

第14回日本加速器学会年会, 札幌, 2017年8月1日

# SACLA軟X線自由電子レーザー ビームラインのビーム特性

渡川 和晃

理化学研究所 放射光科学総合研究センター

# スタッフメンバー

安積隆夫, 原徹, 長谷川照晃, 細田直康, 稲垣隆宏, 金城良太,  
近藤力, 前坂比呂和, 松井佐久夫, 大島隆, 大竹雄次,  
大和田成起, 田中隆次, 渡川和晃, 矢橋牧名, 田中均, 石川哲也  
[RIKEN SPring-8 Center](#)

安積則義, 備前輝彦, 木村洋昭, 松原伸一, 中嶋享, 櫻井辰幸,  
富樫格, 登野健介

[Japan Synchrotron Radiation Research Institute](#)

田尻泰之, 田中信一郎  
[SPring-8 Service Co., Ltd.](#)

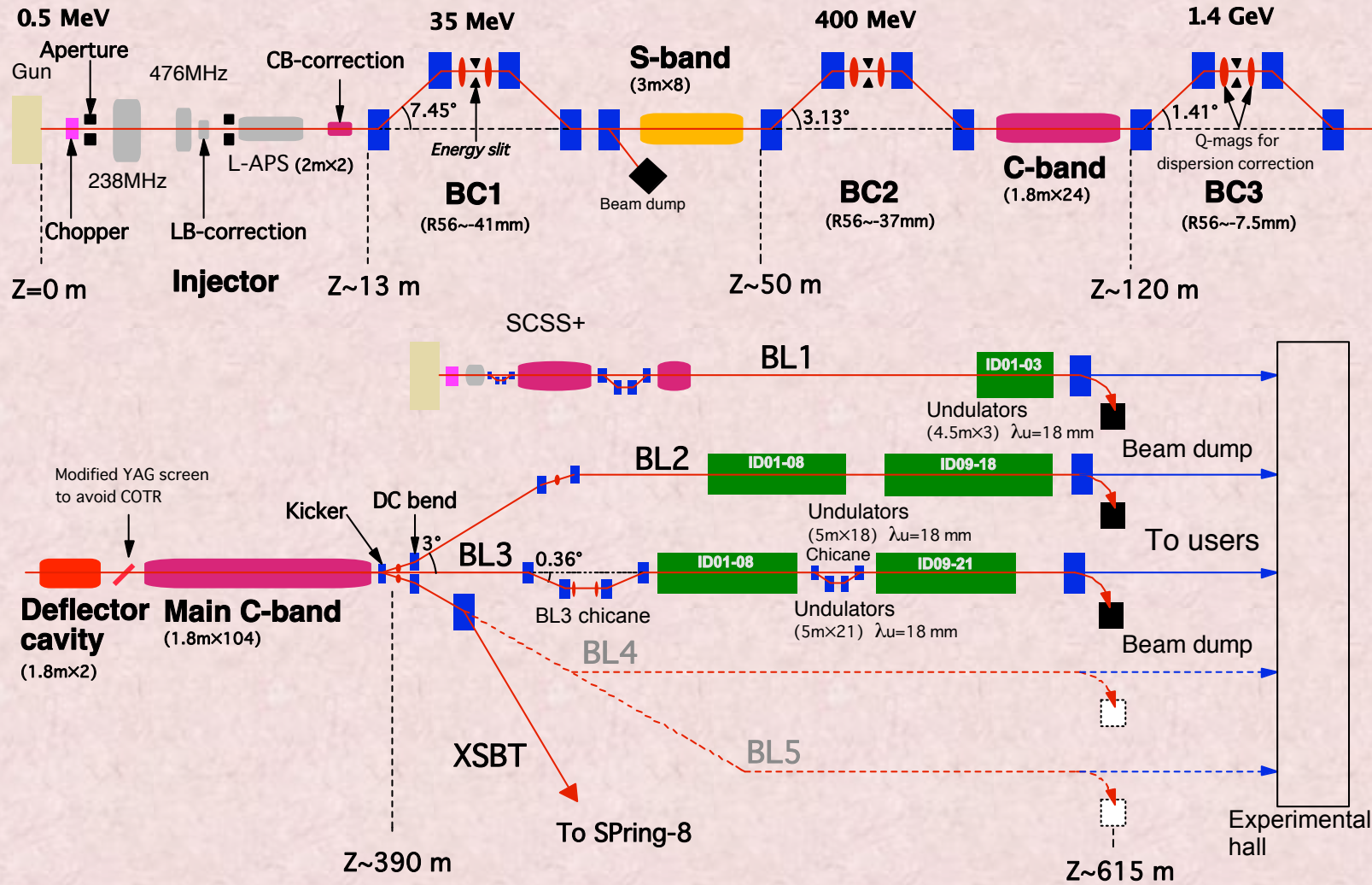
# X線自由電子レーザー施設 SACLA



# SACLAの特徴

- 原子分子光学物理、生命科学、固体物理、化学、材料科学、基礎物理など、様々な分野の実験のために大強度の超短パルスX線レーザーを提供する。
- 軟X線から硬X線までの幅広い波長帯域をカバーする。
- 電子ビームをshot-by-shotで振り分けて、複数のビームラインを同時に稼働する。
- 近い将来に、SPring-8放射光リングの入射用リニアックとして稼働する。

