

SACLA-BL1 極紫外線 FEL 用加速器の建設と RF コンディショニング

CONSTRUCTION AND RF CONDITIONING OF EUV-FEL ACCELERATOR FOR SACLA

櫻井辰幸^{#,A)}, 安積隆夫^{A)}, 安積則義^{A)}, 稲垣隆宏^{A)}, 大島隆^{A)}, 木村洋昭^{B)}, 金城良太^{A)}, 近藤力^{A)}, 武部英樹^{A)}, 田中隆次^{A)}, 渡川和晃^{A)}, 長谷川照晃^{A)}, 原徹^{A)}, 備前輝彦^{B)}, 細田直康^{A)}, 前坂比呂和^{A)}, 松井佐久夫^{A)}, 松原伸一^{B)}, 大竹雄次^{A)}, 田中均^{A)}, 石川哲也^{A)}

Tatsuyuki Sakurai^{#,A)}, Takao Asaka^{A)}, Noriyoshi Azumi^{A)}, Takahiro Inagaki^{A)}, Takashi Oshima^{A)}, Hiroaki Kimura^{B)}, Ryota Kinjo^{A)}, Chikara Kondo^{A)}, Hideki Takebe^{A)}, Takashi Tanaka^{A)}, Kazuaki Togawa^{A)}, Teruaki Hasegawa^{A)}, Tori Hara^{A)}, Teruhiko Bizen^{A)}, Naoyasu Hosoda^{A)}, Hirokazu Maesaka^{A)}, Sakuo Matsui^{A)}, Shinichi Matsubara^{A)}, Yuji Otake^{A)}, Hitoshi Tanaka^{A)}, Tetsuya Ishikawa^{A)}

^{A)} RIKEN SPring-8 Center

^{B)} JASRI

Abstract

In order to increase an opportunity of free-electron laser (FEL) user experiments and to expand generation region of the laser wavelength, we constructed an accelerator for the SACLA beamline-1, which is use for an extreme ultraviolet-FEL (EUV-FEL). Many of the accelerator components, such as an electron gun, an injector part and an RF power sources, were relocated from those of the SCSS test accelerator, which was the prototype machine for SACLA and whose operation was terminated in 2013. A C-band accelerating structure was a newly designed disk-loaded type structure in order to obtain a high shunt impedance and to increase the electron beam energy within the limited space. The permanent magnet segments of an undulator were replaced to SACLA type with 18 mm periodic-length from the previous 15 mm periodic-length. We expect the electron beam energy is 420 MeV, the wavelength and the pulse energy of the EUV-FEL is at 42 nm and 100 μ J, respectively. Installation of the accelerator components was performed during summer shutdown periods in 2013 and 2014. An RF conditioning was started in autumn 2014. Targets of a trip rate of an accelerating structure after the rf conditioning aims at 1 times a hour below. After the RF conditioning of 350 hours, the acceleration gradient of the C-band accelerator was 46 MV/m by a conditioning period of 350 hours. The trip rate decreased to be less than 0.27 times an hour with an acceleration gradient of 42 MV/m.

1. はじめに

X 線自由電子レーザー施設 SACLA (SPring-8 angstrom compact X-ray free electron laser) では 2012 年 3 月より硬 X 線領域 (4~15keV) のレーザーを実験ユーザーに供給している^[1]。SACLA ではより多くの実験ユーザーに X 線レーザーを供給するために、2 本目のアンジュレータビームラインの建設や SACLA 加速器の電子ビームを 2 つのビームラインにパルス毎に振り分ける技術の開発をしており、今年度に振り分け運転で 2 つのビームラインにて同時にレーザー発振させることに成功した^[2]。さらに我々は発振波長領域を長波長側に拡大し、新たな実験ユーザーの利用機会拡大を目指して、SACLA の建屋内に極紫外 FEL 用線型加速器の設置を進めている^[3]。

