

J-PARC メインリング遅い取り出しにおける 取り出し開始前のビームロスの原因の検討

INVESTIGATION OF THE CAUSE OF THE BEAM LOSS BEFORE THE START OF THE SLOW EXTRACTION AT THE J-PARC MAIN RING

武藤亮太郎^{*,A)}, 浅見高史^{A)}, 冨澤正人^{A)}

Ryotaro Muto^{*,A)}, Takashi Asami^{A)}, Masahito Tomizawa^{A)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Japan

Abstract

In the J-PARC main ring, slow extraction using third-order resonance is performed for the Hadron Experimental Facility. During the beam operation in April 2024, a small amount of beam loss was observed between the end of acceleration up to 30 GeV and before slow extraction. In addition, a high beam rate was observed at the start of beam spill in the E16 experiment which uses 30 GeV protons transported on the high momentum beamline of the Hadron Experimental Facility. It was speculated that the cause of these phenomena is that the beam components with large momentum are affected by coupling resonance at the flat top after the end of acceleration, increasing the transverse beam size. To confirm this speculation, beam tests were performed with different beam parameters, and results consistent with the above speculation were obtained. This paper describes the results of the above beam tests and future plans.

1. はじめに

J-PARC メインリングでは、30 GeV または 8 GeV まで加速された陽子の 3 次共鳴を用いた遅い取り出しを行っている。取り出された陽子は、ハドロン実験施設に輸送され、様々な素粒子原子核実験に用いられる。2024 年 4 月から 6 月にかけて行われた遅い取り出しビーム運転において 4.24 秒に短縮された繰り返し周期での最初の遅い取り出しビーム調整を行い、ビームパワー 81 kW でのユーザー利用運転を達成した [1]。このとき、30 GeV までの加速の終了から遅い取り出しを開始するまでの間に、少量ではあるがビームロスが観測された。また、ハドロン実験施設の高運動量ビームラインで輸送された 30 GeV 陽子を用いる E16 実験 [2] の検出器でも、ビーム取り出し初期の高いビームレートを 2021 年の運転時から観測している。本論文では、この 2 つの事象の原因の推測と、それを検証するために試みたビーム調整、また今後の展望について述べる。

2. ハドロン実験施設と高運動量ビームライン (B-LINE)

メインリングから遅い取り出しによって取り出されたビームはスイッチヤードとよばれるビーム輸送ラインを通してハドロン実験施設に供給される。Figure 1 にメインリング、スイッチヤードおよびハドロン実験施設の概念図を示した。このスイッチヤードにビームの分岐点があり、ここでビーム輸送路は 2 次粒子生成のための金標的に向かう A-line と、30 GeV 陽子そのものを実験エリアに導くことのできる B-line にわかれる [3]。B-line への分岐は、A-line のビームの上部ハロー部分をランバートソン電磁石を用いて削りだす形となっている。Figure 2 にランバートソン電磁石とビームの概念的な断面図を示した。B-line に削り出されるビーム量は

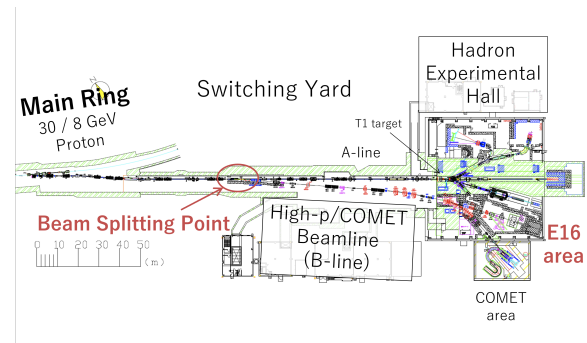


Figure 1: Drawing of the Switching Yard, which connects the Main Ring and the Hadron Experimental Facility. In the Switching Yard a small part of the proton beam was branched into the so-called B-line.

