

実証試験用超電導フライホイール蓄電装置の開発

長谷川 均* 松江 仁**
長嶋 賢*** 山下 知久***

Flywheel Energy Storage System Using Superconducting Magnetic Bearings for Demonstration Tests

Hitoshi HASEGAWA Hitoshi MATSUE
Ken NAGASHIMA Tomohisa YAMASHITA

Financially supported by New Energy and Industrial Technology Development Organization in Japan, Railway Technical Research Institute has developed flywheel energy storage system jointly with KUBOTEK, FURUKAWA ELECTRIC, MIRAPRO and YAMANASHI-KEN. We chose a flywheel system as a storage medium. The flywheel is because it's favorable to the life span, the cost, the capacity and the output. It stores energy in the form of kinetic energy. Therefore, there is no electrochemical damage. In this paper, after describing the effect of the flywheel energy storage system, we describe the details of the equipment for a demonstration test.

キーワード：フライホイール蓄電装置，超電導磁気軸受，再生可能エネルギー

1. はじめに

現在、鉄道総研では、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の助成事業により系統安定化用蓄電装置を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、山梨県企業局と共同で開発している。蓄電媒体としては、寿命、コスト、蓄積エネルギー容量、出力等を勘案してフライホイールを選択した。フライホイール蓄電装置は、電力を回転エネルギーに変換して蓄エネルギーを行うもので、電気化学的な反応を使用しない。このため、二次電池等で課題となっている化学的な劣化を生じない等のメリットがある。さらに、蓄電装置に要求される性能として、出力（単位 kW）と蓄積エネルギー容量（単位 kWh）の 2 つの指標があるが、フライホイール蓄電装置は、これらを独立に設計することが可能である。例えば、高出力であるが低容量であるとか、大容量であるが低出力であるといった装置を実現することができる。この特徴は設備容量を最適化する上で有利であり、蓄電池のように高出力を得るために余剰な容量を設置するといった無駄を省くことができる。

フライホイール蓄電装置の蓄積エネルギー容量は、フライホイール本体である回転体の質量に、また回転速度

の二乗に比例して大きくなる。このため、大容量の装置にするためには、高速で回転する重量物を損失なく支持する必要がある。すなわち回転体を支持する軸受に耐久性と低損失性が求められる。我々はこの条件を満たすものとして超電導磁気軸受に注目した。超電導磁気軸受は、非接触で支持することが可能なため、摩耗や摩擦がなく、回転に伴う損失が発生しない。また、回転軸、固定子双方に超電導を使用することで、他の磁気軸受では困難なほどの大きな浮上力を発生することができる。

一方、超電導状態を維持するための冷凍機の動力が必要となるが、スケールメリットが期待できるため、大容量の蓄エネルギー装置としては全体として損失が小さいものとなりうる。

フライホイール本体も、高速回転に伴う遠心力に耐えられるような工夫と万が一破損した場合の安全性を考慮して、円形螺旋織物技術を使用した炭素繊維強化プラスチックで製作した。

この事業では、山梨県米倉山太陽光発電所に蓄電装置を設置し、電力平滑化の実証試験を行う。実証試験は 1MW 級太陽光発電設備に、出力 300kW、容量 100kWh のフライホイール蓄電装置を接続し、季節変動や天候、系統条件の違いなどを加味しながら、連続運転を実施する。

本報告では、フライホイール蓄電装置の特徴及び要求性能について考察したのち、実証試験用装置の詳細について述べる。

* 車両制御技術研究部 水素・エネルギー研究室

** 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

表1 各種蓄電媒体の特徴

	フライホイール	バッテリー	キャパシタ	SMES
原理	回転体を高速で回転させて運動エネルギーとして蓄積	電気化学エネルギーとして蓄積	電界エネルギーとして蓄積	永久電流により磁界エネルギーとして蓄積
長所	繰返し充放電で劣化しない 瞬時変動に対応できる 有害廃棄物や希少元素を含まない 出力と容量の自由度が大きい	可動部分がない エネルギー蓄積密度が高い	可動部分がない 繰返し充放電で劣化しない	可動部分がない 繰返し充放電で劣化しない
短所	接触式軸受では損失、摩耗等が発生	繰返し充放電で劣化する 出力と容量が固定	エネルギー蓄積密度が低い	エネルギー蓄積密度が低い

