

OPERATION STATUS OF THE SCSS TEST ACCELERATOR - CONTINUOUS SATURATION OF SASE FEL AT THE WAVELENGTH RANGE FROM 50 to 60 nm -

Hitoshi Tanaka^{#, A)}, Yuji Otake^{A)}, Kazuaki Togawa^{A)}, Toru Hara^{A)}, Takashi Tanaka^{A)}, Makina Yabashi^{A)}, Takahiro Inagaki^{A)}, Shinobu Inoue^{A)}, Takashi Ohshima^{A)}, Tatsuyuki Sakurai^{A)}, Katsutoshi Shirasawa^{A)}, Atsushi Higashiya^{A)}, Toru Fukui^{A)}, Naoyasu Hosoda^{A)}, Hirokazu Maesaka^{A)}, Mitsuru Nagasono^{A)}, Mitsuhiro Yamaga^{A)}, Hideo Kitamura^{A)}, Tetsuya Ishikawa^{A)}, Noritaka Kumagai^{A)}, Tsumoru Shintake^{A)}, Takao Asaka^{B)}, Haruhiko Ohashi^{B)}, Toru Ohata^{B)}, Masaya Oka^{B)}, Sunao Takahashi^{B)}, Yasuyuki Tajiri^{B)}, Shinichiro Tanaka^{B)}, Teruaki Hasegawa^{B)}, Taichi Hasegawa^{B)}, Takemasa Masuda^{B)}, Tomohiro Matsushita^{B)}, Takuya Morinaga^{B)}, Masanobu Kitamura^{C)}

^{A)} RIKEN/SPring-8, 1-1-1, Kouto, Sayo, Hyogo, 679-5148

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

^{C)} NDS, Ninty BLD, 5-3-28, Nishikujo, Konohana, Osaka, 554-0012

Abstract

Continuous saturation of SASE lasing at the wavelengths ranging from 50 to 60 nm has been achieved in the SPring-8 compact SASE source (SCSS) test accelerator after machine improvements and fine beam tuning. A pulse-energy of $\sim 30 \mu\text{J}$ with a fluctuation of $\sim 10\%$ in STD is routinely obtained at 60 nm. This stable and intense EUV SASE has been offered to user experiments since October 2007. Analysis on the obtained lasing data with the measured electron beam density profile indicates that the normalized slice emittance at the lasing part is $\sim 0.7 \mu\text{mm}\cdot\text{mrad}$. This paper reports the machine improvements towards the continuous saturation, current lasing performance as well as the latest analysis result on the electron beam quality.

SCSS試験加速器の運転状況 - 50 ~ 60 nmのレーザー波長領域での定常的SASE飽和の達成 -

1. はじめに

SPring-8 Compact SASE Source (以降SCSSと表記) 試験加速器は、現在兵庫県のSPring-8キャンパス内に建設中のX-ray Free Electron Laser (XFEL) 施設 (以後、XFEL/SPring-8と表記) で用いられる加速器基本システムの性能検証を目的に2005年度に建設された。試験加速器のエネルギーは250 MeVで、実機の約32分の1、設計レーザー最短波長は50 nmである。試験加速器の構成を図1に示す。加速器システムは (a) CeB₆単結晶パルス熱電子銃を用いた低エミッタンス入射器、(b) S-band加速システムと4台の矩形偏向電磁石によるバンチ圧縮器、(c) C-band加速システム、(d) 真空封止アンジュレータ、(e) 光診断装置の5つから構成されている。2005年12月の完成後、レーザー増幅の観測には成功した (2006年6月) が目標であったレーザー出力が飽和に達する発振状態には至らなかった。2006年夏から、入射器RFシステムの安定化、それにより実現された安定なレーザー増幅を指標としたビーム調整によるマシンパラメータの最適設定、2台目のアンジュレータ磁石列の設計改善と交換を実施し、2007年9月、ついに目標であった極紫外波長域 (50~60 nm) でのレーザーパワーの飽和を達成した。また同時に、飽和が加速器立ち上げから立ち下げま

で長期間持続する極めて安定な定常的飽和状態をも実現した。2007年10月からは安定で強力な極紫外SASEを利用するユーザー実験も試験的にスタートし、2008年5月からは課題募集による本格的ユーザー利用も開始された。これにともない、ユーザー運転の円滑な実施に向けて、モニター系や加速器パラメータのドリフト自動補正ループの構築も進められつつある。本発表では、定常的SASE飽和を達成する

