

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 22 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14527

研究課題名(和文) 偏光変調分光法を利用したトカマク非誘導生成時の電子速度分布関数計測

研究課題名(英文) Measurement of the electron velocity distribution function using polarization modulation spectroscopy at the non-inductive startup phase of tokamak plasmas

研究代表者

四竈 泰一 (Shikama, Taiichi)

京都大学・工学研究科・准教授

研究者番号：80456152

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：電子サイクロトロン共鳴加熱(ECH)を用いたトカマク非誘導生成時に生じる電子速度分布の時間発展を計測可能な手法を開発し、その手法を用いてプラズマ中の電子挙動を解明することを目的として研究を行った。2年間の研究で以下の成果を得た。(1)原子発光線の1%以下の偏光度を検出可能な偏光分光システムを開発した。(2)観測窓による複屈折及び装置内壁での反射光による機器偏光の対策を確立した。(3)トカマクと同程度のパラメータを持つECHプラズマを用いてヘリウム原子発光線の偏光を計測することに成功した。(4)電子速度分布形状の評価に必要な衝突輻射モデル計算が可能であることを確認した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to develop a diagnostic method to measure the temporal evolution of the electron velocity distribution (EVD) and to reveal electron dynamics during the non-inductive startup phase of a tokamak plasma using ECH. We obtained the following results. (1)A polarization spectroscopy system that can detect a polarization degree of less than 1% in atomic emission lines was developed. (2)A method to reduce the instrumental polarization produced by birefringence of the window and reflection at the vacuum chamber surface was established. (3)Polarization in helium atom emission lines was observed in an ECH plasma having parameters comparable to ECH tokamak plasmas. (4)The feasibility of collisional-radiative modeling required for the evaluation of the EVD shape was verified.

研究分野：プラズマ計測

キーワード：核融合 トカマク ECH ECR 電子速度分布 偏光 光弾性変調器

1. 研究開始当初の背景

電子サイクロトロン共鳴加熱 (ECH) を利用したトカマク非誘導生成の研究が進められている。プラズマ生成時には急峻な電流増加を伴う磁場構造の遷移現象が起こることが観測されているが、その物理機構は明らかになっていない。電子速度分布 (EVD) の時間発展を計測できれば、遷移現象の駆動源であると考えられる高速電子の閉じ込めを追跡できる。

非等方に運動する電子集団により原子やイオンが励起されると脱励起に伴う発光が偏光する。偏光の大きさと方向は電子の運動エネルギーと運動方向の関数となるため、偏光から電子の運動状態を推定できる。プラズマ中では加熱やその他の要因により EVD に非等方性が生じ、非等方成分による励起で偏光が生じる。これまでに ECH を重ねたプラズマ中で最大 10% に達する偏光が観測されており、偏光計測から EVD の推定が可能なが示されている。

申請者は非等方性が顕著になるトカマク生成時の EVD 時間発展を明らかにするために、これまでにない精度と時間分解で偏光計測が可能な装置開発を進めている。磁場構造が変化する時間スケールである 1 ms の時間分解、この間の EVD 変化を観測するための誤差 1% 以下の計測精度を目標として設定している。予備研究により試作機を製作し、直線偏光の光源に対して偏光度・偏光方向を 1% 以下の誤差、100 ms 時間分解で計測できることを確認した。

2. 研究の目的

以下の 2 項目を当初の目的とした。

- (1) 偏光変調分光計測システムの開発
誤差 1%、時間分解 1 ms という性能を両立するプラズマの偏光計測を実現する。このために偏光状態に応じた光強度の時間変調を利用した偏光計測システムを新たに開発する。
- (2) 球状トカマク生成過程における EVD 時間発展の解明
球状トカマク非誘導生成時におけるヘリウム原子発光線の偏光を計測する。計測結果と理論モデルから EVD の時間発展を明らかにし、遷移現象と高速電子の関係性を解明する。

3. 研究の方法

(1) 偏光変調分光計測システムの開発
ノイズを含むプラズマ発光の微小偏光を高精度で計測するために時間変調法を採用した。図 1 に計測器の模式図を示す。プラズマからの発光を異なる周波数の 2 台の光弾性変調器 (42, 50 kHz) と直線偏光子を通した後に対物レンズで集光し、光ファイバで分光器に伝送する。分光器の出射光は光電子増倍管で検出し、広帯域アンプと A/D 変換器を用いて光強度の時間変化を記録する。光弾性変調

