

# SACLA-BL1における 軟X線Free Electron Laser (FEL) の発振と調整の状況

稲垣 隆宏, 渡川 和晃, 原 徹, 大和田 成起, 安積 隆夫, 安積 則義,  
大島 隆, 大竹 雄次, 木村 洋昭, 金城 良太, 近藤 力, 櫻井 辰幸,  
田尻 泰之, 田中 信一郎, 田中 隆次, 富樫 格, 登野 健介,  
長谷川 照晃, 備前 輝彦, 細田 直康, 前坂 比呂和, 松井 佐久夫,  
松原伸一, 矢橋牧名, 田中均, 石川哲也

国立研究開発法人 理化学研究所 放射光科学総合研究センター  
公益財団法人 高輝度光科学研究センター  
スプリングエイト・サービス株式会社

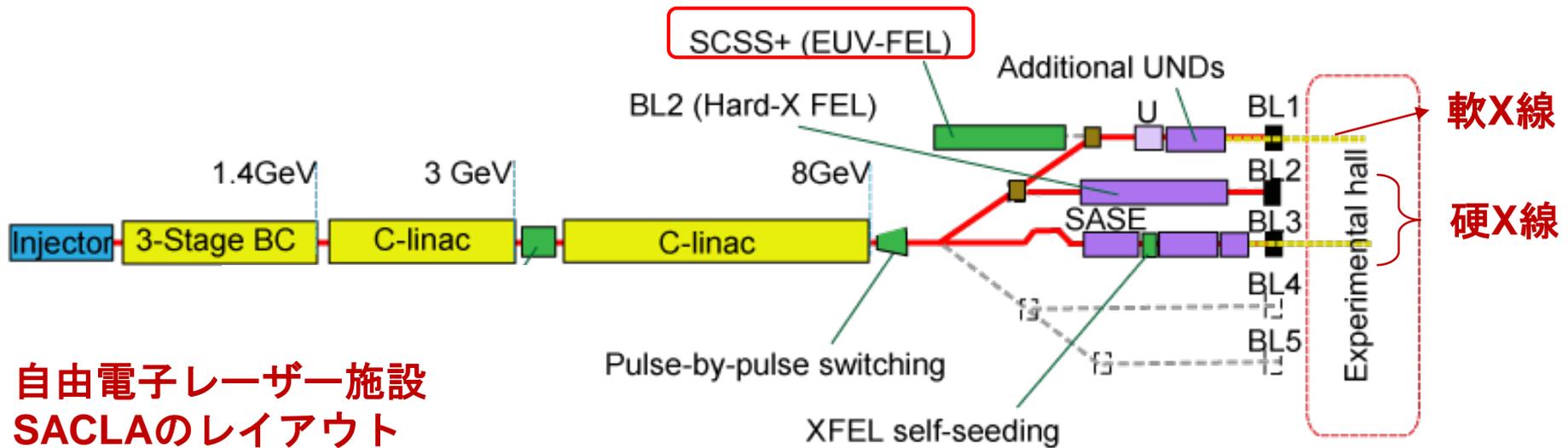


# Outline

- 軟X線FEL施設の概要
- 加速器の調整状況
- 現在のレーザーの性能
- まとめと今後の予定

# SACLAにおける軟X線FEL施設の整備計画

- 軟X線のFELを使ったサイエンスの展開。 分子科学、触媒、磁性、半導体、...
- SACLA BL1を、**極紫外線～軟X線FELの供用施設**として整備。
  - プロトタイプ機である「SCSS」を移設し、専用加速器「**SCSS+**」とする。
  - Cバンド加速器を1台追加 250 MeV→500 MeV (→今秋 800 MeV)
  - アンジュレータを1台追加、磁石列を交換し高輝度化 K=1.5→K=2.1
  - 将来のエネルギー増強 (～1.7 GeV)、シード化などの拡張も可能。

