

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 20 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2011～2013

課題番号：23246159

研究課題名(和文) 分割型高温超伝導マグネット実用化のための普遍的接合技術の創成と実証

研究課題名(英文) Construction and demonstration of universal joint techniques for realization of a remountable high-temperature superconducting magnet

研究代表者

橋爪 秀利 (Hashizume, Hidetoshi)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：80198663

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 31,000,000円、(間接経費) 9,300,000円

研究成果の概要(和文)：分割型高温超伝導マグネットの普遍的工学手法の創成と実証を目指し、普遍的接合手法の確立、多孔質体を用いた除熱システムの最適化、大型高温超伝導導体および接合部の設計・作製の3点を目的として研究を行った。除熱システムの研究では、金属多孔質体を用いることで、膜沸騰が抑制されることを確認し、本システムが有効であることを示した。また100 kA通電が可能な導体と接合部を開発し、本概念の実証をすることができた。

研究成果の概要(英文)：We conducted this research aiming for realization of universal joint techniques to be applied to a remountable high-temperature superconducting magnet. We set three objectives in this research: 1) Establishment of universal joint techniques, 2) Optimization of cooling system using porous media and 3) Design and fabrication of a large-scale conductor and its joint. In the research of the cooling system, we confirmed that metal porous media can suppress film boiling and the fact implies that the system is suitable for the remountable magnet. In addition, we fabricated a large-scale conductor having mechanical joint section and achieved a current of 100 kA. Based on the above results, we demonstrated the concept of joint techniques and a remountable high-temperature superconducting magnet.

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：電磁・マグネット 超伝導材料・素子 プラズマ・核融合

### 1. 研究開始当初の背景

国際熱核融合実験炉における制御された核融合反応の実現は間違いなく、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、莫大な建設コストの低減、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が工学的課題として残っており、将来のエネルギー源としての核融合炉実現に対する見通しは非常に厳しい状況にある。これらの問題を解決するための最もインパクトのある工学的方策の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し、製作コストの劇的な低減と容易な保守が可能とするための超伝導マグネットの分割化が考えられ、ヘリカル炉：マグネット建設コストの低減と部分補修性の導入、スフェリカル炉：センター部分の定期的な交換の可能性、トカマク炉：第一壁/ダイバータ等の炉内構造物へのアクセス性向上、など、この超伝導マグネットの分割化の実証は、魅力ある核融合炉の実現に不可欠な技術である。

分割化の概念自体は低温超伝導体マグネットに既に提案されていたが、作動温度が4 K近傍であるため物質の比熱が極端に小さく僅かな発熱が常伝導転移を誘発するため、脱着が可能な単純な接合機構の導入は不可能であった。一方、研究代表者は、電流ベクトルポテンシャル法による渦電流解析手法を元に、臨界状態モデルに従う第2種超伝導体内部の電流分布の解析手法を世界に先駆けて提案・開発しており、クエンチの伝搬解析を実施した際に、高温超伝導体においては、クエンチの伝搬が非常に発生しにくいことを把握していた。そこで、従来の単なる低温超伝導体の高温超伝導体への置き換えではなく、高温超伝導体の動作温度が高く、比熱が格段に大きいという特性を利用して、多少の発熱を許容してもクエンチが発生するような温度上昇が回避でき非常に魅力的な高温超伝導マグネットが設計できるのではないかと発想に至り、分割型高温超伝導マグネットを提案した。

分割型高温超伝導マグネットの実現に向けて、これまで高温超伝導テープ線材・導体の機械的接合法の研究開発、および金属多孔質体を用いた液体窒素熱伝達促進技術の研究開発に取り組んできた。機械的接合法に関しては、銅ジャケット付BSCCO 2223積層導体を用いた機械的バットジョイントで500 A通電時に140 nΩまで接合抵抗を減少させることに成功している。また、ブロンズ粒子焼結多孔質体を用いて液体窒素冷却の性能に関するデータを取得し、除熱性能が金属多孔質体を用いない場合の3倍以上になることが明らかとなっている。

