

散乱体設置による J-PARC 主リングでのビームロス局所化の増強

BEAM LOSS LOCALIZATION WITH SCATTERER CATCHER SYSTEM IN J-PARC MAIN RING

佐藤洋一^{#, A)}, 橋本義徳^{A)}, 栗本佳典^{A)}, 白形政司^{A)}, 魚田雅彦^{A)}

Yoichi Sato^{#, A)}, Yoshinori Hashimoto^{A)}, Yoshinori Kurimoto^{A)}, Masashi Shirakata^{A)}, Masahiko Uota^{A)}

^{A)}J-PARC / KEK

Abstract

A main issue of high intensity proton accelerators is to reduce residual activation. J-PARC main ring has beam collimators in its first straight section in order to localize beam losses at the collimators. The collimator jaws capture beam halos and scatter protons at the jaw edges simultaneously. The scattered protons are to be captured by the collimators ideally. However, the inseparable functions of capturing and scattering make it difficult to optimize whole collimator settings, and many scattered protons have momentum losses exceeding the momentum aperture of the main ring. Thin tungsten plates are tentatively installed as scatterers to separate scattering function from the collimator jaws and to reduce momentum losses of the scattered protons. The test scatterers have shown better beam loss localization, and the results match with beam simulations.

1. はじめに

大強度陽子加速器における大強度化の課題は、機器放射化の抑制である。J-PARC 主リングでは、現在、速い取り出し運転で 470 kW の利用運転を達成している[1]。ビームロスが放射線対策強化区域（コリメータエリア）に局所化された上で 800 W 程度に抑えられ、メンテナンス性が維持されている。この結果、470 kW 利用運転停止 4 時間後では、コリメータエリア外の機器の放射化は One-foot で 300 μ Sv/h 以下に抑制されている。On-contact では利用運転停止 6 時間後で 2 mSv/h 近くなるホットスポットがいくつかあるが、ビーム調整の最適化で緩和を図っている。

今後の更なる大強度化のために、繰り返しを倍にした増強計画が進んでいる[2]。この大強度化では、ビーム強度とビームロスが繰り返し時間にほぼ反比例して増加することが予想される。放射線対策強化区域全体のビームロス許容量 (> 2 kW) は既に確保されているが、放射線対策強化区域外のメンテナンス性の維持のためには、ビームロス局所化能力を増強する必要がある。

2. 現コリメータシステムの課題



Figure 1: Collimator configuration of J-PARC MR. Boxes stand for injection kickers (gray), quadrupoles (yellow), steering magnets (blue), collimator jaws & capacitors (red/pink), and a scatterer system (green).

J-PARC 主リングでは、入射直線部下流を放射線対策強化区域（コリメータエリア）とし、Figure 1 のように 5 つのコリメータを設置し、この区域に

[#] yoichi.sato@j-parc.jp

ビームロスを局所化させることで、区域外の機器の放射化を抑えている。各コリメータ（上流から順に Col-A, Col-B, Col-C, Col-D, Col-3 と名付けられている）はそれぞれ 500 W のビームロス許容量を持つ。

コリメータ群は Dispersion が 0 の領域にあり、それぞれがビームから見て L 字型もしくは I 字型の厚いタングステンブロック（Jaw）を持つ。主リングは、コリメータエリアを除き物理口径 81 π mm mrad 以上、運動量口径 \pm 1%に設計されている。ビームロスの局所化には、各コリメータの Jaw を水平・鉛直方向に操作して物理口径の十分内側（ \sim 60 π mm mrad）に設置し、コリメータ間の位相差、周回毎の位相差を利用しながらビームハローと Jaw ブロック際で生じる散乱粒子を、各コリメータのビームロス許容量内に収めるようビームロスバランスを取りながら、コリメータエリア内で回収する必要がある。

