

## VACUUM AND BEAM LIFETIME IN S-LSR

Hiromu Tongu<sup>A)</sup>, Toshiyuki Shirai<sup>A)</sup>, Akira Noda<sup>A)</sup>, M Tanabe<sup>A)</sup>, S Fujimoto<sup>A)</sup>, H Souda<sup>A)</sup>,  
M Ikegami<sup>A)</sup>, A. Takubo<sup>B)</sup>, S. Iwata<sup>B)</sup>, S. Shibuya<sup>B)</sup>, T. Takeuchi<sup>B)</sup>, K. Noda<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> Institute for Chemical Research, Kyoto University

1-1 Myavenue, Mycity, Myprefecture, 001-0001

<sup>B)</sup> Accelerator Engineering Corporation

2-62-8-507 Higashi-Ikebukuro, Toshima-ku, Tokyo, 170-0013

<sup>C)</sup> National Institute of Radiological Sciences

2-62-8-507 Higashi-Ikebukuro, Toshima-ku, Tokyo, 170-0013

### Abstract

S-LSR is a compact ion storage and cooler ring for R&D of the accelerator for the medical treatment. The vacuum system for S-LSR has been operated from September 2005. The study of the vacuum and the beam lifetime for the proton beam and Mg beam are presented. The design vacuum pressure in S-LSR is  $3 \times 10^{-9}$  Pa. But the measured vacuum pressure is about  $7 \times 10^{-9}$  Pa because a vacuum leak trouble had happened while lowering the temperature of the baking. The lifetime of 7MeV proton and 35keV Mg<sup>+</sup> beam are measured about 55000sec and 13sec in the present status. They are almost consistent with the calculation.

## S-LSRの真空とビーム寿命

### 1. はじめに

イオン蓄積・冷却リング、S-LSRは重粒子線がん治療用小型シンクロトロンの研究、開発を目的として放射線医学総合研究所（NIRS）と共同で研究開発し、京都大学化学研究所に建設された[1]。

S-LSRはリング周長、ドリフトスペース長、曲率半径がそれぞれ約22.6m、1.86m、1.05mの6回対称リングであり、ビーム入出射は同一直線部で行われる。図1のようにその他の直線部にはビーム加速、レーザー冷却、電子ビーム冷却などに使用するコンポーネントを設置しながらも10m×10mのエリアに収まるよう小型化を実現している。

2005年9月に建設が終わり、真空排気に続きベーキングによるエイジングを行った。ベーキング後1ヶ月で約 $5 \times 10^{-8}$  Paの平均真空圧に到達することができた。その後、既存の7MeV陽子線形加速器を用いたプロトンビームの入射によるコンディショニングを進めてきた。昨年中にビームスタックに成功し、さらに電子ビーム冷却の効果を確認できた。単バンチ入射で電子ビーム冷却を使用し、平均真空圧 $2 \times 10^{-8}$  Paにおいて約300uAの蓄積電流で約5000secのビーム寿命を測定できた。

2006年には真空系のエイジングも進み平均真空圧は $1 \times 10^{-8}$  Pa以下に達した。引き続きプロトンビームの冷却実験を進めると同時にビーム取出し実験、Mg<sup>+</sup>イオン源の建設、ビーム入射のコンディショニングを行ってきた [2] [3] [4]。現在、レーザー冷却実験のための装置整備のための真空排気系立ち上げ、ベーキングを終了した。

本発表ではS-LSR真空系の現状及び7MeVプロトンビーム(7MeV)とMg<sup>+</sup>ビーム(35keV)のリング蓄積

におけるビーム寿命と真空圧の考察をについて報告する。

### 2. 真空系

#### 2.1 排気システム

入射器とビームトランスポートではターボ分子ポンプによる排気ユニットを使用し、それぞれ $10^{-5}$ Pa、 $10^{-7}$ Pa台の真空を維持している。トランスポートと

