

世界のXFELの展望とSACLA の現状と高度化の方向性

理化学研究所

大竹雄次、XFEL研究部門を代表して

本発表の内容

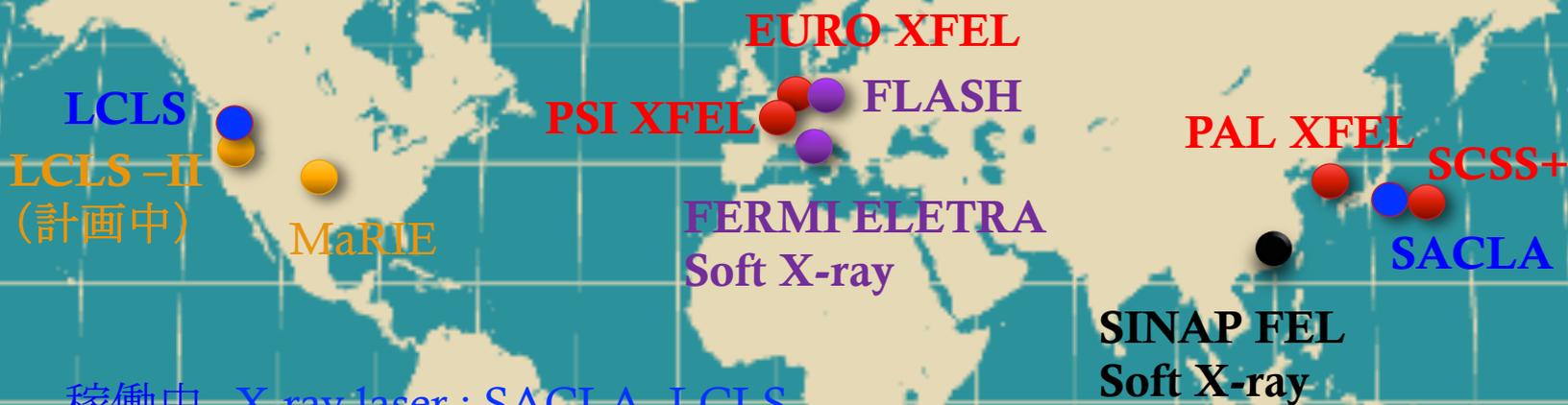
●世界のXFELの展望

●SACLAの現状

安定化

高度化の方向性

世界のXFEL施設 (稼働中、建設中および計画中)



稼働中 X-ray laser : SACLA, LCLS

建設中 X-ray laser : Eruo XFEL, PSI XFEL, PAL XFEL

計画中 X-ray laser : Los Alamos XFEL (MaRIE)

稼働中 Soft X-ray laser : Flash, FERMI

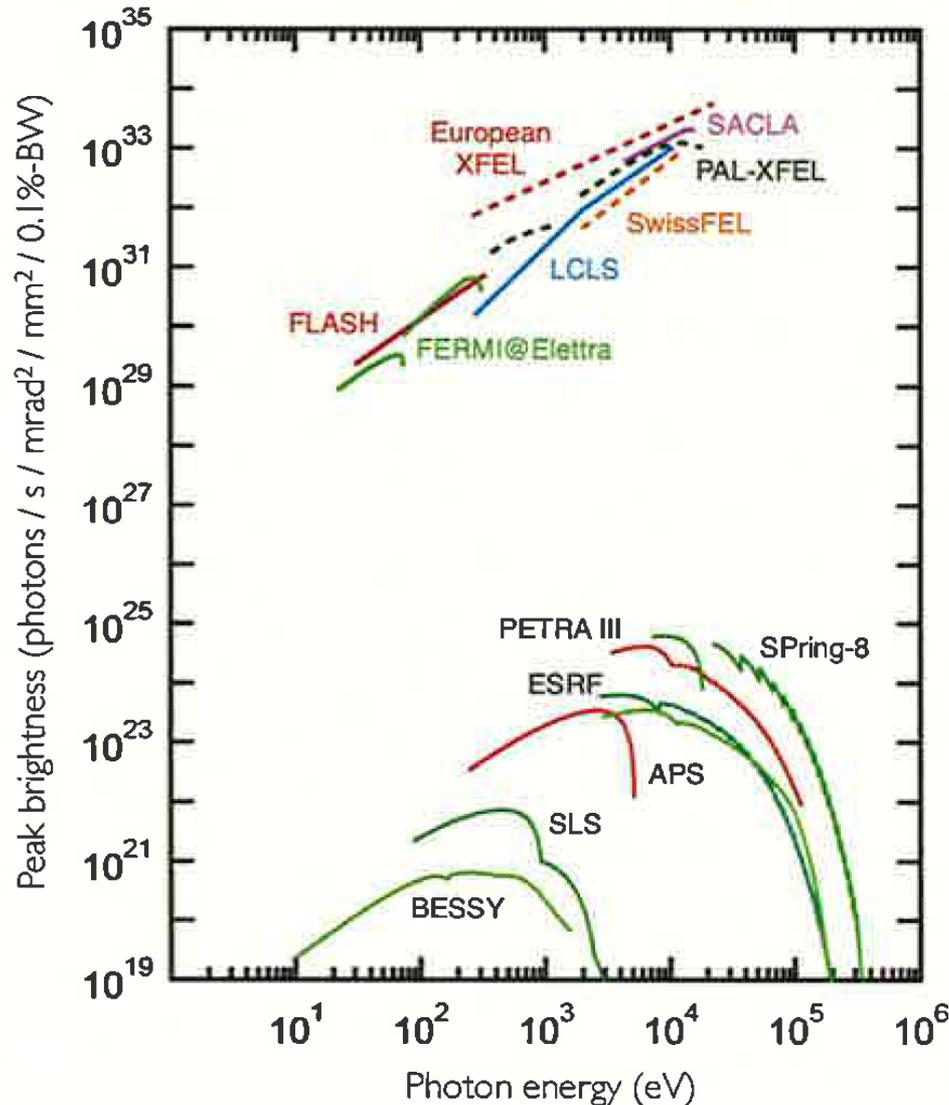
建設中 Soft X-ray laser : SINAP FEL

XFELの性能

建設中

	SACLA (稼働)	LCLS (稼働)	← EURO-XFEL	PAL-XFEL	→ PSI-XFEL
X線の最大エネルギー(keV)	14.5	9.5	24.8	12.4	12
電子の最大エネルギー(GeV)	8.2	14.5	17.5	10	5.8
電子の尖塔電流(kA)	>3~4	3~5	5	2~4	1.5~2.7
電子ビームパルス幅 (fs rms)	< 30	10 ~ 300	10 ~ 100	< 60	13
Peak Brightness @ 10keV (Photon/s/mm ² / mrad ² /0.1% bandwidth)	2x10E33	8x10E32	5x10E33	1x10E33	3x10E32
Pulse Energy/Pulse	0.5 mJ @ 10keV	2.1 mJ @ 9.5 keV	2.2 mJ (設計) @ 12.4 keV	1.8 mJ (設計) @ 12.4 keV	0.06 mJ (設計) @ 12.4 keV
Pulse repetition (Hz) (Shots/pulse, Sh/p)	60 1 sh/s	120 1 sh/p	10 2700 sh/p	60 1 sh/p	100 1 sh/p
K Value	1.5~2.2	2.5	3.3	1.3~2.1	0.85
加速空洞	Cバンド	Sバンド	超伝導 (Lバンド)	Sバンド	Cバンド

各XFEL施設のレーザー輝度



Springer Tracts in Modern Physics
Volume 258 2014
Free-Electron Lasers in the Ultraviolet
and X-Ray Regime, 2nd Ed,
Physical Principles, Experimental
Results, Technical Realization

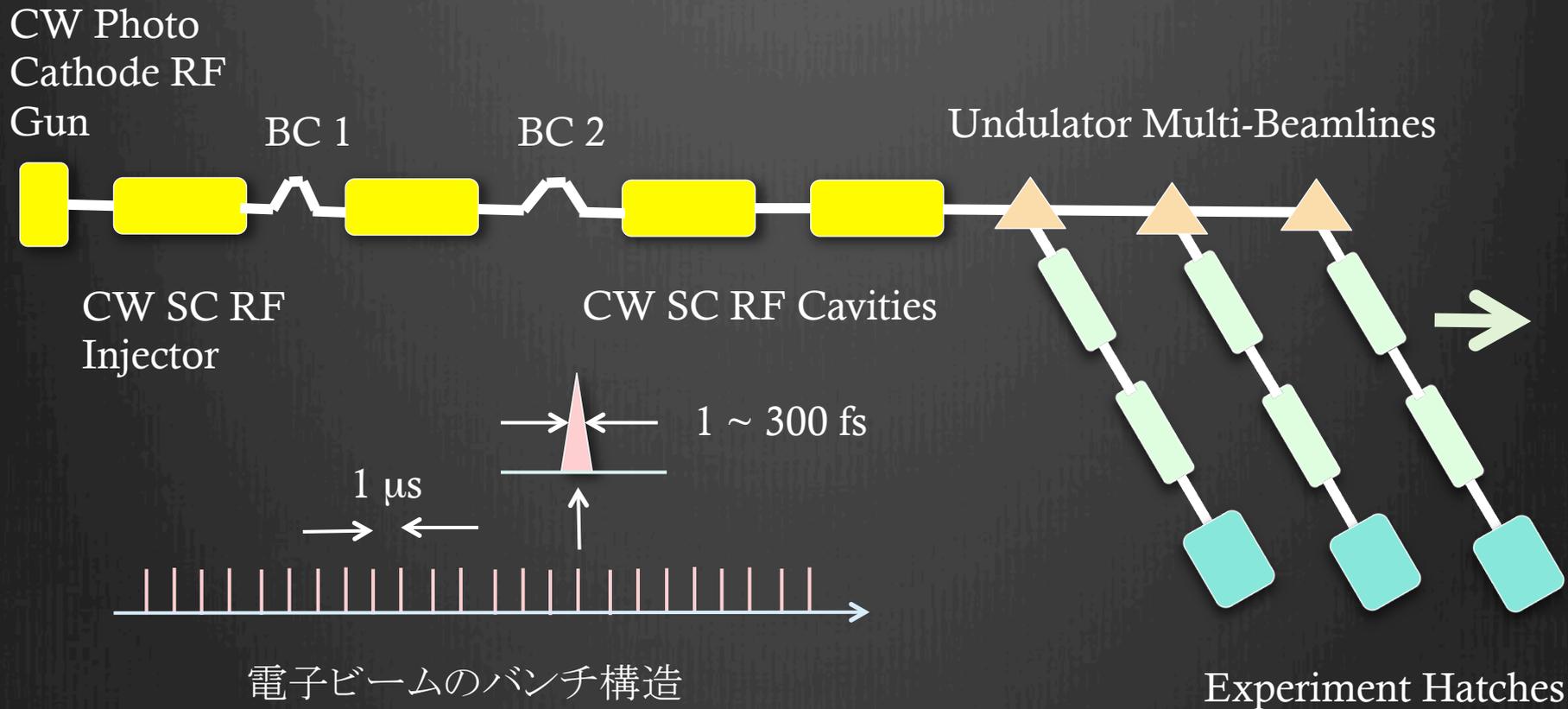
から引用。

計画中の(Soft)XFELの性能(設計)

	LCLS-II (NGLS)	MaRIE (LANL)
X線の最大エネルギー(keV)	1.24	41.3
電子の最大エネルギー(GeV)	2.4	12
電子の尖塔電流(kA)	0.6	3.4
電子ビームパルス幅 (fs rms)	1 ~ 300	< 30
Peak Brightness @ 10keV (Photon/s/mm ² /mrad ² /0.1% bandwidth)	8x10E32	5x10E33
Pulse Energy/Pulse	0.1 mJ @ 9.5 keV	0.3 mJ @ 12.4 keV
Pulse repetition (Hz)	連続波	120 ?
K Value	1.4	0.86
加速空洞	超伝導 (Lバンド)	Xバンド

