

平成21年 5月 7日現在

研究種目：基盤研究（B）
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18360440
 研究課題名（和文） 原型炉を目指した分割型高温超伝導マグネットの実現
 研究課題名（英文） Realization of remountable high temperature superconducting magnet aiming for prototype reactor
 研究代表者
 橋爪 秀利（HASHIZUME HIDETOSHI）
 東北大学・大学院工学研究科・教授
 研究者番号：80198663

研究成果の概要：核融合炉の実現のために必須である建設コスト・補修費の削減を可能とする技術として、高温超伝導マグネットを分割製造し、機械的に接合して用いる分割型高温超伝導マグネットを我々は提案した。本研究では、本コンセプトの基本技術となる高温超伝導導体の機械的接合の最適化を図れる導体構造・使用温度領域を示し、また、金属多孔質体を用いた極低温冷却技術を適用することが本コンセプトには有用であることを実験的に示した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	10,500,000	3,150,000	13,650,000
2007年度	2,700,000	810,000	3,510,000
2008年度	2,300,000	690,000	2,990,000
年度			
年度			
総計	15,500,000	4,650,000	20,150,000

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：超伝導材料・素子

1. 研究開始当初の背景

(1) 分割型高温超伝導マグネットの提案

国際熱核融合実験炉(ITER)のサイト決定を受け、本施設における制御された核融合反応の実現はほぼ間違いなく、核融合炉の実現に向けた期待が非常に大きい状況にある。しかしながら、核融合が将来のエネルギー源の1つとなりうるための経済性のある核融合炉に対する見通しは、ITERの建設費からも明らかでないようにまだ不透明であるばかりでなく、原子力施設であることから不可避となる保守・点検に対する合理的なシナリオの構築

も未解決の課題となっている。

これらの問題を解決するための最もインパクトのある方策の1つとして、超伝導マグネットの製作・保守と第一壁の保守・交換を同時に合理化するための超伝導マグネットの分割化が考えられる。すなわち、磁場閉じ込め型核融合炉(トカマク型・ヘリカル型等)で考えられている従来型の一体ものの超大型超伝導マグネットを使用した商業用核融合炉は、当面の間、経済性の観点から受け入れられず、特に、ヘリカル炉では実用化の際の最も重要な課題と言える。また、スフェリカルトカマク炉においては、センター部の超

伝導マグネットへの中性子照射による損傷が大きく、定期的な交換が不可欠となる。一方、第一壁/ダイバータ等の炉内構造物の保守・交換の際にも、超伝導マグネットの存在はアクセス性の低下の最大要因であり、特にトカマク炉では、スペースの確保が非常に困難な状況である。したがって、製作コストの劇的な低減と容易な保守が可能となる超伝導マグネットの分割化は将来の核融合炉において不可欠の技術であると言える。

そこで、申請者らは高温超伝導体を用いた分割型超伝導マグネットの概念を提案し、研究を進めてきている。マグネットを分割するという概念は、低温超伝導体のマグネットですでに提案されていたが、低温超伝導体では作動温度が 4K 近傍であるため物質の比熱が非常に小さく（デバイ温度以下では絶対温度の 3 乗に比例する）、わずかな発熱がトリガーとなってクエンチを誘発する。そのため、脱着が可能のような単純な接合機構による方法では温度上昇を抑えられず、1 回接合した後に分離することは不可能な接合方法を採用していた。しかし、本提案のように高温超伝導体を用いることによって、まず、マグネットの動作温度が 4K から 77K 程度に上昇し、物質の比熱が格段に増加させることができる。その結果、低温超伝導体ではクエンチを誘起するため許容できなかった発熱をある程度まで許容することが可能となり、発熱を絶対に避けるという視点から、発生した熱を除去し、温度上昇を回避できるかという除熱システムの問題に変わることになり、工学的な解を見つげられる可能性が非常に大きくなる。

