

SACLA から SPring-8 蓄積リングへのビーム入射のための タイミング同期システムの現状

PRESENT STATUS OF TIMING SYNCHRONIZATION SYSTEM FOR BEAM INJECTION FROM SACLA TO SPRING-8 STORAGE RING

大島隆^{#, A, B)}, 細田直康^{A, B)}, 前坂比呂和^{A)}, 森本 理^{C)}, 田尻 泰之^{C)}, 岩井 瑛人^{A)}, 岡田 謙介^{B)}
Takashi Ohshima^{#, A, B)}, Naoyasu Hosoda^{A, B)}, Hirokazu Maesaka^{A)}, Osamu Morimoto^{C)}, Yasuyuki Tajiri^{C)},
Eito Iwai^{A)}, Kensuke Okada^{B)}

^{A)}RIKEN SPring-8 Center

^{B)}Japan Synchrotron Radiation Research Institute

^{C)}SPring-8 Service Co., Ltd.

Abstract

We developed a timing synchronization system for injection from the linac of the XFEL machine, SACLA, to the storage ring (SR) of SPring-8. This injection scheme is demanded by the low-emittance upgraded ring in the future. Since the RF frequencies of the linac and the SR do not have an integer multiples relation, we have to introduce a new scheme to synchronize the beam ejection timing of the linac to the desired RF bucket timing of the SR. The new system was implemented to the MTCA.4 standard modules. The control of the bucket address is done according to the pre-defined injection table. The system was installed to the linac and the measured timing jitter was better than 4 ps in rms, which was enough to obtain high injection efficiency. Results from the actual beam test showed an injection efficiency better than 90 % and the stored bunch currents at aimed injection address. Further improvements will be done to start user operation in 2020.

1. はじめに

SPring-8 の次期計画 SPring-8-II [1]では入射ビームに低エミッタンスが要求されるため、XFEL マシンである SACLA [2]の線形加速器を蓄積リング (SR) への入射器とする予定である。この計画の準備段階として、SACLA を現 SR への入射器として 2020 年から運用することを目指している。

SACLA の線形加速器を SR への入射器として使用する際に要求される事項としては以下のものがある。現 SR ではユーザーの要望に応じてさまざまなフィリングパターン[3]が使われている。この要求に応えるために、ショットごとにバケットアドレスを変更する機能が必要である。また、SACLA から SR への入射では SR にビームがない状態から 100 mA まで 10 Hz の繰り返しで入射を行う積み上げモードと、数分に 1 回の入射を行うトップアップモード[4]がある。これらのモードに対応する必要がある。タイミングの同期精度に関しては、SPring-8-II でのバンチ長が 6 ps rms であることから、この値よりも高い精度が要求される。特に注意を払う点は、非常に高い安定度を要求する XFEL 運転と SR への入射とを両立するという点である。

現在の入射器では SR の基準 RF 信号を元に入射器の 2856MHz をパルス的に生成する方式[5]を採用している。しかし、この方式では通倍時に位相雑音の増加すること、また、入射器の基準信号周波数が周長変化に伴う蓄積リングの周波数変動[6]の影響を受けることなどの欠点がある。そこで、我々は、次に

述べる同期方法を検討した。まず SACLA の線形加速器(Li)のタイミング基準となるマスタトリガを SR のバケットタイミングと一致させる。次に、マスタトリガからビーム出射までの 15.5 ms の間に SACLA のマスターオシレータに対して FM 変調を印加することにより残っていた時間差を抑制する。XFEL 運転時には、その動作を停止し、XFEL 運転に対する影響を最低限に抑える。我々はこのシステムを MTCA.4 規格のモジュールを使って実装した[7, 8]。このシステムを使って実際の SR にビーム入射試験を行い、問題の洗い出しや SACLA の XFEL 運転と SR 入射との両立などを試みている。

本発表では上記タイミング同期システムで達成した同期精度、実際に SR 入射に際して入射バケットアドレスを設定する手順、SR の周長変化に起因するパラメータ変化に対する対処、今後の展望について報告する。

2. 入射器と蓄積リングの同期方法

2.1 マスタトリガの調整

SACLA の master trigger は AC 60Hz のゼロクロスタイミングに対して、SACLA の時間基準である 238 MHz クロック信号を用いてリクロックすることで生成されている。SR との同期を取るために master trigger を SR のバケットタイミングと AC 60 Hz と同期させた。ビーム出射のタイミングはこの master trigger から 15.5 ms 後であり、ビームと SR バケットとのタイミングの差は最大 4.2 ns となる。

