

平成22年6月1日現在

研究種目：基盤研究（B）
 研究期間：2006～2009
 課題番号：18360448
 研究課題名（和文） 総合物理モデルの構築による燃焼プラズマの自己形成制御と崩壊抑制に関する研究
 研究課題名（英文） Study of control of self-organization and suppression of collapse of burning plasmas by the construction of integrated physics model
 研究代表者
 小関 隆久（OZEKI TAKAHISA）
 独立行政法人日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門・研究主席
 研究者番号：50354577

研究成果の概要（和文）：

プラズマ自ら構造形成および崩壊を起こす核融合燃焼プラズマの物理特性の解明と制御法の確立に向けて、総合物理モデルの開発及びそれを用いた特性解明を行った。本研究では、コアプラズマ、周辺・ペDESTALプラズマ、ダイバータプラズマの3つの領域に分けて、各領域において物理モデルの開発及びそれらのモデルの統合化に成功した。統合化したモデルを用い、プラズマ周辺局在モード（ELM）による輸送特性の解明、コアプラズマとダイバータとの矛盾無い熱・粒子輸送特性、等の物理機構解明及び制御指針を示した。

研究成果の概要（英文）：

Toward understanding and controlling fusion burning plasmas that have physical properties of the autonomous formation and decay, physics models are developed and integrated properties are investigated. In this study, models of core plasma, edge-pedestal plasma, and divertor are developed, and their models are successfully integrated. By using the integrated model developed here, mechanism of heat and particle transport due to the edge localized mode (ELM), self-consistent characteristics of the transport in the divertor and the core plasma are investigated, and guidelines of control are indicated.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	4,700,000	1,410,000	6,110,000
2007年度	4,100,000	1,230,000	5,330,000
2008年度	3,000,000	900,000	3,900,000
2009年度	3,000,000	900,000	3,900,000
年度			
総計	14,800,000	4,440,000	19,240,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・核融合学

キーワード：プラズマ閉じ込め、安定性、燃焼プラズマ、自己形成、崩壊抑制、統合化

1. 研究開始当初の背景

核融合燃焼プラズマは自ら固有のプラズマ内部構造を形成し、プラズマ自ら安定定常、

振動、崩壊過程などを起こすことが予想される。特に、核融合出力効率の高い高性能プラズマ（高Q状態プラズマ：Qは核融合エネルギー）

ギー増倍率)においては、プラズマの自己形成や分岐崩壊を制御する外部入力量が小さくなり、制御が難しくなる。これら燃焼プラズマの自己形成および自己崩壊の物理特性の解明と制御法の確立は、核融合研究を進める上で重要課題である。そのため、燃焼プラズマの各物理モデルの開発を行なうと共に、物理モデルの総合化を図り、幾つかの物理モデルが相互作用するトカマクプラズマをシミュレートできる統合コードの開発が求められていた。さらに、開発した統合コードを用いて、炉心プラズマの自己形成過程や分岐崩壊の解明や制御法の構築が必要であった。

2. 研究の目的

本研究は燃焼プラズマのコア、周辺、ダイバータの各領域における物理モデルの開発を行なうと共に、物理モデルの総合化を図る。さらに、燃焼プラズマで特に課題となっている、プラズマ周辺での局在崩壊や自己分布形成、ダイバータにおける物理要素の相互作用特性、等の解明を行い、制御への指針を得る。

3. 研究の方法

燃焼プラズマを特徴的な3つの領域、すなわちコアプラズマ領域、周辺・ペDESTALプラズマ領域、ダイバータプラズマ領域、に分け、各領域において物理モデルの開発及びモデルの統合化を行った。

(1) コアプラズマ領域では、 α 粒子加熱・輸送を中心として、アルフェン固有モード不安定性などを想定した異常輸送モデルを開発し、コアプラズマ輸送モデルへ統合化した。また、閉じ込めに重要な働きをすると考えられるプラズマ流の輸送モデルを開発した。

(2) 周辺・ペDESTALプラズマは、燃焼プラズマの性能に大きく影響する領域である。ペDESTAL領域の磁場に垂直方向の輸送/スクレイプオフ層の磁場に平行方向の輸送/プラズマ周辺のMHD不安定性/中性粒子挙動を統合化したペDESTALプラズマ統合モデルを開発し、プラズマ周辺に局在した不安定性 (ELM) による崩壊とエネルギー吐き出しのプラズマ衝突周波数依存性等を明らかにした。

