

Dispersion-free storage ring

M. Ikegami^{1,A)}, H. Okamoto^{B)}, M. Tanabe^{A)}, A. Noda^{A)}, T. Shirai^{A)}, K. Noda^{C)}, M. Grieser^{D)}

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

^{B)} Graduate School of Advanced Sciences of Matter, Hiroshima University, 1-3-1 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima-City, 739-8530, Hiroshima, Japan

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

^{D)} Max-Planck-Institute für Kernphysik, Postfach 103980, 69029 Heidelberg, Germany

Abstract

A dispersion-free storage ring can be realized by the simultaneous use of an electric field and a magnetic field in a bending region. This idea has been applied to the cooler storage ring “S-LSR” now under construction at Kyoto University. For the sake of dispersion compensation, an electrostatic deflector is inserted in the gap of each dipole magnet. The deflector has been carefully designed so as to improve the quality of the bending field, which is important to minimize closed orbit distortion. According to recent measurement results, the magnetic field error has actually been suppressed to the order of 10^{-4} , while the possible error of the deflector field is estimated to be 10^{-3} .

Dispersionを伴わないイオン蓄積リング

1. はじめに

京都大学化学研究所では放射線医学総合研究所と共同でイオン冷却、蓄積リングS-LSRを建設中である。リングの主な構成要素のうち偏向電磁石、四重極磁石は製作が完了し、磁場測定による性能評価まで完了した。Dispersionを抑制するための静電デフレクターは製作中であるが、完成次第、性能試験を行う予定である。S-LSRではレーザーイオン源で生成された高温イオンビームの電子冷却のほかレーザー冷却による極低温ビームの生成実験も行われる。

適切なラティス構造をもつ蓄積リングと強力な3次元冷却力が用意出来れば、イオントラップ中のクーロン結晶と同様の幾何構造をもつ極低温ビームが生成できると考えられている^{[1],[2]}。これを“クリスタルビーム”と呼ぶ。通常のレーザー冷却力はビームを構成する全粒子の縦方向運動量をそろえるように作用する。この場合、水平方向に有限の広がりをもつクリスタルビームは、偏向電磁石を通過する度に“歪み”を受けてしまう；つまり、軌道の外側に位置する粒子は内側の粒子に比べて遅れることになる。結果として、ビームは加熱され、結晶構造の安定性が著しく損なわれる可能性が生じる^[3]。この問題を解決するには、外側の軌道を通る粒子ほど大きな運動量をもつような定常状態を実現すればよい。このような平衡状態を生み出す特殊な散逸力は“テーパー冷却力”として知られている^[4]。一方、静電デフレクターを導入した蓄積リングは、3次元結晶構造の分散的加熱効果を軽減する新たな解決策として最近提案された。

2. Dispersionを伴わない蓄積リング

Dispersionを伴わない蓄積リングの偏向領域における荷電粒子の運動を考察する。以下の議論は粒子の設計軌道を基準とした曲線座標系で行う。偏向電磁石の作る磁場は偏向領域内では一様でそのベクトルポテンシャルは

$$\vec{A} = \left(0, 0, -\frac{B_y}{2}(\rho + x) \right) \quad (1)$$

と書ける。 ρ は設計軌道の偏向要素中での曲率半径、 x は設計軌道からの水平方向のずれの座標である。Dispersionを抑制するための静電デフレクターは粒子の設計軌道に沿って設置される2枚の円筒形電極と電場補正用の中間電極で構成される(図1)。

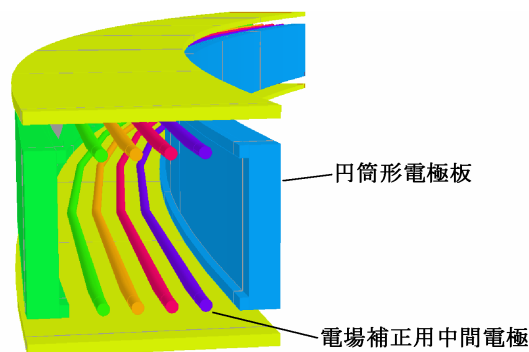


図1. 静電デフレクターの構造の例

これらは偏向電磁石のギャップ内に設置され、偏向

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

電磁石の偏向作用を打ち消す向きに電場を発生させる。理想的な静電デフレクターが作るポテンシャルは以下ようになる。

$$\phi = -\kappa(s) \cdot \ln\left(1 + \frac{x}{\rho}\right) = \kappa(s) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n} \left(\frac{x}{\rho}\right)^n \quad (2)$$

