

平成 30 年 9 月 7 日現在

機関番号：12102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26870082

研究課題名(和文) 超電導機器を液体水素冷却した際の熱的安定性向上効果の熱特性把握による実験的検証

研究課題名(英文) Investigation into the improvement effect of the thermal stability on high temperature superconducting device cooled by liquid hydrogen

研究代表者

中山 知紀(Nakayama, Tomonori)

筑波大学・システム情報系・助教

研究者番号：90707853

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：液体水素と超電導機器を組み合わせるエネルギーシステムが広く検討されているが、液体水素を超電導機器の冷媒として用いた例は少なく、液体水素冷却超電導機器の実現可能性の検討が不十分である。高温超電導コイルを液体水素で冷却した際、発生した擾乱と通電発熱によってコイル各部の温度変化が起こるが、既往の研究では超電導線材長手方向の熱伝導だけを考慮した検討がなされていたため、パンケーキ状に巻かれた実際のコイルの温度分布を正確に考慮できていなかった。本研究では、超電導線材長手方向および線間方向の2次元の熱伝導を考慮することで、より正確な液体水素冷却高温超電導コイルの運転条件を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The energy systems which combined liquid hydrogen and superconducting devices are considered widely, but there are few research examples. When a high temperature superconducting coil cooled by liquid hydrogen, the coil temperature changing are depended on thermal disturbance, the Joule heat, the cooling heat by liquid hydrogen, and the thermal conductivity. In past research, the temperature distribution of a real coil wound up into a pancake form that considered not only the heat conduction of the superconducting wire longitudinal direction in past researches but also the radial direction. In this study, I analyzed the heat transmission and temperature behavior on a high temperature superconducting coil using non-steady-state the two-dimensional heat conduction equation analysis by calculus of finite difference method

研究分野：超電導工学，低温工学，エネルギー工学，電力工学

キーワード：熱伝導解析 クエンチ保護

1. 研究開始当初の背景

環境・エネルギー資源問題に備えるために、水素エネルギーを利用していくことは人類にとって必要不可欠である。水素の貯蔵方法としては、液体水素(LH₂)として貯蔵する方法が高体積密度の点で有力視されているが、沸点が約 20 K と極低温であり低温を維持する動力が必要である。

超電導機器は、電気エネルギーを高効率に発生、利用、輸送、貯蔵することができる。中でも、超電導磁気エネルギー貯蔵装置(SMES)、MRI などに応用される超電導コイル、大電力用超電導ケーブルなどの実用化が期待されているが、超電導機器は極低温に冷却しなければ運転できない。

ここで、LH₂ の貯蔵・輸送と超電導機器の設置を同地点で行えると、LH₂ は沸点が約 20 K であるため、高温超電導体(HTS)や MgB₂ 超電導体を冷却する冷媒として利用できる可能性がある。この場合、それぞれの冷却動力を共通化でき、単純に冷却動力を 1/2 にできることから、LH₂ と HTS 機器の複合システムが精力的に検討されている。しかし、LH₂ を冷媒として利用した HTS 機器はほとんど報告されておらず、LH₂ の熱的特性および HTS の 20 K での熱・電気磁気的特性を踏まえた検討をする必要があった。

2. 研究の目的

液体水素と超電導機器を組み合わせる超電導と水素の複合エネルギーシステムが広く検討されているが、液体水素を超電導機器の冷媒として用いた例は少なく、液体水素冷却超電導機器の実現可能性が実証されていない。高温超電導コイルを液体水素で冷却した際の熱的安定性を解析した結果、液体水素超電導コイルは、液体水素よりも低温で一般に超電導特性が向上すると考えられる液体ヘリウム冷却超電導コイルよりも高い熱的安定性を示すことを明らかにした。本研究では、実験的に液体水素の熱伝達特性と沸騰状態、高温超電導線材がクエンチに至るまでの発熱状態などの熱特性を詳細に検討し、高温超電導コイルの冷媒に液体水素を適用可能であることを示して、水素社会実現と超電導応用による高機能・省エネルギー社会の早期の実現に繋がる基礎的検討を行う。

3. 研究の方法

液体水素冷却による高温超電導体の熱的安定性の検討を詳細に行うために、これまで検討されてきた超電導線材の長手方向だけの熱伝導を取り扱う 1 次元解析ではなく、線間の熱伝導も考慮する 2 次元解析を行い、液体水素冷却高温超電導コイルにおける熱・温度の様子を詳細に明らかにする。

4. 研究成果

(1) 熱伝導解析モデルの提案

超電導コイルの一部を拡大した模式図

を図 1 に示す。図 1 の青色、黄緑色、オレンジ色の部分がそれぞれコイルを構成する HTS 潜在である Bi-2223 線材、接着剤(エポキシ樹脂)、絶縁材(ポリイミドテープ)を示している。図 1 の青色矢印の部分に液体水素が直接触れることによって冷却する状態を考える。

