

平成30年6月26日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06645

研究課題名(和文) ビーム放射分光イメージング開発に基づくHモード遷移前駆振動における乱流揺動の研究

研究課題名(英文) Study of turbulent density fluctuation observed before H-mode transition based on development of 2-dimensional beam emission spectroscopy

研究代表者

小林 進二 (Kobayashi, Shinji)

京都大学・エネルギー理工学研究所・助教

研究者番号：70346055

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ビーム放射分光(BES)法を用いた2次元密度揺動計測機器を整備し、MHDおよび高周波乱流揺動、特にヘリオトロンJで高強度短パルスガスバフ法による高密度放電で観測されるH-mode遷移前の前駆振動を対象に、その時空間構造を明らかにする事を目的とする。BES機器の整備により密度揺動の径方向・ポロイダル方向の波数ベクトルを得ることに成功した。H-mode遷移前の前駆振動においては高周波密度揺動と粒子排出現象に相当する密度揺動が同期し、包絡線解析においても有意なコヒーレンスが見られた。この現象の一つの説明として高周波乱流と粒子排出現象との非線形結合が挙げられる。

研究成果の概要(英文)：In this research, 2-dimensional (2D) density fluctuation measurement system using beam emission spectroscopy (BES) has been prepared to obtain MHD and high-frequency turbulent fluctuations. Especially, target of this research is to clarify the oscillations obtained before H-mode transition triggered by high-intensity gas puffing in Heliotron J. The frequency-wavenumber vector has been obtained by the preparation of the 2D-BES system. By applying envelope analysis to the high-frequency density fluctuation observed before the H-mode transition, a clear correlation between the high-frequency fluctuation and the low frequency density fluctuation corresponding to the particle exhaust phenomena has been found. One candidate to explain the phenomena is non-linear coupling between the two fluctuations.

研究分野：プラズマ物理学、核融合

キーワード：ビーム放射分光 密度揺動 ヘリカルプラズマ H-mode遷移 前駆振動

1. 研究開始当初の背景

プラズマの乱流輸送は、内部・周辺部輸送障壁の形成を始めとした閉じ込め改善に密接に関連している。特に、高閉じ込めモード(H-mode)遷移現象の直前に見られる I-phase におけるリミットサイクル振動(LCO)に代表されるように、乱流の成長と径方向電場 E_r による $E_r \times B$ シアーフローとの競合が別の輸送状態へ遷移する鍵となることが実験的に明らかになりつつある (L-I-H 遷移における乱流の捕食者・被捕食者モデル)。ヘリオトロン J では、高強度短パルスガスパフ(HIGP)を用いた高密度放電において H-mode 遷移が観測されている。遷移前に I-phase に似た特徴的な揺動 (前駆振動) が見られているが、一方で乱流揺動との関連性については明らかになっていない。ヘリオトロン J は低磁気シアの磁場配位であるためトカマクとは異なる乱流の振る舞いが想定されるため、前駆振動の理解が進むことは、H-mode のみならずたとえばトカマクの弱磁気シア・負磁気シア配位等のトラス装置一般の閉じ込め改善現象の理解につながることを期待される。一方で乱流揺動の強度は観測対象とする物理量 (温度・密度等) の平均値の 0.1% のオーダーであるため、実験的に観測することが困難であり、微弱な揺動を観測できる機器の開発が求められている。

2. 研究の目的

本研究では、ビーム放射分光(BES)法を用いた 2 次元密度揺動計測により、ヘリオトロン J の H-mode プラズマにおいて遷移前に観測される前駆振動の理解を目指す。BES 法は加熱や計測用の中性粒子ビームを用いてプラズマ中の密度揺動を計測する手法であり、研究代表者らはヘリオトロン J において BES を適用し、世界で初めて先進ヘリカル装置において実用的な BES 計測を可能にしている。BES 機器の改良により 2 次元密度揺動計測を整備することで、乱流・MHD 揺動の計測、その空間構造の理解を目指す。

