

# SACLAにおける 自己シード型X線FELの観測

稲垣 隆宏<sup>a</sup>、田中 隆次<sup>a</sup>、犬伏 雄一<sup>b</sup>、原 徹<sup>a</sup>、長谷川 太一<sup>c</sup>、  
大橋 治彦<sup>b</sup>、三浦 亜由美<sup>b</sup>、大端 通<sup>b</sup>、登野 健介<sup>b</sup>、金城 良太<sup>a</sup>、  
矢橋 牧名<sup>a</sup>、後藤 俊治<sup>b</sup>、田中 均<sup>a</sup>

<sup>a</sup> 理化学研究所 放射光科学総合研究センター

<sup>b</sup> 高輝度光科学研究センター JASRI

<sup>c</sup> スプリングエイトサービス(株)

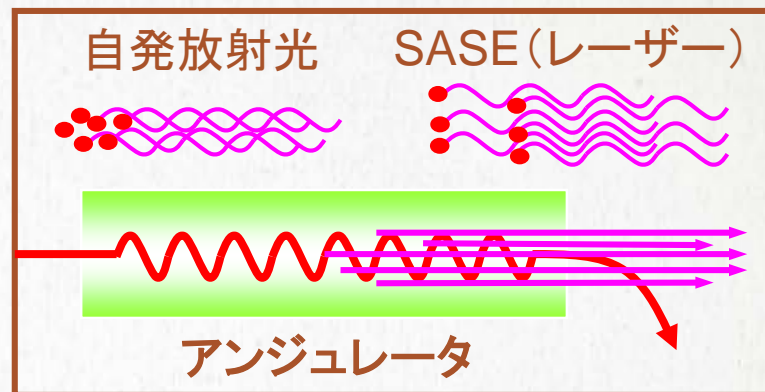
# Outline

- 自己シード型FELの原理
- システムの構成
- 試験結果 主に、今年6月の調整試験より
- まとめと今後の課題

# SASE型FELとシード型FELの違い

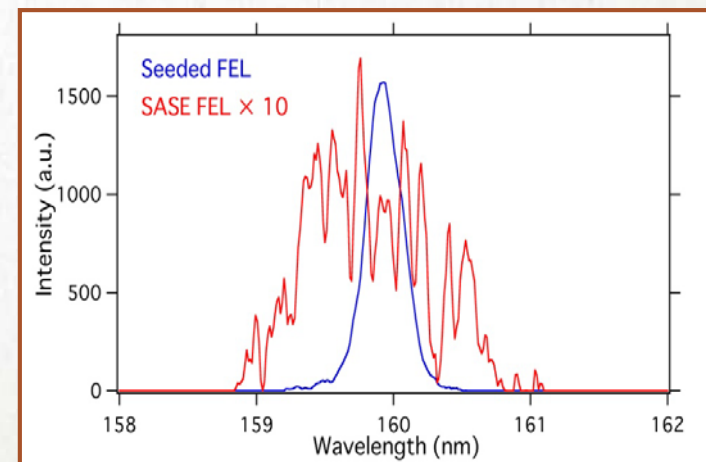
## • SASE (Self-Amplified Spontaneous Emission) 型FEL

- 自発放射光の揺らぎを増幅。
- 時間的にコヒーレントでない。
- 波長スペクトルの広がり、変動がある。



## • シード型FEL

- シード (種光) を増幅。
  - 時間コヒーレンスの改善。
  - 波長スペクトルが狭く安定。
- 
- SCSS試験加速器
    - 希ガスでの高次高調波をシードに使用
    - 2007年 161 nm、 2010年 61 nm

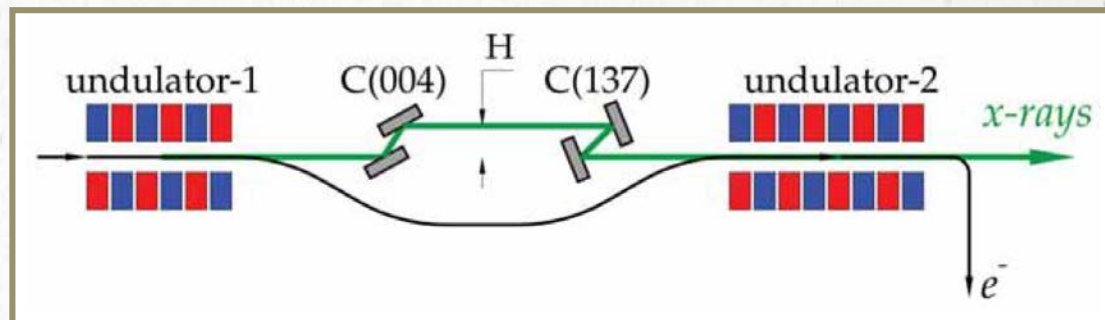


# 自己シード型 X線FEL

- X線領域では、シード光源（レーザー）が無い。
- SASEを分光器で単色化し、シードとする。

## • 反射型

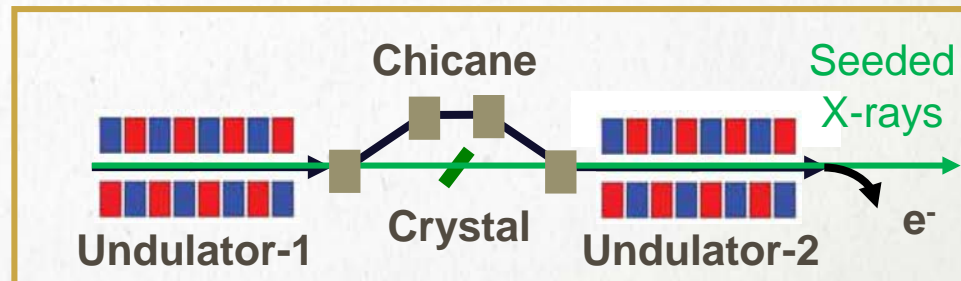
- 二結晶分光器を使用。
- 巨大なシケインが必要。



From The European XFEL TDR (2006)

