

High power RF test of C-band rf mass-production components 8 GeV at XFEL/SPring-8

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

^{A)} XFEL/JASRI

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

^{B)} XFEL/RIKEN

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

Abstract

We report the high power rf test results of C-band accelerator system for X-ray free electron laser (XFEL) in SPring-8 site. In XFEL main accelerator, 64 C-band systems will be used in total, whose components have already finished mass production. We performed the high power RF test with three sets of the mass-produced components in XFEL test bunker. We operated the C-band components with the accelerating gradient, as high as 42 MV/m. We measured the high voltage breakdown rate and the dark current emission.

XFEL/SPring-8でのC-band加速器システム量産品の大電力試験

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。2009年8月より加速器部の据付を開始し、現在は据付の90%が終了している。2010年10月からは加速器のエイジング運転を実施する予定である[1]。

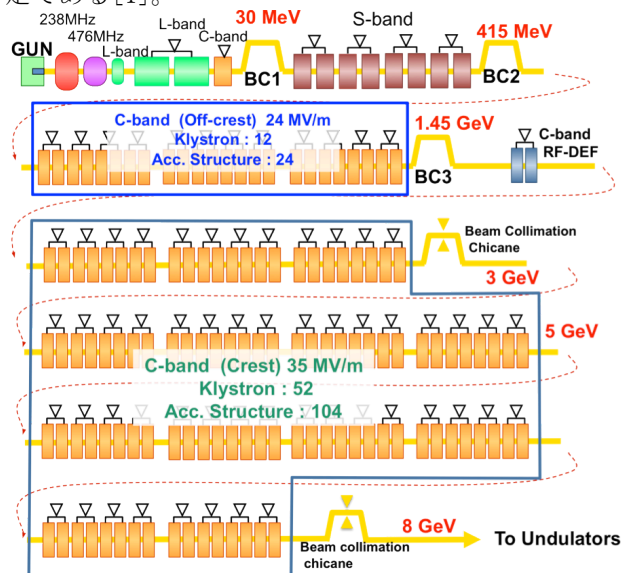


図1 XFEL線形加速器の構成図

図1にXFEL加速器の構成図を示す。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プリバンチャー、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-band、C-bandで速度変調バンチ圧縮を行う。また3段の磁気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 $\mu\text{m}\cdot\text{mrad}$ 以下の電子ビームを作り出す。

XFEL線形加速器では主加速部として128本のCバンド加速管を使用する。これらの加速管の内、24本を速度変調バンチ圧縮に使用し、104本を加速電界35 MV/mで運転し、電子ビームエネルギーを8 GeVまで加速させる。

XFELテストスタンドでの大電力試験

図2にXFELでのC-band加速器システムの機器模式図を示す。C-bandシステムは加速管[2][3]が2本、RFパルスコンプレッサー[4][5]、導波管、パルスクライストロン[6]、モジュレータ電源[7]、高精度充電器、低電力RFシステム、タイミングシステム[8]、制御装置などで構成され、我々はこれらを1ユニットと呼んでいる。図3にXFELテストスタンドの機器配置写真を示す。ここでは量産品のサンプリング試験と連続運転を行っており、これらの機器はXFEL実機で使用される量産品で、配置も一部の直線導波管を除き実機レイアウトに合わせている。2010年1月の運転終了までに製作時期の異なる3ユニットの大電力試験を実施した[9]。

¹ E-mail: t-sakura@spring8.or.jp

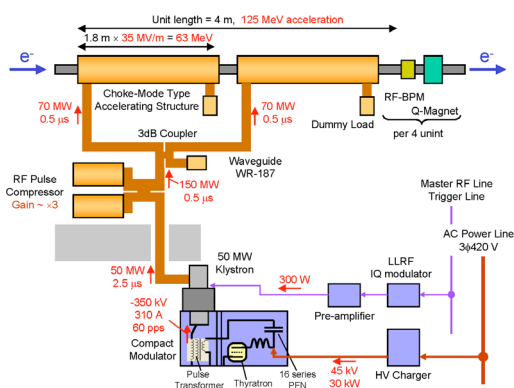


図2 Cバンド加速器システムの構成模式図



図3 XFELテストスタンドの機器配置写真

C-band加速管の加速電界

図4にC-band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は-354kVであった。

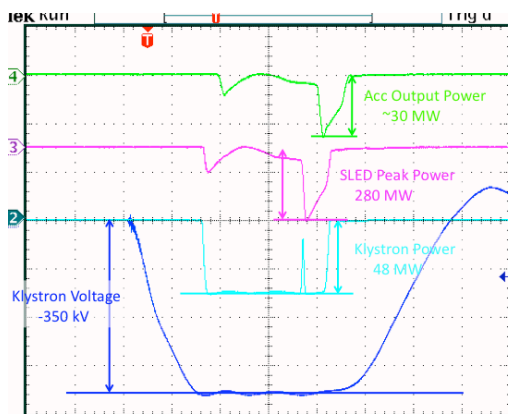


図4 モジュレータ及びRFパワー波形

下よりクライストロン電圧波形、クライストロンRF出力波形、パルスコンプレッサー出力RF波形、加速管通過後のRF波形を示す。

その際のクライストロンRF出力パワーは48MWでパルス幅2.5 μsecであった。その後に繋がるRFパルス

コンプレッサーではRFパルス2 μsec後に位相反転を行い、ピークRF出力を増倍させる。RFパルスコンプレッサーの出力RFパワーはピーク値で280 MWに達した。

