

J-PARC RCS ビームコミッショニングの進捗報告： 1 MW 以上のビーム出力の実現に向けた取り組み

RECENT PROGRESS OF THE J-PARC RCS BEAM COMMISSIONING AND OPERATION: EFFORTS TO REALIZE A HIGHER BEAM POWER BEYOND 1 MW

發知 英明[#]、原田 寛之、林 直樹、金正 倫計、岡部 晃大、サハ プラナブ、
菖蒲田 義博、田村 文彦、山本 風海、山本 昌亘、吉本 政弘
H. Hotchi[#], H. Harada, N. Hayashi, M. Kinsho, K. Okabe, P. K. Saha,
Y. Shobuda, F. Tamura, K. Yamamoto, M. Yamamoto, M. Yoshimoto
Accelerator Division, J-PARC Center, Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

Abstract

In July 2018, the J-PARC 3 GeV rapid cycling synchrotron (RCS) successfully demonstrated a 1-MW design beam operation at 25 Hz with a very low fractional beam loss of the order of 10^{-3} ; most of the residual beam loss was well localized at the beam collimator section; the beam loss power was as small as $<1/10$ of the capability of the beam collimator system. This success of the 1-MW demonstration opened a possibility of further beam power ramp-up. Following this, we have recently initiated further high-intensity beam tests towards realizing a higher beam power going beyond 1 MW. The initial goal is to achieve 1.2~1.5-MW-equivalent high-intensity beam accelerations at the permissible beam loss level increasing the injection pulse length (0.5 to 0.6 ms) and/or the injection peak current (50 to 60 mA). In this paper, we present the results of the 1.2-MW beam tests conducted in October and December 2018, especially focusing on a series of efforts for beam loss mitigation.

1. はじめに

Figure 1 に J-PARC 3 GeV Rapid Cycling Synchrotron (RCS) [1, 2] の全体像を示す。RCS は、周長が 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。Figure 1 に示されるように、RCS は、物質・生命科学実験施設 (MLF) に設置された中性子およびミューオン生成標的へのビーム供給と、後段の 30 GeV Main Ring (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クラスとなる 1 MW (8.33×10^{13} ppp) という大出力でのビーム供給を目指している。

RCS のような MW 級の大強度陽子加速器では、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。RCS では、ビーム試験と数値シミュレーションを組み合わせたアプローチでビーム損失の問題を解決してきた。実験と計算の一致は良好で、計算機上での検討が RCS のビーム損失低減を効率的に進展させる原動力になっている。すでに多くの論文で報告されている通り [3-5]、チューンの最適化、横方向・縦方向ペイント入射の最適化、各種共鳴補正の導入などにより、1 MW 運転時のビーム損失を 10^{-3} レベルにまで低減することに成功している。入射エネルギー領域で残存しているそのビーム損失は ~300 W に相当する。RCS で許容可能なビーム損失

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

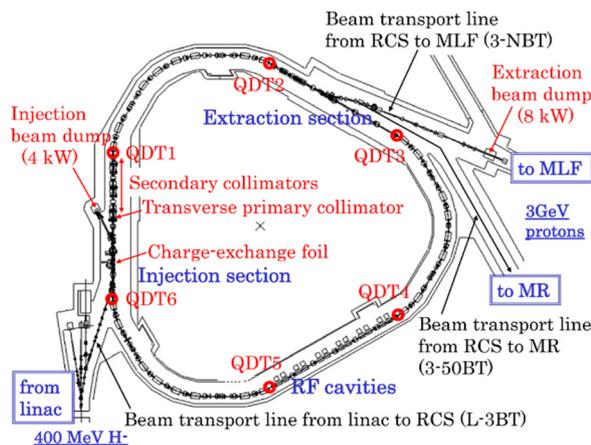


Figure 1: Layout of the J-PARC 3 GeV RCS.

