

MANUFACTURING OF A C-BAND RF DEFLECTOR FOR XFEL/SPRING-8 “SACLA”

Tatsuomi Hashirano^{#,A)}, Sadao Miura^{A)}, Hiroyasu Ego^{B)}, Hirokazu Maesaka^{C)}, Tatsuyuki Sakurai^{B)}, Yuji Otake^{B),C)}

^{A)} Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.

1-1-1, Itozaki minami, Mihara, Hiroshima, 729-0393

^{B)} JASRI/SPRING-8

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

^{C)} RIKEN Harima SPRING-8 Center

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

Abstract

XFEL/SPRING-8 “SACLA”, designed for the 8 GeV beam energy and the under 0.06 nm shortest wavelength lasing, is now under commissioning to open it to the public in the end of fiscal year 2011. To radiate stable and brilliant XFEL, it is important to keep the high peak current of the electron beam after the bunch compression. A transverse RF deflector is used for diagnosing the longitudinal bunch structure. A required transverse voltage for SACLA is more than 40 MV. To achieve this requirement, we developed a C-band RF deflector, and we manufactured two 1.8m-long C-band RF deflectors. It was confirmed that the RF properties of manufactured deflectors were almost equivalent to the design values by the low-level RF measurements. Now the deflectors have installed in the SACLA, and contribute to commissioning.

SACLA(XFEL/SPRING-8)向け C バンド RF デフレクターの製作

1. はじめに

SACLA(XFEL/SPRING-8)は全長約 700 m の常伝導加速器施設で、電子を 8 GeV まで加速し、最短波長 0.6 Å の X 線レーザー発振を目指している。2011 年 3 月に電子の 8 GeV までの加速、同 6 月には波長 1.0 Å の X 線レーザー発振に成功しており、2011 年度末の供用開始に向けて現在も調整中である^[1]。

安定で高輝度な XFEL の発振には、電子ビームをバンチ圧縮することによって得られる高いピーク電流が不可欠である。その圧縮された電子ビームの時間構造を診断する為に RF デフレクターが用いられている。RF デフレクターとはビームキック用横方向電圧させるもので、これにより電子ビームをピッチしてスクリーンモニターでバンチ長を測定する。FEL 施設で用いられる RF デフレクターとしては、S バンドタイプの LOLA^[2-5] が知られている。しかしながら SACLA では、バンチ長 (~30 fs) を測定する為に、ビームキック用横方向電圧 40 MV 以上をドリフト (5 m 程度) 前に発生させる必要がある。その為に、我々は C バンドタイプの RF デフレクターを開発した^[6]。本報告では、この C バンド RF デフレクターの製作とその RF 特性について報告する。

2. SACLA 向け RF デフレクターの特徴

RF デフレクターでは HEM(Hybrid Electro-Magnetic)11 モード後進波を用いてビームキック用横方向電圧を励起している。このモードは双極モードであるので、X,Y 方向の縮退を解き、向きを固定する必要がある。LOLA では、ビームホールとは別の穴をディスク部に設けている (図 1 参照)。しか

しながら C バンドタイプでは、S バンドタイプに比べてディスクが小さい為に、この穴を設けることが困難であった。そこで、本 RF デフレクターでは、ビームホールをレーストラック型としている (図 2,5,6 参照)。ここで、本デフレクターの HEM11-Y モード (垂直偏向モード) のイメージを図 3 に示す。

