

J-PARC 3GeV 陽子シンクロトロンにおける 1MW 運転時の ビーム損失とその低減

1MW BEAM TUNING FOR BEAM LOSS MITIGATION IN THE J-PARC 3GeV RCS

發知英明[#], 原田寛之, 加藤新一, 金正倫計, 岡部晃大, サハ・プラナブ, 菅蒲田義博,
田村文彦, 谷教夫, 渡辺泰広, 山本風海, 山本昌亘, 吉本政弘
H. Hotchi[#], H. Harada, S. Kato, M. Kinsho, K. Okabe, P.K. Saha, Y. Shobuda, F. Tamura,
N. Tani, Y. Watanabe, K. Yamamoto, M. Yamamoto, M. Yoshimoto
Accelerator Division, J-PARC Center, Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

Abstract

After completing injector linac upgrades, the J-PARC 3GeV RCS started a 1MW beam test in October 2014, and successfully achieved a 1MW beam acceleration in January 2015. Since then, a large fraction of our effort has been focused on reducing and managing beam losses. This paper presents recent progresses of 1MW beam tuning with particular emphasis on our approaches to beam loss issues.

1. はじめに

Figure 1 に J-PARC 3GeV Rapid Cycling Synchrotron (RCS) の全体像を示す。RCS は、周長 348.333 m、3 回対称のラティス構造からなる陽子シンクロトロンで、リニアックから供給される 400 MeV の負水素イオンを、入射点におかれた炭素フォイルを使って陽子へと荷電変換しながら多重入射 (307 ターン) し、その陽子を 25 Hz という速い繰り返しで 3 GeV まで加速する。図に示される通り、RCS は、物質生命科学実験施設 (MLF) へのビーム供給と後段の 30 GeV メインリングシンクロトロン (MR) への入射器という 2 つ役割を持ち、最終的には世界最高レベルとなる 1MW という大出力でのビーム供給を目指している。

RCS は、2008 年 12 月の利用運転開始以来、ビーム調整の進展やハードウェア系の増強などに従って着実にビーム出力を増強させており[1-3]、これまでに 500 kW での利用運転を実現している。また、現在、こうした利用運転の合間を縫って、設計性能の実現に向けた大強度試験を定期的実施している。

2013 年と 2014 年の夏季作業期間にリニアックの増強作業が実施され、RCS への入射エネルギー (181 MeV から 400 MeV へ) と入射ピーク電流 (30 mA から 50 mA へ) が共に設計値へと引き上げられた。RCS は、その一連の作業終了直後の 2014 年 10 月より 1MW のビーム調整を開始し、2015 年の 1 月に 1MW 相当のビーム加速を達成したところである。以来、1MW 運転時のビーム損失低減を目指した大強度ビーム調整が精力的に展開されている。

RCS のような MW 級の大強度加速器では、ビーム損失により生じる機器の放射化が、ビーム出力を制限する最大の要因となるため、ビーム損失の低減がビームの大出力化を図るうえで最重要の研究課題となる。本論文では、ビーム出力の増強過程で我々が直面したビーム損失の発生機構やその低減に向けた取り組みを中心に、RCS における 1MW ビーム調

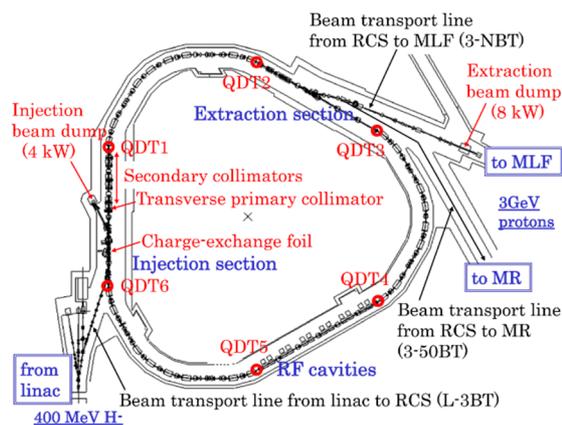


Figure 1: Layout of the J-PARC 3GeV RCS.

