

Status of SCSS Prototype Accelerator and XFEL Project in Japan

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

^{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)}KEK, 1-1, Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

^{D)}PAL/POSTECH, Pohang, Korea

Abstract

On 20 June 2006, the SASE amplification has been observed at 49 nm in SCSS test accelerator, which is prototype for the Japanese XFEL. A challenging approach: CeB₆ single crystal thermionic cathode generates low emittance DC beam from 500 kV gun, followed by velocity bunch compression by factor of a few 100 times, and magnetic chicane bunch compression, measured emittance was 3 π .mm.mrad normalized, made SASE amplification. The XFEL project, aiming at generating 1 Å coherent intense X-ray laser, 8 GeV normal-conducting accelerator, has been funded. The construction is scheduled 2006-2010.

SCSS試験加速器の現状、ならびにX線自由電子レーザー計画について

1. はじめに

波長 1 Å 領域のコヒーレント光源を目指す X 線自由電子レーザー (XFEL) 計画の加速器技術 [1] を総合試験するため、SPring-8 地区に建設を進めていた SCSS 試験加速器において、2006 年 6 月 20 日、真空紫外線領域において SASE-FEL のレーザー増幅を確認した。これによって、低エミッタンス電子入射器、Cバンド加速器、アンジュレータの技術的評価を行うことができ、実機 XFEL の設計、建設に技術的な裏づけを得た。

オングストローム領域にて SASE-FEL を実現するためには、まずは低エミッタンスの電子源が必須であり、つぎにこれをエミッタンスを壊さずにパンチ圧縮して所定のピーク電流に押し上げるシステム設計が必要である。すなわち、最終的に 1 π .mm.mrad という低エミッタンス (スライス値)、ピーク電流 3000 A、輝度 3000 A/ π .mm.mrad とい

う電子ビーム量が要求されるのである。

さてこのシステムの実証実験を行う場合の最大の問題は、その測定方法である。SASE-FEL の増幅ゲインを決定するスライスエミッタンスは 1 π .mm.mrad 以下、エネルギー分散は 1×10^{-4} 以下が要求されており、両者を正確に測定することは、事実上不可能に近い。

そこで、電子ビームをアンジュレータに通してレーザー増幅を行い、増幅率の測定等から逆に電子ビームのパラメータを評価する方が、総合評価となり、はるかに安全性が高くなる。レーザー増幅そのものが電子ビームの測定実験なのである。

