

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 2 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400531

研究課題名(和文) アルペンイオンサイクロトロン波動による磁力線方向へのエネルギー輸送

研究課題名(英文) Energy transport in the direction of magnetic field line owing to Alfvén Ion Cyclotron waves

研究代表者

市村 真 (ICHIMURA, Makoto)

筑波大学・数理物質系・研究員

研究者番号：10151482

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：強い温度非等方性を持つミラー磁場配位中のプラズマでは、アルペンイオンサイクロトロン(AIC)波動が自発励起される。波動との相互作用の結果、磁力線に捕捉されたイオンが開放端部に輸送されることが予想される。GAMMA10では、端損失高エネルギーイオンがAIC波動間の差周波数に相当する周期で変動することが観測され、古典的な過程で説明することができない。マイクロ波反射計を整備し、プラズマ内部の波動計測を詳細に行うことで、AIC波動間の非線形結合として中心近傍で差周波数波動が励起されることを初めて明らかとした。GAMMA10におけるエネルギーの流れには、波動との相互作用が重要な役割をなすことが示された。

研究成果の概要(英文)：In high performance plasmas with the strong anisotropy, Alfvén-ion-cyclotron (AIC) waves, are spontaneously excited. A microwave reflectometer system is introduced for the measurement of spatial structure of density fluctuations owing to the ICRF waves. Couplings between the ICRF waves for heating and the excited waves are clearly observed with the reflectometer for the first time. To evaluate wave-particle interactions, the behaviors of high-energy ions with energy more than 5 keV are detected with semiconductor detectors installed in the central and the east end cells. Ions escaped along the magnetic field line are detected in the east end. Fluctuations around 0.1 MHz which are difference frequencies between AIC waves are observed only on the signal of the detector installed in the east end. Pitch angle scattering of high-energy ions owing to those low-frequency waves are clearly indicated. Considerable energy transport to the ends owing to the AIC waves is suggested.

研究分野：プラズマ理工学

キーワード：高エネルギーイオン ICRF波動 波動粒子相互作用 アルペンイオンサイクロトロン波動

1. 研究開始当初の背景

(1) 核燃焼プラズマにおいては、プラズマ中の高速イオンや核反応生成アルファ粒子の輸送、特に、高速イオン励起MHD不安定性やそれに起因した高速イオンの異常輸送の解明が重要な課題となっている。当該研究代表者は、日本原子力研究開発機構JT-60U装置との協力研究においてイオンサイクロトロン放射(ICE)と呼ばれる核反応生成(FP)イオンが駆動する自発励起高周波波動の観測、また、タンデムミラー装置GAMMA10においては、温度の非等方性に起因して自発励起されるアルペンイオンサイクロトロン(AIC)波動とその高エネルギーイオンに及ぼす影響の実験的研究を進めてきた。ICEに関しては、1990年代に主として理論的な側面からR.O.Dendy等(Nuclear Fusion, 35 (1995)1733にReview論文)によって精力的に解析が進められたが、実験的観測やその解析に関しては不十分であった。研究代表者は、これまでに重水素放電時に観測されるFP-³He、T、Pイオンに起因するICEの空間構造を初めて実験的に明らかとし、そのイオン種に依存する振舞いから異なる波動励起機構の存在を明らかとした。(M.Ichimura, et al., Nuclear Fusion, 48 (2008) 035012, S.Sato, M.Ichimura, et al., Plasma and Fusion Research 5, S2067 (2010)) AIC波動に関しては、実験的に観測される装置は現在世界でGAMMA10のみであり、その詳細な励起機構や高エネルギーイオンとの相互作用に関する研究を進展させているところである。(M.Ichimura, J. Plasma Fusion Res. 79 (2003) 5-13, R.Ikezoe, M.Ichimura, et al., Plasma Fusion Res. 6, 2402047 (2011)) AIC波動励起は磁気圏でも観測される温度非等方プラズマに普遍的な物理現象である。これらの波動と磁気圏で観測される粒子加速が宇宙関連の研究者の間でも注目されている。また、これらの高温・高密度プラズマ中の励起波動と高エネルギーイオンとの相互作用の解明は核燃焼プラズマ研究において不可欠の課題である。

