

平成 30 年 8 月 23 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H04232

研究課題名(和文)核融合周辺プラズマの運動論的モデリングとデタッチメントプラズマの動的特性の解明

研究課題名(英文)Kinetic Modeling of Fusion Edge Plasma and Dynamic Characteristics of Detachment Plasmas

研究代表者

畑山 明聖 (Hatayama, Akiyoshi)

慶應義塾大学・理工学部(矢上)・教授

研究者番号：10245607

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では核融合周辺プラズマを対象として新しい運動論的数値シミュレーションモデルの構築を試みた。とくにELM(Edge Localized Mode)時の電子エネルギー分布関数の非平衡性・非定常性を考慮し、デタッチメントプラズマおよび水素原子・分子反応過程の動的モデリングを行った。ELM時には、分子活性化再結合(MAR)に重要な振動励起分子の生成が効果的に行われ、その結果、ELM通過後、MARの反応レート増大の可能性が示された。また、ELM前後ではコアプラズマ周辺部に急峻な密度・温度勾配が存在し、新古典輸送効果が重要となる。この効果を考慮した新しい運動論的不純物輸送モデルの開発にも成功した。

研究成果の概要(英文)：The final goal of this study is to develop a new kinetic simulation tool of plasmas, neutrals, and impurities in fusion edge plasmas. Taking into account the non-equilibrium and non-steady characteristics of electron energy distribution function (EEDF), we have done a dynamic simulation of the ELM (Edge Localized Mode). The effect of the ELM on the plasma detachment has been studied. Especially, the effects of the ELM on the MAR (Molecular Activated Recombination) has been analyzed. The results show that the vibrational excited molecules, which play a key for MAR, are effectively produced during the ELM heat pulse. Due to this enhancement, MAR rate is possibly enhanced after the ELM pulse. In addition, a new kinetic impurity transport model has been successfully developed. The model includes neo-classical transport effects of impurities, which becomes important under the steep density/temperature gradient in the core pedestal region before and after the ELM pulse.

研究分野：プラズマ物理

キーワード：核融合周辺プラズマ ダイバータ デタッチメントプラズマ 粒子シミュレーション ELM 分子活性化再結合

1. 研究開始当初の背景

炉心プラズマ閉じ込め性能の着実な向上により、現在、国際熱核融合実験炉(ITER)の建設が始まっている。ITER、さらには将来の核融合発電の実証のためには、

- (1)高温・高密度の炉心プラズマから固体壁への熱・粒子流の抑制、
- (2)一方、固体壁で発生した不純物の炉心プラズマへの混入の抑制

が、極めて重要な課題になってきている。具体的には、ITERでは、固体壁(ダイバータ板といわれる受熱面)の熱負荷を10 MW/m²以下に抑えることが要求される。

一方、炉心への不純物の混入は、炉心プラズマ温度の低下を招き、核融合反応の持続を困難にする。そのため、ITERの壁候補材であるタングステン不純物の場合、その混入量は、燃料水素プラズマ密度の0.001%程度に抑えることが必要とされる。

これらの目標を達成するためには、炉心プラズマと固体壁の狭間に存在する周辺プラズマにおける熱・粒子輸送、不純物輸送の理解が不可欠である。

ダイバータ板へのピーク熱負荷が数10 MW/m²にもなる可能性が、ITERでも、当初、指摘された。このような大きな熱・粒子負荷の制御なしには、核融合炉の実現は困難であるといっても過言ではない。

そこで極めて有効な熱・粒子負荷低減手法として、プラズマを固体壁から非接触な状態に保つ、いわゆる“デタッチメントプラズマ”が提案された。周辺プラズマ領域を冷却するための中性粒子あるいは種不純物(Ne、Arなど)を外部から積極的に周辺領域に入射することにより、燃料水素プラズマと中性粒子および不純物との相互作用を促進し、固体壁近傍のプラズマ温度を低下させる。このプラズマ温度の低下により、体積再結合を促進し、壁とプラズマとを非接触状態に保つ。これにより固体壁へのプラズマ熱負荷・粒子負荷を低減する。

このようなデタッチメントプラズマについては、90年代後半から精力的に研究が行われ、その生成条件と“静的”な特性については、実験的にも理論的にも理解が進み、熱・粒子負荷低減に対する有効性が実証されつつある。

