

PREPARATION STATUS OF THE C-BAND MAIN LINAC IN XFEL/SPRING-8 PROJECT

Takahiro Inagaki^{1,A)}, Katsutoshi Shirasawa^{A)}, Chikara Kondo^{A)}, Tatsuyuki Sakurai^{A)}, Hirokazu Maesaka^{A)},
Takashi Ohshima^{A)}, Hideki Takebe^{A)}, Shinsuke Suzuki^{B)}, Yoshitaka Kawashima^{B)}, Tsumoru Shintake^{A)}

^{A)} Spring-8 Joint-Project for XFEL / RIKEN 1-1-1 Kouto, Sayo, Hyogo, 679-5148

^{B)} Spring-8 Joint-Project for XFEL / JASRI 1-1-1 Kouto, Sayo, Hyogo, 679-5198

Abstract

The C-band (5712-MHz) linac is used as the main accelerator of the X-ray free electron laser (XFEL) facility in Spring-8. One unit of the C-band rf system consists of following components; two choke-mode-type 1.8-m accelerating structures, an rf pulse compressor, a 50-MW klystron, and a 110-MW compact modulator power supply. We will use 64 units of them for the XFEL accelerator. Since May 2008, we have operated one of the C-band units in SCSS test accelerator with high accelerating gradient of 36.6 MV/m. We have no trouble, no serious rf discharge, no interlock failure, no effect to FEL amplification. We confirmed the high gradient operation of C-band accelerator. For XFEL, many of high power rf components, which includes the accelerating structure, the rf pulse compressor, the waveguide components, and the klystron, are produced on schedule. In order to test these rf components, we constructed the high power rf test stand. The rf processing is in progress.

XFEL/SPRING-8 Cバンド加速器の開発状況

1. XFELのCバンド加速器

XFEL/SPRING-8は、波長1 Å以下のX線自由電子レーザー(XFEL)を、2010年までに建設するプロジェクトである^[1]。XFELでは、加速電界の高いCバンド(5712 MHz)加速器を採用し、コンパクトで低コストな施設を目指している。

図1に、Cバンド加速器の構成を示す。クライストロン1台で加速管2本をドライブし、これを基本ユニットとする。XFELでは、これを64ユニット用い、450 MeVから最終エネルギーである8 GeVまで電子を加速する。運転繰り返しは最大60 Hz。加速管は将来のマルチバンチ運転に対応したチョークモード

型進行波加速管^[2]で、全長は1.8 m、加速電界は定格35 MV/m。クライストロンは東芝電子管デバイス社E37202で、定格出力50 MW。TE_{0,1,15}空胴を用いたRFパルス圧縮器(SLED)^[3]を使用し、パワーを約3倍(加速管充填時間0.3 μsecでの平均)稼ぐ。

XFELで使用する加速管、パルス圧縮器、立体回路は現在、三菱重工業にて着々と製造中である^[3,4]。クライストロンもまた、東芝電子管デバイスにて月産3台のペースで量産中である。

クライストロンに-350 kV、310 Aのパルス高電圧を供給するモジュレータを、昨年新たに開発した。これは、パルストランスとPFN回路、サイラトロン等をひとつの絶縁油タンク中に納めた「一体型モ

