

BEAM LOADING EXPERIMENT OF A MULTI-BUNCH PHOTO CATHODE RF GUN

K. Hirano^{A)}, M. Fukuda^{A)}, M. Takano^{A)},

Y. Yamazaki^{B)}, T. Muto^{B)}, S. Araki^{B)}, N. Terunuma^{B)}, M. Kuriki^{B)}, M. Akemoto^{B)}, H. Hayano^{B)}, J. Urakawa^{B)}

A) National Institute of Radiological Sciences (NIRS), 4-9-1, Anagawa, Inage, Chiba, 263-8555, Japan

B) KEK, Oho, Ibaraki, 305-0801, Japan

Abstract

A multi-bunch photo-cathode RF gun system has been developed as a beam source for the production of intense beams of quasi-monoenergetic X-rays. The gun produces 100 bunches with a 2.8ns bunch spacing and less 5nC bunch charge. This paper describes transient beam loading by a bunch train with the high charge. We have measured the beam energy of a multi-bunch beam with 280nC/100bunches and calculated the cavity voltages with beam loading.

マルチバンチフォトカソードRF電子銃のビームローディング試験

1. はじめに

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。現在、放医研で計画中の超高輝度硬X線発生試験に利用するため、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^{[2][3]}を構築し、ビーム発生試験（バンチ間隔2.8nsec、電荷量5nC/bunch、パルス当たりのバンチ数100bunches、ビームエネルギー7MeV）を実施している。高電荷マルチバンチビームを発生させると、ビームローディングによってバンチトレインの先頭と後方のビームエネルギーに差が生じる。そこで、RFの立ち上がりにビームを入射させ、バンチトレインのエネルギー差を補正する試験を実施したので報告する。

2. フォトカソードRF電子銃

RF電子銃はカソードシステムを有する1.6セル空洞、BNL-IV型である。カソードは、CsTeを蒸着したモリブデンカソードプラグを用いており、カソードシステムによって空洞内に装填させ、また、真空を破ることなく交換することができる。カソード照射には、波長266nm、最大エネルギー7 μ J/bunchのUVレーザーを用いている。運転時のカソードのQEは0.4~0.2%である。図1に示すように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ている。空洞は精密冷却装置で43.50 \pm 0.15 $^{\circ}$ Cに温調され、空洞の共振周波数が運転周波数2856MHzと同じになるよう設定している。空洞内の電界分布はハーフセル側の電界がフルセル側より高くなるようにチューニングした。

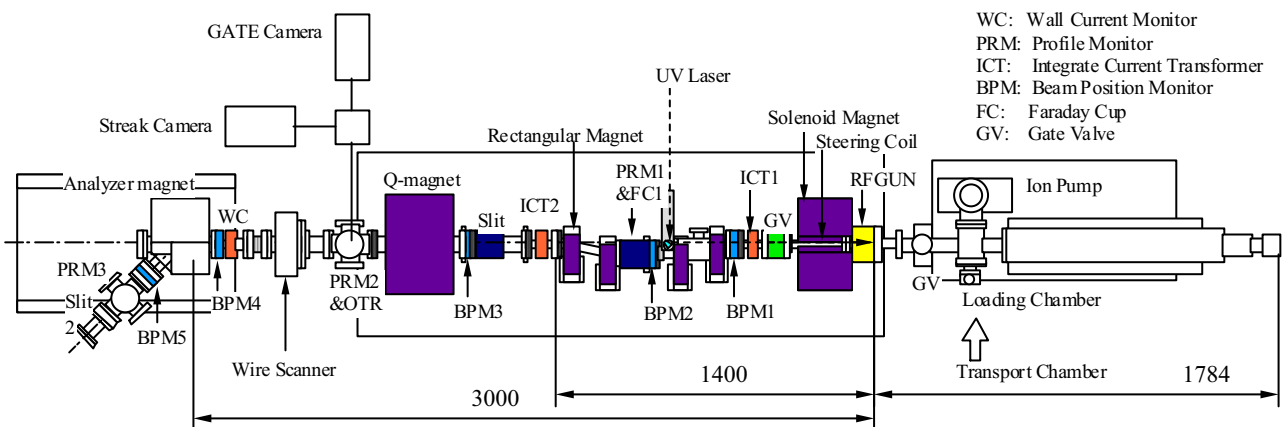


図1：テストベンチ体系図

3. ビームローディング計算

Q値、結合係数 β 、空洞電場分布などの測定値から空洞電圧を求め、RFの過渡状態におけるバンチトレインのビームローディング及び空洞に励起される電圧を求めた。

3.1 Q値及び結合係数 β の測定

空洞への入力電力 P_i 及び反射電力 P_L を測定し、入力電力で規格化したRFパルス内の反射電力を(1)式でフィッティングすることにより、カップリング係数 β 、フィリングタイム t_f 及び無負荷 Q_0 を求めた。結果を図2に示す。

