

SACLA

SACLA 線型加速器における ショットごとバンチ長制御のための RFパラメータ切り替え

Shot-by-shot RF Parameter Switching for Bunch Length Control at the SACLA Linac

2016年8月10日 第13回日本加速器学会年会

前坂比呂和^{A)}, 大島隆^{A, B)}, 松原伸一^{B)}, 森本理^{C)}, 大竹雄次^{A)}

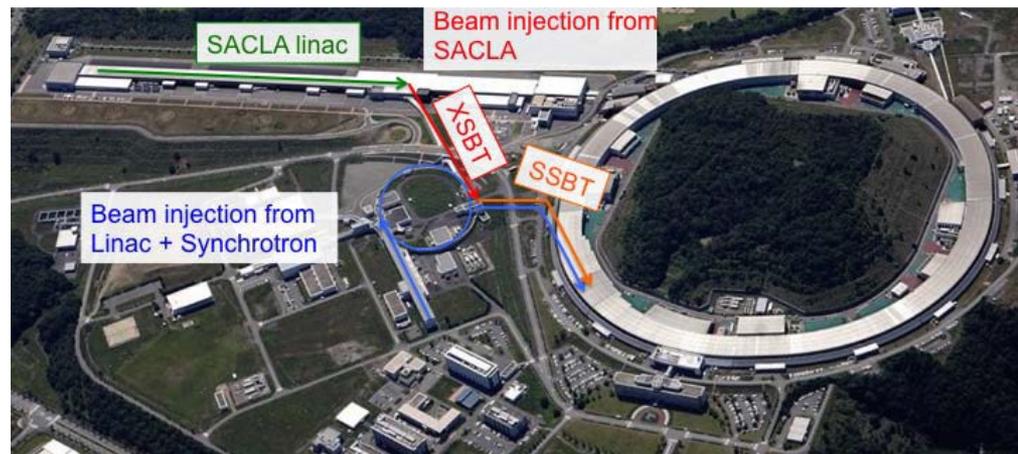
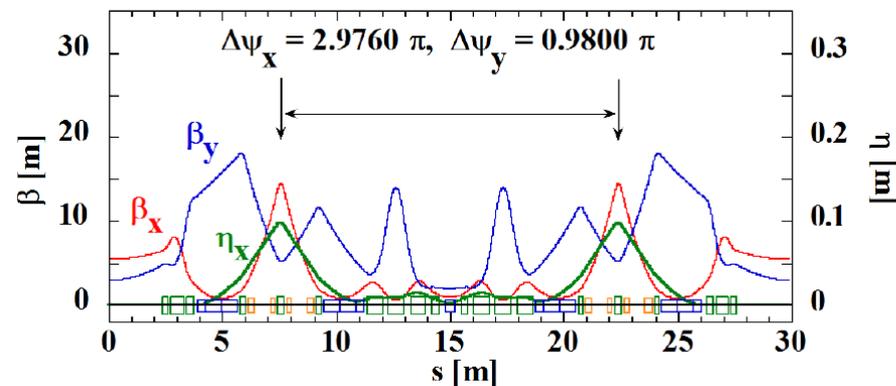
A) RIKEN SPring-8 Center

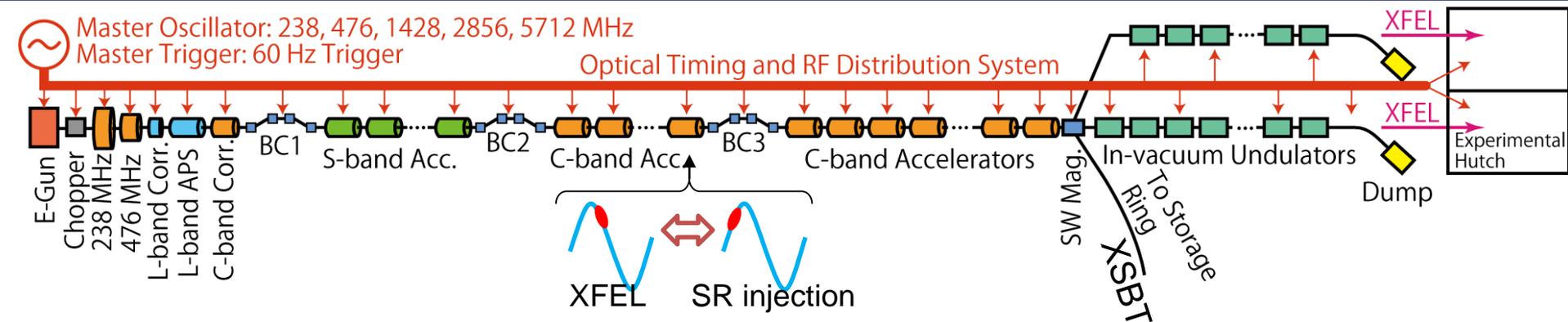
B) Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI)

C) SPring-8 Service Co., Ltd.

