

Measurement of Beam Lifetime in S-LSR

Hiromu Tongu, Masahiro Ikegami, Akira Noda, Toshiyuki Shirai, Hikaru Souda, Mikio Tanabe
Accelerator Laboratory
Advanced Research Center for Beam Science
Institute for Chemical Research
Kyoto University
Gokano-sho, Uji, Kyoto, Japan 611-0011

Abstract

The average vacuum pressure of the vacuum gauges with off-beam was achieved up to about 4×10^{-9} Pa at winter 2007. And the lifetime of the stacking proton beam is about 2 hours. In the case of utilizing the electron cooler, it is more than 10 hours. The lifetime of the stacking proton beam in S-LSR had been estimated by methods different from the storage current.

S-LSRにおけるビーム寿命の測定

1. はじめに

京都大学化学研究所 (ICR) ではイオン蓄積・冷却リング、S-LSRを用いて、7MeVプロトンビームおよび40keV Mg+ビームの蓄積、冷却、取出し等の実験、研究を進めている。S-LSRはレーザー冷却を用いることでクリスタルビームの実現できるようラティス構造を考慮し、設計されているリングであり、既に電子ビーム冷却を用いた実験ではプロトンビームの1次元 Ordering現象などの成果をあげている[1]。現在、Mgビームのレーザー冷却実験を進めている[2]。

加速器を利用することにおいてビーム寿命は性能を示す重要なパラメータの1つであり様々な要因によって制限される。ビーム冷却実験、クリスタルビームの実現ではビーム蓄積、冷却時間および測定のための時間が必要であり、S-LSRにおいてビーム寿命の短いMgビームの測定には大きな問題である。寿命改善のためビーム損失の現状を明確にすることが必要とされる。S-LSRの通常運転ではビーム損失は真空圧に大きく依存する。現在、S-LSRではオフビームで平均真空圧は約 4×10^{-9} Paまで到達し、20sec以上のMgビーム寿命を実現している[3]。

プロトンビームの蓄積電流、周回周波数およびそのときの真空圧を測定することでビーム強度減少、エネルギー損失、残留ガス密度からビーム寿命を推測、比較することによりS-LSRにおけるビーム損失について考察する。

2. ビーム寿命

1/eビーム寿命 (τ) は下記のように定義される。

$$I_t = I_0 \exp(-t/\tau) \quad (1)$$

ここで I_0 、 I_t は測定開始および t 時間後のリング蓄積電流である。S-LSRにおいてビーム寿命は蓄積粒子とビーム軌道上の残留ガスとの衝突、散乱による

蓄積粒子の損失で決まる。ビーム冷却、RF電圧などの蓄積粒子へのエネルギー供給がない場合、ビーム損失は電荷移行(capture, stripping)と多重散乱により蓄積粒子がアクセプタンスを越えることによって起こる。今回測定したプロトンはフルストリップイオンであるため散乱要因はelectron-captureと多重散乱である。また、S-LSRのアクセプタンスの制限は真空ダクトのアーチャーであり、鉛直 ± 23 mm、水平 ± 60 mmである。

3. 測定

上記のように残留ガス以外のビーム寿命に与える影響を排除するため今回の測定ではRFバンチングは行わない。ビームをスタッキングし、入射を止めた後、電子ビーム冷却を停止してから各測定を行った。

図1に示すDCCT、ショットキーモニター、真空

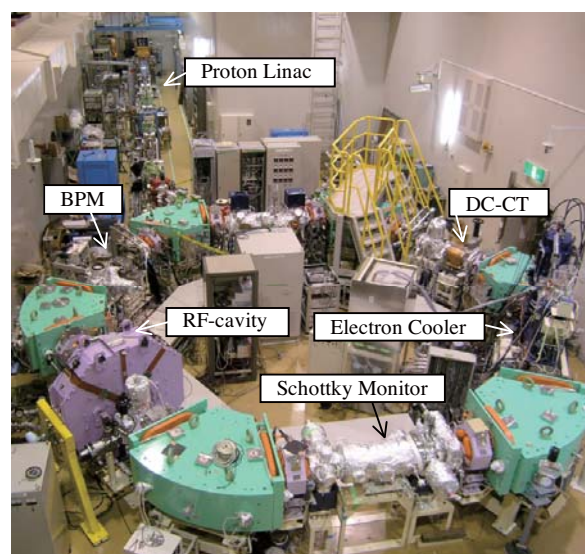


図1 : S-LSRレイアウト

計（リング直線部に各1個、計6個）を用いて蓄積電流、ショットキーノイズ、リング平均真空圧を測定した。S-LSRの真空排気にはイオンポンプ、チタンゲッターポンプ、非蒸発型チタンゲッターポンプを使用しているが、リング平均真空圧によるビーム寿命の違いを測定するため、可能な限りの台数のイオンポンプをオフにした状態での測定も行った。また、以前よりビーム入射用静電セプタム(ESS)の電圧印加によりビーム寿命が悪化することが解っていた。ビーム入射に影響がないよう印加電圧と電極ギャップの調整することで、寿命悪化の原因が電場のビーム軌道への影響ではないことを確認できたので、ビーム蓄積後でESSをoffにして測定を行った。表1に測定時の条件を示した。また、meas.1, 2, 3は同じマシンタイム中に測定し、meas.4のみ別のマシンタイムに測定を行った。

