

## J-PARC MR における不安定性抑制のための八極電磁石

### OCTUPOLE MAGNETS FOR THE BEAM INSTABILITY SUPPRESSION IN J-PARC MR

五十嵐進<sup>#</sup>, ファン カンジュン, 染谷宏彦

Susumu Igarashi<sup>#</sup>, Kuanjun Fan, Hirohiko Someya

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

#### Abstract

We have designed the octupole magnets for the beam instability suppression in the main ring of the Japan Proton Accelerator Research Complex. Transverse instabilities were observed during the injection and acceleration period at the high intensity operation. They were suppressed with the chromaticity setting and bunch by bunch feedback for the daily operation. We have tested the octupole magnets for instability damping successfully. They however reduced the dynamic aperture and resulted in beam losses. The plan has been made to use the magnets only at the injection when the horizontal instabilities are observed and to turn off them after 5 ms of the injection for beam loss minimization. We designed the octupole magnets and power supplies for the fast pattern.

#### 1. はじめに

大強度陽子加速器(J-PARC)の主リング(MR)は、ニュートリノ振動実験(T2K)などの素粒子・原子核の実験のために大強度ビームを供給している。計 8 バンチの 3 GeV の陽子ビームが 40 ms ごとに 4 回に分けて 0.13 s の時間で入射し、その後 1.4 s の時間で 3 GeV から 30 GeV まで加速を行い、ビームを取り出している<sup>[1]</sup>。連続利用運転時の典型的な粒子数はバンチあたり  $1.5 \times 10^{13}$  ppb となっている。

大強度運転で障害となるもののひとつが横方向のビーム不安定性である。クロマチシティを補正した状態では、ビーム粒子数がバンチあたり  $10^{12}$  台を越えると、ビーム不安定性が入射直後および加速中で観測された。この不安定性はクロマチシティを負の値に設定することによりある程度抑制できる。典型的なクロマチシティの設定は、入射時間では -5、加速時間の初期では -2、加速の後半では -5 としている。負の絶対値の大きいほうが、不安定性の抑制効果がある。加速初期に設定を変えているのは、そのとき運動量変位が大きくなるため、クロマチシティ補正により運動量変位についてのチューンの広がりを抑え、それによるビームロス抑制する必要からきている。

更に、バンチバイバンチフィードバックシステムによってビーム不安定性の抑制を行っている。ビーム位置モニタの測定を行い、その測定位置から、エキサイタで、バンチ毎に位置を補正のようにしている。エキサイタは内部にストリップラインを持つ構造で、相対するストリップラインに電場をかけることによりビームにキックを与える。このフィードバックにより不安定性を抑制することができる。このシステムはビームロスの低減に有効であり、大強度運転に欠かせないものとなっている。

八極電磁石の非線形磁場は、ベータatron振動の振幅に依存するチューンシフトをつくる。そのとき、

ランダウ・ダンピングの効果でビーム不安定性が抑制される。しかし、それと同時に非線形磁場により力学口径を縮小させる副作用がある。従って、力学口径があまり小さくならない条件で、ビーム不安定性を抑制するような八極電磁石の配置、および励磁パターンを検討する必要がある。

#### 2. ビーム試験

2011 年に J-PARC の 3 回対称性を保つように、3 つの直線部に八極電磁石を 1 台ずつ設置した。電磁石は KEK PS のビーム不安定性抑制のために 35 年前に製作されたものを移設してビーム試験を行った。そのテストにより、不安定性を抑制する効果が観測されたが、同時に力学口径を縮小させることによるビームロスも観測された。力学口径の縮小は、 $2v_x - 2v_y = 3$  と  $4v_x = 90$  の構造共鳴の影響と考えられる<sup>[2]</sup>。このため、新たにアーク部の最適なベータatron振動位相位置に八極電磁石を設置することにより、これらの構造共鳴を補正し、力学口径の縮小を抑えることを検討した(Figure 1)。