2. 試験加速器の構成と建設

試験加速器の構成は次のように決定した。

- (1) 電子入射器は出来るだけ、実機 XFEL と同一の構成とした。ただし、L-band のバン

¹ E-mail: shintake@spring8.or.jp

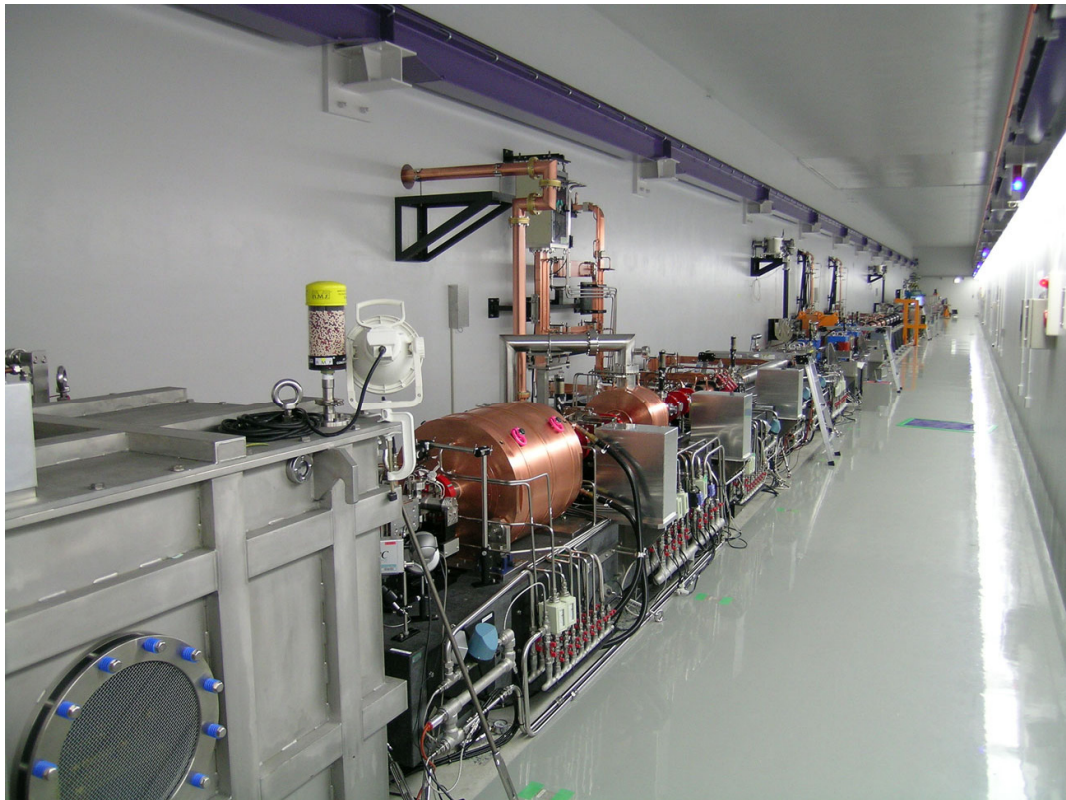


図1. SCSS試験加速器。ビームエネルギー250 MeVにて波長49 nmのSASE増幅に成功した。手前から 500 kV パルス熱電子銃、238 MHzサブハーモニックバンチャー、476 MHzブースター、S-band APSバンチャー、S-band 進行波加速管、50 MeVダンプ、Cバンド加速部、アンジュレータと続いている。トンネル全長 60 m。地上施設、左の壁の外に電源、制御、コントロール卓があり、アクセスが容易。

チャー加速部は、必要な 20 MWクラスのパルスクライストロンが建設期間内に入手不可とわかり、Sバンドにて実施したため、位相空間のアクセプタンスが8分の1となっており、予想されるビーム輝度はそれに比例して低い。実機ではLバンドとする。

- (2) ビームエネルギーが高い方が、発振波長が短く利用研究の幅が広がる。しかし建屋の長さ、建設コスト等の検討により、250 MeV、波長 60 nmとした。
- (3) アンジュレータの台数は、数値計算による電子ビームエミッタンスとピーク電流から飽和に届く2台とした。
- (4) 制御システムは、SPring-8にて構築され運転実績のある MADOCAを採用し、出来るだけ現存する資産を活用した。

具体的な建設にあたり、少ない人員の中で、この複雑な加速器を短期間に建設するために、組織を「横割り」とした。すなわち、クライストロンのパルス電源を担当するスタッフは、電子銃、Sバンドバンチャー、Cバンド加速器のすべての電源を担当する、電力、真空、冷却水、制御、設置、アライメントも出来るだけ横並びとした。理研の3研究室とJASRIが加わったグループの中でこれを実施した。アンジュレータ以外のすべての決定権を

筆者に与えていただき、この組織編制はすばらしい成果をあげた。試験加速器の建設決定時点2004年7月に、完成目標を1年半後の2005年10月末とした。そして予定通り10月末に完成し、そして11月末には、アンジュレータ下流まで電子ビームを運び、自然放射を確認した。

最初の立ち上げ試験で不具合のあった部分の手直しと、不足分の設置を2006年3月末までに完了。加速管のエージング、運転に必要なソフトの拡充を経て、連休明けの5月8日よりレーザー増幅に向けて本格的にビーム調整を開始した。

このビーム調整の詳しい解説は田中均が本会に報告しているので、そちらを参照していただきたい[2]。

3. 電子入射器

我々のXFEL計画と、そのSCSS試験加速器が、諸外国のプロジェクトと大きく異なっているのは、電子源である。すなわち単結晶 CeB_6 の熱カソードを採用し、サブハーモニックバンチャー、バンチャーの古典的な入射器の構成をとっていることである。この方針を取ったのは、古典的な構成の入射器を丁寧に見直せば、必ずや最適解が存在するだろうという予感があったためである。

