

SACLA における 476 MHz 半導体増幅器の導入 INTRODUCING SOLID STATE AMPLIFIERS AT SACLA

岩井 瑛人^{*,A,B)}, 前坂比呂和^{B,A)}, 大島隆^{A,B)}, 稲垣隆宏^{B,A)}

Eito Iwai^{*,A,B)}, Hirokazu Maesaka^{B,A)}, Takashi Ohshima^{A,B)}, Takahiro Inagaki^{B,A)}

^{A)} Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI)

^{B)} RIKEN SPring-8 Center (RSC)

Abstract

The X-ray Free Electron Laser facility SACLA at SPring-8 in Hyogo consists of two linacs of 8 GeV and 800 MeV. It supplies beams to two hard X-ray FEL beamlines, one soft X-ray FEL beamline, and the SPring-8 storage ring. For the 476 MHz booster cavity, which requires high stability and reliability, we have traditionally used a 100 kW pulsed RF source with an Inductive Output Tube (IOT). However, due to the decreasing operational range and increasing difficulty in obtaining maintenance parts for the aging IOTs, we have been transitioning to solid state amplifiers (SSAs). These SSAs, which combine the outputs of multiple amplifier modules, can continue operation even if some of them fail and are also easier to replace on a module-by-module basis. Additionally, since they do not use high voltage like IOTs, they are expected to have higher fault tolerance. At the 8 GeV linac, we have installed a SSA in a way that allows switching between the existing IOTs and the new SSA, and have been operating with the SSA since early last fiscal year. Furthermore, the production of another SSA for the 800 MeV linac has been completed, and we are conducting test runs before their actual installation. This article will introduce the current status of SSA installation, as well as performance and stability measurement results.

1. はじめに

兵庫県の大型放射光施設 SPring-8 にある X 線自由電子レーザー (XFEL) 施設 [1] では、Fig. 1 に示すように 8 GeV (SACLA) と 800 MeV (SCSS+) [2] の 2 つの線型加速器からなり、2 つの硬 X 線 FEL ビームライン、1 つの軟 X 線 FEL ビームライン、そして SPring-8 蓄積リングへビームを供給している。高い安定度と信頼性が求められる 476 MHz ブースター空洞用 100 kW パルス高周波源として、これまで Inductive Output Tube (IOT) を用いてきた。高周波出力は 100 kW, 50 μ s 幅, 60 pps の繰り返しである。経年変化に伴う可用域の減少や保守部品の入手性の悪化から、IOT に変えて半導体増幅器の導入を進めている。半導体増幅器は多数の増幅モジュールの出力を合成する構成のため、部分的な故障があっても運転継続が可能であり、またモジュール単位での交換も容易である。また、IOT のように高電圧を用いないという点においても、障害耐性が高いことが期待される。本稿では、SACLA と SCSS+ における 476 MHz 半導体増幅器の導入状況と得られる性能について報告する。

2. SACLA への導入

SACLA/SPring-8 では TE011 モード高周波空洞合成器を使用した半導体パルス高周波増幅器の開発を進めてきた [3,4]。Figure 2 はこの半導体増幅器の概要図と実機写真である。1 kW 程度の終段増幅器の出力 108 個を $Q_0 \sim 100000$ の空洞で合成して 100 kW の高周波出力を得る。高周波出力の duty-factor が 0.3 % と低いため、この半導体増幅器は CW ではなくパルス動作である。低 duty でのパルス動作は低消費電力や低発熱というメリットがある一方で、FEL に重要なパルスごとの安

定性 (パルス安定度) を犠牲にする可能性があるため確認が必要である。Figure 3 はこの半導体アンプの入出力特性である。

この半導体増幅器を、既存の IOT と共に同軸切替器を介して接続し、476 MHz ブースター空洞用高周波源を二重化した (Fig. 4)。IOT の信頼性や持続性に難を感じ始め、半導体増幅器の実機投入を検討し始めた 2020 年に、まずは単独連続試験運転を行い、動作や性能に問題がないことを確認した。2021 年に同軸導波管や同軸切替器と共に加速器に設置し、既設 IOT 故障時の代替機として稼働できるようにするとともに、加速器のスタディ時間を用いて十分な安定度で XFEL の運転に影響がないことを確認した。2022 年には、実運転で本機として使用するために、運転マージン確保のための出力パワーの増強、制御やインターロックの整備などを行なった。また、476 MHz 高周波源の故障時等に安全かつ迅速に (IOT に) 切り替えられるようにするため RF 源切替器の設計、製作を行なった (Fig. 5)。この RF 源切替器は、空洞に接続する運転器として本機で指定した高周波源と同軸切替器の経路情報の合致を確認すると共に、各種インターロックや制御信号を当該高周波源に接続する。