(2) これまでの成果

これまでに、高温超伝導体の機械的接合の可能性について研究を実施してきた。その中で以下の項目を確認し、現在は、原理の実証を終えた段階にある。

- ① 機械的バットジョイント法による接合を用いることによって、高温超伝導テープ同士（臨界電流値：64A、断面：4mmx0.2mm）の接続部の電気抵抗を十分に小さくできること（ $\approx 3 \times 10^{-12} \Omega \text{m}^2$ ）
- ② 実験において超伝導テープ接合部の電気抵抗値に電流依存性があり、数値解析による評価と併せて総合的に判断すると、電流値の増加に伴うジュール発熱による温度上昇が抵抗増加の原因でなく、超伝導フィラメントの臨界電流密度値の減少が主な要因であること
- ③ 超伝導テープを 7~10 枚積層した超伝導ケーブルを用いた接合実験の結果、断面に傾斜を設けた場合の方が接合性能は良く、30 度~45 度程度で最適になること
- ④ 接合箇所が 4 カ所のプロトタイプ分割型マグネットを製作し動作すること

2. 研究の目的

(1) 目的

これまでの状況を踏まえ、高温超伝導体を用いた分割型マグネットの概念実証を目指すために以下の項目を本研究の目的とする。

- ① 接合構造の最適化をはかると同時に、作動温度と接合性能についての関係を明らかにする。
- ② 接合部分での発生する熱を効率良く除去するためのシステムの開発を行う。
- ③ 冷却システムを含めた分割型高温超伝導マグネットの設計指針を得る。

(2) 実施項目

上記のような目的を達成するため、本研究においては具体的に以下の項目を実施する。

① 接合性能の温度依存性評価

伝導冷却体系において、接合試験を実施し、77K 以下での接合性能の温度依存性を明らかにする。すなわち作動温度を下げることによる超伝導体自体の性能上昇と、比熱の減少による耐発熱性能の劣化との関係を明らかにすることで、最適な作動温度についての指針を得る。

② 接合構造の最適化

構造解析により、接合構造の問題点を明らかにする。続いて、解析結果をもとに超伝導ケーブルの構造を改善して接合試験を行い、従来の超伝導テープを束ねただけのケーブルでの結果と比較する。

③ 液体窒素と金属多孔質体を用いた高熱流束除去システムの検証

高熱流束除去システムとして申請者らが開発を進めてきている金属多孔質体を用い、水の相変化時の潜熱と毛細管現象による冷却材供給を組み合わせた除熱システムを液体窒素に対して適用し、接合部で発生したジュール熱を効率良く除去するシステムを提案する。従来の研究では単相の水を用いて熱除去を行っていたが、本研究では、除熱が問題となる複数の接合部を冷却する必要があるため、サブクール状態の液体窒素（単相流）および飽和状態の液体窒素（気液二相流）を用いた場合の除熱特性を明らかにする。

④ 分割型高温超伝導マグネットの設計可能性の検証

分割型高温超伝導マグネットの適用先の一つとして考えているヘリカル型発電実証炉 FFHR（核融合科学研究所による設計）に分割型高温超伝導マグネットを適用した際の接合部での発熱、および開発した冷却法を適用した際の温度変化を数値解析を用いて評価し、分割型高温超伝導マグネットの設計可能性を検証する。

3. 研究の方法

(1) 接合性能の温度依存性の評価

伝導冷却体系において、接合試験を実施し、77K 以下での接合性能の温度依存性を明らかにする。図1に用いる実験体系を示す。本実験で用いる試験用ケーブルは、BSCCO 2223 テープを10層積層し、低温はんだで束ねたものであり、接合面はケーブルの長手方向に対して45°傾いている。接合力はSUS304製のロッドによる圧縮応力によって与える。この実験体系をGM冷凍機によって冷却し、ヒータを用いて温度を変化させながら、接合部の抵抗（接合抵抗）を評価する。また、初期温度からの温度上昇を評価し、接合性能に対する比熱の効果を確認する。

