

J-PARC RCS におけるビームコミッショニングの近況報告 — 1-MW 出力の実現に向けて —

RECENT PROGRESS OF J-PARC RCS BEAM COMMISSIONING — TOWARDS REALIZING 1-MW OUTPUT BEAM POWER —

發知英明^{#, A)}, J-PARC RCS ビームコミッショニンググループ^{A)}

Hideaki Hotchi^{#, A)}, J-PARC RCS beam commissioning group^{A)}

^{A)} Accelerator division, J-PARC center, Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

Abstract

J-PARC RCS started 1-MW beam tuning from October 2014, and successfully achieved 1-MW beam acceleration in January 2015. The most important issues in realizing such a MW-class high-power beam operation are control and minimization of beam loss to keep machine activations within the permissible level. In the beam test in January 2015, a major part of beam loss, such as space-charge induced beam loss, was well minimized by the combination of transverse and longitudinal painting. In addition, in the following beam test in June 2015, a foil scattering part of beam loss during charge-exchange injection was further reduced by expanding the transverse painting area, which was achieved by compensating beta function beating with newly installed quadrupole correctors. The 1-MW routine beam operation is now estimated to be established within the permissible beam loss level by these recent efforts. The main topic of this paper is to discuss our approaches to beam loss issues that we faced on the process of the beam power ramp-up.

1. はじめに

Figure 1 に J-PARC 3GeV Rapid Cycling Synchrotron (RCS) の全体像を示す^[1]。RCS は、全長 350m、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 という早い繰り返しで 3GeV まで加速する。その図に示す通り、RCS は、物質生命科学実験施設 (MLF) へのビーム供給と後段の 50GeV 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の 1MW という大出力でのビーム供給を目指している。

Figure 2 に利用運転が開始された 2008 年 12 月から現在までのビーム出力の履歴を示す。ビームコミッショニングの開始当初は、設計値の 1%以下の

弱いビームを使って初期調整を行い^[2]、4kW の低出力で利用運転を開始したが、その後は、ビーム調整の進展^[3]やハードウェアの増強などに従って着実に出力を増強させており、現在の利用運転におけるビーム出力は 500 kW にまで達している^{[4][5]}。また、こうした利用運転の合間を縫って、設計出力の実現に向けた大強度加速試験を定期的実施している。図中の赤線で示されるように、RCS は、入射エネルギー増強 (2013 年夏) 前後に 550 kW 相当の大強度加速試験を実施し、また、入射ビーム電流増強 (2014 年夏) 後の昨年 10 月より 1MW 試験を開始したところである。

RCS のような大強度加速器では、ビーム損失により生じる機器の放射化が、出力強度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強度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

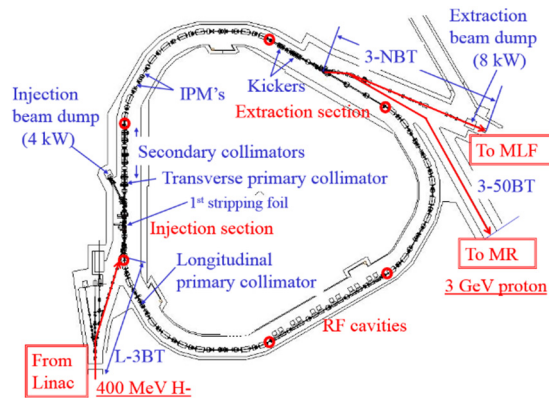


Figure 1: Layout of J-PARC RCS.

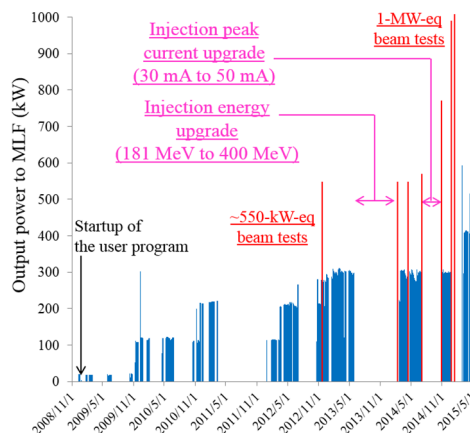


Figure 2: History of the RCS beam power.

