

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20360413

研究課題名(和文) 内部導体装置での電子バーンシュタイン波によるオーバーデンスプラズマ研究

研究課題名(英文) Study on Overdense Plasmas by Electron Bernstein Waves in a Dipole Magnetic Confinement Device

研究代表者

小川 雄一 (OGAWA YUICHI)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授

研究者番号：90144170

研究成果の概要(和文)：マイクロ波のカットオフ密度以上であるオーバードenseプラズマの加熱方法として電子バーンシュタイン波が注目されている。本研究では、内部導体装置にトラス外側からX波の電磁波を入射し、プラズマ中の波の伝搬を直接測定することにより、短波長、位相速度と群速度が逆伝搬、群速度が電子の熱速度程度である、等の電子バーンシュタイン波の特徴を実験的に観測でき、これによりX波からのモード変換で励起された電子バーンシュタイン波の同定に成功した。

研究成果の概要(英文)：An Electron Bernstein Wave (EBW) is attractive for heating of overdense plasmas. In the internal ring device Mini-RT an X-mode wave is injected into the plasma from the low-field-side, and the propagation of the wave inside the plasma is directly measured. Typical characteristics of the EBW such as a short wavelength, backward wave, a group velocity of the electron thermal velocity are experimentally identified. These results indicate the direct observation of the mode conversion from the X-mode to the EBW.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	7,800,000	2,340,000	10,140,000
2009年度	4,300,000	1,290,000	5,590,000
2010年度	1,900,000	570,000	2,470,000
年度			
年度			
総計	14,000,000	4,200,000	18,200,000

研究分野：核融合プラズマ

科研費の分科・細目：総合工学・核融合学

キーワード：炉心プラズマ、電子バーンシュタイン波、内部導体装置、オーバードenseプラズマ、高ベータ

1. 研究開始当初の背景

宇宙空間は、まさにプラズマのダイナミックスが純粋に現出している場であると言える。例えば、惑星間衛星ボイジャーやパイオニアの観測によると、木星の磁気圏には、磁気圧に対するプラズマの圧力を表す指標であるベータ値が100%を超える超高ベータプラズマの存在が確認された。これはD-3He等の先進燃料核融合炉の可能性を示唆するも

のとして期待されると共に、超高ベータプラズマに対する新たな緩和理論の発展の場をも提供している。

このような超高ベータプラズマを実験系で再現するために、我々は内部導体装置Mini-RTにおいて電子サイクロトロン周波数帯のマイクロ波によるプラズマ生成・加熱を行っている。電子サイクロトロン波は、核融合プラズマの有効な加熱手段であり、最近で

はトカマクプラズマの電流駆動や新古典テアリングモードの安定化などにも利用されている。ただし弱磁場装置に応用した場合、カットオフ密度が低いため、高温・高密度プラズマが生成できない、という問題点がある。因みに、磁場が1Tの場合のカットオフ密度は $\sim 10^{19} \text{ m}^{-3}$ である。従って本研究で対象としている内部導体トーラス装置では、磁場が0.1~0.3T領域であるため、高密度プラズマの生成・加熱に電子サイクロトロン波は使えない。

カットオフ密度以上の高密度プラズマで伝播する電子サイクロトロン周波数帯のプラズマ中の波として、電子バーンシュタイン波 (Electron Bernstein Wave) がある。これは隣り合う電子サイクロトロン周波数の高調波間 ($n\Omega_{ce} \sim (n+1)\Omega_{ce}$ の領域) にブランチを持つ静電波である。このEBWは、アップーハイブリッド共鳴領域で電磁波からのモード変換を利用して励起させることが出来る。

近年、磁場の弱い球状トカマクでもEBWに高い関心を持っており、カットオフ密度を超えるオーバードレンスプラズマの生成・加熱、さらには電流駆動の可能性を理論・実験の両面から精力的に研究されている。またWendelstein-7ASでの実験をはじめとして、ヘリカル系でも高い関心もたれており、LHDでも様々な実験が進められている。ヘリカル・球状トカマクなどと同様に、内部導体トーラス装置でも高温・高密度プラズマの手段としてEBWを期待している。

