

J-PARC ハドロン High-p ビームライン分岐部におけるビームロスの評価 EVALUATION OF BEAM LOSS AT A BRANCHING POINT OF THE J-PARC HADRON HIGH-P BEAMLINE

小松 雄哉*, 青木 和也, 上利 恵三, 秋山 裕信, 新垣 良次, 家入 正治, 加藤 洋二, 木村 琢郎, 倉崎 りり,
村杉 茂, 里 嘉典, 澤田 真也, 高橋 仁, 田中 万博, 豊田 晃久, 富澤 正人, 広瀬 恵理奈, 皆川 道文,
森野 雄平, 武藤 亮太郎, 岡村 勝也, 小沢 恭一郎, 山野 井豊, 柳岡 栄一, 渡邊 丈晃

Yusuke Komatsu*, Kazuya Aoki, Keizo Agari, Hironobu Akiyama, Yoshitsugu Arakaki, Masaharu Jeiri,
Yohji Katoh, Takuro Kimura, Ruri Kurasaki, Shigeru Murasugi, Yoshinori Sato, Shinya Sawada,
Hitoshi Takahashi, Kazuhiro Tanaka, Masahito Tomizawa, Akihisa Toyoda, Erina Hirose, Michifumi Minakawa,
Yuhei Morino, Ryotaro Muto, Katsuya Okamura, Kyoichiro Ozawa, Yutaka Yamanoi, Eiichi Yanaoka,

Hiroaki Watanabe

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

The J-PARC High-momentum beam line (High-p line) is under construction at the J-PARC Hadron Experimental Facility. Primary proton beam at 30 GeV is branched to the High-p line by a Lambertson magnet in which a fairly large beam loss is inevitable because an edge of the magnet pole is exposed to the primary beam to separate a portion of the beam. In the beam time in 2019, several types of beam-loss monitors were equipped around the Lambertson magnet. By using the monitors, a beam-position dependence of the beam loss was measured. As a result, the beam loss is estimated to be 25 W in the extraction mode to the High-p line. The amount of the loss is found to be a reasonable level, and thus requirements for radiation safety are satisfied.

1. J-PARC HIGH-P ビームラインと LAMBERTSON 電磁石

J-PARC ハドロン実験施設では、J-PARC 50 GeV 陽子シンクロトロンから取り出された 30 GeV の陽子ビームを標的 (T1 標的) まで導き、 π 中間子, K 中間子の二次ビームを生成して多種多様な素粒子・原子核実験に利用している。現在、ハドロン実験施設では新たに High-p ビームラインと呼ばれるビームラインを建設中である。High-p ビームラインでは、 $\sim 10^{13}$ 陽子/スピル (1 スピル 5.2 秒、ビームの取り出しはスピル内の 2 秒間) の一次陽子の 0.01~0.1% を分岐し、実験エリアまで輸送する。High-p ビームラインの最大ビーム強度は 2.6×10^{10} 陽子/スピルであり、始めに行われる実験では高運動量、高強度の陽子ビームを利用して ϕ 中間子を原子核標的の中に生成し、その質量分布の真空中からの変化を調べる [1]。一次ビームの分岐には Lambertson 電磁石と呼ばれる双極電磁石を用いる [2]。この Lambertson 電磁石は磁場の有る領域と無い領域を有し、各々が磁極で仕切られている。ビームの垂直方向の端のみを磁場の有る領域に通すことで、一部を曲げて High-p ビームラインに分岐させる。

ビームの運転モードと Lambertson 電磁石でのビームの位置の関係を Fig. 1 に示す。ビームの全てを T1 標的まで輸送する場合は T1-Only mode であり、ビームの中心を磁場の境界の磁極から十分離す。一方、High-p ビームラインにビームを取り出すとき (High-p extraction mode) は、右に示すようにビーム中心を磁極から $3 \sim 4\sigma_y$ まで近づける。ビーム幅をガウス分布の分散とすると、 $\sigma_x \sim 1.5$ mm, $\sigma_y \sim 7$ mm である。

