テーマ解説

超電導フライホイール蓄電システム実証機の開発概要

長嶋 賢^{*1,†}

Development Overview of a Superconducting Flywheel Energy Storage System for Demonstration Tests

Ken NAGASHIMA^{*1,†}

Synopsis: A flywheel energy storage system can stabilize the fluctuating output of a solar photovoltaic power generation system, and it can also improve the efficiency of a railway system. To increase storage capacity, Railway Technical Research Institute (RTRI) has invented superconducting magnetic bearings with superconducting coils and bulk superconductors. That is, “total-superconducting magnetic bearing.” RTRI have started with basic research concerning “total-superconducting magnetic bearing,” and developed several prototypes of flywheel energy storage systems using “total-superconducting magnetic bearing.” At last, a demonstration machine for superconducting flywheel energy storage systems has been developed as a joint project of five enterprises subsidized by the New Energy and Industrial Technology Development Organization. This paper describes the background and outline of the research and development of this superconducting flywheel energy storage system.

Keywords: superconducting, flywheel energy storage system

(Some figures in this article may appear in color only in the electronic version)

1. はじめに

2015 年 9 月，国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の助成を受けたプロジェクトにおいて，（公財）鉄道総合技術研究所（以下，鉄道総研），クボテック株式会社，古河電気工業株式会社，株式会社ミラプロおよび山梨県企業局の 5 者で開発を進めた超電導磁気軸受を用いたフライホイール蓄電システム（以下，超電導フライホイール蓄電システム）の実証機が完成した¹⁾。

以来，この実証機を，山梨県が運営する米倉山大規模太陽光発電所と電力系統に連系させて，発電電力を安定させる実証試験を実施するとともに関連の要素技術開発を並行して進めてきた。本稿ではこの超電導フライホイール蓄電システムに至る開発経緯ならびに概要について述べる。

超電導フライホイール蓄電システム開発の発端は鉄道総研にある。鉄道総研の前身である日本国有鉄道の鉄道技術研究所では鉄道システムのさらなる高速化を目指して 1962 年から 50 年以上にわたってリニアモーターカーの研

Fig. 1 Magnetic levitation using superconducting coils.

究を進めてきているが，山梨リニア実験線での走行試験を通じて実用化の目処が立った 2005 年からリニアモーターカー（超電導リニア）で培った超電導技術等を在来方式鉄道へも幅広く役立てるような応用研究を本格的に開始することになった。その中で，鉄道システムの再生失効対策等に役立つ超電導フライホイール蓄電システムが研究開発テーマとして設定された。

従来のフライホイール蓄電装置向け超電導磁気軸受では超電導バルク体しか使わないが，後述する鉄道総研発案の超電導磁気軸受では超電導コイルも適用する構成であり，**Fig. 1** に示すように超電導リニアも超電導フライホイール蓄電システムも「超電導磁石の強力な磁気の力で，重量物（車体／ロータ）を浮上させ，高速走行／高速回転を実現

Received August 8, 2019

^{*1}（公財）鉄道総合技術研究所 浮上式鉄道技術研究部
〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38

Railway Technical Research Institute, 2-8-38 Hikari-cho,
Kokubunji, Tokyo 185-8540, Japan

[†] E-mail: nagashima.ken.16@rtri.or.jp

DOI: 10.2221/jcsj.54.351

Fig. 2 Application of the flywheel energy storage system to a railway system.

する。」という、技術的な課題に共通点があった。また、**Fig. 2** に示すように鉄道システムに蓄電装置を導入すれば、回生電力を貯蔵して省エネルギー効果がある他、輸送量増加等に伴う使用電力量増大時の電圧降下対策等にも役立つというニーズがあったことなどがその理由である。

