

京都大学	博士 (工学)	氏名	LUO XIJIE
論文題目	Conditions of Protection Against Quench and Thermal Runaway of Conduction-Cooled High Temperature Superconducting Magnets		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、薄膜高温超伝導線で巻いたマグネット（以下 HTS マグネット）の実用化を目指して、クエンチ・熱暴走現象に対する保護に着目し、低温容器の外に設けた抵抗でエネルギーを回収する外部保護抵抗法の HTS マグネットへの適用可能性について、短尺線材の試料（短尺試料）を用いた短尺試験により実験的に研究したもので、全 8 章からなる。</p> <p>第 1 章では、超伝導現象、超伝導線、超伝導マグネットから説き起こし、本研究の背景と目的について述べている。背景としては、まず、超伝導マグネットのクエンチ、熱暴走について説明しているが、本論文では、局所的・過渡的な熱擾乱に起因する常伝導転移をクエンチ、長時間続くジュール加熱に起因する常伝導転移を熱暴走と呼んでいる。クエンチ・熱暴走の検出とそれに対する保護法として外部保護抵抗法を説明した上で、この方法の HTS マグネットへの適用性を調べるための短尺試験を提案している。本章の最後では、短尺試験により HTS マグネットの保護条件を調べるという本研究の目的についてまとめている。</p> <p>第 2 章では、本論文を理解するための基礎として、超伝導マグネットのクエンチ・熱暴走現象、それらの検出とマグネットの保護方法について詳細に説明したのち、クエンチ・熱暴走により、なぜ、コイル（マグネット）が劣化するかについて解説している。</p> <p>第 3 章では、本論文における実験方法について紹介している。まず、実験に使用した伝導冷却テストスタンド、短尺試料の作製・設置方法について説明している。次に、FPGA モジュールを使用し、HTS マグネットの検出・保護過程の振る舞いを模擬するための短尺試験の方法について説明している。この方法では、FPGA モジュールで電圧を監視し、電圧が設定した検出電圧を超えると（クエンチ・熱暴走の検出を模擬）、一定時間後（遮断器の動作に要する時間を模擬）、電源出力を指数的に減衰させる（外部抵抗による保護を模擬）。さらに、分流モデルと銅安定化層の抵抗率・温度依存性を用いて試料電圧からホットスポット温度を算出する方法について説明している。</p> <p>第 4 章では、局所的・過渡的な熱擾乱に起因するクエンチを対象として、外部保護抵抗法の HTS マグネットへの適用可能性を検証している。分流モデルによりホットスポット温度を求めるために必要な試料超伝導線の臨界電流の温度依存性の測定結果、クエンチ伝搬速度の測定結果を示したのち、様々な通電電流、検出・保護条件（検出電圧、電流減衰時定数）においてクエンチ検出・保護試験を行い、ホットスポット温度を求め、各条件において、保護が成功するかどうかについて調べている。ここでは、超伝導線の銅保護層厚さやマルチフィラメント化が保護に与える影響についても調べている。さらに、短尺試験により得られた保護可能条件を用いて、外部保護抵抗法の小型 HTS マグネットへの適用のケーススタディを行っている。</p> <p>第 5 章では、持続的なジュール発熱に起因する熱暴走に着目した実験について述べている。本章の実験では、薄膜高温超伝導線において避けられない局所的欠陥や経験磁界分布に起因する低臨界電流部を模擬するために、試料超伝導線に人工的臨界電流劣化部を形成した上で、熱暴走電流（ある一定時間保持している間に熱暴走が発生す</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	LUO XIJIE
<p>る限界の電流値)を求め、また、熱暴走が発生したのちの、クエンチ検出・保護の可能性について調べている。本章の前半では、線材幅方向に偏った欠陥を形成したモノフィラメント線とマルチフィラメント線を比較した実験結果を示している。電流保持時間を 300 s とした場合、使用した実験装置・試料における冷却状態においては、モノフィラメント線とマルチフィラメント線で熱暴走電流はほとんど変わらないが、マルチフィラメント線においては、銅安定化層を介して欠陥を迂回するようなフィラメント間の電流分流が起こり、銅安定化層におけるジュール発熱のために熱暴走が開始するまでの時間が短くなるという結果を得ている。このような差の一方で、検出・保護条件(検出電圧、遅延時間、電流減衰時定数)を揃えた上で、熱暴走に対して保護可能な限界の電流値をモノフィラメント線とマルチフィラメント線について求めたところ、ほとんど同じであるという結果を得ている。このことから、交流損失低減のためにマルチフィラメント化しても、保護特性は低下しないと結論付けている。本章の後半では、モノフィラメント線を用いて、クエンチに対する保護可能条件と熱暴走に対する保護可能条件を比較し、それらがほとんど変わらないことを示している。</p> <p>第 6 章では、短尺試験で実際のコイルのクエンチをどの程度模擬できるかについて、実験結果と線材長手方向に対する 1 次元熱解析をもとに議論している。短尺試験はコイルのクエンチと、線材横方向の熱拡散の点で異なるが、線材周囲に電気絶縁用のポリイミドフィルムやエポキシ含浸材があると仮定し、それらの付加的熱容量を考慮した 1 次元熱解析を行ったところ実験結果を再現できた。また、長手方向の熱伝導という点では、高温超伝導線の常伝導伝搬は遅く、クエンチ・熱暴走の検出・保護にかかわる時間スケールでは常伝導部は局在化しているため、短尺試験における試料の短さはコイルを模擬する点において大きな問題とならないと述べている。</p> <p>第 7 章では、第 5 章までの議論を補強するために、クエンチ保護に影響を与えないであろうパラメータについて、実験的に確認している。すなわち、クエンチの原因となる熱擾乱のパワーはホットスポット温度には影響を与えないこと、初期温度はクエンチさせるために必要な熱擾乱のエネルギーには影響を与えるものの、クエンチ後のホットスポット温度には影響を与えないこと、臨界電流はホットスポット温度や保護可能電流に影響を与えないことを実験的に確かめている。</p> <p>第 8 章は結論であり、まず、HTS マグネットはクエンチ検出・保護が難しいと考えられていること、外部保護抵抗法は技術的には確立しており魅力的だが、その薄膜高温超伝導線での適用性が明らかになっておらず、その適用性を実験的に明らかにすることが本研究の目的であると再掲している。そののち、本研究で得られた成果について要約し、それを踏まえ、外部保護抵抗法の HTS マグネットへの適用性を明らかにすることができたと総括している。本研究で用いた短尺試験法を用いれば、高価なコイルを試作して焼損させないでもクエンチ保護条件を見出せたこと、この方法は外部保護抵抗法以外のクエンチ検出・保護方法の評価や、薄膜高温超伝導線以外で作製された伝導冷却マグネットのクエンチ検出・保護の研究にも利用できると述べている。さらに、スパイラル導体のような他の形式の導体の研究に対しても短尺試験法は有用であり、この研究方法は、薄膜高温超伝導線の応用可能性の拡大に繋がると論じている。</p>			

