

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 17 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24561031

研究課題名(和文) 高効率多チャンネル重イオン検出器の開発による電場形成とプラズマ乱流の研究

研究課題名(英文) Development of high-efficiency multichannel detectors for high-energy heavy ions, and study of the electric field formation and plasma turbulences

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

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要因である電場及び乱流の計測のために、重イオンビームプローブ(HIBP)の改良のための開発研究を行った。特にHIBPで用いることのできる高エネルギーイオン検出法の開発を重点的におこなった。その結果、高エネルギーイオンを金属ターゲットにより二次電子変換したのち計測することで4倍以上の信号を取り出せることを明らかにした。

プラズマ実験においては、大型ヘリカル装置(LHD)において高エネルギー粒子によって帯状流が駆動されていることを実証した。また、新古典輸送理論に基づく電場の遷移現象をLHDにおいて初めて検出することに成功した。

研究成果の概要(英文)：We have developed a heavy ion beam probe (HIBP) in order to measure the electric field and turbulence which determine particle and heat transport in magnetically confined high-temperature plasmas. Several methods to detect high-energy probe ions efficiently have been developed. As the results, we have demonstrated that the signal intensity increases 4 times or more in the case that the high energy probe ions are converted to secondary electrons by use of metal targets. In plasma experiments, we have identified that zonal flow is driven by high-energy ions in the Large Helical Device (LHD). In addition, we have successfully detected transition of radial electric field which is predicted by the neoclassical theory, for the first time in the LHD plasmas.

研究分野：プラズマ工学

キーワード：磁場閉じ込めプラズマ 電位計測 乱流計測 高エネルギー重イオン検出器 高エネルギー粒子駆動不安定性 帯状流

## 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の輸送、閉じ込め性能と密接な関係がある。例えば、プラズマ中に電場勾配が形成されるとせん断流が駆動され、これにより乱流が抑制されるため、核融合プラズマの閉じ込めが改善する可能性がある。特に本研究開始当初においては、乱流の非線形結合により、乱流の空間スケールよりも大きな空間スケールを持つ電場構造、いわゆる帯状流が自発的に形成されることが明らかになっており、この帯状流の生成に伴う乱流輸送の低減が磁場閉じ込めプラズマで見られる閉じ込め改善現象と関係している可能性が指摘され、注目を集めていた。また、この帯状流はプラズマ中に存在する高速イオンによっても励起され得ることが示され、注目されていた。帯状流を含めプラズマ中の電場の特性を明らかにすることは、プラズマ物性物理学の面で興味深い課題であると同時に、核融合炉開発の面でも極めて重要な課題として精力的に取り組まれてきた。

我々が開発している重イオンビームプローブ(HIBP)は、磁場閉じ込め高温プラズマ中でプラズマに影響を及ぼすことなく電位を直接測定できる計測器である。この計測法は原理的に高時間分解能計測の可能性を有するため電位揺動を計測することができ、かつ密度揺動も同時に同位置で計測できるため、プラズマの輸送現象を調べるための強力な計測器となりえる。しかし、HIBPの弱点の一つはプラズマ中でのプローブビームの減衰であり、特に大型ヘリカル装置(LHD)の場合は装置サイズが大きいためビーム軌道長が長く、ビームの減衰が大きい。そのため、帯状流や乱流の計測には計測精度が不十分であり、この改善が必要とされていた。

## 2. 研究の目的

本研究は、HIBPの性能を向上させることにより、磁場閉じ込めプラズマ中における帯状流を含めた電場形成機構の解明、及びプラズマ乱流の特性を明らかにすることを目的として行った。

## (1) HIBPの性能の向上

HIBPの性能向上のためには、検出ビーム信号を増やすことが必要である。その方法として、計測のために入射するビーム強度の増大と、検出器の検出効率の向上が考えられる。本研究では特に検出器の検出効率の向上させることを目的として開発研究を進めた。

## (2) 電場形成機構の解明

非軸対称系プラズマにおけるこれまでの研究では、径方向電場は新古典粒子輸送の両極性条件の予測とよく一致することが示されている。将来の核融合炉心プラズマへの外挿精度を向上させるため、温度、密度などプラズマのパラメータの向上したLHDにおける

検証が重要である。そこで、プラズマパラメータ掃引時に電場の変化をHIBPにより測定し、新古典論に基づく予測の検証を行う。

また、LHDにおいて低密度プラズマに接線方向の中性粒子入射加熱を行った場合に、初期周波数が帯状流の一種であるGAMの周波数と同程度の揺動が観測された。この揺動の特性を明らかにすることを目的として研究を進めた。