3. 研究の方法

本研究では以下の方法により課題の解決を図る。

1. BES 機器の改良について、2 次元計測のための機器の整備、1.2 検出素子であるアバランシェフォトダイオード(APD)の性能向上、1.3 真空容器内ミラーコーティングの改良を行う。
2. ヘリオトロン J の H-mode プラズマにおける前駆振動を対象として、次の方法で前駆振動の理解を進める。2.1 HIGP ガス強度と前駆振動強度との関係の解明、2.2 前駆振動の時空間構造および遷移前後での密度勾配の動

的变化の解析、2.3 統計的解析・エンベロープ解析等の適用による乱流揺動の特徴と、その空間構造の解明。

4. 研究成果

(1) ビーム放射分光装置の改良と 2 次元密度揺動計測

ヘリオトロン J で BES 2 次元密度揺動計測機器を整備し、ポロイダル方向・径方向の周波数・波数ベクトルを得ることに成功した。図 1.1 は NBI 加熱に ECH を重畳した放電において観測される密度揺動の周波数・波数スペクトルである。このモードはプラズマ中心付近のみで観測されており真空容器壁に設置されている磁気プローブ計測ではモードの同定が困難であった。ポロイダル方向の波数 k_θ の径方向分布よりポロイダルモード数が $m=1$ ないし 2 であり、イオン反磁性方向に回転していることがわかった。また径方向には外向きに伝搬する位相差構造を持っていることが明らかになった。この NBI に ECH を重畳した放電では、揺動の周波数が ECH パワーの変調に依存して電子温度の変化より速く変化していることがわかった (図 1.2)。モードがプラズマと同期して回転していると仮定して周波数から $E_r \times B$ 速度を評価したところ E_r が正に大きくなる方向に変化しており、電子温度分布の尖塔化と関連していることが示唆される。

アバランシェフォトダイオード(APD)の性能向上を目指し、冷却によるノイズ低減効果を調べた。図 1.3 は APD を 32°C から -26°C に冷却した場合の、2 つの微弱信号に対する位

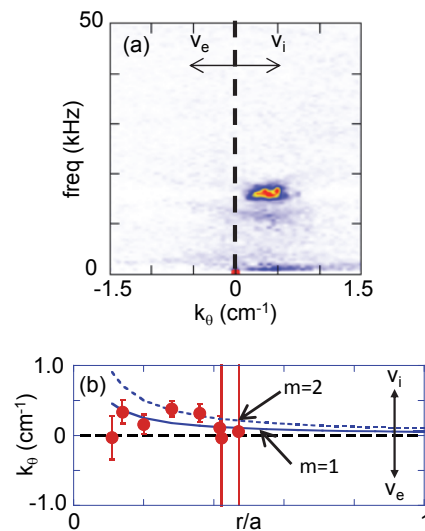


図 1.1 NBI+ECH プラズマで観測される (a)ポロイダル方向の周波数・波数スペクトル、および(b)ポロイダル方向の波数 k_θ の径方向分布。小林, プラズマ・核融合学会誌, **93** (2017) p2-9 より抜粋。

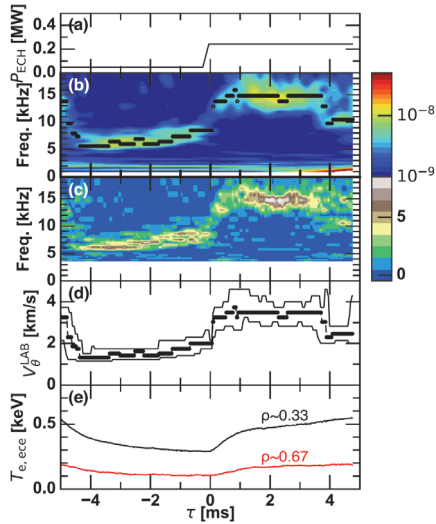


図 1.2 ECH 変調時に観測されたモードおよび回転周波数の時間変化。T. Kobayashi, S. Kobayashi, et al., Phys. Plasma, **25** (2018) 012513.

