

真空とビーム寿命

堀 洋一郎 (高エネルギー加速器研究機構/KEK 物質構造科学研究所*)

1. はじめに

粒子は振動しながら加速器の中を安定に周回している。この振動が許容値を超えた粒子はビームから失われてしまう。放射光の発生源たる電子(群)はガウス分布をなしているため、安定域外となる分布の裾野の電子が定常的に失われていくことになる。このことで決まるビーム寿命を量子寿命と呼ぶ。貯蔵リングでは十分に長い量子寿命を保証するのに必要な許容値が確保されている。しかし、希薄とはいえ真空ダクト内部には相当数の気体分子が残留しており、ビーム電子はある確率でこれらと衝突し、散乱される。そのなかで許容値を超える変化を受けた電子がビームから損失されていく。このことで決まるビーム寿命が真空寿命である。

電子が残留気体との衝突により損失される確率は、残留気体の密度と気体種に依存する。組成が変わらなければ真空寿命は圧力に反比例する。圧力はガス放出と排気のバランスで決定される。放射光リングは強力な放射光の発生を使命としているが、実験に供される放射光はその一部であり大半はリングの真空容器で受け止めなければならない。これがガス放出の主因となっている。従ってリングの真空排気系は放射光照射によるガス放出を主要な標として設計される。

2. 残留気体との衝突によるビーム損失

残留気体との衝突により電子は弾かれたり、エネルギーを失ったりする。衝突後の電子の軌跡は衝突時の条件に依存するが、ここでは簡略且つ実務的に衝突前の電子は中心軌道を運動しているとする。位置ずれを持った電子の振幅は、光学パラメータの一つであるベータatron関数に比例する。この振幅がある箇所では物理的、力学的アパーチャより大きくなるとその電子は損失される。従って、アパーチャとベータatron関数の比が最小となる地点がリングで最も狭い場所である。また衝突による位置ずれもベータatron関数に比例する。ここから安定周回のための限界散乱角が、アパーチャと最狭部及び衝突地点のベータatron関数の比で与えられる。当然アパーチャが小さくベータatron関数が大きい程限界角は小さくなる。エネルギーのずれた電子は、高周波の加速電場によりその位相に従って加減速を受ける。中心エネルギーに対する高周波加速のエネルギー補填率は周回における放射損失に対応するもので、バ

ケット高さと呼ばれる。エネルギー損失では、同時に位置ずれも引き起こされるが、通常その影響はエネルギー変化そのものに比して相対的に小さい。従ってエネルギー損失率の限界値が一般にバケット高さで与えられる。

ビームの真空寿命は、電子と気体分子の原子核及び核外電子との衝突において上述の限界値を超えるような散乱の断面積を相対論的に計算することによって見積もることができる。衝突はクーロン衝突を考えれば良い。角度散乱には弾性散乱が、エネルギー損失には制動放射が該当する。詳しい計算は省略するが、近似的に、弾性散乱による損失断面積はビームエネルギーと限界散乱角の2乗に反比例し、制動放射によるそれはバケット高さの対数に比例している。ビーム寿命は両方の寄与の重畳で決まる。通常バケット高さはビームエネルギーによってあまり変わらない。従って高エネルギーリングでは制動放射がより支配的であり、真空寿命はエネルギーにあまり依存しない。一方低エネルギーリングでは弾性散乱がより支配的であり、極短ギャップが前提とされる最新の挿入光源の導入などによって著しくビーム寿命が劣化する可能性が高い。ビーム寿命のビームエネルギーと限界散乱角による違いを Fig. 1 と Fig. 2 に示す(図中の $I \cdot \tau$ と p/I については次章参照)。改善策としては、制動放射に対しては加速電圧を上げてバ

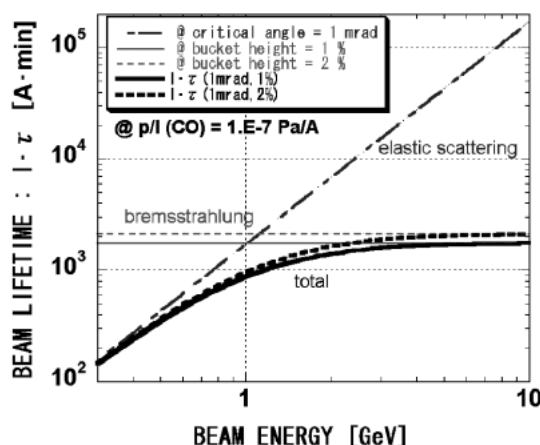


Figure 1. Calculated beam lifetime by elastic scattering and bremsstrahlung as a function of beam energy. Data are given for p/I (CO eq.) = 1×10^{-7} Pa/A (20°C), critical angle = 1 mrad and bucket height = 1% and 2% (broken line). Contribution of extranuclear electrons is disregarded.

