

研究課題：レーザー光脱離およびトムソン散乱法を用いた NBI 用負イオン源内の負イオン分布計測
 研究代表者：富田健太郎（九州大学）
 量研機構担当者：平塚淳一
 研究協力者：柏木美恵子（量研機構）、市川雅浩（量研機構）、小島有志（量研機構）
 研究期間：平成29年度-31年度

「研究目的・意義」

本研究は、負イオン引出し領域の負イオン及びプラズマ密度・温度を計測可能なレーザー散乱(トムソン散乱)計測システムを中性粒子入射装置(NBI)用負イオン源に導入し、既存の負イオン引出し領域のシミュレーションと比較可能な計測データの提供を目指している。最終的には、負イオン引出し物理機構の理解を深め、負イオン源の設計手法を高精度化することを目的として研究を進めている。

「研究成果と進捗状況」

初年度(H. 29年度)は計測システムの仕様決定及び構築、感度評価を行った。2年目は、負イオン源チャンバー内からのトムソン散乱(Thomson scattering: TS)信号の初検出を行い、チャンバー中心部での電子密度(n_e)・電子温度(T_e)評価を行った。3年目は電極近傍でのTS計測を試みた。以下に詳細を述べる。

(1) 計測システムの仕様決定・構築等(初年度)

図1に本試験で使用した那珂核融合研究所におけるカマボコ型負イオン源と計測システム概要を示す。本負イオン源チャンバーは長さ340 mm、直径340 mmの半円筒型放電容器であり、その周辺はプラズマ閉じ込めのための永久磁石に覆われている。プラズマ電極に設けられた直径14 mmの孔から負イオンを引出すため、最も興味ある領域はこの孔近傍となる。

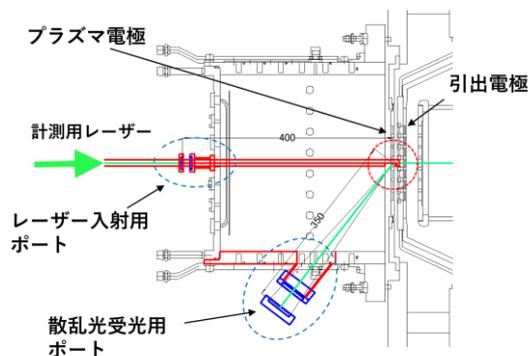


図.1 負イオン源チャンバーと TS 計測配置.

必要な空間分解能(1 mm)に対して、TS計測システムの仕様検討を行った。負イオン密度・ n_e ($<10^{18} \text{ m}^{-3}$)から予想されるTS信号は極めて微弱である。最終的に図1に示すように、チャンバー側面から計測用レーザー(YAGレーザー第2高調波、波長532 nm、最大エネルギー300 mJ/pulse、繰り返し周波数10 Hz)を入射し、斜め下方から散乱光を受光する配置とした。受光ポートは磁場配位への影響を最小限とするため、有効窓径30 mmである。その先の受光レンズ立体角は0.008 srと小さいが、積算計測により信号を補う。電極表面で発生する迷光を十分に除去するため、散乱光計測には、差分散型3回折格子分光器(トリプル分光器)を用いた。トリプル分光器の波長分解能は0.2 nm程度であり、 $T_e > 0.1 \text{ eV}$ のTSスペクトルが計測可能な仕様とした。検出器にICCDカメラを用いるため、全波長および一次元空間分布の同時取得が可能である。

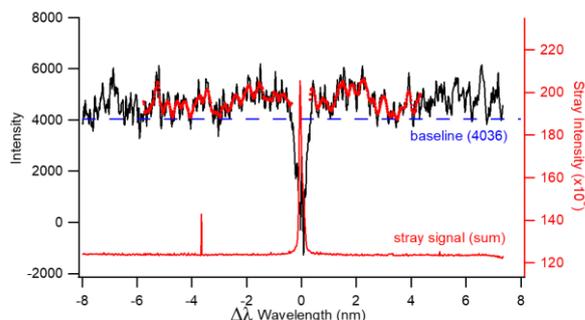


図 2. トムソン散乱信号 1st signal.