## 3. 研究の方法

(1) HIBPの性能向上のためには、検出ビーム信号を増やすことが必要である。その方法として、計測のために入射するビーム強度の増大と、検出器の検出効率の向上が考えられる。特に後者に関しては、これまでの実験の結果、使用しているビームのエネルギー領域(1~6MeV)のイオンに対する検出素子

(MCP)の検出効率がスペック値より1桁程度低下することが明らかになっており、大幅な改善の余地があった。高エネルギーイオンの検出効率の劣化は、イオンがMCP表面から深く入り込むため、2次電子放出率が低下するためと予測した。そこで、阻止能の大きい金属ターゲットを用いてイオンを2次電子に変換し、検出効率を向上させることを試みた。HIBPによる電位測定に用いるためにはビームの検出面への到達位置の情報を得る必要がある。本研究では、多段メッシュを用いて2次電子変換しそれをMCPに導く方法と、2次電子変換用ターゲットをくさび型にして2次電子を分割し、その分割比からビームの重心位置を見積もる方法を試みた。

また、新しい試みとして、シンチレータを用いた検出の可能性の試験を行った。シンチレータを用いることが出来れば、多チャンネル化が容易になるという利点があり、今後の乱流計測上有利になると考えられる。

(2) HIBPを用いた磁場閉じ込めプラズマの物性研究の面では主に①磁場閉じ込めプラズマ中の電場形成機構の解明、②高速イオン励起帯状流の同定とその振る舞いの解明、③プラズマ乱流の振る舞いと閉じ込めとの関係の解明、に取り組んだ。

## 4. 研究成果

## (1) 高効率検出器開発

## ①金属ターゲットを用いた検出器開発

金属ターゲットにより2次電子変換する手法として、微細金属メッシュを用いる方法と、平板金属ターゲットを用いる方法を試験した。図1は2次電子変換の場合と直接計測の場合の検出信号の比を示す。いずれの2次電子変換法でも4倍以上の信号強度の増加がみられた。

次に、ビームの検出位置分解能の試験を行った。ここでは微細金属メッシュを用いる方法と、くさび型金属ターゲットを用いる方

法を試験した。試験は実験を効率よく行うために 30keV ビームを用いて行った。

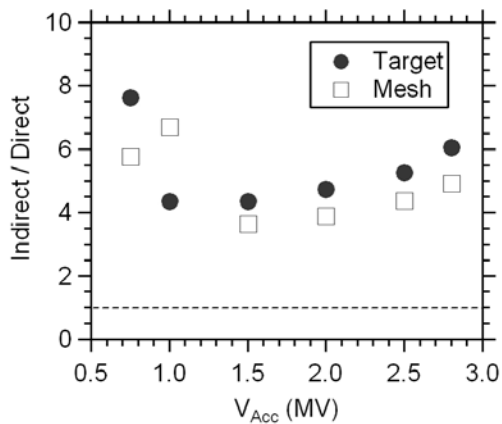


図1 二次電子変換にMCPで検出する場合と(indirect)と直接MCPで検出する場合の信号強度の比。横軸はイオンビームの加速電圧である。

試験の結果、いずれの手法を用いても、ビーム信号から見積もられる重心位置がビーム掃引に追従して移動することが確認された。これにより原理的にプラズマ電位計測が可能であることを実証できた。

しかしながら、同時に問題点も明らかとなった。微細金属メッシュの場合は、発生した2次電子の空間広がりHIBP実機で用いる検出プレート以上に大きくなること明らかとなった。この空間広がりメッシュとMCP間のバイアス電圧を増加させても大きく改善することはできなかった。

くさび型検出器の場合は、ビーム位置は正確に測定することが出来るが、くさび先端で発生する2次電子を十分にMCPに引き込めず、ビームの到達位置によって数%の検出ビーム強度の変動が生じた。HIBPを用いたプラズマ計測においては検出ビーム強度の変動からプラズマの密度揺動を測定するので、上記のビーム強度の変動はHIBPに適用する上で大きな問題となる。

これらの問題点の解決には、MCPの配置を含め検出器の構造の大きな変更が必要であることが分かったが、本補助金を超えるため実施しなかった。

## ②シンチレータを用いた検出器開発

LHD用HIBPで用いるプローブビームが高エネルギーであることを利用して、シンチレータを用いた検出が可能かどうかの試験を行った。実験はシンチレータ光をライトガイドで導き光電子増倍管(PMT)を用いて検出する方法で行った。試験は、入射ビームに対する出力の線形性と周波数応答特性に関して行った。

