

令和 2 年 6 月 12 日現在

機関番号：14301  
研究種目：若手研究(B)  
研究期間：2016～2019  
課題番号：16K17844  
研究課題名（和文）電子系ダイナミクスを取り入れた熱源駆動型乱流による内部輸送障壁の自発形成  
  
研究課題名（英文）Spontaneous internal transport barrier formation in flux-driven turbulence with kinetic electron dynamics  
  
研究代表者  
今寺 賢志 (Imadera, Kenji)  
  
京都大学・エネルギー科学研究科・准教授  
  
研究者番号：90607839  
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）：乱流を抑制することで断熱層/粒子遮蔽層として作用する「内部輸送障壁」の形成は、核融合プラズマを高性能化する上で重要な鍵を握っている。本研究では、我々が開発を進めている第一原理コードGKNETに対して、より現実に即した電子モデルを実装し、内部輸送障壁形成に対する電子ダイナミクスの影響を評価した。その結果、電子ダイナミクスが関与した乱流が選択的に励起されることで、従来は必要とされていた運動量入射をせずとも内部輸送障壁が自発的に形成されることを世界で初めて実証した。

#### 研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、加熱方法などによって電子ダイナミクスが関与した乱流を制御することで、内部輸送障壁が自発形成可能であること示唆しており、核融合プラズマの高性能化に資する研究である。また本研究では、大規模シミュレーションのための高効率並列化手法の開発や、特異点近傍における保存性を担保した数値計算スキームの開発なども行っており、数値計算分野に対しても貢献を行った。

研究成果の概要（英文）：The formation of internal transport barrier, which acts as the shielding layer of particle and heat transport by suppressing turbulence, has a crucial key to achieve high-performance plasma confinement. In this study, by introducing more realistic electron model to our first-principle code GKNET, we evaluated the impact of electron dynamics on internal transport barrier formation. We found that internal transport barrier is formed without external momentum injection by selectively exciting turbulence related to electron dynamics. This is the first report for spontaneous formation in the world.

研究分野：核融合学関連

キーワード：核融合プラズマ 大規模シミュレーション ジャイロ運動論 乱流輸送 内部輸送障壁

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

磁場閉じ込め核融合プラズマにおける「内部輸送障壁」の形成は、プラズマを高性能化する上で重要な鍵を握っているが、第一原理に基づいた乱流輸送シミュレーションでは再現されていなかった。これは、大規模な計算機資源を必要とする大域的乱流輸送コードの開発・実行が容易でないこと、さらには径電場を含む背景分布と乱流の相互作用が物理的に解明されていないことに起因している。

そこで研究代表者である今寺は、近年、新たに大域的乱流輸送コード「GKNET」を開発した。本コードでは、外部からの熱ソース/シンク、ならびに衝突効果が適切に導入されており、乱流輸送だけではなく、新古典輸送過程を経て形成される径電場も適切に評価することができる。また、有限ラーマー半径効果 (FLR) を厳密に取り扱っている点が本コードの特徴の1つであり、ベンチマークテストにおいてその妥当性は十分検証されている。

このコードを用いて、熱源駆動型乱流輸送シミュレーションを行った結果、内部輸送障壁の形成に成功したが、形成のために一定量の運動量入射を必要としており、自発的な形成には本研究を開始した時点で至っていなかった。

### 2. 研究の目的

そこで本研究では、より現実に即した運動論的電子モデルを GKNET に導入し、従来のイオン温度勾配 (ITG) 乱流だけでなく電子ダイナミクスが関与した捕捉電子モード (TEM) 乱流を取り扱うように拡張することで、乱流によって駆動されるトロイダル自発回転を積極的に活用し、自発的な内部輸送障壁形成を実現することを目的とした。

### 3. 研究の方法

本研究は以下の3つの計画を立て、最終目標である内部輸送障壁の自発形成を目指した。

- (1) 大規模並列計算に向けた GKNET の高効率並列化
- (2) 運動論的電子モデルの導入
- (3) 熱源駆動型 ITG/TEM シミュレーションによる内部輸送障壁の自発形成

### 4. 研究成果

- (1) 大規模並列計算に向けた GKNET の高効率並列化

数万コアによる大規模シミュレーションを想定して、GKNET の高効率並列化を行った。具体的には、まずハイブリッド並列の実装を行い、更に MPI 一対一通信のオーバーラップを行うことで計算速度の向上を試みた。その結果、従来の Flat MPI のケースと比較して、約 25.8% の高速化に成功した。