主リングの高繰り返し増強後には、ビームロスがコリメータ許容量の総和に近くなるビーム運転が見込まれ、各コリメータのビームロス許容量を均等に利用するビームロスバランス取りがより重要になる。また、大強度ビームにおいてはビームハローの横方向エミッタンスは周回する中で徐々に増大し、ビームハローの多くが Jaw ブロック際で散乱される。このため、Jaw 位置の最適化にはビームハロー捕獲機能だけでなく Jaw ブロック際における散乱機能も付随した調整が必要となる。現コリメータシステムの課題は、散乱粒子の取り扱いである。散乱粒子の効率的回収のために、Jaw 角度可変コリメータが一部導入されビームロス局所化の成果をあげている[3][4]。しかしながら、散乱機能と捕獲機能が未分化の状況でコリメータ群の Jaw 位置最適化を行わなければならないこと、更に、Jaw ブロック際での散乱粒子には運動量損失がリング運動量口径の 1%を超えるものも多くあり（Figure 2 青線）、散乱角が不足して

いる粒子は Dispersion 0 領域のコリメータでは回収されずにリング曲線部の Dispersion ピーク近傍でのビームロスとなることも考慮しなければならない。コリメータ調整は多変数パラメータの微小応答を見ながら徐々に進められ、最適化には長時間を要する。

3. 散乱体による新コリメータシステムの検討

現コリメータシステムの散乱捕獲機能一体方式に替えて、散乱-捕獲機能独立方式の採用を検討するため、散乱体試験機を導入した。これは、コリメータ群の上流にタングステン 1 mm 厚板を散乱体として設置することで、コリメータシステムにおける、散乱機能と捕獲機能の独立を可能にし、かつ、散乱粒子の運動量損失を抑制することが期待出来るためである。試験機の導入により

- ビームロス分布の応答を見て、ビームロス局所化能力の強化の実証し、散乱-捕獲機能独立方式を新たなコリメータシナリオ候補として評価。
- コリメータシナリオビームシミュレーションのベンチマーク作成とシミュレーションモデルの高度化。
- ビーム試験時の温度上昇と試験後の残留線量測定を通して、利用運転に耐える実用機への要求性能の見積もり。

を企図した。

3.1 薄板散乱体とコリメータ Jaw ブロック際における陽子ビーム散乱角と運動量損失の比較計算

ビームハローに対する散乱機能を、タングステン 1 mm 厚の薄板散乱体とタングステン Jaw ブロックでのそれぞれの散乱シミュレーションで比較した。シミュレーションでは、鉛直方向 60π mm mrad に設定した薄板散乱体もしくは Jaw に当たる位相に在り、かつ、鉛直方向で 60π mm mrad から 62π mm mrad の間に在り、水平方向では 3σ で 60π mm mrad の正規分布を持つ 3 GeV の 10 万計算粒子を生成し、Geant4 コードを用いて散乱過程を計算した。Figure 2 で運動量損失、Figure 3 で散乱角を示す。この結果、Jaw ブロック際の散乱では運動量損失が 5% 程度まで分布するのに対し、薄板散乱体の散乱では、散乱機能の独立に十分な散乱角を確保した上で、運動量損失を 0.2% 程度の分布に留めることが期待できた。

3.2 薄板散乱体の温度上昇と残留線量の見積もり

J-PARC 主リングは利用運転装置であるため、散乱体試験機は、ビーム試験後の利用運転に影響を与えないことが重要である。このため、実用機ではないといえ、厳しいビーム環境でも薄板が破損しない、またメンテナンス性を損なわないビーム試験条件を予め見積もった。

温度上昇の見積もりは、1 mm 厚タングステン板上の 1 cm 平方のエリアに $5e12$ 個の陽子 (8 バンチ 470 kW 利用運転でのビームロスに相当する陽子数) が全て当たる条件で行った。実際には、タングステン板以外にも Jaw や物理口径が狭い箇所でのビームロスもあり、2 バンチで行うビーム試験より数倍厳しい条件である。これに近い状況が起こるとすれば、タングステン板での散乱角が想定よりも著しく小さいか、タングステン板をビームコア近くまで寄せた場合である。更に、タングステン板に熱放射や支持台への熱伝導もない場合で検討した結果、1

ショットで 7 K 程度の温度上昇と算出された。この見積もりから、よほど悪い条件に気づかずにビーム試験を続けるということがなければ温度上昇由来での機器損傷は起きないと考えられた。もちろん、実用機の作成に当たっては熱伝導も考慮した冷却能力の評価が重要であるが、それはビーム試験での温度測定をベンチマークとしたモデル高度化を進めることにした。

