

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 25 日現在

機関番号：82502

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26420863

研究課題名(和文)核融合プラズマの自律系における粒子供給による制御性に関する研究

研究課題名(英文)Study on controllability of fusion plasma by fueling in self-regulating system

研究代表者

竹永 秀信 (TAKENAGA, Hidenobu)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・核融合エネルギー研究開発部門・室長代理(定常)

研究者番号：60354601

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：核融合炉での燃料供給の最適化のため、ガスジェット入射のモデリング及び入射時のプラズマ応答特性解析を行った。モデリングに関しては、CIP法を用いた3次元流体方程式を解くプログラムを整備し、高密度低温度の物体を入射した時の拡散の様子を詳細に捉えた。応答特性に関しては、JT-60の内部輸送障壁を有する弱磁気シアプラズマにおける、入射時のイオン温度の時間変化を解析した。その結果、内部輸送障壁の内側では入射前の熱伝導係数を20%程度増加させ、外側の周辺領域では5%程度低下させた場合に実験結果をよく再現した。トロイダル回転速度にも変化が観測されたが、イオン温度に比べて速く元の状態へ戻ることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In order to optimize a fueling scenario in fusion reactor, modelling of gas-jet injection and analysis of plasma responses to the injection are performed. For the modelling, computer simulations of 3D fluid equation using the CIP method have been developed. Detailed diffusion process of cold dense material like an injected gas-jet is calculated. For the analysis of plasma responses to the gas-jet injection, time evolution of the ion temperature is analyzed in the weak shear plasma of JT-60 with the internal transport barrier (ITB). In the case that thermal diffusivity is assumed to increase by about 20% inside the ITB and decrease by about 5% outside the ITB, the analysis result well reproduces the experimental result. The toroidal rotation velocity also responds to the gas-jet injection and recovers faster than the ion temperature.

研究分野：核融合学

キーワード：核融合 炉心プラズマ 燃料供給 ガスジェット CIP法 粒子バランス コールドパルス トロイダル回転速度

1. 研究開始当初の背景

燃焼プラズマでは、DT 核融合反応で生じる α 粒子による自己加熱分布がプラズマ圧力分布を決め、プラズマ圧力分布が核融合反応分布、すなわち α 粒子による自己加熱分布を決めるため“強い自律系”が形成される。強い自律系が形成されている燃焼プラズマにおいて、燃料密度は外部制御可能な数少ない物理量の 1 つであり、燃料供給は燃焼プラズマを制御するための有効な手段である。燃焼プラズマを効率的に制御するためには、より炉心への燃料供給が必要であるが[1]、その一方で炉心に擾乱を与えすぎると容易に制御領域を逸脱することも考えられ[2]、供給の最適化は極めて重要な研究課題である。

大型トカマク装置 JT-60 においては、燃料供給装置として水素ガスを超音速のジェットにして入射するガスジェット装置を設置し、入射特性と炉心プラズマの応答特性を調べてきた [3]。時間分解能 0.167 ms の高速カメラで測定したガスジェット入射時の発光分布から、発光領域の先端は、炉心プラズマ境界の直ぐ内側近傍に達しているが、発光のほとんどは炉心プラズマ境界より外側で起こっており、ガスジェットで供給された燃料粒子のほとんどは炉心プラズマの外側で電離していることがわかっている。電離領域は、予測されるガスジェットの大きさから十分に広がっており、発光領域の形も前後ともに入射位置に対して凸となっている。この形状は、磁場配位を考慮したプラズマ形状（後ろ面は入射位置に対して凹）より、ガスジェットの幾何学形状に依存していることを示唆していると考えられる。この結果から、ガスジェットとプラズマの相互作用が、ガスジェットによる燃料供給に大きく影響していると考えられ、この相互作用を解明することが核融合炉でのガスジェットの適用可能性を明らかにするために重要である。

また、ガスジェット入射に対する炉心プラズマ周辺イオン温度の急激な減少と、その内側への伝搬（コールドパルス伝搬）が観測されている。燃焼プラズマでは、これらの過渡応答は加熱分布の変化を伴うため、炉心プラズマの状態を大きく変動させる要因と成り得る。そのため、燃焼プラズマ制御に向けた燃料供給の最適化のためには、これらの過渡応答特性を解明することが重要である。

