特 集

超電導磁気軸受を用いた超電導フライホイール蓄電

The Superconducting Flywheel Energy Storage Systems using the Superconducting Magnetic Bearing

山下 知久^{*1}, 小方 正文^{*2}, 長嶋 賢^{*1}

Tomohisa YAMASHITA, Masafumi OGATA, Ken MAGASHIMA

The flywheel energy storage systems (FESS) can be stabilized the fluctuation of the output of the solar photovoltaic power generation system. FESS has been developed as a joint project of five enterprises subsidized by the New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO). Key technology of FESS is the high temperature superconducting magnetic bearing (SMB). It consists of high temperature superconducting coils for its stator and high temperature superconducting bulks for its rotor. The FESS demonstration machine was reinstalled in the power plant, and the examination of the charge/discharge with solar photovoltaic power by the FESS demonstration machine was operated.

Keywords: Flywheel energy storage systems, High temperature superconducting magnetic bearing, Solar photovoltaic power, Stabilization, Renewable energy.

(2016 年 9 月 8 日受付)

1 緒言

2015 年 9 月に山梨県米倉山（こめくらやま）太陽光発電所に超電導フライホイール蓄電の実証実験施設が完成（Fig. 1），日照条件に影響され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]。本稿では鉄道総研が考案した超電導磁気軸受をコア技術とする超電導フライホイール蓄電の原理，特徴，米倉山での実証実験結果紹介そしてこの新しい機械式蓄電の鉄道への展開について述べる。

Fig. 1 Over view of demonstration test facilities for FESS.

2 超電導フライホイール蓄電

超電導フライホイール蓄電（以下，FESS と略す）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。FESS は，超電導磁気軸受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化学電池のような繰り返し充放電によるサイクル数の制限はない。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 FESS も選択肢になると考えられる。

FESS の開発は発電電力の系統安定化検証を目的に NEDO（国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構）の助成を受けて，2012 年度より（公財）鉄道総研，クボテック（株），古河電気工業（株），（株）ミラプロ，山梨県企業局の 5 者が共同で実施してきたものである。

Fig. 2 Principle of operation for FESS.

連絡先： 山下 知久，〒185-8540 国分寺市光町 2-8-38，公益財団法人鉄道総合技術研究所 浮上式鉄道技術研究部，

e-mail: yamashita.tomohisa.91@rtri.or.jp

^{*1} 浮上式鉄道技術研究部

^{*2} 浮上式鉄道技術研究部 低温システム

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。

Fig. 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 $\omega[\text{rad/s}]$ で回転する場合の貯蔵エネルギー量 $E[\text{J}]$ は、下記のとおり表される。

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

すなわち貯蔵エネルギー量 E はフライホイールの質量、大きさ、回転数で設計できることがわかる。貯蔵した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で、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できる仕組みである。

回転数を常に監視しているので貯蔵エネルギーの残量が即時に確認できること、さらに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ことも化学電池と差別化できる大きな特徴である。

Table 1 に、既存の蓄電システムとの違いについて、二次電池、キャパシタを例にして比較したものを示す。表より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用途に合わせて両者を自由に設定することができない

Table 1 Comparison with various type of batteries.

Item	Rechargeable batteries	Capacitor	Flywheel
Charge rate	△	○	○
Storage volume	○	△	○
Discharge rate	△	○	○
Maintainability	○	○	△

Note ○: Excellent △: Inferior

Fig. 3 Comparison with Lithium-ion battery (Operating life).

Fig. 4 Primary structure of SMB.

が、フライホイール蓄電装置の貯蔵エネルギーの出し入れは発電電動機の設定出力により、貯蔵エネルギー量（容量）はフライホイールの質量、大きさ、回転数の設計により、それぞれ決められる。このように FESS は出力と蓄電容量を用途に応じて独立して設定することが可能で、設計の自由度が高いことも特徴である。

Fig. 3 に示すように、リチウムイオンバッテリーに代表される二次電池では充放電の繰り返し回数が高くなるほど許容貯蔵エネルギー量の上限が、初期の数分の 1 以下に制限される劣化特性を有するが、フライホイール蓄電の場合は、二次電池のように電気化学的な反応がないため、充放電の繰り返し回数が数百万回となっても許容貯蔵エネルギーの上限が変化しないと考えられる。また、鉛等の有害物質も排出しないことから環境にも優しい蓄電システムといえる。

しかし保守性の点でフライホイール（従来型）が二次電池やキャパシタより劣るのは、フライホイールの荷重を支える軸受に定期的かつ大がかりなメンテナンスが不可欠なためであり、フライホイール蓄電の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の荷重を機械的損失なく浮上させる超電導磁気軸受で、Fig. 4 にその基本構成を示す [2]。

