



SACLAにおける 極紫外線 FEL 整備計画

稲垣 隆宏、大竹 雄次、原 徹、田中 隆次、櫻井 辰幸、近藤 力、前坂 比呂和、
大島 隆、渡川 和晃、安積 隆夫、牧 伸行、矢橋 牧名、田中 均
(独)理化学研究所 放射光科学総合研究センター XFEL研究開発部門

木村 洋昭、安積則義、備前輝彦
(財) 高輝度光科学研究センター

概要



X-ray FEL

- **SCSS試験加速器** (2005~2013年)
 - SASE型FELの実証試験機
 - 極紫外(EUV) FEL ($\lambda=50\sim60\text{nm}$)
 - HHGシード化も実現
- **SACLA** (2011年~)
 - X線FEL ($\lambda=0.06\sim0.2\text{nm}$)
 - 年間7000時間運転
 - ユーザー利用3150時間
- **SCSS+計画** (目標2014年~)
 - SCSSをSACLAに移設、増強
 - “試験”加速器 → EUV-FELの利用を目的とする。



SCSS試験加速器



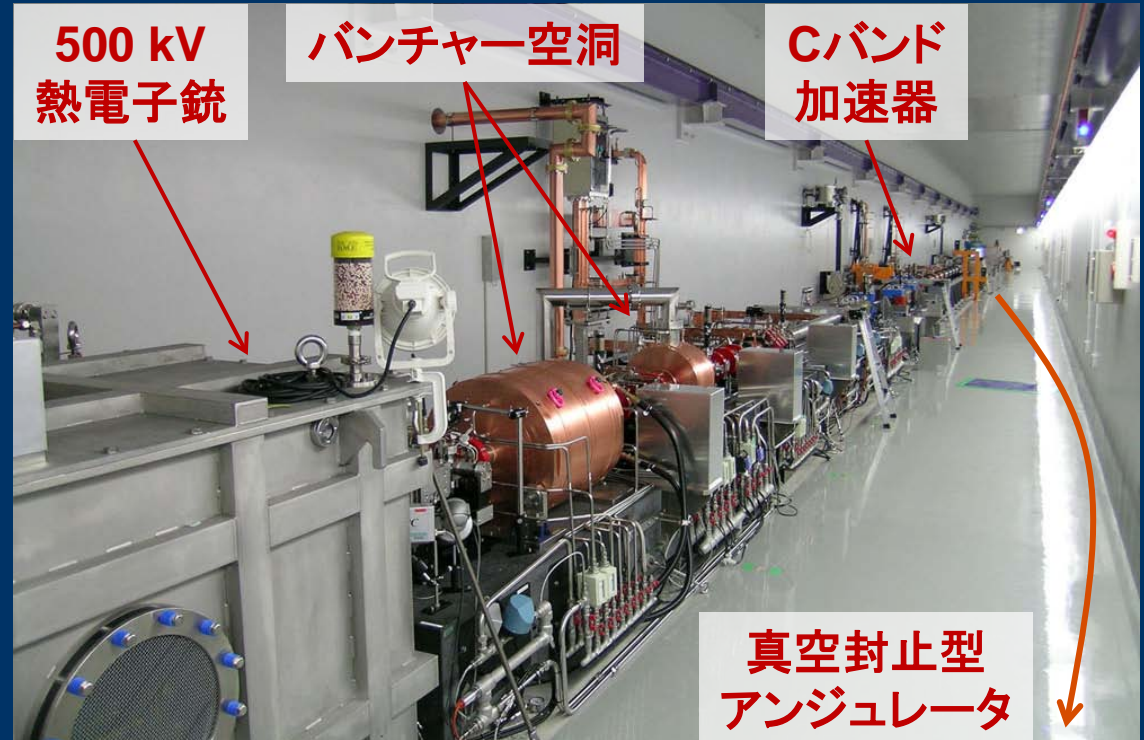
X-ray FEL

- 2005年 建設
- 2006年 FEL増幅 ($\lambda=49$ nm)
- 2007年 **FEL強度の飽和**
安定性の向上
- 2008年 **ユーザー利用開始**
HHG型シード ($\lambda=160$ nm)
- 2011年
HHG型シード ($\lambda=61$ nm)

プロトタイプ機としての目的を達成

- 2013年5月 運転を終了

総運転時間： 約12,000時間
(ユーザー運転 約4,000時間)



