

# 原子線入射と1価イオン入射の場合のプラズマ中でのトラップ効率

A. Tamii

ver 1.0 10-SEP-2005

## 1 序

偏極  ${}^6\text{Li}^{3+}$  イオン源プロジェクトでは、ECR イオン化器に偏極  ${}^6\text{Li}$  原子もしくは偏極  ${}^6\text{Li}^{1+}$  イオンを入射して、3 価に変換する計画である。この電荷増殖 (Charge Breeding) プロセスの効率を考える場合、入射粒子をプラズマ中にトラップする効率が全体の効率に直接影響する。

このメモでは、原子線入射と1価イオン入射のそれぞれの場合について、入射粒子がプラズマ中にトラップされる割合を簡単なモデルを用いて検討し、比較する。

## 2 原子線入射の場合

### 2.1 入射ビームのパラメータ

リチウムオープンからの入射ビームに関するパラメータとして下記の値を仮定する [1, 2]。

速度:  $v_a = 3.0 \times 10^5 \text{ cm/s}$   
角度広がり:  $\theta_c = \pm 20 \text{ mr}$   
ビーム量:  $I_a = 50 \text{ p}\mu\text{A} = 3.1 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}$

以下の効率の計算に直接影響するのは速度  $v_a$  である。

### 2.2 プラズマ条件の仮定

ECR 内のプラズマの条件として下記の値を仮定する。筑波大学の 14.5GHz ECR イオン源 SHIVA の研究結果を用いている [3]。

バッファガス: Oxygen  
中性ガス密度:  $n_{\text{gas}} = 1.4 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$   
電子密度:  $n_e = 2.2 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$   
電子温度:  $T_e = 580 \text{ eV}$

用いている値は、プロポーザル [4] 時の計算と同じである。

プラズマの大きさ (厚さ) をどうとるべきかについては、不定性がある。ECR レゾナンス領域の大きさをとる場合や、プラズマチェンバー全体の大きさをとる場合 [5] がある。

RCNP で設計している 18GHz SC-ECR のプラズマチェンバーの軸方向長さは 380 mm、最大磁場位置間の距離は 400 mm、ECR レゾナンス領域の長さは 50 mm 程度である。ここでは、中をとって、レゾナンス領域の倍程度の 100 mm = 10 cm を使用することにする。

ECR プラズマ領域厚さ  $L = 10 \text{ cm}$

### 2.3 原子線のトラップ効率

原子線のトラップは、主に電子との衝突により 1 価にイオン化されることにより行なわれると考えられる。原子線の速度は小さいため、生じる 1 価イオンの運動エネルギーは小さく、プラズマ領域内に生じた 1 価イオンはそのままトラップされると期待できる。

プラズマ領域にてイオン化されなかった原子はそのまま通過し、プラズマチェンバーもしくは引き出し電極の壁面に衝突して固着すると考えられる。

電子衝突によるイオン化反応率  $\chi$  は、以下の Voronov による現象論的フィットの式で表される [6]。

$$\chi = \langle \sigma v_e \rangle = A \frac{1 + PU^{1/2}}{X + U} U^K e^{-U} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1} \quad (1)$$

$\sigma$  はイオン化反応断面積、 $v_e$  は電子速度で、 $\langle \rangle$  は電子速度のボルツマン分布による平均操作を意味する。原子の速度は電子速度に比べて充分小さいとして無視している。

$A, P, X, K$  はフィッティングパラメータである。 $U$  は、

$$U \equiv \frac{I_i}{T_e} \quad (2)$$

で定義され、 $I_i$  は原子の電離エネルギー (Li の場合 5.4eV)、 $T_e$  は電子の温度 (eV 単位) である。

フィッティングパラメータ [6]、およびプラズマ条件の電子温度を代入して、

$$\chi = 4.52 \times 10^{-8} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1} \quad (3)$$

