

# 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

山下 知久\*    小方 正文\*\*    松江 仁\*\*  
宮崎 佳樹\*\*    杉野 元彦\*\*\*    長嶋 賢\*

## Reliability Verification of Superconducting Flywheel Energy Storage Systems and its Application to Railway System

Tomohisa YAMASHITA    Masafumi OGATA    Hitoshi MATSUE  
Yoshiki MIYAZAKI    Motohiko SUGINO    Ken NAGASHIMA

The flywheel energy storage systems (FESS) can stabilize 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. 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 installed in the power plant, and the examination of the charge/discharge of solar photovoltaic power by the FESS demonstration machine was executed. SMB's test for the levitation time of 3000 hours, 120 times of current application and 24 times of heat cycles could verify the reliability of the SMB.

キーワード：フライホイール蓄電，高温超電導磁気軸受，太陽光発電電力，安定化，再生可能エネルギー

### 1. はじめに

2015年9月に山梨県米倉山（こめくらやま）の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し（図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<sup>1)</sup>。

本報告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，米倉山メガソーラ発電所での実証実験結果や米倉山の実証機を活用した信頼性検証試験の結果を紹介するとともに，得られた知見からこの新しい機械式蓄電システムの電気鉄道への応用展開の考え方について述べる。

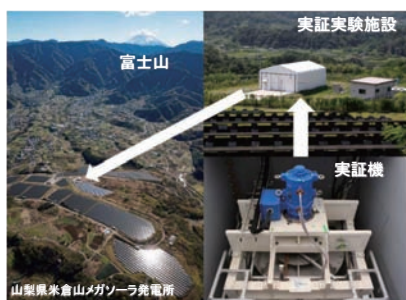


図1 山梨県米倉山実証実験施設と実証機の外観

\* 浮上式鉄道技術研究部  
\*\* 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 低温システム研究室  
(現 東海旅客鉄道株式会社)

### 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（FESS）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（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。FESSも選択肢の一つになると考えられる。

FESSの開発は太陽光発電電力の系統安定化検証を目的に，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）の助成を受けて2012年度より（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者が共同して実施してきたものである。

### 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。

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

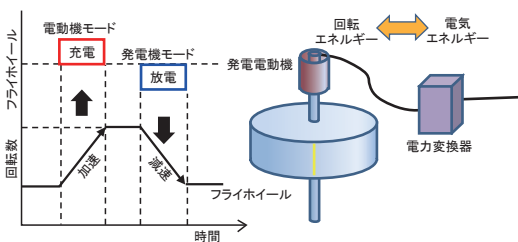


図2 フライホイール蓄電の原理

図2にフライホイール蓄電の原理を示す。質量  $M$ [kg]、半径  $r$ [m] の円盤形状のフライホイールが、回転角速度  $\omega$ [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  $E$ [J] は式(1)で表される。

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

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)・下降(減速)させ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放電する仕組みである。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二次電池と差別化できる大きな特徴である。

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

表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。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、また貯蔵エネルギー量(蓄電容量)はフライホイールの質量、大きさ、回転数の設定条件によりそれぞれ決められる。このようにフライホイール蓄電は、出力と蓄電容量を用途に応じて独立して設定できる設計の自由度の高さも特徴である。

しかし表1において、フライホイール(従来型)が二次電池やキャパシタより保守性の点で劣るのは、フライホイールの荷重を支える軸受には定期的に大がかりなメンテナンスが不可欠なため、フライホイール蓄電の普

