

COMMISSIONING OF IN-GAP SEXTUPOLE WINDING AT NewSUBARU

Takahide Shinomoto^{1,A)}, Yasuyuki Minagawa^{A)}, Yoshihiko Shoji^{B)}

^{A)}JASRI/SPRing-8, 1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo, 679-5198

^{B)}LASTI/NewSUBARU, University of Hyogo, 1-1-2 Kouto, Kamigori-cho, Ako-gun, Hyogo, 678-1205

Abstract

The commissioning of the dipole in-gap sextupole winding at NewSUBARU is reported. It enables the control of the higher order momentum compaction factor (longitudinal chromaticity) and the non-linear dispersion function. We expected the expansion of the momentum acceptance by optimization of the longitudinal chromaticity. We observed a small improvement of the momentum acceptance and elongation of the beam lifetime mainly by an unidentified process.

ニュースバルに於ける逆偏向電磁石内6極コイルの使用試験

1. はじめに

ニュースバルでは分散部の第3 sextupole familyとして逆偏向電磁石内に6極磁場発生コイル (SB) 6台を設置している^[1]。その設置目的は、horizontal chromaticity (ξ_x)、vertical chromaticity (ξ_y)に加えて longitudinal chromaticity (ξ_L)の独立なコントロールであるが、通常利用運転では ξ_L 制御を行わず、 ξ_L 制御が不可欠なquasi-isochronous operation^[2]では ξ_x 制御を犠牲にして対応し、SBを励磁してこなかった。一方 ξ_L の調整で momentum acceptanceが広がり、Touschek 寿命が伸びる可能性を示す測定結果が得られた。

Non-linear momentum compaction factor (α_p)と non-linear dispersion functionの測定^[3]によれば、 ξ_L に対応する higher order α_p (α_1) が大きいため、RFバケツトが $\Delta P/P > 0$ 方向と $\Delta P/P < 0$ 方向で非対称になり、momentum acceptanceは $\Delta P/P > 0$ 方向の mechanical apertureで決まっている可能性が高い。このバランスを調整すれば momentum acceptanceが広がり、Touschek 寿命の改善が期待できる。ニュースバル以外にも sextupole magnetを使って α_1 、あるいは non-linear dispersion function^[4]を変え、Touschek 寿命を改善した例がある。

ここでは、SBを励磁し、寿命を含む様々なビームパラメーターの変化を計測した結果を報告する。

2. SB励磁によるパラメーター変化

2.1 Magnetic field of SB

ニュースバルの主要パラメーターを Table I に、SBと後述のSXHのパラメーターをTable IIに示す。SBが作る磁場は純粋な6極磁場ではなく、別電源の dipole coil (IB)によってdipole成分を補償する必要がある。これがSBを気軽に使えない大きな理由になっている。以後、6極の強さは

$$K_{SB} = (1/B_0\rho)(\partial^2 B_y / \partial x^2) \quad (1)$$

で表し、正值でfocusing sextupoleとなる。他の多極成分の表現もこれに準ずる。

IBの調整はCODを測定しながら行った。 $\Delta IB/\Delta K_{SB}=0.01\%$ 程度であったが、磁石ヨークは鉄ブロックであり、 $\Delta IB=0.02\%$ 程度 (horizontal CODで約2 mm) のヒステリシスもあった。

SB励磁によって ξ_x , ξ_y , ξ_L が変るので、別の sextupole families (SF & SD)によって ξ_x , ξ_y を戻す必要もある。実際に測定したchromaticity変化は概ねモデル計算に合っており、問題なく行う事ができた。Table IIIに設定値を示す。他に dynamic aperture改善の為に無分散部に設置されたsextupole families (S1 & S2)も再調整したが、ビーム寿命を指標とした測定では、 ξ_x , ξ_y が同じであれば S1, S2の最適値はほとんど変わらなかった。

Table I: Basic parameters of NewSUBARU

Parameters	value
Betatron tune: ν_x / ν_y	6.30 / 2.23
Chromaticity: ξ_x / ξ_y	2.9 / 5.6
Synchrotron frequency : fs	6 kHz
Momentum compaction factor α_0	0.0014

Table II: Parameters of sextupole families

Family	SB	SXH
Beta function: β_x / β_y (m)	9.0 / 3.14	10.6, 9.3 /
Dispersion: η (m)	1.38	0
Effectice length: L (m)	0.45	0.144
Magnets per family	6	2

Table III: Changes of sextupoles keeping ξ_x and ξ_y .

