

INJECTION AND COOLING OF THE LOW ENERGY HEAVY ION BEAM IN THE RING

T. Shirai^{1,A)}, A. Noda^{A)}, M. Ikegami^{A)}, M. Tanabe^{A)}, H. Tongu^{A)}, H. Fadil^{A)}, S. Fujimoto^{A)}, T. Takeuchi^{B)}, K. Noda^{B)},
S. Shibuya^{B)}, T. Fujimoto^{B)}, H. Fujiwara^{B)}, H. Okamoto^{C)}, Y. Yuri^{C)}, M. Grieser^{D)}, E. Syresin^{E)}

^{A)}Advanced Research Center for Beam Science, ICR, Kyoto University, Gokasho, Uji, Kyoto 611-0011, Japan

^{B)}NIRS, Inage-ku, Chiba, 263-8555, Japan

^{C)}ADSM, Hiroshima University, Higashi-Hiroshima-City, 739-8530, Hiroshima, Japan

^{D)}MPI für Kernphysik, Heidelberg 69029, Germany

^{E)}JINR, 141980, Dubna, Moscow Region, Russia

Abstract

S-LSR is a new ion cooler ring, which is under construction in Kyoto University. It has an electron beam cooler for 7 MeV proton beam from a linac and 2 MeV/u Carbon beam from a laser ion source. Not only such MeV beam, but also low energy heavy ion beams can be stored in S-LSR from an ion source. The main subject of the heavy ions is a laser cooling to obtain the ultra low temperature beams and to study the phase transition to the crystalline beams. The injection and the extraction system of S-LSR are designed not only for 7 MeV proton beam, but also for the low energy heavy ion beams. The target vacuum pressure of S-LSR is less than 5×10^{-9} Pa to keep the enough life time for the heavy ion beams.

低エネルギー重イオンのS-LSRリングへの入射・蓄積とビーム冷却

1. はじめに

京都大学化学研究所では、小型イオンビーム蓄積・冷却リング S-LSR の建設をおこなっている [1]。S-LSRは、周長が22.557m、最大磁気剛性が1 Tmで、6回対称形をしたリングである (図1参照)。このリングは、電子ビーム冷却装置とレーザー冷却装置をもち、「ビーム冷却技術」を中心に、高密度イオンビームに関する物理、ビーム冷却の技術開発、冷却ビームの応用を研究目的としている。

このリングはその研究目的に合わせ、3種類の入射器をもっている。1つは既存の7 MeV陽子線形加速器を入射器として使用し、電子ビーム冷却を用い

た短バンチ生成などの実験を計画している。もうひとつは超短パルス高強度レーザーによって加速されたMeV級のイオンを蓄積・電子ビーム冷却する実験である。レーザーは隣接したレーザー棟から入射し、発生した高エネルギーイオンを輸送・入射するためのトランスポートを準備している [2]。これらに対し、より低温までの冷却を目指し、重イオンのレーザー冷却 (ドップラー冷却) をおこなう実験も計画されている。

このレーザー冷却のために、S-LSRではイオン源からでてくる50 keV程度の低エネルギーイオン

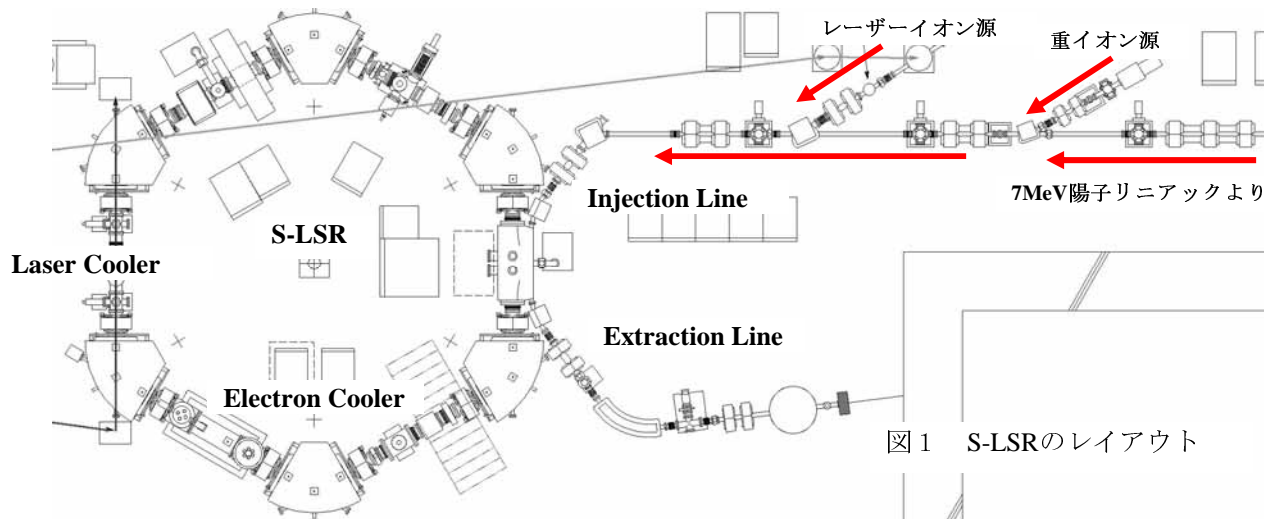


図1 S-LSRのレイアウト

¹ E-mail: shirai@kyticr.kuicr.kyoto-u.ac.jp

ビームを直接リングに入射する。これにより、磁気剛性の小さなリングでも、価数の低い重イオンを蓄積することができる。また、入射用の線形加速器を必要としないため、イオン源の交換により、実験に応じてさまざまな原子・分子イオンをリングへ入射できるというメリットがある。ただし、反面、このような低エネルギービームを蓄積するためには、特別な入射・出射の方法を用意する必要があり、また実用的なビーム寿命を得るために、詳細な真空システムの設計が必要となる。