また、運動論的電子を実装した際に、準中性条件を差分化して解く収束性が悪化することから、不完全コレスキー分解を前処理としたソルバーを用いることで、収束効率の改善を行った。

さらに当初は予定していなかったが、特異点近傍で生じる数値的な湧き出しによって、保存性が破綻する問題が生じたことから、特異点を跨るよう計算メッシュを割り当て、近傍における離散化手法を改善することで、厳密な粒子保存性を担保した数値計算スキームを開発し、丸め誤差の範囲でその保存性が成立することを実証した。

- (2) 運動論的電子モデルの導入

従来の運動論的電子モデルの場合、数値的な高周波モードが現れることによって、時間方向の刻み幅が大きく制限される問題が生じていた。そこで本研究では、近年開発されたハイブリッド電子モデルを実装することで、捕捉電子の運動論効果や新古典輸送に対する効果を保持しつつ、上述の高周波モードの回避を試みた。その結果、十分に現実的な時間方向の刻み幅で電子ダイナミクスを取り入れた長時間シミュレーションを行うことに成功した。

- (3) 熱源駆動型 ITG/TEM シミュレーションによる内部輸送障壁の自発形成

(1)-(2) によって開発したコードを用いて、外部からの運動量入射を必要としない内部輸送障壁の自発形成を試みた。図 1 は (a) 断熱電子を用いた場合の熱源駆動型 ITG 乱流、(b) 運動論的電子を用いた場合の熱源駆動型 ITG 乱流、(c) 運動論的電子を用いた場合の熱源駆動型 ITG/TEM 乱流における径電場の空間-時間発展を示している。ITG 乱流のケースでは十分急峻なイオン温度勾配がイオン加熱によって保持されており、ITG/TEM 乱流のケースでは十分急峻なイオン/電子温度勾配がイオン/電子加熱によって保持されている。これらの結果から、いずれの場合も  $q_{min}$  面で径電場が極大値を取る一方、その値は運動論的電子を用いた (b) と (c) の方が相対的に大きいことがわかる。これは、運動論的電子ダイナミクスによって電子密度揺動と静電ポテンシャルの間で位相差が生じることで、ITG/TEM 不安定性が増大し、結果として  $q_{min}$  面近傍の帯状流生成も増大したためと考えられる。

興味深い点としては、図 2(a) に示すように、その際にロバストな順方向のトロイダル自発回転が  $q_{min}$  面で駆動されている点である。運動量輸送理論によると、運動量フラックスの残留応力

成分は、 $\Pi_{r\phi}^{RS} \sim \alpha IV_E' + \beta I' + \gamma(k_\theta k_\parallel \delta\phi^2)$ で与えられるが、今回の径電場分布が形成されると第1項が運動量拡散を減少させるように作用するため、ロバストなトロイダル自発回転が保持されているものと考えられる。一方、電子温度勾配が急峻な場合、ITGモードの成長率が低い負磁気シア領域において、選択的にTEMが励起されることで、反対方向のトロイダル自発回転が形成されている(図2の $0.2a_0 < r < 0.4a_0$ における赤線参照)。これはバレーニング角の符号がITGモードは正であるのに対して、TEMは負であることに起因している。

このような自発回転分布の違いは、径電場の保持に異なる影響を与えており、図3に示すように、(b)運動論的電子を用いた場合の熱源駆動型ITG乱流では、ロバストな順方向のトロイダル自発回転によって $q_{min}$ 面のやや内側において強い径電場シアが形成される一方、(c)運動論的電子を用いた場合の熱源駆動型ITG/TEM乱流では、 $0.2a_0 < r < 0.4a_0$ における反対方向のトロイダル自発回転によって、径電場シアが更に増大していることがわかる。その結果、図2(b)に示すように、 $0.4a_0 < r < 0.6a_0$ における(c)のイオン乱流熱輸送係数が、新古典輸送係数と同レベルまで低下することが明らかとなった。これは、 $q_{min}$ 面近傍を境界として異なるモードが励起されることで、自発的なITBが形成されることを示唆している。

以上から、電子ダイナミクスは $q_{min}$ 面近傍において径電場とロバストな自発回転を励起することでITBの自発形成に本質的な役割を果たしており、ITBを制御する上で、イオン加熱だけでなく、電子加熱も重要であることが明らかとなった。これらの結果は、JT60-SAやITER、DEMOにおけるITBの制御に資するものと言える。

