

## 電子ビーム加速器に於ける2つの異なる 周波数の新しい同期化方法

川島 祥孝\*

### New Synchronization Method between Two Different Radio Frequencies in Electron Beam Accelerator

Yoshitaka KAWASHIMA\*

#### Abstract

To stabilize beam intensity and transmission efficiency from an electron linac accelerator to a circular accelerator, it is effective to synchronize two different radio frequencies (RF). A new synchronization method of two arbitrary different radio frequencies was developed and has been stably operated at SPring-8. The method is described.

### 1. はじめに

近年多くの放射光施設において蓄積電子ビームを一定に保つ Top-up 運転と呼ばれる利用運転の形態が取られている。放射光利用者が実験室から退去したりせず、放射光取り出しのビームラインを常時開放した状態で円型加速器の蓄積電流が常に一定になるよう常時ビームが入射されている。従って線型加速器の電子銃からのビームの時間幅を短くして円型加速器のねらった RF バケットの中に電子ビームをできるだけこぼさないように入れることが重要となる。さらに放射光施設において利用者が電子ビームを蓄積している各 RF バケットの強度をできるだけ一定にして欲しいという要求を満たすためには、時間精度の良い電子ビーム制御タイミングシステムが構築されていることは当然のこととして、さらに線型加速器と円型加速器の基本周波数が完全に同期していなければならない。しかし電子ビームを扱う加速器において、一般的に線型加速器の周波数と円型加速器の周波数は全く異なり同期をとることは困難である。例えば、日本において線型加速器で使用される周波数の代表的なものは 2856 MHz であり、円型加速器の周波数は小さい蓄積リングで 500 MHz、大きいリングでは 508.58 MHz となっている。これら線型加速器の周波数と円型加速器の周波数は分周または逡倍することにより自分の周波数から相手の周波数を容易に作ることができない関係にあ

る。各加速器で使用される周波数は使用する RF 増幅器であるクライストロンの共振周波数により決まっている。従って線型加速器の周波数と円型加速器の周波数を同期化することはさらに容易なことでは無い。海外では両周波数を同期化するため線型加速器の周波数が 3000 MHz で、円型加速器の周波数を 500 MHz として専用のクライストロンが存在するところもある。この場合、円型加速器の周波数を 6 逡倍することにより容易に線型加速器の周波数を発生することができる。しかしクライストロンとその電源の安定な維持運転を考慮すると、海外から新たな周波数領域のクライストロンの導入をためらう人は少なく無いと思われる。また円型加速器の設計、特に周長設定において自由度を失うことになる。このような状況下において、我々は全く新しい発想の下に線型加速器と円型加速器の異なる任意の基本周波数を完全に同期化する方法を開発した<sup>1)</sup>。

### 2. 任意周波数同期化の着眼点

線型加速器と円型加速器の組み合わせを考える。円型加速器は電子ビームを蓄積するものとする。従って円型加速器の基本周波数 (RF) は常に連続して発生しクライストロンに供給し続けなければならない。一方電子ビームを供給する側である線型加速器は連続して電子ビームを供給しているのでは無い。ビームの供給はパルス的である。この事実から線型加速器の電子

\* 財団法人高輝度光科学研究センター Japan Synchrotron Radiation Research Institute

ビーム発生器を含むクライストロン関連機器は、ビーム出射前後のわずかな時間のみ運転している。ならば線型加速器の基本周波数について、わずかな時間のみ供給すれば良い。これまで線型加速器のRFは運転していない状態でも常に供給し続けていることを考慮するなら完全に発想の転換をしなければならない。以上の説明から解るように、線型加速器の基本周波数はパルスのように運転するクライストロン高電圧発生モジュールに同期して供給するようにすればよい。この基本的事実の考えに到達したなら直ぐわかるように、円型加速器のRFを用いて発生したタイミング信号を利用する。円型加速器のRFのタイミングで電子銃トリガー信号を発生する時の信号を用いて、またはもう少し時間的に早く発生するクライストロンモジュールの起動信号を用いて線型加速器の基本周波数(RF)を発生することができれば完全に両方の基本周波数が同期できるという結論に達する。円型加速器のRF発生器はシンセサイザーであり、線型加速器のRFもシンセサイザーで発生するとする。その際、円型加速器のRFタイミング信号で線型加速器のRF発生器のシンセサイザーを起動できればよいのであるがそれはできない。それを解決したのが次の方法である。