$$\frac{P_L}{P_i} = \left(\frac{2\beta}{1+\beta} (1 - e^{-t/t_f}) - 1 \right)^2 \quad (1)$$

結合係数 $\beta = 0.688 \pm 0.011$

フィリングタイム $t_f = 0.632 \pm 0.015 \mu s$

よって、無負荷 Q_0 、 Q_0 は(2)式から求まる。

$$Q_0 = t_f \pi f_0 (1 + \beta) = 9570 \quad (2)$$

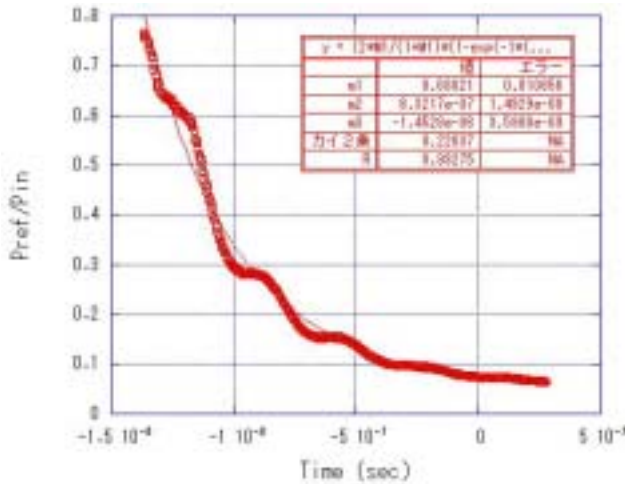


図2：入力電力で規格化したパルス内反射電力

3.2 空洞内電場分布の測定

摂動法により、RFGN空洞内の電場分布を求めた。微小な摂動として空洞内に体積 $\Delta\tau$ 、半径 r の導球体（半径1.47mm、重さ0.0362mg、比重2.7）を4mm間隔で挿入し、基本周波数 f_0 からの周波数変化 Δf をネットワークアナライザで測定した。この時、加速に用いるTM010モードは空洞中心で電場成分しかもたず、磁場はゼロとして、さらにビーズ近傍で電場が一定とする近似を行うと、周波数変化 Δf と空洞中心での電場 E の関係は(3)式となる。ここで、 E は電場、 ϵ は誘電率、空洞に蓄えられているエネルギー W である。

$$\frac{\Delta f}{f_0} = -\frac{k\epsilon|E|^2 \Delta\tau}{4W} = -\frac{3\epsilon|E|^2 \frac{4}{3}\pi r^3}{4W} \quad (3)$$

半径 r の金属球の定数は $k=3$ である。従って、電場は空洞電力 P_c を用いて(4)式で表される。また、空洞電力 P_c は入力電力 P_i と(5)式の関係にあり、入力電力 P_i が12MWで定常状態の時、 11.6 ± 0.1 MWとなる。この時の空洞内電場分布を図3に示す。

$$E(z) = \sqrt{\frac{|\Delta f|}{f_0} \frac{W}{\epsilon \pi r^3}} = \sqrt{\frac{|\Delta f|}{f_0^2} \frac{P_c Q_0}{2\epsilon \pi^2 r^3}} \quad (4)$$

$$P_c = \frac{P_e}{\beta} = \frac{kE_e^2}{\beta} = \frac{4\beta}{(1+\beta)^2} (1 - e^{-t/t_f})^2 P_i \quad (5)$$

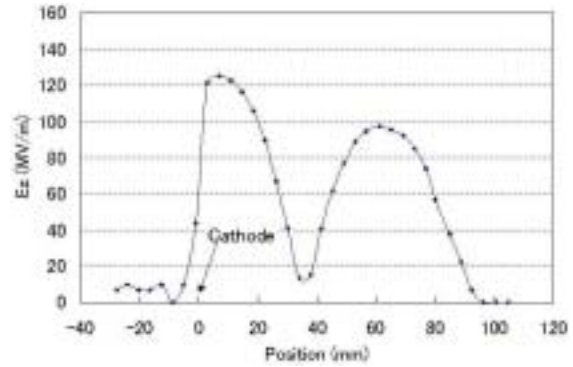


図3：空洞内電場分布

3.3 ビームエネルギーとビームローディング^[4]