残留線量見積もりは PHITS 2.52 と DCHAIN-SP2001 を用いて行われた。ビーム条件は 1 ショットで $5e12$ 個の陽子がタングステン板に照射されるとし、600 ショットのビーム試験を行うと仮定した。この場合、チェンバー表面で試験 4 時間後に 3 mSv/h、試験 24 時間後に 1 mSv/h、試験 1 か月後で 40 μ Sv/h との見積もりとなった。

以上の見積もりを通して、ビーム試験に当たっては薄板散乱体がビームコアにまで届かないようにハード的制限を与えること (40π mm mrad)、温度を測りながら、100 ショットを上限に残留線量を見ることにした。

3.3 散乱体試験機の導入

散乱体試験機は、その目的から、入射直線部でかつコリメータエリアの上流に位置する必要がある。しかしながら、入射直線部は各種機器の取り合いが込み合っている上に、コリメータエリアの近傍のため、放射化の厳しい領域でもある。検討の結果、入射キッカー下流にある、イオンポンプ・粗排気ポートとエリアを共有することで、散乱体試験機の場所を確保した。また、装置の故障によるビーム利用運転への影響を回避するため、10 分程度で試験機全体を撤去する緊急撤去シナリオを用意した。

Figure 4 は散乱体試験機をビーム方向から見た構造図である。散乱体試験機には、1 mm 厚タングステン板を、鉛直方向上側、水平方向リング外側、水平方向リング内側の 3 方向から挿入する直線導入機と熱電対温度計、鉛直方向下側にイオンポンプ・粗排気ポート、試験機側面にシンチレータを配備した。なお、シンチレータは散乱体試験機だけでなく、各コリメータの近く、また、第 1 曲線部の β_x 関数極大点と Dispersion peak にも配備した。シンチレータはターン毎の時間発展も追える時間分解能を持つため、ビームハローに対するエミッタンスモニターとしてビームコミッショニングでの利用も可能である。

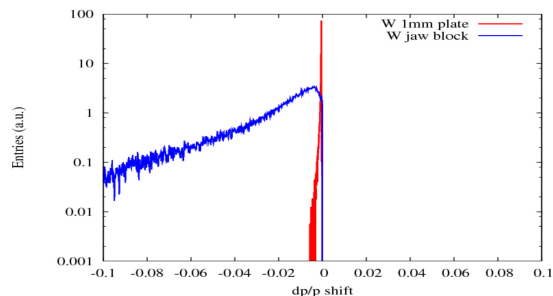


Figure 2: Momentum shifts of scattered particles at test-scatterer vertical plate (red line), and COL-B vertical jaw (blue line).

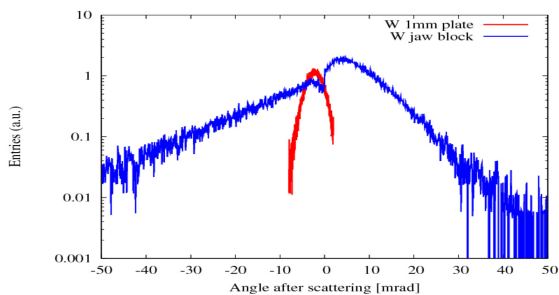


Figure 3: Scattered angles of scattered particles at test-scatterer vertical plate (red line) and COL-B vertical jaw (blue line).

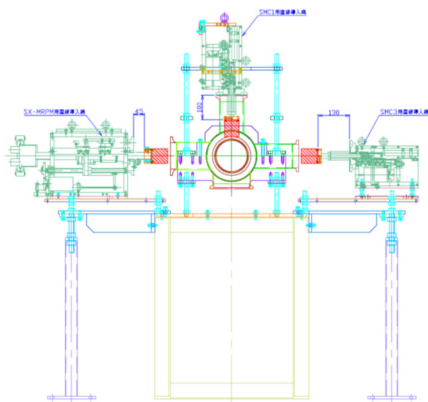


Figure 4: New scatterer test device. Three red squares show W-plates.

