

Xバンド熱カソード型 RF 電子銃の設計検討

山本 昌志^{1,A)}、松尾 健一^{A)}、栄 久晴^{A)}、深沢 篤^{B)}、飯島 北斗^{B)}、上坂 充^{B)}、
明本 光生^{C)}、早野 仁司^{C)}、肥後 寿泰^{C)}、浦川 順治^{C)}、土橋 克広^{D)}

^{A)} 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

^{B)} 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

^{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)} 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

概要

文部科学省の先進小型加速器開発プロジェクトの一環で、様々な用途が考えられる小型硬 X 線源の開発を進めている [1]。これは、X バンド電子リニアックから出射される電子ビームとレーザー光との逆コンプトン散乱により X 線を発生させるシステムである。X バンドリニアックの電子源としては、RF 電子銃を用いる。電子のエミッターとして、熱カソードとフォトカソードを検討しているが、ここでは熱カソードの現状の検討結果について報告する。

1 . はじめに

将来の応用を考えると、X 線強度はできるだけ高くしたい。そのため、リニアックでのマルチバンチの加速を検討している。この場合、フォトカソード型の RF 電子銃では、マルチバンチのレーザーの開発に困難が伴うので、自然にマルチバンチが発生する熱カソード型の RF 電子銃を検討している。しかし、熱カソード特有の困難 熱絶縁を保持しつつカソードの RF シールド構造 バックボンバードメントの問題等があるので解決すべき課題も多い。

加速管は X バンド、さらに別の RF 源を用意して RF 電子銃は実績のある S バンドを用いることも考えられるが、将来の応用を考えるとシステムの複雑化は避ける必要がある。このようなことから、RF 電子銃も X バンドとした。

熱カソード型 RF 電子銃に要求される電子ビームの概略仕様を表 1 に示す。

表 1 : RF 電子銃の概略ビーム仕様

エネルギー	MeV	> 3
規格化エミッタンス rms	mm mrad	< 10 π
電荷量	pC/bunch	> 20
バンチ長 FWHM	psec	1
パルス長	μ sec	1

2 . RF 電子銃システム

熱カソードを用いた場合、レーザーシステムが不要になり、かなりシステムは単純になる。一方、カソードからは π rad の位相にわたって、電子が放出されるため、ビームの品質はかなり悪くなる。そのため、 α -磁石を用いて品質の悪い部分を取り除く必要がある。我々が検討している RF 電子銃のシステムを図 1 に示す。実際に加速管に導くためには、 α -磁石の下流に Q 磁石が必要と考えられるが、この部分については、加速管を含めて今後検討する予定である。

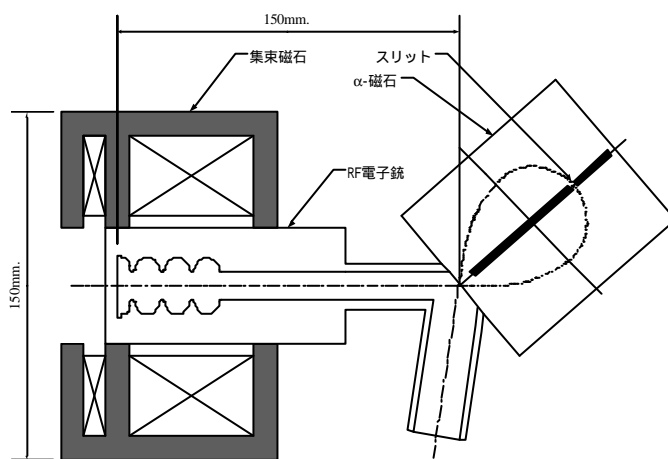


図 1 : RF 電子銃のシステム

2.1 RF 電子銃空洞

空洞は、X バンド(11.424GHz)の 3.5 セルで構成され、その RF 特性と加速モードを表 2 と図 2 に示す。とりあえず、ディスク孔径は $2a=12\text{mm}$ と比較的大きくしている。この場合、ビームとの隙間が大きくなりビームの取り扱いが容易になる。さらに、空洞間のカップリングも大きくモードは安定である。一方、

¹ E-mail: masashi_yamamoto@ihi.co.jp

ディスク孔径が大きくなるとエミッタンスを悪化させる電場のEr成分が大きくなる。最終的にはシミュレーションを進めて決める予定である。

電場はディスクの先端が最も高く、240MV/mに達する。周波数が高いため、通常のSバンドのRF電子銃に比べ2倍程度ブレイクダウン限界は高いと考えられるが、ほぼ限界に近いと予想している。

実機を製作する上で最も注意を要する熱カソードの接続部分は、各地の研究所で実績のあるバネ構造をしたRFコンタクト方式を考えている。

また、カップラーの構造は、最下流の空洞と結合する同軸タイプを考えている[2]。同軸タイプを選択した理由は、空洞外周部の集束磁石の設置が容易である。電磁場の対称性が良いの2点を考慮した結果である。しかし、Xバンドの場合、波長に比べ同軸部が大きくなり、高次モードのカットオフ周波数が11.424GHz以下になり、TEM以外のモードの伝播が可能となる。矩形導波管から同軸導波管へのモードコンバーターではTEM以外のモードの混入を防ぐ構造が必要である。これについては、3次元の電磁場解析コードで計算する予定である。