器は速軸・遅軸間の位相差を時間的に正弦波で変調する。光強度の時系列信号を周波数解析し、DC 成分から光強度 I 、変調周波数とそれらの高調波およびビート成分の振幅から偏光状態を表す 3 つのストークスパラメータ Q, U, V を計測することができる。また、これらのストークスパラメータを用いて偏光度と基準軸に対する直線偏光成分の方位角 (偏光方向) を求めることができる。広周波数帯域の揺動を含むプラズマ発光から変調成分のみを検波するためノイズ耐性が良好であり、また、単一視線で光強度のみを計測するため校正が容易、変調の高調波およびビート成分を同時に検波することで冗長化が可能、同一セットアップで紫外から近赤外までの広波長域の計測が可能、等の長所がある。

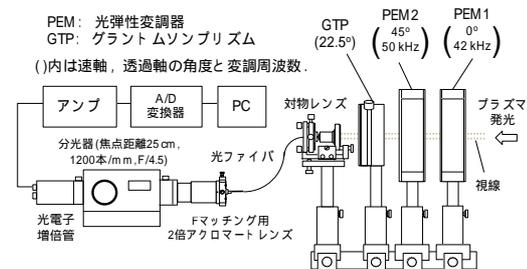


図 1. 開発した偏光計測システム

(2) 球状トカマク生成過程における EVD 時間発展の解明

当初トカマク実機での計測を計画していたが、実機の複雑な条件下で計測を成功させるためには、観測窓の複屈折および壁面での反射光により生じ得る機器偏光の対策、観測した偏光が電子衝突に由来する (電子衝突偏光) ことを検証するための手法の確立、EVD を求める際に必要となる衝突輻射モデル計算が可能であることの検証、が必要であったことが分かったため、これらの課題に取り組んだ。

機器偏光の対策

観測窓として用いた合成石英円板 (直径 114 mm, 厚さ 8 mm) の複屈折を評価した。複屈折を生じ得る要因として製造時の残留応力と真空排気時の大気圧応力がある。まず前者を調べるために、大気中に置いた窓に既知の直線偏光を入射し、透過光の偏光状態を図 1 のシステムを用いて計測した。その結果、偏光状態の変化は計測誤差よりも小さく無視できることが分かった。次に、大気圧応力の影響を計算により評価した。円周を固定して一様圧力を印加した円板の近似式を用いて応力の空間分布を計算し、合成石英の光弾性係数から応力により生じる複屈折の大きさを求めた。その結果、大気圧応力による複屈折は無視できる程度に小さいことが分かった。

反射光による機器偏光を低減するための対策として、黒塗りしたアルミ板を積層したビューイングダンプを視線対面の真空容器

内壁に設置した．ダンプが設置されていない壁面（ステンレス）では反射により数%程度の機器偏光が観測されたが，ダンプ上では機器偏光の影響が十分低減できていることを確認した．

基礎実験装置での電子衝突偏光の確認

ECH による球状トカマク非誘導生成時の初期プラズマと近いパラメータを持つプラズマを生成可能な小型放電装置を用いて実験を行った．装置の概要を図 2 に示す．3 対のコイルにより生成した定常なカスプ磁場中に周波数 2.45 GHz, 約 800 W のマイクロ波を入射して ECH によりプラズマを生成した．サイクロトロン共鳴面は回転楕円体となり，主軸・副軸の直径がそれぞれ 168 mm, 84 mm である．共鳴面における電子加熱により非等方な EVD を作る事ができる．実験はヘリウムプラズマを用いて圧力 23-402 mPa の範囲で行った．

図 2 中に示すように $r\theta z$ 座標系を定義し， $z = 6$ mm の位置の $r\theta$ 面内に視線を配置して発光を計測した．発光強度が大きい 2^1P-3^1D 線（波長 668 nm）, 2^3P-3^3D 線（波長 588 nm）の 2 本の発光線を共鳴面に接する視線（視線 1, z 軸からの距離 83 mm）を用いて計測した．