Figure 1 に SACLA 加速器施設の模式図を示す。SACLA は最大で 5 つのアンジュレータラインを設置することができ、現在は BL3、BL2、BL1 が整備されている。この極紫外 FEL 用の加速器は BL1 の電子ビームを振り戻すために使用する電磁石の上流部およそ 90m のスペースに設置される。加速器は基

本的には 2005 年に建設され、SASE (Self-amplified spontaneous emission) 原理の実証試験や極紫外線 FEL のユーザー実験に使用された SCSS (SPring-8 compact SASE source) 試験加速器^[4]を移設して使用した。更に、電子ビームエネルギーの増強のために新しい加速管を設置した。既存の SACLA の制御系と共通化して保守しやすくするために、タイミング・低電力高周波機器を SCSS のものから SACLA のタイプに変更した。また、SCSS のクライストロン用高電圧電源に対して同様の制御系の変更および

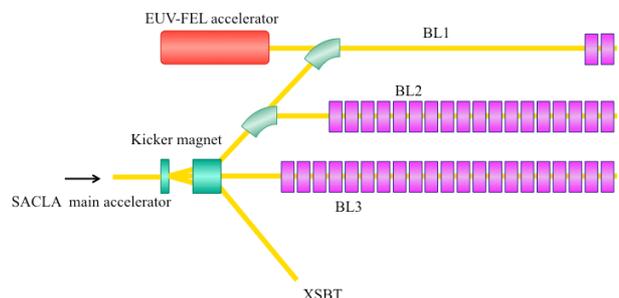


Figure 1: Schematic view of the undulator section of SACLA.

[#] t-sakura@spring8.or.jp

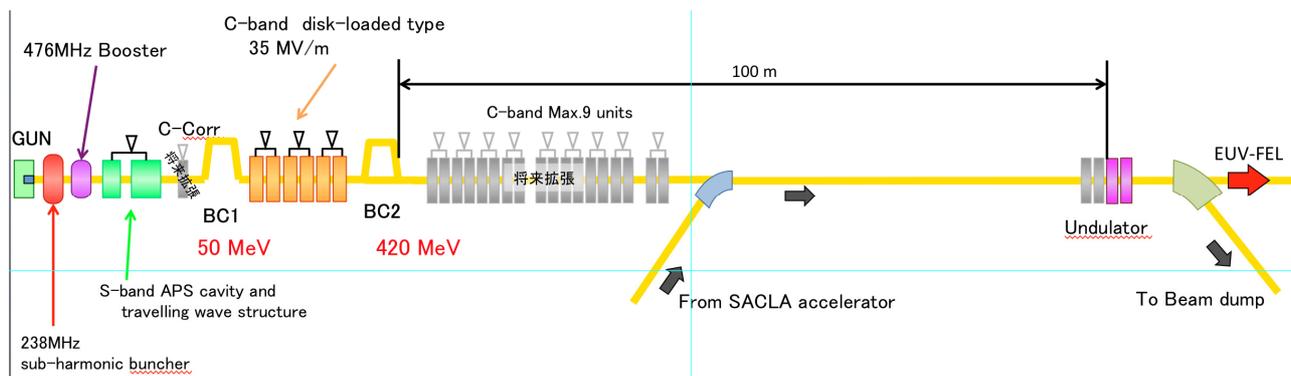


Figure 2: Machine layout of the EUV-FEL accelerator.

不備な点の改良を施したものを新たに設置した^[5]。これらの機器を設置後は RF 空洞のコンディショニング運転を行い、加速管の立ち上げを行った。RF コンディショニングでの目標は、1) 所定の加速電界を十分に得られること、2) 加速器全体の停止頻度が 1 時間に 1 回程度で運転できること、3) RF 安定度が SACLA と同等^[6]であることを目指す。本稿では SACLA-BL1 に設置した極紫外 FEL 用加速器の構成と設置状況、そして設置後に行った RF コンディショニングの結果について報告する。