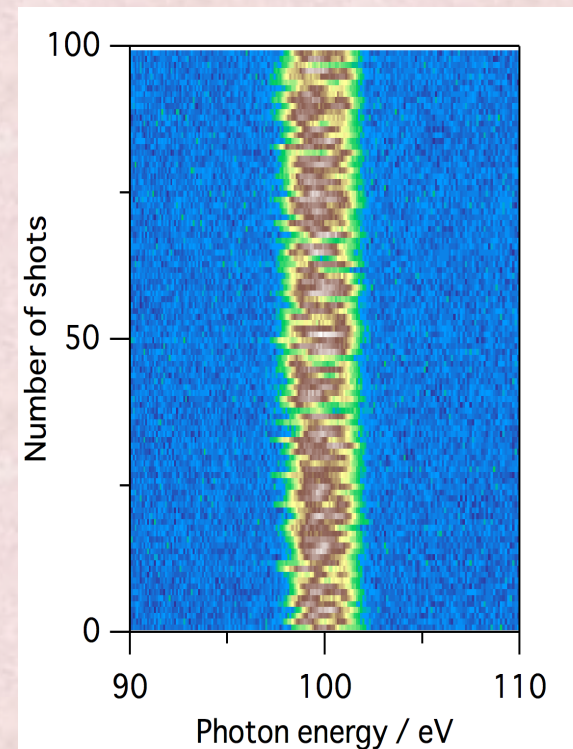
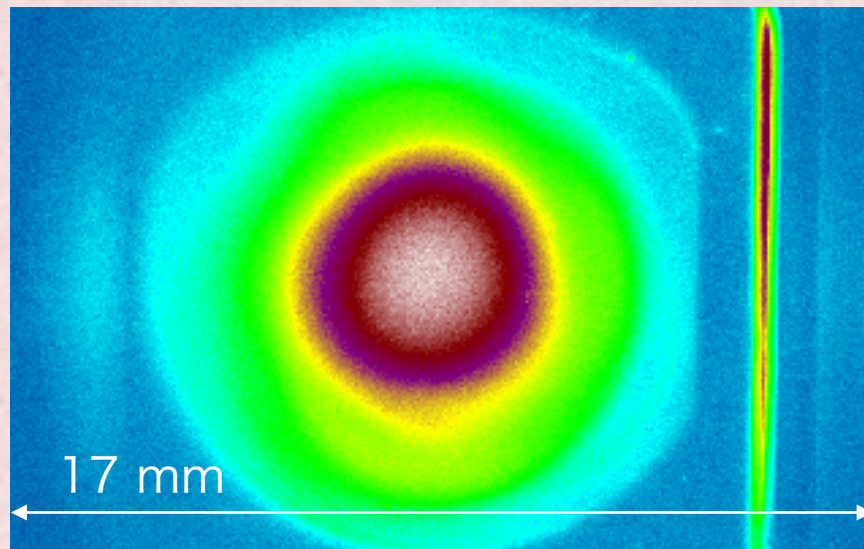
# SACLA加速器のレイアウト



# SACLA軟X線ビームライン(BL1)の歴史

- 2012: SACLAユーザー運転開始  
BL1は軟X線自発光ビームラインとしてスタート
- 2013: SCSS試験加速器 (250 MeV) 運転終了
- 2014: SCSS試験加速器をSACLAアンジュレータ  
ホールに移設 (500 MeVに増強)  
BL1を軟X線FELビームラインにアップグレード
- 2015: First SASE lasing ( $\lambda=34$  nm)
- 2016: 電子ビームエネルギーを800 MeVに増強  
SASEの飽和を達成 ( $\lambda=12$  nm)  
ユーザー利用運転の開始 ( $\lambda=8-60$  nm)

# BL1における軟X線FELビーム



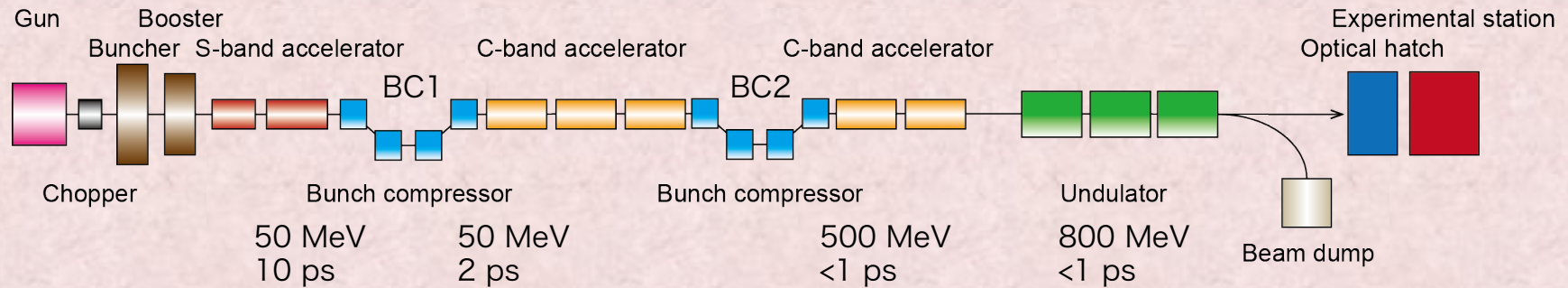
- FEL発振波長: 12 nm (100 eV)
- アンジュレータより50 m下流のCe:YAG screenで測定
- 軸対称Gaussianの空間分布
- 安定な中心スペクトル

# BL1におけるユーザー利用実験 (2016)

- ラッシュバ型スピン軌道相互作用誘起の界面垂直磁気異方性を持つ磁性超薄膜の超高速消磁・緩和現象と軟X線領域における第二高調波発生に関する非線形光学効果の研究 (松田G、東京大、50 eV)
- 超高速光電子回折法による分子光化学反応の研究 (柳下G、KEK、21 eV、33 eV)
- 超短パルス高輝度コヒーレント軟X線レーザーによる超微細加工に向けたアブレーション現象の解明 (QST、錦野G、92 eV)
- 強レーザーパルスによる原子の極紫外域非線形過程の操作 (彦坂G、富山大、41 eV)
- 極紫外自由電子レーザー光による短波長超蛍光の観測 (繁政G、自然科学研究機構、23 eV、24 eV)
- SXFELビームを用いた時間分解光電子分光のための基礎研究 ~ 高速光電子観察による強光子場誘起空間電荷効果の可視化 ~ (大浦G、理研、100 eV、85 eV)
- 時間分解クーロン爆発イメージングによる光化学反応に伴う分子構造変化の実時間観測 (福澤G、東北大、93 eV)
- ラッシュバ型スピン軌道相互作用誘起の界面垂直磁気異方性を持つ磁性超薄膜の超高速消磁・緩和現象と軟X線領域における第二高調波、和周波発生に関する非線形光学効果の研究 (松田G、東京大)