整の進捗状況について報告する。

2. 縦方向のビーム損失とその低減

前回の加速器学会で報告した通り[3]、RCS は、2014 年 10 月に最初の 1MW 加速試験を敢行したが、その際には、RF 陽極電源の制限により、目的を達することができなかった。この試験結果を受けて、我々は、1MW 加速に必要な陽極電流値を低く抑えるために、RF 空胴の共振周波数を 1.7 MHz から 2.1 MHz へと変更した。この応急処置を行った直後の 2015 年 1 月のビーム試験で、めでたく 1MW 加速を達成したが、その際には、まだ、解決すべきビーム損失が僅かながら残っていた。

Figure 2 の上図に、分散の高いアーク部に設置されたビームロスモニタ (BLM) の信号値を示す。図に示されるように、830 kW (青色) 相当のビーム強度までは有意なビーム損失は生じていないが、900 kW を超えたあたり (緑色と赤色) からビーム損失が出現しているのがわかる。これは、RF バケツからこぼれた粒子の運動量が大きく逸脱したためにおこる縦方向のビーム損失で、ビームの大強度化に伴って顕在化するビームローディング効果による

[#] hotchi.hideaki@jaea.go.jp

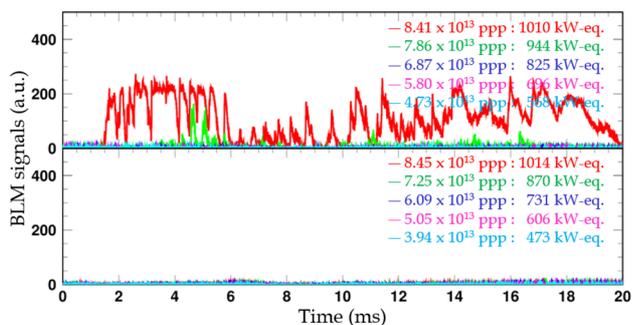


Figure 2: BLM signals in the high dispersion area measured over the whole 20 ms with various beam intensities of up to 1MW before (upper) and after (lower) the RF power supply upgrade.

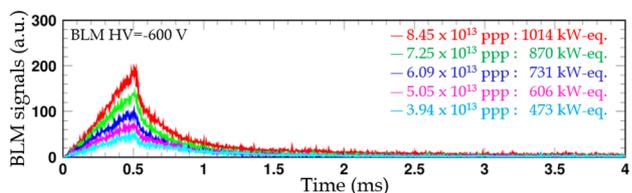


Figure 3: BLM signals at the collimator measured for the first 4 ms with various beam intensities of up to 1MW.

RF バケツの歪みがこのビーム損失の主原因と考えられる。ビームローディング補償については、フィードフォワード (FF) 法を開発して上手く機能させることに成功しているが[4]、この試験当時、RF 陽極電源がほぼ上限値に達してしまい、900 kW を超える大強度ビームについては十分なFF調整ができなかったことがこのビーム損失の主原因と言える。また、この試験前に行った RF 空胴の共振周波数の変更もこのビーム損失の一因と考えられる。RCS は、通常、ハーモニック数 $h=2$ の 2 バンチ運転を行っている。そのため、主要なビームローディング電圧は偶数次のハーモニック成分 ($h=2, 4, 6 \dots$) となるが、共振周波数の変更により、奇数次のハーモニック成分 ($h=1, 3, 5 \dots$) の影響が付加的にエンハンスされ、その結果、2 バンチ間で非対称な縦方向運動が出現するような状況が生じていた[5]。我々の FF システムは、偶数次と共に奇数次のビームローディング補償にも対応可能であるが[6]、奇数次の影響により、FF 調整がより複雑化したことも、この縦方向ビーム損失の原因の一端と言える。このビーム損失は 0.1% 以下と僅かであるが、分散の高い比較的狭い領域にビーム損失が集中すること、また、高エネルギーの成分も含まれることから有意な機器の放射化が懸念されるため、1MW 連続運転の実現を図るには、このビーム損失の抑制が不可欠となる。

上記の試験結果を受けて、我々は、2015 年の夏季メンテナンス期間に RF 陽極電源の増強を行った。また、その際、より安定な縦方向運動を回復するために、RF 空胴の共振周波数も設計値へと戻された。Figure 2 の下図に示される通り、RF 電源増強後に行ったビームローディング補償により、縦方向のビーム損失は完全に除去された。