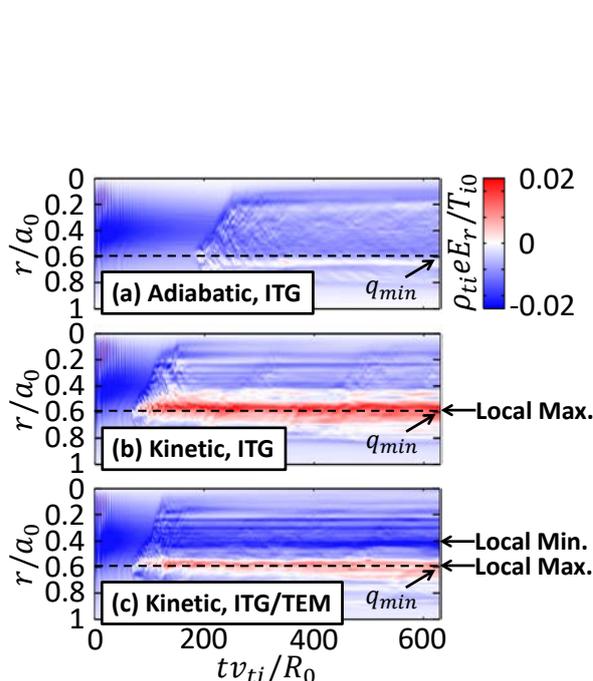


図1: (a)断熱電子を用いた場合の熱源駆動型ITG乱流、(b)運動論的電子を用いた場合の熱源駆動型ITG乱流、(c)運動論的電子を用いた場合の熱源駆動型ITG/TEM乱流における径電場の空間-時間発展

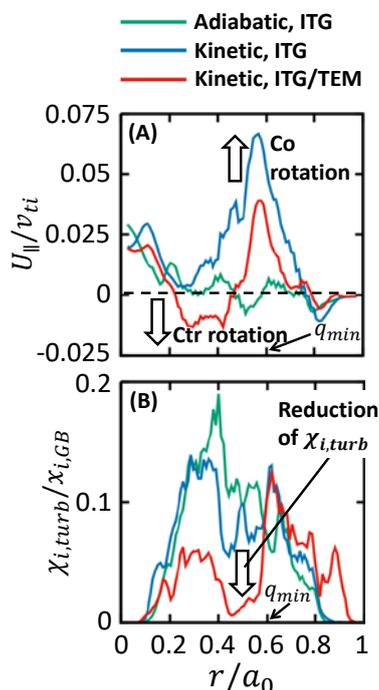


図2: (A)トロイダル自発回転、(B)ジャイロボーム輸送係数で規格化したイオン乱流熱輸送係数の半径分布

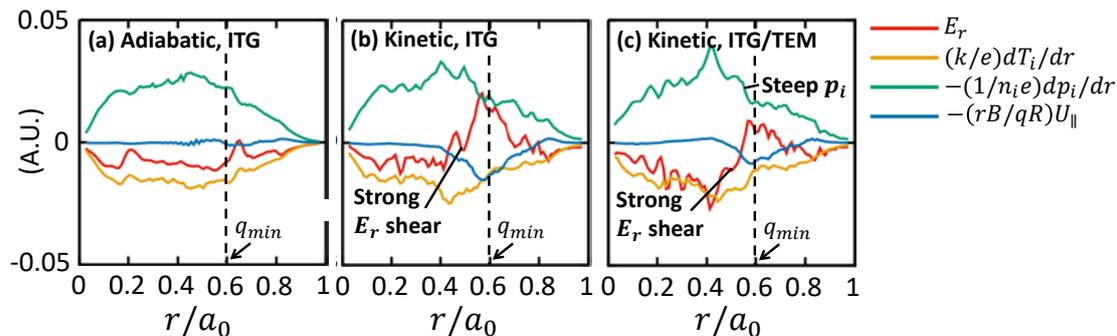


図3 (a)断熱電子を用いた場合の熱源駆動型ITG乱流、(b)運動論的電子を用いた場合の熱源駆動型ITG乱流、(c)運動論的電子を用いた場合の熱源駆動型ITG/TEM乱流における力学的平衡の各項の半径分布

