

RFQ Accelerators as High Energy negative ion injectors

M. Ogasawara

Toshiba Research and Development Center, Toshiba Corporation,
4-1, Ukishima-cho, Kawasaki-ku, Kawasaki 210

Abstract

A parametric survey of RFQs was carried out for the application to the high energy neutral beam injectors used in future large Tokamak systems. RFQs considered accelerate 100 keV negative deuteron ions to 1.3 MeV. Cell parameters were determined on condition that the transverse limited current equals to the longitudinal limited current. It was shown numerically that the accelerated current is inversely proportional to about one and a half power of the driving RF frequency in the range from 25 Mhz to 80 Mhz. The charge exchange losses of negative ions were also evaluated. For RFQs with the length of about 3m, the neutral gas pressure should be kept below 10^{-5} Torr to suppress the loss to less than several percent.

高エネルギー負イオン源としてのRFQの検討

1. はじめに

現在検討が進められているITER, SSTRといった次期、次次期核融合研究用大型トカマク装置に於ては1.3 MeV ($\sim 60A$), 2 MeV ($\sim 40A$) という高エネルギーの重水素の中性粒子ビームをプラズマ加熱及び、電流駆動用に使用することが考えられている。その為には高エネルギーの負イオン源の開発が必要である。しかしながら、このような高エネルギーの負イオンを得るためには従来の100 keV程度以下の中性粒子入射用イオン源の如く静電加速方式を用いる場合かなりの困難が予想される。そこで、電圧的には問題の少ない高周波加速を用いることが考えられ、特にRFQの使用が提案されている。¹⁾ NBI装置に使用する場合にはビームチャンネルの電流をなるべく大きくとることが必要と考えられる。そこで、今回、RFQの構造と電流限界について調べた。また、負イオンの加速途中での中性ガスとの荷電交換による損失についても評価した。

2. RFQの構造と電流限界

2-a) 計算条件

100 keV の重水素負イオンを1.3 MeVまで加速することを考える。RFQの構成は通

常の Radial Matcher - Shaper - Gentle Buncher - Accelerator の4つのセクションより成るものを考えた。ここで、Gentle Buncher に於ては各セルで縦方向の電流限界と横方向の電流限界²⁾とを等しく取った。Accelerator の位相は電流限界が Gentle Buncher 入り口にほぼ等しくなる様に決めた。また、Radial Matcher のアクセプタンスの計算では空間電荷の影響を含めた。イオン源の電流密度は 13 mA/cm^2 、発散角は最大で 35 mrad と仮定した。これより、エミッタンスの最大値は 例えば 1 A で $3.257 \text{ cm}\cdot\text{mrad}$ とし計算した。エミッタンス分布は Radial Matcher のアクセプタンスに一致するものとした。その他、ヴェーン間電圧/平均半径 と 最大表面電場 E_s^{max} との比は 1.36 と仮定した。RF源として、4極管を使うことを想定して、周波数は 25 Mhz から 80 Mhz までの範囲とし、 25 Mhz , 40 Mhz , 60 Mhz , 80 Mhz について調べた。加速計算では、最低次の項だけを取り入れた。

2-b) 計算結果

各周波数に於て Shaper のセル数と出口の同期位相 及び、集束係数 B を可変パラメータとして、RFQの構造を決め、電流限界を求めた。Kilpatrick factor は 1.7 にとった。 B の上限は Radial Matcher でビームのヴェーンへの衝突で決まる。Radial Matcher の長さは全長を短く抑える為に4セルとした。空間電荷の影響が大きい場合 Radial Matcher を長くしても加速性能はあまり改善しない。本方式で構造を決めた場合RFQの全長は Radial Matcher を除き、各周波数で、 $2.6\sim 3 \text{ m}$ であった。得られた構造に対して、加速計算を行った。 40 Mhz での加速計算の例を図1に示す。縦方向の電流限界を大きくした為エネルギー幅がかなり広がっている。入射電流の約8割が加速されたときの加速電流を仮に $I_{80\%}$ として、電流限界の式の与える値とともに高周波の周波数 f 依存性を図2に示す。同時にKilpatrick factor が 2.0 の場合の結果も示した。ほぼ $I_{80\%} \propto f^{-1.5}$ である。また、電流限界の式で与えられる電流を入射した場合、 $7\sim 8$ 割が加速される。

3. 荷電交換による損失の評価

重水素の負イオンの中性ガスとの荷電交換の断面積は正イオンに比べて二桁以上大き³⁾く特に加速前半に於ける荷電交換による損失が懸念されている。そこで、負イオン数 N^- がレート方程式

$$dN^-/d\eta = \lambda \beta_s (\sigma_{-10} + \sigma_{-11}) n_0 N^-$$

$\eta = z/\lambda \beta_s$, $\lambda \beta_s/2$: ユニットセル長, n_0 : 中性ガス密度

σ_{-10} : $\text{H}^- + \text{H}_0 \rightarrow \text{H}_0$, σ_{-11} : $\text{H}^- + \text{H}_0 \rightarrow \text{H}^+$ の断面積

