

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 5 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360410

研究課題名(和文) トーラス系高密度プラズマでの電子バーンシュタイン波の総合的理解

研究課題名(英文) Research on Electron Bernstein Wave in high-density torus plasmas

研究代表者

小川 雄一 (Ogawa, Yuichi)

東京大学・新領域創成科学研究科・教授

研究者番号：90144170

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,100,000円、(間接経費) 4,230,000円

研究成果の概要(和文)：トーラス系核融合プラズマで、カットオフ密度を超えるような超高密度の高温プラズマに対する加熱や電流駆動として、電子バーンシュタイン波(EBW: Electron Bernstein Wave)が脚光を浴びている。トーラス系プラズマでのEBWの励起の方法として、弱磁場からのXモード入射、弱磁場からの0モードの斜め入射、強磁場からのXモード入射が提案されている。本研究では内部導体装置Mini-RTにおいて、プラズマ中の高周波直接計測手法を用いて、この3つの方法に対して、短波長であり後進波であるという、EBWとしての特徴を有する波動の検出に成功し、EBWの励起手法としての有効性を実証した。

研究成果の概要(英文)：The Electron Bernstein Wave (EBW) is quite attractive for plasma heating and current drive in a fusion reactor, because the EBW can propagate even in so-called overdense plasmas. There are three methods to excite the EBW in a torus plasma; (i) X-mode wave injection from the low field side, (ii) oblique 0-mode wave injection from the low field side and (iii) X-mode wave injection from the high field side. In this research we have succeeded to excite the EBW in an internal ring device Mini-RT for these three methods, and we have found the characteristics of the EBW such as the short wavelength and backward wave with the direct measurement of the EBW in the plasma by inserting receive antennae into the torus plasma.

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：炉心プラズマ 高周波加熱 内部導体装置

1. 研究開始当初の背景

近年、トーラス系核融合プラズマ（球状トカマク、ヘリカル、RF P、内部導体など）で電子バーンシュタイン波（EBW: Electron Bernstein Wave）が脚光を浴びている。これはカットオフ密度を超えるような超高密度の高温プラズマに対する加熱や電流駆動として、EBW が有力な候補であるからである。現在の研究では、比較的大型の装置を中心として EBW によると予想されるプラズマの加熱が観測されている。また EBW からの逆プロセスとして励起される電子サイクロトロン周波数帯の電磁波をプラズマ表面で測定することにより、EBW の励起を間接的に測定している。しかし、トーラスプラズマにおいて、プラズマ中に励起された EBW を直接測定してはいない。

2. 研究の目的

トーラス系プラズマでの EBW の励起の方法として、以下の3通りの方法が挙げられる。

- (i) 弱磁場からの X モード入射で、カットオフ領域を超えて強磁場サイドの X モードを介しての EBW へのモード変換 (FX-SX-B と呼称)
- (ii) 弱磁場からの O モードの斜め入射を利用した EBW へのモード変換 (O-SX-B と呼称)
- (iii) 強磁場からの X モード入射による EBW へのモード変換 (SX-B と呼称)

球状トカマクやヘリカルプラズマでは、主に「(ii)O-SX-B」の方式での EBW の励起を考えている。またより効率良く EBW を励起するには「(iii)SX-B」の方式も有効である。

本研究では、YBCO 高温超伝導コイルによる強磁場化を図り Mini-RT プラズマの高性能化を行い、Mini-RT で研究・開発してきた EBW の直接測定の手法を用いて、EBW の励磁方法として期待されている3つの方法での研究を推進し、トーラスプラズマでの EBW の励起・伝搬・吸収特性を総合的に理解する事を目的とする。

3. 研究の方法

小型の内部導体装置 Mini-RT では、コイル主半径 $R=15\text{cm}$ 、コイル電流 50kAt の内部導体コイルで、ダイポール磁場配位を形成し、 2.45GHz の高周波でプラズマの生成・加熱を行っている。(図1参照) 磁気浮上させた内部導体コイルでの実験では、 2.45GHz のカットオフ密度を超えるオーバードンスプラズマの生成が確認された。これは電子サイクロトロン波が電子バーンシュタイン波にモード変換されている可能性を示唆している。