2. 超電導バルクと超電導コイルによる「全超電導磁気軸受」

超電導磁気軸受を使った超電導フライホイール蓄電装置の自体は特に目新しい物では無く、高温超電導体が発見された 1986 年以降、世界中で盛んに開発が行われていた。超電導バルク体の有する「磁束ピン止め」効果を利用すれば、無制御で物体の安定な磁気浮上が実現できるからである。しかし、これらはほとんどがロータ側に永久磁石、ステータ側に液体窒素冷却の超電導バルク体という組み合わせの超電導磁気軸受であった。その場合、超電導磁気軸受の性能（支持荷重）は永久磁石の性能で決まってしまう、超電導バルク体の優れた性能を十分引き出せていないという問題があった。

この理由として、理想的な条件では超電導バルク体は磁気的な鏡のような働きをし（磁気鏡像効果）、永久磁石に向かい合った超電導バルク体の表面を鏡面としてその面の対称位置に永久磁石の磁気的な鏡像を作る効果を果たす。その「鏡像」と永久磁石の間に働く反発力が浮上力となるわけであるが、それでは永久磁石同士の間には働く力以上の力は望めない。そのため、電磁力密度（超電導バルク体の単位面積あたりに支持できる電磁力）は最大で 100 kN/m^2 程度にとどまっていた²⁾。超電導フライホイール蓄電装置で大きなエネルギーを蓄積するためには、重量物を回転させる必要がある。従って、従来は超電導バルク体と永久磁石を多数並べ、必要な電磁力を確保しなければならなかった。

そこで、**Fig. 3** に示すように永久磁石の代わりにより強力な磁場発生が可能な超電導コイルを使い、超電導バルク

Fig. 3 Conceptual diagram of a “total-superconducting magnetic bearing.”

Fig. 4 Conceptual diagram of the flywheel energy storage system using a “total-superconducting magnetic bearing” (as of 2007).

体と超電導コイルを用いるというのが、鉄道総研独自のアイデアである³⁾。こうすれば、同じ磁気鏡像効果でも超電導コイル（磁石）同士の間に働く力を得ることができると、電磁力密度は磁場の自乗に比例して飛躍的に向上する。これにより、同じ荷重であれば超電導バルク体の個数を減らすことも可能となる。ただし、回転するロータ側に超電導コイルを使うことは困難なため、ロータ側には超電導バルク体を使い、ステータ側に超電導コイルを使うという、いわゆる「全超電導磁気軸受」を適用する構成が考案された。**Fig. 4** はその 2007 年時点での「将来構想図」である³⁾。

3. 鉄道総研（国立）における基礎研究

鉄道総研では、上で述べた「全超電導磁気軸受」の成立性を検証するために基礎的な検討から開始した。

3.1 超電導バルク体と超電導コイルに働く電磁力測定

はじめに、超電導バルク体と超電導コイルの間に働く電磁力が予測通りであるのかどうか確認するために、標準的な超電導コイルとバルク体を用いた実験を行った。**Fig. 5** の左に実験に用いた装置の構成を示す。超電導コイル（室

Fig. 5 Schematic illustration of an experimental setup for measuring electromagnetic forces.

温ボア 100 mm, 最大発生磁場 3.5 T) の磁場分布によって超電導バルク体 (直径 46 mm, 厚さ 15 mm のペレット形状) が最大の電磁力を受ける位置 z が決まるので, あらかじめジャッキによってその位置に超電導バルク体を固定しておく。次に超電導バルク体を冷凍機 (GM サイクル冷凍機, 最低到達温度 10 K) で任意の温度に冷却し (ゼロ磁場冷却), 超電導コイルを励磁する。その際, 超電導バルク体に働く電磁力をロードセル (最大測定荷重 1000 N) によって計測するというものである。

ゼロ磁場冷却した超電導バルク体に磁場 B_z を外部から印加すると, 超電導バルク体の外周部には Fig. 5 の右に示すような超電導シールド電流 I_s が流れる。シールドの電流密度が大きく超電導バルク体内部への侵入深さを無視できる場合, I_s は超電導バルク体に鎖交する全磁束量 $\pi R_d^2 B_z$ を排除することから, 次式で表現できる⁴⁾。

$$I_s = \frac{\phi}{L_{cyl.}} = \frac{\pi R_d^2 B_z}{L_{cyl.}} \quad (1)$$

ここで R_d は超電導バルク体の半径, $L_{cyl.}$ は超電導シールド電流の自己インダクタンスである。自己インダクタンスは薄肉円筒コイルの公式⁵⁾から求めることができる。

