

XバンドRF電子銃の開発

松尾 健一¹、山本 昌志、山本 顕義、金子 七三雄

石川島播磨重工業(株)

〒135-8732 東京都江東区豊洲 3-1-15

概要

9.3GHzのXバンドRF電子銃の設計、製作を行い、ビーム加速試験を実施した。1.27MWのRFパワーで、1MeV×100mAの電子ビームが得られるRF電子銃ではあるが、マグネトロンの問題により、最大0.8MWのRFパワーしか投入できず、0.3MeVの加速にとどまった。また、熱カソードのRF電子銃での特有な問題であるバックボンバードメントに起因するとみられるビーム電流波形が観測された。本稿では、これらの実験結果を中心に報告する。

1. はじめに

電子線滅菌システムなどの産業用機器として加速器システムを汎用化させるためには、その小型化は重要な課題の一つである。その解決の一つとして、RF電子銃を用いることを考えている。これにより、短距離で高エネルギーの電子ビーム生成が可能となり、高性能な初段加速器としての役割を果たすものと期待できる。また、単独で3MeV以下の領域の電子線滅菌装置への応用も可能である。

国内^[1-6]で実用化されているRF電子銃はSバンドのものが多いが、我々は社内に9.3GHzのRF源があることから、XバンドのRF電子銃を開発し、基礎試験を実施することにした。産業用を考えると、RF源の選択枝の広いSバンドの方が有利と思われるが、Xバンドでも設計にかかわる大部分のデータが入手できる。また、Sバンドのものに比べてかなりコンパクトになるため、小型化の要請には有利である。このような理由で我々は、XバンドRF電子銃の開発を行った。

2. 空洞設計とローパワーRF試験

図1に示すように2.5セル空洞である。空洞数が少ないため、1MVを得るためには軸上電場は高く141MV/mに達する。カソード部はチョーク構造とした。その理由は、①熱カソードの熱絶縁と②カソードの交換を可能にするためである。カソードはZ方向に位置が変えられる構造で、1stセルのチューナーの役割も担っている。また、ビームローディングが少ないので、導波管とのマッチングは $\beta=1$ とした。隣のモード($\pi/2$)との周波数差は119MHzで十分大きく、RFに起因する問題は発生しなかった。

この設計に基づいて精密旋盤加工技術と拡散接合技術を活用しRF電子銃を製作した。製作した電子銃のZ軸上の電界分布をビーズパータベーションにより測定した結果、ほぼ設計通りの電場分布が実現されていることが確認できた(図2)。これは、設計値通りに各空洞の周波数が仕上がっている事を示している。また、測定された外部Q値も約5600 ($Q_0=6886$)と設計値に近い値であった。

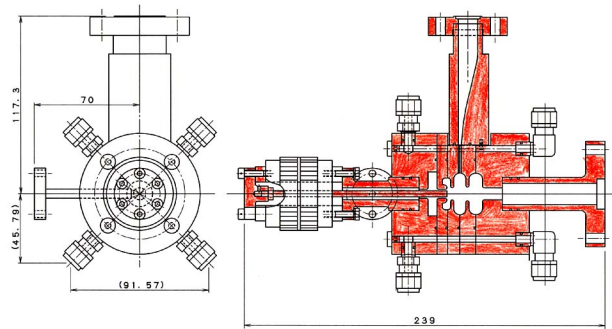


図1：XバンドRF電子銃の構造

表1：RF電子銃のパラメーター

セル数	2.5セル
運転周波数 TM_{012}	9300 MHz
運転モード	π
Q値	7490
RF電力	1.24MW
軸上最大電場	141MV/m
ビームエネルギー	1MeV
ビーム電流	100mA