高ディユーター・高エネルギーX線(?)への指向

NGLS (LCLS-II)の例



CW リニアックでたくさんのビームラインを駆動。
そのための大きな障害となるのは電力である。
だから、超伝導CWリニアックを使用する。

SACLAの現状と高度化

ユーザー実験の再現性のために

- SACLAの概要、現状
- X線レーザーの出力強度、波長範囲、安定性、パルス幅

レーザーの強度安定性を向上するための機器の安定化（環境影響排除）

- 空洞の温度制御、湿度制御
- 高周波時間基準信号ライン用ファイバーの光路長制御
- バンチ圧縮のためのバンチ長制御

SACLAの高度化

（シングルユーザーマシンを超えて、より柔軟にユーザーの要求に対応するために）

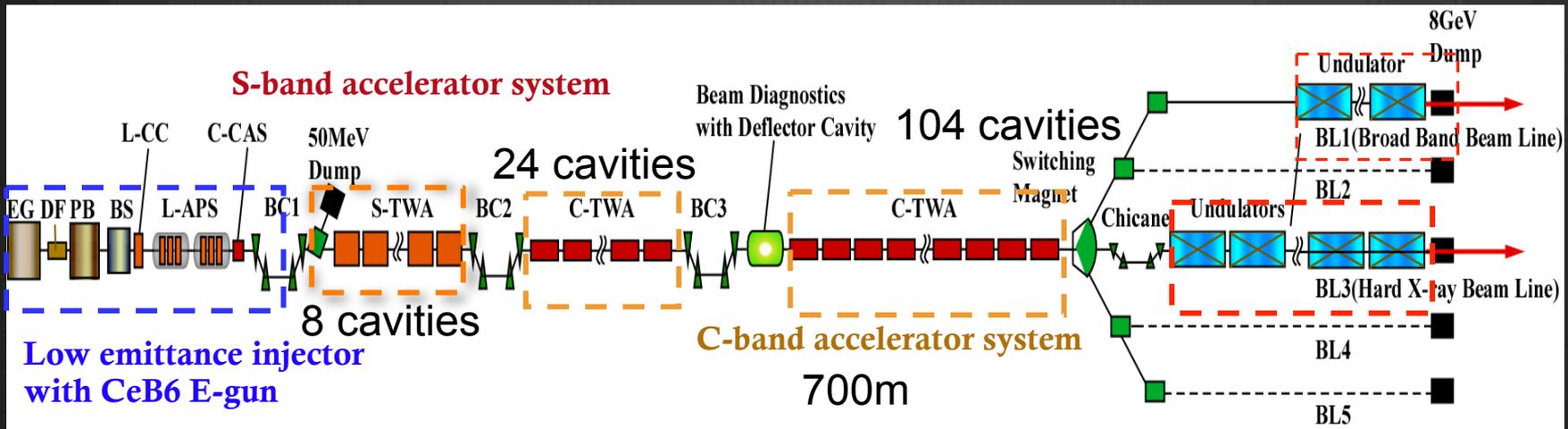
- ⊗ BL3でのセルフシーディング
- ⊗ 新規X線ビームライン増設, BL2.
- ⊗ マルチビームラインに対応したビームのパルス振り分け
- ⊗ SCSSのSACLA光源棟への移設による(SCSS+)、既存ビームラインBL1の能力向上
- ⊗ 加速器の高電界化および高繰り返し化(将来に向けた開発)

SACLAの現状

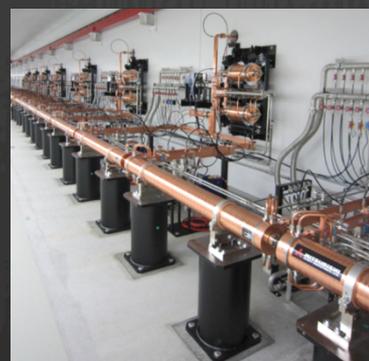
SACLAの機器構成

SACLAは、500kV低エミッタンス($<1\text{mmrad}$)パルス電子銃とCバンド高電界(37MV/m)、短周期(K \sim 2,2)真空封止アンジュレータにより構成されている。

In-vacuum undulators

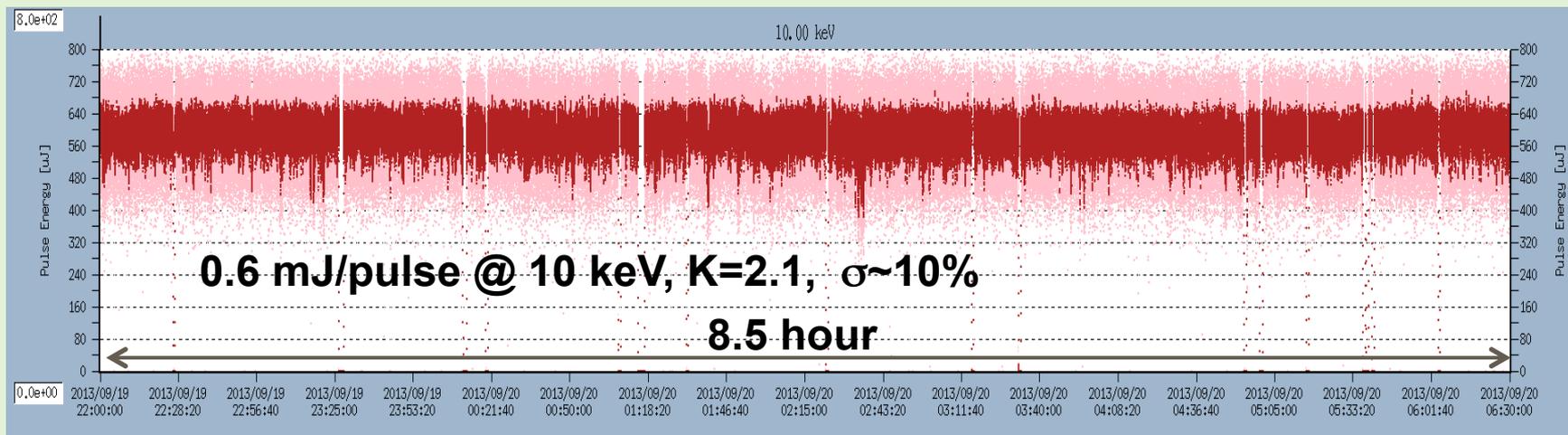


Experimental Hall

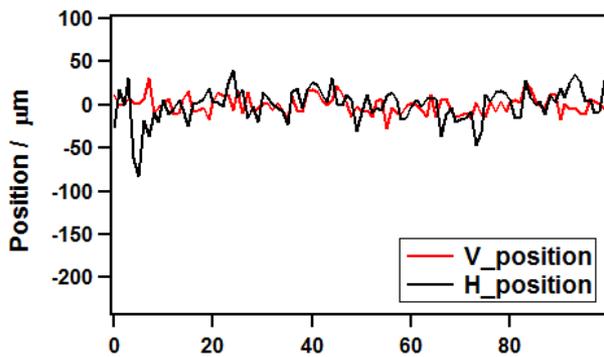
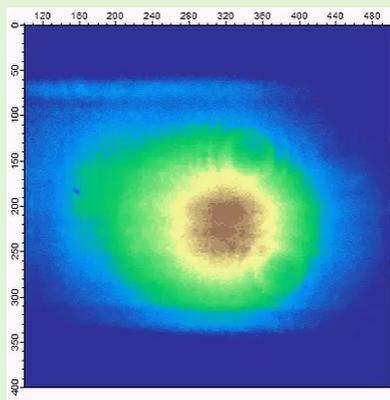


SACLA の現状性能

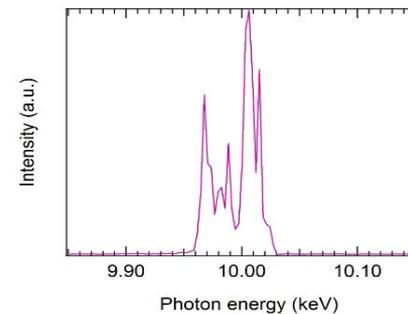
SASE 強度安定性



Pointing stability @実験ハッチ1



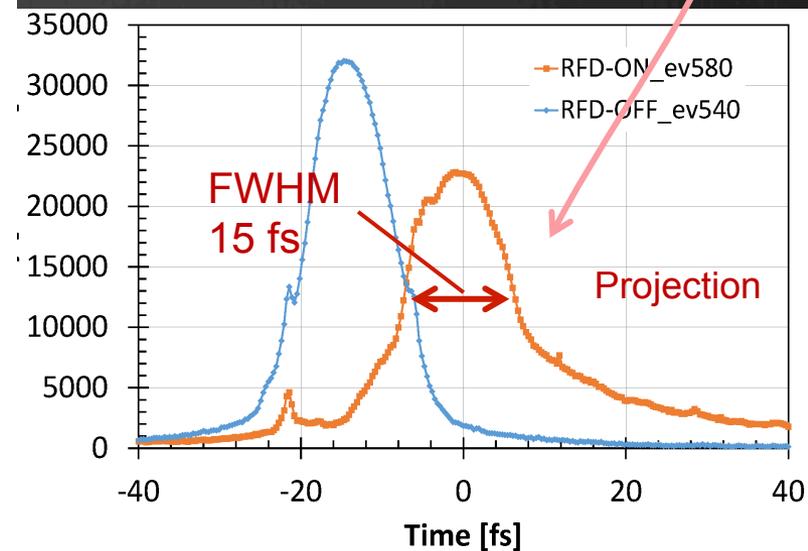
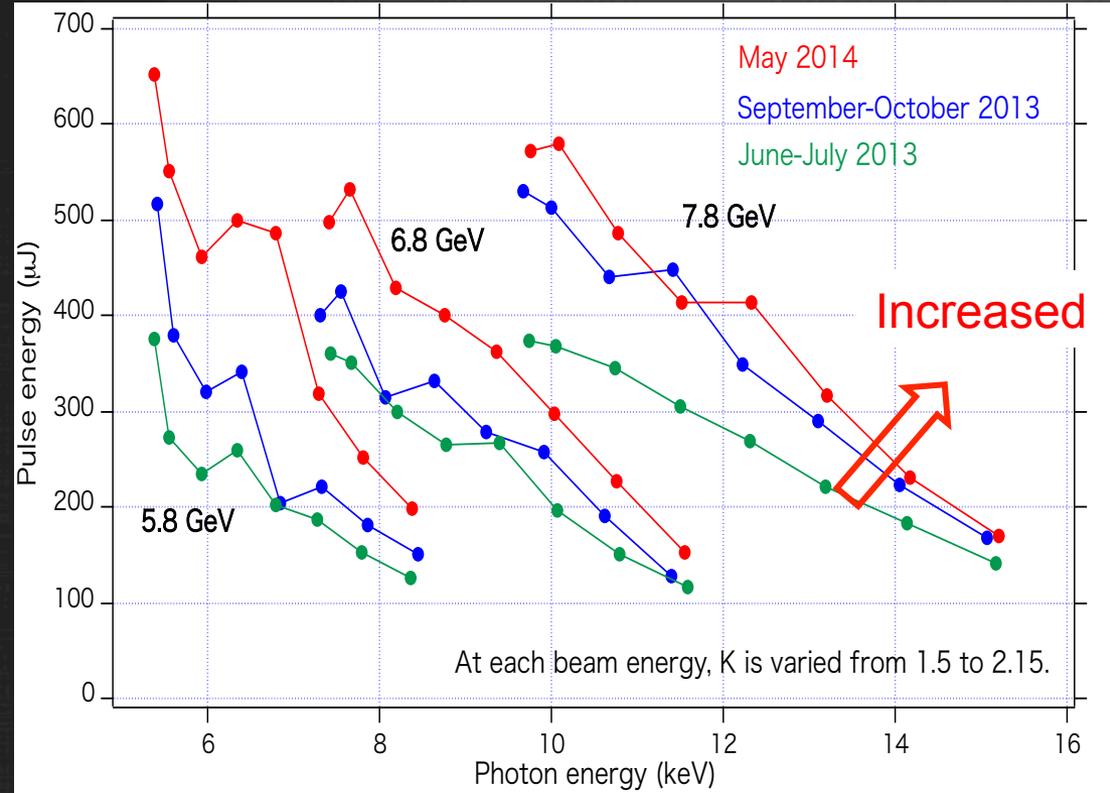
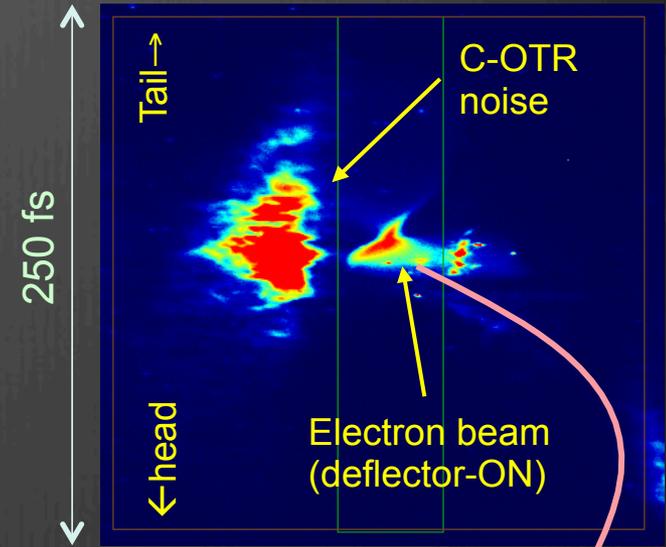
Spectrum stability



