

# OFF-MOMENTUM TOP-UP INJECTION INTO NEWSUBARU

Yoshihiko Shoji <sup>#,A)</sup>, Yasuyuki Minagawa<sup>B)</sup>, Yasuhiro Takemura<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> NewSUBARU/SPring-8, LASTI, University of Hyogo

1-1-2 Kouto, Kamigori-cho, Ako-gun, Hyogo, 678-1205

<sup>B)</sup> Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI)

1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo, 679-5198

## Abstract

NewSUBARU is temporarily operated with non-achromatic mode for the research using chromaticity modulation. At this special mode, the ring energy is displaced from the injected beam energy (off-momentum injection) in order to obtain good injection efficiency. The finite dispersion at the injection point transfers a part of betatron oscillation to a synchrotron oscillation. Using this technique, it became possible to inject new beam keeping the stored beam, that was the necessary condition for the top-up operation.

## ニュースバルへの運動量差を利用したトップアップ入射

### 1. INTRODUCTION

ニュースバル[1]では、交流6極を用いたクロマティシティー変調の応用を研究している。その際には通常の放射光利用運転とは異なり、直線部に有限なディスパージョンを持つ非アクロマティックラティスを用いる。ところがこのラティスではアパーチャーが十分でなく、新しくビームを入射しようとすると、既に蓄積していたビームが廃棄されてしまう問題があった。これを解決する為に提案したのが入射点のディスパージョンと運動量差を利用した入射である [2]。

入射ビームの運動量がリングと異なる場合、ディスパージョンに従ってベータトロン振動中心がズレる。このズレを使って、入射ビームのベータトロン振動を小さくできる。最も単純な入射点のモデルで、入射ビーム軌道の入射バンプ軌道からのズレを  $x_D$ 、入射ビームのエネルギーのズレを  $\delta_{INJ}$ 、入射点のディスパージョンと  $\beta$  関数を  $\eta$  と  $\beta_x$  とする。入射ビームのベータトロン振動の大きさ  $J_x$  は下式になる。

$$J_x = (x_D - \eta \delta_{INJ})^2 / \beta_x \quad (1)$$

ベータトロン振動が小さくなる一方でシンクロトロン振動が始まるので、ベータトロン振動の一部をシンクロトロン振動に移した事になる。

この入射方式提案後、クロマティシティー変調導入の目的であった、横方向不安定性抑制の研究[3]が一応の成果を得て終了したため、この入射方式はテストされないままになった。ところが 2019 年に不安定性抑制の研究を再開し、2010 年には THz コヒーレント放射への応用研究[4]が提案されるという状況になり、再びこの入射方式を試す事になった。

### 2. INJECTION INTO NewSUBARU

#### 2.1 Non-Achromatic Lattice of NewSUBARU

<sup>#</sup> shoji@lasti.u-hyogo.ac.jp

ニュースバルの主要パラメーターを Table 1 に示す。更に通常運転時と、非アクロマティック運転時の入射点のパラメーターを Table 2 に比較して示す。チューン、クロマティシティーやモーメンタムコンパクションファクターは、同じ値になるように設定している。非アクロマティックラティスの Twiss パラメーターとディスパージョンを Fig.1 に示す。

Table 1: Basic parameters of NewSUBARU

Injection Energy	0.976 GeV
Circumference $L_0$	117.8 m
Betatron tune: $\nu_x / \nu_y$	6.30 / 2.23
Chromaticity: $\xi_x / \xi_y$	3.4 / 5.8
Synchrotron tune: $\nu_s$	0.0024
Momentum compaction factor: $\alpha_p$	0.00136
Septum wall from the beam center: $x_{MAX}$	+21 mm
Septum thickness: $\Delta x_{SEP}$	3 mm

Table 2: Parameters of the NewSUBARU at the injection point at 1.0 GeV, with the achromatic lattice (normal user operation) and the non-achromatic lattice.

