

SACLA 電子銃システムの交換作業効率化のための機器整備

PREPARATION FOR EFFICIENT EXCHANGE OF THE SACLA ELECTRON GUN

前平晃太郎^{A)}, 竹村育浩^{A)}, 林田寿和^{A)}, 渡川和晃^{#, B)}

Koutarou Maehira^{A)}, Yasuhiro Takemura^{A)}, Toshikazu Hayashida^{A)}, Kazuaki Togawa^{#, B)}

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

^{B)} RIKEN SPring-8 Center

Abstract

At the SPring-8 campus, the linear accelerator of the X-ray free-electron laser SACLA has started beam injection to the SPring-8 storage ring at 2021. Since electron beams are supplied to both accelerators, the CeB₆ electron gun becomes important more than ever. Rapid restoration is required after unexpected machine troubles, such as high-voltage breakdowns, vacuum deterioration, cathode emission degradation, and so on. In order to restart accelerator operation quickly, the electron gun tank and the peripheral equipment was modified so that the tank can be replaced smoothly while maintaining the ultra-high vacuum condition of the gun chamber. All preparations of the tank, including cathode replacement are completed in advance at the electron gun test stand. The prepared tank stands ready nearby the entrance of SACLA accelerator tunnel, and the entire electron gun tank is replaced when trouble occurs or routine cathode replacement is conducted. The details of the preparation for efficient exchange of the SACLA electron gun is reported in this paper.

1. はじめに

X線自由電子レーザーSACLAの電子線形加速器は2021年よりSPring-8蓄積リングの入射器として併用され、両施設への電子ビームの同時供給を行なっている[1]。SACLAのCeB₆電子銃[2]は2つの放射光源のための電子源を担うことになったため、利用運転中に故障が発生した場合に素早く復旧し、加速器運転を再開することがこれまで以上に強く求められるようになった。例えばカソードを交換する際には、真空作業からスタートしてカソードの加熱ガス出し、高電圧コンディショニングなど全ての作業を加速器収納部で終わらせる必要があるため、ビーム再調整の開始まで短くても3日間ほどの時間を要していた。

この問題を克服するため、超高真空を保ったまま入射部ビームラインからの切り離しと再接続を行うことができるよう電子銃タンクの改造を行い、効率的な交換作業のために周辺機器の整備を行なった。以下、これらに関する詳細について述べる。

2. 電子銃タンクの改造

2.1 接続部の改造

改造した電子銃タンクをFig. 1に示す。電子銃チャンバー内を大気開放せずに、タンクの交換を行えるようにするため、電子銃チャンバー側に手動ゲートバルブを追加した。タンクが既存の位置より後退してしまうのであるが、電子ビームのエンベロープをこれまでと同じ条件で入射部と接続するためには、磁気レンズ電磁石を1台追加する必要がある。また、ステアリング電磁石と電子銃タンクを傾けて設置する際に使用する小型偏向電磁石を取り付ける必要がある。これらを設置するために、後退距

離を300mmとしてタンク前面側に小型の石定盤を取り付けた。以下、電子銃石定盤と呼称する。既存の電子銃タンク2台の改造と新規電子銃タンク1台の製作は日本電磁工業株式会社が行った[3]。

電子銃側とビームライン側のゲートバルブ間のビームダクトにはミニオールメタルアングルバルブを取り付け、タンクの切り離し、再接続の際にはこの部分だけ大気開放、真空排気を行えばよい構造にした。小型偏向電磁石の位置に合わせてビームダクトにベローズを取付けた。再接続の際の排気時間は1時間以内に抑えられている。