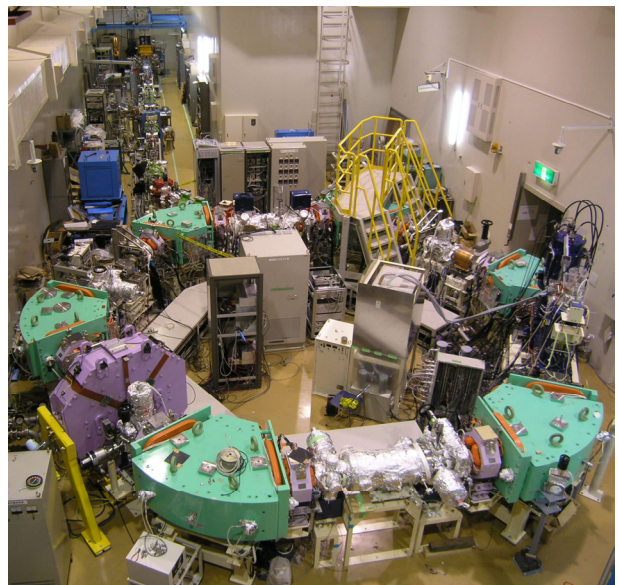


図1：S-LSR全景。左上に7MeVプロトンライナック及びMg<sup>+</sup>イオン源を設置。

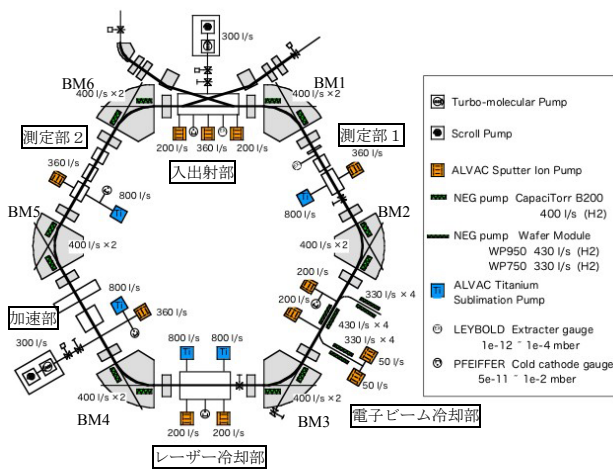


図2：S-LSRの真空排気システム

リングの間はチタンサブレーションポンプとイオンポンプによる差動排気と差動排気区間のベーキングすることによりリング内を超高真空に維持するよう設計されている。図2のようにリング偏向部ではNEGポンプを真空ダクト内に設置し、直線部ではチタンサブレーションポンプとイオンポンプを使用している。真空圧は各直線部に設置した真空計により測定できる。さらに超硬真空を実現するため偏向部真空ダクト950℃のプレベーキング、直線部ダクトはセラミック部等の溶接前にアニーリングによる脱ガス処理を採用し低ガス放出速度の真空系を製作することができた[5]。

2.2 到達真空圧

建設後に行ったベーキングは12.5℃/hで200℃（セラミック部等は180℃）まで昇温し、スケジュールの関係から36時間のみ保温、昇温と同じペースで降温させた。降温中に測定部1 (Vacuum Gauge 42)で

