

FOIL SCATTERING LOSS MITIGATION BY THE ADDITIONAL COLLIMATION SYSTEM OF J-PARC RCS

Kazami Yamamoto^{#A)}, Yoshio Yamazaki^{A)}, Masahiro Yoshimoto^{A)}, Junichiro Kamiya^{A)}, Hiroyuki Harada^{A)},
Pranab Kumar Saha^{A)}, Hideaki Hotchi^{A)}, Michikazu Kinsho^{A)} and Shinichi Kato^{B)}

^{A)}Accelerator Division in J-PARC Center

2-4 Shirakata-shirane, Tokai-mura, Ibaraki-ken, 319-1195

^{B)}Tohoku University

1-1-2 Katahira, Aoba-ku, Sendai, 980-8577

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. From the beam study, we were certain that these losses were caused by the scattering of the injection and circulating beam at the charge exchange injection foil. In order to mitigate these losses, we started to develop a new collimation system in the H0 branch duct. We present latest study results and overview of this new collimation system.

J-PARC 3GeV RCS 入射部コリメータによるロス低減

1. はじめに

J-PARC 3GeV シンクロトロン (Rapid Cycling Synchrotron, RCS)では、2008年12月より物質生命科学実験施設(Material and Life science experimental facility, MLF)ユーザーに向けて20kWの出力でビーム供用を開始した[1]。その後改良を続けて、2009年9月に120kW、2010年11月には200kWまで出力を上昇させ、震災による運転停止までの間安定に供給を続けてきた。RCSのMLFユーザーへの供用は通常2週間から3週間続けて行われ、その間に数日の加速器コンディショニング/メンテナンスが挟まれる。

図1に震災直前の1月に行われた200kW連続供用運転終了後の線量分布を示す。この際は、1月13日よりRCSのビーム試験を開始し、1/21より200kWにてMLFへの供用を開始した。その後、2/10の午前中に供用を停止し、停止4時間後に残留線量の測定を行った。

図の測定値は機器表面での値である。現状、このような条件で連続運転を行っても、RCSトンネル内の空間線量はどの領域においても立ち入りできなくなるようなレベルとはならない。しかしながら、入射部付近には無視できない線量の上昇がみられる。

これらのうち、リニアックからRCSへのビーム、無輸送ライン(L3BT)からRCSにビームを入射するためのセプタム電磁石1と2の間で観測された2.0mSv/hrの残留線量に関しては、セプタムによって曲げられるビーム軌道の反対側だけで線量が確認できるため、おそらくL3BTを輸送中に何らかの理由(残留ガスとの衝突やローレンツストリッピング等)で荷電変換された粒子が当たっていると考えられる。詳細な原因はまだ不明であるが、この点でのビームロス量はビームパワーに比例する事が判っているため、1MW運転時でも4時間冷却後の機器表

面の測定値で10mSv/hr程度と想定され、またポイントロスであるため空間線量への寄与は小さくメンテナンスができないロスではない。

現時点でRCSの運転上もっとも問題となるロス発生点は、入射時に発生した荷電変換に失敗したH-およびH0を廃棄するダンプへの分岐部(H0ダンプ分岐部)と、その下流のステアリング電磁石内のビーム位置モニタ(BPM)である。これらの箇所では停止4時間後で5mSv/hr前後の線量が観測され、また広い範囲に線量が分布しているため、作業時の被ばくの観点からこれ以上のパワーの上昇を目指すためには何らかの対処が必要である。

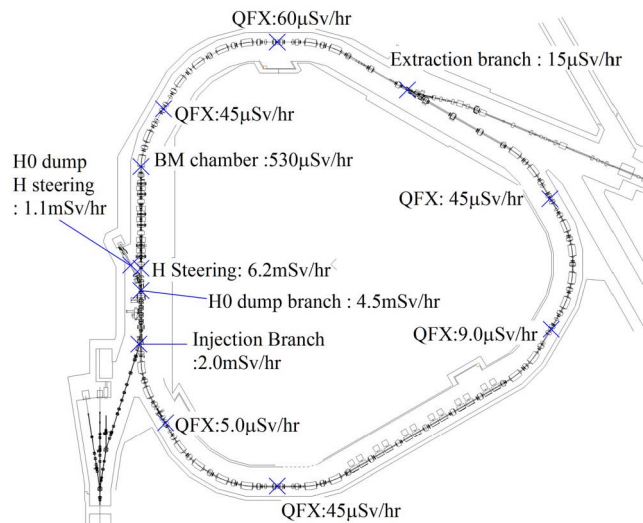


Figure 1: Residual radiation level after beam shutdown. 4 hour after 200kW 20days operation(10th Feb., 2011).

