

J-PARC RCS : 入射バンプ電磁石に内在する非線形磁場成分が周回ビームに与える影響

J-PARC RCS: EFFECTS OF NONLINEAR FIELD COMPONENTS OF INJECTION BUMP MAGNETS ON CIRCULATING BEAM

發知 英明[#]、原田 寛之

H. Hotchi[#], H. Harada

Accelerator Division, J-PARC Center, Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

Abstract

In the J-PARC 3 GeV Rapid Cycling Synchrotron, four sets of injection bump magnets (pulsed dipole magnets) have been employed for multi-turn charge-exchange injection over a period of 0.5 ms (~307 turns). The injection bump magnets include significant nonlinear field components due to their large ratio of gap length to core length. The nonlinear field components, which locally exist in the injection section not following the lattice super-periodicity, have a significant influence on the circulating beam during the period of multi-turn injection through excitations of high-order random resonances. In this paper, we discuss the detailed mechanism of emittance growth and beam loss caused by the nonlinear field components of the injection bump magnets, including its correction scenario.

1. はじめに

Figure 1 に J-PARC 3 GeV Rapid Cycling Synchrotron (RCS) [1-3] の全体像を示す。RCS は、周長 348.333 m、3 回対称のラティス構造からなる陽子シンクロトロンで、リニアックから供給される 400 MeV の負水素イオンを入射点におかれた炭素フォイルを使って陽子へと荷電変換しながら多重入射 (~307 ターン) し、その陽子を 25 Hz という速い繰り返しで 3 GeV まで加速する。図に示されるように、RCS は、物質・生命科学実験施設 (MLF) に設置された中性子およびミュオン生成標的へのビーム供給と、後段の 30 GeV Main Ring Synchrotron (MR) への入射器という 2 つ役割を持ち、最終的には世界最高クラスとなる 1 MW (8.33×10^{13} ppp) という大出力でのビーム供給を目指している。

RCS のような MW 級の大強度陽子加速器では、ビーム損失により生じる機器の放射化がビーム出力を制限する最大の要因となるため、ビーム損失の低減がビームの大出力化を図るうえで最重要の研究課題となる。大強度加速器におけるビーム損失の原因は、誤差磁場や非線形磁場による効果、空間電荷や像電荷の効果、荷電変換入射中の散乱など、多様であると共に、実際のビーム損失は、そうした複数の効果が絡み合った複雑な発生機構を持つため、その解決を果たすには、より詳細なビームの運動学的検討が不可欠となる。

RCS では、実際のビーム試験と共に、計算機上での数値シミュレーションを精力的に行ってビーム損失の問題を解決してきた[4]。実測と計算の一致は良好で、計算機上での検討が RCS のビームコミッショニングを効率的に進展させる原動力になっている。すでに多くの論文で報告されている通り[4-7]、チューンの最適化、横方向・縦方向ペイント入射の最適化、共鳴補正の導入などにより、1 MW 運転時

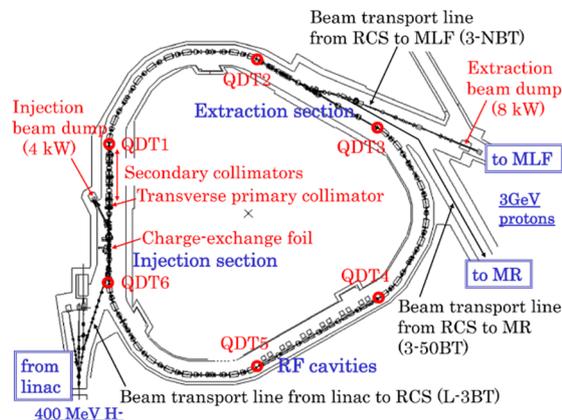


Figure 1: Layout of the J-PARC 3 GeV RCS.