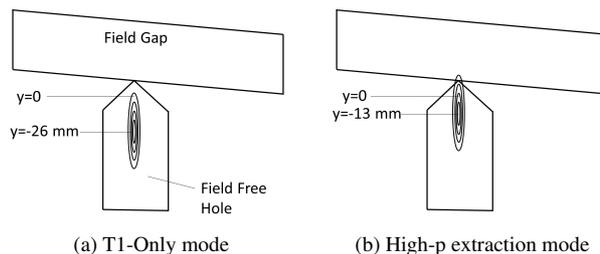


Figure 1: A schematic view of beam positions at the Lambertson magnet. The circles indicate 1σ , 2σ , 3σ and 4σ of the beam size.

ビームが Lambertson 電磁石を通過するときには磁場の境界の磁極でロスが生じることは避けられず、運転時には放射線安全とビーム軌道の健全性の確認という観点から、ロス量が妥当であるか監視する必要がある。また、ビーム中心から 3σ 以上離れた、分布の端のみを分岐するため、ビームの垂直方向の位置と幅の安定性が取り出しビーム量とロス量に大きく影響する。

2019 年 2 月から 4 月の J-PARC のビームタイムで、我々は Lambertson 電磁石の近傍にロスモニター用の検出器を設置し、ロス量を計測した。以下にその詳細について報告する。

2. 分岐部のビームロスモニター

Lambertson 電磁石近傍には、三種類のビームロスモニターを設置した。それぞれ、ビームロスモニター (BLM)、高感度ビームロスモニター (pBLM)、SM Intensity Monitor (SMIM) と呼ばれる。BLM と pBLM

* komatsu@post.kek.jp

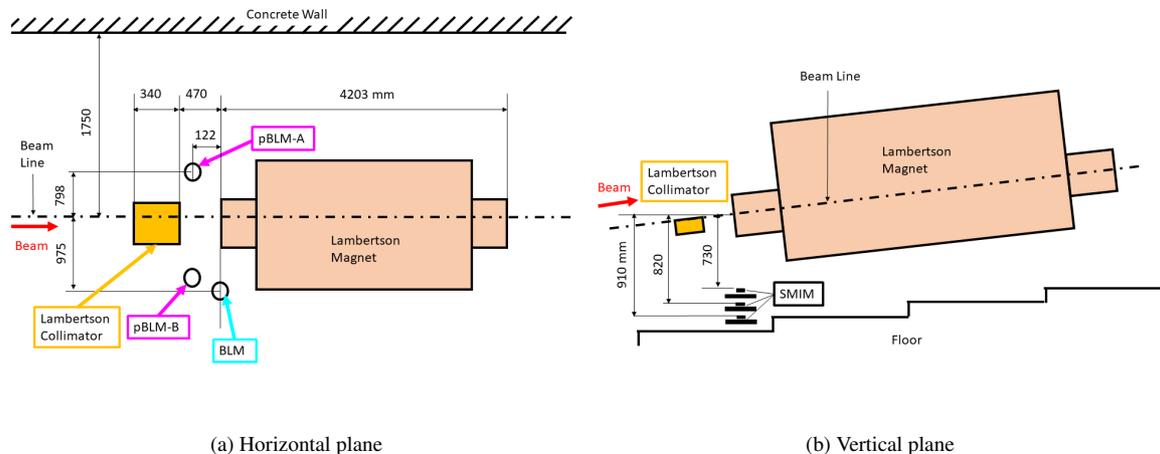


Figure 2: Schematic figures of the positions of beam loss monitors around the Lambertson magnet.

