

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 23 日現在

機関番号：63902

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25800307

研究課題名(和文)光共振器を利用した水素負イオン温度計測法の開発

研究課題名(英文)Development of Negative-Hydrogen-Ion Temperature Measurement with Optical Cavity

研究代表者

中野 治久(Nakano, Haruhisa)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教

研究者番号：90442524

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：水素負イオンとは水素原子に1つ電子が多くついたイオンである。水素負イオンを粒子ビームとして用いる水素負イオン源が核融合炉の加熱装置の一つ中性粒子ビーム入射装置NBIに用いられている。NBIの更なる高性能化には水素負イオン源の高性能化が重要な開発要素の一つである。本研究において、水素負イオン源の高性能化に寄与する基礎研究に必要な水素負イオン温度を、光共振器を用いた方法で計測する手法を開発に成功した。既存の光共振器を用いた水素負イオン密度計測法を応用した物であり、水素負イオン密度と温度を同時計測可能となった。

研究成果の概要(英文)：Negative hydrogen ion has one more electron than hydrogen atom. Neutral beam injector which is one of the powerful heating devices for fusion reactor include a negative hydrogen ion source which generates negative hydrogen ion beam. To enhance the NBI performance, one of the important parts is improvement of the negative hydrogen ion source performance. Basic study contributed to it needs many physical values including negative hydrogen ion temperature. In this research, diagnostics of the negative hydrogen ion temperature by using an optical cavity was successfully developed by applying an existing negative hydrogen ion density measurement. As a result, a developed instrument can measure negative hydrogen ion density and temperature, simultaneously.

研究分野：プラズマ計測

キーワード：水素負イオン温度 水素負イオン密度 Cavity Ringdown Method レーザー計測 イオン源 中性粒子ビーム 光脱離反応

1. 研究開始当初の背景

水素負イオン (H^-) とは水素原子に電子がもう1つ付着した負に帯電したイオンである。この H^- ビームを発生する水素負イオン源は、核融合分野において中性粒子ビーム入射装置 (NBI) に用いられている。NBI の水素負イオン源 (図1) では、プラズマ生成部にセシウム (Cs) を添加し、 H^- ビームの大電流化を実現している。この大電流化は、プラズマ引出界面の電極 (Plasma Grid electrode (PG)) 表面に付着した Cs の表面効果により、PG 表面に到達した水素原子 (H^0) や水素正イオンから H^- が生成され、それがビームとして引き出されるためだと考えられている。しかし、この過程を説明する粒子ダイナミクスは十分に理解されていない。この粒子ダイナミクスに関して、理論やシミュレーション、実験による研究が行われている。実験研究においては、 H^- の生成・引き出し領域となる PG 近傍の計測が重要となる。同領域における重要なパラメータとして H^- の密度と温度がある。 H^- 密度は、Cavity RingDown 法 (CRD 法) によって計測されている [5. [学会発表] ⑤]。一方、本研究で対象とする H^- 温度は、Cs 添加下の水素負イオン源において、十分な精度を持って計測された例はなかった。

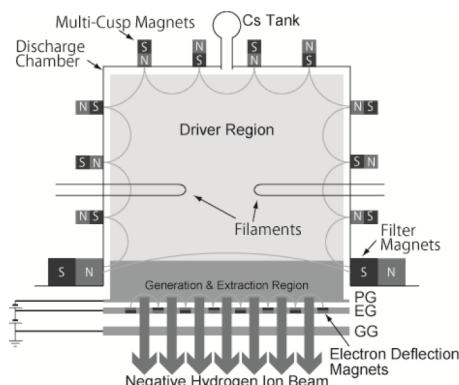


図1. セシウム添加型水素負イオン源 (アーク放電方式)

2. 研究の目的

CRD 法は光共振器を応用したレーザー吸収分光法である。核融合科学研究所の水素負イオン源に構築されている CRD 法による H^- 密度計測システムを図2に示す。ここでは、水素負イオン源プラズマの両端に設置した光共振器用の高反射率ミラーの一方から、YAGレーザー (波長 1064 nm) のパルス光を入射する。パルス光は光共振器内を往復しながら、徐々に両端のミラーから透過するため、共振器内に何も無い場合においても、もう一方のミラーからの透過光強度は減衰波形を示す。この波長のレーザー光は H^- の電子を光脱離させるので、 H^- がある場合は減衰の時定数が短くなる。両者の減衰の時定数を比較することで H^- 密度の絶対値を計測している。

