

J-PARC MR におけるビームコリメータの 4 軸化とビームロス応答

FOUR-AXES BEAM COLLIMATOR AND BEAM LOSS RESPONSES AT THE J-PARC MR

白形政司^{#, A)}, 佐藤洋一^{A)}
Masashi Shirakata^{#, A)}, Yoichi Sato^{A)}
^{A)} KEK/J-PARC

Abstract

Two of five beam collimators of J-PARC main ring were replaced by ones which has four axes system in 2015. The operating point has been altered toward the high power beam operation. The collimator jaws are required to have a tunability to get along with the beam envelope. When the jaw has a wrong angle to the beam envelope, the scattered particles increase by the jaw edge. As the result, unexpected beam loss spots are produced at the downstream places in the ring. The rotation and tilt mechanisms were added to the jaw mover. The collimator can follow the change of beam envelopes of the various operating points. The beam loss distribution of the scattered particles by the collimator jaws is complicated because the particles go around many times in the ring. The angular responses of single jaws were investigated. And the actual collimator tuning method is also described for the experimental run.

1. コリメータの 4 軸化

J-PARC main ring (以下、MR) のビームコリメータシステムは、2012 年秋の運転より、それまでの散乱捕獲法から剛体による直接ハロー除去へと方式を変更した。その後、コリメータの構成には何度か変遷があったが[1]、2015 年秋以降は jaw に対して 4 方向の自由度を持った 4 軸型コリメータを 2 台導入し、2017 年 7 月現在まで Figure 1 に示すような 5 台コリメータ体制としている。コリメータは剛体である jaw がビームのハロー成分を直接取り除くワンパス型を並べることで、比較的短い距離で必要なビームロス容量を得られる。

コリメータをワンパス型にすることで jaw が長くなり、jaw 面のビームエンベロープに対する角度の追従性が求められるようになった。そのため、jaw の位置だけで無く角度も変えられる 4 軸型コリメータを開発した。Figure 2 に示すように、従来の上下左右への位置移動機構に、水平方向の回転と垂直方向の傾きを持たせる機構を追加している。Jaw 面に対してビームエンベロープが合っていないと、jaw の入口や出口のエッジで多くのビームが中途半端に散乱されてリング下流部にビームロスをつくるので、それを抑制する必要がある。現時点では 5 台あるコリメータのうち、Col-C, Col-D の 2 台が 4 軸型コリメータとなっている。4 軸化以前の各コリメータに対するビーム応答については、2014 年 5 月に単独応答に関して調査している[2]。軸数が増えたことにより調整の自由度も増加したが、ビームの応答は以前よりも複雑になった。ここでは、jaw の角度に対するビームの応答と、実運転時の調整について述べる。Col-C, D はいずれも MR の座標系でマイナス側に jaw を持つコリメータであり、ビームから見て左および下に jaw が存在する。Horizontal jaw の角度を θ とすると、 $+\theta$ 方向は jaw 下流部が閉まる方向である。また、vertical jaw の角度を ϕ とすると、 $+\phi$ 方向は jaw 下流部が閉まる方向である。それぞれの jaw の動

きを区別するために、horizontal 方向の位置と角度をそれぞれ H, T、vertical 方向の位置と角度をそれぞれ V, P の文字で表す。例えば、Col-C の horizontal jaw の角度を変える際は『Col-CT を動かす』、vertical jaw の角度を変える際は『Col-CP を動かす』という表現を用いる。

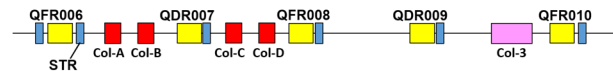


Figure 1: Collimator configuration of J-PARC MR since October 2015.

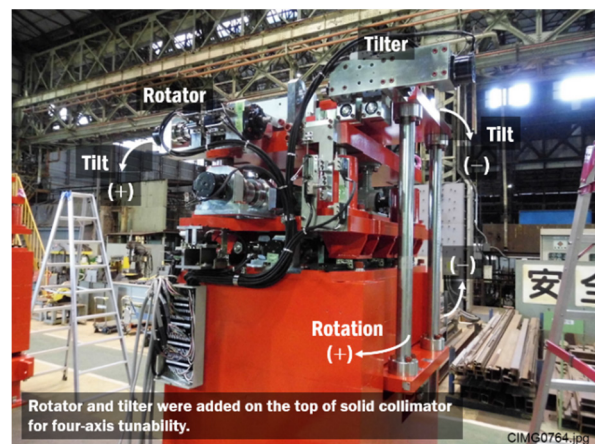


Figure 2: Collimator with four axes.