4 官民共同プロジェクトでの開発推進

FESS の研究開発は、超電導リニアの開発で培った鉄道総研の超電導技術を在来の鉄道にも幅広く役立てる応用研究としてスタートしたものであるが、その技術は「短周期・多回数のエネルギー貯蔵」用途の再生可能エネルギー発電所の発電電力の出力平滑化にも適用可能である。一方、山梨県は自前の水力発電所を所有している関係から、施策として電源開発を重要なテーマと位置付けており再生可能エネルギーのうち太陽

光発電も積極的に導入する方針を打ち立てて東京電力と共同で米倉山に総出力 10MW の太陽光発電所の建設を進め、その発電電力の出力平滑化に役立つ蓄電システムを模索していた。このような経緯から 2011 年、鉄道総研と山梨県の間で技術協力協定が結ばれ、両者が協力して超電導技術を活用した蓄電システムの開発を進めていくことになった [3]。

2012 年度には NEDO の「安全・低コスト大規模蓄電システム技術開発」に民間会社 3 社(クボテック(株)、古河電気工業(株)、(株)ミラプロ)と共に公募し、鉄道総研が技術取りまとめを担う形で 5 者共同の開発体制となった。こうして FESS の実証機の開発と山梨県米倉山メガソーラ発電所での実証実験を実施する官民 5 者共同開発プロジェクトが発足し、FESS の開発が本格化するに至った。

5 FESS 実証機の特徴

実証実験の目的は、山梨県米倉山メガソーラ発電所のうち山梨県が所有する出力 1 MW の太陽光発電所に FESS 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。

Fig. 5 に山梨県米倉山の出力 1 MW の太陽光発電所の出力変動例を示す。グラフ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も時々刻々変動し、その変動幅は破線間のように概ね 300 kW であることから実証機の出力は 300 kW と設定した。なお、フライホイールの蓄電容量は NEDO の公募要件(300 kW, 20 分間)に沿って 100 kWh と設定し、フライホイールには大径化と高速回転化を両立する材料として CFRP を採用することとした。Table 2 に FESS 実証機の主要仕様を、Fig. 6 に構成を各々示す。今回のプロジェクトは、FESS 実証機開発と実証試験完了ま

Fig. 5 Characteristics of solar PV power.

Table 2 Specifications of FESS.

Output power	300 kW
Storage capacity	100 kWh
Maximum rotating speed	6000 min ⁻¹
Flywheel material / mass / dimensions	CFRP / 4000 kg / 2 m in diameter and 0.9 m in height
Thrust bearing	Magnetic bearing composed of RE high temperature superconducting coils and bulks
Radial bearing	Active magnetic bearing for assistance

Fig. 6 System configuration of FESS demonstration machine.

での開発期間が 4 年間と短いことから、超電導磁気軸受と CFRP フライホイールを実証機開発の最重要課題(コア技術)と位置づけて、開発のリソースを集中する開発方針とした。

以下、FESS 実証機のコア技術である CFRP フライホイールと超電導磁気軸受について詳述する。

(1) CFRP フライホイール

FESS 実証機のエネルギー貯蔵を担うのが、フライホイールである。その形状は外径 2 m, 内径 1.4 m, 厚さ 0.1 m の円環状の CFRP 製リングを 9 個積層させたものであり、CFRP フライホイールの全体形状は直径 2 m, 高さ 0.9 m である。質量は金属製の回転軸を含めると 4000kg となる。この CFRP フライホイールが毎分 6000 回転すると目標の 100 kWh のエネルギーが貯蔵される設計である。

CFRP フライホイールの特徴は毎分 6000 回転時に発生する遠心力に対して必要な強度が得られるよう、炭素繊維が周方向と径方向に配列可能な独自の製法を適用したところにある。これをエポキシ樹脂で成形し、最終的に直径 2 m の世界最大級の大径 CFRP フライホイールを製作した [4]。

エネルギー貯蔵量は CFRP 製リングの積層個数により任意に設定可能な設計となっている。

なお、大気中に設置される発電電動機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は、鉄道総研が開発した世界最高速の高速回転・真空シールを介して直結され、フライホイールの回転に必要な動力を伝達する機構を採用した。真空シールの信頼性・耐久性は要素試験で検証した [5]。

(2) 超電導磁気軸受

今回開発した FESS 実証機の場合、小型の超電導磁気軸受が発生する強力な磁気反発力を利用し 4000 kg のフライホイール本体の荷重 (39.2 kN) を 20 mm 浮上させ非接触支持する設計である。Fig. 7 に FESS 実証機の超電導磁気軸受における磁界解析結果を示す [6]。

強力な磁界を発生する高温超電導コイル (以下 HTS コイルと称す) と高温超電導バルク体 (以下 HTS バルク体と称す) を所定の温度以下に冷却し、HTS コイルに通電し励磁すると HTS バルク体側にそれを打ち消すように遮蔽電流が発生し、HTS コイルと HTS バルクの間には磁気反発力が発生する。この特性を利用し

Fig. 7 Magnetic field analysis for SMB.

