

令和 2 年 6 月 15 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2015～2019

課題番号：15H05751

研究課題名(和文) Super-penetrationを用いた高速点火の加熱検証

研究課題名(英文) Proof of fast ignition scheme using Super-penetration of laser light

研究代表者

田中 和夫 (Tanaka, Kazuo)

大阪大学・先導的学際研究機構・特任教授(常勤)

研究者番号：70171741

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 145,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題はレーザー光が相対論効果と光圧力効果を伴い臨界密度を超える高密度プラズマの中を自己集束し、穿孔するスーパーペネトレーション(SP)現象を利用し高速点火レーザー核融合の実現を目指してきた。我々は大規模爆縮球対称プラズマにおけるSPの加熱の有効性の実証を行い、その実験条件において1%程度の加熱効率を実証し、更に高速電子の発散角を抑制する手法を見出すことで、実用に耐えうる10%以上の加熱効率の見通しを得ることに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

点火級の大規模プラズマに対し、プラズマチャンネルを安定的に形成し、核融合点火に必要なエネルギーを燃料コア近傍まで輸送可能なことを示した。更に効率的に加熱する手法を開発し実用レベルの加熱効率の実現可能である見通しがたち、本研究課題の有用性と核融合エネルギー実現の道筋を示すことができた。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research project is to apply the super-penetration (SP) phenomenon, in which a laser light penetrates in a high-density plasma exceeding the critical density points via relativistic and optical pressure effects, to fast-ignition laser fusion, and to demonstrate heating on a large-scale implosion fuel core. In this project, we, 1. developed several measurement techniques necessary for observation of SP mode in over critical density plasma, 2. successfully showed a stable formation of plasma channel capable of transporting heating energy to the fuel core, and 3. developed a large-scale parallel simulation code allowing real scale and real time calculation equivalent with the experiments. Based on these results, about 1% heating efficiency (energy coupling) in large-scale imploded spherical plasma was demonstrated. By applying methods to reduce divergence angles of fast electrons we can prospect heating efficiency of 10% or more that is necessary for practical use.

研究分野：プラズマ科学

キーワード：高速点火 レーザー自己集束 高速電子

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

レーザー核融合の高速点火方式<sup>1</sup>は、レーザー爆縮により高密度に圧縮された燃料コアを、慣性による静止時間内(~100ピコ秒)に、(1)コアを取り巻くプラズマコロナ中に導波路を確保し、コア静止時間より十分短いパルス幅を持つ超高強度(強度 $>10^{18}$ W/cm<sup>2</sup>)レーザーパルス(時間幅1-数10ピコ秒)を注入し、(2)そのレーザーエネルギーを燃料コア近傍にて高エネルギーの電子に変換し、(3)この電子により瞬時に高密度燃料コアを加熱、高速(瞬間)点火する。従来の中心点火方式で最重要課題とされてきた爆縮時の流体力学的不安定性条件を回避でき、数分の1のレーザーエネルギーで核融合点火を達成できると考えられる。我々は、導波路として中空の金コーンを予め差し込んだ球ターゲット用い、高速点火実験において、超高強度レーザーパルス加熱により爆縮コアで1keVのイオン温度を世界で初めて達成した<sup>2</sup>。金コーン手法は、その後国内外の複数の研究機関でより大型のレーザーを用いて研究がなされている。しかし高強度レーザーの大型化に伴って主パルスの前に存在するレーザープリパルスなど幾つか解決の必要な課題により研究が停滞している。プリパルスは、コーン内に不要なプラズマ(プリプラズマ)を生成する。レーザー加熱パルスとこのプラズマの相互作用現象により、電子への変換効率の抑制、電子発散角がコアを狙う立体角より大幅に大きくなるなどの課題が挙げられている。

### 2. 研究の目的

我々はスーパーペネトレーション(以下SPと略)と呼ぶレーザー自己集束現象を発見し、この10年間基礎実験で高速点火へ応用し、高密度に爆縮された燃料コア近傍まで加熱用レーザービームが進入し、コアへの加熱が可能である事を示してきた<sup>3</sup>。SPとは、レーザー光が相対論効果と光圧力効果を伴い臨界密度を超える高密度プラズマの中を自己集束し、穿孔する現象である。本研究課題では

(1) 1ピコ秒もしくは10ピコ秒のレーザーを使い、SPを大規模スケール(=点火プラズマ級)の平面プラズマで実証し、加熱実験に向けた特性評価・最適化を行う。

(2) 爆縮を伴う点火級大規模スケールのプラズマでSPの有効性実証を行い、燃料コアの加熱を検証する。

以上を目的として研究を推進する。

### 3. 研究の方法

SP手法を大規模プラズマであるレーザー核融合の高速点火方式実験に適用して高速点火の有効性を証明することが本研究計画の主眼である。そのために

(1) 臨界密度を上回る高密度プラズマでのSPの観測に必要な計測手法を確立する。

(2) 平板ターゲットに作られた大規模プラズマ(1mm級)においてSPモードを実証する。二つのレーザーパルスモード(単パルスもしくはダブルパルス)を使い、加熱実験に向けた最適化を行う。