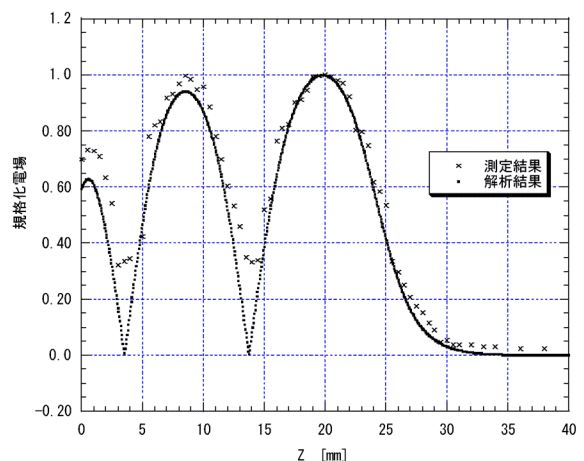


図2：Z軸上電界分布の計算結果と測定結果の比較

¹ E-mail: kenichi_matsuo@ihi.co.jp

3. ハイパワービーム試験

3.1 測定システム

RF 電子銃の測定システムの概略図を図 3 に示す。マグネトロンのパルス幅は約 $4\mu\text{s}$ であり、繰返し $10\sim 60\text{pps}$ 程度で試験を行った。ビーム量はファラデーカップを介して、また、RF 波形は方向性結合器を介して観測した。ビームエネルギー分析のために、ビームライン部に偏向マグネットを設けた。真空度は、RF 投入時で $1\times 10^{-8}\text{Torr}$ 以下であった(電離真空計)。

3.2 熱カソード

カソードとして、空洞エージングには先端径 $\phi 4\text{mm}$ の銀カソードを用い、ビーム試験には同寸法のバリウム含浸の熱カソードを用いた。図 4 に RF パワー 0.75MW を投入した時の熱カソードのビーム電流波形と RF 反射波形を示す。カソードヒーター電流を増加させると、ビーム波形と RF 反射波形が相関して変化の様子を図(a)～(f)に示している。カソードヒーターを投入しない時の暗電流量は、 9.8mA 程度で RF もほとんど反射を起こしていない(図 4 (a))。ヒーター電流を投入すると、熱カソードの温度が上昇するため、ビーム電流量は増加する。しかし、その増加量はパルス内で均一ではなく、パルスの後半部にかけて急激に上昇している(図 4 (b), (c))。これは、RF の設計位相から外れて放出された電子が、逆方向に加速されてカソードに衝突し、カソード表面の温度を更に上昇させるためにおこるバックボンバードメントが主因であると考えられる。

バックボンバードメントによる温度上昇を知るために、ヒーター抵抗の上昇を観測し、温度換算した。予めカソードヒーターを 864°C に保った状態で、 0.75MW (24pps)の RF を投入すると、カソード抵抗(温度)は急激に上昇し一定となった(969°C)。その後 RF のみを遮断し放置すると元の 864°C に戻った。この場合バックボンバードメントの影響は、約 100°C のカソードの温度上昇をもたらしたことが分かる。図 5 は、カソードのヒーター電流とヒーター抵抗の関

