

EVALUATION OF LIFETIME OF AN ELECTRON BEAM AND ION TRAPPING PHENOMENON AT NEWSUBARU

Takashi Masuda, Satoshi Hashimoto, Ainosuke Ando
Laboratory of Advanced Science and Technology for Industry (LASTI), University of Hyogo
NewSUBARU, 1-1-2, Kouto, Kamigori, Ako, Hyogo 678-1205, Japan

Abstract

The decrease in the beam lifetime due to the ion trapping phenomenon was evaluated by measuring the Touschek lifetime and the gas scattering lifetime at the NewSUBARU storage ring. In order to evaluate the influence of trapped ions, the neutralization factor η , which is the ratio of the electron density to the density of trapped ions, was estimated from the beam lifetime and the Bremsstrahlung gamma-rays.

NewSUBARU における Ion Trapping 現象及び電子ビーム寿命の評価

1. はじめに

NewSUBARU電子蓄積リングでは、真空チェンバーの“真空枯れ”に伴い、ガス散乱寿命 τ_g が数年前に比べて大幅に改善された。また利用運転中はRF-Shakerにより垂直方向のビームサイズを増大させてTouschek寿命 τ_T を向上させている。一方で実際には様々な不安定性の影響によりビーム寿命が低下する事態が発生している。ビーム不安定性の一つとして、Ion Trapping現象[1]が挙げられる。この現象の影響は、蓄積ビームの電子密度と捕獲されたイオン密度の比である中性化効率 η 値から定量的に評価することができる。今回、Ion Trapping現象が及ぼす寿命低下の影響を評価するために、電子ビーム寿命 τ を τ_T 、 τ_g 及びIon Trapping現象によって低下する寿命 τ_i を用いて評価を行った。各寿命の、電流値 I もしくはバンチ電流値 I_b 及び垂直方向のRF-Shakerパワー W に対する依存性を調査した。

本報告では、1.0GeV運転時における各ビーム寿命と様々なFilling patternにおける中性化効率 η を評価し、利用運転時におけるFilling patternの最適化について述べる。表1にNewSUBARUの幾つかのパラメータを示す。ビームサイズに関してはリング1周における平均ベータ関数から求めた計算値であるがバンチ電流の増加やRF-Shakerパワーの増大に比例して大きくなる。

周長	118.731 m	周回周波数	2.525MHz τ
ハーモニク数	198	ビームサイズ σ_x	354 μ m
最大バンチ電流	~ 50mA	ビームサイズ σ_y	177 μ m

表1：NewSUBARUにおけるパラメータ。

2. ビーム寿命評価

2.1 ビーム寿命

ビーム寿命 τ は、 τ_T 、 τ_g 、 τ_i 、 τ_q を用いて以下のように表わされる[2]。

$$1/\tau = 1/\tau_T + 1/\tau_g + 1/\tau_i + 1/\tau_q \quad (1)$$

ここで τ_T, τ_g, τ_i 、 τ_q が成り立つので、以下では量子寿命 τ_q を無視して議論を行う。

2.2 Touschek寿命の評価

バンチ体積を V_b 、定数を C_T とするとTouschek寿命 τ_T は次式で表される[2]。

$$1/\tau_T = C_T I_b / V_b \quad (2)$$

バンチ長 σ_s と水平方向のビームサイズ σ_x は、それぞれ $I_b^{1/3}$ に依存して増大するが、 σ_y は I_b には依存しない[3]。

始めに、 τ_T の I_b 依存性を調べる。 $\tau \approx \tau_T$ になるように一定の低電流値 $I = 30$ [mA]の下、使用バンチ数を変えることで I_b を変化させた。 $I_b \tau_T$ の I_b 依存性を測定することによって τ_T のバンチ電流依存性は(2)式から以下のように表される(図1左)。

$$\frac{1}{\tau_T} [1/\text{hrs}] = \frac{I_b [\text{mA}]}{2.91 - 1.89 I_b^{1/3} + 2.33 I_b^{2/3}} \quad (3)$$

NewSUBARUでは現在RF-Shakerによって σ_y を増大させ、 τ_T を長くしている。visibility monitorによって測定した σ_y と測定された τ_T は、いずれも \sqrt{W} に比例していることが図1(右)から分かる。

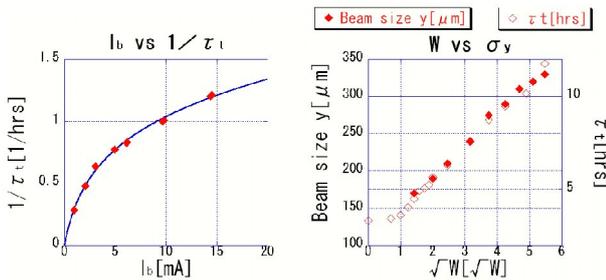


図1：左の図は I_b と $1/\tau_T$ の関係。点は測定点であり曲線は(3)式である。右の図は \sqrt{W} に対する σ_y () 及び τ_T () の関係。

