

PARTICLE OPTICS IN THE TIT-RFQ CALCULATED USING A 3D PARTICLE-IN-CELL CODE

Yoshiyuki OGURI and Masahiro OKAMURA

*Research Laboratory for Nuclear Reactors
Oh-okayama 2, Meguro-ku, Tokyo 152, JAPAN*

ABSTRACT

Beam dynamics in an RFQ at the Tokyo Institute of Technology was analyzed using a 3D particle-in-cell computer code. In this calculation not only space charge force between each macroparticles but also 3D image charge field were included. Beam transmission performance was calculated for two types of vane-tip design with different tip curvature radii. These results are compared with ones obtained with the idealized linear two-term potential. The old vane tip design with a small tip curvature radius has given very poor beam transmission efficiency which cannot be accepted for the actual machine.

三次元粒子コードを用いた東工大 RFQ におけるビーム光学計算

1. はじめに

東京工業大学原子炉工学研究所にて建設中の重イオンRFQ(TIT-RFQ)の設計においては、当初シャントインピーダンスの向上を目指して先端曲率半径が小さいベインの採用が検討された[1, 2]。しかし東大核研の徳田により開発された PARMTEQ-H コードを用いてベイン間電界中の高調波成分を考慮してビーム軌道計算を行ったところ、 $\rho = 0.75r_0$ (ρ : ベイン先端曲率半径, r_0 : 平均ボア径) の設計では特に大電流ビーム加速時にビーム透過率が非常に低くなることが判明した。そこで加速電力効率を多少犠牲にしても、より高いビーム透過率を得るため、高調波成分の少ない $\rho = r_0$ の構造の採用を検討することにした。PARMTEQ-H の結果をフィードバックしながら、さらに各パラメーターを $\rho = r_0$ の構造に最適化したところ、ビーム透過率の大幅な改善が期待されるようになった[3]。

一方 TIT-RFQ では主に予算的制約からビーム径に対する四重極チャンネルの内径、すなわち safety factor[4] を小さく取る必要があった。そのためビームが電極表面から近く、ビームの鏡像電荷力の影響が比較的大きいことが予想される。鏡像電荷はイオンと反対の電荷を持つため、イオンは鏡像から引力を受ける。従って鏡像はビームを発散させる

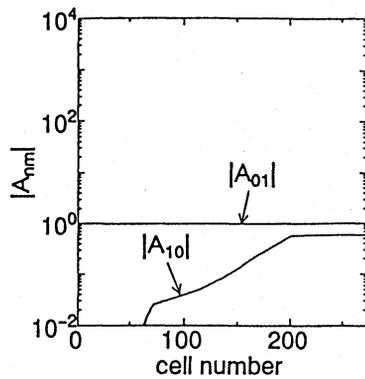
効果を持ち、RFQ のビーム透過率はさらに低下する恐れがある。PARMTEQ-H コードではこの鏡像電荷効果は考慮されていない。そこで新しく開発された粒子コード (particle-in-cell code) により同様なビーム光学計算を行い、 $\rho = r_0$ の構造を持つ新しい設計のビーム光学的性能を確認することにした。このコードでは各マクロ粒子間に働く三次元空間電荷反発力を計算しているだけでなく、三次元鏡像電荷力の評価を可能とするために高速の Poisson solver が組み込まれている。

理想化された双曲線状断面ベインによって実現される two-term potential, 及び現実的構造である $\rho = r_0$, $\rho = 0.75r_0$ の三種のベイン間ポテンシャルについての計算結果を比較し、 $\rho = r_0$ の採用により、 $\rho = 0.75r_0$ に比べてどの程度の改善が見られるかを調べる。また PARMTEQ[5] コードによる結果との比較を行う。鏡像電荷力の有無が透過率に与える影響についても検討する。