RCSでは上記以外のロスはほぼ全てコリメータに局所化されており、入射直線部以外で100μSv/hrを超えるような箇所は無い[2]。

そこで、更なる高出力を目指すにあたり、これら H0 ダンプ分岐部および下流 BPM でのロスの原因究明と対策を検討した。

2. ビームロスの原因調査

ロスの原因調査のため、入射条件を変えて線量の高い H0 ダンプ分岐部に設置したプラスチックシンチレータ型ロスモニタの出力を比較した。図 2 は、RCS 入射時の水平方向のペインティング条件を変えた際のロスモニタの生波形を示しており、ペインティングを行ってビームを広げるほどにロスが減っているのが判る。RCS でペイント入射を行った際には、①空間電荷の影響が弱まる、②周回ビームのフォイル衝突回数が減少する、という 2 つの効果が得られる。そこで、さらに条件を加えて、周回ビームのフォイル衝突回数とロスモニタ信号の積分値の関係を調査した。図 3 中の左側の 2 つの図は、H0 ダンプ分岐部および下流 BPM に設置したプラスチックシンチレータ型ロスモニタの出力の積分値を、条件を変えてプロットした物である。図中にはまた、各条件でのフォイル衝突回数の評価値が記載してある。これらのフォイル衝突回数を用いて、各ロスモニタ出力の積分値を規格化した物が右側の図である。フォイル衝突回数で規格化すると、ロスモニタ出力は一定になっている。すなわち、このロスはフォイル衝突により周回ビームが散乱される事が原因である事が判る[3]。

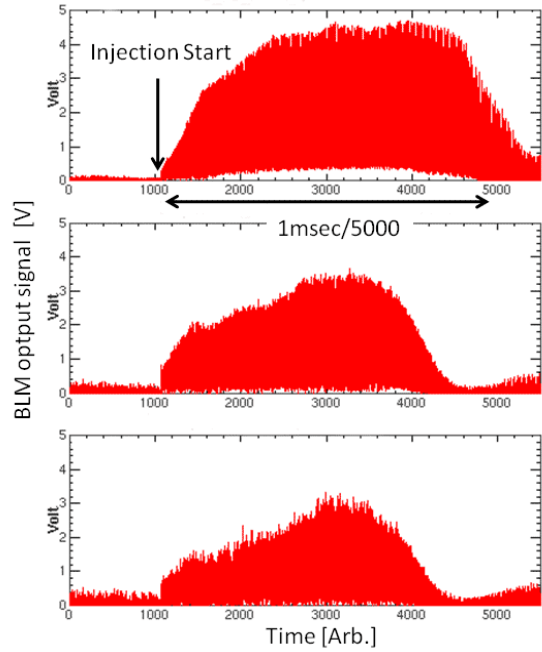


Figure 2: BLM signal at the H0 dump branch. Upper figure shows the BLM signal without painting. Middle figure shows the BLM signal with 100 π mm-mrad painting. Lower figure shows the BLM signal with 150 π mm-mrad painting.

