

## L3BT デザイン (1) アーク部について (F8)

2002 March T. Kato

### まとめ

L3BT 第1 アーク部分のデザイン(ver-1)について、検討結果を記す。ここまでの解析結果では、縦のコリメータはほとんど実効的な効果はないと思われる。縦のコリメータを生かそうとするデザインをしている事により、シミュレーション結果によれば、横のエミッタンス増加が大きくなりやすく、その場合には、後段の横のコリメータ方式は、ロスが多くなりすぎてうまく機能しないと思われる。Preliminary の結果ではあるが、縦のコリメータを入れないデザイン(ver-2)を行い、簡単な比較を行ったところ、ver-1 は空間電荷効果の影響を受けやすく、150mA では不安定な事、ver-2 は空間電荷の影響を受けにくい事がわかった。

### 1) 計算 tools:

LINSAC コードに偏向磁場を入れた bend-code と、偏向磁場を含まないビーム輸送系を計算する lebt-code を作り、これらを組み合わせて粒子計算を行う。Bend-version では、粒子が偏向磁石を通過後に座標系を回転させて、ビームの進行方向を新たに設定している。従って、bend-code 内部では、ビームは実際に偏向している。このコードは t-code なので、磁石境界線の弁別の精度が、計算結果全体の精度を劣化させる可能性がある。そこで、bend-code では、lebt-code の2倍のタイムステップ(540)を用いて精度向上を目指す。縦のコリメータがある部分では、水平方向のスクレーバを入れてビームをカットし、カットしない場合との比較を行い、縦のコリメータシステムの評価を行う。

現在、計算コードの改良等が進行中なので、ここでは、検討が十分ではない preliminary な結果を含めて報告する。Preliminary な場合でも、複数のデザインの相互比較はある程度意味があると思われる。

ビームラインのデザイン用に、軸対象3次元線形な空間電荷効果を含むラティスパラメータ計算用コードを開発した(bt3d)。入力形式は、粒子コードと同じであり、beta,  $\eta$ , phase advance 等、検討に必要な最小限の項目が計算できる。

### 2) L3BT デザイン(ver-1)の特徴

図1にラティスパラメータ(電流ゼロ)を示す。これは、L3BTのH13.03.15付けのParmila用入力データを使って計算した。偏向磁石の dispersion を90度のアーク全体で消す構造となっており、縦方向のハローをとる目的もあって、アーク中央45度部分の dispersion が大

きくなっている。同時に、beta 関数が大きく、さらに dispersion 最大の所では、x と y の beta 関数の比が非常に大きくなっていて、強い空間電荷効果に対しては、強いデザインではなさそうに見える。

