

SACLA における極紫外線 FEL 整備計画 CONSTRUCTION PROJECT OF AN EUV-FEL IN SACLA

稲垣隆宏^{#,A)}, 大竹雄次^{A)}, 原徹^{A)}, 田中隆次^{A)}, 櫻井辰幸^{A)}, 近藤力^{A)}, 前坂比呂和^{A)}, 大島隆^{A)}, 渡川和晃^{A)},
安積隆夫^{A)}, 牧伸行^{A)}, 木村洋昭^{B)}, 安積則義^{B)}, 備前輝彦^{B)}, 矢橋牧名^{A)}, 田中均^{A)}
Takahiro Inagaki^{#,A)}, Yuji Otake^{A)}, Toru Hara^{A)}, Takashi Tanaka^{A)}, Tatsuyuki Sakurai^{A)}, Chikara Kondo^{A)},
Hirokazu Maesaka^{A)}, Takashi Ohshima^{A)}, Kazuaki Togawa^{A)}, Takao Asaka^{A)}, Nobuyuki Maki^{A)},
Hiroaki Kimura^{B)}, Noriyoshi Adumi^{B)}, Teruhiko Bizen^{B)}, Makina Yabashi^{A)}, Hitoshi Tanaka^{A)}

^{A)} RIKEN SPring-8 Center, 1-1-1, Kouto, Sayo, Hyogo, 679-5148

^{B)} JASRI / SPring-8, 1-1-1, Kouto, Sayo, Hyogo, 679-5198

Abstract

The SCSS test accelerator (SCSS) was a prototype machine for a compact XFEL project SACLA. SCSS generated SASE-typed FEL in the extreme ultraviolet (EUV) region with a wavelength range of 50-60 nm and an electron beam energy of 250 MeV. Since SCSS accomplished the initial role of the prototype machine for XFEL, we decided to terminate the operation of SCSS in May 2013, and to start relocation of the SCSS machine into the SACLA undulator hall; which is called a “SCSS+” project. We plan to increase the electron beam energy from 250 MeV to 420 MeV with one additional C-band accelerator unit. With the FEL simulation, we expect the EUV-FEL with a wavelength range of 30-40 nm and a pulse energy of 100 μJ. As a future option, SCSS+ has a capability to install additional 9 C-band accelerator units and increase a beam energy up to 1.4 GeV, which can generate a soft X-ray FEL for various user experiments.

1. はじめに

理化学研究所は、X 線自由電子レーザー (XFEL) 計画を進めるに先立ち、SASE (Self-Amplified Spontaneous Emission) 型 FEL の実証を目的として 2005 年に SCSS 試験加速器を建設した。2007 年には目標である極紫外波長 (Extreme Ultra-Violet: EUV) 域の FEL を発振させることに成功し[1,2]、その後は EUV-FEL の利用実験や、利用技術の R&D に供されてきた。また、High-harmonic generation (HHG)法による EUV-FEL のシード化も実現し[3,4]、プロトタイプ機としての一連の目的を達成した。そこで、この SCSS 試験加速器を、XFEL 施設 SACLA[5]のアンジュレータホールに移設して EUV-FEL を生成する「SCSS+計画」を進めている。

Table 1 に、プロトタイプ機としての SCSS 試験加速器と、SACLA に移設した後の SCSS+計画でのパラメータを示す。また、Figure 1 に、それぞれの機器構成を示す。SCSS+計画では、C バンド加速器を 1 台追加して電子ビームエネルギーを 420 MeV まで上げ、波長 30~40 nm までの極紫外線 FEL を安定的に生成する予定である。また、SCSS の構成機器は試作的な要素が強かったのに対し、SCSS+計画ではより堅牢な運用が求められるため、機器の安定性や信頼性が重要である。そこで、低電力 RF 系や高電圧電源、制御システムなどの一部を SACLA に準じたものに置き替え、安定性や信頼性を向上させる予定である。本報告ではまず計画の概要を説明する。

続いて、SCSS で行った 3 日間の連続運転試験について報告し、今後の SCSS+計画での改善点を述べる。

Table 1: Machine parameters.

