

HIGH POWER CONDITIONING OF C-BAND RF DEFLECTING STRUCTURE FOR XFEL/SPring-8 “SACLA”

Tatsuyuki Sakurai^{#A,B)}, Hiroyasu Ego^{A,B)}, Hirokazu Maesaka^{A,B)}, Yuji Otake^{A,B)}

^{A)} RIKEN/SPring-8

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

^{B)} JASRI/SPring-8

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

Abstract

We succeeded in the first lasing of an X-ray laser at SACLA (SPring-8 Angstrom Compact free electron LAser) facility in June 2011. It is important to compress an electron bunch length from 1 nsec to 30 fsec with 3 kA in a peak for SACLA accelerator. Measurement of the bunch length (temporal profile) is one of the key issues for the beam commissioning. We developed a C-band RF deflecting structure for the diagnosis on the bunch length. Two deflecting structures were required to generate a deflection voltage over 40 MV to pitch a 1.4 GeV electron bunch in the vertical direction. An RF power of 32 MW or more was necessary to generate the deflection voltage. We built the structures and conditioned the structure for high power RF operation at an XFEL test bunker. After the conditioning in 40 hours, the structure worked well at an RF power of 50 MW, which is above the requirement. In this paper, we report the results of the RF conditioning of the C-band RF deflecting structures and its operation status.

XFEL/SPring-8 “SACLA”用 C バンド RF デフレクター空洞の大電力エージング

1. はじめに

SPring-8 に建設された X 線自由電子レーザー (XFEL) “SACLA” は 2010 年 2 月よりビーム調整を開始し、2011 年 6 月 7 日に世界最短波長 1.2Å の X 線レーザー発振に成功した^[1]。SACLA では熱電子銃から発生した電子ビームをピーク電流 3 kA、バンチ長 100 fsec 以下まで圧縮することが必要である。その為に我々は速度変調バンチ圧縮と 3 段の磁気バンチ圧縮を組み合わせることで要求を満たしている。その際、電子ビームのバンチ圧縮過程を把握すること、具体的にはバンチ内の XFEL 発振に寄与する部分のピーク電流とスライスエミッタンスを観測することが非常に重要である。

そのために、我々は C バンド RF デフレクター空洞を開発し、電子バンチの時間構造を観測するシステムを構築した。このシステムは大電力高周波によって空洞内に誘起された横方向電界によってバンチを上下方向に伸張し、約 5 m 以上後方のスクリーンモニターでバンチの時間構造を測定するものである。このシステムは最後段の磁気バンチ圧縮器の後方に設置される。ここでの電子ビームエネルギーは約 1.4 GeV で、要求される横方向掃引電圧 40 MV 以上を得るためには、クライストロン出力で約 32 MW 以上の大電力 RF が必要となる。また RF デフレクター空洞は横方向電磁界を励起する為 HEM11-y モードを採用し、また安定共振させるために結合孔の形状をレーストラックとした。これらの新規開発要素が用いられているため、加速器収納部設置前にデフレクター空洞の大電力コンディショニングを実

t-sakura@sring8.or.jp

施し、所定の RF 電力が投入できるか確認した。

本稿ではその大電力コンディショニングの結果と収納部移設後の運転状況に関して報告する。なおデフレクター空洞によるバンチ長測定や空洞設計・製作に関する詳細は参考文献[2][3]に示されている。

2. テストスタンドでの大電力コンディショニング

2.1 機器構成

RF デフレクター空洞の大電力エージングは、C バンド主加速器の大電力試験を行ったテストスタンドを使用した^[4]。図 1 に C バンド RF デフレクター高周波システムの概略図を示す。