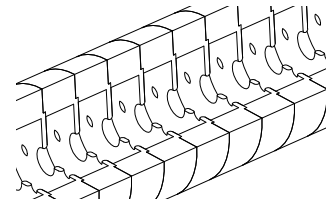


図 1 : S バンド RF デフレクター (LOLA) 概略図

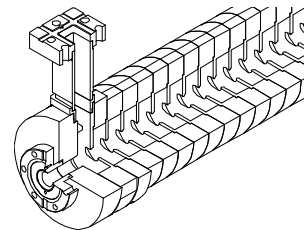


図 2 : C バンド RF デフレクター概略図

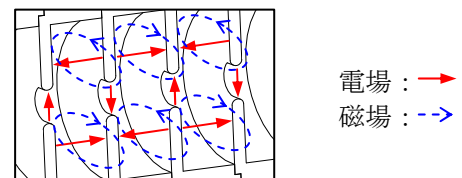


図 3 : HEM11-Y モードイメージ

[#] tatsuomi_hashirano@mhi.co.jp

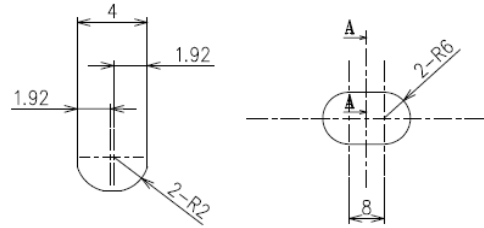
3. 製作

3.1 要求仕様

開発した RF デフレクターの主な要求仕様を表 1 に示す。本仕様にて 2 本の製作を行った。

表 1 : SALCA 用 RF デフレクターの主な要求仕様

運転周波数	5712 MHz (28 °C, 真空中)
型式	HEM11 $5\pi/6$ モード 定インピーダンス後進波型
形状	レーストラック型ビームホール付 ディスクロード円筒タイプ
無負荷 Q 値	7500 以上
実効シャント インピーダンス	9.0 M Ω /m 以上
累積移相誤差	± 5 度以内
VSWR	入力側、出力側ともに 1.1 以下
減衰パラメータ	0.5 程度
群速度	0.021c 程度
フィリング タイム	0.27 μ s 程度
空洞数	77+2 結合空洞



(A-A 断面拡大)

図 5 : レーストラック形状

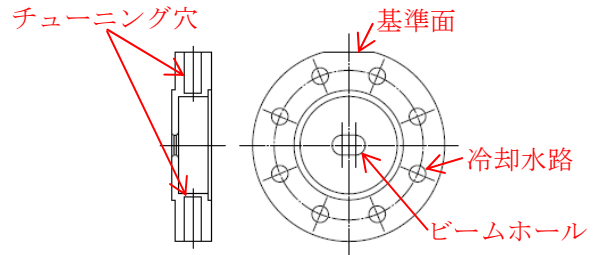


図 6 : レギュラーセル概略図

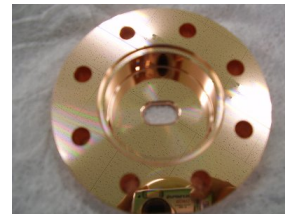


図 7 : レギュラーセル外観

3.2 セルの製作

本 RF デフレクターは 1 本当り 81 枚のセル (上流側/下流側に各 1 枚のカプラー蓋とカプラーセル、および、レギュラーセル 77 枚) で構成している。セルは全て無酸素銅 (C1011 Class1) 製である。

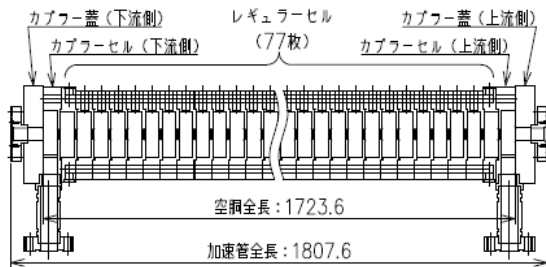


図 4 : SACLA 用 RF デフレクター構成

(1) レギュラーセル

レギュラーセルはディスクとシリンダーを一体とした構造となっており、セル中心のビームホールは 2 項において述べた通りレーストラック型 (図 5) である。各セルのレーストラックの向きを揃える為にそのストレート部分と平行な基準面をセル外周部に設けている。また、冷却水用の穴を 8 ヶ所、ディンプリングにてチューニングする為の穴を軸対称に 1 ヶ所ずつ計 2 ヶ所をそれぞれ設けている。概略図を図 6 に、外観写真を図 7 にそれぞれ示す。

ディスク平坦部とシリンダー内径は超精密旋盤による切削加工で鏡面仕上げ (表面粗さは最大高さ $0.1 \mu\text{m}$ 以下) としている。ビームホール部分はレーストラック型である為に、旋盤加工が適用できないので、エンドミルを用いたフライス加工にてレーストラック形状およびアイリス R 部を形成した後に、電解研磨仕上げ (表面粗さは RMS 平均高さ $0.5 \mu\text{m}$ 以下) とした。