は 4 kW (ビーム損失した粒子を回収するビームコレクターの許容値) なので、その十分の一以下にまでビーム損失を低減できたことになる。また、昨年 7 月には、1 時間と短時間ながら、25 Hz での 1 MW 連続運転にも成功している (本年 7 月には、10.5 時間の連続運転にも成功)。MLF の中性子生成標的の 1 MW 対応が未完了のため、現在の利用運転時のビーム出力は 500 kW に制限されているが、RCS 自身の調整は順調に進展している。

RCS は、設計性能 1 MW の実現という所期目標にほぼ到達したと言える。また、1 MW 運転時のビーム損失を 10^{-3} レベルにまで低減できたという成果は、RCS が 1 MW 以上のビーム出力を実現するポテンシャルを十分に有していることを強く示唆する結果とも言える。こうしたことを踏まえ、また、J-PARC の将来アップグレード計画 (MLF の第二ターゲット

ステーションの建設案など)も見据えて、RCS では、現在、1 MW 以上のビーム出力の実現を目指した大強度試験を本格的に推し進めている。当面の目標は、入射ビームのパルス長とピーク電流を増強して、1.2~1.5 MW 相当の大強度ビーム加速を実現することである。本稿では、昨年の10月と12月に実施した1.2 MW 相当の入射・加速試験において出現したビーム損失の発生メカニズムを議論するとともに、それを低減するために行った一連の取り組みを紹介する。

Table 1: Operational Parameters

	For 1-MW operation	For 1.2-MW operation
Bare betatron tune	(6.43, 6.32)	(6.45, 6.42)
Transverse painting area	ϵ_{ip} : 200 π mm mrad	ϵ_{ip} : 150 π mm mrad
Longitudinal painting	$\Delta p/p$: -0.1% V_2/V_1 : 80% $\Delta\phi_2$: -100 \rightarrow 0 $^\circ$	$\Delta p/p$: -0.2% V_2/V_1 : 80% $\Delta\phi_2$: -100 \rightarrow 0 $^\circ$
Sextupole magnets	Used for $\nu_x-2\nu_y=-6$ correction	Used for $\nu_x-2\nu_y=-6$ correction

2. 1 MW 試験結果

本題に入る前に、1 MW 試験の結果を手短かに報告しておく。

Table 1 (中央列)に1 MW 運転時の主要な運転パラメータをリストした。そこに示されるように、RCS では、ビームの空間電荷を低減するために、横方向および縦方向のペイント入射を導入している。横方向のペイント入射[3]では、ビーム入射中に、入射ビームと周回ビームの位置や傾きの相対関係を時間的に変化させる。この操作により、ベータatron振動の振幅を徐々に拡幅して、200 π mm mrad (ϵ_{ip})という位相空間上の広い範囲にビーム粒子を一様に分布させている。もう一方の縦方向ペイント入射[6, 7]も原理は同様で、ビーム入射中に、RF バケツに対して運動量オフセット ($\Delta p/p$)を付加することで振幅の大きいシンクロtron振動を励起させて縦方向の空間電荷密度の平坦化を図る。その際、RF 基本波 (V_1)の80%の振幅を持つ2倍高調波電圧 (V_2)を重畳してRFポテンシャルの形状を平坦化させると共に、その2倍高調波電圧の位相 ($\Delta\phi_2$)をスイープしてRFポテンシャルの形状を動的に変化させるなどの追加措置をとることでバンチングファクターの大幅な改善 (0.28 \rightarrow 0.45)を実現している。

Figure 2 に、入射終了直後のチューンフットプリントの様子を示す。ペイント入射導入前は、非常に大きなチューンシフトが発生し、ビームのコアがベータチューンの下方に存在する低次の構造共鳴 (図中のライン)の影響を強く受けているのが見て取れるが、ペイント入射による電荷密度の低減で、チュー

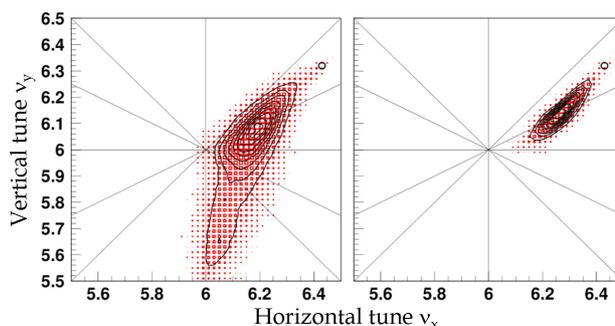


Figure 2: Numerical simulation results; tune footprints at the end of injection calculated without (left) and with (right) injection painting for the 1-MW-equivalent beam intensity, where the open circles show the bare betatron tune.

