

平成 30 年 6 月 22 日現在

機関番号：12614

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05971

研究課題名(和文) 波形制御パルス磁場による高温超伝導バルク磁石の捕捉磁場特性

研究課題名(英文) Trapped magnetic field characteristics of high temperature superconducting bulk magnet by waveform control pulse magnetic field

研究代表者

井田 徹哉 (Ida, Tetsuya)

東京海洋大学・学術研究院・准教授

研究者番号：80344026

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：我々は単一パルス着磁による高温超伝導(HTS)同期モータ内のHTSバルクへの強磁場捕捉に関して研究した。HTS同期モータの内部構造に即した鉄芯無しの渦巻型分割銅コイルを用いて波形制御パルス着磁(WCPM)法によりGdBCOバルクを着磁したところ、磁場中冷却によって得た最大捕捉磁束密度近傍でフラックスジャンプが引き起こされ、捕捉磁束密度が大幅に増加することを確認した。最大捕捉磁束密度近傍を目標として磁場フィードバックWCPMを試みたところ、HTSバルクは従来通りのPFMでは実現不可能な着磁エネルギーの印加を受け入れ、最大捕捉磁束密度に匹敵する強磁場の捕捉に成功し、PFM法の実用化に目処を立てた。

研究成果の概要(英文)：We have studied strong magnetic field trapping to HTS bulk in high temperature superconducting (HTS) synchronous motor with single pulse magnetization. When the GdBCO bulk is magnetized by waveform control pulse magnetization (WCPM) method using a spiral type divided copper coil without an iron core which resembles the internal structure of the HTS synchronous motor, in the vicinity of the maximum trapped magnetic flux density obtained by cooling in the magnetic field, the bulk accompanied the magnetic flux jump and greatly increased the trapped magnetic flux density. We attempted magnetic field feedback WCPM with the target near the maximum trapped magnetic flux density, HTS bulk accepted application of magnetization energy which can not be realized by conventional PFM. As a result, the HTS bulk succeeded in capturing a strong magnetic field comparable to the maximum trapped magnetic flux density, and made a prospect of practical application of the PFM method.

研究分野：電子工学，超伝導工学，電子物性工学，電気機器工学，海洋工学

キーワード：高温超伝導 パルス着磁 発電機 モータ 電気機器 電気エネルギー変換

1. 研究開始当初の背景

今世紀に入り、全地球規模で低炭素・省エネルギー社会の実現に向けた気運が高まっている。一方、資源に乏しく、海に囲まれた我が国では原油や天然ガスなどのエネルギー資源を船舶によって輸入しなければならず、既存設備の発電に関わるコストの抑制のほか、近年は風力発電や海潮流発電などの再生可能エネルギーの重要性にも注目が集まっている。そうした期待に応える手段として、申請者は従来の電磁回転機と比べて小型化・高出力化と高い効率を実現可能な高温超伝導磁石を用いた回転機の実用化に注目している¹。

大気流と比べて約 800 倍の密度を持つ海水流によって、海潮流発電は風力発電と同程度のエネルギーを発生する。我が国において潮流や海流は風力と比べて容易に変動を予測することができる。それゆえ、海潮流発電は実現性と経済性を兼ね備えた再生可能エネルギー発電技術として近年注目されている。海に囲まれた我が国、特に申請者の研究拠点である広島県大崎上島をはじめとする島嶼部沿岸域の自然資源を有効活用し、過疎地域における産業・漁業等を始めとする様々な分野への新たなエネルギー源として海潮流発電は適している。風力発電は言うまでも無く、海潮流発電では流体損を低減するために、発電機本体が小型であることが望ましい。そして、CO₂ 排出量低減と船体の運動性能の向上に加えて貨物運搬のために推進機関の容積の減少が期待される船用電動機でもモータの小型化が期待されている。

