

PLA - 89 - 15

10 / 25 / 89

1 GeV リニアック検討資料

1 GeV LINAC DESIGN NOTE

題目 (TITLE) 橋絡結合器模型の測定

著者 (AUTHOR) 両角祐一

概要 (ABSTRACT)

橋絡結合器 (TM012 mode 仕様) の模型について、同調や離調などの操作法、各空洞の周波数や入力孔の結合度などの測定法を定め試行した。これまでに出てきた結果から特性に関しかなりの知見が得られ、多連空洞型 (TM010 mode 仕様) の設計にも役立てることができる。

KEY WORDS:

Ion source, RFQ, DTL, CCL, Magnet, Monitor, Beam Dynamics,
Transport, Vacuum, Cooling
Klystron, Low level rf, High power rf, Modulator
Control, Operation, Radiation, Others

1989年7月20日

10月24日改

橋絡結合器模型の測定

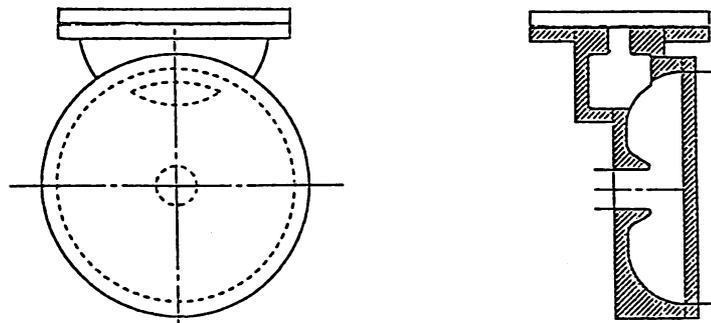
両角

概要

本器では、単空洞型 (TM₀₁₂ mode 仕様) の特性を調べることと、今後製作する多連空洞型 (TM₀₁₀ mode 仕様) の設計に資する実験結果を得ておくことを目的として、次のような項目について操作や測定を行なう。

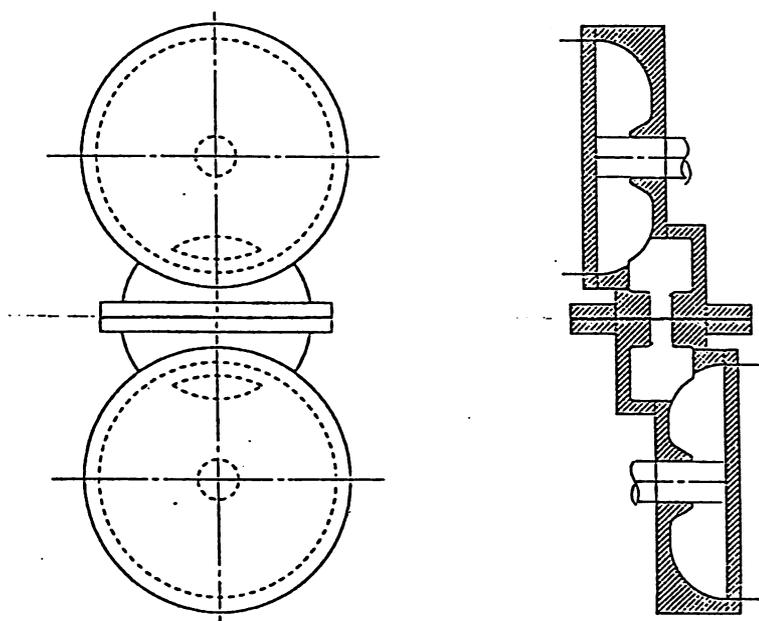
1) 加速空洞の mode

加速管連結部の結合空洞の縦半割と加速空洞の横半割から成る部品において、それぞれの分割端面に測定孔付き短絡板を付けて、周波数と quality factor を測っておく。これは加速空洞と結合空洞から成る系において結合空洞側を離調したときの加速空洞内の mode で、加速空洞の固有 mode (TM₀₁₀) に近いはずである。



2) 結合空洞の mode

この部品2個を結合空洞の分割面で合わせ加速空洞の分割面は両方とも短絡板を当て離調棒によって離調させた状態で、結合空洞の mode を測る。これも結合空洞の固有 mode (TM₀₁₀) から遠くないものであり、以降の結合空洞の測定の際の基準とすることができる。さらに同調器を動かしその効果も調べておく。



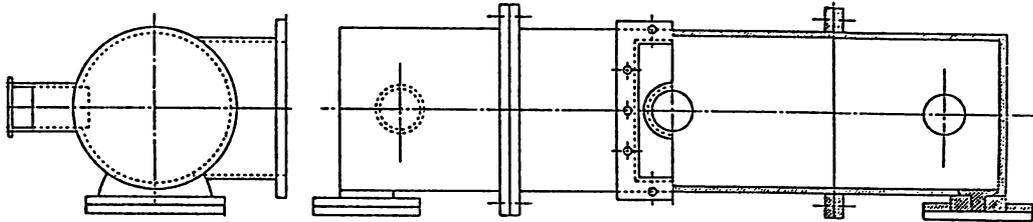
ここで、結合空洞を1)の加速空洞の mode に同調させた上で加速空洞の離調棒を除き、共振 mode を測れば、加速空洞と結合空洞との間の結合係数が確かめられる。

3) 橋絡空洞の mode

橋絡空洞内の基準の mode として次のものを調べておく。

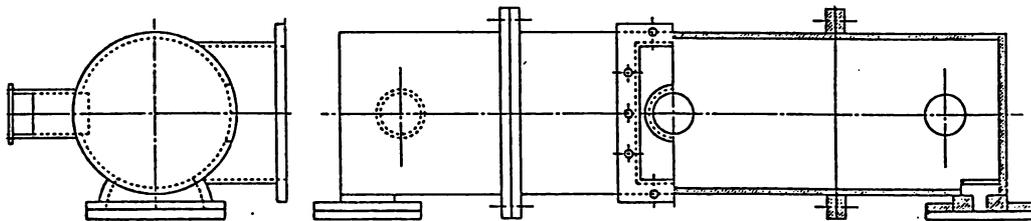
3-1) 橋絡空洞単体の固有 mode

橋絡空洞の入力部及び出力部に盲蓋をし、円筒空洞を構成し、同調器の位置を変えながら、固有 mode (TM₀₁, TE₁₁) の周波数と quality factor を測る。



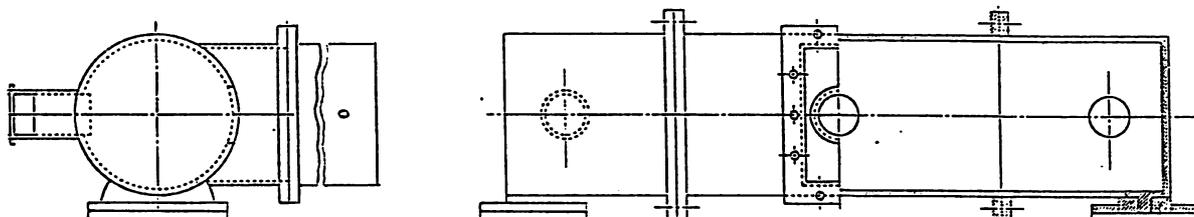
3-2) 結合空洞との結合系での mode

出力部に結合空洞上半部を付け、その端面を短絡した場合についても同様に測っておく。これは橋絡空洞と結合空洞との結合系において結合空洞を離調したときの橋絡空洞の mode を見ていることになる。

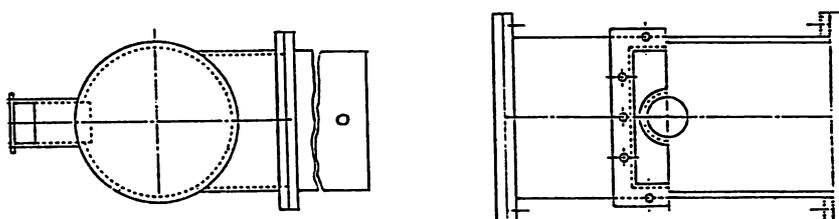


4) 入力孔の結合度

橋絡空洞の出力部には盲蓋をし、入力部には結合孔をあけ導波管及び導波管同軸変換器を付け、入力孔の種類を変えながら TM_{010} 及び TM_{012} mode について導波管の空洞に対する結合度を測る。



両側の四半端部を切り離し中央部の両端に短絡板を当て半分の長さの空洞を構成した場合についても同様に測っておく。

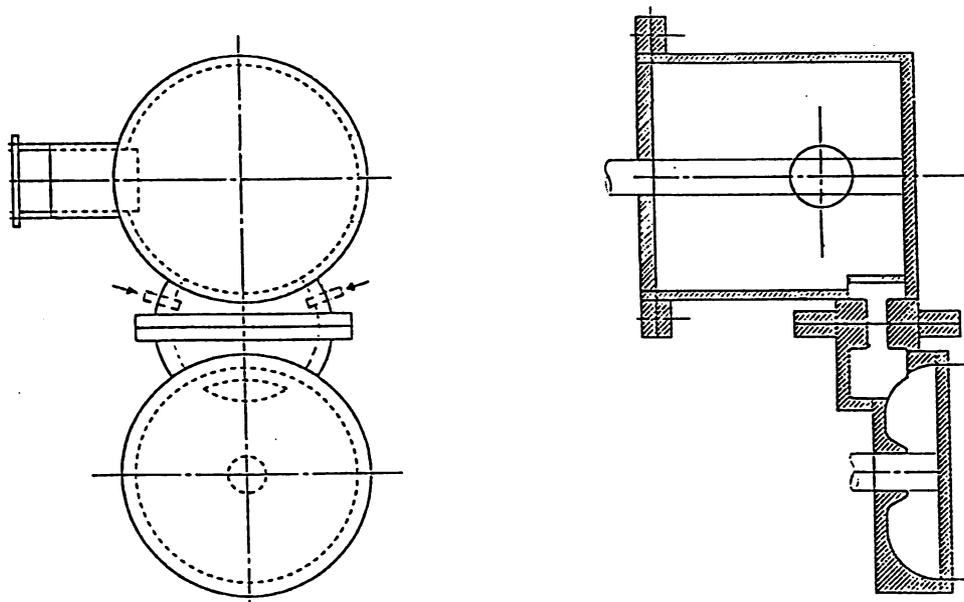


5) 橋絡空洞と結合空洞の結合係数

橋絡空洞と結合空洞の軸間距離を変えると両空洞間の結合係数がどのように変化するか見るために、橋絡空洞出力部に連結する結合空洞上半部の部品を付け替えては以下の手順を繰り返す。

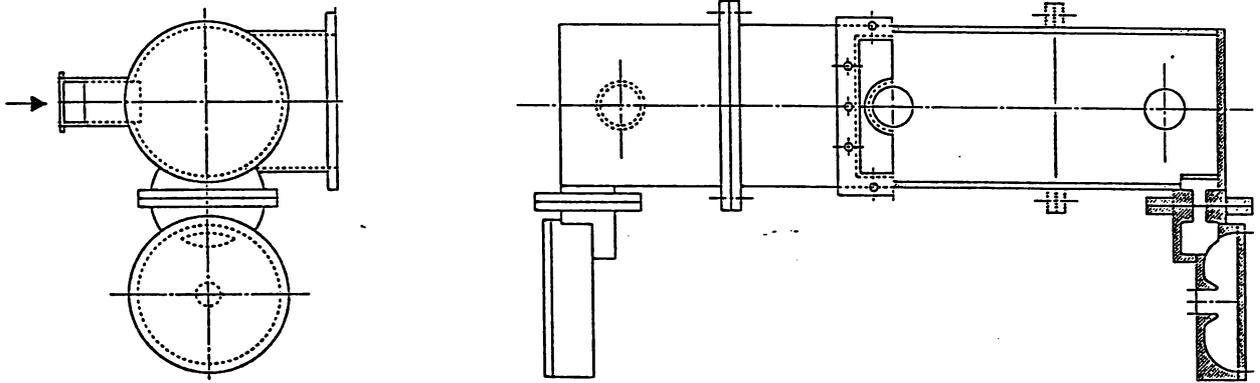
5-1) 結合空洞の同調

橋絡空洞の四半端部を切り離し、離調棒付きの短絡板を付け、出力部に結合空洞と加速空洞から成る部品を付けその加速空洞側にも短絡板を付ける。橋絡空洞と加速空洞を離調して、結合空洞の mode を測る。これは、2) で測った mode より周波数は低いはずであるが、その周波数が、3-2) の橋絡空洞の TM_{010} の、また、 TM_{012} の周波数に近く、そのまま、あるいは、結合空洞の同調器によって橋絡空洞の可調範囲に入れることができるなら必要ないが、結合空洞の周波数が低すぎて同調できない場合は結合空洞の中央突出部を切削し周波数が可調範囲にくるように調整し同調器を固定し周波数を測っておく。



