

## ORBIT CORRECTION FOR S-LSR DISPERSION FREE MODE

Hikaru Souda\*, Mikio Tanabe, Shinji Fujimoto, Hicham Fadil<sup>A</sup>, Masahiro Ikegami, Toshiyuki Shirai, Akira Noda  
ICR, Kyoto University, Gokasho, Uji-city, Kyoto, 611-0011  
<sup>A</sup>MPI Kernphysik, Saupfercheckweg, Heidelberg, Germany

### Abstract

Closed orbit correction will be applied to S-LSR for dispersion-free mode. Gradual transfer from normal mode to dispersion free one is needed and addition of electric field and correction of closed orbit distortion(COD) is shifted step by step to guide the ions through 30×26mm aperture in bending sections. Maximum COD is reduced from 2.5mm to 0.8mm using a proton beam. Based on this result, possible process to realize the dispersion-free mode is simulated. During the process, COD will be kept below 9mm, smaller than vertical aperture of ±13mm.

### S-LSR Dispersion-Free Modeのための軌道補正

#### 1. はじめに

京都大学化学研究所に建設された S-LSR<sup>[1]</sup> では、<sup>24</sup>Mg<sup>+</sup> ビームの蓄積を開始し、レーザー冷却によるビーム結晶化を実現する準備を進めている。S-LSRは偏向部に電極を挿入し、電場と磁場の両方を用いてビームを偏向させることにより、一次の運動量分散を消去する機構を備えている。

電場  $B$  と磁場  $E$  がともに存在する半径  $r$  の偏向領域では、電荷  $q$ 、質量  $m$ 、速度  $v$  の粒子の運動量分散  $\Delta r/r$  は

$$\frac{\Delta r}{r} = \frac{qr}{mv^2} \frac{\Delta v}{v} (vB - 2E) \quad (1)$$

のように表せる<sup>[2]</sup>。ここで、電場と磁場は遠心力のつりあいの条件

$$m \frac{v^2}{r} = q(vB - E) \quad (2)$$

を満たす必要がある。式(1)より、電場と磁場が

$$E = vB/2 \quad (3)$$

の条件を満たすとき、一次の運動量分散が消去されることがわかる。

この電場を発生させる電極は主電極と中間電極からなり、開口径は水平方向 30mm、鉛直方向 26mm である。これは、もともとのビームアパーチャーと比べて著しく小さい。そのため、この電極を用いて無分散状態でビームを周回させるには、CODの補正が不可欠である。

#### 2. S-LSRのアパーチャーとCOD発生源

S-LSRでは現在まで、陽子ビームとMgビームを分散消去用の電極を用いずに磁場のみによる偏向で蓄積している。この正の運動量分散をもった運転状態(通常モード)では、アパーチャーは大きくCODは小さいため、ビームの周回は容易である。水平方向のアパーチャーを制限するのはMCP(Micro Channel Plate)ビームプロファイルモニターの中間電極で、そ

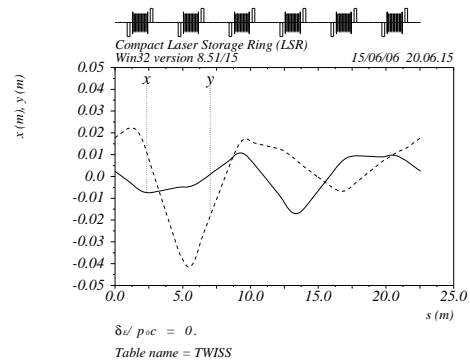


図 1: 電極誤差による COD( $(\nu_x, \nu_y) = (2.07, 2.07)$ )

の大きさは±60mmである。鉛直方向は静電ビームポジションモニター(BPM)の電極板で±20mmに制限される。主なCOD発生源は電子ビーム冷却装置(EC)内のトロイド磁場、MCPの鉛直電場、そして偏向磁石のBL積の個性差である。

