

# 超電導を使用したエネルギー貯蔵

清野 寛

浮上式鉄道技術研究部  
(低温システム 主任研究員)

米津 武則

同  
(電磁力応用 研究員)



せい ひろし



よねづ たけのり

## はじめに

皆さんも、国際的な地球温暖化防止の取り組みとして、京都議定書、気候変動枠組条約締約国会議などのキーワードを耳にしたことがあると思います。国内でも、さまざまな取り組みが行われています。これらの活動は、新しいエネルギーを創出する”創エネルギー”と、従来技術の高効率化を図る”省エネルギー”に大別できます。創エネルギーとしては、CO<sub>2</sub>を排出しない風力発電、太陽光発電などの再生可能エネルギーの利用、化石燃料代替エネルギーとした燃料電池の利用などが挙げられます。いっぽう、省エネルギーとしては個々の機器の高性能化はもちろんのこと、電力貯蔵、コージェネレーション、蓄熱やヒートポンプを併用して排出エネルギーをリサイクルする高効率化などが挙げられます。

鉄道では、後者の省エネルギー、中でも電力貯蔵装置の導入が盛んです。特に、電車が制動する際の運動エネルギー

を回生エネルギーとして有効利用する目的で導入が進められています。この分野の技術開発は、古くは電化の初期のころから、負荷平準化を目的として導入されています。これに加え、架線の電圧を補償する目的や、省エネルギーという意味で最近クローズアップされています。

この分野の実用装置としては、京浜急行電鉄逗子線のフライホイール式装置と西武鉄道秩父線の電気二重層キャパシタを用いた装置があります。京浜急行電鉄のフライホイール式装置は、25kWhの電気エネルギーを蓄積するもので、1988年から運転されています<sup>1)</sup>。西武鉄道の装置は、電気二重層キャパシタ容量3.86kWh (13.9MWs)で、2007年より稼動しています<sup>2)</sup>。

この電力貯蔵の分野に超電導技術を適用する試みが行われています。以下に超電導技術を使った電力貯蔵技術について解説し、最新の技術動向を紹介します。

## 超電導技術を適用したエネルギー貯蔵装置の展望

経済産業省が独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の協力でまとめた技術戦略マップ<sup>3)</sup>では、超電導技術を適用したエネルギー貯蔵機器として、フライホイールと超電導エネルギー貯蔵装置 (SMES: Superconducting Magnetic Energy Storage) が挙げられて

ています。技術戦略マップにおける、電力貯蔵分野への超電導技術の技術開発導入シナリオを図1に示します。また、これらの技術開発に関する重要技術のマイルストーンが示されたロードマップを図2に示します。

