

LOW POWER RF FIELD TUNING OF A FOUR-VANE TYPE RFQ FOR THE JHP

Akira UENO and Yoshishige YAMAZAKI
National Laboratory for High Energy Physics, KEK
1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305, Japan

ABSTRACT

A 432 MHz four-vane type radio-frequency quadrupole (RFQ) linac stabilized with π -mode stabilizing loops (PISLs) is under construction as a preinjector linac for the Japanese Hadron Project (JHP). It was designed to accelerate a 20-mA H^- beam from 50 keV to 3 MeV with a 3 % duty factor. In the RFQ, we obtained the uniform distribution within ± 1 % both longitudinally and azimuthally by adjusting the positions of dummy tuning plungers. The sizes of stab tuners and the standard positions of movable tuners were thus determined to reproduce the obtained field distribution.

JHP用4ヴェイン型RFQの低電力試験

1. 序

大型ハドロン計画 (Japanese Hadron Project : JHP) の初段加速器として使用する目的で、共振周波数432MHzの高周波四極リニアック (radio-frequency quadrupole linac : RFQ) を製作中である[1, 2, 3]。このRFQは、ピーク値20mAの H^- ビームを50keVから3MeVまで加速するように設計されている。投入される高周波電力のデューティは、通常のRFQに比べて高く、3% (パルス幅600 μ sec、繰り返し50Hz) である。これらの設計値は、JHP全体のビーム光学の検討を行って決定された。RFQ内の最大表面電場がKilpatrick限界の1.8倍以下という条件で、これらの要求を実現するためには、RFQの長さが約2.7m (高周波の自由空間波長の約4倍) 必要になる。

このように長い4ヴェイン型RFQでは、次に示す2つの理由から、二極モードの混合を防ぐための安定化構造が必要となる。

(1) いくつかの二極モード (TE110-, TE111-とTE112-モード) の共振周波数と加速モード (最低次の四極モード : TE210-モード) の共振周波数が近いこと、僅かな機械加工誤差や非対称な熱変形により、これらの二極モードが、加速モードと混合する[4]。

(2) 混合した二極モードは、ビームを偏向し、横方向アクセプタンスを減少させるので、ビーム光学に大きな影響を及ぼす。

従って、現在運転中の4ヴェイン型RFQのほとんどが、ヴェイン結合環 (vane coupling ring : VCR) と呼ばれる安定化構造を採用し、二極モードの混合を防いでいる[5]。高デューティRFQでは、VCR上での発熱による温度上昇を抑えるため、VCRを水冷しなければならない。しかし、VCR用水冷管の製作は、VCRが複雑な形状をしているため非常に難しい。カナダのチョークリバー原子核研究所 (CRNL) で、VCR付4ヴェイン型RFQを使用して、連続 (CW) 運転で陽子の加速に成功した例があるが[6]、このCW-RFQの長さは短い (高周波の自由空間波長の約1.3倍)。このCW-RFQに使用された2対の水冷管付VCRは、2つの空洞端部付近でヴェインに溶接されている。JHP用RFQのように長いRFQでは、空洞端部から離れた位置にも数対のVCRが必要となり、CW-RFQで用いられた方法を用いることはできない。

4ロッド型RFQのような、二極モードが存在しない4ヴェイン型以外の構造も考案されている[7]。しかし、こ

れらの構造は、数十MHz以下の空洞を4ヴェイン型で製作すると径が大きく (1m以上) なるので、RFQを製作しやすい大きさにするために考案されたものである。このため、4ロッド型RFQに使用されるロッドのように、4ヴェイン型以外の構造に使用される要素には、高い周波数では小さくなりすぎて製作が難しくなるものがある。さらに、4ヴェイン型以外の構造には、4ヴェイン型に比べ電流がより集中している部分があり、発熱もその部分に集中する。従って、4ヴェイン型以外の構造は、4ヴェイン型に比べQ値も低くなる。