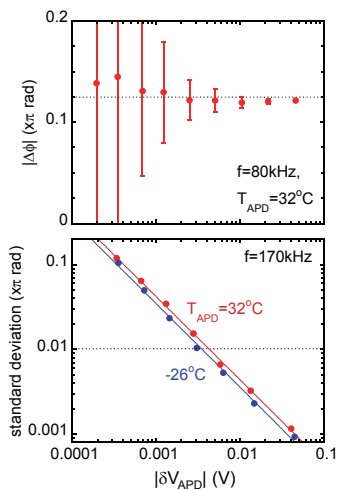


図 1.3 APD の冷却が位相差評価の精度に与える効果。APD 動作温度を下げることで、位相差のばらつきが低減した。S. Kobayashi, et al., Rev. Sci. Inst. **87** (2016) 11E519.

相差の評価精度を示している。冷却により評価された位相差の標準偏差が40%改善しており、位相差評価精度が向上した。また真空容器内に設置しているステンレスミラーのコーティングを行った。TaO₃の誘電体多層膜を施すことで、反射率が約40%から96%まで改善した。

(2) H-mode プラズマで観測される前駆振動の解析およびその理解

図2.1にヘリオトロン J で高強度短パルスガスバフ(HIGP)を適用した際に観測される

H-mode遷移プラズマ(#60553)の時間発展を示す。HIGPは $t=210-225\text{ms}$ で印加されており、直後に蓄積エネルギー、線平均密度の低下が見られるが、蓄積エネルギー回復中の $t=240\text{ms}$ にH α 輝線強度の急峻な低下と共に密度の増加が見られ、H-mode遷移が観測されている。この時は外部からの粒子補給がないため自発的な粒子閉じ込めの改善が起こっていると考えられる。遷移前に特徴的な密度揺動がプラズマ周辺部で観測されており、 $f=5-30\text{kHz}$ 程度のバーストしたモードとそのバースト周期に相当する $f=1-3\text{kHz}$ 程度の低周波揺動が観測される。HIGPの入射ガスが不十分でH-mode遷移が起きない場合(#60514)にはバーストしたモードは観測されず、周波数が一定の揺動が見られた。

