

## 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 6 月 6 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2009～2012

課題番号：21340174

研究課題名（和文）ドップラーフリー分光計測に基づくエルゴディック層内粒子輸送の研究

研究課題名（英文）Study of particle transport in the ergodic layer based on the Doppler-free spectroscopy

研究代表者

後藤 基志 (GOTO MOTOSHI)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授

研究者番号：00290916

研究成果の概要（和文）：核融合プラズマにおける粒子輸送現象の理解において重要な水素原子電離位置の測定を目的として、半導体レーザーを用いた吸収分光計測の手法により水素原子のスペクトル線を詳細に計測する手法を開発した。発光観測では実現し得ない超高波長分解計測を比較的簡素なシステムで可能とした。スペクトルに含まれるテール成分や異常クロスオーバー信号など、プラズマ中粒子の運動量緩和機構の解明に繋がると期待される現象が観測された。

研究成果の概要（英文）：We have developed the technique of absorption spectroscopy for a hydrogen atom line with diode laser aiming at determination of the ionization location of hydrogen atoms in fusion plasma. An ultra-high wavelength resolution that is never available with usual emission spectroscopy technique has been realized with a relatively simple measurement system. Furthermore, we have observed several interesting phenomena like unexpected large tail components and anomalous crossover signals that could be related to the momentum relaxation mechanism of particles in plasma.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	5,000,000	1,500,000	6,500,000
2010年度	3,200,000	960,000	4,160,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
2012年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
総計	10,000,000	3,000,000	13,000,000

研究分野：プラズマ分光学

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：ドップラーフリー分光，半導体レーザー，水素原子，ゼーマン効果

## 1. 研究開始当初の背景

LHD プラズマは最外殻磁気面の外側に、エルゴディック層と呼ばれる、磁気面は形成されていないが磁力線のダイバータプレートへの接続長が長く、比較的高い圧力のプラ

ズマを維持している領域が存在する。トムソン散乱計測等によりエルゴディック層内では電子密度が勾配を持つことが知られており、また一方で、ゼーマン効果を用いたヘリウム原子および水素原子の発光位置計測により、主な原子発光はエルゴディック層外側

境界付近に位置していることが明らかとなっている。原子の発光強度は電離レートによく対応しているため、この結果はプラズマへの粒子供給源がエルゴディック層外側に位置することを示している。

これが正しいとすれば、電離により発生した荷電粒子は磁場に補足され、ただちにダイバータ部へと導かれるため、エルゴディック層内部ではプラズマへの粒子供給が行われず、電子密度勾配は維持されないはずである。しかしながら上の結果は原子の代表的な電離位置を示しているにすぎず、一部の原子はエルゴディック層深くまで侵入し、それがプラズマへの粒子供給源になっていると考えられる。

そのような電離位置の空間的広がりやゼーマン分裂スペクトルに反映されるはずであるが、LHDでのH $\alpha$ 線計測ではドップラー広がりが大きく、ゼーマン分裂スペクトルの観測が困難である。何らかの方法でドップラー広がりを抑制し、詳細なゼーマン分裂スペクトルを観測することができれば、その解析から粒子供給レートの空間的広がりを求めることが可能となり、エルゴディック層内の粒子輸送機構を解明するための大きな手がかりとなる。

## 2. 研究の目的

本研究では、レーザー吸収分光の手法のひとつであるドップラーフリー分光計測を用いて水素原子 H $\alpha$  線のゼーマン分裂スペクトルを詳細に計測し、その結果得られる粒子供給レートから、エルゴディック層内の粒子輸送現象の特性を理解することを目的とする。

