

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

大島隆^{AB}、細田直康^{AB}、前坂比呂和^A、岩井瑛人^A
森本理^C、田尻泰之^C、岡田謙介^B

A理化学研究所 放射光科学研究センター

B高輝度光科学研究センター

Cスプリングエイトサービス

- 概要
- 同期方法
 - 従来の方法
 - Li マスタトリガの調整
 - 残留誤差の抑制
- 実運用に向けて
 - SR基準RF周波数変化への対応
 - 入射アドレスの制御
- 試験結果
 - 同期精度
 - 入射試験
- まとめ

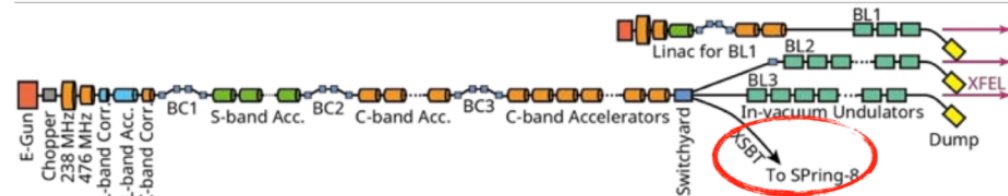


SACLAとは SRとは

SACLA: SPring-8 Angstrom Compact free electron LAser

• SACLA: X線自由電子レーザー施設

- 高ピークパワー超短パルス幅高輝度のX線を供給
- 電子ビームのエネルギー 4~8GeV: **線形加速器**からのビームを1passで使用
- 繰り返し 60pps
- ビームライン 3本 (8GeVはBL2,3 BL1は500MeV専用加速器有り)
- BL3とBL2で均等振り分け運転 (それぞれのBLに30pps) を実施中



• SR: 大型放射光施設

- 平均パワーの高い高輝度のX線を供給
- 電子ビームのエネルギー 8GeV: 電子ビームを蓄積して周回させて使用
- 蓄積電流 100mA (0mAからの積み上げ~20分)
- トップアップ運転 99.5mA以下で再入射し電流を維持 (~5分毎)
- ビームライン 62本



• 同期システム開発の目的

• 蓄積リング(SR)のアップグレード計画：

- 新リングは低エミッタンス
 - 入射ビームに対しても低いエミッタンスが求められる
 - 現行の入射器では不十分→XFEL施設SACLAの線形加速器 (Li) のビームの利用
- この計画の準備段階としてSACLAからのビームをSRに入射 2020年から運用めざす
- 老朽化した既存入射器と交代 → **維持費節約**

