

PLA / 95 / 10

95 / 9 / 26

1 GeV リニアック検討資料

1 GeV LINAC DESIGN NOTE

題目 (TITLE) シミュレーションによる超伝導陽子線形加速器の
基本的考察メモ

著者 (AUTHOR) 加藤隆夫

概要 (ABSTRACT)

超伝導陽子線形加速器 (SCPLA) のビームダイナミックスの基本的な問題点を上げると

- 1) 周波数の選定
- 2) 常伝導 DTL から SCPLA に変換するエネルギーの決定
- 3) DTL と SCPLA の周波数比の選定
- 4) 加速電場と位相の選定。

そこで、SCPLA の感触を探る為のシミュレーションを行った。

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, Others

超伝導陽子線形加速器 (SCPLA) のビームダイナミックスの基本的な問題点を上げると

- 1) 周波数の選定
- 2) 常伝導 DTL から SCPLA に変換するエネルギーの決定
- 3) DTL と SCPLA の周波数比の選定
- 4) 加速電場と位相の選定。

これらのパラメーターは、超伝導空洞のメカニカルな特徴からくる制約のもとで考慮されなければならない。950913 の会議において筆者が得た情報によれば、超伝導空洞特有の制約は以下の通り。

- 1) 冷却タンクの片端には、断熱用の 70 cm の空間が必要である。
- 2) ユニットタンク長さは、1 m 以下又は 10 セル以下でなければならない。
- 3) ユニットタンクに給電できる高周波電力は、現時点では 100 kW、将来は 150 - 200 kW 以下である。
- 4) ユニットタンクとユニットタンクのつなぎには、高周波デカップリングの為に波長分の空間が必要である。
- 5) ベータが低い所では、周波数が低い方がセル数が少なくて助かる。
- 6) 加速電場 7 - 10 MV/m は可能。
- 7) 周波数が高ければ 15 MV/m も可能。

そこで、SCPLA の感触を探る為のシミュレーションを行った。これは、既にある CCL 用コード PROEND に以下の改良を加えて使用した。

- 1) 高周波デカップリングの為のおよそ波長長さのドリフトスペースを入れる。
- 2) ユニットタンク 2 台毎に収束磁石を入れる。

基本パラメーター

周波数 600 MHz

加速電場 7 MV/m

収束磁石用空間 約 1.8m、比較の為に 1 m も行った。

入射エネルギー

(A) 70MeV, (B) 100 MeV, (C) 150 MeV

ユニットタンク長さ約 1 m

高周波デカップリング長さ 0.5 m - 0.9 m (改良の余地がある)

横方向位相進み 90°

入射エネルギーが異なる3種類のリニアックの主なパラメーターを以下に示す。

(A) 70 MeV 1.8 m drift space

FREQUENCY = 600.000 MHz
Win = 70.000 MeV
Wout = 1504.419 MeV
Ez = 7.000 MV/m
NUMBER OF TANK= 277
NUMBER OF CELL= 1628
TOT.LENGTH = 30829.5928 cm
TOT.LENG.WITH Q= 65214.3875 cm
TOT.RF = .075 MW
TOT.RF*1.2 = .091 MW
BEAM POWER = 28.688 MW
CURRENT = .020 A

(B) 100 MeV 1.8 m drift space

FREQUENCY = 600.000 MHz
Win = 100.000 MeV
Wout = 1505.360 MeV
Ez = 7.000 MV/m
NUMBER OF TANK= 270
NUMBER OF CELL= 1560
TOT.LENGTH = 30172.4373 cm
TOT.LENG.WITH Q= 63725.7098 cm
TOT.RF = .066 MW
TOT.RF*1.2 = .079 MW
BEAM POWER = 28.107 MW
CURRENT = .020 A

(C) 150 MeV 1.8 m drift space

FREQUENCY = 600.000 MHz
Win = 150.000 MeV
Wout = 1507.478 MeV
Ez = 7.000 MV/m
NUMBER OF TANK= 259
NUMBER OF CELL= 1468
TOT.LENGTH = 29127.3016 cm
TOT.LENG.WITH Q= 61368.7824 cm
TOT.RF = .057 MW
TOT.RF*1.2 = .069 MW
BEAM POWER = 27.150 MW
CURRENT = .020 A

注) 超伝導のZは常伝導の10000倍としている。

Fig.1 に使用した TTF を示す。これは長谷川さんによるもの。

Fig. 2 SCPLA を構成する 2 種類のドリフトスペース (収束用と高周波デカップリング用) の分布を示す。

1] アクセプタンス

まずアクセプタンスと twiss parameter を求める。Fig. 3 には $x-x'$ acceptance を求める場合の入射ビーム分布を示す。粒子数は $81 \times 81 = 6561$ である。この場合、立て方向は安定粒子を仮定している。ビーム孔半径は 6 cm とした。入射エネルギーとドリフトスペースを変えた時の、透過粒子数を Fig.4 に示す。入射アクセプタンスに換算した値を Fig. 5 に示す。これは、楕円をフィットする事により求めている。注意する点は以下の 3 点。

- 1) 縦方向は安定粒子を仮定している。
- 2) アクセプタンスの値が大きくても、その形が適切でないことがある。
- 3) 横収束系の最適化は行っていない。

同じ方法で $y-y'$ acceptance も求める。phi-w acceptance は、 $x=y=0$ を仮定して求める。こうして求めたアクセプタンスを以下に示す。

Fig. 6 - 8 70 MeV Injection, drift space=1.8m.

Fig. 9 - 11 100 MeV Injection, drift space=1.8m.

Fig. 12 - 14 150 MeV Injection, drift space=1.8m.

Table 1 にアクセプタンスのまとめを示す。

2] random 粒子によるシミュレーション

SCPL の入り口で粒子を作り、シミュレーションを行う。粒子パラメーターは入力として以下の値を採用した。

横エミッタンス 0.2 pi cm-mrad (100%)

縦エミッタンス 4.04 MeV-deg for 70 MeV, 4.10 for 100 MeV, 4.19 for 150 MeV

粒子数 3000

粒子分布 PARMILA random input の case-2 を使用。

電流 ゼロ

twiss parameter はアクセプタンスの値にそろえた。

Table 1 Acceptance of sc-proton linac vs. injection energy.

Win	xrms cm-mrad	x90	yrms cm-mrad	y90	zrms MeV-deg	z90
70 MeV	0.779	2.501	0.861	2.360	31.01	123.2
100 MeV	1.141	4.144	1.506	5.017	35.42	140.20
150 MeV	7.871	29.59	7.756	29.82	43.23	165.5

シミュレーションのまとめを Table 2 に示す。これからわかるように、70 MeV 入射の場合には、入射エミッタンスがアクセプタンスに比べて十分小さいにもかかわらず、ビーム損失を生じる。この原因は前節の注意点の (1) と (2) にあると思われる。粒子分布の様子を以下に示す。

Fig. 15 - 17 70 MeV Injection beam ; x-x', y-y' and phi-w.

Fig. 18 - 20 Output emittance for 70 MeV injection beam.

Fig. 21 - 23 100 MeV Injection beam ; x-x', y-y' and phi-w.

Fig. 24 - 26 Output emittance for 100 MeV injection beam.

Fig. 27 - 29 150 MeV Injection beam ; x-x', y-y' and phi-w.

Fig. 30 - 32 Output emittance for 150 MeV injection beam.