τ_T の W 依存性を明らかにするために、一定の低電流値 $I = 30 [mA]$ の下、使用バンチ数を10,30バンチ ($I_b = 3.0, 1.0 [mA]$) とし、 W を変化させた時の τ_T を測定した(図2左)。その結果、RF-Shakerパワーの弱い $W \leq 1$ の領域では W によって τ_T が変化しないので (3)式を用いて τ_T を記述でき、 $1 < W [W]$ の領域では τ_T と \sqrt{W} の関係から(4)式を用いて τ_T が記述できる。

$$\frac{1}{\tau_T} [1/hrs] = \frac{I_b}{2.91 - 1.89I_b^3 + 2.33I_b^5} \frac{1}{1 + 0.60(\sqrt{W} - 1)} \quad (4)$$

2.3 残留ガス及び捕獲イオンによる散乱寿命の評価

残留ガス圧力は全電流値 I に比例することから $I * \tau_g$ は一定値 C_g をとる。捕獲イオンによる等価的な圧力上昇がある場合に C_g を C_{g+i} と記述すると、全ビーム寿命 τ は以下のように書ける。

$$1/\tau = 1/\tau_T + C_{g+i}^{-1} I \quad (5)$$

C_g はFilling patternに関わらず一定の値を取るが、 C_{g+i} はIon Trapping現象の影響で値が変化する。これらの値は、各Filling patternにおける寿命 τ の測定結果を(5)式でカーブフィッティングすることによって求めることができる。

C_g を求めるためにはIon Trapping現象が発生していないFilling patternで寿命の測定を行う必要がある。イオンの水平・垂直方向の安定性に関する線形理論を用いると70+70 bunchというFilling patternはイオンが捕獲されにくい結果となった。70+70 bunchとは、連続70バンチを間隔を空けて2つ配置したFilling patternのことである。70+70 bunchにおける寿命の測定から C_g を求めた。

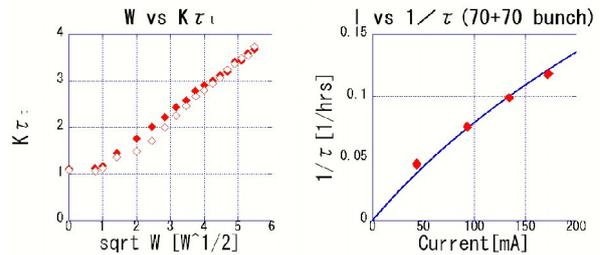


図2：左の図は \sqrt{W} と $K\tau_T$ の関係。 K とは、(3)式の右辺の値である。点は $I_b = 1 [mA]$ () と $I_b = 3 [mA]$ () での測定点を表す。右の図は70+70 bunchにおける I と $1/\tau$ の関係。点は測定点であり曲線は $C_g \approx 5700$ とした時の(5)式である。

$I = 100 [mA]$, $W = 30 [W]$ において3つのFilling pattern、(1) 70+70 bunch, (2) Full filling, 及び現在NewSUBARUで利用運転に用いられている(3)70+70+FF(Full fillingに70+70 bunchを I_b が1:3になる様に重ねたパターン)について求めた C_g, C_{g+i} 値(単位: $mA * hrs$)と各寿命(単位: hrs)を以下の表に示す。表2から1.0GeVでは、ガス散乱寿命よりも、Touschek寿命の方が支配的であることが分かる。3つのFilling patternを比較すると、Full fillingは最もIon Trapping現象の影響を受けているので C_{g+i} 値が小さい。求められた C_g, C_{g+i} から各Filling patternの τ_g, τ_{g+i} が決定する。同じ電流値における70+70 bunchとFull fillingのチューンの差はごくわずかであり、ビーム寿命のチューンシフトによる影響はほとんど無かった。

	70+70 bunch	Full filling	70+70+FF
τ	12.4 ± 0.2	14.7 ± 0.2	15.00 ± 0.1
τ_T	15.9 ± 0.2	21.1 ± 0.2	21.5 ± 0.2
τ_g, τ_{g+i}	56.6 ± 2.0	47.9 ± 0.7	49.5 ± 0.2
C_g, C_{g+i}	5660 ± 200	4790 ± 70	4950 ± 20
η	≈ 0%	0.013%	0.010%

表2：各Filling patternにおけるそれぞれの寿命と C_{g+i} 及び η の比較。70+70 bunchにおいては $\tau_g + \tau_i \rightarrow \tau_g, C_g + C_i \rightarrow C_g$ の値をとる。