2. フライホイール蓄電装置の特徴及び要求性能

電気エネルギーは直接的な貯蔵や蓄積が困難である。このため、超電導電力貯蔵 (SMES : Superconducting Magnetic Energy Storage) 以外の方式では、他のエネルギーに変換して蓄積することとなる。例えば、蓄電池 (二次電池, バッテリー) は化学的エネルギー, 揚水発電は位置エネルギー, コンデンサ (キャパシタ) は電界のエネルギーである。

表1に各種蓄電媒体の特徴と比較を示す。

バッテリーは古くから実用化され、自動車のエンジン始動用や携帯電子機器に応用されている。また、無停電電源装置など、比較的大容量な装置も作られている。

バッテリーは可動部がなく蓄電容量が大きいという特徴があるが、繰返し放電による劣化があり廃棄の問題もある。また、蓄電は電気化学反応であるため、反応物質により、理論的なエネルギー密度が決まってしまう、高性能化に限界がある。さらに、出力と容量の比率に制限があるため、大出力の装置を作ろうとすると設備規模が大きくなってしまふ。

キャパシタは可動部分がなく、繰返し放電に強いがエネルギー密度が小さい。

フライホイール装置は、回転エネルギー (運動エネルギー) として蓄積するものであり、回転体の質量を大きく、回転速度を上げていけば理論上はエネルギーをいくらでも蓄積できることとなる。実際は回転体の遠心力に対する機械強度に限界があるなど、エネルギーは無限には蓄積することができない。

フライホイール蓄電装置は、蓄電池の短所である繰返し寿命や劣化の問題に対して優位性をもっているが、可動部分があり損失発生やメンテナンスの必要性がある。この可動部分が低損失、省メンテナンスにできれば十分に実用化の可能性がある。

このような得失からフライホイール蓄電装置は、回転体の機械的な強度や安全性の担保、非接触高荷重軸受が実現すれば他の蓄電媒体に比して、低コスト、安全、省メンテナンスな蓄電装置となる可能性が期待できる。

今回の実証試験の目的は太陽光発電所の電力平滑化にあり、開発期間や開発項目の重点化により、出力300kW、容量100kWhの蓄電装置を製作した。これは、直径2m、質量3200kgのフライホイールを3000min⁻¹～6000min⁻¹で回転することにより実現可能である。また、後述する超電導磁気軸受によりこのフライホイールを支持することができる。

図1に蓄電装置の出力と蓄電容量を示す。蓄電装置の出力と容量のバランスは用途によって異なるが、電気鉄道用の回生電力吸収目的に適した領域を図中に示す。これを見ると、実証機を電気鉄道用の回生電力吸収に使用するとすれば蓄電容量は十分だが、さらなる高出力化が望ましいことがわかる。前述のとおり、フライホイール装置の場合、発電電動機を大型化することで出力は大きくなるため、このような違った目的にも適用することができる。

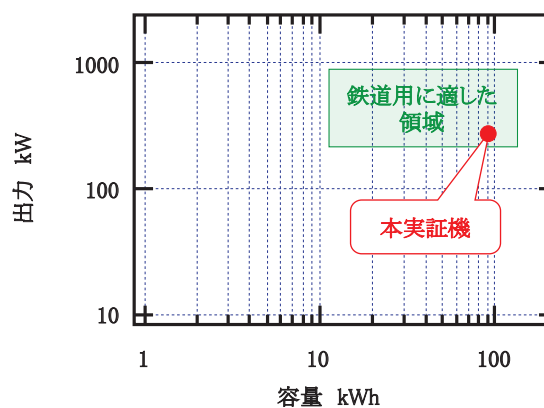


図1 蓄電装置の出力と容量

3. 太陽光発電所による実証試験

3.1 実証試験の概要

蓄電システム導入の目的としては、電気鉄道においては回生エネルギー吸収、電力系統においては電力平滑化、周波数安定化などの短周期対応が挙げられる。その他にも、季節変動や曜日による需要変化など長周期の蓄電も

