

ニュースバルにおける六極電磁石追加によるビーム寿命改善

IMPROVEMENT OF BEAM LIFETIME BY ADDITIONAL SEXTUPOLE FAMILIES AT NEWSUBARU

皆川康幸^{#,A)}, 竹村育浩^{A)}, 庄司善彦^{B)}
 Yasuyuki Minagawa^{#,A)}, Yasuhiro Takemura^{A)}, Yoshihiko Shoji^{B)}

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

^{B)} LASTI/NewSUBARU, University of Hyogo

Abstract

The electron storage ring NewSUBARU has been operated with 1.0 GeV top-up mode. Following the request for higher stored beam current, we have adjusted sextupole families at dispersion free sections for the long beam lifetime. As a result, we succeeded to raise the top-up beam current from 250 mA to 300 mA. In this paper, we report results of machine studies for the improvement of beam lifetime in chronological order.

1. はじめに

ニュースバル蓄積リングでは、1.0GeV のトップアップ運転での利用運転が行われており、利用時の蓄積電流値を上げる事が望まれていた。ニュースバルでトップアップ運転のビーム電流値を決めているのは、入射電荷量に対する放射線安全上の制限であり、蓄積電流の維持に必要な入射効率とビーム寿命の改善が蓄積電流値の増加に繋がる。

これまで入射効率については、入射ビームトランスポートラインでの Q-scan による入射マッチング等を行う事で改善はなされており、挿入光源非稼働時 (ID gap open) で入射効率 95%、稼働時 (ID gap close) で 80%を達成している。これにより、トップアップ運転が維持出来るビーム電流値が 2011 年に 220mA であったのが、2012 年に 250mA と上がってきた^[1]。

より高い蓄積電流での安定したトップアップ運転を維持する為には、長尺アンジュレータ(LU)稼働によるビーム寿命の短縮と、入射効率劣化の改善が必要になっている。このために dispersion free section に設置した六極電磁石によってダイナミックアパーチャを改善してビーム寿命を増加させることを試みてきており、本報告ではこの改善の様子を時系列順で記していく。六極電磁石追加によるダイナミックアパーチャの簡易な計算も行っているの、実際の結果との比較も示す。

ビーム寿命が伸びた事で 300mA のトップアップ運転を定常的に行えるようになったことを最後に記す。

2. 六極電磁石の設置位置

ニュースバルは、6つの偏向セルを持つレーストラック型で、長直線部が2箇所、短直線部が4箇所ある。Dispersion free の短直線部には defocus (S1)、

focus (S2)の六極電磁石が1直線部当たり2台ずつあり、長直線部には defocus (S3)の六極電磁石のみが1直線部当たり2台設置されているが、focusing 六極電磁石は無かった。ただ、長直線部のひとつに設置した LU の前後には多機能補正電磁石を置き、focus (S₁)の六極磁場を発生する補助コイルを巻いてあった^[2]。そこで、2013 年春に長直線部の垂直ステアリング電磁石を多機能電磁石に交換し、focusing 六極電磁石 (S4)として機能するようにした。Figure 1 に現在の六極電磁石の設置位置を示す。

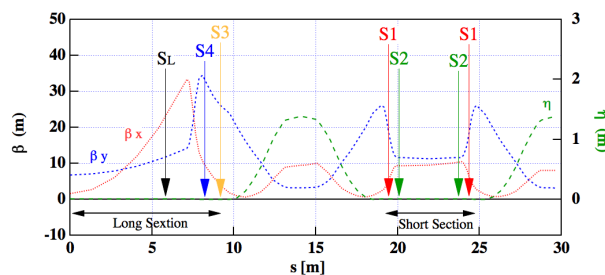


Figure 1: Betatron and dispersion functions and locations of sextupole magnets in a quarter of the ring.

3. 六極電磁石の最適化

3.1 S1 と S2 の最適化

2011 年 10 月時点では、S1 と S3 が共通の電源で動作しており、dispersion free section の六極電磁石は 2ファミリーだけであった。このとき、ID gap close (LU = 34.8mm、SU = 40.0mm) の状態で、ビーム寿命が伸びる最適な S1 (S3=S1)と S2 を調査している。Dispersion section の2ファミリーはクロマティシティーを決めているので、調整対象にはしない。S1 と S2 のキック値を変化させた時の I_τ (蓄積電流とビーム寿命の積) を等高線表示で示したのが Figure 2 である。従来からの利用運転時の値は S1 = -10.1 と S2 = 5.9 であった。ここで数値の+は focus、-は