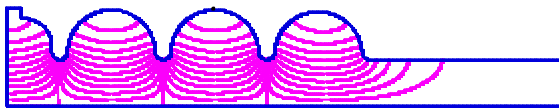


図 2：RF 電子銃空洞の π モード(11.424GHz)

表 2：RF 電子銃の RF 特性(SUPERFISH)

周波数	GHz	11.424
モード		π
Q 値		9292.
入力 RF 電力	MW	5.4
最大電場強度	MV/m	240
カソード表面電場	MV/m	150

2.2 集束磁石

RF 電子銃からのビームは、発散ビームである。そのため、ビームパイプ等への衝突を防ぐために α -磁石の手前で、平行ビームにする必要がある。図 2 の磁場を用いて、平行ビームに戻している。エミッタンスの悪化を防ぐために、カソード表面での磁場は $B_z=0$ になるようにバックアップコイルで補正する。

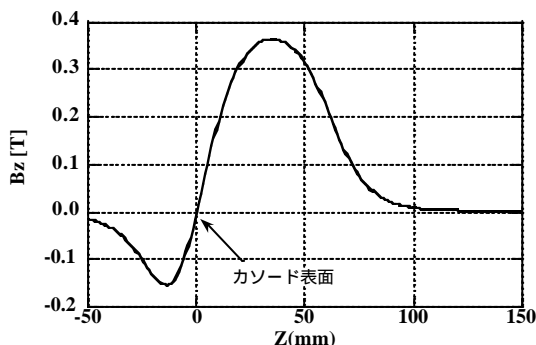


図 3：集束磁石の軸上磁場分布

2.3 α -磁石とスリット

RF 電子銃から出射されるビームの規格化エミッタンスは $70\pi\text{mm mrad}$ 程度、パンチ長は 10psec 程度である。これらの値を改善するために、電荷量は減少するが、 α -磁石とスリットによりエネルギー選択を行い不要なビームをカットする。

下流でのビームのハンドリングを考えると、 α -磁石はアクロマティックものが望ましい。この要求を満たす様々なタイプの α -磁石が考えられるが、ここでは構造が単純な Q マグネットを半分にしたタイプを選択した。RF 電子銃にこのタイプの α -磁石を適用した例として SSRL のものがあり[3]、設計の参考にしている。

α -磁石の磁場は、最適化はされていないが 10T/m の磁場勾配で計算している。入射位置から 65mm の位置に 2.7mm 間隔のスリットを入れて、3.5MeV 付近のビームのみ通過できるようにしている。

3 . ビームトラッキング

3.1 計算方法

ビームトラッキングには General Particle Tracer (GPT) [2]を用いている。空間電荷効果は、各マクロ粒子間の相互作用として計算している。一方、空洞との作用(鏡像電荷、ウェークフィールド)については、計算を行っていないが、それらは RF の電磁場に比べ十分小さいので無視しても良いであろう。磁石や空洞の電磁場は、POISSON/SUPERFISH の出力を取り込み計算している。

このコードは拡張が非常に容易で、ここでの計算のために、 α -磁石とスリットのエレメントを追加して計算を行っている。

3.2 カソードでの電子の発生

RF 電子銃では、熱カソードを温度制限領域で非常に高い電場で電子を引き出す。そのため、カソードの表面電場に依存しないで、加速位相にあるとき、常に一定の電流で電子が放出される。GPT では、時間を追ってカソード表面にマクロ粒子を発生させている。ここでは、加速位相の π rad の領域に 4000 個、合計 150pC のマクロ粒子を発生させた。カソードの直径は $\phi=2.8\text{mm}$ としている。

3.3 出力ビーム

RF 電子銃システムを構成する機器のパラメータをこれまで示した値に設定して、ビームトラッキングを行った。表 3 にその計算結果をまとめている。 α -磁石とスリットによるエネルギー選択の効果は絶大で、ビームのエミッタンスは非常に小さくなっている。さらに、パンチ長も短く、十分目標を達成していると考えている。図 4 に α -磁石から 30mm の位置のパンチの様子を示す。

カソードから放出された電子のうち、スリットを通過する電荷量は 17% である。そのため、カソードの

放出電流は 1.71A とかなり高い値となっており、RF 電子銃でも、通常の電子銃と同様、電流密度の高いカソードが必要となってくる。

カソードから放出されて電子のうち、スリットを通過する割合は 17%、スリットに衝突する割合は 37%、カソード側の空洞壁に衝突する割合は 43%で、他 3% である。バックボンバードメントを含めこれらの壁に衝突する電子は様々な問題を引き起こすので、極力少なくしたい。システムの全領域にわたって、トラッキングができるようになったので、空洞形状や収束磁場を、この観点からも最適化する予定である。

