

マルチバンチフォトカソード RF 電子銃のテストベンチ

平野耕一郎^{A)}、野村昌弘^{A)}、高野幹男^{A)}、山崎良雄^{B)}、武藤俊哉^{B)}、荒木栄^{B)}、
照沼信浩^{B)}、栗木雅夫^{B)}、明本光生^{B)}、早野仁司^{B)}、浦川順治^{B)}、

^{A)} 放射線医学総合研究所 〒263-8555 千葉県稲毛区穴川 4-9-1

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

概要

高輝度硬 X 線生成とその利用の可能性を実証するため、小型電子蓄積リングと光蓄積装置^[1]でレーザーコンプトン散乱により超高輝度硬 X 線源開発を計画している。この電子源として、マルチバンチフォトカソード RF 電子銃を採用し、その開発を KEK と共同で行っている。RF 電子銃の性能向上のためには、RF 空洞構造、カソードの長寿命化・高 QE 化、レーザーの安定化、高電荷量のマルチバンチビーム加速等の開発が必要である。そこで、KEK のアッセンブリーホール内にマルチバンチフォトカソード RF 電子銃のテストベンチを準備している。本報告では、このテストベンチの構成及び運転条件について報告する。

1 はじめに

アッセンブリーホール内の試験加速器施設 (ATF) では、Cs₂Te カソードを有するフォトカソード RF 電子銃を電子源^[2]として使い、その電子ビーム (バンチ間隔 2.8nsec、電荷量 4.8nC/bunch、パルス当たりのバンチ数 20bunches) を各種開発実験に利用している。今回準備中のテストベンチは ATF の加速器運転とは別に、RF 電子銃のビーム試験を行うとともに、放医研で計画中の加速管及び光蓄積装置を用いた超高輝度硬 X 線発生試験に利用する計画である。現在、コンクリート遮蔽体で囲んだ RF 電子銃室 (幅 3.5m × 長さ 11m × 高さ 3m) を設け、その横で導波管の RF エージングを兼ねたクライストロンの動作試験を実施中である。

図 1 に示す本テストベンチは、RF 電子銃直後にシケインマグネットを設置し、UV レーザー光をシケイン中央部からカソードの真正面へ入射させるところに特徴がある。これにより、カソード出射時のバンチ長の増大が無くなり、かつ、レーザーの安定化やアライメントの簡易化を行うことができる。また、ダークカレントをシケイン部で消失できる。

本試験における新たな試みとして、バンチ内の電子のエネルギーが後方よりも前方が低いような電子ビームを電子銃内部で発生させ、RF 電子銃単独でバンチ長を短縮させる試験を行う。さらに、高電荷量・高品質のマルチバンチビームを発生させ、かつ、これを安定に加速させる技術開発を行うため、シケインマグネット後にビーム診断系を設置して表 1 に示す試験パラメータの範囲でマルチバンチビーム加速試験を行う。

表 1: 試験パラメータ

ビームエネルギー (最大)	9MeV
電荷量 (最大)	5nC/bunch
バンチ数 (最大)	100/pulse
繰り返し (最大)	12.5Hz
RF 周波数	2856MHz
バンチ周波数	357MHz
バンチ間隔	2.8nsec
フォトカソード	Cs ₂ Te
QE (目標)	>3%
UV レーザー パワ (目標)	>3 μJ/bunch
UV 波長	266nm
レーザーパルス幅 (FWHM)	10psec
RF 幅 (最大)	4 μsec
RFGUN 入力電力 (最大)	20MW
ソレノイド中心磁場 (最大)	3.2kGauss
シケインビーム垂直方向磁場	500Gauss

2 RF 電子銃テストベンチの構成

2.1 RF 系

クライストロンは 80MW-E3712 (東芝製) を使用した。クライストロン電源 (ニチコン製) は DC 電源部に 50kV インバータユニット、14 段 2 並列の PFN 回路を用いている。オイルタンク (スタンガネス製) 内のパルストランス (昇圧比 1:16) によって、最大パルス電圧 397kV、最大パルス電流 485A を得る。また、シーケンサ部に FA-M3 (横河製) を使い、試験に用いる全てのインターロックを集中させ、イーサーネットを経由してリナックスで制御する。クライストロン設置用調整架台は上下及び回転調整できるコンパクトな据え置き型架台 (イーキューブ製) を用い

