

# グリッド付き熱カソードを用いた低エミッタンス電子銃システムの開発

## DEVELOPMENT OF LOW-EMITTANCE GRIDDED THERMIONIC ELECTRON GUN EMBEDDED IN A SINGLE CAVITY WITH VOLTAGE OPTIMIZED ELECTRODES

安積隆夫<sup>#, A, B, C</sup>, 稲垣隆宏<sup>B, C</sup>, 谷内努<sup>B</sup>, 西森信行<sup>A</sup>, 馬込保<sup>B, C</sup>, 田中均<sup>A, C</sup>  
Takao Asaka<sup>#, A, B, C</sup>, Takahiro Inagaki<sup>B, C</sup>, Tsutomu Taniuchi<sup>B</sup>, Nobuyuki Nishimori<sup>A</sup>, Tamotsu Magome<sup>B, C</sup>,  
Hitoshi Tanaka<sup>A, C</sup>

<sup>A</sup>National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology (QST)

<sup>B</sup>Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI)

<sup>C</sup>RIKEN SPring-8 Center (RSC)

### Abstract

The injector linac for a next-generation SR source requires an electron gun capable of delivering highly stable and bright electron beam with minimum maintenance downtime for long-term operation. A new low-emittance gridded thermionic gun embedded in a 238-MHz rf cavity has been developed for this purpose. The rf cavity accelerates the electron beam generated from the 50-kV thermionic-gun up to 500 keV to avoid emittance dilution due to space charge effect at low energy. A particle tracking simulation based on CST and PARMELA shows the gun can generate a high brightness beam with normalized emittance of 2 mm mrad with a bunch charge of 0.6 nC when it is operated with the optimized gun grid voltage. In this paper, the simulation results and experimental results at the gun test stand are presented.

### 1. はじめに

次世代放射光施設[1]の入射用 3 GeV 線型加速器に備わる電子銃には、0.6 nC の電荷量で規格化エミッタンスが 5 mm mrad 以下の電子ビームが要求されている。また、Top-up 運転を前提とする本施設において、電子銃から生成される電子ビームは、長期間にわたって高い安定性をもつことが不可欠である。

このような低エミッタンス電子ビームを得るための電子源として、光陰極型 RF 電子銃や単結晶熱カソードを備える 500 kV パルス電子銃[2]が候補となる。光陰極型 RF 電子銃において、長期間にわたって安定なビームを生成するには、レーザーシステム安定化は必要不可欠であり、その付帯設備（空調、冷却水、防振）にも十分な安定化対策を施さなければならない。一方、500 kV パルス熱電子銃は高い安定性能を有し、カソード寿命においても優位性をもっている。しかしながら、500 kV の高電圧パルス発生のための大規模装置を用意する必要がある。

こうした点を踏まえ、省コストでかつ保守性に優れた 500 keV 低エミッタンスビーム生成可能な電子銃システムを新たに考案した。本電子銃は、50 kV の印加電圧で駆動する熱電子銃と 238 MHz RF 空洞で構成される。電子銃カソードにはグリッド付き熱カソードが装着され、1 ns 以下の幅をもつ電子バンチを生成し、238 MHz RF 単空洞にてクレスト加速することで 500 keV ビームを生成する。

グリッド付き熱カソードのグリッド近傍の電場は、カソード・アノード間の高電圧による静電場とカソード・グリッド間のグリッドパルス電圧による電場の重ね合わせとなる。グリッドの存在により生じ

るグリッド近傍での電場歪み、いわゆるレンズ効果によるエミッタンス悪化は、グリッドパルス電圧を最適化することで、抑制可能と考えられる。そこで、グリッドメッシュ部分の電子軌道について、粒子トラッキング計算をおこない、レンズ効果による収束と電子ビームの空間電荷効果による発散が釣り合う条件を見出すことで、低エミッタンスビームを生成する最適化をおこなった。本報告では、ビームシミュレーション結果を示すとともに、実証試験のために製作した各機器の諸特性、ならびにビーム試験結果について報告する。