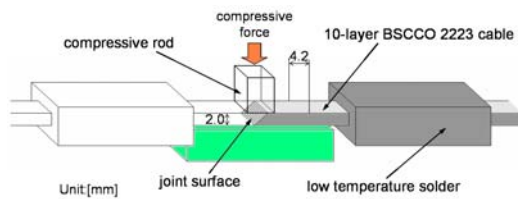


図1 接合試験体系

(2) 接合構造の最適化

高温超伝導ケーブルのバットジョイントの構造最適化を図るために、まず、高温超伝導ケーブル内応力分布を評価するための構造解析を行う。図1に示された実験体系、およびケーブルの上下からSUS304ロッドによって圧縮応力を与えた場合において、高温超伝導ケーブルの接合面上における垂直応力分布、ケーブル内の相当応力分布およびケーブルに垂直な方向の応力成分の分布を有限要素法によって評価する。

続いて、解析結果をもとに機械的強度を上げた高温超伝導ケーブルの接合試験を行い、接合面精度向上、接合力負荷による材料劣化の防止といった工学的課題の解決を目指す。

(3) 金属多孔質体を用いた液体窒素高熱流束除去システムの検証

図2に使用した試験部を示す。本試験部では、金属多孔質体が、く形流路に設置されており、その前後に取り付けられているひずみゲージ式圧力計により、多孔質体前後での圧力損失の計測が可能となっている。液体窒素の流量は、液体窒素を供給するタンクの内圧を制御することで調整し、試験部上流に取り付けられているタービン式流量計によって計測することができる。また、使用する液体窒素供給タンクでは、液体窒素をサブクール状態にすることができる。本実験で使用した金属多孔質体はブロンズ粒子焼結体であり、

伝熱面となる銅ブロックに焼結接合された状態になっている。伝熱面へは銅ブロック内に取り付けられたヒータにより熱が負荷され、熱流束は銅ブロックに取り付けられた熱電対で測定した温度分布より算出する。

本実験では、空孔径20 μ m、60 μ m、120 μ mの各多孔質体に対して、飽和状態の液体窒素、またはサブクール状態の液体窒素を流し、除熱特性（壁面過熱度と入射熱流束の関係）を評価する。また、比較のため、多孔質体を設置していない場合の除熱特性も取得する。

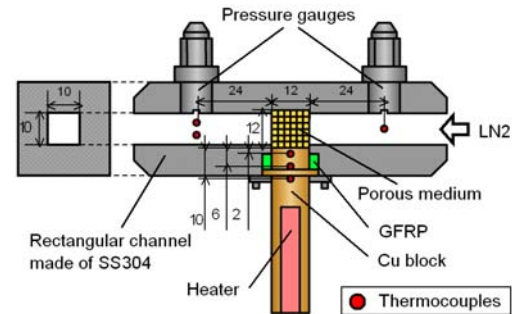


図2 冷却実験の試験部

(4) 分割型高温超伝導マグネットの設計可能性の検証

FFHRのヘリカルコイルに分割型高温超伝導マグネットを適用した場合を想定し、100kAの電流が流れる導体の接合部を液体窒素で冷却した場合の温度上昇の度合いを熱解析によって評価する。本解析では接合部にヒートシンクである焼結金属多孔質体を設置した場合、設置していない場合の双方について接合部での温度上昇を求める。図3に解析モデルの概念図を示す。接合部の抵抗、および熱伝達率は実験結果を元に決定している。

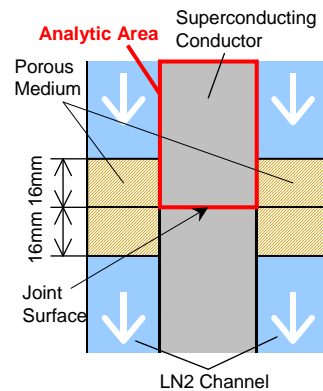


図3 熱解析モデル

4. 研究成果

(1) 接合性能の温度依存性の評価

実験により得られた温度-接合抵抗特性を図4に示す。図4より、温度が低下するほど接合抵抗が減少することが確認できる。この結果が得られた理由としては、温度低下にともなってケーブルの臨界電流値が上昇し、接合部抵抗の上昇が抑えられたことが挙げられる。

