

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レート・ パラメータ切り替えシステムの開発

前坂比呂和^{A)}, 大島隆^{A)}, 細田直康^{A)}, 福井達^{A)}, 近藤力^{A)}, 岩井瑛人^{A)}, 原徹^{A)}, 稲垣隆宏^{A)}, 田中均^{A)}, 岡田謙介^{B)}, 山鹿光裕^{B)}, 松原伸一^{B)}, 深見健司^{B)}, 青木毅^{B)}, 藤田貴弘^{B)}, 出羽英紀^{B)}, 正木満博^{B)}, 早乙女光一^{B)}, 高雄勝^{B)}, 高野史郎^{B)}, 渡部貴宏^{B)}, 森本理^{C)}, 長谷川太一^{C)}, 篠本考秀^{C)}, 住友博史^{C)}, 田尻泰之^{C)}, 田中信一郎^{C)}, 吉岡正倫^{C)}

A) 理研 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

2019.8.1.

第16回 日本加速器学会 年会



JASRI

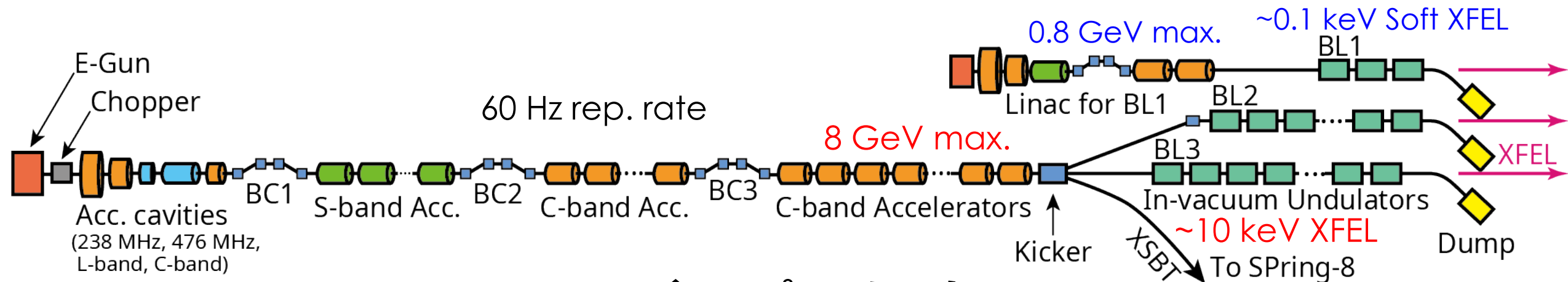


アウトライン

- はじめに
 - XFEL 施設 SACLA のマルチビームライン運転
 - SPring-8-II 計画
 - SACLA から SPring-8 への入射
- 現行のビームルートパラメータ切り替えシステム
 - 2つの XFEL ビームラインの均等振り分け運転
 - ビームラインごとのパラメータの違い
- 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
 - システム設計
 - テストベンチでの試験結果
 - SACLA での XFEL 運転試験と SPring-8 入射試験
- まとめと展望

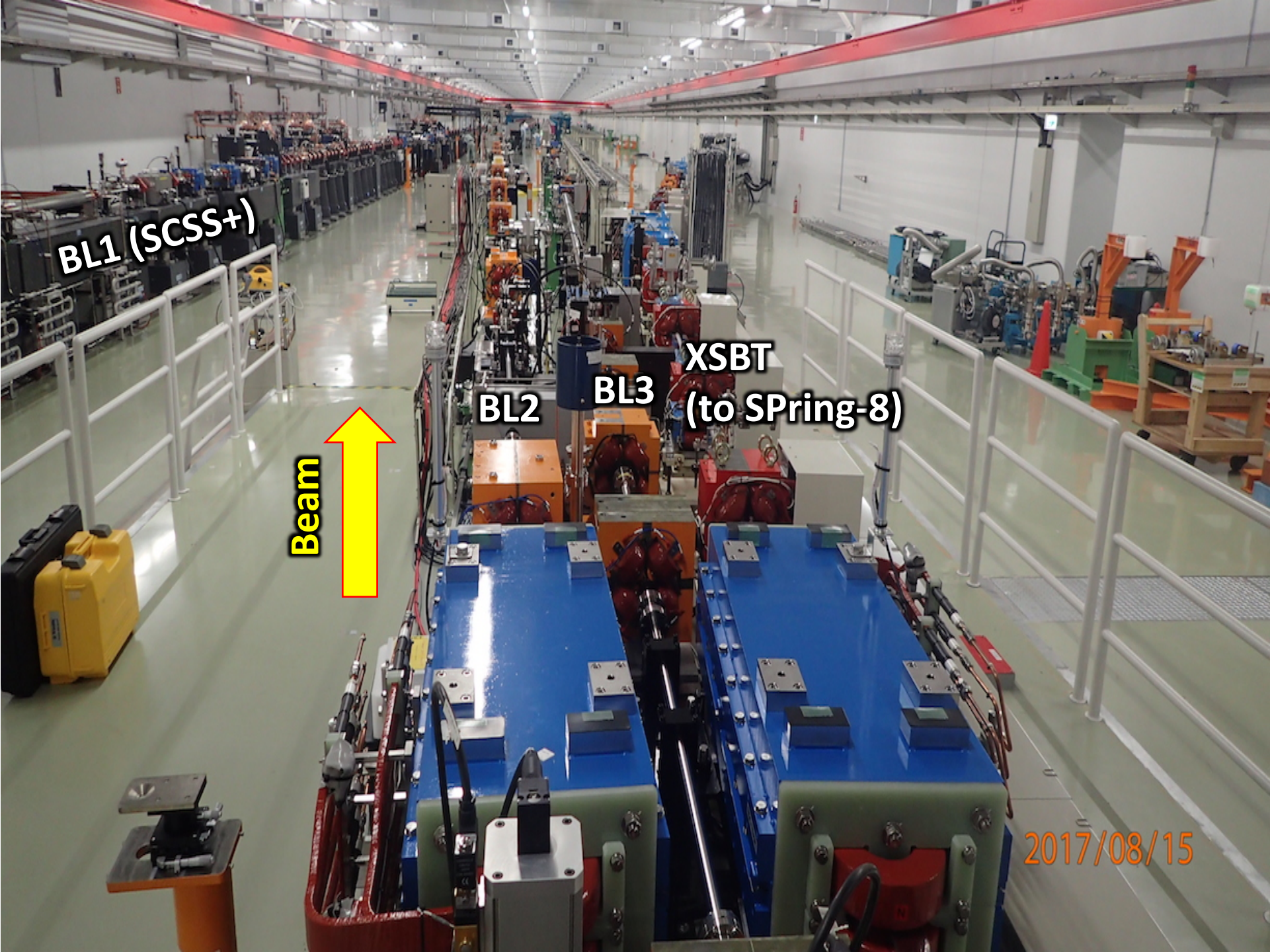
SACLA のマルチビームライン運転

- XFELはリング型放射光源に比べてビームライン本数が少ないため、利用機会を増やすことが重要。
- ショットごとにビームルートを切り替えて複数のビームラインを同時に利用できなければならない。



SACLA BL2, BL3 の主要パラメータ

- ビームエネルギー: **4 – 8 GeV** (各 BL ショットごとに可変)
- バンチ長: **~10 fs FWHM**
- ピーク電流: **> 10 kA**
- 規格化スライスエミッタンス: **< 1 mm mrad**
- XFEL 光子エネルギー: **4 – 20 keV**
- XFEL パルスエネルギー: **> 500 μ J (10 keV)**
- 繰り返し: **60 Hz max.** (BL2 30 Hz + BL3 30 Hz)



