

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 8日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360456

研究課題名（和文） 次世代超伝導マグネットの冷却構造最適化による高性能化研究

研究課題名（英文） Optimization study of the cooling structure for the next generation superconducting magnets.

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

研究成果の概要（和文）：超伝導マグネットの冷却構造の最適化、設計指針の確立を目的として研究を行った。冷却の新技术として自励振動式のヒートパイプ（OHP）を巻線内に組み込むことにより、高熱拡散率の巻線構造を実現することを目指し、OHPの極低温域での動作を世界で初めて系統的に実証した。更に、実験で得られた特性を無次元数で整理することにより、経験式を導出し、冷却構造を最適化した高性能の超伝導マグネットについての設計指針を得た。

研究成果の概要（英文）：The optimization study of the cooling structure has been done in order to establish the design manual of the next generation superconducting magnets. The cryogenic Oscillating Heat Pipes (OHP) have been developed, which is used by being imbedded in the magnet windings as a heat transfer enhancement device. It has been demonstrated for the first time in the world, and the high heat transport properties of the cryogenic OHP have been experimentally confirmed. The obtained data sets have been used to make a fitting by means of multi-regression analysis. The modeling with non-dimensional quantities is useful for the design of cryogenic OHP and the optimization of the cooling structure of the superconducting magnets.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	3,000,000	900,000	3,900,000
2010年度	2,700,000	810,000	3,510,000
2011年度	2,700,000	810,000	3,510,000
年度			
年度			
総計	8,400,000	2,520,000	10,920,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・核融合学

キーワード：超伝導、冷却技術、核融合、マグネット、ヒートパイプ、自励振動、低温

## 1. 研究開始当初の背景

低温超伝導技術は、これまでの研究成果によって、既に実用化の段階に到達している。一方、高温超伝導技術は、1986年の高温超伝導体の発見から20年を経過し、液体窒素温度でも使用が可能なテープ形状の線材が開発され、幅広い分野への応用を目指した研

究が進められている。しかし、現在長尺線材が製造可能な第一世代の高温超伝導線材と呼ばれるBi2223線材の性能コスト比は、構成材料として銀を必要とすることなどから低温超伝導線材に比べて低く、第二世代の線材と呼ばれるY系線材の開発を待っている状況にあった。高温及び低温の超伝導体の種類

に依らない基盤技術として、超伝導マグネットの導体および冷却構造の最適化、新技術の導入による高磁場、高熱負荷への対応、伝導冷却型超伝導マグネットの設計指針の確立が求められていた。

## 2. 研究の目的

本研究では、言わばジレンマに陥っている超伝導応用研究に活路を見いだすべく、超伝導体の種類に依らない基盤技術として、超伝導マグネットの導体および冷却構造の最適化、新技術の導入による高磁場、高熱負荷への対応、次世代で主流になると考えられる伝導冷却型超伝導マグネットの設計指針を確立することを目的とした。

伝導冷却方式の超伝導マグネットを設計する場合、使用温度の相違による材料の熱物性の変化に注意を払う必要がある。高温超伝導マグネットは低温超伝導マグネットに比べて冷却し易い印象を受けるが、実際には高温超伝導マグネットの方が、巻線内部で発生した熱を外部に取りだし難く、局所的な温度上昇による熱歪みの発生やそれによる超伝導特性の劣化が起きる可能性が高い。このことは、温度上昇に伴う比熱の上昇に熱伝導度の上昇が追いつかないためであり、20K以上の運転温度でも熱拡散率の高い冷却部材を開発する必要があった。

## 3. 研究の方法

高磁場環境下で現在使用可能な超伝導撚線は、金属間化合物であり、熱処理後の超伝導体生成後は機械的、熱的な歪みを極力避ける必要がある。Nb<sub>3</sub>Sn等の金属間化合物の超伝導撚線を熱伝導率に優れ機械的な強度も確保できるアルミニウム合金で被覆した導体を開発した。アルミニウム合金は超伝導体の熱処理温度に耐えられないため、熱処理した超伝導撚線にアルミニウム合金を被覆する必要がある。あらかじめ溝加工したアルミニウム合金に熱処理した超伝導撚線を挿入し、蓋をかぶせて溶接する導体製造方法を開発した。

