

機関番号：63902

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2008～2010

課題番号：20686062

研究課題名(和文) 多チャンネル重イオンビームプローブの開発による電位構造形成過程の研究

研究課題名(英文) Investigation of the electric field formation through development of a multi-channel heavy ion beam probe

研究代表者

井戸 毅 (IDO TAKESHI)

自然科学研究機構核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授

研究者番号：50332185

研究成果の概要(和文)：磁場閉じ込めプラズマの閉じ込め性能を左右する電場及び揺らぎの振る舞いを理解するため、重イオンビームプローブ(HIBP)の高性能化を行った。このHIBPを用いて、(1)ヘリカルプラズマの電場が新古典理論によってよく説明できること、(2)プラズマ内部での不純物吐き出し現象は電場に起因する粒子束だけでは説明できないこと、(3)帯状流が高エネルギー粒子によって誘起され、プラズマ中心近傍に発生していること、が明らかになった。

研究成果の概要(英文)：The heavy ion beam probe(HIBP) on the Large Helical Device has been improved to investigate behaviors of the electric field and fluctuations which determine the confinement of magnetically confined plasmas. The observations by the improved HIBP have brought the following results: (1) Measured electric field profiles agree with the prediction by the neoclassical theory. (2) The outward impurity flux observed in the core plasmas cannot be explained only by the radial electric field. (3) Zonal flow is induced by energetic particles and appears in the central region of the plasmas.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|-----------|-----------|
| 2008年度 | 3,900,000 | 1,170,000 | 5,070,000 |
| 2009年度 | 1,300,000 | 390,000 | 1,690,000 |
| 2010年度 | 900,000 | 270,000 | 1,170,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 6,100,000 | 1,830,000 | 7,930,000 |

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：電位計測, 重イオンビームプローブ, HIBP, 高エネルギー粒子検出器, 電場, GAM

1. 研究開始当初の背景

磁場閉じ込めプラズマ中に形成される電場はプラズマ中の熱及び粒子輸送に密接な関係がある。これは、電場によって粒子軌道が変化することにより低周波数領域において新古典輸送を低減させることや、電場勾配により発生するせん断流により乱流輸送が低減するためである。近年は乱流自身の非線形な相互作用により自発的にメソスケールの電場構造である帯状流が形成され、

これが乱流の飽和レベルを決定する因子の一つであることが明らかになりつつある。したがって、プラズマ中に形成される電場と乱流の振る舞いを明らかにすることは、将来の核融合プラズマの輸送特性を予測するという観点から極めて重要である。

本研究を実施した核融合科学研究所の大型ヘリカル装置(LHD)プロジェクトでは長期にわたる研究開発の末、磁場閉じ込め高温プラズマ中の電位および密度揺動を直接、

かつ同時に測定できる重イオンビームプローブ (HIBP)を開発し、これを用いた電場形成機構の解明、及び電場の輸送現象に果たす役割を解明するための実験研究が開始された。

2. 研究の目的

本研究の目的は、HIBP を主要な計測器として用いて電場及び揺動を計測することにより、磁場閉じ込めプラズマ中での電場形成機構と電場が関係する種々の輸送現象の解明を進めることである。この研究を遂行するには電場及び揺動の空間スケールを含めた議論が重要である。しかしながら、通常 HIBP により計測できるのは電位、つまり電場の空間積分であるので、空間構造の観測には工夫が必要である。そこで本研究は、HIBP での多点計測、及び他計測器との同時計測により、電位分布および揺動の空間構造を明らかにすることを通じて輸送研究を進めることを意図して実施した。

3. 研究の方法

本研究は核融合科学研究所の LHD によって生成されるプラズマを対象として実施した。本研究を進めるにあたっては、まず(1)HIBP の多点計測のための開発を行った。この開発と同時に、次のような研究を行った。(2)ヘリカルプラズマに形成される電場の新古典予測との比較、(3) 高イオン温度プラズマの不純物吐き出し現象における電場の寄与の解明、(4)帯状流の検出。次節にそれらにより得られた成果を記す。

4. 研究成果

(1)多点計測のための開発

HIBP で多点計測を行うには、エネルギー分析器用スリットと検出器の多チャンネル化が必要であり、軌道計算コードを用いてその配置の検討を行った。その結果とビームライン及びエネルギー分析器の機械的制約から 1cm 刻みの検出器列を 3 列並べる検出器を製作した。これによる計測可能波数は $k \leq 6(1/\text{cm})$ である。

この検出器を用いて電位分布計測を行った結果、全チャンネルでの電位計測が可能であることが確認できた。信号数が増えたことにより電位分布計測の精度が向上し、その結果に基づき、後述するように電場分布計測に基づく成果(2),(3)を得た。また、チャンネル間の電位差と位相差を調べた結果、誤差以上の差は検出できなかった。これは現時点で計測できている電場分布及び揺動の特性長が 3 チャンネルの間隔約 2cm より大きいことを示しており、現在観測できている電位分布及び MHD モードや後述の GAM ((4)項参照)などの空間スケールから考えると妥当な結果

