

ENERGY DISPERSION CORRECTION OF ELECTRO-MAGNETS CHICANE

Yutaka Kano ^{#,A)}, Toru Hara ^{B)}, Kenji Fukami ^{C)}, Hideki Takebe ^{B)}, Yasuyuki Tajiri ^{A)}, Taichi Hasegawa ^{A)},
Takuya Morinaga ^{A)}, Shinichiro Tanaka ^{A)}, Ryo Yamamoto ^{A)}, Kazuaki Togawa ^{B)}, Hitoshi Tanaka ^{B)}

^{A)}SPRING-8 Service Co., Ltd. (SES)

1-20-5 Kouto, Shingu-cho, Tatuno-shi, Hyogo, 679-5165

^{B)}RIKEN SPRING-8 Center/XFEL

1-1-1 Koto, Sayo-cho, Sayo, Hyogo, 679-5198

^{C)}Japan Synchrotron Radiation Research Institute

1-1-1 Koto, Sayo-cho, Sayo, Hyogo, 679-5148

Abstract

The XFEL facility of SPRING-8 is named SACLA (SPRING-8 Angstrom Compact free-electron LASer). The beam operation of the SACLA accelerator was started at the end of February 2011. After four months of beam tuning, 1.2Å X-ray laser was successfully obtained. In the SACLA accelerator, a 1 ns electron bunch produced by the electron gun is compressed to less than 100 fs by using velocity bunching and three bunch compressors in order to obtain a 3 kA peak current at the end of the 8 GeV linac. When the bending magnets of magnetic chicanes have multi-pole field components, energy-dispersion function leaks from the chicane and degrades beam emittance downstream of the bunch compressor. In each bunch compressor of SACLA, two quadrupole magnets are installed at the chicane center to control the dispersion function. In this paper, measured dispersion function and its control by quadrupole magnets are reported.

電磁石シケインのエネルギー分散関数補正

1. はじめに

SPRING-8のX線自由電子レーザー施設は、SACLA (SPRING-8 Angstrom free-electron LASer) と命名され、2010年10月より加速管の高周波エージング、2011年2月からビームコミッションを開始した。3月末には8 GeV電子ビームからの0.8 Åアンジュレタ自発放射光の観測に成功し、6月7日に1.24 Åの波長でX線レーザーの発振に成功した^[1]。

SACLAの直線加速器では、熱カソード電子銃で生成した電子ビームを、低エネルギー入射部のvelocity bunching、および3段の磁気シケイン型バンチ圧縮器(BC1-3)を用いてバンチ長を百フェムト秒以下に圧縮する。BCでのバンチ圧縮は、エネルギーチャープを付けた電子バンチを、偏向電磁石4台で構成するシケインに通し、その行路長のエネルギー依存性を用いて圧縮する。またSACLA加速器には、BCとは別に、高電界加速管で発生した暗電流除去を目的とするシケインが2カ所ある。図1にSACLA加速器の概要を示す。

シケインを構成する偏向電磁石のヨーク形状は長方形型であり、水平方向エネルギー分散関数は理想的にはシケイン内で閉じ、シケイン下流への漏れ出しはない。しかし、電磁石の端部磁場や、シケイン入射軌道に誤差があるとエネルギー分散関数が下流に漏れ、電子ビームエミッタンスの増大につながるため、その補正は重要である。エネルギー分散関

数による実効的なエミッタンスの悪化は、(1)式で評価することができる^[2]。

$$\varepsilon \approx \varepsilon_0 \left\{ 1 + \frac{1}{\varepsilon_0} (\beta \eta_1'^2 + 2\alpha \eta_1 \eta_1' + \gamma \eta_1^2) \sigma_E^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

α 、 β 、 γ はtwiss parameter、 σ_E はエネルギーस्पレッド、 ε_0 がエミッタンスで、 ε が分散関数とその傾き(η と η')により実効的に悪化したエミッタンスである。