* 高エネルギー加速器研究機構/KEK 物質構造科学研究所 〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1
TEL: 029-864-5672 FAX: 029-864-2801 E-mail: yoichiro.hori@kek.jp

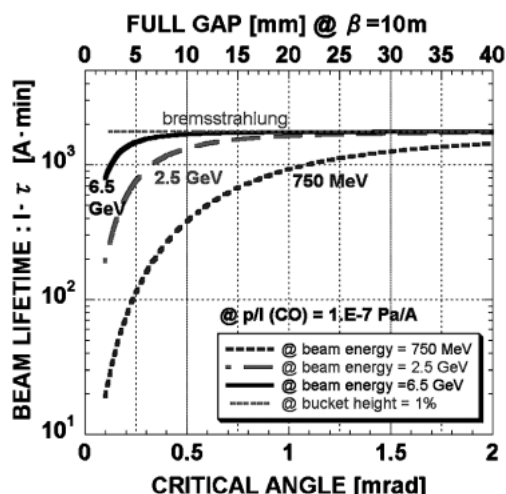


Figure 2. Calculated beam lifetime as a function of critical angle. Bucket height is 1% and other conditions are same as Fig. 1. Full gap (aperture) value corresponding the uniform betatron function of 10 m is shown in top axis.

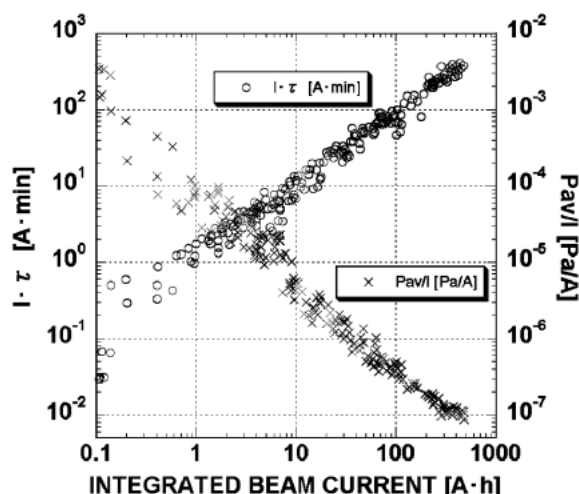


Figure 3. Changes of beam lifetime and pressure in the PF ring. Horizontal axis is the operation time represented by the time-integrated stored current. 1 A·h of the operation time corresponds to the irradiation photon dose of 3.9×10^{22} ph./m. Refer the text as to $I \cdot \tau$ and p_{av}/I .

ケットを高くすること、弾性散乱に対してはベータatron関数を、特にリングの最狭部で小さくする（挿入光源部では輝度向上にも有効）こと、などが挙げられる。尚、損失断面積は概略原子番号の2乗に比例する。例えば、同量なら一酸化炭素は水素の数10倍の寄与がある。組成比と原子番号に応じて各ガス種の寄与を合算したものが圧力当たりの断面積となるが、通常は一酸化炭素等価を前提として論じられることが多い。当然ビームが感じるCO等価圧力とリングの公称（平均）圧力との間には圧力測定位置や残留ガス組成による相違があり、例えばPFリングではその比が1.5-2と見積もられている。

3. 圧力とビーム寿命

圧力は温度と分子密度に比例する。従ってビーム電子と気体分子の衝突頻度も圧力に比例し、真空寿命は圧力に反比例する。放射光照射によるガス放出が圧力決定の主因であるとき、ビームエネルギーが変わらなければガス放出量は貯蔵電流にほぼ比例する（総光子数はエネルギーと電流に比例する）。このとき、低電流領域を除いて、電流あたりの（平均）圧力 p/I と、電流とビーム寿命の積 $I \cdot \tau$ は一定値と見なせる。前者は運転圧力の、後者はビーム寿命の性能指数として用いられる。運転と共にビーム寿命とリングの平均圧力が変化する様子を **Fig. 3** に示す。ビーム寿命はビーム電流の減衰率の逆数で与えられる。 $I \cdot \tau$ が一定の場合にこのビーム寿命は半減期となる。ビーム寿命10時間以上、運転圧力 10^{-8} Pa 台以下というのが放射光リングに要求される典型値である。