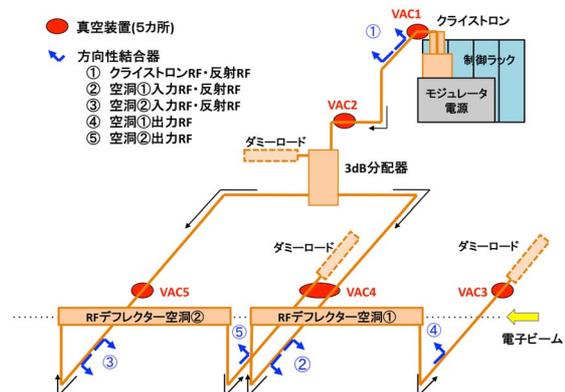


図 1 : RF デフレクター高周波システムの概略図

クライストロンから発生した最大 50 MW の大電力高周波は 3dB 分配器によって 2 分割され、2 本の

空洞に投入される。クライストロンやモジュレータ電源・制御機器等は C バンド主加速器と共通である。

真空排気は 5 カ所設けており、イオンポンプ（内訳：VAC1→排気速度 50L/sec VAC2～5→排気速度 100L/sec 場所は図 1 を参照）を使用し、その近くにコールドカソードゲージ(CCG)真空計を設置している。エージング時は真空度が 1×10^{-5} Pa を超えると、速やかに運転を停止する。

空洞や導波管は 26.5 °C の冷却水を流して冷却を行う。ただし、空洞には精密温調システム¹⁵⁾を導入し、空洞温度が一定になるようにヒーターで冷却水温度を調整する。空洞の共振周波数は低電力測定の結果、それぞれ 5712.207 MHz、5711.965 MHz であった。これを 5712 MHz に合わせるために設定温度を 30.00 °C、27.50 °C とした。

本試験では実機と同一の機器及びレイアウトにし、運用時とほぼ同じ条件を再現した。

2.2 大電力コンディショニング

RF デフレクター空洞の大電力コンディショニングの到達目標は運転繰返し 60 pps で RF パルス幅 1.0 μ sec、空洞入力各 25 MW とした。これは電子ビームの掃引に必要な電力の 1.6 倍、空洞の Filling Time(0.269 μ sec)に対して 3.7 倍に相当する。これは高電界までコンディショニングする事で、要求値での停止頻度を下げるためである。またより高い掃引電圧が必要になった際に、すぐに対応可能にする狙いもある。

図 2 にコンディショニング時の空洞入力 RF パルス幅の変更推移と真空悪化等によるインターロック積算数を示す。コンディショニングの開始時は RF パルス幅を 0.1 μ sec とし、RF パワーを徐々に上げていき、50 MW まで投入した。これは最初から大電力を投入して大きな放電によって空洞を痛めてしまうことを防ぐ為である。到達後は目標の 1.0 μ sec まで徐々にパルス幅を広げた。その結果、約 40 時間で目標パルス幅での連続運転が達成された。図 3 はインターロック停止頻度を項目別に示している。放電による真空悪化が 9 割を占め、その内の半分が 2 本の空洞の間（図 1 の VAC4）であった。VAC4 は 2 つの空洞の間にあり、1 台のポンプで排気している。そのため 2 つの空洞でそれぞれ起こる放電の影響を受けるため、頻度が高くなると考えられる。

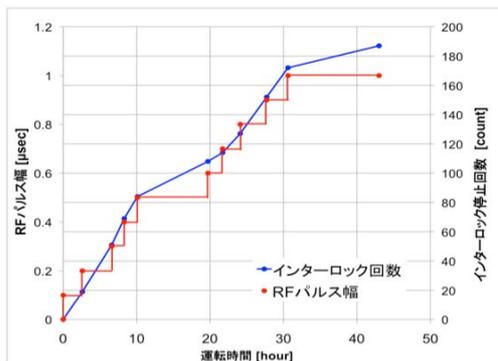


図 2 : RF パルス幅の変更推移とインターロック積算回数

図 4、5 にコンディショニング開始時（パルス幅 0.1～0.2 μ sec）と約 30 時間経過後（パルス幅 1.0 μ sec）のクライストロン電力と空洞・導波管内 5 カ所の真空度の約 10 時間の推移を示す。コンディショニング初期は VAC1 の真空度が他と比較して悪かった。これはクライストロン用セラミック RF 窓からのガス放出が原因と思われる。コンディショニングの継続によりクライストロン直下の真空度は徐々に改善し、30 時間後には他の真空度と同程度となった。一方、図 4 では VAC4 の放電による真空悪化が目立った。