のビーム損失を 0.25%程度にまで低減することに成功している。入射エネルギー領域 (400 MeV) で残存している 0.25% (333 W) のビーム損失は、それを回収するコリメータ系の許容値 (4 kW) と比べて十分に小さな値であり、許容範囲内のビーム損失とも言えるが、コリメータ系で回収しきれなかった一部の粒子がその下流領域に有意な放射化を引き起こすことが懸念されるため、更なるビーム損失の低減が望まれている。

数値シミュレーションをベースにした検討により、残存しているビーム損失が、主として、入射バンプ電磁石に内在する非線形磁場成分によって引き起こされていることが明らかになっている。後述の通り、RCS では、4 台のパルス型バンプ電磁石を用いてビームを多重入射するが、それらは大口径であるがゆえに有意な非線形磁場成分を含む[8,9]。この局所的に存在する非線形磁場成分は、ビーム入射中に、高次の非構造共鳴を励起して周回ビームに有意な影響を及ぼす。本論文では、入射バンプ電磁石に内在する非線形磁場成分を導入して行った数値シミュレ

[#] hotchi.hideaki@jaea.go.jp

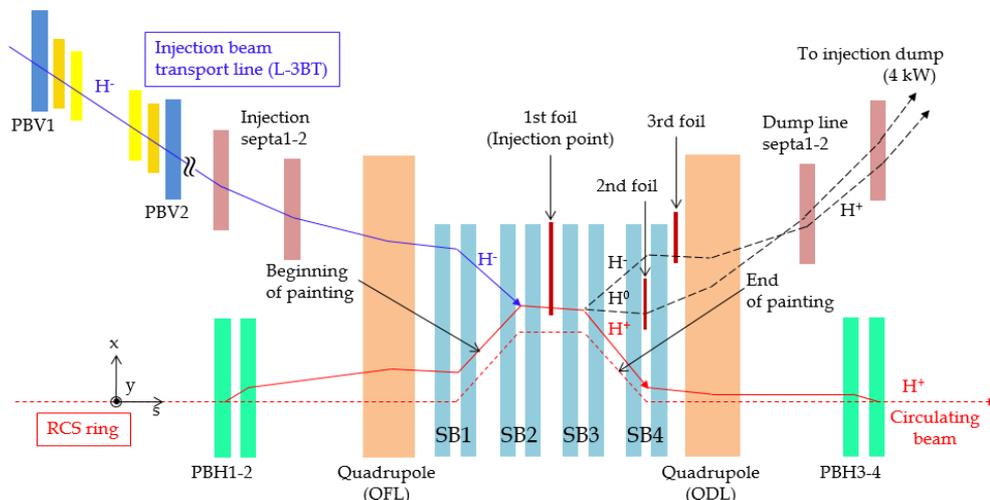


Figure 2: Layout of the RCS injection section.

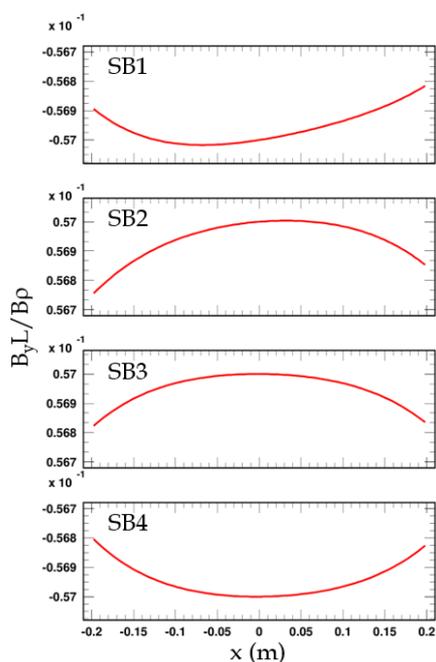


Figure 3: Result of the field measurements for SB1-4: $B_y/L/B_p$ vs. x at $y=0$ during injection.