	ΔK_{SB}	ΔK_{SF}	ΔK_{SD}
Model calculation	-10.4	+29.9	- 8.6
Real Machine	+11.7	-27.9	+ 8.2
	-10.4	+28	-11

2.2 Imperfections of SB

¹ sinomoto@spring8.or.jp

SBはpole faceとvacuum chamberの隙間に設置された板状のコイルであって、電磁石ヨークより機械的に脆弱である。当然ながら製作、設置誤差も大きいと推測できる。

Fig.1はSBを励磁し($\Delta K_{SB}=-5$)、dipole成分を共通IB電源で戻した際のhorizontal COD変化で、SBのdipole成分のばらつきを表す。Single error sourceを仮定して解析すると、horizontalにはIB1(BPM2付近)に強さ-0.026 mradのdipole errorである。IB補償量は0.07mrad.×6台なので、ハード的な誤差として決して小さく無いが実用上の問題は無い。Vertical COD変化はsingle errorでfittingできず、6つのerrorでfittingした。マイナス方向に偏っており、個々の値も大きく、horizontalと同程度であった。このvertical CODは複数の測定で再現したが、horizontal CODは振幅と位相が概ね再現する程度で、IB1にerrorを仮定したfittingはFig.1ほど良く無い。ヒステリシスが原因と考えている。

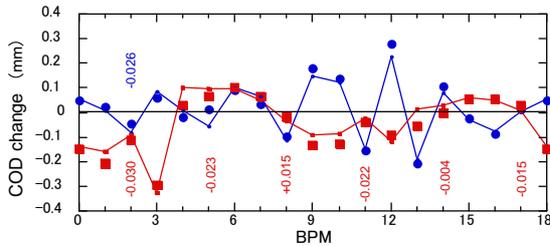


Fig.1 COD produced by SB ($K_{SB}=-5$). The circles are horizontal displacements and the squares are the vertical displacements. The lines are the fitted results assuming dipole errors. The numbers are the horizontal (above) and vertical (below) deflection angle with unit of μrad .

SBがquadrupole componentを持つとachromatic conditionが崩れ、linear α_p (α_0)も変る。実際に変化した、SB直近のquadrupole familyの調整でdispersion、 α_0 、更にbetatron tuneもほぼ元に戻った($\Delta\nu_x \approx 0.01$, $\Delta\nu_y < 0.01$)。但し、SBとquadrupoleの位置が異なる為、完全には戻らない。調整量は $(\Sigma \Delta K_Q L)/K_{SB}=0.03$ であり、SBの水平方向位置のズレでは説明困難な大きな値であった。

Fig.2に $K_{SB}=0$ と $K_{SB}=-10.4$ のlinearとparabolic dispersionを示す。リングとSBにばらつきがなければ、変化分はリングの対称性に従うはずである。Horizontal linear dispersionは予想通りで、非対称な変化成分の変化も最大0.05mと小さい。Parabolic dispersionの変化は短直線部が最大で-15mであったが、非対称成分は4mと大きく、SBのsextupole componentのばらつきの大きさを疑わせる。Vertical linear dispersionの変化原因はskew quadrupole componentである。 $K_{SB}=-10.4$ ではSBがdispersion sectionにおける主要なskew quadrupole源になっている。Dispersionの変化をsingle errorで仮定してfittingするとIB3(BPM8付近)がbest fitを与える。

更に高次成分のばらつきは、3次共鳴 $3\nu_x=19$ に対する補正量変化から推測できる。共鳴補正コイルは $3\nu_x=19$ に対する位相が直行する2組 (SXH1とSXH2)

で、dispersion free sectionに設置されている。各組はsextupole magnet 2台へのtrim windingから成り、1組当りのresonance driving forceは $\beta_x^{3/2} K_{SXH} L/I = 4.6\sim 3.9 \text{ m}^{1/2}/\text{A}$ である。共鳴補正量の $\Delta P/P$ 依存性を測定した結果をFig.3に示す。

