

High power RF test on C-band rf components of 8 GeV accelerator system for XFEL/SPring-8

Tatsuyuki Sakurai^{1,A)}, Takahiro Inagaki^{A)}, Chikara Kondo^{A)}, Katsutoshi Shirasawa^{B)}, Shinsuke Suzuki^{B)},
Tsumoru Shintake^{A)}

^{A)} XFEL/RIKEN

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

^{B)} XFEL/JASRI

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

Abstract

We report the high power rf test results of the C-band accelerator system for 8GeV main linac in the X-ray free electron laser (XFEL) at SPring-8, where 64 C-band systems will be used. Each C-band accelerator system is composed of two accelerator columns of Choke-mode-type accelerating structure, the rf pulse compressor, the 50 MW pulse klystron, compact modulator and solid state switching high voltage charger. It is designed to operate at rather high accelerating gradient as high as 35 MV/m, therefore it is crucial to evaluate high gradient performance and reject some component with defect or poor performance before installation. The hardware components are under mass production at several companies in Japan. Some of these systems have been installed and tested in high-power test bunker up today (July 2009). After a certain period (typ. 400 hours) of rf processing, 40 MV/m of the accelerating gradient was obtained. We confirmed high reliability of the C-band accelerator system at high gradient.

XFEL/SPring-8テストスタンドでのCバンド加速器システムの高電界RF試験

はじめに

我々は波長0.1nm以下のX線レーザーを発生させるX線自由電子レーザー(XFEL)の開発をSPring-8サイトで行なっている。Fig. 1にXFEL加速器の構成図を示す。

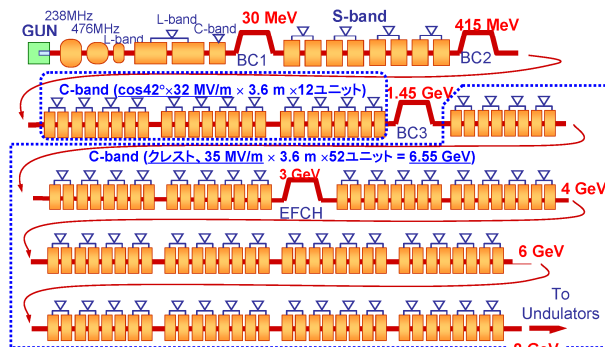


Fig.1 XFEL線形加速器の構成図

CeB₆カソード熱電子銃から発生した0.5 MeVの電子ビームは238 MHzグリバンチャー、476 MHzブースター、Lバンド補正空洞、LバンドAPS空洞、Cバンド補正空洞で構成される入射部とSバンド、Cバンド加速器の一部で速度変調バンチ圧縮を行う。また3段のバンチ圧縮器によってバンチ圧縮を行う。それによりピーク電流3 kA、スライスエミッタンス1

π mm·mrad以下の電子ビームを作り出す。

XFEL線形加速器では64ユニット(加速管2本で1ユニット)合計128本のCバンド加速管を使用する。これらの加速管全てを加速管の加速電界35 MV/mという高電界にて運転を計画している。XFELの実証器であるSCSS(SPring-8 Compact SASE Source)試験加速器では2008年5月からCバンド加速管1ユニットにて加速電界37 MV/mで常時運転を実現している。

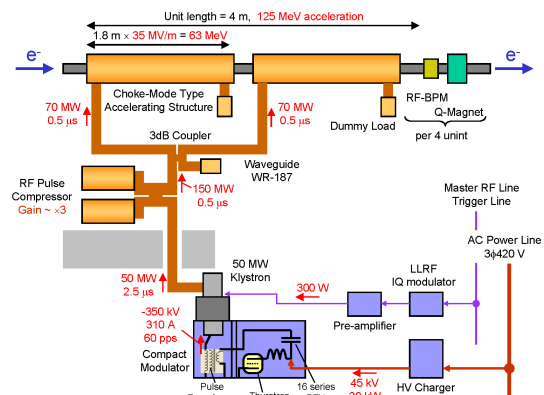


Fig. 2 Cバンド加速器システムの構成図

Fig. 2にXFEL/SPring-8で主加速器として使用するCバンド加速器システムの構成図を示す。Cバンド加速器システムは主に以下のもので構成される。

¹ E-mail: t-sakura@spring8.or.jp

Cバンドチョークモード型加速管 (Fig. 3) [2] [3]