H-mode遷移後は周辺部($r/a=0.85$)で急峻な密度勾配が観測されており、エネルギー閉じ込め時間のステラレータ国際スケーリング

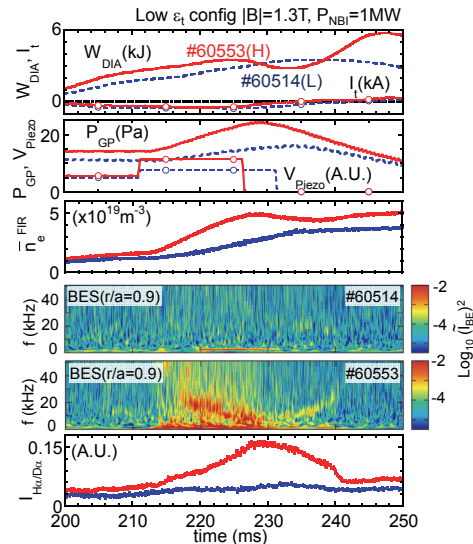


図 2.1 ヘリオトロン J で観測された H-mode 放電と前駆振動の波形。

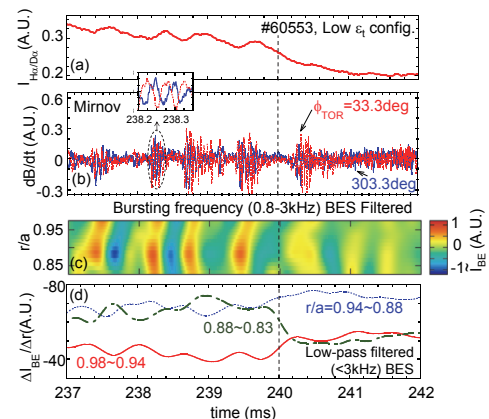


図 2.2 H-mode 遷移前後での H α 線強度、磁気プローブ信号、密度揺動の時間・空間および密度勾配の時間発展。

則(ISS)と比較した改善率は1以上となり、良好な閉じ込めが得られている。図2.2にH-mode遷移前後の、H α 輝線強度、磁気プローブ信号、バースト周期に相当する密度揺動の時空間構造、および径方向に設置したBESの2点間の信号強度差から評価した密度勾配を示す。H-mode遷移前では密度揺動はプラズマ外向きに伝搬しており、しばらく後にH α 輝線強度に応答が見られる。このことからバースト周期の揺動は粒子の排出現象を示している事が明らかになった。また特徴的なこととしてH-mode遷移のタイミングにおいて $r/a=0.83-0.88$ の密度勾配は急激(0.4msの間)に減少し、それより外側で密度勾配が増加していることがわかった。以上の結果からH-mode遷移のタイミングにおける周辺部密度の早い構造変化が明らかになった。

密度揺動の空間構造を調べるため相互相関解析を適用したところ。バーストモードの周波数帯(5-20kHz)では $r/a=0.94$ で局所的に存在しているのに対し、粒子排出の周波数帯(1-3kHz)はLCHF外側まで大きく変動しており、上記で示した粒子排出は1-3kHzの揺動のみに起こっていることが明らかになった。この解釈として5-20kHzの揺動が粒子排出をトリガーしていると考えられる。

この揺動の特徴を調べるため、平衡計算からMercier条件を評価した。ヘリオトロンJは低磁気シアで、真空配位では低次の有利面を避けた回転変換分布を持つ。揺動が発生している時間帯の圧力分布でMercier条件を調べたところ、磁気井戸であるにもかかわらず、周辺部ではMercier不安定となる領域があることがわかった。圧力勾配に対する依存性を調べたところ、観測値の50%程度の圧力でMercier安定になった。一方で図2.2で示すとおり揺動が発生している際の密度勾配の変動はおおむね20%であり、その間に揺動の発生・減衰が見られる。従って揺動の同定に関しては、さらに非線形効果を考慮したMHD安定性解析が必要であるが、観測された揺動の候補として圧力勾配による交換型不安定性が第一に挙げられる。

ショット毎にHIGP強度を変化させH-mode遷移出現の領域を調べ、粒子排出現象とH-mode出現の有無との関係を調べた。遷移後の周辺部密度勾配に対するH-mode遷移前の粒子排出の周波数帯(0.8-3kHz)の揺動強度を図2.3に示す。図の横軸は遷移直前の密度と最大蓄積エネルギーの時刻における密度の差分である。その結果HIGPによる密度増加が大きい場合にH-mode遷移が現れることがわかった。H-mode遷移後は急峻な密度勾配が形成される。H-mode遷移がない場合には粒子排出の周波数帯(0.8-3kHz)の揺動強度がノイズレベル程度に小さく、遷移が現れるときのみ

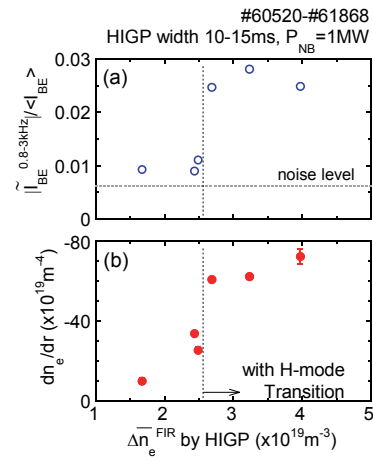


図 2.3 H-mode 遷移の出現範囲と前駆揺動の関係、および H-mode 遷移後の密度勾配の関係。S. Kobayashi, et al., submitted to Nucl. Fusion.

