

RF Characteristics of ITC-RF Gun Designed for Production of Very Short Electron Bunch*

Kenichi Nanbu¹, Fusashi Miyahara, Masayuki Kawai, Fujio Hinode, Hiroyuki Hama
 Laboratory of Nuclear Science, Tohoku University
 1-2-1 Mikamine, Taihaku-ku, Sendai 982-0826

Abstract

A thermionic RF gun has been developed to generate very short electron bunch at Laboratory of Nuclear Science, Tohoku University. The independently tunable cells (ITC) RF gun is especially designed so as to produce very short electron bunches by manipulating longitudinal phase space. After RF conditioning, we observed the first electron beam from the ITC RF gun, lately. We performed numerical simulations using GPT and PARMELA to understand dynamics of the beam accelerated by only the 1st-cell of ITC RF-gun. During RF conditioning, we found a difficulty of the RF contact between cavity wall and cathode plug caused by thermal expansion. Consequently RF characteristic seems to have deteriorated, which has to be improved in haste.

超短バンチ生成のための独立2空洞型高周波電子銃の高周波特性

1. はじめに

東北大核理研では、コヒーレント放射光を利用した大強度テラヘルツ光源開発のための試験加速器の研究を行っている^[1]。本加速器システムは超短バンチ生成線形加速器とアイソクロナスリングから構成される。試験加速器の入射部は独立2空洞型高周波電子銃とアルファ電磁石からなる。電子銃の2つの空洞への入力RFパワー及び位相差を制御することによって電子ビームの縦方向位相空間操作を行い、下流に位置するアルファ電磁石を用いて適度に位相空間を回転させ加速管に入射する。加速管でエネルギー変調を行い、最終のバンチ圧縮を磁気シケインで行うことにより、100フェムト秒以下のバンチ長生成を目標に開発を進めている。

現在ITC-RF-GUNの第1空洞及び第2空洞のコンディショニングが完了し、2009年6月に第1空洞のみでの最初のビーム加速に成功した。平行してGPTとPARMELAを用いてシミュレーションを行い実験データとの比較を行っている。カソードヒータが端板を加熱することによってRFコンタクトが変化するという問題が発生し、現在対策を検討中である。

2. 電子銃とテストベンチ

2.1 電子銃

我々が開発したITC-RF-GUN^[2]は2つの空洞へのRFパワーの大きさと位相を独立に制御することができる。そのため後段のアルファ電磁石^[3]でのバンチ圧縮に最適な位相空間分布を作り出すことができる。

陰極には直径1.75mmのLaB₆単結晶を用いて、初期エミッタンスを小さくしている。このRF電子銃の基本パラメータを表1に示す。この電子銃はフィリングタイムを短くするために導波管と空洞との結合度βを4前後で設計しており、フィリングタイムの設計値は0.3μsec程度である。

表1. RF-GUNのパラメータ

第一空洞のEz ^{max}	25 MV / m
第二空洞のEz ^{max}	70 MV / m
セル間の位相差	π + 24°
カソード電流密度	50 A / cm ²

2.2 大電力試験系

本試験系は新たに建設した高周波電源棟に設置した。RF源には7MWクライストロン(PV-2012M)を用いている。図1に本試験で使用した大電力RF伝送系を示す。RFパワーの制御は可変減衰器を用いて行っている。空洞内部の真空度は排気速度10l/sと20l/sのイオンポンプで1×10⁻⁶Pa程度に保持されてい

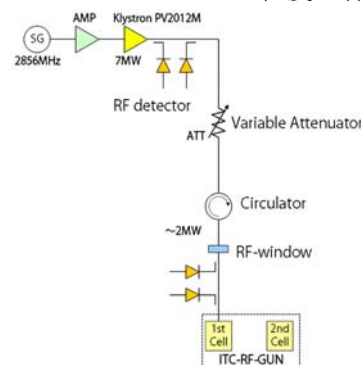


図1 RF-GUN試験回路の構成

* Work supported by the Grants-in-Aid of Japan Society for the Promotion of Science, contract No. 20226003.

