

# 同期タイミングシステムの性能とビーム特性

安積隆夫<sup>1</sup>、川島祥孝、高嶋武雄、小林利明、大島隆、花木博文

高輝度光科学研究センター 放射光研究所

〒679-5198 兵庫県佐用郡三日月町光都 1-1-1 SPring-8

## 概要

線形加速器とブースターシンクロトロンや蓄積リングなどの円形加速器はそれぞれ異なる加速周波数で運転され、これらの周波数が整数倍関係を成立しない場合がある。これに加えて、線形加速器からのビーム電流強度の増加、あるいは短パルス化にともないビームトリガー信号との同期関係を得ることは不可欠なものとなってきている。現状、多くの加速器施設で構築されている同期タイミングシステムでは、使用する加速周波数を得るために分周器、逡倍器を複雑に組み合わせた回路構成を余儀なくされている。この問題に対して、各加速器の加速周波数生成とビームトリガー信号の同期関係の高精度化を簡易に実現するため、新しい方式によるタイミングシステムの開発をおこなった。このタイミングシステムの導入により、ビームタイミングとすべての加速周波数の同期運転が実現し、とくに線形加速器においてはビーム生成のタイミングと 2856MHz との間には生じる時間ジッターを縮小することでビームショット毎のビームエネルギー安定化に貢献している。現在では SPring-8 の通常運転に導入されており、ビームトリガー信号との同期関係においては 3.5ps (rms) の時間ジッター、ビームエネルギー安定度は 0.009% (rms) を達成している。

## 1. はじめに

SPring-8 は 1GeV 線形加速器、8GeV ブースターシンクロトロン、8GeV 蓄積リングから構成されている。また線形加速器は 1.5GeV 蓄積リングである NewSUBARU へのビーム入射もおこなっている。各加速器の RF 周波数は線形加速器が 2856MHz、ブースターシンクロトロン、ならびに蓄積リングが 508.58MHz、NewSUBARU が 500MHz である。従来、これらの RF 周波数は各加速器に独立にある高周波発信器から生成され、加速管、加速空洞を励振している。ビームトリガー信号はそれぞれの蓄積リングの 508.58MHz および 500MHz に同期したタイミングで作られ、線形加速器の RF 周波数である 2856MHz とは無関係に生成されることから、電子銃にて生成されるビームパルス幅が縮小されるにしたがい、バンチに捕捉される電荷量は一定せずバンチング部から放出されるビーム電流強度はビームショット毎に著しい変動を引き起こす。このような短パルスビーム生成の際、安定したビーム電流強度を実現するため

に、両蓄積リングの RF 周波数と線形加速器の 2856MHz の同期関係を成立する必要がある。われわれが開発した新しい方式の同期タイミングシステムは任意の 2 つの RF 周波数に対応可能であるため、現在使用している加速空洞、加速管に合わせた励振周波数生成が実現できる [1]。本システム構築にあたり、RF 純度、ならびにビームと RF 位相との間の時間ジッター許容値に関する検討と評価をおこなった結果、位相雑音レベルは主信号に対して 100kHz から 10MHz の間で 0.3°以下とし、時間ジッターは 15ps 以下とする値が見積もられた [2]。実際に、この同期タイミングシステムを線形加速器の運転に導入後、生成される RF 純度、ビームトリガー信号と RF 位相との時間ジッター等の評価測定を実施し、さらに同期、非同期運転時におけるバンチング部後方のビーム電流強度、1GeV 加速後のビームエネルギー安定度測定をおこなった。この同期方式においては蓄積リングの RF 周波数を変更しても、その変化量に応じて全ての同期関係が保たれる。通常、SPring-8 は潮汐等の地殻変化の影響による周期的なリング周長変化に対して 508.58MHz ± 200Hz で補正がおこなわれている [3]。この周波数変化が線形加速器へ及ぼす影響としては 2856MHz ± 11.2kHz であり、このことによるビームエネルギーシフトは線形加速器最下流に設置されているエネルギー圧縮システム [4] により補正され、常に安定した入射が可能である。本稿においては同期タイミングシステムの回路構成、本システムの諸特性を示し、システム導入によるビーム特性向上について述べる。