### 2. 研究の目的

本研究では、高温超伝導体マグネットの動作温度の上昇により、物質の比熱を格段に増

加させることで、低温超伝導体では不可能であった接合部での発熱の許容により、脱着可能な機械的接合を可能とすること、さらに金属多孔質体の導入により、この接合部での局所的発熱を高効率で除熱するという革新的なアイデアを実現し、魅力的な核融合炉設計が可能となる分割型高温超伝導マグネットの普遍的工学手法の創成と実証を目指す。以下の3点を具体的な目的とした。

- (1) 接合構造最適化による接合性能向上と線材に依存しない普遍的接合手法の確立
- (2) 多孔質体の除熱性能評価実験と数値解析コード高度化による除熱システムの最適化
- (3) 大型高温超伝導導体および接合部の設計・作製による本概念の実証

### 3. 研究の方法

- (1) 接合構造最適化による接合性能向上と線材に依存しない普遍的接合手法の確立

これまでの研究では、BSCCO 2223 テープを積層して銅ジャケットに納めて、接合試験用の高温超伝導導体サンプルとし、図1に示すような機械的接合法の開発をしてきた。BSCCO 2223 テープは自己磁場下での臨界温度が110 Kと高い長所がある一方で、核融合炉環境のような強磁場環境では著しく臨界電流が低下するという短所がある。近年、研究開発が進み、販売もされるようになったREBCO系(YBCOやGdBCO)テープは、臨界温度が90 Kとやや低いものの、強磁場環境でも臨界電流が低下しにくいという特長を持つ。したがって、これまで研究対象としてきたBSCCO 2223 テープを用いた導体に加えて、REBCO系高温超伝導テープを用いた導体を使っての接合法の開発が必要となる。ここで、図2に示すように、2種類の高温超伝導テープは異なる構造を有している。これまで用いてきたBSCCO 2223 テープは超伝導体が占める断面積が大きく、また、安定化材である銀の断面積も大きいため、機械的バットジョイントのような断面同士を接触させるような接合法でも接合面における電流パスを期待することができた。しかしながら、

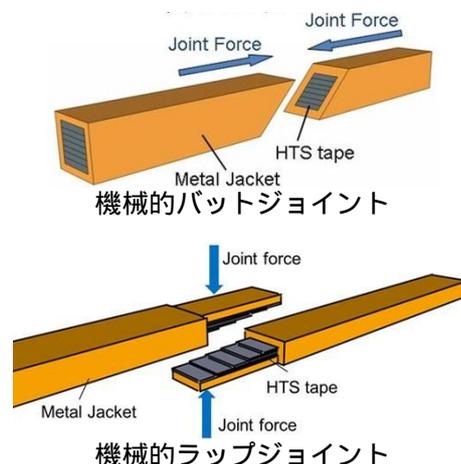


図1 高温超伝導導体の機械的接合法

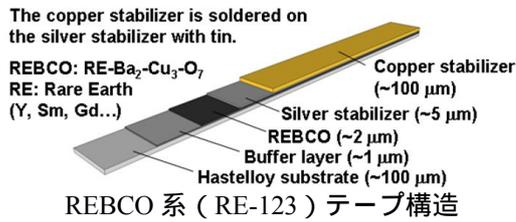
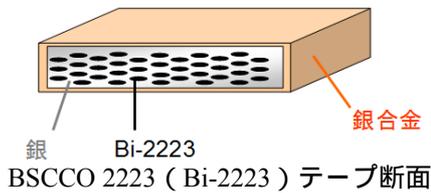


図2 高温超伝導テープの構造

REBCO系テープの場合、層状構造をしており、かつ超伝導体が占める面積が著しく小さい。また、安定化材の銀や銅が存在する面では接合時に電気伝導性が良い一方で、基板の Hastelloy 側では電気伝導性が悪い。したがって、機械的のバットジョイントにおいては、わずかな接合面のずれが、抵抗の増加につながる可能性がある。また機械的のラップジョイントにおいては、接合面を安定化材面（導電層面）にしなければならず、導体構成に制約が生じる。