また図5に初期温度-温度上昇特性を示す。接合抵抗にともなう発熱は温度が上昇すると単調増加するのにもかかわらず、温度上昇はある温度で極小値を持つ。比熱は極低温では温度の3乗に比例するが、ケーブルを構成する BSCCO 2223 テープの安定化材である銀の熱伝導率は 6K 付近で極大値を取る。銀の熱伝導率は BSCCO 2223 の熱伝導率に比べて非常に大きいため、試験用の高温超伝導ケーブルの熱伝導率も 6K 付近で極大値を取る。したがって、高温超伝導ケーブルの機械的バットジョイントにおいて、温度上昇はケーブルの比熱だけではなく、熱伝導率にも依存すると言える。

以上より、接合抵抗をより下げられる(臨界電流値をより上げられる)より低い温度域・かつ熱伝導率が高い温度域を選択するのが、抵抗・温度上昇の双方を考慮した場合には適当であると考えられる。

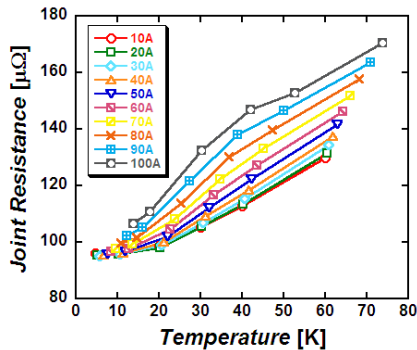


図4 温度-接合抵抗特性

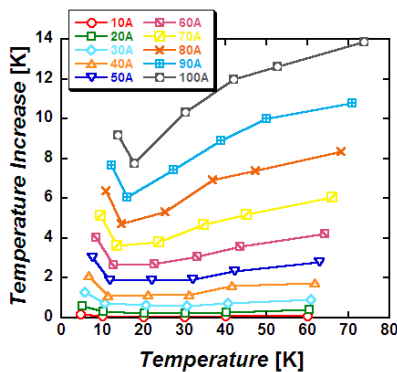


図5 初期温度-温度上昇特性

(2) 接合構造の最適化

結果の一例として上下からケーブルに圧縮応力を加えた場合のケーブル内のケーブルに垂直な方向の応力成分の分布を図6に示す。実際の体系においては、接合面にすべりが生じた場合、長手方向の応力成分が増加し、その結果座屈が生じる可能性がある。したがって、実際の体系においては何らかの方法で、このケーブルに作用する外向きの力を拘束する必要がある。

上記の解析結果を受けて、ケーブルの高強度化を図るために図7のような銅ジャケット付 BSCCO 2223 ケーブルを製作した。このケーブルの接合面に様々なコーティングを施し、負荷応力と接合抵抗の関係を評価するとともに、変位、ひずみの抑制性について考察を行った。

図8に接合部なしの状態での、SUS304 ロッドによってケーブルに与えられる圧縮応力と臨界電流の低下の関係を示す。従来のコンジットなしのケーブルと異なり、超伝導テープへのロッド端による応力集中が回避できるため、臨界電流の低下を抑えることができている。

図9に銀メッキ処理、インジウム箔挿入の2つ場合で、最小抵抗を与えた条件での応力-抵抗特性の比較を示す。従来の銅ジャケットなしのケーブルの接合試験では、250MPa 程度の応力下で、ケーブルの材料劣化により接合抵抗が上昇傾向に変化していたが、本実験では、400MPa 程度の応力でも接合抵抗が減少傾向にある。また接合面にインジウム箔を挿入した場合、接合応力が小さい場合でも、接合抵抗が小さく抑えられていることが確認できる。これは、インジウムが銀に比べて軟らかく、接合面における接触抵抗を低減しやすいためであると考えられる。