また, この電流によって超電導バルク体に働く電磁力 F_z は超電導バルク体の有する電磁エネルギー U_{mag} の微分によって求められ, 下式のようになる⁴⁾。

$$F_z = -\frac{\partial U_{mag}}{\partial z} = -\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{2} L_{cyl.} I_s^2 \right) = -\frac{\pi^2 R_d^4}{L_{cyl.}} B_z \frac{\partial B_z}{\partial z} \quad (2)$$

右辺の $\frac{\pi^2 R_d^4}{L_{cyl.}}$ は $L_{cyl.}$ が超電導バルク体の半径 R_d と厚み t の関数として求められるので, 全て超電導バルク体の形状によって決定される因子である。

この因子は超電導バルク体の大きさ (直径あるいは半径) が大きくなるにつれて (バルク体の面積が大きくなる以上に) 大きくなるので, バルク体を複数並べるより, できるだけ直径の大きな超電導バルク体を使用することが浮上力を向上するのに効果的であることがわかる。

Fig. 6 Electromagnetic force F_z vs. Applied magnetic field B_z for a superconducting bulk.

一方, $B_z \frac{\partial B_z}{\partial z}$ は超電導コイルの磁場分布で決定される因子であり, 「磁気力場」と呼ばれる⁶⁾。

超電導バルク体と超電導コイルを用いて行った実験結果の一例を Fig. 6 に示す。超電導バルク体の位置は実験に用いた超電導コイルの磁気力場 (即ち磁場と磁場勾配の積) が最大となる $z=70$ mm (超電導コイルの高さ方向の中心位置から 70 mm 下) とした。これによると磁場 (グラフ横軸は超電導コイルの中心磁場) が増大するにつれ電磁力が増大している様子がわかる。また, バルク体の温度が低下するに従い, 電磁力が増大し, 図中の太い実線に漸近している。この実線は (2) 式によりバルク体の外周表面だけに超電導シールド電流が集中した場合の電磁力を求めたものである。前述した通り, 電磁力は磁気力場に比例している。

位置を固定している場合, B_z も $\frac{\partial B_z}{\partial z}$ も超電導コイルの発生磁場に比例することになるので, 電磁力は磁場の自乗に比例し, 計算結果は放物線となる。

実験結果から, 超電導バルク体の温度が上昇してバルク体表面を流れる超電導シールド電流の電流密度が低下するに従ってシールド電流がバルク体の内部に侵入し, 電磁力が低下するので, より臨界電流密度の高い, 超電導バルク体を使用することが浮上力の観点から効果的であることがわかる。

また, 超電導バルク体と超電導コイルの組合せにより, 当初の目論見通り, 従来の永久磁石と超電導バルク体の組合せと比較して電磁力密度を飛躍的に向上できることがわかった。

3.2 超電導バルク体の冷却に関する検討

ロータ側には超電導バルク体を使い, ステータ側に超電導コイルを使うという「全超電導磁気軸受」では, ロータ体側の超電導バルク体を冷却することが課題となる。フライホイールでは回転時の風損を低減するためロータ体周り

は真空に近い状態にすることが望ましく、真空に近い状態の中で浮上、回転する超電導体を冷却するのは困難である。

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⁷⁾。

Fig. 7 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。

Fig. 8 に真空度（圧力）を変数としたときの、実験データを熱伝導率の次元 ($\text{W/m}\cdot\text{K}$) で整理した値 (●印)、輻射による伝熱の理論計算値⁸⁾ (破線) と分子伝導による伝熱の理論計算値⁹⁾ (実線)、および気体摩擦抵抗 (空力抵抗) の理論計算値¹⁰⁾ (◆) を示す。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。

