

話 題

SCSS 試験加速器で達成された連続レーザー発振
—ビーム調整の視点から—

田中 均*・渡川 和晃・原 徹・矢橋 牧名・田中 隆次・大竹 雄次

Continuous SASE Saturation Achieved at the SCSS Test Accelerator
—From the Viewpoint of Beam Tuning—Hitoshi TANAKA*, Kazuaki TOGAWA, Toru HARA,
Makina YABASHI, Takashi TANAKA and Yuji OTAKE

Abstract

The SPring-8 compact SASE source (SCSS) test accelerator for XFEL/SPring-8 was constructed in 2005 to perform proof-of-principle experiments for stable SASE FEL operation. The first lasing at 49 nm, though not reached saturation, was observed with the 250-MeV electron beam in June 2006. Towards the saturation, we started stabilizing the RF system for the injector section, which dramatically facilitated the lasing condition. The stable operation enables us to tune each of the machine parameter, for instance transversal beam focusing and a beam trajectory in the two undulators, much more precisely by using the lasing response. The second undulator, which did not sufficiently contribute to the first lasing because of large multipole field errors, was replaced by new one. These improvements led us to the successful observation of continuous SASE saturation at the wavelength ranging from ~50 to 60 nm in September 2007. A pulse-energy of 30 μ J is routinely obtained at 60 nm. The stable and intense EUV SASE FEL has been offered for user experiments since October 2007. Analysis of the obtained SASE saturation data with a 3D-FEL simulation code, SIMPLEX, suggests that the electron beam emittance of 0.6 π mm·mrad is unaffected by the bunch compression process with over three hundred compression factor. This result proves the validity of our bunch compression scheme that starts from velocity bunching of uniform and long cylindrical electron beam instead of initially short and intense electron beam from a RF photo-cathode.

1. はじめに

SPring-8 Compact SASE Source (以降 SCSS と表記)^{1,2)} 試験加速器³⁾は、現在兵庫県 SPring-8 キャンパス内に建設中の X-ray Free Electron Laser (XFEL) 施設⁴⁾ (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建設された。試験加速器のエネルギーは 250 MeV で、実機の約 30 分の 1、長さは 55 m で約 10 分の 1 に当たる。XFEL/SPring-8 では、第一段階として Self Amplified Spontaneous Emission (SASE) 方式により、最短波長 0.6 Å の SASE XFEL を目指している。この施設で生み出される XFEL は、0.6 Å の波長において 2 次元の空間干渉性を有し、100 fs 以下の極短パルスを実現、ピークパワーは GW を超え、ピーク輝度

(単位は photons/sec/mm²/mrad²/0.1% b.w.) に於いて SPring-8 標準アンジュレータからの放射光を 10 億倍も上回る優れた特性が期待されている。

試験加速器の構成を図 1 に、主要パラメータを表 1 に示す。加速器システムは (a) CeB₆ 単結晶パルス熱電子銃⁵⁾を用いた低エミッタンス入射器³⁾, (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⁶⁾, (d) 真空封止アンジュレータ⁷⁾, (e) 光診断装置⁸⁾の 5 つから構成されている。敷地の制約から、レーザー増幅にもっとも重要なパラメータであるレージング部分(スライス)の電子ビームエミッタンスを直接測定するビーム診断系は設置されていない。このため、電子ビームの基本性能は電子ビームのレーザー増幅特性の解析、最終的には、設計ビーム性能を満たした場合に実現すると予

* 独立行政法人理化学研究所 X線自由電子レーザー計画推進本部
XFEL Project Head Office
(E-mail: tanaka@spring8.or.jp)

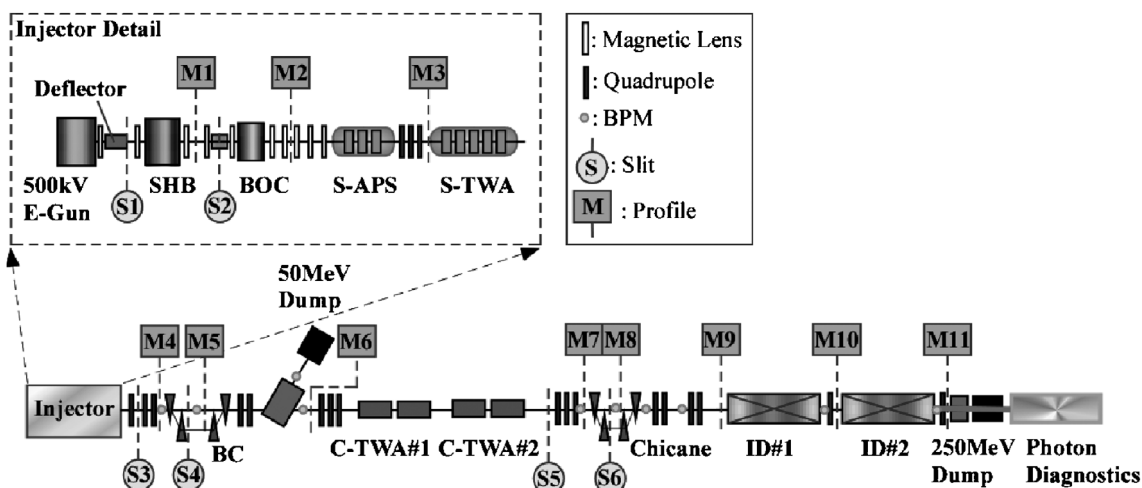


図1 SCSS 試験加速器の構成

表1 SCSS 試験加速器主要パラメータ

Beam energy	250 MeV	
Repetition rate	≤60 Hz	
Acceleration charge/pulse	0.3~0.4 nC	
Length	55 m	
FEL effective brilliance (peak current/normalized slice emittance)	≥400 A/πmm·mrad	
Undulator Specification	Period length λ_u	15 mm
	Number of periods N_u	2×300
	Maximum K	1.5
	Minimum gap	3 mm
	Averaged betatron function β_x/β_y	7.2 m/1.6 m
	Radiation wavelength	30~61 nm

