

## BEAM PERFORMANCE OF THE SCSS PROTOTYPE ACCELERATOR

Hitoshi Tanaka<sup>1,A,B)</sup>, Takao Asaka<sup>1,B)</sup>, Yoshihiro Asano<sup>A,B)</sup>, Hitoshi Baba<sup>A)</sup>, Teruhiko Bizen<sup>B)</sup>, Hiroyasu Ego<sup>B)</sup>,  
Toru Fukui<sup>B)</sup>, Shunji Goto<sup>B)</sup>, Hirohumi Hanaki<sup>B)</sup>, Toru Hara<sup>A,B)</sup>, Atsushi Higashiya<sup>A)</sup>, Toko Hirono<sup>A,B)</sup>,  
Naoyasu Hosoda<sup>B)</sup>, Takahiro Inagaki<sup>A)</sup>, Shinobu Inoue<sup>B)</sup>, Miho Ishii<sup>A,B)</sup>, Yasuhide Ishizawa<sup>B)</sup>, Daisuke Iwaki<sup>A)</sup>,  
Koujiro Kase<sup>A)</sup>, Yoshitaka Kawashima<sup>B)</sup>, Hiroaki Kimura<sup>A,B)</sup>, Tomoyuki Kirimura<sup>A)</sup>, Masanobu Kitamura<sup>A)</sup>,  
Satoru Kojima<sup>A)</sup>, Hirokazu Maesaka<sup>A)</sup>, Xavier Marechal<sup>B)</sup>, Sakuo Matsui<sup>B)</sup>, Hiroshi Matsumoto<sup>B,C)</sup>,  
Tomohiro Matsushita<sup>A,B)</sup>, Tetsuro Mochizuki<sup>B)</sup>, Jong-Seok Oh<sup>A)</sup>, Haruhiko Ohashi<sup>B)</sup>, Toru Ohata<sup>A,B)</sup>,  
Takashi Ohshima<sup>B)</sup>, Kazuyuki Onoe<sup>A)</sup>, Yuji Otake<sup>A)</sup>, Tatsuyuki Sakurai<sup>A)</sup>, Takamitsu Seike<sup>B)</sup>,  
Katsutoshi Shirasawa<sup>A)</sup>, Shinsuke Suzuki<sup>B)</sup>, Kazuhiko Tahara<sup>A)</sup>, Tetsuya Takagi<sup>B)</sup>, Sunao Takahashi<sup>B)</sup>,  
Takeo Takashima<sup>B)</sup>, Masao Takeuchi<sup>B)</sup>, Ryotaro Tanaka<sup>A,B)</sup>, Takashi Tanaka<sup>A,B)</sup>, Yoshihito Tanaka<sup>A)</sup>,  
Shingo Taniguchi<sup>A,B)</sup>, Takanori Tanikawa<sup>A)</sup>, Kazuaki Togawa<sup>A)</sup>, Rieko Tsuru<sup>A)</sup>, Shukui Wu<sup>B)</sup>,  
Makina Yabashi<sup>A,B)</sup>, Akihiro Yamashita<sup>B)</sup>, Kenichi Yanagida<sup>B)</sup>, Chao Zhang<sup>B)</sup>,  
Noritaka Kumagai<sup>A,B)</sup>, Tetsuya Ishikawa<sup>A,B)</sup>, Hideo Kitamura<sup>A,B)</sup>, Tsumoru Shintake<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> RIKEN/SPRING-8, 1-1-1, Kouto, Sayo, Hyogo, 679-5148

<sup>B)</sup> JASRI/SPRING-8, 1-1-1, Kouto, Sayo, Hyogo, 679-5198

<sup>C)</sup> KEK, 1-1, Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

### Abstract

Towards realization of x-ray free electron laser (XFEL) in wavelength region of 1 Å, we constructed the SCSS prototype accelerator as a test-bench where performances of key accelerator components and systems are fully investigated. Among the key subjects, performance check of the injector system comprising of a 500-kV pulsed electron gun and a three-stage velocity bunching process, which governs electron beam quality required for self-amplified spontaneous emission (SASE), has a first priority. Via beam tuning over half a year, SASE at wavelength of about 50nm was successfully observed in June 20th, 2006. The analysis of experimental SASE data predicts that essential beam quality, i.e., "electron beam brilliance" reaches to the design value, 400A/πmm·mrad. In this report, we describe a strategy for beam tuning of the SCSS prototype accelerator and show the achieved beam performance, including how the beam brilliance was estimated.

