

DEVELOPMENT OF HIGH GRADIENT TRANSVERSE C-BAND DEFLECTING STRUCTURE FOR THE DIAGNOSIS OF TEMPORAL BUNCH STRUCTURE IN THE XFEL/SPRING-8 “SACLA”

Hiroyasu Ego^{#,A,B)}, Hirokazu Maesaka^{A,B)}, Tatsuyuki Sakurai^{A,B)}, Yuji Otake^{A,B)}

Tatsuomi Hashirano^{C)}, Sadao Miura^{C)}

^{A)} RIKEN Harima SPring-8 Center

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

^{B)} JASRI

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

^{C)} Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.

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

Abstract

The 8 GeV compact XFEL “SACLA” was constructed in SPring-8 and successfully lased with a wave-length of 1.2 Å after commissioning for three months. A single bunch of electrons is compressed down to about 30 fs in duration and has a peak current of more than 3 kA for the brilliant SASE X-ray radiation. It is crucial for stable lasing to investigate the lasing part in the temporal structure of the bunch. We developed a high gradient C-band deflecting structure named RAIDEN for the temporal diagnosis with a resolution of femtosecond regime. The RAIDEN is a periodically disc-loaded cylindrical waveguide. The deflecting backward travelling-wave of the dipole HEM11-5 π /6 mode is excited at 5712 MHz. Each disk has a featuring racetrack-shaped iris. The irises fix the deflecting plane of the HEM11 mode and generate strong cell-to-cell coupling for stable resonance. Two 1.8 m-long RAIDEN were installed in the SACLA and generate a deflection voltage over 40 MV in the vertical direction. We succeeded in diagnosis for a lasing part with a duration of several tens fs in a bunch.

X線自由電子レーザー施設 SACLA における 時間構造診断用高電磁界 C バンドデフレクターの開発

1. はじめに

SPring-8 X線自由電子レーザー施設 SACLA (XFEL/SPring-8) は、高電界 C バンドチョーク型加速管と真空封止アンジュレータによるコンパクト XFEL として建設され、実験ホールを含めた全長は約 700 m である^[1]。2011 年 3 月末に完成し、3 ヶ月のコミッショニングを経て、世界最短波長の 1.2 Å レーザー発振に成功した^[2]。高強度の安定 X 線レーザーとして供給すべく、調整運転が継続中で 2011 年度内に供用運転を開始する予定である。

SACLA において X 線レーザーを発振させるには規格化スライスエミッタンス $1\pi\text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 、ピーク電流 3 kA 以上、時間にして約 30 fs 長のレーザー発振部を持つ電子バンチの生成が不可欠である。この極短バンチは、複数段のサブハーモニック加速空洞を用いた断熱的速度変調による電子集群と 3 段の磁気バンチコンプレッサーによって形成される^[3]。このバンチ構造を知り、適正にバンチ圧縮を調整する事は、安定なレーザー発振に必要不可欠である。我々は fs オーダーのバンチ時間構造を解析するた

め、横方向に加速電磁場を発生させる加速管 (RF デフレクター) を用いた診断システムを開発した。

このシステムは、ビームエネルギーが 1.4 GeV となる、3 段目バンチコンプレッサー後方にある約 15 m のドリフト領域に設置された。このスペースに測定システムを構築するには 40 MV を超える横方向偏向電圧を必要としたため、高電磁界 C バンド RF デフレクターを設計した^[4]。この加速管はディスクロード型円筒導波管で、TM11 と TE11 の混成双極モード (HEM11) 後進波の電磁場によりビームを横方向へキックする。各ディスク中央には、この加速管を特徴付けるレーストラック型アイリスが設けられている。レーストラック型アイリスは強いセル間結合をもたらすと共に、軸対称性を破る形状であるため、HEM11 モードの縮退を解き、モードの偏向面を固定させて安定共振に寄与する。本論文では RF デフレクターへ課された要求性能と、その解決手段として開発した C バンド加速管の詳細、及び実際のビーム調整で実現された診断性能について述べる。

