

Present Status of the Vacuum System for S-LSR

H.Tongu^{A)}, M.Ikegami^{A)}, Y.Iwashita^{A)}, S.Shibuya^{C)}, T.Shirai^{A)}, A.Takubo^{C)}, T.Takeuchi^{B)},
M.Tanabe^{A)}, A.Noda^{A)}, K.Noda^{B)}, H.Fadil^{A)}, S.Fujimoto^{A)},

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

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

^{C)} Accelerator Engineering Corporation, 4-9-1, Inage-Ku, Chiba-City 263-8555, Chiba, Japan

Abstract

S-LSR is a compact ion storage and cooler ring for R&D of the accelerator for the medical treatment. The development and study of the vacuum system for S-LSR is presented. 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 $\sim 3 \times 10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ in the beam duct is expected to be obtained and the average vacuum pressure can be estimated to be $5 \times 10^{-9} \text{ Pa}$. In this condition, the beam lifetime of Mg^+ beam (35keV) will become to be over 10 sec.

S-LSR真空系の現状

1. はじめに

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の建設が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進められている。S-LSRはフェムト秒レーザーイオン源から生成される高エネルギーホットイオンビームの蓄積効率の向上と電子ビーム冷却法およびレーザーイオン源からのイオン蓄積リング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]。

図1に S-LSR のレイアウトを示す。R&D のためのストレートセクションと速い取出しビームの利用エリアを確保した上で ICR 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に小型化を実現している。

S-LSR の調整運転には既存の 7MeV 陽子線形加速器を入射器として使用する。その後、高強度レーザー

イオン源を用いた C^{6+} 、クリスタルビームの生成を目的とした Mg^+ を入射する予定である。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モニタ、ビーム加速、そしてレーザー冷却、電子ビーム冷却のコンポーネントが設置される。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ている[2]。

2. ビーム寿命

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、電荷交換反応である[3]。現時点ではS-LSRにおいて蓄積されるイオンは陽子(7MeV)、 C^{6+} (24MeV)、 Mg^+ (35keV) である。図2は上記のビーム損失を考慮したそれぞれのイオン種における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[4]。この計算では超高真空における一般

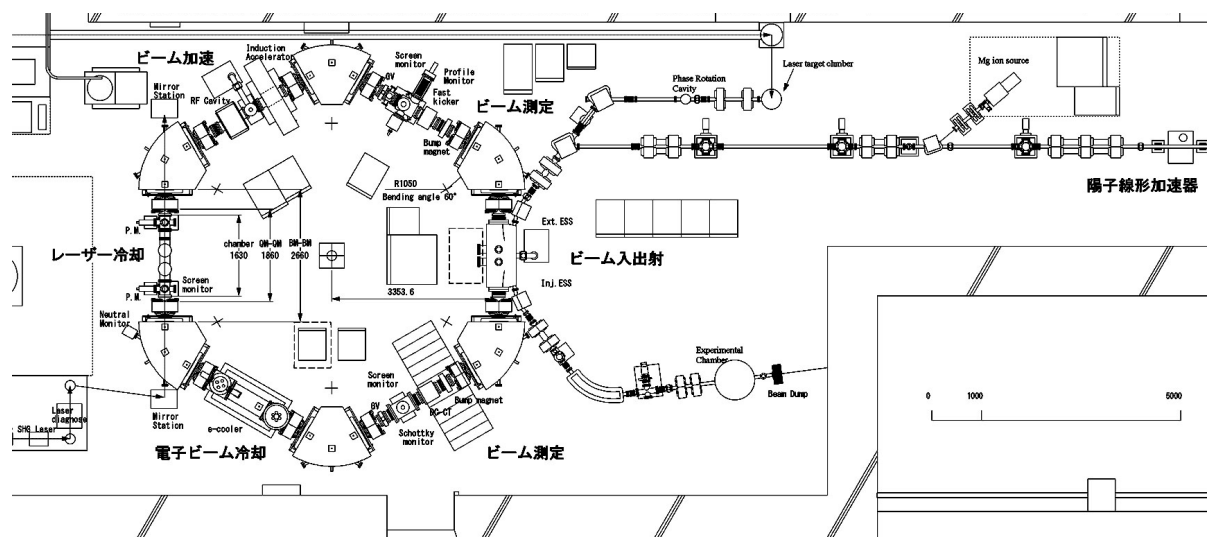


図1: S-LSRのレイアウト

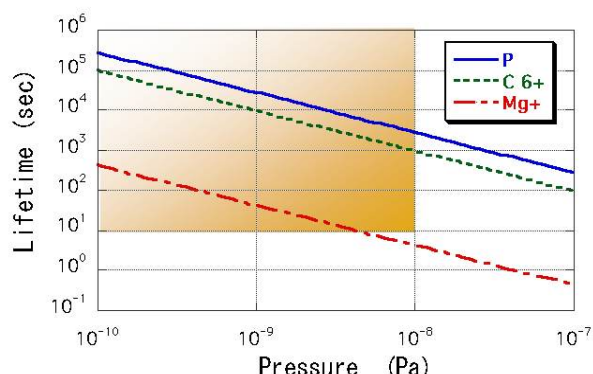


図2：S-LSRにおけるp、C⁶⁺とMg⁺のビーム寿命。
横軸はリング内の平均真空圧、残留ガス組成は
H₂:74%, CH₄:7%, CO:15%, CO₂:4%で計算。

