

## J-PARC リニアックにおけるビーム調整試験の進捗 RECENT PROGRESS OF BEAM STUDY IN THE J-PARC LINAC

丸田朋史<sup>\*A)</sup>、劉勇<sup>A)</sup>、二ツ川健太<sup>A)</sup>、宮尾智章<sup>A)</sup>、三浦昭彦<sup>B)</sup>、池上雅紀<sup>C)</sup>

Tomofumi Maruta<sup>\*A)</sup>, Yong Liu<sup>A)</sup>, Kenta Futatsukawa<sup>A)</sup>, Tomoaki Miyao<sup>A)</sup>, Akihiko Miura<sup>B)</sup> and Masanori Ikegami<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup>J-PARC Center, High Energy Accelerator Research Organization

<sup>B)</sup>J-PARC Center, Japan Atomic Energy Agency

<sup>C)</sup>Facility of Rare Isotope Beams, Michigan State University

### Abstract

The J-PARC linac had conducted two-step beam power upgrade for last two years. The energy was extended to 400 MeV in year 2013 by introducing annular-ring coupled structure (ACS) linac after the existing linac. The second step is beam intensity upgrade. The front-end, an ion source and an RFQ, is replaced to new one which is applicable to peak current of 50 mA. In the 1st beam commissioning after the front-end upgrade of the J-PARC linac, we successfully demonstrated the 50 mA beam acceleration. This success is an important milestone to realize an operation with the design beam power. In this paper, we discuss the progress of beam commissioning after the front-end upgrade.

### 1. はじめに

J-PARC は MW 級の陽子加速器を主体とした複合研究施設である。陽子加速器群は 400 MeV リニアック、3 GeV シンクロトロン (RCS)、50 GeV シンクロトロン (MR) で構成される。また、RCS から物質・生命研究実験施設へ、MR からハドロン実験施設およびニュートリノ実験施設へビームが輸送され、各施設内の実験標的で生成された 2 次粒子を用いた研究が行われている。

リニアックの設計エネルギーとピーク電流はそれぞれ 400 MeV および 50 mA だが、運転開始後のビームパワー増強計画等を考慮し、二期に分けて建設がおこなわれた。第一期計画ではエネルギー 181 MeV、最大ピーク電流 30 mA のリニアックを建設し、2008 年に運転を開始した。リニアックを設計ビームパワーに向上させる第二期計画は 2013 年から開始した。利用運転への影響を抑えるため、工事は夏期メンテナンス期間中に限定し、2013 年と 2014 年の 2 年に分けて機器の増設・交換を実施した。2013 年は既設部分の下流に 400 MeV 環結合型 (Annular-ring Coupled Structure, ACS) リニアックを増設することにより、供給ビームエネルギーを 181 MeV から 400 MeV に引き上げた。ピーク電流が増加すると、RCS における空間電荷効果に起因したチューンのシフト量が増加し、ビーム強度を制限する可能性がある。エネルギーの増加による、このチューンシフトの抑制を目的としている。ACS 増設後最初のビーム試験は 2013 年 12 月 16 日に開始し、翌年 1 月 17 日に 400 MeV の加速に成功した<sup>[1]</sup>。それ以降、2014 年 6 月末までの半年間にわたり、400 MeV・15 mA のビームを安定的に RCS へ供給した。

2 年目の 2014 年は、ピーク電流を 30 mA から 50 mA へ向上させるため、フロントエンド (イオン源、RFQ) の交換を実施した。フロントエンド交換後、最初のビーム調整試験を 9 月 29 日に開始した。ピーク電流 5 mA で位相スキューによる各加速空洞の位相と振幅を調整後、ピーク電流を 30 mA に調整して利用運転用パラメータを作成し、その後さらに 50 mA に調整して大強度試験を行った。設計ピーク電流である 50 mA の加速に 10 月