シケインの偏向電磁石4台は1台の電源で直列に励磁されるが、4台の磁場個体差を補正するための独立したトリム電源が各電磁石に接続されており、これらを用いてシケインへの入射ビーム軌道が直線になるよう調整する^[3]。エネルギー分散関数の補正のみであれば、4台の偏向電磁石磁場を独立に調整することにより、エネルギー分散関数をシケイン出口でゼロにすることは可能である。しかしこの場合、入射軌道が直線になるとは限らない。SCSS試験加速器シケインでは、機器の配置スペースの制限からC型偏向電磁石を採用したが、ビーム軌道上の四極磁場成分が大きく、エネルギー分散関数とビーム軌道の補正を同時に行うことができなかった。この経験を踏まえSACLA加速器では、左右対称なH型ヨークを採用し、更に端部六極磁場成分をシムで補正することにより、ビーム軌道上の四極磁場成分が極力小さくなるようにしている^[2]。

エネルギー分散関数の漏れは、特にビームエネルギーが低く、エネルギーチャープが大きいBCシケインで問題となる。本稿では、SACLAビームコミッ

#kano@spring8.or.jp

ショニング時に行ったBCシケインにおけるエネルギー分散関数の測定、および分散関数補正用四極電磁石について報告する。

2. エネルギー分散関数の測定と補正用四極電磁石

SACLA加速器では、各BCシケインの中央に2台エネルギー分散関数補正用四極電磁石を配置している(図2中Q-BC1-3とQ-BC1-4)。これらの四極電磁石は、通常のビーム収束系に用いる四極電磁石よりも弱く、分散関数の補正のみに用いる。2台の四極電磁石位置を基準エネルギーのビーム軌道の上に置くことにより、基準となるビーム軌道を動かすことなくエネルギー分散関数およびその傾きを制御することができる。

シケイン上下流に設置された BPM と四極電磁石は、あらかじめワイヤー等を用いて、50 μ m 程度の精度で直線上にアライメントされている。シケイン上流の水平ビーム入射軌道はステアリングで、出射軌道は偏向電磁石のトリム電源を用いて上下流のBPMと四極電磁石中心を通るよう調整すれば、シケインへの入出射軌道は1直線上にのり、理想的にはシケイン下流への分散関数の漏れはない。

2.1 BC1 シケイン

図2にBC1シケインの機器配置を、主なパラメータを表1に示す。表2はエネルギー分散補正用四極電磁石のパラメータである。

表1: BC1 シケインの主なパラメータ

偏向角	7.4503 deg
最大 dispersion	170 mm
磁極長	300 mm
有効長	336 mm
エネルギー	31 MeV
最大電流	20 A
最大磁場	0.0821 Tesla

表2: 分散関数補正用四極電磁石の主なパラメータ

磁極長	40mm
有効長	93mm
最大電流	3 A
最大磁場勾配	0.138T/m

BC1のビームエネルギーは31 MeVと低く、ビームサイズが大きいので、SACLA加速器で標準的に使用されているcavity type BPMは設置されていない。シケインへの入射軌道は、上流側にあるQ-BC1-1、Q-BC1-2の四極電磁石収束力を周期的に変化させ、BC1下流のスクリーンモニタ (SCM-BC1-4) でビームプロファイルの重心の動きを確認しながら四極電磁石中心を通るよう調整した。BC1シケイン中央のQ-BC1-3とQ-BC1-4についても同様に、B-BC1-1とB-BC1-2のトリム電源を用いて2台の四極電磁石中心にビームを通す。出射軌道は、下流側にあるQ-BC1-5、Q-BC1-6、Q-BC1-7、Q-BC1-8、Q-BC1-9の四極電磁石中心を通るよう、B-BC1-3およびB-BC1-4のトリム電源で位置と角度を調整する。

エネルギー分散関数の測定は、BC1上流にあるC-band補正空洞のRFをON/OFFすることでビームエネルギーを約15%変化させ、下流のスクリーンモニタ (SCM-BC1-4) でビーム軌道の差を測定する。このとき入射ビーム軌道は、2つのビームエネルギーで同じになるよう調整する。図3にBC1シケイン下流で測定した水平ビーム位置を示す。

赤と緑のプロットは、分散関数補正用四極電磁石Q-BC1-4の極性を変えて励磁したときの結果である。図3の結果から、補正用四極電磁石の励磁なしでほぼエネルギー分散関数が閉じていることがわかる。