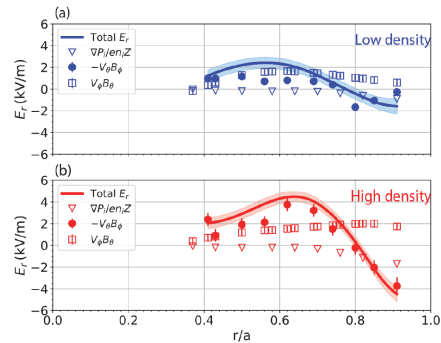


図 2.4 HIGP による高密度放電で観測された周辺部の径方向電場分布。X. Lu, S. Kobayashi, et al., Plasma Fusion Res, 13 (2018) 1202077.

有意な揺動が観測された。このことから遷移前の粒子排出現象はH-mode遷移と関連性を持つ事が明らかとなった。

高周波乱流揺動と粒子排出現象との関連性を明らかにするため、周辺部($r/a=0.94$)の高周波密度揺動の包絡線(乱流揺動のパワーに相当)と粒子排出の周波数帯(0.8-3kHz)の揺動強度とを比較した。その結果、高周波密度揺動と粒子排出が同期しており、一つの可能性として高周波乱流と粒子排出の非線形結合が考えられる。この特徴は $r/a=0.8-1$ の間の密度揺動ともコヒーレンスがあり、空間構造を持っている事が明らかとなった。また、HIGPを用いた放電では、高密度になると周辺部で $E_r \times B$ フローシアが増加することがわかり(図2.4参照)、H-modeプラズマの閉じ込め改善に寄与していることがわかった。

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 16 件)

1. Xiangxun LU, Shinji Kobayashi (2番目) Shun TANOHIRA, Katsumi IDA, Shinsuke OHSHIMA, (他17名), “Poloidal flow velocity measurement in high-density NBI plasmas of Heliotron J”, Plasma and Fusion Research, **13** (2018) 1202077. 査読あり。
2. T. Kobayashi, S. Kobayashi (2番目), X. X. Lu, N. Kenmochi, K. Ida, S. Ohshima, (他8名), “Response of a core coherent density oscillation on electron cyclotron resonance heating in Heliotron J plasma”, Physics of Plasmas **25**, (2018) 012513, 査読有り。
3. M.M. Islam, Y. Nakashima, S. Kobayashi(3番目), (他17名), “Study of Plasma behavior during ECRH injection in the GAMMA 10 SMBI experiments”, IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series, vol. 959, (2018) 12007. 査読有。
4. 小林進二, “ビーム放射分光計測が拓く MHD・乱流揺動の時空間構造”, プラズマ・核融合学会誌 (研究最前線), Vol.93, No.1 (2017) 2-9. (査読なし: 学会誌記事)
5. S. Kobayashi (一番目), X.X. Lu, K. Ida, S. Ohshima, (他14名), “Development of ultra-fast charge exchange recombination spectroscopy for temperature and flow velocity fluctuation measurements in Heliotron J”, Proc. 44th EPS Conf. Plasma Phys, ECA vol. **41F**, P5.108 (2017) 査読なし。
6. N. Kenmochi, T. Minami, C. Takahashi, S. Mochizuki, K. Nishioka, S. Kobayashi(6番目), S. Ohshima, (他14名), “Characteristics of electron internal transport barrier in Heliotron J”, Plasma Physics and Controlled Fusion, vol. 59, p055013, (2017). 査読有り。
7. S. Yamamoto, K. Nagasaki, S. Kobayashi(3番目), K. Nagaoka, A. Cappa, (他14名), “Suppression of fast-ion-driven MHD instabilities by ECH/ECCD on Heliotron J, Nuclear Fusion”, **57** (2017) 126065. 査読有り
8. Md.Maidul ISLAM, Y. Nakashima, S. Kobayashi (3番目), (他17名), “Effect of Laval Nozzle in the GAMMA 10 SMBI Experiments”, Plasma and Fusion Research, vol. **11** S1, (2016) 2402053-1~2402053-4. (査読あり)
9. S. Kobayashi (1番目), S. Ohshima, H.Matsuda, (他17名), “Development of beam emission spectroscopy for turbulence transport study in Heliotron J, Review of Scientific Instruments, vol. **87**, (2016) 11E519-1~11E519-3. (査読あり)
10. S. Kobayashi (1番目), S.Ohshima, K.Nagasaki, (他21名), “Study of H-Mode Transition Triggered by High-Intensity Gas