ビーム電流に対する出力信号強度の関係を図2に示す。これにより線形性を示すことが確認できた。また、実機に試験的に取り付

けたシンチレータを用いて、本研究のターゲットの一つであるGAMに伴う密度揺動を反映する信号を検出することが出来た。この結果から、LHD用HIBPの使用環境下でシンチレータが十分な発光量を持ち、かつ十分な周波数応答を持つことが確認できた。

今後実機に応用するにあたり、迷光対策などを施しチャンネル間のクロストークが無い検出器を設計することが必要である。また、LHDにおいては重水素を用いた実験を計画しているため、発生する中性子の影響を考慮した検出器の設計が必要である。

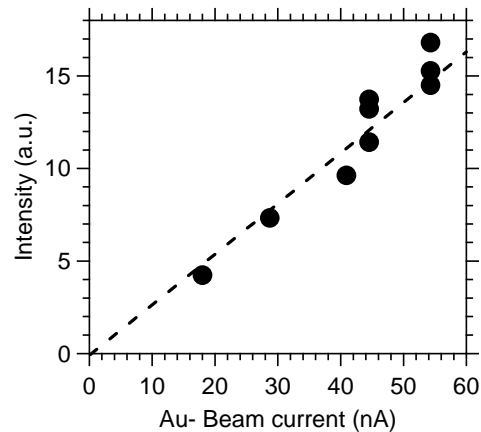


図2 入射ビーム電流(横軸)に対する検出信号強度(縦軸)。入射ビーム種はAu、エネルギーは1.190MeV。

## (2) ①磁場閉じ込めプラズマ中の電場形成機構の解明

新古典輸送の両極性条件によれば、高温低密度では正電場(電子ルート)、低温高密度では負電場(イオンルート)が形成されることが予測される。したがって、LHDプラズマにおいてこれらのパラメータをスキャンすれば、正電場から負電場、もしくはその逆の電場の遷移が起こることが予測され、これを実験で観測することにより理論予測の検証を行うことが出来る。

そこで放電中に密度を上昇させることにより、正電場から負電場への遷移を観測する実験を行った。その結果、1ミリ秒以下の速い時定数で正電場から負電場へ遷移することが観測された。この現象はECHによる電子加熱プラズマにおいても(図3)、垂直NBI加熱によるイオン加熱割合を増やしたプラズマにおいても観測されている。この結果は、新古典論の予測と定性的に一致している。また図3のように、電場の遷移及び逆遷移が繰り返し起こっている様子も観測されており、この現象は、過去に中型装置であるCHSにおいて発見されたパルセーションと呼ばれる現象(A. Fujisawa, et al., Phys. Rev. Lett., vol. 81, p2256 (1998))と同様の振る舞いを示している。これまで、このパルセーションも新古典輸送によって説明されてきた。プラ

ズマパラメータの大きく進展したLHDで観測されたことは、従来の理論を核融合炉への外挿する上で重要な結果であると考えられる。この結果はA. Shimizu, et al., Plasma Fusion Res., 8, Special Issue 1, 2402122 (2013)に発表した。

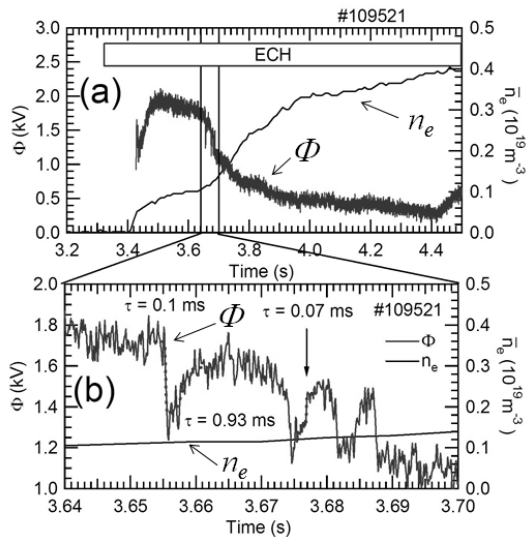


図3 (a) ECHプラズマにおける密度 ( $n_e$ ) 上昇時の電位 ( $\Phi$ ) の変化。(b) 拡大図

## ② 高速イオン励起帯状流の同定とその振る舞いの解明

LHDにおいて低密度プラズマに接線方向の中性粒子入射加熱を行った場合に、初期周波数が帯状流の一種であるGAMの周波数と同程度となる揺動が観測された。そこで、この揺動を同定するために、揺動の分散関係がGAMの分散関係と一致するかどうかを調べた。この実験では、電位揺動及び密度揺動の周波数の温度依存性と空間構造を、HIBPと磁気プローブを用いて測定した。