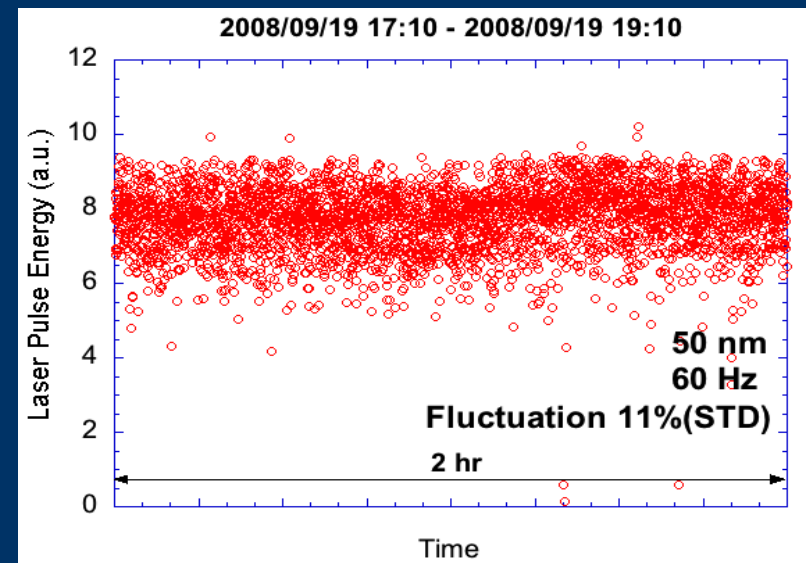
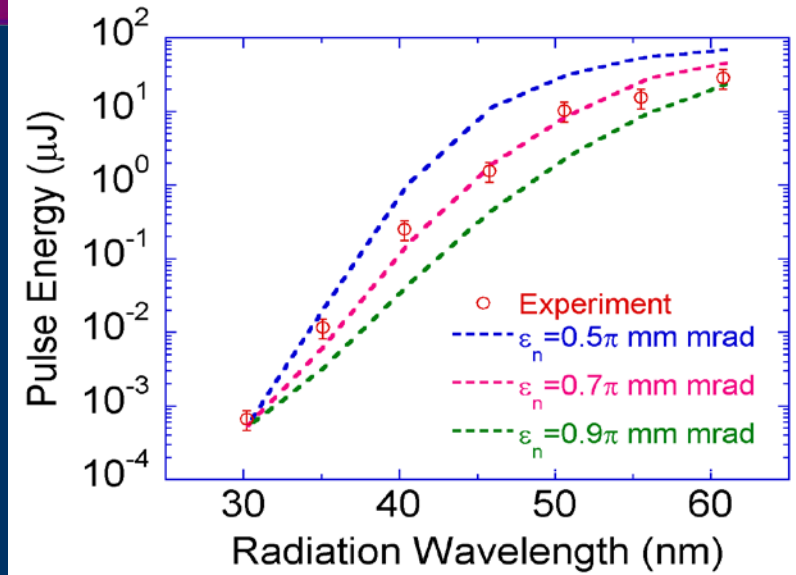
SCSSの性能

PRST-AB 12, 070701 (2009)
渡川 2009年 加速器学会



X-ray FEL

電子 エネルギー	250 MeV
ピーク電流	300 A
電子バンチ長	0.7 ps (FWHM)
スライスエミッタンス	0.7π mm mrad
繰り返し	最大 60 pps
Cバンド加速電場	37 MV/m
アンジュレータ周期長	15 mm
FEL波長	50 ~ 60 nm
パルスエネルギー	~ 30 μ J @60 nm 最近は 10~15 μ J
パルス毎変動	~ 10% (STD) 最近は 20~30%
波長スペクトル幅	0.6 % (FWHM)



