

R&D STATUS REPORT ON SCSS X-RAY FEL PROJECT AT RIKEN/SPRING-8

T. Shintake^{1,A)}, K. Togawa^{A)}, T. Inagaki^{A)}, T. Tanaka^{A)}, T. Hara^{A)}, H. Kitamura^{A)}, T. Ishikawa^{A)}, H. Baba^{A)},
K. Onoue^{A)}, Y. Otake^{A)}, K. Shirasawa^{A)}, T. Bizen^{B)}, T. Seike^{B)}, M. Xavier^{B)}, Y. Kawashima^{B)}, T. Takashima^{B)},
S. Matsui^{B)}, Z. Chao^{B)}, H. Ego^{B)}, S. Takahashi^{B)}, T. Kudo^{B)}, T. Fukui^{B)}, T. Ohata^{B)}, R. Tanaka^{B)}, N. Kumagai^{B)},
H. Matsumoto^{C)}, M. Yoshida^{C)}

^{A)} RIKEN Harima Institute, SPring-8, Koto, Hyogo, 679-5148, Japan

^{B)} JASRI SPring-8, Koto, Hyogo, 679-5198, Japan

^{C)} KEK, Tsukuba, 305-0801, Japan

Abstract

In the low-emittance electron source development, we started operational test of the 500 kV pulsed thermionic gun in the end of 2003, where we have performed series of emittance measurements^[1]. Typical value of the transverse emittance was 1.1 π .mm.mrad at 1 Amp. peak, 2 nsec time-slice in micro-sec beam, 500 kV gap voltage. It satisfies the required emittance value for the future X-FEL machine based on SASE at Angstrom region. For the next step, we are designing beam bunching system using sub-harmonic buncher. As the high-gradient accelerator development, we are preparing the high power test of the Choke-Mode type accelerator structure^[2]. About the undulator, the first model of the in-vacuum type FEL undulator (15 mm pitch) was manufacture and tuned. We applied a minor change in the hanger structure to obtain superior stability. We are doing various R&Ds in parallel, such as the laser beam alignment system, precise water temperature control system^[3], automatic control system using PLC^[4], and trigger timing system of sub-pico-second precision.

SPring-8 SCSS計画 (X線FEL技術開発)の現状

1. はじめに

X線領域(波長が1Å以下)のレーザーは、現在のところ、SASE-FEL(自然放射自己増幅型FEL)が唯一実現可能な方式として国際的に認知され、SLAC-LCLSが筆頭にプロジェクトが進行中であり、TESLA-XFEL、PAL-XFELなどがこれにつづいている。日本国内では、正式な形でX線領域のSASE-FELはまだ提案されておらず、国際的な立ち遅れが懸念される。

波長1ÅのX線をアンジュレータで発生させるには、短波長の真空封止型を用いても、電子ビームのエネルギーとして6 GeV以上が必要となり、加速器としてかなり大型の大規模プロジェクトとなり、その実現性につき慎重な検証が必要である。

理研播磨研究所(RIKEN/SPring-8)では、X線FELに必要な技術の習得と、SASE-FELの実用性の検証のため、電子エネルギーが1 GeVの軟X線FEL計画(SCSS)を2002年にスタートした。現在、各要素の技術開発を行っている。

2. 理研SCSS計画の特徴

SCSSとはSPring-8 Compact SASE Sourceの頭文字をとったものであり、

(1) 低エミッタンス電子銃

(2) 高電界Cバンド加速器技術

(3) 短波長の真空封止型アンジュレータ

の3つの技術によって、全長100m以内の装置にて波長4 nmの軟X線FELを実現するものである。これは、諸外国の同種のプロジェクトに比べて格段に短いため、プロジェクトの特徴として“Compact”性を強調している。より広くこの種のFELを利用できるようにするために、装置のコンパクト化を行い、施設のコストの低減を図っているのである。