(3) 球状のプラスチックターゲットを用いた大規模爆縮球対称プラズマにおいて、SPの加熱の有効性を実証する。

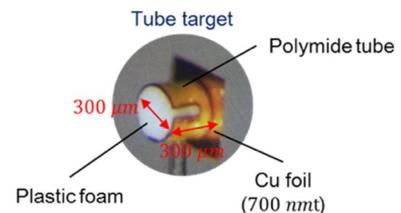
(4) 爆縮プラズマと高強度レーザーで生成する高速電子の放出発散角を抑制し、効率良い燃料加熱を実現する。

### 4. 研究成果

(1) 臨界密度を上回る高密度プラズマ中でのSPの観測に必要な計測手法の確立

高密度プラズマ中における高強度レーザー伝搬速度の計測

プラズマのスケール長が短い小規模なプラズマでは、SPの観測は薄いプラズマを通し、プローブを用いた干渉計測などの光学計測を行うことが出来たが、大規模プラズマではプラズマ中での光吸収が強いため光学計測が困難となる。そのため当初計画ではSP過程において作られるプラズマチャンネルに沿って形成されると予測されている静電場・磁場を、プロトンバックライト手法により計測することを考案し仏エコール・ポリテクニクとの共同実験を行った。右図のように、直径300 $\mu$ m、長さ300 $\mu$ mのポリイミドチューブに低密度プラスチックフォームを挿入し、片側の入り口に薄い(700nm)銅薄膜を貼り付けたターゲットを開発した。銅薄膜に高エネルギーナノ秒レーザーを照射してプラスチックフォームをプラズマ化し、チューブ側面のスリットを通してX線バックライト計測を行い、一様な臨界密度プラズマが生成されていることを確認した<sup>4</sup>。このプラズマに高強度レーザーを照射し臨界密度プラズマ中での伝搬の様子を、別のレーザーで生成した高エネルギーイオンをチューブ側面よりバックライト計測を行った。ところがターゲットホルダーなどがレーザー照射によって強く帯電したためSPで形成される微小領域の電場磁場による信号はノイズレベルで判別不能となり、これに限らず爆縮プラズマのようなグローバルな電磁場ダイナミクスを伴うプラズマ中でマイクロサイズの領域を計測する手法としては、プロトンバックライト手法は不適切であることが判明した。



そこで上記実験体系にて、SPモード時に高強度レーザーがプラズマチャンネルを形成しつつ高密度プラズマ中を伝搬する際に、チャンネル先端で反射するレーザー反射光に対する分光計測を行った。右図はターゲット密度(上:5mg/cc及び下:10mg/cc)及びレーザー強度(=パルス幅:赤300fs/青900fs)を変更したときの反射光スペクトルであり、レーザー強度が高いほうが、またプラズマ密度が低いほうがより強い赤方偏移(ドップラーシフト)を示している。これは臨界密度以上のプラズマを高強度レーザーがある速度で伝搬していることを示し、SPモードが臨界密度以上のプラズマでも存在す

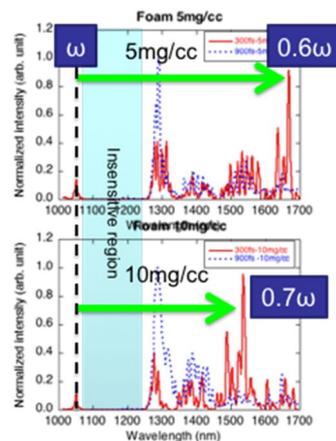
ることを示す重要な実験結果である。この現象を解析するため、我々は高強度レーザーの強いポンデロモティブ力でその前面のプラズマを押し、それに伴う温度上昇と密度上昇を考慮したレーザー伝搬モデルを構築し、その理論による伝搬速度と、ドップラーシフトから見積もられる伝搬速度が一致することを示した<sup>5</sup>。また粒子シミュレーションの結果でも、レーザーが超臨界密度プラズマ中をその速度で伝搬することが示され、その反射光スペクトルが実験結果とほぼ一致することを見出した<sup>6</sup>。これらの成果により、我々の開発した解析モデルをベースに、点火級の大きなプラズマにおいて必要な大きさのプラズマチャンネルを形成するレーザー条件を見積もることが可能となった。

#### 長スケールプラズマ中でのプラズマチャンネル計測

点火スケール級の長いプラズマ中では、コロナ領域において干渉計測などでプラズマチャンネルの形状が計測できたとしても、どの密度領域まで高強度レーザーが侵入できたのかというのはシミュレーションと比較しないと不可能であった。そこで我々は紫外レーザーをプローブ光として用いることでプラズマ中の吸収を回避しつつ、レーザーの屈折率がプラズマ密度の局所的な勾配に依存することを利用し、プローブ光に対しプラズマ透過後に角度フィルターを挿入し、プローブ光がどの密度領域から屈折されたかを明示する手法をロチェスター大学の研究者らと共同開発した。その手法を SP モードにおけるプラズマチャンネルの計測に適用することに成功し、高強度レーザーによって臨界密度以上の密度領域までプラズマチャンネルが形成されたことを示した<sup>7</sup>。