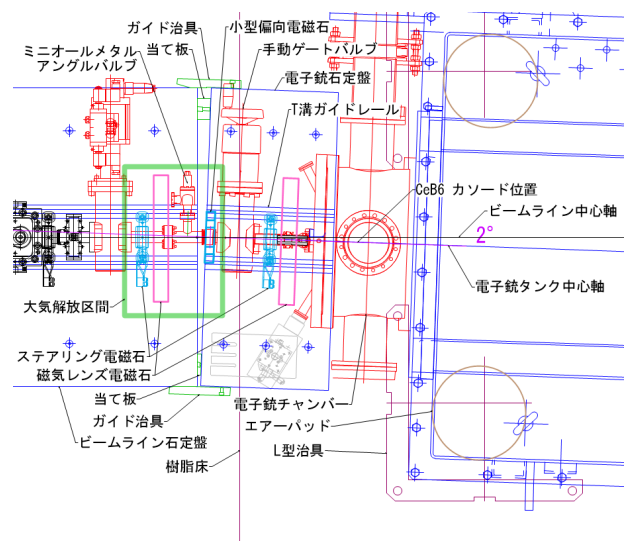


Figure 1: Layout of the modified SACLA electron gun.

2.2 配線及び冷却水配管整備

電磁石等の配線接続を迅速に行えるよう、電子銃石定盤の上に端子台を設置して全ての配線を集約した。ま

togawa@spring8.or.jp

た、冷却水配管は継ぎ手をクイックカプラーに変更し、タンク上面に新たにクイックカプラーのヘッダーを作製して冷却水配管を集約した。

3. 電子銃テストスタンドの整備

Figure 2 に電子銃テストスタンドの写真を示す。

3.1 レイアウトの変更

SACLA 電子銃は東から西へ向かってビームを射出する配置となっている。それに対し、隣接する電子銃テストスタンドの電子銃は西から東へビームを射出する配置となっていた。効率的に電子銃タンクの運搬作業を実施するために、電子銃テストスタンドの配置を逆転することにした。

これまで電子銃タンクは高さ 35 mm、幅 500 mm 角の樹脂床 4 枚の上に置かれていたので、そのままレイアウトを反転すると、この足場がビームライン設置の障害となる。そこでまず既設樹脂床とビームライン石定盤の架台脚の位置関係を調べ、既設の樹脂床を撤去せずにレイアウトの反転が可能となるよう、石定盤の支持架台の改造を行なった。

3.2 精密アライメントのための樹脂床施工

SCSS 試験加速器や SACLA では、電子銃タンクを精密にアライメントするために平坦に研削したコンクリートの床面 [4] の上に電子銃を設置していたが、その後エポキシ樹脂によるセルフレベルング工法の高精度平坦床面 (アルファ工業株式会社 [5]) が広く使われるようになったので [6]、今回の電子銃テストスタンド及び SACLA の改造にもこれを採用することにした。

総重量が 3 トンを超える精密なカソードや高電圧部品を装着している電子銃タンクを安全かつ安定に移動するためには、樹脂床面を既設床面と同じレベルに仕上げ段差を無くす必要がある。そのために既設のコンクリート床を 30 mm 分掘り下げ、そこに下地 (AT830H、エポキシグラウト工法) と樹脂床 (AT150S、セルフレベルング工法) を流し込む施工を行なった。樹脂床の範囲は 2300 mm×1300 mm であり、平坦度は基準点より±50 μm に収められた。

3.3 エアーパッドによる位置調整

電子銃タンクの精密な位置調整のため、SACLA ではこれまで大口径のエアーパッド 4 個を利用していたが、後述する電動リフターのフォークをタンク下部へ挿入するためにスペースが必要となったため、SCSS 試験加速器のために開発した直径 220 mm の小型エアーパッド (製作: 株式会社旭工業所 [7]) に変更した [8]。エアーパッドへ導入する圧縮空気の圧力調整は、導入部前に取り付けした小型バルブで行なった。0.7-0.9 MPa の圧縮空気の導入で人の手による力でも問題なく移動できることを確認した。タンク位置の微調整はエアーパッド横の床に固定した L 型治具の押しボルトで調整する。