ego@spring8.or.jp

2. Cバンド デフレクター “RAIDEN”

電子バンチが RF デフレクター内を通過する際、横方向偏向電磁場のゼロクロス位相近傍にバンチの重心を乗せると、重心からの距離にほぼ比例した力を受け、バンチ前方部とバンチ後方部は逆方向へキックされる。横方向運動量を得たバンチは RF デフレクターを抜けてドリフトするにつれて横方向へ伸張して行き、RF デフレクター下流に設置したプロファイルモニター上にビーム進行方向（時間方向）のバンチ構造が射影される（図1）。モニター上の射影バンチ長 l 、重心位置変化 Δy と偏向電圧（電場と磁場キックの換算値との和） V_T の関係は次式で与えられる。

$$l \approx \frac{eV_T L_d}{cp_z} k_a \sigma_z \cdot \cos \varphi_a \quad (1)$$

$$\Delta y \approx \frac{eV_T L_d}{cp_z} \sin \varphi_a \quad (2)$$

ここで、 L_d はデフレクターとモニター間のドリフト距離、 k_a はデフレクターの波数、 φ_a はゼロクロスからの位相ずれ、 σ_z はバンチ長、 p_z はバンチの進行方向運動量を表す。SACLA での設置を考慮してデフレクターの収納に 5 m 程度、バンチのドリフト長を 5 m とし、バンチ進行方向の時間長 200 fs を射影長 1 mm 以上に伸張して、10 μm 以下の空間分解能を持つプロファイルモニターを用いれば、数 fs の分解能でバンチの時間構造を診断できるようになる。

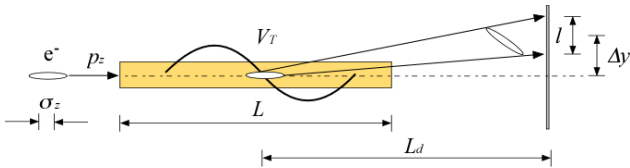


図1：バンチ時間構造診断システム

Sバンド LOLA^[5,6]は FEL 用 RF デフレクターとして実用化されている加速管である。文献[5]より LOLA の偏向電圧は次式で与えられる。

$$V_T \approx 1.6 [MV/m / MW^{1/2}] L \sqrt{P_0} \quad (3)$$

ここで、 L は LOLA 加速管長、 P_0 は入力パワーを表す。収納スペースや必要 RF パワーを考慮すると SACLA では LOLA より高い電磁場を発生させる RF デフレクターが必要である。一般に Cバンド加速管は Sバンド加速管に比べ、伸張率を上げることができるため、Cバンド (5712 MHz) を利用したコンパクト高電磁界デフレクターの開発を行った。この加速管において横方向電圧を 40 MV 以上生成できれば、必要条件を満足する。また、Cバンド大電力システムが SACLA で開発されており、安定に動作

する 50 MW クライストロン、電源、導波管が、RF デフレクターにも活用可能である^[7]。一方、Sバンドに比べて Cバンド加速管のセル結合アイリス（ビーム孔）は小さくなってしまいが、時間構造診断においてはバンチの重心移動を必要としないため、Cバンド化に伴うアイリスの縮小は致命的な欠陥にならない。図2に今回開発した Cバンドデフレクターの構造図を表す。この RF デフレクターはディスクロード型円筒導波管で、レーストラック形状のアイリスを持つのが特徴である。アイリス断面形状は、半径 R_a の2つの半円と2本の水平方向直線部 L_a から構成される。我々は、この加速管構造 “racetrack-shaped iris-coupling deflection structure” を省略して RAIDEN と呼んでいる。

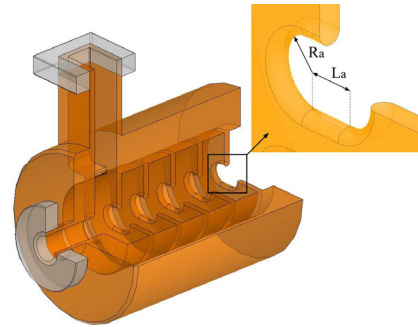


図2：Cバンド デフレクター (RAIDEN)