更に、高温超伝導の核融合用大型マグネットへの適用を目指し、マグネットの冷却構造を最適化する研究を実施した。伝導冷却型超伝導マグネットで高熱負荷を達成するためには、巻線内部で発生した熱をいかに効率よく外部へ取り出せるかがキーポイントとなる。金属線や金属箔を巻線内に挟み込む固体熱伝導に頼る方法では、取り出せる熱量に限界がある。本研究では、ヒートパイプを組み込んだ冷却パネルを巻線内部に設置することにより、高熱拡散率と高熱伝導率を両立したコイル冷却構造を開発した。20K以上の運転温度では、構成材料の熱拡散率が著しく低下するため、局所的な発熱により過度の温度

勾配が発生する可能性が高い。冷却の新技術として自励振動式のヒートパイプ (OHP) を巻線内に組み込むことにより、高熱拡散率の巻線構造を実現することを目指した。

## 4. 研究成果

熱処理後のNb<sub>3</sub>Sn導体にアルミニウム合金ジャケットを被覆する新技術として、摩擦撹拌接合による温度上昇を伴わない接合方法を採用し、超伝導特性の劣化がないことを実験で確認した。図1にNb<sub>3</sub>Sn生成のための熱処理 (リアクト) 後に、機械的保護のためのアルミニウム合金ジャケットを摩擦撹拌接合によって被覆した導体の断面を示す。同製法で試作した導体を図2に示す3ターンのコイル状に成型し、磁場中での臨界電流の曲げ歪特性を測定し、経験式から予測される特性に一致することを確認し、同製法の有効性を示した。

摩擦撹拌接合を用いたアルミニウム合金の被覆により、熱処理後の機械的に脆いNb<sub>3</sub>Sn等の金属間化合物の超伝導撚線を用いて強固な巻線が必要な大型超伝導マグネットに適用可能な大型間接冷却導体の製造方法を構築できたことは大きな成果である。この製法は機械的に脆い酸化物の高温超伝導体にも適用可能である。

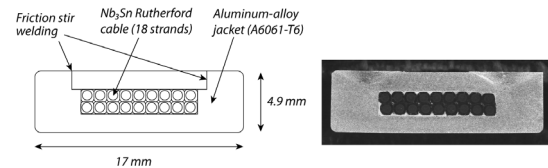


図1. 摩擦撹拌接合を用いたアルミニウム合金被覆 Nb<sub>3</sub>Sn 導体

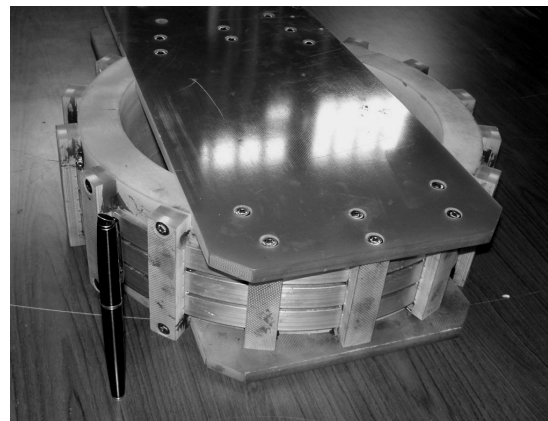


図2. アルミニウム合金被覆 Nb<sub>3</sub>Sn の特性試験用3ターンコイル

低温で動作する OHP の開発研究では、低温と室温では作動流体の密度などの物性値が大きく異なるため、独自の工夫を施すことにより、OHP の極低温域での動作を世界で初めて系統的に実証した。図3にステンレスのパイプを繰り返し折り返した構造の低温

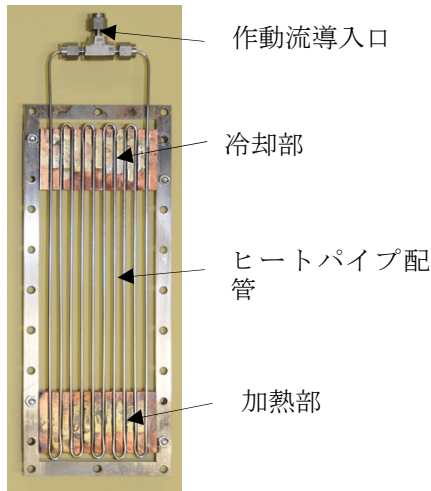
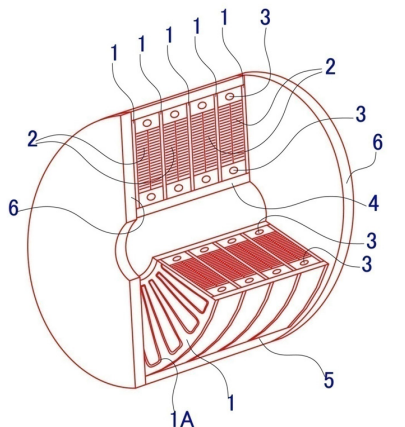