- はじめに
 - SPring-8 蓄積リングの低エミッタンスアップグレード
 - SACLA 線型加速器からの入射
- ショットごとのRFパラメータ切り替えシステム
 - RFパラメータ切り替えシステムの要件
 - SACLA の タイミング・LLRF システム
 - RFパラメータ切り替えシステムの設計方針
- RFパラメータ切り替えシステムのビーム試験
 - 試験セットアップ
 - 試験結果
- まとめ

- SPring-8 蓄積リングの低エミッタンスアップグレード: **SPring-8-II**
 - エミッタンス: 約 2.4 nm rad → **約 150 pm rad**
 - マルチベンドラティス: Double-bend Achromat → **5-bend Achromat**
 - ビームエネルギー: 8 GeV → **6 GeV**
 - SPring-8-II Conceptual Design Report: <http://rsc.riken.jp/pdf/SPring-8-II.pdf>
- 入射するビームは十分に低エミッタンスでなければならない (**< 560 pm rad**)
 - マルチベンドラティスを用いた放射光リングのダイナミックアパーチャはかなり小さい
 - 既存のブースタシンクロトロンでは得られない
- X線自由電子レーザー (XFEL) 施設 **SACLA** の線型加速器を入射器として使用
 - 6 GeV にて **約 100 pm rad** のビームを生成可能
 - SACLA には SPring-8 蓄積リングへのビーム輸送路 (XSBT) がすでに併設済
- **SACLAのビームタイミングを蓄積リングと同期させるシステムも開発中**
 - T. Ohshima, et al., TUP010



