

SACLAにおける マルチビームライン試験運転の現状

原 徹、稲垣 隆宏、田尻 泰之、渡川 和晃、金城 良太、
武部 英樹、近藤 力、大竹 雄次、田中 均

RIKEN SPring-8 Center

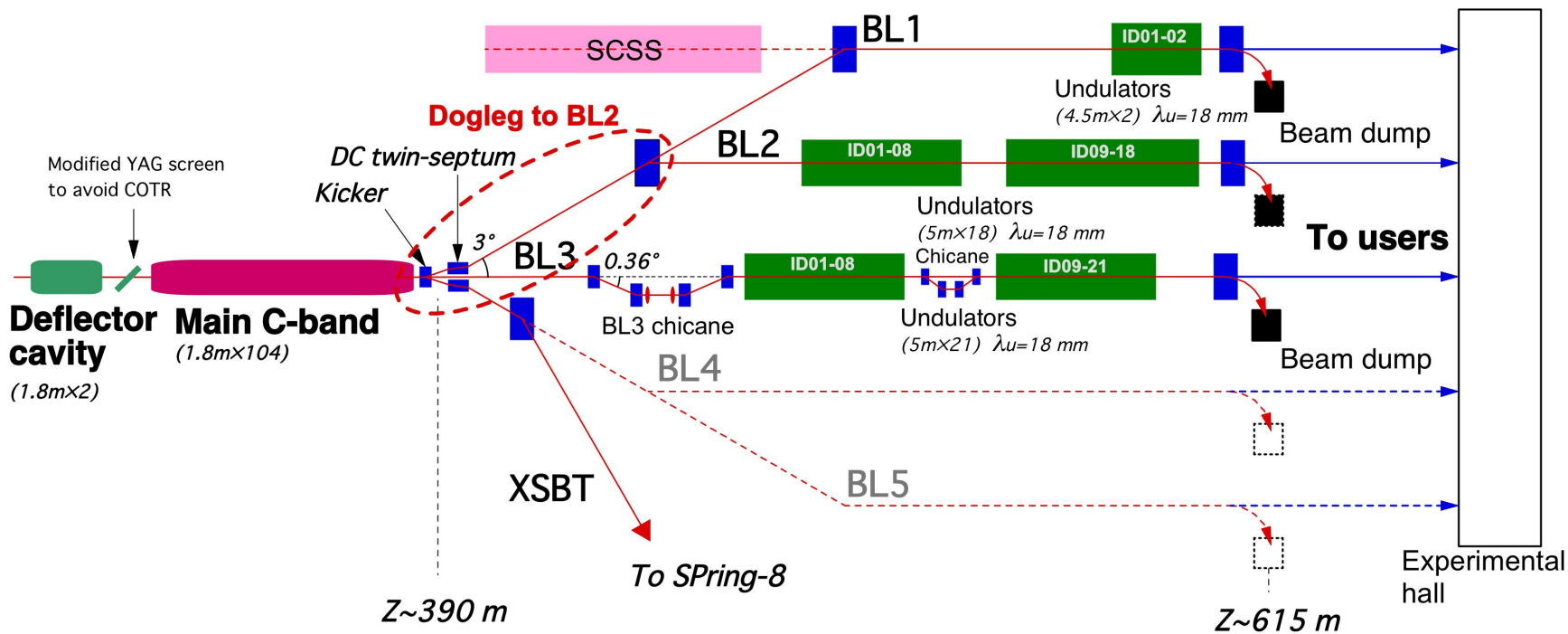
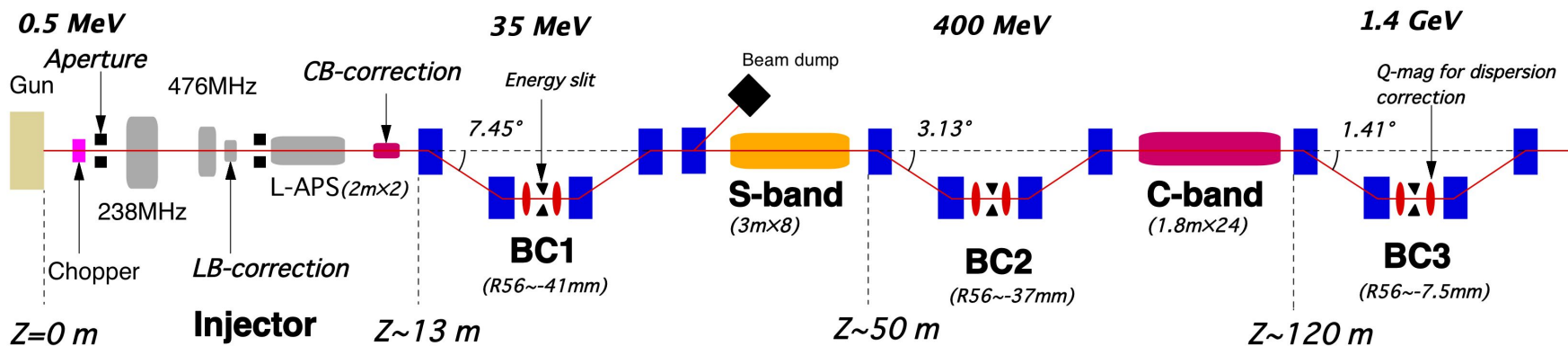
深見 健司

