

[P8-22]

DESIGN STUDY OF AN RF PHOTO CATHOD X-BAND LINAC

M. Yamamoto, A. Yamamoto, N. Kaneko,
T. Ueda*, M. Uesaka*

Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co.,Ltd
1-15 Toyosu 3-Chome, Koto-Ku, Tokyo, Japan

*Nuclear Engineering Research Laboratory, University of Tokyo
22-2 Shirakara-Shirane, Tokai, Naka, Ibaraki, Japan

Abstract

The femto second electron beam is very useful in radiation chemistry physics and material science. To produce the 100 femto second order beam, we are considering a compact X-Band linac system which consists of a photo-cathod RF-gun and an accelerating structure, chicane-type magnetic pulse compression system. The simulation of electron dynamics is carried out by using GPT. It is found that charge 0.9[nC] and 150(FWHM) second beam can be obtained.

RF フォトカソード Xバンドリニアックの設計研究

1. はじめに

近年、放射線物理・化学や材料化学の分野において、フェムト秒時間領域での現象の解明の必要性が高まってきている。東京大学では、半値幅 200[fs]の極短パルス電子ビームとフェムト秒レーザーを用いた実験が進められている。

ここでの極短パルス電子ビームの発生に用いられている線型加速器は、入射器にフォトカソード Sバンド RF 電子銃、加速部に Sバンド加速管、そしてシケインタイプの磁気パルス圧縮装置により構成されている[1]。

加速器を小型化するために、Xバンドのシステムに置き換えることを考えている。Xバンドリニアックを用いフェムト秒のビームの発生については、以前から検討を進めている。例えば、熱電子銃と SHB, 2本(加速とエネルギー変調)の Xバンド加速管、アークタイプの磁気パルス圧縮装置で 100[fsec]のビームが可能であるというシミュレーション結果が得られた[2]。また、Sバンド RF 電子銃と 2本の Xバンド加速管のシステムについても検討が行われた[3]。検討が進むに従い、構成機器が減少しシステムは単純化している。

さらに、単純化・小型化を目指し、フォトカソード Xバンド RF 電子銃と 1本の Xバンド加速管、シケインタイプの磁気パルス圧縮装置から構成されるシステムの検討を行った。本稿では、機器の概要とビームシミュレーション結果について報告する。

2. 機器構成

施設は、フェムト秒電子ビームを発生させる加速器とフェムト秒レーザー光を検出・処理を行う測定系から構成される。ここで検討した加速器のシステムを図 1 に示す。また、シミュレーションの結果、

半値幅 150[fs]が得られた機器のパラメーターを表 1 に示す。以下構成機器の概要を説明する。

2.1 Xバンドフォトカソード RF 電子銃

RF 電子銃は、東京大学での運転実績から、フォトカソードタイプとした。従来、フォトカソードは量子効率が悪く、十分なビーム強度が得られない問題があった。しかし、近年の極短パルスレーザーのハイパワー化により、低い量子効率でも十分な電子ビーム強度が得られるようになった。

RF 電子銃の空洞形状は、BNL の 1.6 空洞タイプをスケールダウンから計算を始めた。放電の問題を避けるために、軸上電場の最大値は 100[MV/m]以下とした。そのため、1.6 空洞ではビームエネルギーが低く、加速管に導くまでに、バンチ長が長くなる問題が生じた。この問題を避けるためには、3 [MeV]以上のビームエネルギーが必要であることがシミュレーションから分かった。先に示した軸上電場強度の制限の中で、このエネルギーを達成するために、RF 電子銃は 6.5 セルとした。

エミッタンスの悪化を防ぐために、RF 電子銃には収束コイルが取り付けられている。現状集束磁場は、カソード表面ではゼロ、カソードから 10 [mm]の場所で $B_z = 0.13$ [T]に急速に立ち上がるようにしている。

2.2 Xバンド加速管

加速管では、ビームを 20[MeV]程度まで加速するとともに、バンチ前方から後方に向かってエネルギーが高くなるように変調をかける。このエネルギー変調を利用して、後段のシケインでビームを圧縮する。この変調と圧縮の方針は、次のようにした。