さらに、プラズマの輸送特性と関連していると考えられているトロイダル回転速度にも過渡応答が観測されており、イオン温度の過渡応答との違いを解明することで、熱と運動量の輸送の違いを明らかにすることができる。炉心プラズマの輸送特性解明は、燃焼制御に向けて重要な研究課題である。

2. 研究の目的

本研究では、ガスジェットの入射特性を解明するために、プラズマとガスジェットの相互作用を明らかにする。高速カメラで測定し

たガスジェットからの発光分布は、ジェットの大きさより十分に広がっており、入射モデルの開発を実施する。モデルの開発には計算機を用いたシミュレーションが効果的であると考えられ、有効に取り入れつつモデル化を進める。

次に、プラズマの応答特性を解明するために、イオン温度のコールドパルス解析を行う。初期的解析では、平衡状態の熱伝導係数を用いて過渡応答特性が大まかには説明できることを示しているが、より詳細な解析を行い、平衡状態での熱伝導係数からのプラズマ輸送特性の「変化」を明らかにする。この「変化」はプラズマ応答特性を解明すると共に、プラズマ輸送特性決定の物理機構解明にも貢献するものである。さらに、ガスジェット入射時に、トロイダル回転分布も変化していることが観測されており、コールドパルスの伝搬と同様にトロイダル回転速度の非平衡状態から平衡状態への緩和を明らかにする。

3. 研究の方法

ガスジェット入射特性のモデル化については、著しい数値の変化を伴う場合の計算に有効な CIP (Constrained Interpolation Profile Scheme) 法によるプログラム開発を行い、実験結果との比較を通してプラズマとガスジェットの相互作用を明らかにする。CIP 法は、双曲型方程式を移流項と非移流項に分離して解く手法で、分布の補間に 3 次多項式を用いることで（現在は 3 次多項式以外の補間も行われるようになっている。）優れた数値安定性を実現でき、現在多くの分野で用いられている。固体・液体・気体と異なる相も統一的に取り扱えるといった特徴も持っている。

プラズマの過渡応答特性の解明においては、コールドパルスの速さや大きさを調べ、実験結果を再現できる熱伝導係数を導出する。導出した値の平衡状態における熱伝導係数からの「変化」を明らかにし、ガスジェットによる外部擾乱がプラズマに与える影響について検討する。さらに、トロイダル回転の変化速度とイオン温度の変化速度の比較を行い、熱及び運動量輸送を決めている物理機構の解明を試みる。

最終的には、得られた結果を基に、核融合炉での燃焼プラズマ制御のために最適化された燃料供給シナリオについて検討する。

4. 研究成果

(1) ガスジェット入射のモデル化

JT-60 に設置したガスジェット装置は、パルス (1-2 ms) 的に超音速ガスジェットを入射でき、その周波数は 10 Hz 以下、速度は 2.2 km/s (計算値) である。モデル化のために、CIP 法による 3 次元流体方程式を解くプログラムを開発した。質量保存の式、運動方程式、エネルギー保存の式は、以下のとおり表すことができる。

$$\begin{aligned} \rho / \partial t + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) &= 0, \\ \rho (\partial \mathbf{u} / \partial t + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u}) &= -\nabla p, \\ \rho (\partial T / \partial t + (\mathbf{u} \cdot \nabla) T) &= -p \nabla \cdot \mathbf{u}. \end{aligned}$$

ここで、 ρ は密度、 \mathbf{u} は速度ベクトル、 p は圧力、 T は温度である。これらの式は、双曲型方程式

$$\partial \mathbf{f} / \partial t + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{f} = \mathbf{g}$$

で書くことができる。ここで、 $\mathbf{f} = (\rho, \mathbf{u}, T)$ 、 $\mathbf{g} = (-p \nabla \cdot \mathbf{u}, -\nabla p / \rho, -p \nabla \cdot \mathbf{u} / \rho)$ である。左辺は移流項、右辺は非移流項である。この方程式は、物体が $\mathbf{u} = (u, v, w)$ の速度で、 (x, y, z) 方向に移動する現象を表している。ここで開発した CIP 法プログラムでは f を 3 次関数で以下のとおり表す。

$$f_{i,j,k} = \sum \sum \sum C_{i,j,k} x^i y^j z^k \quad (i, j, k = 0-3)$$

係数 C は $4 \times 4 \times 4 = 64$ 個の変数が考えられるが、ここでは表 1 に示す 20 個の係数を用いている。

k=0	i				k=1	i			
	0	1	2	3		0	1	2	3
j	0	○	○	○	j	0	○	○	○
	1	○	○	○		1	○	○	
	2	○	○			2	○		
	3	○				3			
k=2	i				k=3	i			
	0	1	2	3		0	1	2	3
j	0	○	○		j	0	○		
	1	○				1			
	2					2			
	3					3			

