

ENERGY FEEDBACK FOR SASE-FEL STABILIZATION IN SCSS TEST ACCELERATOR

Yasuyuki Tajiri^{1,A)}, Kazuaki Togawa^{B)}, Mitsuhiro Yamaga^{A)}, Hirokazu Maesaka^{B)}, Makina Yabashi^{B)},
Shinichiro Tanaka^{A)}, Taichi Hasegawa^{A)}, Takuya Morinaga^{A)}, Yutaka Kano^{A)}, Ryo Yamamoto^{A)},
Yuji Otake^{B)}, Hitoshi Tanaka^{B)}

^{A)} JASRI/SPring-8, 1-1-1 Kouto, Sayo, Hyogo, 679-5198, Japan

^{B)} RIKEN/SPring-8, 1-1-1 Kouto, Sayo, Hyogo, 671-5148, Japan

Abstract

In order to stabilize a performance of SASE (Self Amplified Spontaneous Emission) FEL (Free Electron Laser) at the SCSS test accelerator, we introduced an automatic correction of electron beam energy at the magnetic chicane. This is because the clear correlation between the laser intensity and the beam energy was found. We report on the outline of the energy correction feedback and the currently achieved results.

SCSS試験加速器におけるSASE-FEL安定化に向けたエネルギーフィードバック

1. はじめに

SPring-8では、X線自由電子レーザー(XFEL/SPring-8)施設の建設が進められている。2005年にSCSS試験加速器を建設し、翌年EUV領域(50~60nm)でレーザー増幅に成功した。その後ユーザー利用に向けて実験棟の建設、加速器の調整・安定化が行われ¹⁾、2007年9月にSASE-FELの飽和を達成、2007年10月から試験的ユーザー利用運転が、2008年5月からは課題募集による本格的ユーザー運転が開始されている²⁾。レーザーを用いた精密実験には、レーザー特性の長期に渡る安定性が重要である。しかし、ユーザー運転中に、レーザーの増幅状態を常時監視できるモニターは整備されていない。これまでに、レーザー強度変動は、電磁石シケイン部のエネルギー変動と相関する事が観察されている。レーザー特性の安定化並びに実機XFELでのビーム電流分布制御の試験を目的とし、ビームエネルギーの安定化を試みた。

2. バンチ圧縮システム

SASE-FELの性能には、ビームのエミッタンスとピーク電流が直接影響する。SCSS試験加速器では熱電子銃から生成した電子ビームをエミッタンスの増加を抑制しつつピーク電流をあげるため、速度変調バンチング、磁気バンチ圧縮の二種類の方法を用いて2段のバンチ圧縮を行っている。ディフレクターにより切り出された電子ビームは、238MHzサブハーモニックバンチャー(SHB)と476MHzブースター(BS)で構成されるバンチャーシステムに入射し、速度変調バンチングにより約100倍のバンチ圧縮を行う。引き続きS-band加速管で、バンチング位相で加速し、ビームにエネルギーチャープを与え、直後の電磁石シケインで約3倍バンチを圧縮し、ピーク電流を300Aまで引き上げる。バンチ圧縮の変動要因は電子

銃電圧、ディフレクタータイミング、RF系の変動である。これらの変動の影響を受けるのは、主にピーク電流(電流分布)であり、レーザー強度やスペクトル等のレーザー特性に影響を及ぼす。

3. ビーム電流分布の制御

本システムでは初段の圧縮に速度変調バンチングを用いているため、ビーム電流分布の変動要因は、多岐に渡り複雑である。速度変調バンチングでの変動は、下流S-band加速管への到達タイミングを変化させ、2段目のバンチ圧縮率の変動をも引き起こす。このように、バンチ圧縮後のビーム電流分布を維持するには、全圧縮過程においてビームのエネルギーとチャープを一定に保つ必要がある。この複雑な圧縮システムに対して以下の仮定を導入し、ビーム電流分布の制御を構築することを考える。仮定1: SHBとBSは、高精度の位相固定ループ(PLL)と振幅固定ループ(ALC)によりその位相と電圧が制御されておりドリフトは無視できる。仮定2: 速度変調バンチングのビーム電流分布変動の主要因は、熱容量が大きく運転中平衡状態に達しない電子銃の印加電圧ドリフトである。仮定3: S-band加速管直前から相対論領域に達すると見なし、2つのバンチング過程を分離する。これらの仮定から、次の2つのフィードバックループをカスケードに配置することでビーム電流分布を制御できる可能性がある。ループ1: 電磁石シケインの直前に空洞型BPMを設置し、RF基準信号に対するビームの到達時間変動を観測し、それを補正する電子銃電圧へのフィードバックループ。ループ2: 電磁石シケインでのビームエネルギーとピーク電流の情報から、ビームエネルギーとピーク電流の変動を補正するS-band加速管の位相と電圧へのフィードバックループ。

