

セシウム添加型負イオン源の開発とファーストプラズマ

日大生産工(院) ○稲数拓馬

指導教員 教授 荒巻光利, 助手 波場泰昭
提示されている。第一の機構は、放電プラズマ領域内で生成された負イオン(体積生成)が初段の電極(プラズマ電極)から引き出される。第二の機構は、プラズマ電極表面で生成された負イオン(表面生成)が放電プラズマ領域を經由して引き出される。第三の機構は、表面生成された負イオンがプラズマ電極孔縁部から直接引き出される。これらの異なる生成過程及び引出経路を起源とする負イオンは、異なる速度分布関数を持ってビーム加速電極が成す静電レンズに入射するため、生成される負イオンビームの集束性を必然的に低下させる。従って、ビームの集束性を極限までに向上させるためには、これら3つの引出機構を理解し、制御する必要がある。

1. 背景

セシウム添加型負イオンビームの応用は、半導体加工、ホウ素中性子捕捉療法(BNCT)、高エネルギー粒子加速器、そして核融合プラズマ実験など広がりを見せている。将来の基幹エネルギー源となる核融合発電では海水から採取される重水素と三重水素とを高温(10 keV)かつ高密度(10^{20} m^{-3})状態にするために磁場のかごで核融合プラズマを閉じ込める。プラズマを高温状態にするには、磁場の影響を受けない高エネルギーの中性粒子ビーム入射によって加熱する。中性粒子は静電加速ができないため、前駆体として荷電粒子(正/負イオン)を高エネルギー状態にし、その後中性化を行う。荷電粒子ビームの中性化効率のエネルギー依存性を図1に示す[1]。正イオンは高エネルギー領域(>60keV)において、中性化効率が急落する。一方で、負イオンは、高エネルギー領域でも60%以上の中性化効率が維持される。このことから、核融合プラズマの加熱には負イオンビームが必須である。

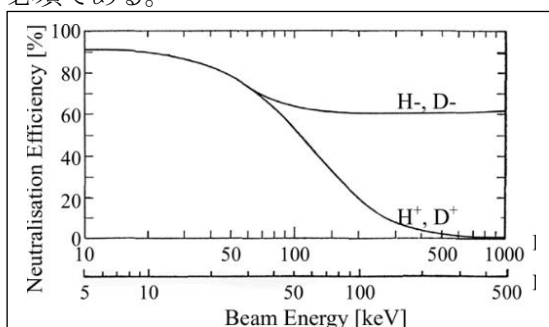


図1 正,負イオン中性化効率のエネルギー依存性

近年、核融合発電の実用化に向けて、負イオンビームの集束性を格段に向上させることが喫緊の課題となっている。国際プロジェクトITER関連の負イオンビーム発散角(14-16mrad)は、仕様の発散角(3-7mrad)に対して3倍程度大きい。負イオンビームは空間的非対称性を有しており[2]、単一のガウス分布関数のみでは十分な集束性の評価をすることはできない。負イオンビームの集束を困難にしている大きな要因の一つは、複雑な負イオンの生成・引出機構であると示唆されている[2]。負イオン源内にセシウムを添加することによって、図3のように、3つの負イオン生成・引出機構が