(2) GAMMA10において、AIC波動の励起により、温度非等方性が緩和することは以前から実験的に観測されていた。(M.Ichimura, et al., PRL, 70 No.18 (1993) 2734-2737) すなわち、直角方向に加熱されたイオンがAIC波動によるピッチ角散乱を受け、磁力線に沿った方向に輸送される。実際に観測されるプラズマパラメタから、入射されたエネルギー収支を評価するとAIC波動により開放端部に輸送されるエネルギーは十分に大きく無視できない量であることが理論的に指摘されている。(H.Hojo, et al., J. Plasma Fusion Res. 75 No.9 (1999) 1089-1094.) GAMMA10において、ミラー開放端部を利用してダイバ-

タ模擬実験を行うことにも大きく寄与することから、開放端部から流出する粒子束、エネルギー束の定量的評価の必要性とその制御を念頭に本研究課題を着想した。

2. 研究の目的

ミラー磁場配位における開放端部から流出するエネルギーに関して、プラズマ中に自発的に励起されるAIC波動と高エネルギーイオンとの相互作用が大きく関与していることが理論的に指摘されている。本研究課題では、ICRF加熱により磁力線に対して直角方向に入射されたエネルギーがAIC波動によるイオンのピッチ角散乱で開放端部へ輸送されることを実験的に明らかにすることが目標である。その最初の段階として、波動プラズマ間の相互作用を解明するためのプラズマ内部における波動の詳細計測が第一の目的となっている。磁力線方向へのエネルギー輸送は、開放端磁場配位を活用したダイバータ模擬実験やICRF波動を用いたプラズマ推進等において、さらに、宇宙プラズマにおける粒子加速等の現象とも深く関わっており、その物理の解明やプラズマ制御の観点から重要である。

3. 研究の方法

GAMMA10セントラル部においては、イオンサイクロトロン周波数帯(ICRF)の高周波による磁力線に対して直角方向への加熱に起因して強い温度非等方性を持つプラズマが形成され、AIC波動が励起される。周辺部に設置されている磁気プローブによる計測に加えて、プラズマ内部の空間構造に関する情報を収集するためのマイクロ波反射計による詳細計測を進めた。真空容器内に設置するマイクロ波ホーンアンテナを磁力線方向に増設することにより、磁力線方向の固有モードとして励起されるAIC波動の境界条件を明らかとする。また、印加周波数を変化させることにより、波動の径方向構造についても明らかとする。

高エネルギーイオン計測としては、半導体を用いた検出器で磁力線方向と磁力線に直角方向への輸送を計測しているが、現状の検出器では検出可能エネルギーが比較的高エネルギー(6keV以上)に制限されている。より低エネルギー領域にも感度を持つ検出器を併用し、磁力線方向への粒子とエネルギー輸送を明らかとし、AIC波動との相関を計測する。研究代表者(市村)は、ICRF波動を用いたプラズマ生成・加熱を手法として、波動の励起、波動とイオンとの相互作用、プラズマ中に励起される様々な巨視的・微視的揺動の解析等に関して、統一的に実験的研究を推し進めている。また、研究分担者(池添)は、ICRFによるプラズマ加熱実験、波動計測、特に反射計を用いたプラズマ中の励起波動の空間分布測定を中心に研究を進める。

