

# DEVELOPMENT OF LOW EMITTANCE ELECTRON-GUN SYSTEM FOR LINAC IN RESEARCH CENTER FOR ELECTRON PHOTON SCIENCE, TOHOKU UNIVERSITY

Masayuki Kawai<sup>#,A)</sup>, Fujio Hinode, Shigeru Kashiwagi<sup>A)</sup>, Fusashi Miyahara<sup>B)</sup>, Kenichi Nanbu<sup>A)</sup>, Shigenobu Takahashi<sup>A)</sup>, Yoshinobu Shibasaki<sup>A)</sup>, Ikurou Nagasawa<sup>A)</sup>, Toshiya Mutou<sup>A)</sup>, Yuu Tanaka<sup>A)</sup>, Li Xiangkun<sup>A)</sup>, Ken Takahashi<sup>A)</sup> and Hiroyuki Hama<sup>A)</sup>

Research Center For Electron Photon Science, Tohoku University  
1-2-1 Mikamine, Taihaku, Sendai 982-0826, Japan  
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)  
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

## Abstract

A new electron gun with low emittance using a LaB<sub>6</sub> thermionic cathode and low voltage but high field gradient has been developed for use injection into old 300MeV linac in Research Center for Electron Photon Science Tohoku University. A maximum energy of 50 kV, a current of up to 300 mA, pulse width of 1-5 μs and repetition rate of up to 300 pps were obtained respectively. The normalized emittance were measured to be less than 2π mm mrad. Moreover, an S-bund prebuncher was fabricated for the new electron gun. An integrated long run operating was examined which has satisfied the most strict requirements.

## 東北大学電子光理学研究センターにおける低エミッタンス DC 電子銃システムの開発

### 1. はじめに

東北大学電子光理学研究センターは平成 21 年 12 月 1 日に旧核理研から改組した。このため加速器を始め設備のほとんどを引き継いだ。リニアックについては核理研開設当時からのもので、これまで積極的な改修がなされず様々な懸案事項が残されている。その一つが DC 電子銃システムの更新である。現在では旧型の電子銃は元より、そのカソードを始めとする部品の入手が困難な状況になった。これが契機となり東北大独自の電子銃システムの開発を行うこととなった。平成 17 年から設計を開始、製作を経て平成 22 年度末に実証性能試験を完了した。

本開発は小口径の LaB<sub>6</sub> を熱陰極とした DC 電子銃であり、ビーム電流のパルス制御にグリッドを用いないことや、陰極とウエネルト電極に負バイアス電圧を印加することで、低エミッタンス化を図った。電子ビームの総合評価試験を終えた結果、開発機器については実用運転に耐えうる性能を有していることが実証された。本稿ではこれまでの開発経緯や実証試験の結果についての総合的にまとめを報告する。

### 2. 低エミッタンス DC 電子銃システム

この電子銃システムは旧核理研の 300MeV ライナックの電子ビーム源として開発された。旧型の電子銃に比べ低エミッタンス化を図ることはもとより、実用機としての様々な条件を満たす必要がある。物

理的な仕様を満足することは言うまでも無いが、安全性・保守点検の容易さ・省電力化・耐久性など様々な開発項目の実現が求められる。とりわけカソードの寿命と長期にわたる安定入手の確保は最大の課題である。

#### 2.1 低エミッタンス DC 電子銃

開発に当たって、これまで使用してきた電子銃よりも出来るだけ低エミッタンス化を図り<sup>[1]</sup>、リニアックへの入射に際して、できるだけビームのロスを防ぐことを念頭においた。このためエミッタンスを出来るだけ小さくする必要がある。表 1 に DC 電子銃の仕様を示す。同時にその達成状況の結果も示す。

図 1 に開発された電子銃の構造を示す。真空容器は全てアルミ製で、電子ビーム溶接で製作した。

電子ビームのエネルギーを 50 keV と比較的低い

表 1: 低エミッタンス DC 電子銃の仕様と実績

	Design	Achieved
Beam energy	50 keV	←
Beam current	>300 mA	←
Pulse width (FWHM)	1-5 μs	←
Repetition rate	300 pps	←
Normalized emittance	<5 π mm mrad	<2 π mm mrad
Normalized thermal emittance	0.25 π mm mrad	-
LaB <sub>6</sub> Cathode diameter	1.75mm φ	←