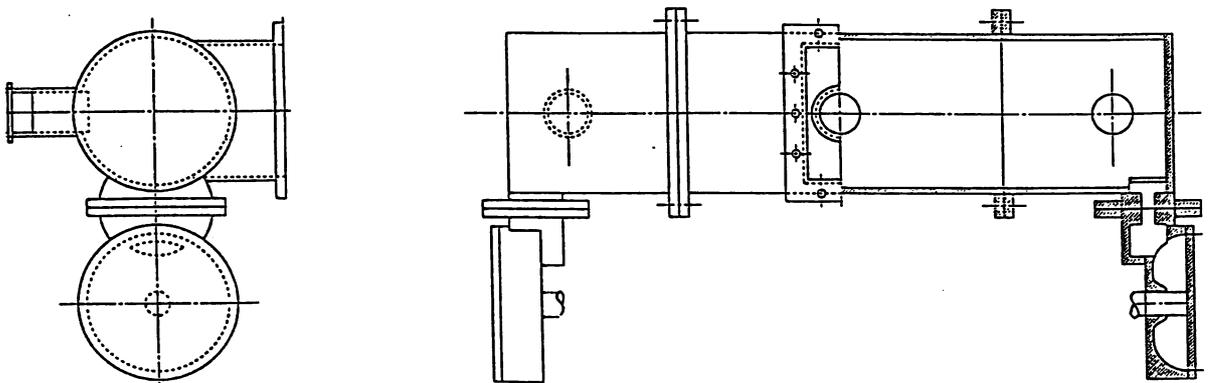
5-2) 橋絡空洞の同調

橋絡空洞を組み立て、3-2)の結果をもとに橋絡空洞の同調器を5-1)で得た結合空洞の周波数に同調させる位置に置く。



5-3) 橋絡空洞と結合空洞の結合

加速空洞は離調させた状態で、橋絡空洞と結合空洞との結合系の mode を測る。これから空洞間の結合係数がわかる。

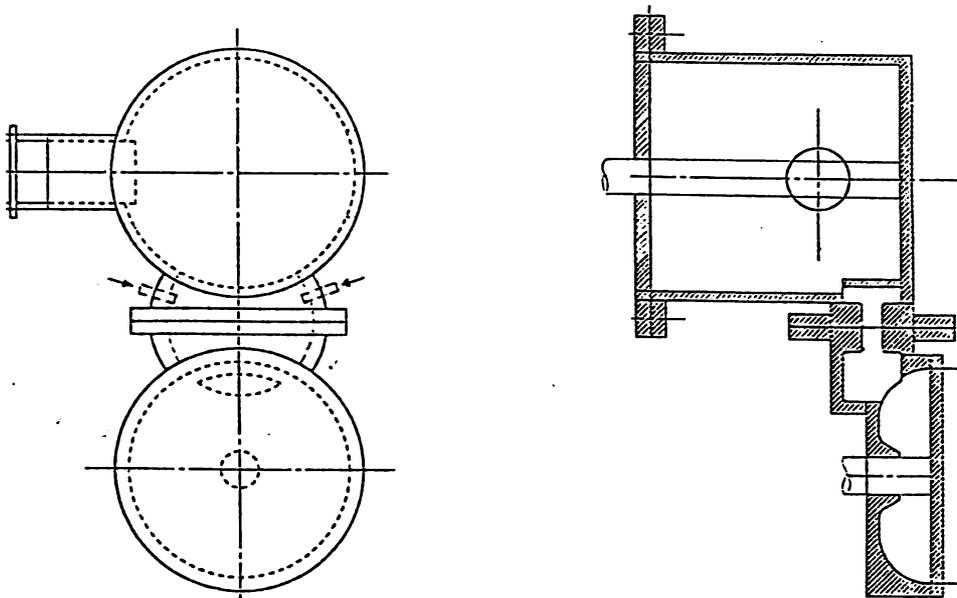


6) 全結合系の入力孔の結合度

橋絡空洞の両端に結合空洞と加速空洞を連結させ同調させた状態で、入力孔の大きさを変えながら、導波管のこの系に対する結合度を見ておく。

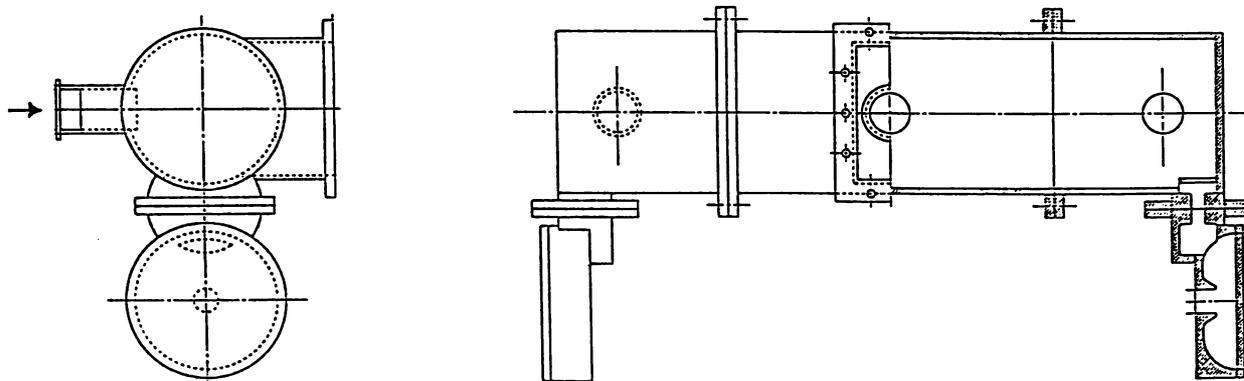
6-1) 結合空洞の同調

5-1) のようにして、二組の結合空洞と加速空洞から成る部品について、それぞれ橋絡空洞の四半端部につなぎ、結合空洞の周波数を同調器を用いて加速空洞の周波数に一致させる。1) の加速空洞の周波数より低く同調器でも補償できない範囲にあれば、結合空洞の中央突出部を削り落とす。



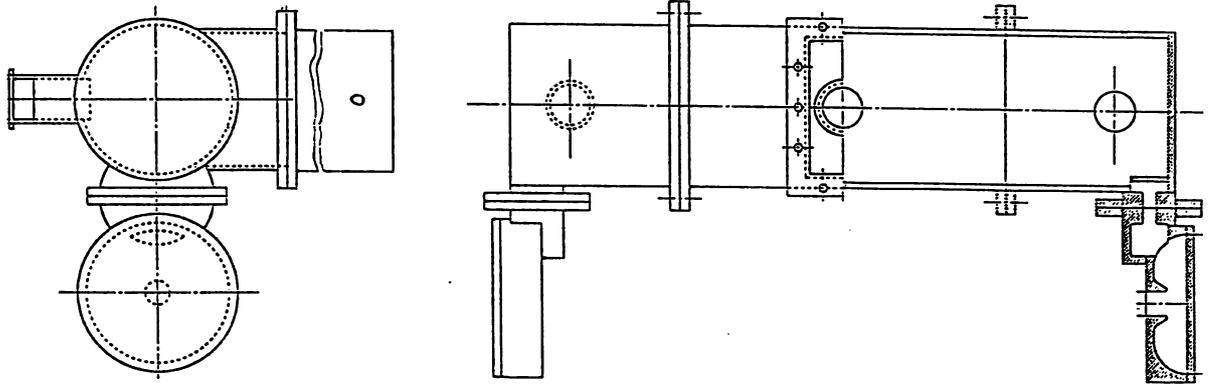
6-2) 橋絡空洞の同調

橋絡空洞を組み立て、3-2) の結果をもとに橋絡 mode (TM₀₁₂) も加速空洞の周波数に一致する位置に同調器を置く。



6-3) 橋絡結合器と導波管の結合

全系を組み、入力部に導波管同軸変換器を付け、加速空洞は短絡し、各空洞を同調させた状態で、4)のように結合度を測る。



結果と検討

これまで終えたところの結果について前記の順序にしたがって見ていく。
周波数は摂氏 23 度に換算した値である。

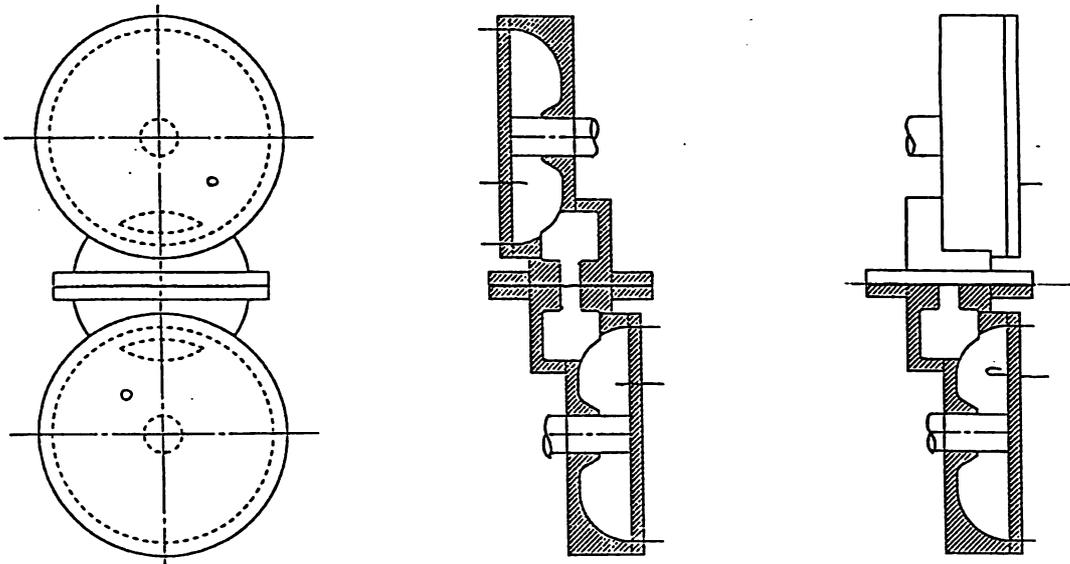
1) 加速空洞の mode

2 個とも狙いの周波数より少し低いものの良く一致している。

f /MHz	Q
1292.04	9500
1292.00	9500

2) 結合空洞の mode

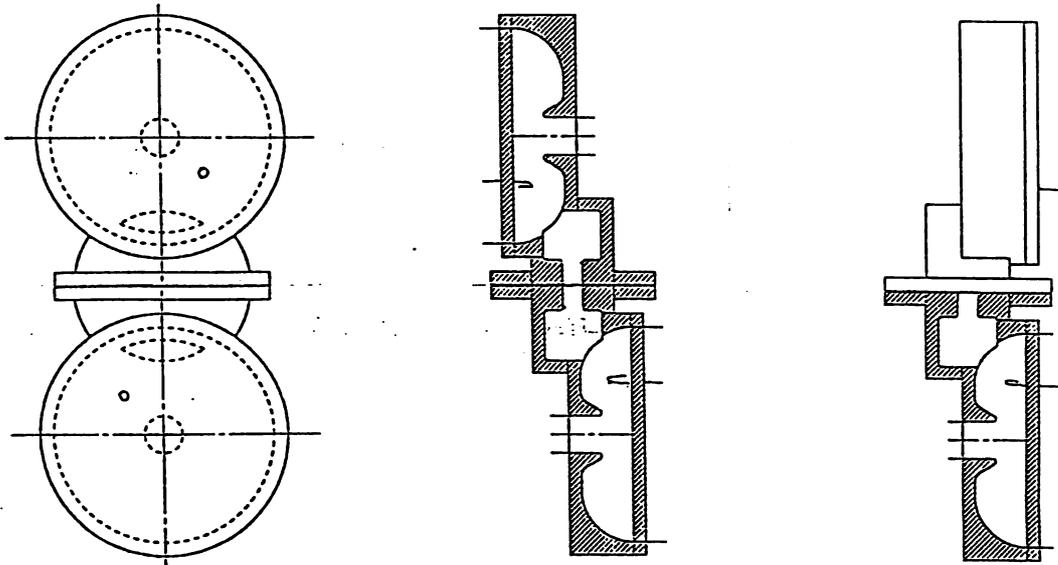
部品の組み合わせ方と用いる探針の種類を変えて 3 通り測った。



加速空洞の向き	探針	f /MHz	Q
逆	針	1293.41	5800
逆	環	1293.33	5700
同	環	1293.35	6400

組み合わせ方ではQに差が出ている。

加速空洞の周波数とは0.1%程度のずれがあるが、両空洞間の結合をやはり2通りの組み方で見ておいた。



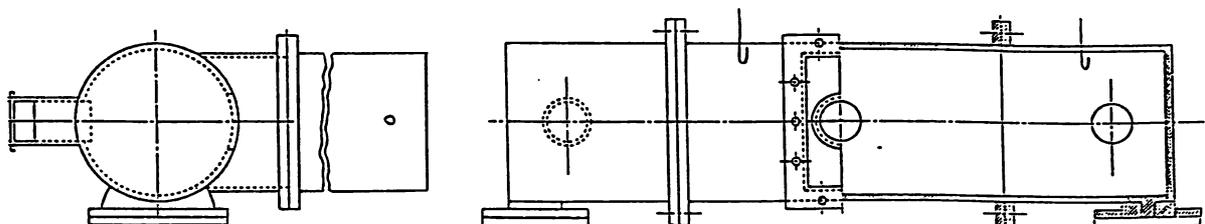
	$f(0)/\text{MHz}$	$f(\pi/2)/\text{MHz}$	$f(\pi)/\text{MHz}$
逆	1258.41	1291.57	1328.78
同	1255.44	1286.14	1326.22