JASRI

XFEL施設のマルチビームライン運転

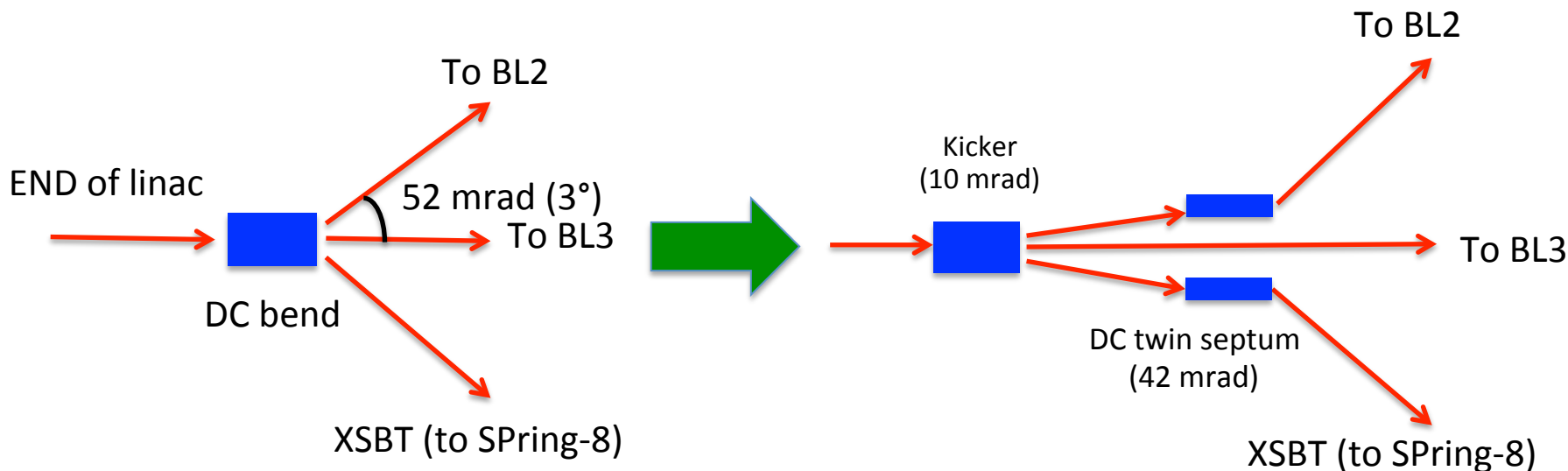
- マルチユーザー施設である蓄積リングベースの放射光施設に対し、線型加速器ベースのXFELはシングルユーザー施設。
- 実験装置入れ替え時間などのデッドタイムをなくし、電子バンチ振り分けによる複数BLの同時運転(マルチビームライン運転)は、施設利用効率向上の面から非常に重要。
- 波長可変性はXFELの特長のひとつであるが、マルチビームライン運転において広い範囲で波長可変性を得るには、各ビームラインの利用実験のレーザー波長に合わせてビームエネルギーを電子バンチ毎に変えることが必要(マルチエネルギー運転)。

SACLA facility



SACLAの電子バンチ振り分けシステム

- SACLAでは2014年9月に2本目のアンジュレータビームラインBL2を設置、2015年1月にDC偏向電磁石をキッカー+DCツインセプタム電磁石に置き換え、最大60 Hz(現状30 Hz)で電子バンチを各BLへ振り分けるマルチビームライン運転の試験を開始。
- 電子ビーム軌道安定性を確保するため、キッカーの偏向角はなるべく小さく抑えている。



キッカー電磁石および電源の開発

- キッカー電磁石用電源は非共鳴型のパルス電源



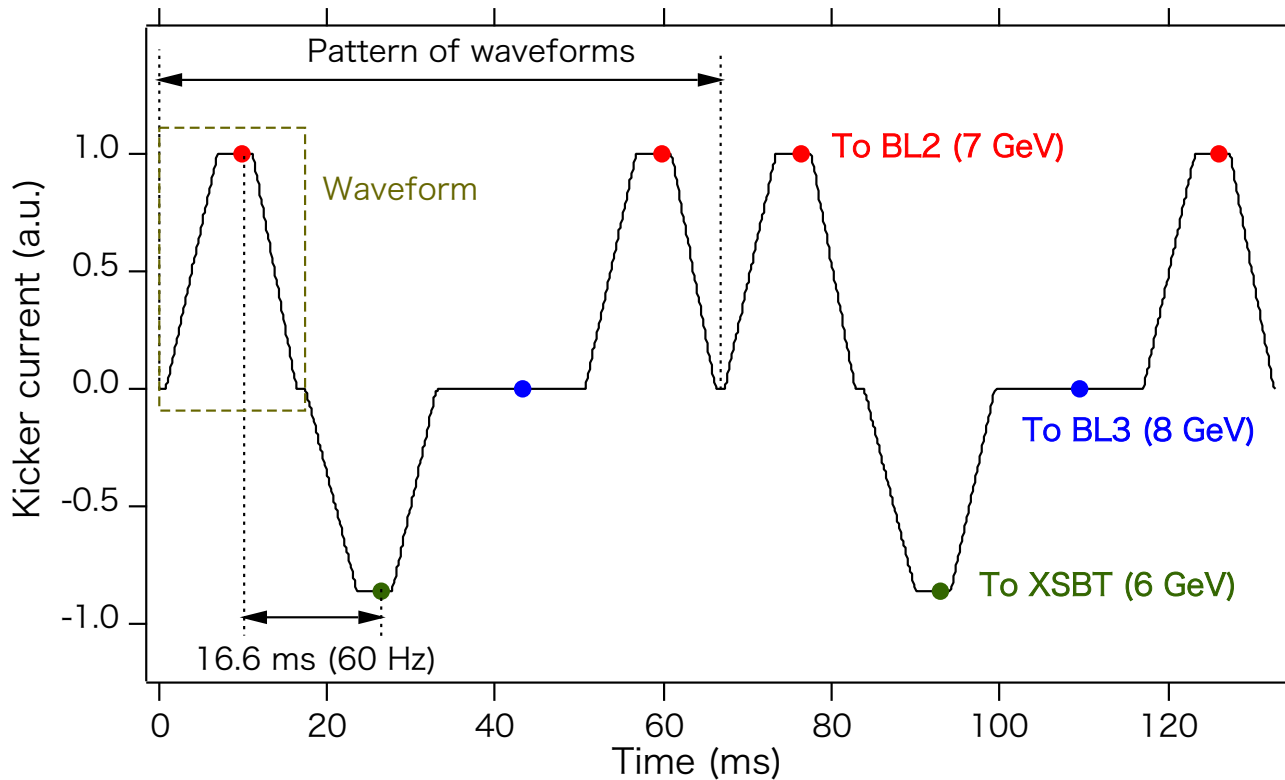
0.35 mm silicon steel

パルス間の目標安定性
10 ppm (p-p)



PWM (Pulse Width Modulation) type,
320 A-150 V,
60 Hz trapezoidal waveform,
FET 8-unit in parallel,
made by Nichicon Kusatsu.