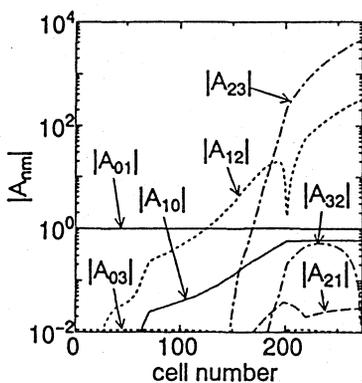
2. 計算方法

ビーム光学計算には三次元粒子コード QCLASSI[6] を用いた。マクロ粒子の個数は、計算時間の都合上現在最大 2^9 個である。

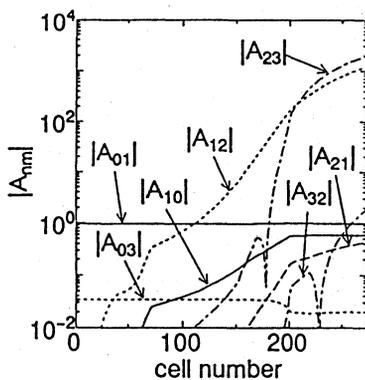
各ベイン断面形状に対応する高調波成分を含む RF 電場は Fourier-Bessel 級数で表される。各項の係数 A_{nm} はセル長、ベインの変調度等に依存するが、これらは Crandall による表 [7] を内挿して求めた。図 1 は考察した三種類のポテンシャルについての A_{nm} の変化をセル番号の関数として示す。



(a) two-term



(b) $\rho = r_0$



(c) $\rho = 0.75r_0$

図 1: 各高調波の強度のセル番号依存性。

空間電荷力は他の全てのマクロ粒子からの単極クーロン力の和として計算される。

また鏡像電荷力を評価するため、イオンの空間電

荷と電極から構成される三次元 Dirichlet 境界値問題を各時間積分ステップ毎に解き、各マクロ粒子の感じる鏡像電場を求めている。バンチした細いビームが変調された四重極チャンネル内にあるときの空間電荷+鏡像電荷による yz 平面内の電場のベクトル図を図 2 に示す。

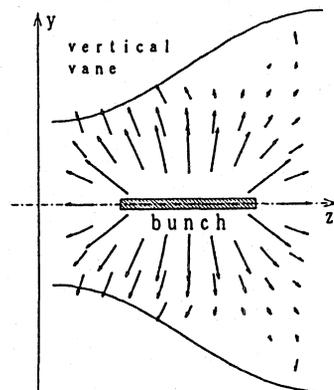


図 2: 空間電荷+鏡像電荷による電場の一例。

全電場は以上の和で表され、各粒子の運動方程式を 4 次の Runge-Kutta 法で積分して軌道を求める。計算は東京工業大学総合情報処理センターの CDC-ETA10 スーパーコンピュータを用いて行った。計算時間は 1 加速セルあたり 20 秒程度である。

3. 計算結果及び考察

図 3 はセル番号を横軸とする $^{16}\text{O}^+$ ビームの透過率及び損失率のプロファイルである。(a) と (b) は two-term potential に対する結果である。ビーム電流ゼロのとき透過率は 89% となり、PARMTEQ 計算との一致は良い。ビーム電流が 10mA のとき、透過率は 73% に低下した。比較のため、(b) に PARMTEQ コードによる計算結果を示す。透過率のプロファイルに多少の差異が認められるが、これは QLASSI と PARMTEQ とにおける空間電荷効果の計算方法の違いによるものと解釈可能である。

図 3(c)-(f) は現実的な構造である非双曲線断面のベインに対する結果である。ビーム電流がゼロのときにも既に透過率は低下している。ビーム電流 10mA に対しては、two-term potential のときよりも透過率は大きく低下し、特に $\rho = 0.75r_0$ の設計では 34% となる。 $\rho = r_0$ については PARMTEQ-H による結果 [3] と大体一致している。

