

LバンドフォトカソードRF電子銃の開発 (IX)

DEVELOPMENT OF THE L-BAND RF GUN (IX)

磯山 悟朗^{#, A)}, 川瀬 啓悟^{A)}, 矢口 雅貴^{A)}, 船越 壮亮^{A)}, 堤 亮太^{A)}, 古川 和弥^{A)}, 藤本 将輝^{A)},
加藤 龍好^{B)}, 渡邊 謙^{B)}, 倉本 綾佳^{B)}, 早野 仁司^{B)}, 浦川 順治^{B)}, 高富 俊和^{B)}, 飯島 北斗^{C)},
栗木 雅夫^{C)}, 柏木 茂^{D)}

Goro Isoyama^{#, A)}, Keigo Kawase^{A)}, Masaki Yaguchi^{A)}, Sousuke Funakoshi^{A)}, Ryouta Tsutsumi^{A)},
Kazuya Furukawa^{A)}, Masaki Fujimoto^{A)}, Ryukou Kato^{B)}, Watanabe Ken^{B)}, Ayaka Kuramoto^{B)}, Hitoshi Hayano^{B)},
Junji Urakawa^{B)}, Toshikazu Katatomi^{B)}, Hokuto Iijima^{C)}, Masao Kuriki^{C)}, Shigeru Kashiwagi^{D)}

^{A)}Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University,

^{B)}High Energy Accelerator Research Organization

^{C)}Graduate School of Advanced Sciences of Matter, Hiroshima University,

^{D)}Research Center for Electron Photon Science, Tohoku University

Abstract

We report progress in development of the L-band RF gun in collaboration with KEK, Hiroshima University. The RF gun is equipped with many water cooling channels because the average input RF power will reach 25 kW to the RF gun without any frequency tuning device. We reported at the PASJ meeting last year that we had cooling water leakage from brazing parts between the main body and stainless steel water pipes and we were fixing it. We fix the leaking using liquid gasket and Vacséal, which are sucked in the leaking parts from outside by evacuating a water channel with appropriate treatment. After Vacséal thinned quadruple with trichloroethylene is sucked in the leaking, the part is heated to approximately 200 C using a heat gun for an hour. The temperature is not enough high to harden but it works for small leak. The viscosity of liquid gasket is too high to be sucked in a recess but it is found that its viscosity becomes sufficiently low when it is heated. Thus the water leakage problem has been solved. The resonance frequency and the electric field balance between the half and the full cells are corrected, using a device named the torture machine together with special jigs, from 1301.525 MHz and 0.6 to 1 to 1300.211 MHz and 0.934 to 1, which are expected to be 1300.160 MeV and 1 to 1 at room temperature. The high power test of the L-band RF gun is being conducted at the Superconducting RF Test Facility (STF) of KEK.

1. はじめに

大阪大学産業科学研究所 (阪大産研) の L バンド電子ライナックの高度化を目指す基礎研究として、KEK と、広島大、東北大と協力の共同で L バンドレーザーフォトカソード RF 電子銃の開発研究を行っている。KEK-STF で試験が出来るように RF 周波数 1.3 GHz、最大入力パワー5 MW、パルス幅 1 ms、繰返し 5 Hz で運転可能な DESY 型 L バンドフォトカソード RF 電子銃の基本設計を採用した。RF 電子銃は 1.5 セルの無酸素銅製の RF 空洞を持ち、ここに平均 25 kW の RF パワーが入力される一方、RF 空洞には共振周波数同調用のチューナーが無いいため、最大入力時の RF 空洞の温度上昇を 5 °C 以下に保つ必要がある。RF 空洞の円筒部と両端板、セル間の壁であるアイリス部全てに水冷用の溝が掘られて RF 電子銃陰極側に 12 組、上流側に 3 組の水冷配管を出し、最大 500 l/分の冷却水を流す。これらの水冷管は精度良く加工したステンレス製 (SUS 製) で、RF 空洞本体の一部を差し込み銀ロウ付けで固定する。

