

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

宮崎 佳樹* 水野 克俊* 山下 知久**
中尾 健吾*** 向山 晋一*** 松岡 太郎#

Development of a Superconducting Magnetic Bearing Able to support Large Loads in a Flywheel Energy Storage System for Railway Applications

Yoshiki MIYAZAKI Katsutoshi MIZUNO Tomohisa YAMASHITA
Kengo NAKAO Shinichi MUKOYAMA Taro MATSUOKA

We have been developing a superconducting magnetic bearing (SMB) that has high temperature superconducting coils and bulks for a flywheel energy storage system (FESS). The FESS equipped with the SMB has been demonstrated at the mega photovoltaic power plant test site in Yamanashi Prefecture. The SMB that used superconducting material for both its rotor and stator was capable of supporting the flywheel which has the weight of 4000 kg without any contact, and has been operated stably for 5000 hours so far. Further increase of the storage capacity is required in order for the FESS to be applied to railways as the system that prevents cancellation of regenerative braking. In this paper, the development of the SMB which is able to support a large load of 147 kN using a new type coil structure for the improvement of FESS storage capacity is described.

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

鉄道総研は高温超電導コイルと高温超電導バルクを組み合わせた、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、そ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、軸受部での摩耗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。2015 年から山梨県米倉山（こめくらやま）にある太陽光発電

所において、太陽光発電出力の平滑化を目的とした系統連系など、SMB を用いたフライホイール蓄電システム（以下、米倉山実証機）の実証試験に取り組んできた（図 1、2）²⁾。米倉山実証機は、工場試験を含めて試験開始から延べ 5000 時間超の浮上を経験しているが、現在まで超電導のトラブルは一切なく、SMB の高い安定性を示す知見が得られたと考えている。また、疲労寿命に関する加速試験として、連続 100 サイクルの励磁・消磁、24 サイクルの冷却・昇温などを実施し、加速試験後に劣化がないことを確認するなど、SMB の信頼性の高さを裏付ける有益な知見も得られつつある³⁾。

このような開発・検証が進む超電導フライホイール蓄

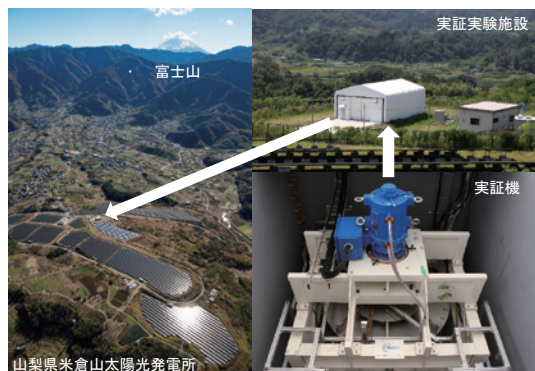


図 1 山梨県米倉山実証実験施設と実証機の外観

- * 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
- *** 古河電気工業株式会社
- # 元 古河電気工業株式会社