Cバンド加速管は進行波加速管で全長は1.8m、filling time は300 μ secである。将来のマルチバンチ運転を想定して、チョーク構造を有している。Cバンド加速管は三菱重工業(株) で製造しており、現在70%の製造が終了した。

RFパルスコンプレッサー (Fig. 3) [4] [5]

RFパルスコンプレッサーは1対の高Q空洞と3dBカプラーから構成される。空洞と3dBカプラーの間にモードコンバーターを取り付けており、TE10モードからTE01xモードへの変換を行なっている。パルスコンプレッサーは三菱重工業(株)にて製造されている。現在76%の製造を終了した。



Fig.3 加速管・SLEDの配置風景

50 MW パルスクライストロン (Fig. 4) [6]

クライストロンは東芝電子管デバイス(株)のE37202を使用している。定格出力50MW、運転繰り返し60pps、RF出力のパルス幅2.5 μ secで運転する。現在76%の製造が終了した。

モジュレータ (Fig. 4) [7]

これはパルストランス、サイラトロン、PFN回路および保護回路などをひとつのタンクに収めた一体型構造をとっている。一体型し絶縁油で密閉構造とすることにより電源のコンパクト化、電磁ノイズの低減を目指している。モジュレータはニチコン(株)において量産されている。

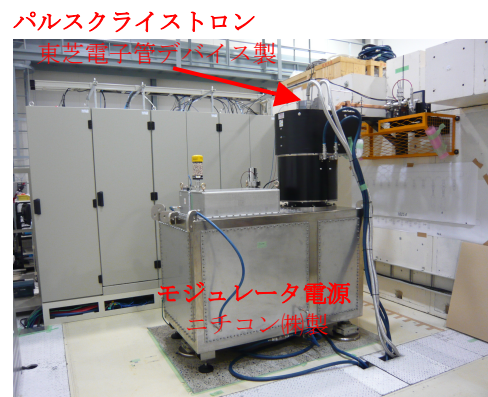


Fig.4 電源部の配置風景

高精度充電器

PFN回路のコンデンサーに充電を行う電源としてインバータ方式の高電圧電源を使用する。最大充電電圧は50kV、充電電流は約2Aである。XFELでは充電器の電圧ジッタを0.01%程度に抑える必要があるため、モジュレータの高電圧プローブで充電電圧をモニタリングし電源にフィードバックを行なう。また電源は充電の99%を行なう主充電回路と、出力を微小に制御できる補充電回路を有しており、これらを並列に備えることで、精密な電圧制御を行なっている。充電器もニチコン(株)で製作している。

XFELテストスタンドでのCバンド加速管の高電界試験

XFELテストスタンドは、XFELで用いる高電圧電源(モジュレータ、充電器)や大電力RF機器(加速管、パルスコンプレッサー、クライストロン)の性能確認、およびこれらの機器の大電力RFエージングを行なう[8][9]。Fig.3及び4はXFELテストスタンドの機器配置風景を示した。使用する機器及び配置は全てXFEL実機で使用するものを用いている。2008年春より運転試験を開始し、これまでに3unit(1unitは加速管2本、SLED1台)のエージングを行なった。

