

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 20 日現在

機関番号：63902

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656561

研究課題名(和文) 高エネルギーイオン励起不安定性を介したバルクイオン加熱の実験的検討

研究課題名(英文) Experimental evaluation of bulk-ion heating by energetic particle driven instabilities

研究代表者

長壁 正樹 (Osakabe, Masaki)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授

研究者番号：90280601

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：マイクロ波によって保持された低密度プラズマに高エネルギーイオンを入射した時に励起されるトロイダルモード数がゼロの不安定性の同定を行い、それが測地線音響モード(GAM)であることを明らかにした。また、この不安定性が励起された時に観測されるイオン温度上昇現象について解析を行い、それがGAMによるプラズマイオンの加熱であると考えるのが最も確からしいという結論を得た。

研究成果の概要(英文)：On the Large Helical Device, the excitation of energetic particle driven instability, whose toroidal mode number is zero, and the increase in ion temperature being associated with the activity of the instabilities is observed when energetic particle beams are injected to very low density microwave sustained plasmas. From a theoretical analysis based on experimental observation, the instability was evaluated to be Geodesic Acoustic Mode (GAM). From the correlation analysis between the activity of the mode and the ion temperature behaviors, it was concluded the anomalous heating of bulk-ions is the most probable mechanism to explain the increase in the ion temperatures.

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：GAM 高速イオン励起不安定性 イオン異常加熱 チャンネリング

1. 研究開始当初の背景

核融合炉の実現においては、10keV 程度の高いイオン温度を持つプラズマを生成する必要がある。そのためには、核融合反応で生成した高エネルギーの粒子(3.45MeV)が持つ運動エネルギーを効率良くバルクイオンに受け渡す必要がある。通常、このエネルギーの受け渡しは、バルクプラズマ(イオンと電子)と粒子の間の衝突緩和過程によって行われ、その結果粒子が持つ運動エネルギーの大部分は電子へと渡されてしまう。これに対し、粒子による効率的なイオンの加熱手法として、粒子が励起した波(或いは不安定性)を利用したイオンの加熱手法(チャンネルリング)が理論の面から提唱された。特に、最近では高エネルギーイオンによって励起された測地線音響モード(Geodesic Acoustic Mode:GAM)を用いたバルクイオンの加熱方法(GAM チャンネルリング)の可能性が指摘されてきた。その反面、実験においては、このような現象が観測されたという報告例はない。

2. 研究の目的

近年、核融合科学研究所の大型ヘリカル装置(LHD)の低密度プラズマにおいて高エネルギーイオンによって励起されたトロイダルモード数(n)がゼロの周波数が上方掃引する不安定性が発生し、その不安定性の揺動強度の増加に伴って、バルクのイオン温度が上昇する現象が中性粒子分析装置(NPA)によって観測されている。本研究では、このn=0のモードの同定を行い、また、そのモードがバルクイオンの振る舞いに及ぼす影響、及びその現象の発生条件を明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

LHDの低密度プラズマに最適化された干渉計を設置し、モードの初期周波数を観測し、そのプラズマパラメータ依存性を調べ、モードの同定を行った。その後、モード発生に伴う高速イオン及びバルクイオンの振る舞いの変化や、モード発生に伴う静電ポテンシャルの変動を観測し、観測されているイオンの温度上昇と思われる現象のメカニズムの解明を行った。

現状では、モードの周波数はミルノフコイルを用いた磁場揺動計測から同定している。その結果、上述したn=0のモードの周波数の電子温度依存性を調べるとモードは2種類に分けることが出来ることがわかっている。一つは電子温度のほぼ0.5乗の依存性を持ち、もう一つは電子温度に対する依存性が弱く、プラズマ中を周回する高エネルギーイオンの周回軌道周波数に一致することがわかっている(図1)。周波数の電子温度依存性から、前者はGAMであることがわかっているが、後者については不明である。ヘリカル型装置においては、GAMはプラズマ中心部で励起さ