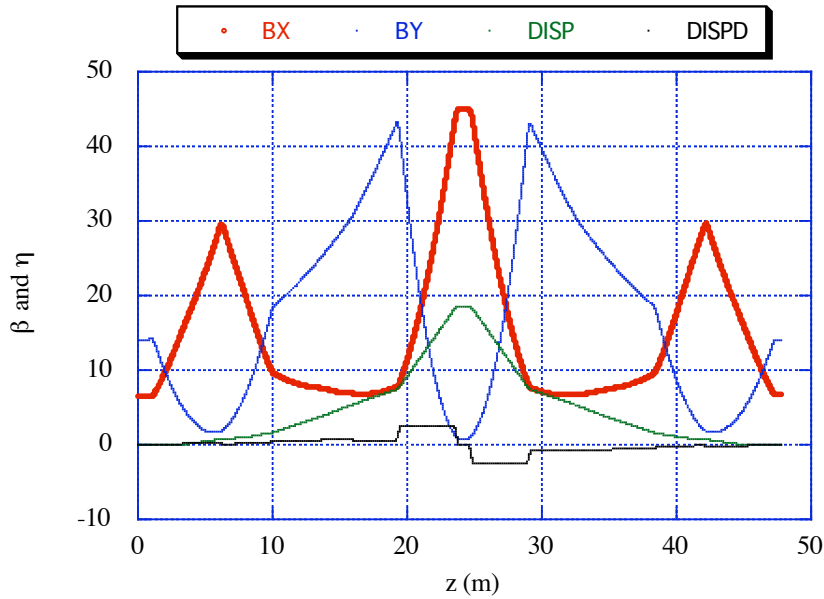


図1 ver-1 の $\beta, \eta, \eta'$

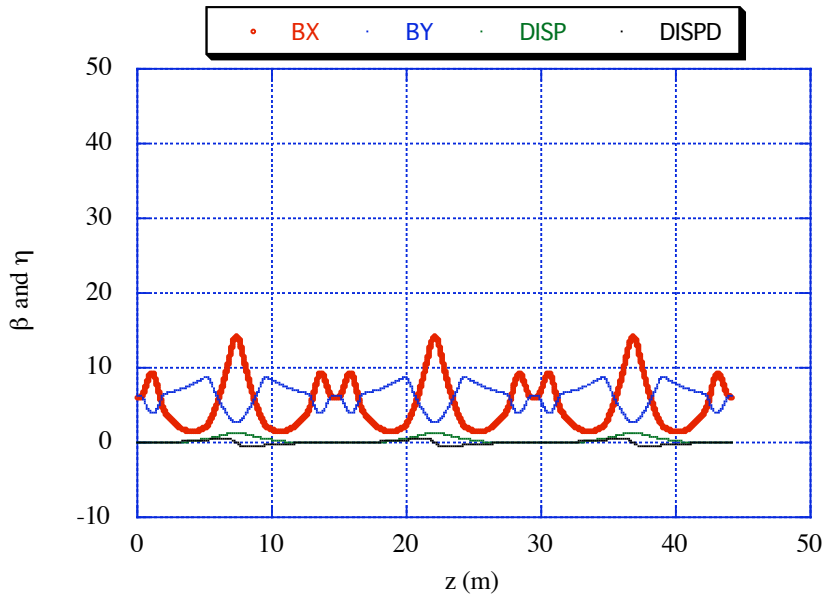


図2 ver-2 の $\beta, \eta, \eta'$

### 3) 新デザイン(ver-2)

図2にラティスパラメータ（電流ゼロ）を示す。このラインでは、偏向磁石の dispersion を個別に消している。収束系はトリプレットを使っている。スケールの適当な図は、図 11-13

を参照。

### 3) 縦のコリメータの効果 (ver-1)

dispersion によるビームの振れは、 $\eta(\Delta p/p)$  だから、 $\Delta p/p=0.001$ 、 $\eta=18$  とすれば、18 mm となる。エミッタンスによるビームの広がり、ビームの最大エミッタンスを  $4\pi\text{mm-mrad}$  とすれば 13 mm 程度である。リニアックでは、コリメータの場所を各粒子は一回だけ通過する。したがって、最大運動量偏移の粒子( $\Delta p_{\max}/p$ ) だけを 100% 確実に除去する為に必要な dispersion による偏移幅 = [ビーム直径分 ( $D\sim 26$  mm)] + [除去したくない運動量偏移( $\Delta p_{\text{core}}/p$ )を持つ粒子が dispersion により偏移する距離] 以上となる。故に、

$$\eta(\Delta p_{\max}/p - \Delta p_{\text{core}}/p) = D$$

これより必要な  $\eta$  と、きれいに除去できる運動量偏移の関係は Table 2 のようになる。この表を満たさない設定の場合には、望ましくない運動量偏移の粒子まで削ってしまう事になる。

Table 1 クリーンカットできる  $\Delta p_{\max}/p$  と  $\eta$  の関係。  $\Delta p_{\text{core}}/p = 0.001$  とする。

$\Delta p_{\max}/p$	$\eta$
0.0011	260
0.0012	130
0.0015	52
0.0025	18

従って、 $\eta=18$  の場合、 $\Delta p/p \approx 0.0025$  以上の粒子はきれいにコアと分離できる。以下の粒子はきれいに分離できない事が予想される。

3-1) 縦のコリメータ検証シミュレーション (ver-1 に対して)

ハローを含む入射ビームは、人為的に縦ハロー粒子を加えて用意した。図3に入射ビーム縦エミッタンスを示す。これは $\pm 500\text{keV}$ 程度のエネルギー幅を持つ3200個の入射粒子(コア部分)の一部をハロー粒子に置き換えてつくったものである。実際には、randomに選んだ44個の粒子のエネルギーを、 $400\pm 0.7\text{MeV}$ (20粒子)、 $400\pm 0.8\text{MeV}$ (20粒子)、 $400\pm 1\text{MeV}$ (4粒子)とした。図4に、エネルギーとx座標との相関がない事を示している。この粒子集団をver-1のビームラインに通し、アーク部の最大dispersionの場所においてx-scrapersにより粒子をカットする。図5にスクレーパ位置の粒子分布(x- $\Delta W$ )を示す。図5から、Dispersionの効果により、エネルギーとx位置に相関がある事がわかる。同時に、この輸送系で、ここでつかった