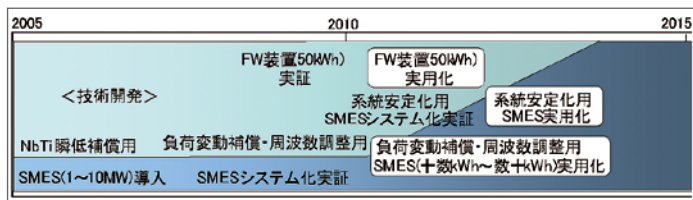


図1 フライホイール, SMESの技術開発導入シナリオ<sup>3)</sup>

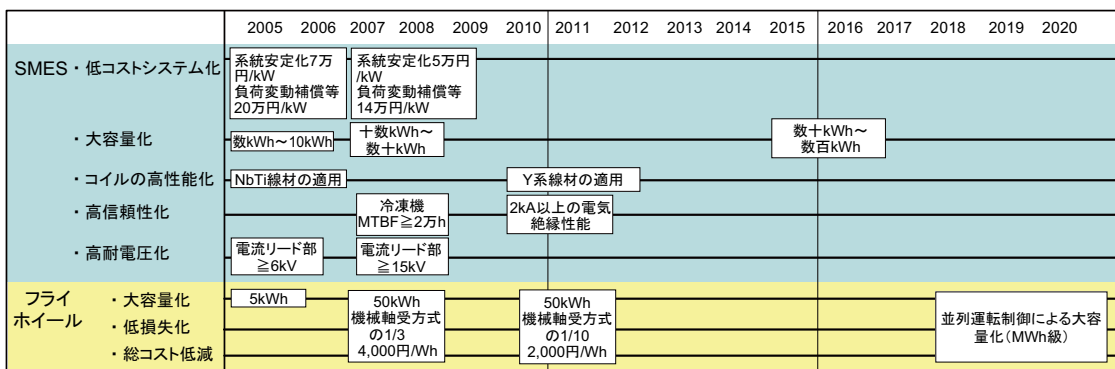


図2 フライホイール, SMESの技術開発ロードマップ<sup>3)</sup>

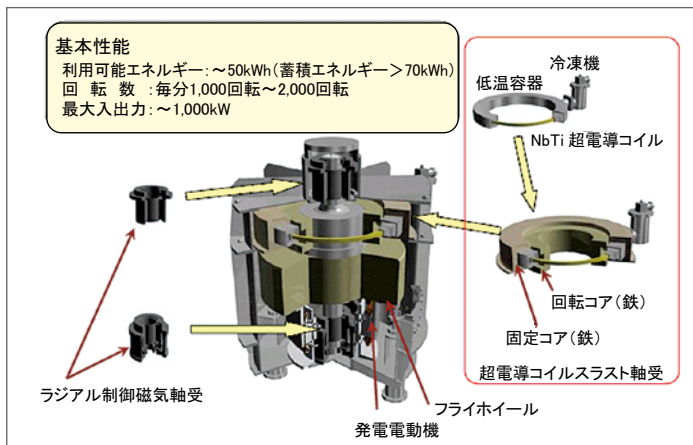


図3 1000kW, 50kWh超電導フライホイール<sup>5)</sup>(日本)

技術戦略マップでは、フライホイールとSMESを、2020年頃までに産業化もしくは技術革新を生み出す可能性のある技術、超電導技術の適用に関する実現可能性が高く、優位性の認められる技術として位置付けています。図1は、2005年部分から2020年までの導入シナリオのうち、2015年までを抜粋したもので、2015年以降は導入・普及へと続いています。図2は、技術導入シナリオ(図1)に関して、重要な技術項目の検討課題と、コストや耐久性に関する目標値をマイルストーンとしたロードマップの抜粋版です。フライホイールでは、超電導技術を軸受に適用してエネルギー容量50kWh規模の装置の実用化を目指しています。技術開発はコスト低減を主目標として、2020年には並列運転化による大容量化へと展開されています。一方、SMESにおいては新材料の適用や、要素技術の信頼性を向上しつつ、エネルギー容量を段階的に向上して、2020年までに数百kWh規模の容量を目指すシナリオとなっています。

### 超電導フライホイールエネルギー貯蔵装置

#### フライホイール貯蔵装置に超電導磁気軸受を適用するメリット

最初に、超電導技術を利用したフライホイールエネルギー貯蔵装置について紹介します。機械などの固定部と回転部との間にあって回転部を支える装置を軸受と言いますが、このひとつに回転体を磁気的な力により完全非接触で支持する磁気軸受があります。これは、磁界を発生させるための常電導磁石と、磁界中で非接触浮上し、回転する浮上体で構成されるもので、通常は常電導磁石の吸引力を制御することで能動的な支持機能を発揮します。この磁界発生装置に超電導磁石を適用したり、浮上体の支持に高温超電導体を適用したりすることで、フライホイールを低損失で支持することを目的とした研究開発が進められています。磁気軸受を超電導化するメリットは、超電導の特徴である「無損失・大電流」、「高磁界」、「大きな空間に高磁界を発生できる」、「安定な高磁界を発生できる(永久電流)」

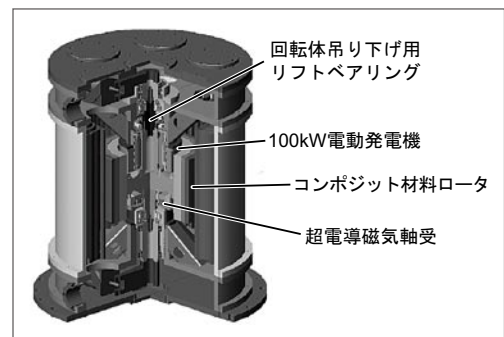


図4 100kW, 5kWh超電導フライホイール<sup>7)</sup>(米国)

にあります。また、高温超電導体(第二種超電導体)を適用すれば、超電導体内の常電導部分に磁束を捉えて保持する磁束のピン止め効果で「磁界中での安定浮上」という特徴を得ることができます。これらの特徴を活かすことで、従来の能動型磁気軸受では難しい大型化や、低消費電力化が可能となります。さらに、超電導による非接触支持により軸受部の損失を極小化できる可能性があります。