# SACLA-BL1 加速器



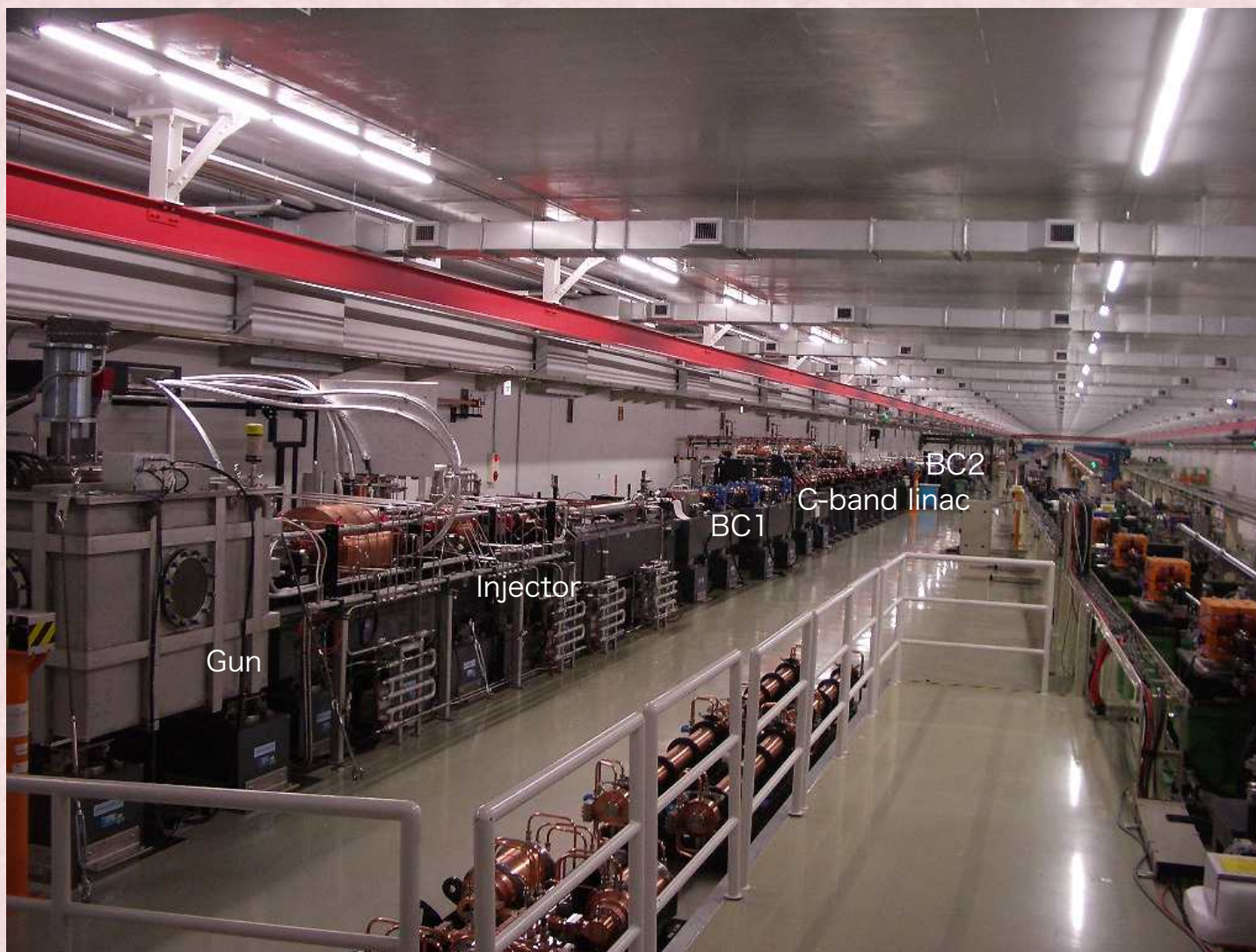
## Electron beam

Beam energy	300-800 MeV
Bunch charge	0.2-0.3 nC
Peak current	300 A (simulation)
Bunch width	<1 ps
Energy spread (projected)	0.6% (fwhm)
Normalized emittance (projected)	3 mm mrad
Repetition rate	60 Hz

## Undulator

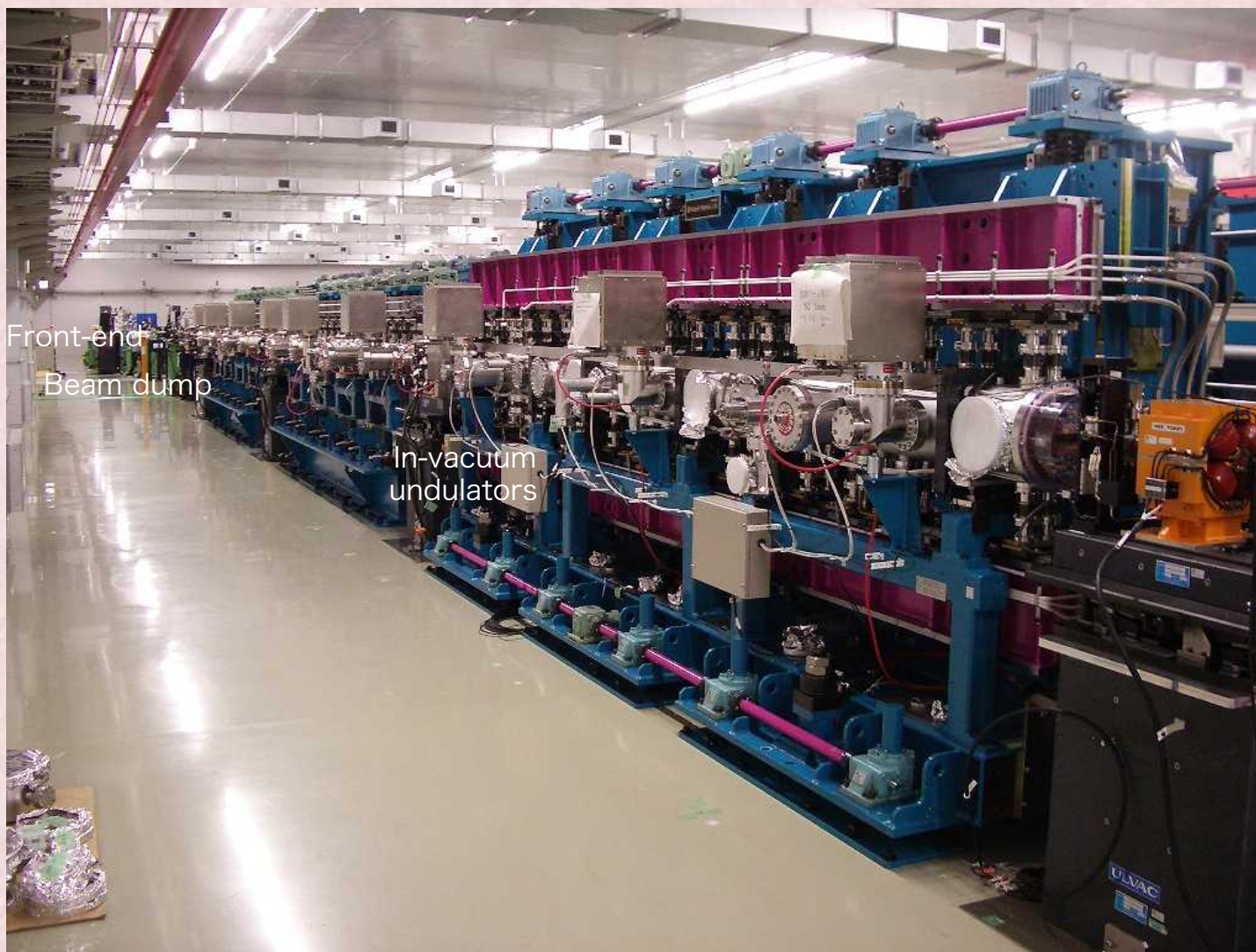
Periodic length	18 mm
Number of undulator modules	3
Total number of period	777
Maximum K-value	2.1
Minimum gap	3.8 mm
FEL wavelength	8 - 60 nm
FEL pulse energy	several-100 $\mu$ J

