

令和 6 年 6 月 1 8 日現在

機関番号：25503

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2022～2023

課題番号：22K20434

研究課題名（和文）高温超伝導線材の電気-熱連成現象解明による限流器の復帰時間推定モデル構築

研究課題名（英文）Model Development for Estimating Recovery Time of Fault Current Limiters by Elucidation of Electrical-Thermal Phenomena in High-Temperature Superconducting Tapes

研究代表者

結城 光平（Yuki, Kohei）

山陽小野田市立山口東京理科大学・工学部・助教

研究者番号：00963563

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では超伝導限流器の実現に向け超伝導線材に利用するポーラス安定化材の構造を検討した。まずポーラス安定化材内に保持される冷却液の沸騰モデルを提案した。その結果、本モデルと実験の冷却性能の相対誤差は10%程度であり、液体保持がポーラス安定化材の重要な役割であることを示した。また、3次元の電気・熱連成解析により常伝導領域の伝播挙動を評価し、ホットスポット抑制に効果的なポーラス安定化材の構造を抽出した。その後、解析結果を基にポーラス体を選定し実験的にホットスポット抑制効果を評価した。その結果、ポーラス安定化材により瞬時に常伝導領域が拡大しホットスポットの発生を抑制可能であることを実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超伝導限流器は電力系統での短絡事故電流を抑制する役割を持ち、既存機器の交換が不要なため費用対効果が大きい。が未だ実現には至っていない。本研究では実現の大きな障壁となっている超伝導線材の冷却特性に着目し、ポーラス安定化材により従来成し得なかった「冷却性能の向上」と「超伝導線材のホットスポットの抑制」を同時に達成可能な指針を示している。また、ポーラス体内の沸騰という複雑な現象をモデル化することで冷却性能の向上に対する重要因子の抽出に成功している。

上記の知見を超伝導限流器だけでなくポーラス体を利用したCPU冷却やヒートパイプなどの既存機器にも応用することで更なる性能向上が見込めると期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this study, structures of porous stabilizer utilized for superconducting tapes was investigated for the realization of superconducting fault current limiters. First, we proposed a boiling/evaporation model in the porous stabilizer. As a result, the relative error between this model and experimental result was approximately 10%, indicating that coolant retention is an important role of the porous stabilizer.

Further, to clarify the structure of the porous stabilizer that is effective in suppression of hot spots, propagation behaviors of the normal-state region was evaluated by an electrical and thermal coupling analysis. After the analysis, the effectiveness of porous stabilizer was experimentally evaluated. The results shows that the porous stabilizer can instantly expand the normal-state region of superconducting tape and suppress the occurrence of hot spots.

研究分野：熱工学、超伝導工学

キーワード：沸騰熱伝達 ポーラス体 液体窒素 急冷 超伝導限流器 超伝導線材

1. 研究開始当初の背景

電力系統の拡大に伴い今後 10 年で短絡事故電流が遮断器容量 (63 kA) を超えることから、「超伝導限流器」の開発が進められている。超伝導限流器は液体窒素 (77 K) で浸漬冷却された Rare-Earth Barium Copper Oxide (REBCO) 線材で構成され、事故電流による REBCO 線材の常伝導転移・温度上昇 (77 K→300 K) に伴う電気抵抗で電流を遮断器容量以下まで抑制することを目的としている。事故後は沸騰熱伝達により系統再閉路時間 (0.3 s) 内に再度 77 K まで冷却し超伝導復帰させる。

REBCO 線材は Fig. 1 に示すように、超伝導体と限流動作時に電流パスとなる金属安定化材 (銅などの金属箔) で構成される。一方、臨界電流密度 J_c (超伝導を維持できる最大電流密度) は不均一であり、局所的に 10% 程度低い領域が存在する。その状態で事故電流が流れると、図 1 に示すように J_c が低い領域で最初に常伝導転移・発熱が起こることで、最大 200 K ほど温度が高くホットスポットになるため、局所的に復帰が遅れポーラス安定化材利用時においても 0.3 s 以内の超伝導復帰は達成できていない。

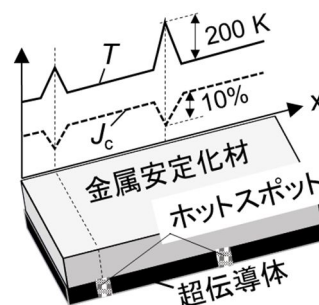


Fig. 1 REBCO 線材内の
ホットスポット発生イメージ

2. 研究の目的

本研究では安定化材を多孔質化したポーラス安定化材付 REBCO 線材によりホットスポットの抑制と高速冷却の同時達成を目的とする。REBCO 線材の超伝導体は、事故電流が流れた際、最初に臨界電流密度が低い領域で局所的に常伝導転移する。そのため、他の領域が常伝導転移し事故電流を抑制するまでの間に、臨界電流密度が低い領域で局所的に熱負荷が大きくなりホットスポットが発生する。そこで、本研究ではポーラス安定化材の小さな接触面積を利用し、電流転流部での電流密度 J を強制的に臨界電流密度 J_c 以上に増加させる。その結果、瞬間的に常伝導領域が伝播し、REBCO 線材全体の電気抵抗を利用し事故電流を抑制すると共に、熱負荷を分散させることができるため、ホットスポットの抑制と高速冷却の同時達成が可能となる。