SCSS 60 pps連続運転試験



X-ray FEL

- フルパワーでの連続運転を行い、SCSS+に向けての問題点を確認

○ 56時間に渡って、FEL発振を継続

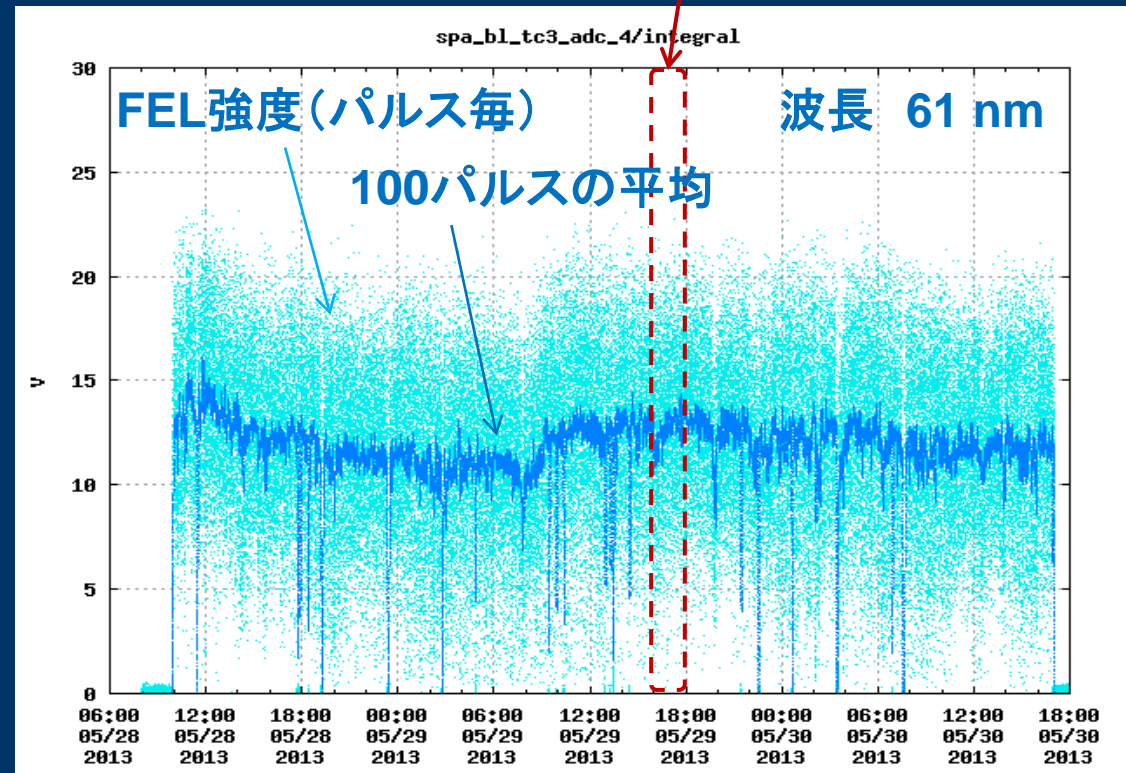
○ 30pps→60ppsで、加速空洞の設定温度を変えるだけでほぼ再現。

○ 機器の故障は無し。

△ 一部のモジュレータの油温が48°Cに到達 ⇒ 冷却の強化

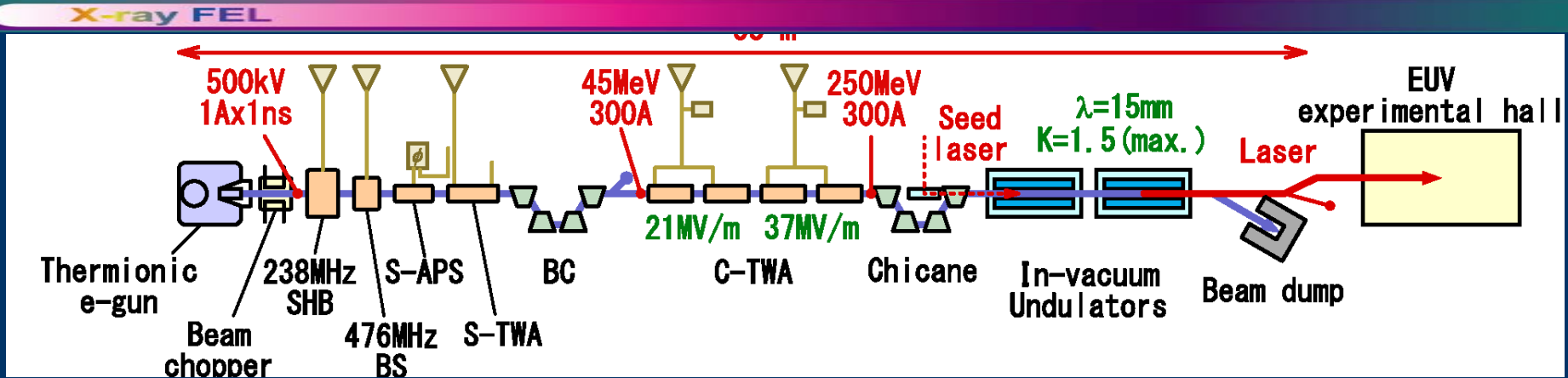
× 電子銃電圧と電子エネルギーの変動が大 ⇒ インバータ充電電源と、タイミングRF系を更新