# SACLA-BL1 加速器



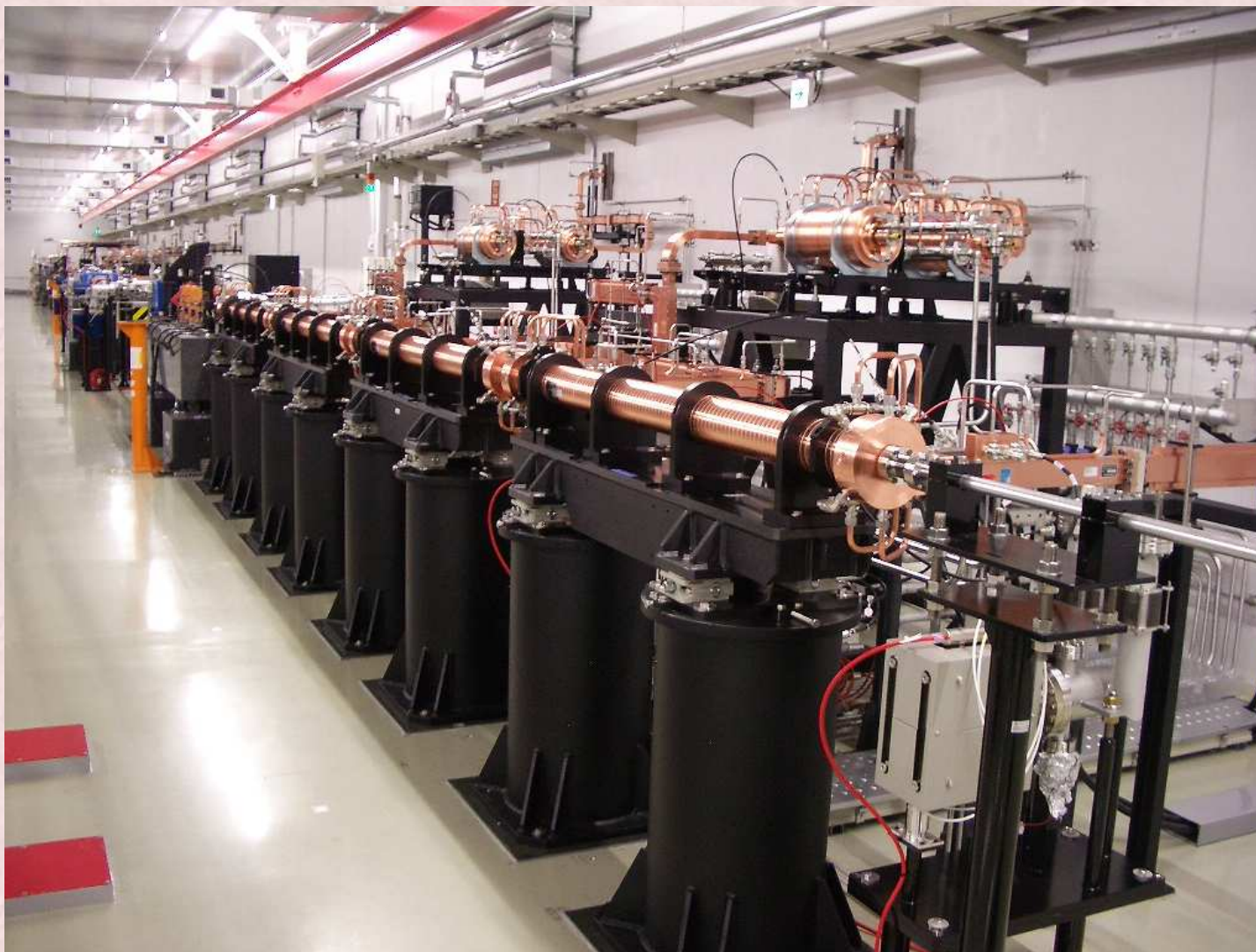
アンジュレータホール上流より

# SACLA-BL1 加速器



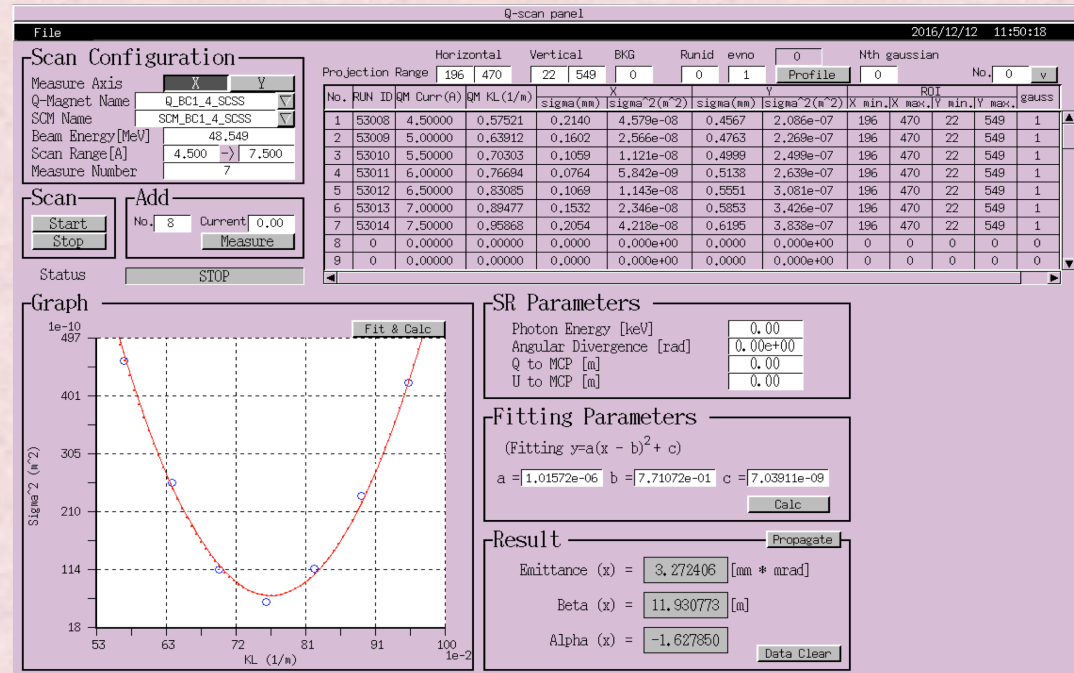