#### フライホイール質量支持に超電導磁気軸受を適用した開発例

超電導磁気軸受を適用したフライホイールエネルギー貯蔵装置は、日本とアメリカ、ドイツで開発が行われています。

日本における主要な開発はNEDOの委託を受けて実施されています<sup>4)5)</sup>。第一段階が、2000年から2005年にかけて四国総合研究所(四国総研)、IHL、ISTECらが実施した<sup>4)</sup>もので、先のロードマップの5kWh機器に相当します。第二段階は容量50kWhの機器開発で、JR東海が2005年から実施しています<sup>5)</sup>。これらは、回転体の質量を超電導磁気軸受で支持して、ラジアル方向の回転軸の安定化に能動型磁気軸受を適用したハイブリッドタイプです。第二段階の50kWh機器は実証試験を経て、鉄道用として2010年頃の実用化を目指しています<sup>6)</sup>。図3に50kWhフライホイールエネルギー貯蔵装置の構造を示します。超電導磁気軸受は質量25tのフライホイールを支持する軸受として使用され、フライホイール回転軸のラジアル方向支持には能動型の磁気軸受が採用されています。フライホイールの最高回転速度は2000rpmで、最大出力は1000kW、利用可能なエネルギー容量(以下蓄積エネルギー容量と呼ぶ)は50kWhです。超電導磁気軸受のステータ(固定側)に超電導磁石を用い、ロータ(回転体側)に配置した磁性材との吸引力で回転体を浮上させます。超電導の「大きな空間に高磁界を発生できる」、「安定な高磁界を発生できる(永久電流)」特徴を利用した軸受を適用しました。

#### フライホイール回転体の安定化に超電導磁気軸受を適用した開発例

米国のBoeing社では、日本の開発例とは異なり、超電導磁気軸受をフライホイールのラジアル方向支持、つまり回転軸の安定化に適用しています<sup>7)</sup>。図4にフライホイール装置を示します。超電導磁気軸受は高温超電導バルク体

と永久磁石を組み合わせたもので、高温超電導体の磁束ピン留め効果を使った「磁界中での安定浮上」という特徴を適用して、制御を伴わない安定性を実現しています。超電導磁気軸受はフライホイール直下に配置し、質量164kgのフライホイール自体は回転軸上部に配置した永久磁石と磁性体を組み合わせた軸受で吸引浮上させています。最高回転速度15000rpmで、蓄積エネルギー容量5kWh、最大出力100kWと報告されています。

#### 超電導磁気軸受で質量支持と回転安定性を保持する開発例

ドイツでは、フライホイールの質量支持とラジアル方向安定性保持を両立させる超電導磁気軸受の開発と、それを適用したフライホイールの開発が行われています<sup>8)</sup>。超電導磁気軸受は高温超電導バルク体と永久磁石を組み合わせたものです。質量500kgのフライホイールを、最高回転速度10000rpmで回転させて、蓄積エネルギー5kWh、最大出力250kWを目指しています。

#### そのほかの超電導磁気軸受の開発例

鉄道総合技術研究所でも、一部国庫補助を受けて超電導コイルと超電導バルク体とを組み合わせる超電導磁気軸受の基礎検討に取り組んでいます<sup>9)</sup>。ここまで説明してきた超電導磁気軸受では、超電導バルク体と永久磁石の組み合わせや、超電導コイルと磁性材の組み合わせが採用されています。このため、高磁界においても高い磁気作用を発揮できる超電導バルク体や、永久磁石の数倍の磁界を発生できる超電導磁石を使用している場合、永久磁石の磁化限界や鉄の飽和磁界までの能力で装置を使用することになります。この限界を超えて、従来実現できなかった高荷重容量のフライホイール用超電導磁気軸受を目指しています。

### SMES (超電導エネルギー貯蔵装置)

#### SMESをエネルギー貯蔵に適用するメリット

SMESとは、超電導線をコイル状に巻いたもの(超電導コイル)に直流電流を流し続けることでエネルギーを貯蔵する装置です。図5 (a) のように外部から直流の電圧を加えた後、図5 (b) のようにコイルの両端をスイッチ(永久電流スイッチ)により短絡すれば超電導コイルとスイッチからなる回路が構成され、この回路に電流を還流させることができます。超電導は電気抵抗がゼロになる状態なので、超電導コイルに電気を流しても、電流が減衰することがなく一定の磁界を発生し続けます。このようにして、電気エネルギーを磁気エネルギーとして貯蔵することができます。もし、超電導コイルではなく銅や鉄のコイルを用いた場合

