減速電極の設計とイオンの減速電場通過効率

A. Tamii

ver 1.1 02-MAY-2005
ver 1.2 03-MAY-2005
ver 1.3 27-SEP-2005

1 序

偏極 ^{6}Li^{3+} イオン源では、偏極 ^{6}Li^{1+} ビームを減速して ECR Ionizer に入射し、3 価のビームを引き出す計画である。

この 1 価から 3 価への変換効率には、以下の 4 つの要素が関与する

1. 1 価イオンの減速電場透過効率
2. 1 価イオンのプラズマによるトラップ効率
3. 1 価イオンから 3 価イオンへのイオン化効率
4. 3 価イオンの引き出し効率

このメモでは、減速後のイオンエネルギーの仮定、入射ビームのエミッタンスの仮定について議論を行った後、1. に関与する具体的な減速電極の設計と減速電場透過効率のシミュレーション結果について報告する。

2 減速後のイオンエネルギーの仮定

ECR Ionizer を Charge Breeder (電荷増殖) の目的で使用する試みは、Grenoble のグループ [1, 2, 3, 4, 5] や、KEK-JAERI のグループ [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13] により行われて来た。ISOL 等により生成された 1 価の不安定核ビームを ECR Ionizer に入射し、価数を高くして取り出して再加速するのが目的である。

Charge Breeder としての性能および効率を調べる為、プロトタイプ機を製作し、別のイオン源により生成した 1 価ビームを入射して多価ビームを引き出して調べるテスト実験が行われている。

以下では、それぞれのグループの報告から関連情報をまとめる。

2.1 Grenoble グループの開発

Li と同じアルカリ金属である Rb^{1+} を用いた試験結果が報告されている ([2]。衣装したイオン源の性能に関しては [4] の Introduction に記述がある。図 1 の様に、Thermoioniation Source を用いて、7 kV+ΔV の電位で加速した Rb^{1+} ビーム (10 πmmmr、energy spread 0.5 eV) を 10 GHz

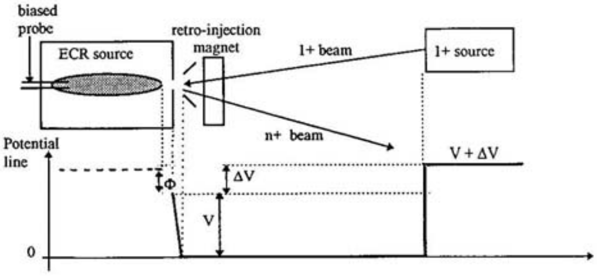

図 1: Grenoble の実験のセットアップ [2]。Rb^{1+} のビームは、Thermoionization Source により生成され、ECR 入射後、引き出された Rb^{9+} のビーム量を測定する。図 2 の測定時の V は 7 kV と思われるが、論文中の記述は明確ではない。

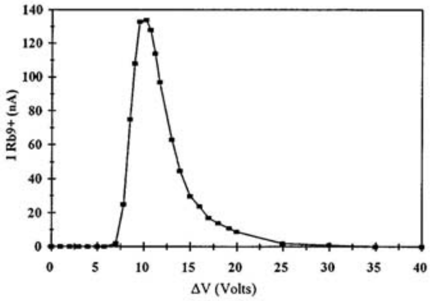

図 2: ECR から引き出された Rb^{9+} ビーム量の ΔV 依存性 [2]。入射ビームのエネルギー広がりは 0.5 eV 程度で十分小さい。

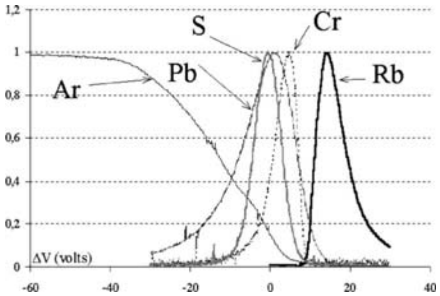

図 3: 種々の引き出しビーム量の ΔV 依存性 [5]。Pb, S, Cr は入射ビームが ECR で生成されているため、入射ビーム側のプラズマポテンシャルが関与することが理由で、Rb に比べてピークが 0 V 側に寄っていると考えられる。

Minimafios ECR に前面から入射 (retro-injection mode、ECR 電位 7 kV) し、引き出した Rb^{9+} のビーム量を磁気分析後にファラデーカップに測定している。減速後のエネルギーに対応する ΔV を変化させた時の、Rb^{9+} ビーム量の変化の測定結果が図 2 である。

ΔV=10 V 付近でピークをとり、20 eV では桁落ちとなっていることが分かる。7 eV 以下で急激に効率が落ちるのは、プラズマポテンシャル (Φ) が超えられないためと説明されている [2]。この解釈については、減速電場の透過効率にも強く依存するので妥当かどうかの判断には注意を要する。

希ガスである Xe の実験結果は大きく異なり、0 V 付近で価数増殖効率は最大値を取るが、±500 V 程度の非常に大きな領域でかなりフラットである [2]。その理由として、希ガスイオンが壁面に衝突して中性ガス化し ECR 内でイオン化されて引き出されることが挙げられている。これに対して、アルカリ金属の場合は壁面に衝突すると固化して吸着する可能性が高い。