加速電界の算出はパルスコンプレッサーのピーク出力から加速管のFilling time(300 nsec)に相当する部分のRFパワーを平均した値を3dB分配器で等分配され、10%の導波管損失があると仮定して算出した。RFパワーの測定はパワーメーターとIQ検出器を用いた。図5は加速管の加速電界のクライストロン出力依存性を示している。XFELにて要求される加速電界は35 MV/mであるのに対して、テストスタンドでの加速管の最大加速電界は42 MV/mに達した。

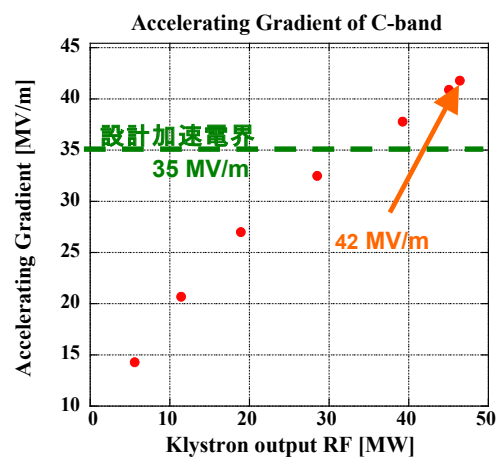


図5 大電力試験での加速電界のクライストロン出力依存性

C-band加速管の暗電流量

我々は加速管の両端にファラデーカップを設置して、運転時の電荷量から加速管1ユニットの暗電流量を測定した。ファラデーカップの直径は620 mm、加速管とファラデーカップとの距離は170 mmであった。図6に暗電流量の加速電界依存性を示す。

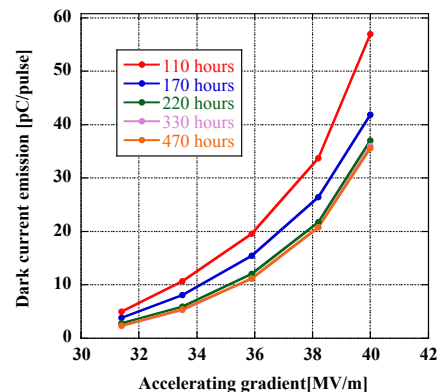


図6 暗電流量の加速電界依存性
色の違いはエージング開始からの暗電流の違いを示す。

大電力試験は運転繰り返し60 Hzで連続運転し、開始から110時間後にRFパルス幅2.5 μ sec、加速電界40 MV/mに到達した。その際の暗電流量は57 pC/pulseであった。その後約350時間の間、ファラデーカップの電荷量の推移を追った。その結果、470時間経過時で加速電界40 MV/mの時に35 pC/pulseとなった。XFEL線形加速器では、電子ビームの電荷量は300 pC/pulse程度であるため、C-band加速器64ユニットを通過した暗電流は無視できないほど大きくなる。そのため電子ビームが3 GeVと8 GeVのセクションに2つの暗電流除去シケインを設置して、余分なビームハローを取り除く設計になっている。

大電力試験時のインターロック停止頻度

加速器の大電力エージングの進捗の判断として機器の停止頻度がある。将来のコミッショニングやユーザー運転に向けて加速器トラブルによる中断を無くすことが望ましい。我々はテストスタンドでの大電力試験時のC-bandシステムのインターロック停止回数をカウントし、加速器の停止頻度を調査した。図7に停止頻度の加速電界依存性を示す。インターロック回数の計測は運転開始約200時間後から始め、各加速電界で50~70時間の連続運転の間に起こったインターロック停止回数をカウントした。この結果、加速電界を下げると停止頻度が減り、36 MV/m以下ではほとんど停止しないと予測される。その後、200時間経ってから39 MV/mで再度停止回数をカウントした結果を青点が示しており、停止頻度が約40%まで減少した。停止の原因としては主に加速管等の放電による真空悪化が主であり、その他にモジュレータや充電器のインターロックである。これより大電力エージングによって、設計加速電界35 MV/mは安定した運転が期待できる。またエージングを継続することで、より高い加速電界での運転が可能となることが確認された。