熱電子銃を用いた場合の最大のメリットの一つ

が、メンテナンスフリーという事であって、これは「仕事が減るからいい」という意味ではなく、メンテナンスしなくても一定の性能が確保できるという意味。これによって、常に同じ特性の電子ビームが加速器に供給されるので、日々の運転でのパラメータの再現性が良いということである。X線FELでは、これが特に重要であって、アンジュレータ区間のビーム軌道のチューニングにミクロメートルの精度が要求され、また長さ100mにも及ぶアンジュレータ区間をすべてチューニングする必要があるために、上流のビームパラメータに変動や変更があっては調整が全く成り立たないのである。

さて具体的な設計を振り返ると

- (1) 必要なビーム電流を供給するカソードとしてLaB₆またはCeB₆のカソードがあり、電子顕微鏡の電子源としてマーケットが確立しており、高純度の単結晶が入手可能であった[3]。ただし、ニードル型ではなく、結晶をフラットにカットし、面源として1 A以上の電流を取り出している。CeB₆の方がLaB₆より、約2倍寿命が長いとの報告があり、CeB₆を採用した。ただし、1600度Cを超える運転では、LaB₆の方が、寿命が長くなるので注意が必要。
- (2) カソードの温度と面積から算出される理論熱エミッタンスが0.4 π. mm.mradであり十分に低い値とわかった。ただし面密度は30 A/cm²以上となる。
- (3) 面密度30 A/cm²の電流を温度制限領域とするには約400 kV/5cm以上の電圧が必要。
- (4) 一方、サブハーモニックバンチャーからバンチャー空胴へのビーム輸送において、空間電荷効果によってビームが受ける発散力は左式によっており、明らかに初期エネルギーが高い方がよい。

$$\frac{d^2r}{dz^2} = \frac{E_r}{m_0 c^2 (\beta\gamma)^3}$$
- (5) 電子銃に印加できる電圧は、クライストロンの最高電圧500 kVから決定した。電子銃の絶縁セラミックは現在までの運転で、幸い1回も放電パンクしていない、すばらしい。
- (6) 500 kVはパルスでなければ、実用にならない。我々の電子銃はなぜか、「DC熱電子銃」と誤解されているが、実際は、数マイクロ秒のパルス高電圧による「pulse熱電子銃」である。高電圧パルスは、クライストロン・モジュレータ電源から昇圧トランスを通して供給している。またインピーダンスのマッチングには、ダイオード電子管を用いている[4]。
- (7) 短パルスの切り出しのため、通常の熱電子銃では、グリッドを使用しているが、グリッドは明らかにエミッタンスを悪化させるので排除した。
- (8) 1 nsecのビームパルスの切り出し。幸い、JASRIの小林氏が電子銃のグリッドから出る暗電流をカットするためのビームデフレクターを開発中であり、1 nsec程度の切り出しに成功し

ていたのでこれを参考とした[5]。パルサーはイギリスのKenteck社製。バイアスコイルにてビームを曲げ、下流のモリブデンターゲットにて止める。1 nsecのパルスを50オームの平行平板に送り、ビームを曲げもどし、下流に送る。エミッタンスを壊さないような電極の設計を渡川君が詳細に行った[6]。

