

# 3GeV 陽子ビーム輸送施設のためのパルス偏向電磁石とセプタム電磁石の検討 PULSE BENDING MAGNET AND SEPTUM MAGNET FOR 3-GeV PROTON BEAM TRANSPORT LINE

山口雄司<sup>#,A)</sup>, 近藤恭弘<sup>A)</sup>, 明午伸一郎<sup>A)</sup>, 高柳智弘<sup>A)</sup>, 藤森寛<sup>B)</sup>, 篠崎信一<sup>A)</sup>

Yuji Yamaguchi<sup>#,A)</sup>, Yasuhiro Kondo<sup>A)</sup>, Shin-ichiro Meigo<sup>A)</sup>, Tomohiro Takayanagi<sup>A)</sup>, Hiroshi Fujimori<sup>B)</sup>,  
Shinichi Shinozaki<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> J-PARC Center, Japan Atomic Energy Agency

<sup>B)</sup> Institute of Materials Structure Science, High Energy Accelerator Research Organization

## Abstract

Preliminary designs of new bending magnets have been considered for the second target station (TS2) of Materials and Life Science Experimental Facility (MLF), J-PARC. To give a design approach for the bending magnets, several examples of bending magnets, such as a pulse bending magnet and a septum magnet were reviewed. The reviewed magnet specifications compared with requirements for the new bending magnets indicate that the new pulse bending magnet requires a new design idea, while the new septum magnet can be designed based on the previous design of an extraction septum magnet for the 3-GeV synchrotron in J-PARC. The new design idea for the pulse bending magnet and the septum magnet design idea based on the previous one are presented.

## 1. はじめに

大強度陽子加速器施設(J-PARC)[1]の 3 GeV 陽子ビーム輸送施設(3NBT)[2]は、3 GeV シンクロトロン(RCS)から 25 Hz の早い繰り返しで取り出される 1 MW の大強度パルス陽子ビームを物質・生命科学実験施設(MLF)に輸送している。輸送される陽子ビームは Fig. 1 に示すように、RCS から出射した後 3NBT の垂直偏向部で上方に曲げられて主リング(MR)トンネルの上を通過し、水平偏向部で 30°曲げられて MLF に供給される。MLF にはミュオン生成標的とその下流に中性子生成標的が設置されており、陽子ビームをこれらの標的に照射して、それぞれミュオンビームと中性子ビームを取り出し、MLF での実験に利用されている。

MLF の利用運転のために供給される陽子ビームの出力は、2008 年の利用運転開始以降、着実に増強されてきた[3, 4]。2024 年の利用運転では、設計出力 1 MW での長期利用運転を達成し、パルスあたりの中性子ビーム

強度は、J-PARC に次ぐオークリッジ国立研究所の 2 倍以上で世界一となっている[5]。

J-PARC では今後の施設拡充、高度化計画の一つとして MLF 第 2 ターゲットステーション(TS2)の検討が進められている[6]。TS2 の計画は、既存の MLF(TS1)では達成できない実験的研究の実現と学術、産業における利用拡大を目指すものとされており、ミュオン、中性子ビームの強度、輝度を TS1 より増大させることが考えられている。そのため、TS2 は TS1 と異なり、ミュオン源と中性子源を一体化した構想となっている。

TS2 の運転には TS1 と同様、RCS からの 3 GeV 陽子ビームが用いられ、陽子ビームは 3NBT の水平偏向部で振り分けられる計画となっている。この場合、ビーム振り分けによって TS1 に供給する陽子ビームの出力が減少してしまうため、RCS からのビーム出力を増強させる計画もあり、少なくとも 1.5 MW までの増強が見込まれている[4]。水平偏向部で TS2 に振り分けるビームの輸送ライン

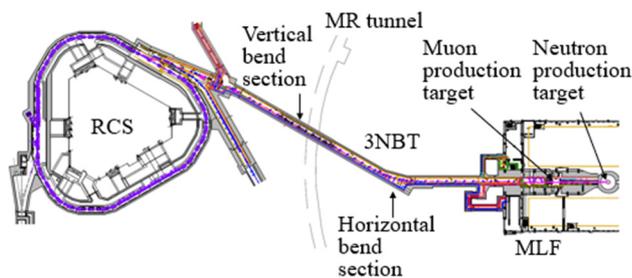


Figure 1: Plan view of 3 GeV rapid cycling synchrotron (RCS) to Neutron facility Beam Transport (3NBT) line. The 3NBT line delivers the pulsed proton beam to Materials and Life Science Experimental Facility (MLF) passing over the main ring (MR) tunnel.