そこで、本研究では、REBCO系テープを用いた導体を製作し、REBCO系導体の機械的接合の抵抗低減を図るための各種条件を特定し、かつ、BSCCO 2223 導体・REBCO系導体の双方に適用できる接合法の開発に取り組むこととした。まず、図3のようにREBCOテープの機械的バットジョイントをモデル化し、数値解析と実験によって、接合角度・超伝導テープ構造の最適条件を特定した。REBCOテープにおいては、超伝導体間の電流パスが期待できないため、電流は全て安定化材（導電層）を経由して接合面を通過すると仮定している。また、図4のようにマグネトロンスパッタ装置で接合面に銀層を成膜する、インジウム箔を挿入するなど、接合条件を変えて積層導体の接合抵抗を実験的に評価し、REBCO導体・BSCCO 2223 導体双方に適用できる接合法を検討した。

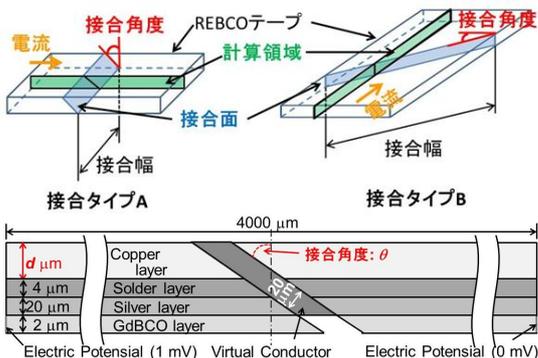


図3 数値解析で用いたREBCO系導体の機械的バットジョイントの2次元モデル

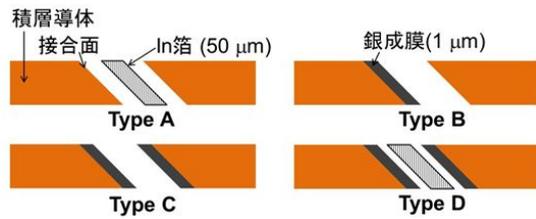


図4 接合面の条件

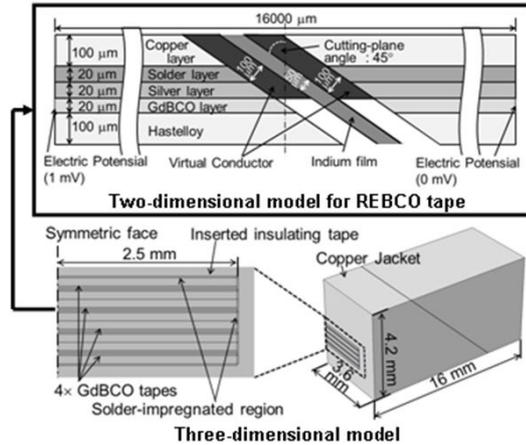


図5 数値解析で用いたREBCO系導体の機械的バットジョイントの3次元モデル

さらに実験で用いた各種導体の接触抵抗を求めるために、図5に示すような導体の3次元モデルを使って数値解析を行った。

(2) 多孔質体の除熱性能評価実験と数値解析コード高度化による除熱システムの最適化

図6に用いる実験体系図を示す。これまで用いていた液体窒素熱流動試験装置では、熱侵入が大きく、サブクール状態の液体窒素を用いて実験が行えなかったため、まず、断熱を強化した実験体系に改修した。この実験装置試験部に、ブロンズ粒子焼結多孔質体を設置し、液体窒素のサブクール度をパラメータとして、沸騰曲線を得た。また、得られた特性を水とブロンズ粒子焼結多孔質体を用いたデータと比較し、熱伝達特性の一般化の指針について議論した。あわせて熱伝達特性を定量的に議論するために数値解析コードの高度化を行った。