考えられる。一般に短周期対応は出力重視で、長周期対応は容量重視となることが想定される。

本フライホイール蓄電装置は、短周期対応の電力平滑化が主な目的である。

太陽光発電所は、昼夜の変動、天候による日照の変化、季節による発電量の違いなど、火力、水力、原子力発電に比べて発電出力が不安定である。太陽光発電システムにおいては、この出力が不安定となる部分を蓄電システムで補償することで、電力系統への安定した接続が可能となる。

そこで、変動する自然エネルギーの代表である太陽光発電所に本装置を設置して実証試験を行うこととなった。

3.1.1 プロジェクト工程

実証試験機製作のスケジュールとしては、図2に示すように、平成26年度中に工場内での組み立てを終え、米倉山へ移送、設置を行い、夏期前に電源接続、回転試験の開始を行う。回転試験、連続運転等を12月まで実施し、試験結果の整理、商品化のまとめを行う予定である。実証試験は営業実系統への接続を行うため、安全、確実な実施の完遂を目指している。

	H24年度	H25年度	H26年度	H27年度
概念設計	→			
要素開発		→		
部品製作			→	
組立				→
工場試験				→
現地設置				→
実証試験				→

図2 フライホイール蓄電装置開発工程

3.1.2 米倉山太陽光発電所

山梨県甲府市の米倉山には東京電力(株)の10MW級及び山梨県の1MW級太陽光発電所が完成し、発電を行っている。今回の実証試験では、この1MWの太陽光発電所に実証機を設置し、平成27年夏期より太陽光発電装置と6.6kV交流系統で連系し、電力安定化実証試験を行う計画である。

実証試験では、回転速度向上試験を行ったのち、連続運転試験を行う。蓄電システムで実績のある蓄電池における劣化検証に相当するような試験を行い、フライホイール蓄電装置の実用性の検証を行っていく予定である。

図3に米倉山太陽光発電所の外観を、図4に系統接続の概要を示す。



図3 米倉山太陽光発電所

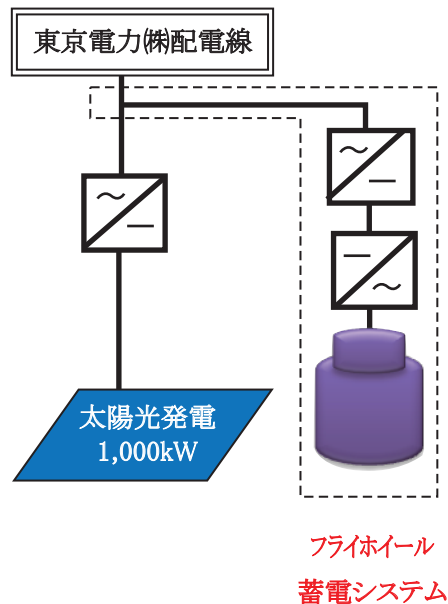


図4 フライホイール蓄電装置の接続

3.2 実証機の概要

3.2.1 実証機のコセプトと全体システム

プロジェクト開始から実証試験完了までの期間があまり取れないことなどから、今回の実証機については、超電導磁気軸受及びCFRPローターの開発に注力することとした。このため、ラジアル方向の補助軸受に関しては、

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

従来の制御型磁気軸受を使用し、発電電動機についても産業用汎用機を流用した。発電電動機は汎用の永久磁石型同期機であり気中で運転するため、真空槽と発電電動機の間でトルク伝達と気密を両立させる必要があり、このシール部には磁性流体シールを採用した。

表2に実証機の仕様を、図5に実証機の概要を示す。

図6には、工場組立時のCFRPローター組込作業の様子を、図7に装置全体の外観を示す。

表2 実証用フライホイール蓄電装置仕様

項目	値
入出力	300kW
発電機出力	330kW
定格電圧	直流 600V
蓄積エネルギー	100kWh
運転回転数	3,000 ~ 6,000min ⁻¹
CFRP ローター	直径 2m
	質量 3,200kg
軸受	スラスト 超電導磁気軸受
	ラジアル 制御磁気軸受