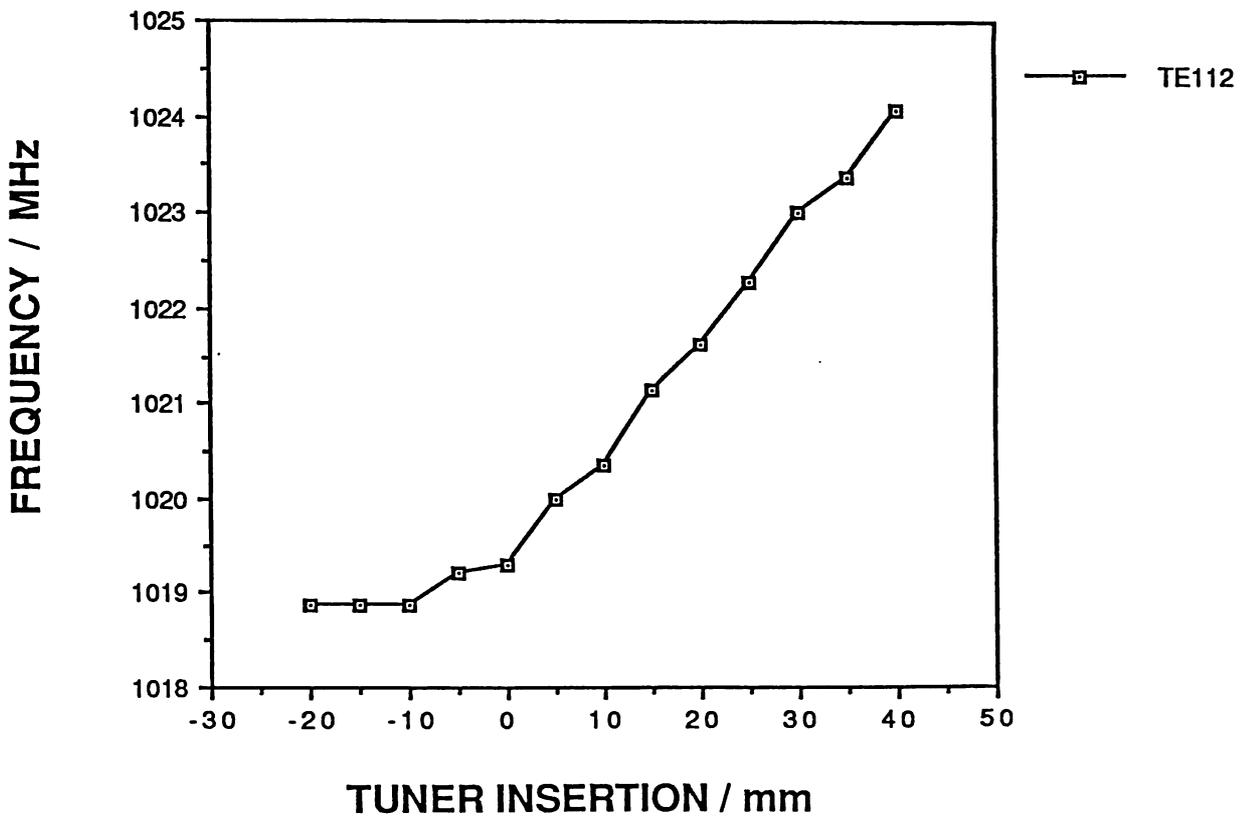
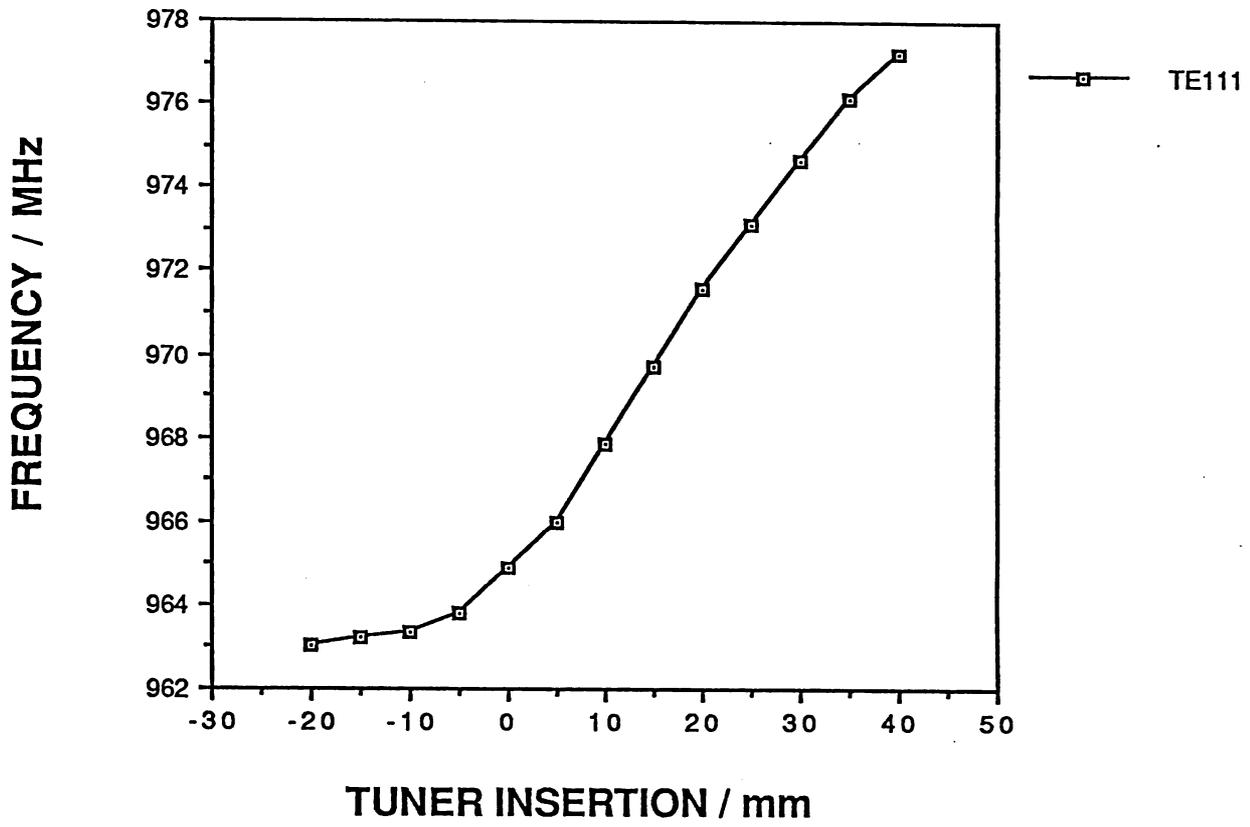
結合係数は約5.5%ということになる。

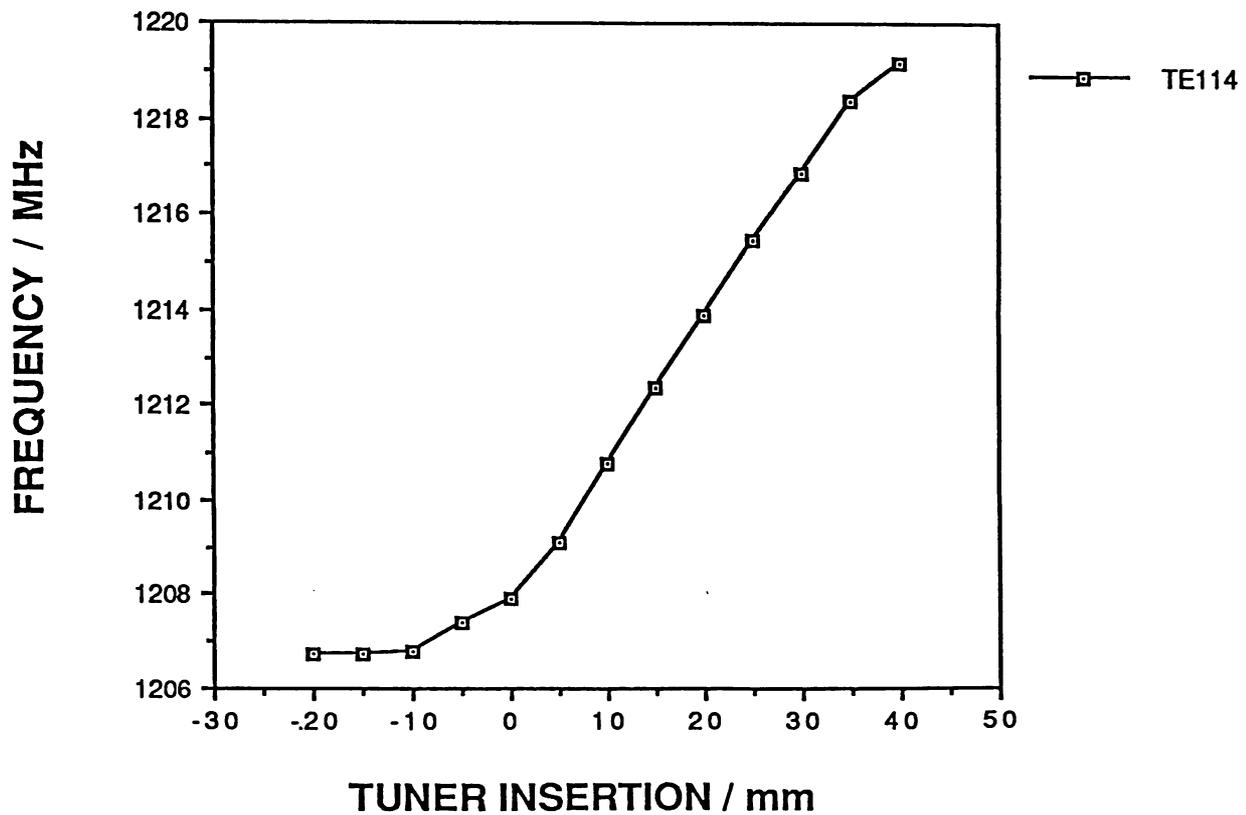
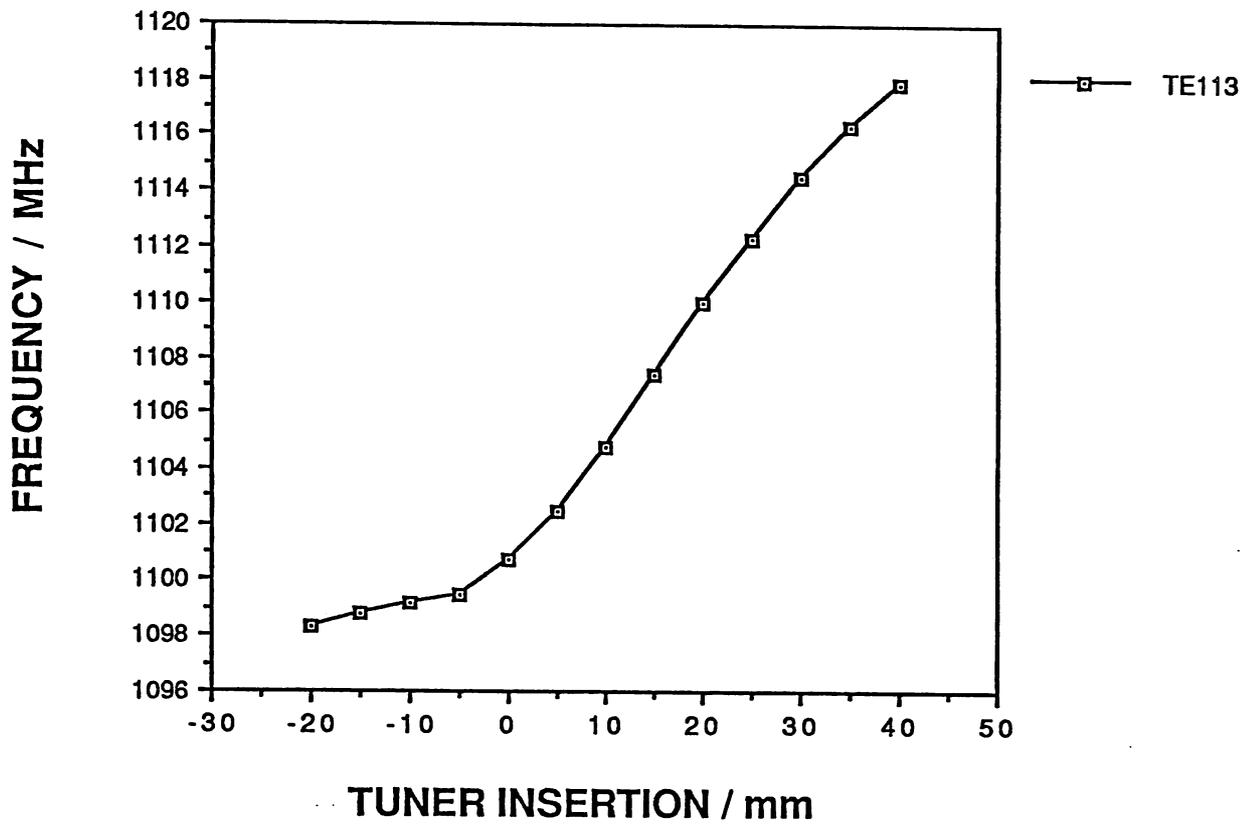
3) 橋絡空洞の mode