を得る。これに電子密度を掛けることにより、イオン化反応周波数  $\nu_a$  は

$$\nu_a = \chi \times n_e = 9.9 \times 10^3 \text{ s}^{-1} \quad (4)$$

となる。イオン化反応に対する原子線の平均自由行程  $\lambda_a$  は、

$$\lambda_a = \frac{v_a}{\nu_a} = 30 \text{ cm} \quad (5)$$

である。

従って、厚さ  $L$  のプラズマを通過している間のイオン化確率  $P_a$  は

$$P_a = 1 - \exp\left(-\frac{L}{\lambda_a}\right) = 28\% \quad (6)$$

となり、今考えている仮定では、この値がそのままトラップ効率となる。

### 3 1価イオン入射の場合

#### 3.1 入射ビームのパラメータ

1価イオンの入射エネルギーに関しては、減速電極の考察において他の研究所の研究結果を基に議論してきた [7]。ここではその議論をもとに、10 eV とする。

$$\text{ビームエネルギー: } K_i = 10 \text{ eV}$$

速度に換算すると、 $1.8 \times 10^6 \text{ cm/s}$  である。

#### 3.2 プラズマ条件の仮定

原子線の場合と同じ条件を仮定する (2.2 節)。

#### 3.3 1価イオンのトラップ効率

1価イオンがトラップされるためには、プラズマ通過中に充分減速される必要がある。この減速過程は、主にプラズマ中のイオンとのクーロン相互作用によって引き起こされる。散乱に寄与するのはほとんどが前方への小角散乱である。

どの程度まで減速されればトラップされるかについては議論の余地があるが、ここでは、KEKの鄭氏のシミュレーションをもとに、 $K_f=1.5 \text{ eV}$  とする [5]。鄭氏は、KEK-JAERI Charge Breeder の設計検討において、 $40\text{Ar}^{1+} 10 \text{ eV}$  の He バッファガスプラズマ中でのトラップのシミュレーションを行っており、運動エネルギー 1.5 eV 程度で入射  $40\text{Ar}^{1+}$  はプラズマ中での乱雑運動状態 (平衡状態) に入るとしている。

遠方小角散乱が支配的であるクーロン散乱を輸送断面積を用いた計算に取り扱う為に、クーロン対数 (Coulomb Logarithm)  $\Lambda_i$  を導入する。対象としているイオン-イオン間散乱においては、

$$\Lambda_i = 23 + \frac{3}{2} \ln T_i - \frac{1}{2} \ln n_i \quad (7)$$

と近似できる ([8] pp. 39)。ここで  $T_i$  はイオン温度で eV 単位、 $n_i$  はイオン密度で  $\text{cm}^{-3}$  単位である。 $T_i$  は入射イオンのエネルギー 10-1.5 eV と、ECR 中のバッファガス (酸素) イオンのエネルギー (温度) 5 eV との関係から得られるものであるが、どちらをとっても大差はない。ここでは、ECR 中のバッファガスのイオン温度 5 eV を使用する。 $n_i$  として、電子密度 ( $n_e$ ) と同じ  $2.2 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$  を使用する

$$n_i = 2.2 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3} \quad (8)$$

が、中性ガス密度にとってもクーロン対数への影響は小さい。結局クーロン対数の値は、プラズマパラメータの詳細には鈍感である。以上を代入すると、

$$\Lambda_i \sim 12 \quad (9)$$

となる。

輸送断面積は

$$S_{ii}^t = 4\pi \left( \frac{e^2}{\mu_{ii} v^2} \right)^2 \Lambda_i \quad (10)$$

で表される。 $\mu_{ii}$  は換算質量で、今の場合

$$\mu_{ii} = \frac{M(^6\text{Li})M(^{16}\text{O})}{M(^6\text{Li}) + M(^{16}\text{O})} = 4.4 \text{ AMU} \quad (11)$$

$v$  は入射イオンとバッファガスイオンの相対速度であるが、以下では簡単のため入射イオン速度の 10 eV を使用することにする。

$$v = 1.8 \times 10^6 \text{ cm/s} \quad (12)$$

以上を代入して (CGS-Gauss 系への単位変換を経て)