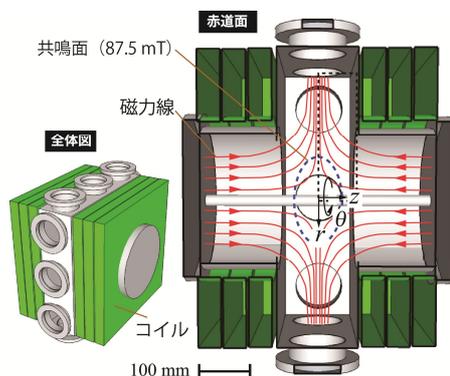


図 2. 実験装置の概要

衝突輻射モデル計算の検証

EVD を求める際には，まず EVD 形状を解析関数で近似し，これを入力として偏極まで含む衝突輻射モデル計算（PACR モデル）を行い，出力される励起準位の密度とアライメントを計測値に対してフィッティングする．この際，PACR モデル計算は EVD に加えて，準安定状態の $2^1S, 2^3S$ 原子密度， 1^1S-n^1P 準位間（ n : 主量子数）の共鳴線の再吸収による光励起にも影響を受けることが分かっている．このため，フィッティングを行うことが可能かどうかを EVD が等方なマクスウェル分布の場合に検証した．

図 2 の $z = 12$ mm の位置の $r\theta$ 面内に複数の視線を配置し，波長 300-800 nm の範囲に存在する 10 本のヘリウム原子発光線スペクトルを計測した．これらのスペクトルから求めた発光強度とアーベル逆変換を用いて放射率および上準位密度の r 方向分布を求めた． r 方向の各点において $T_e, n_e, 1^1S, 2^1S, 2^3S$ 原子

密度， $1^1S-3^1P, 1^1S-4^1P$ 準位間の光励起の指標であるオプティカルエスケープファクタ，の合計 7 個の変数をパラメータする衝突輻射モデル計算を行い，上準位密度の計測値に対するフィッティングからこれらのパラメータを適切に求めることができるかを確認した．

4. 研究成果

(1) 偏光変調分光計測システムの開発

システムを製作し，性能評価を行った．ストークスパラメータが既知の単色完全偏光を計測し，誤差を評価した．系統誤差は主に光弾性変調器位相差の時間変化が正弦波からずれることと光学素子の設置誤差に由来し，前者を考慮した校正を行うことで中央値の約 4% 以下に低減できることが分かった．また，偶然誤差は主に光電子増倍管の暗電流とショットノイズ，光源・周辺環境由来のノイズからなる．これらは実験条件と計測時間によって変化するが，計測に用いる周波数の近傍で S/N 40 程度で周波数スペクトルを計測できれば，約 1×10^{-2} 以下にできることが分かった．

(2) 球状トカマク生成過程における EVD 時間発展の解明

基礎実験装置での電子衝突偏光の確認

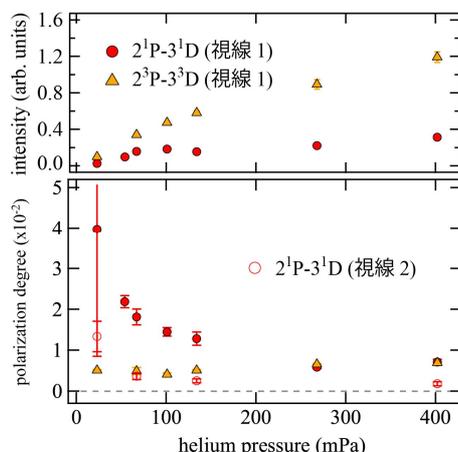


図 3. 発光強度と偏光度の圧力依存性

偏光度の圧力依存性の計測結果を図 3 に示す．2 本の発光線に対して低圧時に偏光度の有意な差が観測され，偏光方向はともに磁場に垂直であった． 2^1P-3^1D 線は圧力の低下とともに偏光度が単調に増加する傾向が見られた．この偏光が電子衝突に由来することを確認するために，共鳴面を横切る異なる視線（視線 2, z 軸からの距離 35 mm）を用いて 2^1P-3^1D 発光線の偏光度を計測した．電子衝突による原子発光線の偏光は電気双極子放射であるため，発光位置における視線と磁場のなす角 α に応じて偏光度が $\sin^2 \alpha$ に比例して変化する．偏光が共鳴面で生じていると仮定すると，視線 1, 2 に対する α の値はそれぞれ $90^\circ, 155^\circ$ であり，視線 2 で計測される偏光度は視線 1 の約 20% となる．この比は図 2

に示した2本の視線での計測値の比と近くなっており、共鳴面付近で生じた電子衝突偏光を計測できていると考えられる。また、2本の発光線の偏光度の違いは、原子の偏極を生じる励起断面積の違いによると考えられる。