2. 極紫外線 FEL 用線型加速器

2.1 機器構成

Figure 2 に SACLA-BL1 に設置した極紫外 FEL 用加速器の構成を、また、Table 1 に設計パラメータを示す。CeB₆ カソードを用いた熱電子銃から 500kV、1A の電子ビームを引き出し、後段のビームチョッパーで 1 nsec のビームパルス幅で切り出す。そして 238 MHz サブハーモニックバンチャーと 476 MHz ブースター空洞でエネルギー変調を与え速度変調パンチ圧縮を行いつつ、1 MeV まで加速する、次の S バンド APS (Alternating periodic structure) 加速空洞 (S-APS) ではさらに速度変調パンチ圧縮を行いつつ 14 MeV まで加速される。後続の S バンド進行波型加速管 (S-TWA) では、電子バンチをオフクレスト位相に乗せることで内部にエネルギー差を付けて、磁気バンチ圧縮器 1 (BC1) に入射することでピーク電流を 300A 程度まで圧縮する。BC1 までの電子銃・加速空洞は SCSS で使用していた機器を移設・再利用した。BC1 の後段には主加速器として C バンド加速器を 3 ユニット設置し、クレスト位相で所定のエネルギーまで加速する。今回の C バンド加速器ではディスクロード型加速管を採用した^[7]。この加速管はシャントインピーダンスがチョークモード型よりも高く、加速電界で 10% 程高くなるため、電子ビームエネルギーを上げてより短波長の FEL を発振させることが出来る。Table 2 には、FEL 発振調整時に想定される各 RF 空洞の加速電界と RF パルス幅を示す。C-band 加速管の加速電界を 35 MV/m とすると、電子ビームエネルギーは約 380 MeV とな

り、入射部での到達エネルギーと合計すると 420 MeV に達する。主加速部で加速された電子ビームは BL1 に合流し、約 100m 下流のアンジュレータまで導かれる。その間の四極電磁石の配置は FODO とした。アンジュレータが下流に設置してあるのは波長の長い FEL 光は発散角が大きいため、光源点が実験エリアになるべく近いほうが有利であるためである。アンジュレータの永久磁石列については SACLA と同じ Hybrid 型に交換し、K 値を 2.1 まで上げられるように変更した。これらにより FEL 発振波長は 42 nm と見込まれる。

電子銃や大電力 RF 源であるクライストロンを駆動させるための高電圧電源は、SCSS 試験加速器で使用したものを移設し、足りない分は新規製作した。ただし RF の安定性に重要な高電圧充電器は新たに開発した充電器を採用した^[8]。タイミング・LLRF システム、制御システムについては安定度が重要であるため、SACLA と同じシステムに置き換えた。

Table 1: Machine Parameter of the EUV-FEL Accelerator

Accelerator		EUV-FEL
Beam energy		420 MeV
Bunch charge		~0.3 nC
Peak current		300A
Repetition rate		60 Hz
Undulator		
Periodic length		18 mm
K parameter		2.1 (max)
Number of periods		460
FEL		
Wavelength		42 nm (K=2.1)
Pulse energy		~100 μJ

2.2 加速器の将来拡張の計画

この加速器では3ユニットのCバンド加速器からSACLAとの合流部までの間に広いスペースがある。ここに加速管を増設することで、電子ビームエネルギーを上げることにより、FEL発振波長を短くすることを計画している。最大で9ユニットのCバンド加速器を設置することができ、その場合1.4 GeVまで電子ビームのエネルギーを上げられ、軟X線領域のFELまで発振させることができる。また将来、電子ビームエネルギーが上がった際には、電子バンチをさらに圧縮するために、S-band加速器の出口にバンチ時間エネルギー構造補正(エネルギーチャープ線形化)のためのCバンド補正加速管(C-band correction cavity: C-Corr)を増設し、さらにBC2での磁気バンチ圧縮を行うことも検討している。

