

# OPTIMIZATION FOR THE ADDITIONAL COLLIMATION SYSTEM OF J-PARC RCS

Shinichi Kato<sup>\*A)</sup>, Kazami Yamamoto<sup>B)</sup>, Yoshio Yamazaki<sup>B)</sup>, Masahiro Yoshimoto<sup>B)</sup>,  
Junichiro Kamiya<sup>B)</sup>, Hiroyuki Harada<sup>B)</sup>, Michikazu Kinsho<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup>Tohoku University

1-1-2 katahira, Aoba-ku, Sendai-shi, Miyagi-ken, 980-8577, Japan

<sup>B)</sup>Accelerator Division in J-PARC Centor

2-4 Shirakata-Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, Japan

## Abstract

In the J-PARC RCS, the significant losses were observed at the branch of H0 dump line and the Beam Position Monitor which was put at the downstream of the H0 dump branch duct. These losses were caused by the large angle scattering of the injection and circulating beam at the charge exchange foil. To realize high power operation, we have to mitigate these losses. So, we started to develop a new collimation system in the H0 branch duct. In order to optimize this system efficiently, we primarily focused on the relative angle of collimator block from scattering particles. We simulated behavior of particles scattered by foil and produced by collimator block and researched most optimized position and angle of the collimator block. These simulation were performed by SAD and GEANT4. We present simulation results and anticipated performance of this new collimation system.

## J-PARC 3GeV RCS 入射部コリメータの最適化

### 1. はじめに

J-PARC 3GeV Rapid Cycling Synchrotron(RCS) [1] では、大強度出力を実現するために空間電荷効果を緩和する必要があり、ペイント多重入射を行っている。また、位相空間に隙間なくペイントするため、入射点に荷電変換フォイルを配置し、 $H^-$  イオンを陽子に変換して入射している [2] [3]。

2008年12月の供用運転開始以後、RCSではビーム強度を上昇させ、2010年11月には200kWでの供用運転を行っている。このビーム強度の上昇に伴い、多重入射の過程ですでに荷電変換され周回しているビームが再度フォイルに衝突し、原子核散乱、クーロン多重散乱されることにより、入射部下流のビームダクトやBeam Position Monitor(BPM)でロスしていることが判明した [4] [5]。これは広い範囲に放射化を引き起こしており、供用運転終了数時間後も数mSv/hrの残留線量が計測されている。この値は加速器のメンテナンスを考えた際、無視できるものではなく、現在ビーム強度を制限する一つの原因となっている [6]。現在の供用運転での出力は200kWであり、将来1MWの出力を目指すためには、なんらかの対策をとる必要がある。

このロスを局所化し放射化する範囲を抑えるために、新しいコリメータを導入する [7]。これは、ビームダクトにフォイルでの散乱粒子を吸収するコリメータブロック(吸収体)を組み込んだものである。この吸収体の最適な設置位置を検討するため、粒子のトラッキングには主にSADを、散乱粒子と吸収体との衝突にはGEANT4を用いたビームシミュレーションを行った。以下ではその結果について述べる。