BL1 (SCSS+)

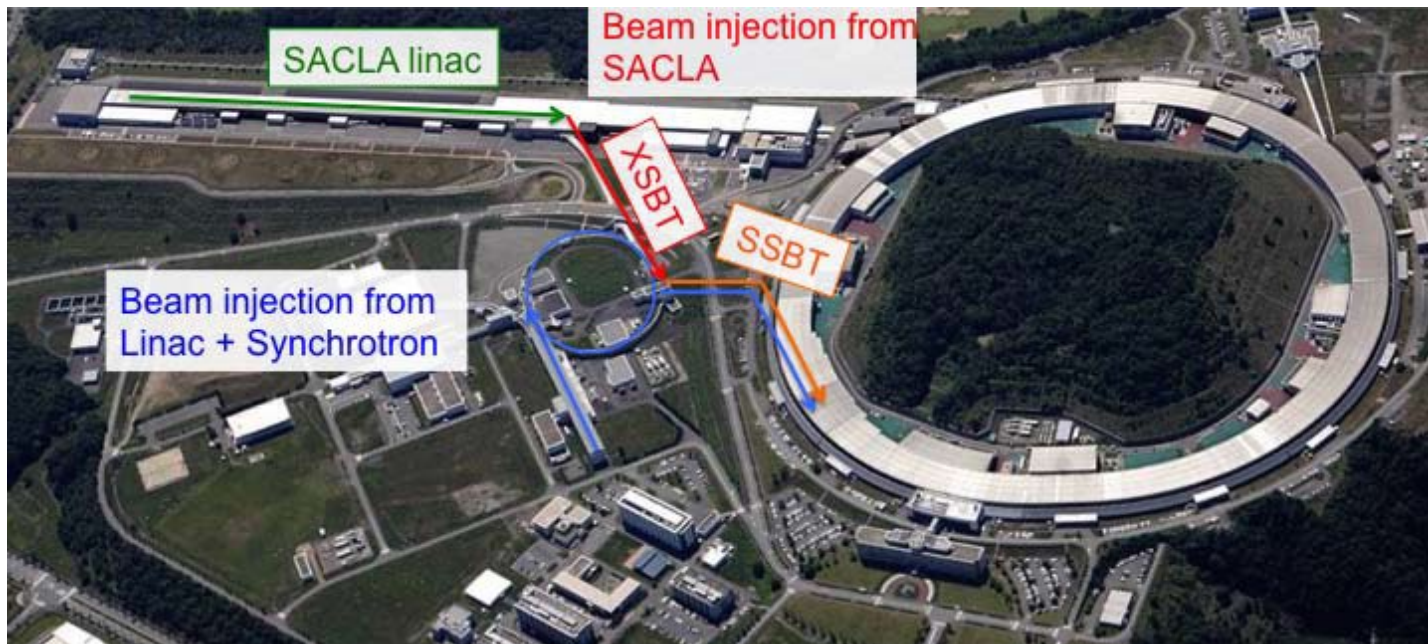
BL2 **BL3** **XSBT**
(to SPring-8)

Beam ↑

2017/08/15

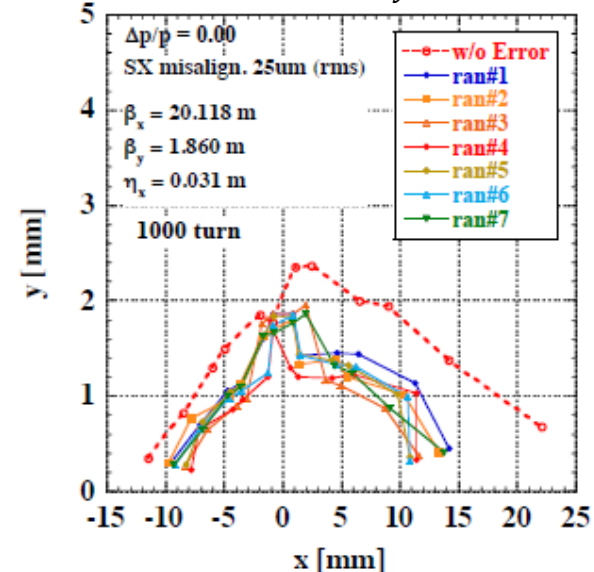
SPring-8-II 計画

- マルチベンドラティスを用いて SPring-8 を低エミッタンス化・高輝度化する計画
- エミッタンス: $2.4 \text{ nm rad} \rightarrow 140 \text{ pm rad}$
(アンジュレータの放射減衰がない場合)
- ラティス: Double-Bend Achromat (DBA) \rightarrow 5-Bend Achromat (5BA)
- ビームエネルギー: $8 \text{ GeV} \rightarrow 6 \text{ GeV}$
- SPring-8-II Conceptual Design Report, Nov. 2014,
<http://rsc.riken.jp/pdf/SPring-8-II.pdf>
- 500 pm rad 以下の入射ビームが必要
 \rightarrow SACLA からの入射

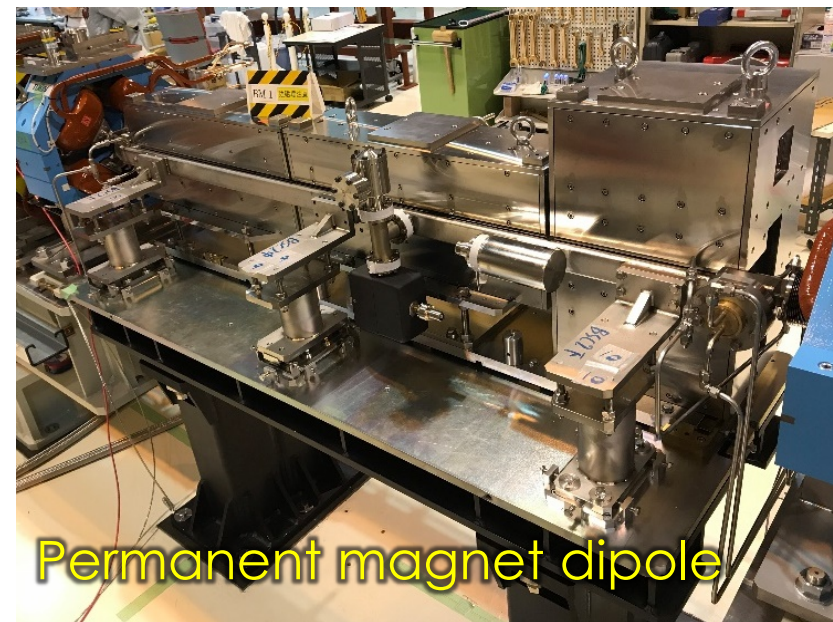
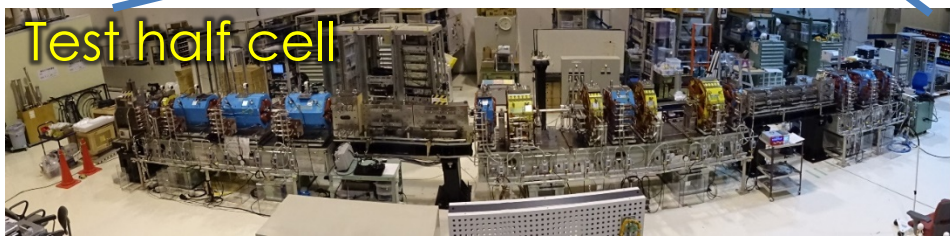
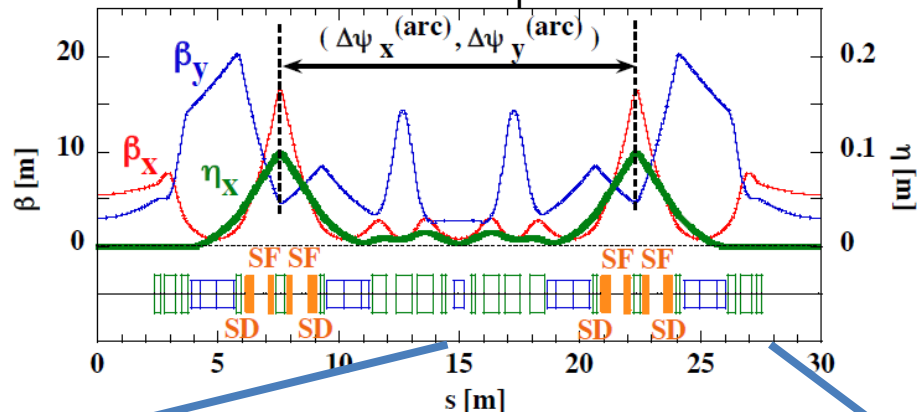


