

ニュースバルにおける加速と減速

OPERATION AT VARIOUS ENERGIES AT NEWSUBARU

庄司善彦^{#,A)}, 松本卓也^{A)}, 皆川康幸^{B)}, 竹村育浩^{B)}, 竹内裕嗣^{B)}
Yoshihiko Shoji^{#,A)}, Takuya Matsumoto^{A)}, Yasuyuki Minagawa^{B)}, Yasuhiro Takemura^{B)},
Hiroshi Takeuchi^{B)}

^{A)} University of Hyogo, NewSUBARU/Spring-8

^{B)} Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI)

Abstract

We report some new understandings about the acceleration and deceleration process at NewSUBARU. The static problems are about the dependence of beam parameters on the setting energy. The dynamic problems are about the effect of dB/dt terms and the control to overcome the problems. We solved some problems, however the study is still going on.

1. はじめに

電子蓄積リング NewSUBARU の運転モードは、1 GeV (放射線安全規定上の理由で実際は 0.974 GeV に設定) のトップアップ運転と、1.5 GeV (実際は 1.46 GeV に設定) まで加速しての非入射蓄積の 2 つの運転モードが基本である。最近ではこれらに加えて、コンプトン線利用を目的とした更に別のエネルギーの蓄積運転も行われるようになってきた[1]。ここでは 1 GeV 以外のエネルギーにおける蓄積利用運転に必要な加速や減速時の問題点について、最近明らかになった様々な点について報告する。

NewSUBARU の電源、電磁石、および真空ダクトの設計は直流運転を想定しているため、1.0 GeV (入射エネルギー) から 1.5 GeV への加速は、約 10 分かけて緩やかに行っている。この際に lattice parameter の蓄積エネルギー依存、さらに dE/dt 依存が確認されている。加速は 1 GeV から 1.5 GeV までを 13 のエネルギーステップに分割し、それぞれのエネルギーに調整済パラメータを登録している。このパラメータとは COD 補正後の steering 値と、tune 測定に基づいて設定した Q-magnet の値である[2]。ステップ間の変化は local cpu (VME) 上のプログラムが制御し、全ての磁石電流を同時に直線的に変化させている。 dE/dt 依存は補償せず、各ステップで変化スピードを小さく抑えることで許容範囲に納めている。

加減速の問題点としては、(1)静的なエネルギー依存と(2)動的な dE/dt 依存があり、これらは分けて考えることができる。以下、これらについて現状の理解を報告する。

2. 絶対電子エネルギー

蓄積中の電子エネルギーは、ほぼ偏向電磁石の磁場で決まり、この電流設定値はホール素子を使った B-I 曲線の測定に基づいている[3]。しかし近年、コンプトン線を使った絶対エネルギー較正が行われ

た結果、実際の電子エネルギーは設定値より高い事が解ってきた[4]。Figure 1 にこの測定結果を、偏向電磁石に設置したホール素子電圧測定値と合わせたものが Figure 1 である。ホール素子電圧はコンプトン線を使った測定結果の凸凹をきれいに説明する。ここでは、ホール素子電圧 V_{HP} (Volt) に対する、電子エネルギー E (GeV) を下式で仮定した。

$$E = 8.2125V_{HP} - 0.45V_{HP}^2 \quad (1)$$

一方、設定エネルギー E_{SET} (GeV) に対する電磁石電流 I_B (kA) の関数は以下である。

$$I_B = 0.47146E_{SET}[1 + (0.5495E_{SET})^{10.599}] \quad (2)$$

当然ながらこの式の精度が疑われるので、式の非線形部分を 1 GeV の電流値で規格化したものを Fig.1 に破線で重ねた。すると、1.1~1.3 GeV で実測の凸凹と同じオーダーである。単純な関数である Eq. (2) では、非線形性を 1 GeV 付近と 1.4 GeV 付近で過小評価になっていることが解る。Eq.(2) の非線形項は、1.4 GeV では 140 MeV 相当にもなり、free parameter 数の少ない単純な関数にしては良く合っているとも言える