内部導体装置 Mini-RT ではプラズマ中に高周波測定用のアンテナ等を挿入できるので、この EBW を直接測定する事を目指した。なおここでは、プラズマ生成・加熱用の 2.45GHz の直接計測ではなく、 2.45GHz よりやや周波数の低い高周波を入射し、その波

動伝搬を直接測定することにした。具体的な計測システムを図2に示す。プラズマ周辺に励起用の送信アンテナを設置し、 $1-2\text{GHz}$ の高周波を入射し、プラズマ

中には、その高周波を直接計測するための受信アンテナを挿入し、プラズマ中の高周波の空間分布を測定する。高周波成分としては、電場の3成分を測定するポールアンテナ3本と、磁場成分を測定するループアンテナ1本が挿入され、同時測定する。なおこれらの受信アンテナ側には、 2.45GHz のハイパワー高周波をカットし、検出器を保護している。

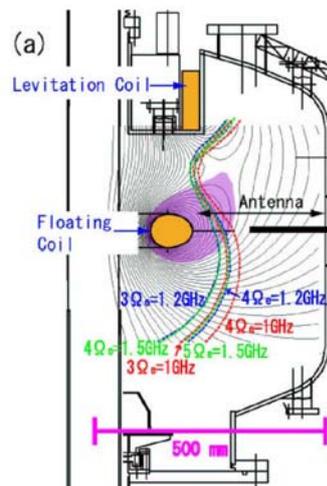


図1 内部導体装置 Mini-RT の断面

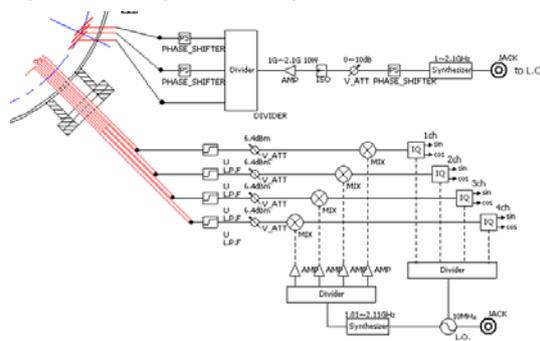


図2 プラズマ中の高周波計測システム

内部導体装置 Mini-RT では 2004 年にビスマス高温超伝導線材で内部導体コイルを製作し実験に供してきた。高温超伝導コイルでの永久電流および磁気浮上は、世界に先駆けた技術開発であった。しかし、その後の運転により、永久電流でのコイル電流減衰時定数が徐々に短くなってきており、最近では3時間程度にまで特性劣化が進んできて、プラズマ実験にも影響が出てきた。一方、最近ではイットリウム系の超伝導線材の開発も目覚ましいものがあり、コイル化技術も発展してきている。核融合炉に高温超伝導線材を応用する場合も、銀シースを有するビスマス系は銀の放射化やコスト高が問題であるので、イットリウム系の方が望ましい。そこで我々は、イットリウム系高温超伝導線材を用いたコイル開発に着手した。