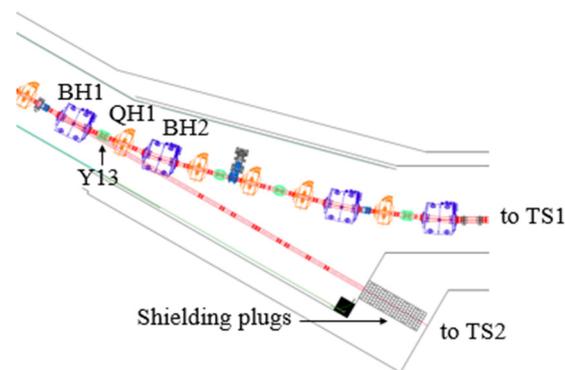


Figure 2: Horizontal bend section of 3NBT line. Bending magnets, quadrupole magnets, and steering magnets are shown in blue, orange, and green, respectively. The beam duct for the TS2 is drawn from a bending magnet BH1 to shielding plugs.

<sup>#</sup> yamaguchi.yuji@jaea.go.jp

は Fig. 2 に示すように、ブロック構造の遮蔽体に向けて設置され、ブロックを取り除く等することで TS2 まで拡張される。RCS からの 2 バンチ (間隔~600 ns) のパルスビームを TS2 に振り分ける方法には、TS1, TS2 へのパルスビームの時間構造によって次の 2 通りの方法が検討されている[6]。

- i) 既存の直流偏向電磁石 BH1 をパルス偏向電磁石に置き換えて、2 バンチのパルスビームを TS1 と TS2 に振り分ける。
  - ii) BH1 の上流にキッカー電磁石を設置し、さらに BH1 をセプタム電磁石に置き換えて、TS1 と TS2 に 1 バンチずつ振り分けることを可能にする。
- ii)の方法は、i)の方法のように 2 バンチのパルスビームを振り分けることもできるが、既存のビーム輸送ラインを大幅に変更する必要がある可能性が高く、詳細な検討が必要となる。

以上の検討に基づき、より簡易な i)の方法による振り分けを想定して、これまで TS2 までのビーム輸送ラインの設計案を検討してきた[7]。i)の方法を用いる場合、Fig. 2 の BH1 をパルス偏向電磁石と交換し、これを励磁することで TS1 に、励磁を停止することで TS2 に振り分けることができる。現在、MLF へのビーム輸送に使われている電磁石はすべて直流電磁石であるため、新たにパルス電磁石の検討が必要となる。また、Fig. 2 に示した TS2 へのビーム輸送ラインが既存の偏向電磁石 BH2 と干渉するため、BH2 に代わる偏向電磁石も検討する必要がある。なお、TS2 への輸送ラインは四極電磁石 QH1, 補正電磁石 Y13 と干渉する。Y13 での補正量は十分に小さく、これを取り除いた場合でも 3NBT のビーム輸送は成立する。QH1 との干渉についてはこれを取り除いた 3NBT の新たなビーム光学を用いることで、TS1, TS2 へのビーム輸送が両立する見込みである[6, 7]。

本検討では、ビーム振り分けのため水平偏向部において新たに必要となる電磁石の設計方針を明確にすることを目的として、要求仕様をまとめるとともに参考になる電磁石の例を調べる。本稿に要求仕様と参考例を示しながら、現状の設計案を提示する。

## 2. パルス偏向電磁石

### 2.1 要求仕様

MLF への陽子ビーム輸送に用いられている既存の BH1 は直流電流によって励磁され、約 1 T の磁場により 3 GeV 陽子ビームを 7.5°偏向させる[8]。大強度ビーム輸送のため、BH1 の口径は大きく設計され、磁極間距離と磁極幅はそれぞれ 160, 580 mm となっている。磁極長は必要な BL 積が得られる長さ 1500 mm である。これら BH1 の仕様を満たし、パルス動作に対応した偏向電磁石が必要となる。パルス動作の繰り返しについては、TS1 と TS2 に振り分けられるそれぞれのパルスビームの繰り返しに基づいて提示できるが、現状ではそれぞれの繰り返しは決められていない。また、運転開始後も将来的に繰り返しを変更する必要があることも想定される。そこで、パルス動作の繰り返しを RCS の繰り返し 25 Hz とし、どのような振り分けの配分にも対応できる仕様とする。パルス偏向電磁石に対する主な要求仕様を Table 1 にまとめる。