台形波電流駆動による 電子バンチ振り分けパターンの一例



- 最大4つのウェーブフォームを自由に組み合わせて電子バンチ振り分けのパターンを作成可能。
- 各ウェーブフォームの極性および振幅は、振り分けの方向やビームエネルギーに合わせて設定可能。
- 電子バンチのタイミングは、電流が十分静定された台形波フラットトップの最後に合わせる。

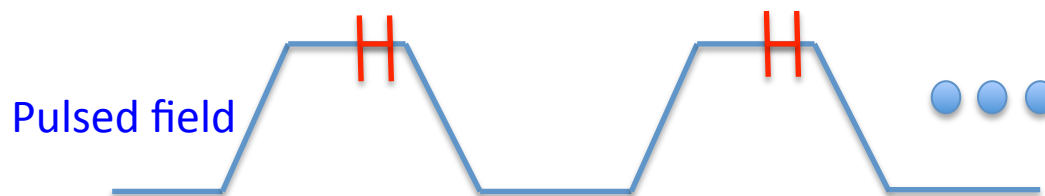
ゲート型NMRを用いたパルス磁場測定



- キッカーのパルス間磁場安定性の目標は 10 ppm (p-p) で、 $0.1\mu\text{rad}$ に相当。
- DCCTによるパルス電流測定では 30 ppm 以下の精度を得るのが難しい。
- ゲート型NMRを用いてパルス磁場を直接測定。
- ゲート型NMRは、0.6 ms のゲートopen時に共鳴周波数をスキャン、分解能 2 ppm。

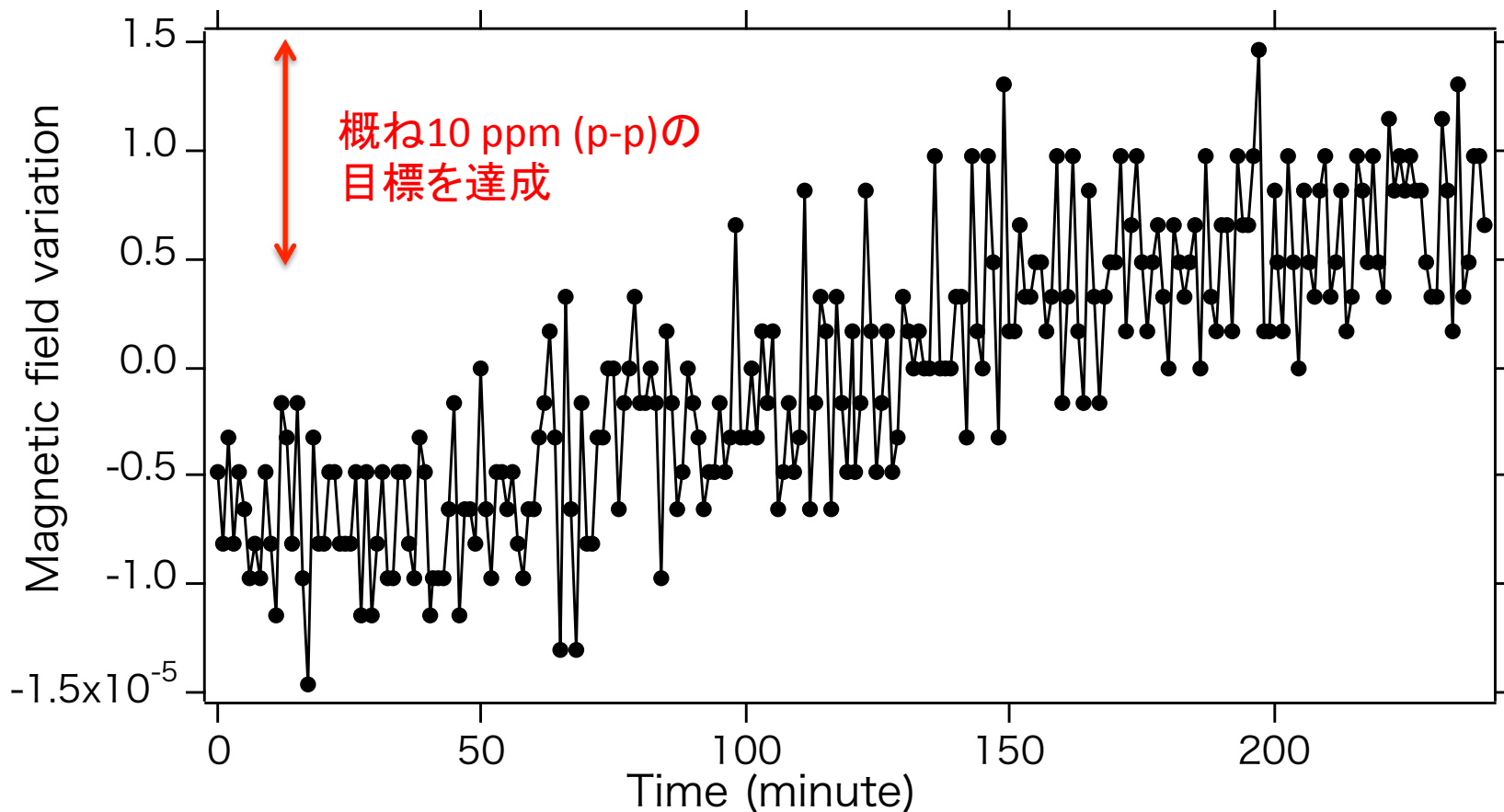


Gate opens for 0.6 ms



Developed by Echo Denshi.