(3) ダイバータは、熱・粒子制御において重要な領域であり、ダイバータプラズマ輸送/中性粒子挙動/不純物輸送を結合した統合モデルの開発を行った。特に、粒子モデルによる不純物輸送モデルの統合化に成功した。

さらに、これらコア、ペDESTAL、ダイバータ領域の物理モデルの統合化を図り、統合物理モデルによるプラズマの特性解明研究を進め、不安定性による燃焼プラズマの熱/粒子輸送特性解析や、内部分布構造による周辺挙動の解明、局所高放射状態への形成制御の解明を行った。

4. 研究成果

(1) コアプラズマモデルの統合化

トロイダル・アルフェン・固有 (TAE) モード等の不安定モードが原因となる α 粒子の異常輸送は α 加熱効率を低下させ、ITER等の核燃焼プラズマの性能を低下させるとして懸念されている。 α 粒子の異常輸送を統合コードで模擬するため、半径方向への輸送項を伴った Fokker-Planck 方程式を用いた速度空間 1D+実空間 1D の数値解析コード FP-RAT を開発した。これを統合コードへ組み込むことにより、コア・プラズマ (重水素+3重水素) の輸送と核融合反応で生成されるアルファ粒子の減速過程と径方向輸送を矛盾なく解析することを可能にした (図1参照)。

ITER 標準シナリオ運転でプラズマ加熱を行っている時のQ値の時間変化を調べ、TAEモードによって α 粒子の異常輸送を発生し、Q値を低下させることを示せた。

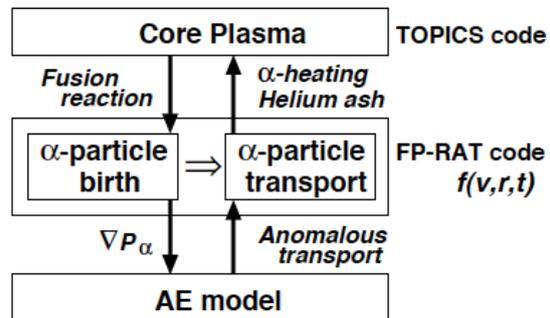


図1. 統合コードとFP-RATの関係。

プラズマ流は不安定性の抑制と密接な関係があるため、その物理機構を明らかにし定量的な予測手法を構築することが重要となっている。そのため、コアプラズマのプラズマ流を背景プラズマと自己無撞着に解くことの出来る多流体輸送コード TASK/TX を開発した。これまでの輸送コードと異なり、準中性条件を陽に課す必要がないという大きな特徴を持っている。この特性を活かし、JT-60U でトロイダルリップル磁場が大きいときに、プラズマ電流と順方向にトルクを入力しているにも関わらず、周辺部に逆方向の回転が生じることをシミュレーションで再現し (図2)、高速イオンのリップル損失によって流れる径方向電流が駆動するトルクが原因であることを突き止めた。

また、軌道追跡モンテカルロコード OFMC

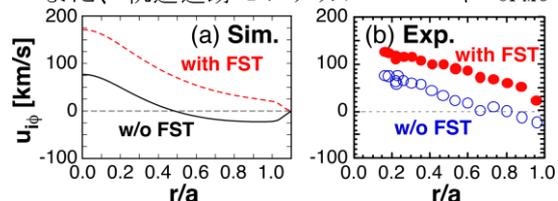


図2. フェライト鋼有り (with FST) と無し (w/o FST) におけるプラズマ小半径に対するプラズマ流の計算 (a) と実験 (b) の比較。

と統合したモデルを構築し、JT-60U で多数設置されている準垂直中性粒子ビームによって特に多く生成される捕捉高速イオンの、軌道効果によって生じるトルクを再現するとともに、その物理的特性を明らかにした。プラズマ周辺部ではイオンと中性粒子の衝突によるプラズマ回転の減速効果が顕著となるうえ、JT-60U ではガスパフによる回転方向の逆転現象も観測されている。そのため、中性粒子のプラズマでの挙動を簡便かつ正確に模擬するモデルを構築し、その妥当性を検証し確認した。また、ガスパフによって回転方向が変化する現象も、シミュレーションによって定性的に再現することに成功した。

(2) ペDESTALモデルの統合化

ペDESTAL領域は、プラズマ内部からの磁場を横切る熱粒子輸送、プラズマ周辺における閉じ込め改善と局所崩壊現象 (ELM)、プラズマ外部のスクレープオフ層 (SOL) 磁場に平行方向輸送が結合して連続した一つの現象を引き起こすため、モデルの統合が必要な領域である。