• 要求事項

• 同期精度

- 6ps-rms ←新リングのバンチ長

• モード

- 積み上げ：0mAからの積み上げ入射を20分程度で完了
- トップアップ：100mAの蓄積電流を維持

• SACLAのXFEL運転を妨げない

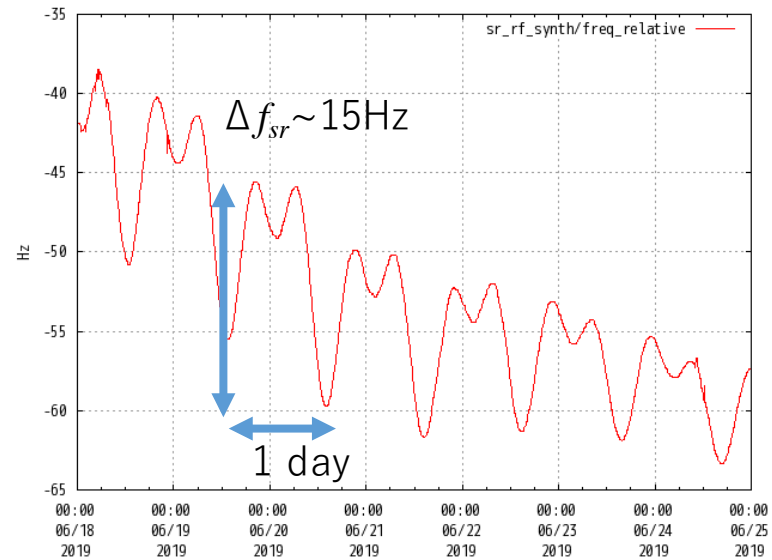
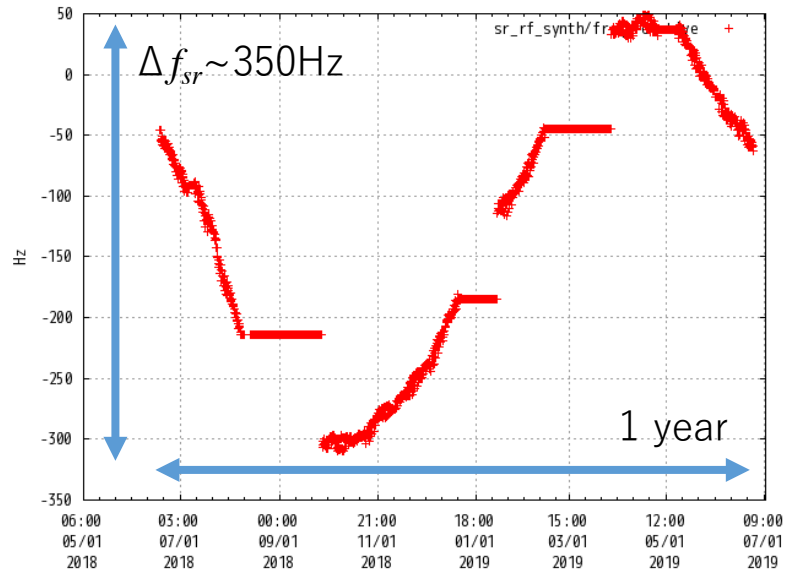
- 60ppsのビームのうち、SR入射のショットのみ外乱（タイミング調整）を許容
- 外乱はXFEL実験で使用する同期レーザーのPLLロック外れを起こさない範囲に抑制

• 要求事項

• SR基準RF周波数 f_{sr} への追従

- 潮汐や地中温度変化などの影響でリング周長が変化する
- 周長の変化→エネルギーの変化→エネルギーを一定にするために f_{sr} を調整

SR周波数のトレンドの例



• 要求事項

- フィリングへの対応

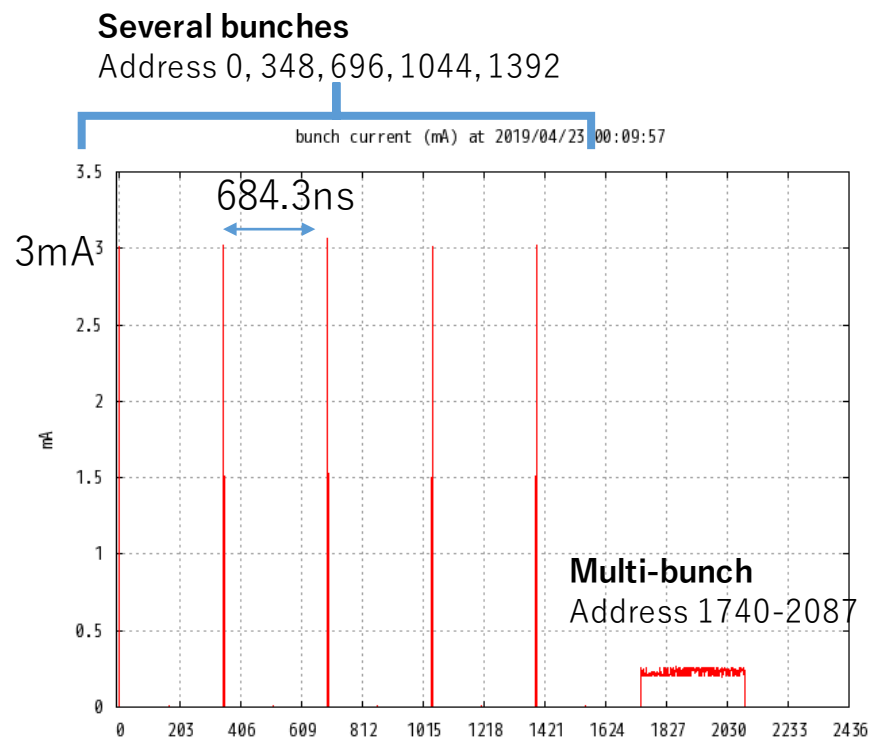
- SPring-8では時分割の実験ユーザーの為に複数種類のフィリングが使われている