2.3 機器移設・設置

本加速器はユーザー運転を行っているSACLAの収納部内に設置されるので、移設・設置作業はSACLAの運転が長期停止する期間を狙って設置する必要から、作業時期を分割して実施した。SCSS試験加速器は2013年5月に運転を終え、機器の解体が始められた。電気配線・水配管の撤去・導波管や真空機器の解体等を約2ヶ月で終えた。2013年8月のSACLA加速器の夏期停止期間(約1ヶ月)に、電子銃からBC1までの入射部の移設・アライメントを行った。移設先の光源棟のアンジュレータホールは床からビーム軸までの高さが1200 mmであり、SCSSの800 mmに対して400 mm嵩上げする必要がある。そのため床に高さ400 mmの石定盤を置き、その上に架台アライメントのために使用するエアパッドを下部に取り付けた既存の石定盤を置くことで対処した。2013年度中に製作した増設機器の据付アライメント、導波管の締結やケーブル配線・水配管の敷設は、2014年の夏期停止期間(約2ヶ月)に行った。高電圧電源やクライストロンは収納部外に設置するので、停止期間外に設置作業を行った。

3. RF コンディショニング

3.1 運転方針

我々は、機器の最終設置後、SACLAの運転開始に合わせて、極紫外線FEL用加速器に設置されたRF空胴のコンディショニング運転を開始した。RFコンディショニングの期間は2014年10月~2015年7月までの9ヶ月の間で行った。RFコンディショニングの目標は、各空洞においてTable 2で示した加速電界が得られ、且つ加速器全体での停止頻度が1時間に1回程度で運転できることとした。

Table 2: Required Accelerating Gradients and RF Pulse Widths

Cavity	Gap voltage or Acceleration gradient	RF Pulse width
238 sub-harmonic buncher	200 kV	100 μ sec
476 booster	800 kV	50 μ sec
S-APS	20.6 MV/m	2.5 μ sec
S-TWA	18 MV/m	2.5 μ sec
C-band	> 35 MV/m	2.5 μ sec

3.2 Cバンド加速管のコンディショニング

新規製作したCバンド加速管はパルス幅を0.1 μ secから、徐々に幅を広げながらコンディショニングを行った。Figure 3にはC-band加速管のRFコンディショニングのパルス幅変更履歴と管内真空度の推移を示す。RFパルス幅2.5 μ secまで135時間で到達した。そして460時間後には加速電界が46 MV/mに到達した。

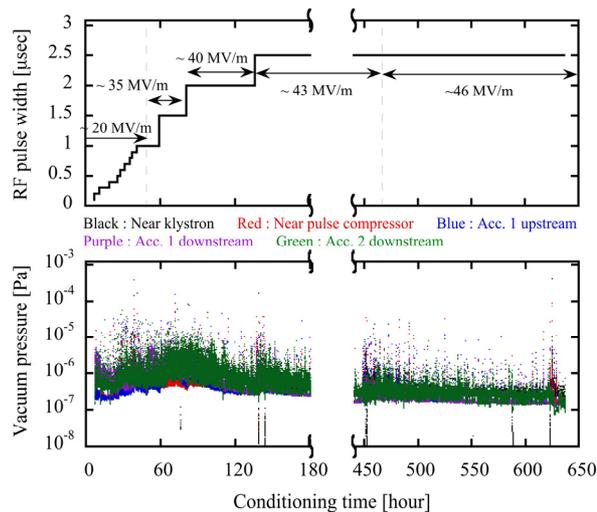


Figure 3: History of the RF pulse widths and the maximum accelerating gradients (upper) at individual conditioning stages and the vacuum pressure (lower) during the RF conditioning period.

加速管内の真空度は、運転を継続することで、650時間後に 3×10^{-7} Paまで低下した。Figure 4はCバンド3ユニットの到達加速電界のSLED出口のRFパワー依存性を示す。RFコンディショニングにより最大加速電界は46~47 MV/mに達し、目標加速電界よりも十分高い所まで到達する事ができた。