RF 電子銃を組み立て後、多くの SUS 製水冷管の

[#] isoayama@sanken.osaka-u.ac.jp

ロウ付け部分から水漏れが発生した。原因は、SUS 製水冷管を機械加工後にアルゴン溶接で組み立てたために差込み部に歪が生じてロウ付けが不良であることが分かった。銀ロウ付けを何度もやり直したが漏水は完全には止まらない。又、RF 周波数と 1.5 セル間の電場比も 1 対 1 からずれていたが、2012 年夏に KEK-STF でハイパワー試験に成功した。その後は水冷管の水漏れを止める作業を行った。以前は水冷管を大きく切取らなければ無理であると言われていたが、既存の水冷管を RF 空洞から切り取れることが分かり、新たに製作した SUS 製水冷管を銀ロウ付けして水漏れを止めることに成功した。この方法を他の全てにて適用する財源が無いため、液体ガスケットでの補修で水漏れを止めることにした。

本発表では、その後の水漏れ補修作業と、RF 電子銃の再チューニング、ハイパワー試験の開始について報告すると共に、RF 電子銃用のファイバーレーザー発振器の開発の現状について報告する。

2. 冷却水配管の修理

液体ガスケット等の補修材を用いた水冷管水漏れ修理方法を述べる。図 1 に示すように水冷管の入口と出口をゴム栓でふさぎ、一方のゴム栓に取付けた



Figure 1: Fixing of the water leakage from a silver brazing part between copper and stainless steel in a water cooling channel using liquid gasket.

金属パイプにリークディテクターを繋ぎ、水冷管を真空排気する。水冷管ロウ付け部の疑わしい場所にヘリウムガスをかけて漏れ個所を捜し、その大きさを漏れ量より求める。漏れ個所にクリーム状の液体ガスケットを吸込ませ、ヘリウムガスを吹きかけて漏れが止まるのを確認する。漏れが大きい場合には、リークディテクターのバックグラウンドが大きいために検出感度が下がる。大きな漏れを止めた後には真空度の低下を待ち、漏れ止め作業を繰り返す。漏れが止まるのを確認したら、1日から1週間程度補修材が固化するのを待つ。次に真空漏れ試験を再度行い、正常であれば、加圧試験のため圧縮空気を1 MPaまで充填して1昼夜後の圧力変化を見て漏れが止まったことを確認する。圧力が低下して不合格であれば漏れ止め補修をやり直す。

液体ガスケットによる補修は大きな漏れでも止まるため有効であるが、粘性が高いために水冷管下部の漏れ修理に使うことは出来ない。この部分に大き



Figure 2: Special jigs for tuning the frequency and the electric field balance between the half and the full cells of the RF gun.

な漏れはなく、アルコールで一時的に止めることが出来る。逆に、液体ガスケットのような粘度が高い補修材を水冷管下側の漏れ個所に吸込ませることが出来ない。

本格的な水漏れ修理のため、水冷管上面に開けた長方形の窓に SUS 板を TIG 溶接してふさいだ。高い温度に耐える液体状の補修材として真空の漏れ止めを使うバクシールを使う。バクシールは液体状であるが粘性は比較的高い。これをバクシールの主成分であるトリクロロエチレンで4倍まで希釈して粘性を下げる。バクシールの固化には300℃で30~40分、260℃では1時間が必要である。RF電子銃をこのような高温に長時間保つことは出来ないため、強力なドライヤーであるヒートガンでバクシールを吸込ませた部分を200℃に昇温し1時間程度保つ。前述のように1昼夜後に真空リーク試験と加圧試験を行った。バクシールでの修理により、小さな漏れは止まるが比較的大きな漏れは加圧試験で不合格になる場合がある。この場合でも時間を置くと自動的に回復する現象が見いだされた。バクシールの表面だけが固まり、加圧により表面の固化した部分が破壊されるが時間が経つと未固化のバクシールが漏れ個所をふさぎ、空気に接触する部分が固化し漏れを止めると考えられる。結論として、バクシールでは大きな漏れを塞ぐには不適當であり他の補修材を探す必要がある。

これらの修理はコミヤマエレクトロンが行ったが、担当者が液体ガスケットをヒートガンで加熱すると粘性が大きく低下することを見出した。これにより水冷管下側の漏れにも適用可能であり、低温での完全固化が難しいバクシールより大きな漏れを効果的に止めることが出来る。これにより冷却水管のロウ付け部での水漏れを止めることが出来た。この方法には耐久性に問題はありますが、たとえ水漏れが再発しても現場での対応可能である。