4. 大強度ビーム試験結果とビームシミュレーションとの対応

4.1 大強度ビームでの薄板散乱体ビーム試験

大強度ビームに対する、コリメータシナリオ検討用ビーム試験は、速い取り出し利用運転と同じビーム設定で、470 kW 運転と同じバンチ当たりの陽子数を持つ 2 バンチビームに対して行った。薄板散乱体とコリメータについては、以下の 3 条件を選んだ。条件 (1): まず薄板散乱体とコリメータの全てを全開にし、MR 全周の物理口径でのビームロスとロス分布を測定し (Figures 5, 7, 8 黒線条件)、条件 (2): 次に鉛直方向上側の薄板散乱体を 60π mm mrad に設定し、ビームロス局所化が十分になるまで鉛直方向のコリメータ Jaw を移動させ、Col-B 鉛直方向上側 Jaw を 60π mm mrad、Col3 鉛直方向下側 Jaw を 75π mm mrad にした (Figures 5, 7, 8 赤線条件)。条件 (3): その後、コリメータ条件はそのまま薄板散乱体を全開にした (Figures 5, 7, 8 青線条件)。この操作により、条件 (2) (3) は、散乱体適用の有無で、ビームロス総量と同じに維持しながら、ビームロス分布だけが変化するデータとなっていることが、Figure 5 に見る DCCT で測定したビーム強度の時間応答から言える。Figure 6 は上記 3 条件でのビームハロー、散乱体、Jaw、散乱粒子の正準化位相関係である。ただし、共通条件として Col-A, Col-C, Col-D は水平方向、鉛直方向ともに全開に設定しているが、現在のオペレーションでは Col-A 水平方向と

Col-C 水平方向の物理口径が 75π mm mrad となっていて、他所の物理口径 (81π mm mrad 以上) より絞られていることに留意する必要がある。Figures 7, 8 はそれぞれ第 1 曲線部の最初の β_x 関数極大点と Dispersion peak において、比例係数管で測定したビームロスモニター信号 (P-BLM) である。薄板散乱体の利用により、第 1 曲線部の最初の β_x 関数極大点と Dispersion peak の BLM が下がることから、ビームロス局所化能力への効果を実証された。Figures 9, 10, 11 はそれぞれ条件 (1) (2) (3) に対する、P-BLM 信号のうち、薄板散乱体 (赤点)、コリメータエリア (上流から緑、青、紫、水色点)、第 1 曲線部 β_x 関数極大点 (黄点) と Dispersion peak (黒点) の近傍のものを選んだ。散乱体の適用で Col-B 対応の P-BLM (緑点) が増加し、Col-3 対応の P-BLM (水色点) が抑制されることから、ビームロスバランスの均一化能力も確認された。コリメータエリア中央に対応する P-BLM (青、紫点) は条件 (1) (2) (3) で差が殆どないが、これはコリメータエリアの物理口径が一部絞られていることと対応していると考えられる。第 1 曲線部の 2 点の P-BLM 応答は Figure 7, 8 で既に議論したものだが、コリメータエリアの P-BLM 信号と比べると低い信号強度での議論である。なお、シンチレータは散乱体試験機、コリメータ部ともに P-BLM と同様の時間応答を示している。

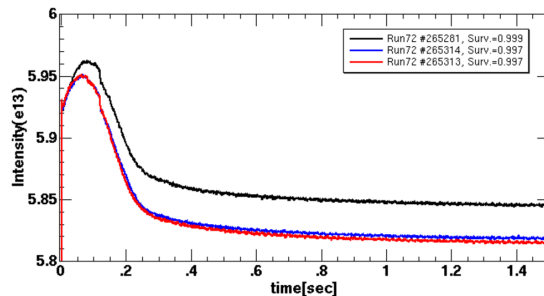


Figure 5: Beam intensities for scatterer-catcher beam tests with DCCT measurement. Black line is for “Condition (1): fully opened Scatterer and Collimators.” Blue line is for “Condition (2): fully opened Scatterer, ColB-Vertical-up jaw 60π mm mrad, Col3-Vertical-down jaw 75π mm mrad.” Red line is for “Condition (3): Scatterer-Vertical-up 60π mm mrad, ColB-Vertical-up jaw 60π mm mrad, Col3-Vertical-down jaw 75π mm mrad.”