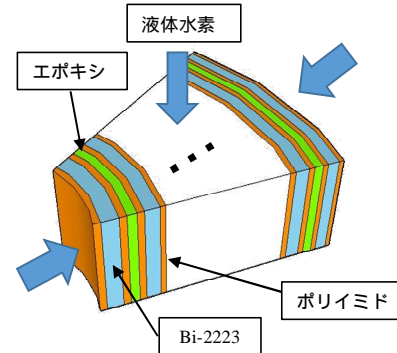


図 1 HTS パンケーキコイルの構成要素

パンケーキコイルにおける解析点の設定と軸を図 2 に示す。解析モデルとして 200 ターンのシングルパンケーキコイルを考えた。コイル内の熱の伝播の傾向を解析するのに十分であると考えたため、図 2 の点が解析点であり 1 巻きに 2.4° ずつ 150 個とした。

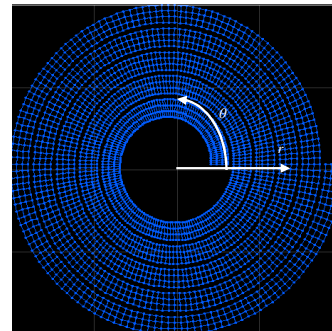


図 2 HTS パンケーキコイルの解析点と軸の設定

Bi-2223 線材の長手方向(θ 方向)の熱は熱伝導率の高い銀によって伝導するのにに対し、線間方向(r 方向)は熱伝導率の低い接着剤、絶縁材があるために、コイルの半径方向の熱伝導量は小さいと考えられる。しかし、コイルを作成した際半径方向には各材料間の熱伝導が生じて、隣の層の線材も発熱する可能性がある。そこで、コイルの周および半径方向の熱伝導を考慮した二次元数値解析することで熱擾乱発生後の温度分布を算出して、熱伝導の程度を見積もることは重要である。式(1)に、HTS パンケーキコイルにおける熱計算の支配方程式である非定常二次元熱伝導方程式を示す。

$$\begin{aligned}
& \gamma C(T) \frac{\partial T}{\partial t} \\
&= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r k_r(T) \frac{\partial T}{\partial r} \right) \\
&+ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{k_\theta(T)}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + G(T, I_{op}) \\
&- Q(T) + G_d
\end{aligned} \quad (1)$$

図2に示す解析点について式(1)を差分法により解くことで HTS パンケーキコイルにおける温度分布を求める。ここで t は擾乱発生からの時間 [s], k は各材料の周方向の熱伝導率 [W/(m·K)], k_r は各材料の半径方向の熱伝導率 [W/(m·K)], θ はコイルの解析点同士のコイル中心からの角度 [rad], r は中心から解析点までの距離 [m], γ は各材料の密度 [kg/m³], C は各材料の比熱 [W/(kg·K)], I_{op} は運転電流値 [A], Q は単位時間当たりの冷媒による冷却熱量 [W/m³], G は単位時間当たりの導体の通電によるジュール発熱量 [W/m³], G_d は単位時間あたりの熱擾乱の熱量 [W/m³]である。ここで、複数の物体の平均熱伝導率は式(2)のように表わせる。

$$k_{12} = \frac{\frac{\Delta l_1 + \Delta l_2}{\Delta l_1} + \frac{\Delta l_2}{\Delta l_2}}{\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}} \quad (2)$$

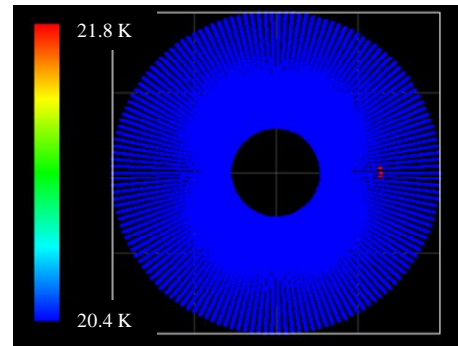
それぞれの材料の物性や特性の温度依存性などを文献などから取得し計算を行った。また、今回研究に用いた Bi-2223 テープ線材の臨界電流値 I_c は液体水素温度(20.4 K)で $I_c = 252$ A である。

(2) HTS コイルの熱伝導解析

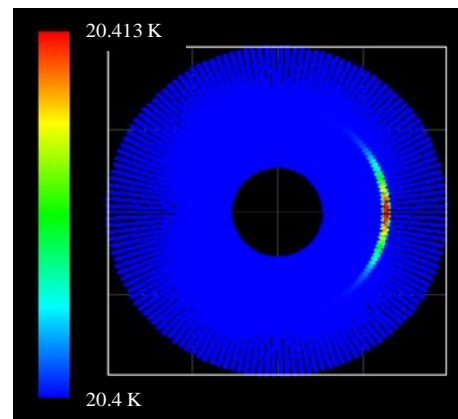
HTS コイルに電流を流しているとき、擾乱が発生したとして式(1)の二次元熱伝導方程式を用いて解析を行った。超電導コイルの冷却に液体水素を用いる場合と液体ヘリウムを用いる場合の擾乱発生後のコイルの温度分布を算出した。

