

1 GeV リニアックの試み

加藤隆夫

1 GeV リニアックを考えるにあたり、なにを重要と考えれば良いのだろう。直接にはいかなる周波数を選び、どのような structure を選ぶかであるが、実は、何を考えて選択するか、更に何を考えずに選択の決断をするか、即ち、選択の基準に何を選択し、またはしなかったかが重要であろう。事実がそうであったかは知る由もないが、思い起こすべきは、先輩たる Los Alamos 800 MeV linac 建設の時の膨大なレポートにみられる科学的合理的創造的な姿勢であって、設計、製作、運転、保守等諸々に対して、科学計算と実験事実に基づいて誠実な判断をくだしている。付けを将来に残す事が無いように数多くの御批判に期待したい。

話を進めるにあたり、以下のモデルを設定してみる。

- 1) 構成 ion source + RFQ + DTL + CCL
- | | | | | |
|-----|---------|------|---------|---------|
| RFQ | 50 keV | ---> | 2 MeV | 200 MHz |
| DTL | 2 MeV | ---> | 150 MeV | 200 MHz |
| CCL | 150 MeV | ---> | 1 GeV | 600 MHz |

RFQ = radio frequency quadrupole linac

DTL = drift tube linac = Alvarez linac

CCL = coupled cavity linac

上の区分は単なる一例にすぎないが、この様にエネルギーに従って加速管の構造と周波数を変えなければ効率の良いリニアックは出来ない事は確かである。

2) Criterion for optimized design

以下の指針を書き下すことはたやすく出来るが、各々の項目を真面目に追求する事は難しい。しかし万人が納得出来る様な説得力を持つ解答を得たいものであるが、そのためには、都合の良いことは勿論、都合の悪い事まで批判にさらす勇気と誠実さが求められる。

1. almost no beam loss at the high energy part
2. low cost of construction (structure and rf)
3. low cost of operation
4. reliability of operation

2.と3.は加速管と高周波電源の選択と cost optimization に依存する。
1.は beam dynamics design の予測する許容誤差に従って製作された各部分の出来具合いと、rf field and phase の調整具合い、及び 4. に依存する。

3) Given parameters

- peak 10 mA, 500 μ sec, 50 Hz
rf pulse length 550~650 μ sec

duty factor 2.75~3.25%

4) 決めるもの

1. type of structure

RFQ、DTL は決まり、CCL は相当のstudyをしないと決まらない。

2. rf frequency

3. transition energy

4. accelerating field

5. synchronous phase

6. bore radius and focusing parameters

5) 高周波電力損失の周波数依存性

加速管の効率を shunt impedance Z により定義する。

$$Z = E_0^2 / (P_c/L) \quad (1)$$

ここで E_0 は加速電場、 P_c は加速管内の高周波損失、 L は加速管の長さである。加速管のエネルギー利得 V は次式で表される。

$$V = E_0 T L \cos \phi \quad (2)$$

T は transit time factor, ϕ は加速位相を表す。上の二式を便利な形に書き直すと、

$$\begin{aligned} P_c &= E_0^2 / (P_c/L) = V^2 / (Z T^2 L \cos \phi \cos \phi) \\ &= V E_0 / (Z T \cos \phi) \end{aligned} \quad (3)$$

初期条件として、 $V = \text{const.}$ の場合を考えると、 P_c は加速電場 E_0 に比例し、shunt impedance Z に反比例する事がわかる。 Z の周波数依存性は、表皮効果の周波数依存性であって、

$$Z \propto f^{1/2} \quad (4)$$

となるから、ある一定の加速エネルギーを得るのに必要な高周波電力は加速管の周波数の平方根に逆比例する(加速電場を一定に保つ場合)。

$$P \propto f^{-1/2} \quad (5)$$

200 MHz の加速管に必要な高周波電力を 1.0 とすれば 800 MHz の場合には、半分の 0.5 でよいことになる (Table 1)。

逆に、使用電力が一定とすれば、加速電場を周波数の平方根に比例して高くする事が出来る。

更に rf power source の cost は周波数の何乗かには比例すると言われてい

るので、高い周波数を選択する事は一段と有利と言える。

周波数を 600 MHz に選んだ時の、1 GeV linac の CCL 部分の計算結果 (PARMILA による) を Table 2 に示す。他の周波数に応用する事は、式 (2) - (5) を用いれば容易である。 Table 3 は CCL linac の実用的な Z の値を示す。

Fig.1 - 3 に Table 2 を図示してある。

Table 1 RF power の周波数依存性 ($E_0 = \text{const.}$)

周波数 (MHz)	RF power (ratio)
200	1.0
400	0.707
600	0.577
800	0.5
1000	0.447
1200	0.408

Table 2 1 GeV linac (CCL part).

E_0 (MV/m)	P_c (MW)	Length (m)	No. of cell	average Z ($M\Omega / m$)
2.0	58.17	544.9	2957	37.45
2.5	72.73	436.02	2366	37.47
3.0	87.30	363.43	1972	37.47
3.5	101.83	311.46	1690	

150 MeV ---> 1000 MeV, stable phase = -30° , 603 MHz

Table 3 実用的な CCL の average shunt impedance Z

周波数 (MHz)	Z ($M\Omega / m$)
400	30.6
500	34.2
600	37.5
800	43.3
1200	53.0

average T = 0.9 とおいている。

6) cost optimization (参考文献 Linear accelerators 赤本 p.597)

経費の最適化が出来るためには、ある変数（ここでは加速電場の強さ）に対して相反する動きをする二つの量、例えば比例する経費と反比例する経費が必要である。うまい具合にリニアックにおいては、主要な二つの経費、高周波電源の製作費と加速管の製作費が、前者は加速電場に比例し、後者は反比例するので最適化は全く簡単であって、高校の数学を駆使すれば、両者に費やす費用が等しい場合に最適化がなされる事がわかる。

初期条件として、周波数、エネルギーゲイン V 、transit time factor T 、synchronous phase ϕ 、rf peak power P を与え、最適化によって加速管の長さ L 、加速電場 E_0 、かかる最小経費 C_t を求める。

