

J-PARC メインリング速い取出しキッカー電磁石の フェライト残留磁化によるビームロスに対する対策

MEASURES AGAINST BEAM LOSS DUE TO RESIDUAL MAGNETIZATION OF FERRITE FOR FAST EXTRACTION KICKER MAGNET OF J-PARC MAIN RING

杉本拓也*, 石井恒次, 芝田達伸, 上窪田紀彦

Takuya Sugimoto*, Koji Ishii, Tatsunobu Shibata, Norihiko Kamikubota

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

A control system to switch the excitation trigger signals sequentially has been developed for the bipolar extraction kicker magnet of the J-PARC main ring (MR). The system consists of a relay circuit board, PLC ladder, and EPICS IOC software. Due to the hysteresis of the ferrite, the kicker magnet is magnetized after the excitation and works as a permanent magnet which magnetization is depending on the polarity of the excitation. During accelerator study in 2017, the effect of the magnetization (i.e. COD variation and beam loss increase) became obvious. The system has been installed and tested in 2018 May. In this paper, the magnetization of the kicker magnet and the design of the control system are described.

1. はじめに

J-PARC メインリング (MR) では、長基線ニュートリノ振動実験 T2K へ向けて、30 GeV に加速した陽子ビーム (8 バンチ) を 1 ターンで取り出す速い取出し方式により供給している。2018 年夏までの運転で、504 kW (繰り返し周期: 2.48 s, 1 サイクルあたりの総粒子数: 2.61×10^{14} 個) の陽子ビームをニュートリノ生成ターゲットに向けて供給することに成功している [1, 2]。Figure 1 に、速い取出しのための直線部の概略図を示す。この直線部には、5 台の集中定数型キッカー電磁石 (KM) [3] と、2 台の低磁場セプトム電磁石 (SM1, 2)、4 台の高磁場セプトム (SM30, 31, 32, 33) が配備されている。速い取出し方式により MR からビームを取り出す際、ビームの行き先は 2 種類ある。一つは、ニュートリノターゲット (NU) へと続くニュートリノ 1 次ビームラインである。もう一つは、加速器の調整や機器の異常によるインターロック発報時に、ビームを捨てるためのビームアポートダンプ (ABT) へと続くアポートビームラインである。キッカー電磁石のパルス磁場の極性を変えることで、ビームの行き先を制御している。

Figure 2 に、キッカー電磁石の断面図を示す。1 枚のコイル (銅板) の周囲に、C 型のフェライトコア (米 CMI 社 CMD5005) [4] を配置した集中定数型キッカー電磁石である。キッカー電磁石を励磁するためのパルス電源 [5] は、パルス変調器 (Blumlein 型の Pulse Forming Network; PFN, 2 台のサイラトロン、パルストランス)、及び高速充電器 [6] から構成されている。定格電圧は 33 kV で、主電磁石の電流パターンに追従して PFN を充電する。6.5 kA の励磁パルス電流を流す事で、キッカー電磁石の中心部に 0.062 T の垂直磁場を発生させている。30 GeV の陽子に対し、5 台のキッカー電磁石により 6.08 mrad の蹴り角を実現している。1 つの PFN の両端には、正負それぞれのパルス電流極性に対応したサイラトロンが 1 台ずつ配備されており、どちらか一方のサイ

ラトロンへトリガー信号を送信することで、磁場の極性を変更している。ここでは、ニュートリノターゲットに取り出す場合の極性を NU 極性、アポートダンプへ取り出す場合を ABT 極性と呼ぶ。ニュートリノターゲットへ向けてビームを取り出しているユーザー運転時 (User Operation) は、キッカー電磁石は NU 極性に励磁されている。一方、加速器の調整運転時 (Accelerator Study) は、ABT 極性でのみ励磁される。また、機器の異常時には、機器からのインターロック信号を集約している MPS (Machine Protection System) により、行き先に関わらず ABT 極性で励磁される。