高いバンチ純度が必要なため、ずれたアドレスにビームが入ることが許されない。

例 1/7-filling+5bunches

1/7-filling + 5 bunches

全周を7等分し、1/7には連続して85mA相当の電子が入り、残りの部分は等間隔5カ所に各3.0mA相当のバンチがある。



同期方法

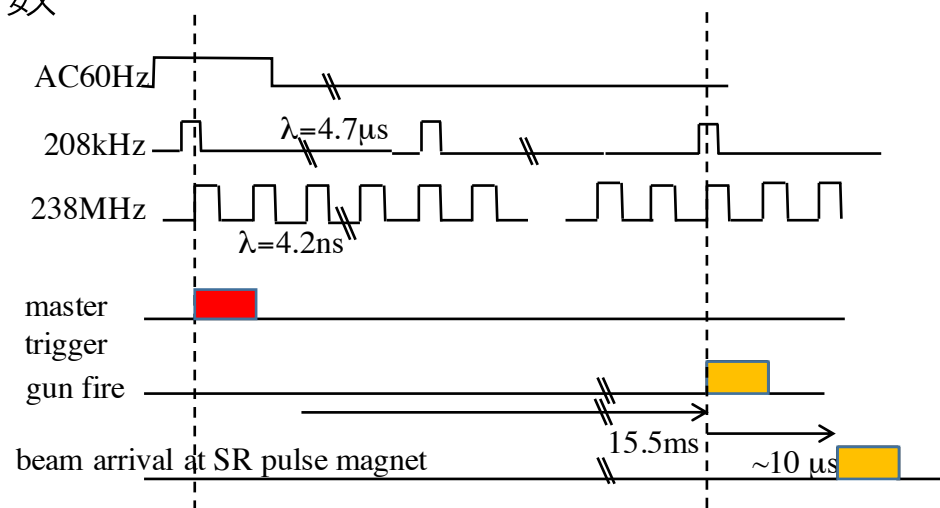
- Liの励振パルス信号をSRクロックから作る
 - 現行の入射器のLiは この方法を採用
 - $508.58\text{MHz}/359*63 *32=2856*(1-6.5\text{E}-6)$ MHz、 ~280usのパルス基準信号
 - **位相雑音が増加**
 - **SRの周波数変化の影響を受ける** → XFEL 性能に影響



新しい同期方法を検討した

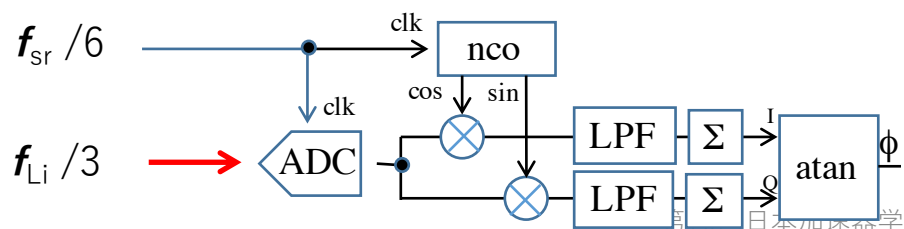
同期方法（マスタトリガの調整）

- Li マスタトリガ
 - Liのタイミング基準、15.5ms後にビームが出射、SHB空洞の周波数238MHzに同期
 - このトリガタイミングを調整して同期をとる
- SR バケットタイミング
 - f_{rev} = RF基準信号508.58MHz/ハーモニクス数2436 = 208kHzと同期
- Liの繰り返しAC60Hzを f_{rev} で叩き直し
→ 4.2ns以下の誤差



