

## 高周波加速

伊澤正陽 KEK-PF 〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

E-mail: masaaki.izawa@kek.jp

高周波加速は、大電力高周波源（クライストロン等）、立体回路（導波管、サーキュレーター等）、低電力回路（高周波の位相、振幅を制御する）、それに加速空洞からなる（Fig. 1）。大電力源で増幅した高周波の電磁波（50 MHz～1.5 GHz 程度、電力は数 kW から MW 程度）を加速空洞に投入し、加速空洞で強い電場を発生させ、それによって電子を加速する。空洞内の電磁場は交流電磁場になるが、その位相、振幅は精度良く制御される必要がある。高周波加速は、周回する電子を加速するのが仕事であるが、言葉から想像されるような電子の速度を加速するというのとは様子が違う。これは放射光リングでは電子は既に相対論的速度すなわち光の速度にはほぼ達して、エネルギーが変わっても速度がほとんど変わらないという事情による。加速というよりは周回する電子のエネルギーを補給するという方が実感として分かりやすい。周回する電子は放射光を放出することによってエネルギーを一部失うのでその分を補うということである。放射光を放出することで失うエネルギーのことを radiation loss というが、大部分は偏向電磁石で発生する。挿入光源でも radiation loss は生じるが、超伝導のウィグラーでも無い限り、無視はできないがそれほど大きくは無い。高周波加速が補給しなければならないエネルギーは radiation loss (keV) に蓄積電流値 (mA) をそのまま掛けると電力 (W) で得られる。例えば PF の場合は偏向電磁石の radiation loss は 400 keV

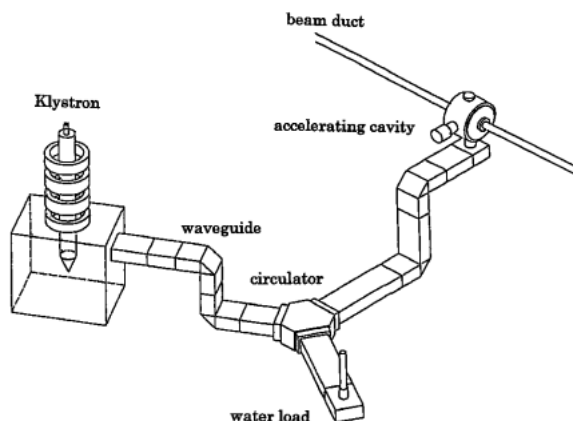


Figure 1. rf accelerating system. High voltage power supply for klystron and low level control circuit, which are not shown here, are very important for the system.

なので蓄積電流 450 mA の場合は 180 kW となる。偏向電磁石による radiation loss は電子のエネルギーの 4 乗に比例する。高エネルギーになるほど補給しなければならないエネルギーは非常に大きくなる。

高周波加速のもう一つの大事な仕事は電子をバンチ内に閉じ込めることである。横方向（水平、垂直方向）に電子を収束させるのは四極電磁石であるが、縦方向（バンチの進行方向）に閉じ込めるのは加速空洞である。ではどのようにして、電子にエネルギーを補給し、かつバンチ内に閉じ込めるのかということになるが、これを正確に書こうとすると beam loading というやや面倒な話を説明しなければならなくなるので、ここでは位相安定性とエネルギー収支について述べることにする。まず電子にエネルギーを与えるには電子に電場（もちろん正しい向きの）を感じさせれば良い。加速空洞は電子軌道付近にできるだけ強い電場が生じるように設計されたものである。Fig. 2 にその断面の 1 例を示すが、金属でできた中空の箱のようなものである。この箱の中に高周波の電磁波を送り込んで箱が持つ共鳴モードに共振させる。これによって、箱の中に強い電磁場の定在波が立つことになる。共振するからには、箱の共鳴モードと送り込む電磁波の周波数が一致しなければならないし、中心軌道付近に強い電場をもつようなモードを選ばなければならない。中空円筒の TM<sub>010</sub> モードが都合の良い電場を作るので、ほとんどの場合このモードが加速モードとして使われる。そのためほとんどの空洞は基本的に円筒型となる。空洞の大きさは加速モードの周波数で決まるので、常識的な大きさにしようと思えば周波数は数百 MHz から 1.5 GHz くらいということになる。500 MHz