3.4 電子銃タンク運搬のための電動リフターの導入

電子銃タンクを電子銃テストスタンドから SACLA 加速

器棟収納部まで移動するために電動リフター (杉国工業株式会社 [9]) を導入した。許容昇降荷重が 4 トンの製品を選択し、フォーク部は電子銃タンクの構造に合うよう幅や長さをカスタマイズした。

3.5 ビームライン石定盤の整備

電子銃テストスタンドのビームライン石定盤は、収納部のビームライン石定盤とサイズが異なる。接続部を収納部の石定盤と同様の環境にするために、ドッキング部に W700 mm×D67.5 mm×H150 mm のアルミブロックを取り付けた。また、樹脂床面から測ったビーム軸が電子銃テストスタンドと SACLA で同じになるよう、石定盤の高さを調整した。

3.6 放射線遮蔽扉の改造

電子銃テストスタンドの放射線遮蔽壁は、H 鋼の柱の間に遮蔽壁板を上方より差し込む構造になっていたため、電子銃タンクを移動する際には毎回遮蔽壁板 2 枚と柱 2 本を解体する必要があった。作業を効率的に行うために、既設の遮蔽壁板と柱を一体物の扉とし、人力で開閉が行える観音扉に改造した。この改造により、電子銃タンクの出し入れが簡便になった事に加え、室内へのアクセスが容易で十分な作業スペースも確保されるようになり、作業効率が劇的に改善された。

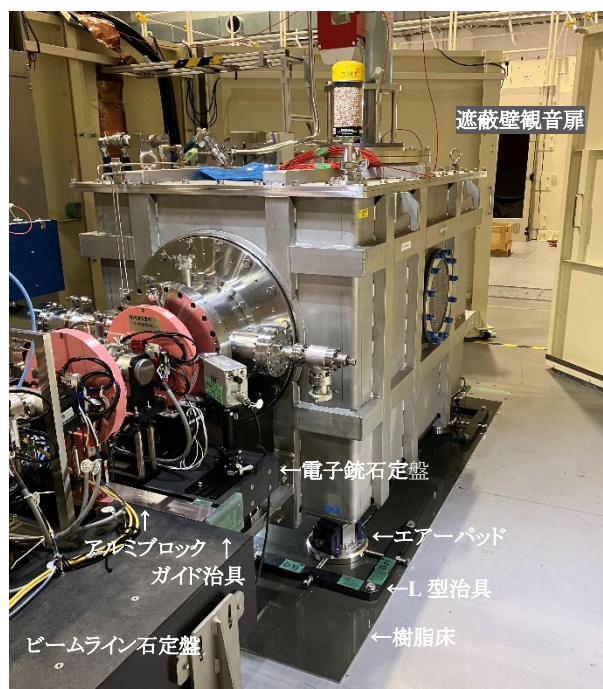


Figure 2: Gun tank and beam line of the gun test stand.

4. SACLA 電子銃部の整備

Figure 3 に SACLA 電子銃部の写真を示す。

4.1 樹脂床の施工

SACLA 加速器棟収納部内の電子銃部にて樹脂床の施工を行なった。施工内容は 3.2 節と同じである。

4.2 地磁気コイルの調整

電子銃タンク直下の入射部ビームラインには地磁気補正コイルが組み立てられており、ドッキング時に干渉してしまうので、コイル取り付け端部を 200 mm 程度短縮した。

4.3 冷却水ヘッダーの改造

既設の冷却水はステンレス管で機器まで配管されていた。取り回しを整理して電子銃タンク関係の冷却水を一カ所に集約し、接続部はメタルフレキシブルホースを用いてクイックカプラーで容易に接続が可能となるよう改造を行った。

