

鉄道一般
車両
施設
電気
運転・輸送
防災
環境
人間科学
浮上式鉄道

超電導磁気軸受を用いたフライホイール蓄電システムを鉄道へ応用する

フライホイール蓄電システムは、電気化学反応を利用しないため、何回充放電しても蓄電容量が劣化しないという長所を有しています。鉄道の変電所の電力平滑化用蓄電システムの充放電回数は数十万から数百万回になると予想されるため、この長所は鉄道へ適用する場合にも重要な要素になります。ここでは、システムのメンテナンス性を改善するために、フライホイールローターを支える軸受に、大きな荷重を非接触で支持できる超電導磁気軸受を適用したフライホイール蓄電システムについて、超電導磁気軸受の概要を中心に説明します。



松江 仁
Hitoshi Matsue
浮上式鉄道技術研究部
低温システム研究室
主任研究員
【専門分野】超電導磁気浮上



宮崎 佳樹
Yoshiki Miyazaki
浮上式鉄道技術研究部
低温システム研究室
副主任研究員
【専門分野】低温工学



山下 知久
Tomohisa Yamashita
浮上式鉄道技術研究部
主任研究員(上級)
【専門分野】低温工学



小方 正文
Masafumi Ogata
浮上式鉄道技術研究部
低温システム研究室
室長
【専門分野】低温工学

フライホイール蓄電システムとは

電動モーターを使って回転体を回すと、その回転体は回転の運動エネルギーを持つことになります。このことは、電動モーターが、電気エネルギーを保存可能な回転の運動エネルギーに変換していると考えられます。したがって、この回転体の回転損失を極力減らして、回転体が長時間回転し続けることができるようにすれば、それが、電気エネルギーを保存するシステムとなります。これが、フライホイール蓄電システムです。電動モーターは発電機としての機能も持つため、ここでは、電動モーターのことを発電電動機と呼ぶことにします。また、回転体のことをフライホイールローターと呼ぶことにします。

蓄電システムは、電気エネルギーの有効活用や電力平滑化に利用できます。電車はもともとほかの輸送手段と比較するとエネルギー効率のよい乗り物ですが、さらにエネルギー効率をよくするためには、回生失効(☞参照)の頻度を減らすことが有効です¹⁾。図1のように、減速するとき電車に架線に戻す回生エネルギーを使って、フライホイールローターの回転速度を上げれば、回生エネルギーをフライホイール蓄電システムに保存することができます。反対に、フライホイールローターの回転速度を下げれば、保存したエネルギーを電車が加速するためのエネルギーとして有効利用できます。フライホイール蓄電システムそのものは、鉄道システムですでに20年以上使われている実績があります²⁾³⁾が、既存の

☞ 回生失効

電車が減速するとき、電車のもっている運動エネルギーを電気エネルギーに変換し、その電気エネルギーを架線などに戻すことにより減速力を得るブレーキを回生ブレーキといいます。通常は、ほかの加速中の電車はその電気エネルギーを受け取りますが、加速している電車が近くにいない場合は、架線に戻す電気エネルギーを絞り、機械式のブレーキなど、ほかの方法で電車を減速します。このように、ブレーキをかけたときに、電車の運動エネルギーから変換した電気エネルギーを有効に活用できない状態になることを回生失効といいます。

フライホイール蓄電システムの場合、フライホイールローターの荷重を支える軸受をメンテナンスするために、システム分解などの大掛かりな作業を定期的に行ななければならないという課題があります⁴⁾。ここでは、この課題を解決するために、フライホイールローターの重量を非接触で支持できる超電導磁気軸受を適用し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と呼びます）の概要を紹介します。

試作した超電導フライホイール蓄電システムの概要

フライホイール蓄電システムは、短時間での電気エネルギーの出し入れが得意なので、時々刻々と発電量が変化する太陽光発電所の出力を平滑化する用途へ応用することも可能です。そのため、鉄道への応用に先立ち、山梨県こめくらやまの米倉山太陽光発電所用の超電導フライホイール蓄電システムを試作しました（図2）⁵⁾。

