

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年5月23日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22540507

研究課題名（和文）慣性静電閉じ込め核融合における収束イオンのダイナミクスとポテンシャル構造

研究課題名（英文）Spectroscopic investigations of ion dynamics in an inertial-electrostatic confinement discharge

研究代表者

多幾山 憲 (TAKIYAMA KEN)

広島大学・大学院工学研究院・特任教授

研究者番号：40112180

研究成果の概要（和文）：

慣性静電閉じ込めプラズマからのビーム状発光に含まれるH $\alpha$ 線のドップラーシフトを観測した。その低速成分の最大シフトは、レーザー誘起蛍光法によって計測された陰極内ポテンシャル分布から評価した電位差と一致した。この結果は、低速成分に寄与する水素励起原子は、陰極中心部の水素イオンがポテンシャルによって陰極方向に加速され、陰極内部に分布する水素原子や分子との荷電交換反応によって生成されたことを意味する。

研究成果の概要（英文）：

Doppler shift of H $\alpha$  spectral lines were measured in the central cathode plasma generated by an Inertial-Electrostatic Confinement discharge in He/H<sub>2</sub> mixture. Acceleration voltages were estimated from the observed maximum shift of near wings of H $\alpha$ , and agreed with potential differences between the plasma center and the cathode, estimated from the potential profiles measured by the laser-induced fluorescence method. This suggests that excited H atoms are generated by charge-exchange reactions of H ions accelerated by the potential formed inside the cathode with background H atoms or molecules.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学・プラズマ科学

 キーワード：慣性静電閉じ込め・ポテンシャル構造・ドップラーシフト・  
レーザー誘起蛍光偏光分光法・プラズマ電場計測

### 1. 研究開始当初の背景

ビーム・ビーム衝突核融合の一種である慣性静電閉じ込め (IEC) 核融合は可搬型中性子 (陽子) 源としての広範な応用の可能性から、世界各国で活発な研究が行われている。これは重水素あるいは三重水素イオンを球状メッシュ陰極の中心部に収束し、イオン同士の衝突により核融合反応を生起するものである。イオンが収束すると、イオンとの衝突により陰極より放出された二次電子もまたイオンが作るポテンシャルにより中心部に引き寄せられ、プラズマが生成される。その結果、静電ポテンシャルが構造を持つと考えられている。理論的には、この構造が球中心部でのイオン衝突核融合反応率に強い相関があると考えられており、また、その構造は二重井戸構造であると予測されていた。この構造を実験的に突き止めるために、陽子生成空間分布計測など種々の実験が試みられたが、決定的証拠は得られなかった。1999年京大グループと共同して、レーザー誘起蛍光 (LIF) 偏光分光法による電場計測法[3]を球状収束イオンビーム核融合中性子源 (京都大学) に適用し、世界で初めてプラズマコアの電場分布の直接計測に成功し、二重井戸構造の形成を確認した。しかしながら低電圧印加で形成される一重井戸から高電圧での二重井戸への遷移機構はまだ解明されていないなど、今後、ポテンシャル構造と IEC 核融合反応率との相関を実験的に解明していく上で、解決すべき課題を残した。また、収束イオンのダイナミクスも十分に明らかにされているわけではない。最近、豪州のグループがイオン収束により形成されたポテンシャルにより径方向に加速された陽イオンが中性水素原子との荷電交換により中性化された結果高速の中性原子ビームが形成されることを示し、このドップラースペクトルから中性子生成効率が推定できることを実証した。このことはこのスペクトルがポテンシャル構造と強い相関を持っていることを示唆している。しかしながら、ポテンシ

アル構造を精度良く計測する方法が無かったため、まだこの関係は明らかにされていない。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、慣性静電閉じ込め (IEC) プラズマコアに形成される収束イオンによるポテンシャル分布とバルマー- $\alpha$  ( $H\alpha$ ) 線のドップラーシフトをそれぞれ別な方法で測定し、両者の相関から収束イオンのダイナミクスに関する知見を得ることである。