2. ビームロス分布の応答

2.1 ビーム運転条件

コリメータが作る意図しないビームロススポットを見るためには、比較的強いビーム強度が必要である。そのため上流リング(RCS)からの粒子数を 3.0×10^{13} ppp 以上としつ

[#] masashi.shirakata@kek.jp

つ、バンチ数を2(RCS 1 サイクル分)としてMR 本体へのロスの総量を抑えた。この粒子数は、30 GeV のMR ビーム運転で58 kW に相当する。ビームバンチはK1 タイミングの2 バンチか、K3 タイミングの2 バンチを用いた。この違いによる差は考えなくて良い。

ビームチューンは、利用運転においては2016 年からそれまでの $(v_x, v_y) = (22.40, 20.75)$ に代わって $(21.37, 21.44)$ が採用されている。4 軸コリメータが導入された2015 年秋以降、新しいチューンはたびたび試されてきたわけだが、4 軸コリメータの初期の応答試験では古いチューンを使っている。この報告書では、 $(22, 20)$ チューン、 $(21, 21)$ チューンと呼んで区別する。

2.2 単独効果

最初のビームを用いた試験は、2015 年12 月24 日に行なった。ビーム条件は、粒子数 3.32×10^{13} ppp, K3, $(22, 20)$ チューンである。単独での応答を見るため最初にすべてのコリメータを全開とし、Col-C の horizontal jaw のみを挿入した。ビームエンベロープと jaw の角度が合っていない場合、例として jaw に対して深い角度でビームが入射すると、Figure 3 に示す様に jaw の後方で散乱された粒子がビームライン下流にビームロススポットを作りやすくなる。Col-CT, DT, CP, DP の傾斜の効果を図4a, 4b, 4c, 4d に示す。Col-CT の調整では、BLM037~049 および BLM088~119 において顕著な差が見取れる。Col-DT についても同様の傾向で、jaw 後方を少し開く(同時に jaw 前方は閉まる)とビームロスが大きく減少した。Vertical jaw についても Col-CP, DP でリング上流部のロス分布は変化した。期待された BLM070~090 の改善等は見られなかった。ここで変化が見られたビームロスは当該 jaw が作成しているものと言えるが、現在のシミュレーションでは jaw からの一次散乱のみを対象としていることもあり、必ずしもすべてのロススポットは再現できていない。二次、三次散乱も含めた検討が必要であろう。ともあれ、ここでの結果から Col-CT, DT については -2 mrad 程度、Col-CP, DP についてはゼロ近傍が良しとされ、以後しばらくその設定が継続されることとなった。

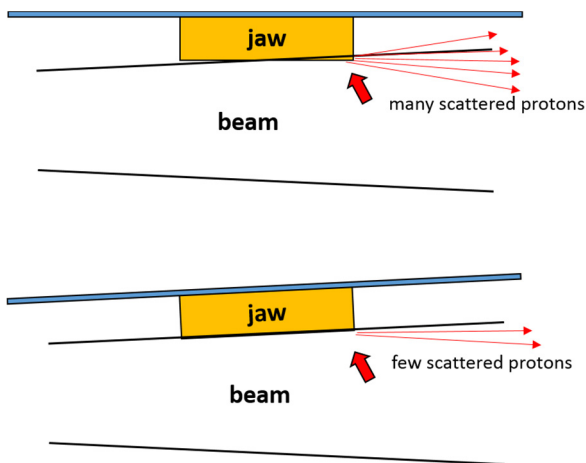


Figure 3: Scattered protons from the edge of collimator jaw with a beam envelope.

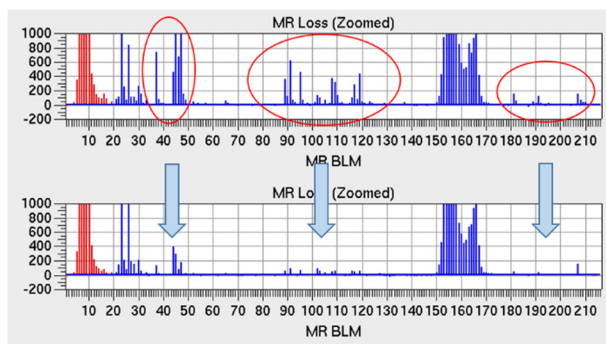


Figure 4a: Beam loss decrease by Col-CT.

