

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 14 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25289343

研究課題名(和文) 自励振動式ヒートパイプ組み込みによる高温超伝導マグネットの冷却構造強化研究

研究課題名(英文) Reinforcement of cooling structure of high temperature superconducting magnets using built-in oscillation heat pipes

研究代表者

三戸 利行 (Mito, Toshiyuki)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授

研究者番号：10166069

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 9,900,000円

研究成果の概要(和文)：核融合炉用の超伝導マグネットに高温超伝導体を用いることができれば、低温超伝導体を用いた場合に比べて、より高い安定性と経済性が期待できる。しかし、核融合炉に必要な大型のマグネットを実現するためには、マグネットの巻線内部で発生した熱をいかに効率良く短時間で外部に取り出せるかが重要となる。高熱伝導率と高熱拡散率を同時に達成できる熱輸送素子としてヒートパイプに着目し、平板状の自励振動式ヒートパイプ(OHP)をマグネット巻線内に組み込んだ冷却構造の開発研究に取り組んだ。超伝導マグネットの巻線内に組み込める高機械強度で低温動作が可能な平板状OHPの開発に成功し、低温での優れた熱輸送特性を実験で検証した。

研究成果の概要(英文)：If the high-temperature superconductor can be used for the superconducting magnet for the nuclear fusion reactor, higher stability and viability can be expected compared with the case to use the low temperature superconductor. However, whether the heat generated in the winding of the magnet can be taken out outside very efficiently in a short time to achieve a large-scale magnet necessary for the nuclear fusion reactor becomes important. It paid attention to the heat pipe as a thermotransport element that was able to achieve high thermal conductivity and a high diffusivity of heat at the same time, and it worked on the development study of the cooling structure to build in tabular self-induced vibration type heat pipe (OHP) in the magnet winding. We succeeded in developing the sheet-like OHP that has the high mechanical strength that is able to be built in the winding of the magnet, and verified the excellent thermal transport property at cryogenic temperature.

研究分野：超伝導工学

キーワード：ヒートパイプ 高温超伝導 低温 自励振動 マグネット OHP HTS

1. 研究開始当初の背景

経済的な核融合炉の実現には、高温度のプラズマを安定に閉じ込める高性能かつ高効率な超伝導マグネットの開発研究が必要不可欠とされている。1911年に水銀の超伝導現象が発見されてから既に100年を経過し、医療用のMRI装置やリニアモーターカー等、超伝導機器は実用化の段階に入っている。更に1986年には、それまでの金属系の低温超伝導体に加え、陶磁器に似たセラミックス系の高温超伝導体が発見され、液体窒素温度(-196℃)でも使用が可能なテープ形状の線材が開発されるなど、幅広い分野への応用を目指した精力的な研究が世界各国で進められている。

高温超伝導(HTS)マグネットの開発研究では線材や巻線技術の開発研究が重視され、冷却に関する研究はそれほど活発には行われていない。しかし、実用化するためには、冷却系を含むトータルシステムの研究が特に重要である。金属系の低温超伝導(LTS)マグネットの冷却では、マグネットを液体ヘリウムに直接浸した浸漬冷却方式や、液体ヘリウムと熱交換した超臨界圧ヘリウムを強制循環する方式が一般的であり、最近では小型冷凍機を用いた伝導冷却も普及してきている。HTSマグネットの場合、その取扱いの安易さから小型冷凍機による伝導冷却が採用される場合が多いが、大型や高熱負荷のHTSマグネットに適用可能な冷却方式の研究は進んでいない。