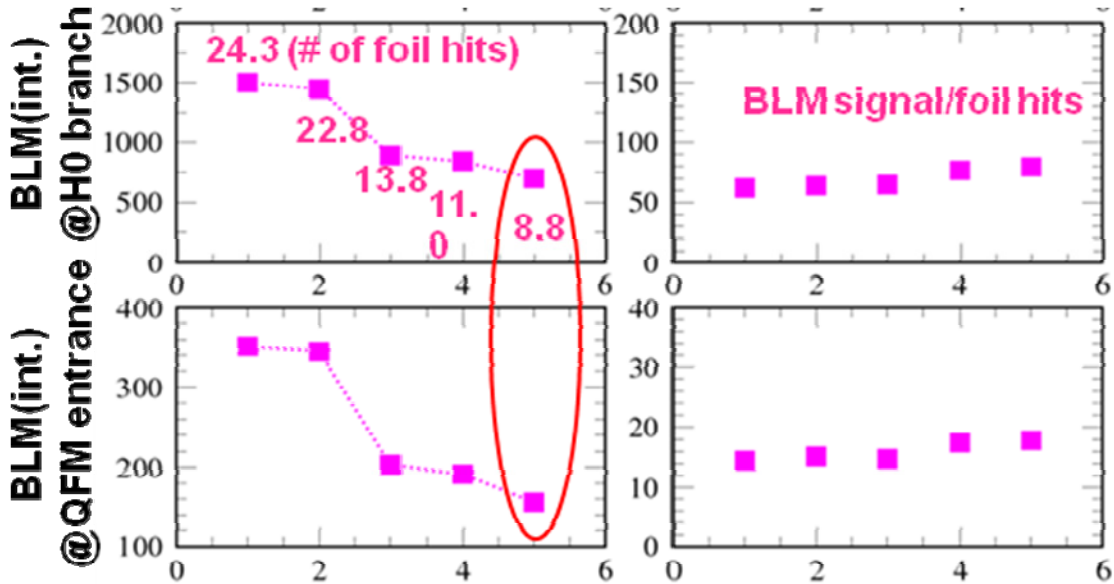


Figure 3: BLM signal dependence on the number of foil hit.

3. ロスの対策

3.1 小型フォイルの採用

周回ビームの散乱回数を減らす方法としては、フォイルの大きさを小さくすることが考えられる。120kW 供用運転時には、リニアックビームのハ

ロー部分がフォイルに当たらずに H0 ダンプに捨てられる事を避けるため、測定されたリニアックビームサイズと比較してかなり大きめのフォイルを使用していた。しかし、L3BT および RCS 入射部近傍でのプロファイル測定の結果から、より小さいフォイルでもほぼすべての粒子が荷電変換可能であると考えられたため、200kW 供用運転開始前に垂直方向

の寸法を 40mm から 15mm まで狭めた小型フォイルでの連続運転試験を実施した(図 4 参照)。しかしながら、結果としてはプロファイルモニタで測定できていないテール部分が 1%以上も存在し、それらが H0 ダンプに廃棄されることでダンプ周辺を汚染する事が判明した。ダンプ周辺の線量は大型フォイル使用時の 10 倍以上にもなり、今度はその周辺での作業に支障をきたすようになった。

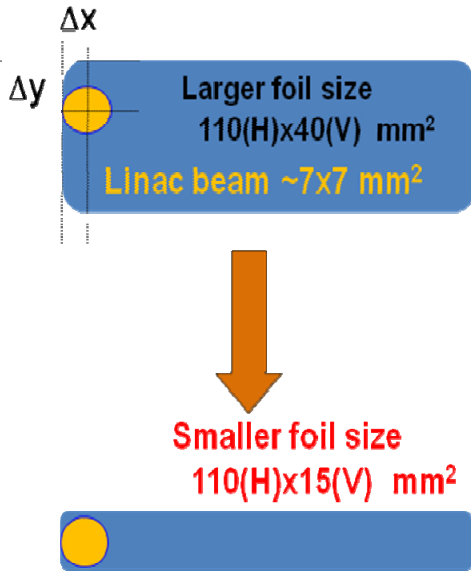


Figure 4: Foil size

そのため、最終的には 15mm より少し幅を大きくした 20mm のフォイルで供用運転を行う事となったが、この寸法のフォイルでは 200kW 供用運転後の線量が図 1 の値となり、保守作業時の被ばく量を十分低減する事はできなかった。

3.2 新規コリメータの設置

フォイルの小型化だけでは対策として不十分であったので、H0 ダンプ分岐ダクトを遮蔽体で覆いロスによる残留放射線がその遮蔽体の外に漏れないように改造を行うこととした。また、この遮蔽体で覆われた真空容器に追加のコリメータを取りつけてビームエンベロープに添わせる形で張り出させ、積極的にロスを集中させ、下流の BPM への影響を低減させる方向で検討を開始した。