ーションや実際のビーム試験結果を用いて、その非線形磁場成分が引き起こすエミッタンス増大やビーム損失の発生メカニズムを議論すると共に、今後の補正シナリオを紹介する。

2. 入射バンプ電磁石に内在する非線形磁場成分

Figure 2 に RCS 入射部の機器配置図を示す。図に示されるように、RCS では、4 台の同一形状のパルス型二極電磁石 (Shift bump magnets: SB1-4) を用い、水平方向にバンプ軌道を形成してビームを多重入射する。最初の 0.5 ms に亘ってバンプ軌道を立ち上げ、

その間、~307 ターンかけてビームを蓄積し、入射終了後は、0.35 ms で素早くバンプ軌道を立ち下げる。本章では、磁場測定結果を用いて、バンプ電磁石に内在する非線形磁場成分を評価する。

ミッドプレーンシメトリーな磁場は、以下のように多項式展開が可能である。

$$B_y + jB_x = \sum_{n=0}^{\infty} b_n (x + jy)^n - \frac{b_0''}{2} y^2 \dots \quad (1)$$

Figure 3 に SB1-4 の x 軸上のミッドプレーン磁場分布 ($B_y/L/B_p$ vs. x at $y=0$ during injection) を示す。この分布は、Eq. (1) の b_n 成分 (ピュアな多極磁場成分) の寄与を反映する。図から明らかなように、各 SB は、二極磁場成分以外にも高次の磁場成分を含む。特に、有意な六極磁場成分 (二次関数の成分) を含んでいるのが見て取れる。既述の通り、SB1-4 はバンプ軌道を形成するためのもので、設計上は、SB1-4 の磁場の絶対値・分布形状は同一で、その磁場は SB1-4 の全領域に亘って積分すれば相殺される。つまり、各 SB が有意な非線形磁場成分を含んでいても、それらは、SB が設置されている局所的な領域で相殺されてしまいビームへの影響は殆どないことになるが、実際の状況はそれと異なる。Figure 4-(a) に SB1-4 の全域に亘る s 軸上のミッドプレーン磁場分布 (B_y/B_p vs. s at $y=0$ during injection) を示す。この図からわかるように、SB1-4 は互いに近接しているため、磁場干渉が生じている。加えて、SB1 と SB4 の外側には四極電磁石 (QFL と QDL) が近接して設置されているため、SB1 と SB4 の磁場はそれらとも干渉する。QFL-SB1、SB1-2-3-4、SB4-QDL の間で異なった磁場干渉が生じているために、SB1-4 の磁場分布は同一ではなく、有意な誤差が生じているのが実際の状況となる。また、Fig. 2 に示される通り、バンプ軌道が立ち上がると、ビームの位置が SB1-4 で異なることになる。SB1-4 は有意な非線形磁場成分を含んでいるので、ビームの位置に依存して異なったフィードダウン磁場が生じることにな

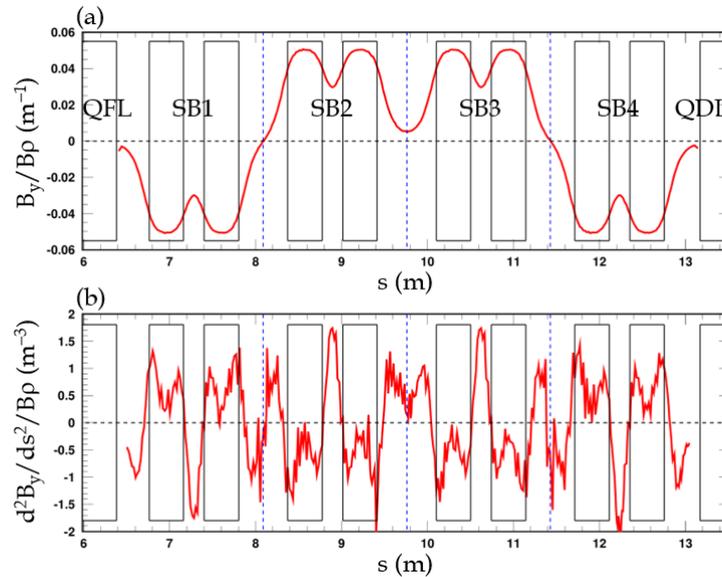


Figure 4: Result of the field measurements for SB1-4: (a) $B_y/B\rho$ vs. s at $y=0$ during injection. (b) $d^2B_y/ds^2/B\rho$ vs. s at $y=0$ during injection.