2. 研究の目的

核融合炉用の超伝導マグネットに高温超伝導体(HTS)を用いることができれば、低温超伝導体(LTS)を用いた場合に比べて、より高い安定性と経済性が期待できる。しかし、核融合炉に必要な大型のHTSマグネットを実現するためには、マグネットの巻線内部で発生した熱をいかに効率よく短時間で外部へ取り出せるかが重要となる。熱を伝える能力が高い(熱伝導率が大きい)と考えられる金属板等を巻線内に挟み込む方法では、熱拡散率を同時に大きくすることができず、一定時間内に外部に取り出せる熱量には限界がある。そこで、高熱伝導率と高熱拡散率を同時に達成できる熱輸送素子としてヒートパイプに着目し、低温での動作が可能なシート状の自励振動式ヒートパイプ(OHP)をマグネット巻線内部に組み込んだ新しい冷却構造の開発研究に取り組んだ。

また、本研究で得られた成果をより短期間で社会へ還元することを目的とし、核融合炉への適用の前段階として、エネルギー応用への適用を考えた。燃料電池車の市販が開始さ

れるなど、地球環境に優しい水素社会の実現に向けた新たな取組が求められている。本研究の後半では、早期の課題解決が必須とされている水素の効率的な貯蔵方法として、HTSコイルを用いた磁気浮上で、液体水素容器を支持することで、低熱侵入かつ高効率で、地震等の災害にも強い、安心・安全な液体水素貯蔵技術の確立を目指し、本研究成果の適用を検討した。最初は防災拠点や病院等の停電時の電力供給に、将来は化石燃料に代わる資源として液体水素を大量に備蓄することを想定した。水素ガスの製造は、当面は国内では風力や太陽電池等の再生可能エネルギーによる電力を用いた水の電気分解で、国外からは水力や褐炭などを用いて生成した水素ガスを液体水素の形態で輸入することを想定した。最終的に、核融合炉を用いて水から水素を生成すれば、CO₂排出量0の真に持続可能な社会実現のストーリーが完結する。図1に直径40mの液体水素貯槽を磁気浮上させる場合の超伝導コイルの配置例を示す。

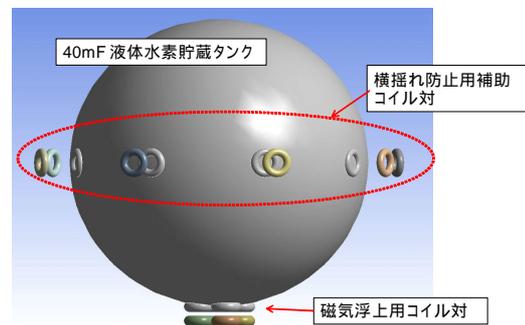


図1. 40m 液体水素貯槽の磁気浮上

3. 研究の方法

高温超伝導(HTS)は低温超伝導(LTS)に比べて冷却は楽になるものと一般的には誤解されている。しかし、運転温度の上昇に伴って、HTSマグネットを構成する材料の熱拡散率はむしろ低下するため、固体熱伝導のみに頼るとマグネット内で発生した熱は外部に伝わるのに時間がかかることになり、マグネット内の発熱を除去しづらい状態となる。結果として熱暴走や巻線内のホットスポットの発生等、コイルの焼損につながる危険な状態に陥りやすい。個体熱伝導に頼らないHTSマグネットの新しい冷却方式として自励振動式ヒートパイプ(OHP)を巻線内に組み込むことにより、高い熱輸送特性の実現と同時に、高い熱拡散率による応答の早さを実現することができる。図2にOHPを巻線内に組み込んだHTSマグネットの例を示す。

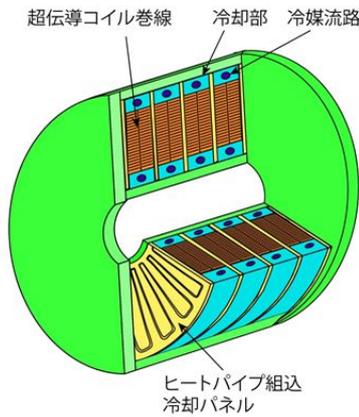


図2. OHP 組込み HTS マグネットの構成

テープ形状の HTS 線材をダブルパンケーキ巻きしたコイルの側面に OHP を埋め込んだ冷却パネルを挟み込む。巻線内で発生した熱は OHP により、巻線の内外径側に速やかに伝えられる。巻線の内外径側には、冷凍機からの冷媒を循環する冷却流路が設けられており、ここで OHP の両端が冷却される。