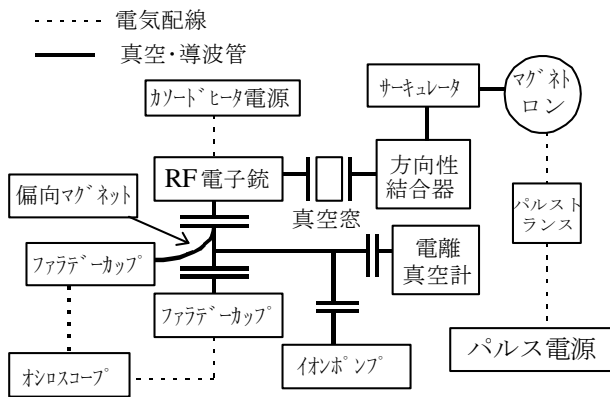


図 3 : 測定システム概略図

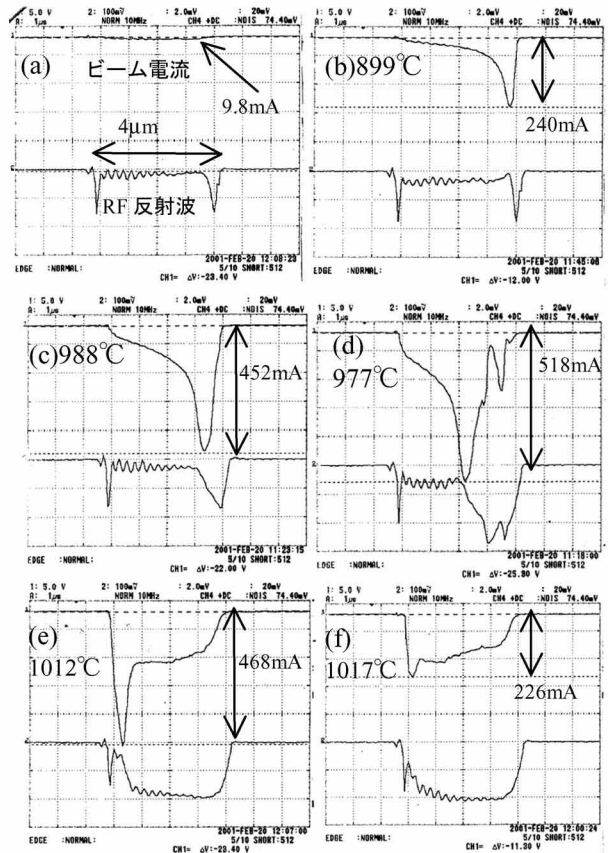


図 4 : ビーム波形(上段)と RF 反射波形(下段)の熱カソード温度依存性 (RF パワー= 0.75MW 、 58pps)
(a)ヒーター無し→(b) 899°C →(c) 988°C →(d) 977°C →(e) 1012°C →(f) 1017°C

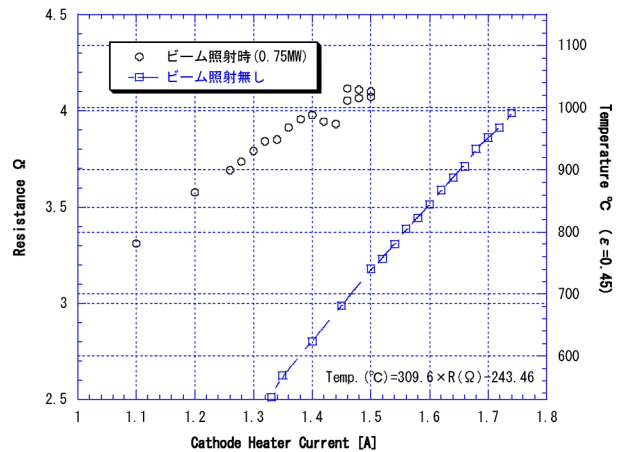


図 5 : カソード抵抗(温度)とカソードヒーター電流の関係(ビーム照射は RF 0.75MW 、 58pps)

係を、ビームを照射した時とカソード単体で加熱した時と比較したものである。この場合、同じヒーター電流に対し、ビームを照射したときのヒーター抵抗の上昇分($250\sim 350^\circ\text{C}$)がバックボンバードメントによる温度上昇であると考えられる。2 つの観測の温度上昇分の違いは、繰返し数、カソードの表面状態や温度履歴、抵抗と温度の測定誤差によるものと考えている。

図4および図5のカソード温度は、ヒーター抵抗を温度換算して求めたものである。カソード温度は、カソード単体を放射温度計で測定した。

図4(d)、(e)にかけてさらにカソードヒーター電流を増加させると、ビーム電流のピーク値がパルス前半にシフトする。これは、ヒーターの十分な加熱によりパルス前半から大量の電子が放出され、バックボンバードメントも急速に誘発されるためと考えられる。バックボンバードメントの影響で大量に電子が放出されると、RFパワーもビームに大量消費されるため、急速にビーム量が減少する。このビームローディングの影響により、RFのマッチングが外れてRF反射波が増大することが図4からもうかがえる。ビームの減少と反射波の増大は同時現象であることが分かる。図4(f)のようにさらにカソード温度が上昇し1000°C以上になると、ビームローディングが過剰に発生し、RFはほとんど反射を起こし、ビーム量は低下する。