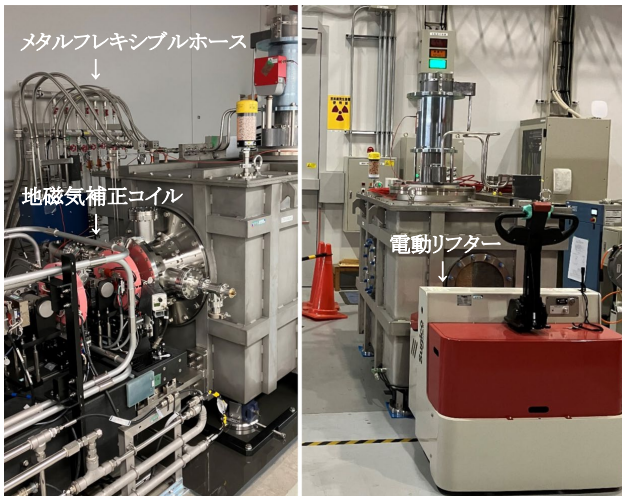


Figure 3: SACLA electron gun and the electric lifter.

5. 電子銃タンクのアライメント

5.1 電子銃チャンバーと電子銃石定盤のアライメント

電子銃チャンバーの中心軸上にカソードが取り付けられているので、チャンバー上下流フランジの中心を繋ぐ軸をビーム軸とすることができる。これを基準に電子銃石定盤の上面の高さとピッチ角の調整を行なった。アライメントのレイアウトを Fig. 4 に示す。ヨー角は、石定盤のアライメント基準である 2 本の T 溝ガイドレール間の中心軸がビーム軸に平行となるよう調整した。電子ビームが軸対称であるためロール角の調整は必要ないが、タンク本体の上面とほぼ平行となるよう調整した。アライメント精度は 100 μm 以内に収められた。

上記アライメントによりビーム軸が石定盤に転写されたので、以降は測定しやすい石定盤を基準に電子銃タンクのアライメントを実施することができる。

5.2 ガイド治具

ガイド治具とはベークライト板で作製した 4 箇所当て板のことで、電子銃石定盤の両側面と前面 2 カ所に取り付け、それらを入射部のビームライン石定盤に接触、押し当てる事で電子銃タンクとビームラインの位置関係を再現性良く決定する治具である。先端をテーパ状に加工した側面板を電子銃石定盤から張り出させ、ビームライン石定盤の側面に沿わせ導くことで、横方向の位置関係が決まり、前面 2 カ所の当て板を接触させることで前後方向の位置関係が決まる。

電子銃タンクを水平面に角度を付けて設置する場合は、想定する角度に合わせた寸法を持つガイド治具を用意することで実現できる。SACLA では CeB_6 カソードのエミッション劣化の原因究明と対策が最重要課題の一つとなっており [10-13]、その原因が入射部からの逆流電子であることが推測されている。 CeB_6 カソードへの逆流電子の直接入射を回避するために、ビーム軸に対して電子銃タンクを 2 度傾けるためのガイド治具を用意した。前述の通り、電子銃石定盤は電子銃チャンバーを基準にアライメントされているので、これを基準に角度を付けた治具でビームラインとドッキングすることでビーム軸を指定角だけ曲げることができる。

5.3 磁気レンズ電磁石の位置合わせ

電子銃石定盤上の磁気レンズ電磁石は、アノードフランジ面から指定長のピン 2 本を用いて機器間に挟み込む形で、位置合わせを行った。高さと水平位置は金尺を使い 0.2 mm 程度の精度で初期位置を調整した。最終的にはビームを基準にムーバーを用いて精密な位置合わせを行う。

5.4 電子銃タンク設置後のアライメント

SACLA 入射部のビームラインにも機器をビーム軸に合わせて設置、固定するための T 溝ガイドレールが石定盤中央から ± 60 mm の位置に設けられているので、これを利用したビーム軸測定用治具を作製した。また、電子銃石定盤は角を基準とした測定治具を作製した。ビーム軸の測定にはレーザートラッカーを使用し、電子銃タンク全体の水平位置、ピッチ角、ヨー角、ロール角を調整した。次に、再設置の際に無調整でタンク位置が再現できるようにするために、ガイド治具と石定盤との隙間が無くなるようシム板を挿入した。