<基本構成>

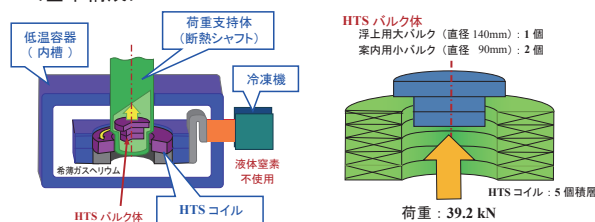


図3 超電導磁気軸受(SMB)の基本構成

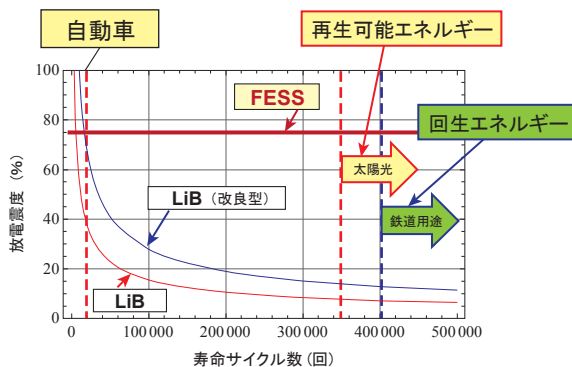


図4 リチウムイオンバッテリーとの比較

及にむけた技術的な課題となっていた。

この課題を解決したのが、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、図3に鉄道総研が考案した基本構成を示す<sup>2)</sup>。

図4に二次電池の寿命サイクル数と放電深度(充放電回数に対する劣化特性で、充放電可能な許容上限を示す指標)との関係を示す。グラフよりリチウムイオンバッテリー(LiB)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以下に制限されるという特性を有するが、FESS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。

鉄道の回生失効対策では期待寿命20年に対して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が、太陽光発電等の再生可能エネルギーも概ね同等の充放電サイクルに対応する必要がある点に着目し、太陽光発電電力の平滑化効果を検証することは、今後の鉄道用途への本格展開にむけて、有益なデータが得られる先行検証試験と位置付けた。

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、その技術は前述のとおり「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、鉄道の回生失効対策等にも展開が期待されることから、鉄道総研では本件を鉄道応用への先行検証と位置付けた。

一方、山梨県は自前の水力発電所を所有し売電事業を実施している関係から、施策として県内での電源開発を重要なテーマと位置付けて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、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推進しており、その発電電力の出力平滑化に役立つ蓄電システムを求めている。

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<sup>3)</sup>。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。こうして本 FESS の実証機の開発と山梨県米倉山太陽光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、本 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、山梨県米倉山の太陽光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。図 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 の公募要領（300 kW, 20 分間）から 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。

表 2 に FESS 実証機の主要仕様を、図 6 にその構成を各々示す。今回のプロジェクトは、実証機開発と実証試

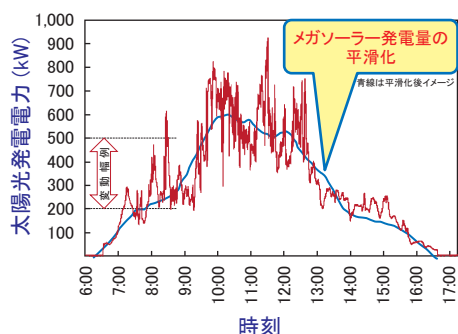


図 5 米倉山太陽光発電所の出力変動例

表 2 FESS 実証機の主要仕様

項目	設計諸元
出力	300 kW
貯蔵エネルギー量	100 kWh
最高回転数	6000 min <sup>-1</sup>
フライホイール	主要材料 CFRP, 質量 4000 kg 直径 2 m, 高さ 0.9 m
スラスト軸受	超電導磁気軸受
ラジアル軸受	制御型磁気軸受

験完了までの開発期間が 4 年間で短いことから、SMB 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<sup>4)</sup>。

以下に、FESS 実証機のコア技術である CFRP フライホイールと SMB について詳述する。

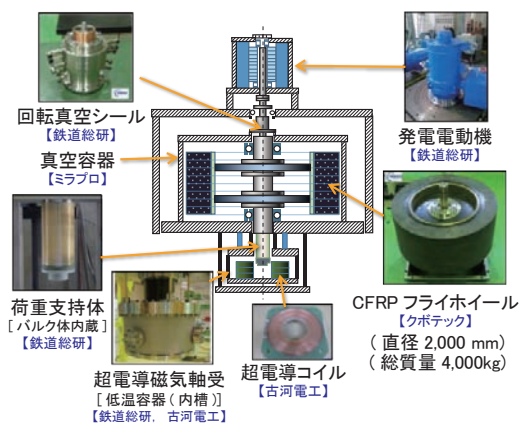


図 6 FESS 実証機の構成

#### 5.1 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て 4,000 kg である。この CFRP フライホイールが毎分 6,000 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 6,000 回転する際に発生する遠心力に対して必要な強度が得られるよう、炭素繊維を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<sup>5)</sup>。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ている<sup>6)</sup>。

