

# J-PARC RCS におけるビームロスの局所化に向けた研究 STUDY OF THE BEAM LOSS LOCALIZATION IN THE J-PARC RCS

小島邦洸<sup>\*</sup>), 原田寛之, Saha Pranab Kumar  
Kunihiro Kojima<sup>\*</sup>, Hiroyuki Harada, Pranab Kumar Saha  
J-PARC center, Japan Atomic Energy Agency

## Abstract

Uncontrolled beam loss in the 3 GeV rapid-cycling synchrotron (RCS) of the Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC) was investigated. A significant amount of uncontrolled beam loss was observed, especially at each arc section, despite the RCS being equipped with a collimation system designed to collect halo particles with one scatterer and five absorbers. Based on the time-dependence of the beam loss measured in the collimation system and arc sections, the particles lost at the arc sections are found to be likely scattered by the absorber rather than the scatterer, contrary to the design of the collimation system. By changing the configuration of the collimation system, it was determined that the absorber through which the majority of the lost particles passed was the 2nd absorber. In addition, the trajectory of such a particle was investigated by using numerical simulation.

## 1. はじめに

J-PARC 3 GeV シンクロトロン (RCS) は最大で 1 MW ビームを物質生命科学実験施設及び主リングシンクロトロンに供給している [1]。このような大強度陽子加速器では、ビーム損失に伴う装置の放射化の影響を最小化し、機器のメンテナンス性を確保することがビームの安定供給において非常に重要である。そのため、ビーム不安定性等で生じるビーム損失の低減に加えて、RCS ではコリメータシステムを用いたその局所化が図られている [2]。コリメータシステムは RCS ダクト内壁に衝突し損失する可能性のある大振幅な粒子を効率的に回収し、他機器の放射化を抑制することでメンテナンス性の改善に大きく寄与してきた [3]。

Figure 1 に示すようにコリメータシステムは入射直線部の下流に設置されている。これはビーム軌道に向けて厚さ 1 mm のタングステン板を挿入する 1 箇所の散乱体部に加えて、厚さ 200 mm の銅ブロックを挿入する 5 箇所の吸収体部で構成されている。タングステン板及び銅ブロックは各箇所においてビーム軌道を囲むように上下左右の 4 つずつ設置されており、それらは全てビーム進行方向に並行な面を内側に向けている。コリメータシステムが大振幅な粒子を回収する過程を Fig. 2 に示す。RCS のコリメータシステムは 2 ステージコリメーション [4] と呼ばれる方式を採用しており、1 ステージ目で大振幅な粒子は散乱体に衝突する。散乱体の開口部径は大振幅な粒子が他の機器よりも先に衝突するように  $324\pi \text{ mm}\cdot\text{mrad}$  とコリメータシステム外部の  $486\pi \text{ mm}\cdot\text{mrad}$  と比較して狭く設定されている。ここで散乱された粒子はビーム位相の進みに伴い実空間方向に拡がり、2 ステージ目では下流にある吸収体に衝突する。吸収体は 400 MeV の陽子が通過しない十分な厚さを持っており、衝突した粒子は全ての運動エネルギーを失い回収される。散乱体に衝突した粒子の分布は、コリメータシステムを通過する間に左右もしくは上下の吸収体によって少しずつ削られ、最終的に散乱

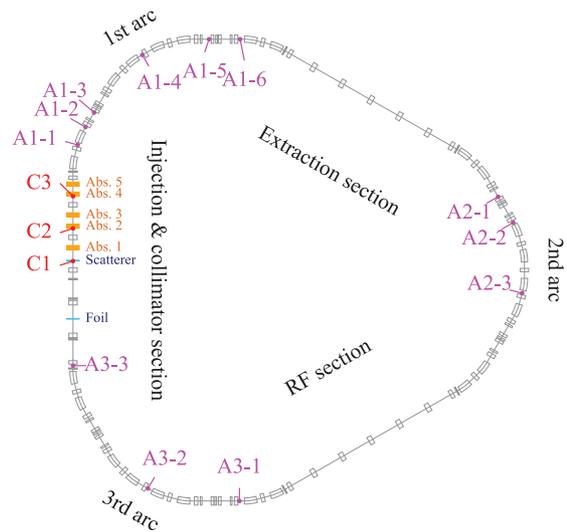


Figure 1: Schematic layout of the J-PARC RCS. The positions of the scatterer and absorbers are indicated by blue squares, and the positions of the BLMs are indicated by red circles.