3) 原研DTL出力ビームを使ったシミュレーション

原研の長谷川さんにDTL出力ビームをつくっていただいたので、これを使ってシミュレーションを行った。前節よりも使用ビームに信頼性があると思われる。

為に入射させるまでに次の作業を行った。

1) DTL から SCPLA までのドリフトスペースを 2m とした。この効果はあまり大きくはないと思われる。

2) 周波数の比に対応する為、位相幅を 3 倍にした。

3) 縦横のマッチングをさせた。

Fig.33 - 35 に DTL 出力を示す。Fig. 36 - 38 に上の作業をした SCPLA 入射ビームを示す。

Fig. 39 - 41 に 100 MeV 入射の場合の出力を示す。

Table 2 Random 粒子によるシミュレーションのまとめ

Win	透過率	emittance-x		emittance-y		emittance-z	
		rms	90%	rms	90%	rms	90%
70 MeV	47.5%						
input		0.025	0.106	0.025	0.106	0.504	2.14
output		0.26	1.07	0.52	2.10	2.35	11.03
100 MeV	100%						
input		0.025	0.106	0.025	0.108	0.511	2.17
output		0.0292	0.12	0.0305	0.13	0.50	2.10
150 MeV	100%						
input		0.025	0.106	0.025	0.106	0.522	2.22
output		0.025	0.107	0.025	0.107	0.52	2.23

Fig. 42 - 47 には 70 MeV の場合を示す。

シミュレーションのまとめを Table 3 に示す。70 MeV 入射ではビーム透過率は 42.3 % となる。横方向のマッチングだけをして入射させた場合には、透過率は 21.7 % に低下する。この損失は、縦方向が主たる原因と思われる。Fig. 48 にビーム損失の様子を示す。

なお、70 MeV 入射の場合、ユニットタンク長さを 1m 程度に選び、収束磁石用空間を 0.6 - 0.9 m に選んだ常伝導リニアックの構造ならば、ビーム透過率は 100 % となる。

まとめ

このシミュレーションで用いた SCPLA の構造では、断熱の為のドリフトスペースが、縦と横の収束の劣化を引き起こしている。その改善の為には、次のいくつかの方策が考えられる。

- 1) ドリフトスペースを短くする。
(超伝導磁石、低エネルギー部分を別の構造)
- 2) 高いトランジションエネルギーを選ぶ。
- 3) DTL の出力エミッタンスを小さくする。

注) ここで使った横収束系には多少の改善の余地がある。

Table 3 DTL 出力ビームによるシミュレーションのまとめ

Win	透過率	emittance-x		emittance-y		emittance-z	
		rms	90%	rms	90%	rms	90%
70 MeV	42.3%						
input		0.105	0.422	0.102	0.413	1.74	6.91
output		0.379	1.74	0.672	2.58	4.05	16.9
100 MeV	100%						
input		0.106	0.43	0.102	0.416	1.74	6.98
output		0.191	0.882	0.166	0.723	1.86	7.41

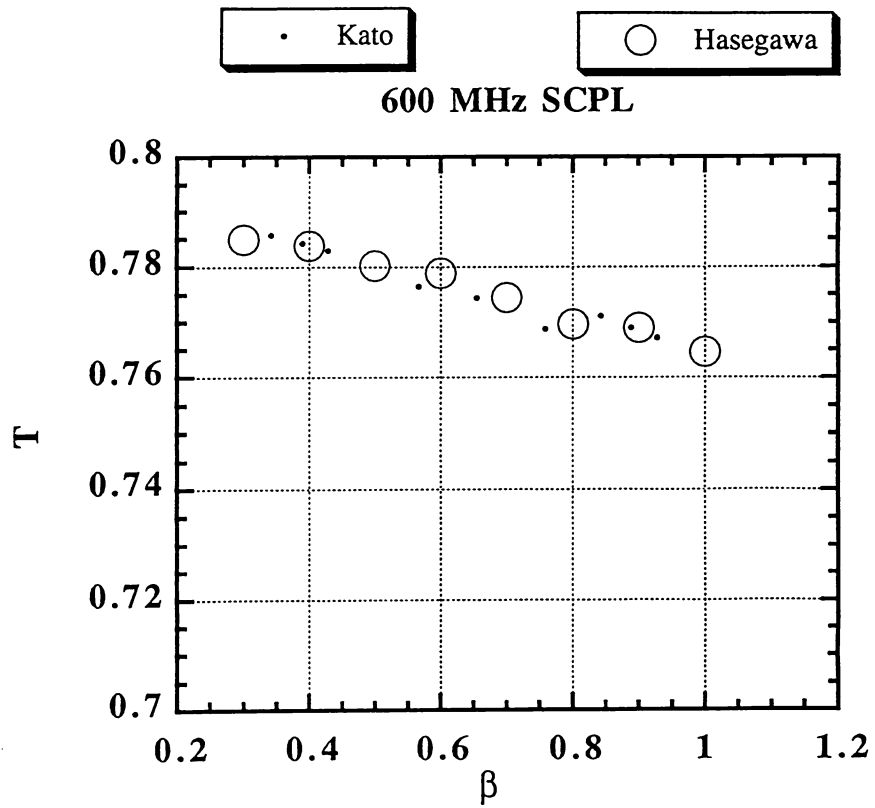


Fig. 1 Transit time factor vs. beta

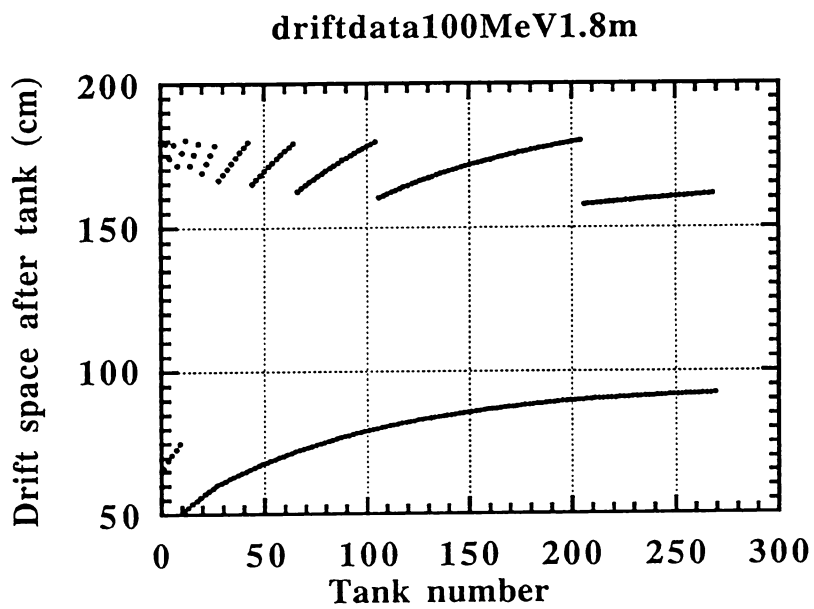


Fig. 2 2種類のドリフトスペースの分布、(B) の場合。

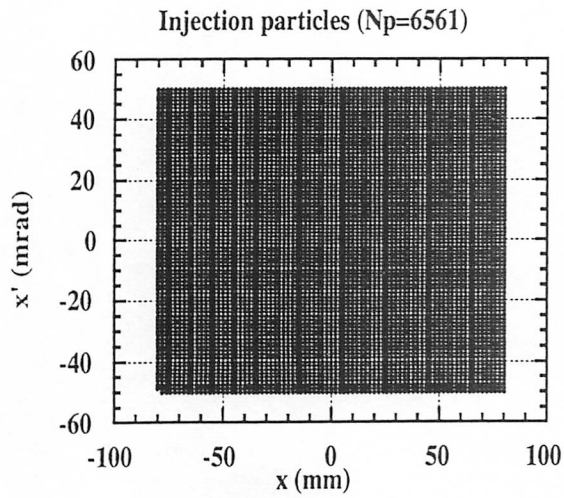


Fig. 3 $x-x'$ acceptance を求める場合の
入射ビーム分布。

Transverse vs Injection energy (x-xd input)