しかしながら、デタッチメントプラズマの動的な特性に関しては、必ずしも十分に理解されているとはいえないのが現状である。

2. 研究の目的

上記、背景を踏まえ、本研究では核融合周辺プラズマを対象として、新しい運動論的数値シミュレーションモデルの構築を目

的とする。とくに、ELM(Edge Localized Mode)の際の熱パルスに対するデタッチメントプラズマの動的応答解析が可能となる新しい数値シミュレーションモデルの構築を目指す。

その特徴は、水素イオン、電子の運動量・エネルギー緩和過程の理解に加えて、非平衡・非定常プラズマ中における水素原子・分子の衝突・輻射および輸送過程の理解、不純物をも考慮した新しい多種粒子系核融合周辺プラズマの統合数値シミュレーションモデルの構築を目指す点にある。

非平衡開放系である周辺プラズマのモデル化と動的応答メカニズムの解明は、学術的な意義はもちろん、核融合炉実現にとって不可欠な研究課題であり、その工学的意義も大きい。

3. 研究の方法

多種粒子系核融合周辺プラズマの非平衡・非定常な複雑な振る舞いを理解するために、以下の3段階の開発ステップを踏む：(1)従来、我々が非平衡水素プラズマを対象として開発してきた運動論的プラズマ輸送モデルおよび中性粒子輸送モデルの高度化、(2)水素以外の不純物種に対する運動論的モデルの高度化、(3)(1)、(2)に基づく不純物をも含む多種粒子系統合モデルによる核融合周辺プラズマの動的応答特性の総合的理解。

各開発ステップにおいて、炉心プラズマ周辺部のモデル化、固体壁との相互作用のモデル化、原子・分子データ整備の観点で専門家の分担・協力を仰ぐ。

さらに、実験的な測定が比較的容易な、水素負イオン源プラズマ装置や直線型核融合実験装置の実験研究者と連携し、モデル妥当性検証を行い、モデル高度化に資する。加えて、従来のプラズマ流体モデルとのベンチマークテストなども行い、上記、目標達成を目指す。

とくに、デタッチメントプラズマにおける原子・分子過程については、水素負イオン源プラズマとの共通点が多い。本研究で構築する運動論的プラズマ-中性粒子モデリングの妥当性検証とモデル高度化にとって、水素負イオン源プラズマ実験との比較は、重要な意味を持つ。

4. 研究成果

(1)運動論的プラズマ輸送モデルおよび中性粒子輸送モデルの高度化とその妥当性検証

デタッチメントプラズマでは、プラズマ体積中での再結合過程が、ダイバータ板への粒子束の低減にとってきわめて重要であ

る。水素原子イオン H^+ と電子との3体再結合や放射再結合に加えて、分子を介した再結合(分子活性化再結合: Molecular Activated Recombination: MAR)の重要性が指摘されている。MARでは、振動励起分子、分子イオン、負イオンが重要な役割を演じる。MARの反応過程は、上述したように、水素負イオン源プラズマにおける原子・分子過程と同様である。

そこで、われわれは、本研究のために開発してきた分子・原子過程計算モデルを実装した新たな運動論的水素負イオン源プラズマ-中性粒子統合コードを開発した。(下記、5. 主な発表論文等 5.1[4]および5.1[3]参照)

このコードでは、電子、 H^+ イオン、 H 原子に加えてMARの過程で重要となる H_2^+ 分子イオン、 H_2 振動励起分子をも考慮した多粒子種統合コードである。特筆すべき点は、異なる重みを有する各粒子種間の衝突をより正確に扱うことができる点にある。

モデル妥当性評価のため本コードを実際に高周波水素負イオン源プラズマのパルス実験に適用した。詳細は、主な発表論文5.1[4]に譲るが、中性原子からの発光線分光測定から求めた電子密度、電子温度と、計算結果とはよい一致がみられた。今後、ELMの際の非平衡・非定常プラズマ中における水素原子・分子の衝突・輻射および輸送過程の理解に関して、本研究で構築したモデルの有用性を示している。

(2)不純物輸送モデルの高度化とその妥当性検証

本研究では、従来、我々が開発してきた運動論的不純物輸送コード IMPGYRO の高度化を行った。具体的には、磁力線方向の熱力および摩擦力の運動論的評価モデルの実装と実トカマク体系への適用、不純物新古典輸送(インワードピンチおよび温度遮蔽効果)の運動論的なモデリングの2点が、主な成果である。