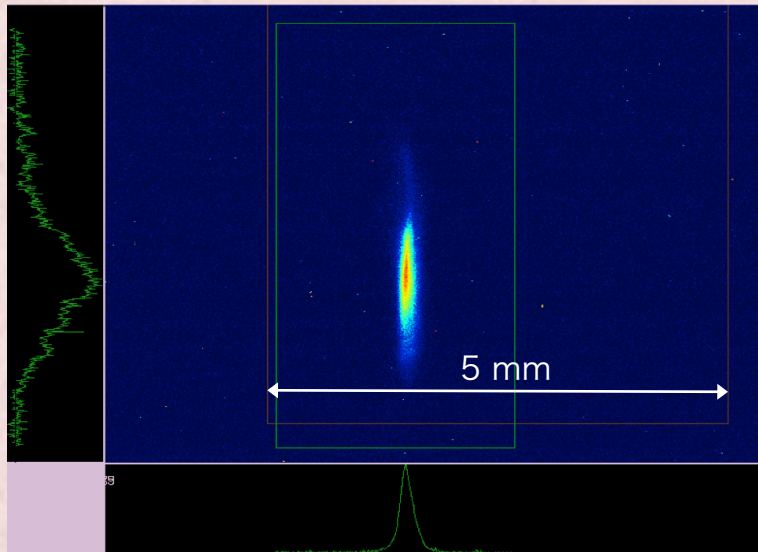
アンジュレータホール下流

# SACLA-BL1 加速器



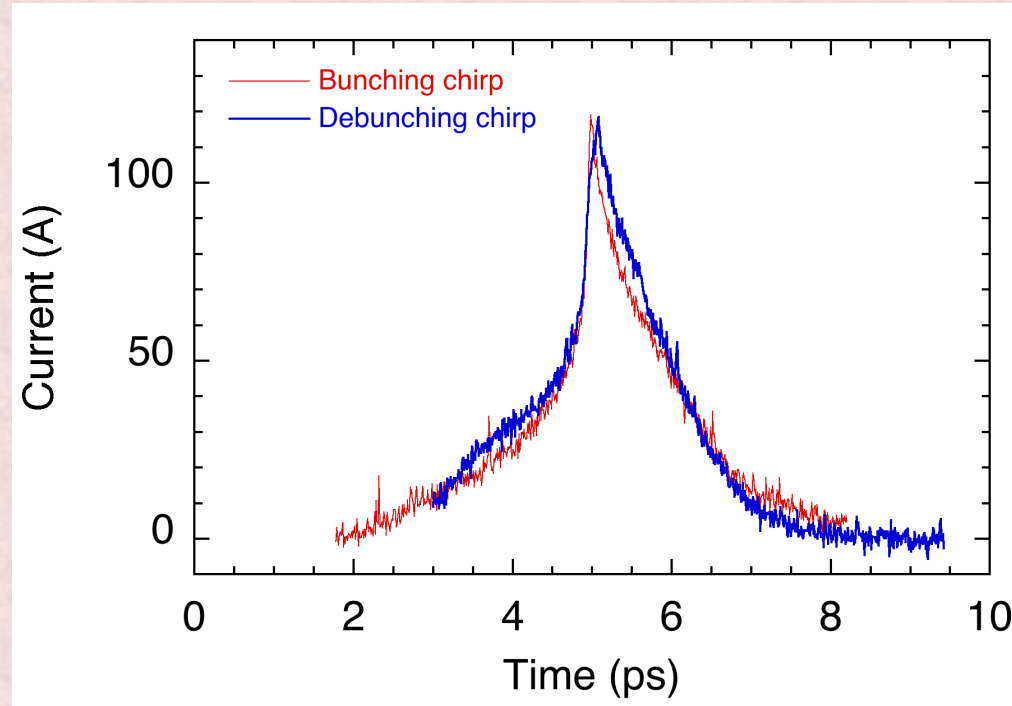
$2\pi/3$ ディスクロード型C-band加速管 (1.8 m、42 MV/m)

