LATTICE DESIGN OF THE COMPACT COOLER RING, S-LSR

白井敏之^{A)}、池上将弘^{A)}、田辺幹夫^{A)}、岩下芳久^{A)}、Hicham Fadil^{A)}、頓宮 拓^{A)}

野田 章^{A)}、竹内 猛,^{B)}、野田耕司^{B)}、渋谷真二^{B)}

A) 京都大学化学研究所 〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄

B) 独立行政法人放射線医学総合研究所 〒263-8555 千葉県千葉市稲毛区穴川 4-9-1

概要

S-LSR は電子ビーム冷却装置とレーザ冷却装置を備え、 冷却技術をもちいたビーム物理と、冷却技術の R&D を目 的とする小型イオン蓄積・冷却リングである。電子ビーム 冷却では、陽子、炭素イオンビームの冷却をおこない、冷 却可能なビームエミッタンスは1%のエネルギー広がり で、水平・垂直方向に(281 πmmmrad, 102 πmmmrad)で ある。レーザ冷却は、ビーム結晶化の実現を目的としてお り、リングの構造に起因するビーム過熱を抑えるために、 1 周期あたりの位相進みを 127 度または 90 度以下にして 運転することが可能になっている。

1 はじめに

京都大学化学研究所では、小型イオンビーム冷却リング S-LSR の建設をおこなっている[1]。S-LSR は、周長が22.557 m、最大磁気剛性が1Tm で、6回対称形をしたコンパク トな蓄積・冷却リングである。このリングは、電子ビーム 冷却装置とレーザ冷却装置を備え、「ビーム冷却」をキー ワードに、それに関係したビーム物理とその応用を研究目 的としている。現在、実験テーマとして、

- (i) 超高強度レーザによって加速されたイオンビーム(主 に陽子または炭素イオン)の効率的な電子ビーム冷却 方法のR&D[2]
- (ii) 結晶化イオンビーム(主にマグネシウムイオン)の 生成と応用[3]
- (iii) 超短パルスイオンビーム(主に陽子ビーム)の生成 と応用

といった課題を準備中である。これらの研究のために、 S-LSR は設計されており、本論文ではそうした中でも、ラ ティス構造と動作点に関連した項目を中心に述べる。

2 ラティス構造

S-LSR のラティス構造は、1 周期が、

QM 1 - BM - QM 2 - Drift Space

であり、リング全体の周期数は6である。この構造は、で きるだけリングの対称性を高めながら、限られたスペース の中で、冷却装置を設置するドリフトスペースを長くとる ために採用された。ドリフトスペースの長さは、1860 mm である。これは、有効冷却長 500 mm の電子ビーム冷却装 置の長さによって決まっている[4]。これ以外のスペースの 節約のために、四重極電磁石と偏向電磁石の間のスペース は可能な限り短くし、200 mm になっている。表1に S-LSR の主要パラメータをまとめて示している。

表 1	:	S-LSR	の主要パラ	メー	9
~~ -		~ ~~~		/ /	

# 健 / 1、任	
音槓1 オン 種	
陽子(1価)	7 MeV
炭素 (6価)	24 MeV
マグネシウム(1価)	35 keV
リング	
周長	22.557 m
平均半径	3.590 m
ドリフトスペース長	1.86 m
周期数	6
偏向電磁石	H-type
最大磁場	0.95 T
偏向半径	1.05 m
磁極ギャップ高	70 mm
四重極電磁石	
磁極長	0.20 m
ボーア半径	70 mm
最大磁場勾配	5 T/m



図1 S-LSR のリングレイアウト

図1は、S-LSRのリングレイアウトを示している。一番 右側のドリフトスペースには、静電型入射・出射セプタム が設置されている。その両横のドリフトスペースは、入出 射点からのベータトロン位相進みが約 90 度であるので、 バンプ電磁石、キッカー電磁石が設置されている。また、 同じドリフトスペースに、DC-CT などのビームモニタも設 置されている。それ以外の3つのドリフトスペースは、そ れぞれ、電子ビーム冷却装置、レーザ冷却装置、高周波・ 誘導加速装置が設置されている。