表 1 3次元 CIP 法で用いた係数

20 個の係数を求めるために、図 1 の○での f 、 $\partial f / \partial x$ 、 $\partial f / \partial y$ 、 $\partial f / \partial z$ の 4 つの値 ($4 \times 4 = 16$) と●の f の値 ($4 \times 1 = 4$) の計 20 個の値を使って求めている。

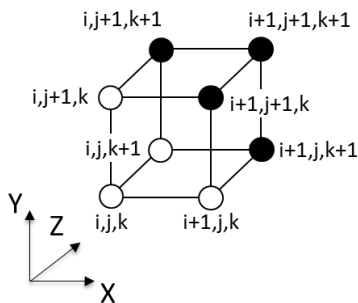


図 1 3次元 CIP 法で用いた値

図 2 に計算結果を示す。一様な密度温度の物体中を x 方向にガスジェットから入射されたと想定する高密度低温度 (回りの物体に比べて) の物体が動いている様子を計算している。初期条件としては、 y, z 方向は水平面に物体を置いている。図 2 は y 方向の水平面 ($x-z$ 平面) での密度、温度の時間変化を示している。下に向かうほど時間が進展してお

り、 x 方向に物体が移動していることがわかる。温度については、図示しやすいように軸を反転している。図 2 に示すように高密度低温度領域が x 方向に動くにつれて、テールを引きつつ拡散している様子がわかる。テール部は複雑な形状となっているが、進行方向に凸に近い形状になっており、実験結果と同じ傾向にある。今後、より実験結果に近い条件での計算と発光強度の計算を行っていく必要がある。

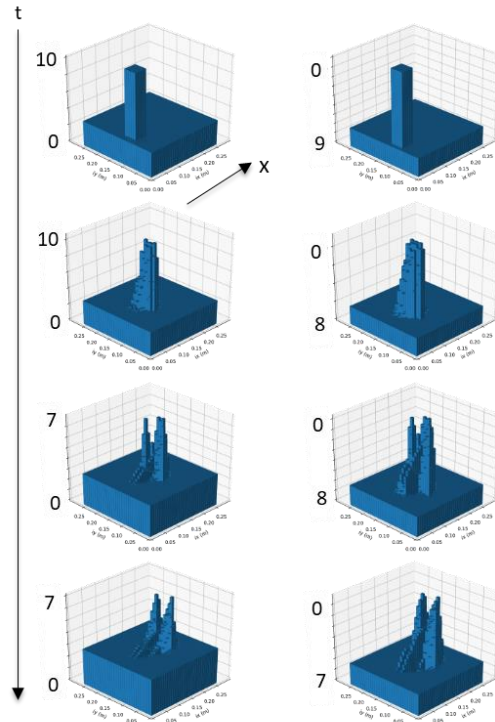


図 2 CIP 法を用いた 3次元流体シミュレーション結果。左側が密度、右側が温度。温度は反転して図示している。上図から下図に向けて時間が経過している。

(2) イオン温度のコールドパルス解析

弱磁気シアプラズマ (プラズマ電流: $I_p = 0.95$ MA、トロイダル磁場: $B_T = 1.9$ T、中性粒子入射加熱パワー: $P_{NB1} = 12$ MW) にガスジェットを入射した時のイオン温度の時間変化を図 3 に示す。 $t = 4.39$ s にガスジェットが入射され、周辺のイオン温度が急激に減少していることがわかる。内側に向かってコールドパルスが伝搬しており、周辺と比べるとゆっくりと温度が低下している。

ガスジェット入射前の $t = 4.35$ s におけるイオン温度分布 (□) 及び入射後の $t = 4.5$ s と 4.35 s のイオン温度の差 (●) を図 4 に示す。この放電では $r/a = 0.4$ 付近から内部輸送障壁 (ITB) が形成されており、その内側で温度低下が大きくなっている。図中緑線