図1にSCSSの構成を示す。単結晶CeB6の熱電子銃から低エミッタンスビームを発生させ、入射加速器によりバンチ化し20 MeVまで加速、Cバンド加速器1ユニットにより250MeVに加速後、バンチコンプレッサーにてバンチ長を1/4に圧縮、さらに3ユニットのCバンド加速器によって1 GeVのビームを得て、5台のアンジュレータ(15 mm周期、4.5 m長)に通し、SASE-FEL動作を行い、電子ビームはアンジュレータ下流でダンプし、軟X線ビームをミラーにて取り出し、ユーザー実験室へ供給する。予測される最高出力は、波長3.6 nmにて2 GWである。

さて電子バンチの圧縮過程において、バンチャー空洞のモジュレーション電圧の非線形、加速電界の非線形、Longitudinal wakefieldの非線形などのために、バンチ内部の電流密度が中央だけが鋭くデルタ関数的にピークを形成する。このピーク部分のみ

¹ E-mail: shintake@spring8.or.jp

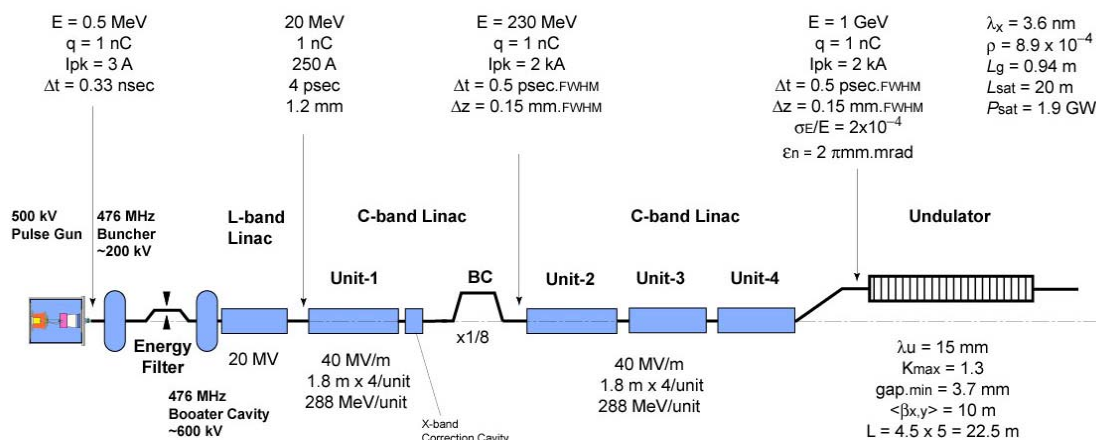


図1 SCSS: SPring-8 Compact SASE Source システム図

が、FELに寄与し、残りは自然放射を発生しミラーへの熱負荷となる。SLAC-LCLSなどでは、バンチ内密度分布をできるだけフラットになるように高調波空洞などで補正を行っている。しかし我々は、むしろデルタ関数的なピーク波形がフェムト秒のFEL光を発生できるので、好都合と考えており、高調波空洞はあえて準備していない。

さてSASE-FELでは、初段のアンジュレータから発生する自然放射（ノイズ）を後段のアンジュレータによって増幅させ、飽和までもってゆく。このため、パルス内の時間方向のコヒーレンシーがなく、またパルスごとのパワーも不安定となる。これを改善するため、通常のパルスレーザー光のシード光を入れることも検討しており、ガス励起の高調波発生によって10 nm程度までのSeedingは容易に実行可能である。この方法により、波長、位相、パワー、空間分布ともに安定な光が得られるようになるが、この技術をX線領域にまで拡張することは、容易ではないと考えている。

3. 電子入射器

寿命、安定性、再現性、取り回しなどを考慮して、熱カソードを用いた電子銃を採用した。フォトカソードを用いた電子銃は、レーザーパルスによって電子を発射するので、サブピコ秒の同期が容易に取れるという大きなメリットがあるが、上記の理由で採用しなかった。熱電子銃からのビームは、入射器のバンチャー空洞の高周波電界によりバンチ化するので、この高周波と同期をとることになる。