4. 新規コリメータの設計検討

4.1 光学設計

新規コリメータの設計検討として、まず H0 分岐部周辺でロスしている粒子の軌道を、SAD を使用して計算した。

図 5 に、フォイルで散乱された粒子の軌道を示す。この計算では、粒子は設計周回軌道中心に広がりを持たずに存在するとし、フォイル通過後に+30mrad. ~-30mrad.の蹴り角を等間隔で与え、それら散乱を受けた粒子が電磁石の磁場を通過して真空容器のど

こに衝突するかを評価した。その結果、散乱角度の非常に大きい物に関しては、H0 ダンプ分岐部の真空容器の股周辺に局所化される事が判った。また、分岐部真空容器の下流側にコリメータを挿入し、そのコリメータを 486pmm-mrad.のアクセプタンス (RCS の一般の機器の物理口径に相当する大きさ) の位置に設置すると、さらに下流の BPM に局所化されていたロスもここで吸収できる事が判った。

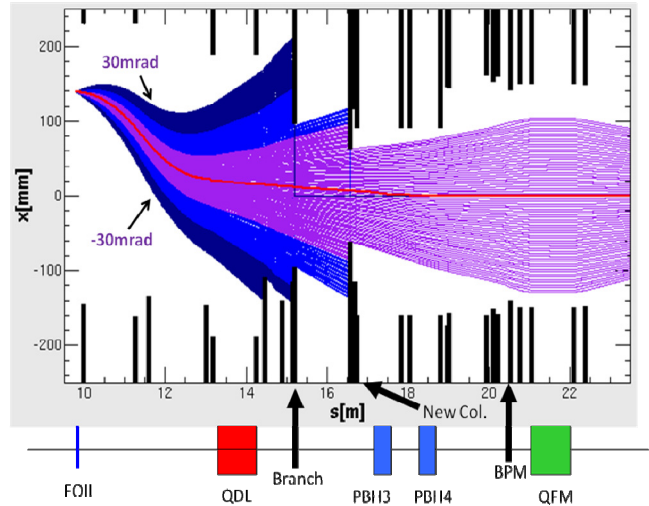


Figure 5: Orbit of the scattered particles by the foil. The scattering angle was varied $\pm 30\text{mrad}$ and large scattered particles are well localized on the branch and new collimator.

実際の入射ビームの分布を考慮した、より詳細な評価は SAD と GEANT4 を用いて行われている[4]。

4.2 機器設計

新規コリメータはすでに設置されている H0 ダンプ分岐部の真空容器に追加する形で機器設計を行った。現在の H0 ダンプ分岐部周辺の状態を図 6 に、また新規に制作している真空容器を図 7 に示す。

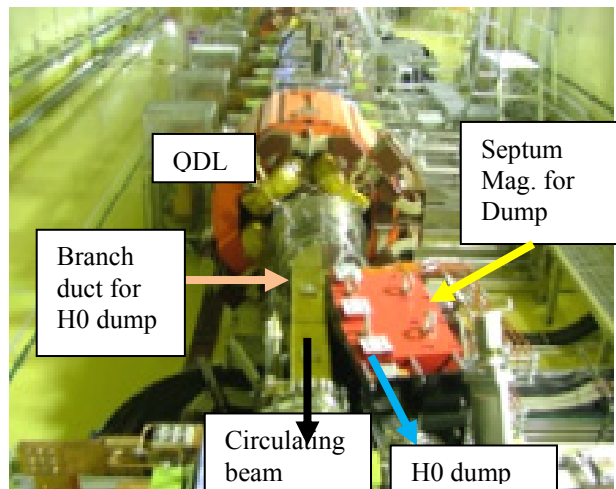


Figure 6: Location of the H0dump branch.

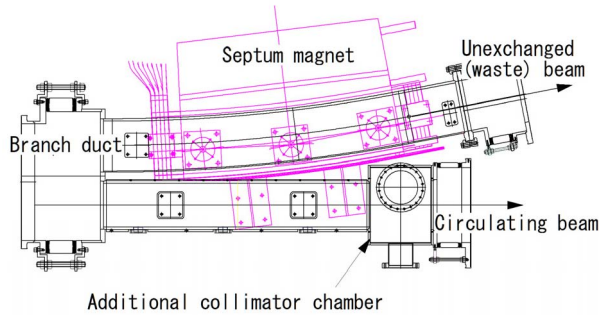


Figure 7: Renewal chamber of the H0dump branch.

