

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 19 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289070

研究課題名(和文) 冷却時の通電特性低下を抑制する希土類系超電導コイルの基本設計指針と冷却指針の構築

研究課題名(英文) Guidelines of basic coil design and cooling process of a REBCO coil for suppressing deterioration of current carrying characteristics in cooling process.

研究代表者

津田 理 (TSUDA, Makoto)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：10267411

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,000,000円

研究成果の概要(和文)：希土類系超電導コイルを液体窒素で冷却する場合は、過渡熱応力によりコイル特性が劣化する可能性があるため、コイルの予冷が重要であるといえる。また、過渡熱応力の抑制に有効な予冷温度について検討したところ、90K程度(液体窒素上空10mm程度)での予冷が有効であることがわかった。しかし、コイル冷却時の過渡熱応力による特性劣化を抑制するには、巻棒の材料選定も重要である。コイルの特性劣化は、コイル冷却時に超電導層に作用する剥離応力だけでなく、コイル端部と電流リードの接続方法にも大きく依存するため、コイル通電時のクエンチや焼損を防ぐには、これらの劣化要因も考慮したコイル設計・製作・冷却が重要となる。

研究成果の概要(英文)：A pre-cooling process is very important to suppress the deterioration of the current carrying characteristics of a REBCO coil caused by the transient thermal stress generated in the LN2 cooling process. We investigated the suitable pre-cooling temperature for suppressing the transient thermal stress within the coil. The suitable temperature was around 90 K and the temperature was obtained at the height of about 10 mm from the LN2 surface. Selection of the suitable coil material was also important to suppress the transient thermal stress. The deterioration of the current carrying characteristics greatly depends on not only the peeling stress in the cooling process applied to the superconducting layer of the REBCO tape but also the connecting method between the coil end and the current lead. Therefore, we should design, manufacture, and cool the REBCO coil in consideration of the above deterioration factors to suppress the quench and the fire damage of the coil.

研究分野：超電導工学

キーワード：超電導コイル 冷却 応力 剥離

1. 研究開始当初の背景

超電導応用機器は、高効率化・高磁場化・大容量化・小型軽量化に優れており、既に実用化されている磁気共鳴画像診断装置 (MRI)、超電導エネルギー貯蔵装置 (SMES)、単結晶引き上げ装置等、多くの超電導応用機器では、超電導コイルが不可欠となっている。このうち MRI や SMES では、これまでは、材料が安価な金属系の低温超電導線材が使用されてきた。しかし、金属系超電導線材の冷却に不可欠であり 100% 輸入に頼っているヘリウムの枯渇に伴う価格高騰が、近年、世界的に大問題となっている。このため、市場規模の大きい MRI をはじめ、大型設備に起因する用地確保と高コスト化が都市部での導入の妨げになっている癌治療用重粒子線加速器や、欧米諸国で必要と目されている 15MW 以上の大型風力発電機においても、冷却にヘリウムを使用しない酸化物系の高温超電導線材の適用が不可欠となっている。しかし、このうち Bi 系超電導線材では、高価な銀を使用するため、今後も経済性の成立が困難とされている。そこで、最近、Y や Gd を用いた多層構造の希土類系超電導線材 (ハステロイ等のテープ状の金属基板上に酸化セリウム等の中間層を形成し、その上に厚さ数 μm 程度の超電導層を形成した線材) の研究開発が日本を中心に盛んに行われており、希土類系超電導コイル技術の構築が急務となっている。一般的に、超電導コイルでは、大きな電磁力に対して機械的強度を確保するために、エポキシ樹脂等による樹脂含浸が行われている。しかし、樹脂含浸した希土類系超電導コイルでは、冷却時の超電導層積層方向の剥離が原因で通電性能が著しく低下することが報告されており、世界的に問題となっている。このため、近年、超電導層の剥離を抑制する方法が盛んに検討されており、これまでに、超電導層の成膜時間の短縮化、パラフィン含浸やポリイミド絶縁皮膜処理の採用等が超電導層の剥離抑制に有効であることが明らかにされている。しかし、超電導層の剥離については、コイルを構成する各材料の常温時と低温時の熱収縮率の違いが原因として考えられているものの、熱収縮率の違いだけでは超電導層の剥離を説明できない場合もあり、冷却時の通電特性低下を抑制する希土類系超電導コイルの設計指針や冷却指針を確立するまでに至っていない。