3. 中性化効率 η の評価

3.1 ビーム寿命による η の評価

η は、蓄積ビームの電子密度 d_e 及び捕獲された

イオンの密度 d_i の比で表される。

$$\eta = d_i/d_e \quad (6)$$

Full fillingにおける η は、Full fillingで求められた C_{g+i} 値と70+70 bunchで求めた C_g 値の差から計算できる。それぞれのFilling patternにおけるガス及びイオンによる散乱寿命は、残留ガス密度 d_g 、光速 c 、散乱断面積 σ_R を用いて以下のように表される[2]。

$$1/\tau_g = I/C_g = cd_g\sigma_R \quad (70+70 \text{ bunch})(7)$$

$$1/\tau_{g+i} = I/C_{g+i} = c(d_g + d_i)\sigma_R \quad (\text{Full filling})(8)$$

(7),(8)式から、 d_i は以下のように求まる。

$$d_i = I/c\sigma_R (1/C_{g+i} - 1/C_g) \quad (9)$$

又、電子密度 d_e は以下のように表される。

$$d_e = (I/ef_r)/2\pi\sigma_x\sigma_y L \quad (10)$$

ここで、 e は電気素量を表す。NewSUBARUのパラメータと $C_g = 5660$ 、 $C_{g+i} = 4790$ 、 $\sigma_R = 4.18 \times 10^{-27} [m^2]$ を用いると、 $\eta = 0.013\%$ であった。これは、2006年7月現在の値であるが5月では $\eta = 0.040\%$ であり、3月では $\eta = 0.075\%$ であった。この期間に行われた真空チェンバーにおけるリークの改善と共に η は低下している。

3.2 制動放射線による η の評価

電子とガス分子が衝突すると、制動放射線が発生する。捕獲されたイオンによっても同様に線が発生するので、70+70 bunch とFull fillingにおける線検出量の差は捕獲されたイオンによるものと仮定して η を求めることが出来る。

η の導出において、検出器周辺におけるチェンバー内の真空度は検出器周辺に設置された幾つかの真空ゲージが示す値の平均値としているが、実際のビーム軌道上におけるガスの圧力は計測値よりも数倍高い。ビーム軌道上は真空ゲージよりも約5倍真空度が高いと仮定すると $\eta = 0.014\%$ となり、ビーム寿命から評価した η とほぼ同じ値が得られた。

4 . 考察

捕獲イオンの影響により、Full fillingの τ_{g+i} は70+70 bunchの τ_g に比べ8.7[hrs]も低下しているが、Touschek寿命の方が支配的であるため τ で比較すると1.0[hrs]程の差でしかない。全電流値が一定である時、使用するバンチの数を増やせば τ_T は長くなるのでFull fillingは τ_T 及び τ が長く、一見こ

のFilling patternにおける利用運転が望ましいと思われる。しかし、Full fillingはIon Trapping現象が顕著に発生する傾向があり、寿命の低下だけでなくビームサイズの増大や振動、チューンシフト、ビームロス等を引き起こすことがあり、Full fillingにおいて安定な運転を行うことは困難である。 τ_T, τ_i 双方を同時に最長にすることは出来ないのので、 $1/\tau_T + 1/\tau_i$ が最小値を取る様に折り合いをつけた最適Filling patternを求めなければならない。より長い τ 、より小さな η 、そしてより安定なビーム運転を行う為に現在のFilling patternとして先に述べた70+70+FFが用いられている。過去の運転実績から、他のFilling patternよりも長寿命であり、ビームの不安定化が起こる頻度も少ない。70+70+FFにおける中性化効率率は $\eta = 0.010\%$ であり、0%ではないもののFull fillingよりも更に小さな値である。

5 . まとめ

NewSUBARUにおける1.0GeV運転時のTouschek寿命 τ_T を電流値 I_b とRF-Shakerパワー W の関数として表し、いくつかのFilling patternにおける τ_g, τ_{g+i} を評価した。ビーム寿命から評価したFull fillingにおける中性化効率率は $\eta = 0.013\%$ であった。また、Filling patternによる γ 線検出量の差から求めた η もこれにほぼ等しく、現在この程度の値であると示された。 η は真空度の改善に伴い低下してきていることが明らかとなった。

現在は上記の70+70+FFによってビーム寿命の最適化を図っていて $\eta = 0.010\%$ となっている

今回求められた η を一つの指標とし、今後より厳密な議論を重ねてゆく事で現在の70+70+FFよりも更に最適なFilling patternの構築を行い、電子ビームの安定化に貢献したく考えている。

参考文献

- [1]:坂中 章吾,高エネルギー加速器セミナーテキストOHO'86 Ion Trapping現象(1986)
- [2]:中村 典雄,高エネルギー加速器セミナーテキストOHO'91 ビーム寿命(1991)
- [3]:A.Ando, "Beam size blowup and energy widening in NewSUBARU(2001)"Nuc. Inst. Meth. in Phys. Res.A481 (2002)43-47