超伝導材料は従来の金属あるいは磁性材料と比べて非常に大きな電磁エネルギーを取り扱うことができ、産業用電磁機器の大幅な小型化、高出力化、効率化を実現可能である。低温超伝導材料は既 MRI など医療用途で実用化されており、強磁場が必要な材料開発や運輸分野の研究用途にも使用されている。ただし -260 °C 以下の極低温が必要なために運用コストが高く、経済性が要求される産業機器へ利用することは難しい。一方、-180 °C 以下であれば利用可能な高温超伝導材料は、発見以来 25 年が経過してようやく実用的な特性を有する材料を量産できるようになった。そこで申請者は、最強の Nd-Fe-B 系永久磁石の 10 倍を超える強磁場を達成可能な高温超伝導材料の発する大きな電磁エネルギーが大電力の取り扱いにおいて低炭素・省エネルギー社会におけるブレークスルーになり得ると考え、東京海洋大学と共同で、船用電気推進器に利用可能な高温超伝導同期モータと、高温超伝導潮流発電装置の開発を進めている。

現在実用化されている最も強力な Nd-Fe-B 系永久磁石は最大で 1.5T を発生し、これが永久磁石形回転機の性能限界を決定している。電磁石を用いれば 1.5T を上回る磁場を発生可能であるが、大電流による発熱

を抑えるために電磁石以上に巨大な冷却機構が必要となり、回転機全体の体積及び重量との兼ね合いから回転機の性能向上は実現し難い。高温超伝導回転機であれば、小型化によって流体損失を抑制しながら高い効率と出力を兼ね備えた産業用電磁回転機を実現できる。

2. 研究の目的

高温超伝導バルク磁石を利用したモータや発電機は、永久磁石を用いる既存の製品と比べて飛躍的な出力増加と高効率化、小型化を実現可能であるため、産業用電磁機器の低炭素・省エネルギー化に大きく寄与する。高温超伝導バルク磁石が示す高い磁束密度は、数時間を掛けて大型の超伝導電磁石から発した静磁場によって実験室で着磁をすることで得られる。一方、産業用電磁機器内で高温超伝導バルク磁石を利用するために小型コイルから発したパルス磁場で着磁を行うと、磁場特性が大幅に劣化して磁束密度と総磁束の低下、磁場分布の乱れを生じ、静磁場着磁によって引き出せる超伝導材料本来の性能を発揮できない。その原因は、パルス磁場の急峻な立ち上がりによって内部へ急激に侵入する磁束が激しく運動するために高温超伝導バルク磁石が発熱して捕捉磁場特性の劣化を引き起こすことにあると考えられる。その対策として、複数回のパルス着磁を組み合わせる技術が研究されてきている^{2,3}。一方、高温超伝導バルク磁石による磁束の捕捉を妨げないように着磁磁場の発生を制御することができるならば、高温超伝導バルク磁石自体の性能や実用のために必要な形状を損なうこと無く磁場特性の劣化の抑制が可能となる⁴。申請者はこの点に着目し、その材料に最適となるよう半導体チョップを用いて能動的に波形を整形したパルス磁場による着磁法を考案した（特許 479380 号「超伝導体への最適化された着磁方法」）。本研究の目的は高温超伝導回転機を実用化するために、高温超伝導バルク磁石が本来有している大きな総磁束と良好な捕捉磁場分布を、能動的に波形を整形したパルス磁場によって材質・形状を問わず十分に引き出せる実用的なパルス着磁技術を実用化することである。

3. 研究の方法

従来のパルス着磁では、コンデンサに蓄えた電荷を一気に着磁コイルへ流すことから LCR 過渡応答に従う鋭いピークを持つ磁場波形を得て、高温超伝導バルク磁石へ短時間に過大な磁場を印加した後、その磁場の多くが捕捉されずに外部へ消失する。申請者は高温超伝導バルク磁石へ侵入したパルス磁場の確実な捕捉のために印加磁場波形を整形することを試み、波形制御パルス着磁によって捕捉磁場特性を大幅に向上させた（科研費基盤研究(B) 課題番号 23360394)。その実験の過

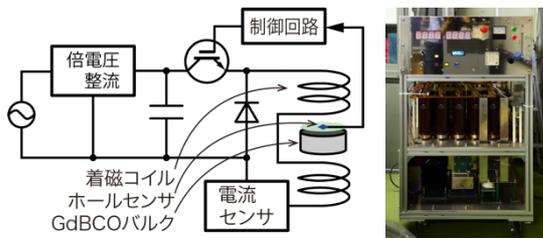


図1：波形制御パルス着磁装置

程で、申請者は静磁場着磁によって得られたバルク磁石の最大捕捉磁束密度程度を境として磁束侵入の状態と捕捉磁場特性が大きく変化することを発見した。そこで、バルク磁石への侵入磁束の状態を計測した結果を逐次用いてパルス波形を能動制御し、その材料の磁場捕捉に適した磁束侵入状態を作り出して、捕捉磁場分布特性の向上を実現するという着想に至った^{5,6}。

