

Beam Optimization for Laser Cooling at S-LSR

Hikaru Souda*, Mikio Tanabe, Takehiro Ishikawa, Masao Nakao
Graduate School of Science Kyoto University, Kitashirakawa, Kyoto, 606-8502

Masahiro Ikegami, Hiromu Tongu, Toshiyuki Shirai, Akira Noda
ICR Kyoto University, Gokasho, Uji-city, Kyoto, 611-0011

Abstract

Beam parameters of S-LSR are being optimized for laser cooling. Closed orbit distortion is corrected by response matrix, and is fine adjusted using $\phi 6\text{mm}$ aperture. Crossing angle of the beam and the aperture center is reduced less than 0.2mrad . Betatron tune is set to (2.069, 1.075) for three-dimensional laser cooling and (1.642, 1.198) for one-dimensional laser cooling. Synchrotron tune is measured by sideband measurement and bunching time measurement, and the maximum value is 0.12. The effective length of RF cavity is 119.3mm, which is too large for $40\text{keV } ^{24}\text{Mg}^+$ at harmonic number 100. A new drift tube with 26.6mm effective length will be installed.

S-LSR でのレーザー冷却のためのビーム調整

1. はじめに

京都大学化学研究所の小型重イオン蓄積リング S-LSR では、2007年1月より $^{24}\text{Mg}^+$ のレーザー冷却実験を行っている。S-LSR では 3次元結晶化ビームの生成を目標としているが、現在は 1次元のレーザー冷却を中心に実験を行っている。現在の主要なビームパラメータは表 1 の通りである。

表 1: S-LSR Mg モードパラメータ

リング周長	22.557 m
リング対称性	6
蓄積イオン種	$40\text{keV } ^{24}\text{Mg}^+$
周回周波数	25.192 kHz
イオン源射出電流量	$5\text{-}20\mu\text{A} (N = 1 \sim 3 \times 10^9)$
リング蓄積電流量	$1\text{-}3\mu\text{A} (N = 3 \sim 8 \times 10^8)$
リング真空度	$4 \times 10^{-9}\text{Pa}$
ビーム寿命	5-15sec

レーザー冷却の効果は、ビームとレーザーそれぞれのパラメータによって変化してくる。ビーム側は粒子数、Closed Orbit Distortion(COD)、ベータトロンチューン、シンクロトロンチューン等が影響し、レーザー側は強度、周波数、スポット径、軌道誤差等が影響する。本論文では主にビームのパラメータ、軌道誤差とチューンについて述べる。

2. COD CORRECTION

レーザー冷却はレーザーの進行方向に運動量を与えることで冷却を行うため、ビームとの間に角度差があれば加熱作用が生じ冷却力は減少する。また、ビームとレーザーが平行でも両者の中心がずれていれば冷却される粒子数が減り、冷却速度の減少やビーム

の損失を招く。そのため、レーザー冷却に際しては通常の COD 補正より精度の高い軌道調整を行う必要がある。具体的には、通常の Response Matrix を用いた COD 補正を行った後にレーザー部のアパーチャーを挿入して通過試験を行い、ビームとレーザーの軌道一致を確認した。

S-LSR では静電 Beam Position Monitor(BPM)6 個、偏向磁石の補正電流による水平キッカー 6 個、BPM 電極を用いた鉛直キッカー 2 個によって COD 補正を行う。これらの配置は図 1 の通りである。BPM による位置測定の結果から Response Matrix を用いて Simplex 法によって補正量を計算^[1]し、ビームを BPM 中心に合わせる。チューン変更など大幅に COD が変化した後は 15~30 回、前日のパラメータに合わせた後などは 5~10 回の補正で COD は目標値に収束している。