Table 1: Main Requirements for Pulse Bending Magnet

Parameter	Value
Bending angle [degree]	7.5
Magnetic field [T]	1.11
Pole length [mm]	1500
Pole gap [mm]	160
Pole width [mm]	580
Repetition rate of pulse operation [Hz]	25

パルス偏向電磁石は、J-PARC では MR へのビーム振り分けや RCS へのビーム入射等のために使われている。これらの例を Table 1 の要求仕様と照らしながら 2.2, 2.3 節に示す。

### 2.2 MR 用パルス偏向電磁石

3NBT の上流部には、RCS から取り出された 3 GeV 陽子ビームを MR に振り分けるためのパルス偏向電磁石が設置されている。このパルス偏向電磁石は MR にビームを振り分けるときに励磁され、MLF にビームを送るときに励磁が停止される。励磁電流の波形は台形であり、RCS から 25 Hz で取り出されるパルスビームのうち 4 パルスが MR の周期ごとに振り分けられている[9]。

MR へのビーム振り分け用パルス偏向電磁石の主な特性値を Table 2 に示す。磁場の大きさは要求仕様より最大 9%程度大きく、磁極長は同じであるが、磁極間距離が約 10%小さい。偏向角を与える BL 積は約 1.93 Tm と測定されており[10]、要求仕様から簡易的に計算される 1.67 Tm より 10%以上大きい。必要な口径を得るために磁極間距離を要求仕様の 160 mm まで拡張すると、BL 積は約 1.71 Tm と見積もられ、磁極間距離を拡張した場合でも、必要な偏向角は得られると推定できる。しかし、MR の周期は短い場合でも約 1 s であるため、パルス動作の繰り返しは、はやい場合で 1 Hz であり、25 Hz の繰り返しには対応していない。

Table 2: Main Parameters of Pulse Bending Magnet for MR [10]

Parameter	Value
Maximum magnetic field [T]	1.21
Pole length [mm]	1500
Pole gap [mm]	142
Repetition rate of pulse operation [Hz]	0.3 - 1

### 2.3 RCS 可変偏向電磁石

RCS 可変偏向電磁石は、線形加速器から RCS へのビーム輸送ラインと RCS 周回ビームラインとの合流部付近に設置されている。RCS の入射電磁石の一つである。RCS では空間電荷効果に起因したエミッタンスの増大やビームロスを抑制するために、ペイント入射が利用されており、MLF と MR それぞれが要求するビームの性質によって運転条件が異なる。各運転条件に応じてビームの入射軌道を変化させる等の役割をもつのが、可変偏向電

Table 3: Main Parameters of RCS Pulse Bending Magnet [12]

Parameter	Value
Magnetic field [T]	0.06
Pole length [mm]	200
Pole gap [mm]	160
Repetition rate of pulse operation [Hz]	25

磁石である[11, 12]。

RCS 可変偏向電磁石の主な特性値を Table 3 に示す。パルス動作の繰り返しは、RCS の繰り返しと同じ 25 Hz である。磁場の大きさは要求仕様の 5%程度にとどまり、磁極間距離は同一であるものの、磁極長も要求仕様の約 10%と短い。偏向角を与える BL 積は約 0.024 Tm と測定されており[12]、要求される BL 積に遠く及ばない。これは、RCS 可変偏向電磁石が 400 MeV 入射に利用され、3 GeV ビームを対象としておらず、またビームを振り分けるほどに大きな偏向角を要求されないためである。磁極長を要求仕様 1500 mm に伸ばした場合でも BL 積は約 0.18 Tm と見積もられ、必要な BL 積の 10%程度である。