角が小さいものを除いて殆どが回収される。

一方で、コリメータシステム直下流の第 1 アーク部をはじめ RCS の各所で有意なビーム損失が確認されている。加えて RCS では、1.5 MW を目標としたビーム大強度化が進められており、ビーム損失の増大が見込まれる。そこで、より一層のビーム損失の局所化を目指し、コリメータシステム外部でのビーム損失原因を調査した。利用運転後の空間線量は、出射直線部や加速空洞部に比べてアーク部が明らかに高いことが分かっているため、散乱体ではなく吸収体による粒子の散乱に着目した。Figure 3 に模式的に示す様に、大振幅な粒子はビームエンベロープに沿って銅ブロックに斜めに入射し、想定よりも短い経路長で通過する。その過程で半端にエネルギーを失い大きな運動量偏差を獲得した粒子は、ディスパージョンの高いアーク部で軌道が内側に曲がり、開口部径が大きい地点でも損失し得る。

\* kunihiro.kojima@j-parc.jp

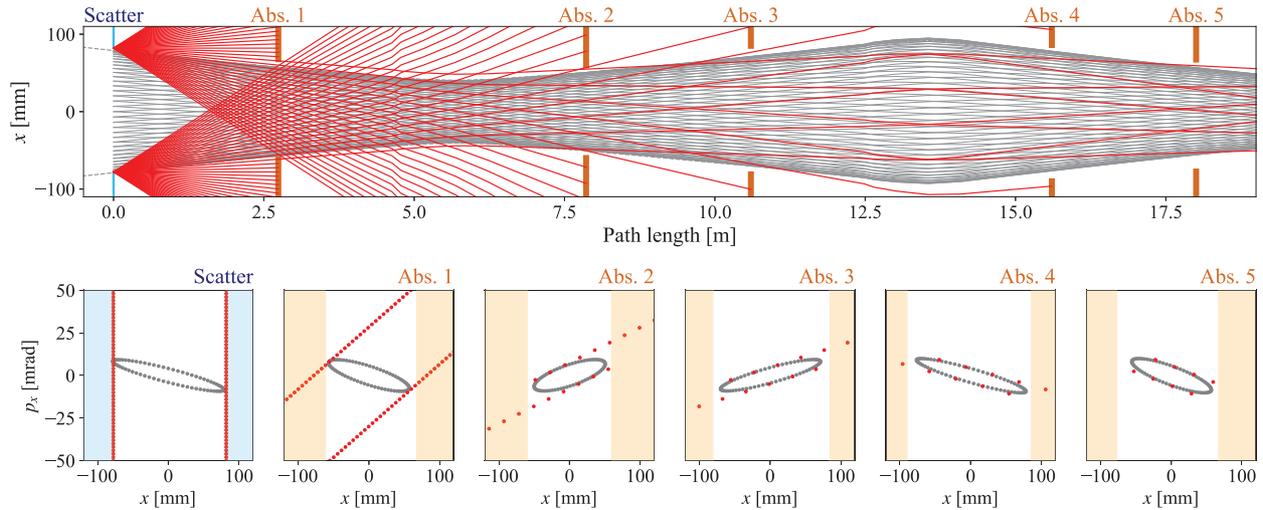


Figure 2: (a) Trajectories of the particles projected on the horizontal plane in the collimation system, and (b) horizontal phase spaces. Apertures of the scatterers are shown in gray squares, while the apertures of the absorbers are shown in brown squares. The scattered particles are indicated in red. The particles having horizontal emittances of  $324\pi$  mm·mrad are shown in gray.