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

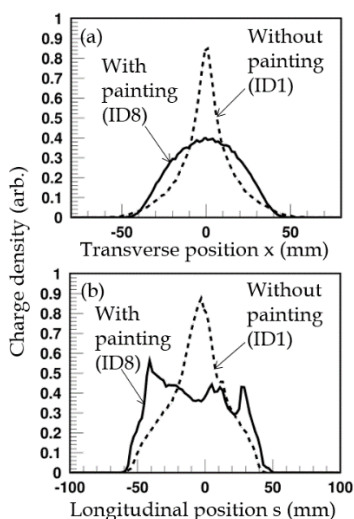


Figure 3: Transverse (a) and longitudinal (b) beam profiles at the end of injection obtained without and with injection painting; the charge density peak is well reduced by injection painting.

Painting parameter ID				
Parameter ID	ϵ_{tp} (π mm mrad)	V_2/V_1 (%)	ϕ_2 (degrees)	$\Delta p/p$ (%)
1	-	-	-	-
2	100	-	-	-
3	-	80	-100	-
4	-	80	-100	-0.1
5	-	80	-100	-0.2
6	100	80	-100	-
7	100	80	-100	-0.1
8	100	80	-100	-0.2

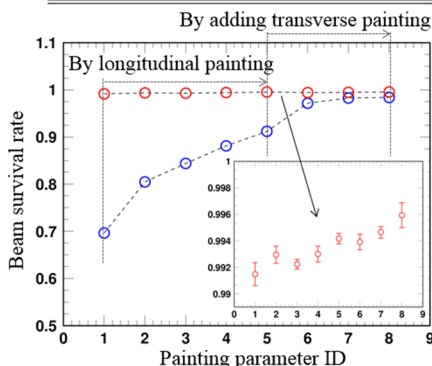


Figure 4: Beam survival rates measured with various combinations of transverse and longitudinal painting (IDs 1 to 8), where the blue circles correspond to the old data taken with the lower injection energy of 181 MeV with a beam intensity of 539 kW, while the red ones are the new data taken with the upgraded injection energy of 400 MeV with a similar beam intensity of 553 kW.

ーム損失の発生機構やその低減に向けた取り組みについて報告する。

2. ペイント入射によるビーム損失低減

ビーム損失の原因は多様に存在するが、ビーム入射直後の低エネルギー領域で顕在化する空間電荷効果やそれに付随した共鳴現象が第一の原因として挙げられる。RCS では、この空間電荷効果を軽減するために、入射ビームを横方向および縦方向の位相空

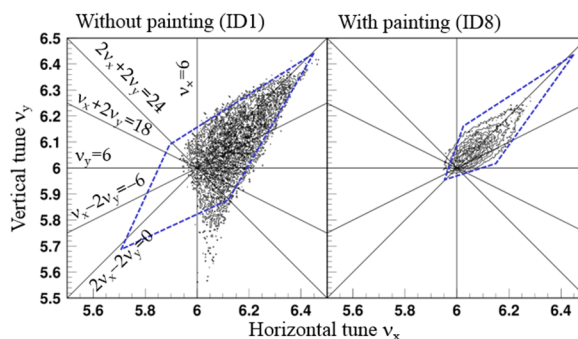


Figure 5: Tune footprints at the end of injection calculated for the lower injection energy of 181 MeV with a beam intensity of 539 kW-eq value, without (left) and with (right) injection painting.

間上にできる限り広く一様に分布させてビームの空間電荷密度を低減させるペイント入射^[6]と呼ばれる手法を採用している。

横方向のペイント入射では、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、位相空間上の必要な範囲 (ϵ_{tp}) にビーム粒子を一様に分布させる。Figure 3 の上図に示される通り、横方向ペイント入射の導入により、横方向の空間電荷密度が大幅に低減されているのがわかる。一方の縦方向のペイント入射^{[7][8]}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。この際、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 (ϕ_2) をスイープさせて RF ポテンシャルの形状を入射中に変化させるなどの追加措置をとることで、より効果的な縦方向分布の制御を実現させている。Figure 3 の下図に示すように、縦方向ペイント入射の導入により、縦方向のビーム分布が効果的に平坦化されているのがわかる。