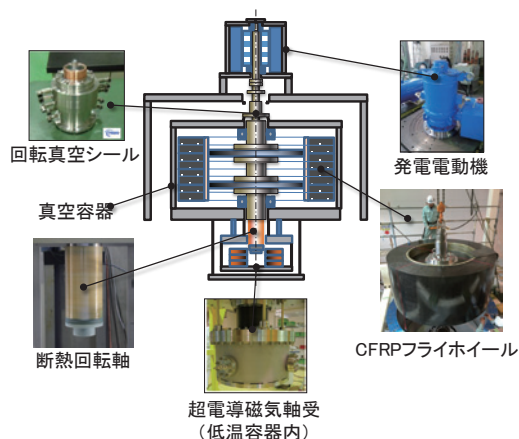


図 2 超電導フライホイールの装置構成

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

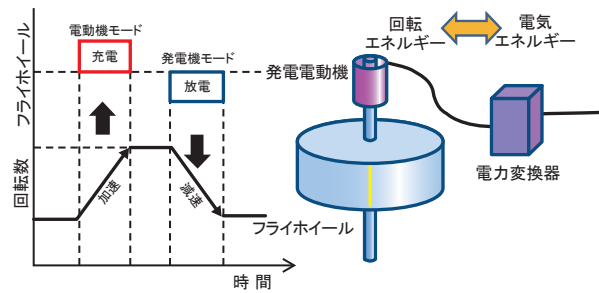


図3 フライホイール蓄電の原理

表1 各種蓄電システムとの比較

項目	二次電池	キャパシタ	フライホイール
蓄電速度	△	○	○
蓄電容量	○	△	○
放電速度	△	○	○
保守性	○	○	△

記号の意味 ○：優れている △：劣っている

電システムを鉄道へ適用するためには、さらなる蓄電容量の向上、SMBの大荷重化が求められる。そこで、浮上式鉄道用の実機大高温超電導コイルの開発において鉄道総研が考案した融着材法を適用して、新しい超電導コイルを設計・試作し、SMBの発生浮上力の検証試験を行ったので報告する。

2. 超電導フライホイール蓄電システムの原理と特徴

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り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。

図3にフライホイール蓄電の原理を示す。質量 M [kg]、半径 r [m]の円盤形状のフライホイールが、回転角速度 ω [rad/sec]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 [J]は(1)式で表わされる。

$$E = \frac{1}{4} M(r\omega)^2 \quad (1)$$

表1に、既存の蓄電システムの例として二次電池、キャパシタとフライホイール蓄電システムの比較を示す。二次電池やキャパシタは、出力と貯蔵エネルギー量（蓄電容量）の関係が成立する範囲に限りがあり、両者を自由

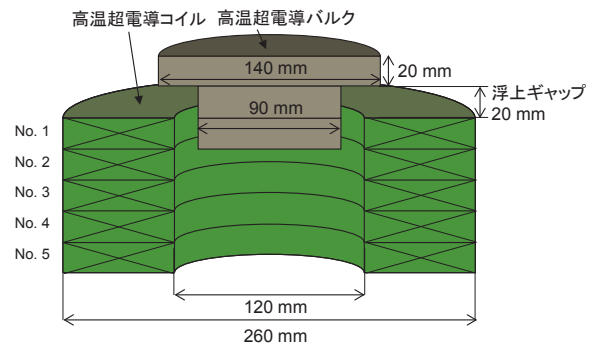


図4 超電導バルクと超電導コイル

表2 高温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	RE-Ba-Cu-O系
	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：ダブルパンチコイルの略

に設定することができない。一方、フライホイール蓄電システムでは、蓄電容量は(1)式より、出力は発電電動機の設計により、用途に応じて各々独立して設定することができる。さらに、回転数を計測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。

しかし、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、定期的な大規模な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保守性で二次電池やキャパシタに劣っており、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。

3. 大荷重対応超電導磁気軸受の開発

3.1 超電導磁気軸受の構成

図4にSMBを構成する高温超電導バルクと高温超電導コイルを示す。高温超電導コイルに通電・励磁すると、コイル周辺には大きな磁界が発生する。すると高温超電導バルクにはそれを打ち消すように遮蔽電流が流れ、コイルとバルクの間に強力な磁気反発力が発生する。この特性を利用してフライホイールの自重を非接触支持するのがSMBの役割である。

ロータ側に内蔵された高温超電導バルクは、直径140

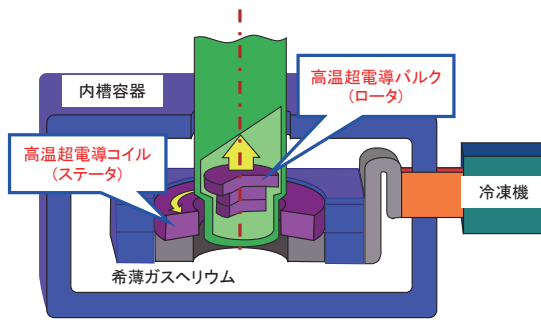


図5 超電導磁気軸受（SMB）の基本構成

mm, 厚さ 20 mm のバルク体 1 個と直径 90 mm, 厚さ 20 mm のバルク体 2 個を積層した構成となっている。高温超電導バルクは、第二世代高温超電導物質を QMG (Quench and Melt Growth) 法により作製した大型単結晶体を円盤形状に整えたものである(新日鐵住金製)^{4) 5)}。直径 140 mm 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 90 mm のバルク体は、主として回転軸を回転中心に案内する力の発生を担っている。

