

RF Characteristics of the INS 25.5-MHz Split Coaxial RFQ

S. Shibuya^{*}, S. Arai, A. Imanishi, T. Morimoto, E. Tojyo, and N. Tokuda,

Institute for Nuclear Study, University of Tokyo

^{*}The Graduate University for Advanced Studies

ABSTRACT

A 25.5-MHz split coaxial RFQ for heavy ions with a charge-to-mass ratio greater than 1/30 has been constructed. We have finished low power tests and obtained the following results: the field strengths between neighboring vanes have a four-time symmetry within $\pm 0.6\%$ over the whole vane length; the intervane voltage is constant all along the vanes, since the measured field strength in the beam aperture is well reproduced by a calculation on the assumption of the flat voltage distribution. High power tests are now going on. We have so far attained an intervane voltage of 110 kV under a pulse operation with an input power of 70 kW in peak and a duty factor of 0.9%.

25.5 MHz 分割同軸型RFQライナックの高周波特性

1. はじめに

INSタイプの分割同軸型RFQは、電極にベインを使ったマルチモジュール構造をしている。¹⁾ 大型ハドロン計画のための25.5 MHz原型モデルは、3台のモジュール空洞（内径90cm、長さ70cm）からなっている。全長は約210 cmで、荷電質量数比1/30以上のイオンを核子あたり1 keVから45.4 keVまで加速できる。この加速空洞の構造と設計については、すでに報告した。^{2, 3)} 今回は、空洞内のベイン間電場の4回対称性、ビームアパーチャー内の軸方向の電場強度分布及び、現在行なわれている高電力試験の経過について報告する。

2. 電場分布の測定

共振空洞内の電場分布は摂動法によって求めた。摂動法による電場強度と共振周波数のズレの関係は、 $E \propto (\Delta f / f_0)^{1/2}$ となる。但し、 E は摂動体の位置での電場強度、 Δf は摂動体による共振周波数のズレ、 f_0 は空洞の共振周波数を表わす。また、摂動体が空洞内にある時と無いときとでは、モニターループからの透過波と入射波との間の位相差に違いが生じる。この変化を θ とし、共振空洞の無負荷Q値を Q_0 とすると、 $-\tan \theta \approx 2 Q_0 (\Delta f / f_0) \propto E^2$ という関係が成り立つ。以下に述べる実験では、この θ を測定した。測定系の構成を図1に示す。信号発生器より出たRF出力は-20dB方向性結合器で、ループカプラーから共振空洞に入る入射波と、ベクターボルトメーターに入る参照波に分けられる。一方、共振空洞からの透過波もベクターボルトメーターに入れて、位相差の変化を測定した。

RFQのベインは、ビーム軸に対して4回対称である。ベイン間電場の対称性を測定するために、摂動体（テフロン製、直径20 mm、長さ10 mm）を図2に示すように、常に二つのベインにあたるようにしてビーム軸方向に動かした。四つのベイン間の電場強度の測定データを図2に示す。それぞれのベイン間の電場強度は、それらの平均値（軸方向の位置を固定したときの、四つのベイン間電場強度の平均値）に対して、 $\pm 0.6\%$ 以内に収まっている。

摂動体をビーム軸上で動かして、ビームアパーチャー内の電場強度を測定した。この測定の際に

は、最小アパーチャー半径 (5.12 mm) を考慮して直径9.5 mm、長さ7.5 mmのテフロン製振動体を使った。結果を図3に太線で示す。一方、計算でこの実験結果を再現できるか試みた。ベインのセルパラメータの設計値を使って、電場成分を求め、振動体の体積内で電場エネルギーを積分した。このとき、ベイン間電圧は軸方向に一様であると仮定した。計算結果を図3の細線で示す。計算の中でベイン間電圧は、ビーム入口のラジアルマッチャー部の終わりのところ (入口から30 cmのところ) で実験値と一致するように決めた。ラジアルマッチャー部を除けば、計算値は測定値と良く合っている。これは、仮定通りに、ベイン間電圧が一様であることを示している。また、アパーチャー内で実際に作られている電場も、理論値に近いものと推測出来る。