Pb, S, Cr などの測定結果は [5] に報告されている (図 3)。受け入れる ΔV の幅が、∼20 V 程度であることについては Rb の実験結果に近い。ただし、これらのイオンの実験については、1 価ビームを ECR イオン源で生成しているため、入射ビーム生成側のプラズマポテンシャルが影響することが原因で、ピークとなる ΔV の値が 0 V 付近に寄っている。

2.2 KEK-JAERI グループの開発

KEK-JAERI のグループでは、ΔV=10 eV を想定して Charge Breeder の設計を進めている [10, 11]。この設計では、Grenoble の試験結果を参考にしている。

2.45 GHz ECR イオン源より生成した Ar^{1+} ビーム (12 kV) を、12 GHz ECR Charge Breeder に入射した試験から、ΔV=0 付近で価数増殖効率が最大値をとるという結果が報告されている [12]。また、Xe を使用した実験では ΔV=0-100 V の範囲で価数増殖効率が高い [13]。入射ビーム生成側が ECR であることや、対象としているイオンが希ガスであることから、今回の設計の基礎情報とすることはできないが、希ガスの受け入れエネルギー範囲が広いという点は Grenoble の結果とコンシステントと言える。

実機を用いたテストで、希ガスについてはかなり理想値に近い電荷増殖効率を達成している。金属イオンについては試験を開始したところであるが、まだプロトタイプ機の効率まで達成しておらず、低めの値となっている様である。受け入れエネルギー範囲が小さいこと、および入射軌道の調整が大きく依存することが関係している可能性がある [14]。

2.3 減速後イオンエネルギーの仮定

以上の情報から、アルカリ金属である Li の入射に関しては、減速後エネルギーとして 10 eV を仮定して検討を進めるのが妥当と考えられる。なお、ECR の電位はサイクロトロンへの入射エネルギーの要請から 19 kV であるため、入射ビームのエネルギーは 19.01 keV となる。

3 入射ビームエミッタンスの仮定

効率良くイオン減速して入射する為には、入射ビームのエミッタンスが重要であることが、Grenoble および KEK-JAERI の両指摘されている。

Grenoble では、Ar^{1+} 18 keV の入射ビームのエミッタンスを 15 πmmmr から増大させた場合の入射効率の測定から、50 πmmmr 程度のアクセプタンスを現象論的に導き出している [5] が、詳しい解析は行われていない。より以前の研究では、特に金属イオン (Zn と Kr) について、電極内径を ϕ10 mm から ϕ6 mm に下げて面取りを行うことで効率が改善したこと、入射ビームのエネルギー幅も効率に影響することが、実験から導き出されている [4]。

一方で、KEK-JAERI のグループでは、減速電場透過効率をイオン軌道のトラッキングシミュレーションによって見積もっている [10, 8]。プロトタイプ機による試験では、Ar^{1+} 12 keV、40 πmmmr を入射し、ほぼ全ての Ar の減速に成功している [12]。

この節では、入射 $^6Li^{1+}$ ビームのエミッタンスに関して検討する。

3.1 入射 $^6Li^{1+}$ ビームのエミッタンス

入射 $^6Li^{1+}$ ビームは、表面電離器により生成される。リチウムオーブンにより生成した ^{6}Li 原子を光ポンピング法により偏極させた後、1000 ℃以上に熱したタングステン板によりイオン化させる。タングステン板の電位をに ECR 入射する得寝る g-に対応した電位 (19 kV+ΔV) に設定する。タングステン板から 5 mm 程度離れた位置に引き出しグリッドを置き、タングステン板に対する相対電位 -1.4 kV にてイオンを引き出す。その後、加速レンズにて GND 電位まで加速した後、ECR に入射する。詳細については [17, 18] に記載している。

入射ビームのエミッタンスは、タングステン板上での原子線ビームの広がりに起因する空間広がりと、グリッドが理想的な等電位面でないために起きるワイヤー近傍での偏向に起因する角度広がりによって決まると考えられる。

原子線ビームの広がりは、ノズル、スキマー、コリメータの構造により決まるが、Max Plank Institute (MPI)[15] および Florida State University (FSU)[16] のイオン源の実績から ±20 mr の値を用いる。ノズルから表面電離器までの距離として 370 mm を想定している [17]。タングステン板が原子線に対して 45° 傾いていることを考慮に入れると、$^{6}\mathrm{Li}^{1+}$ ビームの空間広がりとして、タングステン面内で磁場に平行な方向 (y 軸。但しグリッド偏向計算のメモでは z 軸としている) に ±8 mm、磁場に垂直な方向 (x 軸) に ±12 mm の値を得る。平均値として ±10 mm を用いる。

一方、グリッドでの偏向については、森信氏の近似解析計算 [18] によれば、ストライプ型引き出しグリッドでの角度広がり全幅 ($\Delta\alpha$) はタングステン板と引き出しグリッドの間隔 (d) およびストライプの間隔 (a) によって決まり

$$\Delta\alpha = \frac{a}{2d} \ \ (\text{or} \ \pm\frac{a}{4d}) \quad \text{for stripe shape electrode} \tag{1}$$