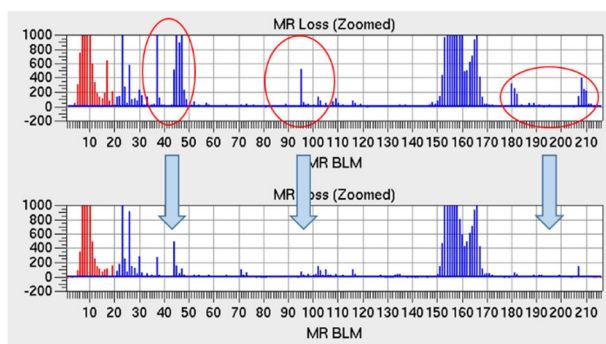


Figure 4b: Beam loss decrease by Col-DT.

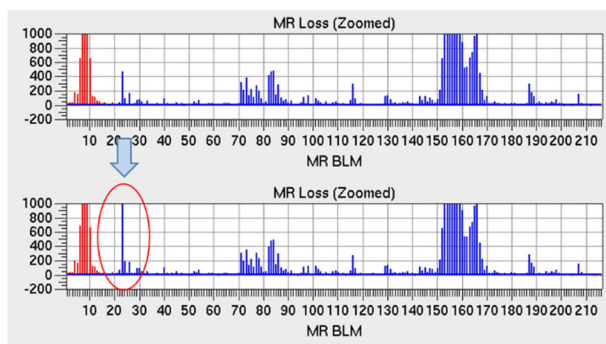


Figure 4c: Beam loss increase by Col-CP.

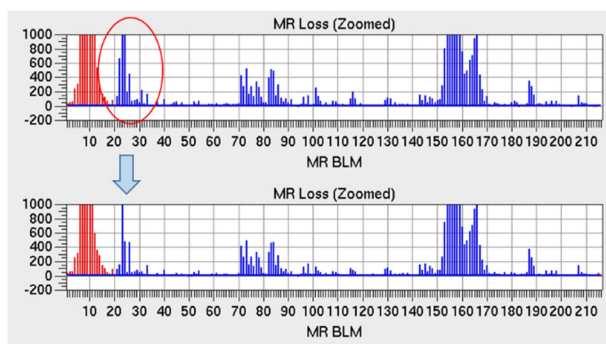


Figure 4d: Beam loss decrease by Col-DP.

2017 年1 月24 日、対象を Col-D に絞り、再度 Col-

DT, DP の効果を見た。この時のビーム条件は、粒子数 $5.92e+13$ ppp, K1, (21, 21) チューンである。

ビームロス分布の応答を Figure 5a, 5b に示す。応答を詳細に見るために、リングを三等分して縦にならべた。上段が BLM001~072、中段が BLM073~144、下段が BLM145~216 である。Col-D は、BLM008 のすぐ上流に位置している。Col-DT, DP を 1.25 mrad ステップでそれぞれ ± 5 mrad 変化させた。グラフはその際の変化量を重ね描きでプロットしたものである。Col-D 周辺とすぐ下流である BLM016 までを無視し、応答のあるロススポットとして有意なものを Table 1 にまとめた。DT, DP 双方に応答があるのは、BLM116 - 119, 188, 202 である。また、BLM037 は Col-DP に大きく反応している。Vertical jaw の反応は、チューンを(21, 21)にしてから見えやすくなった。ここでの結果を用いて利用運転時のビームロスを減らせると期待できるのであるが、次節で見るように物事はそう単純では無い。

Table 1: Responded BLM Channels

Col-DT	026, 030, 033, 079, 082 , 083, 102, 103, 105, 116 - 119 , 130, 131, 133, 148, 154 - 157 , 188 , 202
Col-DP	030, 037 , 082, 102, 103, 105, 116 - 119 , 130, 137, 174, 188 , 202

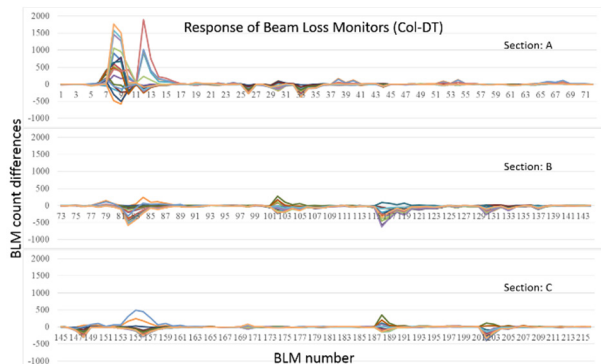


Figure 5a: BLM responses according to Col-DT.