衝突輻射モデル計算の検証

フィッティングにより得られたパラメータの r 方向分布を図4に示す。カイ2乗値からフィッティング結果がローカルではなくグローバルなミニマムとして求まっていることを確認した。また各パラメータは物理的に妥当な値となっていることが確認され、EVDがマクスウェル分布の場合には衝突輻射モデル計算によるフィッティングが可能であることが分かった。

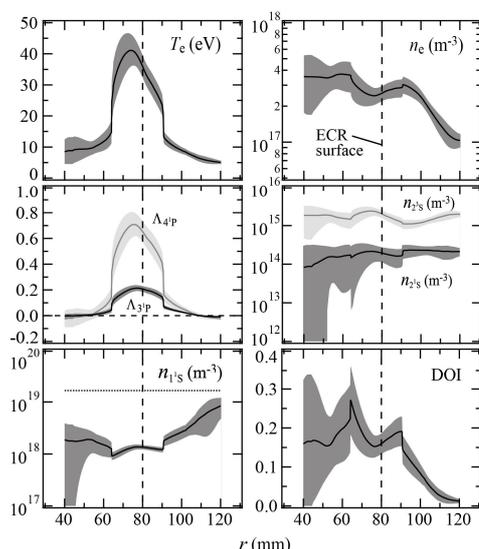


図4. 衝突輻射モデルのフィッティングにより求めたパラメータの r 方向分布

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4件)

A. Ueda, T. Shikama (CA), T. Teramoto, Y. Iida, and M. Hasuo, Spectroscopic measurement of the degree of ionization in a helium electron cyclotron resonance discharge in a simple cusp field, *Appl. Phys. Lett.* 111, 074101 (2017). DOI: 10.1063/1.4998969.

T. Higashi, T. Shikama (CA), T. Teramoto, A. Ueda, and M. Hasuo, Measurement of linear polarization in the HeI 2^1P-3^1D emission line in an ECR discharge plasma, *Jpn. J. Appl. Phys.* 56, 096101 (2017). DOI: 10.7567/JJAP.56.096101.

K. Yasui, T. Shikama (CA), T. Higashi, and M. Hasuo, Development of a polarization-modulation spectroscopy system for the temporally resolved measurement of linear polarization in plasma emission, *Rev. Sci. Instrum.* **87**, 103507 (2016).

DOI: 10.1063/1.4965976.

T. Shikama (CA), S. Ogame, Y. Iida, and M. Hasuo, Measurement of the helium 2^3S metastable atom density by observation of the change in the 2^3S-2^3P emission line shape due to radiation reabsorption, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 43, 025206 (2016).

DOI: 10.1088/0022-3727/49/2/025206.

〔学会発表〕(計10件)

四竈 泰一, 偏光分光と方向性プローブを用いたヘリウム ECR プラズマ中の電子速度分布非等方性計測, 日本物理学会 第73回年次大会 (2018).

上田 明, 発光線強度比法を用いたカスプ磁場配位 ECR プラズマの電離度計測, 第65回応用物理学会春季学術講演会 (2018).

T. Shikama, Measurement of electron velocity distribution anisotropy in an ECR plasma using directional Langmuir probe and polarization spectroscopy, APSPT-10 (2017).

A. Ueda, Spectroscopic measurement of the degree of ionization in a helium electron cyclotron resonance discharge in a simple cusp field, APSPT-10 (2017).

四竈 泰一, シュタルクおよびゼーマン分光へのふく射再吸収の影響, Plasma2017 (2017).

寺本 達哉, カスプ磁場配位 ECR プラズマにおけるヘリウム原子複数発光線の偏光変動分光, Plasma2017 (2017).

東 孝紀, ECR プラズマ中ヘリウム原子発光線の時間分解偏光分光計測, 2016年度日本物理学会秋季大会 (2016).

T. Teramoto, Development of a polarization-modulation spectroscopy system for the temporally resolved measurement of polarization in plasma emission, 8th Korea-Japan Seminar on Advanced Diagnostics for Steady-State Fusion Plasmas (2016).

T. Shikama, Spectroscopy, 4th A3 Foresight Summer School and Workshop on Spherical Torus (2016).

四竈 泰一, ヘリウム原子発光線の偏光変動分光計測, 日本物理学会第71回年次大会 (2016).

〔その他〕

ホームページ等

<http://oel.me.kyoto-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

四竈 泰一 (SHIKAMA, Taiichi)

京都大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 80456152