以上より、金属ジャケットと複合構造とした高温超伝導ケーブルに金属メッキ処理や金属箔挿入処理を施すことによって、高強度・低抵抗の接合が実現できることが示された。

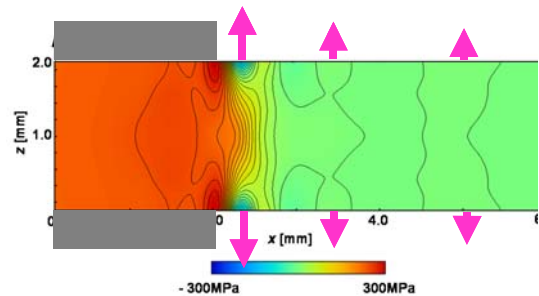


図6 ケーブルに垂直な応力成分の分布

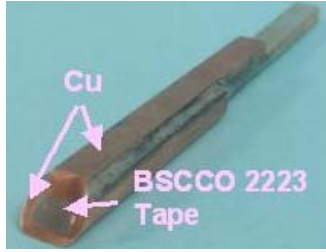


図7 銅ジャケット付 BSCCO 2223 ケーブル

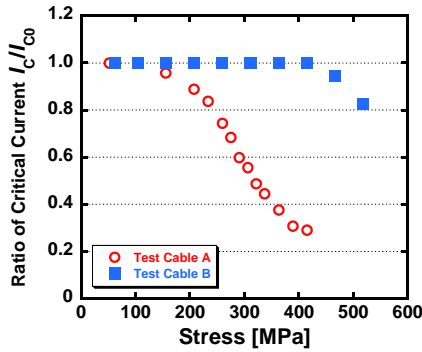


図8 銅ジャケット付 BSCCO 2223 ケーブルの応力-臨界電流特性

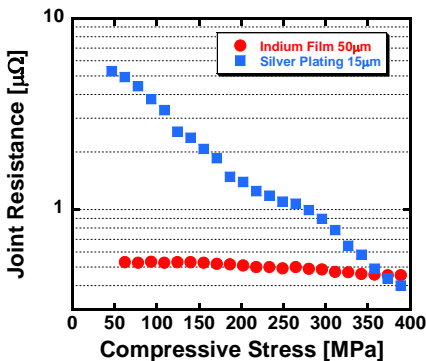


図9 銅ジャケット付 BSCCO 2223 ケーブルの応力-接合抵抗特性

(3) 金属多孔質体を用いた液体窒素高熱流束除去システムの検証

図10に液体窒素流量2L/minの際に得られた壁面過熱度と熱流束の関係を示す。多孔質体を設置した場合のCHF(限界熱流束)は多孔質体を設置しない場合のCHFに比べて最大6.9倍となった。また、多孔質体を設置した場合において空孔径ごとのCHFに注目すると、空孔径が小さいほどCHFが大きくなるという結果になった。これは、空孔径が小さいほど毛細管力が大きくなり、伝熱面へ液体窒素が連続的に供給されやすくなるためと考えられる。

除熱特性は空孔径20μmのブロンズ製多孔質体とサブクール状態の液体窒素を用いた場合が最も優れているといえるが、この場合の圧力損失が比較的大きいうえに、この多孔質体を飽和状態の液体窒素が通過した場合には、圧力損失および流量の周期的変動が出る可能性があり、流動特性の安定性に欠けているといえる。したがって、流動特性の安定性や除熱性能、ポンピングパワーなどを考慮した場合、空孔径60μm以上といった比較的空孔径の大きいブロンズ製多孔質体を伝熱面に焼結したヒートシンクを用いたうえで、サブクール状態の液体窒素の流量を大きくする場合は、分割型超伝導マグネット接合面の冷却システムとして適しているといえる。

