

The Design Study of Bunch Compressors for the JLC and the ATF

Mitsuo Kikuchi and Junji Urakawa

KEK, National Laboratory for High Energy Physics

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki-ken, 305 Japan

ABSTRACT

The JLC linear collider and the ATF facility are envisaged to be constructed in near future and in very near future[1]. In these plans, the extracted beam from the dumping ring[2] has a bunch length of 5mm and a relative momentum spread of 0.08%. In the JLC, it is necessary to shrink the bunch length to $60\mu\text{m}$ in order to obtain high luminosity with extremely low-beta optics and also to reduce an adverse effect of single bunch transverse wake field in the X-band cavities. The ATF also requires a bunch-length compressor in order to provide the Final Focus System and the X-band cavity test-stand with beams which have a momentum spread of 0.13% to 1.0%. The bunch compressors for the JLC and the ATF were designed fulfilling the requirements mentioned above. The emittance growth due to radiation excitation and chromatic effects was taken into account. The misalignment tolerance was partly analyzed and is estimated to be several microns.

JLC 及び ATF のバンチコンプレッサーの設計

1. はじめに

JLC 計画ではエネルギー 500 GeV で衝突点のビームサイズは水平方向(x) $0.2\mu\text{m}$, 垂直方向(y) 2nm とされている [1]。ダンピングリングから取り出されたビームのエミッタンスは $\varepsilon_{xn} = 3 \times 10^{-6} \text{m}$, $\varepsilon_{yn} = 3 \times 10^{-8} \text{m}$, バンチ長は 5mm, エネルギー幅 0.08% である。また衝突点のベータ関数は $\beta_x^* = 14\text{mm}$, $\beta_y^* = 80\mu\text{m}$ と極端に絞られる。横方向にビームを収束させたときに有効にルミノシティを得るためには $\sigma_z \leq \min(\beta_x, \beta_y)$ が必要で (σ_z はバンチ長)、上に述べた JLC のパラメータから、 $\sigma_z \simeq 60\mu\text{m}$ が要求される。これは横方向の単バンチ wake 場の影響を軽減するためにも必要である。また、ATF においては JLC の研究開発のためにダンピングリング、最終収束系 (FFS)、X-バンドキャビティのテストが行なわれる予定である。後者のためには RF 位相で少なくとも 20 度以下 ($\sigma_z = 1.5\text{mm}$)、前者のためには FFS の運動量幅のテスト (0.13% から 1.0%) のためこれに見合ったバンチ長 ($\sigma_z = 3.4\text{mm} \sim 0.4\text{mm}$) が必要である。

2. JLC 用バンチコンプレッサー (JLC-BC)

図-1 に JLC-BC の概念的なスケッチ (ただし全体の半分のみ) を示す。BC の原理は図-2 に示すようにエネルギーの違いによる軌道長の差、及び RF によるバンチ内の位置に依存した加速 (減速) による位相空間での回転である。バンチ長の圧縮比は $60\mu\text{m}/5\text{mm} \simeq 1/80$ と大きいので 2 段階に分けて行なわれる (BC1, BC2)。BC1 で約 $1/12.5$ に圧縮 (エネルギー幅は 1% に増加する) した後加速し相対エ

エネルギー幅を0.3%にし再びBC2で1/7に圧縮し60 μm のバンチ長を得る。このときエネルギー幅は2%に達する。次に設計の要点について述べる。

BCの光学系の設計の際注意すべきことはエミッタンスが非常に小さく、クロマティックな効果によるエミッタンス増加を抑えることがJLCの絶対条件となることである。BCに要求される条件は次のようになる。(1)X-バンドライナック(主ライナック)の入口で許される最大エネルギー幅は約2%、(2)運転およびライナックの増設を容易ならしめるためダンピングリングは衝突点付近におかれる。従ってビームは主ライナックに沿って輸送され180度曲げられて入射される。(3)高エネルギーでは曲線部での放射励起によるエミッタンス増加が無視できない、これは γ^5/ρ に比例する。(4)BC1の後のS-バンドキャビティでは横方向wakeによる不安定性を避けるため少なくとも $\sim 0.4\text{mm}$ 以下でなければならない。(5)光学系の運動量依存性からくる有効エミッタンス増加を避けるためエネルギー幅は、ラインの長さにもよるが、1%以下であることが望ましい。