2時間の集計
平均強度 = 12.7 $\mu\text{J}/\text{pulse}$
パルス毎変動 = 28%



60 Hz運転 56時間

SCSS 加速器の変動



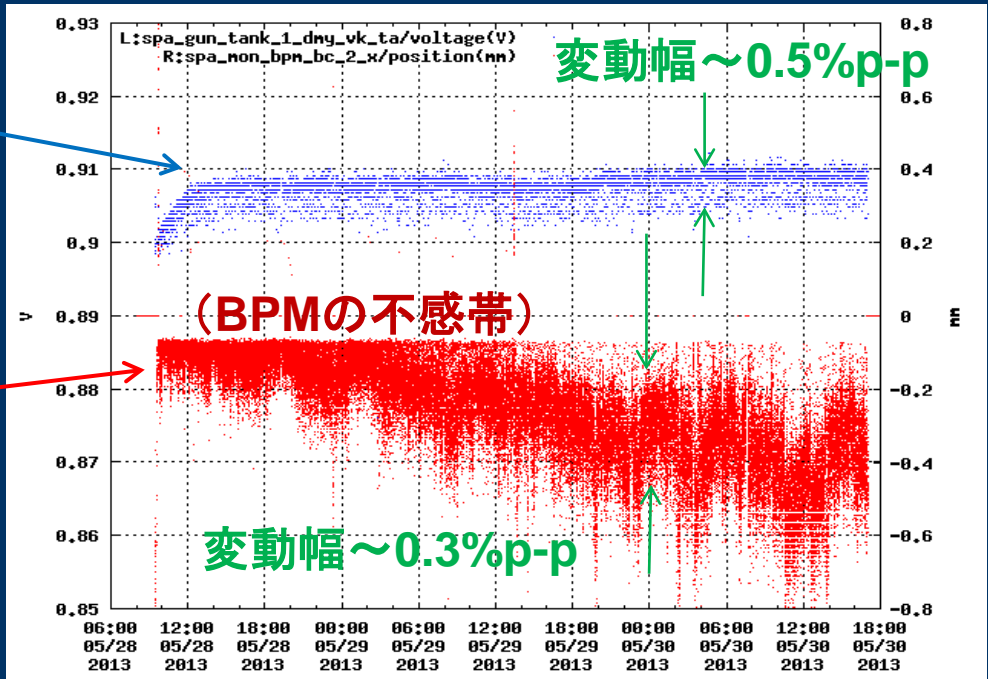
電子銃 カソード電圧

- 中心値のドリフト ~1%
⇒ ダミー管の熱膨張
- パルス毎変動 ~0.5%
⇒ インバータ充電電源の安定性不足

SACLAは
0.01%

BCでの電子エネルギー

- ドリフト ~0.5%
⇒ タイミング・RF系のドリフト?
- パルス毎変動 ~0.3%

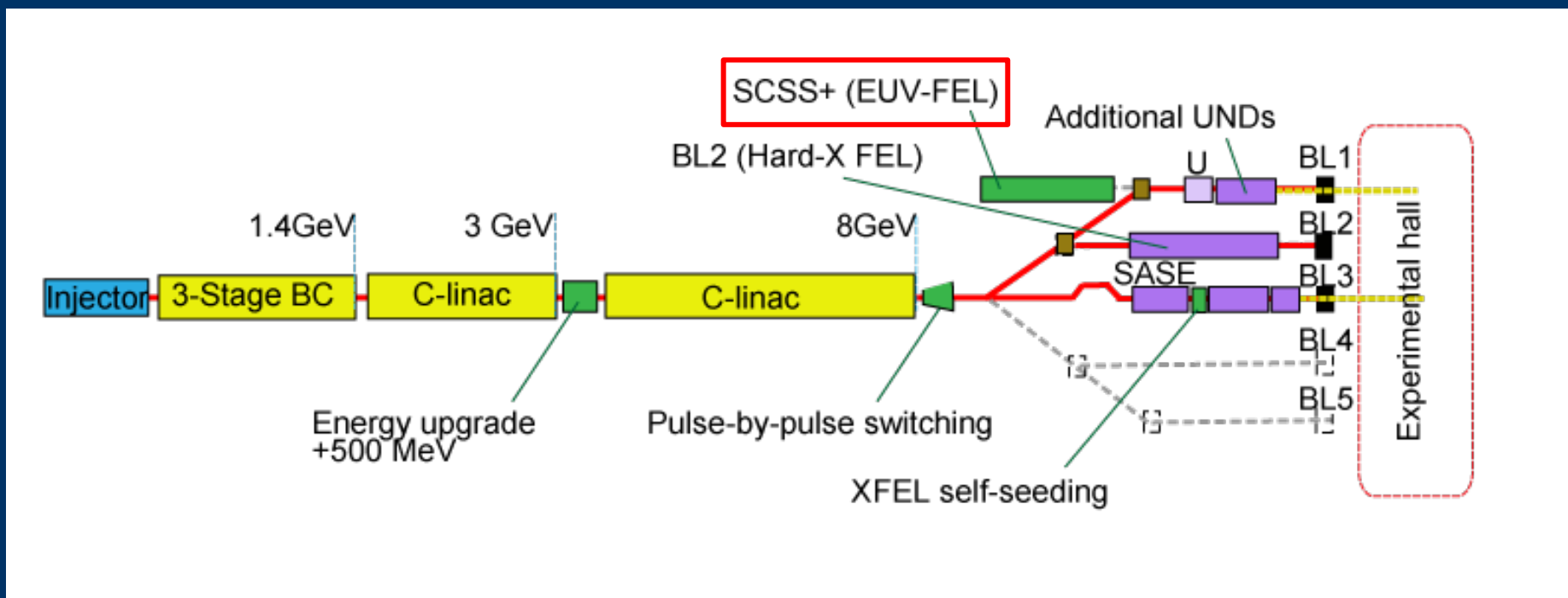


極紫外線FEL施設 「SCSS+」計画



X-ray FEL

- SCSS試験加速器を、SACLA光源棟に移設。
- SACLAのBL1に入射、アンジュレータを共用。SACLA実験棟にFELを供給。
- 制御系、タイミング系をSACLAに統一。
 - SACLA制御室から24時間運転。保守性の向上。
 - SACLAとの同時運転も可能。