JHP用の長いRFQに要求される高い共振周波数で、高いデューティという二つを同時に実現するために、我々は、新しい4ヴェイン型空洞の電磁場を安定化する方法 (π -モード安定化ループ : PISL) を考案した[8, 9]。この方法では、隣合う2つの1/4空洞の組の各々は、導体の閉ループを使って磁氣的に結合される。この結合により、全ての二極モードの共振周波数を、加速モードの共振周波数より十分に高くし、加速モードと二極モードの混合を防ぐことができる。MAFIA[10, 11]を用いた3次元高周波電磁場解析の結果、最適化されたPISLは、VCRより次ぎの点で優れている : (1)容易な製作、(2)高いQ値、(3)より一様な電場分布。PISLのこれらの長所と安定化効果が、低電力試験モデルにおける測定でも検証されたので[12]、PISLをJHP用RFQに採用することにした。

この論文では、JHP用プロトタイプRFQについて行った低電力高周波電磁場調整の結果について述べる。

2. 低電力高周波電磁場調整

図1に、1対の水平方向PISLがある位置における空洞の断面図を示す。直径5mmのロッドが、ヴェインに開けられた直径15mmの孔を通して第一と第四1/4空洞に渡って挿入されている。この時、ロッドと2つの1/4空洞の壁により、導体の閉ループが形成されている。この閉ループがPISLであり、これら2つの1/4空洞を磁氣的に結合する。第二と第三1/4空洞に挿入されたロッドもPISLを形成している。冷却水のシールが空洞の外で高周波電流のコンタクトと分離して行うことができるので、PISL用ロッドの挿入はVCR用リングのヴェインへの取り付けよりも非常に容易である。参考文献8に述べられているように、全ての二極モードの共振周波数を高めるためには、数対の垂直方向PISLも必要である。図1を90°回転させると、1対の

垂直方向PISLがある位置における空洞の断面図になる。ビーズ摂動法を用いて各1/4空洞内の磁場分布を測定するために使用するビーズの位置も図1に示されている。

図2に、チューナ、カップラー及びモニターを設置する前の空洞の長手方向の外観図を示す。この図からわかるように、8対の水平方向PISLと8対の垂直方向PISLが設置されている。また、この空洞には、20箇所の真空ポート(V)、8箇所の可動チューナ・ポート(Tm)、10箇所のスタブ・チューナ・ポート(T)、2箇所のカップラー・ポート及び20箇所のループ・モニター・ポートが設けられている。計18箇所の可動チューナ・ポートとスタブ・チューナ・ポート(TmとT)にマイクロ・メータ付き調整用ダミー・プランジャを設置し、低電力高周波電磁場調整を行った。この調整の間、2箇所のカップラー・ポート(C)にはダミー・カップラーを、20箇所のループ・モニター・ポート(M)にはループ・モニターを設置した。調整後に得られたダミー・チューナの位置を基に、スタブ・チューナの大きさと可動チューナの基準位置を決定する。カップラーの先端ループ形状もダミー・カップラーを用いて決定される。

最初に、四極モード(TE21nモード)と2つの縮退が解けた二極モード(TE11n-AとTE11n-Bモード)の分散曲線を測定した。測定結果を図3に示す。この図からわかるように、PISLにより加速モード(TE210モード)と二極モードとの周波数差は、27MHz以上に広がっている。この測定の間、全てのダミー・チューナは、それらの効果がなくなる位置に設定されていた。

この時測定された加速モードの共振周波数は、設計値より1.14MHz低かった。この設計値は、MAFIAを用いた解析結果と低電力試験モデルの測定結果を基に計算されたものである。設計値と測定値の差の内、0.8MHzは、水冷管を空洞に溶接したときに生じた変形によるものである。残りの小さな差(0.34MHz)は、機械加工誤差及びMAFIAを用いた解析の計算誤差によるものと考えられる。

次に、ビーズ摂動法を用いて4つの1/4空洞内の磁場分布を測定した。ダミー・チューナを調整する前の測定結果を図4aに示し、ダミー・チューナ調整後の測定結果を図4bと図4cに示す。ビーズ摂動法で測定される周波数シフトが磁場強度の自乗に比例するので、図4は磁場強度の自乗の分布を表している。これらの周波数シフトは、直径4.5mmのアルミ製のビーズが各1/4空洞内を通過する際