### 2. ビームロスと入射部コリメータ

#### 2.1 フォイル散乱によるビームロス

荷電変換フォイルによる散乱の様子を Fig. 1 に示す。

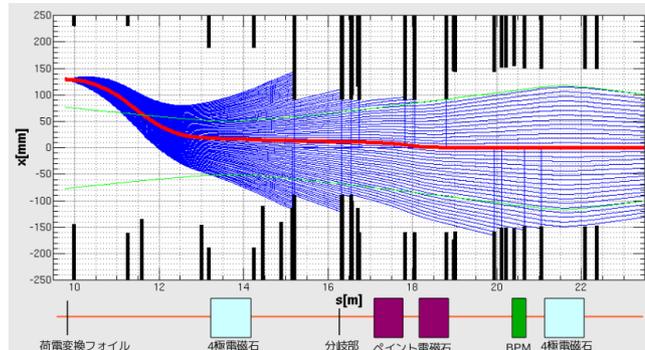


Figure 1: 荷電変換フォイルによる水平方向の散乱の様子。フォイル位置で散乱角を一様に持たせた粒子をトラッキングした。

フォイルで散乱された粒子のうち下流部でのロスに寄与するものは、x軸方向については約 $\pm 3$ mrad、y軸方向については約 $\pm 10$ mrad以上の角度が付加されたものであった。y軸方向に比べてx軸方向のアクセプタンスが狭い理由は、分岐ダクト手前にy軸方向収束の4極電磁石があるからである。よって今回導入するコリメータの吸収体は、x軸方向に大角度で散乱された粒子の回収を目的としている。

#### 2.2 入射部コリメータの概要

入射部コリメータの概要を Fig. 2 に示す。今回導入する入射部コリメータは周回ビームラインのダクトと、フォイルで荷電変換し損なった $H^-$ イオンを廃棄ライン

\* skato@post.j-parc.jp

に導くダクトが二股に伸びた構造をしている。それに加えて、吸収体とそれを格納する角型チェンバが、ビームライン側のダクト最下流部に接続されている。廃棄ライン側セプタム電磁石からのもれ磁場を遮蔽するために、ビームライン側のダクトは磁性材料である SUS430 で作られており、角型チェンバも同様である。これらは放射線を遮蔽するために鉄で被われる。

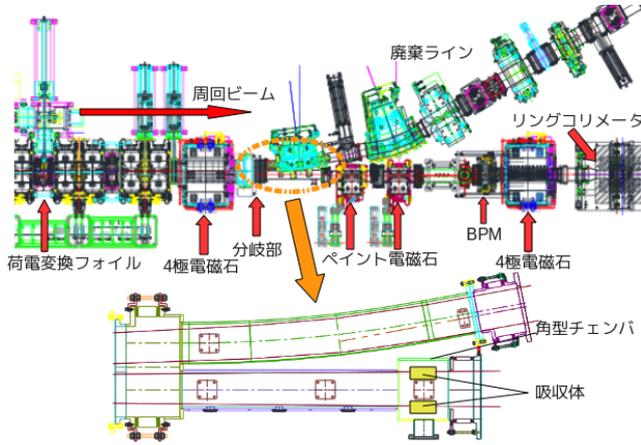


Figure 2: 入射部の各エレメントの配置と、入射部コリメータ (楕円内部) の図。

吸収体は無酸素銅で作られており、水平方向のアクセプタンスを制限するように左右に一つずつ置かれる。また、吸収体は完全な直方体ではなく、ビーム中心側の面がビーム軸に対して角度を持つようになっている。これには2つの理由がある。第一に、この場所では水平軸のビームエンベロープが広がる向きに角度を持っており、吸収体がそれに干渉するのを防ぐためである。第二に、散乱粒子も水平方向に広がるような角度をもって到達するため、それらが吸収体側面に非常に薄い角度で掠るように衝突すると、散乱粒子を十分に吸収できないばかりか、余分な電子が生成することが予想されるためである。これらの理由により、ビーム運転パラメータによらず散乱粒子の入射角が吸収体側面と平行となるよう、吸収体は  $\pm 1$  度回転できる構造となっている。

### 2.3 吸収体のビーム中心からの位置

Table 1 に、ビームが入射点の中心を通ると仮定した場合で、いくつかの運転チューンに対してアクセプタンスを  $486\pi\text{-mm}\cdot\text{mrad}$  とした時の水平方向のビーム幅と、角型チェンバより下流でのロス無くすのに必要なビーム軸中心からの吸収体の理想的な位置、吸収体が除去できずにロスを引き起こす散乱粒子のフォイルでの水平方向の蹴り角を示す。

アクセプタンス  $486\pi\text{-mm}\cdot\text{mrad}$  とはシミュレーションより得られた値で、ビームのハロー成分を取り除くために BPM より下流に設置されているリングコリメータについて、ハロー成分の粒子に蹴り角を与えるプライマリコリメータを  $324\pi\text{-mm}\cdot\text{mrad}$ 、その粒子を吸収するセカンダリコリメータを  $400\pi\text{-mm}\cdot\text{mrad}$  のアクセプタンスに設定した際に、リング全周のどこの位置についても、ビームロスが  $1\text{W/m}$  以下とするために確保しなければならないものである。実際、RCS ではリングコ