想定する運転パラメータ



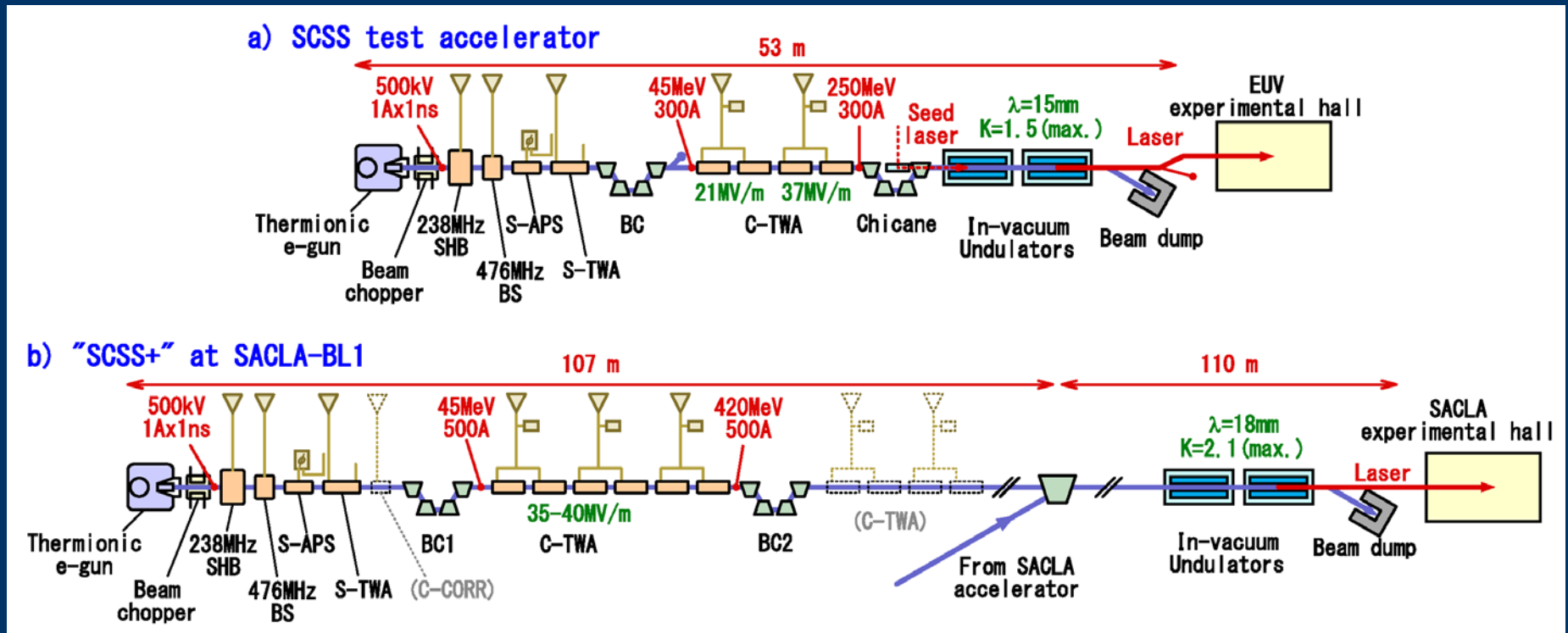
X-ray FEL

	SCSS	SCSS+	SACLA
電子ビーム			
エネルギー	250 MeV	420 MeV (最大拡張 1.4 GeV)	8 GeV
電荷	~ 0.3 nC	~ 0.3 nC	~ 0.3 nC
ピーク電流	~ 300 A	~ 500 A	~ 3,000 A
繰り返し	最大 60 pps	最大 60 pps	最大 60 pps
アンジュレータ			
周期長	15 mm	18 mm	18 mm
K値	最大 1.5	最大 2.1	最大 2.1
FEL			
波長	50~60 nm	30~40 nm (3~4 nm)	0.06~2 nm
エネルギー	10~30 μ J/pulse	~100 μJ/pulse	~400 μ J/pulse

