

氏 名 川越 明史

学位（専攻分野） 博士（工学）

学位記番号 総研大乙第 156 号

学位授与の日付 平成 18 年 3 月 24 日

学位授与の要件 学位規則第 6 条第 2 項該当

学位論文題目 伝導冷却型低温超伝導パルスコイルの開発と性能評価
に関する研究

論文審査委員	主 査 教授	佐藤 元泰
	助教授	柳 長門
	教授	三戸 利行
	教授	新富 孝和（日本大学）
	教授	岩熊 成卓（九州大学）

論文内容の要旨

超伝導の産業応用の為には、低コストで取り扱いの簡便な超伝導パルスコイルの開発が必要である。本論文は、革新的な伝導冷却型の低温超伝導パルスコイルの開発に挑み、その試作したパルスコイルの性能評価を行った研究をまとめたものである。これまでに開発されている多くの低コスト超伝導パルスコイルは、冷媒を使用する浸漬冷却型や強制冷却型であり、取り扱いが煩雑で運転に手間がかかる。また冷却系のトラブルが起こるリスクが高く、低温工学分野の専門家が運転を行う必要がある。これに対し、冷媒を使用しない伝導冷却型の超伝導コイルは、ユーザの負担を劇的に軽減できるとされ、その開発も進められているが、そのほとんどが直流コイルである。最近、この冷却方式によるパルスコイルの開発も始まったが、材料費が高い高温超伝導線材を使用するものである。以上のような理由から、コストの安い NbTi などの低温超伝導線材で作製する伝導冷却型の低温超伝導パルスコイルの実現が期待されているものの、開発が進まず未だ実用化に到っていない。これは、伝導冷却型のパルスコイルを低温超伝導線材で作製すると、臨界温度が低いために、パルス運転時に発生する大きな損失によって短時間でクエンチに到るという不安定性の問題を解決できなかったことによる。

一般に超伝導線材は、必要な電流容量を確保するために導体化して使われる。多くの場合、成形より線型の導体が使われることが多く、この場合素線間接触抵抗の大きさによって損失や安定性という導体の基本性能が決定される。素線間結合損失を低減するために素線間接触抵抗を大きくすれば、素線間の電流転流を妨げ安定性が低下し、低損失化と高安定化を両立することが難しくなる。しかも、この素線間接触抵抗は導体作製時に制御することが難しい。したがって、伝導冷却型低温超伝導パルスコイルの実現のためには、新しい導体開発を始め低損失性と高安定性を両立させる従来にない新しい発想のコイル設計法の開発が必要である。しかも設計どおりのコイル性能を発揮させるためには素線間接触抵抗の影響を排除する導体構成が望まれる。

本研究では、まず、低損失で高安定な伝導冷却型の低温超伝導パルスコイル開発のための要素技術として、新しいコイル巻線方法とそれに適した導体構造の提案を行った。これは、素線配置が規則正しい NbTi ラザフォードケーブルの周囲をアルミニウムで包み込んだ断面外形が円形の構造をもつ導体を用い、コイル巻線部分の局所磁界がラザフォードケーブル幅広面に水平な方向に加わるように導体の捻り角を制御しながら巻線するというものである。この巻線方法は、素線間接触抵抗を非常に小さくおさえて安定性を高めても、損失が低減できるという画期的なものである。しかもこの導体構成をとることによって、従来から制御が困難とされてきた素線間接触抵抗の影響を排除でき、導体を設計どおりに作製できる。

上記のことを確かめるために、提案した導体の設計と試作を行い、短尺試料の損失測定を行った。その結果、この導体がほぼ設計どおり、内部のラザフォードケーブル幅広面に水平な方向に変動横磁界が加わる場合には、低損失性と高安定性とを同時に満足できることを明らかにした。さらに、瞬時電圧低下補償用 SMES に用いることを想定して、100kJ/50kW、1秒の性能をもつ、伝導冷却型の低温超伝導パルスコイルを設計した。そしてこのコイルが伝導冷却方式であるにもかかわらず、定格パルス運転が可能であること

を理論的に示した。

次に、設計した 100kJ 級伝導冷却型低温超伝導パルスコイルを実際に作製した。コイルの作製のために、巻線時の導体捻り角を制御できる巻線機を開発した。また高伝熱スペーサとしてダイニーマ FRP とリッツ線を使用し、伝導冷却に必要な高い伝熱特性を確保した。巻線した 100kJ コイルを実際に冷却し、励磁試験を行って、伝導冷却型低温超伝導パルスコイルが実現できることを実証した。

本伝導冷却型低温超伝導パルスコイルで低いランニングコストが実現できることを確かめるために、本コイルの低損失の性能を確かめる必要がある。このためまず交流損失の評価法として新しい方法を見出した。これは、繰り返し励磁試験時に、コイルの発熱と冷凍機の冷却能力が釣り合った状態になるため、このときの冷凍機 2nd ステージの冷却能力から、コイルの交流損失が評価できるというものである。新しい方法により交流損失を評価した結果、本コイルがほぼ設計どおりの低い交流損失値であることを確かめた。このことにより、本研究で提案している新しい捻り巻線方法の効果が実証できた。