<sup>#</sup> kawai\_m@lns.tohoku.ac.jp

エネルギーに設定したのは高電圧の絶縁を容易にするためである。しかしカソードアノード間の距離を15mmと小さくすることで、3.3 MV/mの高電界を発生することで低エミッタンス化の条件の一つをみたした。

低エミッタンス化のためにはカソードを小口径にする必要があるが、必要なビーム電流を得るためには放出電流密度の高いカソード材料が必要となる。この条件を満たした材料がLaB<sub>6</sub>である。カソードの発熱については小口径であることからヒーターの電力が極めて小さくてすむ。必要な温度を達成するための電流電圧は7.3 A, 1 V程度である。このため発熱量は10 Wに満たないため、電子銃全体が熱平衡に達するまで約1時間程度である。カソード材料としての特徴は、特に単結晶の場合は表面の原子層が蒸発して常に正常な電子放出面が形成される。このためコンデイショニングが数時間で済み、カソード交換の作業時間が短くて済む。カソードの寿命を決める要因の一つが真空度である。セラミック絶縁管を真空容器の中に取り付ける構造とすることで、カソードとアノード間に直接イオンポンプを設置することができ、コンダクタンスの大きな排気特性が得られる構造になっている。また大気中で保存ができることから取り扱いが容易である。

電子銃の高電圧パルス電源については、従来のPFN方式ではなく、インバーター充電電源によりコンデンサに蓄えた電荷を高電圧半導体スイッチ(MOSFETを多段直列接続)で制御する方式である。スイッチングノイズも小さく、パルスの平坦部のリップルも原理的に極めて小さい。更に、パルス発生に関するスイッチングの電力損失も著しく小さく抑えることができる。最大定格運転において消費電力はシステム全体で1.2 kW程度である。旧システムに比べると消費電力は1/10以下である。

## 2.2 プリバンチャー

旧電子銃システムのプリバンチャーについてはどのようなパラメータで運転されているのか明確な資料が残っていないため電子銃の性能に整合したプリ

バンチャーを製作した。また電子ビームにエネルギー変調や密度変調が生じていることを確認するためのスペクトロメーターとピックアップ空洞を用いた。新しいプリバンチャーは無酸素銅製のピルボックス型の単空洞である。表2にプリバンチャー及びピックアップ空洞の仕様を示す。プリバンチャーは特に強電界を発生させる必要がないため、Q値を比較的小さくし共振周波数幅を広く取れるようにした。一方ピックアップ空洞はQ値を高くして、電子ビームの密度変調に対してより大きな出力信号が得られるようにした。また可変チューナーにより共振周波数を選べるようにした。

表2：プリバンチャー・ピックアップ空洞仕様

Parameters(Achieved)	Prebuncher	Pickup Cavity
Resonant Frequency: $f$ [Hz]	2856	2856±2 (Variable)
Q Values: Q	1428	7140
Coupling Coefficients: $\beta$	3.93	1.70
Filling Time: $t$ [ $\mu$ s]	0.27	0.796

## 3. ビーム特性評価

電子ビームの特性評価については様々な方向から特性評価がおこなわれた。カソードの温度特性、電子ビームの電圧-電流特性、エミッタンス特性の様々な測定をおこなった。プリバンチャー特性の評価にはエネルギー変調が生じているかについては180度偏向型のエネルギー分析器を用いた。密度変調が生じているかについてはピックアップ空洞を用いて評価した。