放射光リングにおけるガス放出の主機構は、高エネルギー光子により生成した二次電子が照射表面の、或いは気相放出を経て対壁表面の吸着・吸蔵ガスを放出するものと

理解されている。放射光照射によるエネルギー付与は十分高いので、静的真空では問題とならないような高い吸着エネルギーのガス種も叩き出される。放出された気体分子は吸着と脱離を繰り返して移動し、やがて真空ポンプに捕らえられたものが系から排気される。圧力は準定常的に吸着と脱離のバランスで決まり、吸着量の枯渇に従って排気時間と共に減少していく。このとき圧力即ちガス放出率が時間経過に比例して減少するのが一般に観察される。このことは、吸着エネルギーの小さなサイトでより脱離が頻繁であり、漸次エネルギーの高いサイトへと枯渇が進む結果と理解することができる。放射光リング或いは電子貯蔵リングにおいても、場所によって照射や排気条件が異なるものの、排気時間を放射光照射量に置換えて、包括的に圧力が放射光照射量の概ね-1乗で減少することが観察されている。従ってビーム寿命はビーム電流の時間積分値に比例して向上する (**Fig. 3** 参照)。放射光照射によるガス放出低減の過程を“光焼き出し”又は“ビーム焼き出し”と呼んでいる。放射光や二次電子の照射効果の高い表面は早く、低い表面はゆっくりと“枯れ”ていく。単純には圧力を1/2にするのに倍の焼き出し時間が必要な目安となる。

リングにおけるガス放出量を評価するのに、照射放射光当たりのガス放出率（単位は例えば molecules/photon）が用いられる。これを用いて放射光強度分布からガス放出分布を求め、排気ポンプの配置を当てはめることでリングの圧力分布が大まかに予測できる。基本的にはガス放出の大きな箇所により大きな排気速度を設定することが肝要といえる。このガス放出率は照射条件に依存してリングごとに異なるべきものであるが、量子効率が対象となる波長領域で桁違いには変化しない、等などの理由から、意外と共通な目安となり得る。典型的には、 10^{-5} - 10^{-6} mol./pho-

ton のガス放出率を前提として、リングの長さ当たりの排気速度が100-数100 l/s/m に設定される。主排気系は通常ゲッターポンプとイオンポンプで構成される。ゲッターポンプは炭化水素を排気しない。この“枯れ”を達成するのに必要な照射量の目安はリングの長さ当たり 10^{24} - 10^{25} photon/m, ビーム電流の時間積分で表した運転時間にして数100-1000 A・h である。表面処理によるガス放出率の違いは照射初期において顕著だが、照射と共に少なくなり、最終的に必要となる照射量の低減にはあまり寄与しない。これは、表面処理といっても母材の金属表面を露出保持できるわけではなく、真空ベーキングも吸着エネルギーの小さなガスを除去するに過ぎないためである。従ってベーキングの有無に関わらず、一定時間以上の光焼き出しが低ガス放出率の達成に必要な条件かつ十分である。但し放射光照射は履歴効果がある。“軽い”吸着は速やかに除去されるので、大気解放する場合にも大気接触や暴露時間を最小限にして“しつこい”吸着を極力排除することで、再焼き出しの時間を大幅に短縮することができる。

4. Touschek 寿命

圧力とは無関係であるが、忘れてはならないビーム損失の要因の一つにバンチ内での電子同士の散乱がある。最新のリングにおけるビーム寿命の決定主因と言っても過言ではない。バンチ内の各電子は似通ったエネルギーで運動しているが、バンチ全体は相対論的速度で運動しているため、衝突により水平方向の運動量が軌道方向に変換されたときにバケット高さを超える変化となって損失に至ることがある。このことで決まるビーム寿命を Touschek 寿命と呼ぶ。圧力には依存しない。散乱はバンチの電子密度に比例して起こるので、Touschek 寿命においても $I \cdot \tau$ 一定の関係が成り立つ。バンチサイズが小さい程、またバンチ数が少なく周長が長い程電子密度が高くなり Touschek 寿命は短くなる。ビーム寿命は真空寿命との重畳で決まるため、圧力をどんどん低くしていくとやがて Touschek 寿命が上限となって立ち塞がる。Touschek 寿命はビームエネルギーにも強く依存し、エネルギーが低い程寿命は短い。以前は低エネルギーリング以外ではあまり問題視されなかったが、最近では低エミッタンスが追求され、単バンチ運転が行われるので、中～高エネルギーリングにおいても問題になる場合が多く、低エネルギーリングにおいては一層厳しい制約となっている。対処としては、バケット高さを高くする、エミッタンスを犠牲にしてバンチを太くする、或いはバンチ長さを伸長してエミッタンスを大きくすること無くバンチサイズを大きくする、といった方策がとられている。