[#]ohshima@spring8.or.jp

2.2 時間差の測定と補正

タイミング偏差 4.2 ns は蓄積リングへのタイミング同期許容範囲を逸脱しているため、さらに差を小さくする必要があります。我々は、SACLA の master oscillator に対して FM 変調を印加することにより、このタイミング差を抑制することを検討した。

タイミング差を小さくするためには、現状の時間差を精度良く測定することが必要である。時間差の計測には、例えば、1) オシロスコープを使った計測、2) Time to Digital Converter の使用が考えられる。しかし、両者は単発での測定精度が不十分であること、60 Hz (16.7 ms) 以内に複数回の計測を行うことが困難であることから、他の方策を検討した。我々は、それぞれのトリガが基準としているクロック信号の位相差を計測することを採用することとした。周波数の異なる信号に対しては位相差の定義はできないが、指定したタイミングからの位相のずれは定義できる。このことを利用し、SR のクロックで動作する ADC に Li のクロック信号を入力し、ここから得られるデータ列と、SR のクロックで動作する FPGS 内のローカルオシレータ信号 (Numerically Controlled Oscillator: NCO) との間の位相を測定することとした。NCO は master trigger でリセットを行い、このタイミングとの位相差を計測することとなる。位相検出に使用する ADC の帯域、動作クロック、分解能から、ADC のクロックとしてリングの基準周波数 f_{sr} である 508.58 MHz の 1/6 分周の信号 (85 MHz) と、ADC への入力として SACLA の基準周波数 f_{li} である 238 MHz を 1/3 分周の信号 (79 MHz) の 2 つの信号を用いた。ADC からは 2 つの信号の差周波数の信号 f_{if} (5.6 MHz) のデータ列が得られる。NCO 信号の周波数 f_{NCO} もこの周波数と一致させる。

前節で述べた位相差を元に、SACLA の master oscillator への FM 変調を印加することにより、残留タイミング誤差を抑制する。この FM 変調は 15.5 ms 以内の時間で行い、次の SACLA のショットに対する影響を最小限に抑えるようにする。

2.3 master trigger の微調整

SACLA の master oscillator に対する FM 変調の補正の大きさは 15.5 ms の期間に最大で 4.2 ns となる。この変調量は、XFEL 実験で使用している超短パルスレーザーの PLL 回路にとって過大であり、ロック外れが生じることがわかった。そこで、初期の時間ジッタ (FM 変調の補正の大きさ) をさらに減らす方策を検討した。

蓄積リングの狙ったバケットのタイミングは 4.8 μ s の周回時間ごとに現れる。そこで、1 周回時間だけ SACLA の master trigger のタイミングを遅らせた場合に、master trigger とバケットとのタイミングの変化を計算した。その結果、0.1 ns だけ早まることがわかった [7]。このことは、当初最大 4.2 ns あった時間差を、最大 42 周回待つことにより時間差を 0.1 ns に減らすことが可能であることを示している。AC 60 Hz 信号のタイミングで位相計測を行い、周回待ちターン数を演算して、その後 master

trigger を出力するようにした。Figure 1 にタイミングチャートを示す。

3. 同期システムの実装

3.1 MTCA.4 規格モジュール

前章で述べたシステムを MTCA.4 規格のモジュールに実装した。蓄積リング基準信号や SACLA 基準信号の分周、信号のリクロックなどの処理を行う Rear Transition Module (RTM) はキャンドックス社で新規開発を行った。2 つのクロック信号の位相検出や SACLA の master oscillator への FM 変調信号の出力には、Advanced Mezzanine Card (AMC) としてサンプリングレート 120 Msps 分解能 16 bit の ADC、Vertex 6 の FPGA を搭載した struck 社製デジタル AMC である SIS8300L2 を使用した。トリガ信号を SACLA から SR に伝送するためには N.A.T. 社製 pstime を使用した。これらの機器は SACLA master oscillator 室に設置した。Figure 2 に本システムのブロック図を示す。

