

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24246143

研究課題名(和文) 海洋と水素エネルギー：超伝導応用の水素製造・貯蔵・輸送技術への新展開

研究課題名(英文) Ocean and Hydrogen Energy: New Development of Applied Superconductivity into Hydrogen Technology for Production, Storage and Transportation

研究代表者

武田 実 (TAKEDA, Minoru)

神戸大学・自然科学系先端融合研究環重点研究部・教授

研究者番号：50206992

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,000,000円

研究成果の概要(和文)：始めに、海流/潮流エネルギーを利用したMHD(MagnetoHydroDynamics)発電/水素発生器の開発(テーマA)では、ヘリカル型発生器内部の流速分布に対する整流器の効果을明らかにした。また発電/水素発生特性に及ぼす磁場方向/誘導電場方向の影響を調べたところ、起電力は誘導電場方向に依存しないことがわかった。続いて、スロッシングよりみた船用液体水素(LH2)タンクの開発(テーマB)では、外部加熱型超伝導MgB2(二ホウ化マグネシウム)液面センサーを長尺化した場合の最適ヒーター入力値の予測が可能になった。また、液面センサーの動的液面検知特性も良好であり、3Dスロッシング計測が可能となった。

研究成果の概要(英文)：First, on the subject A of development of seawater magnetohydrodynamics (MHD) power generator/hydrogen generator utilizing ocean/tidal currents, it was found that the effect of a rectifier on the velocity distribution inside the helical-type generator. In addition, the electromotive force obtained was in agreement with the calculated value in stable helical flow and was independent of the direction of the induced electric field. Second, on the subject B of development of liquid hydrogen (LH2) tank for marine transportation from the view point of sloshing, the temperature distribution and static level-detecting characteristics of an external-heating-type superconducting magnesium diboride (MgB2) level sensor for LH2 was studied. Then, the optimum heater input to long MgB2 level sensor was able to estimate. In addition, the MgB2 level sensor showed good dynamic level-detecting characteristics, so that 3D sloshing measurements were carried out with several level sensors.

研究分野：水素低温工学

キーワード：海洋工学 超伝導応用 水素 再生可能エネルギー MHD

1. 研究開始当初の背景

太陽光・風力などの再生可能エネルギーは広く地球規模で分布しているため、これを水素に変換して液体水素(LH₂:沸点 20 K)の極低温状態で海外から日本へ海上輸送する計画[1]が再び脚光を浴びている。水素は海洋に無尽蔵に存在するだけでなく、化学反応後に残るのが水だけなので、究極のクリーンエネルギー源であると言える。

我々は、これまで余り注目されなかった海流/潮流エネルギーを利用した、MHD (MagnetoHydroDynamics; 電磁流体力学) 発電/水素発生基礎研究を行い、小型の新型(ヘリカル型)試作機(外径 100 mm、長さ 300 mm、磁場 7 テスラ(7 万ガウス))を対象として流動特性および発電特性を明らかにした[2]。海流/潮流エネルギーは、太陽光・風力エネルギーに比べて季節や天候に大きく左右されないため、水素発生のための再生可能エネルギーとして極めて重要である。この研究は国内・国外において例のない全くユニークなものであり、MHD 発電/水素発生器の大型化が最重要課題となってきた。

一方我々は、LH₂ タンク用の高精度・高信頼性の液面計の開発を目指して、超伝導線材をベースとした電気抵抗式の液面センサーを創製した[3,4]。これは、同時期にドレスデン工科大学(ドイツ)で提案された自己(内部)加熱型と比べて、外部加熱型を採用しており、優れた静的液面検知特性(直線性 99.99%以上、精度 0.1%以下)を有している。ごく最近の研究により、動的特性も優れていることが明らかとなり、この液面センサーを用いた LH₂ のスロッシング(液面揺動)状態の解明が喫緊の課題となってきた。

【参考文献】

[1] World Energy Network; 水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術研究開発成果報告書 (1998).

[2] M. Takeda: Seawater Magnetohydrodynamics Power Generator / Hydrogen Generator, Adv. Sci. Tech., Vol. 75, pp. 208-214 (2010).

[3] 神戸大学・物材機構・岩谷瓦斯: 液体水素用液面センサー及び液体水素用液面計, 特願 2008-014998.