同期方法（残留誤差の抑制）

- 2つの信号の時間差の計測方法
 - オシロスコープ：リアルタイムの計測不可
 - TDC：単発の測定を高くしにくい ショット内で複数回の計測不可
 - **基準となるクロックの位相差の計測** ← これを採用
- 位相差の計測
 - $f_{sr}=508.58\text{MHz}/6$ と $f_{Li}=238\text{MHz}/3$ との差周波の信号を検出
 - f_{Li} 信号を f_{sr} のクロックで動作するADCで検出（**Digital Down Conversion**）
 - f_{Li} のクロックで動作するNumerical Controlled Oscillator（NCO）と比較
- 残ったタイミング誤差をSACLAのmaster oscillatorへのFM変調で補正



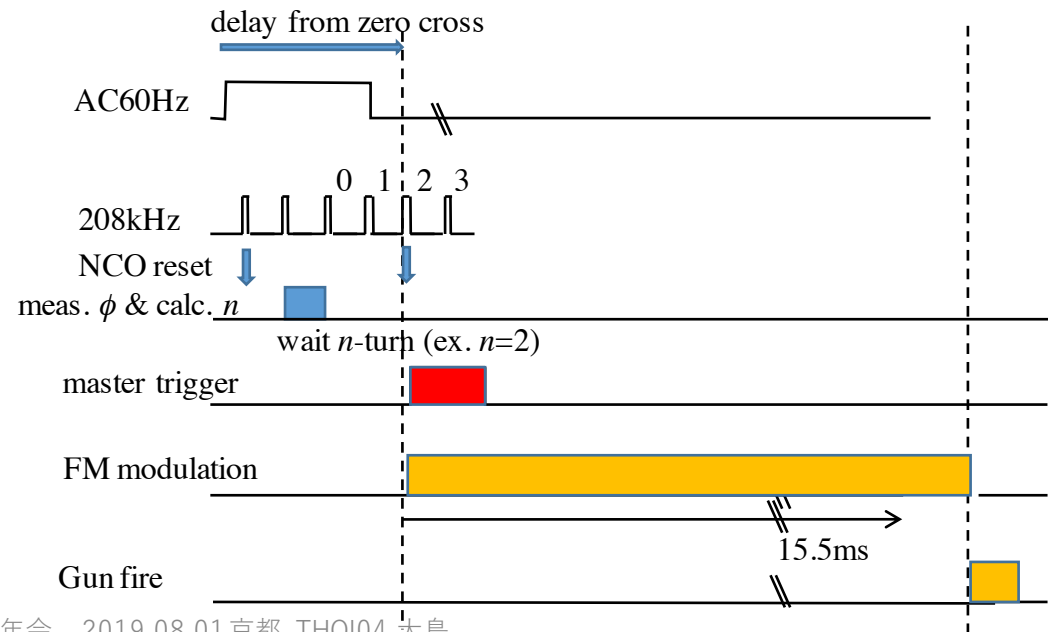
$$\begin{aligned}
 \text{DDC} \quad a(k) &= \cos[2\pi f_{Li} \cdot t(k) + \phi] \\
 &= \cos\left[2\pi k \frac{f_{Li}}{f_{SR}} + \phi\right] \\
 &= \cos\left[2\pi k \frac{f_{Li} - f_{SR}}{f_{SR}} + 2\pi k + \phi\right] \\
 &= \cos[2\pi \Delta f \cdot t(k) + \phi],
 \end{aligned}$$