図 3. 低温動作自励振動式ヒートパイプ (OHP)

動作 HP の実例を示す。作業流体に水素、ネオン、窒素を用いた場合の動作温度範囲はそれぞれ 17-30 K、27-39 K、67-91 K と広いこと、および、実効的な熱伝導率が 10,000 W/m/K を超えることを明らかにした。更に、実験で得られた特性をレイノルズ数、プラントル数、ヤコブ数などの無次元数で整理することにより、OHP 構造から熱輸送量を求める経験式を導出した。これらの成果に基づき冷却構造を最適化した高性能の超伝導マグネットについての設計指針を得た。

実際の超伝導マグネットの巻線中に組み込むためには、薄い板状の OHP が必要となる。高温超伝導ソレノイドコイルの巻線中に OHP を組込んだ冷却パネルを挿入した構成例を図 4 に示す。



1. 冷却パネル
- 1A 自励振動式ヒートパイプ
2. コイル巻線
3. 冷却冷媒流路
4. 内巻枠
5. 外巻枠
6. 端板

図 4. OHP 組込超伝導マグネット



図 5. 金属板に溝加工した組立前の板状 OHP



図 6. 板状 OHP の室温での動作確認

超伝導マグネットへの組込みに対応するため、パイプの折り返し構造から金属板にヒートパイプの溝を加工した板状の OHP への展開を図った。その製作例を図 5 に示す。図 5 の OHP は自励振動によるヒートパイプ熱輸送特性の動作確認のため、透明なパネルで覆われている。図 6 に作業流体としてエタノールを用い、室温での動作試験を行った様子を示す。流路内に気体部と液体部が交互に現れる縞模様状の状態となり、更に加熱部と冷却部の温度差によって自励振動が発生して加熱部から冷却部へ作業流体が移動すると共に熱が輸送される様子が観測された。

高温超伝導マグネットの冷却構造を最適化できる低温動作の自励振動式ヒートパイプの開発に成功したことは、高温超伝導の核融合装置への適用に道を開く重要な研究成果と言える。低温動作の自励振動式ヒートパイプ (OHP) の開発成功は、大型の高温超伝導マグネットの実用化への重要なステップとなる研究成果である。今後、OHP を組み込んだ高温超伝導モデルマグネットによる実証へ向けた研究の展開が期待できる。

#### 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 5 件)

- ① T. Mito, K. Natsume, N. Yanagi, H. Tamura, T. Tamada, K. Shikimachi, N.

