

# KEKにおけるJ-PARCリニアックMEBTのビームコミッショニング(I)

池上 雅紀<sup>1,A)</sup>、加藤 隆夫<sup>A)</sup>、五十嵐 前衛<sup>A)</sup>、山口 誠哉<sup>A)</sup>、上野 彰<sup>A)</sup>、近藤 恭弘<sup>B)</sup>、池上 清<sup>A)</sup>  
岡田 雅之<sup>A)</sup>、久保田 親<sup>A)</sup>、吉野 一男<sup>A)</sup>、濁川 和幸<sup>A)</sup>、門倉 英一<sup>A)</sup>、川村 真人<sup>A)</sup>、福井 祐治<sup>A)</sup>  
小林 鉄也<sup>B)</sup>、上窪田 紀彦<sup>A)</sup>、内藤 富士雄<sup>A)</sup>、田中 宏和<sup>A)</sup>、野口 修一<sup>A)</sup>、高崎 榮一<sup>A)</sup>  
福田 茂樹<sup>A)</sup>、千葉 順成<sup>A)</sup>、穴見 昌三<sup>A)</sup>、新井 重昭<sup>A)</sup>、小林 仁<sup>A)</sup>、伊藤 崇<sup>B)</sup>  
長谷川 和男<sup>B)</sup>、吉川 博<sup>B)</sup>、木代 純逸<sup>B)</sup>、山崎 良成<sup>B)</sup>  
Sheng Wang<sup>C)</sup>、Shinian Fu<sup>C)</sup>、Robert Ryne<sup>D)</sup>、Ji Qiang<sup>D)</sup>

<sup>A)</sup> 高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設

〒305-0032 茨城県つくば市大穂1-1

<sup>B)</sup> 日本原子力研究所 大強度陽子加速器施設開発センター

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方2-4

<sup>C)</sup> Institute of High Energy Physics, 19 Yu Quan Lu, Beijing 100039, China

<sup>D)</sup> Lawrence Berkeley National Laboratory, 1 Cyclotron Road, Berkeley, CA 94720, USA

## 概要

KEKにおいて、J-PARCリニアックの上流部分の建設およびビームテストがすでに始まっている。これは最終的なJ-PARC加速器施設の建設地である原研東海研究所への移設に先立って、リニアック上流部のビームテストを行い、リニアックのシステムとしての完成度を早期に高めておく目的で行われているものである。J-PARCリニアックのうち、3MeVRFQとMEBTはすでに設置作業が完了し、ビームテストが行われた。本論文では、このビームテストの結果と、シミュレーションとの比較について発表する。

## 1. はじめに

J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) の加速器施設は、400MeVリニアック、3GeV RCS (Rapid Cycling Synchrotron)、50GeVシンクロトロンからなる[1,2]。そのうちリニアックは、50keV負水素イオン源、3MeV高周波四重極リニアック(RFQ)、50MeVドリフトチューブリニアック(DTL)、190MeV分離型ドリフトチューブリニアック(SDTL)および400MeV環結合型結合空洞リニアック(ACS)からなる。RFQ、DTL、SDTLの周波数は324MHz、ACSの周波数は972MHzである。J-PARCリニアックの上流部分の建設およびビームテストは、最終的なJ-PARC加速器施設の建設地である原研東海研究所への移設に先立って、リニアックのシステムとしての完成度を早期に高めておくことを目的に、KEKですでに開始されている。3MeVRFQおよびそれに続くMEBT (Medium Energy Beam Transport) はすでにKEKの加速器トンネル内に設置され、2002年4月から7月、および2003年1月から2月の2つの期間に渡ってビームテストが行われた。この2つの期間のビームテストの間には、プリチョッパー空洞を設置するための若干の変更が

イオン源とRFQをつなぐLEBT (Low Energy Beam Transport) に施されている。これらのビームテストは、MEBTでとくに重要な役割を担うコンポーネントの性能確認を主な目的として行われた。MEBTは、主に次の2つの役割をもつ：1) DTLに対して横方向および縦方向のマッチングをとる。2) RCSへの入射時のロスを軽減するため、RCSへの入射サイクルと同じ周期でビームをチョッピングする。図1(a)に、MEBTのレイアウトを模式的に示した。MEBTは、横方向のマッチングをとるための8台の四重極電磁石と、縦方向のマッチングをとるための2台の324MHzバンチャー空洞をもつ。また、チョッピングを行うための2台の324MHz高周波チョッパー空洞と、チョッパー空洞で横方向に蹴り出されたビームを取り除くための1台のスクレーパーをもつ。今回の実験では様々な開発がなされたが、本論文では、特にエミッタンス測定の結果とそのシミュレーションとの比較について発表する。チョッパー空洞のビーム試験および偏向電磁石を用いた測定結果については、別の論文で詳しく発表する[3,4]。