と表される。d=5 mm、a=0.5 mm を仮定した場合、角度広がり全幅は 50 mr(±25 mr) である。OPERA-3D TOSCA による電場計算結果を用いたトラッキングシミュレーションは、ストライプ型グリッドの解析計算式 (1) をよく再現している。同方法で、正方網目型グリッドを使用した場合には、ストライプ型と比較して角度広がりが約半分程度になるという結果を得た [19]。

$$\Delta\alpha \sim \frac{a}{4d} \ \ (\text{or} \ \pm\frac{a}{8d}) \quad \text{for grid shape electrode} \tag{2}$$

また、グリッド引き出し後に 19 kV まで加速されるため、進行方向速度がエネルギーのルートに比例して大きくなる効果により、エミッタンスはエネルギーのルートに反比例して小さくなる。

これらを考慮し、ストライプ型の計算式からビームのエミッタンスの見積もりとして

$$10 \times 25 \times \sqrt{\frac{1.4}{19}} \sim 60\pi\text{mmmr} \tag{3}$$

の値を得る (conservatibe)。正方網目型グリッドがうまく機能すれば、半分の 30πmmmr 程度のエミッタンスが期待できることになる (optimistic)。

FSU では、プロファイルモニタを用いて引き出し後の $^{6}\mathrm{Li}^{1+}$ ビームのエミッタンスを実測しており、0.4 π cm rad eV$^{1/2}$ と報告している [16]。確認のため、上記の式による見積もりを行って実測値と比較する。FSU では a=0.060” 間隔の正方網目グリッド [23] と、タングステン-グリッド間隔 10 mm[24] を用いているので、正方網目グリッドの式 (2) を用いると引き出し時の角度広がりは

$$\frac{1}{2}\frac{0.060''}{4 \times 10\ \text{mm}} = \pm 19\text{mr} \tag{4}$$

となる。±10 mm の原子線広がりとグリッド引き出し電圧 850 V[16] を入れると、規格化エミッタンスは

$$\begin{aligned} 10 \times 19 \times \sqrt{850} &= 5,500\,\pi\ \text{mm mr eV}^{1/2} \\ &= 0.55\,\pi\ \text{cm rad eV}^{1/2} \end{aligned} \tag{5}$$

となる。実測値の 0.4 πcm rad eV$^{1/2}$ と比較的良く合っていると言える。実測値の方が 30%程度小さくなっているが、詳細を議論するほどの精度はないので誤差の範囲と捉えておくのが妥当で

ある。FSU のエミッタンス実測値を 19 keV に換算すると 30 πmmmr であり、我々の optimistic 仮定と同程度である。

以上の考察から、入射 ^{6}Li^{1+} ビームのエミッタンスとして x、y 方向ともに 60 πmmmr を、conservative な仮定として以下の検討で用いる。30 πmmmr を optimistic な仮定とする。

3.2 入射ビームのエネルギー幅

ビームのエネルギー広がりについては詳しく調べられていないが、原子線ビームの速度がおよそ 1-3 km/s 程度で [20, 21] エネルギーに換算して $\leq$ 0.3 eV であること、タングステンの温度が 1000-1500°C で [22] エネルギーに換算して 0.1-0.15 eV であることを考えれば、$\leq$0.5 eV 程度であることが予想される。この値は、Grenoble の Thermoionization Source のエネルギー幅 0.5 eV [2, 4] に近い。

以下では、エネルギー幅は十分小さいとして無視する。

4 減速電極構造、電場分布、磁場分布

4.1 減速電極の構造

減速電極の構造として、図 4 の形を想定して議論を進める。この構造は、KEK-JAERI Charge Breeder 開発グループの、Sudden Deceleration での減速方式 [10] の設計を土台としているが、内筒の内径が大きくなっている (KEK-JAERI の実機は ϕ20mm[12]) こと、外筒の端に穴付きの蓋状の部分があることが若干の相違である。

ECR プラズマチェンバーの電位は 19 kV に固定されている。減速電極は厚さ 2 mm の内筒 (内径 ϕ30mm) と外筒 (先端付近内径 ϕ40mm) の 2 重構造となっている。内筒の電位は GND に固定する。外筒の電位はプラズマチェンバーと同じ 19 kV を基本とするが、調整できる様にしておく。

減速電極の端は最大磁場位置から約 10 mm 外 (上流) にある [26]。前後に動かした場合の変化をシミュレーションによりチェックするが、中に入れすぎるとプラズマが不安定になる可能性がある。

真空引きのコンダクタンス、絶縁耐圧、RF の印加による影響については現時点では考慮していない。

4.2 電場分布

減速電極およびプラズマチェンバーが生成する電場を OPERA-3D TOSCA を用いて数値計算した。メッシュサイズは最大 2 mm に指定した。電場計算において、導波管部は考慮していないが、プラズマチェンバーと同電位であるため事実上影響はない。プラズマ領域上流端にはガス導入、冷却水導入のための穴が設置されるが、これも影響は小さいと考えて無視する。

