

[P7-45]

## MULTI-HARMONIC IMPULSE CAVITY

Y. Iwashita and A. Morita

Accelerator Laboratory, NSRF, ICR, Kyoto University, Uji, Kyoto 611, Japan

A method that may enable very high gradient acceleration is proposed. A short impulse shape wave form can be generated by superposition of many harmonics. It is achieved by a cavity with multi-harmonic resonances, which may have ten or more modes excited simultaneously with proper phases. Such impulse wave form may achieve very high peak accelerating gradient.

### 多重高調波高電界空洞

#### 1. はじめに

パイオンなどの二次粒子ビームの位相空間内分布の実空間部分 ( $x, p_x, y, p_y$ ) 及び運動量 ( $p_z$ ) は非常に広がっている。もとの位相空間内分布が時間軸方向 ( $t$  又は  $z$ ) に狭くバンチされていればデバンチ操作により運動量 ( $p_z$ ) 空間内分布を改善する事ができる。ただし、二次粒子は寿命が短いので、必要な操作を短時間で行う必要がある。この際の限界を決めるのは二つあり、一つは高電界を発生させる際の発熱であり、もう一つはその高電界自身の真空中における放電限界である。

前者は特にシンクロトロンからの遅い取り出しによる二次粒子ビームの利用を考えた際に問題となり、ほぼ連続運転に近い運転条件となる。このため超伝導空洞が有利であるが、二次粒子発生のためのターゲットの近くでは放射線による熱流入が大きく注意が必要であろう。また、非常にエミッタンスが大きいので、ビームを捕捉しておくためにソレノイド磁場等によるチャンネルを形成して導く必要がある。そのもれ磁場の影響によるクエンチ、または、Q値の低下なども問題になる。また、放電限界はキルパトリックにより高周波における放電限界に対する目安として与えられていて、周波数があがるにつれて高くなる傾向がある。

シンクロトロンなどの加速器から得られる一次ビームが時間軸方向に狭くバンチさせることができ、また、その幅が加速空洞の周波数 (ここでは10 MHzと仮定) の周期 ( $\sim 100$  ns) よりも十分狭いとすると、上記の操作に必要な電界は実は短時間のみ必要なことがわかる。発熱などを考慮すると必要のない部分の電場はゼロであることが望ましいので、結局、必要な波形はインパルス状の波形となる。高電界加速器を間欠運転させたときの放電限界はパルス幅が短くなるほど高くなることも知られているので、このような波形による放電限界は高いのではないかと期待される。通常、高電界を発生させるのに

はQ値の高い共振空洞を使うが、こういった波形は高調波を多数含むので、単一のQ値の高い共振モードでは実現できない。このため、整数倍、もしくは奇数倍の高調波に対応する共振周波数群を持つ空洞を考え、複数のモードの同時励起を考える (図1参照)。二次ビームのインテンシティーは一般に低いので、ビームによる高次モードの励起などはここでは考えなくても良いと思われる。

#### 2. 同軸型共振空洞

このような整数倍ないし奇数倍の固有値をもつ共振器で、現実知られているものとしては半波長同軸共振器 (図2参照) があり、整数倍の共振周波数のモードを持つ。但し、最低次を含む奇数次のモードが中央に腹があるのに対し、偶数次