## 2. 実験条件

ビーム実験においては、MEBTの出口に仮設のビーム診断系を設置し、これを用いてビームの横方向エミッタンスの測定を行った。このビーム診断系は、DTLの設置時には撤去するものである。このビーム診断系は、ダブルスリット型の横方向エミッタンスモニターを備えており、そのスリットは幅0.1mm、スリット間隔は205mmである。上流側スリットは、MEBT下流端からおよそ50cmの位置に設置されている。

実際の運転時には、DTLに対するマッチングをとるため、MEBT出口でビームを強く収束する必要がある。しかし、今回の実験においては、下流でのエミッタンス測定を可能にするため、MEBTの最後の2つの

<sup>1</sup> E-mail: masanori.ikegami@kek.jp

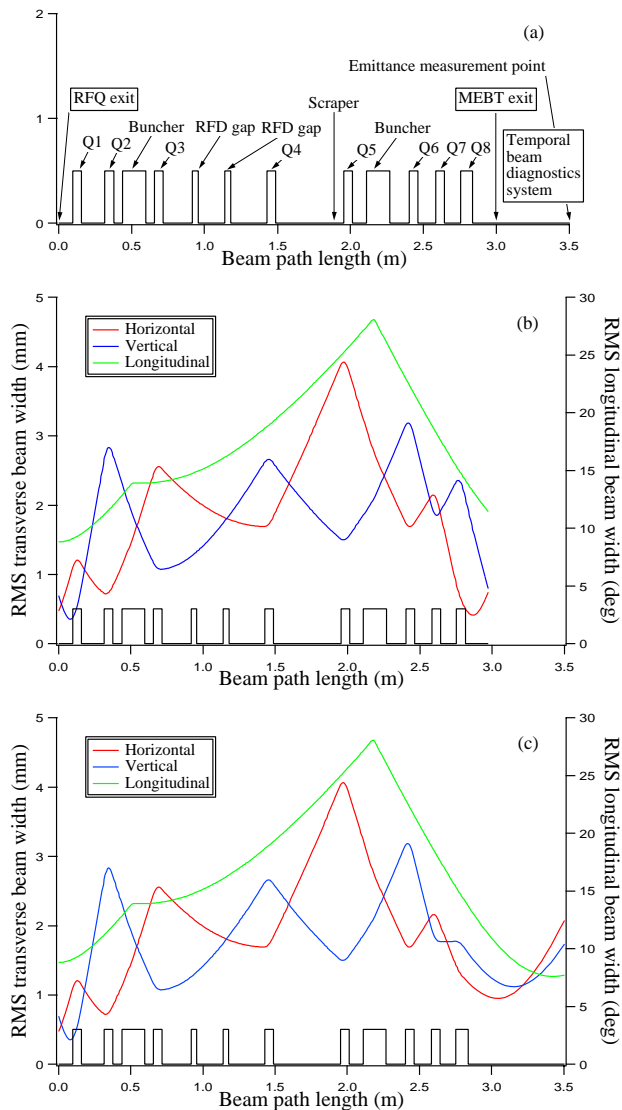


図 1 : MEBTのレイアウトとMEBTに沿ったビームエンベロープの例。(a)MEBTのレイアウト。(b)DTLにマッチングをとった場合のビームエンベロープの例。(c)実験で用いた設定でのビームエンベロープの例。

四重極電磁石の強さを弱めて測定を行った。図 1 (b) は、DTL に対するマッチングをとった場合のビームのエンベロープの例であり、図 1 (c) は、実験において用いられた四重極電磁石の設定でのビームのエンベロープの例である。図 1 (c) では、図 1 (b) に比べて、最後の 2 つの四重極電磁石の強さだけを弱めている。図 1 (c) の下流端は、仮設ビーム診断系のエミッタンスモニターの上流側スリットの位置に対応する。図 1 (c) は、次節で述べる測定 1 の場合の四重極電磁石およびバンチャー空洞の設定を想定している。

