

OPERATION STATUS OF THE SCSS TEST ACCELERATOR FOR EXPERIMENTS USING EXTREMELY ULTRAVIOLET LASER LIGHTS

Kazuaki Togawa^{1,A)}, Takahiro Inagaki^{A)}, Takashi Ohshima^{A)}, Naoyasu Hosoda^{A)}, Hirokazu Maesaka^{A)}, Mitsuhiro Yamaga^{B)}, Mitsuru Nagasono^{A)}, Kensuke Tono^{A)}, Makina Yabashi^{A)}, Shinichiro Tanaka^{B)}, Taichi Hasegawa^{B)}, Yasuyuki Tajiri^{B)}, Takuya Morinaga^{B)}, Yutaka Kano^{B)}, Ryo Yamamoto^{B)}, Yuji Otake^{A)}, Hitoshi Tanaka^{A)}

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

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

Abstract

The SPring-8 compact SASE source (SCSS) test accelerator was constructed in 2005 to demonstrate an original concept for x-ray free electron lasers (XFELs). It composed of a low-emittance thermionic electron injector, a high-gradient normal conducting C-band accelerator, and a short-period in-vacuum undulator. With a 250-MeV electron beam, continuous SASE saturation was achieved at the extremely ultraviolet wavelength range from 50 to 60 nm, with the maximum pulse energy of 30 μ J and the intensity fluctuation of \sim 10%. In FY2008, 11 research groups including that from overseas used the SCSS facility. The total operation time for the user experiments was 95-days, and the net operation time was 840-hours. Another 80-days were spent for machine studies for improvement of the SCSS test accelerator and R&Ds of the XFEL project at SPring-8. The SCSS test accelerator continues to deliver the stable laser lights in FY2009. In this paper, the operational status and recent progresses of the SCSS test accelerator are reported.

SCSS試験加速器における極端紫外レーザー利用実験のためのマシン運転

1. はじめに

SCSS試験加速器は、現在SPring-8サイトにて建設中のX線自由電子レーザー研究施設(XFEL/SPring-8)のための実証用試験器として2005年に建設された。電子ビームのエネルギーは250 MeVで、波長50 nmから60 nmの極端紫外領域のSASE (Self-amplified Spontaneous Emission) 型レーザー光を発生する。XFEL/SPring-8と比較して、電子ビームエネルギーが32分の1、施設長さが約10分の1の小規模加速器であるが、本計画の特徴である重要な3つの技術要素、熱電子銃を用いた低エミッタンス入射器、高電界C-band加速システム、短周期真空封止アンジュレータの全てを備えている。電子ビームの特性を表1に示す。

表1: SCSS試験加速器における電子ビームの特性

| Property | Performance |
|-----------------|----------------------|
| Beam energy | 250 MeV |
| Bunch charge | \sim 0.3 nC |
| Repetition rate | 20 Hz (max. 60 Hz) |
| Peak current | \sim 300 A |
| Bunch length | \sim 0.7 ps (FWHM) |

2006年に最初のレーザー増幅を確認し、その後、マシンの改良と電子ビームの安定化を行った結果、2007年にレーザー増幅の飽和を達成した。装置およびビーム特性に関する詳細は文献1、2に掲載されて

いるので、それらを参照して頂きたい。

SCSS試験加速器は、2008年度より極端紫外レーザーを利用したユーザー実験施設として、本格的な運用が開始された。また、XFEL/SPring-8に向けた機器開発のための運転も並行して行われている。

2. 極端紫外レーザー光の特性

SCSS試験加速器が発生する極端紫外レーザー光の特性を表2に示す。レーザー波長は、真空チャンバー内に設置されたアンジュレータ磁石のギャップを調整することで、50 nmから60 nmまで可変となっている。ユーザー運転にはレーザー光の高出力化と安定化が求められるため、運転期間に入る前の準備として、各ユーザーが要望する波長に最適化したマシンパラメータのセットを予め作成しておき、ユーザー運転中に可能な限り迅速に波長の変更が行えるような体制をとっている。

表2: SCSS試験加速器における極端紫外レーザー光の特性

| Property | Performance |
|-------------------------|-------------------------|
| Wavelength range | 50-60 nm |
| Repetition rate | 20 Hz (max. 60 Hz) |
| Pulse energy | \sim 30 μ J/pulse |
| Power fluctuation | \sim 10% |
| Laser spot size | \sim 3 mm (FWHM) |
| Pointing stability | \sim 5% of spot size |
| Averaged spectrum width | 0.6% (FWHM) |

¹ E-mail: togawa@spring8.or.jp

アンジュレータ出口から16 m下流の実験ホール入口で観測したレーザー光の空間分布を図1に示す。スクリーンの材質はCe:YAG、レーザー光の直径は約6 mm (半値幅)である。このような対称性の良い極端紫外レーザービームを常時発生し、ユーザー実験のために供給している。