このシステムでは、図3に示すように、真空容器の中に回転エネルギーを蓄えるフライホイールローターがあり、下側にある超電導磁気軸受がフライホイールローターの重量を非接触で支えます。そして、システムの上部にある発電電動機により、電気エネルギーと回転エネルギーとを相互に変換します。

【コア技術】超電導磁気軸受

超電導材料を応用した磁気軸受にはいくつかの種類があります⁶⁾。超電導コイルと鉄との間に発生する吸引力を利用するもの⁷⁾や、超電導バルク（参考）と永久磁石との間に働く電磁力を利用したもの⁸⁾などがありますが、米倉山太陽光発電所用の超電導フライホイールでは、4トンのフライホイールローターを20mm浮上させるため

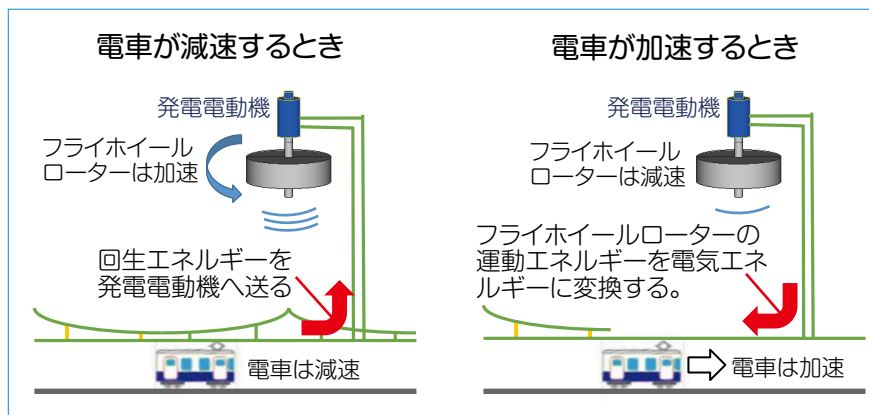


図1 フライホイール蓄電システムのエネルギー制御

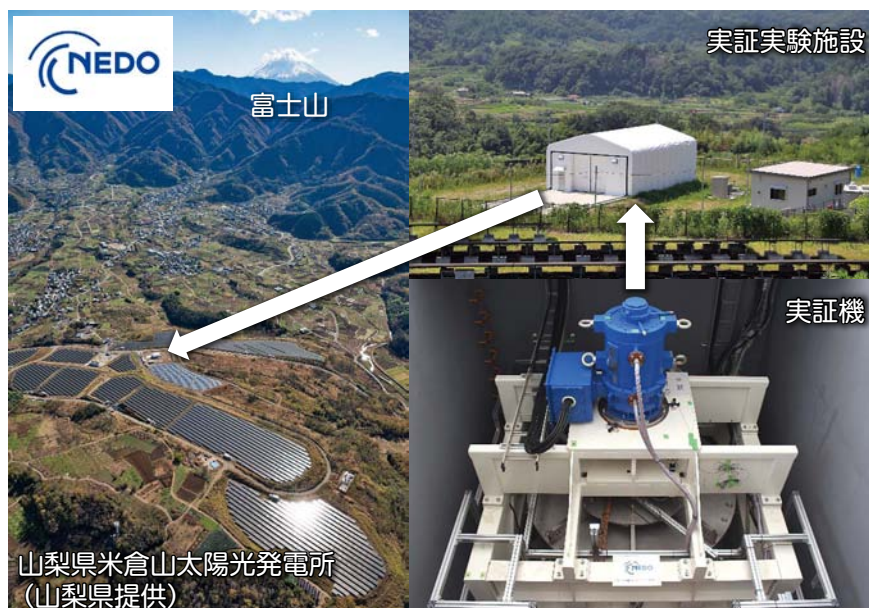