ここでは既存の Mini-RT 内部導体コイ

ルのビスマス線材製の主コイルおよび永久電流スイッチ (PCS) とをイットリウム系線材に置き換える事とした。従って、イットリウム系線材のテープ幅も、既存のビスマス線材と同じ 4.3mm とするなど、幾つかの制約を加味して設計・製作を行った。イットリウム系線材は、ハステロイの基盤の上にイットリウム系超伝導膜が積層されており、引張り応力には強いが、剥離応力が数十 MPa 程度と低く、非常に剥離しやすい。そのため、コイル含浸には十分な注意を払った。図 3 に開発されたイットリウム系超伝導コイルでの永久電流モード運転結果を示す。定格の 100A 通電 (コイル電流としては、55.2kAt) での電流減衰時定数は 300 時間以上であり、4-5 時間のプラズマ実験中は、ほぼ一定電流とみなすことができ、プラズマ実験に支障無いコイルが開発された。ところで、永久電流回路には 7 ヲ所の接続部があり、一カ所あたり 15-20nΩ である。一方、電流減衰時定数は 150 nΩ 程度の抵抗に対応しており、永久電流回路内の 7 ヲ所の接続抵抗でほぼ説明できることが判った。

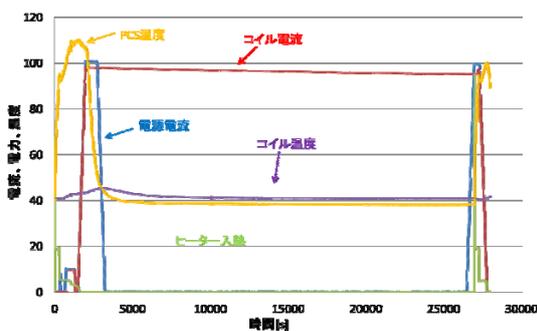


図 3 イットリウム系超伝導コイルでの永久電流運転

4. 研究成果

電子バーンシュタイン波の励起では前述の 3 つの方法が提案されている。ここではすべての方法に対して実験的検証を試みた。なお何れの方式も、高域混成共鳴 (UHR : Upper Hybrid Resonance) にアクセスすることにより、EBW へモード変換させる必要がある。

(1) 弱磁場からの X モード入射 (FX-SX-B 法)

この方式では、Fast-X 波のカットオフ密度領域をトンネリングさせ、Slow-X 波に変換し、Slow-X 波がさらなる高密度領域でのカットオフで反射されるのを利用して、UHR 層にアクセスさせる。Fast-X 波のカットオフ密度領域をトンネリングさせるので、その領域が狭い方がよい。そのため、比較的急峻な密度勾配が要求される。

Mini-RT 装置では、内部導体コイルと引上げコイルとの組み合わせにより、セパトロリックス配位を形成し、最外殻磁気面の位置を制御できる。最外殻磁気面での急峻な密度勾

配を利用して、FX-SX-B 法を実験的に試みた。その結果、半径方向の短波長成分測定のアナテナに波長が 10mm 程度の波動が検出された。しかも、その領域は UHR 層の位置と一致した。密度勾配が急峻な場所を変化させると、それによって、UHR 層も移動するが、この短波長の波動も UHR 層近傍にいつも観測された。

また EBW は群速度と位相速度が互いに逆方向を向いている、いわゆる Backward 波 (後進波) であるが、波動の位相計測でも、後進波であることが確認できた。

なお計算では EBW の波長は 2-3mm 程度となり、実験結果と定量的には必ずしも一致しない。その理由として、高エネルギー電子の可能性はある。ただし現時点では、高エネルギー電子の定量的な評価ができていないので、理論と実験の完全な一致には至っていない。

(2) 弱磁場からの O モードの斜め入射 (O-SX-B 法)

弱磁場側から O 波を入射し、プラズマ中の O 波のカットオフ密度で反射させ、その時に Slow-X 波に変換させて、UHR 層にアクセスさせる方法である。ここで O 波のカットオフ層で X 波に変換させるためには、O 波の入射角を調整させる必要がある。この最適な入射角を実験的に同定し、理論値と比較することを試みた。

図 4 は入射角度を変えた時のプラズマ中の波動の測定結果である。 $\theta=66.5^\circ$ では短波長モードが観測されたが、その前後の入射角では見つからなかった。この場合、最適な入射角は $\theta=66.5^\circ$ 近傍だと言える。一方、この時の理論的な入射角は $\theta=68.8^\circ$ である。幾つかの場合について、実験的に観測された最適入射角と理論値とを図 5 に比較した。測定精度は必ずしも良くないが、最適入射角は理論値と実験値が大体一致していると言えよう。