3 動作点とラティスパラメータ

3.1 電子ビーム冷却

陽子、炭素イオンビームの電子ビーム冷却を効率よくお こなうためには、電子ビーム冷却装置が設置されたドリフ トスペースにおいて、

(i) ツイスパラメータが左右対称で、変化が小さい(ii) β 関数と分散関数が小さい

ことが望ましい。これらの条件をできるだけ満たすために、 チューンが (v_x , v_y) = (1.875, 0.793) を動作点の候補として 考えている (ノーマルモード)。図2には6次までの共鳴 線とこの動作点 (丸印) が示されている。もっとも近い4 次以下の共鳴線は、 v_y =0.75のラインである。差共鳴による 結合を避けるために、水平・鉛直チューンの差を 0.08 にと っている。このときの1周期内での β 関数と分散関数の分 布を図3に、表2には MAD8 を用いて計算した主要なラテ ィスパラメータを挙げる[5]。

電子ビーム冷却の場合には、陽子ビームのマルチターン 入射や、レーザによって加速されたホットビームの冷却を おこなうために、アクセプタンスが重要となる。真空チェ ンバーサイズと電磁石の有効磁場範囲によって決まる幾 何学的アパーチャーは、水平±200 mm、鉛直±22.5 mm で ある。これには、真空チェンバーのアライメント誤差や、 大気圧によるチェンバーのたわみも含まれている。

様々な誤差要因に対する個別のCODの大きさを評価 した結果が表3である。ここでは各電磁石のもつ誤差が完 全にランダムに分布していると仮定して計算している。こ れから、偏向電磁石のBL積の個体差が大きな影響を与え ることがわかるが、S-LSRでは、6台の偏向電磁石のヨー クを同時に加工する方法を採用したため、このばらつきを 2x10⁴以下にできると考えている[6]。また、電子ビーム冷 却装置のトロイドコイルによるCODは、7MeVの陽子ビ ームに対するものであり、これは構造上避けられないもの である。そのため、磁場の影響をキャンセルするための専 用補正水平ステアリング電磁石をすぐ側に設置している。

図4は各誤差が、表3で与えた値を 1gとするガウス分 布すると仮定して、乱数で値を与えて計算したCODの一 例である。COD補正計算は、6台の偏向電磁石の補正電 流と各ドリフトスペースに1台ずつ計6台設置された垂 直ステアリング電磁石をもちいておこなった。具体的には、 COD を12台の四重極電磁石真空チェンバー内部に設置 された静電型ビームモニタの位置で検出し、それらの値を 最小二乗法によって最小化するように軌道補正をおこな い、それを3回繰り返した。

この結果から補正しなければ、水平方向3 mm、鉛直方 向1 mm の COD が発生している。この値は表3 の個別の COD の和より大きくなっているが、これは、通常の COD とトロイドによる COD が結合しているためと思われる。ま た、補正をすることにより、それらがトロイド部分を除いて、 1/1 0以下まで小さくなくことがわかる。これらの計算か ら、エネルギー広がり±1%のビームの最大アクセプタン スは、(2300 πmm mrad, 102 πmm mrad) になる。電子ビー ム冷却では、イオンビームのサイズを直径 50 mm である電 子ビームサイズ以下にする必要があるので、冷却可能な最 大エミッタンスは、(281 πmm mrad, 102 πmm mrad) になる。



図3 ノーマルモードでの、1周期内でのβ関数と 分散関数の分布

表2 ノーマルモードでの、ラ	ラティスパラメータ
ベータトロン振動数	(1.875, 0.793)
磁場勾配 QM1, QM2	-0.59 m ⁻²
Natural Chromaticity	(-0.93, 0.38)
最大β関数	(3.68 m, 4.67 m)
ドリフト中央でのβ関数	(1.23 m, 4.46 m)
最大水平分散	1.37 m
Transition γ	1.63
Momentum Compaction	0.378