[4] M. Takeda (他 4 名, 1 番目): Application of MgB₂ Wire to Liquid Hydrogen Level Sensor - External-Heating-Type MgB₂ Level Sensor, IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol. 19, No. 3, pp. 764-767 (2009).

2. 研究の目的

2011 年 3 月に起こった東日本大震災および福島第一原発事故により、日本のエネルギー問題がクローズアップされている。原発離れが進む中、代替エネルギー源として再生可能エネルギーが注目されており、温室効果ガス削減の切り札として大いに期待されている。本研究では、エネルギー媒体として水素

に着目し、超伝導をベースとした MHD (電磁流体力学) 技術を用いて、再生可能な海流/潮流エネルギーの有効利用を提言するものである。更に本研究は、地球規模で水素エネルギーを海上輸送するための極低温タンクの開発を通じて、究極の水素エネルギー社会の実現に大きく貢献するものである。

本研究では、海流/潮流エネルギーを利用した MHD 発電/水素発生器の開発(テーマ A)およびスロッシングよりみた船用液体水素(LH₂)タンクの開発(テーマ B)を目的として、以下の項目について取り扱う。

テーマ A

(A-1)MHD 水素発生器内部の 3 D 流速分布計測: 性能予測に関する知見を得るためには、内部の流速分布を調べることが重要である。5 孔式ピトー管を用いることにより、流速の半径方向および軸方向依存性を調べてきた。さらなる高精度計測により、3 D (3 次元)流速分布を明らかにする。

(A-2)MHD 発電/水素発生特性に及ぼす磁場方向の影響: 磁場の方向(順方向または逆方向)に依って、発生起電力の大きさに差が生じる可能性が指摘された。これについて調べるために、水素発生器形状の違いに着目して、発生起電力の磁場方向依存性を明らかにする。

(A-3)MHD 水素発生器用電極の特性改善: 新規な水素ガス採集方法として、電極を通じて水素ガスを吸蔵・採集する方法について検討している。これまでにパラジウム銀合金膜を電極として、水素透過特性を調べてきたが、これを薄膜化することにより特性改善を試みる。

(A-4)MHD 水素発生器用高温超伝導マグネットの設計: MHD 水素発生器を実用化するためには、冷却コストを低く抑えられる高温超伝導マグネットの使用が不可欠である。

(A-1)の研究成果に基づいて、発生磁場が数テスラのマグネットの設計を試みる。

(A-5)プロトタイプモデルの設計・製作・性能試験: (A-2)の実験結果と数値シミュレーション結果を比較して、計算モデルの妥当性について検討する。これに基づいて、(A-3)(A-4)の研究成果を反映したプロトタイプモデルを設計・製作し、性能評価を試みる。

テーマ B

(B-1)小型容器を対象とした 3 D スロッシング計測: 船用 LH₂ タンク内部のスロッシング状態を解明するためには、3 D 計測による実験的研究が重要である。これまでに開発した複数の超伝導液面センサーを用いて、小型容器を対象とした高精度の 3 D スロッシング計測を行う。

(B-2)超伝導センサーによる液面・温度同時計測: 船用 LH₂ タンクの安全設計のためには、スロッシングのみならず温度分布変化を把握することが不可欠である。超伝導液面セン

サーを利用して、全体および各部の電気抵抗を計測することにより液面・温度同時計測を試みる。

(B-3)超伝導センサーの長尺化設計：これまでに長さ 200 mm ~ 800 mm センサーの液面検知特性に及ぼす外部ヒーターの影響を調べてきた。超伝導液面センサーの長尺化を目指して、長さ 1 m ~ 10 m のセンサーを対象とした、ヒーター入力値・形状を含む設計を試みる。

(B-4)大型容器を対象とした 3 D スロッシング計測：(B-3)の研究成果を反映した、1 m 級の超伝導センサーを複数作製する。これらのセンサーを大型容器内部へ設置して 3 D スロッシング計測を行い、小型容器のそれと比較検討する。

(B-5)プロトタイプモデルの設計・製作・性能試験：(B-1) (B-4)の実験結果と数値シミュレーション結果を比較して、計算モデルの妥当性について検討する。これに基づいて、(B-2) (B-3)の研究成果を反映したプロトタイプモデルを設計・製作し、性能評価を試みる。