まず(4)(5)からBC1の圧縮率を1/12.5と決めた。そうすると(1)から主ライナックの入射エネルギーは5.5GeV以上と決まる。一方(3)からエネルギーはできるだけ小さい方がよい(さも無くば軌道半径を大きくとることになるがこれはコスト高につながる)。以上からBC2のエネルギーは5.5GeVに選んだ。表-1にJLC用バンチコンプレッサーのパラメータを示す。BC1はエネルギーが低く放射励起を考慮する必要がないのでBC2に比べ簡単であるので以下BC2の設計についてのみ述べる。

Arc-1 RFキャビティ以前の曲線部(Arc-1)ではエネルギー幅は約0.3%と小さくクロマティックな効果は小さい。Arc-1の設計では(a)RFキャビティにおけるバンチ長はRFのsin波に起因する非線形性を小さくするため位相にして20度(1.5mm)以下、(b)放射励起によるエミッタンス増加は5%以下、(c)単位セルはFODOとする、(d)偏向磁石の強さ1.3T以下、(e)4極磁石の強さ90T/m以下、という条件からパラメータを決めた。表-2にArc-1のパラメータを示す。

Arc-2 RFキャビティ後の曲線部ではエネルギー幅が2%と大きいのでsecond-order achromat[3]の概念を採用し6極磁石による補正を行なった。

性能評価 トラッキングの手法を用いて性能評価を行なった。1000個の粒子をバンチ内に分布させトラッキングを行ない10回の平均をとった。結果はバンチ長は $\sigma_z = 66.3 \pm 2.2\mu\text{m}$ 、エミッタンス増加は $\varepsilon_x^{\text{out}}/\varepsilon_x^{\text{in}} = 1.06 \pm 0.03$ 、 $\varepsilon_y^{\text{out}}/\varepsilon_y^{\text{in}} = 1.00 \pm 0.04$ であった。misalignmentの許容値をみるため各磁石にランダムな偏位を与えエミッタンス増加が2倍になる偏位量を求めた。結果は水平方向の4極磁石のずれについては30 \sim 300 μm 、垂直方向については3 \sim 30 μm であった。また4極磁石回転については0.1 \sim 1.0mradであった。これらは軌道補正をしていればより小さくなると推測される。

2. TAF用バンチコンプレッサー(TAF-BC)

場所的な制約のためダンピングリングの曲線部に沿った輸送路をBCに利用している。TAF-BCの特徴は各種のテストのためにバンチ長の可変範囲が広いことである。セルの位相進行を45度から135度まで変えることによってバンチ長の可変範囲は0.4mmから3.4mm(エネルギー幅0.13%から1%)になっている。必要なRF(S-バンド)電圧は4.7MVから48MVである。クロマティシティ補正のため

に曲線部のセルには6極磁石が配置されている。

References

- [1] 竹田誠之, JLC Study Group [JLC計画とATF計画] 本研究会
- [2] 浦川順治, 黒田茂, [ATFのダンピングリングの設計] 本研究会
- [3] K.L.Brown, *A Second Order Magnetic Optical Achromat* SLAC-PUB-2257 (1979)

表-1 Parameter of Bunch Compressors for JLC 表-2 Parameters of Arc-1 of Second Compressor