実験結果は試験装置の寸法にも依存するが、使用した試験装置ではヘリウムガスの圧力が 10^{-1} Pa 以下の低い圧力域では輻射伝熱の理論値と一致し、10 Pa 以上の圧力域では分子伝導の理論値と一致し、輻射伝熱レベルに比べて桁違いに向上することを確認できた。また、超電導バルク体と超電導コイルの間にヘリウムガスを入れるとフライホイールの回転に伴う気体摩擦抵抗が発生するが、気体摩擦抵抗が増大するのは 10^2 Pa 以上の領域である。従って 10 Pa 前後の圧力の希薄なヘリウムガスを容器の中に入れば、フライホイールの空力損失は少なく、超電導バルク体の冷却特性は真空に比べて桁違いに大きい領域があることが確認できた。超電導コイルを冷凍機で伝導冷却し、超電導バルク体を空間を介して冷却する場合、必要と想定した空間の熱伝導率は $0.1 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 以上であったので、バルク体の冷却は、輻射熱では不十分であるが、希薄なヘリウムガスによる分子伝導であれば十分であることが確かめられた。

3.3 初期の試作機

鉄道総研では 2008 年から複数の試作機を製作して回転試験を実施してきた。前項の基礎検討により、超電導バルク体と超電導コイルによる「全超電導磁気軸受」が目論見通りの電磁力が得られることと冷却は希薄なヘリウムガスで行うのが良さそうであることは分かったが、冷却に関しては初めからこの知見を活かすことはできなかった。

試作機 1 号機の超電導磁気軸受ではロータ側の超電導バルク体を液体窒素で 77 K まで冷却して、液体窒素の容器ごとフライホイールの回転軸として回転させることとした (**Fig. 9**)。なぜなら、ステータ側のコイルはコストを考え、当時、最も安価に入手できる低温超電導 NbTi コイルを採用し、冷凍機で 4 K まで冷却して実験に供したためである。

超電導コイルは同一の形状を有する 2 つの超電導コイルを上下に直列に配置して、それぞれを異極励磁するもので、発生する磁場分布をカスプ磁場と呼ぶ。カスプ磁場は

Fig. 7 Schematic illustration of an experimental setup for measuring heat transfer properties.

Fig. 8 Pressure dependence on heat transfer and windage drag.

Fig. 9 First prototype of the flywheel energy storage system using a “total-superconducting magnetic bearing.”

Fig. 10 Second prototype of the flywheel energy storage system using a “total-superconducting magnetic bearing.”

コイル 2 つを異極励磁することによって、コイル間の空間の磁場を弱め、一方、磁場勾配の値は強め、あう効果がある。上述した (2) 式の「磁気力場」は確保しつつ、液体窒素温度で使用する超電導バルク体の臨界電流密度を低減させないように、超電導バルク体周辺の磁場を低減する設計思想によるものである。

この実験機は最終的には、2,000 kg のフライホイールを支持して最大 $3,600 \text{ min}^{-1}$ の回転数で回転することに成功した¹¹⁾。ただフライホイールの回転軸に液体窒素を貯めて試験する構造である限り長時間の回転を行うことができず、そのままの姿で実用化することは難しいものであった。

そこで 3.2 項の知見に基づいて、2010 年に製作した小型の試作機第 2 号機 (**Fig. 10**) では、超電導コイルを高温超電導コイルとし、冷凍機から伝導冷却されるステータ側の高温超電導コイルから希薄ヘリウムガスを介してロータ側の超電導バルク体を間接的に冷却する方式を採用した¹²⁾。ただし、製作した時点では REBCO 線材の高温超電導コイルはまだ入手性や製作性の点で採用が困難であったため BSCCO 線材の高温超電導コイルを適用して製作した。

Fig. 11 Experimental setup for evaluating the “total-superconducting magnetic bearing.”