まず加速管内の高周波消費電力は、

$$P = E_0 V / (Z T \cos \phi) \propto E_0$$

だから、加速電場に比例する事がわかる。また加速管の長さは

$$L = V / (E_0 T \cos \phi) \propto E_0^{-1}$$

だから、加速電場に反比例する。

6.a) DTL or CCL type of structure

経費を次のように分類する。ここではまず DTL linac もしくは CCL linac を想定している。

C_p = 1 MW 当たりの rf 電源の製作費

C_{pr} = 1 MW 当りの電力料金 / 一年

C_{pm} = 1 MW 当りの保守費用 / 一年

C_s = 1 m 当りの加速管の製作費

C_{sm} = 1 m 当りの加速管の保守費用

リニアックの使用年数を t とすれば、総額は

$$C_t = P(C_p + t * C_{pr} + t * C_{pm}) + L(C_s + t * C_{sm})$$

次ぎに
$$P = V^2 / (Z T L \cos \phi * \cos \phi) = V^2 / (Z_0 L)$$

$$Z_0 = Z T \cos \phi * \cos \phi$$

を用いて書き直すと、

$$C_t = V^2 A / (Z_0 L) + L B$$

ここで

$$A = C_p + t * C_{pr} + t * C_{pm} \quad \text{rf cost}$$

$$B = C_s + t * C_{sm} \quad \text{structure cost}$$

C_t を微分して最適長さを求めると

$$L_{opt} = (V / \sqrt{Z_0}) (\sqrt{A} / \sqrt{B}) = P A / B$$

この時 $C_t = 2 V \sqrt{A B} / Z_0 = 2 P A$

$$E_{opt} = V / (P I \cos \phi) * B / A$$

最適化された C_t は当然ながら rf cost の二倍であり ($2PA$)、rf cost A が大きいときは E_{opt} が小さくなって、そのかわりに L_{opt} が大きくなるという常識的な式となっている。なお rf cost A は依然としてそう小さくはならないので、 E_{opt} は放電限界以上の値にならないのが普通かと思われる。従って加速電場は出来るだけ下げて cost optimization の結論に従った設計をするのが一般的であった。しかし例えば、KEK 20 MeV proton linac では、structure cost が rf cost に比べて些かまざっているという事なので、cost optimization を今から行うとすれば、加速電場を更に上げてタンクの長さを短くし、安い高周波電源を拡張する結果となるだろう。

ex. $t=0$, $A=C_p=1$ 億 / MW, $B=C_s=0.15$ 億 / m, $P=75$ MW, $I=0.9$, $\phi=-30$

$$L_{opt} = 75 * 1 / 0.15 = 500 \text{ m}$$

$$C_t = 2 * 75 * 1 = 150 \text{ 億}$$

$$E_{opt} = 850 / (75 * 0.9 * \cos(-30)) * 0.15 / 1 = 2.18 \text{ MV/m}$$

6.b) Chain of single cavities

rf cost は peak power に依存する経費と、空洞の数に依存する経費にわけける。

$$C_{ps} = 1 \text{ MW 当たりの rf 電源の製作費 (クライストロンなど)}$$

$$C_{pn} = \text{空洞の数に依存する製作費 (カップラー、チューナーなど)}$$

空洞一個当り。

$$C_{pr} = 1 \text{ MW 当りの電力料金 / 一年}$$

$$C_{pms} = 1 \text{ MW 当りの保守費用 / 一年}$$

$$C_{pmn} = \text{空洞の数に依存する保守費用、空洞一個当り。}$$

structure cost は空洞一個当りの経費で考える。

$$C_{sn} = 1 \text{ 個 当りの加速管の製作費}$$

$$C_{smn} = 1 \text{ 個 当りの加速管の保守費用}$$

空洞総数を n とすれば、総額は

$$C_{ts} = P(C_{ps} + t * C_{pr} + t * C_{pms}) + n(C_{pn} + t * C_{pmn} + C_{sn} + t * C_{smn})$$

$$= P A + n B$$

$A = C_{ps} + t * C_{pr} + t * C_{pms}$	rf cost
$B = C_{pn} + t * C_{pmn} + C_{sn} + t * C_{smn}$	structure cost

ユニットセルの平均長さを a とすれば、

$$L = n a$$

$$P = V^2 / (Z_0 n a)$$

となるから、前と同様にして

$$n(\text{opt}) = P A / B = P A / (a B')$$

$$L_{\text{opt},s} = a P A / B = P A / B'$$

$$C_{\text{ts,opt}} = 2 P A$$

$$\begin{aligned} E_{\text{opt}} &= V / (P a T \cos \phi) * B / A \\ &= V / (P T \cos \phi) * B' / A \end{aligned}$$

CCL と比較するために単位長さ当りの $B' = B / a$ を使用した。Table 4 に比較を示す。SINGLE の計算では、セルの数に比例する rf cost は structure cost に繰り入れた事に注意する。

- A) rf power が同じ時に、最適化された CCL と SINGLE の経費は等しい。
($A(\text{SINGLE}) = A(\text{CCL})$ だから)。
- B) SINGLE の merit は単位長さ当りの経費 $B' < B(\text{CCL})$ が予想される場合であるが、 B' が小さい利点を生かして、CCL に比べて長さが長くなり、加速電場は低くなって、セルの数が増える結果となる。

さて、all cost, rf power P , structure cost B が与えられる場合、cost optimization は一つのリニアックを決める (Table 5)。しかしこの中で実現可能なものは、Table 5 の右端の shunt impedance Z が現実の値に近いものに限られるから、与えられた条件のもとで一意的に決ってしまう。その様にして求められた optimized linac を Table 6 に示す。条件は

1. 総額 150 億
2. $Z = 37.5 \text{ M}\Omega/\text{m}$
3. 600 MHz, average cell length = 0.184 m.
4. $T = 0.9$, $\phi = -30$

話はある意味で簡単になっている。rf cost A と structure cost B の比 A/B が決まりさえすれば CCL の cost optimization に従った design は完全に決まるので、その様なリニアックの beam dynamics の可否を吟味すれば良いのである。Fig.4 に P vs. A/B , Fig.5 に L vs. A/B , Fig.6 に E vs. A/B , Fig.7 に N vs. A/B を示してある。

逆にこれらの図から、rf cost はいくら、structure cost はいくらと決めてしまう事も出来よう。最難問は A と B の算出であり、皆様の知恵の絞り所であるが、多少乱暴ではあるが、最近の TRISTAN を例として考えてみよう。

TRISTAN ではおよそ、

$$A = 1.923 \text{ 枚/MW}$$

$$B = 0.185 \text{ 枚/m} \text{ と推定する。}$$

これを応用して最適化を行うと、

	500 MHz	600 MHz	
ZTT	27.75	30.4	MΩ/m
Ze	20.81	22.81	MΩ/m
Lopt	600.7	573.9	m
Popt	57.8	55.2	MW
Eopt	1.82	1.90	MV/m
cost	222.3	212.4	枚

次に補正をしよう。TRISTAN は CW, リニアックはパルスである。2 MW 出力以上のクライストロンが同じ値段と考えられる。しかし陽極変調器が必要となる。そこで

$$A = 1.1 \text{ 枚/MW}$$

$$B = 0.185 \text{ 枚/m} \text{ と仮定すると、次の結果を得る。}$$

	500 MHz	600 MHz	
ZTT	27.75	30.4	
Ze	20.81	22.81	
Lopt	454.4	434.1	
Popt	76.4	73.0	
Eopt	2.40	2.51	
cost	168.1	160.6	

Table 4 Cost optimization の比較
single

		CCL
A	$Cps + t \cdot Cpr + t \cdot Cpm$	$Cp + t \cdot Cpr + t \cdot Cpm$
B	$Cpn + t \cdot Cpmn + Csn + t \cdot Csmn$	$Cs + t \cdot Csm$
	per unit cell	per unit length
Copt	2 P A	2 P A
Lopt	P A / B'	P A / B
Eopt	F * B' / A	F * B' / A
	$F = V / (PT \cos \phi)$	

ここで P = rf peak power, B' = B / a, L = n a.

Table 5 Results of cost optimization program.

