

平成 26 年 6 月 18 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560997

研究課題名(和文) EC加熱変調を用いたELM状熱流束模擬による境界プラズマ制御研究

研究課題名(英文) Study of the boundary plasma control with ELM like heat flux simulation by ECH power modulation

研究代表者

今井 剛 (Imai, Tsuyoshi)

筑波大学・数理物質系・教授

研究者番号：80354637

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：核融合炉で大きな課題であるELMについて、GAMMA 10 装置でのECHパワー変調により、ELM状の熱流束模擬を行い、ELM時の熱流束の能動制御の基礎データを得ることが目的である。ECH装置改造により、間欠的な発振を可能にし、任意の間欠的な熱流束を発生させることに成功した。この間欠的ECHにより、ベースのプラズマの10倍以上の熱流束密度10MW/m²を得るとともに、熱流束の径方向分布の測定、熱流束の主要粒子の電子の実効温度などを測定し、ECHによる能動的制御性を示し、ELM模擬実験の基礎データを取得した。また、タングステンターゲットに、間欠的高熱流を照射し、相互作用の初期的データを得た。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to obtain the basic data for the ELM control with ELM heat flux simulation by the ECH power modulation on the GAMMA 10 mirror device. We have succeeded in getting arbitrary intermittent heat flux with the modification of the ECH system. The more than 10MW.m² heat flux density which is 10 times higher than the base heat flux has been produced by the ECH and the intermittent heat flux have been characterized, measuring the radial distribution of heat flux, effective temperature and so forth. These indicate the active control of the heat flux parameters is possible by ECH modulation. It is also obtained the preliminary data of the tungsten target interaction with the intermittent heat flux.

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：周辺プラズマ 電子サイクロトロン加熱 ELM 熱流束 GAMMA 10

1. 研究開始当初の背景

第23回IAEA核融合エネルギー国際会議(2010年)で最も注目された研究課題である、トカマク等のダイバータへの熱負荷の緩和、特に、ELM時の熱緩和対策は、緊急の大きな課題である。RMPやペレットを用いたELMそのものの制御が重要であるが、ELMが発生した後の熱流の時間的、空間的集中を緩和する対策も同様に重要であり、その基礎的な現象の解明と制御手法の開発が求められている。ダイバータ板への熱負荷の軽減のための境界プラズマ物理/輸送制御研究はITERのみならず原型炉を含めた磁場閉じ込め装置の緊急かつ最重要物理課題の一つである。

直線型磁場装置はトーラス系のスクレープオフ(SO)プラズマに類似の開放端磁場を持つことから、ダイバータ領域の境界プラズマを模擬する小型の直線装置は国内にもいくつか存在し、成果をあげているが、プラズマ温度や熱流束が大幅に異なることから、より、ITER等の炉心プラズマの境界プラズマに近い模擬装置で境界プラズマの物理研究、制御法研究が切望されている。世界的にもこのような装置は皆無で、欧州オランダでそれに向けた装置の建設が計画されている。筑波大学プラズマ研究センターにある大型のタンデムミラー型の直線型の装置を、この境界プラズマ模擬装置に応用することにより、開放端磁場を利用した、より、炉心プラズマに近い境界プラズマの研究が可能となる。

また、筑波大が大きな実績を持つガンマ10用やLHD用ジャイロトロン開発で得られた最先端の加熱技術など独自の研究基盤として強力な加熱による高熱流束制御ツールを持ち、境界プラズマ制御ではガスや不純物などの通常のツールに加え、筑波大の特長である「電位/電場によるプラズマ輸送制御」の実績を応用した多様な制御が可能となる。この電位/電場構造による輸送制御やECHジャイロトロン・伝送系アンテナの開発については、2010年7月にロシアで開催された国際会議(OS2010)はもとより、2010年10月に韓国太田で開催された核融合国際会議においても、サマリーで取り上げられるなど高い関心が寄せられた。