### 3. 同期化の準備

線型加速器の基本周波数を円型加速器のRFのタイミング信号を使ってパルスのように発生する方法を採る。先ず一つ目の道具として任意波形発生器を用意する。次に任意波形発生器から出てきた信号の周波数をさらに上の周波数に上げるため逡倍器を準備する。そして任意発生器の動作基準クロックは円型加速器で用いている基本周波数を必ず使うという条件を満たせば基本的にこれら2つの道具があれば線型加速器の基本周波数を発生することができる。

ここで任意波形発生器について説明する。これは利用者が発生したい任意の波形について情報をメモリーに書き込む。そして外部トリガー信号または手動でスタートボタンを押すと、書き込まれたデジタル情報が内部または外部クロックに同期してメモリーから出力され、それがD/A converterによりアナログ信号に変換される。このようにして任意波形発生器の出力から欲しい波形が得られる。さらに任意波形の発生時間も任意の時間間隔から無限の時間まで設定できるようになっている装置である。外部入力クロックは我々の使っている製品については2GHzまでの帯域がある。

それでは、具体的にSPring-8の周波数同期化について説明する。そのことが理解できれば誰でも簡単に

任意の2つの周波数について同期化することができる。SPring-8の円型加速器の基本周波数は508.58 MHzである。一方線型加速器のそれは2856 MHzである。今勝手に任意の正の整数をNとし508.58 MHzをNで割った値をf1とすると、

$$f1 = \frac{508.58 \text{ MHz}}{N} \quad (1)$$

なる周波数が得られる。このf1を逡倍器で偶数倍して得られる周波数をf2とする。そのf2の周波数は線型加速器の基本周波数となるべき値である。そして正の整数をM, M1, M2とすると、

$$\begin{aligned} f2 &= f1 \times M \\ &= f1 \times (M1 \times M2) \\ &= \left( 508.58 \text{ MHz} \times \frac{M1}{N} \right) \times M2 \end{aligned} \quad (2)$$

と書く事ができる。得られた周波数f2が線型加速器の基本周波数と一致すればよいので、線型加速器の基本周波数2856 MHzと得られた周波数f2との差を $\Delta f$ とすると、

$$\Delta f = 2856 \text{ MHz} - f2 \quad (3)$$

となる。この $\Delta f$ の値ができるだけ小さい程、線型加速器の基本周波数に近い値が(1)と(2)の過程を経て得られることとなる。(2)式の括弧の外のM2を逡倍器の倍率とする。そうするとM2は偶数でなければならないという条件が得られる。さらに(2)式のM1とNを含む最後の式の括弧の中の周波数は任意波形発生器で発生すべき周波数とすることができる。ここまでくると後は逡倍器の倍率を決定しておき(1), (2), (3)式を用いて計算機で $\Delta f$ が最小になるM1とNの値を捜せばよい。SPring-8では逡倍器の倍率M2=32倍という数字を選択した。そうすると(3)式が最小になる正の整数について任意の整数の領域について計算機を用いて計算してM1=431, N=2456という値が得られた。それらの値を用いて(2)式の括弧の中を計算すると

$$508.58 \text{ MHz} \times \frac{M1}{N} = 89.24999186 \text{ MHz} \quad (4)$$

となる。この(4)式の値を任意波形発生器で発生させ、その後32倍の逡倍器に入れると

$$f2 = 2855.999739 \text{ MHz} \quad (5)$$

なる線型加速器の基本周波数が得られる。(5)の値を

(3)式に代入し得られる周波数の差をみると

$$\Delta f = 260.6 \text{ Hz} \quad (6)$$

となる．このように円型加速器の周波数から完全には線型加速器の周波数が得られないがほぼ一致した値が得られることが解る．後で述べるようにこの程度の周波数のずれは線型加速器の加速管にとって全く問題にならない．