2023 年の 4 月より、RF 源切替器を導入すると共に、この半導体増幅器を運転器として XFEL の運転を開始した。これまで 1 年以上、SACLA/XFEL と SPring 蓄積リングへ安定したビーム供給を続けている。XFEL の安定性に直結する、pickup 信号の振幅と位相のパルス毎の安定性 (パルス安定度) はそれぞれ rms で 0.007 %, 0.022 degree である (Fig. 6)。旧来の IOT の安定度はそれぞれ rms で 0.009 %, 0.010 degree であり、半導体増幅器の振幅 (位相) 安定度は IOT よりやや良い (悪い)。出力位相の安定度は、終段増幅器の出力、つまり合成器の入力で 0.007 degree rms 程度、合成器の出力直後では 0.03 degree rms 前後に悪化することがわかっているが、

* iwai@spring8.or.jp

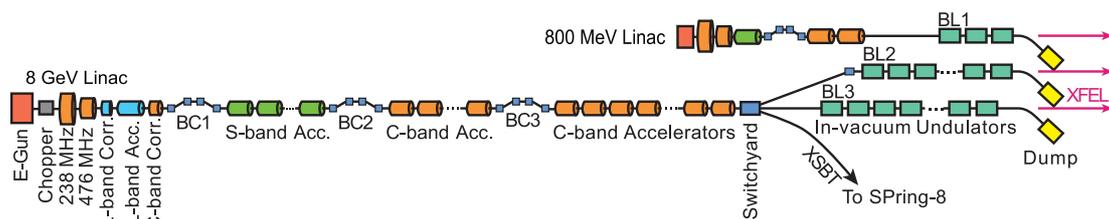


Figure 1: Schematic view of SACLA and SCSS+.

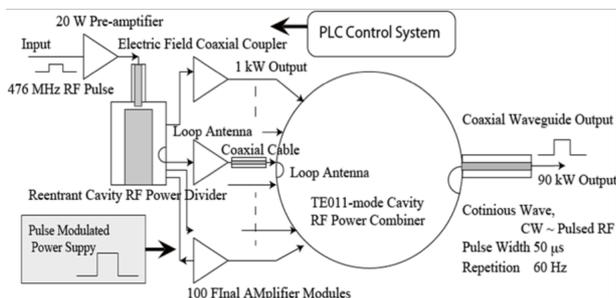


Figure 2: Block diagram (top) and the actual photo (bottom) of the amplifier.

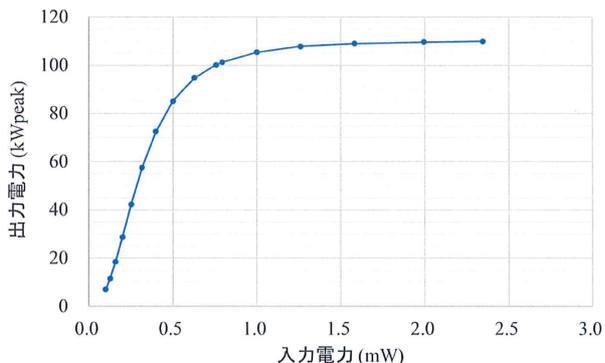


Figure 3: RF output power as a function of the input RF power.

合成器出力が悪化する原因はわかっていない。出力振幅については、入力励振信号よりも良い安定度が得られており、これは出力飽和領域に近い 100 kW を運転に用い

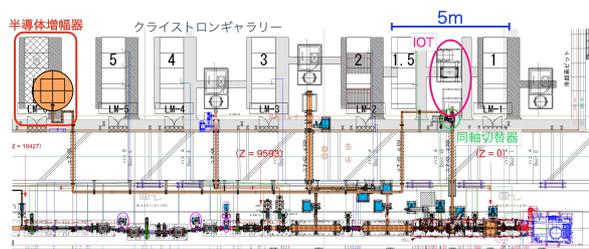


Figure 4: Schematic layout of the existing IOT, the installed solid state amplifier and the RF coaxial switch.



