

J-PARC MR 取り出し時の大強度ビームプロファイルのシミュレーションによる検討

SIMULATION STUDY OF THE BEAM PROFILE OF THE HIGH-POWER BEAM AT THE EXTRACTION OF J-PARC MR

五十嵐進^{#,A)}, 石井恒次^{A)}, 大見和史^{A)}, 佐藤洋一^{A)}, 白形政司^{A)}

Susumu Igarashi^{#,A)}, Koji Ishii^{A)}, Kazuhito Ohmi^{A)}, Yoichi Sato^{A)}, Masashi Shirakata^{A)}

^{A)}High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

The transverse profiles of the high-power beam at the extraction were studied with simulations at the main ring (MR) of the Japan Proton Accelerator Research Organization. During the fast extraction operation, the beam losses have been observed in the region of the extraction devices at the extraction timing. A part of the causes is the limited aperture of the quadrupole magnet QDT155 for the extraction beam. The present beam power of MR is 500 kW at maximum with the cycle time of 2.48 s and the number of extracted protons of 2.6×10^{14} protons per pulse (ppp). The beam power upgrade is being promoted for 1.3 MW with the cycle time of 1.16 s and the number of extracted protons of 3.3×10^{14} ppp. We estimated beam losses at the extraction for the present and future high-intensity beams with the particle tracking program, SCTR, taking the space charge effect into account. We have further estimated the improvement in beam losses with the large aperture QDT magnets that are being constructed.

1. はじめに

大強度陽子加速器施設(J-PARC)の主リング(MR)では漸次ビームパワー増強を行っており、最近のランでニュートリノ実験のための速い取り出し(FX)モードで最大 500 kW のビームパワーで 30 GeV の陽子を供給した。繰り返し周期は 2.48 s で、取り出し時の陽子数は 2.61×10^{14} protons per pulse (ppp) としている[1]。

速い取り出し(FX)モードでの取り出し時に、顕著なビームロスが観測されている(Fig. 1)。ロスは MR の取り出しのセクションで発生しており、ニュートリノビームラインの最上流部にも影響を与え、ビームパワーが増えるにつれて、ロスも増えている。毎週メンテナンス日での残留放射線量測定が行われているが、2017年3月1日のビーム停止6時間後の測定では、FXセブタム1, 2の表面で 2.10 mSv/h、四極電磁石 QDT155 の下流部表面で 0.92 mSv/h となっていた。取り出しビームに比べて、この場所でのアパーチャーが充分ではないと考えられる。

繰り返し周期を 1.32 s とすることで MR の現状の設計値 750 kW を超えるビームパワーを目指し、電磁石電源、高周波加速空洞、入出射機器の増強を行っている。ニュートリノ振動実験 T2K で CP 対称性の破れの測定のため更なるビームパワーの増強を目指し、1.3 MW とすることを検討している[2]。繰り返し周期は 1.16 s とし、取り出し時の陽子数は 3.3×10^{14} ppp として、目標を達成することを考えている。そのため、高周波加速空洞システム、コリメータなどの増強の検討が行われている。それに加えて、加速陽子数を 30 % 程度増やすことが検討されている。

この増強により将来取り出しセクションでビームロスが増加することが予想され、空間電荷効果を考慮したシミュレーション SCTR[3]により、現在と将来でのビームロスの評価を行った。また、取り出しセクションでアパーチャーを制限している四極電磁石 QDT を大口径化する計画があり、それによるビームロスの改善を評価した。

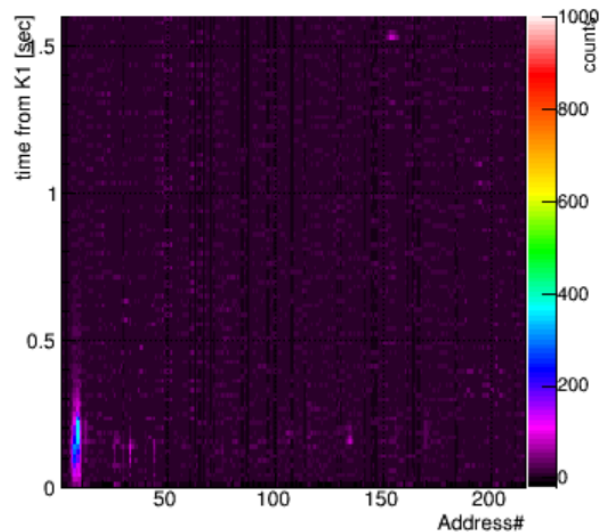


Figure 1: The beam loss distribution as a function of MR address and time from the first injection kicker timing, K1, for a user operation shot with the beam power of 470 kW. The beam loss is indicated at the extraction time of 1.53 s and the address including 155.

