

21p-4

COLD MODEL TEST OF SLOT COUPLING BETWEEN RFQ AND DTL CAVITIES

K. IKEDA, T. KAN, K. YOSHIKAWA, J. HIROTA, Y. IWASHITA*, A. NODA* and M. INOUE*

Mitsubishi Atomic Power Industries, Inc.

3-1, Minatomirai 3-chome, Nishi-ku, Yokohama-shi 220, Japan

*Nuclear Science Research Facility, Institute for Chemical Research, Kyoto Univ.
Gokasho, Uji-shi, Kyoto-fu 611, Japan

ABSTRACT

A cold model test has been carried out for the investigation of slot coupling between a four vane RFQ and an Alvarez DTL cavity. The RFQ has unmodulated vanes and the DTL consists of six 4π -mode cells which are resonant at about 400 MHz. These two cavities are coupled through two slots provided in the common end plate and the maximum coupling constant so far obtained is 1.15 %. Measurements of the magnetic and electric field distribution indicate that good field distributions can be obtained by the π -mode coupling if the coupling constant is less than 0.75 %.

RFQとDTL空洞のスロット結合コールドモデル試験

1. はじめに

多目的用陽子線形加速器の設計研究を1990年4月以来行って来た。この研究では、陽子を10 MeVまで加速するため、4ヴェイン型RFQ、 4π および 2π モードのアルバレ型DTLの最適な組み合わせを求めることが目的であった。RFQから 4π DTLへの移行は、RFQの製作・調整を容易にするため、1 MeVと定めている。

RFQとDTL空洞は、通常、別々のタンクとして製作され、ビーム輸送ラインによって結合されている。RFQ空洞をDTL空洞と結合させ、RFQ空洞への高周波電力がDTL空洞から供給することを計画した。

何故なら、RFQへの高周波源と駆動ラインが不要になるからである。PIGMI (Pion Generator for Medical Irradiation)の設計では、RFQ空洞はスロットを通じてRFQマニホールドに結合され、このマニホールドがDTL空洞と共振的に結合された¹⁾。

PIGMIの方法より簡単でより効果的な構成が望ましいと考えられたので、コールドモデル試験を行うことを決定した。ループ結合も可能であるが、スロットの方が簡単である。使用したRFQモデルは既存のものであり、モジュレーションなしのヴェインを有している²⁾。DTLモデルは新しく製作した。

- 1 RFQ(existing)
- 2 Drift tube
- 3 Stem
- 4 Garter
- 5 End plate(inlet)
- 6 End tuner
- 7 Cutback-block
- 8 Slot plate
- 9 End plate(outlet)
- 10 Cavity wall
- 11 Channel
- 12 Side tuner

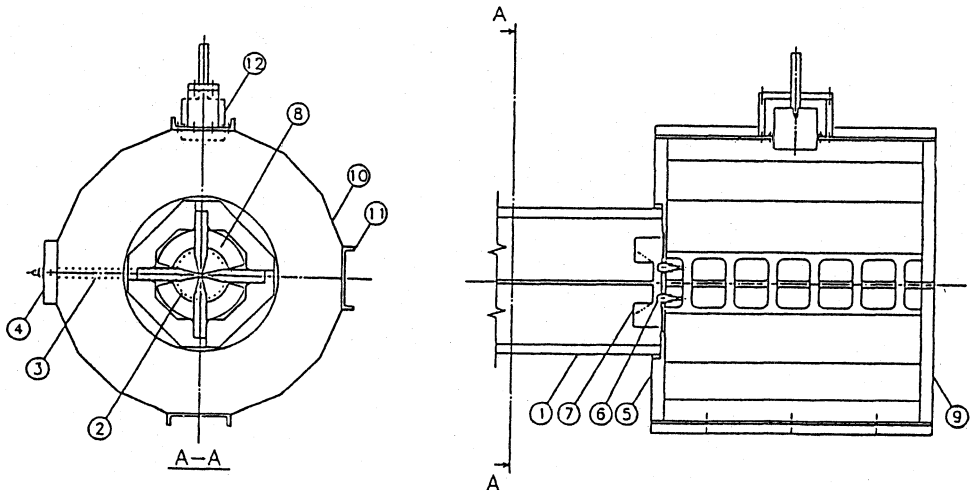


図1 モデル空洞の構造

2. モデル空洞の構造

RFQモデル空洞とともにDTLモデル空洞の構造を図1に示す。DTL空洞は 4π モードの6セルからなり、各々は68.5mm長さで、1MeVの陽子のエネルギーに対応している。空洞の等価内径およびドリフトチューブ(DT)の外径は、それぞれ、460および80mmであり、ポアー半径は5mmである。DTL空洞はアルミ合金(5052)製、DT間隙はSUPERFISH計算により、TM010モードの共振周波数が403.5MHzになるように決定されている。共振周波数を調整するため、サイドチューナーおよび固定チューナーが用意されている。