電磁石磁場の絶対値を問題にする以上、ヒステリシスの影響も評価しておく必要がある。磁場測定では、同じ 0.974 GeV の電流でも、1.46 GeV から設定した場合の磁場は、0 GeV から設定した場合より、2.5 MeV 相当強くなるという結果が出ている。Figure 1 の磁場測定と絶対エネルギー測定は、整合性をとるために同じ履歴で測定した。実際には、エネルギー測定、磁場測定ともに、電磁石初期化後に入射エネルギーである 0.974 GeV に設定し、そこから磁場を上げるか下げるかして測定した結果である。

[#] shoji@lasti.u-hyogo.ac.jp

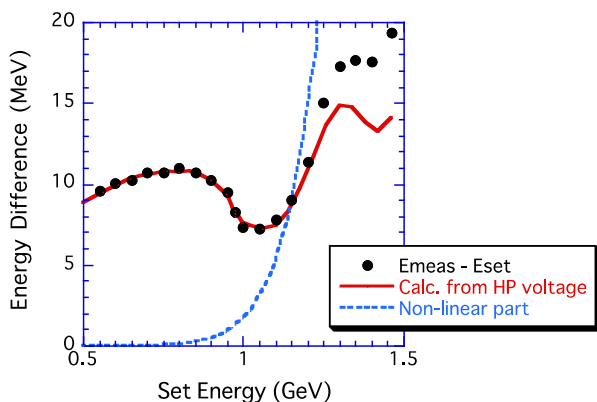


Figure 1: Deviation of the measured electron energy from the set value [3] (black symbols). The red solid line shows the calculated energy deviation from the hole probe voltage. The broken line shows the non-linear term of the equation for setting current (Eq.(2)) normalized with the current at 1 GeV.

3. オプティクスエネルギー依存

3.1 Betatron Tune

ニュースバルにおける 1 GeV から 1.5 GeV までの加速は複数のエネルギーステップに分割され、それぞれのステップで $dE/dt = 0$ の状態で同じ tune (ν_x, ν_y)=(6.28, 2.22)となるように dispersion free section の 2つの Q-magnet families (Q1, Q2)を使って調整してある。調整が必要なのは、modelから計算した tune 設定値は実測とは一致しておらず、しかもエネルギー依存があるからである。設定電子エネルギーに対して model 上の設定 tune を整理したものが Figure 2 である。

この変化を(ν_x, ν_y)平面に書き直したものが Figure 3 であり、やや複雑な動きをしていることが判る。

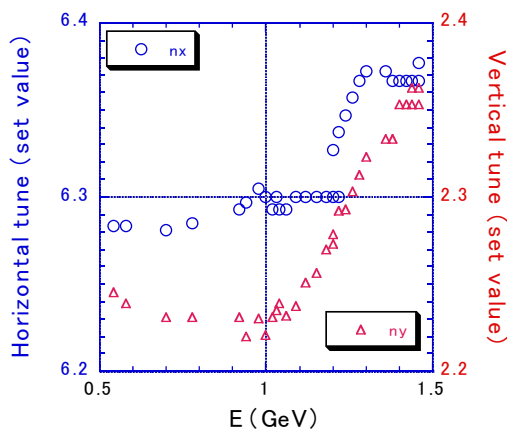


Figure 2: Energy dependence of set betatron tunes where the real tunes are the same.

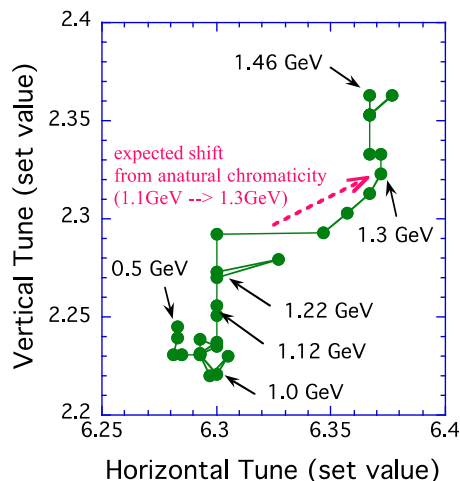


Figure 3: Energy dependence of the set tunes. The broken arrow shows the expected shift from the known error of the current set for the bending magnet.