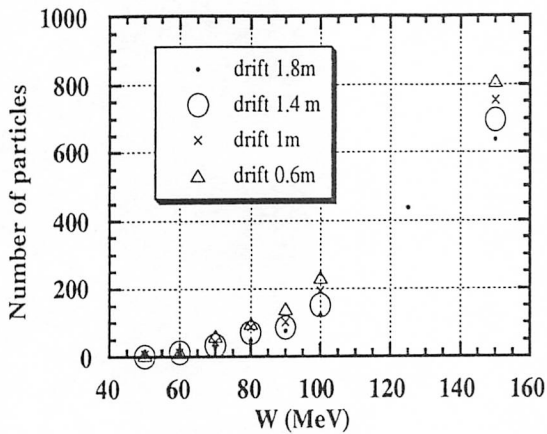


Fig. 4 $x-x'$ acceptance を求める時の透過粒子数と、
入射エネルギー及びドリフトスペースの関係。

Acceptance vs W and drift

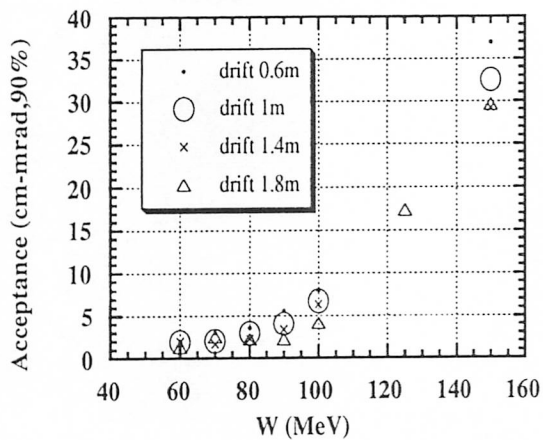


Fig. 5 $x-x'$ acceptance vs. injection energy for
four kinds of drift-space length.

FT75acceptance-x 70MeV1.8m

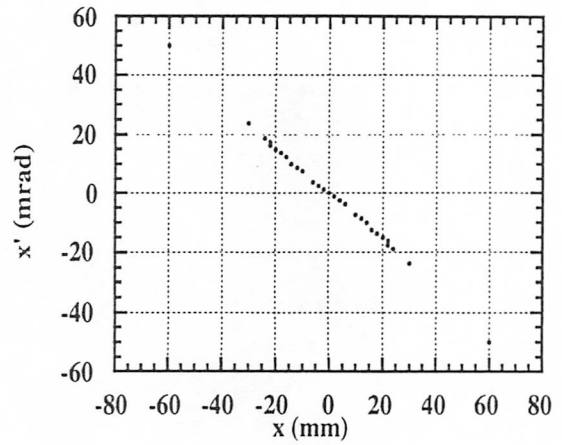


Fig. 6 $x-x'$ acceptance : 70 MeV injection, drift
space=1.8m.

FT75acceptance-y 70MeV1.8m

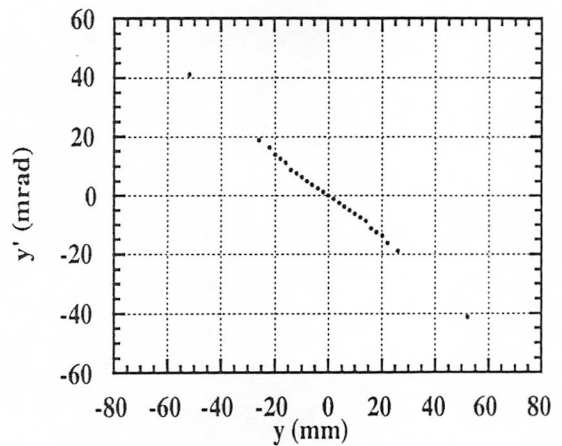


Fig. 7 $y-y'$ acceptance : 70 MeV injection,
drift space=1.8m.

FT75acceptance-z 70MeV1.8m

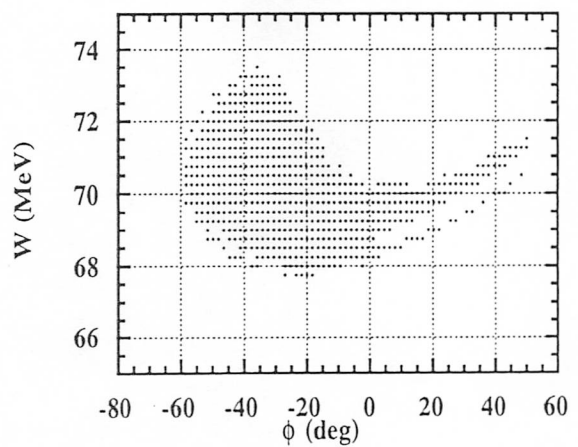


Fig. 8 $\phi-w$ acceptance : 70 MeV injection,
drift space=1.8m.

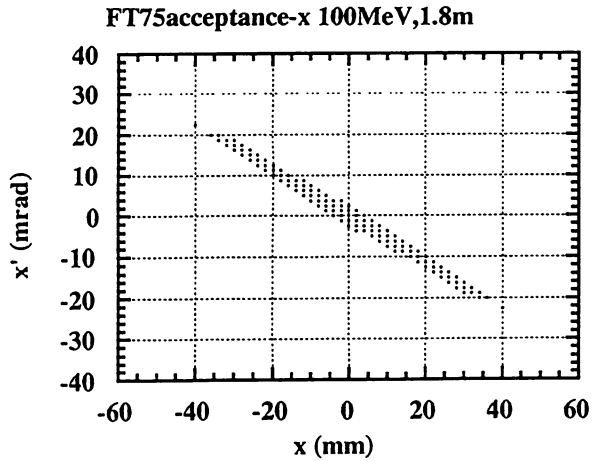


Fig. 9 x-x' acceptance : 100 MeV injection, drift space=1.8m.

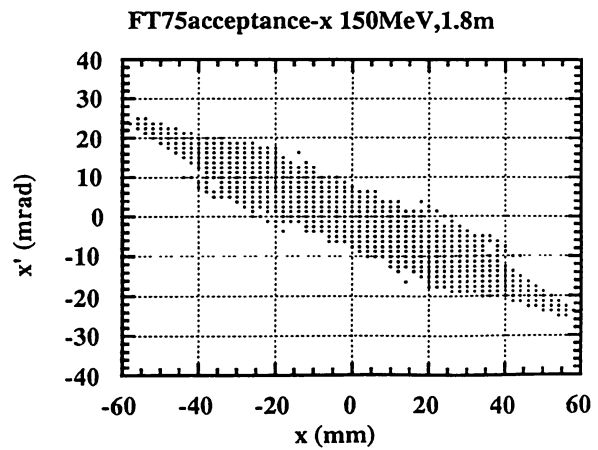


Fig. 12 x-x' acceptance : 150 MeV injection, drift space=1.8m.

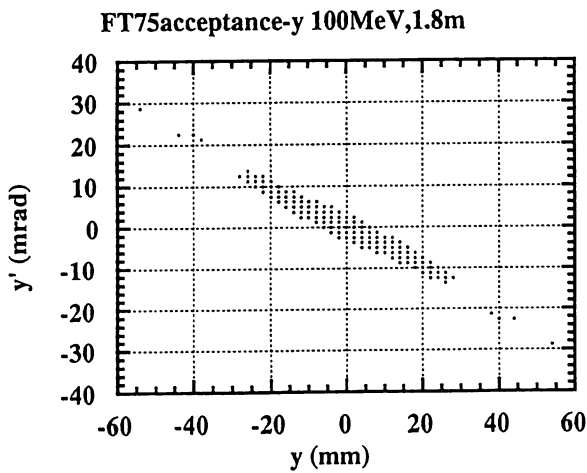


Fig. 10 y-y' acceptance : 100 MeV injection, drift space=1.8m.