## • 透過型

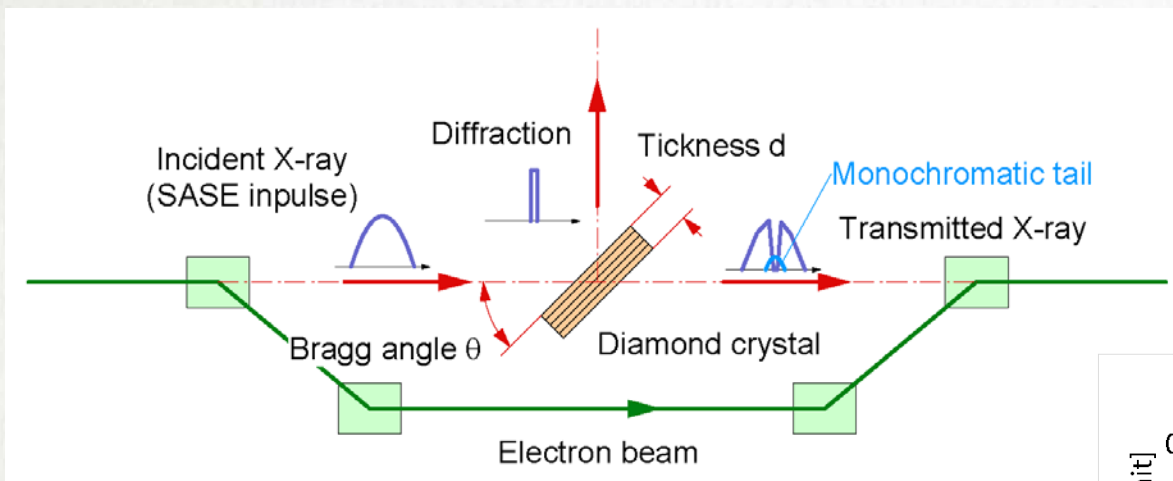
- 2011年にDESYで考案。
- 結晶のBragg回折を利用。
- 小型のシケインで済む。
- 2012年 LCLSで実証。



G. Geloni et. al., J. Mod. Opt. 58, 1391-1403 (2011)  
and FEL conference 2011 presentation.

# 自己シード型FELの動作原理

- 短時間長のX線（SASE）が、結晶で多重Bragg回折をする。
- 透過光から遅れて、単色成分が出現する。



単色成分の強度

$$|G_{00}(t)|^2 \propto \left[ \frac{J_1(\sqrt{t/T_0})}{T_0 \sqrt{t/T_0}} \right]^2,$$

$$T_0 = \frac{\Lambda^2 \sin \theta}{2\pi^2 c d}$$

SACLAの場合

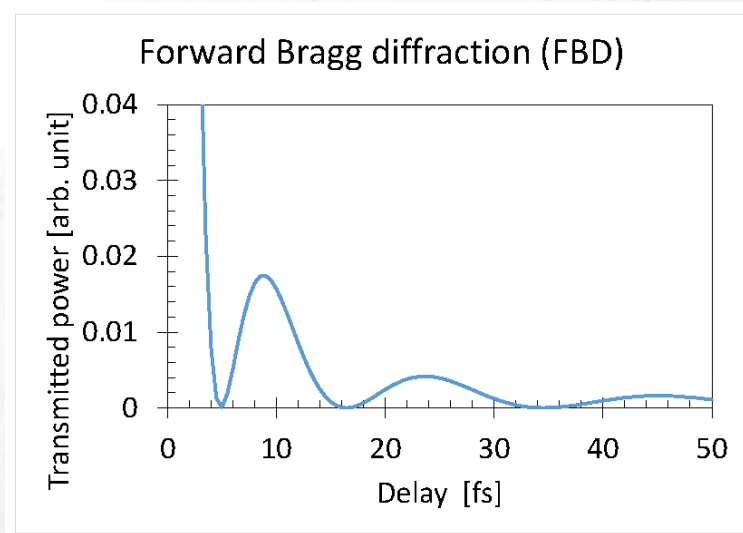
C(400)回折

$d = 180 \mu\text{m}$

$\theta = 44^\circ$

$\Lambda =$ 消滅長  $23 \mu\text{m}$

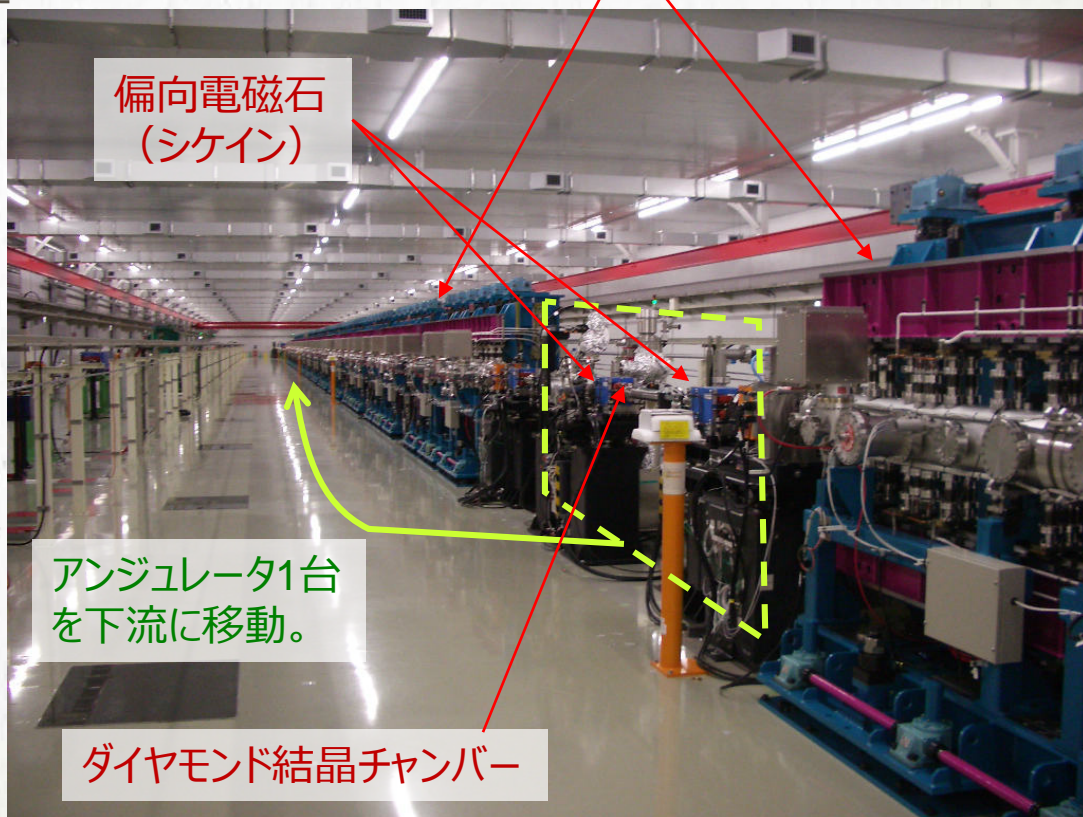
$T_0 = 0.3 \text{ fs}$



# SACLA-BL3に 自己シード型X線FELを建設

- 単色化、輝度の向上、時間コヒーレンスの改善 早期の実用化、供用化を目指す
- 2012年夏 シケインの設置
- 2013年夏 ダイヤモンド結晶の設置
- 9月 ビーム調整開始
- 11月 シード増幅を確認
- シード増幅の最適化、安定化のため調整試験を行ってきた。

真空封止型アンジュレータ 5 m×21台  
 $\lambda_u=18$  mm、 $K\sim 2.1$ (max.)