A-line のビームの約 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ というごく少量であり、このビームは最下流に設置された実験エリアで物理実験に使用される。2024 年現在、この実験エリアでは E16 実験 [2] が展開されている。

3. B-LINE に取り出されたビームの時間構造

2021 年 6 月のビーム運転において、E16 実験の実験標的からの荷電粒子を測定している鉛ガラス検出器で Fig. 3 に示すようなビームの時間構造が観測された。この図は、2 つ以上の鉛ガラス検出器での荷電粒子の検出を条件としたトリガーの発生時間と、メインリングの周回クロックとの差を取り、1 周回の中の時間を縦軸、取り出し中の時間を横軸にしてプロットしたものである。取り出し開始前に RF を OFF してデバンチングしているにもかかわらず、バンチ構造が強く見えており、運動量が中心運動量から正負にずれた 2 成分がある。30 GeV フラットトップでの slippage factor -0.00192 をもちいて運動量をもとめると、取り出し初期の成分は $\Delta p/p \simeq +0.6\%$ 、取り出し後半の成分は $\Delta p/p \simeq -0.3\%$ 、

* ryotaro.muto@kek.jp

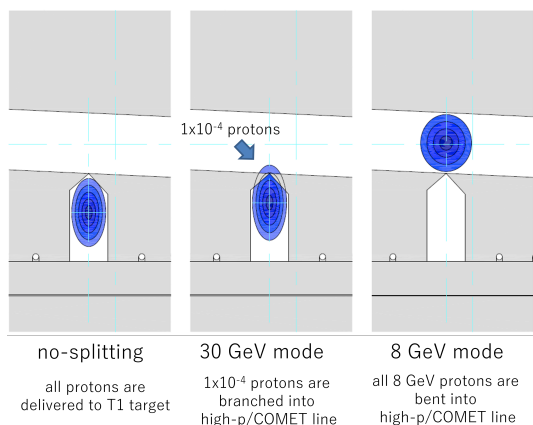


Figure 2: Schematic cross sections of the lambertson magnet and the proton beam. There are three beam operation modes, each with different beam profiles and vertical positions.

であった。また取り出し初期においては、ビームレートはその後の取り出しビームに比べて高くなっており、それが運動量の高い成分に由来していることがわかる。

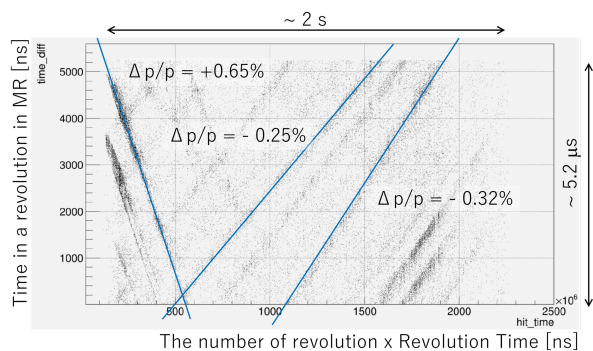


Figure 3: The time structure of the extracted beam observed by the lead glass calorimeters of the E16 experiment during beam operation in June 2021. The detection time is determined by the generation time of a trigger that requires two or more hits in the lead glass calorimeters. The vertical axis shows the time in one revolution in the ring, and the horizontal axis shows the time during extraction.

以下、この時間構造の推定される由来について順に述べる。

3.1 取り出し後半の時間構造

スイッチヤードは 80 m で 2.9 m の高さ分だけ振り上げる構造となっており、鉛直方向の dispersion が生じる。2021 年 6 月のビーム運転時には、B-line 分岐部の鉛直方向の dispersion が約 -3.6 m となる光学を用いていた。このため、運動量の低いビーム成分はビーム分岐部で上方に偏る。先に述べたように、B-line へ分岐されるビームは、A-line のビームの上部ハロー部分であるため、結果として B-line に分岐されるビームの運動量は低い方に偏ることになる。取り出されたビームの運動量分布は全幅約 $\pm 0.5\%$ であり [4]、上記の偏りによ

り運動量分布の低い方の端に近い -0.3% あたりがエンハンスされていると推測される。

また、通常は RF を OFF にするとビームの持つ運動量の幅によりバンチ構造は解消されていくが、上記のようにある運動量のものだけが選択されてしまうとバンチ構造は残りやすくなる。このために Fig. 3 のような強いバンチ構造が観測されていると考えられる。

2023 年 6 月のビーム運転ではビーム分岐部の鉛直方向の dispersion をほぼ 0 にする光学を適用し、取り出し後半のバンチ構造の低減が観測されている [5]。

3.2 取り出し初期の時間構造

B-line への取り出しがされやすいようなビーム成分としては、取り出し後半の場合のようなビームの位置が鉛直上方への偏っている成分のほかに、ビームの鉛直プロファイルの幅が増大している成分が考えられる。そこで、 $\Delta p/p \simeq +0.6\%$ という運動量をもつ成分の betatron tune の振る舞いを検討した。Figure 4 に 30 GeV 遅い取り出し運転時のクロマチシティの設定値を示した。加速終了後のフラットトップにおいて、横方向の