り、その影響も無視できない。実際のビーム調整では、バンプ軌道が閉じるように、つまり、ビームが感じる二極磁場成分が相殺するように、SB1-4の磁場強度を調整しているが、磁場干渉やフィードダウン磁場の影響のために、高次の磁場成分については、完全には相殺されない状況が生じてしまっている。こうした残存した高次磁場成分がビームに悪影響を及ぼすことになる。

以上では、Fig. 3の磁場分布から評価可能なピュアな多極磁場成分 (b_n) を取り扱ったが、Eq. (1)の第2項で示される非線形磁場成分も考慮する必要がある。つまり、二極磁場成分の2階微分 ($d^2b_0/ds^2=b''_0$) に比例して生じる非線形磁場成分である。SBは、ギャップ長/磁極長の比が大きいいため、Fig. 4(a)に示されるように、 s 軸上の磁場分布にはフラットな領域が殆どない。そのため、Fig. 4(b)に示すように、Eq. (1)の第2項は、 s 軸上のいたるところで有意な値を持つことになるが、この成分も、設計上は、SB1-4の全領域に亘って積分することで完全に打ち消されることになる。但し、実際は、この場合も、磁場干渉やフィードダウン磁場の影響のために、完全には相殺されずに一部が残ってしまう。

入射部に局在するこうした非線形磁場成分、つまり、RCSのラティス対称性(3回対称)から逸脱して存在する非線形磁場成分は、高次の“非”構造共鳴を通してビームに悪影響を及ぼすことになる。Figure 3のミッドプレーン上の磁場分布を4次の多項式でフィットしてEq. (1)の b_n 成分 ($n \leq 4$) を特定し、また、Fig. 4(b)からEq. (1)の b''_0 に比例する成分を算出した結果、SBに内在する非線形磁場成分の中では、 b_2 成分が最も強い値 ($K_2=2! \int b_2/B\rho ds=0.012 \text{ m}^2$) を持つことが明らかになった。この成分のビームへの作用は、以下のHamiltonianで表され、

$$\Delta H(x, x', y, y'; s) = \frac{1}{6} \left(\frac{2! b_2}{B\rho} \right) (x^3 - 3xy^2) \quad (2)$$

第一項を介して $3v_x=l$ と $v_x=l$ 共鳴が、また、第二項を介して $v_x \pm 2v_y=l$ 共鳴が励起されることになる。一方の b''_0 に比例する磁場成分のHamiltonianも以下のように表され、

$$\Delta H(x, x', y, y'; s) = -\frac{1}{2} \frac{b''_0}{B\rho} xy^2 \quad (3)$$

この項も、Eq. (2)の第二項と同様に、 $v_x \pm 2v_y=l$ 共鳴を励起することになる。どの共鳴がどの程度ビームに影響するかは、各磁場成分の強度だけでなく、運転条件(チューンやベータトロン位相の設定など)にも依存するので、数値シミュレーションを行ってその詳細を調査した。

3. 入射バンプ電磁石の非線形磁場成分を取り入れた数値シミュレーション

本章では、実際の運転条件(ビーム強度: 1 MW相当)を模擬すると共に、前章で評価したSBの非線形磁場成分、つまり、Eq. (1)の b_n 成分 ($n \leq 4$) と b''_0 に比例する成分を取り入れて行った数値シミュレーションの結果を用いて、SB1-4の非線形磁場成分が周回ビームに及ぼす影響を考察する。

Figure 5に、入射終了直後のチューン ($v_{x,y}$) とベータトロン振動振幅 ($J_{x,y}$) の2次元相関プロットを示す。その図から、 $v_x=6.33$ に位置する粒子のベータトロン振動振幅が x 方向に増大しているのが見て取れる。 b_n 成分と b''_0 に比例する成分の影響を個別に調査した結果、主に、 b_2 成分(ピュアな六極磁場成分)がそのエミッタンス増大を発生させていることが分かった。前章で述べた通り、 b_2 がSBに内在する非線形磁場成分の中で最も強い成分であり、

