

## STATUS OF THE L3BT FOR J-PARC

Tomohiro Ohkawa<sup>1,A)</sup>, Hiroyuki Ao<sup>A)</sup>, Masanori Ikegami<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> Japan Atomic Energy Agency, JAEA

1-1 Shirakata-Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1195

<sup>B)</sup> High Energy Accelerator Research Organization, KEK

1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-0801

### Abstract

L3BT is a beam transport line from J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) linac to the succeeding 3-GeV RCS (Rapid Cycling Synchrotron). The construction of the L3BT has been almost finished. The beam commissioning of the L3BT will be started soon. On the other hand we have performed 3D particle simulations with IMPACT to evaluate the performance of the halo scraping and beam loss in the scraper section and beam dump line. In this paper, results of the beam simulation of the L3BT are presented. The construction status of the L3BT is also presented in brief.

## J-PARC L3BTの現状

### 1. はじめに

J-PARCの加速器は線形加速器、3GeV RCS、および50GeV MR (Main Ring)から構成される<sup>[1]</sup>。これらの加速器が、それぞれの機能を持つビーム輸送系で接続される。L3BTは線形加速器とRCSを接続するビーム輸送系である。

J-PARCは、最終的には1MWと大強度の陽子ビームを供給する加速器であり、既存の加速器と比べて、ビーム損失を極力低減する必要がある。L3BTは線形加速器とRCSを接続するだけでなく、RCSでのビーム損失を抑制するために、運動量拡がりやエミッタンスの大きさを抑制したり、整合を取った入射を行ったりするための重要なセクションである。RCS入射点で要求されるビームパラメータは以下の通りである。

運動量拡がり $< \pm 0.2\%$ 以下

ビームエミッタンス $< 4 \pi \text{ mm}^* \text{ mrad}$ 以下

L3BTは直線部、アーク部、スクレーパ部、および入射部から構成される。L3BTには2台のデバンチャーが設置され、RCS入射点での運動量拡がりを $\pm 0.2\%$ 以下にするという要求仕様を満足するために使用される。この系で、上流の加速空洞で $\pm 1\%$ のRFエラーが生じてビームエネルギーが設計値よりずれた場合にも、デバンチャー効果によりエネルギーが補正されることがシミュレーションにより確認されている<sup>[2]</sup>。

### 2. ビームシミュレーション

#### 2.1 前提条件

ビームシミュレーションには、PARMILA<sup>[3]</sup>と

IMPACT<sup>[4]</sup>を使用する。我々が使用したIMPACTには、J-PARC荷電変換スクレーパールーチンが池上氏により加えられている。このルーチンは、もともとLANAコードの中でstripping modelとして開発されたStripper Routine (MstripF\_BPM)に基づいて開発されたものである<sup>[5]</sup>。スクレーパでは、ハロー粒子はストリップパーfoilによって荷電変換され、所定のビームダンプに導かれる。4極電磁石の強さについては、TRACE3D<sup>[6]</sup>を用いて決定した。

#### 2.2 計算結果

MEBTからRCS入射点までのシミュレーションはPARMILAとIMPACTを用いて実施する。ピーク電流は30mAを仮定する。MEBT入口でのビームの初期分布としては、RFQの実験とシミュレーション結果から求めたビーム分布を使用する。初期パラメータを表1に、RCS入射点でのビームパラメータの計算結果を表2に示す<sup>[7]</sup>。

PARMILAとIMPACTの計算結果を比較すると、 $\epsilon_{z\_rms}$ と $\beta_z$ を除いて、殆ど同じような結果が得られることが分かる。

表1: MEBT入口での初期パラメータ

粒子数	95322粒子
$\epsilon_{x0\_rms}$	$0.212 \pi \text{ mm}^* \text{ mrad}$
$\epsilon_{y0\_rms}$	$0.212 \pi \text{ mm}^* \text{ mrad}$
$\epsilon_{z0\_rms}$	$0.091 \pi \text{ MeV}^* \text{ deg}$
$\epsilon_{x0\_99.5}$	$2.08 \pi \text{ mm}^* \text{ mrad}$
$\epsilon_{y0\_99.5}$	$2.05 \pi \text{ mm}^* \text{ mrad}$
$\epsilon_{z0\_99.5}$	$1.32 \pi \text{ MeV}^* \text{ deg}$

