

Study of the residual gas in S-LSR

Hiromu Tongu^{A)}, Akira Noda^{A)}, Hikaru Souda^{A)}, Masao Nakao^{A)},
Akihisa Wakita^{A)}, Toshiyuki Shirai^{B)}, Masahiro Ikegami^{C)}

A) Advanced Research Center for Beam Science, Institute for Chemical Research, Kyoto University
Gokano-sho, Uji, Kyoto, 611-0011 Japan

B) National Institute of Radiological Sciences

4-9-1 Anagawa, Inage-ku, Chiba-shi, 263-8555 Japan

C) Kansai Photon Science Institute, Japan Atomic Energy Agency
8-1 Umemidai Kizugawa-city Kyoto 619-0215 Japan

Abstract

S-LSR is a compact ion storage and cooler ring to inject beam of the 7MeV proton and the 40MeV Mg⁺. The average vacuum pressure measured by the vacuum gauges without beam was achieved up to about 4×10^{-9} Pa. The beam lifetime can be estimated with the vacuum pressure or the loss-rate of the beam energy (the Schottky-noise). The values of the estimated lifetime are nearly equal to the measured lifetime values (the storage current).

イオン蓄積リングS-LSRにおける残留ガスの考察

1. はじめに

京都大学化学研究所ではイオン蓄積・冷却リングS-LSRを用いて7MeVプロトンおよび40keV Mg⁺のビーム冷却実験を行ってきた。これまでの実験研究により電子ビーム冷却によるプロトンビームの1次元Ordering現象[1]などの成果をあげている。また、S-LSRはレーザー冷却を用いてクリスタルビームを実現できるラティス構造を考慮し、設計されているリングであり、クリスタルビームの実現を目標にMg⁺ビームのレーザー冷却による3次元冷却の実験を進めている[2][3]。クリスタルビームとは究極にまで冷えたビームであり各研究施設で理論、実験ともに研究されてきたが、まだ実験的に確認されるに至っていない。

ビーム冷却実験を行うには冷却時間、測定時間のためのビーム寿命が必要である。S-LSRではMg⁺ビーム蓄積のビーム寿命は現状で10秒程度でありビーム冷却実験におけるビーム測定時間の改善による効果は大きいと考えられる。本発表ではS-LSRの真空環境及びビーム寿命の現状について報告する。

2. ビーム寿命

加速器実験においてビームの寿命は実験や測定を行うために必要な時間であるとともに、ビームの挙動を知るパラメータの一つでもある。ビーム軌道上の真空圧(残留ガス密度)との散乱によって起こるビーム損失はビーム寿命に端的に影響し、エミッタンスなどビーム性能を左右する大きな要因となる。S-LSRにおいてビーム冷却、RF電圧などの蓄積粒子へのエネルギー供給がない場合、電荷移行と多重散乱によりビーム散乱がおり、蓄積粒子がアクセプ

タンスを越えことによってビームが損失する。プロトンとMg⁺では異なるビーム散乱過程がビーム損失の主原因となっている。図1に示す計算結果からプロトンビームでは衝突散乱、Mg⁺は電子捕獲が主原因であり、プロトンに比べMg⁺の寿命は非常に短い。冷却時間、計測時間を考慮すると10秒以上のビーム寿命が必要と考える。図1よりS-LSRは 1×10^{-8} Pa以下の平均真空圧を維持する必要がある。

3. 真空系の現状

S-LSRの真空系は平均真空圧を 5×10^{-9} Paを目標に設計している。ほぼ全ての真空ダクトは950℃のプレベキング処理を採用し[4]、メインポンプはチタンゲッターポンプ、スパッターイオンポンプを使用し排気を行っている。また、ポンプの設置スパー

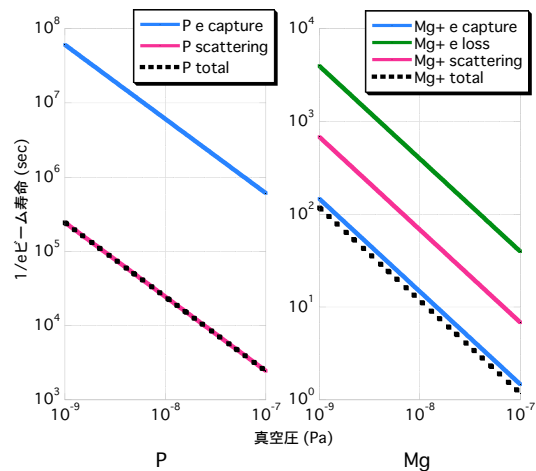


図1：真空圧と残留ガスとの散乱によるビーム寿命計算結果

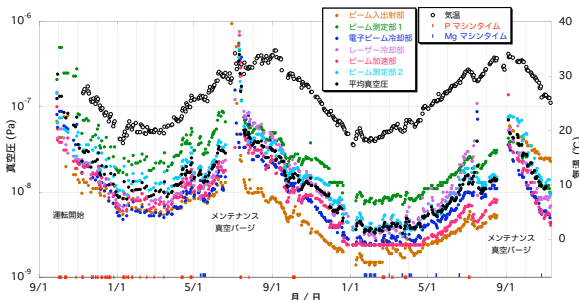


図2：真空圧測定結果
2005年9月の真空系運転開始からの
各直線部の真空計(6個)による測定。

スが無い偏向部には非磁性NEGポンプを用いることで計算では 3×10^{-9} Paを実現できる。S-LSRの設置されているイオン線形加速器実験棟では室温を積極的にコントロールしていないため図2のように外気温によって室温が大きく変化し、S-LSRの真空圧は大きく影響される。そのため実験によっては季節を選んで行う必要がある。しかし気温の低い期間は 4×10^{-9} Paに到達している、