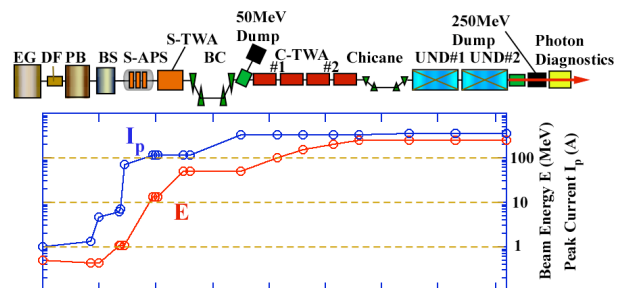


図1: SCSS 試験加速器の模式図 (上) と加速器各点でのピーク電流とビームエネルギー (下)。EG:500-keV電子銃; DF:ビームディフレクター; PB:238-MHzプレバンチャー; BS:476-MHzブースター; S-APS:S-band APS; S-TWA:S-band進行波管; BC:バンチ圧縮器; C-TWA:C-band進行波管 (2ユニット×2本); UND: アンジュレータ (2台)。

[#] E-mail: tanaka@spring8.or.jp

ための加速器の改良や調整の概要、達成されたレーザー特性とレーザー出力の波長依存性から評価された電子ビーム性能について報告する。

2. 加速器の改良とビーム調整の精密化

SASEレーザーの性能を最大化するには、電子ビームレーズング部の6次元位相空間を精密に制御する必要がある。通常のモニターはバンチ長に渡り積分した情報を与えるため、これらを用いての調整は困難である。最終目標であるレーザー出力飽和を達成するには、安定したレーザー出力をプローブとして、各チューニングパラメーターをビームレーズング部に対し最適化する以外、現実的アプローチはない。

2.1 入射器RF系の安定化^[1]

安定な増幅状態の実現には、レーズング部のピーク電流のショット毎の変動を十分小さく抑えることが重要である。SCSS試験加速器の場合、バンチ圧縮特性を支配する入射器RF系の安定性がレーザー増幅状態の安定性に直結する。速度変調バンチングを実施する低エネルギー領域では、定在波空洞が用いられ、それらのQ値は1万以上である。これは空洞の僅かな形状変化で容易にRF位相がシフトすることを意味し、0.01度の位相安定性を得るには、空洞の温度変動を1mK以下に抑える必要がある。この実現に向け、先ず熱平衡状態での使用を前提に空洞本体温度を直接制御する方式から、空洞入口冷却水温度を一定に制御する方式に切り替えた。さらに高周波ノイズをカットするローパスフィルターを組み合わせることでRF系の早い変動成分を大幅に抑制することに成功した。この改造の後でもゆっくりしたドリフトは残るため、各RF系に空洞内RF位相と振幅の測定値に基づく位相固定ループ(PLL)と振幅固定ループ(ALC)が構築された。12bitのDACに制限されていた設定分解能は、制御ソフトの位相・電圧設定アルゴリズムの改善や時間分解設定による実効的分解能の向上により大幅に改善された。入射器RF系の安定性は、最終的にRF位相で0.02度 STDに、振幅で0.03% STDに達し、これはXFEL/SPring-8で要求される水準をほぼ満たすものである。

2.2 2台目のアンジュレータ磁石列の交換

効率的な磁場調整を実現するため、2台目のアンジュレータの磁気回路は磁化方向を磁石面に対し45度傾けた特殊な永久磁石で構成^[2]されていた。しかし、製作してみると2台目のアンジュレータの磁場精度が許容範囲に収まらず、誤差磁場の多極成分、特にSkew4極成分が問題となった。この成分は、ギャップを狭めていくと下流スクリーン上で電子ビームが回転する程ビームに強く作用していた。このことから、増幅利得が予想を約1桁下回る主原因は2台目のアンジュレータの誤差磁場であると予想された。永久磁石ブロックの磁場精度を高めるため、磁気回路をハイブリッド型とした周期長が15 mm、300周期の磁石列を新たに製作し、2007年9月に交換した。この経験