[#] minagawa@spring8.or.jp

defocus を表している。

Figure 2 では $S1 (S3) = -14.1$ 、 $S2 = 9.9$ に設定するとビーム寿命が最も伸びるが、この状態で入射を行うと入射効率は利用運転時のときより 5%ほど悪くなってしまった。長寿命の設定と高入射効率の設定が一致せず、このままではトップアップ運転に使用出来ないことが分かった。

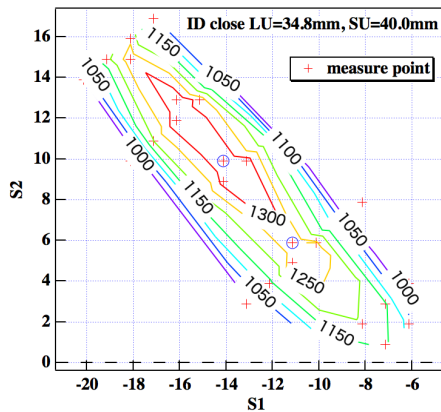


Figure 2: Contour line plot of I_t in $S1 \times S2$ plane.

3.2 S3sub による調整

2012 年 1 月、 $S1$ と $S3$ の電源は共通のままであったが、 $S3$ に補助コイルを巻き ($S3_{sub}$ と呼ぶ)、それを調整してビーム寿命の変化を見てみた。 $S3_{sub}$ に電流を流すと 10A まではビーム寿命が伸びたが、それ以上は飽和してビーム寿命は伸びなかった。

そこで $S3_{sub}$ を 10A に固定して、 $S1 (S3)$ と $S2$ のキック値を変化した時の I_t を等高線表示で示したのが Figure 3 である。Figure 3 では $S1 (S3) = -16.1$ 、 $S2 = 11.9$ に設定するとビーム寿命が最も伸びる。このまま入射をすると蓄積ビームを削ってしまったが、入射バンプの調整によってこれを解消し、入射効率も利用運転時と同程度になった。

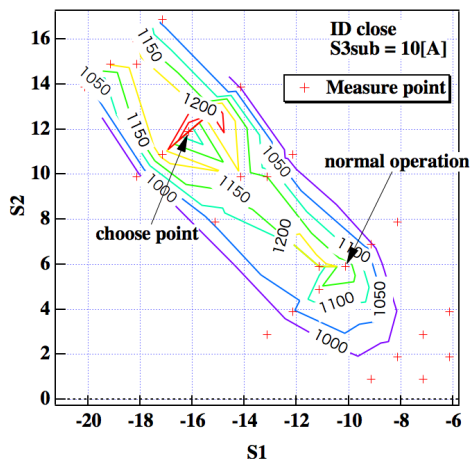


Figure 3: Contour line plot of I_t in $S1 (S3) \times S2$ plane with fixed $S3_{sub}=10A$.

3.3 S3 を独立させて調整

$S3_{sub}$ の調整から、 $S3$ の電磁石を $S1$ ファミリーから独立させる有効性が分かったため、2012 年夏に $S3$ を $S1$ から切り離して独立で操作出来る電源に接続した。 $S3_{sub}$ の操作でビーム寿命が最も長くなった $S1 = -16.1$ 、 $S2 = 11.9$ に設定しておき、 $S3$ の最適値を測定したのが Figure 4 である。 $S3 = -8.1$ の設定でビーム寿命が最も伸びている。

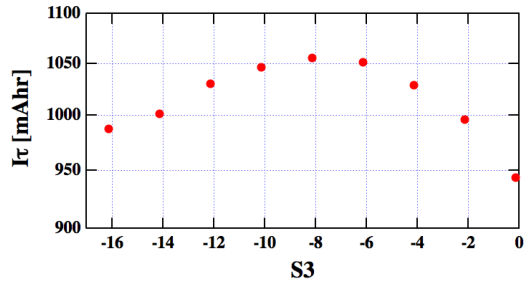


Figure 4: Optimization of $S3$ for larger I_t .