MEBT の透過効率は、MEBT に備えられた 3 台の CT (Current Transformer) によって測定された。最上流の CT (CT1) は最上流の四重極電磁石 (Q1) 出口に、

2 番目の CT (CT2) はチョッパー空洞の出口に、最下流の CT (CT3) は 7 番目の四重極電磁石 (Q7) の出口に設置されている。MEBT は、その他に、3 台の FCT (Fast Current Transformer)、8 台の BPM (Beam Position Monitor)、4 台の WS (Wire Scanner) を備えている。WS は、直径  $7\mu\text{m}$  のカーボンファイバーを、水平方向、鉛直方向、斜め  $45^\circ$  方向の 3 本もったものである。詳しいビームモニターの様、配置については参考文献 [2] を参照すること。

本実験では、イオン源において LaB6 フィラメントを用い、セシウムを使わずに、イオン源出口でピーク電流  $33\text{mA}$ 、RFQ 出口で  $29\text{mA}$  を達成した。実験の目的に応じて、 $0.025\%$  から  $0.25\%$  までデューティーを変化させて実験を行った。エミッタンス測定においては、測定時間を短縮するため、高い繰り返し ( $12.5\text{Hz}$  または  $25\text{Hz}$ ) を用いた。その場合、1 平面の測定時間は約 15 分であった。

### 3 . 実験結果

測定された正規化 rms エミッタンスを表 1 に示す。測定 1 および 2 は、MEBT 出口に設置された仮設ビーム診断系で測定されたものである。測定 1 は、2003 年の 1 月から 2 月にかけての実験で、測定 2 は、2002 年の 4 月から 7 月にかけての実験で得られたものである。測定 3 は、MEBT 設置前に、同じ仮設ビーム診断系を RFQ 直後に設置し、測定した結果である。イオン源の開発がビームテストと並行して進められているため、測定 3 を行った時期にはまだイオン源の最大ピーク電流が  $10\text{mA}$  であった。表 1 に示すビーム電流は、CT1 で測定したものである。ビーム電流が増加するにしたがって、ある程度のエミッタンス増大が生じていると思われるが、測定 1 で得られた正規化 rms エミッタンスは、当初予想されていたものと大きな隔たりはない。

表 2 は、測定 1, 2 において、CT1 ~ CT3 で測定したビーム電流をまとめたものである。透過効率を CT1 と CT3 の読み値の比と定義すると、測定 1 では  $99.3\%$  の透過効率に到達していることになる。

図 2 は、測定 1 で得られた位相平面上での粒子分布を示したものである。図 2 で、x、y はそれぞれ水

表 1 : 測定された正規化 rms エミッタンス

測定	1	2	3
測定場所	MEBT	MEBT	RFQ
ピーク電流 (mA)	28.7	24.6	10.0
水平 ( $\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ )	0.252	0.227	0.173
鉛直 ( $\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ )	0.214	0.220	0.194

表 2 : MEBT の透過効率

測定	CT1	CT2	CT3
1	28.7 mA	28.5 mA	28.5 mA
2	24.6 mA	23.9 mA	23.7 mA

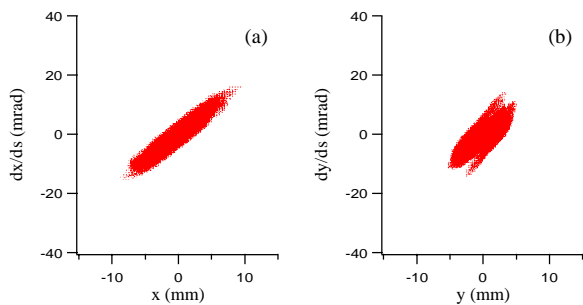


図2：測定1で得られた位相平面上での粒子分布。(a)水平方向。(b)鉛直方向。

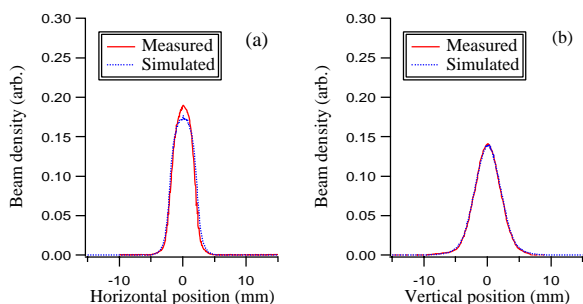


図3：WS3で測定したビームプロファイル。(a)水平方向。(b)鉛直方向。IMPACTを用いて得られたシミュレーション結果もあわせて表示されている。

水平方向、鉛直方向の粒子の座標を表し、sはデザイン軌道に沿った距離を表す。測定された粒子密度は、シミュレーションとの比較を容易にするため、10万個の点(粒子)で表されている。