表 3: ビームトラッキングの結果。エミッタンスは規格化エミッタンス(rms)である。

		RF 電子銃 出口	α -磁石 出口
エネルギー	MeV	0.15 ~ 3.55	3.45 ~ 3.55
エミッタンス	mm mrad	76π	2.6π
電荷量	pC/bunch	83.1	25.6
バンチ長 σ_z	psec	-	0.67

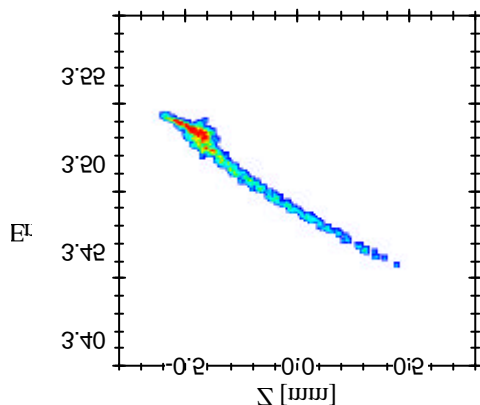


図 4: α -磁石出口(30mm)でのバンチの様子

3.4 バックボンバードメント

熱カソードを使用する上での最大の問題点であるバックボンバードメントについても、マクロ粒子数

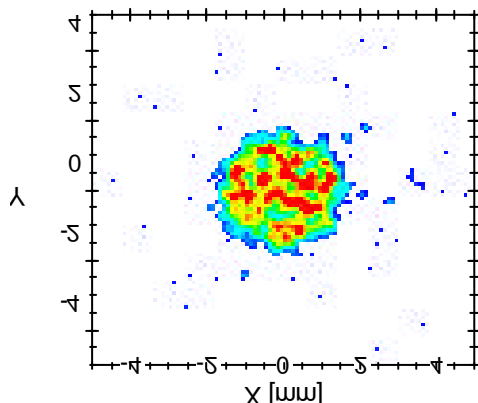


図 5: バックボンバードの密度分布

2000 個でトラッキングを行った。その結果、放出された電子の 43%がカソード側の空洞壁に戻ることが分かった。図 5 から、その大部分がカソードに衝突することが分かる。エネルギー分布は図 6 のとおりで、カソード側の空洞壁の衝突する電子の平均エネルギーは 270KeV である。そのパワーはパルス内では 0.2 MW にも達し、カソードの熱暴走を引き起こすには十分な電力と考えられる。

4. まとめと今後の予定

α -磁石を用いてエネルギー選択をする熱カソード型 RF 電子銃の検討を進めている。このシステムについてビームトラッキングを行った結果、 α -磁石でのエネルギー選択は、エミッタンスの改善やバンチ長の短縮に非常に効果があることが分かった。しかし、電荷量はスリットで 1/3 程度に減少するので、カソードからの放出電流を増加させる必要がある。26.6pC/bunch の強度を得るためには、カソードから 1.71A 放出する必要があることが分かった。

一方、バックボンバードメントはかなり大きく、パルス内では 0.2 MW にも達し、今後、対策を考慮する必要があることが分かった。

今後は、トラッキング計算を更に進め、システムが安定に稼働できるようにパラメーターを決める。特に、機器のエラーが引き起こす X 線強度の低下について見積もる。

RF 電子銃の具体的な設計については、同軸カップラーおよびモードコンバーターの計算を進める。合わせて、最も難しいと考えているカソード部分の具体的な構造の検討を始める予定である。さらに、真空や熱の検討も重要と考えている。

参考文献

- [1] 上坂 充, et al., “X-band linac を用いた小型硬 X 線源”, 原子核研究, to be published.
- [2] Bas van der Geer, et al., “The General Particle Tracer Code”, URL: <http://alexandria.tue.nl/extra2/200111445.pdf>.
- [3] Michael Borland. “A HIGH-BRIGHTNESS THERMIONIC MICROWAVE ELECTRON GUN”, SALC-Report-402, Feb. 1991

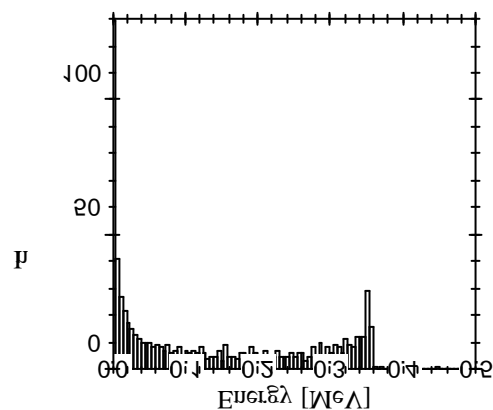


図 6: バックボンバードのエネルギー分布。0.5MeV以上にも粒子はあるがその数は少ない。