2. 重イオンビームの入出射

レーザー冷却の実験においては、原子・分子の光の吸収波長と、利用可能なレーザーの波長幅の関係から、冷却できるイオン種は非常に限られている。具体的には、 Li^+ 、 Be^+ 、 Mg^+ などである。S-LSRではこの中でも Mg^+ の冷却を考えている。そのため、CHORDIS型スパッターイオン源で、 Mg^+ を生成する。この入射ビームの様子は、表1のとおりである。

S-LSRでは7 MeVの陽子イオンビームの入射時は、2台1セットのバンパ電磁石をもちいて、静電セパタム部分にバンパ軌道をつくり、マルチターン入射と1ターンの早い取り出しをおこなう。しかし、重イオン源からの低エネルギーイオンビームの場合には、レーザー冷却をおこなうために、そのレーザースポット径の制限から、入射ビームサイズは1 cm以下、エミッタンスにして $5 \pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ 以下でなければならない。そのためには、エミッタンスの小さなビームのシングルターン入射が不可欠となる。

S-LSRの静電セパタムは、1つの真空チェンバーで、この両方の入射方式とシングルターンの取り出しに対応できる構造となっている。図2はその静電セパタムの図を示している。重イオンビームは中央の静電キッカーにより曲げられて、直接リングの中心軌道へと入射される。この電極への印加電圧は最大 $\pm 10 \text{ kV}$ であり、 200 nsec のスイッチング時間をもつ高速高圧半導体スイッチによってON/OFFをおこない、入射を制御している。

これに対し、レーザービーム冷却によって冷やされたビームの取り出しは、取り出し静電セパタムから、位相が 90° 離れた位置に設置された、取出し静電キッカーと静電セパタムによっておこなう。この静電キッカーも電圧を高速にON/OFFして取り出しを制御するが、入射用のキッカーに比べて、蹴り角が小さいため、電圧は1 kV程度で済む。

3. 重イオンビームの寿命

低エネルギー重イオンビームをもちいた実験において重要なことは、ビーム寿命 τ である。これは残留ガス密度 ρ 、反応断面積 σ 、イオンの速度 v_{ion} をもちいて、

$$\tau = \frac{1}{\sigma \rho v_{\text{ion}}} \quad (1)$$

であたえられる。この反応の中では、電子捕獲が

表1 リングと重イオン入射ビームのパラメータ

リング	
周長	22.557 m
平均半径	3.59 m
ドリフトスペース長	1.86 m
周期数	6
入射イオンビーム	
イオン種	Mg^+
全エネルギー	30 - 50 keV
蓄積イオン数	$10^4 - 10^7$
周回時間	46 - 36 μsec

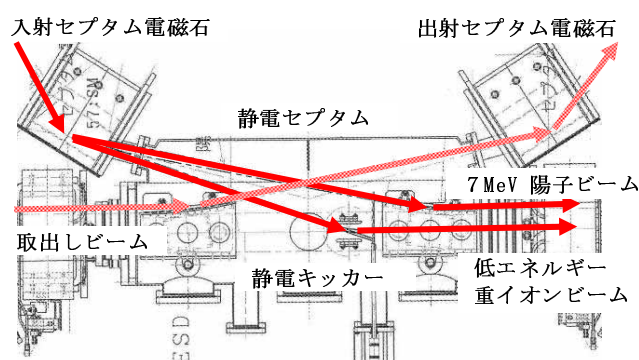


図2 入射・取り出しのための静電セパタム。中央の10 kV静電キッカーで重イオンビームの入射をおこなう。

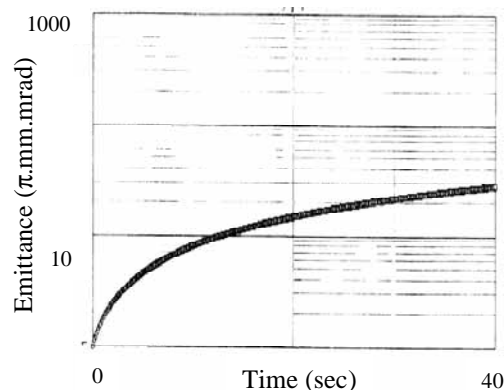


図3 50 keV、Mgビームの残留ガスとの多重散乱によるエミッタンス増加

もっとも断面積が大きい。一般にこの電子捕獲断面積は、ビームのエネルギーが低くなると急激に大きくなって ($\propto E^8$)、寿命が短くなることが知られているが、1価程度のイオンでは、核子あたりのエネルギーが10 keVの領域で最大値をとり、それより低エネルギー側では減少する。これに加えて、式(1)により、イオンの速度 v_{ion} に反比例しても延びることになる。