レギュラーセルの各寸法は 3 次元電磁場シミュレータ (MAFIA および HFSS) と試作により決定した。レーストラック形状はシミュレーションにより決定し、その結果を元に 7 空洞定在波管 (レギュラー $\times 5$ + ハーフ $\times 2$ 、図 8) を製作し、隣り合う 2 セル毎に端板法 (図 9) で測定した $\pi/2$ モードの周波数を揃えることでセル毎のバラツキを抑えつつ、7 空洞定在波管での $5\pi/6$ モードの周波数が 5712 MHz となる様に調整加工し、セル内径を決定した。

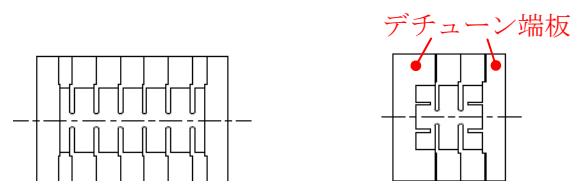


図 8 : 7 空洞定在波管

図 9 : 端板法

(2) カプラー部

カプラー部はカプラーセル、カプラー蓋、ステップ導波管、導波管、ビームフランジ、および、角フランジで構成している。導波管 (WRI-48) の E 面幅とカプラーセルのセル長が異なるので、ステップを設けて接続している。また、カプラー空洞と導波管は 1 開口アイリスで結合しており、電場の対象性を考慮して、カプラーセル内径の中心軸をビームラインに対してアイリスとは逆側へオフセットさせている。概略図を図 10 に示し、カプラーセル単体の外観写真を図 11 に示す。

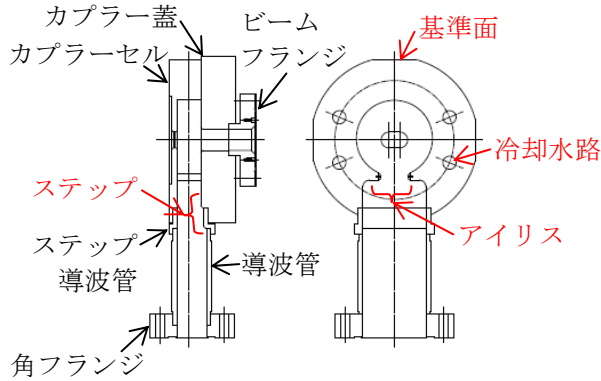


図 10 : カプラー部概略図

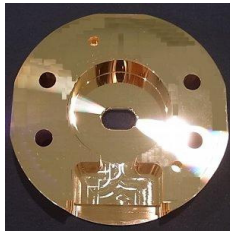
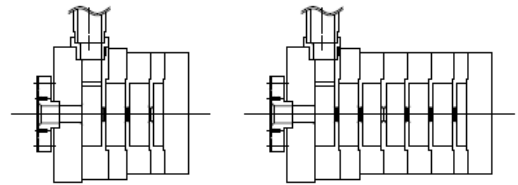


図 11 : カプラーセル外観

ステップおよびアイリスの各寸法とオフセット量は HFSS と試作により決定した。ステップはシミュレーションにて VSWR が 1.05 以下で最適となる寸法に決定した。またアイリス部寸法についてもシミュレーションを行い、得られた寸法にて試作カプラーを製作し、低電力 RF 測定にて検証した。まずはレギュラーセル部を 2.5 空洞と 5.5 空洞とに変えた時の S11 の位相差が 180 度となるようにビームフランジからチューナを挿入してカプラー周波数を調整する。次にレギュラーセル部を 1.5 空洞、2.5 空洞、3.5 空洞と変えた時の S11 の位相差が -60 度となるように調整加工することでアイリス幅寸法を決定した。試作カプラー測定時のイメージを図 12 に、この時の理想的な S11 位相を図 13 にそれぞれ示す。

アイリス幅調整後には、その試作カプラーを含む 9 空洞後進波測定 (図 14) にて、上流および下流からの VSWR が 1.1 未満であり、ビーズ法での累積相誤差 ±5.0 度以下であることを確認した。