(1) 最初に、ドップラーフリー分光によるゼーマンスpektrum計測の有効性を実証する。H $\alpha$ 線は十分な強さの磁場環境下ではゼーマン効果によりひとつの $\pi$ 成分と $\sigma$ 成分に対して対称にシフトするふたつの $\sigma$ 成分とに分裂する。 $\sigma$ 成分のシフト量はほぼ磁場強度に比例する。原子の存在領域がプラズマの径方向に空間的広がりを持つ場合、発光位置によって磁場強度がわずかに異なるため、シフト量が連続に変化する $\sigma$ 成分を同時に観測することとなり、ゼーマン分裂スペクトルの $\sigma$ 成分のみが広がりを持つ。本研究はこのようなゼーマン効果の特性を利用するが、計測対象の線広がりや通常の発光線計測ではドップラー広がりによって隠れて観測されないため、ドップラーフリー分光の技術を利用してゼーマン効果による線広がりのみを検出する。

(2) ドップラーフリー分光により得られた $\sigma$ 成分プロファイルから原子密度の磁場強度に対する分布が得られ、その結果を空間的広がりやに焼き直す。線強度は容易に電離レートに変換できるため、最終的にエルゴディック層内の粒子供給レートの空間的広がりが得られる。得られた粒子供給レートとトムソン散乱計測等による電子密度分布とから、エルゴディック層内の粒子拡散係数を導出する。

LHDでは標準的配位でもっともエルゴディック層が薄く、磁気軸を外側へシフトさせると磁気面が形成される領域のプラズマ体積が減少しエルゴディック層が広がる。本研究の最終的な目的は、異なる磁場配位のプラズマに対して本計測を適用し、エルゴディック層の厚さと粒子拡散係数の関係を明らかにし、エルゴディック層内の粒子輸送機構を解明することである。

## 3. 研究の方法

(1) 名古屋大学の直線型プラズマ発生装置において、水素原子 H $\alpha$  線を対象としたドップラーフリー分光計測法の基礎開発を行う。微小なゼーマン分裂を呈する程度の磁場強度で計測を行い、通常の発光線の計測ではドップラー広がりのため観測が困難な微細構造各成分の分離が検出できる波長分解能の実現を目標とする。

(2) 基礎開発と平行して、LHD実験中には計測システムをLHDへ移設し計測を行う。ドップラー広がりやのため発光線の計測では観測が困難な H $\alpha$  線のゼーマン分裂スペクトルを測定し、磁場閉じ込めプラズマに対するドップラーフリー分光計測の有効性を実証する。その後、吸収線のドップラーシフト量の精密測定、およびそれに起因する検出効率低下に対応するため2波長のレーザー光によるドップラーフリー分光計測システムを開発し、LHDにおいて計測を行う。計測されたゼーマン分裂スペクトルから中性粒子の侵入長を求め、電子密度分布との比較からエルゴディック層内の粒子拡散係数を求める。磁場配位の変更によりエルゴディック層の厚さを変化させ、導出されたパラメータとの関連性を明らかにする。とくに、内部拡散障壁 (IDB) を伴う高密度放電において IDB の出現とエルゴディック層内粒子輸送機構の特性との関係を明らかにする。