X線パルスエネルギーの増加 from 2013 to 2014

- X線レーザーの出力強度は、増加傾向にある。0.5 mJ @ 10 keVにまで到達。
- 典型的なバンチ長 <15 fs (FWHM), RF デフレクターでの測定 (測定精度 ~12 fs エミタンスにより制限)

電子バンチの時間構造
RFデフレクターで測定

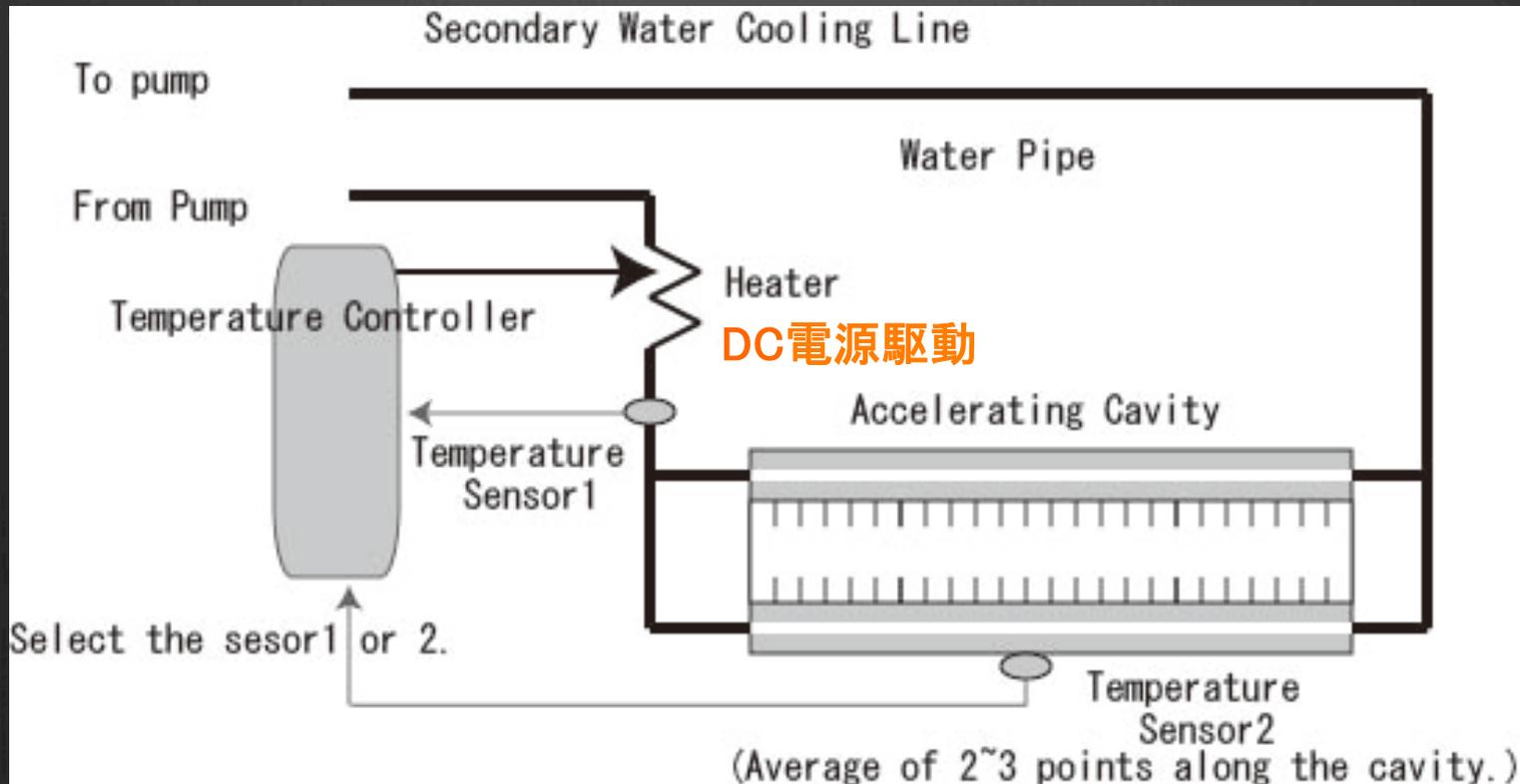


SACLAの安定化

現状の安定性は、次の例に示す性能向上策などで実現。

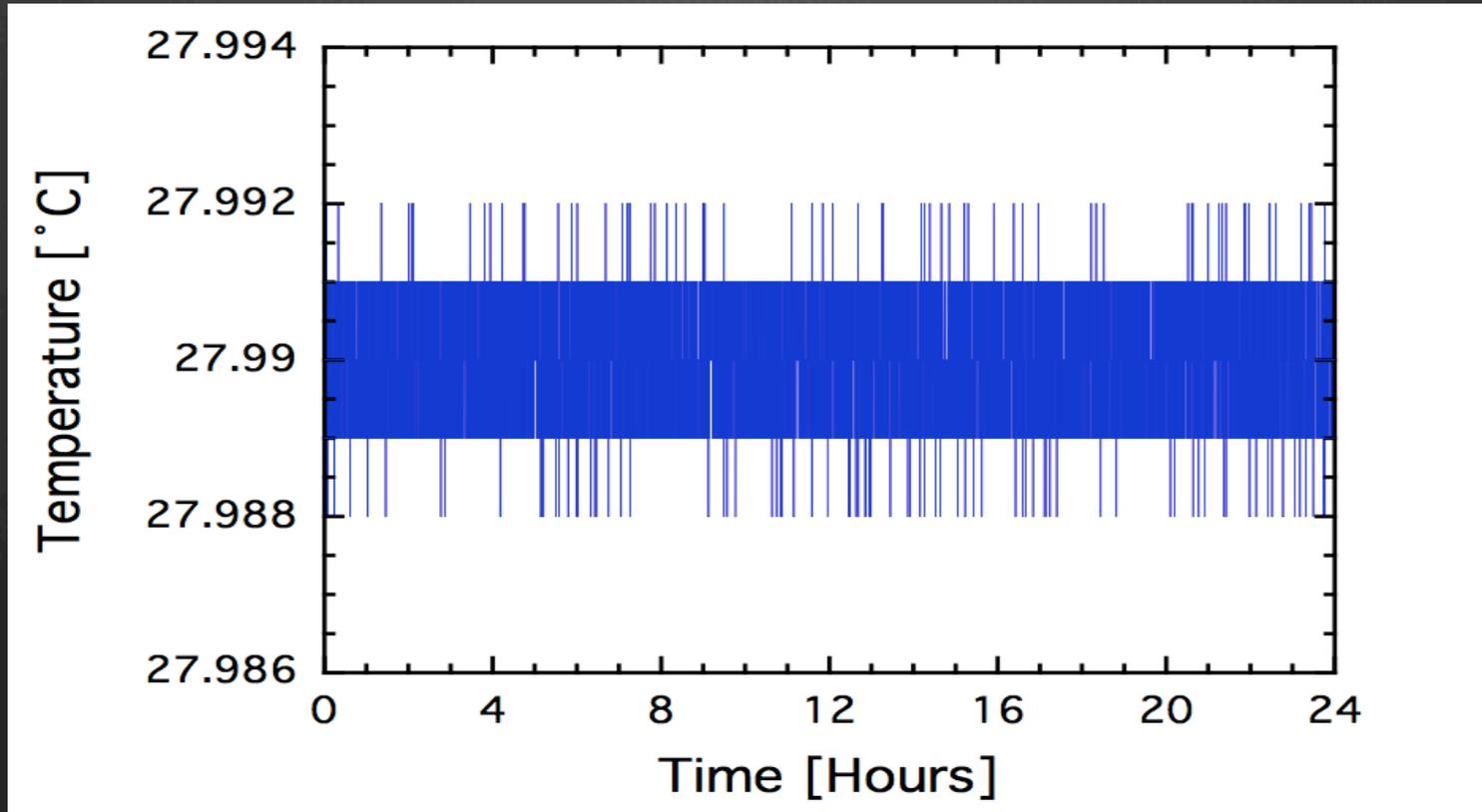
高周波空洞の精密温調制御系

SACLA建設当初の精密温調系の性能(100mKの安定度)は不十分だったので、改良した。



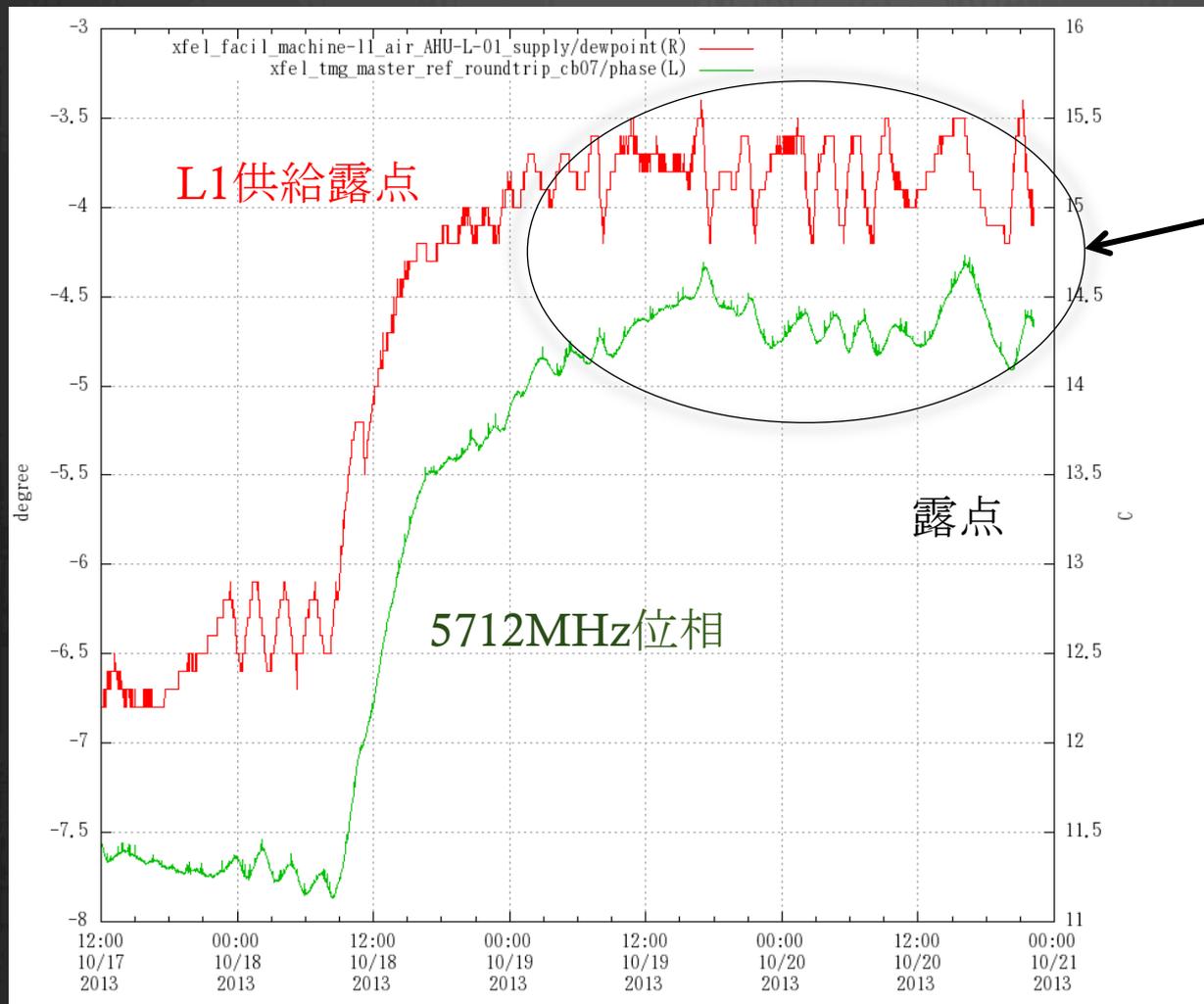
入射部の空洞には高度な温度安定性が要求される。この理由から、2次冷却水系には10 mK に及ぶ恒温性を確保するために、精密温調制御装置が設置されている。また、温調用ヒータ電源をDC化して、ヒータ電流変化によるビーム軌道キックを低減した。