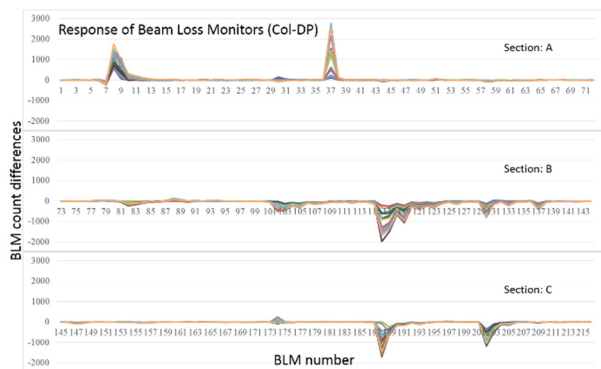


Figure 5b: BLM responses according to Col-DP.

2.3 複合効果

利用運転のためのビーム調整として、コリメータの最適化を行う。リングコリメータでは jaw によって散乱された粒子が周回してくるため、リング全周で見た応答はビーム輸送路に比べて複雑である。調整日は 2017 年 1 月 19 日と 2 月 3 日。利用運転時のコリメータ調整では、上流の jaw から順次位置調整を開始するが、下流の jaw による調整が上流の調整に影響を与えるため、Col-A から Col-3 までの一連の位置調整を 1~3 回程度繰り返す。その後、Col-C, D の角度調整を行う。正確には角度調整も含めて繰り返しを行う必要があるが、いままでのところ実用上切り分けても問題は出ていない。Col-A から Col-3 までの 5 台のコリメータのすべての jaw がラインに入っているため、Col-CT, CP, Col-DT, DP によるビームロスの応答が単独 jaw の場合とは異なっている。Figure 6 に、ビームロス分布の応答を示す。これは Figure 5 と違って差分では無く、実際のビームロス分布そのものである。BLM023~044 までは通常予想されるコリメータによるロススポットであり、BLM078 は静電セプタムによりアパーチャが狭くなっているために出来るロススポットである。BLM133 以降のロスの反応については素性がよくわかっておらず、これらのロスの解析にはシミュレーションの精度を上げる必要がある。ただ実験的にはあるが、現在のシステムでセクション 3 のロスを低減可能であることは判明した。

この時の調整では、Col-DT を逆位相に大きな値とすることでビームロスの総量を最も小さくすることができた。一方、Col-CT については -2 mrad のままがやはり最良であった。Col-DT を -2 mrad から +5 mrad にすると、Col-D において jaw のエッジで散乱されるビーム成分が増えるはずだが、それは下流の Col-3 で回収されたと考えられる。今後他のコリメータの 4 軸化が進むと、より調整は複雑となる。

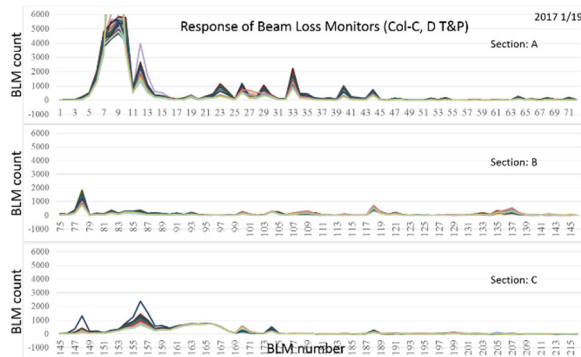


Figure 6: BLM responses by angles of Col-C&D.

3. まとめ

3.1 4 軸化の効果

- 調節可能なパラメータが増えたことで、今後見込まれるビームチューンの変更にも柔軟に対応できるようになった。
- Jaw の角度をビームエンベロープに合わせるができることから、リング下流域におけるビームロス量

をこれまでより減らすことが可能となった。

3.2 今後の展望

Col-C, D の結果から、コリメータの 4 軸化には望ましい効果があることは明らかである。ただし、調節パラメータが増えることで、調整に必要な時間は大幅に長くなる恐れがあり、コリメータシステム全体を考えた調整スキームの再考が必須である。

コリメータセクションの最下流にあり、アーク部へのビームスポットを最も作りやすいと考えられる Col-3 は、全体の中で一番旧型のコリメータであり、4 軸化が急がれている。そのため、今夏 Col-3 は撤去し、Col-D を Col-3 の場所へ移設する計画である。

参考文献

- [1] M. J. Shirakata *et al.*, THAM4Y01, Proc. of HB2016, Malmö, Sweden, July 2016, pp. 543-547.
- [2] M. J. Shirakata *et al.*, WEP016, Proc. of the PASJ12, Tsuruga, Fukui, Japan, Aug. 5-7, 2015, pp. 441-443.