表1：ビーム測定時の機器使用

	Ion pump : number of use	ESS
meas. 1	12 (all)	off
meas. 2	12 (all)	On
meas. 3	2	off
meas. 4	12 (all)	off

3.1 蓄積電流

図2に蓄積電流とビームサイズの測定結果、図3に図2の蓄積電流から計算したビーム寿命を示した。図3から測定開始（電子ビーム冷却停止）後からビーム寿命は悪化して行き、ある程度時間がたつたところで一定になるように考えられる。これは測定開始時には電子ビーム冷却によりエミッタンスが非常に小さいビームが測定開始と同時に冷却力を失い、Intrabeam-scatteringによりエミッタンスが増大していくと考えられる。この間もelectron-captureと多重散乱は起こっていて、ビームも損失しているが非常にエミッタンスの良いときは損失すると思われるビーム中心周辺部は粒子が少なく損失する粒子数も少ないため電流値でみると寿命は良い。図2のビームサイズ10mm前後でビーム寿命が一定となる。これはIntrabeam-scatteringによるエミッタンスの増大の影響がなくなってきたためと考えられる。式(1)ではビーム寿命は一定であり、図3に示すTcが残留ガスとの散乱によるビーム寿命といえる。

表2：蓄積電流によるビーム寿命の推算

	T _c : Estimated Beam lifetime (sec)
meas. 1	1.6 e4
meas. 2	1.2 e4
meas. 3	3.3 e3
meas. 4	7.9 e3

3.2 真空圧

上記のようにビーム損失が残留ガスとの衝突散乱によるものならば、ビーム損失の頻度が蓄積粒子数（電流）及び真空（残留ガス密度）Pに依存し、衝突の起こる割合を衝突断面積σとするとビーム寿命τは次の式で表される。

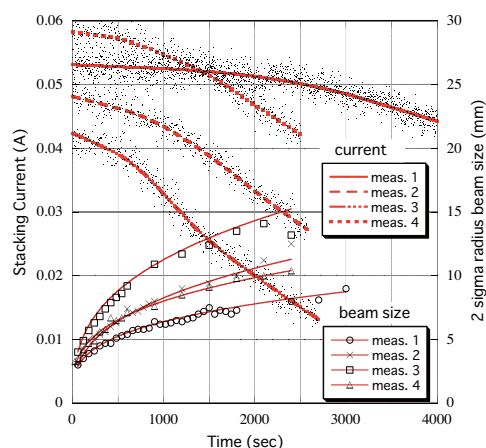


図2：蓄積電流、ビームサイズの測定結果

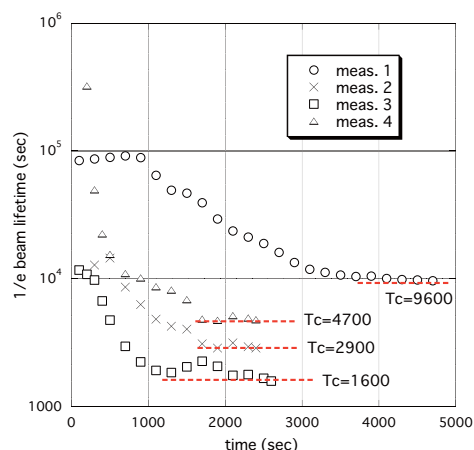


図3：ビーム寿命計算値

図2の測定値の20secごとの平均値に回帰曲線フィッティングにより算出した。

$$\tau \propto 1/(\sigma \cdot P)$$

したがって測定真空圧からビーム寿命を計算することができる。真空計はビーム軌道上を測定してはいないが近い位置に設置している。また、真空計6台の平均値はダクト形状、ガス放出量、真空ポンプ性能から計算した真空圧平均値に十分近い値である[3]。したがって真空計平均値を用いてビーム寿命の見積りを行った。表3に測定値と計算結果を示す。

表3：真空圧によるビーム寿命の推算

	Average Pressure (Pa)	T _p : Estimated Beam lifetime (sec)
meas. 1	1.9 e-8	1.6 e4
meas. 2	2.6 e-8	1.2 e4
meas. 3	9.4 e-8	3.3 e3
meas. 4	3.9 e-8	7.9 e3