4. ビーム寿命の測定

$1/e$ ビーム寿命(τ)は下記のように定義される。

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

ここで I_0 、 I_t は測定開始時および t 時間後のリング蓄積電流である。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、常用しているチューンでは四重極マグネット位置での鉛直方向 ± 23 mmが最も狭い。散乱によるビーム損失は蓄積電流、エネルギー損失などビーム測定結果から推測することができる。このためビーム軌道上の残留ガスの状態を知ることが可能である。

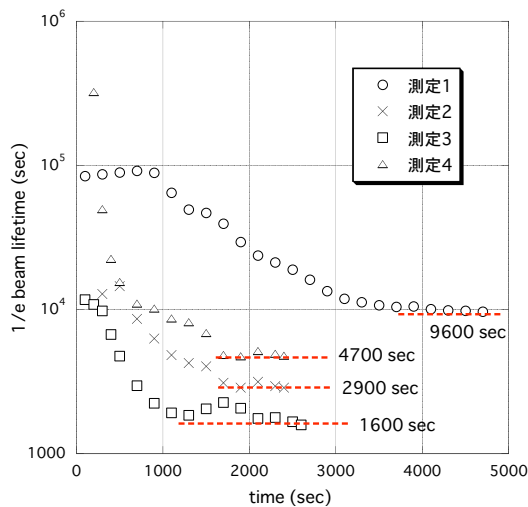


図4：プロトンビームの寿命測定結果
20秒間測定の平均値に帰帰曲線
フィッティングを行い算出した。

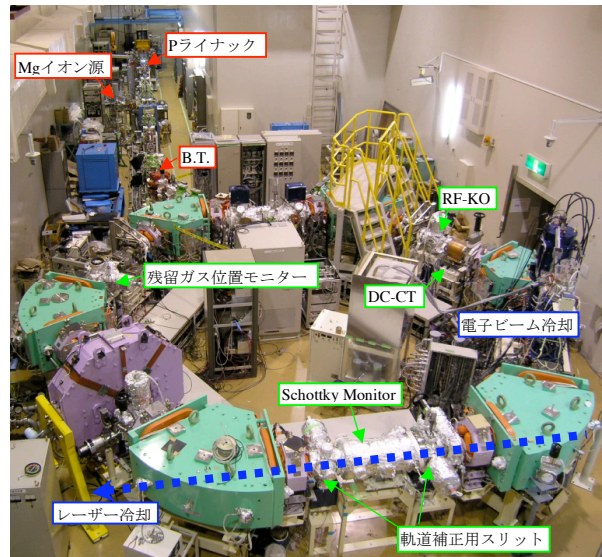


図3：S-LSR全景
静電ピックアップによる蓄積電流測定は
QMダクトに設置した静電位置モニター(12個)
またはRF-KOの電極を利用。

現在、S-LSRには図3のようにビーム測定装置が設置されている。これらを用いて蓄積電流及びビームエネルギーの測定をすることができる。また、真空計(リング直線部に各1個、計6個)から平均真空圧を推定することができる。

4.1 プロトンビーム

図4に電子ビーム冷却停止後にDC-CTを用いて測定した蓄積電流から計算したビーム寿命を示す。ビーム冷却停止後からゆっくりと寿命が悪化し、ある程度時間が経つとビーム寿命はほぼ一定となる。測定開始時には電子ビーム冷却によりエミッタンスの非常に小さいビームが測定開始(冷却停止)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。この間も電子移行や多重散乱は起こっておりビーム損失しているが、非常に良いエミッタンスのときは損失すると考えられるビーム周辺部には粒子が少なく損失する粒子数も少ないため電流値で見ると寿命は良い。ある程度時間が経つとIntrabeam-scatteringによりエミッタンスが増大し、ビーム内の粒子も通常の分布になりビーム寿命が一定となると考えられる。[5]

また、ショットキーノイズによる周回周波数の変化量測定によりビームエネルギーの損失を見積もることができ、Bethe-Blochの式を用いてビーム軌道上のガス密度を算出できる。表1に各測定結果を示す。真空ダクト内での印加電圧による小領域のガス放出が確認されている測定2を除く測定では実測値(蓄積電流、ビームエネルギー測定からの計算値)は計算値(真空圧測定からの計算値)の6割ほどの値となっている。[5]