もう一つ日本では円型加速器において 500 MHz を採用している場合もあるので，これについて同じように計算機を使って M1 と N の値を捜す，但し通倍器の倍率は 32 倍として計算した．そうすると M1=357, N=2000 という値がそれぞれ得られる．それらの値を用いて(4)式を計算すると

$$500 \text{ MHz} \times \frac{M1}{N} = 89.25 \text{ MHz} \quad (7)$$

が得られる．この周波数を任意波形発生器で発生し通倍器に入れると

$$f2 = 89.25 \text{ MHz} \times 32 = 2856 \text{ MHz} \quad (8)$$

と完全に線型加速器の基本周波数を得ることができると．このような場合もある．以上の説明では最初，通倍器の倍率を決めてから M1 と N を捜す方法を示した．しかし，初めての方は通倍器の倍率を決定せずに計算を始めることがあると思われる．この場合(1)と(2)式の M と N について(3)式の  $\Delta f$  が最小になる値を捜した後，通倍器の倍率を決定しても良い．

線型加速器の基本周波数が 2856 MHz, 円型加速器のそれが 500 MHz および 508.58 MHz の場合について両者の周波数の同期化について述べた．一般の周波数についても円型加速器の周波数から線型加速器の場合について上記した方法を理解すれば簡単に導くことができる．ただし簡単なプログラムを書いて計算機で最適な M1 (または M) と N を求めなければならない．

#### 4. 線型加速器の基本周波数発生

実際のハードウェアでどのように線型加速器の基本周波数を円型加速器の基本周波数から発生するのか具体的に SPring-8 の場合について説明する．最初に線型加速器の基準信号 2856 MHz 発生のブロック図を図 1 に示す．この図で円型加速器の基本周波数 508.58 MHz が基本でありこの RF から総ては始まる．この RF 信号に同期してあらゆる加速器の機器が動作するように SPring-8 では作られている．図 1 で

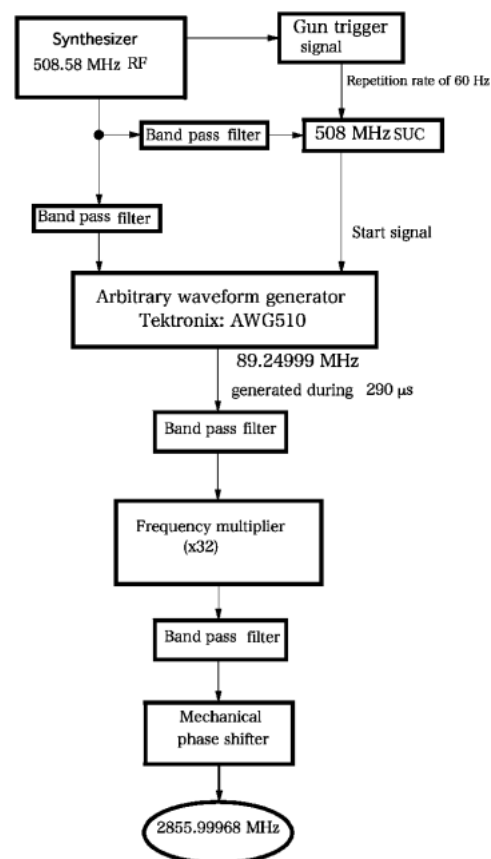


図 1 508.58 MHz を用いて 2856 MHz を発生するためのブロック図．基本的には任意波形発生器と通倍器の2つの道具からできている．任意波形発生器で使う時計は必ず円型加速器の基本周波数を用いなければならない