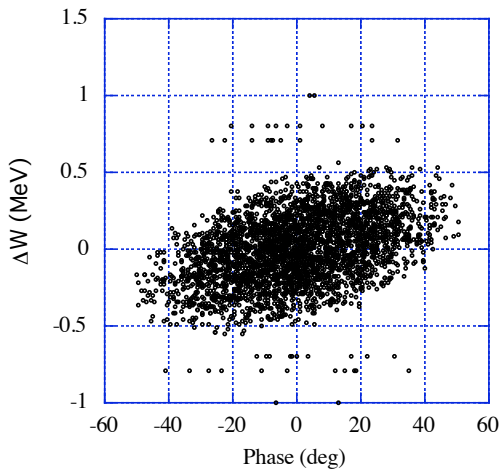


図3 入射粒子分布( $\Delta\phi$ - $\Delta w$ )

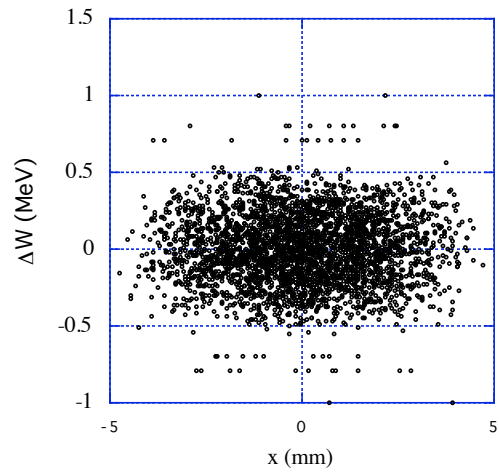


図4 入射粒子分布 (x- $\Delta w$ )

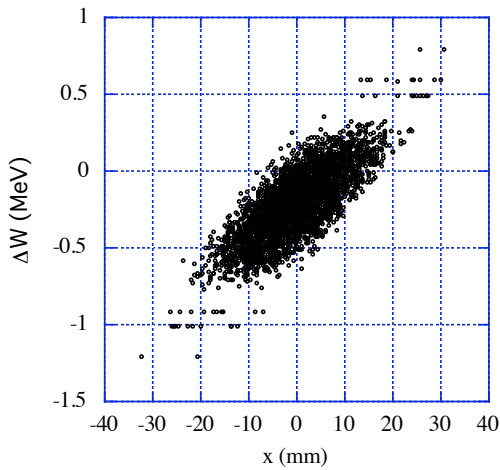


図5 スクレーパ位置の粒子分布 (x- $\Delta w$ )

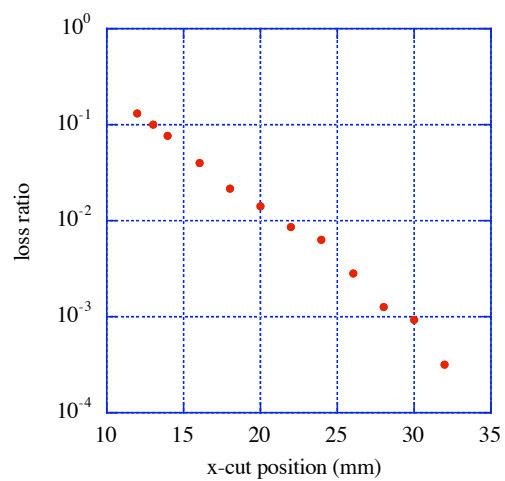


図6 スクレーパによるビームロスの割合

入射粒子分布の場合には、ハロー粒子だけをカットする事が難しい事もあきらかである。スクレーパの位置を変えた時のピーロスの変化を以下に示す。図6は、スクレーパ位置によるビームロス量（カット粒子）の割合を示している。図7には、スクレーパを通過したビームの全エネルギー幅および、カット粒子の中のコア粒子の割合を示した。図8にはスクレーパ位置が20mmの場合の、カット粒子のエネルギー分布を示す。コア粒子のエネルギー幅は  $\pm 500\text{keV}$  だから、図7より、20m程度の dispersion では、きれいな縦のスクレーパ効果は難しいと思われる。この計算では、空間電荷効果は入れていないが、空間電荷効果は、事態を一層悪化させる方向だと思われるので、この検討結果に及ぼす影響は小さいと思われる。