## SCSS試験加速器のビーム性能

### 1. はじめに

2005年12月から始まったSCSS試験加速器のビーム調整は、自発放射光確認の後、加速管の設置・交換作業及びエージング過程等を経て、2006年5月の第一週に全ての機器の運転準備が整った。レーザー増幅を目指した加速器の本格的ビーム調整は2006年5月8日から開始され、6月20日に目標波長付近でSASEの観測に成功した。試験加速器の最大の目的は、x線領域でSASEが飽和するために必要な電子ビーム輝度をフォトカソードRF電子銃とは異なる現入射器システムで達成可能か検証することにある。このためビーム目標性能を、規格化スライスエミッタンス $2\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 、ピーク電流値800A、電子ビーム輝度で $400\text{A}/\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ に設定した。

### 2. ビーム調整基本方針

SCSS試験加速器の構成をFig. 1<sup>[1]</sup>に示す。試験加

速器にはスライスエミッタンスを計測する測定系がなく、電子ビーム輝度はSASEデータのパラメータ依存性から評価される。このため、ビーム調整ではスライスエミッタンスを悪化させることなくピーク電流を増加させ、アンジュレータまで効率よく導くことが課題となる。

(1) 空間電荷効果によるスライスエミッタンス悪化の抑制：ビームの絞りすぎは空間電荷効果によるエミッタンスの悪化を引き起こすため、ビームエンベロープを計算<sup>[2]</sup>と一致させることが重要である。この実現には、電子銃から出てくる電子ビームの初期条件を確定する必要がある。238MHzのプレバンチャーと476MHz ブースターのRFを切り、複数のソレノイドレンズの磁場を系統的にスキャンして得られるビームプロファイルの変化から試験加速器における電子ビームの仮想光源を決定した。

(2) オーバーバンチングによるスライスエミッタンス悪化の抑制：バンチ圧縮特性を計算条件<sup>[2]</sup>に

<sup>1</sup> E-mail: tanaka@spring8.or.jp

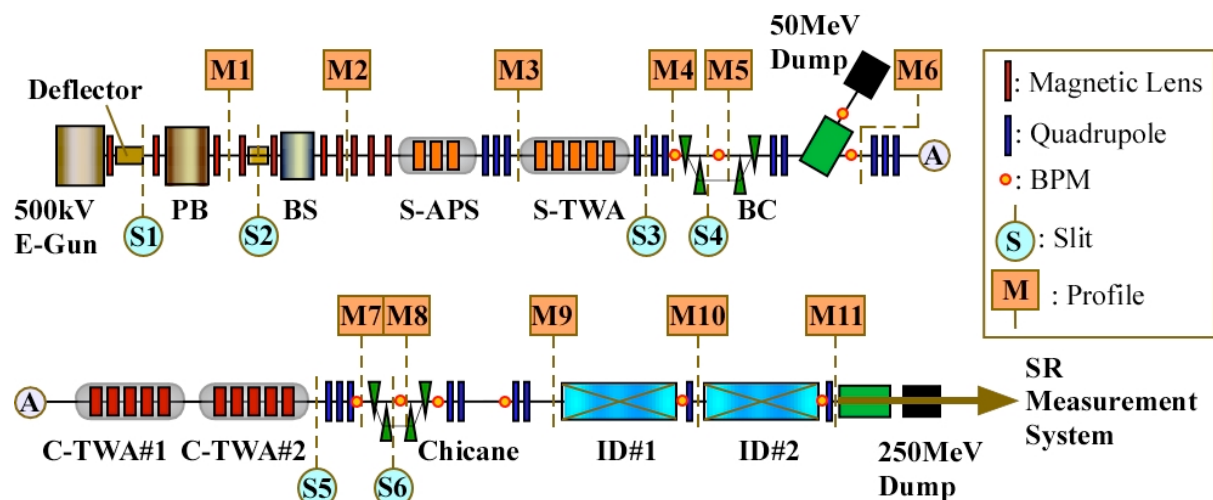


Fig. 1 Schematic drawing of the SCSS prototype accelerator

あわせるため、RF加速機器の電圧と位相の両パラメータをビーム応答により確認、設定した。ビーム応答としては、バンチ圧縮特性の両パラメータに対する依存性を用い、マイクロ波波長計<sup>[3]</sup>、並びにハイパスメッシュフィルタと広帯域検波器<sup>[4]</sup>を組み合わせた検出器により測定した。RF加速位相のクレストの検出には、ビーム誘起法<sup>[5]</sup>、電流通過量の加速位相依存性、及び線形エネルギー分散部でのビーム変位の加速位相依存性を状況に応じて使い分けた。