影響を与える可能性があるのはプラズマ自身の電位分布であるが、現実的な電位分布を評価するのはかなり困難である。KEK-JAERI グループでは、減速電極出口にプラズマチェンバーと同電位の等電位平面を置くことにより試算している [8]。以下の計算では、プラズマの電位分布については当面無視することとし、減速電極出口に等電位平面を設置した場合との違いを見るに留める。

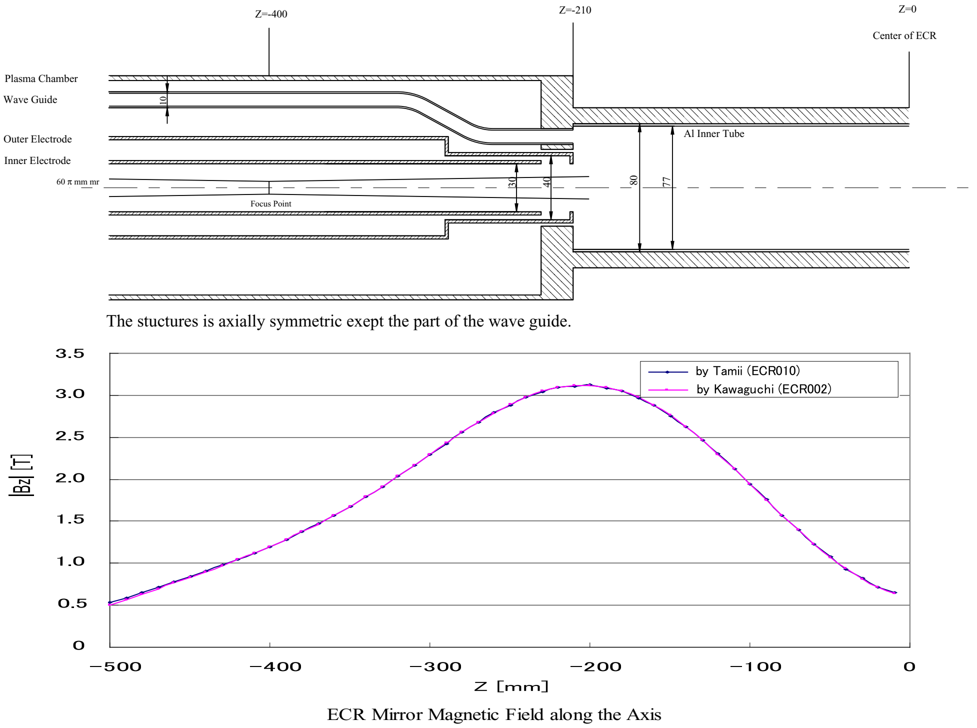

図 4: シミュレーションに使用した電極構造 (上図)。電極の厚さは 2 mm。ECR ミラー磁場の計算値を下図に示す。中央ミラーコイルの中心を $z = 0$ とする。イオンは左側から入射する。図に示されたイオン軌道は、60 πmmmr で $z = -400$ にて収束するように調整した場合の電磁場がない場合のエンベロープ。

プラズマチェンバーと減速電極外筒を 19 kV に、内筒を GND 電位に設定した場合の等電位面の計算値を、図 5 に示す。

4.3　磁場分布

ECR ミラー磁場分布として、KT サイエンス川口氏を中心に OPERA-3D TOSCA を用いて行った数値計算のデータを入力した。この計算は、RCNP に納入済みの超電導 ECR 磁石の具体的な形状を取り入れたものである。軸上の軸方向磁場分布を図 4 の下部に示す (赤色)。比較の為 RCNP 側で行った簡略計算の結果を同時に示す (青色)。表示している領域では両者はよく一致しているが、$z = -50$[cm] 付近より上流の領域で、RCNP 側計算は漏れ磁場を大きく見積もっている傾向がある[1] 。図では磁場の絶対値をプロットしているが、軸方向磁場の符合はマイナスである。なお、ECR の 6 極磁場は計算に入れていない。

5　イオン軌道シミュレーション

5.1　解析解

シミュレーションを行う前に、磁場が存在しない場合 (もしくは一様な場合) で、かつ減速電場の厚みが十分薄い場合の減速電場通過効率を、解析計算によりチェックした。詳細については、別