508.58 MHz 発生器であるシンセサイザーと電子銃の trigger 信号発生は蓄積リング側にある．ケーブル(光ファイバー)の長さで約 800 m 離れた場所に図 1 の任意波形発生器以降の装置が設置されている．基準信号は SPring-8 のどの場所においても位相が一定になるよう PLL (Phase-Locked Loop) システムが動作し常に位相角度で 1 度以内に保たれている．電子銃の trigger 信号は長い距離伝送してくるのでタイムジッターが発生する．しかしこれも図 1 にある 508 MHz SUC (Synchronous Universal Counter)<sup>2)</sup>によりそのタイムジッターは完全にキャンセルされる．任意波形発生器は Tektronix の 10 ビットの市販品を用いた．任意波形発生器で発生した 89 MHz の信号を直接スペクトルアナライザーで測定するとサイドバンドが多く，加速器で要求するレベルの信号では無くそのままでは使用できない．これらサイドバンドを除去するため非常に狭い band pass filter (約 3 kHz の幅) を使いきれいな信号とする．この信号を通倍器で 32

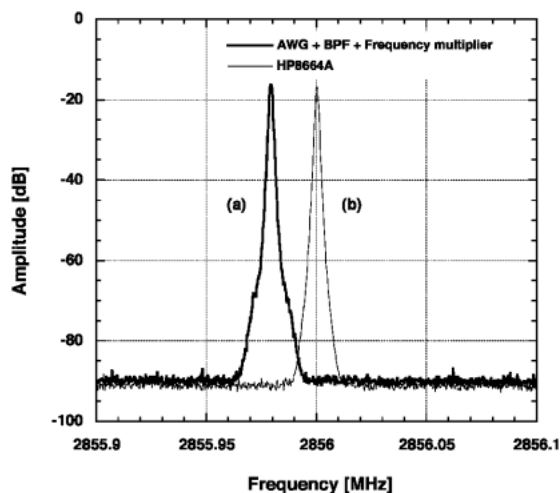


図 2 (a)は新しい同期化の方法で発生した 2856 MHz, (b)はこれまで使用していた HP 製のシンセサイザーから出力した線型加速器の基本周波数

倍し 2856 MHz が作られ, さらに band pass filter を通すと線型加速器の基本周波数が得られる. 図 1 の最後に手動で動かす位相器が設置されている. この目的はバンチングセクションにおける位相を最適にする時用いる位相調整用, または電子ビームが完全に円型加速器の 1 個の RF パケットの中にできるだけこぼれないよう入射する目的で設置されている. 当然一度調整するとほとんど触ることは無い.

さて図 1 の方法で発生した 2856 MHz の信号とこれまで実際の運転で使われていたシンセサイザーから発生した同じ周波数をスペクトラムアナライザーで見ることにする. 新しい方法で発生した 2856 MHz とシンセサイザーから発生した同じ周波数は (6) で示したようにほとんど差が無いので, 少し M1 と N の異なる値を用いることにより  $-18.719 \text{ kHz}$  ずれた 2855.981281 MHz を図 2 に示す. 図から従来使っていたシンセサイザーから発信される信号に比べ見劣りしないものが出てきていることがわかる.

実際の運転で各種信号のタイミングがどのようになっているのかタイムチャートを図 3 に示す. この図で 508.58 MHz のタイミング信号を用いて任意波形発生器 (AWG) から 89 MHz を発生する. その後, 逡倍器を通過し 2856 MHz が約  $290 \mu\text{s}$  の時間発生し続ける. このように発生時間幅が長いのは, 任意波形発生器の後に取り付けた band pass filter が狭帯域の 3 kHz の周波数幅しかないので, 逡倍器から出てきた 2856 MHz の信号の振幅が正常値になるまで時間がかかる. 実際発生した信号の振幅の測定から任意波形発生器から出力される信号発生時間を必要とする数十

