

PLA - 92 - 2

92 / 5 / 15

1 GeV リニアック検討資料

1 GeV LINAC DESIGN NOTE

題目 (TITLE) JHPバンチャーの設計

著者 (AUTHOR) 加藤隆夫

概要 (ABSTRACT)

ビームテストスタンドのRFQとDTLの間に置いて使用するバンチャーの形状を決めた。リエントラント型の単一空洞を使用する。主なパラメーターは以下の通り。

全長 12 cm、ギャップ長 0.9 cm、周波数 432 MHz

直径 41.2 cm

シャントインピーダンス 60.43 MΩ/m、

Q 23951

RF 電力 約 7 kW

加速電圧 159 kV

KEY WORDS:

Ion source, RFQ, DTL, CCL, Magnet, Monitor, Beam Dynamics, Transport, Vacuum, Cooling, Klystron, Low level rf, High power rf, Modulator, Control, Operation, Radiation, General, Others

JHPバンチャーの設計

920515 加藤隆夫

JHP ビーム加速テストスタンドでは、RFQとDTLの間に長さ1.7mのビームラインがある(図1)。ここでは、主として横方向のビームマッチングを目的とするが、反面、縦方向のマッチングは損なわれてしまう。そこで、途中に加速空洞を置いて、縦方向のマッチングを回復させる。

1) 基本仕様

ビームダイナミクス計算により要求される諸特性は以下の通りである。

- | | | |
|----------------|-----------|------------------------------|
| 1) 隣り合う四極磁石の間隔 | 18 cm | |
| 2) 必要な加速電圧 | 130 kV | ($V=E_0L=E_0\beta\lambda$) |
| 3) 周波数 | 432.0 MHz | |

ここで、二つの余裕度を考える。第一は、四極磁石のコイルの長さ等を考慮して、空洞の全長を12cmに設定する。第二は、最大電圧を200kVまでとれるようにする。従って、空洞に要求される特性をまとめると、以下になる。

全長 12 cm、運転周波数 432 MHz、最大加速電圧 200 kV。

2) 概要

利用空間、加速電圧の大きさ等を考えると、リエントラント型の単一空洞が適当である。

空洞には、周波数チューナーを二個、周波数モニターを二個つける。水冷をして熱的に安定化させる。

リエントラント型の単一空洞
周波数チューナー 2本
周波数モニター 2個
水冷 30℃

3) 計算周波数の決定

SUPERFISH, MAFIA を使って空洞形状の最適化を行なうが、計算の途中で、計算周波数の設定を改めて行なう必要がある。それは、周波数変動の二つの原因を考慮する為である。第一は、周波数チューナーの効果、第二は、空洞計算自体が含む周波数誤差の補正である。