3. 高電力試験

高周波電力は、WX-120D同軸導波管と、セラミクス絶縁を施した水冷式のループカプラーを通して空洞に入る。高電力試験中の空洞の主な諸元を表1に示す。

運転中にベイン間電圧を測定するために、モニターループからの電圧がベイン間電圧の約 10^{-4} 倍になるように、モニターループの較正を行なった。較正は、ベインに直接RF電圧をかけたときのモニターループからの電圧を測定して行なった。結果は、ベイン間電圧1 Vに対して、モニターループ電圧は0.1225 mVであった。一方、共振抵抗の値 R_p が与えられれば、入力電力 P_{in} からベイン間電圧 V_v を式 $V_v^2 = 2 \times R_p \times P_{in}$ を使って計算することができる。共振抵抗は、ベイン間電圧 V_v と、その時50Ωで終端した入力カプラーにかかる電圧 V_c を直接測定すれば、式 $R_p = 50 \times (V_v/V_c)^2$ に代入して求めることが出来る。結果は、86.8 kΩとなった。また、共振抵抗は無負荷 Q 値からも求めることができ、 $R_p = Q_0 / 2\pi f_0 C$ となる。ここで、 C は空洞の静電容量を表わす。 $f_0 = 25.5$ MHz, $Q_0 = 6400$, $C = 453$ pFの値を用いて、88.2 kΩとなる。これらの共振抵抗の値を用いて、入力電力とベイン間電圧の関係を求めた結果を図4に実線で示す。図中の白丸は、モニターループ出力から求めたベイン間電圧と、高周波電源についている電力計から読みとった入力電力との関係を示す。これらの値は、 $\pm 1.1\%$ 以内で一致している。

加速空洞のエージングは、空洞の真空度が 7×10^{-6} Torrより悪くならないように3%~0.6%の低いデューティーで行なった。CWに換算したエージングの時間と到達ベイン間電圧との関係を図5に示す。現在までの最高到達ベイン間電圧は110 kVであり、デューティーは0.9% (パルス幅 0.3 ms, 繰り返し30 Hz) であった。荷電質量数比1/30のイオンを加速するのに必要なベイン間電圧は109 kVであるので、低いデューティーながら、ベイン間電圧の目標値が、達成されたことになる。

モニターループからの出力電圧をオシロスコープで見ながら入力電力を徐々に上げていくと、ベイン間電圧で6 kVの点で突然電圧がかかり、さらに電力を上げていくと、波形が歪むと同時に、真空度が急激に悪くなる電圧レベルが数カ所みられた。これはマルチパクタリングによるものであり、ベイン間電圧が8.9~12.2 kV, 13.9~18.0 kV, 39.2~56.3 kVの時に発生した。電圧が低いほどその現象は顕著であった。図5からも、マルチパクタリングレベルの存在が読み取れる。この実験結果から、この加速器ではベイン間にかかる電圧の可変範囲は、約6 kV~110 kVであるので、1/2~1/30の荷電質量数比を持つイオンを加速できることがわかった。

4. まとめと今後の予定

方位方向の電場強度分布のばらつきは、四つのベイン間の電場強度の平均値に対して、 $\pm 0.6\%$ 以内であった。これまでのRFQの製作と加速経験から、この程度のばらつきは問題にならない。ビームアパーチャー内の電場分布は、ベイン間電圧が軸に沿って一様であると仮定した計算によって、よく再現された。

高電力試験では、ベイン間電圧の目標値110 kVは達成したので、引続きデューティーを現在の0.9%から10%に引き上げることを試みる。また、放電限界電圧の測定や、高デューティー運転における空洞の温度上昇による共振周波数への影響などについて調べて行く。なお N_2^+ イオンを用いたビーム加速試験を、11月中旬に始める予定である。

参考文献

- 1) S.Arai, Split Coaxial RFQ Structure with Modulated Vanes, GSI-Report 83-11,1983.
- 2) S.Arai et al., Design Study of a 25.5-MHz Split Coaxial RFQ, 14th Int. Conf. on H.E. Accelerators, KEK, Tsukuba, Aug.,1989.
- 3) N.Tokuda et al., Structure and RF Characteristics of the INS 25.5 MHz Split Coaxial RFQ, 7th Symp. on Accelerator Science and Technology, Osaka Univ.,Dec.,1989.