(case 1) は、図 5 の緑線で示す $t = 4.35$ s の平衡状態でのイオンの熱伝導係数を用いて計算した温度変化である。概ね実験値と合っているが、特に ITB 内で一致していない。

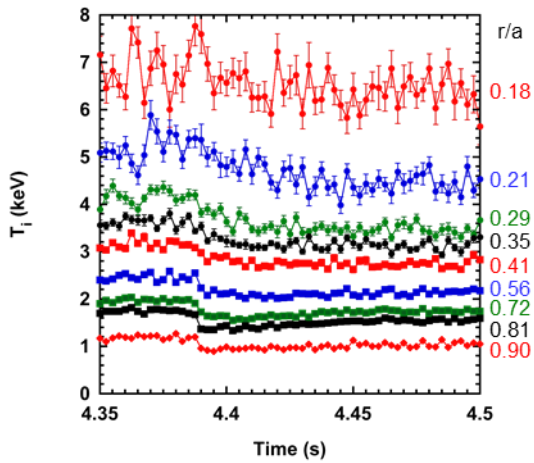


図3 ガスジェット入射時のイオン温度の時間変化

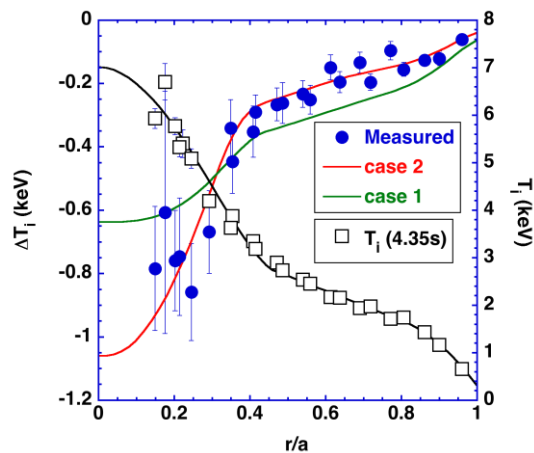


図4 ガスジェット入射前のイオン温度分布 (□、黒線) 及びガスジェット入射後のイオン温度の変化値 (●計測値、緑線: case 1、赤線: case 2)

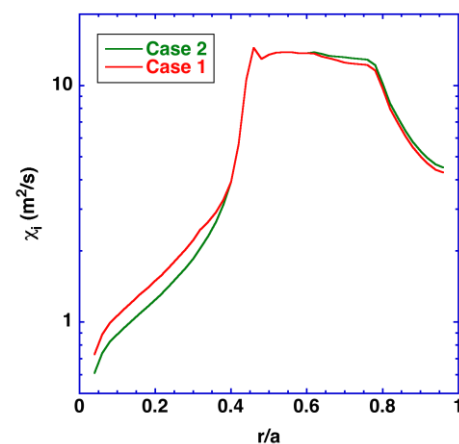


図5 イオンの熱伝導係数の時間変化 (緑線は case 1、赤線は case 2)

図中赤線 (case 2) は、実験値に計算値を近づけるために、イオンの熱伝導係数を平衡状態の値から変化させた場合の計算結果である。ここでは、 $t=4.35$ s でのイオン温度に

比べ 50eV の差が出た時点でイオンの熱伝導係数を変化させている (コールドパルスの伝搬に合わせ変化)。図 5 の赤線が変化させた後の分布であり、ITB の内側 ($r/a=0.4$ より内側) では係数を 20% 程度増加させ、外側の周辺領域 ($r/a=0.6$ より外側) では 5% 程度低下させている。これにより、計算結果は実験結果をよく再現している。このことは、ガスジェットにより外部擾乱を与えた結果、プラズマの輸送特性が変化していることを示しており、制御性を検討する上で重要な成果である。

(3) トロイダル回転速度の過渡応答

図 3 と同じ放電におけるトロイダル回転速度の時間変化を図 6 に示す。同プラズマでは、プラズマ周辺部では、トロイダル回転速度はほぼゼロであり、内側に向けて順方向に回転している。中性粒子入射加熱装置からのトルク入力も順方向である。図 6 からわかるように、イオン温度と同様に、ガスジェット入射時にトロイダル回転速度にも変化が観測されている。 $r/a=0.7-0.8$ 近辺で急激に変化していることがわかる。その内側ではゆっくり変化している。回転速度がほぼゼロの $r/a=0.9$ には明確な変化は見られない。

