

ELECTRON BEAM SLIT FOR XFEL/SPRING-8

Shinobu Inoue ^{#,A)}, Atsushi Higashiya ^{BD)}, Hiroyasu Ego ^{BC)}, Sunao Takahashi ^{BC)}, Yuji Otake ^{BC)}

^{A)} SPring-8 Service Co., Ltd. (SES)

2-23-1 Koto, Kamigori, Ako, Hyogo, 678-1205

^{B)} RIKEN, XFEL Joint Project /SPring-8

1-1-1, Kouto, Sayo, Hyogo, 679-5148

^{C)} JASRI, XFEL Joint Project /SPring-8

1-1-1, Kouto, Sayo, Hyogo, 679-5198

^{D)} Industrial Technology Center of Wakayama Prefecture

60, Ogura, Wakayama, Wakayama, 649-6261

Abstract

An electron beam slit has been developed for beam tuning at the x-ray free electron laser facility of SPring-8 (XFEL/SPring-8). This electron beam slit was designed by taking into account the stopping range, the thermal analysis and the wakefield. The material of the slit was chosen to be tungsten (5cm in thickness) because of its specific gravity and heat-resistant characteristics. The tungsten block is joined to a copper rod with a brazing method in order to minimize the temperature increase. The two copper rods of the slit are alternately settled along the longitudinal direction of a beam. To reduce a wakefield, round chamfering is applied to the edges of the tungsten and the vacuum chamber. The slit has two copper rods with tungsten blocks and each of them is mounted on a motorized stage. Therefore, both width and position of the slit can be changed. We measured the position accuracy of the motorized stage with a laser tracker, and the result of 10 μm positioning accuracy was sufficient for the XFEL accelerator.

X線自由電子レーザー計画における電子ビームスリット

1. はじめに

現在 SPring-8 キャンパスに建設中の X 線自由電子レーザー (XFEL/SPring-8) では超短バンチビームを生成する必要があるため、3カ所の磁気シケイン型バンチ圧縮器を設置している^[1]。また、アンジュレータ上流にも1カ所シケインを設置している。これらのシケインのエネルギー分散部では、不要なエネルギーテール成分や加速管からの暗電流を除去するために、100 μm 以下の水平位置精度で電子ビームの整形を行う水平駆動型の電子ビームスリットが必要である。

磁気シケイン型バンチ圧縮器では、電子ビームに大きなエネルギーチャープが付いている。このために分散部では最大 50mm の扁平ビームとなるため、電子ビームスリットはこの扁平ビームに適した構造である必要がある。4カ所のシケイン部でのビームエネルギーはそれぞれ、0.03GeV, 0.45GeV, 1.45GeV, 8GeV である。

8GeV シケインに設置される電子ビームスリットでは最大 150W の熱負荷が推測されるため、この熱負荷に十分耐えうるスリット材の選定や熱設計が必要となる。また、ビームダクト部からスリット材に至る経路には構造の変化があり、かつ、電子ビームがスリット材のすぐ近くを通過するため、強い航跡場の発生が考えられる。したがって、航跡場の影響を低減するための配慮が必要である。

本稿では、熱負荷・航跡場を考慮した電子ビームスリットの設計・製作について報告する。

2. 電子ビームスリットの概念設計

2.1 概要

4 台の電子ビームスリットは、エネルギーなどの条件が異なるものの、設計・製造コスト面を考慮し同じ設計方針で開発することとした。まず概略構造を決定し、次にビームエネルギー8GeV、電荷 0.3nC の条件でスリット材を選定した。また、熱解析を行いスリット材の熱負荷対策を決定した。最後に航跡場の対策方法を決定した。

2.1 概略構造

図 2 に示すように、電子ビームスリットは各々開

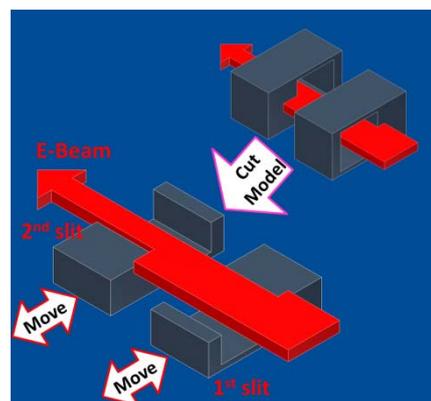


図 2：電子ビーム基本構造

口を持ったスリットブロックをビームの縦方向にオフセットした2つの異なる水平可動軸に設置し、ビームに対するスリットの横断面方向の開口射影面積を変更する構造とした（以下、開口投影面積型電子ビームスリットとする）。これはスリットブロックが同軸上に対向する構造では、何らかのトラブルでスリットブロックどうしが衝突し破損する恐れがあるためである。

