

SCSS 軟X線FEL計画の技術開発現状

新竹 積^{1,A)}、渡川和晃^{A)}、稲垣隆宏^{A)}、田中隆次^{A)}、原 徹^{A)}、北村 英男^{A)}、石川 哲也^{A)}、
馬場 齊^{A)}、尾上和之^{A)}、中田太志^{A)}、備前輝彦^{B)}、清家隆光^{B)}、Marechal Xavier^{B)}、
川島祥孝^{B)}、高嶋武雄^{B)}、工藤統吾^{B)}、松井佐久夫^{B)}、張 超^{B)}、恵郷博文^{B)}、齋野恵太^{B)}、高橋 直^{B)}、
松本 浩^{C)}、吉田光宏^{D)}、佐伯学行^{D)}

^{A)}理化学研究所、播磨研究所 (SPRING-8/RIKEN) 〒679-5148 兵庫県佐用郡三日月町光都1-1-1

^{B)}高輝度光科学研究センター (SPRING-8/JASRI) 〒679-5198 兵庫県佐用郡三日月町光都1丁目1-1

^{C)}高エネルギー加速器研究機構 (KEK) 〒305-0801 茨城県つくば市大穂1-1

^{D)}東京大学素粒子物理国際研究センター(ICEPP) 〒113-0033 東京都文京区本郷7-3-1

概要

将来、オングストローム領域のX線自由電子レーザー (XFEL)を実現するために、まず軟X線でのFELを実証すべく、理研・播磨研究所ではSCSS計画を実施している。SCSSの特徴である「コンパクトなFEL」を実現するために、Cバンド高電界加速器、短周期の真空封止アンジュレータ、そして電子銃には単結晶CeB6カソードを採用し、その技術開発を行っている。また将来のユーザー利用を考慮して「ビームの安定性」を最重要課題に取り上げ、技術開発を行っている。

1. はじめに

SCSS [1] 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”を強調している。いわゆるSASE型の自由電子レーザーではノイズレベルのX線パワーを、極めて長いアンジュレータによってGWレベルの強力なX線パワーに増幅するため、装置が長大になり、これに伴って建設コストもはねあがる。また供給できるビームラインも10本以内にとどまるため、コストパフォーマンスが極めて低いマシンとなる。この問題を解決し、将来より広く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っているのである。

SCSSでは、広く実用に供するために「ビームの安定性」を最重要課題に取り上げ、各要素の開発を行っている。すなわち、

(1) 電子源の安定化：低エミッタンス電子銃のカソードに、電子顕微鏡のカソードに使用されている単結晶CeB6を用いた熱電子銃を採用しており、長寿命(数万時間)が実現可能。さらに、これに用いる高電圧電源の安定化、カソード温度のフィードバック等により、ビーム電流の安定化(変動 1×10^{-3} 以内)が期待できる。

(2) 高品質電子ビーム：電子銃の加速電圧を

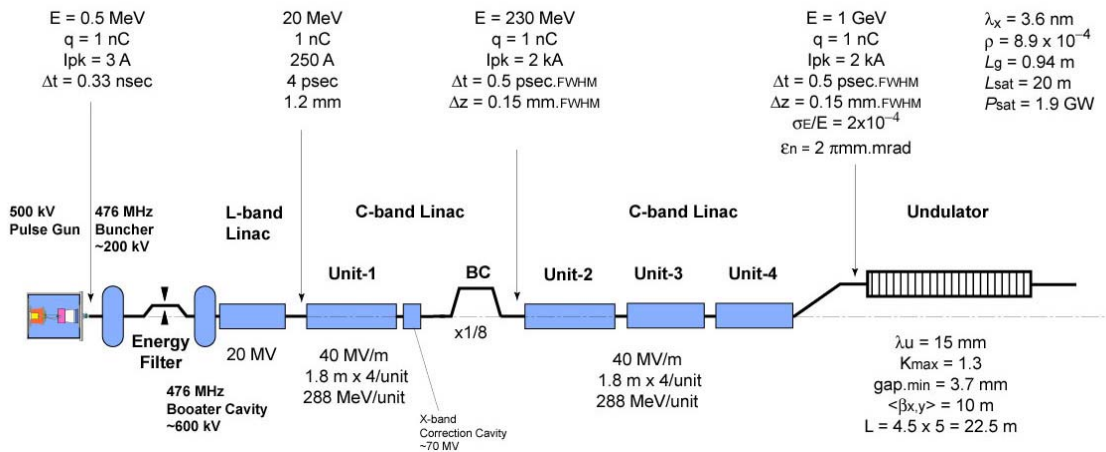


図1 SCSS: SPRING-8 Compact SASE Source :システム図

¹ E-mail: shintake@spring8.or.jp

500 kVとし、相対論の効果により空間電荷によるビームの発散をおさえ、エミッタンスが小さく (2π -mm-mrad以下)、かつハローの極めて少ないクリーンな電子ビームを発生する入射方式を採用。

