

COMPARISON OF PARMELA SIMULATION AND MEASURED PARAMETERS ON SCSS PROTOTYPE ACCELERATOR

Toru Hara^{1,A)}, Kazuaki Togawa^{A)}, Takanori Tanikawa^{B)}, Makina Yabashi^{C)}, Hitoshi Tanaka^{C)}, Tsumoru Shintake^{A)},
Hideo Kitamura^{A)}
^{A)} RIKEN/SPring-8
 1-1-1 Kouto, Sayo, Hyogo 679-5148
^{B)} School of Science, University of Hyogo
 3-2-1 Kouto, Kamigori, Ako, Hyogo 678-1297
^{C)} JASRI/SPring-8
 1-1-1 Kouto, Sayo, Hyogo 679-5198

Abstract

After the completion of the SCSS (SPring-8 Compact SASE Source) prototype accelerator in autumn 2005, we started the commissioning of the machine in May 2006. One month later, we have succeeded to confirm the amplification of spontaneous radiation. The electron beam parameters have been designed and estimated by PARMELA. The measured beam parameters, after the bunching procedure and emittance degradation due to space charge, show fairly good agreement with the simulation.

PARMELAによるSCSS試験加速器のビーム設計と 実測パラメータの比較

1. はじめに

SPring-8では、0.1 nmを切るX線自由電子レーザー (X-FEL) 計画 (SCSS) の実現に向け、250 MeV試験加速器を建設し、2005年秋からビーム運転を行っている。ハードウェアや制御系の改良を経て、2006年5月より本格的なビーム調整を行い、約1ヶ月でレーザー増幅に成功した。試験加速器のビーム設計は主にPARMELAを用いて行われ、実際のビームパラメータはほぼ設計通りの値を得た。以下SCSS試験加速器のビーム設計の概要と、得られた測定結果について報告する。

2. 250MeV-SCSS試験加速器の概要

SCSSの大きな特徴の一つは、他国のX-FEL計画が採用しているRFレーザーフォトカソード電子銃に代えて、CeB₆単結晶を用いた500kVパルス熱電子銃を用いている点である^[1]。熱電子銃は、電子ビーム安定性や維持管理の面でRFフォトカソードに比べ非常に優れている反面、電子銃からのピーク電流が小さく、低エネルギー (<1 MeV) でのバンチ圧縮が不可欠となる。

図1にSCSS試験加速器の構成を示す。電子銃から出た1 Aのマイクロ秒パルスは、下流のdeflectorによってパルス中心の1 ns程度が切り出され、φ5 mmのピンホールでカソードエッジから放出された外側の電子を落とした後、238 MHz、476 MHzおよびAPS

型S-band定在波加速管を用いたvelocity bunchingによって、RFフォトカソード電子銃とほぼ同等のピーク電流 (約80 A) までバンチ圧縮される。その後、S-band進行波加速管 (TW-S) で約40 MeVまで加速したところで、バンチコンプレッサー (BC) を用いた2段目のバンチ圧縮を行い、C-band加速管 (C-1からC-4) で250 MeVまでビームを加速する。

FELにとって最も重要なビームパラメータであるスライスエミッタンスとピーク電流は、40 MeVバンチコンプレッサー出口でほぼ決まるため、入射器部分でいかにエミッタンスを崩さず、高いピーク電流を得るかがビーム設計の鍵となる。

3. PARMELAによるビーム設計

3.1 初期条件

PARMELAは電子銃部のDC加速を取り扱えないため、simulationでは仮想のカソード面から、パルス幅1 ns、初期エネルギー500 keVの時間方向に均一な電子ビーム出射を仮定している。カソード面上の初期規格化エミッタンスは、0.5 π mm-mradを用いた。初期のビームサイズと角度発散は、S-band加速管前の3カ所 (図1中 (a)、(b)、(c)) において、各々磁気レンズの収束パラメータを変化させて測定したビームサイズを再現するように合わせている。このときの3カ所におけるビームサイズの実測値と計算