2.3 スリット材

スリット材の候補としてグラファイトとタングステンを選び、検討をおこなった。グラファイトは、XFEL/SPring-8の技術試験の目的で建設されたSCSS試験加速器の0.03GeVの磁気シケイン型パンチ圧縮器に設置された電子ビームスリットに用いられている。グラファイトは熱負荷に強く、中性子の発生が比較的少ないという特徴がある。タングステンは、比重が重く放射長 X_0 が短い。そのため、コンパクトな設計が可能である。また熱負荷にも比較的強い。スリット材の選定を行うために、ビームエネルギー8GeVの電子ビームがグラファイトとタングステンに入った場合のエネルギー損失計算を行い、必要な厚さを求めた。計算に用いた式は以下のものである^[2]。

$$\frac{dE}{dt} = E_0 b \frac{(bt)^{a-1} e^{-bt}}{\Gamma(a)} \quad (1)^{[2]}$$

グラファイト：a=4.7, b=0.6
タングステン：a=4.0, b=0.5

ここに、tは物質の放射長 X_0 の単位で測った長さ、a, bは電子のエネルギーと物質の種類によって決まる定数である。

グラファイトとタングステンのエネルギー損失計算結果をそれぞれ図3, 4に示す。図3のグラフ

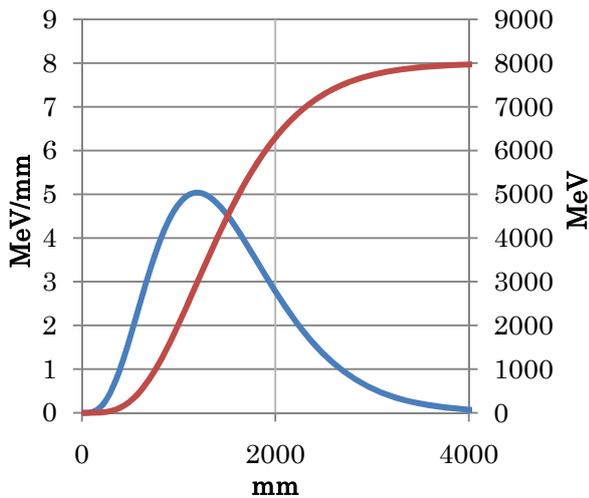


図3：グラファイトにビームエネルギー8GeVの電子ビームが入った場合の、エネルギー損失計算結果

単位長さ当たりのエネルギー損失／青色 左縦軸
エネルギー損失累積／赤色 右縦軸

イトによるエネルギー損失計算結果が示すように、8GeVに必要なグラファイト厚は最低2mである。図4のタングステンによるエネルギー損失計算結果が示すように、タングステン厚50mmにおいて、90%以上のエネルギー損失が達成可能である。以上の結果から、装置サイズを考慮してタングステンをスリット材に用いることとした。厚さは50mmとした。タングステンを採用することで装置がコンパクトとなり、製造コスト面でも有利である。

2.4 熱負荷対策^[3]

XFEL/SPring-8の8GeVのシケインでは、エネルギーが8GeV、電荷量が0.3nC、繰り返しが60Hzのビームがスリット材に当たる可能性がある。このとき最大で144Wの熱が発生することが考えられる。タングステンは熱伝導率：174W/m/Kである。タングステンはそれほど熱伝導の高い金属ではないため、大きな温度上昇が起こる恐れがある。そこで、なるべく効率的な冷却方法を検討し、熱解析をおこなって温度上昇を解析した。

効率の良い冷却方法として、熱伝導率：401W/m/Kである銅のブロックを水冷し、タングステンブロックに密着している構造を考えた。そこで我々は、水冷した銅が接触したタングステンに8GeVのビームエネルギーの電子ビームが衝突した際に発生する熱の解析を行った。解析にはANSYS^[4]を使用し、解析条件は以下のようにした。