## 4. 研究成果

(1) 基礎開発で利用した飽和吸収分光計測装置を図1に示す。飽和吸収分光計測システム

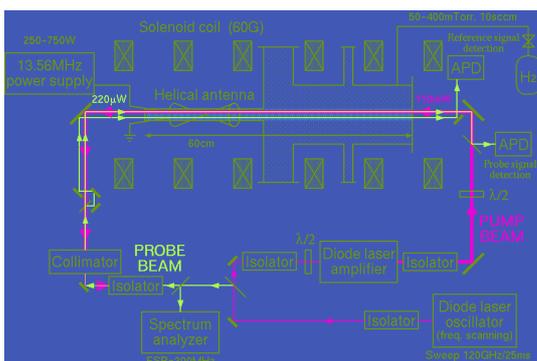


図1：基礎開発で利用した飽和吸収分光計測装置。

の開発は、一様磁場を有する直線型プラズマ発生装置を用いて実施した。6枚のコイルの内部に円筒型の真空容器が設置されており、その一端には石英製の放電管が取り付けられている。石英管の周囲にはヘリカル型の高周波アンテナが設置されており、それに13.56 MHzの高周波電力を印加することによりプラズマが生成される。この装置はヘリコン波プラズマ源と呼ばれるプラズマ生成装置であり、高密度モードで放電させると $10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 近くの電子密度を有する水素プラズマが生成できるが、本研究では主として低密度モードの放電を用いており、電子密度は $10^{11} \text{ cm}^{-3}$ のオーダーである。水素原子の $H\alpha$ 線の下準位は、多くのレーザー吸収分光法の対象となる基底状態および準安定状態に比べて大きな緩和周波数を有する（下準位のひとつである $2s$ 状態は準安定状態だが電子衝突による $2p$ 状態への移行の緩和周波数が大きい）ので、飽和吸収スペクトルを得るには強い波長可変レーザーを光源に用いる必要があることがわかった。図1のシステムでは、波長可変半導体レーザー発振器（米国 New Focus 社製）の出力を半導体レーザー増幅器（ドイツ TOPTICA 社製）で増幅することにより、半導体レーザー増幅器から約200 mWの大出力波長可変レーザー光を得て、それをプローブ光として用いている。半導体レーザー発振器の出力の一部は、増幅器入射する前にビームスプリッターにより取り出され、さらにその一部が波長計測装置（波長計およびスペクトルアナライザー）に入力され、残りはプローブ光として使用される。プローブ光とポンプ光を、プラズマ発生装置の軸方向から、互いに対向する向きにプラズマに入射した。プローブ光の光路は長いので、伝搬中のレーザービームの発散を補正するため、ビームコリメータを用いた。プローブ光は二つの光路に分岐されており、その一方はポンプ光と完全に重

なる光軸でプラズマに入射し、他方はポンプ光と重ならない光軸でプラズマに入射した。以下ではポンプ光と重ならないプローブ光を参照光と呼ぶことにする。プローブ光と参照光の強度は、それぞれアバランシェフォトダイオードで検出した。

(2) 上で述べたとおり、本研究で導入・調整した半導体レーザー装置により、出力200 mWの波長可変・単一モード発振のレーザー出力が得られた。あとで示すように、この出力は水素原子の $H\alpha$ 線において飽和吸収スペクトルを得るのに十分な出力である。レーザーシステムの設置に必要な面積は、波長計およびスペクトルアナライザーなどの光計測装置を含んで $0.5 \times 0.5 \text{ m}^2$ 程度であり、極めてコンパクトな装置である。

LHDへの適用を考えた場合には、出力の他に波長掃引性能が重要である。これは、LHD実験では、単一ショットの放電においてプラズマパラメータが一定とみなせる時間のうちにレーザー波長を必要な波長帯において掃引する必要があるためである。図2は本研究で導入した半導体レーザー装置で実現可能な波長掃引幅と掃引に要する時間の関係を表している。本装置では100 GHzを超える

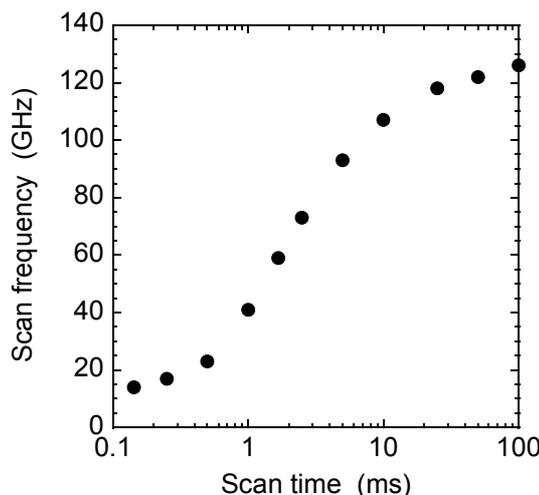


図2：レーザー装置の波長掃引可能幅と波長掃引に要する時間との関係。

波長（周波数）を10 msの間に掃引できる。従来の半導体レーザーの波長掃引可能幅が20 GHz未満であったことを考えると、図2は半導体レーザーの波長掃引性能としては極めて高い性能である。

