

CONSTRUCTION STATUS OF TIMING & LOW LEVEL RF SYSTEM AT XFEL/SPRING-8

Takashi Ohshima^{#,A,B)}, Naoyasu Hosoda^{A,B)}, Hirokazu Maesaka^{A,B)}, Shin-ichi Matsubara^{A,B)} and Yuji Otake^{A,B)}

^{A)} RIKEN

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

^{B)}Japan Synchrotron Radiation Institute

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

Abstract

The construction of the XFEL/SPring-8 is in a final stage, in which the beam operation will be started in the end of fiscal year 2010. As for the LLRF system of the XFEL, about 80 % of the construction was now finished. The LLRF system was categorized into three parts: A) The timing reference signal transmission system, B) installation of phase-stabilized optical fiber cables for the reference signal distribution, and C) installation and build of LLRF components and control units. The component test of the reference signal transmission system, such as a phase and amplitude variation by a temperature change of the master oscillator, was finished and the installation of each component will be done in this August. The installation of the optical fiber cable was almost finished along an accelerator building. The delivery of about seventy LLRF component and control units from a company to the accelerator building was finished in March 2010, and cabling of the RF coaxial cables and comprehensive examination for the system are under progress. The preparation of the LLRF system will be finished in October 2010 which enables us a start of the conditioning of the accelerator structure.

XFEL/SPring-8 タイミング・低電力 RF システムの建設状況

1. はじめに

XFEL/SPring-8 は X 線領域での SASE 発振を実現し、膜たんぱく質の構造解析、ポンププローブ実験などの可干渉性を持つパルス幅の短い高輝度 X 線を用いた実験を行うための施設である。現在、建設の最終段階となり、2010 年 10 月からの加速空洞コンディショニング開始、2010 年度末のビーム運転開始に向けて、それぞれの機器の据付が進んでいる。[1]。

安定した SASE 発振の実現のために、XFEL/SPring-8 の低電力高周波(LLRF)システムに対しては、rms で 50fs の位相安定度、1E-4 の振幅安定度と厳しい要求がなされている [2]。この要求に対応するために、基準信号発生器(マスターオシレータ)、基準信号光伝送系、空洞電力制御装置の低雑音化、温度の安定化が図られてきた [3]。LLRF システムの構成を示す概要図を図 1 に示す。LLRF システムの建設は、大きく分けて 3 つに分割された。1 つはマスターオシレータ、光送信器、光分配器を含む基準信号光伝送システムである。2 つ目は光ファイバの温度を安定化させる恒温措置を施した基準信号伝送用光ファイバケーブル敷設である。3 つ目は、光受信器、RF 位相振幅パルス変調器 (IQ 変調器)、クライストロンドライバンプ、IQ 検出器などを含む LLRF 制御装置である。

基準信号光伝送システムは加速器の最上流部に設置される。この装置は特に温度安定化に注意を注ぐ

必要があるため、クライストロンギャラリー内に専用の断熱室 (マスターオシレータ室) が作られ、その中に収められている。基準信号を伝送する光ファイバは、クライストロンギャラリー内に設置された約 70 式の 19"ラック群に基準信号を伝送するために使用される。この基準信号は、光源棟に設置されたビーム位置検出器、実験棟内に設置されるポンプ・プローブ実験用のレーザーハッチなどにも配信される。LLRF 制御装置の総数は約 40 ユニットあり、これらは長さ約 400m のクライストロンギャラリー内に分散して設置される。1 つのユニットは 4 連の 19"ラックで構成され、そのうち 2 台は水冷ラック