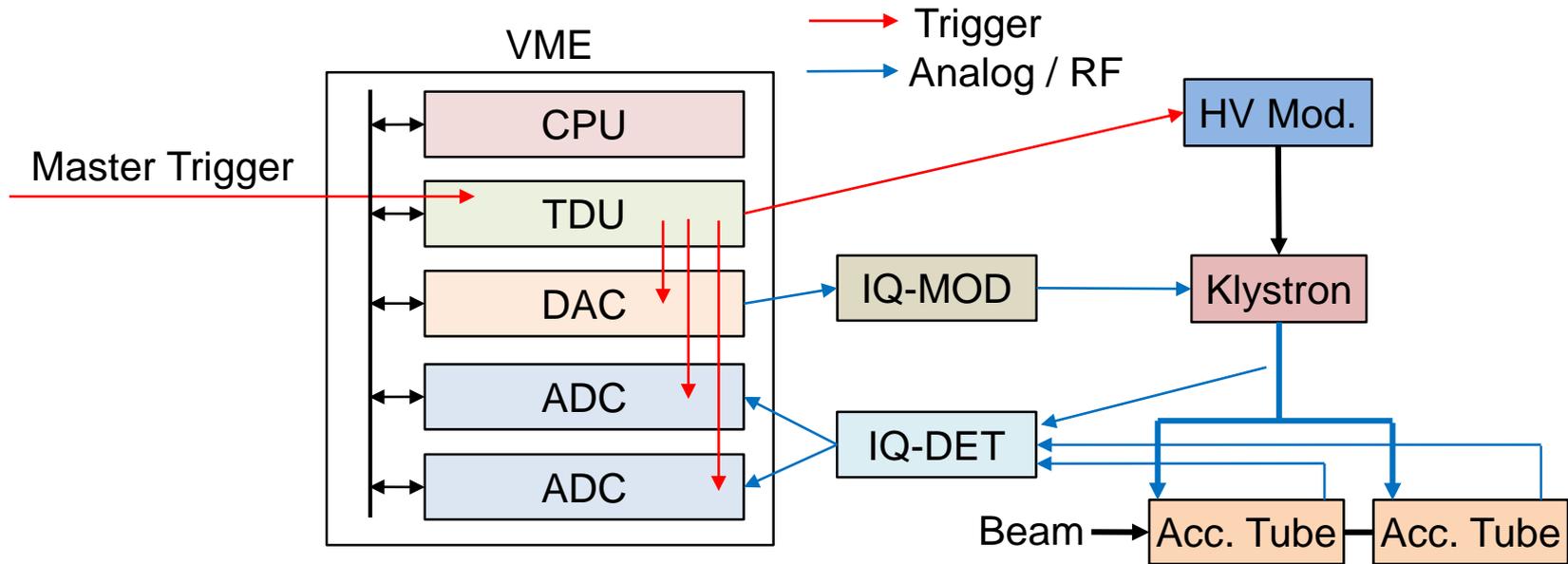


- XFEL 運転と並行して蓄積リングに入射
 - SACLA の繰り返し **60 Hz** の電子ビームの経路をショットごとに切り替える
 - T. Hara, et al., WEOM13
 - ショットごとに**エネルギー**も切り替える (一部の加速ユニットのトリガを間引く)
 - T. Hara, et al., Phys. Rev. Accel. Beams **16**, 080701 (2013).
 - 現状では均等な繰り返しでのみ可能なため、**不定期な要求**に対応する必要あり
- XSBT にてエミッタンスを悪化させずにビーム輸送することが重要
 - XFEL用の電子ビームは**バンチ長**が約 **10 fs** と短いため、**Coherent Synchrotron Radiation (CSR)** によるエミッタンス悪化が深刻
 - **バンチ長**を **1 ps 程度**に伸ばして **CSR** を抑制
 - バンチ長は磁気シケイン型バンチ圧縮器 (BC) 上流の加速器で与えられるエネルギーチャープの量で制御
 - **BC上流の加速ユニットのRF位相**をショットごとに切り替えることが必要
 - XFEL運転においても、ビームラインごとにバンチ長を微調整した電子ビームを供給することができるなどの恩恵がある

- 不定期的な入射要求に対応するには、各機器にビーム経路情報を配信する必要がある
- 各機器において、ビーム経路情報に応じて 60 Hz のショットごとにパラメータを切り替えなければならない
- 蓄積リング入射に関する条件
 - 蓄積電流 0 mA からの積み上げ入射は最大 10 Hz
 - 100 mA 蓄積まで数分
 - 定常運転時のトップアップ入射は入射要求から 1 秒程度遅れてもよい
 - 想定されるタウチェック寿命 約 10 時間 を考えると蓄積電流変動への影響は軽微
- XFELユーザからの要件
 - 検出器や同期レーザとの整合から、各ビームラインに一定間隔で XFEL が供給される運転パターンが望ましい
 - 実験用同期レーザのうち、繰り返しの遅いもの (1 Hz 以下) と蓄積リング入射が重ならないように
- ショットごとのRFパラメータ切り替えは、いくつかの規則正しい繰り返しをもった運転パターンの中から選択する、という形をとる

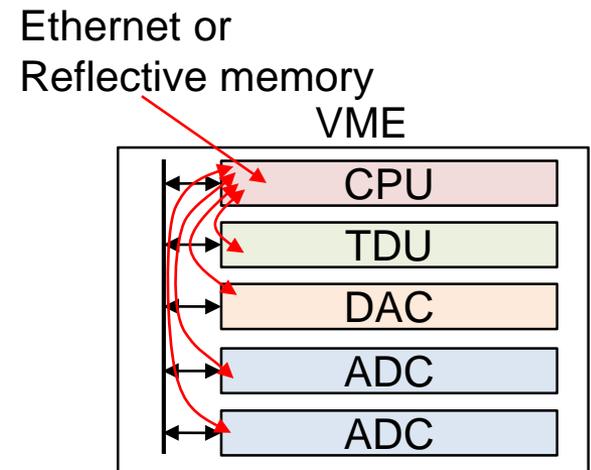
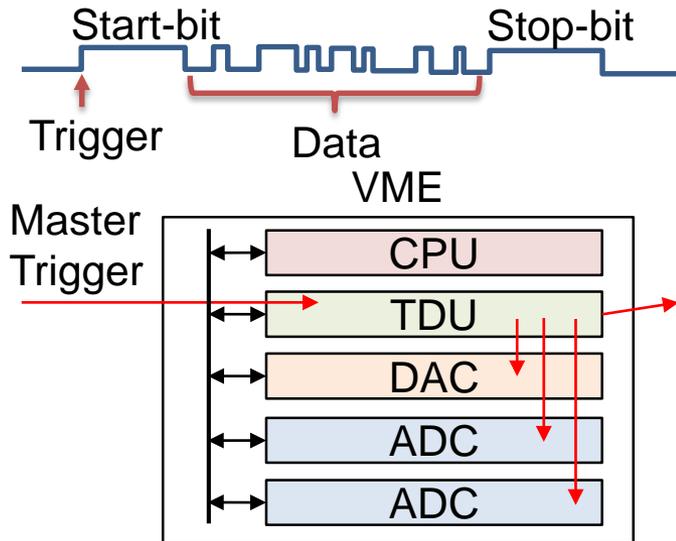
適宜
切替