Figure 4 がペイント入射によるビーム損失低減を実験的に検証した結果である。縦軸がビームのサブイバルレート、横軸がペイント入射のパラメータ ID である (ID1-8 のパラメータ式が表にまとめられている)。図中の青丸が、入射エネルギー増強前の 2012 年 11 月に 181 MeV の入射エネルギーで、540 kW 相当のビーム強度で試験した結果、一方の赤丸が入射エネルギー増強後の 2014 年 4 月に同様のビーム強度で試験した結果になる。

図に示されるように、空間電荷効果のより厳しい、入射エネルギー増強前のほうがより顕著なペイントパラメータ依存性を示している。ID1 のペイント入射無しの場合に、30% という非常に大きなビーム損失が発生したが、縦方向ペイントの導入 (ID5)、更に、横方向ペイントを組み合わせた (ID8) ことでビーム損失を最終的に 1% 領域にまで大幅低減させることに成功した。Figure 5 にペイント入射無し

(ID1) 有り (ID8) で計算した入射終了直後のインコヒーレントチューンシフトの様子を示す。ペイント入射無しの場合は、非常に大きなチューンシフトが発生し、ビームのコア領域がベアチューンの下方に存在する強い低次の構造共鳴に達していることが見て取れる。こうした共鳴線からの影響で、ビーム粒子のベータトロン振幅が増大したことが 30% という大きなビーム損失の主原因であるが、ペイント入射の導入により、チューンシフトが低減され、共鳴の影響が緩和されたことで、ビーム損失が 1% 台にまで大幅低減されたと解釈することができる。

更に、この状況が、入射エネルギーの増強により、青から赤へと大幅改善されたことが見て取れる。これは、入射エネルギーの増強で、空間電荷効果が約 1/3 にまで低減されたことに対応する。図中の挿入図が赤色データの拡大図であるが、この場合にも、ペイント入射によるビーム損失の低減が確認できる。

入射エネルギー増強前後に実施した一連のビーム試験結果は、ペイント入射や入射エネルギーの増強が期待通り強力に機能したことを明確に示している。また、ここでもう一つ強調しておきたいのは、入射エネルギー増強前に実施した 540 kW 試験でのビーム損失を 1% 領域にまで低減できたという成果の位置づけである。空間電荷効果は、ローレンツ因子の小さい低エネルギー領域ほど顕著となる。1MW 設計出力運転時の入射エネルギー 400 MeV 領域のラスレット量を 1 に規格化すると、その試験時のラスレット量は 1.6 に相当する。ビーム強度は設計値の半分程度であるが、入射エネルギーが低いために、設計値の 1.6 倍という強い空間電荷効果が発生する。言い換えれば、その試験時のビーム運転は、設計ビーム強度 1MW の 1.6 倍、1.6MW 相当のビーム運転と運動学的に等価な関係といえる。つまり、その試験結果は、入射エネルギー増強後の 1MW 出力実現への目途をつけるデータであると共に、設計出力を上回る 1.6 MW 以上の更なる大強度化への道を開く大きな成果と位置づけることができる。

3. 1MW 大強度加速試験

上述のビーム試験直後の 2014 年夏に、リニアックのフロントエンド部 (イオン源と RFQ) の増強が実施され、入射ビームのピーク電流値が 30mA から設計値である 50mA へと引き上げられた。このリニアック増強に合わせ、RCS でもビーム強度を更に積み上げた大強度ビーム試験を昨年 10 月より開始し、本年 1 月 10 日に、設計出力 1MW 相当のビーム加速を達成した。Figure 6 に、電流モニターで測定した周回ビームの粒子数を示す。入射から出射までの粒子数は、570kW (水色) から 1MW (赤色) 相当のビームまでどれもほぼ一定であり、重篤なビーム損失を発生させることなく 1MW 加速を達成できたことがわかる。

但し、まだ、解決すべきビーム損失が僅かながら残っている。Figure 7 (a) に分散の高いアーク部に設置されたビームロスモニター (BLM) の信号値を示す。図に示されるように、830 kW (緑色) 相当のビーム