3-1) 周波数チューナーの効果

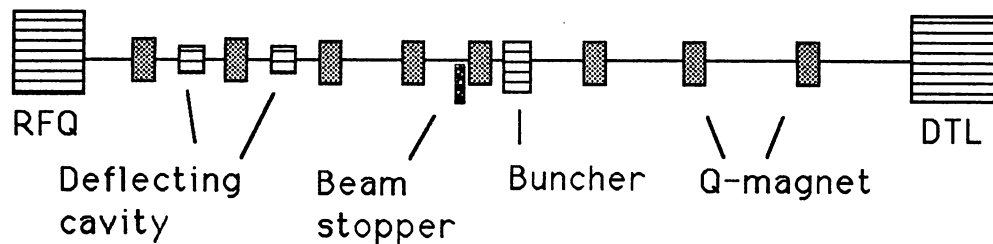
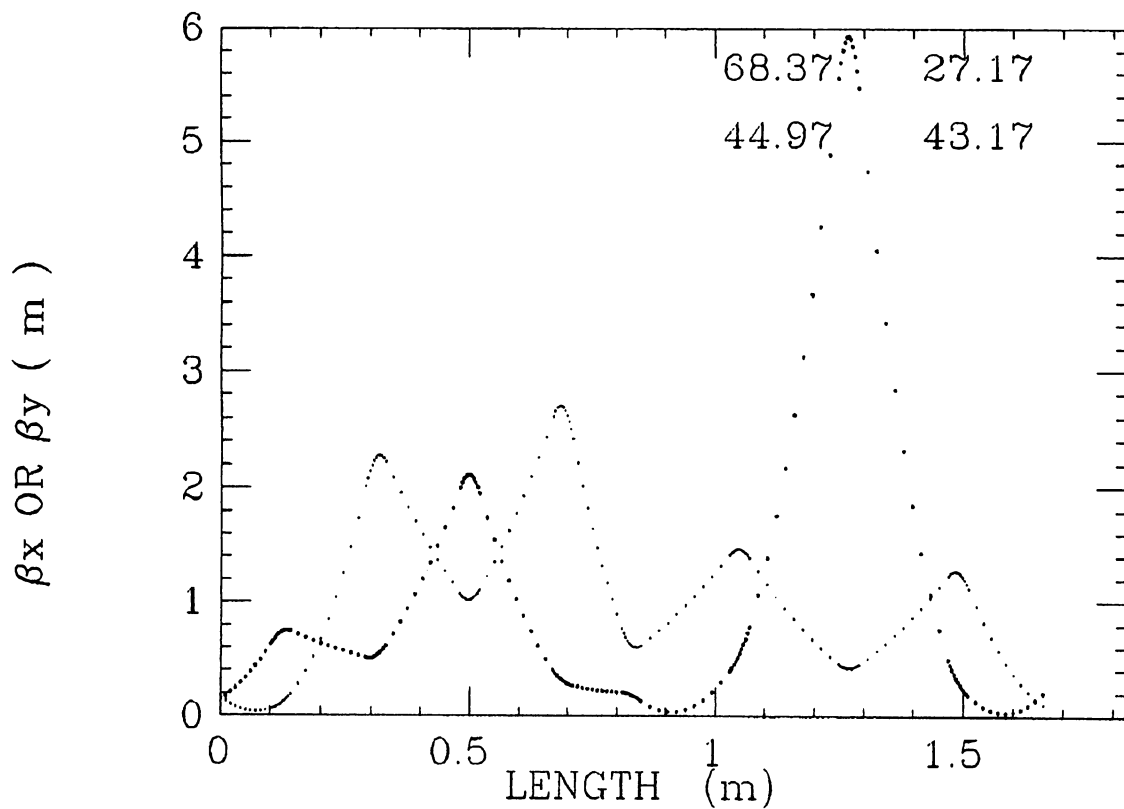


図1 RFQ-DTLの間のビームライン。

図2に周波数チューナーによる周波数変化を示す。MAFIAによる1/2空洞の計算結果である。2本のチューナー(直径50 mm、長さ1cm、 $R_c=120$)により、2 MHz周波数が上昇する。そこで約2mmチューナーを挿入した地点を運転の通常的位置として、周波数変化分は700 kHzと考える。

チューナーによる周波数変化	$\Delta f_1 = -700 \text{ kHz}$
---------------	---------------------------------

3-2) SUPERFISH計算の含む誤差の推定

図3にメッシュの大きさによる計算周波数の変化を示す。メッシュサイズ0.80 mmの計算により得られる周波数は、真の値に比べ、157 kHz大きいと推定される。

メッシュサイズによる周波数変化	$\Delta f_1 = 157 \text{ kHz}$
-----------------	--------------------------------