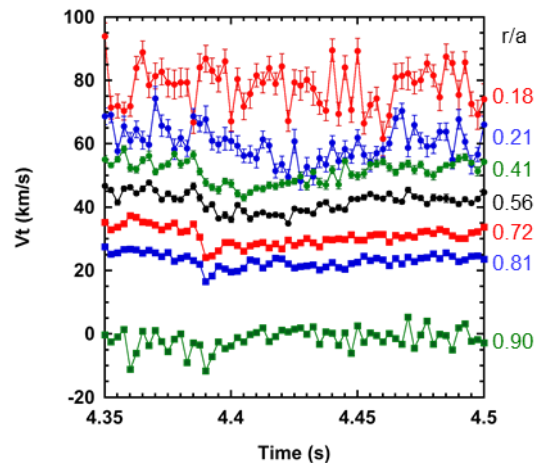


図6 ガスジェット入射時のトロイダル回転速度の時間変化

図 7 にイオン温度とトロイダル回転速度の変化の比較を示す。横軸はイオン温度の入射前の平均値からの変化分、縦軸はトロイダル回転速度の平均値からの変化分である。○は入射前、●は入射後の計測データである。この図から、イオン温度に比べてトロイダル回転速度の方が早く平衡状態の値に回復していることがわかる。特に、 $r/a=0.41$ で顕著であり、イオン温度は回復していないにもかかわらず、トロイダル回転速度は、元の値に近いところまで回復している。これは、熱と運動量の輸送の違いを示唆していると考えられる。トロイダル回転速度は輸送特性に影響を与える物理量と考えられるが、ここでは熱輸送との強い連関は観測されない。

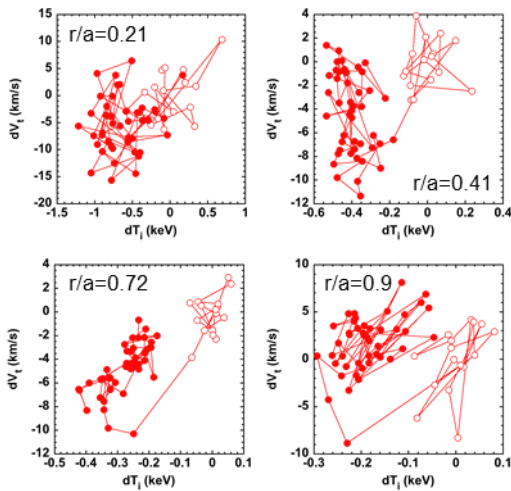


図7 イオン温度とトロイダル回転速度の変化の比較 (○はガスジェット入射前、●はガスジェット入射後)

(4) 核融合炉での粒子バランスの検討

図8に核融合炉で想定される粒子バランスを示す。ここでは、SlimCSパラメータ[4]を用いており、DTは分離しないことを想定した。炉心プラズマに供給された粒子の閉じ込め時間は2 s、周辺プラズマに供給された粒子の閉じ込め時間は2 msと仮定した。ダイバータでの排気量は、これまでのJT-60での実験結果を踏まえダイバータへの粒子束の3%としている。この時、ヘリウム密度は電子密度の2%となっている。炉心プラズマへの燃料供給は、ダイバーを含む周辺プラズマへの燃料供給に比べて、一桁程度小さな値となっている。炉心プラズマへの燃料供給法としては、ペレット入射が有力であるものの、炉心プラズマへ与える擾乱も大きい。一方、ガスジェットは粒子の多くは周辺プラズマで電離しているものの、周辺プラズマへの燃料供給法として考えられるガスパフより効率的に炉心プラズマへの燃料供給が出来ており、本研究で明らかにしたように、プラズマへ与える外部擾乱もプラズマ特性を変えるほどには大きくない。そのため、核融合炉での燃料供給法の一つとして考えられるものである。