(2) チャンバー中心部でのTS計測(2年目)

まずは、プラズマ電極近傍よりも n_e が高く、迷光の少ないチャンバー中心位置でのTS計測を行った。計測はアーク電力10kWの条件で行った。一度のプラズマ生成運転は10秒間であり、TS計測の積算は100回となる。計測を20回繰り返し、合計2000ショット分の積算信号を評価した。図2にその結果を示す。レーザー波長付近($\Delta\lambda=0$ がレーザー波長532 nmに対応)に、わずかにTS信号と思われる信号が得られたが、信号対ノイズ(S/N)比は想定していたよりも低いものであった。そ

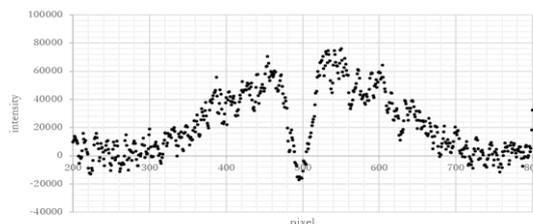


図 3. 自発光ノイズ対策後の TS 信号.

の後の調査の結果、アークフィラメント部からの連続発光スペクトルがS/N悪化の主要因であることがわかった。受光レンズに通じるポートにアパーチャーや、ポート内壁の黒化処理を施すことで、発光ノイズは1桁程度改善されることがわかった。改善後のTS信号を図3に示す。

(3) PG近傍でTS計測(3年目)

前年度(2年目)では、負イオン源チャンパーに対して初めてTS計測を実施し、チャンパー中心部の n_e , T_e を明らかにした。次により低密度かつ迷光が深刻となるプラズマ電極近傍の計測を実施した。一度のTS計測では計測視野がレーザー軸方向に10mm程度に制限されるため、電極表面から20~30mm ($x = 20 \sim 30$ mm)の位置(電極近傍)での計測と、 $x = 10 \sim 20$ mm(電極最近傍)の2種類の光学配置で計測を行った。電極近傍でのTS計測結果を図4(a)に示す。左右方向は波長情報($\Delta\lambda$)、縦方向は空間情報(x)に対応する。積算回数は500である。積算結果を示した図4(b)ではレーザー波長近辺($-0.5\text{nm} < \Delta\lambda < 0.5\text{nm}$)は迷光除去の過程で取り除かれているが、それ以外で明確なTS信号が得られている。図4(c)は4(b)をエネルギー表示したものであり、該当エネルギー範囲(およそ2 eV)でマクスウェル分布であり、絶対値較正により n_e を求めた。電極最近傍の計測

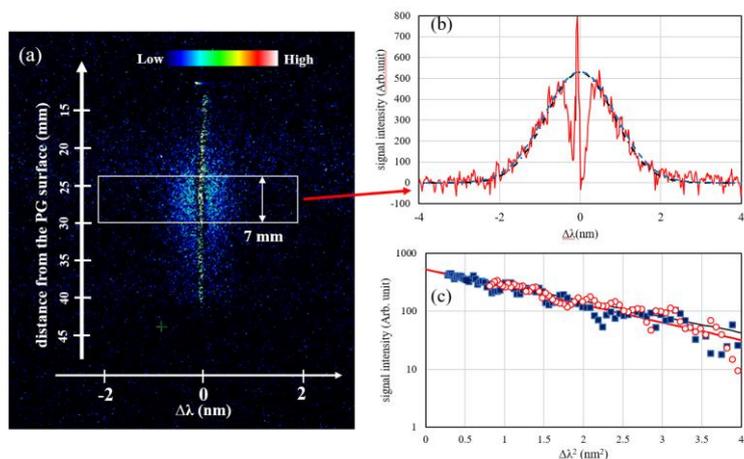


図.4 (a) プラズマ電極近傍での TS 計測結果. (b)空間積算された TS スペクトルとそのフィッティング曲線. (c) (b)のスペクトルの片対数グラフ. ただし横軸は $\Delta\lambda^2$ (nm^2).