(3) 図3は、ポンプ光と重ねあわされていない参照光の吸収スペクトルをあらわしている。図の縦軸は吸収係数 $\alpha$ と吸収長 $l$ の積であり、 $\alpha l = -\ln(I_t/I_0)$ で与えられる。ただし、 $I_0$ および $I_t$ はそれぞれプラズマに入射するレーザー光の強度およびプラズマを透過したレーザー光の強度である。このときの参

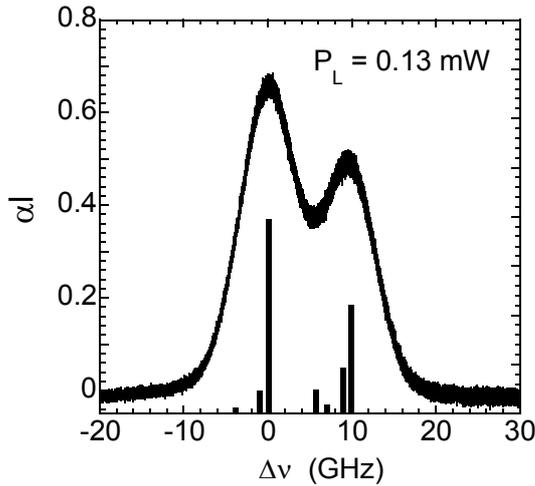


図 3：吸収スペクトルの例．磁場強度 350 G，レーザーパワー 0.13 mW における測定結果．

照光のパワーは  $I_0=0.13$  mW であり，磁場強度は 350 G である．図 3 の横軸の原点は  $2^2P_{3/2}-3^2D_{5/2}$  遷移（波長 656.285 nm）の中心周波数であり，H $\alpha$  線のその他の微細構造線（ゼーマン分裂がない場合）の位置を図中に棒線書き入れている．棒線の高さは，主量子数が 2 の三つのエネルギー準位の占有密度分布が統計重率の比であり，統計重率と遷移確率の積で吸収強度が与えられると仮定したときの吸収の大きさをあらわしている．あとで示すように，350 G の磁場中では H $\alpha$  線の 7 本の微細構成分はゼーマン効果によりさらに多数の遷移線に分裂しているが，図 3 のスペクトル分解能はドップラー広がり制限されており，微細構造線を観測することはできない．

図 4 は，図 3 と同様の実験を様々なレーザー強度で繰り返し， $2^2P_{3/2}-3^2D_{5/2}$  遷移の中心周波数における  $\alpha_l$  をレーザーパワーの関数としてプロットしたものである．レーザーパワ

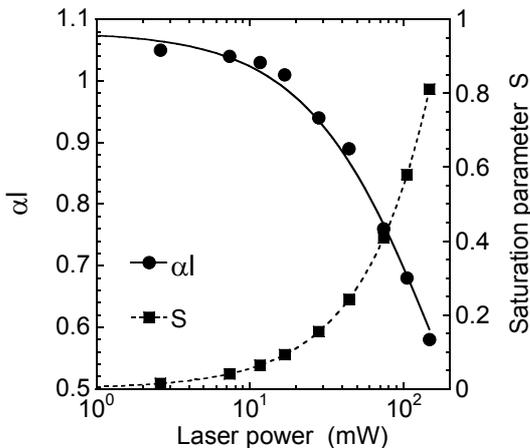


図 4：レーザーパワーと吸収の大きさとの関係（飽和特性）．図中の曲線はレーザー吸収の理論に基づくフィッティング．

ーが大きいくほど吸収が低下することが分かる．レーザー吸収の理論によれば，吸収の飽和は  $\alpha = \alpha_0 / (1+S)$  の関係式で与えられ， $\alpha_0$  は吸収の飽和が無視できるときの吸収係数， $S$  は飽和パラメータである．図 4 の中に書き入れた実線は  $\alpha = \alpha_0 / (1+S)$  の関係を用いた実験結果のフィッティングであり，破線は対応する  $S$  の変化でその大きさは右側の縦軸で示されている．実験結果は吸収理論の式でよくフィッティングでき，本研究で整備したレーザー装置で得られる最大レーザーパワーでは吸収パラメータが 0.8 程度の吸収の飽和が生じることがわかる．