## 2. システムの構成

図 1 には任意波形発生器と 3 2 周波数逡倍器を基本構成とした同期タイミングシステムを示す。使用している任意波形発生器は外部クロック動作、ならびにスタートトリガー信号入力によるリセット機能を搭載したテクトロニクス社製 AWG510 である。円形加速器の RF 周波数である 508.58MHz (500MHz) を外部クロックとする AWG510 の設定パラメーターは計算機により最適値が求められており、89.24999MHz が生成される。また 508.58MHz (500MHz) は 2 台の 30bit 高速カウンターモジュール (SUC) [5] へ入力され、それぞれからビームトリガー信号である 1Hz、および AWG510 のスタートトリガー信号となる 60Hz が生成される。スタートトリガー信号が AWG510 に入力されると 89.24999MHz の RF 位相を初期化して

<sup>1</sup> E-mail: asaka@spring8.or.jp

パルス幅が 290 $\mu$ s のバースト波の出力を開始する。89.24999MHz は 2 台の周波数ダブラー、ステップリカバリーダイオード、さらに周波数選択のためのバンドパスフィルターから構成される 3 2 周波数通倍器を介して 2855.9997MHz が生成される。各トリガー信号、および RF 周波数について、タイミングチャートを図 2 に示す。

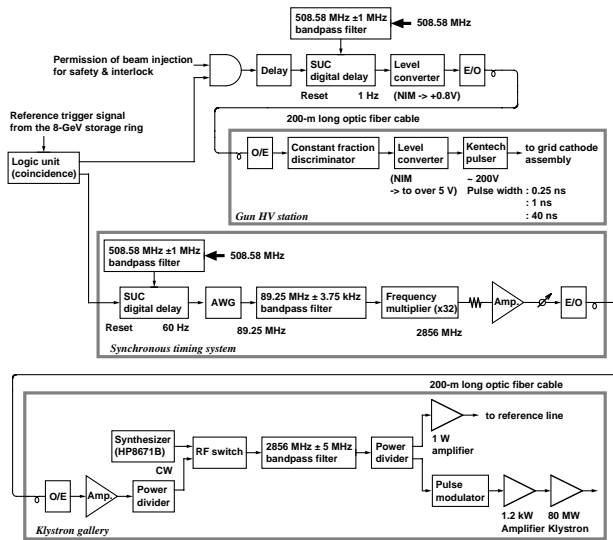


図 1 同期タイミングシステムブロック図

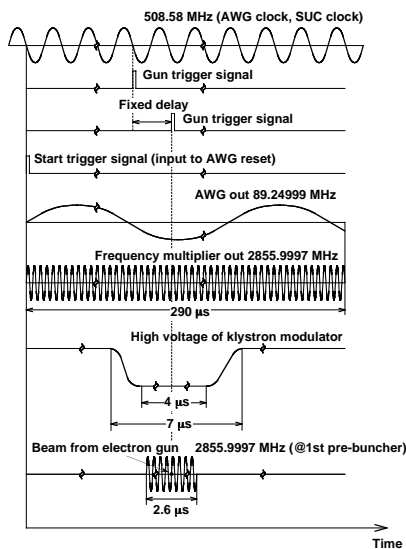


図 2 各信号のタイミングチャート

### 3 . RF 純度・時間ジッター測定

同期タイミングシステムで生成される 2856MHz の RF 周波数純度測定はスペクトラムアナライザー (HP8560E) を用いておこない、併せて従来から使用している高周波発信器 (HP8671B) との比較をおこなった。図 3 にスペクトラムアナライザーにて得られた周波数測定結果を示す。このときの測定内容は同期タイミングシステムにある AWG510 出力部におい

て 89.25MHz $\pm$ 3.75kHz 狭帯域水晶フィルターの有無に対する 2856MHz、また HP8671B からの 2856MHz とした。同期タイミングシステムにおいて 89.25MHz $\pm$ 3.75kHz 狭帯域水晶フィルターの導入前には主信号より $\pm$ 20MHz の範囲にわたり多数のサイドバンドノイズ、およびノイズフロアの悪化が観測された。しかし狭帯域水晶フィルターの導入によりこれらの雑音は完全に除去され、HP8671B とほぼ同等の特性を得ることができている。