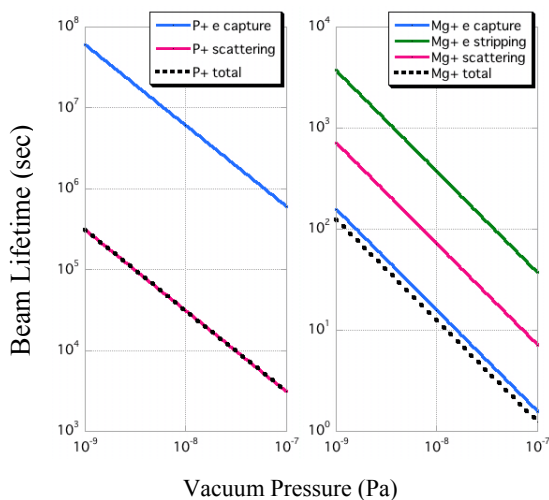


図4：プロトンビーム（左）とMg<sup>+</sup>ビーム（右）の計算による真空圧とビーム寿命の関係

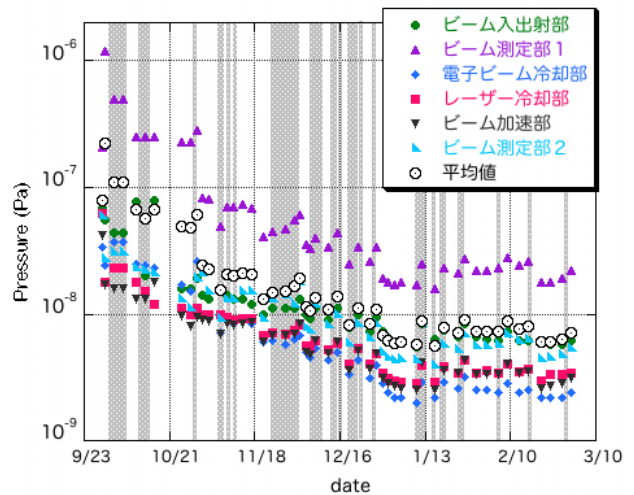


図3：ベーキング後の図2に示す各直線部の真空計とその平均値のトレンド。10月末にリークが止まり、真空圧が下がり始めた。グレーの背景部のマシンタイム中は真空が悪化し運転停止時にエイジングが進んでいる。

リーク事故があり、 $1 \times 10^{-7}$  Pa以下には下がらなかった。図3のようにベーキングの約1ヶ月後にリークを完全に止めることができ真空計平均で約 $5 \times 10^{-8}$  Paに到達した。エイジングにより6ヶ月後には $7 \times 10^{-9}$  Paの平均真空圧を実現したが測定部1はリーク事故、及び直接ベーキングできないDCCT真空ダクトが設置されているため $10^{-9}$  Pa台に到達できていない。真空ダクト製作前に行ったテストダクトによるガス放出速度測定結果及び上記の真空系から推定されるリング平均真空圧は $3 \times 10^{-9}$  Paを実現できると考えている[5]。

3. ビーム寿命

図4に示すように質量分析計によるガス成分測定結果（図5）を用いてビーム寿命の計算を行った[6]。表1に上記の目標真空圧におけるビーム寿命を示す。

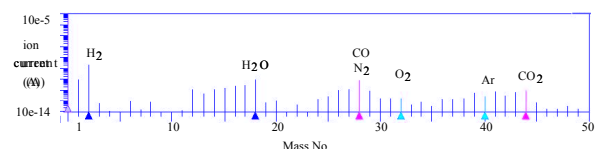


図5：質量分析計によるベーキングから6ヶ月後の残留ガスの測定結果。

	Beam lifetime (sec)			
	capture	stripping	scatterin g	total
P	20300000	-	104000	103000
Mg <sup>+</sup>	53	1240	239	42

表1：平均真空圧 $3 \times 10^{-9}$  Paにおけるリン

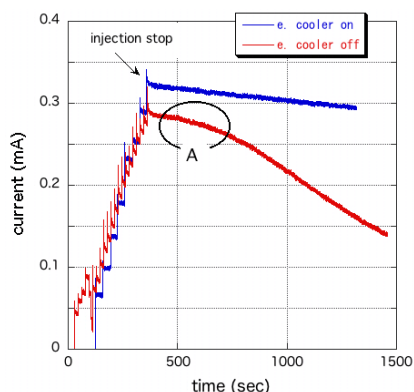


図6：DCCTを使用したプロトンビームの蓄積電流の測定結果。ビームスタック後電子ビーム冷却を使用した場合と使用しない場合。

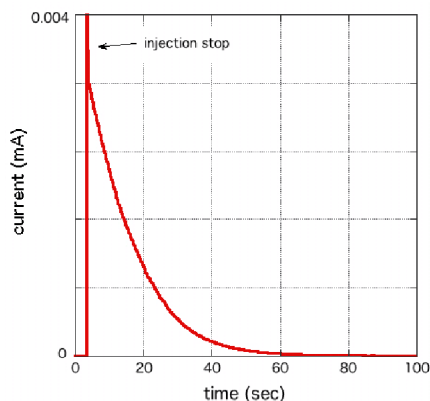


図7：静電ピックアップを使用したMg<sup>+</sup>ビームの蓄積電流の測定結果。

	(1) Measured Lifetime (sec)	(2) Measured Pressure (Pa)	(3) Calculated Lifetime (sec)
P	8600	$4.6 \times 10^{-8}$	6700
P	55100	$7.3 \times 10^{-9}$	42500
Mg <sup>+</sup>	13	$1.0 \times 10^{-8}$	12.5