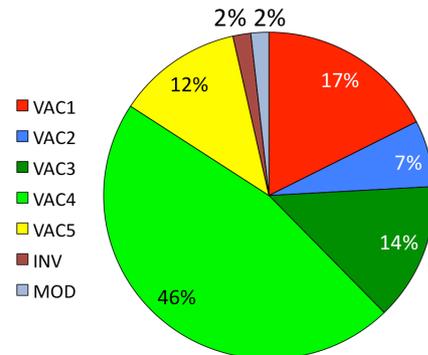


図 3 : 項目別インターロック停止頻度

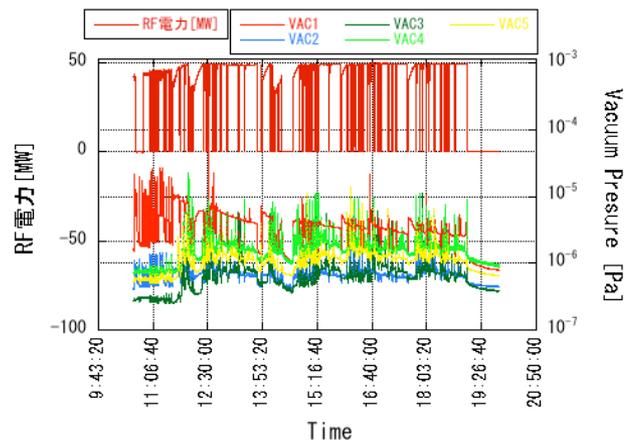


図 4 : コンディショニング開始時の RF 電力と真空度の推移

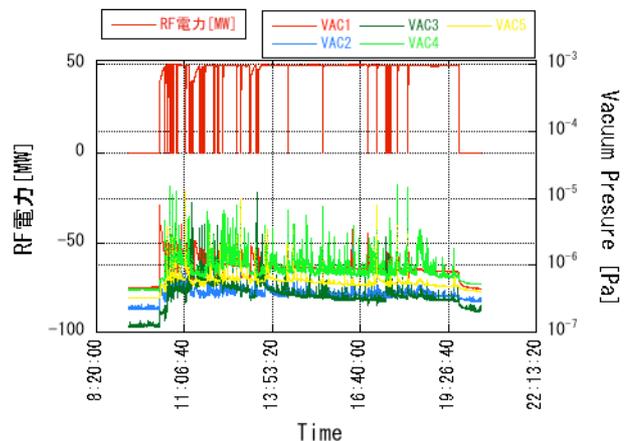


図 5 : 約 30 時間経過後の RF 電力と真空度の推移

図 6、7 にクライストロン出力 45 MW、RF パルス幅 0.5 μsec の条件で方向性結合器②～⑤（場所は図 1 参照）で計測された RF 波形を示す。この測定事実から、RF 耐電力、空洞の Filling Time が十分に要求を満たしている事が判る。加えて、3 dB 分配器で 2 分割された RF は、それぞれの空洞を異常なく通過している事がわかる。

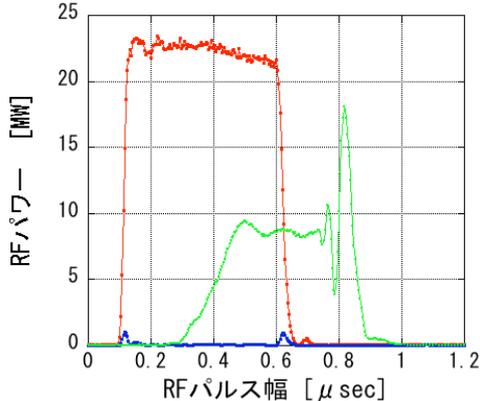


図 6 : デフレクター空洞①の各方向性結合器からの RF 波形 (赤) 空洞への入力 RF 波形 (場所は図 1 中のモニター②) (青) 空洞の反射 RF 波形 (場所は図 1 中のモニター②) (緑) 空洞通過後の RF 波形 (場所は図 1 中のモニター④)

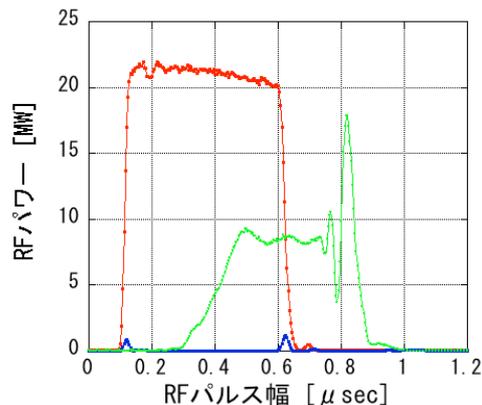


図 7 : デフレクター空洞②の各方向性結合器からの RF 波形 (赤) 空洞への入力 RF 波形 (場所は図 1 中のモニター③) (青) 空洞の反射 RF 波形 (場所は図 1 中のモニター③) (緑) 空洞通過後の RF 波形 (場所は図 1 中のモニター⑤)

