

DEVELOPMENT OF L-BAND PHOTOCATHODE RF GUN (II)

Shigeru Kashiwagi^{1,A)}, Ryukou Kato^{A)}, Naoya Sugimoto^{A)}, Kenichiro Huruhashi^{A)}, Yutaka Morio^{A)}, Yoshikazu Terasawa^{A)}, Goro Isoyama^{A)}, Hitoshi Hayano^{B)}, Harue Sugiyama^{B)}, Junji Urakawa^{B)}, Masao Kuriki^{C)}, Daisuke Kubo^{C)}, Chie Shonaka^{C)}, Kouta Kanbe^{D)}

^{A)} Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University
8-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, 567-0047

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

^{C)} Graduate School of Advanced Sciences of Matter, Hiroshima University
1-3-2 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, Hiroshima, 739-8511

^{D)} Nuclear Professional School, School of Engineering, University of Tokyo
2-22 Shirane-shirakata, Tokai, Naka, Ibaraki, 319-1188

Abstract

We conduct research on Free Electron Laser (FEL) in the infrared region and pulse radiolysis for radiation chemistry using the 40 MeV, 1.3 GHz L-band linac of Osaka University. At present, the linac is equipped with a thermionic electron gun. It can accelerate a high-intensity single-bunch beam with charge up to 91 nC but the normalized emittance is large. In order to advance the research, we have begun development of a photocathode rf gun for the L-band linac in collaboration with KEK and Hiroshima University. A new design of the L-band rf gun cavity that improves the cooling system for a long rf pulse operation is being developed and the ultra-precision machining is given to the fabrication of the rf gun cavity. Before we install the new L-band rf gun into Osaka University, we plan to commission the DESY type of L-band rf gun at the KEK-STF. The DESY type of gun is fabricated at the Fermi National Accelerator Laboratory, and the resonant frequency and field balance of the rf gun cavity have been adjusted using a tuning apparatus at KEK-STF. We describe details of the L-band rf gun development.

LバンドフォトカソードRF電子銃の開発(II)

1. はじめに

阪大産研Lバンド電子ライナックにおける自由電子レーザー(FEL)やパルスラジオリシス実験などの電子ビーム利用研究の高度化を図るために、大強度かつ高品質(大電荷量・低エミッタンス)電子ビーム生成が可能なLバンドRF電子銃の開発を、平成20年度よりKEK、広大先端研と共同で開始した。本研究開発では、阪大産研のLバンド電子ライナックへ導入するLバンドRF電子銃空洞の設計および製作と並行して、KEKの超伝導加速器試験施設(KEK-STF)でのビーム加速実験に用いるDESYタイプLバンドRF電子銃の開発も行っている。これまでに、アルミ製の試験空洞とショート板の位置を改良した同軸導波管結合器を製作した。これらの特性測定を行い、その結果をもとに新たな同軸導波管結合器の形状の検討やRF電子銃空洞の内形状と共振周波数および電場分布の関係について明確にした。KEK-STFでビーム加速実験に用いるRF電子銃空洞の製作(切削加工、ロウ付け)は、日米共同開発の一環で米国フェルミ国立研究所(FNAL)において行われている。このLバンドRF電子銃空洞の最終周波数

調整および電磁場分布調整は、試験空洞の測定結果などを参考にし、我々がKEK-STFにおいて行った。現在、2010年夏にSTFで開始予定のビーム加速実験に向けた入射器部ビームライン設計を行っている。また、そのSTF入射器部で使用する主コイルと補正コイル(バックアップコイル)を結合させた形状のエミッタンス補正用ソレノイド電磁石も開発中である。本学会では、我々のLバンドフォトカソードRF電子銃開発の現状について報告する。