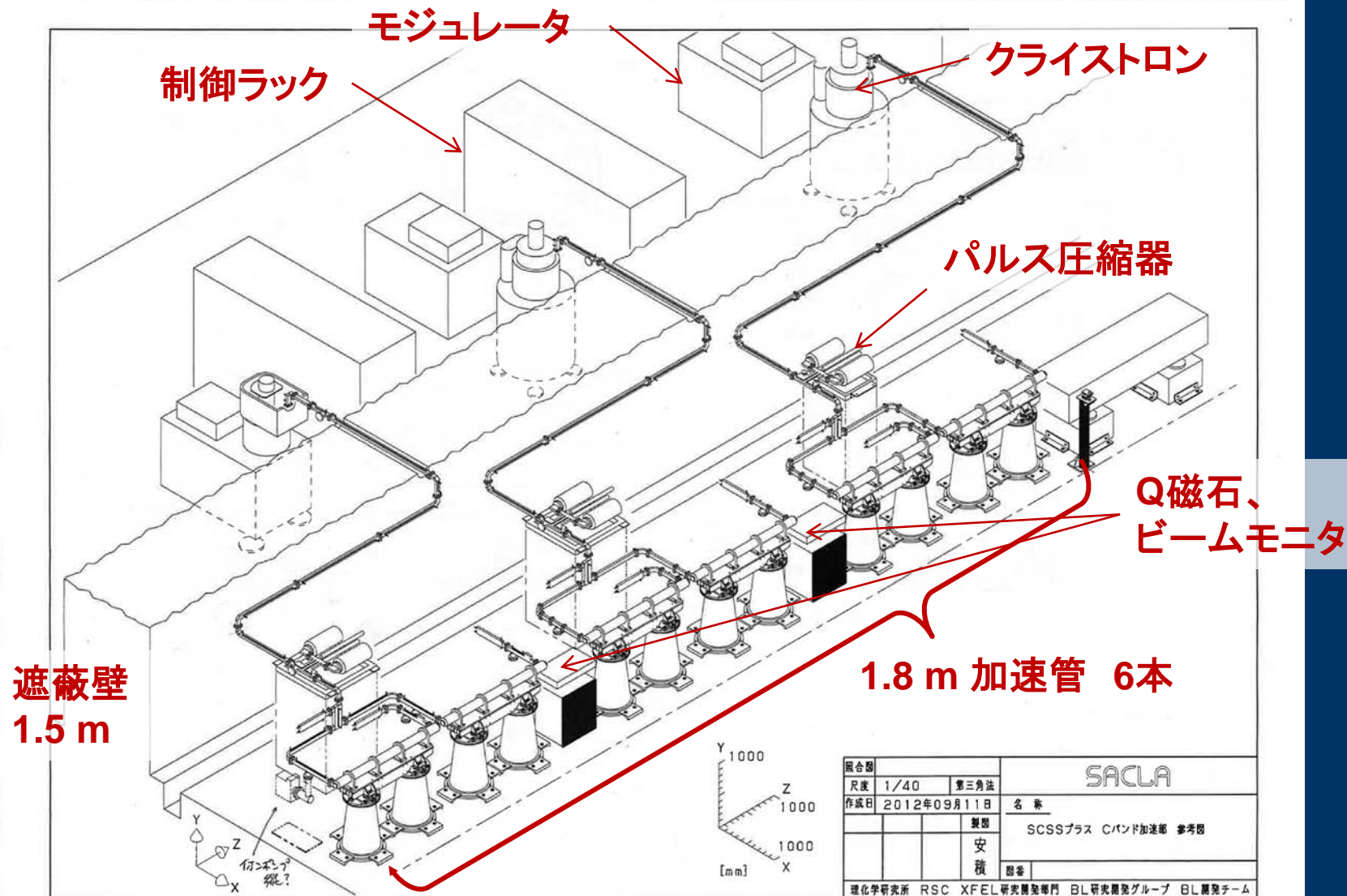
SCSS+ 加速器の構成

X-ray FEL

- BC1まではSCSSをそのまま移設。
- Cバンド加速器を1台追加、エネルギー 250MeV → 420MeV
- アンジュレータは、SCSSのもの2台を、磁石列を交換して使用。
- まずはSASE型FEL。 シード化等も今後、検討。
- 将来は1.4 GeVまで拡張可能。 Cバンド加速器とC補正空洞を追加。



Cバンド加速器 完成イメージ

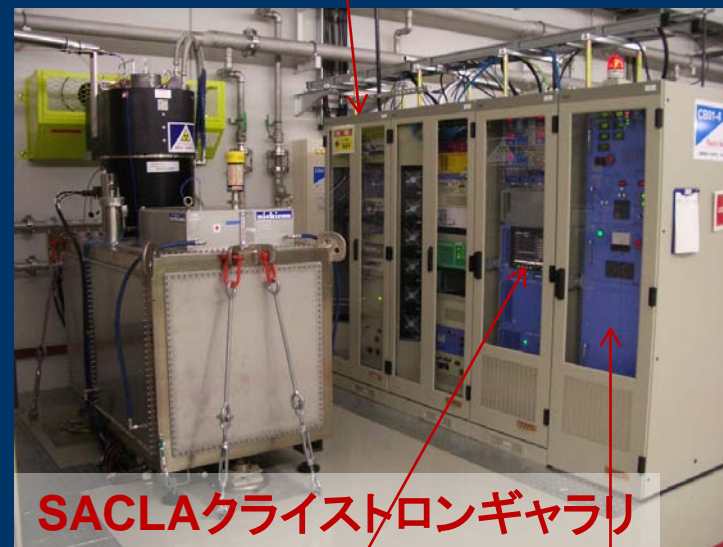


安定性、保守性の向上(1)

重要な部分は、SACLAに準じたものに改造する。

- タイミング、基準RF系
 - 位相安定化光ファイバー、温度安定化
 - 水冷ラック
 - 高精度 低電力RFシステム
- パルス電源(モジュレータ)
 - 高精度(0.01%)インバータ充電電源
 - 受電AC電圧の安定化
- PLCを用いた制御システム
 - 省配線、改造が容易
 - FL-netで上位制御系(MADOCA)と接続

水冷ラック &
低電力RFシステム



PLC制御
システム

インバータ
充電電源

安定性、保守性の向上(2)



