

# 新機能超電導電力機器の開発

Development of New-Concept Superconducting Power Equipment

浜島 高太郎  
T. Hamajima

鶴永 和行  
K. Tsurunaga

浦田 昌身  
M. Urata

超電導電力貯蔵装置 (SMES) は、コイルの抵抗がゼロの状態に電流を流し、必要なときに電流を外部に迅速に供給できる機能をもっている。また、超電導限流器は、定常時インピーダンスがゼロであり、過大な短絡電流が流れると、大きなインピーダンスが発生して電流を抑制する機能をもっている。これらは、従来機では実現できない機能で、新しい電力機器の特長である。

当社は SMES について、小規模 SMES プロジェクトの中で 100 kWh 級の要素コイル、また電力系統制御用の実用化の第一ステップとして 1 kWh/1 MW モジュール型の製作を担当した。超電導限流器ではヘリウムなどの冷媒補給を不要とした 6.6 kV-1 kA 級の限流器開発と短絡電流の限流試験に成功した。

We have been developing new-concept superconducting power equipment such as a superconducting magnet energy storage (SMES) system and a superconducting fault current limiter. The SMES stores magnetic energy in a superconducting coil without loss, and discharges the energy very rapidly into the power line when needed. The fault current limiter normally passes transport current without impedance, but restricts excessive fault current in an emergency.

This paper describes superconducting coils for the SMES and a 6.6 kV-1 kA class fault current limiter.

## 1 まえがき

21 世紀に向かって、ますます増加する電力量の需給に伴う種々の課題や環境問題に対して、電力機器の超電導化は、重要な役割を担うものと期待されている。このため、超電導線の実用化とともに世界各国で精力的に研究開発が行われ、当社も超電導の電力機器応用への技術開発に、本格的に取り組んできた。現在、超電導電力機器は大型プロジェクトが展開され、実用化に向けた開発段階に入った。

超電導電力機器は、現用機の機能向上を旨とした超電導発電機、超電導変圧器、超電導ケーブル、および従来機にない新しい機能をもつ SMES、超電導限流器に分類される。特に、後者の超電導機器は、超電導の特長をきわめてうまく利用した装置で、次世代の電力機器として革新的な役割を果たすものと期待される。

ここでは、SMES、および超電導限流器について、当社が先駆けて開発してきた技術、およびそれらに対する展望について述べる。

## 2 SMES

SMES は、超電導の抵抗がゼロである特徴を利用して超電導コイルに電流を供給し、磁気エネルギーの形で電力を貯蔵して必要に応じてエネルギーの出し入れを行う装置である。電力の直接の入出力により高い貯蔵効率、速い応答

速度が得られ、パワー エレクトロニクスと組み合わせて、有効・無効電力の独立制御などが可能である。そのため、kWh から GWh 級の幅広い規模で、系統の負荷変動補償や安定化から負荷平準化までの多様な機能をもち、将来の電力系統において重要な役割を果たすものと期待されている。

当社では、SMES に要求されるもっとも重要な技術である繰返しパルス運転下で安定に運転できる、超電導技術の開発を 1970 年代後半から開始し、その技術の確立とスケールアップの装置製作技術開発を図ってきた。

### 2.1 100 kWh 級 SMES の要素コイル

小規模 SMES のパイロットプラントに必要な要素技術を確立するための SMES プロジェクトは、資源エネルギー庁から(財)国際超電導産業技術研究センター (ISTEC) が受託した。その中の心臓部にあたる試作要素コイルの試作と評価を、ISTEC から受託している中部電力㈱から当社が受注した。パイロットプラントは、12 個の要素コイルをトロイド型に並べて構成される。試作した要素コイルは 1 要素コイルの 1/2 の大きさで、要素コイルを 2 個厚み方向にスタックすると、1 要素コイルとなる。また、これには将来必要となる強制冷却コイル方式を採用した。試作要素コイルの諸元を表 1 に示す<sup>(1),(2)</sup>。

試作要素コイルは、大電磁力に耐え得るように、細い超電導線を多数本ステンレスの管内に納めた構成の、超電導導体を用いた。図 1 に、使用した超電導導体の断面と、真空容器内に配置した試作要素コイルの写真を示す。この導

表 1. 試作要素コイルの諸元

Main parameters of element coil for 100 kWh SMES

内径/外径/厚さ	2.76/3.34/0.234 m
最大磁界	2.84 T
蓄積エネルギー	7.92 MJ
冷却方式	強制冷却
超電導材料	NbTi 合金
コンジット外形寸法	25.4×27.8 mm
総ターン数	88