3. 研究の方法

海流 / 潮流エネルギーを利用した MHD 発電 / 水素発生器の開発 (テーマ A) およびスロッシングよりみた船用液体水素 (LH₂) タンクの開発 (テーマ B) について、主な研究の方法を以下に示す。

テーマ A

海流 MHD 発電 / 水素発生器内部の 3 D 流速分布計測では、作製した模擬発電機に 5 孔ピトー管を挿入し、これを回流水槽 (1 m/s) の中に設置して実験を行った。

海流 MHD 発電 / 水素発生特性に及ぼす磁場方向 / 誘導電場方向の影響を調べる実験では、電極分割式ヘリカル型海流 MHD 発電 / 水素発生器を作製し、7 T の磁場下で誘導起電力を測定した。

海流 MHD 発電 / 水素発生器の発電特性に及ぼす電磁ブレーキの影響を調べる研究では、小型発電セルを作製し、10 T の磁場下で圧力損失や電気分解特性等を測定した。

テーマ B

シミュレーション解析では、デスクトップ PC へインストールした汎用解析ソフト ANSYS を用いた。

液体水素 (LH₂) の 3 D スロッシング計測では、小型容器および中型容器を利用して、超伝導 MgB₂ (ニホウ化マグネシウム) 液面センサーを容器へ挿入して実験を行った。

海上輸送中のスロッシング計測を行う前段階として、停泊中の練習船深江丸の後部甲板上において、MgB₂ 液面センサーを挿入した小型容器を用いて、容器内部の液面・温度・圧力・加速度の同時計測に関する予備実験を行った。

4. 研究成果

海流 / 潮流エネルギーを利用した MHD 発電 / 水素発生器の開発 (テーマ A) およびスロッシングよりみた船用液体水素 (LH₂) タンクの開発 (テーマ B) について、主な研究成果を以下に示す。

テーマ A

新型 (ヘリカル型) 海流 MHD 発電 / 水素発生器では、海水が同軸電極周りを螺旋 (ヘリカル) 状に運動するので、比較的大きな流体損失を伴う。誘導起電力の向上には、流体損失を低減して海水流速を増加させるとともに流速分布を明らかにすることが重要である。そこで、5 孔ピトー管および 3 DCAD を用いて 3 D 流速分布の詳細を調べるとともに、流速分布に対する整流器設置の効果を明らかにした。

次に、海流 MHD 発電 / 水素発生特性に及ぼす磁場方向 / 誘導電場方向の影響を調べるために、電極分割式ヘリカル型海流 MHD 発電機を作製し、ヘリカル流と発生起電力との関係を実験的に明らかにするとともに、起電力が誘導電場方向に依存しないことを明らかにした。実験結果の一例を図 1 に示す。

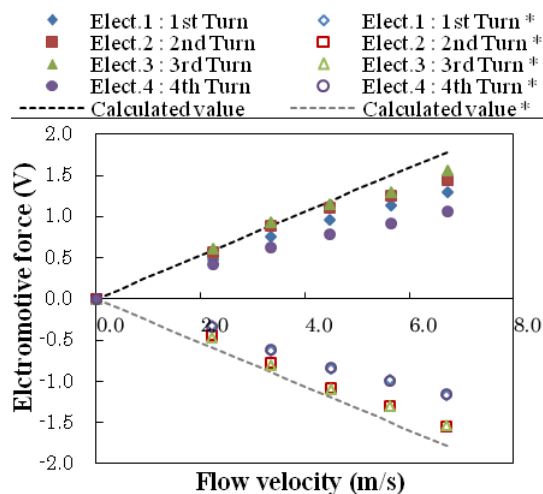


図 1 海水の平均流速と起電力の関係 (* は逆方向磁場)

続いて、海流 MHD 発電 / 水素発生器のプロトタイプモデルおよび実用モデルを設計するために、流体損失、起電力、発電出力等に関する単純な計算モデルの検討を行った。この計算モデルによる計算値は過去の実験値に近いものであり、大型化に伴う性能予測から最適形状に関する知見が得られた。

さらに、海流 MHD 発電 / 水素発生器の発電特性等を明らかにするために、作製した小型発電セルを用いて同特性に及ぼす電磁ブレーキの影響を調べた。特に、模擬発電状態における磁場印加時の電流と圧力損失の関係に着目すると、電流に対する圧力損失の傾