$$S_{ii}^t = 1.4 \times 10^{-14} \text{ cm}^2 \quad (13)$$

となる。

これより、有効衝突周波数  $\nu_{ii}^t$  は ([8] pp. 32)、

$$\nu_{ii}^t = n_i S_{ii}^t v = 5.7 \times 10^3 \text{ s}^{-1} \quad (14)$$

平均衝突時間  $\tau_{ii}^t$  は

$$\tau_{ii}^t = (\nu_{ii}^t)^{-1} = 1.8 \times 10^{-4} \text{ s} \quad (15)$$

平均自由行程は  $\lambda_{ii}^t$  は

$$\lambda_{ii}^t = v \tau_{ii}^t = 3.2 \times 10^2 \text{ cm} \quad (16)$$

となる。平均自由行程がプラズマの厚さよりも数倍から 10 倍程度長く、クーロン散乱によって十分な減速を得ることは難しいと考えられる。

単位微小距離当たりのエネルギー損失は、

$$\begin{aligned} \frac{dK}{dl} &= -n_i S_{ii}^t \kappa (K - K_{\text{buffer}}) \\ &\simeq -n_i S_{ii}^t \kappa K \\ &= -1.3 \times 10^{-3} K \end{aligned} \quad (17)$$

$$\kappa \equiv \frac{2M(^6\text{Li})M(^{16}\text{O})}{(M(^6\text{Li}) + M(^{16}\text{O}))^2} = 0.40 \quad (18)$$

( $dl$  は cm 単位) となり、1 cm あたりのエネルギー損失は 0.1%程度に過ぎない。 $S_{ii}^t$  が  $K$  の 2 乗に反比例して小さくなる効果を考慮しても、10-40 cm 程度のプラズマ厚中で十分な減速が得られる確率は非常に小さいであろう。

これ以上の定量的なトラップ効率の見積もりには、

- 入射粒子の減速の統計的振るまい

を考慮に入れる必要がありここでは行なわないことにする。また、さらに定量的な計算もしくはシミュレーションには、

- クーロン散乱による動径方向への拡散
- 前項および入射角度に依存するサイクロトロン運動による、実効プラズマ厚の増加
- ミラー磁場による反射の効果

を考慮に入れる必要がある。

### 3.4 KEK-JAERI Charge Breeder の見積もりとの違い

プラズマ条件の仮定の不定性も大きい。鄭氏の計算では、バッファガスを  $^4\text{He}$  として、 $5 \times 10^{11}$  のイオン密度を仮定している (本偏極リチウムイオン源プロジェクトでも  $^4\text{He}$  もしくは  $^3\text{He}$  をバッファガスとして使用する予定)。この鄭氏の条件に合わせると各計算値の変化は

$$\begin{aligned}\mu_{ii} &\rightarrow \times 1.8 \\ S_{ii}^t &\rightarrow \times 3.4 \\ \lambda_{ii}^t &\rightarrow \times 1/7.6 \\ \kappa &\rightarrow \times 1.2 \\ \frac{dK}{Kdl} &\rightarrow \times 9.1\end{aligned}\tag{19}$$

となり、1 cm あたりのエネルギー損失が 1% となるがまだかなり小さい。

同じ条件下で KEK-JAERI の Charge Breeder が実用に耐えると判断されていることとの違いの主な原因は、入射粒子の質量にある。Charge Breeder の見積もりでは  $^{40}\text{Ar}^{1+}$  を想定しているため、質量が  $^6\text{Li}^{1+}$  の 6.7 倍ある。一方入射エネルギーとして同じ 10 eV を想定しているため、イオン速度は 2.6 分の 1 である。この影響で、 $^6\text{Li}^{1+}$  の場合と比較して以下の違いが出る。

$$\begin{aligned}\mu_{ii} &\rightarrow \times 1.5 \\ S_{ii}^t &\rightarrow \times 20 \\ \lambda_{ii}^t &\rightarrow \times 1/20 \\ \kappa &\rightarrow \times 0.34 \\ \frac{dK}{Kdl} &\rightarrow \times 6.9\end{aligned}\tag{20}$$

結局 1cm 当たりのエネルギー損失が 8% 程度となり、さらに輸送断面積がエネルギーの 2 乗に反比例する<sup>1</sup> 効果とあいまって、10 cm 程度のプラズマ厚でも充分減速できるという結果が得られていると考えられる。

## 4 原子線入射と 1 価イオン入射の比較

1 価イオン入射の場合のトラップ効率については定量的な値となっていないが、かなり小さいと見積もられる。一方で原子線のトラップ効率は 28% と、有意な値になっている。