# エミッタンス測定



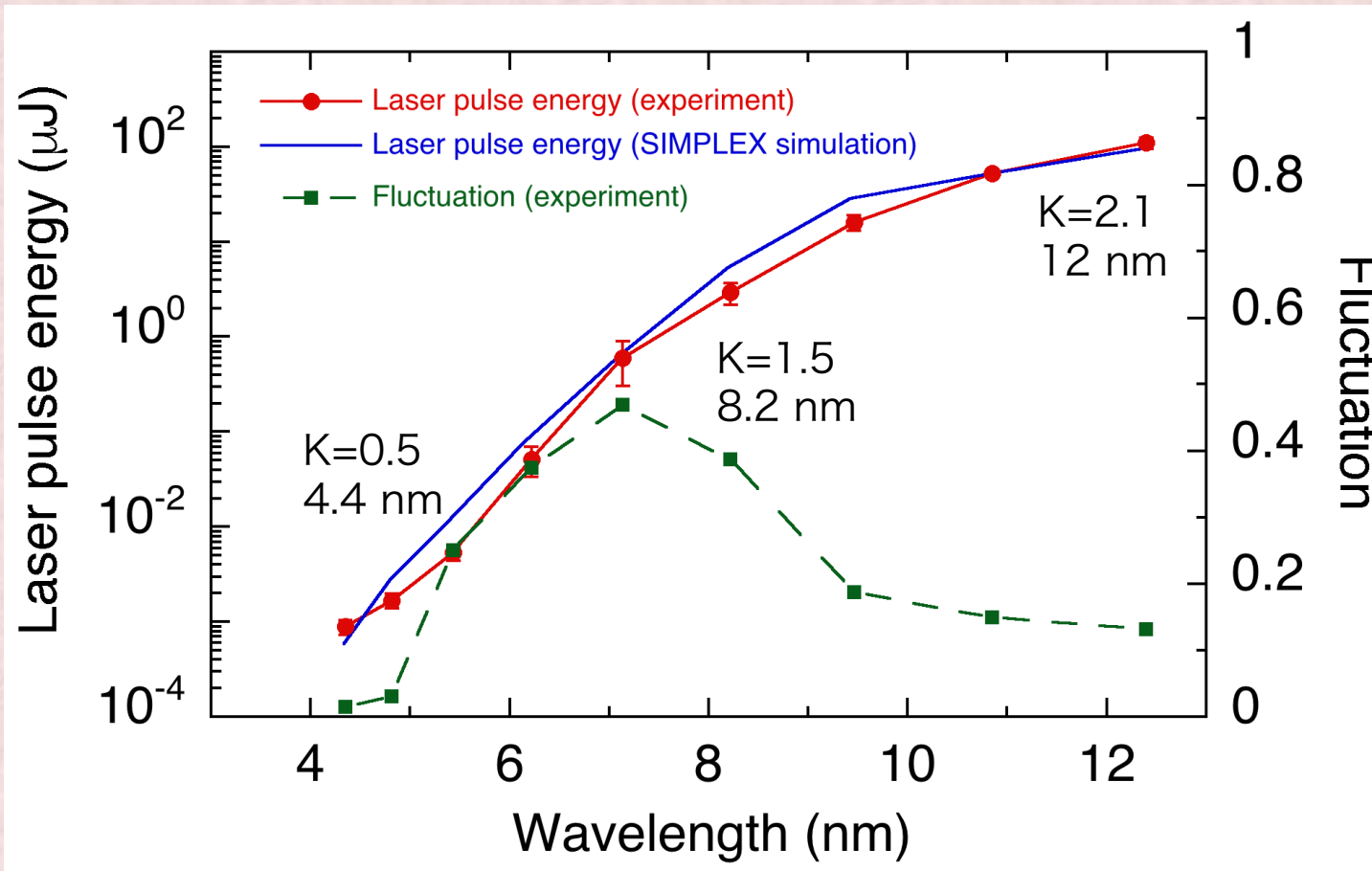
- Qスキャン法による測定
- 第一バンチ圧縮器出口(50 MeV)
- 規格化射影エミッタンス: 3 mm mrad.
- SCSS試験加速器の性能を再現

# 縦方向バンチプロファイル測定



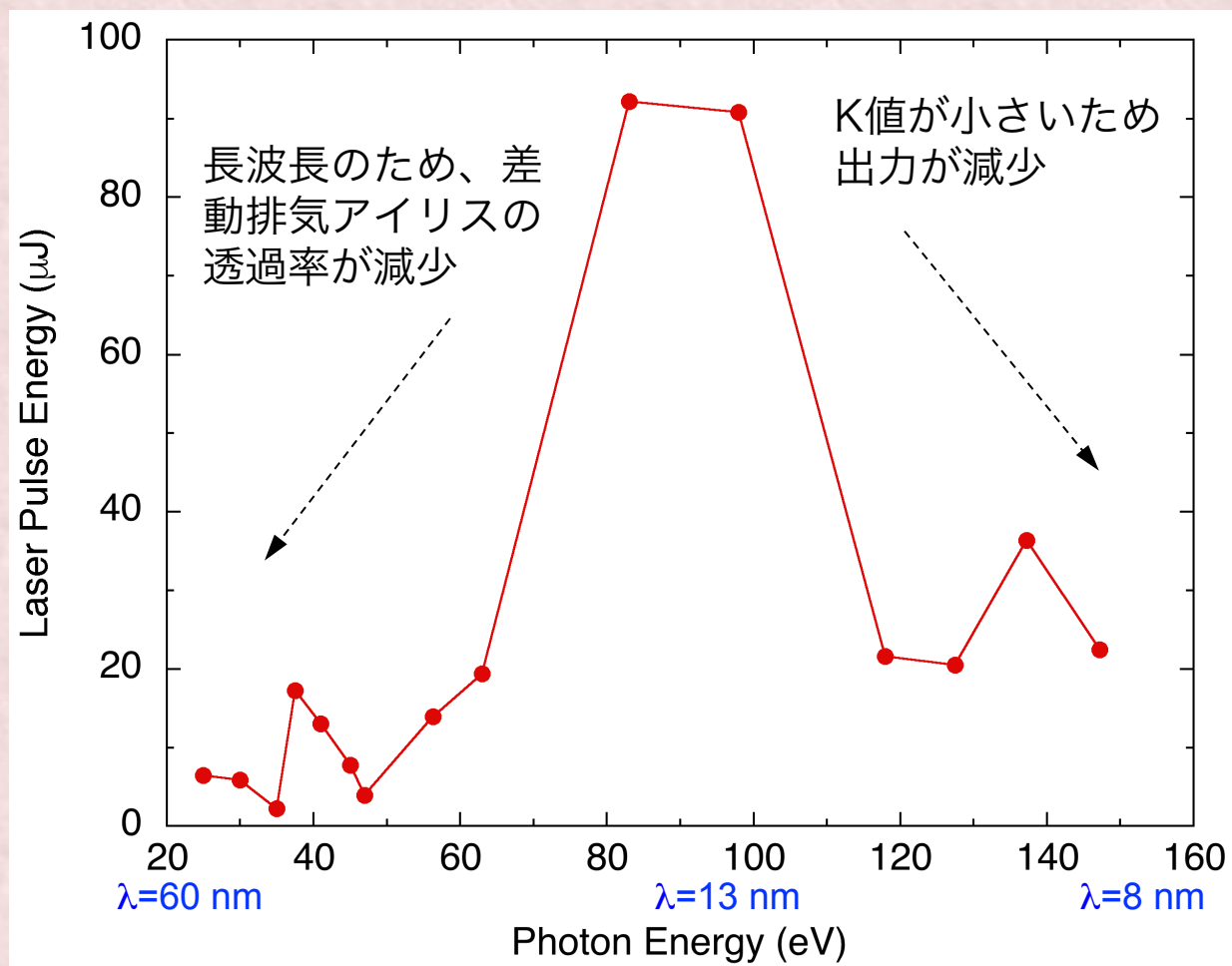
- RFゼロ位相法による測定 (BC1圧縮後の状態)
- 3番目のC-band加速ユニットで線形のエネルギーチャープを与え、BC2の偏向電磁石でエネルギープロファイルを測定
- Peak current: 120 A, Bunch width: 0.8 ps
- アンジュレータ部のバンチプロファイルは未測定