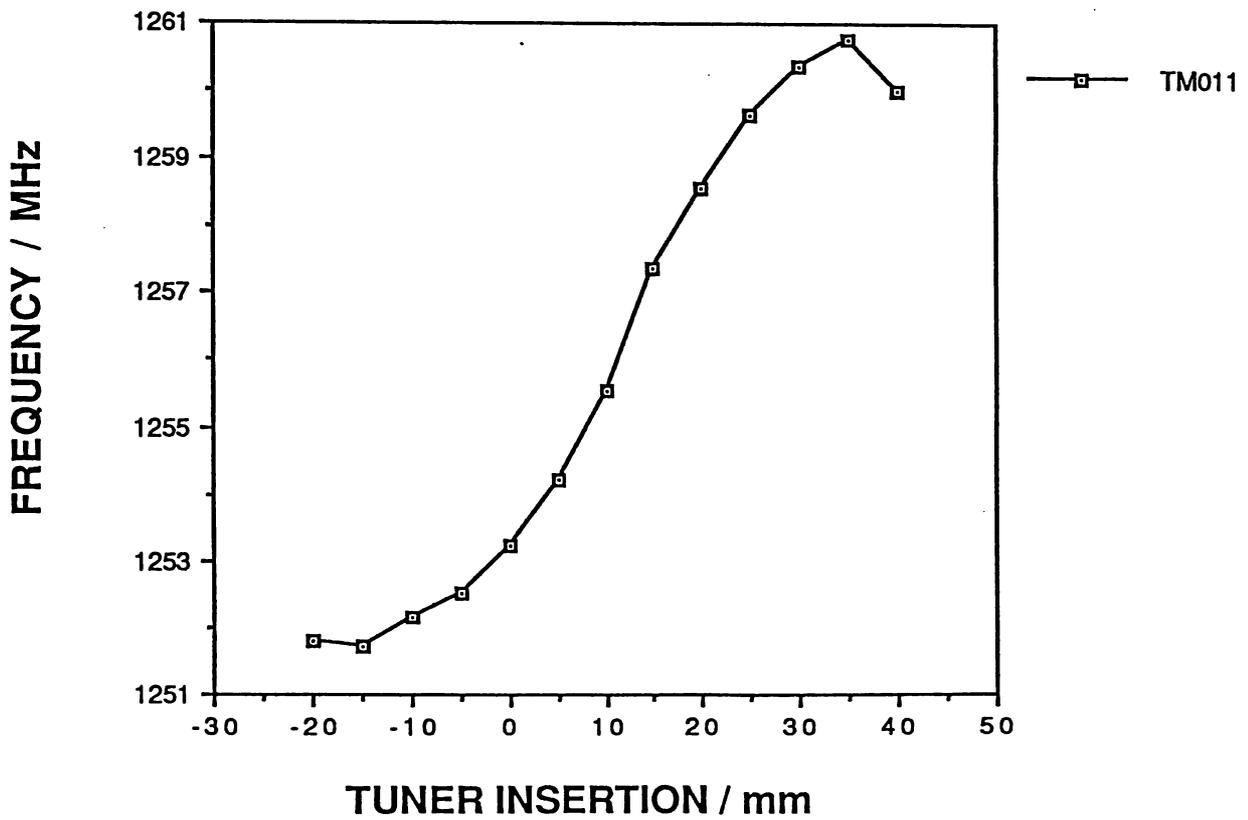
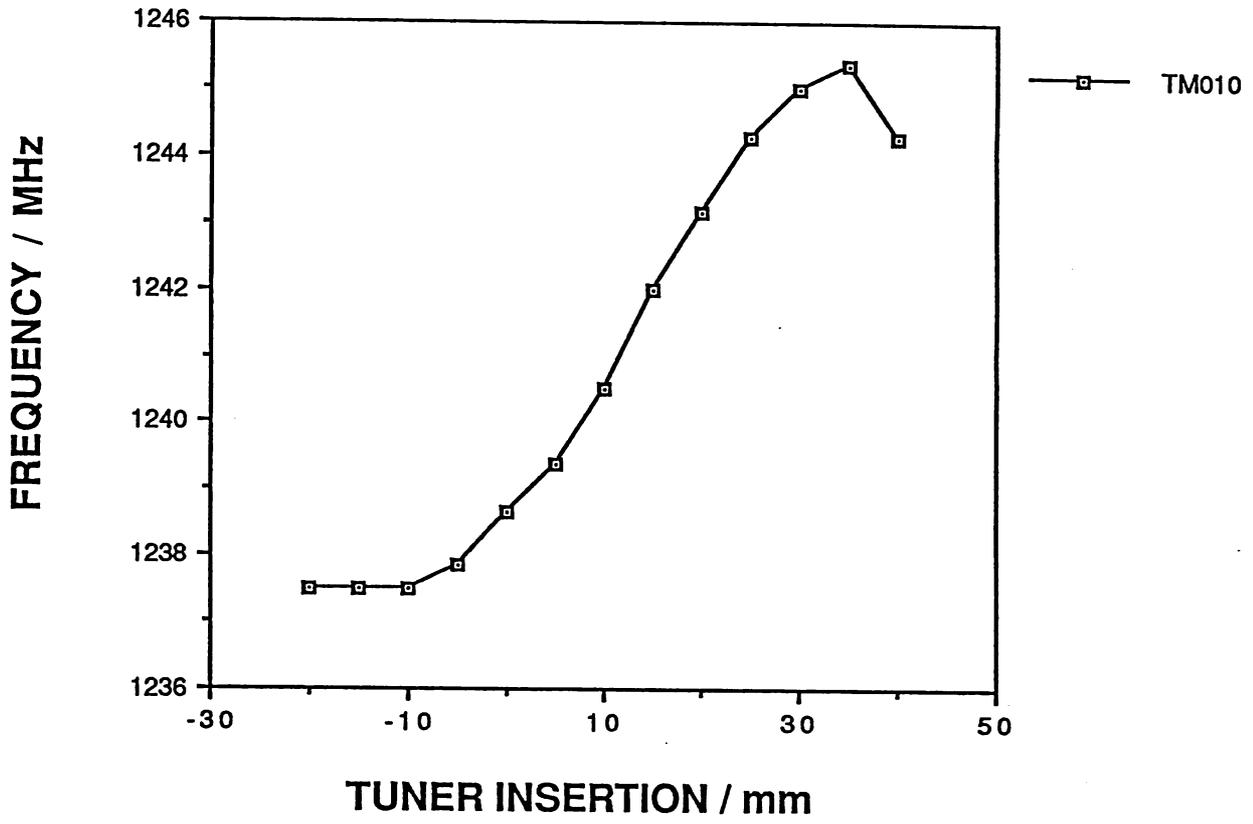
3-1) 橋絡空洞単体の固有 mode