プラズマの閉じ込めエネルギーを増加させるには高いペDESTAL圧力が必要であるが、周辺部局在モード (ELM) が発生しエネルギーを吐き出して閉じ込めを低下させるとともにダイバータ板の寿命を縮めることが課題となっていた。このため、ELM の発生機構を明らかにし、ITER や将来の実証炉の性能予測のためには、エネルギー吐き出しやペDESTAL特性の統合モデルが必要であった。

このため、図3に示される1.5次元輸送コード TOPICS に理想 MHD 安定性コード MARG2D とスクレープオフ層 (SOL) /ダイバータ輸送モデル、中性粒子輸送コード/モデルを統合化したモデルを構築した。TOPICS では、与えたペDESTAL幅で新古典輸送を、その内側の領域で異常輸送を仮定して、ペDESTAL分布を形成する。ELM のモデルは、時々刻々にプラズマの安定性を MARG2D で調べ、プラズマが不安定な場合に ELM が発生するため、不安定モードの固有関数分布に基づいて熱/粒子拡散係数が増大するとした。さらに SOL/ダイバータ領域の自己矛盾のない輸送を解析するため、TOPICS に SOL/ダイバータの動的5点輸送モデルを統合した。5点モデルは、セ

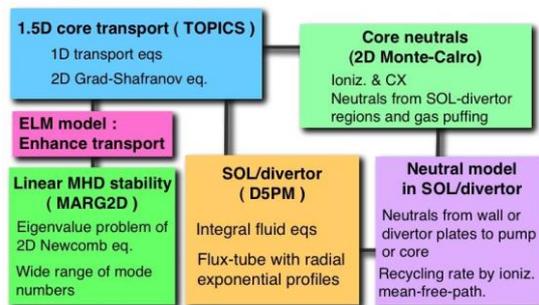


図3 ELM・ペDESTAL統合化モデルの概要

パラトリックス近傍の開いた磁力線チューブを4つの領域で分割し、各領域の積分流体方程式から5点 (滞留点、2つのダイバータ領域入口とシース入口) の物理量の非線形方程式を導出したものである。粒子のリサイクリングを考慮するために、炉心で2次元モンテカルロコード、SOL/ダイバータ領域で簡易モデルを用いて中性粒子の輸送を解いた。SOL/ダイバータ領域の簡易モデルでは、イオン化の実効的な平均自由行程長によりリサイクリング率を評価して、第1壁とダイバータ板で発生した中性粒子は排気されるか炉心領域へ逃げるとした。

この統合化モデルを用いて、JT-60U のパラメータにより、時間発展のシミュレーションを行い、ペDESTAL分布の形成と ELM による崩壊とが実験とほぼ同様に繰返される現象が得られた。用いたペDESTALの輸送モデルが、実験で観測された ELM 間輸送の衝突周波数依存性を再現し、ELM と ELM の間のエネルギー閉じ込め時間は JT-60U の閉じ込め比例則と一致することを確認した。さらに、ELM エネルギー損失の衝突周波数依存性を調べ、図4に示されるように実験で観測された ELM エネルギー損失の衝突周波数依存性を再現した。

シミュレーションによるエネルギー吐き出し機構の解明を行った。電子の輸送に関しては、低衝突周波数ではブートストラップ電流が ELM で増幅される輸送の範囲を広げ、かつ SOL 磁力線方向の熱伝導が SOL の温度を低下させることで、径方向の熱伝導損失を増幅させることが分かった。一方、イオンの輸送に関しては、低衝突周波数では温度緩和が弱くなりイオン温度が電子温度より高くなって、対流と荷電交換による損失を増幅することが分かった。これらの効果を合わせることで、全エネルギー損失は、図4の様に、衝突周波数の10倍の変化に対して損失が2倍程

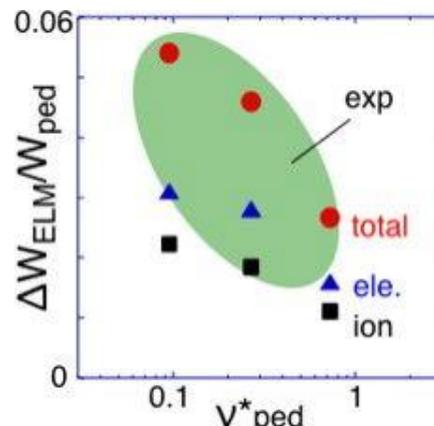


図4 ELM エネルギー損失 ΔW_{ELM} の衝突周波数 v^*_{ped} 依存性。図の点はシミュレーション結果、影の領域は JT-60U 実験データ。エネルギー損失 ΔW_{ELM} は、ペDESTALの閉じ込めエネルギー W_{ped} で規格化。