電極の中では $\kappa(s) = V_0$ (一定)、外では $\kappa(s) = 0$ とする。電極に与える電圧は、設計軌道上 ($x = 0$) で次の関係式が満たされるように決める：

$$p_0 = qB_y \rho - \frac{qV_0}{\beta_0 c} \quad (3)$$

ここで、 p_0 は設計運動量、 ρ は軌道曲率半径、 B_y は偏向磁場の強さである。また、偏向領域での荷電粒子の運動方程式は

$$\frac{d^2 x}{ds^2} \approx - \left[1 + \frac{1}{\gamma_0^2} \left(\frac{q\kappa}{\beta_0^2 E_0} \right)^2 \right] \frac{x}{\rho^2} + \left(1 - \frac{q\kappa}{\gamma_0^2 \beta_0^2 E_0} \right) \frac{1}{\rho \beta_0^2} \frac{\Delta E}{E_0} \quad (4)$$

となる^[5]。この式から、電場の強さが

$$\frac{qV_0}{\gamma_0^2 \beta_0^2 E_0} = 1 \quad (5)$$

の関係を満たすとき粒子の軌道はエネルギーに依存しなくなり、Dispersionは消えることがわかる。電場と磁場が満たすべき関係式は(3)と(5)式から

$$\left(1 + \frac{1}{\gamma_0^2} \right) \frac{V_0}{\rho_0} = B_y \beta_0 c \quad (6)$$

となる。

時間 t に陽に依存するポテンシャル (たとえば高周波空洞) が存在しない場合、ビームのエネルギー広がり $\Delta E/E_0$ は保存する。一方、蓄積リング中の粒子のエネルギーと運動量の関係は次の式で表される：

$$p = \sqrt{(E - q\phi)^2 / c^2 - m^2 c^2} \quad (7)$$

静電デフレクターが存在するリングでは、粒子がストレートセクションで持っていたエネルギーの一部がポテンシャルエネルギーに変わる。(2)式から、ポテンシャルエネルギーは偏向領域の軌道半径に依存し、設計軌道からのずれ x が小さければ近似的に、 x に比例することが分かる。(7)式と設計運動量 $p_0 = \sqrt{E_0^2 / c^2 - m^2 c^2}$ の差は x が小さい場合近似的に

$$\Delta p \equiv p - p_0 \approx \frac{\Delta E - q\phi}{\beta_0 c} \quad (8)$$

と表すことが出来る。さらに運動量広がり $\Delta p/p_0$ は

$$\frac{\Delta p}{p_0} \approx \frac{1}{\beta_0} \frac{\Delta E - q\phi}{E_0} \approx \frac{1}{\beta_0} \frac{\Delta E}{E_0} + \frac{q\kappa}{E_0 \beta_0^2} \frac{x}{\rho} \quad (9)$$

と書ける。したがって、Dispersionを伴わない蓄積リングでは、偏向領域に平行かつ同一速度で入射した粒子の運動量広がり Δp の大きさは x に比例する。特に電場が Dispersion free の条件を満たすときには(9)

と(6)式から設計軌道の粒子とそれ以外の粒子の速度の比が

$$\frac{v}{v_0} \approx 1 + \frac{x}{\rho} \quad (10)$$

となることが分かる。これは前節で触れたクリスタルビーム安定化の必要条件に合致する。したがって、Dispersionを伴わない蓄積リングでは、テーパー冷却力を用いずとも、あらゆる結晶構造を安定に維持できる可能性がある。