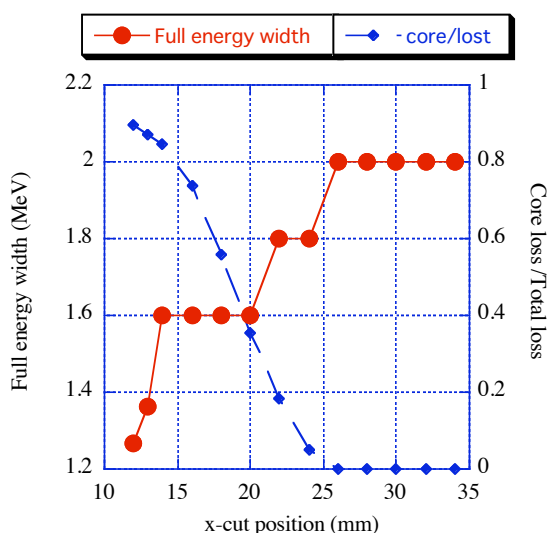


図7 スクレーパを通過したビームの全エネルギー幅、および、カット粒子の中に占めるコア粒子の割合。

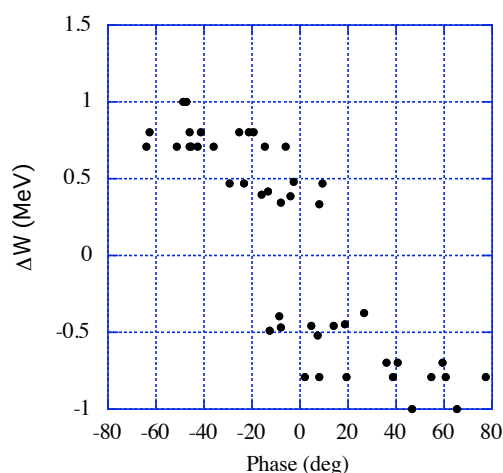


図8 スクレーパ位置 20mm の場合のカット粒子の  $\Delta\phi - \Delta w$ 。

### 3-2) 横エミッタンス増加

ビームサイズが非対称に大きく変化するラインは、空間電荷効果とあいまってエミッタンス増加を起こす事がよく見られる。Table 2 に ver-1 と ver-2 のシミュレーション結果を示す。ピーク電流 150mA、粒子数 3200 でアーク部だけの計算を行った。

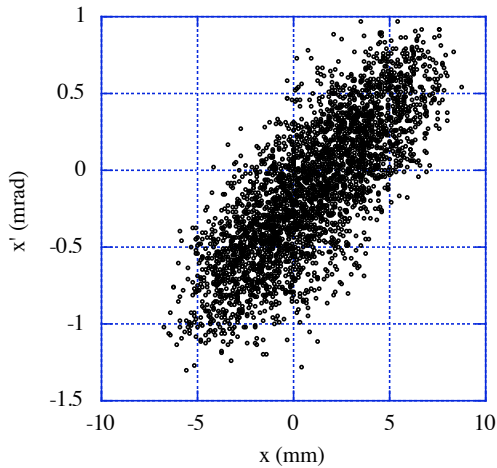


図9 ver-1 ライン出口の x-x'エミッタンス。

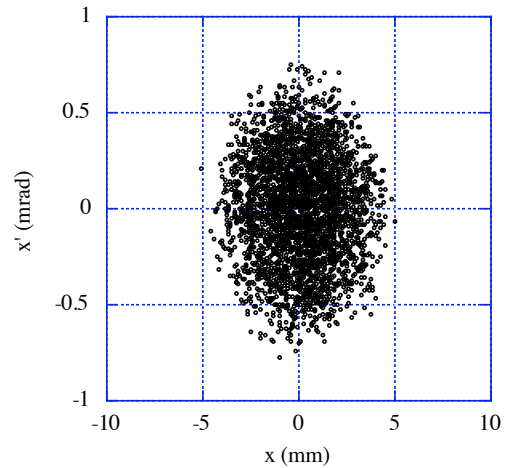


図10 ver-2 ライン出口の x-x'エミッタンス

Table 2 Output emittance of the beam line (cm-mrad).

