

小型硬 X 線源のための X バンドライナックにおけるビームローディング

深澤 篤^{A)}、土橋 克広^{B)}、飯島 北斗^{A)}、坂本 文人^{A)}、鮫名 風太郎^{A)}、上坂 充^{A)}、
 浦川 順治^{C)}、肥後 泰寿^{C)}、明本 光生^{C)}、早野 仁司^{C)}、
 松尾 健一^{D)}、栄 久晴^{D)}、山本 昌志^{E)}

^{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白根 2-22

^{B)} 放射線医学総合研究所 〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

^{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

^{E)} 国立秋田工業高等専門学校 〒011-0923 秋田県秋田市飯島文京町 1-1

概要

血管造影等の医療・生命科学応用を目的とした小型硬 X 線源のための X バンド加速器におけるビームローディングについて計算を行った。加速器は熱カソード RF ガンと加速管により構成されている。RF ガンにおいてはビームローディングの影響は 0.14MV 加速エネルギーが低下するが、加速管では先頭のバンチが後のバンチより最大 2.9MV 大きなエネルギーとなるため、ビーム輸送中の損失によるノイズ放射線源になるとして懸念されることが分かった。

1 はじめに

文部科学省のプロジェクト「先進小型加速器開発」において、小型硬 X 線源の開発を行っている。これはレーザーと電子ビームの衝突により硬 X 線を発生する装置で、電子加速器に X バンド加速器を選ぶことで装置の小型化を図っている。この装置は血管造影を目標として掲げており、33keV 以上の X 線を発生させ、ヨウ素の K 端を利用することで高コントラスト像を得る。また、医療応用のほかにも、タンパク質の構造解析など生命科学応用にも用いられることが期待されている。

加速器は熱カソード RF ガンと加速管から構成され、一台の 50MW、1 μ s のクライストロンにより駆動され、それぞれ 10MW、40MW のパワーが供給される。電子銃に熱カソード RF ガンを採用しているため、ビームはマルチバンチとなり、そのマイクロバンチの間隔は入力される RF の周期の 88ps である。したがって、マルチバンチとしての影響が心配されるが、ここではビームローディングに関して計算を行った。

2 3.5セル熱カソード RF ガン内のビームローディング

2.1 3.5セル熱カソード RF ガン

ビームは 3.5セル熱カソード RF ガン(図 1)で発生させられる。RF は同軸コプラにより対称性よく入力され [1][2]、加速モードは π モードである。カソードはタングステンで、直径は 3mm である。このキャビティの SUPERFISH による解析の結果を表 1 にまとめる。

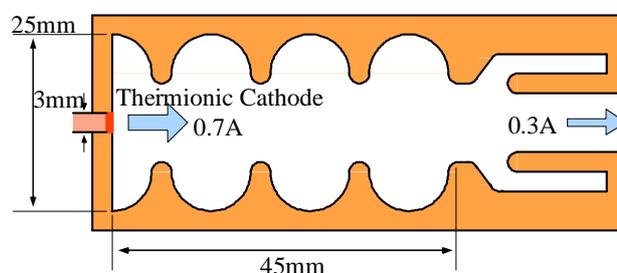


図 1. X-band 3.5セル熱カソード RF ガンキャビティ

表 1. RF ガンキャビティの特性

共振周波数	11.424 GHz
Transit Time Factor	0.703
シャントインピーダンス	2.46 M Ω
Q 値	9350
Wake Loss Paramete	4.72 V/pC

2.2 RF ガン内のビームローディングの計算

RF ガン内でのビームの振舞いを解析するために PARMERA を用いた。また、ビームローディングに関しては、[3]を参考に導いた。カソード電流密度を 20A/cm² とし、加速位相時のみ流れることを考慮すると、ビーム電流は 0.71A となる。入力 RF パワーは 6MW(パルス幅 1.0 μ s)、導波管との結合度は充填時間を短くするために 2.0 とした(充填時間 87ns)。このとき、カソード上の電界強度はビームローディングがない場合、156MV/m になる。

計算手順は、ビーム電流がキャビティ内の電界強度によって変化するので、あらかじめカソード上でのいくつかの電界強度に対応する電場に対するビームの運動を PARMELA で計算しておく。そして、1バンチ毎に入力される RF、ビームローディングを計算し、次のバンチの電荷量を決定するキャビティ内の電界強度に反映させるということを繰り返すした。

図 2 にカソードにかかる電界強度と RF ガンからの出力電荷量の関係を示す。カソードに 30MV/m 以上印加されるようなパワーを入力しないと、RF ガンからは電子は出てこない。また、130MV/m 以降では RF ガンから出力されるマイクロバンチの電荷量の時間変化を図 3 に、RF ガンキャ

ビティ内のビームローディングの様子を図4に示す。マイクロバンチの電荷量はRFが充填されていくに従って増えていき、200ns程度ではほぼ一定になる。ビームローディングもほぼ同様の振舞いを見せ、その効果は安定時の加速電圧をわずかに下げている。