3. 閉軌道の変形

3.1 イオン蓄積リングS-LSRへの応用

S-LSRは周長22.557 mで偏向領域の曲率半径は1.05 m、超周期は6で一つの超周期は四重極磁石、偏向要素、四重極磁石、ストレートセクションで構成される^[6]。偏向電磁石のギャップは70 mm、偏向角60° エッジ角0° である。静電デフレクターを偏向電磁石の真空槽に挿入した場合、電極のすぐ上下に磁極、真空槽の内壁等の導体が存在することになる。そのため、電極間に出来る電場は弱くなってしまふ。この問題を解決するため、図1に示したような中間電極を持った静電デフレクターを採用し発生させる電場の強度、一様性を向上させた^[7]。電極の間隔は30 mmで製作された。また、磁場のみでイオンを蓄積する場合もあるため静電デフレクターはビーム通過領域の外へ退避させることが出来る。

S-LSRでは運動エネルギー35keVの²⁴Mg⁺ビームのレーザー冷却を行う予定である。このビームを Dispersion freeの状態に蓄積するのに必要な電場、磁場はそれぞれ6.67×10⁻⁴ V/m, 0.252 Tでありこれらは製作した静電デフレクター、磁石で十分達成可能である。

3.2 電場、磁場の誤差の影響

偏向電磁石、静電デフレクターの製作誤差により設計軌道上に電場、磁場の誤差が生じた場合を考える。電場、磁場の誤差はそれぞれ

$$\phi + \Delta\phi = -\{\kappa_0(s) + \Delta\kappa(s)\} \cdot \ln\left(1 + \frac{x}{\rho}\right) \quad (11)$$

$$\vec{A} + \Delta\vec{A} = \left(0, 0, -\frac{B_y + \Delta B(s)}{2} (\rho + x) \right) \quad (12)$$

で与えられるとする。このとき設計運動量を持った粒子の運動方程式は以下ようになる。

$$\frac{d^2 x}{ds^2} \approx - \frac{1 + \gamma_0^2}{\rho^2} \cdot x + \frac{\gamma_0^2}{\rho} \frac{\Delta\kappa}{\kappa_0} - \frac{1 + \gamma_0^2}{\rho} \frac{\Delta B}{B_0} \quad (13)$$

電場、磁場の誤差によって粒子がキックを受ける角度は(13)式を s で積分することにより近似的に求めら

れる。例えば大きさが $\Delta\kappa$ の電場誤差が軌道上に長さ L にわたって存在するとき粒子が蹴られる角度は

$$\Delta\theta \approx \frac{\gamma_0^2}{\rho} \frac{\Delta\kappa}{\kappa_0} L \quad (14)$$

と見積もることが出来る。S-LSRに存在する場の誤差としては以下のものが考えられる：

1. 磁場の誤差

偏向電磁石のギャップ内の設計軌道上での磁場の誤差は磁場測定の結果から $\pm 2 \times 10^{-4}$ 以下であることが分かった。また、各偏向電磁石のBL積の差は $\Delta BL / B_0 L = \pm 3 \times 10^{-4}$ 以下である。このとき

$$\Delta\theta \leq \mp 3 \times 10^{-4} \text{ rad}$$

2. 電極に空けたレーザー冷却用の穴^[7]

静電デフレクターにはレーザー冷却のレーザーを通すために穴が開いている。この影響で電場は穴の付近約 2 cm の範囲で $\pm 2 \times 10^{-3}$ 程度乱れる。このとき

$$\Delta\theta \approx \pm 4 \times 10^{-5} \text{ rad}$$

3. 電極板間隔の製作誤差

電極ギャップの製作精度は 30.0 ± 0.1 mm である。このとき想定される電場の誤差はおおよそ $\pm 3 \times 10^{-3}$ である。ギャップが静電デフレクターの全長にわたって 0.1 mm 狭くなった場合