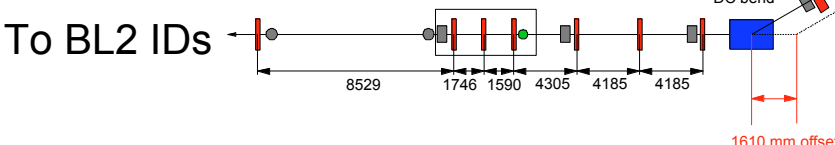
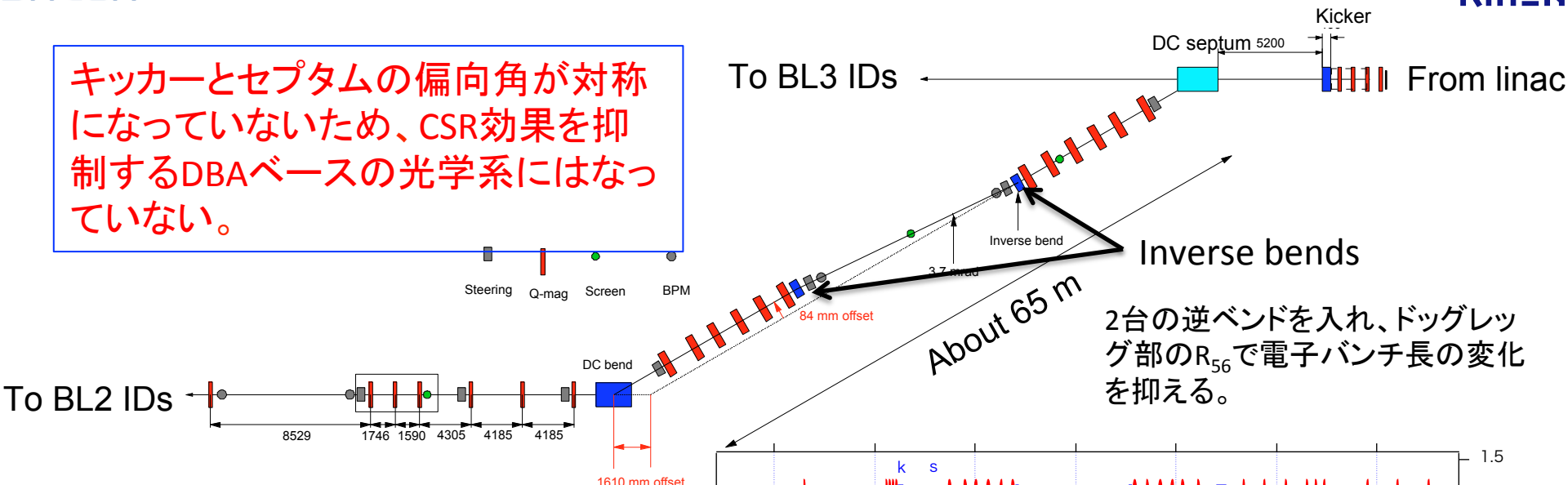
キッカー電磁石のパルス磁場安定性



