

The Vacuum ducts for S-LSR

H.Tongu ^{A)}, M.Ikegami ^{A)}, T.Shirai ^{A)}, M.Tanabe ^{A)}, A.Noda ^{A)}, S.Fujimoto ^{A)}, S. Shibuya ^{B)},
T.Takeuchi ^{B)}, K.Noda ^{C)}, J.Kanakura ^{D)}, M.Sano ^{D)}

^{A)} Institute for Chemical Research, Kyoto University, Gokanosyo, Uji-City, 611-0011, Kyoto, Japan

B) Accelerator Engineering. Co. Ltd., 4-9-1, Inage-Ku, Chiba-City 263-8555, Chiba, Japan

^{C)} National Institute of Radiological Sciences, 4-9-1, Inage-Ku, Chiba-City 263-8555, Chiba, Japan

D) Sumitomo Heavy Industries, Ltd., 5-2, Soubiraki-Cho, Niihama-City, 792-8588, Ehime, Japan

Abstract

The beam ducts for S-LSR is required the low rate of outgassing and the construction to utilize the electrodes for dispersion control. The beam ducts in the arc sections are applied the treatment of pre-baking with 950 °C. As the result, the rate of outgassing of $\sim 3 \times 10^{-10}$ Pa·m³·s⁻¹·m⁻² in the beam duct is expected to be obtained and the average vacuum pressure can be estimated to be 5×10^{-9} Pa. In this condition, the beam lifetime of Mg⁺ beam (35keV) will become to be over 30 sec. The production of the vacuum ducts and the estimation of the beam lifetime are presented.

S-LSRの真空ダクト

1. はじめに

現在、京都大学化学研究所 (Institute of Chemical Research: ICR) では、重粒子線がん治療用小型シンクロトロン開発のためのイオン蓄積・冷却リング S-LSR が建設中であり夏期には既存の 7MeV 陽子線形加速器を用いたプロトンビームの入射、ビームコンディショニングを行う予定である。S-LSR は先進小型加速器事業の一環として放射線医学総合研究所 (National Institute for Radiological Sciences: NIRS) との共同研究により開発を行い、フェムト秒レーザーイオン源による高エネルギーイオンビームの蓄積と電子ビーム冷却法、レーザービーム冷却法によるビーム物理研究および速い取出しによるビーム利用を目的として設計されたコンパクトなイオン蓄積リングである[1]。

S-LSR はリング周長、ドリフトスペース長、曲率半径はそれぞれ約 22.6m, 1.86m, 1.05m で6回対称

リングを構成し、取出しビームの利用エリアを確保した上でイオン線形加速器実験棟の実験エリアに設置できるよう小型化を実現している。ビーム入出射は同一ストレートセクションで行い、各セクションにはビーム加速、そしてレーザー冷却、電子ビーム冷却などのコンポーネントが設置される[2]。

図1に S-LSR のアークセクションの図を示す。H 型偏向電磁石と四重極電磁石の間にはフィールドクランプが設置されるためコンポーネント間が狭くアクセスが容易でない構造を持つ。そのためアークセクション真空ダクトはベローズを用いた偏向電磁石と四重極電磁石の共通真空ダクトを採用した。ダクト内部には静電ピックアップ型のビームポジションモニタと蓄積ビームの運動量分散補正を行うための静電場電極が設置される。

2. ビーム寿命と真空度

低エネルギーのイオン蓄積リングにおいてビーム

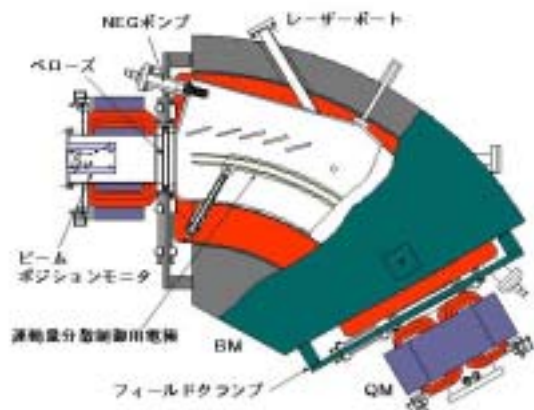


図 1 : S-LSR アークセクション。

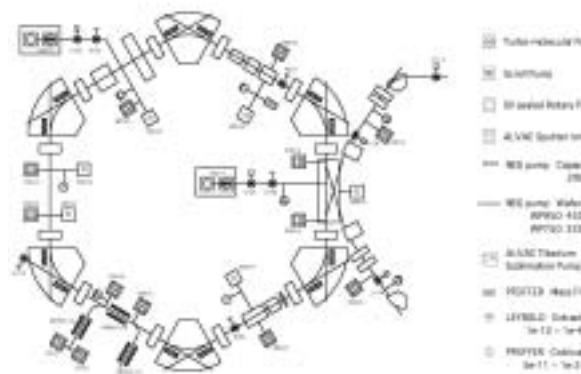


图 2 : S-LSR真空排气系

	プレベークング	制御電極	平均真空圧 (Pa)
— · — · —	なし	使用しない	1.3×10^{-8} Pa
————	あり	使用する	7.3×10^{-9} Pa
-----	あり	使用しない	5.3×10^{-9} Pa