	SCSS	SCSS+
Operation period	2005 ~ 2013	2014 ~
Electron beam		
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		
Wavelength	50-60 nm	30-40 nm
Pulse energy	10-30 μJ/pulse	100 μJ/pulse

[#] inagaki@spring8.or.jp

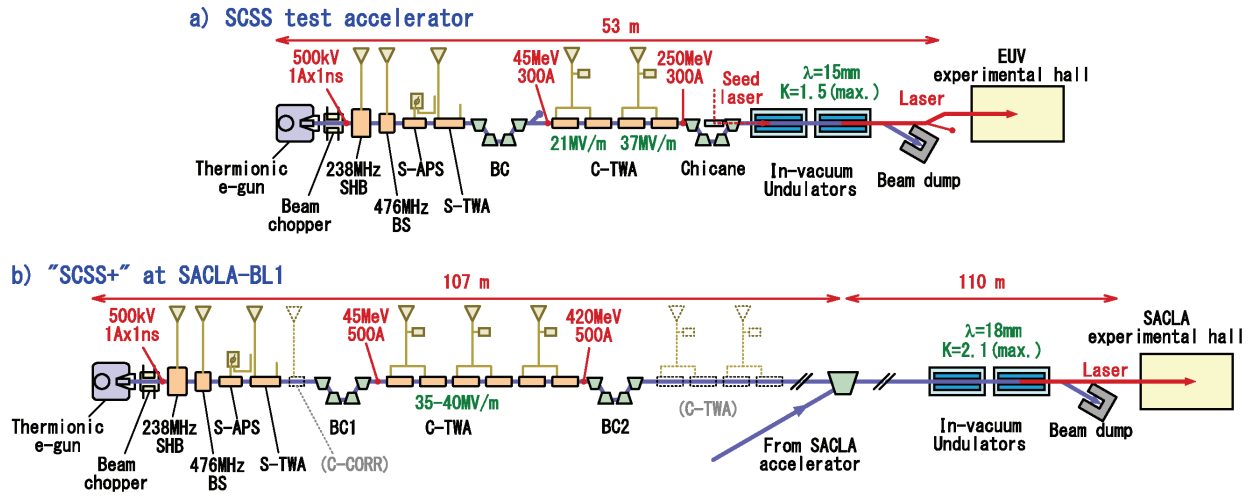


Figure 1: Machine configurations of a) the SCSS test accelerator and b) the SCSS+ machine.

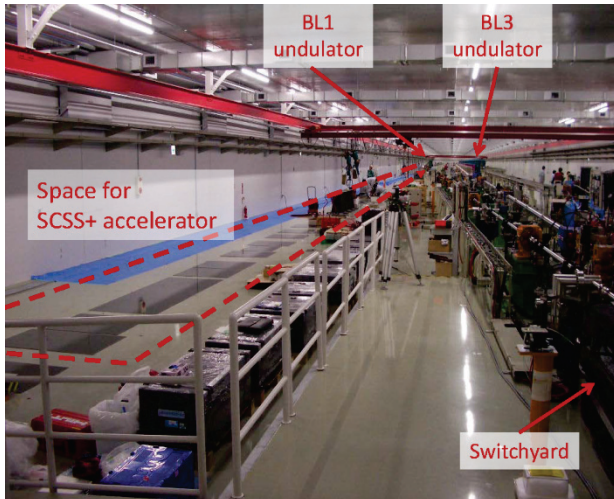


Figure 2: Photograph of the switchyard toward two beamlines (BL1 and BL3) in the SACLA undulator hall. SCSS+ will be constructed in the upstream of BL1 (left side of the photograph).

2. SCSS+計画

2.1 計画の概要

SCSS+計画では、SCSS 試験加速器を SACLA のアンジュレータホールに移設する。移設予定地の写真を Figure 2 に示す。SACLA は、5 本のビームライン (BL1~5) に対して、8 GeV の電子ビームを 3° の角度で左右に分配するため、最も外側の BL1 ビームラインは、分岐部から約 110 m 下流に位置する。そこで、BL1 の上流側に空いたスペースに SCSS 試験加速器を移設して SCSS+加速器とし、加速した電子ビームを BL1 ビームラインに合流させる。BL1 に置いたアンジュレータには、SCSS+と SACLA のいずれからも電子ビームを入射でき、発生した FEL は既存の BL1 光学ビームラインによって実験研究棟に届けることができる。

