

高温超電導SMESの要素技術開発

超電導電力機器開発の最先端

Elemental Technology Development for High-Temperature Superconductivity SMES

Development of Cutting Edge Superconductive Electric Power Equipment

(電力技術研究所 流通G 超電導T)

イットリウム(Y)系高温超電導体の、高強度・高電流密度という特徴を活用した、超電導電力貯蔵装置(SMES)の要素技術開発を行ってきた。電力機器としての絶縁の確保は、超電導状態を発現させるための冷却効率を低下させる。本稿では、絶縁性能と両立した冷却技術や、超電導線材の異常を検出して超電導機器を保護する技術の開発について報告する。

(Superconductivity Team, Power System Group, Electric Power Research and Development Center)

Elemental technology for Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) using the high-strength, high current density characteristics of Yttrium (Y) series high-temperature superconductors was developed. Ensurance of insulation as electric power equipment decreases cooling efficiency, which is required for superconductivity. This paper presents that development of a cooling technology which coexists with insulation performance, and technology for protecting superconductive equipment by detecting errors with the superconductive material.

1 開発の背景

イットリウム(Y)系超電導線材は、金属基板上に複数の薄膜を積層した構造になっており、強度の高い金属を基板に使用することで高強度化することができる。超電導線材のメリットは抵抗ゼロで高電流密度の通電を可能とすることであるが、強磁場下での通電は電流密度の大きさに比例して強い電磁力を超電導線材が受けるため、超電導線材の高強度化は、強磁場を発生する超電導コイルに有効であり、Y系超電導線材を用いた機器開発が全世界で推進されている。これまでに、当社はYoroi-coilと称した高強度超電導コイル構造の開発に成功し(技開ニュース145号)、電磁力に対する超電導コイルの強度で制限されてきた発生磁場や通電電流を著しく増大させる手法を見出した。しかし、超電導電力貯蔵システム(SMES: Superconducting Magnetic Energy Storage System)に代表される超電導電力機器では、冷却を含むシステム全体での効率やメンテナンス性、異常時の対応等が重要となる。本稿は、新エネルギー・産業技術開発機構(NEDO)から受託した経済産業省資源エネルギー庁のプロジェクト「イットリウム系超電導電力機器技術開発」の一環で行なってきた高温超電導SMESの技術検討の内、伝導冷却技術開発とコイル保護技術開発について報告する。

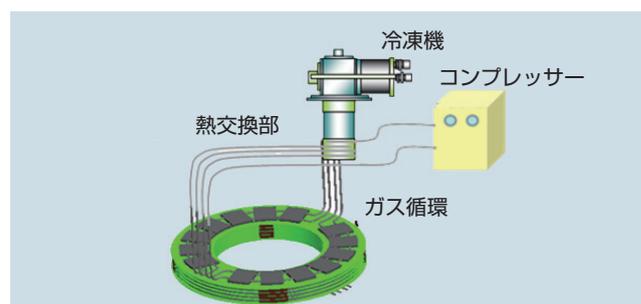
2 伝導冷却技術開発

Y系超電導線材は高い臨界温度を有し、20K~40K(-253℃~-233℃)の温度領域では、液体ヘリウム温度領域に比べ超電導コイルの熱的安定性が非常に高いことが確認されている。この高い熱的安定性はSMESの短時間過負荷運転を可能にし、この温度領域は高効率な冷凍機で超電導コイルを冷却することも可能となる。SMESコイルの冷却システムに要求される事項として、次の課題が挙げられる。

①高速で均質な冷却

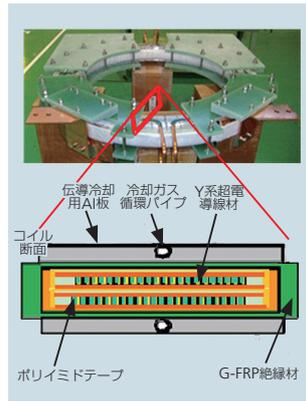
②冷凍機とコイルの遠隔分離

20K~40Kという温度領域においては、固体熱伝導のみによる冷却システムだけでは十分な熱伝達の実現が困難である。そこで、本研究では、第1図に示すヘリウムガスを循環させることで熱伝達を促進する、高速で均質な冷却システムを検討した。この冷却システムを導入して、実規模SMESシステムの実現性を評価するため、直径600mm級モデルコイルを製作し、伝導冷却によるコイル特性評価を行った。コイルは、絶縁を施した4枚積層のY系超電導線材をパンケーキ状に巻線し、絶縁処理したものを2層重ね、その両表面に冷却配管を埋め込んだアルミニウム伝熱板を取り付けた。超電導状態を維持するために必要な冷却にとって、電力機器として必要な絶縁は冷却効率を低下させるため、絶縁と冷却の両立を図ることが必要である。第2図にコイル外観写真と断面構造図を示す。コイルに接続した冷却配管内に小型冷凍機で20K以下に冷却したヘリウムガスを循環することで、コイル全体が20K以下に冷却されることを確認した。しかし、SMESには複数個のコイルを配置するため、磁場分布が発生し、それに伴う発熱分布が存在する。この発熱分布に対して冷却シミュレーションを実施し、シミュレーションの結果を受け、発熱分布を模擬できる発熱体を用いてコイル伝導冷却構造の妥当性を評価する試験を行った。発熱体は、コイルの半径方向、周方向ともに分割して