### 3.1 電流電圧特性

図2に電子銃電圧波形(上)に対するビーム電流波形(下)を示す。電圧パルスの発生には半導体スイッチ方式を採用したのでパルス形成ラインを用い

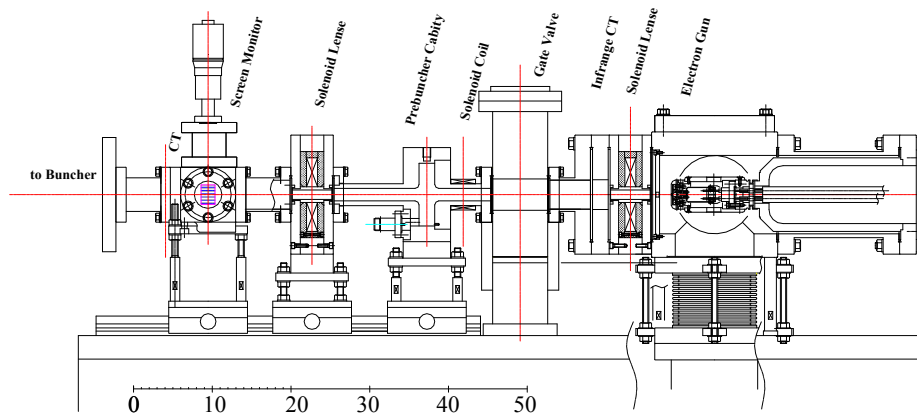


図1：低エミッタンス DC 電子銃システム

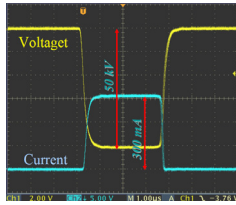


図 2：電子銃電圧及びビーム電流波形

た時の様なリップルは原理的に発生しない。このため電圧の平坦度は良好である。この電子銃の電圧電流の動作点は温度制限領域であり、カソードからの放出電流は電子銃電圧の変動に対し大きな変化はない。このためビーム電流の平坦度も更に良好である。

### 3.2 エミッタンスの評価

エミッタンス測定にはダブルスリット・スキャン法を用いた。これはビーム電流の径方向の分布切り出しその切り出した点でのビームの角度広がり測定し位相空間分布からエミッタンスを求める方法である。図 3 に電子ビームの位相空間測定結果の一例を示す。エミッタンスはこの位相空間の面積から求められる。図 4 にエミッタンスのビーム電流依存性を示すこの時の電圧は 50 kV であり、ビーム電流が増加するにしたがって空間電荷効果によりエミッタ

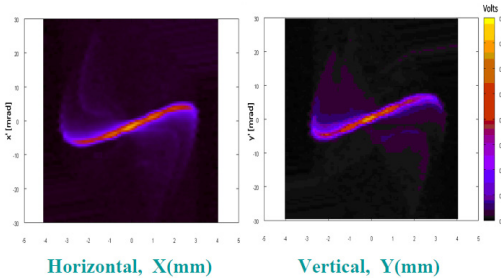


図 3：ダブルスリット法による電子ビームの位相空間測定例

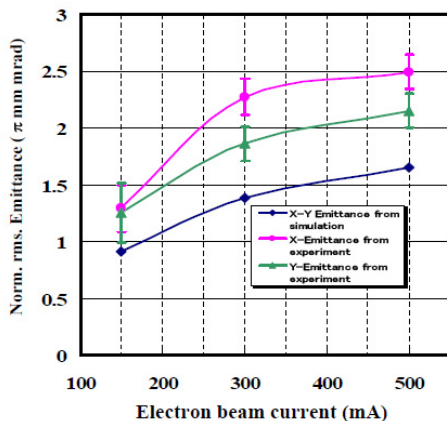


図 4：エミッタンスのビーム電流依存性。

ンスが増加してゆくことが分かる。一番上が X エミッタンス、中央が Y エミッタンスである。また一番下は数値計算結果が示されている。実験結果と傾向がよく一致していることが分かる。またこの電子

