

J-PARC 30mA RFQのビーム実験結果とシミュレーションの比較

近藤 恭弘^{1A)}、上野 彰^{B)}、池上 雅紀^{B)}、池上 清^{B)}

A) 日本原子力研究所 東海研究所 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白根2-4

B) 高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設
〒305-0801 茨城県つくば市大穂1-1

概要

J-PARCリニアックのMEBTまでのコミッショニングがKEKにおいて行われた^[1,2,3,4]。J-PARC用30mA RFQについて、新旧2つのバージョンのPARMTEQM^[5]とTOUTATIS^[6]を用いてシミュレーションを行った。TOUTATISによるシミュレーションのほうが、テール部分が若干大きくなる結果が得られた。また、得られた粒子分布を用いてMEBTのシミュレーションをPARMILA^[7]を用いて行ない、実験データとの比較を行った。シミュレーションにより実験結果を合理的な範囲内で再現することが出来た。

1. はじめに

J-PARCリニアックでは、コミッショニング開始当初、JHF用に開発されたピーク電流値30mAのRFQを用いる。J-PARCリニアックのうち、MEBTまでのコミッショニングが、2003年2月までにKEKにおいて行われた。コミッショニングの詳細は、他の論文で述べられる^[1,2,3]。30mA RFQの設計時には、ビームシミュレーションはPARMTEQMを用いて行なった^[8]が、その後、PARMTEQMがバージョンアップされたり、新しいコードであるTOUTATISが開発されたりした。そのため、これらのコード間の比較、また実験データとの比較において、設計の妥当性を確認する必要がある。本論文でのシミュレーションは[1]における測定1のデータを再現することを目標に行なった。

2. RFQ入り口での粒子分布

RFQ入り口での分布は、 $x-x'$ 、 $y-y'$ に関してはガウス分布(4σ でカットオフ)、エネルギーは50keVで広がり無し、位相は一様分布と仮定した。ガウス分布の幅は、LEBTのエミッタンスモニターでの測定を基に決定した(図1)。LEBTのエミッタンスモニターは、2つのソレノイドマグネットの間にあるため(測定器の位置に関しては[4]参照)、測定にはH以外の粒子も含まれてしまう。ここでは、実験データに見られるテールの部分は、バックグラウンドとみなした。RFQのシミュレーションに用いた入射ビームのパラメータを表1にまとめる。ビーム電流値は、LEBTでの実測値である。

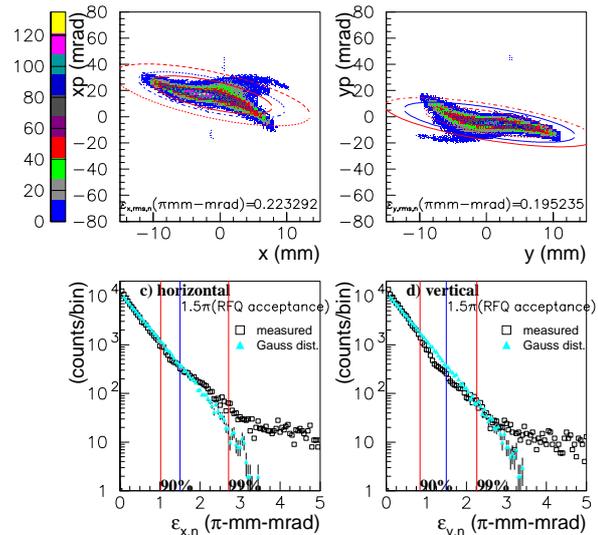


図1：LEBTのエミッタンス測定結果。スキャッタープロットa) $x-x'$ b) $y-y'$ 。楕円は内側から、90%、 1.5π (RFQの設計アクセプタンス)、99%。エミッタンスを横軸にした粒子分布c) $x-x'$ d) $y-y'$ 。四角が実験結果、三角がシミュレーションで用いた分布である。

表1：RFQシミュレーションに用いた入射ビームパラメータ

Input parameters	value
Beam current	32 mA
Number of particles	100000
α_t	2.23
β_t	0.112 mm/mrad
ϵ_t (rms, normalized)	$0.217 \pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$
Distribution $x-x'$, $y-y'$	Gaussian (truncated at 4σ)
phase	Uniform
energy	50keV, no spread