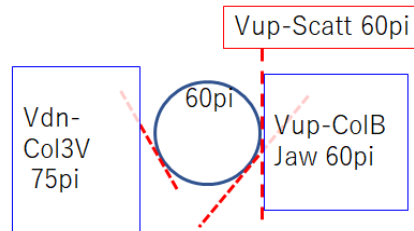


Figure 6: Phase diagram of Beam halo, Scatterer plate, Collimator Jaws in normalized phase space of Y-PY for scatterer-catcher beam tests. Other collimators (Col-A, Col-C, Col-D) are fully opened

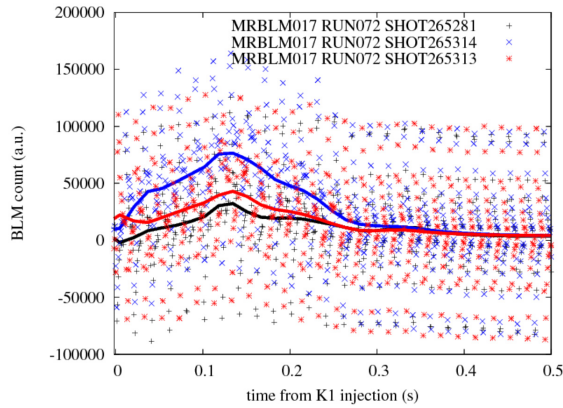


Figure 7: Beam loss signals at the top of the first arc section having high beta function. Colors correspond to the same conditions used in Figure 5. Lines are smoothed lines for 1 kHz data (dots)

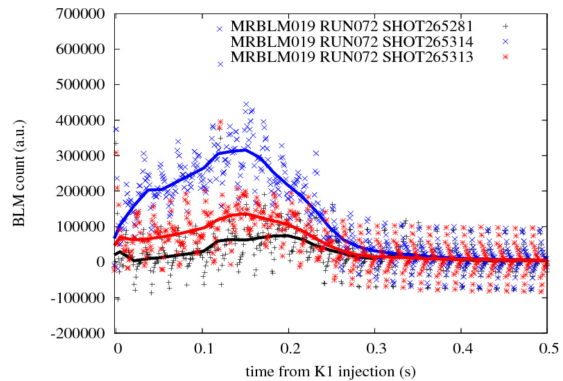


Figure 8: Beam loss signals at the first dispersion peak. Colors correspond to the same conditions used in Figure 5. Lines are smoothed lines for 1 kHz data (dots)

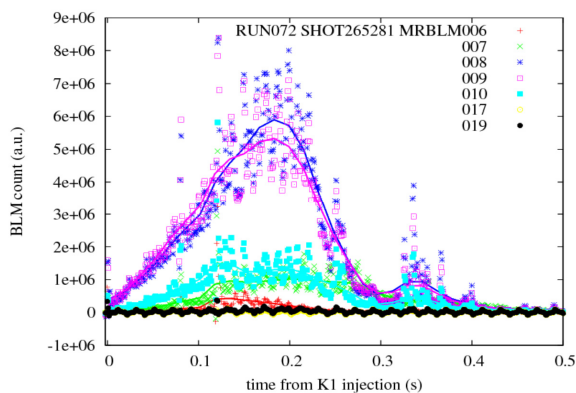


Figure 9: Beam loss signals at Scatterer (red), Collimators (green, blue, purple, cyan), a high beta function (yellow) and the first dispersion peak (black) for fully opened Scatterer and Collimators.

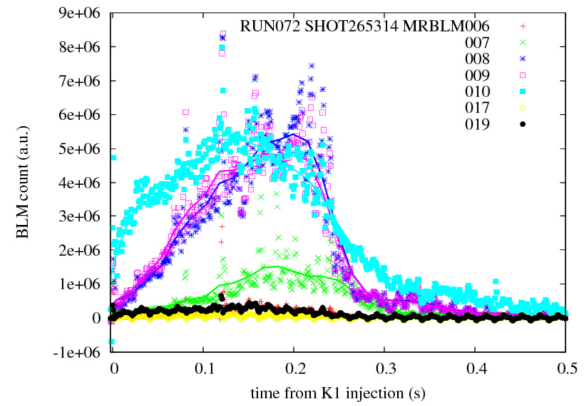


Figure 10: Beam loss signals at Scatterer (red), Collimators (green, blue, purple, cyan), a high beta function (yellow) and the first dispersion peak (black) for fully opened Scatterer, ColB-Vertical-up jaw 60π mm mrad, Col3-Vertical-down jaw 75π mm mrad.