Z00= 37.50 Z0H= 38.00 Z0L= 37.00
given cost is 150.00 ㇿ
CELL=.184 600 MHz CCL
Z= 37.500 CELL= 0.1840

COST	P	A	B	L	E	N	A/B	Z
ㇿ	MW	ㇿ/MW	ㇿ/m	m	MV/m			
150	50	1.500	30.000	2.50	436.22	13.6	0.05	9514.42
150	50	1.500	0.968	77.50	14.07	421.2	1.55	306.92
150	50	1.500	0.492	152.50	7.15	828.8	3.05	155.97
150	50	1.500	0.330	227.50	4.79	1236.4	4.55	104.55
150	50	1.500	0.248	302.50	3.61	1644.0	6.05	78.63
150	50	1.500	0.199	377.50	2.89	2051.6	7.55	63.01
150	50	1.500	0.166	452.50	2.41	2459.2	9.05	52.57
150	50	1.500	0.142	527.50	2.07	2866.9	10.55	45.09
150	50	1.500	0.124	602.50	1.81	3274.5	12.05	39.48
150	50	1.500	0.111	677.50	1.61	3682.1	13.55	35.11

Table 6 Optimized 600 MHz CCL linac.

cost	P	A	B	L	E	Number of cell
ㇿ	MW	ㇿ/MW	ㇿ/m	m	MV/m	
150	30	2.5	0.071	1058	1.03	5747
150	40	1.875	0.095	792	1.38	4304
150	50	1.5	0.118	635	1.72	3451
150	60	1.25	0.142	528	2.07	2870
150	70	1.071	0.166	451	2.42	2454
150	80	0.938	0.189	396	2.75	2152
150	90	0.833	0.214	351	3.11	1908
150	100	0.75	0.238	315	3.46	1712
150	110	0.682	0.262	286	3.81	1554
150	120	0.625	0.284	264	4.13	1435
150	130	0.577	0.304	247	4.42	1342
150	140	0.536	0.335	224	4.87	1217
150	150	0.500	0.357	210	5.19	1141

7) Shunt impedance Z の幾つかの例

ここに示す値は、完全に最適化してあるわけでは無い事に注意するが、結論が逆になる程の事は無いと思われる。

Fig.8 500 MHz APS の ZTT のエネルギー依存性、ビーム穴径 5cm, 2.54 cm.

Fig.9 Fig.8 の二つを 比率に焼き直したもの。

Fig.10 500 MHz CCL cavity の free design と、隣合う壁の距離を 4.5 cm に保つ design.

Fig.11 Fig.10 の二つを 比率に焼き直したもの。

Fig.12 800 MHz CCL と 500 MHz CCL の比較。

Fig.13 Summary of ZTT calculation.

8) 運転時のチューニングとはどんなものか？

リニアックの運転時のパラメーターは、rf phase and amplitude と Q magnet である。LAMPF のチューニングの成果をみてみよう。

1972.6	1 μ A
1974.12	13 μ A
1976. 夏	100 μ A
1979	500 μ A

彼らはさぼっていたのであろうか。否、総力を挙げて問題にあたっているのである。彼らのレポートから引用する。

1972: A major effort has to be spent on tuning problems with low current beams before one attempts high current operation.

1976: The fundamental problem in producing high quality beams remains the appropriate adjustment of the phase and amplitude in the bunchers and 48 separate sections of the accelerator. One of the real difficulties associated with this problem is the nonorthogonality of the many different parameters and the myriad of different set points which can produce sensibly the same beam; another difficulty is the impossibility of accurately measuring phase and amplitude of the accelerating field other than through its effect on the beam.

彼らには技術力が無かったと言えようか。この問題を楽観的に考えて良いものだろうか。巷でいわれる様に 3 dB coupler で分けて mechanical な導波管の長さを揃えれば amplitude は均等になり、phase は circulator の誤差程度に納まるといふ事に彼らは考えつかず、その為に 4 年も浪費したのか。彼らが 1973 に直面した状況をみてみる。

energy (MeV)	peak current (mA)
0.75	40
100	15
212	15
302	6
400	3
800	1

但し、このレポートの筆者は、study 時間が無い為の中間報告であり、misleading の無いようにと注意している。彼らが採用したチューニング法を挙げる。

1. beam loading これは 精度が足りない。
2. 一つのタンクの中に、phase oscillation が一周期以上ある時は、rf phase and amplitude の関数としてエネルギーを測る。
3. 一つのタンクの中に 1/2 phase oscillation がある時は、time of flight method を使う。
4. phase oscillation が小さい時は、エネルギーを測る。

44 個の独立なタンクを持つ LAMPF のチューニングに 4年かかっている。CCL 部分を chain of single cavity で作る場合には、互いに独立な free parameter はセルの数の 2 倍に増え、1000 以上 (optimized design では 4000 以上か) の数になる。この場合に何を目安にしてどの様なチューニング法が考えられるのか。LAMPF の努力を馬鹿にしないような解を捜さねばならぬ。LAMPF よりも技術力が相当高いとは思えない。LAMPF が遭遇した問題の解決策は単に tolerance が大きいから大丈夫だろうとか、alignment の技術が優れているから大丈夫という様な推測ではなく、ビームの何をどのように測定して phase and amplitude を決めるかという具体的なものでなくては行けない。phase and amplitude の絶対測定が難しい事は入射器の経験でも明らかだと筆者は考える。

恐いレポートがある。(大ハドロン加速器計画提案書、p.182)

*** (単細胞型リニアックでは)

- 1) ビームに対する各ユニットの平均位相の調整は、クライストロンの励振源である基準周波数発生装置からの信号を電氣的に移相して行う。
- 2) ユニット内でのビームと各空洞との位相調整は、導波管の長さを機械的に変えて行う。

現在、KEK では、これと類似した高周波系がトリスタンで安定に運転されていることから、構成上特に問題になることはない。***

加速電場の振幅にふれていないのは、それほどの難事ではないということらしいが、ここに現れている楽天性は、当然ながら、LAMPF の問題を見事に解決された結果と思われ、その具体的な方法を、早急に公開されて厳密な検討に委ねる事を要望したい。

9) 一般的な rf の事

9.a) Power consumption in CCL vs. frequency and E_0

第 6 章では cost optimization から加速電場が決まる事を述べたが、一般には、放電限界からその上限が決まり、しかもある程度の余裕を持たせて、安定な運転を期待する。例えば 200 MHz では放電限界の目安といわれる Kilpatrick's limit は 14.75 MV/m であり、KEK 40-MeV proton linac の加速電場 2.12 MV/m の時は、空洞内の表面最大電場は 11.0 MV/m となっている。ビーム加速では、設計値の 10% 増しの加速電場を使用する事もある。また、この様に低く抑えた KEK proton linac においても周波数チューナーや端板には放電の痕跡が見受けられる。これらはいわゆる multipacting であって、空洞設計においては multipacting がおこりにくい形状に注意するものである。multipacting-computer code も存在して、忌み嫌われる形状も次第に明らかになっている。そこで比較的大きめの加速電場を想定する空洞の最適化は、表面最大電場を低くおさえ、multipacting が起こりにくい形で、effective shunt impedance を大きくする必要がある。

こんな考えから、筆者は Kilpatrick's limit/6 を最大加速電場の目安とした (ref. 1 GeV リニアックの簡単な考察)。勿論、表面電場と加速電場の比が小さい場合にはさらに条件は緩和されるべきであり、逆の場合には、きつくなる。