[#]susumu.igarashi@kek.jp

2. FX ビームのためのアパーチャー

FX モードでの取り出しビーム軌道を Fig. 2 に示す。水平方向アパーチャーは低磁場セプタムと四極電磁石 QFR154 (ボア直径 140 mm) の真空ダクトによって 30π mm mrad に限られている。低磁場セプタムのセプタム導体は取り出しビームおよび周回ビームに近くに設置され、そのアパーチャーはキッカー電磁石のキック角に依存する。キック角が小さい場合には、取り出しビームがセプタム導体に当たり、残留放射線量が上がると考えられる。

垂直方向のアパーチャーは QDT155 (ボア直径 150 mm) の真空ダクト (Fig. 3) によって 15π mm mrad に限られている。

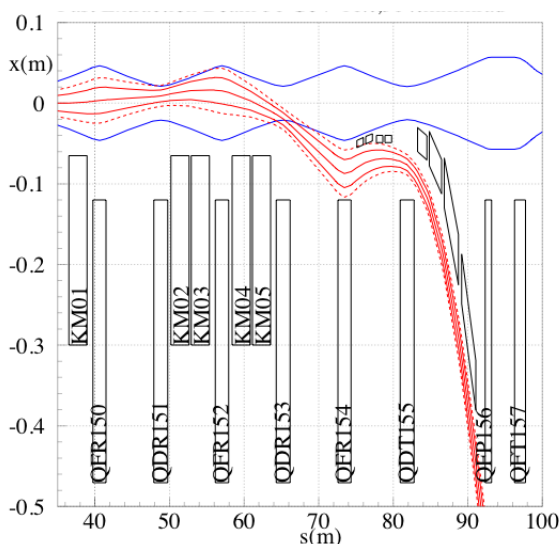


Figure 2: Orbits of the beams at the FX section in the horizontal plane. Orbits of the FX beam are shown in red solid lines for the beam emittance of 10π mm mrad and in red dashed lines for 30π mm mrad. The orbit of the circulating beam of 81π mm mrad is shown in blue lines.

3. 大口径 QDT 電磁石

ボア直径 220 mm の QDT 電磁石を新たに制作している。これにより、FX ビームのためのアパーチャーは 60π mm mrad となる (Fig. 4)。電磁石の鉄心長は 2.36 m で、現行のものより 0.6 m 長くなる。ボア径が大きくなることにより、達成できる磁場勾配 K1 が小さくなり、それを補うために鉄心長を長くする必要がある。また、付近のセプタム電磁石も新たに設計され、新しい QDT 電磁石の設置に対応している。QDT 電磁石は合計 6 台あり、MR のラティス対称性を保つために、6 台全て置き換えることを計画している。

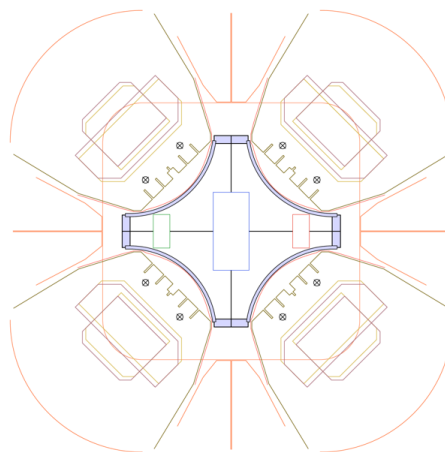


Figure 3: Front view of QDT155 magnet with the bore diameter of 150 mm and the vacuum chamber. The circulating beam of 81π mm mrad (blue rectangle), the FX beam of 15π mm mrad (red rectangle) and the abort beam of 15π mm mrad (green rectangle) are also shown.

