

超伝導利用による電力貯蔵技術開発への取組み

Study on Energy Storage System Using Superconductivity

技術本部 南 正 晴*1

電力平準化のニーズ増大に伴い、電力貯蔵の必要量は相当な量となり、現在の電力貯蔵技術である揚水発電では対応は困難で、新たな電力貯蔵装置が必要となっている。こうした社会的ニーズに対して、様々な研究開発が推進されているが、地球環境に優しく、クリーンな電力貯蔵を可能とする有力な手段である、超伝導技術を利用した超伝導電力貯蔵システム (SMES) と、超伝導フライホイールシステムの2つの新貯蔵技術について、技術の現状と開発取組み状況を紹介する。

As the demand for the load leveling of electric power has been increasing steadily, a newly developed energy storage system has become necessary. Several research and development projects have been carried out according to social needs. In this paper, new energy storage systems friendly to the global environment will be introduced such as a superconducting energy storage system and a superconducting flywheel using superconducting technology.

1. ま え が き

電力需要の増加に伴って、昼夜間の電力格差は拡大する傾向にある⁽¹⁾。一方、電気エネルギーは発電と消費が同時に行われるため電力設備は最大電力に合わせて建設する必要があり、このために設備の利用率が低下することになる。これを改善して電力設備の効率的運用を図るために、電力を平準化することが重要な課題となっている。また、工場負荷変動補償や電力システムの安定化、停電対応等のニーズに対応した電力貯蔵技術の開発が期待されている。

図1に、将来の色々な経済成長シナリオに基づき予測された電力システムに必要な電力エネルギー貯蔵容量の推移を示す⁽²⁾。

揚水発電は頭打ちとなっており、低成長シナリオで予測した場合でも、電力貯蔵設備容量として、2030年に約1000万kW、2050年に約2500万kWが不足する。

このようなニーズに対応して、電力貯蔵技術の開発に対する期待はますます大きくなっているが、本報では、超伝導技術の応用として、抵抗零の現象を利用して超伝導コイルに磁気エネルギーの形でエネルギーを蓄える超伝導電力貯蔵装置 (SMES) と、磁気反発力による磁気浮上現象を利用してロータを非接触支持し、回

転エネルギーの形でエネルギーを蓄える超伝導フライホイール装置について技術の紹介を行う。

2. 超伝導利用電力貯蔵技術

超伝導現象は、1911年オランダのオネスが、4.2 Kで Hg が超伝導を示すことを発見して以来、材料開発が進み、図2に示すように、超伝導体の臨界温度 (超伝導現象を示す温度) は、着実に上昇し、1986年にIBMのミュラーほか、酸化物である La-Ba-Cu-O が 30 K くらいの超伝導体であることを発見して以来、急激

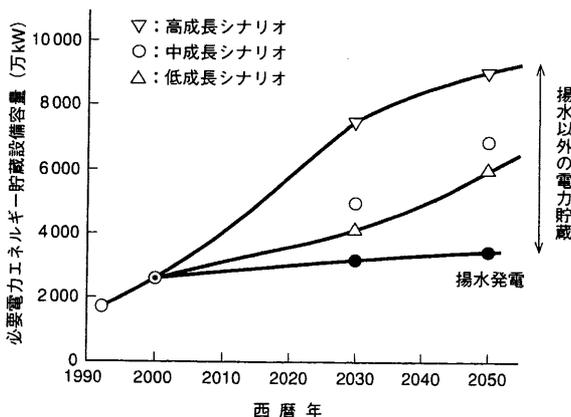


図1 電力システムに必要な電力エネルギー貯蔵容量の推移
将来の色々な成長シナリオに基づき、必要な電力エネルギー貯蔵容量の推移予想を示す。
Transition of power storage capacity required to power system

