

次世代電力機器を支える超電導技術

Superconducting Technologies for Next-Generation Electric Power Equipment

浜島 高太郎
T. Hamajima

高野 広久
H. Takano

北島 敏男
T. Kitajima

超電導電力機器は、次世代の有力な電力機器の候補である。その中には、超電導電力貯蔵装置 (SMES) や超電導限流器のように従来機器にない機能をもつもの、および超電導発電機、超電導変圧器、超電導ケーブルなどのような付加価値をもった現用機器の改良型のものがある。現在、SMES、核融合装置、発電機は実用化のための開発段階にあり、大型プロジェクトとして推進されている。これらを支える主要な超電導技術として、超電導コイルを安定に運転できる技術および変動磁界中でも性能が発揮できる技術を確認し、これらを電力機器に適用することにより、一段と信頼性のある超電導機器の実現に有効であることを確認した。

We have been developing next-generation electric power equipment such as a superconducting magnet energy storage (SMES) system, superconducting generator, superconducting transformer, superconducting fault current limiter, and superconducting cable. The SMES and the fault current limiter are new-concept equipment, while the other superconducting equipment comprises advanced versions of conventional equipment.

The SMES, a fusion machine, and the superconducting generator have been intensively developed as large-scale national projects in Japan. We have established important technologies related to stability and alternate current loss estimation which will lead to highly stable and reliable superconducting equipment.

1 まえがき

超電導の応用は比較的新しく、超電導線の実用化とともに1970年ころから世界各国で研究開発が始まった。そのころから、電力応用を旨とした超電導発電機、MHD (電磁流体工学) 発電装置や、加速器、核融合装置、磁気浮上列車などへの応用が始まり、当社も本格的な取組みを開始した。1986年に高温超電導が発見され、超電導に対する期待が一段と大きくなった。図1に示すように、超電導応用も広範囲な分野に広がり、医療分野ではMRI (磁気共鳴診断装置) が商品化され、電力分野で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。

ここでは、超電導を用いた次世代電力機器の代表として、SMES、核融合装置、超電導発電機、などに用いられる主要な超電導技術を中心に紹介し、次世代の超電導電力機器に対する展望を述べる。

2 超電導の特長と技術課題

電力機器への応用は、超電導の特長をうまく利用したものである。抵抗ゼロの性質から、機器の低損失化や高効率化、が期待でき、また電流を永久に流し続けることができるため、電力を磁気エネルギーの形で貯蔵可能である。さらに、強磁界を発生できる特性から、鉄心が不要となり、電力機器の小型・軽量化や低インピーダンス化が図れ、電

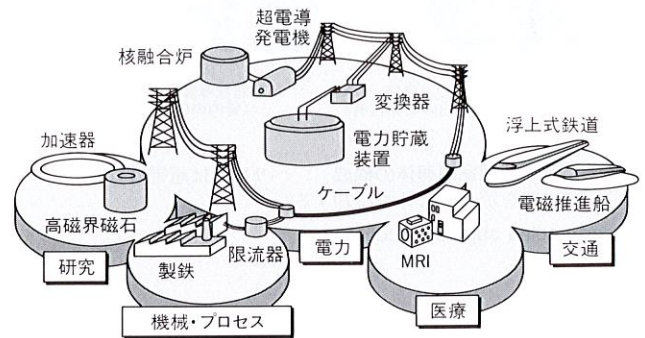


図1. 各分野における超電導応用 超電導は広範囲の分野に応用され、一部は商品化、実用化されている。

Applications for superconductivity

力系統の安定度向上が期待できるなどの効果がある。

一方、超電導線は低温で使用されるために、比熱がきわめて小さくなり、常温の1/3,000程度である。したがって、超電導線のわずかな動きによる摩擦発熱などの熱で、超電導線は温度上昇し、超電導状態を維持する臨界温度を超え、常電導状態に移り、抵抗による発熱が生ずることがある。このため、超電導が破れても、再度安定に超電導に回復するための超電導安定化技術が重要である。特に、大型コイルになるほど重要になる。また、超電導線に加わる磁界が変動すると交流損失が発生し、熱となって超電導線の温度を上げ、超電導状態が消失することがある。このため、交流損失を低減する技術開発が重要となる。これらの技術開

発が超電導電力機器開発のキーポイントとなる。

3 超電導電力機器への適用

3.1 大型コイルの安定化技術

SMES や核融合装置用の超電導コイルは、GJ 以上のエネルギーを貯蔵するために巨大な電磁力を受ける。したがって、コイルおよび導体の剛性を高くし、また超電導線の冷却特性を上げるためには、図 2 に示すように、ステンレスの管内に多数の撚(よ)り合わせた超電導線を入れ、線と管のすき間に超臨界圧ヘリウムを圧送する構成の強制冷却導体が適する。蓄積エネルギーが大きくなる大型コイルほど剛性が必要となり、強制冷却導体を巻線したコイルが有効となる。