従って、SUPERFISHによる目標周波数は

$f_{cal} = 432 + \Delta f_1 + \Delta f_2 = 431.457 \text{ MHz}$

4) 空洞形状の最適化

最適化に際して、留意すべき点は

- 1) シャントインピーダンス、
- 2) 最大表面電場の大きさ、
- 3) マルチパッキングに対する配慮、
- 4) 必要励振電力と利用可能な電源との比較、

等が考えられる。

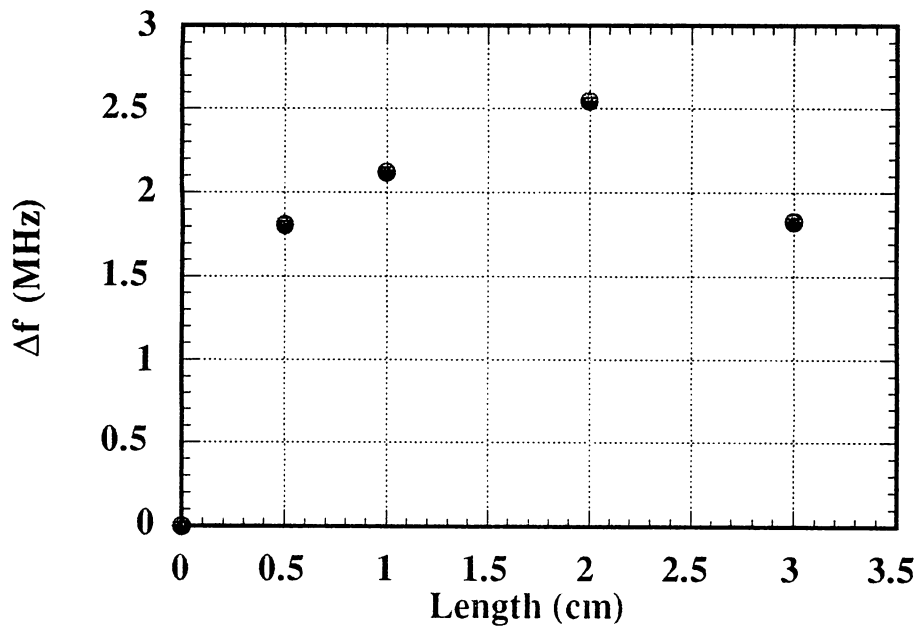


図2 チューナー2本による周波数変化。

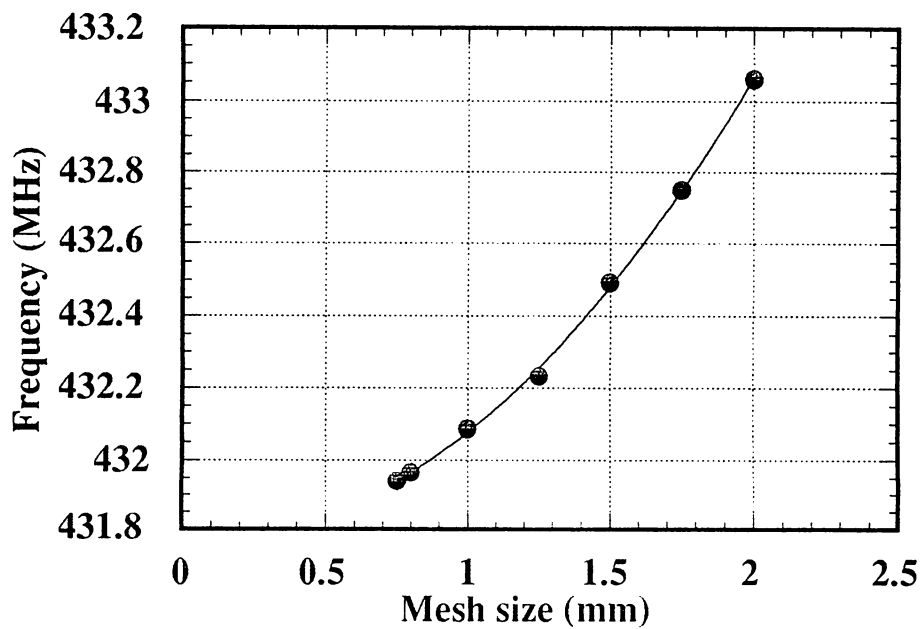


図3 メッシュサイズによる共振周波数の変化。

4) ビーム孔半径について

4-1) ビームサイズ

この付近の β は約 1m である。ビームの規格化エミッタンスを $1.5 \pi \text{mmrad}$ とすれば、ビーム半径は 4.3 mm となる。

4-2) 加速電場の分布について

半径方向には、実効加速電圧が変化する。それは transit time factor の変化として次式で表される。軸上と軸外の transit time factor の比が、

$T(r)/T(0) = I_0(kr)$, $I_0(x) = 1 + x^2/4 + x^4/64 + \dots$ (変形ベッセル関数)、 $k = 2\pi/\beta\lambda$ 。
これを図 4 に示した。半径が 10 mm になれば、実効加速電場の差が 30 % 以上になってしまう事がある。