(4) 図 5 は図 3 とほぼ同じ条件で得られたプローブ光の吸収スペクトルを示している．

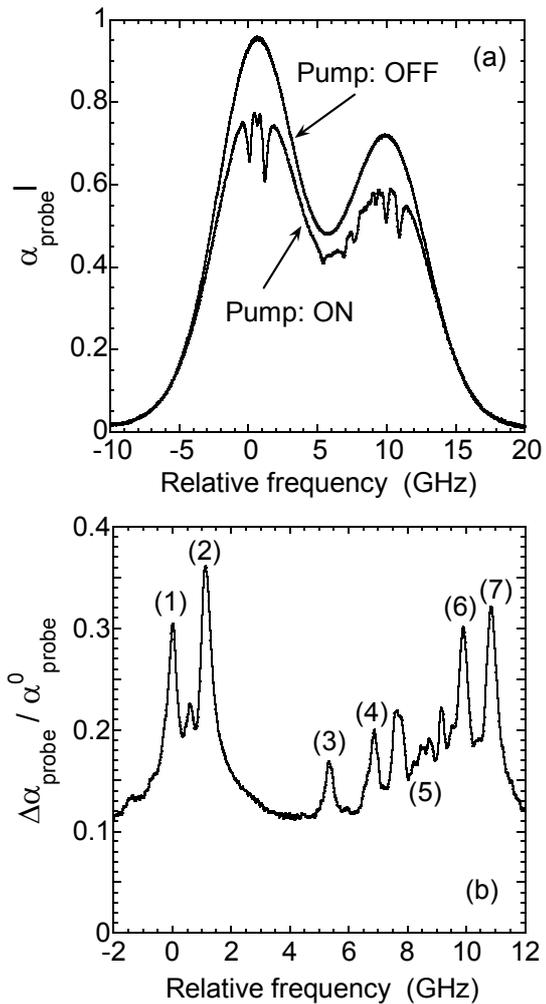


図 5：水素原子 H $\alpha$  線における飽和吸収スペクトルの例．(a) プローブ光の吸収スペクトルをポンプ光の有無で比較した結果，(b) プローブ光の有無の場合の吸収係数の違いをプローブ光がない場合の吸収係数で割ったもの．

図 5(a) のブロードでなめらかな形状を有するスペクトルはポンプ光がないときに観測

された吸収スペクトルであり、参照光の吸収スペクトルと同じである。約 150 mW のポンプ光を入射すると、多数のくぼみを伴うスペクトルが観測された。これらはラムディップと呼ばれるくぼみであり、飽和吸収分光法において吸収線の線中心において生じる。二つのスペクトルの差を計算し、それをポンプ光がないときのスペクトルで割ることにより、 $\Delta\alpha/\alpha$  を縦軸とする図 5(b) に示したスペクトルが得られた。H $\alpha$  線のゼーマン分裂特性に関する量子力学計算の結果と比較することにより、図 5(b) において (1)~(7) のラベルが付されたピークは表 1 に示すように磁場強度 350 G の元でゼーマン分裂した H $\alpha$  線の微細構造線としてアサインメントされた。それぞれの微細構造線の線幅は、半値全幅で 130-500 MHz 程度であり、ドップラー幅をはるかに超える高スペクトル分解能でゼーマン分裂スペクトルが取得可能であることが示された。このように、本研究で開発した飽和吸収分光計測システムを用いることにより、ドップラーフリーの分解能で水素原子のゼーマン分裂スペクトルを観測できることが確認された。