4. 研究成果

(1) AIC波動の励起と磁力線方向への高エネルギーイオンの輸送

GAMMA10では、比較的低密度ではあるが数keVのイオン温度を持つ高ベータプラズマが容易に形成され、高温で強い温度非等方性をもつプラズマに特徴的なAIC波動が容易に励起される。ミラー磁場配位は、トラス系にも局所的に存在すること、また、磁気圏プラズマにおいても一般的な磁場配位であり、磁力線に対して直角方向に捕捉された温度非等方性を持つ高ベータプラズマ中に自発励起される波動とその高エネルギーイオンとの相互作用に共通な物理を理解することが重要である。GAMMA10では、磁力線に捕捉されたイオンのピッチ角分布計測や開放端部への端損失イオン計測により、イオンの速度空間分布を容易に知ることができ、励起波動との相互作用の実験的解明が可能である。GAMMA10の開放端部には、半導体検出器を用いた高エネルギーイオン計測器 (eeHED) がすでに1台設置されており、50keVに達する高エネルギーイオンを検出している。図1に実際に観測された高エネルギーイオン信号の例を示した。図1上段の挿絵は、セントラル部で観測される磁気プローブ信号の周波数スペクトルの時間変化を示している。加熱に用いられるイオンサイクロトロン周波数帯 (ICRF) 波動 6.36MHz とその 0.9 倍付近に離散的な周波数ピークをもつ AIC 波動が確認できる。加熱電力の上昇とともに反磁性信号が増大し、AIC 波動の励起と共に eeHED 信号が急激に増大することがわかる。

図2は、異なる放電における高エネルギーイオン信号の時間変化を示している。図2(a)は、信号の生波形であり、50ms付近から観測される信号の増大がAIC波動の励起と関連している。図2(b)は、信号の周波数

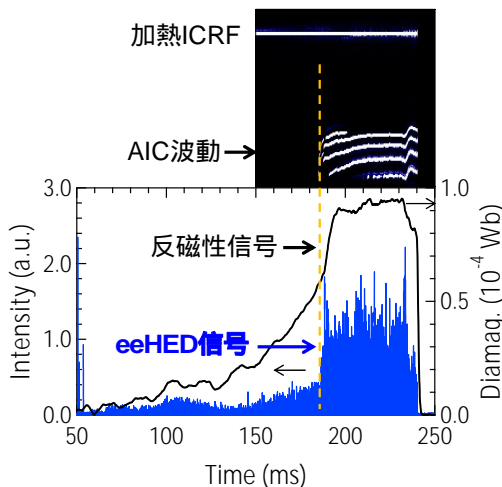


図1：開放端部における高エネルギーイオン信号と AIC 波動の励起

スペクトルの時間変化であり、その強度が色の濃淡で示されている。100kHz 付近に強い周波数ピークが観測されることがわかる。この周波数は、AIC 波動の持つ離散的な周波数ピーク同士の差周波数に対応している。

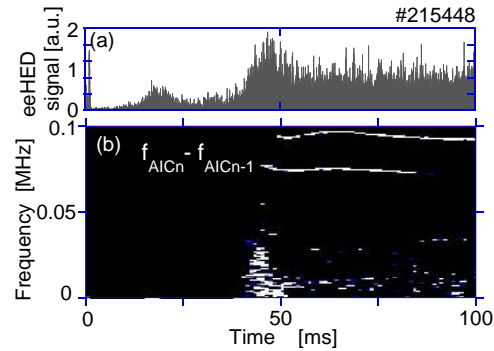


図2：(a)高エネルギーイオン信号、(b)信号の周波数スペクトルの時間変化

(2) 反射計を用いたプラズマ内部の波動計測

プラズマ中の波動の振舞いを詳細に理解するためにマイクロ波反射計を整備し、高周波波動に起因する密度揺動を計測している。セントラル部に自発励起される AIC 波動の空間構造に関しては、これまでに周辺部に設置された磁気プローブ計測から予想されていた磁力線方向の定在波形成がプラズマ中心部においても初めて確認された。半径方向の空間構造に関しては、2 台の反射計を準備し、一つの周波数を 10GHz に固定し、もう一方の周波数を変化させることにより AIC 波動の位相差の周波数依存性を計測した。円柱プラズマにおけるイオンサイクロトロン遅波の径方向分布は、プラズマ全体にグローバルな構造となり、プラズマ中心部において左回り偏波、周辺部において右回り偏波を持つことが報告されている。10GHz は、 r/a (a :プラズマ半径) が 0.7 近傍の密度での遮断周波数に相当する。位相差は、10GHz より低い遮断周波数に対応する径方向位置 (より周辺部) で反転することが明らかとなり、波動の偏波の反転に起因して密度揺動が反転することを示唆するデータが得られている。