設置の際には、ガイド治具をビームライン石定盤の北西方向、Fig. 1 図で左上方向に押し付け続けた状態でエアパッドの圧縮空気を抜くという一定のルールを決めた。合計 7 回の設置再現試験を行い、全てのずれ量が 50 μm 以内に収まることを確認した。この再現性の結果から、事前に精密なアライメントを行っておけば、再設置後の軸アライメントは不要であると判断した。

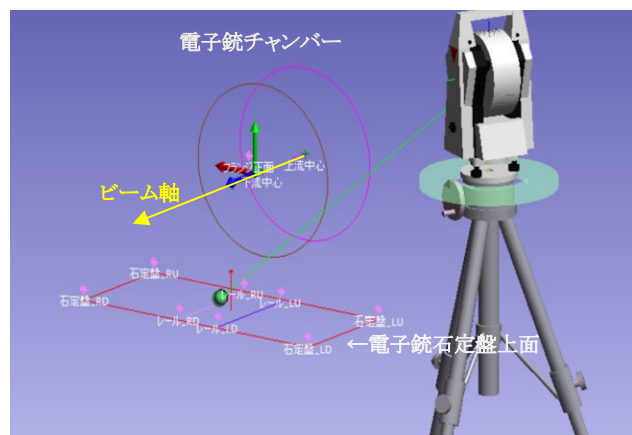


Figure 4: Alignment of the gun chamber and stone plate.

6. まとめ

今回の電子銃タンクの改造、電子銃テストスタンドおよびSACLA電子銃部の整備により、電子銃タンクのメンテナンス性が飛躍的に向上した。既にこのシステムを利用して長期停止期間におけるカソードの定期交換を行っており、停止期間明けには電子銃運転をスムーズに開始することが出来ている。トラブル時の緊急交換の場合は、作業開始から4時間程度で交換作業を終えることが出来ると想定している。

電子ビーム調整に関しては、電子ビームの初期状態を精密に再現する調整と機械学習によるSACLA全体の調整[14]により、運転開始から12時間で出力0.7 mJ/pulseのXFEL光を再現良く発生することが出来ている。

これを機に電子銃テストスタンドの環境を限りなく実機に近い状態に整えられたので、今後の新しい電子銃の開発研究にも大いに役に立つと期待している。

参考文献

- [1] T. Hara *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams **24**, 110702 (2021).
- [2] K. Togawa *et al.*, Phys. Rev. Spec. Top. –Accel. Beams **10**, 020703 (2007).
- [3] 日本電磁工業株式会社, <http://www.denji-kogyou.co.jp>
- [4] 新竹積 他, “床面研削装置の開発”, 第2回日本加速器学会年会 (2005).
- [5] アルファ工業株式会社, <https://alpha-kogyo.com/>
- [6] 木村洋昭 他, “エポキシ系グラウトによる高精度平坦床面の評価”, 第9回日本加速器学会年会 (2012).
- [7] 株式会社旭工業所, <http://www.asahigroup.net>
- [8] 渡川和晃 他, “重量物の精密位置決め用エアパッド開発”, 第2回日本加速器学会年会 (2005).
- [9] 杉国工業株式会社, <https://www.sugiconet.co.jp/>
- [10] 渡川和晃 他, “SACLAにおける熱電子銃カソードの長寿命化に向けて”, 第13回加速器学会 (2016).
- [11] 渡川和晃 他, “CeB₆電子銃の運転経験と今後の開発課題”, 第15回日本加速器学会年会 (2018).
- [12] T. Magome *et al.*, Journal of Applied Physics **133**, 165107 (2023)
- [13] 馬込保 他, “ナノ秒パルスレーザを利用した光電子収量分光法によるSACLA熱カソードCeB₆の仕事関数の測定”, 第20回日本加速器学会年会 (2023).
- [14] 岩井瑛人 他, “機械学習手法を用いたXFELの自動調整”, 第18回日本加速器学会年会 (2021).