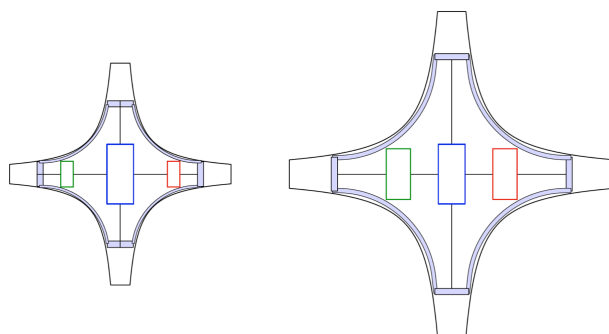


Figure 4: Front view of conceptual scheme of large aperture magnet with the bore diameter of 220 mm and the vacuum chamber (right figure). The circulating beam of 81π mm mrad (blue rectangle), the FX beam of 60π mm mrad (red rectangle) are also shown. The present QDT magnet with the bore diameter of 150 mm (left figure). The circulating beam of 81π mm mrad (blue rectangle) and the FX beam of 15π mm mrad (red rectangle) are also shown.

4. ビームパワー470 kW についての取り出し時のビームプロファイルの評価

取り出し時にビームプロファイルおよびビームロスの評価のために空間電荷効果を考慮した粒子トラッキングを SCTR によって行った。ビームパワー 470 kW、ビーム強度 3×10^{13} protons per bunch (ppb) の場合の計算を行った。マクロ粒子の数は 200,000 個とし、入射期間と 30 GeV までの加速期間の計算を行った。この強度についての横方向の入射粒子分布は、3-50BT でのプロファイル測定結果をもとにして、水平方向、垂直方向ともに 2σ エミッタンスで 16π

mm mrad のガウス分布とした。縦方向分布は、MR での Wall Current Monitor によるバンチ形状の測定結果をもとにして、バンチングファクター 0.2 のトラッキングしたガウス分布とした。コリメータアパーチャーを 60π mm mrad と設定し、それより外の粒子をロスと計数した。それぞれの電磁石の強さのばらつき、多極成分、電磁石設置誤差をシミュレーションに入れた。入射期間と加速期間の初期についてのビームサバイバルを Fig. 5 に示す。ビームサバイバルがシミュレーションにより概ね再現できている。

粒子分布を概ね 40,000 turn 毎に出力し、水平方向と垂直方向分布を Fig. 6 に示す。それぞれの分布はアディアバティックダンピングを仮定して、30GeV 相当にスケールさせた。30GeV の分布について、中心部分をガウスフィットした場合、水平方向 2σ エミッタンスは 2.1π mm mrad であり、垂直方向 2σ エミッタンスは 2.3π mm mrad であった。端部の分布は、加速が進むにつれて、大きくなっており、垂直方向の分布は取り出しアパーチャーの ± 20 mm を超えている。分布の端部がアパーチャーに近いことおよび端部でも分布の変化が大きいことから、ビームロスの評価が難しいことが分かる。

このシミュレーション結果を、ニュートリノビームラインでの 19 台の segmented secondary emission monitors と 1 台の optical transition radiation monitor によるプロファイル測定結果と比較した。ビームラインの Twiss パラメータを使い、水平方向 2σ エミッタンスは 3.2π mm mrad、垂直方向 2σ エミッタンスは 3.0π mm mrad と評価された。これらの値はシミュレーション結果より大きくなっており、ヘッド・テール不安定性などにより、加速中にエミッタンスが増加していると考えられる。このエミッタンス増加の仕組みの解明には、さらにビームスタディが必要である。現時点では、シミュレーションで、それぞれのマクロ粒子の水平・垂直座標に適切な係数をかけたガウス乱数を足すことにより、ニュートリノビームラインでのエミッタンス測定結果を再現するようにした。この係数はビーム強度 3×10^{13} ppb で再現するように設定した。Figure 7 に 30 GeV での QDT 電磁石の出口での横方向分布を示す。現行の QDT 電磁石でのアパーチャーによるビームロスは 28 W、大口径 QDT 電磁石により 2 W と評価された。

シミュレーションの系統的な誤差の評価のため、横方向の初期分布を少し変え、水平方向・垂直方向ともに 2σ エミッタンスを 17π mm mrad とし、シミュレーションを行った。また、コリメータアパーチャーを 65π mm mrad とした。前述の同じ係数によるガウス乱数により、加速中のエミッタンス増加の効果を模擬した。取り出し時の 2σ エミッタンスは、水平方向と垂直方向ともに 2.8π mm mrad となった。これは、Fig. 5 の赤線で示すように、この場合は入射と加速初期のロスが多いためと考えられる。取り出し時の現行 QDT 電磁石でのビームロスは 33 W、大口径 QDT では 2 W と評価された。