コリメータは運転条件によってその位置およびビーム軸に沿った角度を調整する必要がある。H0 ダンプ分岐部は外周側に分岐ライン用のセプタム電磁石が設置されており、それら駆動機構は全て内周側に設置する必要がある。図 8 にビーム進行方向から見た駆動機構部分の断面図を示す。駆動部には二つのペローが付いており、一つがビーム軌道中心からの位置の調整、もう一つがビーム進行方向に対する角度の調整に使用される。位置の調整幅はビーム軌道中心から 50mm~95mm までとしてあり、想定している全ての運転条件（水平垂直チューンで 6.0-7.0 の範囲）に対応できるように設計されている。角度の調整幅は±1 度としている。

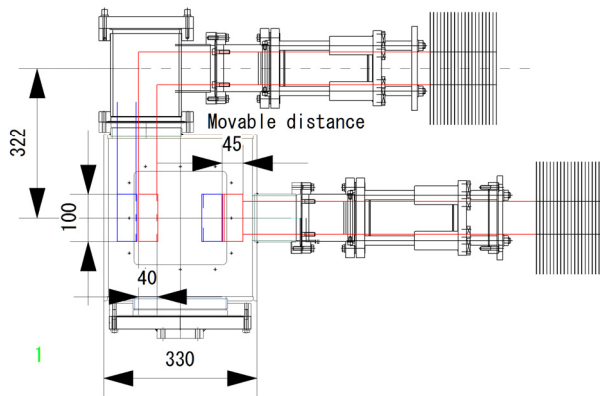


Figure 8: Cross section of movable collimator chamber.

コリメータは熱伝導によって真空容器外のフィンまで熱を伝え、自然空冷を行う設計としている。そのため、コリメータ本体および支持部は無酸素銅を採用し、十分な熱伝導が得られる大きさとしている。ANSYS による解析では、100W の入熱があった場合でもフィン周辺が室温（30℃程度）であればコリメータの温度は 80℃程度に抑えられる。

コリメータ本体のビーム軸方向の厚みは、最大入射エネルギー400MeV の陽子の無酸素銅中での飛程がおよそ 130mm であるので、余裕を見て 200mm としている。

4.3 遮蔽体設計、二次粒子の評価

コリメータでは、陽子ビームの衝突によりコリ

メータや真空容器が放射化される。その影響を抑えるために、コリメータ真空容器を遮蔽体で覆う必要があるため、必要な遮蔽体の構造および厚みを MARS コードを用いて評価した。その結果を図 9 に示す。

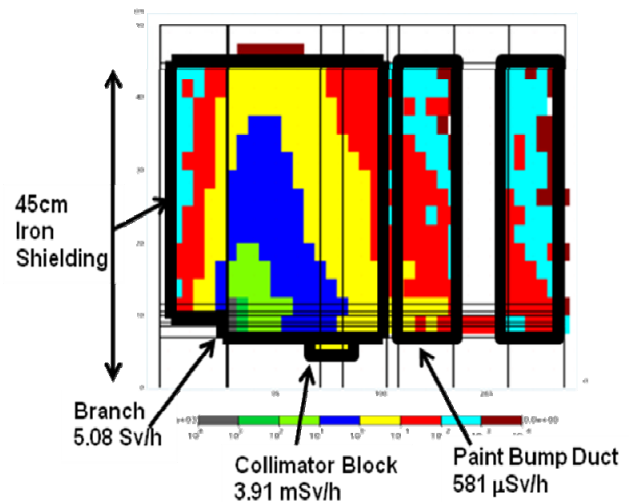


Figure 9: Residual dose estimation result.

