

J-PARC ハドロン実験施設における一次ビームライン分岐部電磁石のメンテナンスシナリオ(2)

A REMOTE HANDLING MAGNET SYSTEM IN A BRANCH REGION OF A NEW PRIMARY BEAM LINE AT THE J-PARC HADRON FACILITY (2)

広瀬恵理奈^{#, A)}, 青木和也^{A)}, 上利恵三^{A)}, 秋山裕信^{A)}, 家入正治^{A)}, 加藤洋二^{A)}, 小松雄哉^{A)}, 里嘉典^{A)}, 澤田真也^{A)}, 高橋仁^{A)}, 田中万博^{A)}, 豊田晃久^{A)}, 皆川道文^{A)}, 武藤亮太郎^{A)}, 森野雄平^{A)}, 山野井豊^{A)}, 渡辺丈晃^{A)}
Erina Hirose^{#, A)}, Kazuya Aoki^{A)}, Keizo Agari^{A)}, Hironobu Akiyama^{A)}, Masaharu Ieiri^{A)}, Yohji Katoh^{A)}, Yusuke Komatsu^{A)}, Yoshinori Sato^{A)}, Shinya Sawada^{A)}, Hitoshi Takahashi^{A)}, Kazuhiro Tanaka^{A)}, Akihisa Toyoda^{A)}, Michifumi Minakawa^{A)}, Ryotaro Muto^{A)}, Yuhei Morino^{A)}, Yutaka Yamanoi^{A)}, Hiroaki Watanabe^{A)}
^{A)} KEK

Abstract

A new primary proton beam line, which is called high-p/COMET beam line (B-line) [1], is now under construction at the J-PARC Hadron Facility. B-line is branched off from the existing primary proton beam line (A-line) in the middle of the beam-switching yard. We use a Lambertson [2] magnet and two septum magnets as the splitting devices for the B-line. At the Lambertson magnet, there is field-off hole in the yoke of the magnet. Almost amount of the beam goes through the hole and is transported to the A-line. And very tiny fraction of the beam is kicked off at 5 degree and is transported to the B-line at the same time. At the edge of the field-off hole, there is a significant beam-loss. Therefore, those magnets work in high radioactive environment. Those magnets are placed on the plug-in base assembled with water and electric-power quick disconnect devices. The installation of those magnets is completed in 2018, and the first beam introduced to the A-line. Next year the first beam will be introduced to the high-p experimental area.

1. はじめに

J-PARC ハドロン実験施設では、主リングで 30 GeV に加速された陽子が遅い取り出しで取り出され、長さ 200 m のスイッチヤードを経由し、ハドロン実験ホール (HD-Hall) にある2次粒子生成標的 (T1 ターゲット) に導かれる。HD-Hall では、現在、生成標的からの2次粒子を用いた様々な実験が行われている。

また、ハドロン実験施設では、high-p/COMETビームラインと呼ばれる新たな一次ビームライン建設が進んでいる[1]。Figure 1 に、ハドロン実験施設の平面図を示す。既存の一次陽子ビームラインを A-line、新しい一次ビームライン (high-p/COMET ビームライン) を B-line と呼ぶこととする。B-line は、200 m のスイッチヤードの中間地点 (Fig. 1(a)地点) で分岐される。さらに、B-line は、ハドロン実験ホールに入ってからすぐの Fig. 1(c)地点で、COMET ビームラインに分岐される。これを C-line と呼ぶこととする。B-line は、high-p 実験 [3] に、C-line は COMET 実験 [4] に利用される。

A-line と B-line の分岐部 (AB 分岐部) には、分岐のためのセプタムシステムが置かれ、それは、1 台のランバートソン電磁石と、2 台のセプタム電磁石から成る [5]。このセプタムシステムは、B-line への曲げ角度が 5° であり、以下の3つの運転モードが要求される。

- 1) A-line モード: A-line に 30 GeV 陽子ビームをすべて既存 A-line に輸送する。
- 2) B-line モード (high-p モード): 30 GeV 陽子ビームの

大部分を既存 A-line に輸送し、30 GeV 陽子ビームの一部を B-line に輸送する。high-p 実験で要求されるのは、 10^{10} proton/s の陽子ビームで、既存 A-line のインテンシティの約 10^4 に相当する。よって、B-line モードでは、A-line ビームのほんの一部のビームだけが B-line に曲げられる。