Table 1: ビームエミッタンス  $486\pi\text{-mm}\cdot\text{mrad}$  としたときの吸収体位置での水平方向のビーム幅と、下流でのロスを全て取り除くために必要な吸収体のビーム中心からの位置との関係。チューンによっては、理想的な位置まで挿入できない事がわかる。

チューン : (6.38,6.45)	リング内側		リング外側	
	ON	OFF	ON	OFF
ペイント				
中心からのビーム幅 (mm)	-60.7	60.7	60.7	60.7
理想的な吸収体位置 (mm)	-63.5	63.8	70.7	66.3
ロスする散乱角 (mrad)	-	-	-	-
チューン : (6.40,6.42)	リング内側		リング外側	
	ON	OFF	ON	OFF
ペイント				
中心からのビーム幅 (mm)	-68.5	68.5	68.5	68.5
理想的な吸収体位置 (mm)	-63.0	63.3	70.7	66.3
ロスする散乱角 (mrad)	-8.61	-8.64	-	6.35
	$\sim -9.24$	$\sim -9.24$		$\sim 6.65$

リメータ以外全周に渡って、 $486\pi\text{-mm}\cdot\text{mrad}$  のアクセプタンスを確保するように設計されている。

今回の入射部コリメータの吸収体の設置位置についても、アクセプタンスとして  $486\pi\text{-mm}\cdot\text{mrad}$  を確保することを想定している。しかし、その場合ビームパラメータによっては下流でのロスに関係する全ての散乱粒子を取り除くことが出来ない場合もあることが分かる。これは、入射部下流のスペースの関係から入射部コリメータの角型チェンバと吸収体をあまり下流に設置できず、取り除こうとする散乱粒子をビーム中心から十分に離せていないことが原因である。

この取り除くことが出来ない散乱粒子を取り除くためには、 $486\pi\text{-mm}\cdot\text{mrad}$  のアクセプタンスを削ってより中心に吸収体を挿入するか、この場所での水平方向のビーム幅ができるだけ小さくなるようなオプティクスを選ぶ必要があると考えられる。

### 3. シミュレーションモデル

RCS では、SAD を用いたシミュレーションモデルを構築している。このシミュレーション結果と BPM などから得られたデータとをリアルタイムで比較しながらビームコミッシングが行われており、モデルは現実とよく一致している。よって、今回のシミュレーションでも粒子のトラッキングに SAD を用いた。また、散乱粒子と吸収体との衝突により生成する粒子や、吸収体の角度による生成粒子数の違いなどについて考察するため、散乱粒子と吸収体との衝突には GEANT4 を用いた。

トラッキングを行う前に、まず荷電変換フォイルでの大角度の散乱確率とその分布を求めた。Fig. 3 に、フォイルによる陽子散乱の GEANT4 シミュレーション結果を示す。

シミュレーション結果から、問題としている大角度散乱 (x 軸方向で  $\pm 3\text{mrad}$ 、y 軸方向で  $\pm 10\text{mrad}$  以上) の確率は  $10^{-4}$  程度と、非常に低い確率である事が分かった。このため、入射ビームを周回させながら、フォイル