- サンプル間隔は1分毎。
- スタート時やパラメータ変更時に顕著に現れるゆっくりしたドリフトはビーム軌道FBで補正可能。

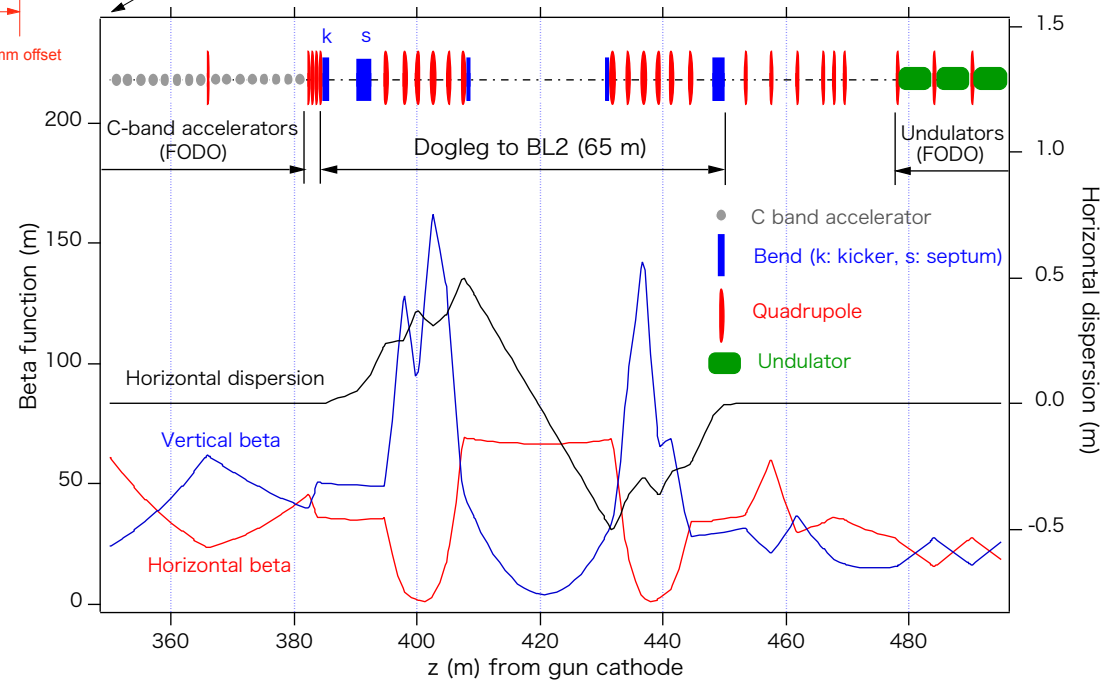
BL2ドッグレッグ部

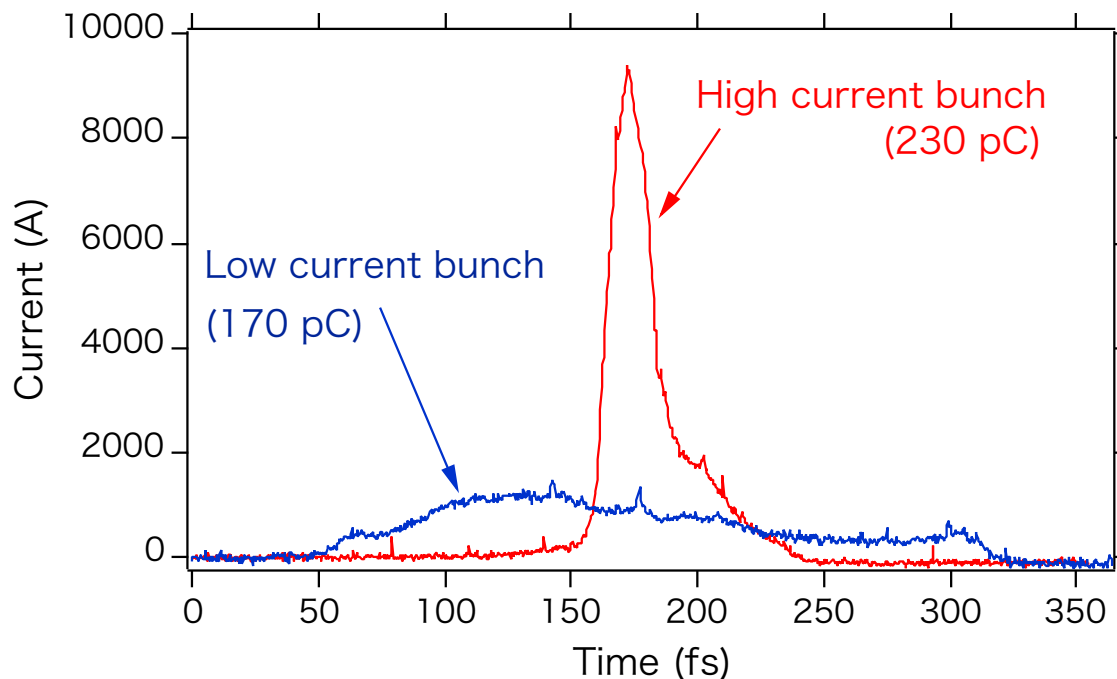
キッカーとセプタムの偏向角が対称になっていないため、CSR効果を抑制するDBAベースの光学系にはなっていない。



2台の逆ベンドを入れ、ドッグレッグ部の R_{56} で電子バンチ長の変化を抑える。

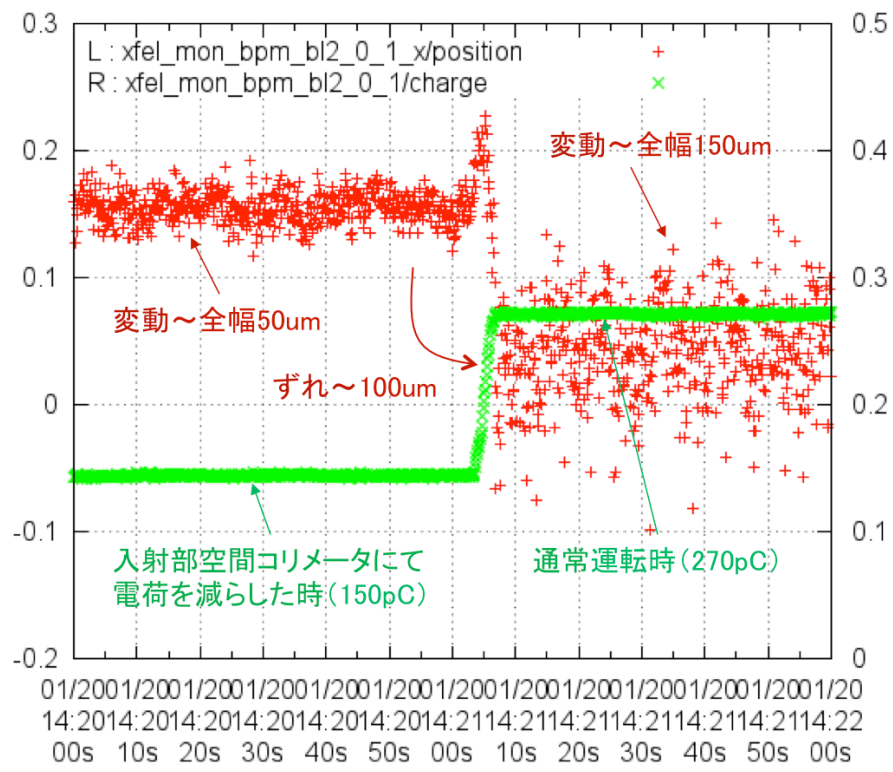
R_{56} of dogleg:
 DC switching magnet 1.6 mm,
 kicker + septum without correction 4.0 mm,
 kicker + septum with correction 0.07 ± 0.4 mm.





- RF deflectorで測定した電子バンチ時間分布(ビームサイズ込み)。
- BL3通常シングルビームライン運転で使用している高ピーク電流の電子バンチは、設計ピーク電流の3倍以上。
- 低ピーク電流時間分布は、dogleg部のCSR効果を抑えるために電子バンチを伸ばした時のもの。

Dogleg部におけるCSR効果



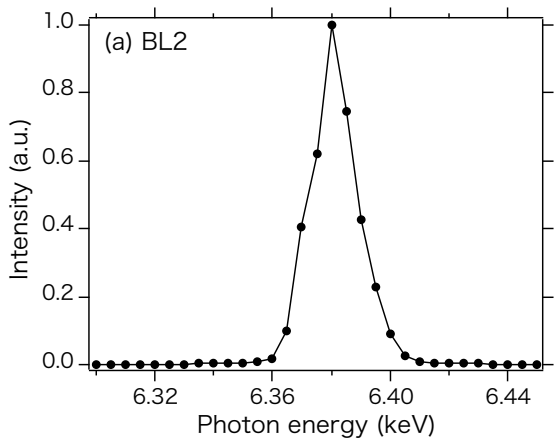
	水平方向 (pm-rad)	垂直方向 (pm-rad)
BL2 高ピーク 電流 (10 kA)	16.3	0.74
BL2 低ピーク 電流 (1 kA)	2.7	0.64
BL3 高ピーク 電流 (10 kA)	1.4	0.27
BL3 低ピーク 電流 (1 kA)	0.83	0.24

Dogleg通過後の水平ビーム位置 (赤)とバンチ電荷 (緑)