Dynamic Aperture

$$\beta_x = 20.1 \text{ m}, \quad \beta_y = 1.86 \text{ m}$$



Linear Optics

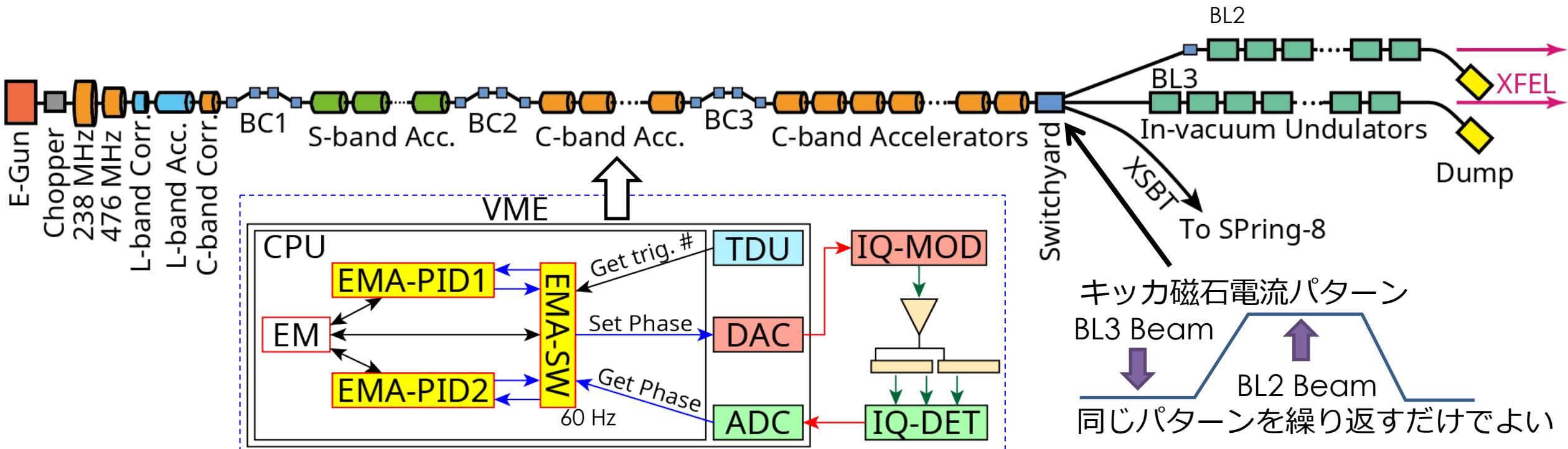


XFEL v.s. SPring-8(-II) 入射

	XFEL	SPring-8	SPring-8-II
ビームエネルギー	4 – 8 GeV	8 GeV	6 GeV
バンチ長	< ~ 10 fs	> 100 fs	> 100 fs
ピーク電流	> 10 kA	< ~ 1 kA	< ~ 1 kA
繰り返し	60 Hz max.	10 Hz (initial) < 0.1 Hz (top-up)	10 Hz (initial) < 0.1 Hz (top-up)
ビームレート	BL2, BL3	XSBT	XSBT
リングとの同期	No	Yes	Yes

- XFEL 運転と 蓄積リング (SR) 入射ではビームパラメータが異なる。
- SR のトップアップ運転時は単発の入射要求が不定期にやってくる。
- SR 入射時は SACLA をリングに同期させなければならない。
- SPring-8 アップグレードの前から 現 SPring-8 に SACLA から入射することで 現行の入射器の運転経費を節約できる。
 - 今のうちから SR 入射の試験をおこない、SACLA から入射する運転に移行していく。

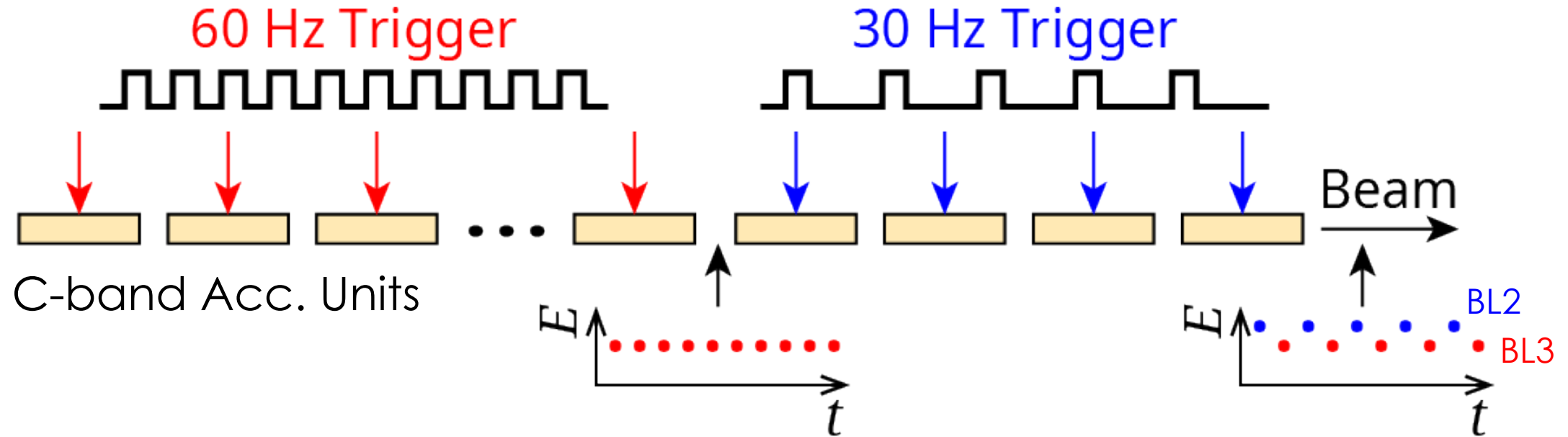
現行のビームルート・パラメータ切り替えシステム



- ビームルート・エネルギー・バンチ長をショットごとに交互に均等に切り替える。
 - BL2 30Hz + BL3 30Hz
- バンチ長は BC3 より上流の加速高周波位相をショットごとに切り替えて制御。
 - 位相を切り替えるためのソフトウェアを開発
 - EMA-SW: VMEモジュールにアクセスしてショットごとに値を設定をしたりデータを取ったりし、ビームルートごとに分類する。
 - EMA-PID1 and -PID2: ルートごとの加速高周波位相の PID 制御プロセス
- キッカ磁石は同じ電流パターンを繰り返すだけでよい。