高周波空洞精密温調装置 の温度制御性能



238 MHz-SHBの場合を示す。空洞に入力される冷却水の温度は、10 mK以内に制御されている。これにより空洞の高周波位相は、0.07度以内に収まっている。

加速器高周波基準信号光ファイバー伝送ラインへの湿度変化の影響 (クライストロンギャラリー)



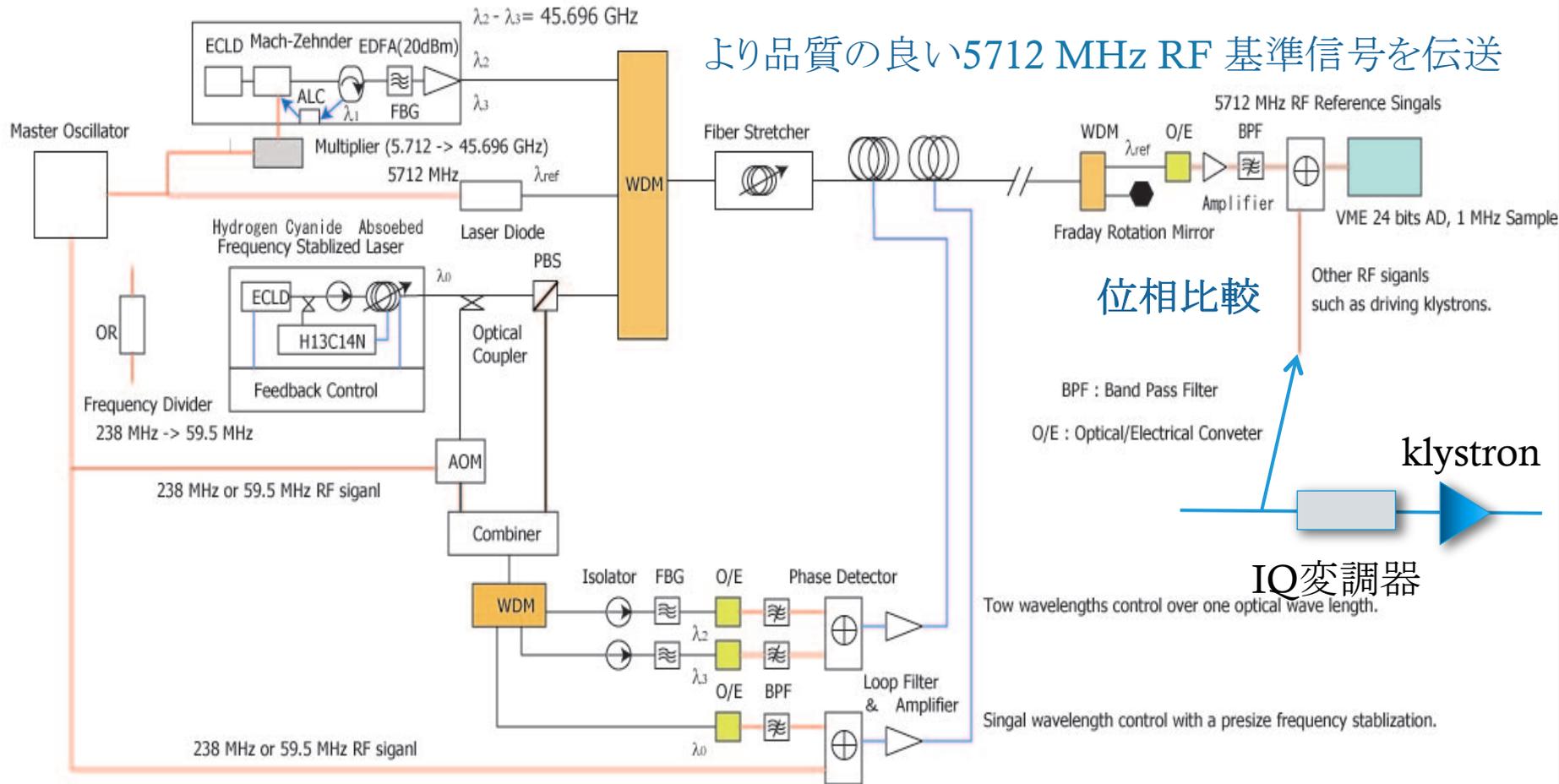
最近の湿度制御の改善で、これくらいには収まっている。

ファイバ往復位相 露点変動の影響は見られている

T. Ohshima et al., Proc. of the 11th PASJ, (2014), in Japanese.

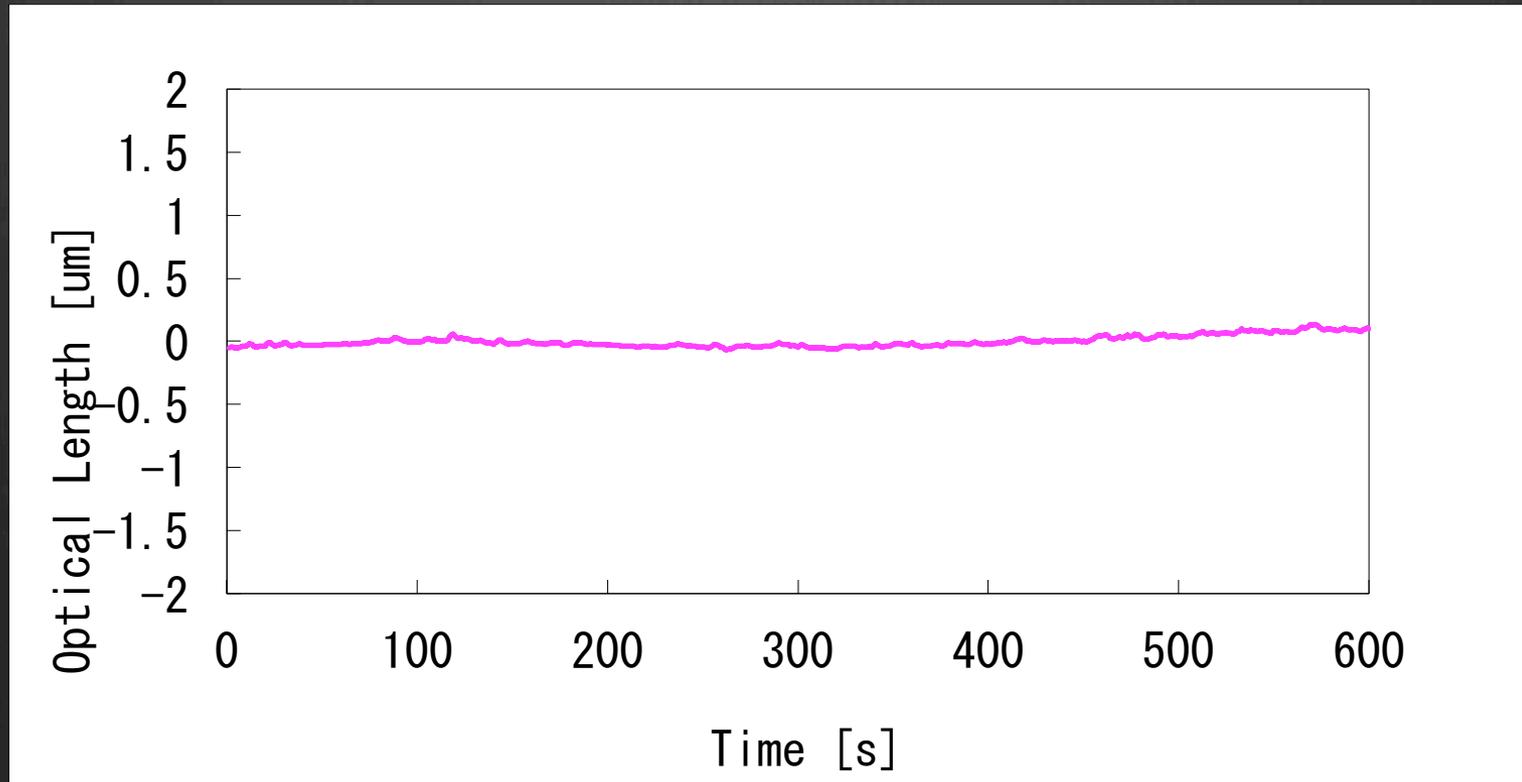
光ファイバー長制御装置

マイケルソン干渉計を使用した、粗調と微調のファイバー長測定装置建設している。



微調の測長制御は、 λ_0 (1548.96 nm) の光波長を基準としている。粗長の測長基準は、光の波長 λ_2 (1552.15 nm) and λ_3 (1552.89 nm)の差周波である45 GHzを使用している。

微調のファイバ長制御装置の性能例 (実験室でのデータ)



安定化している光ファイバー長は、1500 mである。実験室でデータ。

現在、SACLAの実機でもファイバー長制御が実働しており、ファイバー長制御ループの外的変動も含めてSACLAの高周波時間基準ラインの安定度は、50fs p-p程度に安定化されている。

H. Maesaka et al., Proc. of IPAC14, 1906 (2014).

電子ビームのモニターを使用した帰還制御による バンチ幅・強度の安定化

238 MHz SHB
476 MHz Booster Cavity
1428 MHz Correction Cavity
1428 MHz APS Cavity
5712 MHz Correction Cavity



バンチ圧縮器BC1

帰還制御



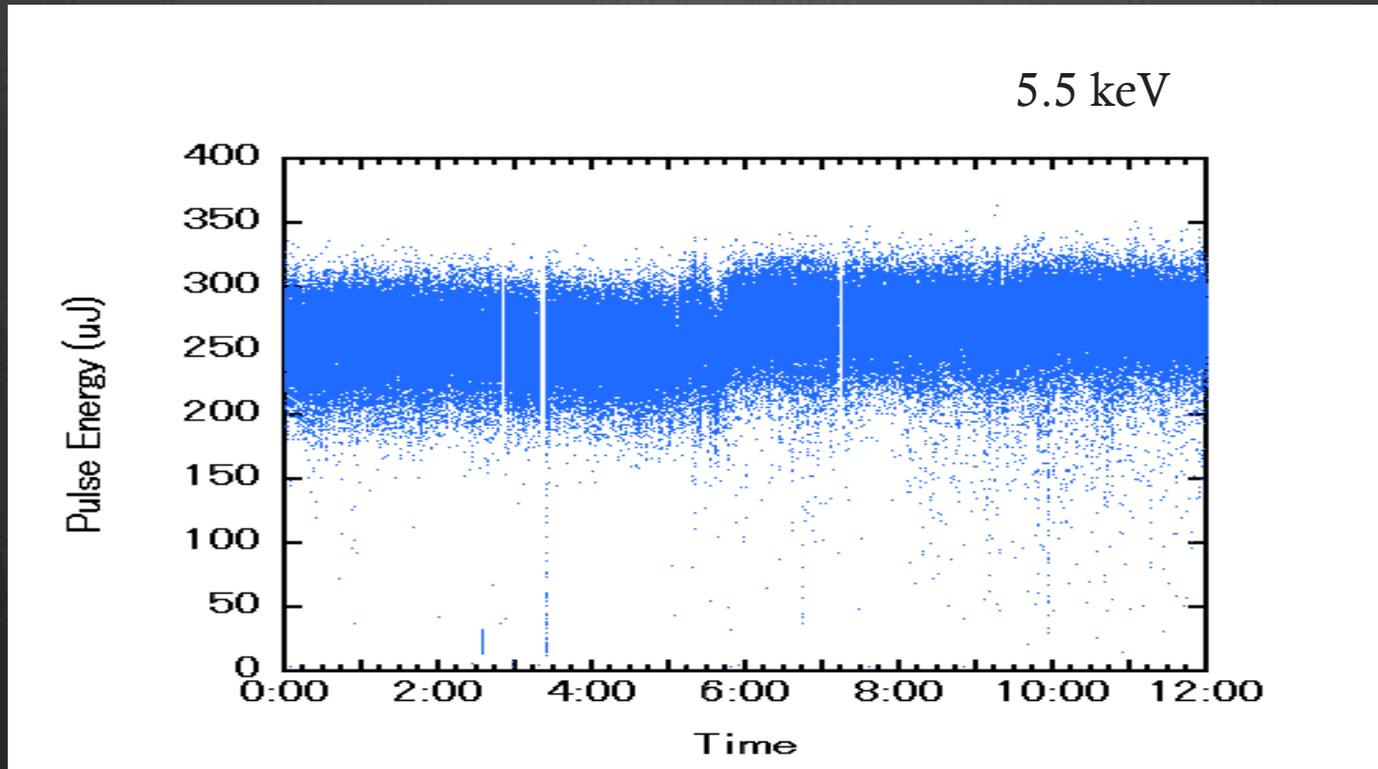
ビーム到着時間モニター

CSRバンチ長モニター

→ 電子ビーム

BC1の前後にある電子ビームモニターにより、ビームの到着時間、エネルギー、バンチ幅を測定して、入射部高周波空洞群の高周波位相などに帰還制御する。それにより電子ビームのバンチ幅ほかを、安定化してX線レーザーの強度変動を少なくする。