Figure 3 に、MR へのビーム入射から取り出しまでの一連のサイクルを、陽子ビームのエネルギーで表したものを示す。ニュートリノの CP 非保存をより高統計で研究するには、J-PARC 加速器の設計値である 750 kW のビーム出力が必要不可欠である。そのため、MR ではビームの入射から取り出しまでの周期を、2.48 s から 1.3 s へ短縮する事を計画している。ひとつのサイクル中には、決まったタイミングで出力されるトリガー信号がいくつかあり、それらを用いる事で機器を同期させている。まず、サイクルの開始を決めるスタート信号 (P0) が出力されると同時に Beam Gate 信号が立ち下がり、ビームの入射 (P1) から加速開始 (P2) を経て、加速終了 (P3)、取出し終了 (P4) までの間、出力されている。キッカー電磁石を励磁するための励磁トリガー信号は、P3 のタイミングで出力されている。これらのタイミング信号は、ビームの有無に関わらず常に定期的に出力されており、ある運転サイクルにどの行き先に向けてビームを入射して加速するかどうかは、加速器オペレーターの操作により切り替えることが出来る。加速器の運転は、単発 (シングルショット) と連続運転が可能で、加速器の調整運転の際にはシングルショットで運転されることが多い。

キッカー電磁石では、立ち上がり非常に高速なパルス磁場を形成するため、磁束を集めて戻すためのリターンヨークとして、高周波特性の良いフェライトコアを使用している。磁性体であるフェライトコアは、ヒステリシスを持つため、キッカー電磁石を励磁すると磁化す

* takuya.sugimoto@j-parc.jp

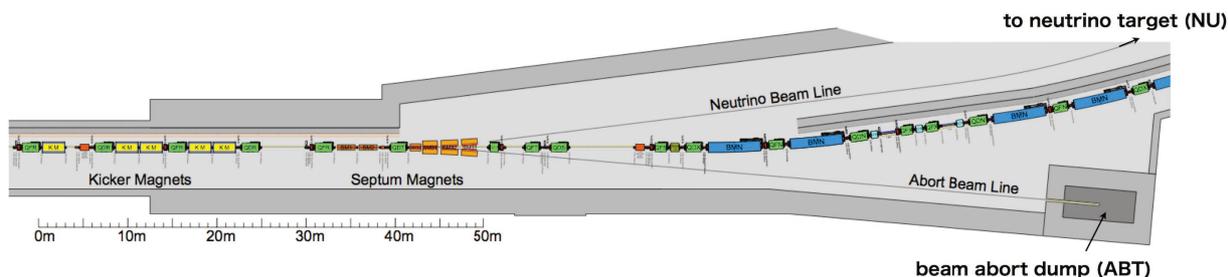


Figure 1: Insertion section of fast extraction and abort extraction.

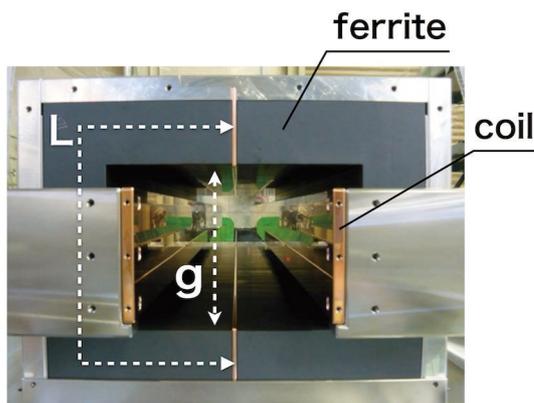


Figure 2: Cross section of the extraction kicker magnet. L indicates the magnetic path length in the ferrite and g indicates the gap length of the kicker.

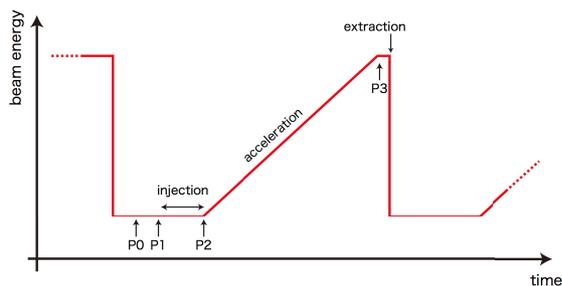


Figure 3: Beam energy and timing signals for fast extraction.