2. 研究の目的

本研究は、近年の通電特性向上により実用化の期待が高まっている希土類系超電導応用機器の開発において、現在、世界的に問題となっている、超電導コイル冷却時の超電導層の剥離による通電特性の低下を抑制するために、超電導コイルの基本的な設計指針と冷却指針を確立することを目的とするものである。具体的には、超電導コイル冷却時の

過渡熱応力特性に着目し、コイル冷却・昇温時のコイル内部における温度・ひずみ分布を実験や解析で評価することにより、超電導層の剥離のメカニズムや、剥離抑制に有効な超電導コイル構成方法を明確にする。また、液体窒素冷却時において、過渡熱応力の抑制に有効な冷却方法を明確にする。

3. 研究の方法

本研究では、まず、ダブルパンケーキ型希土類系超電導コイルを取り上げ、液体窒素冷却時のコイル内温度分布と熱応力分布の推移を、三次元有限要素法に基づく過渡熱解析で評価した。次に、本解析結果を用いて、コイル内の温度分布と熱応力分布の関係を精査することにより、超電導層の剥離のメカニズムとコイル冷却時の過渡熱応力低減に適したコイルの構成方法について検討した。そして、モデルコイルを作製して、液体窒素冷却時のコイル内のひずみ分布を測定し、有限要素法を用いたコイル内の過渡熱応力解析結果の妥当性を検証するとともに、コイル冷却時の過渡熱応力低減に適したコイルの冷却方法を検討した。なお、当初予定していた研究方法・内容の詳細は以下の通りである。

(1) 冷却時のコイル内部の過渡熱応力特性と超電導層剥離の発生メカニズムの解明

解析対象とする超電導コイルの形状・大きさ・構成方法の検討

超電導コイルは、用途に応じてコイルの形状・大きさ・構成方法が異なることから、冷却時や昇温時のコイル内温度分布や熱応力分布も、コイルによって異なることが予想される。そこで、まず、事前検討として、超電導層の剥離の一要因として考えられている、コイルを構成する材料の低温時の熱収縮率の違いに着目し、冷却後のコイル内部の熱応力分布を、有限要素法を用いた定常熱解析により評価する。また、その結果を踏まえ、過渡熱応力の低減に有効となる、コイル構成方法について検討する。なお、本解析は、これまでに開発してきた熱解析用計算機コードを改良して行う。

超電導コイル内の過渡熱解析・応力解析コードの開発

超電導コイル冷却時の過渡熱応力特性を明確にするには、コイル巻棒ならびに超電導巻線部内の温度分布推移を精度よく評価する必要がある。そこで、まず、三次元有限要素法に基づく、コイル内部の過渡熱解析用計算機コードを開発する。本解析では、超電導コイルを常温から低温に冷却するまでのコイル周辺における熱流束の近似が重要となる。このため、液体窒素冷却については、液体窒素の核沸騰領域や膜沸騰領域での熱伝達特性を詳細に近似し、コイルとの熱流束を評価する。また、計算された温度分布と超電導コイルを構成する各材料の熱膨張係数を用いて、各時刻、各要素における熱応力を算出する。

超電導コイル内の過渡熱解析・応力解析の実施

で作成した解析コードを用いて、常温から低温まで（冷却時）と、低温から常温まで（昇温時）の、超電導コイル内の温度分布を解析する。また、その温度分布の解析結果を用いて、各時刻の熱応力分布を計算する。特に、液体窒素冷却の場合は、常温の超電導コイルを液体窒素容器に入れる前の予冷方法（超電導コイルの初期温度）によって、超電導コイル冷却時の過渡熱応力分布が異なることが予想される。そこで、過渡熱応力抑制に効果的な予冷方法を明確にするために、様々な超電導コイルの初期温度に対して過渡熱応力分布を計算し、その結果を比較する。

超電導層剥離の発生メカニズムの解明

希土類系超電導コイルにおける超電導層の剥離は、コイルの構成材料における常温と低温の熱収縮率の違いや、超電導コイルの冷却・昇温時のコイル内部における温度勾配に大きく依存することが予想される。そこで、の結果において、特に、冷却時の温度勾配が大きくなるコイル形状・大きさ・構成方法を取り上げ、コイル内部で最も温度勾配が大きくなる場所やその場所での過渡熱応力推移を比較・精査することにより、超電導層剥離の発生メカニズムに対する統一的理解を示す。