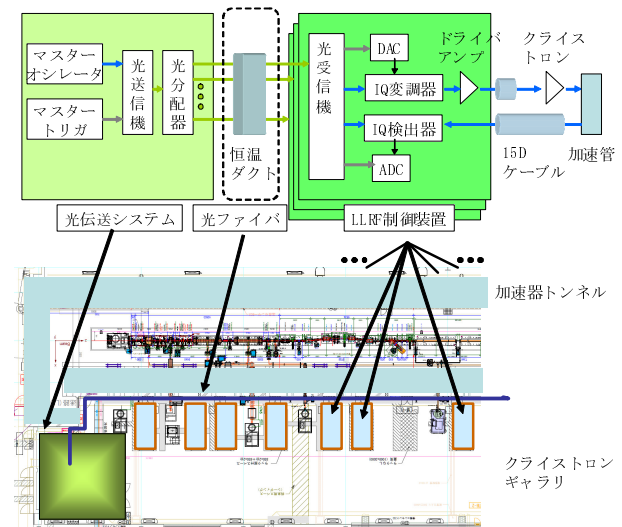


図 1 : LLRF システムの概略構成。

[#] E-mail:ohshima@spring8.or.jp

表 1 : LLRF システムの製作工程

	2007		2008		2009		2010		2011		2012	
	10	4	10	4	10	4	10	4	10	4	10	
マイルストーン					☆ 加速器棟光源棟 建屋竣工		☆ 空洞コン 開始	☆ デイショニング		☆ ビーム運転 コミッショニング開始		☆ XFEL 供用開始
光伝送システム		☆ プロトタイプ器 試験	設計	製作		設置・配線	検査					
光ファイバ敷設			設計	製作・設置			検査					
LLRF制御機器	設	製作	設置・配線・検査	☆ 初号器RF試験		☆ 量産1号機RF試験						

であり内部空気の温度が 0.2 度の範囲内に安定化されている。この水冷ラック内に LLRF 機器が設置される。

これらの3つの案件についての工程表を表 1 に示す。現在、約 80%の機器が据え付けられ、残りの配線作業、I/O 確認、現地での性能確認などの作業が進められている。

以下では、これらの機器の製作状況の詳細および製作途上で生じた問題点、また昨年度の報告から進捗した事項として、基準信号光伝送系機器の位相・振幅の温度による変化やノイズ抑制結果についての報告を行う。

2. LLRF システムの製作状況

2.1 工程進捗

まず、基準信号光伝送システムについては、光送受信器のプロトタイプが XFEL 実機の発注の前段階として JST の予算で開発された[4]。ここで開発された技術を元に改良が加えられて実機の製作が行われた。製作された機器は 2010 年 8 月下旬に現地への搬入、配線、現地試験が行われる予定である。

次にファイバ敷設については、ファイバを収める恒温ダクトの設計、2m の恒温ダクトの試作およびその性能試験の結果を踏まえ[5]、現地での施工が行われている。加速器棟での光ファイバ敷設についてはマスターオシレータ室での融着工事以外は 2009 年 11 月に完了した。光源棟での光ファイバ敷設は 2010 年 6 月から施工が開始され現時点で約 80%が施工済みである。2010 年 9 月上旬には加速器棟、光源棟の工事をすべて完了する予定である。利用実験に対してタイミング信号を配信するための工事は 12 月に工事開始を目指している。

LLRF 制御装置については SCSS 試験加速器で開発された技術[6]を元に改良を加えた IQ 変調器・検出器など各構成要素の設計、製作が行われ、2009 年 3 月に C バンド制御装置の初号器の納品が行われ

た。その後 6 ユニット/月のペースでの XFEL 加速器棟への納品が行われた。2010 年 2 月には XFEL 建屋に据付られた量産第 1 号器に対して先行して配線作業を終え、XFEL 加速器棟のユーティリティ設備の環境下での動作確認試験が行われた。LLRF 制御装置の加速器棟への搬入は、C バンド用ユニットの納品が 2010 年 3 月に完了、38MHz,476MHz などの入射部空洞用ユニットの納品が 5 月に完了した。現在のクライストロンギャラリの様子を図 2 に示す。ここでは 15D 同軸ケーブルの敷設作業、現地での LLRF 制御装置動作確認試験などが進行している状況であり、2010 年 10 月からの加速空洞コンデイショニングに間に合うように努力がなされている。