2. 研究の目的

ここでは以下の3つの視点に重点を置いて内部導体トーラスプラズマでの、モード変換による電子バーンシュタイン波の励起・伝播・加熱特性を明らかにすると共に、カットオフ密度を超えたオーバードレンスプラズマを利用した高密度化を目指す。

- (1) プラズマ中に診断用マイクロ波を入射し、その波動の直接測定により、電子バーンシュタイン波の伝播特性の実験的同定
- (2) プラズマパラメータの精緻な測定による電子バーンシュタイン波の伝播特性理論との比較
- (3) 多様な磁場配位・密度勾配での電子バーンシュタイン波の励起・伝播・加熱特性評価

(1)では、プラズマ生成・加熱用の2.45GHzのマイクロ波とは独立に、これよりやや周波数の低い「診断用マイクロ波」(1~2.1GHz)を入射する。さらに、プラズマ中に「小型アンテナ」を挿入し、診断用マイクロ波が波長の短い電子バーンシュタイン波にモード変

換されるのを直接測定することにより、電子バーンシュタイン波の実験的同定を行う。

(2)では、電子バーンシュタイン波へのモード変換特性において重要な役割を果たす密度分布をマイクロ波干渉計や各種プローブ類を駆使して精密に測定し、熱い波の伝播特性理論との比較を行い、RAM達の理論の妥当性を評価する。(3)では、磁場配位および密度勾配を変化させ、EBWへのモード変換の精緻な実験を行い、理論的予測との比較を行うことにより、モード変換の条件を実験的に明らかにする。

3. 研究の方法

本研究は、高温超伝導コイルを磁気浮上させた内部導体トーラス装置Mini-RTを用いて行う。Mini-RT装置は、内部導体コイル近傍で磁場強度が $\sim 0.1 \text{ T}$ であり、2.45GHz (パワー2.7kW)のマイクロ波でプラズマを生成している。Mini-RT装置では図2に示すように、基本モード ($\omega = \Omega_{ce}$) のサイクロトロン周波数が浮上コイル近傍に存在しているが、それに加えて、磁場強度の急激な変化により、2倍、3倍、等の高次サイクロトロン共鳴間の距離が大変狭くなっている。このような内部導体装置での特性を利用して、内部導体トーラスプラズマでの、モード変換による電子バーンシュタイン波の励起・伝播・加熱特性を明らかにすると共に、カットオフ密度を超えたオーバードレンスプラズマを利用した高密度化を目指す。具体的な研究の内容は以下の通りである。

【診断用マイクロ波入射によるプラズマ中の電子バーンシュタイン波の同定】

Mini-RT装置は、プラズマ密度 $10^{16} \sim 10^{17} \text{ m}^{-3}$ 、電子温度 10~20eV 程度のプラズマが生成可能であり、急速掃引可能な駆動機構を有する各種プローブやアンテナ等をプラズマ中に挿入して、密度・温度等のプラズマの基本パラメータやプラズマ中の波動の直接計測ができる。この利点を利用し、プラズマ中の波動を直接測定するシステムを構築し、電子サイクロトロン波から電子バーンシュタイン波へのモード変換を直接実験的に同定する。

具体的には2.45GHzのマイクロ波でプラズマを生成し、その中に数Wレベルの「診断用マイクロ波を入射」し、プラズマ中に挿入した小型アンテナで、これを直接受信し、プラズマ中の伝播特性を調べるものである。なおプラズマ中に挿入する受信アンテナは複数の電場成分を同時測定出来る様に多チャンネル化すると共に、高速で挿引できる駆動システムによりプラズマ中の空間分布の精密な測定を行う。

入射する診断用マイクロ波は周波数 $f = 1 \sim 2.1 \text{ GHz}$ 領域で可変であり、広範囲のプ

ラズマ密度に対して電子バーンシュタイン波の伝播特性を調べられるようにする。また送信・受信システムがプラズマ生成用の2.45GHzに近いので、キロワットレベルのマイクロ波の混入を防ぐため、バンドパスフィルター（BPF）を設置する。なおプラズマ中を伝播する診断用マイクロ波は、ミキサーでリファレンス波と混合し、その位相特性を同定する。