14 日に成功した。本発表では、このフロントエンド交換後のビーム調整試験の進捗について報告する。

第二期計画完了後の J-PARC リニアックの構成は、Fig. 1 に示すとおり、RF 駆動型負電荷水素イオン (H<sup>-</sup>) 源、3 MeV Radio Frequency Quadrupole (RFQ)、50 MeV ドリフトチューブリニアック (DTL)、191 MeV 機能分離型 DTL (SDTL)、400 MeV 環結合型 (Annular-ring Coupled Structure, ACS) である<sup>[2]</sup>。RF 周波数は、RFQ から SDTL までが 324 MHz、ACS は 3 倍の 972 MHz である。また、ビーム輸送系が 4 カ所あり、上流からそれぞれ LEBT (イオン源~RFQ)、MEBT1 (RFQ~DTL)、MEBT2 (SDTL~ACS)、L3BT (ACS~RCS) である。Figure 1 の左上に RFQ と DTL 間のビーム輸送系 (MEBT1) の概要を示す。

リニアックでは、DTL、SDTL、ACS の Q 磁石の収束力の決定に、equipartitioning 条件を採用している。equipartitioning 条件は、次式の縦方向と横方向のエネルギーの比 ( $T$ )、

$$T = \frac{\varepsilon_x k_x}{\varepsilon_z k_z} \quad (1)$$

を 1 になるように収束力を決める。ここで  $\varepsilon$  は RMS エミッタンス、 $k$  は波数である。縦方向と横方向の自由エネルギーをバランスさせ、エネルギー交換によるエミッタンス増加を抑制させる。

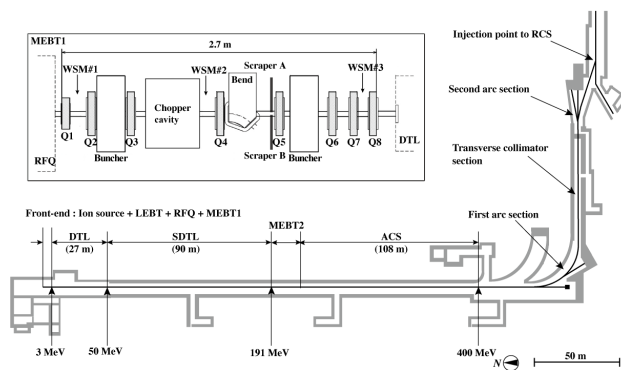


Figure 1: Outline of the J-PARC linac. The top-left figure shows the outline of MEBT1.

\*tmaruta@post.j-parc.jp

## 2. ビーム調整の進捗

フロントエンド交換後初のビーム試験は 2014 年 10 月に実施した。この章では主にこの 10 月のビーム試験で得られた結果のうち、MEBT1 と MEBT2 の調整、および調整後の横方向エミッタンスとビームロスの測定結果について報告する。

### 2.1 MEBT1 調整

新しいフロントエンドはビームラインに設置前に、テストスタンドで長期運転試験を実施し、その際にエミッタンスモニタによる測定を行った<sup>[4]</sup>。しかし加速器トンネルへの移設の際にアライメント等が変わり、出射ビームのプロファイルが異なる可能性がある。したがって、RFQ の出射ビームプロファイルを確認する必要がある。そこで我々は Q スキャン法により RFQ 出射ビームの横方向プロファイルを測定した。Q スキャン法は、Q 磁石の収束力  $k$  と、それに対する RMS ビームサイズを測定し、その相関からビームプロファイルを求める方法である。測定には上流から 3 番目の Q 磁石 (Q3) と、Q3 から 0.62 m 下流のワイヤースキャナー (Figure 1 左上の WSM#2) を使用した。Q3 から WSM のラティスは Q 磁石 + ドリフトであるため、thin lens 近似によるエンベロップ方程式より、 $k$  と  $\sigma_{WSM}$  の関係は、

$$\sigma_{WSM}^2 = \varepsilon [(1 + Lk)^2 \beta - 2(1 + Lk)L\alpha + L^2\gamma] \quad (2)$$

となる。ここで  $L$  は Q3 から WSM の距離 (= 0.62m)、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\varepsilon$  は Q3 における Twiss パラメータ、および RMS エミッタンスである。この式より、原理的には  $x$ 、 $y$  それぞれ 3 つ以上の収束力でビームサイズを測れば、ビームパラメータを導出できる事が分かる。