==== First Compressor ====			
Energy (GeV)	1.5400	*Energy (GeV)	5.5000
compression factor	0.0800	*Total bend_angle (deg)	340.0000
bunch length (in/out) (mm)	0.4240	*emittance_0 (rad.m)	2.7873D-10
deltaE/E (in/out) (%)	5.3000 / 1.0000	*emittance_growth (%)	5.0000
dilation factor of Arc_1 (m)	0.0800 / 0.0	*phase_advance_x (deg)	90.0000
dilation factor of Arc_2 (m)	0.5283	*phase_advance_y (deg)	90.0000
rf frequency (GHz)	2.8560	q_strength (kf/kd) (m ⁻²)	4.9057 / 4.8963
rf voltage (MV)	48.3875	*Q_field (T/m)	90.0000
rf phase at sigz (degree)	18.1767	Q_length (m)	0.2865
voltage decrement at sigz (%)	1.6690	Bend_angle/magnet (deg)	2.3271
		B_field (T)	1.3070
		B_length (m)	0.5701
		*Free_space (m)	0.5000
==== Second Compressor ====		cell_length (m)	2.2132
Energy (GeV)	5.5000	beta_x (m)	3.6557
compression factor	0.1415	beta_y (m)	0.6678
bunch length (in/out) (mm)	0.0600	dispersion_x (m)	0.1206
deltaE/E (in/out) (%)	0.4240 / 1.9787	*dilation_factor (m)	5.0000D-01
dilation factor of Arc_1 (m)	0.2800 / 0.5000	No. of cell	73.0509
dilation factor of Arc_2 (m)	0.0739	Total_length (m)	161.6756
rf frequency (GHz)	11.4240	align_tolerance_x (micron)	1.78
rf voltage (MV)	352.5444	align_tolerance_y (micron)	0.18
rf phase at sigz (degree)	20.0671		
voltage decrement at sigz (%)	2.0319		

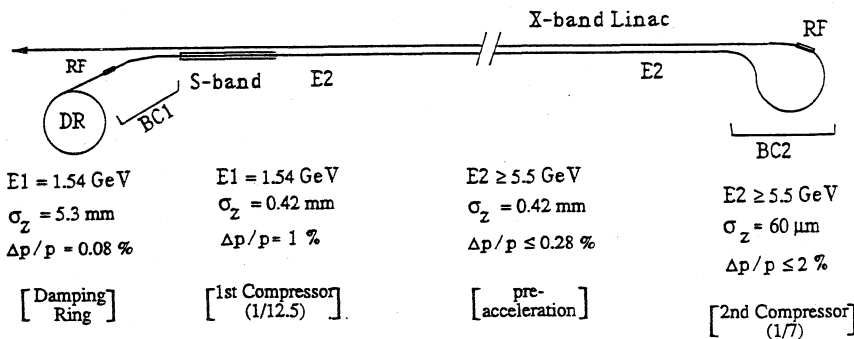
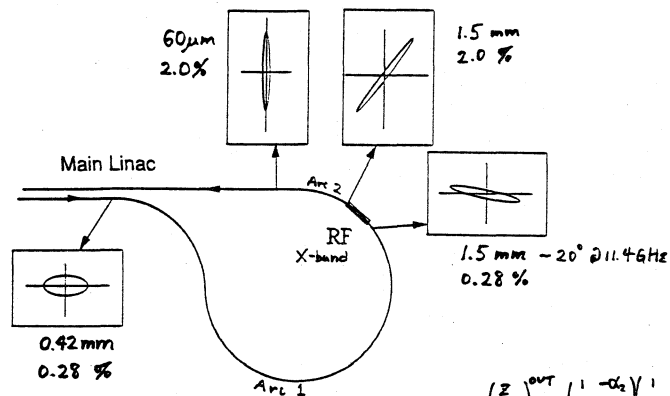


図-1 Layout of Bunch Compressor for JLC

図-2 Second Compressor for JLC



$$\begin{pmatrix} z \\ \sigma_z \end{pmatrix}^{OUT} = \begin{pmatrix} 1 & -\alpha_2 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & v & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & -\alpha_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z \\ \sigma_z \end{pmatrix}^{IN}$$

$$\alpha = \int \frac{1}{p} ds, \quad v = \frac{u}{c} \hat{v}$$