に引き起こされたものである。なお、ダミー・チューナ調整後、加速モードの共振周波数は、高周波源の設計周波数(432MHz)に一致させた。

図4で、各1/4空洞の16箇所に鋭いピークが観測されている。これらは、PISL用のロッドに近い位置で、局所的に変形した磁場分布を表している。図1に示されているように、ビーズとロッドの最短距離は、非常に近く約7mmである。磁場分布は、同様にして、真空ポート、ダミー・カップラー及びダミー・チューナの近くでも変形される可能性がある。磁場分布の長手方向での傾き量(四極の高次モードの混合量)や二極モードの混合量を正確に評価するためには、これらの局所的な影響を排除しなければならない。そこで、4つの1/4空洞内の磁場強度はループ・モニターの位置で比較することにした。

図4aからわかるように、ダミー・チューナ調整前でも、分布はすでになり様である。この分布の長手方向での傾き量は、+6%から-10%の範囲内に納まっている。

(磁場は、+3%から-5%の範囲で傾いている。)ヴェイン間静電容量は、ヴェイン・モデレーションの形状に応じて異なるため、長手方向で非一様になる。この非一様性が、磁場分布が傾いている主な原因と考えられる。一方、4つの1/4空洞内の分布の差は、±2%程度である。

(磁場強度の差は、±1%程度である。)この値は、低電力試験モデルで測定された値よりも1.3倍大きい。このプロトタイプRFQは、水冷配管の溶接を除くと、低電力試験モデルと同様の方法で製作されている。従って、溶接により加速モードへの二極モードの混合量が僅かながら増加したと考えられる。

図4bと図4cに示すように、ダミー・チューナ調整後、長手方向での分布の傾き量は、±2%以下に改善された。

(磁場分布の一様性は、±1%以下である。)図4cでは、詳細を示すために、各分布を分離し、縦軸も拡大して示している。各ダミー・チューナの位置で観測されるピークの高さは、各々のチューナの挿入量に比例している。4つの1/4空洞内の分布の差も、±1%以下に改善されている。(磁場強度の差は、±0.5%以下である。)これは、加速モードへの二極モードの混合量が0.5%以下であることを意味する。