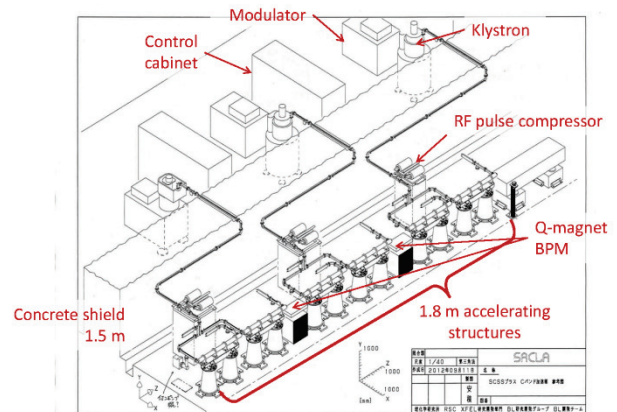


Figure 3: Bird view image of the C-band accelerator section.

SCSS+は SACLA とは独立の電子源を用いるため、同時に運転を行う事ができ、FEL の利用機会を大幅に拡大できる可能性がある。また、SACLA と SCSS+を同時に運転することにより X 線と極紫外線の FEL を同時照射させることも考えられる。SCSS+では、SACLA とタイミングシステムや基準 RF システム、制御システムを統合する。これにより、SACLA の制御室から SCSS+加速器の制御も行うことが可能となり、運転の効率化が図られる。

2.2 加速器の構成

Figure 1 に示した SCSS+加速器の構成を、上流より順に説明する。
熱電子銃の CeB₆ 単結晶カソードから引き出された 500 kV、1 A の電子ビームは、ビームチョッパーで 1 ns の幅に切り出された後、238 MHz プリバンチャー空洞 (SHB)、476 MHz ブースター空洞 (BS) にてバンチ長を圧縮しながら 1 MeV に加速されて、S バンド APS 型加速管 (S-APS) に入る。電子ビームは更にバンチ長を圧縮しつつ 14 MeV まで加速されて、後続の S バンド進行波型加速管 (S-TWA) に入る。S-TWA では、約 30° のオフレスト位相に

て約 45 MeV まで加速され、バンチの先頭と後尾でエネルギー差がつけられる。そしてバンチ圧縮部 (BC1) を通過することによりバンチ長は約 1 ps に圧縮され、ピーク電流が約 500 A に高められる。

圧縮後の電子ビームは、3 台の C バンド加速器 (C-TWA) によって、発振波長に応じたエネルギーまで加速される。6 本の 1.8 m 進行波型加速管にて 35 MV/m の加速電場にて加速すると、最後の加速管の出口では 420 MeV のエネルギーになる。C-TWA の完成イメージを Figure 3 に示す。C-TWA を出た電子ビームは、バンチ長とエネルギー測定用のシケイン (BC2) を経て、SACLA の BL1 ビームラインに合流する。

EUV-FEL は、XFEL よりも角度発散が大きいので、SCSS から移設するアンジュレータ 2 台は、BL1 ビームラインの最下流に置かれる。ここで使用する真空封止型アンジュレータは、後述するように磁石の周期長を SCSS の 15mm から SACLA と同様の 18 mm に変更する。上下の磁石列の間隔 (ギャップ) は 3.5 mm まで狭められ、この時の K 値は約 2.1 になる。例えば 420 MeV の電子を入射すれば、波長 43 nm、パルスエネルギー 100 μ J 程度の FEL を得ることができる設計となっている。FEL を発振させた後の電子ビームはダンプに捨てられる。FEL は、真空パイプを通して隣接する SACLA 実験研究棟に導かれ、実験に使用される。

2.3 SCSS からの変更点

Figure 1 に示すように、SCSS+の加速器の構成は SCSS 試験加速器[2]とほぼ同様であり、SCSS で使用していた電子銃、加速器・加速空洞、電磁石、ビームモニタ、ビームダクトなどを移設して使用する。ただし、いくつかの点については、変更をする。加速器の構成についての変更点を、以下に列記する。

- 1) レーザーの強度を増し、また安定性を高めるため、アンジュレータの磁石列を、周期長 15 mm (最大 K 値 1.5) から SACLA と同様の周期長 18 mm (最大 K 値 2.1) に交換をする。
- 2) C バンド加速ユニットをもう 1 台追加してエネルギーを 420 MeV まで上げ、SCSS より短波長領域をカバーする。
- 3) ゲイン長が長くなった分は、圧縮条件を強めてピーク電流を 500 A まで上げることで補償する。
- 4) C バンドの加速管について、SCSS+ではシャントインピーダンスの高いディスクロード型の進行波型加速管を用いる[6]。SACLA のチョークモード型加速管に比べて 10%ほど高い電場が得られ、電子ビームのエネルギーを上げることができる。
- 5) BC 部で使用する偏向電磁石は、SCSS のものは C 型の磁極形状で 6 極成分が漏れるため、