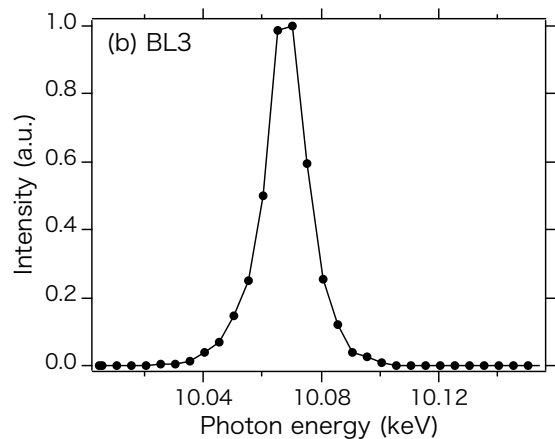
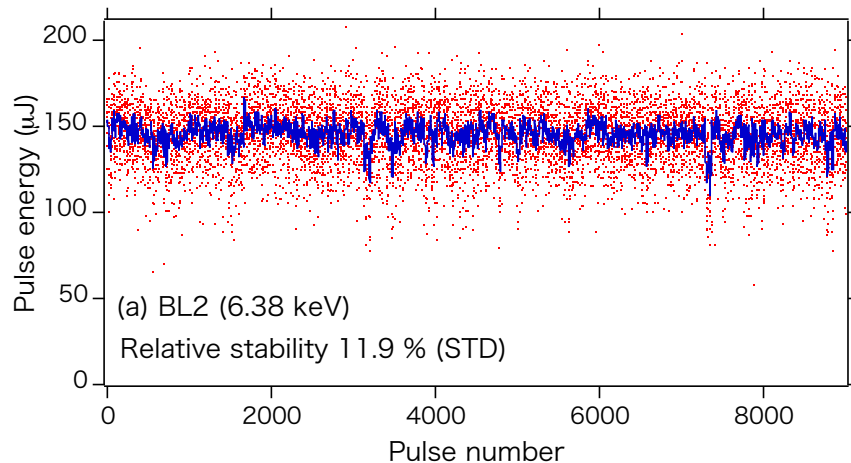
7.8 GeV、規格化エミッタンス0.5 $\mu\text{m-rad}$ の電子ビームエミッタンスは33 pm-rad。

- 高ピーク電流時には、dogleg通過後の水平方向軌道変動が激しく、スクリーン上のプロファイルが水平方向に広がっている。
- レーザー発振はするものの、パルス出力は30 μJ 程度、出力変動が非常に大きい。