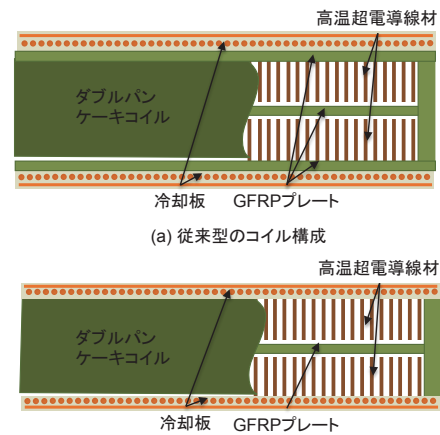
ステータ側となる高温超電導コイルは、幅 6 mm, 厚さ 0.1 mm のテープ状の希土類系高温超電導線材(Super-Power 社製)を外径 260 mm, 内径 120 mm の大きさにコイル巻きにしてユニット(ダブルパンケーキコイル)とし、これを 5 個積層した構造となっている。表 2 に高温超電導コイルの設計諸元を示す。各ダブルパンケーキコイルの間には冷却板が挟まれており、超電導バルクに近いコイルの冷却板は、回転に伴う渦電流発熱を抑制する目的で「低発熱銅すだれ材」を熱可塑性樹脂(融着材)で硬化成形したもの⁶⁾を用いた。

図 5 に SMB の基本構成を示す。高温超電導コイルは冷凍機に接続されており、高温超電導バルクはロータに内蔵されている。SMB を収めた内槽容器内にはガスヘリウムが充填されており、気体摩擦抵抗(風損)は十分小さく、熱伝達は大きくなるような圧力領域(10 Pa 程度)に設計されている⁷⁾。高温超電導コイルは冷凍機により伝導冷却し、高温超電導バルクはガスヘリウムにより冷却することで、液体窒素のような寒剤を用いない簡便なシステムとなっている。

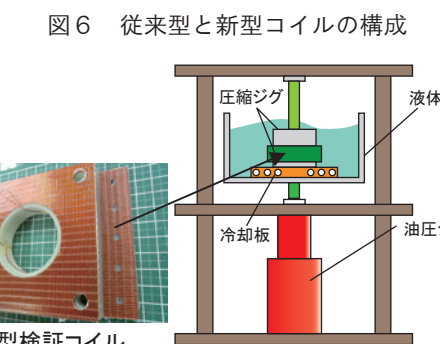
3.2 融着材法を適用した新型超電導コイル

フライホイール蓄電システムを鉄道へ適用する場合には、蓄電容量は数十 kWh が必要と考えられることから、SMB の負担荷重を米倉山実証機の 39.2 kN から 147 kN に大荷重化する必要がある。そこで、従来型に比べコイルの線積率を向上するため、高い電流密度と大きな浮上力を得ることができる融着材法を用いた新しいコイル構造を設計・試作し、発生浮上力の検証試験を行った^{8) 9)}。