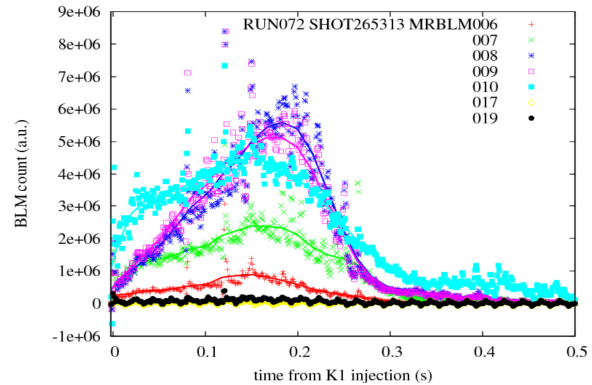


Figure 11: Beam loss signals at Scatterer (red), Collimators (green, blue, purple, cyan), high beta function (yellow) and the first dispersion peak (black) for Scatterer-Vertical-up 60π mm mrad, ColB-Vertical-up jaw 60π mm mrad, Col3-Vertical-down jaw 75π mm mrad.

4.2 ビームシミュレーションとの対応

Figure 12 は、条件(2)(3)に対応したシミュレーションでの、コリメータエリアを除いたビームロス時間積分の分布である(条件(2)は青点、条件(3)は赤点)。横軸は主リング全周のアドレス番号である。薄板散乱体と Col-B それぞれで散乱された粒子分布をセクション 3.1 と同じ手法で生成し、位相差を考慮しながら SAD コードでトラッキング計算を行い、薄板散乱体・コリメータ Jaw・コリメータエリアを含む全周の物理口径に抵触した粒子をビームロスとして扱っている。特に、Col-3 では散乱計算は行わず、ビームハロー捕獲体としてのみ扱った。Figure 7 での P-BLM 応答はアドレス 17、Figure 8 での P-BLM 応答はアドレス 19、Figures 9, 10, 11 で見た P-BLM 応答はアドレス 6,7, 8, 9, 10, 17, 19 に対応している。P-BLM の実際のビームロスへの応答が、P-BLM の幾何的配置によりアドレス番号で ± 1 ずれ得ることを考慮すれば、シミュレーションで見た散乱体の効果はビーム試験結果と正応してい

る。アドレス 131 は散乱体の適用でロスが増加した計算結果となっているが、このロス粒子は鉛直方向の位相とエミッタンスがちょうど Col-3 鉛直方向下側 75π mm mrad の Jaw に対応しており、ビーム試験における Col-3 の Jaw 設定が 0.2 mm ずれて 1π mm mrad 変わること、利用運転でも Col-3 での Jaw 位置を 0.2 mm 移動させると、ビームロス分布が大きく変動することを考慮すれば[3]、このシミュレーションは実情を反映した良いモデルといえる。

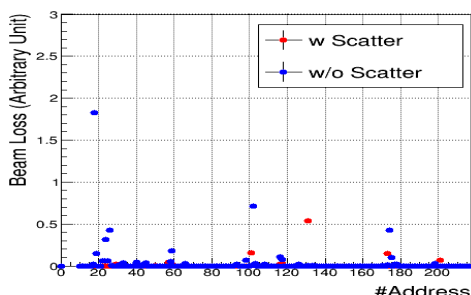


Figure 12: Simulated beam loss signals. Blue dots are for “Condition (2): fully opened Scatterer, ColB-Vertical-up jaw 60π mm mrad, Col3-Vertical-down jaw 75π mm mrad.” Red dots are for “Condition (3): Scatterer-Vertical-up 60π mm mrad, ColB-Vertical-up jaw 60π mm mrad, Col3-Vertical-down jaw 75π mm mrad.

