

陽子線治療用H⁺イオン源における電子輸送の数値シミュレーション Analysis of Electron Transport in a Positive Ion Source for Proton Beam Therapy

矢口真子¹, 山田翔太¹, 上口長昭², 高橋伸明², 青木康², 畑山明聖¹, 星野一生¹
YAGUCHI Mako¹, YAMADA Shota¹, KAMIGUCHI Nagaaki², TAKAHASHI Nobuaki²,
AOKI Yasushi², HATAYAMA Akiyoshi¹, HOSHINO Kazuo¹

慶大理工¹, 住友重機械工業²
Keio Univ.¹, Sumitomo Heavy Industries, Ltd.²

1. 研究背景・目的

陽子線治療用サイクロトロンではPIG放電型H⁺イオン源が用いられており, 治療の高度化のためにビームの高精度な電流制御が求められている。

本研究の目的は, PIG放電型H⁺イオン源内のプラズマ輸送とビーム電流に与える影響について解析し, ビームの高精度制御に貢献することである。解析対象とするイオン源は円柱軸方向に強磁場がかけられており, 両端面にはカソードが設置されている。よってプラズマの損失は径方向での磁場を横切る拡散が支配的と考えられるが, その過程は明らかではない。イオン源内プラズマ密度は粒子損失過程に強く依存し, また引き出しビーム電流値はイオン源内プラズマ密度に強く依存する。従って, ビーム電流の高精度制御にとってイオン源内の粒子損失過程の理解が必須の課題となる。

2. 方法

本研究では電子輸送解析モデル(KEIO-MARC code^{[1][2]})に拡散モデルを実装し, PIG放電型H⁺イオン源に適用して内部の電子密度 n_e を求めた。KEIO-MARC codeは運動論的粒子輸送コードであり, イオン源3次元実形状, 3次元磁場配位を考慮し, 電子軌道を運動方程式によって追跡する。また衝突過程はモンテカルロ法により考慮する。以上により電子に対するボルツマン方程式を解き, イオン源内の電子エネルギー分布関数(EEDF)や電子密度の3次元空間分布等を求めることができる。考慮できる弾性・非弾性衝突種は水素プラズマについて500種以上になる。

上述した磁場を横切る拡散過程は主に 1)古典的な衝突に起因するいわゆる両極性拡散過程, および 2)揺動損出による異常拡散過程の2つに分類される。1)の両極性拡散係数は, 以下の式(1)で与えられる^[3]。一方, 2)の異常拡散係数については式(2)で与えられる半経験式, いわゆるBohm拡散係数が用いられることが多い^[3]。

$$D_{\text{Ambi}} = 2D_i \quad (1)$$

$$D_{\text{Bohm}} = T_e/16B \quad (2)$$

ここで D_i はイオンの磁場を横切る拡散係数, 電子温度 T_e および磁束密度 B の単位はそれぞれeV, およびTである。

今回の検討では磁場を横切る拡散過程を式(3)に示すランダムウォークモデルを用いて考慮する。

$$\Delta x = \sqrt{2D\Delta t}\xi_x, \Delta y = \sqrt{2D\Delta t}\xi_y \quad (3)$$

$\Delta x, \Delta y$ は時間ステップ Δt あたりの拡散による移動距離を表す。 D は 1)両極性拡散モデルの場合には式(1)を, 2)異常拡散モデルでは式(2)を用いる。 ξ_x, ξ_y は平均0, 分散1の正規乱数を表す。

3. 結果

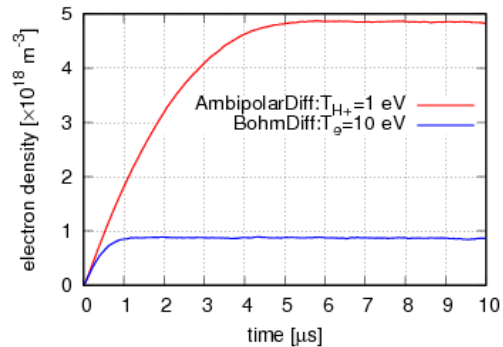


Fig. 1 両極性/ボーム拡散を仮定した n_e の時間発展

Figure 1に両極性拡散およびボーム拡散を仮定したときの n_e の時間発展を示した。少なくとも現在の計算条件では, 異常拡散の場合には n_e が小さくなることが示された。

4. 結論・今後の展望

今回の計算条件においては拡散過程によって n_e に大きな差が現れることが明らかになった。今後はFig. 1の結果と実験結果との比較を試み, 支配的な輸送過程を検討する。具体的にはKEIO-MARC codeで得られるEEDFを用いて計算した反応レートおよび拡散係数を元に, イオン源内のH⁺, H₂⁺イオン, 電子, H, H₂中性粒子に対する0次元レート方程式を解き, 実験で測定可能なH⁺とH₂⁺イオンのビーム構成比との比較などを試みる。

参考文献

- [1] T. Shibata, *et al.*, J, Appl, Phys, **114** 143301 (2013).
- [2] A. Hatayama, *et al.*, New J. Phys., **20** 065001 (2018).
- [3] F. F. Chen, "Introduction to Plasma Physics", Plenum Press, New York (1974).