

## Optimization of injection matching of Mg+ beam at S-LSR

Hikaru Souda<sup>\*A)</sup>, Masao Nakao<sup>A)</sup>, Tatsuya Hiromasa<sup>A)</sup>, Hiromu Tongu<sup>A)</sup>, Akira Noda<sup>A)</sup>, Kouichi Jimbo<sup>B)</sup>, Kazuya Osaki<sup>C)</sup>, Hiromi Okamoto<sup>C)</sup>, Yu Peicheng<sup>D)</sup>, He Zhengqi<sup>D)</sup>, Jie Wei<sup>D)</sup>, Andrew M. Sessler<sup>E)</sup>, Manfred Grieser<sup>F)</sup>,

<sup>A)</sup>Institute for Chemical Research, Kyoto University, Gokasho, Uji, Kyoto, 611-0011, Japan

<sup>B)</sup>Institute of Advanced Energy, Kyoto University, Gokasho, Uji, Kyoto, 611-0011, Japan

<sup>C)</sup>Graduate School of Advanced Sciences of Matter, Hiroshima University, Higashi-Hiroshima, Hiroshima, 739-8530, Japan

<sup>D)</sup>Tsinghua University, Beijing, 100084, People's Republic of China

<sup>E)</sup>Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California, CA 94720-8211 United States of America

<sup>F)</sup>Max-Planck-Institut für Kernphysik, D - 69117 Heidelberg, Germany

### Abstract

Beam transport parameters were investigated at S-LSR for the matching of the injected beam to the acceptance of the storage ring in order to avoid the emittance blowup might be caused by the mismatch. Beam halo was cut by x-y slits based on the results of measurements of beam profile by changing Einzel lens voltage and beam current reduction by the slits.

## S-LSR での Mg+ ビーム入射マッチング調整

### 1. はじめに

京都大学化学研究所のイオン蓄積・冷却リング S-LSR<sup>[1]</sup>では、2007年1月より極低温ビーム実現のために 40keV  $^{24}\text{Mg}^+$  のレーザー冷却実験を行っている。S-LSR で冷却に用いる  $^{24}\text{Mg}^+$ 、イオン源 CHORDIS<sup>[2]</sup> から加速電圧 40kV で引き出され、蓄積リングまで輸送され、パルス静電キッカーによってシングルターン入射を行う。ビームはリングを周回しながらレーザーによる冷却作用を受け、進行方向の速度広がり初期値から減少していく<sup>[3]</sup>。現在は、進行方向の冷却力をシンクロ・ベータトロン結合を用いて横方向に伝達する共鳴結合による横方向レーザー冷却<sup>[4][5]</sup>の実験を行っている。分子動力学シミュレーションによれば<sup>[6]</sup>、十分な冷却時間があれば最終的な到達温度は初期温度(エミッタンス)にほとんど依存しないが、実際には 1/e 寿命で十数秒の間に冷却を行う必要があり、入射ミスマッチなどによりエミッタンス増大が起こり初期温度が高くなると、一定の時間内での到達温度が悪化してしまう。そのため、初期エミッタンスの増大を抑えるため、入射パラメータの調節とそれに伴う調査を行った。

### 2. S-LSR BEAM TRANSPORT 系

S-LSR の  $^{24}\text{Mg}^+$  ビームトランスポート系は図 1 のようになっている。CHORDIS イオン源 (Heavy Ion Source, HIS) からアインツェルレンズ、静電ステアリング、x-y スリット、四重極磁石 2 台を通過して 25 度偏向磁石により線形加速器からの 7MeV 陽子と共有の直線トランスポートラインに接続する。ここでは QM2 台、ステアリング磁石 2 台と 2 枚のスクリーンモニターで軸とプロファイルを確認し、37 度偏向磁石で入射ラインに投入する。x-y スリットで整形を行った後、最終 QM2 台を通してセプタム電磁石で 33.5 度偏向し、パルス静電キッカーで 19 度を曲げてリング周回軌道に導入する。

S-LSR でのレーザー冷却実験において、当初リングの動作点は 7MeV 陽子ビームと同じ  $(\nu_x, \nu_y) = (1.64, 1.20)$  として行い、1次元のレーザー冷却実験を行った。現在は、共鳴結合を利用した横方向冷却のため、シンクロトロンチューン 0.07 に対して  $(\nu_x, \nu_y) = (2.07, 1.10)$  とし、水平方向と進行方向の共鳴結合が起こる条件としている<sup>[7]</sup>。