- 3) C-line モード (COMET モード): 主リングで 8 GeV に加速された陽子ビームを全て B-line に曲げ、C-line を経て、COMET 実験エリアに輸送する。

ランバートソン電磁石は、加速器の入射、出射によく使われる電磁石である [2]。ランバートソン電磁石は、構造上、磁場の有無の境界部分に磁極があるので、そこでビームロスが生じる。このビームロスは、50 kW の陽子ビームで約 400 W と見積もられている [5]。

さらに、数年後には、"π 20" という2次ビームラインが計画されており [6]、そのときには、このランバートソン・セプタム磁石は、2 台の偏向電磁石に置き換えられ、15 kW ビームロスの生成標的が置かれる予定である。

既存ビームラインである A-line は、加速器から取り出された後に、2.9 m / 80 m (2.077°) の角度で振り上げられ、ハドロン実験ホールのターゲットに向けて振り下げ磁石により、水平に戻され、ビーム高さ 1 m の T1 ターゲットに輸送されている。A-line, B-line の分岐部は、この 2.077° の角度で振り上げられる傾斜部に位置している。このことが、設置、及びメンテナンスを難しくしている。

本件では、この A-line, B-line 分岐部のセプタム電磁石システムの設置、及び3台の電磁石のメンテナンスシナリオを確立したので、その報告をする。

[#] erina@post.kek.jp

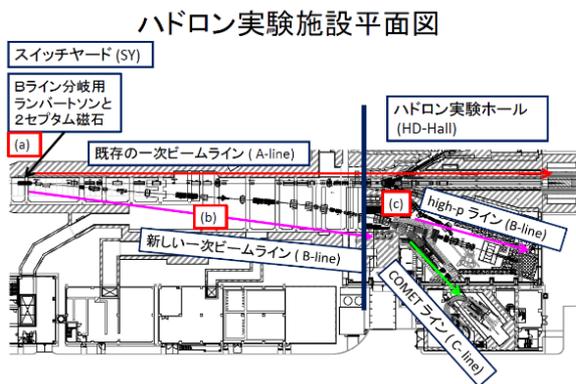


Figure 1: The floor plan of the J-PARC Hadron Facility.

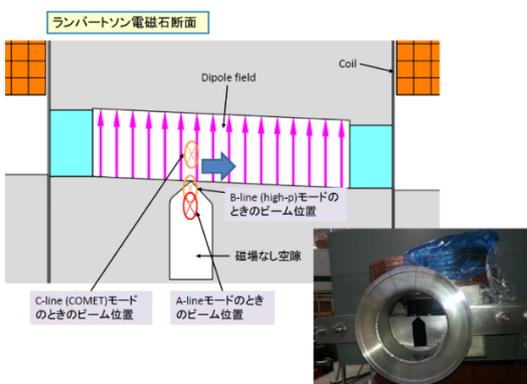


Figure 2: The cross section of the Lambertson magnet.

2. ランバートソン、セプタム電磁石の設置

2.1 ランバートソン電磁石

1章で述べた通り、A-line, B-line 分岐用のランバートソン電磁石[5]は、3つのモードでの運転が要求されており、Fig. 2 のような断面構造となっている。ランバートソン電磁石の断面を、Fig. 2 に示すが、電磁石 1 台で、磁場のある空隙と磁場のない空隙を有する。

- 1) A-line モード : 30 GeV 陽子ビームを全て磁場のない空隙に通す。全てのビームは A ラインを直進。
- 2) B-line モード : 30 GeV 陽子ビームを、Fig. 2 の右拡大図のように、ほとんどのビームを磁場のない空隙に通し、ビームの一部を磁場のある空隙にはみ出す形で通す。磁場のない空隙を通るほとんどのビームは A-line へ、磁場のある空隙にはみ出したビームの一部は B-line に曲げられる。
- 3) C-line モード : 8 GeV 陽子ビームを、全て磁場のある空隙を通して、全てのビームを B-line に曲げる。

磁場のある空隙と、磁場のない空隙の境目は、Fig. 2 のように、どうしても磁極が必要になるので、B-line モードのときは、Fig. 2 の右拡大図のような構造で、必ずビームの一部が磁極に当たるので、50 kW の陽子ビームで約 400 W のビームロスが起り、ランバートソン電磁石自体