マスタトリガ番号	N+0	N+1	N+2	N+3	N+4	N+5	N+6	N+7	...	N+59
BL2, BL3	BL3	BL2	BL3	BL2	BL3	BL2	BL3	BL2	...	BL2
BL2, BL3, Topup	BL3	SR	BL3	BL2	BL3	BL2	BL3	BL2	...	BL2
BL2, BL3, SR 10Hz	BL3	SR	BL3	BL2	BL3	BL2	BL3	SR	...	BL2
...									...	



- **タイミング生成**
 - Trigger Delay Unit (TDU) にて、マスタトリガを基準とする各機器に適したタイミングのトリガ信号を生成
 - TDUはマスタトリガを分周して出力することが可能
- **加速RF信号は、In-phase and Quadrature変調器 (IQ-MOD) にて生成**
 - 位相・振幅を決める IQ ベースバンド信号はVME DA変換器 (DAC) によって生成
- **加速RF電力は IQ 検出器 (IQ-DET) により検波**
 - IQベースバンド信号はVME AD変換器 (ADC) にて記録
- **XFELの安定な生成には 50 fs の安定度が必要**

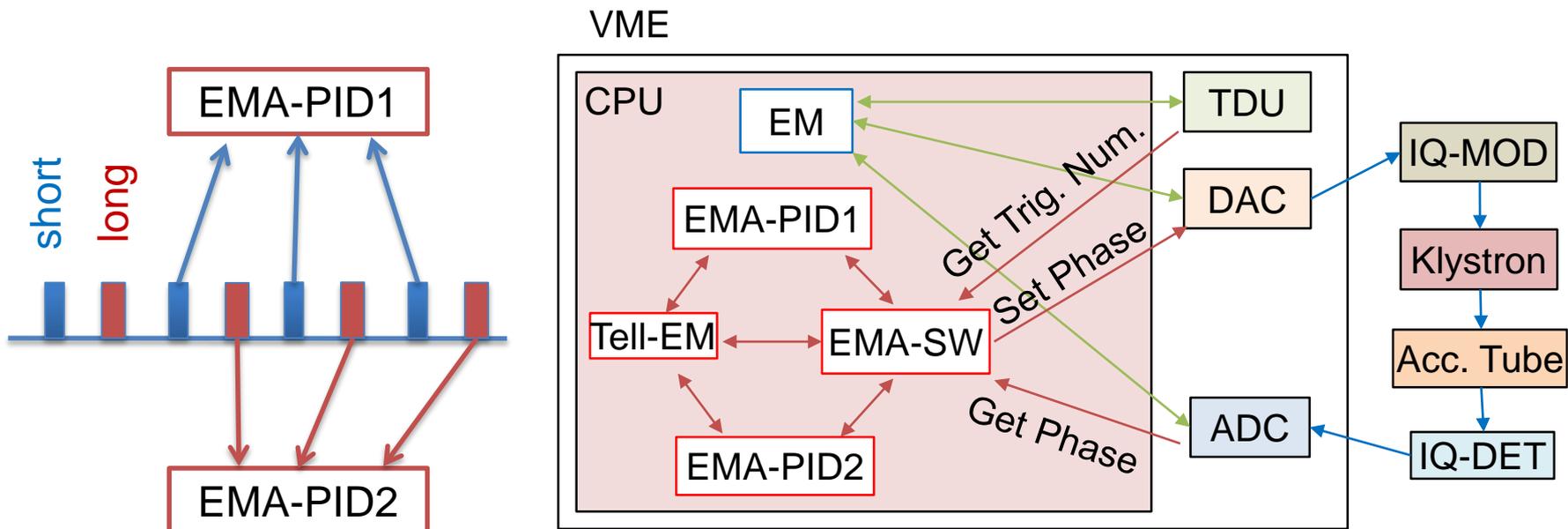
- 以下の2つの方法が考えられる
- トリガパルスに経路情報を付加し、各機器がそれを解読してパラメータを切り替える方式
 - トリガと同時に経路情報があるのでリアルタイム性は問題なし
 - TDU や DAC などのファームウェアアップグレードが必要
- ネットワークで情報を伝送し、ソフトウェアでパラメータを切り替える方式
 - 運転パターンをネットワークで伝送 (約1秒おき)
 - Ethernet or Reflective Memory
 - 各機器上のパラメータ切り替えソフトウェアがマスタトリガカウンタを監視し、更新されるごとに命令を出す
 - 現状、全ショットの同期データ収集が安定に稼働していることから、ソフトウェアによる方法でも見込みは十分
 - M. Yamaga, et al., proceedings of ICALEPCS2009, pp. 69–71.
- 後者の方がコスト的にメリットがあり、すぐに試すこともできることから、まずは後者の方法について開発を進めることとした