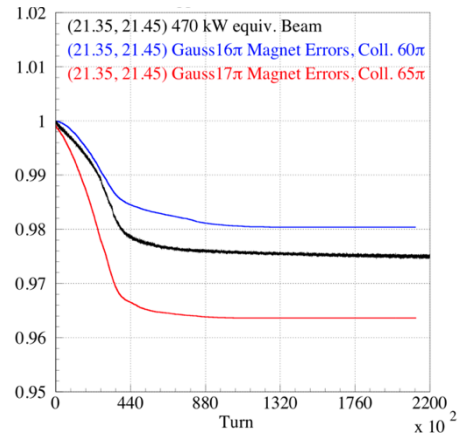


Figure 5: Measured beam survival of the 470-kW equivalent beam (black line), the simulated beam survival for an initial transverse distribution with 2σ emittance of 16π mm mrad and a collimator cut of 60π mm mrad (blue line), and the simulated beam survival for an initial transverse distribution with 2σ emittance of 17π mm mrad and a collimator cut of 65π mm mrad (red line).

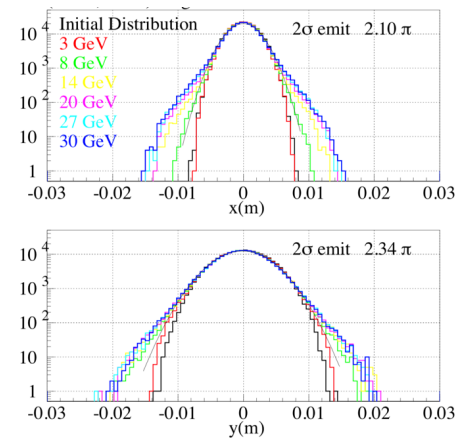


Figure 6: Macro particle distribution in horizontal (top figure) and vertical (bottom figure) direction. Initial distribution (black), distribution at 3 GeV (red), 8 GeV (green), 14 GeV (yellow), 20 GeV (purple), 27 GeV (sky blue), and 30 GeV (blue). The distribution was scaled to the distribution at the extraction energy of 30 GeV, taking the adiabatic damping into account.

5. ビームパワー1.3 MW についての取り出し時のビームプロファイルの評価

ビームパワー1.3 MW、ビーム強度 4×10^{13} ppb の場合での取り出し時のビームロスの評価をシミュレーションにより行った。この強度についての横方向の入射粒子分布は、3-50BT でのプロファイル測定結果をもとにして、水平方向、垂直方向ともに 2σ エミッタンスで 24π mm mrad のガウス分布とした。

縦方向分布は、MR での Wall Current Monitor によるバンチ形状の測定結果をもとにして、バンチングファクター 0.2 のトランケートしたガウス分布とした。コリメータアパーチャーを 60π mm mrad と設定し、それより外の粒子をロスと計数した。MR のチューンは新しい設定の (21.40, 20.45) としている。また、このシミュレーションでは電磁石の誤差は導入していない。ビームサバイバルを Fig. 8 に示す。

Figure 9 に取り出し時の QDT 電磁石出口での横方向分布を示す。前章で記述した係数にビーム強度の比 $4/3$ 倍したものを使いガウス乱数により、加速中のエミッタンス増加の効果を模擬した。水平方向 2σ エミッタンスは 5.0π mm mrad であり、垂直方向 2σ エミッタンスは 6.2π mm mrad であった。ビームロスは現行 QDT 電磁石では 471 W となり、大口径 QDT 電磁石では 7 W となった。

シミュレーションの系統的な誤差の評価のため、偏向電磁石と四極電磁石の磁場のばらつきと多極成分を考慮して、シミュレーションを行った。また、コリメータアパーチャーを 65π mm mrad とした。取り出し時のビームロスは現行 QDT 電磁石では 159 W、大口径 QDT では 27 W と評価された。