### 3. 研究の方法

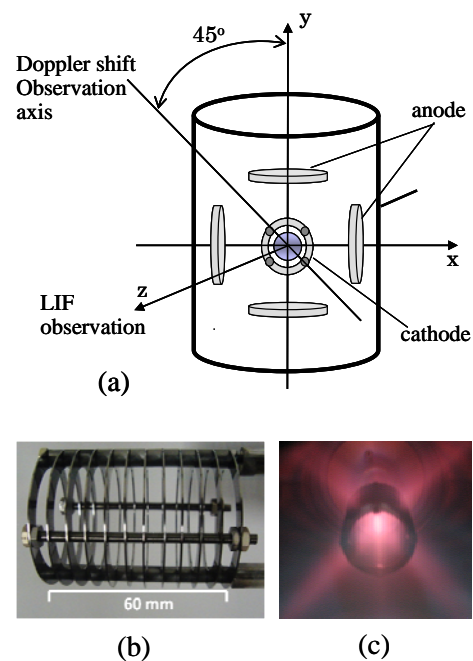


図 1 (a) 実験配位, (b) 中空陰極, (c) 陰極中心部に生成されたプラズマの写真

図 1 に示すように、真空容器の中心に、径方向の透過率が高い円筒型陰極 (中心軸を  $z$  軸とする) を設置し、 $z$  軸に直交する  $x, y$  軸上に 4 枚の金属板を軸対称性が高くなるよう中心から等距離の位置に陽極として設置した。真空容器内にヘリウムまたは水素・ヘリウム混合ガスを導入し、直流高圧電源により電極間に高電圧を印加し、円筒型陰極内に円柱状プラズマコアを生成した。プラズマコアから陰極外側に向かって斜めに走る 4 本の

ビーム状発光に含まれる水素原子の  $H\alpha$  (656 nm) 線のスペクトル形状を、 $z$  軸に直交しかつビームに対して平行な方向から測定する。観測されたドップラーシフトからイオンの加速電圧を求める。

IEC コアプラズマのポテンシャル分布測定には円偏光 LIF 法によるプラズマ電場計測法を用いる。この方法はシュタルク-電気四極子干渉に基づき LIF の円偏光度から電場を決定する方法で、高い検出感度 (10V/cm) を持つだけでなく電場の極性をも計測できるため、構造を持つポテンシャル計測には最適な方法である。この方法を適用するためにプラズマに影響を与えない程度の弱磁場 (5 G 程度) を陰極軸 ( $z$  軸: 水平面内) 方向 (計測対象とする電場に直交する方向) に印加した状態で、プラズマコア領域に  $y$  軸 (鉛直) に沿ってレーザーを導入し、電場計測用プローブ原子としての He 準安定原子の禁制線励起 ( $2^1S-4^1D$ ) を行い、誘起される蛍光 ( $4^1D-2^1P$ ) の円偏光度を測定する。IEC 放電装置を水平 ( $x$  軸) 方向に走査することによって、その  $x$  軸方向の空間分布を得る。観測された円偏光度とその極性から IEC プラズマコア内のポテンシャルプロファイルを求める。

#### 4. 研究成果

作動ガスとしてヘリウム/水素混合ガスを用い、ガス圧 30 mTorr、放電電流 20 mA

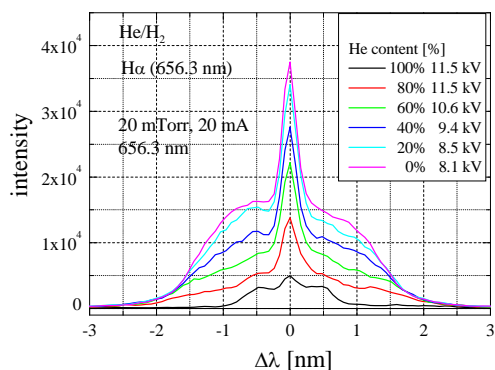


図2  $H\alpha$  線のドップラースペクトル

のときに、観測された水素およびヘリウムの発光スペクトルのガス混合比依存性を図2に

示す。水素の発光スペクトルは、すべての場合において、中心の鋭いピークと両側にある大きく広がったウイングの二つの成分で構成されている。中心のピークは  $H\alpha$  線の固有の波長 656.3 nm に等しいため、主としてバックグラウンド水素原子の電子衝突励起によるものと考えられる。一方、両側のウイングは、波長 656.3 nm の光がドップラーシフトしたのと考えられる。このようにシフトした  $H\alpha$  線は、観測軸上を高速で移動している水素励起原子によって放射される。この励起水素原子は、水素原子や分子を含む気体の IEC 放電においては、陽極近傍で生成した  $H^+$ 、 $H_2^+$ 、 $H_3^+$  などのイオンが陽極-陰極間に印加された高電圧によって加速され、陰極中心に向かって収束するときに誘起される高速イオンとバックグラウンドの水素原子や分子との荷電交換反応によって生成されることが知られている。従って、生成された水素励起原子  $H^*$  のスピードは、イオンの質量に応じて異なる。その速度比は、