同期方法（マスタトリガの微調整）

- 予備実験の結果
 - 4.2ns分のFM変調振幅
 - 同期レーザのPLLロック外れ
 - **初期のタイミング偏差を小さくする必要**がある
- LiとSRのタイミングは SRの1revolution待つと -100ps変化する
- 最大4.2nsだった偏差は 最大42ターン待つことで0.1ns以下の偏差に小さくなる

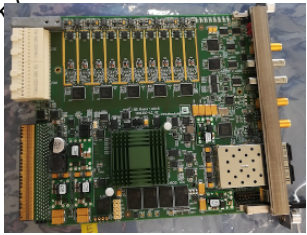
$$dt = \left\{ \frac{1}{208 \text{ kHz}} - \frac{\text{int}\left(\frac{79 \text{ MHz}}{208 \text{ kHz}}\right)}{79 \text{ MHz}} \right\}$$

$$\approx -0.1 \text{ ns}$$



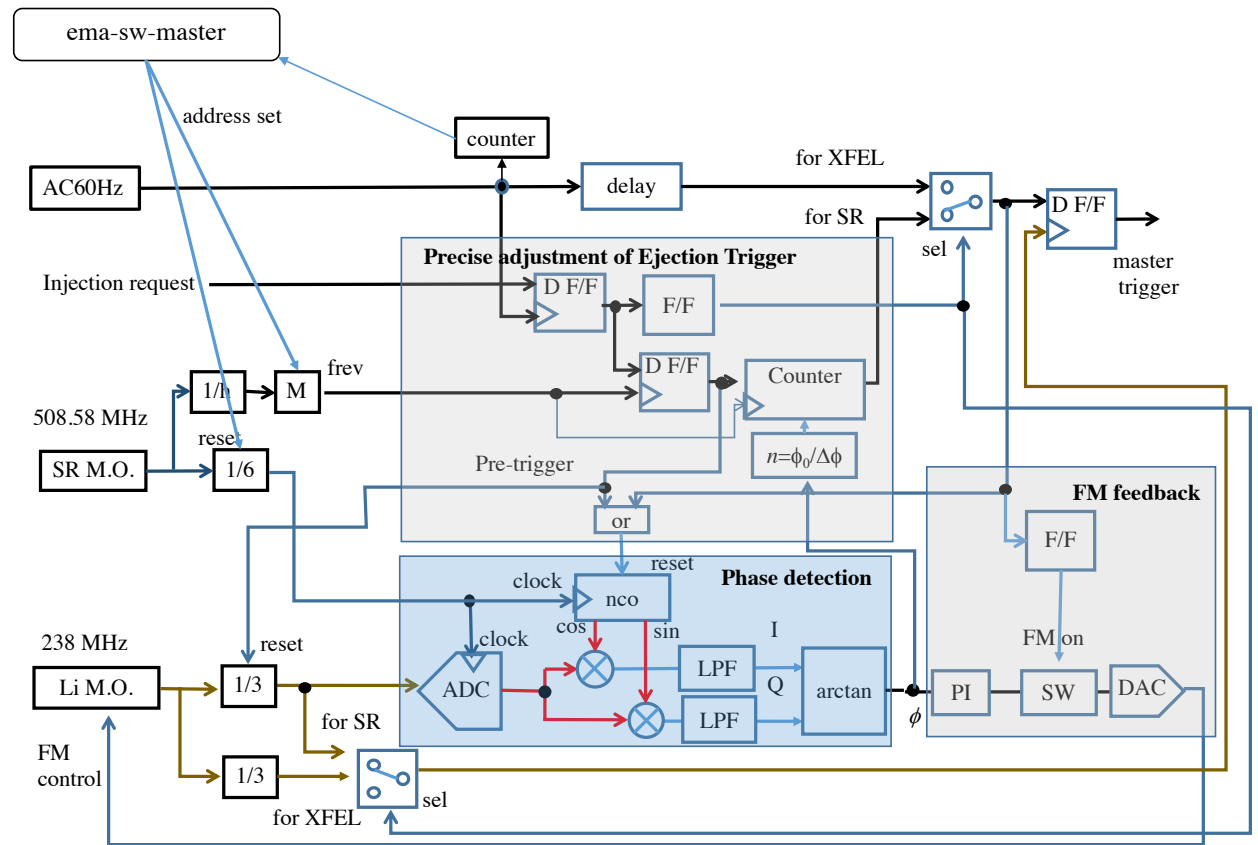
同期方法 (MTCA.4規格モジュールに実装)