図 6 に従来型と新型コイルの構成の断面図を示す。米



(a) 従来型のコイル構成



(b) 熱融着材法を適用した新型コイル構成

図6 従来型と新型コイルの構成

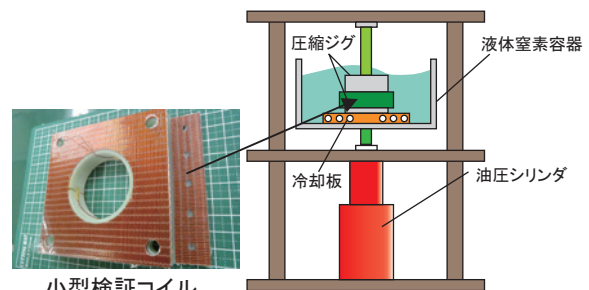


図7 圧縮試験装置

倉山実証機の SMB に用いられている従来型のコイル構成(図 6 (a))では、ダブルパンケーキコイルはガラス繊維強化プラスチック(GFRP)プレートでケーシングされ、上下に冷却板を取り付けている。伝熱経路は高温超電導線材-GFRP-冷却板となっており、各面の接触は圧縮荷重によって担保されている。より安定した冷却を得るには GFRP のような熱絶縁層を介さず、冷却板と高温超電導線材を直接固着させることが望ましい。

そこで新型コイルでは、浮上式鉄道用の実機大高温超電導コイルの開発成果を導入し^{10) 11)}、従来型コイル上下面の GFRP プレートを銅すだれ材の冷却板に置き換え、高温超電導線材と冷却板は熱可塑性樹脂で固着する構造として伝熱性を改善した(図 6 (b))。また、高温超電導線材の変形や移動を防ぐため、コイル内の GFRP プレートにも熱可塑性樹脂を施工している。新型コイル構造では、ダブルパンケーキコイル間のギャップが従来型コイルよりも縮小されることによりコンパクトとなり、高い電流密度と大きな浮上力を得ることができる。

3.3 小型検証コイルを用いた荷重試験

新方式コイルの製作性、耐荷重性などを検証するため、小型の検証コイルを製作し、予備試験を行った⁸⁾。小型検証コイルの仕様は内径 60 mm, 外径 96 mm, ターン数 124 × 2 層となっており、高温超電導線材には Super-Power 社製 SCS 6050-AP (6 mm 幅線材)を用いている。

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

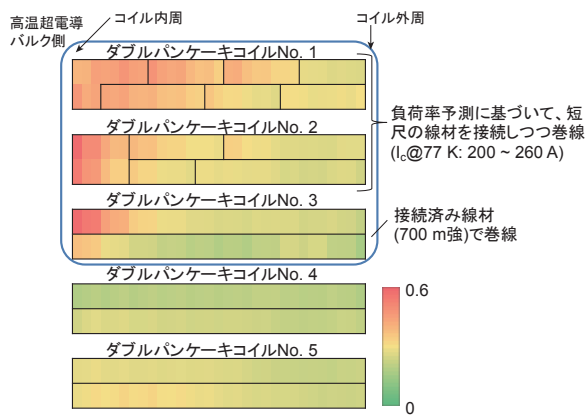


図8 超電導コイルの構成及び負荷率分布図

製作した小型検証コイルについて、液体窒素中での臨界電流 (I_c) 測定を実施した。製造過程での劣化等がないことを確認するため、熱可塑性樹脂の融着前後で通電を行い異常がないことを予め確認し、圧縮試験機による荷重試験を実施した。図7に圧縮試験装置の概略を示す。圧縮試験はコイルに通電した状態で実施し、コイル両端電圧の変化を測定した。圧縮荷重による臨界電流の変化や構造部材の損傷の有無を評価し、銅すだれ材による冷却性が改善されていること、および発生応力が実機と同じレベルの 50 kN の荷重を経験しても超電導コイルの臨界電流に有意な変化は確認されず、外観上も損傷がないことを確認できたため、米倉山実証機と同仕様の新型超電導コイルを融着材法で開発することとした。