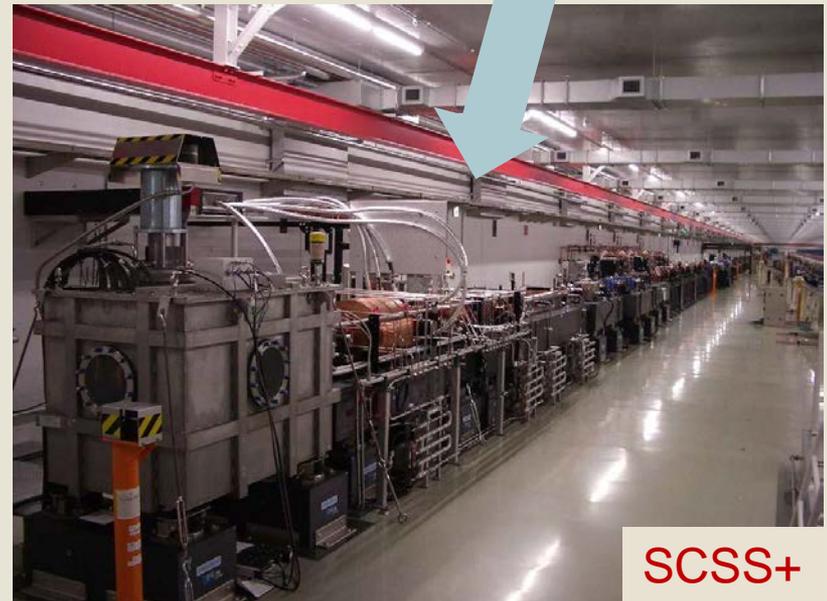


自由電子レーザー施設  
SACLAのレイアウト

# SCSS+の建設 これまでの経緯

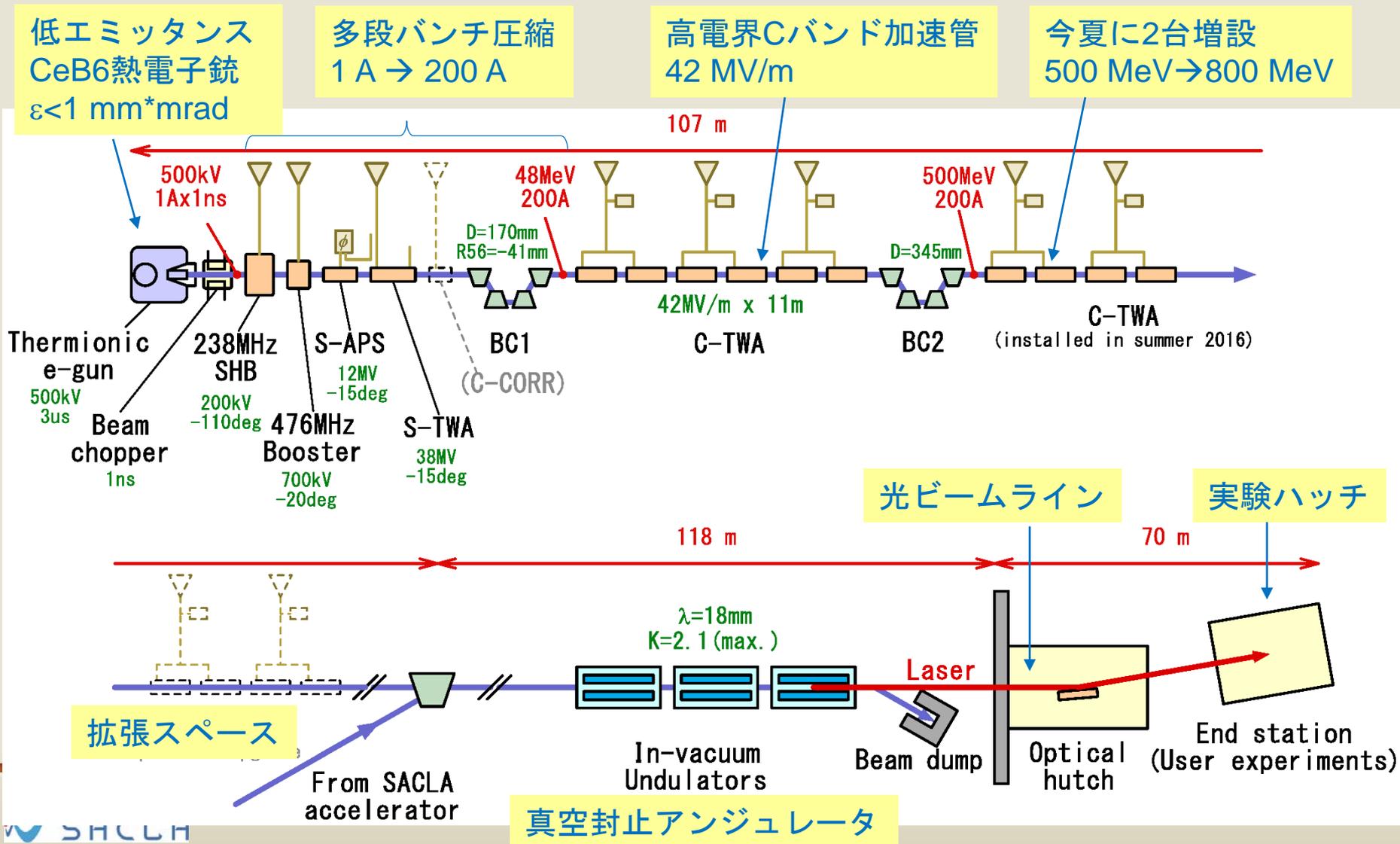
- 2005年 SCSS試験加速器の建設
- 2006年 SASE型FEL発振 (49 nm)
- 2008年 HHG型シードFEL (160 nm)
- 2013年 SCSSの運転を停止  
SACLA-BL1への移設
- 2014年 RFコンディショニング運転開始  
昨年の加速器学会 櫻井氏 報告
- 2015年9月 ビーム調整を開始
- 10月 SASE型FEL発振 (33 nm)
- 12月 アンジュレータを1台追加
- 2016年7月 ユーザー実験 開始

SCSS試験加速器  
(2005~2013)



# SCSS+ 加速器の構成

- SACLAと同様の構成。電子ビームとFELの安定性を重視。



# 運転パラメータ

( ) 内は今夏の加速器増強後

		SCSS+ / BL1	SACLA (BL3)
電子ビーム	エネルギー	<b>500 MeV</b> ( <b>~800 MeV</b> )	5~8 GeV
	電荷	<b>300 pC</b>	300 pC
	ピーク電流	<b>~200 A</b>	~10 kA
	バンチ長	<b>1.5 ps (FWHM)</b>	~10 fs (FWHM)
	繰返し	<b>~60 pps</b>	30~60 pps
アンジュレータ	磁石列 実効長	<b>14 m</b>	106 m
	周期長	<b>18 mm</b>	18 mm
	K値	<b>~2.1</b>	~2.1
FEL	光子エネルギー	<b>40~60 eV</b> ( <b>~160 eV</b> )	5~15 keV
	パルスエネルギー	<b>~15 <math>\mu</math>J/pulse</b>	~600 $\mu$ J/pulse