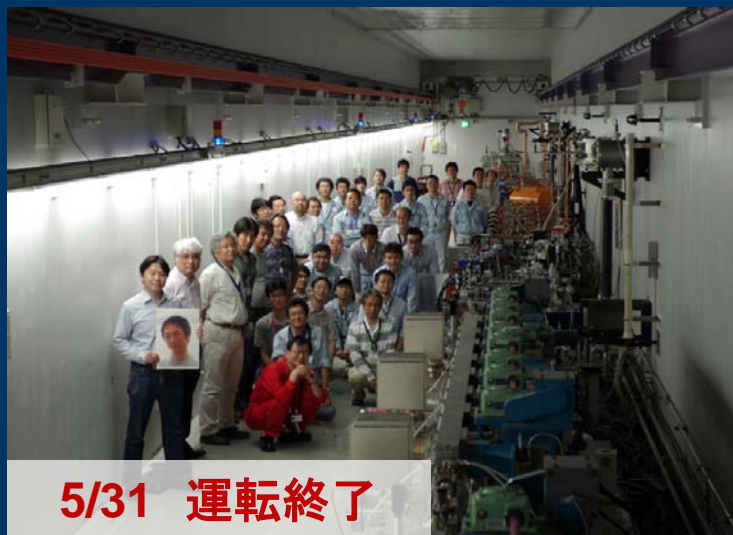
X-ray FEL

- 加速空洞の冷却水
 - 0.01°C精度での精密温度調節システム
 - バンチャー空洞に関して、電熱ヒータのDC電源化（漏れ磁場の影響）
- 入射部の地磁気対策
 - 残留磁場の消磁
 - 地磁気補正コイルの設置
- フィードバック制御
 - RF位相
 - 電子ビーム軌道
 - 電子ビームエネルギー
-