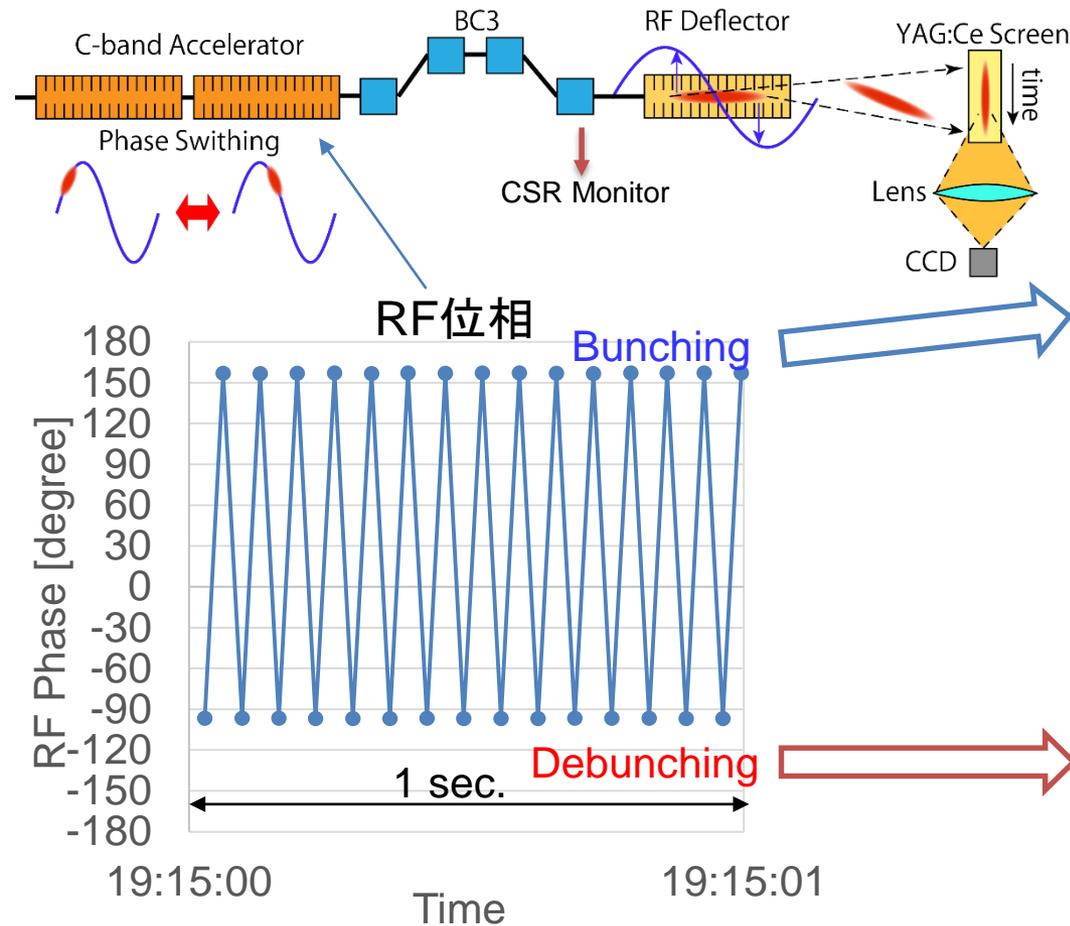
- SACLA 線型加速器のBC3上流の加速ユニットのひとつに対し、RFパラメータ切り替えの試験を実施