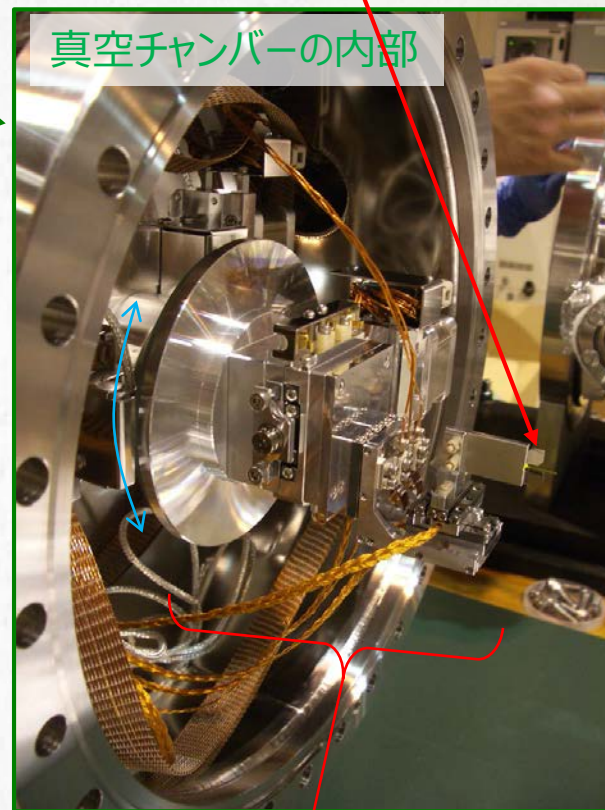
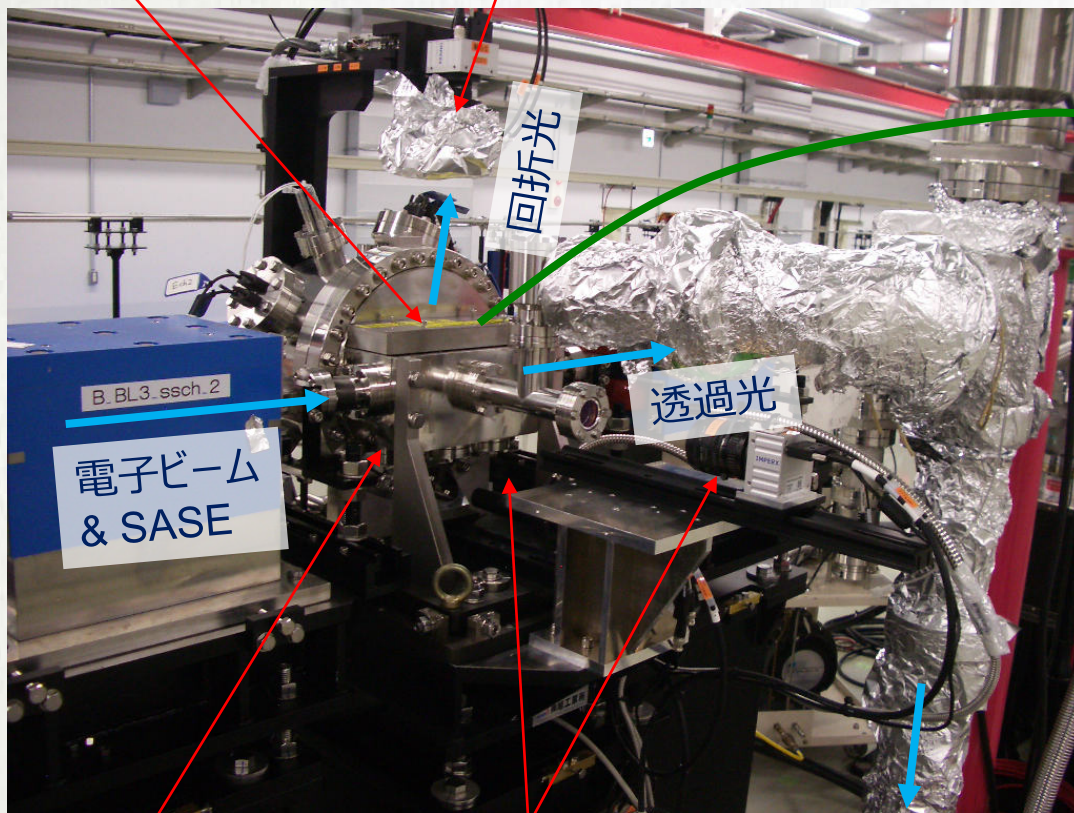


# ダイヤモンド結晶とチャンバー

Be真空窓

20回転アーム先端に、回折光モニター  
(Photo-diode & CCDカメラ)

ダイヤモンド単結晶 (2枚)  
180  $\mu\text{m}$   $\times$  6.5mm  $\times$  6mm



真空チャンバー

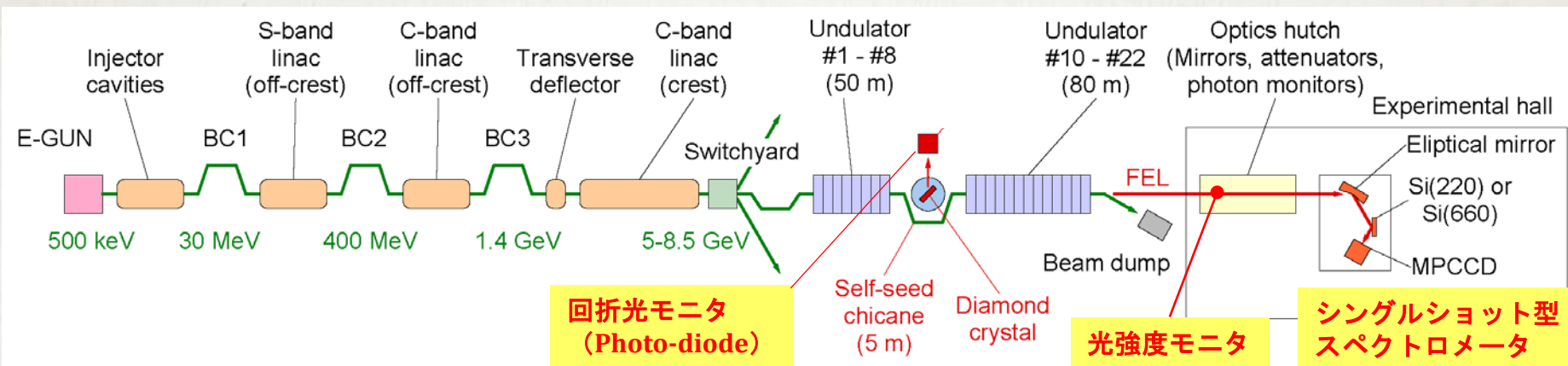
目視確認用カメラ

局所排気系  
(イオンポンプ)