Figure 5: Photo of the RF source selector.

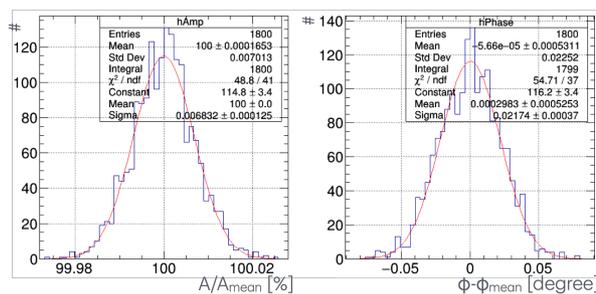


Figure 6: Pulse by pulse stability of amplitude (left) and phase (right). Obtained stability is 0.007 % and 0.022 degree in rms, respectively.

ているためと考えている。前述したように、この位相の安定度の XFEL への影響は見られなかった。

3. SCSS+ への導入

SACLA は SPring-8 蓄積リングへの入射器の役割を担うことから、その高可用性はより重要であるが、SCSS+ で用いている 476 MHz 高周波源 IOT は、移設・増強前の SCSS 試験加速器にて 2005 年から稼働しており、経年による性能低下は SCSS+ の方がより顕著であったため、SACLA での稼働開始後すぐに SCSS+ への導入検討を開始した。Figure 7 は 476 MHz ブースター空洞

のピックアップ信号の振幅、位相と FEL パルスエネルギーの相関である。振幅と位相それぞれの安定領域の全幅 0.2 %, 0.1 degree を 4σ として、要求性能はそれぞれ $\sigma_A/A < 0.05\%$, $\sigma_\phi < 0.025$ degree とした。SCSS+ 向けの半導体増幅器は費用とメンテナンス性なども考慮して広く検討したところ、理研小型中性子源 RANS において、検討中の構成に近い周波数、出力パワーの半導体増幅器があることがわかった。パルス安定度の厳しい要求性能に対する性能が唯一の懸念材料であったが、当該施設担当者様のご好意により、測定機材を持ち込み直接測定させていただき機会を得て、パルス安定度についても要求性能に合致しそうであることが確認できたため、製作を進めた。

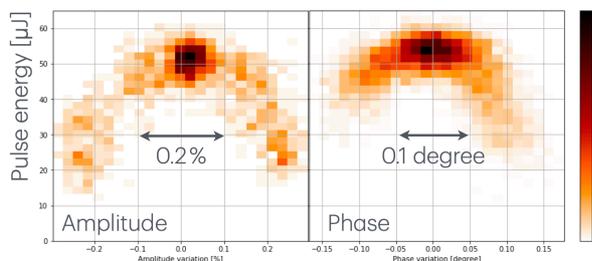


Figure 7: Obtained pulse energy of FEL as a function of amplitude (left) and phase (right) of 476 MHz cavity pickup, respectively.



Figure 8: Actual photo of the amplifier for SCSS+.

Figure 8 は 2023 年度中に製作した新しい半導体増幅器である。Figure 9 はこの半導体増幅器の入出力特性である。こちらは 4 つの出力をもつ 34 個の終段増幅器の出力計 136 系統を radial combiner を用いて合成する構成になっている。また、将来的な拡張性も考慮して 600 pps 運転対応となっている。

今年度に入ってから試験準備と連続運転を行なってきた。1 ヶ月程度の連続運転で動作が問題ないことを確認した。パルス毎の安定度についても評価を行なった。出

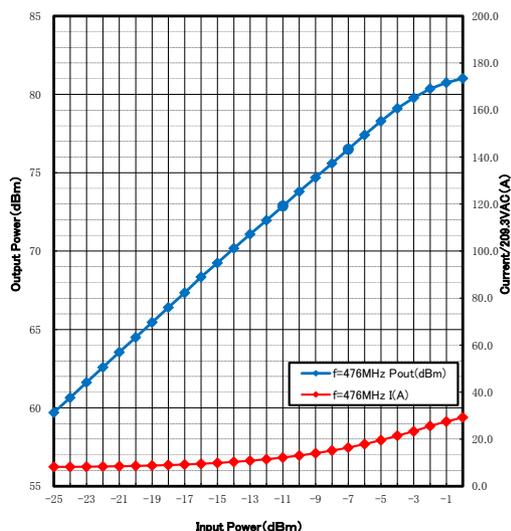


Figure 9: RF output power (blue) and input current (red) as a function of the input RF power.