Touschek 寿命を含めたビーム寿命と圧力の関係について筆者に身近な具体例を Fig. 4 と Fig. 5 に示し、各リングの関連する運転諸元を Table 1 に掲げる。但し、ビーム寿命の算定に必要なビームパラメータや真空条件のなか

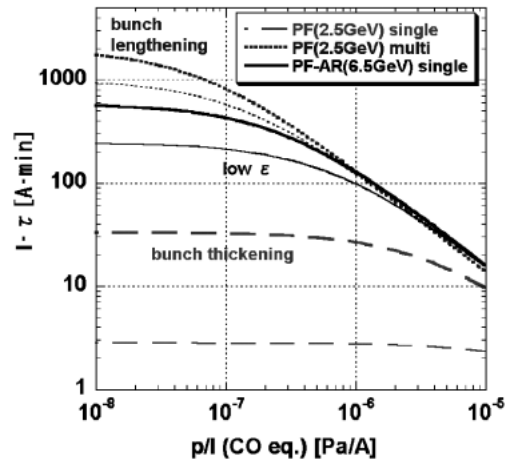


Figure 4. Beam lifetime of the PF and the PF-AR as a function of pressure. The bunch lengthening is adopted in multi-bunch operation and the bunch thickening in single-bunch operation in the PF ring to improve the beam lifetime (original value is indicated by thin line). The Touschek lifetime of the PF-AR is short for its beam energy and emittance because of the single-bunch operation. In present operation pressure, however, the vacuum lifetime is dominant and no affect is expected even if the emittance was reduced in the half (thin line). Both in the PF and the PF-AR, the beam lifetime is limited by the bremsstrahlung in high-pressure range.

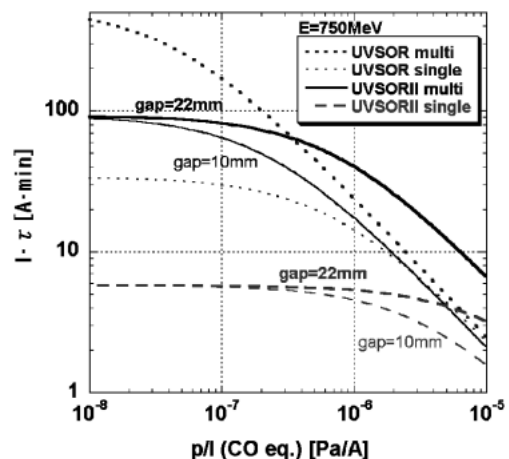


Figure 5. Beam lifetime of the UVSOR and the UVSORII as a function of pressure. The UVSORII is the upgraded UVSOR with the emittance of $27 \text{ nm} \cdot \text{rad}$. The bunch lengthening is adopted in multi-bunch operation and the bunch thickening is additionally adopted in single-bunch operation. The beam lifetime is limited by elastic scattering in the UVSOR. In the UVSORII, the vacuum lifetime will be improved by modulating the betatron function. Then the beam lifetime is expected not to change so much in multi-bunch operation when the present pressure is maintained. But it strongly depends on physical aperture (minimum gap is 10 mm). The beam lifetime in single-bunch operation is limited by the Touschek effect.