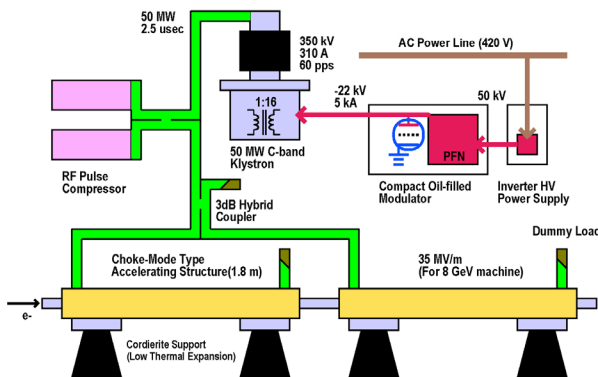


図1 : Cバンド加速器、基本ユニットの構成。

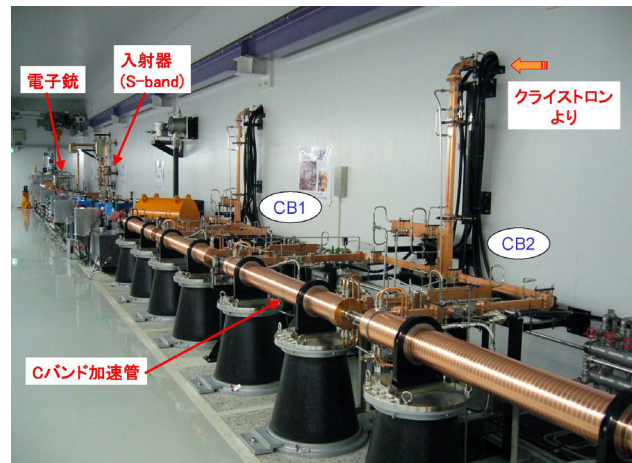


図2 : SCSS試験加速器トンネル内、Cバンド加速器の全景。

¹ E-mail: inagaki@spring8.or.jp

ジュレータ」である。一体型とすることにより高電圧ケーブルを省き、電磁ノイズの低減と高信頼性を目指している。試作機は日本高周波にて製作された。開発の詳細は別発表^[5,6]を参照のこと。試作機は後述するテストスタンドにて使用され、これまで故障もなく安定に運転を続けている。

PFN充電電源として、インバータ方式の高電圧電源を使用する。最高充電電圧は50 kV、充電電流は約2 Aである。XFELでは加速器が非常に安定でなければならないため、PFN充電電圧のジッタも0.01% (100 ppm) 程度に抑える必要がある。そこでまず、応答が速く安定性の良い高電圧プローブ^[7]を開発し、PFN充電電圧を拾って充電電源にフィードバックさせることとした。また、充電電源では、出力の大きな「主充電回路」と、出力を微小に制御できる「補充充電回路」を並列に備えることにより、精密な電圧制御を行うこととした。昨年は2種類の充電電源を試作し、ニチコン製の電源^[8]は電圧ジッタ (全幅) 50~60ppm、東芝電波プロダクツ製の電源は電圧ジッタ (全幅) 250ppmと、従来の充電電源より1桁から2桁も良い安定性を実現することができた。

XFEL実機のモジュレータ電源とPFN充電電源は、入札の結果、ともにニチコンが製作することになり、現在はその初号機を製作中である。

2. SCSS試験加速器での、高電界運転

SCSS (SPring-8 Compact SASE Source) 試験加速器は、SASE増幅によるレーザー発振を実証するために、2005年に建設された。既存の建屋を改造し、全長60 mのトンネルに、エネルギー250 MeVの加速器とアンジュレータ2台を備える。2006年に50 nmでのレーザー増幅を達成し、現在ではFEL光を利用した実験も行われている^[1]。

SCSS試験加速器の写真を図2に示す。SCSSでは、Cバンド加速器を2ユニット (加速管4本) 使用し、上流からCB1、CB2と呼んでいる。通常の250 MeV運転ではエネルギーに余裕があるので、これまでの運転ではCB1、CB2ともにパワーを抑え、29 MV/mの加速電界にて運転を行ってきた。そして通常運転の合間に、延べ500時間のエイジング運転を行い、高電界でも放電せず運転できる準備が整った。

そこで本年5月より、CB2のパワーを上げ高電界での運転を行っている。放射線管理上最終ビームエネルギーを上げられないため、CB1のパワーを下げ、250 MeVとなるよう調整している。

CB2高電界運転時のパルス波形を、図3に示す。RFのパルス幅は2.5 μsec で、2 μsec の時点で位相反転を行っている。位相反転後の尖鋭な出力を抑えるため、振幅変調を行いパルスを平坦化している。位相反転や振幅変調、および位相の制御は、低電力RF系にあるIQ変調器^[9]によって行っている。クライス