典型的な高イオン温度放電におけるセントラル部反磁性量の時間変化を図3(a)に示す。反磁性量は $t = 45$ ms 付近で飽和することが示されている。この前後二つの時間 ($t = 40$ ms と $t = 50$ ms) における反射計で計測した内部密度揺動の周波数スペクトルを図3(b),(c)に示す。図3(b),(c)はそれぞれ 0-1.0 MHz, 5.5-6.5 MHz の周波数範囲を拡大して表示している。この放電において AIC 波動は $t = 35$ ms 近くで励起されており、図3(c)のスペクトル上に4つの離散的なピーク (f_{AIC}) として二つの時間 ($t = 40$ ms : 赤と $t = 50$ ms : 黒) において共に観

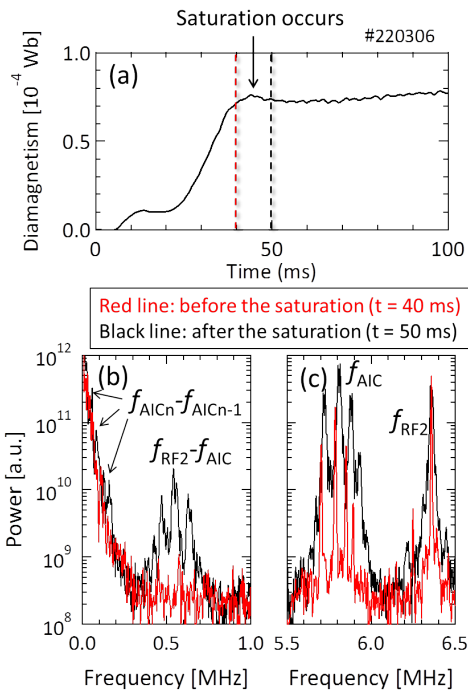


図 3: GAMMA10 セントラル部における (a) 反磁性量の時間発展と (b), (c) 反射計で計測した内部密度揺動スペクトル ((b): 0 - 1.0 MHz, (c): 5.5-6.5 MHz)

測されている。なお、6.36 MHz のピーク (f_{RF2}) はセントラル部のイオン加熱に用いている ICRF 波動による密度揺動である。図 3(c) から、反磁性量の飽和後 ($t = 50$ ms) に f_{AIC} 、 f_{RF2} のスペクトル幅が極端に広がっていることがわかる。また、図 3(b) に示す低周波数帯に着目すると、 f_{RF2} と f_{AIC} の差周波数にピークが観測される。この結果は、加熱用の ICRF パワーが AIC 波動との差周波数を有する波動の励起に費やされ、そのために反磁性量が飽和している可能性を示唆している。また、複数ある AIC 波動間の差周波数 ($f_{AICn} - f_{AICn-1}$) をもつ低周波波動も励起されていることがわかる。この $f_{AICn} - f_{AICn-1}$ の時間変化と前節で示した端損失高エネルギーイオン信号中に観測される揺動の周波数は完全に一致する。従って、AIC 波動により励起されたこの低周波波動が、セントラル部に閉じ込められている高エネルギーイオンと相互作用し、磁力線方向への輸送を引き起こしていることが強く示唆される。反磁性量が飽和する前には $f_{AICn} - f_{AICn-1}$ の波動が励起されていないことから、この AIC 波動が介在する磁力線方向への輸送が反磁性量の飽和に関与している可能性も示唆される。セントラル部のプラズマ内部においては、外部より印加する高周波と上記 AIC 波動との結合ばかりでなく、AIC 波動の離散的ピーク周波数間の差周波数を持つ波動が実際に励起されていることが明らかとなった。

さらに、入射マイクロ波の周波数を変化させて磁力線と直角方向 (プラズマ半径方

向) の空間構造を計測した結果、より中心部において波動間の結合が強く起こることを初めて見出した。開放端部において観測される高エネルギーイオン信号上に観測される周波数が、この内部領域で観測された波動間の非線型結合の結果としての低周波波動であることが明らかとなり、磁力線方向へのエネルギー輸送機構の詳細な解析が可能となった。