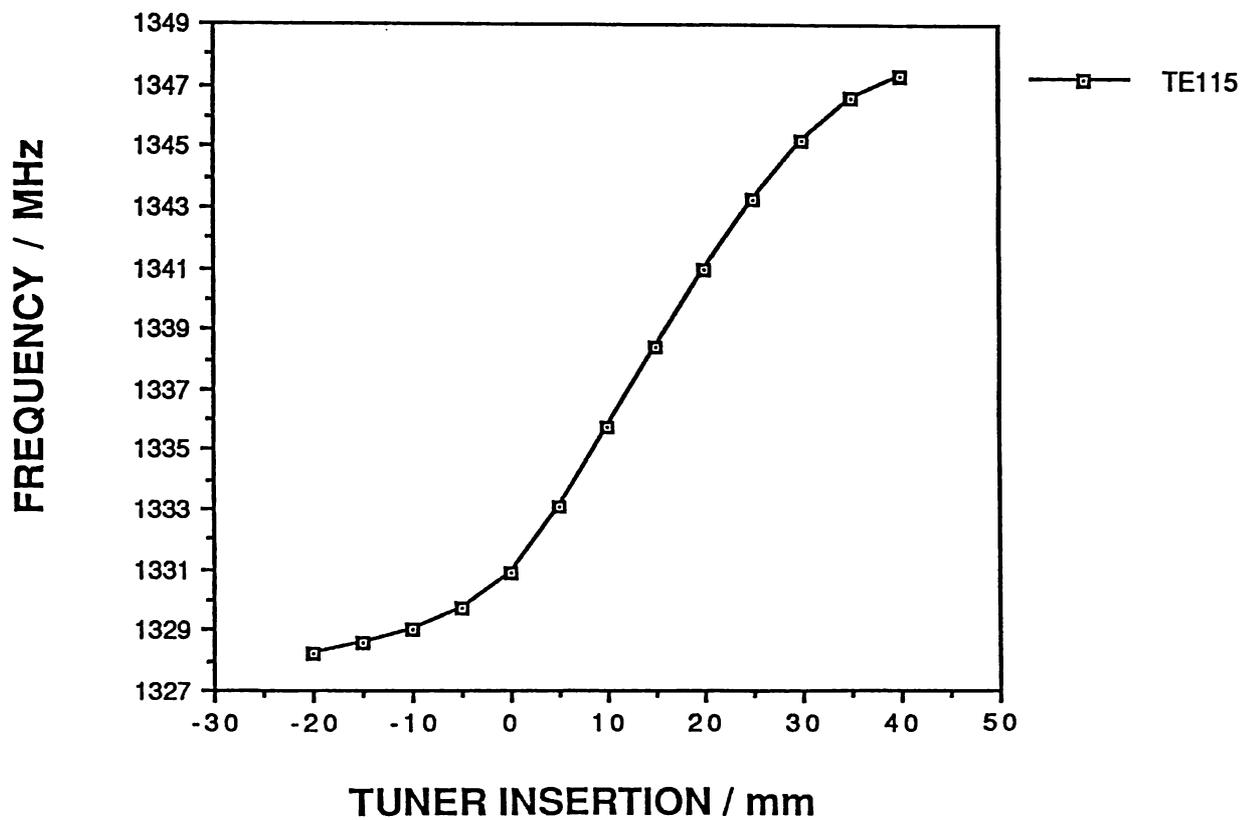
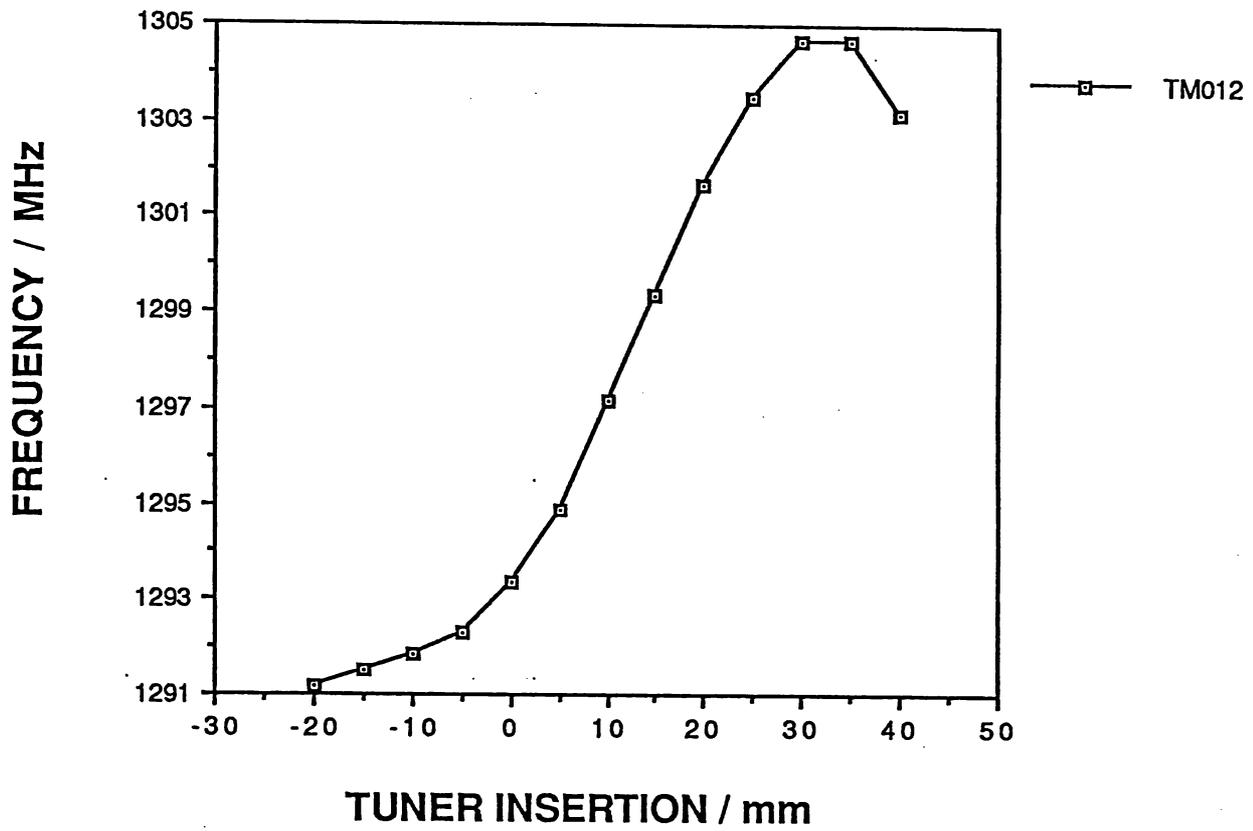
導波管からの入力孔が直径4cmの場合に導波管の他端を無反射終端にし測った。

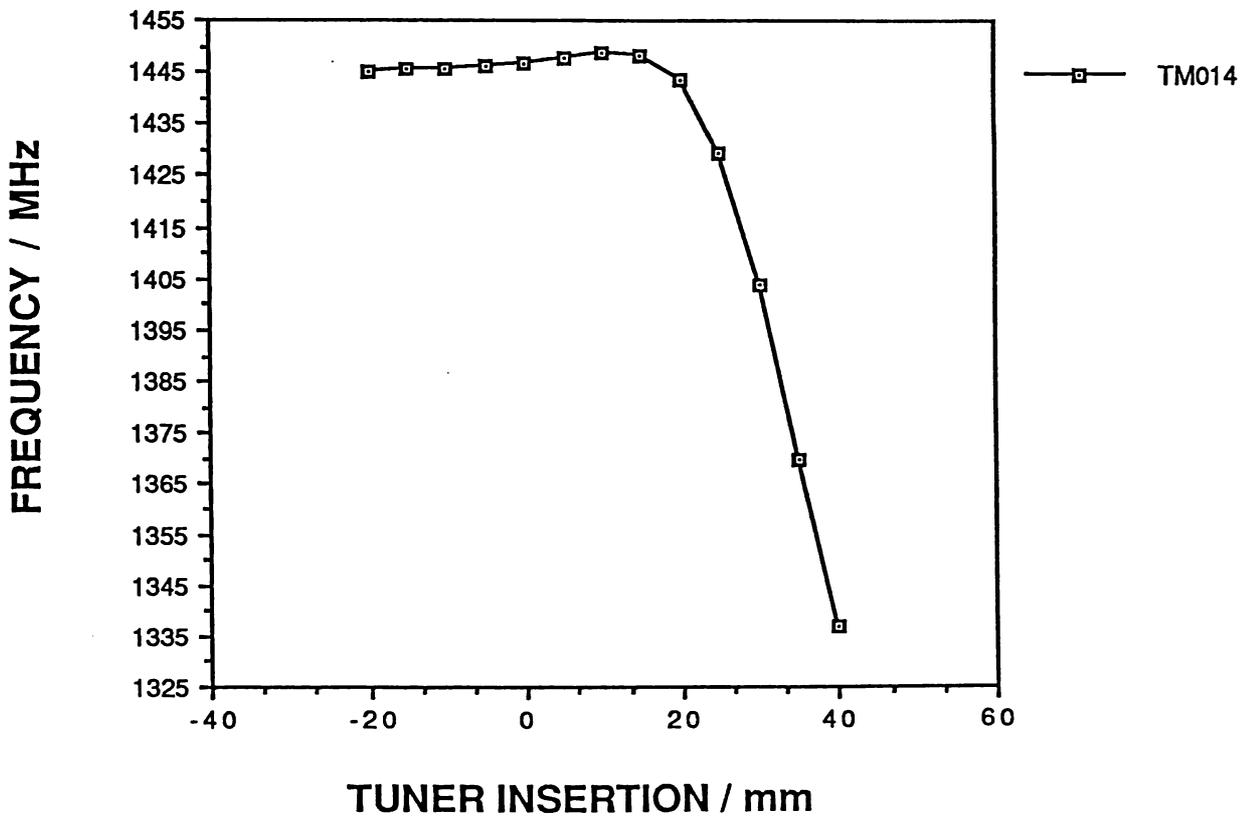
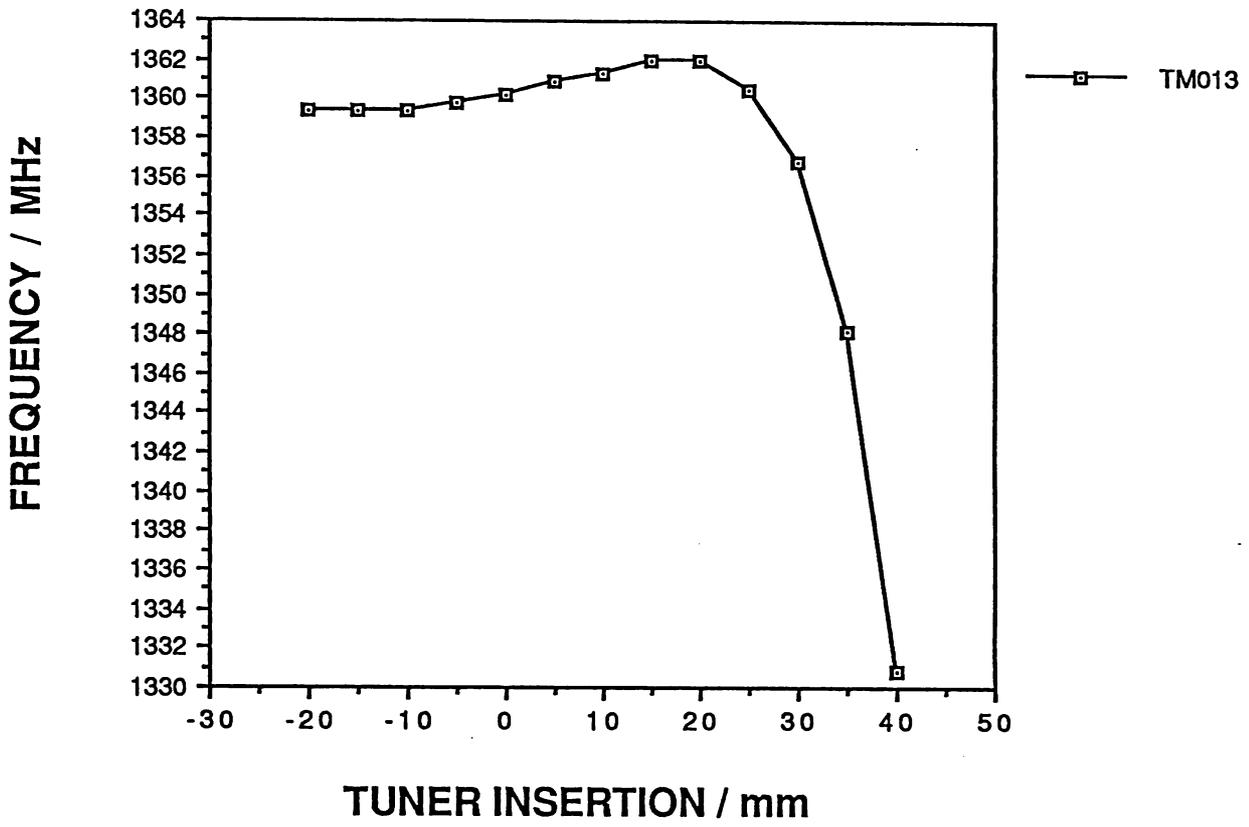






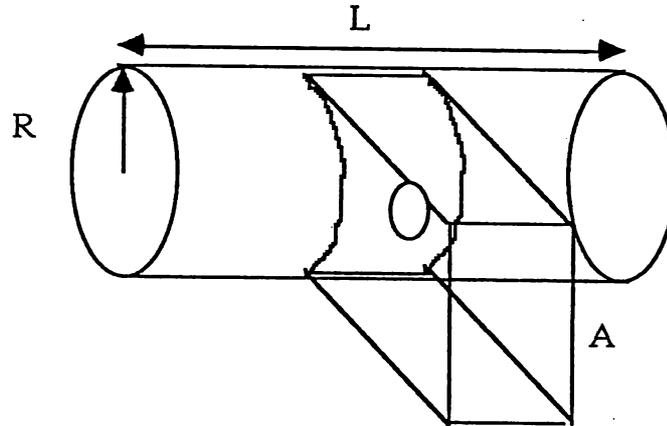






4) 入力孔の結合度

直径 4 cm の結合孔の TM₀₁ mode での結合度を空洞軸長 80 cm と 40 cm の場合について調べた。



		f / MHz	Q	β
L = 80 cm	TM ₀₁₀	1237.62	37500(85% of ideal value)	0.16
	TM ₀₁₂	1291.75	34000(83%)	0.36
L = 40 cm	TM ₀₁₀	1237.19	35100(88%)	0.29
	TM ₀₁₂	1444.44	25800(72%)	0.70

結合度 β は空洞の半径 R、軸長 L、周波数 f、quality factor Q、体積 V 及び導波管の幅 A に対して

$$\beta \propto Q \sqrt{\{(2f/c)^2 - (1/A)^2\}} / V$$

であり、従って

$$\beta \propto \sqrt{f} \sqrt{\{(2f/c)^2 - (1/A)^2\}} / (R+L) \quad \text{TM}_{010}$$

$$\propto 2 \sqrt{f} \sqrt{\{(2f/c)^2 - (1/A)^2\}} / (2R+L) \quad \text{TM}_{012}$$

