

イットリウム系線材を用いた伝導冷却超電導コイル

冷媒を用いない冷却システムで5テスラを超える高磁場を達成

イットリウム(Y)系線材は、液体窒素の温度である -196°C でも超電導状態を維持できる高温超電導線材の一つです。Y系線材には、高強度で高電流密度という特長があり、機器の小型・高効率化が可能になります。現在、Y系線材の性能は実用レベルにまで向上しており、国内外で、送電ケーブルや、超電導電力貯蔵システム(SMES)など、Y系線材を適用した機器の開発が進められています。

東芝は、Y系線材の唯一の弱点であった、厚さ方向の力に対する機械的弱さを克服したコイルを開発しました。これまでに、液体ヘリウムなどの冷媒を用いない伝導冷却型のY系コイルとしては世界最高^(注1)となる中心磁場5.1 T(テスラ)の発生に成功しています。

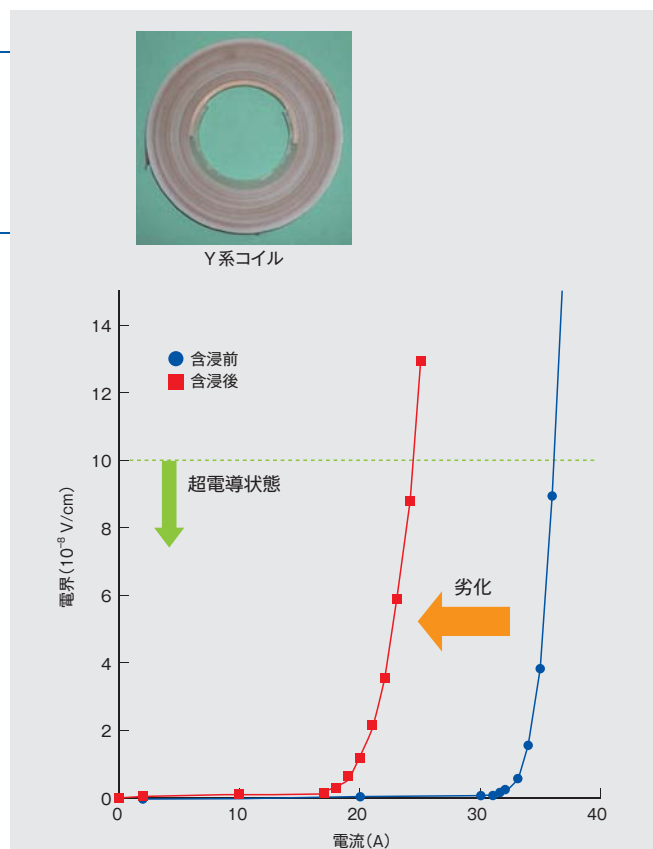


図1. Y系コイルの通電試験結果 — 液体窒素中で行った通電試験の結果から、Y系コイルは樹脂を含まないことで、超電導状態を維持できる電流値が低下してしまうことがわかります。

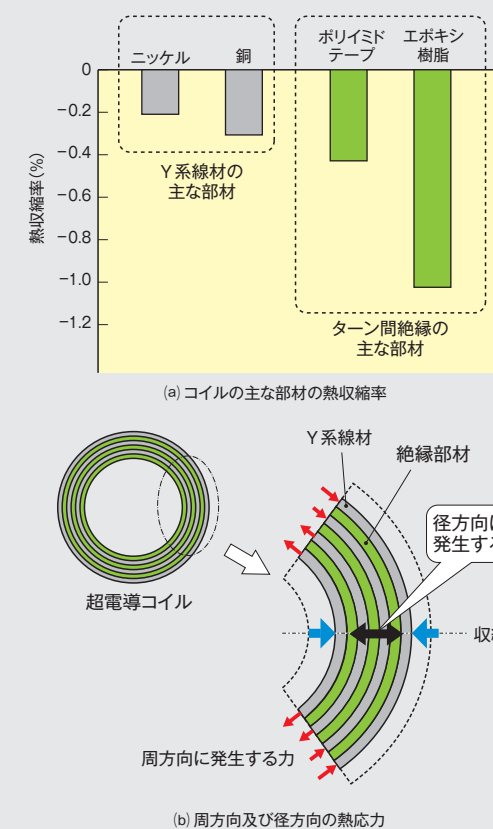


図2. 熱応力発生メカニズム — 20°C から -196°C まで冷却すると、コイル各部材の熱収縮率の違いにより、周方向と径方向それぞれに熱応力が発生します。

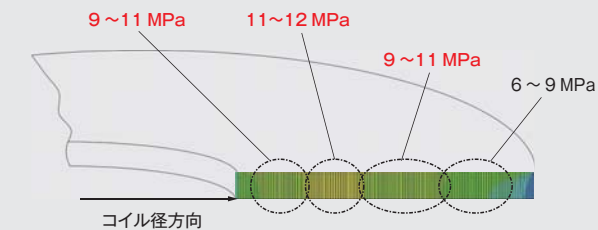


図3. 径方向の熱応力解析結果(従来型) — 従来型のY系コイルを 20°C から -196°C まで冷却すると、径方向には最大で12 MPaの応力が発生します。