(a) カプラー+2.5 空洞 (b) カプラー+5.5 空洞

図 12 : 試作カプラー測定イメージ

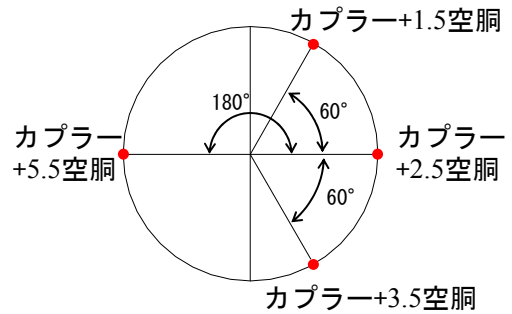


図 13 : 理想的な S11 位相

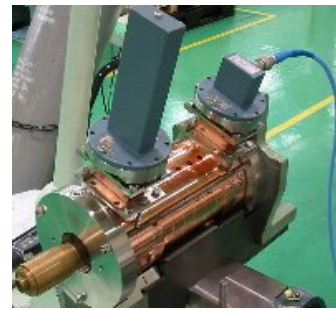


図 14 : 9 空洞後進波測定状況

3.3 セルの接合

セルの接合は、真空ろう付にて行った。ろう付手順は、以下の通りである。

- ① 加速管中央部 (レギュラーセル 77 枚) をろう付 (図 15)
- ② カプラー部、両端各 1 組をろう付 (図 16)
- ③ ①および②にてろう付した加速管中央部と両端カプラーとを組み立て全体ろう付 (図 17)

ビームホールレーストラック部分の加工誤差による周波数への影響が大きく、セルの組合せを変えるとセル周波数が変わってしまう。その為、接合後の加速管中央部のチューニングがほぼ完成した後に、その加速管中央部と組み合わせてカプラーセル内径の寸法調整を行う必要があった。そこで、上記のろう付手順を採用した。

加速管中央部チューニング時は、カプラー部は仮組み状態でチューナを用いて上流および下流からの VSWR が 1.1 以下となるように調整しておく。加速管中央部チューニング後に、再度チューナを調整し、この時のカプラー周波数を目標値としてカプラーセル内径の調整加工を行う。(③の全体ろう付後に最

最終的な周波数調整を行うので、この時点では共振周波数 5711.9MHz 程度までチューニングとした。))

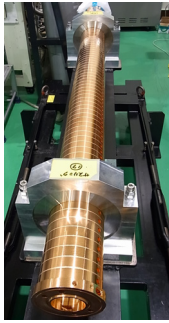


図 15 : 加速管中央部
ろう付後

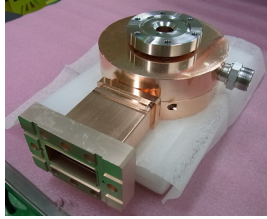


図 16 : カプラー部
ろう付後

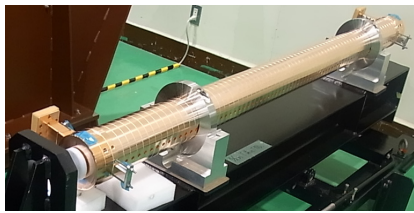


図 17 : 全体ろう付後

3.4 チューニング

チューニングはビーズ測定の結果から以下に示す式にてチューニング量を計算し、ディンプリングにて行った^{[7],[8]}。φ3mm のセラミックスビーズを用いて 0.4mm ピッチで計測した。本 RF デフレクターではディスク部に電界が集中するので、n 番目のディスク部でピークとなる S11 の振幅を A_n 、位相を ϕ_n とし、同様に加速波成分を $a_n \cdot e^{j\psi_n}$ 、反射波成分を $b_n \cdot e^{j\phi_n}$ とすると、

$$A_n \cdot e^{j\phi_n} = a_n \cdot e^{j\psi_n} + b_n \cdot e^{j\phi_n} \quad (1)$$

と表される。また、ディスク部の散乱波は、

$$S_n \cdot e^{j\theta_n} = b_n \cdot e^{j\phi_n} - b_{n-1} \cdot e^{j(\phi_{n-1} + 5\pi/6)} \quad (2)$$