(5) 図 5(b) で示したスペクトルは、ゼーマン分裂した遷移線の波長を読み取るという目的からは十分な性能を有しているが、飽和吸収分光法に関する通常の理論では説明が困難なくつかの異常性を含んでおり、それらは、1) 飽和吸収スペクトルのテール部分におけるスペクトル形状、2) 飽和吸収スペクトルにおいて観測された異常なクロスオーバー信号、および、3) 飽和吸収スペクトルにおいて観測された微細構造線のピーク強度比である。本研究では、これらの異常性を詳しく解析することにより、これまでに知られている水素プラズマ中の素過程のレート係数に疑問を投げかける結果を得ているが、その詳細については紙面の都合により本稿には述べない。飽和吸収スペクトルのテール部にブロードなバイアス成分が重畳される現象が高密度プラズマにおいて顕著になる傾向が見られたことから、LHD プラズマへの適用における困難性となることを懸念し、水素/アルゴン混合ガスを用いた高密度モードのヘリコン波放電 (電子密度  $>10^{13} \text{ cm}^{-3}$ ) において飽和吸収スペクトルを取得したところ、シュタルク広がりによるものと思われるスペクトル分解能の低下は見られたものの、飽和吸収スペクトルの取得は可能であることを確かめた。飽和吸収スペクトルの特性を完璧に理解するためには基礎研究の継続が必要であるものの、ゼーマン分裂した微細構造スペクトルのピーク波長の測定という目的に限れば、図 1 に示した飽和吸収分光計測システムは十分な性能を有しているものと考えられる。

(6) 飽和吸収分光法のスペクトルを観測するためには、通常の単純吸収分光法の配置においてレーザー光の吸収が観測されることが前提である。LHD 装置における飽和吸収分光法の実現可能性をより具体的に検証するために、LHD 装置におけるレーザー吸収分光計測を実施した。この実験では、レーザー装置および検出器類を計測器室に設置し、LHD 装置との間の光伝送は光ファイバーを用いて実現した。光学ポートの配置、および、LHD プラズマを透過したレーザー光の強度をその他のプラズマパラメータとともに図 6 に示した。このショットはガスパフを施した高密度

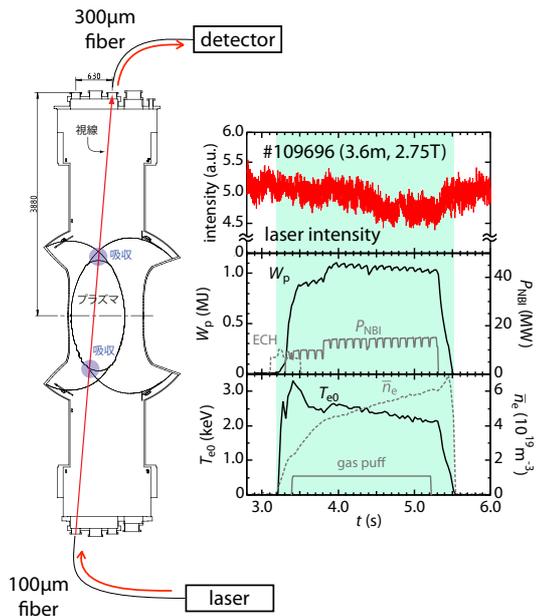


図 6 : LHD における単純配置の吸収分光計測で使用した光学ポートの配置、および、得られた吸収信号の例。

度の放電であり、この種の放電においてのみ LHD においてレーザー光の吸収が観測された。図 6 に示した光学ポートを用いるという制限の範囲内では、観測可能なレベルのレーザー光の吸収が得られるのは特定の放電条件に限られることがわかった。

従って、当初計画していた LHD プラズマの粒子輸送研究を期間内に十分行うことができなかったが、ロックイン検出等高いシグナル対ノイズ比が得られる高感度計測を実施することによりドップラーフリー分光計測を実現する可能性を示すことができた。