2. LバンドフォトカソードRF電子銃

阪大産研Lバンドライナックに導入するLバンドRF電子銃空洞の形状は、Sバンドで多くの実績があるBNLタイプの1.5セルRF電子銃を基本に設計を行う。カソードは、大電荷量のビーム生成のために 10^{-2} オーダーの高い量子効率を有するCs₂Teを用いる。今回のLバンドRF電子銃開発の目標の1つは、高いRF負荷運転(長パルス運転)にも耐えうる空洞を製作する事である。つまり、ILCスペックの長い時間幅(1ms)のRFパルスが空洞に供給された場合にも、放電の原因になる電解放出暗電流が少なく、また空洞内でのRF損失による発熱とそれによ

¹ E-mail: shigeruk@sanken.osaka-u.ac.jp

る形状変化が生じない空洞を設計・製作することである。

RF電子銃では高い加速電場を空洞内に作り出すことができる。しかし一方で、電場が強くなるにともない空洞内表面で生じる暗電流が増加する為、安定な電子ビーム生成には放電の原因となる暗電流を削減する必要がある。我々は空洞材料にHIP処理を施した無酸素銅 (Class1) 使い、空洞内表面にはダイヤモンドによる超精密加工を施す。切削加工後は電界研磨処理やオゾン洗浄処理などは行わずにロウ付けを行う予定である^[1-2]。

次に、空洞の定常状態での温度上昇について、STFの運転パラメータ(ILCスペック)を例に定性的な考察をする。空洞に供給されるRFの平均パワーは、入力ピークパワー5MWを仮定すると25kW(= 5[MW] × 1[ms] × 5[Hz])である。銅の空洞の重量(M_{cav})を47.5kg(肉厚を25mmとしての概算)と仮定すると、冷却水が無い場合は毎秒1.37[K] = $\Delta E / (C_{pCu} \times M_{cav})$ の温度上昇が生じる。また、内径9mmの水路に流速2m/s ($dV_w/dt = 1.27 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} = 7.62 \text{ [l/min]}$)で冷却水が流れるとした時、冷却水の温度上昇は約47.4[K] = $P / (C_{pCu} \times \rho_w \times dV_w/dt)$ と大きい。チャンネル数(N)を増やすことにより、温度上昇を47.4/N[K]に抑える事ができる。(C_{pCu}:銅の比熱、ρ_w:水の密度)

また、銅から冷却水への熱伝導率 $h[\text{W}/\text{m}^2/\text{K}]$ は、下の式(1)より求まる。(k_{water}: 水の熱伝導率、Nu: Nusselt number[$Nu = 0.023 \times Re^{0.8} \times Pr^{0.4}$, Re: Reynolds number, Pr: Prandtl number], de: 冷却配管直径)

$$h = k_{water} \cdot Nu / d_e = 9.971 [kW / (m^2 \cdot K)] \quad (1)$$

冷却管の内面積が0.5m²の場合、温度差がΔT= 5.02[K]で平均パワーを取ることが出来る。以上のことから、RF入力により生じるジュール熱を冷却するためには、多くの冷却チャンネルを確保し、冷却配管の内面積(銅と水が接する面積)を増やすことが必要である。また、RFを供給している最中の過渡的な状態での空洞の温度・形状変化に関しては、解析コード(ANSYS, AMPSなど)を使い調査し、最適な空洞冷却システムの設計を行う。

3. 超伝導加速器のためのRF電子銃開発

KEKの超伝導加速器試験施設(KEK-STF)では、平均電流10mAのILCスペックのビーム生成とその加速実証を目的の一つとしている。我々は、STFの電子源となるマクロパルス幅が約1msのマルチバンチを生成するためLバンドフォトカソードRF電子銃の開発も行っている。そのRF電子銃空洞と同軸導波管結合器は、現在、FNALと共同製作中である。また、フォトカソード用のレーザーシステム開発は、ロシアのJINR(Joint Institute of Nuclear Research)とIAP(Institute of Applied Physics)と共同で行っている。

3.1 STF用LバンドRF電子銃空洞製作

FNALと共同で開発しているRF電子銃は、DESY TTF/FLASHにおいて開発されてきたLバンド常伝導RF電子銃システムを基にしたものである。FNALにおいて機械加工・ロウ付けを行い、本年4月にKEKで空洞の共振周波数および電場プロファイルの測定と、それらの最終調整を行った。このDESYタイプ