ただ、図 6、7 の緑線の空洞出力 RF 波形では、波形の立ち下がり部分に尖塔状の RF パワーの増大が現れた。このような波形が現れる原因は RF 波形の立ち上がり/立ち下がりが非常に早いことに理由があると推測した。尖塔形状は高周波シミュレーションによっても再現された。この尖塔状の RF パワーの増大が事実だとすれば、空洞のピーク電力が高くなるため、放電頻度が高くなる恐れがある。これを回避し尖塔形状を緩和する為に、クライストロンを駆動させる RF 波形に FIR (有限インパルス応答) フィルタをかけ、波形の立ち上がり/立ち下がり時間を遅くした。図 8 は FIR フィルタの有無による空洞通過

後の RF 波形の変化を示した。立ち上がり時間を 130 nsec に伸ばすことで、図 7 の下の図のように波形の尖塔部を小さくすることが出来た。

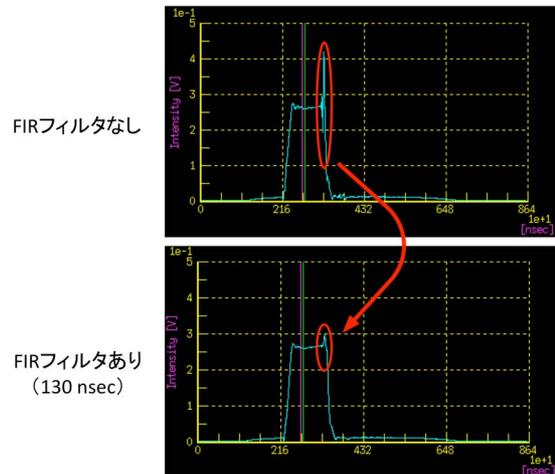


図 8 : FIR フィルタの有無による空洞通過後の RF 波形の変化

図 9 に図 1 のモニター①で計測されたクライストロン出力 RF と反射 RF 波形を示す。測定時の運転条件は図 6、7 のそれと同じである。図 9 の RF パワーから VSWR を求めると 1.33 となり、反射 RF パワーが大きいことが判った。これに対して図 6、7 より求めた空洞の VSWR はそれぞれ 1.11、1.04 と問題なかった。この 2 つの結果の矛盾の原因はモニター①の反射 RF を計測する方向性結合器の方向性が悪い為に起こっているものと思われる。確認のためコンディショニング終了後に、ネットワークアナライザを用いて高周波システム全体の VSWR を測定した結果、1.18 であったため高周波システムとして問題がない事が実証された。

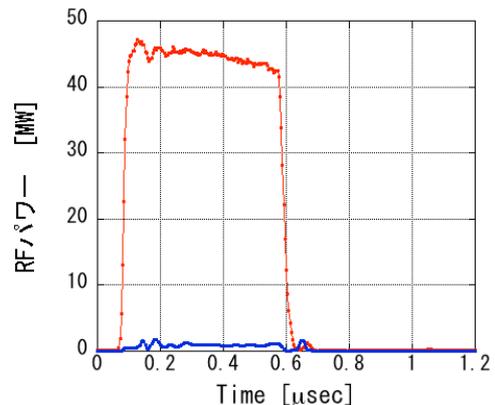


図 9 : 図 1 中のモニター①の方向性結合器で計測した RF 波形 (赤) クライストロン出力 RF 波形 (青) 反射 RF 波形

3. 収納部設置後の運転状況

3.1 加速器収納部への移設

テストスタンドでの大電力コンディショニング終了後、RF デフレクター空洞は加速器収納部へ移設され、2010 年 12 月末にシステム全体の組立が完了した。図 10 に収納部への移設完了後の RF デフレクターシステムの全体写真を示す。2011 年 1 月より機器立ち上げを行い、本格運用を開始した。