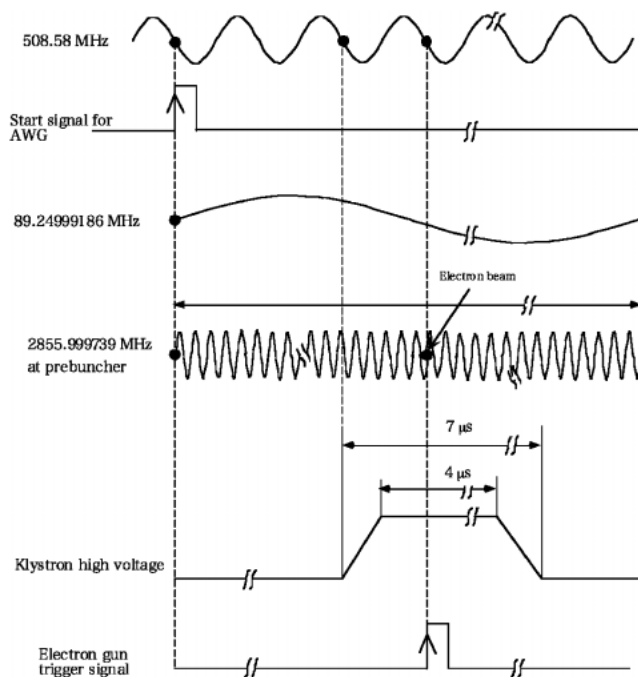


図 3 SPring-8 において 508.58 MHz から 2856 MHz が発生するタイムチャート. 総ての機器が 508.58 MHz に同期して動作するように作られている

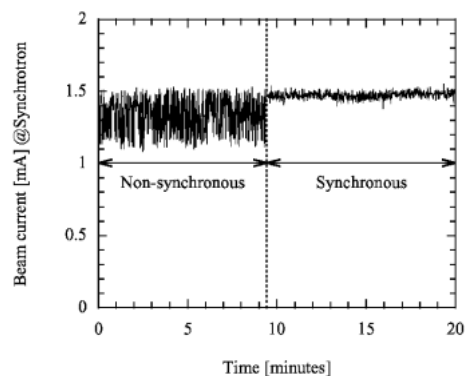


図 4 線型加速器と円型加速器の周波数が同期した時, しない時 SPring-8 のプースターシンクロトロンに入射した電子ビーム強度の変化の様子

$\mu\text{s}$  から  $290 \mu\text{s}$  まで長くした. 2856 MHz が発生し, クライストロンに高電圧を供給し, その間に電子銃から電子が発射される. 出てきた電子の塊はバンチングセクション (SPring-8 の場合バンチングセクションの周波数は 2856 MHz) に入り電子ビームとのタイミングは常に 2856 MHz の一番良い条件に合うよう調整されるので線型加速器から円型加速器に入射した時のビーム強度は, 2 つの周波数が非同期の場合と同期の場合とでは差がでてくることが期待される. 実際,

SPring-8 で線型加速器の電子銃のグリッドバルサーの時間幅を 1 ns にして線型加速器からブースターシンクロトロン的一個の RF バケットに電子ビームを注入した時のビーム強度変化を図 4 に示す。非同期の場合と同期している時とでは明確な差が出ることが分かる。

線型加速器から円型加速器へビーム出射の度に線型加速器の基本周波数は円型加速器の基本周波数から作られる。従って両者の基本周波数は常に同期している。

## 5. 円型加速器の周波数は常に変化する

円型加速器に蓄積された電子ビームの理想軌道からの変移を見ながら理想的な軌道に電子ビームを移すべく周長調整する。そのためには基本周波数を変更する。この時、新しい同期化の方法により発生する線型加速器の基本周波数は円型加速器の基本周波数を用いて発生するので、線型加速器で問題が発生しないか議論する。