RAIDEN では、垂直方向に偏向させた HEM11モード後進波を励起し、通過するバンチを垂直方向に伸張する。完全軸対称構造体では、HEM11モードは二次の縮退モードである。この縮退を解いて偏向面の回転を防ぐために、前記の LOLA はビーム軸から外れた位置に2つの小さなサプレッサー孔を設けているが、Cバンドデフレクターにおいて複数のサプレッサー孔を設けるのは、製造が困難になると我々は判断した。RAIDEN では軸対称性を破るレーストラック型アイリスの採用で、この問題を解決した。このアイリスにより互いに直交する偏向面を持つ2つの HEM11モードが現れる。 L_a が水平方向になるように設置すると垂直方向の偏向面を持つモード (yモード) は強いセル間結合を持ち、水平方向の偏向面を持つモード (xモード) は弱いセル間結合を持つ。よって yモードのみ、広いパスバンドを持ち、xモードとのパスバンドの重なり (混合) を小さくすることができる。図3にシミュレーションコード MAFIA を用いて計算した $R_a = 6 \text{ mm}$ 、 $L_a = 8 \text{ mm}$ の x、y 両モードのパスバンドを示す。この場合、大きなセル間移相を持つ yモードは xモードのパスバンドから外れ、高い群速度を持つようになる。よってこれらの yモードは xモードと混合することなく、安定に励起することができる。今回、光速比で約 2.1%の群速度を持つ $5\pi/6$ -yモードを採用し、5712 MHz で共振するように設計した。この場合、

セル長（ディスク間隔）を 21.869 mm と長くできるため、 $2\pi/3$ モード等での製作に比べてセル数、接合点数を減じて製造コストの削減が可能となった。また、開発期間の短縮や製造工程の簡素化を考慮して、定インピーダンス型 RAIDEN とした。

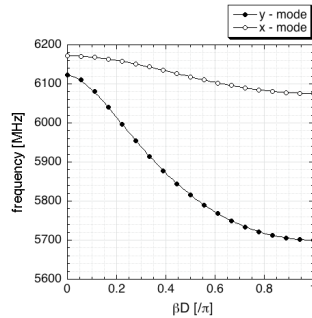


図 3 : HEM11 モードの分散

図 4 に HEM11 $5\pi/6$ -y モードの電力規格化偏向電圧と群速度の MAFIA シミュレーション結果を示す。La を 1 mm に固定して Ra を変化した場合と、Ra を 6 mm に固定して La を変化した場合を比較すると Ra を大きくしてセル間結合を高めて群速度を上げるよりも、アイリスを適切な長さで扁平化の方が、速い群速度を持つ。また、レーストラック型アイリスはビーム偏向方向に幅が狭いため、電場を集中させ、より高い加速勾配を生成することができる。これは加速空洞にノーズコーンを設けることと類似している。要求電圧、電力消費量、真空のコンダクタンス等を考慮して Ra = 6 mm、La = 8 mm のアイリス形状を採用した。この時のシミュレーション性能を表 1、電磁場分布を図 5 に示す。シミュレーションの結果、RAIDEN の偏向電圧は次式のようになる。

$$V_T \approx 4.3 [MV/m / MW^{1/2}] L \sqrt{P_0} \quad (4)$$

ここで、L は RAIDEN の長さを表す。RAIDEN の管長は、SACLA の C バンド主加速管^[1]とほぼ同じ、1.8 m とした。その結果、2 本の RAIDEN に 16 MW の RF パワーを投入すると、40 MV を超える偏向電圧を発生することができる。これは SACLA におけ