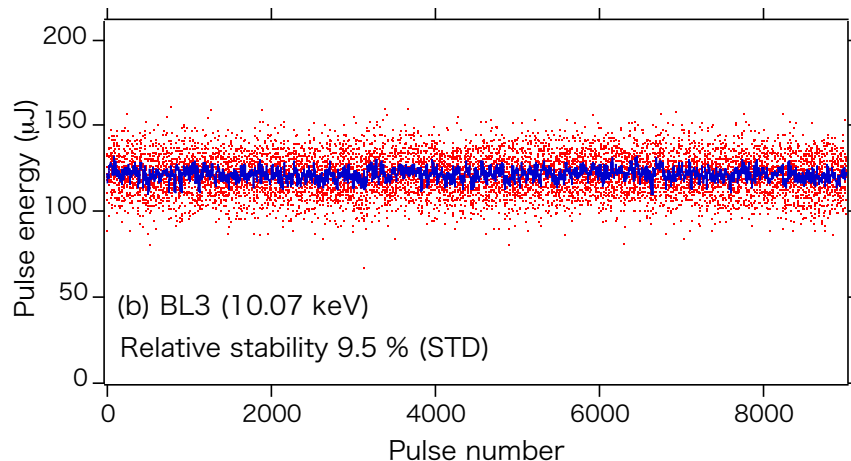
電子ビームエネルギー7.8 GeV、ピーク電流1.2 kA、繰り返し30 Hz



BL2
 7.8 GeV
 6.38 keV
 15 Hz
 K=2.85

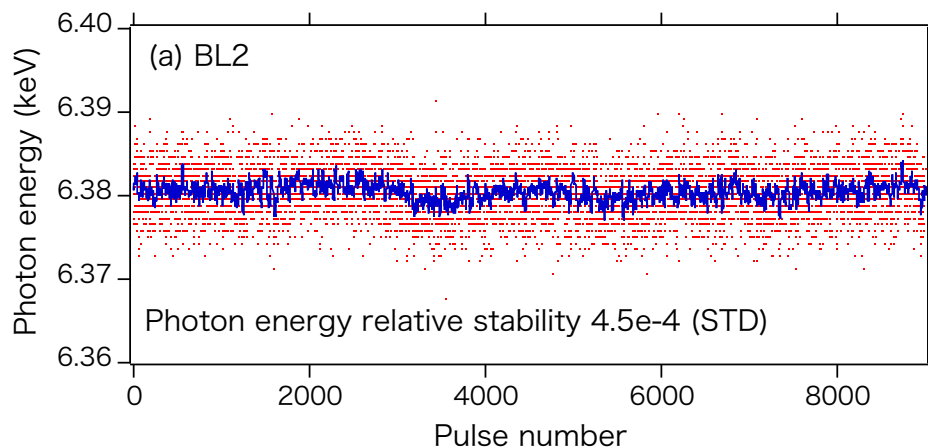


BL3
 7.8 GeV
 10.07 keV
 15 Hz
 K=2.1



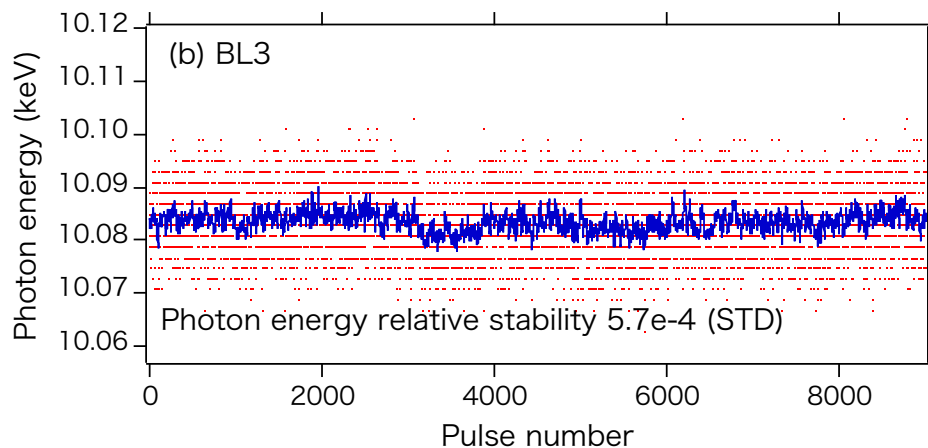
電子ビームエネルギー7.8 GeV、ピーク電流1.2 kA、繰り返し30 Hz

BL2
 7.8 GeV
 6.38 keV
 15 Hz
 K=2.85



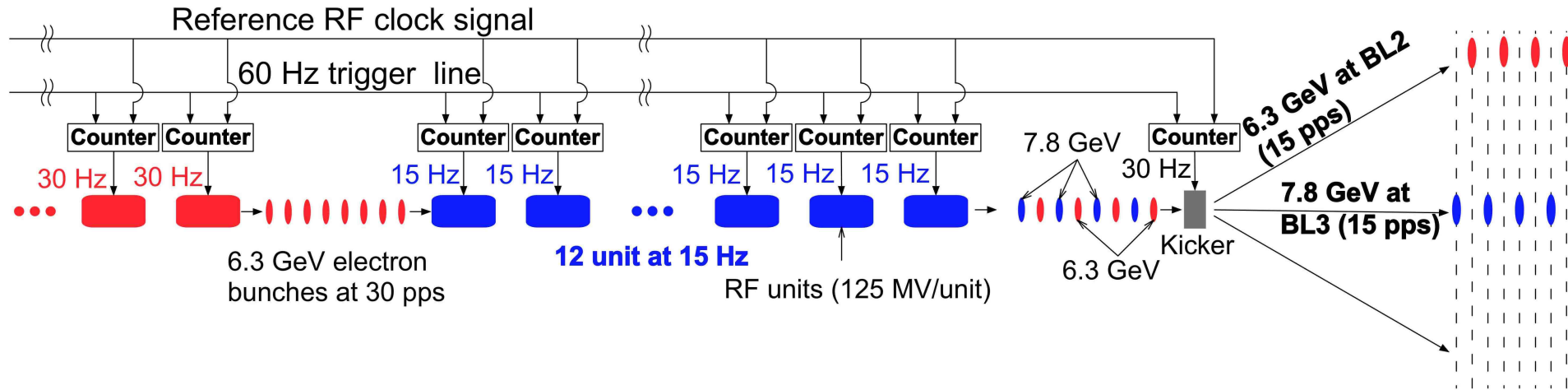
横軸フルスケール
 は10分

BL3
 7.8 GeV
 10.07 keV
 15 Hz
 K=2.1



中心波長(ビームエネルギー)の安定性は 5×10^{-4} (2.5×10^{-4})、通常運転時と同じ

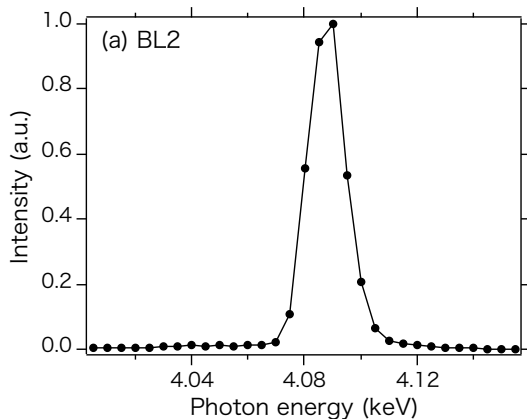
マルチビームライン運転における マルチビームエネルギー運転



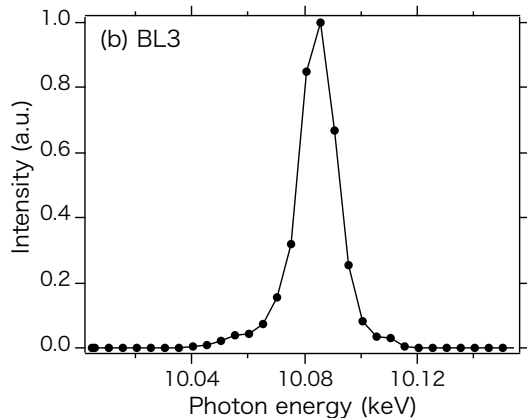
- BC3下流のCバンドクライストロン52台中、12台のクライストロン（加速管24本）を15 Hzで運転。
- 30 Hz電子バンチのうち、半数はこれらの加速管では加速されず最終エネルギーを6.3 GeVに下げることができる。
- キッカー電磁石の電子バンチ振り分けと組み合わせ、BL2へは低いビームエネルギーをもつ電子バンチを振り分けることで、マルチビームライン運転においても、広い波長可変性を確保。

マルチビームライン運転

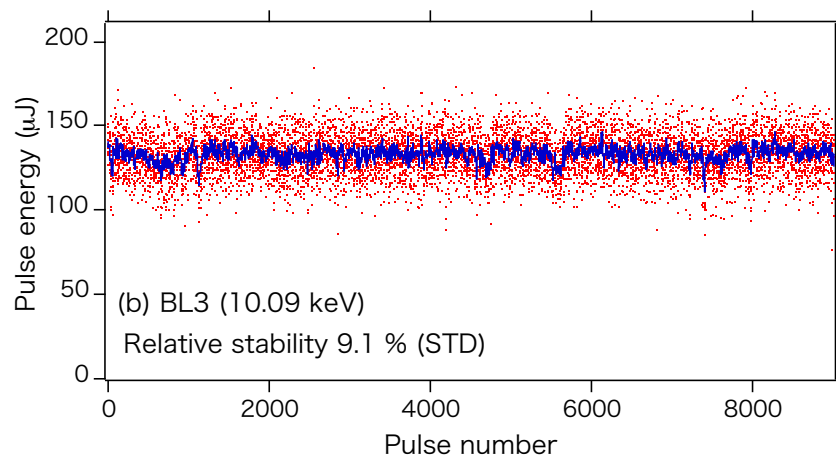
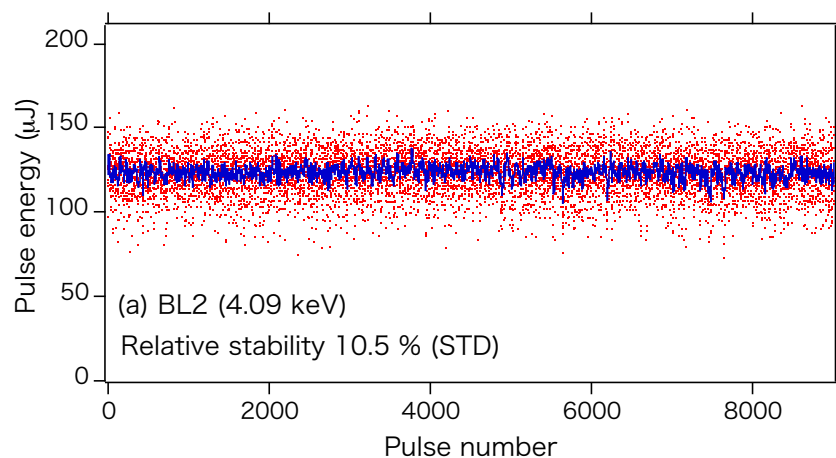
マルチエネルギー運転、ピーク電流1.2 kA、繰り返し30 Hz