表1：プロトンビームの寿命測定結果

	1/eビーム寿命 ×1000 sec		
	蓄積電流測定	エネルギー測定	真空圧測定(圧力Pa)
測定1	9.6	11	16 (1.9e-8)
測定2	2.9	4.3	12 (2.6e-8)
測定3	1.6	2.4	3.3(9.4e-8)
測定4	4.7	5.5	7.9(3.9e-8)

4.2 Mgビーム

Mgビームの寿命測定はプロトンビームと比較し蓄積電流が少なくDC-CTでは推測できないため静電位置モニター電極板を用いてピックアップ電圧から蓄積電流測定を行った。また、プロトンビームとは異なりリング入射からビーム冷却は行っていない。表2に測定結果を示す。

表2：Mgビームの寿命測定結果

	Tune	ビーム寿命 (sec)	
		蓄積電流測定	真空圧測定(圧力Pa)
測定5	(1.64, 1.20)	27.5	30.8(3.9e-9)
測定6	(2.07, 0.72)	8.8	10.1(8.3e-9)
測定7	(2.07, 1.07)	3.8	5.6(1.7e-8)

測定時期が異なるためチューンおよび測定真空圧は違うが、プロトンビームと同様に実測値（蓄積電流、ビームエネルギー測定からの計算値）が計算値（真

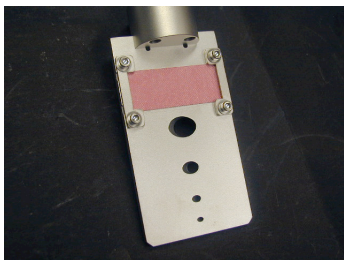


図5：ビーム・レーザー軌道補正用スリット
ステンレス板に蛍光板、φ10, 6, 3, 2mmのスリットを
設けている。真空ダクト上側から下ろし、
ステンレス板下面を用いてアパーチャ調整を行う。

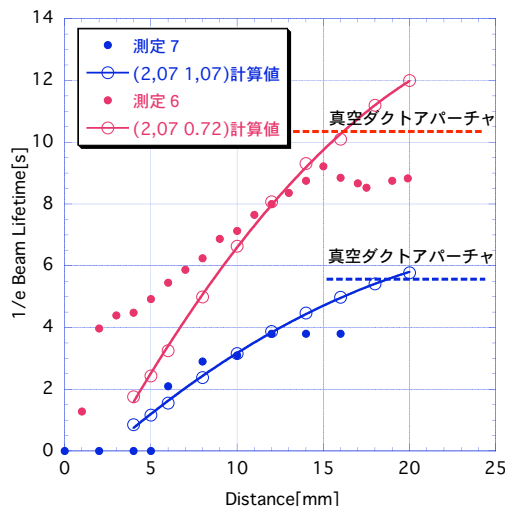


図6：アパーチャサイズとビーム寿命
横軸は鉛直方向アパーチャ（半径）

空圧測定からの計算値）に比べやや寿命は短い傾向は一致している。

測定6、7については図5のレーザー冷却用の軌道補正スリットを用いて積極的に鉛直方向アパーチャを狭くしてビーム寿命の測定を行った。図6のように測定結果は計算値のラインに沿うが、アパーチャが狭くなるに従い計算値よりも実測値の寿命が長くなった。

5. 考察

測定数は少ないが、プロトン、Mg⁺のビーム寿命の実測値はともに計算値に比べ短く、プロトンビームはその傾向が強い。真空計測定値とビーム軌道上の真空圧は局所的なガス放出などもあり一致しないのは当然だが、計算値と実測値との差がプロトンビームのほうが明らかに大きいのは蓄積電流の違いによるものと推測する。今回の測定ではプロトンビームの蓄積電流は60~30 μA、Mg⁺は数 μAである。また、プロトンビームは測定直前に電子ビーム冷却を行っていることも影響しているかもしれない。

Mg⁺ビーム寿命においてアパーチャの大きいときは計算値によくあっている。また、上記四重極マグネット位置でのアパーチャ制限も計算値に近い値を得ている。しかしながらアパーチャの狭くなると計算値に合わなくなる。これはビーム軌道補正が図5のφ10mmスリットを使用しているためアパーチャ中心位置との誤差が大きく影響していると考えられる。今後は少蓄積電流、アパーチャの狭い状態やチューンの違いによるMg⁺ビーム寿命測定のデータ蓄積を行い3次元冷却実験などにむけて真空系およびビーム寿命の改善を進めたい。

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., "Laser Cooling of Mg⁺ beam at S-LSR", Proc. of the 4th Annual Meeting of PARTICLE ACCELERATOR SOCIETY of JAPAN, (2007) 118-120.
- [3] H. Souda, et al., "Beam Optimization for Laser Cooling at S-LSR", Proc. of the 4th Annual Meeting of PARTICLE ACCELERATOR SOCIETY of JAPAN, (2007) 327-329.
- [4] 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, (2004) 221-223.
- [5] H. Tongu, et al., "Measurement of Beam Lifetime in S-LSR", Proc. of the 4th Annual Meeting of PARTICLE ACCELERATOR SOCIETY of JAPAN, (2007) 324-326.