VME CPU 上のプロセス

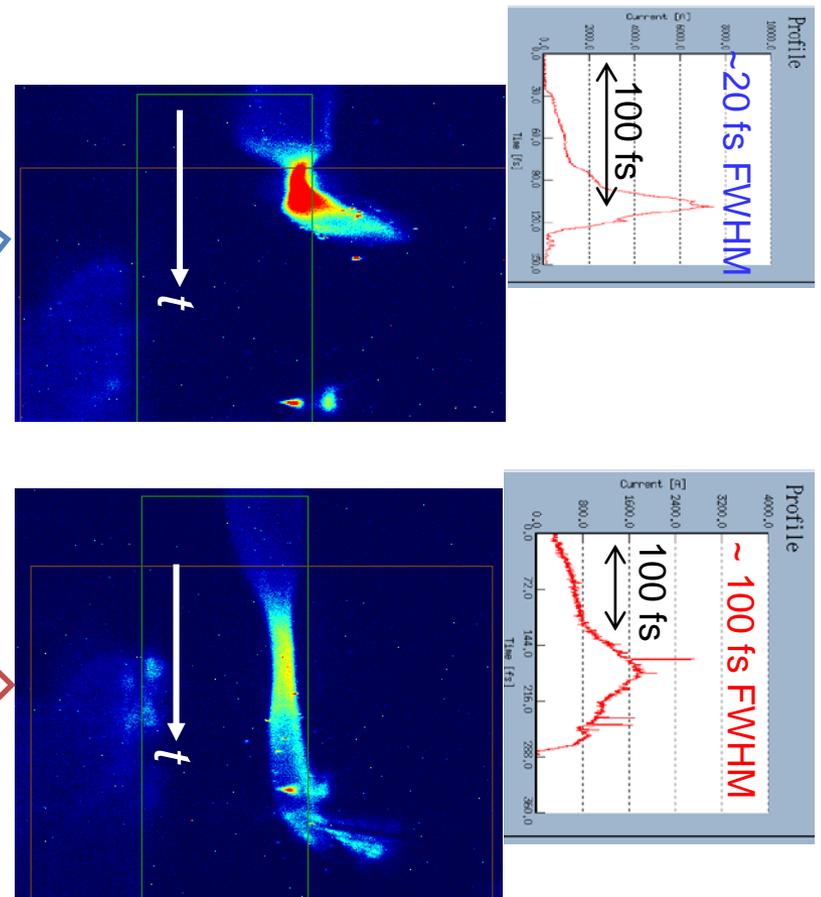
- EM** (Equipment Manager): 通常の TDU, DAC, ADC などの機器制御
- Tell-EM**: 以下の3つのEMA (Equipment Manager Agent) プロセスの起動や停止をおこなう
- EMA-SW** (Equipment Manager Agent for SWitching): パラメータ切り替え命令を発行
 - TDUのマスタトリガ番号を常時監視
 - トリガが来たらADCからRF位相を取得し、DACに適切なRF位相を設定
 - 検出されたRF位相をトリガ番号に応じて適切なEMA-PIDプロセスに振り分け
 - EMA-PID プロセスから設定値を受け取る
- EMA-PID1, EMA-PID2** (EMA for Proportional-Integral-Differential control): PID制御の計算
 - ADC で検出された RF 位相が一定となるようにフィードバック
 - 2 種類の RF パラメータそれぞれの PID 制御計算を独立におこなう



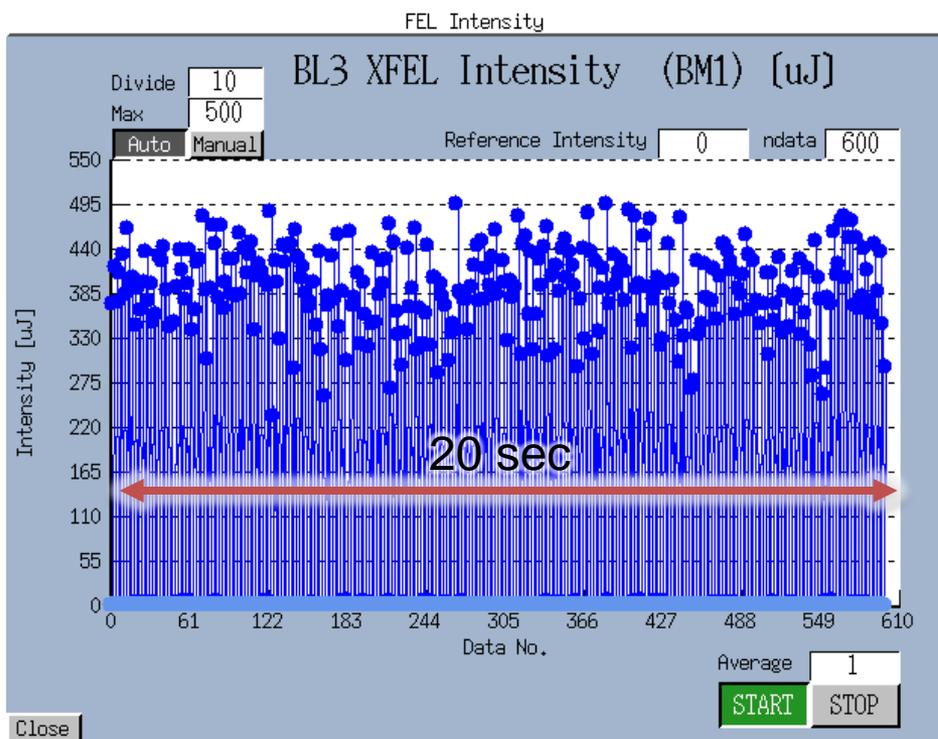
- 繰り返し 30 Hz の電子ビームのバンチ長を交互に 15 Hz ずつ切り替え
- バンチング、デバンチングそれぞれのRFパラメータでビームエネルギーが等しくなるように位相を調整