ンシフトが低減されると共に、共鳴自身の強度も軽減されるため、大幅なビーム損失の低減が達成された。このペイント入射に、六極電磁石を用いた $\nu_x-2\nu_y=-6$ 共鳴の補正などを組み合わせることで、ビーム損失を最終的に 10^{-3} レベルにまで低減することに成功した。

入射エネルギー領域で残存しているそのビーム損失については、その大部分をシールドされたコリメータ領域でうまく回収することができた。また、そのビーム損失量は、コリメータの許容値の十分の一以下と十分少ない。1 MW 運転時の機器の放射化は、許容範囲内に収まると評価されている。

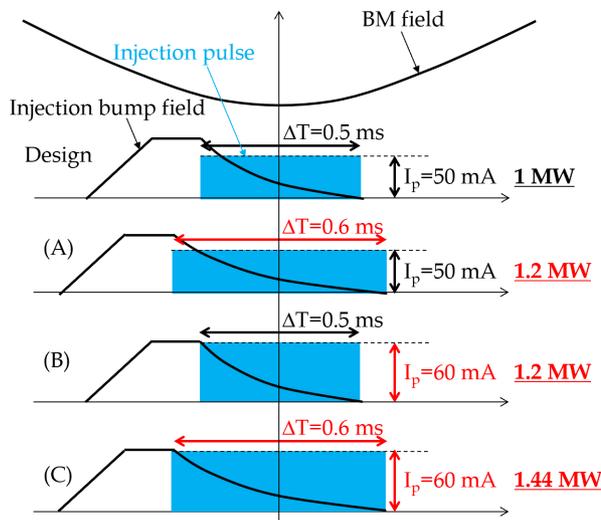


Figure 3: Injection beams required for the beam power upgrade of the RCS.

3. ビームの増強シナリオ

1 MW 試験の結果は、RCS の更なる大強度化の可能性を拓く成果と言える。この結果を受けて、RCS では、1 MW 以上のビーム出力の実現に向けた検討を開始した。現状のリニアックと RCS で試験可能なシナリオとして、入射ビームのパルス長 (ΔT)とピーク電流 (I_p)を設計値 ($\Delta T=0.5$ ms, $I_p=50$ mA)

から 20%ほど増やすことでビーム増強を目指すこととした[8]。つまり、Fig. 3 の(A)と(B)で 1.2 MW、(C)で 1.4 MW 以上の大強度ビーム加速を実現し、その際のビーム損失を許容範囲内にまで低減することが当面の目標となる。

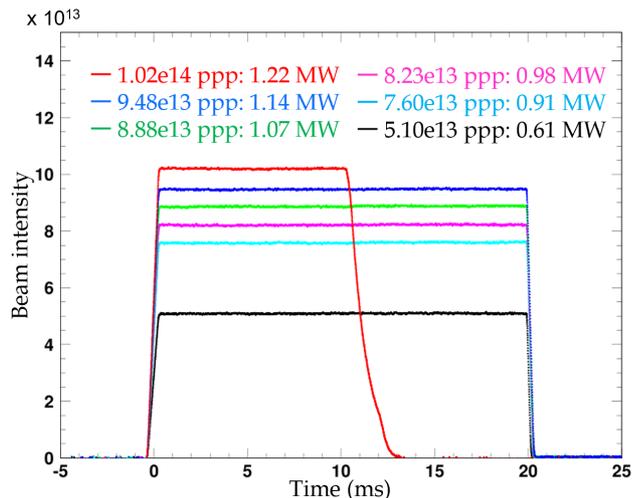


Figure 4: Beam intensities from injection to extraction.