が放射化する。

2.2 ランバートソン電磁石とセプタム電磁石の設置

ランバートソン電磁石(SM1)とセプタム電磁石(SM2,3)のスペックを Table 1 に、平面図を Fig. 3、側面図を Fig. 4 に示す。Figure 4 側面図でわかる通り、SM1,2,3 電磁石の置かれる場所は、 2.077° の傾斜部に位置する。そして、SM2,3 電磁石については、さらに、SM2 電磁石は、水平方向に 1.1° 、SM3 電磁石は、 3.05° 回転した位置に置かれる。また、SM2 電磁石と SM3 電磁石との間が非常に近接していることが分かる。

2.1 節で述べた通り、B-line モードは、ビームロスが前提の運転条件であり、これらの電磁石は放射化することが予想される。また、将来 $\pi 20$ ビームラインになるときに、SM1,2,3 電磁石は、撤去され、代わりに、 $\pi 20$ 用ターゲットと、BS01,BS02 の 2 台の電磁石に置き換えられる予定である。

以上のことを考慮し、我々は、設置に当たって、ピボットと呼ばれるピンを備えた敷板と呼ばれる鉄板 3 枚 (敷板 1, 2, 3) を基準として設置することとした。

敷板は、全て A-line を基準として設置することとし、敷板には、ケガキ線、及び電磁石設置用のピボットと呼ばれるピンを、各電磁石 1 台につきビーム方向に 2 個備えた。これで、現行の SM1,2,3 だけでなく、将来 BS01,02 に置き換えるときも、このピボットを基準として、電磁石を製作し、ピン勘合で、0.1 mm 以内の精度での設置を完了することができる。各敷板には、Fig. 5 のように、以下のケガキ線及びピボットを備えた。

- 敷板1: SM1 電磁石と、 $\pi 20$ 用の BS0A 電磁石用のピボット及びケガキ線
- 敷板2: $\pi 20$ 用ターゲットと、BS0B 電磁石用のピボット及びケガキと、SM2,3 電磁石用ケガキ線
- 敷板3: SM2,3 電磁石のピボット及びケガキ線

Figure 4 側面図のように、この分岐部は、斜面なので、床が階段状になっている。これらの電磁石は長尺なため、敷板 3 枚は、それぞれ、階段を数段またがることになるが、スパーサーで高さを合わせ、敷板を水平に設置し、水平面にピボットを設けた。そして、水平面の敷板を基準としたときに、SM1 電磁石が、 2.077° の傾斜となるように、SM1 電磁石架台を製作した。セプタム電磁石は、SM2 と SM3 電磁石の間が近接していて、現場で、真空ダクトを着脱することが困難である。そこで、SM2 と SM3 電磁石を共通架台の上に乗せ、両者の真空は一体とし、SM2 電磁石の上流、SM3 電磁石の下流の真空フランジを現場で切り離し、2台同時に着脱できるようにした。SM2 電磁石、SM3 電磁石は、水平方向に、それぞれ、 1.1° 、 3.05° 回転し、その上で 2.077° の傾斜をつけた架台を製作した。SM2 と SM3 は、敷板 2 と敷板 3 にまたがっているが、精度が出しやすいように、ピボットは、敷板 3 にのみ備え、敷板 2 は高さだけを合わせることにした。

設置に当たっては、各電磁石のビーム軸の入口出口、ビーム方向の磁極中心位置、ビーム高さの座標をそれぞれ算出し、設置を行った。結果、SM1 電磁石は、0.3 mm、SM2,3 電磁石は、各計算値に対して、 ± 0.5 mm の精度で設置することができた。ここで、敷板と、電磁石位置の精度が製作上、あるいは設置上の誤差で、異なる場合は、 $\pi 20$ の BS01,02 偏向電磁石より、精度が求め

られる SM1,2,3 電磁石に合わせて、敷板の調整を行った。

Table 1: Specifications of the Septum Magnets

	SM1	SM2	SM3
磁極[m]	3.6	1.4	2.2
設置角度[°]	0	1.1	3.05
Gap[mm]	80	105	109
最大電流値[A]	1550	4600	4400
重量[トン]	33	4.2	16.9

