

令和 4 年 5 月 24 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04340

研究課題名(和文) 相転移を応用した高温超伝導送電ケーブルの局所温度異常検出に関する基礎的研究

研究課題名(英文) Fundamental study on detection of local temperature anomalies in high-temperature superconducting transmission cables by application of phase transition

研究代表者

高畑 一也 (Takahata, Kazuya)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授

研究者番号：10216773

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円

研究成果の概要(和文)：高温超伝導機器の実用化を促進するためには、温度異常を簡便かつ確実に検出し、それによって機器を保護することが重要である。特に、クエンチ現象による急激な局所温度上昇は、機器を破損させる可能性がある。本研究では、細長いチューブに封入された過熱液体窒素の突沸現象を、チューブ先端に接続した圧力計で検出する方法を提案した。内径1mm、長さ50mのステンレス製細管を用い実験を行った結果、局所的な温度上昇が過熱限界である110K近傍で液体窒素の爆発的な沸騰を引き起こし、その圧力上昇が音速で管端まで伝播することが確認された。高温超伝導体にチューブを沿わせることにより、局所温度上昇を検出できる可能性を見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超伝導送電ケーブルを含め、高温超伝導機器を普及させるためには、超伝導から常伝導への転移、いわゆるクエンチを確実に検出する必要がある。従来は電圧を測定する方法が主流であったが、電磁ノイズによる誤動作を避けられない。本研究で提案する突沸による圧力上昇を検出する方法では、電磁ノイズの影響を受けずクエンチによる局所温度上昇を確実に検出することができる。液体窒素の突沸現象は研究例が少なく、ステンレスの長尺細管内での実験は世界で初めてとなる。加熱条件によって突沸する温度が変化するなど、学術的に貴重な実験データが得られた。細管内での突沸現象は確実に起こることを実証し、超伝導機器への応用に期待が高まった。

研究成果の概要(英文)：To promote the commercial use of high-temperature superconducting devices, the ability to detect temperature anomalies easily is important. In particular, a sudden local temperature increase due to a superconducting-to-normal transition can damage a device. In the present study, we propose a method to detect explosive boiling of superheated liquid nitrogen sealed in a long thin tube using a pressure gauge connected to the end of the tube. Experiments using a stainless-steel tube with an inner diameter of 1 mm and a maximum length of 50 m showed that the local temperature rise caused explosive boiling at a temperature slightly below the superheat limit of 110 K for liquid nitrogen; the results also showed that the rapid pressure increase was transmitted to the end of the tube at approximately the speed of sound (~830 m/s). The proposed method of placing a thin tube along high-temperature superconducting conductors can be used to easily detect a local temperature rise.

研究分野：超伝導・低温工学

キーワード：過熱液体 突沸現象 液体窒素 過熱限界 クエンチ検出 超伝導機器 高温超伝導 圧力伝播

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 高温超伝導導体は、安定性が高く常伝導転移(クエンチ)しにくい反面、一度起こってしまうと常伝導部が伝播せず、局所的に温度が上昇する。さらに、常伝導部が伝播しないことから、電圧の発生が小さく、電圧測定法ではクエンチ検出が遅れることがある。そのような理由から、高温超伝導機器において、導体が損傷する事象が多く起きていた。

(2) 超伝導送電ケーブルなど、交流機器では、電圧測定に誘導電圧が重畳し、電圧測定法によるクエンチ検出ではこの誘導電圧をキャンセルする必要がある。一方、直流機器であっても、複数のコイルで構成される機器では、他のコイルとの相互結合による誘導電圧をキャンセルする必要がある。このようなクエンチ検出器の回路は複雑であり、誤動作の可能性も高い。

(3) 本研究で提案する極低温液体の突沸現象を用いる方法は、電磁ノイズの影響がほとんどないが、長尺の細管の中で極低温液体が確実に突沸現象を起こすかは、これまで調べられていなかった。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、従来の電圧測定法によるクエンチ検出に代わり、極低温液体の相転移に基づく検出法を提案する。気泡核が存在しない場合、液体は沸点以上の温度でも準安定な液相の状態を保つことができる。この準安定状態の液体は、過熱液体と呼ばれる。しかし、一旦温度が過熱限界に達すると、一気に気泡核が生成され自然に成長する。このとき爆発的な沸騰が起こり、突沸とも呼ばれている。我々は、高温超伝導機器の局所温度上昇を検知する手段として、細長いチューブに封入された過熱液体の爆発的沸騰(突沸)を、チューブ先端に接続した圧力計で検出する方法を提案する。