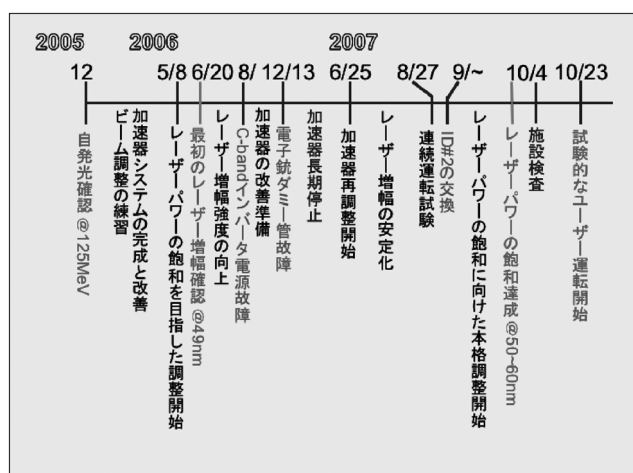


図2 SCSS 試験加速器の運転経過

み上げ、レーザーパワーの飽和が達成されたのかを紹介する。

2. SCSS 試験加速器システムの概要

測される波長 60 nm でのレーザー発振（以降パワーの飽和と表記）の達成で検証せざるを得ない。

2005 年 12 月の完成以降、今日に至るまでの試験加速器の運転状況を図 2 にまとめて示す。C-band モジュレータのインバータ電源や電子銃ダミー管の故障等様々なトラブルはあったものの、加速器の安定化やビーム調整精度の向上を積み上げ、2007 年 9 月、ついに目標であった極紫外波長域（50~60 nm）においてレーザーパワーの飽和を達成した⁹⁾。2007 年 10 月からはユーザー実験も試験的に開始されている。

本記事では、得られた電子ビーム性能を示すと共に、どのような方針のもとで加速器のビーム調整を積

試験加速器では熱電子銃からエネルギー 500 keV、ピーク電流 1 A、パルス幅 2 μsec の長い電子ビームパルスが引き出される。均一な低エミッタンスビームを引き出すため制御グリッドは使用せず、直下流に設置された高速ビームディフレクターによりロングパルス中央の約 1 nsec が切り出される。ディフレクター出口には丸穴スリットが設けられ、空間コリメーションにより電子ビームの芯の部分が削り抜かれ、下流に輸送される。

1 nsec, 1 A の電子ビーム（全電荷 1 nC/pulse）は、238 MHz の Sub Harmonic Buncher (SHB) と 476 MHz BOoster Cavity (BOC) の 2 つの RF ポテンシャ

ルによりエネルギーの変調が制御され、BOC 下流の S-APS 空洞までの区間で速度変調バンチングにより圧縮される。圧縮は SHB のエネルギー変調により開始され、ピーク電流は BOC 入口で 6 A、S-APS 入口で 70 A まで増大する。速度変調バンチングでは、エネルギーと速度の非線形関係によりビームを圧縮するため、主に 2 次の非線形性によりビームの時間とエネルギーで構成される位相空間が時間方向に湾曲し、電子密度がバンチの先頭で高くなる現象（オーバーバンチング）が発生しやすい。オーバーバンチングが生じると電子ビームの密度は局所的に急激に増大し不均一となるため、空間電荷効果の影響が大きい非相対論的エネルギー領域では、非線形空間電荷力により電子ビームのエミッタンスが悪化する。このため、オーバーバンチングを防ぐように SHB と BOC の電圧と位相を正しく設定することが極めて重要になる。XFEL/SPring-8 では補正空洞の導入により、位相空間を歪める 2 次の非線形性を補正する改善が図られている。これにより、2 つの RF ポテンシャルの広いパラメータ範囲でオーバーバンチングが抑制され、圧縮後の電子ビーム密度分布の制御を可能にしている。

圧縮途中の 1 MeV の電子ビームは S-band APS 加速管（11 セル）により -25 度のバンチング位相（以下位相はクレスト基準）で加速され、出口では 10 MeV までエネルギーが引き上げられる。速度変調バンチングは APS 加速管最初の数セルではほぼ完結し、電子ビームのピーク電流は S-APS 出口で約 100 A まで増大する。非相対論的エネルギー領域（電子銃から APS 加速管入口まで）では、軸対称性の維持がエミッタンス保存に重要となるため、電子ビーム収束には軸対称電磁石レンズが用いられている。