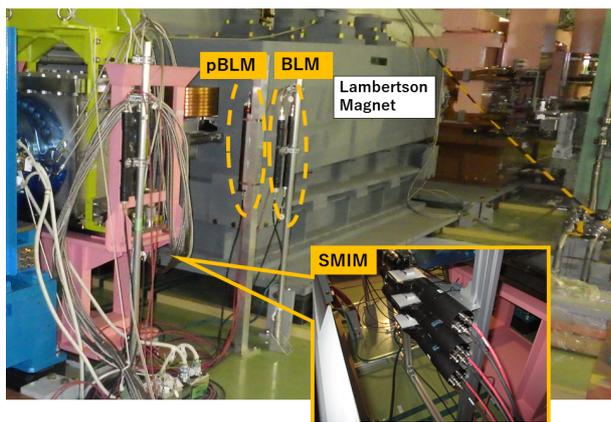


Figure 3: A photograph of the Lambertson magnet and beam loss monitors.

は内部にガスを封入した比例計数管であり、SMIMは3台1セットの光電子増倍管を取り付けたシンチレータを、サイズの異なる2セット用意したものである。

BLMはハドロン実験施設で従来用いられてきたロスモニターであり、Lambertson電磁石での比較的大きなロスを検知する。pBLMはBLMよりも最大電圧で数万倍感度がよく、小さなロスに対してもロス量に比例した信号を得られる。SMIMはLambertson電磁石の磁極部に対して指向性を持つカウンターである。各ビームロスモニターの配置と現場の様子をFig. 2, 3に示す。

2.1 BLM

BLMは高周波用同軸ケーブルを利用して製作され、内部に空気が封入されている[3]。ロスで生じた二次粒子が内部の空気を電離し、アノードによって電離電子を収集する。収集した電荷はスピル毎にVME Current Integratorによって2秒間積分され、ADC Advme 2607によってデジタル変換して読み出した。印加電圧は-100Vであり、プラトー領域の増幅率での運用である。BLMはLambertson電磁石の磁極の上流端からほぼ90°、ビー

ムラインから~1m離れた場所に設置した。

2.2 pBLM

pBLMはキャノン電子管デバイス株式会社製のE6876-400[4]である。有感領域の直径と長さはそれぞれ50.8mm、300mmである。封入ガスの主成分はArであるため、印加電圧の上昇に伴いガス増幅が始まる。Lambertson電磁石近傍への設置に先立ち、⁶⁰Co線源を用いて増幅率を測定した。増幅率の電圧依存性曲線をFig. 4に示す。ここで、ビームラインを挟むように設置したpBLMをそれぞれpBLM-A、pBLM-Bと呼ぶ。プラトー領域の印加電圧をpBLM-AとpBLM-Bについてそれぞれ440V、500Vとし、電圧を変えた際の出力をプラトー時の出力でノーマライズした。印加電圧は最大-2000Vであり、その時増幅率としては $3\sim 3.5 \times 10^4$ 倍ほど得られることが分かった。実際は-500Vで十分な信号強度を確保できたため、-500Vで運用した。

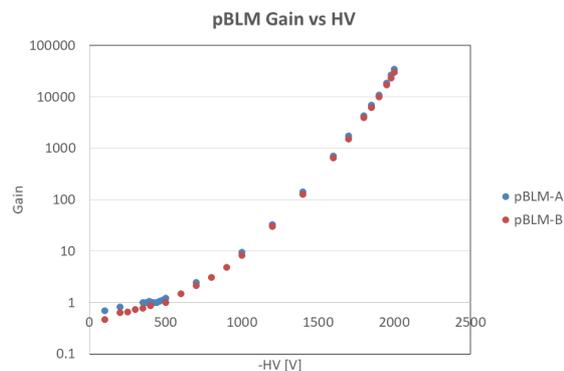


Figure 4: High voltage dependencies of gain of pBLM-A and B.