	Xrms	X90	X99.9	Yrms	Y90	Y99.9
Ver-1	0.878E-01	0.378E+00	0.923E+00	0.534E-01	0.226E+00	0.539E+00
Ver-2	0.509E-01	0.219E+00	0.387E+00	0.504E-01	0.214E+00	0.368E+00
Injection	0.496E-01	0.211E+00	0.355E+00	0.502E-01	0.212E+00	0.357E+00

図9と図10にアーク出口での x-x' エミッタンスを示す。Ver-1では90%エミッタンスが4pmm-mrad近くに増大している。従って、この場合には、後続の横方向のスクレーパーの機能は、ビームロスの制限を考慮すれば、期待できない。ここでは計算結果の数字自体を論じるのではなく、ver-2と比較して、ラインの性質が悪く、収束力の変化に弱いので、さまざまな問題を起こす可能性がある点が重要と思われる。Ver-2の場合には、横方向ビームサイズが小さくなっているので、縦方向の空間電荷力が強くなり、それは、ver-1に比べて大きなエネルギーの広がりを生み出す事になる。従って、必要な第2デバンチャー電圧が増大する。

### 3-3) 空間電荷の効果

ラティスパラメータは、空間電荷効果の影響を受ける。このアーク部分では、ACSの出口直後のような急激な変化はないが、2台のデバンチャーの運転方法と関連して、空間電荷効果も変化する。ラティスデザイン用のbt3dコードによる、前節のシミュレーションのver-2の2台の偏

向磁石からなる基本ラティスについての計算結果を、図 11-13 に示す。図 14 に ver-1 の 150mA の場合を示す。磁場等のパラメータは変化させていない(tuning していない)。図 11 と比べると、空間電荷効果により受ける影響が大きい事がわかる。Ver-1 の、出口におけるこの大きな dispersion を消して、収束磁石のチューニングで 150mA での安定な解を求めようとしたが、縦のコリメータ付近の 2 個の磁石だけのチューニングのみでは、y 方向の安定な解は見いだせなかった。

Table 3 に ver-2 の基本ラティスを示す。

図 11 : 電流ゼロにてチューニング後、150mA 空間電荷を入れた時のパラメータ。わずかではあるが、 $\eta$  が生じ、マッチングがずれている(ver-2)。図 14 との比較のために 3 periods の図を添付した。

図 12 : dispersion を消す為に、収束磁石をチューニングした結果、dispersion はゼロに近くなったが、ミスマッチが大きくなった(ver-2)。

図 13 : 入り口のビームパラメータをマッチさせた。空間電荷効果がある場合の、final state。

図 14: ver-1 のゼロ電流のラティスに 150mA 空間電荷を入れた場合の変化。図 11 と比較する。縦スケールが異なるので注意。

ここに示したのは、このようなチューニングができる事を示しただけであり、実際に行う必要があるかどうか等は、今後の検討課題。

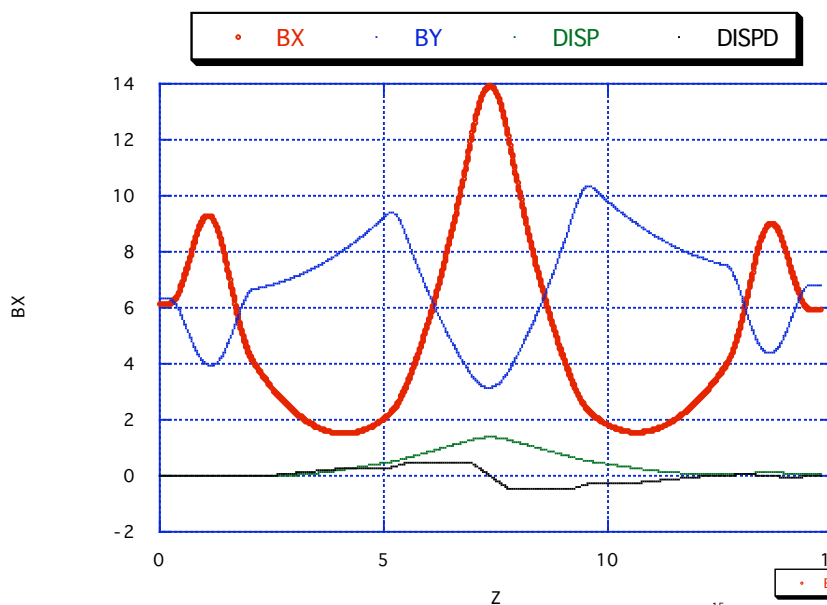
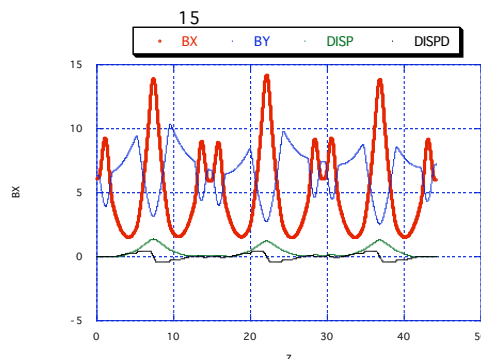