3.3 ビームエネルギー損失

図4はmeas.4で測定したプロトンビーム周回周波数1.61MHzの34番目ハーモニックのショットキーノ

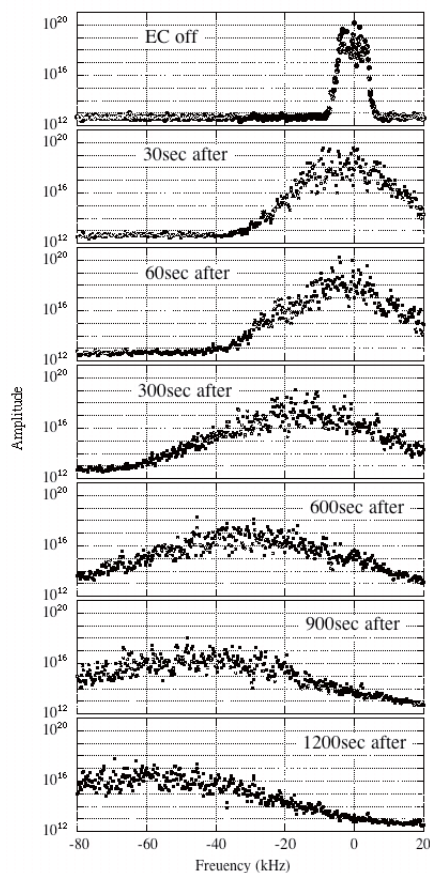


図4：ショットキーノイズ

イズの測定結果である。ノイズ信号の幅はビームエネルギーの広がり、周波数の移動はビームと残留ガスとの衝突散乱によるビームエネルギーの減少である。このビームエネルギーの移動量と Bethe-Bloch の式を用いた阻止能からビーム軌道上の残留ガス密度を見積もることができる。図5に示したショットキーノイズの移動量から計算したビームエネルギー損失率、真空圧（残留ガス密度）、ビーム寿命を表4に示した。

表4：エネルギー損失によるビーム寿命の推算

	Calculated energy loss rate (MeV/m)	Estimated Pressure (Pa)	T_S : Estimated Beam lifetime (sec)
meas. 1	6.11 e-13	2.8 e-8	1.1 e4
meas. 2	1.55 e-12	7.2 e-8	4.3 e3
meas. 3	2.82 e-12	1.3 e-7	2.4 e3
meas. 4	1.20 e-12	5.6 e-8	5.5 e3

4. 考察

上記において蓄積電流、真空圧及びショットキーノイズの測定からそれぞれビーム寿命を見積もることができた。Intrabeam-scatteringの影響がなくなり、寿命定義の式(1)に従ったビーム損失を行う（ビーム寿命が一定）ビーム状態のときの計算値Tcを寿命の規

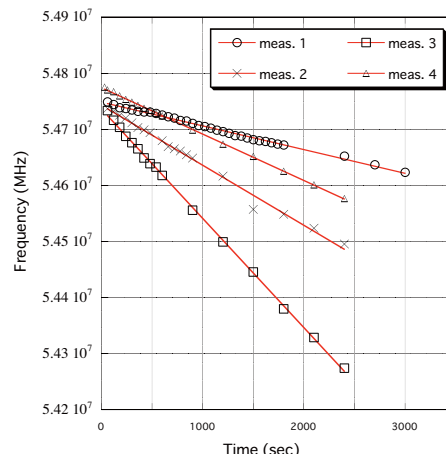


図5：ショットキーノイズピークの測定値

準値とし、Tp、Tsをノーマライズした結果を表5に示した。

表5：推算ビーム寿命の比較

	Tp/Tc	Ts/Tc
meas. 1	1.7	1.1
meas. 2	4.1	1.5
meas. 3	2.1	1.5
meas. 4	1.7	1.2

Bethe-Blochの式による見積りTsも真空計平均値からのTpもTcとほぼ同じ値が得られている。しかし、Tp/Tcの値から実際のビーム軌道の平均上真空圧は真空計平均値の1.7~2倍程度高いと考えられる。これは平均真空圧の見積り誤差と真空計には測定されない小領域でのガス放出が原因と考えられる。そのため平均真空圧の見積りとは条件の異なるMeas.2, 3で差が大きいと思われる。さらにMeas.2のTp/TcではESSの電圧印加によるガス放出によってビーム軌道上の平均真空圧を2倍以上悪化させていることがわかる。

平均真空圧が 10^{-9} Pa台まで到達している現状のS-SLRにおいて局所的な真空の悪化がビーム寿命に大きく影響する。今後のS-LSRのビーム寿命改善には全体の真空圧ではなくビーム軌道周辺の内容物のガス放出要因の排除が重要と考えられる。

参考文献

- [1] T. Shirai, et al., "One dimensional beam ordering of protons in a storage ring", Physical Review Letters, 98, p. 204801 2007
- [2] M. Tanabe, et al., "Status of the storage of mg+ beam at S-LSR", Proceedings of the 3rd Japan Accelerator Society Meeting, p. 600, 2006
- [3] H. Tongu, et al., "Present status of the Vacuum System for S-LSR", Proc. of the 1st Annual Meeting of PARTICLE ACCELERATOR SOCIETY of JAPAN, p. 221-223, 2004