表1：ビーム損失原因。

平均真空圧 5×10^{-9} Pa (H₂:74%, CH₄:7%, CO:15%, CO₂:4%)で計算。
アークセクションでのアパーチャーは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 ± 100 , ± 25 mmから
 ± 15 , ± 11 mmに減少する。

Ion	Energy (keV/u)	with electrode	Beam Lifetime (sec)			Total
			Multiple scattering	Electron capture	Electron loss	
P	7000	×	12600	3000000	***	12600
C ⁶⁺	2000	×	5330	200	***	193
Mg ⁺	1.46	×	1340	36	4200	35
Mg ⁺	1.46	○	151	36	4200	29

的な残留ガスの組成を用いた。Mg⁺ビーム寿命が最も短いことがわかる。S-LSRのビーム調整時間を考慮すると数十秒程度のビーム寿命が要求され、約 5×10^{-9} Paのリング平均真空圧が必要とされる。

リング平均真空圧 5×10^{-9} Paにおける損失原因別に表した寿命計算の結果が表1に示される。陽子ビーム寿命は残留ガスとの弾性散乱、C⁶⁺とMg⁺については電子移行(electron capture)によるビーム損失が大きく影響していることがわかる。また、Mg⁺蓄積時に使用する運動量分散制御用電極の影響は少ないことがわかった。図3に残留ガスによるビーム損失過程に対するビーム寿命計算値を示した。Mg⁺ビーム寿命はH₂との電子移行(electron capture)によるビーム損失が大きく影響していることがわかる。

3. 真空排気系

入射ビームトランスポートラインではターボ分子ポンプによる排気ユニットを使用し、リングとの間を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。リングアークセクションでは、H型偏向電磁石が採用されているのでコンダクタンスの良い排気ポート・真空ポンプを設けるスペースがない。そのため排気には2個のNEGポ

ンプをアークセクション真空ダクト内に設置された(図4)。ストレートセクションではチタンサブリメーションポンプとイオンポンプが使用される(図5)。

4. 真空ダクト

H型偏向電磁石と四重極電磁石との間にはフィールドクランプが設置されている(図4)。小型イオンリングの場合、図4に示されるように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の真空ダクトはベローズによる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。

4.1 放出ガス量の軽減

S-LSRの排気系はコンダクタンスが悪いためにガス放出量の影響が大きく、排気速度増強ではリング平均真空圧 5×10^{-9} Paを達成することができないことがわかっている。そこでダクト内面からの放出ガスを減らすことで目標真空圧に到達するよう試み