トロイダル方向の空間構造に関しては、トロイダル方向に配置された磁気プローブによりモード数が0であることが明らかになった。ポロイダル断面内の構造はHIBPの計測位置を掃引することにより測定した。その結果、電位揺動は赤道面に対して上下対称、密度揺動は反対称であることが明らかになった。これらの構造はGAMが持つポロイダル断面構造と矛盾しない結果である。

一方、周波数の温度依存性を調べた結果、通常のGAMは温度の平方根に依存するが、実験結果はそれよりも弱い温度依存性を示した。また、周波数の絶対値に関して、従来の理論では高速イオンによって励起されるGAMは通常のGAM周波数よりも低くなることが予測されていたが、実験結果は通常のGAM周波数よりも有意に高くなり、従来の理論予測と合わないことが明らかになった。

この周波数の違いの原因として、従来の理論で仮定されている高速イオンのエネルギー

一分布関数と本実験で実現されているエネルギー分布関数が異なっていることが考えられた。実際に、従来の理論では減速分布を仮定しているが、本実験は低密度であり高速イオンの減速時間が長いこと高エネルギー側に向かって正の勾配を持つ分布となっていることが中性粒子分析器(NPA)を用いて明らかとなった(図4)。

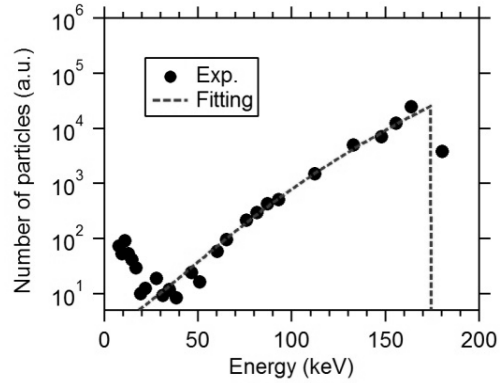


図4 中性粒子分析器(NPA)を用いて測定された高速イオンのエネルギー分布関数。

そこで、測定されたエネルギー分布を取り入れた分散関係( $D=0$ )を新たに理論的に導いた。図5に分散関係を導く関数 $D$ の実部及び虚部の等高線をそれぞれ実線及び点線で示す。交点A~Eが分散関係を満たす解であるが、このうち交点Cのみが正の成長率を持つ解である。この解の周波数の温度依存性と実験結果を比較したものが図6である。この比較より、実験で計測された周波数は、本研究で導出されたGAMの分散関係で説明できることが分かる。つまり、空間構造と周波数がGAMと一致することが示され、LHDで観測された揺動は高速イオン励起GAMであることが同定することが出来た。この結果はNuclear Fusion誌(2015年)に掲載予定である。

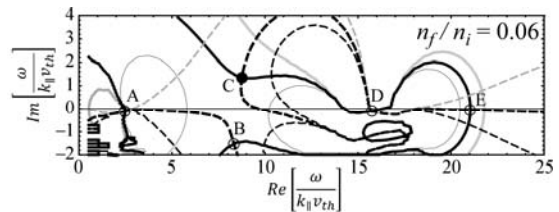


図5 高速イオンの密度がバルクイオン密度の6%の場合の分散関数 $D$ の実部(実線)及び虚部(点線)の等高線。横軸は規格化した周波数の実部、縦軸はその虚部を示す。細線、太線、灰色線がそれぞれ負、0、正の値を表す。交点A~Eが $D=0$ を満たす。