入射パラメータの調整については、ビームを初段スリットで平行と仮定し、(1.64, 1.20) のチューンの入射点の  $(\beta_x, \beta_y) = (1.5\text{m}, 2.9\text{m})$  がマッチし、 $(\alpha_x, \alpha_y) = (0, 0)$  の正立ビームで入射するパラメータを MAD8 コード<sup>[8]</sup> で計算した値から、ビーム入射効率を最大化し、入射軌道がレーザー部の  $\phi 6\text{mm}$  アパーチャーの中心を通過するように微調整を行ったものである。チューン (2.07, 1.10) では、入射点の  $(\beta_x, \beta_y) = (1.17\text{m}, 3.33\text{m})$  となっており、また  $(\alpha_x, \alpha_y) = (-0.55, 0.75)$  となっており、このマッチングをとることが必要と考えられ、実測によって Twiss パラメータのマッチングを確認することとした。

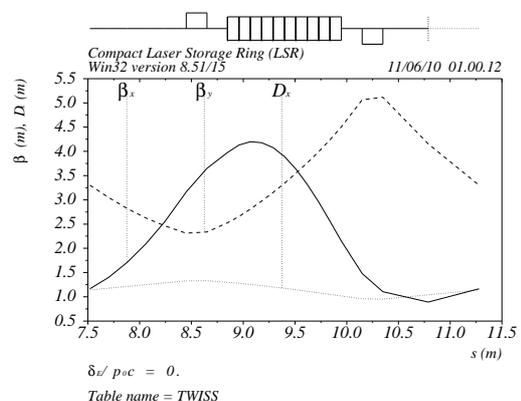


図 2:  $(\nu_x, \nu_y) = (2.07, 1.10)$  でのリング Twiss パラメータ計算値

\* souda@kyticr.kuicr.kyoto-u.ac.jp

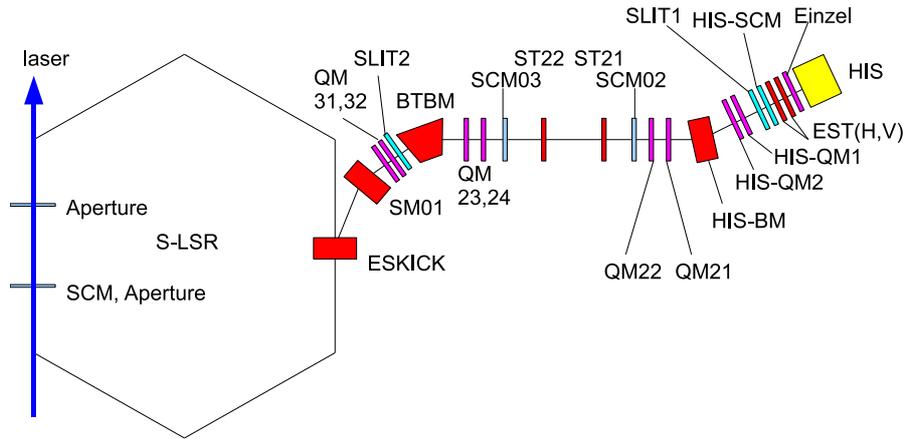


図 1: S-LSR Beam Transport 機器配置図

### 3. BT パラメータ測定と調整

当初の計算値は表 1 の通りで、MAD での  $\beta$  関数計算値は図 3 の通りである。ビーム加速電圧は 40kV、アインツェル電圧は 20kV、イオン源直後の静電ステアリングは水平 70V、鉛直 0V である。

表 1: BT 系 QM 初期パラメータ

	G/I [T/m/A]	I[A]	K1 [1/m]	G [T/m]
HIS-QM1	0.033	10.50	2.454	0.347
HIS-QM2	0.033	19.69	4.602	0.650
BT-QM21	0.113	-5.50	-4.398	-0.621
BT-QM22	0.113	7.50	5.997	0.847
BT-QM23	0.113	9.50	7.596	1.073
BT-QM24	0.113	8.60	6.877	0.971
BT-QM31	0.116	-4.50	-3.690	-0.521
BT-QM32	0.116	9.00	7.380	1.042

水平 2.5mm 鉛直 4mm であり、計算した 関数値 ( $b_x, b_y$ ) = (0.89m, 4.16m) から予想される縦が 2 倍長い形状からずれており、初期パラメータの仮定が実際のビームと異なっていることが予測された。

