

DEVELOPMENT OF THE ON-AXIS COUPLED STRUCTURE III

K.Hayakawa, T.Tanaka, K.Sato and Y.Torizuka
Atomic Energy Reserch Institute, Nihon University
Narashinodai 7-24-1 Funabashi 274

ABSTRACT

The behavior of standing wave structure are analyzed by means of simple coupled resonator model. The relations of the cavity parameters and amplitude and phase deviation along the accelerating tube are deduced. For the short accelerating tube, frequency tuner is valid over 2MHz of frequency range without significant change of field distribution.

ON-AXIS COUPLED STRUCTURE の開発 III

1 はじめに

定在波型加速管で2重周期型構造を持つものは、大なり小なりストップバンドが生ずるのは避け難い。また、すべての空洞の共鳴周波数を一致させることも事実上困難である。(例えば、数空洞ごとにチューナーが付いた加速管を考えれば良い)OCSの加速管を制作するときこのストップバンドをどの程度まで小さくしなければならぬかチューナーの数と位置をどのように設定するのがよいかを検討するために、簡単な等価回路を用いて解析を行った。

2 計算方法

等価回路は、L,C,Rが直列に接続する最も簡単なものを使った。この回路の共鳴周波数は、各セルの共鳴周波数と結合係数によって決まる。良く知られているようにこの回路を表現する方程式は、加速空洞について

$$I_{2n} = X_{2n} \left(1 - \frac{\omega_{2n}^2}{\omega^2} + \frac{1}{jQ_{2n}} \frac{\omega_{2n}}{\omega} \right) + \frac{1}{2}k_1(X_{2n-1} + X_{2n+1}) + \frac{1}{2}k_2(X_{2n-2} + X_{2n+2}) \quad (1)$$

結合空洞について

$$I_{2n+1} = X_{2n+1} \left(1 - \frac{\omega_{2n+1}^2}{\omega^2} + \frac{1}{jQ_{2n+1}} \frac{\omega_{2n+1}}{\omega} \right) + \frac{1}{2}k_1(X_{2n} + X_{2n+2}) + \frac{1}{2}k_3(X_{2n-1} + X_{2n+3}) \quad (2)$$

である。ここで、 I_n は励振項、 X_n は振幅、 Q_n はn番目の空洞の Q 、 k_1 は隣接空洞間の結合係数、 k_2 は最近傍加速空洞間の結合係数、 k_3 は結合空洞間の結合係数である。セル毎に共鳴周波数が異なるときは、たとえ Q が無限大であっても結合回路の共鳴周波数は簡単な式では書けない。しかし、 Q が無限大の時には、共鳴周波数を求める問題は、行列の固有値を求める問題に帰着するので、標準的な手法でこれを求めることができる。固有値問題を解くことによって得られた結合回路の共鳴周波数を(1),(2)式に代入し、マイクロ波をフィードする空洞に対応して1つのセルの励振項のみをゼロでない値として連立方程式を解けば各セルの振幅と位相を求めることができる。なお今回の解析では $k_2 = k_3 = 0$ とした。

3 計算結果

各セルの Q 値と、結合係数、ストップバンドの大きさと電場分布との関係を見るために次のような計算を行なった。加速空洞の Q 値と共鳴周波数は全て同じとし、これを各々 Q_a, f_a とする。同様に結合空洞について Q_c, f_c とする。ストップバンドは、 $\Delta f = |f_a - f_c|$ となる。 $\pi/2$ モード周波数 2450MHz の 2m 加速間の中央からドライブする場合を考える。計算結果の一例を図 1 に示す。加速空洞の振幅と位相が励振セルから遠ざかるに従って、放物線状に変化しているのが見られる。また、結合空洞の振幅は大きく変動している。

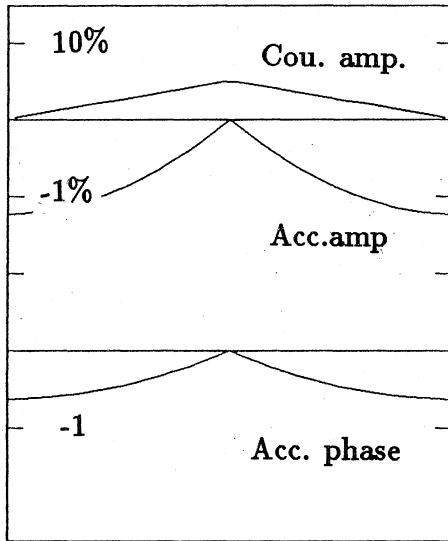


図 1 加速管の中央からマイクロ波をフィードした場合の結合空洞の振幅、加速空洞の振幅、加速空洞の位相の変化。加速空洞数 33

$$\begin{aligned} \Delta f &= 1 \text{ MHz} \\ Q_a &= 10000 \\ Q_c &= 1000 \\ k_1 &= 0.065 \end{aligned}$$