[1] RCNP 側計算のシミュレーションで使用している空間が小さいことが原因であることが確認された (27-SEP-2005)。

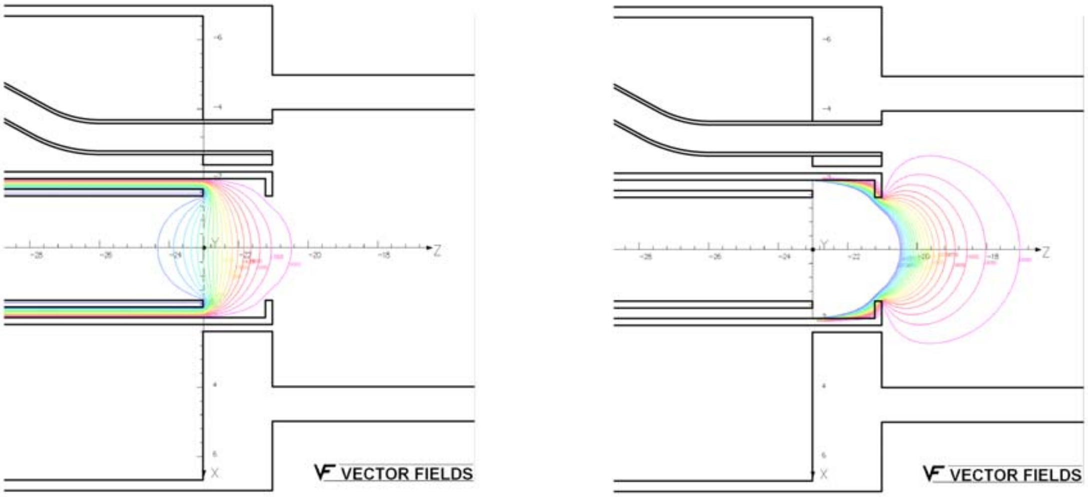

図 5: シミュレーションに使用した電場の等電位面分布。左は 1000-18000 V を 1000 V ステップで図示したもの。右は 18000-18950 V を 50 V ステップで図示したもの。等電位面の一部が電極の中まで入っているのは、電場計算のメッシュの細かさ (2 mm) が不十分であるのが原因。

のメモ [25] に記載している。この条件では、イオンが減速電場を通過するための臨界角度 (θ_c) を与えることができ、θ_c は下記の式で表される。

$$\theta < \theta_c = \sin^{-1}\sqrt{\frac{E'}{E}} \tag{6}$$

入射エネルギー (E) として 19 keV を、減速後エネルギー (E') として 10 eV を代入すると、臨界角度は 23 mr である。これより浅い角度で入射したイオンは全て通過し、深い角度で入射したイオンはすべて反射されることになる。

これに磁場分布と減速電場の厚みがどのように影響するかを、定量的に調べるのが今回のシミュレーションの目的である。

5.2　シミュレーション

イオン発生位置として、ECR 軸上の z=-855 mm の位置をとる。この位置は、ECR 外壁から 300 mm 上流の位置で、森信氏メモ [18] の計算位置に合わせている。この位置での磁場は 50 Gauss である。

イオンのエミッタンスとして水平面内 (x), 鉛直面内 (y) ともに 60 πmmmr を仮定し、x,y 独立にエミッタンス楕円内で一様乱数を振って初期イオン軌道を生成した。エミッタンス楕円の縦横比 (倍率) および傾き (収束点) は、通過効率が最大になる様に、他の条件を変更する度にに最適化した。ベースとする電磁場分布での最適値は、4 mm×15 mr で、(電磁場がない場合の) 収束位置は $z = -400$ である。目安として、電磁場がない場合の軌道を図 4 に示す。

数値計算により得られた電磁場分布 (メッシュサイズ 2 mm、近接格子 8 点の値を用いて線形補間) を用い、各イオンの軌道を 4 次の Runge-Kutta 法により独立にトラッキングした。スペースチャージの効果は入っていない。トラッキングのステップサイズは 2 nsec で、入射時で 1.6 mm、

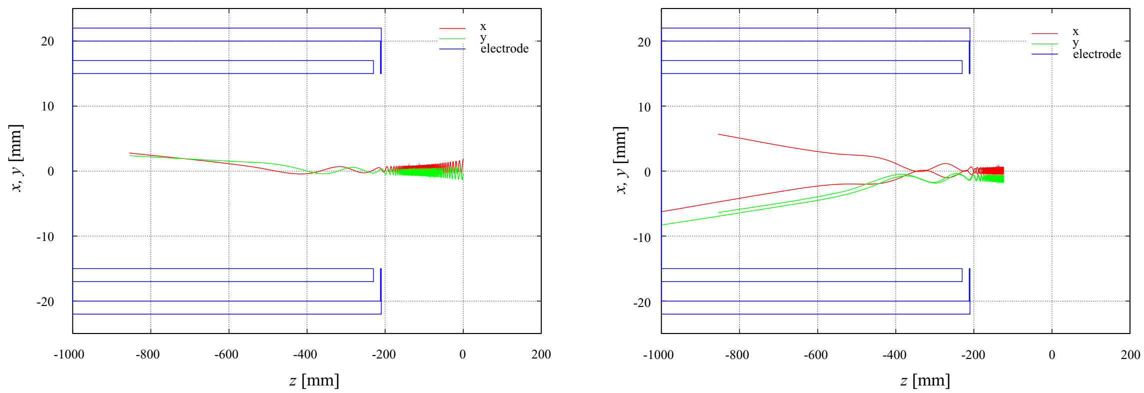

図 6: イオントラッキングの例。減速電場を通過した場合 (左) および通過しなかった場合 (右)。赤は x 方向軌道、緑は y 方向軌道、青は電極の形を表す。イオン発生位置は z=-855 mm で、$z = 0$ に到達した場合を “通過”、電極またはプラズマ内壁に衝突した場合、もしくは z=-1000 mm まで戻って来た場合を “不通過” と判定している。