この試作機では、希薄ヘリウムガスの冷却効果を実験的に確認することができた。また、高温超電導線材の断面形状に由来する、扁平なパンケーキ巻線構造は超電導磁気軸受に必要な「磁気力場」を確保する上で有利であることや、直径の異なる複数の超電導バルク体を組み合わせることにより、超電導磁気軸受の浮上力と径方向の案内力を実現する構成等について有益な知見を得た。また、磁気カップリングを用いて回転体に非接触でトルク伝達する方式を初めて採用し、ロータの完全非接触浮上回転にも成功した。

その後、試作機第 2 号機の超電導磁気軸受の考え方を継承し、同じく BSCCO 線材の高温超電導コイルを使って性能向上した超電導磁気軸受を 1 対製作した。そして **Fig. 11** のような試験装置で実機相当の荷重試験および回転試験を実施した。1 対の超電導磁気軸受を上下に 1 組ずつ向かい合わせて配置し、それぞれの軸受で発生する電磁力（浮上力）を回転軸上で相殺することにより、大質量のフライホイールが無くても、荷重・回転試験を実施可能である。本装置で最大荷重 60 kN (6,000 kgf 相当) の確認等を行った¹³⁾。ここまでは国土交通省の国庫補助金を受けて行った、超電導磁気軸受の基礎研究であった。

4. 米倉山太陽光発電所（山梨）での実証試験

4.1 実証試験に至る経緯

上述したように元々は鉄道総研で鉄道向けに開発がはじまった「全超電導磁気軸受」を適用した超電導フライホイール蓄電システムであるが、用途としては発電電力の変動が大きい再生可能エネルギー発電所の発電電力平滑化にも適用できるものである。

一方、山梨県は元来、県の施策として再生可能エネルギー、中でも太陽光発電を積極的に導入する方針であり、発電電力を平滑化する蓄電システムを求めていた。山梨県は蓄電システムに対するニーズがあり、太陽光発電所というフィールドを有していた。一方、鉄道総研には超電導軸受の技術があった。そこで両者の間で 2011 年に技術協力協定が結ばれ、協力して蓄電システムの開発を進めることとなった¹⁴⁾。2012 年から 2015 年度までの 4 年間の計画で NEDO の「安全・低コスト大規模蓄電システム技術開発」プロジェクトの中で、フライホイール蓄電システムの事業化に意欲もあり技術力も有するクボテック株式会社、古河電気工業株式会社、株式会社ミラプロを加えた 5 者体制で、超電導フライホイール蓄電システムの開発と実証試験を進めることとなった。

4.2 実証試験の目的

山梨県甲府市の米倉山には東京電力(株)の 10 MW 級太陽光発電所の他に山梨県の 1 MW 級太陽光発電所があり、発電を行っている。今回の実証試験では、この山梨県所有の 1 MW の太陽光発電所に超電導フライホイール蓄電システム実証機を設置し、山梨県の 1 MW 級太陽光発電所と連

Fig. 12 Configuration of the flywheel energy storage system demonstration machine.

系して、電力安定化実証試験を行うことを目的とした。

4.3 実証機の構成

Fig. 12 に実証機の構造を示す。基本的な部分は **Fig. 4** の構想図に近い物となった。プロジェクト開始から実証試験までの期間が短かく、この中で実証機の設計・製作から実証試験を行わなければならないため、開発は超電導磁気軸受等の独自技術に注力することとし、その他の部分はできる限り汎用技術を流用する方針とした。このため、ラジアル方向の補助軸受に関しては、既存の制御型磁気軸受を使用し、発電電動機についても汎用の永久磁石型同期機を使用している。

エネルギー貯蔵部分であるフライホイールは試験開始当初は CFRP 製とし、直径 2 m、高さ 0.9 m であった。質量は回転軸等を加えておよそ 4000 kg であった。

高速で回転するフライホイールは回転に伴う空力的な損失（気体摩擦抵抗）を防ぐために真空容器に収納されている。このフライホイールと発電電動機とは回転軸を介して接続されている。空気中で回転する発電電動機と真空中で回転するフライホイールを接続し、真空を仕切りながら大きなトルクを伝達するために、磁性流体を適用した高速回転シールを使用している¹⁵⁾。

本実証機の実績は、前述の 4,000 kg の CFRP 製フライホイールを最高 3,000 min⁻¹（実績値）で回転させて、出力 300 kW、蓄電容量 25 kWh まで確認した¹⁶⁾。近年は鉄製のフライホイール（同じく 4,000 kg）を組み込んで 3000 min⁻¹ までの回転数で試験を実施している。