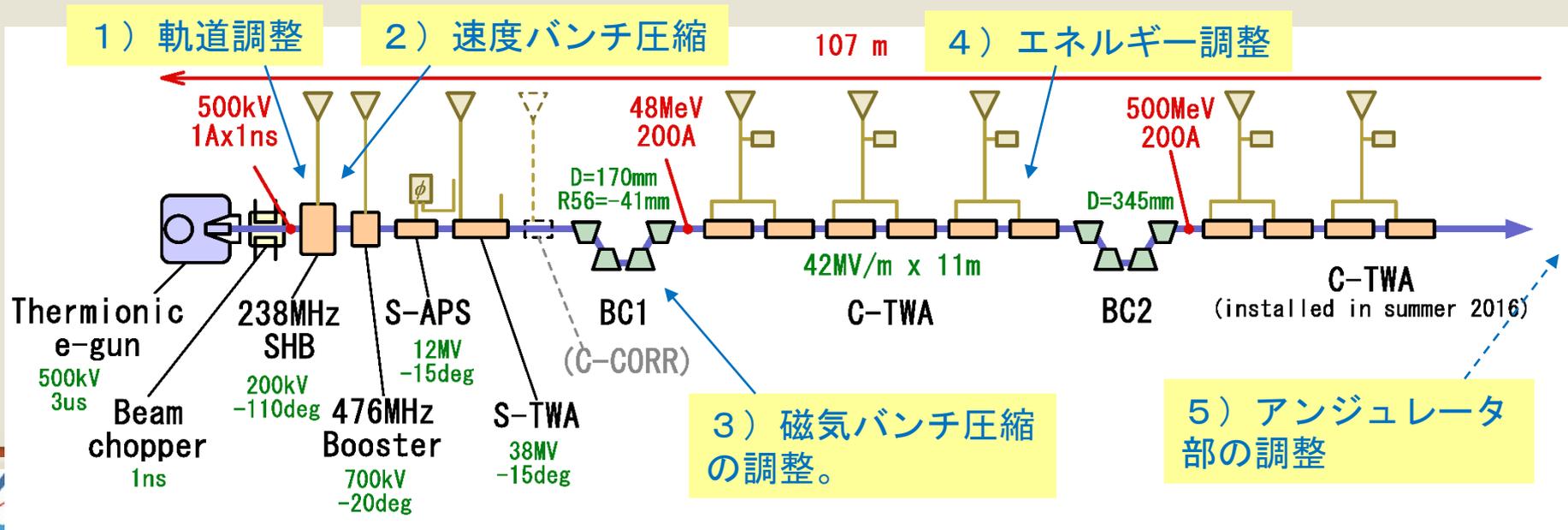
# Outline

- 軟X線FEL施設の概要
- **加速器の調整状況**
- 現在のレーザーの性能
- まとめと今後の予定

# 加速器の調整手順

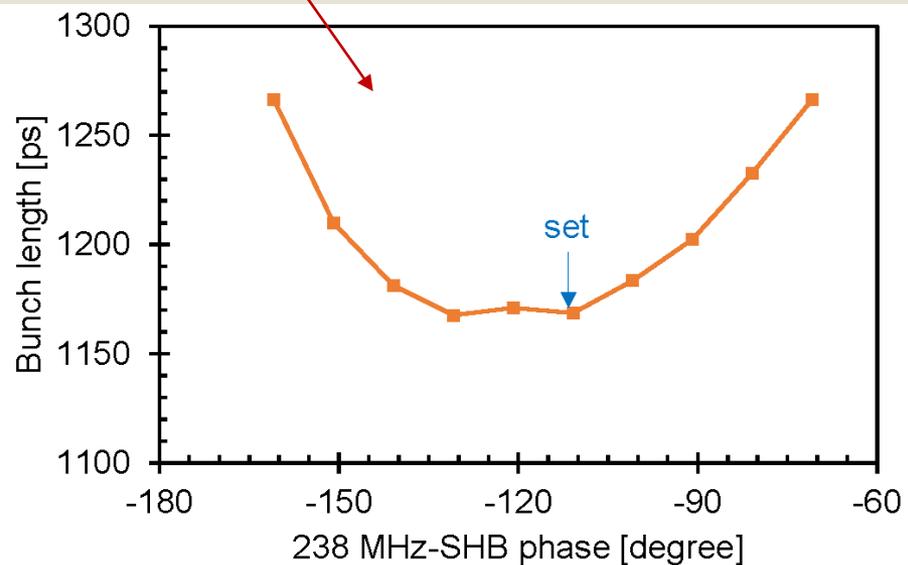
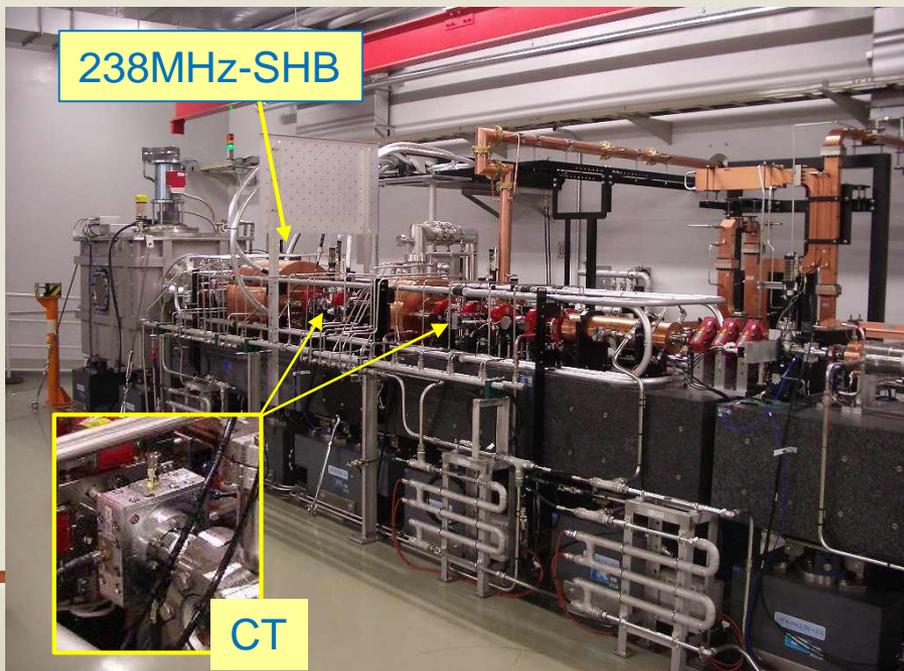
- 上流から順に、RFや電磁石などの調整を行っている。
  - 1) 入射部の軌道調整
  - 2) 速度バンチ圧縮の調整
  - 3) BC1での磁気バンチ圧縮の調整
  - 4) ビームエネルギーの調整
  - 5) アンジュレータ部での調整

調整の詳細と結果について報告する。



# 238 MHz-SHB での、速度バンチ圧縮の調整

- エネルギーチャープ  $\pm 200$  kV
- 下流2か所のコアモニタ (CT) にて、バンチ長を測定。
- バンチが短くなるようにRF位相を設定した。



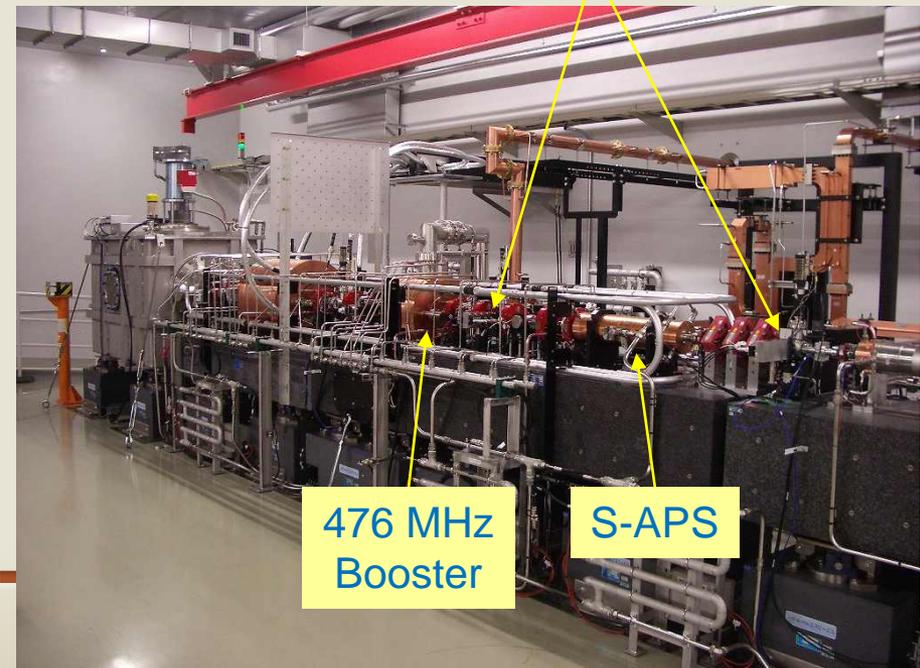
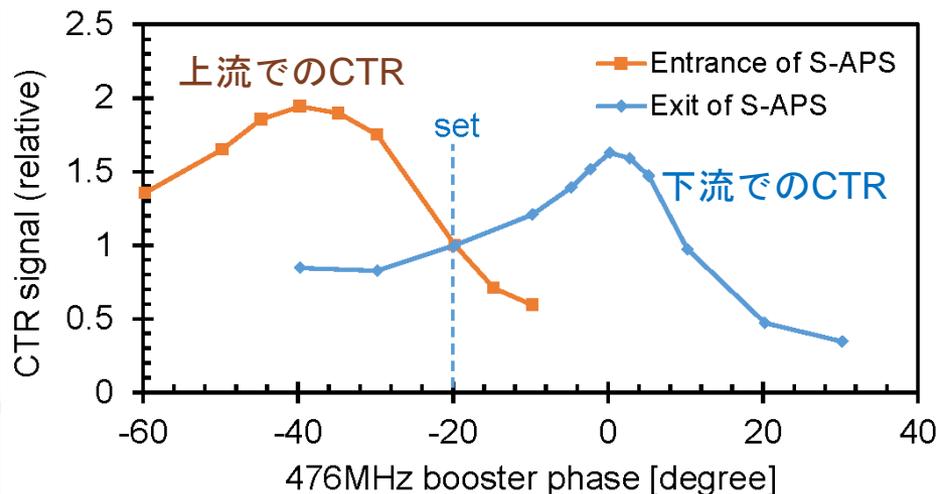
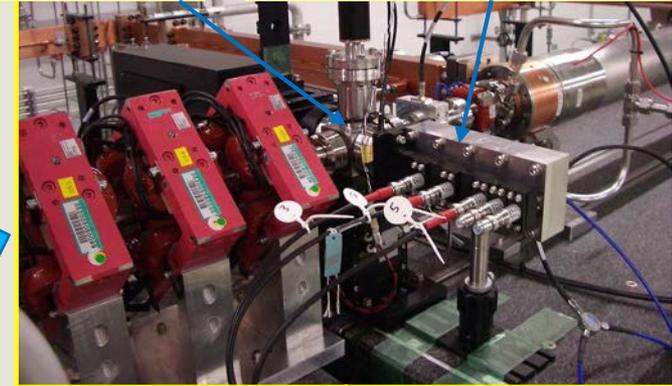
# 476 MHz-Boosterでの、速度バンチ圧縮の調整