#### c. 多チャンネル電子分光器の開発

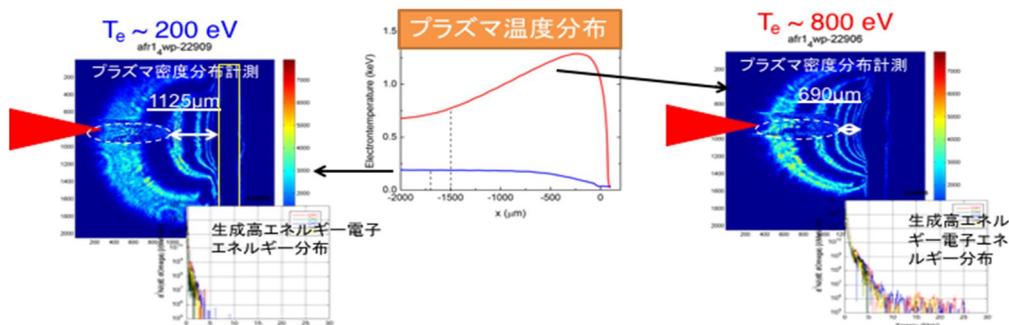
高強度レーザーが爆縮プラズマの臨界密度点で生成する高速電子は、燃料プラズマを加熱する加熱媒体となるため、そのエネルギーや放出分布を調べるのは非常に重要な課題である。我々は米国ロチェスター大学の研究者らと共同で、高速電子のエネルギー分布を多方向から計測する磁場偏向型計測器を開発し、高速電子エネルギースペクトルの角度依存性を得た。更に磁場の強さを変更することで、高強度レーザーが生成する数 MeV の高速電子のみならず、爆縮の際のレーザープラズマ不安定性によって生成する数 keV の電子を計測できるようにし、これによって爆縮パフォーマンスの計測も可能となった<sup>8</sup>。



#### (2) 平板ターゲットに作られた大規模プラズマ(1mm 級)における SP 条件の実証

平板ターゲットに kJ クラスの高エネルギーレーザーを照射して大規模プラズマを生成し、そこに高強度レーザーを照射する実験を米国ロチェスター大学の研究者らと同大学附属レーザーエネルギー研究所にて行った。SP に伴う高密度領域でのプラズマチャンネル形成の様子は上記紫外レーザーを用いた角度フィルター計測にて、また生成した高速電子の計測も上記多チャンネル電子分光器にて行った。

下図はプラズマを生成する高エネルギー爆縮レーザーのパルス波形を任意に調整し、高強度レーザーを照射するタイミングのコロナ領域のプラズマの温度が 200eV 程度、または 800eV 程度(下図中央。ただしプラズマ密度分布はほぼ同一)になるよう制御した場合の実験結果である。左右の図中、右から左に広がるリング状の信号が紫外プローブのイメージで、図中の白い四角枠が初期の平板ターゲット位置を示している。プラズマは図の左方向に吹き出し、そのプラズマに対し高強度レーザーが左側か



ら右向きに照射された。リング状の構造はそれぞれ異なるプラズマ密度領域において屈折されたプローブ光であり、初期ターゲット位置に近い信号がより高密度領域で屈折された光である。さらに左右の図の中央、横方向にリングパターンが崩れている(点線で囲まれた)部分はプラズマチャンネルが存在している場所を示しており、左の低温プラズマではレーザーが臨界密度まで到達していないが、右の高温プラズマでは臨界密度に達している。またその下のグラフはターゲット裏面で計測したレーザー軸上の高速電子のエネルギー分布であり、横軸が電子エネルギーを示している。明らかに右の高温プラズマでは高エネルギーの電子が生成されているが、左の低温プラズマでは高速電子の生成が抑制されていることがわかった。これらの結果を踏まえた解析により、低温プラズマでは衝突フィラメント不安定性等より高強度レーザーエネルギーが伝搬過程で散逸され、プラズマチャンネルの形成がうまく行かなかったと推測された。

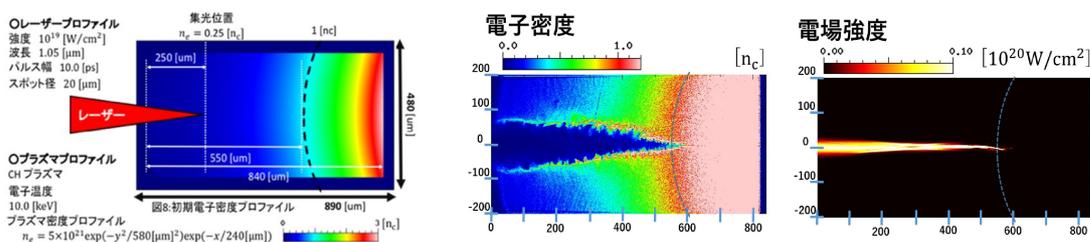
この結果をベースに高強度レーザーの照射位置、パルス幅を変化させて同様の計測を行い、エネルギー輸送と高速電子生成を最大化するにはコロナプラズマ温度を高温に保ち、0.1 倍の臨界密度近傍に照射するのが望ましいという高強度レーザーの条件とプラズマの条件を明らかになった。このことは

高速点火レーザー核融合には単に高密度なコアというだけでなく、その密度・温度プロファイルを制御することが必要であることが判明した重要な結果となった<sup>9</sup>。