S-LSRの設計平均真空度は $5 \times 10^{-9} \text{ Pa}$ であるので、50 keV Mg^+ の計算寿命は36秒になる[2]。これから、1価のイオンであれば、50 keVでも実験に必

要なビーム寿命が得られることがわかる。

図3は、このときの多重散乱によるエミッタンス増加を計算したシミュレーション結果である。これから、多重散乱による寿命は、電子捕獲の寿命よりも長いことがわかるが、レーザーによる冷却力を切ると、数秒でエミッタンスが増加することもわかる。

4. ビーム冷却シミュレーション

レーザー冷却実験の最大の目的は、極低温ビームの実現と、それによって予想されるビーム結晶化の相転移のメカニズムを実験によって示すことである。極低温まで冷やすためには、冷却力が強いだけでなく、リングの共鳴現象に起因するエンベロープ不安定性を回避しなければならない[3]。そのため、S-LSRでは、表2に挙げているように動作点をとれるように設計している。チューンが(1.45, 1.44)の場合は、1ピリオドあたりのベータトロン位相の進みが90度以下になり、エンベロープ不安定性を回避できる動作点である。図3には、このときの1ピリオド内でのツイスパラメータの分布を示している。

チューンが(2.08, 1.07)の場合は、ベータトロン位相の進みが90度を超えるが、メンテナンス条件と呼ばれる127度は下回っており、粒子数が少なければ、結晶化が起きる可能性がある[4]。この動作点では、シンクロトロンチューンを0.07にすることにより、縦・横の3次元結合がおき、3次元のレーザー冷却が可能となる[5]。

表4は、分子動力学計算コードSOLID[6]をもちいて、S-LSRで生成するビーム結晶の構造と蓄積粒子数の相関である。結晶の形は、磁場による収束力の影響を受けるので、チューンに依存するが、相転移点の粒子数は一定である。

5. まとめ

S-LSRではイオン源から重イオンビームを直接入射できるようにすることにより、レーザー冷却をはじめとするさまざまな実験を計画している。本発表でも述べたように、低エネルギーイオンビームをもちいた実験を可能にするために、ビーム冷却・入射・取り出し・寿命の観点から、検討・設計を進めている。リング自身は今秋からアライメントを開始し、来春のコミッショニングを目指している。

6. 謝辞

本研究を進めるにあたっては、京都大学化学研究所の風間氏に、多大な協力をいただきました。ここに感謝いたします。また、本研究は先進小型加速器事業の一環としておこなわれました。

表3 レーザー冷却時の動作点とパラメータ

Betatron tune	(1.45, 1.44)	(2.08, 1.07)
Phase advance /period	(86.9, 86.3 deg)	(125, 64.2 deg)
Field gradient of QM	-1.58 m ⁻²	1.42 m ⁻²
Chromaticity	(-0.10, 1.26)	(-1.21 -0.18)
Max. β -function	(4.33, 2.74 m)	(4.20, 5.32 m)
Max. hori. dispersion	2.42 m	1.32 m
Transition γ	1.23	1.76
Moment. Compaction	0.658	0.321

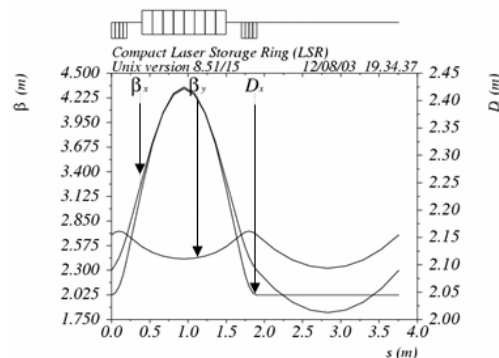


図3 表3の中でチューンが(1.45, 1.44)の時の、1ピリオドのツイスパラメータ

表4 表3の2つの動作点での、結晶構造と蓄積粒子数の関係

Particle number	Crystal Structure (Qx=1.45)	Crystal Structure (Qx=2.08)
1.8×10^5	String	String
4.0×10^5	Horizontal Zigzag	Vertical Zigzag
5.3×10^5	Horizontal 3-line	Vertical 3-line
7.8×10^5	Horizontal 4-line	Single Shell (3D)
1.6×10^6	Single Shell (3D)	Single Shell (3D)

参考文献

- [1] A. Noda et al., Proc. of Symposium on Accel. Sci. and Tech. (2001) 125.
- [2] H. Tonguu et al., in this proceedings
- [3] L. Tecchio, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 391 (1997) 147.
- [4] J. Wei, X.-P. Li, A. M. Sessler, Phys. Rev. Lett. 73 (1994) 3089.
- [5] T. Kihara et al., Phys. Rev. E, 59, 3594-3604 (1999)
- [6] J. Wei, X-P Li, A. M. Sessler, Reprt BNL-52381 (1993).