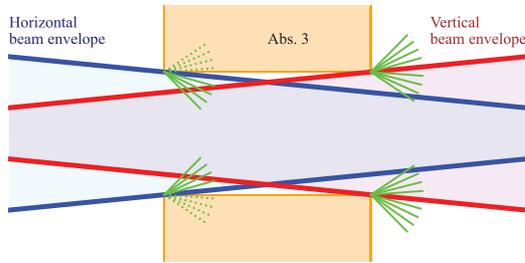


Figure 3: Schematic diagram of the beam scattering at the corner of the copper block in the 3rd absorber. Red and blue lines represent the horizontal and vertical beam envelope, respectively. Green lines represent the scattered particles.

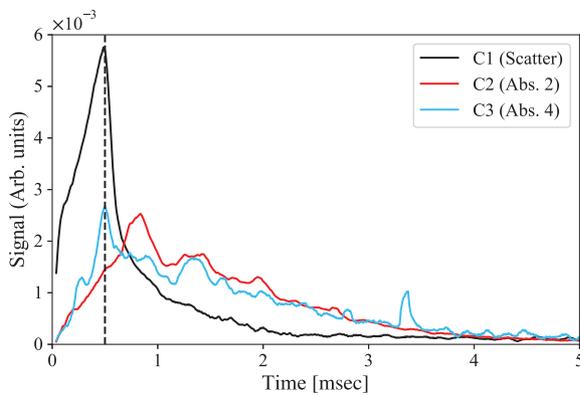


Figure 4: BLM signals measured in the collimation system. The positions of each BLM are indicated in Fig. 1.

本研究では、ビーム試験に基づきアーク部で損失する粒子が経路する吸収体の特定に加えて、ビーム損失の分布を再現するモデルの構築を試みた。

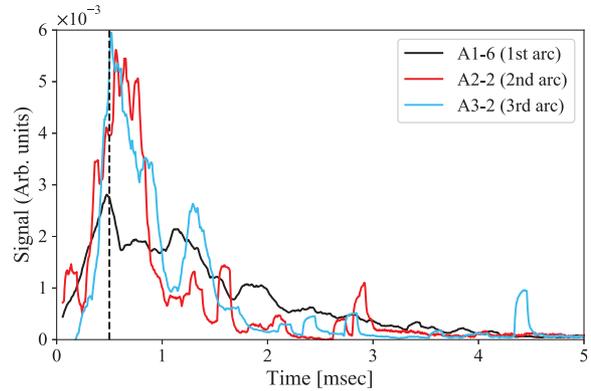


Figure 5: BLM signals measured in the arc sections. The positions of each BLM are indicated in Fig. 1.

## 2. ビーム試験

まず、アーク部で損失する粒子が衝突している吸収体を特定するために、ビームロスモニタ (BLM) の信号に注目する。RCS には多数の BLM が設置されており、これは比例計数管を用いて、粒子がエネルギー失う過程で発生する 2 次粒子を観測し、間接的にビーム損失の多少を測る仕組みとなっている。アーク部で損失している粒子が吸収体に衝突していた場合、その近傍にある BLM の信号はアーク部と同様な時間応答を示すと考えられる。したがって、各部の BLM の信号を比較することで、アーク部で損失する粒子がコリメータシステム内で衝突している地点を特定できる。

コリメータシステム近傍に設置されている 3 台の BLM について、信号の時間応答を Fig. 4 に示す。このとき、ビーム条件は 1 MW の利用運転時と同様であり、BLM の信号はビーム損失の多い入射から 5 ms までを示している。3 台の BLM は Fig. 1 に示すように、それ