SPring-8 の場合、放射光利用者にビームを供給する前に基本周波数を変えて軌道調整する。さらにユーザー運転時間中も電子ビームの軌道変化をビームポジションモニターにより約 1 ミクロン程度の精度でビーム位置を測定し<sup>3)</sup>約 10 分間隔で電子ビーム軌道を理想とする軌道に移動するために基本周波数を変更して調整する。これら一連の作業を自動的に計算機が

実施する。電子ビームの軌道が時々刻々変化する最大の原因は月の重力による潮汐力により蓄積リングが設置されている地面が拡大または縮小するからである<sup>4)</sup>。さらに 1 年という長い期間の変化は地面の季節の温度変化によるものである。それらの最新の具体的データを図 5 に示す。同図の縦軸は現在のモニター周波数（周波数カウンターを用いて 12 桁の精度でシンセサイザーの信号をモニターしている）から 508.58 MHz を引いた値である。さらに横軸は年と月、日、時を表す。このデータから 1 日に 2 度潮汐があることがよくわかる。また全体が時間と共に右上方向に移動している。これはデータが 2005 年の 12 月のものなので、地面が徐々に冷えて縮むことによる年変化を表している。その証拠に周波数は徐々に高い方向に向かっており、蓄積リングの周長が短くなっていることを示していることから解る。このように SPring-8 の蓄積リング全体がこれまでのどの電子蓄積リングとは全く異質の超精密な精度で運転されていることが解る。SPring-8 の円型加速器の基本周波数は常に GPS が発生するセシウム原子時計の基準信号を受信し 12 桁の精度でモニターされている。シンセサイザーの周波数設定精度は 10 桁であり、SPring-8 の基本周波数は 0.1 Hz の桁の精度で周波数を 10 分毎に変更している。これを距離にすると nm の精度で周長を調整していることを意味している。円型加速器の基本周波数の

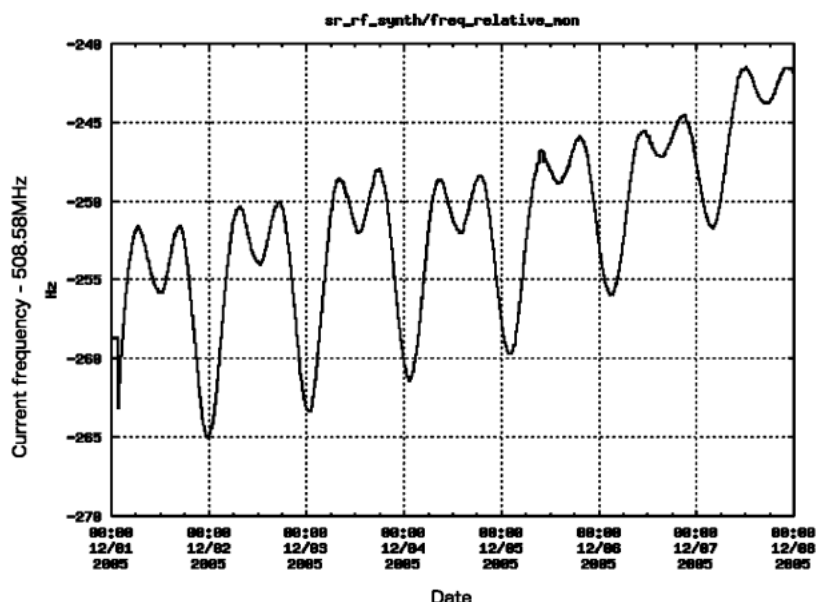


図 5 SPring-8 において円型加速器の基本周波数は 10 分毎にエネルギー補正のために周波数を変更する。その生のデータを示す。縦軸は現在の周波数から 508.58 MHz を引いた値を示す。一日 2 度の潮汐による変化が見える。さらに周波数が右肩上がりを示しているが、これは 2005 年 12 月のユーザー運転中の生のデータであり年変化を表している。大気の温度が下がり地面が縮むので周波数は高い方にシフトする傾向を示している。毎年 4 月中旬以降は逆に地面が膨張するので周波数は下がる方向となり右肩下がりとなる