減速後で 0.04 mm の飛行距離に相当する。

このシミュレーションではイオンエネルギーのダイナミックレンジが大きいため、イオンの運動エネルギーの変化をその位置での電場から計算すると減速後のエネルギーに無視できないほど大きな誤差を生じてしまう。これに対処するため、電場の数値計算結果から格子点上の電位も取り込み、ステップ毎のイオンエネルギーをその位置における電位から再計算する方式でトラッキングを進めた。イオンに働く力は、その位置での電場および磁場から計算している。

イオンが減速電極およびプラズマチェンバー内壁に衝突することなく $z = 0$ まで到達した場合に、減速電場通過、と判定した。今回のシミュレーションの範囲内では、プラズマチェンバー内壁にイオンが衝突することはなく、通過しなかったイオンは、減速電極内筒に衝突するか、入射方向に戻されるか ($z = -1000$ mm までトラッキング) のどちらかである。多くの場合、通過しなかったイオンを入射方向に反射されており、ベースとしている減速電極内筒径 ϕ30mm の場合は、減速電極内筒に衝突するイオンは 0.0 ± 0.1%である。

1000 個のイオンのトラッキング結果から通過効率を算出した。2 項分布に基づきシミュレーションの統計誤差を付ける。統計誤差は通過効率に依存するが、最大で 0.016 である (50%通過の場合)。今回の議論には十分な統計精度と考える。

イオンが減速電場を通過したと判定された場合、および通過しなかったと判定された場合の軌道の例を図 6 に示す。

5.3 シミュレーション結果

減速電場通過効率をシミュレーション結果を表 1 に示す。ベースとしている電磁場分布 (ID=1) での通過効率は 32%であった。この値は十分とは言えないため、さらなる改良を検討する必要がある。

磁場がなく減速電場の厚さが 0 の場合の臨界角度 (式 (6) は 23 mr であり、この場合は想定しているエミッタンスのビームは 100%通過することになる。このことから、磁場分布および減速電場の有限の厚さが結果に大きく影響していることが分かる。

ベース電磁場分布での通過効率の、収束点位置依存性、ビーム中心位置依存性 (ビーム位置がずれた場合に相当)、ビーム中心角度依存性 (ビーム角度がずれた場合に相当) を図 7 に示す。収束

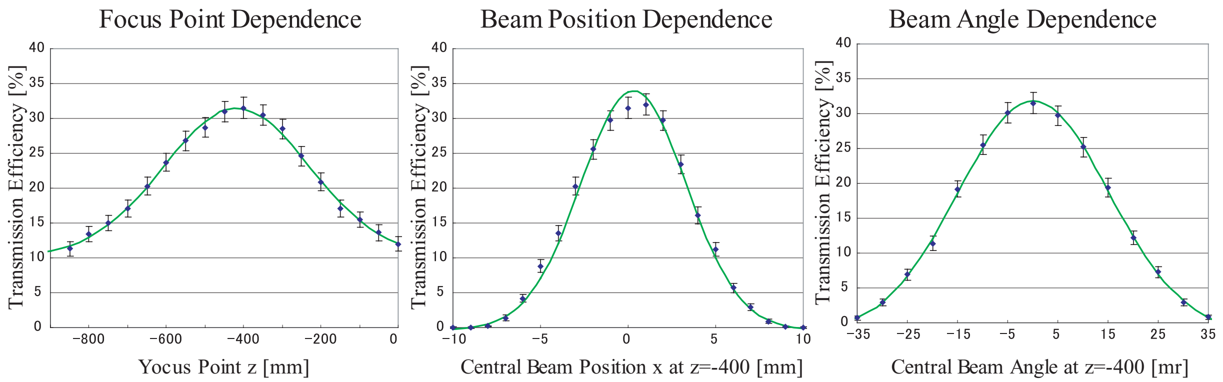

図 7: ベース電場 · 磁場分布 (表 1 の ID=1) の場合の、減速電場通過効率の焦点位置依存性 (左図)、ビーム中心位置依存性 (中図、ビーム位置がずれた場合に相当)、ビーム中心角度依存性 (右図、ビーム角度がずれた場合に相当)。電磁場を入れたイオン軌道のトラッキングを行った結果であるが、横軸は全て電磁場がない場合の値である。

点位置依存性は z=-400 mm 付近で最大値をとる。この結果は、森信氏メモの計算値 z=-355 mm (森信氏の定義では z=+200 mm。ECR 外壁を z=0 としている) とよく一致している [18]。ピークの半値半幅 (HWHM) は 220 mm である。ビーム中心位置依存性および中心角度依存性の半値半幅は、それぞれ 3.6 mm、18 mr である。ビームエミッタンスとして 4.0 mm×15 mr を仮定していることからリーゾナブルであると言える。

エミッタンスが 30 πmmmr (optimistic) の場合 (ID=2) の通過効率は、54%である。エミッタンスが 60 と 30 のそれぞれの場合での位相空間上での通過効率分布を図 8、9 に示す。エミッタンスを小さくできれば通過効率が良くなる。このアプローチは検討に値する。改善の可能性があるのは、グリッドの構造、グリッド-タングステン間距離、グリッド引き出し電圧である。ビームを切ってエミッタンスを良くする方法はトータルとして特をしない。