周波数	Kilpatrick/6
400 MHz	3.24 MV/m
600	3.84
800	4.44

kilpatrick/6 の電場を持つリニアックを考えてみよう。

assumption ZT^2 in 800 MHz = 35.1 M Ω /m

$$ZT^2 \propto \omega^{1/2}$$

Accelerating field = Kilpatrick limit/6

CCL 150 MeV ----> 1000 MeV

$$T = 0.9$$

$$P_c = E_0^2 / (P_c/L) = V^2 / (ZT^2 L \cos \phi \cos \phi) = V E_0 T / (ZT^2 \cos \phi)$$

	800 MHz	600 MHz	400 MHz
E_0 (MV/m)	4.44	3.84	3.24
ZT^2 (M Ω /m)	35.1	30.4	24.8
L (m)	245.6	284.0	336.6
P_c (MW)	111.7	111.1	115.4

9.b) Transverse acceptance

$$\text{bore radius } a = \sigma * \beta \lambda / 2\pi$$

$$\sigma = \text{safty factor} = 0.75$$

transverse acceptance

$$A_t = \pi a^2 \sin \mu / (sF)$$

$$= \pi (\sigma * \beta \lambda / 2\pi)^2 \sin \mu / (sF)$$

s = length of the focusing period

0 <= μ <= π phase advance

F = form factor

9.c) Longitudinal acceptance

$$A_L = \pi \Delta \phi_{\max} * \Delta W_{\max}$$

$$\Delta \phi_{\max} \sim 3/2 |\phi s| (1 - \mu_L)$$

μ_L = longitudinal space charge parameter

$$\Delta W_{\max} = q * \sqrt{(-2\lambda / 3\pi)(mc^2/q) E T (\beta \gamma \phi s (1 - \mu_L))^3}$$

half bunch length in DTL

$$b = \beta \lambda \Delta \phi_{\max} / 2\pi$$

9.d) damping

0 <----- DTL -----> 1 とすれば

$$\frac{\Delta W_{\max 1}}{\Delta W_{\max 0}} = \sqrt{\frac{E_1 T_1 (\beta_1 \gamma_1 \phi s_1 (1 - \mu_{L1}))^3}{E_0 T_0 (\beta_0 \gamma_0 \phi s_0 (1 - \mu_{L0}))^3}}$$

$$\Delta \phi_1 / \Delta \phi_0 = \Delta W_0 / \Delta W_1$$

$$\frac{\Delta \phi_1}{\Delta \phi_{\max 1}} = \frac{\Delta \phi_0 * \phi s_0 \left[\frac{E_0 T_0 \sin(\phi s_0) \beta_0^3 \gamma_0^3 (1 - \mu_{L0})^5}{E_1 T_1 \sin(\phi s_1) \beta_1^3 \gamma_1^3 (1 - \mu_{L1})^5} \right]^{1/4}}{\Delta \phi_{\max 0} * \phi s_1}$$

$$\frac{b_1}{b_0} = \frac{\Delta \phi_1 \beta_1}{\Delta \phi_0 \beta_0} = \left[\frac{E_0 T_0 \sin(\phi s_0) \beta_1 \gamma_0^3 (1 - \mu_{L0})}{E_1 T_1 \sin(\phi s_1) \beta_0 \gamma_1^3 (1 - \mu_{L1})} \right]^{1/4}$$

ここで μ_L = -15 l λ β λ / (π a_x a_y b² E T sin φ)
だから、上式を解くと、

$$(b_1/b_0)^2 = B (\mu_{L0} D/2 + \sqrt{1 - \mu_{L0} + (\mu_{L0} D/2)^2})$$

$$\sqrt{B} = (E_0 T_0 \sin \phi_0 \beta_1 \gamma_0^3 / (E_1 T_2 \sin \phi_1 \beta_0 \gamma_1^3))^{1/4}$$

9.g) DTL と CCL の周波数の比率について

DTL から出て来る micro bunch が CCL で捕獲される為には、その周波数比が整数でなければならない。その上限は縦方向の安定な捕獲から決められ、四倍が限度であるがやや危険がありそうである。またこのような加速器においては、通常の H^- イオンのほかに $+$ イオンを加速する要求も出てくる可能性がある。その場合周波数比を奇数倍に選んでおくと同様加速が可能である。そこで 400 と 1200 MHz などと三倍に選ぶのが常識的である。

既に完成されている技術を応用する事は勿論必要であるが、そのために加速器としての性能が安易に犠牲にされることは避けなければならない。少しの技術の改良と開発によって、もし新しい周波数の選択が可能ならば、そちらを選択するのが、新しい加速器にふさわしいのではあるまいか。1 GeV linac は、科学の最先端を研究するために、巨額の費用をついやする big project の一環であり、それ自身の最適化を考える必要のある規模を持つと思われる。

10) 1 GeV linac の為の computer codes (DTL and CCL)

10.a) DTL の部分

40 MeV linac に使用した code "PARMILA" がそのまま使用可能である。

10.b) transition (DTL ----> CCL)

1) longitudinal motion

transverse beam matching の為に必要となる drift space L による phase の広がり、周波数の通倍化による phase の広がりを考える。安定粒子の速度を $c\beta_s$ とすれば、距離 L を進む時の位相の変化は、

$$\Delta \phi_s = 2\pi L / (\beta_s \lambda)$$

他の粒子の位相変化は、安定粒子を基準にして、

$$\phi_{i,new} = \phi_i + 2\pi L / \lambda (1/\beta_i - 1/\beta_s)$$

周波数の倍率を K とすれば、安定粒子を基準とした他の粒子の位相は、

$$\phi_{i,new} = K * (\phi_i - \phi_s) + \phi_s$$

2) transverse matching

ここでは簡単の為に (x, x') の matching だけ考える。DTL の入口において、6次元 (x, x', y, y', ϕ , E) の random 分布をした粒子を考えるが、(y, y') のエミッタンス ε_y を小さくして、(y, y') の影響を計算結果から取り除く。予め CCL linac のアクセプタンスを計算して (但し $\Delta\phi=0, \Delta E=0$ の beam simulation によるもの)、twiss parameters ($\alpha_2, \beta_2, \gamma_2$) を求める。DTL の出口の twiss parameters ($\alpha_1, \beta_1, \gamma_1$) を CCL のそれに一致させればよいから、未知数の数に対応して、

$$\text{drift space } \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \text{ と thin lens } \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ C & 1 \end{pmatrix} \text{ の組み合わせで}$$

matching させる。途中省略すると、

$$L = (-(\alpha_2 - 2\alpha_1) \pm D) / 2\gamma_1$$

$$C = -(\alpha_2 / 2 \pm D) / \beta_2$$

$$D = \sqrt{(\alpha_2 - 2\alpha_1)^2 - 4\gamma_1(\beta_1 - \beta_2)}$$

以上の計算をさせる code "TRIPLE" を開発した。

10.c) CCL の computer code

"PARMILA" に以下に述べる改造を加えて "PARMOD" を作った。

- 1) 本来 2π mode の計算をしている PARMILA を π mode で働くようにした。
- 2) タンク長さを指定する事により、CCL を自動的に分割させる。これは、間に transverse focusing elements を入れるためである。
- 3) triplet 又は singlet による transverse focusing を計算する。
入力パラメータは、phase advance μ 及びタンクとタンクとの間の geometry (drift space, Q-magnet length など) である。各セル毎の rf defocusing force は thin lens 近似で考慮している。
- 4) rf amplitude error 及び rf phase error の考慮
両者について、各セル毎及び各タンク毎に error を設定できる。この方法では CCL 全体にわたって random error を設定しているので、error の単純平均は零となる。
タンク番号を指定して、amplitude 又は phase に offset を加える事ができる。
- 5) 表示機能
指定するタンクの出口、及び入口において、または指定するセルの後ろにおいて、以下の表示を行う。
 1. emittance and twiss parameters
 2. average energy, energy width, phase width and beam width
 3. graph representation
(x, x'), (y, y'), (ϕ, E), energy distribution
energy oscillation vs. tank number
 4. 以上の表示は、生き残り粒子に対しても出来る ---> acceptance