と表される。チューニング前の S11 を $S11^0$ とするとチューニング後のセル反射の無い S11 との差がチューニング量 U_n として求めることができる。

$$U_n = |S11 - S11^0| = \text{Re}(S_n \cdot e^{j(\theta_n + \pi/2)}) \cdot K_n \quad (3)$$

ここで、 K_n はカプラー部のディスクをショートした時の S11 ($S11^*$) により得られる係数である。

$$K_n = (|S11^*| / a_n) \cdot (A_n / a_3)^2 \quad (4)$$

この計算は LabVIEW にて作成した「ビーズ測定結果評価プログラム」を用いて行った。

1号機のチューニング当初は、セル毎の $5\pi/6$ 周波数を算出し、その周波数のバラツキを抑え、かつ、加速管全体の共振周波数が 5712MHz となるようにチューニングを進めた。しかし HEM11 モードは隣接セルへの結合度が大きい為に、この手法でチューニングを行うと反射波が大きいセルが増えて、ビーズ法での累積移相誤差や VSWR が悪化した。そこで、1号機のチューニングを中断し、セルの周波数ずれによる反射を小さくしつつ、加速管全体の共振周波数を調整する手法に変更し、「ビーズ測定結果評価プログラム」を改良した。この手法にて1号機のチューニングの続きを実施すると、累積移相誤差および VSWR の改善することが出来た。尚、2号機は改良後の手法でチューニングを行い、良好な結果が得られた。3.5 項に測定結果を示す。

3.5 低電力 RF 試験

製作完了後に低電力 RF 試験を行い、その実測値および実測値からの計算値にて、製作した RF デフレクター2 台の RF 特性を確認した。測定結果を表 2 および図 18~21 に示し、試験状況を図 22 に示す。

尚、低電力 RF 試験後に、理化学研究所播磨研究所にあるテストベンチにて大電力 RF 試験が実施され、1号機、2号機共に SACLA 用 RF デフレクターとして必要な性能に達していることが確認された^[9]。

表 2 : 低電力 RF 測定結果

		1号機	2号機
共振周波数 (28℃、真空中)		5712.207 MHz	5711.965 MHz
無負荷 Q 値		8809	8948
実効シャントインピーダンス		20.8 MΩ/m	21.0 MΩ/m
累積移相誤差		±7.5 度	±2.8 度
VSWR	入力側	1.1236	1.0949
	出力側	1.1130	1.0833
減衰パラメータ		0.548	0.539
群速度		0.0214c	0.0214c
フィリングタイム		0.269 μs	0.269 μs

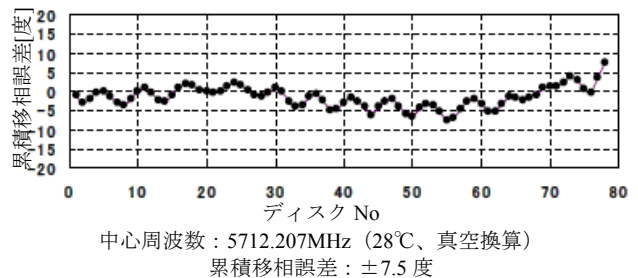


図 18 : 1号機 累積位相誤差測定結果

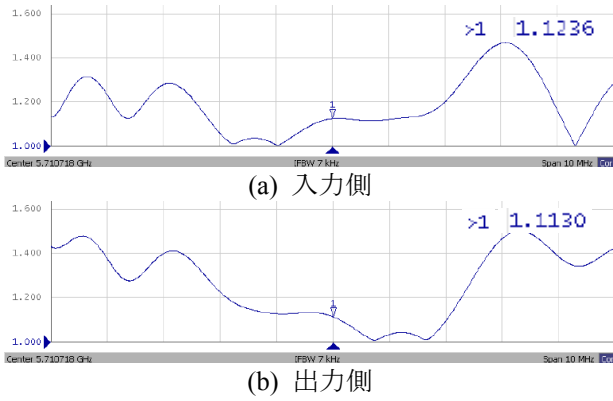


図 19 : 1 号機 VSWR 測定結果 (スパン 20MHz)