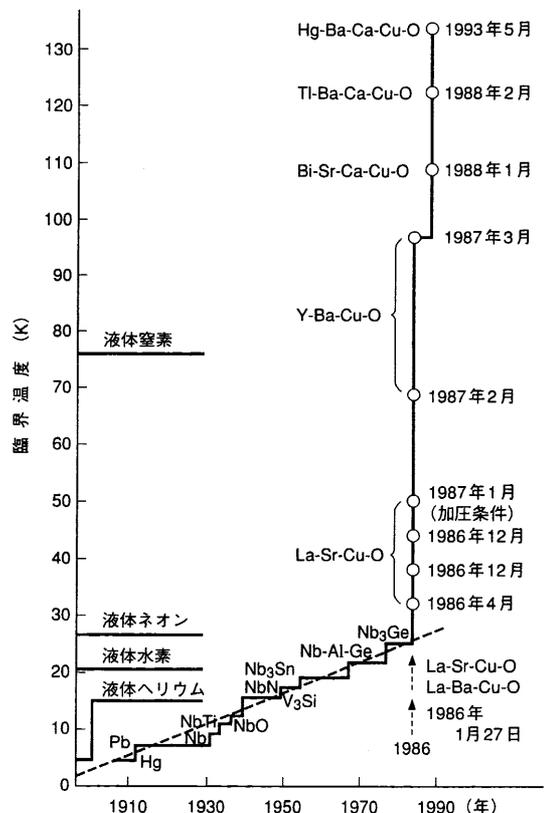


図2 超伝導体の臨界温度 超伝導体の臨界温度の進展を示す。
Critical temperature of superconductors

*1 高砂研究所応用物理研究グループ主査

に上昇した。1987年には、液体窒素温度 77 K でも超伝導現象が得られる Y 系高温超伝導体が発見され、応用の可能性が広がった。

これらの新材料の発見とともに、電力貯蔵分野への応用として、電気抵抗零を利用した超伝導電力貯蔵装置 (SMES) 及び磁気反発力効果を利用した超伝導フライホイール装置が実現可能となり、実用化の期待が高まっている。

現在、新しい電力貯蔵設備として開発が進められている各貯蔵設備について、揚水発電と比較したものを表 1 に示す⁽³⁾。超伝導電力貯蔵 (SMES) は、規模的には小容量から大容量までの広範な対応が可能であり高効率で、高速応答性に優れている点が特徴である。また、超伝導フライホイールは回転軸の発生応力に対する CFRP 材料強度の限界から、小中容量対応となりエネルギー密度が大きくコンパクト化が図れる点に特徴があり、電力需要地に近い変電所地下等への設置が考えられる。機械式であるため、同規模の蓄電池と比較して高寿命が期待できる。

表 1 電力貯蔵の比較
Comparison of power storage systems

種類	揚水発電	超伝導電力貯蔵 (SMES)	超伝導フライホイール	蓄電池	圧縮空気貯蔵
原理	水の位置エネルギーの形でエネルギーを貯蔵する。	磁気エネルギーの形で超伝導コイルにエネルギーを蓄える。	運動エネルギーの形で回転体にエネルギーを貯蔵する。	化学エネルギーの形で電池にエネルギーを蓄える。	高压空気に圧力エネルギーの形で地下空洞などにエネルギーを蓄える。
規模	大容量 (100~5000 MWh)	小~大容量 (0.1~5000 MWh)	小~中容量 (0.1~100 MWh)	小~中容量 (0.1~100 MWh)	中~大容量 (100~1000 MWh)
効率	~70%	~90%	70~80%	70~80%	70~80%
特徴	●プラント機器が単純 ●立地制約あり	高効率 高速応答	高エネルギー密度、高寿命	高エネルギー密度、構造が単純	土木工事が比較的容易 (廃坑等の利用)

3. 超伝導電力貯蔵装置

3.1 SMES の原理

超伝導コイルは、極低温に冷却されると電気抵抗が零となるので、コイル内に永久電流を流すことが可能となる。電力系統から SMES へ充電、貯蔵を行い、必要な時に SMES から電力系統へ放電することができる。

図 3 に、SMES の原理図を示す。

(1) 充電

状態 1 は、電力系統から SMES への電力の投入を示す。スイッチ S1 を開き、スイッチ S2 を閉じ、超伝導コイルを電力系統と交直変換器を介して接続する。電力系統からの交流電流を交直変換器で直流電流に変換して超伝導コイルに流す。