イオン源直後のアインツェルレンズの印加電圧を変えながらスクリーンモニタでのプロファイルを観測した。像は図 4 のようになり、ほぼ x,y 方向に対称であった。ビーム中心はスクリーン中心から右に 4.1mm, 下に 1.7mm の位置にあり、アインツェル電圧を変えても不変であった。

イオン源直後では偏向磁石を通過していないためイオン源からの  $Ar^+$  ビームが多く混ざって観測されるが、アインツェルレンズの集束効果は加速電圧とアインツェル電圧の比で決定されるため、アインツェルの効果の調査はこのスクリーンモニタ行える。図 5 のようにアインツェル電圧 21kV の時が最集束条件となることがわかった。20-21kV の時は、スリットから QM12 の間がアインツェルレンズの焦点となる。

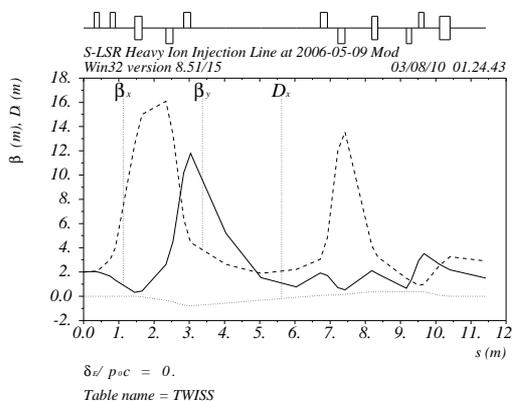


図 3: BT 系 Twiss パラメータ計算値 (MAD8 による)

このパラメータでリングに入射し、レーザー部の高感度冷却 CCD カメラでビームサイズを測定したところ、

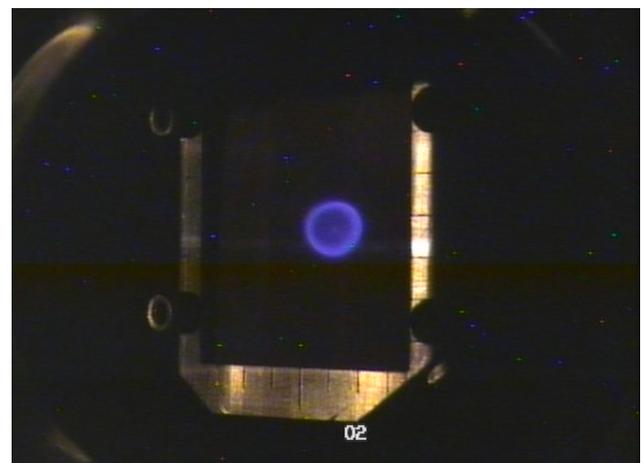


図 4: イオン源直後スクリーンモニタでのビーム像 (アインツェル電圧 20kV)。ケガキ線は水平・鉛直とも 5mm ごとに入っている。この時のビームサイズは水平 6.3mm、鉛直 6.3mm。

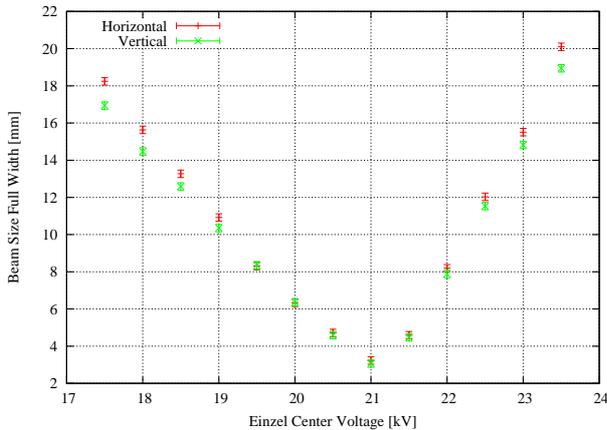


図 5: アイソツェルレンズ電圧変化時のスクリーンモニタ上でのビームサイズ変化

アイソツェルレンズの電圧を初期値 20kV とし、後方のスリットを挿入しビームが失われる様子を偏向磁石後のスクリーンモニタ SCM02 表面でのビーム電流を観測することで測定した。スリットは上下左右の 4 つの水冷モリブデン円筒が独立に駆動する。スリット全開でビームが全て通過する状態の電流値を  $I_0$  とし、1mm ずつスリットを挿入してビーム電流  $I$  を測定する。スリットの挿入に伴いビーム減少率  $1 - I/I_0$  は図 6 のように 1(全開) に近づいていく。この減少率の変化は、正規分布の積分値である累積分布関数で Fitting でき、その結果から減少率が半分になる地点をビーム中心とした。