RFQ空洞の等価内径および長さは、154.5および1220mm、ポアー半径は3.0mmである。空洞壁およびヴェインはアルミ合金(5052)製である。各ヴェインの両端に向かって8個のエンドチューナーが設けられている。このチューナーは直径12mmの銅棒で、チューナーとヴェインとの間隙は10.0~0.0mmに調整可能である。各ヴェインの両端には $30.0 \times 39.8 \text{ mm}^2$ のカットバックがある。5個の異なる寸法のカットバックブロックが用意された。

RFQヴェインの出口からDTLの第一間隙の中心までの距離Lは、RFQに“1/2エンドセル”が用いられるならば、加速を同期させるために次の関係を満足すべきである。

$$L = (\Phi_{SDTL} - \Phi_{SRFQ}) \beta \lambda / 2\pi + n \beta \lambda / 2 \quad (n = 1, 2, \dots) \quad (1)$$

ここに Φ_{SDTL} と Φ_{SRFQ} は値DTLとRFQにおける陽子ビームの同期位相である。RFQとDTL空洞との共通端板として、2つの端板(A, B)を用意した。それぞれの厚さは、 Φ_{SDTL} と Φ_{SRFQ} が等しいと仮定し、7.1および24.3mmである。試験では、非共振スロットのために用意した端板Aを主として使用した。端板Bは共振スロット用に用意したもので、横方向のマッチング要素を入れ得る余地を有している。しかし、共振スロットについては、現在までのところ、成功していない。

試験に使用したスロットは、円形のレーストラック状である。非共振結合には、同形の2個のスロットを点対称に使用する。ヴェイン端に対しては、それぞれ、

左右対称である。スロット板を取り替えることにより、スロットの形を変え、結合特性の比較ができる。また、スロット板の縦方向位置を変えることにより、RFQ、DTL間の励振強度比を変えることができる。

3. 結合特性

3.1 共振周波数と結合常数

電磁場のチューニング以前、単独で測定したRFQ空洞のTE210モードの共振周波数が402.96MHz、一方、DTL空洞のTM010モードの共振周波数は402.18MHzであった。試験に最初に使用したスロットの中心に張る角度は、RFQ空洞の端部における磁束の方向を同じに保つため、 90° に限定した。ネットワークアナライザーを用いて測定したスロット自体の共振周波数は1GHz以上であった。

非共振スロットにより結合された空洞には、2個の共振周波数が現れる。表1に示す結合周波数は、以下のようにして測定したものである；まず、DTL空洞を脱調させて、RFQ空洞のTE210モードの共振周波数を測定する。次に、RFQ空洞を脱調させて、DTL空洞のTM010モードの共振周波数をRFQ空洞の非結合周波数に、サイドおよび固定チューナーを使用して合わせる。次いで、RFQの脱調を除くと、 π および0モード結合に対応した共振周波数 f_* および f_0 が現れる。

結合空洞理論を使用し、同様な空洞間の結合を仮定すると、結合常数kは次のように与えられる。

$$k = (f_*^2 - f_0^2) / (f_*^2 + f_0^2) \quad (2)$$

kはスロットの幅を増加すると増大するが、スロットの中心角を 90° に限定すれば、最大のkは0.34%に過ぎない。中心角を 90° を越えて拡大すると、kは大きく増大する。

また、元の中心周波数fは、 f_* と f_0 で次のように与えられる。

$$f = f_* \cdot f_0 \cdot \sqrt{2 / (f_*^2 + f_0^2)} \quad (3)$$

元の周波数と計算値間の比較を表2に示す。これらの値がよく一致しているのは、この試験に結合空洞理論が適用可能であることを示している。

表1 結合周波数と結合常数

Slot	Arc-angle($^\circ$)	Width(mm)	f_* (MHz)	f_0 (MHz)	$f_* - f_0$ (MHz)	k(%)
A-1	90	9.0	404.36	403.50	0.86	0.21
A-2	90	18.0	404.47	403.33	1.14	0.28
A-3	90	27.0	404.45	403.09	1.36	0.34
A-4	120	9.0	405.36	403.80	1.56	0.39
A-5	150	9.0	404.95	401.93	3.02	0.75
A-6	150	18.0	405.25	400.94	4.31	1.07
A-7	150	27.0	405.30	400.65	4.65	1.15

表2 元の周波数と f_r , f_o より算出した f の比較

Slot	Exp. f (MHz)	Cal. f (MHz)
A-4	404.67	404.58
A-5	403.55	403.43
A-6	403.29	403.08
A-7	403.22	402.96