多段ステージ (x,y,z,Ry, $\theta$ )  
使用しない時はx=-10 mmに退避

# 調整の手順

6/23に行ったスタディを例に、調整過程を報告する

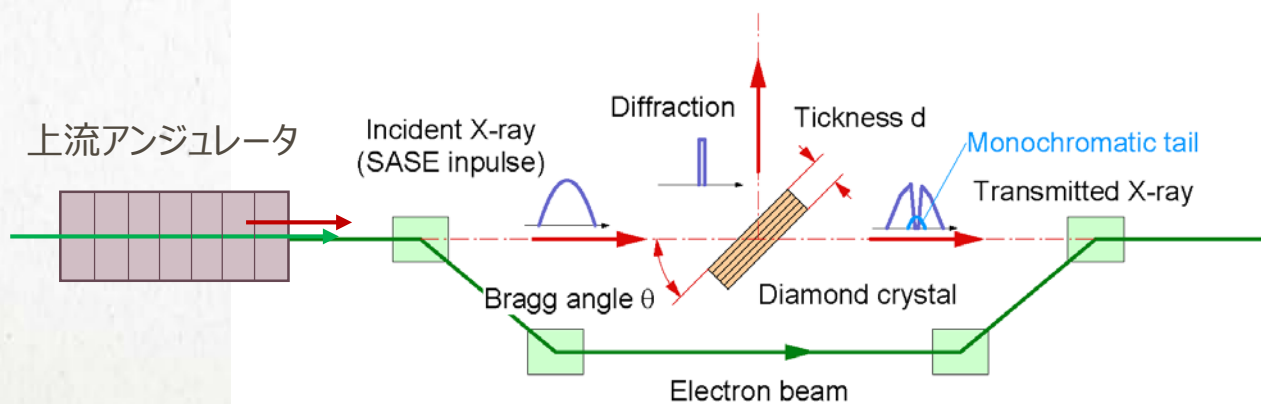
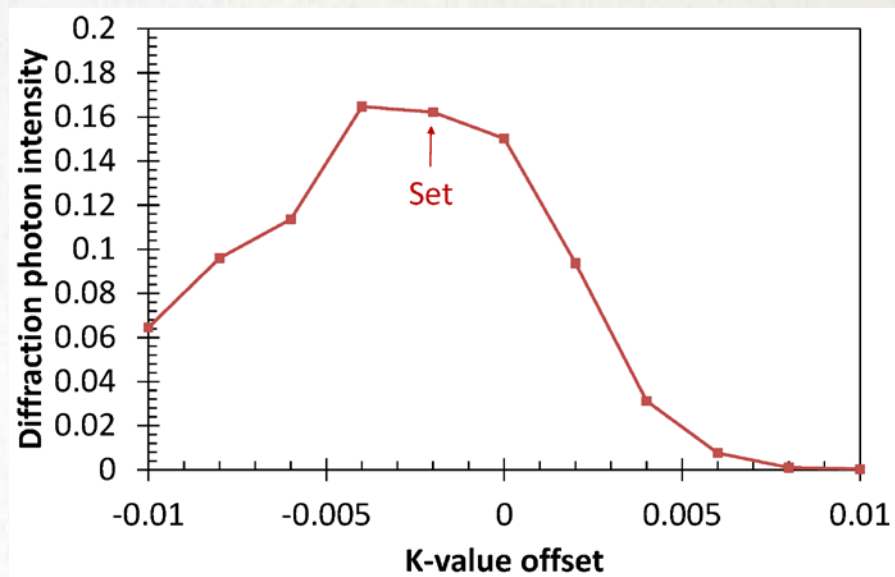


- 6/23の運転条件  $E_e=7.8$  GeV、 $Q_e=340$  pC、 $K=2.1$ 、 $E_\gamma=10$  keV、 $550$   $\mu$ J/pulse
- 上流アンジュレータだけを閉じ、SASEの強度を確認 @光強度モニタ
- 結晶を挿入し、回折光が最大となるよう調整 @回折光モニタ
- 透過光のスペクトル測定 @スペクトロメータ
- 下流アンジュレータを閉じて、スペクトルの変化を測定 @スペクトロメータ
- シード条件の最適化（アンジュレータの台数、K値、遅延時間など）
- 加速器の調整（RF位相、ビーム軌道など）



# 上流アンジュレータからのSASEの調整

- 上流のアンジュレータ4台のみ閉。
- シケインで遅延20 fsを付け、結晶を挿入。
- 結晶の角度 $\theta$ は、10 keVのBragg角（約 $44^\circ$ 、C(400) 回折）に固定。
- 上流アンジュレータのK値を変え、SASEの発振波長を変える。
- Bragg回折光の強度が最大となるように調整した。