(2) 貯蔵

状態 2 は、SMES での電力の貯蔵を示す。スイッチ S1 を閉じ、スイッチ S2 を開くと超伝導コイルに直流電流が永久に流れ続けて電力エネルギーが貯蔵される。コイルに貯蔵されるエネルギー $E(J)$ は、コイルインダクタンス $L(H)$ 、電流 $I(A)$ とすると式(1)で表される。

$$E = \frac{1}{2}LI^2 \tag{1}$$

(3) 放電

状態 3 は、電力系統への SMES からの電力の取出しを示す。スイッチ S1 を開き、スイッチ S2 を閉じ SMES に貯蔵された電力エネルギーを交直変換器により、超伝導コイルに流れている直流電流を交流電流に変換して電力系統へ放電する。

3.2 SMES の規模と用途

電力用として SMES を利用する場合、表 2⁽⁴⁾に示すように、負荷平準化 (ロードレベリング)、負荷変動補償、電力系統安定化、停電対応等が考えられるが、SMES はこれらすべてに対応可能である。図 4⁽⁵⁾に、将来の SMES として期待される 100 万 kW×5 h の貯蔵が可能な 5 GWh SMES の構想図 [関西電力(株)との共同研究] を示す。

3.3 SMES の開発状況⁽⁶⁾

SMES は 1970 年代に研究が開始され、1980 年代に揚水発電規模に匹敵する 5 GWh 級の SMES の概念設計が日米でそれぞれ行われた。これまで製作された中で最大のものは、30 kJ (約 8 kWh) 級の SMES である。これはアメリカのタコマ変電所に設置され、系統安定化のための運転研究が行われた。また、アメリカでは、マイクロ SMES が市販されている。

我が国では、100 kWh 級 SMES の国家プロジェクトが行われているが、本プロジェクトは通商産業省資源エネルギー庁の“超伝導電力貯蔵システム要素技術開発調査”の一環として、(財)国際超伝導産業技術研究センター (ISTEC) 取りまとめで中部電力(株)へ再委託されている開発研究で、当社はこれまで Nb₃Sn 強制冷却型コイル (二重コンジット型) の要素試作を担当し、低交流損失化を達成し現在も本プロジェクトへ参画中である。図 5⁽⁷⁾は、当社と関西電力(株)との共同研究で開発した SMES 用 400 kJ 超伝導マグネットである。本マグネットは、定格電流 350 A、中心磁場 4 T、励磁速度 1 T/s (連続) で、高速応答性を持たせると同時に、低交流損失化を図るため、①超伝導線材内の Cu 安定化材を CuNi (キュープロニッケル) で細分化、②ヘリウム容器を FRP 化した点が特徴である。FRP ヘリウム容器は、軽量でかつ渦電流を防止するのに有効である。通電試験は、充放電速度 1 T/s、連続 3 h、充放電 1000 回行われ、動作特性及び健全性が確認できた。

関西電力(株)において本マグネットを使い系統導入時の系統特

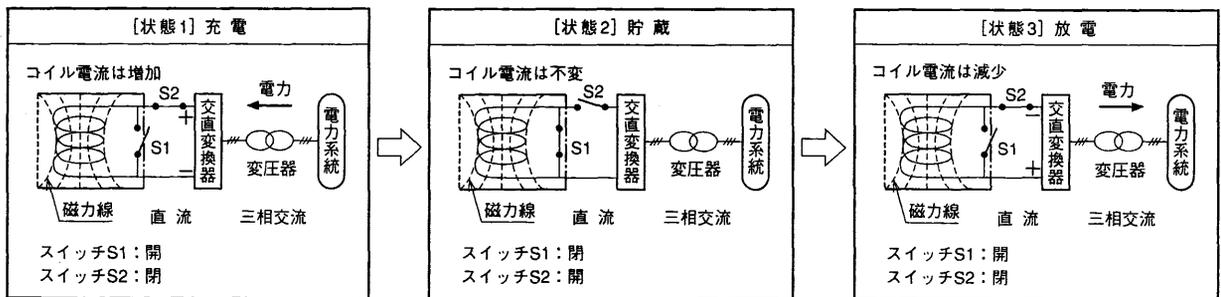
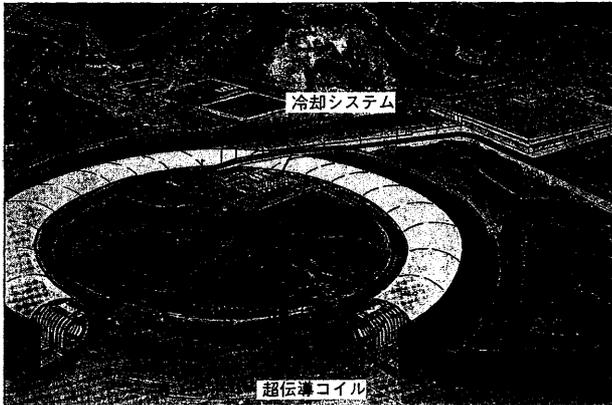