Figure 1を見ると、1.1GeVから1.3GeVにかけて、偏向電磁石磁場の変化が理想より約0.4%大きい。これによる natural chromaticity ($\xi_{xN} = -11.1, \xi_{yN} = -6.6$)の効果を打ち消すため、Figure 2 に示した設定で Q を強くしているはずであると予想し、0.4%に相当するこの動きを Figure 3 に破線で示した。設定値の変化は予測とあっており、このエネルギー領域の horizontal tune の動きの 2/3 は natural chromaticity で説明できる。また、残るエネルギー依存は主として vertical tune であることが判る。ところが、なぜ vertical tune であるかは不明のまま解っていない。

3.2 Dispersion Function

Dispersion function η および momentum compaction factor α_p は、bending section の 2つの Q-magnet families (Q3, Q4)でほぼ決まっている。Top-up 運転を行なう 0.974 GeV では achromatic cell を構成しているが、モデル上の設定値を一定とすると、これ以外のエネルギーでは achromatic condition が崩れる。

この原因を探るため、様々なエネルギーで dispersion 計測を行った。測定したのは RF 周波数 $f_{RF} = 499.9555 \text{ MHz}$ に対して、周波数を $\pm 1 \text{ kHz}$ 変えた際の軌道変化である。式では以下ようになる。

$$\Delta x = -(\eta/\alpha_p)(\Delta f_{RF}/f_{RF}) \quad (3)$$

測定結果とこの結果を再現するモデル計算を行うと、Q3 と Q4 の強さ K_{Q3} と K_{Q4} の設定値との差がどう変わったか解る。その結果をプロットしたものが Figure 4 である。0.57 GeV で不連続だが、このエネルギーで achromatic condition を再調整し Q3 を 0.801 から 0.77 へ変更したためである。つまり不連続の原因は Q-magnet のヒステリシスである。

通常設定は 2つの family とともに horizontal focusing で、 $K_{Q3} = 0.8081, K_{Q4} = 1.309$ である。1 GeV では K_{Q3} のみ大きい、2011 年に報告した 0.97 GeV の線形ラ

ティスモデルでは low alpha 測定の結果から、これが電磁石電流に依存しない原因不明の off-set であるとしている[6]。今回の結果は、Figure 1 に示した偏向電磁石磁場だけでは説明がつかず、dispersive section に未知のエネルギーに依存する focusing element が存在することを示している。

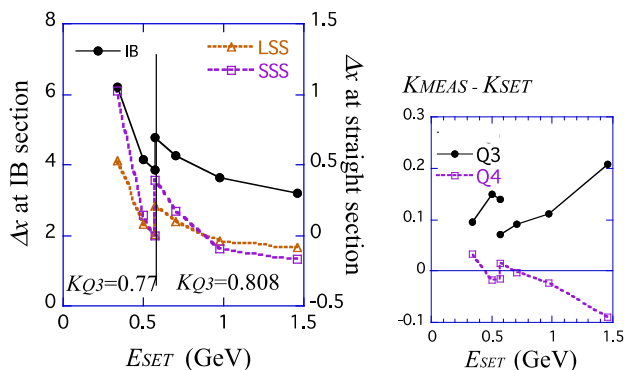


Figure 4: Energy dependence of the Δx and correction factor for Q3 and Q4.

3.2 Focusing at Bending Magnet

Vertical tune を下げる energy dependent focusing の候補は bending magnet の変形であり、この影響をモデル計算しておく。Table 1 に偏向電磁石および逆偏向電磁石に集束力を仮定したときのモデル計算上の tune 変化を示す。このときに dispersion が変化するが、その変化に相当する Q3 と Q4 の変化を計算した結果も示す。Figure 3 から推測した $\Delta v_y \approx -0.15$ に対して、dispersion 変化を再現する Q3 と Q4 の変化量は、Figure 4 に示した値より 1 桁小さい。また偏向電磁石のみが変形して逆偏向電磁石は変形しないという仮定は不自然であり、現象をきれいに説明できる答えは見つかっていない。

Table 1: Tune shifts and equivalent focusing shifts of Q3 and Q4 for the horizontal focusing at bending magnets.