この計算ではビームは左から右に通過すると定義されており、100W の熱量に相当する数の陽子が図中 Branch と書かれた分岐の段差部分に衝突しているという仮定での結果である。30 日連続運転し、1 日冷却を行った後の残留線量の分布を色で示しており、濃い緑-黄緑-青-黄-赤-水色の順で線量が下がっている。ビームが衝突している分岐段差部分は 5Sv/h という非常に高い線量となっているが、45cm の鉄の遮蔽体の外側やコリメータブロック下流のペイントバンプ磁石内のセラミックダクトでは数百 μSv/h と、4 桁程度まで線量を下げることが成功している。

4.4 漏れ磁場対策

H0 ダンプ分岐部には廃棄ラインにビームを輸送するためのセプタム電磁石が設置されており、遮蔽体およびコリメータを増設するダクト周辺ではセプタム電磁石の漏れ磁場の影響が無視できない（図 6 参照）。そこで、ダクト自体を磁性材料であるフェライト系ステンレスの SUS430 を材料として作成し、さらに熱処理を加える事で磁気特性を高め、セプタムからの漏れ磁場を吸収させる方向で対策を進めた。

SUS430 を使用するにあたって、効果的な熱処理条件を決めるために、ヘルムホルツコイルを用いた試験によって磁気遮蔽性能を確認した[5]。この試験では、予めヘルムホルツコイル内部の磁場分布を測定しておき、次にサンプルダクトをコイル内に配置した状況でダクト内部の磁場分布を再度測定した。それらの比を取る事で、ダクト内部でどの程度磁場が弱められているか確認した。図 10 に試験結果を示す。図の縦軸はダクトが無い場合で規格化した磁場強度を、横軸は磁場に垂直な方向に沿って実施し

た測定位置を示している。プロットの形状の違いは、測定した面の垂直方向の高さの違いを表わしている。熱処理をしない状態（緑）でも 6~11%程度まで磁場を遮蔽しているが、真空加熱炉にて 700°C で 4 時間加熱する事で 3%まで遮蔽性能が改善する事が判った。処理温度をさらに上げ 850°Cにすると、遮蔽効果はさらに上昇し外部磁場を 1%前後まで低減できる事が判明した。この結果を考慮し、実機のダクトは 850°Cで 4 時間、真空加熱炉で処理を行う事とした。

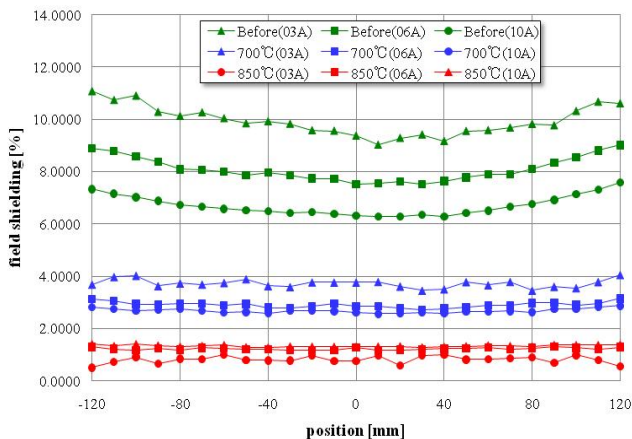


Figure 10: shielding property for magnetic field

4.5 その他

新規コリメータの設計検討として、上記以外にも真空特性の確認として放出ガス速度の測定が行われている[6]。また、保守作業時の被ばく低減を目的として、遮蔽体とコリメータ、真空ダクト、セプタム電磁石を一体で搬送するシステムの設計が進められている。

5. まとめ

RCS では、100kW 以上の運転を安定に行うために入射部周辺に発生しているロスの原因を調査し、その対策を検討してきた。その検討結果から、新規コリメータシステムを設置する事で入射部付近の線量を十分低減する事が可能であると判断した。この新規コリメータシステムの製作は震災復旧作業と並行して進められており、年度内に再開予定のビーム運転によって性能試験が実施される予定である。

参考文献

- [1] M. Kinsho, in Proceedings of the 1st International Particle Accelerator Conference (IPAC 10), Kyoto, Japan (2010)
- [2] K. Yamamoto, in Proceedings of the 46th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop (HB2010), Morschach, Switzerland (2010)
- [3] P. K. Saha, in Proceedings of the 46th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop (HB2010), Morschach, Switzerland (2010)
- [4] S. Kato, in this Proceedings
- [5] M. Yoshimoto, in Proceedings of the 2nd International Particle Accelerator Conference (IPAC11), San Sebastian,

- Spain, to be Published
 [6] S. Kato, 第 52 回 真空に関する連合講演会, 学習院大学, Japan (2011) to be Published