3. RF 空洞の再調整

水冷管の水漏れ修理が終わった RF 電子銃の共振周波数と電場比を低レベル RF で測定した。RF 電子銃は周波数 1300.00 MHz、冷却水温度約 60℃で運転するため、温度による周波数変化-22 kHz/℃と真空排気による周波数変化+390 kHzを考慮すると、共振周波数の目標値は空气中 25℃の測定で 1300.160 MHz、半セルとフルセルの電場比は 1:1 でなければならない。今回の測定値は共振周波数 1301.525 MHz、電場比は 0.6:1 であるため、再調整した。調整方法は、2013年に行ったものと同じで、拷問機と名付けた装置に空洞本体を固定し、陰極側と出口側の ICF フランジを押し引きして共振周波数と電場比を目標値に一致させる。そのためには、RF 空洞の外周を固定して両端板を変形するが、水冷管が取り付けられているため、これらを避けて両端板の外周部のみを押さえる図 2 に示す治具を作成した。RF 空洞にこの治具を取り付けると 2人で持ち上げるのも容易でないほど重いため、拷問機とビーズ法による電場測定台間の移動に小型稼働クレーンを用いるなどして

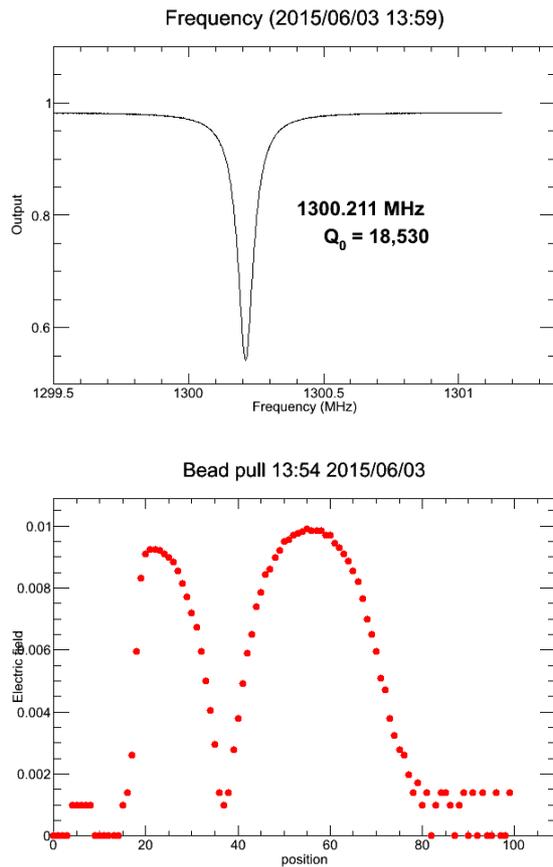


Figure 3: Results of the tuning of the L-band RF gun measured in the low RF level. The resonance frequency (a) and the electric field (b).



Figure 4: L-band RF gun under high power testing at KEK-STF.

無事に作業を終えた。図3に調整後の共振周波数と電場を示す。調整後の共振周波数は1300.211 MHz、電場比は0.934:1である。

4. ハイパワー試験

ハイパワー試験に先立ち、KEK-STFの地上階で、RF電子銃と入力結合器、真空ポンプや測定装置などをハイパワー試験用架台に組立てた。カソード穴には模擬プラグを挿入し、RF電子銃と入力結合器の接続には、入力結合定数を1にするため厚さ9 mmのガスケットを使用した。真空が正常に立ち上がることを確認した後、ハイパワー試験を行うためにRF電子銃システムを地下に降ろし、図4に示すようにKEK-STFのRF電子銃の真横に設置した。冷却水配管を取り付け水温設定を60℃とし水の循環を始めたところ2時間程度で設定温度に達した。温度と真空度監視のため、STF空洞の本体と、入力結合器、冷却水ヘッダーの入口と出口に取付けている熱電対を阪大産研のRF電子銃に付け替え、STFの真空ゲージ2台を試験機に取付け、TF用RF入力用導波管を試験機に取付けてハイパワー試験の準備を