# FELゲインカーブ



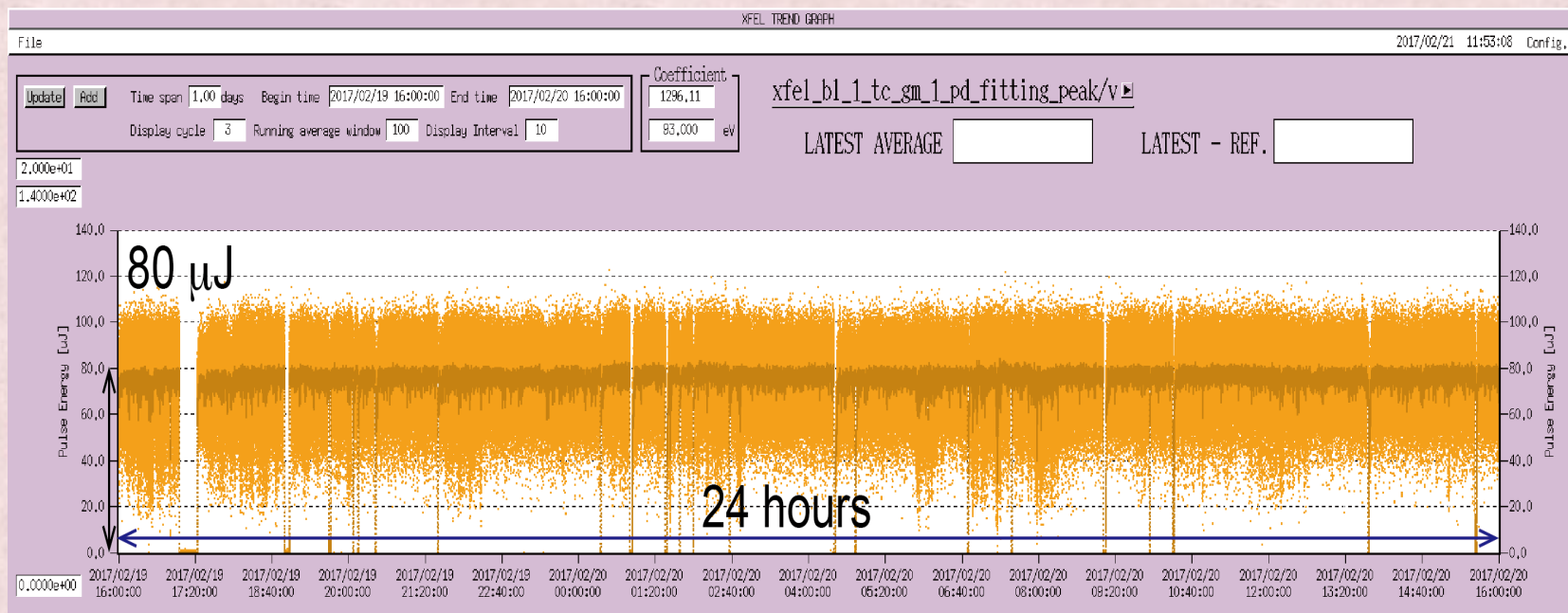
- アンジュレータギャップをスキャン (K=0.5 to 2.1).
- カロリメータ ( $>1 \mu\text{J}$ ), フォトダイオード ( $<1 \mu\text{J}$ ).
- SIMPLEXシミュレーションで再現  
(Gaussian,  $I_p=300 \text{ A}$ ,  $t=0.7 \text{ ps}$  (fwhm),  $\varepsilon_{n, \text{rms}}=0.5 \text{ mm mrad}$ )