については、実際に高度化した IMPGYRO コードを、現在、国際プロジェクトとして建設中の ITER に適用し、不純物輸送予測シミュレーションを行った。(主な発表論文等 5.1[5], 5.2[2])

予測シミュレーションでは、ITERの代表的な二つのダイバータ運転モードである、a)高リサイクリング(アタッチ)モード、b)部分デタッチモードを対象とした。プラズマ流体コードの計算結果から、各々の運転モードに対する背景燃料水素プラズマ分布を与え、不純物輸送計算を実施した。その結果、a)高リサイクリング(アタッチ)モードでは、主として熱力の効果により、SOL

上流へとタンゲステン不純物が輸送されることが示された。一方、b)部分デタッチモードでは SOL 上流側への不純物輸送は、起こらないことが示された。将来の ITER 運転モードについての有用な知見が得られた。

また、ELMの熱パルスが発生するようなコアプラズマの閉じ込めが良い状態(Hモード)では、コアプラズマの周辺に、いわゆるペDESTAL領域と呼ばれる急峻な温度および密度勾配が存在する。このような急峻な温度および密度勾配の存在下では、上述の新古典輸送効果(とくにインワードピンチ)による不純物のコアへの侵入が懸念される。したがって、新古典輸送効果のより信頼性の高い評価が、きわめて重要となる。

従来、SOLあるいはダイバータプラズマなど核融合周辺プラズマを対象とした運動論的不純物輸送コードにおいて、新古典輸送効果を取り入れたコードは存在しなかった。その意味で、本研究において開発した不純物新古典輸送“インワードピンチ(Inward Pinch: IWP)および温度遮蔽効果(Temperature Shielding Effect: TSE)の運動論的なモデルの意義は大きい。

開発したモデルの妥当性検証を目的として、理論計算が可能な円形トカマク体系に適用した。(主な発表論文等 5.1[6])不純物イオンは、いわゆる Pfirsch-Schlüter 流に引きずられてトカマク上部へと輸送される。その後、磁気ドリフトによりコアの内部に侵入する。テスト粒子の磁力線を横切る方向の平均輸送速度は、新古典輸送理論から計算されるインワードピンチ(IWP)による輸送速度と良い一致を見た。また、新古典輸送理論による不純物の熱遮蔽効果(TSE)についても同様の結果を得ている。

さらに、上記、本研究において開発した不純物新古典輸送の運動論的なモデルを IMPGYRO に実装することにより、IMPGYRO コードを高度化した。これにより、ITER、原型炉などの実トカマク配位における不純物輸送計算において、運動論的に新古典輸送効果を考慮することが可能となった。

現在、ITERを対象として、背景プラズマのドリフト効果および不純物の新古典輸送効果を考慮した IMPGYRO コードによる計算が実施されている。初期結果では、不純物の新古典輸送効果の有無により、SOLおよびダイバータ領域での不純物密度空間分布に大きな差が生じている。この結果は、今後の不純物輸送解析における新古典輸送効果の重要性を示唆している。更なる結果の吟味と論文作成に、現在、着手している。

また、磁力線方向の不純物の輸送過程で

重要な熱力と摩擦力のモデル化について、本研究で開発した運動論的な輸送モデルと流体モデルによる計算結果のベンチマークテストを実施した。具体的には、熱力・摩擦力には流体モデルを用いた旋回中心近似不純物輸送コード (DIVIMP コード) と本研究で開発高度化した IMPGYRO コードによる計算を、全く同じ計算条件の下で実施した。

その結果、流体モデルでは磁力線方向の不純物イオンの輸送速度が過大評価されること、また、ダイバータ近傍での不純物密度分布に大きな差が生じることが示された。後者の原因は、主として、DIVIMP コードでは、ダイバータ板近傍における、いわゆる prompt re-deposition による板への再付着過程を正確に扱えないことによる。従来の旋回中心近似を用いたコードと比較して、フルオービットを追跡する IMPGYRO コードの優位性、重要性が示された。(主な発表論文等 5.2[1])

また、以上に基づき IMPGYRO コードによる原型炉の損耗、再付着の解析が進められている。(主な発表論文等 5.1[7]) 本研究で開発・高度化された IMPGYRO コードの有用性を示している。