(3) 非線形磁場によるスライスエミッタンス悪化の抑制：ソレノイドレンズの端部<sup>[6]</sup>及びRF空洞内の非線形電磁場によるスライスエミッタンスの悪化防止には、ビームを各機器の中心に合わせることが重要である。このビームの軸合わせは、電磁石の電流変調、及び加速空洞の加速位相変調に対するビーム応答を観測して実施した。

(4) スライスエミッタンスの間接的確認：横方向位相空間分布の健全性は、ビームプロファイル(C-Band前5カ所)と射影エミッタンス(3カ所)の測定結果をシミュレーションと比較し、間接的に確認した<sup>[2]</sup>。

### 3. 射影エミッタンス

射影エミッタンスは以下の3条件：(1)ディフレッタで500keVの電子ビームを1nsecのパルス幅に切り出した直後、(2) Sバンド進行波加速管のクレスト位相で約50MeVまで加速した状態、(3) Sバンド進行波加速管をバンチ圧縮位相(クレスト-30°)、Cバン

ド進行波管はクレスト位相で250MeVまで加速した状態で測定した。(1)での射影エミッタンスは、スリット位置でのビームサイズと1次元水平方向スリットでビームを切り出し測定した水平方向の角度発散を用いて評価した。また(2)と(3)では通常のQスキャン法を用いた。射影エミッタンスの評価結果をTable 1に纏める。表にはディフレッタで切り出す前のエミッタンス<sup>[7]</sup>も参考を示した。3箇所の射影エミッタンスは計算予測でほぼ説明できる<sup>[2]</sup>。

### 4. バンチ長

バンチ圧縮器下流(50MeV)では円錐プリズムからのチェレンコフ光を、またシケインの下流(250MeV)では金薄膜からのOTR光をストリークカメラで観測した結果、バンチ長(1 $\sigma$ )はそれぞれ5psecと2psecとなった。バンチ圧縮器以降のバンチ長計算値はFWHMで1psec以下である。測定値が計算値に比べ長くなった原因として、チェレンコフ光ではビームサイズによる、また、OTR光では測定光学系による光パルス長増大が考えられる<sup>[8]</sup>。

これに対し、2番目のCバンド進行波管(Fig. 1のC-TWA#2)のゼロクロス位相を用い、ビームのパルス幅に関連したエネルギー偏差を導入し、エネルギー分散部(ここではシケイン)でパルス幅を水平方向のビーム広がりに変換する全く異なる方法<sup>[9]</sup>でバンチ長計測を行った。その結果、全幅でバンチ長は~1psecとなり、計算値と矛盾しない値が得られた。

### 5. 安定性

電子ビームの長期的安定性は、電磁石パラメータの再設定とピックアップ値によるRFパラメータの再現により標準的なレーザー増幅が常に得られる程度に確保されている。但し、24時間連続運転ではないため、運転開始から2~3時間は電子銃電圧やRFパラメータのドリフト等があり、ゆっくりしたフィードバックループの導入が検討されている。

Table 1 Estimation of normalized projection emittance

| Energy [MeV]       | Norm.Emittance<br>( $\epsilon_x, \epsilon_y$ )<br>[ $\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ ] | Calculation<br>( $\epsilon_x, \epsilon_y$ ) |
|--------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| 0.5(bef.deflector) | (0.6, 0.6)                                                                           | -                                           |
| 0.5(aft.deflector) | (1, -)                                                                               | -                                           |
| 50                 | (3, 3)                                                                               | (2.8, 2.6)                                  |
| 250                | (4, 2)                                                                               | (2.3, 2.3)                                  |

ビームの短期的安定性として、Cバンド進行波管で250MeVまでクレスト位相で加速後のエネルギー変動は全幅(6 $\sigma$ )で0.37%<sup>[10,11]</sup>である。線形ディスパージョンのないアンジュレータ入り口での電子ビーム軌道の安定性は、水平、垂直共に20 $\mu\text{m}$ (1 $\sigma$ )程度であり<sup>[12]</sup>、ビームサイズ(1 $\sigma$ )の1/5以下に抑えられている。

現状、レーザー増幅を最大化するには、加速器の標準パラメータ設定後に、238MHzプレバンチャーやSバンド進行波加速管等の加速位相、各スリットの開口と重心位置の微調整が必要である。