- ・加速管では、 (z, γ) 空間の粒子分布を線形にする。
- ・この線形な分布を、シケインでの線形な成分で圧縮する(2.3 シケインで記述)。

変調と加速の条件を満足させる最適加速位相は、ビームクレスト前方 $\pi/6$ [rad]であることがシミュレーションより分かった。

システム全体の RF 電力は 10 [MW]を目安とし、加速管では 8 [MW]程度を考えている。この電力で必要なエネルギーまで加速するために、ディスク孔径 2a は 8.5~6.3 [mm]の 100 セル加速管とした。

2.3 磁気パルス圧縮装置

パルス圧縮装置は、構造が簡単な偏向電磁石 4 個から構成されるシケインタイプとした。ここでは、 dp の運動量変化が出口で dz の軌道長の変化を与える。

$$dz = \alpha_1 \frac{dp}{p} + \alpha_2 \left(\frac{dp}{p}\right)^2 + \alpha_3 \left(\frac{dp}{p}\right)^3 + \dots$$

1 次の項はパルス圧縮に寄与するが、高次の項はパルス幅を長くする方向に作用する。特に、2 次の項が問題で、 $\alpha_2 = 0$ とできれば、かなり理想的な圧縮が可能である。

シケインタイプの場合、 $\alpha_2 = 0$ は不可能であることが理論計算で分かったので、この係数 α_2 を小さくする方針で設計を進めた。シケインを大きくすれば、この係数を小さくすることができる。結果、シケインは 1.7 [m]と大きめなものになった。

3. ビームシミュレーション結果

ビームシミュレーションには、GPT(General Particle Tracer)[4]を用いた。これは、ビームをマクロ粒子に分割し、粒子間や電磁場との作用を時間領域で計算する。さらに、エレメントの追加が可能で、ここでは加速管のショートレンジウェーク場を追加して計算を行った。

ここでの計算では、2000 個のマクロパーティクルで 1[nC]のビームをシミュレーションした。図 1 と表 1 で示したシステムの計算結果を表 2 と図 2, 3, 4 に示す。

RF 電子銃のカソードで $\sigma_z = 4$ [psec]のガウス分布、1[nC]のビームを出発点としている。カソードでの粒子の 89.9 [%]が RF 電子銃出口まで到達している。RF 電子銃を出て収束磁場の区間を通過したビームの分布を図 2 に示す。

RF 電子銃からのビームは、加速管で加速及びエネルギー変調を受けている。加速管出口でのエネルギーは図 3 のように 19.5~24.8[MeV]まで z 座標に対してほぼ線形に分布している。また、図 2,3 の中図より、加速管では z 方向の粒子数の分布の変化が少ないことが分かる。これは、スムーズに加速されているからで、これは後段のシケインでのパルス圧縮に重要である。

このエネルギー変調がかかったバンチは、シケインで 1/28 に圧縮される。シケイン出口でビームの様子を図 4 に示す。図 4 右図の用に三日月の形にな

るのは、2 次の効果 α_2 の影響である。

4. まとめ

X バンドのフォトカソード RF 電子銃と加速管 1 本、シケインタイプのパルス圧縮装置システムで 150[fs]の電子ビームの発生の可能性がシミュレーションにより示された。

表 1 リニアックの構成機器のパラメーター

RF 電子銃	
運転周波数	11.424 [GHz]
加速セル数	6.5
軸上最大電場	88 [MV/m]
レーザーパルス幅	$\sigma = 4$ [ps]
加速管	
運転周波数	11.424 [GHz]
加速管長(加速部)	0.874 [m]
シャントインピーダンス	79 [MΩ]
加速電場 (8MW 入力)	24.8 [MV/m]
磁気パルス圧縮装置	
方式	シケインタイプ
磁場	0.4 [T]