- (9) サブハーモニック・バンチャー空胴によって、電子ビームをバンチに形成する。その周波数をSバンドの12分の1に選定。固体素子の増幅器が入手できること、空胴の直径が極端に大きくならない範囲で選定した。この空胴とすぐ下流の476 MHzブースターが電子バンチのタイミングを決定するため、熱安定性、機械的安定性を重視し、空胴ノーズの中心軸をビームラインに正確にアライメントできる構造とした。詳細は柱野氏の報告を参照[7]。4台の固体増幅器の電力を合成する代わりに、加速空胴を合成器として使用しているのが、面白いアイデアである。
- (10) ブースター空胴。電子ビームが集群するにつれてピーク電流が高くなり、空間電荷効果によりビームが発散する。そこで、ブースター空胴によってエネルギーを1 MeV以上に上昇させ、相対論の効果によってビーム発散を抑える。高周波源はIOT (Eimac製、70 kW パルス出力)。空胴設計、製造については、柱野君の報告を参照[8]。
- (11) 収束系。従来の入射器は、あの大きな多数のソレノイドコイルに取り囲まれていて、メンテナンスがやりにくかった。また調整が容易ではなかった。そこで電子顕微鏡等で使われている磁気レンズ(小さなソレノイドコイルと磁気ヨーク)を用い、レンズ→ドリフト→レンズ→空胴→レンズというように、要素を空間的に分離し、パラメータを個別に調整できるようにした。これはいわゆるリング加速器のcombined functionからseparated functionの進化に相当する。
- (12) S-band APS空胴。476 MHz空胴のあとドリフト走行する間にVelocity bunchingによって電子バンチはさらに短くなり、いよいよ高電界加速器空胴によって高エネルギー領域に持ち込まれ、電子分布が相対論的效果によって固定される(電子の見かけの質量が大きくなり外乱に対して強くなること)。ここは出来るだけ周波数が低いほうが良い。しかし大電力マイクロ波が得られるのは、Lバンド以上の周波数。試験加速器の建設当初に20 MW程度のLバンドのクライストロンが入手できないので、試験加速器ではSバンドで代用することとした。空胴はAPS型の定在波。入力カプラ空胴を加速管の中央にもってくることで、低エネルギーの電子が入射する最上流の空胴では、対称性の良い電界が得られ、非対称電磁場によるエミッタンス破壊がない。APS空胴の製作の詳細は、稲垣君