### (3)実スケール・実時間で計算可能な大規模超並列粒子シミュレーションの開発

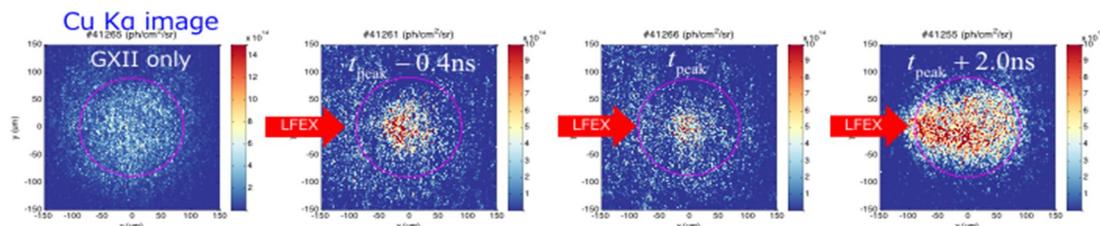
本研究課題の実証のためには大型レーザー装置を用いた実験が必須だが、そのような装置は世界中でも数が限られており、実験に使用できる期間、機会は非常に限られている。そのため、行う実験の目標に対し、それが最も達成出来ると考えられる実験条件(レーザー強度、照射位置、照射タイミングなど)を予め推定することは非常に大切な課題である。我々は実験で用いる大規模爆縮プラズマ(固体密度以上、ミリメートル空間スケール、数10ピコ秒)を取り扱うことが出来る粒子シミュレーションコードの開発を本研究課題当初より行ってきた。現実的な時間で計算を終了させるために、大型スーパーコンピュータ(核融合科学研究所プラズマシミュレータ等)を用い、さらに効率的に計算するために超並列化技法である動的負荷分散手法を導入し、従来手法より最大10倍の高速化の実現に成功した。

下図は開発したシミュレーションの計算例を示しており、上記課題(2)におけるロチェスター大学での実験を実スケール計算したものである。左図は計算条件を示しており、ミリメートルサイズでかつ最大密度が数倍の臨界密度を持つプラズマを配置し、レーザープラズマ相互作用を10ピコ秒に渡って計算したところ、計算時間はおよそ数時間であった。中央と右の図は計算開始から約8ピコ秒後の電子密度分布とレーザーの電場強度分布を示しており、電子密度の図ではプラズマチャンネルの形成が確認され、さらに電場強度では相対論的自己収束によるレーザー電場強度の増大が見られ、どちらも臨界密度を超えてレーザーが伝搬する、SPモードが確認できている<sup>10</sup>。



### (4)大規模爆縮球対称プラズマにおける SP の加熱の有効性の実証

大阪大学レーザー科学研究所付属の大型レーザー装置を用い、同研究所及び米国カルフォルニア大学の研究者らと共同で、球状プラスチックターゲットを用いた爆縮プラズマ中での SP における加熱の有効性の実証実験を行った。同研究所は共同研究施設であり、確保出来る実験期間は最大で年に1週間程度であるため設置及び調整に時間のかかる反射光ドップラー計測及び紫外プローブによる計測は困難である。その為 SP モードは上記(2)で得た条件をそのまま用い、生成された高速電子によるプラズマの加熱を計測する実験を行った。



プラスチックターゲットに少量の銅イオンを添付し、高速電子が銅イオンと衝突する際に放出する銅特性 X 線イメージを計測した。計測手法から時間積分イメージとなるが、高強度レーザーで生成する高速電子の時間幅であるピコ秒程度の時間分解能は有している。下図は左から高強度レーザー未照射、爆縮プラズマ密度が最も高くなるタイミングより-0.4ns、0ns、+2.0nsのタイミングで高強度レーザーを入射したときに計測したイメージである。矢印は高強度レーザーの照射方向を示し、左側から右に向かって照射されている。これらのタイミング計測の結果、高強度レーザー照射時点での爆縮プラズマの大きさに依存した X 線の発光領域の増減が見られ、特に最大爆縮時では形成されたコア領域の大きさにほぼ等しい大きさの発光が見られ、本計測にて実際に高速電子がプラズマを加熱している様子を初めて計測することに成功している。我々はこの特性 X 線の発光強度から、高強度レーザーから高密度プラズマへの加熱効率(エネルギー結合率)を見積もる手法を上記米国カルフォルニア大学の研究者らと共同開発しており<sup>11</sup>、その結果、本実験における結合率はおおよそ1%程度であることがわかった<sup>12</sup>。

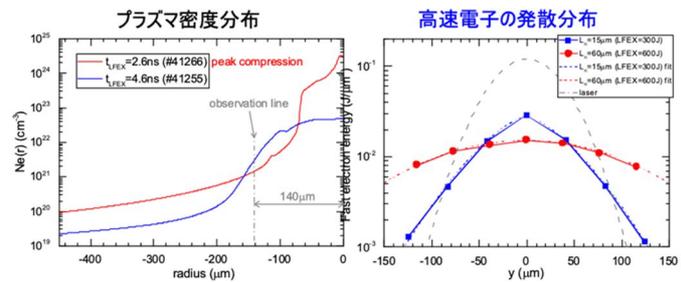
この結合率は以前の金コーンを用いた実験に比べてそれほど小さくなく、他の高速点火手法に比べて本手法の利点とならない。そこでこの要因を解析すると、2つの可能性が示された。1つ目はプラズマの面密度が点火級の大きなプラズマよりも大分低く、生成される高速電子がほとんどエネルギーを付与せずに通り抜けることが原因であることがわかった。大きな爆縮プラズマを生成するにはメガジュール級の爆縮レーザーエネルギーを持つ米国国立点火装置(NIF)やフランス・レーザーメガジュール(LMJ)などの装置が必要であり、そのような爆縮プラズマを用いた実験・研究は本研究課題の範囲外であり、本研究課題で加熱メカニズムを明らかにした後、シミュレーション等を用いた実験設計を行い実験提案をしていく予定である。もう一つの要因は予想されるよりも高速電子の放出角度が大き