最後にヘリカル炉のヘリカルコイルをモデル化して熱解析を行い、分割型マグネットと上記除熱システムの適用性を議論した。

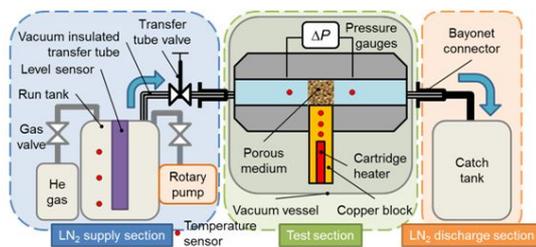


図6 液体窒素と金属多孔質体を用いた熱流動試験装置の体系図

### (3) 大型高温超伝導導体および接合部の設計・作製による本概念の実証

ここでは、機械的バットジョイントおよび機械的ラップジョイントを用いた大型導体の設計・製作を行う。なお、実験室レベルで大型導体を製作する場合、機械的ラップジョイント試験のほうが簡易に行えるため、機械的バットジョイントに関しては、数値解析を用いた導体設計のみとした。

## 4. 研究成果

### (1) 接合構造最適化による接合性能向上と線材に依存しない普遍的接合手法の確立

図7にREBCOテープの銅層厚さと接合抵抗の関係を、図8に接合面角度と接合抵抗の関係を示す。図7より銅層厚さにほぼ反比例して接合抵抗は減少することが確かめられた。また、REBCOテープでは銀層の上に銅層を配置する際にはんだ付けしているものがあるが、バットジョイントではこのはんだ層の存在は接合抵抗に大きな影響を与えないことも確認できた。また図8より図3に示す接合タイプBのほうが、接合タイプBより、接合面角度を大きくすることによる接合抵抗の低減効果が大きくなることも分かった。

図9に接合条件ごとの接合試験結果を示す。タイプBとタイプCの比較により、銀層を接合面に成膜することで、接合抵抗を低減できることがわかる。またタイプAはタイプDより低い抵抗を示しているが、これは接触面個数の増加が接合抵抗の増加につながることを示唆している。また、タイプA、タイプDではIn箔が接合面の表面粗さ(算術平均粗さの測定結果  $4.5 \mu\text{m}$ ) に比べて十分な厚さを持っているため、接合抵抗が接合応力に依存せず一定の値となった。一方、銀成膜を施したタイプBとタイプCの接合抵抗は接合応力の増加に伴い、接合抵抗が低減されているが、これは、 $1 \mu\text{m}$  厚さの銀膜は接合面の表面粗さより小さく、接合面の隙間を十分に埋めることができなかったため、低接合応力下で導体表面と銀膜間の接触抵抗が大きくなったためであると考えられる。以上より、接合面の表面粗さに対して十分な厚さを持った金属膜を成膜することで、低接合応力下で接触抵抗を低減できると考えられる。

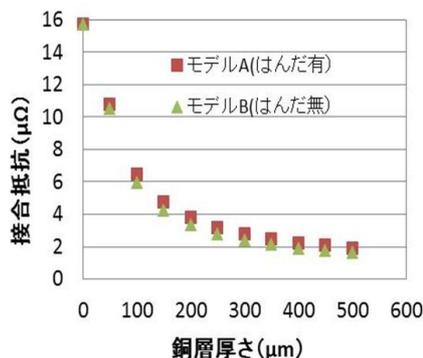


図7 銅層厚さと接合抵抗の関係

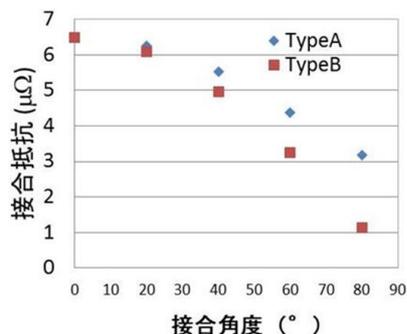


図8 接合面角度と接合抵抗の関係

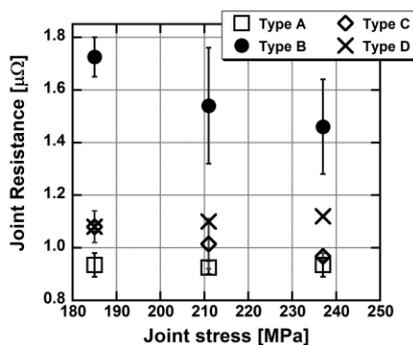


図9 接合条件変化にともなう接合性能変化

図5のモデルを用いてREBCO導体の機械的バットジョイントの実験結果と数値解析結果を比較して、接触抵抗率を評価したところ、 $2.5 \sim 4.5 \times 10^{-12} \Omega \text{m}^2$  が得られた。これは過去のBSCCO 2223導体の機械的バットジョイントの結果を用いて得られたものと同等である。したがって、あらゆる機械的接合法において、図5のようなモデル化を行い、今回得られた接触抵抗を導入することで、接合抵抗の予測が可能である。