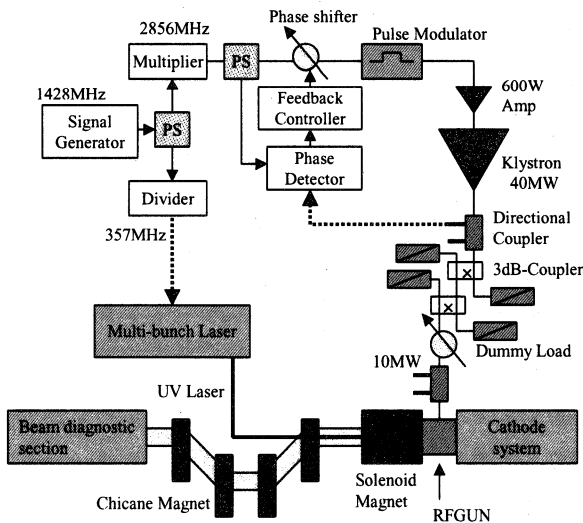


図 1: RF 電子銃テストベンチ概略構成図

た。

2.1 フォトカソード電子銃

RF 電子銃は 1.6 セル空洞、BNL-IV型であり、KEK 工作センターで製作した。RF 電子銃を取り付けるソレノイドマグネット^[3] (IDX 製) の固定部は RF 電子銃位置を微調整できる構造とした。フィールドバランス調整用に 2 個のチューナーがフルセル円筒面の軸対称な位置にある。レーザー斜入射用 (ビーム軸に対し 67.5°) のポートがハーフセル円筒部の対称位置に 2 箇所ある。UV レーザーのスポットがカソード中心にあることをウランガラスの蛍光 (波長 500~600nm) を利用して確認するため、図 2 に示す直径 11mm×厚さ 4mm のウランガラスを取り付けたカソードプラグを製作した。ウランガラスの表面は穴の開いた厚さ 0.2mm のステンレスで覆われている。ウランガラス上の蛍光をハーフセルのポートから直接観測することで UV レーザースポットの位置及び径を確認する。RF 電子銃の冷却は専用の恒温冷却装置を用いており、空洞温度を変化させて共振周波数を 2856MHz に調整する。

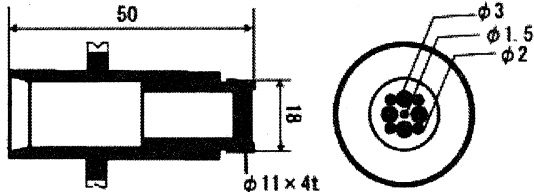


図 2: ウランガラス付きカソードプラグ

2.2 カソードシステム

カソードシステム (トヤマ製) は ATF のカソードシステム^{[4][5]} をコンパクト化したものである。このシステムには 3 個の独立したチャンバーがあり、それらはカソードプラグに Cs₂Te を蒸着させる蒸着チャンバー、カソードプラグを電子銃キャビティ内へ導入させるカソード導入チャンバー (図 3 参照)、及び、これらのチャンバーに接続してカソードプラグを移動させる搬送用チャンバーである。カソード導入チャンバーには 5 個のカソードプラグを保管するチャンバーが付属しており、カソードの QE が低下した時などに真空を破ることなくカソードプラグを交換することができる。

2.3 マルチバンチレーザー

シードレーザーには SESAM (semiconductor saturable absorber mirrors) を有する 357MHz パッシブモードロック LD 励起固体レーザーを用いる。波長 1064nm、出力 6 W (CW) の IR レーザーをポッケルスセルで 100 パルス (マクロパルス幅 280nsec) を切り出し、Nd:YAG ロッドフラッシュランプ増幅器で 2 パス増幅させ、これを 2 台用いる。現在、光学設計中である。シードレーザーの基準信号を送らせる RF ケーブル及び RF の位相制御に用いる RF ケーブル (図 1 に示す点線矢印) に恒温冷却水配管を沿わせ、その周りを保温材で巻いて、温度を安定化させた。これにより、RF 位相に対するレーザー位相を安定させる。

2.4 ビーム診断系

ビームライン構成要素及びビーム診断系の配置図を図 3 に示す。マルチバンチのパルスについて、シケイン前後のビーム強度測定、ビームエネルギー測定 (Analyzer Magnet, Slit, FC2)、Q スキャン法によるエミッタンス測定 (Analyzer Magnet, Slit, FC2) 等を行う。パルス内の各バンチについて、OTR からの光をストリークカメラで測定してバンチ長を測定する。また、ゲートカメラを用いてプロファイル及びエネルギー測定^[6]を行う。その他、各バンチのエネルギー測定 (Analyzer Magnet, BPM4) も行う。