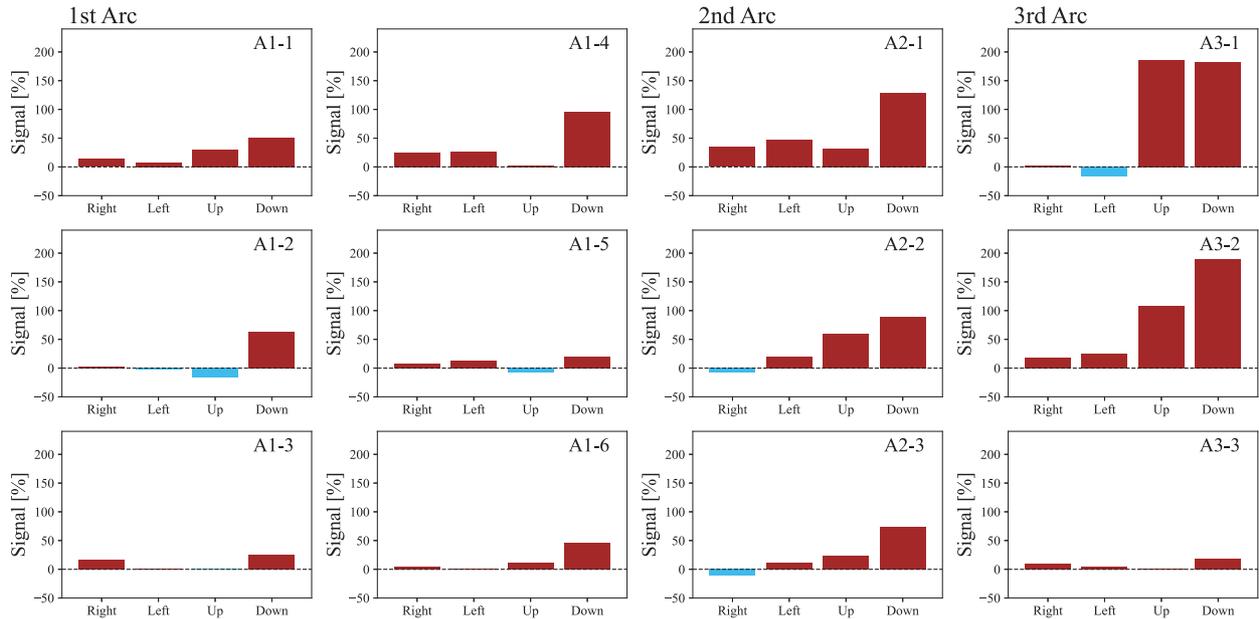


Figure 6: Integral of the BLM signals over 6 ms from the beam injection when one of the copper blocks of right, left, up, and down is pulled out by 4 mm in the 2nd absorber. Each signal is normalized by the BLM signals measured with the current configurations of the collimation system.

それ散乱体 (C1)、吸収体 2 番 (C2)、吸収体 4 番 (C3) の近傍に設置されている。また、各 BLM について真空ダクトに対する設置位置や距離が異なり、信号の大小はビーム損失の多少とほぼ無関係である。そのため、Fig. 4 と Fig. 5 について BLM の信号は、その積分値で規格化している。C1 についてはビーム入射から約 0.5 ms までの信号が顕著であることから、観測しているビーム損失は主に RCS への入射過程で発生していると考えられる。これに対し、吸収体 2 番以降ではビーム入射から 4 ms まで徐々に信号が減衰する C1 と明らかに異なる時間応答が観測された。この結果は、吸収体 2 番より下流と上流でビーム損失の過程が異なることを示唆している。次に、RCS の各アーク部に設置されている BLM の信号を Fig. 5 に示す。これら 3 台全ての BLM で 0.5 ms 以降にも有意なビーム損失を確認でき、C3 に近い時間応答を示していることが分かる。したがって、アーク部で損失する粒子は 2 番以降の吸収体に衝突している可能性が高い。