図1: RF電子銃空洞周波数調整器

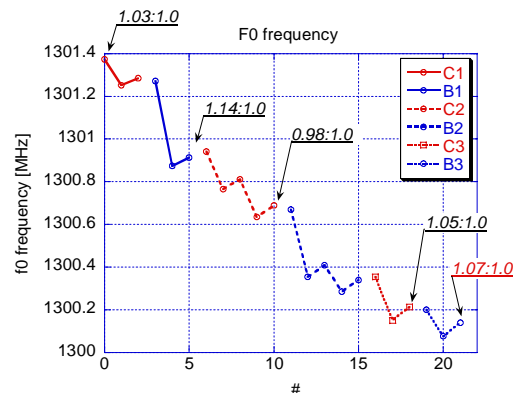


図2: RF電子銃空洞の共振周波数変化

のRF電子銃空洞の共振周波数調整は、カソード側とビーム出力側の空洞端板を変形させる事により行う。今回、周波数調整前の共振周波数は1301.414 MHz (25)であった。運転時は冷却水を50に設定する予定であるので、測定時よりも空洞温度は25高くなる。この25の温度差分による周波数変化-550[kHz] (25[K] × -22[kHz/K])と空洞を真空にする事による+390kHzの周波数変化を考慮し、1300.16 MHz (Δf=1.254MHz)を目標の周波数として調整を行った。これまでのアルミ製テスト空洞の測定や電磁場計算の結果をもとに、両端板を押し込むことにより周波数を下げ、各端板を押し込む量のバランスにより2セル間のフィールドを調整した。図1に空洞の周波数調整装置の写真を示す。空洞を中央に設置し、上面の空洞端板を固定板で受け、下側から高分解のリフトジャッキに取り付けられた治具を使って空洞の下側端板を押し込む機構となっている。結合器を使い周波数を測定しながら、カソード側・ビーム出力側の端板を調整器で交互に変形させ、周波数を調整した。最終的にそれぞれの端板を3回ずつ押し込み、ほぼ目標の周波数に到達した。(f(π)=1300.187 MHz, f(0)=1295.142 MHz) また、ビーズ摂動法により電場分布を測定し、フルセルとハーフセル間の比が1.07

と良いフィールドバランスになっていることを確認した。その他、 $Q_0=23200$ と $Q_L=9420$ ($\beta=1.46$)という測定結果が得られた。

3.2 STF入射器部

STFでは2010年夏から、LバンドRF電子銃によりマルチバンチ電子ビームを発生し、超伝導加速空洞のビーム加速実証実験を開始する。最初のビーム加速実験期間では、2台の9セル超伝導空洞を使い最大50MeV程度までビームを加速する。現在、そのための入射器部のビームライン設計を行っている。入射器部は、LバンドRF電子銃空洞、エミッタ補正用ソレノイド電磁石(S1)、4つの偏向電磁石からなるシケイン部、ビーム集束のための四極電磁石(Q)とソレノイド電磁石(S2)、2台の9セル超伝導空洞により構成される。シケインの中央部にスリットを配置し、電子ビームのエネルギー選択を行うと同時に、RF電子銃空洞からの暗電流の削除(削減)を行う。また、レーザーはシケインの途中から、カソードに垂直に入射される。

エミッタ補正用のソレノイド電磁石は、メインコイルとバックアップコイルが一体となったものを製作している^[3]。LバンドRF電子銃の場合、空洞サイズが大きいためソレノイド電磁石のボア径も大きくなりメインコイルの磁場がカソード上に漏れ出て、初期エミッタを劣化させてしまう。そのため、DESYやFNALで使用されているソレノイド電磁石システムでは、メインコイルの他にバックアップコイルをカソード後方に設け、カソード上の磁場を打ち消している(図3上)。今回、カソード後方にカソード交換用のロードロックシステムのスペースを確保し、またカソード上での磁場勾配(dBz/dz)を小さくするためにバックアップコイルも一体にしたソレノイド電磁石を開発した(図3下)。