からXFEL/SPring-8の磁気回路をハイブリッド型に、周期長も15 → 18 mmに変更する事となった。

2.3 アンジュレータ内の軌道精密設定

アンジュレータの垂直収束力や誤差磁場の影響は250 MeVの電子ビームにとっては大きい上、アンジュレータギャップの関数になっているので、ビームエネルギーやSASEの波長に応じて最適な軌道を見いだし、マッチング条件をも調整する必要がある。本来であれば各アンジュレータに対し、入射軌道のマッピング、エンベロープのマッピング(2.4を参照)、2台目のアンジュレータの光の位相整合と相対レベル調整を増幅率が最大になるよう使用ギャップ毎に実施することになる。この調整は時間を要することから、安定なレーザー増幅状態が実現して初めて、効率的に行えるようになった。この中で、光の位相整合は現在実施していない。理由は、アンジュレータ1台当たりの増幅率が十分大きく、測定ノイズ環境下では、2台目のアンジュレータ間に設置された位相器の位相とレーザー増幅強度の間に有意な相関を見いだすことができないからである。

2.4 エンベロープマッピング

レーザー増幅に寄与する部分のエンベロープが2台目のアンジュレータ内で設計通りに振動するよう電子ビーム収束系を調整してマッチングを取る必要がある。この調整はレーザー増幅状態が安定して初めて可能になった。ビーム収束系の微調整は、初期条件の正確な評価が難しく計算できない。そのため軸対称電磁石レンズと4極電磁石の全てを微調整し、増幅率に対する感度を先ず調べた。次に、感度の高い一連の電磁石を繰り返し微調し、増幅率を徐々に上げていった。調整を積み重ねるうちに位相条件の合致した電磁石が識別でき、現在では電磁石レンズと4極電磁石併せて計4台程をエンベロープ整合用ノブとして使用している。これにより、アンジュレータの運転条件に合わせて迅速にエンベロープの整合が可能になった。エンベロープマッピングによるレーザー出力の増大は数倍から5倍程度もあり、無視できない大きさである。

3. 定常的SASE飽和時のレーザー特性

前章で述べた様々な改良の結果、SASEレーザーの定常的飽和がレーザー波長50~60 nmの範囲で再現性良く達成されるようになった。SASEの飽和はレーザー出力のK値(ギャップ)依存性を測定して確認した^[3]。K値をほぼゼロ(ギャップ全開)から1.5(ギャップ最小: 3mm)まで変えていくと、FELパラメータがK値に依存して変わり、図2(左)に示す様にレーザー出力の指数関数的増加が飽和する明らかな遷移が確認できた。また、飽和に達すると図2(右)に示す様に出力変動は~10%にまで減少し、安定化する。この飽和は、調整を一旦完了すると加速器の運転停止まで持続する。定常的飽和時のレーザー特性と1時間に渡るレーザー出力変動(波長50 nm, 10Hz)の様子

を各々表1と図3に示す。

ユーザー運転では、電子銃インバータ電源の充電電圧安定化回路の不安定性から、繰り返しは20Hzに制限されている。通常、朝9時からRF機器のウォームアップとビーム調整を実施し、10時前後には実験が開始され、終了は夜の7時である。各RF系のPLLとALCの他に、アンジュレータ内の軌道^[4]とディフレクターのタイミング^[5]のフィードバックが用いられている。電子銃の充電電圧は運転中ドリフトし続けるが、電圧モニターの分解能が現状十分ではなく、非破壊型強度検出器でモニターされるレーザー出力を一定に保つよう手動でゆっくりとした帰還をかけている。

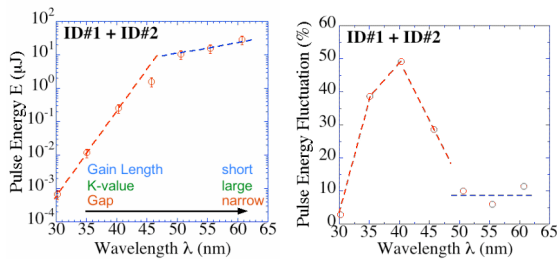


図2 レーザーパルスエネルギー（左図）とパルスエネルギー変動（右図）のK値依存性。

表 1 連続飽和時のSASEの特性。

SASEの特性	達成値
レーザー波長	50~60 nm
繰り返し	≦20Hz(設計値60Hz)
パルスエネルギー	~30 μJ @60 nm
パルスエネルギー変動(STD)	~10 %
レーザースポットサイズ(FWHM) [§]	~3 mm
位置安定性 [§]	ビーム径の~5 %
平均スペクトル幅(FWHM)	0.6 %