- 16bit 125MSPS digitizer AMC (struck)



ID 1	% 60	Bucket Addr.
3	0	
9	1	
15	2	
21	3	
27	4	
33	5	
39	6	
45	7	
51	8	
57	9	
0	X	

- 同期ファームウェア (三菱電機特機)
 - DigitizerのFPGAに機能を搭載
- 信号処理回路 RTM (candox)



実運用に向けて (SR基準RF周波数変化への対応)

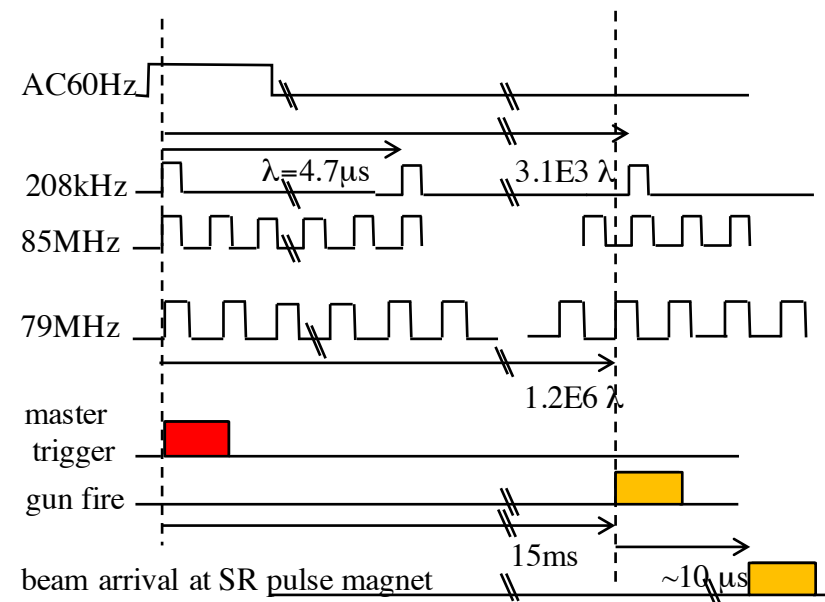
- SR基準RF周波数 f_{sr} は潮汐や地中温度変化などの影響で変化する
- f_{sr} の変化の与える影響
 - f_{nco} の変化
 - 15.5ms後のタイミングの変化
 - 15.5msは固定 = $3/238\text{MHz} * 1.2\text{E}6$
 - 15.5ms後のfrevのタイミングはずれる = $1/508.58\text{MHz} * 7.9\text{E}6$

- 補正
 - 周波数カウンタで計測した f_{sr} を元に f_{nco} を補正

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

- FM変調の目標値を補正

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



実運用に向けて（入射アドレスの制御）

- SACLAでのルートの制御
 - ソフトウェアベース
 - 60shot単位でルート（BL3, BL2, XSBT）を制御
 - 詳細は 前坂氏 「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」 参照