に従うと仮定して、荷電交換による損失を計算した。

25 Mhz の場合の計算結果を図3に示す。 10^{-4} Torr に於ても 30% が失われることが分かる。荷電交換による損失を数%以下に抑える為には中性ガス圧力を 10^{-5} Torr 以下にすることが必要である。現在核融合用に開発されている負イオン源は 10^{-2} Torr 程度のガス圧力で運転されているため、上記の低い圧力を達成するためには排気速度がビーム電流 1 A あたり、数十万 //sec 以上と非常に大きいポンプが必要となると考えられる。ポンプの排気速度を抑える為には低圧力で動作する負イオン源の開発が急務である。

4. 今後の予定

今回はビームの加速のみを調べた。RFQ共振器構造や、RF源、また、イオン源とRFQとの接続部分、RFQ後のビーム伝送系、さらには、負イオン源そのものの開発等残された課題は多い。今後はそれらについても検討を進める予定である。

参考文献

- 1) W. R. Bencraft et. al : Fusion Technology 15 (1989) 734
- 2) R. L. Gluckstern : Proc. Linear Accel. Conf., Los Alamos, 1966, p237
P. M. Lapostolle : Cern int. report, AR/Inf. SG/65-15, 1965
- 3) 堀池 他 : JAERI-M 86-064

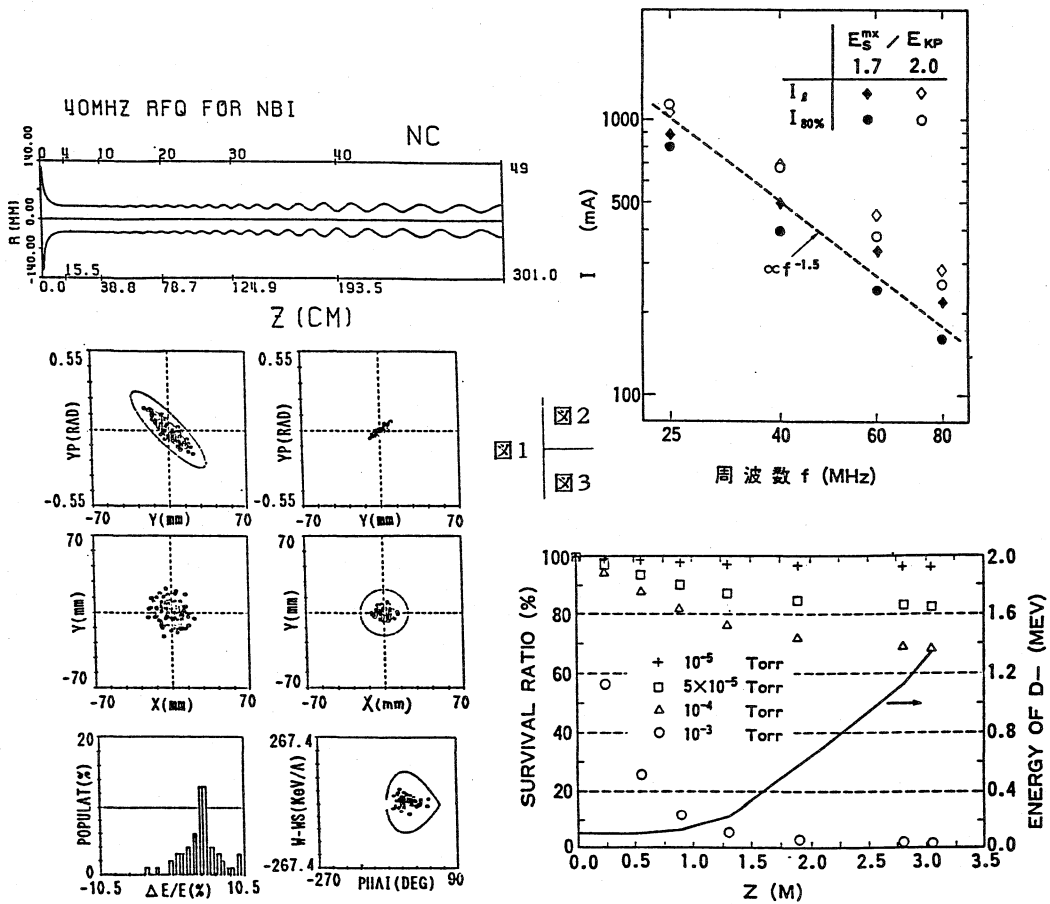


図1. RFQ加速計算の例 40MHz 上:ヴェーン形状 中左:入射ビームのエミッタンス分布 中右:RFQ出口での分布 下左:エネルギー分布 下右:エネルギー, 位相分布
 図2. 周波数と加速電流との関係 記号は図中に説明
 図3. 幾つかの中性ガス圧力に於ける負イオンの加速途中の荷電交換損失