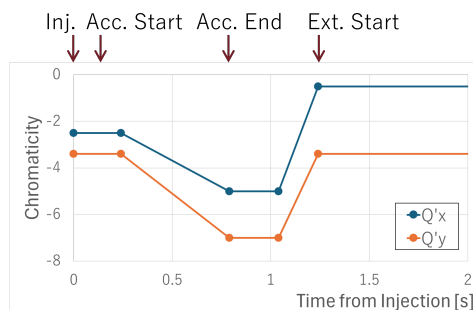


Figure 4: The settings of the chromaticity for 30 GeV slow extraction operation. Between the end of acceleration and the start of extraction, RF voltage is turned off and the beam is debunched. Chromaticity correction during this period is weakened to mitigate beam instability.

ビーム不安定性を減衰させるためにクロマチシティ補正を弱くしており、設定値は $(Q'_x, Q'_y) = (-5, -7)$ である。また、取り出し前の betatron tune の測定値は $(H, V) = (22.285, 20.788)$ である。この値を用いて、中心運動量をもつビーム成分と、 $\Delta p/p = +0.6\%$ という運動量をもつ成分の取り出し直前の betatron tune を tune diagram 上に plot したものを Fig. 5 にそれぞれ赤と青の円で示した。この図からわかるように、 $\Delta p/p \simeq +0.6\%$ の運動量を持つビーム成分は $\nu_x + \nu_y = 43$ の coupling resonance の上についており、この resonance の影響でビームの幅が太り、B-line に取り出されやすくなっていると考えられる。ビームの幅の増大は鉛直方向だけでなく水平方向にも起こると考えられ、その場合、取り出し開始前に起こるビームロスとも関連がある可能性がある。

4. ビーム試験

上記のような推測を検証するために、下記のようにビームパラメータを変更してビーム試験を行った。

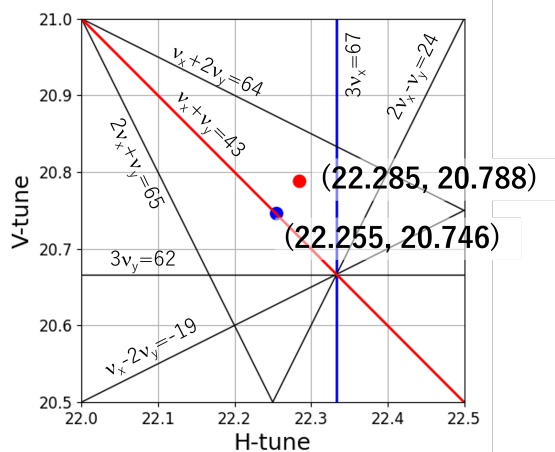


Figure 5: Tune diagram around the operation point for 30 GeV slow extraction operation. The red circle represents the betatron tune of the beam component with central momentum, and the blue circle represents the betatron tune of the beam component with momentum of $\Delta p/p = +0.6\%$.

- 取り出し開始直前の区間のクロマティシティ設定を $(-5, -7)$ から $(-4, -6)$ に変更
- 取り出し開始直前の区間の Vertical betatron tune を $+0.01$

このように変更したときの $\Delta p/p = +0.6\%$ のビーム成分の取り出し直前の betatron tune が Fig. 6 に緑の円で示してある。図からわかるように、このビーム成分に対する

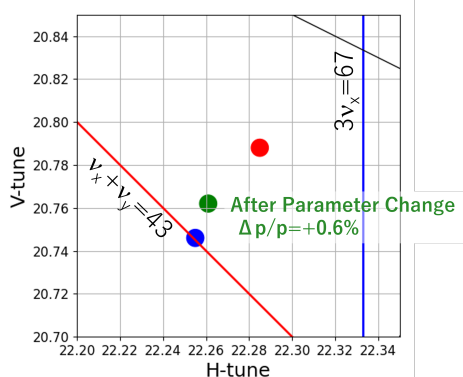


Figure 6: Zoomed up tune diagram with the green circle which indicates the betatron tune of the beam component corresponding to momentum $\Delta p/p = +0.6\%$ after changing the beam parameters.

