PERFORMANCE OF RF SYSTEM FOR THE SACLA INJECTOR AT SPring-8

Takao Asaka ^{A)}, Takahiro Inagaki^{A)}, Hiroyasu Ego^{B)}, Toshiaki Kobayashi^{B)}, Shinsuke Suzuki^{B)},

Tsutomu Taniuchi^{B)}, Kazuaki Togawa^{A)}, Hirofumi Hanaki^{B)} and Yuji Otake^{A)}

^{A)} RIKEN Harima Institute RIKEN SPring-8 Center

1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo 679-5148, Japan

^{B)} Japan Synchrotron Radiation Research Institute

1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo 679-5198, Japan

Abstract

In the X-ray free electron laser facility SACLA, to realize stable bunch compression process for an electron beam without emittance growth, an injector adopts a combination of an extremely low emittance thermionic gun and multistage sub-harmonic RF cavities (238 MHz, 476 MHz and L-band) for velocity bunching. L-band accelerating structures were introduced to expand an RF acceptance. The two L-band accelerating structures of the APS type compress a 1 MeV beam bunch and accelerate it up to 40 MeV. Each accelerating structure is fed into an RF power of 12 MW with a pulse width of 6 µs and a repetition rate of 60 pps. An L-band waveguide system employs a vacuum type without a circulator and thus it was carefully designed and fabricated to minimize RF reflection to a 30 MW klystron for its stable operation. The RF conditioning of the waveguide system and accelerating structures were completed in 20 days. After the RF conditioning, the stability performance of the RF cavities and accelerating structures were measured and turned out almost up to the satisfaction of the target values.

X線自由電子レーザー施設 SACLA 入射部の RF システム性能

1. はじめに

X線自由電子レーザー施設 SACLA の 40MeV 入射 部は、2011 年 1 月初旬に RF 空胴、加速管、電磁石 の精密アライメント、機器の最終調整が完了した後、 約 1 ヶ月間にわたる RF エージングを実施した。2 月からはビームコミッショニングが開始され、6 月 初旬には波長 1.2 Å のレーザー増幅を確認、現在は レーザーパワー増強のための精密調整がおこなわれ ている^[1,2]。

入射部におけるビームの基本性能は、試験加速器施設にてすでに実証されているが^[3]、本加速器の入射部では、さらなるビーム性能の高度化・高安定化を目指した構成機器の改良をおこなった。とくに加速電荷量増強のために、加速部のアクセプタンスを広げる施策として2本のLバンドAPS加速管を初段加速システムに採用した^[4]。このLバンド加速システムでは、エミッタンス悪化を抑制し、40 MeVの加速、ならびに磁気バンチ圧縮のためのエネルギーチャープを形成する。その要請される RF 電圧、位相安定性は0.01%(の)、0.06°(の)であり、構成機器の設計、製作においては、この安定度を実現することを主眼として開発が進められてきた^[5]。

新規開発した L バンド方向性結合器、移相器、終 端負荷^[6]といった大電力装置については、その健全 性確認のため事前に大電力試験をおこない、定格 RF 電力 25 MW 供給時の安定動作を確認した。これ らを立体回路に実装した後におこなわれた APS 加速 管の RF エージングは、20 日間でビーム運転時の要 求電力(12 MW、5.5 μs、60 pps)に到達し、その 安定性能も概ね目標値を満たしている。

また、入射部に備えられているその他の RF 空胴、 および加速管の RF エージングについても、順調に 進められ、数日で定格電力に到達している。表 1 に は、各 RF 空胴、加速管の RF 電力条件とともに、 RF エージングに要した時間をまとめて示す。

本稿では、新規開発項目である L バンド加速シス テムの構成、ならびに RF エージング状況の詳細に ついて報告する。また RF エージング完了後、入射 部の各 RF 空胴(238 MHz サブハーモニックバン チャ空胴、476 MHz ブースタ空胴、L バンド補正空 胴)、加速管(APS 加速管、C バンド補正加速管) の RF 電力変動測定を実施した。その測定結果も報 告する。

表 1 : 入射部 RF 空胴、ならびに加速管へ投入する RF 電力、パルス幅、および RF エージング所要時間

			,, 1 = 1 + 1
	Peak Power	Pulse width	Aging time
238 M SHB	14 kW	100 µs	6 days
476 M Booster	120 kW	50 µs	7 days
L-B Correction	5 kW	10 µs	2 days
L-B APS acc.	12 MW	6 µs	20 days
C-B Correction	10 MW	1 μs	7 days