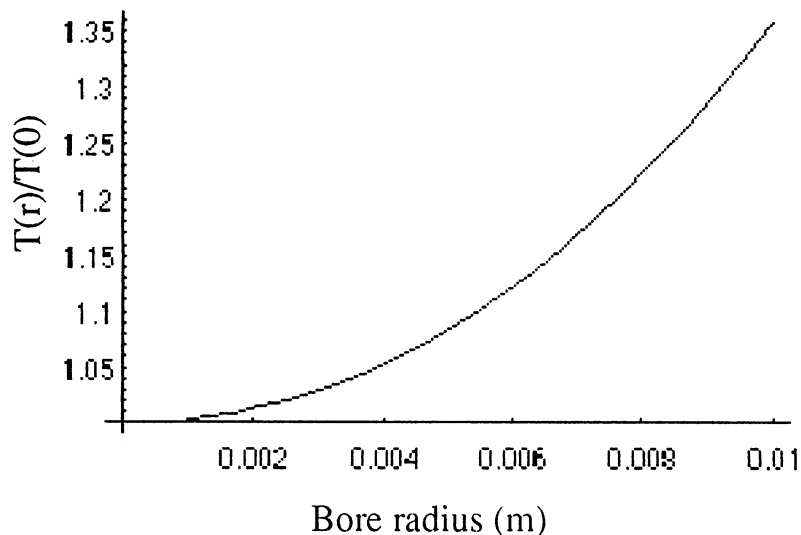


図 4 transit time factor の半径依存性。

諸半の事情を考慮すれば、半径 7.5 mm ではビームロスが起こりそうであるが、一種のフィルターの役目と考えて、7.5 mm とする。従って、ビーム半径には、70 % 以上の余裕があり、又、実効加速電圧は 20 % 程度変化する。