一般的にパルス着磁に必要な高電圧、大電流は受動的な LCR 過渡応答を利用して発生させる。その際、パルス波形の立ち上がりが急峻なため、高温超伝導バルク磁石へ印加される磁場は急増し、超伝導材料の完全反磁性（マイスナー効果）を破って次々にバルク磁石の内部へと侵入した多くの磁束が激しく運動することで発熱を生じ、温度上昇に繋がって高温超伝導バルク磁石の捕捉磁場特性を劣化させていると考えられている。一方、本研究では、能動的に波形を整形したパルス磁場による波形制御パルス着磁を用いて捕捉磁場特性の劣化を抑制し、高温超伝導バルク磁石の持つ捕捉磁場特性を産業用電磁機器であっても効率良く引き出せるパルス着磁技術の開発を行う。波形制御パルス着磁は申請者が考案した技術で、コンデンサから着磁コイルへ至る放電電流の断続によってパルス磁場の立ち上がり時間の制御を行い、高温超伝導バルク磁石の捕捉磁場特性を改善する。

波形制御パルス着磁を行うために、本研究では図1に示す着磁装置を使用した。この装置は申請者が取得した特許に基づき自ら設計試作した世界で唯一の機材であり、商用交流電力を1 kVに昇圧してコンデンサを充電し、放電スイッチを経由して着磁コイルへ最大25 kJの大電流放電を行う。この装置の特徴は、波形制御パルス着磁を行うために放電スイッチにIGBT（絶縁ゲートバイポーラトランジスタ）を採用し、出力電流をPWM（パルス幅変調）制御する際のデューティ比を変更することによって、パルス磁場の波形を任意に制御できることにある。そしてデューティ比を着磁前に設定しておくほか、パルス着磁の際に着磁コイルを流れる電流及びバルク磁石へ侵入する磁束密度のフィードバックによるPID制御で随時変更しながら決めることができる。この装置によって、高温超伝導バルク磁石に対して比較的再現性の高いパルス磁場の印加が可能となり、同一の着磁エネルギー毎にパルス波形条件を変えた実験

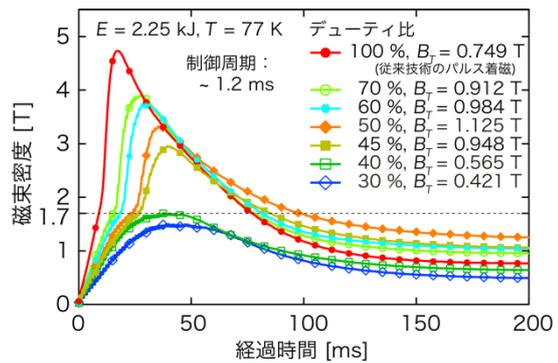


図2：デューティ比の異なる波形制御パルス着磁による侵入磁場の時間発展

を容易に行えるようになった。本研究ではこのパルス着磁装置を用いて、高温超伝導バルク磁石が磁場を帯びていない状態で1度のパルス着磁を行った際に捕捉した磁場について調べた。

4. 研究成果

本研究では新日鐵住金製 GdBCO バルク磁石 (QMG, $\phi 45\text{mm} \times t19\text{mm}$) を実験試料として、高温超伝導モータの内部構造を模倣し、2つの渦巻型銅コイルの間に5mm離してバルク磁石を固定した。このバルクは、77 Kで約3 Tを適用する磁場中冷却による着磁 (FC) によって1.7 Tを捕捉した。

このバルクを臨界温度以下に冷却し、同じ磁化エネルギーを用いて異なるデューティ比で発生させたパルス磁場によって着磁を行った。77 Kで2.25 kJの着磁エネルギーによる従来通りのパルス着磁において、このバルクは0.749 Tを捕捉した。これは静磁場着磁による捕捉磁束密度1.7 Tの44%にしかならず、複数回のパルス着磁を繰り返すことによって捕捉磁束密度の向上が可能となる。