2. 研究の目的

これまで、電子サイクロトロン加熱(ECH)などによる電子・プラズマ流の制御、さらに、電位/電場生成とその電位/電場による磁力線方向および垂直方向の熱粒子輸送の制御に成果を挙げてきた[T. Imai, et al., "STATUS AND PLAN OF GAMMA 10 TANDEM MIRROR PROGRAM", in Proc. 8th int. Conf. on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, 5-9 July, 2010, Novosibirsk, Russia(Plenary talk), T. Imai, *Journal of Plasma*

and Fusion Research, 85, 378(2009)]. これらの実績を用いて、ECHのパワー変調によるELM状熱流の生成を行い、また、ECHによる電位制御やダイバータ模擬プレート電位の制御による磁力線方向の電場分布の制御を行うことにより、定常熱流からELM状の熱流まで、様々なプラズマ熱流を模擬し、その制御を試みる。さらに、その熱流を利用してダイバータへのピーク熱負荷の軽減に向けた研究を実施し、また、間欠熱流と壁材料とプラズマの相互作用実験への活用を試みる。

3. 研究の方法

タンデムミラーでのECHにより、これまでにITER等の定常時のダイバータ熱負荷に匹敵する強力な磁場方向熱流束の生成が可能になったことが明らかになった。ECHパワーの変調制御などにより、ELM状の熱流束を発生させ、磁場方向の熱流束制御の手法の開発とさらにはこのELM状熱流束を利用したPWI表面物理現象を解明することが最終目標であるが、その第1ステップとして、1) ECH装置の電源改造により加熱パワーの変調を可能にする、2) パルス変調したECHパワーによりELM模擬パルスを発生する。さらに、3) このパルス変調熱流束により、模擬ダイバータプレートへのELM熱負荷時のプラズマの特性を調べ、その制御のための基礎データを得る。また、3) ダイバータ候補材のELM時のPWI現象の基礎データを取得する。不純物ガスパフなどの通常の制御ツールに加え、加熱装置による電場制御なども導入し、制御手法の開発に向けた境界プラズマの基礎データを得る。

4. 研究成果

本研究の主プラズマ装置は、図1に示すGAMMA 10/PDXと呼ばれる全長27mの大型タンデムミラー装置である。ミラー端の西側拡大図を図2に示した。このミラーの端損失を利用して、熱・粒子束を発生させ、ダイバータ模擬実験を実施した。カロリメータ、ターゲット板、端損失電子のエネルギー分析測定器(LED)、端部に近いプラグ部の加熱用ECHアンテナの設置位置も同図に示す。

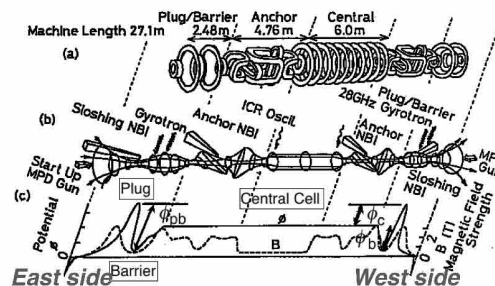


図1 GAMMA 10/PDXの概要図

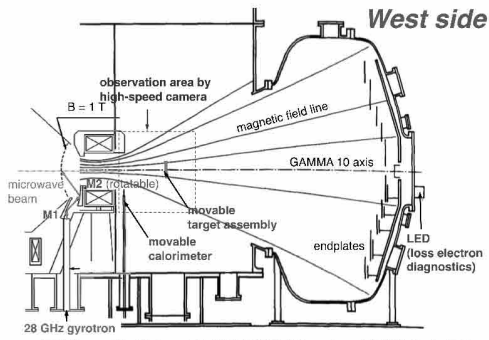


図2 GAMMA 10/PDX 西側エンド部拡大図。

初年度は、ECH装置のプラグ部入射パワーの自在な変調に向け、間欠的なジャイロトロン発振を可能にした。ジャイロトロンは発振管であるため、ジャイロトロンのビーム電圧そのものを間欠的な波形とする必要がある。このため電源電圧の制御回路を変調できるように改造し、ビーム電圧のon/offが任意に制御できるようにした。この間欠的な入射パワーにより、GAMMA 10の端部の磁力線方向の間欠的な熱流束を発生させることに成功した。図3に5ms幅で10ms間隔での入射パワーの変調とそれによるセントラル部プラズマの反磁性量(DMc)の変化、線密度(nlc)変化を示す。プラグ部ECHパワー入射のon/offに伴い、DMcが増加していることが分かる。