電子ビームのモニターを使用した帰還制御 によるバンチ幅・強度の安定化の結果

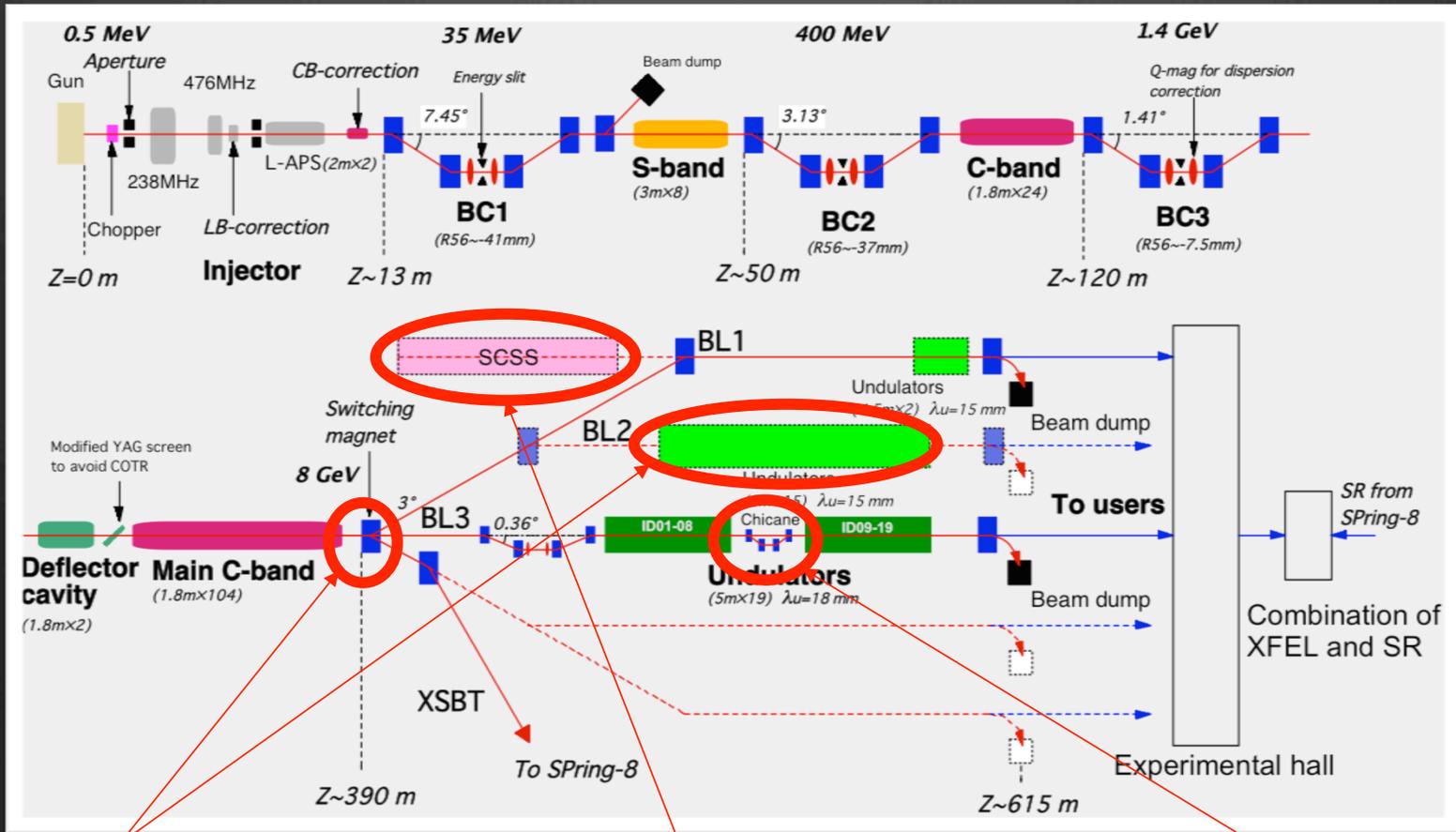


- ⊗ BC1部モニターを使用した入射部高周波空洞の位相への帰還制御の実験を行った。帰還制御部はコンピュータ上に構成された。現状で12時間くらいは、運転員が調整せずにX線レーザーの強度をある程度一定に保持できる場合もある。本システムは、現在、SACLAで稼働中である。

SACLAの高度化

多くのユーザーに、より使いやすいX線レーザーを供給するために。

SACLAの高度化のための増強装置



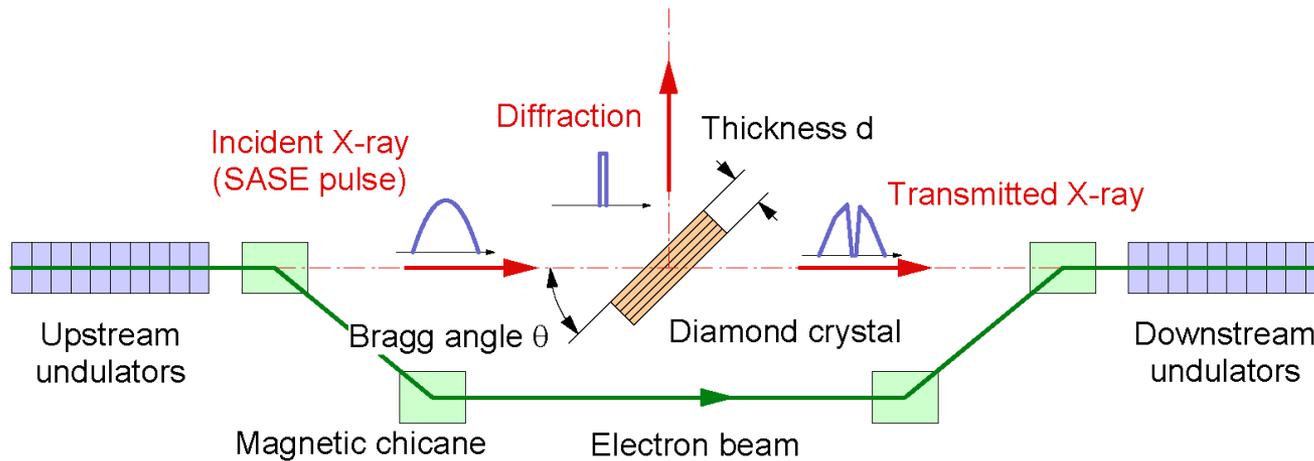
3番目のビームライン、BL2
の建設
時分割の電子ビームのパ
ルス電磁石によるマルチ
ビームラインへの振り分け

SCSS試験加速器移設・
増設 → EUV-FEL 施設
400 MeV、1 GeVまで
増設予定

X線自己シード
透過型のブラッグ回折を使用

セルフシーディング (前方ダイヤモンド結晶回折、FDB)

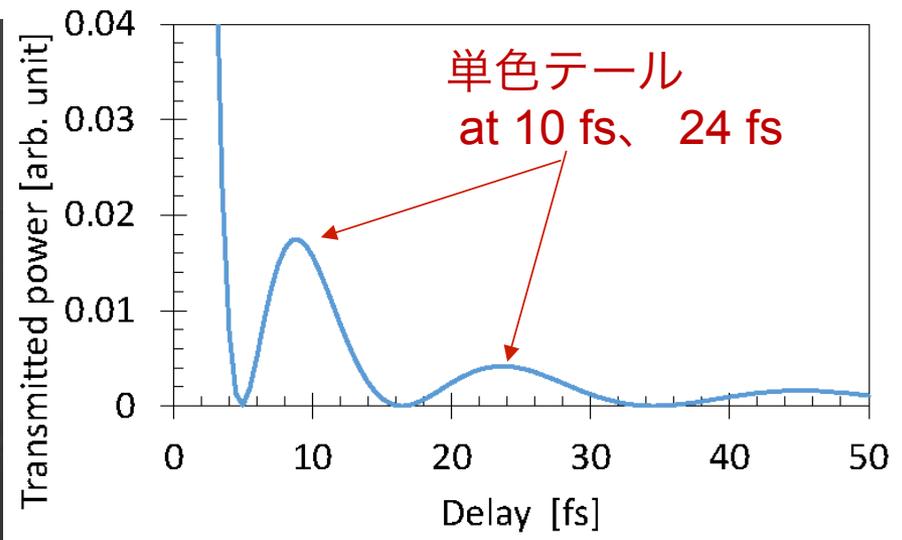
- ⊗ DESY の G.Geloni, V. Kocharyan & E. Saldin, J. Mod. Opt. 58, 1391 (2011) により提案
- ⊗ LCLS J. Amann, et. Al., Nat. Photonics 6, 693 (2012) により実証



FDB 放射のエンベロープ
(数値計算)
10 keV pulse,
C(400) plane,
 $t=180 \mu\text{m}$

FBD により単色エンベロープ成分を生成
(シード光)