5) SUPERFISH による計算結果

図5にシャントインピーダンスのボア半径依存性を示す。小さい方が有利であるが、前節(4-1)の議論により上限がある。

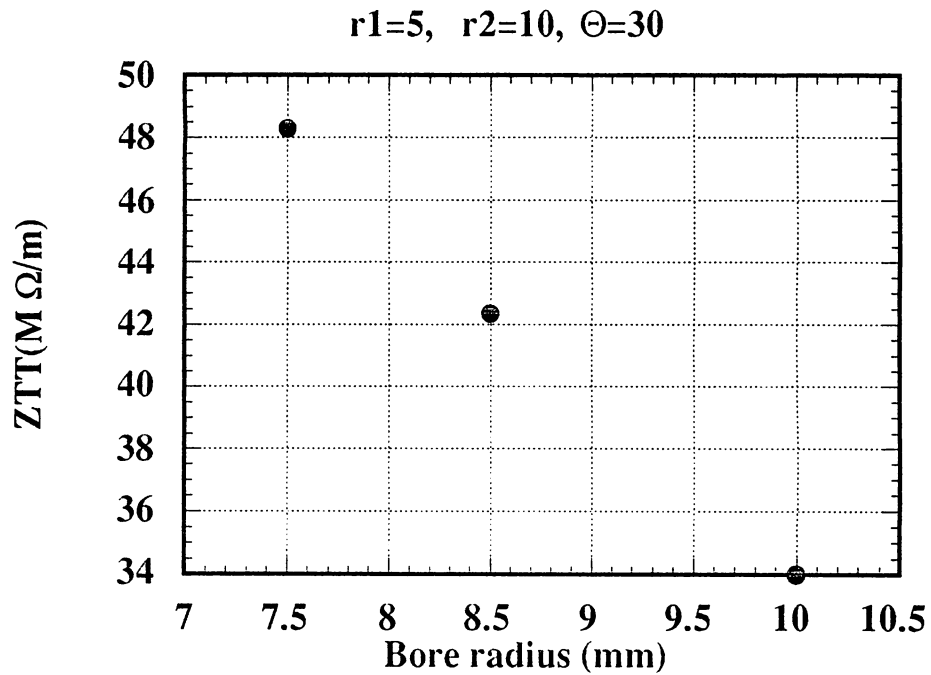


図5 シャントインピーダンスのボア半径依存性。 r_1 と r_2 はノウズコーン部の半径、 Θ はそのテーパ角である。

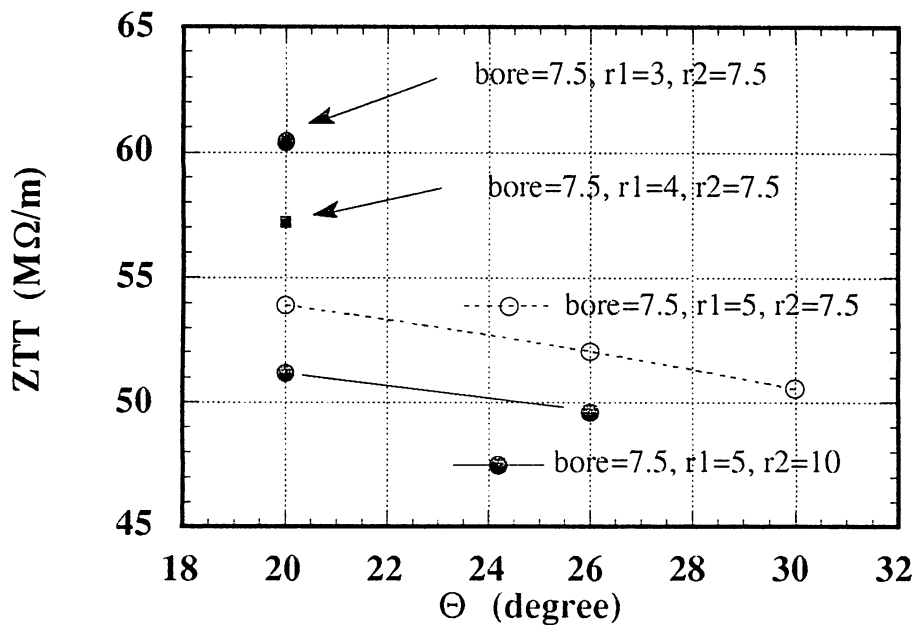


図6 シャントインピーダンスのテーパ角度依存性及びノウズコーン半径依存性。

図6にシャントインピーダンスのテーパ角度依存性を示す。同時にノウズコーン半径依存性も示す。ビーム孔に近い方の半径を小さくすると transit time factor が大きくなるので、効果大きい。角度をゼロにすれば、ドリフトチューブ型となるが、付け根の部分でmultipactoringがおきやすいので、好ましくない。外部接続の面積も取りたいので、採用しない。r1は小さい方がZTTは大きくなるが、この部分が最大表面電場であり、次第に大きくなるので、3mmを選んだ。もっと頑張って2mmとする解もあると思う。

