

氏名	すぎもと まこと 杉本 誠
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成13年2月14日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第2項
最終学歴	平成元年3月 東北大学大学院工学研究科博士課程後期3年の課程 機械工学専攻 退学
学位論文題名	強制冷凍超電導コイルの流量低下現象とコイル安定運転限界に関する研究
論文審査委員	主査 東北大学教授 島本 進 東北大学教授 山下 努 東北大学教授 犬竹正明 東北大学教授 上條謙二郎 東北大学教授 村瀬 暁

論文内容要旨

強制冷凍超電導コイルは、超電導導体内部に冷媒である超臨界ヘリウムを圧送し、これを冷却する方式である。強制冷凍超電導コイルが機械的、電気的に浸漬冷却より優れているため、核融合炉用超電導コイルに代表される大型の超電導コイルの冷却方法として用いられている。また近年の研究の進歩に伴い、国際熱核融合実験炉(ITER)の超電導コイルは、超臨界ヘリウムを冷媒としたこの強制冷凍方式によって設計されている。

強制冷凍超電導コイルがその運転条件によって冷媒の供給流量が低下すること（これを冷媒流量低下現象と呼ぶ）を本研究において初めて見出した（その一例を図1に示す）。強制冷凍超電導コイルのパルス運転時の発熱が大きくなると、冷媒流量は完全にゼロになり、コイル内部に冷媒が流れなくなる。このためこの状態が続けば、コイルは安定に運転できなくなる。パルス運転による冷媒流量低下現象は、強制冷凍超電導コイルの安定な運転を脅かす重要な問題であるが、これまで全く着目されていなかった。これまでの研究では、強制冷凍超電導コイルの損失や不安定性等が議論される時は、冷媒である超臨界ヘリウムは無限の泉から湧き出ているとの想定のもとに行われている。本論文は、6章から構成し、各章の内容は以下の通りである。

第1章では、本研究の位置付けと目的を記した。本研究における強制冷凍超電導コイルの冷媒流量低下現象の定量的研究は、以下の点を目的として行った。

- 1) 強制冷凍超電導コイルに発生する冷媒低下現象の普遍性を実験的に検証する。複数の大型強制冷凍超電導コイルのパルス通電試験結果を基に、冷媒流量低下量とパルス通電の因果関係をまとめる。
- 2) 強制冷凍超電導コイルに発生する冷媒低下現象の普遍性とその発生機構を考案する。
- 3) 冷媒低下現象が強制冷凍超電導コイルのパルス運転に与える影響を考察する。仮にそれがコイルの運転に悪影響を及ぼすのなら、その回避方法を考案する。

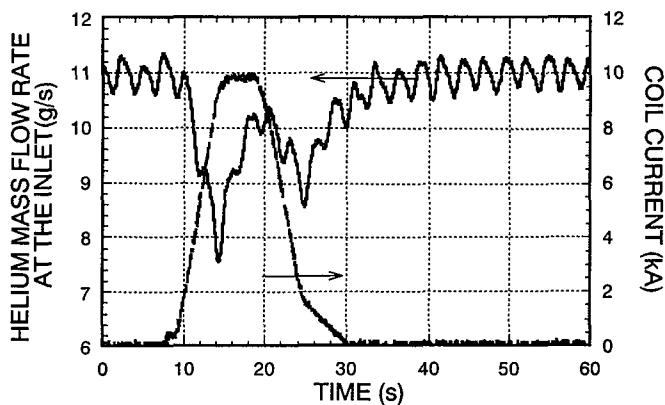


図1 強制冷凍超電導コイルの流量低下現象の一例

依存することを初めて実験的に明らかにした。また、パルス運転に伴う変動磁場損失による発熱量がある値に達すると、強制冷凍超電導コイルにそれまで流れていた超臨界ヘリウムが流れなくなってしまう。コイルの入発熱がこれより大きくなると、ヘリウムがコイルに流れず冷凍できなくなるので、コイルのパルス通電が不可能になる。このように冷媒流量低下現象は強制冷凍超電導コイルの安定運転限界を決めている重要な現象であること指摘した。

さらに、トカマク型核融合炉用超電導コイルに発生する核加熱を模擬した加熱実験を行い、核加熱模擬実験でもパルス通電と同じ冷媒流量低下現象が発生することを見出した。発熱源が異なる場合でも、強制冷凍超電導コイル内部での発熱量に冷媒流量低下量が依存することを示した（図2のシンボルで示す）。

第3章では、前章で構築した冷媒流量低下量のデータベースをもとに、これまで未解明であったパルス運転による冷媒流量低下現象を解明し、その機構を明らかにした。冷媒であるヘリウムに水力学的手法を適用し、強制冷凍超電導コイルに冷媒を供給する極低温循環ポンプの性能曲線とコイルの管摩擦を考慮してこの現象を解明する流量低下式を考案した。この現象解明式により、実験で得られた冷媒流量低下現象を説明すること、および冷媒流量低下量を解析することができるようになった（図2の実線で示す）。