【プラズマパラメータの精緻な測定と、電子バーンシュタイン波のモード変換理論との比較】

Mini-RT 装置ではトラス外側から X 波で入射された診断用マイクロ波は、カットオフ領域を超えて電子バーンシュタイン波にモード変換することが期待される。

モード変換の効率に関しては、RAM 等により与えられている。ここでモード変換に大きく影響するのはプラズマの密度勾配と磁場強度である。RAM 達の理論によると、高いモード変換効率を得るための条件が、 $L_n \times B \sim 5.8 \times 10^{-4} \text{ T} \cdot \text{m}$ で与えられている。 L_n は密度勾配の特性長さである。因みに $B=0.1 \text{ T}$ では $L_n=5.8 \text{ mm}$ となり、1cm 以下の密度勾配が必要となる。Mini-RT プラズマに対して、変換効率を計算すると、 $L_n=5-6 \text{ cm}$ の時、最大の変換効率となる。

本研究では、マイクロ波干渉計や静電プローブ類を整備し、プラズマ中の密度分布を高精度で測定する。また電子バーンシュタイン波へのモード変換も扱える熱い波の伝播特性を有した波動解析コードを導入し、実験データとの比較を行い、RAM 等の理論の妥当性の検証を目指す。

【多様な磁場配位・密度勾配での電子バーンシュタイン波研究】

Mini-RT 装置では真空容器上部に引上げコイルが設置されている。通常は、内部導体コイルを浮上させるために、引上げコイル電流はフィードバック制御されているが、浮上させない場合は、この引上げコイル電流を適当に選択することにより、プラズマ閉じ込め領域を制御・変形させることができる。

磁気面形状を変形させることにより、セパラトリックス近傍の磁気面で急峻な密度勾配が形成できていることができる。これに電子サイクロトロン波を入射することにより、電子バーンシュタイン波へのモード変換を効率よく行うことができる。

4. 研究成果

球状トカマク、ヘリカル、内部導体等の装置においては、高 β ・高密度プラズマの加熱として電子バーンシュタイン波（EBW）が注目されている。EBW は、以下のような特徴を

有している。

- (1) 伝播による密度限界が存在しない、
 - (2) 波長は電子のラーマー半径程度である、
 - (3) 静電波である、
 - (4) 位相速度と群速度の伝播が逆である
 - (5) 群速度は電子の熱速度程度である、
- などの特徴を有している。

図1に内部導体装置 Mini-RT の断面図およびサイクロトロン共鳴の磁場分布、さらに Mini-RT のプラズマの写真や挿入されたプローブ類の写真を示す。

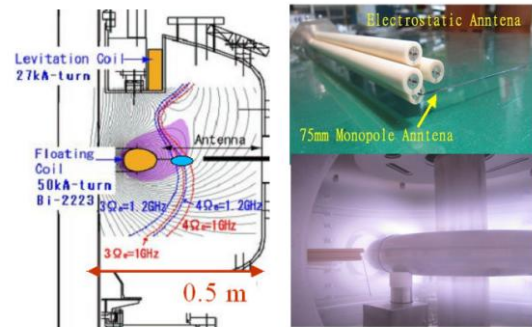


図1 内部導体装置 Mini-RT の断面図、静電プローブアンテナ、プラズマ写真

Mini-RT では、2.45GHz のマイクロ波でプラズマを生成し、その中に数 W レベルの「診断用マイクロ波を入射」し、プラズマ中に挿入した小型アンテナで、これを直接受信し、プラズマ中の伝播特性を調べた。その構成を図2に示す。