[§]発光点から~10m下流

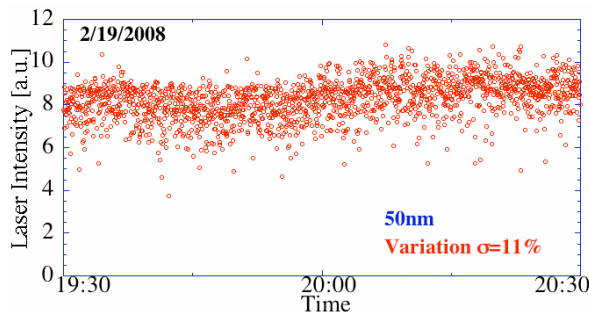


図3 SASEレーザー出力の1時間に渡る変動。

4. スライスエミッタンスの評価

SASEレーザー出力のK値依存性からレージング部のスライスエミッタンスを評価するには、電子ビームの時間方向へ射影した密度分布（ピーク電流分布）が必要である。そこでRFゼロ位相法を用いてピーク電流分布の測定を行った^[6]。測定に必要な線形エネ

ギーチャープは2番目のC-band加速ユニットで与え、下流のシケイン中央で時間方向のピーク電流分布を水平方向に引きのばし測定を行った。測定結果を図4(左)に示す。ピーク電流は約280 Aである。この実測電流分布を用い、3次元FELシミュレータSIMPLEX^[7]でスライスエミッタンスを評価した。この際、パラメータとして平均スライスエミッタンスのみが用いられた。図4(右)に示すように、スライスエミッタンス0.7 πmm·mradで測定結果をほぼ再現できることが分かった。電子銃から出た電子ビームの初期エミッタンス0.6 πmm·mrad^[8]は、1/300に圧縮した後も殆ど劣化していないのである。また、この結果は2006年7月に2台のアンジュレータを用いて得られたレーザー増幅強度の加速電荷依存性のデータ^[9]とも矛盾しない。1次元FELモデルから、レージング部分のピーク電流とスライスエミッタンスの比として480 A/πmm·mradが得られた。ピーク電流値280 Aを用いればスライスエミッタンスは0.6 πmm·mrad となり、今回の解析結果と良い一致を示すことが分かる。

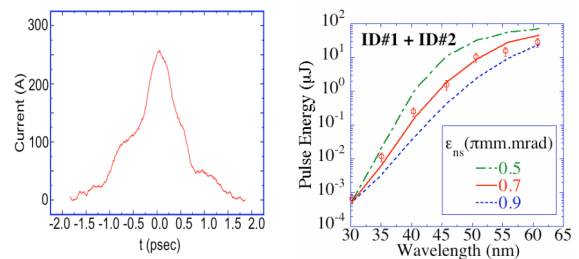


図4 バunch圧縮後のピーク電流分布（左図）とレーザーパルスエネルギーのK値依存性の実験データとシミュレーションの比較（右図）。

5. まとめ

SASEレーザーの定常的飽和、並びに目標性能を上回る0.7 πmm·mradのスライスエミッタンスの達成により、XFEL/SPring-8の設計性能が十分実現可能であることが示された。

参考文献

- [1] H. Maesaka, et al., in these proceedings.
- [2] T. Tanaka et al., "Development of the short-period undulator for the X-ray FEL project at SPring-8", *Proc. SRI'03*, 2003, p.227.
- [3] T. Shintake, et al., "A compact free-electron laser for generating coherent radiation in the extreme ultraviolet region", *Nature Photonics advanced online publication*, 27 July 2008 (doi:10.1038/nphoton.2008.134).
- [4] S. Tanaka, et al., in these proceedings.
- [5] N. Hosoda, et al., in these proceedings.
- [6] K. Togawa, et al., in these proceedings.
- [7] SIMPLEX was developed by Takashi Tanaka (RIKEN/SPring-8), <http://radiant.harima.riken.jp/simplex/>
- [8] K. Togawa et al., "CeB₆ electron gun for low-emittance injector", *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **10**, 020703 (2007).
- [9] H. Tanaka, et al., "Low-emittance injector at SCSS", *Proc. FEL'06*, 2006, p. 769.