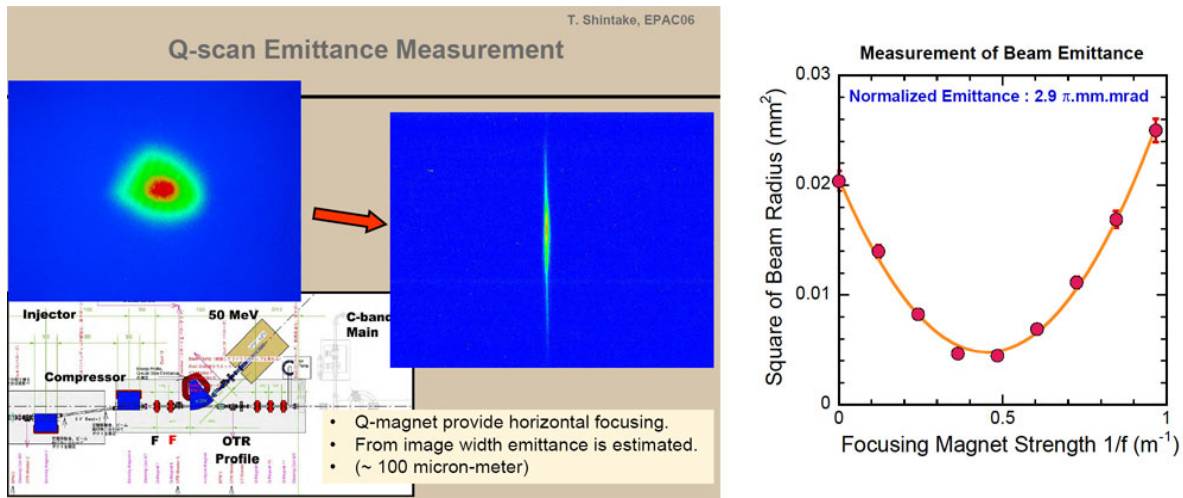


図2. エミッタンス測定。Qスキャン法によって、入射器出口でのエミッタンスを測定。

の報告を参照のこと[9]。

- (1 3) Sバンド進行波管、2 mの KEK-B向けの進行波管を使用している。これによって、電子ビームエネルギーは 50 MeVまで加速され、シュケイン磁場のバンチコンプレッサーに送られる。
- (1 4) シュケイン磁場型バンチコンプレッサー。上流の2 m進行波管での電子ビームの位相を、バンチング側、すなわち、バンチの頭が低エネルギー、テールが高エネルギーとなるように調節し、シュケイン磁場を通してバンチ圧縮する。基本設計では圧縮率2倍であるが、実際の運転では大きく変動させて最適値を適宜選定した。この詳細は、田中均、原徹の報告を参照[2][10]。興味深いのは、現在までCSR-instabilityらしき現象が観測されていないことである。熱電子銃からの電子ビームが時間的に滑らかで、振動源となる密度変動が混在していないのかもしれない。
- (1 5) RF制御系は各クライストロン別に独立に固体増幅器を有し、デジタル I Q変調、復調器によって高度な制御を可能としている。またC-bandのRFをタイミング同期に用いて、高精度のタイミングシステムが構築されている[11]。またこれには、Cavity-BPMの検出回路も含まれており、システムを簡素化している。

その他、試験加速器には数多くの新しい取り組みがなされているので、本会の関係の報告を参照されたい。

4. エミッタンス測定

入射器出口でのエミッタンスを測定した(図2)。ビームダンプ直前のQ磁石の1台の配線を逆転してFF配置とし、水平に強収束し、下流のOTRモニターにて幅を観測。Q磁石の強度を変化させてエミッタンスを測定し、 $2.9 \pi \text{ mm.mrad}$ という値を得た。ビーム電荷 0.25 nC、パルス幅 1

psec。数値シミュレーションとも良い一致を見た。

スライスエミッタンスの測定を50 MeVダンプヘビームを曲げて行き、y方向、 $2 \pi \text{ mm.mrad}$ という数値を得ているが、プロファイルモニターの分解能に制限されている。実際の値は、 $1 \pi \text{ mm.mrad}$ 以下と思われるが測定、数値計算ともに困難が多い。

5. レーザー増幅実験

下流のアンジュレータのギャップを閉め、軌道エラーをCavity-BPMにて修正し、下流においたスペクトロメータによって、発光のスペクトルを観測すると、SASE-FEL増幅によって、スペクトルは非常に狭くなっていることが観測された(図3)。また電流量を変化させると図4のように非線形の変化を示し、0.2 nC付近からSASE増幅が開始していることがわかった。この種のデータからSASEゲインを決定し、ピーク電流とエミッタ

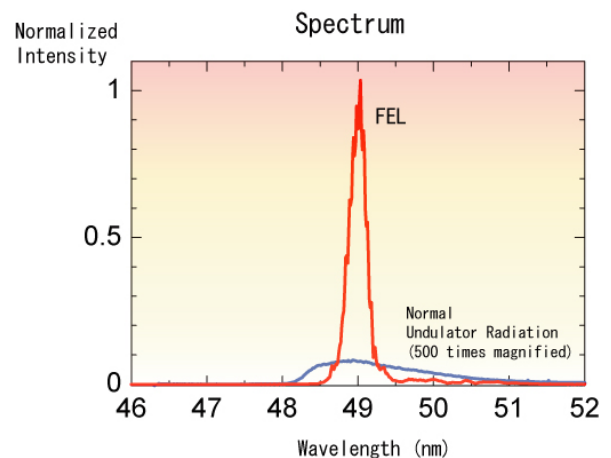


図3. 最初に観測されたSASE増幅を示唆するアンジュレータ放射光のスペクトル。幅が狭く、左右対称。ビームの電荷量を下げると、自然放射となり、幅が広く長波長側の裾が長くなり通常のアンジュレータ放射に特有なスペクトルとなる。(下の青色の広いカーブが自然放射、見やすくするため500倍に拡大している)。