加速モードのQ値の測定値は、6950で、低電力試験モデルで測定された値6800より僅かながら改善されていた。

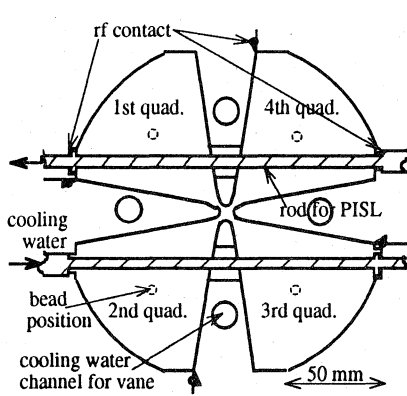


図1 1対の水平方向PISLがある位置における空洞の断面図。

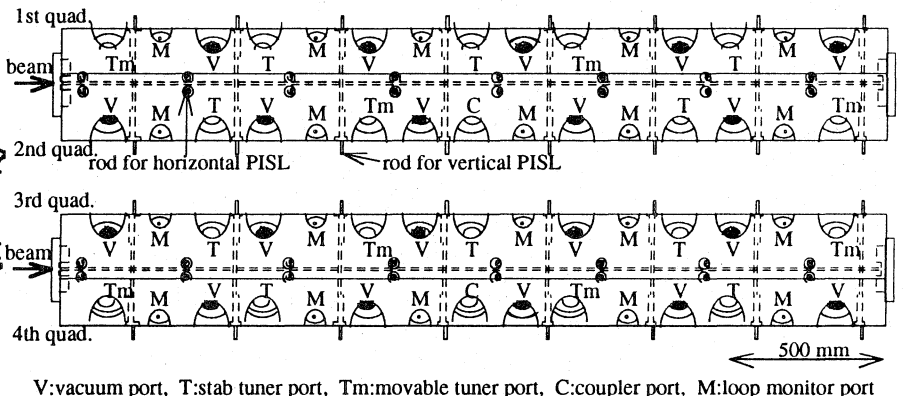


図2 チューナ、カップラー及びモニターを設置する前の空洞の長手方向の外観図。

3. 結び

ダミー・チューナを使用して、JHP用プロトタイプRFQの低電力高周波電磁場調整を行った。磁場分布の様性が±1%以下で、共振周波数を高周波源の設計周波数に一致させることができた。この時、加速モードへの二極モードの混合量は、0.5%以下であった。

今後、対応するダミー・チューナの大きさに合わせて加工したスタブ・チューナと可動チューナをRFQに設置した後、ビーム試験を行う予定である。

参考文献

- [1] A. Ueno and Y. Yamazaki, Proc. 1990 Lin. Accel. Conf., LANL report, LA-12004-C, 1991, pp.329-331.
- [2] Y. Yamazaki and M. Kihara, Proc. 1990 Lin. Accel. Conf., LANL report, LA-12004-C, 1991, pp.543-547.
- [3] F.Naito et al., "JHP 1GeV 陽子リニアックの構成要素の開発", this meeting.
- [4] A. Ueno, Y. Mori, A. Takagi, C. Kubota and Y. Yamazaki, Proc. 1990 Lin. Accel. Conf., LANL report, LA-12004-C, 1991, pp.60-62.
- [5] H. R. Schneider and H. Lancaster, IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-30 (4), 1983, pp.3007-3009.
- [6] G. M. Arbique, B. G. Chidley, G. E. McMichael and J. Y. Sheikh, Proc. 1988 Lin. Accel. Conf., CEBAF-Report-89-001, 1989, pp.91-93.
- [7] H. Klein, IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-30 (4), 1983, pp.3313-3322.
- [8] A. Ueno and Y. Yamazaki, Nucl. Instr. and Meth. A300, 1991, pp.15-24.
- [9] A. Ueno, T. Kato and Y. Yamazaki, Proc. 1990 Lin. Accel. Conf., LANL report, LA-12004-C, 1991, pp.57-59.
- [10] T. Weiland, Part. Accel. 17, 1985, pp.227-242.
- [11] R. Klatt, F. Krawczyk, W. R. Novender, C. Palm and T. Weiland, Proc. 1986 Lin. Accel. Conf., SLAC report, SLAC-303, 1986, pp.276-278.
- [12] A. Ueno and Y. Yamazaki, Proc. 1992 Lin. Accel. Conf., AECL-10728, 1992, pp.713-715.