(2) 超電導層の剥離抑制に有効なコイル形状・大きさ・構成方法の明確化

過渡熱応力抑制方法ならびに試験用モデルコイルの検討

との結果を比較・精査し、コイル内部の過渡熱応力抑制に適したコイル形状・大きさ・構成方法を明確にする。そして、大きな過渡熱応力が得られるコイル形状・大きさ・構成方法に対して、過渡熱応力の低減を可能とする予冷方法を検討する。また、その結果を踏まえ、超電導層の剥離抑制に有効なコイル形状・大きさ・構成方法や、過渡熱応力低減に有効な予冷方法の妥当性を検証するためのモデルコイルのコイルパラメータを選定する。

過渡熱応力抑制方法検証用超電導モデルコイルの作製

本モデルコイルではGdBcO超電導テープ線を使用する。現用の巻線機を用いて、GFRP製の巻枠に一定の張力を印加しながら巻線し、ダブルパンケーキ型コイルを作製する。希土類系超電導コイルの臨界電流値は、冷却時の熱応力のみならず、自己磁場や巻線時の機械的劣化の影響を受けるため、それぞれの影響を分離する必要がある。そこで、GdBcO超電導テープ線の短尺試料と、巻線張力のみ異なるコイルを用いて臨界電流値を測定し、その結果を比較する。本測定後、エポキシ樹脂を用いて真空含浸し、電気炉にてエポキシ樹脂を硬化させる。

モデルコイルを用いた液体窒素冷却時の温度・ひずみ分布の測定

で作製した液体窒素冷却用コイルを使用する。冷却時の過渡熱応力の影響を調べるために、まず、エポキシ樹脂含浸した超電導コイルを液体窒素温度までゆっくり冷却し、臨界電流値を測定する。この臨界電流値を、エポキシ含浸前の臨界電流値と比較し、冷却時の定常熱応力（熱収縮率）の影響で臨界電流値が低下していないことを確認する。ここで臨界電流値の低下が無い場合は、その値を過渡熱応力の影響が無い場合の臨界電流値とする。その後、時間をかけてゆっくり昇温してから、液体窒素の蒸気で予冷をし、コイル内の温度が落ち着いていることを熱電対出力で確認してから、超電導コイルを液体窒素中に浸して冷却する。この間のコイル内の温度分布とひずみ分布の推移を測定する。

解析コードの妥当性と過渡熱応力抑制方法の有効性検証

で得られた、コイル内での温度分布やひずみ分布の解析結果と、の実験結果を比較し、解析コードの妥当性を検証する。また、大きな過渡熱応力が得られたコイルパラメータを取り上げ、液体窒素冷却時における実験結果を解析結果と比較することにより、過渡熱応力の低減に有効な方法を検証する。

(3) コイルの通電特性低下を抑制する高効率なコイル冷却・昇温方法の明確化

過渡熱応力抑制に適した冷却プロセスの検討

で得られた、コイル内の温度分布やひずみ分布解析結果とで得られた実験結果を踏まえ、過渡熱応力抑制に適した冷却方法を明確にする。特に、冷却時に過渡熱応力が大きくなる場合を取り上げ、過渡熱応力抑制に適した、液体窒素冷却時の予冷方法を明確にする。なお、必要に応じてモデルコイルを追加作製・実験し、過渡熱応力解析結果と比較する。

4. 研究成果

平成26年度は、有限要素法に基づく解析コードを作成し、コイル冷却時の過渡熱応力解析を行った。その結果、巻線部に比べて巻枠部（GFRP）の熱伝導率が低いことから、巻枠部と巻線部間に大きな温度勾配が生じることがわかった。特に、巻枠部の径方向内側表面は、液体窒素により直接冷却されるため、短時間で冷却が進行し、巻枠部が収縮することに対して、径方向外側表面は、巻線部と接していることから、内側表面に比べて冷却速度が遅くなり、熱収縮量は内側表面よりも小さくなった。このため、巻枠部の軸方向端部には、軸方向の応力が発生し、巻線部と巻枠部がエポキシ含浸を介して一体化されている場合は、巻線部の超電導線の軸方向端部に、剥離方向の応力が印加されることがわかった。