4. 1.2 MW 相当の大強度試験

RCS では、昨年 10 月、手始めに Fig. 3 の(A)の入射ビームを用いて 1.2 MW 相当の大強度試験を実施した。

Figure 4 に電流モニタで観測した入射から出射までのビーム強度を示す。そこに示されるように、1.1 MW 相当 (青) のビーム強度までは、順調に 3 GeV 加速を達成できたが、1.2 MW 相当 (赤) の強度では、加速中盤の 10 ms でビーム強度の急激な下落が発生した。これは、その時刻に RF 系の Interlock が動作したため、当初から予期されていた。高いビーム強度ほど、大きなビームローディング補償[9]が必要になるため、結果として、加速で要求される陽極電源の出力が制限値を超過したために起こった事象である。1.2 MW 相当の 3 GeV 加速を実現するには、空胴の共振点を調整して 3 GeV 加速で必要になる陽極電流の抑制を図るとともに、真空管アンプにおいて Push-pull 方式で使用している 2 本の真空管の動作を最適化するなどの対策を講じる必要がある[10]。RF 系の改良については、2019 年の夏メンテナンス期間に実施する予定である。また、同じ時期に、より安定な大強度ビーム加速を実現するために、FB 方式 (現在は FF 方式) を用いたより高精度のビームローディング補償も導入予定である[11]。昨年 10 月のビーム試験では、Fig. 5 に示すように、応急措置として、RF がトリップする手前の 6.75 ms、つまり、1 GeV でビームを取り出してビーム損失低減等の詳細調整を行った。後で示すように、ビーム損失が発生するのはエネルギーの低い最初の 6 ms 領域なので、1 GeV 加速という条件の下でも、必要十分なビーム調整を行うことができた。

Figure 6 に 1 GeV 出射の下で行ったビーム調整の

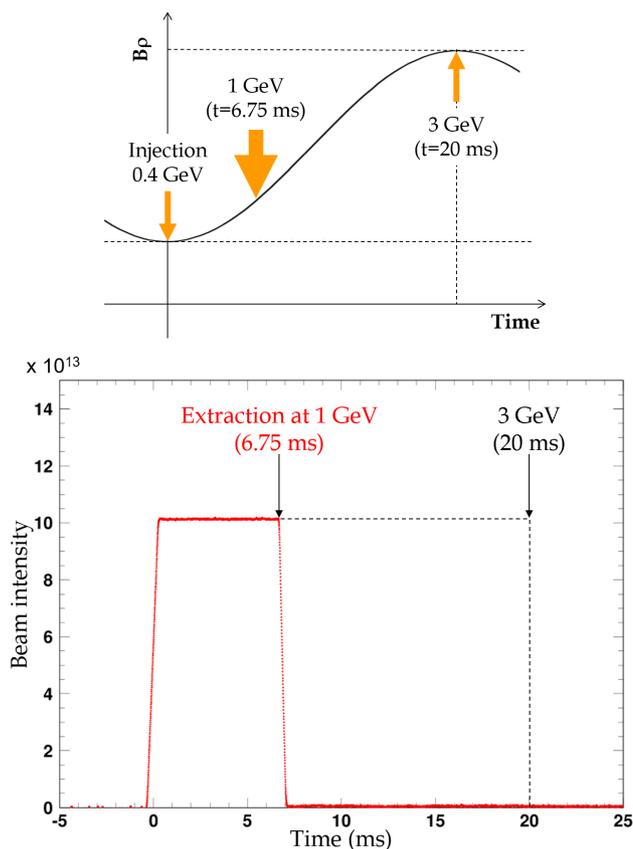


Figure 5: 1 GeV extraction applied for the 1.2-MW high-intensity beam test.

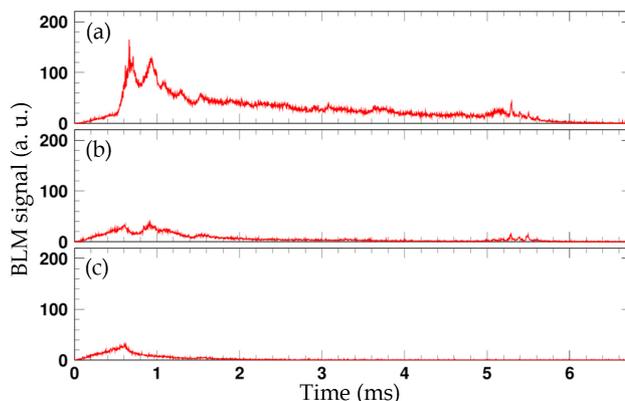


Figure 6: Beam loss monitor signals observed at the collimator section.