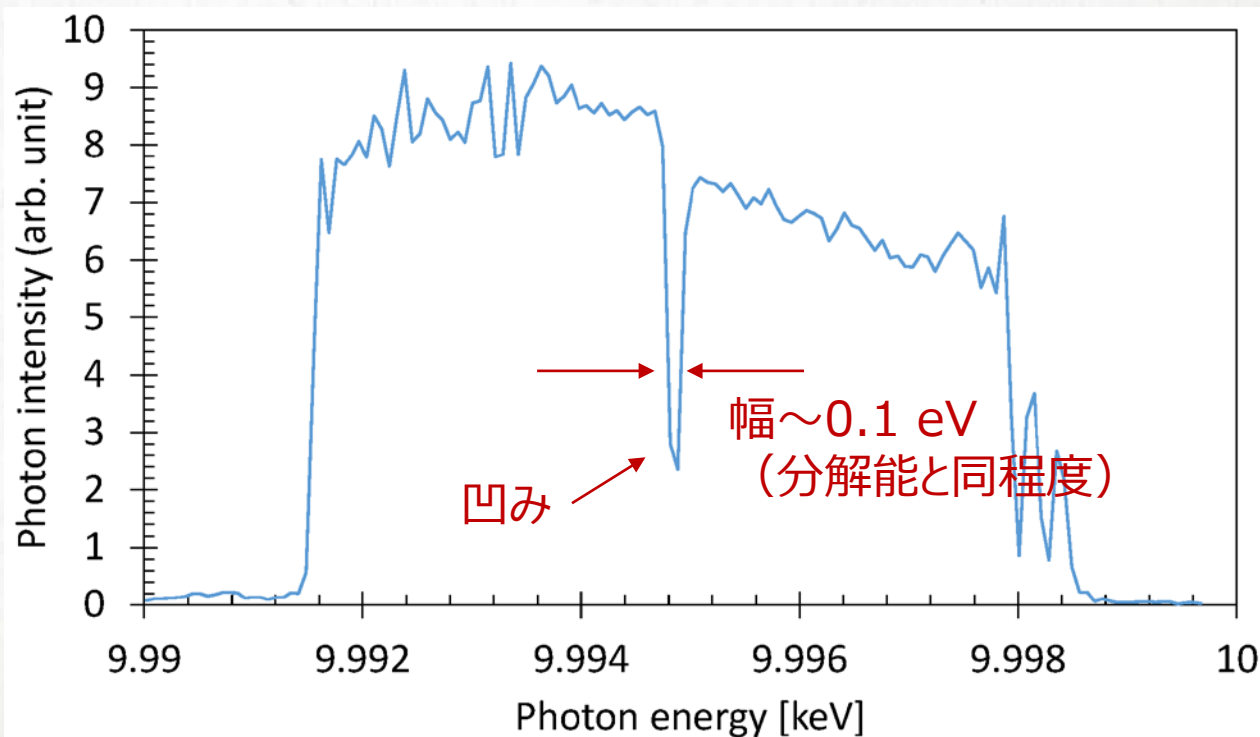


# 透過光のスペクトル測定

- スペクトロメータの分解能を上げ、透過光のスペクトルを測定。
- Bragg回折によって生じる凹みを観測。
- ダイヤモンド結晶の損傷や品質劣化が無いことを確認。

透過光のスペクトル  
(100ショット積算)

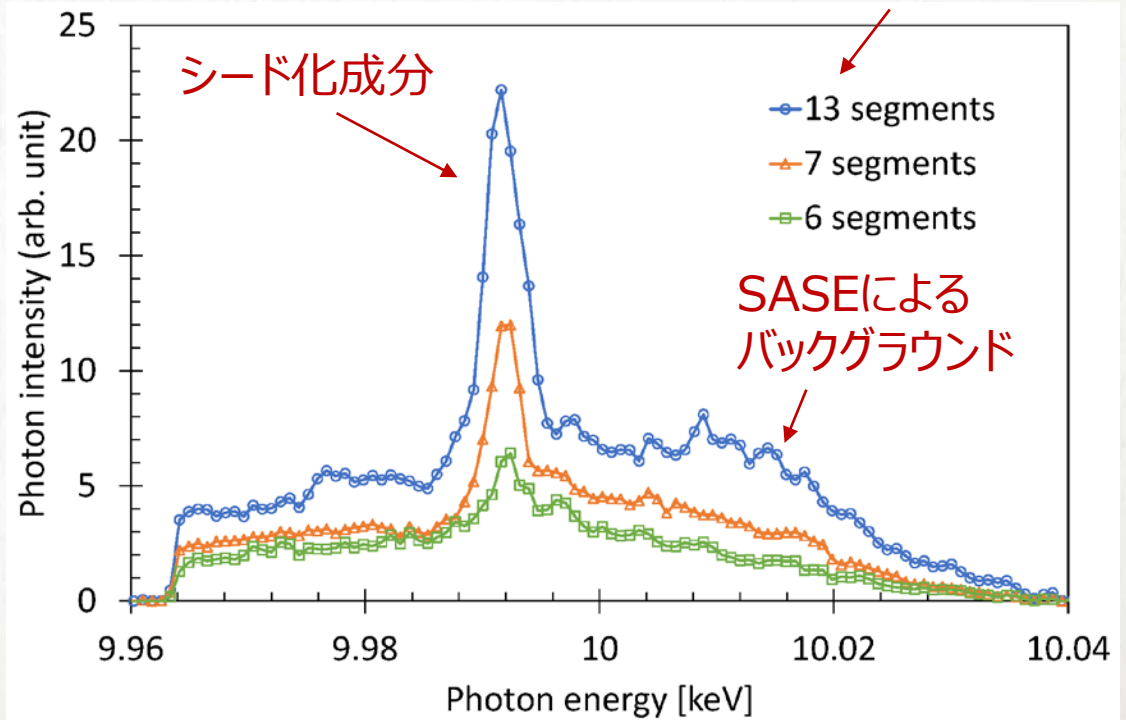
Si(660)面を用い  
高分解能で測定



# シード化による増幅の確認

- 下流アンジュレータを閉じると、シード化された単色成分の増加が観測された。
- 下流アンジュレータを全13台とも使用した時、100ショットの平均強度で
  - ピーク強度 SASEの約4倍
  - スペクトル幅 FWHMで3 eV …SASEの約1/10