表 1. 高電力試験中の空洞の主なパラメーター

共振周波数 (f_0)	25.505 MHz
無負荷 Q (Q_0)	6400
静電容量	453 pF
共振抵抗 (R_p)	88.2 k Ω

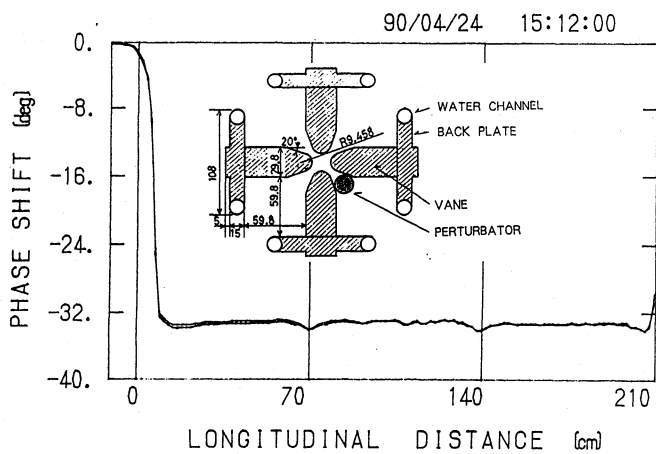


図 2. 4つのベイン間電場強度の測定における摂動体の位置と測定結果

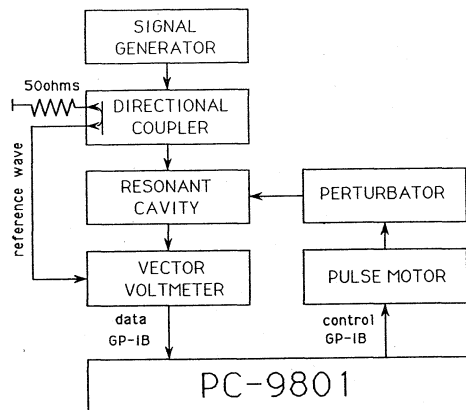


図 1. 電場強度測定系の構成

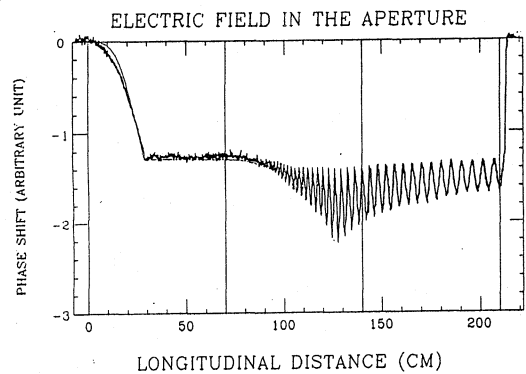


図 3. ビームアパーチャー内の電場強度分布

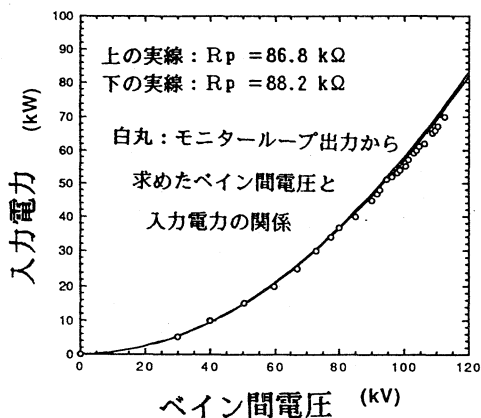


図 4. 入力電力とベイン間電圧の関係

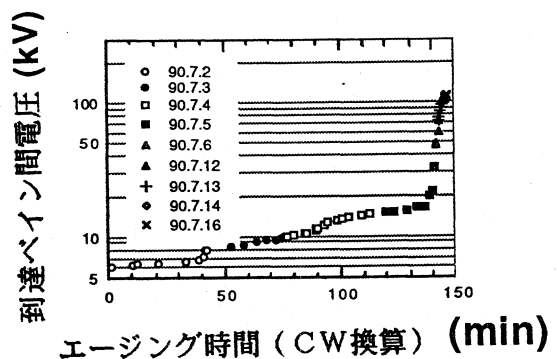


図 5. エージング時間 (CW換算) と到達ベイン間電圧の関係