

# X-band熱カソードRFガンにおけるビームローディング

深澤 篤<sup>1,A)</sup>、今井 貴之<sup>A)</sup>、坂本 文人<sup>A)</sup>、名 風太郎<sup>A)</sup>、上坂 充<sup>A)</sup>  
土橋 克広<sup>B)</sup>、飯島 北斗<sup>B)</sup>、浦川 順治<sup>C)</sup>、肥後 寿泰<sup>C)</sup>、明本 光生<sup>C)</sup>、早野 仁司<sup>C)</sup>  
松尾 健一<sup>D)</sup>、栄 久晴<sup>D)</sup>

A) 東京大学大学院工学系研究科附属原子力工学研究施設  
〒319-1188 茨城県那珂郡東海村白方2-22

B) 放射線医学総合研究所  
〒263-8555 千葉県千葉市稲毛区穴川4-9-1

C) 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

D) 石川島播磨重工業株式会社  
〒235-8501 神奈川県横浜市磯子区新中原町1番地

## 概要

逆コンプトン散乱硬X線源のためのX-band熱カソードRFガンについて、ビームのパルス内挙動を解析するために、PARMELAによるビーム運動の解析とビームローディングによる影響について計算を行った。ビームローディングは一バンチ当たり30pCで88ps間隔のマルチバンチビームで0.38MVであり、ビームの最大エネルギーは3.8MeVであった。また、最大エネルギーの90%以上の粒子だけでは、規格化rmsエミッタンスは6.2[mm.mrad]である。

## 1. はじめに

文部科学省「先進小型加速器プロジェクト」において、小型硬X線源の開発を行っている。これはX-band電子線形加速器とQスイッチYAGレーザーを組み合わせ、逆コンプトン散乱によって33keVの硬X線を発生させ、血管造影への応用を狙っている。ここでは電子銃としてX-band熱カソードRFガンを採用しているため、RFパルスを入力している1 $\mu$ sの間、X-bandの間隔(88ps)でマイクロバンチが並ぶマルチバンチの電子ビームとなる。従ってビームローディングの影響を考慮する必要があり、シミュレーションによりその評価を行う。最終的にはガンと加速管をあわせて評価し、RF波形を整形することで出力されるビームの安定領域を増やすことを目標にする。ここでは、ガンについて評価を行い、ガンキャビティのフィールドはSUPERFISH、ビームの運動はPARMELA、ビームローディングは理論式[1]を用いておこなった。

## 2. ビームローディング

### 2.1 計算体系

X-band熱RFガンのキャビティは3.5セルできて

おり、 $\pi$ モードで加速するように設計されている(図1)[2]。キャビティへのRFの入力はガンの出口側から同軸で投入される。熱カソードは直径3mmで、20A/cm<sup>2</sup>の電流の放出能力を持っているとする。キャビティの特性はSUPERFISHを用いて計算し、ビームローディングの効果は理論式[1]を用いて行った。

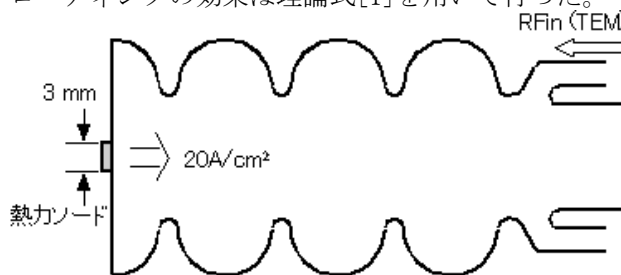


図1. RFガンキャビティ

### 2.2 SUPERFISHによるキャビティの計算

RFガンキャビティについてのSUPERFISHによる計算の結果をいくつかのパラメータについて表1に示す。シャントインピーダンスはTransit Time Factorを考慮した実効的なシャントインピーダンスである。

表1. RFガンキャビティの特性

パラメータ	値
周波数	11.424 GHz
Transit Time Factor	0.703
シャントインピーダンス	2.46 M $\Omega$
Q値	9350
Wake Loss Parameter	4.72 V/pC

### 2.4 キャビティを通過する電荷量

ビームは熱カソードより、20A/cm<sup>2</sup>の電流が放出されている。カソードの面積をかけると1.41Aである。熱カソードRFガンではカソード表面の電場の符号が

<sup>1</sup> E-mail: fukasawa@utnl.jp

半周期毎に変わるので、ビームが放出されるのは加速フェーズにある半周期の間である。ビーム電流は半分の0.705Aとなり、半周期の間に放出される電荷量は62pCである。このうち、キャビティを通過する電荷量を計算するため、PARMELAを用いてビームの運動を計算した。これによると、カソード表面の電界強度が120-130MV/mを超えると、30pCに落ち着いてくる。これ以上の電荷量を望むためにはカソードから放出される電子の量をふやす必要がある。