3. 研究の方法

本研究は以下の 3 つの実施項目により構成される。以降、それぞれの実施内容についての説明を示す。

1. ポーラス安定化材内の冷却モデルの提案と復帰時間の推定

ポーラス安定化材により冷却性能が向上するメカニズムの解明に向けて、沸騰現象に着目した冷却モデルを提案する。また、先行研究で得られたポーラス安定化材の冷却性能との比較により、本モデルの妥当性について検討する。

2. ホットスポット抑制に向けたポーラス安定化材の重要パラメータの抽出

ホットスポット抑制が可能な条件を電気-熱連成数値解析により抽出する。ポーラス安定化材は先行研究で使用された Ni-Cr 発泡体を一様構造としてモデル化する。本研究ではポーラス安定化材の「孔径 (接触間隔)」、「線径 (接触面積)」をパラメータとし、REBCO 線材の J_c が局所的に低下している場合の常伝導転移現象を把握する。

3. ポーラス安定化材によるホットスポット抑制の実験的検証

「2. ホットスポット抑制に向けたポーラス安定化材の重要パラメータの抽出」で抽出した条件により実際にポーラス安定化材付 REBCO 線材を製作し,ホットスポットの抑制が可能であるかを実験により検証する。

4. 研究成果

1. ポーラス安定化材内の冷却モデルの提案と復帰時間の推定

Fig. 2 はポーラス安定化材が冷却時間に与える影響を示している。横軸が REBCO 線材を通電加熱後の温度 (冷却が始まる瞬間の温度), 縦軸が冷却時間 (REBCO 線材が 77 K に冷却されるまでの時間) である。ポーラス安定化材を接合することで,冷却時間が 75%程度短縮されている。一方, ポーラス安定化材を接合した状態においても, 沸騰発生時には蒸気の膜がポーラス安定化材全体を覆い液体窒素が外部からは供給できないことから, 液体窒素がポーラス安定化材の内部に保持されていると考えられる。

そこで Fig. 3 に示すようなモデルを提案した。本モデルではポーラス体を構成する金属線 (以後, ポーラス線と記述) が積層された構造を持つと仮定した。ポーラス線間で蒸気が成長し, ポーラス線の直下まで蒸気が侵入した状態を考えると, その領域ではラプラスの式を満たすために局所的に圧力が増大する必要がある。しかしながら, その場合には同一蒸気内に大きな圧力分布が生じるため, 結果として蒸気はポーラス線下部には侵入できず, ポーラス線下部に常に液体が存在する形となる。

このモデルから液体保持領域の体積を計算し, 計算した体積分の液体が蒸発することで冷却され则认为ると, その熱流束は 0.061 MW/m^2 となる。本モデルと実験における冷却時の温度減少過程の比較を Fig. 4 に示す。実験では蒸気膜の崩壊現象のため 0.7 s から 0.9 s で急激に冷却性能が高くなっているが, その前の線形変化領域で比較すると, モデルと実験の温度変化率の相対誤差は 10%程度となる。蒸気膜の崩壊現象などを考慮することでより正確な予測は可能となるが, 現時点における単純なモデルにおいても冷却時間を 20%程度の範囲で予測することに成功している。