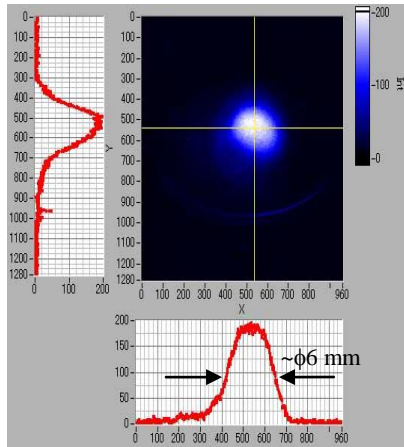


図1：Ce:YAGスクリーンで観測した極端紫外レーザー光の空間分布。

3. 利用実験のためのマシン運転

3.1 2008年度のユーザー運転

2008年度は、海外からの研究グループを含めて合計11の研究グループがSCSS試験加速器の極端紫外レーザー光を利用した実験を行った。主な研究分野は以下の通りである^[3]。1) 強光子場における原子分子科学、2) コヒーレントイメージング、3) 超高速分光、4) プラズマ科学、5) 材料科学。

SCSS試験加速器におけるユーザー運転は24時間体制は採っておらず、運転は平日のみ行い、運転時間は基本的に午前10時から午後7時までの9時間である。1年間のユーザー運転日数は95日、総運転時間は840時間であった。また、高電圧機器などのFaultによる運転中のDowntime Rateは僅か4%であった。

3.2 電子銃電圧ドリフトの抑制による運転の自動化

レーザー出力に最も敏感なパラメータの一つが電子銃電圧である。電子銃電圧はダミー管が熱平衡状態に達するまで一方向にドリフトを続けるため、平日の夜間はヒーターパワーを半減した予熱状態にしておき、朝8時にフルパワーにすることで電圧ドリフト時間の短縮を図っていた。しかし、十分な熱平衡状態となるには正午頃までかかるため、その間はレーザー出力が一定になるよう手動で電圧制御を行っていた。最近、フルパワーに切り換える時間を2時間早めることで実験開始までにはほぼ熱平衡状態となるようにし、さらに入射器のエネルギーフィードバック制御を導入することで、電子銃電圧のドリ

フトに起因するレーザー出力の変動を自動的に抑制することに成功した。この手法は既にユーザー運転に取り入れている。

上記のエネルギーフィードバックと高精度のRFフィードバック^[4]により、夜間および週末は全ての高電圧機器を停止しているにもかかわらず、実験開始前の1時間程度の暖気運転後、即座にレーザー光をユーザーに提供することが可能となっている。

3.3 変調器電源サイラトロンのトラブルと対処

最近、変調器電源のサイラトロンに関わるトラブルが多発した。経緯を以下にまとめる。

1) 電子銃：以前よりサイラトロンのミスファイアーが問題となっていた。調査により、電子銃パルススタックからの過剰な逆電圧が原因であることが判明した。サイラトロンの交換によりミスファイアーは殆ど発生しなくなったが、逆電圧を抑えるよう変調器電源の回路の改造が必要。

2) S-band：サイラトロンミスファイアーの頻度が増加。同時にサイラトロンのトリガー回路に使われている保護ダイオードが故障していることも判明。これらの因果関係は明らかとなっていないが、サイラトロンおよび保護ダイオードの交換により対処。

3) C-band#2：サイラトロンミスファイアーの頻度が増加。水素濃度をタイミングジッターが増加しない領域まで下げることで、ミスファイアーの頻度を抑えて対処。

サイラトロンの寿命は1万時間程度と言われているが、SCSS試験加速器ではその半分程度となっている。このサイラトロン短寿命化は、1日の起動と停止で繰り返される、24時間連続運転に比較して大きな熱的負荷が原因だと推測している。

サイラトロンの交換には時間を要するため、サイラトロンの寿命を予知することは非常に重要である。その目安となるのがミスファイアーの発生頻度であり、長期にわたる発生頻度をグラフ等により可視化したり、事前の予兆を観測するシステムを構築し交換時期を可能な限り予測できるようにしていく。

4. フルスペック運転に向けた性能の向上

4.1 高繰返し運転

昨年度、SCSS試験加速器において、ビーム繰返し設計値である60 Hzを達成した。高繰返し運転において、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と476 MHzブースター空洞のIOT電源の不安定性が問題となっていたが、いずれも回路系の改良により克服し、今回の成功に至った。

フォトダイオードで測定したレーザーパルスエネルギーの2時間にわたるトレンドグラフを図2に示す。発振波長は最短の50 nmで行った。図に示すように、FEL Gainが小さい状態にもかかわらず、出力の飽和

