也, 上島 史生, 竹谷 剛: 超電導フライホイール蓄電装置用高熱伝導・複合回転シャフトの開発, 2014 年秋季低温工学会講演概要集, Vol.90, p30, 2014
- 8) 例えば, <http://www.matsuikozai.com/mms/pdf/20160825-01.pdf> (参照日: 2019年3月11日)
- 9) 特許第 6245475 号「異種金属複合部の製造方法」
- 10) 例えば, 超伝導・低温工学ハンドブック(1993) p.1098
- 11) 例えば, 回転機械設計者のための磁気軸受ガイドブック(2004) pp.8-17
- 12) 春井 眞二: 鉄道車両用抵抗器について, 鉄道車両工業, Vol.480, pp61-62, 2016
- 13) 大浦 行雄, 杉田 澄雄: ターボ分子ポンプ用タッチダウン軸受に関する研究, NSK テクニカルジャーナル, Vol.674, pp18-23, 2002