ピーク電流換算で 100 倍圧縮された 10 MeV の電子ビームは、引き続き S-band 進行波管（54 セル）により -30 度のバンチング位相で約 45 MeV まで加速され、形成されたエネルギーチャープにより下流の 4 台の矩形偏向電磁石で構成されるエネルギー分散部でさらに 3 倍圧縮される。この時点で設計ピーク電流は 300 A、初期電流の 300 倍に達する。

この電子ビームは C-band 加速システム（2 ユニット、加速勾配 ~ 30 MV/m）により 250 MeV まで加速され、暗電流除去用シケインを通し 2 台の真空封止アンジュレータ（周期長 15 mm, 300 周期/1 台, K 値 $1.5@Gap=3$ mm）へ導かれる。アンジュレータを通過するパルス当たりの電荷量は約 0.3 nC である。1 台目のアンジュレータは主にモジュレータ、電子ビームの密度変調器として働き、2 台目のアンジュレータ

の後半で強度の増大したレーザー場と密度変調の発達した電子ビームにより強力な SASE が発生する。

2 台目のアンジュレータ下流には、実験棟へ SASE を輸送する光ビームラインの他に、光診断ビームラインが設置され、SASE のショット毎のエネルギー、空間プロファイル、及びスペクトルの測定が可能になっている。

3. 連続的レーザーパワーの飽和に至るビーム調整・加速器改善の要点

図 2 に示すように、2005 年末に試験加速器が完成、2006 年初頭から加速システムのコンディショニングや手探りのビーム調整をスタートした。2006 年 5 月、全ての機器の状態が整い、レーザーパワーの飽和に向けた本格的ビーム調整を開始した。6 月 20 日にレーザー増幅の初観測に成功し、以後レーザーパワーの飽和に向けた調整を進めた。ビーム調整途上の 2006 年 12 月、電子銃ダミー管にトラブルが発生し、ビーム調整は約半年間中止された。2007 年 6 月 25 日からビーム調整を再開し、レーザー増幅の再現性の確認と安定化を図った。9 月初めに 2 台目のアンジュレータ磁石列の交換を実施、レーザーパワーの飽和に向けた調整を 9 月初旬から再スタートし、9 月の終わりには 50~60 nm の波長領域でのレーザーパワーの飽和を実現した。

この間、線型加速器でよく用いられる 3 次元シミュレーションコード PARMELA 等を使用し、リング加速器と同様、計算機モデルに基づいた調整を実施した。調整終盤まで加速器モデルはビーム調整の指針として十分に機能した。しかし、飽和パワーの最大化を目指した精密調整（最終）段階では、レーザー増幅強度を抛り所に調整を進めざるを得なかった。即ち、PARMELA をベースとした加速器モデルではビームの 6 次元位相空間の時間発展を、FEL の調整に必要な精度では記述できないということである。以下に、特にレーザーパワーの飽和に至る過程で重要な役割を担った事項をまとめてみる。

3.1 電子ビーム初期条件の確定

500 keV の電子銃から引き出されたエネルギーのそろった電子ビームエンベロープの初期条件は、SHB と BOC の各 RF を切った状態で軸対称電磁石レンズの強さに対するビーム径の応答を系統的に測定し、解析する事で決定した。これにより加速器モデルを実際のビーム条件に合わせ、S-APS 入口までの軸対称電磁石レンズ収束系の初期値を決めることが可能になった¹⁰⁾。

3.2 ビームの圧縮特性測定による速度変調バンチングパラメータの設定

2章で述べたように、速度変調バンチングでは2つのRFポテンシャルの位相と電圧を合理的に決める必要がある。各RF機器の位相、電圧で構成されるマルチパラメータ空間で目標ビーム性能に到達可能な運転点はユニークではないが、S-APSで加速され速度変調バンチングが完了する時点で、電子ビームがアンダー及びオーバーバンチングしない事、エネルギーと時間で構成される位相空間でビームが直立する少し手前、ピーク電流で100 A弱に制御することが肝要である。しかし、SHBの位相や電圧などを電子ビーム応答で決定する精度は位相で数度、電圧で数%程度の大きな誤差を持つ。そこで、BOCの位相以外のRFパラメータをビーム応答の測定で設定しておき、S-APSのRFを切った状態でS-APSの出入口において電子ビームのバンチ長が最小となるBOC位相を測定する。この測定には、バンチ長の情報が反映されたデマルケストスクリーンからのCoherent Transition Radiation (CTR)を使用した。検出器としては、マイクロ波の検波器とハイパスフィルターを組み合わせたバンチ長測定器¹¹⁾を用いた。BOCの位相は、S-APS入口と出口で最小条件を与える2つの位相の平均として設定する。この位相はS-APSのRFを入れた状態ではオーバーバンチングを起こさない。平均の位相はS-APSのRFを切った状態でS-APSのほぼ中央でビームが直立する位相を与える。しかし、S-APSにRFを入れると、電子ビームは加速されビーム内の全ての電子の速さが急激に光速に近づき、速度変調バンチングがS-APSの中央より上流で終了するからである。この設定が計算で評価される最適位相を与えることは、1次元及び3次元のシミュレーションで確認している。このパラメータ設定の考え方を図3(a)に模式的に示す。図3(b)には、実測した検波器のシグナルとシミュレーションで得られた電子ビームのピーク電流の2乗のBOC位相依存性を比較して示す。検波器のシグナルはシミュレーションではほぼ説明できることが分かる。