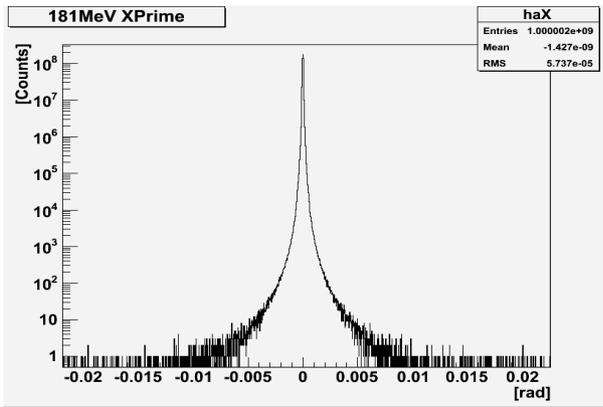


Figure 3: 181MeV陽子の、荷電変換フォイルによる散乱のシミュレーション。横軸は水平方向の散乱角度 (mrad)。

での衝突と吸収体との衝突に GEANT4 を用いるようなシミュレーションでは、散乱粒子と吸収体との衝突に関して十分な統計を得ることが難しい。ロス分布だけでなく、吸収体に衝突する粒子数を稼ぎ吸収体による生成粒子について考察するためには、シミュレーションモデルの簡略化が必要である。

今回は、ロスの原因となる大角度の散乱粒子のみに注目し、注目するロスの範囲についてもリングコリメータまでとした。また、大角度散乱による周回粒子数の減少を無視した。具体的には、以下のような手順でシミュレーションを行った。

- 入射ターン毎の、荷電変換フォイルでの入射及び周回ビームの粒子情報を用意する。
- フォイルによる陽子散乱の GEANT4シミュレーション結果を用いて、粒子に角度 (x 軸方向で  $\pm 3\text{mrad}$  以上、または y 軸方向で  $\pm 10\text{mrad}$  以上) を付加する。
- 角型チェンバ手前まで、粒子を輸送する。
- 散乱粒子と吸収体との衝突を GEANT4 でシミュレーションする。
- 角型チェンバ出口からリングコリメータまでトラッキングし、ロス分布を得る。

これを入射ターンごとに行い、結果は入射ターン数で積分した。また、加速器のセットアップとしては、ビーム試験を想定したもの (セットアップ 1) と、実際の供用運転を想定したもの (セットアップ 2) の 2 つを用いた。

- セットアップ 1  
チューン (6.38,6.45)、水平方向ペイント電磁石が  $150\pi\cdot\text{mm}\cdot\text{mrad}$  ペイント時の最大出力の状態位相空間上の一点に入射 (センター入射) する。入射ターン数は 100 ターン、内側の吸収体は中心から 50.00mm (設計の限界値)、外側の吸収体は中心から 72.75mm (セットアップのビーム軌道の  $486\pi\cdot\text{mm}\cdot\text{mrad}$  幅) の位置。
- セットアップ 2  
チューン (6.40,6.42)、水平方向に  $150\pi\cdot\text{mm}\cdot\text{mrad}$  でペイント入射する。入射ターン数は 235 ターン、内側の吸収体、外側の吸収体は共に閉軌道の中心から 68.50mm (閉軌道でのエミッタンス  $486\pi\cdot\text{mm}\cdot\text{mrad}$  の際のビーム幅) の位置。

以下の章では、シミュレーション結果について述べる。

## 4. 吸収体により生成する粒子

### 4.1 回転角度と生成電子数

前述したとおり吸収体は、散乱粒子の入射角度と吸収体側面が平行になるよう、回転させることができる。そこで、吸収体の角度 (ビーム軸に対する、側面の角度) と生成電子数の関係を調べた。ここでの生成電子数とは、角型チェンバ底面のフランジ ( $r=90\text{mm}$ ) に検出器があると想定し、そこに到達した電子の数としている。加速器のセットアップはセットアップ 1 を用いた。Fig. 4 に結果を示す。