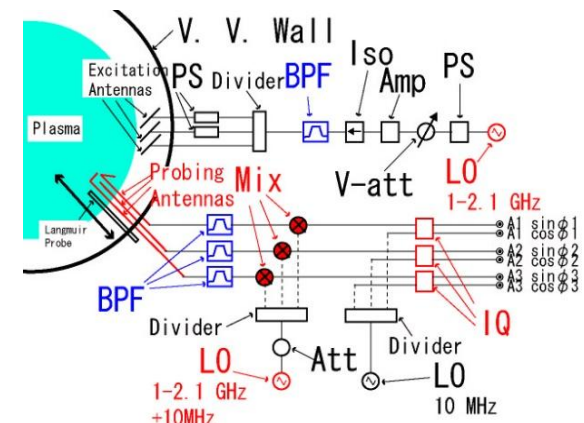


図2 干渉法によるプラズマ中の波動測定システム

ここでは、弱磁場側から X 波を入射し、カットオフ領域を超えて O 波へ変換し、さらに高域混成共鳴（UHR）で EBW にモード変換することを期待している。計測用アンテナとして、電場成分の計測用に長さ 3mm 程度の静電プローブアンテナが、磁場成分計測用に直径 5mm 程度のピックアップループアンテナを挿入した。

プラズマ中に $f=1.0\text{GHz}$ のマイクロ波を入射した場合の代表的な測定結果を図3に示す。 $f=1.0\text{GHz}$ のカットオフ密度を考慮すると $R\sim 280\text{mm}$ でカットオフになっていると推定される。

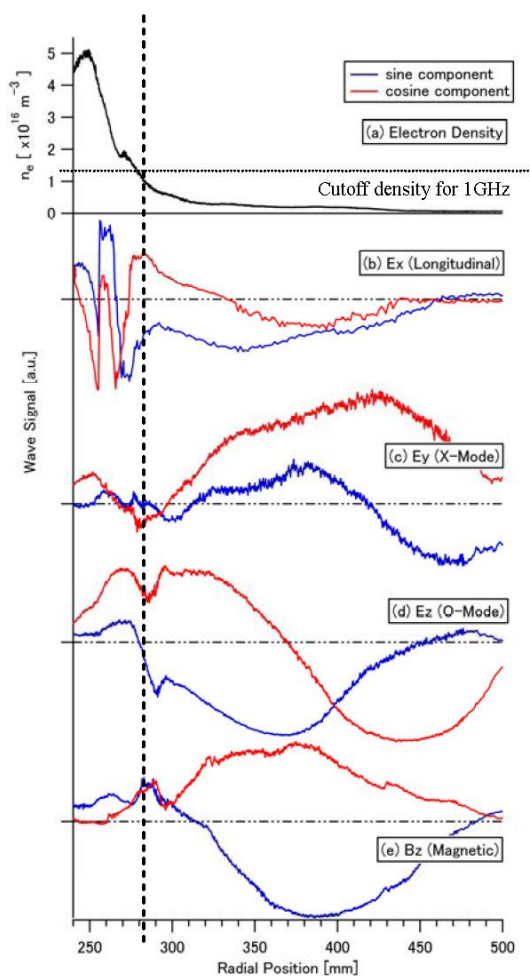


図3 プラズマ密度分布、静電プローブおよびピックアップループの測定結果

真空容器表面 ($R\sim 500\text{mm}$) から放射された電磁波が、真空および低密度プラズマ中を電磁波モードとして伝搬しており、それが図3中の E_y , E_z および B_z の長波長モードとして観測されている。一方、半径方向の電場成分 E_x では、 $R<280\text{mm}$ 領域で短波長の波が検出されていることが判る。波長は 20mm 程度であり屈折率としては $N\sim 15$ 程度である。これは短波長の静電波モードであることから、電磁波モードからモード変換された電子バーンシュタイン波であると考えられる。

プラズマ中の分散関係を図4に示す。モード変換された電子バーンシュタイン波の屈折率は $N\sim 100$ であるのに対して、図3での測定結果では $N\sim 15$ 程度であり、定量的には必ずしも一致していない。その理由として、静電プローブの空間分解能による測定限界の問題や、プラズマ中の高エネルギー電子成