EM: Equip Manager
EMA: Equip Manager Agent

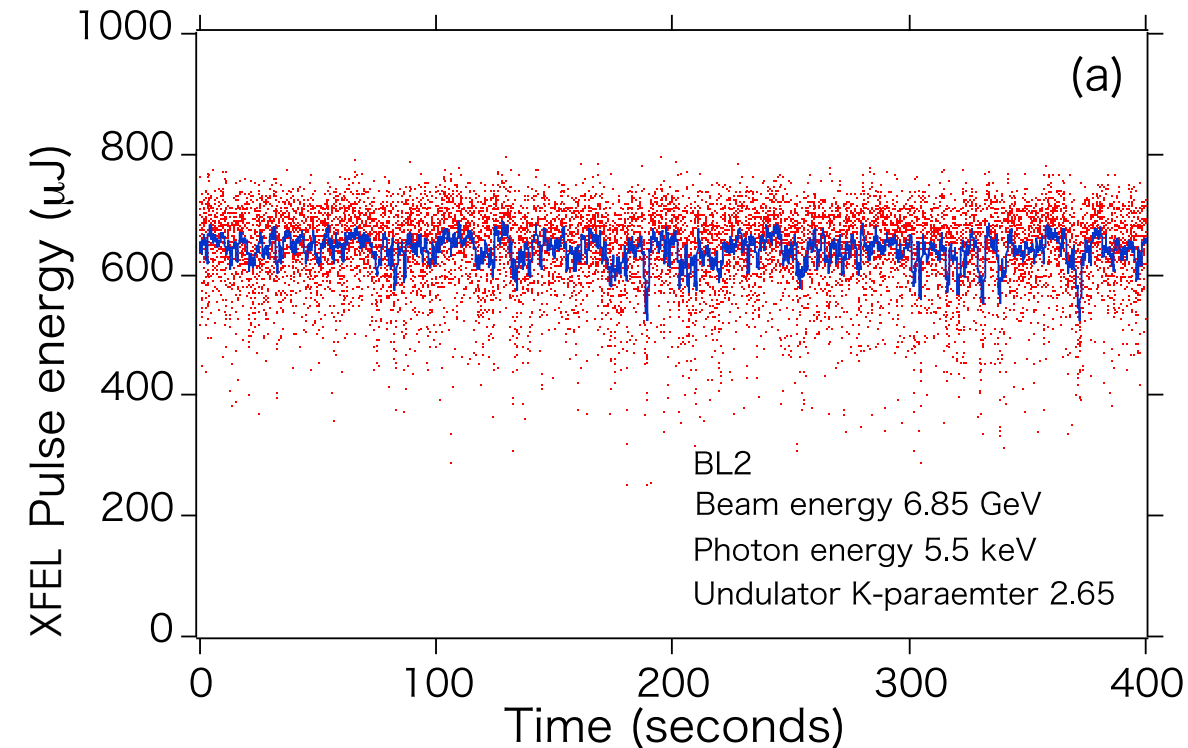
ショットごとのビームエネルギー制御



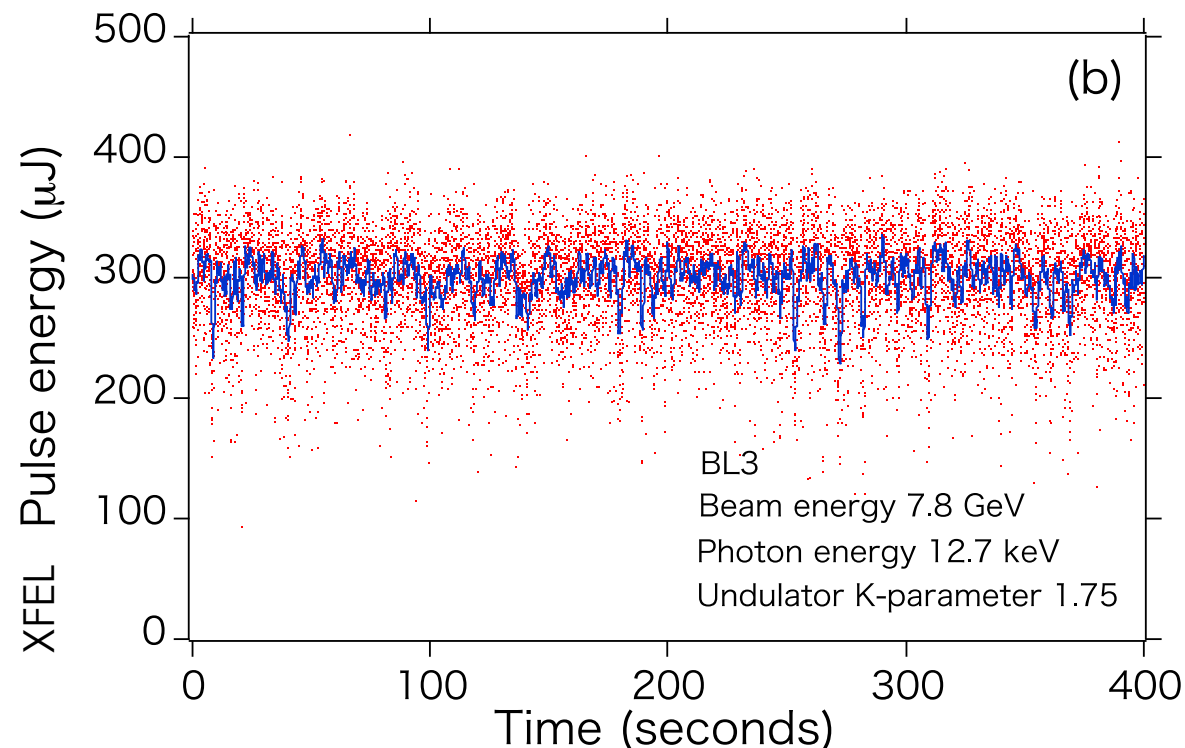
- 各加速ユニットのトリガ繰り返しは独立に変更可能。
 - 交互に変更するだけならリアルタイムにON/OFFを切り替える必要はない。
- Cバンド1ユニット当たりの加速エネルギー: ~ 120 MeV
- 4極磁石の強さは共通だが、ビームエンベロップはキッカ磁石でルートを振り分けたあとでマッチングさせることが可能。

2つのXFELビームラインの時分割同時運転

BL2 (6.85 GeV)