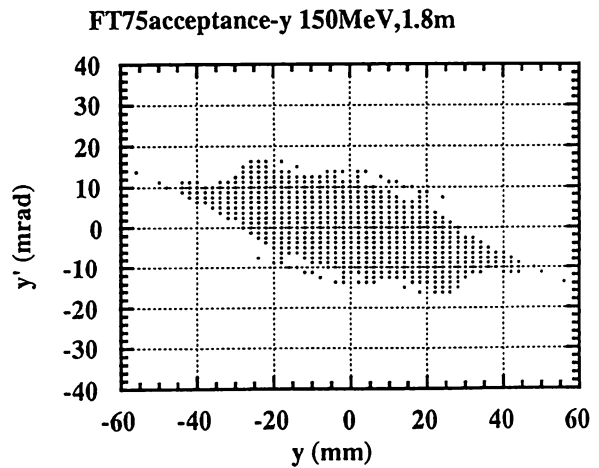


Fig. 13 y-y' acceptance : 150 MeV injection, drift space=1.8m.

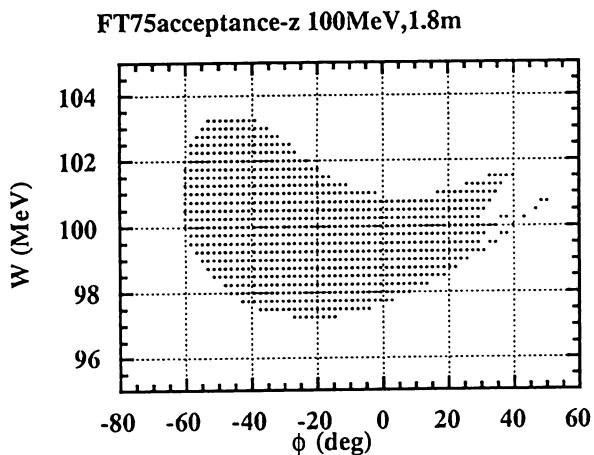


Fig. 11 phi-w acceptance : 100 MeV injection, drift space=1.8m.

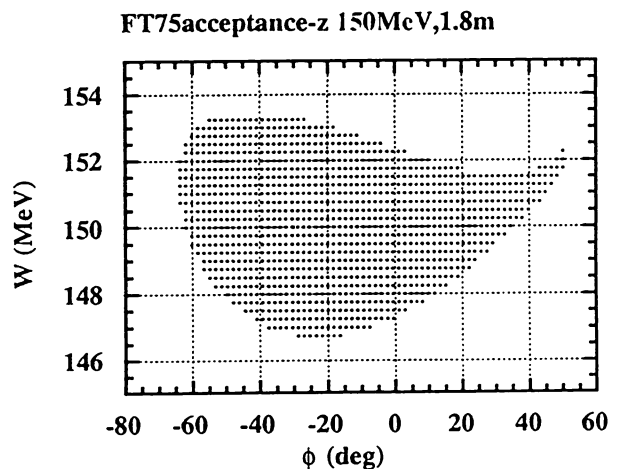


Fig. 14 phi-w acceptance : 150 MeV injection, drift space=1.8m.

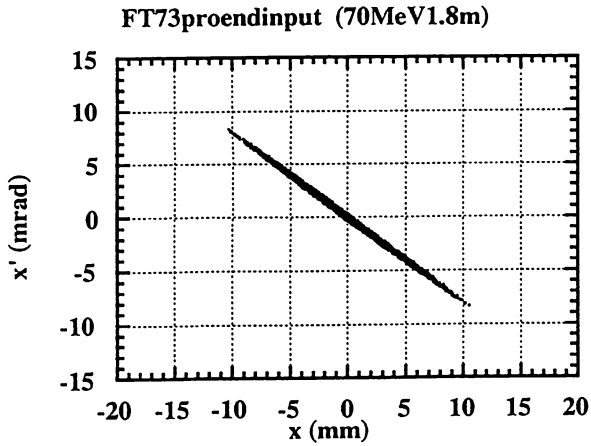


Fig. 15 x-x' emittance of matched 70 MeV-beam.

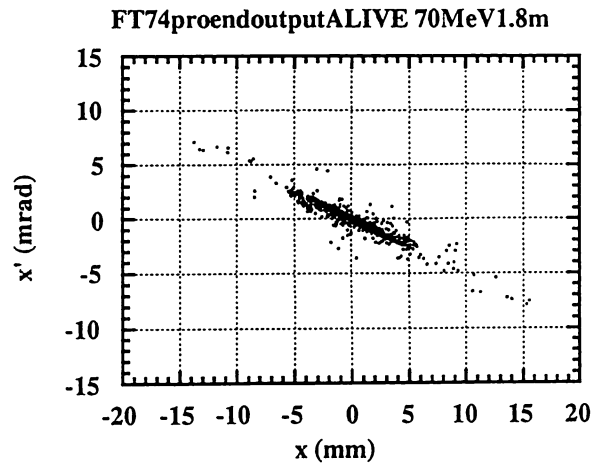


Fig. 18 x-x' emittance of SCPLA output beam for 70 MeV-injection.

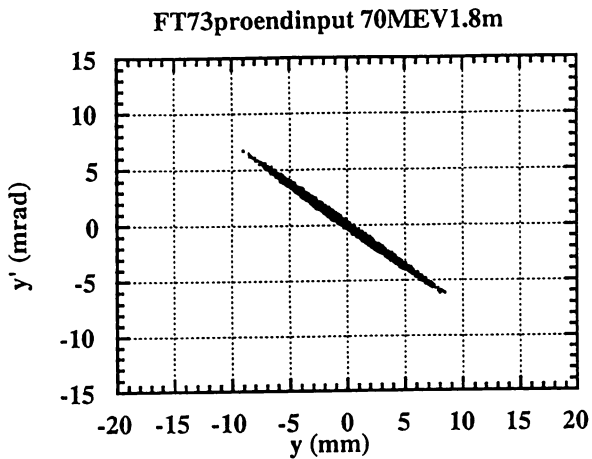


Fig. 16 y-y' emittance of matched 70 MeV-beam.

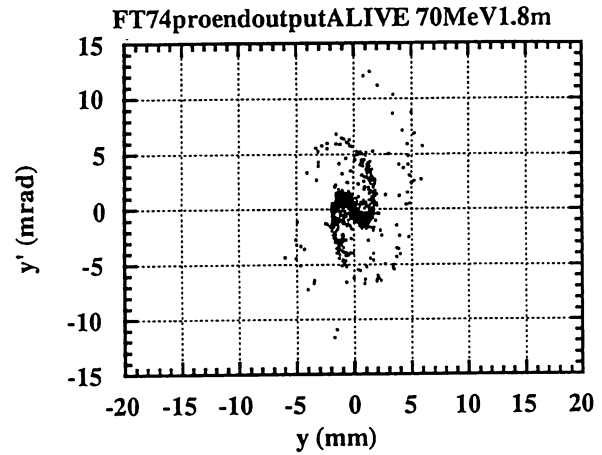


Fig. 19 y-y' emittance of SCPLA output beam for 70 MeV-injection.

