

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 26 日現在

機関番号：13102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25630418

研究課題名(和文) 超大出力パルスパワー実験装置による核融合研究のための高密度状態測定への挑戦

研究課題名(英文) Challenge for Dense Material State Measurement by using Extreme Intense Pulsed Power Experimental Device for Nuclear Fusion Study

研究代表者

菊池 崇志 (Kikuchi, Takashi)

長岡技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：30375521

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：固体からプラズマへ相変化していく段階で、物質が通過することになる特異な領域では、従来の固体物理の理論あるいはプラズマ科学の常識が通用せず、物性が良くわかっていない。慣性核融合方式では、固体の燃料ペレットを爆縮し、高温・高密度プラズマを形成して核融合反応を起こす。このため、固体からプラズマへ通過する領域・過程の理解が重要である。本研究では、超大出力パルスパワー実験装置を用いて慣性核融合爆縮過程を模擬した高密度状態の物質を生成および計測する実験系を構築し、試料の特異な高密度状態での様々な物性値(電気伝導率、熱伝導率、比熱、状態方程式など)を測定可能な基盤および計測法を構築・検討した。

研究成果の概要(英文)：Conventional theories of solid-state physics and plasma science are not suitable to explain a state during the phase transition process. Although the state is common phenomena between a solid and plasma, the physical properties are unclear. In an inertial confinement fusion scenario, the fusion output is given by nuclear fusion reactions in dense and high temperature plasma produced by an implosion process of a fuel pellet. Therefore understanding of the properties and the process is important for nuclear fusion studies. In this study, the experimental setup for generation and measurement of dense state during the similar time scale of implosion process was constructed with an extreme intense pulsed power generator. The measurement method of the physical properties, such as electrical conductivity, thermal conductivity, specific heat, equation-of-state, and so on, in the unique state of dense material was considered and established by using the constructed setup.

研究分野：重イオン慣性核融合

キーワード：核融合 慣性核融合 Warm Dense Matter パルスパワー 高密度プラズマ 高エネルギー密度科学 非常定熱伝導 放射輸送

1. 研究開始当初の背景

固体からプラズマへ相変化していく段階で、物質が通過することになる特異な物理領域では、従来の固体物理の理論あるいはプラズマ科学の常識が通用せず、物性が良くわかっていない[1,2]。この領域は固体からプラズマ発生過程で必ず通過するにもかかわらず、非常に高い圧力条件下であるため、人工的に良く定義された状態で維持し調査することは至難の業であり、これまでは避けられてきた特異点である。物性科学の観点からは、高圧科学の一種であり、部分電離や縮退を考慮した特殊な状況、金属・絶縁体の遷移、導電率や熱などの輸送特性が未解明で、学術的に興味深い問題である(図1参照)。

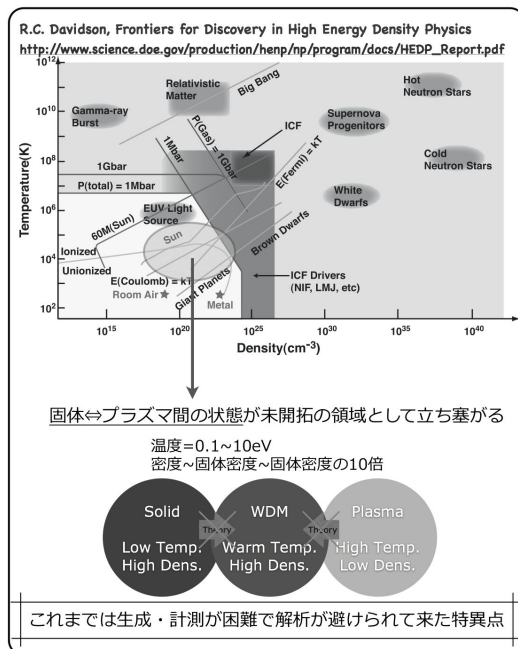


図1：本研究で扱う高密度状態の領域。固体⇔プラズマの領域は Warm Dense Matter とも呼ばれ、特異な状態点として学術的に注目されている [1,2]。