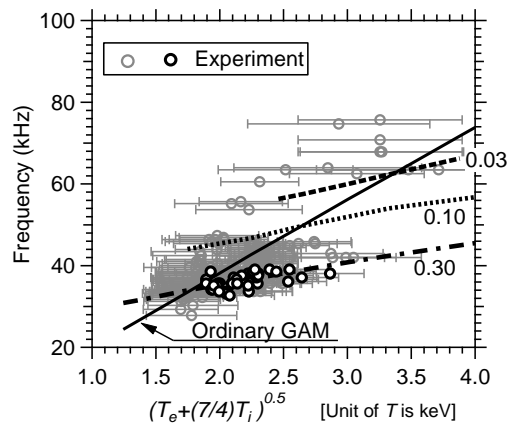


図6 周波数の温度依存性。黒太丸は同一放電における電子温度掃引の結果。点線は導出した分散関係による予測。破線、点線、一点鎖線は、それぞれ高速イオンとバルクイオンの密度比を0.03, 0.10, 0.30とした場合の計算結果。

### ③ プラズマ乱流の振る舞いと閉じ込めとの関係の解明

最終年度の実験において、ECH 単独加熱プラズマにおいて、規格化小半約0.3より外側に密度揺動が広く存在している様子を HIBPにより初めて観測することに成功した。また、プラズマ密度の増加と共にこれらの揺動強度は小さくなり、密度揺動強度が計測限界以下になった直後に密度の上昇率が多くなる現象も観測された。この結果は、観測された密度揺動が粒子閉じ込めに影響を及ぼしている可能性を示唆している。現在、他計測器による計測結果との比較を通じて揺動の空間構造、広がり調べ、揺動の振る舞いの理解を進めている。

## 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7件)

- ① T. Ido, M. Osakabe, A. Shimizu, (12番中、1番目), "Identification of the energetic-particle driven GAM in the LHD", Nuclear Fusion(2015年掲載予定) (査読有)
- ② X. D. Du, K. Toi, M. Osakabe, S. Ohdachi, T. Ido, (17番中、5番目), "Resistive Interchange Modes Destabilized by Helically Trapped Energetic Ions in a Helical Plasma", Physical Review Letters, 114, 155003 (2015) (査読有)  
DOI:http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.114.155003
- ③ M. Osakabe, T. Ido, K. Ogawa, A. Shimizu, (15番中、2番目), "Indication of bulk-ion heating by energetic

particle driven Geodesic Acoustic Modes on LHD", Proc. 25th IAEA fusion energy conference, Oct.13-18, (2014) Saint Petersburg(Russia), CD-ROM file No. EX/10-3 (査読無)

(http://www.nifs.ac.jp/report/IAEA2014/EX-10-3\_Osakabe.pdf)

- ④ X. D. Du, K. Toi, M. Osakabe, S. Ohdachi, T. Ido, (16番中、5番目), "Resistive Interchange Mode destabilized by Helically Trapped Energetic Ions and its Effects on Energetic Ions and Bulk Plasmas", Proc. 25th IAEA fusion energy conference, Oct.13-18, (2014) Saint Petersburg(Russia), CD-ROM file No. EX/P6-36 (査読無)  
(http://www.nifs.ac.jp/report/IAEA2014/EX-P6-36\_Du.pdf)
- ⑤ A. Shimizu, T. Ido, M. Kurachi, (9番中、2番目), "2D potential measurements by applying automatic beam adjustment system to heavy ion beam probe diagnostic on the Large Helical Device", Review of Scientific Instruments, vol. 85 (11), 11D853, (2014). (査読有)  
DOI:10.1063/1.4891975
- ⑥ A. Shimizu, T. Ido, (11番中、2番目), "Bifurcation-Like Behavior of Electrostatic Potential in LHD", Plasma Fusion Res., 8, Special Issue 1, 2402122 (2013) (査読有)  
DOI:10.1585/pfr.8.2402122
- ⑦ T. Ido, M. Osakabe, A. Shimizu, (17番中、1番目), "Observation of a new energy channel from energetic particles to bulk ions through geodesic acoustic mode", Proc. 25th IAEA fusion energy conference, Oct. 8-13 (2012) San Diego (United States), CD-ROM file No. PD/P8-16 (査読無)  
(http://www.naweb.iaea.org/napc/physics/FEC/FEC2012/papers/800\_PDP816.pdf)

[学会発表] (計18件)

- ① 井戸毅、長壁正樹、清水昭博、他、"LHDにおける高速イオン励起 GAM の突発的励起現象の観測"、日本物理学会年次大会、2015年3月21日~24日、早稲田大学(東京都)
- ② 井戸毅、長壁正樹、清水昭博、他、"LHDにおける高速イオン励起 GAM の特性"、Plasma Conference 2014、2014年11月18日~21日、朱鷺メッセ(新潟県新潟市)
- ③ M. Osakabe, T. Ido, K. Ogawa, A. Shimizu, et al., "Indication of bulk-ion heating by energetic particle driven Geodesic Acoustic Modes on LHD", 25th IAEA fusion energy conference, Oct.13-18, (2014) サンクトペテルブ