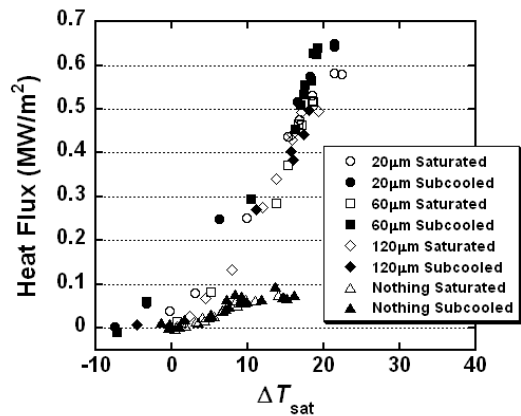


図10 金属多孔質体を用いた液体窒素高熱流束除去システムで得られた伝熱特性

(4) 分割型高温超伝導マグネットの設計可能性の検証

図11に解析で得られた温度分布を示す。解析の結果、金属多孔質体を設置していない場合には、接合部の最大温度が86.06Kになったのに対し、金属多孔質体を設置した場合には、接合部の最大温度が80.20Kに抑えられた。臨界電流が77Kから臨界温度110Kまで線形に減少すると仮定した場合、前者では臨界電流の低下が15.7%であるのに対し、後者では、2.3%に抑えることができる。

以上より金属多孔質体を用いた冷却システムを用いることによって、分割型高温超伝導マグネットの設計がより現実的なものとなったと考えられる。今後は、マグネット全体としての冷却システムの設計、電磁力解析によるマグネット構造の健全性の評価などが課題となる。

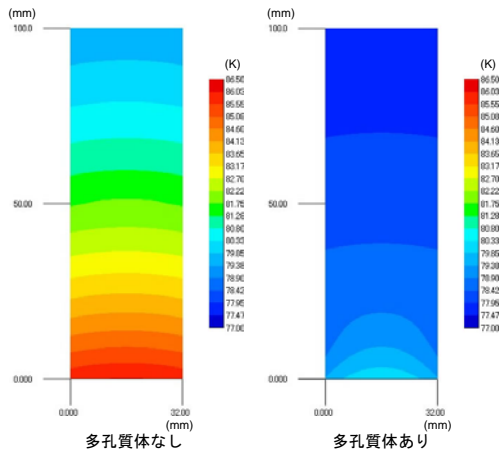


図 11 接合部における温度分布

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 0 件)

[学会発表] (計 5 件)

- ① Hidetoshi Hashizume, Mechanical Butt Joint of Laminated HTS Cable with Metal Jacket for Remountable HTS Magnet, Applied Superconductivity Conference 2008, 2008 年 8 月 20 日, Chicago, IL, USA.
- ② Hidetoshi Hashizume, Research of Cooling Technique Using Liquid Nitrogen and Metal Porous Media, International Cryogenic Engineering Conference 22, 2008 年 7 月 23 日, Seoul, Korea.
- ③ 橋爪 秀利, コンジット型BSCCO 2223 ケーブルの機械的バットジョイントの基礎研究, 2008 年度春季低温工学・超電導学会, 2008 年 5 月 26 日, 東京都日野市.
- ④ 橋爪 秀利, 液体窒素と金属多孔質体を用いた冷却技術の検討, 2007 年度秋季低温工学・超電導学会, 2007 年 11 月 21 日, 宮城県仙台市.
- ⑤ 橋爪 秀利, 高温超伝導ケーブルのバットジョイント法における高強度化と接合面の改善, 2007 年度秋季低温工学・超電導学会, 2007 年 11 月 21 日, 宮城県仙台市.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

6. 研究組織

(1) 研究代表者

橋爪 秀利 (HASHIZUME HIDETOSHI)
 東北大学・大学院工学研究科・教授
 研究者番号: 80198663

(2) 研究分担者

結城 和久 (YUKI KAZUHISA)
 東北大学・大学院工学研究科・講師
 研究者番号: 90302182
 伊藤 悟 (ITO SATOSHI)
 東北大学・大学院工学研究科・助教
 研究者番号: 60422078

(3) 連携研究者