形状

- タングステンブロック
高30mm x 幅42 x 厚50mm
- タングステンブロック開口
高10mm x 幅22
- カスケード領域

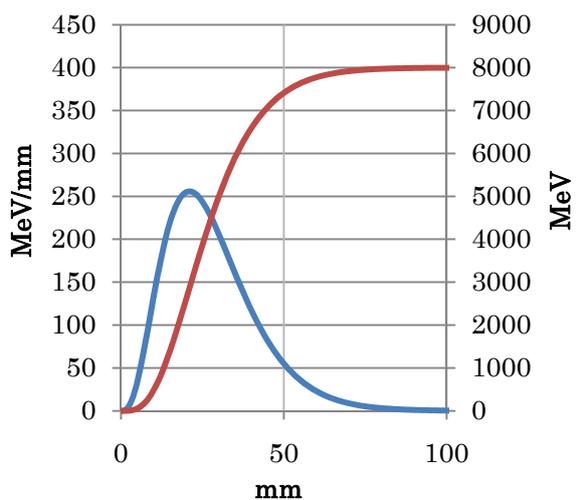


図4：タングステんにビームエネルギー8GeVの電子ビームが入った場合の、エネルギー損失計算結果

単位長さ当たりのエネルギー損失／青色 左縦軸
エネルギー損失累積／赤色 右縦軸

図 5 の電子のカスケードによるタングステン内の散乱から、カスケード領域を $\phi 10\text{mm}$ とした。

熱流束

- $8\text{GeV} \cdot 0.3\text{nC} \cdot 60\text{pps}$
平均パワー(60pps) : $2.4 \times 60\text{pps} = 144\text{W}$
ピークパワー : $2.4\text{J} / 300\text{fsec} = 8\text{E}12\text{W}$
- 電子のカスケードによる入射物質内の散乱を考慮した熱流束の付与
- メッシュは半径方向、深さ方向とも 1mm ピッチで作成し (図 6 参照), 各要素にはカスケードを考慮した体積発熱 (W/mm^3) でパワー付与し, $\phi 10\text{mm}$, 深さ 50mm の領域に入るパワーは 144W 中 129.3W(90%)であるが, 安全側にするためトータルで 144W になるように補正した (図 7 参照)

熱接触部

- 接触面要素として, タングステンと水冷銅ジャケット接触部を定義し, 接触熱コンダクタンスを $5000\text{W}/\text{m}^2/\text{K}$ として計算

冷却面

- 水冷銅ジャケットの片側面を 28°C で固定
以上の条件による解析結果から, この場合タングステンが最大 32°C , 銅が 1.5 度上昇する結果が得られた (図 8 参照)。

この程度の温度上昇に抑えられればスリットの実用構造として問題ないので, タングステンブロックを無酸素銅ロッドにロウ付けすることにした。また, 開口投影面積型電子ビームスリットが設置されるビームエネルギーを考慮し, 1.45GeV と 8GeV の開口投影面積型電子ビームスリットのみ, 銅ロッドを水冷する構造とした。

2.5 航跡場対策^[5]

電子ビームは, 開口投影面積型電子ビームスリット真空槽の, 横: 60mm , 縦: 22mm のダクト部分, ダクト部分と直交する銅ロッド移動用の開口部分, タングステンブロックの開口を順次通過する。このため真空槽内部では, 大きな構造の変化があり, かつ電子ビームがスリット材のすぐ近くを通過するため, 航跡場対策が必要である。

当初, ベリリウム銅フィンガを用い, ダクト部分からタングステン開口に滑らかに接続する方法を検討した。しかし, 水平方向に移動するタングステン開口にフィンガを直接接続することは不可能であり, 銅ロッドに接触させる構造を検討したが, 接触部に電場が集中する隙間を作る構造となり, 目的を達しない。

そこで, 航跡場の影響を受けにくい形状にすることを検討した。CST STUDIO^[6]による電磁界解析をおこなって航跡場が小さくなるような形状を目指した。解析条件は, 電荷が 0.3nC , バンチ形状がシングルガウシアンバンチ (バンチ長シグマ値= 0.6mm) である。現実の XFEL のバンチ長は約 $10\mu\text{m}$ であるが本シミュレーションにおいては $10\mu\text{m}$ のバンチ長は扱えないので, バンチ長を長く設定し, その分のスリットの幾何形状も大きくして航跡場の強度をシ