3.2 トリガ信号の伝送

蓄積リング基準信号は多摩川電子社製の EO/OE モジュールを使用して光信号に変換し、SR の E 位相調整室から SACLA master oscillator 室に伝送した。SACLA の出射トリガ信号および蓄積リングの電流測定用の 1 Hz 連続トリガ信号は、pstime に接続した光伝送 SFP コネクタを用いて SACLA master oscillator 室からシンクロトロン棟制御機器室に伝送した。これはシンクロトロン棟制御機器室には既存の入射器のトリガ信号が集められており、これらの信号と SACLA からの信号を切り替えて入射試験を行うためである。これらの信号を伝送する光ファイバとしては既設の位相安定光ファイバを用いた。この光ファイバには波長多重方式を用いてトリガ信号も伝送している。

3.3 入射アドレスの制御

SPring-8 蓄積リングでは時分割の実験ユーザーの要望に応じて様々なフィリングが採用されている [3]。これを実現するために入射ビームは狙ったバケットからずれたタイミングで入射しないようにする必要がある。ビーム入射には蓄積電流が 0 mA から

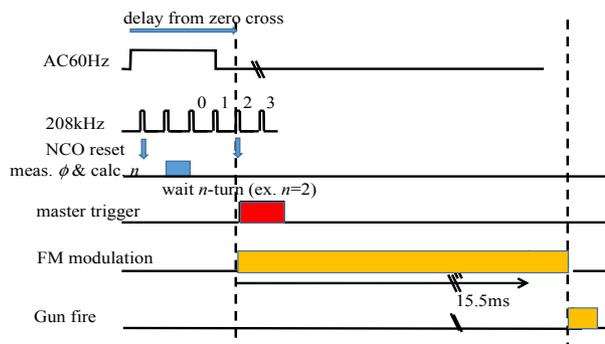


Figure 1: Timing chart of the synchronization system.

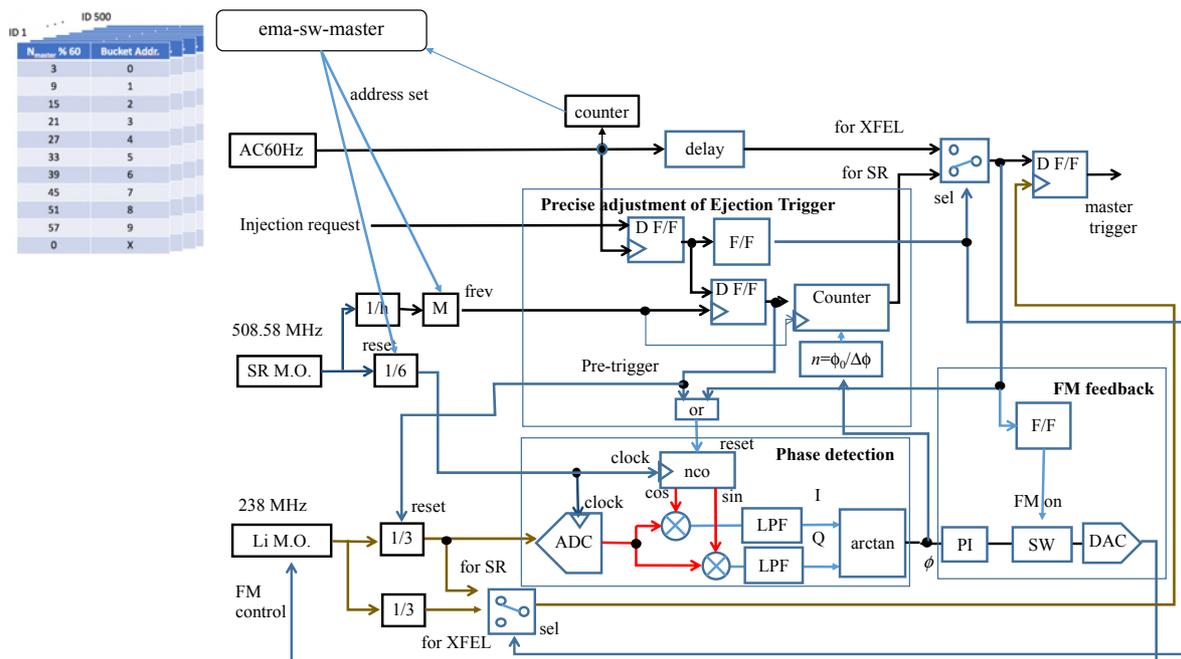


Figure 2: Block diagram of synchronization system.