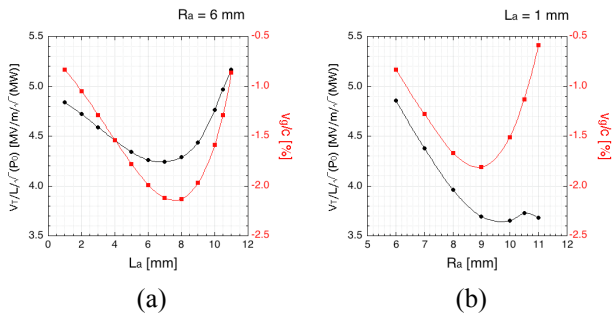


図 4 : 電圧と群速度のアイリス形状依存性

る必要性能を十分満足する。また、C バンドクライストロンは 50 MW の出力があるため、2 本の RAIDEN を駆動するのに十分な能力を持つ。

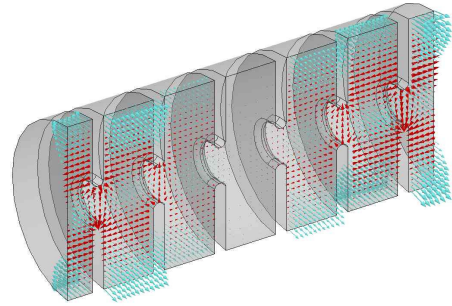


図 5 : HEM11 $5\pi/6$ -y モード電磁場分布 (赤 : 電場、青 : 磁場)

表 1 : RF デフレクター設計性能

必要横方向偏向電圧	V_T	> 40	MV
運転位相	φ_a	0 or 180	度
パンチ長	σ_z	< 200	fs
解析ビームのエネルギー	cp_z	1.4	GeV
共振周波数	f_a	5712	MHz
セル間遷移位相(セル移相)	βD	$5\pi/6$	rad
群速度 (光速比)	v_g/c	-2.13	%
加速管充填時間	T_f	0.27	μ s
無負荷 Q	Q_a	11200	
シャントインピーダンス	r_T	27.7	M Ω /m
加速管タイプ	定インピーダンス型		
共振モード	HEM11		
セル数	77+2 カップラーセル		
加速実効長 (加速管長)	L	1706 (1807)	m
加速管台数	2		台

3. 製作

RAIDEN はクラス 1 無酸素銅製で、77 個の加速セル群と 2 個のカップラーセルで構成される。ディスクとシリンダーが一体となったカップをスタックして加速セル群を形成しており、ディスクの中心にレーストラック型アイリスを設けている。チューニング用ディンプルング穴をシリンダー部中央の上下、計 2ヶ所に設けた。アイリス部以外のディスク平坦部とシリンダー内径部は超精密旋盤による 0.1S 鏡面加工で仕上げた。アイリスは、ラジラスエンドミ

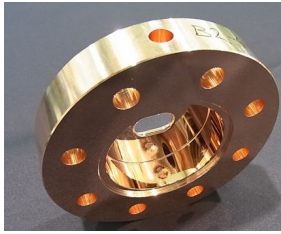


図6：ディンプリング試行のテストセル

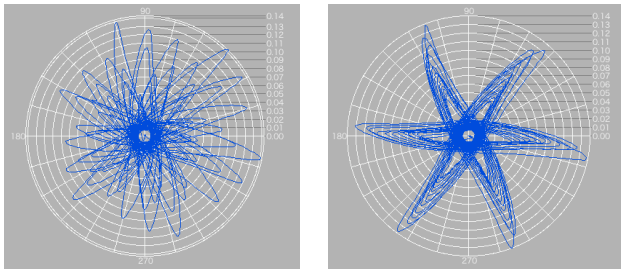
ルを用いたフライスで 1.6S 加工した後、電解研磨にて表面粗さが 0.5 μm (rms) 以下となる鏡面仕上げを行った。加速セル群とカップラーセルを真空ろう付け接合にて一体化し、1号機と2号機の2本の加速管を製作した。

レーストラック型アイリスのエッジ加工誤差による周波数への影響が大きく数 MHz に及んだため、ろう付け後にディンプリングによるセルチューニングを行った。図6にディンプリング試行後のテストセルの写真を示す。HEM11 モードは隣接セル間の結合が大きく、また、アイリス部に電場が集中することから(図5参照)、金属ロッドの挿入によるデチューニングが困難で、ノードルシフト法では精密調整ができなかった。そこで、T. Khabioulline^[8-10]等が開発したビーズ法を用いてチューニングを行った。この方法は、ビーズ測定結果で算出した各セルの反射波成分からセルの散乱係数を求め、チューニングに必要な S₁₁ パラメータ変化量に換算するものである。次式に散乱係数と S₁₁ との関係を表す。

$$\frac{|\Delta S_{11}|}{|S_{11}^*|} = \frac{\Re[jS_n e^{j\theta}]C_n}{a_2} \quad (5)$$