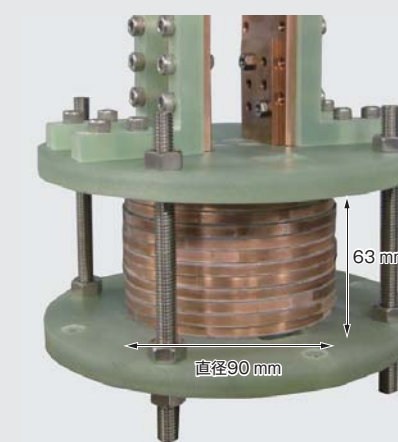


図4. 試作した5.1 T Y系コイル — 径方向の応力を低減する工夫を行い、世界最高の中心磁場5.1 Tを達成することができました。

超電導コイルの役割

超電導線材は電気抵抗がゼロという特長を持つため、これを巻いてコイルにすると、損失なく電気エネルギーを蓄えることができます。また、普通の電磁石では発生不可能な強力な磁場を発生させることができます。これらの性質を利用することで、落雷などにより電力系統の電圧が瞬間的に低下してしまうことを防ぐSMESや強力な磁場の力でシリコンウェーハの品質を向上させる単結晶上げ装置などが既に実用化されています。現在これらの機器に使用されている超電導線材は、液体ヘリウムの温度である -269°C という極低温

(注1) 2011年9月時点、伝導冷却型Y系コイルとして、当社調べ。第24回国際超電導シンポジウム(ISS2011)で発表。

に冷却して使用するため、一般に低温超電導線材と呼ばれています。

高温超電導コイルのメリット

一方、液体窒素の温度以上で使用できる高温超電導線材の開発が進められており、特にY系線材は、高強度で高電流密度という特性を生かして、機器の小型・軽量化が期待されています。また、冷却温度を高く設定できるため、液体ヘリウムのような冷媒を使用しない“伝導冷却システム”も容易に利用できるようになります。伝導冷却システムは、極低温冷凍機からの熱伝導により超電導コイルを冷却するシステムで、超電導コイルを手軽に使用できるメリットがあります。

伝導冷却型Y系コイルの課題

伝導冷却システムでは、固体中の伝

熱経路を確保するため、超電導コイルを樹脂で含浸する必要があります。しかし、当初試作した含浸型のY系コイルには、 -196°C まで冷却すると、線材の一部に欠陥が生じてしまい、超電導特性が低下するという問題がありました。超電導特性が低下すると低い電流値でも電圧が発生してしまい、超電導の特長である電気抵抗ゼロで通電できる範囲が狭くなり(図1)、超電導の特長を十分に生かせなくなります。

劣化のメカニズムの解明

樹脂で含浸された超電導コイルを -196°C まで冷却すると、コイル全体が縮んで熱応力が発生します。この際、超電導コイルを構成している材料の線膨張係数の違いにより、Y系線材を引っ張る方向の力が働きます。この力

は、コイルの周方向に働く力と、径方向に働く力に分けられます(図2)。周方向に働く力は、線材の長手方向に引っ張る力に相当しますが、この力に対しては、非常に高い機械強度を持つことが知られています。実際に周方向の許容応力を調べたところ、600 MPa程度の高い応力に対しても超電導特性が低下しないことがわかりました。一方、径方向に働く力は、線材の厚さ方向に働く力に相当しますが、許容応力を調べたところ、わずか10 MPa程度の低い応力で超電導特性が低下してしまうことがわかりました。このようにY系線材は、厚さ方向の力に対する機械強度が低いという弱点が明らかになりました。

試作した小型の従来型Y系コイルを 20°C から -196°C まで冷却する際に働く熱応力を解析した結果を図3に示

します。径方向に最大で12 MPaの応力が発生しており、この径方向に働く力が許容範囲を超えることで、コイルを劣化させることがわかりました。

5.1 T Y系コイルの開発

コイルに含まれる樹脂や絶縁テープなどの量や材質をコントロールすることにより、径方向に働く応力を10 MPa以下に低減する工夫を行いました。この結果、Y系線材の超電導特性を低下させることなく超電導コイルを製作できるようになりました。

この結果を元に、Y系コイルを12個積み重ねたコイルを試作しました(図4)。これを伝導冷却システムに組み込んで通電試験を実施した結果、最大中心磁場5.1 Tという世界最高の磁場を達成することができました。

今後の展望

5 Tを超える磁場を発生できるコイルが製作できるようになったことで、Y系コイルを実機へ適用できる可能性が開けました。今後は、実機サイズを想定した大型コイルの開発や、単純な円形でない複雑な形状を持つコイルの開発も行っていく予定です。Y系コイルをSMESやがん治療用重粒子線装置などの超電導機器に適用することで、小型で取扱いが容易な機器を提供できるようになります。

宮崎 寛史

電力システム社
電力・社会システム技術開発センター
電気計装システム開発部主務