3 運転条件

General Particle Tracer(GPT)を使用し、シケインがある場合のビーム軌道計算を行った。RF 電子銃の空洞内電場及びソレノイドマグネットの磁場は POISSON-SUPERFISH を用いて計算し、GPT の入力データとして用いた。計算条件及び計算結果を表 2 に示す。

カソードにおける電界が最大になる位相を 0 度とした時に、レーザー入射位相 ϕ が -30 度から -50 度の範囲内^[7] でエミッタンスの小さいビームが得られる。このようなレーザー入射位相の範囲では、図 4 に示すように RF キャビティ内でバンチの先方電子のエネルギーが常に後方電子よりも高くなる。このため、電子ビームのバンチ長は図 5 のようにカソードから離れるほど長くなり、シケインを通すとさらに長くなる。シケイン直後に加速管を設置することを予定しているため、できるだけ短いバンチ長のビームを得たい。

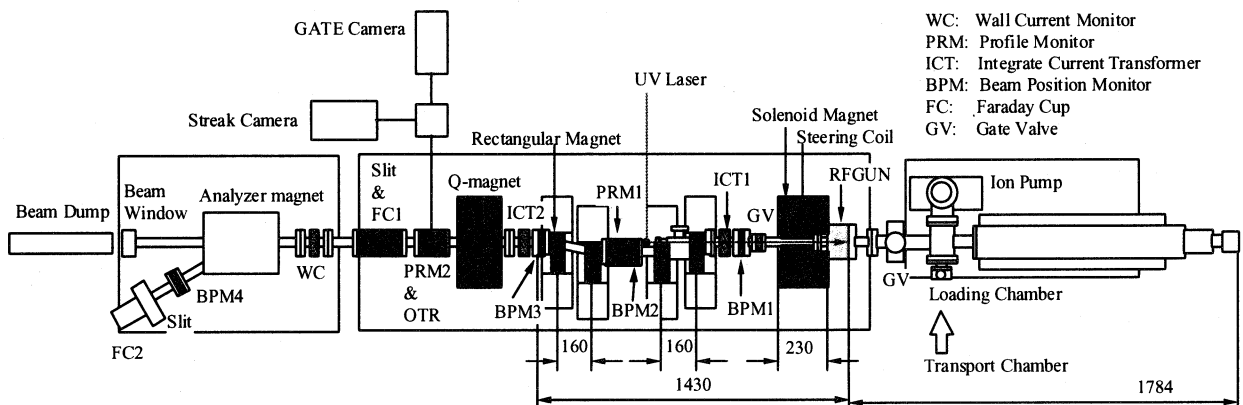


図 3: テストベンチ概略構成図

そこで、図6に示すようにRF電子銃出口(0.1m)でバンチ内の先方の電子エネルギーが後方よりも低くなる条件(運転2)を選択した。レーザーの入射位相を-75度とし、ハーフセル側の電場が高くなるようにフィールドバランスを調整し、レーザー入射時のカソード電界を60MV/m(最大150MV/m)まで高めた。フィールドバランスは前項2.1のチューナーで調整可能である。この結果、電子ビームはRF電子銃内で縮められ、そのバンチ長は増大することなく(図7)、1.4mでビーム径 ϕ 4mm(図8)、エミッタンス $10\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ ^[3]となった。しかし、カソード最大電界が高いので放電を起こす恐れがある。このため、パルス幅を狭め、かつ、RFGUN入力電力を高め、放電を発生させることなくカソード電界60MV/mが得られる条件を実験的に求める必要がある。

表2: 計算パラメータ及び計算結果

	運転1	運転2
レーザー入射位相(度)	-40	-75
カソード最大電界(MV/m)	150	150
入射位相時のカソード電界(MV/m)	120	60
フィールドバランス(half-cell:full-cell)	1.5:1	1.5:1
ソレノイド最大磁場(kGauss)	2.2	2.5
電荷量(nC)	1	1
レーザースポット径FWHM(mm)	0.8	0.8
ビーム径(mm)@1.4m	10	4
RMSエミッタンス($\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$)@1.4m	26	10
バンチ長FWHM(ps)@1.4m	18	8.3

4 まとめ

レーザー正面入射用シケインマグネットを有するマルチバンチフォトカソードRF電子銃のテストベンチのシステムを準備中である。レーザーの入射位相を-75度とし、バンチ内の先方の電子エネルギーが後方よりも低くなる条件にすれば、バンチ長が増大することなく1.4m離れた場所でビーム径が小さく、エミッタンスも良いビームが得られることがわかった。