きと磁場の関係が線形近似できることがわかった。これは理論と定性的に一致している。また小型発電セル内における電気分解特性を調べたところ、電圧印加順方向に関して印加磁場が大きくなるほど電気分解電圧が小さくなる傾向が見られた。

海流 MHD 発電 / 水素発生器用電極の特性改善については、水素ガスを吸蔵・採集する観点だけでなく、有害な塩素の発生を抑制する観点からの研究課題も残っている。また、海流 MHD 発電 / 水素発生器用高温超伝導マグネットの研究開発を通じて、大型化・実用化に関する研究課題も残る。本研究は、最先端の極低温・超伝導技術およびシミュレーション技術を応用して、海流 / 潮流エネルギーの有効利用技術の開発を行うものであり、これらの課題を解決すれば、世界初の海流 MHD 発電 / 水素発生器が実現する。

テーマ B

船用液体水素タンク内部のスロッシング状態を解明するために、汎用解析ソフト ANSYS を用いて、小型容器および 2000 L タンクを対象としたスロッシングのシミュレーション解析を行った。解析結果と実験結果を比較したところ、両者は定性的に一致した。続いて、船用液体水素タンク内部の温度分布変化を把握するために、液体水素用超伝導 MgB₂ (二ホウ化マグネシウム) 液面センサーを利用して、センサーの全体および各部の電気抵抗を計測することにより液面・温度同時計測を試みた。測定精度の問題は残ったが、同時計測の目処が立った。

次に、スロッシング計測の高精度化のために、外部加熱型超伝導 MgB₂ 液面センサーの測定電流依存性を詳しく調べた。その結果、出力信号の直線性に注目すると測定電流に依存しないが、有効液面検知長さの割合に着目すると測定電流に依存することがわかった。続いて、超伝導液面センサーの温度分布および静的液面検知特性を調べ、超伝導液面センサーを長尺化した場合の最適なヒーター入力値の予測が可能になった。さらに、海上輸送中のスロッシング状態の解明を目指して、停泊中の練習船深江丸の船上において小型容器を対象とした、液面・温度・圧力・加速度の同時計測システムを構築した。

続いて、船用液体水素 (LH₂) タンク内部のスロッシング状態を解明するために、製作した中型容器を対象として、外部加熱型超伝導 MgB₂ 液面センサーを 5 本用いて、液面位置の時間変化を計測した。

さらに、MgB₂ 液面センサーを長尺化した場合の最適なヒーター入力値、およびセンサー性能のセンサー長依存性を明らかにした。また、船用 LH₂ タンクのプロトタイプモデルを設計するための計算モデルを構築するために、汎用解析ソフト ANSYS を用いて、大型 LH₂ タンク内部の熱流体解析を試みた。その結果、液面位置の時間変化に対して初期充

填率による違いが見られた。

最後に、船用液体水素タンク内部のスロッシング状態を解明するために、中型容器を対象として、長さ 500 mm の外部加熱型超伝導 MgB₂ 長尺液面センサーを用いて、液体水素のスロッシング計測を行った。センサー出力電圧と高速度カメラの画像データを比較したところ、液面誤差の平均値は±4 mm 程度、また応答時間の平均値は 0.15 s 以内であることがわかった。実験結果の一例を図 2 に示す。

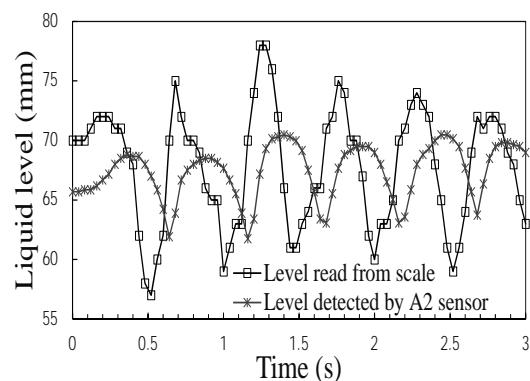


図 2 高速度カメラと液面センサーが捉えた液体水素の液面位置の比較

小型容器および中型容器を用いた、液体水素の 3D スロッシング計測については、大型容器を用いた、実船によるデータ取得の課題が残っている。また、超伝導 MgB₂ 液面センサーの長尺化設計については、ヒーター入力最適値は見積もられるものの、船用大型タンク内部へ実装する際の形状等の課題も残る。本研究は、最先端の極低温・超伝導技術および安全工学・技術を応用して、地球規模での水素エネルギー海上輸送技術の開発を行うものであり、これらの課題を解決すれば、世界初の液体水素運搬船の実現に大きく寄与することができる。