第1図 ヘリウムガス循環による伝導冷却システムの模式図

ヒータを埋め込み、温度分布を模擬できる構造となっており、コイル温度を20K程度に冷却した条件でコイルの表面で平均熱流速 $3\text{W}/\text{m}^2$ の熱交換を行い検証した。その結果、温度分布を与えた状態でもコイル温度を20Kに維持できることが確認され、目標の $3\text{W}/\text{m}^2$ を大きく上回る $21.8\text{W}/\text{m}^2$ の伝導冷却性能を有したシステムが実現できたことを確認した。



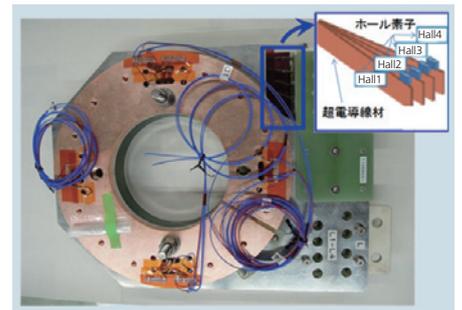
第2図 ヘリウムガス循環による伝導冷却システムの模式図

さらに、電圧試験や充放電試験を行い、伝導冷却システムの信頼性を検証した。電圧試験では20Kに冷却し直流電圧を印可することで、コイル及び冷却配管等のシステム全体の絶縁耐電圧性能を検証した。今回のコイルは、6kVを使用電圧としたため、試験電圧を $6\text{kV} \times 2 + 1\text{kV}$ の13kVとし電圧を上げ目標の電圧を1分間印加した。また、充放電を想定して、両極性で試験を行った。その結果、20Kにおいて13kVの耐圧性能をコイルおよび伝導冷却システムが有していることが確認された。充放電試験では、モデルコイルを20Kに冷却した状態で、コイルに10秒周期で400Aの電流変化を100回以上与えた。この運転条件下において、充放電による温度上昇もなく、温度安定性が確認できた。また、この伝導冷却システムはヘリウムガス循環なので冷凍機を超電導コイルから隔離できるのでメンテナンスも容易であり、コイル磁場の影響も受けない構成である。

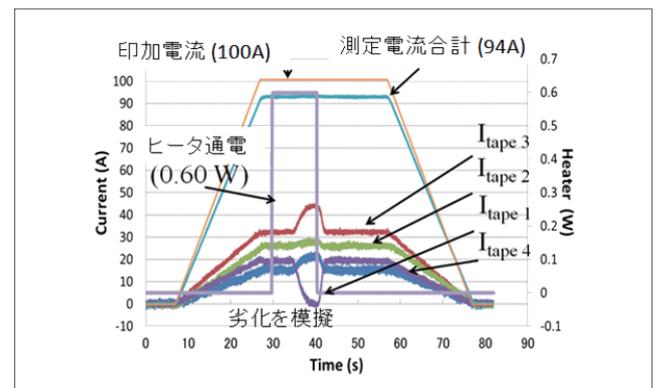
3 高強度超電導コイル保護技術の開発

また、超電導機器では磁場変化や温度変化、超電導線材の不均一性などによって超電導特性が部分的に損なわれるクエンチと呼ばれる現象が問題である。特に高温超電導体ではクエンチの検出が難しく、クエンチ箇所が局所的に発熱してホットスポットとなり、機器の損傷に至るため、その保護が重要な課題である。Y系高温超電導線材はテープ形状であるため、大電流導体はテープ積層導体(集合導体)になる。この集合導体を用いたコイルのクエンチ検出は、従来の電圧を監視する方法ではノイズなどにより検出が遅れるため、別の方法を検討しなければならない。そこでコイル端部で各超電導素線の電流を監視し、積層導体内の電流分布(偏流)の変化(転流)の有無からクエンチを検出する方法を考案し、集合導体を用いたダブルパンケーキコイルを用いてクエンチ検出の可能性を実験的に検証した(第3図)。素線絶縁したY系超電導集合導体によるモデルコイルを伝導冷却して、常電

導領域の発生はヒータ発熱により模擬し、各素線の電流分布はホール素子を用いて推定した。実験では、定常状態(100A通電)と変動状態(50A→100A→50A)においてヒータにより局所的な常電導領域を発生させて、コイルの両端の電圧と各素線の電流を測定した。実験結果の一例を第4図に示す。ヒータ投入0.6Wで局所的な常電導領域が発生することを確認するとともに、この常電導領域発生に伴う電流転流が発生することを確認できた。一方、従来の両端電圧監視による手法ではノイズに埋もれてしまい、常電導検出は極めて困難となることも確認された。以上より、積層導体内の素線で常電導領域が発生しても、素線間の偏流を観測することによって、ホットスポット発生の危険性を回避するクエンチ検出が可能であることを検証した。



第3図 クエンチ検出試験用ダブルパンケーキコイル



第4図 コイル中の素線1本で劣化を想定した場合の各素線の電流の実験結果

4 今後の展開

今回の成果は、超電導コイルの冷却とクエンチ保護に関するもので、超電導機器の実用化に重要な要素技術の開発ということが出来る。この技術は、SMESだけでなく様々な機器に展開が期待される。例えば、ヘリウムガス循環式の伝導冷却技術は強磁場の発生する機器において、強磁場が冷凍機におよぼす影響を低減することができて機器の信頼性を向上するものと推定される。クエンチは超電導機器の損傷の最大の原因で、今回開発した方法は高温超電導のクエンチの迅速な検出を可能にする。今後は、実用化に向けた更なる信頼性の向上を進め、超電導強磁場マグネットを適用した技術の早期実現を図りたい。



執筆者／渡部智則