図2 米倉山太陽光発電所および超電導フライホイール蓄電システムの設置状況

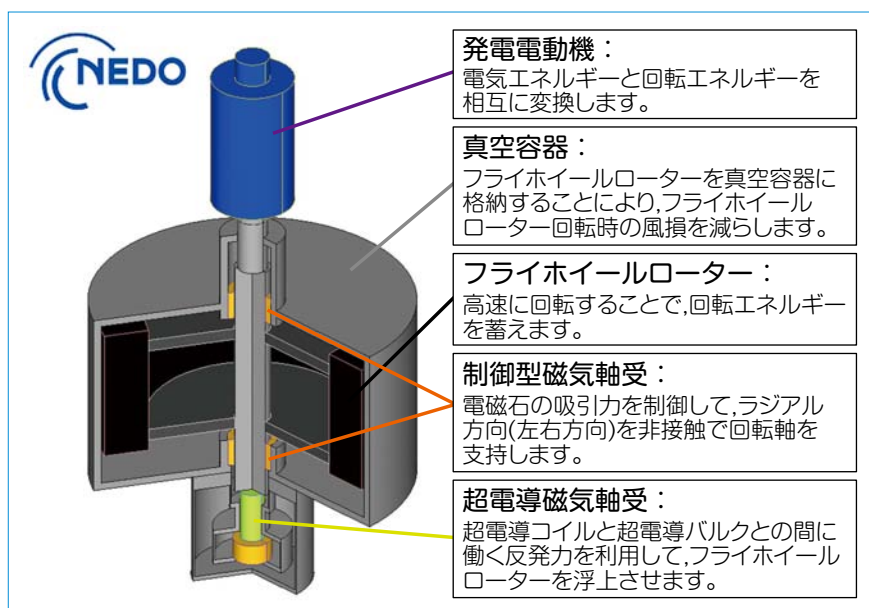


図3 米倉山太陽光発電所用フライホイール蓄電システムの構成

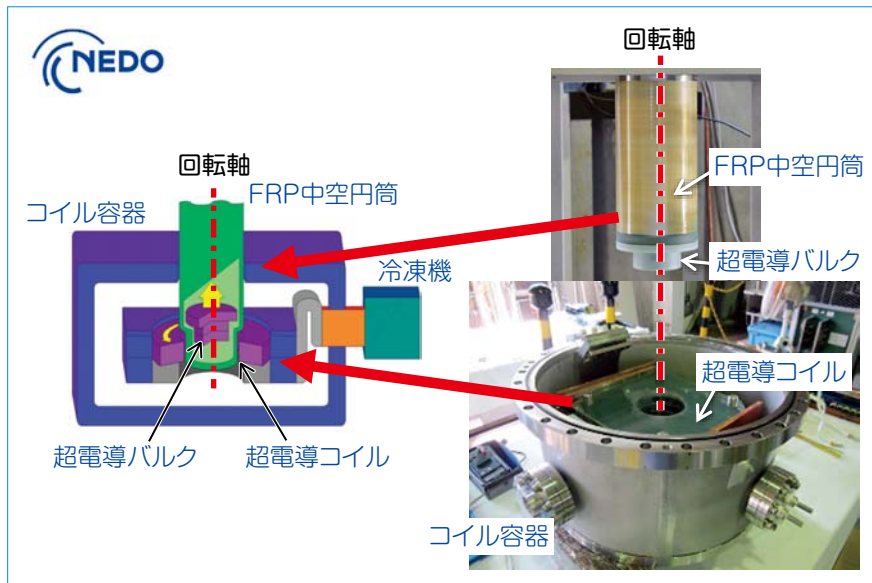


図4 超電導磁気軸受の構成

に、超電導コイルと超電導バルクとの間に働く電磁気的な反発力を利用する超電導磁気軸受を採用しています。超電導体は反磁性を示すことが知られており、冷却されて超電導状態になった超電導バルクに磁場をかけると、その超電導バルクには反発力が発生します。ここで紹介する超電導磁気軸受はこの性質を利用しており、十分に冷却されている状態で、超電導コイルに電流を流すだけで、電流の大きさに応じた反発力が発生し、超電導バルクは浮上します。回転側と固定側が非接触となるため、超電導磁気軸受の回転損失はごくわずかとなります。