(3) 流体コード計算結果および直線型ダイバータ実験結果との比較

本研究で開発した運動的粒子コードによる計算結果と流体モデルによる計算結果のベンチマークおよび筑波大学の直線型プラズマ実験装置 (GAMMA10/PDX) における実験との比較による妥当性検証を目指し、直線型プラズマ実験装置用に流体コード (LINDA コード) の開発を連携研究者側が中心となり行った。(主な発表論文等 5.1[8])

また、本研究で開発した中性粒子輸送コードとの統合化についても進められた。(主な発表論文等 5.1[2]) 統合化に際して、中性粒子輸送コードに実装されている原子・分子反応モデルの妥当性検証を目的として、GAMMA10/PDX 実験体系を空間平均した多粒子種 (電子、 H^+ , H_2^+ , H 原子、 H_2 振動励起分子 $H_2(v)$) レート方程式系を構築し、プラズマ-中性粒子統合計算を行い、イオン化レート、H 原子再結合レート、MAR 再結合レートを計算した。計算結果は、GAMMA10/PDX の典型的なデタッチメント実験のプラズマ温度 ($\sim 1eV$)、密度 ($\sim 1 \times 10^{17} m^{-3}$) では、MAR 再結合レートが H 原子再結合レートより大きくなり、MAR による再結合が支配的となる計算結果を得た。

GAMMA10/PDX では、実験的に MAR の観測が報告されており、計算結果は実験結果と矛盾しない。(1) に述べた負イオン源プラズマ装置における実験結果との比較も含め

て、本研究で構築した中性粒子輸送モデルに実装されている原子・分子反応モデルの妥当性を示している。

GAMMA10/PDX では、V字型をしたダイバータ板により、閉形状ダイバータを模擬しており、通常の軸対称性が仮定できない。空間分布を含めたさらに詳細な実験との比較には、3次元のプラズマ流体-中性粒子輸送コードが必要となる。また、実際のトカマク型配位においても、ガス供給や排気が軸対称に行われていない。このため、3次元流体輸送コードの開発が望まれる。

これに対して LINDA コードを含め、従来の SOL ダイバータプラズマを対象とした有限差分法や有限体積法を用いた流体コードのほとんどは、軸対称性を仮定した2次元コードである。現状、EUの開発したモンテカルロ法による流体コード (EMC3 コード) のみが3次元コードとして知られている。しかしながら、知る限り EMC3 コードでは、デタッチメントプラズマの再現に成功していない。その主な理由は、モンテカルロ法における境界条件の取り扱いの難しさ (主な発表論文等 5.1[9]) と対流支配の問題への適用性にやや欠ける点にあると推察される。そこで、我々は、ラグランジュ-モンテカルロ法に基づく、新しい3次元コードの開発にも着手した。主な発表論文等 5.1[1]) すでに1次元体系における基本的アルゴリズムについての検証を、ほぼ終わつつある。今後、2次元および3次元体系への拡張を行い、より定量的な実験との比較を目指す。

さらに、不純物輸送に関しても、上記の流体コードの計算結果および GAMMA10/PDX におけるデタッチメント実験の結果との比較を行うため、IMPGYRO コードの改良、高度化を並行して進めた。

すなわち、GAMMA10/PDX のデタッチメント実験では、デタッチメントプラズマ生成のための Ar などのいわゆるプラズマ冷却用の種不純物を入射している。これにより、プラズマ温度を減少させ、ダイバータ板への熱負荷を低減するとともに、デタッチメントで重要な体積中でのプラズマ再結合過程を促進する。

このため、従来、ダイバータ板から発生するタングステン不純物を対象としていた IMPGYRO コードに、Ar の原子過程を追加し、実験との比較を可能とした。実際に、LINDA コードによって得られた背景プラズマ分布をもとに、GAMMA10/PDX 内の Ar 不純物輸送計算を実施した。(主な発表論文等 5.3[2])