Table 3 Specifications of HTS coil.

Item	Specification
Wire	Product of Superpower
Width of tape	6 mm
Thickness of tape	0.1 mm
Inner diameter	120 mm
Outer diameter	260 mm
Height of the coil	17.6 mm

Fig. 8 The appearance of the SMB stator coil unit.

てフライホイールを機械的な損失なく安定浮上させるのが超電導磁気軸受の役割である。

HTS バルク体は HTS コイル線材に使用されているものと同じ第二世代高温超電導物質 (単結晶) を円盤形状に整えたものである。

FESS 実証機の HTS コイルは、幅 6 mm、厚さ 0.1 mm のテープ状の高温超電導線材を外径 260 mm、内径 120 mm の大きさにコイル巻きしたユニットを 5 個積層させたもので、詳しい仕様を Table 3 に示す。Fig. 7 に HTS コイルの巻き線作業終了時の写真を示す。

超電導磁気軸受のロータにあたる HTS バルク体は、直径 140 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 個を積層して構成されている。直径 140 mm の HTS バルク体の主たる役割は、回転軸を含めたフライホイール本体の自重を支える浮上力の発生を担い、直径 90 mm の HTS バルク体の主たる役割は、回転軸を回転中心に案内する力の発生を担う設計思想である。

Fig. 9 に、今回開発した超電導磁気軸受のコイル通電電流と浮上力の関係を示す [7]。

グラフより浮上力は通電電流の自乗に比例し、超電導磁気軸受の超電導コイルを冷凍機で 50 K (マイナス 223 °C) 以下まで冷却すれば、超電導コイルに約 80 A 通電するとフライホイール本体の自重を支えるのに必要な浮上力 39.2 kN が発生することがわかる。

なお、HTS 線材の採用により、超電導磁気軸受を運転可能な温度に維持するのは冷凍機による伝導冷却で賄えるため、液体窒素等の液体寒剤は不要となりその分取り扱いが容易な設計となっている。

また、超電導磁気軸受が 50 K (マイナス 223 °C) で運転可能になったことで消費電力は出力の 1% 以下に抑えることが可能となり冷却コストの低減も実現することができた。

Fig. 9 Relationship between current and levitation force.

次に、Fig. 10 に示すような超電導磁気軸受のロータ回転時の異状振動に伴う HTS コイル冷却板に発生する電磁誘導発熱に対して独自の発熱低減策を考案したので詳述する。

超電導磁気軸受のロータ回転時の異状振動の形態としては、Fig. 11 に示すような上下運動、偏心運動、コンカル運動が考えられ、いずれの運動に対しても銅製の冷却板のままでは電磁誘導（渦電流）による発熱が避けられない。そこで銅製のコイル冷却板の発熱を低減するためには発生する渦電流ループを物理的に制限することに着目し、冷却板の細分化による渦電流発熱低減策の検討を進めた。Fig. 12 に冷却板の細分化と渦電流発熱の関係に関してロータが 100 Hz で±2 mm 上下運動した場合の解析例を示す。グラフより冷却板を 200 分割以上にすれば実用上問題のないレベルまで渦電流発熱を低減できることがわかる。

そこで低発熱 HTS コイル冷却板は、鉄道総研が独自に考案した直径 1 mm [280 分割に相当] の無酸素銅線をポリエステル繊維でスダレ織りしたものを、90 度向きを変えて積層し樹脂成形した構成とした。

Fig. 13 に FESS 実証機に採用された低発熱 HTS コイル冷却板の外観と銅線をスダレ織りした部分の拡大写真を示す。FESS 実証機では HTS コイル各部の温度を常時計測しているが非回転時と毎分 3000 回転までのロータ回転時との温度差は見られず、HTS コイルの冷却状態は安定していることが確認されている。このことは今回開発した低発熱 HTS コイル冷却板がコイル冷却と低発熱化を両立する知見が得られたと考えている [8]。

Fig. 10 Revolution when the heat load behavior.

Fig. 11 Primary revolution motion.

Fig. 12 Relationship between eddy current loss and cooling plate division.

Fig. 13 Low-heat load cooling plate using OFHC wire screen structure.

