

CONSTRUCTION STATUS OF A TIMING AND LOW-LEVEL RF SYSTEM FOR XFEL/SPRING-8

Naoyasu Hosoda^{A)}, Takashi Ohshima^{A)}, Hirokazu Maesaka^{A)}, Shin-ich Matsubara^{A)}, Mitsuru Musha^{B)},
Kenji Tamasaku^{A)}, Yuji Otake^{A)}

^{A)} RIKEN/SPRING-8

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

^{B)} Institute for Laser Science, University of Electro-Communications

1-5-1, Chofugaoka, Chofu-shi, Tokyo, 182-8585

Abstract

Stable XFEL/SPRING-8 operation requests a high phase stability of 50 fs and a high amplitude stability of 0.01 % for a XFEL RF system. To achieve the requirements, we made a lot of consideration for temperature stabilization of a timing and low-level RF (LLRF) system for the XFEL. We designed all the modules for the LLRF system, as which are installed in a water-cooled 19-inch rack. We also designed an optical fiber cables for timing and RF distribution, and coaxial cables to monitor the RF phase and amplitude of a cavity, as which are installed in water-cooled ducts. Even through, temperature regulation of the klystron gallery of the XFEL is designed to control within 26 ± 2.0 K (P-P), temperature in the water cooled racks and the ducts is going to control within 26 ± 0.2 K (P-P), because of the cooling water temperature variation. We made a test to confirm the performance of the instruments described above. Inside temperature variation per a 1 K outside temperature variation in the water cooled rack was 0.11 K. Inside temperature variation per a 1 K outside temperature variation in the water cooled duct was 0.07 K. Feasibility of the optical RF distribution system with the water cooled duct was demonstrated by using the SCSS test accelerator for the XFEL. By comparing between coaxial and optical cable distributions, no difference was observed on EUV laser intensity at the test accelerator.

XFEL/SPRING-8のタイミング・低電力RFシステムの建設状況

1. はじめに

全長700mのX線自由電子レーザー施設(XFEL)の8GeV電子線形加速器は、熱陰極電子銃とビームディフレクターでバンチ幅1ns、ピーク電流1Aの電子ビームを発生し、それを238MHz、476MHz、1428MHzの3周波数を用いた速度変調圧縮と、その後のエネルギー増加に沿った2856MHz、5712MHzの2周波数を用いた3段の磁気バンチ圧縮で3000倍圧縮し、超短バンチ幅30fs、高ピーク電流3KAの電子ビームを作る。このバンチ圧縮部ではオフクレストでビームを加速するため、位相と振幅の変化に非常に敏感になる。高周波(RF)信号に要求される精度は、最も厳しい値で、位相50fs、振幅0.01%である^[1,2]。

ユーザー運転時に長時間、安定した光を供給するためには、温度変化による位相と振幅のドリフトを出来るだけ抑える必要がある。ドリフトの原因のひとつは、機器内部で用いている電気素子に温度依存性があることによる。例えば我々の開発したRF分配器中の、アンプユニットの位相温度係数は182fs/Kであり、クライストロンギャラリーの室温変化が ± 2 K(P-P)であることから、位相変化は ± 364 fs(P-P)にもなってしまう。またもうひとつは、同軸ケーブルの電気長や光ファイバーの光路長の温度依存性である。例えば、我々が採用する古河電気工業製位相安定化SM光ファイバーケーブルの位相温度依存性は、

測定の結果、 -0.22 ppm/K($10 \sim 40$ K、1550nm)であった。これを用いて加速器の最終段まで500mを伝送すると、位相変化は ± 1.0 ps(P-P)にもなってしまう。

そこで我々は全ての機器、ケーブル、ファイバーなどを恒温化する事を採用した。恒温化にはオープンヒーターを用いる方法もあるが、規模の大きなXFELで採用することは現実的でない。そこで我々は温調冷却水を用いることにした。 26 ± 0.2 K(P-P)の冷却水を用いることで、先に示したアンプユニットの位相変化は ± 36 fs(P-P)に、またファイバーケーブルによる位相変化は ± 100 fs(P-P)に抑えられることになる。

この発表では、我々のいろいろな取り組みの中から、上記のような温度安定化に重点をおいて報告する。具体的には、今回開発した、機器恒温化のための水冷ラック、ケーブル恒温化のための水冷ダクトについてである。加えて、光ファイバーケーブルの水冷恒温化の試験を試験加速器において行ったので、その結果も述べる。また現在の機器製作、据え付け工事などの建設状況を簡単に述べる。なお特に断らない限り、誤差はRMS値を用いる。