Lattice	achromatic	non-achromatic
Natural emittance	50 $\pi$ nm	80 $\pi$ nm
Dispersion	0 m	1.1 m
Dispersion angle $\eta'$	0	0.05 rad.
Beta function $\beta_x / \beta_y$	9.36/11.57	10.0/15.9
Alpha function $\alpha_x / \alpha_y$	-0.035/-0.14	-0.15/-0.19
Horizontal beam size $\sigma_x$	0.6 mm	1.03 mm

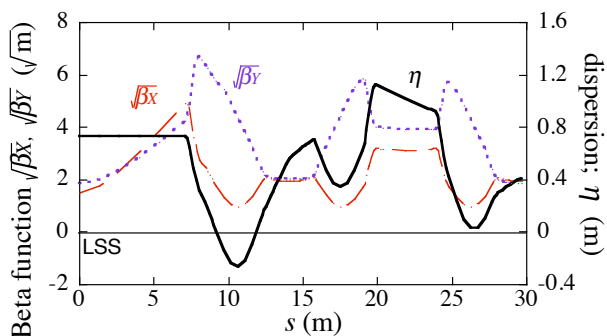


Figure 1: Beta functions and dispersion function of non-achromatic lattice in 1/4 of NewSUBARU. The solid, the dashed and the dotted lines show  $\eta$ ,  $\sqrt{\beta_x}$  and  $\sqrt{\beta_y}$ , respectively. The left end is the center of the long straight section. The AC sextupole will be set at the location:  $s=5.87\text{m}$  in this figure.

## 2.2 Beam Injection System of NewSUBARU

ニュースバルでは4台のパルスバンプ電磁石を使い、Figure 2のようなバンプ軌道を作る設計である。時間幅は1msで、リング2周よりやや長い。実際の利用運転ではFigure 2に示す閉じた軌道ではなく、入射点への入りと出で差をつける。この差によって、軌道差を入射ビームのベータatron振動と蓄積ビームのベータatron振動に振り分けて入射効率を上げている。

蓄積ビームバンプ軌道中心からセパタム内壁までの距離を蓄積ビームの $4\sigma_x$ にとると、入射点へ入るバンプの高さは17mm以下という事になる。実際はかなり細かな調整を行い、挿入光源を稼働させない状態なら100%近い入射効率を実現している。

非アクロマティックでは、蓄積ビームの入射点に於けるビームサイズが大きく、更にダイナミックアパーチャーも小さいと考えられるので、入射が難しくなる。

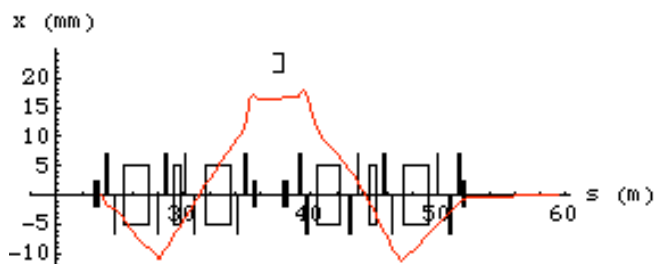


Figure 2: Closed injection bump of NewSUBARU. The height at the injection point is 16mm. Four small squares indicate the locations of four pulse bump magnets. The top clear box shows the location and the thickness of the septum. The stored beam goes from the left to the right.