である。当初の計測目標の一つである空間スケールの小さな乱流計測を実施するには、さらなる S/N の改善が不可欠である。今後は多チャンネルであり、かつ検出効率の高い検出器の開発が必要である。

(2)電場形成機構解明のための新古典論予測との比較実験

ヘリカルプラズマにおける電場決定機構の一つは新古典粒子束の両極性条件である。そこで測定した電場と新古典両極性条件による予測との比較を行った。計測結果をイオン温度と電子温度のパラメータ空間上でまとめると、正電場と負電場の出現する領域の境界が、広いパラメータ空間上で新古典予測とほぼ一致することが分かった。また、新古典両極性条件による予測は定量的にも計測された電場をよく再現することが確認された。この結果は、新古典粒子輸送がヘリカルプラズマ中の電場形成の主要な機構であることの裏付けとなっており、将来の核融合炉心プラズマを予測するための目安となる。

なお、この結果の一部は第 23 回 IAEA 核融合エネルギー会議におけるポスター発表として報告された。

(3) 高イオン温度プラズマの不純物吐き出し現象における電場の寄与の解明

LHD においては加熱手法および燃料供給の最適化により、プラズマ内部でイオン温度分布が急峻化する高イオン温度放電と呼ばれる放電が実現されている。また、この放電中イオン温度の急峻化がみられるプラズマ中心付近において不純物イオン密度が減少する不純物ホールと呼ばれる現象が発見されている。この現象は、核融合炉において危惧されている不純物蓄積が自発的に解消される可能性を意味しており、その物理機構の解明は、将来の核融合炉心プラズマ開発上、極めて重要である。

この不純物ホールの形成機構として、正電場による外向き粒子束の駆動が候補の一つとして考えられた。しかしながら、この実験パラメータでは新古典両極性条件は負電場を予測していた。そこで、電場の役割を実験的に調べるために、HIBP を用いて電場計測を行った。

結果を図 1 に示す。(d)に示すように高イオン温度放電中にプラズマ中心近傍では負電場が形成されていることが本研究により初めて観測された。この結果は電場が新古典両極性条件を満たすように決まっていることを示している。一方、単一不純物イオンの新古典粒子輸送を考えた場合、密度勾配や温度勾配の寄与よりも電場の寄与が大きく、図 1 の場合は負電場による内向きの粒子束が予

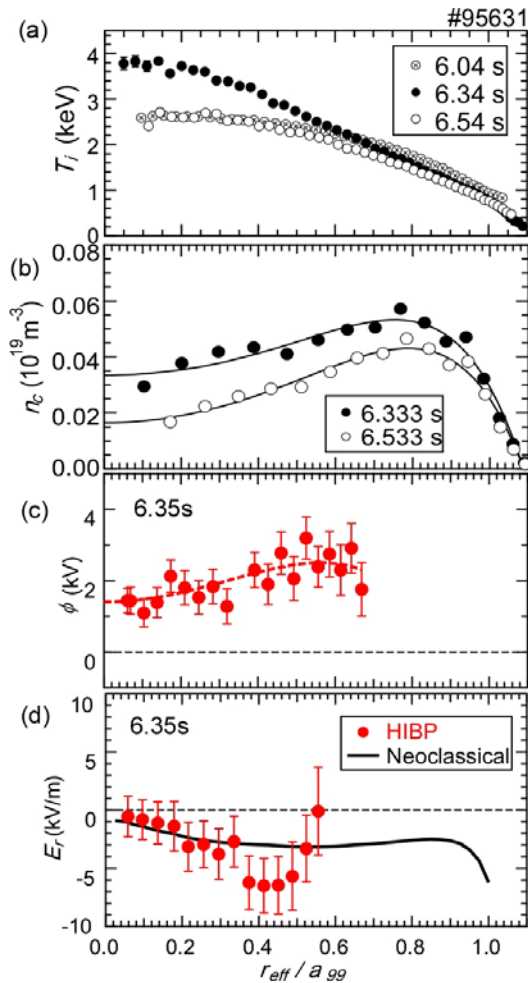


図 1(a)イオン温度, (b)炭素イオン密度分布, (c)HIBP により測定された電位分布, (d) 電場分布の測定結果と新古典論による予測 (実線)。横軸はいずれも規格化小半径。

測されるが、これは不純物ホール形成と逆向きであり、不純物ホール形成を説明できないことが明らかになった。したがって、不純物ホールを説明するには、多種イオンの存在を考慮した新古典輸送を導入するか、それ以外の異常輸送を考える必要がある。このように、本研究の結果は今後の不純物ホール解明のための研究の方向性を考える上で重要な知見を与えたといえる。