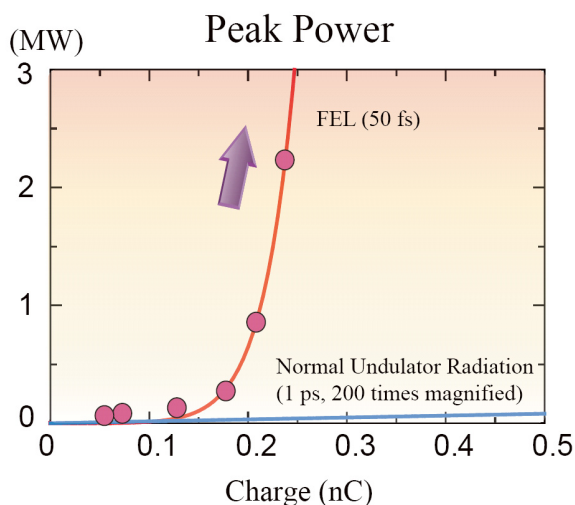


図4. 電荷量に対するFELピークパワー変化。2006年7月末までの調整で、飽和に近いデータが得られている。

ンスの比（すなわちビーム輝度）を推定するという評価を田中均君が行っており、 $400 \text{ A}/\pi\text{mm.mrad}$ という値が得られている[2]。また発生したFEL光の特性測定を矢橋君が行っており[12]、図5のようにvisibilityの高い干渉縞が得られている。

6. 実機建設

試験加速器にてレーザー増幅に成功し、そのデータ解析により電子ビーム輝度が目標内であることを確認し、低エミッタンス電子ビームの発生技術が完成したことを意味しており、XFELの実現が原理的に可能であることを示している。

しかし、試験加速器での運転によって、ハードウェアにいくつかの不具合が発見されており、これらについて設計変更、デバック、運転試験を実施しながら、実機の建設を行う必要がある。

クライストロンの数で80本近い加速器を新規に建設するという、大型プロジェクトであります。スケジュール等を注意深く見ながら、事故のないように遂行し、必ずやX線FELを完成させたいと思っております。

7. 謝辞

これまでSCSSの技術開発、試験加速器の建設に協力いただきましたメーカーの方々に感謝いたします。また昨年、春から秋にかけて不眠不休の闘いで建設に係わっていただいた方々、そして、この方々を背後から支えていただいたご家族の方々にも、ここに深く感謝いたします。

また論文のリストにない事務方、秘書そしてアルバイトの方々の見えない努力に深く感謝いたします。

皆さん、ほんとうにご苦労様、そして、ありがとうございました。

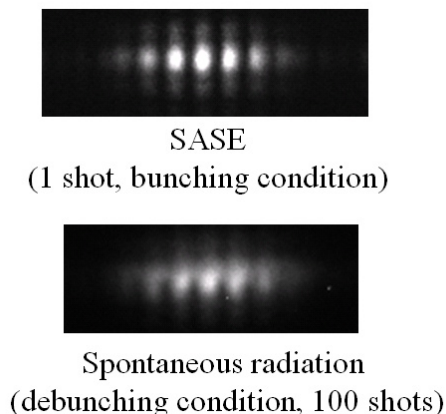


図5. 2重スリットによる干渉試験。
(スリット幅 $100 \mu\text{m}$, 間隔 $400 \mu\text{m}$)、SASE増幅では、干渉性の高い波が得られている[12]。

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] H. Tanaka, *et al.*, "Beam Performance of the SCSS Prototype Accelerator", this meeting.
- [3] FEI Beam Technology.
<http://www.feibeamtech.com/>
- [4] Diode tube matching method was suggested by H. Matsumoto.
- [5] T. Kobayashi, *et al.*, "Development of the beam deflector", Proc. of the 25th Linear Accelerator Meeting in Japan, Himeji, July 12-14, 2000.
- [6] K. Togawa, *et al.*, "Beam deflector system to generate a low-emittance short electron bunch", this meeting.
- [7] T. Hashirano, *et al.*, "Development of the 238MHz Cavity for SASE-FEL", Proc. of the 2nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 30th Linear Accelerator Meeting in Japan(2005), pp340-342
- [8] T. Hashirano, *et al.*, "Development of 476MHz Cavity for SASE-FEL", this meeting.
- [9] T. Inagaki, *et al.*, "Construction and operation of S-band APS-type accelerating structure for SCSS injector", this meeting.
- [10] T. Hara, *et al.*, "Comparison of PARMELA simulation and measured parameters on SCSS prototype accelerator", this meeting.
- [11] Y. Otake, *et al.*, "Sub-pico-second Trigger and Phase Control for SCSS", this meeting.
- [12] M. Yabashi, *et al.*, "VUV diagnostic system for SCSS Prototype Accelerator", this meeting.