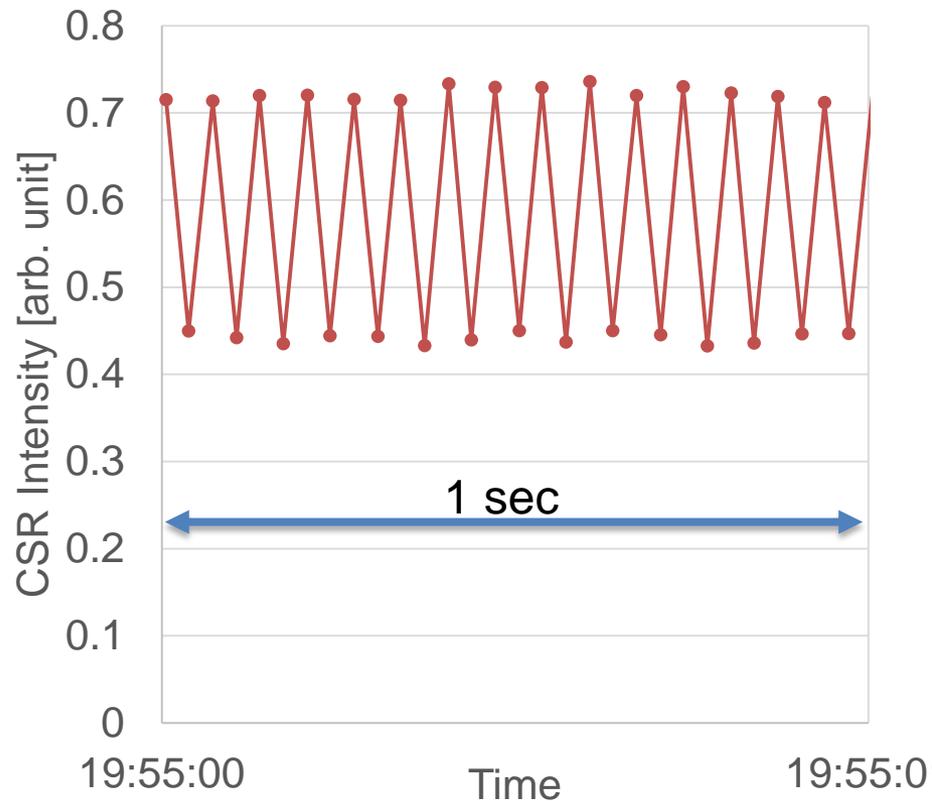
RFデフレクタによるバンチ長測定



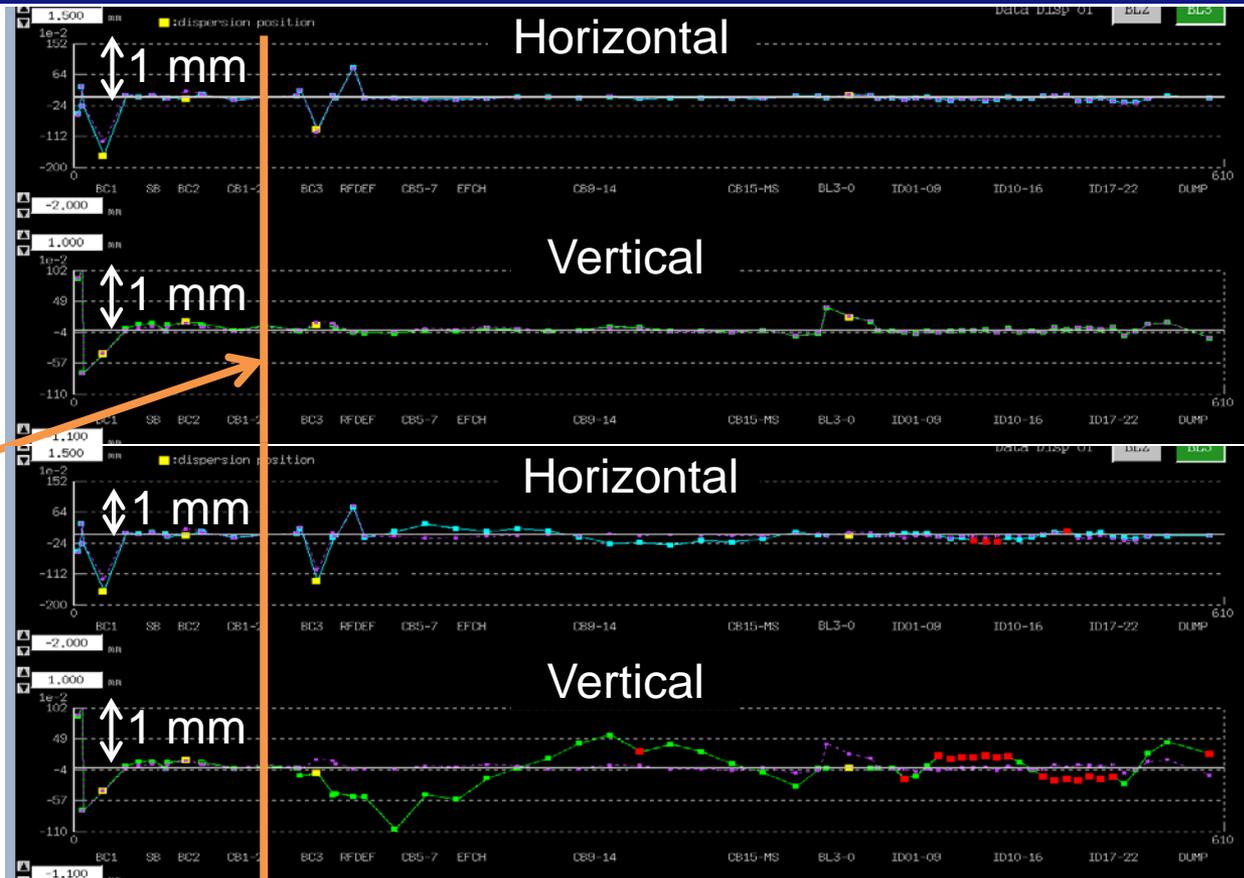
XFEL Intensity (10 keV)



CSR Intensity at BC3



- XFEL 強度や CSR 強度も交互に変わっている
- バンチング位相での XFEL 強度は通常どおり



Bunching

歪み無し

Parameter Switching

位相を変えると軌道がひずむ

Debunching

- デバンチング位相のとき、ビームがキックされる
 - 加速管の端部収束が位相によって異なる →
 - 加速管の中心がビーム軌道からずれている
- RFパラメータ切り替えの実運用に向けて
 - 加速管を精度よくアライメントし直す
 - ビーム調整の際にビーム軌道を加速管の中心に合わせる

H. Maesaka, et al., "Analysis and Measurement of Focusing Effects in a Traveling Wave Linear Accelerator", proceedings of FEL2013, pp. 329–333.