慣性核融合方式では、固体の燃料ペレットへ高強度レーザーやイオンビームを照射し、高温・高密度プラズマを形成して核融合反応を起こす。このため、固体からプラズマへ通過する領域・過程の理解が重要である。爆縮過程の挙動・現象解明や標的設計のために、数値シミュレーションを行うことは必須である。しかし、数値シミュレーションを行うためには、固体からプラズマへ変化する領域の状態方程式や熱力学特性、輸送特性などの精度の良いデータ・モデルが必要となる。米国の大型レーザー装置(NIF)を用いた点火実証実験が進展し、点火燃焼が見通せる状況になって来ており、本応募課題研究は慣性核融合実現のために緊急かつ欠かせない基盤研究である。

[1] R.C. Davidson (Ed), "Frontiers in High Energy Density Physics-The X-Games of Contemporary Science" (National

Academies Press, Washington, DC, 2003).  
[2] R.P. Drake, "High-Energy-Density-Physics" (Springer, 2006).

2. 研究の目的

長岡技術科学大学の知的・設備的資産を有効活用し、実験と数値シミュレーションの両輪で、高密度状態物質の特異点を解析し、慣性核融合研究へ適用する。

テーブルトップのパルスパワー放電装置で実験を行ってきている(図3参照)[3]。この実験装置では放電周期が長い(10μs程度)、慣性核融合爆縮過程(数10ns程度)を再現するために、大強度パルスパワー発生装置 ETIGO-II [4] (50ns程度の放電パルス)を主実験装置として利用する(図4参照)。

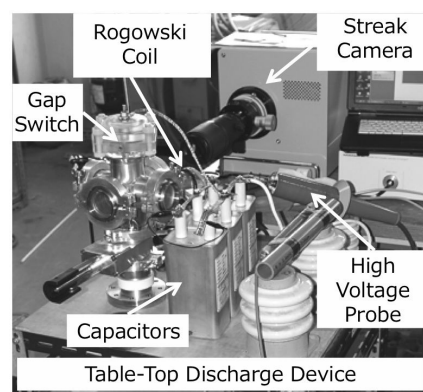


図2：小型パルスパワー放電装置による高密度プラズマ生成実験[3]

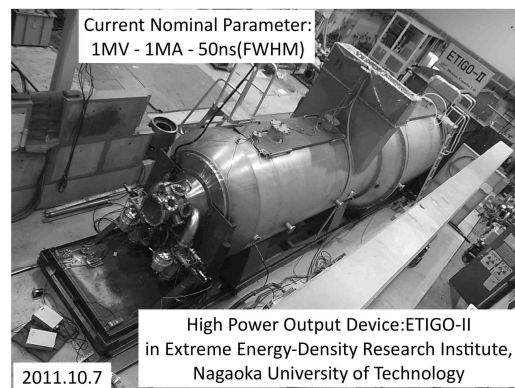


図3：大強度パルスパワー発生装置 "ETIGO-II" [4] (長岡技術科学大学・極限エネルギー密度工学研究センター)全長 20m、現在の定格出力は 1MV-590kA-50ns。

ETIGO-II の出力は TW を超え国内最大級であるため、本応募課題研究を遂行するために必要な入力エネルギーを極短時間に供給できる。新たに真空容器や電極、計測機器を整備し、他の研究機関ではできないパラメータ領域で実験データを揃える。

既知の状態方程式や熱力学特性、輻射輸送特性を組み込んだ数値シミュレーションを

行う。得られた実験データと計算結果を比較し、従来モデル・データとの違いを検証し、状態方程式や輸送特性の新たな計算モデルを構築する[5]。

慣性核融合爆縮過程への適用のため、輻射熱流体計算コード PINOCO [6]を用いた共同研究で、状態方程式モデルが異なるだけで爆縮過程の計算結果に大きな違いができることを確認している[7]。本研究で得られる物性データ・新計算モデルを PINOCO などの計算コードへ適用し、慣性核融合実現へ向けた数値シミュレーションの高度化を行う。

- [3] Y. Amano, Y. Miki, T. Takahashi, T. Sasaki, T. Kikuchi, N. Harada, Rev. Sci. Instrum. 83 (2012) 085107.  
 [4] 例えば, W. Jiang, et al., Jpn. J. Appl. Phys. 32 (1993) L752.  
 [5] T. Kikuchi, et al., NIFS-PROC 94 (2013) 80.  
 [6] H. Nagatomo, et al., Phys. Plasmas 14 (2007) 056303.  
 [7] Y. Komatsu, T. Sasaki, T. Kikuchi, N. Harada, H. Nagatomo, EPJ Web of Conferences 59, 04010-pp.1-4 (2013)