熱は伝えずに力を伝える

繰り返しになりますが、超電導体はかなり低い温度以下まで冷却しないと

超電導の性質を示しません。本システムの場合では、超電導磁気軸受をマイナス223℃以下に冷却します。図4に示すように、超電導磁気軸受は超電導コイルと下部にバルクを挿入した中空円筒から構成されています。超電導磁気軸受の上部、すなわち、中空円筒の上面は、図3に示すように、フライホイールローターの回転軸と接続されていますが、この円筒には、高強度でかつ熱を伝えにくいFRP (Fiber Reinforced Plastics, 繊維強化プラスチック) を使用しており、フライホイールローターから超電導バルクに熱が侵入するのを極力抑え、かつ、超電導バルクに発生する浮上力は伝えるという、大変難しい性能を実現し、冷却に必要な冷凍機の消費電力も少なくなるようにしています。ちなみに、この

中空円筒は、断熱性能がよいため、フライホイールローターが冷却されることはありません。

熱は伝えて回転抵抗は小さく

超電導材料が超電導状態になるためにはマイナス223℃以下に冷却する必要がありますことを説明しましたが、ここで、超電導コイルと超電導バルクの冷却方法について簡単に説明します。超電導コイルには冷凍機を直結しており、熱伝導により超電導コイルは冷却されます。使い勝手をよくするために液体窒素のような冷媒は使っておらず、冷凍機を起動するだけで超電導コイルが冷却されるようになっていました。その一方で、超電導バルクは冷凍機と接している部分がないため、超電導バルクを冷却するための工夫が必要です。先程、フライホイールローターは真空容器内にあると説明しましたが、厳密にいうと真空容器内は完全な真空ではなく、一万分の一気圧という、ごく少量のヘリウムガスで満たされています。

超電導コイルが冷凍機で冷却されているため、その周囲にあるヘリウムガスも冷却され、そのヘリウムガスが超電導バルクも冷却します。超電導バルクを冷却するためだけならば、ヘリウムガスをたくさん真空容器の中に入れる方がよいのですが、ヘリウムガスの圧力が千分の一気圧を超えると、高速回転するフライホイールローターに対するヘリウムの風損(ヘリウムガスの粘性抵抗による損失)が大きくなってしまい、その分、フライホイールローターの回転エネルギーを消失させてしまうので好ましくありません。定性的には、ヘリウムガスの圧力を高くすれば風損が大きくなり、圧力を低くすれば冷却性能が悪くなるのですが、ヘリウムガスには、風損が小さく、かつ、冷却性能も高いという、ちょうどよい

超電導バルク

高温超電導材料は金属ではなく、セラミックスです。電線にする場合は、金属テープに超電導材料を蒸着したり、銀などの金属管に超電導材料の粉末を詰めたものに圧延、熱処理などをしたりします⁹⁾が、超電導線として利用するのではなく、セラミックスの塊の形で利用する超電導材料は超電導バルクと呼ばれます。図5の写真のように超電導バルクは黒い塊で、冷却すると電気抵抗がゼロになります。なお、超電導フライホイールに用いている超電導バルクは希土類系の単結晶体で、米倉山太陽光発電所用の超電導フライホイール蓄電システムには、世界最大クラスの直径のものを使用しています¹⁰⁾。

圧力の範囲があることに着目し、ヘリウムガスをそのような圧力に調整して、風損を増やすことなく、超電導バルクを冷却できるように運用しています¹¹⁾。

フライホイール蓄電システムの特徴

一般的に、蓄電システムには、以下のような8つの性能が求められると考えられます¹²⁾。

- ①エネルギー密度が大きいこと
- ②高速な充放電が可能なこと
- ③エネルギー効率が高いこと
- ④価格が安いこと
- ⑤耐久性に優れること
- ⑥安全性が高いこと
- ⑦使用可能な温度範囲が広いこと
- ⑧有害な物質を使用しないこと