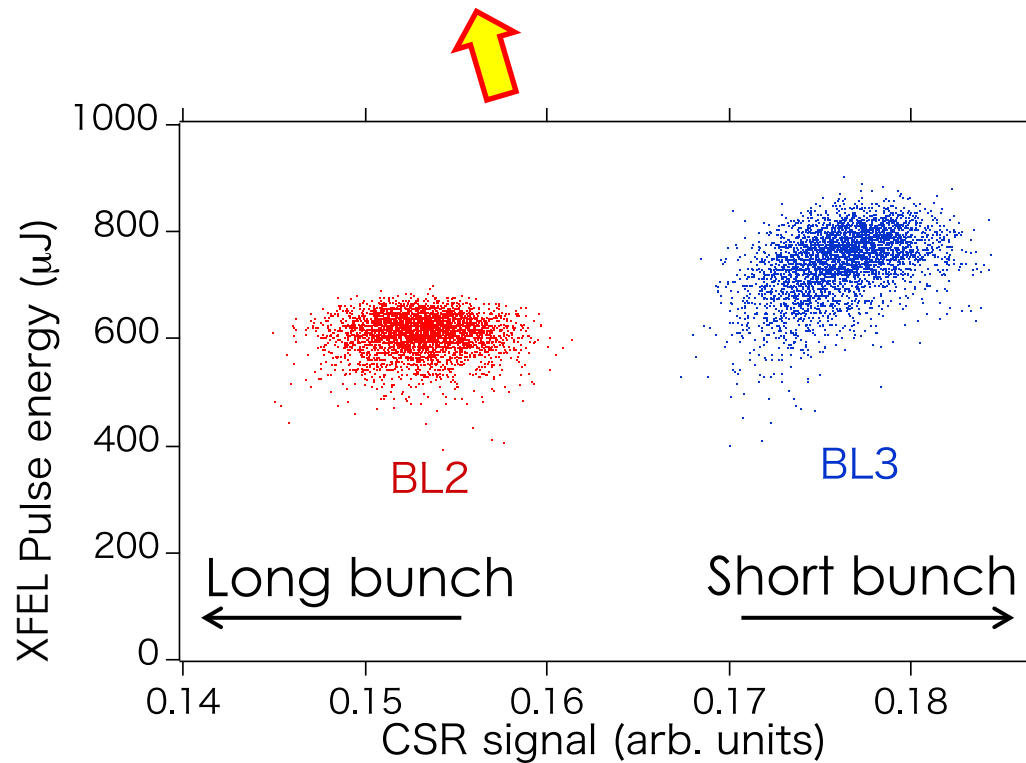
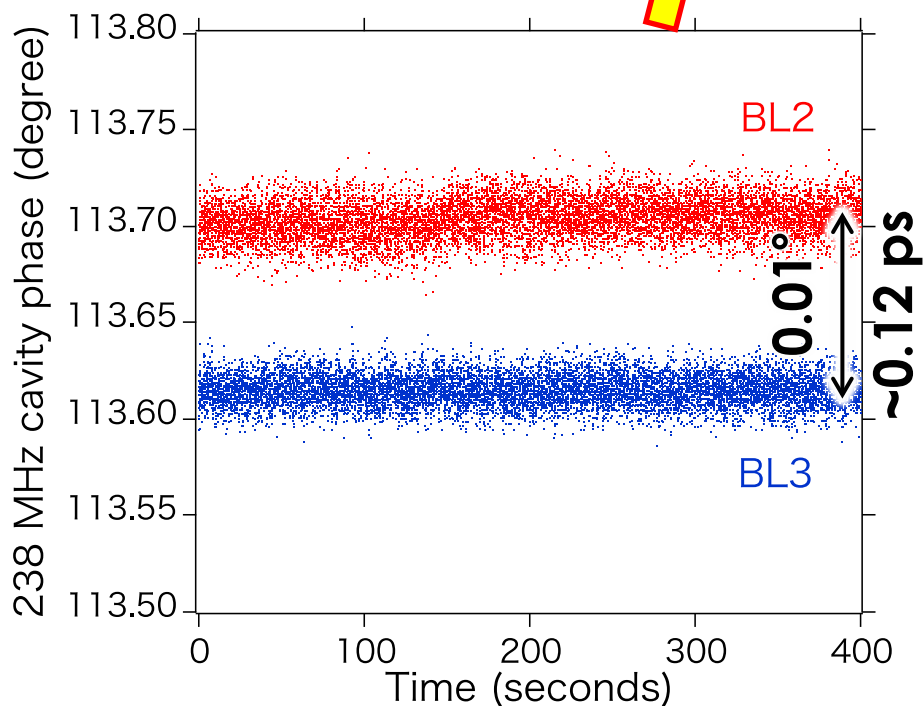
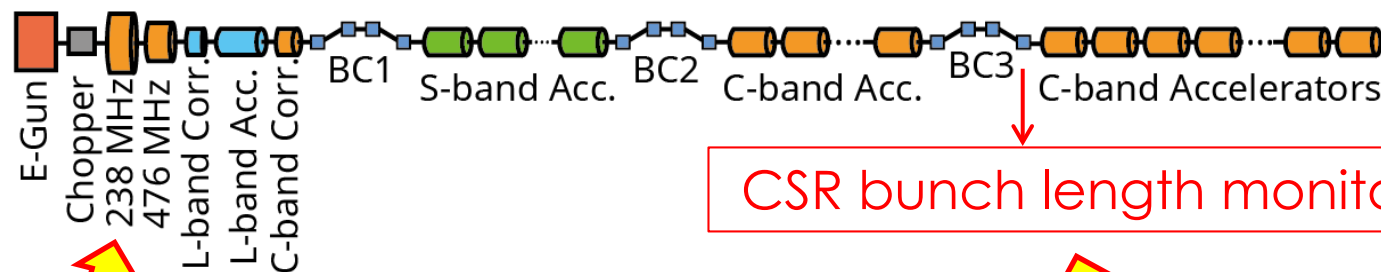


BL3 (7.8 GeV)



- BL2 に 6.85 GeV、BL3 に 7.8 GeV の電子ビームを供給。
- 光子エネルギーは BL2 が 5.5 keV、BL3 が 12.7 keV で 約 2 倍異なる。
- パラメータ切り替え運転により、両方のビームラインで XFEL 性能が最大化されている。

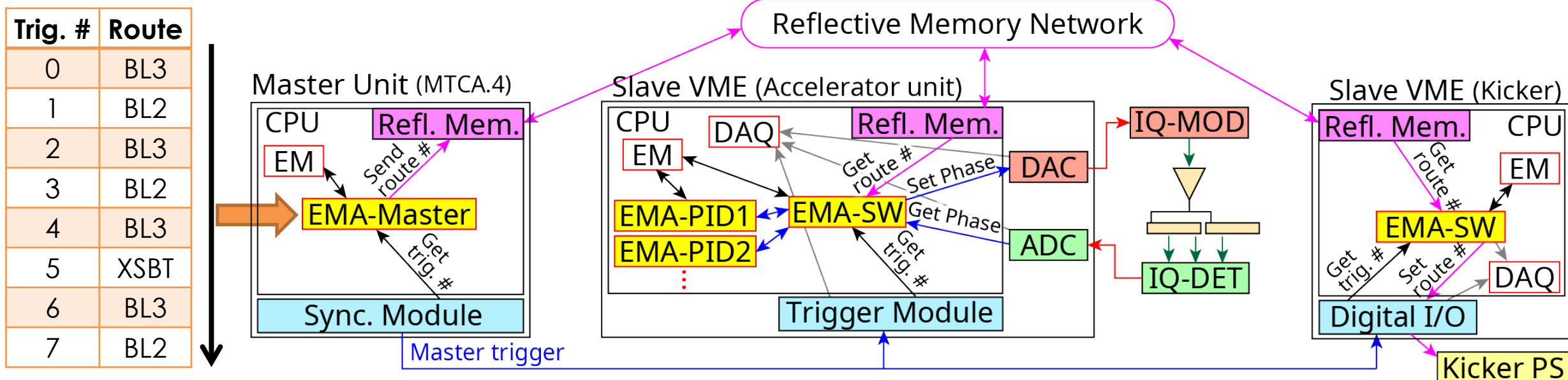
各ビームラインのパラメータ



- 繰り返し 60 Hz (BL2 30 Hz + BL3 30 Hz)
- ビームエネルギー: 7.8 GeV (BL2、BL3 とも)
- 各加速ユニットの位相をショットごとに高精度に切り替え、バンチ長を BL ごとに最適化。
- XFEL 光子エネルギー: 10 keV (BL2、BL3 とも)
- バンチ長: ~10 fs FWHM