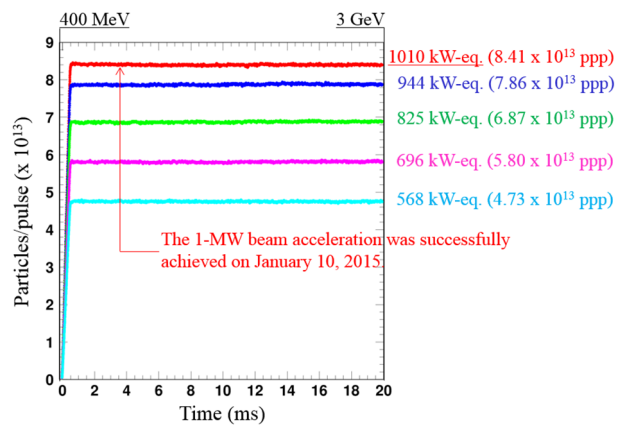


Figure 6: DCCT data over the full acceleration time of 20 ms for various beam intensities from 568 kW to 1010 kW.

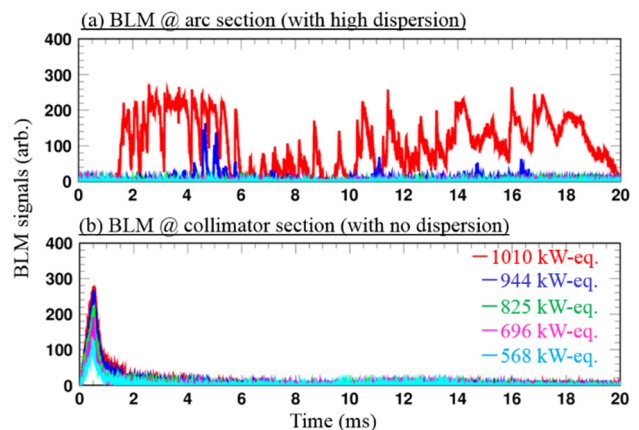


Figure 7: BLM signals at the arc and collimator sections measured over the full acceleration time of 20 ms for various beam intensities from 568 kW to 1010 kW.

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 (青色と赤色) 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 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⁹⁾、この試験当時、RF 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関しては十分な FF 調整ができなかったということがこのビーム損失の根本原因といえる。このビーム損失の絶対量は 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、エネルギーの高い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。この試験結果を受けて、RF 電源の増強作業が現在進行中である。その作業終了後の本年 10 月に、再度、1MW のビーム試験を行う予定であるが、RF 電圧の再調整を十分に行えば、

この縦方向のビーム損失は抑制できると期待される。

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セクションで回収されている。Figure 7 (b)に、コリメータ領域の BLM 信号値を示す。図に示される通り、コリメータセクションでのビーム損失は、入射中の最初の 1ms 領域のみ出現し、それ以外の時間領域では有意なビーム損失は生じていない。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、ペイント入射の導入により、ほぼ最小化させることができている。この 1MW ビーム加速の際のコリメータ領域のビーム損失は約 0.2%と評価された。コリメータのビーム損失許容限界値は 3%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。

既述の通り、RF 電源増強後の本年 10 月に、再度、1MW 試験を行う予定であるが、この一月のビーム調整・試験により、1MW の連続運転を実現する見通しは大凡付いたと考えている。

4. 更なるビーム損失低減に向けた取り組み

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目途は立ったといえる。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ロスして機器の放射化の原因になっている。夏季シャットダウンに入る前に、一月近く 400 kW の連続利用運転を行ったが、その運転直後のフォイル近傍の残留線量は、チャンバー表面で 15 mSv/h ほどであった。つまり、このままの状況で、ビーム強度を 1MW まで増強させた場合、その位置での線量は、40 mSv/h 近くにまで上昇することになる。この予想線量は、適切な冷却期間などを設ければ許容範囲内ともいえるが、メンテナンス作業中の被爆をできる限り最小化させるというのは鉄則であり、その観点から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ずることが必要となるが、横方向のペイント範囲を更に拡幅することができれば、ビームをより早くフォイルから遠ざけることができるので、その分だけ入射中のフォイルヒット回数を減ずることができる。例えば、現状のペイント範囲 100π mm mrad を 150π mm mrad に拡幅することができれば、フォイルヒット回数を 0.6 倍に低減することができる。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、入射バンプ電磁石のエッジ収束に起因していることが