い可能性があることである。(1)で示したプラスチックフォームを用いた実験においては、発散角は10度程度と見込まれたが、この爆縮プラズマを用いた実験においては100度近くまで広がっている可能性が示された。

この大きな角度広がりを抑制するため2つの手法について研究を進めた。

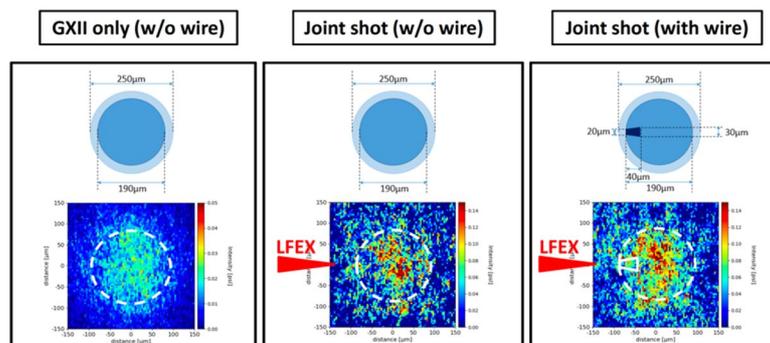
#### ダブルパルス法によるプラズマ密度勾配の制御

上記実験において、最大爆縮時から2.0ns後に高強度レーザーを照射した際(上図右端)のビーム広がりが約30度程度と見積もられ、最大爆縮時での100度と大きく異なる結果が示された。シミュレーションを用いた解析の結果、下図に示すように高速電子が生成する臨界密度近傍の密度プロファイルが急峻(青線)な場合、ポンデロモティブ力によりプラズマをより前方に押し込むことで、下図右に示すように収束された電子ビームが生成されることが示された(横軸角度、縦軸電子個数)。これは研究成果(1)で示したフランスでの実験における電子ビームの放出分布にも傾向が一致する。このことより、高強度レーザーを2つのパルスに分離し、最初のパルスはプラズマチャンネルを作りつつチャンネル内の背景電子を排除し、チャンネル先端で急峻な密度勾配を生成することで、2番目の高強度レーザーで生成する電子ビームを低い角度広がりとなる可能性が示された。



#### 抵抗性自己生成磁場による高速電子発散角の抑制

電流が電気抵抗率の異なる2つの金属物質層中を伝搬すると、抵抗率の勾配に依存した磁場が発生し、それによって電流を高抵抗率金属の領域に閉じ込めることができることが報告されている。そこで我々はプラスチック中実球に金属(Ni)ワイヤを挿入し、高強度レーザー照射時にプラスチックと金属の抵抗の勾配により発生する自己生成磁場を用いることで高速電子の発散を抑え、加熱効率を向上させる研究を行った。上図はその実験結果を示したものであり、同様に1%程度添付された銅イオンからの特性X線発光イメージである。左から高強度レーザー未照射、中央がワイヤ挿入なしで高強度レーザーを照射した場合、右がNiワイヤを挿入したターゲットを爆縮し、高強度レーザーを照射した際の発光イメージである。ワイヤが挿入された場合、コア領域からの発光強度及び発光面積が広がることが確認できた。X線分光計測も同時に行い、プラズマが加熱されたことを示唆する高エネルギー領域へのスペクトルシフトが観測された。シミュレーションを用いた詳細な解析により、最大数100テスラの磁場が生成し、それによりコア領域を通過する高速電子が最大50%程度増加した可能性が示された。



以上の結果により、点火級の大規模プラズマを用い、更にダブルパルス法もしくは金属ワイヤを燃料球に挿入することにより、15%程度のエネルギー結合が実現可能<sup>12</sup>である見通しがたち、本研究課題の有用性を示すことができた。