Table 1: Beam Condition

Beam Power	Repetition Cycle	Spill Length
5 kW (5.4×10^{12} protons/spill)	5.2 s	2.0 s
51 kW (5.5×10^{13} protons/spill)		

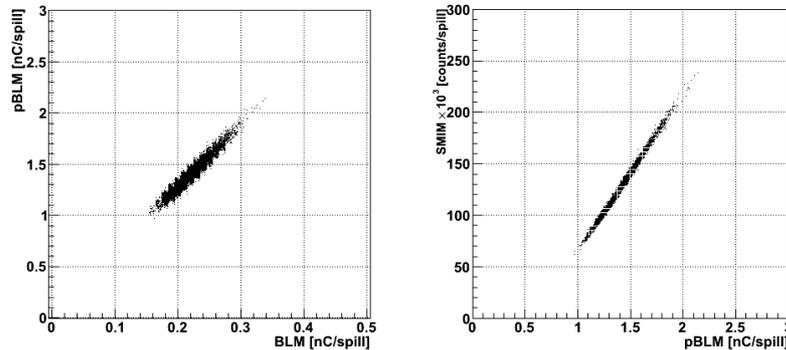


Figure 5: The left figure shows a scatter plot of pBLM and BLM signals. The right is a scatter plot of SMIM($10 \times 10 \text{ cm}^2$) and pBLM signals.

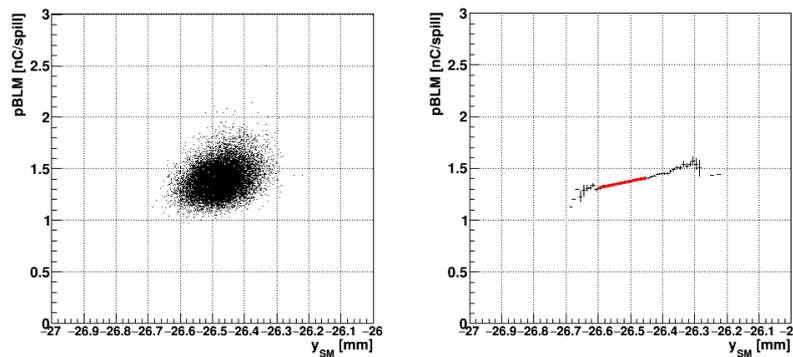


Figure 6: The left figure shows a correlation of pBLM and y_{SM} , and the pBLM signals are averaged and fitted with a linear function in the right plot. The expression of the fit result is $pBLM = 0.64 y_{SM} + 18.6$.

2.3 SMIM

SMIM はプラスチックシンチレータにライトガイドと浜松ホトニクス製の光電子増倍管 H7195 を取り付けたカウンター 6 台で構成した。シンチレータは $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ と $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ の 2 種類のサイズを用意した。Figure. 2 のように、Lambertson 電磁石でのロスを検出できるように、磁極の上流端の下方に設置した。光電子増倍管からの信号はディスクリミネータで NIM 信号に変換し、同形のシンチレータ同士のコインシデンスをスパイル毎に計数した。

3. 測定結果

測定は 2019 年 2 月 8 日から 4 月 25 日まで、J-PARC 陽子シンクロトロン の 運 転 期 間 中 に 実 施 し た 。 ビ ー ム 条 件 を Table 1 に 示 す 。 本 ビ ー ム タイ ム は Lambertson 電 磁 石 を イ ン ス ト ー ル 後 、 初 め て の ビ ー ム タイ ム で あ る 。

スイッチャード内の遮蔽体の設置が完了していなかったため Lambertson 電磁石は励磁せず、またロスを極力低く抑えるために定常状態では Fig. 1 に示す T1-Only mode でビームを輸送した。Lambertson 電磁石の 1.6 m 上流には残留ガスモニタ [5] を設置し、ビームの垂直方向の分布が測定可能である。測定された分布をガウス分布で fit し、平均値と分散を位置 (y_{SM}) と幅 (σ_{ySM}) とすると、 $y_{SM} = -26.8 \text{ mm}$ 、 $\sigma_{ySM} = 6.7 \text{ mm}$ であり、概ね想定通りの光学を実現した。