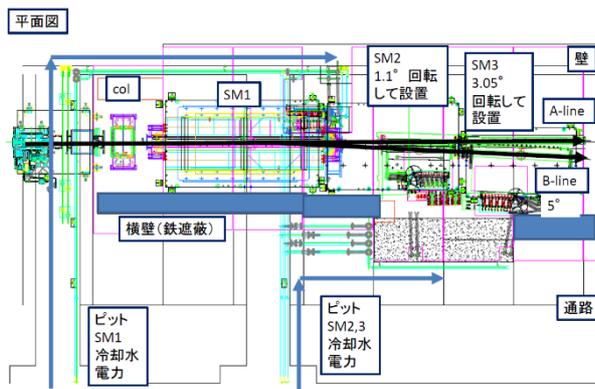


Figure 3: The floor plan around the Lambertson (SM1) and 2 septum (SM2, SM3) magnets.

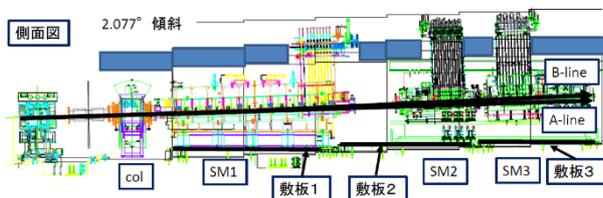


Figure 4: The cross section around SM1, SM2, SM3 magnets.

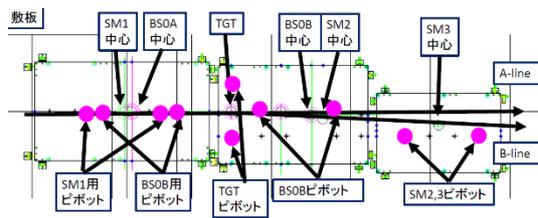


Figure 5: The 3 base plates of the SM1, SM2 and SM3 magnets.

2.3 配管配線

SM1 電磁石の放射線環境は、5 年運転後 2 時間冷却で、オンコンタクト～50 mSv と見積もられている。よって、これらの電磁石は、軽故障時には遮蔽体越しにメンテナ

ンスができるように、また、重故障時には、遠隔で電磁石を交換できるようなシステムが求められる。また、これらの電磁石は、Fig. 6 のように、周りを厚さ 50 cm の局所鉄遮蔽体で囲まれる。そこで、我々は、端末を 1 m 上方に延長した、ミニチムニーシステムを採用した[7]。

SM1 ランバートソン電磁石のミニチムニーシステムを、Fig. 7 に示す。このように、約 1 m 端末を上方に延ばし、軽故障が懸念される銅ロウ付け、SUS-銅変換継手、絶縁チューブを天井遮蔽体の上部に持ってきて、修理できるようにした。冷却水や電力については、壁沿いとし、重故障時に、Fig. 6 のようにメンテナンスする人が天井遮蔽体上で冷却水コネクタや電力コネクタを着脱できるようにした。さらに、Fig. 7 に示すように、壁沿いの冷却水、電力ラインには、将来用の $\pi 20$ のときに延長できる冷却水ポートや電力接続部をつけた。

2台のセプタム電磁石は、30 GeV 陽子ビームを 2.8° 曲げるために、それぞれ、最大 4600 A と 4400 A の大電流を流すことになる。大電流をミニチムニーとして遮蔽体上部にあげるのは限られたスペース内では難しい。また、セプタム電磁石は、Bラインに曲げた後なので、Fig. 6 に示すように、端末が壁から遠く、壁側に配管・配線を設置することが難しい。そこで、Fig. 8 のように、長さ 3200 mm × 幅 1000 mm × 高さ 2000 mm のコンクリートブロックを製造し、高さ 500 mm × 幅 1000 mm の貫通孔を設け、ブスパー配線を行い、配管は、コンクリートブロックに備えた、配管付コンクリートブロックを製造した。電力の着脱に関しては、速着脱ナイフスイッチを備え、天井遮蔽体を開け、上部から着脱できるようにする。遮蔽体の影になるところで、セプタムの温度計、圧力計、ボールバルブを備え、メンテナンスできるようにし、天井遮蔽体上部に、速着脱冷却水コネクタを備え、天井遮蔽体越しに着脱できるようにした。