# 利用可能なパルスエネルギー





# ユーザー運転中の出力トレンド



- FEL波長: 13 nm (93 eV)
- 黄色: シングルショット, 茶色: 100ショット平均
- 長時間安定なFELパルスが提供出来ている

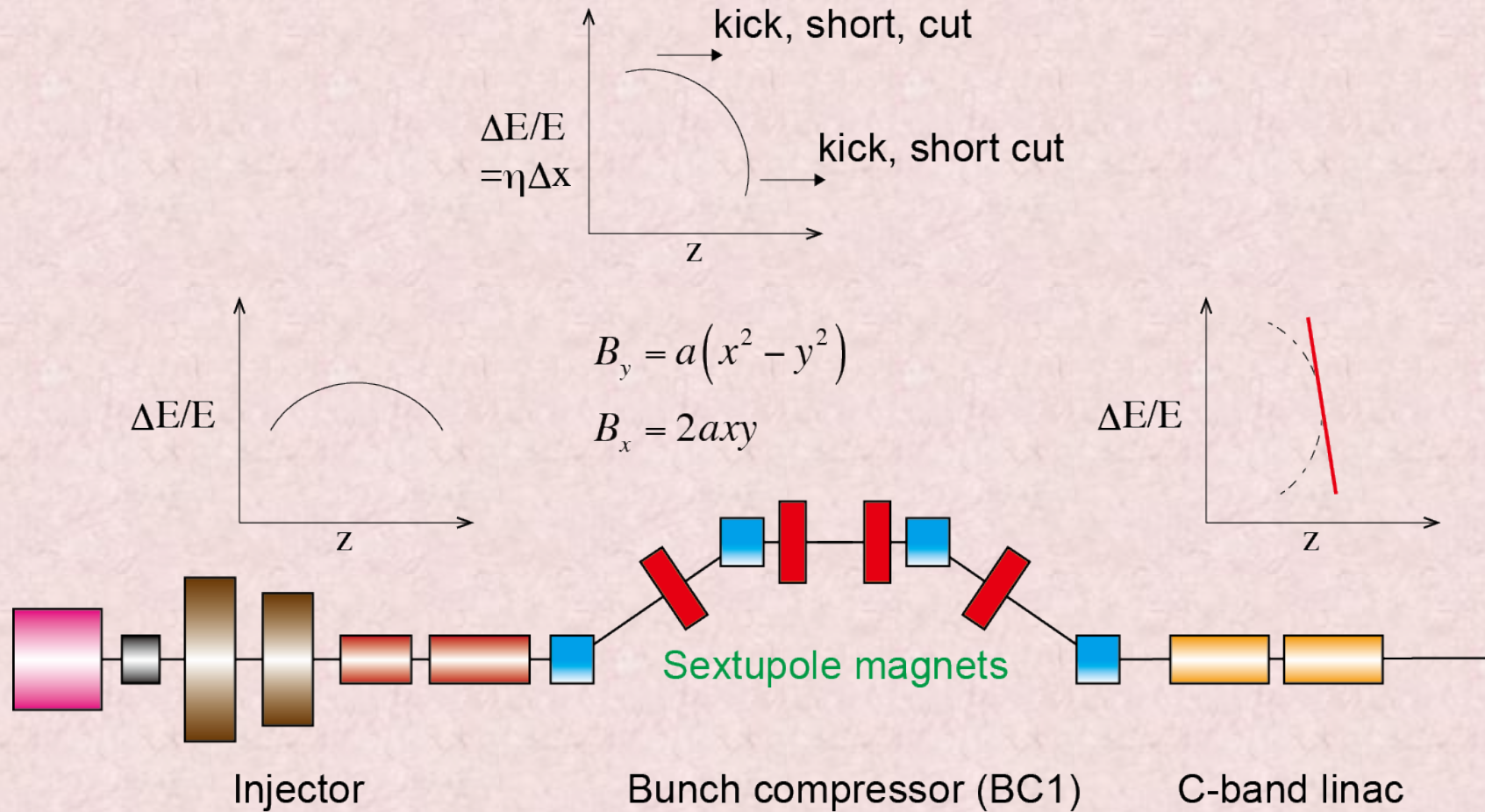
# 将来のアップグレード (案)

- 電子ビームのピーク電流を高めてFELパルスエネルギーを増強するために、入射部において発生する電子ビームの非線形エネルギーチャープを補正する。現在、BC1の分散部に六極電磁石を導入することを検討中。
- C-bandユニットを追加してエネルギーを増強し、Water Window (2-4 nm) 領域をカバーする。
- もう一つの軟X線ビームライン(BL5) では、ブランクとなる0.3 nmから2 nmの領域のFELをターゲットにする。

# BL1におけるエネルギーチャープ非線形補正

- BL1入射部のメイン加速器の周波数はS-band。
- 高調波補正空洞の周波数は、C-bandではビームの減速が大きすぎて現実的でない。
- X-bandは技術的に可能ではあるが、RFシステム一式を構築するには人手と予算と時間を要する。
- バンチ圧縮器の分散部にて、多極磁場使ったエネルギーチャープの非線形補正を検討する。

# BL1におけるエネルギーチャープ非線形補正



# まとめ

- SACLA軟X線ビームライン (BL1) をFELマシンにアップグレードし、2016年より軟X線FELユーザーのための利用運転を開始した。
- 現在のところ、FEL出力はパルス当り数 $\mu\text{J}$ から100  $\mu\text{J}$ 、波長は8 nmから60 nm、パルス繰り返しは60 Hzである。
- 電子バンチの最終ピーク電流を高めてFELのパルスエネルギーを増強するために、バンチ圧縮器に多極磁場を導入して非線形エネルギーチャープを補正することを検討中。

# SACLA関連の発表

- TUOL08 : SACLA油密閉型モジュレータに用いる50kV半導体スイッチの開発 (稲垣隆宏)
- TUOM03 : SACLA高速振り分け電磁石用の大電力・高精度パターン電源の開発 (近藤力)
- THOM03 : LバンドRFデフレクタによるSACLA入射部での電子ビーム時間構造測定 (前坂比呂和)
- THOL14 : DBAを用いたCSR効果の抑制 (原徹)
- TUP058 : TE011モード高周波空洞電力合成器を使用した100 kW 半導体パルス高周波増幅器の設計 (大竹雄次)
- TUP102 : SPring-8とSACLAにおけるBPM信号処理システムへのMADCOCA-to-EPICS ゲートウェイの適用 (清道明男)
- WEP062 : SACLAでのサイラトロンの劣化診断と対策 (中澤伸侯)
- WEP066 : SACLAとSPring-8蓄積リングの高周波基準信号の同期システム その2 (大島隆)
- WEP110 : 高温環境下における六ホウ化セリウム熱陰極と高融点金属の反応 (渡川和晃)