11) 計算例

11.1) Effect of rf defocusing force

rf defocusing は Q-magnet による収束力を弱めるので、一定の phase advance を得るための Q-magnet field を強くしなければいけない。その一例を Fig.28 に示す。

11.2) Decrease of longitudinal acceptance due to inter-tank length

Q-magnet を設置するためのタンクとタンクとの間の距離は、縦方向のアクセプタンスを小さくする (Fig.29)。

実線 -- 3.0 MV/m, 150-->500 MeV, 938 cells, 96 tanks, tank長さ=160 cm
破線 -- 3.3 MV/m, 150->1000 MeV, 1784 cells, 136 tanks, tank長さ=225 cm

11.3) 設計例 - 1 (PARMOD)

CCL linac の基礎的な事を考察する為のデザイン (Table 1)。

$E=3.3$ MV/m, $\phi = -30^\circ$, $W_{in}=150$ MeV, $W_{out}=995.19$ MeV

1784 cells, 136 tanks, rf power=96.0 MW

focusing design

singlet, length between two Q-magnets = 300 cm,

inter-tank length = 75 cm, phase advance = 80°

tank length = 328.36 m, total length with Q-mag. = 429.61 m

* longitudinal acceptance Fig.30

* transverse acceptance Fig.31

但し $\Delta\phi=0, \Delta E=0$ の入射ビームの場合の計算結果。

90 % normalized emittance $\epsilon_x = 1.105$ cm mrad at entrance

= 0.986 cm mrad at exit

$\alpha=7.472, \beta=2255.9$ at entrance

11.4) 設計例 - 2 (TRIPLE)

DTL output beam (150 MeV)

* longitudinal Fig.32

after phase transformation Fig.33

energy spread Fig.33' \equiv Fig.40(A)

* transverse Fig.34

$\alpha=0.233, \beta=61.75$

90 % normalized emittance $\epsilon_x = 2.317$ cm mrad

emittance growth in DTL = 2.71

設計例 - 1 のアクセプタンスへのマッチングを行うと、

Fig.35を得る。

図の中の楕円は CCL のアクセプタンスを示している。

12) Beam dynamics simulation

前節で作ったビーム集団を用いて CCL の beam simulation をしてみる。

*random error の入れ方

2 % の error とは、136 個のタンクに対して、最大が $\pm 2\%$ となる様に、電場の強さに揺らぎを与える。この時の平均偏差は 0.0095 であり、標準偏差は 0.011 である。

同様にしてセルに対して、又 rf phase に対しても error を入れる。

* loss ratio の定義は、タンク番号 17 (at 252 MeV) を通過した粒子の中で、その後落後する粒子の割合である。1 % 以下が必要となろう。

* 用いた粒子集団の transverse emittance は、CCL acceptance の 25 % の大きさを DTL output beam に持たせるように決めた。

- 12.1 loss ratio and energy spread vs. tank field error (Fig.36)
energy spread は 90 % full width で表しており、単位は MeV である。
- 12.2 energy spread vs. cell field error (Fig.37)
tank error 2 % の時に、更にセル error が加わると、energy spread
が大きくなる。 loss ratio は殆ど変わらない。
- 12.3 error が無い場合 (A)と、 tank error= 2 % and cell error= 10 % の
場合 (B) の比較

Fig.38 Variation of energy spread in CCL.

- A. No error is considered.
- B. Error of (tank=2,cell=10) is considered.

Fig.39 Longitudinal emittance at the CCL exit.

- A. No error is considered.
- B. Error of (tank=2,cell=10) is considered.

Fig.40 Energy spread at the CCL exit.

- A. No error is considered.
- B. Error of (tank=2,cell=10) is considered.

Fig.41 Transverse emittance at the CCL exit.

- A. No error is considered.
- B. Error of (tank=2,cell=10) is considered.

以上に挙げた結果は、CCL linac のおよその振舞いを見るための最初の試みであり、使用したパラメータはまだ最適化されていない事を付記しておきます。

例えば加速電場 3.3 MV/m は、DTL と CCL の全長が 500 m 以下との制約から決めて居ます。

13) デバンチャーによる energy spread の減少

1 GeV linac の field error の無い場合の $\Delta E/E$ は、前節の設計例では 0.27 % (90 % full width) であるが、実際に起こりうるわずかの error に依って 0.5 % 以上に拡大してしまう。対策は、(1) 弱い加速電場を用いて、(2) filed の fine tuning を行う、(3) one cell 毎に独立な rf power amplifier を使用する、(4) デバンチャーを使用する、等が考えられる。ここではデバンチャーについて考察する。

結論

80 m 下流に加速電圧 ± 6 MV のデバンチャーを置くと、 ± 0.34 % が $\Delta E/E = \pm 0.034$ % となる。

前節で使用したビーム集団を、tank error = 2 %, cell error = 15 % の CCL へ入射すると、CCL の出口では、 $\Delta E = 13.02$ MeV (90 % full width) となる (Fig.42)。80 m の drift space を通過すると、 $\pm 12^\circ$ の bunch length は $\pm 68^\circ$ になり (Fig.43)、そこに加速電圧 6 MV のデバンチャーをおくと、 $\Delta E = \pm 0.66$ MeV となる (Fig.44)。

Fig.45 は、drift space 50 m と 80 m の場合について、デバンチャー加速電圧と energy spread との関係を示したもの。

このデバンチャーを作るとすれば、例えば、

7 cells $\pi/2$ mode cavity, length = 1.52 m,

$P_c = 0.95$ MW, $Z = 47.4$ M Ω /m, $T = 0.91$

となる。

なお、本節は、熊田氏の示唆 (リニアックビームの $\Delta P/P \sim 0.1\%$ 程度) による。

LINOUT SUBROUTINE NO. 1 DYNAMICAL PARAMETERS

Table 7-1 Output table of computer code of "PARMOD".