この結果は、第 37 回ヨーロッパ物理学会における招待講演として報告された。

(4) 帯状流の検出

LHD において高エネルギー接線中性粒子ビームを入射した放電において、帯状流の一種である Geodesic acoustic mode (GAM) と同じ周波数をもつ揺動が磁気プローブにより観測されていた。本研究において、この揺動を HIBP によりプラズマ内部で直接観測することにより、この揺動が静電揺動を伴っている

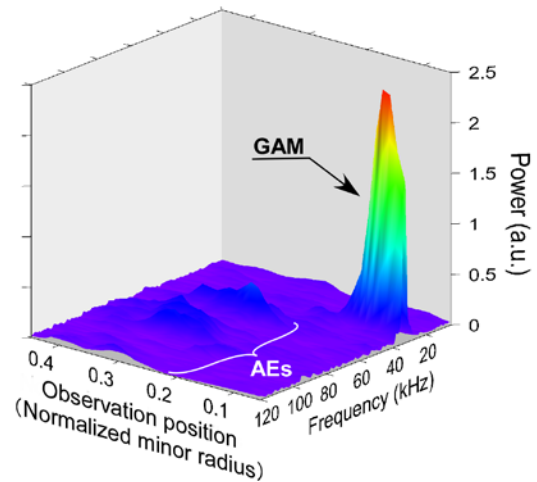


図 2 GAM 及び Alfvén 固有モード (AE) に伴う電位揺動の周波数-空間分布。プラズマ中心近傍に GAM、その外側に Alfvén 固有モードが存在している。

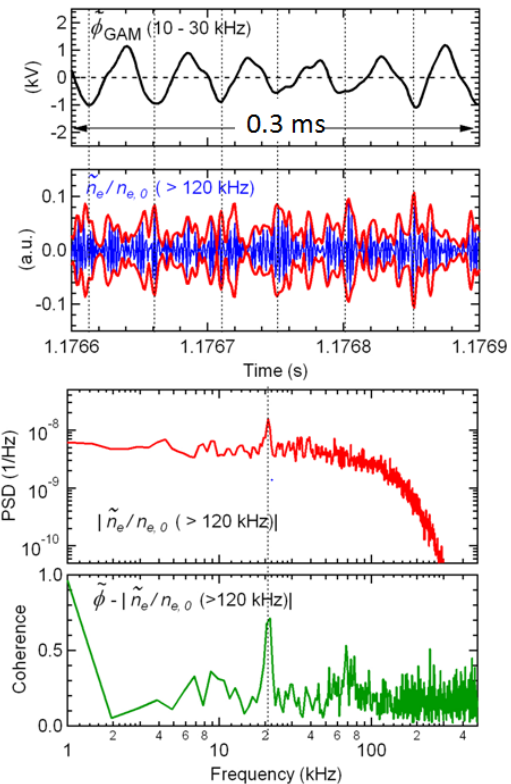


図 3 上から、GAM に伴う電位揺動、密度揺動の 120kHz 以上の成分(青)とその包絡線(赤)、包絡線の周波数スペクトル、電位揺動と高周波密度揺動の包絡線のコヒーレンスを示す。密度揺動の振幅が GAM 周波数(約 20kHz)で変調されていることを示している。

ことを初めて明らかにした。また、図2のようにこの揺動がプラズマ中心近傍に局在していることを明らかにし、それが電場揺動、つまり流れの揺らぎを伴っていること示し、帯状流の性質を持っていることを明らかにした。つまり、高エネルギー粒子によって帯状流の1つであるGAMが誘起されていることが明らかになった。

さらに、乱流を反映していると考えられる密度揺動の振幅がGAM周波数で変調されている様子も観測された。この変調の物理機構は現時点では同定できていないが、高速イオン励起揺動とプラズマの結合を示している可能性もあり、今後引き続き詳細な研究が必要である。

この結果は、第37回ヨーロッパ物理学会における招待講演、及び第23回IAEA核融合エネルギー会議にて口頭発表の一部として報告された。

一方、乱流の非線形結合により駆動される帯状流の計測も試みた。これまでに40V程度の精度で電位揺動計測を行ったが、現時点では検出できていない。この結果は帯状流の大きさの上限を与えるという点で重要であるが、今後直接計測するためには計測器の精度の向上が必要である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計9件)

1. "Experimental study of radial electric field and electrostatic potential fluctuation in the Large Helical Device", Takeshi Ido, Akihiro Shimizu, Masaki Nishiura, (他22名), Plasma Physics and Controlled Fusion, Vol.52, 124025-1~14 (2010)、査読有