(3) 加速エネルギーの安定化：クライストロン電源にインバータ方式の高電圧電源を採用し、その安定制御技術を開発中である。現在 2×10^{-3} の安定度が得られているが、さらに一桁以上の改善をめざし、回路技術を検討中。これにより近い将来は 1×10^{-4} の波長安定度が保証できるだろう。

(4) 電子軌道の高精度制御：分解能100nm以下の空洞型ビーム位置モニターがリニアコライダー研究ですでに開発済みであり、これをアンジュレータ間のビーム位置制御に応用する。また、このビーム位置モニターを設置する架台として、熱膨張の極めて小さい (0.1×10^{-6})セラミック (コージライト) を使用した架台を開発中である。

(5) 加速器を収納する加速器建屋を、日照等による影響を出来るだけ押さえるべく、建物の向き、壁の構造、機器の配置など詳細な検討を行っている。

2. SCSS 加速器

SCSSのシステムを図1に示す。電子ビームの最高エネルギーを1 GeVと設定し、アンジュレータを真空封止型として、その周期長を無理なく実現可能な最短の15 mmに選ぶと、最短波長3.6 nmが得られることになる ($K=1.3$ のとき)。これはちょうど水がX線に対して透明、有機物が不透明といういわゆるWater Window領域であり、生体物質を生きのまま観測するというX線顕微鏡の実現が期待される。発生する放射光はきわめてピークパワーが大きく数GWレベルである。このため広範囲な分野への貢献が期待されているが、その有用性は未知の部分が多いのも事実である。

3. 要素技術開発から

ここでは、現在行っている技術開発の中から、いくつか抜粋して報告する。なおCバンド加速器の技術開発については、KEKの松本、及び理研の稲垣が本会にて発表しているのので、そちらを参照していただきたい[2, 3]。

3.1 単結晶CeB6カソードを使用したパルス電子銃

SASE-FELにて問題となるエミッタンスは、X線と電子ビームがアンジュレータの中で相互作用するときの“Cooperation Length”または“Slippage Length”の中での“Slice Emittance”であり、電子パンチを進行方向に数ミクロンから数十ミクロンの厚みにスライスして切り取ったディスク状の電子雲についてのエミッタンスである。空間電荷効果やバンチャー空洞でのRFキックによるエミッタンスの増大は、“Projected Emittance”であり、パンチ長全体にわたる投影である。Slice

Emittanceは内部エミッタンスに相当するものである。表面が極めて平坦な単結晶カソードから静かに電子を引き出せば、熱運動のみが問題となり、極めて小さいスライスエミッタンスが得られるものと期待される。計算によるとエミッタンスは 0.4π -mm-mradである。詳細は渡川が本会にて発表しているののでそちらを参照していただきたい[4]。

3.2 空洞型ビーム位置モニター (Cavity RF-BPM)

アンジュレータの区間において、正しくFELが増幅作用をするには、電子ビームの軌道をかぎりなく直線にし、発生するX線との重なりを確保しなくてはならない。最近の数値計算によると、4.5 m長のアンジュレータを使用するとき、軌道の偏差の許容値は約10ミクロンメートルである。すなわち、1 GeV SCSSにて5台のアンジュレータ区間におき、電子ビームの軌道を ± 10 ミクロンメートル以下にアライメントしなくてはならない。

これを達成するには、(1) Beam-based alignment または、(2) ビーム位置モニタを基準にアライメントするという二つが考えられるが、SCSSでは方式(2)を採用し、この目的のためにCavity RF-BPMを開発している。(1)の方式では、入ってくる電子ビームのパラメータに左右されやすいこと、加速管からの暗電流成分があると信頼性が低くなること、チューニングに時間がかかることなどが問題である。

Cavity RF-BPMは、リニアコライダーの研究開発の一環としてすでに、1996年よりSLAC-FFTBにて試験を行い、その位置分解能については23 nm というレコードを記録している[5]。

絶対位置精度については、同位相モードの混ざりこみが問題となり、これを解決するための構造としてスロットのある空洞を提案し、y方向のみを検出できるCOM-Free Cavity BPMを製作し、コールド試験にて機械加工基準とBPM読み出しの電氣的基準とが10ミクロンメートル以内であることを実証した。

現在、SCSS向けに、xとy両方を同時に読み出すための空洞を製作し試験を行っている (図2) [6]。

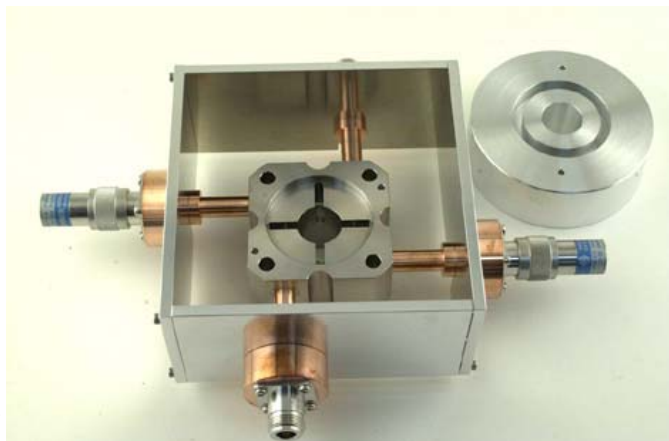


図2 コールド周波数測定中のCavity-BPM空洞。

3.3 アライメントレーザー

上記のRF-BPMを直線にならべるために、HeNeレーザーを使用する予定である。ただし、空気による擾乱のため数十メートルにわたり10マイクロメートルという精度が得られないので、真空中、それも電子ビームパイプに直接通すこととした。