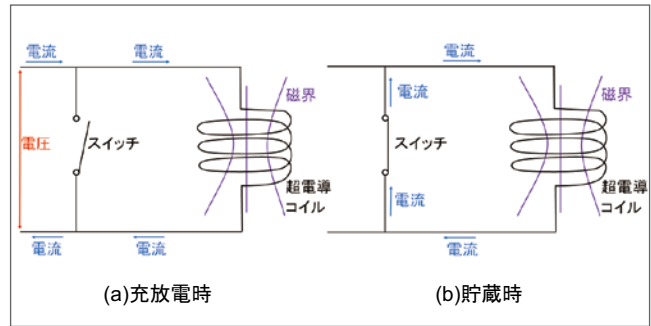


図5 SMESの原理

には、コイルに抵抗が存在するため、時間とともに電流は減少し、貯めたエネルギーは無くなってしまいます。コイルによるエネルギー貯蔵は、超電導を用いることではじめて実現可能となります。

SMESは、超電導コイル、低温容器、電力変換器、監視制御装置、永久電流スイッチ、冷凍機などから構成されます。SMESから所望のエネルギー量を自由に外に取り出したり、外から吸収したりするためには、パワーエレクトロニクス機器を用いた電力変換器とその制御技術が必要です。また、超電導コイルの超電導状態を維持するための冷却技術も必要です。

SMESは、電気エネルギーを直接磁気エネルギーに変換するため、貯蔵効率が高いという特長があります。また、パワーエレクトロニクス技術を用いることで超電導コイルに流れる電流を高速に制御することができ、高速なエネルギー授受が可能です。さらに、SMESは静止機器であり、かつ化学反応を利用していないため、高頻度のエネルギー授受、長耐用年数が期待できます。

そのようなSMESの特長を生かして、電力系統の分野で様々な用途が提案されてきました。電力負荷平準化、電力負荷変動補償、電力系統安定化制御、周波数制御、電圧制御、瞬時電圧低下補償(無停電電源装置)などが考えられています<sup>10)</sup>。

超電導コイルをエネルギー貯蔵に応用する提案は1960年代に日本でなされ、1970年代に日米で概念設計研究が行われました。現在、金属系超電導体を用いたSMESを中心に日本、アメリカをはじめとしてドイツ、ロシアなどでSMESの開発が行われています<sup>11)</sup>。

#### アメリカにおけるSMES開発例

アメリカではメガジュール規模のSMESがAMSC (American Superconductor) 社によってマイクロSMESという名称ですでに実用化されています。超電導コイル(3MJ, 3MW)、電力変換器、冷凍機、変圧器など、SMESシステム一式が18.6m、29.5tのトレーラーに積み込まれています。

送電の増減などに伴う系統の不安定現象からの電力系統



図6 変電所に導入されたD-SMES<sup>13)</sup>

保護を目的として系統に分散配置されるD-SMES、瞬時電圧低下からの電力需要家(産業プラント等)の保護を目的とするPQ-IVRといった製品が提案されています。図6にアメリカの変電所に導入されたD-SMESを示します。実系統に導入されたD-SMESは、事故時の電圧低下抑制に大きな効果があったとの報告があります<sup>12)</sup>。

#### 日本におけるSMES開発例

日本での本格的なSMES開発は、1991年から国家プロジェクトとして産学官を挙げて進められてきました。第1フェーズ(1991-1998年度)には20MW/100kWhの要素技術開発が行われ、要素技術開発用超電導コイルの安定な繰り返し運転に成功しました。第2フェーズ(1999-2003年度)では主としてコスト低減を目的とした研究開発が進められ、系統安定化用100MW/15kWhで6.9万円/kWh、負荷変動補償・周波数制御用100MW/500kWhで19.7万円/kWhが達成できる見込みが示されました<sup>14)</sup>。また、酸化物系超電導体を使用したSMESの開発も進められました。2004-2007年度の第3フェーズでは、SMESの電力系統制御システムとしての機能検証を目指した開発が行われました。古河日光発電株式会社細尾発電所の系統に図7に示すような出力10MW、貯蔵エネルギー19MJのSMESシステムを連系して、2007年から実負荷応答性、システム保護・監視、SMES動作時の電力系統への影響等が検証されました<sup>15)</sup>。

また、中部電力と東芝によって、国内の液晶工場において出力5MVAの瞬時電圧低下補償用SMESのフィールド試験が2003年から開始されました。落雷による瞬時電圧低下時に、工場電力負荷に影響を与えることなく健全にSMESが動作したことが報告されています<sup>17)</sup>。現在、出力10MVA、貯蔵エネルギー20MJ級のSMESが運用されています。SMESは短時間に大電力を放出することが可能なことから、電池などの補償装置では困難な、工場を一括補償できるシステムが可能となります。高品質な電力を必要とするハイテク工場へのSMESの適用が期待されています。