図2に示すように、波形制御パルス着磁によってデューティ比を下げると、パルスの持続時間が長くなると共にパルス磁場概形の勾配 dB/dt が小さくなり、その代わりにパルスのピークが低くなったにも関わらず、捕捉磁束密度は向上した。逆にデューティ比を0%より大きくすると、高温超伝導バルクにおける捕捉磁束密度は増加したが、これはデューティ比の小さいほど単位時間当たりの電力供給が小さく印加磁束密度も小さくなるためであると考えられる。そして、デューティ比40%以下では最大捕捉磁束密度がとても低かった。しかし、デューティ比が40%を超えると、フラックスジャンプが観察され、45%のパルスピークはほぼ倍増した。近年の研究で、高温超伝導バルク磁石に対する着磁とフラックスジャンプとの関わりについての報告があり⁷⁻⁹、この結果はそれらと矛盾しない。デューティ比が40%から45%へ至る間でのこのような変化は、バルク中心での磁場変化曲線がピークに達する前に肩が現れることで明確に観測できる。そして、侵入磁束のピークが1.7 Tに達すると常にフラ

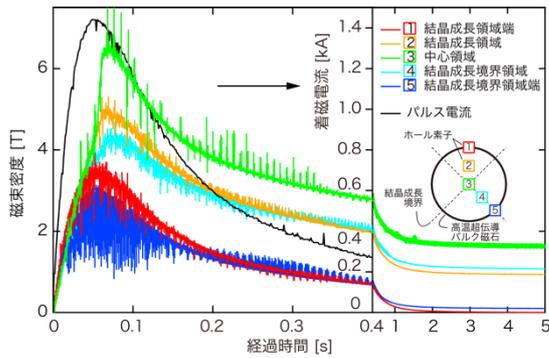


図3：磁場フィードバックによる波形制御パルス着磁実験結果

ックスジャンプを観測した。デューティ比が45%を超える実験では、最大捕捉磁束密度が従来のPFMで得られた磁束密度よりも増加した。特に、デューティ比50%において、最大捕捉磁束密度は1.125 Tと従来技術によるパルス着磁の1.5倍に達した。この傾向は、高い捕捉磁場を得るためにフラックスジャンプによる挙動に関する必要性を示唆し、同時に過剰なフラックスジャンプによる捕捉磁束密度の減少をも示唆している。

デューティ比の制御による波形制御パルス着磁は従来技術によるパルス着磁と比べて捕捉磁束密度を大きく改善した。しかしながら、これは必ずしも高温超伝導バルク磁石のための最適な磁化方法ではない。着磁過程においてバルクがフラックスジャンプを伴う磁気不安定性を示すため、最適な制御条件を一意に決定することは困難であった。そこで本研究ではパルス着磁中にバルク表面中心で測定した磁束密度をパルス着磁装置の制御回路へフィードバックすることにより、パルス波形制御のデューティ比をリアルタイムに決定するシステムを製作した。図1に示す実験で使用した波形制御パルス着磁装置は以前開発した機材に対して、設計変更と改良を経て前述の仕様・機能を獲得したものであり、このパルス着磁装置を実験に供したこと自体が装置開発として本研究における成果の一部となっている。本研究では特に高電圧大電流回路の改善によってパルス駆動時のサージ電圧を抑制しIGBTの安全・安定な制御を実現したこと、様々なセンサ入力情報によるフィードバック制御を行えるように制御回路とA/D変換回路の再設計・試作を行った。

本研究では、フラックスジャンプを生じる1.7 T近傍の磁束密度を目標値としてパルス着磁中に1 ms毎のPID制御による波形整形を行った。その方法として、バルク表面中心の磁束密度が目標値を超えた場合に、デューティ比を小さく再設定して印加パルス磁場の抑制を試みた。着磁エネルギーに関しては、強磁場の捕捉を期待しバルクに対して14.86 kJという過剰なエネルギーを印加した。

