

次世代超電導コイル開発に成功

世界最高強度の電磁力に耐えるコイルの実現

Successful Development of a Next-Generation Superconducting Coil

Realizing a Coil with the World's Strongest Resistance Against Electromagnetic Force

(電力技術研究所 超電導プロジェクト)

超電導技術は、高い電流密度を電気抵抗がゼロで実現できる特徴を生かして、大電流送電や強磁場の発生などを可能とする技術である。しかし、大型コイルには大きな電磁力が作用するため、超電導線材やコイルの応力に対する耐性が機器の性能や規模を制限することになる。今回、超電導線材の耐性向上とコイルの構造強化により、強い電磁応力に耐える世界最高強度のコイルの開発に成功したので報告する。

(Superconductivity Project, Electric Power Research and Development Center)

Superconducting technology enables large current power transmission and the generation of a high magnetic field by taking advantage of its capability to achieve high current density with no electrical resistance. However, because a large electromagnetic force acts on large coils, superconducting wires or stress resistance of coils impose limitations on performance or the scale of equipment. Chubu Electric has successfully developed a coil with the world's strongest electromagnetic stress resistance by improving the resistance of the superconducting wires and reinforcing the coil structure.

1 開発の背景

超電導コイルは強磁場を発生するため、強磁場下で大電流を流す必要がある。強磁場下で電流を流すと電流の大きさに応じて超電導線材は電磁力を受けることとなる。そのため、超電導線材は加わる電磁力に耐える強度が必要である。イットリウム系超電導線材は、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、強磁場マグネットへ応用が期待されている。ところが、イットリウム系超電導線材で製作したコイルは、冷却や電流を流した際に、熱収縮や電磁力が超電導線材に作用して、薄膜がはく離する現象が生じ、特性が低下して実用に課題がある。また、コイルの地絡・短絡防止のために素線毎に絶縁する必要があり、イットリウム系超電導線材では樹脂テープを線材に巻く手法が採られている。だがこの手法には、絶縁テープが擦れて切れる、線材を曲げた際にテープがずれて隙間が開くまたは重なって膨らむといった問題がある。そのため、超電導線材をコイルに加工するには曲げに強く優れた絶縁も必要であった。

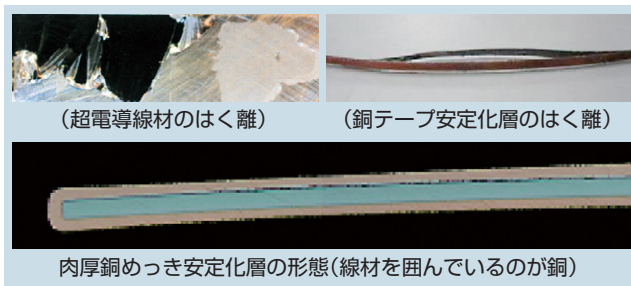
さらに、機械強度を超電導線材の耐力に頼る超電導コイルは、電磁応力が線材の耐力より小さな条件でしか使用できない。したがって、大型化等により大きな電磁力がコイルに作用する場合、通電電流が制限されるので超電導の利点である高電流密度を活用できない。これらの解決が超電導コイルの実用化には不可欠なのである。なお、本開発は新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)から受託している経済産業省資源エネルギー庁のプロジェクト「イットリウム系超電導電力機器技術開発」の一環で行なっている。

2 超電導線材の特徴を活用するための開発

以下が本開発の特長である。

(1)肉厚の銅めっきによる超電導線材の耐はく離性向上

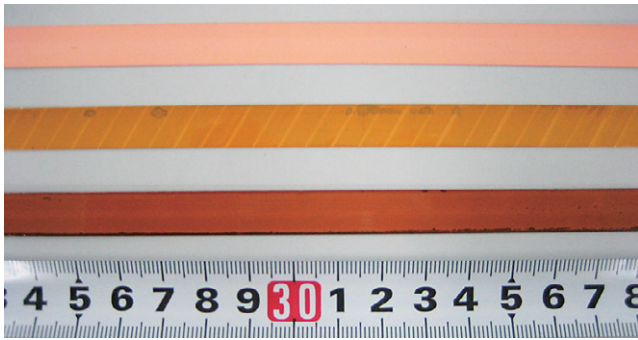
超電導材料に臨界電流を越える過電流が流れようとする際、電流を流して超電導材や機器を保護するための材料を安定化材と呼び、通常は導電率の高い銅が使われる。従来、安定化材として銅のテープ材料を貼り合わせていたが、第1図に示すように、超電導線材のはく離に加え、銅テープによる安定化は曲げ加工などで銅テープがはがれることが観察された。今回、肉厚の銅めっきにより超電導線材の周囲に安定化層を形成することで、第1図に示すように超電導線材の周囲を切れ目なく覆うことができ、これによって、はく離の起点となる線材幅方向端部のはく離発生を抑制し、はく離耐性に関して大きな改善となった。



第1図 従来のはく離の形態と今回の銅めっき安定化層

(2)樹脂コートによる超電導線材の絶縁被覆技術

イットリウム系超電導線材は大気中で高温に曝すと特性が低下するため、従来の絶縁は樹脂テープを線材に巻いていた(第2図)。この手法は、絶縁テープが擦れて切れる、線材を曲げた際にテープがずれて隙間が開くまたは重なって膨らむといった問題があった。今回、低温で硬化が可能な液状樹脂を開発して絶縁被覆を施すことにより、素線の超電導特性を維持し形状変化の無いフレキシ