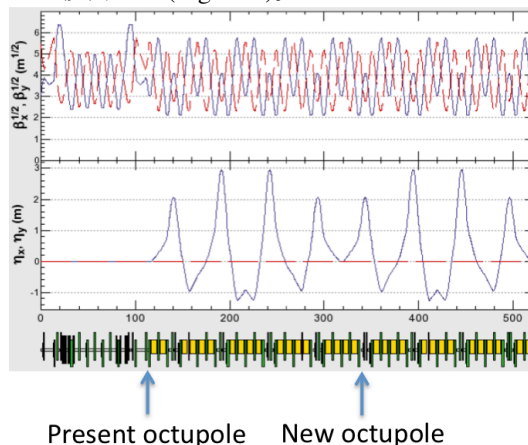


Figure 1: Beta, dispersion function and position of the octupole magnets in one third of MR.

<sup>#</sup> susumu.igarashi@kek.jp

SAD 計算より、八極磁場としては、アーク部のものが直線部のものの 2 倍の強さのときに共鳴が補正されることが分かっている。この新たな八極電磁石は、2012 年に 3 つのアーク部の対称な位置に 1 台ずつ設置した。この電磁石も KEK PS から移設したものである。

2 バンチあたり  $2.45 \times 10^{13}$  ppp のビームを入射したときに八極電磁石の電流設定値を変えて、ビーム強度を測定した。直線部の八極電磁石 3 台の場合と比べて、直線部とアーク部の 6 台の八極電磁石での励磁によりビームロスが少なくなることが確認できた (Figure 2)。更に直線部とアーク部の 6 台の八極電磁石の電流設定を変え、ビームロスが少なくなる条件をさがすと、電流が負の設定のときに入射後 10 ms 程度までは八極電磁石の励磁がないときよりよくなるが、その後は優位性がなくなる。つまり光学口径の補正は完全ではないことが分かった (Figure 3)。

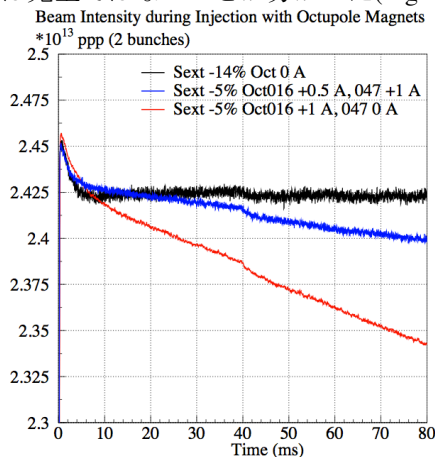


Figure 2: Beam intensity as a function of time from the injection to 80 ms without octupole magnets (black line), with magnets of both straight and arc sections (blue line), and with magnets of straight sections only (red line).

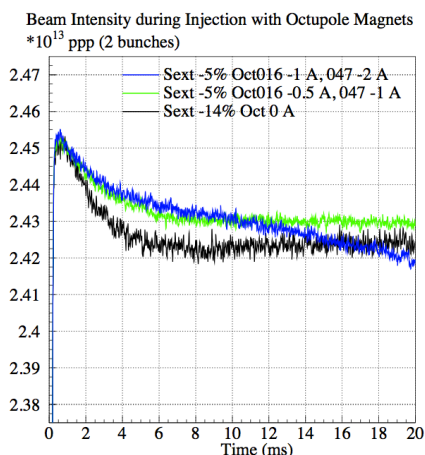


Figure 3: Beam intensity as a function of time from the injection to 20 ms without octupole magnets (black line), with -1 A of straight and -2 A of arc magnets (blue), and -0.5 A of straight and -1 A of arc (green).