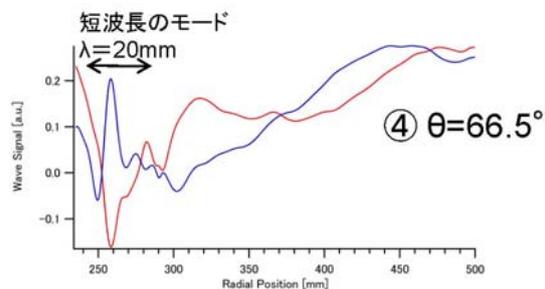


図 4 弱磁場側からの O 波入射実験結果

(3) 強磁場からの X モード入射 (SX-B 法)

この方式では、強磁場側から Slow-X 波を励起し、これを直接 UHR 層へアクセスさせる。ただし、プラズマ密度が Slow-X 波のカットオフよりかなり高いと、カットオフ密度より低い磁場領域に伝搬できなくなり、UHR

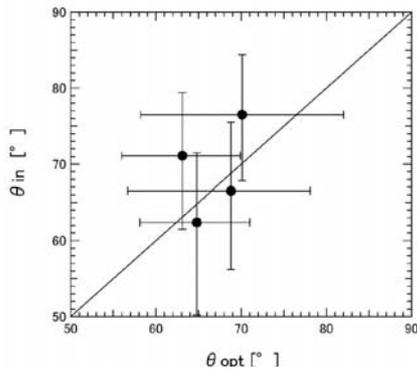


図5 弱磁場側からの O 波入射での最適入射角と理論値の比較

層にアクセスできない。従って、この方法が使えるのは、比較的低密度の場合である。

さらに強磁場側から Slow-X 波を励起させるためには、強磁場側にアンテナを設置するか、電磁波の反射板のようなものを設けなければならない。ここでは内部導体コイルの表面に励起アンテナを直接挿入する方式を採用した。

あまり高くない密度領域での実験を行うことにより、Slow-X 波から UHR 層近傍で EBW にモード変換したとみられる短波長の波動を観測することができた。ただし、この方式では、密度領域に制限が加えられ、あまり有効は EBW へのモード変換とは言えない。

以上の実験結果に示したように、ここでは EBW の励起方式として提案されている3つの方法を実験的にトライし、すべての場合に対して EBW の特徴である短波長であり、後進波としての特徴を有する波動の検出に成功した。例えば、FX-SX-B 方式では急進な密度勾配が必要とされるが、密度勾配の位置と EBW 波の検出された位置とは定量的に一致しており、また O-X-B 方式では最適入射角が存在するが、理論値と実験データではほぼ一致している、などが判った。ただし実験的に観測された波長は理論値より、数倍長い値であり、必ずしも良い一致を見ていない。その理由を探ることが今後の課題とも言えよう。

(4) 有限差分時間領域法 (FDTD : Finite Domain Time Difference) によるプラズマ中での波動の伝搬解析

プラズマ中での波動の伝搬を解析すべく、Maxwell 方程式とプラズマ中の誘電率テンソルとを連結させて、初期値・境界値問題として解く FDTD 法による2次元コードを開発した。このコードを用いて、アンテナから放射された電磁波がプラズマ中を伝搬しモード変換するプロセスが直接、計算することができる。なおプラズマの応答を表わす誘電率テンソルは、Cold 波の場合だけではなく、EBW のような静電的な Hot 波も扱えるように拡張した。