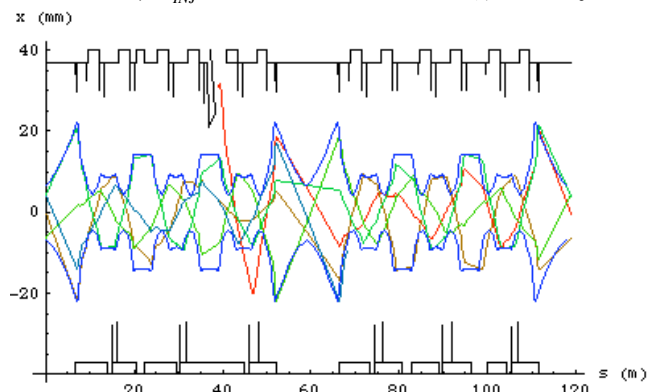
## 2.3 Calculation

まずは線形ラティスで入射軌道を計算し、運動量差の効果を確認したものがFigure 3である。バンプ

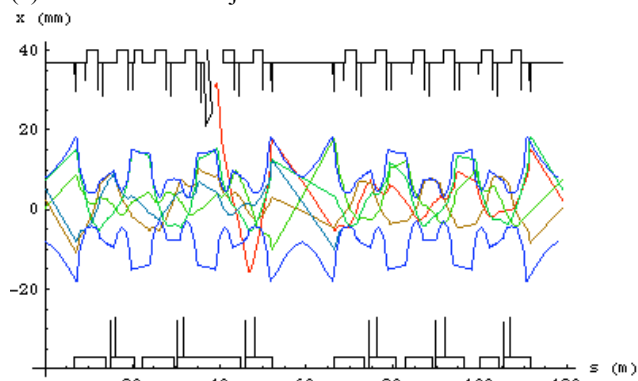
の高さは16mmで $\delta_{inj}=0.5\%$ とした。

運動量差をつけると、青で示したビーム振動のエンベロップが小さくなる事が解る。図からは十分なアパーチャーがあるように見えるが、実際にはダイナミックアパーチャーが効いていると考えられるので、小さなエンベロップが望ましい。

更に、入射直後に一回だけ通過する軌道にはフィジカルアパーチャーが問題になる。この場合は $s=46\text{m}$ に位置で、リングと同じエネルギーでは-18.1mmだが、 $\delta_{inj}=0.5\%$ では-16.2mmに縮小した。



(a) on-momentum injection.



(b) off-momentum injection by +0.5%

Figure 3: Orbit excursion of the injected beam in cases of (a) on-momentum injection and (b) off-momentum injection. The injection point (the exit of the pulse septum) is at  $s=38\text{m}$ . The red, brown, light green, dark green and dark blue lines are the orbits at the 1-st, the 2-nd, the 3-rd, the 4-th and the 5-th turn after the injection, respectively, during which the pulse bump field was active. The two blue lines show the envelope of the orbit excursion after the 5th turn, which include the spread by the synchrotron oscillation but we ignored the radiation damping. The black lines on the top and the bottom show the physical acceptance of the ring.

## 2.4 Experiment

実際の施設では、入射器はSPring-8と共用なので運転期間中はエネルギーを変える事ができない。その代わりにリングのエネルギーを変える(磁場を変える)ことで運動量差を作った。

Figure 4は6種類の入射バンプに対してリングエ

エネルギーを変え、入射効率の変化を見た結果である。バンプを低くする ( $x_D$  を大きくする) と、最適運動量差  $\delta_{INJ}$  が拡大する。計算では  $\eta \approx 1$  m なので、バンプ高 4mm に対して最適  $\delta_{INJ}$  は -0.4% 変化だが、測定結果は -0.2% 程度であった。

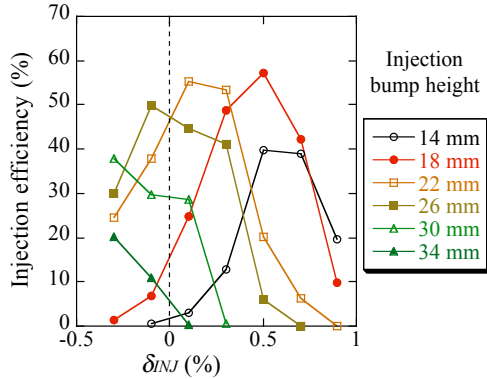


Figure 4: Dependence of the injection efficiency on the ring energy.

通常の運転では 21~22mm のバンプの高さが必要だが、閉じたバンプを使うと蓄積ビームが落ちてしまう。已むなく閉じていないバンプで入射するので蓄積ビームも入射直後からベータトロン振動を開始する。しかし、十分低いバンプで入射できるならば、利用上望ましい閉じた入射バンプを使う事ができるはずである。Figure 5 は、線形モデルの計算上ではあるが閉じた入射バンプを使い、100 mA トップアップを試みた際の蓄積電流変化である。このとき  $\delta_{INJ} = 0.7\%$ 、バンプの高さは 15mm、入射効率は約 40% であった。ベータトロン振動数など様々なパラメーターを調整すれば、更に良い状態で運転可能であろう。

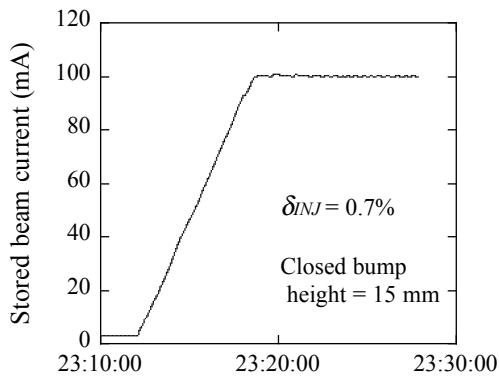


Figure 5: Stored beam current during the test of 100 mA top-up operation using the closed injection bump.