100 mA まで積み上げる入射と、蓄積電流が 99.5 mA を下回ると入射を行うトップアップ入射とがある。SACLA からの入射では積み上げ入射は 10 pps で、トップアップ入射は最大 1 pps で行うことを予定している。

SACLA には、BL 3、BL 2、XSBT の 3 つのルートがあり、出射する電子ビームをどのルートに運ぶかを決めるパターンは 60 ショットを単位として制御する[7]。パターンテーブルには、ショット数を積算しているマスタトリガカウンタを 60 で割った剰余にしたがって、どのルートにビームを通すかが書かれている。SACLA のルートを選択するプロセス *ema-sw-master* は MTCA クレートに実装された CPU 上で動作する。このプロセスは SACLA の RF ユニットやルート振り分けに使用されるキッカー磁石に実装された子プロセス *ema-sw* に対してルート情報を伝え、該当するルートに対応する位相を設定し、ビームの振り分けを行なう。また、同期モジュールに対しても蓄積リングへの入射スケジュールを設定する。同期用デジタル化 AMC 上の FPGA には、10 個の入射アドレスを記載できるテーブルを 512 種類設定できる。この入射アドレステーブルはフィリングが決定した時点であらかじめ FPGA にロードしておき、*ema-sw-master* がどのテーブルを使用するかを設定する。アドレステーブルのインデックス 0 は XFEL 運転に割り当て、同期動作を行わない。インデックス 511 はトップアップ入射に割り当てて、1 pps で指定したアドレスに同期する動作を行う。

3.4 蓄積リング周波数変化に対する対応

蓄積リングでは、月と太陽の位置に関連した潮汐の影響や地中温度変化の影響により周長の変化が生

じる。蓄積リングのエネルギーが一定になるようにこの周長の変化に応じて RF 基準周波数を補正する。Figure 3 に周波数変化の例を示す。この例では 508.58 MHz 信号の周波数は、潮汐の影響で 1 日に 15Hz 程度の変化が見られている。年間では、地盤の伸び縮みで年間 350 Hz 程度の変化が見られている。

この周波数の変化は、同期回路で使用している周波数のずれを生じる。このため、NCO の周波数も蓄積リング基準信号のずれに対応して補正する必要がある。また、SACLA の *master trigger* から 15.5 ms 後の電子ビーム出射タイミングと SR バケットタイミングとのずれを生じる。15.5 ms を定義している時間のクロックは SACLA の f_{Li} であり、その 3.6×10^6 カウント後に電子ビームは出射される。一方で、15.5 ms の間にリングの周回信号は 3.1×10^3 カウントあるが、こちらの周回時間は SR 基準信号の変化に応じて変化するため、ずれが発生する。これに対する補正量は以下の式で与えられる。SR 基準信号周波数が変化した場合に NCO 周波数をこのように補正しておけば入射タイミングがずれないようにすることができる。

$$\Delta f_{nco} = \frac{\Delta f_{sr}}{6} - \frac{f_{nco} \times \Delta f_{sr}}{f_{sr}} \approx 0.156 * \Delta f_{sr} \quad (1)$$

$$\Delta t = 15.5ms \times \frac{\Delta f_{sr}}{f_{sr}} \approx 30.5 \text{ ps/Hz} \quad (2)$$

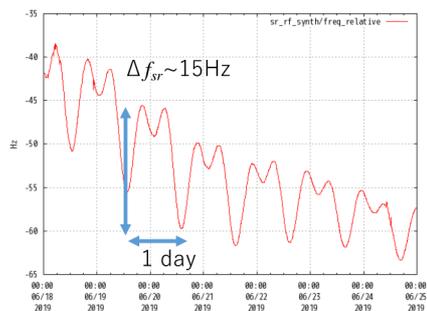


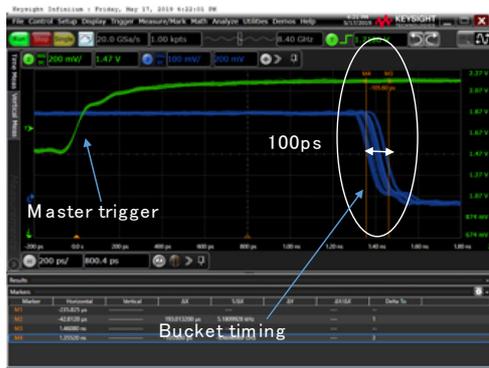
Figure 3: Trend of SR reference frequency for one week.