また、巻枠部と巻線部間の温度勾配に基づく熱収縮量の差が過渡熱応力に及ぼす影響を明確にするために、コイルの巻線部のみを

冷却する場合と、巻棒のみを冷却する場合について、コイル内部の過渡熱応力特性を評価した。その結果、コイルの巻線部のみを冷却した場合は、GFRPの熱伝導率が低いために巻棒部の温度がほとんど下がらず、巻線部との温度勾配が大きくなり、コイル全体を冷却する場合よりも過渡熱応力が大きくなった。一方、コイルの巻棒のみを冷却した場合は、巻線部の熱伝導率が高いため、巻線部と巻棒部の温度が同様に低下した。このため、巻線部と巻棒部間の温度勾配が小さくなり、過渡熱応力はコイル全体を冷却する場合よりも小さくなった。以上より、コイル冷却時は、巻棒部の冷却条件をよくすることが、コイルに発生する過渡熱応力の抑制に有効であるといえる。

次に、これを実現する方法として、コイル巻棒中心部の GFRP 量を減らす方法、巻線部を GFRP で覆う方法、コイル巻棒 (GFRP) の半径方向の厚みを薄くする方法を考え、これらの方法を用いた場合の過渡熱応力低減効果を検討した。その結果、コイル巻棒中心部の GFRP 量を減らすことにより GFRP が速く冷却され、巻線部と巻棒部間の温度勾配を小さくできること、巻線部を熱伝導率の低い GFRP で覆うことにより巻線部が冷えにくくなり、巻棒部と巻線部間の温度勾配を小さくできること、そして、コイル巻棒である GFRP の半径方向の厚みを薄くすることにより、巻棒部が短時間で冷却され、巻棒部と巻線部間の温度差を小さくできることがわかった。以上より、これらの方法が、いずれもコイル冷却時の過渡熱応力抑制に有効であるといえる。

平成 27 年度は、液体窒素上空でコイルを予冷してから液体窒素に浸漬冷却する方法に着目し、室温から予冷温度、および、予冷温度から液体窒素温度に冷却する際に生じる過渡熱応力について検討した。まず、液体窒素上空の温度分布を把握するために、セルノックス温度計を用いて液体窒素液面からの距離と窒素ガス温度の関係を評価した。次に、予冷温度をパラメータとし、予冷中と液体窒素浸漬冷却中のコイル内過渡熱応力を解析した。その結果、予冷時の過渡熱応力は、時間の経過とともに単調増加し、予冷温度が低い場合ほど大きくなるものの、窒素ガス冷却の場合は、液体窒素冷却時よりも熱伝達が小さくなることから、コイル巻棒部と巻線部の温度差が小さくなり、予冷しない場合よりも最大過渡熱応力を抑制できることがわかった (液体窒素液面より 10mm 上空 (約 90K) で予冷した場合に、コイル冷却時の最大過渡熱応力を大幅に低減できた)。ただし、液体窒素の遷移沸騰領域で巻棒部と巻線部の温度差が大きくなる様な予冷温度の場合は、予冷温度から液体窒素温度へ冷却する際に、予冷時と同程度の過渡熱応力が発生することがわかった。また、本結果を検証するために、Y 系超電導テープ線を用いたダブルパンケークコイルを作製した。しかし、電流リード

との接続部での通電特性の劣化が、コイルの通電特性に大きな影響を及ぼすことが確認されたため、コイルの巻線端部と電流リード間の接続方法について改めて検討した。その結果、Y 系超電導テープ線の劣化抑制に適した低温半田の種類と半田接続方法を明らかにした。

平成 28 年度は、希土類系超電導コイルを液体窒素上空で予冷する方法が、コイル冷却時の過渡熱応力の発生に及ぼす影響について検討した。内径 60mm、外径 74mm の GFRP 製巻棒に GdBCO テープ線を 10 層巻き付けたコイルを作製し、エポキシ含浸前と含浸後の、コイル内部で生じる過渡熱応力を、ひずみゲージを用いて測定した。ひずみゲージは、液体窒素冷却時に発生する過渡熱応力を明確にするために、巻棒内周部、巻棒外周部、GdBCO テープ表面 (最内層部) にそれぞれ取り付けた。まず、コイルを液体窒素中に直接入れて冷却したところ、解析結果として得られていた様に、コイル内周部は、速やかに冷却され、ひずみ量は、含浸前後で大きく変化しなかった。一方、コイル巻棒外周部は、エポキシ含浸の有無とは関係なく、巻棒内周部よりも冷却が遅れることが確認された。また、エポキシ含浸前は、時間の経過とともに収縮し、ひずみが発生していたのに対して、エポキシ含浸後は、巻棒と巻線部が一体化されたため、本来収縮するはずの巻線外周部が十分に収縮しなかった。この時に発生する応力が、最もひずみに弱い超電導層に印加されることにより、剥離が生じることが考えられる。