ではレーザー波長近辺($-0.5\text{nm} < \Delta\lambda < 0.5\text{nm}$)は迷光除去の過程で取り除かれているが、それ以外で明確なTS信号が得られている。図4(c)は4(b)をエネルギー表示したものであり、該当エネルギー範囲(およそ2 eV)でマクスウェル分布であり、絶対値較正により n_e を求めた。電極最近傍の計測

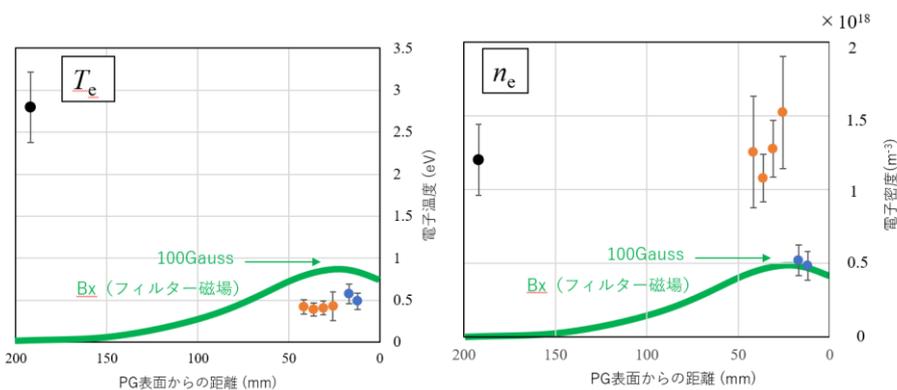


図.5 T_e , n_e の空間分布およびフィルター磁場強度分布.

では、 n_e 低下と迷光だけでなく、自発光ノイズも電極近傍より強く、S/Nは大幅に低下したため、計測ショット数を3000に増やした(30秒運転を10回)。チャンパー中心($x = 192$ mm)、電極近傍・最近傍のすべての結果を図5にまとめる。 T_e については、チャンパー中心部では2.5 eV以上と高かったが、電極近傍・最近傍は0.5 eV程度で推移した。フィルター磁場により、高エネルギー電子が排除された結果だと考えられる。次に n_e は、チャンパー中心部および電極近傍で、 $(1-1.5) \times 10^{18} \text{m}^{-3}$ で推移した。フィルター磁場の増加に伴い T_e は明確に減少したが、 n_e はむしろ、微増する傾向にあった。 n_e は磁場ピークより電極側で急激に低下し、 $20 \text{mm} < x < 10 \text{mm}$ では $0.5 \times 10^{17} \text{m}^{-3}$ 程度となった。 n_e , T_e どちらも磁場フィルターの影響を受けるものの、減少する位置は、両者で異なる結果となった。

本研究により、世界で初めて高密度負イオンビーム用イオン源のプラズマ電極近傍のプラズマに対してTS計測に成功し、PG近傍の負イオン分布及び負イオン引出し面が測定できる見通しが得られた。今後の課題として、PG表面から10 mm以内の計測では、PG表面で発生する迷光が大きく、さらなる迷光低減対策が必要であるが、チャンパー内部にアパーチャーを設置することはできないので、レーザーの入射窓や、ポートの工夫を行うことで、対処する必要がある。一つの目安は、大気圧近辺の窒素のレイリー散乱が、迷光に負けずに観測可能となることである。この対処と発光ノイズ対策を強化することで、高精度なTS計測が可能になる。

本研究により、世界で初めて高密度負イオンビーム用イオン源のプラズマ電極近傍のプラズマに対してTS計測に成功し、PG近傍の負イオン分布及び負イオン引出し面が測定できる見通しが得られた。今後の課題として、PG表面から10 mm以内の計測では、PG表面で発生する迷光が大きく、さらなる迷光低減対策が必要であるが、チャンパー内部にアパーチャーを設置することはできないので、レーザーの入射窓や、ポートの工夫を行うことで、対処する必要がある。一つの目安は、大気圧近辺の窒素のレイリー散乱が、迷光に負けずに観測可能となることである。この対処と発光ノイズ対策を強化することで、高精度なTS計測が可能になる。