表 2 シミュレーション結果

加速管入口 ($z = 0.58\text{m}$)	
ビームエネルギー/MeV	3.3 平均
ビーム径 (ϕ_x, ϕ_y)/mm	5.6, 5.6
バンチ長さ/psec	4.8 半値
規格化エミッタンス(ϵ_x, ϵ_y)/mm mrad	40, 40 _{RMS}
加速管出口 ($z = 1.48\text{m}$)	
ビームエネルギー/MeV	21 平均
ビーム径 (ϕ_x, ϕ_y)/mm	7.8, 8.7
バンチ長さ/psec	4.2 半値
規格化エミッタンス(ϵ_x, ϵ_y)/mm mrad	61, 64 _{RMS}
磁気パルス圧縮装置後 ($z = 3.57\text{m}$)	
ビームエネルギー/MeV	21 平均
ビーム径 (ϕ_x, ϕ_y)/mm	15.3, 17.2
バンチ長さ/fsec	150 半値
規格化エミッタンス(ϵ_x, ϵ_y)/mm mrad	62, 72 _{RMS}
電荷量/nC	0.9

参考文献

- [1] M.Uesaka et al., Proc. of EPAC98, p.776.
- [2] A. Takeshita et al., NIM-A, vol.421(1999), P.43.
- [3] Harano et al., Proc. of the 22nd Linear Accelerator Meeting in Japan(1997), pp.270-271.
- [4] Pulsar Physics, General Particle Tracer User Manual.