となるはずであるが、TM₀₁₀ mode の場合には直ちにこれらの関係が認められ、TM₀₁₂ mode の場合には Q の理想的な値からの低下の度合を考慮すれば成り立つことがわかる。

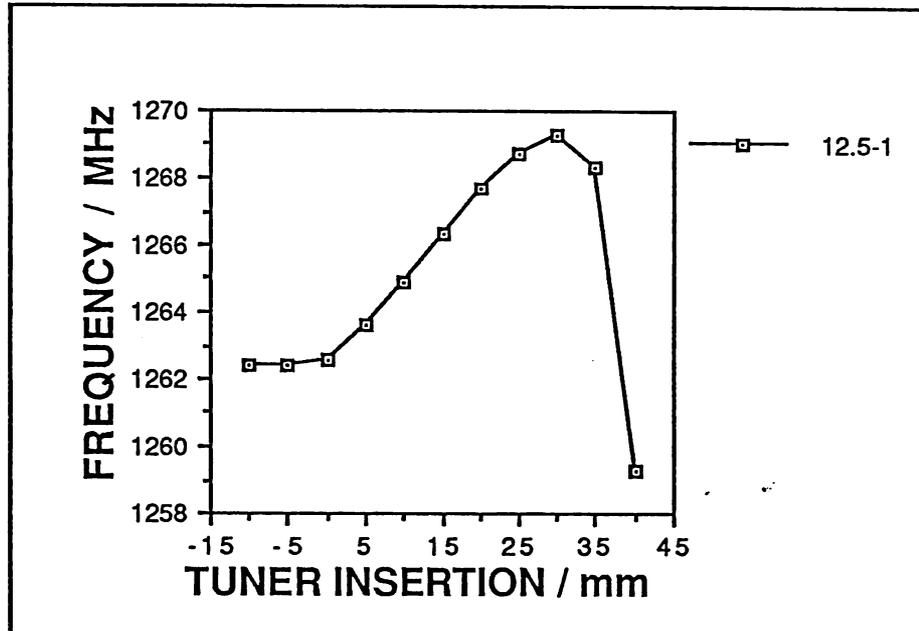
5) 橋絡空洞と結合空洞の結合係数

5-1) 結合空洞の同調

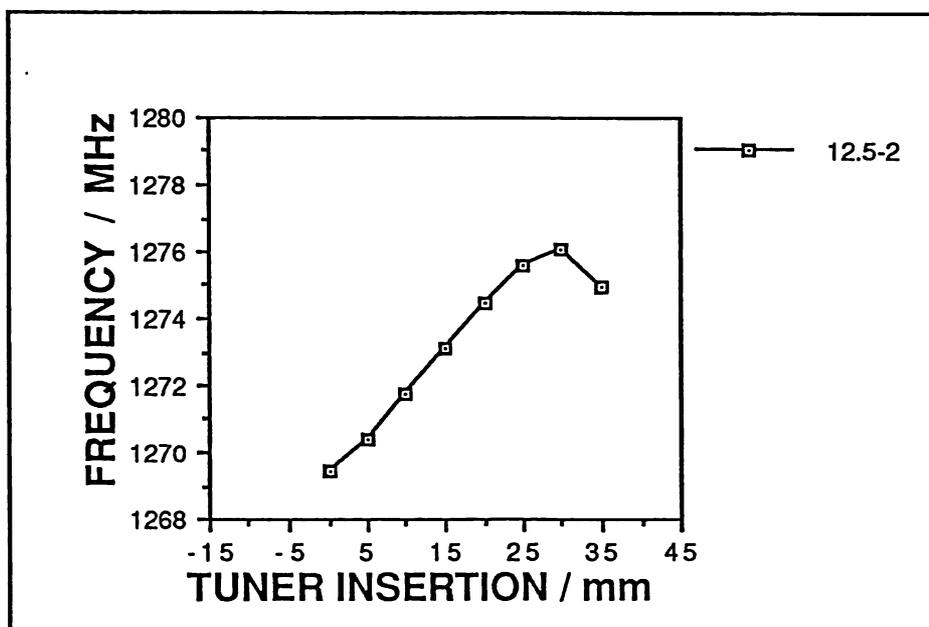
橋絡空洞と結合空洞の軸間距離が 12.5 cm の場合

結合空洞の周波数は 1262.43 MHz であり、同調器による周波数の遷移は次の様であった。

まず同調器を一本動かしてみた。



一本目を 30 mm の位置に固定し二本目を動かした。

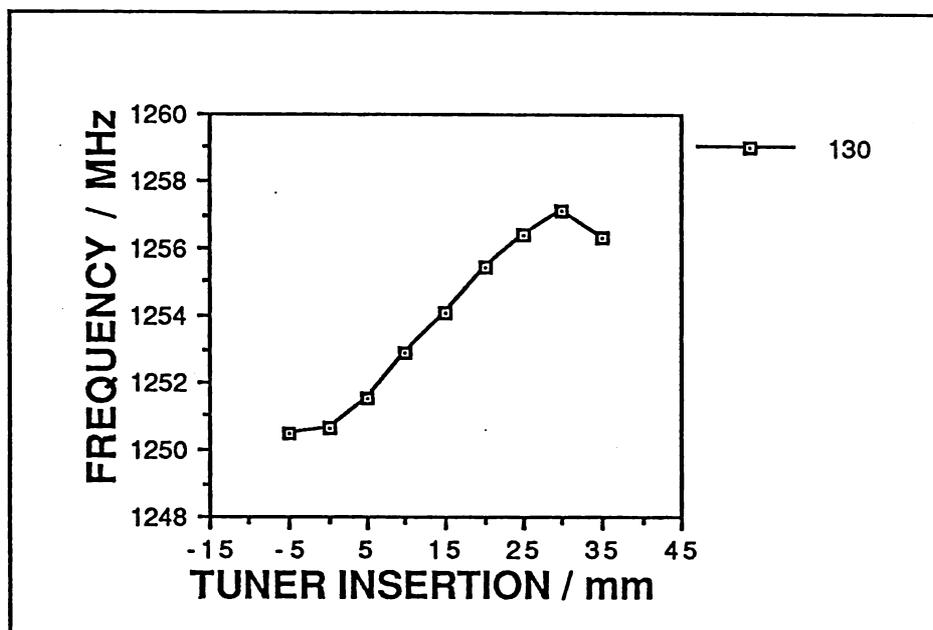


3本目を動かして達した周波数の最大値は 1282.09 MHz で、そのまま 4本目を入れたときの最大値は 1288.04 MHz であった。

1本当たり 6ないし 7MHz 上げることができるが、結合空洞に 3 cm も突き出すことになる。挿入の深さを 1 cm までとすると、1本で 2.5 Mz 位上昇させることができる。

橋絡空洞と結合空洞の軸間距離が 13 cm の場合

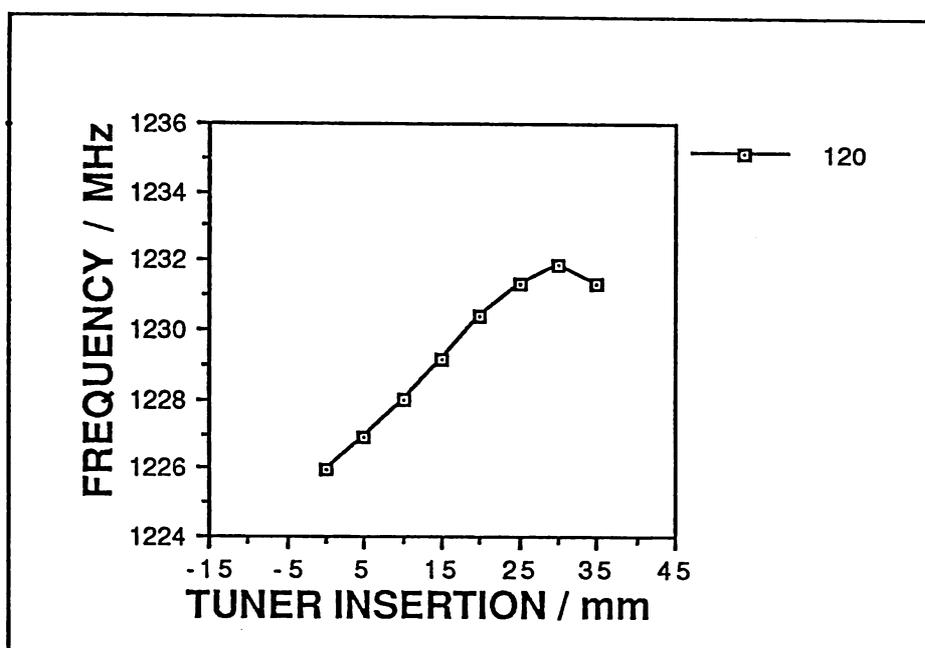
結合空洞の周波数は 1250.45 MHz であり、同調器による周波数の遷移は次の様であった。



先の場合とほぼ同様な動きを示している。

橋絡空洞と結合空洞の軸間距離が 12 cm の場合

結合空洞の周波数は 1225.79 MHz であり、同調器による周波数の遷移は次の様であった。



いずれの場合も橋絡空洞の周波数 1290 MHz よりかなり低く同調できる範囲にはないので、結合空洞の中央の突出部を削る必要がある。

結果と検討（続）

1) 加速空洞の mode

f /MHz	Q
1291.62	6000
1292.00	5600

結合空洞の接合面接触状態が悪くなってきたためQの値が低下した。

2) 結合空洞の mode

中央突出部の間隔を 9.15 mm (平均) から 10.57 mm (平均) に広げた。

加速空洞の向き	探針	f /MHz	Q
逆	針	1349.26	11700

間隔を 1.42 mm 広げたことにより、周波数は 55.85 MHz 上昇した。広げる前は R 2.5 mm で角を丸めてあり、後では C 0.1 mm 程度で面取りしたことを考慮すると、既に測られた周波数変化率の値 51.6 MHz/mm (影山) に良く合う（同じ間隔では R 2.5 mm で角を処理した場合には R 1 mm でした場合に比し約 14 MHz 高くなるので C 0.1 mm の場合にはさらに多少高くなるであろうと推測して）。

3) 橋絡空洞の mode

3-2) 結合空洞との結合系での mode

入力孔の径が 75 mm のとき、入力孔に盲蓋をした場合及び終端器を付けた導波管を接続した場合の周波数を測っておいた。

mode	周波数 /MHz				
	単体 (孔 40 mm)	単体(孔 75 mm) 盲蓋	導波管	結合空洞接続 盲蓋	導波管
TE ₁₁₄	1207.9			1207.0	1207.0
TM ₀₁₀	1238.6	1238.0	1236.4	1236.8	1234.5
TM ₀₁₁	1253.2	1253.3	1253.3	1248.5	1248.5
TM ₀₁₂	1293.4	1292.5	1289.8	1287.8	1285.0
TE ₁₁₅	1330.9			1328.7	1325.0
TM ₀₁₃	1360.1	1360.6	1360.7	1356.0	1356.3
TM ₀₁₄	1446.7	1446.2	1442.8	1440.7	1437.5

結合空洞（上半部）を付け入力孔をふさいだ状態では 30 mm、結合空洞と導波管が付いた状態では、同調器を 27 mm 押し込むことで周波数を 1296 MHz にすることができる。