3. 横方向のビーム損失とその局所化

その他の横方向のビーム損失については、その大部分が、分散のない直線部に設置されたコリメータで上手く局所化されている。Figure 3 に、コリメータ領域の BLM 信号値を示す。図に示されるように、コリメータ領域のビーム損失は入射中の最初の 1 ms 領域のみに出現し、その量は線形なビーム強度依存性を示しているのが見て取れる。このビーム損失は、ビーム入射に使用している荷電変換フォイル上での散乱現象により生じたもので、それ以外の空間電荷などに起因したビーム損失については、横方向および縦方向のペイント入射[7-9]の導入により、ほぼ最小化させることができている。この 1MW ビーム加速の際のビーム損失は 0.1% (130 W) 以下と評価された。コリメータのビーム損失許容限界値は 3% (4 kW) であるので、極めて小さなビーム損失で 1MW のビーム加速を達成したことになる。

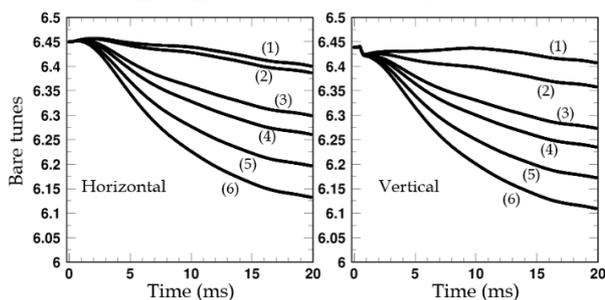


Figure 4: Six sets of tune variations from injection to extraction used for the beam instability measurement.

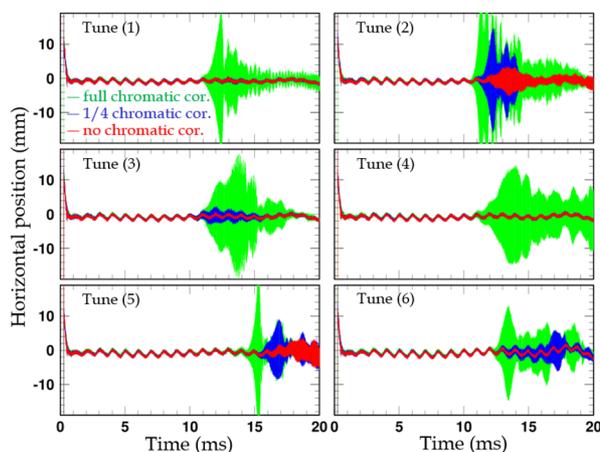


Figure 5: Time dependence of the turn-by-turn horizontal beam position measured for the 1MW beam with six sets of tune variations (1)–(6) given in Fig. 4; (green) the natural chromaticity is fully corrected to zero at injection with dc sextupole fields, (blue) only a quarter of the natural chromaticity is corrected similarly, and (red) no chromaticity correction is applied.

4. ビーム不安定性とその抑制

ビーム不安定性の抑制も 1MW 加速の際の重要な課題であった。RCS では、ビーム出射に使用するパ

ルスキッカーが支配的なインピーダンスソースであり、それが、ビーム強度や運転パラメータの選択に依存して重篤なビーム不安定性を引き起こす[10, 11]。それを抑制できる運転条件を見出すために、1MW試験の初期段階で、チューンやクロマチシティーをノブにした系統的なビーム不安定性観測を行った。

Figure 4に、この測定で使用した6種類のチューンを示す。図に示される通り、入射開始時のチューンは何れも同じ位置に設定されているが、加速と共に異なった経路で変化させている。Figure 5に、この6種類のチューンを用いて測定した水平方向のビーム重心振動を示す。緑色のデータは、入射エネルギーでのクロマチシティーを0にするように六極電磁石を直流励磁した場合の結果である。データは、キッカーインピーダンスの周波数構造に由来する特徴的なチューン依存性を示しているが、この場合は、どのチューンを選択しても有意なビーム重心振動が励起されている。一方、青色のデータは、入射エネルギーでのクロマチシティーを1/4だけ補正するように六極電磁石を直流励磁した場合の結果、また、赤色のデータは、クロマチシティー補正なしでの結果に対応する。図に示される通り、運動量広がりによって由来したランダウ減衰により、クロマチシティーが負方向に大きな値を持つほどビームが安定化していくのがわかる。この一連の測定から、クロマチシティーと加速過程のチューンを上手く制御することで、1MWのビーム強度でもビーム不安定性を十分に抑制できることが明らかにされた。先に示したFigure 2と3は、ビーム不安定性の発生しない安定な条件下(1/4のクロマチシティー補正とチューン(4)の組合せ)で測定した結果である。