3.3 入射器RF系の安定化^{12,13)}

レーザー強度を極限まで追求するには、増幅率をプローブとして全てのマシンパラメータを精密に調整する必要がある。コライダーでルミノシティを抛り所にビームのパラメータをしゃにむに調整するのと同じ感覚である。そのためには、レーザー増幅状態を先ず安定化しなければならない。SCSS試験加速器の場合、入射器RF系の安定性がレーザー増幅状態の安定性に

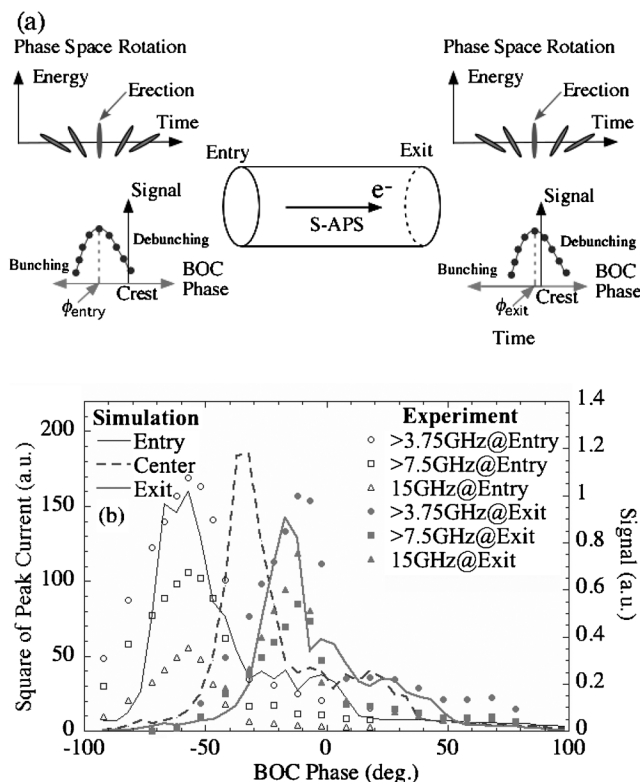


図3 速度変調バンチングのRFパラメータをS-APS出入口での電子ビームのバンチ圧縮特性を測定することで設定する方法を説明する模式図(a)。BOCの加速位相をスキャンした場合のS-APS出入口に設置されたバンチ長モニターからの信号と1次元シミュレーション結果の比較(b)。実線、鎖線、太線はそれぞれS-APS入口、中央、出口でのシミュレーション結果を、白抜きと黒塗りのシンボルはS-APS入口と出口でのモニターの信号を示す

直結する。

(a) RF空洞冷却水温度安定化：2章で述べたように速度変調バンチングを実施する低エネルギー領域では、軸対称性がエミッタンス保存に重要となるため、定在波空洞が用いられている。設計を工夫しても定在波空洞のQ値は 10^4 程度と高い。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する。加速モードを TM_{010} とし、 $Q=10^4$ 、空洞の材質を無酸素銅として計算を行うと、0.01度の位相安定性を実現するのに1 mK以下の温度安定性が必要になることが分かる。このため空洞冷却水系には精密温度調整システム¹⁴⁾が設置され、空洞本体温度(空洞外壁面に設置された熱電対の平均温度)が0.01 Kの分解能で一定となるようにPID制御が施されていた。しかし、ビームのエネルギー変動を詳しく調べるうちに、実はこのフィードバック制御がRFの位相変

動を引き起こしていることが判明した。熱平衡状態での使用を前提に、制御点を空洞本体温度から空洞入口冷却水温度に変更し、高周波ノイズをカットする FIR フィルターに制御信号を通すことで RF 系の早い変動成分を大幅に抑制することができた。

(b) RF 系のフィードバックループの設定分解能の改善：RF の早い変動を抑制してもゆっくりしたドリフトは残る。そこで各 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) を構築した。空洞の高周波位相電力制御及びモニターには IQ 法を使用した。改善前では、位相設定の分解能が 0.09 度 (360 度の 1/4096) に制限され、フィードバックループの設定分解能が足りず滑らかなフィードバック制御が実現できなかった。そこで 12 bit の DAC による位相制御の中で、I と Q を独立に取り扱い、I と Q の設定分解能が位相の設定分解能に最大限反映できるように制御ソフトの位相設定アルゴリズムを改善した。また空洞の Q 値が大きいことを逆手にとり、空洞の長い filling time の間で入力側の設定値を DAC の最小分解能で振りながら時間分解設定を行うことで実効的な分解能を引き上げる改善を行った。以上 2 つの改善により、フィードバックループの実効的な設定分解能を約 1 桁改善することに成功した。空洞冷却水温度を安定化させた後での SHB の位相と振幅の安定性を、RF 系フィードバックループの設定分解能を向上させた前後で比較し図 4 に示す。2 つの改善策で安定度は、RF 位相で 0.02 度 STD に、振幅で 0.03% STD に達し、これは XFEL/SPring-8 で要求される安定度の水準をほぼ満たすものである。