(3) 反射計システムの改良とバイスペクトル解析の導入

より詳細な空間構造を計測することを目的として、多チャンネル化を進めるとともに、アンテナを含む計測器の改良・調整を進展させ、MHz の高周波帯でのヘテロダインシステムを採用し、空間 2 点からの反射波信号上に観測される揺動の強度成分と位相成分との分離を可能とした。さらに、AIC 波動や加熱に用いる ICRF 波動に起因する密度揺動信号にバイスペクトル解析を適用し、三波結合強度を評価することにより、GAMMA10 プラズマ中で観測される低周波数揺動成分が、AIC 波動や加熱 ICRF 波動との間の非線形結合で励起されていることを確認した。また、AIC 波動間の差周波波動を励起する結合に強い径方向依存性が見出され、プラズマ内部領域において顕著

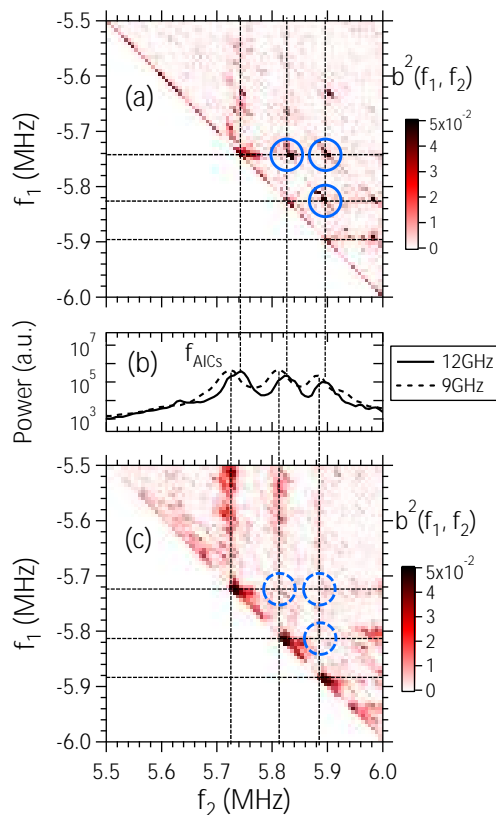


図 4: AIC 波動間 (f_1 と f_2) の差周波数揺動に着目したバイコヒーレンスの強度: (a) 12GHz 入射時 (中心付近) (b) 対応する放電における揺動のパワースペクトル (c) 9GHz 入射時 (周辺部)

に励起されていることが明らかになった。図4にAIC波動間(f_1 と f_2)の差周波数揺動に着目したバイコヒーレンスを示した。入射マイクロ波周波数(a)12GHzはプラズマのほぼ中心の遮断周波数に対応し、(c)9GHzは周辺部に相当する。図4より、AIC波動間の差周波数揺動は、中心付近のみで観測されることが確認された。よりはっきりと差周波数揺動の発生場所を確認するために入射マイクロ波周波数を変化させたときのバイコヒーレンスを $f_1+f_2=\text{const}(f_3)$ となる線上で積分した値を図5に示した。ほぼ中心付近のみで差周波数に相当する揺動が観測されていることが分かる。また、周辺領域では、 <100 kHzの広い低周波数帯にわたり強い非線形結合が生じており、乱流との相互作用によりスペクトルのピーク幅が広がられている可能性が示唆され、新しい知見を得ることができた。開発した反射計を用いて有意な波動構造計測ができるまで進展し、波動の非線形結合によって励起された低周波数波動がイオンの磁力線方向の輸送を駆動することが明らかとなった。