図 3 SMES 原理図 超伝導電力貯蔵装置の電力貯蔵の原理を示す。
Principle of SMES system

表2 規模の異なる SMES の設置場所と用途
Established place and use of different-scale SMES

規模	設置場所	用途							
		ロードレベリング	負荷変動補償	安定度向上	周波数調整	瞬時電圧低下対応	停電対応	自然エネルギー有効利用	
小規模 SMES 100 kWh 級	長距離送電線発電端, 66 kV 変電所 太陽光発電・風力発電導入箇所		◎	◎			△	○	△
中規模 SMES 10 MWh 級	配電用変電所 154 kV ~ 275 kV 変電所	◎	◎	△	○	△	○		
大規模 SMES GWh 級	分類型: 500 kV 変電所 大 型: 立地条件を満たす地点	◎			○		○		

(注) ◎: 本来の用途 ○: 有効 △: 条件 (立地点, 時間帯など) によっては有効



コイル大半径: 260m, コイル小半径: 13m, コイル数: 360

図4 5 GWh SMES 構想図 地下貯蔵式の将来の大規模貯蔵 SMES (100 万 kW × 5 h) の構想を示す。
Image of 5 GWh SMES

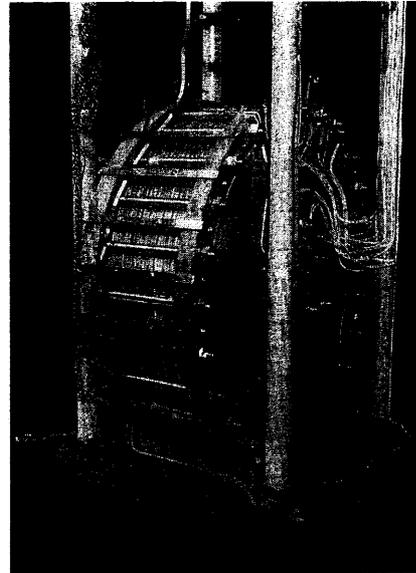


図5 400 kJ SMES 用超伝導マグネット [関西電力(株)との共同研究] 外径 780 × 幅 190 mm の NbTi 超伝導マグネットの外観を示す。
Superconducting magnet for 400 kJ SMES system (Joint research with the Kansai Electric Power Co., Inc.)

性について検証がなされた。

3.4 SMES の技術課題

SMES 実用化に当っては, 多くの技術課題があり, ①大型の超伝導コイルの開発, ②大電流型永久電流スイッチの開発, ③クエンチ対策技術, ④安全性の検証等, があるが, 国家プロジェクトでは現在は, 小規模 SMES (100 kWh 級) を対象に技術開発が進められており, 今後コスト低減, 高温超伝導の適用可能性について検討予定になっている。また, 将来構想として小規模 SMES の開発実績を踏まえて, 中・大規模 SMES の開発の可能性を検討しようとしている⁽⁴⁾。

4. 超伝導フライホイール装置

4.1 超伝導フライホイールの原理

フライホイールは, 円板を回転軸に取付けたもので, 円板を回転させることにより運動エネルギーの形でエネルギーを貯蔵する。図6に, 超伝導フライホイールの原理図を示す。軽量, 高強度の CFRP フライホイールリングを磁束のピン止めによる磁気反発作用を利用した高温超伝導磁気軸受で磁気浮上させて, 真空中で高速回転させることによりエネルギーを貯蔵するものであり, 発電電動機及び周波数変換装置を通して, 電力系統から超伝導フライホイールへの充電, 貯蔵を行い, 必要なときに超伝導フライホイールから電力系統への放電を行う。