5. 横方向ペイント入射範囲の拡幅による更なるビーム損失低減

現状、残っているビーム損失の大部分は、入射中のフォイル散乱起源のもので、その他のビーム損失についてはほぼ最小化することができた。上述の通り、フォイル散乱起源のビーム損失の大部分は、シールドされたコリメータ領域で回収されており、現在のところ大きな問題には至っていないが、大角度で散乱された一部の粒子がフォイル直下で損失して機器の放射化の原因になっている。現状のままだと1MW運転時のチェンバー表面での残留線量は38 mSv/h程度にまで達してしまうと予想されるため、更なるビーム損失の低減が強く求められていた。その残留線量を低減させるには、入射中のフォイル散乱回数を減らすことが必要となるが、横方向のペイント入射範囲を更に拡幅することで、その回数を大幅に減らすことができる。

RCSでは、入射中、周回軌道に水平ローカルバンプリングを形成し、そのバンプリング軌道を時間変化させることで水平方向のペイント入射を実現している。そのため、ペイント範囲を拡幅できれば、より速く周回ビームをフォイルから遠ざけることが可能となり、その分、フォイルヒット回数を減らすことができる。一方、垂直方向では、入射ビームの角度を時間変化

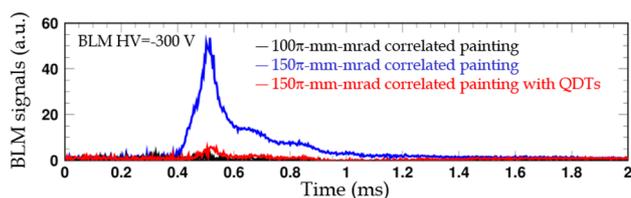


Figure 6: BLM signals at the collimator measured for the first 2 ms with a beam intensity of 850 kW.

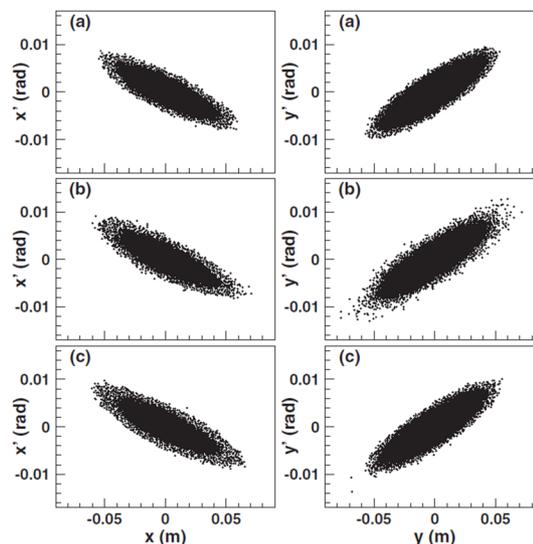


Figure 7: 2D plot of transverse phase space coordinates calculated at the end of injection with 150π -mm-mrad correlated painting; (a) without edge focus, (b) with edge focus, and (c) with the addition of QDTs to (b).

させることでペイント入射を実施している。この場合も、ペイント範囲を拡幅できれば、フォイル幅より大きなベータatron振動が励起されることになり、フォイルヒット回数の低減につながる。これまでで使用してきた横方向のペイント範囲は 100π mm mradである。この値は、空間電荷由来のビーム損失を最小化する上で十分であるが、それを更に1.5~2倍に拡幅できれば、ヒット回数を半減以下にできる。