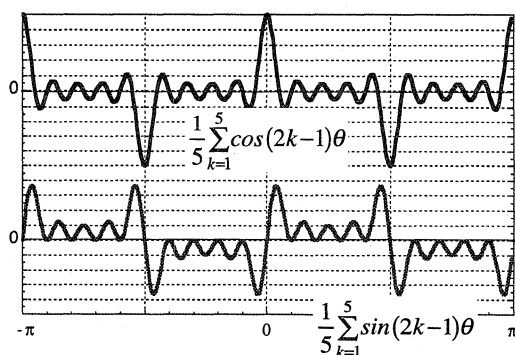


図1 多重高調波の重畳

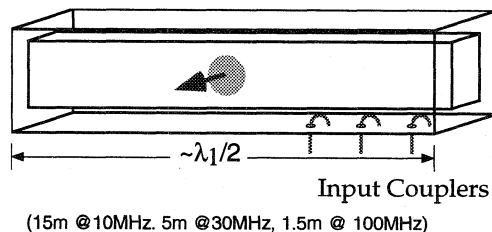


図2 同軸型共振空洞

のモードは中央で節になるので、この共振器の場合、奇数次のみが有効である。このような共振器に適切な位相関係で多数の周波数成分の高周波電力を注入してやることによりインパルス状の波形を実現することができる。特筆すべき事は位相関係としてコサイン波形の重ね合わせた場合、各モードのシャントインピーダンスが同程度と仮定すると使用モードの数に比例する所要高周波電力と、加速電圧が比例するということである。単一モードの場合、所要高周波電力は加速電圧の二乗に比例するので、大きな違いとなってくる。非常に粗い評価として各モードのシャントインピーダンスを4 MΩ/m、注入高周波電力を40 kW/mとすると三つのモードで100 kW/mで1 MV/mほど得られる。単純計算なら三十のモードで1 MW/mで10 MV/mとなるが、ここまで達成するにはもう少し工夫がいるであろう。例えば、同軸型共振器の場合、内部導体の内側は電場のない空間となるが入れ子状の構造をとることによりこの部分も使うなどの工夫ができる(図3参照)。但し、先に述べたように集束用のソレノイド磁場の生成を考慮する必要があるので、この部分はそういう用途に使った方がよいかもしれない。

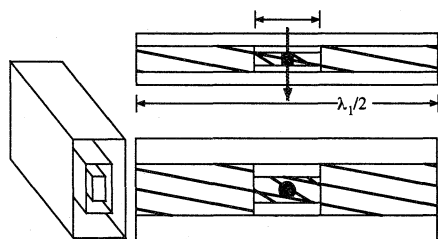


図3 入れ子状同軸共振器

図4に製作した同軸型モデル(CoaxPOP)の構造と外観を示す。基本周波数は質量、長さ等の取扱を考慮して144.5MHzにしたため高次モードの周波数は433.5MHz, 722.5MHz, 1011.5MHz, 1300.5MHz等となる。周波数、チューナーおよびカプラ位置を3種類、左右に設けてあり、中央に電場測定用のアンテナが取り付けられるようになっている。図5に透過電力スペクトルを示す。予想通り、両端のカプラ(#1、#6)間では整数倍のモードが観測され、端部のカプラ(#1)と中央のアンテナ間では奇数モードのみが強く観測されている。図中、周波数が何桁も表示されているが、精度は1 MHz程度である。表1には3種類の位置に対応する各チューナーの周波数可変係数の測定値[kHz/mm]を示す。

低レベル信号発生制御系として検討中の回路を図8に示す。各高調波間で位相関係を保つ必要があるため通倍による高調波発生を行い、相対的な位相、振幅の調整を行えるように考えている。

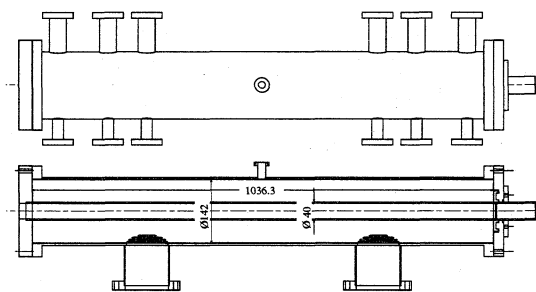


図4 同軸型モデル (CoaxPOP) とその部品

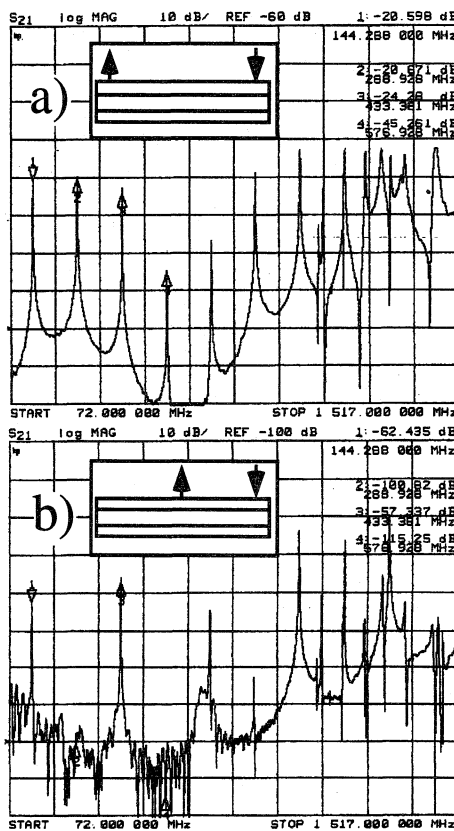


図5 CoaxPOPの透過電力スペクトル。a)両端のカプラ間。b)端部のカプラと中央のアンテナ間。

	$f_1$	$f_3$	$f_5$	$f_7$	$f_9$
Tuner #1	3	4	-8	-28	-54
Tuner #3	0	-1	-4	-10	-18
Tuner #5	2	-13	6	4	-69

表1 各チューナーの周波数可変係数[kHz/mm]

現状では基本モードのみが臨界結合になっていてほかのモードに対しては反射が大きい。今後、複数カプラの同時使用や、マッチングボックスなどの外部回路の工夫を通して結合がとれるようにする予定である。