図3に擾乱が発生した際の、液体水素冷却 HTS コイルの温度分布の時間経過を示す。図中の赤色が最大温度 [K]で、青色が最小温度 [K]として色の違いによってコイルの温度分布を示している。 t を経過時間[s]とし、 $t = 0$ s で熱擾乱が発生したとする。図3(a)は $I_{op} = 200$ A の際の $t = 5.0 \mu\text{s}$, 図3(b)は $t = 0.5$ s における温度分布である。これらから、上覧によって HTS コイルの一部が超電導状態ではなく、通電によるジュール発熱が起こっていることが分かる。また、温度勾配が θ 方向に鮮明に現れていることから、熱伝播の主な経路は HTS 線材の長手方向であることが分かるが、 r 方向の線材間熱伝導によりある程度の熱伝播があることから、従来の線材長手方向だけを取り扱う1次元熱伝導方程式を用いた解析よりも精密に計算ができていると言え、実際の現象をより正確に表現できるよう

になった。



(a) $I_{op} = 200$ A, $t = 5 \mu\text{s}$



(b) $I_{op} = 200$ A, $t = 0.5$ s

図3 液体水素冷却 HTS パンケーキコイルに発生した熱擾乱と通電発熱による各部の温度変化

図4に I_{op} を変化させた際の液体水素冷却 HTS コイルの熱擾乱発生点での温度の時間変化を示す。

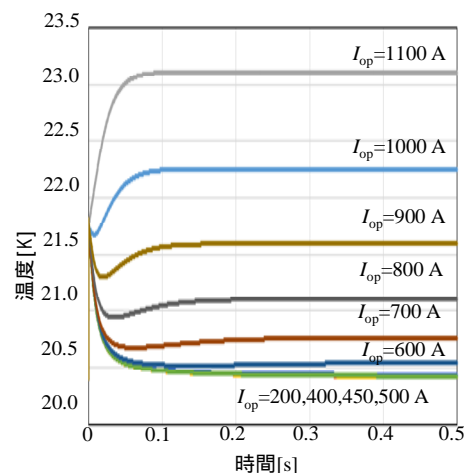


図4 I_{op} を変化させた際の液体水素冷却 HTS コイルの熱擾乱発生点での温度の時間変化

図4から、擾乱発生時に瞬間的に温度上昇が起こり、そこから I_{op} に応じた温度となることが分かる。ここで、500 A 以下の運転電流で

は、擾乱発生点の温度は時間経過とともに液体水素温度の 20.4 K まで低下しており、発熱よりも冷却熱が勝っていることが分かる。超電導状態に復帰していることが分かる。また、 $I_c = 252$ K の HTS テープ線において臨界電流を超える電流で通電を行っても、液体水素のもつ冷却能力の高さから I_c の 2 倍程度の電流を通電が可能であることが分かった。このことは、HTS テープ線材の構成要素である安定化材の断面積を 1/2 にできる可能性を示唆しており、液体水素冷却の HTS コイルは、より低コストな HTS 線材を利用できる。他方で、600 A 以上の場合、緩やかであるが熱擾乱発生点の温度は上昇をしておリクエンチにいたる危険がある。しかし、その温度上昇速度は比較的緩やかであり、外部回路でクエンチを検出して運転電流を遮断するために十分な時間を取れる可能性を示唆している。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 1 件)

佐々木 大樹, 中山 知紀, 石田 政義, 花田 信子, 液体水素冷却での高温超電導コイルの熱伝播特性の評価, 2015 年度春季低音工学・超電導学会講演概要集, 査読無, Vol. 91, 2015, pp. 130

[学会発表](計 2 件)

佐々木 大樹, 中山 知紀, 石田 政義, 花田 信子, 液体水素冷却での高温超電導コイルの熱伝播特性の評価, 2015 年度春季低音工学・超電導学会, 産業技術総合研究所つくばセンター(つくば), 2015 年 5 月 27-29 日

中山 知紀, 液体水素冷熱利用エネルギーシステムの検討, 水素エネルギー協会, 第 152 回定例研究会, 日本大学理工学部(東京), 2016 年 10 月 18 日

[図書](計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況(計 2 件)

名称: 低温冷却システム

発明者: 中山 知紀, 日高 睦夫

権利者: 産業技術総合研究所

種類: 特許

番号: 特願 2016-094402

出願年月日: 2016 年 5 月 10 日

国内外の別: 国内

名称: THE LOW TEMPERATURE COOLING SYSTEM

発明者: TOMONORI NAKAYAMA, MUTSUO HIDAKA

権利者: NATIONAL INSTITUTE OF ADVANCED INDUSTRIAL SCIENCE AND TECHNOLOGY

種類: 特許

番号: 国際出願番号 PCT/JP2017/016924

出願年月日: 2017 年 4 月 28 日

国内外の別: 国外

6. 研究組織

(1)研究代表者

中山 知紀 (NAKAYAMA, Tomonori)

筑波大学・システム情報系・助教

研究者番号: 90707853