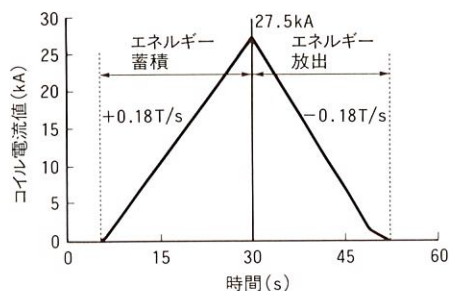


図 2. パルス運転時の電流波形 パイロットプラントを模擬したパルス運転モードで、安定に運転できることを実証した。

Pulse current waveform in pilot plant simulation

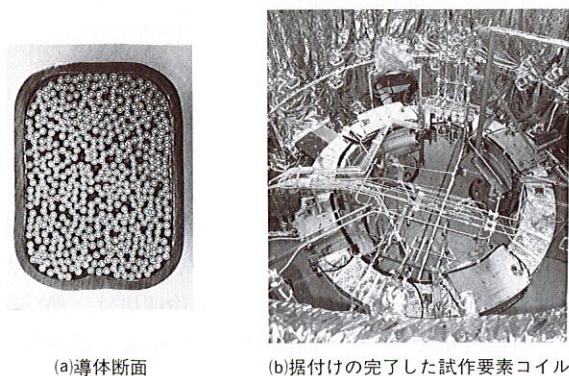


図 1. 超電導体断面と試作要素コイル 試作要素コイルを試験のために、真空容器内に設置した状態を示す。

Forced-cooled cable-in-conduit type superconductor and superconducting element coil for SMES

体はヘリウムを、多数本の超電導線と、ステンレス管の間の空間に強制的に循環させて冷却する方式の導体である。

試作要素コイルは、ISTEC と日本原子力研究所との共同研究により、同研究所の試験装置の中に設置して、性能評価試験を行った。

パイロットプラントに必要な要素コイルの諸特性を把握するために、初期冷却・昇温特性、圧力損失特性、侵入熱特性、流量バランス、接続抵抗、熱擾(じょう)乱限界値、臨界電流、交流損失などの測定を行うとともに、パイロットプラント運転パターンでの通電特性などの実証試験を行い、所定の性能を得た。

図 2 には、パイロットプラント運転時と同じ磁界変化率の下で、エネルギーの蓄積・放出のパルス通電を行い、超電導状態を保持したまま電力の充電・放電が可能であることを確認した電流波形を示す。

このコイルは、米国との国際協力の下、米国ローレンスリバモア国立研究所(LLNL)の試験装置内に組み込まれ、98年度まで長期繰返し通電試験を行う予定である。

今後、これらの結果を基にパイロットプラント建設の総合評価を行い、次のステップに発展させていく。

## 2.2 1kWh/1MW モジュール型 SMES

負荷変動補償などを目的とした電力系統制御用 SMES の

実用化の第一ステップとして、安定性・信頼性を十分に評価できるモジュール型 SMES (愛称: ESK) を設計・製作し、大容量化および実用化技術の開発を九州電力(株)と共同研究で行っている<sup>(3)</sup>。

この SMES は 2 モジュールで構成され、各モジュールは 3 個の要素コイルから構成される。要素コイルの形状は、大容量化に向けて問題となる総拡張力が低減でき、かつ D 形の曲線部を設けることにより、曲げモーメントを減少できる変形 D 形コイルを採用した。

要素コイルは、液体ヘリウム中に浸漬冷却される。コイルの主要諸元を表 2 に、完成した要素コイルを図 3 に示す。

表 2. 1kWh モジュール型 SMES の諸元

Main parameters of 1 kWh experimental SMES

コイル形状	変形 D 形
最大貯蔵容量	1 kWh (3.6 MJ)
定格直流電流	1 kA
最大経験磁界	5.5 T
コイル数	6 (3×2 モジュール)
冷却方式	浸漬冷却



図 3. 試作要素コイル通電試験装置 試験のためにフランジに取り付けた状態のコイルを示す。

Model coil for 1 kWh SMES

コイルに使用した導体は、交流損失を低減するために、高抵抗層のCuNi合金を被覆した構造をもつ素線をより合わせている。1モジュールの製作を完了した後、各要素コイルの単体通電試験を実施して、コイルの主要諸元が設計値どおりであることを確認した。また、6個のコイルの同時励磁で経験される電磁力を模擬するために、定格の1.2倍の電流まで上昇させ、コイルの健全性を確認した。

今後、九州電力(株)管内の配電用変電所で、SMESの有効性を検証する系統連系試験を実施する計画である。

### 3 超電導限流器

超電導体中を流れる電流の密度が所定値(臨界電流値)を超えると、超電導体は瞬時に抵抗体に変化する。この現象はクエンチ現象と呼ばれ、超電導応用の面でしばしば問題となる現象の一つとして知られていた。当社は、このクエンチ現象を電流非直線抵抗体として応用することで、電力系統に生ずる事故電流を瞬時に抑制する機器として、超電導限流器の開発を東京電力(株)と共同で進めている。