度変化することを示せた。

さらに、上記の推測を踏まえて、エネルギー損失に対するペDESTAL内側の圧力勾配の効果について調べた。図5に示される様に、ペDESTAL内側の急峻な圧力勾配が、不安定モードの固有関数分布を広げて、ELMで増幅される輸送の範囲を広げており、ペDESTAL内側の急峻な圧力勾配がELMエネルギー損失を増大することが解った。このシミュレーション結果は、JT-60Uの実験データとほぼ同じ傾向を示した。この結果から、ペDESTAL内側圧力勾配が、衝突周波数とともにELMエネルギー損失を決める重要な要因であることを明らかにした。

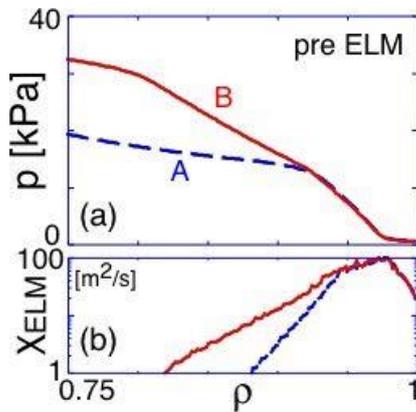


図5 ペDESTAL内側圧力勾配の異なる2つの場合(AとB)のELM発生時の圧力pとELMで増幅される拡散係数 χ_{ELM} の分布。

(3) ダイバータモデルの統合化

トカマク装置のダイバータは、プラズマ/中性粒子/不純物の挙動が相互作用する領域であり、ダイバータによる粒子・熱制御を矛盾無く研究するため、ダイバータ統合コードSONIC (SOLDOR/NEUT2D/IMPMC)の開発を行った。SONICの特徴は、モンテカルロコードIMPMCで不純物輸送とプラズマ輸送が自己無撞着に解ける事である。モンテカルロ法はモデリングの自由度が高い利点がある一方で、不純物イオンの散乱過程の時間ステップが減速時間に強く制限される事、モンテカルロノイズの問題、定常性の仮定の問題等の克服すべき課題があった。イオンの散乱過程に対して、ランジュバン方程式の解析解を用いた新しい拡散モデルを開発し、並列化による最適化を行い、またIMPMCコードの非定常計算へのモデル拡張をおこなった。こうしたモデル開発により、モンテカルロのノイズ問題を解決し、不純物輸送モンテカルロコードIMPMCとダイバータコード(SOLDOR/NEUT2D)の結合に世界で初めて成功した。

このSONICコードを用いて、JT-60Uでの強力なガスパフ実験のシミュレーションを行い、接触ダイバータから、X点MARFE発生ま

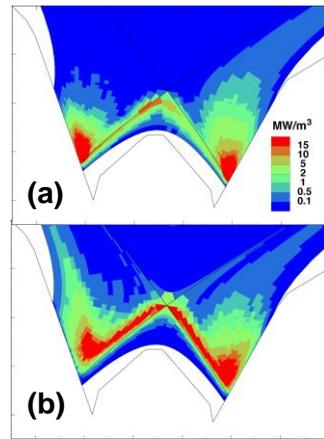


図6 SONICで計算したJT-60Uの放射損失分布。(a) ガスパフ前の接触状態、(b) ガスパフ後の非接触状態。

での放射損失の時間変化を再現し、モデリングの有効性を示した。図6に計算で得られた放射損失分布を示す。このシミュレーション解析により、プライベート領域から化学スパッタリングで発生したメタンが、X点近くまで深く侵入して解離した結果、X点近傍で強い放射損失をもたらす事を明らかにした。

また、次期装置JT-60SAでは、加熱パワーが41 MWと高いため、ダイバータ板の熱負荷が懸念されていた。SONICコードを用いたシミュレーション解析により、ダイバータ形状の最適化を行った。外側ダイバータにV字型コーナー(図7〇で囲んだ領域)を設置する事で、中性粒子をこの領域で圧縮、高リサイクリング状態を実現する事により、外側ダイバータは非接触状態となり、熱負荷を設計上問題が無い程度まで低減できる事を明らかにした。一方、X点を11cm程度上げると、外側での排気効率が上がり、外側ダイバータの非接触領域は狭まる。これにより、全面非接触状態となり閉じ込めが劣化した時、X点を上げる事で閉じ込めが回復する可能性を示した。