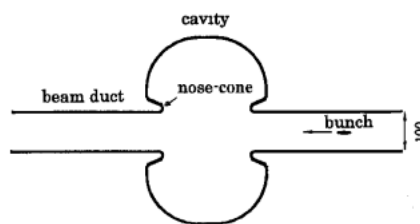


Figure 2. Cross sectional view of a cavity. The nose cone, which helps to concentrate the electric field in the region of the beam, and the spherical shape, which minimizes losses at the cavity surfaces, are the characteristic features of standing-wave accelerating structure.

だと波長が60 cm だから、外形はその程度のものになる。その他、なるべく中心軌道付近に強い電場が生じるようにとか、電子が通過する間にできるだけ仕事をするように（交流電磁場なので電子が空洞を通過中に少なくとも電場の向きが反転してはいけない）というようなことを考慮すると図のような形状に行き着くことになる。空洞の性能を評価するには空洞のシャントインピーダンス  $R_{sh}$  というオームの dimension を持った量を使う。 $R_{sh}$  は、 $P_c = V^2 / R_{sh}$  と定義される。ここで  $P_c$  は空洞内面で消費される電力である。共振している空洞内面上には非常に強い高周波電流が流れるので、表皮抵抗によって発熱する。その消費電力のことである。 $V$  は電子の軌道上、空洞の入り口から出口まで電場を積分したもので電圧である。電場は時間と共に変わり（交流電場だから）位置によっても変わる。電子と共に動く座標系で電場を入り口から出口まで積分するという方が説明としては正しい。 $R_{sh}$  が大きければ、それだけ少ない電力でギャップ間（入り口と出口の間）に電圧を発生させることができるということになる。

さて、このように空洞のギャップに電圧を発生させることができたとする。この電圧は時間についてプロットすると **Fig. 3** のようになるであろう。電子が1周で失うエネルギーすなわち radiation loss  $U$  を **Fig. 3** に示す程度とすると、毎回失ったエネルギーだけ補給するにはちょうど1周してきた時に、電圧が図のAまたはBの位相になっていれば良い。放射光リングの場合はBの位相の時に空洞に戻って来ないと回りつづけられない。エネルギーが少しだけ高くなってしまった電子は軌道の少し外周側を回り、一方、電子の速度はほとんど光速のまま変わらないので1周するのに余計に時間がかかる。そのためBの位相の位置より遅れてCの位相の時に戻ってくる。そうすると必要十分な電圧よりもやや足りない電圧を感じるようになるので、少し減速される。反対にエネルギーがやや低くなった電子は早く戻ってくるので、Dの位相の電圧を経験する。つまり余計に加速される。空洞のところで1周してくる電子を見ているとBの位相の前後を行ったり来たりすることになるだろう。一方、Aの位相では行ったり来たりすることは出来ず、駆け上がるか転がり落ちるかのどちらかになる。こうしてBの位相のまわりで安定に周回を続けられることになるのだがこれが位相安定性である。行ったり来たりする縦方向の振動はシンクロトロン振動と呼ばれる。またこの仕組みがあるので電子の集団はバンチにならざるを得ない。入射器から時間的に十分長い幅（例えば、**Fig. 3** の1周期以上）の電子の集団がやっても、Aの位相付近で空洞に到達したものは生き残れず、Bの位相の付近（通常はかなり広い範囲になる）に来たものだけが生き残ってバンチを形成する。シンクロトロン振動の振幅がバンチの長さに相当することになる。この解説のシリーズのどこかでビームダイナミクスについて解説があると思うので、詳しくは述べないが、シンクロトロン振

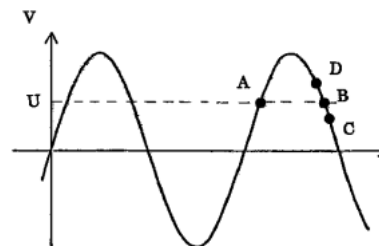


Figure 3. Phase stability. Points A~D show the change in the accelerating voltage per turn for an electron which is delayed by small time per turn.