る。すなわち、キッカー電磁石は、パルス励磁していない時は、その直前に励磁した磁場の向きに対応した残留磁化を持つ永久磁石となる。キッカー電磁石の極性が常に同じ向きであるならば、残留磁化の影響を含めてビーム軌道の調整を行えば良い。しかしながら、先に述べた通り、MRの取り出しキッカー電磁石は両極性のキッカー電磁石であるため、ユーザー運転時と加速器の調整運転時ではフェライト磁化の極性も変わってしまう。これまで低いビーム強度で運転をしていた際は、この影響が見えていなかった。しかしながら、2017年頃からビーム強度が増すにつれて、その影響が閉軌道歪み (Closed

Orbit Distortion, COD) の変化やビームロスの増加として顕在化してきた。このビームロスを減らすためには、ビームの入射から取出しの直前までの間はフェライトをNU極性で磁化させてビーム軌道を測定するが、ビームはニュートリノターゲットではなくアボードダンプへ取り出すという事が必要となる。

本報告では、加速器の調整運転時にフェライトコアをNU極性で磁化させるために新たに構築したシステムについて述べる。そして、実際の陽子ビームを用いたシステムの動作試験結果について述べる。

2. トリガー信号の切り替え

加速器の調整試験中に、キッカー電磁石をNU極性で磁化させてABTに取り出すために、複数のリレーの開閉を組み合わせ、励磁トリガー信号をABTからNUへ切り替えるためのシステムを新たに構築した。Figure 4に、今回構築したシステムの概略図を示す。このシステムは、トリガー信号の行き先を切り替えるためのリレーを有する回路モジュール (Trigger Switcher Module) と、それを外部から制御するPLCならびにEPICS IOC (Experimental Physics and Industrial Control System Input Output Controller) から構成される。PLCはシーケンスCPUモジュール (横河電機製 F3SP71) とDC入力モジュール (同 F3XD32)、リレー接点出力モジュール (同 F3YC08) で構成されている。IOCは速い取り出しキッカー電磁石電源の制御用のものを利用し、IOCの内部では、今回のシステムの制御用に新たに定義したEPICSレコードと、回路モジュールの動作シーケンス (後述) を記述したEPICSシーケンサが動作している。CSS (Control System Studio) で製作されたGUIパネルにより、シーケンス開始用のEPICSレコードを変更すると、EPICSシーケンサの状態遷移が開始する。GUIパネルでは、リレーの開閉状態や状態遷移の様子をモニターできるようになっている。

Figure 5に、リレー回路モジュールの外観ならびに回路基板を示す。回路は1ピンのNIMモジュール内に収められており、基盤中央に4つのリレー素子 (OMRON社製 G6A) が実装されている。回路モジュールの前面には、それぞれの励磁トリガー信号の入力ならびに出力のためのBNCコネクタがある。BeamGate信号は、ビーム入射に同期したタイミングでリレー状態をリセットするために用いられる。回路モジュールの背面には、PLCと通信するためのD-Subコネクタがある。回路モジュール

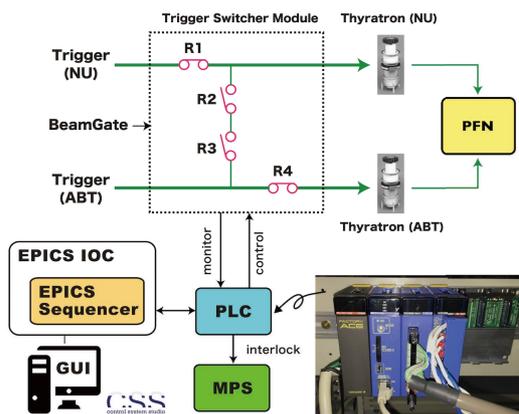


Figure 4: System diagram to control trigger switcher module.

ルと PLC との通信は、リレーの状態を監視するための接点信号と、リレーの状態を変更するための電圧信号がある。PLC の制御はラダー CPU で行い、ラダーの制御は EPICS レコードを介して行う。リレーの状態はまた、フロントパネルにある LED でも確認することが可能となっている。



Figure 5: Trigger Switcher Module

Figure 6 に、リレーの開閉状態の組み合わせを示す。励磁トリガー信号の入力と出力の間には、4 つのリレー (R1 から R4) があり、それらの開閉を切り替えることで信号の切り替えを行う。リレーの開閉状態の組み合わせを 3 つに分け、回路モジュール前面の押しボタンスイッチによるローカル操作と、PLC によるリモート操作のいずれかにより状態間の遷移を行う。加速器の調整運転を行う際は、CSS で作成された GUI パネルを用いてリモート操作を行う。以下に述べる切り替え手順を、EPICS シーケンサを用いて実装した。