れ、プラズマの周辺部で計測を行っている磁

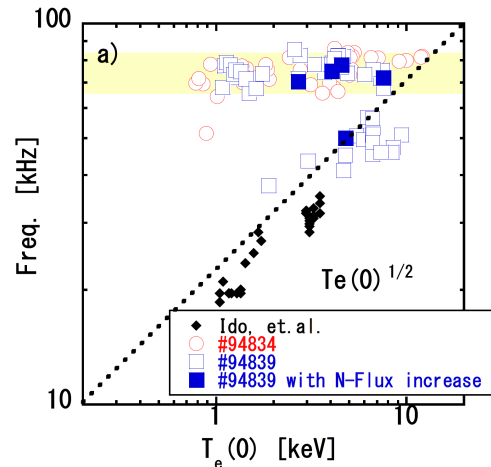


図1 低密度ECHプラズマに高エネルギーNBを照射した時に観測される周波数が上方掃引するn=0の不安定性の初期周波数の温度依存性

場揺動信号では、強度が小さい発生初期の揺動観測が困難になっていることが予想され、この結果、周波数掃引するモードの初期周波数を正確に捉えていないことを懸念した。そこで、プラズマ中心部での密度揺動計測が可能な低密度計測に最適化した干渉計を新たに設置して、モードの初期周波数を詳細に捉え、モードの同定を行った。

次に、モード発生に伴う高エネルギーイオンの振る舞いを調べ、モードと高エネルギーイオンの間の相互作用、それに伴うビームによるバルクイオン加熱の影響を評価した。

また、重イオンビームプローブ(HIBP)を用いて静電ポテンシャルの揺動成分の観測を行い、モード発生時のその揺動強度分布を計測した。これまでLHDではEnergetic particle driven GAM(EGAM)発生時のポテンシャル揺動強度分布の計測は出来ていたが、バルクのイオン温度上昇が観測された時は、計測出来ていなかった。これは、ポテンシャル揺動振幅が大き過ぎ、計測のダイナミックレンジを超過したことが原因と考えられた。そこで、HIBPのプローブビームのイオン種を通常使用する金(Au)から銅(Cu)に変更することで、計測のダイナミックレンジを向上させ、イオン温度の上昇を伴う場合のモードのポテンシャル揺動強度分布を計測し、そのバルクイオンの振る舞いに対する影響を評価した。

4. 研究成果

前述した周波数が上方掃引するn=0のモードの初期周波数を、干渉計を用いて計測したところ、その初期周波数が磁場揺動信号とほぼ同一であることが確認された。これによって、磁場計測で観測された揺動の初期周波数に問題がないことがわかり、周波数の電子温度依存性に基づいてグループ分けされた2つのモードの存在が明確になった。電子温度に対して、初期周波数が弱い依存性を示すモ

ードの同定が急務となった。一方、高速中性粒子計測を用いたプラズマ中を周回する高エネルギーイオンのエネルギースペクトル計測から、モードが励起される実験条件においては、高エネルギーイオンのエネルギー緩和時間 (~8s) に比べて、同イオンの荷電交換損失時間 (~50ms) が非常に短くなる為、同イオンのエネルギースペクトルが正の勾配を持つことが明らかとなった (図 2 (b)点線)。このことを考慮にいれ、GAM の分散関係式を導いたところ、良く知られている周波数が電子温度の 0.5 乗の依存性を持つブランチに加えて、電子温度依存性が弱く高エネルギーイオンの軌道周回周波数に依存するブランチを見いだした (Ido, IAEA-FEC 2013)。このことから、実験で観測された初期周波数の電子温度依存性の弱いモードも GAM であることを明らかにした。

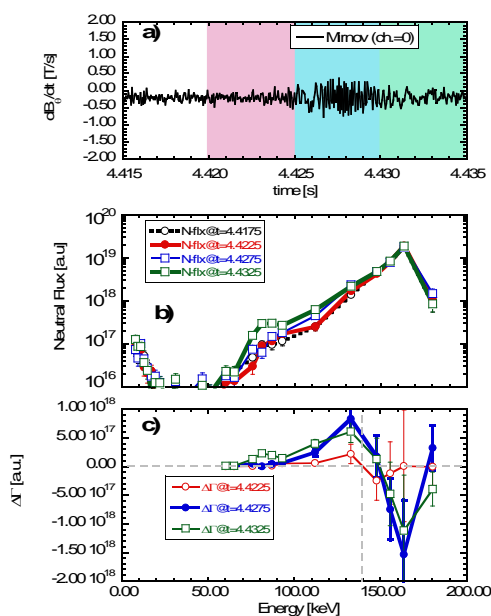


図 2 n=0 モード発生前後の (a) 磁場揺動信号、(b) 中性粒子束から評価したプラズマ中の高速イオンエネルギースペクトル (点線: モード発生前、赤: モード発生初期、青: モード強度最大時、緑: モード発生終盤)、(c) モード発生時の高速イオンエネルギースペクトルの変分 (モード発生前のスペクトルからの変分をとっている)