#### 3.1 開発の現状

超電導限流器の開発は、現在、6kV-1kA級システムでの原理実証を終え、66kV級の要素開発に入っている。最終ターゲットは、500kV級超電導限流器の開発である。試作された6.6kV-1kA超電導限流器の外観と構造断面を図4および図5に示す<sup>(4)</sup>。

超電導限流器は、図5に示すように、常温端子、電流リード、超電導限流素子、ヘリウム容器、真空容器、冷凍機

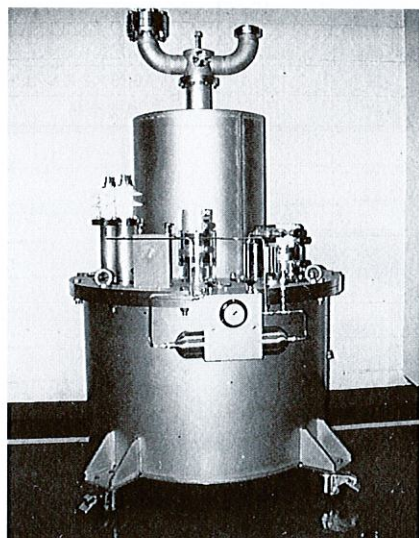


図4. 6.6 kV-1 kA 級超電導限流器 下段部容器の上部に(左から)常温端子、80 K 冷凍機、4 K 冷凍機が取り付けられている。

External view of 6.6 kV-1 kA class superconducting fault current limiter

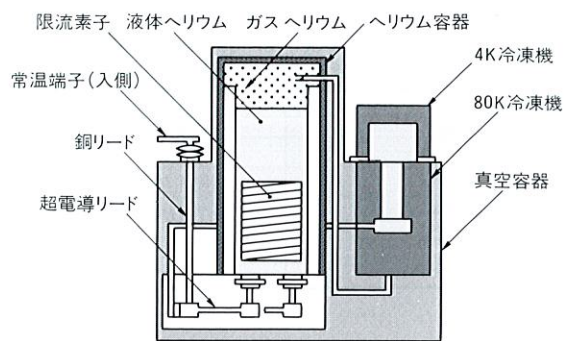


図5. 6.6 kV-1 kA 級超電導限流器の構造断面 ヘリウム容器内の超電導限流素子と常温端子間は、銅および酸化銅超電導電流リードにより接続されている。

Cross-sectional view of 6.6 kV-1 kA class superconducting fault current limiter

の各部から構成されている。電流は常温端子(入側)、電流リード、超電導限流素子、電流リード、常温端子(出側/図では省略)のルートを通る。80 K 冷凍機は、熱シールド板と超電導電流リードの高温端温度を80 K に冷却保持して、ヘリウム容器内への輻射および伝導侵入熱量を抑制する。超電導限流素子は、ヘリウム容器内の液体ヘリウム中に保持冷却されている。液体ヘリウムは、前述の侵入熱量と超電導限流素子の定常交流損失および限流時ジュール損失によって一部が気化してガスヘリウムとなるが、4 K 冷凍機によって冷却され液体ヘリウムに戻される。超電導限流器は、このようなサイクルにより液体ヘリウムの供給無しで、連続運転が可能なクローズドシステムとなっている。

超電導限流器の基本仕様を表3に示す。限流器の定常インピーダンスは6 mΩと非常に低いが、限流時には6 Ω(1,000倍)に上昇する。事故電流を遮断した後は、10秒以内に定常状態に復帰し、繰返しの使用にも対応できる。

表3. 6.6 kV-1 kA 級超電導限流器の基本仕様

Basic specifications of 6.6 kV-1 kA class superconducting fault current limiter

定 格	6.6 kV-1 kA 50 Hz (連続)
限 流 動 作 電 流	3 kA (波高値)
定常インピーダンス	0.006 Ω-50 Hz
限流インピーダンス	6.0 Ω

超電導限流器の6.6 kV回路における短絡電流限流特性を図6に示す。波高値56 kAの短絡電流(破線)は超電導限流器により第1波から5.2 kA(実線)に限流された後、最初のゼロクロス点で直列スイッチにより遮断されている。