BLM と pBLM、SMIM と pBLM の信号量の二次元プロットを Fig. 5 に示す。それぞれ相関が確認でき、ロスを正常に観測できていることが分かる。

次に、pBLM と y_{SM} 、 σ_{ySM} の相関を Fig. 6, 7 に示す。pBLM の値を平均化し、一次直線でフィットしてロスと y_{SM} 、 σ_{ySM} の関係を求めた。ロス量の 10% の変動を位置と幅の変動に換算すると、それぞれ $210 \mu\text{m}$ 、 $90 \mu\text{m}$ であった。幅の変動は位置の変動よりも影響が大き

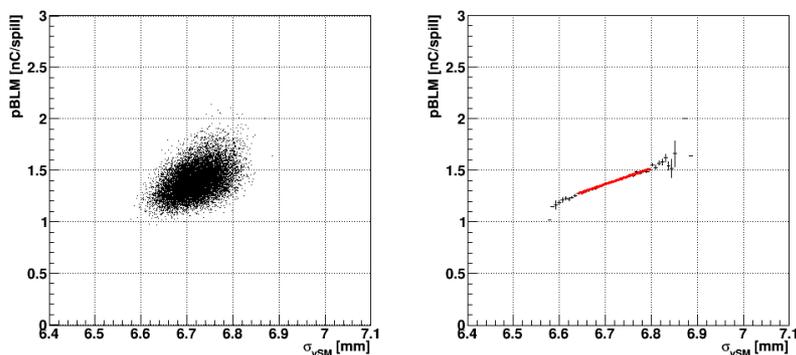


Figure 7: The left figure shows a correlation of pBLM and σ_{ySM} , and the pBLM signals are averaged and fitted with a linear function in the right plot. The expression of the fit result is $pBLM = 1.54\sigma_{ySM} - 8.9$.

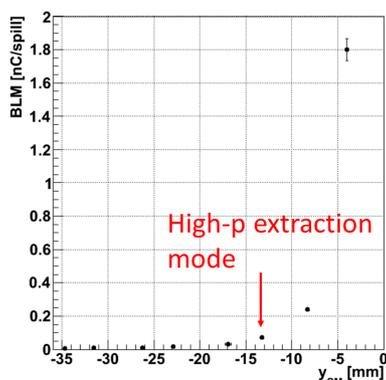


Figure 8: The y_{SM} dependence of BLM. The errors are statistical. The beam power was 5 kW in this measurement.

いようである。 y_{SM} 、 σ_{ySM} のふらつきの原因としてイオン源の安定性、電磁石電源の安定性などが推測されるが、解明できていない。

2020 年の High-p ビームラインへのビーム取り出し時は、Fig. 1 の $y = -13$ mm の軌道 (High-p extraction mode) でビームを輸送する。その際ロスが何 W になるかを既知のロスポイントでの BLM の値と、今回設置した BLM の出力の y_{SM} 依存性から見積もった。 y_{SM} 依存性の測定の際は、万が一の事故を避けるため、ビームパワーを 5 kW に下げた。 y_{SM} を -34.7 mm から -4.0 mm まで動かし、8 点を測定した。結果を Fig. 8 に示す。High-p extraction mode に対応するのは $y_{SM} = -13.3$ mm の測定点であり、0.071 nC/スピルであった。過去の測定で、ビームパワー 51 kW、スピル長 2.0 秒の条件で厚さ 100 μm のアルミニウムの真空膜から 53° (上流から下流のベクトルを 0° とする)、距離 1250 mm の位置に BLM を設置したときは、2.57 nC/スピルであった。これから、アルミニウム膜でのロス量を BLM の値、ビームパワー、立体角、ロスポイントを見込む角度による二次粒子のフラックスの違いによってスケールし、50 kW、