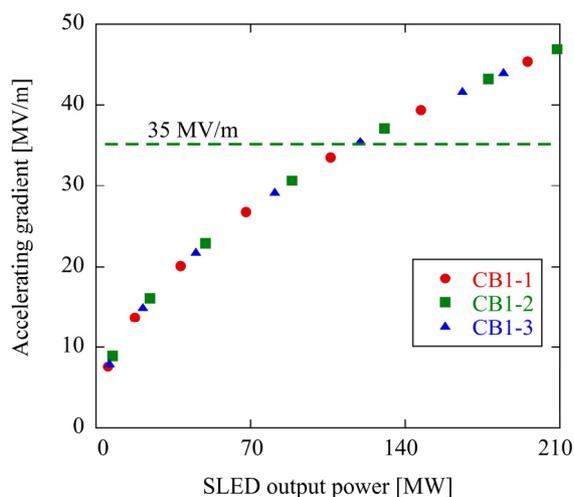


Figure 4: Accelerating gradient depending on the SLED output power.

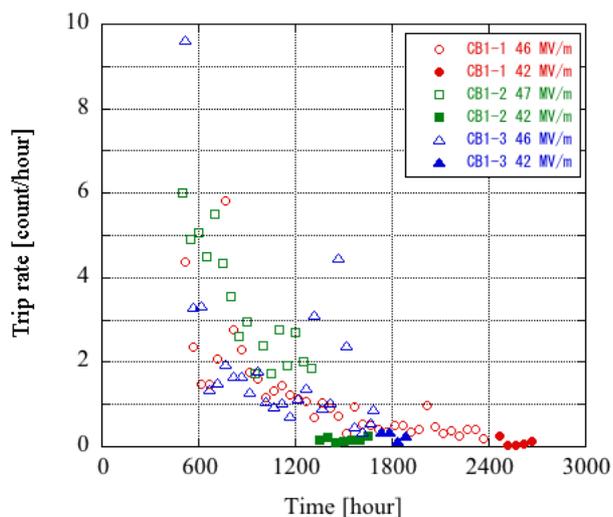


Figure 5: Trip rate depend on the RF conditioning time. Red-rhombus, green-squares and blue-triangles shows the trip rate of the CB1-1, CB1-2 and CB1-3, respectively,

Figure 5 に RF コンディショニング時の C バンド 3 ユニットの停止頻度を示す。停止頻度は 50 時間運転毎に停止回数を評価した。コンディショニング時の最大加速電界での停止頻度は 0.3~2.1 回/hour であった。ここから加速電界を下げて 42 MV/m で運転し続けた結果、0.1~0.27 回/hour となった。上記の加速器全体の目標停止頻度以下に達している。

3.3 入射部空洞のコンディショニング

入射部を構成する 238MHz サブハーモニックバンチャー、476MHz ブースター空洞、S バンド APS 加速空洞、S バンド進行波型加速管は SCSS 試験加速器で 7 年間運転し続けていたものを再利用する。運

転開始から 238MHz サブハーモニックバンチャーと 476MHz ブースター空洞は数時間で、S バンドの 2 台の加速管は 7 日で目標以上の加速電界に到達した。その後連続運転を継続し、停止頻度は 1 日 1 回以下と十分に低くなった。

3.4 空洞 RF 信号の位相・振幅安定性

極紫外線 FEL 用加速器のビーム運転時に要求される RF 信号の位相・振幅安定性は SACLA と同程度である。Table 3 は各加速空洞での RF の振幅・位相変動の 24 時間運転時の振幅・位相の 10 ショット平均の測定値を示す。Figure 6 は CB1-1 の 24 時間運転時の振幅・位相変動を示す。これらの安定度を得るために、1) 高精度 PFN 充電器の採用^[8]、2) クライストロンヒーター電圧の安定化のための AVR (交流安定化電源) の設置、3) 加速空洞温度の安定化^[9]、4) 低電力高周波機器類を水冷恒温ラックへ実装しての温度安定化、5) 空洞ピックアップ信号を基にした RF 電力・位相フィードバックによる安定化^[6]、等の工夫を施している。これらの値は、測定系誤差を含めた値ではあるが、ほぼ SACLA と同程度に収まっていることを確認した。

Table 3: Measurements Results of the RF Amplitude and Phase Fluctuations for 24 Hours at Each Acceleration Cavities

	Voltage	Phase
238MHz sub-harmonic buncher	0.01%	0.008 deg.
476MHz booster	0.01%	0.007 deg.
S-band	0.06%	0.06 deg.
C-band	0.10%	0.10 deg.