BL2
 6.3 GeV
 4.09 keV
 15 Hz
 K=2.85



BL3
 7.8 GeV
 10.09 keV
 15 Hz
 K=2.1

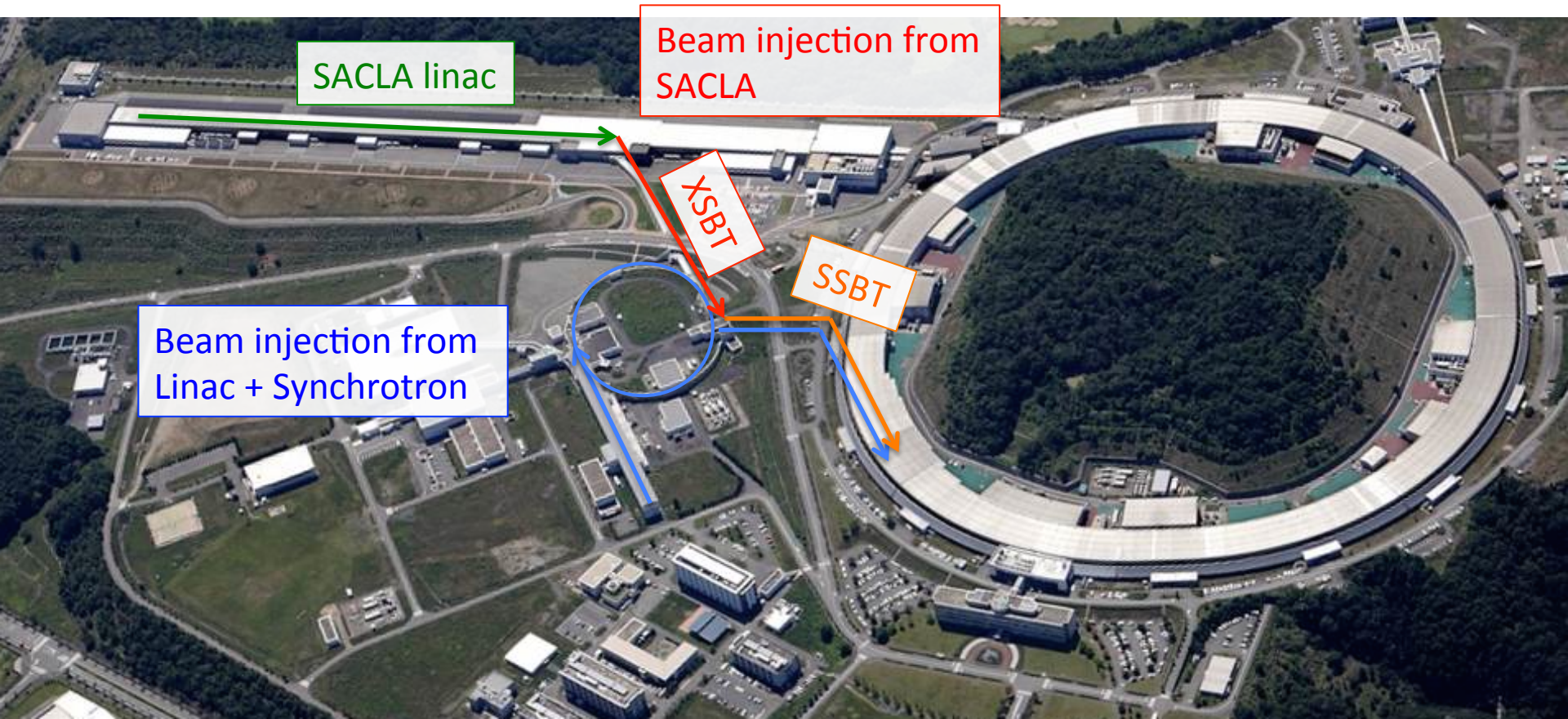


2本のBL間の波長差2倍以上

BC3下流のCBクライストロン52台中12台を15Hzで運転

SPring-8-IIへのビーム入射に向けて

- SACLAからXBSTを通し、シンクロ出口までのビーム試験は終了。
- ビームエネルギーだけでなくバンチ長の制御が必要。
- トップアップ運転には任意のタイミングで入射。



まとめ

- キッカー電磁石を用いた、2本のビームライン間のマルチビームライン運転をXFEL施設で初めて行った。
- 高ピーク電流(10 kA)の電子バンチをBL2ビーム輸送路に通すと、現状dogleg部のCSRの影響が顕著に現れる。Dogleg部のビーム光学系の再配置を現在検討中。
- CSR効果を抑えるため、ピーク電流を1 kAに下げて運転。レーザーパルス出力は100-150 μ Jと通常運転時の1/3程度だが、安定なレーザー発振を達成。
- 電子バンチのビームエネルギーをビームライン毎に変えることで、マルチビームライン運転において2倍以上の波長可変範囲を得ることに成功。