オンデマンド切り替えシステム

- リング入射は入射要求が来たときだけ行えるようにしなければならない。
- SPring-8 トップアップ運転時は 数分に 1ショット の頻度で入射。



- 均等振り分けシステムでソフトウェアベースの切り替えに成功したので、オンデマンドシステムもソフトウェアで実装することとした。
- ビームルート情報はリアルタイム性が必要なためリフレクティブメモリネットワークで配信。
 - イーサネットは確実性に欠ける。
- 各ユニットのON/OFF、加速高周波位相、キッカ磁石電流などをルート情報に応じて切り替える。
- ルート情報、加速高周波信号、マスタトリガ番号などのデータはトリガに同期したデータ収集系で全ショット分収集する。

オンデマンド切り替えに使用する機器

Master unit (MTCA.4)

Reflective memory

Front

CPU



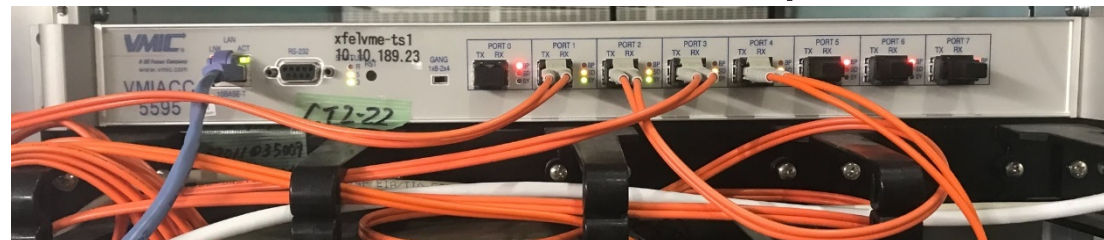
Digitizer for sync. with SP8

Rear

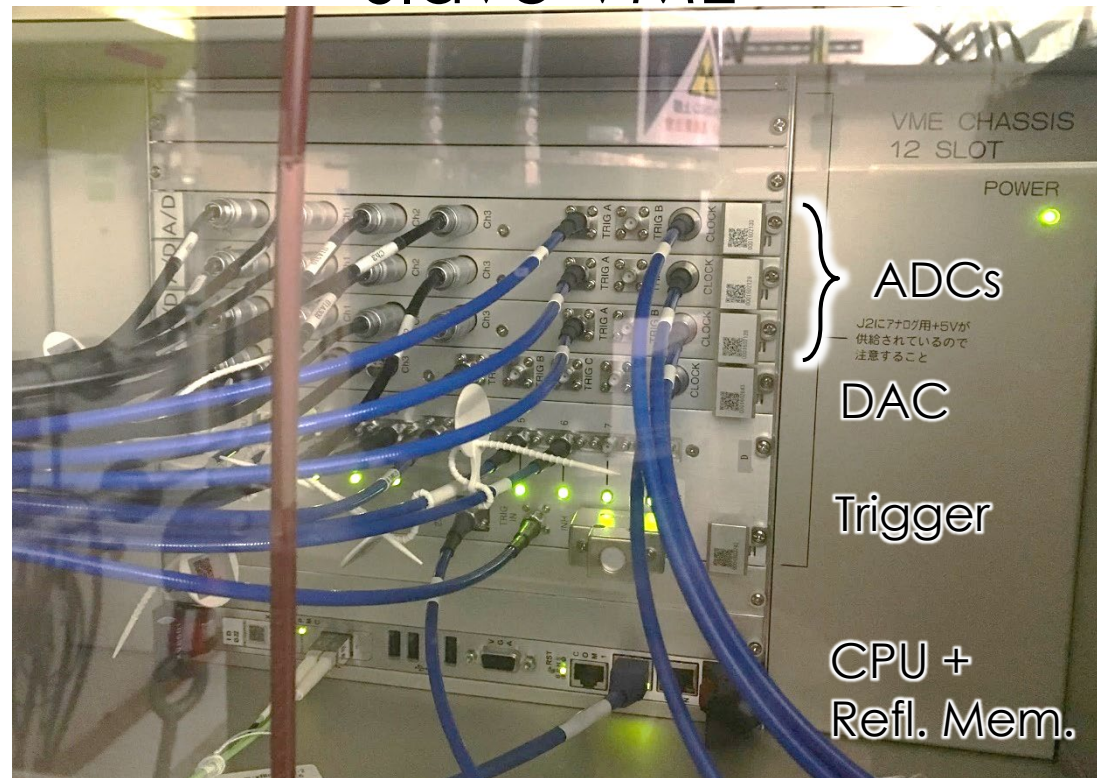


RTM for sync.