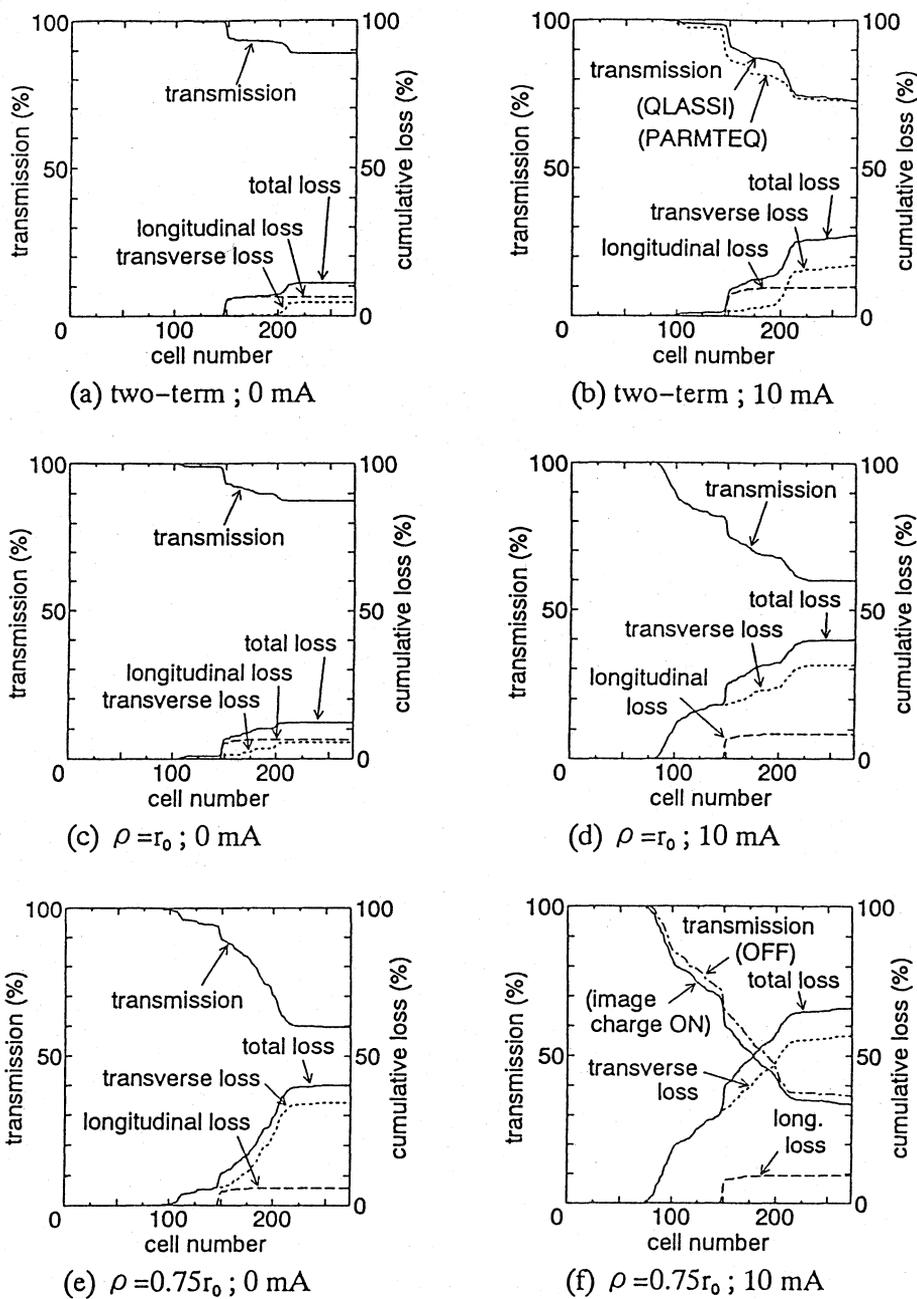


図3: ビーム透過率及び損失率のプロファイル.

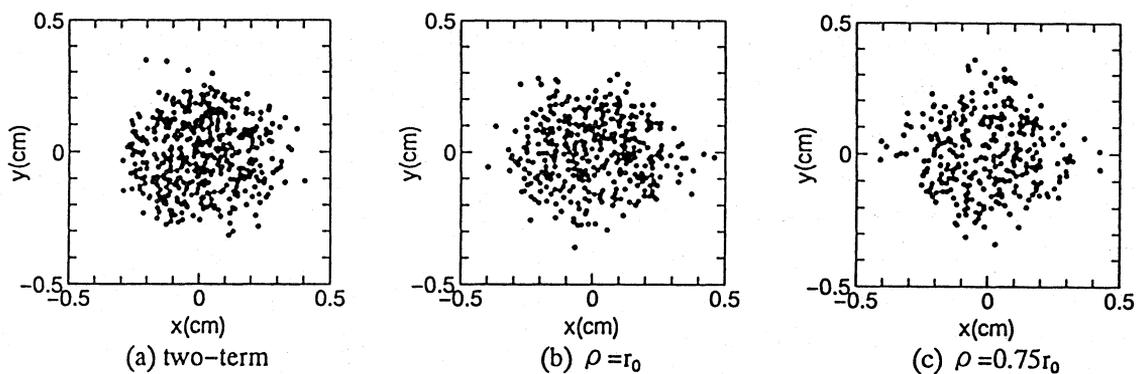


図4: buncher section 終端部付近におけるビーム断面形状.