図7に最大表面電場を示す。

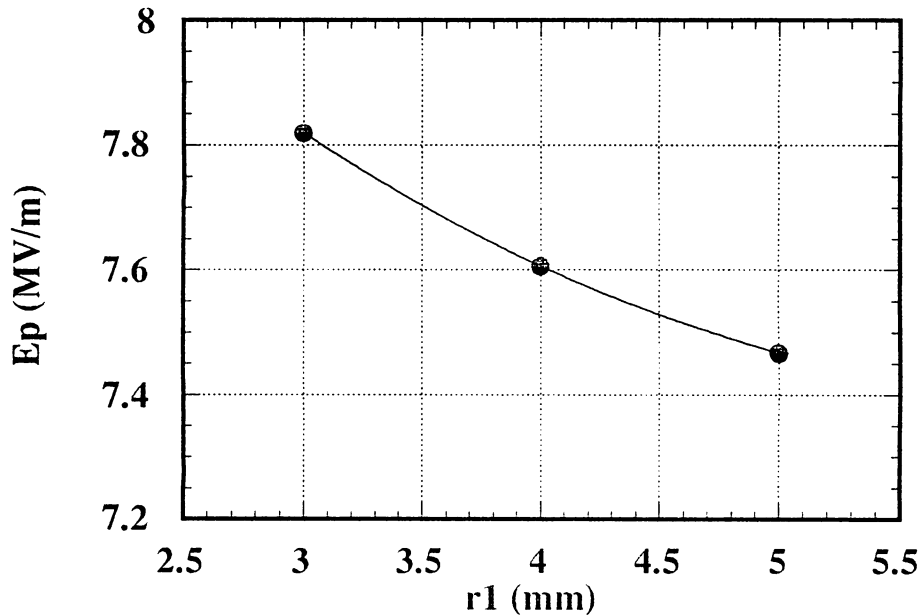


図7 最大表面電場の r1 依存性。

空洞の変形量と周波数変化についてのまとめ

- 1) 外側半径 1.5 MHz/mm
- 2) 側面 1.65 MHz/mm
- 3) ギャップ 11 MHz/mm

銅の熱膨張率 16.7 E-6/ deg

空洞のまとめ (図 8 参照) (preb0303)

Diameter	412.48	Length	120	Gap length	9
Frequency	431.453	MHz (by Superfish)			
TTF	0.7763				
Z	100.28	MΩ/m			
ZTT	60.43	MΩ/m			
Pc	552.2	W (E ₀ =1 MV/m)			
Ep	7.820	MV/m			
Q	23951				
βλ	55.38	mm			
β	0.0797				
Tuner	-700 kHz, +1400 kHz with two tuners				

* 必要な加速電圧(E₀L)を得るための電力をまとめておこう。

加速電圧	130	200	kV (in LEBT)
加速電圧	159	244	kV (in Superfish)
Pc	4.55	10.7	kW
1.3*Pc	5.92	13.9	kW
Ep	22.5	34.5	MV/m
KL	1.12	1.7	

注) 電場分布の形、即ちTが二つのソフト(LEBT, Superfish)で異なっているため、加速電圧の値が違っている。

* 必要ポート

rf カップラー	1個	39D
チューナー	2個	
rf モニター	2個	
真空ポート	1個	

* 製作公差について

許容周波数変化を50 kHz とすれば

- 1) 外側半径 1.5 MHz/mm より ±0.03
- 2) 側面 1.65 MHz/mm より ±0.03
- 3) ギャップ 11 MHz/mm より ±0.01 (ゆるめである)

水冷 ±1°C

図8に空洞の形状及び寸法、そして主な寸法公差を示した。その他の公差は、主要な公差が達成出来るように決められる。特にノウズ部分の公差は全て0.01と考える。60 mmの位置がフランジ面となる。ビーム軸は±0.1の精度でビームラインに合わせるべきである。チューナーは片側の左右又は上下の側板に2個 ($r = 120$ の位置) 装着される。空間的に無理ならば、上下、又は左右につける事になるが、空洞の作り方とも関係する。

図9に空洞の発熱分布を示した。各セグメントの Superfish 計算値を示してある。このセグメントは実際には円状の帯である。図中の発熱量に 0.32 をかけると、実際の平均発熱量になる。密度を算出する時は、各セグメントの面積で割って下さい。