Puffing in NBI Plasmas of Heliotron J”, 26th IAEA Fusion Energy Conference, 2016.10.17-22, Kyoto, Japan (2016) EX/P8-17. (査読なし)

以上、代表的発表のみ記載。その他は京都大学エネルギー理工学研究所・年報に記載。

<http://www.iae.kyoto-u.ac.jp>

[学会発表] (計 107 件)

1. X.X. Lu, S. Kobayashi, 他, Heat transport analysis in high density NBI plasmas of Heliotron J, 44th EPS Conference on Plasma Physics, Waterfront Hall, 2017.6.26-30,
2. 小林進二, 高性能磁場閉じ込めプラズマを目指した粒子補給法の検討, 筑波大学プラズマ研究センターシンポジウム, つくばイノベーションプラザ, 2017.8-3-4,
3. Y. Matsumoto, S. Kobayashi, 他, International Stellarator-Heliotron Workshop (ISHW2017), Shiran-Kaikan, Kyoto University, 2017.10.2-6,
4. S. Tanohira, S. Kobayashi, 他, Poloidal flow measurement with Charge-eXchange Recombination Spectroscopy in Heliotron J(2), Plasma Conference2017 (PLASMA 2017), 姫路商工会議所, 2017.11.20-24,
5. S. Kobayashi, S. Ohshima, 他, Development of Beam Emission Spectroscopy for Turbulence Transport Study in Heliotron J, 21st Topical Conference on High Temperature Plasma Diagnostics, Madison, Wisconsin, U.S.A., 2016.6.5-9,
6. X.X. Lu, S. Kobayashi, 他, Development of Ultrafast Charge-eXchange Recombination Spectroscopy System in Heliotron J, 21st Topical Conference on High Temperature Plasma Diagnostics, Madison, Wisconsin, U.S.A., 2016.6.5-9,
7. S. Kobayashi, S. Ohshima, 他, Characteristics of low frequency fluctuation at L-H transition in NBI plasmas of Heliotron J, 6th Asia Pacific Transport Working Group (APTWG) International Conference, Seoul, Korea, 2016.6.21-24,
8. 小林進二, 他, ヘリオトロンJにおける高強度ガスパフを用いたH-mode遷移の研究, 第11回核融合エネルギー連合講演会, 九州大学伊都キャンパス, 2016.7.14-15,
9. 小林進二, 高性能磁場閉じ込めプラズマを目指した粒子補給法の検討, 筑波大学プラズマ研究センターシンポジウム, つくばイノベーションプラザ, 2016.7.27-28,
10. S. Kobayashi, 他, Study of H-Mode Transition Triggered by High-Intensity Gas Puffing in NBI Plasmas of Heliotron J, 26th IAEA Fusion Energy Conference, Kyoto,