結果を示す。これは、コリメータ領域に設置されたビームロスモニタ (シンチレーション計数管) で観測した 1.2 MW 加速の際に発生したビーム損失の時間構造である。上段の(a)は、1 MW のビーム強度で最適化した Table 1 (中央列) の運転パラメータを使用して観測した結果である。1 MW 相当のビーム強度では、この運転パラメータでビーム損失を 10^{-3} レベルにまで低減することができたが、1.2 MW 相当のビーム強度では、最初の 6 ms 領域に 1%ほどの有意なビーム損失が出現した。同じ図に示すように、

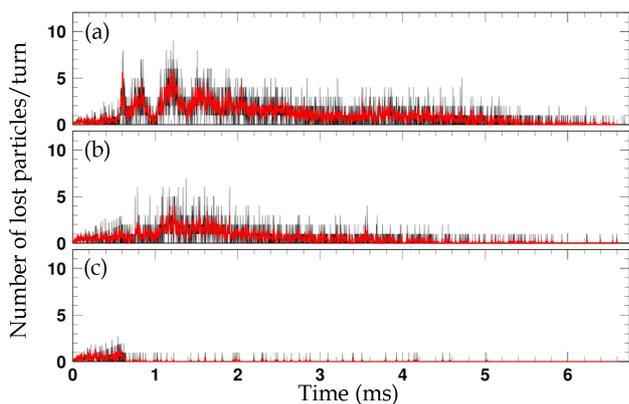


Figure 7: Numerical simulation results corresponding to (a), (b) and (c) in Fig. 6.

そのビーム損失は、ペイント範囲を 200π mm mrad から 150π mm mrad に縮小することで(b)へ、更に、ベアチューンを (6.43, 6.32) から (6.45, 6.42) へ変更することで(c)にまで低減された。

上記の実験結果は、Fig. 7 に示すように、計算機上で概ね再現することができた。次に、その数値シミュレーション結果を用いて、ビーム損失の発生や低減のメカニズムを議論する。Figure 8 に(a), (b), (c)の場合の横方向エミッタンスを、また、Fig. 9 に入射終了直後のチューンフットプリントを示す。Figure 8 に示されるように、(a)の場合には、y 方向でより顕著なエミッタンス増大が発生する。Figure 9 の(a)に示されるように、ビームの近傍には、 $v_y=6$ や $v_x-2v_y=6$ など、y 方向のエミッタンス増大を引き起こす構造共鳴が存在する。特に $v_y=6$ の帯域には、全次数の共鳴が構造共鳴として励起されるため、それらが y 方向のエミッタンス増大の主要な発生源になっている。 $v_x-2v_y=6$ については、六極電磁石を用いた共鳴補正を導入してその影響を最小化しているが、オンモーメンタム粒子に焦点を絞った補正であるため、オフモーメンタム粒子に対する影響が残ってしまう。それも y 方向のエミッタンス増大の一因になっている。こうした共鳴の影響で発生する y 方向のエミッタンス増大が、(a)のビーム損失の主要原因であるというのが数値シミュレーションからの結論である。

Figure 8 の(b)に示すように、横方向のペイント範囲を 200π mm mrad から 150π mm mrad に縮小することでエミッタンスを低減することができる。但し、y 方向については、その効果が限定的であるのが見て取れる。Figure 9 の(b)に示されるように、ペイント範囲の縮小によって、空間電荷由来のチューンシフトがエンハンスされるとともに、 $v_y=6$ の帯域に励起される共鳴自身の効果も強められるため、余分なエミッタンス増大が y 方向に生じ、ペイント範囲を縮小した効果を相殺してしまったと解釈される。

こうした状況を改善するために行ったのがベアチューンの変更である。Figure 9 の(c)に示すように、ベアチューンを (6.43, 6.32) から (6.45, 6.42) に変更して、ビームと $v_y=6$ のセパレーションを改善した。Figure 7 と 8 の(c)に示されるように、この措置によ