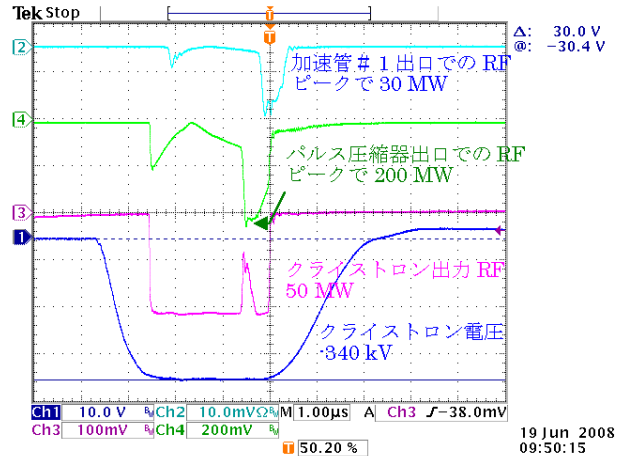


図3 : CB2高電界運転時の、各パルス波形。

トロン出力50 MWにて、パルス圧縮後の出力はピークで約200 MW、加速管の充填時間0.3 μsec の平均では約150 MWであり、加速管での電圧利得は約1.8倍である。

CB2加速管での加速エネルギーの測定は、3 m下流にあるシケイン部の偏向電磁石にて行った。CB2で加速した時とOFFにした時との比較から、加速エネルギーが131 MeV、加速電界が36.6 MV/mと求められた。以降、アンジュレータ部での電子ビーム調整が行われ、FEL発振にも問題のない事が確かめられた。現在まで、高電界運転が続けられている。

高電界運転時のベース真空度は 10^{-8} Pa台である。加速管付近で微小な真空度の跳ねが1時間に1回程度見られるが、それも 10^{-7} Pa台に納まり、インターロックの閾値 (2×10^{-5} Pa) を超えることは無い。実際、5月から平日は毎日、10 ppsにて運転をしているが、放電によりインターロックで停止した事は、立ち上げ直後の数回だけである。安定して加速器の運転が続けられている。

3. 大電力テストスタンド

XFEL実機で使用される大電力RF機器 (加速管、パルス圧縮器、立体回路、クライストロン) の性能を確認するために、今春、テストスタンドを建設した。特に、パルス圧縮器とダミーロードについては、SCSS試験加速器で使用しているものと製造場所 (三菱重工名古屋→三菱重工神戸・日本高周波) や製造方法が異なる^[3,4]ため、大電力RFで試験することが重要である。

図4に、テストスタンドの写真を示す。コンクリート壁厚50 cmの遮蔽室を作り、その内側に加速管を設置した。加速管、パルス圧縮器、ダミーロード、立体回路、およびクライストロンは、XFELで使用する量産品の初号機をそれぞれ実装した。真空機器、架台、冷却配管もほぼ実機と同じ配置とし、Cバンド加速器の1ユニットを完成させた。

モジュレータは、一体型モジュレータの試作機^[5]を当面用い、量産品が出来次第、入れ替える予定である。クライストロン導波管との接続については、発表^[6]に詳細が報告されている。また、XFELで使用する予定の、PLCを用いた制御システムを組み、試験運用されている。

6月中旬に加速管に初めてRFを入れた。7月下旬より本格的にエージング運転を開始した。初めはRFのパルス幅を狭め、徐々にパルス幅を広げてゆく。自動エージングシステムが用意され、真空度を見ながらモジュレータの充電電圧を徐々に上げてゆく。図5に、エージング運転時の真空度の推移を示す。エージングの初期および低いパワーの時は、クライストロン直後の真空度が悪い。これは、クライストロン出力窓を大気に曝していた為ではないかと推察している。パワーが上がると、加速管での放電による真空悪化が多くなる。インターロック閾値を