その結果、ビーム中心は両スリットの midpoint から水平方向は右に 3.9mm、鉛直方向は下に 1.4mm と測定された。スリット全開ではビームのハロー部分が通過し、後方でのプロファイル測定に支障を与えたり入射後のエミッタンス増大を招く可能性があるため、開口を水平 3mm、鉛直 3.4mm に調節した。図 7 にビーム中心位置、調節後の開口の様子を示している。

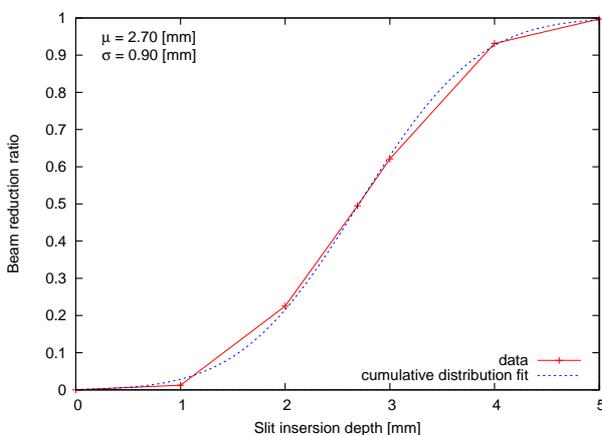


図 6: 水平方向手前側スリット挿入時のビーム減少量変化

スリットでのビームサイズ整形を行った結果、SCM02、03 でのビームハローが減少し、HIS-QM1,2, を変化させた際のプロファイル変化も少なくなるなどの改善が見ら

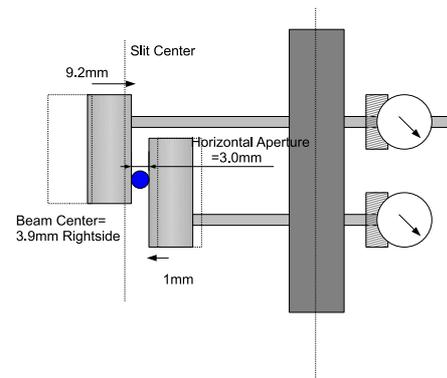


図 7: スリット開口調節 (水平方向)

れた。現在、再度 Q スキャン法による Twiss パラメータ測定を行い、トランスポートライン後段でのマッチング確認ができるよう測定を行っている。

#### 4. まとめ

京都大学化学研究所のイオン蓄積・冷却リング S-LSR で、横方向レーザー冷却に入射パラメータを最適化するため、イオン源直後のビームプロファイル調査を行った。S-LSR の  $^{24}\text{Mg}^+$  入射系は、イオン源からアイソツェルレンズと静電ステアリング、x-y スリットで初期ビームプロファイルを調整し、入射点の静電キッカーまでに 3 組の QM Doublet で調整を行う構成になっている。高感度のレーザー冷却部スクリーンモニタで入射後 1 周目のビームプロファイルを観測したところ、初期パラメータを平行ビームと仮定した際の計算結果と異なっており、Twiss パラメータの実測を行う必要が生じた。アイソツェル電圧を変えてのプロファイル測定、スリット開口を変えての減衰率測定により、スリットの位置でビーム全幅が 3mm 程度に集束していることがわかった。現在、スリットを絞ってハロービームを削減し、後段のプロファイル測定から Twiss パラメータがイオン源直後と一致するか測定を行っている。

#### 参考文献

- [1] A. Noda: Nucl. Instrum. Methods **532** (2004) 150.
- [2] R. Keller, B. R. Nielsen and B. Torp: Nucl. Instrum. Meth. **B37-38** (1989) 74.
- [3] M. Tanabe *et al.*: Appl. Phys. Express **1** (2008) 028001.
- [4] H. Okamoto, A. M. Sessler and D. Mohl: Phys. Rev. Lett. **72** (1994) 3977.
- [5] H. Okamoto: Phys. Rev. E **50** (6) (1994) 4982.
- [6] Y. Yuri and H. Okamoto: Phys. Rev. ST-AB **8** (2005) 114201.
- [7] M. Nakao *et al.*: in this proceedings.
- [8] F. C. Iselin: CERN/SL/92: CERN (1992).