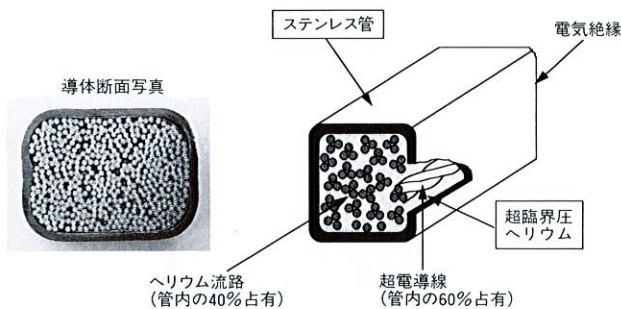


図 2. 強制冷却超電導導体の構成 ヘリウムは超電導線とステンレス管のすき間を流れて導体を冷却する。

Forced-cooled superconductor

大型コイルでは、超電導線の動きに伴う摩擦発熱などの外乱により、導体の一部が超電導状態を消失すると、通電電流も大きいために常電導抵抗の発熱が大きくなる。その発熱がヘリウムの冷却能力を超えると、常電導部が拡大する、いわゆるクエンチという現象に至り、貯蔵されているエネルギーが常電導部で消費され、大型コイルの場合には機器に損傷を与える懸念がある。一方、発熱を冷却能力以下に抑えると、常電導は超電導に回復する。したがって、導体内の発熱と冷却の関係を明確にし、熱の流れを予測することが重要である。そのため、超電導の特性と、超臨界圧ヘリウムの流体特性を表す方程式を連立して解析するシミュレーションコードを開発した。これを日本原子力研究所と当社の共同研究で開発した強制冷却コイルに適用した結果を図 3 に示す。この図から、電流が大きくなると、許容できる外乱量が急激に小さくなることがわかり、安定に運転できるための電流や温度などの定格値を前もって推測できる。図には、外乱を外乱から与えたときの実験結果も

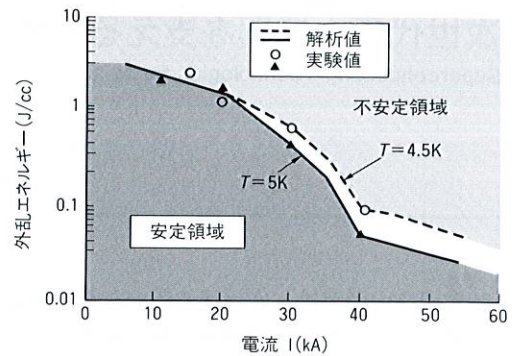


図 3. 超電導コイルの安定性 超電導コイルの安定に運転できる領域が予測できる。

Stability margin of superconducting coil

示した。解析と実験結果が良く一致しており、解析が予測に有効であることを示している。

当社は、強制冷却コイルの開発を 10 年以上前から行い、この解析を含む種々の技術を蓄積してきた。表 1 に当社の強制冷却コイルの実績を示す。

表 1. 当社の強制冷却超電導コイルの実績
Toshiba's experience with forced-cooled coils

対象	直径 (m)	完成
社内 R&D コイル	1.1	1984 年
日本原子力研究所との共同研究	1.8	1991 年
文部省核融合科学研究所大型ヘリカル装置	コイル 1: 4.1 コイル 2: 6.2 コイル 3: 11.6	1993 年 1995 年 製作中
資源エネルギー庁 SMES プロジェクト	3.0	製作中
国際熱核融合実験炉 (ITER) R&D コイル	3.6	製作中

資源エネルギー庁と国際超電導産業技術研究センターの主導で進めている SMES プロジェクトでは、電力系統安定化を目的とした 20 MW-100 kWh 容量のパイロットプラントの建設を目標としており、このための要素コイルの開発を 1998 年までに終了させる予定である。この SMES 要素コイルには強制冷却コイルを採用した。図 4 には、製作した要素コイルを示す。パイロットプラントでは、この要素コイルをトロイダル状に並べて構成し、漏えい磁界の減少を図る構成としている。

また、核融合装置用大型コイルにも、大きな電磁力が作用するため強制冷却コイルが用いられる。国際協力で進められている国際熱核融合実験炉 (ITER) は出力 1.5 GW が目標である。研究開発の段階は 1998 年に終了し、その後、実験炉の建設が計画されている。現在、中心に配置される