磁気シケインで、シード光に対する電子
ビームの遅延・デバンチを生成、単色光成
分との時間的な重なりを生成



ダイヤモンド結晶チェンバー

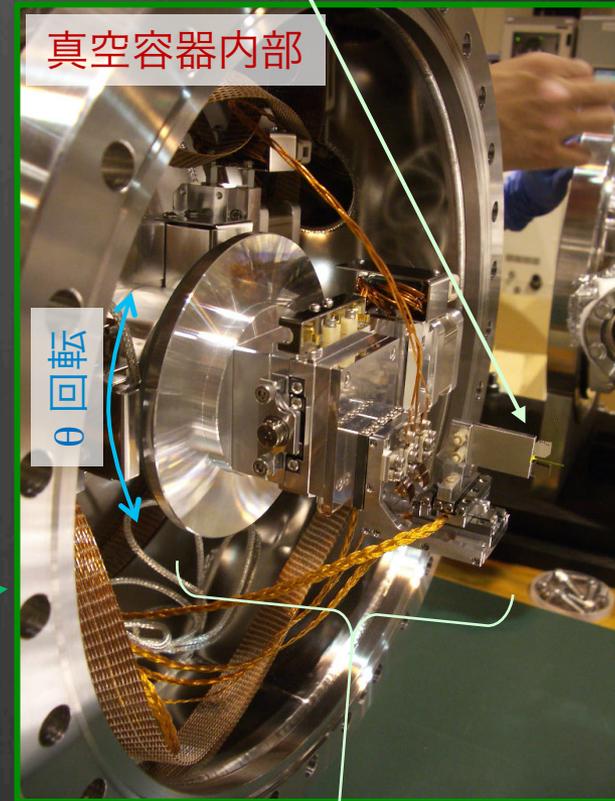
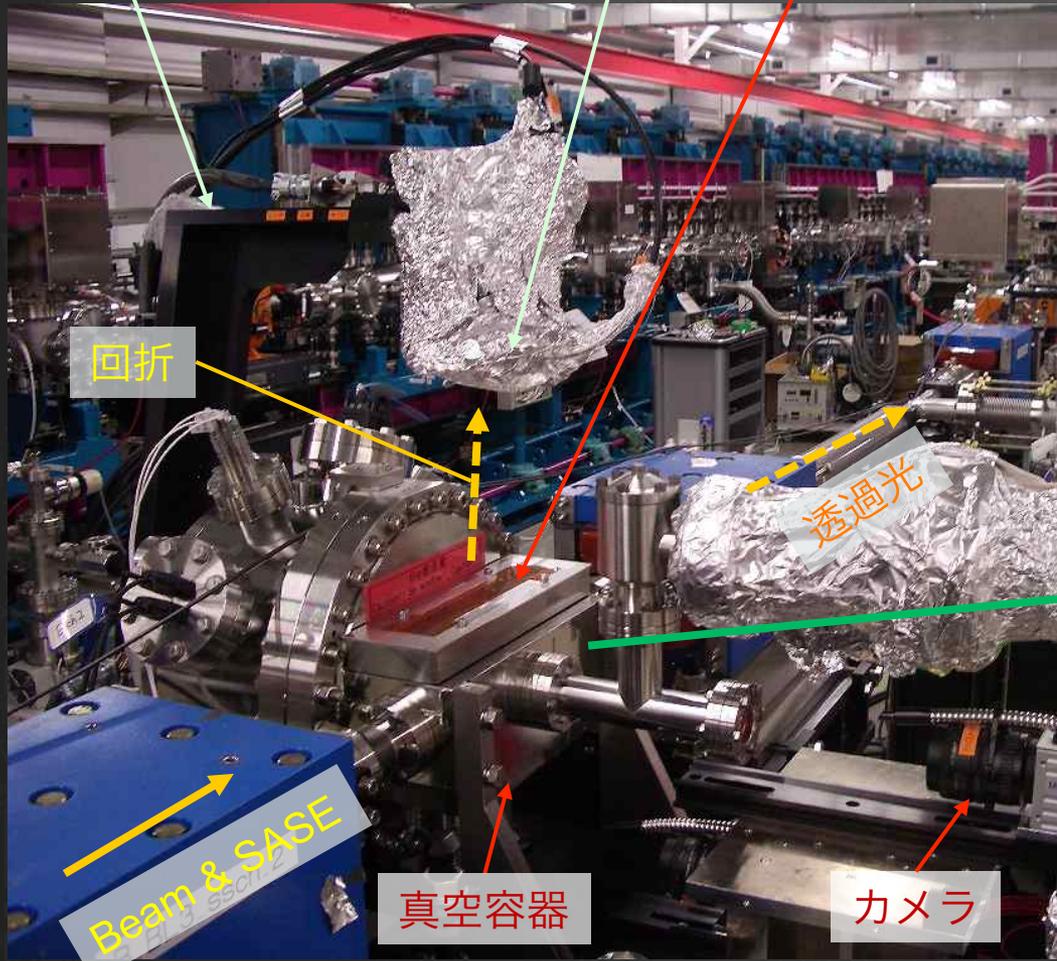
20 回転アーム

回折モニター(Photo-diode & CCD)

Be 窓

ダイヤモンド単結晶

180 μm \times 6.5mm \times 6mm



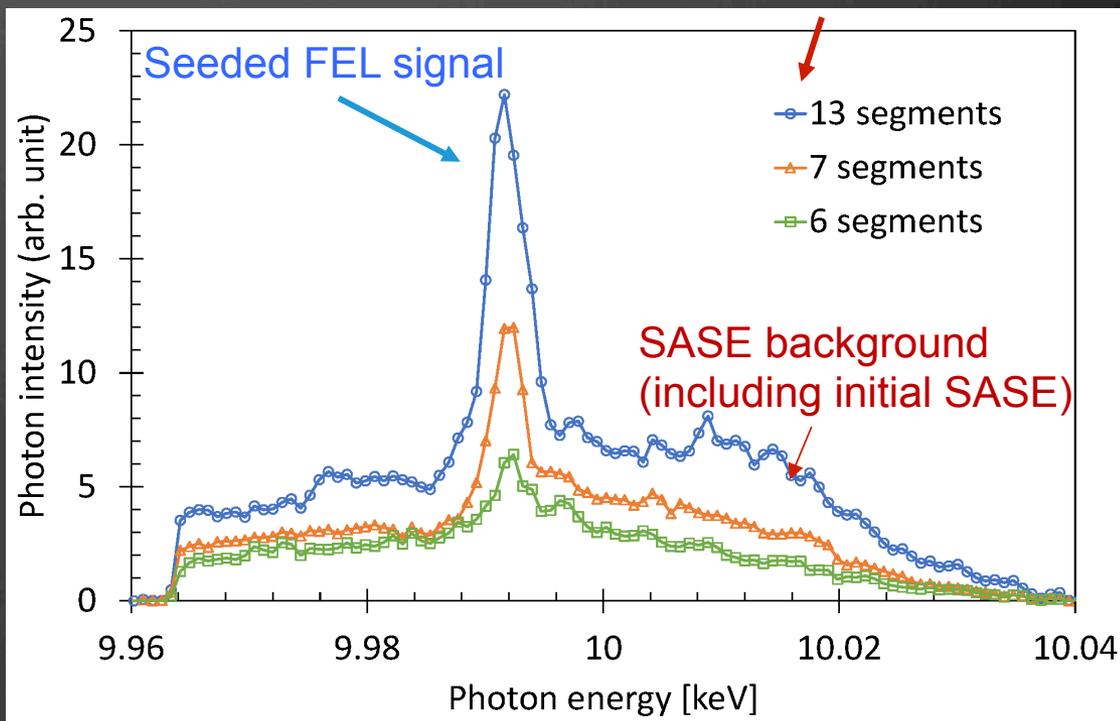
遠隔操作多軸ステージ(x,y,z,Ry, θ)

シードFELの発達

- アンジュレータのギャップを閉じると、シード光が発達する。

シード結晶下流の
アンジュレータの台数

100ショット積分した
シード光のスペクトル



上流4
アンジュレータ

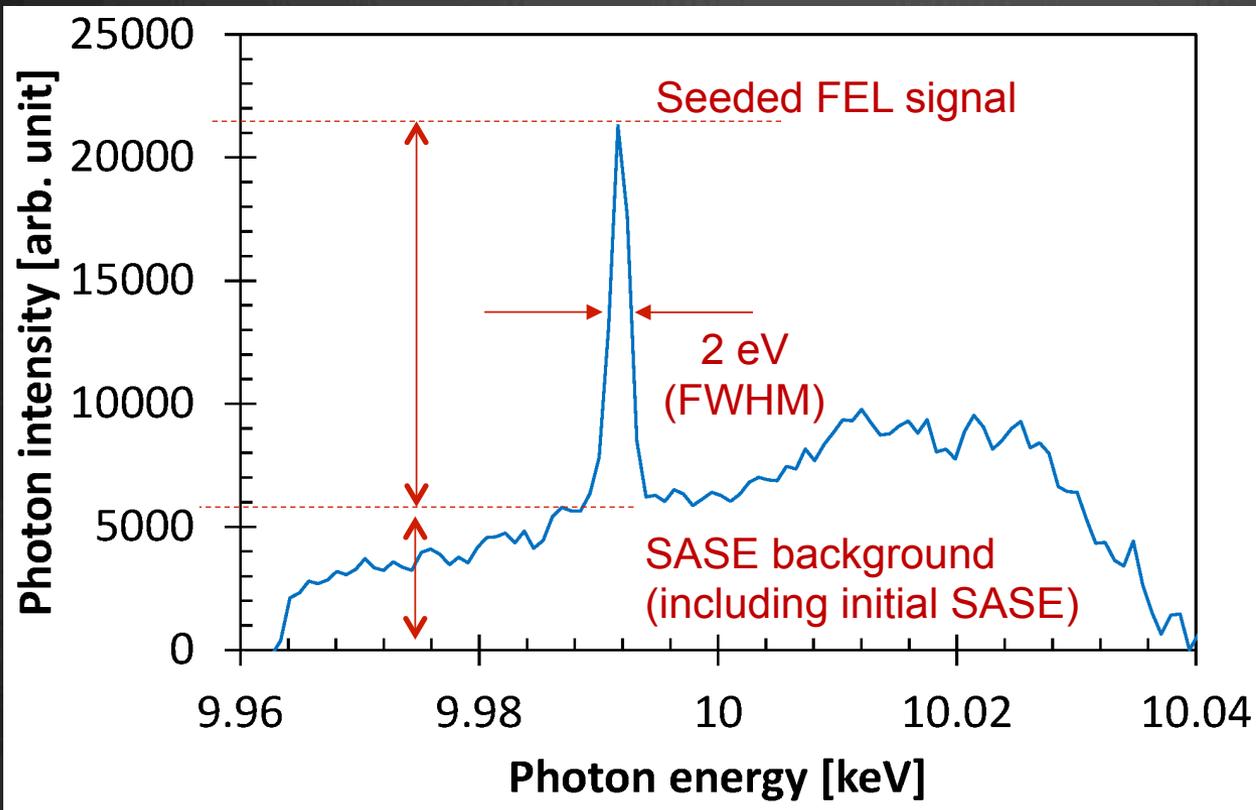
下流 6-13
アンジュレータ

ダイヤモンド
結晶

■ Si 220 面使用
スペクトルメーター
広帯域レンジ

100ショット積分したシード化されたレーザーのスペクトル

- ピーク強度: **SASEのバックグラウンドより4倍**
- スペクトル幅: **2 eV (FWHM), SASEの1/15**



結晶真空容器上流の4アンジュレータでシード光を発生。下流の13アンジュレータでシード化されたX線レーザーを発生。

シケインでの電子ビームのシード光に対する遅延は20 fs。

BL-2とSCSS+の建設状況



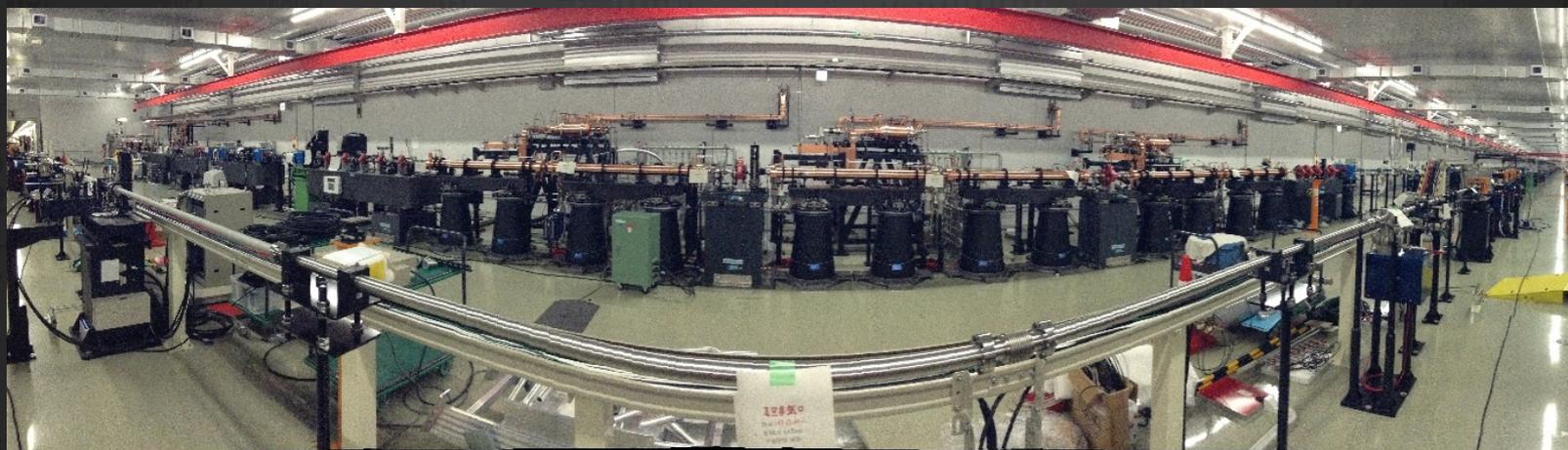
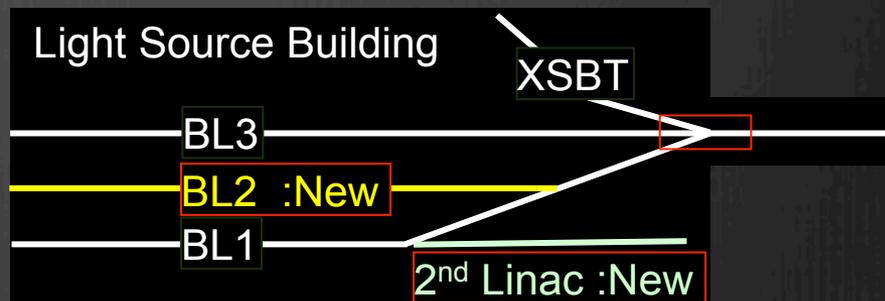
BL2