#### 2.4 新規パルス偏向電磁石

2.2, 2.3 節で既存のパルス偏向電磁石の仕様を調べた結果、次のことがわかった。

- MR へのビーム振り分け用パルス偏向電磁石は、BH1 と同じように 3 GeV 陽子ビームを偏向できるが、25 Hz のパルス動作に対応していない。

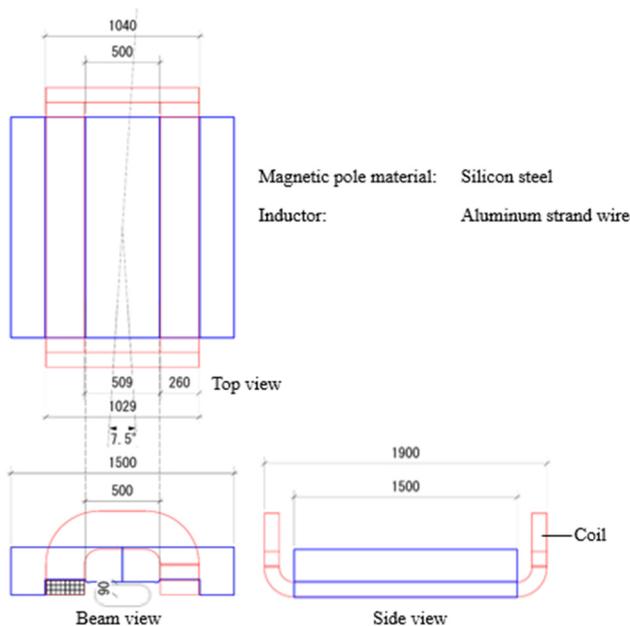


Figure 3: Design idea of new pulse bending magnet for beam separation at horizontal bend section of 3NBT line. The top half of the magnet is shown in the figure. The top drawing is a top view of the magnet. The bottom left and right drawings are a beam view and a side view, respectively.

Table 4: Main Parameters of New Pulse Bending Magnet

Parameter	Value
Bending angle [degree]	7.5
Peak magnetic field [T]	1
Pole length [mm]	1500
Pole gap [mm]	180
Pole width [mm]	500
Repetition rate of pulse operation [Hz]	25
Number of turns per coil	24
Peak excitation current [A]	3000
Inductance [mH]	30

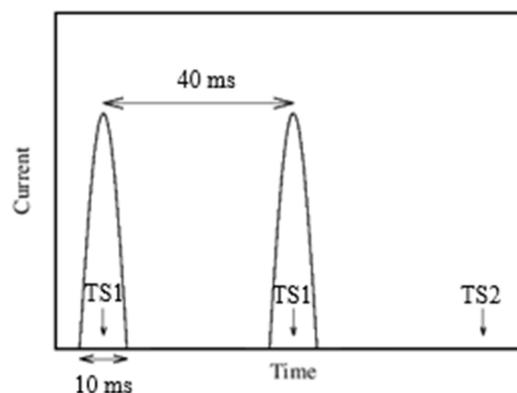


Figure 4: Excitation current waveform of new pulse bending magnet. The pulse current waveform is a half-sine wave with a time width of 10 ms. The time interval between pulses is 40 ms. The pulse peak is at the TS1 beam timing indicated by the down arrow with the label TS1.

- RCS 可変偏向電磁石は、25 Hz でパルス動作できるが、BH1 と同じ偏向角を得るためには磁場の大幅な増強等が必要となる。
- Table 1 に示した要求仕様を満たす新しいパルス偏向電磁石の検討が必要である。

現在検討されている新規パルス偏向電磁石の設計案と主な特性値をそれぞれ Fig. 3 と Table 4 に示す。磁場の大きさや磁極の寸法は BH1 の仕様準じており、磁極長 1500 mm で 3 GeV 陽子を 7.5°偏向させる設計となっている。直流電磁石と異なり、パルス動作によって生じる渦電流損を低減させるために、コイル導体にアルミストランド線を利用することが考えられている。パルス動作の繰り返しは 25 Hz で、励磁電流の波形には Fig. 4 のような 10 ms の正弦半波を用いることを考案している。

### 3. TS2 ラインと無干渉の偏向電磁石

#### 3.1 要求仕様

TS2 へのビーム輸送ラインと干渉する既存の偏向電磁石 BH2 は BH1 と同じ型式であり、BH2 の偏向角や磁場、磁極寸法は Table 1 に示した仕様と同様である。これらの