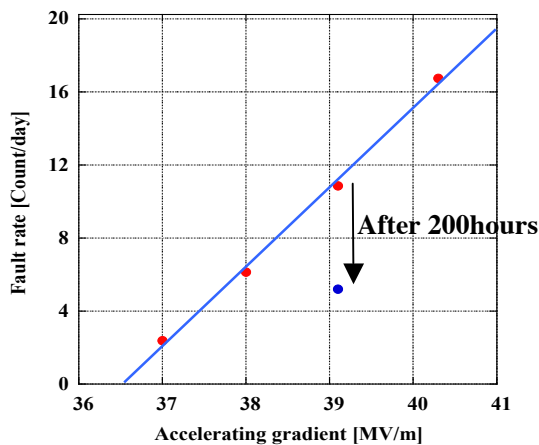


図7 C-bandシステムの停止頻度の加速電界依存性

パルスコンプレッサーの出力パワーの温度依存性

XFEL/SPring-8ではクライストロン出力RFパワー

を増倍させるRFパルスコンプレッサーを使用する。パルスコンプレッサーは2つの高Q値の共振空洞を有しており、2つの空洞の共振周波数の調整は空洞端部に取り付けられた差動ねじを用いて調整する。パルスコンプレッサーの空洞温度が1 $^{\circ}$ C変化すると周波数で約97 kHz、位相シフトで約18 $^{\circ}$ 変化し、RF出力パワーも変化するため、我々は冷却水の精密温度制御を行っている[10]。今回の大電力試験時にパルスコンプレッサーRF出力パワーの温度依存性を測定した。

図8は精密温調システムでパルスコンプレッサーの冷却水温度を変化させた時のパルスコンプレッサーRF出力波形の変化を示している。

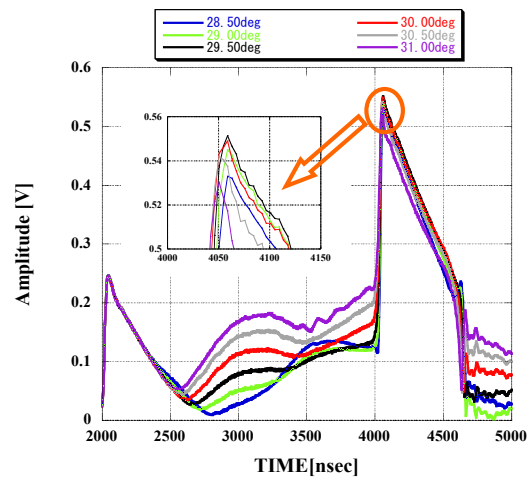


図8 空洞温度の変化によるパルスコンプレッサーRF出力波形
色の違いは空洞温度の違いを示している

図9は図8のピーク部のRFパワーを抜き出してプロットしたものである。これより、このパルスコンプレッサーの最適な空洞物温は目標30 $^{\circ}$ Cに対して29.7 $^{\circ}$ Cであった。また空洞物温が1 $^{\circ}$ C変化することで、RFパワーが8%減少した。XFELでは64台のパルスコンプレッサーを使用するので、大電力エージング時に物温を変化させてRFパワーを最大値に設定することで、電子ビームを効率よく加速できる。

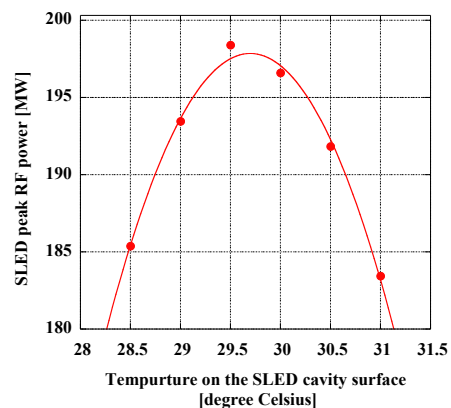


図9 空洞の温度変化によるRFピーク出力変化
曲線は二次曲線で近似

まとめ

我々はXFELで使用するCバンド加速器システム量産品の大量電力試験を行い、3ユニットの試験を終了した。エージング時の加速管の加速電界は42 MV/mに到達した。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。また加速管の暗電流についてはシケインの追加により問題が解決される予定である。また大量電力エージングの試験結果により約500時間のエージングを施すことで、高い加速電界で安定運転が可能なのがあった。

現在、加速器の据付はほぼ終了にしており、2010年10月より加速器全体のRFエージングを開始する予定である。

謝辞

大量電力試験はXFELに携わって頂いたメーカーの方々の協力によって実施することができた。またSES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、前田大輔氏には連続運転時の監視業務に携わって頂いた。この場を借りて深く感謝致します。

参考文献

- [1] T. Shintake et al, "Status report on Japanese XFEL construction project at SPring-8", IPAC10, 2010.
- [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バンドチョークモード型加速管量産結果報告 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結果報告 本学会
- [6] Y. Ohkubo et al, "The C-band 50 MW Klystron using Travelling-wave Output Structure", LINAC'98, 1998.
- [7] T. Shintake et al, "Compact klystron modulator for XFEL/SPring-8", IPAC10, 2010.
- [8] 大島隆他 XFEL/SPring-8のタイミング・低電力RFシステムの建設状況 本学会
- [9] T. Sakurai et al, "High power RF test on the mass-produced C-band RF components for XFEL/SPring-8", IPAC10, 2010.
- [10] T. Hasegawa et al, "Status of a precise temperature-regulation system for the C-band accelerator at XFEL/SPring-8", IPAC10, 2010.