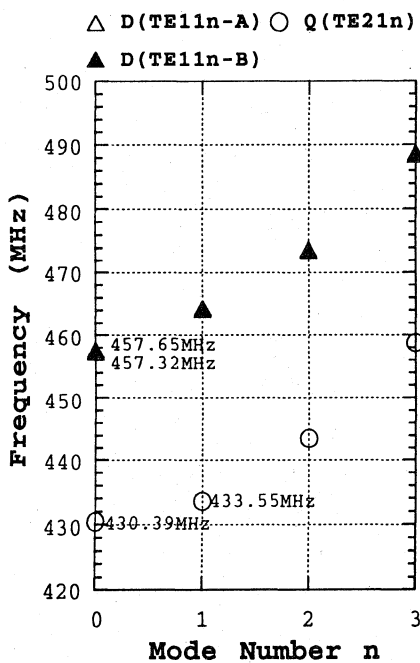


図3 四極モード (TE21n) と縮退が解けた2つの二極モード (TE11n-AとTE11n-B) の分散曲線の測定結果。

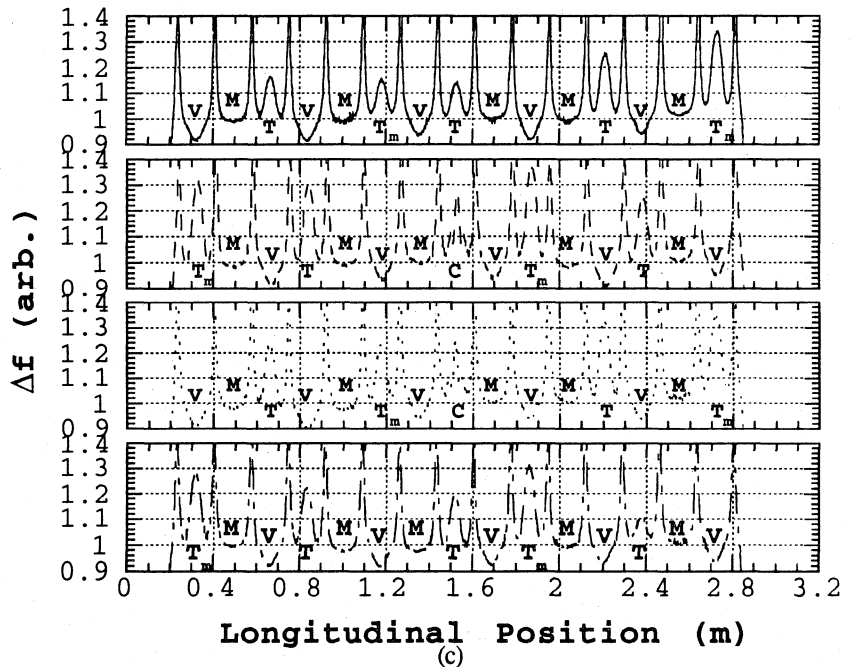
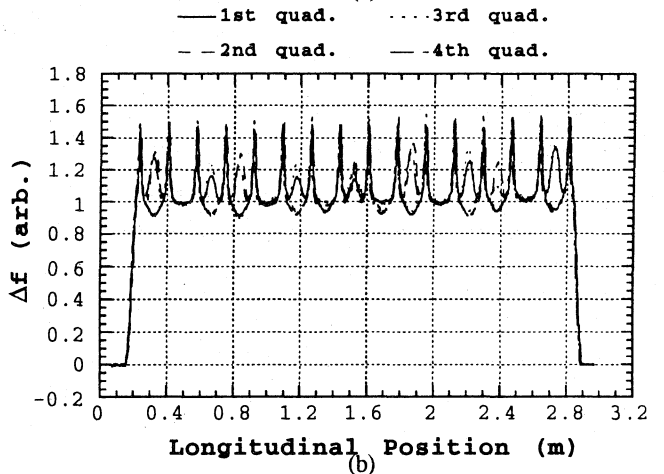
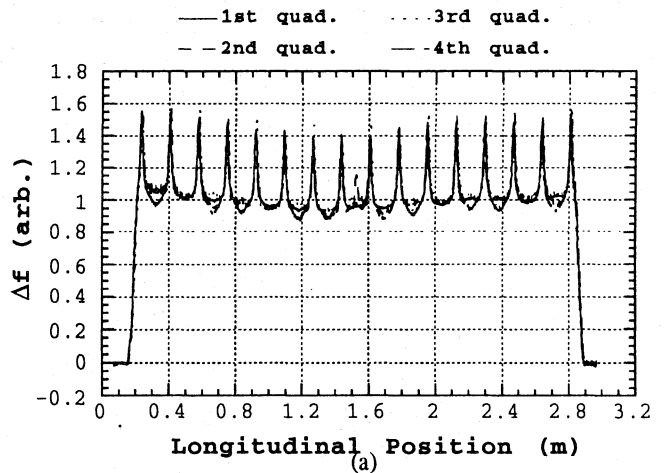


図4 4つの1/4空洞内の磁場強度の自乗の分布
 a: ダミー・チューナ調整前の分布。
 b, c: ダミー・チューナ調整後の分布。詳細を示すために、図4cでは各分布を他と分離し縦軸を拡大して表示。