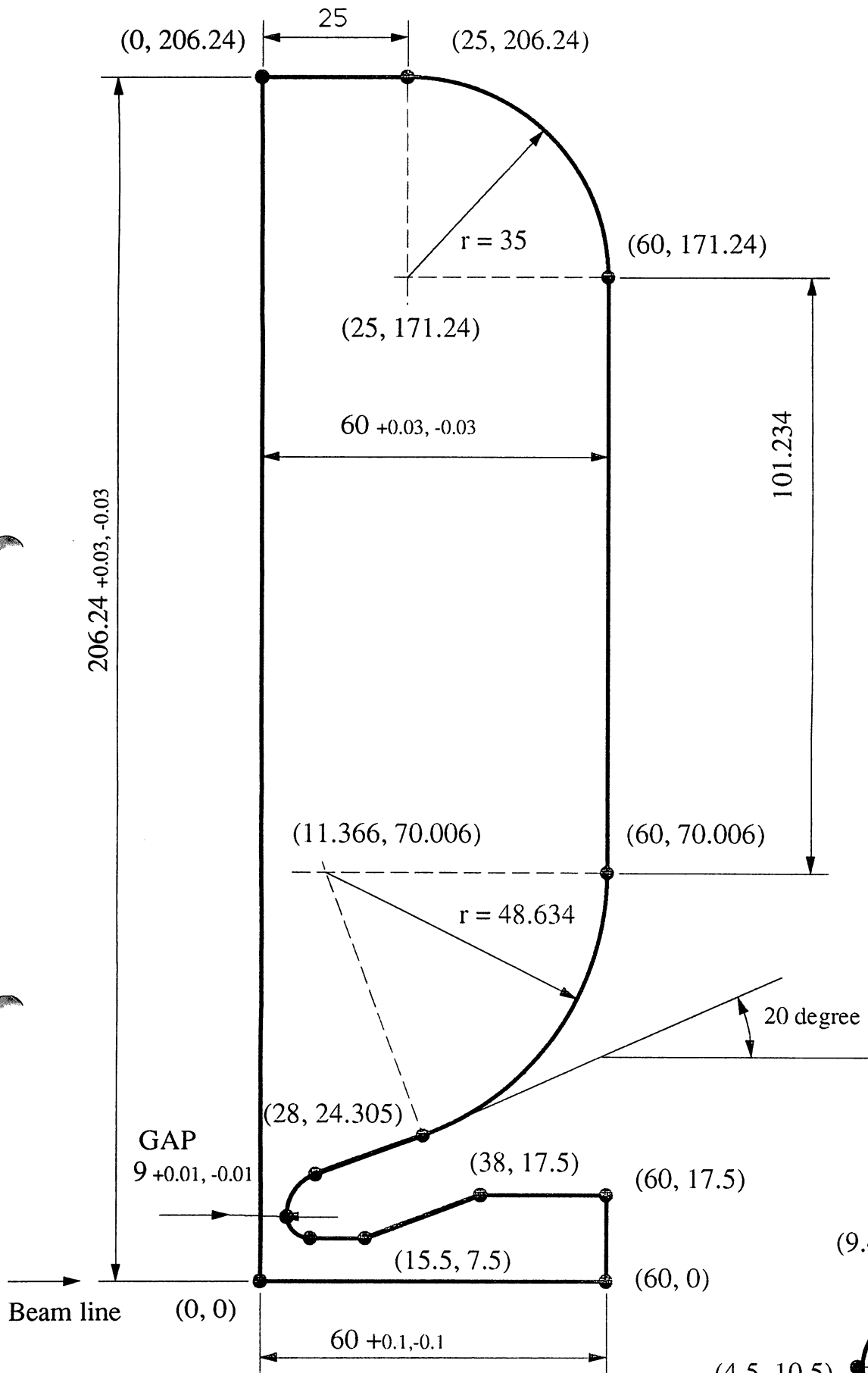
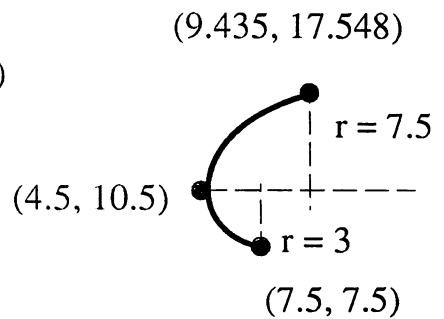
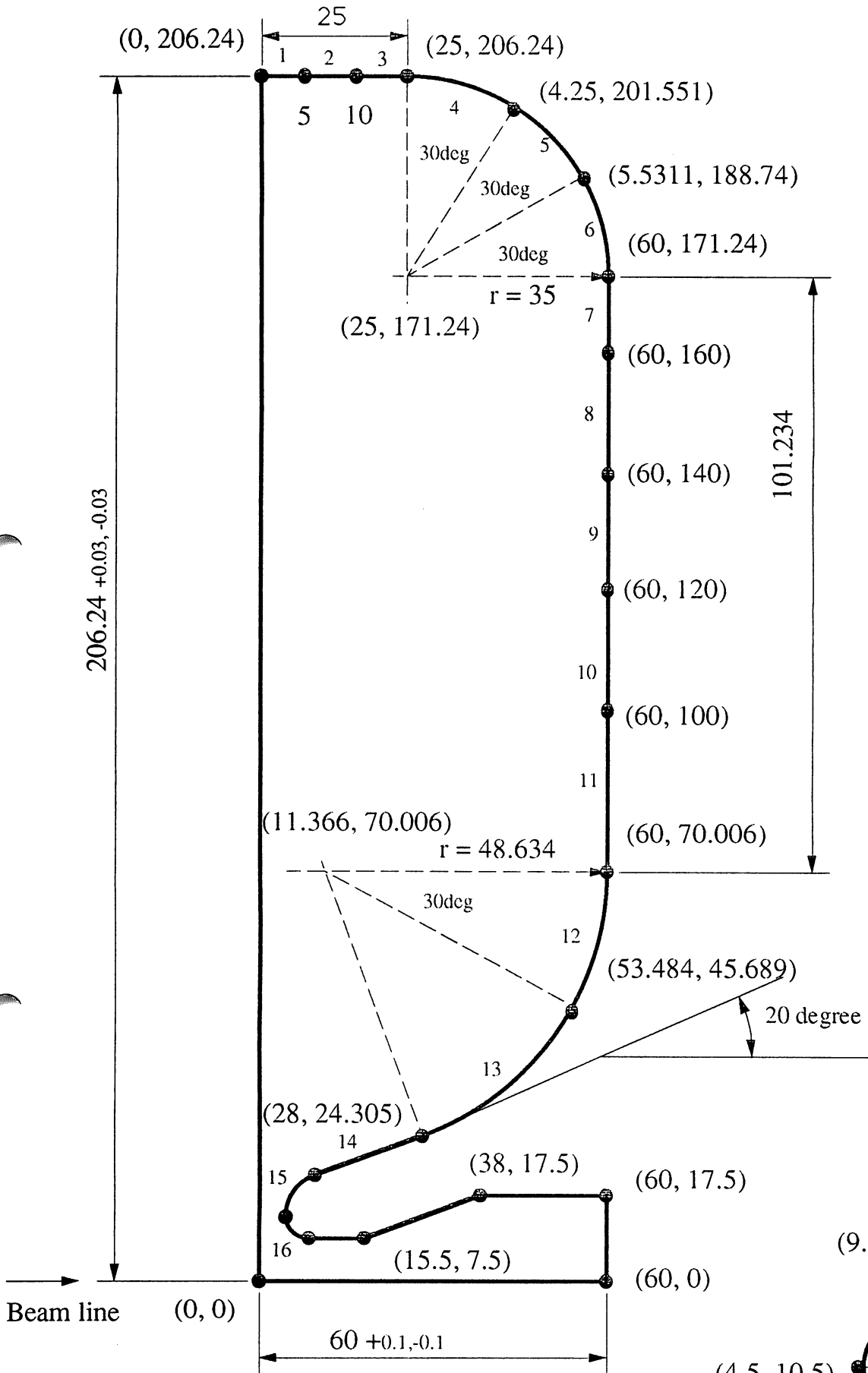


图 8

Buncher single cavity 1/4 part



Nose part



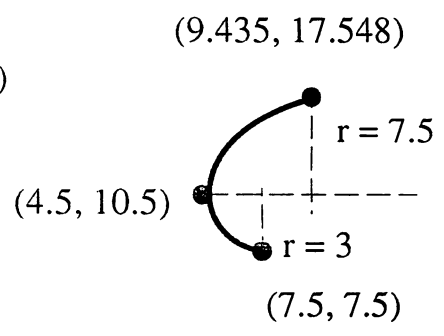
part No	power loss (w) in circular band for half cell
1	5.24
2	10.5
3	10.5
4	19.2
5	19.6
6	20.5
7	12.9
8	23.0
9	22.1
10	20.7
11	28.5
12	24.7
13	38.0
14	17.8
15	2.7
16	0

Condition
E=1 MV/m

in study
E=2.86 MV/m
duty = 3 %
safty factor=1.3

thus, total multiply factor is 0.32.

Buncher power loss



Nose part

9