CELL NUMBER	KINETIC ENERGY	BETA	LENGTH	T	TP	S	SP	QUAD LENGTH	QUAD GRADIENT	EZERO MV/M	Z	TOTAL LENGTH	RFPOW
1	150.0000	0.5066	12.5993	0.8642	0.0402	0.3969	0.0518	0.0	0.0	3.3000	45.216	12.599	0.030
3	150.3112	0.5070	12.6201	0.8644	0.0402	0.3967	0.0518	0.0	0.0	3.3000	45.263	37.829	0.091
5	150.9344	0.5079	12.6409	0.8646	0.0401	0.3964	0.0518	0.0	0.0	3.3000	45.310	63.101	0.152
7	151.5588	0.5087	12.6617	0.8648	0.0400	0.3962	0.0518	0.0	0.0	3.3000	45.357	88.413	0.213
9	152.1844	0.5096	12.6824	0.8651	0.0400	0.3959	0.0518	0.0	0.0	3.3000	45.405	113.768	0.273
11	153.4392	0.5112	12.7031	0.8653	0.0399	0.3957	0.0518	0.0	0.0	3.3000	45.451	139.164	0.334
13	154.0683	0.5120	12.7237	0.8655	0.0399	0.3954	0.0518	0.0	0.0	3.3000	45.498	164.601	0.395
15	154.6986	0.5129	12.7443	0.8657	0.0397	0.3952	0.0518	0.0	0.0	3.3000	45.545	190.079	0.456
17	155.3301	0.5137	12.7649	0.8661	0.0397	0.3950	0.0517	0.0	0.0	3.3000	45.592	215.599	0.517
19	155.9628	0.5145	12.7855	0.8665	0.0396	0.3945	0.0517	0.0	0.0	3.3000	45.639	241.159	0.578
21	156.5966	0.5154	12.8060	0.8668	0.0396	0.3945	0.0517	0.0	0.0	3.3000	45.685	266.761	0.639
23	157.2316	0.5162	12.8266	0.8672	0.0395	0.3940	0.0517	0.0	0.0	3.3000	45.732	292.404	0.700
25	157.8678	0.5170	12.8470	0.8676	0.0394	0.3938	0.0517	0.0	0.0	3.3000	45.778	318.088	0.761
27	158.5051	0.5178	12.8675	0.8680	0.0394	0.3935	0.0517	0.0	0.0	3.3000	45.825	343.813	0.822
29	159.1436	0.5187	12.8879	0.8684	0.0393	0.3935	0.0517	0.0	0.0	3.3000	45.871	369.578	0.884
31	159.7833	0.5195	12.9083	0.8688	0.0393	0.3933	0.0517	0.0	0.0	3.3000	45.917	395.385	0.945
33	160.4241	0.5203	12.9286	0.8692	0.0392	0.3930	0.0516	0.0	0.0	3.3000	45.963	421.232	1.006
35	161.0661	0.5211	12.9489	0.8696	0.0391	0.3928	0.0516	0.0	0.0	3.3000	46.009	447.119	1.067
37	161.7093	0.5219	12.9692	0.8700	0.0391	0.3926	0.0516	0.0	0.0	3.3000	46.055	473.048	1.129
39	162.3536	0.5227	12.9895	0.8704	0.0391	0.3923	0.0516	0.0	0.0	3.3000	46.101	499.017	1.190
41	162.9990	0.5236	13.0097	0.8708	0.0390	0.3921	0.0516	0.0	0.0	3.3000	46.147	525.026	1.252
43	163.6457	0.5244	13.0299	0.8712	0.0389	0.3918	0.0516	0.0	0.0	3.3000	46.193	551.076	1.313
45	164.2935	0.5252	13.0501	0.8716	0.0388	0.3916	0.0516	0.0	0.0	3.3000	46.239	577.166	1.374
47	164.9424	0.5260	13.0702	0.8720	0.0388	0.3914	0.0516	0.0	0.0	3.3000	46.285	603.296	1.436
49	165.5925	0.5268	13.0903	0.8724	0.0387	0.3911	0.0515	0.0	0.0	3.3000	46.330	629.467	1.497
51	166.2438	0.5276	13.1104	0.8728	0.0387	0.3909	0.0515	0.0	0.0	3.3000	46.376	655.677	1.559
53	166.8962	0.5284	13.1304	0.8732	0.0386	0.3907	0.0515	0.0	0.0	3.3000	46.421	681.928	1.621
55	167.5497	0.5292	13.1505	0.8736	0.0385	0.3904	0.0515	0.0	0.0	3.3000	46.467	708.219	1.682
57	168.2044	0.5300	13.1704	0.8740	0.0385	0.3902	0.0515	0.0	0.0	3.3000	46.512	734.550	1.744
59	168.8603	0.5316	13.1904	0.8744	0.0385	0.3900	0.0515	0.0	0.0	3.3000	46.557	760.921	1.806
61	169.5173	0.5332	13.2103	0.8748	0.0384	0.3897	0.0515	0.0	0.0	3.3000	46.603	787.332	1.867
63	170.1754	0.5348	13.2302	0.8752	0.0384	0.3895	0.0515	0.0	0.0	3.3000	46.648	813.782	1.929
65	170.8347	0.5364	13.2501	0.8756	0.0383	0.3893	0.0515	0.0	0.0	3.3000	46.693	840.272	1.991
67	171.4951	0.5380	13.2699	0.8760	0.0383	0.3890	0.0515	0.0	0.0	3.3000	46.738	866.802	2.053
69	172.1567	0.5396	13.2897	0.8764	0.0382	0.3888	0.0514	0.0	0.0	3.3000	46.783	893.372	2.115
71	172.8194	0.5412	13.3095	0.8768	0.0381	0.3886	0.0514	0.0	0.0	3.3000	46.828	919.981	2.176
73	173.4832	0.5428	13.3292	0.8772	0.0381	0.3883	0.0514	0.0	0.0	3.3000	46.872	946.629	2.238
75	174.1482	0.5444	13.3489	0.8776	0.0380	0.3881	0.0514	0.0	0.0	3.3000	46.917	973.317	2.300
77	174.8143	0.5460	13.3686	0.8780	0.0380	0.3879	0.0514	0.0	0.0	3.3000	46.962	1000.044	2.362
79	175.4816	0.5476	13.3882	0.8784	0.0379	0.3876	0.0514	0.0	0.0	3.3000	47.006	1026.811	2.424
81	176.1499	0.5492	13.4078	0.8788	0.0379	0.3874	0.0514	0.0	0.0	3.3000	47.051	1053.617	2.486
83	176.8195	0.5508	13.4274	0.8792	0.0378	0.3872	0.0514	0.0	0.0	3.3000	47.095	1080.462	2.549
85	177.4901	0.5524	13.4470	0.8796	0.0377	0.3869	0.0513	0.0	0.0	3.3000	47.140	1107.346	2.611
87	178.1619	0.5540	13.4665	0.8800	0.0377	0.3867	0.0513	0.0	0.0	3.3000	47.184	1134.269	2.673
89	178.8348	0.5556	13.4860	0.8804	0.0376	0.3865	0.0513	0.0	0.0	3.3000	47.228	1161.231	2.735
91	179.5088	0.5572	13.5054	0.8808	0.0376	0.3863	0.0513	0.0	0.0	3.3000	47.272	1188.233	2.797
93	180.1840	0.5588	13.5249	0.8812	0.0375	0.3860	0.0513	0.0	0.0	3.3000	47.316	1215.273	2.859
95	180.8602	0.5604	13.5443	0.8816	0.0375	0.3858	0.0513	0.0	0.0	3.3000	47.360	1242.351	2.922
97	181.5376	0.5620	13.5636	0.8820	0.0374	0.3856	0.0513	0.0	0.0	3.3000	47.404	1269.469	2.984
99	182.2161	0.5636	13.5830	0.8824	0.0373	0.3853	0.0513	0.0	0.0	3.3000	47.448	1296.625	3.046
101	182.8958	0.5652	13.6023	0.8828	0.0373	0.3851	0.0513	0.0	0.0	3.3000	47.492	1323.820	3.109

TANK NO. 1 TANK LENGTH 33032.18372 CENTIMETERS 1793 CELLS POWER= 96.004 MW COST= 0.0 M\$

Table 7-2 Details of section tank.