5.1 ペイント入射範囲を拡幅した際に発生するビーム損失の発生機構とその低減

但し、ペイント範囲の拡幅はそう簡単ではない。現状のままでは、ペイント範囲を 100π mm mrad以上に拡幅すると、別種のビーム損失が付加的に発生してしまう。ペイント範囲を拡幅した際に発生する付加的なビーム損失については、計算機上での検討から、入射バンプリング電磁石のエッジ収束に起因していることが判明した。このエッジ収束は、入射中のベータ関数を変調して加速器の対称性を崩してしまうので、その際に、非構造共鳴が付加的にエンハンスされるといった状況が生まれる。そうした非構造共鳴によるダイナミックアバーチャの減少がペイント範囲を拡幅した際のビーム損失の主原因となる。

こうした計算機上での検討を踏まえて、入射中のベータ関数変調を補正するための6台の補正四極電

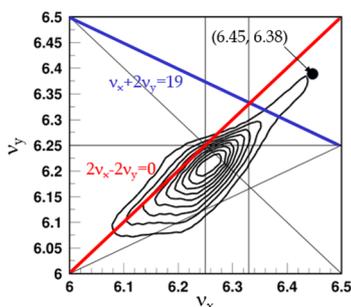


Figure 8: Tune diagram near the present operating point (6.45, 6.38), where the tune footprint was calculated at the end of injection with 150π -mm-mrad correlated painting assuming a beam intensity of 850 kW.

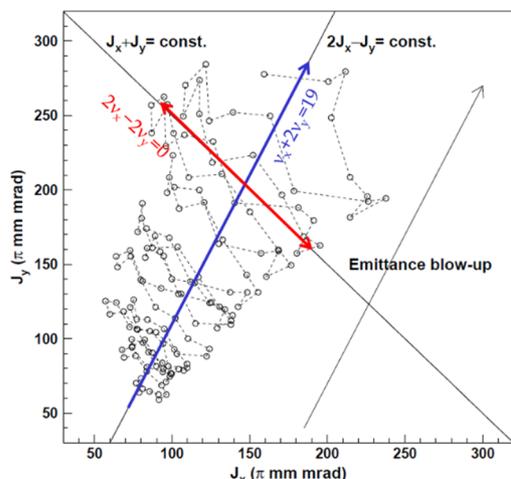


Figure 9: 2D plot of the turn-by-turn betatron actions for a beam halo particle.

磁石が最近になって追加設置された (Figure 1 の赤丸) [12]。ベータ関数変調の補正により、加速器の対称性を回復し、非構造共鳴の影響を最小化させて付加的なビーム損失を抑制するというのが我々の取ったシナリオになる。

この補正手法の有効性を確認するために、850 kW 相当のビームを使って実証試験を行った[13]。Figure 6 がその試験結果で、コリメータ領域の BLM 信号を示す。図に示されるように、ペイント範囲を、これまでの 100π mm mrad から 150π mm mrad まで拡幅すると 0.5% の有意なビーム損失が発生するが、補正四極電磁石を導入することで、期待通りに、そのビーム損失をほぼ最小化することができた。

この実験結果は数値シミュレーションでよく再現されたので、その計算結果を使ってより詳細なビーム損失の発生機構について議論した[13]。Figure 7 は、 150π mm mrad のペイント入射を想定して計算した入射終了直後の横方向位相空間座標を示す。(a) がエッジ効果なし、(b) がエッジ効果あり、そして、(c) が (b) に対して更に補正四極電磁石を導入した場合の結果に相当する。(b) に示されるように、エッジ収束が y 方向に顕著なビームハローを生成しているのがわかる。このハローが Figure 6 (青) で観測された

ビーム損失の主原因に相当するが、補正四極電磁石を導入することでハロー生成が軽減され、Figure 6 (赤) のビーム損失低減につながったと解釈できる。

数値シミュレーションから、このハロー生成は、主として Figure 8 に示される 2 つの共鳴線によって引き起こされていることが判明した。 $v_x + 2v_y = 19$ は、クロマティシティー補正用の六極電磁石や偏向電磁石内に内在する六極磁場成分がソースとなって、エッジ収束によって加速器の対称性が崩される際に出現する 3 次の非構造共鳴である。この和共鳴は、 $2J_x - J_y$ が保存量となるので、x 方向のエミッタンス増大に対して、2 倍の比率でより大きなエミッタンス増大を y 方向に引き起こす。一方の $2v_x - 2v_y = 0$ は、六極磁場の 2 次効果や空間電荷八極成分が主ソースとなって励起される構造共鳴である。この差共鳴は、 $J_x + J_y$ が保存量となるので、x 方向と y 方向のエミッタンス交換を引き起こす。