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

5.2 SMB（超電導磁気軸受）

今回開発した FESS 実証機の場合、4,000 kg のフライホイール本体の自重 (39.2 kN) を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て 20 mm 浮上させ、非接触支持する設計である。図 7 に FESS 実証機 の SMB における磁界解析結果を示す<sup>7)</sup>。

強力な磁界を発生する高温超電導コイル（以下 HTS コイル）と高温超電導バルク体（以下 HTS バルク体）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 バルク体の間には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を機械的な損失なく安定浮上させるのが SMB 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を原材料として、QMG 法で作成した大型の単結晶を円盤形状に整えたものである<sup>8)</sup>。

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

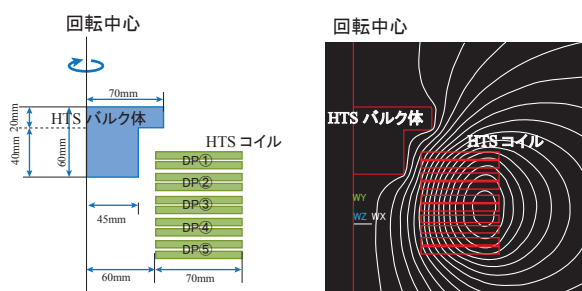


図 7 超電導磁気軸受 (SMB) における磁界分布

表 3 高温超電導 (HTS) 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：ダブルパンチキーコイルの略

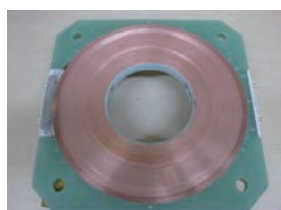


図 8 HTS コイルの内部構造 (巻き線完了時)

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、詳細仕様を表 3 に示す。図 8 に HTS コイルの巻き線作業終了時の写真を示す。

SMB 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うことであり、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である。

図 9 に、今回開発した SMB のコイル通電電流と浮上力の関係を示す<sup>9)</sup>。グラフより浮上力は通電電流の 2 乗に比例し、SMB の HTS コイルを冷凍機で 50 K (マイナス 223 °C) 以下まで冷却し超電導コイルに約 80 A 通電すれば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、SMB を運転可能な温度の維持は冷凍機による伝導冷却で可能となった。その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、SMB を 20 K (マイナス 253 °C) で運転した場合の冷凍機の消費電力は 2.9 kW と実測され、実証機の出力 300 kW の 1% 以下であることが検証された。

なお、50 K (マイナス 223 °C) で運転した場合は、運転温度が上昇した分だけ熱負荷が減少することから冷凍機の消費電力は 0.9 kW と推定され、出力に対する消費電力の比率はさらに小さくなる。

SMB は、万一冷凍機が停止した場合でも高速回転するフライホイールが安全に停止するまでの 30 分間、安定浮上を継続できるよう、低温容器に保冷部材を配置し HTS コイルと HTS バルク体の温度上昇を抑制する保冷設計を採用している。

なお、SMB の電源には専用の UPS を備え、停電しても 1 時間通電可能な設計としている。図 10 に冷凍機を停止した場合の HTS コイルと HTS バルク体の温度上昇特性を示す。グラフより冷凍機を停止して 30 分経過時の温度は HTS コイル、HTS バルク体とも 33K であり、