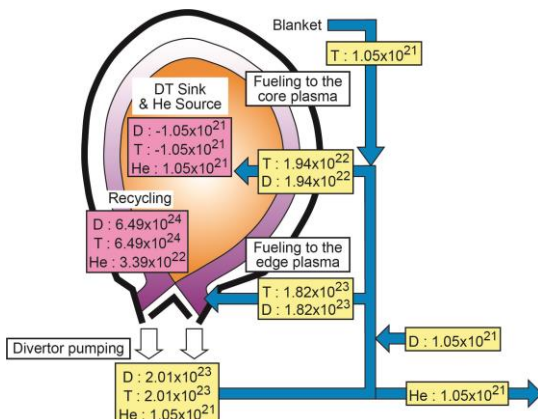


図8 核融合炉での粒子バランス

(5) まとめ

ガスジェット入射のモデリング及び入射時のプラズマ過渡応答解析を行った。モデリングのための数値計算プログラムを開発し、高密度低温の物体を系に入射した時の物体の拡散の様子を詳細に捉えた。また、ガスジェットを入射した時のイオン温度のコールドパルス解析を行い、平衡状態の熱伝導係数からITBの内側では係数を20%程度増加させ、外側では5%程度低下させた場合に実験結果をよく再現することを明らかにした。イオン温度とトロイダル回転速度の時間変化を解析し、トロイダル回転速度に変化が見られたITB境界部から外側ではトロイダル回転の方が速く平衡状態へ回帰していることを明らかにした。さらに、核融合炉での粒子バランスについて解析し、ガスジェット装置の適用について検討した。これらの結果は、燃料供給の最適化に資すると共に、輸送特性決定の物理機構解明に貢献するものである。

<引用文献>

- [1] H. Takenaga et al., "Study of Fueling Scenario and Particle Balance in a Fusion Reactor" *Fusion Sci. Technol.* **57** (2010) 94.
- [2] H. Takenaga, the JT-60 Team, "Particle control study towards burning plasma control in JT-60U" *J. Nucl. Mater.* **390-391** (2009) 869-875.
- [3] H. Takenaga et al., "Fuelling characteristics of supersonic molecular beam injection in JT-60U" *Nucl. Fusion* **50** (2010) 115003.
- [4] K. Tobita et al., "Concept of Compact Low Aspect Ratio Demo Reactor, SlimCS," *Proc. 21st Int. Conf. on Fusion Energy (Chengdu, 2006)* (Vienna: IAEA) CD-ROM file EX/P5-22 (2006) and http://www-naweb.iaea.org/naweb/physics/FEC/FE_C2006/html/index.htm

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計4件)

- ① E. Narita, M. Honda, M. Nakata, M. Yoshida, H. Takenaga, N. Hayashi, "Gyrokinetic modelling of the quasilinear particle flux for plasmas with neutral-beam fueling", *Plasma Physics and Controlled Fusion* 査読有 **60** 2018 025027 10.1088/1361-6587/aaa02d
- ② S. Tokunaga, A. Matsuyama, Y. Someya, H. Utoh, Y. Sakamoto, N. Asakura, K. Tobita, "Conceptual design study of pellet fueling system for DEMO", *Fusion Engineering and Design* 査読有 **123** 2017 620~623 10.1016/j.fusengdes.2017.02.079
- ③ M. Yoshida, G. R. McKee, M. Murakami, B. A. Grierson, M. Nakata, E. M. Davis, A. Marinoni, M. Ono, T. L. Rhodes, C. Sung, L. Schmitz, C. C. Petty, J. R. Ferron, F. Turco, A. M.

Garofalo, C. T. Holcomb, C. M. Collins, W. M. Solomon, “Magnetic shear effects on plasma transport and turbulence at high electron to ion temperature ratio in DIII-D and JT-60U plasmas”, Nuclear Fusion 査読有 57 2017 56027
10.1088/1741-4326/aa611e

④ M. Yoshida, M. Honda, E. Narita, N. Hayashi, H. Urano, M. Nakata, N. Miyato, H. Takenaga, S. Ide and Y. Kamada, “Effects of toroidal rotation shear and magnetic shear on thermal and particle transport in plasmas with electron cyclotron heating on JT-60U”, Nuclear Fusion 査読有 55 2015 073014 (9pp)
10.1088/0029-5515/55/7/073014

〔学会発表〕(計 17 件)

① 成田絵美、本多充、仲田資季、吉田麻衣子、竹永秀信、林伸彦、“ジャイロ運動論に基づく準線形粒子輸送モデルを用いた密度分布制御”、日本物理学会第73回年次大会、2018年

② E. Narita, M. Honda, M. Nakata, M. Yoshida, H. Takenaga and N. Hayashi, “Development of the particle transport model based on gyrokinetic analysis of JT-60U tokamak plasmas”, US-Japan JIFT workshop (国際学会)、2018年