多種多様の蓄電システムがありますが、現在のところ、上記の8項目に対して完全な優位性を持つ蓄電システムはありません。蓄電システムとしての性能を重視するかによって、選択すべきシステムが変わってきます。一般的には、電極における電気化学反応を利用する蓄電システムが主流ですが、フライホイール蓄電システムは電気化学反応を使わない蓄電システムであるため、耐久性があり(⑤)、使用温度範囲が広く(⑦)、有害物質を使用しない(⑧)という項目に対して優れた特徴を持っています。言い換えれば、繰り返しの充放電回数が多い用途に適した環境にやさしい蓄電システムであるということが出来ます。たとえば、10分周期で必要電力が変動するような線区で30年間蓄電システムを使用した場合、単純計算で百万回オーダーの充放電が繰り返されることとなりますが、フライホイール蓄電システムは、このような用途に向いており、さらには、寒冷地に設置しても蓄電性

能は低下しないという特徴があります。また、フライホイールローターの回転数を計測するだけで蓄積エネルギー量が正確にわかるということや、出力は発電電動機の機能により、容量はフライホイールローターの大きさによることから、出力と容量を独立に設計できることなどの長所も、フライホイール蓄電システムにはあります。

今後の取り組み

さまざまな蓄電システムがある中で、ほかの蓄電システムと違い、フライホイール蓄電システムは電気化学反応を利用しないため、機械式の蓄電システムとしてユニークな特徴を持っています。今後は、超電導磁気軸受の高荷重対応化など、より蓄電容量を大きくするための開発を進めていくこととなります。

なお、米倉山太陽光発電所の超電導

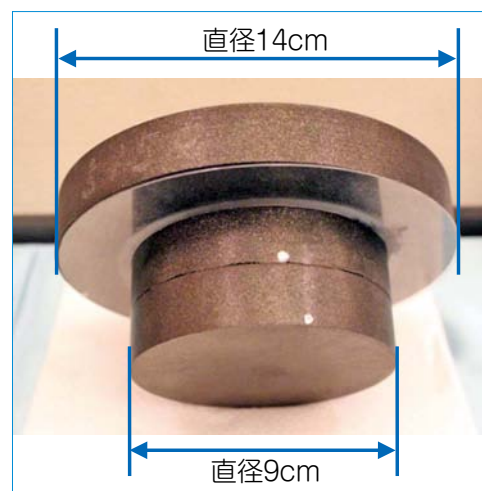


図5 大型超電導バルク

フライホイールは、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の助成事業として、山梨県企業局、クボテック(株)、古河電気工業(株)、(株)ミラプロ、(公財)鉄道総合技術研究所の5者共同で開発したものです。[RRR]

文献

- 1) 小笠正道, 小西武史, 清野寛: 蓄電技術でエネルギー効率を向上する, RRR, Vol.66, No.12, pp.10-13, 2009
- 2) 坂元貴: フライホイールの実績-フライホイール式電車線電力蓄勢装置-, 鉄道と電気技術, Vol.4, No.4, pp.16-18, 1993
- 3) 島津登志成, 橘浩司: 京浜急行電鉄(株)納め電車線用フライホイール発電電動機, 三菱電機技報, Vol.63, No.8, pp.662-665, 1989
- 4) 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
- 5) 山下知久, 小方正文, 長嶋賢: 超電導磁気軸受を用いた超電導フライホイール蓄電, 日本AEM学会誌, Vol.24, No.4, pp.293-298, 2016
- 6) 清野寛, 米津武則: 超電導を使用したエネルギー貯蔵, RRR, Vol.66, No.3, pp.26-29, 2009
- 7) 久保田通彰: 超電導フライホイール電力貯蔵装置, 鉄道と電気技術, Vol.17, No.7, pp.37-42, 2006
- 8) 松永晃治, 富田充, 池澤寛, 村上雅人, 腰塚直己: 超電導フライホイール開発の現状, 低温工学, Vol.37, No.11, pp.614-621, 2002
- 9) 小方正文, 水野克俊: 世界の高温超電導線材の現状, 鉄道総研報告, Vol.25, No.3, pp.53-56, 2011
- 10) 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, No.3, pp.73-80, 2011
- 11) 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
- 12) 例えば, 石井陽祐, 川崎晋司: 自然エネルギー利用拡大のための大型蓄電池開発, 日本AEM学会誌, Vol.24, No.4, pp.281-286, 2016