SCSS+用では H 型の磁極を用いたものを製作し使用する。

2.4 将来的な拡張性

SCSS+を SACLA のアンジュレータホールに建設する理由のひとつとして、将来的な拡張の余地が十分にあることが挙げられる。

まず、BC2 から SACLA 合流部までの間には、約 40 m のスペースがある。将来、ここに C バンド加速ユニットを 9 台設置すれば、電子ビームのエネルギーを 1.4 GeV 程度まで上げることができる。アンジュレータも増設すれば、水の窓と呼ばれる波長 3 ~ 4 nm の軟 X 線領域まで、発振波長の範囲を広げることが可能となる。

次に、ピーク電流を更に増加させて FEL 増幅を促進させることが可能である。S-TWA の直後に C バンド補正空洞を追加することによりパルス形状を補正し、BC1 と BC2 の間の C バンド加速器をオフクレスト位相にしてバンチ圧縮をもう 1 段階増やすことにより、ピーク電流を高めることができる。

更に、SCSS+では、SACLA 合流部からビームダンプまでの間に約 110 m のスペースがある。将来ここにアンジュレータを増設したり、シード化や新光源技術の開発に必要な機材を設置したりすることができる。

2.5 建設のスケジュール

SCSS は 2013 年 5 月に運転を停止し、加速管や導波管、電磁石、真空配管などのコンポーネントは既に解体され保管されている。アンジュレータホールへの大規模な設置作業は、SACLA の長期停止期間 (8 月のほぼ 1 ヶ月間) に限られるため、今夏と来夏に分けて設置作業が行われる。今夏は、石定盤などの設置架台と、入射部から BC1 までのビームライン上の機器が設置される予定である。来夏は、電子銃、C バンド加速器、アンジュレータなどの設置と、導波管の締結作業が予定される。来年度中に、全ての機器の設置を行い、また RF コンディショニング運転、ビームコミッショニング運転を開始することが目標である。

3. 加速器の安定化に向けた改良

3.1 SCSS での連続運転試験

SCSS 試験加速器は、1 章で述べたように FEL のプロトタイプ機としての目的を達したため、2013 年 5 月に運転を終了した。2005 年の運転開始から 7 年半の総運転時間は 12,000 時間であった。

SCSS+は、SCSS 試験加速器の機器を移設して使用する。その際に生じる問題点や改善すべき点を洗い出すために、運転を終了する直前の 5 月に、連続運転試験を行った。SCSS 試験加速器の最大運転条件である繰り返し 60 pps、電子エネルギー 250 MeV

にて、波長 61 nm の FEL を発振させながら 3 日間 (56 時間) に渡って連続で運転をした。

連続運転を行った 3 日間のレーザー強度の推移を Figure 4 に示す。レーザー強度は平均して約 10~15 $\mu\text{J}/\text{pulse}$ であり、パルス毎の変動は 20~30%ほどであった。ユーザー利用実験が始まった 2008 年当初は、レーザー強度は 30 $\mu\text{J}/\text{pulse}$ あり、パルス毎の変動も 10%程度であったので、その頃よりもレーザーの出力は低下している。この理由は、アンジュレータが不均等沈下したことにより光軸がずれて、発振の効率が低下したためであると推測される。Figure 4 にて、レーザー強度が時々ゼロに落ちているのは、加速器のトリップ (主にサイラトロン) の自爆により 2 分程度の間でビーム運転が停止しているためである。また、数時間周期で 30%程度のレーザー出力の増減が見られる。

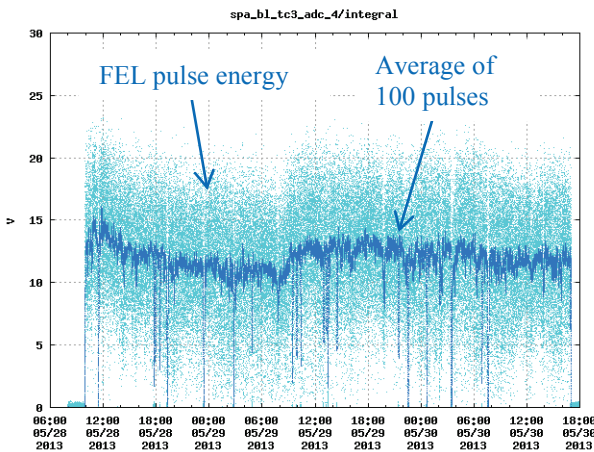


Figure 4: Trend graph of the pulse energy of FEL radiation, during the long run test at the SCSS test accelerator. The pulse energy was measured by a photo diode in the EUV beamline. Unit of the vertical axis is $\mu\text{J}/\text{pulse}$.