測定はピーク電流 30 mA と 50 mA について行い、そのうち Fig. 2 に 50 mA における測定結果を示す。横軸は Q3 の収束力、縦軸は RMS ビームサイズである。青点と赤点がそれぞれ  $x$  方向、 $y$  方向の測定結果である。この測定では、一番細いビームサイズを測ることが、精度の良いプロファイルの導出に重要である。そのため  $x \cdot y$  両方とも一番細いビームサイズが測定できるように、Q1、Q2 の収束力を調整した。この測定結果からのビームパラメータの導出のため、我々はビームエンベロップ計算コードである TRACE3D<sup>[5]</sup> でフィッティングした。RFQ 出口の  $\alpha_{x,y}$ 、 $\beta_{x,y}$ 、 $\varepsilon_{x,y}$  の 6 パラメータを変数とし、測定結果を最も再現するパラメータを求めた。また縦方向のパラメータについては、LINACSRfqSIM による RFQ シミュレーションの値をそのまま採用している。Figure 2 の実線が TRACE3D によるフィッティング結果である。

このフィッティングにより求めた Twiss パラメータとエミッタンスを Table 1 に示す。また位相空間上の楕円を、Fig. 2 下に示す。左が  $x - x'$ 、右が  $y - y'$  である。比較のため、LINACSRfqSIM<sup>[3]</sup> による RFQ シミュレーションの結果も示した。シミュレーションでは、 $x$  方向と  $y$  方向のプロファイルがほぼ軸対称であるのに対し、測定結果はやや非対称で、 $y$  方向が  $x$  方向と比べて傾きが急になっている。また 50 mA のエミッタンスは、30 mA と比べ約 10% 大きい。

オプティクス計算には、3D PIC コードである IMPACT<sup>[6]</sup> を用いた。この区間のビームエネルギーが 3

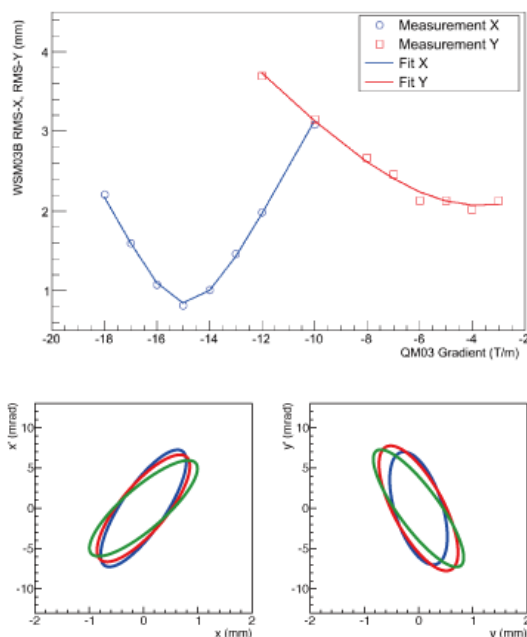


Figure 2: (Top) Measurement result of a Q-scan at 50 mA by Q3 and WSM#2 shown in top-left of Fig. 1. (Bottom) Comparison of measured horizontal ellipses (left) and vertical one (right) at the RFQ exit with the RFQ simulation by LINACSRfqSIM (green). We obtain the ellipses at peak current of 30 mA (blue) and 50 mA (red).

Table 1: Summary of Transverse Beam Profile at the MEBT1 Entrance. Here, the  $\varepsilon_{x,y}$  Show the Normalized RMS Emittance.