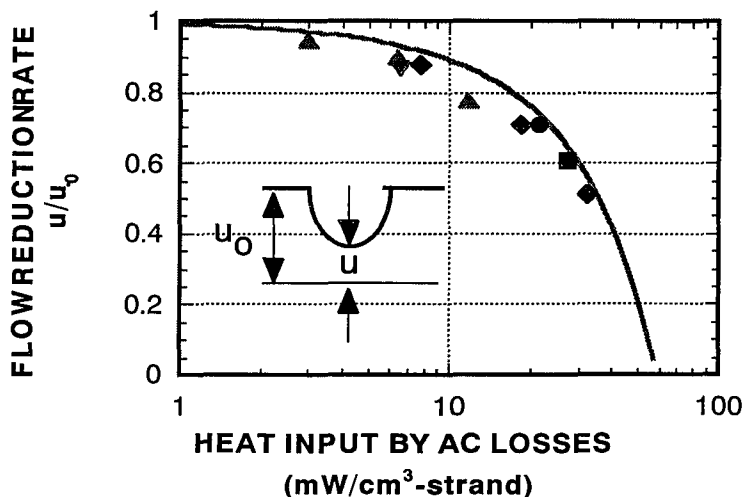


図2 強制冷凍超電導コイルの冷媒流量低下量。シンボルは測定結果を、実線は解析値を示す。

第2章では、冷媒流量低下現象が、変動磁場損失や核加熱により強制冷凍超電導コイルに発生することを示した。本章では3つの異なる大型超電導コイルを用いてパルス通電実験を行い、パルス運転による変動磁場損失と冷媒流量低下を定量的に求めた。冷媒流量低下により、電気磁気的性能ではなく熱的に強制冷凍超電導コイルの安定運転限界が定まることを見出した。

3つのコイルのパルス通電実験では、それぞれのコイルで冷媒流量低下量が変動磁場損失によるコイル内部の発熱量(W)に

冷媒流量低下現象はコイル冷媒流路の圧力損失の増加により発生するが、この主要因は冷媒である超臨界ヘリウムの膨張であることを突き止めた。この冷媒流量低下現象の解明により強制冷凍超電導コイルの安定運転のための条件（安定運転限界）は、コイル自身の性能だけでなく、超電導コイルに冷媒を供給する極低温循環ポンプの流量及びポンプ・ヘッド特性に立脚していることを指摘した。つまり極低温ヘリウム循環ポンプの特性は超電導特性と同等に重要であり、パルス運転が

求められる強制冷凍超電導コイルの開発において、極低温ヘリウム循環ポンプの性能を向上させることが必要である。

第4章では、現象解明のための流量低下式とは独立に、ヘリウム膨張モデルに基づいた流量低下式を考案した。ヘリウム膨張による流量低下式は、超電導コイルの開発計画立案・設計段階で、超電導コイルのパルス損失に見合った冷媒流量の算出及び総ヘリウム循環量の精度の良い予測を行うことを目的としている。

本来なら現象解明式から流量低下量を求めるためには、超電導コイルの管摩擦係数および極低温ヘリウム循環ポンプの性能曲線を先に把握しておく必要がある。しかしこれらの値はコイル開発計画立案・設計段階では得ることができない。ここで考案したヘリウム膨張モデルによる流量低下式を用いることにより、これらの値が分からなくても、パルス運転時に発生する変動磁場損失と冷媒流量低下を安全側の評価で求めることが可能になった。

更にこのヘリウム膨張モデルによる流量低下式を拡張し、パルス運転時にコイルが安定に動作するために必要な最小流量を求める手法を考案した。コイル内の発熱により、コイル内のヘリウムが膨張し、流量低下が引き起こされるが、発熱量の増加とともにやがてヘリウムが流れなくなってしまふ。流量がゼロになるときのコイル内のヘリウム温度を、ヘリウム膨張モデルによる流量低下式より求め、これが超電導コイルの設計条件として一般的に用いられている分流開始温度(T_{cs})より大きいことが、コイルの安定な動作を決めることを導出した。

第5章では、パルス運転される強制冷凍超電導コイルに最適なクエンチ検出法である「流体法」の実験的・解析的研究を行った。流体法は、原理的に電気ノイズがないため、パルス運転される強制冷凍超電導コイルには最適なクエンチ検出法である。しかし、クエンチ検出時の冷媒流量低下量と内部エネルギー消費量の定量的な研究は、これまでなされていなかった。本章で取扱ったクエンチ時に発生する冷媒流量低下現象は、局所的かつ短時間で発生する非定常流れである点が前章まで記述した冷媒流量低下現象と大きく異なる。

ケーブル・イン・コンジット(CIC)導体を用いて、冷媒条件をパラメータとして非定常冷媒流量低下量を実験的に測定した。この冷媒流量低下実験の結果を、ヘリウム膨張モデルに基づく流量低下式に、新たに考案した実効加熱時間を導入することにより、急速加熱の場合の冷媒流量低下量を解析できることを示した。考案した実効加熱時間は、CIC導体の断面内のヘリウムへの熱の移動時間を表す量といえる。