ΔK at B		Δv		ΔK at Q	
NB	IB	x	y	Q3	Q4
0.005	0	+0.011	-0.150	0.013	-
					0.0065
0.005	0.005	+0.020	-0.153	0.0021	0.0063

4. 加速時の変化 (dE/dt 依存)

4.1 加速時の水平軌道変化

$dE/dt \neq 0$ で問題になる軌道変化は主として水平軌道である。このときの COD パターンを Figure 5 として示す。これは逆偏向電磁石がやや強い場合に一致する。

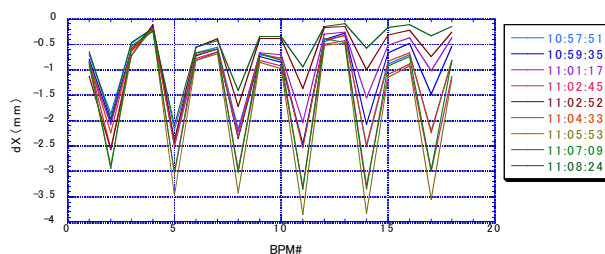


Figure 5: (dE/dt) dependent horizontal COD shift.

0.974GeV から 1.46GeV まで加速する際の BPM8 (Figure 5 の左から 3 番目の棘) における位置変化を Figure 6 に示す。上向きスパイクは加速ステップの間で $dE/dt \approx 0$ になり、ビーム軌道が中心に戻るためである。通常の加速中にはビーム軌道が reference 軌道から約 7mm ずれている。常識的には軌道変化は Figure 6 に示す $(dE/dt)/E$ に比例するはずだが、後述するように実際には比例関係はなく、高いエネルギーで軌道変化が小さい。

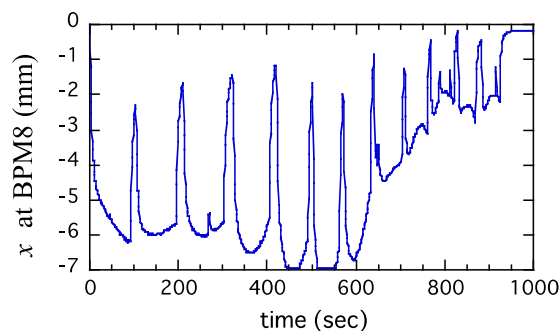


Figure 6: Horizontal orbit shift during the acceleration.

$dE/dt \neq 0$ で問題になる軌道変化は主として水平軌道である。このときの COD パターンは逆偏向電磁石がやや強い場合に一致する。0.974GeV から 1.46GeV まで加速する際の BPM8 における位置変化を Figure 5 に示す。上向きスパイクは加速ステップの間で $dE/dt \approx 0$ になり、軌道がゼロに戻るためである。常識的には軌道変化は Figure 7 に示す $(dE/dt)/E$ に比例するはずだが、高いエネルギーで軌道変化が小さい。

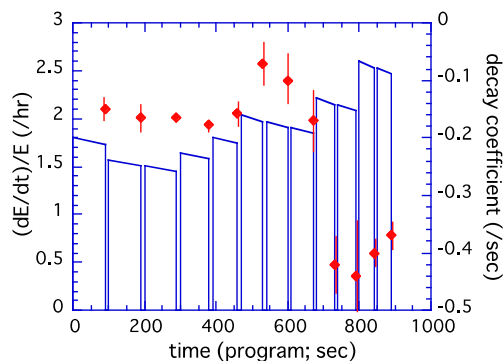


Figure 7: $(dE/dt)/E$ (line) and decay coefficient (circles with error bars).

Figure 6 に示した軌道変化のゼロに戻るスパイクが丸みを帯びている点に注目し、これを拡大したものが Figure 8 である。電磁石電流は一定であるが、軌道は緩やかにある値に落ち着く動きを示す。この変化は指数関数で fitting できる。各エネルギーで fitting によって得られた decay coefficient を Figure 7 に示す。低いエネルギーでは 10 秒に近い時定数であるが、高いエネルギーでは 2~3 秒と応答が速くなる。偏向電磁石と逆偏向電磁石ヨークはともに鉄ブロックからできているが、磁石長が異なるために時定数は偏向電磁石が長くなったと考えている。原因は確認していないが、時定数の差は別測定でも観測できている。