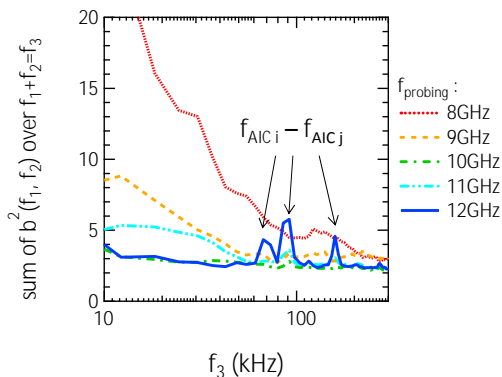


図5: 入射マイクロ波周波数を変化させたときのバイコヒーレンスを $f_1+f_2=\text{const}(f_3)$ となる線上で積分した値

(4)まとめ

強い温度非等方性を持つミラー磁場配位中のプラズマにおいては、AIC波動が自発励起される。波動との相互作用の結果、磁力線に直角方向に捕捉されたイオンが磁力線方向にピッチ角散乱を受け、開放端部に輸送されることが示唆されている。図6は、理論的に検討されたGAMMA10セントラル部における電力の流れを示している。古典的な過程のみでは、実験結果を説明することができずにAIC波動との相互作用が重要な役割をなすことが示されている。実験で観測される端損失高エネルギーイオンが、AIC波動間の差周波数に起因する揺動の周期で変動することから、マイクロ波反射計を整備し、セントラル部におけるプラズマ中の波動計測を詳細に行い、AIC波動

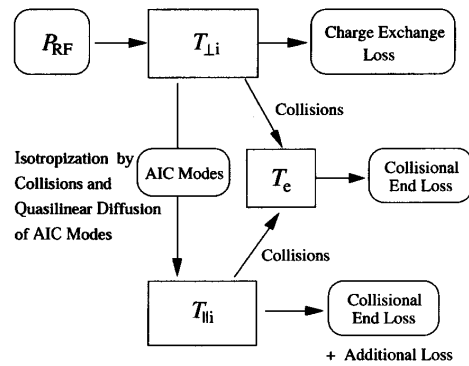


図6: GAMMA10 セントラル部におけるエネルギーの流れ

間の非線形結合の結果として、中心付近で差周波数の波動が励起されていることを初めて明らかとした。また、この磁力線方向へのイオンの輸送とセントラル部の反磁性量の飽和が関連することが明らかとなった。本研究で確認された高エネルギーイオンの輸送に加えて、低エネルギー領域を含めた総量評価が可能となった。

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12件)

R. Ikezoe, M. Ichimura, et al.,
“Wave excitation by nonlinear coupling among shear Alfvén waves in a mirror-confined plasma”, Phys. of Plasmas, 22 (2015) 90701
(査読有) [dx.doi.org/10.1063/1.4930216](https://doi.org/10.1063/1.4930216)

R. Ikezoe, M. Ichimura, et al.,
“Extension of Operational Regimes with ICRF Heating on GAMMA 10/PDX”, Fusion Science and Technology, 68 (2015) 63. (査読有)
[dx.doi.org/10.13182/FST14-853](https://doi.org/10.13182/FST14-853)

T. Okada, R. Ikezoe, M. Ichimura, et al.,
“Internal Measurement of Propagation of ICRF Waves by Using Reflectometers on GAMMA 10”, Fusion Science and Technology, 68 (2015) 161. (査読有)
[dx.doi.org/10.13182/FST14-898](https://doi.org/10.13182/FST14-898)

R. Ikezoe, M. Ichimura, et al.
“Coupling of ICRF Waves and Axial Transport of High-Energy Ions Owing to Spontaneously Excited Waves in the GAMMA 10 Tandem Mirror”, Nuclear Fusion, 53 (2013) 073040
(査読有)
[dx.doi.org/10.1088/0029-5515/53/7/073040](https://doi.org/10.1088/0029-5515/53/7/073040)

M. Ichimura, M. Hirata, R. Ikezoe, et al.,
“Recent ICRF heating experiments for a divertor simulation study on GAMMA 10”, Fusion Science and Technology, 63, 1T (2013)115 (査読有)
<http://epubs.ans.org/?a=16884>

R. Ikezoe, M. Ichimura, et al.,
“Time evolving structure of Alfvén-ion-cyclotron waves in GAMMA10”, Fusion Science and Technology, 63, 1T (2013)58 (査読有) <http://epubs.ans.org/?a=16874>

[学会発表](計23件)

池添竜也, 市村真, 他,
「GAMMA10高温プラズマ中のアルベン波の2点相関」, 第32回プラズマ・核融合学会年会, 2015.11.24-27, 名古屋大学(愛知県・名古屋市), 24aE11P