4.4 超電導磁気軸受

Fig. 13 にはフライホイールを回転軸の下から支持する超電導磁気軸受の超電導コイルと超電導バルク体による「全超電導磁気軸受」の構成を示す。基本構成は **Fig. 11** の超電導磁気軸受に近いが、実証機では超電導コイルは REBCO 線材の高温超電導コイルを初めて採用した。超電導バルク体も同じく REBCO 高温超電導材料である。超電導コイルは外径 260 mm×内径 120 mm のダブルパンケーキコイルを 5 個積層し、超電導バルク体は外径 140 mm×厚さ 20 mm の浮上用の大径バルク 1 枚と外径 90 mm×厚さ 20 mm の径方向案内用小径バルク 2 枚を積層している。**Fig. 14** は実際の超電導磁気軸受の写真である。冷凍機で 50 K 以下まで冷却

Fig. 13 The basic configuration of a "total-superconducting magnetic bearing."

Fig. 14 Photograph of the "total-superconducting magnetic bearing."

した後、超電導コイルに約 80 A 通電すると、超電導バルク体に 4,000 kg のフライホイールを浮上支持することのできる約 40 kN の浮上力が発生し、この時の超電導コイルに対する超電導バルク体の浮上高さが 20 mm であることを実験と解析で確認した¹⁷⁾。

最近では REBCO 線材の通電性能が向上し、また大荷重対応の超電導コイルも開発できたため、上記とほぼ同じ超電導バルク体と超電導コイルの構成で、約 150 kN までの浮上力を発揮することができるようになってきた。これは鉄道総研で独自に開発を進めてきたコイル製作手法（融着材法）により、研究者が設計・開発した独自の巻線機を用いて研究者自らが巻線・製作した超電導コイルを適用することによって得られた成果である¹⁸⁾。

今回の超電導フライホイール蓄電システムは、冷却が簡便であるという特長もある。**Fig. 13** に示すように、ステータ側の超電導コイルを冷凍機で伝導冷却し、コイルを介して間接的に希薄なヘリウムガス（10 Pa）でロータ側の超電導バルク体を冷却する構造となっている。ガスによる冷却は 10 Pa（大気圧の 1 万分の 1）で十分であり、その圧力であれば、空力的な損失は無視できるほど小さいことは **Fig. 8** に示したとおりである。超電導磁気軸受をコンパクト化したため、軸受を冷凍する冷凍機の電力も少なくできた。現在の実証試験では試作機と言うこともあり余裕をみ

Fig. 15 Overview of the demonstration test facilities for the prototype flywheel energy storage systems.

て冷却温度を 20 K 台まで下げているが、それでも実測の消費電力は 3 kW 程度である。また、液体窒素などの冷媒を使っていないので、冷凍機のスイッチを入れるだけで運転できる扱いの容易な装置となっている。

4.5 実証試験結果

Fig. 15 に完成した実証機、実証施設、米倉山太陽光発電所の写真を示す。左の米倉山太陽光発電所の写真には東京電力(株)の 10 MW 級太陽光発電所と山梨県の 1 MW 級太陽光発電所が写っているが、実証機が接続されているのは山梨県の 1MW 級太陽光発電所である。

Fig. 16 に山梨県の 1 MW 級太陽光発電所との系統連系試験結果の一例を示す。この時はフライホイールの回転数は $1000 \sim 1800 \text{ min}^{-1}$ の間で運転した。グラフより太陽光発電電力(上段の実線)が時間の経過と共に数百 kW 変動するのに対応する形で超電導フライホイール蓄電システム実証機の充放電電力(下段の実線)が秒単位で充放電を繰り返す、太陽光発電所の出力(中段の実線)を平滑化している様子が確認でき、所期の効果を実証できた¹⁶⁾。システムの蓄電効率についてはエネルギーの変換効率が支配的であり、80%以上を確認している。