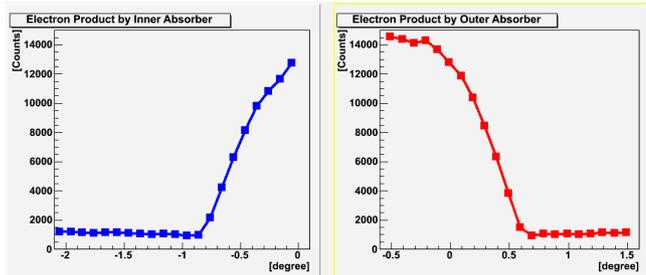


Figure 4: 生成電子数と回転角の関係。左図はリング内側の吸収体によるもの、右図はリング外側の吸収体によるもの。

このシミュレーション条件の時、吸収体の側面 (頂点) にくる散乱粒子の、ビーム軸に対する水平方向の角度は、粒子が入射点中心からきたと仮定すると、内側では  $-0.83$  度、外側では  $+0.63$  度である。グラフでは、吸収体とビーム軸との角度がこの値に近づいたとき、つまり散乱粒子と吸収体側面との角度が平行になった時、生成電子数が最小となっている。散乱粒子と吸収体側面との角度関係が平行になっていない場合には、吸収体側面を掠った散乱粒子によって、平行の時と比べると  $0.1$  度のずれで約 2 倍、 $0.5$  度のずれで約 10 倍の電子が発生している。電子の生成は電子雲不安定性を引き起こすなどの悪影響が考えられるため、基本的には散乱粒子の入射角度と吸収体側面とが平行となるように調整する必要があるといえる。

この結論をうけて、吸収体の角度の調整手法の検討を行った。すでに述べたように、散乱粒子と吸収体側面との角度が平行でない場合には、発生する電子の量が平行時の数倍になる。つまり、吸収体によって発生した電子をビーム運転中に収集することが出来れば、実際のビーム運転中に、より精密に吸収体の回転角度を設定できる可能性があると考えた。現在、吸収体が組み込まれている角型チェンバの底面に到達した電子を検出する事を検討している。

### 4.2 生成中性子

今回導入する吸収体は、見方を変えれば中性子の生成源ともなりうる。下流でのビームロスを取り除くために吸収体を導入するわけだが、生成した中性子が下流部に残留放射能を生じさせる可能性がある。そこで、生成した中性子が下流のどこにどの程度達するのかを調べた。

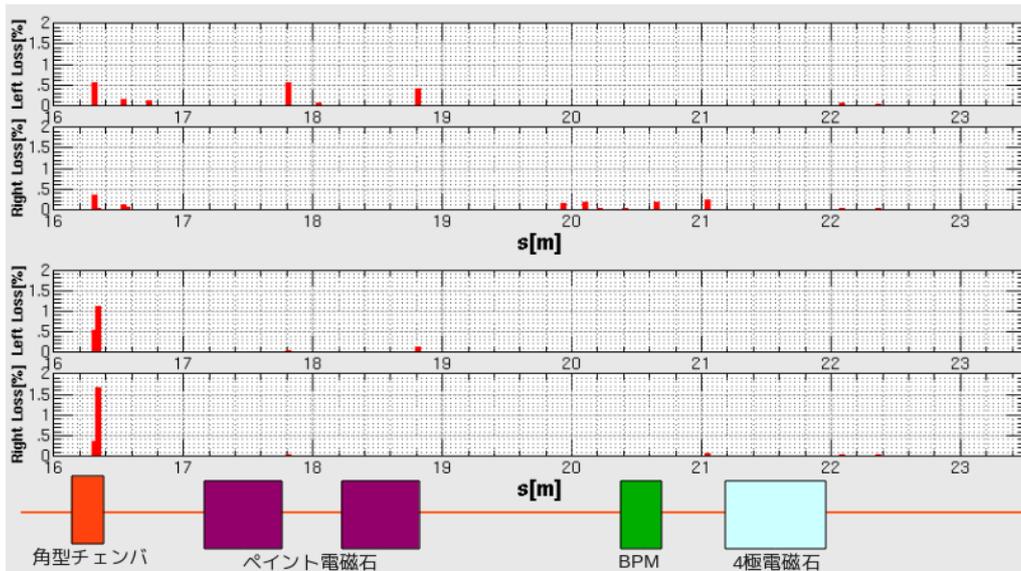


Figure 5: セットアップ 1 での角型チェンバからプライマリーコリメータまでのロス分布。上 2 つが吸収体が挿入されていない時、下 2 つが吸収体を挿入した時でのロスを示す。縦軸は x 軸方向で  $\pm 3\text{mrad}$  以上または y 軸方向で  $\pm 10\text{mrad}$  以上の角度を付加した粒子数で規格化されている。