変化は1998年から2005年までに取得された実際のデータから508.58 MHzを基準にして周波数の高い方は最大+28 Hz, 周波数の低い方は-630 Hz動いている。これらの値から(1), (2)そして(3)式を使って線型加速器の基本周波数2856 MHzからの差 $\Delta f$ を計算すると, 円型加速器の基本周波数が一番高い時 $\Delta f = 103.0$  Hzとなる。さらに基本周波数が最も低い値の時 $\Delta f = 3.798$  kHzとなる。これら円型加速器の基本周波数の変化が原因で, 線型加速器において電子ビームを所定の値まで加速し正確に円型加速器に入射できなくなるのではないかという疑問が出てくる。実際, 線型加速器で電子ビームを加速する時, 問題になるであろうか? 答えは“いいえ”である。SPring-8の線型加速器に設置されている加速管のQ値( $=f/\Delta f$ :  $f$ は基本周波数)は13500ある。従って加速管の半値周波数 $\Delta f = 211.6$  kHzと計算される。この値からすると線型加速器の基本周波数2856 MHzから最大 $\Delta f = 3.798$  kHzシフトしても全く問題にならないことが解る。実際SPring-8の線型加速器において問題は全く発生していない。さらに500 MHzを基本周波数としている兵庫県立大学付属のNewSUBARUの蓄積リングにSPring-8の線型加速器から1 GeVのエネルギーの電子ビームを供給している。この時SPring-8側にビームを供給する時と同様に500 MHzと2856 MHzを同期させている。線型加速器からビーム入射する二つの独立したリング側の周波数に応じてRFスイッチを用いて発生する2856 MHzを切り換えている。ここでも問題は発生していない。

以上, 円型加速器の周長調整(エネルギー補正)のために基本周波数を変化させることにより, それに応じて線型加速器の基本周波数も新しい周波数同期化の方法では変化する。しかしその変化の値は線型加速器の加速管のQ値のおかげで問題にならない。

## 6. 同期化の注意点

線型加速器と円型加速器の基本周波数を同期化する際, 問題となる重要な点がある。図1に示した方法を用いて線型加速器の基本周波数を発生した場合, 円型加速器の基本周波数に対する線型加速器の基本周波数のタイムジッターを測定すると, 時間測定器(Sampling oscilloscope)の限界精度である偏差値が約3 ps程度以内にある。この精度を常に保つには加速器全体の基本周波数の時間精度と各機器の安定度が問題となる。SPring-8では全加速器がpsの精度で運転されていることは上記した通りである。その方法は参考文献5)を参照していただきたい。線型加速器の電子銃

triggerについても円型加速器の基本周波数を用いてpsの精度で電子ビームが出射されている<sup>2)</sup>。SPring-8の蓄積リングに設置されている加速空洞とその制御機器の安定度について, 客観的な事実として実際放射光の利用者の報告がある。これによると508.58 MHzの基本周波数を用いてレーザー発振を基本周波数に同期し蓄積リングの任意のある特定の一つのRFバケットにある電子ビームからの放射光とレーザーをコインシデンスさせ実験している。ストリークカメラを用いた彼らの測定から, 蓄積電流の値が時間と共に下がるにつれ(Top-up運転をしていない時, 測定された)RFバケットの中にある電子ビームは蓄積電流によって理論的にRFのある位相角度の位置に存在することが計算により導出される。電子ビームはその計算された位相角の値に従って変化する様子が見られる結果が得られている<sup>6)</sup>。パルス信号も参考文献2)に記載したカウンターをSPring-8で開発し, それを用いることによりタイミングのジッターをキャンセルできるようにした。そしてレーザーと放射光とのコインシデンスもこのカウンターが存在したからこそ実現できたのである。このように加速器全体が基本周波数に同期するよう初めから設計製作されていなければ周波数を同期化することは困難であることを指摘しておく。