5. おわりに

本稿で述べた、超電導フライホイール実証機の特徴を列記すると下記ようになる。

- ・超電導バルク体と超電導コイルの組合せにより磁気軸受の電磁力密度を飛躍的に大きくできたので、必要な浮上力に対して軸受がコンパクトになり超電導体の使用量が低減・低コスト化が可能となった。
- ・上記の磁気軸受コンパクト化と REBCO 高温超電導材料の適用により、運転温度を 30 K まで上げることが可能となったので冷凍機の消費電力を数 kW 程度に低減することができた。
- ・太陽光発電出力平滑化効果を実証することができた。

Fig. 16 Examples of validating the solar photovoltaic power smoothing effect using the flywheel energy storage system.

これらの成果を受ける形で鉄道総研、山梨県及び東日本旅客鉄道株式会社(JR 東日本)は、鉄道事業において「超電導フライホイール蓄電システム」を実用化することを目指し、3 者で「鉄道用超電導フライホイール蓄電システムの技術開発に関する基本合意書」を 2018 年 3 月 29 日に締結した¹⁹⁾。鉄道総研が本稿冒頭で想定した、構想が具体的に動き出したわけである。

超電導フライホイール蓄電システムを実用化するためには、今後、特に超電導磁気軸受等の新規技術について信頼性・耐久性の確認や安全性の確認、低コスト化等を進めていく必要がある。

なお今回紹介した研究開発は一部、国土交通省の国庫補助金あるいは、NEDO プロジェクトの助成を受けて実施したものである。

参考文献

- 1) 公益財団法人鉄道総合技術研究所、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：「次世代フライホイール蓄電システム実証試験施設が完成しましたー大規模太陽光発電及び電力系統との連系試験を開始ー」、鉄道総研 News Release, <https://www.rtri.or.jp/press/2015/u83mct00000001sl-att/20150903-1.pdf> (2015 年 9 月 3 日付, 2019 年 8 月 31 日閲覧)
- 2) N. Koshizuka, K. Matsunaga, N. Yamachi, A. Kawaji, H. Hirabayashi, M. Murakami, M. Tomita, S. Une, S. Saito, M. Isono, H. Nasu, T. Maeda and F. Ishikawa: "Construction of the stator installed in the superconducting magnetic bearing for a 10 kWh flywheel", Physica C **412-414** (2004) 756-760
- 3) K. Nagashima, H. Seino, Y. Miyazaki, Y. Arai, N. Sakai and M. Murakami: "Force density of magnetic bearing using superconducting coils and bulk superconductors", RTRI Report **21**, 9 (2007) 29-34 (in Japanese)
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 **21**, 9 (2007) 29-34