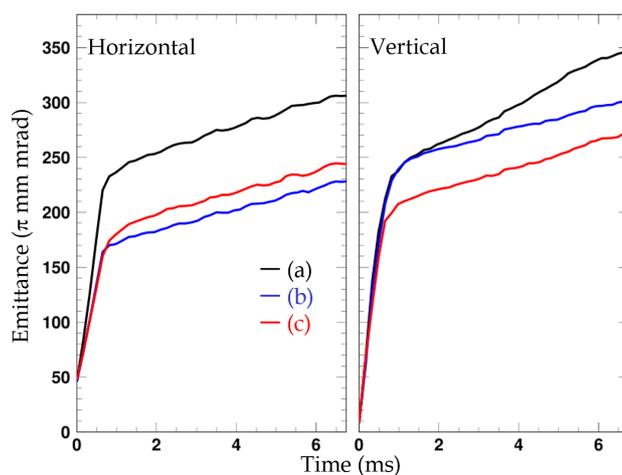


Figure 8: Numerical simulation results; time dependences of the 99.5% emittances.

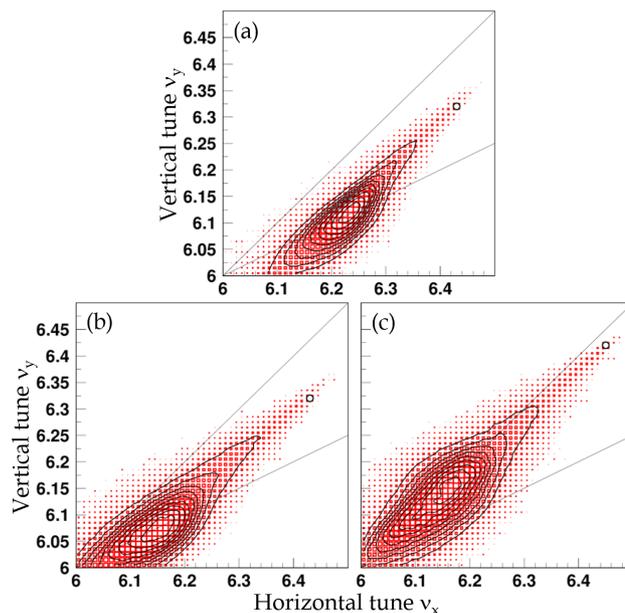


Figure 9: Numerical simulation results; tune footprints at the end of injection, where the open circles show the bare betatron tune.

り、y 方向のエミッタンス増大は大幅に軽減され、それに伴って、ビーム損失も大幅に低減できるというのが数値シミュレーションの予想である。Figure 6 に実験結果を示したが、(a)→(b)→(c)のパラメータ変更で、概ね期待通りのビーム損失低減が達成されたことがわかる。

Figure 10 に、調整後の(c)の運転パラメータ (Table 1 の右列) で測定したビーム損失のビーム強度依存性を示す。これは、入射ビームのパルス長を 0.1 ms (黒) から 0.6 ms (赤) まで 0.1 ms 刻みで変更して測定した結果である。ビーム損失の大部分が、最初の 1 ms 領域で発生しているのが見て取れる。それは、入射バンパ軌道が立ち上がっている時間帯で、周回ビームの一部が荷電変換フォイルとの衝突を繰り返している時間域に相当する。加えて、そのビーム損

失は、入射中の一粒子あたりの平均フォイルヒット回数とビーム強度の積に比例するような応答を示している。以上の実験結果は、観測されたビーム損失の大部分が入射中のフォイル散乱によって生成されたものであることを結論づける。数値シミュレーションもそれを支持している。フォイルを用いた荷電変換入射を行っている限り、散乱由来のビーム損失は不可避であるが、その他のビーム損失成分については、ほぼ最小化できたことになる。

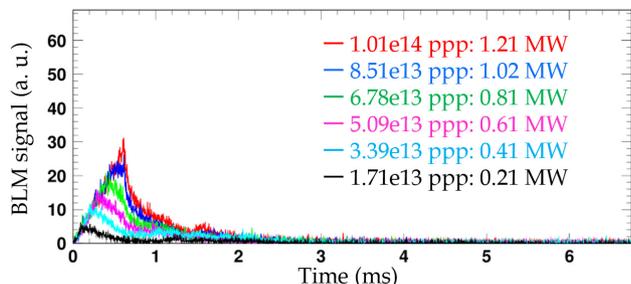


Figure 10: Beam loss monitor signals observed at the collimator section.