(2) 局所的な温度上昇が起こったときに、長尺の細管内に過熱液体が生成され、確実に突沸が起こるかどうか、実験的に検証する。また、突沸が起こる温度が加熱条件にどのような影響を受けるかを調べる。

(3) 突沸で発生した圧力波の伝播速度を測定し、例えば、キロメートルオーダーの送電ケーブルに応用した場合に、端部の圧力計の応答にどの程度の時間遅れが生じるかを推定する。

3. 研究の方法

(1) 図1に実験装置の模式図を示した。ヒーターユニットは、内径1.0 mm、長さ200 mmのステンレス配管の中央部の長さ10 mmにニクロムヒーター線を巻き付け、配管継手を用いてヒーターの周囲を真空断熱にした構造である。また、突沸した瞬間を検出するためAEセンサーを取り付けた。ヒーターユニットの端部にコイル状の延長管#1(長さ L_1)を接続し、さらに2 mの延長管#3で常温に導き、圧力計に接続した。またもう一方の端部には、延長管#2(長さ L_2)を接続し、端部を封止した。配管はすべてヒーターユニットと同じ内径1.0 mmのステンレス配管である。

(2) 圧力調整器で0.2 MPaの窒素ガスを導入し、ヒーターと延長管をデューアに挿入し、77 Kの飽和液体窒素で浸漬冷却した。配管内の窒素ガスが液化した後、ヒーター部をステップ状に加熱し、ヒーターと配管の間に挿入した銅コンスタンタン熱電対で温度を測定するとともに、圧力計により圧力変化を観測した。

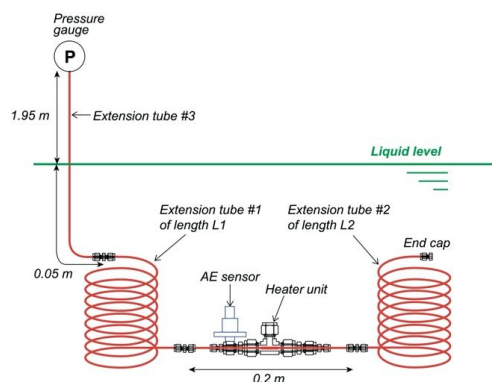


図1 実験装置の模式図

4. 研究成果

(1) 観測結果の一例を図2に示す。延長管の長さ L_1 と L_2 を0か16 mのいずれかに設定した。いずれの条件でも、ヒーター部の温度が液体窒素の過熱限界の110 K近傍に達したときに圧力が急激に上昇した。これは明らかに液体窒素の突沸によるものである。また、様々な加熱条件で実験したが、確実に110 K近傍で突沸を検出できた。突沸する温度については、延長管の有無、長さの影響はなかった。

(2) 突沸温度のヒーターパワー依存性を図3に示す。ヒーターパワーが大きいほど、ヒーター長さが短いほど、突沸温度が減少した。ただし、110 Kから100 Kまでの間の減少であり、局所温度上昇検出としての実用上の問題はない。この現象はこれまで研究報告のないものであった。有限要素法による温度分布解析を行い、この現象が温度分布の不均一による不均質核生成が影響しているのではないかと推定している。要因については今後さらなる研究が必要である。