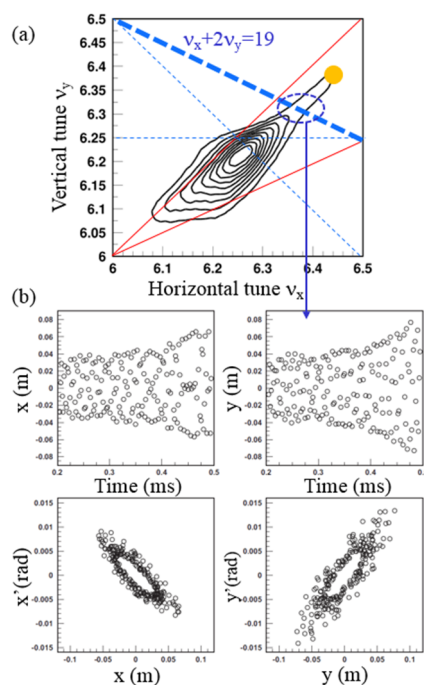


Figure 8: (a) Tune diagram near the operating point, where the red lines are the structure resonances, while the blue lines are the non-structure resonances excited through a distortion of the super-periodicity caused by the edge focus of the injection bump magnets. (b) Turn-by-turn incoherent oscillation calculated for a particle near the resonance $v_x + 2v_y = 19$.

判明した^[10]。RCS では、入射中、水平方向にローカルバンプ軌道を形成し、そのバンプ軌道を時間変化させることでペイント入射を行っているが、その際に、バンプ軌道を形成するために用いている入射バンプ電磁石の出入り口に、エッジ収束力が発生することになる。このエッジ収束力により、入射中のベータ関数に変調して加速器の対称性が崩れてしまうために、非構造共鳴が付加的に励起・エンハンスされるといった状況が生まれる。Figure 8 (a)に、動作点近傍のチューンダイアグラムを示す。図中の赤実線が構造共鳴、そして、青点線がエッジ収束力によって加速器の対称性が崩れることで出現する非構造共鳴に対応する。現状の運転条件では、こうした非構造共鳴の中で、 $v_x + 2v_y = 19$ 共鳴が特に強くビームに影響を与えている。 $v_x + 2v_y = 19$ は和共鳴なので、ビーム粒子がその共鳴に近づくと、Figure 8 (b)に示される通り、x 方向・y 方向共に、エミッタンス増大が引き起こされる。また、図から見て取れるように、この共鳴の特性から、x 方向のエミッタンス増大に対し、2 倍の比率でより大きなエミッタンス増大が y 方向に発生する。この y 方向の大きなエミッタンス増大が、ペイント範囲を拡幅した際に出現する付加的なビーム損失の主原因となっている。

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 台の補正四極電磁石が最近になって追加設置された^[10] (Figure 1 の赤丸)。ベータ関数変調の補正により、加速器の対

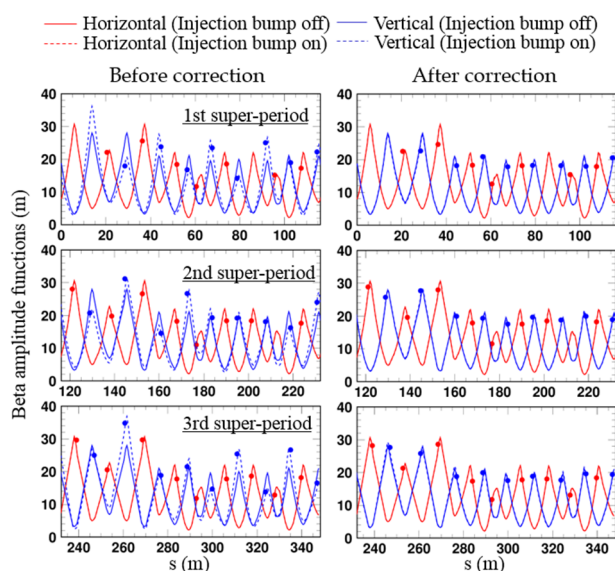


Figure 9: Beta functions measured without (left) and with (right) the addition of quadrupole correctors.