- ルグ(ロシア)
- ④ X. D. Du, K. Toi, M. Osakabe, S. Ohdachi, T. Ido, et al., "Resistive Interchange Mode destabilized by Helically Trapped Energetic Ions and its Effects on Energetic Ions and Bulk Plasmas", 25th IAEA fusion energy conference, Oct.13-18, (2014) サンクトペテルブルグ(ロシア)
- ⑤ 井戸毅, 長壁正樹, 清水昭博, 他, "LHDにおける高速イオン励起 GAM の同定", 第10回核融合エネルギー連合講演会, 2014年6月19日~20日, つくば国際会議場(茨城県つくば市)
- ⑥ A. Shimizu, T. Ido, et al., "2D potential measurement by applying automatic beam adjustment system to heavy ion beam probe diagnostics on the Large Helical Device", 20th Topical Conference on High-Temperature Plasma Diagnostics, 1-5, June (2014), アトランタ(アメリカ)
- ⑦ Takeshi Ido, Akihiro Shimizu, et al, "Large electrostatic potential fluctuation associated with energetic-particle driven geodesic acoustic mode in LHD", 23rd International Toki Conference, 2013年11月18日~21日, セラトピア土岐(岐阜県土岐市)
- ⑧ Akihiro Shimizu, Takeshi Ido, et al, "Temporal behavior of electrostatic potential in the LHD", 23rd International Toki Conference, 2013年11月18日~21日, セラトピア土岐(岐阜県土岐市)
- ⑨ A. Shimizu, T. Ido, et al., "Temporal behavior of electrostatic potential measured with HIBP in the LHD", 9th Asia Plasma and Fusion Association Conference, 2013年11月5日~8日, キョンジュ(韓国)
- ⑩ Takeshi Ido, "Spatiotemporal dynamics of H-mode transition/back transition and ITB formation", 14th International Workshop on H-mode Physics and Transport Barriers, 2013年10月2日~4日, 九州大学(福岡県福岡市) (招待講演)
- ⑪ A. Shimizu, T. Ido, et al., "The temporal behavior of electrostatic potential and bifurcation property in LHD", Joint 19th International Stellarator and Heliotron Workshop and 16th IEA-RFP Workshop, 2013年9月16日~20日, パドバ(イタリア)
- ⑫ A. Shimizu, T. Ido, et al., "The temporal behavior of electrostatic potential and bifurcation property in LHD", The 12th Asia Pacific Physics Conference, 2013年7月14日~19日, 幕張メッセ(千葉県千葉市)
- ⑬ T. Ido, M. Osakabe, A. Shimizu, et al., "Characteristics of EGAM and influence on ion energy spectra in the LHD plasmas", 3rd Asia Pacific Transport Working Group International Conference, 2013年5月21日~24日, 済州(韓国)
- ⑭ Akihiro Shimizu, Takeshi Ido, et al., "Bifurcation-like behavior of electrostatic potential in LHD", 22nd International Toki Conference, 2012年11月19日~2012年11月22日, セラトピア土岐(岐阜県土岐市)
- ⑮ T. Ido, M. Osakabe, A. Shimizu, et al., "Observation of a new energy channel from energetic particles to bulk ions through geodesic acoustic mode", 24th IAEA Fusion Energy Conference, 2012年10月08日~13日, サンディエゴ(アメリカ)
- ⑯ T. Ido, A. Shimizu, et al., "CHARACTERISTICS OF ENERGETIC-PARTICLE DRIVEN GAM IN THE LARGE HELICAL DEVICE", International Conference and School on Plasma Physics and Controlled Fusion, 2012年9月17日, アルシュタ(ウクライナ) (招待講演)
- ⑰ T. Ido, A. Shimizu, et al., "Electrostatic potential measurement by the heavy ion beam probe on LHD", Workshop on Electric Fields, Turbulence and Self-Organisation in Magnetized Plasmas, 2012年7月9日, ストックホルム(スウェーデン)
- ⑱ 井戸毅, 清水昭博, 他, 「LHDにおける高エネルギー粒子駆動 GAM の空間構造及びバルクプラズマへの影響の評価」, 第9回核融合エネルギー連合講演会, 2012年6月28日, 神戸国際会議場(兵庫県神戸市)

## 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

### (2) 研究分担者

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