2. 水冷19インチラック

我々は、クライストロンギャラリーでタイミング・低電力RFシステムを収めるために、水冷19イン

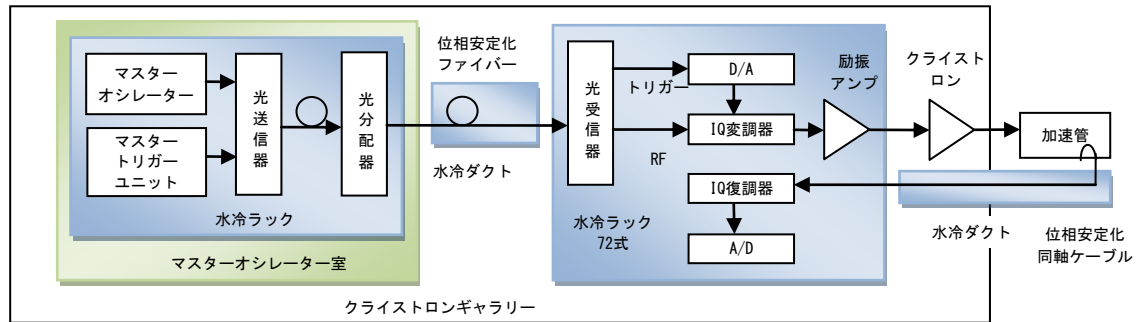


図1：低電力RF機器と光基準RF伝送系の概念図

チラックを製作した。図1に、水冷ラックが収納する機器を、我々の低電力RF機器と光基準RF伝送系^[3]の概念図と共に示す。水冷ラックは個々に、機器を収納する空間の左側に、温調された冷却水で内部空気温度を安定化し、ファンで風を循環させる水冷ユニットを持っている。

ラックの特徴のひとつは、通常的水冷ユニット前吹き出し型の他に、ラックに収納される各機器の側面から冷却風を吹き込む横吹き出し型を用意したことである。これにより、機器の前面で配線されるケーブルを風で振動させないようにになっている。図2に、水冷ラックを上から見た時の、構造と風の流れを示す。どちらの型も風は機器背面から排出する。機器の内部は、熱解析、風速解析のシミュレーションを行い、素子が効率よく冷却される事や、内部配線を振動させない事などを確認しながら配置設計をした。タイミング・低電力RFシステムの全ての機器は、この横吹き出し型水冷ラックと組み合わせて使用するよう設計されている。

このラックのもうひとつの特徴は、集中型水冷低ノイズ電源である。これは、この電源から電力を供給する各機器の低ノイズ化と、各機器内での熱の発生低減のためである。各機器内部にトランスや電圧安定化回路を持たないため、空間的な部品配置に余裕が出来、冷却風の通路も確保できた。また、機器の発熱は多くがトランスなどの電源部からなので、集中冷却することで冷却効率が上がる。

ラックが設置されるクライストロンギャラリーの室温は $26\pm 2\text{K(P-P)}$ で設計されているが、このラック内の設計温度安定度は、温調されたマシン用冷却水に依存し、 $26\pm 0.2\text{K(P-P)}$ 以内になる。

図3は、この水冷ラックについて、ラック外温度を 28K から $24\text{K}\sim 4\text{K}$ 下げ、かつ冷却水温度を 26.2K から $25.8\text{K}\sim 0.4\text{K}$ 下げた時の内部温度の様子を示している。これは実環境の最大温度変化を模擬するためである。結果、内部ファン吹き出し温度は 0.42K 下がっただけであり、ラック外温度変化 1K に対するラック内温度変化は、 0.11K であった。

3. ケーブル用水冷ダクト

基準RF信号を分配するための光ファイバーケーブルは、専用水冷ダクト中に敷設される。基準RF信号の伝送には位相安定型光ファイバーを用いる^[4,5]。このダクトは加速器収納トンネル外側面の高さ 3.8m の