フライホイールに貯蔵されるエネルギー E は, 式(2)で示される。

$$E = K_s \cdot \sigma \cdot V \quad (2)$$

ここで,

K_s : フライホイールの形状係数

σ : 回転によりフライホイールに発生する最大周方向応力

V : フライホイールの体積

軸受にはフライホイールの重量 W が作用し, 式(3)で示される。

$$W = \gamma \cdot V \quad (3)$$

ここで,

γ : フライホイール材料の比重

E は貯蔵エネルギーを大きくとる観点からできるだけ大きく, W は軸受荷重を低減する観点からできるだけ小さい方がよい。式(1)及び(2)から, フライホイール材料として比強度 σ_b/γ の大きい材料が好ましい。表3に, フライホイール候補材料の機械的特性を示すが, CFRP が他の材料に比べ比強度 σ_b/γ が大きく, 本超伝導フライホイールシステムに適していると考えられる。

表3 フライホイール材料の機械的特性
Mechanical property of flywheel materials

	比重 γ (gf/cm ³)	繊維方向引張強さ σ_b (kgf/mm ²)
Ti 合金	4.5	100
GFRP	2.0	145
CFRP	1.6	310

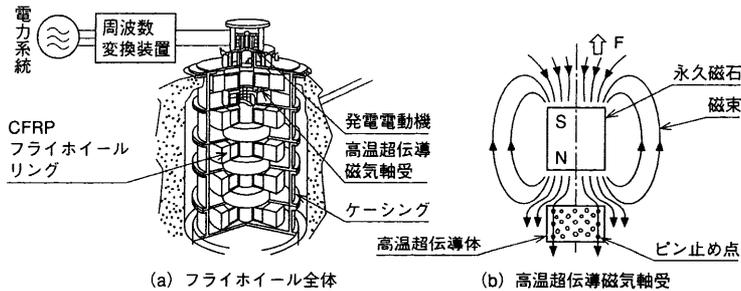
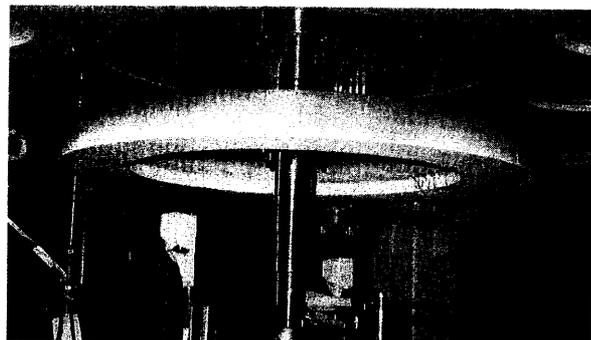


図6 超伝導フライホイール原理図
 Principle of superconducting flywheel



(a) CFRP フライホイール単体リング



(b) 高温超伝導磁気軸受

図7 1.4 kWh 超伝導フライホイール要素試作モデル [中部電力(株)との共同研究] 1.4 kWh 超伝導フライホイールの実寸大(外径600×内径450×幅70 mm)のCFRPフライホイール単体リングと高温超伝導磁気軸受の外観を示す。
 Manufacturing of elements for 1.4 kWh superconducting flywheel (Joint research with Chubu Electric Power Co., Inc.)