今後行う予定の、電場と磁場を併用した運転状態(無分散モード=Dispersion-Free Mode)では、これらの状況が大きく異なり、アパーチャーは小さく、CODは大きくなる。分散消去用電極はアパーチャーを大きく制限し、水平方向に±15mm、鉛直方向に±13mmの範囲でしかビームは運動できない。また、電極のギャップの小ささから製作誤差が大きく影響し、ギャップ長誤差と電極設置時の回転によって、数cm単位のCODが発生する。計算コードMAD<sup>[3]</sup>で計算したところ、チューン $(\nu_x, \nu_y) = (2.07, 2.07)$ のときで図1のようなCODが発生すると予測されている。結果として、無分散モードでは表1にまとめたようにアパーチャーを上回るCODが発生するため、無分散モードでのビーム周回には何らかのCOD補正が必要となる。

#### 3. 陽子ビームでのCOD補正

S-LSRのCOD測定系・補正系は、2005年から行っている陽子ビーム蓄積・冷却実験で使用している。このときの装置の構成は図2の通りである。ビームの周回には電場を用いず、電極はビーム軌道より十分

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

表 1: 通常モードと無分散モードでのアパーチャーと COD

	Normal	D-Free
水平アパーチャー	±60mm	±15mm
鉛直アパーチャー	±20mm	±13mm
水平 COD	±5mm	±12mm
鉛直 COD	±3mm	±40mm

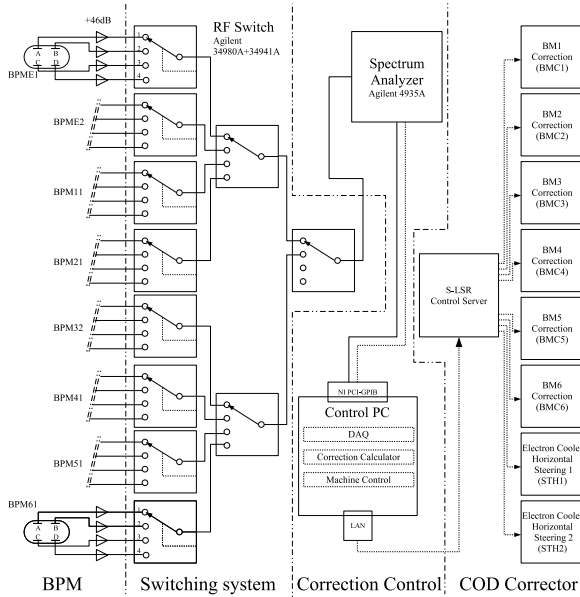


図 2: COD 補正のブロック図

内側に移動させてある。水平方向の COD 補正は各偏向磁石の補正電流および電子ビーム冷却装置のステアリング磁石で行う。鉛直方向の補正は BPM を転用した静電キッカーで行う (次節で詳述)。補正のシステムは 8 個の BPM による測定系、BPM のスイッチング系、補正計算・制御系、そして 8 個の補正要素からなる。リング中の BPM と補正要素の配置は図 3 のようになる。

ビームが通過する時に BPM の 4 つの電極板に誘導された信号をスイッチ系で選択した後スペクトラム・アナライザーで測定し、制御コンピュータでデータ取得を行い、4 つの極板の上下・左右を減算することでビームの位置を計算する。こうして取得したビーム位置をもとに、シンプレックス法を用いて最適な補正要素の値の組を計算する。評価関数は中心軌道からのずれの値の重みつき RMS で、計算に用いる応答行列はあらかじめ実測したものをを用いた。制御用コンピュータは S-LSR のコントロール系に接続し、各補正要素の値を計算で求めた値に設定することで、COD の補正を行う。

補正の結果は図 4 の通りで、COD の最大値は 2.5mm から 0.8mm に減少している。残余の COD は、EC ステアリング磁石の飽和によって可動範囲が狭くなったことから生じたものである。