### 3. 八極電磁石の速いパターンでの励磁

八極電磁石を入射直後の 5 ms 程度のみ励磁できれば、入射直後のビーム不安定性を抑制することができる。その後 5 ms 程度の速い時間で立ち下げることができれば、光学口径の縮小によるビームロスも限定的となり、八極電磁石が効果的に使用できる。

現在使用している八極電磁石はブロックの鉄でできたもので、パターン励磁には適さない。また、電源もこの電磁石に直流で流すためのものとなっている。速いパターンの励磁のためには積層鋼板を使った電磁石が必要となり、その電磁石の速いパターン通電に対応する電源が新たに必要となる。この設計のための典型的な励磁パターンとして、5 ms で立ち上げ、5 ms のフラットトップ、5 ms で立ち下げを考える (Figure 4)。このパターンを入射期間中の 40 ms のビーム入射ごとに励磁する (Figure 5)。

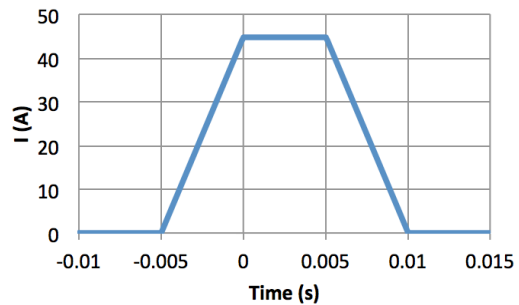


Figure 4: Typical excitation pattern.



Figure 5: Excitation pattern in the reputation cycle.

### 4. 電磁石の設計

電磁石のサイズは、現在の電磁石のものと同じ、ボア半径 70 mm、磁極長 200 mm とする。磁場勾配  $\partial^3 B / \partial x^3 = 2270 \text{ T/m}^3$  で、磁極表面での磁場は 0.13 T を想定する。起磁力は 1800 ATurn/pole となり、極あたりのコイル巻数を 40 turn とすると、電流は 45 A となる。電磁鋼板は 0.35 mm 厚の無方向性電磁鋼板で、無機質の絶縁皮膜をもつものを想定している。磁場が比較的速いパターンに追従させるために、うず電流についての考慮が必要で、電磁石の構造を保つために溶接する側板等は SUS を考えている。

八極磁場の一様性のために、つまり他の多極成分の混入を最小にするために、磁極の形を最適化した。他の多極成分の混入を  $r = 60 \text{ mm}$  で 1% 以下にするように、OPERA の 3 次元計算で行った (Figure 6)。いくつかの種類磁極面を試したが、磁極面が円弧となる場合で、その円弧の半径を 30 ~ 70 mm の間するときの磁場を計算して、円弧の半径が 40 mm の

場合に多極成分が最小となった。24 極成分は 8 極成分に比べて 0.24 %、40 極成分は 0.8 % であった (Figure 7)。

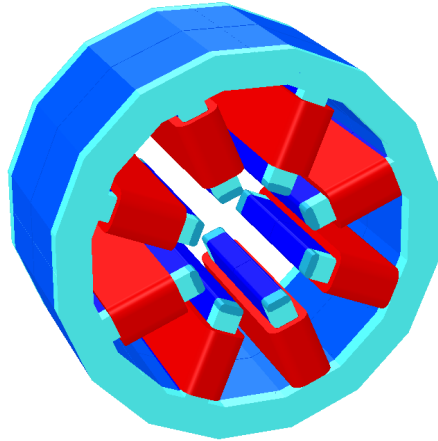


Figure 6: OPERA3d image of the octupole magnet.