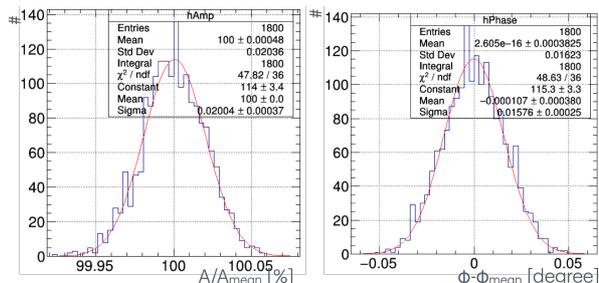


Figure 10: Pulse by pulse stability of amplitude (left) and phase (right). Obtained stability is 0.020 % and 0.016 degree in rms, respectively.

力 RF の振幅と位相のパルス毎の安定性はそれぞれ rms で 0.020 %, 0.016 degree である (Fig. 10)。なお、LLRF 系は SCSS+ 実機と同じ構成であり、この半導体増幅器を接続しない状態での LLRF(測定) 系の安定度は、運転に用いているパラメータにおいて振幅、位相それぞれ rms で 0.010 %, 0.006 degree 程度と見積もっている。以上の結果より、SCSS+ の運転に十分なパルス毎の安定度を備えていることも確認した。今夏、既設の IOT と置き換えして設置し、秋からの加速器運転に使用する予定である。

4. まとめ

X 線自由電子レーザー施設 SACLA では 476 MHz ブースター空洞向けの大強度高周波源として、経年変化に伴う可用域の減少や保守性の観点から、旧来の IOT に変えて、半導体増幅器の導入を進めている。SPRing-8 蓄積リングの入射器を兼ねる SACLA では先行して半導体増幅器の導入し、既存の IOT に加えて新たに半導体増幅器を追加することで高可用化を進めた。2023 年度初頭からは半導体増幅器を使って運転を行なっており、1 年以上安定したビームの供給を続けている。

ついで SCSS+ にも導入するため、新たな半導体増幅器を製作し 1 ヶ月程度の連続稼働確認と、パルス毎の安

定性の評価を行なった。パルス安定度は振幅, 位相それぞれ rms で 0.020 %, 0.016 degree であり、SCSS+ の安定運転のための要請を満たしていることを確認した。この半導体増幅器は今夏に既設の IOT と置き換え、秋からの運転に活用する予定である。

謝辞

日本高周波株式会社 と 株式会社アールアンドケーの方々に、それぞれの高周波増幅器の製作と導入にあたりご尽力いただき感謝いたします。理研小型中性子源 RANS の方々には、SCSS+ 向けの半導体増幅器の導入に先立って、保有されている同等品の性能測定をさせていただきました。どうもありがとうございました。

参考文献

- [1] T. Ishikawa *et al.*, “A compact X-ray free-electron laser emitting in the sub-angstrom region”, *Nat. Photon.* 6, 540 – 544, 2012.
- [2] T. Inagaki *et al.*, “First Lasing and Commissioning Status of the Soft X-ray FEL Beamline at SACLA”, *Proc. of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society in Japan, Chiba*, 286-290, 2016.
- [3] Y. Otake *et al.*, “Design of a 100 kW Solid-state RF Pulse Amplifier with a TE011 Mode RF Combiner at 476 MHz”, *Proc. of International Particle Accelerator Conference (IPAC’17), Copenhagen, Denmark*, 4180-4183, 2017.
- [4] Y. Otake *et al.*, “90 kW Solid-state RF Amplifier with a TE011-mode Cavity Power-combiner at 476MHz”, *Proc. 29th Linear Accelerator Conference (LINAC’18), Beijing, China*, 889-892, 2018.