その結果、背景プラズマの密度が高い場合に、上流に輸送される Ar 不純物イオンが減少するという計算結果を得ている。これは、

実験と矛盾しない。さらなる定量的かつ詳細な比較には、上と同様、3次元流体コードによる背景プラズマの計算が必要となる。

(4) ELM に対する動的応答解析

上記、4. 研究成果(1) - (3) に示したモデルおよびコードの高度化と妥当性検証に基づき、ELM に対する動的応答解析に着手した。

PIC 法に基づくプラズマ粒子輸送解析で求めた電子エネルギー分布関数 (EEDF) をもとに、ELM の際の分布関数の非平衡性を考慮し、GAMMA10/PDX の典型的な運転条件下でのデタッチメントプラズマの動的応答シミュレーションを、実施した。

その結果、ELM パルスの際には、EEDF の高エネルギー成分が、高い振動励起準位分子生成に寄与することが確かめられた。一方、ELM パルス終了後は、EEDF の高エネルギー成分がほとんど存在しない状態となり、MAR の生成レートが増大することが示された。このような MAR の動的な振る舞いを、EEDF の非平衡性まで考慮したシミュレーションは、現状、知る限りない。以上の結果は、8月に開催される第12回開放端磁場系プラズマ閉じ込め国際会議(OS2018)に発表予定である。

(5) まとめと今後の展望

以上述べたように、本研究では ELM の際の熱パルスに対するデタッチメントプラズマの動的応答解析が可能となる新しい数値シミュレーションモデルの構築を試みた。

プラズマと中性粒子統合モデルに関しては、ELM の際のプラズマの非平衡・非定常性を考慮して、MAR を含む複雑な水素原子・分子の衝突・輻射過程を模擬できるシミュレーションモデルの構築を行った。デタッチメントの動特性解析に有用なシミュレーションモデルの開発に成功し、今後のより詳細なデタッチメント動特性の理解に有用なシミュレーションツールが本研究により構築できた。

一方で、不純物輸送の運動論的モデルの高度化については、研究成果4.(2)に述べたように ELM の解析に重要となる新古典輸送効果の運動論的モデル化、ITER、原型炉に対する予測シミュレーションなど、さまざまな成果が得られたものの、プラズマ-中性粒子輸送コードと不純物輸送コードとの統合化については、今後の課題として残された。

尚、本研究を基盤として、SOL・ダイバータプラズマのみではなく、さらにコア周辺プラズマの研究者をも含めたより広範な共同研究(自然科学研究機構 核融合科学研究

所一般共同研究「不純物を考慮した核融合周辺プラズマのモデリング」)が開始されている。今後、本研究で開発したツールのさらなる妥当性検証、モデル高度化を行い、ITER、原型炉設計における、より信頼性の高い周辺プラズマ予測シミュレーションモデルの構築に寄与する。

5. 主な発表論文等

5.1 学術論文(全て査読有)

- [1] R. Tatsumi, A. Runov, R. Schneider, A. Hatayama,
“Development of a Lagrange-Monte-Carlo Scheme for Fluid Modeling of SOL/Divertor Plasmas”,
Contributions to Plasma Physics, (2018) in press.
- [2] S. Islam, K. Abe, R. Tatsumi, T. Iijima, A. Hatayama, Y. Nakashima,
“Numerical Simulation Study towards Plasma Detachment in the End-Cell of GAMMA 10/PDX by a Coupled Fluid-Neutral Code”,
Contributions to Plasma Physics, (2018) in press.
- [3] K. Nishida, S. Mattei, J. Lettry and A. Hatayama,
“Numerical Analysis of Effects of Ion-Neutral Collision Processes on RF ICP Discharge,”
Journal of Applied Physics, **123** (2018) 043305.
- [4] S. Mattei, K. Nishida, M. Onai, J. Lettry, M. Q. Tran and A. Hatayama,
“A fully-implicit Particle-In-Cell Monte Carlo Collision code for the simulation of inductively coupled plasmas,”
Journal of Computational Physics, **350** (2017) 891.
- [5] S. Yamoto, X. Bonnin, Y. Homma, H. Inoue, K. Hoshino, A. Hatayama, R.A. Pitts,
“Kinetic modeling of the high-Z tungsten impurity transport in ITER plasmas using the IMPGYRO code in the trace impurity limit”,
Nuclear Fusion, **57** (2017) 116051.
- [6] Y. Homma, S. Yamoto, Y. Sawada, H. Inoue, A. Hatayama,
“Kinetic modeling for neoclassical transport of high-Z impurity particles using a Binary Collision Method”,
Nuclear Fusion, **57** (2017) 036009.
- [7] Y. Homma, K. Hoshino, S. Yamoto, N. Asakura, S. Tokunaga, A. Hatayama, Y. Sakamoto, R. Hiwatari, K. Tobita and Joint Special Design Team for Fusion DEMO,
“Numerical analysis of tungsten erosion and deposition processes under a DEMO divertor plasma and geometry”,

Nuclear Materials and Energy, **12** (2017) 323.