¹ E-mail: nanbu@lns.tohoku.ac.jp

る。また反射電力とGUN内部の真空度をインターロックに取り込み、異常が発生するとRF出力が停止するようにしている。ITC-RF-GUNの共振周波数の温度依存性は $-50\text{kHz}/^\circ\text{C}$ である。空洞の温度はチラーで $30\pm 0.1^\circ\text{C}$ に制御している。

3. 大電力試験

3.1 RFコンディショニング

空洞のRFコンディショニングは、繰り返し2ppsで空洞の真空度が $5\times 10^{-5}\text{Pa}$ を超えないように行った。これまでITC-RF-GUNへのRFパワー投入を開始しており、第1空洞は約0.5MW、パルス幅4 μsec 、第2空洞は約2.8MW、4 μsec のRFが投入されている。ITC-RF-GUNのコンディショニングにおけるRFパルス波形を図2に示す。

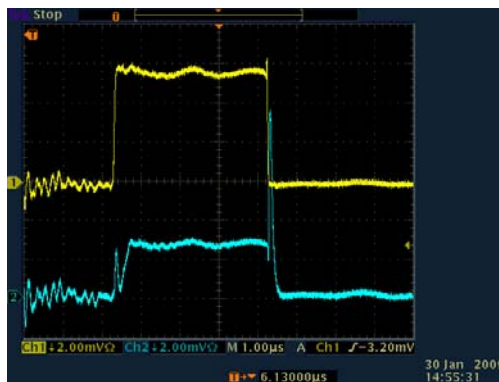


図2. 第1空洞のRFパルス波形例

空洞への入力波形（上）、反射波形（下）を示す。

図2において上からITC-RF-GUNへの入力RF、電子銃空洞からの反射波形を示している。 β が大きいため空洞からの反射が大きい。オーバーカップリングの場合、全反射の尖頭値から β を求めることも出来るが、パルス幅に対してRF検波器の周波数特性が低く、 β を求めるのに十分な精度が無い。そこでフラットトップでの反射係数から β を求めた。Q値については周波数変化法を用いて測定した。表2に測定結果を示す。第1空洞の Q_0 が設計値と比較してかなり低下しているのは、カソード端板部でのRFコンタクトの問題であると考えている。

表2. 測定結果のまとめ

	SUPERFISH (design)	Measured High power
f_{1st}	2856 MHz	2854.5 MHz
f_{2nd}	2856 MHz	2855.2 MHz
β_{1st}	(~4)	3.5
β_{2nd}	(~4)	6.5
Q_{0-1st}	13000	4244
Q_{0-2nd}	12500	15466
R/Q_{1st}	98.2 Ω	-
R/Q_{2nd}	114.6 Ω	-

3.2 ビーム加速試験

RFコンディショニング終了後にカソードヒータに通電し、第1空洞のみにRFパワーを入れてビーム加速試験を行った。入力電力は0.2MW、カソードヒータ電流は7Aである。カソードの放出電流密度は、カソードヒータの電流-温度特性及びカソードの仕事関数の値から^[4]、リチャードソン・ダッシュマンの式より 12 A/cm^2 と求められた。ビーム電流の測定にはファラデーカップを用いた。加速試験系を図3に示す。

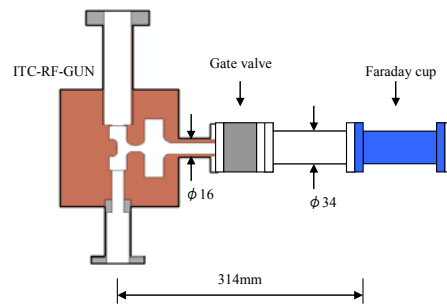


図3 ビーム加速試験系

PARMELAとGPTを用いて第1空洞のみ励振した場合のビームシミュレーションを行った。シミュレーションでは、粒子数は5000個、カソード電流密度を 12 A/cm^2 とし、空間電荷効果の計算ルーチンはGPTがSpacecharge2Dcircle、PARMELAはscheffを用いた。コードバージョンはGPTがv2.82、PARMELAはv3.40である。図4にITC-RF-GUN出口での電子ビームの軸方向分布を示す。カソード表面電場が 25 MV/m の場合、運動エネルギーは最大 260 keV まで加速される。またGPTに比べてPARMELAではバンチ先頭部分のエネルギー分散が大きい結果が得られた。測定データとシミュレーション結果を表3に示す。