まず、待機状態である NORMAL 状態では、リレー R1 と R4 が閉じており、それぞれの入力そのままサイラトロンへ向けてスルーされる。加速器の調整運転中は、励磁トリガー信号は ABT 極性のみが出力されている。GUI パネルの START ボタンをクリックすると、EPICS シーケンサが PLC に対して、インターロック信号ならびに START 信号を送るよう命令する。インターロック信号は MPS へ送られ、ビームの入射が禁止されるため、

ビームが誤ってニュートリノターゲットに取り出される事を防ぐ。START 信号は回路モジュールに送られ、リレーが PRACTICE 状態へと遷移する。この状態では、リレー R1 と R4 は開き、R2 と R3 が閉じるよう設計されているため、ABT に入力された信号は、NU 用のサイラトロンへに出力されるため、フェライトは NU 極性に磁化される。リレーの誤動作により ABT の励磁トリガー信号が NU へと送られる事を防ぐため、2 つのリレー (R2 と R3) が直列に接続して冗長性を持たせる設計とした。フェライトは高い周波数特性を持っているため、数サイクルあれば十分に磁化が可能であると考えている。そのため、EPICS シーケンサで 5 サイクルをカウントすると、PLC に対して STOP 信号を回路モジュールに向けて送信するよう、EPICS シーケンサが命令する。PLC から STOP 信号が回路モジュールに入力されると、リレーは ALL_STOP へと遷移する。この状態では、全てのリレーが開くため、全ての入力信号が遮断される。そして、インターロック信号を解除して MPS をリセットし、ビームをシングルショットで入射すると、ビームは NU 極性のフェライトの中を通過して加速されるため、NU 極性のフェライトを使ったビームの COD を測定することが出来る。また、ビーム入射時に発行される BeamGate 信号により、リレー状態は NORMAL 状態へ戻るよう設計されており、そのサイクルの最後に発行される励磁トリガー信号は、ABT 側へのサイラトロンへ送ら、ビームはアポートダンプへと取り出される。

2018 年 5 月にシステムを導入し、システム単体での試験、ならびにビームを用いた試験を行った。単体試験では、各状態での入出力信号の確認や、模擬 BeamGate 信号を外部から入力して一連のシーケンスの確認を行った。ビーム試験では、中身の無い空ショット、低強度ビーム、大強度ビームの 3 段階でシステムの動作確認ならびに COD とビームロスの測定を行い、設計通りに動作している事を確認した。

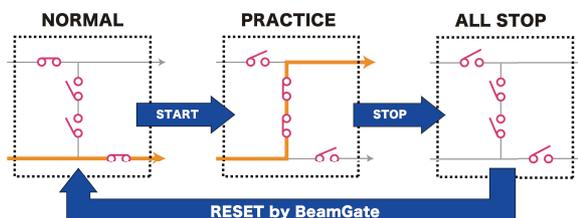


Figure 6: Sequence diagram of the trigger switcher module. Three combinations of the relays are defined to switch the ABT trigger signal to NU signal. These states are controlled by PLCs.

3. フェライトの磁化

ビーム試験により得られた COD の違いが、本当にフェライトの極性の違いに起因している事を確認するために、キッカー電磁石のフェライトの残留磁化を 2 つの手法により評価した。一つ目は、フェライトのヒステリシス曲線を用いる手法で、二つ目は異なるフェライト極性で得られた COD データから補正量を見積もる手法で

ある。以下にそれぞれについて述べる。

3.1 ヒステリシスによる評価

磁性体であるフェライトは、コイルに流れる電流が作る磁場により磁化する。アンペールの法則より、コイルに電流が流れていない場合、フェライト内とギャップを通る任意の閉曲線 C に沿って、

$$\oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{s} = 0 \quad (1)$$

が成り立つ。MR の取り出しキッカー電磁石の断面図を Fig. 2 に示す。フェライトの残留磁化によりギャップ間に生じる磁束密度 B_g は、 L をフェライト内の磁路長、 g をギャップ間隔 (Fig. 2 参照)、 μ_0 を真空の透磁率、 H_c をフェライトの保磁力とすると