図2に示す実験結果から、最初に1.7 Tを目標値としてパルス着磁を試みた。このと

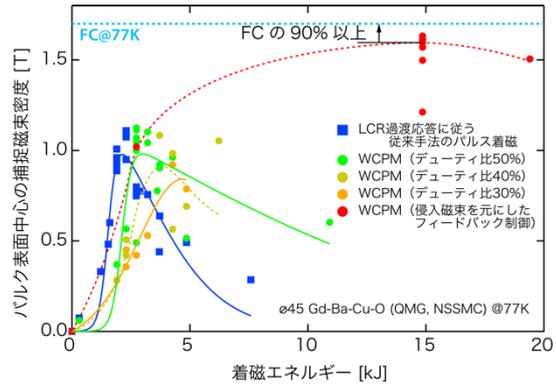


図4：バルクが受け入れられる単一のパルス着磁

エネルギーから得られる最大捕捉磁束密度、バルクを貫く磁束密度が1.7 Tを超えるとパルス着磁装置が印加磁場を減少させたため、バルク内のフラックスジャンプは抑制された。そこで目標値を1.7 Tから0.05 Tずつ増加させてパルス着磁実験を続けたところ、目標値1.85 Tにおいて最大捕捉磁束密度を得た。このことは、強磁場捕捉を達成するためにバルクがフラックスジャンプを必要とすることを示している。図3に示す実験結果では、最終的にバルク中心において1.63 Tもの最大捕捉磁束密度を達成した。これは静磁場着磁による捕捉磁束密度1.7 Tの96%に達し、たった1回だけのパルス着磁によって静磁場着磁並みの強磁場捕捉に成功した。また、このときにバルク表面の各部で測定された磁束密度は円錐形状の磁場分布の際の振る舞いに従っており、無理なく強磁場を捕捉できていることが示された。この波形制御パルス着磁は適切に配置されたホール素子を使用して、バルク材料、結晶品質および形状にかかわらず適用することができることから、今後の高温超伝導材料の実用化に不可欠な技術となり得る。

高温超伝導バルク磁石が捕捉した磁束密度表面中心で測定し、着磁エネルギーごとにプロットしたグラフを図4に示す。波形制御パルス着磁(図中WCPM、丸形のマーカー)によるデータは全て一度のパルス着磁によってバルクが円錐形状に磁場を捕捉しており、それぞれの着磁実験における最大捕捉磁束密度になっている。矩形のマーカーは従来技術によるパルス着磁実験の結果を示しており、概ね2.5 kJ程度でもっとも高い最大捕捉磁束密度が得られることを示しており、それ以上に大きな着磁エネルギーをバルクへ与えても、そのエネルギーを磁場の形で保持することが叶わず、捕捉磁束密度が減少する様子が示されている。一方、デューティ比一定の波形制御によってバルクの受け入れられる着磁エネルギーが増加し、かつそのエネルギー幅が広がっている様子が示された。磁場フィードバック波形制御パルス着磁では、従来技術によるパルス着磁の6倍以上、デューティ比一定波形制御パルス着磁の3~5倍もの大きな着磁エネルギーを高温超伝導バ

ル磁石へ受け入れさせ、さらに効果的に磁場として捕捉させて、単一パルス磁場によって静磁場並みの強磁場捕捉を達成していることが示された。

本研究成果は、磁場フィードバック波形制御パルス着磁が、フラックスジャンプを利用しながらも、高温超伝導バルク磁石へ印加するパルス磁化の根本的な問題であった磁場の動きによって引き起こされる局所的な発熱を大きく抑制することによって、強磁場捕捉を達成し得ることを明らかにした。また、そのようなパルス着磁を広いエネルギー範囲において実現できることを示した。このことは、近い将来に波形制御パルス着磁技術が、現在開発中の超伝導バルク同期モータ、超伝導バルク発電機などの電力応用に有用な着磁技術となり得ることを示唆している。