- Hirano, and S. Nagaya, "Development of highly effective cooling technology for a superconducting magnet using cryogenic OHP," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 査読有, Vol. 20, 2010, pp. 2023-2026.
- ② K. Natsume, T. Mito, N. Yanagi, H. Tamura, T. Tamada, K. Shikimachi, N. Hirano, and S. Nagaya, "Heat transfer performance of cryogenic oscillating heat pipes for effective cooling of superconducting magnets," Cryogenics, 査読有, 51, (6), 2011, pp. 309-314.
- ③ T. Mito, K. Natsume, N. Yanagi, H. Tamura, T. Tamada, K. Shikimachi, N. Hirano, and S. Nagaya, "Achievement of high heat removal characteristics of superconducting magnets with imbedded oscillating heat pipes," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 査読有, Vol. 21, 2011, pp. 2470-2473.
- ④ K. Natsume, T. Mito, N. Yanagi, H. Tamura, T. Tamada, K. Shikimachi, N. Hirano and S. Nagaya, "Heat transfer characteristics of cryogenic oscillating heat pipes for high temperature superconducting magnets," Proceedings of 23<sup>rd</sup> International Cryogenic Engineering Conference and International Cryogenic Materials Conference 2010, 査読有, pp. 991-995, (2011).
- ⑤ K. Natsume, T. Mito, N. Yanagi, H. Tamura, T. Tamada, K. Shikimachi, N. Hirano and S. Nagaya, "Development of cryogenic oscillating heat pipe as a new device for indirect/conduction cooled superconducting magnets" (accepted to publish in IEEE Transactions on Applied Superconductivity), <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&number=6164241>
- [学会発表] (計 17 件)
- ① 三戸利行, Development of Highly Effective Conduction Cooling Technology for a Superconducting Magnet, 第 21 回国際磁石技術会議(MT-21)、2009 年 10 月 21 日、中国、安徽省、合肥
- ② 夏目恭平、Performance characteristics of cryogenic oscillating heat pipes for effective cooling of superconducting magnets、アジア低温工学超電導学会 (ACASC2009)、2009 年 12 月 7 日、島根県、松江
- ③ 三戸利行、自励振動式ヒートパイプを用いた超伝導マグネットの高効率冷却技術の開発、2009 年秋季低温工学超電導学会、2009 年 12 月 7 日、岡山県
- ④ 夏目恭平、超伝導マグネット冷却用自励振動式ヒートパイプの低温動作特性、2009 年秋季低温工学超電導学会、2009 年 12 月 7 日、岡山県
- ⑤ 三戸利行、超伝導マグネット組込型シート状自励振動式ヒートパイプの開発、2010 年春季低温工学超電導学会、2010 年 5 月 12 日、川崎市
- ⑥ 夏目恭平、自励振動式ヒートパイプにおける低温動作特性の設置方向依存性、2010 年春季低温工学超電導学会、2010 年 5 月 12 日、川崎市
- ⑦ 夏目恭平、Heat transfer characteristics of cryogenic oscillating heat pipes for high temperature superconducting magnets、第 23 回国際低温工学会議(ICEC23-ICMC2010)、2010 年 7 月 19-23 日、ポーランド、ロツクロー
- ⑧ 三戸利行、Achievement of High Heat Removal Characteristics of Superconducting Magnets with Imbedded Oscillating Heat Pipes、2010 年超伝導応用会議 (ASC2010)、2010 年 8 月 1-6 日、米国、ワシントン DC
- ⑨ 三戸利行、両端冷却型自励振動式ヒートパイプの低温動作特性、2010 年秋季低温工学超電導学会、2010 年 12 月 2 日、鹿児島市
- ⑩ 夏目恭平、低温動作自励振動式ヒートパイプの開発—超伝導マグネット応用可能性の調査—、2010 年秋季低温工学超電導学会、2010 年 12 月 2 日、鹿児島市
- ⑪ 夏目恭平、低温動作自励振動式ヒートパイプの熱輸送特性—OHP の長さによる影響—、2011 年春季低温工学超電導学会、2011 年 5 月 19 日、つくば市
- ⑫ 夏目恭平、Development of cryogenic oscillating heat pipe as a new device for indirect/conduction cooled superconducting magnets、第 22 回国際磁石技術会議、2011 年 9 月 15 日、フランス、マルセイユ
- ⑬ 杉本昌弘、Novel type of aluminum-alloy jacketed Nb<sub>3</sub>Sn superconductors manufactured by friction stir-welding technique、第 22 回国際磁石技術会議、2011 年 9 月 13 日、フランス、マルセイユ
- ⑭ 夏目恭平、低温動作振動式ヒートパイプの開発—熱輸送特性評価への半経験的モデルの適用—、2011 年 11 月 10 日、石川県金沢市
- ⑮ 夏目恭平、Feasibility study on applying cryogenic oscillation heat pipes to fusion magnet、第 21 回国際土岐コンファレンス (ITC-21)、2011 年 11 月 29 日、岐阜県土岐市
- ⑯ 夏目恭平、Investigation of a flat-plate cryogenic oscillating heat pipe、第 22 回国際低温工学会議 (ICEC24-ICMC2012)、

- 2012年5月16日、福岡市
- ⑰ 高畑一也、Effects of bending on critical current of react-and-jacket processes Nb<sub>3</sub>Sn conductor、第22回国際低温工学会議 (ICEC24-ICMC2012)、2012年5月16日、福岡市

〔産業財産権〕

○出願状況 (計1件)

名称：自励振動式ヒートパイプが組み込まれた超電導マグネット

発明者：三戸、柳、田村、夏目、平野、玉田、式町

権利者：自然科学研究機構、中部電力

種類：特許出願

番号：特願 2009-241397

出願年月日：2009年10月20日

国内外の別：国内

## 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

なし

### (3) 連携研究者

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

田村仁 (TAMURA HITOSHI)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授  
研究者番号：20236756

力石浩孝 (CHIKARAISHI HIROTAKA)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授  
研究者番号：60249969

柳長門 (YANAGI NAGATO)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授  
研究者番号：70230258