2. Lバンド加速システム

2.1 機器構成

各 APS 加速管へは、クライストロンから 3 dB 電力分配器、大電力移相器、RF 波形観測のための方

向性結合器を介して、最大 RF 電力が 15 MW、パル ス幅が 6 µs、繰返し周波数が 60 pps で供給される。 加速器収納部に設置された立体回路、および APS 加 速管を図 1 に示す。2 本の APS 加速管は、ビーム集 群位相、ならびに加速位相が最適化された位置に配 置される。また、各々の APS 加速管から 3 dB 電力 分配器までの電気長を等距離にすることで、加速管 からの反射電力は 3 dB 電力分配器で合成され、ク ライストロンへ戻ることなく終端負荷に導かれる^[7.8]。

2本の APS 加速管のうち1本が真空ロウ付け不良 による製作の遅延があったが、本年1月初旬には入 射部への導入、設置が完了した。また当初予定して いた大電力可変型移相器は、可動プランジャ導入部 フランジ締結部分からの真空リークが発生したため、 エッジ部分の再加工、研磨を施すとともに、暫定措 置として固定式プランジャに変更している。



図1: SACLA 入射部に設置された L バンド立体回 路、ならびに APS 加速管(電子銃(写真奥)、238 MHz サブハーモニックバンチャ空胴、476 MHz ブー スタ空胴、L バンド補正空胴、L バンド加速システ ム、C バンド補正加速管(写真左下))

2.2 RF エージング

L バンド加速システムの立体回路構築に先立ち、 方向性結合器(MEGA industries 社製)、移相器 (MEGA industries 社製)、終端負荷(東芝電力シ ステム社製)といった主要装置については、安定動 作確認のため、装置単体で大電力試験を実施した。 試験はクライストロンギャラリー部に設置した 30 MW クライストロン^[9]・変調器電源、ならびに制御 装置を使用した。RF 電力投入時には、制御装置に 装備されている RF エージング機能により、導波管 内真空度、反射 RF 電力を監視しながら目標到達電 力まで RF 電力供給量が自動調整される^[10]。 RF エージングの初期条件は、パルス幅が 0.3 µs、 繰返し周波数が 10 pps である。RF 電力が目標値で ある 25 MW に到達した後には、パルス幅を 0.5 µs、 1 µs、2 µs、3 µs、4 µs、5 µs、5.5 µs、ならびに繰返 し周波数も 30 pps、60 pps と条件を変更し、再度、 RF 電力投入をおこなった。

• L バンド方向性結合器

方向性結合器の大電力試験では、クライストロン 出力部に真空引き口付き導波管、Η ベンド導波管、 そして方向性結合器が接続される。終端負荷は、既 にクライストロン出力試験で使用した水負荷(日本 高周波社製)を用いた。導波管内真空度が 5×10⁻⁵ Pa 以下に到達した後、上記した初期条件にて RF 電 力投入を開始した。目標到達電力は、実際のビーム 運転を想定し、25 MW、5 μs、60 pps とした。RF エージング開始当初は急激な真空悪化による RF 電 力出力停止が頻発したものの、5 MW を超えた後は 目標到達電力まで正味 3 日程度で達した。

Lバンド移相器

各 APS 加速管の位相関係を調整することにより、 適切なエネルギーチャープの生成が可能となる。こ のための移相器が3 dB 電力分配器と後段 APS 加速 管の間に導入される。位相量調整は導波管 H 面から 3 本の円柱プランジャを突出し、その量を変化させ ることで、可変範囲±7.5°を実現する。本装置製作過 程で、円柱型プランジャ導入口真空フランジロウ付 け部分からの真空リーク、また円柱型プランジャ支 持部の不具合から、可動式円柱型プランジャを固定 式円柱型プランジャへ急遽変更した。この暫定措置 に際して、立体回路の仮構築、およびその低電力 RF 測定により設置誤差から生じる位相差を見出し、 固定移相量を決定した。

移相器の大電力試験では、前節同様、水負荷を用 いたセットアップ、RF 初期条件を設定した。RF エージング初期段階である低電力投入時、急激な真 空悪化が頻発した。導波管内面に突出している固定 式円柱型プランジャはその周囲に 0.2 mm (高さ 3mm)、1.2mm (高さ 5.2mm)の段差のある間隙 を有しており、ここでのマルチパクタリングが発生 しているものと判断し、その隙間にフィンガーコン タクトを導入することで電気接触を強化した。その 後、順調に RF エージングが進行し、5 日程度で目 標到達電力に達した。

Lバンド終端負荷

間接冷却型で、かつ小型化を図るために円筒型 SiC を採用した終端負荷は、最大 RF 電力が 35 MW (平均電力 11 kW)を消費可能とする仕様で設計、 製作した。完成した終端負荷の大電力試験では、0.5 µs、60 pps の条件で 20 MW の RF 電力が 50 時間で 到達したものの、1 µs のパルス幅では、5 MW 程度 で定常的な真空悪化が発生し、これ以上の RF 電力 上昇が見込めなくなった。Microwave STUDIO によ る詳細な電界分布計算をおこない、マルチパクタリ ング発生可能性の再検討、局所的な放電箇所を特定 し、この計算結果を踏まえた内面処理加工、SiC 端 部へコロナリング設置などといった電界集中部分低 減をおこなった。以上の再加工後に実施した大電力 試験では改良の効果により、正味3日程度で目標到 達電力に達成し、安定的なRF電力消費を実現した。 • Lバンド立体回路・APS加速管