表2：図6、図7より推定したビーム寿命(1)と真空計による平均真空圧(2)、及びその真空圧から計算したビーム寿命(3)。

低エネルギーのイオン蓄積リングにおいてビーム損失の主な原因は残留ガスと加速粒子との多重散乱、電荷交換反応である。図4及び表1よりプロトンビームにおいてビーム損失はほとんど多重散乱によるもので寿命は真空とアパーチャーで制限されていると思われる。Mg<sup>+</sup>ビームは電子捕獲が支配的であることがわかる。

真空圧から算出したビーム寿命と比較するためDCCTを用いたビーム寿命測定は真空以外のビーム損失要因をできるだけ無くして行った。高周波加速をせず電子ビーム冷却を用いたビームスタックを行い、入射終了後と同時に電子ビーム冷却を停止し測

定を行った。また局所的な真空悪化が確認されている入射用静電セプタムも入射終了後に停止した。プロトンビームの蓄積電流の測定結果を図6に示す。

蓄積電流、真空圧その他の条件によって多少異なるが電子ビーム冷却停止から500～1000秒後に蓄積ビームの状況が変化しビーム寿命が悪化する。これはビーム軌道上のガスとの相互作用によるビームエネルギー損失が原因と考えている。エネルギー損失によりビームサイズが大きくなり、ダイナミックアパーチャーから外れて急激にビームが損失し寿命が悪化する。このことからビーム寿命の推定には図6のA部の測定点を用いた。同様にMg<sup>+</sup>ビームもプロトンビームほど明確ではないが蓄積状態の変化が見られた(図7)。

表2に蓄積電流から推定したビーム寿命と真空計による平均真空圧及びその真空圧から計算したビーム寿命を示した。測定値と計算値はよく合っていると思われる。しかしながら35keV Mg<sup>+</sup>ビームにおける電子捕獲による散乱断面積についてはデータ不足であることから計算でMg<sup>+</sup>ビームはエネルギーに対して最大値になると考える600keV付近の散乱断面積を用いて推定した。よって次に支配的である多重散乱による制限を受けるがコミッショニングを進めることでビーム寿命の改善は十分にあると考える。

#### 4. まとめ

今後、BM真空ダクト内の運動量分散制御用電極を使用したビームコミッショニングを進めるが、計算ではビーム損失によるガス放出を無視すれば、リング平均真空圧 $3 \times 10^{-9}$  Paが電極使用により $4.2 \times 10^{-9}$  Paになる。さらにMg<sup>+</sup>ビーム寿命は電子捕獲が支配的であるが、電極によるダイナミックアパーチャーは極端に減少し多重散乱によりビーム寿命は悪化すると考えられる。よって真空系のエイジングまたは真空圧の改善が急務と考える。

#### 参考文献

- [1] A. Noda et al., "Compact Ion Accumulation and Cooler Ring in Combination with Laser", Proc. of Symposium on Accelerator Science and Technology, (2001) 125-127.
- [2] T. Shirai et al., "Electron Cooling Experiments at Ion Storage Ring, S-LSR", Proc. of The 3rd Annual Meeting of PARTICLE ACCELERATOR SOCIETY of JAPAN, (2006).
- [3] T. Fujimoto et al., "Injection and Extraction System for S-LSR", Proc. of The 3rd Annual Meeting of PARTICLE ACCELERATOR SOCIETY of JAPAN, (2006).
- [4] M. Tanabe et al., "Status of the Storage of Mg<sup>+</sup> Beam at S-LSR", Proc. of The 3rd Annual Meeting of PARTICLE ACCELERATOR SOCIETY of JAPAN, (2006).
- [5] 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.
- [6] D. Habs et al., "FIRST EXPERIMENT WITH THE HEIDELBERG TEST STORAGE RING TSR", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B43 (1989) 390-410.