図 2 : XFEL 加速器棟クライストロンギャラリの様子。

2.2 製作途上で発生したいくつかの問題点

LLRF 制御装置に関連して発生したトラブルのうち 2 点について報告を行う。

1 つはトンネル内の加速管ピックアップから IQ 検出器までを結ぶ 15D 同軸ケーブルの VSWR 悪化である。C バンド加速管で使用される周波数である 5712MHz は 15D ケーブルのカットオフ周波数に近いので、ケーブルの曲がりによる反射の影響が大き

く見られた。そのため、ケーブルの最小曲げ半径を大きく取るようにルートの見直しが行われ、VSWRは改善された。

もう一つは C バンドクライストロン駆動用アンプの最終段で使用する高周波トランジスタの性能変化であった。初号器製作時に購入した高周波トランジスタでは問題の無かったパルス内位相変動が、次に購入したロットのものでは仕様を満たさなくなってしまった。トランジスタの製造メーカーに確認したところ、製作工程において歩留まり改善のためのチューニングをある時期に行ったとのことであった。そこで半導体メーカーに以前と同じ工程での製作を依頼したところ、以前と同様の性能が確保された。このことにより、ドライバアンプの製作が遅れたが、9月上旬には必要数が XFEL 棟へ納品される予定である

3. 基準信号光伝送系での改善点

3.1 基準信号発生器の温度特性

XFEL/SPring-8 では熱電子銃から得られるパルス幅 1ns エネルギー500keV の電子ビームに対して、エネルギー上昇とともに徐々にバンチ圧縮を行う SCSS コンセプト[7]が採用されている。ここでは、長いバンチ長に対しては低い加速周波数の加速空洞を用いて速度バンチングが行われる。そのため、基準信号として 5712MHz 信号とその分周信号が必要となり、これらの分周信号の相対的な位相関係は安定である必要がある。これらの電気信号を発生させるマスターオシレータの温度特性は重要である。マスターオシレータの温度を変化させて、各分周信号の 238MHz 信号に対する位相の変化量を、サンプリングオシロスコープを用いて測定した。当初、分周器の後段に挿入されている低域通過フィルタなどによる位相の温度変動が確認されたが、補償回路の追加などにより、表 2 に示すように、その係数は 0.48ps/K 以下にまで改善された。表 2 には、パワーメーターを用いて測定した出力信号の振幅変化の温度係数も合わせて示している。その係数は、2.5E-3/K 以下であった。これらの値は 0.2 度以内に温度の安定化された状況では 100fsp-p 以下、5E-4p-p 以下の安定度となるとなり、現状での我々の要求を満足している。

表 2：基準信号源の分周信号の位相/振幅温度係数

周波数(MHz)	位相変化(ps/K)	振幅変化(x1E-3/K)
5712	0.48	2.5
2856	0.34	2.0
1428	0.07	0.2
476	0.12	0.6
238	-	1.5

3.2 光伝送による AM ノイズの増加

基準信号光伝送システムを開発・建設している段階で、マスターオシレータから発生させて光伝送された 5712MHz の信号を観測した際に、オフセット周波数が 8kHz 近傍の領域で AM ノイズの増加が見られた。光送受信器の各要素ごとにノイズ量を測定した結果、これは主として EDFA に起因することがわかった。AM ノイズのレベルが -100dBc/Hz 以下と低いことから実害が発生する可能性が低いことも考えられたが、EDFA で使用している DC 電源の改良、内部の光ファイバの長さの短縮などの対処を行った。その結果、8kHz 近傍の AM ノイズは低く抑えることができた。図 3 に対策前後の AM ノイズのスペクトラムを示す。