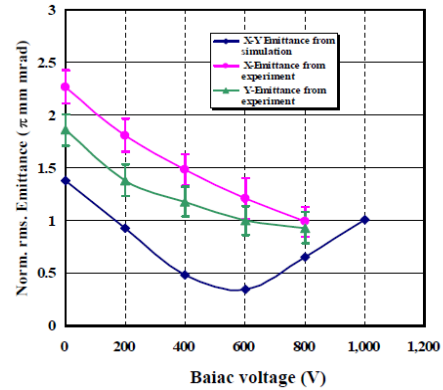


図 5：エミッタンスのバイアス電圧依存性。

銃はカソードとウエネルト電極の間に -1 kV まで負バイアス電圧を印加することができる構造になっている。これはカソード付近のエネルギーの低い電子が空間電荷効果によって広がることや、カソードのエッジエミッションを抑制する効果が期待される。図 5 の上から X 及び Y エミッタンスのバイアス電圧依存性の測定結果を示す。1 番下のグラフは数値計算結果である。数値計算はバイアス電圧 -600 V 付近にエミッタンスの最小値があることが示されている。測定結果ではもう少しバイアス電圧の高いところにエミッタンスの最小値があることが予想される。しかし実験結果及び数値計算はカソードとウエネルト電極の間に最適な負バイアス電圧を印加することで、エミッタンスの劣化を抑制できることを示している。

### 3.3 ビームバンチングの評価

プリバンチャーにより最適なエネルギー変調が生じているか、また電子が必要な距離を走行後に密度変調に変化しているか評価する必要がある。図 6 にエネルギー変調及び密度変調の評価装置の原理を示す。エネルギー変調については磁場による 180 度偏向型のスペクトロメーター<sup>[2]</sup>を用い、磁場をショットごとに変えながらエネルギースペクトルを観測した。密度変調についてはプリバンチャーと同一周波数にチューニングしたピックアップ空洞を用いて、空洞に誘起されるマイクロ波の強度から評価した。

測定に際して、電子ビームが全てピックアップ空洞に入射されているか確認するために空洞直前に電流モニター (CT) とスクリーンモニターで電子ビームのトランスミッションをモニターしながらおこなった。

バンチング長  $L$  は式 (1) で表されえる<sup>[3]</sup>。  $E_0$  は電子銃出口での電子ビームエネルギー、  $f_0$  は変調周波数、  $\Delta E$  はエネルギー変調幅をそれぞれ表している。  $\beta$  は電子の速度、  $c$  は光速である。

$$L = \frac{\beta c E_0}{f_0 \Delta E} \quad (1)$$

図 7 に電子エネルギーをいくつか選んで、プリバンチャーから得るエネルギー変調幅  $\Delta E$  に対するバン

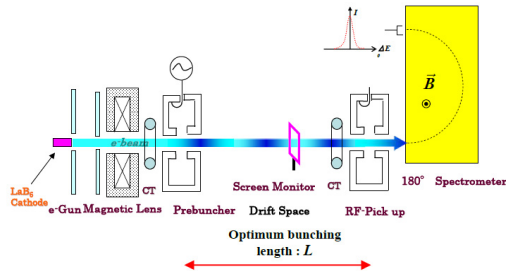


図 6：エネルギー変調及び密度変調の評価原理

チング長  $L$  の関係を示す。この場合プリバンチャーからバンチャーまでの距離  $L=52 \text{ cm}$  と設定するとエネルギー変調幅  $\Delta E$  は  $4.2 \text{ keV}$  となる。

次にプリバンチャーの RF 入力パワー  $W$  とエネルギー変調幅  $\Delta E$  について実験的に検証した。図 8 に入力パワーを  $0$  から  $300 \text{ W}$  まで段階的に変化させたときのエネルギースペクトルの変化が示されている。

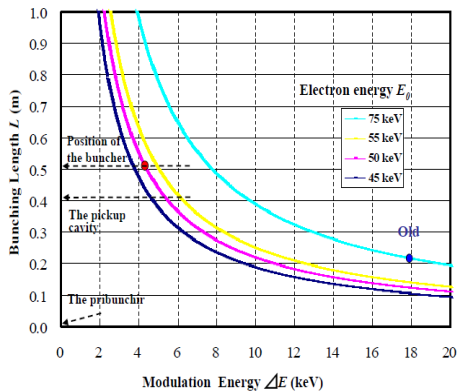


図 7：エネルギー変調幅に対するバンチング長の関係

RF パワーが  $0 \text{ W}$  のときは電子銃の電子ビームスペクトルを表していると考えられる。このデータ取得ではパルスの平坦部分のある 1 点の時刻のビーム電流を観測しているため、電子ビームのエネルギー幅は十分小さいものと考えられる。したがって観測されたエネルギー幅  $0.79\%$  はスペクトロメーターの分解能やシステム全体の変動を総合的に含む値であると考えられる。