### 2. 電子銃システム

高安定・高品質ビーム生成が要求されている本電子銃システムは、高い信頼性と優れた保守性を備えたシステム構築を目指している。これを実現するため、構成機器においては、これまで確立された要素技術のみを使用する。熱カソードは、入手が容易である市販のグリッド付き熱カソード（EIMAC Y-845, CPI 社製）を採用する。カソード・グリッド間の高電圧パルス電圧印加により、600 ps 幅の電子バンチを生成する。付帯設備のコスト削減の観点から、アノード・カソード間電圧は 50 kV と比較的低い電圧設定とする。この場合、電子銃から生成される電子ビームには、わずかのドリフトスペースで空間電荷効果によるビームサイズの著しい増大、エミッタンス悪化が生じる。これを回避するため、アノード電極直後に 238 MHz RF 空洞のギャップを設け、500 keV まで直ちに加速可能な機器配置とする。600 ps 幅の電子バンチが RF 加速電場で加速される際、RF の非線形性からエネルギー幅が広がるが、このエネルギー幅が及ぼすエミッタンスへの影響はわずかである。電子銃の 50 kV 高電圧発生装置は、半導体デ

<sup>#</sup>asaka@spring8.or.jp

バイスで構築される[3]。また 238 MHz RF 空洞の RF 電力供給源である増幅装置においても、半導体デバイスを使用したパルス増幅器を用いる[4]。これらは保守性に優れているだけでなく、信頼性向上、さらに省コスト化にも貢献する。本設計指針に基づいて構築される電子銃システムを Fig. 1 に示す。

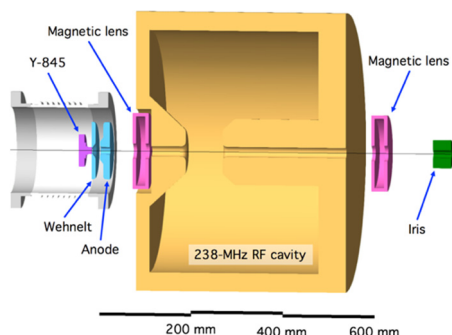


Figure 1: Schematic drawing of the low-emittance gridded thermionic electron gun embedded in the 238-MHz rf cavity.

### 3. 低エミッタンスビーム生成

#### 3.1 グリッドメッシュにおけるレンズ効果

Y-845 グリッド付き熱カソードのエミッタンス悪化要因について考察するために、CST によるビーム軌道計算をおこなった。Figure 2 にはグリッドメッシュ近傍の電場強度、その電場強度分布にしたがう電子ビームの軌道を示す。カソード・グリッド間電圧が 35 V の場合、グリッドメッシュ近傍の電場歪みにより、電子ビームは横方向キックを受ける (Fig. 2 (a))。カソード・グリッド間電圧の増加にとともに、電子ビームへの横方向変位は緩和される (Fig. 2 (b), (c))。Figure 2 (c) に示すように、グリッドメッシュのレンズ効果による収束力と電子ビームがもつ空間電荷による発散力が相殺する電圧が存在する。

上記の電子ビームの軌道特性を踏まえ、エミッタンスとビーム電荷量に関して、カソード・グリッド間電圧依存性、ならびにアノード電圧依存性を調べた。その結果を Fig. 3 に示す。アノード電圧が 50 kV のとき、エミッタンスが最小となるグリッド電圧は 56 V で、生成電荷量は 0.7 nC である。グリッド電圧を 70 V で、1 nC (1.7 A / 0.6 ns) のビーム電荷量を生成するが、エミッタンスは 1 mm mrad とやや劣化する。アノード電圧上昇にしたがい、最小エミッタンスが得られる最適グリッド電圧も上昇することが分かる。