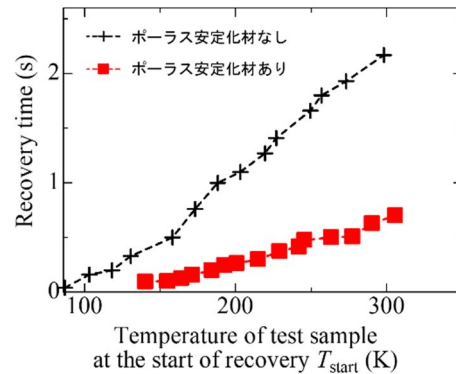


Fig. 2 ポーラス安定化材の有無による冷却時間の変化

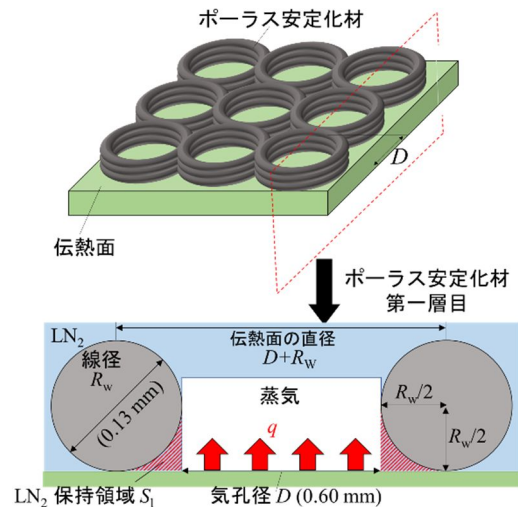


Fig. 3 液体保持効果のイメージ図

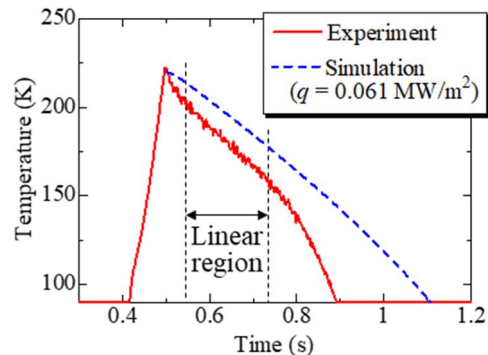


Fig. 4 本モデルと実験の冷却性能比較

2. ホットスポット抑制に向けたポーラス安定化材の重要パラメータの抽出

Fig. 5 に解析体系の概念図を示す．REBCO 線材上に NiCr ポーラス安定化材をモデル化した部品が接合されており，REBCO 線材とポーラス安定化材の接合部はピンフィン構造としている．REBCO 線材の長さとは幅はそれぞれ 100 mm と 4 mm である．Fig. 6 には REBCO 線材を上部から見た際の接合部位置を示している．接合部の 1 辺当たりの長さ d ，接合部の幅方向と長手方向の間隔 p_w と p_l をパラメータとして解析を行った．なお，ホットスポットを模擬するため REBCO 線材長手方向の中央部には幅 1 mm で臨界電流がゼロの領域を設けており，通電電流は 100 A としている．

Fig. 7 は d ， p_w ， p_l をそれぞれ 1，1，4 mm とした際の REBCO 線材の温度分布の経時変化を示しており，REBCO 線材を上部から見た図となっている．ポーラス安定化材が接合されていない場合には臨界電流がゼロの領域で瞬間的かつ局所的に温度が急増するのに対し，Fig. 7 では接合部を介しポーラス安定化材に電流が転流することでホットスポットの発生を抑制し，瞬間的に REBCO 線材の全体に熱を分散し常伝導伝播が可能であることが示された．一方， d を小さくしすぎたり接合部を幅方向に 1 箇所だけにした場合には幅方向に熱が伝わりづらく，ポーラス安定化材への電流の転流量が減りホットスポットが形成されることも示されている．そこで，線径が 1 mm 程度のポーラス体を選定し実験によりホットスポットの抑制効果を検証する．