RF パワーを段階的に増大するにしたがって、エネルギー幅は広がってゆく。図 8 に示した  $\Delta E$  をエネルギー変調幅と定義して、入力パワーとエネルギー変調幅との関係を図 9 に示す。プリバンチャー入力パワー  $W$  とエネルギー変調幅  $\Delta E$ 、つまりエネ

ルギー利得は  $1/2$  乗の関係に成っており電磁波のパワーと電磁界強度との関係と矛盾しない。このプリバンチシステムで必要なエネルギー変調幅  $\Delta E = 4.2 \text{ keV}$  を得るには RF 入力パワーは約  $200 \text{ W}$

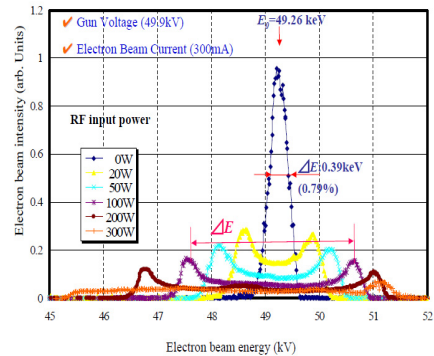


図 8：プリバンチャーの RF 入力パワーに対するエネルギースペクトルの変化

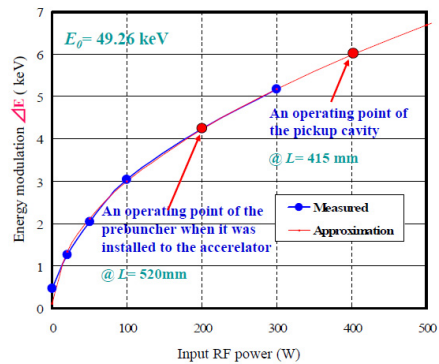


図 9：RF 入力パワーに対するエネルギー変調の深さの関係

となる。

次にエネルギー変調を受けた電子ビームがある距離走行して電流密度変調が生ずる。この検証について直接的な観測は難しい。しかし、密度変調が生じたビームをピックアップ空洞を通過させることで、航跡場によって発生する電磁場による RF 信号が観測できれば、間接的ではあるが密度変調が生じていると考えられる。図 10 にプリバンチャーの入力 RF パワーに対するピックアップ空洞の出力電圧信号の変化を示す。但し、ピックアップ空洞の出力電圧信号がビームで電流の変化に依存していないことを示すために、ビーム電流が一定になっていることをピックアップ空洞の直前に設置した電流モニター (CT) でモニターしながら測定した。電子ビーム電流はどの測定でも  $90 \text{ mA}$  から  $75 \text{ mA}$  にあり大きな変化はなかった。また電子ビームサイズに依存していないことを示すためにピックアップ空洞直前のスクリーンモニターでビームプロファイルを観測した。結果は常に  $2 \sim 3 \text{ mm}$   $\phi$  であった。ピックアップ空洞のチューニングについては、ピックアップ空洞の最大出力が得られるところにチューナーを固定した。

図 10 は電子ビームエネルギーが 50 keV のときのプリバンチャー入力 RF パワーに対するピックアップ空洞の出力信号の関係を測定した。RF 入力がゼロのときピックアップ空洞の出力は 0、70W 程度で飽和しそれ以上入力パワーを大きくするとオーバーバンチングが発生すると考えられるピックアップ空