- 476 MHz-BoosterのRF位相を変え、バンチが集群する位置を調整。
- スクリーンモニタで発生するコヒーレント遷移放射（CTR）を測定し、バンチ長の指標とする。
- S-APSの上流と下流でCTRを測定し、その中間で最も圧縮されるよう位相を設定。

スクリーン  
(金蒸着ミラー) 挿入

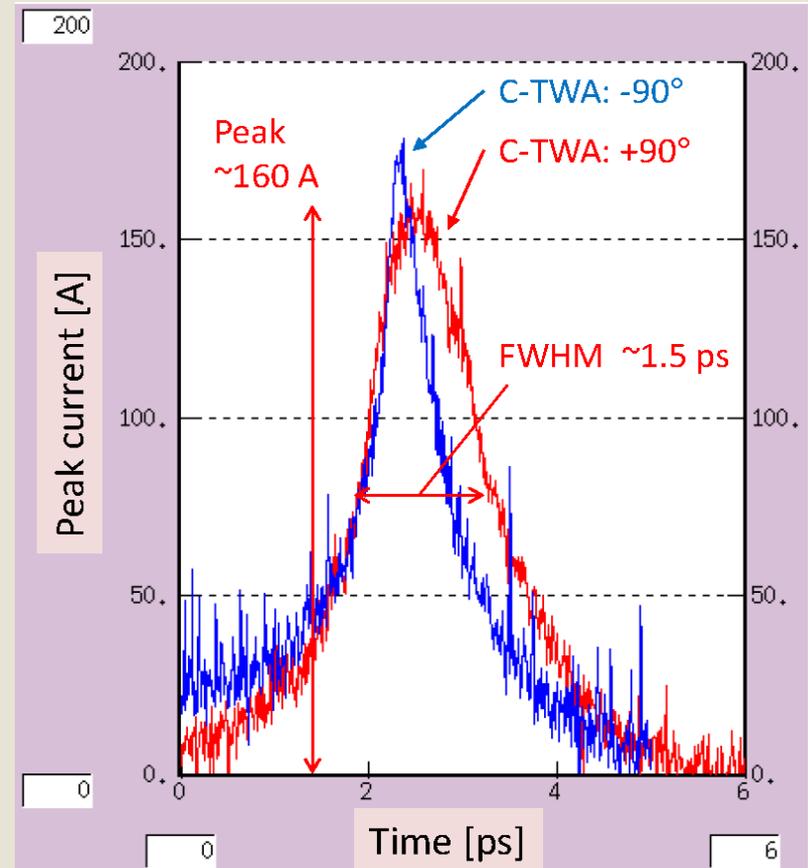
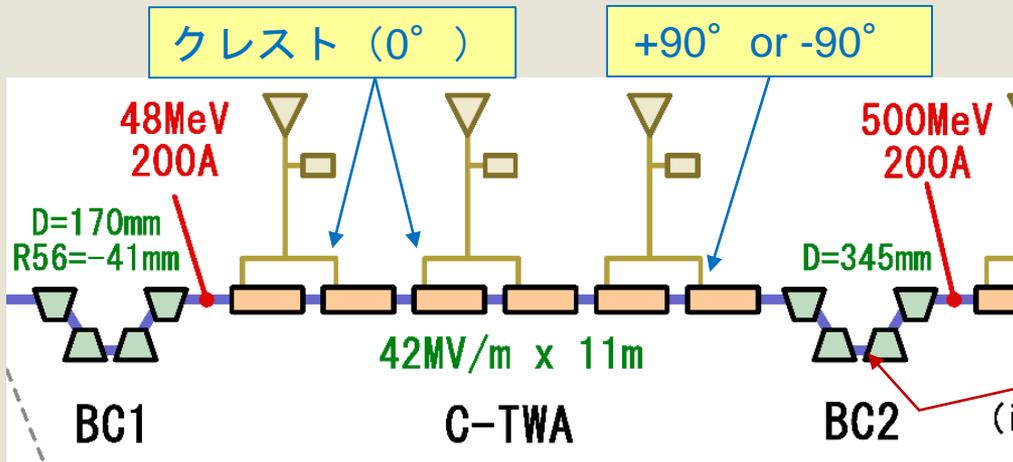
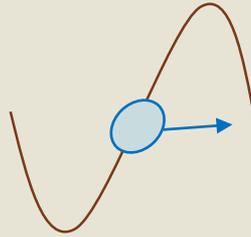
CTRモニタ  
カットオフ 3.8 GHz