仕様を満たし、TS2 へのビーム輸送ラインと干渉しない偏向電磁石が必要となる。BH2 は窓枠型の偏向電磁石であり、BH2 のヨークが TS2 へのビーム輸送ラインと干渉する。ヨークの幅は約 1700 mm であるため、3NBT のビームダクト中心から左右 850 mm の範囲にヨークが存在する。TS2 ラインのビームダクト中心は、BH2 の周辺において、3NBT のビームダクト中心から約 585 mm の位置を通るため、ヨークの存在範囲と重複することになる。TS2 ラインと無干渉の偏向電磁石の大きさは、TS2 ラインのビームダクトの直径に応じて決められるため、想定する最大の TS2 ラインダクト径に対応できる仕様とする。TS2 ラインダクト径の最大想定値は 290 mm なので、3NBT のビームダクト中心から TS2 ラインのビームダクトの管壁までの距離は約 440 mm となる。BH2 に代わり、TS2 ラインと無干渉の偏向電磁石に対する主な要求仕様を Table 5 にまとめる。

近接したビーム輸送ラインとの干渉を避けるには、C 型の偏向電磁石やセプタム電磁石の利用が適している。C 型の偏向電磁石は、12 GeV 陽子シンクロトロン(KEK-PS)の偏向電磁石として使われた。セプタム電磁石は、J-PARC では MR へのビーム入射や RCS からのビーム出射等のために使われている。これらの例を Table 5 の要求仕様と照らしながら 3.2 - 3.4 節に示す。

Table 5: Main Requirements for Bending Magnet to Avoid Overlap with Beam Transport Line for TS2

Parameter	Value
Bending angle [degree]	7.5
Magnetic field [T]	1.11
Pole length [mm]	1500
Pole gap [mm]	160
Pole width [mm]	580
Allowable range between center of 3NBT beam duct and TS2 beam duct [mm]	440

### 3.2 KEK-PS の偏向電磁石

KEK-PS の偏向電磁石は、12 GeV までの陽子をシンクロトロン内で周回させるのに使われ、磁極間への真空ダクトの設置や保守の利便性等から C 型で設計された [13]。

KEK-PS の偏向電磁石の主な特性値を Table 6 に示す。12 GeV 陽子に対する磁場の大きさは、要求仕様より 55%程度大きい。一方、磁極長は要求仕様の 2 倍以上長く、磁極間距離は半分以下である。偏向角を与える BL 積は簡易的に 5.64 Tm と計算されるが、要求仕様に沿って磁極長を 1500 mm に短縮し、磁極間距離を 160 mm に拡張すると、0.91 Tm と計算される。この場合に得られる 3 GeV 陽子の偏向角は、約 4°となり要求仕様を満たさない。TS2 へのビーム輸送ラインとの干渉については、C 型の電磁石のため BH2 では干渉するヨーク部分を無くすことができる。一方、C 型の偏向電磁石の磁場は勾配をもつことに注意する必要がある。また、漏れ磁場が大きく TS2 ラインのビームへの影響が懸念される。

Table 6: Main Parameters of KEK-PS Bending Magnet [13]

Parameter	Value
Magnetic field for 12-GeV proton [T]	1.73
Pole length [mm]	3260 <sup>a</sup>
Pole gap [mm]	56

<sup>a</sup>Calculated value using the bending angle of 7.5° and curvature radius of 24.9 m.

### 3.3 MR 入射用高磁場セプタム電磁石

MR 入射用高磁場セプタム電磁石は、RCS から MR へのビーム輸送ラインと MR 周回ビームラインとの合流部に設置されている、MR の入射電磁石の一つである。このセプタム電磁石は、MR にビームを入射するタイミングで励磁されて 3 GeV 陽子を MR に入射する。MR 用パルス偏向電磁石と同様、パルス動作である。

MR 入射用高磁場セプタム電磁石の主な特性値を Table 7 に示す。磁場の大きさは要求仕様より 23%程度大きい。一方、磁極長は要求仕様の 33%程度長く、磁極間距離は 40%小さい。偏向角を与える BL 積は 2.81 Tm と測定されており [14]、要求仕様から簡易的に計算される 1.67 Tm の約 1.7 倍である。しかし、要求仕様に沿って磁極長を 1500 mm に短縮し、磁極間距離を 160 mm に拡張すると、BL 積は 1.26 Tm 程度と見積もられ、偏向角が不足する。また、既存の BH2 と同様に直流電流で励磁される電磁石を用いることが、安定な運転のために望ましい。

Table 7: Main Parameters of Injection Septum Magnet for MR [14]