天井遮蔽体については、Fig. 6 のように、高さ 2 m にある躯体のくぼみと、通路側に設けた高さ 2 m の遮蔽体の上部に載るような1枚板の鉄板を積み重ねる。よって、チムニー端末や、速着脱コネクタが干渉するので、これらのスペース分を切り欠いた天井遮蔽体を製造した。天井遮蔽体を着脱する際、端末にぶつからないように、Fig. 7 のような、端末保護・遮蔽体のガイド板を設けた。

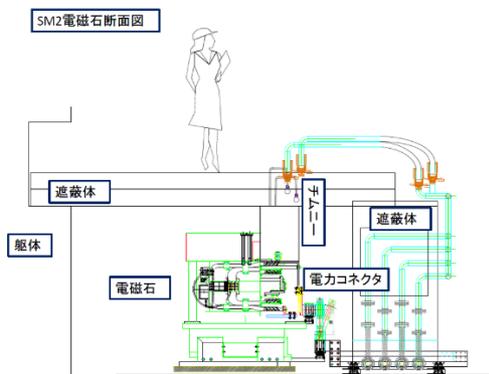


Figure 6: The cross section of the SM2 magnet.

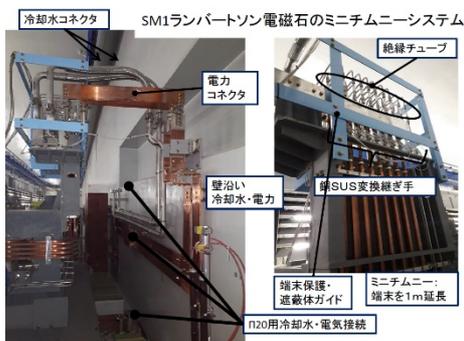


Figure 7: The mini chimney system of the SM1 magnet.

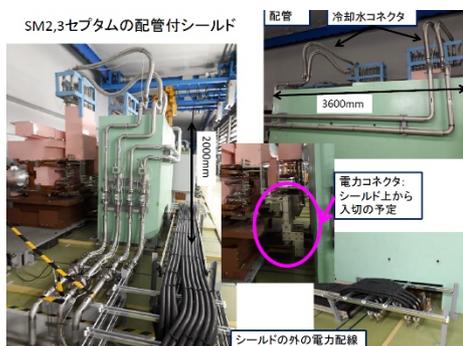


Figure 8: The shield with utility lines of 2 septum magnets.

2.4 SM1 電磁石の遠隔着脱テスト

SM1 電磁石を、重故障時に遠隔着脱のための着脱テストを行った。SM1 電磁石の場合は、上流側は、コリメータがあり、先に外すことが可能であるが、下流側は、直接 SM2 電磁石との真空接続である。その真空接続は、下流の SM1 電磁石に備えられた、縮み幅が約 30 mm の大伸縮片持ちピローシール[8]となっている。よって、下流側は真空ダクトとの距離が約 30 mm の隙間で電磁石を着脱する必要がある。SM1 電磁石を、そのまま吊って、上部に巻き上げると、ここは、2.077°の傾斜がついているので、真空フランジφ500 mm の上端で、真空ダクトとの距離は、約 30 mm から約 18 mm に減ってしまう。そこで、以下のような着脱手順とした。

設置(取り外しは逆順)

- 1) ツイストロック遠隔吊具で、SM1 電磁石の玉掛を行う (Fig. 9 参照)。
- 2) クレーンの目盛を見ながら、ビーム方向について設置位置の±5 cm の範囲にし、真空ダクトフランジをかわす高さまで上方に巻き上げる。(Fig. 9)
- 3) クレーンの目盛りを見ながら、ビームラインを超えて、壁ギリギリ(目盛りの目印)まで近づける。(Fig. 9)
- 4) 架台に設置してある高さブロック(架台から約 70 mm)に当たるまで巻き下げる(Fig. 10①)
- 5) 架台の当て板内に入っているので、当て板に沿って、当て板に当たるまで壁側からビームラインに向かう。(Fig. 10②)