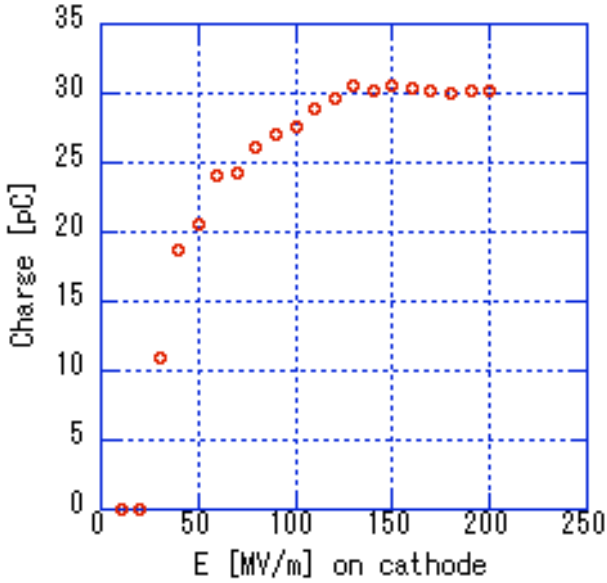


図2. カソード表面の電界と通過電荷量

### 2.3 ビームローディングの計算

30pCのバンチがキャビティを通過してくるので、これによりビームローディングが起きるとし、これが十分短いバンチであり、キャビティ内を光速で運動しているとする。定常状態におけるビームローディング[1]は、

$$V_{br} = \frac{I_0 R_a}{1 + \Gamma} \quad (1)$$

となる。ここで、 $I_0$ はビーム電流、 $R_a$ は実効的なシャントインピーダンス、 $\Gamma$ は外部とのカップリングである。加速の効率 $\Gamma$ は

$$\Gamma = \frac{2\sqrt{\Gamma} \frac{\Gamma}{2K} \frac{K}{\sqrt{\Gamma}}}{1 + \Gamma} \quad (2)$$

$$K = \frac{I_0}{2} \sqrt{\frac{R_a}{P_g}} \quad (3)$$

で表される。ここで、 $P_g$ はRF源からの供給電力である。この加速効率を最適化することで最適なカップリングを求めると、(2)式の $\Gamma$ での偏微分が0になるとき、ビーム電流とRF電力が決まったときの最適なカップリングが求まり、

$$\Gamma = \sqrt{K + \sqrt{K^2 + 1}} \quad (4)$$

ここでは、 $I_0=0.34$  [A]、 $P_g=6$  MWとすると、 $K=0.11$ となるので、最適な $\Gamma$ は1.2で加速効率が0.20である。

i番目のバンチに対するビームローディング $V_i$ は理論式より、

$$V_i = V_0 \prod_{l=0}^{i-1} e^{\Gamma_l} \frac{1}{2} \quad (5)$$

$$V_0 = 2kq, \quad \Gamma = T_b/T_f \quad (6)$$

であり、 $V_0$ は一バンチによるビームローディング、 $k$ はWake Loss Parameter、 $q$ は一バンチ当たりの電荷量、 $T_b$ はバンチ間隔、 $T_f$ はFilling Timeである。この式を用いて空洞内での加速電圧を計算すると入力パワーが6MW、 $\Gamma=1.2$ のとき、図2のようになる。ここでの電圧は、ビームがキャビティ内を光速で通過したときに得られるゲインである。定常状態では、0.38MVのビームローディングがある。PARMELAを用いた計算による(表2)と、やはり最大エネルギーで0.4MeVの差がでる。

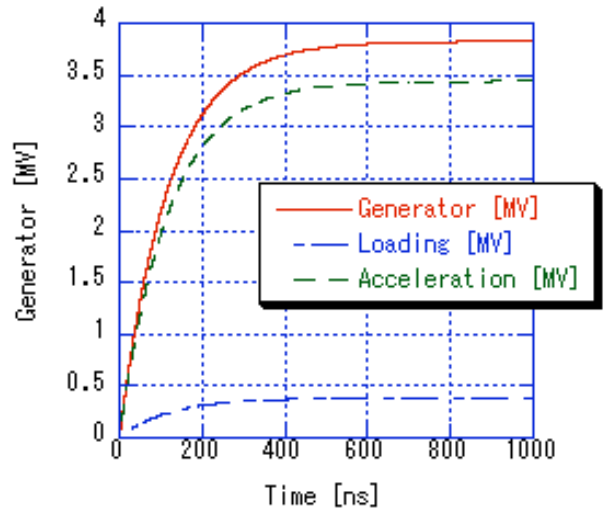


図3. キャビティ内の加速電圧

表2. ビームローディングの影響

Beam Loading	なし	あり
カソード電界	165 MV/m	148 MV/m
最大エネルギー	3.8 MeV	3.4 MeV
平均エネルギー	3.1 MeV	2.7 MeV