Figure 9 は、ハロー粒子の典型的な一粒子運動をプロットしたもので、この図から 2 つの共鳴の効果をはっきりと見て取れる; 保存量 $2J_x - J_y$ を示す青いラインに沿って発生しているエミッタンス増大が $v_x + 2v_y = 19$ による効果で、保存量 $J_x + J_y$ を示す赤いラインと平行に発生しているエミッタンス交換が $2v_x - 2v_y = 0$ による効果と解釈される。この解析から、ハロー粒子の殆どがこうした一粒子運動を通して生成されていることが確認された。また、ビーム損失の原因としては、 $v_x + 2v_y = 19$ によるエミッタンス増大がより決定的で、この共鳴で生成される y 方向のより大きなハローがビーム損失の直接的な原因になっていることが明らかにされた。つまり、補正四極電磁石で加速器の対称性を回復させた結果、非構造共鳴である $v_x + 2v_y = 19$ の効果が軽減されてビーム損失低減につながったという解釈になる。

5.2 200 π -mm-mrad ペイント入射の実現

この解析は、我々に、もう一つ重要なヒントを与えた; 補正四極電磁石を使って $v_x + 2v_y = 19$ を低減させるだけでなく、 $2v_x - 2v_y = 0$ によるエミッタンス交換の影響を同時に軽減できれば、更なるペイント範囲の拡幅につながる可能性がある。この考察結果を受けて、我々は、これまで使用してきた Correlated painting の代替えとして、Anti-correlated painting の導入を検討した。後述の通り、Anti-correlated painting は、エミッタンス交換の影響を軽減するうえで幾つかの利点を持つ。

Figure 10 の左図に示す通り、Correlated painting では、青い矢印に沿ってビームを分布させる。つまり、x 方向・y 方向共に、ビームを周回ビーム楕円の中心から外側へと分布させていく。エミッタンス交換はこのペイントの向きに対して直交する方向に発生するため、この場合は、エミッタンス交換がそのままビームエミッタンスの増大につながってしまう。一方、Figure 10 の右図に示される Anti-correlated painting では、y 方向のペイント過程が逆向きになる。つまり、Anti-correlated painting では、x 方向は中心から外側へ、y 方向は外側から中心へとビームが分布していく。この場合は、ペイントの向きとエミッ

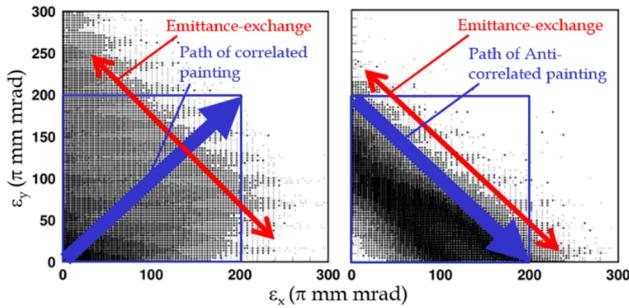


Figure 10: 2D plot of the beam emittances calculated at the end of injection with 200π -mm-mrad correlated and anti-correlated painting using a beam intensity of 1MW.

タンス交換の方向が同じになるため、エミッタンス交換が発生しても、それが、直接、ビームエミッタンスの増大につながることはない。また、Anti-correlated painting は、KV-like な分布を形成するため、空間電荷の非線形成分、特に $2v_x - 2v_y = 0$ のソースである八極成分の絶対量を低減でき、共鳴それ自身の強度を緩和できるといった利点も併せ持つ。

以上の考察を踏まえ、1MW ビームを使って、更なるペイント範囲の拡幅を試みた。Figure 11 がその試験結果で、コリメータ領域の BLM 信号を示す。(a)が 200π mm mrad の Correlated painting を用いた場合の結果で、この場合は、1.9%の大きなビーム損失が発生したが、Anti-correlated painting を導入することで、(a)から(b)へと、期待通りにビーム損失を半分以下にまで低減させることができた。(b)のビーム損失は、更にクロマティシティー補正用の六極電磁石の使用を取りやめることで(c)へと低減された。このビーム損失低減は、リング中の六極磁場の減少によって、 $v_x + 2v_y = 19$ の影響が低減されたことに対応する。(c)のビーム損失は、更に補正四極電磁石を導入することで、最終的に、(d)にまで低減された。このビーム損失低減は、加速器対称性の回復によって、 $v_x + 2v_y = 19$ の影響が更に低減されたことに対応する。(d)に示されるように、0.2%程度の付加的なビーム損失が依然残っているが、その量は十分小さく、また、その殆どはコリメータで回収可能なビーム損失成分なので、大きな問題には至らないと予想される。