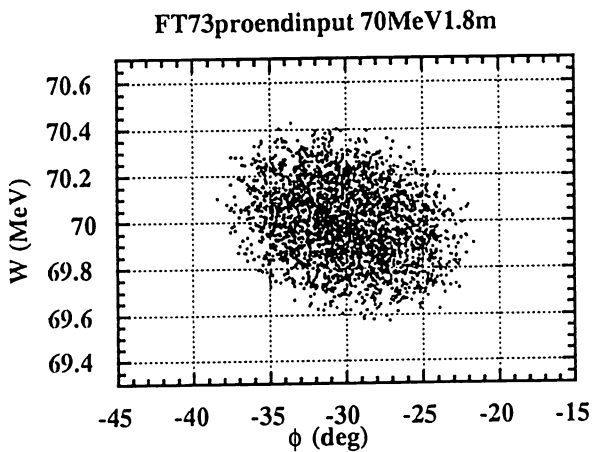


Fig. 17 phi-w emittance of matched 70 MeV-beam.

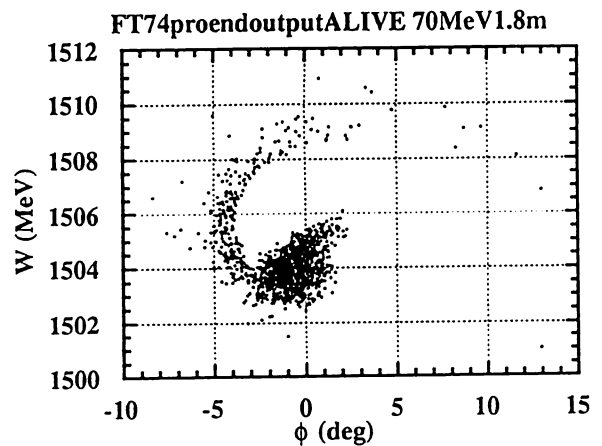


Fig. 20 phi-w emittance of SCPLA output beam for 70 MeV-injection.

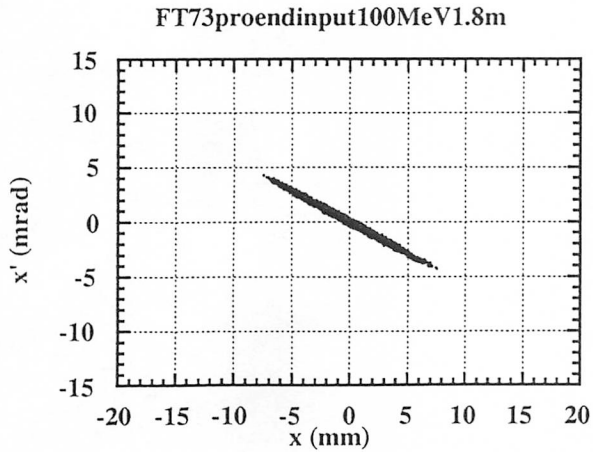


Fig. 21 x - x' emittance of matched 100 MeV-beam.

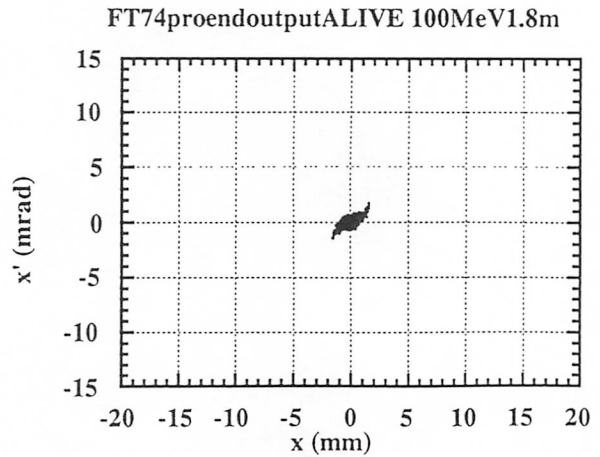


Fig. 24 x - x' emittance of SCPLA output beam for 100 MeV-injection.

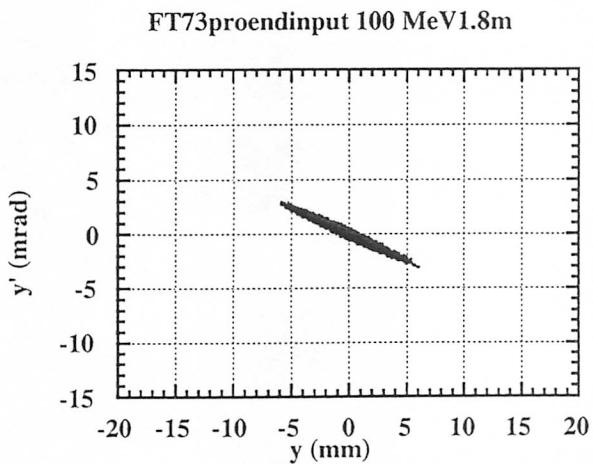


Fig. 22 y - y' emittance of matched 100 MeV-beam.

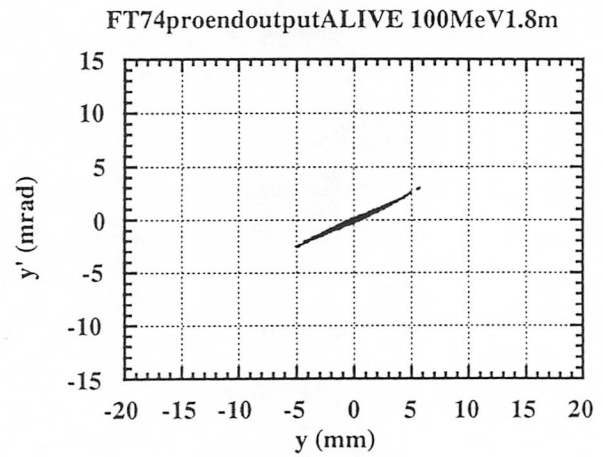


Fig. 25 y - y' emittance of SCPLA output beam for 100 MeV-injection.

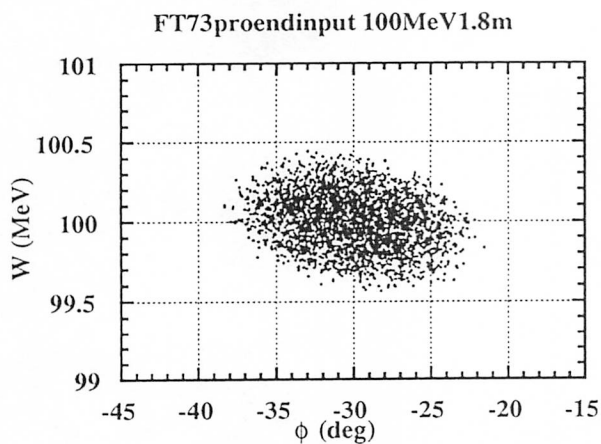


Fig. 23 ϕ - w emittance of matched 100 MeV-beam.

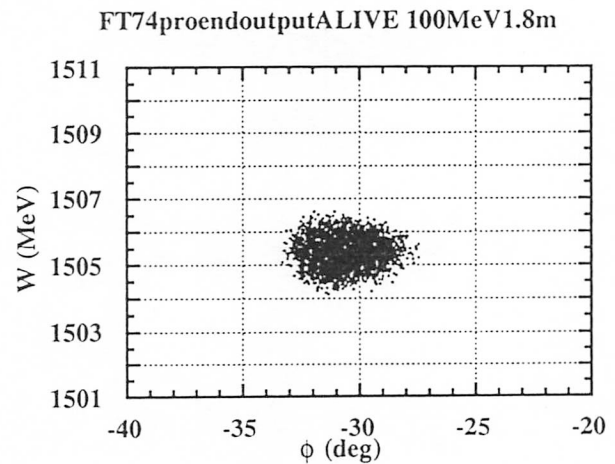


Fig. 26 ϕ - w emittance of SCPLA output beam for 100 MeV-injection.