鏡像電荷がどの程度ビーム透過率に影響を与えているかを調べるため、鏡像力をON/OFFしてその影響を調べた。図3(f)における一点鎖線は鏡像電荷力をOFFとしたときの結果である。ビーム透過率はわずかに増加した。従って、予想されたように鏡像電荷力はビーム透過率をわずかに減少させる効果があることが分かった。この傾向はGuy[8], Junior[9]らによっても報告されている。

図4は buncher section の終り付近に位置する第150セルにおけるビーム断面形状である。two-term potential を用いたとき、粒子分布は入射時と同様に大体楕円型である。しかし非双曲線断面のベインを使うと、ビーム断面形状に変形が見られる。特に $\rho = 0.75r_0$ の場合、断面はむしろ菱形に近い。この菱形状変形は、ベイン先端に誘起された表面電荷（イオンの空間電荷の鏡像に対応）からの引力により助長されている可能性がある。このような形状は少なくとも8極場の発生源となる。従って空間電荷効果の解析には時々刻々変化する三次元的粒子分布を反映した計算手法を用いるべきであることが分かる。

4. 結論

PARMTEQ-H コードで予想されたように、 $\rho = r_0$ の構造は理想的な双曲線状断面のベインの性能には及ばないが、 $\rho = 0.75r_0$ に比較すると大幅な改善となることが確認できた。

$\rho = 0.75r_0$ の構造はビーム透過率が著しく低く、やはり実機には採用できないとの結論に到達した。たとえこの構造を採用しても、 $\rho = r_0$ に比較して数%の電力効率向上しか期待できない[1]ことも、この構造を採用しなかった理由のひとつである。

ビーム径の safety factor[4]を増やす、つまり広い四重極チャンネルに細いビームを通せば、 $\rho = 0.75r_0$ の構造でも高い透過率が得られることは計算により確認した。しかし四重極チャンネルの径を大きくすれば、加速電力効率は急速に低下し、先端曲率半径の小さいベインを用いる意味は消失する。今回考察した構造では、鏡像電荷力のビーム透過率への影響は明確に分かる程度ではあるものの、小さいことが分かった(1%程度)。従っておおまかな設計においては鏡像電荷効果を考慮する必要性は少ない。しかし将来放射性物質の消滅処理、慣

性核融合等でRFQの利用が現実化し、極めて強いビームを加速する場合、数%の損失も問題となる可能性がある。この場合は鏡像電荷効果の詳細な評価が必要であろう。

PARMTEQ-H 計算においては東大核研の徳田 登氏の多大な御援助を頂きました。

参考文献

- [1] O. Takeda, K. Satoh, Y. Tanabe, S. Kawazu, M. Yamaguchi, M. Okamura, T. Hattori, Y. Oguri and N. Tokuda: Proc. 3rd European Particle Accelerator Conf., Berlin, 1334 (1992).
- [2] M. Okamura, Y. Oguri, Y. Takahashi, T. Hattori, O. Takeda, K. Satoh and Y. Tanabe: Proc. 1992 Linear Accelerator Conf., Ottawa, Ontario, 67 (1992).
- [3] M. Okamura, Y. Oguri, Y. Takahashi, T. Hattori, O. Takeda, K. Satoh, T. Miura, Y. Tanabe and N. Tokuda: Proc. International Symposium on Heavy Ion Inertial Fusion, Frascati, Italy (1993), to be published.
- [4] S. Yamada: Proc. 1981 Linear Accelerator Conf., Santa Fe, NM, LA-9234-C, 316 (1982).
- [5] K. R. Crandall, R. H. Stokes and T. P. Wangler: Proc. 1979 Linear Accelerator Conf., Montauk, N.Y., 205 (1979).
- [6] Y. Oguri, M. Okamura, O. Takeda, K. Satoh and T. Hattori: J. Nucl. Sci. Technol. 30, 477 (1993).
- [7] K. R. CRANDALL: Los Alamos Report LA-9695-MS, (1983).
- [8] F. W. Guy: Proc. 1991 IEEE Particle Accelerator Conf., San Francisco, CA, 3032 (1991).
- [9] P. Junior, A. Harth and H. Deitinghoff: Proc. 1992 Linear Accelerator Conf., Ottawa, Ontario, 513 (1992).