次に、各銅ブロックの開口部径の変更に対する BLM の信号の応答を調べることで、粒子が衝突している銅ブロックの特定を試みた。最も大きな応答が得られた吸収体 2 番について BLM の信号の応答を Fig. 6 に示す。ここでは上下左右 4 つのうち 1 つの銅ブロックをビーム軌道から 4 mm 遠ざけている。上下の銅ブロックについて BLM の信号が比較的大きく応答しており、それらに多くの粒子が衝突していると考えられる。加えて、Fig. 6 は鉛直方向に粒子の振幅を増大させる不安定性が存在することを示唆しており、これは今後のビーム調整においても有益な知見である。一方で、Fig. 6 のビーム試験では開口部を拡げる操作しかしていないため、各吸収体に衝突する粒子の数は減少している。し

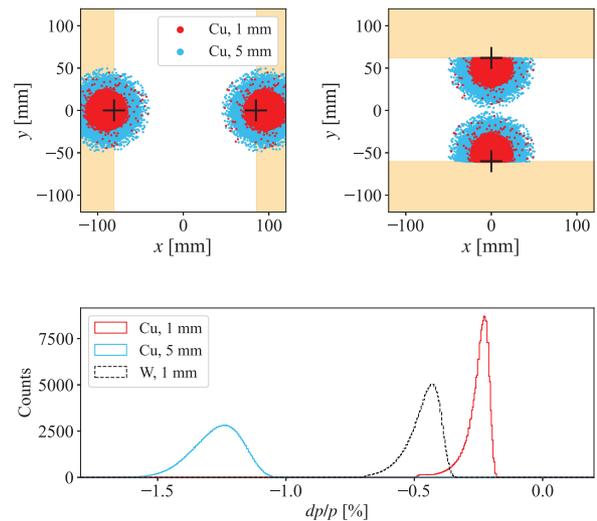


Figure 7: (a) Particle distribution projected on  $x$ - $y$  plane at 1 m downstream of the 3rd absorber, assuming that the particles having kinetic energy of 400 MeV are scattered through 1 mm (red) and 5 mm (blue) length of path in the copper block of the 3rd absorber. (b) Red and blue lines show the corresponding energy spread after the scattering.

たがって、アーク部で BLM の信号が増大した原因は、3 番以降の吸収体に衝突する粒子数の増大に加えて、散乱される地点が下流側に移動したことによるコリメータシステム外での損失のし易さにあると考えられる。

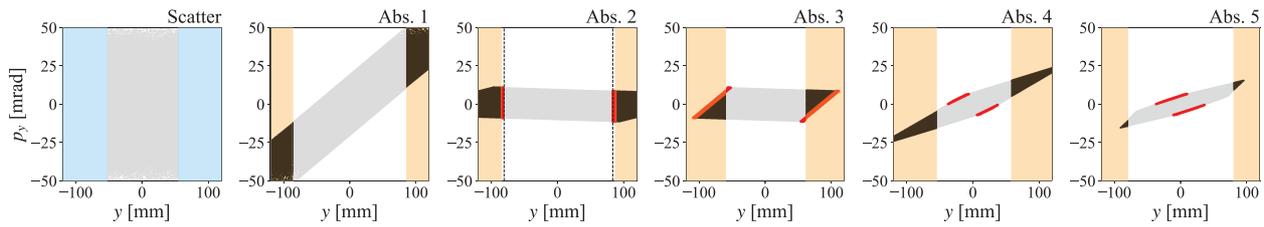


Figure 8: Particle motion in the vertical phase space. The particles that are supposed to hit the 2nd absorber before the copper blocks are pulled out are indicated by red circles.