$$\Delta\theta \approx \pm 3 \times 10^{-3} \text{ rad}$$

3.3 設置誤差

偏向電磁石は誤差 ± 0.1 mm 以内で所定の位置に設置できると考えている。しかし静電デフレクターには偏向電磁石ほど精密な位置の調整機構は備わっていない。また、静電デフレクターをビーム通過領域の外に退避させる場合があり、そのときはデフレクター全体を ρ 方向に移動させる。そのため ρ 方向の設置精度は特に悪く ± 0.5 mm 程度と考えられる。静電デフレクターが作る電場には ρ 依存性がある。そのため ρ 方向に設置誤差がある場合、設計軌道上の電場の強さが変化する。 ρ 方向に x 設置誤差がある場合、設計軌道上の電場の強さは約 $\rho/(\rho-x)$ 倍になる。静電デフレクターは偏向電磁石と同様にセクター形である。そのため ρ 方向に x 設置誤差があった場合、設計軌道上の有効電極長は x だけ短くなる。したがって ρ 方向に ± 0.5 mm 設置誤差がある場合なら $\Delta EL / E_0 L = \pm 2 \times 10^{-5}$ となる。この場合

$$\Delta\theta \approx \pm 2 \times 10^{-5} \text{ rad}$$

である。

3.4 閉軌道の変形

以上の議論から、静電デフレクターの電極ギャップの製作誤差による電場誤差の影響が最も大きいと

考えられる。閉軌道の変形の大きさを簡単に見積もるため6台の偏向要素のうち2台の電極ギャップに誤差があり1台はギャップが0.1 mm狭くもう1台は0.1 mm広い場合を考えた。他の誤差は考えない。この場合、閉軌道の変形(COD)は図2のようになる

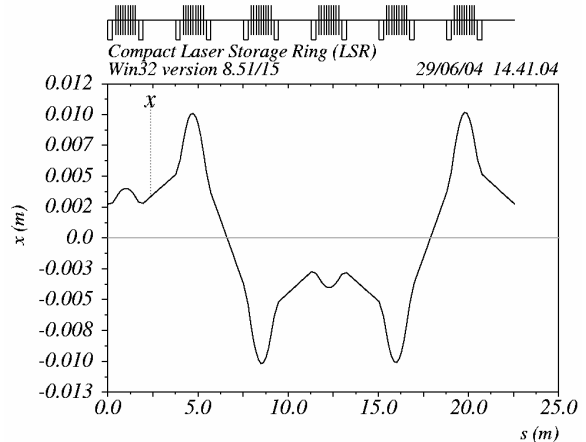


図2. 電場に誤差がある場合のCOD。この図では左から1台目の偏向要素に $+3 \times 10^{-3}$ 、4台目に -3×10^{-3} の電場誤差がある。

図2からCODは最大 ± 10 mm 程度あることが分かる。電極間隔は 30 mm しかないため、何らかの方法でCODを補正すると共にCODが最小となるような6台の偏向要素の配置を考える必要がある。

4. 結論、今後の予定

静電デフレクターの製作は完了していないため正確な電場誤差は今のところ分からない。現在、静電デフレクター用の電源は一台しかなく電場の個体差を電源で補正することは出来ない。しかし、各偏向電磁石の磁場は補正可能である。(13)式を見ると $\Delta\kappa/\kappa_0$ の電場の誤差がある場所の磁場を $\Delta B/B_0 = \gamma_0^2 / (1 + \gamma_0^2) \cdot \Delta\kappa/\kappa_0$ だけ補正すると電場誤差の影響を打ち消すことが出来ることがわかる。偏向要素の全長にわたって誤差が一樣に存在する場合、この方法は有効である。しかし静電デフレクターの全長にわたって一樣に誤差が存在していないことも考えられる。その様な影響が大きい場合、別の補正方法も考える必要がある。

参考文献

- [1] J. Wei et al., Phys. Rev. Lett. 73, 3089 (1994).
- [2] T. Kihara et al., Phys. Rev. E, 59, 3594 (1999).
- [3] J. Wei et al., Phys. Rev. Lett. 80, 2606 (1998).
- [4] H. Okamoto and J. Wei, Phys. Rev. E. 58, 3817 (1998)
- [5] M. Ikegami et al., submitted to Phys. Rev. ST-AB as a title "Heavy Ion storage ring without dispersion"
- [6] T. Shirai et al., Proceedings of EPAC 2002, 623 (2002).
- [7] M. Tanabe et al., in this proceedings.