3.4 電子ビーム収束系の精密調整

電子ビーム分布の中でレーザー増幅に寄与する部分はごく一部であり、電子ビーム収束系はその部分に対しエンベロープのマッチングを取る必要がある。これはビームの射影プロファイルからではどうも評価できない。本来であれば、ビームを時間方向に分解してレーザー増幅部分のみを切り出し、エンベロープを評価できる測定系を準備するべきである。しかし、そのような測定系のない現状のシステムでは、レーザー増幅を強める方向にビーム収束系を調整する以外に手はなく、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計算では評価できないので、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

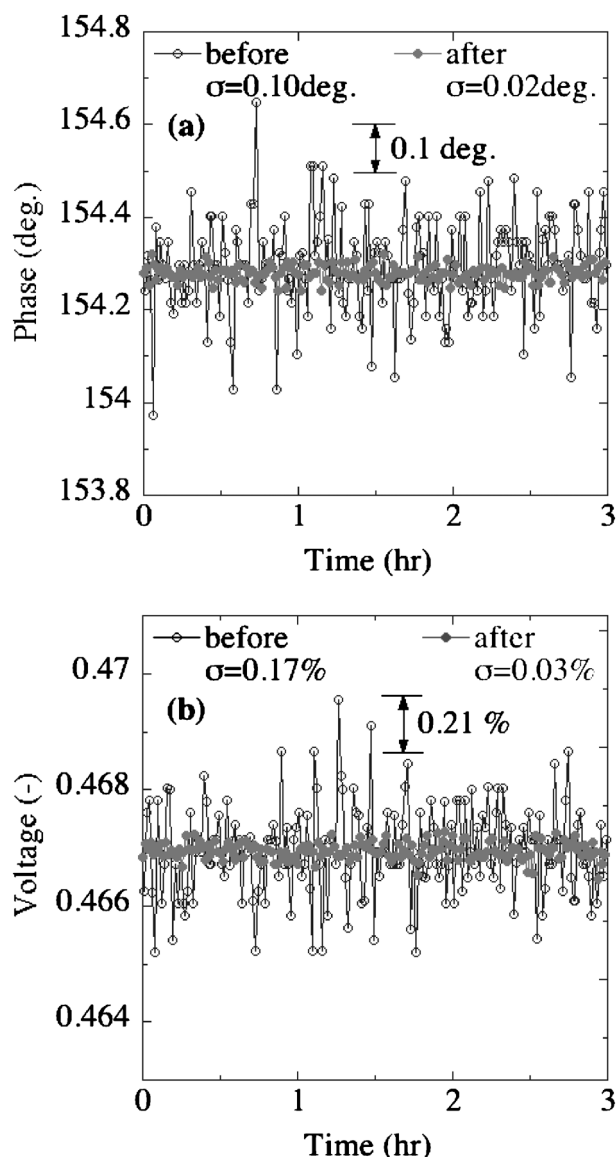


図 4 RF 系フィードバックループの設定分解能を向上させた前と後での SHB の位相 (a) と振幅 (b) の 3 時間に渡る安定性の比較

上げていった。調整を積み重ねるうちにほぼ直交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た迅速なエンベロープの整合が可能になった。

3.5 アンジュレータ内軌道の精密調整

アンジュレータの垂直収束力や誤差磁場は 250 MeV の電子ビームにとっては無視できないものである。それらはアンジュレータギャップの関数になっているので、使用する条件や SASE の波長に応じて最適な軌道を見だし、マッチング条件を調整する必要

がある．本来であれば各アンジュレータに対し，入射軌道 (x, x', y, y') のマッピング，エンベロープのマッピング (3.4を参照)，2台のアンジュレータの相対レベル調整，2台のアンジュレータ間の光の位相整合を使用するギャップ毎に増幅率を最大にするよう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．測定のノイズ環境下では，2台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．逆に，現在の運転条件において，光の位相整合の効果は観測できない程小さいと言える．

ユーザー運転時は，レーザーの光軸を全ての使用波長で揃えて欲しいとの要求があり，光ビームラインに設置されている4象限スリットの中央に光軸が収まるよう軌道に制約をかけている．さらに上流の加速器との軌道の取り合いを単純化する目的で，全ての設定において，軌道が1台目のアンジュレータ直上流のBPMの原点 $(x=0, y=0)$ を通るようになっている．ユーザー運転時の設定軌道は，運転や実験の効率を優先するためレーザー増幅が最大となる最適軌道とは異なるが，これによる増幅率の減少は数10%以下である．

3.6 2台目のアンジュレータ磁石列の交換

2台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(ハルバック型を45度傾けた)特殊な永久磁石で構成されていた¹⁵⁾．周期長が15mmと短いため，磁石の磁場補正はチップマグネット(補正用小型磁石片)を用いては不可能である．そこでスペクトル調整の自由度(磁気回路内の永久磁石ブロックの組み替えの自由度)を増やす目的でこの特殊な磁気回路が考案された．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Skew 4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．結局，磁気回路をハイブリッド型とした周期長が15mm, 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→18mmに変更した．

4. 達成された電子ビーム性能とレーザーパワーの連続飽和

3章で述べた調整や改良を経て，20Hzの繰り返しまで50~60nmの任意の波長でレーザーパワーの連続飽和が再現性良く達成され，試験的なユーザー運転もスタートした．20Hzに繰り返し制限されている理由は，主に電子銃インバーター電源の充電電圧安定化回路の不安定性によるが，改善が進められており30Hz及び60Hz運転によるレーザー安定増幅試験を近く実施する予定である．表2にレーザーパワー飽和時の特性をまとめて示す．パルス当たりのエネルギーは約30μJで光のパルス幅を100fsと仮定すれば，300MWのレーザー出力となる．50~60nmの連続飽和は，チューニングから2週間以内であれば，電磁石の設定値の再ロードと空洞内加速電界の測定値を再現することによりほぼ完全に復帰する．一度求めたチューニングパラメータは2週間程度ピーク性能を維持できるが，それ以降は徐々にレーザー増幅強度が