Parameter	Value
Magnetic field [T]	1.37
Pole length [mm]	2000
Pole gap [mm]	96

### 3.4 RCS 出射セプタム電磁石

RCS 出射セプタム電磁石は、RCS から 3NBT へのビーム出射に使われている出射電磁石の一種で、仕様の異なる 3 台のセプタム電磁石が出射部に設置されている。安定運転のため、これらのセプタム電磁石の動作は直流電流による励磁とされた。3 台のセプタム電磁石のうち、最下流の電磁石がもっとも大きく 3 GeV 陽子の軌道を曲げる。

最下流の出射セプタム電磁石の主な特性値を Table 8 に示す。磁場の大きさは要求仕様の 1.7 倍程度であり、磁極長は 60%と短く、磁極間距離は同程度である。偏向角を与える BL 積は簡易的に 1.72 Tm と計算され、要求仕様に沿って磁極長を 1500 mm に伸ばすと 2.87 Tm と計算される。これは、要求仕様から簡易的に計算される 1.67 Tm の 1.7 倍程度であり、必要な偏向角を与える。TS2 ラインとの干渉についても、セプタム側の電磁石の幅は Table 5 に示した許容範囲内に収まり、無干渉とな

Table 8: Main Parameters of Most Downstream Septum Magnet at RCS Extraction Section

Parameter	Value
Maximum magnetic field [T]	1.91 <sup>a</sup>
Pole length [mm]	900
Pole gap [mm]	167
Magnet width from center of 3NBT beam duct on TS2 beam duct side [mm]	350

<sup>a</sup>Calculated value using the maximum magnetomotive force of 254000 AT and the pole gap.

ることが期待される。

### 3.5 新規セプタム電磁石

3.2 - 3.4 節で C 型偏向電磁石とセプタム電磁石の例について仕様を調べた結果、RCS 出射部最下流のセプタム電磁石の設計を基に、Table 5 の要求仕様を満たす新しいセプタム電磁石を設計可能であることがわかった。

現在検討されている新規セプタム電磁石の設計案と主な特性値をそれぞれ Fig. 5 と Table 9 に示す。磁場の大きさや磁極の寸法は BH2 の仕様に準じており、磁極長 1500 mm で 3 GeV 陽子を 7.5° 偏向させる設計となっている。新規セプタム電磁石が TS2 ラインと干渉しないことを確認するため、新規セプタム電磁石を BH2 の位置に設置した場合の概略図を Fig. 6 に示す。概略図から新規セプタム電磁石は TS2 ラインと干渉しないことがわかった。物理的な干渉だけでなく、漏れ磁場に起因した磁場の干渉も想定されるため、今後の磁場計算等の詳細な検討により対策する。

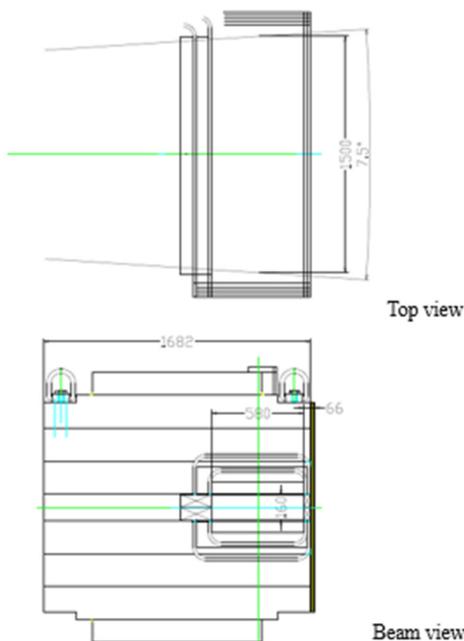


Figure 5: Design idea of new septum magnet for BH2 location of 3NBT line. The top and bottom drawings are top and beam views of the magnet, respectively.