	Simulation 50 mA	Measurement 30 mA	Measurement 50 mA
$\alpha_x$	-1.49	-1.32	-1.27
$\alpha_y$	1.54	0.59	0.99
$\beta_x$ (mm/mrad)	0.300	0.180	0.208
$\beta_y$ (mm/mrad)	0.212	0.088	0.132
$\varepsilon_x$ ( $\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ )	0.264	0.277	0.281
$\varepsilon_y$ ( $\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ )	0.264	0.256	0.321

MeV と低くために空間電荷効果が強く、20%以上のエミッタンス増大が予想される。したがってこの影響を考慮したオプティクス決定が不可欠である。下流部の Q 磁石 4 台 (Q5~Q8) およびバンチャー空洞 2 台の収束力を変数とし、DTL 入射部のミスマッチが最小になるように収束力を決定した。

IMPACT により決定したオプティクスの RMS エンベロップと、WSM で測定した RMS ビームサイズを Fig. 3 に示す。MEBT1 全域で良く一致しているが、最下流の WSM では Y 方向のビームサイズに若干違っているのが分かる。このことは、実際に DTL への入射ビームが、シミュレーションと異なり、それがミスマッチを起こしている可能性がある。今後、最下流の WSM を使った Q スキャン等により、DTL により近い位置でビームプロファイルを測定し、その結果よりオプティクスを求

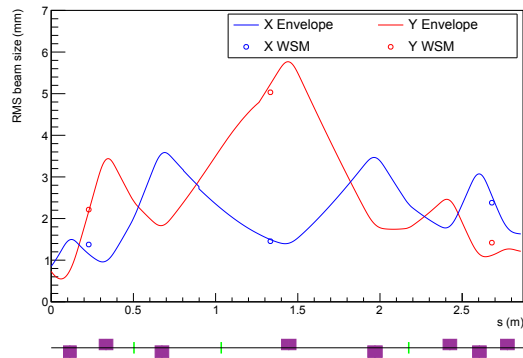


Figure 3: Comparison of reconstructed RMS beam envelopes by IMPACT with measured RMS beam size by 3 WSMs.

めることで、DTLによりマッチしたビームへの成形を目指す。また縦方向はモニターが無い場合、シミュレーションに頼らざるをえない状況であるため、縦方向モニターの設置等を現在検討中である。

## 2.2 MEBT2 調整および縦方向の測定結果

SDTLとACS間のMEBT2では、横・縦方向の両方のビームプロファイルを、ACSのアクセプタンスに最適化することが求められる。特にRF周波数が3倍になるため、ビームバンチが縦方向バケツから溢れてロスしないように、注意しなければならない。Figure 4にSDTL最下流部からACS上流部の概要を示す。横マッチングのため、WSM4台をACS上流部に設置している。全てのWSMを周期的なラティス設置し、全WSMのRMSビームサイズが等しくなるように、MEBT2下流部4台のQ磁石の収束力を調整している。一方、縦方向の測定のため、昨年の夏メンテナンス期間中にバンチシェープモニター (BSM) 1台をMEBT2に設置した。本来は、ACS上流部に3台設置する予定だった。しかし測定中に真空が極端に悪化するトラブルが発生し、真空系の改善が不可欠だったため、設置が延期されていた。1年にわたるモニターグループの多大な努力により、2014年夏に1台をMEBT2下流部に設置できたものである [7]。

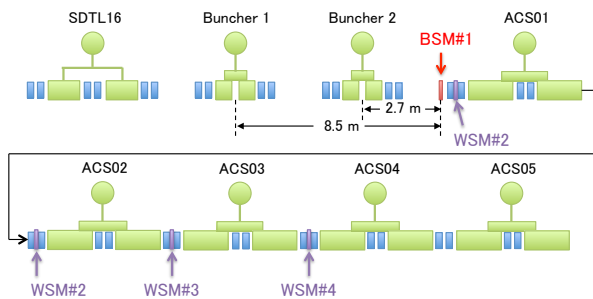


Figure 4: Outline of SDTL16 to ACS05. We place 4 WSMs and 1 BSM for the transverse and longitudinal beam profile measurements. For the shaping of ACS injection beam, we change the focusing force of 2 bunchers and last 4 quadrupole magnets in MEBT2.