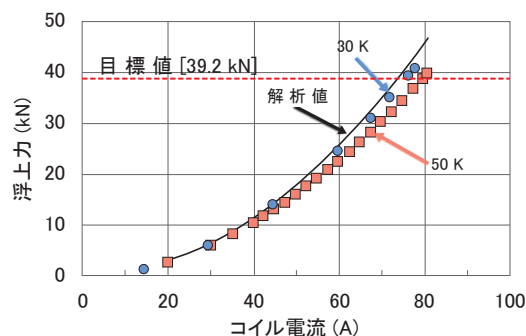


図 9 コイル電流と発生浮上力の関係

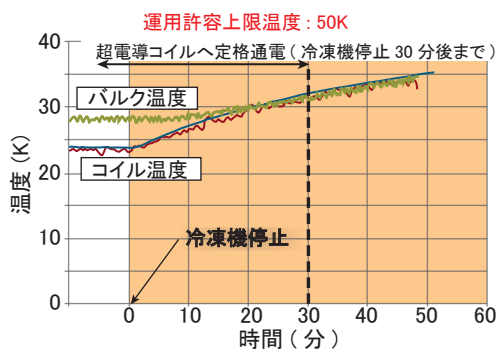


図 10 冷凍機停止時の保冷特性検証試験結果

運用許容上限温度 50K に比べて低温であり、安定浮上可能なことがわかる。ちなみに冷凍機停止後の運用許容上限温度 50 K までの温度上昇は 148 分間かかることも確認しており、FESS 実証機の SMB の保冷設計の妥当性と安全性を実証できた<sup>10)</sup>。

## 6. FESS 実証機を活用した信頼性検証試験

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の効果検証等を目的とした出力 1MW の太陽光発電所との系統連系等の実証試験を開始した。

図 11 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 FESS 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。

図 12 に系統連系試験時の SMB における回転数と浮上高さ制御結果の一例を示す。グラフより試験開始から終了までの約 7 時間、太陽光発電電力の変動に応じた充放電サイクルに伴い FESS 実証機の回転数の上昇・下降の繰り返しに対し SMB の浮上高さに影響はなく制御範囲（基準値  $\pm 0.5$  mm）内で長時間安定浮上できることが確認できた。

このことから FESS 実証機による太陽光発電電力の平滑化効果を実証するデータが得られたと考えている<sup>11)</sup>。

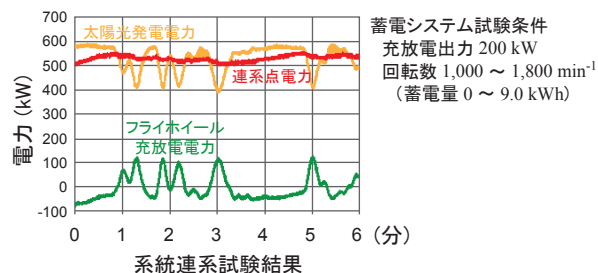


図 11 FESS による発電電力の平滑化効果検証例

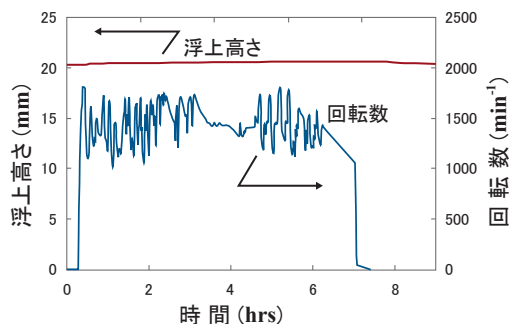


図 12 系統連系試験時の SMB の安定性検証例

また FESS 実証機を活用した検証試験で SMB は、工場試験を含めて 2015 年 9 月の実証実験試験開始から延べ 3,000 時間超の浮上試験を実施してきたが、この間の超電導に係わるトラブルは一切なく、SMB の運用安定性を裏付ける基礎データが得られたと考えている。

なお FESS 実証機では、回転速度向上試験に時間がかかり、蓄電容量は 25 kWh の実証に留まったものの、電力は実証機の最高出力 300 kW で出し入れ可能なことを実証できた。

今回検証された蓄電容量 25kWh は、京急電鉄逗子線で稼働中の従来型のフライホイール蓄電装置の蓄電容量に相当し、鉄道用として実用性のある蓄電容量である<sup>12)</sup>。

NEDO の助成期間は 2016 年 2 月末で終了したものの、継続して FESS 実証機を活用したコア技術の信頼性や耐久性に関する加速試験を実施している。具体的にはコア技術の SMB の期待寿命 20 年に対して、励磁・消磁を想定回数の 5 倍にあたる 100 回繰り返す加速試験や冷却・昇温を想定回数の 1.2 倍にあたる 24 回繰り返す加速試験の実施である。