#### 3.2 適用効果

図7に超電導限流器適用の一例を示す。系統連系用超電導限流器 FCL0 は、複数の系統間を常時連系して、相互に

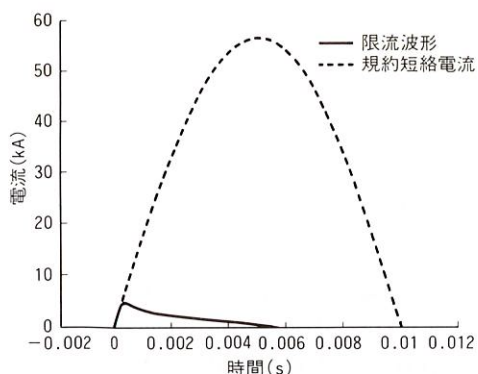


図6. 6.6 kV-1 kA 級超電導限流器の短絡電流限流特性 6.6 kV-56 kA 波高値の短絡電流を 5.2 kA ピークに限流させる。

Current limiting characteristics of 6.6 kV-1 kA class superconducting fault current limiter

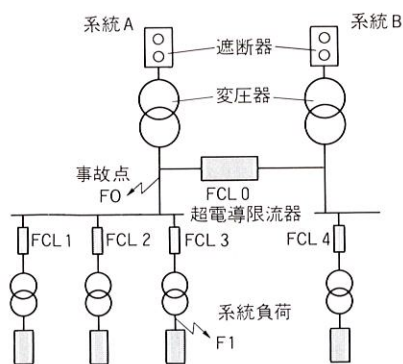


図7. 電力系統への超電導限流器の適用例 系統間連系およびフィード保護に超電導限流器を適用することにより、系統間の電力融通と事故発生時の健全系統保護が可能となる。

Example of application of superconducting fault current limiter to electric power system

電力融通を行い、強固で安定な電力系統網を実現する一方、連系系統の一つに事故(図7中のF0)が発生して過電流が流れると、瞬時に高抵抗体に変化して事故系統との連系を遮断する。これにより健全系統は正常運転を継続できる。フィード保護用超電導限流器 FCL 1~4 は、フィード事故(図7中のF1)による過大な事故電流を瞬時に限流し遮断する。これにより、フィードを構成するケーブルや電力機器の短時間耐量と、耐電磁力を大幅に低減した設計が可能となり、コンパクト化とコストの低減が図れる。また、健全フィードの瞬停時間が短縮されることから、瞬停トラブルの防止にも有効と考えられ、電力の信頼度向上にもつながる。

### 3.3 将来展望

超電導限流器は新しい概念の超電導応用機器であり、電力系統、パワーエレクトロニクス素子、超電導システムなど、広範な分野の過電流保護機器として期待されている。

また、将来的には半導体技術の進歩にも匹敵するような、超電導材料や超電導限流技術の飛躍的進展も期待できる。超電導限流器のもつ技術的な魅力と事業性によって、世界的規模で原理や方式を含めた探究が進められており、今後もさまざまに分化し、進化した超電導限流器が開発されていくものと思われる。

## 4 あとがき

超電導の電力応用機器として期待されている SMES と超電導限流器につき、開発の現状を述べた。今後の SMES 試作要素コイルの長期試験の実施や、モジュール型 SMES の系統連係試験により、実用化へ向けた技術開発がさらに加速されていくことが期待される。また、ヘリウムなどの冷媒補給を不要とした 6.6 kV-1 kA 単相限流器での限流試験の成功により、今後は極低温絶縁技術など、66 kV 系統や 500 kV 基幹系統用限流器など、高電圧限流器システムを実現するための技術に重点が置かれ、開発が進められていくこととなろう。

## 謝辞

この論文の執筆に当たり、ご協力をいただいた資源エネルギー庁、(財)国際超電導産業技術研究センター、日本原子力研究所、中部電力(株)、九州電力(株)および、東京電力(株)に感謝の意を表する。

## 文献

- (1) T. Satow, et al: Present Status of 480 MJ/40 MW SMES Development Project, Proc. ICEC-97, Matsue, pp.122-125 (1997)
- (2) (財)国際超電導産業技術研究センター: 超電導電力貯蔵システム要素技術開発調査, 研究成果発表予稿集 (1997)
- (3) T. Imayoshi, et al: Design Study for Development of 1 kWh/1 MW Module Type SMES, ICEC16/ICMC Proc. pp.1049-1052 (1997)
- (4) 大熊 武, 岩田良浩: 「超電導限流器」電気学会誌, 117 巻 4 号, pp. 222-226, 1997



浜島 高太郎 Takataro Hamajima, D.Eng.

重電技術研究所 電磁装置・放電応用技術開発部主幹, 工博。超電導コイルの研究開発に従事。IEEE, 電気学会, 低温工学会会員。  
Heavy Apparatus Engineering Lab.



鶴永 和行 Kazuyuki Tsurunaga

府中工場 スイッチギヤ部主査。  
限流器の開発に従事。電気学会会員。  
Fuchu Works



浦田 昌身 Masami Urata

電力事業部 新エネルギー技術開発部主査。  
超電導応用機器の開発に従事。電気学会, 低温工学会会員。  
Power Systems Div.