$$H^+ : H_2^+ : H_3^+ = 1 : 1/\sqrt{2} : 1/\sqrt{3}$$

となる。その結果、得られたドップラープロファイルは、3種類の速さの異なる  $H^*$  が放出するスペクトルの重ね合わせとなる。また、中心部に収束したイオンが形成するポテンシャルによって加速される低速成分の存在

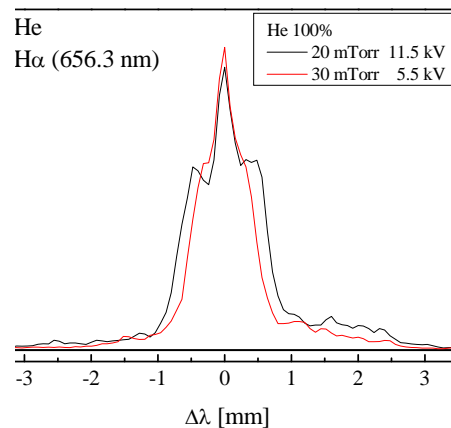


図3  $H\alpha$  線のドップラースペクトル (放電電流 20 mA)

も示唆されている。図2に示されているように、水素濃度が高い場合は、中心ピーク近傍

まで多くのステップ構造が見られる。一方、He 濃度が高い場合 (特に 100%) においては、2 種類のステップ構造のみが現れる。解析の結果、ドップラーシフトはいずれの場合においても関与するイオンは  $H^+$  であることが見出された。これは He 濃度 100%における水素イオン濃度は極めて低いため、 $H_2^+$ 、 $H_3^+$  イオンはほとんど生成しないことによると考えられる。得られた高速成分の最大ドップラーシフト量よりもとめた加速電圧は、ほぼ印加電圧に近い値を示し、低速成分は印加電圧のほぼ 10%に相当する値であった。従って、本研究では、高速成分と低速成分のドップラーシフトを精度よく同定できる He100%の場合について、印加電圧を変えて測定した。印加電圧 11.5kV と 5.5kV の場合のスペクトルを図 3 に示す。収束ポテンシャルによる加速によると思われるシフトより見積った加速電圧の最大値はそれぞれ 800 V と 400 V であった。

図 4(a) に LIF 電場計測法によって観測された円偏光度の空間分布より求めた陰極内部  $x$  軸上の電場分布を示す。ここで  $x=\pm 15$

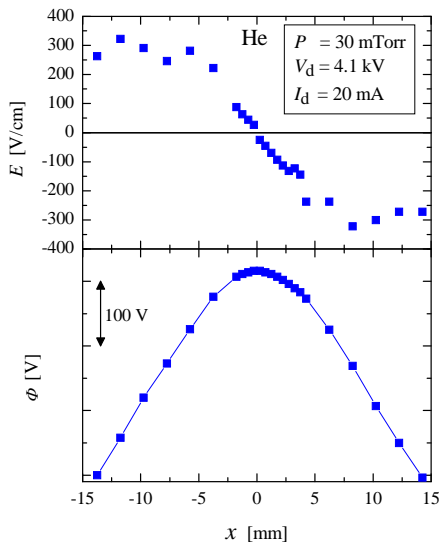


図 4. 陰極内部 ( $x$ 軸上) の 電場分布とポテンシャル分布

mm の位置は円筒型陰極の内側のエッジの位置に相当する。 $x < 0$  の領域には中心から負

の方向に向かう電場、 $x > 0$  では正の方向に向かう電場が存在する。またこれらの電場は陰極から 10 mm の間ではほぼ一定である。一方、中心近傍  $-5 < x < 5$  では電場は中心に向かって減少し、中心で 0 となる。この結果は、この領域にイオンが局在していることを示唆している。このことは He イオンの発光線 ( $HeII$  468.6 nm) がこの領域で観測されていることから裏付けられる。