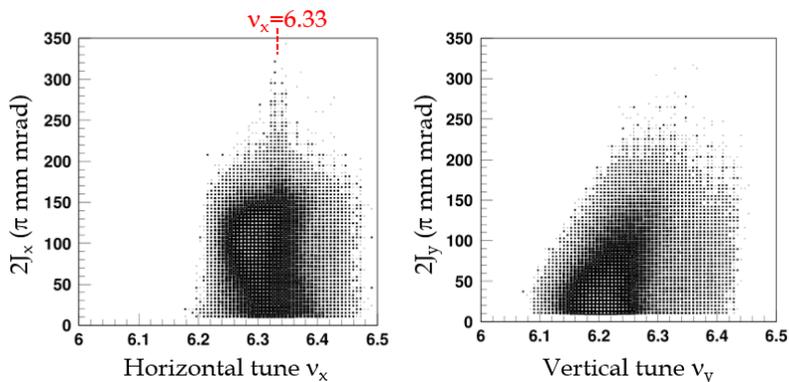


Figure 5: 2d plot of the tune and the betatron action at the end of injection.

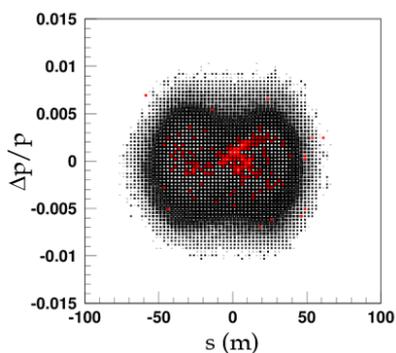


Figure 6: 2d plot of the longitudinal phase space at the end of injection.

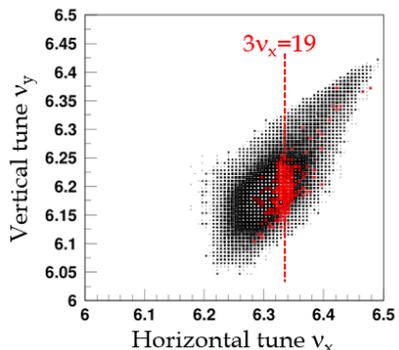


Figure 7: Tune footprint at the end of injection.

その成分が $3v_x=19$ 共鳴を励起してビームに有意な影響を与えていることが明らかになった (b_2 が励起しうるその他の共鳴や b_2 以外の非線形磁場成分の影響は十分小さかった)。

次に、どのような粒子がその共鳴の影響をより強く受けているのかを理解するために、Fig. 5 で観測された x 方向のエミッタンス増大と縦方向振動の相関関係を調査した。Figure 6 に入射終了直後の縦方向位相空間プロット ($\Delta p/p$ vs. s) を示す。また、Fig. 7 に同じく入射終了直後のチューンフットプリント (v_x vs. v_y) を示す。図中の赤色は、Fig. 5 で観測された x 方向にエミッタンス増大した粒子に相当する。Figure 6 に示されるように、エミッタンス増大した

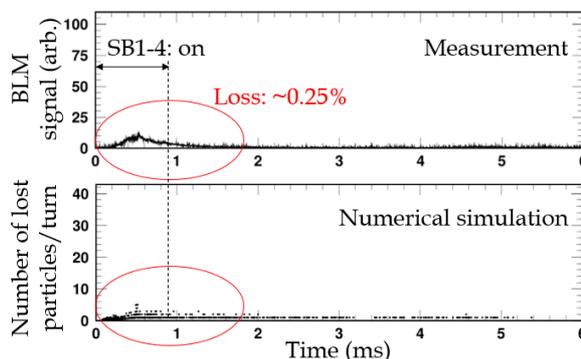


Figure 8: (Upper) Beam loss monitor signal measured at the collimator section. (Lower) Corresponding numerical simulation result.