【プラズマ全領域の統合】

これまでの多くのダイバータシミュレーションでは、コアの端($r/a \sim 0.95$)から流出する粒子束、熱流束を入力データとして決め、プラズマ(不純物を含む)と中性粒子輸送の矛盾の無い定常解が求められてきた。しかし、これらの熱/粒子束は、本来コアでの輸送特性、あるいはELMが決める。そこで、1次元コアコード(TOPICS)と2次元ダイバータコード(SONIC)との結合を行った。この統合コードによって、高閉じ込めコアプラズマと非接触ダイバータプラズマが両立する放電条件の検討が初めて可能となった。

統合コードを用いて、JT-60SA装置の目的の一つ「完全電流駆動放電」のシミュレーションを行った。電流駆動を効率良く行うため、SOL密度を高く取る事が出来ない。このため、

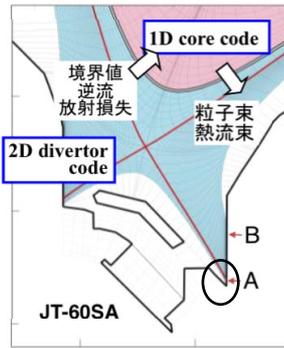


図7 JT-60SAにおけるコア輸送と2次元ダイバータコード統合計算概念図。

ダイバータ板への熱負荷が高くなる事が懸念されていた。従来の計算条件（コアからダイバータへの熱/粒子束を固定）のシミュレーションによって得られる定常状態と大きく異なる結果を得た（図8）。Hモード遷移後の熱/粒子束が減少し、そのことで、電子、イオン温度がダイバータ全面で減少し、その後のゆっくりとした熱/粒子束の増大により、広い領域でリサイクリングが高まり、これまでの定常計算では得られなかった高リサイクリング状態となり、熱負荷のピーク値が大きく減少する事が初めて明らかになった。この結果の意義は核融合炉の設計に大きく、これまでの熱/粒子束固定のダイバータシミュレーションの評価を見直す必要性を指摘した。

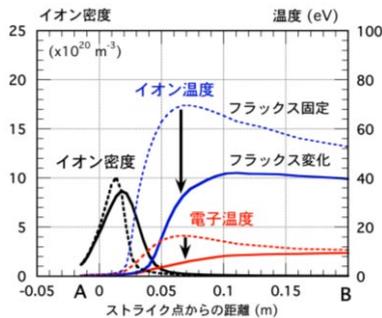


図8 外側ダイバータ板での密度、温度の径方向分布。横軸に示すA、B点は、図7に示す点に対応している。

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 30 件）

- ① N. Hayashi, JT-60 Team, Advanced tokamak research with integrated modeling in JT-60 Upgrade, Physics of Plasmas 17 (2010) 056112-1-056112-13, 査読有
- ② T. Ozeki, N. Hayashi, M. Honda, 他 7 名, Integrated Modeling for Control of Advanced Tokamak Plasma, J. Plasma

Fusion Res. SERIES 8 (2009) 1138-1142, 査読有

- ③ N. Hayashi, T. Takizuka, N. Aiba, 他 4 名, Integrated Simulation of ELM Energy Loss and Cycle in Improved H-mode Plasmas, Nucl. Fusion 49 (2009) 095015-1-095015-8, 査読有
- ④ K. Shimizu, T. Takizuka, K. Ohya, 他 5 名, Kinetic modelling of impurity transport in detached plasma for integrated divertor simulation with SONIC (SORDOR/NEUT2D/IMPMC/EDDY), Nucl. Fusion 49 (2009) 065028-1-056028-9, 査読有
- ⑤ K. Shimizu, T. Takizuka, H. Kawashima, Kinetic Effect of Thermal Force on Impurity Transport: Simulation of JT-60SA Divertor with Integrated Divertor Code SONIC, J. Nucl. Materials 390-391 (2009) 307-310, 査読有
- ⑥ M. Honda, T. Takizuka, A. Fukuyama, 他 2 名, Self-consistent simulation of torque generation by radial current due to fast particles, Nucl. Fusion 49 (2009) 035009-1-035009-10, 査読有
- ⑦ N. Hayashi, T. Takizuka, N. Aiba, 他 2 名, Simulation study of density dynamics effect on the ELM behavior with TOPICS-IB, J. Phys. Conf. Series 123 (2008) 012025-1-012025-10, 査読有
- ⑧ T. Ozeki and JT-60 team, High-beta steady-state research with integrated modeling in the JT-60 Upgrade, Phys. Plasmas 14 (2007) 056114-1-056114-12, 査読有
- ⑨ N. Hayashi, T. Takizuka, T. Ozeki, 他 2 名, Integrated simulation of ELM energy loss determined by pedestal MHD and SOL transport, Nucl. Fusion 47 (2007) 682-688, 査読有
- ⑩ T. Ozeki, N. Aiba, N. Hayashi, 他 2 名, Integrated Simulation Code for Burning Plasma Analysis, Fusion Science and Technology 50 (2006) 68-75, 査読有