主要装置について大電力試験を実施後、立体回路、 ならびに付帯設備を構築、5 日間にわたる真空引き を経て、RF エージングを開始した。RF エージング の状況を図2に示す。

APS 加速管のフィリングタイムが 2.2 µs であるた め、RF エージングの初期段階である 1 µs 以下のパ ルス幅では、主に立体回路の真空悪化が著しく、そ れより広いパルス幅では APS 加速管部の真空悪化が 顕著に見られた。20 日間の RF エージングで目標値 である RF 電力 15 MW、5.5 µs、60 pps (ビーム運 転時の RF パラメータ)に到達した。この条件下の クライストロン高電圧波形、入力 RF 波形、APS 加 速管のピックアップ RF 波形、反射 RF 波形を図 3 に示す。



図 2 : 立体回路を構築した後におこなわれた L バン ド加速システムの RF エージングの様子



図 3 : L バンド APS 加速管への RF 電力波形、なら びにクライストロン高電圧波形 (ビーム運転時の RF 電力)

入射部 RF 空胴・加速管の RF 電力・位 相、ビームエネルギー安定性

入射部の RF 空胴群、ならびに加速管の RF エー ジングが完了した後、各空胴を励振する RF 電力、 位相の安定性に関する評価測定を実施した。表 2 に は、RF 空胴、加速管の RF 電圧振幅、位相に関する 安定度の目標許容値、ならびに変動測定結果を示す。 ここで示した結果は、繰返し周波数が 10 pps で各 RF 空胴の設定パラメータはレーザー発振に最適化 された状態である。RF 空胴、加速管の電圧振幅、 位相は空胴に備わるモニター用ピックアップ部の RF 信号を使用している。これらの信号は IQ 検出器 に入力され、16bit AD 変換器を介してデータベース システムに格納される[11]。ここで示した安定度は10 分間にわたって取得した RF 電圧振幅、位相であり、 これらを 10 ショット毎に移動平均して得られる値 から標準偏差を算出した。L バンド APS 加速管の RF 電圧振幅に対する安定度がわずかに目標許容値 を超えるものであったが、その他の RF 空胴、加速 管の RF 安定度は、許容値を満足する値であった。

ビームコミッショニング開始当初より、238 MHz サブハーモニックバンチャ空胴、476 MHz ブースタ 空胴、L バンド補正空胴は、その設定 RF 電力、位 相に対して低電力 RF フィードバックを 5 秒毎にお こない、長期的ドリフトを抑えている(L バンド APS 加速管、C バンド補正加速管は RF 位相のみ フィードバック制御を適用)。

これら RF 空胴ならびに加速管が寄与するビーム エネルギー安定度(Lバンド APS 加速管位相は-20 deg. off crest に設定)は、入射部直後にある初段磁 気バンチ圧縮装置のエネルギー分散部に配置されて いるマルチストリップライン型エネルギーモニター ^[12]で測定される。このモニターで取得されたビーム エネルギー変動の様子を図4示す。この20分間の 測定は、10ppsの繰返し周波数で運転されるビーム に対して、すべてのビーム重心エネルギーのイベン トデータを取得する。この測定データに含まれるエ ネルギーモニター検出器雑音の低減ため、10ショッ ト毎の移動平均をおこない、その時系列データから 標準偏差を算出した。その結果、得られたビームエ ネルギー安定度は0.013% (std.)であった。

表 2 : 入射部の RF 空胴、ならびに加速管の RF 電 圧振幅、位相安定度の許容値(σ)、および測定結 果(std.)(測定時間: 10 分間、10 ショット毎に 移動平均)

	Tolerance		Measurement	
	Voltage	Phase	Voltage	Phase
238 M SHB	0.01 %	0.01°	0.010 %	0.006°
476 M Booster	0.01 %	0.02°	0.004 %	0.009°
LB Correction	0.03 %	0.06°	0.02 %	0.02°
L-B APS acc. 1	0.01 %	0.06°	0.06 %	0.03°
L-B APS acc. 2	0.01 %	0.06°	0.03 %	0.05°
C-B Correction	0.2 %	0.06°	0.06 %	0.05°



Time [H:M:S]

図4:初段磁気バンチ圧縮装置のエネルギー分散部 に備えられたマルチストリップライン型エネルギー モニターによるビームエネルギー変動測定結果(測 定時間:20分間、10ショット毎に移動平均)