Reflective memory hub



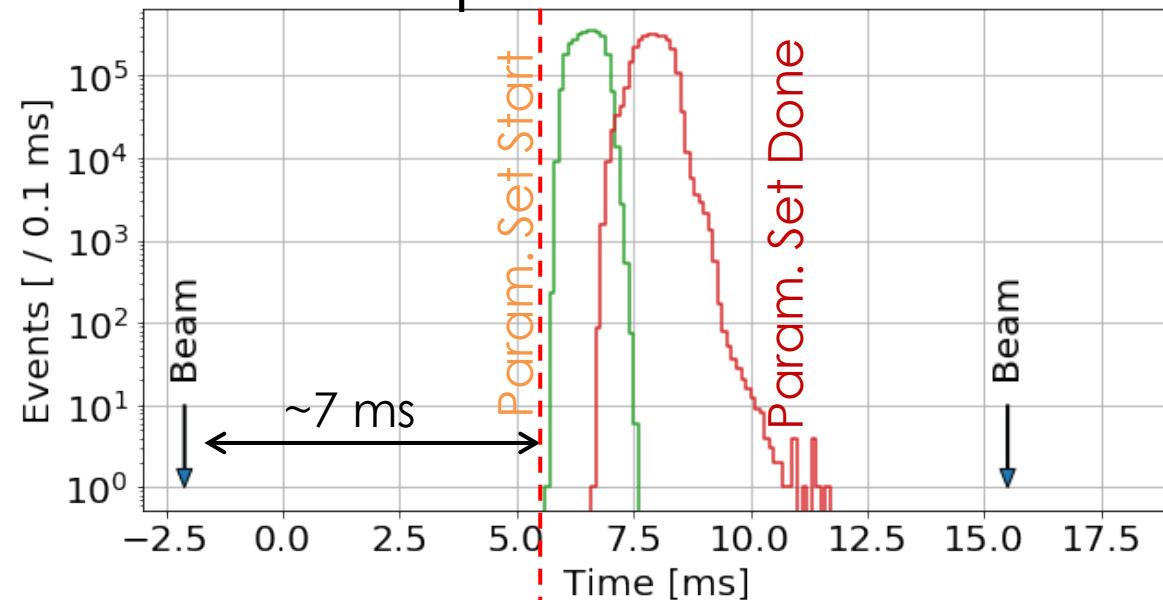
Slave VME



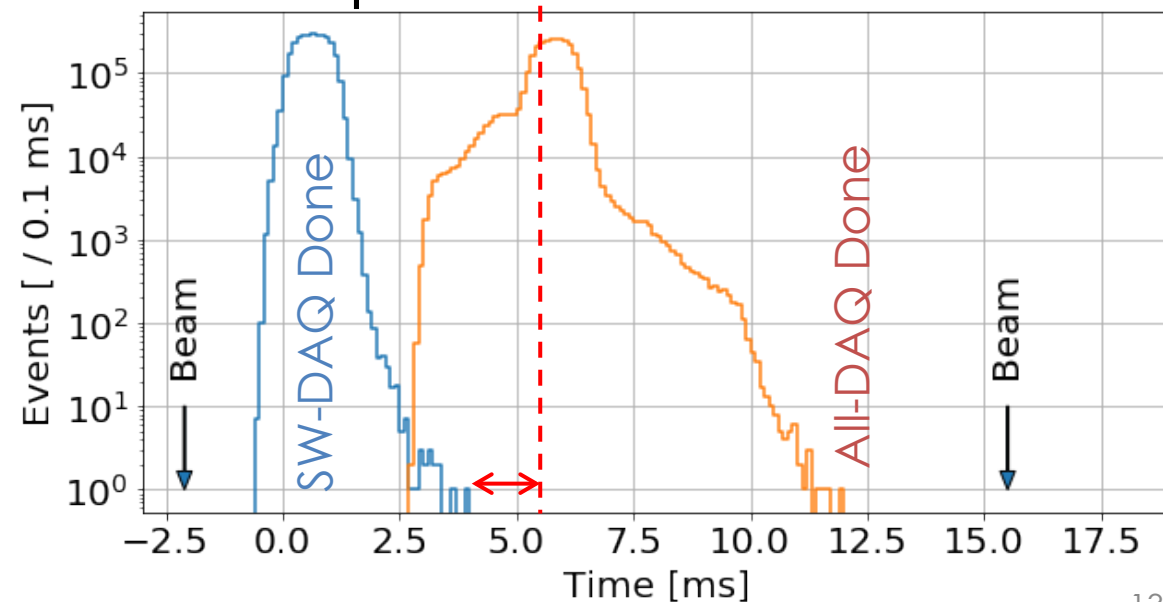
テストベンチでの試験

- セットアップ:
マスタユニット+スレーブユニット1台
- 繰り返し: 60 Hz
- ルートパターンの種類はいろいろ。
- 数日間連続して試験。
- EMA-SW プロセスの動作
 - 前のビームの 7 ms 後に次のビームの値を設定。
 - 値の設定は次のビームが来る前に完了している。
- DAQ プロセスの動作
 - 前のビームの直後にパラメータ切り替えに関するデータを優先的に収集 (SW-DAQ)。
 - 読み出しが EMA-SW による値の書き込みの後になると次のビームのデータを誤って収集してしまう。
 - 全データの収集は次のビームが来るまでに完了。
- すべての動作が間に合っていることを確認。
 - 誤動作確率 $< 1 \times 10^{-7}$ /shot /unit