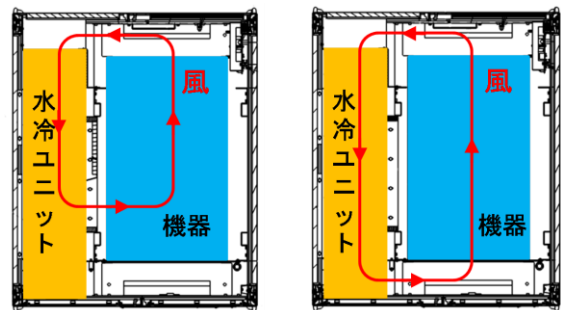


図2：水冷ラックを上から見た時の、横吹き出し型（左）と前吹き出し型（右）の風の流れ

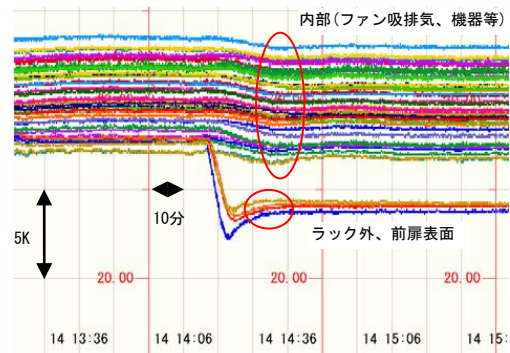


図3：ラック外温度、冷却水温度を下げたときの水冷ラック内外の温度の様子



図4：XFEL棟クライストロンギャラリーに設置された水冷ダクトと水冷ラック

位置に設置し、内部に $26\pm 0.2\text{K(P-P)}$ に温調されたマシン用冷却水を通水する。図4に、クライストロンギャラリーに設置された水冷ダクトと4連19インチラック(左2台は水冷、右2台は空冷)の写真を示す。

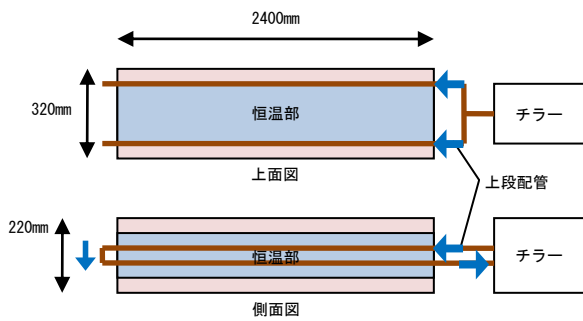


図5：水冷ダクト試作器の構造概念図

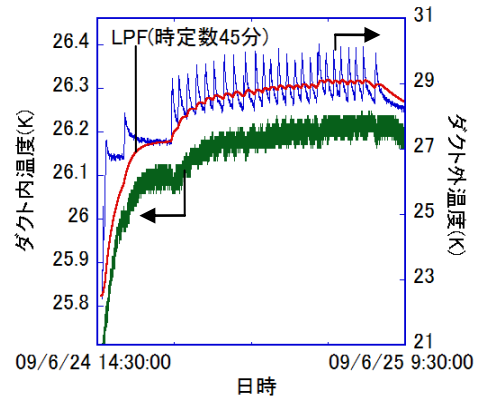


図6：水冷ダクト試作器の温度安定度

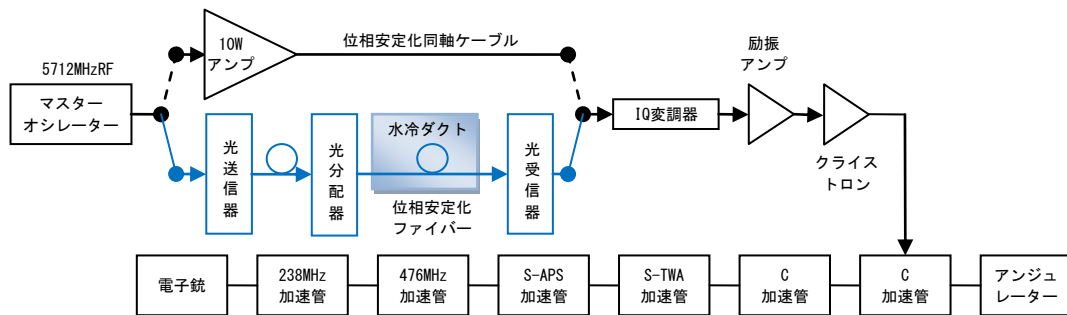


図7：試験加速器における水冷ダクトを通したファイバーでの5712MHz RF伝送実験の概念図

我々は光ファイバーを納める水冷ダクトについて試作器を作成し、温度安定度を調べた。図5に水冷ダクト試作器の構造概念図を示す。冷却水は、チラーから出た後2分岐し、それぞれが内ダクトの両側面を往復したのち合流し、戻っている。ダクト外温度がエアコンの影響で振動していた2時間の結果では、ダクト外温度 29.08 ± 1.71 (P-P)、冷却水温度 26.06 ± 0.12 K(P-P)、内部温度 26.21 ± 0.08 K(P-P)であった(図6)。またダクト外温度はおよそ45分の時定数を持つ1次遅れフィルターを通して内部に伝わっていることもわかった。そして長時間でのダクト外温度変化1Kに対するダクト内温度変化は、 0.07 Kであった。