ここで、ΔS₁₁ は n 番目セルからの反射による S₁₁ 変化量、S₁₁^{*} はカップラーセルをデチューンしたときの S₁₁、a₂ は 2 番セルの加速波振幅、S_n は n 番目セルの散乱係数、C_n はパワー投入口からセルまでの減衰量を表す。

各セルは接合前に周波数が低くなるように加工しておき、ネットワークアナライザにて、S₁₁ を測定しながら、この変化量を達成するようにセル押し込みディンプリングを行った。累積移相誤差 5° 以下、



(a)チューニング前

(b)チューニング後

図7：2号機のビーズ測定データ

VSWR 1.1 以下をチューニング目標とした。その結果を表2に、チューニング前後のビーズ測定結果を図7に示す。チューニングによってセル移相が揃ったことがわかる。ディンプリングによる Q 値の低下は約 12%であった。2号機はチューニング手法、調整プログラムを確立させてチューニングできたため、目標性能を満足した。1号機はプログラム開発と同時進行であったため、目標より若干劣るが運転には問題ないレベルである。実測の RF 特性から得られる偏向電圧 V_r は設計値 (3) 式の 93% となった。製作の詳細は文献[11]を参照されたい。

表2：RAIDEN 実機の RF 特性

	1号機	2号機
共振周波数 (28°C、真空換算)	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°	±2.8°
VSWR	1.12	1.09
減衰パラメータ	0.548	0.539
群速度 (光速比)	-2.14%	-2.14%

製作完了した 2 本の RAIDEN を理化学研究所播磨研究所内のテストベンチに設置し、大電力 RF 試験を行った。約 40 時間のエージング試験の後、放電等のトラブルを起こすことなく、2 本の RAIDEN に対して 50 MW、60 pps、1 μs の定格運転に成功した。この試験完了後、2010 年 12 月に SACLA 収納部へ移設し、大電力連続運転を開始した。図8に収納部内に設置した RAIDEN を示す。後進波管であるため、RF パワーはビーム下流側カップラーから上流側へ投入する。大電力試験、及び、エージングの詳細を文献[12]に述べる。



図8：SACLA 収納部内の RAIDEN

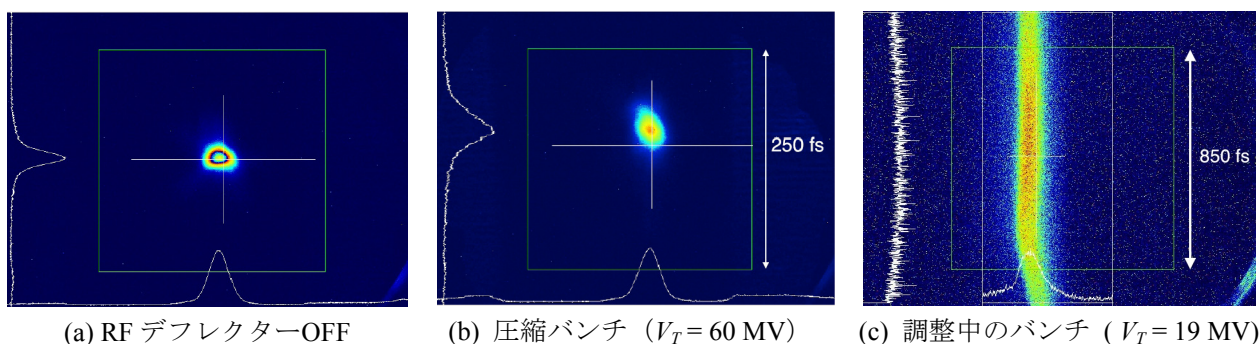


図9：RAIDEN 後方の Ce:YAG スクリーンで観測したビームプロファイル

4. 診断性能

SACLA のコミッショニングにて、バンチの時間構造診断を本 RF デフレクターシステムにて行った。デフレクターを通過したバンチを下流側 RAIDEN 端から約 10.6 m 後方に設置した Ce:YAG スクリーンモニター (空間分解能 約 3 μm)^[13,14]にて観測した。バンチは設計通りに垂直方向へ伸張され、その測定例を図9に示す。図9 (a) はデフレクター OFF 時のビーム像、(b) はレーザー発振のため 40 fs 程度に圧縮した像である。この時、 $V_T = 60$ MV でスクリーン上の射影長 1 mm あたりの換算バンチ時間は約 50 fs である。(c) はバンチ圧縮調整時の像で $V_T = 19$ MV に下げて測定したものである。