3. 2 電磁場分布

RFQおよびDTL内の電磁場分布をビーズ摂動法により測定した。RFQ空洞内の磁場分布の予備的な測定によって、0モード結合では磁場が出口から指数的に減少することが判明した。したがって、以後、 π モードを使用することとした。スロットA-5を使用したRFQの4象限内の磁場分布の測定結果は、磁場が入口から出口に向かって傾斜しており、その傾斜は約-15%であった。より大きいスロットA-6を使用すると、許容できないほど傾斜が増大した。運転周波数を減少すると、その傾斜はある程度減少した。

これらの測定にて、エンドチューナー間隙は、単独のRFQ空洞に対して最適に調整したものであり、方位角の方向の対称性も甚だよくなかった。そこで、エンドチューナー間隙の再調整をスロットA-5を使用したRFQに対し行った。結果を図2に示すが、対称性と軸方向の均一性ともに $\pm 2.3\%$ 以内で、かなり良好な分布が得られた³⁾。

3. 3 スロット縦方向位置の効果

RFQとDTLの電磁場の強さに対するスロット縦方向位置に関しては、以下のような測定を実施した：10mm直径、15mm長さの真鍮棒を、スロットA

-5により結合されたRFQおよびDTL内へ、空洞壁の孔を通して挿入し、周波数のシフト Δf を測定した。次いで、スロット板位置を2.0mmだけDTL側へ移動させた後、上記の測定を繰り返し、 $\Delta f / f$ の結果から、RFQとDTLの空洞壁上の磁場の強さの比を求めた。結果を k とともに表3に示す。一方、SUPERFISH計算では、RFQヴェイン間電圧80KV(Kilpatrick電場限界値の1.8倍)、DTL加速電場3.0MV/mに対応する比の値は2.13であった。したがって、RFQとDTLの電磁場の強さの適切な比は、スロットの縦方向位置を少しく変えることにより得られることが判明した。

表3 スロット縦方向位置の効果

Shift to DTL Side(mm)	k (%)	Ratio of Field of RFQ to DTL
0	0.75	2.26
2.0	0.71	1.74

4. 結論

RFQとDTL空洞間のスロット結合に関するコールドモデル試験を実施した。使用したスロットは円形のレーストラック状である。同形のスロット2個を点対称に使用し、 π モード結合により得られた最大の結合常数は最大のスロットに対する1.15%であった。同形のスロット2個の点対称の使用は、RFQ空洞における磁場の対称性を改善するが、スロットを拡大しすぎると、RFQ空洞内の磁場が出口に向かって傾斜する。過度の傾斜はエンドチューナーだけでは補正することができない。したがって、強い結合と良好な電磁場分布間の妥協が必要であることが判明した。

この試験では、結合常数が0.75%の時、RFQ内の磁場分布は、対称性および均一性ともに $\pm 2.3\%$ という良好な結果が得られた。また、スロットの縦方向位置の移動が、RFQとDTLの電磁場強さの比を適切な値にするのに有効であることも判明した。よって、RFQ空洞はDTL空洞から、共通端板に設置した2個の同形スロットを通じて駆動可能と結論することができる。

参考文献

- 1) Compiled by L.D.Hansborough; PIGMI: A Design Report for A Pion Generator for Medical Irradiation, LA-8880, UC-28 and UC-48(1981)
- 2) K.Ikeda, et al.; Cold Model Test of A Four Vane RFQ for Multi-Purpose Use Linac, Bull. Inst. Chem. Res. Kyoto Univ., 70, 99(1992)
- 3) K.Ikeda, et al.; Cold Model Test of Slot Coupling between RFQ and DTL Cavities, ibid., 72, 1 (1994)

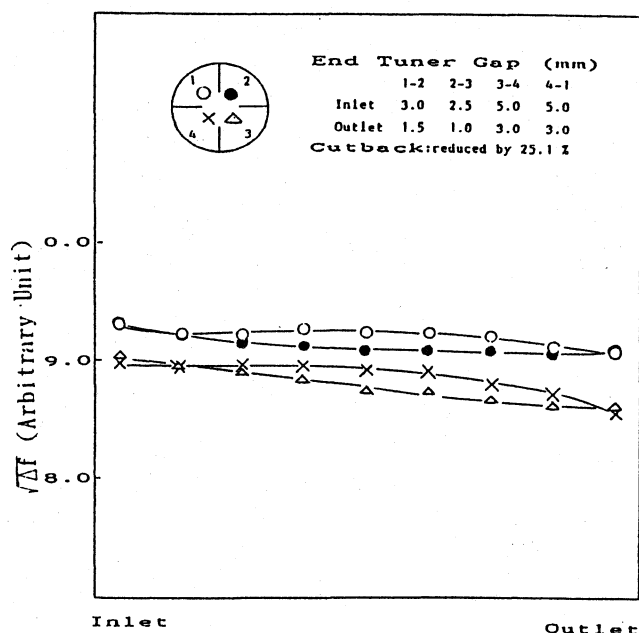


図2 スロットA-5を装着したRFQ内の磁場分布 ($f_r=404.88$ MHz)