## 6. 電子ビームの輝度

電子ビーム輝度は、(1) レーザー増幅のピーク電流依存性を1次元モデルで、(2) レーザー増幅のK値依存性を3次元モデルSIMPLEX<sup>[13]</sup>で再現することで評価した。

### 6.1 1次元モデルによる評価

バンチ圧縮器のスリット(Fig. 1のS4)を用い、バンチ電流を制御し、レーザー増幅のバンチ電流依存性を測定した。ゼロクロス位相を用いたバンチ長計測により、スリットの開口幅にバンチ内の局所ピークが依存していることは確認した。Fig. 2に2台のアンジュレータを用いて、通常のレーザー増幅状態で測定された放射強度を示す。検出器としてフォトダイオード<sup>[14]</sup>が用いられた。エラーバーは100点のデータのばらつきの1 $\sigma$ を示し、データはその平均を表す。電子ビームのエネルギーは250MeV、2台のアンジュレータギャップは4mmで1次光の波長は49nmである。1次元モデルによれば放射強度 $I$ は自発放射強度 $I_N$ とSASE強度 $I_L$ の和として以下のように書ける。

$$I = I_L + I_N = I_{L0} \exp(z/L_{IG}) + I_N, \quad (1)$$

ここで $z$ はアンジュレータの全長を、 $L_{IG}$ はゲイン長を表す。規格化スライスエミッタンス $\epsilon_{ns}$ が水平と垂直で等しいと仮定すれば、 $L_{IG}$ は

$$L_{IG} = \frac{150.2}{\left( \frac{I_p}{\langle \beta_x^{1/2} \rangle \langle \beta_y^{1/2} \rangle \epsilon_{ns}} \right)^{1/3}} \quad (2)$$

となる。ここで $I_p$ はピーク電流を、 $\langle \beta_x \rangle$ 、 $\langle \beta_y \rangle$ はそれぞれアンジュレータに渡る水平、垂直ベータatron関数の平均値を表す。(1)式の電荷依存性を考慮し実験データをフィッティングした結果をFig. 2に線で示した。フィッティング結果とベータatron関数の実測値を用いて評価したビーム輝度は約480A/ $\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ となった。

### 6.2 3次元モデルによる評価

電子ビームの条件を固定し、上流1台のみのアンジュレータのギャップをスキャンし、1次光の光束

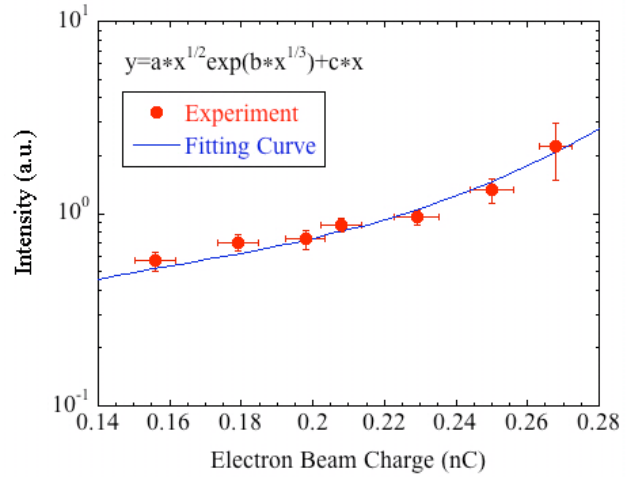


Fig. 2 Dependence of SASE on peak current

角密度のK値依存性を測定した。スリットで光軸を中心に水平100 $\mu\text{m}$ で切り出した光をグレーティングで分光し、CCDカメラで検出した<sup>[15]</sup>。CCDカメラデータのピクセル数にウィンドウを設けることで、光軸を中心に垂直方向の幅、並びにエネルギー幅を選択できる。Fig. 3に標準的なレーザー増幅状態でのK値依存性の例を示す。縦軸は自発放射の光束角密度との比を、横軸はK値を表す。光束角密度は10秒の時間積算(約50ショット)で測定されたものである。規格化スライスエミッタンス2 $\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 、エネルギー広がり0.1%(1 $\sigma$ )を設計値に固定し、ピーク電流をパラメータにSIMPLEXで計算した結果を図に実線で示した。実験データはピーク電流1070Aと1250Aの計算の間に位置することが分かる。これから、この実験条件でのビーム輝度は540~630A/ $\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ と評価できる。