シミュレーション結果より、生成した中性子は吸収体と反対側のダクト側面に多く分布する事が分かった。また、運動エネルギーは 100keV 未満のものが主であることが分かった。この中性子は入射部コリメータを被う遮蔽体よりも下流に分布し、ペイント電磁石も隣接しているため、残留線量の評価を行う必要がある。そこで MARS コードを用いて、生成中性子によるペイント電磁石周辺の残留線量を評価した。出力 200kW で 30 日運転を仮定し、一日冷却後の残留線量を評価した結果は、ダクト表面で数  $\mu\text{Sv/h}$  程度であった。つまり、吸収体を導入したことで新たに発生する残留線量は現在下流部で測定されているものに比べて充分小さいと考えられる。

## 5. 入射部コリメータの効果の検証

次に、加速器のセットアップとしてセットアップ 2 を用いたシミュレーション結果を示す。

吸収体の回転角度は、前述の生成電子数のシミュレーション結果で電子の生成数が下がりきった所を、散乱粒子と吸収体側面との角度が平行になった点であるとして決定した。

Fig. 5 は、ビーム試験を想定したときの、吸収体の導入前後でのロスの分布の比較である。特に問題としているロスの範囲は、リング外側では 18m 付近のペイント電磁石のセラミックダクト周辺、リング内側では 20m から 21m の間の BPM 周辺である。吸収体によって、角型チェンバ内に局所化出来ていることが分かる。

Fig. 6 は、実際の運転を想定したときの、吸収体導入前後でのロスの分布の比較である。吸収体の挿入によって、リング外側のロスは非常によく局所化されている。リング内側のロスについても、BPM 付近の高い残留線量の原因と思われる 20m から 21m の間のロスについては非常によく局所化されており、挿入前と比べると 13 % 程度になっている。しかし、BPM 後方、4 極電磁石手前でのロスについては、挿入前と比べて 80 % 程度と、

ほとんど緩和できていない。これは、内側の吸収体が十分に挿入されておらず、ロスを引き起こす散乱粒子を十分に取り除けていないためである。

内側の BPM 後方、4 極電磁石手前でのロスをさらに取り除くために、内側の吸収体をビームエンベロープに沿わせるように内側に 0.5 度回転させた時のロスの分布を調べた。今まで取り除けなかった散乱粒子を吸収体側面で受けることで、BPM 後方、4 極電磁石手前でのロスは、挿入前と比べて 60 % 程度となった。吸収体側面を掠った散乱粒子は、ほとんどが角型チェンバを通過するが、吸収体との衝突によりビーム中心軸方向に蹴りもどされることでロスが緩和することが別のシミュレーションで確認できた。つまり、前述した、吸収体側面への散乱粒子の衝突による生成電子が、実際のビームに影響を及ぼさなければ、必要に応じて吸収体をビームエンベロープに沿わせることは効果的であるといえる。

## 6. ビームを用いた実証試験にむけて

今回の入射部コリメータによって、現在大きな値の残留線量が測定されているペイント電磁石周辺や BPM 周辺でのロスに関しては、10 分の 1 程度まで緩和することが出来るという結果を得た。しかし、チューンによっては BPM 後方、4 極電磁石手前でのロスについて、あまり緩和することが出来ないことも分かった。この場所は現在大きな値の残留線量が測定されている BPM から数十センチ程しか離れていないため、ここでのロスも BPM での残留線量に寄与している可能性がある。この場所でのロスをチューンによらず取り除くためには、実際のビーム試験で  $486\pi\cdot\text{mm}\cdot\text{mrad}$  のビーム幅よりも内側まで吸収体を挿入し、 $486\pi\cdot\text{mm}\cdot\text{mrad}$  を削ることによる他の場所でのビームロスとのバランスを考察することが考えられるが、これは実際の加速器の状態によるところが大きい。今後は実際のビームを使って、加速器全体でのビームロスにも注意しながら、吸収体の調整を