分の寄与の可能性などが考えられる。例えば、 $\sim 1\text{keV}$ 程度の高エネルギー電子が 10% 程度存在すると、屈折率 $N\sim 10\text{-}20$ 程度の可能性がある。

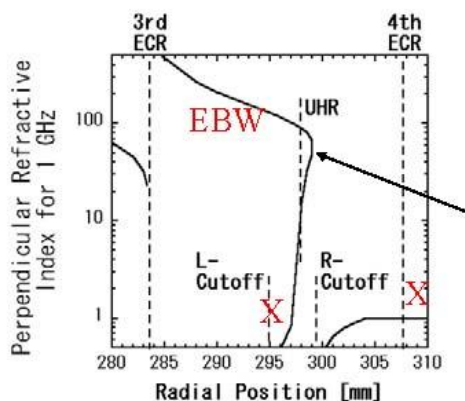


図4 UHR 近傍での分散関係

また図3の測定データにおいて、電磁波モード B_z と静電モード E_x の位相の空間分布を図5に示す。同図より、 $R<280\text{mm}$ の領域では、静電モードの位相変化が電磁波モードのそれと逆になっている。このことより、この静電モードは入射波とは逆方向に伝搬していることが判る。

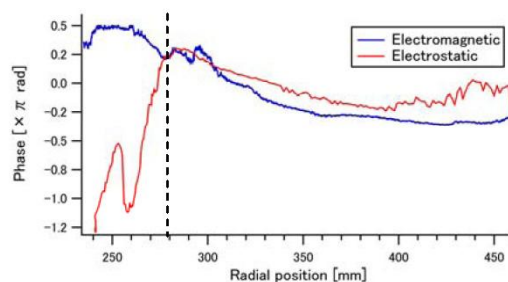


図5 静電モードと電磁波モードの位相変化

次に、極短パルス電磁波の入射による群速度計測を行った。励振アンテナより $3\sim 10\text{ns}$ 程度の 1GHz マイクロ波を入射し、それを可動式計測用アンテナを使用し、浮上コイル径方向 $235\text{mm}\sim 300\text{mm}$ の領域で計測する。マイクロ波の速度は $(3\times 10^8\text{ m/s})$ である為、上記コイル径方向においては、どの位置でも同時刻にパルスは到達すると見なせるが、EBW は高々 $(1.8\times 10^6\text{ m/s})$ (電子温度 10eV の場合) であるため上記コイル径方向においてパルスの到達時刻に差が生じる。EBW は後進波であるため、径方向内向きに伝搬していくと考えられ、装置内側ほど到達時刻が遅れると考えられる。その為、 $R=235\text{mm}\sim 300\text{mm}$ のパルス波形を比較することでEBWの群速度の向きと速度を求めることができる。

図6は極短パルス波の到達時刻計測の実

験結果である。R ~ 250mm 近傍よりパルス到達時刻が遅れていることがわかる。これは EBW へのモード変換によるものと考えられる。グラフより見積もった群速度はおよそ 1×10^6 m/s であり、電子温度 10eV の熱速度 (1.8×10^6 m/s) と近い値であることが判る。

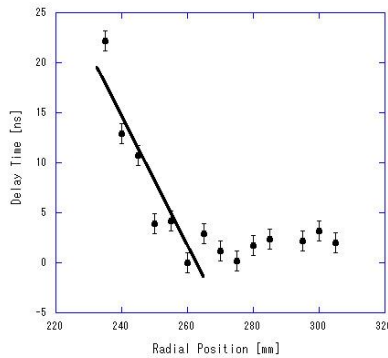


図 6 極短パルスの到達時間

弱磁場側からの X 波入射によるモード変換効率は C_m により次式で与えられる。

$$C_m = 4e^{-m} (1 - e^{-m})$$

ここで密度の特徴的長さをパラメータとして、この変換効率を計算すると図 7 のようになる。同図から判るように、X 波の EBW への変換効率は密度勾配の急峻な関数となっている。一方、Mini-RT プラズマでは図 3 から判るように密度勾配の特徴長さは数 cm である。従って、変換効率としては、比較的大きな値が期待できると言えよう。