2年目は大電力のECHによる高熱流束密度を得る実験を中心に行った。ベースのプラズマの1.0倍近い熱流束密度を得るとともに、入射条件を変えて、より高い熱流束密度 10MW/m^2 以上の熱流束密度を得た。また、今後のELM模擬実験に重要な基礎データとして、熱流束の径方向分布の測定を行い図4に示す結果を得た。ベースのICRFプラズマのみの中心軸上での熱流束密度が 0.6MW/m^2 に対して、230kWのプラグECH印加中は、 5.2MW/m^2 と大きく増大している。また、半値半径が4~5cmであり、ダイバータ板付近の境界プラズマ研究やプラズマ・壁相互作用、材料研究に十分な大きさが確保できることが分かった。また、ECHパワーの吸収分布を実線と点線で指名しているが、そのプロファイルに近い分布であることも分かった。さらに、急峻な分布を持たせることにより、より、集中した熱流束も期待できる。

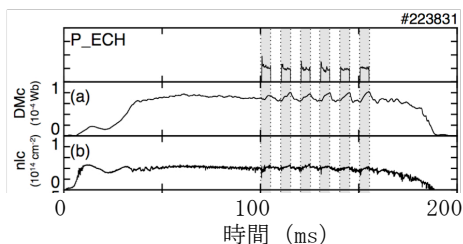


図3 プラグECHパワーの5ms変調時の入射波の検波波形(上)、反磁性量(DMc)(中)と線密度(nlc)(下)の時間変化。

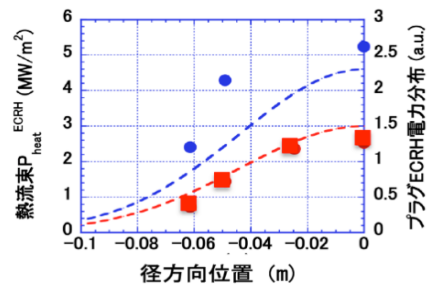


図4 プラグECH印加中の熱流束密度の径方向分布。プラグECHパワー150kW(■)、230kW(●)。点線は吸収分布密度(計算)の概略を示す。

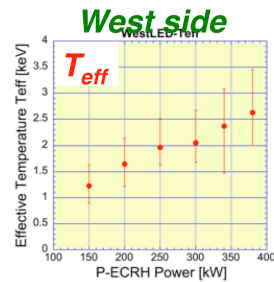


図5 西側エンド部LEDで測定した端損失電子の実効電子温度のプラグECHパワー依存性。

次に、図2のend plate付近の位置に設置した、熱流の主要な粒子である電子のエネルギー分析器(LED)により、平均エネルギーや、エネルギー分布を求めた。LEDは、多重グリッドにより、イオン流の遮蔽、2次電子の抑制をしたエネルギー分析器である。図5は、電子の実効電子温度(高温電子と低温電子の2成分からの平均電子温度)を示した。プラグECHの入射パワーに対して、ほぼ、線形に増加していることがわかる。また、図6に示すように、1パルスあたりの端損失熱流エネルギー密度もパワーにほぼ比例して増大、 0.05MJ/m^2 を $400\text{kW}\times 5\text{ms}$ のECHパルスで得ることができた。ITERで想定されるエネルギー密度 $0.5\sim$ 数 MJ/m^2 に比較して1桁以上小さいが、2MWのジャイロトロン開発やNBIと組み合わせることにより、それに近いELM模擬も可能性があることを明らかにできた。

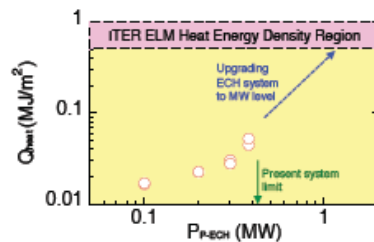


図6 端損失熱流のプラグECHパワー依存性

最終年度では、GAMMA 10/PDX の端部からの熱流束・粒子束の制御性を調べるとともに、

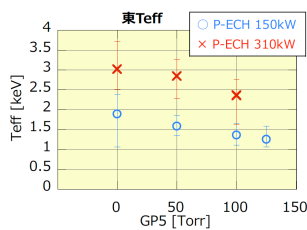


図7 実効電子温度(T_{eff})のガスパフ依存性。

ダイバータ板の最有力候補材であるタングステンをターゲットに、ECH 変調で実際に生成した間欠の高熱流を照射し、初期的データを取得した。

東側バリア部のガスパフ5 (GP5) に供給するリザーバタンクのガス圧を変化させ、導入ガス量を変え、そのときの端損失の変化を測定した。プラグパワーが 150kW と 310kW の2ケースについて、ガス圧を 0 から 120torr まで変化させたときの端損失電子の実効温度を図7に、また、粒子束に比例する電子流電流密度を図8に示した。実効電子温