3.4 S3 を分離して調整

長直線部は 2 箇所あり、それぞれ LU と Optical Klystron (OK) が設置されているが、利用運転は LU のみを稼働させて LU 側と OK 側のリング対称性が崩れた状態で運転している。LU はプラナー型なので、特に垂直方向の対称性の崩れが大きい。これに対応させる為に $S3$ を 2 ファミリーに分けて、LU 側を $S3_{LU}$ 、OK 側を $S3_{OK}$ として、各々独立した電源で制御することにした。

最適値を調査する際には、LU 側と OK 側のバランスを調整パラメーターとするように、 $S3_{LU} + S3_{OK} = -16.0$ になる条件を課した。因に、この条件を外すと、入射効率が劣化または入射が不安定になった。Figure 5 に $S3_{LU}$ と $S3_{OK}$ を個々に調整したときの結果を示す。

この結果では $S3_{OK} = -12.0$ 、 $S3_{LU} = -4.0$ のビーム寿命が最も伸びて、前節で最もビーム寿命が長かった $S3_{OK} = S3_{LU} = -8.1$ よりも、約 6%伸びた。利用運転では多機能電磁石の Sextupole 成分 (S_L) も使用しているので、この調整でも S_L を使用するとビーム寿命が伸びる組み合わせが変わり、 $S3_{OK} = -10.0$ 、 $S3_{LU} = -6.0$ で最もビーム寿命が伸びた。

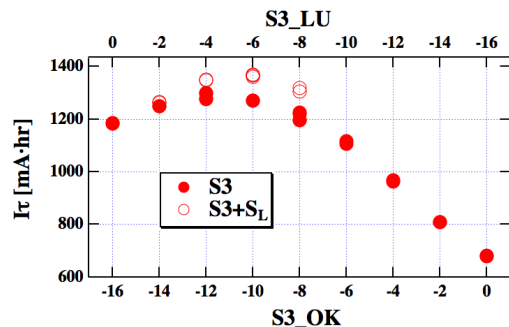


Figure 5: Optimization of $S3_{LU}$ and $S3_{OK}$.

この設定で ID gap close の状態での入射効率は $S3_OK = S3_LU = -8.1$ の時とほぼ同じであったが、ID gap open の時の入射効率は $S3_OK = S3_LU = -8.1$ の設定の時の入射効率までは届かなかった。ID gap open ではリング対称性が保たれており、S3 の対称性を崩すのは逆効果であったと解釈出来る。

3.5 追加した S4 を使用して調整

2013 年 7 月に S4 の最適化を行った。初期設定は利用運転時の設定とし、 $S3_OK = -10.0$ 、 $S3_LU = -6.0$ の設定で S_L も励磁していた。測定結果を Figure 6 に示す。この結果では、S4 を変更してもビーム寿命は伸びる事はなかった。

S4 と同じ役割の短直線部の S2 と組み合わせ、ビーム寿命の 2 次元マップをとった。最適な S4 と S2 に強い相関は見られたが、 $S4=0$ の場合と比較して、有意なビーム寿命の改善は得られなかった。

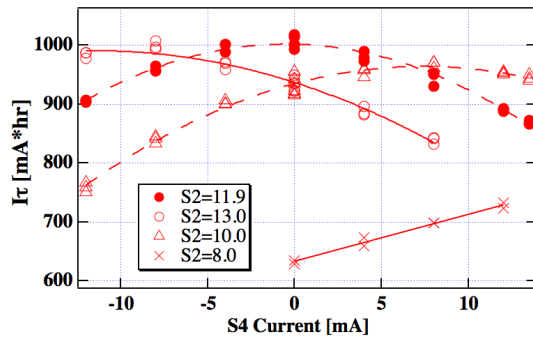


Figure 6: Optimization of S4 and S2.

4. ダイナミックアパーチャの計算

前の章では実測結果を示したが、各設定でダイナミックアパーチャを計算し、実測結果を説明出来るかを検討することにした。

4.1 計算について

ダイナミックアパーチャの計算には Mathematica による手製プログラムを用いた。線形電磁石のみのセクションは Transfer matrix で計算し、6 極電磁石のキックは thin lens 近似とした。これに LU が close 時の垂直集束力を加えた簡易な計算である。Tune は実際の運転と同様に LU が open の時とほぼ同じ値になるように四極電磁石の値を調整している。ビームの初期条件は LU 中心位置の x 、 y をパラメータとし、500 回転出来るギリギリをダイナミックアパーチャ境界としている。

4.2 S1 と S2 の最適化の計算

3.1 節で行った S1 と S2 の最適値を求める結果について計算を行ってみた。その結果が Figure 7 である。実際の測定結果では $S1 = -14.1$ 、 $S2 = 9.9$ に設定すると最もビーム寿命が伸びたが、計算では $S1 = -14.1$ 、 $S2 = 9.9$ のダイナミックアパーチャが最も小さ