### 3. 研究の方法

固体からプラズマへ変化する段階の特異な領域～低温・高密度プラズマや Warm Dense Matter (WDM) と呼ばれる状態～の物性を、実験と計算科学の両輪によって検討する。状態方程式や熱力学特性、輻射輸送特性を明らかにし、物性データ・計算モデルを再構築する。その結果を慣性核融合の爆縮計算へ適用し、標的設計へ資する。

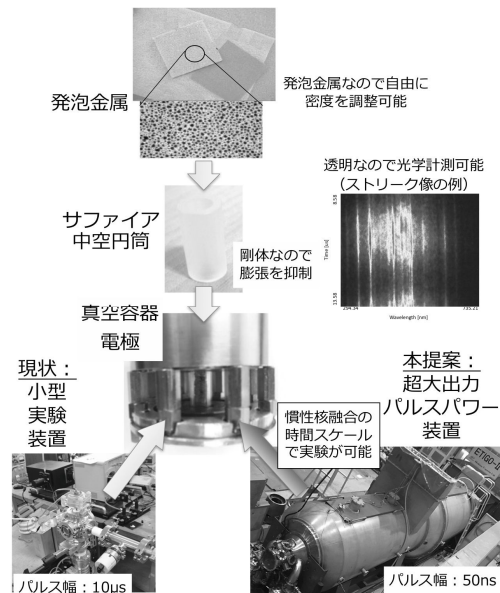


図4：実験方法。发泡金属を試料として用いることで任意の密度の実験が可能。透明な剛体のキャピラリーでプラズマ膨張を抑え、光学計測も可能。慣性核融合爆縮（数 10ns）での現象を再現するために、大強度パルスパワー発生装置 ETIGO-II を利用する。

パルスパワー放電で容積の大きな高密度状態を作り出すためには大出力の装置が必要であるため、国内最大の超大出力パルスパワー装置を利用する。実験では、中空円筒の剛体でプラズマの膨張を制限し、密度を固定したデータを取得するため、従来は難しかった精度の良い計測ができる。数値解析においても、流体運動を無視でき円筒対称で境界が明確な条件は、計算精度や現象理解に大きな利点となる。このため、不明確なパラメータを極力排除した精度良い実験および数値解析の補完的検証が可能となる。

### 4. 研究成果

専用の真空容器を設計し、本予算により購入した（図5参照）。また、パルスパワー放電による WDM 生成のため、電子ビームダイオードを応用した、試料への投入エネルギー制御方法を新たに提案した[8]。購入した真空容器と提案した電子ビームダイオードによる投入電力制御を組み合わせ、実験系を構築した（図6参照）。