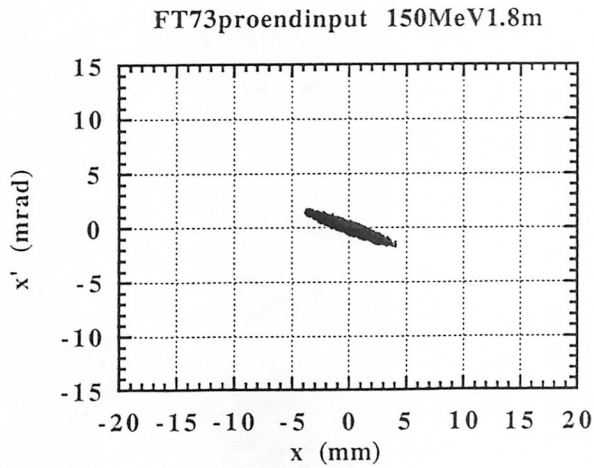


Fig. 27 x-x' emittance of matched 150 MeV-beam.

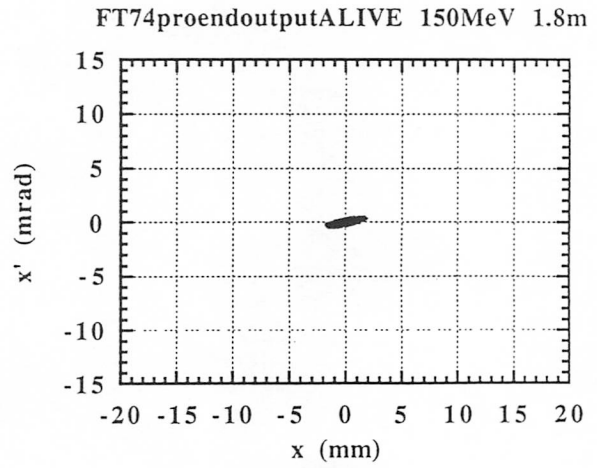


Fig. 30 x-x' emittance of SCPLA output beam for 150 MeV-injection.

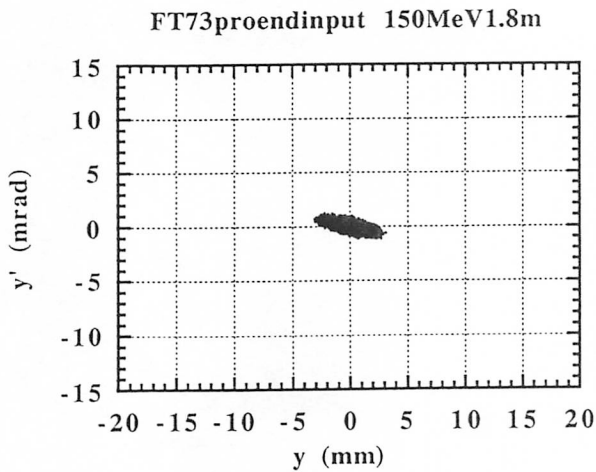


Fig. 28 y-y' emittance of matched 150 MeV-beam.

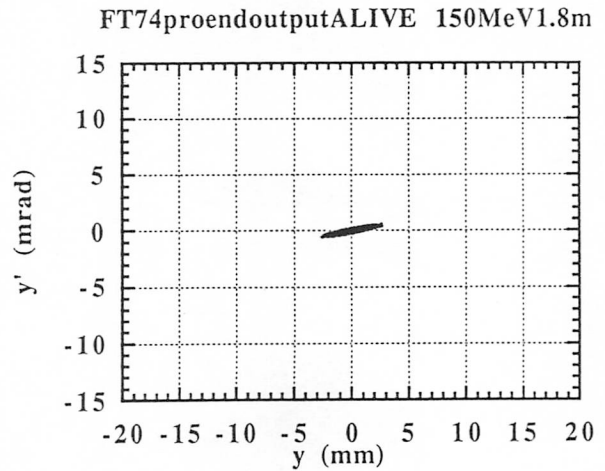


Fig. 31 y-y' emittance of SCPLA output beam for 150 MeV-injection.

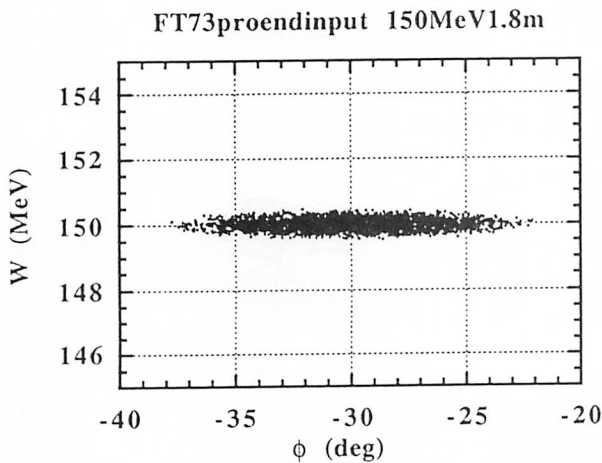


Fig. 29 phi-w emittance of matched 150 MeV-beam.

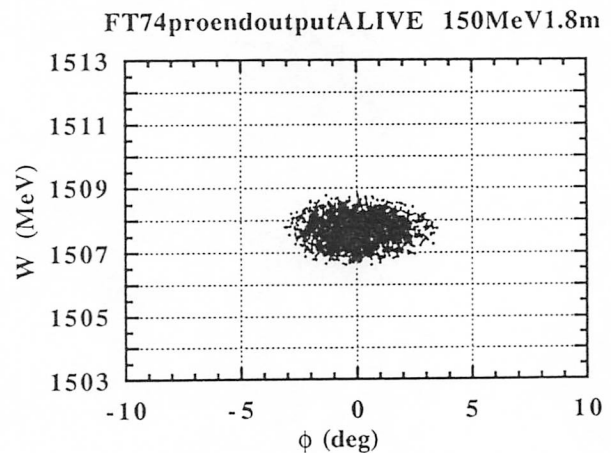


Fig. 32 phi-w emittance of SCPLA output beam for 150 MeV-injection.

Hasegawa's DTL output
100mev.genkenDTLOUT

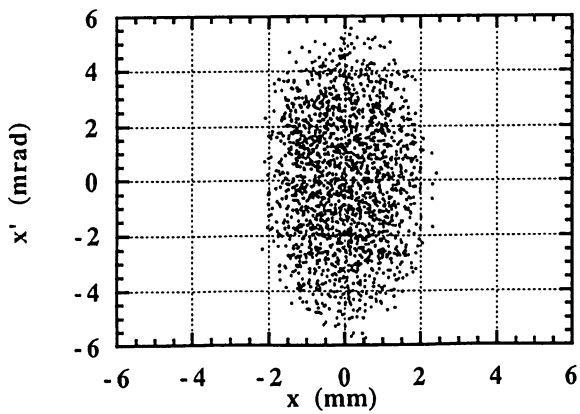


Fig. 33 $x-x'$ emittance of 100 MeV-JA-DTL output beam (20mA) .

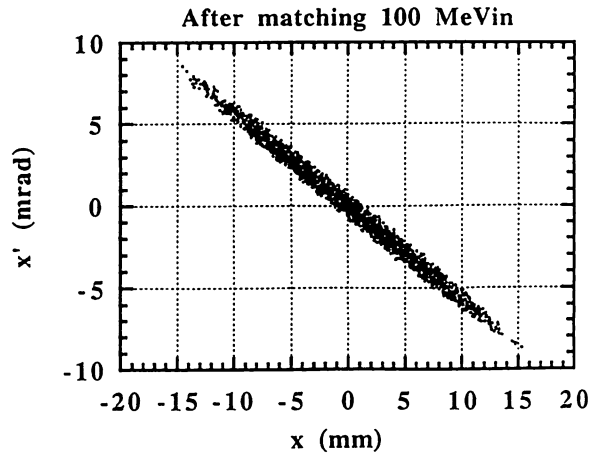


Fig. 36 $x-x'$ emittance of 100 MeV-JA-DTL output beam (20mA) after matching.