続いて、昨年12月に、Fig. 3の(B)の入射ビームを用いて、つまり、入射ビームのパルス長を伸ばすかわりにピーク電流を増やして、同様の1.2 MW相当の大強度試験を行った。ピーク電流を増やしたことで、入射ビームの横方向エミッタンスが30%ほど増大したが[12]、RCSにおけるビーム損失は、Fig. 10の状況をほぼ再現する結果であった。つまり、(B)の場合も、残余のビーム損失の殆どはフォイル散乱由来のもので、それ以外のビーム損失成分については、ほぼ最小化できたということになる。

5. 課題

上述のビーム調整によって、1.2 MW加速時のビーム損失を 10^{-3} レベルにまで低減できたが、課題も残っている。1 MW運転の場合と同等レベルの極めて少ないビーム損失ではあるが、その殆どが、フォイル散乱によって生じている点が1 MW運転の場合と異なる。

フォイル散乱で生成されるビーム損失も、その大部分は、シールドされたコリメータ領域で回収できるが、一部の角度で散乱された粒子がフォイルの直下で損失するため、フォイルの周辺機器を放射化する要因になる。有意な放射化を避けるためには、入射中のフォイルヒット回数を最小化する必要がある。横方向のペイント入射は、ビーム入射中に、周囲ビームをより早くフォイルから遠ざけるという役割も担っており、ペイント範囲を大きくとることでフォイルヒット回数を大幅低減することができる。1 MW運転では、 200π mm mradという大きなペイント入射を実現したのでフォイル散乱由来のビーム損失をほぼ最小化できたが、1.2 MW運転では、ペイント範囲を 150π mm mradに縮小しているため、1 MW運転の場合と比べて、40%ほどフォイルヒット回数が多い状況にある。1.2 MW運転では、現状、 200π mm mradのペイント入射を導入すると、有意な

別種のビーム損失が付加的に発生してしまうという状況にあるので、それを実現できていない。この問題を解決して、ペイント範囲を 200π mm mradに回復することが1.2 MW調整における今後の課題である。

6. まとめ

1 MW試験の成功を受けて、RCSでは、昨年より、1 MW以上のビーム出力を目指した大強度試験を展開中である。昨年10月には、設計値の1.2倍のパルス長を持つ入射ビームを用いた1.2 MW試験を、また、12月には、1.2倍のピーク電流を持つ入射ビームを使用した同様の1.2 MW試験を実施した。当初、1%程度の有意なビーム損失が出現したが、ベアチューンや横方向ペイント範囲を最適化することで、 10^{-3} レベルにまでビーム損失を低減することができた。残余のビーム損失の大部分は、フォイル散乱由来のもので、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。次の課題は、ペイント範囲の幅を図って、入射機器の放射化を招く恐れのあるフォイル散乱由来のビーム損失成分を最小化することである。

今回の試験は、1 GeVまでの加速であったが、本年の夏メンテナンス期間にRF系の改良を行なうことになっており、その後の12月のビーム試験で1.2 MW相当の3 GeV加速を目指すことになる。また、その試験では、入射ビームのパルス長とピーク電流を共に1.2倍にした1.44 MW相当の加速試験も実施する予定である。

参考文献

- [1] High-intensity Proton Accelerator Project Team, JAERI Report No. JAERI-Tech 2003-044.
- [2] H. Hotchi *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams 12, 040402 (2009).
- [3] H. Hotchi *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams 15, 040402 (2012).
- [4] H. Hotchi *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams 19, 010401 (2016).
- [5] H. Hotchi *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams 20, 060402 (2017).
- [6] F. Tamura *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams 12, 041001 (2009).
- [7] M. Yamamoto *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A 621, 15 (2010).
- [8] M. Kinsho, in Proc. of IPAC2016, Busan, Korea, 2016, pp. 999–1003.
- [9] F. Tamura *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams 14, 051004 (2011).
- [10] M. Yamamoto *et al.*, in Proc. of IPAC2019, Melbourne, Australia, 2019, pp. 2017–2019.
- [11] F. Tamura *et al.*, in Proc. of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Japan, 2018, pp. 1131–1135.
- [12] Y. Liu *et al.*, in Proc. of HB2018, Daejeon, Korea, 2018, pp. 60–63.