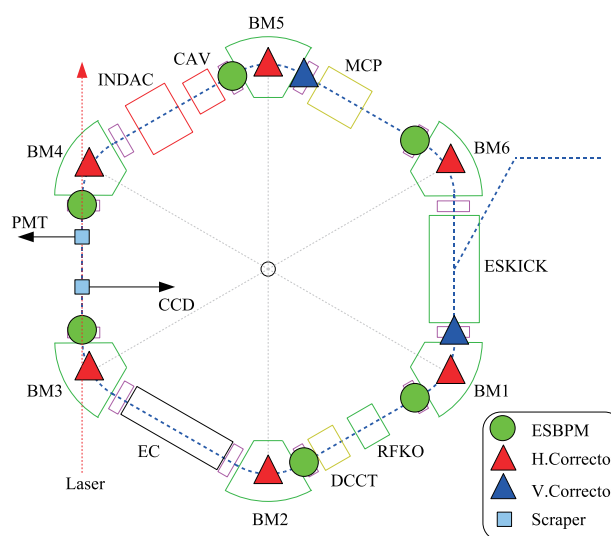


図 1: 測定・補正要素の配置図

この後で、レーザーと軌道が重なることを確認す

* E-mail: souda@kyticr.kuicr.kyoto-u.ac.jp

るため、レーザー冷却部の入口側と出口側にあるアパーチャー板を用いて補正を行う。アパーチャー板は図2のようにビーム進行方向にφ10mm, 6mm, 3mm, 2mmの穴が開いており、レーザーはこの中心を通るようにアライメントされている。この時のビーム寿命を最大化するようCODを補正する。入射パラメータによっては、CODはアパーチャー中心を通っているがベータatron振動による入射1周目の軌道がずれていることがあり、ビーム寿命はやはり短くなる。そのため、入射補正とCOD補正を繰り返し行うことが必要になる。COD補正はフルスケール13A, 12bitの補正電源の1bit, 3.2mAを最低単位として行う。現在は寿命0.5sec, 1秒後の残存率10-20%が最大である。

アパーチャーの半径を R 、CODのアパーチャー中心からのずれを x とした時、周回ごとにアパーチャーに衝突した粒子が失われ、分布は常にガウス分布とすれば、 n 周後のビームの残存率は累積分布関数 $F(x)$ を用いて $(F(R-x) + F(R+x))^n$ で表される。ビームが1秒(25000turn)周回したとき、 $R=4\sigma$, $x=0$ で残存率は20%となるので、アパーチャー周回時の σ は0.8mm程度となる。電源1bit(3.2mA)は0.14mm(0.19 σ), 2bitで0.28mm(0.37 σ)に対応するため、残存率は $x=0.19\sigma$ で12%, $x=0.37\sigma$ で2%になり、中心位置は少なくとも0.28mmの精度で判別できている。このとき角度誤差は0.2mrad以内となる。

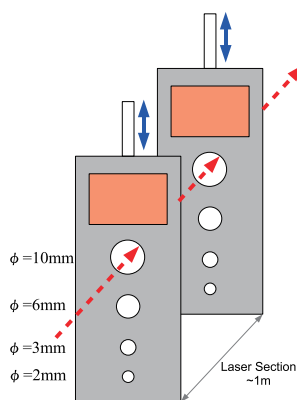


図2: アパーチャー板模式図

図3は $(\nu_x, \nu_y)=(1.602, 1.198)$ でφ6mmアパーチャーを通過するよう補正を行った後のCODである。鉛直方向はほぼ中心位置でビームが安定に周回するが、水平方向は上流側のBPM32で1.8mm程度外側を指す時に安定する、という結果が再現している。これはアパーチャー板かモニターの位置がずれてオフセットとなっていると考えられる。現在はResponse Matrixによる補正の段階でこの値を設定目標値としている。

これ以上の調整は、誘導加速器による冷却力確認や光電子増倍管による蛍光観測などで相互作用の強さを測定しながら微調整を行うことが挙げられる。現在は誘導加速器で52.6mV/mの冷却力が確認できており、蛍光観測を行う光学測定系の増強を行った後でさらなる最適化を行う予定である。