氏名	雨宮尚之
----	------

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、薄膜高温超伝導線で巻いたマグネットの実用化において鍵となる、そのクエンチ・熱暴走現象に対する保護に焦点を絞り、低温容器の外に設けた抵抗でエネルギーを回収する外部保護抵抗法の適用可能性を実験的に明らかにしようとした研究であり、得られた主な成果は以下の通りである。

1. 薄膜高温超伝導線の常伝導伝搬速度が遅く、常伝導部が局在化することに着目して、高価なコイルを多数試作しそれを焼損させるような実験を行う代わりに、短尺試料を用いて、コイルにおけるクエンチ・熱暴走発生を模擬する実験方法を提案した。
2. 1項の実験方法を用いることによって、局所的・過渡的な熱擾乱に起因するクエンチに対して外部保護抵抗法を適用する可能性を検証し、クエンチ保護が可能な検出・保護条件（検出電圧、電流減衰時定数）を明らかにした。さらに明らかにした検出・保護条件に基づいたケーススタディにより、具体的な小型 HTS マグネットに対して外部保護抵抗法が適用できることを示した。
3. 線材幅方向に偏った局所的欠陥を持ったモノフィラメント線とマルチフィラメント線において、大電流を保持した場合に起こる持続的ジュール発熱に起因する熱暴走に着目し、マルチフィラメント線の方が同じ電流値で早期に熱暴走が生じるものの、保護性能、すなわち保護に必要な検出・保護条件（検出電圧、電流減衰時定数）はマルチフィラメント線でもモノフィラメント線に劣らないことを明らかにした。
4. モノフィラメント線を用いて、局所的・過渡的な熱擾乱に起因するクエンチに対する保護可能条件と持続的ジュール発熱に起因する熱暴走に対する保護条件を比較し、両者に差がないことを指摘した。
5. 熱擾乱のパワー、初期温度、線材臨界電流はクエンチ発生の閾値には影響するが、最大ホットスポット温度には影響せず、従って、保護可能条件にも影響しないことを実験的に確認した。

以上のように、本論文は系統的かつ緻密な実験を通して、漠然と適用が難しいと考えられていた外部保護抵抗法が、薄膜高温超伝導線で巻いたマグネットに対しても適用可能であることを明らかにしたものである。これは薄膜高温超伝導線で巻いたマグネットの実用化に大きく寄与するものであり、得られたクエンチ検出・保護条件に関する知見、多くの系統的実験データ、構築した実験方法は、学術上、実際上寄与するところが少ない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。

また、令和4年1月24日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。