Beam



# RFゼロ位相法によるバンチ長の測定

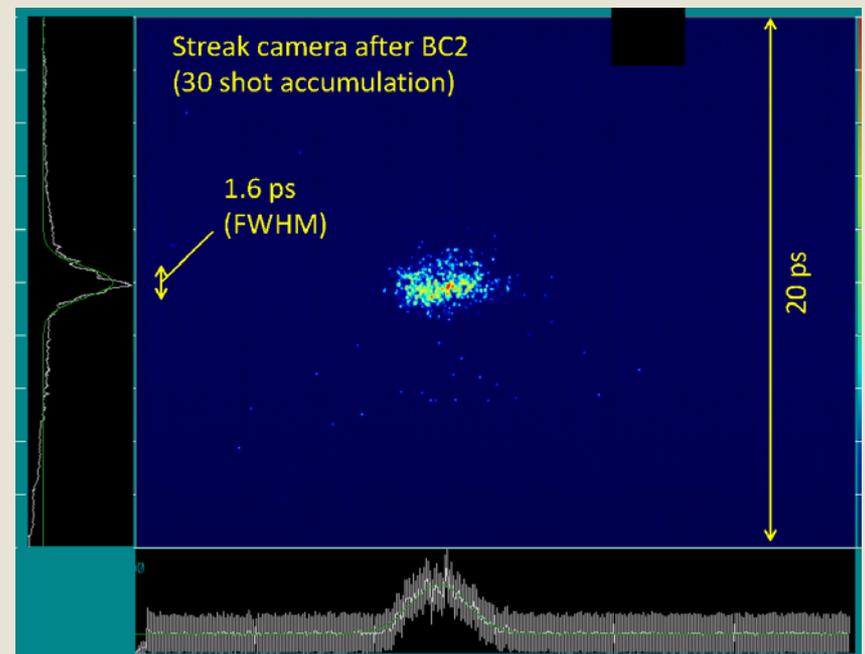
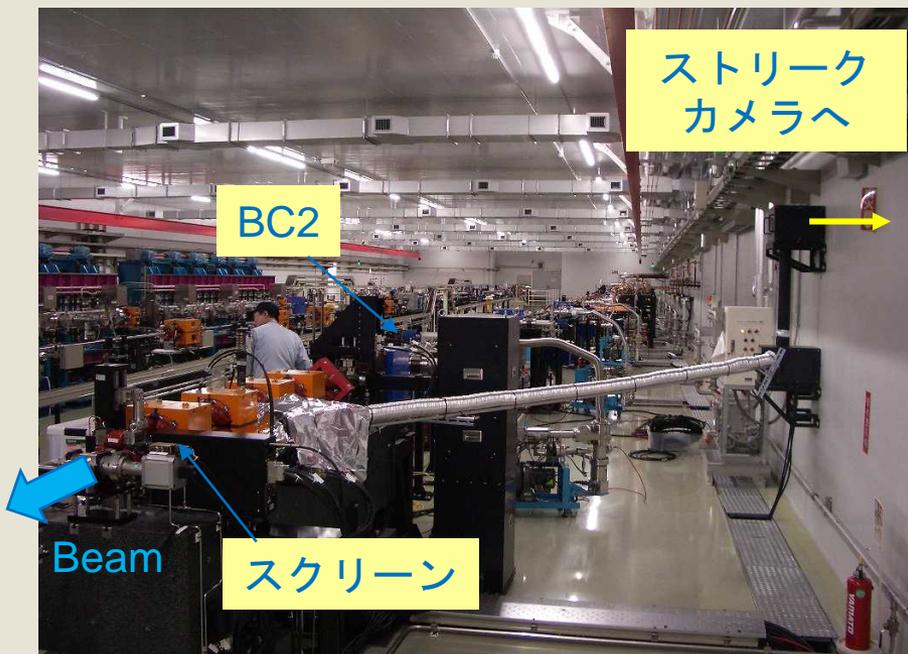
- BC1で圧縮後のバンチ長を測定。
- C-TWAのうち1台を、 $+90^\circ$ または $-90^\circ$ の位相にし、エネルギー分布をBC2にて測定。
- **バンチ長  $<1.5$  ps** (FWHM)  
(ビームの空間広がり込み)
- **ピーク電流 160~200 A**  
(電荷量の測定誤差あり)



スクリーンモニタにて  
エネルギー分布を測定

# ストリークカメラによるバンチ長の測定

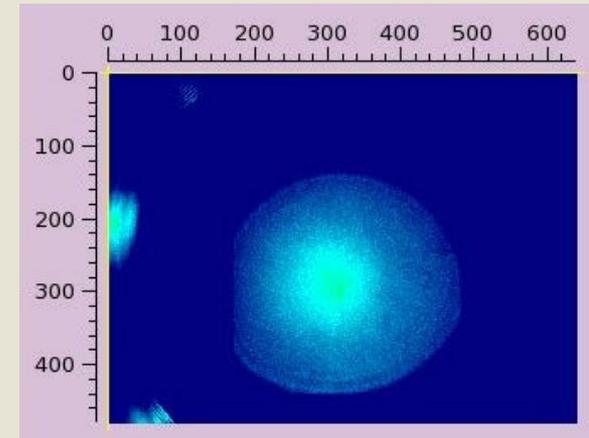
- BC2下流にて、スクリーンで発生したOTR光を、ストリークカメラにて測定。
- 光量が少ないので、30ショットを積算して表示。  
(時間ジッタを除くため、1ショットごとの分布の重心を揃えるようにして積算した)
- **バンチ長 1.6 ps** (FWHM)
- **ピーク電流 200 A** (電荷量の測定誤差あり)