### (2) 多孔質体の除熱性能評価実験と数値解析コード高度化による除熱システムの最適化

図10に平均空孔径  $60 \mu\text{m}$  のブロンズ粒子焼結金属多孔質体を用いた場合に、ランタンクの圧力を  $0.1 \text{ MPaG}$  (質量流量  $170 \text{ kg/m}^2\text{s}$  程度に相当) 液体窒素の多孔質体の上流でのサブクール度を  $2.4 \text{ K}$ 、 $9.1 \text{ K}$  として得られた沸騰曲線を示す。図10よりサブクール度が高くなると核沸騰開始点(DNB)の熱流束が大きくなることが確認できる。また、通常の平滑管を用いた除熱では、核沸騰開始点を

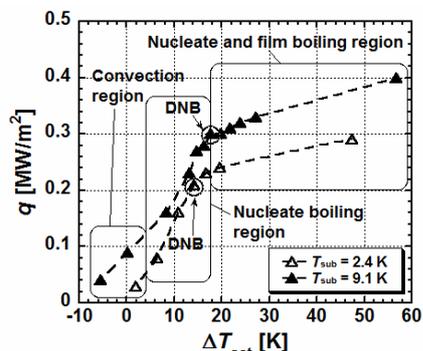


図10 サブクール度と沸騰曲線の関係

超えた後に温度が急上昇する特性を示すのに対して、多孔質体を用いた場合には、この温度上昇が抑えられることが示された。これは、多孔質体の毛細管作用によって急激な膜沸騰の進行を抑え、核沸騰と膜沸騰が共存する状態がある程度の熱流束の範囲で保たれるからであると考えられる。

図 11 にブロンズ粒子焼結多孔質体を共通に伝熱促進体として用いて、冷媒を水および液体窒素とした場合に得られる粒子レイノルズ数と粒子ヌセルト数の関係を示す。水の実験結果については過去のデータを参照している。サブクール度が高く、熱流束が低い場合のデータについては、水・液体窒素ともに液体单相流もしくは核沸騰領域であり、一つの近似曲線で表すことができた。しかしながら、サブクール度が低く、熱流束が高い場合のデータは近似曲線から大きく外れた。これは、沸騰が促進される領域において、伝熱様相が変化したためであると考えられる。

実験と併せて多孔質体内二相熱流動場解析コードの高度化も図った。過去の研究で開発したコードでは、高流速の二相流の解析が行えなかったが、支配方程式の離散化手法を見直すことで、高流速での解析も可能とすることに成功した。熱伝達率について水を用いた実験結果との比較を行ったところ、おおよその傾向は一致したが絶対値はずれており、特に沸騰が起きている領域で熱伝達率の値が大きくずれる状況となった。今後はエネルギーモデルや構成方程式の見直しを行い沸騰領域での解析ができるように改良を加える必要がある。最終的には改良を加えた数値解析コードを用いて計算を行い、さらに実験データを取得していくことで、他の冷媒を用いた場合でも、伝達性能予測が可能になるような手法を開発する予定である。

本除熱システムに関する内容として、最後にヘリカル炉 FFHR のヘリカルコイルをモデル化し、熱解析を行った。多孔質体を設置することで、局所的に温度上昇を抑えられることが確かめられた一方で、温度の上昇により導体構成材料の熱拡散率が減少するため、冷却システムに加えて、導体の構成を最適化が必要であることが示された。