1. M. Tabak et al. Phys. Plasmas 1 (1994) 1626,
2. R. Kodama, K.A. Tanaka et al., Nature 412, 798 (2001); ibid 418, 933 (2002),
3. A.L.Lei, et al., Phys. Rev. E 76, (2007) 066403.
4. S.N. Chen, et al., Sci. Report 6 (2016) 21495.
5. T. Iwawaki, Phys. Rev. E 92 (2015) 013106.
6. H. Habara, et al., J. Phys. Conf. Ser. 717 (2016) 012019.
7. S. Ivancic. Phys. Rev. E 91 (2015) 051101.
8. H. Habara, et al., Rev. Sci. Instrum. 90 (2019) 063501.
9. L. Ceurvorst, et al., Phys. Rev. E 97 (2018) 043208
10. H. Habara, Proc. Direct Drive and Fast Ignition Workshop, Rome, Italy (2019).
11. L.C. Jarrott, et al., Nature Physics 12 (2016) 499-504
12. T. Gong, H. Habara, et al., Nature Commun. 10 (2019) 5614.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計22件（うち査読付論文 22件／うち国際共著 12件／うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Ceurvorst L., Savin A., Ratan N., Kasim M. F., Sadler J., Norreys P. A., Habara H., Tanaka K. A., Zhang S., Wei M. S., Ivancic S., Froula D. H., Theobald W.	4. 巻 97
2. 論文標題 Channel optimization of high-intensity laser beams in millimeter-scale plasmas	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 43208
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevE.97.043208	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Hayashi Y., Kuramitsu Y., Liu Y. L., Habara H.	4. 巻 47
2. 論文標題 2-D-Particle-in-Cell Simulation of Laser Wakefield in an Inhomogeneous Plasma	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Plasma Science	6. 最初と最後の頁 9~11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TPS.2018.2866340	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Pikuz T., Faenov A., Ozaki N., Habara H, Tanaka KA., et al.	4. 巻 3
2. 論文標題 Development of new diagnostics based on LiF detector for pump-probe experiments	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Matter and Radiation at Extremes	6. 最初と最後の頁 197~206
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.mre.2018.01.006	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Jarrott L. C., McGuffey C., Beg F. N., Solodov A. A., Theobald W., Qiao B., Stoeckl C., Betti R., Chen H., Delettrez J., Doppner T., Giraldez E. M., Glebov V. Y., Habara H., Iwawaki T., Key M. H., Luo R. W., Marshall F. J., McLean H. S. et al	4. 巻 24
2. 論文標題 Transport and spatial energy deposition of relativistic electrons in copper-doped fast ignition plasmas	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 102710
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.4999108	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Gong T., Habara H., Uematsu Y., Hayashi Y., Kawazu S., Kubota Y., Matsumoto T., Nakaguchi S., Noma S., Otsuki T., Tsujii A., Yahata K., Yoshida Y., Arikawa Y., Fujioka S., Nagatomo H., Shiraga H., McGuffey C., Krauland C. M., Wei M. S., Tanaka K. A.	4. 巻 24
2. 論文標題 Confirmation of hot electron preheat with a Cu foam sphere on GEKKO-LFEX laser facility	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 112709 ~ 112709
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.4999975	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 M. Ruiz-Lopez, A. Faenov, T. Pikuz, N. Ozaki, A. Mitrofanov, B. Albertazzi, N. Hartley, T. Matsuoka, Y. Ochante, Y. Tange, T. Yabuuchi, T. Habara, K. A. Tanaka, Y. Inubushi, M. Yabashi, M. Nishikino, T. Kawachi, S. Pikuz, T. Ishikawa, R. Kodama and D. Bleiner	4. 巻 24
2. 論文標題 Coherent X-ray beam metrology using 2D high-resolution Fresnel-diffraction analysis	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 J. Synchrotron Rad.	6. 最初と最後の頁 196-204
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1107/S1600577516016568	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 L.C.Jarrott, M.S.Wei, C.McGuffey, A.A.Solodov, W.Theobald, B.Qiao, C.Stoeckl, R.Betti, H.Chen, J.DeLettrez, T.Doppner, E.M.Giraldez, V.Y.Glebov, H.Habara, T.Iwawaki, M.H.Key, R.W.Luo, E.J.Marshall, H.S.Mclean, C.Mileham, P.K.Patel, J.J.Santos, H.Sawada, R.B.Stephens, T.Yabuuchi, and F.N.Beg	4. 巻 12
2. 論文標題 Visualizing Fast Electron Energy Transport Into Laser-Compressed High-Density Fast-Ignition Targets	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Nature Physics	6. 最初と最後の頁 499,504
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/nphys3614	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 H.Habara, S.Honda, M.Katayama, H.Sakagami, K.Nagai, and K.A.Tanaka	4. 巻 23
2. 論文標題 Efficient energy absorption of intense ps-laser pulse into nanowire target	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 063105-1, -5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.4953092	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 T.A.pikuz, A.Ya. Faenov, N.Ozaki, N.J.Hartley, B.Albertazzi, T.Matsuoka, K.Takahashi, H.Habara, Y.Tange, S.Matsuyama, K.Yamauchi, R.Ochante, K.Sueda, O.Sakata, T.Sekine, T.Sato, Y.Umeda, Y.Inubushi, T.Yabuuchi, T.Togashi, T.Kataya	4. 巻 120