4. 新型超電導コイルによる浮上力検証試験¹²⁾

4.1 超電導コイル構成及び負荷率予測

融着材法を適用した新型超電導コイルの設計にあたって、コイル励磁時の負荷率が最大 60% 以下となるよう

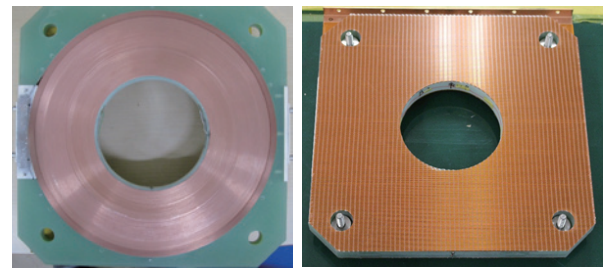


図9 超電導コイルの内部構造及び融着材法を適用した新型コイル外観

に使用線材の配置を検討した。電磁力解析から、高温超電導コイルの励磁電流が 160 A のとき、浮上力は 147 kN となる。図8にコイル温度 30 K、通電電流 160 A における負荷率分布予測を示す。なお、上2コイル (No.1, No.2) は短尺の線材を接続して製作しており、負荷率の高くなる箇所に臨界電流の高い線材が来るように配置している。そのため、負荷率は最大でも 0.6 (上から2段目と3段目のダブルパンケーキコイル最内周) に抑えられており、30 K で十分な余裕を持って励磁できることを確認した。

以上の検討から、5 個のダブルパンケーキコイルのうち、負荷率の高くなる高温超電導バルク側の3コイルに最新 (2016 ~ 2017 年度製 I_c : 200 A 以上 @77 K) の希土類高温超電導線材を用いて融着材法を適用した新型超電導コイルを製作し、浮上力検証試験装置による発生浮上力の検証試験を実施した。

4.2 147 kN 超の大荷重浮上力検証試験

図9に融着材法を適用した新型コイルの外観、図10に浮上力検証試験装置の概略構成を示す。高温超電導バルクに発生する浮上力は、装置上部 (大気側) に設置したロードセルによって測定した。高温超電導バルクを内蔵する断熱回転軸は、米倉山実証機と同仕様の構成で、