CRD 法はレーザー吸収分光法の一種であるので、通常、吸収の飽和に注意する必要がある。しかし、 H^- 密度計測においては光脱離

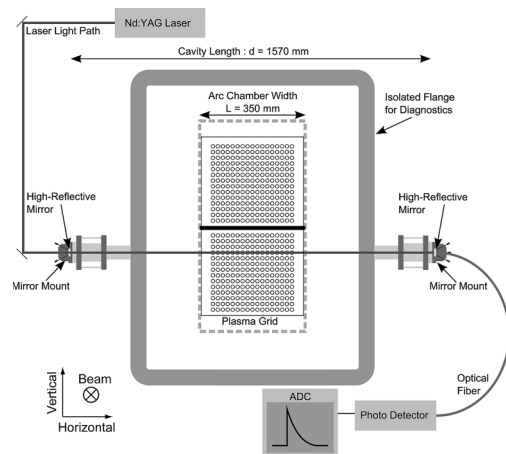


図2. CRD 法による H^- 密度計測システム。

反応を吸収反応とするため、吸収の飽和がない。ただし、レーザー光が共振器内で往復している間、光路上の密度変化がないと見なせなければならない。密度変化がないと見なせるには、①共振器に導入するレーザー強度が十分に小さい(光子数が十分に少ない)、もしくは② H^- の温度が十分に高くレーザー光路への熱拡散が十分大きい事が必要である (図3)。このことは、透過光の減衰の時定数が H^- 密度に加えて共振器内に導入するレーザー光強度、熱拡散、即ち H^- 温度が依存関係にある事を意味する。この依存関係を利用し、既存のシステムを拡張し、 H^- 密度、共振器内に導入するレーザー光強度および透過光の減衰の時定数から H^- 温度計測をすることを目的とする。

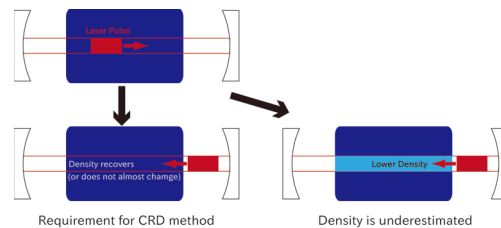


図3. CRD による水素負イオン密度の条件。

3. 研究の方法

本研究は、Cs 添加型水素負イオン源の PG 近傍の粒子ダイナミクスを解明するための手段として H^- 温度計測法を確立することを目的としている。このため、NBI 実規模イオン源により近い規模と性能を持つイオン源を用いる事により、研究成果の波及効果が大きくなる。そこで本研究では、世界的に高性能な核融合科学研究所の NBI 用水素負イオン源と同等の規模および性能を持つ開発用大型水素負イオン源 (アーク放電型) を用いる。同イオン源は開発用であるため実機に比べて運転の自由度が高く、また計測機器 (既存の CRD 法による H^- 密度計測システムやプローブ計測器等) が充実しており、本研究に最適のイオン源である。

水素原子 H^0 は表面生成 H^- の親粒子の一つであり、水素原子温度は、 H^- 温度を見積もる上で指標となる。水素原子温度はレーザー吸

収分光法により計測する。ここで計測された水素原子温度を元に、水素負イオン温度を仮定し、水素負イオン温度計測が評価可能な装置設計を行う。この設計を元に、開発用水素負イオン源に装置を設置する。計測感度に影響するレーザー強度依存性を取得し、実際に必要な入射レーザー強度を決定する。これらを元に、検出信号と計算結果を比較し、水素負イオン温度を評価する。

4. 研究成果

図 4 に水素バルマーアルファスペクトル線を利用したレーザー吸収分光法による水素原子温度の計測結果を示す。水素原子温度はイオン源プラズマへの投入電力によって増加するが、0.2 eV ~ 0.4 eV であることがわかった[5. [雑誌論文] ①、[学会発表] ③-④]。