下流アンジュレータの台数

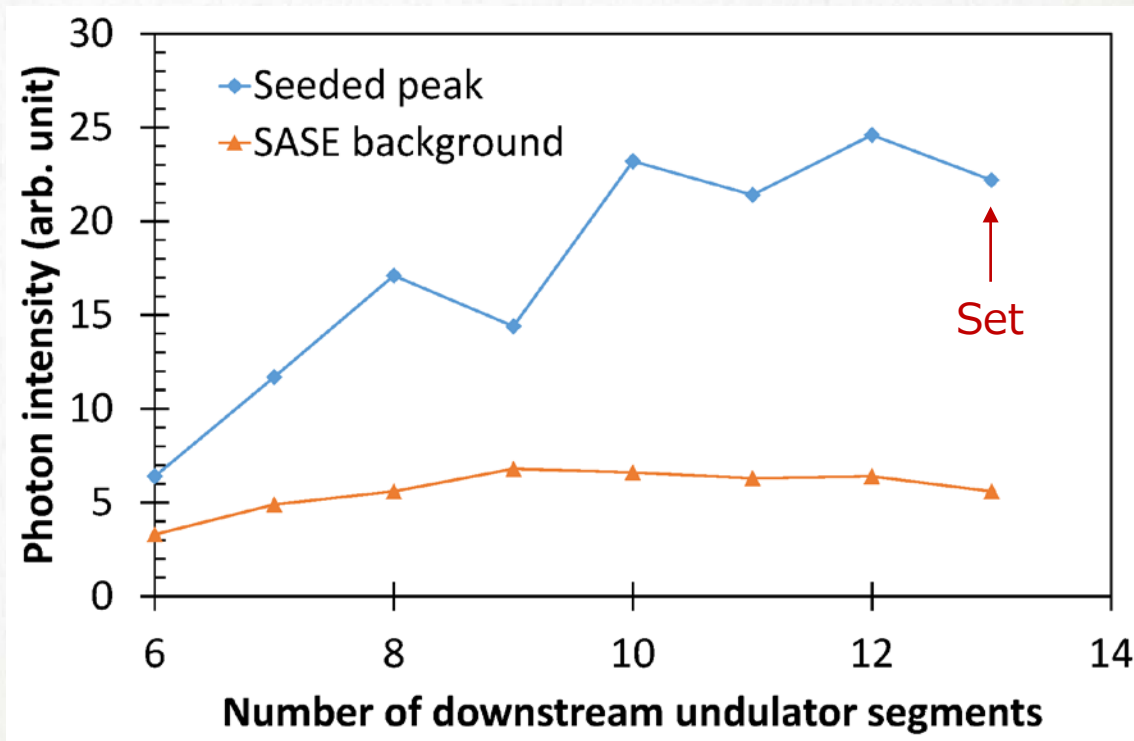


100ショット積算  
したスペクトル

上流アンジュレータ 4台  
遅延時間 20 fs

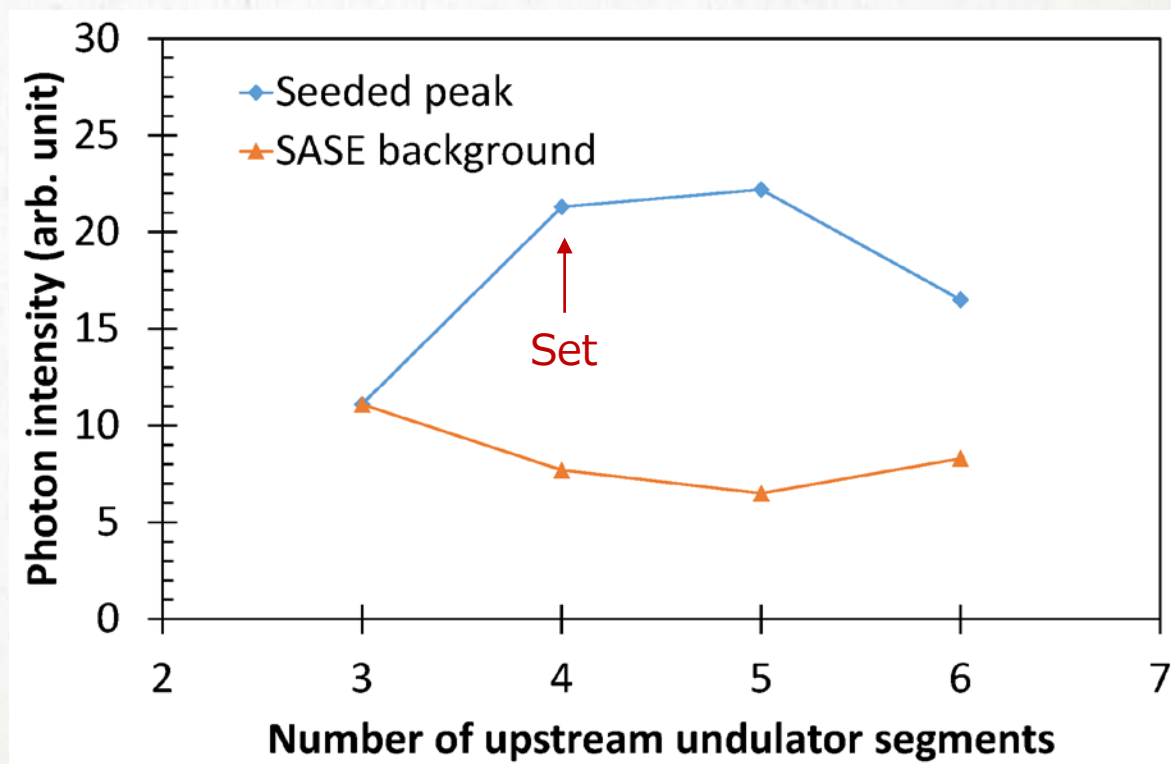
# 下流のアンジュレータの台数

- SASEは、台数を増やしても、強度がほとんど変わらなかった。（ほぼ飽和している）
- シード化成分は、10台目まで強度が増加した。
- 今後、条件（K値のテーパー等）を最適化すると、更に増加できるかもしれない。



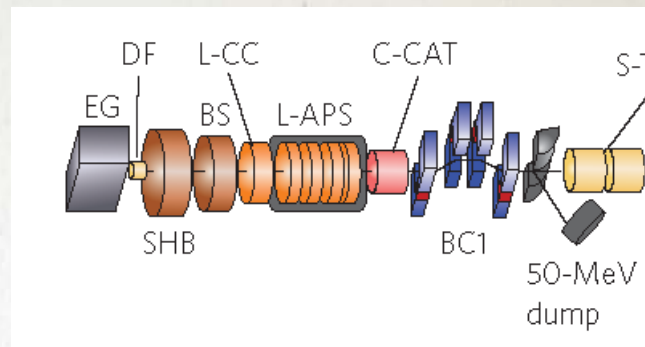
# 上流のアンジュレータの台数

- 上流を3台にすると、SASE ( $\sim 1 \mu\text{J}/\text{pulse}$ ) が弱すぎ、シード化されない。
- 上流を6台 ( $\sim 150 \mu\text{J}/\text{pulse}$ ) 以上にすると、エネルギー発散が大きくなり効率が低下。
- 上流は4~5台 ( $20\sim 100 \mu\text{J}/\text{pulse}$ ) が適切。



# 加速器のRF位相に対する感度

- RF位相を変えた時の、スペクトルの変化を測定。
- シード化成分の許容RF位相誤差 SASEの半分程度
  - Cバンド・オフレスト部  $\pm 0.2^\circ$  (100 fs)
  - Lバンド加速器  $\pm 0.05^\circ$  (100 fs)
  - 238MHzプリバンチャー空洞  $\pm 0.05^\circ$  (600 fs)
- スペクトル幅が1/10であること、およびピーク電流やエネルギーチャープが増幅過程に影響するためか。