仮設ビーム診断系は、DTL設置時に撤去する必要があるため、実際の運転時には、WSが重要な役割を担うことになる。図3は、(4番目の四重極電磁石の81mm上流に位置する)3番目のWS(W3)におけるビームプロファイル測定の結果を示したものである。この測定においては、四重極電磁石の設定は測定1と同じにし、バンチャー空洞だけをオフにした。ワイヤーの熱負荷を軽減するため、パルス幅は50μsecとし、繰り返し5Hzで測定を行った。

#### 4. シミュレーションとの比較

実験結果と粒子シミュレーションの結果がどの程度一致するかの予備的なテストとして、3次元のParticle-in-cell法を用いた粒子シミュレーションコードであるIMPACT[5]を用いたシミュレーションを行った。このシミュレーションでは、RFQ出口の分布を6次元のGauss分布と仮定した。RFQ出口の横方向エミッタンスは今回のMEBT実験の結果を再現するように定め、RFQ出口の縦方向エミッタンスはPARMTEQによるシミュレーションで得られた値を用いた。

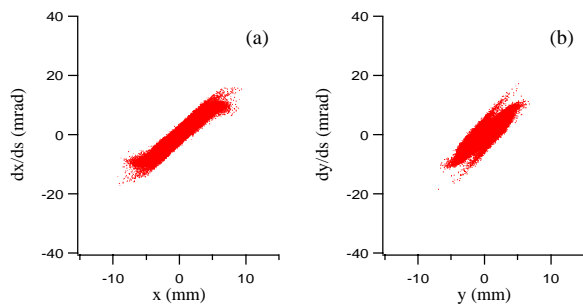


図4：シミュレーションで得られた位相平面上での粒子分布。(a)水平方向。(b)鉛直方向。

図4は、シミュレーションで得られたエミッタンス測定位置における位相平面上での粒子分布である。このシミュレーションにおいては、測定1と同じ四重極磁石およびバンチャー空洞の設定値を用い、シミュレーション粒子数を100万個、メッシュ数は64×64×64、積分ステップ数はβλあたり10とした。ここで、βは粒子速度の光速に対する比、λは高周波の波長である。仮定したRFQ出口での正規化rmsエミッタンスは、水平方向が0.234πmm・mrad、鉛直方向が0.193πmm・mrad、縦方向が0.0822πMeV・degである。

図4では、100万個のシミュレーション粒子のうち、10万個を表示している。図4と図2を比較すると、テール部分の形状が若干異なるものの、定性的には実験を比較的良好に再現できていると思われる。同様のシミュレーションによって得られたWS3の位置でのビームプロファイルを図3に示した。シミュレーションで得られた水平方向のビーム幅がわずかに実験よりも大きい、テール部分まで含めた形状は実験を非常によく再現しているのがわかる。これらのシミュレーション結果は、RFQの出口ですでにある程度のテールが生じていることを示唆している。現在、より現実的なRFQ出口での分布を得る努力を続けており、それにより、実験とシミュレーションの一致の度合いはさらに向上すると期待される。

#### 参考文献

- [1] Y. Yamazaki, "The JAERI-KEK Joint Project (the J-PARC Project) for the High Intensity Proton Accelerator", Procs. of PAC 2003, in print.
- [2] Y. Yamazaki (eds), "Accelerator Technical Design Report for J-PARC", KEK-Report 2002-13; JAERI-Tech 2003-044.
- [3] 加藤隆夫他, "J-PARC陽子リニアックのRFチョッパによるビームテスト", 本予稿集.
- [4] S. Wang et al., "Beam Commissioning of the J-PARC Linac Medium Energy Beam Transport at KEK II", in these proceedings.
- [5] Ji Qiang, et al., "An Object Oriented Parallel Particle-In-Cell Code for Beam Dynamics Simulation in Linear Accelerators", J. Compt. Phys., **163**, p434, 2000.