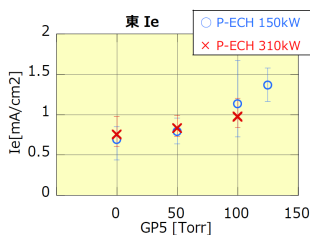


図8 端損失電子電流 (I_e) のガスパフ依存性。

度は導入ガス量の増加とともに減少するが、電子流は増加しているのがわかる。プラグ ECH 入射時の熱流束は電子流によるものが支配的であることから、図9に熱流束に比例すると考えられる実効温度と電子電流の積のガス量依存を示したが、ガスが増えてもほぼ一定の値を示している。一方、図5の実効電子温度の ECH パワー依存性と図7から図9の ECH パワー依存性をみると、熱流束は ECH パワーにほぼ比例し、粒子束はガスパフで大きく変化すること、また、ECH パワーを増加させたときの熱流束の増加が実効電子温度の上昇によるものであることがわかり、ECH パワーとガスパフにより、端損失の熱と粒子束が能動的に制御できることを示すことができた。また、ELM を模擬する上で重要な電子のエネルギー分布の制御もある程度可能であることが示された。

最後に、実際のプラズマ壁相互作用の初期実験としてタングステンターゲットに間欠熱流を照射する初期実験を行った。光学測定による軸方向 (ターゲット前面方向) の発光強度について、ECH パワーを 1ms 間 on、3ms 間 off とした変調入射の時の時間変化を図1

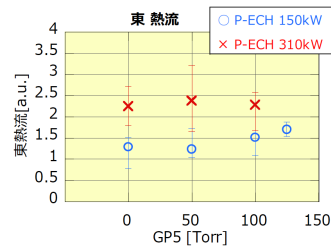


図9 熱流束 (実効電子温度×電子電流) のガスパフ依存性。

0に示す。縦軸が表面からの距離である。休止時間中の発光強度はパルスとともに微増している。フィルターにより H アルファ線強度のみを見ると、この増加がより顕著に現れた。また、最近注目され始めた、ダイバータ材料に長期的に影響を与えるグラッシー ELM 等の中程度の間欠熱流の数万回規模の高積算回数効果についての指標となる熱流束指数(heat flux factor)についての検討も行い、ECH 変調で $0.7\text{MJ}/\text{m}^2\text{s}^{1/2}$ の値を達成し、材料表面に大きな影響を与えるレベルであることを明らかにした。これらの成果は、第9回開放端磁場閉じ込め装置国際会議 (OS2012) と第3回核融合のためのプラズマ材料相互作用装置国際ワークショップの合同国再会議、TOKI 国際会議、プラズマ核融合学会に発表するとともに、核融合関係の有力国際誌 Nuclear Fusion、Transaction of Fusion Science and Technology、Plasma Fusion Research 等に発表した。

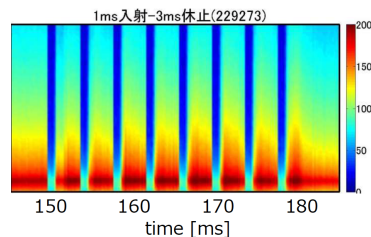


図10 ECH 変調による間欠熱流をタングステンターゲットに照射した時の材料表面の発光強度の時間変化。縦軸が材料表面からの距離である。

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 5件)

1) GAMMA10/PDX Project Status and Future

T. Imai, M. Ichimura, Y. Nakashima, M. Sakamoto, I. Katanuma, M. Yoshikawa, T. Kariya, M. Hirata, J. Kohagura, R. Minami, T. Numakura, R. Ikezoe, K. Oki, K. Sakamoto
Fusion Science and Technology[査読有], vol.63, 1T, p8-15 (2013).

2) Development of High Power ECH Systems for High and ELM-like Heat Flux in GAMMA 10 Tandem Mirror,
R. Minami, T. Imai, T. Kariya, T. Numakura, y. Endo, H. Nakabayashi, 他 13 名
Plasma Fusion Res. [査読有], vol.8, 2402081 (2013).