実効加熱時間を導入したことにより、これまで未解明であったクエンチ発生時のコイル内部でのエネルギー消費量が、冷媒流量低下量から直接測定することが可能になった。このことにより非定常流量低下現象を利用したクエンチ検出法（流体法）において、保護動作開始時間を定量的に示すことが可能になった。つまり大型強制冷凍超電導コイルの保護に必須の技術であるクエンチ検出技術の信頼性向上に貢献できた。

第6章は結論であり、本論文で明らかにした知見をまとめた。前述した強制冷凍超電導コイルに発生する流量低下現象の一連の研究により、定常流量低下現象ではヘリウム物性だけで求まる流量低下式を考案し、コイルのパルス運転に必要な最小流量を定量的に決めることができるようになった。また非定常流量低下現象では、強制冷凍超電導コイルの保護に不可欠であるクエンチ検出法の研究を行い、流量低下量からコイル内部での発熱量の直接測定が可能になった。これによりクエンチ時の流量低下量により、直接コイル保護回路の動作を可能にした。

以上、これらの研究は核融合炉用超電導コイルばかりでなく、パルス運転が要求される全ての強制冷凍超電導コイル（一例として電力貯蔵用超電導コイル）に適用できる新たな概念である。

審査結果の要旨

強制冷凍超電導コイルは、国際熱核融合実験炉や大電流電力貯蔵に用いられるが、著者はこれらの大型ハードウェアの実験を行い、変動磁場損失の増加に従って冷媒の流量が低下することを初めて見出し両者の関係を工学的に明らかにした。さらにその原因を究明し、これを回避してコイルを安定に作動させるための設計手法を開発した。本論文は、これらの成果をまとめたもので、全文で6章よりなる。

第1章は、序論である。

第2章では、3つの異なる大型超電導コイルのパルス通電実験を行い、この通電により生ずる変動磁場損失と冷媒流量低下との関係についてデータベースを構築している。それぞれのコイルの構造が異なっても冷媒流量の低下が変動磁場損失パワーの密度(W/m^3)に依存し、その関係に一般的傾向があることを実験的に初めて明らかにした。すなわち、強制冷凍超電導コイルの安定運転限界は、超電導の電気磁気的特性のみではなく冷媒の流量条件によっても決まることを指摘している。

第3章では、前章で構築した冷媒流量低下のデータベースをもとに、これまで未解明であったパルス通電による流量低下現象を数式化し、その機構を解明している。変動磁場損失を考慮に入れて冷媒である超臨界ヘリウムに水力学的手法を適用し、更に冷媒を供給する極低温ヘリウムポンプの特性曲線とコイルの冷媒流路の摩擦を考慮し、この流量低下現象を説明する複数の式の組み合わせを考案した。これにより実験で得られた流量低下現象の説明が可能になり、更にその流量低下を定量的に解析できるようになったことは高く評価される。流量低下現象はコイル冷媒流路での圧力損失の増加により発生し、この主要因は冷媒である超臨界ヘリウムの膨張であることを指摘している。この流量低下現象の解明により、強制冷凍超電導コイルの安定運転限界が、超電導コイルに冷媒を供給する極低温ヘリウムポンプの流量とポンプヘッドとの特性曲線にも立脚していることを定量的に指摘したことは重要な成果である。

第4章では、超電導コイルの変動磁場損失に見合った冷媒流量および全体の循環量を、冷凍系を含めた超電導コイルの設計段階で精度良く予測する方法を考案している。本来、冷媒流量低下を求めるためには、コイルの冷媒流路の摩擦係数および極低温ヘリウムポンプの性能を先に把握しておく必要がある。全体の設計ができるように、この章で新たにヘリウム膨張モデルによる流量低下を示す式を考案した。流路摩擦およびポンプ性能の値が未知の段階でも、この式はパルス通電による変動磁場損失と冷媒流量低下との関係の算出を可能にしている。本研究は冷媒流量低下による超電導コイルの安定運転限界を設計段階で指摘する上で非常に有意義である。

第5章では、以上の研究をパルス通電する強制冷凍超電導コイルの常伝導転移(クエンチ)検出に適用し、過渡的な流量測定によるクエンチ検出の実験的・解析的研究を行っている。これまで未解明であったクエンチ発生時のコイル内部でのエネルギー消費量を、冷媒流量低下から直接測定する手法を開発している。この流量低下現象を利用したクエンチ検出法は、保護動作開始時間を定量的に示すことを可能にし、超電導コイルの保護手法の信頼性向上に貢献している。

第6章は総括である。

以上要するに本論文は、強制冷凍超電導コイルに発生する流量低下現象を究明し、ヘリウムポンプとは独立してコイルの設計・動作および保護手法を確立し、電気工学および超電導工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は、博士(工学)の学位論文として合格と認める。