〔学会発表〕（計 42 件）

- ① N. Hayashi, Advanced tokamak research with integrated modeling in JT-60U, 51st Annual Meeting of the Division of Plasma Physics of APS, 2009 年 11 月 2-6 日, Atlanta, USA (招待講演)
- ② K. Hamamatsu, Radial transport effects of alpha particles on burning plasma, proceedings of Energetic Particles in Magnetic Confinement Systems on 11th IAEA TM, 2009 年 9 月 21-23 日, Kyiv, Ukraine

- ③ N. Hayashi, Integrated simulation of ELM energy loss and cycle in improved H-mode plasmas, 22nd IAEA Fusion Energy Conference, 2008年10月13-18日, Geneva, Switzerland
- ④ K. Shimizu, Kinetic Modelling of Impurity Transport in Detached Plasma for Integrated Divertor Simulation with SONIC (SOLDOR/NEUT2D/IMPMC/EDDY), 22nd IAEA Fusion Energy Conference, 2008年10月13-18日, Geneva, Switzerland (口頭発表)
- ⑤ M. Honda, Self-consistent simulation of torque generation by radial current due to fast particles, 22nd IAEA Fusion Energy Conference, 2008年10月13-18日, Geneva, Switzerland
- ⑥ N. Hayashi, Integrated Simulation of ELM Crash with Dynamics Response of SOL-Divertor Plasmas, 3rd IAEA Technical Meeting on Theory of Plasma Instabilities, 2007年3月26-28日, York, U. K (招待講演)
- ⑦ N. Hayashi, Integrated ELM simulation with edge MHD stability and transport of SOL-Divertor Plasmas, 11th International Workshop on Plasma Edge Theory in Fusion Devices, 2007年5月23-25日, Takayama
- ⑧ T. Ozeki, High-beta steady-state research with integrated modeling in the JT-60 Upgrade, American Physical Society DPP, 2006年10月30日-11月3日, Philadelphia, USA (招待講演)
- ⑨ 相羽 信行, 大域的・周辺局在理想MHDモードの線形安定性解析手法の確立とELM解析への応用, 第23回プラズマ核融合学会年会, 2006年11月28日, つくば (招待講演)

[図書] (計0件)

[産業財産権] ○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他] なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小関 隆久 (OZEKI TAKAHISA)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門・研究主席

研究者番号: 50354577

(2) 研究分担者

林 伸彦 (HAYASHI NOBUHIKO)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門・研究副主席

研究者番号: 10354573

清水 勝宏 (SHIMIZU KATSUHIRO)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門・研究主幹

研究者番号: 30391262

(H19→H20:連携研究者)

濱松 清隆 (HAMAMATSU KIYOTAKA)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門・研究主幹

研究者番号: 20354574

(H19→H20:連携研究者)

松本 太郎 (MATSUMOTO TARO)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門・研究副主席

研究者番号: 50354676

(H19→H20:連携研究者)

相羽 信行 (AIBA NOBUYUKI)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門・任期付研究員

研究者番号: 20414584

(H19→H20:連携研究者)

滝塚 知典 (TAKIZUKA TOMONORI)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門・研究職

研究者番号: 40354576

(H19→H20 連携研究者)

岸本 泰明 (KISHIMOTO YASUAKI)

京都大学・エネルギー科学研究科・教授

研究者番号: 10344441

(H19→H20:連携研究者)

竹永 秀信 (TAKENAGA HIDENOBU)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・経営企画部・研究主幹

研究者番号: 60354601

(H19→H20 連携研究者)

(3) 連携研究者

本多 充 (HONDA MITSURU)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門・任期付研究員

研究者番号: 90455296

星野 一生 (HOSHINO KAZUO)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門・博士研究員

研究者番号: 50513222

浦野 創 (URANO HAJIME)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門・研究職

研究者番号: 70391258