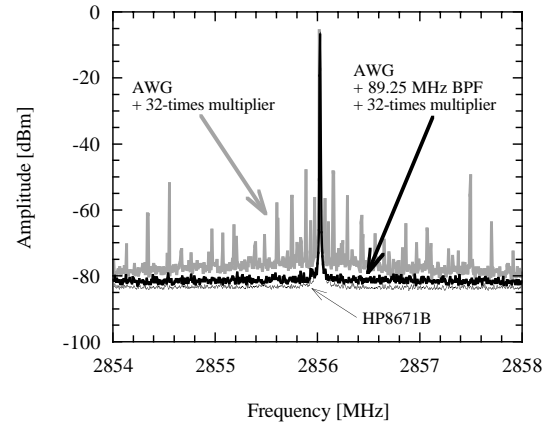


図 3 同期タイミングシステム、および HP8671B からの 2856MHz

さらに位相雑音の詳細な評価をおこなうためには周波数測定の雑音レベルを -140dBc/Hz 以下にする必要がある。このため、図 4 に示すような高純度の RF 信号を発生する高周波発信器 (HP8664A)、ダブルバランスドミキサー、ベクトルアナライザー (HP89410A) からなる測定システムを構築した。得られた結果を図 5 に示す。同期タイミングシステムから生成される 2856MHz の RF 純度は 3 つのノイズフロアをもっている。オフセット周波数が 10kHz で -120dBc/Hz となるスロープ部分は 89.25MHz 水晶フィルターによるものであり、オフセット周波数が 5MHz で -140dBc/Hz となるスロープ部分は 2856MHz のバンドパスフィルターによる効果である。また図 5 には次式で与えられる位相変動の rms 値  $\delta\phi_s$  も併せて示す [6]。

$$\delta\phi_s = \left( \int_{f_1}^{f_2} S(f) df \right)^{1/2}$$

ここで、 $S(f)$  は 2856MHz の位相雑音分布とする。また  $f_1$ 、および  $f_2$  は周波数範囲であり、 $f_1$  はビームが線形加速器を通過する時間と最下流部にある加速管への RF 信号の到達時間から 100kHz とし、また  $f_2$  はクライストロンの周波数帯域幅から 10MHz とした。その結果、位相雑音は 0.22 $^\circ$  であり、これはビームエネルギー安定性を決定する高周波純度の条件に対して満足するものである。

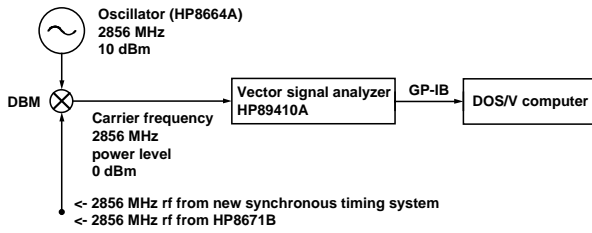


図4 周波数測定システムの構成

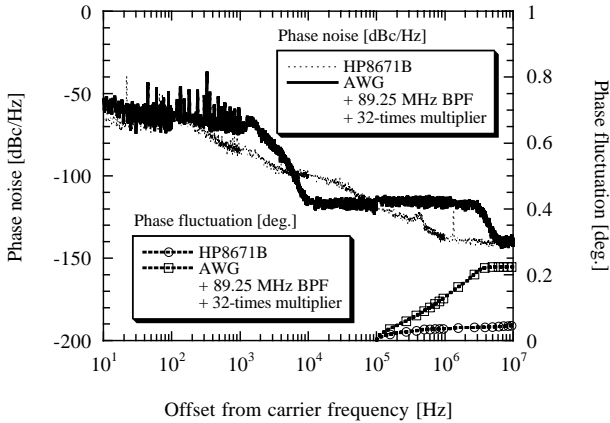


図5 同期タイミングシステム、および HP8671B における位相雑音

ビームトリガー信号と同期タイミングシステムから得られる 2856MHz との時間ジッター測定は高速サンプリングオシロスコープ(HP54121A, HP54120B)を用いておこなわれた。測定においては実際に 2856MHz の伝送のために使用する 200m 長光ファイバーケーブル、ならびに光変換モジュールを介した後の信号を評価した。光ファイバーケーブル、光伝送モジュールのみで発生する時間ジッターは 1.2ps(rms)であり、ビームトリガー信号と 2856MHz の間の時間ジッターは 3.5ps(rms)であった。