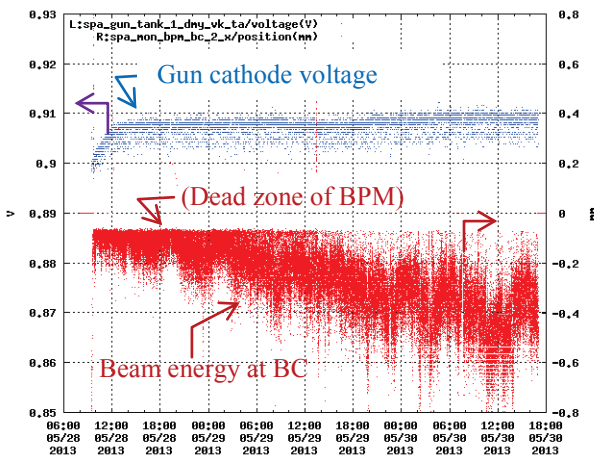


Figure 5: Trend graph of (Upper) the gun voltage, and (lower) the beam position, which corresponds to beam energies, at the dispersive section ($D=110$ mm) of BC.

同じ期間の、電子銃カソード電圧と BC 中間部での水平ビーム位置 (BC 部での電子エネルギーに相当) の連続運転期間中の推移を、Figure 5 に示す。電子銃のカソード電圧は、運転開始直後から中心値が約 1%増加し、それと共にパルス毎の電圧変動も大きくなっている。中心値のドリフトについては既知の現象で、電子銃の終端負荷となっているダミー管の熱膨張により、パルス電源に対する負荷インピーダンスが変化するためである。パルス毎変動の増加は、モジュレータの PFN 回路に充電するインバータ充電電源が、内部回路のドリフトにより電圧の制御範囲を超え出力電圧が不安定になっているためである。電子銃モジュレータで用いているこのインバータ充電電源[7]は、電圧安定化のために開発した試作機のため、2A 出力の主充電器に 10mA 出力の高精度補充充電器を並列に追加した構成になっている。そして主充電器の電圧制御と補充充電器の制御が別の回路になっており、それぞれの閾値が環境条件 (回路周辺の温度等) によってドリフトしたため、補充充電器での電圧整定範囲を超えてしまったのが今回の不安定性の原因であった。SACLA にて使用しているインバータ式充電電源[8]は、主充電器と補充充電器を 1 台の制御部で制御しているため、このような不一致は起きない。

また、Figure 5 の下側に示される BC 部での電子エネルギーは、3 日間で 0.5%ほどエネルギーが高い方向にドリフトしているのがわかる。電子銃のカソード電圧は、運転開始後 4 時間ほどでドリフトが治まっているのに対し、BC 部のエネルギーは、3 日間に渡ってほぼ同じ方向にドリフトが続いた。これは、他のドリフト要因があることを示唆している。SCSS では、基準 RF 系やタイミング系の位相安定化が十分でないため、その影響ではないかと推測している。

3.2 SCSS+での改善点

今回の連続運転試験を通じて、SCSS 試験加速器では、電子銃の電圧や電子ビームのエネルギーに対して短期変動や長期変動が存在することがわかった。この変動は、SACLA に比べても一桁程度大きく、FEL の強度や空間分布の変動に繋がる事が懸念される。そこで、SCSS+の建設にあたっては、考えられる変動の要因について、SACLA での経験も踏まえた対策を行う。主な改造点について、以下に説明する。

- 1) タイミング信号と基準 RF 信号については、SACLA の加速器に分配されているもの[9]を延長して使用する。冷却水を通水しての光ファイバーの温度安定化などの処置も、SACLA と同様に行う。制御ラックに納められる低電力 RF 系の機器は SACLA と同等のもの[9]を使用し、水冷ラックによる温度安定化も行う。これにより、SACLA と同等の安定性能 (短時間安定度が 50 fs (rms)程度、日変動が全幅 500 fs 程度) が得られると期待される。