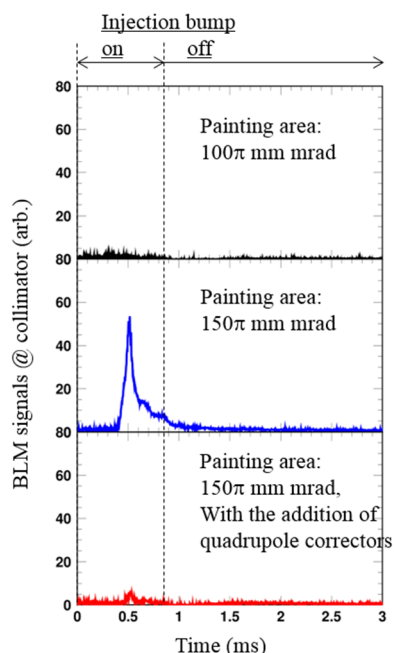


Figure 10: BLM signals at the collimator section measured in the 850-kW high-intensity beam test.

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。Figure 9 に示されるように、エッジ収束が引き起こす y 方向のベータ関数変動が、補正四極電磁石によって十分に補正されているのがわかる。

Figure 10 に、夏季シャットダウン直前の本年 6 月末に実施した 850 kW 試験において観測されたコリメータ領域の 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。

こうした補正を講ずることで、付加的なビーム損失を抑制しつつペイント範囲を拡幅させることに成功したが、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、入射中のフォイルヒット回数を大幅低減させることに成功した。これまでのパラメータでは、1 粒子あたりの平均のフォイルヒット回数は 42 回であったが、ペイント範囲を拡幅したことで 26 回、更に、フォイルのサイズや位置を再調整することで 12 回と、1/4 程度にまでフォイルヒット回数を減らすことができた。元のパラメータで 1MW 運転した場合、直後のフォイル近傍のチェンバー表面での残留線量は、 40 mSv/h に近い領域まで達してしまうと予想されたが、一連のビーム調整により、十分に許容範囲といえる 10 mSv/h 領域にまで大幅低減できる目途がついたことになる。

5. まとめ

本年 1 月に、設計出力 1MW 相当のビーム加速を達成した。RF 電源の不足により、縦方向のビーム損失が僅かながら残っているが、ビーム損失の主成分である空間電荷効果に起因する部分については、ペイント入射の導入によりほぼ最小化することができた。縦方向のビーム損失以外で、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に起因したものであるが、そのビーム損失についても、新規導入した補正四極電磁石を用いて横方向ペイント範囲の拡幅を実現させた結果、大幅低減することに成功した。RF 電源増強後の本年 10 月に、再度、1MW 試験を行う予定であるが、これまでの一連のビーム調整・試験により、許容範囲内のビーム損失で 1MW 連続運転を実現する見通しは概ね付いたといえる。

参考文献

- [1] JAERI-Tech 2003-044, KEK Report 2002-13.
- [2] H. Hotchi et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams **12**, 040402 (2009).
- [3] H. Hotchi et al., Prog. Theor. Exp. Phys. **2012**, 02B003 (2012).
- [4] K. Hasegawa, "Progress of Beam Intensity in the J-PARC Accelerators", Proceedings of the 12th Annual Meetings of Particle Accelerator Society of Japan, Tsuruga, Aug. 5-7, 2015.
- [5] K. Yamamoto and M. Kinsho, "Status of J-PARC 3 GeV Rapid Cycling Synchrotron under the high power operation", Proceedings of the 12th Annual Meetings of Particle Accelerator Society of Japan, Tsuruga, Aug. 5-7, 2015.
- [6] H. Hotchi et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams **15**, 040402 (2012).
- [7] F. Tamura et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams **12**, 041001 (2009).
- [8] M. Yamamoto et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A **621**, 15 (2010).
- [9] F. Tamura et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams **14**, 051004 (2011).
- [10] H. Hotchi et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A **778**, 102 (2015).