図5：本予算で製作した専用の真空容器と ETIGO-II への取り付けの様子。

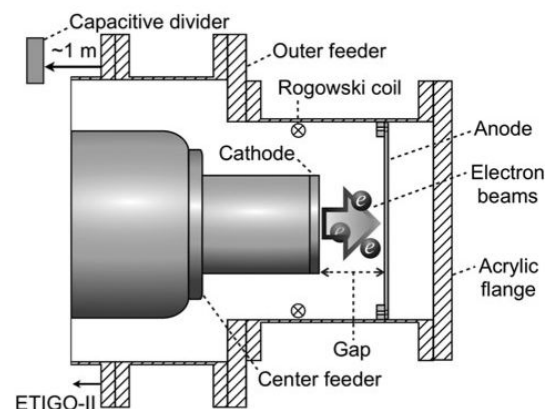


図6：提案した電子ビームダイオードによる投入エネルギー制御の実験系[8]。

試料への投入エネルギー評価のために、負荷部での電圧・電流波形測定を試みた。図7に提案した電子ビームダイオードによる投入エネルギー制御の実験結果例を示す。

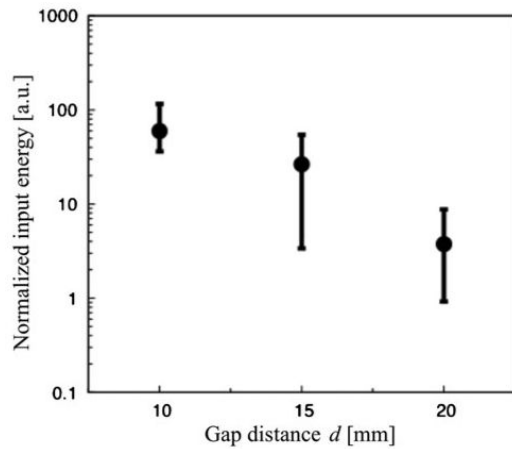


図7：提案した電子ビームダイオードによる投入エネルギー制御の例[8]

実験と比較した数値解析を行うため、非定常熱伝導と放射輸送を考慮した計算コードを開発した。図2に示した実験装置で行ったパルスパワー放電による通電加熱の実験結果と良く一致しているため[9]（図8参照）、本研究課題にも適用可能であると考えられ、光学計測系へ要求される時間・波長分解能を検討した[10]（図9参照）。

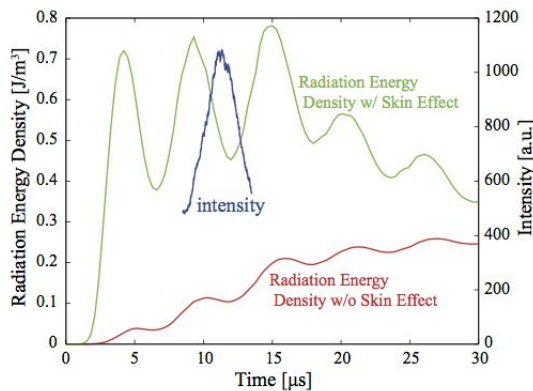


図8：開発した計算コードによる放射エネルギー密度の計算結果（緑線）と実験結果（青線）の比較[9]

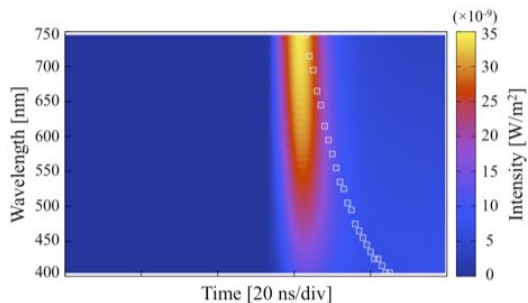


図9：開発した計算コードを用いて求めた波長に対する放射エネルギー強度の時間履歴[10]

提案した投入エネルギー制御法を高度化するため、電極材料の材質および表面粗さに

ついて実験的に検討し、本研究用途としてはロバストな性能を発揮できることがわかった。本予算により購入した真空容器と提案した電子ビームダイオードによる投入エネルギー制御を組み合わせ、試料を想定した模擬負荷へ極短時間にエネルギー投入を行い、WDM生成のための実験系を構築した。パルス高電圧が印加される環境のため、正確な計測のためには十分な電気絶縁と高周波への対策が必須である。試料への投入エネルギー評価のために、上記の対策を踏まえた環境下での電圧・電流波形計測系を構築した（図10参照）。

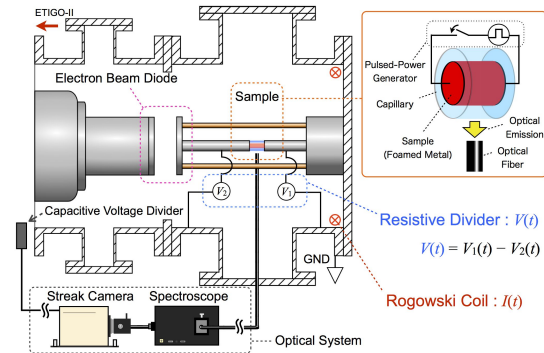


図10：提案するWDM生成・計測実験系。本予算で購入した真空容器をETIGO-IIへ設置し、電子ビームダイオードによる投入エネルギー制御によって、試料へ入力するエネルギーを調整する。電圧・電流波形および光学計測からWDMの物性を測定する。

上記のWDM生成・計測実験系の構築により、試料の特異な高密度状態での様々な物性値（電気伝導率、熱伝導率[11]、比熱、状態方程式）を測定可能であり、得られた物性値を元に数値シミュレーションへ活かすことができる。