NO. TANK	BEGIN	END	NC	LENGTH	RF*1.3
1	1	19	19	241.1595	0.7515
2	20	38	19	244.8676	0.7557
3	39	57	19	248.5230	0.7598
4	58	74	17	225.4181	0.6831
5	75	91	17	228.2644	0.6862
6	92	108	17	231.0729	0.6891
7	109	125	17	233.8437	0.6920
8	126	142	17	236.5767	0.6948
9	143	159	17	239.2720	0.6987
10	160	176	17	241.9281	0.7056
11	177	193	17	244.5446	0.7125
12	194	210	17	247.1220	0.7193
13	211	227	17	249.6604	0.7260
14	228	244	17	252.1602	0.7326
125	1653	1663	11	236.1345	0.6993
126	1664	1674	11	236.3978	0.7006
127	1675	1685	11	236.6585	0.7019
128	1686	1696	11	236.9167	0.7031
129	1697	1707	11	237.1724	0.7044
130	1708	1718	11	237.4256	0.7057
131	1719	1729	11	237.6763	0.7069
132	1730	1740	11	237.9247	0.7081
133	1741	1751	11	238.1706	0.7093
134	1752	1762	11	238.4141	0.7106
135	1763	1773	11	238.6553	0.7118
136	1774	1784	11	238.8942	0.7129
TOTLENG=	32836.5455	WHOLE LENGTH WITH Q=		42961.5455	
TOTRFO=	73.3995	TOTRF*1.3=		95.4194	

Table 7-3 Focusing parameters in emittance unit of cm rad.

TANK	STRENGTH	μ PIMU	β_{max} BETAMAX	β_{min} BETAMIN	ψ MODULATION
1	675.00	79.75	1391.70	192.85	2.69
2	677.00	79.91	1395.81	195.38	2.67
3	678.00	79.78	1400.36	199.03	2.65
4	715.00	79.96	1232.04	189.30	2.55
5	717.00	79.92	1236.53	191.88	2.54
6	719.00	79.87	1241.02	194.48	2.53
7	721.00	79.81	1245.50	197.10	2.51
8	724.00	79.95	1249.83	198.89	2.51
9	726.00	79.86	1254.24	201.55	2.49
10	729.00	79.99	1258.35	203.32	2.49
11	731.00	79.90	1262.58	205.97	2.48
12	734.00	79.99	1266.68	207.79	2.47
13	736.00	79.88	1270.86	210.48	2.46
14	739.00	79.95	1274.93	212.33	2.45
15	741.00	79.82	1279.06	215.06	2.44
16	797.00	79.84	1127.96	200.61	2.37
17	801.00	79.97	1131.57	201.63	2.37
18	804.00	79.94	1135.18	203.35	2.36
19	807.00	79.90	1138.76	205.07	2.36
20	810.00	79.85	1142.31	206.80	2.35

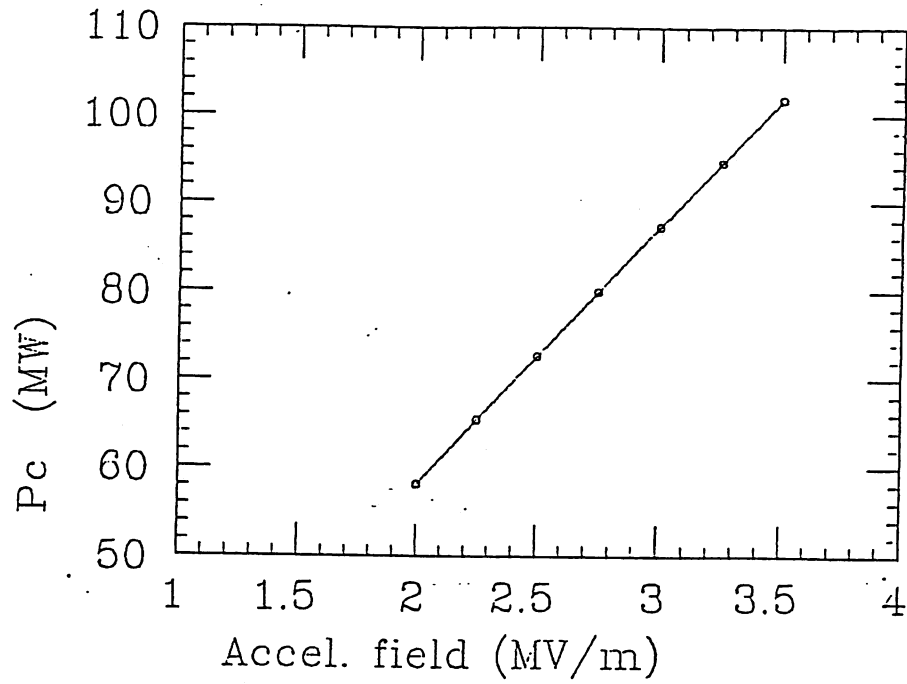


Fig. 1 Rf exciting power of CCL 600 MHz linac with acceleration from 150 to 1000 MeV and synchronous phase of -30 degrees vs. accelerating field.

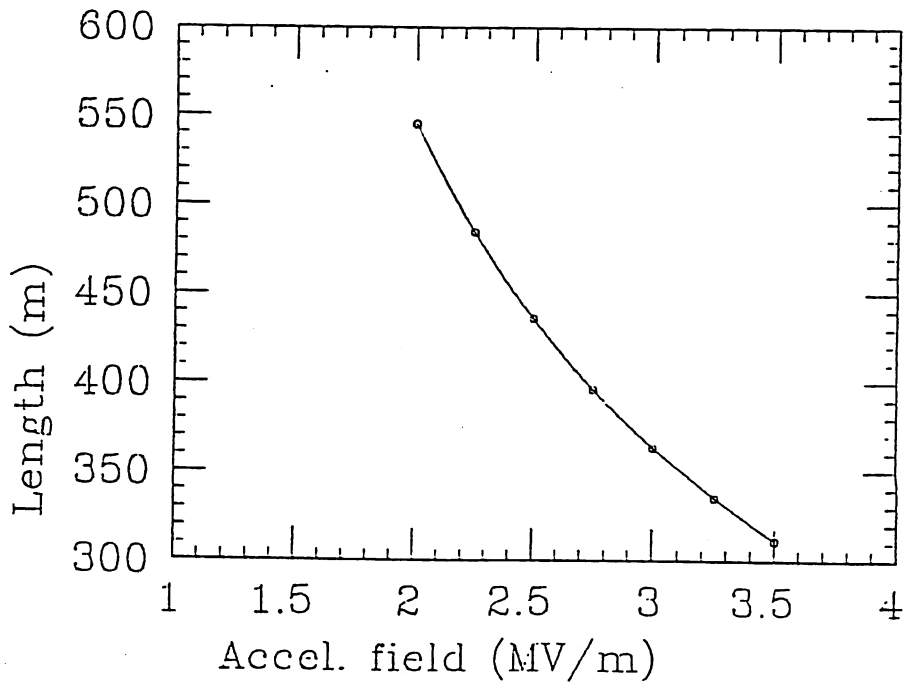


Fig. 2 Length of CCL 600 MHz linac with acceleration from 150 to 1000 MeV and synchronous phase of -30 degrees vs. accelerating field.