最初に HTS マグネットの巻線内への組込みに適した機械強度が高く、薄いシート形状に加工可能な OHP を開発した。流路数、流路幅、流路深さ、流路長、設置方向等を変化させた OHP の液体水素、液体ネオン、液体窒素温度での動作特性を測定し、低温動作 OHP の設計最適化のための実験式を構築した。高温超伝導マグネット・クエンチ時に巻線内に発生する過度の温度勾配、その結果として生じる熱歪による巻線の機械的な損傷や超伝導特性の劣化を防止する効果について

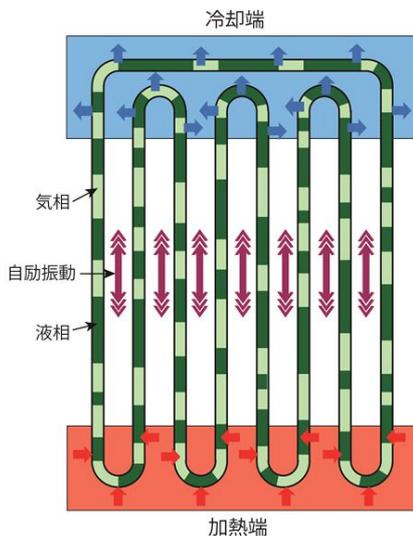


図3. 自励振動式ヒートパイプ (OHP) の動作原理説明図

て検討した。

図3に流路を折り返した構造の OHP の動作原理説明図を示す。気液2相の作動流体で満たされたヒートパイプ流路は、加熱端と冷

却端の間を繰り返し折り返した構造をしている。加熱端と冷却端の温度差によって、気相の泡と液相の栓が膨張、収縮することにより自励振動が発生し、縞模様の気液混合相が移動することで、加熱端から冷却端に素早く効率的に熱を輸送することができる。

4. 研究成果

超伝導マグネットの巻線内に組込可能な高機械強度を持ち、立体流路を有するシート状の OHP を新たに開発し、その優れた熱輸送特性を HTS マグネットを動作させる低温環境下での実験で実証した。図4に開発した低温動作可能なシート状 OHP を示す。4枚のステンレス板を積層し、立体的な流路構造を構成する。中央の2枚のベース板には、互い違いの位置となるヒートパイプ流路がレーザー加工機で溝加工され、上下の流路がつながるように端部でL字型の溝になっている。2枚を重ねることにより、上側から下側、下側から上側へと繰り返し折り返す流路が形成される。更にその上下にカバーとなる板を積層し、4枚の板を真空ロウ付けすることで立体的な流路構造を持ち、低温での使用にも耐えるリークタイトなシート形状の OHP を製作した。作動流体に水素、ネオン、窒素を用いて低温での動作実験を行い、温度範囲として、水素(18 - 24 K)、ネオン(23 - 45 K)、窒素(79 - 84 K)で安定に動作すること、OHP 全断面積で計算した実効的な熱伝導率が、水素(850 W/m²·K)、ネオン(2,500 W/m²·K)、窒素(3,500 W/m²·K)に達する優れた熱輸送特性を示すことを実証した。OHP の全断面積に対し、作動流体が満たされた流路部の断面積が 10.4 %しかないことを考慮すると、測定された実効的な熱伝導率は、十分に高い値と言える。これらの研究成果は論文にまとめられている。

