

# 減速電場を通過する為の入射角度条件についてのメモ

A. Tamii

ver 1.0 05-APR-2005

## 1 序

減速電極が作るポテンシャルギャップをイオンが透過するためには、イオンの運動方向がポテンシャルギャップ面の法線に対して、ある臨界値以下の角度を持つ必要がある。

以下では、簡単なモデルにより、この角度条件について計算する。

## 2 ポテンシャル境界通過臨界角度

図1の様に、質量  $m$  のイオンが通過する領域を領域1と領域2の2つに分け、それぞれの領域内の電位を一様とする。また、領域1,2の境界の電位が変化する領域の幅は十分小さいとして無視する。

イオンは領域1,2でそれぞれ、運動エネルギー  $E$ 、 $E'$  を持つとする。また、それぞれの領域でのイオンの運動量を  $p$ 、 $p'$  とし、ポテンシャル境界面の法線に平行な成分と垂直な成分に運動量を分離して、それぞれ  $\parallel$  と  $\perp$  でラベルする。領域1でのイオンの運動量ベクトルと境界面の法線が成す角度を  $\theta$  とする。

境界面の前後で、境界面の法線に垂直な運動量成分は変化しないので、

$$p_{\perp} = p'_{\perp} \quad (1)$$

イオンがポテンシャル境界を通過する条件は、 $p'_{\perp}$  が実数値を持つこと、即ち、領域2での垂直方向運動エネルギーが全運動エネルギーよりも小さいことである。

$$\frac{(p'_{\perp})^2}{2m} < E' \quad (2)$$

左辺に式(1)を代入して変形すると、

$$\begin{aligned} \frac{(p'_{\perp})^2}{2m} &= \frac{(p_{\perp})^2}{2m} \\ &= \frac{(p \sin \theta)^2}{2m} \\ &= E \sin^2 \theta \end{aligned} \quad (3)$$

式(2)に代入して、下記の様にポテンシャル境界を通過する条件および臨界角度  $\theta_c$  を得る。

$$\theta < \theta_c = \sin^{-1} \sqrt{\frac{E'}{E}} \quad (4)$$

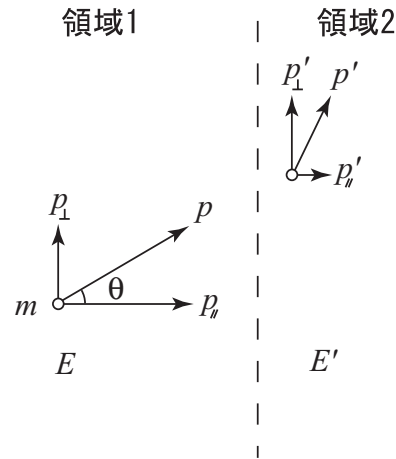


図 1: 減速前後のイオンの諸量。

KEK-JAERI の Charge Breeder を開発しているグループでは、減速後の 1 価イオンのエネルギーを 10 eV、減速前のエネルギーを 12 keV(sudden deceleration の場合) および 2 keV(smooth deceleration の場合) と想定している。[1]

これらの値を代入すると、臨界角度は sudden deceleration の場合で 29 mr、smooth deceleration の場合で 71 mr となる。この値はイオン軌道をトラッキングしたシミュレーション結果の値 (Ref. 1 の図 2 上) と比較して、reasonable と言える。

我々の想定している  ${}^6\text{Li}^{1+}$  イオンの入射エネルギーは 20 keV であり、減速後のイオンエネルギーを KEK-JAERI グループと同じく 10 eV と仮定して sudden deceleration を行う場合を計算すると、臨界角度は 22 mr となる。

### 3 磁場の影響

前節の議論では磁場の影響を考慮していないが、減速ポテンシャル境界付近の磁場がポテンシャル境界面に垂直であり、ポテンシャル境界の厚さが十分薄く境界内での磁場変化が無視できると考えられる場合には、磁場の存在下でも同じ議論が成り立つ。逆に、減速ポテンシャル面の湾曲や、ポテンシャル境界の厚さの影響が問題になる場合には、より詳しいシミュレーションが必要となる。

一方、前節で議論した臨界角度はポテンシャル境界面でのイオン軌道角度であるため、減速部よりも上流でのイオン入射角度を議論するためには、磁場中のイオン運動による軌道角度変化を考慮に入れる必要がある。

イオン軌道上の磁場が強くなるにつれて、イオン軌道角度は大きくなる傾向にある。一般の場合の式を立てることは容易ではないと予想されるが、磁場の変化がサイクロトロン運動の周期に比べて十分遅い場合 (イオンが磁力線に巻き付いて運動していると考えられる範囲内) では、磁力線に対して垂直な方向のイオンの回転のエネルギーが磁場に比例する [2] ことから (以下  $\perp$  は磁力線に対して垂直な方向の成分を表す)、

$$\frac{1}{2}m(v_{\perp})^2 \propto B \quad (5)$$

となり、

$$p_{\perp} \propto \sqrt{B} \quad (6)$$

より、

$$\sin \theta = \frac{p_{\perp}}{p} \propto \sqrt{B} \quad (7)$$

となる。

これより、仮定が成り立つ範囲内において、減速部より上流部では減速部の磁場を基準として、磁場のルートに比例して入射角を抑える必要がある。例えば、減速電極部の磁場が 3T 程度であれば、1.5T 位置での入射角は、減速部の臨界角度の  $1/\sqrt{2}$  程度に抑える必要がある。但し低磁場領域に行くほど仮定が成り立たなくなる。

なお、KEK-JAERI Charge Breeder の減速部の位置は、上流側ミラー磁場の最大磁場位置から 10 mm 上流付近にある。減速電極を上流にずらす場合の主な不具合は減速後のイオンがミラー磁場を越えて ECR プラズマ領域内に入る率が減少することであり、減速電極を下流側にずらす場合の不具合は ECR プラズマが不安定になることにある。

## 4 まとめ

偏極  ${}^6\text{Li}$  イオン源の ECR 入射減速部の設計として、KEK-JAERI の Charge Breeder の減速電極設計 (sudden deceleration) を踏襲する場合には、減速部位置でのイオン角度を 22 mr 以下程度に抑える必要があると考えられる。減速部より上流の低磁場位置ではさらに角度が絞られている必要がある。

さらに定量的な計算には、イオン軌道のシミュレーションが必要と考えられる。

## 参考文献

- [1] M. Oyaizu *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **73**(2002)806.
- [2] V.E. ゴラント他著、田井、下條訳、「プラズマ物理学の基礎」第 2 版、現代工学社、2000、pp. 239。