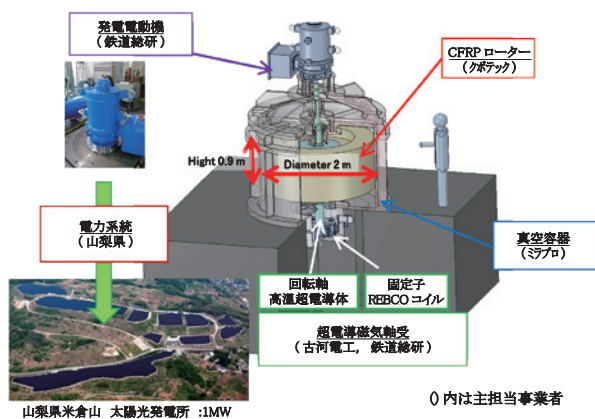


図5 実証機の概要

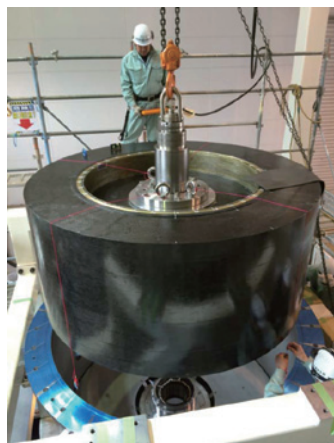


図6 CFRP ローター組込の様子



図7 装置全体外観

3.2.2 超電導磁気軸受

フライホイール蓄電装置は、発電電動機、真空シール、CFRP ローター、真空容器等の様々な部品を組合せてできているが、ここでは開発に重点をおいた超電導磁気軸受について詳細を述べたい。

前述の通りフライホイール蓄電装置の蓄電容量は、フライホイール回転体の質量に、また回転数の二乗に比例する。このため高荷重かつ高速で、損失なく、支持する軸受が必要となる。そこで我々が提案した磁気軸受は、回転子側に高温超電導バルク体を、固定子側に高温超電導コイルを配置し、磁束排除の性質を利用して支持する方式である。磁気軸受には大きく分けて、超電導を利用する受動型のもの、常電導とギャップ制御電源装置からなる能動型のものがある。超電導の方式はさらに、永久磁石を利用する磁束捕捉型と、超電導バルク体を利用する磁束排除型に分かれる(表3)。

制御軸受は鉄心の飽和磁束密度、磁束捕捉型は永久磁石の磁束密度に制約があるが、磁束排除型の超電導磁気軸受は与える磁束により、臨界電流まで荷重を大きくすることが可能であり、本装置の使用条件に合致している。また、磁気軸受であるため、接触による損失や摩耗などの問題はない。ただし、回転子や固定子の冷却が必要であり、ここに工夫が必要となる。

超電導バルク体、超電導コイルともに希土類系(RE-BCO)の高温超電導体を使用しており、高温超電導材の中でも磁場中の特性がよく、臨界電流密度が高いものを使用している。

図8および図9に今回開発した超電導磁気軸受の構造と支持力(回転子の浮上力)を示す。回転子の超電導バルク体はシルクハットを逆さにしたような形状であり、固定子の超電導コイルから発生する磁束を排除することでスラスト方向の全荷重と、ある程度の案内方向荷重を支持することができる。固定子の超電導コイルはテープ線材を巻いた5段構造(5ダブルパンケキ形状)となっており、外部の電源装置から電流リードを通じて常時通電するようになっている。図より、80A程度のコイル