¹ E-mail: toru@spring8.or.jp

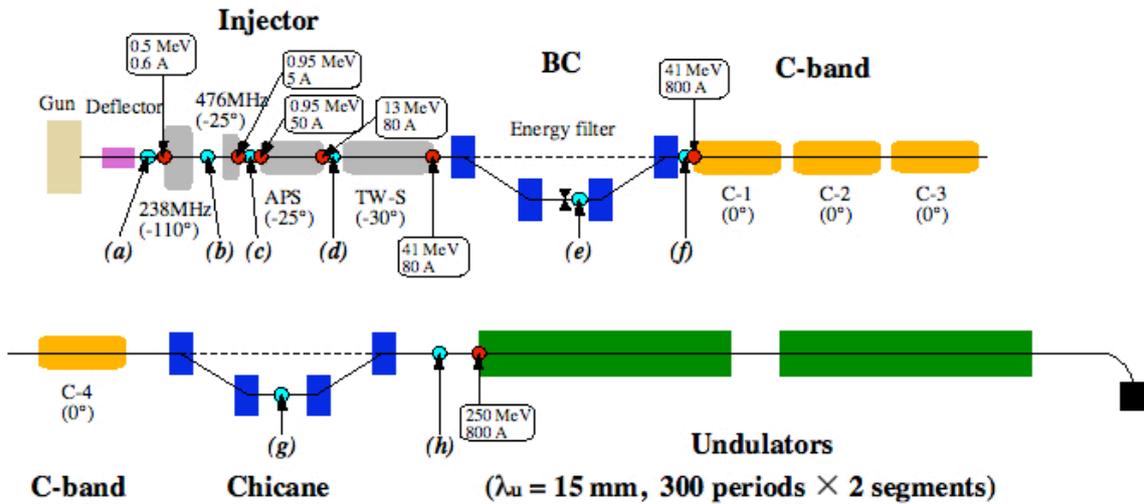


図 1 : SCSS試験加速器の構成

値を、図2に示す。

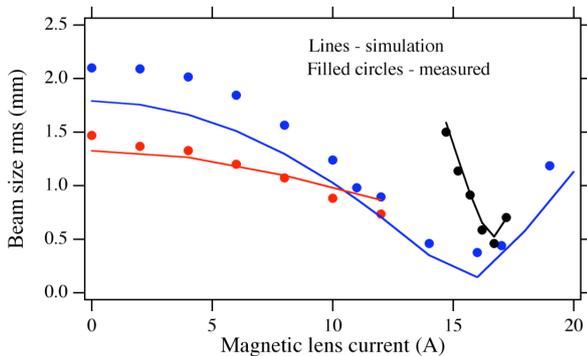


図 2 : 入射部におけるビームサイズの実測値(丸点)と計算値(実線)、各々図1中(a)黒、(b)青、(c)赤における値

3.2 バンチ圧縮

試験加速器におけるエミッタンス劣化の主な要因は、ビームエネルギーの低い入射器部の空間電荷効果である。試験加速器では、1 MeV以下のエネルギー領域のビーム収束系に、離散的な磁気レンズを採用している。ビーム収束系、およびバンチ圧縮率を決定するRF電圧と位相のパラメータは、圧縮の過程で電子銃カソードから出た横方向の均一分布を保ち、空間電荷効果によるスライスエミッタンスの劣化を抑えるように設定した。図1に各加速空洞の位相と、加速器各部におけるエネルギーおよびピーク電流の計算値を示す。

実際の入射器部におけるvelocity bunchingによるバンチ圧縮は、マイクロ波波長計を用いて測定した^[2]。図3は、S-band定在波加速管(図1中APS)をoffにした時、APS前後のスクリーン(図1(c)と

(d)における各々476MHzRF位相に対する電子バンチ圧縮率の相対変化を示している。実線はマイクロ波波長計を用いて測定したバンチ長変化、点線はPARMELAによるピーク電流変化の計算結果である。マイクロ波波長計は、電子ビームをスクリーンに当てた時に発生するコヒーレント放射の出力を測定しているため、バンチ長が短く、ピーク電流が大きくなるほど出力が大きくなる。マイクロ波波長計の出力は波長に対する感度や非線形性があるため、スクリーン(c)におけるバンチ圧縮最大位相が計算と若干ずれているが、概ね設計通り位相でバンチ圧縮が行われていることが確認できる。なお通常のFEL運転で使用される476MHzの位相は -25° で、APS前半部でバンチ圧縮が最大になるように設定されており、APSでの加速によってバンチ圧縮をオーババンチング手前で止めるようにしている。

バンチコンプレッサーを通過した後のバンチ長は、3、4本目のC-band加速管(図1中C-3とC-4)RFのゼロクロスに電子バンチをのせ、バンチ長に応じたエネルギー分散をシケイン部(図1(g))で測定することにより求めた。測定結果は約1 ps(全幅)で、計算値約0.7 ps(全幅)より若干長い結果が得られた。

金ミラーからのOTRを用いたストリークカメラによるバンチ長測定も試みたが、発光点からカメラまでの距離が約8 mと長く、色収差の影響等により得られたバンチ長は約2 ps(RMS)であった^[3]。

3.3 エミッタンスおよびビームサイズ

試験加速器のビームプロファイルは、蛍光板およびOTRを用いて加速器各所で測定を行った。図4に、バンチコンプレッサー中央(図1(e))での水平ビームプロファイルの測定結果と計算結果を示す。スクリーンに蛍光板を使用しているため、測定され

たプロファイルにはぼやけがあるが、ほぼ計算通りのエネルギー分散によるビーム拡がりが見られている。

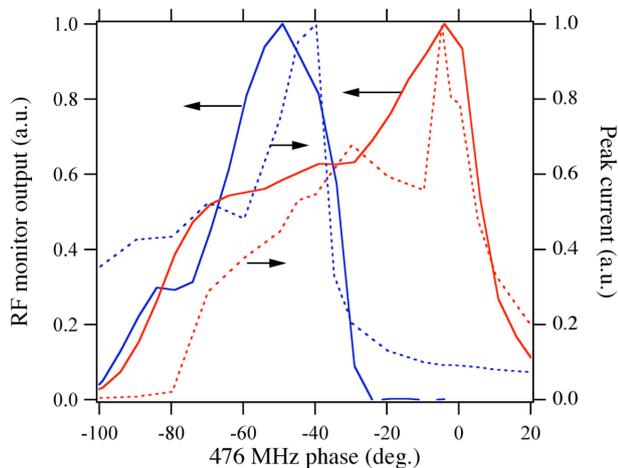


図3：476 MHz空胴のRF位相に対するマイクロ波波長計で測定したバンチ長の相対変化（実線）とPARMELAによるピーク電流の変化（点線）、青がAPS手前（図1(c)）、赤がAPS後（図1(d)）における測定および計算結果、476MHzRF位相は0°がクレストに対応