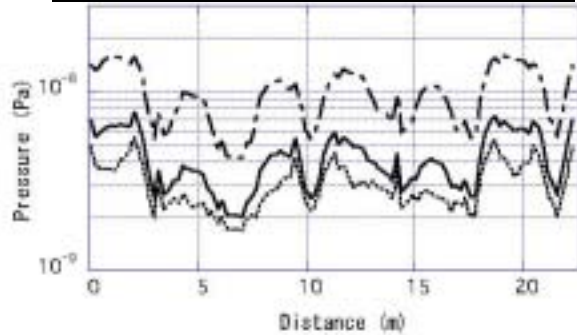


図3：S-LSR真空圧の計算値。残留ガスの組成は H_2 :75%, CO :25%で計算し、アークセクションはプレベークングを行い、ストレートセクションはアニールによる脱ガス処理を採用する。

損失の主な原因はビーム軌道上の残留ガスと加速粒子との多重散乱、電荷交換反応であり、S-LSRにおいて蓄積するイオンのうち Mg^+ (35keV) ビーム寿命が最も短いことがわかっている[3]。S-LSRではビーム冷却実験から要求されるビーム寿命を得るには 10^{-9} Pa 台のリング平均真空圧が必要と考えられ、その実現には放出ガス量を抑えた真空ダクトが重要となる。

2.1到達真空度

図2に示すようにリングのストレートセクション真空排気系にはモニタ等の各コンポーネントダクトにチタンサブリメーションポンプとイオンポンプを組み合わせ使用し、アークセクションでは設置スペースの問題からNEGポンプのみで排気を行う。小型化を特徴としているS-LSRでは超高真空を実現するためには真空ポンプの排気速度よりも真空系内からのガス放出量の軽減が重要であり、S-LSRの真空ダクトは製造工程において約950℃、2時間温度保持の真空焼出し（プレベークング）を採用した。これと同工程にて製作した真空テストダクトを用いてガス放出量の測定を行った[4]。

真空系を約200℃、36時間保持の現場ベークングを行った後の測定でガス放出速度はプレベークングをしない場合に比べて1/4に減少した。また、大気圧雰囲気での長期間保管後もプレベークングの効果は持続できていることがわかった。上記の測定結果からS-LSRの平均真空圧は約 5×10^{-9} Pa と計算できる（図3）。

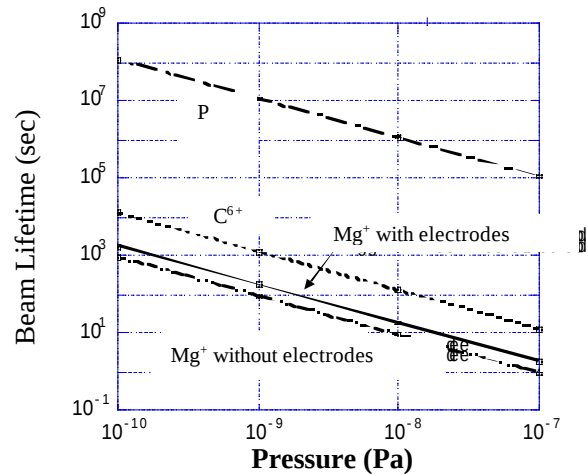


図4：S-LSRにおける p, C^{6+}, Mg^+ のビーム寿命。横軸はリング内の平均真空圧、残留ガス組成は H_2 :74%, CH_4 :7%, CO :15%, CO_2 :4%で計算。

表1：リング平均真空圧 5×10^{-9} Paにおけるビーム寿命。

Ion	with electrodes	Beam Lifetime (sec)			
		Scattering	e-capture	e-loss	Total
P	×	4.36×10^3	2.45×10^3	***	2.32×10^3
C^{6+}	×	2.69×10^3	256	***	256
Mg^+	×	533	44	362	36
Mg^+	○	51	32	263	18

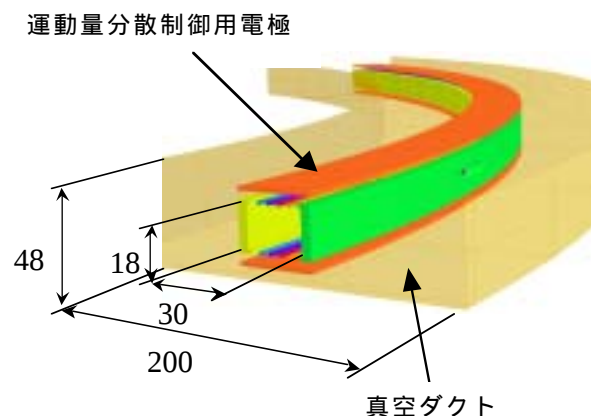


図5：アークセクション真空ダクトでのアパーチャー。運動量分散制御用電極 (electrode)の使用により水平、鉛直それぞれ $\pm 100, \pm 24$ mmから $\pm 15, \pm 9$ mmに減少する。