$Q_a, Q_c, \Delta f, k_1$ を変化させたとき、終端空洞の振幅と位相の変化をプロットしたものが図 2 及び図 3 である。図 2 は横軸 $1/Q_a$ 、縦軸に加速空洞の振幅の相対的な変化をとったもので、 Q_c と Δf をパラメータにしている。この図からわかるように、振幅の変化はほとんどストップバンドの大きさに依存しない。図 3 は縦軸に位相の変化をとったものであるが、こちらは Q_c の値にほとんど依存していないことがわかる。振幅の変化 ΔX_{end} 及び位相の変化 $\Delta \phi_{end}$ は近似的に

$$\Delta X_{end}(\%) \simeq \frac{4.8 \times 10^4}{Q_a Q_c k_1^2} \quad (3)$$

$$\Delta \phi_{end}(\text{deg}) \simeq \frac{24 \times \Delta f(\text{MHz})}{Q_a k_1^2} \quad (4)$$

と書ける。(3) 式からわかるように、振幅の変化には Q_c も Q_a と同等の影響を与える。また、(4) 式からストップバンドを小さくすれば位相の変化は小さくできることがわかる。 $\Delta X_{end}, \Delta \phi_{end}$ ともに k_1 の二乗に逆比例しているので加速管の軸に沿って加速電場の変化を小さくするには k_1 を大きくすることが最も効果的である。

次に、チューナーなどによって特定の空洞の共鳴周波数を変化させた場合を考える。実際に製作を予定している 6 加速空洞の加速間について計算を行なう。まったくチューニングしない状態で、加速空洞の共鳴周波数を 2449MHz、結合空洞の共鳴周波数を 2450MHz とする。すなわち 1MHz のストップバンドが生じている状態から出発する。このとき $\pi/2$ モードの周波数は 2449MHz で、加速管が短いために終端空洞における振幅と位相の変化も小さく、振幅は 0.1% 程度、位相は 0.05 度程度の変化しか生じていない。次にチューナーにより加速管の共鳴周波数を

チューニングする状況に対応して中央の1加速空洞のみ周波数を高くする。6MHz高くすると、全体の共鳴周波数は、2450MHzとなり、これは、加速空洞の各々の共鳴周波数の単純平均と同じである。同様に21MHz高くした場合までをまとめたものが表1である。この表からわかるように一つの加速空洞を10MHz以上変化させても、振幅、位相とも変化はわずかであり、実用上問題はないものと思われる。

長い加速管のチューニングについても同様な方法で検討することができる。

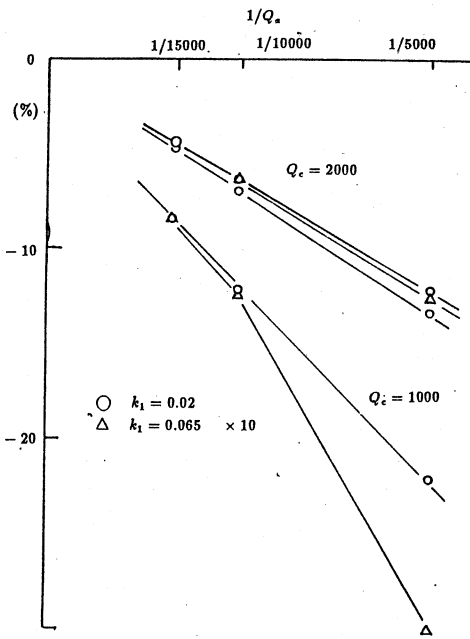


図2 結合回路のパラメータと振幅の変化

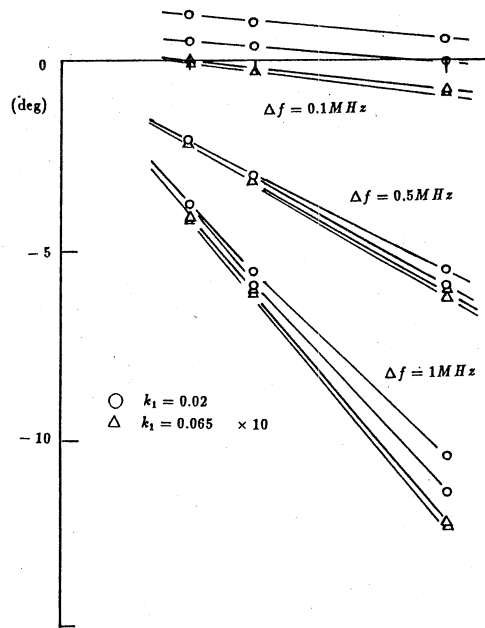


図3 結合回路のパラメータと位相の変化

4 まとめ

既に良く知られている事実であるが、長い加速管の電場の変化を小さくするためには、結合係数を大きくすることが重要である。また、結合空洞のQ値にも注意を払わなければならない。チューナーによるチューニングは短い加速管ではかなり広い周波数範囲で可能であることが明かとなった。但し、チューナー挿入による電磁場分布の乱れの影響などは考慮されていないので、これは別の方法で検討しなければならない。

振幅 X_n は、(1),(2)式からわかるように回路をながれる電流である。従って、同じ構造の空洞であれば、これをそのまま加速電場として読み直すことができる。しかし加速空洞と結合空洞のようにその構造が異なる場合には、対応関係は明かではない。

表1 チューニングによる共鳴周波数および振幅と位相の変化

$\delta f (MHz)$	$freq. (MHz)$	$\Delta X_{max} (%)$	$\Delta \phi_{max} (deg)$
0	2449	-0.055	-0.027
6	2450	-0.057	-0.133
11	2450.83	-0.32	-0.254
21	2452.45	-1.65	-0.5