テーブルの例: 1/7 + 5bunches

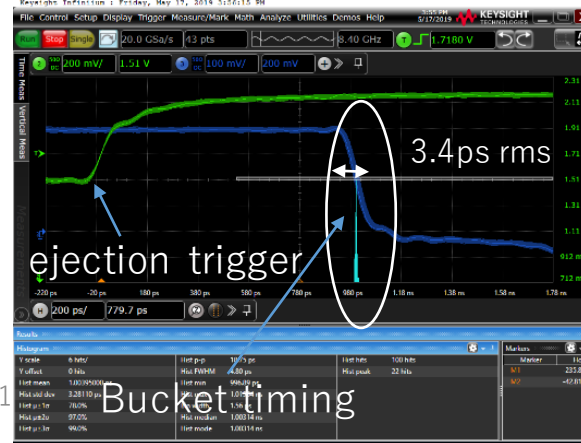
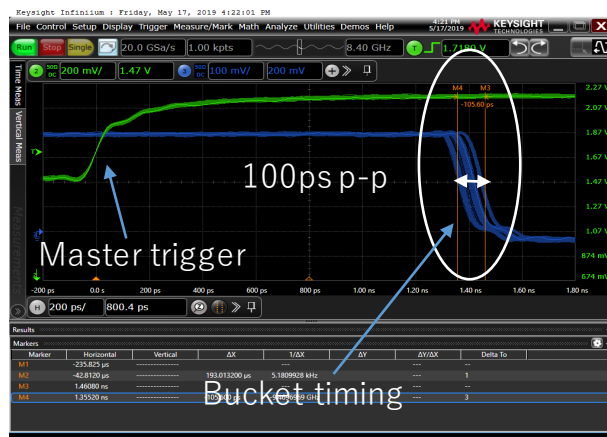
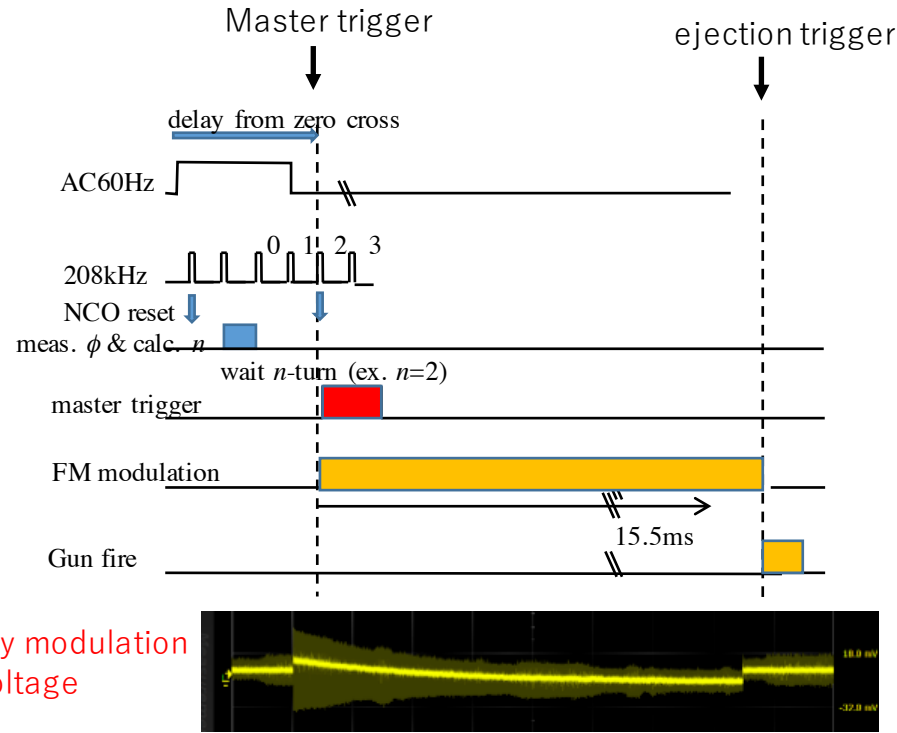
- 積み上げ入射：10shot/秒
 - アドレスを10shot分記載した複数の**入射テーブル**を準備
 - 入射テーブルのindexを同期回路に順次設定
- トップアップ入射：1shot/秒
 - 目標電流から差の大きなアドレス#を求める
 - アドレス#を1shot分記載した**入射テーブル**を設定

shot	#1 several	#2 multi-1	#3 multi-2	...
0	0	1740	1750	
1	348	1741	1751	
2	696	1742	1752	
3	1044	1743	1753	
4	1392	1744	1754	
5	0	1745	1755	
6	348	1746	1756	
7	696	1747	1757	
8	1044	1748	1758	
9	1392	1749	1759	