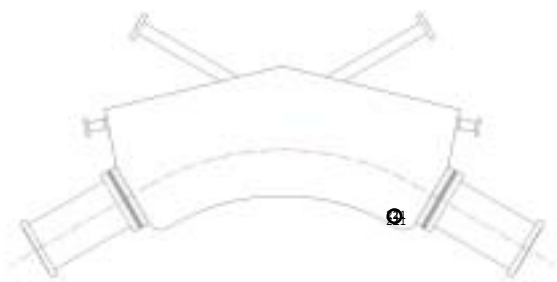


図6：真空ダクトの歪み量測定点。

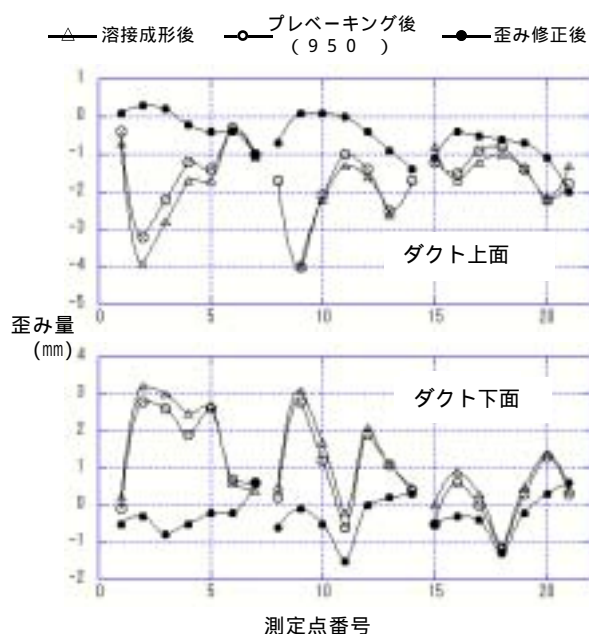


図7：真空ダクト上下面の歪み量測定結果。設計ではメディアムプレーンからの大気圧側上下面は29mmであり、測定結果は設計値からの差分量である。+が膨らみで-がへこみを表す。

2.2 ビーム寿命計算

図4と表1はS-LSRで蓄積するイオン種 $p(7\text{MeV})$, $C^{6+}(2\text{MeV/u})$, Mg^{+} のリング平均真空圧に対する $1/e$ ビーム寿命の計算結果である[5]。この計算では超高真空における一般的な残留ガスの組成を用いた。リング平均真空圧約 5×10^{-9} Pa で Mg ビームの寿命は約35秒となる。平均真空圧 5×10^{-9} Pa におけるビーム損失原因は主に電子移行 (electron capture) であることがわかる。また、分散制御用電極を使用した場合、真空度の悪化 (図3) の影響は少ないが図5に示すパーチャーの減少によるビーム損失 (Scattering) で寿命は上記の半分程度になる。

3. 真空ダクトの製作

上記のガス放出速度の測定とビーム寿命の見積りから、真空ダクトの脱ガス処理として950℃プレベークを採用することで必要な真空度は実現できる。さらにアークセクション真空ダクトの製作で重要なことは内設される運動量分散制御用電極の設置精度の確保である。

電極は使用しない場合リング内側に移動し、水平アパーチャー $\pm 100\text{mm}$ を実現できるように設計されているが、その駆動及び位置固定の精度は真空ダクトの側壁、底壁の製作精度に依存される。そのため溶接成形のダクトの歪みを950℃プレベーク後に修正を行った (図7)。また、200℃の現場ベークによる熱歪みがないこと、真空排気による撓みによる計算結果内であることを確認した。電極使用時のアライメント精度は0.1mmを目標としているため、真空ダクトは真空排気時の撓みを実測し使用時にマグネット基準にアライメントされるよう設置する。

5. まとめ

プレベークによりS-LSRの平均真空圧は約 5×10^{-9} Pa を達成することができ、加速器R&Dにおいて十分に実用になるビーム寿命が実現できる。電極使用ではビーム寿命は約半分になるが現状の真空ダクトの仕様で問題なく使用できると考えている。

テストダクトによる放出ガス速度測定において同時に測定した質量分析計による放出ガス成分の測定結果から、プレベークの有無に関係なく超高真空の一般的なガス成分に比べ水分が多く含まれ、現場ベーク36時間保持では不十分であることがわかった。さらに200℃ベークを含めて10日ほどの排気の後に測定を行ったことから、S-LSRでは長期ベークと調整運転期間の真空雰囲気によるエイジングによりテストダクトの測定結果よりもガス放出量は少なくできると考えられ、上記で見積ったビーム寿命の改善が期待できる。

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., Lattice Design of the Compact Cooler Ring S-LSR, Proc. of Symposium on Accelerator Science and Technology, (2003) 380-382.
- [3] S. P. Müller, Beam-Residual Gas Interactions, CERN Accelerator School vacuum technology, (1999) 155-163.
- [4] H. Tongu et al., Present Status of the Vacuum System for S-LSR, Proceedings of the 1st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 29th Linear Accelerator Meeting (2004) 221-223.
- [5] D. Habs et al., First Experiment with the Heidelberg Test Storage Ring TSR, NIM. B43, (1989) 390-410.