表2 レーザーパワー飽和時の SASE の特性

Wavelength Range	50~60 nm
Repetition Rate	<20 Hz
Pulse Energy	~30 μJ@60 nm
Pulse Energy Fluctuation STD	~10%
Laser Size*1) FWHM	~3 mm
Pointing Stability*1)	~5% to the beam size
Averaged Spectrum Width FWHM	0.6%

*1) ~10-m downstream from the source point

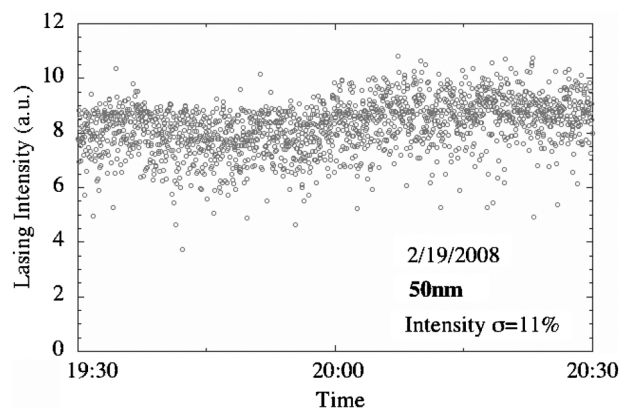


図5 繰り返し10Hz，レーザー波長50nmの場合のレーザー発振強度の1時間に渡る安定性

低下していく．この原因は現時点では特定されていない．ピーク性能を再現するには入射器の RF 系位相の微調整を再度行う必要がある．図 5 に，繰り返し 10 Hz，レーザー波長 50 nm におけるレーザー強度の 1 時間に渡る安定性を示す．この間の強度変動は 11% STD であった．光源から 10 m 下流にある実験ハッチで測定したレーザーの pointing stability はレーザー光のスポットサイズに対し約 5% である．

レーザーパワーの飽和を裏付けるデータとして，波長（アンジュレータの K 値）に対して，パルス当た

りのレーザーのエネルギー(a)と強度の変動(b)がアンジュレータ 1 台と 2 台の場合でどう変わるかを図 6⁹⁾に示す．アンジュレータ 1 台では， K 値が大きくなるにつれて（FEL 相互作用が強くなるにつれて），パルスエネルギーが増加し，強度変動も激しくなる．一方，2 台のアンジュレータを同時に閉めると，パルスエネルギーの増加は波長 50 nm 近辺から飽和傾向となり，強度変動も波長 40 nm でピークを持ち 50~60 nm ではほぼ 10% STD と一定になる．レーザーパワーが飽和に達した 50~60 nm での増幅利得は，およそ 10^5 で，1 台目のアンジュレータで 10^2 ，2 台目のアンジュレータで 10^3 の配分になっている．

図 6 には 3 次元 FEL コード SIMPLEX¹⁶⁾で行ったシミュレーションの結果も線で示してある．この計算にはゼロクロス法¹⁷⁾で測定されたバンチの時間方向密度分布（ピーク電流値は約 300 A）*1 が用いられ，スライスエミッタンスのみがパラメータとして仮定されている．スライスエミッタンス 0.7 $\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ のシミュレーション結果（鎖線）は，アンジュレータ 1 台及び 2 台を用いて測定されたパルスエネルギーの K 値依存性をよく説明する．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（図 7）とも矛盾しない³⁾．図 7 のデータを自発光と SASE の和と仮定し，1 次元 FEL モデルから得られる式でフィッティングを行うと（図 7 の実線），電子ビームのレーザリング部分の FEL 有効輝度（ピーク電流 I_p とスライスエミッタンス ϵ_{ns} の比）として 480 A/ $\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ が得られる．ピーク電流値 300 A を用いればスライスエミッタンスは 0.63 $\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ となり，図 6 に示したレーザー増幅強度の K 値依存性を解析した結果と良い一致を示すことが分かる．