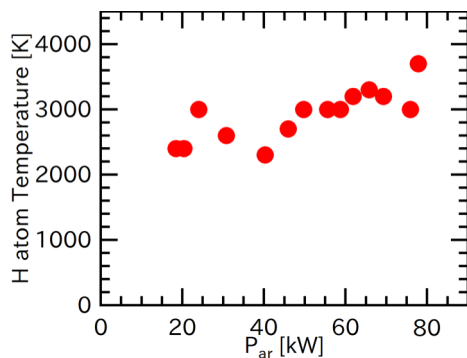


図 3. 水素負イオン温度の投入アーク電力依存性。

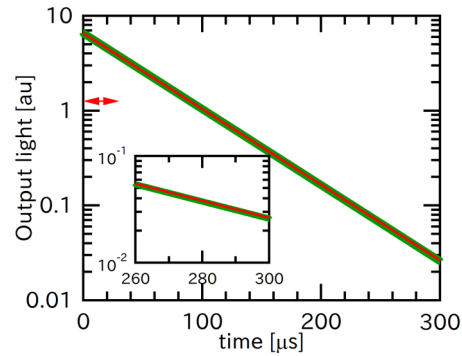
CRD 法を応用した光共振器を利用した水素負イオン温度計測法では、水素負イオン温度が高いと、熱拡散によって共振器内のレーザー柱内へ水素負イオンの回復時間が早くなるため、計測が難しくなる。そこで、計測システム設計においては、水素負イオン温度は親粒子のひとつである H^0 の温度を反映しつつ、かつ生成と放出時の不確定性を考慮し、~ 0.5 eV と仮定する。

図 4 に、CRD による通常の H 密度計測に用いているレーザー強度よりも 10 倍程度大きい強度 (50 mJ) のレーザーを入射した場合の減衰波形の計算結果を示す。水素負イオン密度は $3 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ としている。緑線は計算された透過光強度 (減衰信号) である。赤線は緑線を 30 us までで指数関数フィットしたものであり、信号強度が 2 桁小さくなる 300 us まで緑線と一致している。緑線の減衰信号から得られる水素負イオン密度は光共振器内のレーザー強度が大きい初期の時間から 300 us まで変化がない。図 5 に図 4 の 100 倍の強度 (5 J) のレーザーを入射した場合の計算結果を示す。30 us までで緑線をフィットした赤線が 300 us では大きくずれていることがわかる。密度は、初期の時間で大きく減少し、その後、光共振器内のレーザー強度が減少するとともに元の密度 $3 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ まで回復する。これらの結果から、水素負イオン温度計測には数 J の入射レーザーパルスエネルギーが必要

であることがわかった。

既存の最大レーザーパルスエネルギーは

(a)



(b)

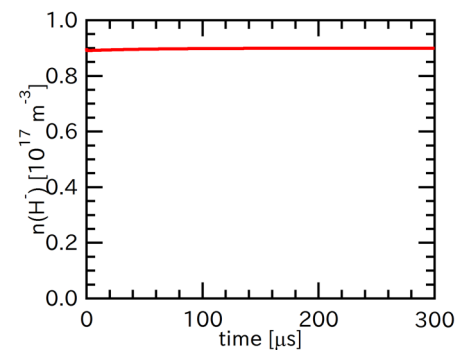
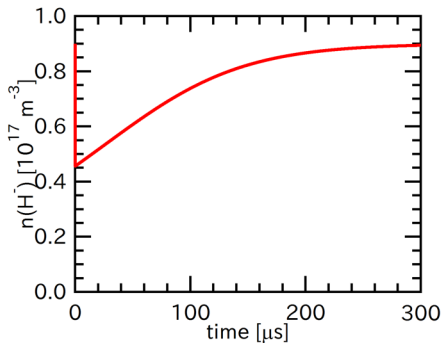


図 4. (a) 通常使用しているレーザー強度の~10 倍 (50 mJ) での減衰波形 (緑線) とフィッティング線 (赤線)。 (b) この時の密度の時間変化。

(a)



(b)

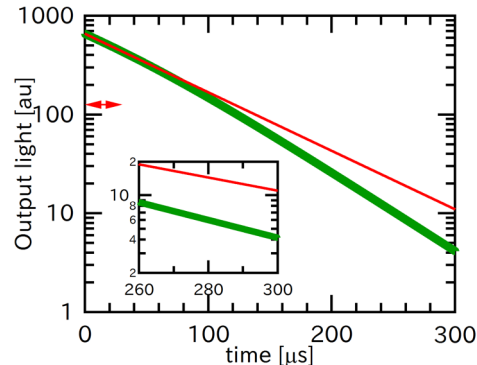
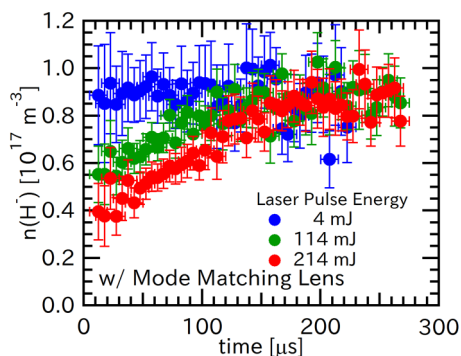