図 13 に前述の加速試験後に SMB を構成する 5 つの HTS コイルの  $I_c$  および n 値の実測結果を工場出荷時の特性と比較したものを示す。ここで  $I_c$  は超電導状態を維持可能な最大電流を、n 値は超電導状態から常電導転移する際の発生電圧の特性に基づく評価指標であり、目安として  $I_c$  が 30 A 以下に、n 値が 20 を下回った場合に被試験体の HTS コイルが劣化したものと判断する。グラフより各コイル共に加速試験前後の  $I_c$  に有意な差は見ら

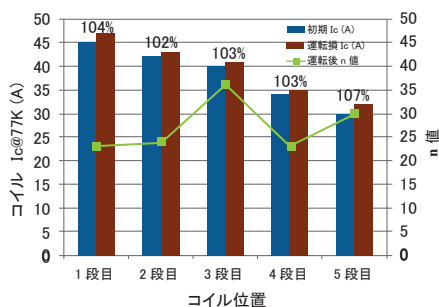


図 13 HTS コイルの期待寿命に対する信頼性検証結果

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

れず、n 値も 20 以上であることから今回の試験で HTS コイルの劣化は無く、期待寿命 20 年に対しコア技術の超電導磁気軸受の信頼性の高さを裏付ける有益な知見が得られたと考えている<sup>13)</sup>。

7. 鉄道への応用展開

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、さまざま線区事情に応じる必要がある。

鉄道総研としては山梨県米倉山で得た知見や開発成果「短周期、多数回のエネルギー貯蔵技術として超電導フライホイール蓄電の有効性検証」をベースに FESS の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、鉄道用の FESS の設計と実用化を目指した開発を継続して進めていく予定である。

8. おわりに

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、山梨県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。

なお FESS 実証機の開発成果に対し、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 に選ばれた<sup>14)</sup>。今回の受賞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。

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、(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ある。

なお、本 FESS 実証機の開発は日本工営株式会社、イーグル工業株式会社、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) <http://www.rtri.or.jp/press/pdf/20150903-1.pdf>  
(参照日：2016 年 9 月 30 日)
- 2) 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
- 3) <http://www.rtri.or.jp/press/2011/20110606.html>  
(参照日：2016 年 9 月 30 日)
- 4) 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
- 5) [http://www.kubotek.com/info/pdf/news/2015/CFRP\\_fly-wheel\\_nr\\_150202.pdf](http://www.kubotek.com/info/pdf/news/2015/CFRP_fly-wheel_nr_150202.pdf) (参照日：2016 年 9 月 30 日)
- 6) <http://www.rtri.or.jp/press/pdf/20141031.pdf>  
(参照日：2016 年 9 月 30 日)
- 7) 向山 晋一, 松岡 太郎, 笠原 甫, 古川 真, 宮崎 佳樹, 荒井 有気, 吉澤 佳祐：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, 2014 年秋季低温工学会講演概要集, Vol.90, p.89, 2014
- 8) 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
- 9) 古川 真, 松岡 太郎, 笠原 甫, 山下 知久, 荒井 有気, 水野 克俊, 吉澤 佳祐：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
- 10) 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, 2015 年春季低温工学会講演概要集, Vol.91, p.13, 2015
- 11) 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, pp.40649-40652, 2016
- 12) 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, pp.63-66, 2014
- 13) 中尾 健吾, 松岡 太郎, 向山 晋一, 山下 知久, 小方 正文, 宮崎 佳樹：超電導フライホイール蓄電装置用超電導磁気軸受 (SMB) の開発～SMB の安定性検証～, 2016 年春季低温工学会講演概要集, Vol.93, p.128, 2016
- 14) [http://www.icef-forum.org/pastevent/outcomes/pdf/icef\\_top10\\_4.pdf](http://www.icef-forum.org/pastevent/outcomes/pdf/icef_top10_4.pdf)  
(参照日：2016 年 9 月 30 日)