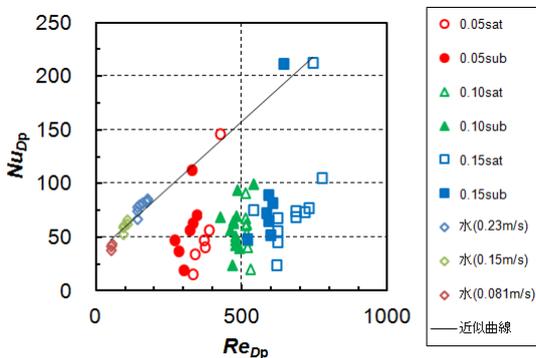


図 11 ブロンズ粒子焼結多孔質体を用いた冷却システムにおける粒子レイノルズ数と粒子ヌセルト数の関係(冷媒:水・液体窒素)

(3) 大型高温超伝導導体および接合部の設計・作製による本概念の実証

まず、「(1) 接合構造最適化による接合性能向上と線材に依存しない普遍的接合手法の確立」で確立した接合抵抗予測手法を用いて、ヘリカル炉 FFHR の 100 kA 級高温超伝導導体に適用する機械的バットジョイントの設計を図 12 のように行った。数値解析によって見積もった接合抵抗は導体 1 本あたり 4.4 ~ 5.4 nΩ となった。本設計を用いた場合の分割型高温ヘリカルコイルの冷却電力を計算すると 23 ~ 27 MW と算出できる。これは低温超伝導導体でヘリカルコイルを製作した場合の冷却電力 30 MW と同等であり、この設計であれば、冷却電力の観点でも許容できると考えられる。

続いて、より簡易的に導体サンプルの製作が可能な機械的ラップジョイントを用いて大型導体を製作した。製作した導体の構成および接合部の概念図を図 13 に示す。10 mm 幅の GdBCO テープを 3 列 14 層に配列し、機械的ラップジョイントを 2 つ組み合わせたブリッジ式機械的ラップジョイントを用いて 1 ターンのレーストラックコイルとした。このジョイント形式では、導電面が片面にしかない REBCO 系テープを用いた場合でも、導体内の REBCO テープの向きをセグメントごとに変える必要がないという特長がある。本導体サンプルを核融合科学研究所所有のクライオスタット内に設置し、液体ヘリウムの浸漬冷却体系で通電試験を行った。なお、本導体サンプルは電流リードがないため、スプリットコイルで与える外部磁場の変化にともなう電磁誘導によって電流を印加し、電流値はロゴスキーコイルとホール素子を用いて評価した。

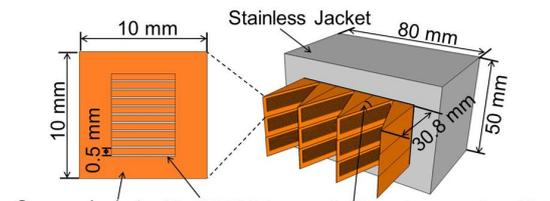


図 12 提案した 100 kA 級導体の導体構造と接合構造(機械的バットジョイント)

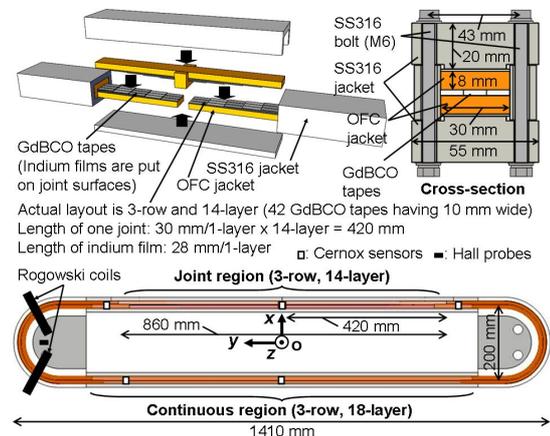


図 13 大型導体サンプルの構成図

図 14 に通電試験結果の例を示す。4.2 K、0.45 T の条件で 118 kA、20 K、5.3 T の条件で 100 kA の通電に成功した。本実験では、通電電流値および継続時間が接合抵抗によって制限されるが、低抵抗が実現されたことにより、大電流の通電に成功した。電流の減衰時定数は導体サンプルの接合抵抗と自己インダクタンスの比で表されるため、減衰時定数から接合抵抗を評価したところ、 $\sim 2 \text{ n}\Omega$  となった。この値はヘリカル炉に分割型高温超伝導マグネットを適用するのに十分に低い値であり、本試験により機械的接合法を用いた分割型高温超伝導マグネットの適用可能性が実証されたと言える。