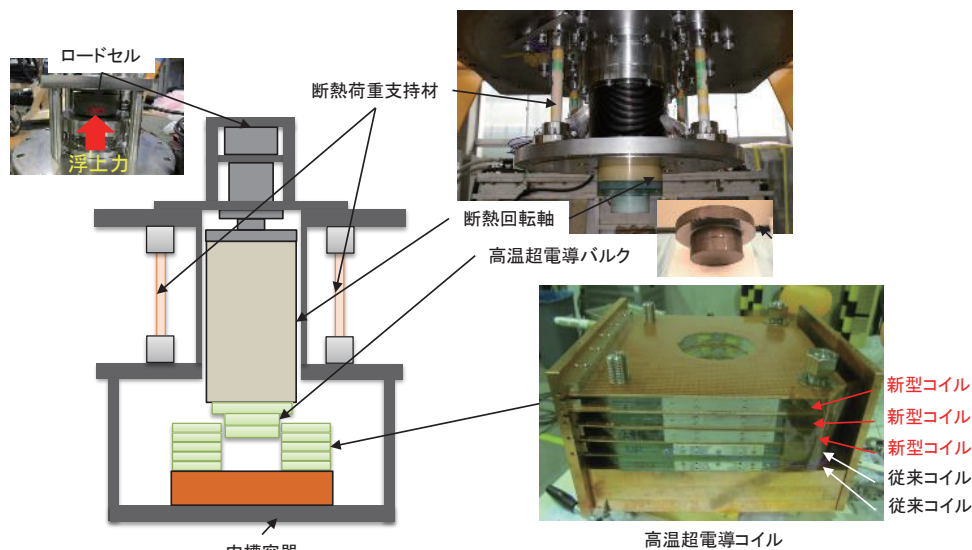


図10 浮上力検証試験装置

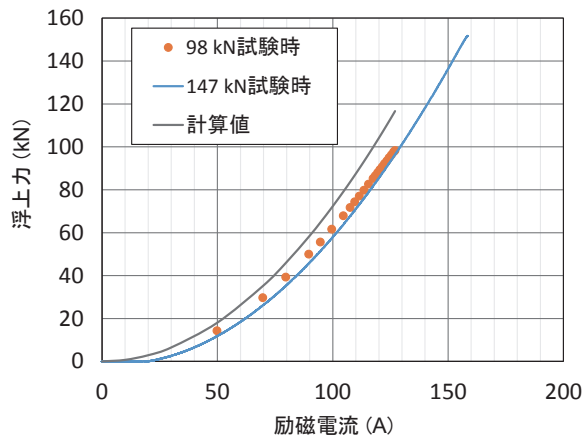


図 11 SMB 励磁電流に対する浮上力

98 kN の発生浮上力を経験したものである。高温超電導コイルと高温超電導バルクの反発力は後述する 4 本の断熱荷重支持材を介して外槽容器で支持する構造となっている。希薄ガスヘリウム雰囲気中で、冷凍機冷却により超電導コイル、超電導バルクを所定の温度以下としたのち、超電導コイルへの励磁を行った。図 11 に励磁電流に対する発生浮上力の関係を計算値、98 kN 試験時と合わせて示す。25 A 付近から浮上力が立ち上がり、25 A 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おり、160 A にて目標の浮上力 147 kN を発生することが確認できた。計算値との差は、高温超電導バルクへの磁束侵入の影響が考えられる。なお、浮上試験後には、超電導バルクの外観検査ならびに超電導コイルの単体通電試験を実施し、超電導コイル特性に変化のないことを確認している。以上のことから、融着材法を適用した新型超電導コイルによる大荷重対応 SMB が構成可能であることが実証されたと考えている。

5. 断熱荷重支持材

断熱荷重支持材の外観を図 12 に示す。断熱荷重支持材は SMB の低温容器に加わる浮上力を常温部へ伝達する役割を担うため、断熱性と耐荷重特性を両立する必要がある（図 10 参照）。このため熱絶縁特性と引張強度に優れるアルミナ繊維強化プラスチック（AFRP）を採用した。147 kN 浮上時に断熱荷重支持材が受け持つ反力は、1 本あたり 36.8 kN となる。断熱荷重支持材の安全率は 2 以上の確保を目安として、98 kN/本まで弾性変形領域として使用可能であることを実験的に確認したものを¹³⁾、浮上力検証試験装置に組み込んだ。図 13 に試作した断熱荷重支持材の引張試験の様子を示す。歪ゲージは AFRP ロッド中央部に設置した。

図 14 に浮上力検証試験前後の断熱荷重支持材の引張試験結果を示す。引張試験は、最大引張力 49 kN とした場合、AFRP の弾性率は応力歪線図より 42 GPa 程度