以上より、本研究によって、超大出力パルスパワー実験装置による慣性核融合爆縮過程での高密度状態測定について、状態方程式を測る基盤を構築できた。また、電気伝導率や熱伝導率の計測法を構築・検討できた。

本研究期間中に、ETIGO-IIが設置されている実験室（放射線管理区域）の改修・増築工事が行われたため、提案した実験系でのWDM生成および計測実験は本研究期間中に実施できなかった。現在は、実験室の工事（放射線管理区域の法的な申請変更の完了も含む）が終了し、改めて実験が可能な状況となっている。このため、本研究課題が目指す慣性核融合爆縮過程でのWDMの生成とその物性の計測を目指して引き続き研究を実施して行く。

[8] R. Hayashi, et al., Laser and Particle Beams 33 (2015) 163.

[9] T. Kikuchi, et al., Transactions on GIGAKU 2(1) (2014) 02010/1-10.

[10] R. Hayashi, et al., Plasma Conference 2014 (2014) 18PB-026.

[11] T. Takahashi, et al., "Evaluation Method for Thermal Conductivity in Warm Dense Matter by using Ruby Fluorescence Probe" accepted by Journal of Physics: Conference Series

#### 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8件)

Ryota Hayashi, Tomoaki Ito, Fumihiro Tamura, Takahiro Kudo, Naoto Takakura, Kenji Kashine, Kazumasa Takahashi, Toru Sasaki, Takashi Kikuchi, Nob. Harada, Weihua Jiang, Akira Tokuchi, "Impedance control using electron beam diode in intense pulsed-power generator", Laser and Particle Beams, volume 33, issue 02, pp.163-167, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1017/S0263034615000051>, 査読有

T. Kikuchi, T. Sasaki, Y. Miki, F. Tachinami, H. Saito, R. Hayashi, N. Anzai, T. Takahashi, T. Aso, K. Takahashi, Nob. Harada, W. Jiang, K. Kashine, A. Tokuchi, "Study on Generation and Measurement Methods for Analysis on Solid-Plasma Transition Process", Transactions on GIGAKU 2(1) (2014) 02010/I-10, [http://www.nagaokaut.ac.jp/e/gigaku/pub/TOG\\_vol2-1.pdf](http://www.nagaokaut.ac.jp/e/gigaku/pub/TOG_vol2-1.pdf), 査読有

K. Kashine, T. Kikuchi, T. Sasaki, R. Hayashi, F. Tamura, A. Watabe, T. Kudo, T. Aso, K. Takahashi, Nob. Harada, W. Jiang, A. Tokuchi, "Recent Progress in the Intense Pulsed Power Generator "ETIGO-II", Transactions on GIGAKU 2(1) (2014) 02015/I-6, [http://www.nagaokaut.ac.jp/e/gigaku/pub/TOG\\_vol2-1.pdf](http://www.nagaokaut.ac.jp/e/gigaku/pub/TOG_vol2-1.pdf), 査読有

Y. Amano, Y. Miki, T. Takahashi, T. Sasaki, T. Kikuchi, Nob. Harada, Evaluation of electrical conductivity for copper foam/plasma using isochoric pulsed-power discharge, EPJ Web of Conferences 59, 16005-pp.1-5 (2013), DOI: <http://dx.doi.org/10.1051/epjconf/20135916005>, 査読有

Y. Komatsu, T. Sasaki, T. Kikuchi, Nob. Harada, H. Nagatomo, Changes of implosion dynamics derived by difference of equation of state, EPJ Web

of Conferences 59, 04010-pp.1-4 (2013), DOI: <http://dx.doi.org/10.1051/epjconf/20135904010>, 査読有

Toru Sasaki, Yasutoshi Miki, Fumitaka Tachinami, Hiroataka Saito, Takuya Takahashi, Nobuyuki Anzai, Takashi Kikuchi, Tsukasa Aso, Nob. Harada, Warm dense matter study and pulsed-power developments for X-pinch equipment in Nagaoka University of Technology, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 733, 1 January 2014, Pages 28-31, doi:10.1016/j.nima.2013.05.099, 査読有