外筒端に外筒と同電位の等電位平面を設置すると、通過効率は 82%まで改善する (ID=4)。この計算は、プラズマの存在の効果を大胆な仮定により取り込んだものであり、KEK-JAERI のグループが試行している方法の 1 つである [8]。現実はこの値とベース (ID=1) との間にあるのではないかと予想する。

磁場を全体的に比例して 2/3、1/3 に下げると通過効率は、43%、72%にそれぞれ増加する (ID=5,6)。以前 (4 月 7 日)、磁場 2/3 で効率が 11%→7%に低下した旨を方向したが、この時の計算では内筒径として ϕ16mm を使用していた (今回のメモでは ϕ30mm)。磁場低下によるサイクロトロン回転半径の増大がより寄与していたものと予想される。再チェックが必要である。

内筒外筒の両電極を 10 mm 程度前後にずらしたシミュレーションでは、有意な変化は見られていない (ID=7,8)。

外筒の電位を、プラズマチェンバーと同電位の 19 kV から 15 kV に下げることで、通過効率は 43% に若干増大する。但しこの変更は、主にプラズマチェンバー内に入った位置付近での電位をより緩やかに変化させることに寄与するものであり、プラズマが存在する場合に同様の効果をもたらすかどうかについては疑問がある。

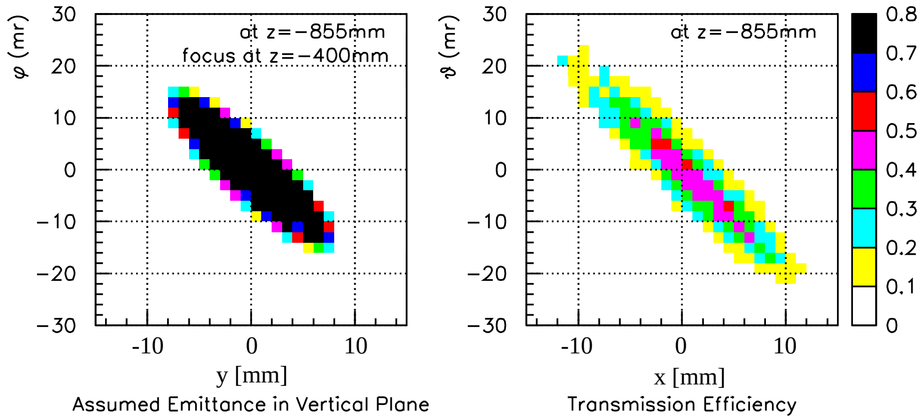

図 8: 鉛直 (y) 平面内エミッタンスとして 60 πmmmr の一様分布を仮定した場合 (左図) の、水平面内位相空間上における減速電場通過効率 (右図)。イオン発生位置 (z=-855 mm) でのプロファイルである。鉛直平面内のエミッタンス楕円の縦横比および傾きは、通過効率が最大になる様に最適化されている。

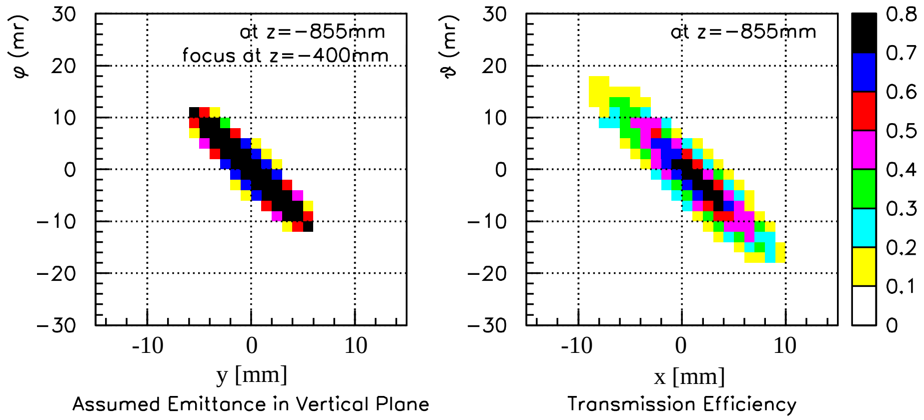

図 9: 鉛直 (y) 平面内エミッタンスとして 30 πmmmr の一様分布を仮定した場合。他は図 8 と同様。

表 1: ベースの電磁場分布から条件を変えた場合の減速電場通過効率。各場合でエミッタンス楕円の縦横比および傾きは最適化されている。

ID	変更点	エミッタンス [mm]	[mr]	収束点 z [mm]	通過効率 [%]	電磁場計算ファイル
1	ベース	4.0	15	-400	32±2	DEC024,ECR002
2	30 πmmmr (optimistic)	2.5	12	-400	54±2	DEC024
3	外筒端の開口を ϕ30 → ϕ20 に	4.0	15	-400	28±1	DEC025
4	外筒端に外筒電位の等電位平面を設置 *1	3.5	17.1	-400	82±1	DEC026
5	磁場を全体的に 2/3 に下げる	2.5	24	-450	43±2	DEC024
6	磁場を全体的に 1/3 に下げる	3.5	17.1	-50	72±1	DEC024
7	両減速電極を 10 mm 内側へ入れる	3.5	17.1	-450	34±2	DEC027
8	両減速電極を 10 mm 外側へ出す	3.5	17.1	-350	31±1	DEC028
9	外筒電位を 19→15 kV に	3.5	17.1	-400	41±2	DEC024
10	内筒を 10 mm 内側へ入れる					to be done
11	内筒を 10 mm 外側へ出す					to be done
12	内筒を径を ϕ30 → 20 に					to be done
13	入射エネルギー依存性					to be done