加速管のRFパワー計測

Fig.5にCバンド加速器システムがほぼ最大出力にて運転を行っている際の典型的な波形を示す。クライストロン電圧・電流はそれぞれ-356kV・318Aであった。

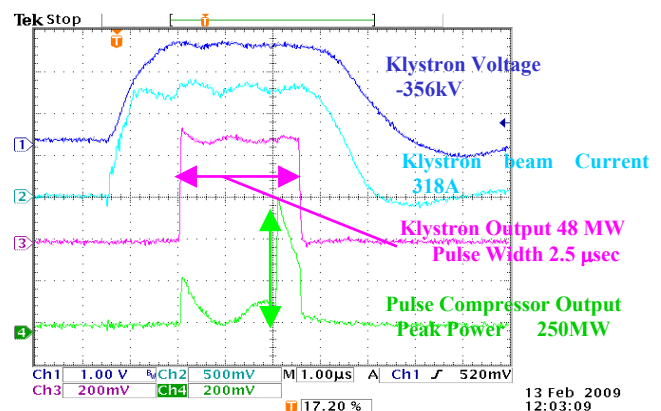


Fig.5 モジュレータ及びRFパワー波形

その際のRF出力パワーは48MWである。RFパルスコンプレッサーRF出力2.5 μ sec後に位相反転を行い、ピークRF出力を増倍させる。パルスコンプレッ

サーの出力RFパワーはピーク値で250MWに達した。

加速電界の算出はパルスコンプレッサーピーク出力から加速管のFilling time(300nsec)に相当するピークからピークから300nsecまでの間のRFパワーを平均した値を用いて算出した。Fig.6は400時間のエージングを実施した後のクライストロン出力と加速電界の関係を示す。XFELにて要求される加速電界の設計パラメータは35MV/mであるのに対して、加速管の最大加速電界は40MV/m以上に達した。また加速電界35MV/m及び37MV/mにて60ppsにて10時間の連続運転を行ったが、1度もRFトリップで停止することは無かった。

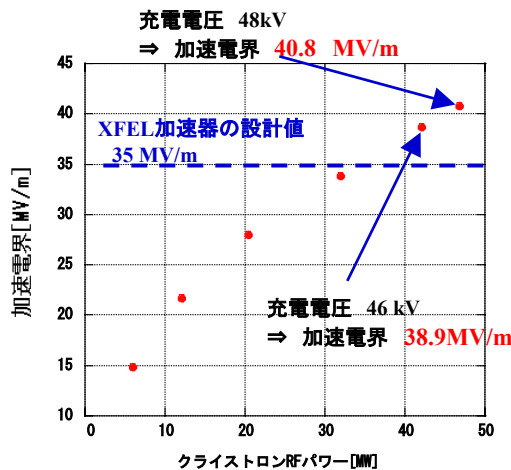


Fig.6 高電界試験での加速電界推移

RFエージング手順

加速管のRFエージングの手順について説明する。まずRFパルス幅を0.1 μ secに設定し、充電器の充電電圧を徐々に上げる。真空度が悪化した時は充電電圧を下げるもしくは停止させ、改善すれば再び充電電圧を上げる。充電電圧が規定値まで上がり安定に運転できるようになれば、RFパルス幅を広げる。これを繰り返して定格のRFパルス幅2.5 μ secまでエージングを行う。エージング中の加速電界の推移をFig.8に示している。

Fig.7に過去3回のエージング終了までに要した時間とRFパルス幅の推移を示す。第3回エージングの進捗は第1,2回目より速く進んでいる。これは加速管末端に取り付けるダミーロードのガス出しを終えたものを使用した効果と思われる。新しいダミーロードを使用した第1,2回でのエージングでは位相反転を開始する1.0 μ secまで100~170時間、定格運転到達まで180~220時間、エージング完了まで約400時間を要した。XFELでは加速器の据付完了後、2~3ヶ月(2000時間以上)の大電力RFエージング運転の時間を確保している。この期間でCバンド加速器は十分なエージングを行うことが出来ると思われる。

Fig.9・10は第2回エージングでの運転開始97時間及び330時間後の充電電圧と5箇所に取り付けた真空ゲージの真空度の推移を示している。放電により真空度が悪化する頻度が格段に少なくなっているのが