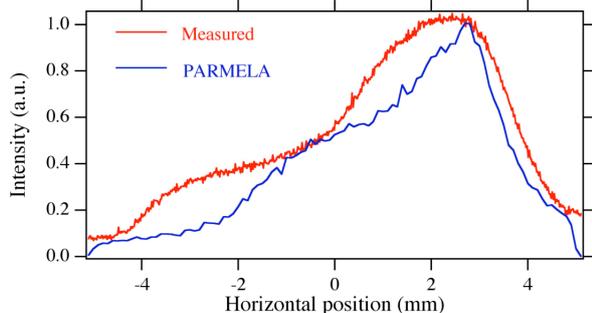


図4：バンチコンプレッサー中央（図1(e)）における水平方向ビームプロファイル、赤線が実測、青線がPARMELAによる計算

FELにとって重要なスライスエミッタンスは、現状の試験加速器では正確に測定できないため、エミッタンス評価は、四極電磁石の収束力を変化させるQ-scanによる射影エミッタンス測定によって行った。バンチコンプレッサー出口（図1(f)）とアンジュレータ手前（図1(h)）で測定した規格化射影エミッタンス（RMS）と、計算で得られた値を表1に示す。射影エミッタンスは、スリットの開口や電子ビーム収束系のエラー等によって変わることを見られると、計算値はかなりよい精度で測定値に一致しているといえる。

最終的にアンジュレータ手前（図1(h)）における、規格化スライスエミッタンスとピーク電流の計算値を図5に示す。現状では、ピーク電流とスライ

スエミッタンスは直接測定できていないが、間接的にレーザー増幅の電流やアンジュレータK値の依存性から推定されるビーム輝度（480から630 A/πmm-mrad程度）^[4]と計算値（約400 A/πmm-mrad）を比較すると、ほぼ設計通りのビームパラメータが得られていると思われる。

測定場所	測定値	計算値
バンチコンプレッサー出口（図1(f)）	$\epsilon_x = \text{約}3\pi$ $\epsilon_y = \text{約}3\pi$	$\epsilon_x = 2.8\pi$ $\epsilon_y = 2.6\pi$
アンジュレータ手前（図1(h)）	$\epsilon_x = \text{約}4\pi$ $\epsilon_y = \text{約}2\pi$	$\epsilon_x = 2.3\pi$ $\epsilon_y = 2.3\pi$

表1：規格化射影エミッタンスの比較（単位はmm-mrad）

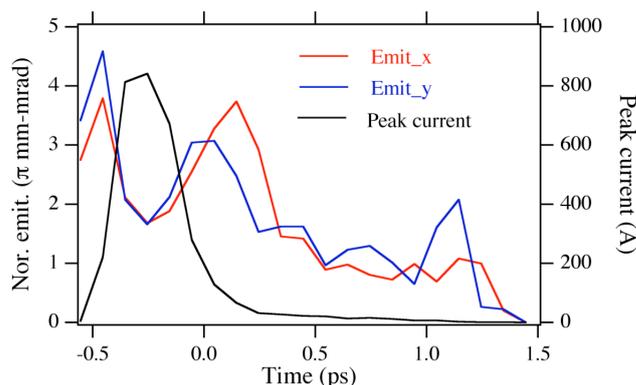


図5：アンジュレータ手前（図1(h)）での規格化スライスエミッタンスとバンチ形状、スライス幅は0.1 ps

4. まとめ

PARMELAのsimulationは、シケイン部のCSR効果が考慮されていないものの、低エネルギー部での空間電荷効果やバンチ圧縮の過程は、実際の加速器を比較的よく再現している。SCSSの8 GeV計画にとって最も重要な入射器部の性能が、試験加速器においてほぼ設計通り達成できたことは、今後8 GeV計画を進める上で大きな指針となる。

参考文献

- [1] K. Togawa, et al., "Emittance Measurement on the CeB₆ Electron Gun for the SPring-8 Compact SASE Source", Proceedings of the 2004 FEL Conference, 351-354, URL: <http://www.JACoW.org>.
- [2] 前坂比呂和 他, "SCSS試験加速器におけるコヒーレント遷移放射を使ったバンチ長測定のためのマイクロ波波長計の開発", in this proceedings.
- [3] 谷川貴紀 他, "SCSS試験加速器におけるフェムト秒ストリークカメラを用いた電子ビームバンチ長測定", in this proceedings.
- [4] 田中均 他, "SCSS試験加速器のビーム性能", in this proceedings.