100mev.genkenDTLOUT

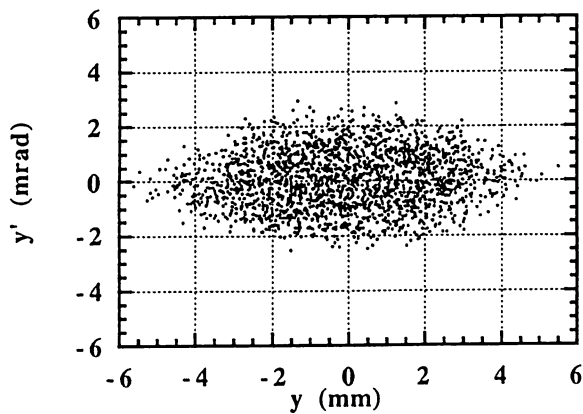


Fig. 34 $y-y'$ emittance of 100MeV-JA-DTL output beam (20mA) .

After matching 100 MeVin

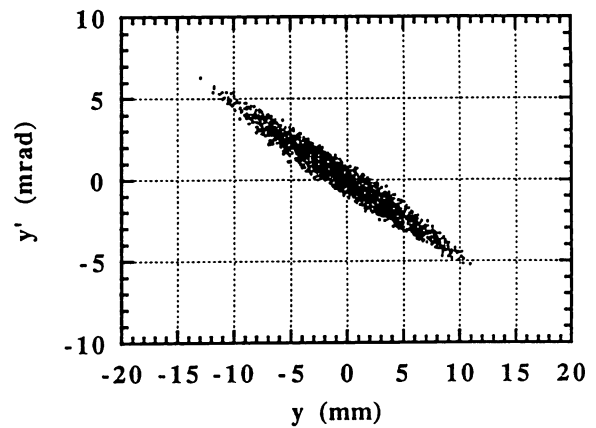


Fig. 37 $y-y'$ emittance of 100MeV-JA-DTL output beam (20mA) after matching.

100mev.genkenDTLOUT

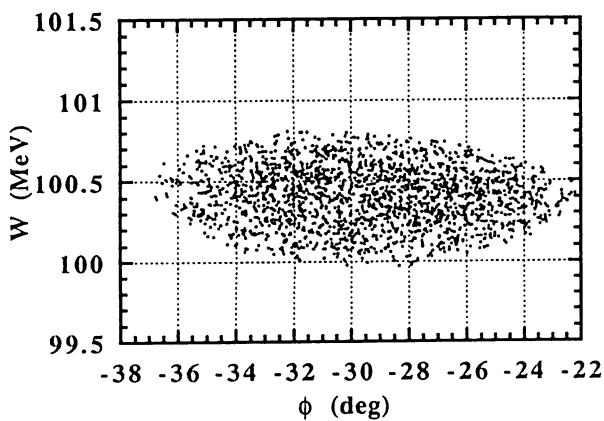


Fig. 35 $\phi-w$ emittance of 100MeV-JA-DTL output beam (20mA) .

After matching 100 MeVin

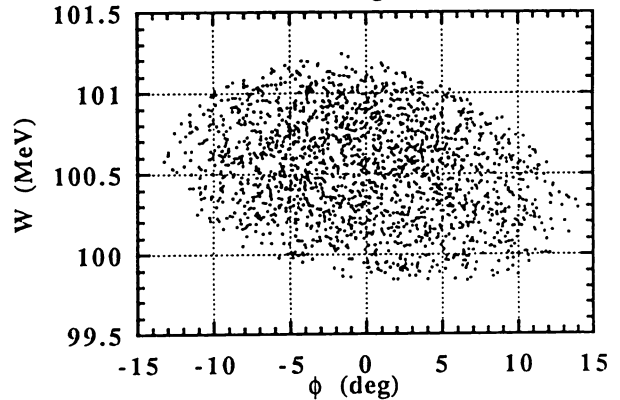


Fig. 38 $\phi-w$ emittance of 100MeV-JA-DTL output beam (20mA) after matching.

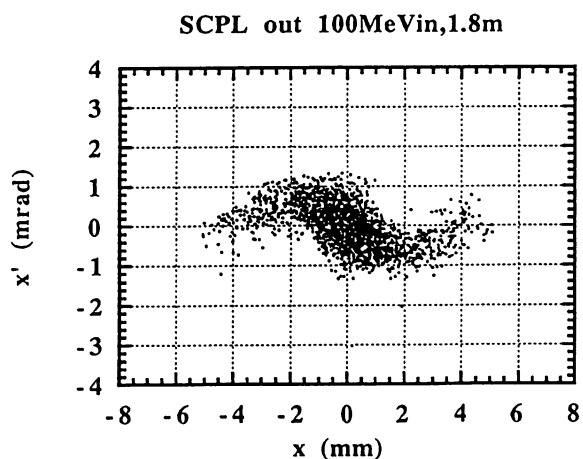


Fig. 39 x - x' emittance of SCPLA output beam using matched-100 MeV-JA-DTL output beam (20mA).

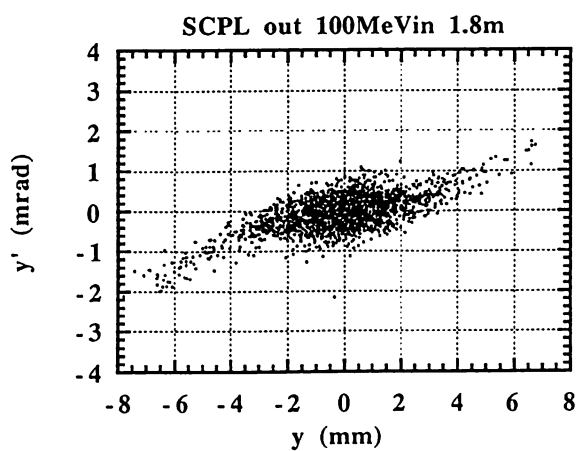


Fig. 40 y - y' emittance of SCPLA output beam using matched-100 MeV-JA-DTL output beam (20mA)after matching.

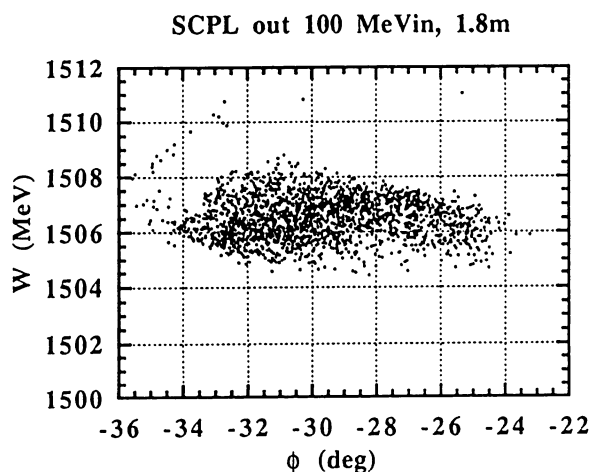


Fig. 41 ϕ - w emittance of SCPLA output beam using matched-100 MeV-JA-DTL output beam (20mA)after matching.