我々は、加速空洞ピックアップから水冷ラック内のIQ検出器までの同軸ケーブルも水冷する。加速空洞内のRF信号の正確な測定は、計算機フィードバックによる位相、振幅の安定化のためにも重要である。ダクト構造の基本的な考え方はファイバー用のものと同じだが、こちらは配線経路に沿ってある程度自由に曲げられるようにしてある。ここには新開発で温度係数 5ppm/K 以下の位相安定型HF-15D高周波同軸ケーブルを使用する。長さは20m程度だが、それでも室温変化 $\pm 2\text{K}$ で $\pm 500\text{fs}$ の変動につながってしまい、やはり温度を安定化する必要がある。

4. 水冷ダクト中を通したファイバーによる加速器運転

250MeV試験加速器において、水冷ダクト中を通したファイバーで5712MHz RF信号を伝送し、それ

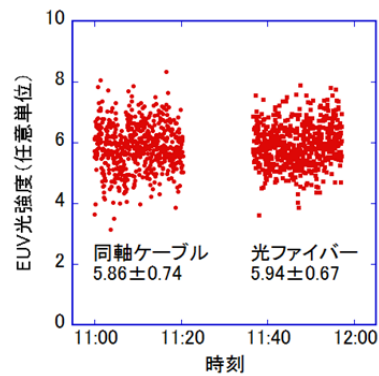


図8：5712MHz RF信号を同軸ケーブル、光ファイバーで送った時のEUV光強度分布の比較

を用いてCバンドクライストロンを運転し、EUVレーザー発振への影響を調べた。通常は10Wアンプと位相安定同軸ケーブルで伝送している部分を、光基準RF伝送系試作器(光送信器、光分配器、光受信器)とファイバーに置き換えて比較した(図7)。ファイバーは、先に述べた同軸ケーブル用水冷ダクトと同じ構造で恒温し、 $26.62 \pm 0.06\text{K}$ に安定化して使用した。結果、20分間中のレーザー強度は、同軸ケーブルの場合 5.86 ± 0.66 (任意単位)、光ファイバーの場合 6.20 ± 0.66 で、両者の変動には差が無かった(図8)。水冷ダクト中を通したファイバーで伝送したRF信号は、試験加速器におけるEUVレーザー発振には十分な性能をもっていることが確認できた。

5. まとめ

XFELのRF信号に要求される精度は、最も厳しい値で位相50fs、振幅0.01%である。我々は長時間でのRF位相と振幅の精度を上げるため、温度安定化に取り組む、水冷ラックと水冷ダクトを採用した。水冷ラック外温度変化1Kに対するラック内温度変化は、0.11Kであった。また水冷ダクト外温度変化1Kに対するダクト内温度変化は、0.07Kであった。これらにより、温度変化に起因する位相変化は、例えば我々のRF分配器中のアンプユニットでは19fsに、位相安定化ファイバーケーブルでは37fsに抑えることが出来る。大型加速器において、タイミング・低電力RFシステムのほとんどすべての部分を温度安定化する構成は、今後他の加速器施設建設の参考になると思われる。

最後に建設状況であるが、3月末にXFEL棟が完成した。低電力RF機器Cバンド用ラックシステムの量産機の納入、設置も6月から始まり、6式/月ずつ行われている。そして7月からは光基準RF伝送系のファイバー敷設工事も開始した。10月には先行でCバンド1ユニットだけ配線配管を行い、性能試験をする予定である。来年3月までに物品の納入を、5月までに配線配管を終える予定である。

謝辞

製作を担当し実験に協力していただいた、三菱電機特機システム株式会社と株式会社きんでんに感謝いたします。

参考文献

- [1] H. Tanaka et al., “XFEL/SPring-8のバンチ圧縮性能に及ぼすRF機器変動の影響評価”, 第4回加速器学会, 和光, 2007, p. 613.
- [2] Y. Otake, et al., “Timing and LLRF System of Japanese XFEL to Realize Femto-Second Stability”, ICALEPCS2007, Tennessee, USA, 2007
- [3] T. Ohshima, et al., “Low Level RF and Timing System for XFEL/SPring-8”, LINAC08, Victoria, Canada, 2008
- [4] H. Maesaka, et al., “Development of the optical timing and RF distribution system for XFEL/SPring-8”, FEL08, Gyeongju, Korea, 2008
- [5] S. Tanaka, et al., “Precise timing signal transmission by a new optical fiber cable”, KEK-90-5, May 1990. 23pp