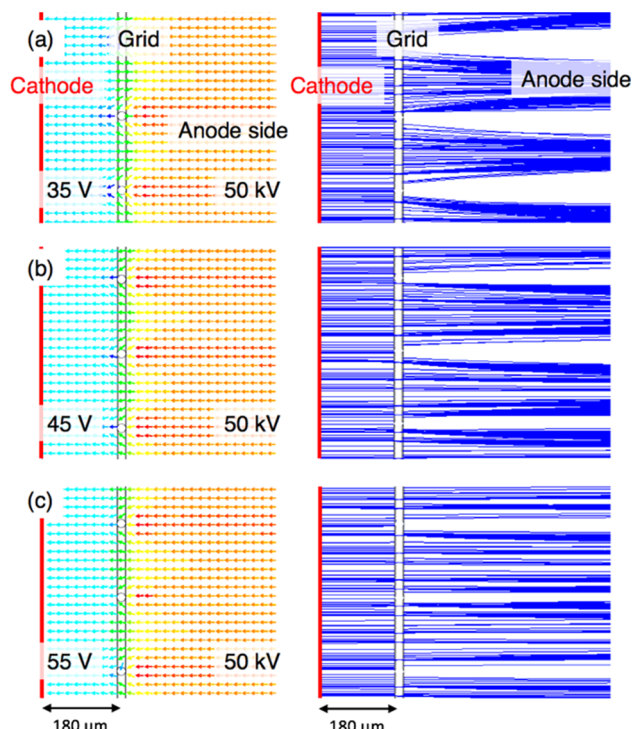


Figure 2: Electric field strength (left) and beam trajectory near grid of Y-845 (right) simulated using CST code. (a), (b) and (c) correspond to grid voltage conditions of 35 V, 45V and 55 V, respectively.

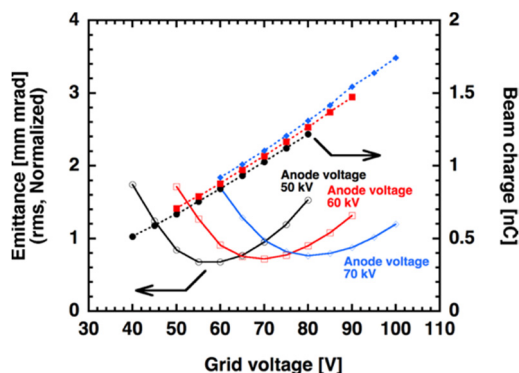


Figure 3: Emittance (solid lines) and beam charge (dashed lines) at the exit of the thermionic-gun as function of grid voltage simulated using CST code.

#### 3.2 50 kV 熱電子銃

50 kV 熱電子銃のウェネルト電極、アノード電極の形状と配置は、平行ビームが得られるように最適化される。Figure 4 には、Y-845 から生成された電子ビームがアノード電極を通過するビーム軌道を示す。アノード電極ビーム開口部は、各電極のアライメント誤差による影響を軽減するために、ビームサイズに対して十分広くしている。

Figure 5 には電子銃出口における水平方向位相空間分布を示す。また、最適化された各電極の電圧パラメータ、および CST に適用した熱カソードパラメータ、ビーム性能を Table 1 に示す。

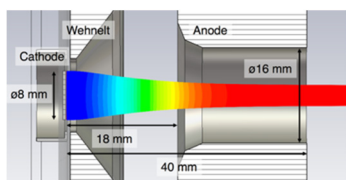


Figure 4: Electron trajectories from Y-845 to anode simulated by CST code. The colormap shows beam energy change (from blue: 10 eV to the red: 50 keV).

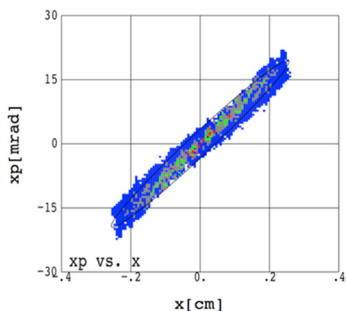


Figure 5: Particle distribution in horizontal phase space at the exit of the 50-kV thermionic-gun.