2. 論文標題 Indirect monitoring shot-to-shot shock waves strength reproducibility during pump-probe experiments	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 035901-1,-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.4958796	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 A.G.Smyth, G.Sarri, M.Vranic, Y.Amano, D.Doria, E.Guillaume, H.Habara, R.Heathcote, G.Hicks, Z.Najmudin, H.Nakamura, P.A.Norreys, S.Kar, L.O.Silva, K.A.Tanaka, J.Vieira and M.Borghesi	4. 巻 23
2. 論文標題 Magnetic field generation during intense laser channelling in underdense plasma	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 079901-1,-1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.4959856	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 SN Chen, T Iwawaki, K Morita, P Antici, SD Baton, F Filippi, H Habara, M Nkatsutsumi, P Nicolai, W Nazarov, C Rousseaux, M Staroudubstev, KA Tanaka and J Fuchs	4. 巻 6
2. 論文標題 Density and temperature characterization of long-scale length, near-critical density controlled plasma produced from ultra-low density plastic foam	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 21495-1,21495-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Y. Mishima, H. Habara, Prashant K. Singh, Amitava Adak, Gourab Chatterjee, Amit D. Lad, P. Brijesh, Malay Dalui, M. Inoue, J. Jha, Sheroy Tata, T. Madhu Trivikram, M. Krishnamurthy, G. Ravindra Kumar, K. A. Tanaka	4. 巻 Vol.43, No.9
2. 論文標題 Efficient Production of Fast Electron Via Surface Plasmon Resonance Induced by Intense Laser Light	5. 発行年 2015年
3. 雑誌名 The Review of Laser Engineering	6. 最初と最後の頁 638,642
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Y. Mishima, H. Habara, and K. A. Tanaka	4. 巻 Vol.32, No.9
2. 論文標題 Two plasmonic mode excitation using a double-step rectangle grating	5. 発行年 2015年
3. 雑誌名 Journal of the Optical Society of America B	6. 最初と最後の頁 1804,1808
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 T. Iwawaki, H. Habara, T. Yabuuchi, M. Hata, H. Sakagami, and K. A. Tanaka	4. 巻 92
2. 論文標題 Slowdown mechanisms of ultraintense laser propagation in critical density plasma	5. 発行年 2015年
3. 雑誌名 PHYSICAL REVIEW E	6. 最初と最後の頁 013106-1, -5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 H. Habara	4. 巻 47
2. 論文標題 超高強度レーザーによるギガガウス級磁場生成	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 レーザー研究	6. 最初と最後の頁 531-535
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 H. Nagatomo, T. Johzaki, T. Asahina, M. Hata, Y. Sentoku, K. Mima, H. Sakagami	4. 巻 59
2. 論文標題 Study of fast ignition target design for ignition and burning experiments	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 106055
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/ab3a5d	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T. Yabuuchi, H. Habara, et al	4. 巻 26
2. 論文標題 An experimental platform using high-power, high-intensity optical lasers with the hard X-ray free-electron laser at SACLA	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 J. Synchrotron Radiation	6. 最初と最後の頁 585
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1107/S1600577519000882	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 H. Habara, et al	4. 巻 90
2. 論文標題 A ten-inch manipulator (TIM) based fast-electron spectrometer with multiple viewing angles (OU-ESM)	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Rev. Sci. Instrum.	6. 最初と最後の頁 63501
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5088529	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T. Gong, H. Habara, H. Nagatomo, K.A. Tanaka et al.,	4. 巻 10
2. 論文標題 Direct Observation of Imploded Core Heating via Fast Electrons with Super-Penetration Scheme	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 5614
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-019-13574-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 N.J. Hartley, H. Habara, K.A. Tanaka, et al.	4. 巻 110
2. 論文標題 Ultrafast observation of lattice dynamics in laser-irradiated gold foils	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 71905
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.4976541	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 K.L. Lancaster, H. Habara, et al.	4. 巻 24
2. 論文標題 Observation of extremely strong shock waves in solids launched by petawatt laser heating	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Phys. Plasmas	6. 最初と最後の頁 83115
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5000064	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 B. Albertazzi, H. Habara, et al	4. 巻 3
2. 論文標題 Dynamic fracture of tantalum under extreme tensile stress	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 e1602705
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/sciadv.1602705	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計35件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 28件)