謝辞

この研究開発は放医研・先進小型加速器計画として進めているもので、本推進委員会のご理解に感謝致します。

導波管を貸して頂いた入射器Grに感謝致します。GPTの計算に関して総合研究大学院大学、長谷川豪志殿にご助言を頂きました。計算に関する助言及び議論をして頂いた日本大学、菅野浩殿に感謝致します。ウランガラスを提供して頂いた関西原研の西村昭彦殿に感謝致します。

参考文献

[1] 野村昌弘 他, “逆コンプトン散乱による高フラックス X線発生のためのレーザーパルス蓄積法の開発”, Proceedings of the 28th Linear Accelerator Meeting in Japan, pp476-478.
 [2] M. Kuriki, K. Hirano *et al.*, Proceedings of the 28th Linear Accelerator Meeting in Japan, pp194-196.
 [3] 山崎良雄 他, “RF電子銃のビームトランスポート”, 本研究会.
 [4] 照沼信浩 他, “ATFにおけるCs-Teフォトカソードによる電子ビーム生成”, Proceedings of the 28th Linear

Accelerator Meeting in Japan, pp162-164.

[5] 照沼信浩 他, “フォトカソードRF電子銃カソードロードロックシステム”, Proceedings of the 27th Linear Accelerator Meeting in Japan, pp145-147.
 [6] X.Z.Qiu, *et al.*, Transition Radiation Electron Beam Diagnostic Study At ATF, PAC95.
 [7] 長谷川豪志 他, “ATFにおけるRFGUNテスト実験のためのシミュレーション”, Proceedings of the 26th Linear Accelerator Meeting in Japan, pp145-147.

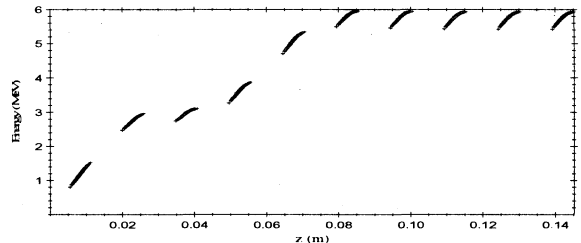


図4: RF電子銃内バンチエネルギー変化(運転1)

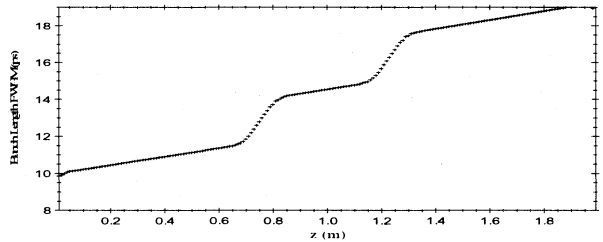


図5: バンチ長の変化、 $\phi = -40\text{deg}$ (運転1)

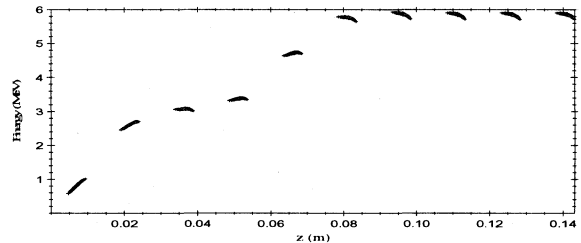


図6: RF電子銃内バンチエネルギー変化(運転2)

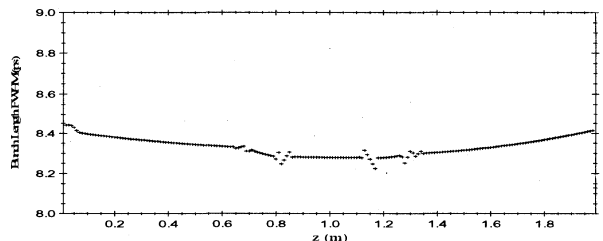


図7: バンチ長の変化、 $\phi = -75\text{deg}$ (運転2)

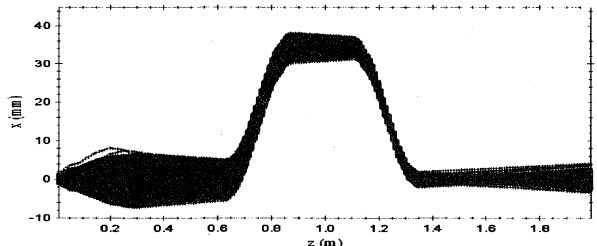


図8: ビーム径の変化、 $\phi = -75\text{deg}$ (運転2)