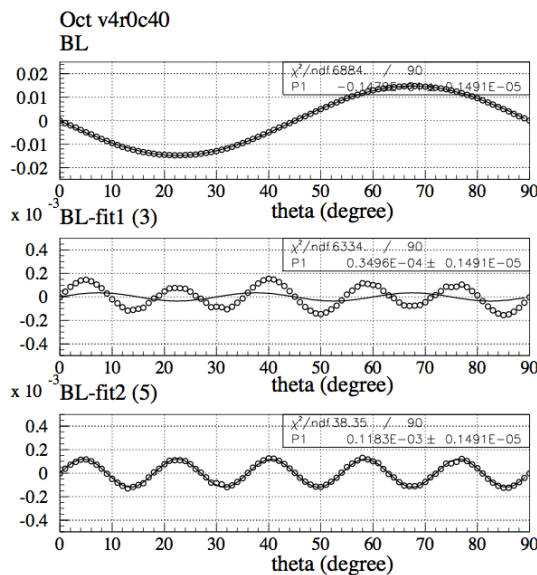


Figure 7: Field integral along the beam axis as a function of  $\theta$  when  $r = 60$  mm in the cylindrical coordinate (top). Fundamental (octupole) component is fit and subtracted from BL and the residual is shown in the middle (open circle). Line in the middle plot is the fit with 3<sup>rd</sup> harmonic (24 pole) component. The residual is subtracted with the fit of 3<sup>rd</sup> harmonic is shown in the bottom (open circle). It was fit with 5<sup>th</sup> harmonic (40 pole) component.

うず電流効果を評価するために、ELEKTRA による動磁場計算を行った。うず電流を低減させるためのスリットの効果についての評価を行うため、スリットをつけたモデルも用意した。スリットなしの場合、端板のみにスリットがある場合、端板と鋼板の端部 50 mm までスリットがある場合、端板と鋼板の全長にわたりスリットがある場合の、4 つの場合について、計算を行った (Figure 8)。立ち上がり時

の追従遅れは、スリットありなしに関わらず、0.1 ms であった。また、磁場の多極成分についても、スリットありなしに関わらず、1 % 以下に保たれていた。更に、うず電流によるパワーロス、立ち上げ時の 5 ms と立ち下げ時の 5 ms で、スリットなしの場合 140 W、スリットありの場合 120 W となっていた。スリットがなくても、うず電流の効果は小さいことが分かった。

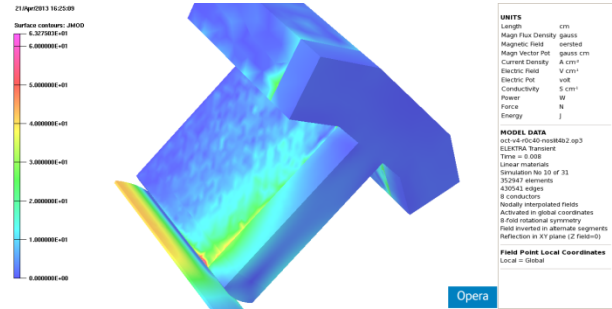


Figure 8: Result of the ELEKTRA calculation about power loss distribution with the eddy current when there is no slit.

#### 4. まとめ

J-PARC MR で観測されているビーム不安定性を抑制するための方法のひとつとして八極電磁石を新たに設置する検討を行った。八極磁場の励磁により振幅に依存するチューンシフトをつくり、そのランダウ・ダンピングの効果でビーム不安定性の抑制が期待される。実際に KEK PS で使用していた八極電磁石を移設してビーム試験を行った結果、不安定性の抑制が観測されたが、同時に力学口径が小さくなることによるビームロスも観測された。問題となる構造共鳴を補正するように八極電磁石を更に設置して、力学口径が補正できることを確認した。しかし、その補正は完全ではなく、それによるビームロスがある。そこで、特に入射直後の不安定性を抑制するために、入射直後の 5 ms 程度のみ励磁し、その後 5 ms 程度で立ち下げることができるよう、比較的速い励磁パターンが可能な電磁石の設計を行った。八極磁場の一様性として 1 % 以下の精度となるように磁極の最適化を行った。うず電流効果を評価するために動磁場計算を行い、磁場の追従遅れ、および磁場の多極成分、パワーロスについて、スリットなしでも問題ないことが分かった。

#### 参考文献

- [1] Y. Sato, et al., "Recent Commissioning of High-Intensity Proton Beams in J-PARC Main Ring", HB2012, Beijing, Sep. 17-21, 2012, TH01C06.
- [2] S. Igarashi et al., "Octupole Magnets for the Instability Damping at the J-PARC Main Ring", IPAC12, New Orleans, May 20-25, 2012, WEP052, p. 3045, (2012).