High-p extraction mode でのロス量を見積もった。

$$\begin{aligned} \text{Loss [kW]} &= 51 \times 0.00025 \times \frac{0.071 \times 50/5}{2.57} \\ &\times \left(\frac{975}{1250}\right)^2 \times 11.5 \sim 0.025 \end{aligned}$$

0.00025 は 100 μm 厚のアルミニウムの Nuclear Interaction Length, 11.5 はロスポイントを見込む角度が異なることによる BLM 内の二次粒子のエネルギー損失量の違いをスケールするための係数であり、放射線輸送コード MARS15 [6] を用いて計算した。見込む角度は Lambertson 電磁石近傍の BLM で 90°、アルミニウム膜近傍の BLM では 53° とした。一方、Lambertson 電磁石でのロスを含んだ計算により放射線量の安全評価がなされており、420 W のロスを仮定しても問題無いことがわかっている。したがって、今回見積もった 25 W のロスは十分低く、High-p ビームラインへの取り出し時にも問題無くビームを調整できる見込みが立った。

検算として、ガウス分布型のビームと Lambertson 電磁石の磁極との重なり面積からロス量を計算した。ビーム位置は $x=0$, $y=-13.3$ mm とし、 σ_y として実測の 5.7 mm、 σ_x は光学計算から求めた 1.9 mm を仮定すると、50 kW のビームに対してロス量は 4.2 W となった。BLM から見積もった値の約 1/6 であった。この差の要因として、中心から 3σ 以降でのビームの形が、ガウス分布と一致していない可能性が考えられる。ビーム中心に近い領域ほどガウス分布に近づくことが期待されるが、High-p ビームライン立ち上げの際はビームの位置、幅とロス量、取り出し量の関係のデータを細かく取得する予定である。

4. まとめ

2019 年前半のビームタイムで、High-p ビームライン分岐部に 3 種類のビームロスモニターを設置し、Lambertson 電磁石でのロス量を測定した。各ビームロスモニターは正常に動作し、ロス量と Lambertson 電磁石近傍のビーム位置、幅に相関が観察された。また、信号量のビーム位置依存性を測定し、既知のロスポイントでの測定と比較することで、High-p ビームライン運転時の光学ではビームロス量が ~ 25 W と見積もられ、計算により安全が確認されているレベルを十分下回ることがわかっ

た。今後は、ビームプロファイルとその変動が取り出し強度とロス量に与える影響をより詳細にスタディし、安定したビーム供給を目指す。

参考文献

- [1] Y. Komatsu *et al.*, "Measurement of the Vector Meson Spectral Modification in the Nuclear Medium at J-PARC", Proceedings of the 14th International Conference of Meson-Nucleon Physics and the Structure of the Nucleon (MENU2016), pp. 020005-1-020005-5, 2017.
- [2] R. Muto *et al.*, "Development of Lambertson Magnet and Septum Magnets for Splitting 30-GeV Proton Beam in Hadron Experimental Facility at J-PARC", IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 26, no. 4, 0603904, Jun. 2016.
- [3] H. Nakagawa *et al.*, Nucl. Instr. and Meth., 174 (1980), pp. 401-409.
- [4] キヤノン電子管デバイス株式会社; <https://etd.canon/ja/product/category/proportional/beamloss.html>
- [5] Y. Sato *et al.*, "Profile Measurements of Proton Beam with Residual Gas Ionization Profile Monitors at J-PARC Hadron Facility", Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society in Japan, pp. 485-487, 2011.
- [6] N.V. Mokhov and C.C. James, "The Mars Code System User's Guide, Version 15 (2016)", Fermilab-FN-1058-APC (2017); N.V. Mokhov *et al.*, "MARS15 Code Developments Driven by the Intensity Frontier Needs", Prog. Nucl. Sci. Technol., 4, pp. 496-501 (2014); <https://mars.fnal.gov>