岡田拓也, 池添竜也, 市村真, 他
「GAMMA10内部領域における反射計を用いたICRF波の吸収と伝搬計測」, 第32回プラズマ・核融合学会年会, 2015.11.24-27, 名古屋大学(愛知県・名古屋市), 24aE12P

板垣惇平, 池添竜也, 岡田拓也, 市村真, 他,
「GAMMA10セントラル部におけるマイクロ波反射計を用いた低周波波動励起の観測」
2015.11.24-27, 名古屋大学(愛知県・名古屋市), 24aE10P

R. Ikezoe, M. Ichimura, et al.,
“Coupling between slow Alfvén waves in the GAMMA 10 tandem mirror”
57th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, Nov. 16–20, 2015, Savannah, USA, NP12.00042.

T. Okada, R. Ikezoe, M. Ichimura, et al.,
“Measurement of the ICRF wave propagation in the internal region of plasmas by using reflectometers on GAMMA10”,
57th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, Nov. 16–20, 2015, Savannah, USA, NP12.00043.

池添竜也, 岡田拓也, 市村真, 他,
「GAMMA 10 セントラル部における ICRF 波動間の非線形結合」, 第 31 回プラズマ・核融合学会年会 (Plasma Conference 2014), 2014.11.18-21, 朱鷺メッセ (新潟県・新潟市) 18PB-081.

岡田拓也, 池添竜也, 市村真, 他,
「GAMMA10 における反射計を用いた ICRF 波動伝搬計測」, 第 31 回プラズマ・核融合学会年会 (Plasma Conference 2014), 2014.11.18-21, 朱鷺メッセ (新潟県・新潟市) 20PB-092

R. Ikezoe, M. Ichimura, et al.,
“On the nonlinear couplings among ICRF waves observed in GAMMA 10”, 56th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics October 27–31, 2014, New Orleans, USA, BP8.00056.

池添竜也, 市村真, 他,
「GAMMA 10 における自発励起 ICRF 波動

の構造計測と高速イオン損失への影響」, 第 10 回核融合エネルギー連合講演会, 2014.6.19-20, つくば国際会議場 (茨城県・つくば市) 19-033

岡田拓也, 市村真, 池添竜也, 他,
「マイクロ波反射計で計測した GAMMA 10 プラズマ内部領域における ICRF 波動の振る舞い」, 第 10 回核融合エネルギー連合講演会, 2014.6.19-20, つくば国際会議場 (茨城県・つくば市) 19-032

市村真, 池添竜也, GAMMA10/PDX グループ,
「ミラー磁場中のアルベン波の自発励起とイオンとの相互作用」, 日本地球惑星科学連合 2014 大会, 2014.4.28-5.2, パシフィコ横浜 (神奈川県・横浜市) P-EM29-01

岡田拓也, 池添竜也, 市村真, 他
「GAMMA10 アンカー部における高周波密度揺動の振る舞いと定量評価に向けた取り組み」, 第 30 回プラズマ・核融合学会年会, 2013.12.3-6, 東工大 (東京都・目黒区) 05aE31P

池添竜也, 岡田拓也, 市村真, 他,
「GAMMA 10 セントラル部における高周波波動の空間構造および非線形結合現象」, 第 30 回プラズマ・核融合学会年会, 2013.12.3-6, 東工大 (東京都・目黒区) 04aE60P

R. Ikezoe, M. Ichimura, et al.,
“Coupling and spatial structure of Alfvén-ion-cyclotron waves in GAMMA 10”, 55th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, Nov. 11-15, 2013, Denver, USA

R. Ikezoe, M. Ichimura, et al.,
“Recent ICRF-related experiments on the GAMMA10 tandem mirror”, US-Japan Workshop on Physics of RF Heating of Fusion Plasmas, September 24-26, 2013, MIT, USA

6. 研究組織

(1) 研究代表者

市村 真 (ICHIMURA Makoto)
筑波大学・数理物質系・研究員
研究者番号: 10151482

(2) 研究分担者

池添竜也 (IKEZOE Ryuya)
筑波大学・数理物質系・助教
研究者番号: 70582849