試験結果

タイミング同期
ejectionとbucketとのジッタ
< 3.4ps rms

要求値を満たすことが確認できた

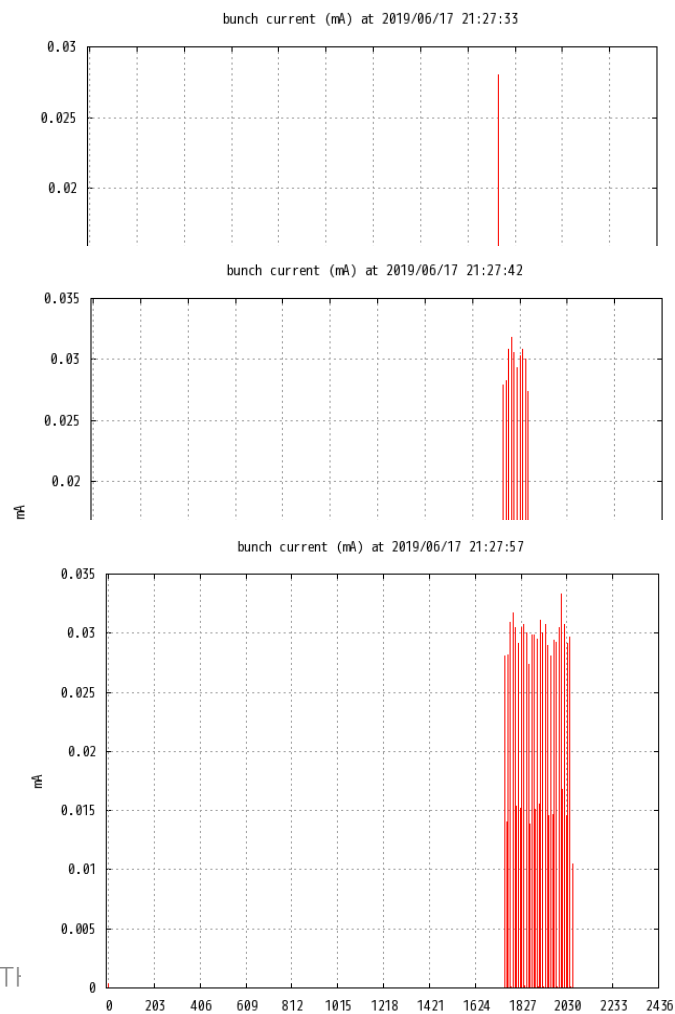


試験結果

- Li-SRタイミング調整
 - FM変調設定値の粗調整で入射効率が大きく変化



- アドレス制御
 - 狙ったバケットに入射できた



まとめ

- SACLAからSRへのビーム入射のための同期システムを開発
 - XFEL性能悪化させないSR入射を目指す
 - SACLAのmaster triggerの調整：100ps p-pで同期
 - SACLAのmaster oscillatorへのFM変調
4ps rms 以下の同期性能を確認
- 2019.01からXFEL運転を新システムで実施 → 問題なし

今後

- SR入射試験
 - 2018.10.15から8回実施済み
 - 狙ったアドレスへの入射OK、SR RFバケットとのタイミング調整OK、90%以上の入射効率、
 - 性能向上
 - 1回/月程度の頻度での試験
 - XFELの短バンチ長と入射の長バンチ長の両立、10pps入射、
- 2020年からの実運用を目指す