¹⁾ E-mail: y-tajiri@spring8.or.jp

4. ビーム電流分布制御の最初の試み

-電磁石シケインでのエネルギー安定化-

3章で述べたビーム電流分布制御に向け、現在ビーム診断系の開発と整備を進めている。一方で、現在既に、電磁石シケイン部でのエネルギー変動とレーザー強度変動の間には、図-1に示す明快な相関が観測されており、この対策が急務となっている。変動要因としてはビームの到達タイミング（電子銃の電圧変動）とS-band RF系の2つが想定される。現状使用できる補正の分解能、時間応答特性を考慮し、支配的な変動を簡便に補正するため、以下の2つの補正スキームの試験を実施した。ひとつ目は、ビームの到達タイミング制御には、設定分解能の低い電子銃電圧の代わりにSHBの位相を用いた補正ループを、ふたつ目は、S-band RF系の変動が引き起こすエネルギー変動制御としてS-bandの位相を用いた補正ループである。

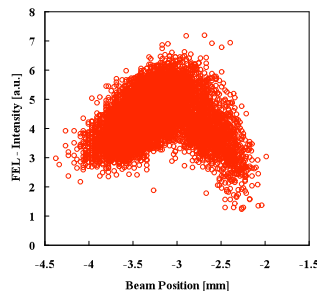


図1： シケイン部のポジションとレーザー強度の関

5. エネルギー安定化の主構成要素

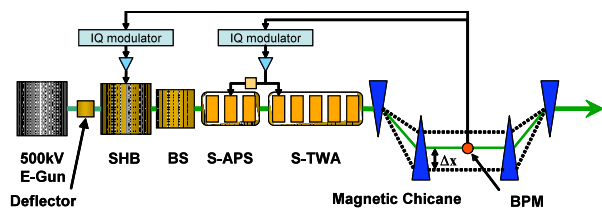


図2： エネルギー安定化のスキーム

5.1 使用するBPM

エネルギー安定化では、電磁石シケインに設置されている空洞型BPMを用いる。このBPMシステムは60Hzまでショット毎のビーム位置を高分解能で検出する能力を有する。現BPMシステムでは、0.2nCの加速電荷の場合で5 μ m以下の位置精度が得られている^[3]。

5.2 IQ変調器

RF位相はIQ変調器で制御を行う。IQ変調器はRFパルス信号の生成、および位相と振幅の変調に用いられる。SCSS試験加速器で使用されているIQ変調器のD/Aコンバータは14ビット精度であり、位相・振幅の分解能はそれぞれ0.01度、0.01%である^[4]。

5.3 同期データ収集システム

同期データ収集システムは、各機器で取ったデータ

にビームショットごとにタグをつけ共有メモリに保存し、そのデータを定期的(1Hz)に専用のデータベースに転送し保存を行うシステムである。ビーム全ショットと同期したデータを得ることができる。

5.4 補正で用いる各機器の感度係数

各補正機器に対応するBPMの線形応答は、線形オプティックスによるモデル計算ではなく、ビーム応答測定により得られる測定値を使用する。IQ変調器の設定値を x 、その時のBPMの変位を σ と表せば、線形感度係数 S を用いて、 $\sigma = Sx + b$ と記述でき、 N 個の設定値の異なるデータを最小二乗法でフィットすることにより感度係数は求められる。

5.5 エネルギー補正

補正は比例制御で行った。同期データ収集システム経由でビーム位置情報を取得し、最新の10ショットのデータの平均値として得られる位置情報と基準位置との偏差に係数を乗算し補正量を決定する。係数を実際の感度係数よりも低く設定し、早い繰り返し(1Hz)で補正を行うことで、補正に積算効果を持たせ、ノイズの影響を低減した。

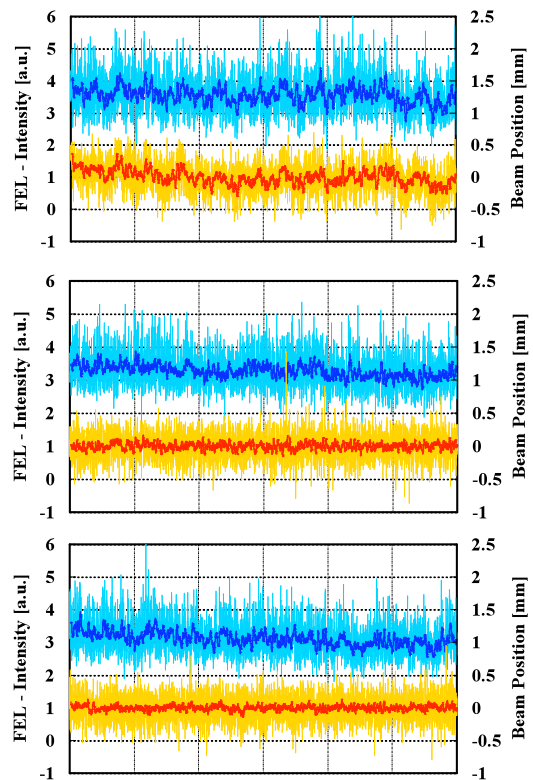


図3： ビームポジションとFEL強度の推移
上から補正OFF、SHB、S-band (3時間)
— : ビームポジション (— : 20点平均)
— : FEL強度 (— : 20点平均)