*1 等電位面付近のシミュレーションに特に注意を払う必要がある。等電位面と次のメッシュ位置の間の電位・電場を格子点の補間から計算しない様にする。等電位面付近のステップサイズを小さくする。

6 まとめ

現実的な電極構造と、電場磁場分布を用いて、$^6Li^{1+}$ イオンのトラッキングシミュレーションを行い、減速電場を通過して ECR に入射する効率を計算した。

現時点で想定している電極構造では、通過効率は 32%であった。この値は十分とはいえず、改善策を検討する必要がある。

電極構造や磁場を変更した計算では、若干の改善が見られる場合がある。大きな改善は得られていない。

一つの有力な方法は、エミッタンスの小さい $^6Li^{1+}$ ビームを作ることである。現在 60 πmmmr のエミッタンスにてシミュレーションを行っているが、グリッド構造や引き出し電圧の改善により、30 πmmmr 程度まで下げられれば計算上は 50%以上の効率となる。グリッドタングステン間距離を 2 倍にとることで、計算上はエミッタンスを 1/2 に下げることが可能である。

7 補足

現在の電極構造には、下記のような点が考慮されていない。

- 真空引きの為のコンダクタンス
  ECR 側からのガス等の流入がかなり予想される。KEK-JAERI の減速電極では、電極に多くの穴を開けている。

- 絶縁
  電極の絶縁構造を検討する必要がある

- RF の影響
  ECR へ導入している RF の反射により、絶縁部が破壊されるなどの障害が起きる可能性が

ある。
18 GHz の RF の波長は 16.7 mm である。
導波管の長径を a とすると、導波管のカットオフ波長は、

$$\lambda_{c,10} = 2a \tag{7}$$

である TE_{10} モード。
減速電極内筒の半径を a とすると、筒内のカットオフ波長は、

$$\lambda_{c,11} = 3.41a \tag{8}$$

である (TE_{11} モード)。内筒内で 18 GHz をカットオフするには半径 $a < 4.9$ mm である必要がある
内筒と外筒の間 (および外筒とその外の間) は TEM モードが伝播するので、カットオフはできない。特性インピーダンスを変化させて部分的に反射させるか、抵抗体で減衰させる？
真空引きの為の穴を開けると状況が複雑になる。

- 調整部
  電極の前後位置などは、特にオペレーションが確立するまでは、調整できる必要がある。

参考文献

[1] R. Geller *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **67** (1996) 1281.

[2] C. Tamburella *et al.*, Rev. Sci. Instrum.**68** (1997) 2319.

[3] N. Chauvin *et al.*, Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. A **419** (1998) 185.

[4] T. Lamy *et al.*, Rev. Sci. Instrum.**69** (1998) 1322.

[5] P. Sortais *et al.*, Nucl. Phys. A **701** (2002) 537c.

[6] M. Oyaizu *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **71** (2000) 1113.

[7] S.C. Jeong *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **71** (2000) 764.

[8] 鄭淳讃、「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.

[9] M. Oyaizu *et al.*, KEK Preprint 2002-87.

[10] M. Oyaizu *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **73** (2002) 806.

[11] S.C. Jeong *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **73** (2002) 803.

[12] S.C. Jeong *et al.*, Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. B **204** (2003) 420.

[13] S.C. Jeong *et al.*, Rev. Sci. Instrum **75** (2004) 1631.

[14] S.C. Jeong, private communication。

[15] E. Steffens *et al.*, Nucl. Instrum. and Methods **143** (1977) 409.

[16] E.G. Myers *et al.*, Nucl. Instrum. and Methods B **56/57** (1991) 1156.

[17] A. Tamii, 「表面電離器の磁石の設計に関する検討 ver 1.1」、14-JAN-2005。

[18] S. Morinobu, 「表面電離器から ECR イオン源への Li ビームの輸送」、2005.03.27。

[19] A. Tamii,「GRID 引き出しによるビーム角度広がりのシミュレーション結果」、20-JAN-2005。

[20] A.J. Mendez, PhD thesis, Florida State Univ, 1993, unpublished, pp. 59.

[21] H. Ebinghaus *et al.*, Z. Phys. 267 (1974) 15.

[22] Ref. 16 には、1500 °C と記載されているが、E.G. Myers と直接議論したところでは、それほど温度は高くなく、1000 °C 程度で使用している様である。このメモの議論では温度の値は重要ではない。

[23] B.G. Schmidt, private communication.

[24] Reported in Ref. 20. 但し実際に使用している状況では 10 mm よりももっと近いのではないかと q 想像されている:E.G. Myers, private communication.

[25] A. Tamii, 「減速電場を通過する為の入射角度条件についてのメモ ver 1.0」、05-APR-2005。

[26] KEK-JAERI Charge Breeder の設計を基にしている: S.C. Jeong, private communication.