状態を一定に保つことができた。現在のところ、ユーザー運転は20 Hzで行っているが、今後、30 Hz、60 Hzと段階的に繰返しを上げていく予定ある。

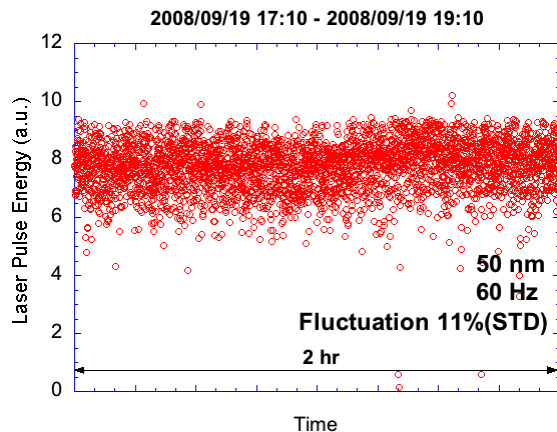


図2：60 Hz運転時のレーザーパルスエネルギーのトレンドグラフ。

4.2 C-band加速器の高電界運転

SCSS試験加速器では、電子ビームを250 MeVまで加速するために、2本の1.8 m加速管で構成されるC-band加速ユニットを2ユニット使用している。これまでは、それぞれ均等にRFパワーを投入し、加速電界29 MV/mで運転を行ってきた。一方、XFEL/SPring-8では35 MV/mの高電界加速が要求されている。長期間、C-band加速システムが安定に高電界加速を行えることを実証するため、第2ユニットの加速電界を37 MV/mまで引き上げた（エネルギーを250 MeVに保つため、第1ユニットは21 MV/mに引き下げた）^[5]。また、長期安定性を証明するために、2008年以降は37 MV/mでユーザー運転を行っているが、現在まで特に大きな故障やトラブルは発生していない。35 MV/m以上の高加速勾配で60 Hzの繰返しにより安定なSASE出力飽和を達成したことは、C-band加速システムが設計目標性能（フルスペック）に達したことを裏付けるものである。

5. FEL特性の安定化へ向けたビーム制御

5.1 電子バンチのピーク電流

電子バンチのピーク電流はFEL発振に極めて敏感であるため、常時安定なレーザー光をユーザーに提供するためには、この変動を10%以下のレベルに抑制する必要がある。ピーク電流安定化の最初の試みとして、バンチ圧縮器におけるバンチ圧縮率を安定化させるために、入射器のビームエネルギーフィードバックを行った。実験の詳細は本学会プロシーディングス（文献6）を参照して頂きたいが、入射器のビームエネルギーの安定化により、レーザー出力の平均レベルの変動を抑えることに成功した。ま

た、フィードバックの帰還対象を適切に選択することにより、レーザー波長スペクトルの形状を安定化できることも明らかとなった。今後、シケイン部で発生するTHz領域のコヒーレント放射光を利用して、直接的なピーク電流のフィードバック制御を加えて、理想的なビーム電流分布制御系を構築していく。

5.2 アンジュレータ軌道

アンジュレータ部における光と電子ビームの相互作用は、電子ビーム軌道の変動により大きな影響を受ける。また、アンジュレータ軌道の変動はレーザー光軸の変動にも繋がるため、これを抑制することは精密な利用実験を行うためにも重要である。

本テーマは昨年度より継続的に取り組んでおり、高速データ収集システムの導入により、軌道変動を水平方向で9.5 μm から6.4 μm に、垂直方向で4.8 μm から2.3 μm に抑制することに成功した。詳細は本学会プロシーディングス（文献7）を参照して頂きたい。

6. 今後の予定

第2章で述べたように、各波長において高出力で安定なSASEレーザー光が得られているが、より効率的な調整、レーザー性能の向上を目指し、2つの取り組みを現在進めている。アンジュレータ部のビームエンベロープを最適化するための集束電磁石の強度は、レーザー出力をモニターしながら手動でノブ調整を行っている。これを自動化するために、エンベロープ最適化の線形モデルを整備し、それに基づいた自動調整プログラムを構築していく。

また、より精密な利用実験を行うためには、波長スペクトルがシングルモードで安定したシード型レーザー光が要求される。高次高調波を用いたシード型レーザー光の原理検証実験は既に成功しており^[8]、本年度は、本格的なユーザー利用実験を念頭に置いたシード型レーザーシステムの開発を行う予定である。

参考文献

- [1] T. Shintake *et al.*, Nature Photonics **2** (2008) p. 55.
- [2] T. Shintake *et al.*, Phys. Rev. ST-AB **12** (2009) 070701
- [3] 代表的な論文を以下に挙げる。T. Sato *et al.*, Applied Physics Letters **92** (2008) 154103, H. Fukuzawa *et al.*, Phys. Rev. A **79** (2009) 031201(R).
- [4] Y. Otake, Proc. of FEL08, p. 222
- [5] T. Inagaki, *et al.*, Proc. of LINAC08 (to be published)
- [6] 田尻泰之 他, 「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」, 本学会プロシーディングス
- [7] 田中信一郎 他, 「SCSS試験加速器におけるアンジュレータ部での軌道補正性能の改善」, 本学会プロシーディングス
- [8] G. Lambert *et al.*, Nature Physics **4** (2007) p. 296