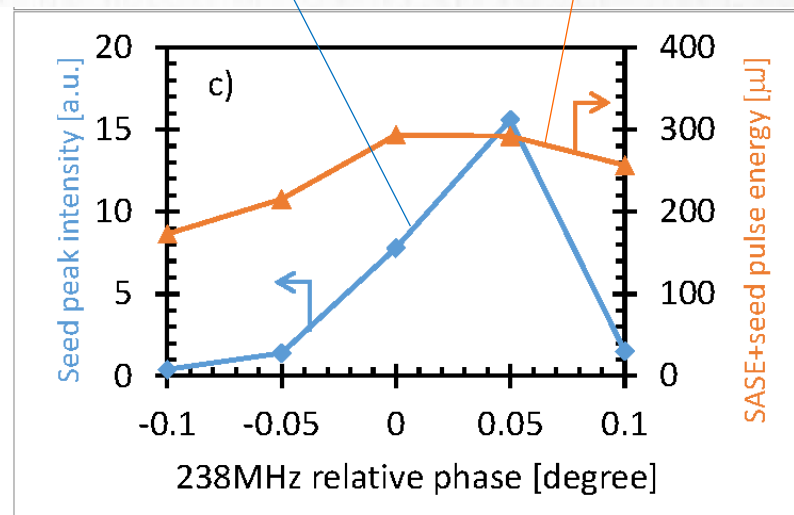
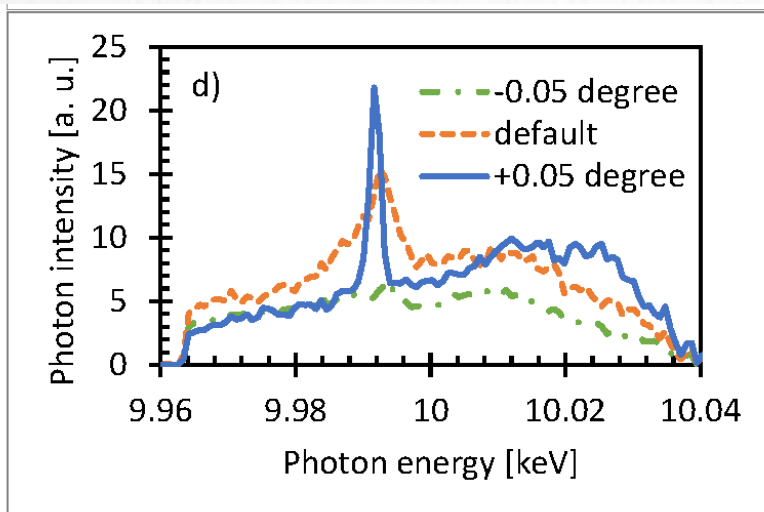


SACLA入射部の構成

パルスエネルギー  
(主にSASEの強度)

シード化成分のピーク強度  
(SASEを差し引き済み)