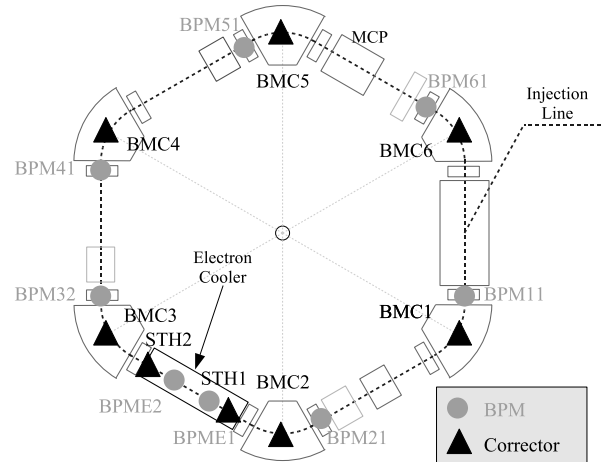


図 3: BPM と補正要素の配置図

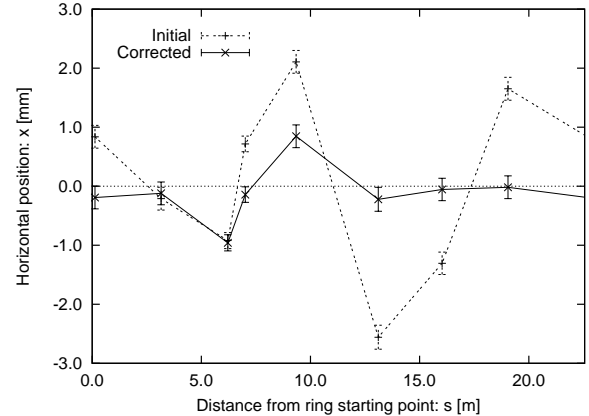


図 4: 水平方向 COD 補正の結果

#### 4. 無分散モードでの補正計画

$^{24}\text{Mg}^+$  ビームを無分散状態で蓄積するためには、COD 補正を行いながら徐々に電場を上げていくことが必要である。最初の段階では、電極をビーム通過領域に移動させた状態で、電圧をかけずに ( $E = 0$ ) 磁場だけで周回させる。この状態では、ビームは小さくなったアパーチャーの中を、小さいままの COD で周回する。

次に、低い電圧をかけ、式 (2) を満たすように磁場も増加させる。電場の発生に伴い、電極の誤差によって COD が増大するが、かけた電圧が十分小さければ、COD の増加は少量に抑えられ、ビームは電極に衝突することなく周回を続けることができる。ここでビーム位置を測定し、COD 補正を適用することにより、増加した COD を再び通常状態と同程度に低減することが可能である。COD が低減すれば新たに電場を付加することが可能となり、同様に COD 補正を行うことができる。こうして、電場と磁場の上昇と COD 補正を繰り返すことにより、ビームを周回させながら無分散状態 ( $E = vB/2$ ) に徐々に移行することが可能となる。

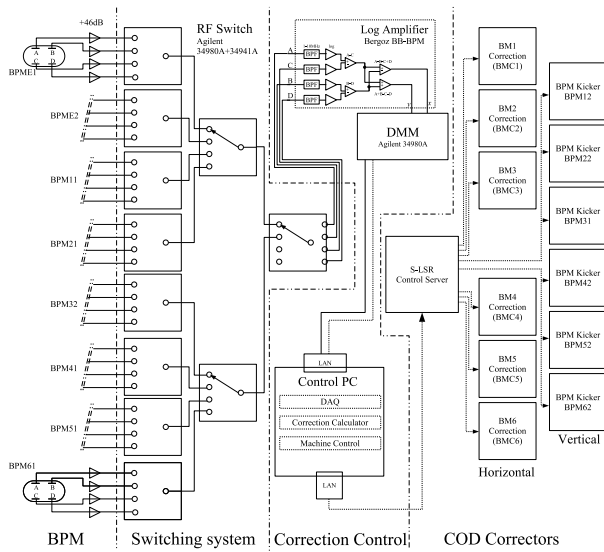


図 5: Mg<sup>+</sup> COD 補正のブロック図

各ステップでの電場増加量の最大値については、MADを用いて計算した。冷却していないビームの半径をおよそ5mmと仮定すれば、ダクト中心から電極までの距離が15mmまたは13mmであるから、CODの最大値は10mm以下に抑える必要がある。計算に用いたベータトロンチューンは、無分散モードで用いる  $(\nu_x, \nu_y) = (2.07, 2.07)$  である。

実験セットアップは、陽子ビームの測定・補正のときと一部異なる。最大の要因は、<sup>24</sup>Mg<sup>+</sup>の寿命が半減時間10秒程度と短いので、スペアナより高速に測定を行えるログアンプを用いる必要がある。水平方向の補正は偏向磁石の補正電流(BMC)6個で行う。陽子ビームと異なり、電子ビーム冷却装置は稼働させないため、ECステアリングは使用しない。鉛直方向の補正は「BPMキッカー」によって行う。S-LSRには四重極磁石の位置に12個の静電BPMがあり、そのうちの6つにアンプを接続して信号の読み取りに用いている。未使用の6個のBPMは、直流電源につなぐことで、上下の極板の間に電場を発生させ、鉛直方向キッカーとして用いることができる。全体図は図5のようになる。