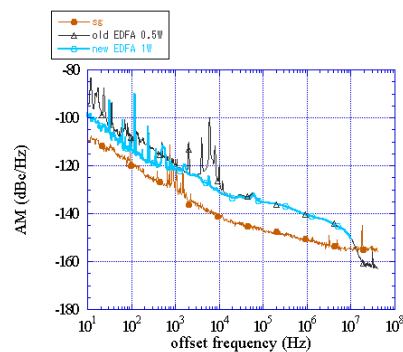


図 3：EDFA のノイズ対策前後での光伝送された 5712MHz 基準信号の AM ノイズ。

4. まとめ

LLRF システムで使用する機器の据え付け、配線は大きく分けて基準信号光伝送システム、光ファイバ敷設、LLRF 制御装置の 3 つに分けられている。基準信号光伝送システムについてマスターオシレータ、光送信器などの機器は設計、製作が完了し 8 月から現地への設置工事が予定されている。光ファイバ敷設について、加速器棟での敷設はほぼ完了し、光源棟のファイバ敷設も約 80%は完了している。LLRF 制御装置の納入は 2010 年 5 月にほぼ完了し、現在 RF ケーブル敷設、現地性能試験などが進められつつある。これら 3 つの工事は 10 月からの加速空洞コンディショニングまでに完了することを目指し努力がなされている。

昨年度の報告からの進展として、光伝送システムに含まれるマスターオシレータで出力される 5712MHz、2856MHz、1428MHz、476MHz、239MHz 高周波信号の振幅、相対位相の温度変化についての測定が行われた。それぞれ 0.48ps/K 以下、2.5E-3/K 以下であり、温度が 0.2Kp-p に安定化されている場合には 100fsp-p 以下、5E-4p-p 以下の安定度となることが予想される。光送信器から送られる RF 信号に AM ノイズの増加が見られた。このノイズは主に EDFA から出力されていることが判明し、DC 電源の改良などにより抑制できた。この性能は、現状における我々の要求を満足している。

上に述べたように LLRF システムの準備は着々と

進められており、2010 年度末からのビーム調整が順調に進むことが期待されている。

謝辞

光送受信機、IQ 変調器・検出器、クライストロンドライバアンプ、水冷ラックなどの製作を担当していただきデータ取得に協力いただいた三菱電機特機(株)の方々、光ファイバダクトの製作据付を担当していただいた(株)きんでんの方々、PLC を用いた制御装置製作などを担当していただいた日立造船(株)の方々に感謝の意を表す。様々な面で協力を頂いた XFEL 制御チーム、主加速器チーム、建設チーム、事務他の方々にも感謝の意を表す。

参考文献

- [1] 新竹積 他、“X線自由電子レーザー計画の進展”、第7回加速器学会年会。
- [2] Y. Otake, et al., "Timing and LLRF System of Japanese XFEL to Realize Femto-Second Stability", ICALEPCS2007, Tennessee, USA, 2007.
- [3] N. Hosoda, et al., "Construction of a Timing and Low-level RF System for XFEL/SPring-8", Proc. of the 1st International Particle Accelerator Conference, pp. 2191-2193, Kyoto, Japan, 2010.
- [4] H. Maesaka, et. Al., "Development of THE OPTICAL TIMING AND RF DISTRIBUTION SYSTEM FOR XFEL/SPRING-8", Proc. of FEL08, pp.352-355, Gyeongju, Korea, 2008.
- [5] T. Ohshima, et al., "Transmission of Reference RF Signals Through Optical Fiber at XFEL/SPring-8", Proc. of the 1st International Particle Accelerator Conference, pp. 1390-1392, Kyoto, Japan, 2010.
- [6] Y. Otake, et. al., "SCSS RF Control Tword 5712 MHz Phase Accuracy of One Degree", Proc. of APAC2007, pp.634-636, Indore, India, 2007.
- [7] 田中均 他、“SCSS 試験加速器の運転状況-50～60nm のレーザー波長領域での定常的 SASE 飽和の達成”、第5回加速器学会年会プロシーディング、pp.87-89、広島、2008.