$$H_c L + \frac{B_g}{\mu_0} g = 0 \quad (2)$$

より

$$B_g = -\frac{L}{g} \mu_0 H_c \quad (3)$$

と表される。

Figure 7 に、測定された CMD5005 のヒステリシス曲線を示す。この測定結果より、保磁力 H_c は 11 A/m であった (Fig. 7 点 A)。しかし、キッカー電磁石の磁場は 0.062 T (Fig. 7 点 B) なので、飽和磁束密度よりも十分に小さい。そのため、ヒステリシス曲線は原点を中心として、初期透磁率曲線上の点 B を通る閉曲線 (マイナーループ) となる。このマイナーループによる保磁力が、飽和磁束密度で磁化させた場合の半分程度であると仮定すると、キッカー電磁石のギャップ間に生じる磁束密度 B_g は、(3) 式に $L = 0.35$ m、 $g = 0.13$ m、 $H_c = 6.5$ m/A を代入して、 $B_g = 1.9 \times 10^{-5}$ T 程度と見積ることができる。キッカー電磁石の磁極長は 5 台で 10 m なので、キッカー電磁石全体で 1.9×10^{-4} Tm の積分磁場となる。キッカー電磁石の励磁電流パルスは、立ち上がり時間が $1 \mu\text{s}$ 、パルス幅が $6 \mu\text{s}$ と非常に高速である。しかしながら、CMD5005 のデータシート [4] によると、このフェライトは高い周波数特性を持っており、周波数が 1MHz 付近でも透磁率がほとんど減衰しないので、十分に磁化することが可能であると考えられる。

3.2 ビーム軌道による評価

ある極性で磁化したフェライトがリング内に存在すると、ビーム軌道はその磁場により常に変動を受ける。加速器の調整時には、キッカー電磁石は常に ABT 極性に磁化しているので、フェライト磁場も含めて COD とビームロスを最適化する。しかし、NU ターゲットへ向けてビームを取り出す際には、キッカー電磁石の極性を反転させるため、NU 極性のフェライト磁場を持つことになる。これまでの MR の運転では、キッカー電磁石の残留磁化による影響は小さく、問題にはならなかったが、ビーム強度が増すにつれて顕在化し、出力 400 kW での調整時には、極性が変わることによりビームロスが 150 W 程度増加するようになった。COD の変化から、キッカー電磁石の残留磁化による蹴り角を求める。

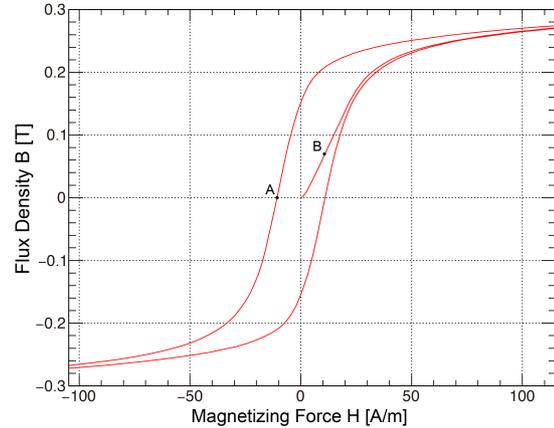


Figure 7: Measured hysteresis curve of the ferrite CMD5005. Point A indicates the coercivity H_c and B indicates the operation point of the kicker magnet.

Figure 8 に、MR 全周に配備された 186 台の Beam Position Monitor (BPM) で測定されたビームの位置情報から求めた水平方向 COD の分布を示す。上の図は、それぞれの BPM で測定したビーム位置と理想軌道から求められる位置との差 (X) の分布の標準偏差 (X_{RMS}) の時間変化を示したもので、値が小さいほど理想軌道に近い軌道である事を示している。下の図は、ある時間スライス ($t = 120$ ms) での全 186 台の BPM が測定したビーム位置と理想軌道から求められる位置との差の分布である。赤線は、フェライトを ABT 極性に磁化させた場合の分布で、青線は、トリガー切り替えシステムを動作させて NU 極性にフェライトを磁化させた際の COD を表している。これらの測定結果より、極性を変える事で COD が変化していることがわかる。入射から加速開始にかけての区間で特に COD の変化が大きいのは、ビームのエネルギーが 3 GeV と低いためであると考えられる。また、入射区間で COD の絶対値が大きいのは、入射時のロスを減らすために直線部 B と直線部 C でローカルバンプを立てているためである。極性を変える事でロスが増加したのは、ロスを減らすために立てたローカルバンプが小さくなったことが原因では無いかと考えている。