### 3. ガン出口のビームパラメータ

ビームローディングの影響を考慮した上での、つまりカソード表面上の電界が148MV/mの時のビームパラメータについてここにまとめる。

### 3.1 ビームの分布

ガン出口におけるビームエネルギーの時間分布およびビーム波形を図4, 5にそれぞれ示す。ビームのほとんどが先頭の30ps以内にあり、エネルギーもその辺りまでが1MeVを超えている。また、ちょうど1周期遅れたところにもエネルギーの高いものが存在するが、これはキャビティ内で1度減速され、再度加速されたものである。

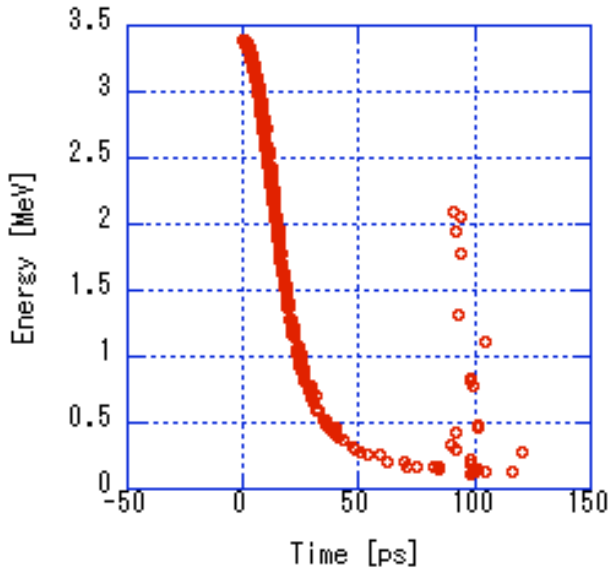


図4. ビームの時間分布

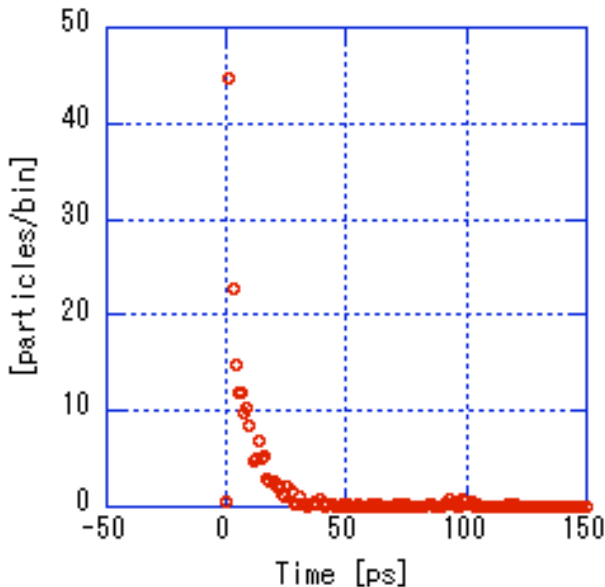


図5. ビーム波形

### 3.3 エミッタンス等

この逆コンプトン散乱装置では、さらにビームを加速する必要があり、この後X-band進行波型加速管で加速する。最終的なビームのエネルギー広がりをも1%程度に抑えたいために、電子銃を出たビームは $\alpha$ 磁石でエネルギー分別され、バンチ長圧縮を受ける。それを考慮して最大エネルギーの90%以上のものだけを考える。計算したパラメータについて表3にまとめる。電荷量は20pC以上が望ましいので、今後の計算により、エネルギー条件の緩和の可能性を検討する必要がある。エミッタンスは十分であり、バンチ長は $\alpha$ 磁石によりさらに圧縮を受ける。

表3. エネルギーが最大の90%以上で構成されるビームのパラメータ

電荷量	17 pC
エミッタンス (rms)	6.2 $\mu\text{mm. mrad}$
バンチ長 (全幅)	6.3 ps

## 6. まとめ

X-band熱カソードRFガンについて、ビームローディングを考慮した計算を行った。ガンを通過する電荷量が30pCの場合、加速効率が最大になる $\Omega$ は6MWの入力パワーで1.2であり、ビームローディングは0.38MVになる。そのときの最大エネルギーは3.8MeVであり、 $\alpha$ 磁石でのエネルギー分別を考慮し、エネルギーが最大の90%以上あるものだけ考えると規格化rmsエミッタンスは6.2 $\mu\text{mm. mrad}$ で、バンチ長は全幅で6.3psである。今後は $\alpha$ 磁石で曲げた後の加速管内のビームローディングについて計算を行い、ビームの安定領域を増やすことができるようなRFの波形を求める。

## 参考文献

- [1] P. B. Wilson, "High Energy Electron Linacs: Application to Storage Ring RF Systems and Linear Colliders", SLAC-PUB-2884 (1982)
- [2] Y. Yamamoto et al., "Design Study on X-band Thermionic Cathode RF Gun", In the proceedings of the 27<sup>th</sup> Linear Accelerator Meeting in Japan, Kyoto, (2002)