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 25 件)

前川一真, 武田 実, 松野 優, 藤川静一, 黒田恒生, 熊倉浩明: 海上輸送のための外部加熱型 MgB₂ 液面センサーによる液体水素タンク内部のスロッシングの基礎研究, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 査読有, 51 巻, 3 号, 2016, pp. 125-131

ShuJun Ye, Hiroyuki Takigawa, Akiyoshi Matsumoto, Hiroaki Kumakura: Uniformity of coronene-added MgB₂ superconducting wires fabricated using an internal Mg diffusion process, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 査極有, Vol. 25, 2015, 6200807(7pp)

武田 実, 宮沢肇, 山本周平, 竹内吾翼志, 松本真治: ヘリカル型海流 MHD 発電機特性

に及ぼす整流器の効果, 神戸大学大学院海事科学研究科紀要, 査読無, 12号, 2015, pp. 17-22

前川一真, 武田 実, 松野 優, 藤川静一, 黒田恒生, 熊倉浩明: 外部加熱型液体水素用 MgB₂ 液面センサーの個体差性能評価、低温工学 査読有, 50巻, 7号, 2015, pp. 368-373
Doi: 10.2221/jcsj.50.368

Minoru Takeda, Yuki Inoue, Kazuma Maekawa, Yu Matsuno, Shizuichi Fujikawa, Hiroaki Kumakura: Superconducting characteristics of short MgB₂ wires of long level sensor for liquid hydrogen, Materials Science and Engineering, 査読有, Vol. 101, 2015, 012156(7pp)
Doi: 10.1088/1757-899X/101/1/012156

Minoru Takeda, Hiroyuki Nara, Kazuma Maekawa, Shizuichi Fujikawa, Yu Matsuno, Tsuneo Kuroda, Hiroaki Kumakura: Simulation of liquid level, temperature and pressure inside a 2000 liter liquid hydrogen tank during truck transportation, Physics Procedia, 査読有, Vol. 67, 2015, pp. 208-214
Doi: 10.1016/j.phpro.2015.06.036

Kazuma Maekawa, Minoru Takeda, Yu Matsuno, Shizuichi Fujikawa, Tsuneo Kuroda, Hiroaki Kumakura: Fundamental study of tank with MgB₂ level sensor for transportation of liquid hydrogen, Physics Procedia, 査読有, Vol. 67, 2015, pp. 1164-1168

武田 実, 宮川拓也, 瀧本佳史, 宮沢 肇, 松本真治: ヘリカル型海流 MHD 発電機の大規模化のための性能予測, 神戸大学大学院海事科学研究科紀要, 査読無, 11号, 2014, pp. 59-65

武田 実, 安井亮太, 前川一真, 井上雄貴, 藤川静一, 松野 優, 黒田恒生, 熊倉浩明: 極低温液体水素の海上輸送を実現するための基盤技術の研究, 神戸大学大学院海事科学研究科紀要, 査読無, 11号, 2014, pp. 54-58

Minoru Takeda, Hiroki Hirosaki, Tsukasa Kiyoshi, Shigeru Nishio: Fundamental Study of Helical-Type Seawater MHD Power Generation with Partitioned Electrodes, Journal of the Japan Institute of Marine Engineering, 査読有, Vol. 49, No. 3, 2014, pp. 113-117

〔学会発表〕(計48件)

宋思遥, 田中順也, 武田 実, 山城一藤, 新郷正志, 神谷祥二: 横振動下における液体窒素の蒸発特性, 第93回2016年度春季低温工学・超電導学会, 2016.6.1, タワーホール船堀(東京都江戸川区)

鈴木康平, 瀧浦隆昌, 前川一真, 武田 実, 松野 優, 藤川静一, 熊倉浩明, 外部加熱型 MgB₂ 液面センサーと高速度カメラによる液

体水素のスロッシング計測, 第93回2016年度春季低温工学・超電導学会, 2016.6.1, タワーホール船堀(東京都江戸川区)

山本周平, 竹内吾翼志, 武田 実, 松本真治: 海流 MHD 発電機特性に及ぼす電磁ブレーキの影響と電気分解特性, 第92回2015年度秋季低温工学・超電導学会, 2015.12.3, 姫路商工会議所(兵庫県姫路市)