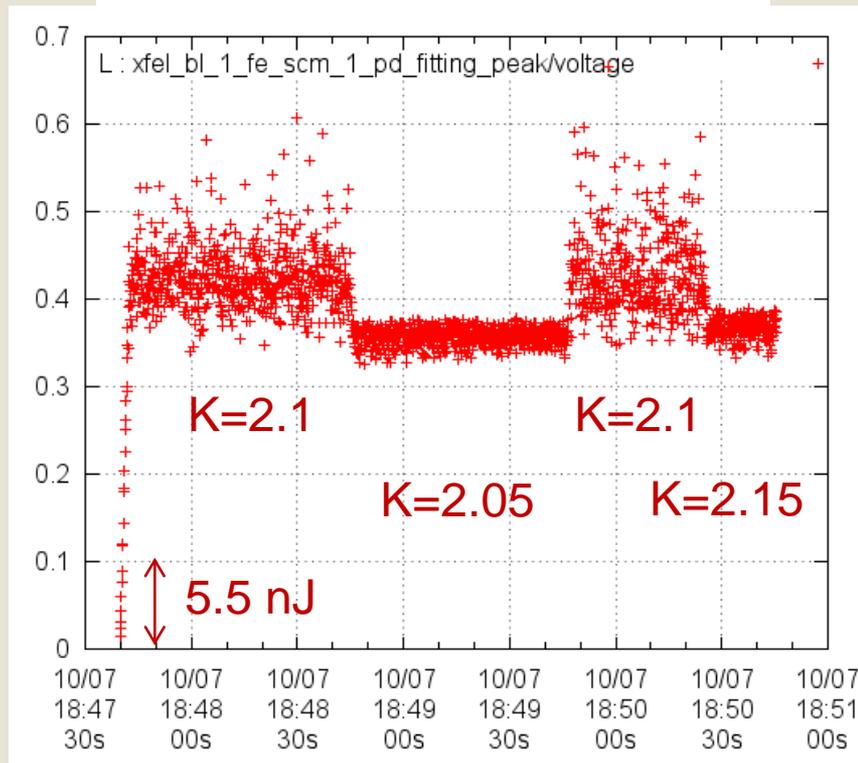
# 2015年10月 初めてSASE増幅を確認

- 2台のアンジュレータを $K=2.1$ に設定し、電子ビームを通すと、光ビームラインのフォトダイオードやプロフィールモニタでSASE-FELが観測された。

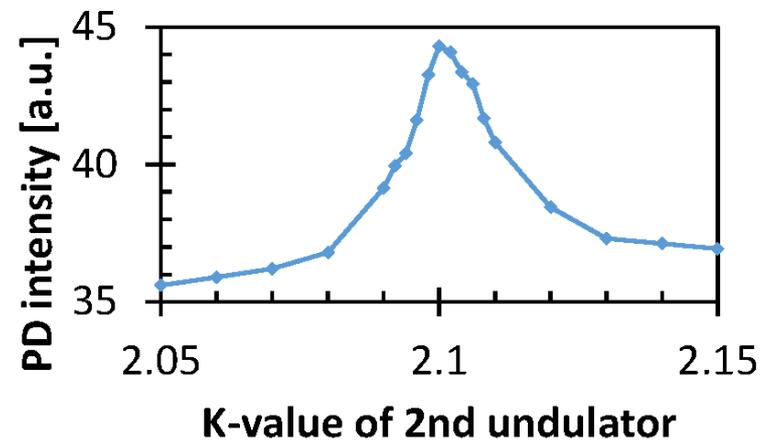
プロフィールモニタでの観測



## フォトダイオードの信号強度

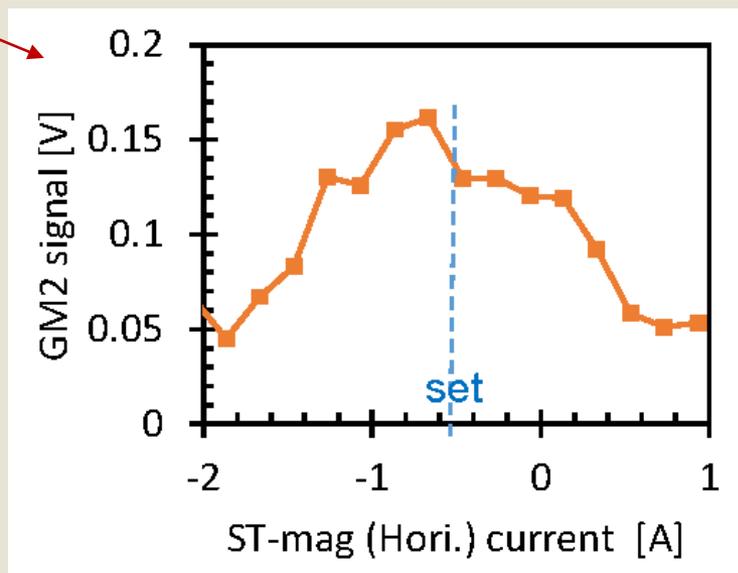
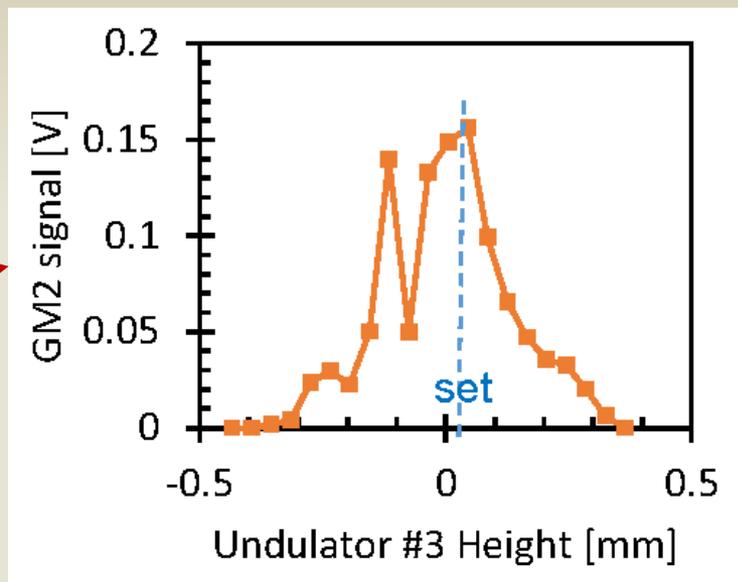
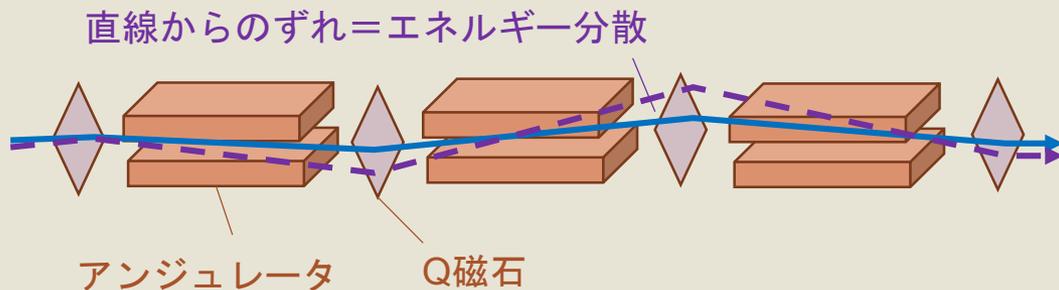


## 下流アンジュレータのK値を変えた時



# アンジュレータの調整

- FELの強度が最大となるよう調整。
  - K値 (磁極ギャップ)
  - 磁極の高さ
  - 軌道 (ステアリング磁石)
  - エンベロップ (Q磁石)
  - 位相差 (位相器)
- ビーム軌道は、Beam Based Alignmentも実施。  
(エネルギーを変えた時の軌道変化を最小に)