5. 今後に向けて

5.1 今後必要となるビーム試験

鉛直方向ではビームロス局所化を実証した、薄板散乱体のビーム試験だが、水平方向での薄板散乱体適用の効果はまだ実証できていない。これは先に述べたコリメータエリアの水平方向の物理口径が狭いこと、薄板散乱体と、現在のコリメータ Jaw との位相関係があまり良くないことと関連する。コリメータ Jaw を全開にして、水平方向の薄板散乱体と物理口径との対応試験はある程度実施しており、シミュレーションモデルのベンチマークにできる。しかしながら、水平方向への薄板散乱体のビームロス局所化効果を明確に見るには薄板散乱体をよりビームコアに近づけたビーム試験を行いたいと考えている。ハードウェアの健全性を維持しながら慎重に試験を行うための条件を現在検討中である。

セクション 4.1 で行った大強度ビーム試験では、ビームロスの応答測定に加え、温度測定、試験後の残留線量測定も行った。温度測定では、単発ショットを数分置きに打つ範囲では有意な温度上昇は見られなかった。これは、温度上昇見積もりを行ったとても厳しいビーム条件よりも、実際のビーム試験では薄板散乱体だけにビームが当たり続けることはなかったこと、熱放射や熱伝導が実際はあることから、熱電対温度計の有効測定範囲を下回ったと考えている。このため、今後の試験では熱の積み上がり評価すべく、利用運転と同じく 2.48 s サイクルでの連続ショットで温度上昇を評価したいと考えている。一方機器の放射化だが、数度に分けた総計 100 ショット程度のビーム試験後の線量測定では周辺機器の放射化と比べ有意な差がなかった。以上から、まずは連続 100 ショッ

トで温度積み上がり効果の測定を行い、残留線量を確認後、メンテナンス性を損なわない範囲でショット数を積み上げ、温度見積もり・放射化モデルの高度化、実用機の冷却機構・遮蔽機構の検討を行いたい。散乱体実用機は遮蔽体の設置、周辺機器放射化への影響を考慮し、現在の入射キッカー直下流ではなく、Col-A 直上流に置く必要がある。今後、散乱体試験機を実用機用区間に移設し、ビーム試験を実用機位置で実施する予定である。

5.2 薄板散乱体の素材検討

放射化抑制を念頭に置き、低原子番号物質素材としてグラファイトの適用も検討した。タングステン 1 mm と厚み当たり同質量となるグラファイト 10 mm 厚板を散乱体としてセクション 3.1 と同様のシミュレーションを行った。グラファイト 10 mm 厚板による散乱角はタングステン 1 mm 厚板の 1/3、運動量損失はタングステン 1 mm 厚板の 2 倍となり、ビームロス局所化の促進という主目的からは離れる結果を得たため、実用機においてもタングステン 1 mm 厚板の採用を考えている。

6. まとめ

J-PARC MR における今後の大強度化におけるロス局所化能力を増強するシナリオとして、現コリメータシステムの散乱捕獲機能一体方式における課題：

- 散乱機能とハローカット・吸収機能が未分化のため、最適化調整に時間がかかる。
- 散乱粒子の運動量シフトが大きく、Dispersion peak でのロスが不可避。

を克服するため、散乱-捕獲機能独立方式の採用を検討した。散乱体試験機を導入してビーム試験を行い

- 良好なロス局所化能力を実証。
- ビームシミュレーションは試験結果と良く一致。
- 単発 100 ショット程度のビームハロー散乱では、温度上昇、放射化ともに有意な差を生じない。

の結果を得た。今後は、散乱-捕獲機能独立方式を利用運転に適用すべく、Jaw との兼ね合いも考慮したシミュレーションベースでのコリメータシナリオを作成する。また、更なるビーム試験を行い必要冷却能力、放射化状況を把握した上で、冷却機能と放射線遮蔽機構を完備した散乱体実用機を設計する。

本研究は特別推進研究科研費 16H06288 の助成を受けたものである。J-PARC 加速器、ニュートリノグループに謝意を表す。JAEA 原田寛之氏からは J-PARC RCS コリメータシステムにおける散乱体の運用知見に基づく有益な助言を、数多く頂いたことを特に記す。

参考文献

- [1] K. Hasegawa *et al.*, “J-PARC 加速器の現状”, FPS002, in this proceeding.
- [2] S. Igarashi, MOAM6P60, Proc. of HB2016, Malmoe, Sweden, July 2016, pp. 21-26.
- [3] M. J. Shirakata *et al.*, THAM4Y01, Proc. of HB2016, Malmoe, Sweden, July 2016, pp. 543-547.
- [4] M. Shirakata and Y. Sato, “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”, WEP083, in this proceeding.