3. RFQ出口でのシミュレーション結果

RFQのシミュレーションには、PARMTEQM^[5]とTOUTATIS^[6]を用いた。PARMTEQMは、2001年10月30日のバージョン以降、粒子がヴェインにあたって失われる際、詳細なヴェイン形状を考慮に入れるようになったため、透過率などの結果が以前のバージョンと異なる。そのため、両バージョン

¹ E-mail: kondo@linac.tokai.jaeri.go.jp

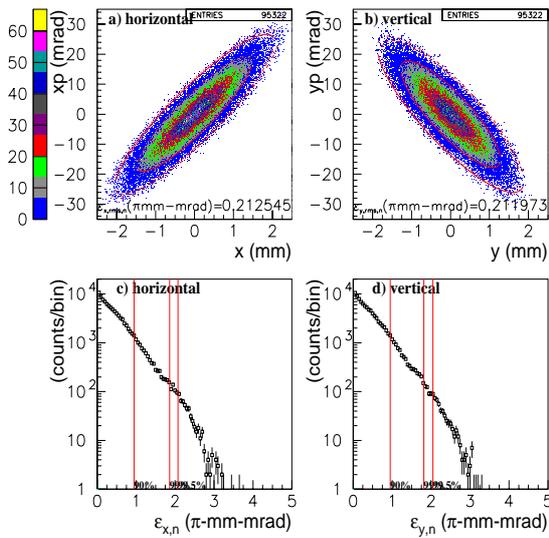


図 2：新PARMTEQMによる、RFQ出口での粒子分布。

ン間の比較をした。

2章の入射ビームを用いた場合の、RFQ出口でのエミッタンス、twiss parameterを、表2に示す。

表 2：RFQ出口でのシミュレーション結果。PQMはPARMTEQMを表す。

parameters	PQM old	PQM new	TOUT ATIS
Transmission(%)	89.8	95.3	94.5
α_x	-2.11	-2.11	-2.09
$\beta_x(\text{mm/mrad.})$	0.181	0.180	0.179
$\epsilon_x(\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad.}, \text{rms}, n)$	0.192	0.213	0.219
$\epsilon_x(\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad.}, 99.5\%, n)$	1.57	2.08	2.33
α_y	1.64	1.63	1.60
$\beta_y(\text{mm/mrad.})$	0.140	0.138	0.136
$\epsilon_y(\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad.}, \text{rms}, n)$	0.192	0.212	0.217
$\epsilon_y(\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad.}, 99.5\%, n)$	1.58	2.05	2.33
α_z	-0.128	-0.123	0.0755
$\beta_z(\text{deg./MeV})$	745	751	668
$\epsilon_z(\pi \cdot \text{MeV} \cdot \text{deg.}, \text{rms})$	0.0898	0.0914	0.0957

新しいPARMTEQMは、古いものに比べ透過率が良くなっており、そのぶんエミッタンスが大きくなっている。また、TOUTATISはPARMTEQMに比べ、透過率は低いが99.5%エミッタンスは大きくなっている。(rmsエミッタンスはあまり変わらない。)図2、3に新しいPARMTEQMとTOUTATISのRFQ出口での粒子分布を示す。

また、ヴェイン間電圧を変えたときの透過率を、実験結果とともに、図4に示す。実験結果の塗り丸は、[1]の測定2の時に相当し、塗り四角は、その後、LEBTにプリチョッパー空洞をインストールした後に測定したデータである。透過率が下がっているのは、このためと考えている。現状の32mA