ビームの入射から 120 ms 後の軌道データを、MICADO 法 (Minimisation des Carrés des Distortion d'Orbite) [7] により比較すると、COD の補正量は 0.014 mrad である事がわかった。これは、3 GeV の陽子に対する積分磁場 1.8×10^{-4} Tm に対応しており、フェライトのヒステリシスから求めた結果とほぼ一致した。これより、この COD の違いを生み出しているのは、キッカー電磁石のフェライトの残留磁化である事を確認した。

4. まとめ

J-PARC メインリングの速い取り出しキッカー電磁石は、ニュートリノターゲットへの取出しとアポルトダンプへの取出しの 2 つの行き先を振り分けるため、励磁電流パ

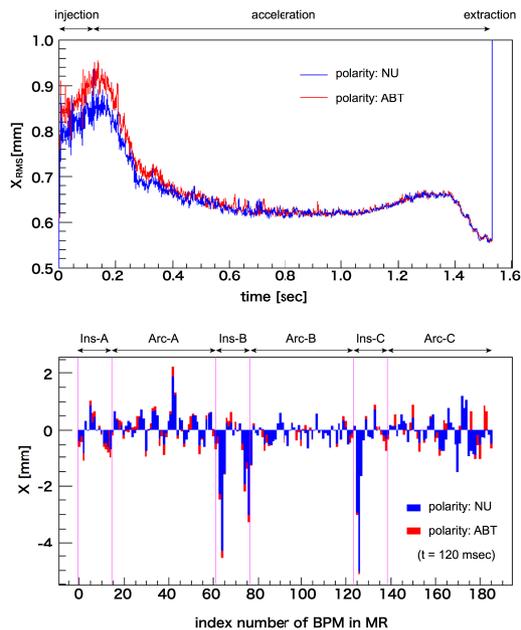


Figure 8: Horizontal COD of MR. Upper shows the time variation of the COD and lower shows the COD distribution of MR at 120 ms after beam injection.

ルスは両極性である。そのため、コイルを励磁したことにより、フェライトの磁化にも極性が存在する。加速器調整時とユーザー運転時では極性が異なるため、加速器調整時のビーム軌道とユーザー運転でのビーム軌道が入射から加速にかけての区間で異なり、大強度運転では調整時に比べてビームロスが増えた。同じ条件となるようにするためには、加速器調整時にもユーザー運転と同じ極性にフェライトを磁化させて、アポートダンプにビームを取り出す必要があった。そのため、キッカー電磁石を励磁させるためのトリガー回路に、新たにリレー回路を加え、リレーの開閉を PLC と EPICS シーケンサで制御するシステムを構築した。本システムの導入により、ユーザー運転と同じ条件で軌道調整が実施できるようになり、よりビームロスの少ないユーザー運転が可能となった。

謝辞

日本原子力研究開発機構 金正倫計氏ならびに菅沼和明氏より、CMD5005 の BH Curve 測定データを提供して頂きました。御礼申し上げます。

参考文献

- [1] S. Igarashi, "HIGH-POWER BEAM OPERATION AT J-PARC", *Proc. HB2018*, Daejeon, Korea, 2018.
- [2] S. Igarashi *et al.*, "Study on the beam intensity upgrade of J-PARC MR", in *these proceedings*.
- [3] K. Koseki *et al.*, "The fast extraction kicker for J-PARC with a novel pulse compression system", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* **739** (2014) pp.63–67.
- [4] <http://www.cmi-ferrite.com/Materials/Datasheets/NiZn/CMD5005.pdf>

- [5] K. Koseki, "The fast extraction kicker power supply for the main ring of J-PARC", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* **729** (2013) pp.3–7.
- [6] T. Sugimoto *et al.*, "Upgrade of the Compensation Kicker Magnet for J-PARC Main Ring", *Proc. PASJ2017*, Sapporo, Japan, 2017.
- [7] J. Takano *et al.*, "Beam commissioning tools for J-PARC MR", *Proc. PASJ2008*, Higashihiroshima, Japan, 2008.