代表的な結果を図6に示す。これは1次元

表示になっているが、右側の弱磁場側から入射された Fast-X 波が波長 3mm 程度の EBW にモード変換されていることが示されている。

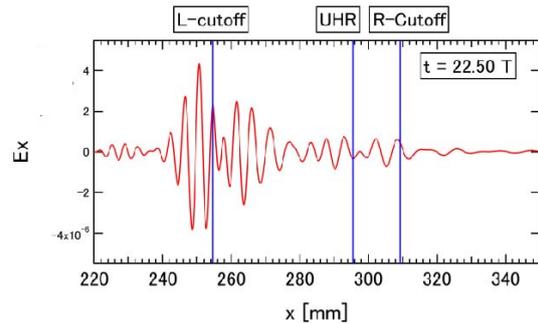


図6 FDTD法での EBW へのモード変換解析

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 Y. Ogawa, J. Morikawa, K. Uchijima, Y. Hosaka, C. Kawai, K. Imano, T. Mito, N. Yanagi, K. Natsume, Y. Terazaki, M. Iwakuma, A. Tomioka and S. Nose, “Design, Fabrication and Persistent Current Operation of the REBCO Floating Coil for the Plasma Experimental Device Mini-RT”, Plasma and Fusion Research: Regular Articles Volume 9, 1405014 (2014) 査読有り
- ② N. Yanagi, S. Ito, Y. Terazaki, K. Natsume, H. Tamura, S. Hamaguchi, T. Mito, H. Hashizume, J. Morikawa, Y. Ogawa, M. Iwakuma and A. Sagara, “Feasibility of HTS Magnet Option for Fusion Reactors”, Plasma and Fusion Research: Regular Articles Volume 9, 1405013 (2014) 査読有り
- ③ K. Natsume, Y. Terazaki, T. Mito, N. Yanagi, Y. Ogawa, J. Morikawa, K. Uchijima, Y. Hosaka, S. Nose, A. Tomioka, I. Itoh, E. Takada, M. Konno, M. Ohaku, “Experimental Results of the HTS Floating Coil Using REBCO Tapes for the Mini-RT Upgrading”, Applied Superconductivity, IEEE Transactions on (Volume:24, Issue:3), 4601104 (2014). 査読有り
- ④ K. Uchijima, K. Okabe, A. Honda, E. Yatsuka, K. Kinjo, J. Morikawa and Y. Ogawa, “Wave Characteristics in the Electron Cyclotron Range of Frequencies in Overdense Plasmas in the Internal Coil Device”, Journal of Plasma and Fusion Research, 6, 2401122 (2011). 査読有り
- ⑤ H. Saitoh, Z. Yoshida, J. Morikawa, Y.

Yano, T. Mizushima, Y. Ogawa, M. Furukawa, Y. Kawai, K. Harima, Y. Kawazura, Y. Kaneko, K. Tadachi, S. Emoto, M. Kobayashi, T. Sugiura, G. Vogel, “high-b plasma formation and observation of peaked density profile in RT-1”, Nuclear Fusion, **51** (2011) 063034. 査読有り

[学会発表] (計 14 件)