EMA-SW process

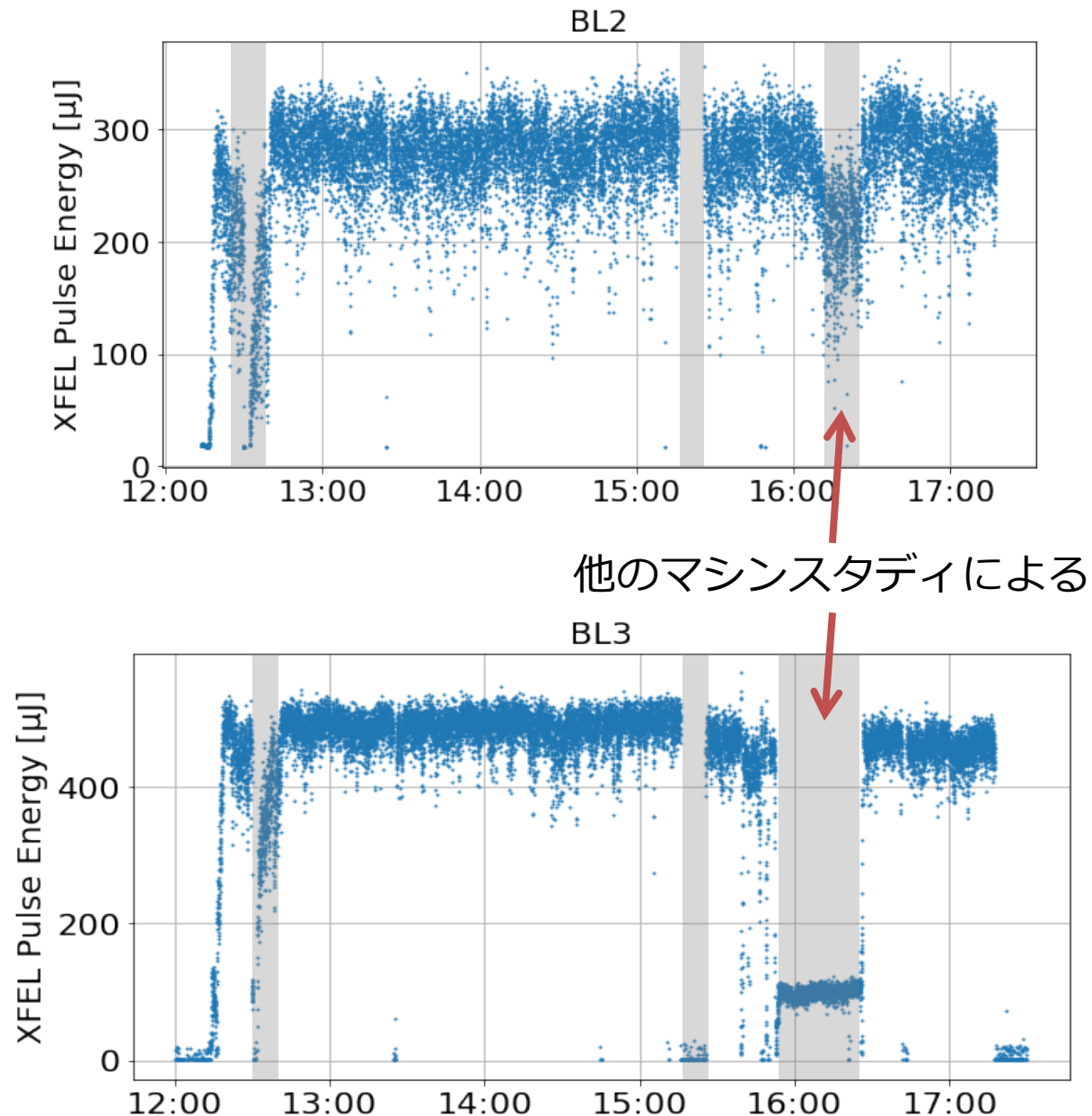


DAQ process



SACLA でのオンデマンド切り替えシステムの試験

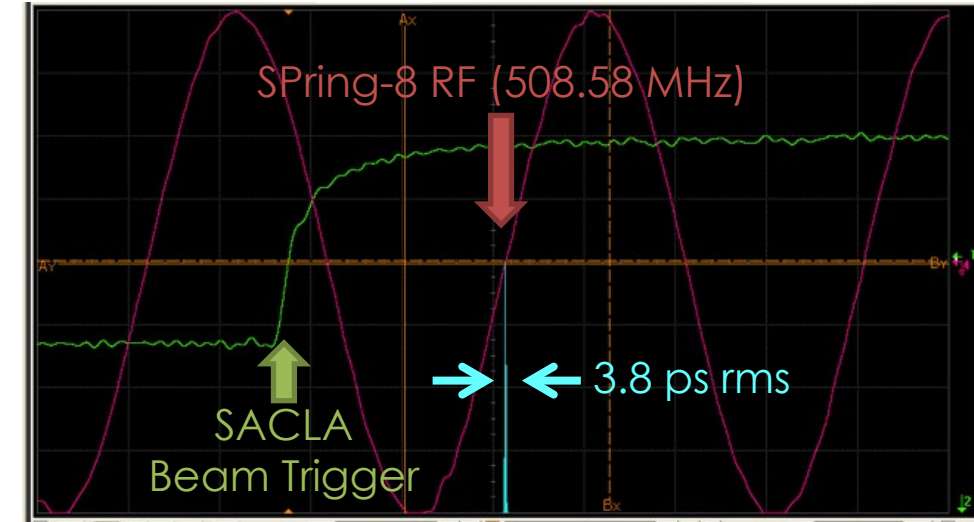
- リフレクティブメモリを40ユニットに実装してルート情報を配信。
 - 全ユニットの約半数。
- オンデマンド切り替えシステムでビームルート・パラメータを制御した。
- 繰り返し 60 Hz
 - BL2: 30 Hz, BL3: 30 Hz
- 試験時間: 約 5 時間
- 安定に XFEL が生成できていた。
 - 均等振り分けシステムのとおり同じ精度で制御できた。
- 誤動作したショットはなかった。
- 誤動作確率 $< 2.5 \times 10^{-8}$ /shot /unit
 - サイクロトロン自爆頻度などの他の要因より十分小さい。
- オンデマンド切り替えシステムは大きなセットアップに展開しても適切に動作した。



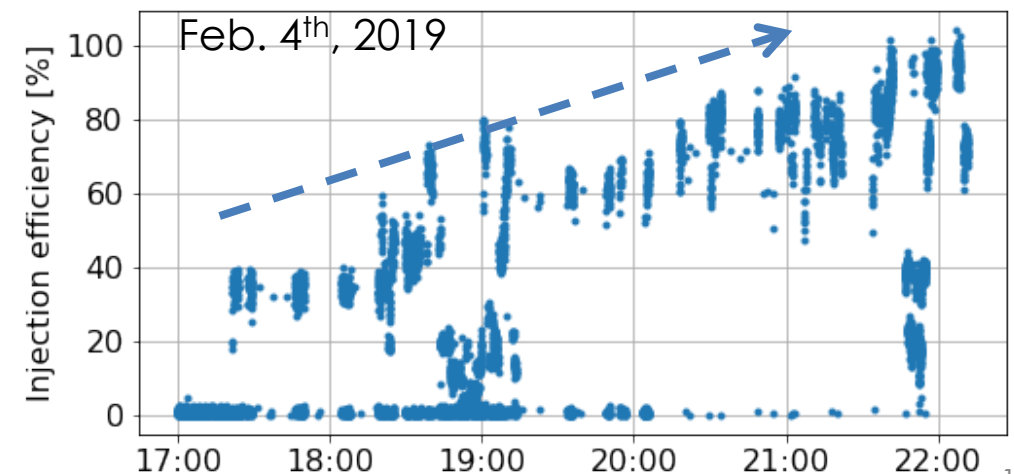
SACLA から SPring-8 SR への入射

- SACLA を SPring-8 に同期させるシステムを開発。
 - 数 ps の同期精度。
 - 大島 ほか、"SACLAとSPring-8蓄積リングの高周波基準信号の同期システム", THOI04, this conference.
- SACLA から SPring-8 に入射するマシンスタディを 2018 年 10 月に開始。
 - おおむね 1シフト/月
- 2019 年 2 月に 90% 以上の入射効率を達成。
 - 入射効率測定の精度を考えると事実上ほぼ100%。
- SACLAからのビームはブースタシンクロトロンからのビームに比べて十分小さい。

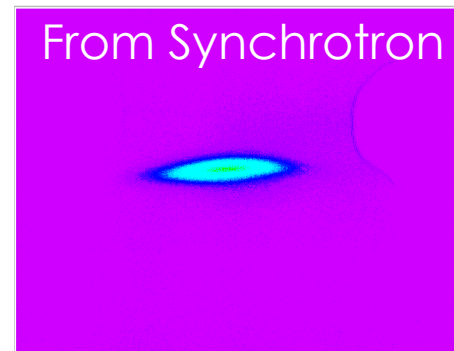
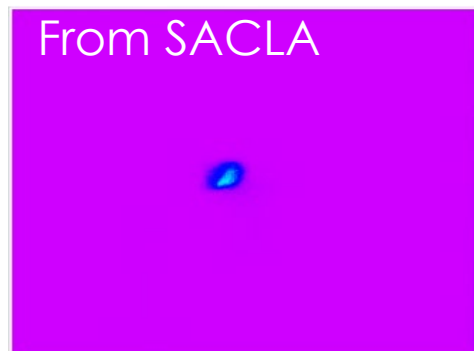
同期性能



入射効率



ビームプロファイルの比較



SPring-8 入射でのオンデマンド切り替えの試験

- 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と SR 同期システムを同時に動作させ、不定期な入射要求に応じて SR に入射できるかどうか確認した。
 - ビーム繰り返し: SR 入射 1 Hz + XFEL-BL3 1 Hz
 - 各加速ユニットの繰り返しは 60 Hz
 - パラメータ切り替えも 60 Hz で動作させた。
- 入射効率: 90% 以上を達成。(測定精度を考えると事実上ほぼ 100%)
- フィリングパターンを設定しての入射 → 成功
- トップアップ入射を模擬した単発の入射 → 成功
- バンチ純度を測定した結果、前後のバケットの電子数は入射されたバケットの電子数の 10^{-8} 程度と十分小さかった。
 - SR 同期システムのジッタは十分小さい。
 - SACLA の暗電流の影響も十分小さい。
- オンデマンド切り替えシステム と SR 同期システムの協調動作を確認。

まとめと展望

- SACLA の 利用機会の増大、多様なビームライン振り分け、SPring-8への入射に向けて、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を開発した。
- 均等振り分けシステムにより、XFEL のマルチビーム運転を実現した。
 - 異なる XFEL 光子エネルギーで複数のビームラインを同時に最適化。
- 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。
 - 繰り返し 60 Hz でショットごとに機器を制御。
 - リフレクティブメモリネットワークによるルート情報配信。
 - ソフトウェアベースのショットごとモジュール制御。
- SACLA でのオンデマンド切り替えシステムの試験。
 - 均等振り分けシステムと同じ XFEL 性能で振り分けることができた。
 - 誤動作確率: 2.5×10^{-8} /shot /unit 以下
- SR 入射の試験。
 - リング入射単独運転の条件で 2018 年 10 月より試験開始。
 - 2019 年 2 月に 90% 以上の入射効率 (事実上ほぼ 100%) を達成。
- オンデマンド切り替えシステムによる SR 入射の試験。
 - 所望のフィリングパターンでの入射 と 不定期的な入射要求による単発入射 の両方に成功した。
 - バンチ純度は 10^{-8} 程度と十分小さい。
 - オンデマンド切り替えシステム と SR 同期システムが同時に適切に動作した。
- 9月以降の SACLA の運転はオンデマンド切り替えシステムを常時使用する予定。
- SACLA からの入射による SPring-8 のユーザ運転を 2020 年 初めに予定。