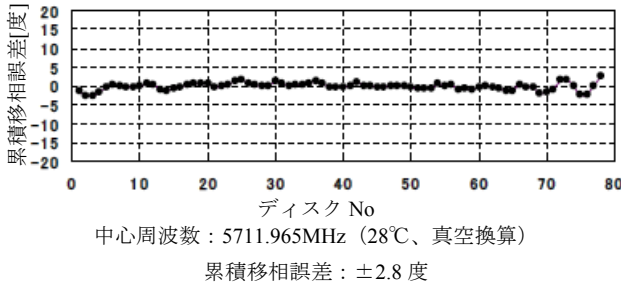


図 20 : 2 号機 累積位相誤差測定結果

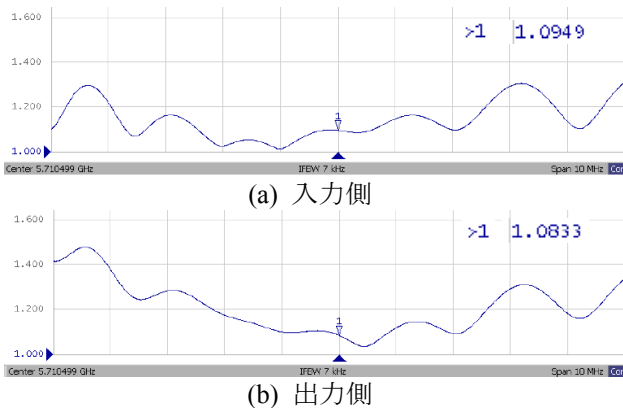


図 21 : 2 号機 VSWR 測定結果 (スパン 20MHz)

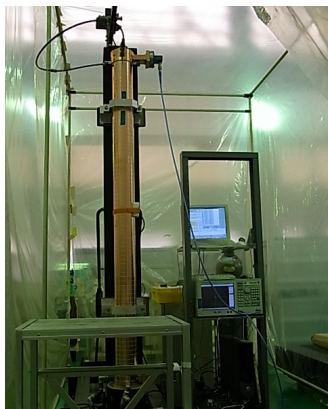


図 22 : 低電力 RF 試験状況

4. まとめ

我々は C バンド RF デフレクター 2 本を製作し、低電力 RF 試験にて RF 特性が必要性能を満足していることを確認した。現在は SACLA 内に据え付けられており (図 23)、40MV 以上の横方向電圧を発生させ、電子ビームの時間構造の診断に成功し^[10]、ビーム調整に用いられている。



図 23 : SACLA 内据付状況 (右側がビーム上流)

参考文献

- [1] T.Hara, et al., "Beam commissioning of the SACLA accelerator", PASJ2011, Tsukuba, Aug 1-3, 2011
- [2] R.Akre et al., "A Transverse RF Deflecting Structure for Bunch Length and Phase Space Diagnostics", PAC'01, Chicago, June, 2001
- [3] R.Akre et al., "Bunch Length Measurements Using a Transverse RF Deflecting Structure in the SLAC Linac", EPAC'02, Paris, June, 2002
- [4] C.Vaccarezza et al., "An RF Deflector Design for 6D Phase Space Characterization of The SPARC Beam" EPAC'04, Lucerne, July, 2004
- [5] O.H.Altenueller et al., "Investigations of Travelling-Wave Separators for the Stanford Two-Mile Linear Accelerator", Rev. Sci. Instr. 35 Vol.4, p.438, 1964
- [6] H.Ego, et al., "Design of The Transverse C-band Deflecting Structure for Measurement of Bunch Length X-FEL", Proceedings of EPAC'08, Genoa, June 23-27, 2008
- [7] T.Khabibouline, et al., "A New Tuning Method for Travelling Wave Structures", 1996 IEEE
- [8] K.Watanabe, et al., "RF Characteristics Evaluation and Tuning Process of X-band 60cm-long Accelerator Structure", GLCX-012, Jan, 2005
- [9] T.Sakurai, et al., "High Power Conditioning Test of C-band RF deflecting Structure for XFEL/Spring-8 "SACLA" ", PASJ2011, Tsukuba, Aug 1-3, 2011
- [10] H.Ego, et al., "Development of a High Gradient Transverse C-band Deflecting Structure for the Diagnosis of Temporal Bunch Structure in the XFEL/Spring-8 "SACLA" ", PASJ2011, Tsukuba, Aug 1-3, 2011