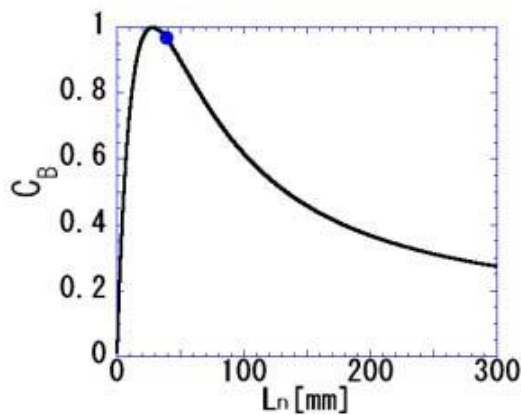


図 7 X 波の変換効率

次にプラズマ断面形状を変化させることにより、密度勾配が急峻な位置を制御して、実験を行った。その結果を図 8 に示す。同図より、密度勾配の位置が変化すると、それに伴って短波長の静電波モードが観測される領域も移動しており、急峻な密度勾配が電子バースタイン波への変換にとって重要な役割を果たしていることが、この結果からも見て取れる。

以上の研究より、当初予定していた電子バ

ースタイン波の実験的な直接的同定に成功し、本研究の所期の目的が達成されたとと言える。

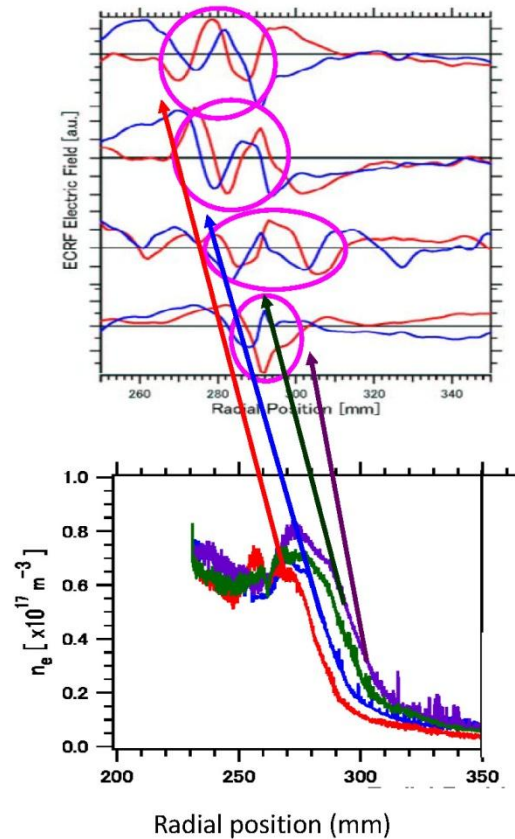


図 8 密度の勾配を変化させた場合の短波長静電波の観測

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 7 件)

① K. Uchijima, K. Okabe, A. Honda, E. Yatsuka, K. Kinjo, J. Morikawa, Y. Ogawa, Plasma and Fusion Research, to be published. (2011) (掲載確定) 査読有り

② 齋藤春彦、吉田善章、小川雄一、森川惇二、矢野善久、水島龍徳、水牧祥一、戸坂泰造, “RT-1 における $B_i - 223$ 高温超伝導コイルの自然昇温による消磁”, 低温工学, 45 巻 3 号 (2010) 107-110. 査読有り

③ Z. Yoshida, H. Saitoh, J. Morikawa, Y. Yano, S. Watanabe and Y. Ogawa, “Magnetospheric Vortex Formation: Self-Organized Confinement of Charged Particles, Physical Review Letters, 104, 235004 (2010). 査読有り

④ Y. Yano, Z. Yoshida, Y. Ogawa, J. Morikawa and H. Saitoh, "Feedback control of the position of the levitated superconducting magnet in the RT-1 device", Fusion Engineering and Design, 85 (2010) 641-648. 査読有り