Table 1: Main Parameters of the 50-kV Thermionic-gun

Physical parameter of thermionic-cathode (Y-845)	
Cathode diameter	8 mm
Distance between cathode and grid	180 $\mu$ m
Grid spacing	180 $\mu$ m
Wire diameter of grid	20 $\mu$ m
Temperature of cathode	1000 $^{\circ}$ C
Work function	1.68 eV
Anode voltage / Grid voltage	-50 kV / 70 V
Beam characteristics of 50-kV thermionic-gun	
Charge (current / pulse width)	1 nC (1.7 A / 0.6 ns)
Normalized emittance	1 mm mrad

### 3.3 ビーム輸送、加速、コリメーション

50 kV 電子銃のアノード電極出口において低エミッタンスビームが生成されるが、ドリフトスペースを経るにしたがって、空間電荷効果によりエミッタンスは増加していく。これを回避するため、238 MHz RF 空胴ギャップは、できる限り電子銃側に近づけて配置する。またビームサイズを適切に調整するために、50 kV 電子銃と 238 MHz RF 空胴の間に磁気レンズを設ける (Fig. 1)。

電子銃から生成される 50 keV ビームの輸送と 238 MHz RF 空胴におけるビーム加速は PARMELA による粒子トラッキング計算で最適化された。238 MHz RF 空胴におけるクレスト位相のビーム加速において、RF の非線形性から生じるエネルギー幅は 2.7% (w/o space charge effect) である。このエネルギー幅が影響するエミッタンス増加は 1 割程である。

空間電荷効果を含んだ計算結果を Fig. 6 に示す。

ビーム電荷量が 1 nC のビームを仮定した場合、238 MHz RF 空胴後の規格化エミッタンスは 3 mm mrad となった。500 keV まで加速されたビームは、Fig. 7 に示すように直径が 10 mm 程度のビームサイズで、ビームコア部分は均一分布となっている。

ビームコア部分の抽出、およびビーム電荷量調整のために、ビームコリメータを使用する (Fig. 1)。Figure 8 にはビームコリメータ口径面積に対するビーム電荷量とエミッタンスを示す。電子銃システムに要求されるビーム電荷量は 0.6 nC であり、この電荷量に相当するアイリスサイズ ( $\phi$  5.9 mm) に設定するとき、2 mm mrad のエミッタンスとなる。

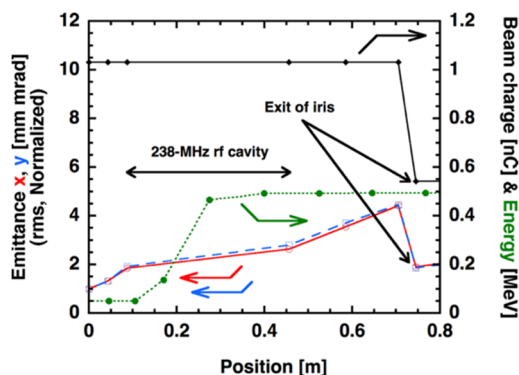


Figure 6: Emittances and beam charges in acceleration process of the electron gun system simulated by PARMELA code. The origin point is the exit of 50-kV thermionic gun.

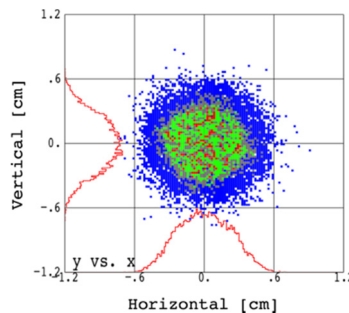


Figure 7: 500-keV beam profile before iris simulated by PARMELA code.

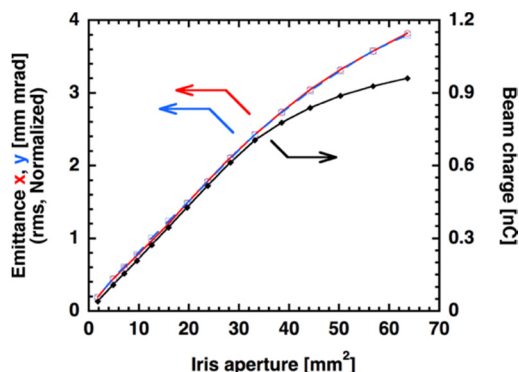


Figure 8: Emittances and beam charges as function of aperture sizes of iris simulated using PARMELA code.