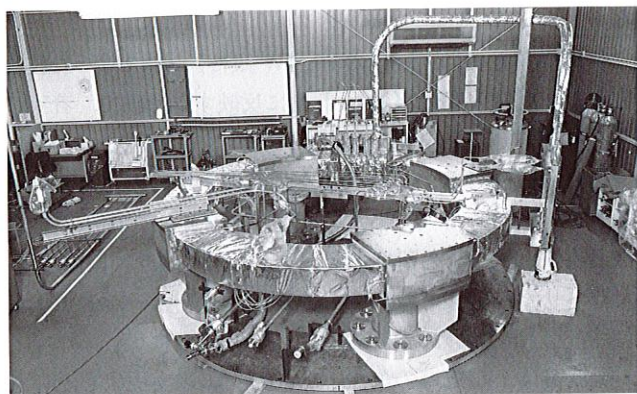


図4. SMES 要素コイル 強制冷却導体で巻線した後に支持脚を取り付けて完成したコイルである。

Superconducting coil for SMES

予定のポロイダルコイルの超電導モデルコイルを製作中である。

また、国内では、核融合科学研究所の大型ヘリカル装置を岐阜県土岐市に建設中である。その三対のポロイダルコイルには強制冷却が採用され、現在までに二対のコイルを製作し、世界最大の直径 11 m をもつコイルを現地で製作中である。

3.2 超速応励磁型コイルの交流損失低減化技術

超電導発電機は、図5に示すように、超電導界磁巻線とトルクチューブ、ダンパなどを含む回転子、および常電導の電機子巻線、磁気シールドなどの固定子で構成されている。界磁巻線を超電導化することにより、高効率、小型・軽量、大容量、電力系統安定度向上などが期待される。超速応励磁型超電導発電機は、通常直流で運転されているが、電力系統に擾(じょう)乱が発生したときに、急速な界磁電流の変化、いわゆる超速応励磁を行うことにより電力動揺を抑制する機能をもつ。そのとき、界磁電流の変化に伴っ

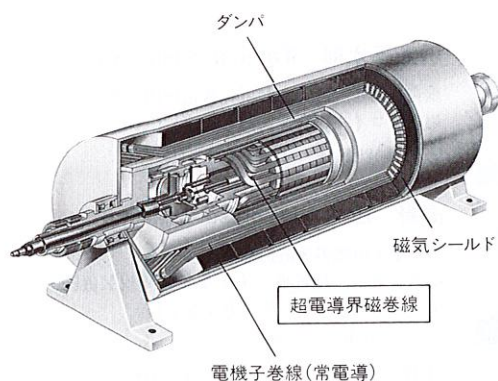


図5. 超電導発電機の構造 界磁巻線を超電導化した超電導発電機概念構造を示す。

Cutaway view of superconducting generator

て、超電導体には変動磁界が加わる。この変動磁界で交流損失が発生し、これによる温度上昇で超電導コイルがクエンチすることを防ぐため、損失の低減化を図る必要がある。

超電導線は、多数の数 μm 径の超電導フィラメントが銅などの安定化母材の中にらせん状に埋め込まれた構成になっている。図6には、任意の一对の超電導フィラメントを取

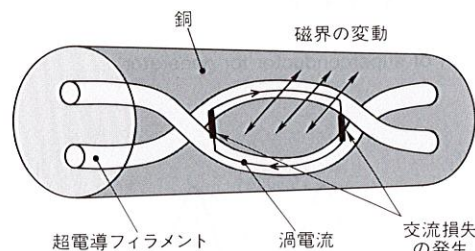


図6. 渦電流損失の発生機構 磁界の変動により、超電導フィラメントと銅母材で作られるループに発生する。

Mechanism of eddy current loss

り出して示した。図に示すように、一对の超電導フィラメントと銅を介したループに変動磁界が鎖交し、ループにはその磁束を打ち消すように渦電流が発生する。この交流損失は銅の部分で発生し、渦電流の二乗に比例して増加する。渦電流を減少させるには、ループの途中に銅の約 1,000 倍の抵抗をもつ銅ニッケル合金 (CuNi) の高抵抗層を適切に配置する必要がある。渦電流ループを有効に切るには、高抵抗層を多層化した複雑な構成になる。したがって、単純な計算では精度よい損失を推定できない。有限要素法による電磁界解析を適用することにより、渦電流分布や交流損失を精度よく予測できるようになり、また、最適な配置も可能となった。

この解析手法を 70 MW 級超電導発電機 (Super-GM) 用界磁巻線導体の設計に適用した。その結果、高抵抗層の最適な配置などにより、従来実績に対して全体の交流損失を約 1/3 に低減できた。70 MW 級発電機用導体を図7に示す。導体は超電導素線を 7 本撚り合わせて、さらにそれを 11 本撚り合わせた構成で定格電流 3,200 A の容量をもつ。この導体を 70 MW 級超電導発電機の回転子部分モデルのスロットにしっかりと固定し、国内外で初めて 3,600 rpm の回転場中で 5,000 A/s の超速応励磁を達成した。そのときの界磁電流と界磁電圧の波形を図8に示す。2 回のサイクル後も、安定に運転できたことを表している。