る coupling resonance からの距離は大きくなっており、resonance の影響は小さくなっていると推測される。

Figure 7 に、上記のビームパラメータ変更前後のビームロスの時間分布を示した。ビームパラメータ変更後は変更前に比べてビーム取り出し前のタイミングのビームロスが低減していることがわかる。この結果は、上記のようなメカニズムでビーム幅の増大が起きていることを示唆している。

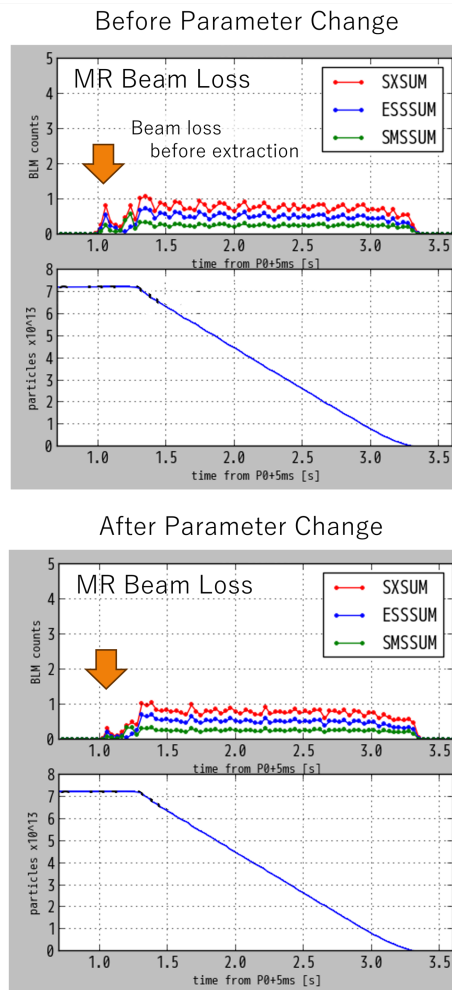


Figure 7: Beam loss distributions before and after changing beam parameters. The top figure is before the change, and the bottom figure is after the change. In each figure, the top row shows the time distribution of beam loss, with the vertical axis being the beam loss monitor count and the horizontal axis being the time from beam injection. Red is the total beam loss monitor count in the slow extraction straight section, while blue and green are the total values limited to the area around the electrostatic septa and the area around the downstream septum magnets, respectively. The bottom row shows the number of particles in the ring measured by DCCT. The beam loss seen before the start of extraction has been reduced after the parameter change.

5. 今後

上記のようなメカニズムによるビーム幅の増大に対する本質的な対策は coupling resonance を補正することである。入射時の 3 GeV でなく、加速後の 30 GeV のビームに対して補正しなければならないため、メインリングに現在設置されている補正用 Skew Q 電磁石では励磁量が不足する可能性が高い。Skew Q 電磁石の増強や、または六極電磁石を用いた補正 [6] など、今後可

能性を検討していく。また、ビーム幅の増大量とビームロスの関係や、B-line での取り出しビームの時間構造の変化などについて、定量的な検討をすすめていく予定である。

謝辞

本論文を執筆するにあたり、E16 実験の皆様、特に四日市悟氏、市川真也氏、森野雄平氏には、実験データの提供および取り出しビームの時間構造の議論においてご協力いただきました。感謝いたします。

参考文献

- [1] R. Muto, “Status and outlook on slow extraction operation at J-PARC main ring”, in *Proc. IPAC'24*, Nashville, TN, May 2024, pp. 1905-1910. doi:10.18429/JACoW-IPAC2024-WEYD1
- [2] <https://ribf.riken.jp/~yokkaich/E16/E16-index.html>
- [3] Y. Komatsu *et al.*, “Beam Commissioning of a New Primary Proton Beam Line at J-PARC Hadron Experimental Facility”, Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Japan, Sep. 2-4, 2020, pp.485-479. https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2020/proceedings/PDF/THPP/THPP17.pdf
- [4] Y. Yoshii *et al.*, “Schottky Signal during Longitudinal Debunching Process at J-PARC MR SX”, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan, Jul. 31-Aug. 3, 2019, pp.506-509. https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2019/proceedings/PDF/WEPI/WEPI028.pdf
- [5] S. Yokkaichi, personal communication, Jul. 2024.
- [6] A. Molodzhentsev *et al.*, “Study of the Beam Dynamics for the ‘Fast Extraction’ Operation Scenario of the J-PARC Main Ring”, in *Proc. IPAC'10*, Kyoto, Japan, May 2010, pp. 1937-1939. <https://epaper.kek.jp/IPAC10/papers/tupd009.pdf>