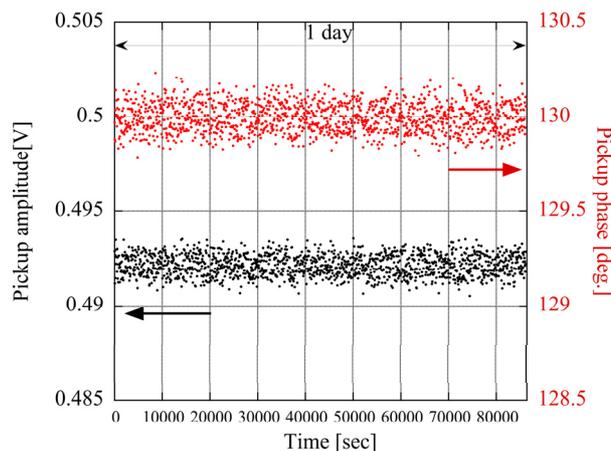


Figure 6: Trend graph of RF amplitude and phase stability at the CB1-1 accelerating structure at for 24 hours.

4. まとめ

我々は X 線自由電子レーザー施設 SACLA の実験ユーザーの拡大や発振波長領域の拡大に向けて、BL1 の上流約 90 m のスペースに専用加速器を設置した。加速器は SCSS 試験加速器をベースに加速エネルギーの増強や機器の高度化を行った。装置の設置後は、我々は RF コンディショニングを実施し、加速電界・停止頻度・振幅・位相安定性の評価を行った。その結果、全てにおいて良好な性能が得られることを確認した。また主加速部を目標より高い加速電界で運転することも可能であった。その値は 42 MV/m で運転した場合、電子ビームエネルギーは 500 MeV となり、発振波長 30 nm が期待される。

本加速器の建設に関する残作業を今夏に終わらせ、我々は SACLA の秋からの運転に合わせてビームコミッショニングを開始し、極紫外線 FEL 発振を目指す予定である。

謝辞

極紫外線 FEL 用加速器の整備において、多くの機器メーカー、作業の方々に尽力頂いた。また長期間にわたる RF コンディショニングの期間中、SACLA 運転員の皆様には運転監視をして頂いた。著者は皆様方に感謝致します。

参考文献

- [1] H.Tanaka et al., "A compact X-ray free-electron laser emitting in the sub-angstrom region", *Nature Photonics*.
- [2] 原徹 他 「SACLA におけるマルチビームライン試験運転の現状」第 12 回日本加速器学会年会 敦賀 2015 年 8 月.
- [3] 稲垣隆宏 他 「SACLA における極紫外線 FEL 整備計画」第 10 回日本加速器学会年会 名古屋 2013 年 8 月.
- [4] T. Shintake et al., "A compact free electron laser for generating coherent radiation in extreme ultraviolet region", *Nature Photonics*, 2 (2008) 555-559.
- [5] Y. Otake et al., "Relocation and improvement status of the SCSS test accelerator to provide dual FEL drivers at SACLA.", IPAC15, 2015.
- [6] 大島隆 他 「XFEL/SPring-8 "SACLA"におけるタイミング・LLRF システムの性能」第 8 回日本加速器学会年会 つくば 2011 年 8 月.
- [7] 櫻井辰幸 他 「C バンドディスクロード型加速管の大電力試験」第 11 回日本加速器学会年会 青森 2014 年 8 月.
- [8] 近藤力他 「SACLA における大電力 RF 機器の高繰り返し化」第 11 回日本加速器学会年会 青森 2014 年 8 月.
- [9] T.Hasegawa et al., "Status of a precise temperature-regulation system for the C-band accelerator at XFEL/SPring-8", IPAC10, 2010.