- ① 内島健一朗、河合智香、竹本卓斗、伊庭野健造、小川雄一、内部導体トーラスプラズマにおける ECRF 電磁場解析、日本物理学会、東海大学 (平塚)、2014 年 3 月 27 日
- ② 内島健一朗、河合智香、竹本卓斗、伊庭野健造、小川雄一、内部導体トーラスプラズマにおける ECRF 電磁場解析、プラズマ・核融合学会、東京工業大学 (東京：大岡山)、2013 年 12 月 3 日
- ③ K. Uchijima, C. Kawai, T. Takemoto, J. Morikawa, Y. Ogawa, “ Full-wave Calculation of the EBW Excitation Scheme in the Internal Coil Device Mini-RT” 23th International Toki Conference, P2-63, Ceratopia Toki, Gifu, Japan (20th November 2013).
- ④ Y. Ogawa, J. Morikawa, U. Uchijima, Y. Hosaka, C. Kawai, K. Imano, T. Mito, N. Yanagi, K. Natsume, Y. Terazaki, M. Iwakuma, A. Tomioka and S. Nose, Application of a REBCO coil for Fusion Plasma Experimental Device Mini-RT, the Asia Plasma and Fusion Association, Korea (Gyeongju), 2013 年 11 月 7 日
- ⑤ 寺崎義朗、柳長門、三戸利行、夏目恭平、小川雄一、森川惇二、内島健一朗、保坂雄一朗、能瀬真一、トーラスプラズマ実験装置 Mini-RT 用 ReBCO 線材コイルの接続抵抗と電流減衰時定数、低温工学・超伝導学会、東京 (江戸川区、タワーホール船堀)、2013 年 5 月 14 日
- ⑥ 小川雄一、森川惇二、内島健一朗、保坂雄一朗、河合智香、三戸利行、柳長門、夏目恭平、寺崎義朗、富岡章、能瀬真一、岩熊成卓、トーラスプラズマ実験装置 Mini-RT 用の ReBCO 線材コイル製作の概要、低温工学・超伝導学会、東京 (江戸川区、タワーホール船堀)、2013 年 5 月 13 日
- ⑦ 夏目恭平、三戸利行、柳長門、寺崎義朗、小川雄一、森川惇二、内島健一朗、保坂雄一朗、能瀬真一、トーラスプラズマ実験装置 Mini-RT 用の ReBCO 線材コイルの冷却・励磁実験、低温工学・超伝導学会、東京 (江戸川区、タワーホール船堀)、2013 年 5 月 13 日
- ⑧ K. Uchijima, C. Kawai, Y. Hosaka, J. Morikawa, Y. Ogawa, “ Direct Measurement of the Electron Bernstein

Waves in the Internal Coil Device Mini-RT” Workshops on Physics and Technology of RF Heating of Fusion Plasmas 2012, P15, Nara Prefectural New Public Hall, Nara, Japan (14th December 2012).

- ⑨ 内島健一朗、河合智賀、保坂友一朗、森川淳二、小川雄一、“ダイポールプラズマにおける 0 波入射による電子バーンスタイン波励起実験” プラズマ・核融合学会第 29 回年会, 28D15P, 福岡県春日市, 2012 年 11 月 28 日
- ⑩ 保坂友一朗、内島健一朗、森川淳二、小川雄一、寺崎義朗、夏目恭平、柳長門、三戸利行、岩熊成卓、“Mini-RT における イットリウム系超伝導コイルの製作” プラズマ・核融合学会第 29 回年会, 28D44P, 福岡県春日市, 2012 年 11 月 28 日
- ⑪ 内島健一朗、保坂友一朗、森川淳二、小川雄一、“内部導体装置 Mini-RT における 0-X-B 法による電子バーンスタイン波励起実験” 第 9 回核融合エネルギー連合講演会, 29A-109p, 兵庫県神戸市, 2012 年 6 月 29 日
- ⑫ 内島健一朗、牧野航、保坂友一朗、森川淳二、小川雄一、“内部導体装置 Mini-RT における電子バーンスタイン波励起実験” 日本物理学会 第 67 回年次大会, 26pYG-9, 岐阜県西宮市, 2012 年 3 月 26 日
- ⑬ 内島健一朗、牧野航、保坂友一朗、森川淳二、小川雄一、“Excitation Experiment of Electron Bernstein Waves via 0-X-B Mode Conversion in Internal Coil Device Mini-RT” Plasma2011, 24P-133P, 石川県金沢市, 2011 年 11 月 24 日
- ⑭ 牧野航、内島健一朗、保坂友一朗、森川淳二、小川雄一、“Excitation experiment of electron Bernstein wave with injection of X waves from strong magnetic field in the Internal Coil Device Mini-RT ” Plasma2011, 24P-134P, 石川県金沢市, 2011 年 11 月 24 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

森川 惇二 (MORIKAWA Junji)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・助教

研究者番号：70192376

(H23-H24 まで)

伊庭野 健造 (IBANO Kenzo)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・
特任研究員
研究者番号：80647470
(H25のみ)