3.3 エネルギー分析

ビームライン部にエネルギー分析用の偏向マグネットを取り付け、熱カソードビームのエネルギー分析を行った。今回は、マグネトロンRF出力が最大

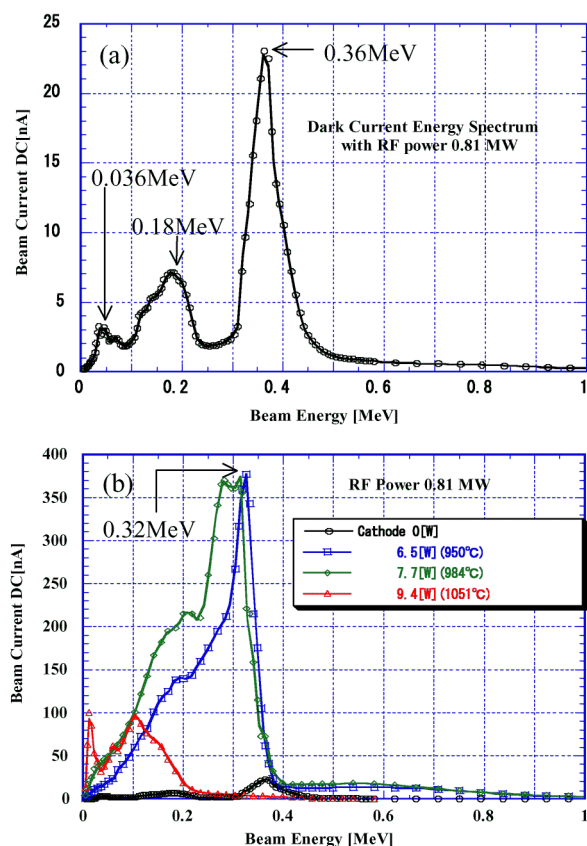


図6：エネルギー分析器によるビームエネルギー分布 (RF投入パワー=0.81MW、53pps)
 (a) 暗電流(カソードヒーター=0[W])
 (b) カソードヒーター投入時

0.81MWであったため、図6に示す通り約0.3MeV程度の加速にとどまった。図の縦軸は、ファラデーカップの電流値を直流化してピコアンペアメーターで読んだ値である。

図6(a)にヒーター加熱を行わなかった時の熱カソードビーム(暗電流)のエネルギー分布を示す。最大ピークは、3セルすべてで効率よく加速パワーを得た電子ビームのエネルギーと予想される。第2、第3ピークは、2セルまたは1セルのみでRFの設計位相に乗って加速された電子ビームであると考えられる。

同様のエネルギー分析をカソードヒーター温度を上げて行った(図6(b))。前述したバックボンバードメントの作用により加速位相が異なる電子が増加するため、暗電流ほどエネルギーピークははっきりしていないが、第1ピークは同じく0.3MeV程度である。しかし、ヒーター温度が1000°Cを超えると、大量に放出された電子のビームローディングによりRF反射波が増大するため、十分なRFパワーで加速されずにエネルギー分布は低エネルギー側にシフトすると考えられる。

4. まとめ

- ①9.3GHzXバンドRF電子銃の空洞部の設計と製作精度は、ほぼ一致していた。
- ②熱カソードでは、バックボンバードメントが発生しパルス内でビーム量が一樣でないため、その対策案が必要である。
- ③また、バックボンバードメントによりエネルギー広がりが顕著になる。

5. 謝辞

このRF電子銃を製作するに当たり、空洞部のRF計算を全面的に実施して頂いたBINPのKazakov氏に深く感謝致します。その計算精度はすばらしく、調整加工を全く行わないで空洞を製作することができ、短期間にRF電子銃を製作することができました。

参考文献

- [1] F. Oda et al., Proc. of the 25th Linac Meeting in Japan, P159, 2000.
- [2] T. Kobayashi et al., Proc. of the 25th Linac Meeting in Japan, P144, 2000.
- [3] T. Taniuchi et al., Proc. of the 25th Linac Meeting in Japan, P165, 2000.
- [4] R. Kuroda et al., Proc. of the 25th Linac Meeting in Japan, P156, 2000.
- [5] H. Kotaki et al., Proc. of the 25th Linac Meeting in Japan, P147, 2000.
- [6] K. Masuda et al., BEAM SCIENCE AND TECHNOLOGY, P9, 2000.