には評価し難い因子が数多く含まれているので、必ずしも正確に現実を模擬しているとは限らない。図はビーム寿命の特質を説明するものとお考えいただきたい。

Table 1. Ring parameters related to the beam lifetime

		UVSOR	PF	PF-AR
beam energy	GeV	0.75	2.5	6.5
circumference	m	53.2	187	377
emittance	nm•rad	165	36	300
stored current	mA	150-300	300-450	
[single bunch]		[30-80]	[30-70]	[30-50]
p/I (nominal)	Pa/A	2.E-07	4.E-08	1.E-05
I•τ	A•min	75	1300	
[single bunch]		[10]	[30]	[50]

5. イオン捕獲, ダスト捕獲

ビーム軌道上には電子が負電荷の集団を形成して、脈電流となって周回している。一方ビームダクトの内空間にはビームや放射光によりイオン化した気体分子が浮遊している。イオンは、バンチから十分離れた位置では自由運動をするが、バンチが近傍を通過するときにはそのバンチに引き寄せられる。この中である条件を満たしたイオンは安定した振動運動を続け、定常的にビーム軌道上に存在することになる。この現象をイオン捕獲と呼ぶ。捕獲の成立には幾つかの条件があるが、一般にバンチ間隔が短い程捕獲され易く、多バンチ運転では多かれ少なかれイオン捕獲が起こっていると考えられる。イオン捕獲はビーム軌道における正電荷の内在と気体密度の増加を意味するので、ビーム特性に変化を生じたり、現実のビーム寿命を若干短くしたりする。このような現象は多くのリングで観察・確認されているが、定量的な解明には至っていない。イオンの源は残留気体であるので、圧力が十分に低いことが影響緩和の一因ともいえる。リングによっては、各所に電極を設けて軌道上に高電界を発生し、イオン捕獲を抑制している場合もある。

原子や分子よりも質量の大きな微小塵が捕獲されるのがダスト捕獲である。ダスト捕獲が起こるとビーム電子を夥しく散乱するためビーム寿命が不測に著しく短くなる。ビームダクトに内在するダストや真空中の摺動や放電で発生したダストが、イオン化されたりはじき出されたりしてビーム軌道上に飛来することが原因と考えられる。実際にも立上げ初期などにビーム寿命の急落が頻発し、著しい時にはビーム中断に至る程電流が減衰する場合もある。が、運転と共に頻度も程度も軽減し、十分な運転時間の経過以降には殆んど問題となっていない。これは運転と共にダストも枯渇するためと思われる。しかし発現が稀且つ偶発的であるためダスト捕獲の実体については殆んど未解明であ

る。清浄な真空を実現することで致命的な障害にはならないとは言え、不測のビーム寿命急落に対して対策法を持たない状況にあり、今後の究明が望まれる。

陽電子ビームを用いた場合には正電荷は反発されるのでイオン捕獲やダスト捕獲は起こらない。不測のビーム寿命急落がないという利点がある。代わりに、イオンを反発して容器壁に打ち付けることによりガスの突出を引き起こすことが考えられるが、これも運転と共に緩和されるべきもので、現実には大きな障害となっているリングはないようである。むしろ周囲に電子を引き付けることによりビーム不安定性を引き起こし得ることが知られているが、本題を外れるのでここでは紹介に止める。

6. トップ・アップ入射

ビーム減衰の根本的な対策として、減衰分をこまめに入射補填することで貯蔵電流を僅かな範囲の一定値に保持する方法が実用或いは検討されている。これをトップ・アップ入射という。ビーム電流が変動すると、バンチ電荷や放射光負荷に起因する真空容器や光学機器の熱変形の程度も変わり、ビーム位置測定や光路制御などの障害と成り得る。トップ・アップ入射はこうした弊害除去の意味でも有用である。実用に当たっての課題は入射時のビーム変動をどれだけ抑えられるか、ということである。貯蔵量に比べて入射率が十分小さければ入射ビームの騒乱は無視できよう。また利用側でゲートをかけて放射光利用を中断し、軌道や入射ビームが落ち着いてから実験を再開するという対処法もある。既述のように高質の放射光を実現するに当たってビームの短寿命化は不可避であり、現在トップ・アップ入射の導入が趨勢にある。ビーム寿命は入射率に見合う程度で十分となる。到達圧力の要求はむしろイオン捕獲や散乱ノイズ、放射線防護などの観点から議論されるようになるかもしれない。要求圧力が緩和されれば排気系の負担軽減に繋がるので、真空系としてもトップ・アップ入射への期待は大きい。

7. おわりに

放射光利用者向けの平易な解説ということで、シリーズのこれまでの解説を前提として、放射光リングの圧力とビーム寿命の特質について紹介した。“装置の真空”はそもそも厳密には語れないものであるが、本稿が多少とも読者各位の理解の一助となれば幸甚である。尚参考文献などは特に掲げなかった。向学の士にはKEKの「OHOセミナー」などを足掛かりにされたい。