⑤E. Yatsuka, K. Kinjo, J. Morikawa and Y. Ogawa, "Radio-frequency electromagnetic field measurements for direct detection of electron Bernstein waves in a torus plasma", Review of Scientific Instruments, 80, no.2, 023505-1 ~ 023505-6 (2009) 査読有り

⑥Yuichi OGAWA, Zensho YOSHIDA, Junji MORIKAWA, Haruhiko SAITO, Sho WATANABE, Yoshihisa YANO, Shoichi MIZUMAKI and Taizo TOSAKA, "Construction and Operation of an Internal Coil Device, RT-1, with a High-Temperature Superconductor", Plasma and Fusion Research, 4, (2009), 020-1~8. 査読有り

⑦E. Yatsuka, D. Sakata, K. Kinjo, J. Morikawa and Y. Ogawa, "Direct easurement of a mode-converted Electron Bernstein Wave in the internal coil device Mini-RT", Plasma and Fusion Research, 3, 013-1 ~ 013-3, (2008). 査読有り

[学会発表] (計 8 件)

①K. Uchijima, K. Okabe, A. Honda, E. Yatsuka, K. Kinjo, J. Morikawa, Y. Ogawa, Wave Characteristics of Electron Cyclotron Range of Frequencies at the Overdense Plasmas on the Internal Coil Device Mini-RT, 20th International Toki Conference, Toki, Japan, December 7, 2010.

②岡部圭悟, 本田章浩, 内島健一朗, 牧野航, 森川淳二, 小川雄一「内部導体装置 Mini-RT における電子パーンシュタイン波の群速度測定」、プラ・核学会年会、札幌、2010 年 11 月 30 日

③本田 章浩, 岡部 圭悟, 内島 健一朗, 牧野 航, 森川 淳二, 小川 雄一、「内部導体装置 Mini-RT における電子パーンシュタイン波の伝播特性」、プラ・核学会年会、札幌、2010 年 11 月 30 日

④内島健一朗、岡部圭悟、本田章浩、谷塚英一、金城清猛、森川淳二、小川雄一、「内島内部導体装置 Mini-RT における EBW 加熱実験」、核融合エネルギー連合講演会、高山、2010 年 6 月 10 日

⑤E. Yatsukul, K. Kinjol, K. Uchijimal, J. Morikawal, Y. Ogawa, Directly Verification of an Electron Bernstein Wave Heating in the Internal Coil Device Mini-RT ", 36th EPS Conf. on Plasma Physics, Sofia, Bulgaria, July 2, 2009

⑥谷塚英一, 金城清猛, 森川淳二, 小川雄二, 「内部導体装置 Mini-RT での電子パーンシュタイン波の励起と伝播」, 『日本物理学会 2008 年秋季大会』, 21pZH-6, 盛岡, 2008 年 9 月 21 日

⑦E. Yatsuka, D. Sakata, K. Kinjo, S. Tanaka, J. Morikawa and Y. Ogawa, "Excitation and Propagation of Electron Bernstein Waves in the Internal Coil Device Mini-RT", 35th EPS Conf. on Plasma Physics, Crete, Greece, P4.109 June 12, 2008

⑧谷塚英一, 坂田大輔, 金城清猛, 森川淳二, 小川雄一, 「内部導体装置 Mini-RT での電子パーンシュタイン波検出実験(2)」, 『日本物理学会第 63 回年次大会』, 26aQF-6, 東大阪, 2008 年 3 月 26 日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小川 雄一 (OGAWA YUICHI)
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授
研究者番号 : 90144170

(2) 研究分担者

吉田 善章 (YOSHIDA ZENSHO)
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授
研究者番号 : 80182765
(H22 : 連携研究者)

古川 勝 (FURUKAWA MASARU)
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授
研究者番号 : 80360428
(H22 : 連携研究者)

斉藤 晴彦 (SAITO HARUHIKO)
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・助教
研究者番号 : 60415164
(H22 : 連携研究者)

森川 淳二 (MORIKAWA JYUNJI)
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・助教
研究者番号 : 70192375