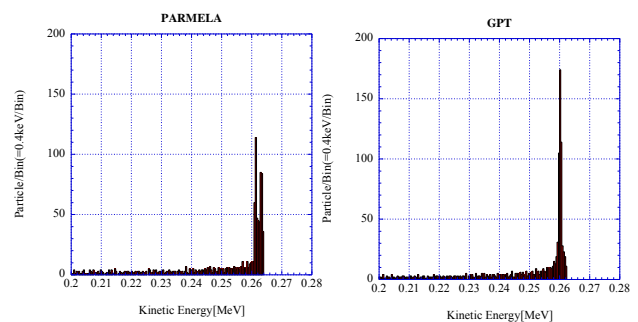


図4 GPTとPARMELAで求めたRF-GUN出口でのエネルギー分布

表3. 測定値とシミュレーション値の比較

	ビーム電流[mA]
測定値	60
GPT	93
PARMELA	85

ビーム電流についてはGPTとPARMELAではほぼ同じ値が得られた。測定値はシミュレーション値より若干小さい結果であった。その差分を生み出す要素として軸方向電場強度の違いが考えられる。そこでGPTとPARMELAを用いて第1空洞の加速電場強度に依存するビーム電流の変化を評価した。図5にシミュレーション結果を示す。

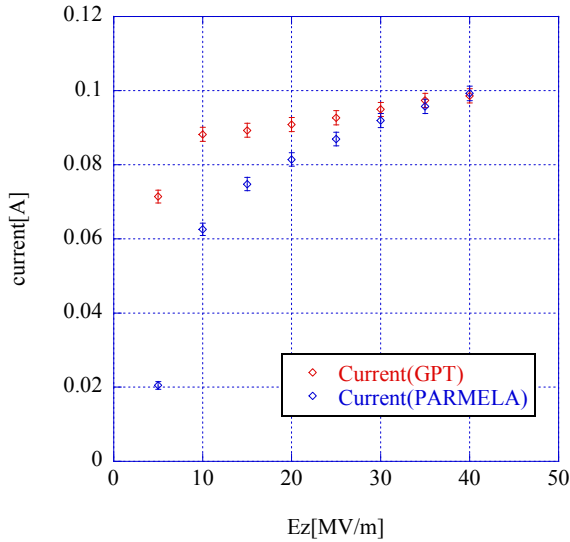


図5 GPTとPARMELAの電場強度とファラデーカップ入り口におけるビーム電流値の結果比較

両者ともに電場強度が下がると、ファラデーカップでの電流値が減少する傾向が見られた。カソードの電流密度は一定であるので、電場強度が低下するとITC-RF-GUN内部でのビーム損失が増えることを意味している。図6にビーム加速試験系における加

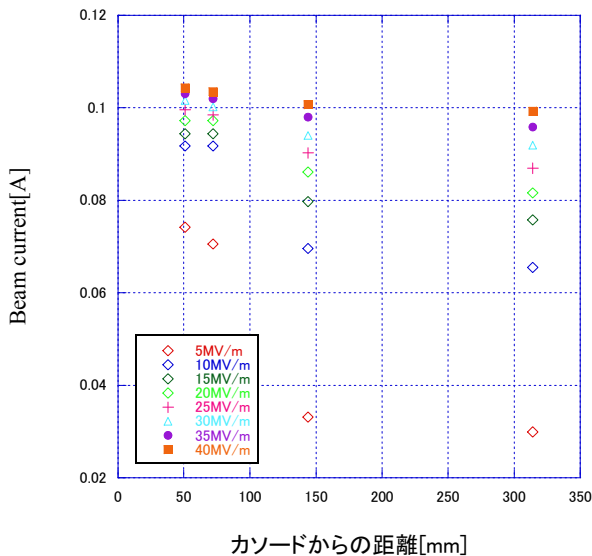


図6 加速電場によるGUN内部でのビーム電流変化

速電場強度によるビーム電流変化のグラフを示す。カソード表面からの位置関係は第二空洞入口が50.8mm、第二空洞出口が72mm、RF-GUNのビームポート出口が133mm、ファラデーカップ入口が314mmに対応する。この結果より電場強度が低いほど、取り出しポート部でのビームロスが多くなることがわかった。実験的にはビーム加速試験中の放射線強度分布ではビーム取り出しポート部での放射線強度が比較的高い。これより現実にビームポート部分でのビームロスが発生していることは明らかであり、実際に空洞内に励振される電場強度が低下している可能性が高いと思われる。引き出し電流が電場強度に依存するのは、電場強度が低いと位相反転までに第1空洞を通過できず、逆位相の電場により逆流する電子の割合が増加するためであると考えられる。