# Outline

- 軟X線FEL施設の概要
- 加速器の調整状況
- **現在のレーザーの性能**
- まとめと今後の予定

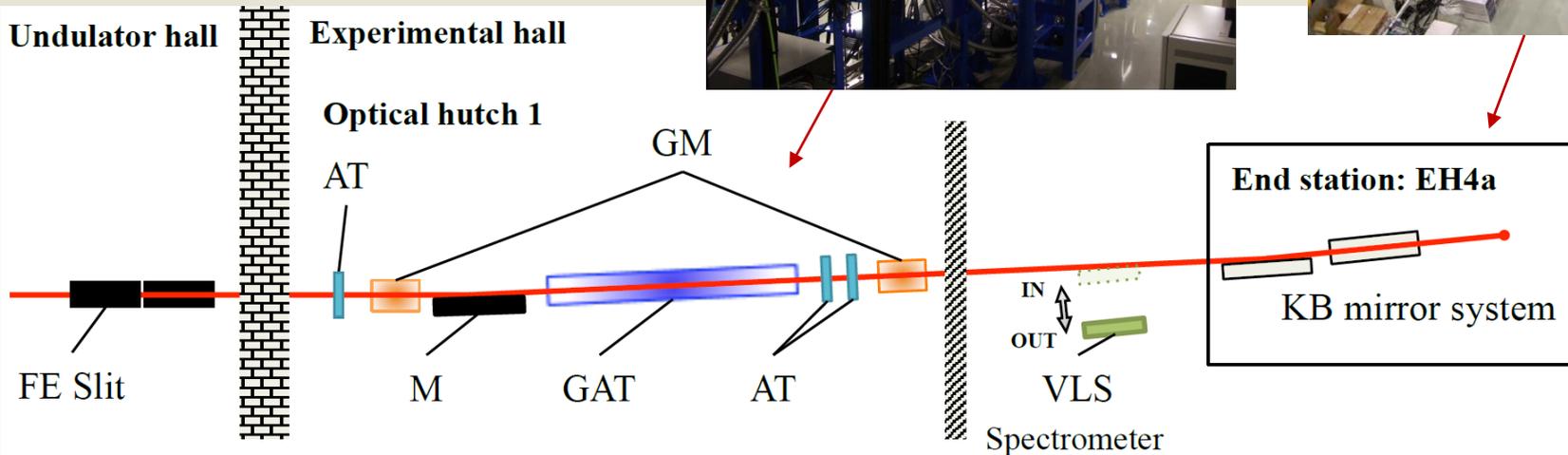
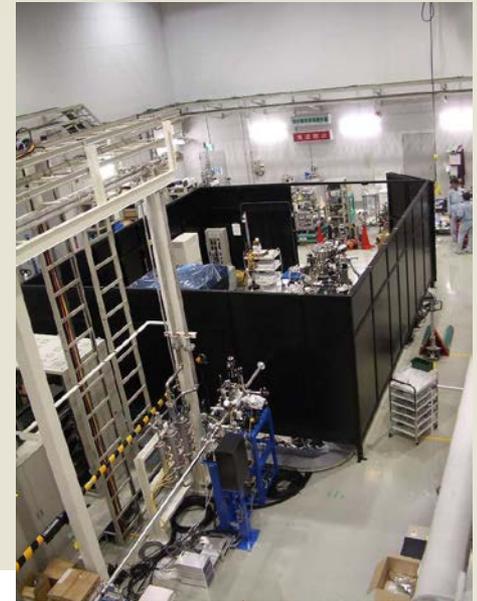
# 光ビームライン

## FELの診断

- 強度（ガス強度モニタ）
- 空間分布（YAGスクリーン）
- スペクトル（格子型）

## FELの伝送と制御

- Front endスリット
- ミラー
- アテネータ
- 集光（KBミラー）

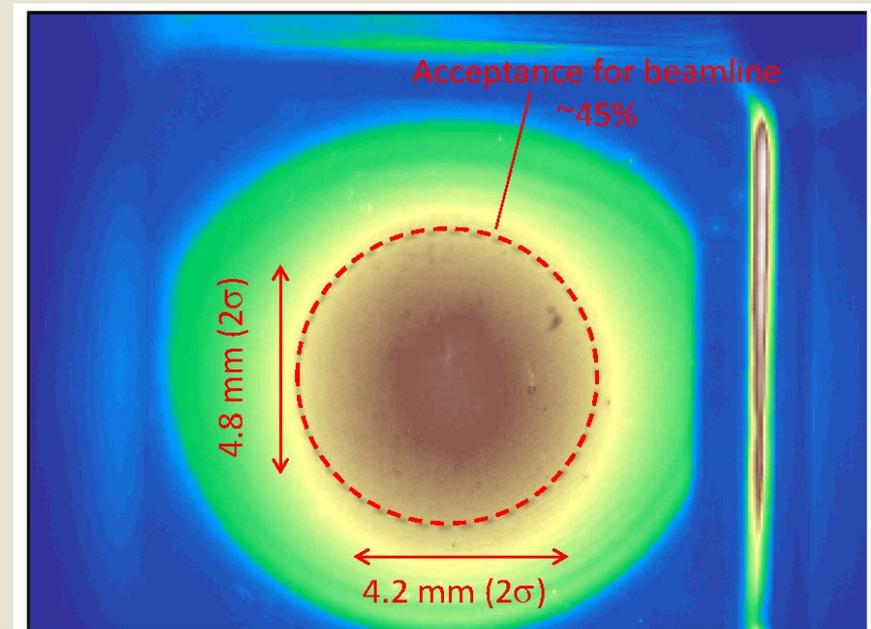


AT : foil attenuator, GAT : gas attenuator, M : plane mirror (C coating/Si substrate)  
GM : gas monitor, VLS : varied line spacing grating

# FELの空間分布 YAG薄板を挿入し測定

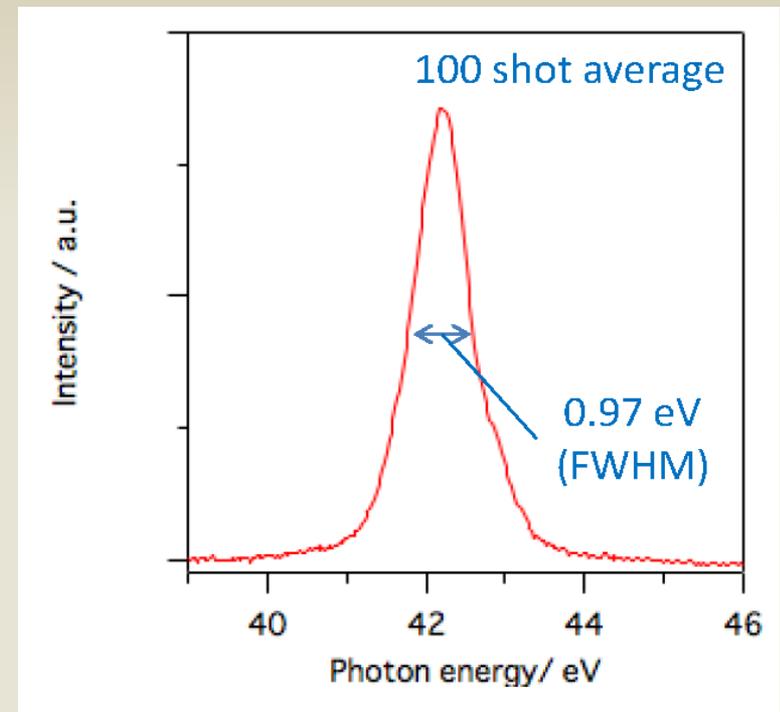
- YAGスクリーンの中央に光軸が来るように、アンジュレータ内での軌道を調整。
- SACLAよりエネルギーが低いため、角度発散が大きい。
- ガスアテネータ、強度モニタの差動排気部 ( $\phi 6$  mm) で半分程度が削られる。
  - 42 eV (K=2.1) 通過率 $\sim$ 45%
  - 62 eV (K=1.5) 通過率 70 $\sim$ 80%
- 差動排気部のアパーチャ拡大を検討中。