モード発生に伴う高エネルギーイオンのエネルギースペクトルの変化を観測したところ、モード発生に伴って高エネルギーイオンのエネルギースペクトルが 100keV 程度を境にモードの前後で反転する現象が発生し、モード発生とともに 70keV 程度のエネルギー成分が増加していることが観測された (図 2 (c))。このビームのエネルギー分布の反転現象によって、ビームによるバルクイオンの加熱の上昇が予想されるので、task3d コードの中で、人為的に高エネルギーイオンのエネルギースペクトル反転現象を引き起こし、これに伴うイオン加熱量の増加を評価した。この

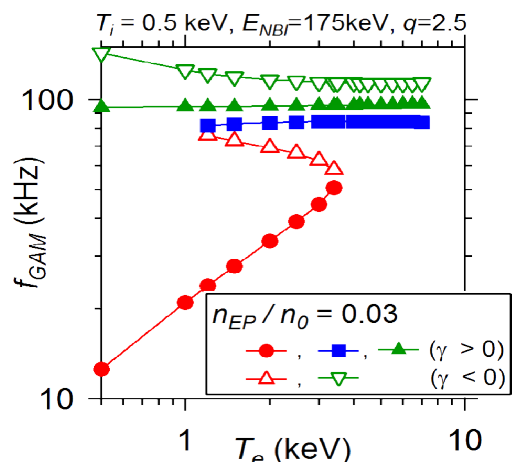


図 3 高速イオンのエネルギースペクトルに正の勾配を仮定して分散関係式から求めた GAM の周波数 (塗りつぶしたシンボルが揺動の成長率が正になる周波数、白抜きのシンボルは成長率が負の値をとる)

結果、モード発生に伴う高エネルギーイオンのスペクトルの歪みによってイオン加熱量は若干増加するが、その増加量はバルク電子からの加熱量に比べて小さく、無視出来ることがわかった。また、task3d によって評価された定常時のバルクイオン加熱量を用いて、0 次元のパワーバランス解析を行い、観測されたイオン温度の上昇のメカニズムとして、バルクイオンのエネルギー閉じ込め改善の可能性とイオン加熱の上昇の可能性を評価した。この結果、想定されるイオン加熱量では、バルクイオンのエネルギー閉じ込め時間を無限大にしても、イオン温度の上昇を説明することが出来ないことがわかった。一方、ビームやバルク電子などによるイオン加熱は、モードが発生していない通常において 1[kW/m³] である。これに対し、モード発生時にこの値が 4[kW/m³] 程度に増加することで実