- 2) インバータ充電電源は、SACLA と同等の安定性能（電圧安定性が 0.01%以下）を持つものを使用する。SACLA で使用している充電電源[8]の他にも、制御特性や信頼性を向上させた 2 種類の充電電源を開発しており、開発が順調に進めばこれらの充電電源を使用する。
- 3) クライストロンやサイラトロンのカソードヒータに用いている AC200V について、安定化電源を導入して電圧を安定化する。
- 4) 加速空洞、加速管の精密温調システムを改良し、SACLA と同様[10]に 0.01°Cの精度で温度安定化を行う。入射部の 238 MHz プリバンチャー空洞、476 MHz ブースター空洞に関しては、漏れ磁場の影響を避けるため、電熱ヒータの DC 電源化も行う。
- 5) 入射部にて、地磁気の影響を避けるため、地磁気補正コイルを設置する。また、入射部の設置される付近の残留磁場を予め調査し、均一な分布になるよう消磁を行う[11]。
- 6) 制御系については SACLA と統合し、SACLA の加速器制御室から制御できるようにする。SACLA のために開発された制御用 GUI やフィードバック制御のルーチンが、SCSS+にも活用できる。

4. まとめ

理研/SPring-8 にて、極紫外（EUV）波長域の FEL 装置を整備する計画を進めている。SCSS で使用していた加速器コンポーネントを SACLA のアンジュレータホールに移設し、新たな EUV-FEL マシン「SCSS+」として整備する。SCSS+では、アンジュレータの磁石列を SACLA と同様のものに交換するとともに、C バンド加速器を 1 台追加して電子エネルギーを 420 MeV に増強する。これにより、波長 30~40 nm、パルスエネルギー100 μ J 程度の FEL が期待される。また、加速器を長期的に安定に運転するため、タイミング系や RF 系、制御系などを SACLA に準じた構成とすることで、SACLA で行っているのと同様の安定化を行う予定である。こうした改造も含めて、来年度中の完成を目標に、準備作業を進めている。

謝辞

FEL の実証試験機 SCSS の運転、および極紫外線 FEL 施設 SCSS+の整備は、理研の FEL 研究開発部門、JASRI の XFEL 利用研究推進室のメンバーを中心に、理研や JASRI の他部門の方々、SCSS や SACLA の運転員の方々、施設管理の方々、装置のメーカーの方々など、非常に多くの方々の尽力によってなされています。皆様方に感謝します。

参考文献

- [1] T. Shintake, et al., “A Compact Free-Electron Laser for Generating Coherent Radiation in the Extreme Ultraviolet Region”, *Nature Photonics*, 2 (2008) 555-559.
- [2] T. Shintake, et al., “Stable operation of a self-amplified spontaneous-emission free-electron laser in the extremely ultraviolet region”, *PRST-AB* 12 (2009), 070701.
- [3] G. Lambert, et. al., “Injection of harmonics generated in gas in a free-electron laser providing intense and coherent extreme-ultraviolet light”, *Nature Physics* 4 (2008), 296-300.
- [4] T. Togashi, et. al., “Extreme Ultraviolet Free Electron Laser Seeded with High-Order Harmonic of Ti:sapphire Laser”, *Optics Express* 19 (2011), 317-324.
- [5] H. Tanaka and M. Yabashi et. al., “A compact X-ray free-electron laser emitting in the sub-angstrom region”, *Nature photonics* 6, 540 (2012).
- [6] 櫻井ほか, “C バンドディスクロード型加速管の開発に向けた試作空洞の RF 特性測定”, 本学会 (2013).
- [7] 川崎ほか, “X-FEL/SPring-8 向け高電圧充電器の開発”, 第 5 回日本加速器学会 (2008).
- [8] C. Kondo, et. al., “High Precision Inverter Power Supply for Klystron Modulator of SACLA”, *proceedings of EAPPC 2012, Karlsruhe, Germany*, (2012).
- [9] 大島ほか, “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 (2011).
- [10] 前坂ほか, “SACLA 加速器構成機器の高度化状況”, 本学会 (2013).
- [11] 長谷川ほか, “SACLA 入射部における環境磁場の一様化対策”, 第 8 回日本加速器学会 (2011).