ここでは、特殊ケースである non-achromatic lattice を扱ったが、通常運転は achromatic lattice である。しかしエミッタンス等への影響が小さい範囲で achromatic 条件を崩し、運動量差を付けることで入射改善の可能性がある。これは今後の課題である。

### 3. INJECTION INTO LOW $\alpha_p$ LATTICE

ここで、amplitude dependent circumference shift[5, 6] について検討しておく。通常は問題にならないが、quasi-isochronous lattice (低い  $\alpha_p$ ) への入射では重要な要素となりうる。

ベータトロン振動の振幅依存周長変化はクロマティシティーによって決まる。この周長変化を打ち消す為にシンクロトロン振動の中心エネルギーが

$$\delta_0 = (2\pi/\alpha_p L_0)\xi_x J_x. \quad (2)$$

へと変わる[7]。この場合、シンクロトロン振動を起こす運動量差は

$$\delta_{INJ} - \delta_0 \quad (3)$$

となる。ニュースバルの場合を  $x_D - \eta\delta_{INJ} = 7$  mm として計算すると shift  $\delta_0 = 0.06\%$  である。量的に大きいとは言えないが、シンクロトロン振動を小さくする方向である。

低  $\alpha_p$  の場合ではこの影響が大きくなり、入射によるシンクロトロン振動が起きない条件が存在する。

$\delta_{INJ} = \delta_0$  とすると、式(1)と式(2)から

$$\delta_{INJ} = (2\pi/\alpha_p L_0)\xi_x (x_D - \eta\delta_{INJ})^2 / \beta_x \quad (4)$$

が得られる。これを幾つかの場合で見てみる。

- $\xi_x = 0$  の場合。周長変化は消え、シンクロトロン振動が起きないエネルギーは  $\delta_{INJ} = 0$  である。
- $\alpha_p = 0$  の極限。シンクロトロン振動が起きないエネルギーは  $\delta_{INJ} = x_D / \eta$  であり、このときベータトロン振動振幅もほぼゼロである。
- 上記 2 例の間で  $\xi_x / \alpha_p$  が十分小さい場合。比較的現実性があり

$$\frac{\eta\delta_{INJ}}{x_D} \approx 2\pi\xi_x \left( \frac{x_D}{\beta_x} \right) \left( \frac{\eta}{\alpha_p L_0} \right). \quad (5)$$

である。

ここで指摘したいのは、シンクロトロン振動を起こさないエネルギーはリングのエネルギーとは異なる点である。さらに低  $\alpha_p$  ではこの効果が大きく現れる為、入射ビームには運動量差が必要となるだろう。

### 参考文献

- [1] A. Ando, *et al.*, Jour. Synch. Rad.5 (1998), 342.
- [2] Y. Shoji " OFF-MOMENTUM INJECTION INTO AN NON-AQCHROMATIC LATTICE ", in the Proc. of the 2nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, July 2005, [http://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj2\\_lam30/Proceedings/21P054.pdf](http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2_lam30/Proceedings/21P054.pdf).
- [3] T. Nakamura *et al.*, " SUPPRESSION OF TRANSVERSE INSTABILITIES BY CHROMATICITY MODULATION ", IPAC'10.
- [4] Y. Shoji, Phys. Rev. ST-AB 13, 060702 (2010).
- [5] L. Emery, in the Proc. of International Conference on High Momentum Accelerators, p.1172 (1993).
- [6] Y. Shoji, Phys. Rev. ST-AB 8, 094001 (2005).
- [7] Y. Shoji, *et al.*, " AMPLITUDE DEPENDENT ORBIT SHIFT AND ITS EFFECT ON BEAM INJECTION ", IPAC'11.