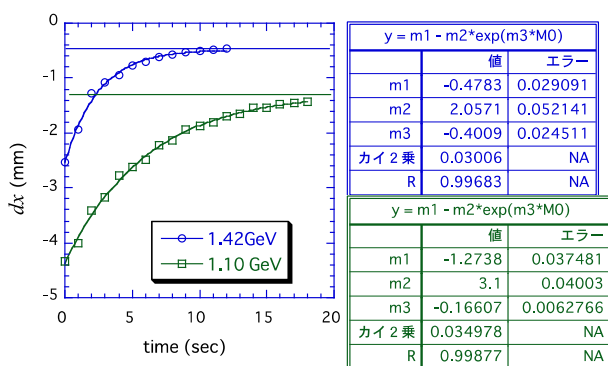


Figure 8: x where the magnet current was constant.

偏向電磁石の磁場変化測定から、偏向電磁石磁場が Figure 7 に相当するエネルギー依存の時定数を持つことが確認された。つまり、軌道変化の主原因は、偏向電磁石磁場が逆偏向電磁石磁場より長い時定数を持つことにある。

4.3 加速時のチューン変化

エネルギーが変化する加速時にはチューンも変化し、 ν_x は高く、 ν_y は低く変化する。この様子を Figure 9 に示す。チューン変化には2つの要素が関係している。(1) 軌道変化に伴うエネルギー変化に対応した chromaticity に比例する変化と、(2)偏向電磁石磁場の变化の遅れに対応する natural chromaticity に比例する変化である。

$dE/dt \neq 0$ での chromaticity 変化は小さいことが別の測定から解っている。これを使って、測定したチューン変化 (Figure 9 の白ヌキシンボル) から前節(1)の効果を計算で除いたチューンの計算値も示す (塗りシンボル)。現時点では(1)と(2)は打ち消し合う方向に働いており、単に軌道変化を補償しただけであれば、加速中のチューン変化は返って大きくなってしまふことが解る。

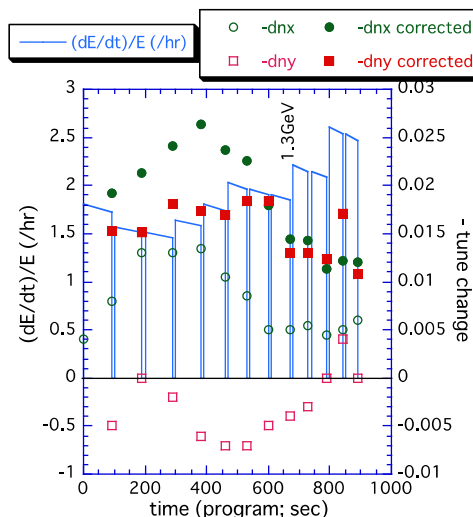


Figure 9: Tune shifts during the acceleration.

4.2 加速制御プログラムの改修テスト

ステップ間の直線的電流変化を制御しているのは、local cpu (VME)上のプログラムで、em (equipment manager)と呼んでいる。今回このプログラムを改修して、やや複雑な動きができるようにした。偏向電磁石電源の構成は Figure 10 のようになっており、逆偏向電磁石のみに通電する調整用補助電源がある。今回の改修でこの補助電源のみ、1ステップの電流変化を直線変化ではなく、Figure 11 に示すようなパターンも可能とした。補助電源電流を調整することで、偏向電磁石と逆偏向電磁石の時定数の差に依る軌道変化を軽減できるはずである

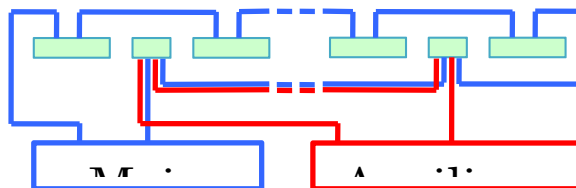


Figure 10: Connection of power supplies to the normal bending magnets (NB) and inverse bending magnets (IB).