3) Development of multi-purpose MW gyrotrons for fusion devices
R. Minami, T. Kariya, T. Imai, T. Numakura, Y. Endo, H. Nakabayashi, T. Eguchi, T. Shimozuma, S. Kubo, Y. Yoshimura, H. Igami, H. Takahashi, T. Mutoh, S. Ito, H. Idei, H. Zushi, Y. Yamaguchi, K. Sakamoto, Y. Mitsunaka and the GAMMA 10 Group
Nucl. Fusion [査読有], vol.53, 063003 (2013), doi:10.1088/0029-5515/53/6/063003.

4) Development of 28 GHz /35 GHz Dual-Frequency Gyrotron for Fusion Research
T. Eguchi, T. kariya, T. Imai, H. Nakabayashi, R. Minami, T. Numakura, R. Kawarasaki, K. Nakazawa
Transactions of Fusion Science and Technology [査読有], Vol.63, 1T, 280-282 (2013).

5) The improvement of the ECH antenna system in the GAMMA 10
K. Nakazawa, T. Imai, T. Kariya, R. Minami, T. Numakura, H. Nakabayashi, T. Eguchi, R. Kawarasaki
Transactions of Fusion Science and Technology [査読有], Vol.63, 1T, 274-276 (2013).

[学会発表] (計 8 件)

1) 大型タンデムミラー装置を用いたダイバータ模擬の為の大熱流束プラズマの発生と非接触プラズマ実現に向けた研究の進展
中嶋洋輔、坂本瑞樹、市村真、今井剛、假家強、南龍太郎、他
第 30 回プラズマ核融合学会、東工大、東京都、3rd Dec. - 6th Dec. 2013 (招待講演).

2) Generation and Control of High Intermittent Heat Load Pattern for Divertor Simulation Studies in GAMMA 10 Tandem Mirror
Ryutaro Minami, Tsuyoshi Imai, Tsuyoshi Kariya, Yousuke Nakashima, et al.,
23rd International Toki Conference (ITC-23), Toki, Gifu, Japan, 18 - 21 Nov., 2013.

3) ELM 模擬に向けた ECH 入射電力変調・位置制御による高熱流束生成の基礎実験、
南龍太郎、今井剛、假家強、中嶋洋輔、他。
第 10 回核融合エネルギー連合講演会、つくば市、19th June. - 20th June. 2014.

4) Development of High Power ECH Systems for High and ELM-like Heat Flux in GAMMA 10 Tandem Mirror
R. Minami, T. Imai, T. Kariya, T. Numakura, 他
22nd International Toki Conference (ITC-22), Toki, Gifu, Japan, 19 - 22 Nov., 2012.

5) Development of MW Gyrotrons for Fusion Devices by University of Tsukuba
R. Minami, T. Kariya, T. Imai, T. Shimozuma, K. Sakamoto, 他 14 名,
24th IAEA Fusion Energy Conference, San Diego, USA [Synopsis 査読有], FTP/P1-20 (2012).

6) The improvement of the ECH antenna system in the GAMMA 10
K. Nakazawa, T. Imai, T. Kariya, R. Minami, T. Numakura, H. Nakabayashi, T. Eguchi, R. Kawarasaki and GAMMA10 group, The Inter. Conf. on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement and the Inter. Workshop on Plasma Material Interaction Facilities for Fusion, Tsukuba, Ibaraki, Japan 27 - 31 Aug. 2012.

7) ECH Power Modulation in GAMMA 10 Tandem Mirror
R. Minami, T. Kariya, T. Imai, 他
Plasma Conference 2011 (プラズマ核融合学会・物理学会合同学会) Kanazawa, 23 Nov. 2011.

8) Improvement of the Central cell ECRH Antenna in GAMMA 10
H. Aoki, T. Imai, T. Kariya, R. Minami, 他.
Plasma Conference 2011 (プラズマ核融合学会・物理学会合同学会) Kanazawa, 23 Nov. 2011.

[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
今井 剛 (Tsuyoshi Imai)
筑波大学 数理物質系 教授
研究者番号 : 80354637

(2) 研究分担者
假家 強 (Tsuyoshi Kariya)
筑波大学 数理物質系 准教授
研究者番号 : 30451678

南 龍太郎 (Ryutaro Minami)
筑波大学 数理物質系 講師
研究者番号 : 70370476

中嶋 洋輔 (Yosuke Nakashima)
筑波大学 数理物質系 教授
研究者番号 : 00188939