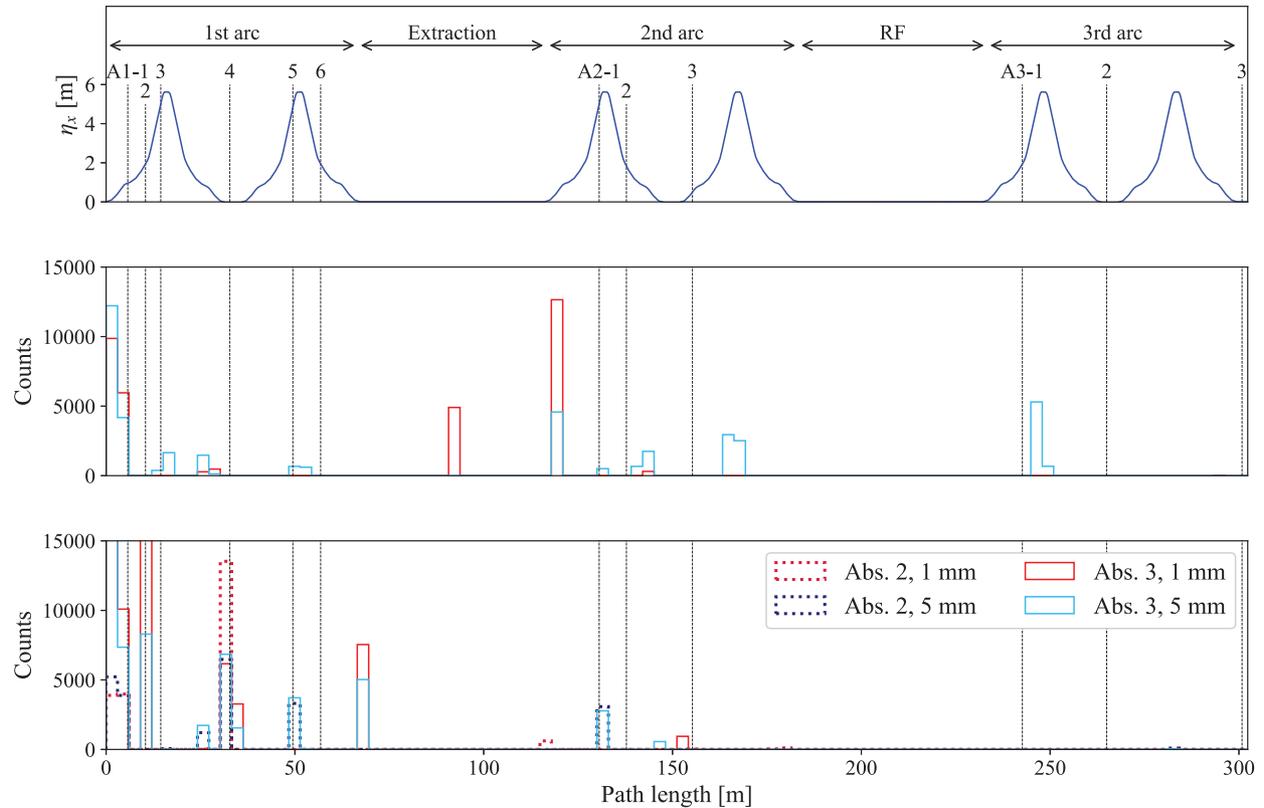


Figure 9: Beam loss distribution along the RCS. Dotted lines represent the positions of BLMs. The dotted and solid lines correspond to the simulation result assuming the particles are scattered in the 2nd and 3rd absorbers, respectively. Red and blue lines represent the particle scattering through 1 mm and 5 mm lengths of the propagation in the copper block, respectively.

### 3. 計算モデル

コリメータシステム外部での粒子の損失過程を同定するために計算モデルを構築した。この計算モデルでは、粒子のトラッキングはSAD [5]、吸収体への衝突による散乱はPHITS [6]を用いて計算する。Figure 7に吸収体3番による粒子散乱を示す。同図(a)と(b)はそれぞれ上下もしくは左右の各吸収体について粒子軌道に最も近い一点に衝突し、1 m 進んだ下流における粒子の実空間分布を表している。簡単のため400 MeVの陽子が厚さ1 mmもしくは5 mmの銅板に垂直に入射した場合を想定している。仮に銅ブロックの端に50 mradの角度で入射したとしても、散乱された粒子の分布は垂直に入射した場合と比較して殆ど差がないことを確認