く、実測結果を説明出来なかった。

4.3 S3 の最適化の計算

3.3 節で行った S3 の最適値を求める結果について計算を行ってみた。その結果が Figure 8 である。実際の測定結果で $S3 = -8.1$ の方がビーム寿命が伸びており、計算結果でもダイナミックアパーチャは広がっている。簡易な計算ではあるが、リング非対称性の影響に関しては実際の結果を説明できていると考えられる。

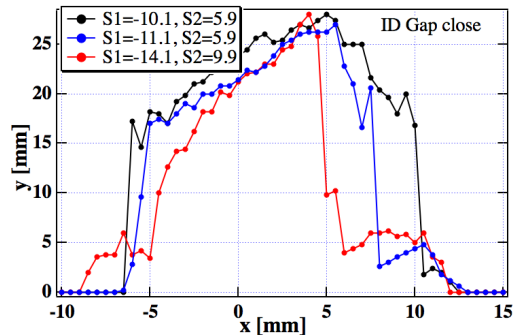


Figure 7: Calculation of dynamic aperture for two setting parameters of S1 and S2.

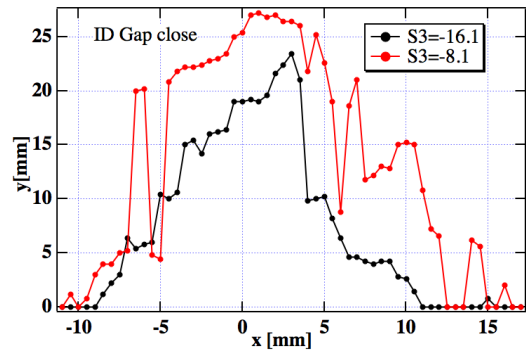


Figure 8: Improvement of dynamic aperture by adjusting S3.

4.4 議論

ビーム寿命は、我々が計算した on momentum のダイナミックアパーチャだけでは評価出来ない。垂直ビームサイズに対するビーム寿命変化の測定結果から、1.0GeV 利用運転時にはビーム寿命の 6 割強が Touscheck 寿命の寄与であると考えられている。従って、計算による寿命評価には momentum compaction factor の非線形項の変化等も必要となる。長寿命設定と高入射効率設定の不一致は、この複雑さの反映と解釈出来る。

より正確な評価には、多くのパラメータを考慮したシミュレーションが必要となるが、それは今後の課題である。

5. ビーム電流値向上

ここまでの結果をもとに利用運転では S3_OK = S3_LU = -8.1 の設定でビームの積み上げを行い、ID gap close 後に S3_OK = -10.0、S3_LU = -6.0 に変更して運転している。

運転サイクルによって入射効率のばらつきがあるが、この運転の採用によって、2012 年夏以降は、常に蓄積電流 300mA のトップアップ運転を維持出来るようになった。典型的な利用運転時の蓄積電流を Figure 9 に示す。

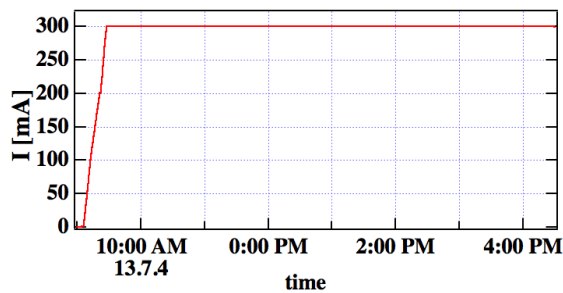


Figure 9: Typical stored current during the top-up operation.

6. まとめ

ビーム寿命を伸ばすために dispersion free section に設置された六極電磁石 (S1、S2、S3) 及び新たに追加された六極電磁石 (S4) の調整を行った。S1、S2、S3 を最適化することでビーム寿命を約 10% 伸ばすことが出来た。ビーム寿命が伸びた事で 300mA のトップアップ運転を定常的に行えるようになっている。

また、簡易ではあるが計算によって実際の測定結果に沿った結果が出ており、実際の調整の方向性を見いだす為のシミュレーションとして使えるような結果が出た。

参考文献

- [1] Y. Minagawa, et al., “第 9 回日本加速器学会年会報告集”, 2012, THPS043, p.987
- [2] Y. Minagawa, et al., “第 8 回日本加速器学会年会報告集”, 2011, TUPS080, p.1076