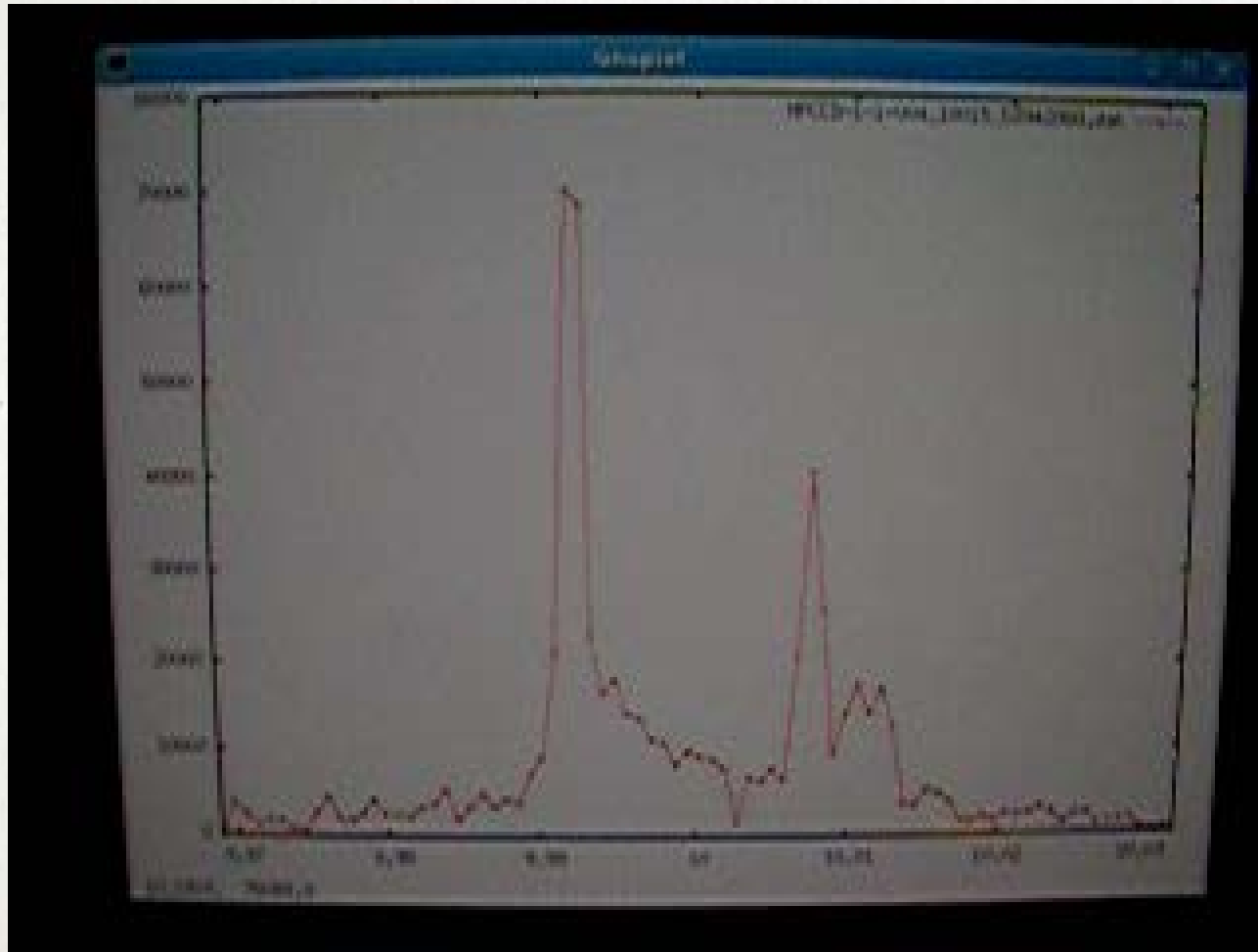
## 238MHzの位相を変えた時の、スペクトルの変化



# シングルショット毎のスペクトル

Movieにて

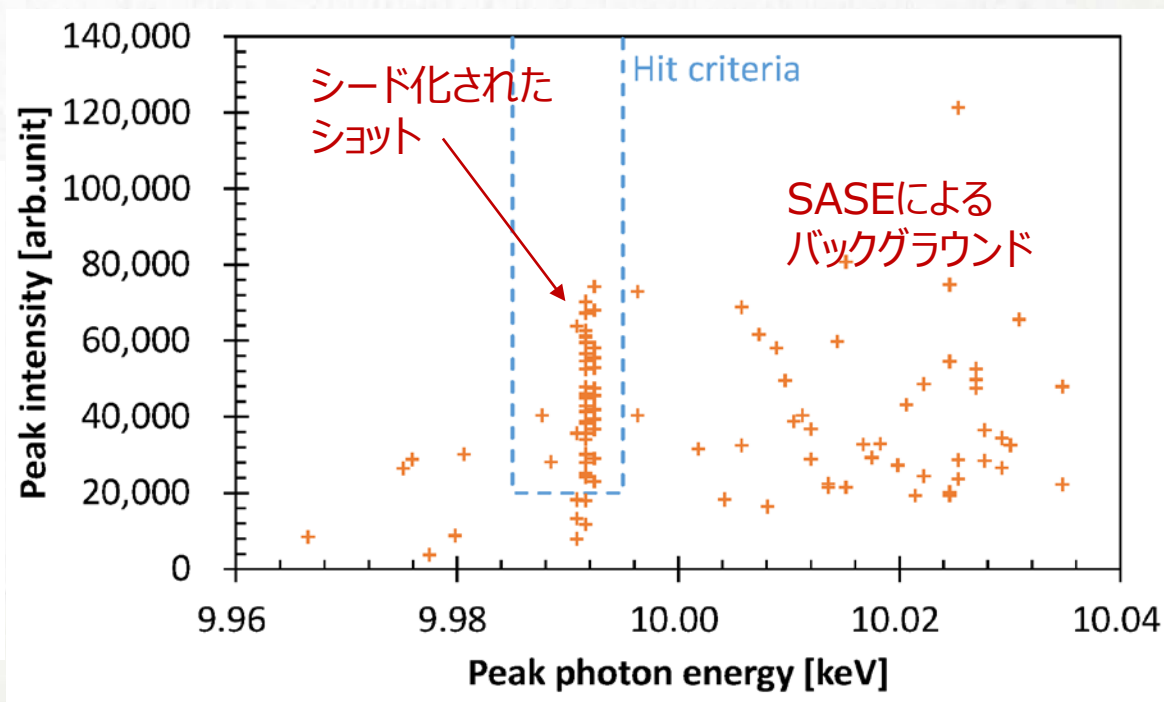
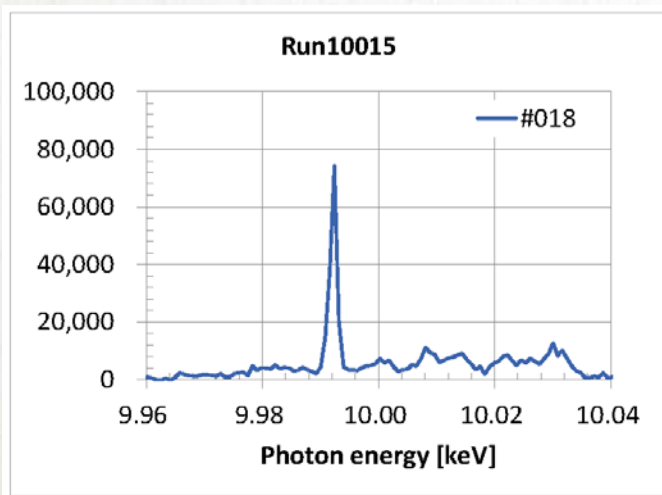
アンジュレータ 上流4台、下流13台、遅延20fs、238MHzを $+0.05^\circ$



# シングルショットでのピーク強度と波長

- 「シード化された」と判定されるショットの割合は、100ショット中42ショット。
- ピーク強度の変動幅 RMSで 31%
- 光子エネルギー（波長）の変動幅 RMSで 0.9 eV（測定系の分解能と同程度）
- 今後の実用化に向け、加速器の最適化と安定化をしてヒット率を上げたい。

シングルショット波形の例

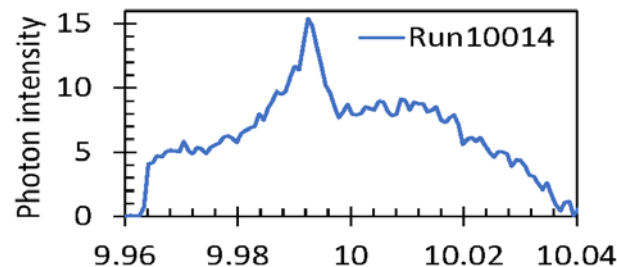




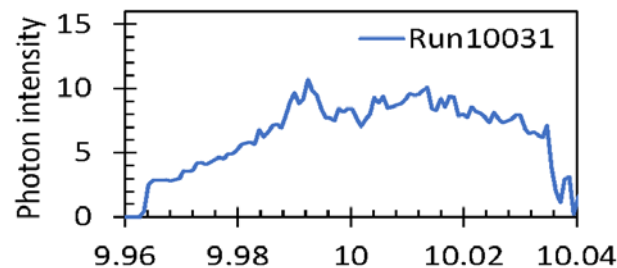
# シード化の安定性

- 中期的、長期的な安定性、再現性は、残念ながら、まだ不足している。
- 自己シード型FELはSASEよりも敏感なため、SASEでは問題とならなかった加速器の不安定性が、影響している可能性がある。
- 加速器の更なる安定化（光路長の制御、フィードバック制御など）や、運転条件の変更（感度を緩和する、等）等を、今後実施する予定。
- SASEより 1ランク上の安定性と制御精度が要求される。

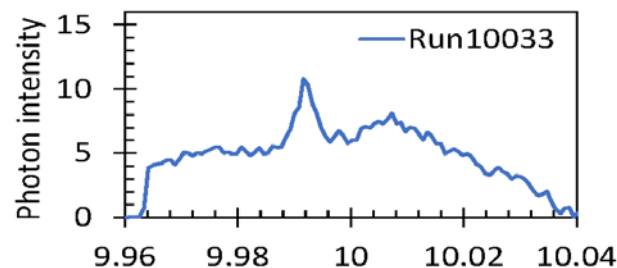
4:00頃



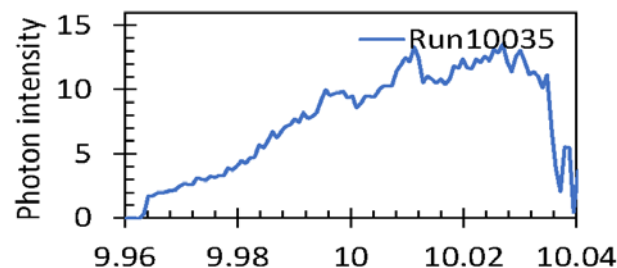
5:00頃



6:00頃



7:00頃



# まとめと今後の課題

- SACLAでは、X線FELの単色化、高輝度化を目指して、自己シード型FELの調整試験を行ってきた。
- ダイヤモンド単結晶のBragg回折により、シード光を生成。
- 下流アンジュレータで増幅し、9.991 keV、波長幅 3eVの単色光を発生できた。
- 平均ピーク強度は、SASEの約4倍。
- 半数近くのショットでシード化がなされ、ショット毎の強度変動は、RMSで31%。
  
- 加速器の変動に対して、通常のSASE運転時よりも、更に敏感である。
- 中期的、長期的な安定性が、まだ不足している。
- 実用化を目指して、安定化と調整を進めてゆく予定である。

# ご清聴ありがとうございました

昨年11月17日  
初めてのシード化の観測