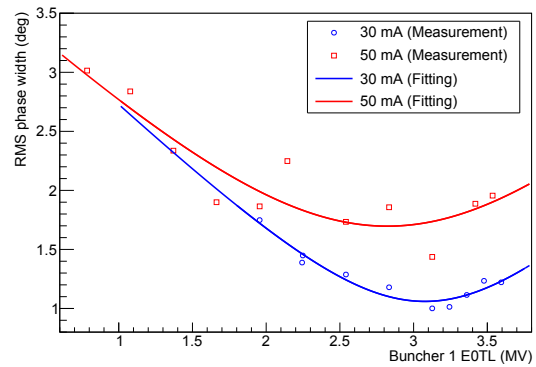


Figure 5: Buncher 1 tank level scan result at peak current of 30 mA (blue) and 50 mA (red).

1台のBSMより縦方向ビームプロファイルの導出に、MEBT1のQスキャンと同様の手法を用いた。つまりBSMから8.5 m上流に設置されたバンチャー1の収束力を変えてビームサイズを測定し、その相関をフィッティングすることでTwissパラメータとエミッタンスを求めた。測定結果をFig. 5に示す。30 mA (青)と50 mA (赤)で測定し、両方とも精度の良いプロファイル導出に重要な一番細いビームサイズを測る事ができた。この結果をフィッティングして得られたMEBT2入り口のビームパラメータをTable 2に示す。RFQシミュレーションによるRFQ出口のエミッタンスが、 $134.4 \pi \cdot \text{deg} \cdot \text{keV}$ である。30 mAではエミッタンスの増加が10%程度に抑えられているのに対し、50 mAでは60%以上増加していることが判明した。

Table 2: Measured Longitudinal Beam Parameters at the MEBT2 Entrance by Buncher 1 Amplitude Scan

	Measurement	
	30 mA	50 mA
$\alpha_x$	0.138	-0.622
$\beta_x$ (deg/keV)	0.0182	0.0183
$\varepsilon_x$ ( $\pi \cdot \text{deg} \cdot \text{keV}$ )	149.9	224.0

## 2.3 横方向エミッタンスおよびビームロス

Figure 6に全マッチングセクションで測定した横方向正規化RMSエミッタンスを示す。青色と赤色がそれぞれ30 mAと50 mAである。比較のため、フロントエンド交換前の25 mAにおけるエミッタンスを緑色で示した。新しいフロントエンドでは、同じ30 mAでも横方向エミッタンスは交換前から約40%大きくなっている。しかしながらSDTL入り口におけるエミッタンスは、交換前後でほぼ同じである。この事は今回の30 mAのMEBT1の調整精度が、フロントエンド交換前よりも向上しており、DTL内のエミッタンス増大が抑制されている事を示唆している。一方50 mAのエミッタンスは、SDTL以降で $\sim 0.43 \pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ であり、MEBT1からの増加が約40%と大きい。50 mAは、2.2の縦方向プロファイル測定でもエミッタンスが増加しており、MEBT1の調整が不十分であることが推測される。した



がって 50 mA では、MEBT1 調整の精度向上を今後も行う必要がある。

SDTL より下流のエミッタンスは、計算精度に起因すると考えられるふらつきはあるものの、いずれのピーク電流でもほぼ一定である。マッチングがエミッタンス増加を起こさない精度を達成していることが分かる。

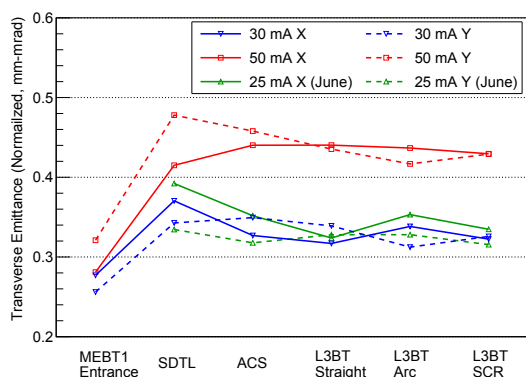


Figure 6: Summary of measured transverse emittance in each matching section, the emittances of 30 mA (blue) and 50 mA (red) are measured after the front-end replacement. The emittance of 25 mA before the replacement is also plotted for a comparison.