③ 竹永秀信、“核融合炉での粒子制御”、第1回核融合原型炉の比較検討に関するシンポジウム、2018年

④ 坂本宜照、“トカマクの原型炉設計 現状と重要課題”、第1回核融合原型炉の比較検討に関するシンポジウム、2018年

⑤ 竹永秀信、“ダイバータ・SOL・周辺プラズマの粒子輸送”、Plasma Conference 2017、2017年

⑥ 坂本宜照、“トカマク系の運転制御”、Plasma Conference 2017、2017年

⑦ 成田絵美、本多充、吉田麻衣子、仲田資季、竹永秀信、林伸彦、“JT-60Uにおける密度分布形成機構のジャイロ運動論解析”、日本物理学会第72回年次大会、2017年

⑧ 竹永秀信、“原型炉に向けた核融合研究開発の課題と展望”、第20回若手科学者によるプラズマ研究会、2017年

⑨ 竹永秀信、“トカマク粒子制御に関するコメント”、第4回原型炉運転制御に関するシンポジウム、2017年

⑩ 坂本宜照、日渡良爾、染谷洋二、朝倉伸幸、宇藤裕康、中村誠、徳永晋介、本間裕貴、三善悠矢、飛田健次、原型炉設計合同特別チーム、“原型炉概念構築に向けた主要パラメータの検討”、プラズマ・核融合学会年会(第33回)、2016年

⑪ Y. Sakamoto, K. Tobita, N. Asakura, R. Hiwatari, Y. Someya, H. Utoh, S. Tokunaga, Y. Homma, N. Hayashi, S. Ide, Joint special design team for DEMO, “Physics Approach to

Forecasting DEMO Plasma”, 4th IAEA DEMO Programme Workshop (国際学会)、2016年

⑫ M. Yoshida, G. R. McKee, M. Murakami, C. M. Collins, E. M. Davis, J. R. Ferron, A. M. Garofalo, B. A. Grierson, C. T. Holcomb, A. Marinoni, M. Nakata, M. Ono, C. C. Petty, T. L. Rhodes, L. Schmitz, W. M. Solomon, C. Sung, F. Turco, “Magnetic shear effects on plasma transport and turbulence at high electron to ion temperature ratio in DIII-D and JT-60U plasmas”, 26th IAEA Fusion Energy Conference (国際学会)、2016年

⑬ Y. Sakamoto, H. Utoh, H. Takase, K. Hoshino, N. Asakura, T. Wakatsuki, S. Tokunaga, Y. Homma, N. Aiba, A. Matsuyama, N. Hayashi, S. Ide, K. Tobita and Joint Special Design Team for Fusion DEMO, “Progress of DEMO physics design study in Japan”, 29th Symposium on Fusion Technology (国際学会)、2016年

⑭ 竹永秀信、“プラズマの密度限界”、第3回運転制御に関するシンポジウム、2016年

⑮ Y. Sakamoto, K. Tobita, H. Utoh, N. Asakura, Y. Someya, K. Hoshino, M. Nakamura, S. Tokunaga and the DEMO Design Team, “Integrated design study for DEMO concept definition”, 3rd IAEA DEMO Programme Workshop (国際学会)、2015年

⑯ 竹永秀信、“トカマクの中性粒子密度とプラズマ密度”、第2回原型炉の運転制御に関するシンポジウム、2015年

⑰ M. Yoshida, M. Honda, M. Nakata, E. Narita, H. Urano, T. Kobayashi, N. Miyato, N. Hayashi, H. Takenaga, S. Ide and Y. Kamada, “Response of ion and electron temperatures, electron density and toroidal rotation to electron cyclotron heating in JT-60U”, 25th IAEA Fusion Energy Conference (国際学会)、2014年

6. 研究組織

(1) 研究代表者

竹永 秀信 (TAKENAGA, Hidenobu)
国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・核融合エネルギー研究開発部門・室長代理(定常)
研究者番号: 60354601

(2) 研究分担者

吉田 麻衣子 (YOSHIDA Maiko)
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・上席研究員(定常)
研究者番号: 20391261

坂本 宜照 (SAKAMOTO Yoshiteru)
国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・六ヶ所核融合研究所 核融合炉システム研究開発部・グループリーダー(定常)
研究者番号: 30354583