表3 磁気軸受の分類

受動型	磁束排除型	超電導バルク+超電導コイル
	磁束捕捉型	永久磁石+超電導バルク
能動型	制御型	磁性体+常電導コイル

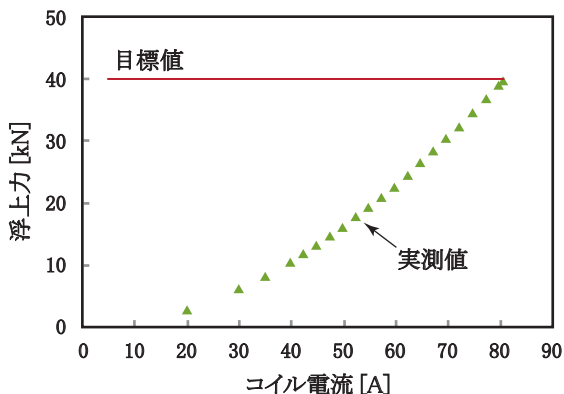


図8 超電導磁気軸受の浮上力

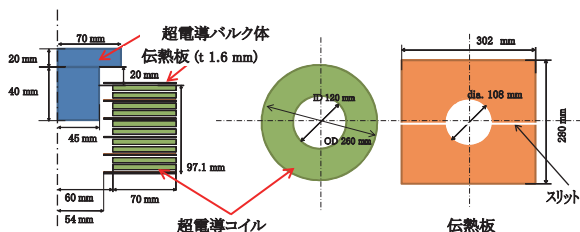


図9 超電導磁気軸受の構造

電流で目標値のフライホイール荷重を支持するのに十分な浮上力が発生できることが分かる。

超電導コイルは冷凍機からの伝導冷却により冷却されるが、回転子については、希薄ヘリウムガス（圧力数 Pa）が軸受容器内に充填されており、分子伝導と輻射により冷却される。回転子の損失としては、ガスが希薄であるため風損はほとんど発生しない。

回転子が定常状態で、固定子の中心を振動なく回転している場合は、風損のみが損失となる。しかし、フライホイールのアンバランスやトルク変動によって回転子に振動が生じると磁束密度分布に変動が発生するため、近傍に金属等の良導体が存在すると、渦電流損失が起こることがあり得る。特に低温部分では金属の導電率が非常に高く大きな渦電流が発生し、少ない発熱でも冷凍機から見ると大きな負荷になる問題がある。

磁束変動による渦電流損失を無くすためには、構成部材に樹脂やセラミックなどの絶縁物を使用すればよい。本磁気軸受も極力、金属をしないように作られているが、超電導コイルが伝導冷却方式であるため、どうしても冷却経路については、熱伝導の良い金属（銅）を使用せざるを得ない。すなわち熱伝導率は高く、電気導電率は低

い構造材を使用しなければならないという二律背反の課題がある。

今回はこの異なった課題を両立させるために、すだれ状の金属を樹脂によってモールドした構造の素材を開発し、超電導コイルの伝熱板として採用した。

渦電流は、導体を細分化することにより減少すると考えられるが、磁場の分布や変動周波数により差異がある。あらかじめ導体の細分化の効果を検証するために、動磁場解析を行った。図10に導体の分割と渦電流損失の関係を示す。図を見ると分割数を多くしていくと、いったん渦電流損失が増えるが、その後は減少し、ある程度細分化されると顕著な減少が見られないことが分かる。細分化により占積率も下がることを考慮すると今回の場合は100分割以上あればよいことが分かる。

図11に実際に製作した超電導コイル伝熱板の外観を示す。

このような形状、構造をもった材質の場合、熱的、機械強度的に異方性が大きくなる。特に伝熱板として使用する場合には、銅線の長手方向には熱抵抗が小さく、線と直角方向には熱抵抗が大きくなることが予測される。この解決方法として、すだれ状の板を数枚積層し、積層間の線方向を変えることが考えられる。例えば、奇数枚