図 5. (a) 図 4 の 100 倍 (5 J) での減衰波形 (緑線) とフィッティング線 (赤線)。 (b) この時の密度の時間変化。

0.55 J (仕様値) であり、十分なレーザー強度ではなかった。そこで、入射レーザー光学系に光共振器に合わせたレンズ光学系を導入することで、出力信号を ~ 10 倍、すなわち、光共振器内に導入されるレーザー強度を ~ 10 倍にすることが可能となった。このシステムを用いて、Cs 未添加時の実験で実際に得られた結果を図 6 に示す[5. [学会発表] ①-②]。入射レーザーパルスエネルギーが十分小さい場合は、計測時間中、一定密度であるのに対し、同エネルギーを大きくすることによって、初期の密度の減少し、時間経過（光共振器内のレーザー強度が減少する）とともに、密度が回復し、一定値となった。この結果は、図 5 で示したものと定性的に一致している。実験結果に対して、既知の水素負イオン密度とレーザー強度を用いて、水素負イオン温度を評価すると、 ~ 0.1 eV となった。Cs 未添加下で水素負イオン温度を評価できる静電プローブ利用光脱離法を応用した計測法で得られた値も ~ 0.1 eV であり、本研究で開発した水素負イオン温度計測法の値と一致した。本研究で開発した光共振器を利用した水素負イオン温度計測法はレーザー計測法であり、構造物をプラズマ中に挿入しないために Cs の影響を受けない。今後、この手法を用いて、Cs 添加下の水素負イオン温度を計測するとともに、PG 近傍の粒子ダイナミクスを解明に向けて研究を進めていく。

5. 主な発表論文等

(a)



(b)

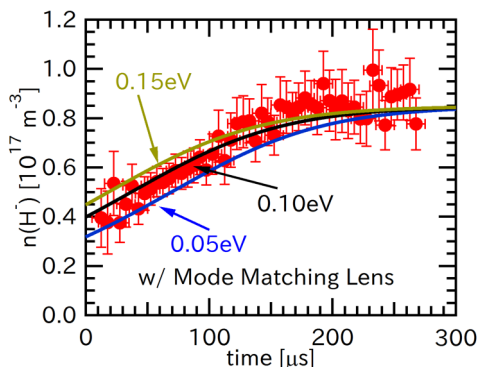


図 6. (a) 大強度レーザー入射時の水素負イオン密度評価値の時間変化。(b) 水素負イオン温度の評価。

(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 H. Nakano 他 11 名 (1 番目), Hydrogen Atom Temperature Measured with Wavelength-Modulated Laser Absorption Spectroscopy in Large Scale Filament Arc Negative Hydrogen Ion Source, AIP Conference Proceedings, 査読有, Vol. 1655, 2015, p.20018.

[学会発表] (計 5 件)

- ① 中野治久, 他 9 名 (1 番目), 水素負イオン源の引出領域における温度と密度分布, 日本物理学会第 70 回年次大会, 22pBH8, 口頭発表, 2015 年 3 月 21 日 - 24 日, 早稲田大学早稲田キャンパス, 東京
- ② Haruhisa Nakano, Consideration of Negative Hydrogen Ion Temperature Measurement with Cavity Ringdown Method, Plasma Conference 2014, 20PB-120, ポスター発表, 18th - 21th November 2014, TOKI MESSE Niigata Convention Center, Niigata, Japan.
- ③ H. Nakano 他 11 名 (1 番目), Hydrogen Atom Temperature with Wavelength-Modulated Laser Absorption Spectroscopy in Large Scale Filament Arc Negative Hydrogen Ion Source, The 4th International Symposium on Negative Ion Beams and Sources, P2-29, ポスター発表, 6th - 10th October 2014, Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Garching, Germany
- ④ 中野治久 他 15 名 (1 番目), 波長変調レーザー吸収分光法による水素負イオン源内の水素原子温度計測, プラズマ・核融合学会第 30 回年会, 2013 年 12 月 3 日 - 6 日, 東京工業大学岡山キャンパス, 東京
- ⑤ H. Nakano 他 13 名 (1 番目), H⁻ Density Behavior for Positive and Negative Extraction and Bias Voltage, The 15th International Conference of Ion Source, 9th - 13th September 2013, Makuhari Messe International Convention Complex, Chiba, Japan.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中野 治久 (NAKANO Haruhisa)

自然科学研究機構・核融合科学研究所・助教

研究者番号: 90442524