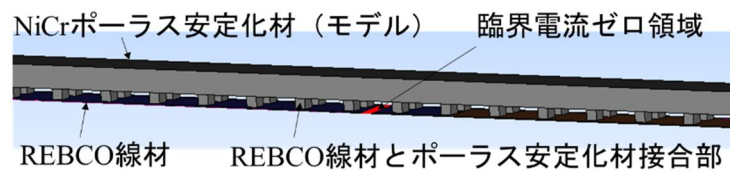


Fig. 5 解析体系の概念図

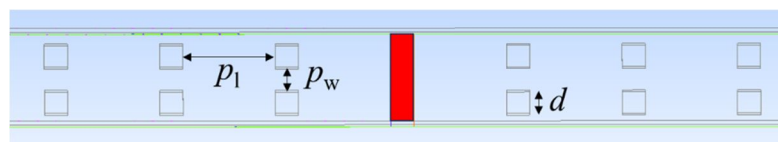


Fig. 6 REBCO 線材の上部から見た際の接合部の配置

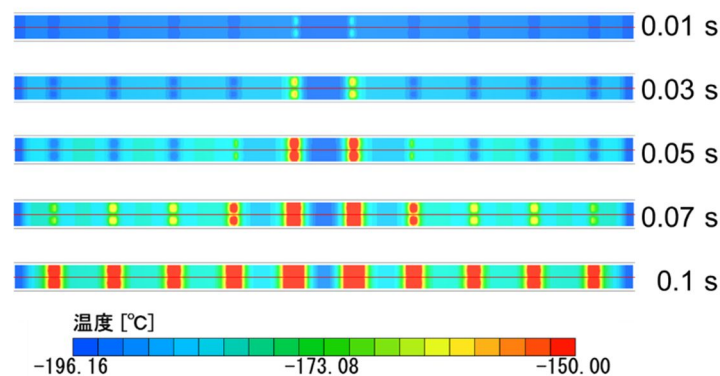


Fig. 7 REBCO 線材内の温度分布の経時変化

3. ポーラス安定化材によるホットスポット抑制の実験的検証

「2. ホットスポット抑制に向けたポーラス安定化材の重要パラメータの抽出」により、線径が 1 mm 程度で気孔径は 2 mm 程度のポーラス体がホットスポット抑制に効果的であることが示されたため、実際に上記条件を満たすように既製品の Ni-Cr ポーラス体を選定した。実験では、選定した NiCr ポーラス体を導電性エポキシ系接着剤を介し REBCO 線材に接合しており、REBCO 線材の長手方向中央部には臨界電流がゼロの領域を設けている。その状態で REBCO 線材に 30 A の電流を通電した際の電圧の発生挙動を領域 1, 2, 3 (Fig. 8 を参照) のそれぞれで測定する。

Fig. 9 はポーラス安定化材が無い場合と接合した場合の比較結果である。ポーラス安定化材が無い場合には電流が 30 A に到達する直前に Area1 が焼損した。これは、臨界電流ゼロ領域でホットスポットが発生しバーンアウトしたことを示している。一方、ポーラス安定化材を接合することで、Area 1 においても焼損することは無く、Area 2 と Area 3 でも電圧が発生していることが確認できる。これは、電流がポーラス安定化材に転流していることを意味している。また、Area 1 の電圧の立ち上がりから僅か 0.2 s 後に Area 2 と Area 3 の電圧が立ち上がっており、Fig. 7 での数値解析結果のように瞬間的に電流が転流しホットスポットを抑制可能であることが示された。

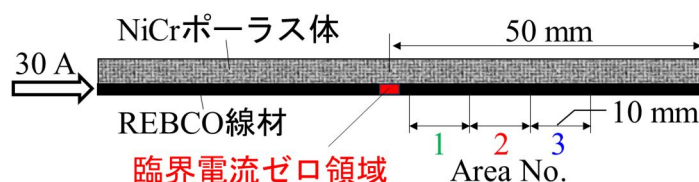


Fig. 8 実験サンプル概念図

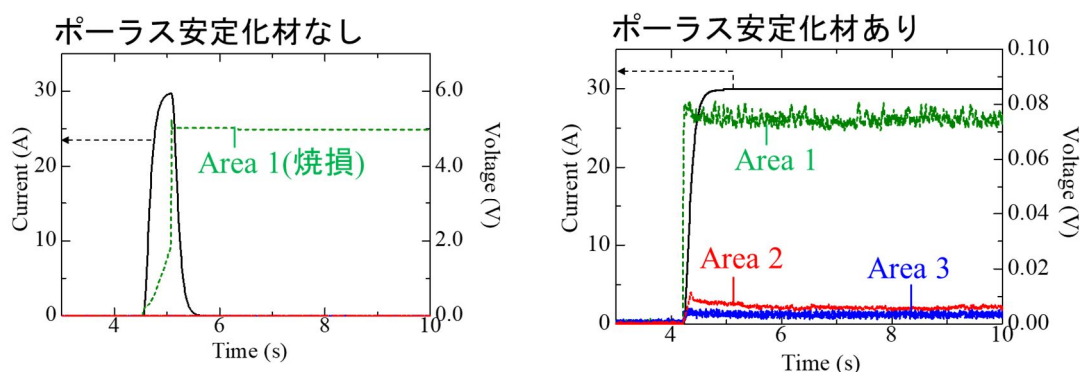


Fig. 9 領域ごとの電圧発生挙動に対するポーラス安定化材の影響

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1 . 著者名 Yuki Kohei、Ito Satoshi、Hashizume Hidetoshi	4 . 巻 33
2 . 論文標題 Mechanism of Recovery Performance Improvement With Porous-Stabilized REBCO Tape for Resistive-Type Superconducting Fault Current Limiters	5 . 発行年 2023年
3 . 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6 . 最初と最後の頁 1 ~ 6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TASC.2023.3256347	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1 . 発表者名 結城 光平
2 . 発表標題 多孔質安定化材を有する超伝導テープ線材の浸漬急冷過程における伝熱特性
3 . 学会等名 日本機械学会熱工学コンファレンス2022
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 Kohei Yuki
2 . 発表標題 Recovery Performance Enhancement of Resistive-Type High Temperature Superconducting Fault Current Limiters with Porous Stabilizer
3 . 学会等名 Applied Superconductivity Conference 2022 (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 Kohei Yuki
2 . 発表標題 Thermal Management Using Porous Material for Various Heat Flux Conditions
3 . 学会等名 2023 Pacific Center of Thermal-Fluids Engineering Workshop (国際学会)
4 . 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------