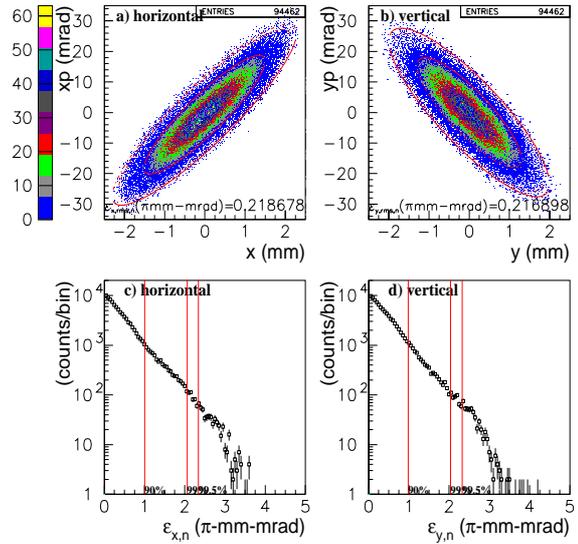


図 3：TOUTATISによる、RFQ出口での粒子分布。

入射での透過率は（電圧依存はまだ測定していないが）89%であり、若干の改善がみられている。シミュレーションは、2章の入射粒子を用いたものである。この図では、TOUTATISの結果が実験結果に最も近いが、PARMTEQMとの間に決定的な差異があるとは言えない。

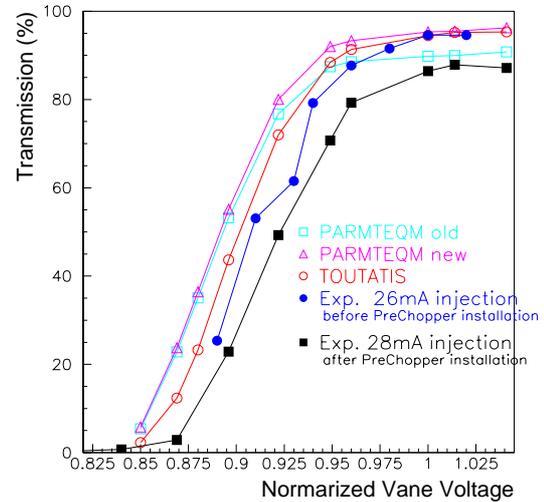


図 4：透過率の測定結果とシミュレーションとの比較。

4. MEBT出口での実験結果との比較

3章で得られたRFQ出口での粒子分布を用いてMEBT出口での実験データと比較する。MEBTのシミュレーションにはPARMILAを用い、スペースチャージは2次元で計算を行った。ただし、Q-マグネットの磁場は、[4]に示されるフリッジングフィールドを考慮に入れた。PARMTEQMとTOUTATISによるRFQ出口での粒子分布を用いた時の結果を実験結果とともに表3に示す。実験結果は[1]の測定1のものである。

PARMTEQMとTOUTATISで、99.5%エミッタンスにおいて差異が認められるが、エミッタンスモニターの微小電流測定に下限があるため、99.5%エミッタンスは実際より小さく測定されているはずであり、どちらが妥当かは現状では決定出来ない。図5、6、7にそれぞれの場合の粒子分布を示す。

表3：MEBT出口での結果

parameters	Exp. data	PQM new	TOUT ATIS
α_x	-3.13	-3.70	-3.67
β_x (mm/mrad.)	1.79	2.70	2.71
ϵ_x ($\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad.}$, rms, n)	0.252	0.244	0.259
ϵ_x ($\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad.}$, 99.5%, n)	2.94	3.23	3.63
α_y	-1.72	1.40	-1.31
β_y (mm/mrad.)	1.00	1.20	1.14
ϵ_y ($\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad.}$, rms, n)	0.214	0.234	0.250
ϵ_y ($\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad.}$, 99.5%, n)	3.44	3.15	4.01