図 10 : 収納部での RF デフレクター空洞全体写真

3.2 運転状況

図 11 に半年間のクライストロンの出力高周波電力と加速管・導波管内の真空度の推移を示す。また図 12 に月毎の運転時間と 1 日当りの停止頻度の推移を示した。全体の真空度は徐々に下がり、現状 1×10^{-7} Pa 以下まで減少した。運転開始から半年間で運転時間は 2800 時間に達した。7 月現在、1 日当りの停止頻度は 0.8 回まで低下した。3 月よりこの RF デフレクターはビーム調整に用いられており、運転繰返し 10 pps、RF パルス幅 1.0 μ sec、クライストロン出力 45 MW で運用されている。空洞等の温度安定性を考慮して常に大電力高周波を投入している。そのため、バンチ長計測のオン/オフの切り替えは RF のタイミングを 10 μ sec ずらす事で行っている。

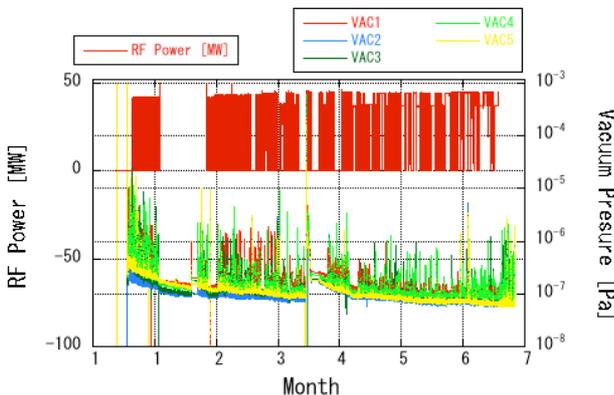


図 11 : 本格運用後の RF 電力と真空度の推移

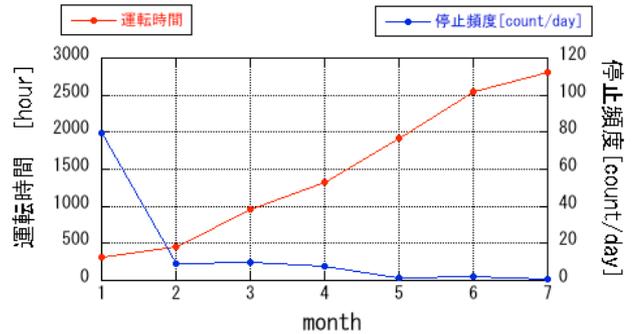


図 12 : 本格運用後の月毎の運転時間と 1 日当りの停止頻度

4. まとめ

XFEL/SPring-8 SACLA での電子ビームのバンチ圧縮過程を計測する為に新しく開発された RF デフレクター空洞・導波管の大電力 RF コンディショニングを行った。その結果、所定の性能を発揮していることが確認された。また要求される横方向電圧を得る為に必要な電力の約 1.6 倍、50 MW までエージングを行った所、約 40 時間で到達し、高電界での使用に問題がない事を確認した。

収納部移設後、これまで約 2800 時間の運転を行い、現在のインターロック停止頻度は 1 日当たり 0.8 回と安定に運転を続けている。

謝辞

スプリングエイトサービス株式会社の益田邦和氏、石井健一氏、石橋一憲氏、町田武彦氏、南潤一郎氏、前田大輔氏にはエージング運転時の監視業務及び収納部への移設に多大な協力をして頂きました。この場を借りて深く感謝致します。

参考文献

- [1] 原徹 他 「SACLA 加速器のビームコミッショニング」 第 8 回日本加速器学会年会、筑波、2011 年 8 月
- [2] 惠郷博文 他 「X 線自由電子レーザー施設 SACLA における時間構造診断用高電界 C バンドデフレクターの開発」 第 8 回日本加速器学会年会、筑波、2011 年 8 月
- [3] 柱野竜臣 他 「SACLA(XFEL/SPring-8)向け C バンド RF デフレクターの製作」 第 8 回日本加速器学会年会、筑波、2011 年 8 月
- [4] T.Sakurai. et. al. "High power RF test on the mass-produced C-band RF components for XFEL/SPring-8" IPAC10, Kyoto, May, 2010
- [5] T.Hasegawa. et. al. "Status of a precise temperature regulation system for the C-band acceptrator at XFEL/SPring-8", IPAC10, Kyoto, May, 2010.