電場  $E$  とポテンシャル  $V$  の関係は

$$E = -dV/dx \quad (1)$$

で与えられる。従って電場分布を空間積分することによってポテンシャル分布が得られる。図 4 (b) に得られたポテンシャル分布を示す。この分布は陽極近傍で生成された  $He^+$  イオンが陽極-陰極間に印加された高電圧によって加速され、陰極グリッドを透過して陰極中心部に収束することにより形成された空間電荷によるものである。得られた分布は  $x=0$  にひとつのピークを持つため一重井戸構造ポテンシャルと呼ばれる。このピークと、 $x=15$  および  $-15$  mm の点に位置する陰極との間の電位差  $\Delta\phi$  は約 320 V であった。

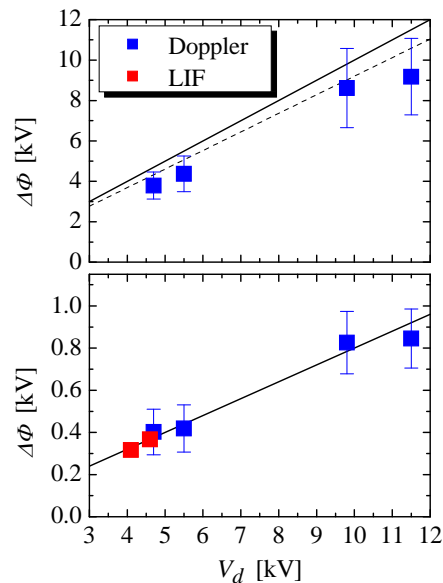


図 5 ドップラーシフトおよびポテンシャル分布 (LIF) から求めた電位差の放電電圧依存性

このようにして LIF 法によって測定したポテンシャルプロファイルから評価した陰極と

$\Delta\phi$  を、ドップラープロファイルの高速成分および低速成分の最大シフトから求めたポテンシャル値とともに放電電圧の関数としてプロットした結果を図5に示す。高速成分については、その値は放電電圧に近い値を示しているが、それを超えることはなく1割程度低いように見える [図5(a)]。一方、低速成分の最大シフトから求めたポテンシャル値はポテンシャルプロファイル(LIF) から評価した電位差 $\Delta\phi$ と良い一致を示す [図5(b)]。このことから、ドップラープロファイル中の低速成分は、プラズマコア中の $H^+$ イオンが中心部に形成されたポテンシャルによる電場によって加速され、陰極近傍で荷電交換反応によって $H^*$ に変換されていることを意味している。上述の高速成分が放電電圧よりも1割程度低いポテンシャルを示すことに関しては、中心部に形成されたポテンシャルによる高速イオンの減速によるものとして説明できる。

#### 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1件)

1. K. Takiyama, S. Namba, S. Furukawa, Y. Kuramoto, K. Nakanishi, and O. Tsunefuji, Spectroscopic measurements of electrostatic potentials in an inertial-electrostatic confinement discharge, Proc. 30th Int. conf. on Phenomena in Ionized Gases, 査読有り, 巻無し, 2011, C8-373(3 pages)

[学会発表] (計3件)

1. K. Takiyama, S. Namba, S. Furukawa, Y. Kuramoto, K. Nakanishi, and O. Tsunefuji, Spectroscopic measurements of electrostatic potentials in an inertial-electrostatic confinement discharge, 30th Int. conf. on Phenomena in Ionized Gases, 28 Aug-2 Sept 2011, Belfast UK

2. 元安辰徳、難波慎一、古川伸哉、多幾山憲、分光学的手法による慣性静電閉じ込めプラズマの電位計測、日本物理学会第68回年次大会、2013年3月26-29日、東広島市(広島大学)

3. 真木大輔、福原大介、難波慎一、多幾山憲、水を微量含む高気圧ヘリウムホローカソード放電プラズマからの禁制線、日本物理学会第68回年次大会、2013年3月26-29日、東広島市(広島大学)

[その他]  
ホームページ等

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

多幾山 憲 (TAKIYAMA KEN)

広島大学・大学院工学研究院・特任教授

研究者番号：40112180

##### (2) 研究分担者

難波 慎一 (NAMBA SHINICHI)

広島大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：00343294

##### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：