## 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 5 件)

① M. Goto, K. Sawada, K. Fujii, M. Hasuo,

S. Morita, "Evaluation of particle source rate and its influence on particle transport in fusion plasma", J. Phys.: Conf. Ser., 査読有, Vol. 397, (2012), 012023-1-012023-6

② R. Asakawa, M. Goto, K. Sasaki, "Characteristics of saturation spectroscopy at the Balmer- $\alpha$  line of atomic hydrogen in a linear magnetized plasma source", Journal of Instrumentation, 査読有, Vol. 7, (2012), C01018-1-11

③ M. Goto, K. Sawada, K. Fujii, M. Hasuo, S. Morita, "Evaluation of hydrogen atom density in the plasma core region based on the Balmer- $\alpha$  line profile", Nuclear Fusion, 査読有, Vol. 51, (2011), 023005-1-7

④ M. Goto, S. Morita, "Self-reversal in hydrogen Lyman- $\alpha$  line profile", Plasma and Fusion Research, 査読有, Vol. 5, (2010), S2089-1-S2089-4

⑤ M. Goto, S. Morita, H. Y. Zhou, C. F. Dong, LHD experiment group, "Passive spectroscopy in visible, VUV, and x-ray ranges for LHD diagnostics", Fusion Science and Technology, 査読有, Vol. 58, (2010), 394-411

[学会発表] (計 20 件)

① S. Nishiyama, M. Goto, K. Sasaki, "Homogeneous Line Width Measurement of Absorption Spectrum of Metastable Argon by Saturation Spectroscopy", 30th Symposium on Plasma Processing, 2013 年 01 月 21 日~2013 年 01 月 23 日, アクトシティ浜松・研修交流センター

② S. Nishiyama, M. Goto, K. Sasaki, "Fine structure of Balmer- $\alpha$  line of atomic hydrogen measured by saturation spectroscopy", Gaseous Electronics Conference, 2012 年 10 月 20 日~2012 年 10 月 26 日, The University of Texas at Austin

③ M. Goto, K. Sawada, K. Fujii, M. Hasuo, S. Morita, "Evaluation of particle source rate and its influence on particle transport in fusion plasma", 21st International Conference on Spectral Line Shapes, June 3-9, 2012, St. Petersburg, Russia

④ 佐々木浩一, "Doppler-free spectra of Balmer- $\alpha$  line of atomic hydrogen measured by saturation spectroscopy in a linear magnetized plasma source", 64th Gaseous Electronics Conference, 2011 年 11 月 15 日, Salt Lake City, USA

⑤ 佐々木浩一, "Characteristics of saturation spectroscopy at the Balmer- $\alpha$

line of atomic hydrogen in a linear magnetized plasma source", Laser-Aided Plasma Diagnostics, 2011 年 10 月 12 日, ShineVille Resort, Jeju, Korea

⑥ M. Goto, S. Morita, "Spectroscopic measurements for magnetic confined fusion plasma in LHD" (invited talk), 日本分光学会, 平成 22 年度年次講演会, 2010 年 11 月 18 日-20 日, 京都大学

⑦ M. Goto, K. Sawada, K. Fujii, M. Hasuo, S. Morita, "Evaluation of neutral hydrogen density in the plasma core region based on the Balmer- $\alpha$  line profile", 20th International Conference on Spectral Line Shapes, Jun 6 - 11, 2010, St. John's, Canada

⑧ R. Asakawa, M. Goto, K. Sasaki, "Saturation of the Balmer- $\alpha$  line of atomic hydrogen in diode laser absorption spectroscopy", The 3rd International conference on plasma-nano technology & science, 2010 年 3 月 11 日, 名城大学

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

後藤 基志 (Motoshi Goto)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授

研究者番号: 00290916

### (2) 研究分担者

佐々木 浩一 (Koichi Sasaki)

北海道大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号: 50235248

森田 繁 (Shigeru Morita)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授

研究者番号: 80174423