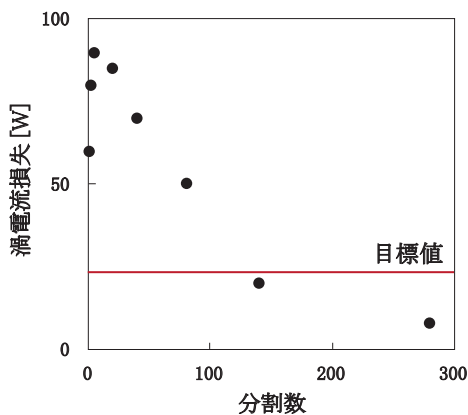


図10 導体分割と渦電流損失

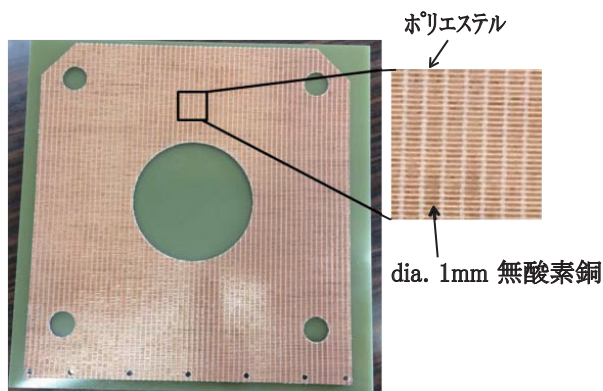


図11 超電導コイル伝熱板の外観

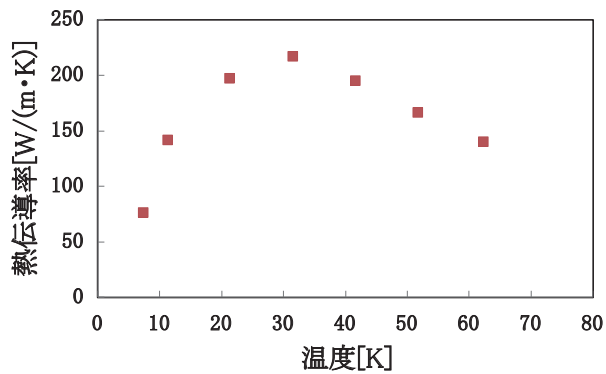


図 12 超電導コイル伝熱板の熱伝導率

目を 0° 偶数枚目を 90° にすることで、渦電流損失の増加無しに、熱伝導の等方性を確保することができる。

図 12 に、製作した伝熱板の等価熱伝導率の測定結果を示す。今回の超電導コイルは使用温度領域を 30～50K として設計しており、この領域では、100W/(m·K) 以上あり、金属単体よりは小さな値であるが、伝導冷却に供する伝熱板としては十分な値である。

このような特殊な伝熱板を使用することで、損失低減と熱伝導の確保を両立することができ、実証試験用超電導磁気軸受が完成した。

4. おわりに、今後の予定

昨今の脱原子力発電の潮流の中では、地球環境負荷低減を実現するためのエネルギー源としては自然エネルギー／再生可能エネルギーに頼らざるを得ない状況である。これらのエネルギーは、これまでの火力、水力、原子力に比べてエネルギー密度が小さく、発電総量が遠く及ばないこともさることながら、変動が大きく、不安定であるという課題を抱えている。省エネルギーにより消費エネルギーの低減を推進しても、電源が不安定であると電力系統全体の安定性を損なってしまう。電源の変動や不安定を抑制するためには、蓄エネルギー装置の設置が不可欠となる。電力は大規模で長時間の貯蔵が難しく、これまで実績のある蓄電池については、寿命の問題

があった。これらの課題を克服するために、我々は、本質的に劣化の心配がないフライホイール蓄電装置の開発を行っている。

このほど NEDO の助成を受け、実際の太陽光発電所に実証用フライホイール蓄電装置を設置し、試験を行うこととなった。本報告では、このフライホイール蓄電装置の概要について述べると共に、今回開発の主となった超電導磁気軸受の詳細を記した。

フライホイール蓄電装置は、重量物を高速で非接触で回転する必要があり、超電導磁気軸受でこれを実現した。

この軸受における損失は電力貯蔵ロスとなってしまうだけでなく、温度上昇により超電導状態に影響を及ぼす可能性がある。風損については希薄ガスヘリウムを充填することにより問題がない程度であり、渦電流損については新たに開発した伝熱板を採用することにより損失を低減した。

本実証プロジェクトでは平成 27 年度中、実証試験を行い、耐久性や経済性の検討を実施する。将来的には、電力系統の安定化のみならず、電気鉄道用の回生電力吸収等にも導入していく予定である。

謝辞

この研究開発は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構助成事業「次世代フライホイール蓄電システムの開発」にて行われている。

また、実証機製作は、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、山梨県企業局の助成事業会社のほか、イーグル工業株式会社、日本工営株式会社の多大なる協力を得て行われたのでここに謝意を表します。

文献

- 1) 長谷川他：超電導フライホイール蓄電装置・実証機の開発，2015 年春季低温工学・超電導学会予稿集，2015 年 5 月
- 2) 宮崎他：フライホイール蓄電装置用超電導磁気軸受の開発，2015 年春季低温工学・超電導学会予稿集，2015 年 5 月