図 11

アーク全体を右に示す



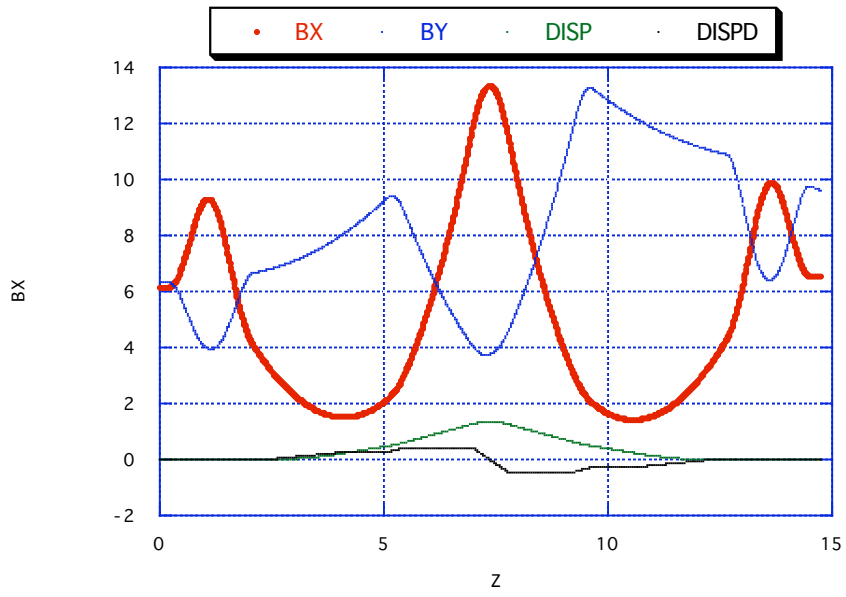


图 1 2

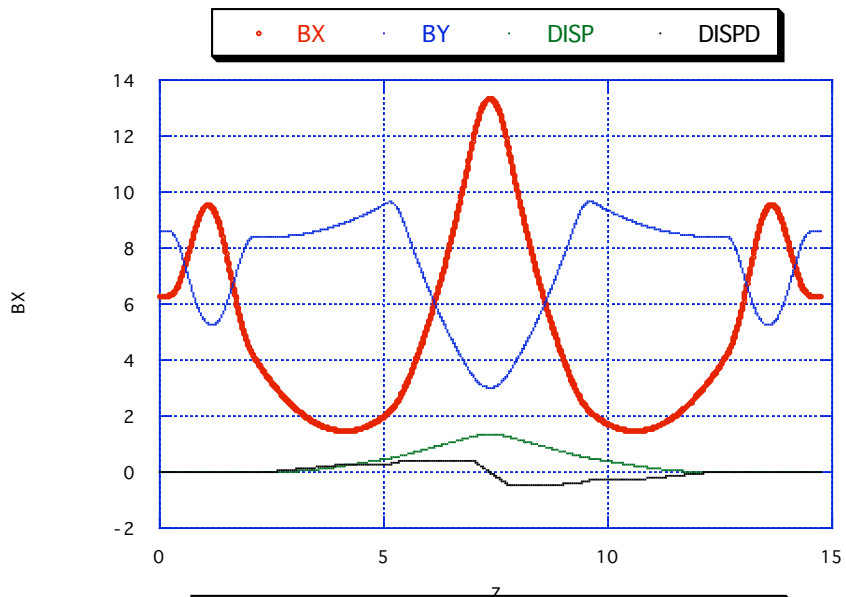


图 1 3

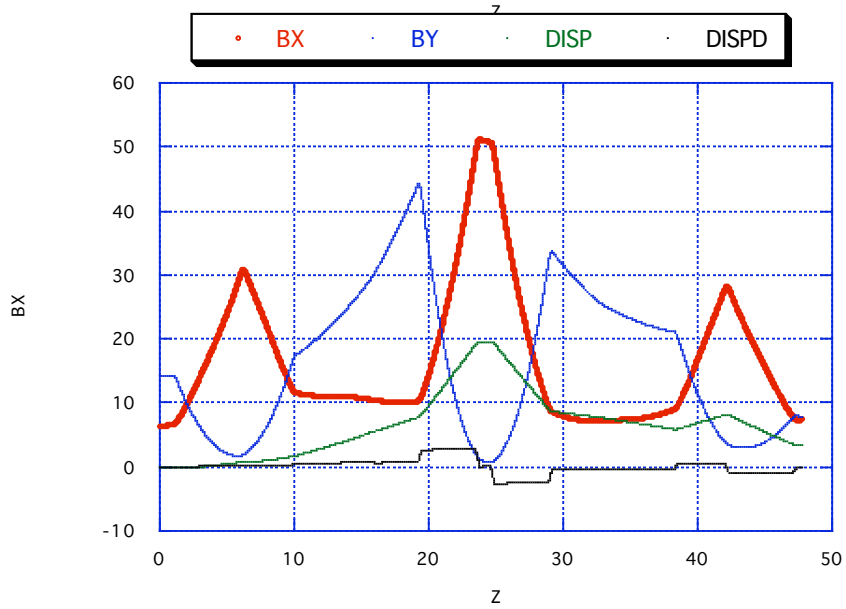


图 1 4



Table 3 ver-2 基本ラティスパラメータ。

MAGNET	20	0	0
MAGNET	30	3.9	-1
MAGNET	30	0	0
MAGNET	70	3.75	1
MAGNET	30	0	0
MAGNET	30	3.800	-1
MAGNET	30	0	0
BEND 0.50022 15 .50022 0			
MAGNET	100	0	0
MAGNET	40	2.70	-1
MAGNET	150	0	0
MAGNET	80	2.6311	1
MAGNET	150	0	0
MAGNET	40	2.700	-1
MAGNET	100	0	0
BEND 0.50022 15 .50022 0			
MAGNET	30	0	0
MAGNET	30	3.800	-1
MAGNET	30	0	0
MAGNET	70	3.75	1
MAGNET	30	0	0
MAGNET	30	3.9	-1
MAGNET	20	0	0

追記：