バンチ伸張の換算係数を確認するため、運転 RF 位相と重心位置の相関を測定した。(2) 式より運転 RF 位相 (ゼロクロス位相) 付近で位相を少し変化させると伸張バンチ形状に、ほとんど影響を与えることなく、スクリーン上のバンチ重心が移動する。図10に電圧 22 MV で測定した時の RF 位相変化に対する重心位置の移動量を示す。測定から得たバンチ伸張係数は、 $V_T = 60$ MV 換算で 53 ± 13 fs/mm となり、設計値とほぼ一致した。

診断時には位相換算で 0.14° 程度のジッターがあるため重心位置が上下に揺れるが、射影バンチ形状への影響は軽微で時間構造解析には問題とならない。

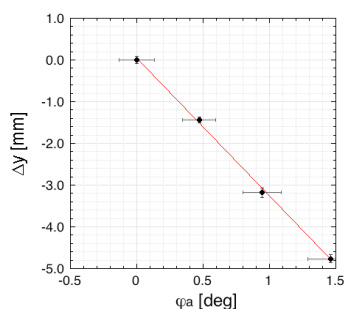


図10：バンチの重心移動と RF 位相の関係

5. まとめ

SACLA においてバンチの時間構造解析することを図り、横方向へのビーム偏向高電磁場を発生する

C バンドデフレクターRAIDEN を開発した。製作した 1.8 m デフレクターは要求性能を發揮し、セル間ディスクに設けたレーストラック型アイリスがもたらす偏向面の固定、光速比 2.1%の群速度等により HEM11 モードの安定共振が得られ、60 MV の高電圧運転ができた。これにより、バンチをスクリーン上に約 50 fs/mm の割合で射影することができ、fs オーダーでのバンチ時間構造解析が可能となった。

謝辞

RF デフレクターの開発にあたり、新竹 積博士、稲垣隆宏博士から C バンド加速システムに関する多大なるご協力とアドバイスをいただきました。高エネルギー加速器研究機構の紙谷琢哉博士には電解研磨加工に関する有益な情報と、ご助言を賜りました。心より感謝いたします。また、理化学研究所 XFEL 研究開発部門の皆様から多くのご支援をいただき、時間構造診断システムを構築することができました。深く感謝いたします。

参考文献

- [1] H. Tanaka, "Operation Status of X-ray FEL facility SACLA at SPring-8", PASJ2011, Tsukuba, August 2011.
- [2] H. Hara et al., "Beam commissioning of SACLA accelerator", PASJ2011, Tsukuba, August 2011.
- [3] T. Shintake, EPAC'08, Genoa, June 2006, p. 136.
- [4] H. Ego et al., EPAC'08, Genoa, June 2006, p. 1098.
- [5] R. Akre et al., PAC'01, Chicago, June 2001, p. 2353.
- [6] R. Akre et al., EPAC'02, Paris, June 2002, p. 1882.
- [7] T. Shirasawa et al., PAC'07, Albuquerque, June 2007, p. 2095.
- [8] T. Khabiboulline et al., Internal Report DESY M-95-02, 1995.
- [9] T. Khabiboulline et al., PAC'95, Dallas, May 1995, p. 1666.
- [10] K. Watanabe, et al., GLCX-012, January 2005.
- [11] T. Hashirano et al., "Manufacturing of a C-band RF Deflector for XFEL/SPring-8 "SACLA" ", PASJ2011, Tsukuba, August 2011.
- [12] T. Sakurai et al., "High Power Conditioning of C-band RF Deflecting Structure for XFEL/SPring-8 "SACLA" ", PASJ2011, Tsukuba, August 2011.
- [13] K. Yanagida et al., PASJ2009, Tokai, August 2009, p. 448.
- [14] H. Maesaka et al., "Commissioning and Performance of the Beam Monitor System for XFEL/SPring-8 "SACLA" ", PASJ2011, Tsukuba, August 2011.