さいわい、SCSSにて採用しているアンジュレータは、真空封止型であり、磁石ギャップを開放でき、ここにレーザービームを通すことができる。Cavity-BPMの口径20mmが最小口径であるが、HeNeレーザーであれば、容易に100メートル区間にわたりほぼ平行にビームを飛ばすことができる。

従来、フレネルゾーンプレート等を使用したアライメント方式が採用されているが、

- (1) パターンをガラスなどの基板に蒸着するので、放射線によりガラスが着色する可能性があること。
- (2) 比較的高価であること。
- (3) CCDカメラを使用し、2次元のデータ解析を実施すれば、かならずしも点状のスポットにレーザー光を収束して位置決定する必要がない。

などの理由により、単純なアイリスをビームラインに挿入し、これによるAiry Imageの重心を測定することとした。このアイリスは、空気シリンダの駆動装置により、Cavity-BPMの背面に設けた基準面につき当たり、位置精度を確保する。

気中ながら3mm径のアイリスをXYステージにセットし、約20メートル下流に飛ばしてCCDカメラにて重心を測定する実験を行ったところ、10マイクロメートルのステップ移動が正確に読み出されている。

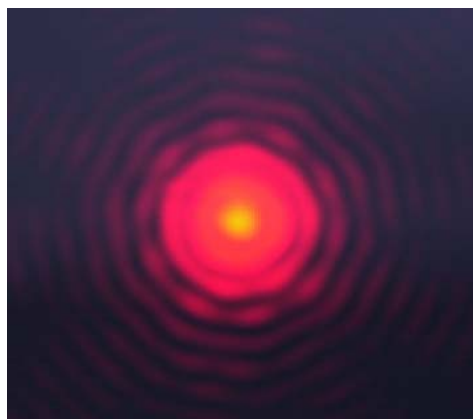


図3 HeNeレーザーのAiry Image. 直径4mmのアイリスを使用し、下流約5mに置いたCCDカメラにて撮影。位置情報は、単純に強度の重心を求めている。

3.4 温度安定化架台

上記のCavity-BPM、アライメント用のアイリスを載せる架台にも、安定なものが要求される。通常行



図4 低熱膨張セラミック（コーザライト）を使用した安定架台。

われるように、鉄のフレームを使用すると、高さ600mmの架台にたいし、1℃の温度変化でも6マイクロメートルも変動し、すでにアライメント許容値にちかい。

そこで温度変動に対して安定な架台を開発している。インバー材は熱膨張係数が小さいことは知られているが、価格的に問題があり架台には採用できない。コーザライトというセラミックは熱膨張係数が広い温度範囲で 1×10^{-6} と小さく、工業的に温度変動の激しいところの耐熱材料として使用されてきた。特に室温では、熱膨張係数が 0.1×10^{-6} 程度と著しく小さい。このばあい1℃の変化で600mmの架台の高さは60ナノメートルしか変動しない。コーザライトは機械的強度も十分であり、また比較的に安価であるため、これを使用した架台を開発中である。

4. スケジュール等

建屋等の問題から、SCSSは当初のスケジュールより遅れが生じているが、技術的な問題は着実に克服しており、2006年のビーム運転には軟X線のビームが期待通り得られると予想される。

ここで開発された要素技術を用い、SCSS計画の第1期である軟X線FELを実証し、これをもとに、オンダストローム領域のX線FELを早期に実現したい。

参考文献

- [1] <http://www-xfel.spring8.or.jp>
- [2] 松本浩、「C-band加速器の開発研究の現状」、本研究会
- [3] 稲垣隆宏、「C-band クライストロン用 コンパクト密閉型変調器電源の大電力試験」、本研究会
- [4] 渡川和晃、「Spring-8軟X線自由電子レーザー計画に用いるCeB6電子銃の開発」、本研究会
- [5] T. Slaton, "Development of Nanometer Resolution C-band Radio Frequency Beam Position Monitor in The Final Focus Test Beam", SLAC-PUB 7921, August 1998.
<http://www-xfel.spring8.or.jp/publications/RF-BPM>
- [6] T. Shintake, "Cold Test Measurement for Four-slot COM-Free Cavity BPM Ver.2003", June 2003.
<http://www-xfel.spring8.or.jp/presentations/RF-BPM>