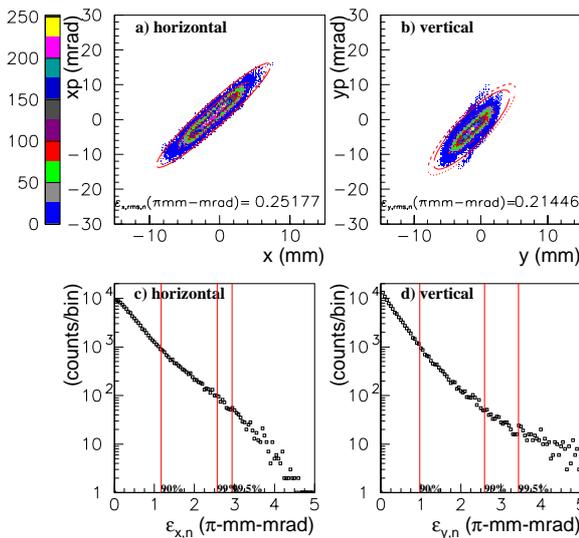


図5：MEBT出口での粒子分布（実験データ）。

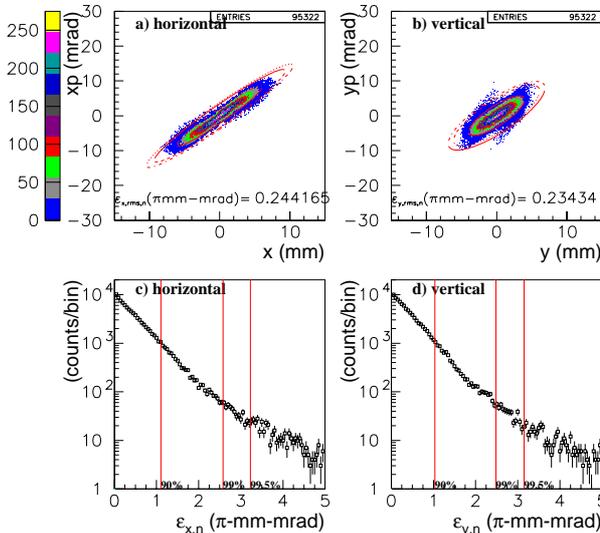


図6：PARMTEQMで得られた粒子分布を用いた結果。

5. 結論

LEBTでの実験データを基にした粒子分布から始めて、RFQ、MEBTのシミュレーションを行い、MEBT出口での実験データをほぼ再現することが出来た。RFQのシミュレーションにはPARMTEQMとTOUTATISの2種類のコードを用いたが、rmsエミッタンスには差異がなかったが、テールはTOUTATISのほうが大きくなった。得られた粒子分布を用いたMEBTのシミュレーションと、実験データの比較において、PARMTEQMとTOUTATISのどちらが現実に近いかを断定することはできず、リニアックの全体のシミュレーションにおいては、両方を用いて比較検討する必要があるものと思われる。

参考文献

- [1] 池上雅紀他, “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)”, 本予稿集.
- [2] S. Wang et. al., “Beam Commissioning of the J-PARC Linac Medium Energy Beam Transport at KEK II”, in these proceedings.
- [3] 加藤隆夫他, “J-PARC陽子リニアックのRFチョッパーによるビームテスト”, 本予稿集.
- [4] A. Ueno et. al., “Beam Test of a Front-end System for the JAERI-KEK Joint (JKJ) Project”, Proceedings of LINAC2002, URL: <http://epaper.kek.jp/I02/PAPERS/TU423.PDF>.
- [5] K. R. Crandall et. al., RFQ Design Codes, LA-UR-96-1836.
- [6] R. Duperrier, “TOUTATIS, a radio frequency quadrupole code”, Phys. Rev. Specials, Topics Accelerator and beams, December 2000.
- [7] H. Takeda, Parmila, LA-UR-98-4478.
- [8] Y. Yamazaki(eds), “Accelerator Technical Design Report for J-PARC”, KEK-Report 2002-13; JAERI-Tech 2003-044.

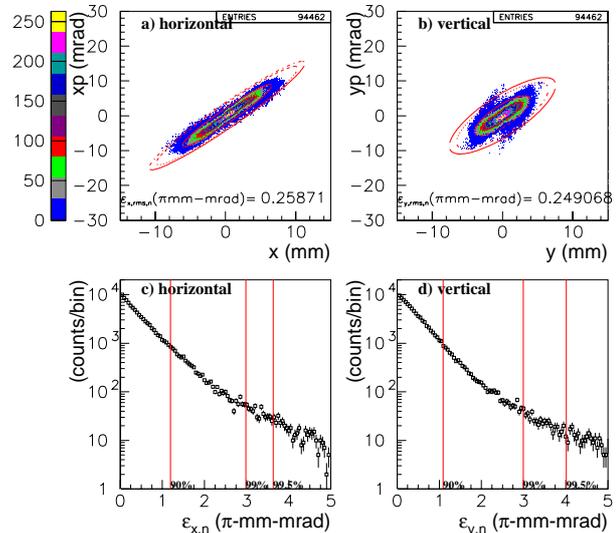


図7：TOUTATISで得られた粒子分布を用いた結果。