レーザー増幅利得の解析結果から 250 MeV のレー

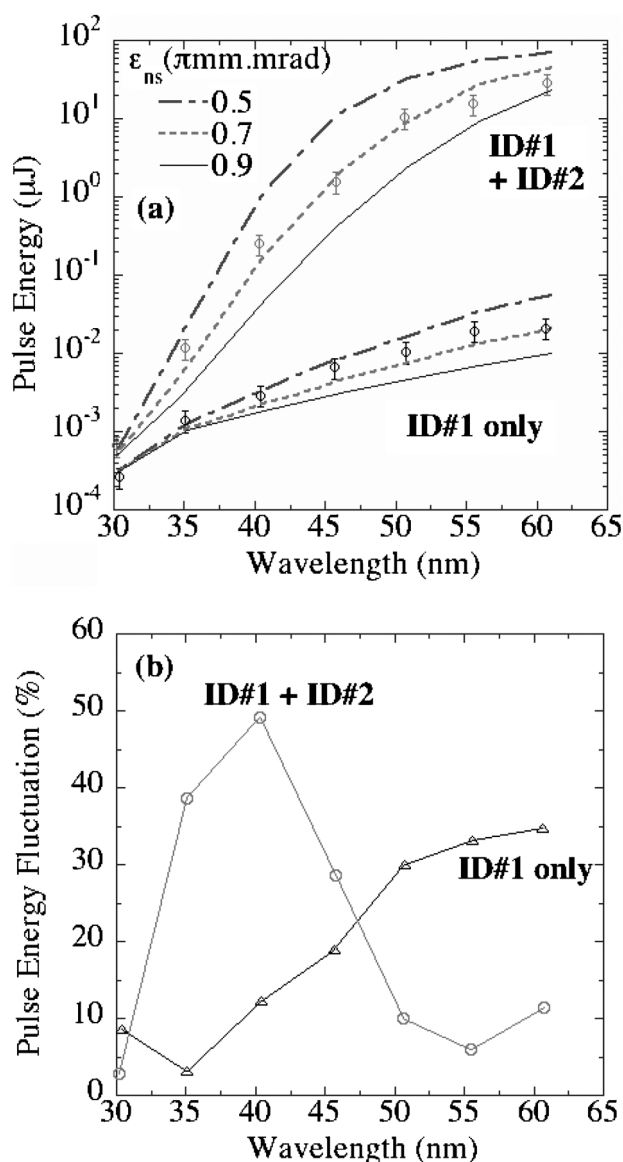


図 6 レーザーのパルスエネルギー(a)と強度変動(b)の波長（アンジュレータの K 値）依存性．パルスエネルギーの波長依存性(a)の点線や実線は，スライスエミッタンスをパラメータとした SIMPLEX によるシミュレーションの結果を示す

*1 C-band 加速管 4 台のうち下流 2 台でバンチ圧縮後（ピーク電流が確定した後）の電子ビームを RF ゼロクロス位相に載せ，バンチ内の進行方向位置に応じたエネルギーチャープを生成する．このため，電子ビームの平均エネルギーは 150 MeV になる．暗電流除去用シケイン中央の水平線形エネルギー分散のピーク部に設置された OTR スクリーンでゼロクロス位相に載せた電子ビームを観測すると，電子ビームの時間構造が水平面に掃引され，密度分布は OTR の発光強度分布として観測できる．測定精度は，電子ビームに元々存在するエネルギー広がりやチャープ，そしてビームのエミッタンスによる水平空間広がりによって決まる．

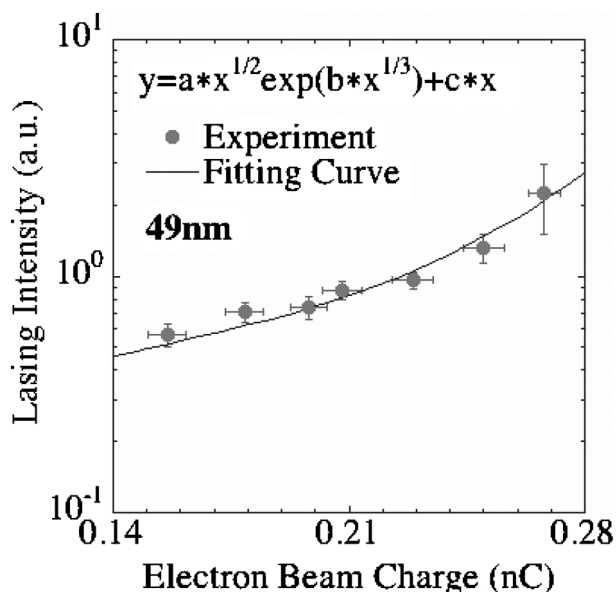


図7 2台のアンジュレータを用いて測定したレーザーパルスエネルギーの加速電荷依存性. 実線は1次元 FEL モデルに基づくフィッティングの結果を示す

ジング部分のスライスエミッタンスはおよそ $0.7 \text{ } \mu\text{m} \cdot \text{mrad}$ と評価される. この結果は, 500 keV の電子銃から引き出された電子ビーム (90% コアエミッタンス $0.6 \text{ } \mu\text{m} \cdot \text{mrad}$ ⁵⁾) のエミッタンスがピーク電流換算で 300 倍に圧縮された後でもほぼ保存していることを示唆する. XFEL/SPring-8 の入射器は, 軸対称でシャープエッジを持つ低エミッタンス円柱電子ビームを実現することにより, 空間電荷効果の非線形成分を抑制し, 円柱ビーム中央部のスライスエミッタンスの悪化を防ぐという基本思想に基づいて設計され, 全ての機器が最適化されてきた. 今回の結果は, その考え方の妥当性を裏付けるものである.

5. 今後に向けて

XFEL/SPring-8 は 2011 年の完成を目指し, 現在建設工事が進められている. SCSS 試験加速器のビーム調整及び加速器改善の経験は, XFEL/SPring-8 の設計や機器の製作はもとより, ビーム制御やビームコミッション戦略を考える上でも有益である. また, 今後のユーザー運転の経験も, XFEL/SPring-8 の利用運転を考える上で参考になろう.