ただ $K_{SB}=-10.4$ に対してのresonance driving termの変化量は $\beta_x^{3/2} K_{SXH} L=36 \text{ m}^{1/2}$ であった。このときのSB一台のsextupole component: $\beta_x^{3/2} K_{SXH} L=126 \text{ m}^{1/2}$ の約30%にあたる。これは、parabolic dispersionの非対称成分が大きい事に対応している。

8極成分と10極成分は $\Delta P/P$ 依存から求める事が可能だが、 $\Delta f_{RF} < 4 \text{ kHz}$ で見られたSHX1とSHX2の直交性の劣化を考慮する必要があり、解析中である。ただヨーク形状(dipole)を反映して、8極成分は小さく10極成分が大きい状況と、SB励磁による必要補正量の増加傾向は見て取れる。

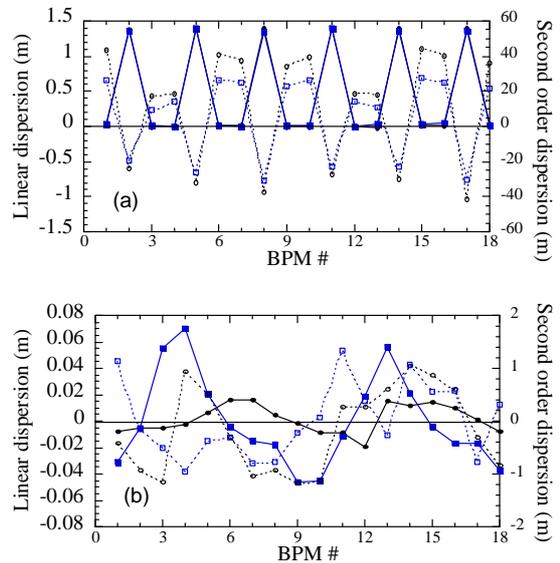


Fig.2: Horizontal (a) and vertical (b), linear (solid line) and the second order (dotted line) dispersion function at $K_{SB}=0$ (circles) and $K_{SB}=-10.4$ (square).

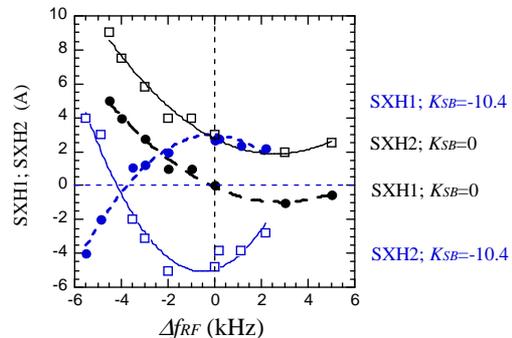


Fig.3 Δf_{RF} dependence of the correction parameters for the sextupole resonance ($3\nu_x=19$).

3. Momentum acceptance

SB励磁によりmomentum acceptanceの拡大が得られたかを確認した。Fig.4に f_{RF} の変化 Δf_{RF} に対する

synchrotron frequency f_s を示す。SBにより α_p のより高次項も大きく変化した。 $K_{SB}=-20.8$ で $\alpha_1=0$ となるが、 $\Delta f_{RF}=-9.4\text{kHz}$ で $f_s=0$ となってしまう、 $\Delta P/P < 0$ 方向の acceptance制限となるので寿命拡大を期待できない。しかし、 $K_{SB}=-10.4$ ならば $f_s=0$ に達せず、acceptance拡大が期待できる。

Fig.5に dispersion sectionのBPMにおけるnon-linear dispersionを示す。SBが変えるparabolic dispersionの寄与は小さく、dispersionに大きな変化は無い。

更に $\Delta P/P$ に対するbetatron tuneの変化をFig.6に示す。 $K_{SB}=-10.4$ の場合を $K_{SB}=0$ の場合と比較すると、 $\Delta f_{RF} > 0$ では $3\nu_x=19$ に、 $\Delta f_{RF} < 0$ では $\nu_x-2\nu_y=2$ に近づき、 $K_{SB} < -10.4$ ではoff-momentumでのtransverse resonanceの影響が懸念される。

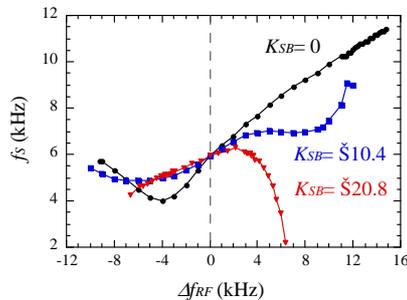


Fig.4 Synchrotron oscillation frequency shift by Δf_{RF} .