熱カソードからの電子ビームのエミッタンスの要因は、

- (1) 横方向の熱運動エネルギー
- (2) カソード表面の凹凸、表面の活性化の不均一性
- (3) エッジ放射

などがあり、それぞれに対して次の対策をとった。

(1) エミッタンスは位置と運動量の積であるかた、カソード半径を小さくして熱エミッタンスを低

く抑えた。ただしその分、電流密度が大きくなるので高エミッションの取れるランタノイド(La, Ce)を採用し、また空間電荷に打ち勝つに十分な高電圧(500kV/5cm)を印加。ただしランタノイドのカソードは1500℃まで加熱する必要があり技術開発に集中した。

(2) は単結晶カソードを採用。具体的にはCeB6の<100>面を使用しており、高温で自然蒸発により平坦な<100>面が維持される。システムの中で最も高温であり、周囲からのコンタミがない。

(3) は、カソード・ロッドを電子放出が少ないグラファイトに埋め込むことで、エッジからの放射をゼロにしている。

図2がスリットを用いて測定されたエミッタンスの位相プロットである。規格化エミッタンスは1.1 π. mm. mradであり十分にSASE-FELに必要な性能を満足する。若干のテールの成長が見られるが、実機では円形スリットにより切り取るため問題とならない。電子銃について渡川が本会で詳しく報告しているのでそちらを参照していただきたい。

このエミッタンスは電子銃直後の長いパルス(2 micro-sec)での値である。今後これをデフレクターで2 nsec分だけ切り出し、バンチャー空洞等で圧縮し、さらにシユケイン磁場によって圧縮すると、空間電荷効果や、空洞での不要なキック、CSR放射による分散、加速管でのWakefield、アンジュレータ内部でのResistive Wakefieldなどによってエミッタンスが大きくなってゆく。ただし、これらはすべてCollective Effectであり、あくまで位相空間での大きな構造が変化するだけであり、微細な構造は崩れない。幸い、SASE-FELの増幅現象において、光がバンチ内部の進行方向にローカルな範囲(数十マイクロン、Cooperation Lengthという)でしか伝播しないので、大きな構造変化(Projected Emittance Growth)がFELゲインを劣化させない。先に述べたように、我々の設計では、意図的にバンチ電流の形状をデルタ関数的にしており、FELに寄与する部分の長さは数十マイクロンと考えられ、この範囲のエミッタンス(Slice Emittanceという)が壊れなければ良い。詳しい