4. まとめ

L バンド移相器、終端負荷に関する大電力試験で は、放電、マルチパクタリングが原因で RF エージ ングが進まないといった不具合が生じたが、それを 改善するための再計算、またその結果を踏まえた改 良を施すことにより、その後の RF エージングでは わずか数日で定格 RF 電力に到達している。これら 主要装置を導入した立体回路、および APS 加速管の RF エージングは、20 日間で目標とする 35 MeV の ビーム加速に必要な RF 電力に到達した。

また、入射部にあるその他の RF 空胴、加速管の RF エージングも順調に進められ、数日で定格 RF 電 力に到達した。

入射部の各 RF 空胴、ならびに加速管の RF 電力、 位相安定性については、あらゆる周波数成分の変動 低減のため、設計、製作段階から機械振動の抑制、 RF 増幅器直流電源、ならびにクライストロン変調 器電源用インバータ電源の安定化、さらに空胴本体 だけでなくその付帯設備に対しても徹底した環境温 度の安定化など、様々な変動要因に対する対策を念 頭において機器の構築が進められてきた。またビー ム運転が開始されてからは、RF フィードバックの 導入により、数十秒以上の変動成分は抑制され、そ の結果、RF 電圧振幅、位相に関して目標許容値を 概ね満たしている結果を得た。

2 月中旬からおこなわれたビームコミッショニン グでは、高水準に安定化された RF 性能を反映し、 入射部で生成されるビームについては、0.013%の ビームエネルギー安定性を実現している。このこと は、高度化されたビーム安定性だけでなく、加速器 の機器設定パラメータ変更においても高水準なビー ム再現化に貢献している。

現在、入射部のビームについて、数秒周期の変動、 ショット毎の変動が問題になっている。この変動成 分の原因を解明し、安定化を図ることにより、レー ザー発振のさらなる安定化を目指す。

謝辞

L バンド加速システム設計、製作では、筆者の他 に東芝電力システム社の佐藤潔和氏、渡辺順子氏、 木村諭氏はじめ、東芝京浜事業所の方々の尽力に よっておこなわれました。

入射部の機器据付け作業、調整は三菱重工業株式 会社の井上典亮氏、沖平和則氏、三宅修治氏、三浦 禎雄氏によっておこなわれました。

機器の設置、精密アライメントは、高輝度光科学 研究センターの木村洋昭氏、松井佐久夫氏、安積則 義氏を中心におこなわれました。

L バンド導波管真空フランジの開発、入射部真空 機器の締結作業、および冷却水システムの調整は、 理化学研究所の長谷川照晃氏、高輝度光科学研究セ ンターの備前輝彦氏、高橋直氏の主導により完了し ました。

L バンド 30MW クライストロン、移相器、および 終端負荷の製作、改良では、理化学研究所の新竹積 氏に有益な助言をいただきました。上記皆様に心か ら感謝申し上げます。

参考文献

- [1] H. Tanaka, "動き始めた X 線自由電子レーザー施設 SACLA の運転状況", in these proceedings.
- [2] T. Hara, et al., "SACLA 加速器のビームコミッショニング", in these proceedings.
- [3] H. Tanaka, "SCSS 試験加速器施設の運転状況 50~ 60nm のレーザー波長領域での定常的 SASE 飽和の達 成", Proceedings of the 5th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Higashihiroshima, pp539-541 (2008).
- [4] H. Hanaki, et al., "SPring-8 XFEL 入射部システムの設計", Proceedings of the 5th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Higashihiroshima, pp87-89 (2008).
- [5] T. Asaka, et al., "XFEL/SPring-8 入射部における高周波 システムの開発状況", Proceedings of the 6th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tokai, pp906-910 (2009).
- [6] J. Watanabe, et al., "Duct-Shaped SiC Dummy Load of Lband Power Distribution System for XFEL/SPring-8", Proc. of IPAC10, Kyoto, pp3729-3731 (2010).
- [7] H. Hanaki, et al., "Construction of Injector System for SPring-8 X-FEL", Proc. of IPAC10, Kyoto, pp3729-3731 (2010).
- [8] T. Asaka, et al., "XFEL/SPring-8 入射部の建設状況", Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Himeji, pp402-405 (2010).
- [9] S. Fujii, et al., "XFEL 加速器向け L バンド 30MW パル スクライストロンの開発", Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Himeji, pp902-906 (2010).
- [10] K. Shirasawa, et al., "XFEL/SPring-8 におけるクライストロン制御システム", Proceedings of the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Wako, pp550-552 (2007).
- [11]T. Ohshima, et al., "XFEL/SPring-8 "SACLA" における タイミング・LLRF システムの性能", in these proceedings.
- [12] H. Maesaka, et al., "Development of a Multi-Stripline Beam Position Monitor for Wide Flat Beam of XFEL/SPring-8", Proc. of IPAC10, Kyoto, pp954-956 (2010).