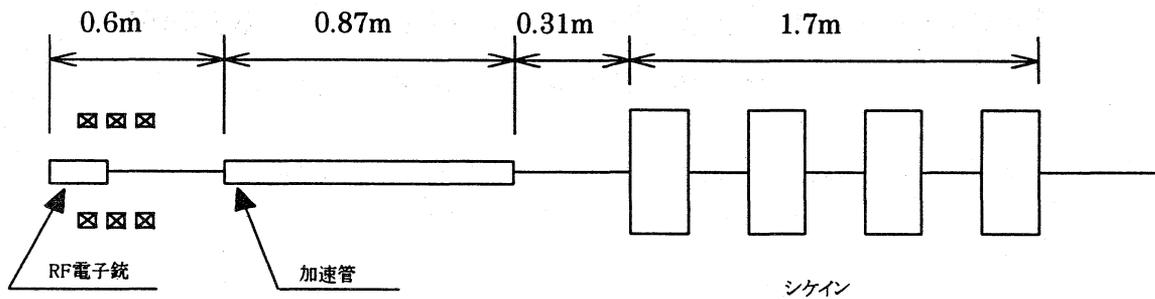


図1 加速器の構成

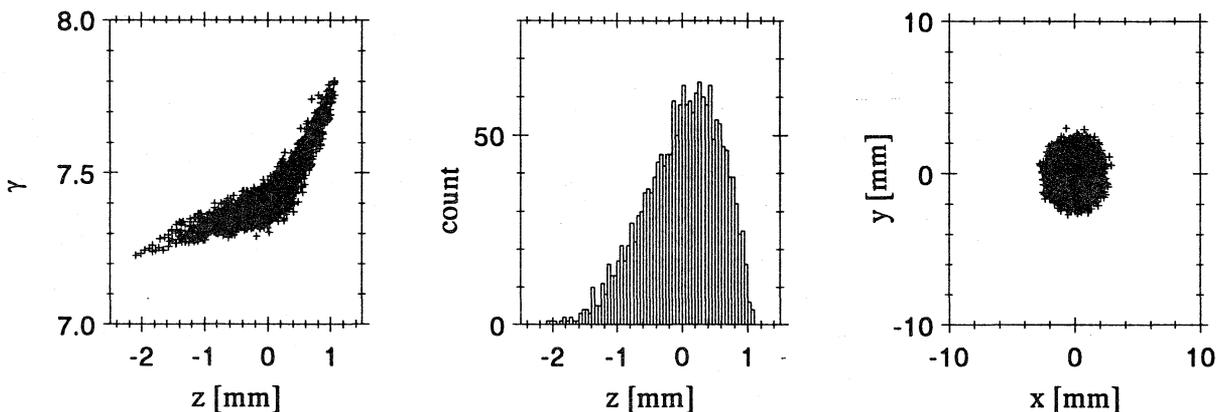


図2 加速管入口($z = 0.58\text{m}$)でのビームの様子。左図：相対論的 γ v.s. z 中図：粒子数 v.s. z 右図： y v.s. x

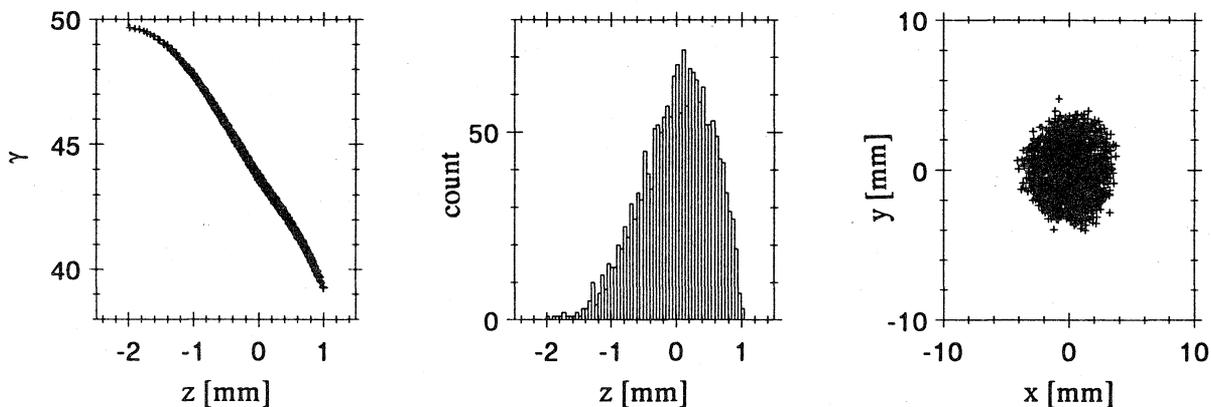


図3 加速管出口($z = 1.48\text{m}$)でのビームの様子

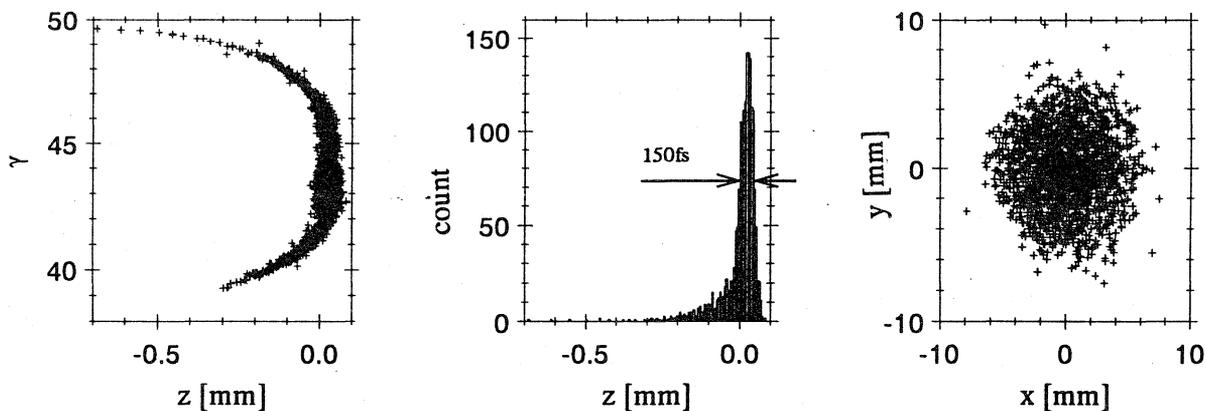


図4 シケイン出口($z = 3.57\text{m}$)でのビームの様子