2. "Potential Fluctuation Associated with Energetic-Particle Induced Geodesic Acoustic Mode in Reversed Magnetic Shear Plasmas on LHD", Takeshi Ido, Akihiro Shimizu, Masaki Nishiura, (他17名), 第23回IAEA核融合エネルギー会議プロシーディング, No. EXW/4-3Rb, Daejeon, Korea, Oct.11-16, (2010) (国内審査有)

3. "Experimental Study of Potential Profile Formation in Large Helical Device", Akihiro Shimizu, Takeshi Ido, Masaki Nishiura, (他21名), 第23回IAEA核融合エネルギー会議プロシーディング, No. EXC/P4-11, Daejeon, Korea, Oct.11-16, (2010) (国内審査有)

4. "Development of 6-MeV Heavy Ion Beam Probe on LHD", Takeshi Ido, Akihiro Shimizu, Masaki Nishiura (他12

名), Fusion Science Technology, vol.58, 436-444 (2010) 査読有

5. "Potential measurement with the 6-MeV Heavy Ion Beam Probe of LHD" Akihiro Shimizu, Takeshi Ido, Masaki Nishiura, (他32名) Plasma and Fusion Research 5, S1015 1-5 (2010), 査読有(第18回国際土岐コンファレンス口頭発表)

6. "Development of a heavy ion beam probe for measuring electrostatic potential profile and its fluctuation in LHD", Takeshi Ido, Akihiro Shimizu, Masaki Nishiura, (他13名), Plasma Science and Technology, vol.11, 460 (2009) 査読有

7. "Measurement of electrostatic potential fluctuation using heavy ion beam probe in Large Helical Device", Takeshi Ido, Akihiro Shimizu, Masaki Nishiura, (他11名) Review of Scientific Instruments, vol.79, 10F318(4p) (2008), 査読有

8. "Measurements of spatial structure of plasma potential and density fluctuations by multichannel heavy ion beam probe on large helical device", Shinsuke Ohshima, Takeshi Ido, Akihiro Shimizu, Masaki Nishiura, and Haruhisa Nakano, Review of Scientific Instruments vol.79, 10F320(3p) (2008), 査読有

9. "Electrostatic Potential Measurement by Using 6-MeV Heavy Ion Beam Probe on LHD", Ido T., Shimizu A., Nishiura M., (他17名), Plasma and Fusion Research, vol.3, 031(8p) (2008) 査読有

〔学会発表〕(計9件)

1. 井戸 毅, "LHDにおける高速イオン誘起 Geodesic acoustic modeの振る舞い", 第27回プラズマ・核融合学会年会, 2010年12月2日, 北海道札幌市

2. Takeshi Ido, "Potential Fluctuation Associated with Energetic-Particle Induced Geodesic Acoustic Mode on LHD", 第23回IAEA核融合エネルギー会議, 2010年10月13日, 大韓民国 テジョン市

3. Takeshi Ido, "Experimental study of radial electric field formation and electrostatic potential fluctuation in the Large Helical Device"(招待講演), 第37回

ヨーロッパ物理学会, 2010年6月24日, アイルランド ダブリン市

4. 井戸 毅, "大型ヘリカル装置における高速イオン誘起Geodesic acoustic modeに伴う電位揺動の観測", 第8回核融合エネルギー連合講演会, 2010年6月11日, 岐阜県高山市

5. Takeshi.Ido, "Observation of electrostatic potential fluctuation of Alfvén eigen mode and geodesic acoustic mode in Large Helical Device", 第19回国際土岐会議, 2009年12月9日, 岐阜県土岐市

6. 井戸 毅, "LHDにおける反転磁気シア配位形成時に励起される高速イオン励起アルヴェン固有モードとGAM周波数揺動の空間構造の観測", 日本物理学会第64回年次大会, 2009年3月27日, 東京都豊島区立教大学池袋キャンパス

7. Takeshi Ido, "Potential fluctuation measurement using a heavy ion beam probe during ECCD in LHD", 14th International Congress on Plasma Physics, 2008年9月8日, 福岡県福岡市 福岡国際会議場

8. 井戸 毅, "大型ヘリカル装置における電位分布及びその揺動の振る舞い", 第7回核融合エネルギー連合講演会, 2008年6月19日, 青森県青森市

9. Takeshi Ido, "Measurement of Electrostatic Potential Fluctuation using Heavy Ion Beam Probe in Large Helical Device", 17th Topical Conference on High Temperature Plasma Diagnostics, 2008年5月14日, Albuquerque, New Mexico, United States

[その他]

「LHDにおける6MeV重イオンビームプローブ(HIBP)による電位分布・揺動計測の現状と将来展望」(解説記事)井戸 毅, 清水昭博, 西浦正樹, プラズマ・核融合学会誌, vol.86, No.8, p.p.507-516 (2010)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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