竹内吾翼志, 山本周平, 武田 実, 松本真治: 海面下におけるヘリカル型海流 MHD 発電機の流動特性, 第92回2015年度秋季低温工学・超電導学会, 2015.12.3, 姫路商工会議所(兵庫県姫路市)

山崎瑛也, 武田 実: 液体水素用外部加熱型 MgB₂ 液面センサーから気体水素への熱伝達, 第92回2015年度秋季低温工学・超電導学会, 2015.12.2, 姫路商工会議所(兵庫県姫路市)

瀧浦隆昌, 前川一真, 山崎瑛也, 武田 実, 松野 優, 藤川静一, 熊倉浩明: 液体水素用外部加熱型 MgB₂ 長尺液面センサーの個体差性能評価, 第92回2015年度秋季低温工学・超電導学会, 2015.12.2, 姫路商工会議所(兵庫県姫路市)

田中順也, 武田 実, 山城一藤, 新郷正志, 神谷祥二: 加圧液体窒素の急減圧時における沸騰挙動の観測, 第92回2015年度秋季低温工学・超電導学会, 2015.12.2, 姫路商工会議所(兵庫県姫路市)

武田 実: 液体水素の輸送技術と超伝導応用, 日本機械学会関西支部第16回秋季技術フォーラム(招待講演), 2015.10.31, 滋賀県立大学(滋賀県彦根市)

瀧浦隆昌, 前川一真, 山崎瑛也, 武田 実, 松野 優, 藤川静一, 熊倉浩明: 液体水素用超伝導 MgB₂ 液面センサーのスロッシング計測への応用, 第85回(平成27年)マリンエンジニアリング学術講演会, 2015.10.28, 富山国際会議場(富山県富山市)

武田 実, 山本周平, 竹内吾翼志, 松本真治: 海流 MHD 発電機特性に及ぼす電磁ブレーキの影響, 第85回(平成27年)マリンエンジニアリング学術講演会, 2015.10.28, 富山国際会議場(富山県富山市)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕
出願状況(計2件)

名称: 炭素のナノ被覆層を有する基材粉末の製造方法、これを用いた MgB₂ 超伝導体の製造方法および MgB₂ 超伝導体、リチウムイオン電池用正極材の製造方法およびリチウムイオン電池、並びに光触媒の製造方法
発明者: 熊倉浩明, 長谷川 明, 葉 術軍
権利者: 物質・材料研究機構
種類: 特許
番号: PCT/JP2015/71688

出願年月日：2015年7月30日
国内外の別：国外

名称：炭素のナノ被覆層を有する基材粉末の製造方法、これを用いた MgB_2 超伝導体の製造方法および MgB_2 超伝導体、非水電解質二次電池用負極材の製造方法、光触媒の製造方法

発明者：熊倉浩明，イエ シュジュン，長谷川 明

権利者：物質・材料研究機構

種類：特許

番号：特願 2014-158308

出願年月日：2014年8月4日

国内外の別：国内

取得状況（計0件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.lab.kobe-u.ac.jp/gmsc-super/research.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

武田 実 (TAKEDA, Minoru)

神戸大学・自然科学系先端融合研究環重点研究部・教授

研究者番号：50206992

(2) 研究分担者

熊倉 浩明 (KUMAKURA, Hiroaki)

物質・材料研究機構・超伝導線材ユニット
招聘研究員

研究者番号：90354307

木吉 司 (KIYOSHI, Tsukasa)

物質・材料研究機構・超伝導線材ユニット
マグネット開発グループ・リーダー

研究者番号：00354316

(H25.1.25 死亡のため、松本博士へ交代)

松本 真治 (MATSUMOTO, Shinji)

物質・材料研究機構・超伝導線材ユニット
主幹研究員

研究者番号：70354313

(H25 から研究分担者として参画)

(3) 連携研究者

西尾 茂 (NISHIO, Shigeru)

神戸大学・大学院海事科学研究科・教授

研究者番号：30208136

蔵岡 孝治 (KURAOKA, Koji)

神戸大学・大学院海事科学研究科・教授

研究者番号：80356930

小田原 悟 (ODAHARA, Satoru)

鹿児島工業高等専門学校・機械工学科・准教授

研究者番号：40390538