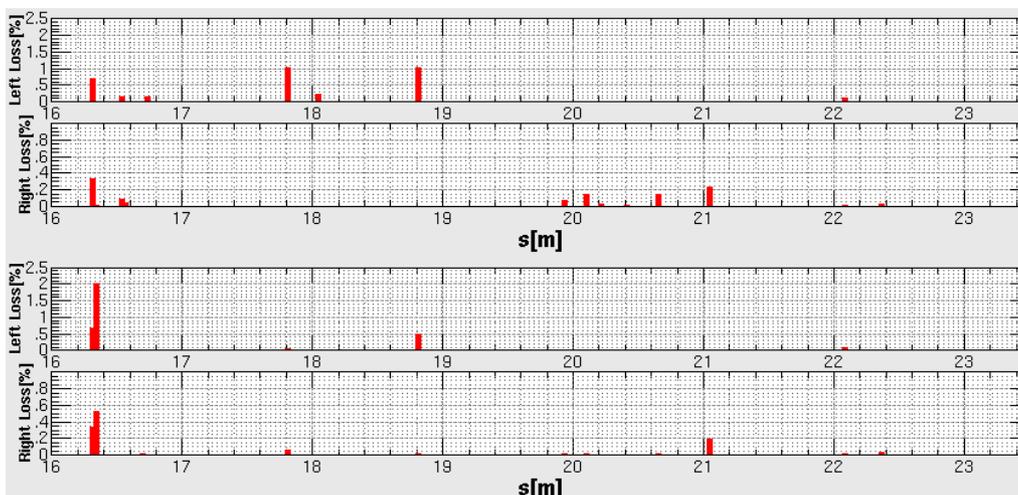


Figure 6: セットアップ 2 での角型チェンバからプライマリーコリメータまでのロス分布。上 2 つが吸収体が挿入されていない時、下 2 つが吸収体を挿入した時でのロスを示す。縦軸は x 軸方向で  $\pm 3\text{mrad}$  以上または y 軸方向で  $\pm 10\text{mrad}$  以上の角度を付加した粒子数で規格化されている。

行っていく予定である。

2011 年 3 月 11 日の震災の影響により、現在 RCS では復旧作業が進んでいる。その中で、電磁石等のアライメントのずれが報告されている [8]。今年 12 月に予定されているビーム試験では、それらの影響による加速器の素性の変化を把握し、今まで用いてきた光学パラメータの見直しも含めて調整を行っていく予定である。その際、吸収体の場所でのビームの水平方向の広がりが少ないオプティクスを選ぶという方法で、入射部コリメータの効果を上げていくことを検討している。

## 7. まとめ

入射コリメータの吸収体は、散乱粒子に対して吸収体の側面が平行になるように調整する必要があるという結論を得た。

吸収体による生成電子を検出できれば、吸収体の精密な回転角度の設定が可能であるという結論を得た。

吸収体を発生源とした中性子による下流部の新たな汚染について、特別な対策を講じる必要はないという結論を得た。

入射部コリメータによって、現在問題となっている下流部のロスを 10 分の 1 程度に抑えることが出来るという結果を得た。また、BPM 後方の 4 極電磁石手前でのロスについては、チューンによってはあまり緩和することが出来ないという結果を得た。

## 参考文献

- [1] Accelerator Technical Design Report for High-Intensity Proton Accelerator Facility Project, JAERI Report No. JAERI-Tech 2003-004 and KEK Report No. 2002-13.
- [2] H. Harada, "Painting-injection study using a virtual accelerator in a high-intensity proton accelerator", KEK Report No. 2009-7.
- [3] P. K. Saha et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams 14, 072801 (2011).

- [4] P. K. Saha, in Proceedings of the 46<sup>th</sup> ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop (HB2010), Morschach, Switzerland (2010).

- [5] H. Harada, private communication.

- [6] M. Kinsho, in Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Particle Accelerator Conference (IPAC 10), Kyoto, Japan (2010).

- [7] K. Yamamoto, in this Proceedings

- [8] N. Tani, in this Proceedings