- SPring-8 蓄積リングの低エミッタンスアップグレード
 - エミッタンス 約 150 pm rad
 - SACLA からの低エミッタンスビームを蓄積リングへ入射
- SACLA からの入射
 - XFEL用のバンチ長 約 10 fs のビームは、蓄積リングまでのビーム輸送路における CSR 効果でエミッタンスが悪化する
 - 蓄積リングへ入射するビームのバンチ長は 1 ps 程度に伸ばす
- ショットごとの RF パラメータ切り替え
 - バンチ圧縮部の RF パラメータを切り替えることでバンチ長を制御
 - XFEL 実験ユーザや蓄積リングの入射からの要請を考慮
 - 1秒間程度の運転パターンをいくつか用意し、要求に応じてそのパターンを切り替え
 - ビーム経路情報の配信案として、トリガに情報を載せる方法とネットワーク経由でソフトウェア的におこなう方法を検討中
- ビーム試験
 - ソフトウェア方式の試験プログラムを使用
 - 繰り返し 30 Hz にて交互に短バンチ (~20 fs FWHM) と長バンチ (~100 fs FWHM) を切り替えることに成功
 - 目標とする 1 ps のバンチ長を得るには、8ユニット程度の加速システムにRFパラメータ切り替えを適用すればよいだろう
- 今後、不定期な切り替え要求にも対応可能なシステムを設計・構築する予定