- 1) 本稿の偏向磁石計算は sector 型を想定して行った。Ver-1 では rectangular を想定していると聞いたので、結果的には若干違うパラメータで計算を行った事になる。エッジ効果を入れるとラティスパラメータは変化する Ver-2 の場合には beta 関数で 5% 程度の差を生じる。Ver-1 の場合には、ベータ関数が大きいので、影響も大きくなると思われる。チューニング等を含めて考えれば、電流値の大幅な変化が予想され、従って、収束力も変化する。そうした収束力の変化に対して、敏感でないような構成を考える事が必要と思われる。
- 2) ver-2 の偏向磁石を rectangular 型とすれば、ここでもラティスパラメータが変わる。当初、安定でなくなる事が見られたので、Table 3 に示した両端の収束磁場を下げるなどして、チューニングしなおす事を行った。
- 3) ver-2 は、とにかくデザインしてみたという意味あいなので、夫々のパラメータについて、および全体としての特性等については、十分な検討がなされていない。
- 4) 筆者は、今までに、リングデザインの経験がないのでその方面の計算 tools になじみがなく、また、空間電荷効果を考慮した使い易いコードも近くに見あたらなかった。その為、今回提示した計算は、ごく最近書き下した新しいコードによっている。従って、コードにはまだ多くのバグがある可能性があり、且つ、基本的な考え方に思い違い等の誤りがある可能性もあるので、計算結果等に不自然な点があれば、指摘していただければ感謝致します。