## 4. 機器製作

電子銃システムは 50 kV 熱電子銃と 238 MHz RF 空洞、その間に備わる磁気レンズから構成される。前節で述べたように、アノード出口から 238 MHz RF 空洞ギャップまでの距離は、空間電荷効果によるエミッタンス悪化を回避するため、できる限り近距離に配置する。一方、両装置の間に備わる磁気レンズの磁場分布は、電子銃のカソード・アノード間、および 238 MHz RF 空洞ギャップ間の電場分布と干渉しないように配置する。これは各機器の電場・磁場の独立制御を可能にするためである。こうした配慮のもと、設計した電子銃システムを Fig. 9 に示す。

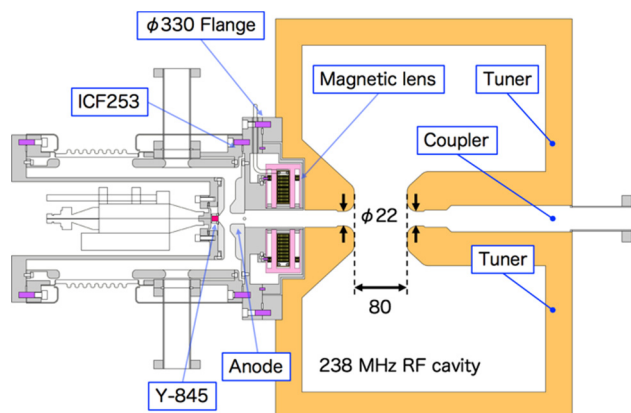


Figure 9: Low-emittance gridded thermionic electron gun embedded in the 238-MHz RF cavity.

### 4.1 磁気レンズ内蔵型 50 kV 熱電子銃

50 kV 電子銃のウェネルト電極、アノード電極形状と配置は CST の計算結果が反映された。電極部の放電を回避するため、最大電場強度は 8 MV/m 以下となる形状とした。磁気レンズは、ビーム軸上磁場の有効範囲を制限するためのトリムコイルが磁気レンズの両側に備えられる。Figure 10 には、磁気レンズのビーム軸上磁場分布を示す。トリムコイルを励磁した場合は、非励磁に比べて磁場が局在化する。これにより電子銃出口から RF 空洞ギャップまでの距離を 30 mm 短縮することが可能となる。

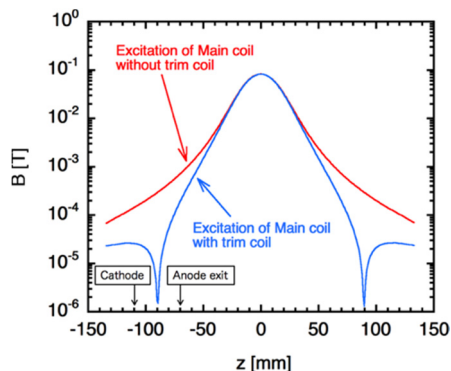


Figure 10: Magnetic field distribution with trim coil on beam axis (blue solid line). Magnetic field distribution without trim coil on beam axis (red solid line).

この磁気レンズは、 $\phi 330$  フランジに装着され、真空層と隔てるための金属ケースに収納される。磁気レンズの冷却配管、電力ケーブルは  $\phi 330$  フランジ側面より引き込む構造となっている。さらに、この磁気レンズを収納した  $\phi 330$  特殊フランジには、アノード電極が設置される。そして Y-845 とウェネルト電極が固定されたカソード電極システム・絶縁セラミック部とは ICF253 フランジで取り合う。

### 4.2 238 MHz RF 空洞

238 MHz RF 空洞に供給する RF 電力源として、半導体パルス増幅器を採用するが、省コスト化の観点から、その最大出力電力は 40 kW とする。その場合、238 MHz RF 空洞には、6 M $\Omega$  以上のシャントインピーダンスが要求される。このシャントインピーダンスを得るために、空洞ギャップのビーム口径は  $\phi 22$  mm とした。

周波数調整用チューナー、および RF 電力入力用ループアンテナは空洞下流側の端板に備えられる。周波数チューナーやループアンテナは、ギャップ部分の電磁場対称性に影響しない位置に取り付けられる。