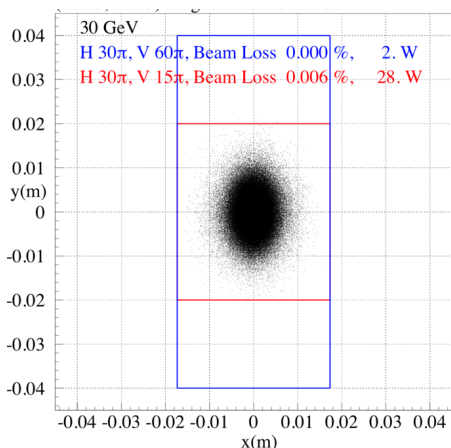


Figure 7: Macro particle distribution at the kinetic energy of 30 GeV in the transverse plane at the exit point of the QDT155. The orbit shift is not expressed. The red rectangle indicates the aperture of the present QDT magnet: the horizontal aperture of 30π mm mrad and the vertical aperture of 15π mm mrad. The blue rectangle indicates the aperture of the large aperture QDT magnet: the horizontal aperture of 30π mm mrad and the vertical aperture of 60π mm mrad.

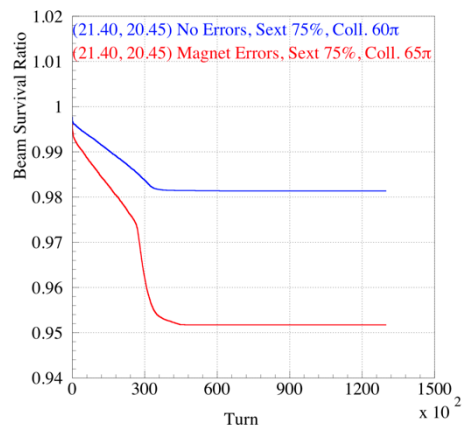


Figure 8: The simulated beam survival for an equivalent beam power of 1.3 MW. The simulated beam survival for an initial transverse distribution with 2σ emittance of 24π mm mrad and a collimator cut of 60π mm mrad and without magnet errors is shown in blue line. The simulated beam survival with a collimator cut of 65π mm mrad and magnet errors is shown in red line.

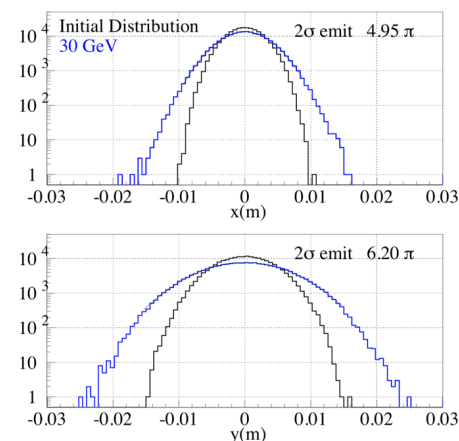


Figure 9: Macro particle distribution in horizontal (top figure) and vertical (bottom figure) directions for the beam power of 1.3 MW. Initial distribution (black) and distribution at 30 GeV (blue). The distribution was scaled to the distribution at an extraction energy of 30 GeV, taking the adiabatic damping into account.

6. まとめ

空間電荷効果を考慮した粒子トラッキングシミュレーション SCTR により、取り出し時の QDT 電磁石でのビームロスの評価を行った。取り出しアパーチャー付近でのビーム分布は非常に小さいハロー部分となっている。また、加速中にエミッタンスの増加があると考えられ、ハロー部分の評価は難しく、ビームロスパワーの評価も同様に大きな系統誤差を含むと考えられる。その上で、可能な範囲で、将来

PASJ2019 THPI040

のビームロス評価を行った。シミュレーションにより、ビームパワー470 kW の場合、QDT 電磁石で 28 W または 33 W と評価した。ビームパワー1.3 MW の場合、現行 QDT 電磁石では、471 W または 159 W のロスが予想される。大口径 QDT 電磁石に置き換えることにより、ビームロスは 7 W または 27 W と改善することが予想される。

参考文献

- [1] S. Igarashi, “High-Power Beam Operation at J-PARC”, Proceedings of the 61st ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on High-Intensity and High-Brightness Hadron Beams (HB’18), Daejeon, Korea, Jun. 2018, paper TUA2WD02.
- [2] T. Koseki, “Upgrade Plan of J-PARC MR – Toward 1.3 MW Beam Power”, *Proceedings of the 9th International Particle Accelerator Conf. (IPAC’18)*, Vancouver, BC, Canada, May. 2018, paper TUPAK005.
- [3] K. Ohmi *et al.*, “Study of Halo Formation in J-PARC MR”, *Proceedings of the 22nd Particle Accelerator Conf. (PAC’07)*, Albuquerque, NM, USA, Jun. 2007, paper THPAN040, pp. 3318-3320.