動を減衰させるメカニズムと増長させるメカニズムの双方が存在するのでその平衡状態でバンチの長さが決まる。

空洞に電磁波を導入（空洞にパワーを入れるという）した時にギャップに発生する電場は単純であるが、蓄積ビームが存在する時は、些か複雑で簡単ではない。しかし、空洞に入れる全電力は、前述したビームに補給しなければならない電力と空洞内面で消費される電力それに空洞から反射される若干の電力の和に等しいというエネルギー収支はいつでも成り立つ。Steady-stateには空洞のギャップに発生する電圧については投入した全電力からビームに補給される分と反射された電力を差し引いた残りの電力が空洞壁で消費され、その電力に相当する電圧が発生していると考えればよいだろう。シンクロトロン振動の安定領域を大きくするにはこの電圧を十分高くしなければならない。PFリングでは四台の空洞を用いているが、ピーク電圧は1.7 MVで、このときの  $P_c$  は空洞1台当たり約30 kWである。また、この電圧はビームの寿命（quantum life time）を決める。

以上は高周波加速に関する基礎的な部分であるが、加速空洞は加速モード以外にも無限の数の高次モードを持っている。これらの高次モードの中でビームと相互作用するのが少なからず存在する。この相互作用は結果としてビーム不安定を引き起こすので極めて有害である。高周波加速の担当者は否応無くこの対策に取り組むことになる。十数年前から、高次モードを damp した空洞（damped cavity）の開発が精力的に行われ既に実現している。KEKにおいても、KEKB, ATF, PF 各リング独自の damped cavity が開発され実用に供されている。

さて、シャントインピーダンスという抵抗に相当する量について述べたが、もちろんこの抵抗はギャップのところに鎮座しているわけではない。しかしながら、パワーを入れていない空洞に蓄積ビームを通すと、オームの式に従って電流値とシャントインピーダンスの積に相当する電圧が発生する。シャントインピーダンスは  $M\Omega$  のオーダーなのでこの電力は決して小さくはない。リングに設置した空洞を使用しない時には加速モードの周波数を十分ずらしておかなければならない。シャントインピーダンスは目に見えないが、頭を交流回路に切り替えて、目を凝らすと見え

るものもある。Fig. 2で空洞の外形を示す線を針金だと思ってそれを軌道中心軸の周りに360度回転させれば空洞になる。針金は必ずインダクタンス  $L$  を持つから1ターンのコイルをぐるりと回したものが空洞だと思えば、空洞は  $L$  成分持っているということが分かるし、ギャップの部分は対向する金属の間に電場が集中しているのだからコンデンサーにも見えるだろう。実際空洞はLCRの並列共振回路とみなして解析できる。前に蓄積ビームが存在すると複雑だと述べたが、このLCRの所為である。身近なところでは、ケーブルと測定器のインピーダンスの整合を取らないと速い信号の解析がうまく出来ないということを経験するが、空洞の場合、空洞の共振モードと蓄積ビームと導波管から放り込む電磁波の間の整合を取るということは本質的に重要である。これがうまく行かないと加速が出来

ないばかりか扱う電力が常識的ではないので、金属の塊にもかかわらず「壊れる」、「熔ける」、「飛び散る」という事態になる。それ故位相や振幅を制御する低電力回路は非常に重要で、PFでは退官された小早川先生が最初に構築されたのだが、日本でPF以降に建設された電子リングの制御回路の原型となっている。PF光源棟地下に並んでいるラックをみると筆者は畏敬の念を禁じ得ない。

さて、空洞に限らず、ビームダクト等には凸凹が必ずあってそれらは上で述べたように少なからず  $L$  や  $C$  成分があるから、電流すなわち蓄積ビームとは必ず相互作用を持つことになる。空洞の高次モードやダクトのインピーダンスに関わるビーム不安定等については次回の担当者にお問い合わせすることにした。