シミュレーションではカソードの電流密度12A/cm²と設定している。しかし実際の陰極の放出電流密度は、陰極の表面状態、真空度などにも大きく影響される。そのためカソードの放出電流密度が12 A/cm²を下回っている可能性も考えられるため、陰極温度の測定を行う予定である。

3.3 高周波特性の変化

導波管に取り付けられた方向性結合器によりRFパルス波形をモニターしている。ビーム加速試験を行っているときにRFパルス波形がビーム加速試験前と大きく変化したことがわかった。RFパルスの反射波形の変化から、空洞の高周波特性が大きく変わったことは明らかである。図7に通電の前後でのRFパルス波形を示す。カソード通電前はβ=3.5前後であったものが、カソードに一旦通電してしまうとβ=8程度に悪化してしまった。この変化は不可逆的なものであり、極めて大きな問題である。

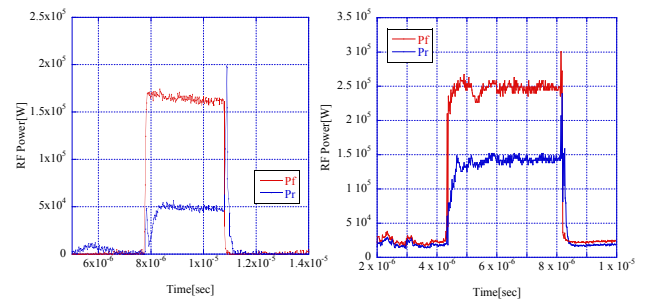


図7 RFパルスの比較、左がカソード通電前、右がカソードに一旦通電した後の波形である。赤が入力波形、青が反射波形である。

ビームローディングが無い場合の電圧波形はE_i:空洞への入力電圧波形、E_e:空洞からの反射電圧波形、ω:共振角周波数として(1)式のように表現される。

$$E_i^2 = (E_e - E_i)^2 + \frac{E_e^2}{\beta} + \frac{2Q_0}{\omega\beta} E_e \frac{dE_e}{dt} \quad (1)$$

カソード通電後は β が大きい場合に特有の反射波形のパルスの立ち上がり部分のピークが見えなくなり、立ち下り部分ではピーク値が低下している。また反射電力のフラットトップの高さも変化した。(1)式では、反射電力の大きさを決定するパラメータは β のみであるので、現在の状態は導波管と空洞との結合度が変化したと考えるのが妥当である。この原因は現在のところ不明であるが、空洞内電磁場が基本モード以外にも励振されている高次モードが存在し、導波管とのカップリングに影響を与えている可能性も否定できない。

ピーク値が低下する原因は、低いQ値による立ち上がり、立ち下り時間の高速化が考えられる。たとえばQ値が1000程度であればRFパルスの反射波形の立ち上がり、立ち下り時間は共に10ns程度となる。RF検波器の周波数特性は50MHz程度であるためこのような短い時間に変化する信号を正確に測定することは出来ない。そのため反射電力のピーク値が低下していると考えられる。

空洞の高周波特性が変化した直接の原因は、カソードヒータの輻射熱によるカソードプラグ及び端板が熱膨張し、RFコンタクトが変化しているためであると推測される。実際にカソードヒータのON/OFFで空洞の高周波特性が変化することから、RFコンタクトの状態も変化していることは明らかである。その結果、空洞の高周波特性が大きく変化し、規定の電力を入力しても所定の電場強度が発生していない可能性が高い。この問題は極めて重大な問題であり、現在対策を検討中である。

4. まとめと今後の予定

テラヘルツ光源のための試験加速器を開発している。ITC-RF-GUNはRFコンディショニングが完了し、現在空洞の高周波特性の把握、ビーム電流の評価を行っている。またPARMELAとGPTを用いてシミュレーションを行い、実験データとの比較を行った。カソード端板部の熱膨張によりRFコンタクトが不安定になり高周波特性が変化するという問題については、現在対策を検討中である。今後ビームのエネルギー分布測定、エミッタンス測定を行い、実験データとシミュレーションとの比較を行う予定である。

参考文献

- [1] H. Hama et al., New Jour. of Phys. 8(2006) 292
- [2] T. Tanaka, et al., Proc. of the 27th International FEL Conf.,Stanford, U.S.A., pp. 142
- [3] F. Hinode, et al., Proceedings of the 5th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (2008)
- [4] K. Kasamsook, Ph.D thesis, Tohoku University (2008).