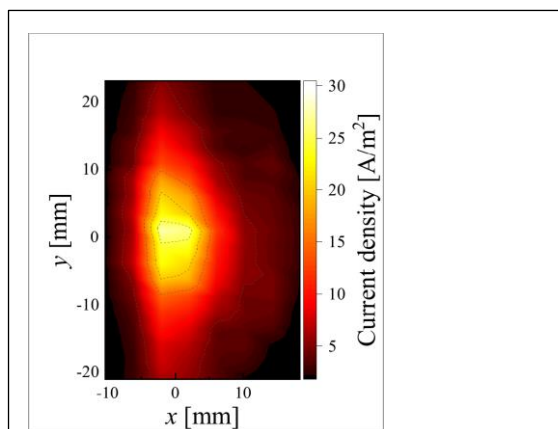


図2 負イオンビームの電流密度分布

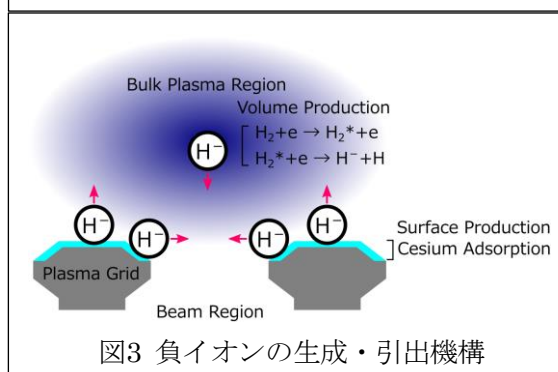


図3 負イオンの生成・引出機構

2. 本研究の目的

本研究では、負イオンビームに内在する複数の速度分布成分の起源を、実験的に明らかにする。この知見に基づき、各速度分布成分の発散角を制御するパラメータを同定する。

3. 測定方法

図4に、負イオンビームの速度分布の計測方法を示す。ピンホールアレイに入射したビームは、多数のビームレットに細分化される。各ピンホールを通過したビームレットは、一定距離 L を移動した後、カプトン箔表面に到達し、照射痕を形成する。ピンホール位置 $(x_{m,n}, y_{m,n})$ に対する照射痕位置 $(X_{m,n}, Y_{m,n})$ を計測すると、ビーム径方向の速度分布は次式で記述される。

$$(\delta_{x_{m,n}}, \delta_{y_{m,n}}) = \left(\frac{X_{m,n} - x_{m,n}}{L}, \frac{Y_{m,n} - y_{m,n}}{L} \right)$$

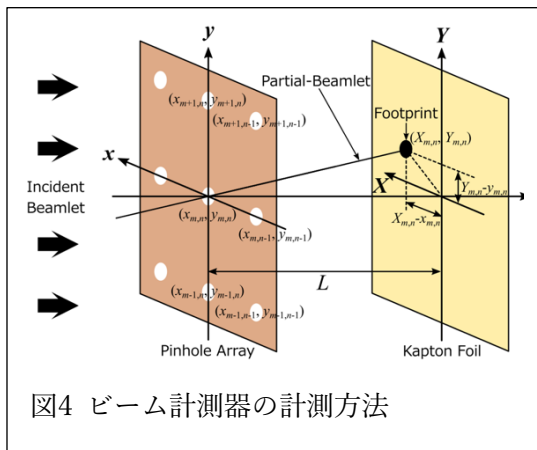


図4 ビーム計測器の計測方法

4. 実験装置

図5に実験装置の全体を示す。実験装置は水素負イオンを生成する負イオン源とビームラインとで構成されている。ターボ分子ポンプ、ロータリーポンプを用いて真空引きを行い、コンダクタンスバルブを用いて真空制御を行う。負イオン源をビーム上流側とすると、ビーム下流側にビーム計測器を挿入する。

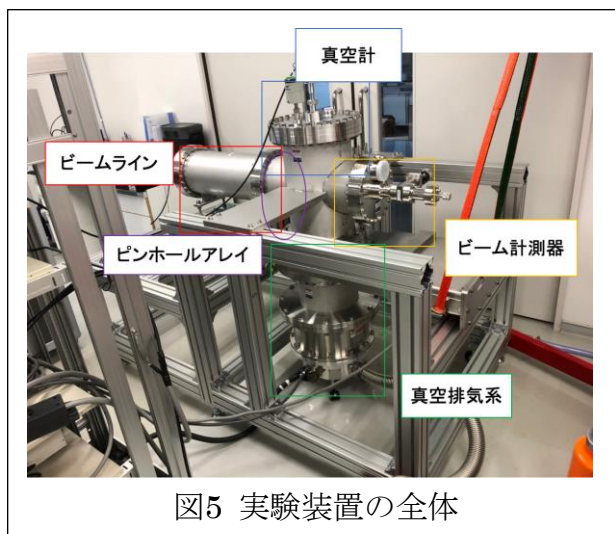


図5 実験装置の全体

5. 今後の展望

プラズマ点火を行い、ついでビーム引き出しを行う。ビーム実験は次のような段階で行う。第一段階はセシウムを添加しない状態でビーム計測を行う。このとき、体積生成を起源とする、負イオンビーム成分の速度分布成分を取得する。第二段階はセシウム添加状態でのビーム計測を行う。表面生成を起源とする負イオンビーム成分の速度分布成分を取得する。第三段階はプラズマ電極の幾何構造を変化させた時のビーム計測を行う。これにより、表面生成され直接引き出された負イオンビーム成分の速度分布成分を取得する。

参考文献

- 1) K. H. Berkner et al Nucl. Fusion **15** 249 (1975)
- 2) Y. Haba et al AIP Adv. **12** 035223 (2022)