4) 入力孔の結合度

結合孔の径を広げながら TM₀₁ mode での結合度を空洞軸長 80 cm と 40 cm の場合について調べた。

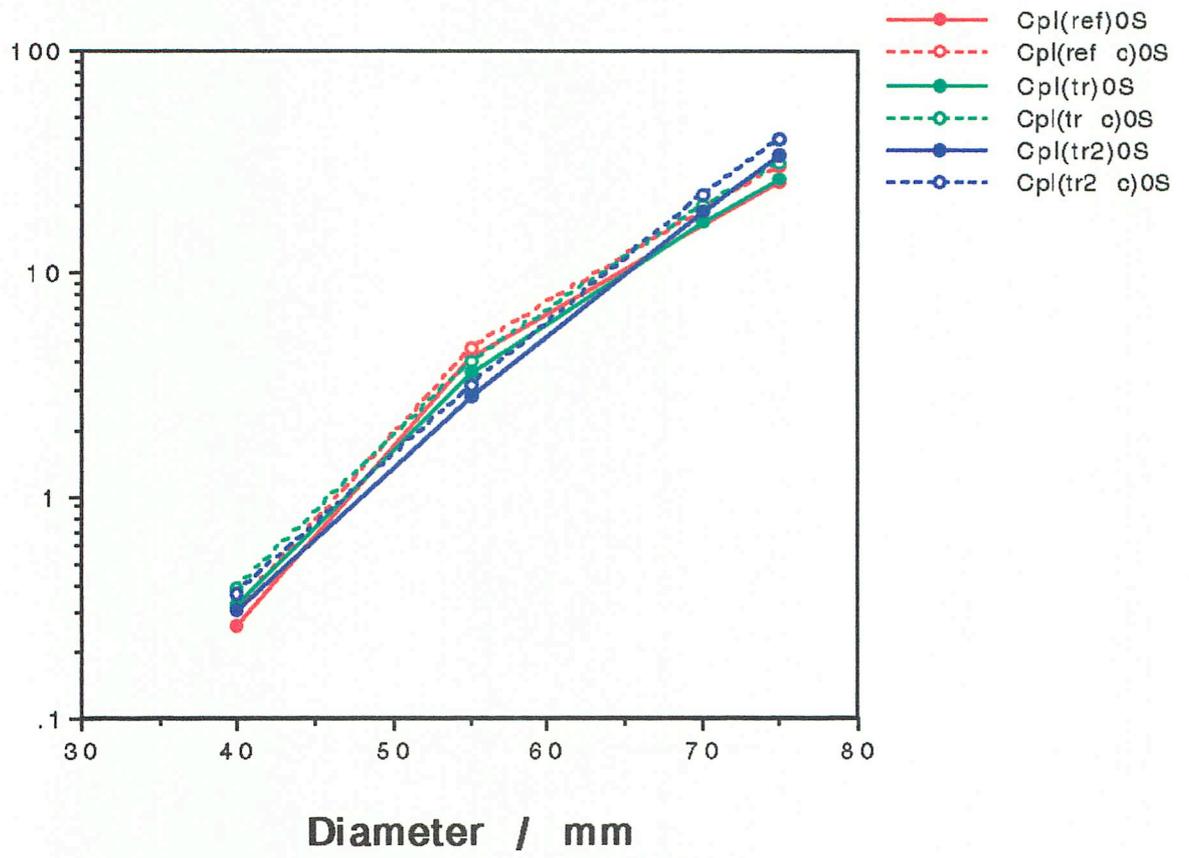
まず、導波管端子に終端器を付けたときの Q と入力孔に盲蓋をしたときの Q の比から結合度を出してみた。

		f /MHz	Q	β
ϕ 40 mm				
L= 80 cm	TM ₀₁₀	1238.5	39100(89% of ideal value)	0.17
	TM ₀₁₂	1293.5	32100(78%)	0.28
L= 40 cm	TM ₀₁₀	1237.7	33800(85%)	0.33
	TM ₀₁₂	1446.1	27200(76%)	0.72
ϕ 55 mm				
L= 80 cm	TM ₀₁₀	1237.9	33300(76% of ideal value)	1.8
	TM ₀₁₂	1292.4	26000(63%)	2.9
L= 40 cm	TM ₀₁₀	1236.6	36000(90%)	4.2
	TM ₀₁₂	1443.9	30900(86%)	8.5
ϕ 70 mm				
L= 80 cm	TM ₀₁₀	1237.0	36500(83% of ideal value)	12
	TM ₀₁₂	1290.7	27900(68%)	16
L= 40 cm	TM ₀₁₀	1235.0	34100(85%)	17
	TM ₀₁₂	1440.0	26100(73%)	36
ϕ 75 mm				
L= 80 cm	TM ₀₁₀	1236.4	35000(80% of ideal value)	24

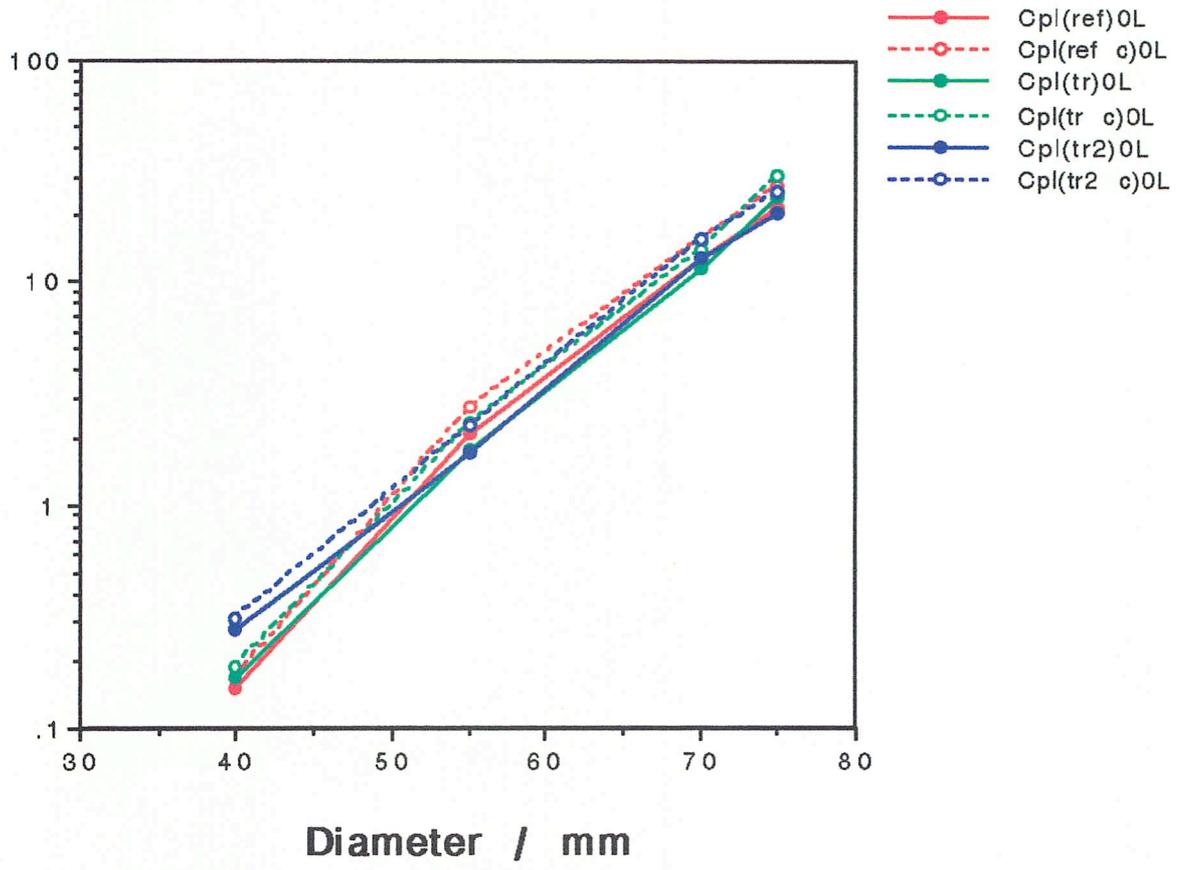
	TM ₀₁₂	1289.8	28200(69%)	28
L= 40 cm	TM ₀₁₀	1234.1	34400(86%)	27
	TM ₀₁₂	1438.2	28600(79%)	128