238 MHz RF 空洞の RF パラメータについて、設計値、ならびに低電力 RF 測定で得られた結果を Table 2 にまとめる。なお、238 MHz RF 空洞の製作に関する詳細は本研究会発表[5]を参照されたい。

Table 2: Main RF Parameters of 238-MHz RF Cavity

Parameter	Design	Measurement
Resonant frequency	238 MHz	238 MHz $\pm$ 100 kHz
Q <sub>0</sub> factor	25400	23000
Shunt impedance	> 6 M $\Omega$	6.172 M $\Omega$
RF input power	42 kW (max)	
RF pulse width	100 $\mu$ s	
Repetition rate	30 Hz	

## 5. ビーム試験

### 5.1 電子銃テストスタンドの構成

製作した電子銃システムについて、ビーム性能評価のため、Fig. 11 に示すビーム診断系を構築した。238 MHz RF 空洞後方には、2 台の壁電流モニター (WCM)、スクリーンモニター (SCM)、ファラデーカップ (FC) が装備される。またエネルギープロファイルを観測するために 30° 偏向電磁石とその後方にスクリーンモニターを設置した。スクリーンモニターの蛍光板には、厚さ 100  $\mu$ m の YAG:Ce シンチレータを使用している。また画像歪みなくビームプロファイルを観測可能となるように、CCD カメラにはテレセントリックレンズを装着する。取得画像は、画像処理装置を介して、ビームサイズを算出する。

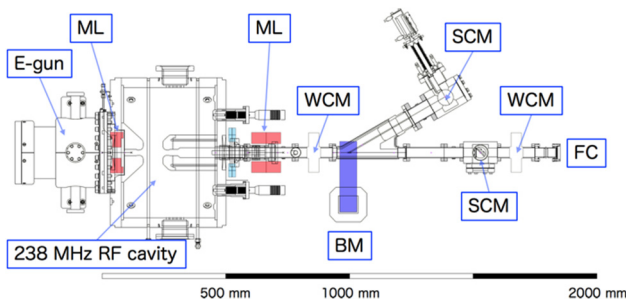
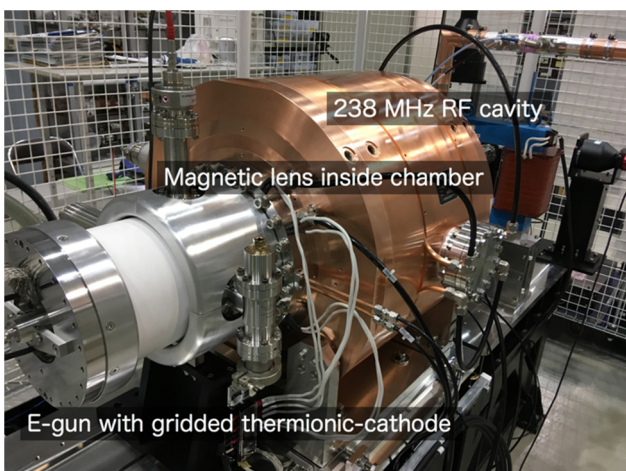


Figure 11: Photograph of the low-emittance electron gun system and layout of the beam monitor system for the low-emittance gridded thermionic electron gun embedded in the 238-MHz RF cavity.

## 5.2 ビーム性能評価

50 kV 電子銃の各パラメータ設定、ならびに 238 MHz RF 空胴へ RF 電力供給後、最大エネルギーが得られる位相に調整した。生成ビームの測定項目は、電荷量、ビームエネルギー、ビームサイズ（エミッタンス）である。得られた結果を Table 3 にまとめる。電荷量 0.6 nC 以上、エネルギー 500 keV 以上、規格化エミッタンス 5 mm mrad 以下という目標は全て達成している。