表3 ノーマルモード	「でのCOD計算値
------------	-----------

誤差要因		COD (mm)
偏向電磁石		
BL積個体差	2 x10 ⁻⁴	1.39 (H)
水平方向位置	0.1 mm	0.52 (H)
進行方向位置	0.1 mm	0.34 (H)
水平方向回転	0.1 mrad	0.31 (V)
鉛直方向回転	0.2 mrad	0.66 (H)
進行方向回転	0.1 mrad	0.52 (V)
四重極電磁石		
水平、鉛直方向位置	0.1 mm	0.12 (H,V)
水平方向回転	0.1 mrad	0.01 (V)
鉛直方向回転	0.2 mrad	0.02 (H)
電子ビーム冷却装置		
トロイドコイル		2.8 (H)

3.2 レーザ冷却

レーザ冷却の場合には、イオン源から引き出した 35 keV の Mg⁺ ビームを直接リングに入射、蓄積をおこなう。この 場合に重要な点は、ビームを冷却するときに、共鳴によっ てビームが過熱されないことであり、

- (i) 1周期あたりの位相進みが127度または90度以下であること[7][8]。
- (ii) 非線形共鳴を誘起しないよう、磁場の非線形成分が 小さいこと。
- (iii) CODが小さいこと。

という条件が求められる。1番目の条件をみたすために、 動作点は、表4に挙げている2点が想定されている(クリ スタルモード)。それぞれ、ビーム結晶化が起きるかどう かの閾値と考えられているベータトロン位相進みが90度、 127度という条件を満たす動作点である。クリスタルモー ド1のときの、1周期内でのβ関数と分散関数の分布を図 5に示す。

3番目の条件は、イオンビームと冷却用レーザビームを 正確にオーバーラップさせるためにも重要である。クリス タルモード1で、前節と同様な手法をもちいて、COD補 正をおこなった結果を図6に示す。1 mm 程度あったCO Dが、静電位置モニタの設置・測定誤差によって決まる限 界の0.2 mm 程度にまで抑えられることがわかる。

4 まとめ

電子ビーム冷却とレーザ冷却の2つの冷却方法とそれ ぞれの実験テーマに合わせて、S-LSRのラティス設計およ び最適な動作点のパラメータ検討をおこなった。これによ り線形オプティクスに関しては実験の要求を満たす設計 ができたと考えている。

5 謝辞

本研究を進めるにあたっては、MPI Heidelberg の Grieser 博士、JINR Dubna の Syresin 博士、広島大学の岡本氏、百 合氏、岡部氏には有益な議論とアドバイスをいただきまし 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。

参考文献

- A. Noda et al., Proc. of Symposium on Accel. Sci. and Tech. (2001) 125.
- [2] J.P. Schiffer and P. Kienle, Z. Phys. A321, 181 (1985).
- [3] H. Fadil et al., Proc. of European Particle Accel. Conf., (2002) 1341.
- [4] H. Fadil et al., in this proceedings.
- [5] H. Grote, MAD Program, CERN/SL/90-13.
- [6] M. Ikegami et al., in this proceedings.
- [7] J. Wei, X.-P. Li, A. M. Sessler, Phys. Rev. Lett. 73 (1994) 3089.
- [8] H. Okamoto et al., Proc. of European Particle Accel. Conf., (2002) 1389.



図4 ノーマルモードでのCOD計算結果。左図は補 正前、右図は補正後。誤差量は表3で与えられて いるとおりである。

表4 クリスタルモードでのラティスパラメータ

	モード1	モード2
ベータトロン振動数	(1.448, 1.438)	(2.080, 1.070)
1周期の位相進み	(86.9, 86.3 deg)	(125, 64.2 deg)
磁場勾配 QM1	-1.586 m ⁻²	1.423 m ⁻²
磁場勾配 QM2	-1.586 m ⁻²	-2.554 m ⁻²
Natural Chromaticity	(-0.10, 1.26)	(-1.21 -0.18)
最大β関数	(4.3 m, 2.7 m)	(4.2 m, 5.3 m)
最大水平分散	2.42 m	1.32 m
Transition γ	1.23	1.76



図5 クリスタルモード1での、1周期内でのβ関数 と分散関数の分布



図6 クリスタルモード1でのCOD計算結果。左図 は補正前、右図は補正後。誤差量は表3と同じだが トロイドは励磁されていない。