ビーム運転停止直後の残留放射線サーベイでは、特に ACS で全域にわたり高い残留放射線を検出している。特に ACS 下流部の真空チェンバー表面で mSv/h レベルであり、このロスの原因究明と対応が今後のビーム強度向上にとって大きな課題となっている。残留が高い原因のひとつは、ACS セクションに設置されるビーム電流モニタ (Current Transformer, CT) の内径が加速空洞よりも狭く、ロス粒子が集中的に照射されていることである。これについては、2015 年夏のメンテナンス期間中に内径の大きな CT への交換を予定している。

ロスの原因は、マイクロバンチ内の H<sup>-</sup> 同士の散乱 (Intra beam stripping, IBSt<sup>[8]</sup>) の可能性が指摘されていたが、実験的に確認されていなかった。ACS の RF 周波数は、上流の 3 倍のため加速空洞における縦方向の収束力が上流と比べて増加する。1 章で述べたように、我々は equipartitioning 条件を採用している。この条件を満たすために、増加した縦方向の収束力に合わせ、横方向の収束力も高い。そのため ACS では、実空間のビームサイズが上流に比べて約 40% 細くなっている。IBSt はビームバンチ内のマイクロ粒子の密度に依存するため、ACS では上流よりも有意に増加すると考えられる。さらに今後ピーク電流の増加に従い、IBSt 起因のロスがピーク電流の 2 乗に比例して増加すると予想される。

IBSt の寄与を実験的に確認するため、我々は ACS セクションで  $T$  が異なる 3 種類のオプティクス ( $T = 0.7$ , 1.0 および 1.3) を用意し、それぞれのビームオプティクスにおけるビームロスを測定した。 $T$  を変えることは、 $Q$  磁石の収束力を系統的に変えていることに等しく、つまり ACS セクション全域のビームサイズが変わる。測定では ACS に各オプティクスを適用後に入射ビームの縦・横マッチングを行い、その後 ACS セクションの全ビームロスの積分信号を記録した。一方 IBSt の口

量を散乱断面積から定量的に見積もるため、WSM と BSM の測定結果より ACS のビームエンベロープを再構成し、IBSt 起因のロスを計算した。その計算から、MEBT2 入り口からの IBSt 起因のロス量を積分した結果を Fig. 7 に示す。ACS セクションではビームサイズがほぼ一定のため、ロス量の積分もほぼ一定の割合で増加する。 $T = 1.0$  から  $T = 1.3$  (0.7) に変更すると、ビームロスが +23% (-23%) になるのが分かる。

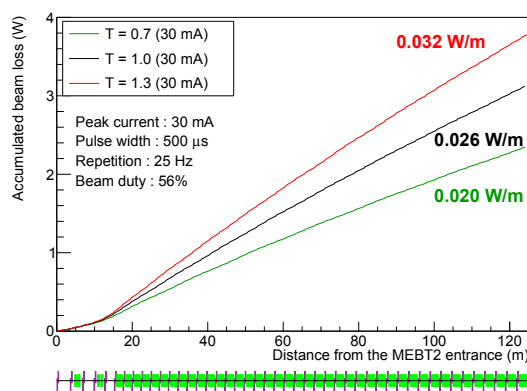


Figure 7: Calculated IBSt beam loss with different  $T$  ratio; 0.7 (green), 1.0 (black) and 1.3 (red). The loss is integrated from the entrance of MEBT2.

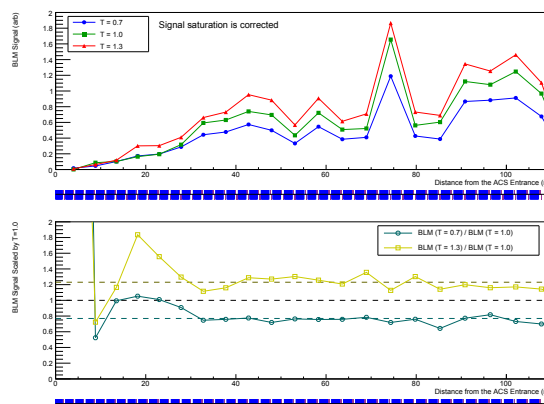


Figure 8: (Top) Measured beam loss signal in the ACS section with different  $T$  ratio of 0.7 (blue), 1.0 (green) and 1.3 (red). (Bottom) The beam loss signal normalized by the signal of  $T=1.0$ . The colored lines are measurement and dashed lines are calculated ratio from Fig. 7.