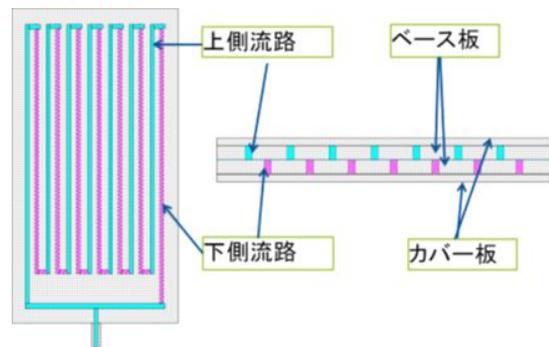


図4. 低温動作可能なシート状 OHP

次に、HTS マグネットと OHP を組み合わせ、マグネットの冷却特性を改善する効果について、有限要素法を用いた詳細な解析を行

った。更に、この優れた熱特性を有する OHP 組み込み HTS マグネットの実応用例として、液体水素を貯蔵する容器を磁気浮上させて熱侵入を極限まで低減すると同時に、地震発生時に免震制御を行って高い安全性を実現できる超伝導磁気浮上液体水素容器への適用について検討し、実現可能であることを明らかにした。LNG タンカー等で用いられる直径 40m の球形タンクに液体水素を貯蔵すると、33,500m³ (重量 2000 トン) の水素が貯蔵でき、燃料電池で発電した場合、40GWh の膨大な電力貯蔵装置となる。タンクの自重を加えた総重量 3000 トンを超伝導磁気浮上する設計案について、地震時の免震動作によって HTS コイル内に発生する交流損失による温度上昇の影響等を解析し、成立可能であることを示した。

免震動作時に HTS コイルで発生する交流損失はそのほとんどが HTS テープ線材のヒステリシス損であり、その低減が磁気浮上による液体水素貯蔵の経済性、ひいては成立性を左右する重要な鍵となる。まず、実現可能性について検討するため、市販されている Bi-2223 テープ線材を用いた OHP 冷却 HTS ダブルパンケーキモデルコイルについて、免震制御時の交流損失発生によるコイル温度分布を有限要素法で解析した。検討したモデルコイルの構造を図 5 に示す。HTS テープ線材を 1 層のパンケーキ形状に巻線し、2 つのパンケーキコイルの間にシート状 OHP (厚さ 5 mm、幅 95 mm、長さ 225 mm) 4 枚を組み込んだ HTS ダブルパンケーキコイル (外径 0.40 m、内径 0.15 m) を想定した。

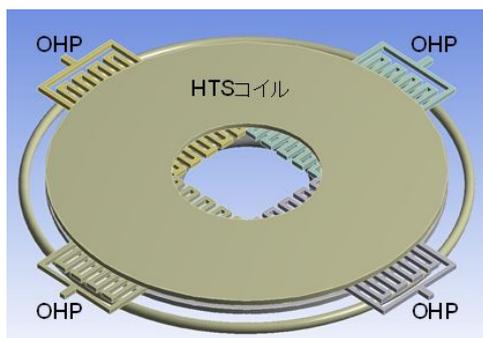


図 5 . HTS モデルコイル

解析結果を図 6 示す。図 6a)は OHP 部の等価熱伝導率を 1,000 W/m・K とした場合、b)は比較として熱伝導率 100 W/m・K の窒化アルミニウム板を OHP の代わりに挟んだ場合を示す。OHP の優れた熱特性により、a) ではコイル内の温度上昇は 26 K に止まっているが、b)では 46 K に達しており、超伝導状態を維持することができない。この解析では、ダブルパンケーキ 1 枚の要素コイルのため、巻線内の最大垂直磁場は 0.63 T と低いが、実際の HTS コイルでは複数のコイルを重ねて磁場をあげる必要があるため、線材の更なる低損失化が必須である。