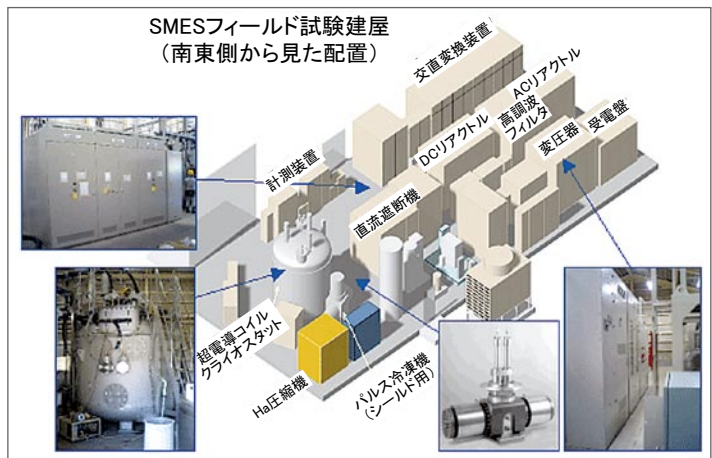


図7 細尾発電所内に設置されたSMESシステム<sup>16)</sup>

#### おわりに

電力貯蔵技術は鉄道においても、古くから研究され、導入されて来ました。今回は、超電導を使った技術という切り口で、超電導磁気軸受を適用したフライホイールと、SMES(超電導エネルギー貯蔵装置)を中心に、最新の超電導電力貯蔵技術の動向を紹介しました。これらに関する技術開発は、国家的なプロジェクトとして推進されています。新しい技術として、近い将来、産業化され、鉄道分野にも広く普及する技術となることを期待しています。[RRR]

#### 文献

- 1) 島津登志成 他: 京浜急行電鉄(株)納め電車専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
- 2) 清水孝浩 他: 電気二重層キャパシタを用いた電力回生吸収装置(キャパバポスト)の導入, JREA, Vol.51, No.6, pp.33423-33425, 2008
- 3) 経済産業省, 技術戦略マップ2008, (6) エネルギー, 超電導技術分野, <http://www.meti.go.jp/>, 2008
- 4) 腰塚直巳: 高温超電導軸受を用いたフライホイール, 電気評論, Vol.91, No.12, pp.32-35, 2006
- 5) 東海旅客鉄道株式会社, 超電導フライホイールシステムの開発, 新エネルギー・産業技術総合開発機構委託業務成果報告書, 2008
- 6) 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 未来へ広がる産業技術とエネルギー成果レポート最前線2007, pp.27-28, 2008
- 7) Strasik, M. et al.: IEE transaction on Applied Superconductivity, Vol.17 Issue: 2 Part 2, p.2133-2137
- 8) Frank Werfel et al.: Proceedings of 8th European Conference on Applied Superconductivity, under printing, Brussels, Belgium, 2007.9
- 9) 清野寛 他: 超電導技術を適用して磁気軸受を創る, RRR, Vol.64, No.12, pp.24-27, 2007
- 10) 仁田旦三 編著: 超電導エネルギー工学, オーム社, 2006
- 11) 電力系統における超電導電力機器特性, 電気学会技術報告, 第1088号, 2007
- 12) Kolluri, S.: Proceedings of IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, vol.2, pp.838-841, 2002.1
- 13) GE Industrial Systems, American Superconductor, <http://www.geindustrial.com/publibrary/checkout/Case%20Studies%207CDEA293%7CPDF>
- 14) 辰田昌功 他: 超電導電力貯蔵システム(SMES)のコスト低減, 低温工学, 第40巻5号, pp.141-149, 2005
- 15) 鈴木光政 他: 超電導を利用して安定な電力供給, 電気学会誌, 第128巻2号, pp.70-73, 2008
- 16) 中部電力株式会社: 電力系統制御用SMES(スメス)(超電導電力貯蔵システム)の実証試験開始について~高品質な電力供給の実現に向けて~, [http://www.chuden.co.jp/corpo/publicity/press2007/0615\\_2.html](http://www.chuden.co.jp/corpo/publicity/press2007/0615_2.html), 2007
- 17) 長屋重夫: 瞬時補償用SMESのフィールド稼働状況, 平成18年電気学会全国大会, 5-S9-2, 2006