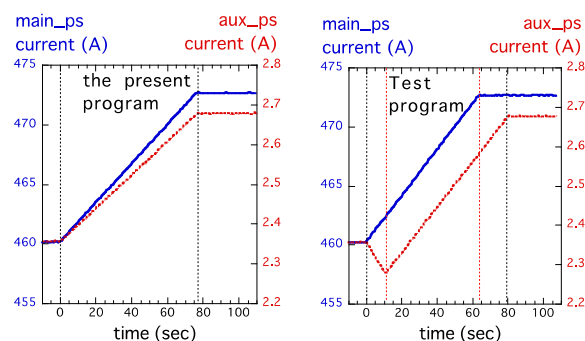


Figure 11: Raising pattern of the auxiliary current supply for the inverse bends (broken line) and those of the other current supplies (solid line).

Figure11 に示した 2 種類の電流変化パターンで 0.974GeV から 1GeV までビームを加速し、分散部の水平ビーム位置(x at bpm8)と、チューンの変化を測定した。その結果を Figure 12 に示す。ここで、位置変化は加速開始時と終了時の位置が同一となるように補正を加えてある。

時間の関係でパラメーターを調整してないが、軌道のずれはかなり小さくなる。電流変化の調整自由度を上げて更に調整すれば、軌道変化は更に小さくすることができる。これはつまり、より素早く加速できるということである。

一方でチューンの変化は 4.3 節の予想通り、水平、垂直ともプラス方向へ大きくなってしまった。Quadrupole families の電流パターンをやや遅らせるようにプログラムを組めば、チューン変化も小さくなるはずである。

- [2] 久岡義典, 尾崎翠, 橋本智, 庄司善彦, 安東愛之輔, 「ニュースバルにおける電子ビーム軌道の変動」、Proc. 第 2 回日本加速器学会年会・第 30 回リニアック技術研究会、2005/7/20-22, pp.570-572.
- [3] 安東愛之輔 「ニュースバル蓄積リングの電子エネルギーと偏向電磁石励磁電流」 NewSUBARU Technical Note, Nov. 19, 1999.
- [4] Hiroaki Utsunomiya, *et al.*, "Energy Calibration of the NewSUBARU Storage Ring for Laser Compton-Scattering Gamma Rays and Applications", IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol.61, No 3, pp.1252-1258 (2014).
- [5] 庄司善彦, 「ニュースバルの線形ラティスマデル」、第 8 回日本加速器学会年会, (8/1-3, 2011).

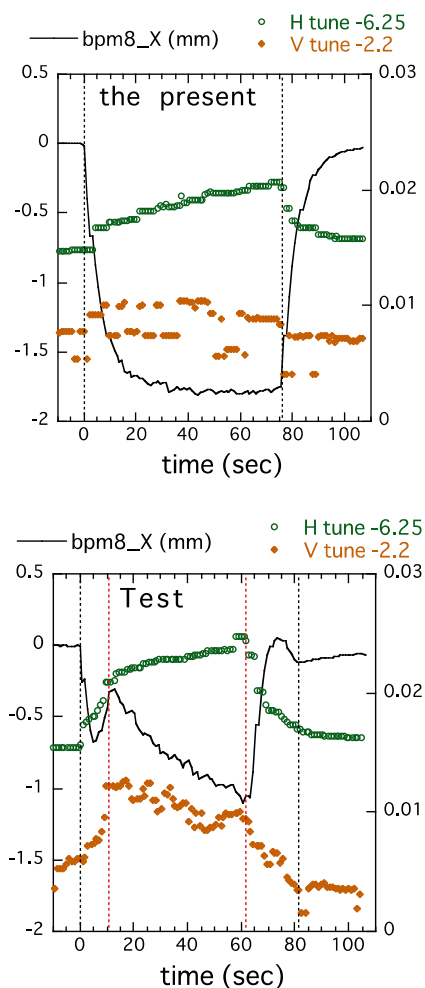


Figure 12: Shifts of the horizontal beam position (bpm8 X) and tunes during one acceleration step from 0.974 GeV to 1 GeV.

参考文献

- [1] 宮本 修治, *et al.*, 「蓄積リングレーザー Compton 散乱ガンマ線による利用研究」、Proc. 第 11 回日本加速器学会年会、2014/8/9-11, pp.475-478.