## 7. まとめ

電子ビームを扱う加速器において, 線型加速器および円型加速器の基本周波数はクライストロンの持つ特性周波数により決定されているといってもよいのではないだろうか。つまり加速器を設計する場合, 先ず制作する加速器に適合する出力パワーのクライストロンを選択し, そのクライストロン固有の周波数により使用する基本周波数が決まるようである。加速器を設計, 制作する人達は異なる加速器の基本周波数は同期していた方がよいことはよく知っている。しかしクライストロンを選択すると周波数は自然と決まるので, クライストロンを新たに開発しない限り異なる周波数間の同期化はあきらめざるを得なかった。その結果, 線型と円型加速器の間の周波数を同期化することはこれまで全く不可能と考えられてきた。しかし, 我々の開発した新しい周波数同期化方法の教えるところは, 従来通りかそれ以上に電子ビーム加速器を制作する場合, 線型加速器と円型加速器はお互い独立した周波数を全く勝手に選択してよいことになった。両者の加速器が完成した後, 我々の開発した同期化方法を用いて互いの周波数の同期化を実行すればよいことになった。

周波数の同期化を実行し、Top-up 運転により SPring-8 では放射光利用者の要求である蓄積リングの各 RF バケットに入射している電子ビーム強度を 3% 以内の精度で常に一定に保つことができるようになった。さらに SPring-8 の線型加速機から電子ビームを供給されている兵庫県立大学附属の NewSUBARU の蓄積リングでは安定した入射効率を維持できるようになったし、この蓄積リングも蓄積ビーム電流を常に一定に保つ事ができている<sup>7,8)</sup>。入射効率の改善は、電子ビーム入射部に設置している各機器の放射化防止に非常に役立っていることも注目すべき点である。線型加速器本体も世界で一番の安定度を保って運転されている<sup>9)</sup>。

### 謝辞

周波数の同期化開発に当たり、共同研究者である高嶋武雄、安積隆夫各氏に感謝します。さらに同僚の大橋裕二氏は同期化について議論し、さらに良い方向に導く手助けをしてくれました。SPring-8 の線型加速器のスタッフの方々は同期化の試験に協力して下さいました。皆さんに感謝します。最後に、Tektronix の実野 久氏は 10 ビットタイプ任意波形発生器には当初、外部クロックの入力部が製品に附属していなかったにも関わらず、私の要求を快く受け入れていただき SPring-8 専用任意波形発生器を製品にして下さいま

した。このおかげで全く異なる 2 種類の任意周波数を同期化することが容易に可能となりました。ここに改めて感謝します。

### 参考文献

- 1) Y. Kawashima et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams Vol. 4, 082001 (2001).
- 2) H. Suzuki et al., Nucl. Instrum. and Methods Phys. Res. A431 (1999) 294-305.
- 3) private communication; SPring-8 のモニターグループの佐々木茂樹氏が開発した方法では、従来ビーム位置検出装置では数 Hz 程度の低周波雑音により数 10 ミクロン程度の位置精度しか実現できなかったものを、平均化によりソフトウェア的なローパスフィルタのカットオフ周波数を下げ、数 Hz 以上の周波数成分をフィルタアウトし、低周波のノイズ成分の影響を削除することにより、ビーム位置精度を 1 ミクロン程度にまで下げることに成功した。
- 4) S. Dàte et al., Nucl. Instrum. and Methods Phys. Res. A421 (1999) 417-422.
- 5) Y. Kawashima, The 13th Symposium on Accelerator Science and Technology, Suita Osaka Japan, Oct. 29-31 (2001) 140-144.
- 6) Y. Tanaka et al., Review of Scientific Instruments, vol. 71, number 3, 1268-1274 (2000).
- 7) Y. Shoji et al., Proc. of the 3-rd APAC, Gyeongju, Korea, March 22-26, 549-551 (2004).
- 8) Y. Shoji et al., AIP CP705, 53-56 (2004).
- 9) T. Asaka et al., Nucl. Instrum. and Methods Phys. Res. A516 (2004) 249-269.