Front end slit直下流での  
FELの空間分布

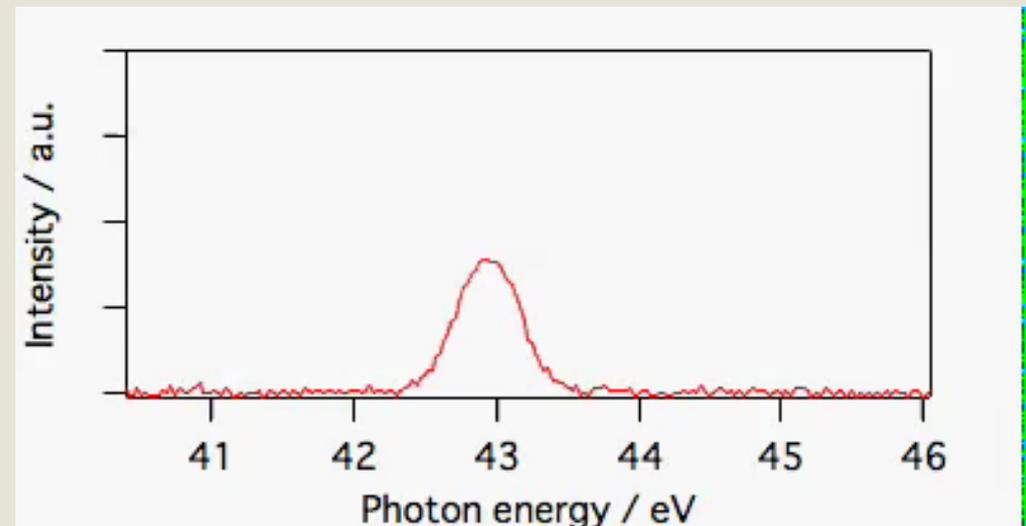


# FELのスペクトル

- 格子型スペクトロメータにて、FELの波長スペクトルを測定。
- スペクトル幅  $\sim 1$  eV (FWHM) 程度。
- ショット毎の中心波長も安定している。

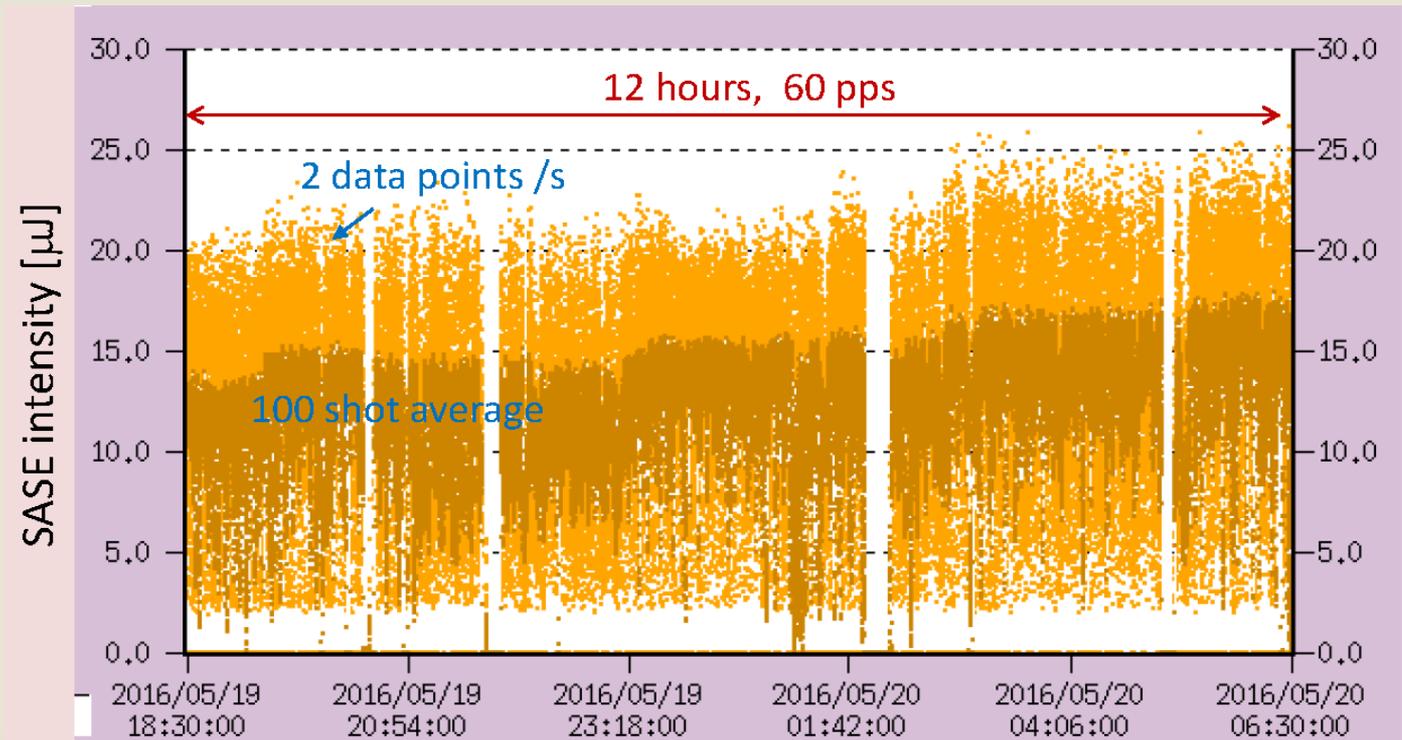


シングルショット  
スペクトル



# FELの強度（パルスエネルギー）

- 低強度はフォトダイオード、高強度はガス強度モニタにて測定。
- 絶対強度は、カロリメータ法にて測定し校正。
- 平均で約15  $\mu\text{J}$ （アンジュレータでは約30  $\mu\text{J}$ ）のFELを、定常的に生成。
- ショット毎の強度 $\sim 30\%$ （ $\sigma$ ） ピーク電流が低くSASEが飽和に達していない？



半日間の推移  
510 MeV  
K=2.1  
42 eV

# Outline

- 軟X線FEL施設の概要
- 加速器の調整状況
- 現在のレーザーの性能
- **まとめと今後の予定**

# まとめと今後の予定

- 極紫外線～軟X線のSASE型FEL供用施設として、SACLA-BL1を整備。
- 昨年9月より調整運転を開始。10月には、FELを観測。
- 今年の7月から、ユーザーの供用実験を開始。
  - 電子ビームのエネルギー 約500 MeV
  - FEL光子エネルギー 40～60eV
  - △ FELのパルスエネルギー ～15  $\mu$ J (アンジュレータで30  $\mu$ J)
  - △ ショット毎の変動が大きい (～30%) まだSASEが飽和に達していない？

## 今後の予定

- 今夏に、Cバンド加速器を増設 500 MeV→800 MeV FELの短波長化 (～160 eV)
- ピーク電流を増やし、FELの強度を上げることを検討。
  - バンチ圧縮の最適化。
  - C-TWAをオフレストにし、BC2にてバンチ圧縮。
  - BC1に高調波 (Cバンド) 空洞を追加し、エネルギーチャープを線形化。