## 7. まとめ

スライスエミッタンスを悪化させないよう注意深くビーム調整を行った結果、波長が40~60nmの範囲でSASEの増幅が再現よく観測できるようになった。

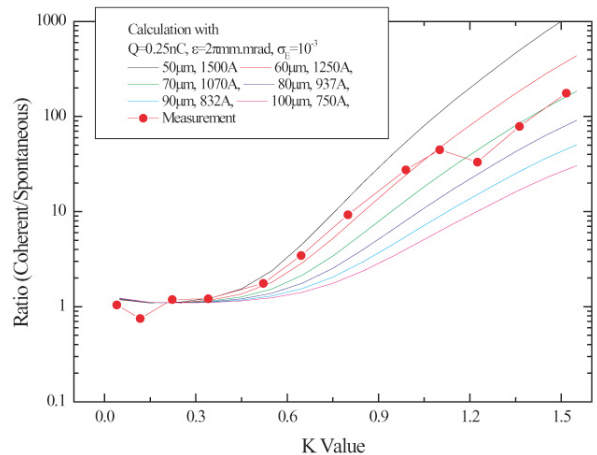


Fig. 3 Dependence of SASE on K-value

非常に強い増幅状態を常に維持するに至ってはいないが、現状、再現できるレーザー増幅状態を1次元と3次元モデルに基づいて解析した。その結果、ビーム輝度は設計値の $400\text{A}/\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ に届いていると評価できることが分かった。

現状のSCSS加速器パラメータにおいて、x線領域でのSASE飽和に必要な電子ビーム輝度は約 $3000\text{A}/\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ である。これはSCSS試験加速器で得られた電子ビーム性能を、輝度ベースで8倍向上できれば届く範囲にあり、この性能はPARMELAの計算においても、SCSS試験加速器で用いた入射器の改良で達成可能との結果が得られている。このことから、試験加速器入射部と基本的に同じ方式でSCSSの入射器を設計・製作してもビーム性能を実現する上で大きな問題はないと結論する。

## 参考文献

- [1] T. Shintake, et al., "Status of SCSS X-FEL project at RIKEN/SPring-8", Proc. of the 2nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and 30th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tosu, 2005.
- [2] T. Hara, et al., "Comparison of PARMELA simulation and measured parameters on SCSS prototype accelerator", presented in the 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and 31st Linear Accelerator Meeting in Japan, Sendai, 2006.
- [3] H. Maesaka, et al., "Development of the microwave spectrometer for the bunch length measurement using coherent transition radiation at the SCSS prototype accelerator", presented in the 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and 31st Linear Accelerator Meeting in Japan, Sendai, 2006.
- [4] Virginia Diodes, Inc., URL: <http://www.virginiadiodes.com/detectors.htm>
- [5] R. B. Neal, "The Stanford Two-Mile Accelerator-I", W. A. Benjamin, Inc., New York, 1968, p.383.
- [6] K. Togawa, private communication. The relating paper is now under preparation.
- [7] K. Togawa, et al., "Emittance measurement on the CeB<sub>6</sub> electron gun for the SPring-8 compact SASE source", Proc. of the 2004 FEL Conference, Trieste, p.351.
- [8] T. Tanikawa, et al., "Bunch length measurement using a femtosecond streak camera at SCSS prototype accelerator", presented in the 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and 31st Linear Accelerator Meeting in Japan, Sendai, 2006.
- [9] L. Rivkin, et al., "Bunch Lengthening in the SLC Damping Ring", Proc. of the 1st EPAC, Rome, 1988, p.634.
- [10] K. Shirasawa, "Operational experience of C-band accelerator at the SCSS prototype accelerator", presented in the 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and 31st Linear Accelerator Meeting in Japan, Sendai, 2006.
- [11] J. S. Oh, "Sensitivity analysis of the beam energy of a C-band main linac for SCSS XFEL", presented in the 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and 31st Linear Accelerator Meeting in Japan, Sendai, 2006.
- [12] H. Maesaka, et al., "Performance of the beam position monitor and the charge monitor at the SCSS prototype accelerator" presented in the 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and 31st Linear Accelerator Meeting in Japan, Sendai, 2006.
- [13] SIMPLEX was developed by Takashi Tanaka (RIKEN/SPring-8), URL: <http://radiant.harima.riken.jp/simplex/>
- [14] International Radiation Detector Inc., URL:<http://www.ird-inc.com/>
- [15] M. Yabashi, et al., "VUV diagnostic system for SCSS prototype accelerator" presented in the 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and 31st Linear Accelerator Meeting in Japan, Sendai, 2006.