3.3 ビームシミュレーション

GPTコードを用いてSTF入射器部のビームシミュレーションを行った。ビームライン構成は前述の通りである。エミッタ補正用のソレノイド電磁石も今回開発した一体型のもとした。超伝導空洞はERLの主加速部で使用されるものと同形状とし、最大加速電場勾配は15.2MV/mとした。そして、カソードより発生する電子ビームパラメータは、電荷量：3.2nC、ビーム直径：3mm (round-uniform)、パルス長：20ps (uniform)とした。

LバンドRF電子銃のカソード上の最大加速勾配を41.4MV/mとした時、RF電子銃単体でのエネルギー利得は最大約4.7MeV ($\Delta E/E=0.9\%$)という結果が得られた。そして、超伝導空洞2台を通過した位置でのビームエネルギーは、21.2MeV ($\Delta E/E=0.2\%$)であった。この時、超伝導空洞2台のRF位相はエネルギー拡がり最小になるように選択した。また、バンチ長は標準偏差で約7.1ps(σ)という結果が得られた。RF電子銃出口でバンチ長は約5psであり、超伝導空洞に入射するまでの間にバンチ長が若干大きくなるのが分かった。図4にSTF入射器部

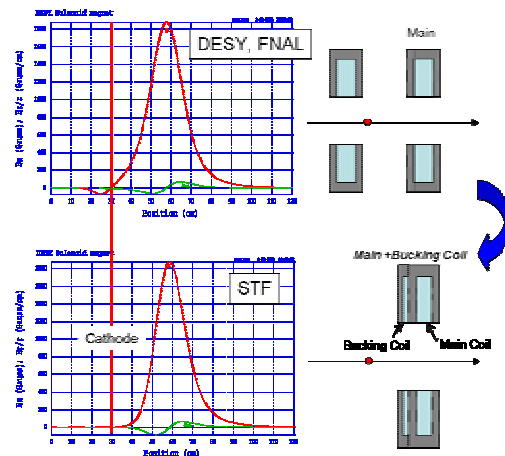


図3：(上) DESYやFNALで使用されているソレノイド電磁石システム、(下)メインコイルとバックアップコイルを一体にしたソレノイド電磁石システム。

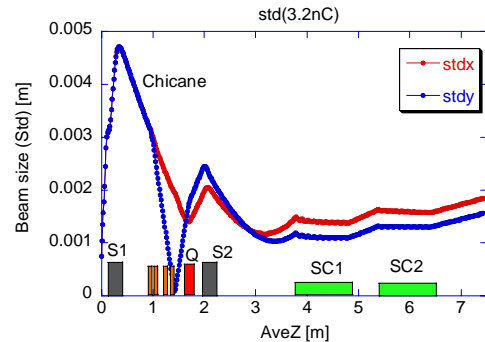


図4：STF入射器部ビームラインにおける水平・垂直方向ビームサイズ変化

のビームラインに沿った水平・垂直方向ビームサイズ変化を示す。シケイン部でビーム垂直方向にエッジ集束力が大きい事が分かる。その下流の四極電磁石(Q)で水平・垂直方向の集束力の調整し、ソレノイド電磁石(S2)により比較的小さなビームサイズで超伝導加速空洞に入射する光学系とした。また、エネルギー拡がり最小とした時の規格化エミッタンスは約6.3mm-mradであった。今回の計算では、理想的な初期ビームパラメータを使い計算を行ったが、今後より現実的なガウシアン形状のパラメータについても計算を行う。

謝辞

本研究はKEKの平成20~21年度加速器科学総合支援事業「大学等連携支援事業」の補助を受け行われている。

参考文献

- [1] C. Suzuki et al., Nucl. Instr. And Meth. A 462 (2001) 337-348.
- [2] H. Matsumoto, Proceedings of LINAC96, Geneva, 1996, p.626.
- [3] 永井良治 他、第4回日本加速器学会年会プロシーディングス、p.673 (2007)