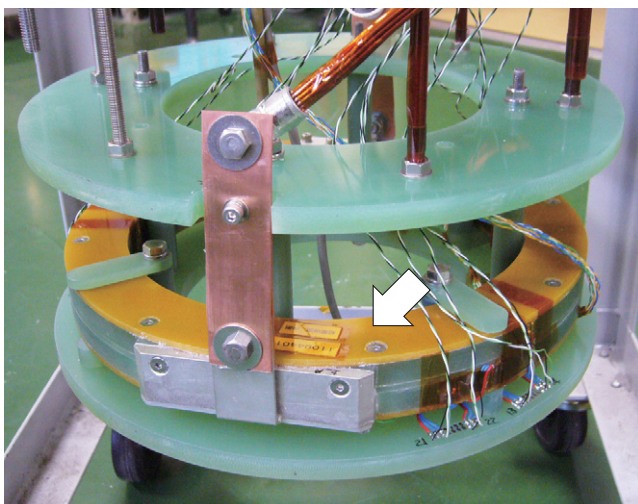
第2図 イットリウム系超電導線材の外観

(上:銅めっき線材、中:銅めっき後樹脂テープ巻いた線材、
下:銅めっき後樹脂コートした線材)

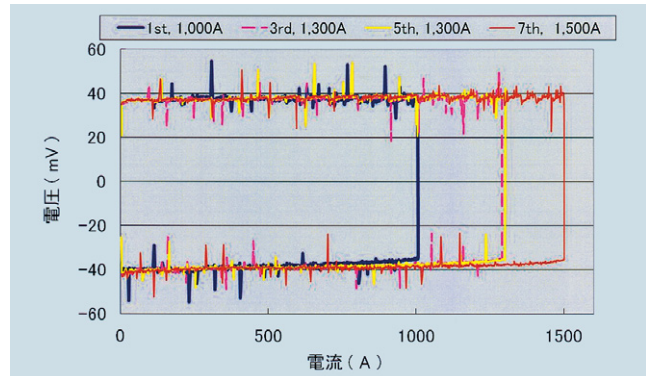
ブルな線材を世界で初めて作製することに成功した。液体窒素への浸漬と室温への昇温を繰り返しても、絶縁被覆には何の損傷も認められず、電気絶縁性能の変化もなかった。さらに、超電導線材の特性低下も測定されず、本開発の絶縁被覆が、これまでのイットリウム系超電導線材の絶縁と比較して優れていることが確認された。

3 新しい概念の超電導コイルの開発

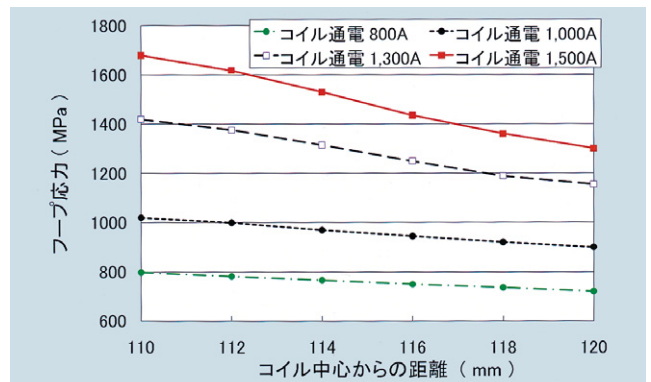
安定化層と絶縁の技術に加え、強い電磁力に耐えるコイル構造の開発により、今回、世界最高強度のコイルの開発に至った。コイル中の超電導線材は発生する磁場と通電電流によってコイルを外側に広げようとする応力(フープ応力)を受ける。この応力に対して超電導線材が特性を維持できなければ、超電導コイルは損傷を受けるので、コイルの容量や規模は線材強度とフープ力の関係で制限されることになる。これまでに、超電導線材として800MPaというフープ応力に耐えたという報告があり、一方で、超電導線材が超電導特性を維持できるのは1~1.3GPaとも報告されている。今回の開発はコイル構造の検討によって、従来はコイルが破壊されるような電磁力を受けても、コイルの変形が制限され、特性低下や破壊を回避することができるというものである。これらの技術を用いて第3図に示すようなコイルを作製し、国



第3図 試験用イットリウム系超電導コイル(矢印の部分)



第4図 超電導コイルの通電試験結果(液体ヘリウム中、8T)



第5図 超電導コイルに加わる電磁応力(計算値)

立大学法人東北大学において8Tの外部磁場中でコイル通電して(液体ヘリウム浸漬)耐電磁力の試験を行った。その結果、第4図に示すように、1,500Aの超電導コイル通電に成功した。このときコイル中の超電導線材には、第5図に示すように、電磁力計算で2GPa級の電磁応力が加わっていることになる。しかし、コイルに損傷は認められなかった。また、この試験の後、液体窒素温度でコイル通電試験を行ったところ、試験前と超電導特性が変わらないという結果を得た。したがって、2GPaの応力を受けても、今回開発したコイルは機械的にも電氣的にも損傷を一切受けておらず、これまでのコイルの常識を覆すような結果が得られたと言える。

4 今後の展開

今回の成果により、コイルの機械強度によって制限されてきた超電導機器の設計を大幅に変えることが可能になる。たとえば、電磁力としてエネルギーをコイルに貯蔵するSMESのコンパクト化が図られたり、リニアモーターカーの超電導コイルを軽量でかつ冷却方法の簡易化が図られたりする。今後は、超電導コイルの異常検出や保護方法の最適化開発を推進し、実用化に向けた信頼性の向上を図っていく。今回の成果に加え、一層の超電導線材低コスト化により、強磁場マグネットを適用した技術の実用化が促進されることが期待される。



執筆／渡部智則