<sup>1</sup> E-mail: tomohiro.ohkawa@j-parc.jp

表2: RCS入射点でのビームパラメータ

	単位	PARMILA	IMPACT
E	MeV	181.037	181.034
$\alpha_x$		-1.519	-1.690
$\beta_x$	m	10.376	11.913
$\epsilon_{x\_rms}$	$\pi\text{mm}^*\text{mrad}$	0.257	0.256
$\epsilon_x$	$\pi\text{mm}^*\text{mrad}$	3.780	3.445
$\alpha_y$		-0.217	-0.362
$\beta_y$	m	11.653	11.369
$\epsilon_{y\_rms}$	$\pi\text{mm}^*\text{mrad}$	0.256	0.248
$\epsilon_y$	$\pi\text{mm}^*\text{mrad}$	3.614	3.653
$\alpha_z$		1.286	1.266
$\beta_z$	$\text{deg}^*\text{MeV}$	1479.4	1701.8
$\epsilon_{z\_rms}$	$\pi\text{MeV}^*\text{deg}$	0.297	0.225
$\epsilon_z$	$\pi\text{MeV}^*\text{deg}$	3.573	3.610
$\Delta p/p$	%	0.024	0.022

表2において、EはRCS入射点でのエネルギー、 $\epsilon_{rms}$ 、 $\epsilon$ は、それぞれrmsと99.5%の正規化エミッタンスを示す。 $\Delta p/p$ は $\epsilon_z$ と $\beta_z$ を用いて計算した運動量拡がりである。

### 2.3 横方向スクレーパ

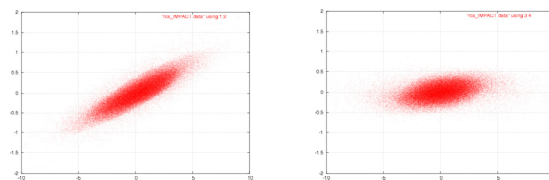
スクレーパ部は、4周期の単純なFODOセルで構成され、水平方向スクレーパと垂直方向スクレーパがそれぞれ4台ずつ設置される。FODOセル当たりの位相進みはおよそ45度に設定されている。スクレーパの荷電変換フォイルとしては、1対の位置調整可能な炭素フォイルが用いられ、スクレーパ本体は、ビームハローを取り除くために、各4極電磁石の直後に設置される。IMPACTを用いてスクレーパ部でのハロー粒子除去の性能評価を行う。

MEBTからRCS入射点までのシミュレーションをIMPACTを用いて実施する。ピーク電流は30mAと仮定する。表1に示したのと同じビーム分布をMEBT入口でのビームの初期分布として用いる。スクレーパの荷電変換フォイルは、それぞれ上流の4極電磁石中心から0.85mの位置に設置される。荷電変換フォイルの垂直または水平方向の設置位置は非正規化99%エミッタンスと $\beta$ 関数を用いて決定する。RCS入射点での正規化99.5%エミッタンスの計算結果を表3に示す。スクレーパ無しの場合と有りの場合のRCS入射点でのビーム分布の計算結果を図1、図2に示す。

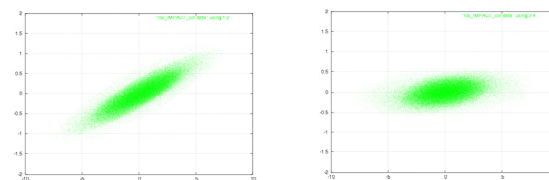
表3: 正規化99.5%エミッタンス

	単位	スクレーパ無	スクレーパ有
$\epsilon_x$	$\pi\text{mm}^*\text{mrad}$	3.445	2.588
$\epsilon_y$	$\pi\text{mm}^*\text{mrad}$	3.653	2.647
$\epsilon_z$	$\pi\text{MeV}^*\text{deg}$	3.610	3.389
$\Delta p/p$	%	$\pm 0.022$	$\pm 0.021$

表3より、非正規化99%エミッタンス $4\pi\text{mm}^*\text{mrad}$ の領域より外側の粒子はスクレーパにより削除され、RCS入射点での正規化99.5%エミッタンスは $4\pi\text{mm}^*\text{mrad}$ 以下の要求仕様を満足する。各スクレーパで荷電変換された粒子数の計算結果を表4に示す。



(a) 水平方向位相空間 (b) 垂直方向位相空間  
図1: RCS入射点でのビーム分布(スクレーパ無し)



(a) 水平方向位相空間 (b) 垂直方向位相空間  
図2: RCS入射点でのビーム分布(スクレーパ有り)

表4: 削除粒子数

初期粒子数	95322 粒子
荷電変換粒子数	1380 粒子
スクレーパ負荷	1.448 %

表4において、スクレーパ負荷は、スクレーパ部で荷電変換された粒子のMEBT入口での初期粒子数に対する比で評価している。スクレーパにて荷電変換されて生じるH+粒子は、ビームラインに沿ってコアのH-ビームと一緒に輸送され、スクレーパ部下流の最初の偏向電磁石により分離される。そして、コアのH-ビームは、RCS入射点に向けて、H+粒子はビームダンプに向けて輸送される。ビームダンプラインの4極電磁石の強さは、H+粒子の偏向電磁石出口のビームパラメータを初期条件として、TRACE3Dによって求めることができる。H+に荷電変換されたハロー粒子は、スクレーパ部以降ビームダンプまで輸送される際に、ビームダクトに衝突することにより、約1%の粒子が消失する。