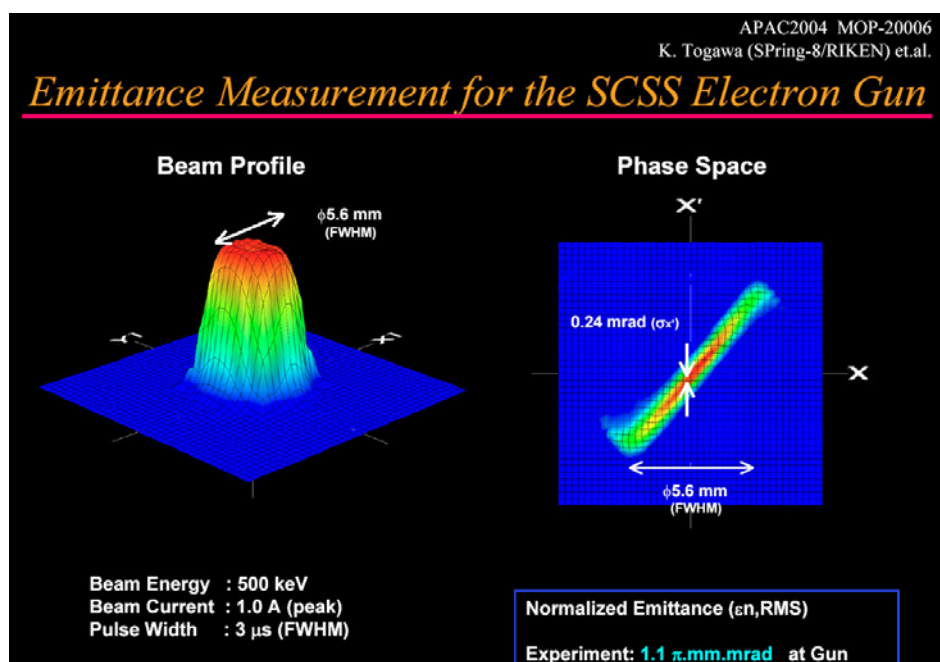


図2 測定されたビームプロファイルと位相空間プロット

計算によると、Slice Emittanceは、シュケイン磁石での放射光発生にともなう光子からの反作用でしか壊れず、これは無視できるぐらい小さい。従って、電子銃直後に測定されたエミッタンスが保存され、アンジュレータ区間でのSlice Emittanceに近いと考えても良い。今回測定されたエミッタンスは、軟X線のSASE-FELに十分な値である。

3. Cバンド加速器^[5]

KEKに於いてリニアコライダー向けに開発された、Cバンドの高電界加速システムを採用し、関連機器の改良を行ってきた。密閉型のパルス・モジュレータ、インバータ電源、インバー材料を用いた温度安定化パルスコンプレッサーなどがあるが、詳しい情報はホームページ (<http://www-xfel.spring8.or.jp>) にすべてまとめてあるので参照願いたい。そのひとつを紹介すると、Cバンドでは従来のSバンド加速器に比べて2~3倍の加速勾配で運転するため、加速管での発熱が大きく、加速管の温度をモニターしながら冷却水温度をダイナミックに制御するシステムを開発した^[3]。なお現在、加速管の高電界試験の準備を行っており、稲垣が本会にて詳しく報告している^[2]。

4. 省配線

一般に加速器を建設するさい、トンネルや電源室に機器を搬入してから、電源ライン、制御線、冷却水などをつなぎこみ、試験立ち上げを行う。この工程が複雑かつ長期に渡り、これにかかる人件費がばかにならない。そこで我々は、(1)出来るだけ機器をユニット化し、(2)搬入前に試験を終了させ、(3)繋ぎ込む線の数を減らすという方針で設計を進めている。特に制御線の数を減らすため、産業界でよく

行われている「省配線」設計を採用し、たとえば、電源の制御は、電源内部にPLC (Programmable Logic Controller)を組み込み内部の制御を行い、上位の制御システムとの情報交換は、通信を使用し、配線を電源から引き出さない。ただし、安全上、非常に重要な回線だけは、ハードワイヤを併用する。またPLCが現状でハンドルできない情報、例えば数マイクロ秒のパルス波形などは、VME上のADCに繋ぎ込む必要が残されているが、上記の方式で、配線の数を圧倒的に少なくすることができ、立ち上げの時間、費用が大幅に削減される。また機器の故障時の交換作業が容易

になる。このようなことが可能となった背景には、PLCの高性能化、そして完成度が高くなったこと、十分な数のPLC機器が市場に準備され使用されデバッグされており、低価格であり、これを取り扱うエンジニアを得やすいことなどがあげられる。ただし将来のメンテナンスを考えて、すべての機器に共通のPLCを採用し、できるだけ単純な構成とし、ドキュメントを共有資産として公開保存する方法の確立がこれからの課題と考える。

5. SCSS計画の今後

- 2004年度はR&Dを継続する。R&D項目として、
- (1) サブハーモニック・バンチャの開発、バンチング試験、エミッタンス測定。
 - (2) アライメント・テストビームラインの設置。
 - (3) Intelligent ADC, RF Vector Modulator/De-Modulator 開発。フィードバック試験。
 - (4) RF-reference, 基準タイミングシステム開発
 - (5) 制御システムの整備。MADOCA導入。
- 加速器の建設は、2005年度以降に実施する予定。

参考文献

- [1] 渡川、"CeB6電子銃のエミッタンス測定結果とX線FELへの応用について"、本研究会。
- [2] 稲垣、"C-bandチョークモード型加速管の高電界試験"、本研究会。
- [3] 高橋、"Cバンド加速管の精密温調システム"本研究会。
- [4] 尾上、"PLCを用いた自働RFエージングコントロールシステム"、本研究会。
- [5] 松本、"Present Status of the C-band Activities at KEK"、本研究会。