粒子の大部分が、縦方向位相空間の中心付近に位置しているのが分かる。そのような粒子は中心運動量の近傍で振動するため、運動量変化が小さく、色収差で生じるチューン変動が少ない。また、その領域の縦方向電荷密度は比較的一様であることから、電荷密度に依存して生じるチューンシフトの変動も少ない。つまり、縦方向位相空間の中心付近で振動している粒子のチューンは大きく時間変化しない。Figure 7 に示されるように、そうした粒子の一部が $3v_x=19$ 近傍に長く留まり、その共鳴の影響を継続的に受けて x 方向にエミッタンス増大したと解釈される。

Figure 8 で、ビーム損失の実測結果と数値シミュレーションの結果を比較している。SB1-4 の非線形磁場成分を取り入れることで、入射エネルギー領域で実際に発生しているビーム損失を、計算機上で概ね再現させることができた。つまり、現在、残存しているビーム損失は、SB に内在するピュアな六極磁場成分が励起する $3v_x=19$ 共鳴によって引き起こされる x 方向のエミッタンス増大に起因して発生している、というのが本解析の結論になる。

4. 補正シナリオ

次の課題は、ビーム損失の低減、つまり、SB の非線形磁場の影響を最小化するシナリオを検討する

ことである。

最もシンプルな方法は、ベアチューンを $3\nu_x=19$ 共鳴の下方にまで移動して、その共鳴の影響を回避することであるが、別の共鳴の影響などを勘案するとあまり良い方法とは言えない。

もう一つの方法は、六極電磁石を使って $3\nu_x=19$ の Driving term を相殺することである。最良の方法は、SB 近傍に薄い六極電磁石を追加設置して、SB の六極磁場成分を単純に打ち消すことであるが、RCS の入射部には、薄いといえども電磁石を追加設置できるような空間はすでに存在していない。代替案は、色収差補正用に設置されている六極電磁石を使用することである。現状は、ビーム損失の発生している低エネルギー領域では色収差補正を行っていないので、その時間帯に六極電磁石の一部を $3\nu_x=19$ の補正に使用することは可能である。ここで一つ問題になるのが、 $3\nu_x=19$ が非構造共鳴であるということ。現状の六極電磁石の総数は 18、それらが 6 台ずつ 3 台の電源に接続され (3 ファミリー)、RCS のラティス対称性に従って 3 回対称に配置されている。そのため、現状のままでは、非構造共鳴である $3\nu_x=19$ を補正することはできない。それを可能にするには、少なくとも 2 台の六極電磁石を独立電源に接続させる必要があるが、この案が最も実用性が高いので、現状は、その線に沿って検討を進めている。

5. まとめ

ビームの荷電変換多重入射に用いている 4 台の入射バンプ電磁石に内在する非線形磁場成分が周回ビームに与える影響を議論した。J-PARC RCS では、磁場干渉やフィードダウン磁場の影響で、バンプ電磁石に内在する非線形磁場成分が、4 台のバンプ電磁石の全領域に亘って積分しても完全には相殺されない状況が生じてしまっている。そうした残存した非線形磁場成分がビーム入射中に非構造共鳴を励起して付加的なエミッタンス増大を引き起こし、コンマ数%と僅かではあるがビーム損失を発生させている。RCS のような MW 級の大強度加速器では、そうした僅かなビーム損失であっても有意な機器の放射化を招く恐れがある。バンプ軌道を立ててビームを多重入射するのは一般的な手法であり、同じような状況が他の施設でも起きている可能性がある。今後、入射バンプ系を設計する際には、バンプ電磁石に内在する非線形磁場成分や磁場干渉の影響を定量的に検討し、必要な場合は、設計段階で、非線形磁場成分の効果を相殺するための補正系を予め準備しておくことが肝要、というのが本検討から得られた知見である。

参考文献

- [1] High-intensity Proton Accelerator Project Team, JAERI Report No. JAERI-Tech 2003-044.
- [2] H. Hotchi *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams **12**, 040402 (2009).

- [3] H. Hotchi *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys. **2012**, 02B003 (2012).
- [4] H. Hotchi *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams **20**, 060402 (2017).
- [5] H. Hotchi *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams **15**, 040402 (2012).
- [6] F. Tamura *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams **12**, 041001 (2009).
- [7] H. Hotchi *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams **19**, 010401 (2016).
- [8] T. Takayanagi *et al.*, in Proc. of the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Wako, Japan, 2007, pp. 85–87.
- [9] H. Harada *et al.*, in Proc. of the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Wako, Japan, 2007, pp. 88–90.