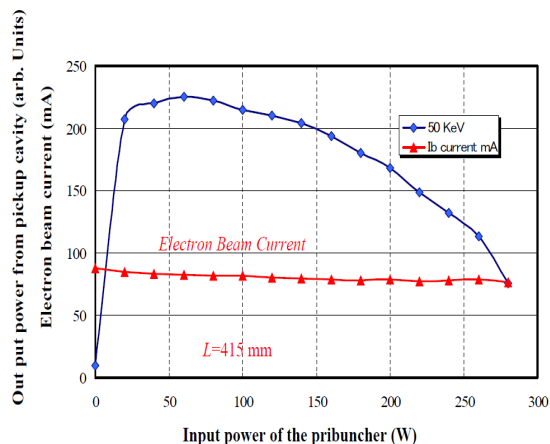


図 10：プリバンチャーの入力 RF パワーに対するピックアップ空洞の信号出力

洞信号の低下が見られる。しかし図 9 で示されているピックアップ空洞の位置での予想される RF 入力パワー400W と比較すると低いパワーで飽和していることになる。ピックアップ空洞の直前の電流モニターのデータが示すとおり、RF 入力パワーに対してビーム電流はほぼ一定であることから、ビーム電流に依存しているものではないと考えられる。このことについては定量的に不明な点もあるがさらに詳細な検討が必要であると考えている。

以上電子ビームのエネルギー分布測定、ピックアップ空洞からの信号に一部データに不明な点が残されているが、総合的な解析結果から、電子ビームに必要な密度変調が生じていると解釈される。

#### 4. 安定性及び耐久性

実用機に求められる性能には安定性と耐久性は欠かすことはできない。安定性は日々の運転に、耐久性はメンテナンス性に大きく関わる。表 3 に電子ビーム電流の安定性と電子銃電圧の長時間安定性の試験結果を示す。電子銃電圧については 50 kV  $\pm$  0.05%、ビーム電流については 300 mA  $\pm$  0.25%の結果が得られている。高電圧電源の充電部にインバーター電源を用いていること、半導体スイッチによるパルス形成が大きく寄与している。また LaB<sub>6</sub> カソードの耐久性についてはカソードヒータ点灯時においても 10<sup>-6</sup> Pa より低い真空度を保ちながら、通算 8,000 時間以上の点灯を行った結果カソード表面は鏡面状態を保ち特に大きな異常は見られなかった。このことで、1~2 年は使用に耐えることが実証さ

表 3：低エミッタンス DC 電子銃の安定性、耐久性

	Condition	Achieved
Gun voltage stability	50 keV	$\pm$ 0.05%
Beam current stability	300 mA	$\pm$ 0.25%
High repetition rate Lon run test	300 pps (Max)	1,000 h heat run test, No damaged
LaB <sub>6</sub> Cathode	2.5 $\times$ 10 <sup>-6</sup> pa] 7.2A 1,800K	8,000 h heat run test, No damaged

れた。更に総合運転において 50 kV, 300mA, 300 pps の条件で 1,000 時間の長時間連続運転を行い異常は認められなかった。これは電子線照射による RI 製造をおこなうため、リニアックによる加速後の平均電流が 150  $\mu$ A と大電流が要求されているためである。

LaB<sub>6</sub> カソードの交換については容易におこなえる構造になっており、特に神経質なアライメント作業は不要である。LaB<sub>6</sub> カソードの供給の問題については、同種のカソードは複数のメーカーからの入手が可能であり、今後長期にわたり予備品不足の問題は回避できたと考えている。以上安定性、耐久性についての試験をおこないシステム全体の健全性の実証がなされた。

#### 5. おわりに

電子光理学研究センターの 300 MeV ライナックの電子ビーム源として低エミッタンス DC 電子銃システムの開発を行った。低エミッタンス、ビーム電流、高繰り返し運転等の当初の性能を十分満たし、且つカソードの寿命等の耐久性試験の結果、実用に供することができることが実証された。

更にこの電子銃はライナックの電子ビーム源に止まらず、そのビームの性質を活かした応用も期待される。

最後に本開発の遂行に当たり「KEK 大学等連携支援事業」に負うところが大きいことを申し述べる。

#### 参考文献

- [1] K. Kasamsook, K. Akiyama, K. Nanbu, M. Kawai, F. Hinode, T. Muto, T. Tanaka, M. Yasuda, Y. Mori, H. Hama, Proceedings of FEL2007, WEPH031, Novosibirsk, Russia
- [2] M. Kawai, Y. Kawamura and K. Toyoda, J. Appl. Phys. 66, 7, 2790 (1989)
- [3] Stanley Humphries, Jr. Charged Particle Beams, JW&S (1990)