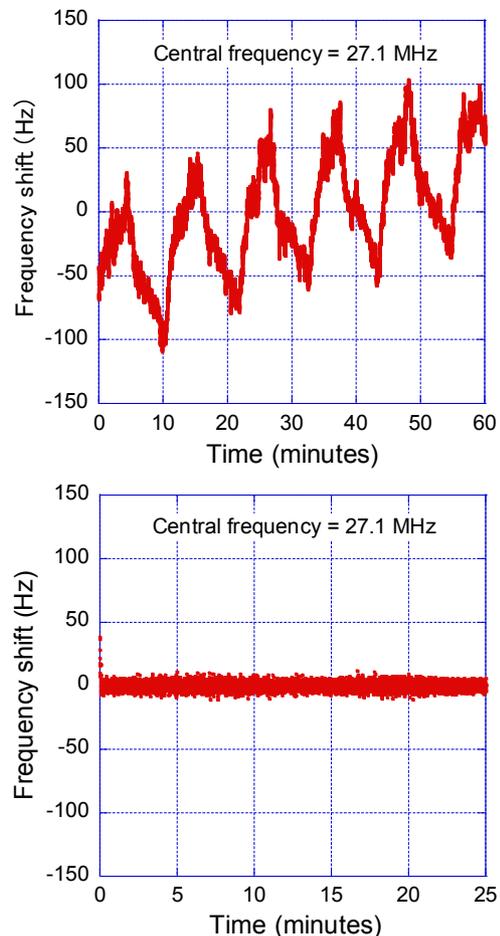


Figure 5: Mode-locked frequencies of the Yb fiber laser oscillator being developed for the L-band RF gun before and after the slow-speed feed-back control of the frequency.

完了した。

2015年7月中旬の2週間でハイパワー試験を行う計画であったが2週目に冷却水装置の温度制御が故障したため一旦中止し、修理が完了した後再開する予定である。

5. ファイバーレーザー発振器

LバンドRF電子銃用の27MHzでモードロック動作をするYbファイバーレーザー発振器を開発している。モードロック周波数は室温などの環境に影響されて短期、中期、長期的に変動する。図5に示すように中期的な変動は部屋の空調機の温度制御に同期して27MHzに対して ± 100 Hz、0.0004%変動する。最終的にはRF電子銃の周波数1.3GHzに完全に同期する必要があるが、中間段階として周波数カウンターとパルスモーター駆動Xステージを用いた周波数安定化システムを開発し周波数変動を ± 10 Hzに抑えることに成功した。次の段階として、速い位相検出器とピエゾ素子を用いた位相・周波数安定化装置を立ち上げる予定である。

6. まとめ

LバンドRF電子銃の開発をほぼ完了した。最大の問題であった冷却水管ロウ付け部からの水漏れは応急処置で解決した。本格的な修理の手法も実証した。ハイパワー試験が終了した後、新しいRF電子銃をSTFライナックに取付け、使用する予定である。

27MHzでモードロックするファイバーレーザー発振器を製作して数分以上の中期・長期の周波数変動を抑制することに成功した。次の段階として発振器をRFに完全に同期するシステムを開発すると共に100W級の増幅器を製作する予定である。

7. 謝辞

LバンドRF電子銃の冷却水配管の水漏れ修理はコミヤマエレクトロン(株)に、KEK-STFでの空洞チューニングとハイパワー試験準備は(株)ケーバックの支援に感謝します。本研究は、高エネルギー加速器研究機構の平成26年度と27年度加速器科学総合支援事業「大学等連携支援事業」の支援を受けている。

参考文献

- [1] K. Kawase, et al., "Development of L-band RF Gun (VII)", Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (August 3-5, 2013, Nagoya, Japan), p. 414.
- [2] G. Isoyama, et al., "Development of L-band RF Gun (VIII)", Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (August 9-11, 2014, Aomori, Japan), p. 1013.
- [3] R. Tsutsumi, et al., "Development of Fiber Laser for Photocathode Electron Gun", Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (August 9-11, 2014, Aomori, Japan), p. 139.