空洞電力 $P_c=11.6$ MWの時、空洞内の最大電界は125MV/mとなった。そこで、空洞内の最大電界125MV/mのときの加速電圧をGeneral Particle Tracer (GPT) コードで求めた。このとき、GPTの電場入力データは摂動法で測定した電場分布になるようSuperfishで計算した電場分布を用いた。また、カソード上の電界が最大になるRFに対するレーザー入射位相を 90° とした時、レーザー入射位相を 23° として計算した。この結果、位相情報を含めた加速電圧は $V_c=5.64 \pm 0.02$ MVとなった。このとき、実効シャントインピーダンス R_{sh} は(6)式で求められる。

$$R_{sh} = \frac{V_c^2}{P_c} = 2.74 \pm 0.06 (M\Omega) \quad (6)$$

よって、時間 t 経過後の空洞内に励起される電圧 V_c は(7)式で表される。

$$V_c = \sqrt{R_{sh} P_c} = \frac{2\sqrt{\beta} R_{sh} P_i}{1+\beta} (1 - e^{-t/t_f}) \quad (7)$$

全てのバンチは同じ電荷を持ち、等しいバンチ間隔 t_b で空洞を通過する時、時間 $t = t_1$ 経過後の過渡状態でのバンチトレインのビームローディングは(8)式となる。

$$V_b = \frac{\omega_0 R_{sh}}{2Q_0} \left(\frac{(1 - e^{-(t-t_1)/t_f})}{1 - e^{-t_b/t_f}} - \frac{1}{2} \right) \quad (8)$$

よって、空洞内に励起される電圧 V は(9)式で表される。

$$V = V_c - V_b \quad (9)$$

4. マルチバンチビームエネルギー測定

GUNから出力される電荷量は図1に示すソレノイドコイル直後のICT1で測定した。レーザー入射位相^[5]に対する電荷量を図4に示す。レーザー入射位相はカソード上の電界が最大になる位相を90°とした。運転時のレーザー入射位相はバンチのエネルギー幅が最小となる22° ± 2° に設定した。UVレーザーのパルス幅は17 ± 1ps (FWHM)、カソード上の直径はφ 5mmである。電荷量はUV用λ/2板の回転角を調整し、レーザーのエネルギーを増減させることによって調整した。

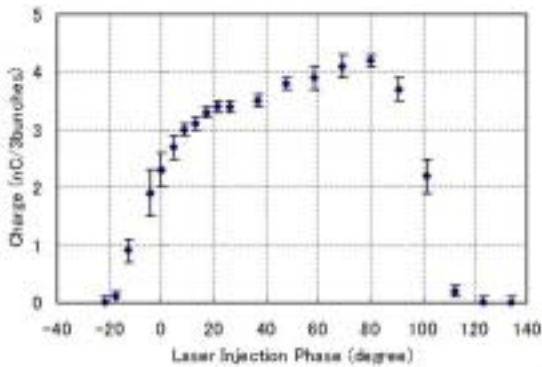


図4：レーザー入射位相に対するICT1の電荷量

GUN入力電力12.1 ± 0.1MW、パルス幅1.8 μs、繰り返し12.5HzのRFパルスに100バンチのビームを表1に示すタイミングで入射させた。バンチトレインのエネルギーは図1に示すエネルギー分析磁石及びBPM5の水平信号を利用して求めた。まず、ビームがエネルギー分析磁石に真直ぐ入射されていることを確認するため、上流に位置するBPM3及びBPM4の波高値を5Gs/sのデジタルオシロ (TDS684C) で測定し、波高値から求めた各バンチの位置が±1mmの範囲内にあることを確認した。次に、バンチトレインの先頭バンチについて、BPM5の水平信号の波高値が±10%の範囲内で一致するときのエネルギーを測定した。また、後方バンチも同様に測定した。これらの差から先頭バンチと後方バンチのエネルギー差を求めた。ビームエネルギーの測定結果及び計算結果を表1に示す。また、(9)式で求めた計算結果を図5に示す。