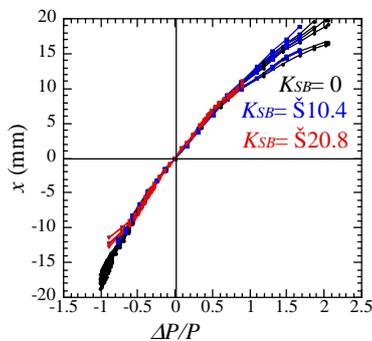


Fig.5 Dispersion at dispersive sections.

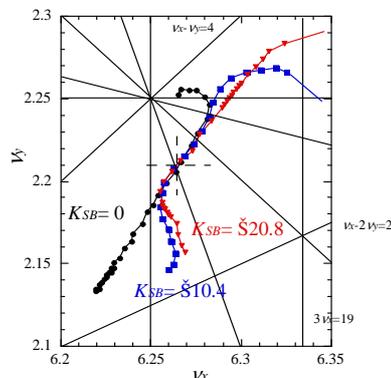


Fig.6 Working space in the tune diagram. The results for $K_{SB}=-10.4$ was reconstructed from some measurements with different centre tunes.

4. Touschek 寿命の改善

Fig. 7に寿命の V_{RF} 依存性を示す。同一設定ならば寿命 (τ)はほぼ蓄積電流 (I)に反比例するため、これらの積 ($I\tau$)を指標とした。またTouschek 寿命はvertical beam sizeに強く依存するため、rf deflectorで連続的にビームを蹴り(deflection with white noise)、vertical beam sizeを上げた。 K_{SB} は異なってもvertical tuneもchromaticityも揃えてあるので、couplingに依らず同程度の vertical beam sizeになるはずである。

Momentum acceptanceが広がると、最適 V_{RF} が大きくなり、それに伴って最長 $I\tau$ も延びるはずである。 $K_{SB}=0$ に対し、 $K_{SB}=-10.4$ では最適 V_{RF} が大きくなり、 $K_{SB}=-20.8$ では逆に小さくなっている。これはFig.3に示した測定から予想できた結果である。 $I\tau$ が単純に momentum acceptanceで決まるなら、低 V_{RF} では $I\tau$ が K_{SB} に依存しないはずだが、明らかに K_{SB} と共に寿命が延びている。SBによるdynamic apertureの拡大などを示唆する、意外な結果である。

多くの施設でdynamic apertureの6極設定依存性が観測されているが、励磁が強いほどdynamic apertureは減少傾向にあり、我々の結果とは逆である。更にdynamic aperture増減にはtransverse resonanceが関係するケースが多いが、SBのばらつきは明らかにnon-structure resonanceを強くしており、この点からも寿命の延びは意外である。因果関係は不明だが、最長寿命を与えるtuneが僅かに変わった事を報告しておく。 $K_{SB}=0$ では ($\nu_x=6.26$, $\nu_y=2.21$)であったが、 $K_{SB}=-10.4$ では ($\nu_x=6.29$, $\nu_y=2.22$)に変わった。

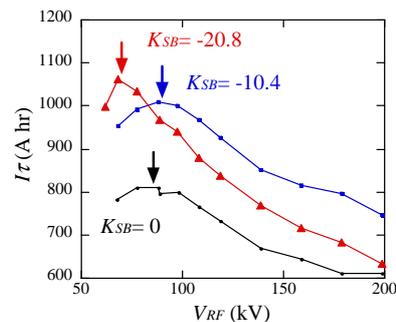


Fig. 7 V_{RF} dependence of beam lifetime.

まとめ

逆偏向電磁石ギャップに設置された6極コイルの励磁を行った。Momentum acceptance拡大を狙って調整したが、それによる寿命拡大は小さかった。ただ、意外な事にdynamic aperture改善によるかもしれない約20%の寿命改善が観測された。

参考文献

- [1] Y. Shoji, *et al.*, IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol.14, No.2, June 2004, pp.453.
- [2] Y. Shoji, S. Hisao and T. Matsubara, EPAC2004, pp.2356.
- [3] Y. Shoji *et al.*, SAST'03, pp.527
- [4] A.-S. Muller *et al.*, EPAC04, pp.2005