エネルギーの精密測定は 820 mm 離れた 2 台の壁電流モニタ出力信号の時間間隔 (TOF) からエネルギーを算出する。Figure 12 には、30° 偏向電磁石後に備わるスクリーンモニタで得たエネルギープロファイルを示す。計測されたエネルギー幅は、1.65% (FWHM) である。さらに、Fig. 12 に 238 MHz RF 空胴入力電力に対する TOF 測定結果、ならびに空胴のシャントインピーダンスから推定される到達エネルギーを示す。TOF 測定で得られたエネルギーについては、空胴シャントインピーダンスで予測された値と良い一致を示している。

Figure 13 には、238 MHz RF 空胴直後の磁気レンズ励磁量に対するビームサイズ応答特性を示す。最小ビームサイズは 0.4 mm ( $\sigma$ ) まで収束できることを確認した。本測定で得られたエミッタンスは 5 mm mrad 以下であるが、空間電荷効果による影響も含んでいるため、正確な値ではない。今後、スリットスキャンによる精密測定を予定している。

Table 3: Measurement Results of Beam Parameters of the Low-emittance Electron Gun System

Parameter	Measurement
Beam charge	< 2 nC (E-gun HV : 55 kV)
Energy	~ 600 keV
dE / E (FWHM)	1.65% (544 keV, 1 nC)
Minimum beam size	< 1 mm ( $\sigma$ , provisional value)

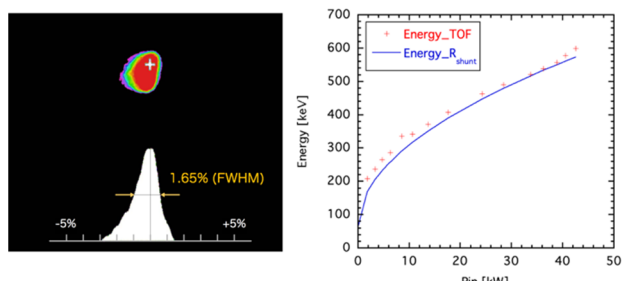


Figure 12: Measurement result of energy profile at screen monitor after 30° bending magnet (left). Measurement of beam energy by TOF (right).

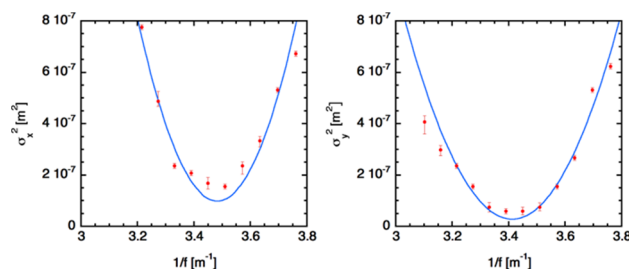


Figure 13: Horizontal and vertical beam size ( $\sigma^2$ ) measurement by magnetic lens scan.

## 謝辞

本研究は、一昨年度まで理研・基盤光源チームリーダーであった大竹雄次氏が主導されてきました。機器製作においては、各メーカーの方々、トヤマの桑原氏、天道氏、三菱重工機械システムの菅野氏、重岡氏、比嘉氏、日本高周波の相澤氏、奥山氏、熊澤氏、福岡氏、日立造船の北村氏、黒木氏に大変お世話になりました。心より感謝いたします。

## 参考文献

- [1] N. Nishimori *et al.*, “Accelerator system of high brilliant 3GeV light source project”, in proc. of the 16th Annual Meeting of PASJ, Kyoto, Japan.
- [2] K. Togawa *et al.*, “CeB<sub>6</sub> electron gun for low-emittance injector”, Phys. Rev. ST Accel. Beams **10**, 020703 (2007).
- [3] C. Kondo *et al.*, “Development of 50kV pulse generator using high voltage SiC-MOSFET for electron gun”, in proc. of the 16th Annual Meeting of PASJ, Kyoto, Japan.
- [4] S. Fukuoka *et al.*, “Development of 238-MHz 42-kW solid-state pulse RF amplifire”, in proc. of the 16th Annual Meeting of PASJ, Kyoto, Japan.
- [5] K. Higa *et al.*, “Manufacture of RF cavities and C-band accelerating structure for the injector linac”, in proc. of the 16th Annual Meeting of PASJ, Kyoto, Japan.