- [8] S. Islam, Y. Nakashima, A. Hatayama, “Investigation of Plasma Behavior during Noble Gas Injection in the End-Cell of GAMMA10/PDX by using the Multi-Fluid Code “LINDA”, Plasma Physics and Controlled Fusion, **59** (2017) 125010
- [9] R. Tatsumi, Y. Homma, S. Yamoto, A. Hatayama, “Basic Consideration of Monte Carlo Algorithm to Solve Fluid Equations for SOL/divertor Plasmas”, Contributions to Plasma Physics, **56** (2016) 516.

[以上を含め、学術雑誌論文 計 41 件]

5.2 国際会議発表

- [1] S. Yamoto, X. Bonnin, Y. Homma, S. W. Lisgo, A. Hatayama, R. A. Pitts, “*W* transport simulations in divertor and SOL plasma using IMPGYRO and benchmark against DIVIMP”, The 23rd ITPA Divertor/SOL topical group meeting, Naka, Japan (2016/Oct./24-27)
- [2] S. Yamoto, X. Bonnin, Y. Homma, H. Inoue, K. Hoshino, A. Hatayama, R. A. Pitts, “Kinetic modeling of impurity transport using the IMPGYRO code”, in Proc. of the 26th IAEA Fusion Energy Conference, TH/P6-23, Kyoto, Japan (2016)

[以上を含め国際会議発表 計 42 件]

5.3 国内学会発表

- [1] 畑山 明聖, 「プラズマ境界層のパーサタイルモデリング」, 日本物理学会第 73 回年次大会 2018 年 3 月 野田 (2018 年)
- [2] 武智 さゆり、巽 瞭子、イスラム シャヒヌル、矢本 昌平、畑山 明聖、中嶋 洋輔, 「直線型核融合装置 GAMMA10 /PDX プラズマ中における Ar 不純物輸送解析」, Plasma Conference 2017、2017 年 11 月 姫路 (2017 年)

[以上を含め国内学会発表 計 38 件]

[本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況]

マックスプランクプラズマ物理研究所 IPP (ドイツ)、欧州原子核研究機構 CERN (EU) ITER 機構

6. 研究組織

(1) 研究代表者

畑山明聖 (Hatayama Akiyoshi)
慶應義塾大学・理工学部・教授
研究者番号 : 10245607

(2) 研究分担者

宮本賢治 (Miyamoto Kenji)
鳴門教育大学・大学院学校教育研究科・准教授
研究者番号 : 00532996

林伸彦 (Hayashi Nobuhiko)
国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・那珂核融合研究所・先進プラズマ研究部・グループリーダー
研究者番号 : 10354573

星野一生 (Hoshino Kazuo)
国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・那珂核融合研究所・先進プラズマ研究部・主幹研究員
研究者番号 : 50513222

深野あづさ (Fukano Azusa)
東京都立産業技術高等専門学校・ものづくり工学科・教授
研究者番号 : 90259838

(3) 連携研究者

澤田圭司 (Sawada Keiji)
信州大学・工学部・教授
研究者番号 : 40262688

津守克嘉 (Tsumori Katuyoshi)
大学共同利用機関法人・自然科学研究機構核融合科学研究所・教授
研究者番号 : 50236949

小島有志 (Kojima Atsushi)
国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・那珂核融合研究所・研究副主幹
研究者番号 : 50446449

村上泉 (Murakami Izumi)
大学共同利用機関法人・自然科学研究機構核融合科学研究所・教授
研究者番号 : 30290919

中村浩章 (Nakamura Hiroaki)
大学共同利用機関法人・自然科学研究機構核融合科学研究所・教授
研究者番号 : 30311210

中嶋洋輔 (Nakashima Yousuke)
筑波大学・数理物質系・物理学域
プラズマ研究センター・センター長 教授
研究者番号 : 00188939

(4) 研究協力者

Jacques Lettry (レトリー ジャッキー)