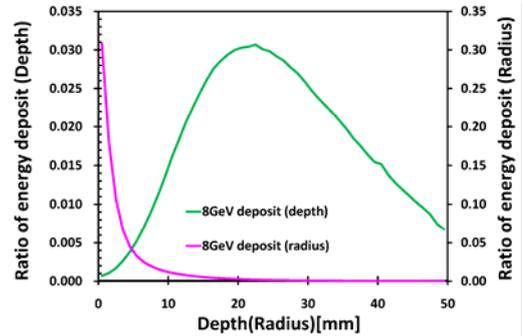


図 5: 電子のカスケードによるタングステン内の付与エネルギー分布

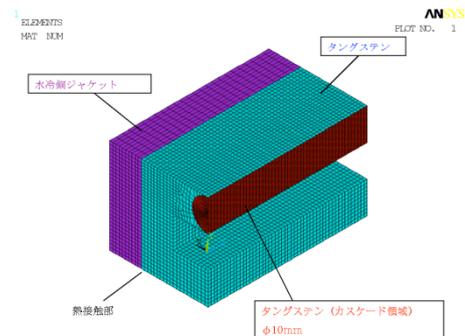


図 6: 熱解析メッシュ

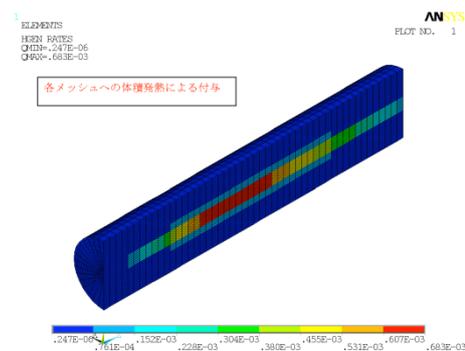


図 7: カスケード領域における各メッシュへの体積発熱による付与

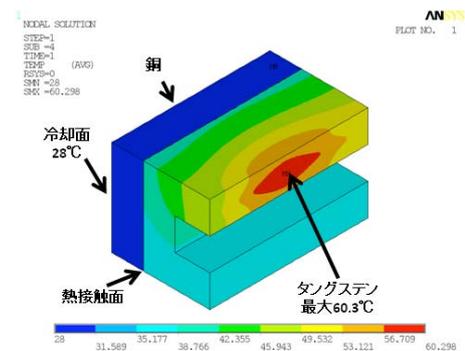


図 8: 熱解析結果, ANSYS^[4]による解析。接触熱コンダクタンス $5000\text{W}/\text{m}^2/\text{K}$

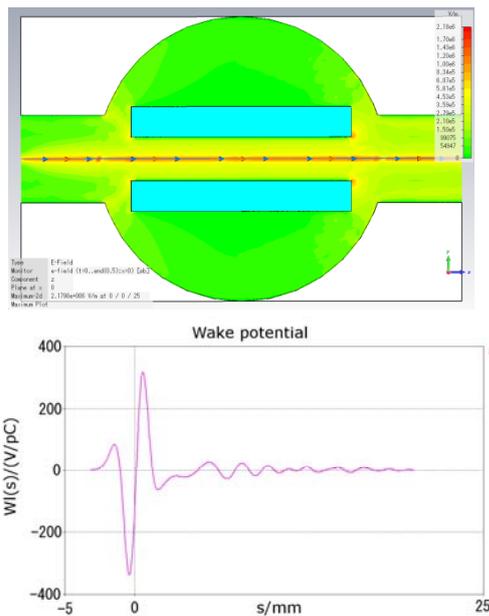


図 9：ビーム軸方向航跡場解析結果

銅ロッド移動用開口 ϕ 75mm

エッジ面取りなし

ミュレーションした。これにより現実の寸法での効果を類推した。

まず、ダクト部分から大きな形状の変化がある銅ロッド移動用の開口部分の形状を見直した。その結果、 ϕ 60mm の銅ロッドに対し銅ロッド移動用の開口部分を ϕ 75mm まで拡大することで、航跡場の影響が少ないことが分かった (図 9 参照)。さらに、検討した結果、各開口部分のエッジに半径 2mm の面取りを行った場合に、さらに航跡場の影響が少ないことが分かった (図 10 参照)。