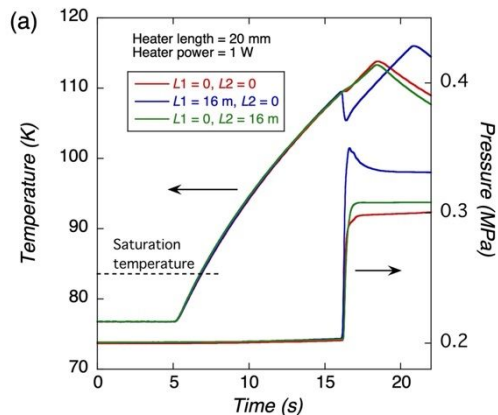


図 2 ヒーター加熱時の温度と圧力の変化。横軸 5 秒の時点で加熱開始。圧力上昇後、加熱を終了し、温度が減少する。

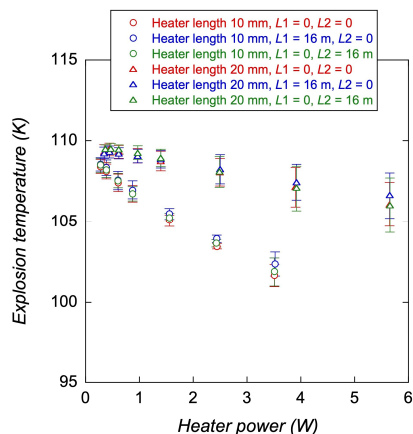


図 3 突沸温度のヒーターパワー依存性

(3) 送電ケーブルでは、キロメートルオーダーの長さの導体の温度を監視する必要がある。遠方の温度上昇を検出する場合に、事象発生から検出までに時間遅れがあると、機器の保護に影響を与える。そこで、延長管を最長 50 m まで延長し、圧力計で検出できるまでの時間遅れを計測した。図 4 に観測例を示す。ヒーターユニットに取り付けた AE センサーは、突沸を瞬時に検出することができる。その AE 信号の開始時間から、圧力計の指示値の変化開始時間までの遅れ時間を測定した。その結果を延長管の長さ ($L1$) 依存性として図 5 に纏めた。このとき $L2 = 0$ である。遅れ時間は $L1$ に直線的に比例し、圧力は一定速度で伝播していることが分かった。その伝播速度は 830 m/s と計算され、液体窒素中の音速 855 m/s (文献値) とほぼ等しいことが分かった。この結果から、配管がキロメートルオーダーになっても、秒オーダーで局所温度上昇による突沸を秒オーダーで検出できることが分かった。

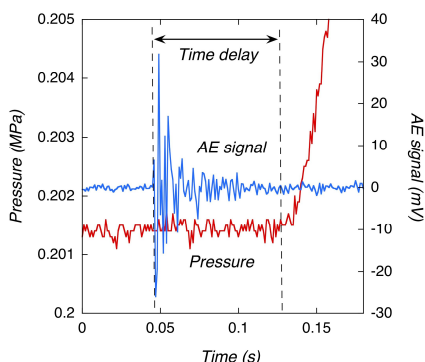


図 4 AE 信号と圧力計指示値の時間変化 ($L1 = 50$ m)

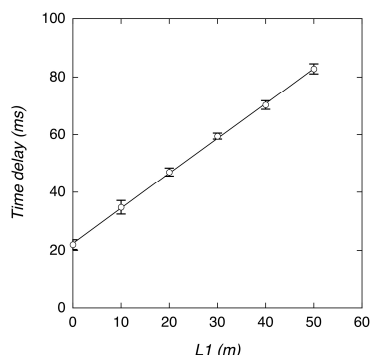


図 5 応答時間遅れの延長管長さ $L1$ 依存性

(4) 細管を超伝導導体に沿わせ、熱的に接触させることができれば、導体の局所温度上昇を圧力上昇によって検出できることを実証した。導体の長さが数キロメートルになっても、1 本の細管と 1 個の圧力計で数秒以内に検出できる。この方法は非常に簡便であり、ノイズの影響をほとんど受けない。

(5) 過熱限界は液体の種類によって異なる。水素、ネオン、酸素の過熱限界は、それぞれ 28 K, 38 K, 134 K である。細管内の液体の種類を変えることで、検出したい温度を変えることができる。そのため応用範囲も広いと考えられる。

<引用文献>

K. Takahata; Explosive boiling of liquid nitrogen in a long thin tube and its application to the detection of a local temperature rise, Cryogenics, Vol. 122 (2022) Article number 103419.

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 Kazuya Takahata	4. 巻 122
2. 論文標題 Explosive boiling of liquid nitrogen in a long thin tube and its application to the detection of a local temperature rise	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Cryogenics	6. 最初と最後の頁 103419
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.cryogenics.2022.103419	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 0件）

1. 発表者名 高畑一也
2. 発表標題 過熱液体の突沸現象を応用した高温超伝導機器の局所温度上昇検出—液体窒素を用いた基礎的実験
3. 学会等名 第99回 低温工学・超電導学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高畑一也
2. 発表標題 過熱液体の突沸現象を応用した高温超伝導機器の局所温度上昇検出—検出原理の理解
3. 学会等名 第100回 低温工学・超電導学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高畑一也
2. 発表標題 過熱液体の突沸現象を応用した高温超伝導機器の局所温度上昇検出—異常箇所の同定
3. 学会等名 第101回 低温工学・超電導学会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計0件

〔取得〕 計1件

産業財産権の名称 超電導体の温度異常検出方法	発明者 高畑一也	権利者 自然科学研究機構
産業財産権の種類、番号 特許、6919938	取得年 2021年	国内・外国の別 国内

〔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
---------	---------