### 2.4 ビームダンプライン

H+粒子の偏向電磁石出口でのビーム分布のシミュレーション結果よりTWISSパラメータを求め、ダンプラインの4極電磁石仕様を抽出する。偏向電磁石出口でのTWISSパラメータの計算結果を表4に、ビームダンプラインのビームエンベロープ解析結果を図3に示す。ビームダンプでのTWISSパラメータは、ガウス分布で $3\sigma$ のビームサイズが $100\text{mm} \times 100\text{mm}$ となるよう求めた。

表4: TWISSパラメータ

	単位	偏向電磁石	ビームダンプ
$\beta_x$	m	16.500	18.356
$\alpha_x$		-0.876	-1.432
$\epsilon_{x\_rms}$	$\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$	9.837	9.837
$\beta_y$	m	11.752	18.718
$\alpha_y$		0.336	-0.232
$\epsilon_{y\_rms}$	$\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$	9.648	9.648

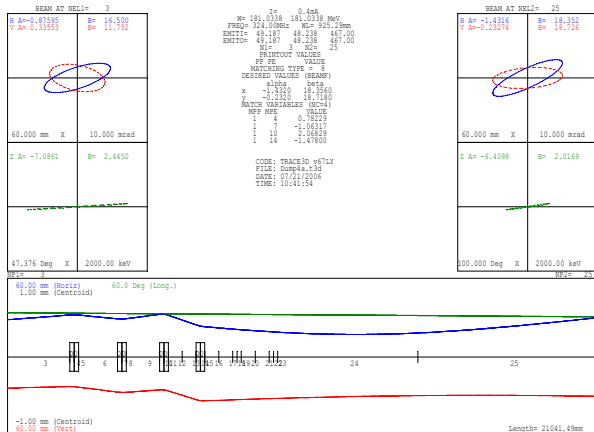


図3: ビームエンベロープ解析結果

偏向電磁石出口からビームダンプまでのシミュレーションをIMPACTを用いて実施する。ピーク電流は0.43mA (30mA\*1380/95322) と仮定する。表4を求める際に用いたのと同じビーム分布を偏向電磁石出口でのビーム分布として用いる。

荷電変換された粒子は、ビームダンプではほぼ100 mm×100 mmの領域に照射されていることが確認できる。また、ビームダンプでの粒子数は、1370粒子と偏向電磁石出口での1380粒子から10粒子消失しているだけである。スクレーパで荷電変換されるビーム出力を2 kWとすると、ビームダンプまでのビーム輸送系でダクトに衝突することにより生じるビーム損失量は、21 mで約14.5 Wと許容値1 W/mより小さく問題ない。

### 3. 建設状況

L3BT建設は、2003年10末までに発注され、主な構成機器（電磁石、電源、スクレーパ、ビームダンプなど）の設計と製作は2005年12月までに終了し、L3BTの設置工事も2006年7月に完了した。L3BTのコミッショニングは、アークの3分の1までは今年の12月に、それ以降は来年の9月に開始される。

### 4. まとめ

スクレーパの性能を評価するために、MEBTからRCS入射点までのシミュレーションをIMPACTを用いて実施した。荷電変換フォイルを非正規化99%エ

ミッタンス $4\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ の領域より外側の粒子を削除するように設置すると、RCS入射点での正規化99.5%エミッタンスは $4\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 以下の要求仕様を満足する。更に、スクレーパ部で荷電変換されたH+粒子の軌道解析を実施し、ビームダンプまで輸送される際の損失量について評価した。スクレーパで荷電変換されるビーム出力を2 kWとすると、ビームダンプまでのビーム輸送系でダクトに衝突することにより生じるビーム損失量は、21 mで約14.5 Wと許容値1W/mより小さく問題ない。

### 参考文献

- [1] Y. Yamazaki(eds), "Accelerator Technical Design Report for J-PARC", KEK-Report 2002-13; JAERI-Tech 2003-044, March 2003.
- [2] T. Ohkawa et al, Proc. 30th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tosu, July 2005, 20P010.
- [3] H. Takeda et al., "PARMILA" LA-UR-98-4478, September 1998.
- [4] J. Qiang et al, "An Object-Oriented Parallel Particle-In-Cell Code for Beam Dynamics Simulation in Linear Accelerators", J. of Comp. Phys. 163, 2000.
- [5] D. Gorelov, Private Communication, LANA is a beam dynamics code developed for RIA R&D.
- [6] K. R. Crandall et al, "TRACE 3-D Documentation (Third Edition)", LA-UR-97-886, May 1997.
- [7] Y. Kondo et al., Proc. 28th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tokai, July 2003, TB-2.