一方で, XFEL/SPring-8 では試験加速器と異なる点も多い. バンチ圧縮システムはより多段となっており, 試験加速器のようにレーザー増幅強度を見ながら単純に入射器のパラメータを調整することはできな

い. 各圧縮ステップにおいて時間方向の電子密度分布を実時間で観測し, 測定結果を加速器パラメータに 1 対 1 で対応させる仕組みを考えていく必要がある. また, XFEL/SPring-8 では, 3 段目のバンチ圧縮器 (1.45 GeV) 直下流にディフレクター空洞を設置し, エネルギーと時間で構成される位相空間上の電子密度分布を正確に測定する予定である. ここで得られる位相空間情報をもとに, 上流のパラメータを精度良く評価し, 適切に修正を加えることが求められる. シミュレーションに基づく十分な検討が必要になろう.

しかし, もっとも困難であるのはアンジュレータ周りのチューニングである. 20 台近いアンジュレータ (全長 100 m) に渡り電子ビーム軌道を $\pm 4 \text{ } \mu\text{m}$ の精度で直線に設定し, 各アンジュレータの光の位相マッチングや電子ビームのエンベロープマッチングを行う必要がある. 試験加速器のアンジュレータはたかだか 2 台で, その間の光の位相マッチングも必要なかったことに比べれば格段の差がある. 最初のビーム調整をどのように行い, また, 積み上げていくのか, さらににはその精度をどのように維持するかはまさに未到の領域であろう. $0.6 \text{ } \text{Å}$ 硬 X 線 SASE XFEL のレーザーパワーの飽和達成への険しい道のりを想像すると, 試験加速器における極端紫外領域でのレーザーパワーの飽和達成は, そのほんの一里塚に過ぎないと感じられる.

謝辞

SCSS 試験加速器の建設, ビーム調整に参加された独立行政法人理化学研究所, 財団法人高輝度光科学研究センター, 高エネルギー加速器研究機構, 民間会社の全ての方々のサポートに対し感謝致します. さらに, XFEL/SPring-8 の礎を作り, 本計画を推進され, 私たちに今回の研究機会を与えて下さった理化学研究所石川哲也プロジェクトリーダー, 北村英男主任研究員にも謝意を表します. また, 単結晶熱電子銃からの低エミッタンス円柱電子ビームを用い, エミッタンスを保存しつつビーム圧縮を進めるバンチ圧縮法を考案し, その具体化に向け技術開発を進めてこられた理化学研究所新竹積主任研究員に特別の感謝を表します.

参考文献

- 1) T. Shintake, H. Matsumoto, T. Ishikawa and H. Kitamura, "SPring-8 Compact SASE Source (SCSS)", Proc. SPIE 4500, p. 12 (2001).
- 2) "SCSS X-FEL Conceptual Design Report", RIKEN/SPring-8, May 2005, Mikazuki, Japan, <http://wwwxfel.spring8.or.jp/>
- 3) H. Tanaka *et al.*, "Low-emittance injector at SCSS",

- Proc. FEL '06, p. 769 (2006).
- 4) <http://www.riken.jp/XFEL/eng/index.html>
 - 5) K. Togawa *et al.*, “CeB₆ electron gun for low-mittance injector”, *Phys. Rev. ST Accel. Beams*, **10**, 020703 (2007).
 - 6) T. Shintake *et al.*, “C-band RF-system development for e^+e^- linear collider”, Proc. APAC '98, p. 154 (1998).
 - 7) H. Kitamura, “Recent trends of insertion-device technology for X-ray sources”, *J. Synchrotron Rad.*, **7**, p. 121 (2000).
 - 8) M. Yabashi *et al.*, “Photon optics at SCSS”, Proc. FEL '06, p. 785 (2006).
 - 9) T. Shintake *et al.*, “A compact free-electron laser for generating coherent radiation in the extreme ultraviolet region”, *Nature Photonics*, **2**(9), 555 (2008).
 - 10) T. Hara *et al.*, “Comparison of PARMELA simulation and measured parameters on SCSS prototype accelerator”, Proc. 3rd Particle Accelerator Society of Japan, p. 302 (2006).
 - 11) H. Maesaka *et al.*, “Development of the microwave spectrometer for the bunch length measurement using coherent transition radiation at the SCSS prototype accelerator”, Proc. 3rd Particle Accelerator Society of Japan, p. 328 (2006).
 - 12) H. Maesaka *et al.*, “Precise RF control system of the SCSS test accelerator”, Proc. EPAC '08, p. 1404 (2008).
 - 13) Y. Otake *et al.*, “SCSS RF control toward 5712 MHz phase accuracy of one degree”, Proc. APAC '07, p. 634 (2007).
 - 14) S. Takahashi *et al.*, “Precise temperature regulation system for C-band accelerating structure”, Proc. APAC' 04, p. 678 (2004).
 - 15) T. Tanaka *et al.*, “Development of the short-period undulator for the X-ray FEL project at SPring-8”, Proc. SRI '03, p. 227 (2003).
 - 16) SIMPLEX was developed by Takashi Tanaka (RIKEN/SPring-8), <http://radiant.harima.riken.jp/simplex/>
 - 17) D. X. Wang, G. A. Krafft and C. K. Sinclair, “Measurement of femtosecond electron bunches using a RF zero-phasing method”, *Phys. Rev.* **E 57**, p. 2283 (1998).