1. 発表者名 H. Habara
2. 発表標題 Energy Transportation to the Imploded Core Plasma by Direct Irradiation of Ultra-intense Laser Beam
3. 学会等名 11th Eleventh International Conference of Inertial Fusion Sciences and Applications (IFSA2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Makiyama
2. 発表標題 Study of Fast Electron Collimation by Self-Generated Magnetic Field in the Imploded Plasma by Using Solid Sphere with Inserted Ni Wire
3. 学会等名 11th Eleventh International Conference of Inertial Fusion Sciences and Applications (IFSA2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Okida
2. 発表標題 Influence of Laser Irradiation Position on Fast Electron Propagation
3. 学会等名 11th Eleventh International Conference of Inertial Fusion Sciences and Applications (IFSA2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Johzaki
2. 発表標題 Ignition requirement for HBRPA C6+ beam driven fast ignition
3. 学会等名 46th EPS Conference on Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 城崎知至
2. 発表標題 マルチピコ秒相対論レーザー物質相互作用による非平衡輻射プラズマの数値研究
3. 学会等名 第6回「京」を中核とするHPCIシステム利用研究課題 成果報告会 ~スーパーコンピュータ「富岳」の胎動、計算科学、AIの融合に向けて~ (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Habara
2. 発表標題 Stable creation of a single plasma channel inside large-scale imploded plasmas
3. 学会等名 15th International Workshop on Direct-Drive and Fast Ignition (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Sakagami
2. 発表標題 Effects of laser focusing on plasma channeling by ultrahigh intense laser in fast ignition
3. 学会等名 46th EPS Conference on Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Nagatomo
2. 発表標題 Hydrodynamic simulation with the hot-electron transport model for shock ignition
3. 学会等名 61st Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuo A. Tanaka
2. 発表標題 ELI-NP Status and Plan
3. 学会等名 3rd International Conference on Matter and Radiation at Extremes (ICMRE) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tao Gong, Hideaki Habara, Kazuo A. Tanaka
2. 発表標題 Quantitative analysis of the K-alpha emission from a Cu doped CD shell target
3. 学会等名 3rd International Conference on Matter and Radiation at Extremes (ICMRE) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hideaki Habara
2. 発表標題 Visualization of Energy Transport in the Imploded Plasma for Super-penetration Fast Ignition
3. 学会等名 3rd International Conference on Matter and Radiation at Extremes (ICMRE) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masaya Yoshimoto, Hideaki Habara, Kazuo A. Tanaka
2. 発表標題 Double structure of ions in 2D particle in cell laser plasma simulation
3. 学会等名 2nd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kentaro Abe, Hideaki Habara, Kazuo A. Tanaka
2. 発表標題 Surface Plasmon Resonance Of High Power Laser Field
3. 学会等名 2nd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tao Gong, Hideaki Habara, Kohei Sumioka, Kazuo Tanaka
2. 発表標題 Visualizing the transport & deposition of fast electrons in an integrated super-penetration experiment
3. 学会等名 Direct-Drive & Fast-Ignition Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Gong, H. Habara, K.A. Tanaka
2. 発表標題 Improvement of implosion performance by controlling preheat with a solid Cu foam sphere target
3. 学会等名 Sixth International Conference on High Energy Density Physics (ICHED2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. Kawazu, H. Habara, H. Sakagami, K.A. Tanaka,
2. 発表標題 eal-scale PIC simulation with dynamic load balance parallelization
3. 学会等名 Sixth International Conference on High Energy Density Physics (ICHED2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 H. Habara, K.A. Tanaka
2. 発表標題 Direct irradiation of ultraintense laser light into imploded plasma
3. 学会等名 Sixth International Conference on High Energy Density Physics (ICHED2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 住岡耕平、羽原英明、田中和夫
2. 発表標題 Niシリンダーを挿入したCuドープレイン酸中実球を用いた高強度レーザー照射における自己生成磁場による高速電子の収束可能性
3. 学会等名 レーザー学会第38回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田中和夫
2. 発表標題 Relativistic Laser Self-focusing Approach toward Fast Ignition
3. 学会等名 OPIC2016 ( 国際学会 )
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Gong Tao
2. 発表標題 On the mismatch in stimulated scattering processes in inhomogeneous plasmas
3. 学会等名 OPIC2016 ( 国際学会 )
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 林宜章
2. 発表標題 Selection transport in The Background Plasma with Steep Density Gradient
3. 学会等名 OPIC2016 ( 国際学会 )
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 大月崇史
2. 発表標題 Generating Surface Plasmon Resonance by interacting Laser with Ag Grating
3. 学会等名 OPIC2016 ( 国際学会 )
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 羽原英明
2. 発表標題 Surface plasmon resonance by ultra intense laser field
3. 学会等名 The 14th International Conference of Near-Field Optics, Nanophotonics and Related Techniques (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 羽原英明
2. 発表標題 高強度レーザー伝搬におけるプラズマ密度・温度依存
3. 学会等名 日本物理学会 (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 羽原英明
2. 発表標題 高強度レーザーを用いた超臨界・遮断密度プラズマ中での導波路形成と加熱
3. 学会等名 日本物理学会 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 植松祐仁
2. 発表標題 Measurement of Electron Collimation and X-ray Synchrotron Radiation by Ultra-high Intense Laser Interaction with Overdense Plasma
3. 学会等名 ICHED2015
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 田中和夫
2. 発表標題 Super-penetration is so far so good.
3. 学会等名 第16回高速点火レーザー-核融合に関する日米ワークショップ (国際学会)
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 植松祐仁
2. 発表標題 Synchrotron Radiation X-ray Emission and Electron-beam Collimation by Relativistic Laser Interacting with Overdense Plasma
3. 学会等名 第16回高速点火レーザー-核融合に関する日米ワークショップ (国際学会)
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 羽原英明
2. 発表標題 長スケール臨界密度プラズマ中の高強度レーザーの伝搬
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 植松祐仁
2. 発表標題 超高強度レーザーと臨界密度プラズマの相互作用によるシンクロトロン放射X線と電子のコリメーション
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 村上莉穂
2. 発表標題 ミリメートルスケールプラズマ中の プラズマチャネル形成の解析
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 羽原英明
2. 発表標題 INTENSE LASER PROPAGATION INTO HOMOGENEOUS CRITICAL DENSITY PLASMA
3. 学会等名 I F S A (International Fusion Sciences and Applications) (国際学会)
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 林宜章
2. 発表標題 ELECTRON TRANSPORT IN THE BACKGROUND PLASMA WITH STEEP DENSITY GRADIENT
3. 学会等名 I F S A (International Fusion Sciences and Applications) (国際学会)
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 村上莉穂
2. 発表標題 ANALYSIS OF PLASMA CHANNEL FORMATION IN THE MM-SCALE PLASMA
3. 学会等名 I F S A (International Fusion Sciences and Applications) (国際学会)
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 久保田善大
2. 発表標題 金属フォームターゲットを用いた レーザーイオン加速
3. 学会等名 日本物理学会第71回年次大会
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<a href="http://www.eie.eng.osaka-u.ac.jp/le/habara/sp.htm">http://www.eie.eng.osaka-u.ac.jp/le/habara/sp.htm</a>
---

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	羽原 英明  (Habara Hideaki)  (60397734)	大阪大学・工学研究科 ・准教授   (14401)	
研究分担者	長友 英夫  (Nagatomo Hideo)  (10283813)	大阪大学・レーザー科学研究所・准教授   (14401)	
研究分担者	坂上 仁志  (Sakagami Hitoshi)  (30254452)	核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授   (63902)	

## 6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	城崎 知至  (Johzaki Tomoyuki)  (10397680)	広島大学・工学研究科・准教授     (15401)	