この結果から、ダクト部分と銅ロッド移動用の開口部分が交わるエッジには半径 5mm の面取りを行い、タングステンブロックの開口のエッジには半径 2mm の面取りを行った。

3. 電子ビームスリット機械設計

3.1 概要

図 11 は、我々が製作した開口投影面積型電子ビームスリットである。また、図 12 はタングステンブロックを冷却するための銅ロッドの概略図である。銅ロッドを両端から支持する構造とし、真空槽の両側にベローズを配置することで、真空と大気の大気圧差から生じる力が駆動の妨げにならない構造とした。

3.2 タングステンブロック

磁気シケイン型バンチ圧縮器の 3 台の電子ビームスリットのタングステンブロックには、扁平ビームに対応するため 55mm x 10mm の開口を設けた。アンジュレータ上流シケインの電子ビームスリットのタングステンブロックには、20mm x 10mm の開口を設けた。タングステンブロックの上側の面が無酸素銅ロッドにロウ付けした。(図 12 参照)

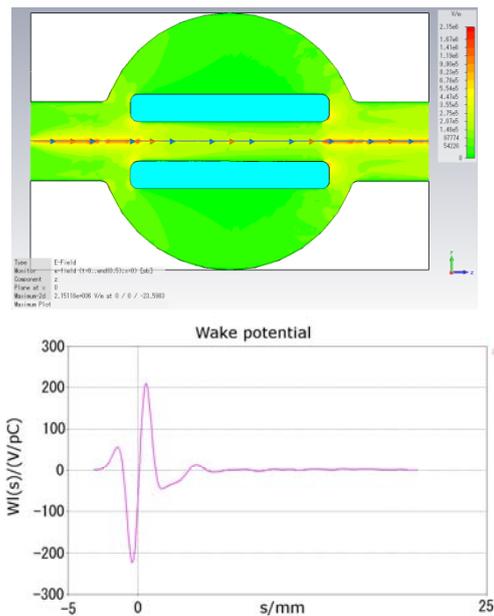


図 10：ビーム軸方向航跡場解析結果

銅ロッド移動用開口 ϕ 75mm

エッジ半径 2mm 面取り

3.3 銅ロッド

詳細な機械設計の前に、銅板とタングステン板を用いてロウ付け試験を行った。銅とタングステンの熱膨張率の違いから、銅が大きく反ることが確認できた。この結果を詳細設計に反映し、図 12 に示すように銅ロッドの凹みにタングステンをロウ付けし、銅ロッドが一方に積極的に曲がる構造にした。このようにすることで、ロウ付け後に銅ロッドの曲がり修正加工を容易にすることができた。

XFEL/SPRING-8 では、アライメント用にレーザートラッカを使用しており、電子ビームスリットのレーザートラッカによるアライメント基準を、銅ロッドの大気側に設けた。このアライメント基準とタングステンブロックの開口エッジの駆動軸方向の位置関係を測定しておくことで、設置後も開口の位置を把握できる(図 12 参照)。

3.4 駆動機構

駆動軸には、絶対位置管理を行えるレゾルバ付きステッピングモータ (メレック製)^[7]を使用する。このステッピングモータを制御するステッピングモータードライバーは、省配線ネットワークであデバイスネットや USB のインターフェースを持っているので、ドライバーと上位制御装置の配置の自由度が格段に向上し、配線距離が長い大型装置である XFEL には最適である。加えて、インテリジェントなドライバーであるため多数のドライバーでの並行分散制御可能で、様々な機能を有している。これらの理由で、このドライバーを採用した。その機能の一つとして、コントローラの機械原点復帰プロセスでは、機械原点に用いるセンサは、一般的に使用されているマグネスイッチ等の原点センサだけではな

く、CW・CCWのリミットセンサも使える。この方法は、リミットセンサの位置から、逆に駆動させ最初にレゾルバのZ相に出会う位置を機械原点と認識する機能を有しているためである。これは、レゾルバが一回転内で絶対位置測定ができ、かつステップモーターで一回転させる駆動量に対してリミットセンサの位置決定精度の値が十分小さいため可能である。このため、開口投影面積型電子ビームスリットには、マグネスイッチ等の原点センサを設けていない。