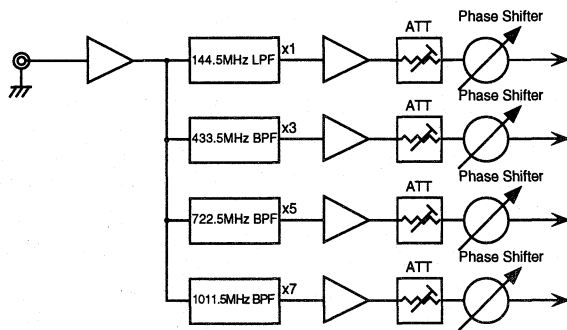


図 8 多重高調波発生回路

### 3. 円筒空洞

同軸型共振器はその構造上、加速電圧を発生する部分が2ヶ所あり、荷電粒子のその間の移動時間と電圧波形との間に制約が生じるので、使いにくい可能性もある。円筒空洞ならば単一の加速ギャップを持つが、一般にはその共振周波数はもはや整数倍の関係とはならないので形状を工夫する必要がある。また、同軸型の場合も同様であるが、空洞には無限個のモードが存在し、次数が上がるほど密度が上がる。実際に使うのはこれらのうち特定のモードなので、次数の高いモードを使う場合は注意が必要である。単純な円筒空洞の場合には解析的に解けるので、このモード分布の例を図7に示す。ダイポールモードや、四重極、六重極、八重極などのモードが多数出てくる様子がわかる。ただし、 $s > 0$ のモードや  $TE_{mns}$  のモードは、軸方向に短い空洞の場合かなり高い周波数を持つということもあり、この図では省略されている。

円筒空洞は、一軸方向のみに長い同軸型とくらべた場合、その形状より、全体に大きき、特に体積が大きくなり、周波数が低くなると製作や設置が困難となる。内部を高真空に保つため、大気圧に耐えうる強度を持たせる必要があることなどを考えるとより深刻である。このため、円筒空洞を半径方向に折り返したものを考えた。図7にその共振周波数の分布を示す。このような形状をとることにより、直径を半分程度にでき、また、下の方のいくつかの周波数が奇数倍に近くできることがわかる。

### 4. まとめ

高調波を単一空洞に入れて運転するという考え

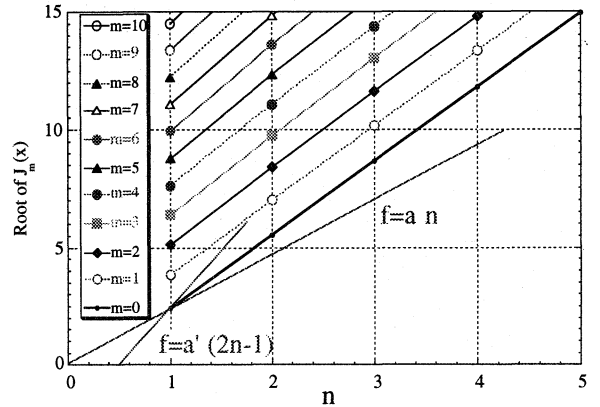


図 6 円筒空洞のモード分布

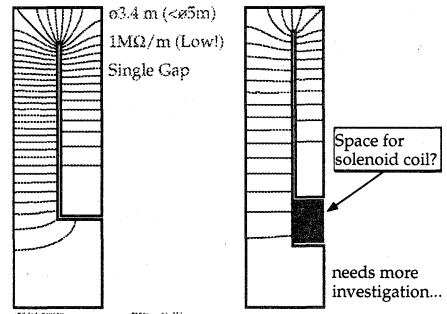
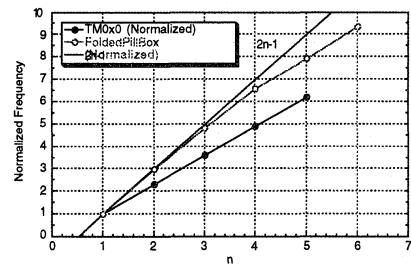


図 7 折り返し状円筒空洞

自身は低エネルギービームのバンチャーなどで検討されてきたが、高電界発生に着目し、多数のモードの使用を考慮したものは珍しいと思われる。この多重の高調波の重畳により、高電界を得つつ常伝導においても連続運転に近く働かせることができる可能性があり、同軸モデルによる Feasibility Study を行っている。

現在想定されている主な問題点としては1)多種類の高周波電源を用い、それぞれの電力を空洞に注入する必要があるため、システムが複雑化する、2)多数の高次モードの中をかき分けながら特定のモードを使わないといけない、などがあり、詳細な研究を必要とする。将来的には奇数次周波数のみでなく、偶数次も使えると最大周波数までのモードの数が増え、また単一ギャップ空洞が自由度が大きいためこの組合せの検討も重要である。