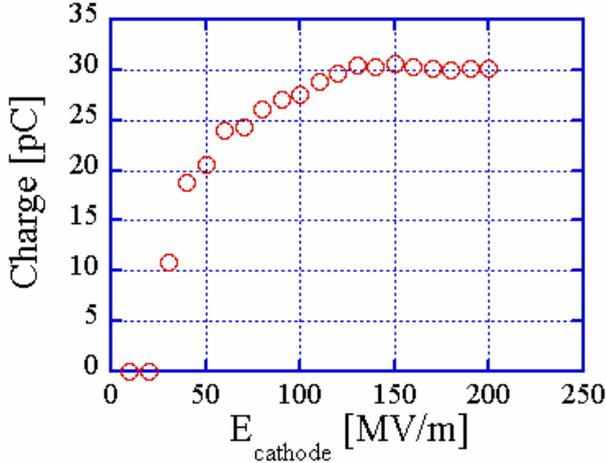


図2. カソード電界とRFガン出力電荷量

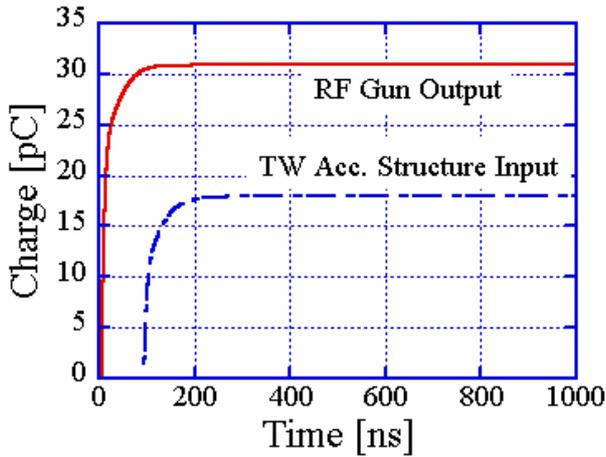


図3. RFガン出力・加速管入力電荷量の時間変化

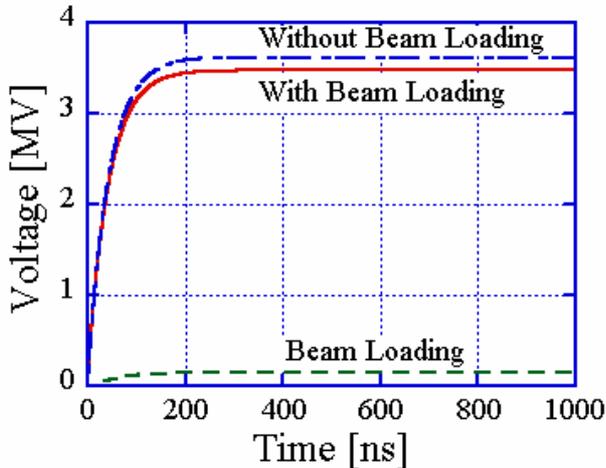


図4. RFガン内の加速電圧の時間変化

2.3 マイクロバンチ

安定時のマイクロバンチについて、バンチ波形及びエネルギー分布を図5、図6にそれぞれ示す。電荷の多くは先頭を集まっており、エネルギーも先頭の高くなっていて最大3.4MeVとなっている。また一周期位相がずれて加速されている電子も見ることができる。

我々のシステムではガンを出た後に α マグネットにて、エネルギー分別を行う。これは、エネルギーがあまりに異なる電子は、ビーム輸送の最中に結局ロスしてしまい、しかも、ノイズ源となってしまうため、ここで余分な電子はあらかじめ落としておくのである。ここでは、3-3.5MeVのものを通させるとすると、 α 磁石を通過して加速管に到達できる電荷量は図3に示すとおり31pCから18pCに減少し、透過率は58%である。また、その部分のみのビームパラメータは表2にまとめる。電荷量は18pCと目標の20pC間ではやや足りない。また、バンチ長が6.3psとなっているので、加速管内でのエネルギー広がり抑制するために、 α マグネットでのバンチ圧縮も必要である。