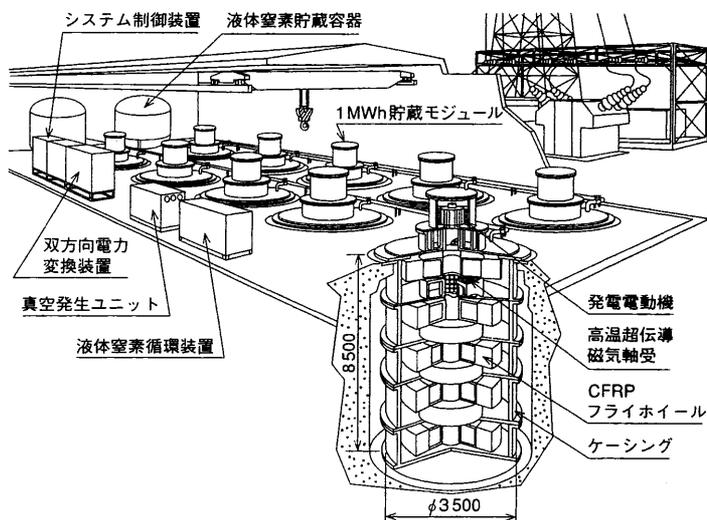


図8 10 MWh 電力貯蔵用超伝導フライホイールシステム構想図 分散電源用電力貯蔵装置として1 MWh貯蔵モジュールを10基連結したフライホイールシステムの構想を示す。
 Image of 10 MWh superconducting flywheel for energy storage system

4.2 超伝導フライホイールの開発状況

1987年に、液体窒素で実用可能なY系高温超伝導導体が発見されて以来、その応用として超伝導フライホイールへの適用化研究が開始された。国内では、1995年より、国家プロジェクトがスタートし、現在0.5 kWh機の開発が推進されている⁽⁹⁾。海外においても、研究が進められており、ドイツではカールスルーエ研究所で要素技術の検討及び設計がなされている。また、アメリカのアルゴンヌ国立研究所がコモンウェルス社と共同で、100 kWhを20台並べて2 MWhの容量とする超伝導フライホイール装置の開発に着手している⁽⁹⁾。

当社では、1994年より中部電力(株)との共同研究を開始し⁽⁷⁾⁽¹⁰⁾、現在1.4 kWh機の開発を推進中である。

図7に、1.4 kWh超伝導フライホイールの実寸大要素試作モデル(高温超伝導磁気軸受/CFRPフライホイール)を示す。高温超伝導磁気軸受については、ロータ計画重量80 kgfを10 mm浮上できることが確認でき、また、CFRPフライホイールリングについては、27 000 rpmまでの回転試験を実施済みである。

図8に、10 MWh超伝導フライホイールシステムの構想図[中部電力(株)との共同研究]を示す。

4.3 超伝導フライホイールの技術課題

超伝導フライホイール実用化に当って、高エネルギー密度化及び大容量化のため、①軽量・高強度・大型CFRPフライホイールの設計、製造技術の確立、②高面圧、低損失超伝導磁気軸受技術

の確立、がキー技術であり、これら技術の積上げが必要と考えられる。

5. む す び

新技術を応用した電力貯蔵技術として、超伝導電力貯蔵(SMES)及び超伝導フライホイールについて技術の現状を述べた。

現時点では、両者共に検討すべき課題が残されているが、今後の電力貯蔵のニーズ増大を考えると、21世紀に重要な技術となる可能性が大きく、またクリーン技術として地球環境対策の上でも適しており、今後の実用化が期待される。

参 考 文 献

- (1) 久留ほか、地球環境保全とこれからの発電技術、三菱重工技報 Vol.33 No.1 (1996) p.54
- (2) 田中ほか、将来の電力システムにおけるエネルギー貯蔵の導入量の展望—夜間の余剰電力からみた考察—、電中研研究報告 No.T 93064 (1994) p.3
- (3) 内山ほか、電力貯蔵技術とその将来展望、化学工学 Vol.54 No.10 (1990) p.703
- (4) 奥村、電力貯蔵シンポジウム'95、ISTECジャーナル Vol.9 No.2 (1996) p.20
- (5) Asami, N. et al., Superconducting Technology Development at Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., JAPAN 21st (July 1992) p.78
- (6) 田中、超伝導電力貯蔵(SMES)、電力貯蔵シンポジウム'95予稿集(1995) p.1
- (7) 南、三菱重工業(株)における超伝導研究、ISTECジャーナル Vol.10 No.4 (1997) p.29
- (8) 石川、高温超伝導フライホイール電力貯蔵、超伝導エネルギー貯蔵シンポジウム'97予稿集(1997) p.51
- (9) 村上ほか、超伝導エネルギー貯蔵、OMH (1995-7) p.43
- (10) Nagaya, S. et al., The Study of the High-Tc Superconducting Flywheel of the Energy Storage System, Proc. of 1995 IWS (1995) p.158