6 実証実験が進む FESS

実証機は山梨県米倉山メガソーラ発電所に併設された実証実験施設に設置され、2015 年 9 月より太陽光発電電力の平滑化効果検証等を目的とした出力 1 MW の太陽光発電所と系統連系等の実証試験を開始した。

Fig. 15 に太陽光発電所との系統連系試験結果の一例を示す。グラフより太陽光発電電力（上段のライン）が時間の経過と共に数百 kW 変動するのに対応する形で実証機（下段のライン）が秒単位で充放電を繰り返し、太陽光発電所の出力（中段のライン）を平滑化している様子がわかる。このことから、超電導フライホイールが太陽光発電電力の平滑化に有効でその効果を実証することができたと考えている [9]。米倉山での実証実験では回転速度向上試験に手間取り、蓄電容量は 25 kWh の実証に留まったものの、出力は最高出力 300 kW を確認できた。25 kWh は京急電鉄逗子線で稼働中の従来型フライホイール蓄電装置の蓄電容量に相当し、実用性のある容量である [10]。

また、FESS の期待寿命 20 年に対するコア技術の信頼性や耐久性に関する加速試験を実施中で、FESS のコア技術である超電導磁気軸受に加わる負担荷重やストレスに対する設計の妥当性や構造部材の機械的な強度マージンに関する有益な知見が得られている。

Fig. 15 Solar PV power smoothing effect validation example according to FESS.

今後米倉山実証機の設計上限(98kN)での浮上試験を行い、超電導磁気軸受が現行の設計で 98kN 超の大荷重に対応可能なことも検証する予定である。

6 鉄道への展開

鉄道用の電力貯蔵装置には、回生失効電力の有効利用をはじめ、電車線の供給電力の安定化のための電圧降下対策や変電所のピーク電力低減のための電力負荷変動対策、停電時の最寄り駅までの緊急走行 (BCP) 対策など、線区の事情に応じる必要がある。

鉄道総研では FESS が出力とエネルギー貯蔵量を独立に設定できる設計の自由度の高さを生かして、今後さまざまな線区ニーズに応じた FESS の設計と実用化開発を継続して進めていきたいと考えている。今回の FESS 実証機の開発成果に対して、Innovation for Cool Earth Forum (ICEF) の 2015 年総会において投票総数 150 件の中からトヨタのミライ等と共に ICEF Top 10 Innovations にも選ばれたことは、この新しい蓄電技術が国際的にも注目され始めたことを意味したものと考えている[11]。

7 結言

本稿では鉄道総研が考案した超電導磁気軸受をコア技術とする FESS の原理、特徴、米倉山での実証実験結果紹介ならびにこの新しい機械式蓄電の鉄道への展開について述べた。

- ・ FESS 実証機を完成させ、2015 年 9 月より山梨県米倉山で実証実験を開始し、最高出力 300kW、蓄電容量 25kWh を実証した。
- ・ 系統連系試験を実施し、太陽光発電電力の平滑化効果とコア技術の超電導磁気軸受の安定浮上特性を実験的に確認できた。

鉄道総研としては米倉山で得られた知見をベース

に今後、鉄道用の FESS の実用化にむけた設計を進めていく予定である。

謝辞

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」にて実施したものである。

FESS 実証機の開発は、日本工営 (株)、イーグル工業 (株)、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。

参考文献

- [1] 「次世代フライホイール蓄電システム実証実験施設が完成」 (参照日: 2016 年 9 月 8 日)
http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100443.html
- [2] 長嶋 賢 他: 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.
- [3] 「グリーンイノベーションの推進」 (参照日: 2016 年 9 月 8 日)
<http://www.rtri.or.jp/press/2011/20110606.html>
- [4] 「次世代フライホイール蓄電システム向け大径 CFRP 製フライホイールの完成」 (参照日: 2016 年 9 月 8 日)
http://www.kubotek.com/info/pdf/news/2015/CFRP_fly_wheel_nr_150202.pdf
- [5] 「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」 (参照日: 2016 年 9 月 8 日)
<http://www.rtri.or.jp/press/pdf/20141031.pdf>
- [6] 向山 晋一 他: 超電導フライホイール蓄電装置用超電導磁気軸受の開発～冷却試験結果, 2014 年秋季低温工学会講演概要集, Vol. 90, p. 89, 2014.
- [7] 古川 真 他: 超電導フライホイール蓄電装置用超電導磁気軸受の開発～RE コイル設計, 2014 年秋季低温工学会講演概要集, Vol. 90, p. 90, 2014.
- [8] 宮崎 佳樹 他: 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.
- [9] 山下 知久 他: 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, pp. 40649-40652, 2016
- [10] 秋元 利之 他: 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, pp. 63-66, 2014.
- [11] Innovation for Cool Earth Forum (ICEF) 総会資料 (参照日: 2016 年 9 月 8 日)
<http://www.icef-forum.org/pastevent/outcomes/index.html>