- 4) K. Nagashima, Y. Iwasa, K. Sawa and M. Murakami: "Controlled levitation of bulk superconductors", IEEE Trans. Appl. Supercond. **10** (2000) 1642-1648
- 5) 電気学会編：電気磁気学，電気学会 (1950) 262
- 6) O. Ozaki, T. Kiyoshi, S. Matsumoto, J. Fujihira and H. Wada: "Development of a magnetic force booster", IEEE Trans. Appl. Supercond. **14** (2004) 1663-1665
- 7) Y. Tanaka, T. Furusawa, M. Nakauchi and K. Nagashima: "Heat transfer characteristics under cryogenic, low pressure environments", Physica C **469** (2009) 1862-1865
- 8) 吉田 駿：「伝熱学の基礎」，理工学社 (2002) 4-7, 125-132
- 9) 株式会社アルバック編：「真空ハンドブック」，オーム社，(2007) 133-136
- 10) 古屋善正，村上光晴，山田 豊：「流体力学」，朝倉書店 (2005) 197-200
- 11) Y. Arai, H. Seino and K. Nagashima: "Development of flywheel test equipment for flywheel energy storage system with cryo-cooled superconducting magnetic bearings", RTRI Report **25**, 3 (2011) 41-46 (in Japanese)
荒井有気，清野 寛，長嶋 賢：「冷凍機冷却型超電導フライホイール用試験装置の開発」，鉄道総研報告 **25**, 3 (2011) 41-46
- 12) H. Seino, H. Hasegawa, M. Ikeda, K. Nagashima and M. Murakami: "Numerical analysis and evaluation of electromagnetic forces in superconducting magnetic bearings and non-contact permanent magnetic clutch", RTRI Report **24**, 1 (2010) 29-34 (in Japanese)
清野 寛，長谷川均，池田雅史，長嶋 賢，村上雅人：「超電導磁気軸受と永久磁石磁気クラッチの電磁力解析と評価」，鉄道総研報告 **24**, 1 (2010) 29-34
- 13) Y. Arai, K. Yoshizawa, H. Seino, T. Kashiwagi and K. Nagashima: "Contactless rotation of high temperature superconducting magnetic bearing over 20-kN load", Abstracts of CSSJ Conference **87** (2013) 89
荒井有気，吉澤圭祐，清野 寛，柏木隆行，長嶋 賢：「荷重 20kN 超高温超電導磁気軸受による非接触回転試験」，低温工学・超電導学会講演概要集 **87** (2013) 89
- 14) 山梨県，公益財団法人鉄道総合技術研究所：「グリーンイノベーションの推進～超電導等を用いた電力貯蔵技術の研究の推進に関する協定の締結について～」，鉄道総研 News Release, <https://www.rtri.or.jp/press/2011/20110606.html> (2011 年 6 月 6 日付，2019 年 8 月 31 日閲覧)
- 15) 公益財団法人鉄道総合技術研究所：「超電導フライホイール向け高速回転軸用真空シールを開発しましたー大容量の超電導フライホイール蓄電システムが可能にー」，鉄道総研 News Release, <https://www.rtri.or.jp/press/pdf/20141031.pdf> (2014 年 10 月 31 日付，2019 年 8 月 31 日閲覧)
- 16) T. Yamashita, M. Ogata, H. Matsue, Y. Miyazaki, M. Sugino and K. Nagashima: "Reliability verification of superconducting flywheel energy storage systems and its application to railway system", RTRI Report **31**, 1 (2017) 47-52 (in Japanese)
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 **31**, 1 (2017) 47-52
- 17) K. Nakao, T. Matsuoka, M. Furukawa, T. Yamashita, Y. Miyazaki and K. Mizuno: "Development of magnetic bearing for HTS flywheel energy storage system –Result of load weight test and validate for stable lifting in unusual situation–", Abstracts of CSSJ Conference **91** (2015) 13
中尾健吾，松岡太郎，古川 真，山下知久，宮崎佳樹，水野克俊：「フライホイール蓄電装置用超電導磁気軸受の開発～荷重支持試験と異常時を想定した検証試験結果」，低温工学・超電導学会講演概要集 **91** (2015) 13
- 18) Y. Miyazaki, K. Mizuno, T. Yamashita, K. Nakao, S. Mukoyama and T. Matsuoka: "Development of a superconducting magnetic bearing able to support large loads in a flywheel energy storage system for railway applications", RTRI Report **32**, 3 (2018) 35-40 (in Japanese)
宮崎佳樹，水野克俊，山下知久，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 **32**, 3 (2018) 35-40
- 19) 公益財団法人鉄道総合技術研究所：「鉄道用超電導フライホイール蓄電システムの技術開発に関する山梨県及び東日本旅客鉄道株式会社との基本合意書の締結について」，鉄道総研 News Release, https://www.rtri.or.jp/press/2018/is5f1i0000005eyf-att/20180329_001.pdf (2018 年 3 月 29 日付，2019 年 8 月 31 日閲覧)

長嶋 賢 1966 年 2 月 8 日生。1989 年千葉大学理学部物理学科卒業。同年(財)鉄道総合技術研究所勤務。主として磁気浮上式鉄道用超電導磁石の開発に従事。1995 年から 3 年間，(財)国際超電導産業技術研究センター・超電導工学研究所にて高温超電導バルクの研究に従事。低温工学・超電導学会，電気学会会員。工学博士。