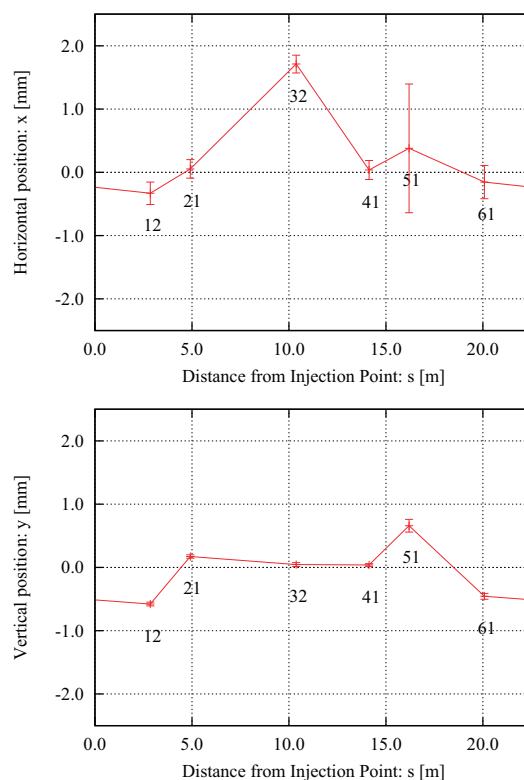


図3: $(\nu_x, \nu_y)=(1.602, 1.198)$ でのレーザー冷却時COD(上: 水平COD、下: 鉛直COD)

3. シンクロトロンチューン

S-LSRでは、共鳴結合法を用いた3次元レーザー冷却^[2]を計画している。これは加速空洞設置地点での運動量分散を利用して進行方向と水平方向の振動を結合させ、進行方向のレーザー冷却力を水平方向に伝えるものである。

これを実現するにはシンクロトロンチューン・ベータatronチューンの小数部分を揃える必要がある。ただし、通常のパラメータではシンクロトロンチューンは0.01以下と小さく、ベータatronチューンをこの小数部に合わせると整数共鳴でビームが不安定になってしまう。またシンクロトロンチューンを上げるには加速電圧またはRF harmonicsを上げる必要があり、0.1~0.2程度が限界である。

S-LSRではできるだけ高いシンクロトロンチューンと安定周回できる小さなベータatronチューンとして、 $(\nu_x, \nu_y, \nu_s) = (2.07, 1.07, 0.07)$ ^[3]のパラメータを予定している。現在は予備段階としてチューンの測定を行っている。

S-LSRはフェライト装荷無同調空洞を備えており、この空洞に投入するRFの電力と周波数を変えてシンクロトロンチューンの測定を行っている。測定方法は、RF Knock Out(RFKO)の上下端版をピックアップとしてバンチビームのSidebandを測定する方法と、RFをパルスで投入し、位相回転によりピックアップでの信号強度が変化の様子からシンクロトロン振

動の周期を測定する方法 (Bunching time 測定) の 2 種類で行った。この結果と計算値を比較したものが図 4 で、現在 $\nu_s = 0 \sim 0.12$ の値が得られている。

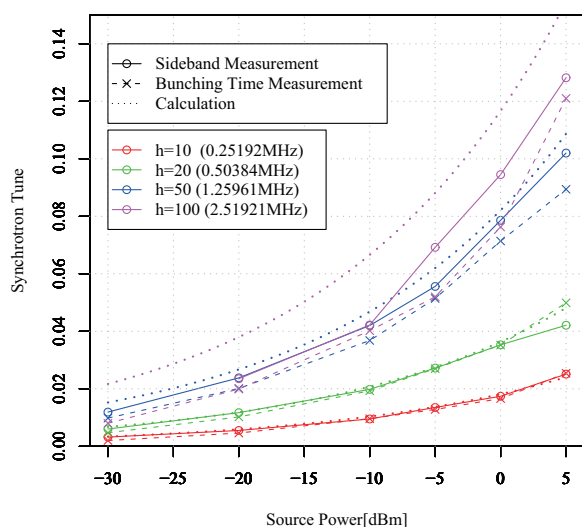


図 4: シンクロトロンチューンの測定結果

チューンを高くするため印加する RF の harmonic number を大きくしていき、 $h=100$ になると、加速空洞の電場実効長 (120mm) が 40keV 24Mg+ の RF 半周期での移動距離 (113mm) と同程度になり、Transit Time Factor (TTF) が 0.36 となり RF の位相変化の影響が大きくなる。これは $h=50, 100$ でチューンの実測値が計算値から外れてくることの一因と考えられる。より精度の高いチューン調整を行うため、実効長 27mm 程度の 2-gap ドリフトチューブを製作し、今後の実験で用いる予定である。