Yasutoshi Miki, Hiroataka Saito, Takuya Takahashi, Toru Sasaki, Takashi Kikuchi, Nob. Harada, Evaluation of transport properties of warm dense matter using isochoric pulsed-power discharges, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 733, 1 January 2014, Pages 8-11, doi:10.1016/j.nima.2013.05.103, 査読有

Takuya Takahashi, Yoshimasa Kawaguchi, Takumi Ohuchi, Kazumasa Takahashi, Toru Sasaki, Takashi Kikuchi, Tsukasa Aso, and Nob. Harada, "Evaluation Method for Thermal Conductivity in Warm Dense Matter by using Ruby Fluorescence Probe" accepted by Journal of Physics: Conference Series, 査読有

[学会発表](計39件)

工藤 隆弘, 他: 「大強度パルスパワー装置を用いた飛翔体加速のための電子ビーム照射エネルギーの評価」, 平成26年度核融合科学研究所共同研究「パルスパワーとその周辺技術の展開」, 2015.1.8, 核融合科学研究所(土岐)

林 亮太, 他: 「大強度パルスパワー発生装置を用いた Warm Dense Matter 生成に向けた試料温度評価のための光学計測系の検討」, PLASMA CONFERENCE 2014, 朱鷺メッセ(新潟) 2014.11.18-21

工藤隆広, 他: 「大強度パルスパワー装置を用いた飛翔体加速のための電子ビーム付与エネルギー計測法の検討」, PLASMA CONFERENCE 2014, 朱鷺メッセ(新潟) 2014.11.18-21

佐々木徹, 他: 「高速点火核融合のための Warm Dense Matter 物性の検討」 PLASMA CONFERENCE 2014, 朱鷺メッセ (新潟) 2014.11.18-21

Arata Watabe, et al., "Skin Effect Suppression in Sample Structure for Warm Dense Matter Generated by Fast Pulsed-power Discharge with Isochoric Heating", EAPPC2014 - 5TH EURO-ASIAN PULSED POWER CONFERENCE, 2014.9.8-12, 熊本大学 (熊本)

Takahiro Kudo, et al., "Electron Emission Characteristics of Electrode toward Warm Dense Diamond-Like Carbon Generation by Using Flyer Impact with Intense Pulse Power Generator", EAPPC2014 - 5TH EURO-ASIAN PULSED POWER CONFERENCE, 2014.9.8-12, 熊本大学 (熊本)

菊池 崇志, 他: 「大強度パルスパワー発生装置を用いた慣性核融合材料の物性評価手法の検討」, 電気学会 平成 26 年基礎・材料・共通部門大会, 信州大学 (長野) 2014.8.21-22

佐々木 徹, 他: 「細線爆発衝撃加熱による Warm Dense DLC の形成法とその評価法の検討」, 電気学会 平成 26 年基礎・材料・共通部門大会, 信州大学 (長野) 2014.8.21-22

T. Sasaki, et al., "Warm Dense Matter Studies using Pulsed-power Discharge toward Inertial Confinement Fusion Researches", 20TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HEAVY-ION INERTIAL FUSION (HIF 2014), 蘭州 (中国) 2014.8.11-15

〔図書〕(計 1 件)

一般社団法人 電気学会 (共著), 一般財団法人 電気学会, 電気学会 125 年史, 2013 年, p.254 (菊池崇志)(総ページ数: 769 ページ)

〔その他〕

ホームページ等

<http://fusion.nagaokaut.ac.jp/committee/ResearchAdHocCommittee.html>

佐々木徹, 菊池崇志, 堀岡一彦, パルスパワー放電による高エネルギー密度プラズマ生成・計測の研究動向, 電気学会論文誌 A, 電気学会, 134 巻, 1 号, 30 頁 ~ 35 頁, 2014 年 01 月 (解説記事)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

菊池 崇志 (KIKUCHI, Takashi)  
長岡技術科学大学・工学研究科・准教授  
研究者番号: 3 0 3 7 5 5 2 1

(2) 研究分担者

樫根 健史 (KASHINE, Kenji)  
鹿児島工業高等専門学校・准教授  
研究者番号: 6 0 3 3 2 1 1 0

佐々木 徹 (SASAKI, Toru)  
長岡技術科学大学・工学研究科・准教授  
研究者番号: 9 0 5 1 4 0 1 8