- Japan, 2016.10.17-22,
11. H. Okada, S. Kobayashi, 他, Fast Ion Generation by Combination Heating of ICRF and NBI in Heliotron J, 26th IAEA Fusion Energy Conference, Kyoto, Japan, 2016.10.17-22,
 12. 長崎百伸, 山本聡, 國分大, 小林進二, 他, ECH/ECCD を用いた高エネルギー粒子励起 MHD 不安定性の制御, 第 33 回プラズマ・核融合学会年会, 東北大学青葉山キャンパス, 2016.11.29-12.2,
 13. 大島慎介, 元嶋誠, 岡田浩之, 小林進二, 他, ヘリオトロン J 装置における乱流および長距離相関現象に対する水素同位体効果, 第 33 回プラズマ・核融合学会年会, 東北大学青葉山キャンパス, 2016.11.29-12.2,
 14. 岡田浩之, 小林進二, 他, ヘリオトロン J における NBI および ICRF 重畳加熱によって生成された高速イオンの解析, 第 33 回プラズマ・核融合学会年会, 東北大学青葉山キャンパス, 2016.11.29-12.2,
 15. 國分大, 小林進二, 他, ヘリオトロン J における高速イオン励起 MHD 不安定性による密度揺動分布の特徴, 第 33 回プラズマ・核融合学会年会, 東北大学青葉山キャンパス, 2016.11.29-12.2,
 16. X.X. Lu, S. Kobayashi, 他, ヘリオトロン J における高密度 H モードプラズマの電子密度・温度分布特性, 第 33 回プラズマ・核融合学会年会, 東北大学青葉山キャンパス, 2016.11.29-12.2,
 17. M.M. Islam, Y. Nakashima, S. Kobayashi, 他, Investigation of Plasma Behavior during ECRH Injection in the GAMMA 10 SMBI Experiments, 第 33 回プラズマ・核融合学会年会, 東北大学青葉山キャンパス, 2016.11.29-12.2,
 18. 大島慎介, 小林進二, 他, 第 72 回日本物理学会年次大会, 大阪大学豊中キャンパス, 2017.3.17-3.20,
 19. S. Kobayashi, 他, Rapid NBI plasma initiation using pre-ionization method by non-resonant microwave injection in Heliotron J, 20th International Stellarator-Heliotron Workshop (ISHW), Greifswald, Germany, 2015 October 5 - 9,
 20. S. Ohshima, S. Kobayashi, 他, The characteristics of long range correlation in Heliotron J, 20th International Stellarator-Heliotron Workshop (ISHW), Greifswald, Germany, 2015 October 5 - 9,
 21. K. Hada, K. Nagasaki, S. Kobayashi, 他, "Model Analysis of Plasma Start - Up by NBI with assistance of 2.45 GHz Microwaves in Heliotron J", 20th International

- Stellarator-Heliotron Workshop (ISHW), Greifswald, Germany, 2015 October 5 - 9,
22. S. Kobayashi, 他, Characteristics of low frequency oscillation during L-H dithering phase in high density plasmas of Heliotron J, 15th International Workshop on H-Mode and Transport Barrier Physics, Garching, Germany, 2015 October 19-21,
 23. 小林進二, ビーム放射分光計測が拓く MHD・乱流揺動の時空間構造, 第 32 回プラズマ・核融合学会 年会, 名古屋大学東山キャンパス・豊田講堂, 2015.11.24-27, 招待講演
 24. X.X. Lu, S. Kobayashi, 他, Development of Charge-eXchange Recombination Spectroscopy (CXRS) system for poloidal rotation in Heliotron J, 第 32 回プラズマ・核融合学会 年会, 名古屋大学東山キャンパス・豊田講堂, 2015.11.24-27, 24pD17P
 25. 松田啓嗣, 小林進二, 他, ヘリオトロン J における密度揺動の給気法依存性, 第 32 回プラズマ・核融合学会 年会, 名古屋大学東山キャンパス・豊田講堂, 2015.11.24-27, 26aE12P

以上、代表的発表のみ記載。その他は京都大学エネルギー理工学研究所・年報に記載。
<http://www.iae.kyoto-u.ac.jp>

[その他]
ホームページ等
<http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/new-iae/organization/generation/plasma.html>
<http://www.center.iae.kyoto-u.ac.jp/plasmak/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小林 進二 (Kobayashi Shinji)
京都大学・エネルギー理工学研究所・助教
研究者番号：70346055

(3) 連携研究者

門 信一郎 (Kado Shin-ichiro)
京都大学・エネルギー理工学研究所・准教授
研究者番号：10300732

大石 鉄太郎 (Oishi Tetsutaro)
核融合科学研究所・高密度プラズマ物理研究系・助教
研究者番号：80442523

大島 慎介 (Ohshima Shinsuke)
京都大学・エネルギー理工学研究所・助教
研究者番号：00469610