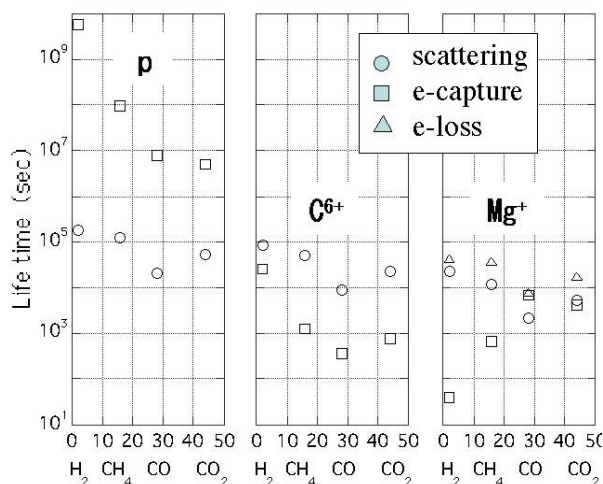


図3：残留ガス組成とビーム寿命。
横軸は残留ガスの質量数、その組成は
H₂:74%, CH₄:7%, CO:15%, CO₂:4%で計算。

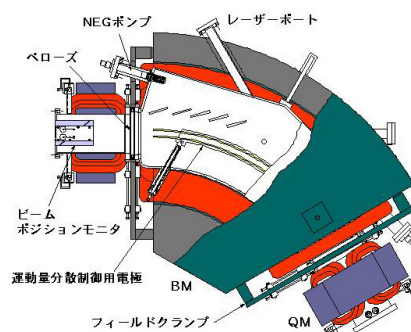


図4：S-LSRアークセクション。
図は電極の使用時に静電場により運動量分散制御を行う。通常はリング内側に引寄せた広いアパーチャーを確保する。

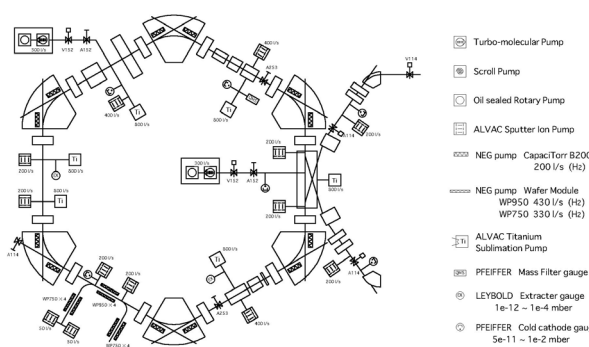


図5：S-LSR真空排気系

た。真空雰囲気での高温ベーキングはダクト表面だけでなく母材内のガスを減らす効果があることがわかっている。ダクト内面を機械研磨し溶接成形後に950°C、2時間の高温脱ガス処理（プレベーキング）の製作工程とリング組立て後の約200°Cベーキングを採用により母材からのガス放出の軽減が期待できる。

4.2 テストダクトによる放出ガス速度の測定

オリフィス法による放出ガス速度の測定をプレベーキングしたテストダクトとしていないテストダクトに対して行った。得られた測定結果を図6に示す。プレベーキングを採用することで得られた放出ガス速度は約 $3 \times 10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ でプレベーキングなしの場合に比べ約1/3である。また、大気圧雰囲気に長期間さらしてもプレベーキングの効果は十分にあることがわかった。S-LSRの真空ダクトはこの製作工程を採用する予定である。大型の真空ダクトは溶接成形前のアニールと同時に脱ガス処理を行うことでプレベーキングに近い効果が期待できることがわかった。

5. 到達真空圧

プレベーキングを採用した場合、先に述べられた排気系と放出ガス速度の測定結果からS-LSRの平均真空圧は約 $3 \times 10^{-9} \text{ Pa}$ を達成することができる（図7）。また、テストダクトの測定は200°Cベーキングを含めて10日ほどの排気の後に行ったので、S-LSRでは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値よりも少ない放出ガス速度の真空系が期待できる。

6. まとめ

S-LSRにおける蓄積イオンビーム種、エネルギー、残留ガス組成、そして運転条件から約 $5 \times 10^{-9} \text{ Pa}$ のリング平均真空圧が必要とされることがわかった。小型化を特徴としているS-LSRではその仕様を満たすためには真空系内からのガス放出量の軽減が重要であり、真空ダクト内面の機械研磨、溶接成形後に950°C、2時間のプレベーキングによる製作工程を採用した。テストダクトの放出ガス速度測定結果によ

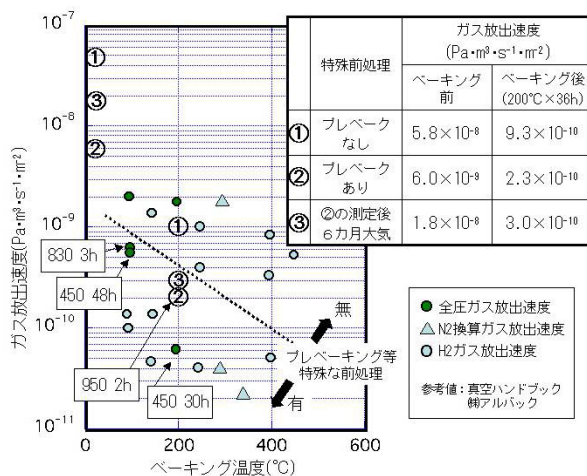


図6：ガス放出速度測定結果。横軸のベーキング温度は測定前の現場ベーキング。□内の温度、時間はプレベーキングの仕様。プレベーク等の特殊な前処理のあるなしでガス放出速度の値は図上の破線の上下に分かれる。

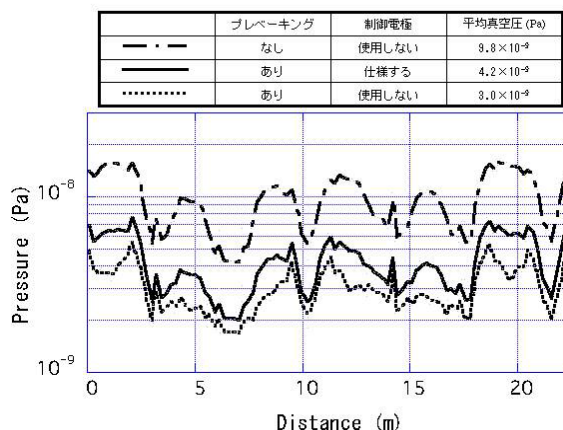


図7：S-LSR真空圧の計算値。残留ガスの組成は H_2 :75%, CO :25%で計算し、アークセクションはプレベーキングを行い、直線部はアニールによる脱ガス処理を採用する。

る計算では、最も短寿命の Mg^+ 蓄積時において10秒以上のビーム寿命を得ることが可能で、加速器R&Dにおいて十分に実用になると考えられる。

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. Møller, "Beam-Residual Gas Interactions", CERN Accelerator School vacuum technology, (1999) 155-163.
- [4] D. Habs et al., "First Experiment with the Heidelberg Test Storage Ring TSR", NIM. B43, (1989) 390-410