- 6) 巻き下げをしてピボット勘合する。(Fig. 10②)→設置完了

電磁石と架台を合わせて、長尺の 4 m、重量が約 33 トンの SM1 電磁石で、下流の真空フランジとの隙間が 30 mm の状況で、上記の手順による着脱テストを成功させた。巻き上げ時のクレーンの揺れにより、壁に設置してある配管・配線コネクタに非常に近接したため、配管・配線を保護する板が必要になったことが分かった。

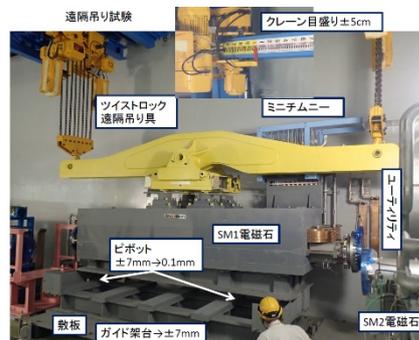


Figure 9: Lift up the SM1 magnet by two cranes.

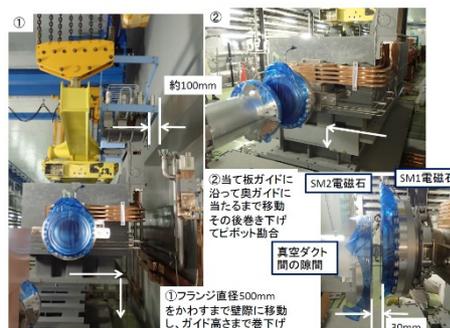


Figure 10: The method of the remote handling of the SM1 magnet.

3. SUMMARY

J-PARC ハドロン実験施設で建設が進んでいる新しい一次ビームラインである、high-p/COMET ビームラインの分岐部電磁石の設置を行った。分岐部は将来的に、厳しい放射線環境になるので、遮蔽体越しにメンテナンスでき、さらに、重故障時には遠隔で電磁石を交換できるシステムを構築した。本件の分岐部は、斜面に置かれているため、特に SM2 電磁石は、水平面に置かれる敷板に対し2軸の回転となり、難しい設置であったが、±0.5 mm の精度で設置できた (Fig. 11)。さらに、将来 $\pi 20$ にするときにも、放射線被ばくを低減するピボット勘合で設置完了となるようなプラグイン架台、ユーティリティラインの整備も行った。SM1 電磁石に対して、遠隔着脱テストを行い、重大な問題はなかった。現在、Fig. 12 のように、着々と周りの遮蔽体を構築している。

2019 年度春に、既存 A-line にビームを受け入れ、A-line のビーム輸送に成功している[9]。2020 年度には、B-

line にビームを輸送する予定である。



Figure 11: Over view of beam level from the upper collimator of the SM1 magnet.



Figure 12: Overview around SM1-3 magnets.

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 基盤研究C(一般)No. 254003101 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] H. Takahashi, Nuclear Physics A 914 (2013) 553-558.
- [2] M. Harrison and F. N. Rad, "Symmetric and non-symmetric Lambertson magnets," Nucl. Instrum. Methods, vol. A227, no. 3, pp. 401-410, Dec. 1984.
- [3] Y. Morino *et al.*, "Measurement of vector meson decays in nuclei at J-PARC," in Proc. JPS Conf., 2015, vol. 8, pp. 1-6.
- [4] The COMET Collaboration, "COMET phase-1 technical design report"; http://comet.kek.jp/Documents_files/PAC-TDR-2014/PAC-Review-20141110.pdf
- [5] 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.
- [6] H. Noumi *et al.*, J-PARC P50 Proposal, "Charmed Baryon Spectroscopy via the (π , D^{*-}) reaction", Jan, 2013;

http://www.j-parc.jp/researcher/Hadron/en/Proposal_e.html#1301

- [7] E. Hirose *et al.*, "A remote handling magnet system in a branch region of a new primary beam line at the J-PARC hadron facility", Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Chiba, Japan, Aug. 8-10, 2016, pp. 1214-1218.
- [8] R. Kurasaki *et al.*, "Development of a long-stroke pillow-seal for the J-PARC Hadron High-P beamline", submitted the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan, July 31-Aug. 3, 2019, WEPH013.
- [9] Y. Komatsu *et al.*, "Evaluation of beam loss at a branching point of the J-PARC Hadron High-P beamline", submitted the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan, July 31-Aug. 3, 2019, WEOI06.