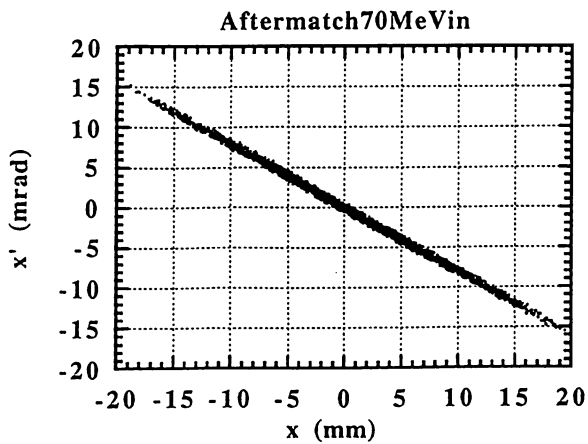


Fig. 42 $x-x'$ emittance of 70 MeV-JA-DTL output beam (20mA) after matching.

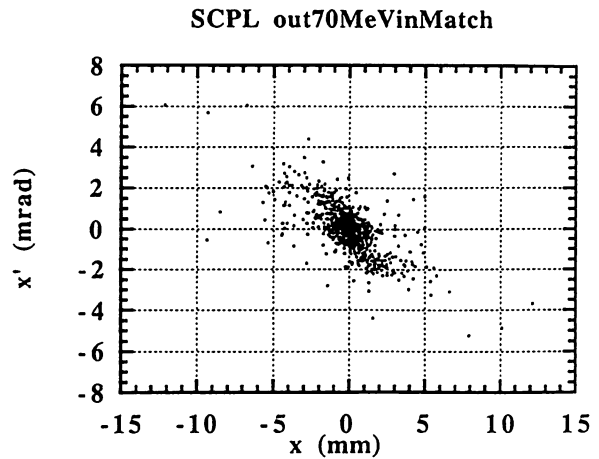


Fig. 45 $x-x'$ emittance of SCPLA output beam using matched-70 MeV-JA-DTL output beam (20mA).

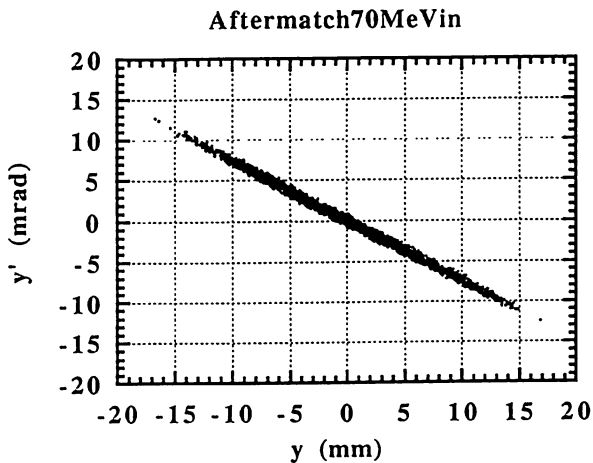


Fig. 43 $y-y'$ emittance of 70 MeV-JA-DTL output beam (20mA) after matching.

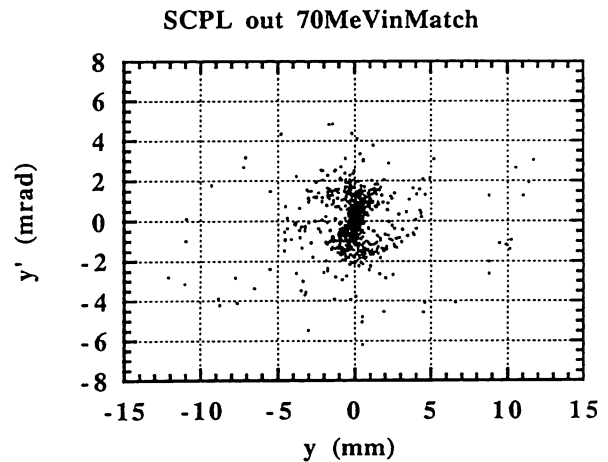


Fig. 46 $y-y'$ emittance of SCPLA output beam using matched-70 MeV-JA-DTL output beam (20mA) after matching.

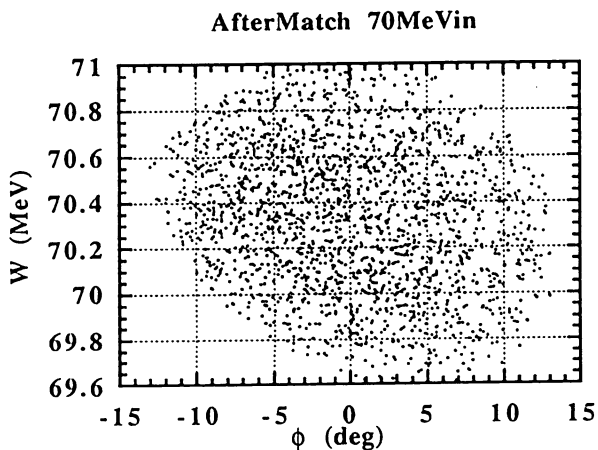


Fig. 44 $\phi-w$ emittance of 70 MeV-JA-DTL output beam (20mA) after matching.

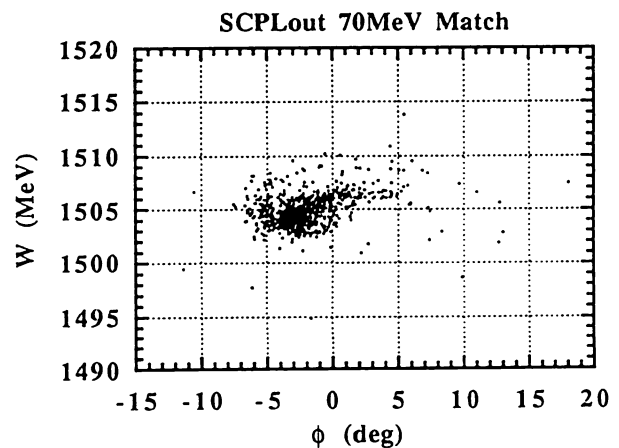


Fig. 47 $\phi-w$ emittance of SCPLA output beam using matched-70 MeV-JA-DTL output beam (20mA) after matching.

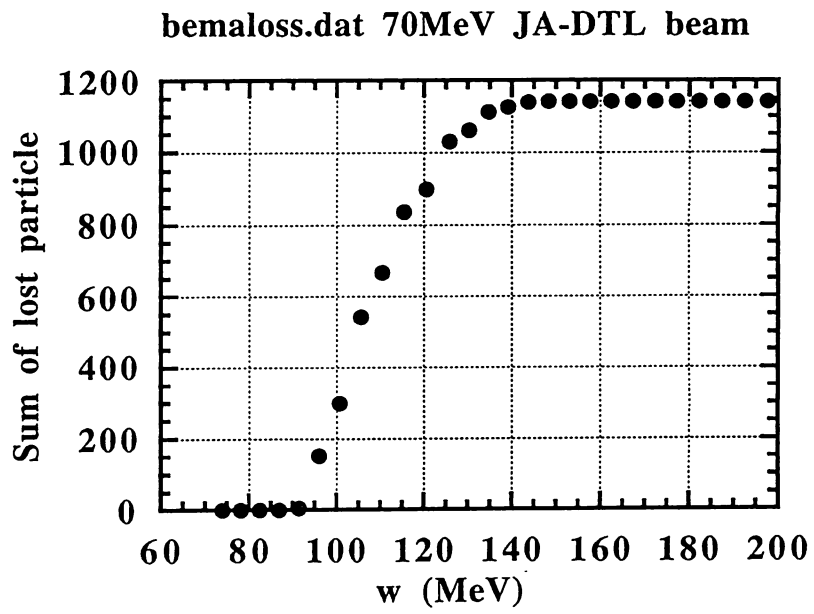


Fig. 48 Sum of the lost particles along SCPLA : 70 MeV JA-DTL injection.