4. 試験結果

開発した同期システムを SACLA に導入し、試験を実施した。Figure 4 にその結果を示す。master trigger 信号とバケットタイミングは全幅およそ 100 ps のジッタに収まっていることが確認できた。これは 2.3 節で予想した値と矛盾しない。FM 変調によるタイミング調整後のビーム出射信号とバケットタイミングとのジッタは、rms 値で 3.4 ps であった。これは要求値を満たしていることが確認できた。

ベンチでの動作確認の後、実際に SACLA からのビームを SR に入射する試験を行った。SR の入射パルス磁石のタイミングと SACLA との粗いタイミング調整は pstimer の遅延時間設定値で行った。微調整は同期回路の FM 変調のフィードバック目標値の調

a)



b)

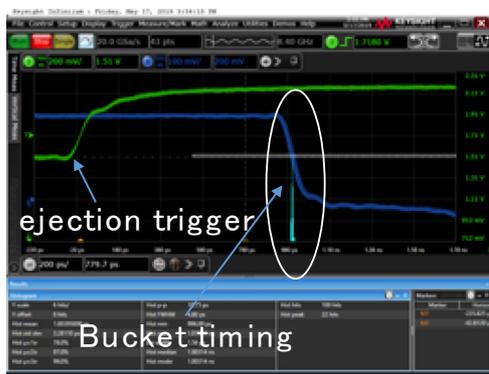


Figure 4: Timing jitter between SR bucket timing and (a) master trigger timing, (b) beam ejection timing.

整で行った。このときの位相は 79 MHz 換算となるので換算係数は 35 ps/degree となる。2 ns ごとのタイミング調整は同期回路の目標バケットアドレスにオフセットを与えることで行った。これらの調整の結果、ビーム輸送路から蓄積リングへの入射効率は 90% を超える値を確認できた。また、狙ったバケットへの入射が行えたことも確認できた。アドレス制御の動作を確認するために、203 バンチ均等フィルのパターンで連続入射を行った。ショットごとに入射アドレスが変更されることを確認した。

5. まとめと今後

SACLA から蓄積リングに入射するためのタイミング同期システムの開発を行った。その結果、SACLA の電子ビーム出射タイミングとバケットタイミングとのジッタは rms 値で 3.4 ps を得ることができた。この値は要求値を満足している。このシステムを用いて実際に SACLA から SR に入射を行った。効率 90% 以上で狙ったバケットに対して入射を行うことができた。

同期システムとしての動作は確認できたので、今後は残っている問題の洗い出しや SACLA の XFEL 運転と SR 入射との両立などを継続して試験し、2020 年からの運転を目指す予定である。

参考文献

- [1] SPring-8-II Conceptual Design Report; <http://rsc.riken.jp/eng/pdf/SPring-8-II.pdf>
- [2] T. Ishikawa *et al.*, "A compact X-ray free-electron laser emitting in the sub-ångström region", *Nat. Photonics*, 6, p. 540, June 2012; <https://doi.org/10.1038/nphoton.2012.141>
- [3] M. Takao, "大型放射光施設 SPring-8 加速器の現状", *Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Sapporo, Japan, Aug. 1-3, 2013, pp. 302-306.
- [4] H. Tanaka *et al.*, "SPring-8 におけるトップアップ運転の現状と今後の課題", *放射光 March 2005 Vol.18 No.2* 2005 The Japanese Society for Synchrotron Radiation Research
- [5] Y. Kawashima *et al.*, "New synchronization method of arbitrary different radio frequencies in accelerators", *Phys. Rev. ST. Accel. Beams*, vol. 4, 082001, Aug. 2001, doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTAB.4.082001H>
- [6] S. Date and N. Kumagai, "A long-term observation of the DC component of the horizontal COD in the storage ring of SPring-8", *Nucl. Instr. Meth. A* 421, 1999, pp. 417-422.
- [7] T. Ohshima *et al.*, "SACLA と SPring-8 蓄積リングの高周波基準信号の同期システム", *Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Chiba, Japan, Aug. 8-10, 2016, pp. 832-835
- [8] T. Ohshima *et al.*, "Timing Synchronization System for Beam Injection from the SACLA Linac to the SPring-8 Storage Ring", *Proceedings of the 10th Int. Particle Accelerator Conf.*, Melbourne, Australia, May, 2019, pp. 3882-3885
- [9] H. Maesaka *et al.*, "X 線自由電子レーザーの多様な運転と SPring-8 入射に向けた SACLA のオンデマンドビームルート・パラメータ切り替えシステムの開発", *Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Kyoto, Japan, Jul. 31-Aug. 3, 2019