プラズマ条件やプラズマの厚さの想定を変えることで、現実的に用いることができる程度にまで、1 価イオンのトラップ効率を上げることは可能かもしれない。しかし、原子線の場合はもっとたやすく 100% 程度にまで効率を近づけることが可能であろう。このため、トラップ効率としては、原子線の方が大きく勝っていると言える。

また、1 価イオン入射の場合には、ECR プラズマに入射する以前に 10 eV 程度にまでエネルギーを下げる必要があり、この減速効率の見積もりは現在のところ 30-40% 程度と高くない [7, 9]。このことから原子線入射を使用する方が有利と言える。

原子線を入射する場合のデメリットを挙げると

<sup>1</sup> ただし、入射粒子のエネルギーがバッファガスのイオンエネルギーに近付くと式 (18) の  $K_{\text{buffer}}$  の項が効いて平均エネルギー損失は 0 に近付く。これは、最終的にバッファガスのイオンと平衡状態になることから考えると当然である。

1. ECR 内で原子を 1 価にイオン化する効率が余分に掛かる
2. ECR 内で原子を 1 価にイオン化する場合の減偏極が余分に掛かる
3. ECR 内で原子を 1 価にイオン化するまでに要する時間に非一様磁場の影響などによる減偏極が余分にかかる
4. 原子線偏極部および RF 遷移部への、ECR 漏れ磁場の影響が大きくなる
5. 原子線発生部と ECR との間に原子線偏極度測定部を設置する場所を余分に確保するか、原子線偏極度測定部に原子線を導くための回転機構を加えなければならない。
6. 入射粒子の調整パラメータがほとんどなくなる。

ということが考えられる。1. の要素は既にトラップ効率の中に含まれている。2. については、最外殻電子の剥ぎ取り過程での減偏極は小さいと予想される。3. については、イオン化までの時間は比較的短く ( $100 \mu\text{s}$ ) また、原子の偏極緩和時間は長いため無視できる。4.,5. については、設計上の工夫で回避できると期待したい。原子線の角度広がり ( $\pm 20 \text{ mr}$ ) と ECR プラズマ入射部の開口 ( $\phi 48$ ) から考えると、原子線偏極度測定部を間に設置することは可能であると予想される。6. については、逆に 1 価入射を使用して、入射エネルギーや入射角度などの調整パラメータを増やすことで、果してどの程度のメリットがあるのか明らかでない。

一方、原子線入射のメリットについては、これまでに挙げた、プラズマ中のトラップ効率が高いこと、減速電極通過効率を考えなくとも良いこと、に加えて

1. 装置全体がシンプルになる。
2. 表面イオン化器でのイオン化効率、減偏極の効果が掛からなくなる。

というメリットがある。2. については定量的には明らかでなく表面イオン化器の効率と偏極保持は比較的高いと考えられているが、1. のメリットは非常に大きいと思われる。

以上の考察から、原子線入射の優先度を上げた検討を今後進めることとする。

## 参考文献

- [1] E. Steffens *et al.*, Nucl. Instrum. and Methods **143** (1977) 409.
- [2] E.G. Myers *et al.*, Nucl. Instrum. and Methods B **56/57** (1991) 1156.
- [3] M. Imanaka, PhD thesis, Tsukuba Univ., 2003, unpublished.
- [4] K. Hatanaka, A. Tamii *et al.*, RCNP P-PAC Proposal, 03-NOV-2003, unpublished.
- [5] 鄭淳謙、「2 段電子サイクロトロン共鳴型イオン源による短寿命核イオン価数増殖システムの開発」、科研費報告書、2001 年、unpublished.
- [6] G.S. Voronov, ATom. Data and Nucl. Data Tables **65** (1997) 1.
- [7] A. Tamii, 「減速電極の設計とイオンの減速電場通過効率 ver 1.2」, 03-MAY-2005.

- [8] V.E. ゴラント、A.P. リジンスキー、I.E. サハロフ著、下條、田井訳、「プラズマ物理学の基礎」、現代工学社、1983。
- [9] S. Morinobu, 「ECR イオン源への  $^{6+}$  イオンの入射」, 21-JUL-2005.