BL3

2nd Linac

この夏に18台のアンジュレータを含んだBL2と2番目のリニアック(SCSS+)を設置した。

現在、BL-2はコミッショニング中、
レーザー増幅を確認
(細かいデータは追って別の発表で)



BL2の性能

Number of undulators	18
Undulator length	5 m
Number of periode (undulator)	277
Minimum magnetic gap (undulator)	< 3.5 mm
Maximum K vale (undulator)	< 2.2
Effective length of the beam line	~ 70 m
Output wave length	~ 0.1 nm
Electron beam energy	~ 8.5 GeV
Electron focusing	FODO
Use self seeding scheme	

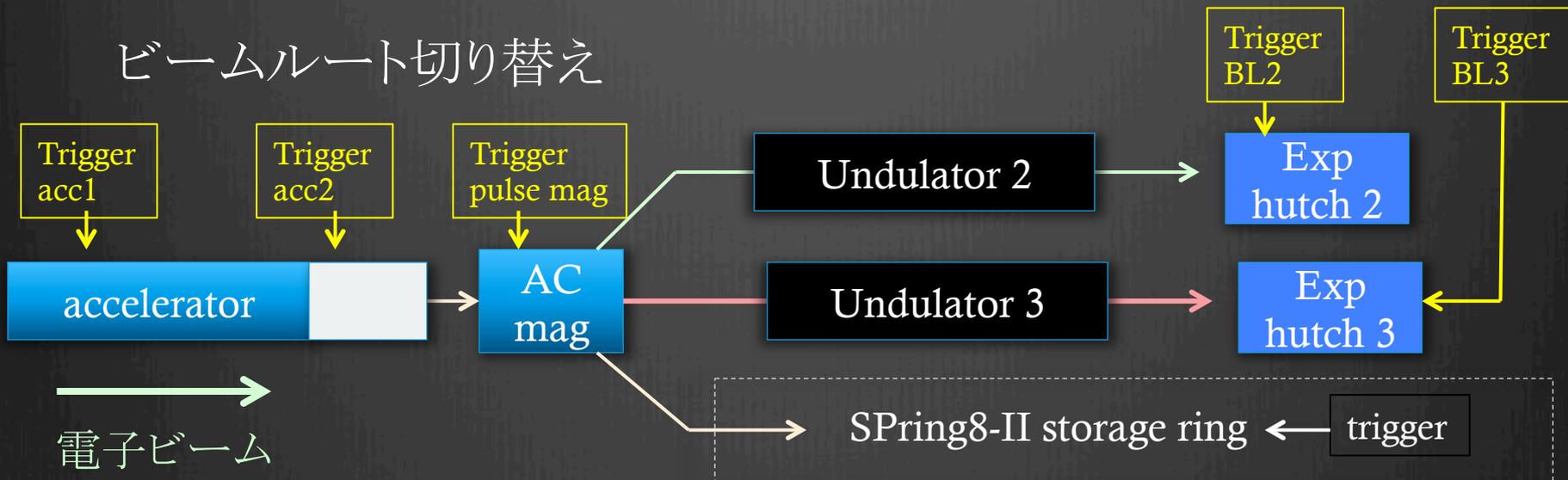
SCSSとSCSS+の性能比較

	SCSS	SCSS+
Operation period	2005 ~ 2013	2015 ~
Accelerator		
Beam energy	250 MeV	420 MeV
Bunch charge	~0.3 nC	~0.3 nC
Peak current	~300 A	~500 A
Repetition	60 pps (max.)	60 pps (max.)
Undulator		
Periodic length	15 mm	18 mm
K parameter	1.5 (max.)	2.1 (max.)
Photon Beamline		
Wavelength	50-60 nm	30-40 nm
Pulse energy	10-30 μ J/pulse	100 μ J/pulse