<引用文献>

- ① H. Matsuzaki, Y. Kimura, I. Ohtani, M. Izumi, T. Ida, Y. Akita, H. Sugimoto, M. Miki and M. Kitano, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 15 (2005) 2222.
- ② H. Ikuta, Y. Yanagi, M. Yoshikawa, Y. Itoh, T. Oka and U. Mizutani, *Physica C* 357-360 (2001) 837.
- ③ H. Fujishiro, M. Kaneyama, T. Tateiwa and T. Oka, *J. J. Appl. Phys.* 44 (2005) L1221.
- ④ T. Ida, H. Matsuzaki, Y. Akita, M. Izumi, H. Sugimoto, Y. Hondou, Y. Kimura, N. Sakai, S. Nariki, I. Hirabayashi, M. Miki and M. Kitano, *Physica C* 412-414 (2004) 638.
- ⑤ T. Ida, H. Matsuzaki, E. Morita, H. Sakashita, T. Harada, H. Ogata, Y. Kimura, M. Miki, M. Kitano and M. Izumi, *J. Phys. : Conf. Series.* 43 (2006) 539.
- ⑥ T. Ida, M. Watasaki, Y. Kimura, M. Miki and M. Izumi, *J. Phys. : Conf. Series.* 234 (2010) 032023.
- ⑦ M. D. Ainslie, D. Zhou, H. Fujishiro, K. Takahashi, Y.-H. Shi and J. H. Durrell, *Supercond. Sci. Technol.* 29 (2016) 124004.
- ⑧ R. Weinstein, D. Parks, R.-P. Sawh, K. Carpenter and K. Davey, *J. Appl. Phys.* 119 (2016) 133906.
- ⑨ D. Zhou, M. D. Ainslie, Y. Shi, A. R. Dennis, K. Huang, J. R. Hull, D. A. Cardwell and J. H. Durrell, *Appl. Phys. Lett.* 110 (2017) 062601.

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4件)

- ① Tetsuya Ida, Zhi Li, Motohiro Miki, Masahiro Watasaki and Mitsuru Izumi,

Waveform Control Pulse Magnetization for HTS Bulk with Flux Jump, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 28, Issue 4 (2018) Article#: 6801905 (5pp), 査読有 DOI: 10.1109/TASC.2018.2816099

- ② Tetsuya Ida, Takumi Nakagawa and Mitsuru Izumi, Two-dimensional measurement technique for dynamic magnetic flux density distribution on the surface of HTS bulk, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 26, Number 3 (2016) Article#: 9001404 (4pp), 査読有 DOI: 10.1109/TASC.2016.2525983
- ③ Tetsuya Ida, Zhi Li, Difan Zhou, Motohiro Miki, Yufeng Zhang and Mitsuru Izumi, Materials preparation and magnetization of Gd-Ba-Cu-O bulk high-temperature superconductors, *Supercond. Sci. Technol.* 29, Number 5 (2016) 054005 (8pp), 査読有 DOI: 10.1088/0953-2048/29/5/054005
- ④ Tetsuya Ida, Koji Shigeuchi, Sayo Okuda, Masahiro Watasaki and Mitsuru Izumi, Waveform control pulse magnetization for HTS bulk magnet, *J. Phys. : Conf. Ser.* 695 (2016) 012009 (6pp), 査読有 DOI:10.1088/1742-6596/695/1/012009

[学会発表] (計5件)

- ① Waveform Control Pulse Magnetization for HTS Bulk with Flux Jump, Tetsuya Ida, Zhi Li, Motohiro Miki, Masahiro Watasaki and Mitsuru Izumi, 13th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS2017), September 18-21, 2017, Genve, Switzerland
- ② バルク高温超電導体の磁石応用の展開, 井田徹哉, 和泉 充, 第15回高温超伝導バルク材「夏の学校」in 岩手 -ピンニング制御と応用技術-, 2016年8月26日
- ③ Waveform control pulse magnetization for HTS bulk magnet, Tetsuya Ida, Koji Shigeuchi, Sayo Okuda and Mitsuru Izumi, The 9th International Workshop on Processing and Applications of Superconducting (RE)BCO Large Grain Materials (PASREG 2015), September 2-4, 2015, Liège, Belgium

- ④ Two-dimensional measurement of dynamic magnetic flux density distribution on the surface of HTS bulk, Tetsuya Ida, Takumi Nakagawa and Mitsuru Izumi, 12th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS2015), September 6-10, 2015, Lyon, France
- ⑤ 磁束密度分布の時間変化を計測する二次元磁場センサの開発, 中川拓弥, 番野木晨, 井田徹哉, 平成 26 年度電気学会中国支部第 7 回高専研究発表会, 2015 年 3 月 6 日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

井田 徹哉 (IDA, Tetsuya)
東京海洋大学・学術研究院・准教授
研究者番号：80344026

(2) 連携研究者

和泉 充 (IZUMI, Mitsuru)
東京海洋大学・学術研究院・教授
研究者番号：50159802

三木 基寛 (MIKI, Motohiro)
東京海洋大学・学術研究院・博士研究員
研究者番号：60559475