Table 9: Main Parameters of New Septum Magnet

Parameter	Value
Bending angle [degree]	7.5
Magnetic field [T]	1.2
Pole length [mm]	1500
Pole gap [mm]	160
Pole width [mm]	580
Magnet width from center of 3NBT beam duct on TS2 beam duct side [mm]	356

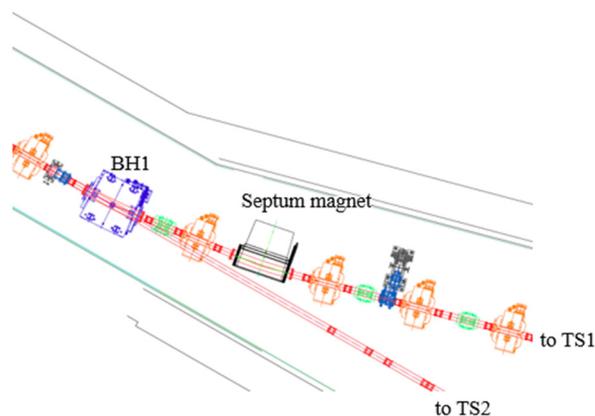


Figure 6: Horizontal bend section of 3NBT line with new septum magnet. The new septum magnet is shown at the BH2 location without the overlap with the beam transport line for the TS2.

## 4. まとめ

TS2 へのビーム振り分けに必要なパルス偏向電磁石および TS2 へのビーム輸送ラインと干渉しない偏向電磁石の設計方針を明確にするために、要求仕様をまとめ、偏向電磁石の参考例を調べた。パルス偏向電磁石については新規設計が必要であり、TS2 ラインと無干渉の偏向電磁石については、RCS 出射セプタム電磁石を参考に類似設計が可能であることがわかった。今後、現状の設計案を基により詳細な設計検討が必要となる。

## 謝辞

RCS 出射セプタム電磁石の運転に関する情報を提供いただいた J-PARC センター加速器第三セクションの Saha Pranab 氏に感謝する。新規セプタム電磁石の設計検討にご協力いただいた株式会社トーキンの尾形敢一郎氏に感謝する。

## 参考文献

- [1] The Joint Project Team of JAERI and KEK, "The Joint Project for High-intensity Proton Accelerators", JAERI-Tech 99-056, 1999, pp. 1-78.
- [2] S. Sakamoto *et al.*, "Advanced design of high-intensity beam transport line in J-PARC", Nucl. Instrum. Methods A, 562, 2006, pp. 638-641.

- [3] K. Yamamoto *et al.*, “Design and actual performance of J-PARC 3 GeV rapid cycling synchrotron for high-intensity operation”, *J. Nucl. Sci. Technol.*, 59, 2022, pp. 1174-1205.
- [4] K. Yamamoto *et al.*, “J-PARC linac and RCS – operational status and upgrade plan to 2 MW”, *J. Neutron Res.*, 26, 2024, pp. 59-67.
- [5] Press Release 2024.05.31, <https://j-parc.jp/c/en/press-release/2024/05/31001348.html>
- [6] N. Aizawa *et al.*, “J-PARC 物質・生命科学実験施設第2ターゲットステーション概念設計書”, No. J-PARC 19-04, 2020.
- [7] Y. Yamaguchi *et al.*, “Design Study of New 3-GeV Proton Beam Transport Line for MLF Second Target Station”, Proc. The 4th J-PARC Symposium (J-PARC2024), Mito, Japan, Oct. 2024 (in press).
- [8] H. Fujimori, S. Meigo, S. Sakamoto, “Optimization of the field uniformity for large aperture magnets at the J-PARC 3GeV Beam Transport-line (3NBT)”, Proc. 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan And the 31st Linear Accelerator Meeting in Japan, Sendai, Japan, Aug. 2006, pp. 430-432.
- [9] J. Takano *et al.*, “Residual Field Correction of Pulse Bending Magnet”, *JPS Conf. Proc.* 8, 012023, 2015, pp. 1-6.
- [10] K. Koseki *et al.*, “Pulsed bending magnet of the J-PARC MR”, Proc. 10th European Particle Accelerator Conference (EPAC’06), Edinburgh, Scotland, Jun. 2006, pp. 1747-1749.
- [11] N. Hayashi *et al.*, “Injection energy recovery of J-PARC RCS”, Proc. 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsukuba, Japan, Aug. 2011, pp. 306-308.
- [12] N. Tani *et al.*, “Field Measurement of Pulse Steering Magnet for J-PARC 3 GeV Rapid Cycling Synchrotron”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 24, 2014, pp. 1-4.
- [13] K. Endo, “シンクロトロン電磁石”, 加速器講義ノート集, 2015, pp. 1-216.
- [14] T. Shibata *et al.*, “The development of new injection septum magnet for upgrading of J-PARC MR(3)”, Proc. PASJ2017, Sapporo, Japan, Aug. 2017, pp. 68-72.