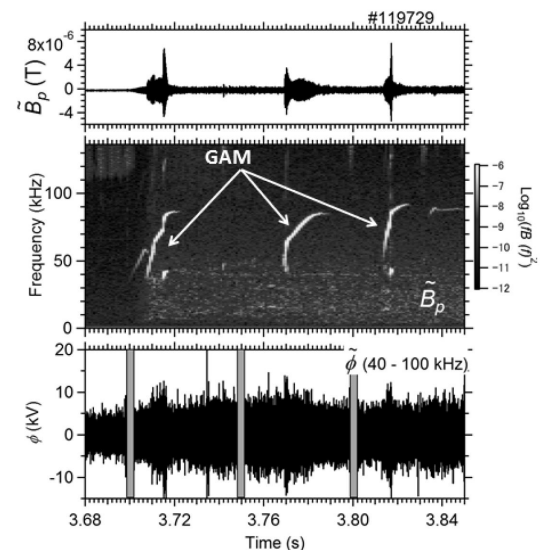


図 4 EGAM 発生時の (上) 磁場揺動信号と (中) その周波数スペクトログラム、及び (下) 静電ポテンシャル揺動信号

験観測を説明出来ることがわかった。また、この増分は、モード発生に伴う高エネルギーイオンの蓄積エネルギーの損失分と比べ、矛盾しない値であることから、モード発生にともなう高エネルギーイオンの蓄積エネルギーの損失分が、何らかのメカニズムを介して、バルクイオンを加熱しうることがわかった。HIBP のイオン源に使用するイオン種を変えることで、静電ポテンシャル計測のダイナミックレンジを増大させ、バルクイオン温度の上昇が見られる場合の GAM 発生時の静電ポテンシャル揺動計測に成功した(図4)。この結果、バルクイオンのイオン温度変動が観測されている場合においては、10kV 程度の振幅のポテンシャル揺動を観測した。また、ポテンシャル揺動強度と磁場揺動強度の間に線形な相関関係を確認した。揺動とバルクイオンの間の揺動電場を介したエネルギーのやりとりを仮定し、イオン温度の上昇と揺動強度の時間積分値の間の相関を調べたところ、モードの揺動強度が小さい場合には、イオン温度に対する影響は見られないが、揺動強度の時間積分値が大きくなると、イオン温度の変化は、揺動強度の2乗の時間積分値に対して0.3乗に比例することが示された(図5)。

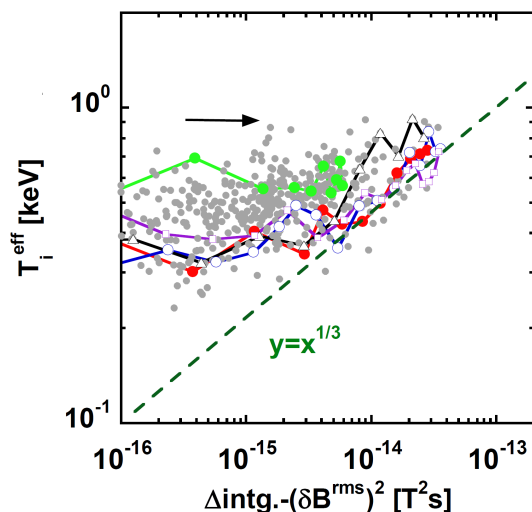


図5 モード発生における磁場揺動強度の2乗値の時間積分値に対するイオン温度変化の依存性。

これらのことから観測されたイオン温度の上昇は、高エネルギーイオンによって励起された GAM によるバルクイオンの加熱であると考えられる。

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0件)

[学会発表](計4件)

“Large electrostatic potential

fluctuation associated with energetic-particle driven geodesic acoustic mode in LHD”, T. Ido, A. Shimizu, M. Osakabe, 他, 23rd International Toki Conference, Toki (Japan), 2013年11月18日~2013年11月18日

“Indication of anomalous ion-heating associated with energetic particle driven Geodesic Acoustic Mode(GAM) on LHD”, M.Osakabe, T.Ido, K.Ogawa, A.Shimizu, 他, 13th IAEA Technical Meeting on Energetic Particle, Beijing (China), 2013年09月17日~2013年09月20日

“Characteristics of EGAM and influence on ion energy spectra in the LHD plasmas”, T. Ido, M. Osakabe, A. Shimizu, 他, 3rd Asia Pacific Transport Working Group International Conference, Jeju (Korea), 2013年05月21日~2013年05月24日

“Measurement of ion mass density by GAM spectroscopy”, T. Tokuzawa, S. Inagaki, K. Itoh, S.-I. Itoh, K. Ida, T. Ido, A. Shimizu, A. Fujisawa, H. Yamada, K. Toi, K. Ogawa, M. Isobe, M. Osakabe, 他, 3rd Asia Pacific Transport Working Group International Conference, Jeju (Korea), 2013年05月21日~2013年05月24日

[図書](計0件)

[産業財産権]
出願状況(計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕
ホームページ等
特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長壁 正樹 (OSAKABE MASAKI)
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授
研究者番号：90280601

(2) 研究分担者

井戸 毅 (IDO TAKESHI)
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授
研究者番号：50332185

徳沢 季彦 (TOKUZAWA TOKIHIKO)
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授
研究者番号：90311208

清水 昭博 (SHIMIZU AKIHIRO)
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教
研究者番号：00390633

(3) 連携研究者

()

研究者番号：