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Zhihao Qin, Kenji Imadera, Jiquan Li and Yasuaki Kishimoto	4. 巻 13
2. 論文標題 Global Gyrokinetic Simulation of Linear Micro-Instability Using Parameters Referring to HL-2A Plasma with Ion Transport Barrier	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 3403083 1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.13.3403083	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 Kevin Obrejan, Kenji Imadera, Jiquan Li and Yasuaki Kishimoto	4. 巻 216
2. 論文標題 Development of a new zonal flow equation solver by diagonalization and its application in non-circular cross-section tokamak plasmas	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Computer Physics Communications	6. 最初と最後の頁 8-17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="http://dx.doi.org/10.1016/j.cpc.2017.02.010">http://dx.doi.org/10.1016/j.cpc.2017.02.010</a>	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 Wei Wang, Yasuaki Kishimoto, Kenji Imadera, Jiquan Li and Zheng-Xiong Wang	4. 巻 58
2. 論文標題 A mechanism for the formation and sustainment of the self-organized global profile and E×B staircase in tokamak plasmas	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 056005 1-17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1088/1741-4326/aab032">https://doi.org/10.1088/1741-4326/aab032</a>	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 Johan Anderson, Kenji Imadera, Yasuaki Kishimoto, Jiquan Li and Hans Nordman	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 Statistical description of turbulent transport for flux driven toroidal plasmas	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 066013 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1088/1741-4326/aa686b">https://doi.org/10.1088/1741-4326/aa686b</a>	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 Akihiro Ishizawa, Kenji Imadera, Yuji Nakamura, Yasuaki Kishimoto	4. 巻 26
2. 論文標題 Global gyrokinetic simulation of turbulence driven by kinetic ballooning mode	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 082301 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1063/1.5100308">https://doi.org/10.1063/1.5100308</a>	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27件 (うち招待講演 7件 / うち国際学会 17件)