分かる。

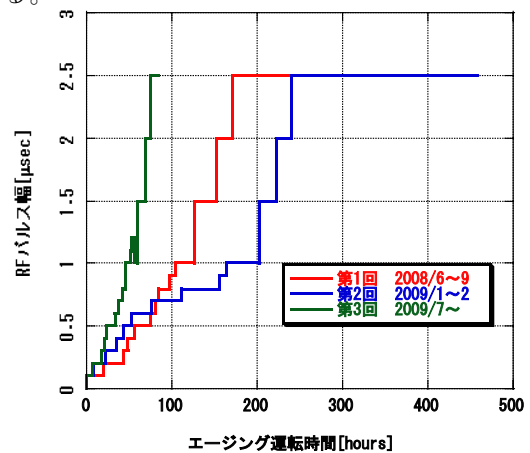


Fig.7 エージング終了までに要した時間とRFパルス幅の推移

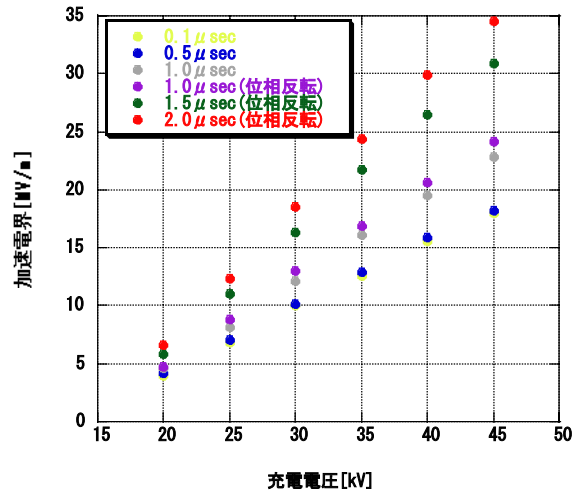


Fig.8 エージング時の各RFパルス幅での加速電界

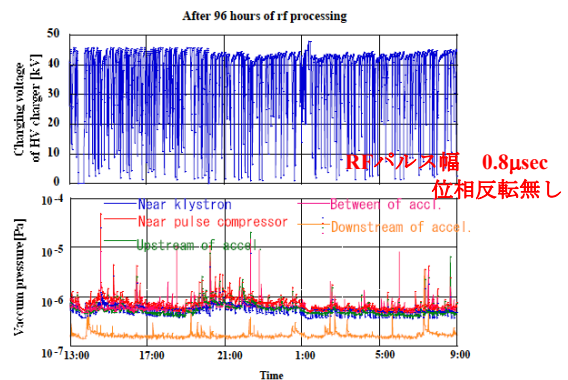


Fig.9 エージング開始97時間後の充電電圧(上)と真空度(下)の推移

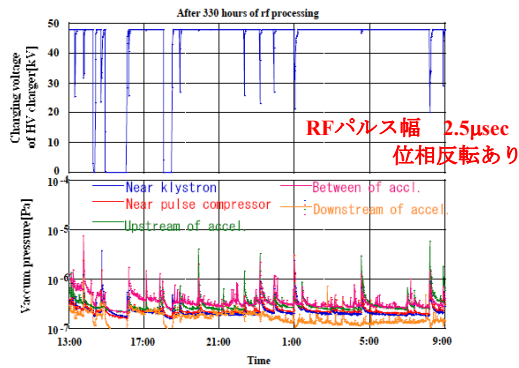


Fig.10 エージング開始後330時間後の充電電圧 (上)と真空度(下)の推移

まとめ

我々はCバンド加速器システムの高電界試験及びRFエージングを行った。これまでに2ユニットのRFエージングを終了し、現在3ユニット目を運転中である。エージング時の加速管の加速電界をRFパワーから評価し、最大で40MV/mの加速電界が得られていることを確認した。XFEL加速器での設計値35 MV/mでの運転に問題なさそうである。今度、更に1~2ユニットほどのRFエージングを実施し、性能を確認する予定である。

2009年8月よりCバンド加速器の据付が始まり、2010年秋頃からXFEL加速器の全てのRFエージングを実施する予定である。

参考文献

- [1]T.Shintake et al, "A compact free-electron laser for generating coherent radiation in the extreme ultraviolet region", Sept. 2008, Nature photonics Vol.2 No.9, p555-559.
- [2]T.Shintake et al, "The First Wakefield Test on the C-band Choke-mode accelerating structure.", PAC'99, 1999.
- [3]三浦禎雄他 Cバンド加速管量産中間報告 本学会
- [4]T.Shintake et al, "Development of C-band RF Pulse Compressor System for the e+e- Linear Collider.", PAC'97, 1997.
- [5]沖平和則他 CバンドRFパルスコンプレッサー量産経過報告 本学会
- [6]Y.Ohkubo et, al, "The C-band 50 MW Klystron using Travelling-wave Output Structure", LINAC'98, 1998.
- [7]C.Kondo et, al, "Cooling System of Klystron Modulator Power Supply for XFEL Project at SPring-8", LINAC'08, 2008.
- [8]T.Inagaki et al, "8GeV C-band accelerator construction for XFEL/SPring-8", LINAC'08, 2008.
- [9]T.Sakurai et al, "High power RF test on C-band rf components of 8 GeV accelerator system for XFEL/SPring-8", PAC09, 2009