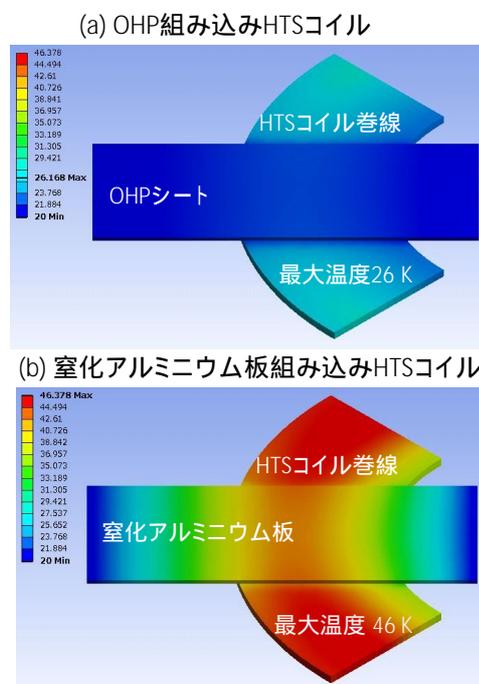


図 6 . 免震動作時の交流損失による HTS コイルの温度上昇

これらの研究成果は超伝導応用に関する国際会議 ASC2016 で口頭発表すると共に、IEEE の学術誌である Transaction on Applied Superconductivity に論文として掲載されている。

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 3 件)

- Mito, T., Kawagoe, A., Yanagi, N., Hamaguchi, S., Takada, S., Hirano, N., Terazaki, Y., “Highly Efficient Liquid Hydrogen Storage System by Magnetic Levitation Using HTS Coils”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 査読有, Vol. 27, 2017, DOI:10.1109/TASC.2017.2653228.
- Natsume, K., Terazaki, Y., Mito, T., Yanagi, N., Ogawa, Y., Morikawa, J., Uchijima, K., Hosaka, Y., Nose, S., Tomioka, A., Itoh, I., Takada, E., “Experimental Results of the HTS Floating Coil Using REBCO Tapes for Mini-RT Upgrading”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 査読有, Vol. 24, 2015, DOI:10.1109/TASC.2013.2287706.
- Mito, T., Natsume, K., Tamura, H., Terazaki, Y., “Enhancement of Thermal Properties of HTS Magnets Using Built-in Cryogenic Oscillating Heat Pipes”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 査読有, Vol. 23,

〔学会発表〕(計5件)

Mito, T., "Highly Efficient Liquid Hydrogen Storage System by Magnetic Levitation Using HTS Coils", Applied Superconductivity Conference (ASC2016), 2016年9月4日~9日、デンバー(米国).

Kawagoe, A., "Developments of HTS Levitation Coil with Conduction Cooling by Using Heat Pipes", European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS2015), 2015年9月6日~10日、リヨン(フランス).

三戸利行, 「液体水素備蓄用高温超伝導磁気浮上コイルの研究」, 2015年春季低温工学超電導学会, 2015年5月27日~29日, 産業技術総合研究所つくばセンター共用講堂(茨城県つくば市).

大迫智弥, 「ヒートパイプ冷却高温超伝導磁気浮上コイルの開発」, 2015年春季低温工学超電導学会, 2015年5月27日~29日, 産業技術総合研究所つくばセンター共用講堂(茨城県つくば市).

夏目恭平, 「超伝導マグネットに適用する平板状ヒートパイプの低温動作特性」, 2013年秋季低温工学超電導学会, 2013年12月4日~6日, ウィンク愛知(愛知県名古屋市).

6. 研究組織

(1)研究代表者

三戸 利行 (MITO, Toshiyuki)
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・
教授
研究者番号: 10166069

(2)研究分担者

夏目 恭平 (NATSUME, Kyohei)
研究参加時:
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・COE
研究員
現在:
量子科学研究開発機構・那珂研究所・
研究員
研究者番号: 90632282

(3)連携研究者

柳 長門 (YANAGI, Nagato)
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・
教授
研究者番号: 70230258

田村 仁 (TAMURA, Hitoshi)
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・
準教授
研究者番号: 20236756