1. 発表者名 Kenji Imadera, Kevin Obrejan, Akihiro Ishizawa and Yasuaki Kishimoto
2. 発表標題 GKNET overview
3. 学会等名 ITPA Transport and Confinement Topical Group Meeting Spring 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 今寺賢志, 岸本泰明
2. 発表標題 運動論的電子モデルに基づいたジャイロ運動論的熱源駆動型乱流輸送シミュレーション
3. 学会等名 第12回 核融合エネルギー連合講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kenji Imadera, Kevin Obrejan, Wei Wang, Akihiro Ishizawa and Yasuaki Kishimoto
2. 発表標題 Status of GKNET
3. 学会等名 US-Japan JIFT Exascale Computing Workshop (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kenji Imadera, Kevin Obrejan, Wei Wang, Akihiro Ishizawa and Yasuaki Kishimoto
2. 発表標題 Global turbulent transport and profile formation in full-f gyrokinetic simulation
3. 学会等名 24th NEXT Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kenji Imadera, Akihiro Ishizawa and Yasuaki Kishimoto
2. 発表標題 Global gyrokinetic electrostatic/electromagnetic GKNET simulation
3. 学会等名 US-Japan Joint Institute of Fusion Theory Workshop on "Multi-scale Simulations in Plasma Physics" (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 今寺 賢志, 秦 志豪, 中島 大地, 本田 裕也, 石澤 明宏, 岸本 泰明
2. 発表標題 運動論的電子効果を取り入れた大域的ジャイロ運動論シミュレーション
3. 学会等名 第8回 IFERC-CSC研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 今寺賢志, 岸本泰明
2. 発表標題 磁場閉じ込め核融合プラズマの大域的乱流輸送シミュレーション
3. 学会等名 第22回 若手科学者によるプラズマ研究会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kenji Imadera, Jiquan Li and Yasuaki Kishimoto
2. 発表標題 ITB formation by toroidal momentum injection in flux-driven gyrokinetic turbulence
3. 学会等名 7th Asia-Pacific Transport Workshop Group (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kenji Imadera, Rentaro Yoshida and Yasuaki Kishimoto
2. 発表標題 Full-f gyrokinetic simulation with kinetic/hybrid electron model
3. 学会等名 12th Japan-Korea workshop (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kenji Imadera, Paul Hilscher, Obrejan Kevin, Jiquan Li and Yasuaki Kishimoto
2. 発表標題 5D full-f gyrokinetic simulation for ion turbulence and transport barrier in tokamak plasmas
3. 学会等名 Collisionless Boltzmann (Vlasov) Equation and Modeling of Self-Gravitating Systems and Plasmas (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 今寺賢志, 李繼全, 岸本泰明
2. 発表標題 トカマクプラズマ中の内部輸送障壁形成に関する大域的ジャイロ運動論シミュレーション
3. 学会等名 Plasma Conference 2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kenji Imadera, Jiquan Li and Yasuaki Kishimoto
2. 発表標題 ITB formation in gyrokinetic ITG turbulence with toroidal momentum injection
3. 学会等名 2nd Kyoto Univ. - UNIST Workshop on Turbulence and MHD in Fusion Plasmas (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Kenji Imadera, Jiquan Li and Yasuaki Kishimoto
2. 発表標題 Study of global transport and internal transport barrier formation in flux-driven gyrokinetic ITG turbulence
3. 学会等名 The 18th International Congress on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Kenji Imadera, Jiquan Li and Yasuaki Kishimoto
2. 発表標題 Full-f gyrokinetic turbulence simulation for ITB formation
3. 学会等名 The 21st Joint EU-US Transport Task Force Meeting (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Kenji Imadera, Jiquan Li and Yasuaki Kishimoto
2. 発表標題 ITB formation in Gyrokinetic Flux-driven ITG Turbulence
3. 学会等名 26th IAEA Fusion Energy Conference (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 今寺賢志, 岸本泰明
2. 発表標題 内部輸送障壁形成に対する弱磁気シア効果
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会 第33回年会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Kenji Imadera Obrejan Kevin, Rentaro Yoshida, Jiquan Li and Yasuaki Kishimoto
2. 発表標題 ITB formation in flux-driven gyrokinetic turbulence
3. 学会等名 22nd NEXT Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kenji Imadera and Yasuaki Kishimoto
2. 発表標題 Flux-driven full-f gyrokinetic ITG/TEM simulation with hybrid kinetic electron model
3. 学会等名 5th Kyoto Univ. - UNIST Workshop on Turbulence and MHD in Fusion Plasmas (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kenji Imadera, Daichi Nakajima and Yasuaki Kishimoto
2. 発表標題 Turbulent particle/momentum/heat transport in flux-driven ITG/TEM turbulence
3. 学会等名 14th Japan-Korea Workshop on "Modeling and Simulation of Magnetic Fusion Plasmas" (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kenji Imadera and Yasuaki Kishimoto
2. 発表標題 Effect of kinetic electron dynamics on ITB formation in flux-driven ITG/TEM turbulence
3. 学会等名 3rd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kenji Imadera, Mikiya Muto, Akihiro Ishizawa, Yasuaki Kishimoto
2. 発表標題 Global profile formation and relaxation in flux-driven ITG/TEM turbulence
3. 学会等名 Max Planck Princeton Center Workshop (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 今寺賢志, 吉田練太郎, 岸本泰明
2. 発表標題 大域的イオン温度勾配/捕捉電子モードに対する磁気シア依存性
3. 学会等名 日本物理学会 第72回年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kenji Imadera, Jiquan Li and Yasuaki Kishimoto
2. 発表標題 Global turbulent transport and mean flows in flux-driven gyrokinetic turbulence
3. 学会等名 Festival de Theorie 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 今寺 賢志, 中島大地, 石澤明宏, 岸本 泰明
2. 発表標題 イオン加熱および電子加熱下での大域的な乱流輸送と分布形成
3. 学会等名 25th NEXT Workshop
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 今寺 賢志, 中島大地, 岸本 泰明
2. 発表標題 イオン加熱および電子加熱下での大域的な乱流輸送と分布形成
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 今寺 賢志, 中島大地, 岸本 泰明
2. 発表標題 熱源駆動型乱流における内部輸送障壁形成に対する運論的電子効果
3. 学会等名 プラズマシミュレーションポジウム 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 今寺 賢志, 石澤 明宏, 中島 大地, 武藤 幹弥, Zhihao Qin, Wei Wang, 岸本 泰明
2. 発表標題 大域的ジャイロ運動論コードGKNETによる数値トカマク研究の現状と課題
3. 学会等名 第36回 プラズマ・核融合学会 年会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 プラズマ・核融合学会	4. 発行年 2018年
2. 出版社 京都大学学術出版会	5. 総ページ数 404
3. 書名 プラズマシミュレーション：多階層複雑現象の解明へ	

〔産業財産権〕

〔その他〕

京都大学大学院 エネルギー科学研究科 エネルギー基礎科学専攻 プラズマ・核融合基礎学分野  
<http://plasma-fusion.energy.kyoto-u.ac.jp>

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
---------------------------	-----------------------	----