6. エネルギー安定化の効果

ビームポジションとレーザー強度の推移を図-3に示す。補正OFFではエネルギーの変動と同期し、レーザー強度も変動していることがわかる。SHBの位相で補正すると、レーザー強度の重心の変動は抑制され、補正を行わないのに比べ、標準偏差で約1%改善された(表-1)。一方、S-bandの位相で補正を行うと、エネルギーは一定に保たれているが、レーザー強度の変動はSHBの位相を用いた時と比べ、抑制されていない。図-4に運転開始時、終了時のスペクトルとその変化量を示す。補正OFFとSHBの位相で補正を行った際は形状等に大きな変化がないのに対し、S-bandの位相で補正を行った際は中心波長、スペクトル形状に大きな変化が観察された。このことから、電磁石シケイン部のエネルギー変動の主な要因は速度変調バンチングにおける変動により生じるビーム到達タイミング変動であると推定できた。また、SHBの位相を用いた補正も、短期間の重心の変動は抑制できたものの、細かな変動や長期のドリフトなどが抑制できていない。このことから、今後ビームの到達タイミングを測定する改造や、電子銃電圧への直接の帰還が可能ないように、設定分解能の向上や電圧モニター精度の改善等を進めていく必要がある。

電磁石シケイン部のビームエネルギー安定化を簡便な方法により実施した。この方法により、ある程度レーザー特性の変動は抑制され、ビーム電流分布の変動は、主に速度変調バンチングでの変動に依ることが明らかとなった。また、ビーム到達タイミングの変動を電子銃電圧やSHBの位相などで上流1段目のバンチ圧縮に帰還をかけ、エネルギーとピーク電流の微調整をS-bandのパラメータで行うカスケード補正でビーム電流分布を制御できる見通しを得た。今後この情報を基に、試験加速器のレーザー特性の安定化を進めると共に、今回の結果をより複雑なバンチ圧縮システムを有するXFEL安定化へ活かしていく。

参考文献

- [1] T. Shintake *et al.*, Phys. Rev. ST-AB **12** (2009) 070701
- [2] 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連続SASE飽和の達成 -”, 本研究会2008年口頭発表
- [3] 前坂比呂和、他. “SCSS試験加速器のビーム位置検出器および電荷検出器の性能”, 本研究会2006年発表
- [4] 前坂比呂和、他. “SCSS試験加速器のRFシステムの高精度化”, 本研究会2008年ポスター発表

7. まとめ

レーザー特性の安定化を行うための第一歩として、

表1: エネルギー安定化の性能

	電子ビームの変動 (σ) ^{※1}	レーザー強度の変動 (σ) ^{※1}		スペクトルの变化	
		全体	重心 ^{※2}	中心波長	FWHM
補正 OFF	0.216 mm	15.49 %	10.26 %	0.10 nm	0.05 nm
SHB	0.189 mm	14.84 %	9.25 %	0.19 nm	0.05 nm
S-band	0.183 mm	15.32 %	10.00 %	0.49 nm	0.40 nm

※ 1 : 3時間の変動

※ 2 : SASE特有の変動を11.6 %としたとき

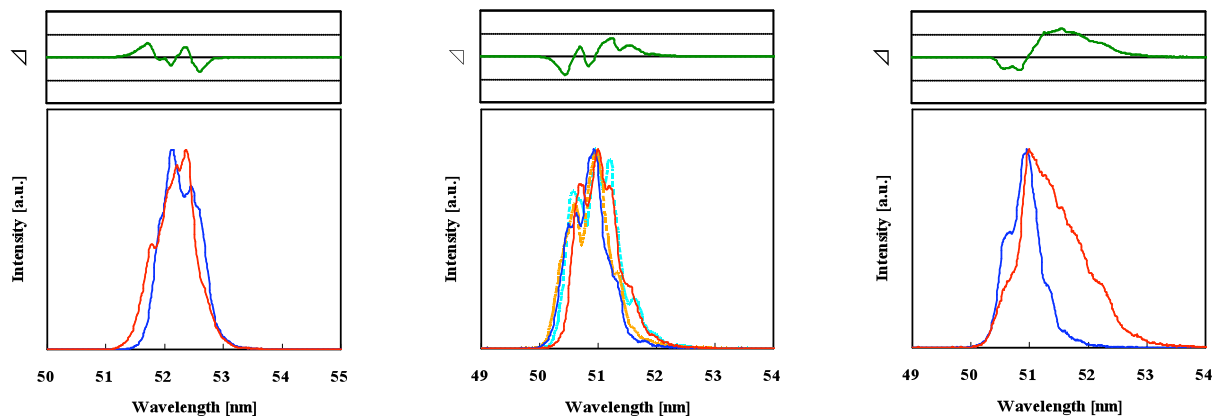


図4: 各補正を行った際のスペクトル変化とその差分

— : 運転開始時 — : 運転終了時 — : 開始時と終了時の差分
 左から、補正OFF、SHB、S-band (点線: 運転中1.5h毎の測定結果)