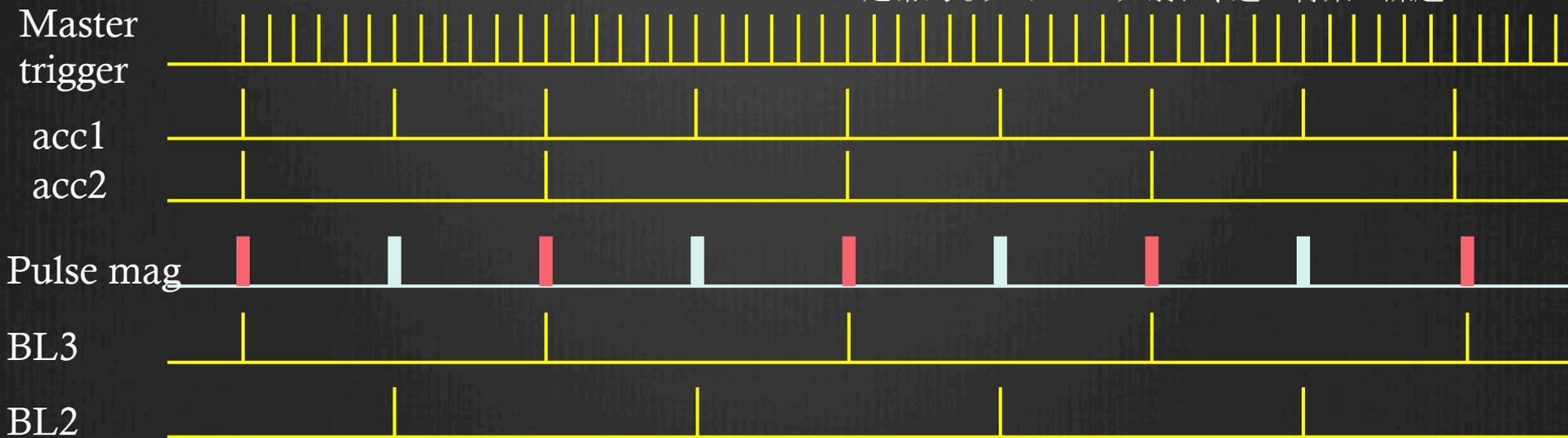
SACLAにおける複数ビームラインへの時分割出射

異なったビームラインへの異なったエネルギーでの電子出射

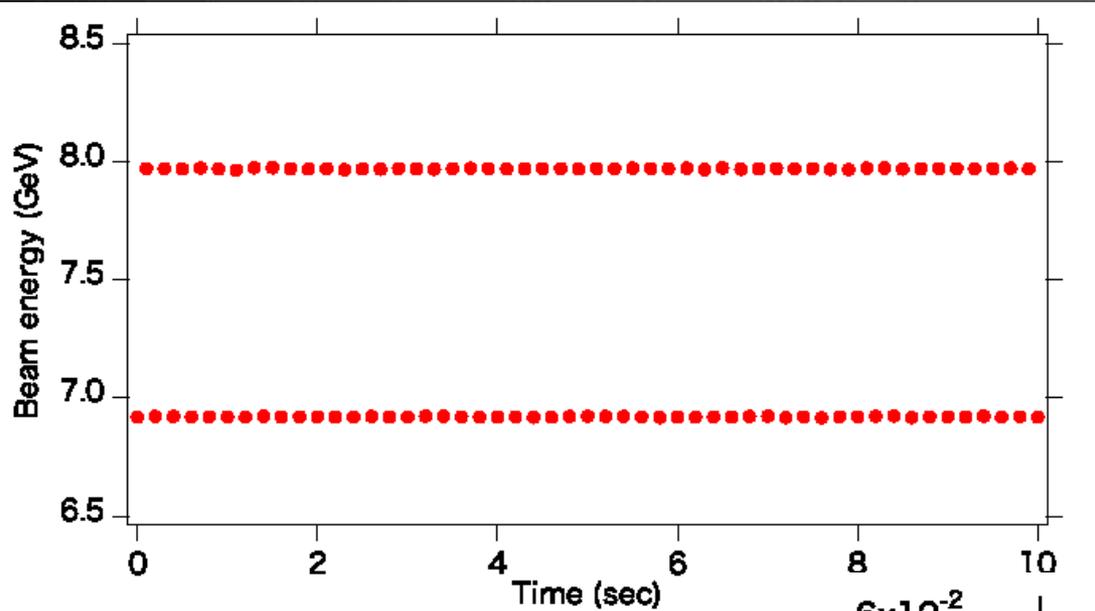
ビームルート切り替え



定常的なリングへの入射は、近い将来の課題

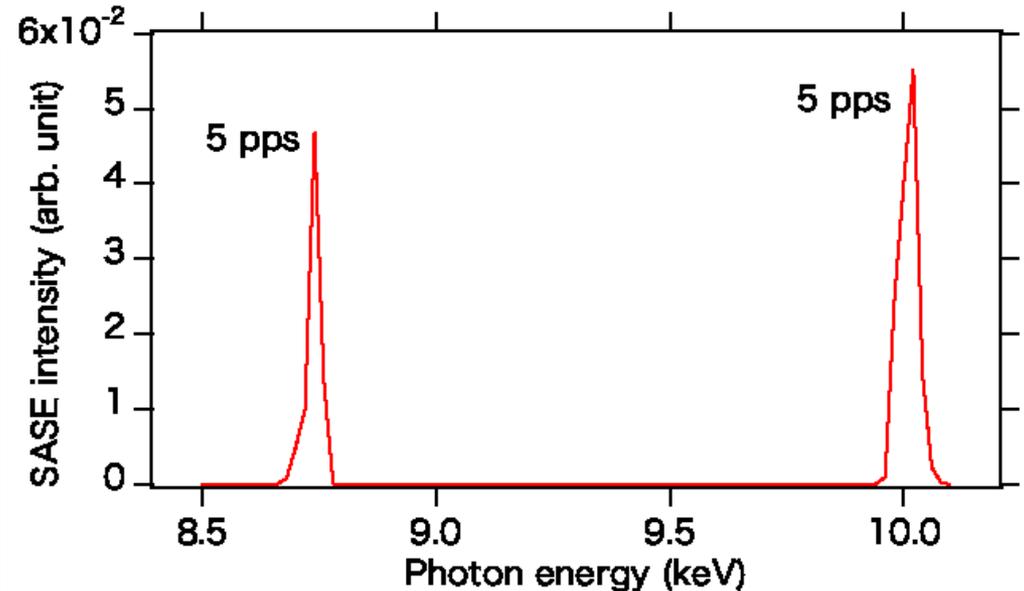


SACLAにおける2エネルギービーム実験結果



2色のレーザービーム、
電子のエネルギーは7.3と
7.8GeVである。

電子ビーム、
一つおきのパルスでエネルギーが交
互に変わっている。電子のエネルギー
は、8.9と6.9 GeVである。

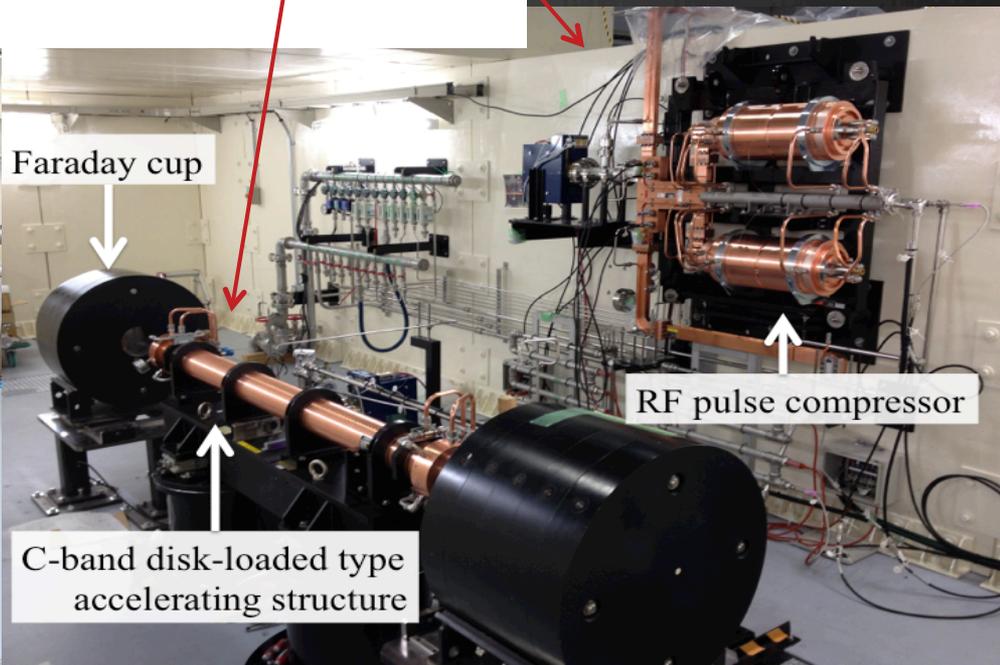
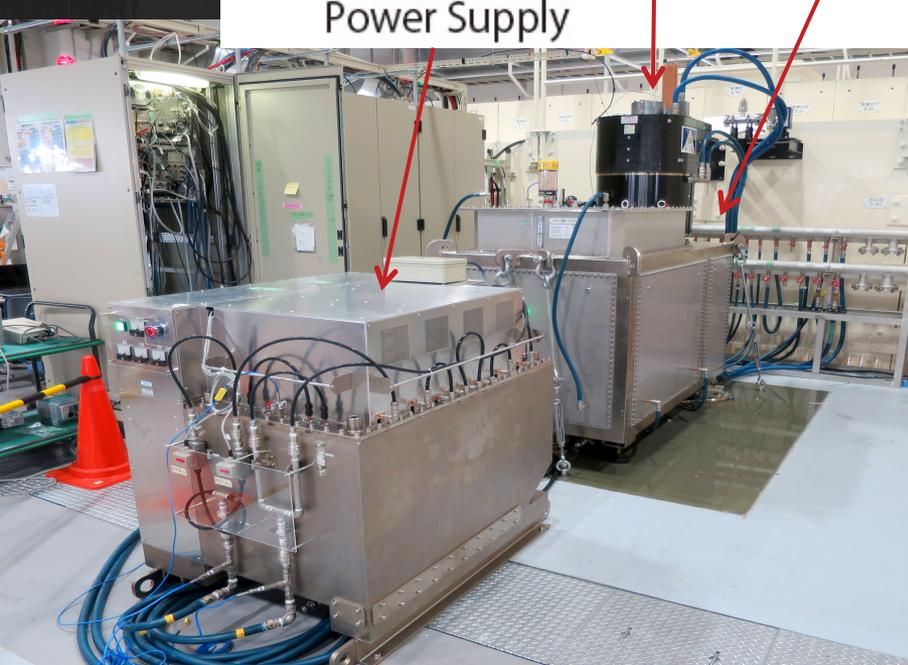
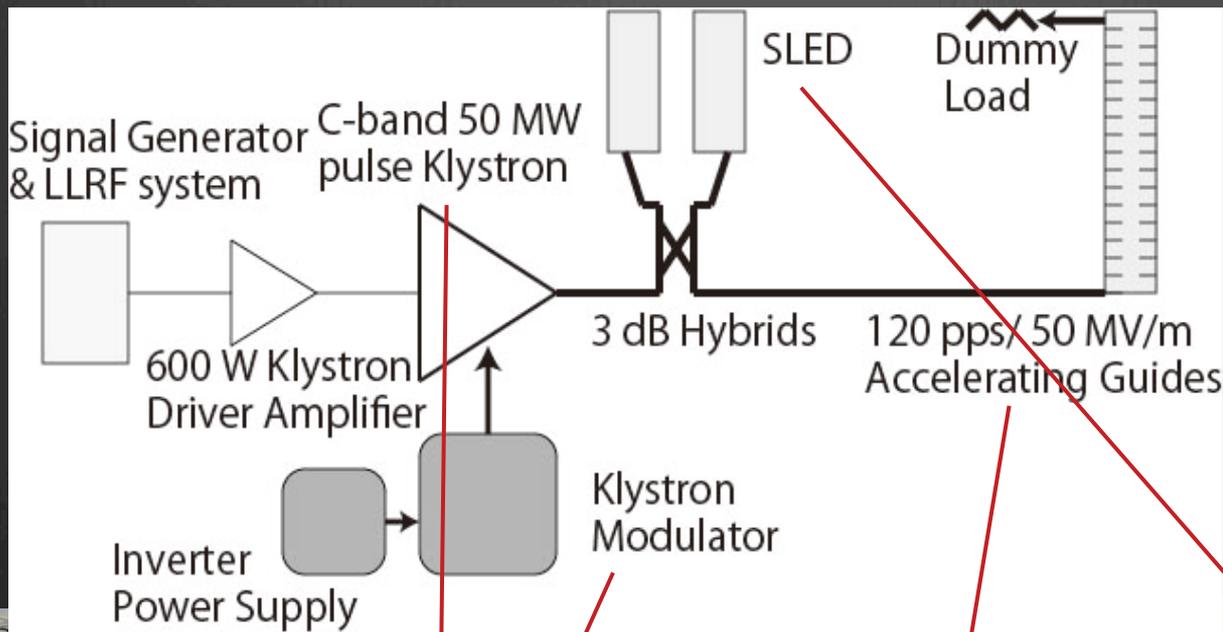


更なる未来のために

当面の実施計画はないが

多くのユーザーのための、装置の高繰り返し・コスト削減のための高電界加速。

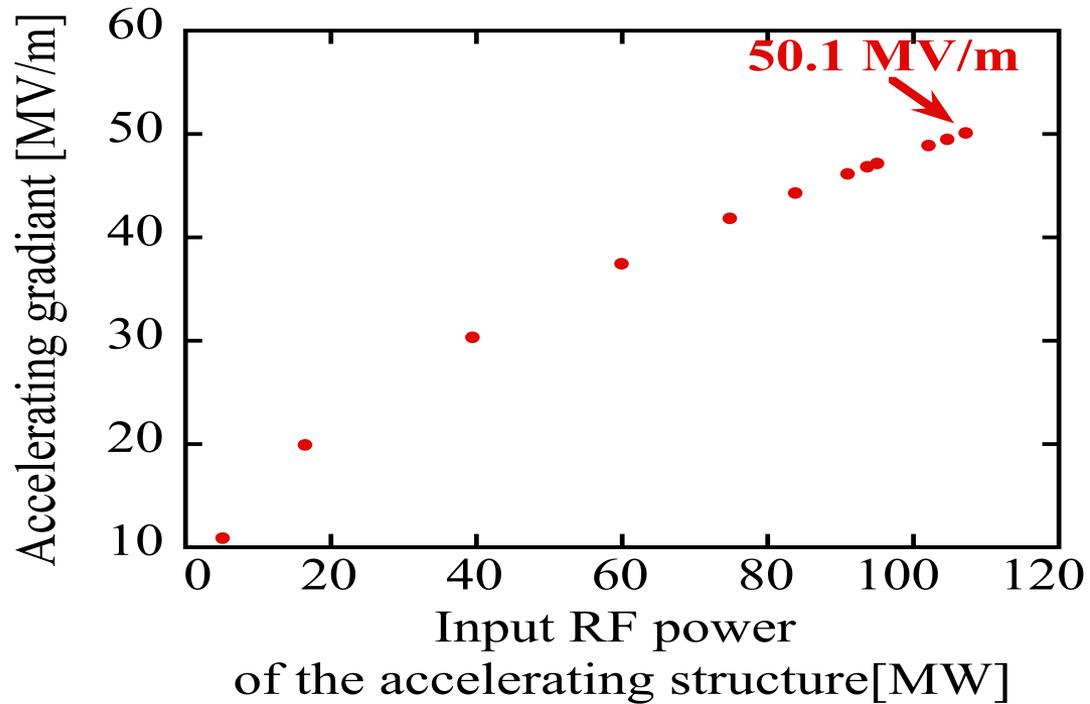
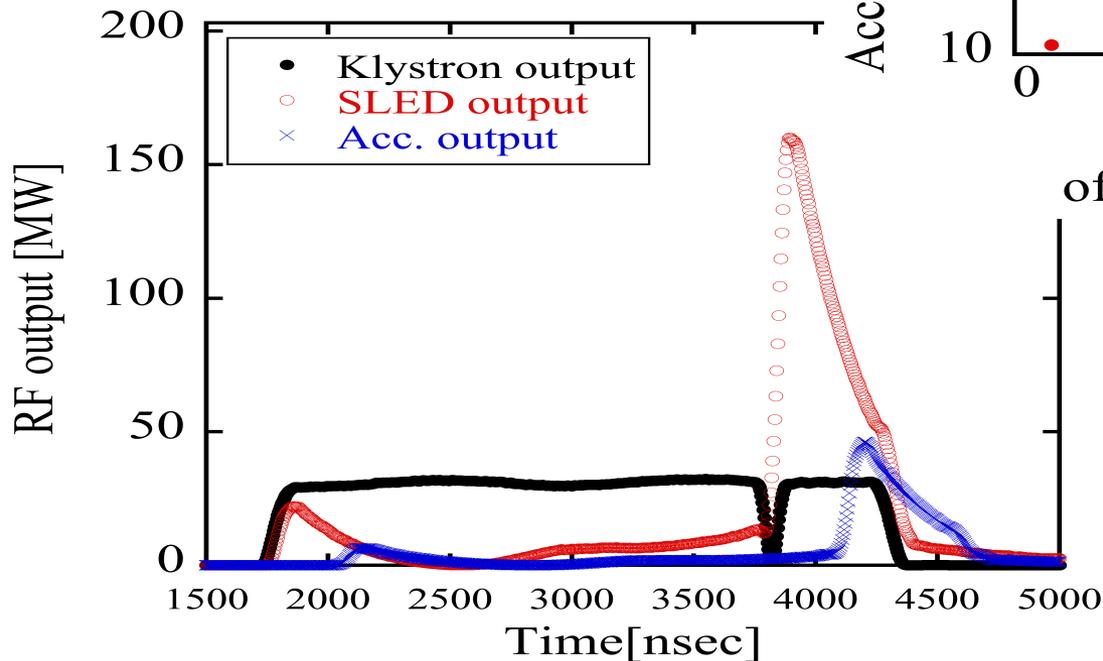
50MV/m、120 pps 試験大電力高周波源開発



50MV/m、120 pps 試験大電力高周波源実験結果

T. Sakurai et. al., Proc. of LINAC12, 372 (2012).

高周波電力波形



発生加速電界
(シャントインピーダンス、
64 MΩ/mから計算)

まとめ

- 大竹の私見としては、世界のXFEL(軟X線も含む)は高繰返しで、多数のユーザー(マルチビームライン)に同時に対応できるような方向に進みつつある。
- もう一方の流れとしては、X線の高エネルギー化もあるかもしれない。
- 現状の稼働中や建設中の装置を見ると、より小型化・低コスト化は既定路線。
- SACLAのユーザー運転は、機器の安定化などにより4～8時間程度は無調整でレーザーを供給できようになっている。ユーザー運転を順調にこなしている。

SACLAの高度化

- シード化でX線レーザーの時間方向の単色化を進めている。
- BL-2の増設やSCSS+の建設、時分割での電子ビームの振り分けで、多数のユーザーが同時に実験が可能ないように進めている。
- 更なる将来を目指して、現状では実施計画は無いが、60ppsから120pps、更に上に行くような高電界・高繰返しのCバンドリニアックの開発を進めている。