### 5. シミュレーションの結果

徐々に電場を追加していくという条件の下で、CODの増大量と補正要素の値をMADによって計算した結果が図6である。ここで磁場は初期状態  $B_0 = 1.26T$  から無分散モードで  $B_{df} = 2.52T$ 、電場は  $E_0 = 0V/m$  から  $E_{df} = 7 \times 10^4 V/m$  に増加している。電場と磁場の最終値  $B_{df}$  と  $E_{df}$  は、無分散モードの条件  $E_{df} = vB_{df}/2$  を満たしている。

計算の結果、5回の電場増加-COD補正の過程によって、CODを10mm以下に保ったまま無分散モードに移行できることがわかった。各過程には磁場の安定までに数分の時間を要するため、全体で30分程度の時間が必要と見込まれる。

図6によると、鉛直方向のCODが大きく増加して

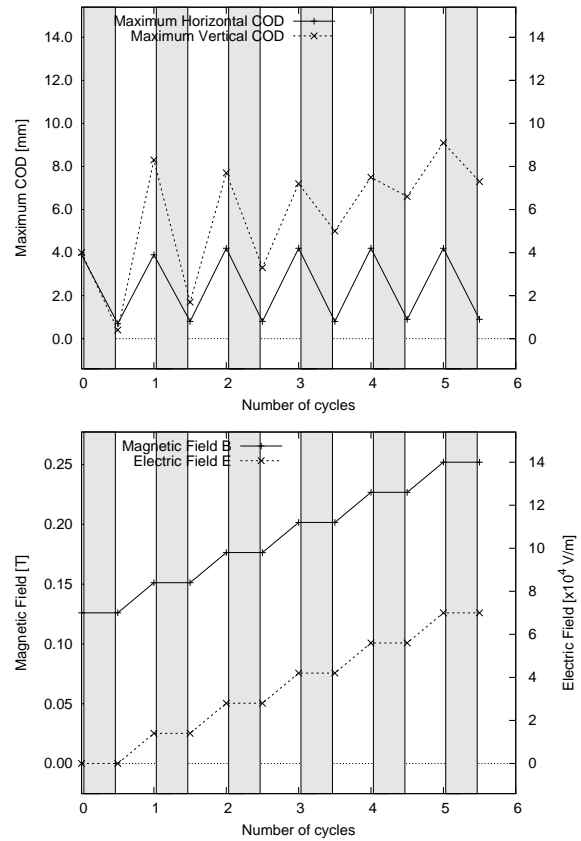


図 6: 無分散モードへの移行シミュレーション。上図はCODの変化、下図は電場と磁場の変化を表している。灰色の部分はCOD補正を行うステップである。

いる。BPMは偏向磁石の両端にある四重極磁石の中に設置しており、BPM位置でのCODが完全に補正されても、偏向磁石の中では残余のCODが発生してしまう。この量は電場に比例して大きくなるが、電場が  $1.2E_{df} = 8.4 \times 10^7 V/m$  以内であれば許容できる。水平方向のCODはこれより小さく、補正したときの0.8mmは陽子ビームでの補正後CODとほぼ等しい。

補正角度の最大値は水平方向に4.0mrad、鉛直方向に12.5mradであり、これはBPMキッカーに120Vの電圧をかければ実現できる。

### 6. まとめ

S-LSRでは<sup>24</sup>Mg<sup>+</sup>を無分散モードで蓄積する準備を進めている。電場の増加とCOD補正の繰り返しからなる手順を構築し、その実現性についてMADを用いて定量的な検討を行った。その結果、5回の繰り返しによってCODを10mm以下に保ったまま、無分散モードに移行できることを確認した。

### 参考文献

[1] A. Noda: Nucl. Instrum. Methods **532** (2004) 150.  
[2] M. Ikegami et al.: Phys. Rev. ST-AB **7** (2004) 120101.  
[3] F. C. Iselin: CERN/SL/92.