上記の通り、補正四極電磁石と Anti-correlated painting を併用することで、付加的なビーム損失を抑えつつペイント範囲を2倍に拡幅することに成功した。このペイント範囲の拡幅およびフォイルのサイズや位置の再調整により、荷電変換フォイル上での大角度散乱に起因した制御不能なビーム損失成分は大幅に低減された。ペイント範囲の拡幅以前の1粒子あたりの平均フォイルヒット回数は41回であったが、ペイント範囲を2倍に拡幅したことで15回、更に、フォイルのサイズや位置を再調整することで7回と、1/6程度にまでフォイルヒット回数を減ずることに成功した。この成果により、フォイル近傍のチェンバー表面での残留線量は、1MW の連続運転を行った場合でも、十分に許容範囲といえるレベル (< 10 mSv/h) にまで抑え込める見通しが

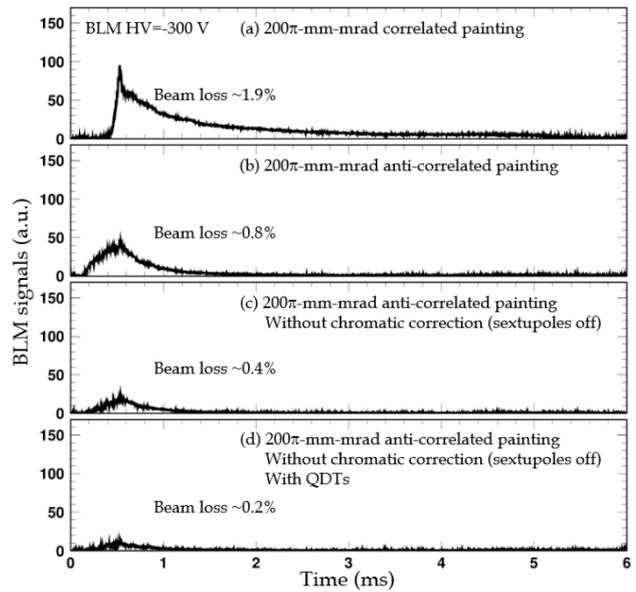


Figure 11: BLM signals at the collimator measured for the first 6 ms with a beam intensity of 1MW.

立った。

6. まとめ

RF 陽極電源増強後の2015年10月から1MW ビーム調整を再開した。その後の一連のビーム調整により、1MW 運転時のビーム損失は、十分に許容範囲内と言えるレベルにまで大幅低減された。MLF の中性子生成標的の不具合により、現在、利用運転時のビーム出力は200 kW に制限されているが、RCS のビームコミッショニングは、1MW 設計出力での連続運転の実現に向かって着実に進展している。

参考文献

- [1] H. Hotchi *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams **12**, 040402 (2009).
- [2] H. Hotchi *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys. **2012**, 02B003 (2012).
- [3] H. Hotchi *et al.*, Proc. of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2015, p.103.
- [4] F. Tamura *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams **14**, 051004 (2011).
- [5] M. Yamamoto *et al.*, Proc. of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2015, p.1008.
- [6] F. Tamura *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams **18**, 091004 (2015).
- [7] H. Hotchi *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams **15**, 040402 (2012).
- [8] F. Tamura *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams **12**, 041001 (2009).
- [9] M. Yamamoto *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A **621**, 15 (2010).
- [10] Y. Shobuda *et al.*, Proc. of HB2014, USA, 2014, p. 369.
- [11] P.K. Saha *et al.*, Proc. of IPAC2016, Korea, 2016, p. 589.
- [12] H. Hotchi *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A **778**, 102 (2015).
- [13] H. Hotchi *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams **19**, 010401 (2016).