#### 4. ビーム試験

タイミングの同期化がビーム性能に効果的に作用していることを確認するために、電子銃から生成するビームパルス幅を 250ps とし、ビーム集群、加速試験をおこなった。電子銃後段にあるバンチング部は 2 台のプリバンチャーと 13 セルバンチャーから構成されており、これらは 2856MHz で励振されている。このため、ビーム生成タイミングとバンチング部での RF 位相との間で決まるビーム捕獲の観点から、同期、非同期運転時においてはビーム電流強度に影響を及ぼすこととなる。図 6 には同期、非同期運転時における電子銃直後、ならびにバンチング部直後にある壁電流型ビーム電流モニターから得られたビーム電流強度の時間変化を示す。非同期運転では不安定であるビーム電流強度が同期運転に切り替えると安定化しており、システムが有効に動作していることを示している。

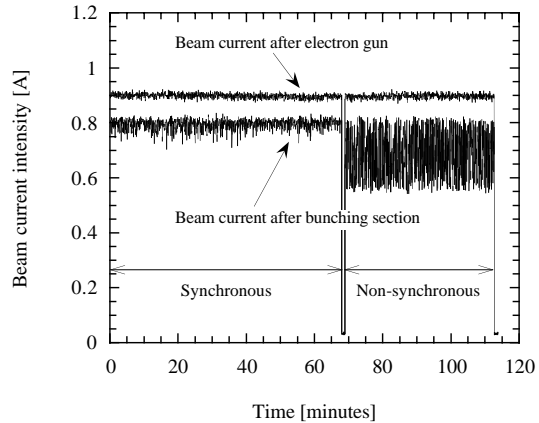


図6 同期、非同期運転時における電子銃出口、およびバンチング部出口のビーム電流強度変化

非同期運転はバンチ数変動を引き起こすために、加速管でのビーム負荷変動により、ビームエネルギーの不安定要素となる。このことは同期運転により解消され、ビームエネルギーの安定化へ貢献する。図 7 には 1GeV シケイン部にある遷移放射光モニターにより測定された同期、非同期運転時のビームエネルギー変動の分布である。測定時のビームパルス幅は 1ns であり、ビーム電流強度は 1.8nC である。非同期運転時には 0.030%(rms)であった変動が同期運転により 0.009%(rms)まで抑制される結果を得た。

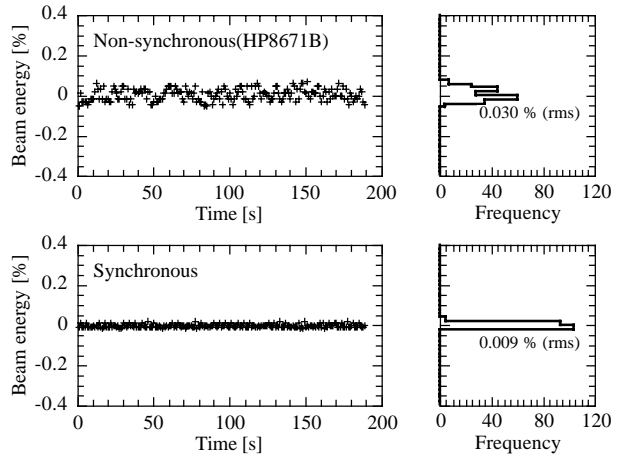


図7 ビームパルス幅 1ns、ビーム電流強度 1.8nC に対する同期、非同期運転時の 1GeV ビームエネルギー不安定性

#### 参考文献

- [1] Y. Kawashima et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams 4, 082001 (2001)
- [2] T. Asaka et al., Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res., Sect. to be published.
- [3] M. Takao et al., 7th EPAC, Vienna, Austria, 2000, p.1572.
- [4] T. Asaka et al., 8th EPAC, Paris, France, 2002, p.1079.
- [5] H. Suzuki et al., Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res., Sect. A 431 (1999) 249-305.
- [6] E. Ezura, KEK Report 2000-6 June 2000 A