図 15 にこれまでの研究開発の成果をまとめる。研究開発開始と比べると通電電流値は千倍以上、接合抵抗値は 10 万分の 1 以下になっており、着実に研究開発は進展している。

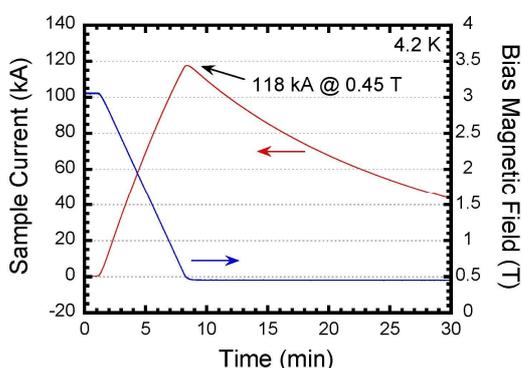


図 14 大型導体試験における通電波形の例 (4.2 K、0.45 T、118 kA 通電)

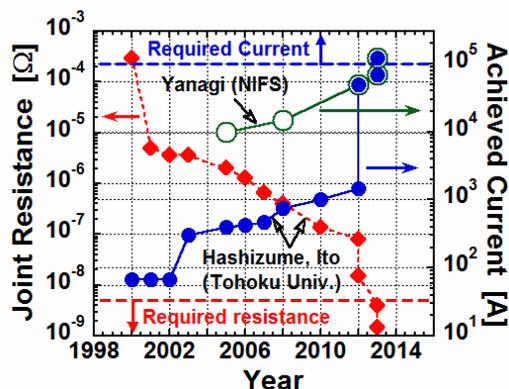


図 15 研究開発の進展のまとめ

## 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 6 件)

H. Hashizume, S. Ito, Design prospect of remountable high-temperature superconducting magnet, Fusion Engineering and Design, 査読有, 2014 年, 採録決定済  
DOI: 10.1016/j.fusengdes.2013.12.014

Y. Tanno, S. Ito, H. Hashizume, Characteristic Evaluation of Cooling Technique using Liquid Nitrogen and Metal Porous Media, AIP conf. Proc., Advances in Cryogenic Engineering: Transactions of the Cryogenic Engineering Conference-CEC, 査読有, 1573 巻, 2014 年, 597-604

DOI: 10.1063/1.4860756

S. Ito, T. Ohinata, L. Bromberg, H. Hashizume, Structure improvement and joint resistance estimation in demountable butt and edge joints of a stacked REBCO conductor within a metal jacket, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 査読有, 23-3 巻, 2013 年, 6425423

DOI: 10.1109/TASC.2013.2244197

[学会発表](計 18 件)

丹野裕介, 伊藤悟, 橋爪秀利, 液体窒素と金属多孔質体を用いた冷却システムの沸騰熱伝達特性評価, 日本原子力学会 2014 年春の年会, 2014 年 3 月 27 日, 東京都世田谷区

橋爪秀利, 伊藤悟, 分割型高温超伝導マグネット設計のための機械的接合および冷却技術研究の進展, プラズマ・核融合学会 第 30 回年会, 2013 年 12 月 6 日, 東京工業大学 (東京都目黒区)

S. Ito, Y. Seino, N. Yanagi, Y. Terazaki, A. Sagara, H. Hashizume, Bridge-type mechanical lap joint of a 100 kA-class HTS conductor having stacks of GdBCO tapes, 23rd International Toki Conference, 2013 年 11 月 19 日, セラトピア土岐 (岐阜県土岐市)

## 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

江原 真司 (EBARA, Shinji)  
東北大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号：30325485  
遊佐 訓孝 (YUSA, Noritaka)  
東北大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号：60466779  
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

なし