SCSS試験加速器の解体

X-ray FEL



5/31 運転終了

6/29 加速管の搬出



7/16 入射部を撤去した後

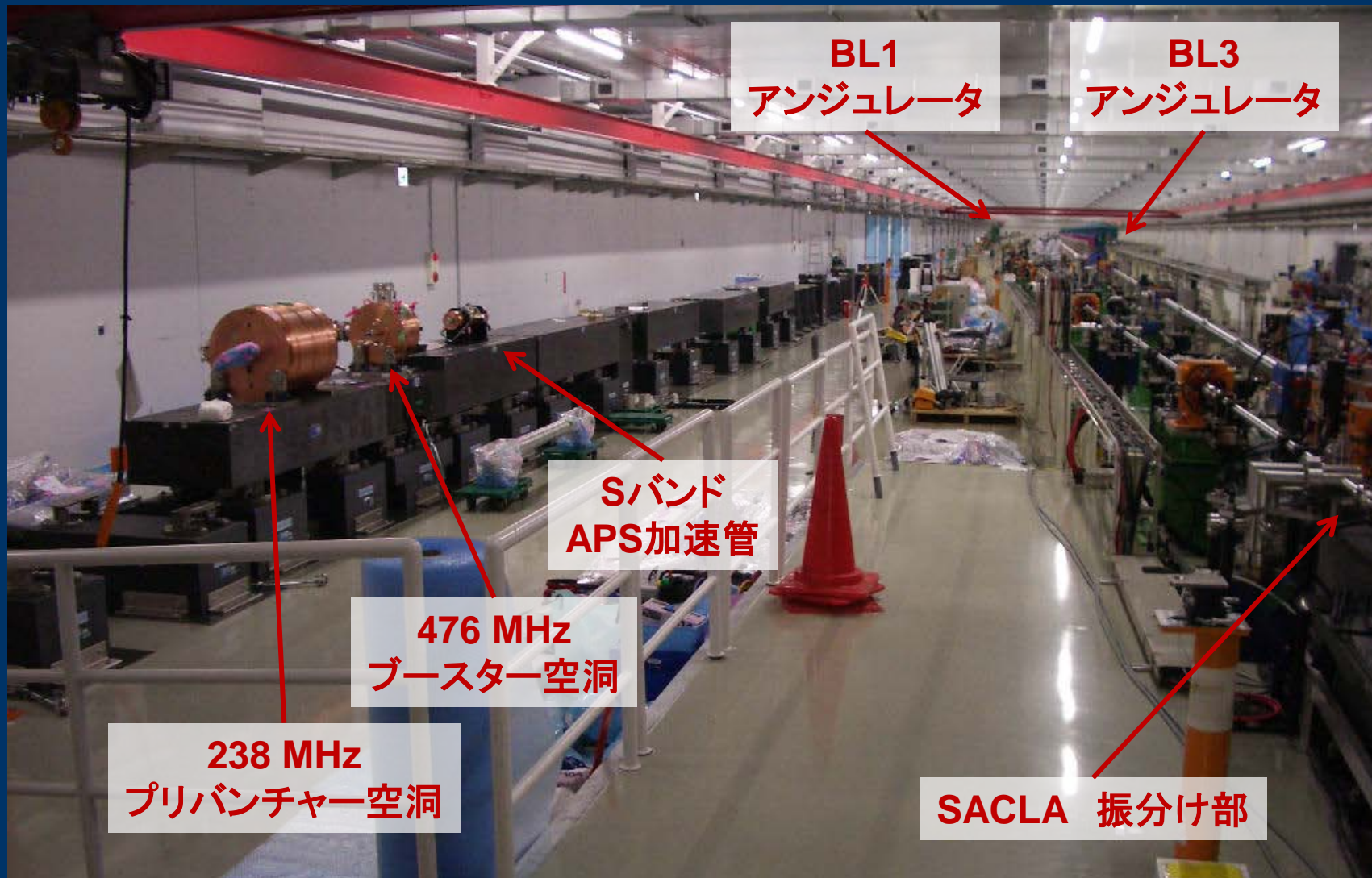


7/16 クライストロンギャラリー跡

SCSS+ 設置開始



X-ray FEL



SCSS+ クライストロンギャラリー



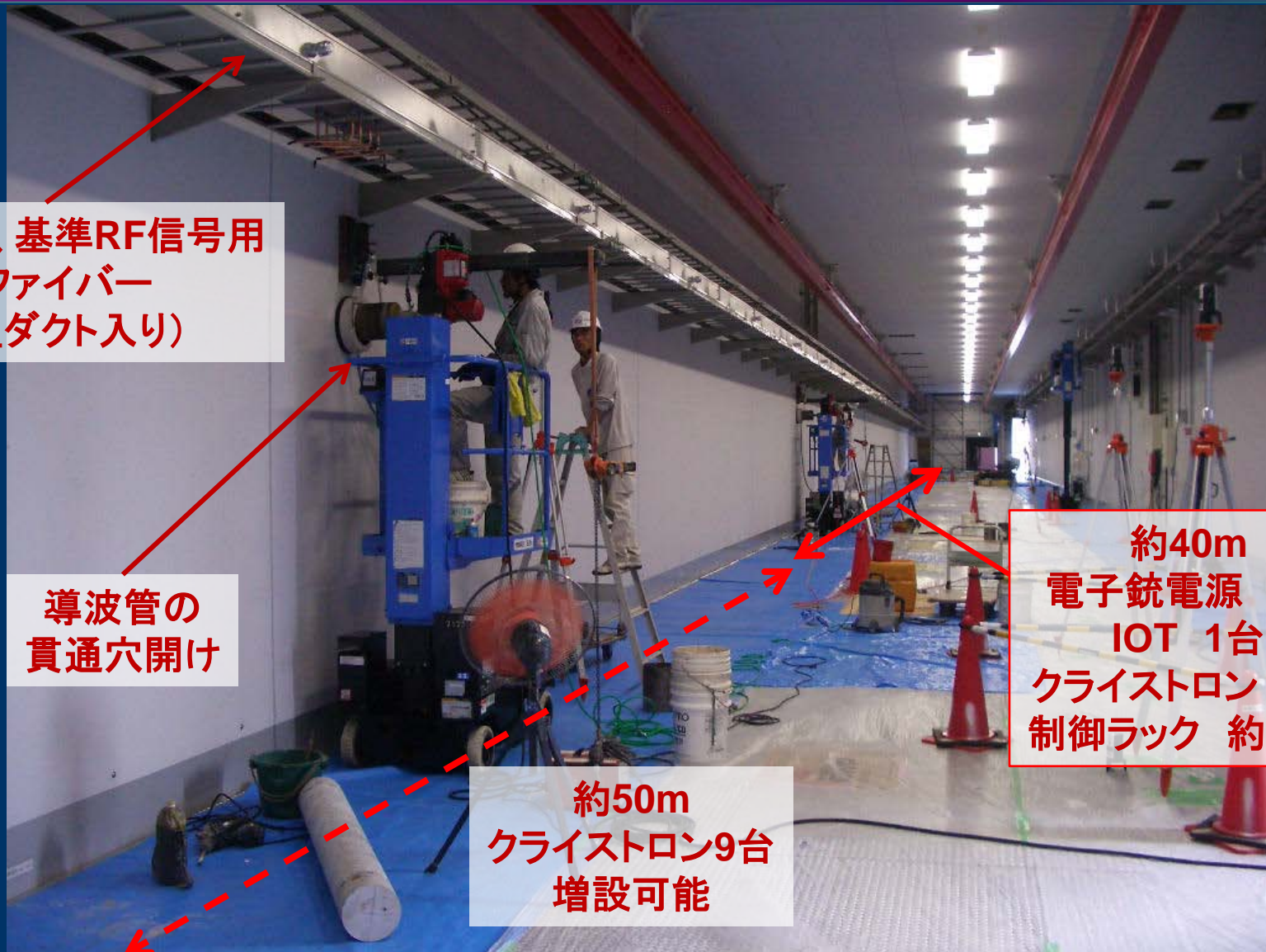
X-ray FEL

タイミング、基準RF信号用
光ファイバー
(恒温ダクト入り)

導波管の
貫通穴開け

約50m
クライストロン9台
増設可能

約40m
電子銃電源 1台
IOT 1台
クライストロン 4台
制御ラック 約40台



まとめ



X-ray FEL

- プロトタイプ機： SCSS試験加速器（2005～2013年）
 - SASE型FEL発振の実証
 - 電子銃、Cバンド加速器、真空封止アンジュレータ、などの実運転
 - FEL利用技術、シード型FEL光源の開発
 - 安定性の悪化、経年劣化。

- 極紫外線(EUV) FEL施設： SCSS+
 - SACLA光源棟 BL1に設置。
 - 電子エネルギー 420 MeV、 FEL波長 30～40 nm。
 - (将来的には、1.4 GeV、3～4 nmまで拡張可能)
 - SACLAと同様の安定性、信頼性を実現。
 - SACLAと同時運転も可能。
 - 来年度中の運転開始を目指す。