電荷量に応じて、レーザーの入射タイミングを変化させることにより、バンチトレインのビームエネルギー差を1%以下に補正することができた。

パルス幅が1.85 μs以下では、放電発生の頻度が少なかったため、カソードがあるハーフセル側の電界は最大120MV/mまで安定して印加できることがわかった。電荷量の増加に伴い、エネルギー補正を行うと、ビームエネルギーが減少する。ビームエネルギーの低下はビームロスの原因になるので、ビームエネルギーをできるだけ増加させたい。エージングを進めれば、最大電界を増加できると思われるが、最大電界の目安を120MV/m とすると、GUN入力電力18MW、パルス幅1 μsを投入できる場合は、400nC/100bunchesのバンチトレインのビームエネルギーは4.60 ± 0.01MeVに補正できると推測される。

5. まとめ

230nC/100bunchesのマルチバンチを発生させ、RFの肩に乗せることによって、各バンチのエネルギー差を1%以内に補正することができた。高電荷マルチバンチ発生に伴う問題点を検討するとともに、本システムでどの程度まで電荷量を増加させ、エネルギーを補正できるか試験する。また、バンチ長、エミッタンス等のビームパラメータも測定する予定である。

表1：試験結果及び計算結果

電荷量 (nC/100bunches)	バンチトレインの 入射タイミング (μsec)	実験値		計算値		
		先頭バンチの エネルギー (MeV)	先頭バンチと 後方バンチの エネルギー差 (MeV)	先頭バンチの エネルギー (MeV)	バンチトレイン のビームロー ディング (MeV)	先頭バンチと 後方バンチの エネルギー差 (MeV)
230 ± 10	0.849	4.21 ± 0.04	0.04 ± 0.06	4.22 ± 0.27	0.48	0.05
120 ± 5	0.849	4.22 ± 0.04	0.26 ± 0.06	4.22 ± 0.27	0.25	0.28
49 ± 2	0.849	4.19 ± 0.04	0.42 ± 0.06	4.22 ± 0.27	0.1	0.43
49 ± 2	1.409	5.04 ± 0.04	0.05 ± 0.06	5.05 ± 0.27	0.1	0.12
280 ± 10	1.409	4.99 ± 0.04	-0.49 ± 0.06	5.05 ± 0.27	0.58	-0.36

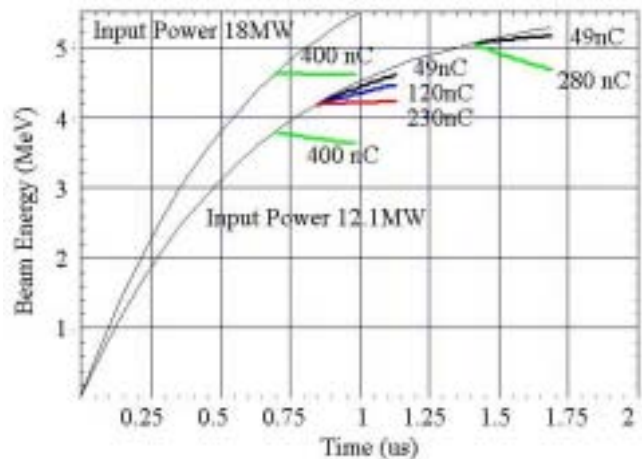


図5：バンチトレインのエネルギー変化

6. 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。この実験に関し、KEK、ATFグループの方々の協力に感謝致します。CTの較正に協力して頂いたKEK、諏訪田先生に感謝致します。ビームローディングに関する議論をして頂いたKEK、影山先生に感謝致します。

参考文献

- [1] K. Takezawa, et al., “大強度X線生成のためのファブリペロー共振器内レーザーパルス蓄積”, 第1回加速器学会, Aug. 2004.
- [2] K. Hirano, et al., “Development of A Multi-bunch Photocathode RF gun System”, EPAC'04.
- [3] K. Hirano, et al., “マルチバンチフォトカソードRF電子銃のテストベンチ”, The 14th SAST, Japan, November 2003.
- [4] P. B. Wilson, “High Energy Electron Linacs: Applications to Storage Ring RF Systems And Linear Colliders”, SLAC-PUB-2884, Nov. 1991.
- [5] K. Hirano, et al., “ATF入射部の高強度ビーム運転”, 第1回加速器学会, Aug. 2004.