各  $T$  における ACS セクションのビームロスモニタの信号を Fig. 8 の上に示す。 $T$  が大きくなるにつれて、系統的にロス信号が高くなるのが分かる。この測定結果より、 $T = 0.7$  と 1.3 のロスモニタ信号を  $T = 1.0$  で規格化した結果が Fig. 8 の下である。黄色と青緑色の実線が、それぞれ  $T = 1.3$  を  $T = 1.0$  で規格化、 $T = 0.7$  を  $T = 1.0$  で規格化した結果である。35 m より下流でほぼ一定になっていることが分かる。一方、Fig. 8 で示した計算結果から同様にロスの比を計算した結果を破線で示している。35 m より下流で、測定結果と計算結果が良く一致している。この結果より、ACS セクショ

PASJ2015 WEP014

ンのビームロスには IBSt 起因のロスが支配的であると考  
えられる。J-PARC リニアックにおいて、IBSt の影響を  
調べた初めての結果である。現在このロスの低減方法に  
ついて検討中である。

### 3. まとめ

フロントエンド交換後の初となるビーム調整では、  
2014 年 10 月 14 日に設計ピーク電流である 50 mA の加  
速に成功した。これは設計ビーム強度の運転に向けて、  
重要なマイルストーンである。しかしながら、50 mA で  
は 30 mA と比較して縦・横方向のエミッタンスが顕著  
に増加しており、MEBT1 の調整精度が不十分であると  
考えられる。

ACS のビームロスについて、IBSt の検証実験を行っ  
た。ピーク電流 30 mA で ACS に 3 種類のオプティクス  
を適用し、ビームロスモニタの信号を測定。それを散乱  
断面積とプロファイル測定から再構成したビームエンベ  
ロープより計算したロス量と比較した。その結果、両者  
がよく一致したことから、IBSt が支配的であることを  
明らかにした。

今後も継続的なビーム試験によりビーム品質の向上  
に取り組む、設計ビーム強度における安定した運転の達  
成を目指す。

### 参考文献

- [1] T. Maruta, et al., "Progress of Beam Commissioning at J-  
PARC Linac after 400 MeV Upgrade", in proceedings of  
the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of  
Japan, Aomori, Japan, August 9 - 11, 2014, pp.955 - 958.
- [2] Y. Yamazaki eds., "Technical design report of J-PARC",  
KEK Report 2002-13, JAERI-Tech 2003- 44.
- [3] R.A. Jameson, *LINACS Design and Simulation Framework*,  
Tech. Rep. KEK/J-PARC Seminar 6 March 2012 (KEK/J-  
PARC, 2012).
- [4] Y. Kondo, et al., Phys. Rev. ST Accel. and Beams **16**, 040102  
(2013).
- [5] K.R. Crandall, "TRACE: An Interactive Beam Dynamics  
Code", in *Linear Accelerator and Beam Optics Codes*", ed.  
Charles R. Eiminhez, AIP Conference Procs. **177** (1988) 29.
- [6] J. Qiang, R.D. Ryne, S. Habib and V. Decyk: J. Comp. Phys.  
**163** (2000) 434.
- [7] T. Miyao, et al., "Improvement of the Vacuum Pressure of the  
Bunch Shape Monitor at J-PARC Linac" in these proceed-  
ings.
- [8] V. Lebedev, et al., "Intrabeam Stripping in H<sup>-</sup> Linacs",  
in proceedings of Linear Accelerator Conference  
(LINAC2010), Tsukuba, Japan, September 12 - 17,  
2010. pp. 929 - 931.