次に、導波管端子から見た電力反射率から結合度を測った。結果は以下の graph に示すようである。

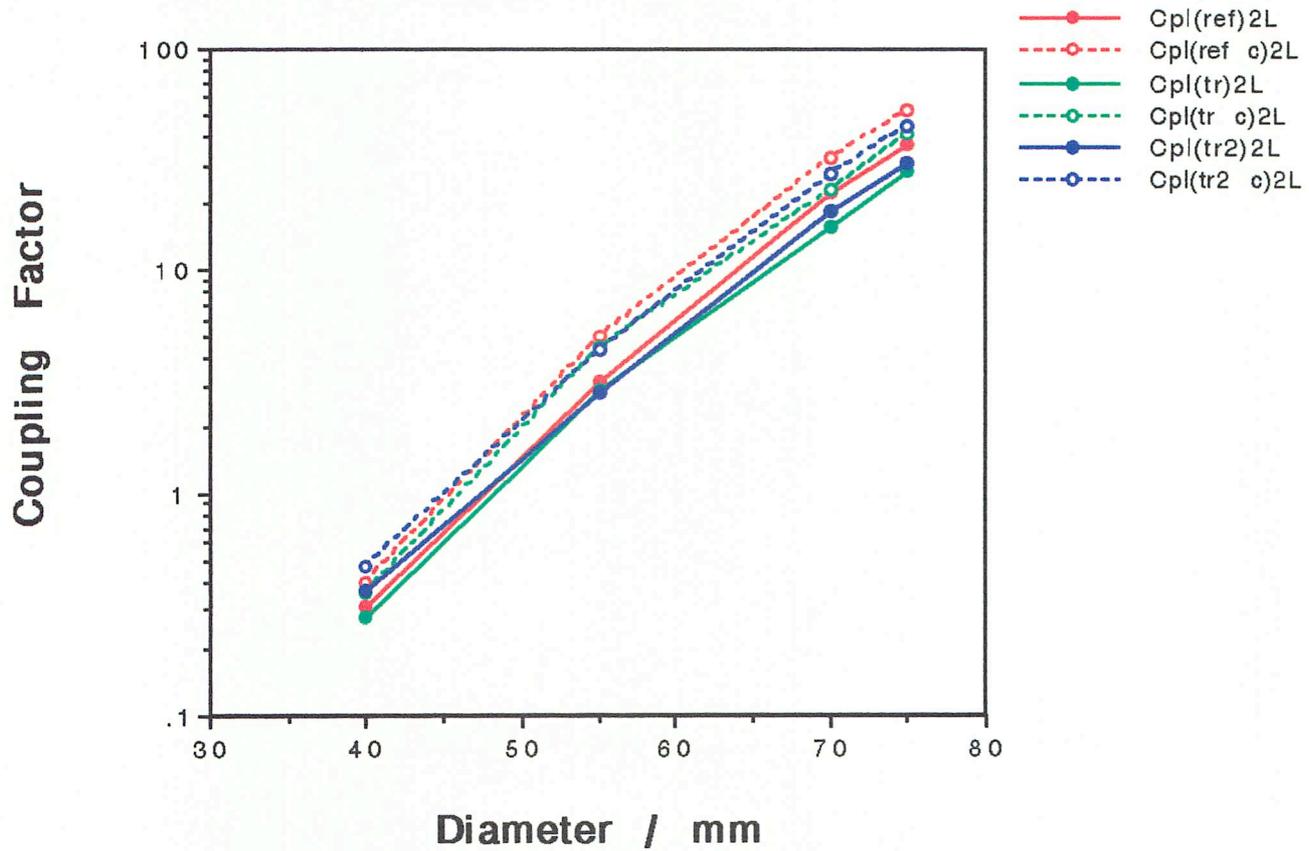
Coupling Factor



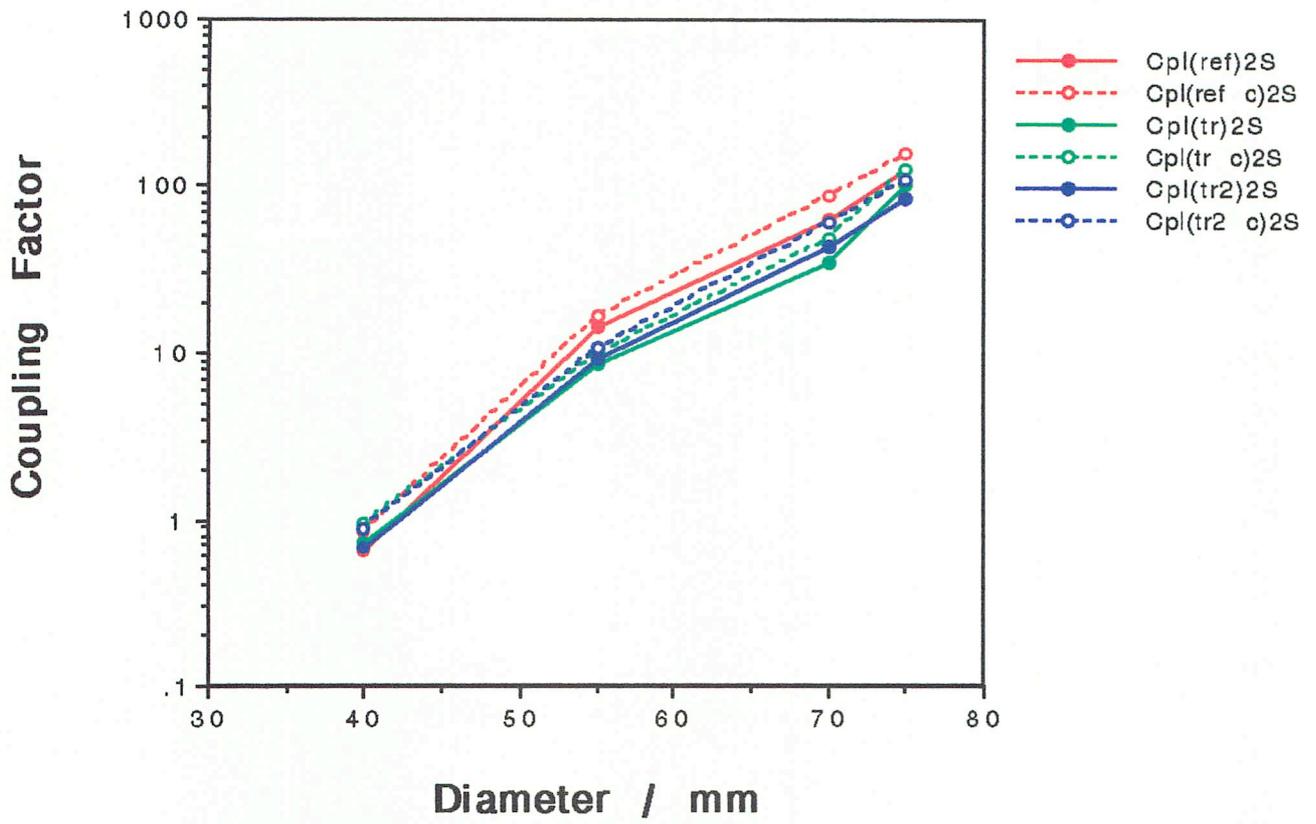
Coupling Factor



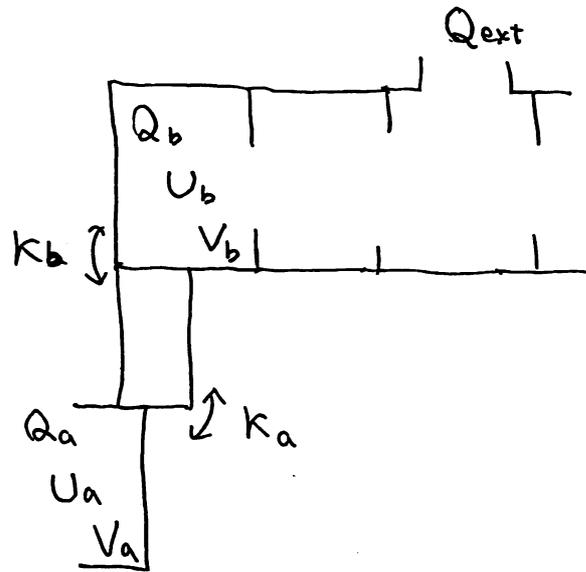
TM012 L=80 cm



TM012 L=40 cm



5連構造の橋絡空洞の両側に、二かまた5連構造のACS加圧管を配した系に必要な入力孔の大きさを考える



$$K_b \sqrt{\frac{U_b}{V_b}} = K_a \sqrt{\frac{U_a}{V_a}}$$

$$Q_b \approx Q_a$$

$$V_b \approx V_a$$

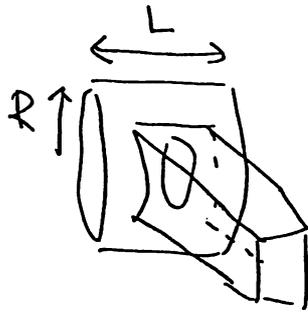
$$U_a = \left(\frac{K_b}{K_a}\right)^2 U_b$$

$$= 4 U_b$$

$$\frac{1}{Q} = \frac{3 \frac{U_b}{Q_b} + 10 \frac{U_a}{Q_a} + \frac{U_b}{Q_{ext}}}{3 U_b + 10 U_a}$$

$$\beta = \frac{Q}{Q_{ext}} - 1 = 1$$

$$\beta_0 \equiv \frac{Q_b}{Q_{ext}} = 43$$



TM₀₁₀

$$\beta_c \propto \frac{1}{R+L}$$

$$\beta_{L=40\text{cm}} = \beta_0 \frac{9+8}{9+40} \approx 15$$

L=8cm

$$\beta_{L=80\text{cm}} = \beta_0 \frac{9+8}{9+80} \approx 8.2$$

L=8cm

$$\frac{1}{\beta_c} \propto R+L$$

$(R+L) - \frac{1}{\beta_c}$ plot 直線

$L=8\text{cm}$ の時に 外挿すればよい

5) 橋絡空洞と結合空洞の結合係数

5-1) 結合空洞の同調

中央突出部を削りその間隔を 10.6 mm 位にした。橋絡空洞との軸間距離が最も大きい 135 mm のものは同調できた。削る前後の周波数の間隔に対する依存性を graph に表わした。橋絡空洞との結合孔の大きさの効果の為、2) のほぼ完全な結合空洞の形状の場合に比し、周波数の変化率が低くなり、しかも、橋絡空洞との軸間距離が小さく結合孔が大きいほど変化率が鈍っているのがわかる。

5-2) 橋絡空洞の同調

橋絡結合器を組み上げて、3-2) の結果をもとに橋絡空洞の同調器を 5-1) で得た結合空洞の周波数に同調させる位置に置いた。

5-3) 橋絡空洞と結合空洞の結合

入力孔は盲蓋をし、加速空洞は離調させた状態で結合系の共振 mode を見た。

周波数 /MHz	らしき mode
1211.5	TE ₁₁₄
1236.8	TM ₀₁₀
1240.7	TM _{012 0}
1253.2	TM ₀₁₁
1293.4	TM _{012 $\pi/2$}
1324.4	TE ₁₁₅
1345.7	TM _{012 π}
1368.0	TM ₀₁₃
1420.8	TM ₀₁₄

計算機による模擬実験で調べたように、結合系の mode はかなり複雑な様相を呈していることが予想されるが、橋絡空洞の固有 mode の混合として考えると主たる成分は一応上の様になると思われる。すると、結合係数

は約 8.1 % ということになる。

6) 全結合系の入力孔の結合度

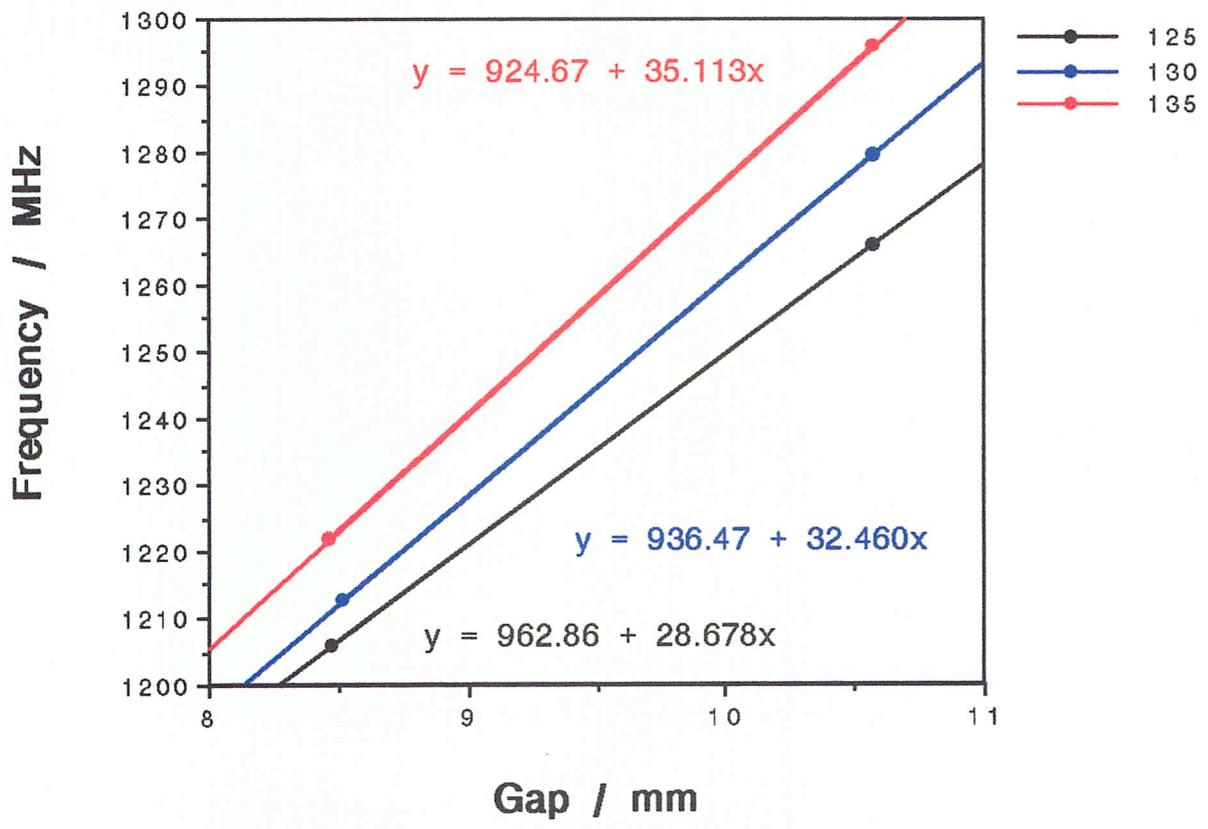
加速空洞の離調棒を抜き、各空洞を同調させ、共振 mode を測っておい
た。

周波数 /MHz	Q	らしき mode
1264.4	2700	TM ₀₁₂ 0
1276.3	4500	$\pi/4$
1294.6	7400	$\pi/2$
1310.6	4800	$3\pi/4$
1332.2	6900	π

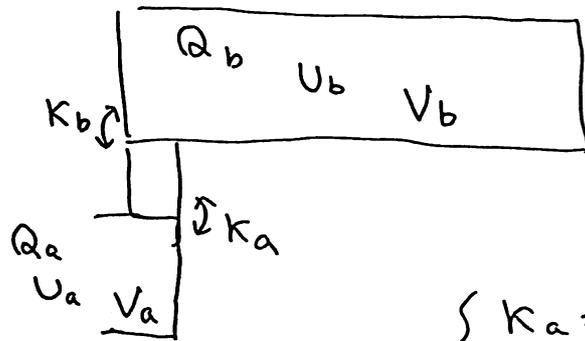
6-3) 橋絡結合器と導波管の結合

入力部に導波管同軸変換器を付け、上の $\pi/2$ mode とと思われるものについ
て 4) のように結合度を測った。

周波数 /MHz	Q	結合度	
		反射率より	Q の比より
1293.5	1500	4.8	3.9



結合系の Q



$$\begin{cases} K_a = 0.055 \\ K_b = 0.081 \end{cases}$$

$$K_a \sqrt{\frac{U_a}{V_a}} = K_b \sqrt{\frac{2U_b}{V_b}}$$

TM₀₁₀

TM₀₁₂

$$Q_a \approx 6000$$

$$Q_b \approx 30000$$

$$V_b \approx 18V_a \quad (\text{と12 F.W.})$$

~~Q_a~~
$$U_a = \left(\frac{K_b}{K_a}\right)^2 2U_b \frac{V_a}{V_b} \approx \frac{4.4}{18} U_b$$

$$\frac{1}{Q} = \left(\frac{U_b}{Q_b} + 2 \cdot \frac{U_a}{Q_a} \right) / (U_b + 2U_a)$$

$$\approx \frac{1 + 2 \cdot \frac{4.4}{18} \cdot 5}{1 + \frac{8.8}{18}} \frac{1}{Q_b}$$

$$\approx \frac{62}{26.8} \frac{1}{Q_b}$$

$$Q \approx 13000$$