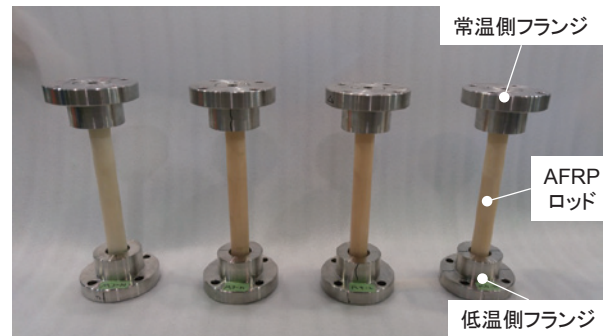


図 12 AFRP を用いた断熱荷重支持材

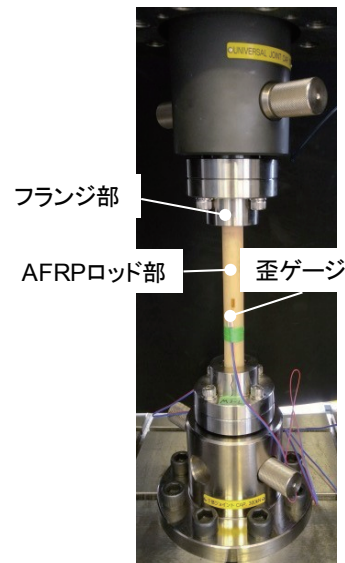


図 13 断熱荷重支持材引張試験

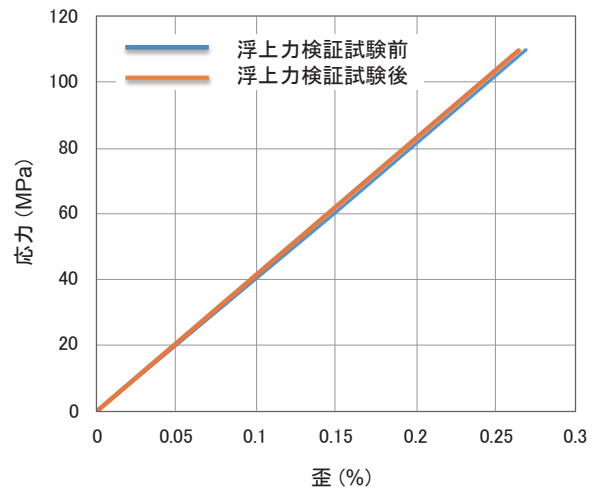


図 14 AFRP ロッド部の応力 - 歪線図

であり、引張試験の最大応力は 110 MPa であった。また 147 kN の浮上力検証試験前後で、断熱荷重支持材の特性に変化のないことを確認した¹⁴⁾。

引き続き、AFRP ロッドの強度（破断荷重）の評価ならびに期待寿命 30 年相当の繰返し引張荷重試験を実施し、SMB の重要な構成部材である断熱荷重支持材の信頼性について基礎データを蓄積していく予定である。

6. まとめ

フライホイール蓄電システムを鉄道へ適用する場合、蓄電容量は数十 kWh が必要と考えられることから、SMB の負担荷重を米倉山実証機の 39.2 kN から 147 kN に大荷重化する必要がある。そこで、浮上式鉄道用の実機大高温超電導コイルの開発において鉄道総研が考案した融着材法を適用して新しい超電導コイルを設計・試作し、発生浮上力の検証試験を行った。

開発した新型超電導コイルを浮上力検証試験装置に組み込み、超電導コイル、超電導バルクを所定の温度に冷却したのち、超電導コイルの通電・励磁を行った。その結果、励磁電流 160 A で目標とする浮上力 147 kN を得ることができた。浮上試験後には、超電導バルク外観、超電導コイル特性に変化のないことを確認しており、融着材法を適用した新型超電導コイルによる大荷重対応 SMB が構成可能であることが実証されたと考えている。

断熱荷重支持材についても、147 kN 対応のものを新たに設計・試作した。試作した断熱荷重支持材を浮上力検証試験装置に組み込み、浮上力検証試験に供した。浮上力検証試験の前後で引張荷重試験を実施し特性変化のないことが確認できた。

引き続き、期待寿命 30 年とした場合の実運用条件を想定した繰り返し励消磁、連続浮上試験などを行い、SMB ならびに断熱荷重支持材の信頼性評価を進める予定である。

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、ミラプロ、松井鋼材グループ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) 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發現状，低温工学，Vol. 46, pp. 73-80, 2011
- 5) 森田 充：溶融法によるバルク作製，応用物理，Vol. 62, pp.72-73, 1993
- 6) 宮崎佳樹，山下知久，長谷川均，松岡太郎，中尾健吾，原 照正，貝森弘行，松井 義，土肥哲也，上島史生：フライホイール蓄電装置用超電導磁気軸受の開発～磁気軸受低発熱化対策～，2015 年春季低温工学会講演概要集，Vol.91, p.15, 2015
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 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）—融着材法を適用した新型コイルの設計—，2017 年秋季低温工学会講演概要集，Vol. 96, p.166, 2017
- 10) 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
- 11) 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
- 12) 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）—大荷重試験結果—，2017 年秋季低温工学会講演概要集，Vol. 95, p.167, 2017
- 13) 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 —断熱荷重支持材—，2017 年春季低温工学会講演概要集，Vol. 95, p.127, 2017
- 14) 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 —断熱荷重支持材—，2017 年秋季低温工学会講演概要集，Vol. 95, p.168, 2017