している。また、Fig. 3に示すように吸収体による散乱は、ビームエンベロープが縮小する場合には上流側、逆の場合には下流側で発生し、前者では軌道の外側に向かって散乱された粒子は銅ブロックに吸収される。計算モデルではこの効果を導入し、例として吸収体3番上下の銅ブロックによる散乱ではFig.7 (b)に示すように、下流に到達しない粒子を落とすとしている。加えて、運動エネルギーの減少も考慮する。Fig. 7 (c)に示すように粒子が厚さ5 mmの銅を通過する際には約1%の大きな運動量偏差を獲得する。

Figure 8はFig. 6のビーム試験に対応した粒子トラッキング結果の一例である。赤色で示す粒子は銅ブロックの位置を変更する前は吸収体2番に衝突していた。これらの粒子は殆どが吸収体3番に衝突しており、反対に4番と5番では位相の関係から殆ど衝突しないこと

が分かる。したがって、Fig. 6 が示す BLM 信号の増大は吸収体 3 番で散乱される粒子の増大が主な要因であると考えられ、以降では吸収体 2 番と 3 番に注目する。

Figure 9 は先述の計算モデルにより評価した吸収体 2 番及び 3 番のそれぞれで散乱された粒子が損失する地点の分布を示す。(a) では左右、(b) では上下の吸収体を出発点とし、それぞれの計算でマクロ粒子は 20 万個用いた。吸収体 3 番を始点とした粒子トラッキングには Fig. 7 に対応した散乱角の粒子分布を用いている。運動量偏差について RCS のアクセプタンスは 1% 程度であり、粒子は大きな散乱角も併さって RCS を 1 周する前に殆どが損失する。そのため、粒子トラッキングは RCS の 5 周のみとして、この程度の短時間ではシンクロトロン振動の位相は殆ど変化しないため縦方向の運動は考慮しない。粒子損失の判定には設計値に基づく開口部径を使用し、設置誤差等は考慮しない。また、粒子損失の判定は各コンポーネントの入口と出口のみで行っている。殆どの粒子がアーク部で損失しており、空間線量の測定結果と整合していることが分かる。一方で、有意なビーム損失の信号を示した BLM の位置と計算モデルが示すビーム損失の分布は殆ど対応していない。特に、計算モデルについて第三アーク部でのビーム損失は BLM で観測可能な位置では発生しておらず、Fig. 6 に示す A3-1 と A3-2 の応答を説明できない。したがって、現時点では計算モデルと実機との整合性が十分ではないことが判明した。

#### 4. まとめ

ビーム損失局所化によりメンテナンス性の改善及びビーム大強度化に貢献する目的で、コリメータシステ

ム外部におけるビーム損失の原因を調査した。BLM 信号の時間応答を比較し、アーク部で損失する粒子は 2 番以降の吸収体により散乱されている可能性が高いことを示した。加えて、吸収体 2 番鉛直方向の開口部径増大に対し、アーク部及び出射直線部におけるビーム損失量の有意な増大を観測した。詳細の把握に向けて PHITS と SAD に基づく、粒子損失の分布を評価する計算モデルを構築したが、ビーム試験結果を上手く再現できなかった。

今後は、シミュレーションモデルに、実機に即した開口部径データを導入するなどして整合性を改善する。また、今回の実験では空間線量の増大が顕著なディスパージョンの高い地点でのビーム損失を観測できなかったため、適切な箇所への BLM の追加を検討する。計算モデルの改良及び実験条件の最適化によりコリメータシステム外部でのビーム損失原因を明らかとし、ビーム損失局所化の改善を進めて行く。

#### 参考文献

- [1] Accelerator Group, JAERI/KEK Joint Project Team, "Accelerator Technical Design Report for J-PARC".
- [2] K. Yamamoto, Phys. Rev. ST Accel. Beams 11, 123501 (2008).
- [3] K. Yamamoto, Prog. Nucl. Sci. Tech. 4, pp. 243-246 (2014).
- [4] J. B. Jeanneret, Phys. Rev. ST Accel. Beams 1, 081001 (1998).
- [5] <http://www-sad.kek.jp>
- [6] T. Sato *et al.*, J. Nucl. Sci. and Technol., 55, pp. 684 - 690, 2018.