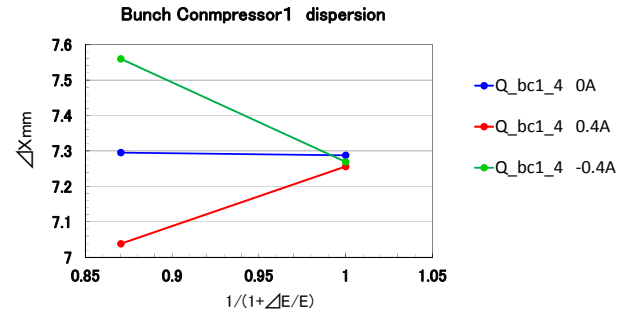


図3: ビームエネルギーを15%変化させた時のBC1シケイン下流の水平軌道変位

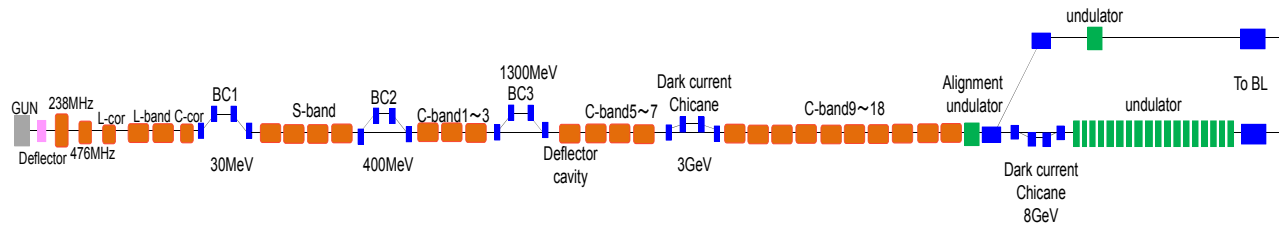


図1: SACLA 加速器の概要

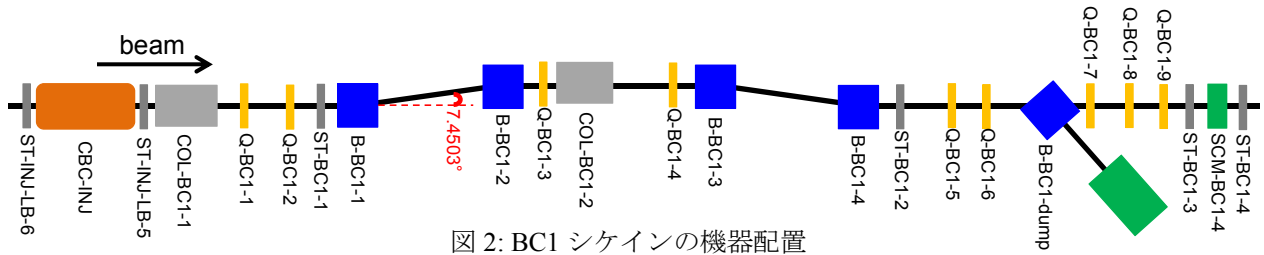


図 2: BC1 シケインの機器配置

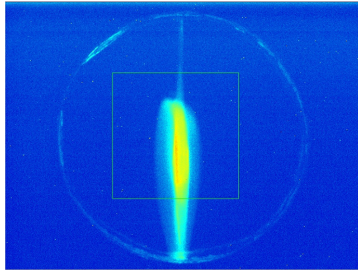


図 4: Q-BC1-4 非励磁時のビームプロファイル

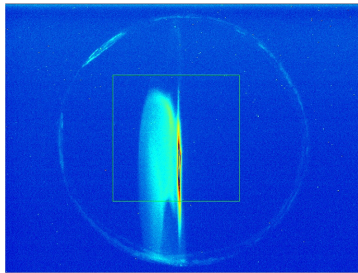


図 5: Q-BC1-4 +1A 励磁時のビームプロファイル

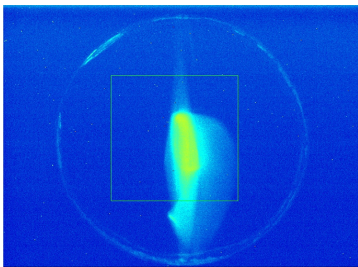


図 6: Q-BC1-4 -1A 励磁時のビームプロファイル

図 4 から 6 は、約 18% のエネルギーチャープがついた電子ビームに対し、分散関数補正用四極電磁石 Q-BC1-4 を非励磁、+1 A および -1 A 励磁したときのビームプロファイルの様子である。Q-BC1-4 を励磁するとエネルギー分散関数がシケインから漏れ、ビームプロファイルが左右に広がってエミッタンスを悪化させていることがわかる。