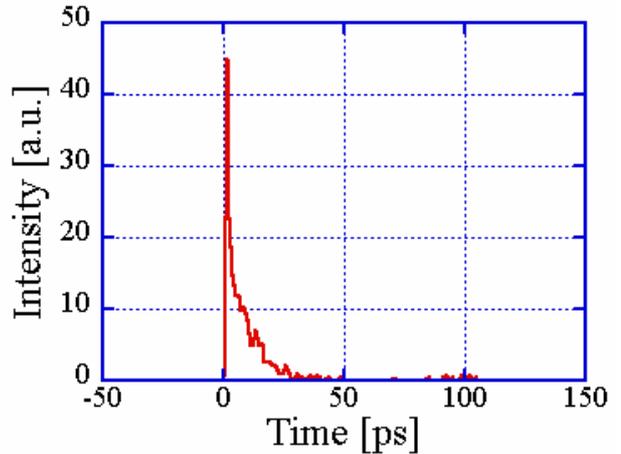


図5. RFガンからのマイクロバンチの波形

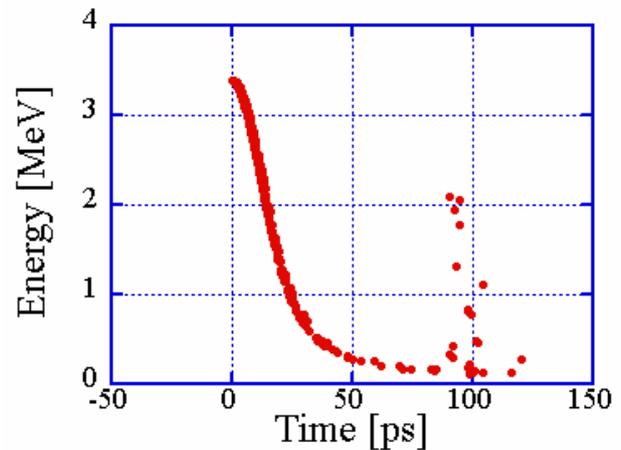


図6. マイクロバンチのエネルギー分布

表2. マイクロバンチの3-3.5MeVの範囲の粒子のパラメータ

電荷量	18 pC
エミッタンス(rms)	6.2 π mm.mrad
バンチ長(全幅)	6.3 ps

3 加速管内のビームローディング

加速管は高エネルギー加速器研究機構で進められているリニアコライダの技術を応用して設計されている[4][5]。主なパラメータを表3にまとめる。

入力RFパワーは40MW(パルス幅1 μ s)、ビームは図2に示すような電荷量が入力されるものとする。ビームローディングを考慮しない場合には、加速電界は59MV/mに達する。この加速管は定勾配型として設計されているが、計算を簡単にするため代表的なパラメータを用いて定インピーダンス型として計算する。

その結果が図7である。入力されるRFから得られる加速電圧は41MVであるが、ビームローディングにより2.9MV低下し、結局加速電圧は37MVとなる。ビームが入り始めるのは、加速管が充填されるのとはほぼ同時である。ビームの先頭の100ns程度では、まだビームローディングが増加している最中なので、後のものより高いエネルギーを得ている。我々の設計ではこの後90度曲げコンプトン散乱実験を行うのであるが、これらの粒子は途中でビームパイプに衝突するなどして強力なノイズ放射線源となってしまう。したがって、このような設計とは異なったエネルギーのバンチが生まれないようにRFを整形することでバンチのエネルギーをそろえる必要がある。また33keVの硬X線を発生させるためには、波長が1 μ mのレーザーに対して電子のエネルギーは最低43MeVはなくてはならない。しかし、ガンと加速管をあわせても加速電圧は41MVしか得ることができない。入力RFパワーを増やすと加速管内の電界強度が上がり、放電を起こしやすくなってしまいうので、進行波加速管を長くすることで対応できないか検討中である。

表3. 加速管の主なパラメータ

基本周波数	11.424 GHz
加速モード	$2\pi/3$ モード
加速管長	70 cm
シャント抵抗(平均)	94 M Ω /m
減衰定数 τ	0.50
充填時間	94 ns

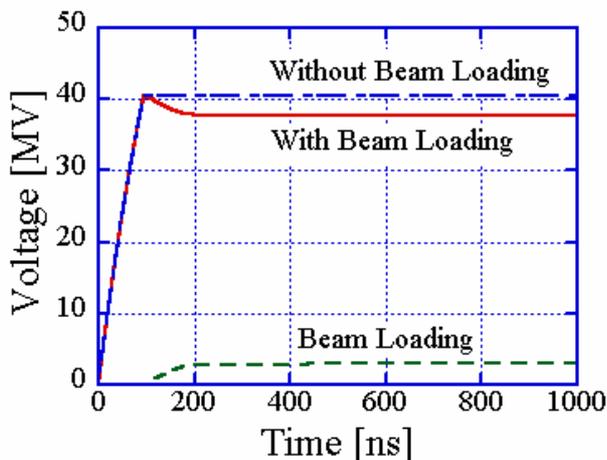


図7. 加速管内でのビームローディング

4 まとめ

小型硬X線源のためのXバンドライナックにおけるビームローディングについて計算を行った。RFガン内においてはビームローディングは0.14MVの加速エネルギーの低下をもたらす、加速管内においてはビームの先頭のバンチが最大2.9MV過加速を受けることが分かった。今後は熱カソードの逆流電子による加熱を考慮に入れた計算を行っていく予定である。

参考文献

- [1] K. Matsuo, et al., In the Proceedings of the 28th Linear Accelerator Meeting in Japan, 197 (2003)
- [2] K. B. Kiewiet, et al., In the Proceedings of EPAC 2000, Vienna, Austria, 1660 (2000)
- [3] P. B. Wilson, SLAC Technical Report, SLAC-PUB-2884 (1982)
- [4] H. Sakae, In the Proceedings of the 27th Linear Accelerator Meeting in Japan, 175 (2002)
- [5] N. Toge, et al., In the Proceedings of the 26th Linear Accelerator Meeting in Japan, 46 (2001)