70 MW 級超電導発電機はニューサンシャイン計画の下に 1997 年度に工場試験を実施し、1998 年度に関西電力(株)の発電所での現地試験を予定している。

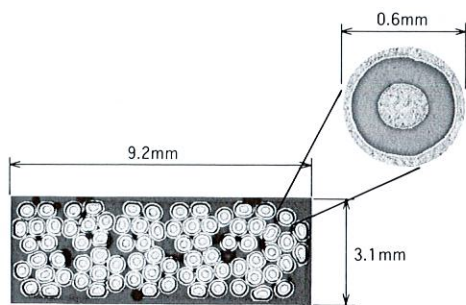


図7. 超電導発電機用導体の断面 交流損失を低減化した超電導導体の断面と構成。

Cross section of superconductor for generator

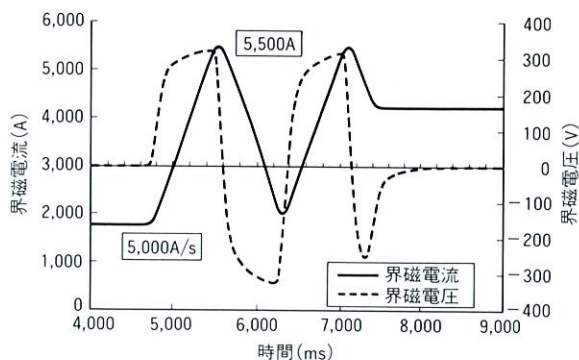


図8. 超速応励磁試験波形 3,600 rpmの回転場での超速応励磁時の界磁電圧・電流波形を示す。

Current and voltage waveforms in quick-response excitation test

この研究の一部は、通商産業省工業技術院ニューサンシャイン計画「超電導電力応用技術開発」の一環として、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) からの受託により実施したものである。

4 次世代の超電導電力機器の開発

超電導電力機器の代表として、SMES、核融合装置、発電機を取り上げたが、このほかに、限流器や変圧器、リアクトル、ケーブルなどがある。これらのうち、SMESや限流器は、従来器にはない新しい機能をもっており、将来の電力機器として大きなインパクトを与える可能性がある。

SMESは、その新しい機能のため多くの用途が検討されており、日負荷平準化用の大型から、応答速度の速いことを利用した瞬時の異常電圧保護用のマイクロ型までの広範囲な規模に広がっている。このマイクロ SMES はすでに商品化され、さまざまところで使われている。アラスカでは、30 MW-0.5 MWhの SMES が建設される計画である。国内では、SMES プロジェクトが推進されており、今後はニーズとともに大型化の方向へ着実に進むものと予想され

る。

超電導発電機は、現在の70 MW級モデル機で培った技術を次の200 MW級パイロット機に反映する計画で、着実に進められている。

核融合装置では、プラズマを長時間閉じこめるために超電導コイルが不可欠である。現在、国際協力で国際熱核融合実験炉 (ITER) の研究開発が進められており、国内では、大型ヘリカル装置を建設中で、夢のエネルギー源の実現に向けた努力が払われている。

限流器は、超電導の欠点とされるクエンチ現象を逆に利用した装置である。電力系統に直列に接続され、通常インピーダンスがゼロで、事故電流が増大すると、コイルがクエンチして抵抗を発生し、事故電流を抑制する機能をもっている。現在、東京電力(株)と共同研究で6.6 kV-1 kA級の限流器を開発した。これらの技術を基に容量の大きな基幹系統への適用の検討を開始した。

電力消費量は今後も増大し続け、遠距離大電力輸送がますます重要となるため、それに対応した超電導電力機器の検討が開始された。

5 あとがき

次世代の超電導電力機器に適用する特長的な主要な技術として、超電導安定化や交流損失低減化技術を紹介した。実際に、各機器を製作するにあたっては、これらの技術と合わせて機器の性能を満足させるのに必要な独自の技術があり、それらの技術も重要である。

エネルギー・電力機器を超電導化することにより、多くの効果が期待でき、それらを実現するための主要な技術開発を示した。現在は、実用化に向けた開発段階にあり、大型プロジェクトが推進されている。今後いつその進展が期待される。当社は特長のある超電導技術を開発して、エネルギー・電力機器の超電導化の実現に向けていつその努力をする所存である。



浜島高太郎 Takataro Hamajima, D.Eng.

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



高野 広久 Hirohisa Takano

京浜事業所機器装置部部长。核融合装置、超電導コイルなどの新規装置開発設計に従事。日本機械学会、原子力学会会員。Keihin Product Operations



北島 敏男 Toshio Kitajima

京浜事業所発電機部課長。超電導発電機の開発設計に従事。日本機械学会会員。Keihin Product Operations