次に、本伝導冷却型低温超伝導パルスコイルの伝熱特性の評価を行うために、励磁試験時のコイル内の温度変化と 2 次元有限要素法による伝熱解析結果を比較した。後者の解析を行うために、ANSYS を用いて、本パルスコイルの伝熱特性の評価が可能な 2 次元有限要素法モデルを作成した。そして試験時に観測しているコイル内の各部の温度と導体との温度差を評価し、パルス運転時のコイル各部の到達温度を評価した。その結果から本コイルの高い伝熱特性を明らかにした。

最後に、これまでに得られた結果から、伝導冷却型低温超伝導パルスコイルの安定性裕度を求め、本コイルが定格運転時に非常に大きな裕度を持っていることを示した。さらにこの結果から、100kJ 級コイルの運転可能な条件を求め、定格運転の 3 倍近い性能を持っていることを示した。

論文の審査結果の要旨

本論文では、コストパフォーマンスに優れた低温超伝導体を用い、伝導冷却型の超伝導パルスコイルの開発に成功した成果を纏めると共に、開発したコイルの詳細な特性評価を行って、更なる性能向上の可能性及び今後の最適設計のための指針を示している。

超伝導技術が一般産業用途に普及するためには、低コストで取り扱いが容易であり、かつ高速の励減磁にも対応可能な超伝導パルスコイルの開発が求められている。これまでに開発された低温超伝導パルスコイルは、超伝導コイルを液体ヘリウムに浸した浸漬冷却方式や超伝導導体の内部に低温のヘリウムガスを循環させる強制冷却方式であり、冷却システムが複雑で取り扱いが難しく、一般用途への普及を妨げてきた。最近、取り扱いの容易な GM 型小型冷凍機を用い、冷凍機による直接伝導冷却の超伝導コイルが開発され、ユーザーの負担を劇的に低減した超伝導コイルとして、その用途を広げている。しかし、開発されている伝導冷却型低温超伝導コイルは総て直流用途であり、パルス運転時の交流損失による発熱によってコイル温度が上昇し、コイルがクエンチに至るといふ不安定性の問題が解決できていない。臨界温度の高い高温超伝導体を用いた伝導冷却型パルスコイルの開発研究も進んでいるが、コストパフォーマンスの観点から、実用化には高性能で低コストの高温超伝導線材の開発を待つ必要がある。

本研究では、まず、低損失で高安定な伝導冷却型の低温超伝導パルスコイル開発のための要素技術として、超伝導導体の電磁特性に関する詳細な検討の結果、新しいコイル巻線方法とそれに適した導体構造の提案を行った。導体内の素線配置が規則正しい成型撚線を基本とし、素線内の超伝導フィラメントの撚り方向と、成型撚線の撚り方向を同じにすることにより、変動磁場によって撚線内に発生する誘導起電力をキャンセルし、素線間を低接触抵抗で接触させても交流損失の発生を低減できる。次に、成型撚線の周囲をアルミニウムで囲んだ断面外形が円形の導体とし、コイル巻線部分の局所磁界が成型撚線の幅広面に水平な方向に加わるように導体の捻り角を制御しながら巻線することによりコイル全体の交流損失を更に低減することができる。この巻線方法は、素線間接触抵抗を非常に小さくおさえて安定性を高めても、損失が低減できるという画期的なものである。提案した導体の設計と試作を行い、短尺試料の損失測定を行った結果、導体が設計どおり、低損失性と高安定性とを同時に満足することを明らかにした。

次に、1秒間にコイル蓄積エネルギーの半分を放出する 100kJ/50kW 性能をもつ、伝導冷却型の低温超伝導パルスコイルを設計し、定格パルス運転が可能であることを理論的に示した。更に、設計したコイルを実際に作製し、冷却励磁試験を行った。コイルの作製には、巻線時の導体捻り角を制御できる巻線機を開発すると共に、高伝熱スペーサとしてダイニーマ FRP とリッツ線を使用し、伝導冷却に必要な高い伝熱特性を確保した。製作したコイルの交流損失特性を評価するため、繰り返し励減磁試験時は、コイルの発熱と冷凍機の冷却能力が釣り合った状態になることから、このときの冷却能力から交流損失を評価した。結果としてコイルが設計どおりの低い交流損失値を持つことを確認した。次に、コイルの伝熱特性の評価を行うために、励磁試験時のコイル内の温度測定結果と 2次元有限要素法による解析結果を比較検討した。解析には ANSYS を用い、本コイルの伝熱特性の評価が可能な 2次元有限要素法モデルを作成し、試験時に観測している

コイル内の各部の温度から導体内部の最高到達温度を推定した。結果として、導体やスペーサ間が理想的に接触し、接触熱抵抗が無視できるとした解析結果と実際の温度測定結果がほぼ一致し、製作したコイルが設計どおりの優れた伝熱特性を持つことを明らかにした。更に、本コイルの安定性裕度を定量的に見積もると共に、今後の最適設計のための指針を得ている。

川越氏は、伝導冷却型の低温超伝導パルスコイル開発という研究テーマに対し、交流損失の低減と高安定性を両立させた導体構造及びコイル巻線方法を開発し、パルス運転時のコイル内の交流損失による発熱を抑制すると同時に、コイル内の排熱特性を高度に制御した巻線構造を開発することにより、世界で初めて伝導冷却型の低温超伝導パルスコイルの開発に成功した。更に、試作したコイルの詳細な特性測定及び解析を行うことにより、今後の最適設計のための指針を示している。これらは、超伝導応用の範囲を広げる優れた研究成果と言える。従って、学位を与えるに十分な内容を持っているものと判断した。