銅ロッドを移動させるためのベローズはバネとしての復元力があるため、何らかのトラブルでステップモーターの励磁電流が切れた場合、この復元力によって銅ロッドが動き、タングステンブロックに電子ビームのコアが衝突する可能性がある。このため、電磁ブレーキを駆動機構に設けた。前記のステップモータードライバーから電磁ブレーキの制御も行う。

3.5 駆動試験

銅ロッドの大気側に設けた基準面をレーザートラックで監視しながら動作試験を行い、水平方向位置決定精度は、ビーム軸に対して $10\mu\text{m}$ 以下の良好な結果が得られた。

4. まとめ

XFEL/SPring-8の磁気シケイン型バンチ圧縮器などのエネルギー分散部に使用するスリットを設計・製作した。スリット材として比重が重く、熱に強いタングステンを採用した。電子ビームがスリット材であるタングステンに衝突した際に発生する熱を、積極的に伝達させるためにタングステンブロックと銅ロッドをロウ付けした。熱解析をおこなった結果、この形状で発熱が十分に抑えられることがわかった。航跡場対策を、電子ビームスリット真空槽とタングステン開口の形状に施した。水平方向位置精度は、ビーム軸に対して $10\mu\text{m}$ 以下の良好な結果が得られた。このように、XFELに必要な性能をすべて満足するスリットを製作することができた。このスリットは9月末までに設置・配線が完了し、来年からのビーム運転で使用される予定である。

参考文献

- [1] T.Hara, et al., "ESTIMATION OF EMITTANCE DEGRADATION DUE TO MULTI-POLE FIELDS OF XFEL BUNCH COMPRESSORS", Proc. of the 6th Meeting of the Particle Accel. Soc. of Japan (2009);
- [2] H. Bichsel, et al., Phys. Lett. **B667**, 267 (2008).
- [3] 日本機械学会編：「伝熱工学(JSME テキストシリーズ)」, 日本機械学会(2005)
- [4] <http://www.ansys.com/>
- [5] K. Yokoya, "Impedance Of Slowly Tapered Structures", CERN-SL/90-88 (AP) (1990).
- [6] <http://www.cst.com/>
- [7] S.Inoue, et al., "Beam Monitor system Controller for XFEL/SPring-8", Proc. of the 6th Meeting of the Particle Accel. Soc. of Japan (2009);

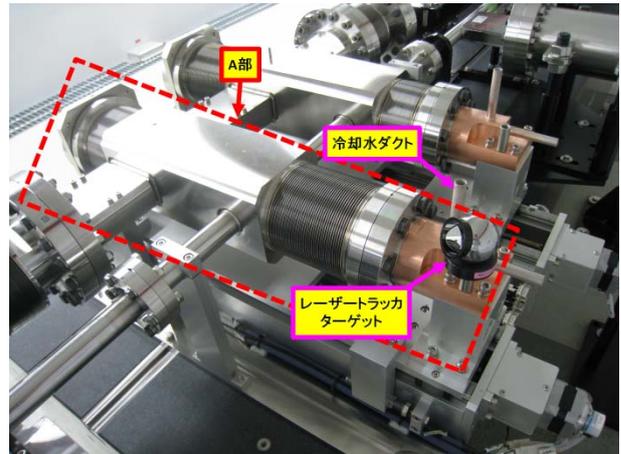


図 11：電子ビームスリット
1.45GeV 磁気シケイン型バンチ圧縮器分散部用

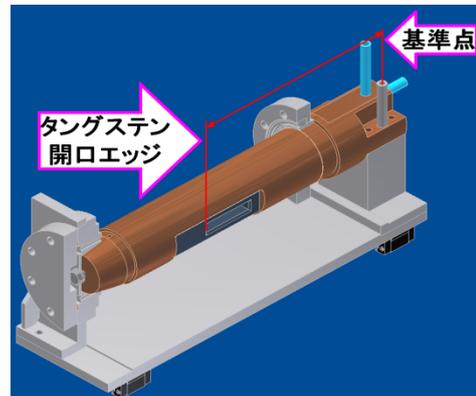


図 12：銅ロッド、タングステンブロック構造体概略図、図 11 の A の部分。