2.2 BC2 シケイン

BC2 シケインの主なパラメータを表 3 に示す。

エネルギー分散関数の測定は BC1 と同様に行い、スクリーンの代わりに上下流各 2 台の BPM を用いてビーム軌道位置と角度を測定した。ビームエネルギーは、上流の S-band 加速管の位相を -18deg から ±2

deg および ±4 deg 変え、エネルギーを約 ±3 % の範囲で変化させた。

表 3 : BC2 シケインの主なパラメータ

偏向角	3.1345 deg
最大 dispersion	345 mm
磁極長	400 mm
有効長	439 mm
エネルギー	428 MeV
最大電流	20 A
最大磁場	0.2016 Tesla

図 7 に BC2 下流の BPM で測定した、ビームエネルギー変化に対する水平軌道の変位を示す。図 7 の各プロットは、分散関数補正用四極電磁石の電流を変化させた時の軌道変位で、BC1 と同様に非励磁でエネルギー分散関数がほぼ 0 になっていることがわかる。

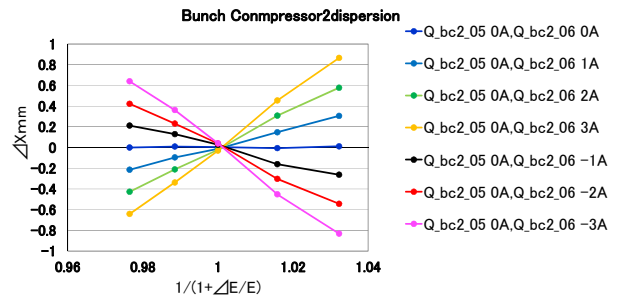


図 7: ビームエネルギー変化に対する BC2 下流の水平軌道変位

2.3 BC3 シケイン

表 4 に BC3 シケインの主なパラメータを、図 8 にエネルギー分散関数の測定結果を示す。ビームエネルギーの変更は、上流にある C-band 加速管の位相を -48deg から ±3 deg 変化させた。

表 4 : BC3 シケインの主なパラメータ

偏向角	1.4094deg
最大 dispersion	155mm
磁極長	400mm
有効長	443mm

エネルギー	1.32GeV
最大電流	20A
最大磁場	0.1560 Tesla

図 8 の結果では、非線形性が見られるが、コヒーレント遷移放射によりビーム重心位置がずれる等の原因があるのかもしれない。

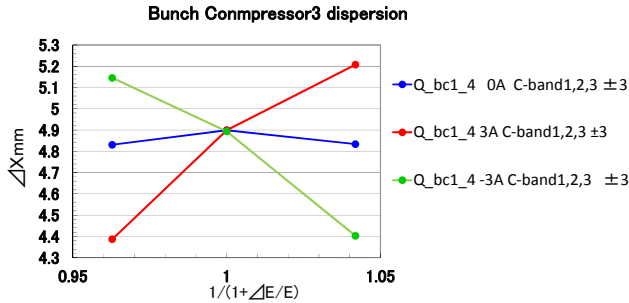


図 11. ビームエネルギー変化に対する BC3 下流の水平軌道変位

3. まとめ

今回ビームコミッショニング時に行った測定では、SACLA 加速器の BC 部シケイン偏向電磁石のビーム軌道上四極磁場は小さく、式 (1) で見積もられるエミッタンス悪化もほぼ無視できることが確認された。エネルギー分散関数補正用四極電磁石は、分散関数の補正には現状必要ないものの、想定した機能を果たすことが確認できた。この補正用四極電磁石を用いて、コヒーレント遷移放射や加速管ウェークによるバンチ内 head-tail の傾きを補正することなども検討している。

参考文献

- [1] H.Tanaka, et al., “動き始めた X 線自由電子レーザー施設 SACLA の運転状況”, in these proceedings
- [2] Toru Hara, et al., “ESTIMATION OF EMITTANCE DEGRADATION DUE TO MULTI-POLE FIELDS OF XFEL BUNCH COMPRESSOR”, Proceedings of the 6th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tokai, Aug. 5, p.585 (2009).
- [3] Kenji Fukami, et al., “DESIGN OF ELECTRO-MAGNETS FOR XFEL/SPRING-8”, Proceedings of the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 32nd Linear Accelerator Meeting in Japan, Wako, Aug. 3, p.805 (2007).