4. ベータトロンチューン

共鳴結合の条件を満たすためには各方向のチューンの小数部分が一致する必要がある、シンクロトロンチューンは大きくても 0.1 程度なので、必然的にベータトロンチューンも整数に近くする必要があり、 $(\nu_x, \nu_y) = (2.07, 1.07)$ でビームが安定に周回するかどうか確認し、他のチューンとの比較も行った。

ベータトロンチューンは RFKO で Coasting Beam を励振した際の Sideband を BPM Pickup で測定することで得ている。共鳴条件のチューンではチューンの小数部分が水平、鉛直方向で同じとなるため判別が困難になるが、図 5 のように測定結果からピーク位置を読み取り、チューンの小数部分に変換し MAD による計算値と比較して変化を追うことで、水平方向・鉛直方向の判別が可能となる。

これまでに用いたチューンは表 2 の通りである。 $(2.069, 1.075)$ ではビーム寿命が他の半分程度と短いものの、ビームの周回は確認できている。現在は 1 次元レーザー冷却の実験に特化しているため、proton 実験の時に用いていた $(1.64, 1.20)$ を主に用いている。

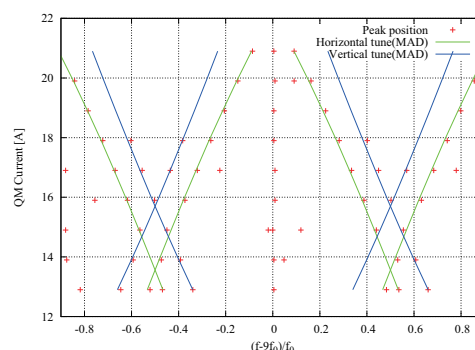


図 5: チューン小数部と計算値との比較

表 2: ベータトロンチューンとビーム寿命の測定結果

QM1[A]	QM2[A]	ν_x	ν_y	Life[s]
13.2	-23.45	2.069	1.075	5.3
10.5	-17.5	2.115	0.724	14.2
-12.9	-12.9	1.53	1.34	14.1
-10.5	-10.5	1.642	1.198	13.5

5. まとめ

S-LSR でのレーザー冷却実験に際し、レーザーと軌道を合わせるための COD の補正を行い、3次元レーザー冷却のためのチューン測定を行った。

COD については、まず Response matrix を用いた補正を行い、レーザー冷却部の $\phi 6\text{mm}$ アパーチャーを通過させることで、ビームの中心軌道がレーザー軌道と 0.2mrad の精度で一致していることを確認した。

チューンは共鳴結合の条件から $(2.07, 1.07)$ を目標としている。シンクロトロンチューンについては最大で $\nu_s = 0.12$ の値が得られているが、電場の実効長がビーム移動距離に比べて長いことが問題となっており、実効長が 26.6mm と短い空洞を新たに製作している。ベータトロンチューンについては $(2.07, 1.07)$ で寿命 5.3 秒のビーム周回を確認した。

今後はビーム軌道とレーザー軌道をより一致させる努力を進め、同時に共鳴条件を満たすチューンの探索も進めていく予定である。

6. 謝辞

本研究は、先進小型加速器事業、京都大学 21 世紀 COE プログラム「物理学の多様性と普遍性の探求拠点」、および日本学術振興会特別研究員奨励費の援助を得て行われました。

参考文献

- [1] H. Souda et al.: Proceedings of the 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan And the 31st Linear Accelerator Meeting in Japan (2006) p. 895.
- [2] H. Okamoto: Phys. Rev. E **50** (6) (1994) 4982.
- [3] Y. Yuri and H. Okamoto: Phys. Rev. Lett. **93** (2004) 204801.