また、コイル冷却時の過渡熱応力の抑制にコイルの予冷が有効であるかを検証するために、コイルを予冷無しに直接冷却した場合と、コイル上空約 10mm (90K) と 50mm (140K) で予冷してから液体窒素に浸した場合において、コイル冷却時のひずみ特性を評価した。その結果、140K で予冷することにより、直接冷却する場合よりもひずみ量を抑制することができた。また、90K (液体窒素上空約 10mm) で予冷した場合が、最も過渡熱応力によるひずみ量を抑制できた。この結果は、解析結果と同様であり、液体窒素上空約 10mm で予冷してから液体窒素中で冷却する方法が、コイルの劣化抑制に有効であるといえる。

また、コイル冷却時の巻棒の過渡熱応力が、超電導層の特性劣化 (剥離) に及ぼす影響を調べるために、材質の異なる巻棒を用いた場合の、コイル冷却時の過渡熱応力特性を評価した。また、液体窒素冷却時のコイル巻棒表面とテープ表面の熱ひずみを測定し、コイル巻棒の過渡熱応力抑制に適したコイルの冷却方法について検討した。まず、巻棒の材質の影響については、通常使用される GFRP 製の他に、SUS 製と CFRP 製の巻棒について検討した。その結果、SUS 製巻棒の場合は、内側の超電導層端部において、冷却開始後 10 秒以内に 2MPa 程度の引張応力が生じるものの、その後は、すべての超電導層において圧縮応

力が生じることが確認された。一方、CFRP 製巻棒では、すべての超電導層において圧縮応力が生じた。また、GFRP 製巻棒の軸方向熱膨張係数のみを CFRP の値に変更したところ、CFRP 製巻棒の場合と同様の熱応力低減効果が得られた。これより、超電導層に働く劈開力の抑制には、SUS 製や CFRP 製の巻棒を適用するなどして、軸方向の熱膨張を抑制することが有効であるといえる。

以上の成果より、希土類系超電導コイルを液体窒素で冷却する場合は、過渡熱応力によりコイル特性が劣化する可能性があるため、コイルの予冷が重要であるといえる。また、過渡熱応力の抑制に有効な予冷温度について検討したところ、90K 程度（液体窒素上空 10mm 程度）での予冷が有効であることがわかった。しかし、コイル冷却時の過渡熱応力による特性劣化を抑制するには、巻棒の材料選定も重要である。コイルの特性劣化は、コイル冷却時に超電導層に作用する剥離応力だけでなく、コイル端部と電流リードの接続方法にも大きく依存するため、コイル通電時のクエンチや焼損を防ぐには、これらの劣化要因も考慮したコイル設計・製作・冷却が重要となる。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔学会発表〕（計 3 件）

加藤雅大、河口大和、宮城大輔、津田理、Y 系超電導コイル浸漬冷却時の過渡熱応力低減に関する基礎研究、平成 28 年度電気関係学会東北支部連合大会、2016.8.31、東北工業大学（仙台）

櫻井周平、福島規至、宮城大輔、津田理、横山彰一、熱的測定法を用いた伝導冷却型 Y 系超電導コイルの交流損失評価、平成 28 年電気学会全国大会、2016.3.17、東北大学（仙台）

加藤雄大、河口大和、宮城大輔、津田理、Y 系超電導コイル冷却時の過渡熱応力に関する基礎研究、平成 28 年電気学会全国大会、2016.3.17、東北大学（仙台）

6. 研究組織

(1) 研究代表者

津田 理 (TSUDA MAKOTO)
東北大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：10267411

(2) 研究分担者

宮城 大輔 (MIYAGI DAISUKE)
東北大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：10346413