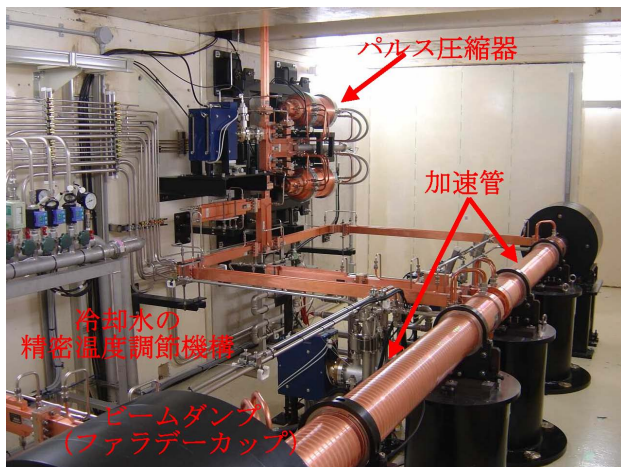


図4：Cバンド大電力テストスタンドの全景。

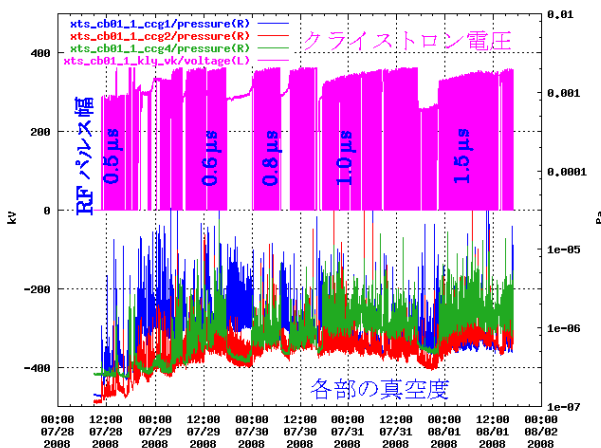


図5：エージング運転時の、クライストロン印加電圧（上）と各部の真空度（下）。真空度は、青がクライストロン直後、赤がパルス圧縮器付近、緑が加速管付近の真空度。この期間中は、60 ppsにて、24時間運転を行った。

1×10^{-5} Paに設定しており、放電により停止、運転再開を繰り返す。こうして徐々にエージングが進み、パワーを上げられるようになる。8月4日現在までに、運転時間164時間にて、RFパルス幅2 μsec まで到達しており、定格のパルス幅2.5 μsec まであと少しである。これまでのところ、加速管やパルス圧縮器のエージングは順調に進み、トラブルは無い。

今後エージングが完了すれば、加速管、パルス圧縮器、立体回路、クライストロンを別のものと交換し、再度エージングを行う。XFELに据え付けられるまで、なるべく多くのコンポーネントを試験し、性能を確認してゆく予定である。

4. まとめと今後の予定

Cバンド加速器は、SCSS試験加速器にて定格35 MV/m以上の加速電界にて安定して運転できることが確認された。また、テストスタンドにてXFELで実際に使用するコンポーネントの大電力試験を行い、性能に問題のないことを確認しつつある。加速管、パルス圧縮器、立体回路、クライストロンは各メーカーで順調に製造が行われている。モジュレータは試作機を用いた試験がおおむね完了し、量産にかかる予定である。

来年春にはXFEL加速器棟が完成し、夏より順次、Cバンド加速器の据付を行う予定である。そして2010年度中に加速器の運転を始め、FEL発振を目指す予定である。

謝辞

Cバンド加速器は、日本の各メーカーの方々の高度な技術と長年の開発のおかげである。SCSS試験加速器の安定な運転は、田中均リーダー、渡川和晃氏、及びSCSS運転員の方々の着実な調整の成果である。テストスタンドの建設、運転に当たっては、大竹雄次氏、福井達氏、北村全伸氏、細田直康氏、木村洋昭氏、安積則義氏、高橋直氏、備前輝彦氏、長谷川照晃氏、印道征一氏、中嶋一馬氏をはじめXFELグループの多くの方々にお世話になった。こうした多くの方々に感謝いたします。

参考文献

- [1] 新竹積 本学会WO03.
- [2] 三浦禎雄 2003年リニアック技術研究会WP-31.
- [3] 沖平和則 本学会WP112.
- [4] 三浦禎雄 本学会WP113.
- [5] 近藤力 本学会WP107, 白澤克年 本学会WP109,
- [6] 櫻井辰幸 本学会WP110.
- [7] 近藤力 本学会WP108.
- [8] 川崎敦志 本学会WP111.
- [9] 大島隆 本学会TO07.