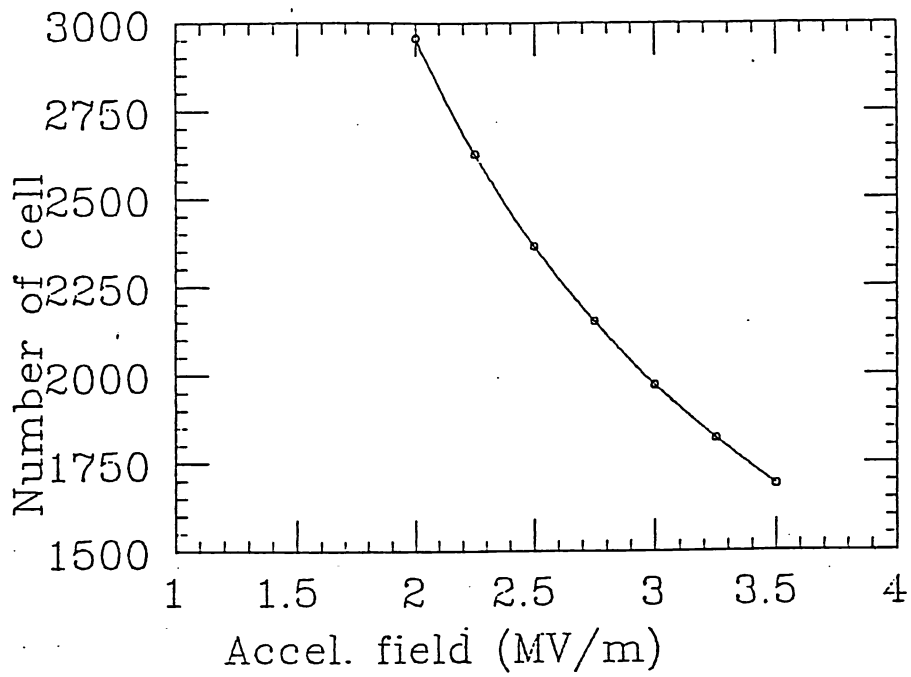


Fig. 3 Number of cells of CCL 600 MHz linac with acceleration from 150 MeV to 1000 MeV and synchronous phase of -30 degrees vs. accelerating field.

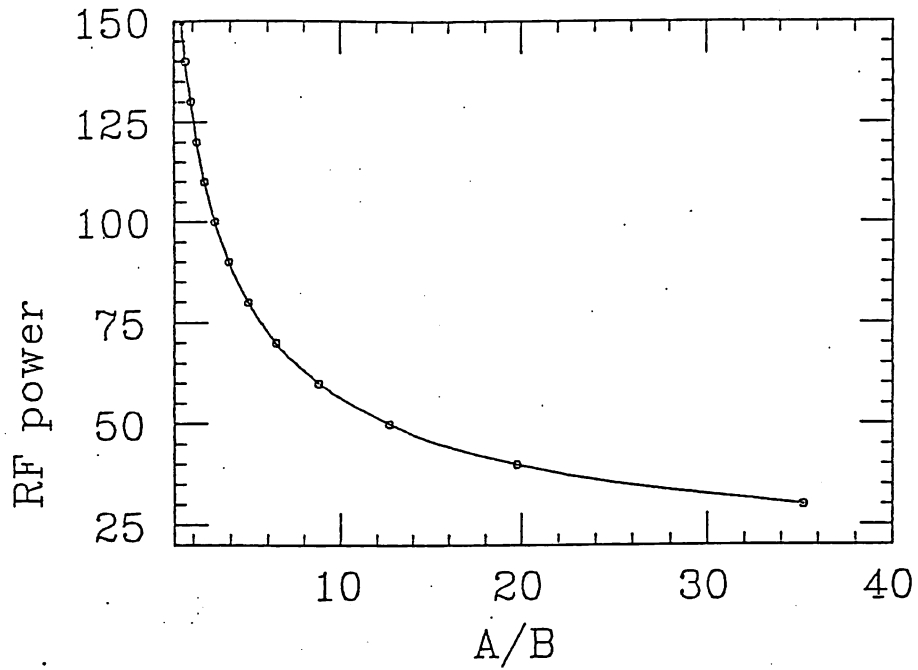


Fig.4 Rf power vs. A/B for the cost-optimized 600 MHz CCL linac. $\eta = 150$ 枚.

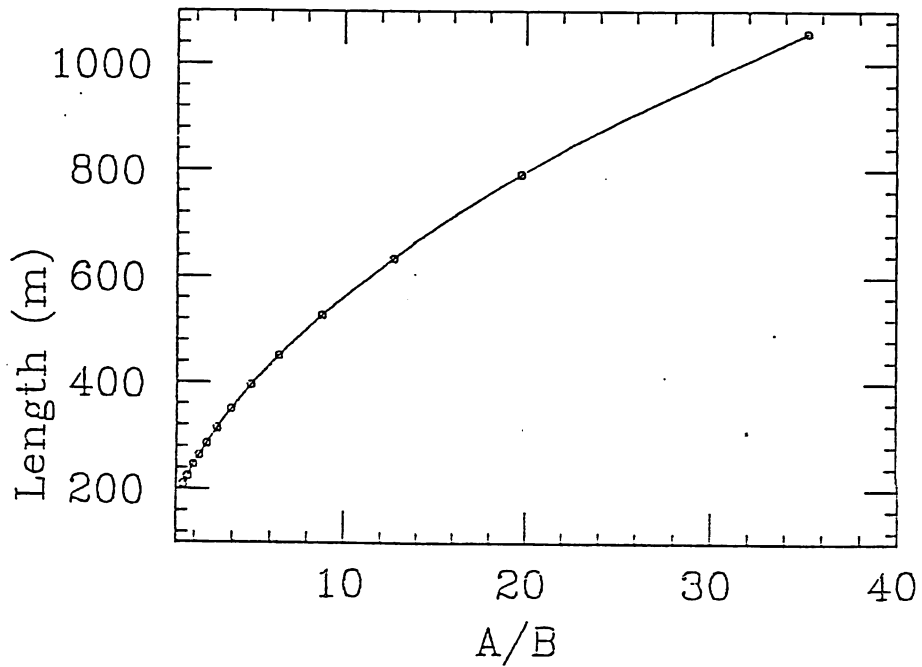


Fig.5 Length vs. A/B for the cost-optimized 600 MHz CCL linac. $\eta = 150$ 枚.

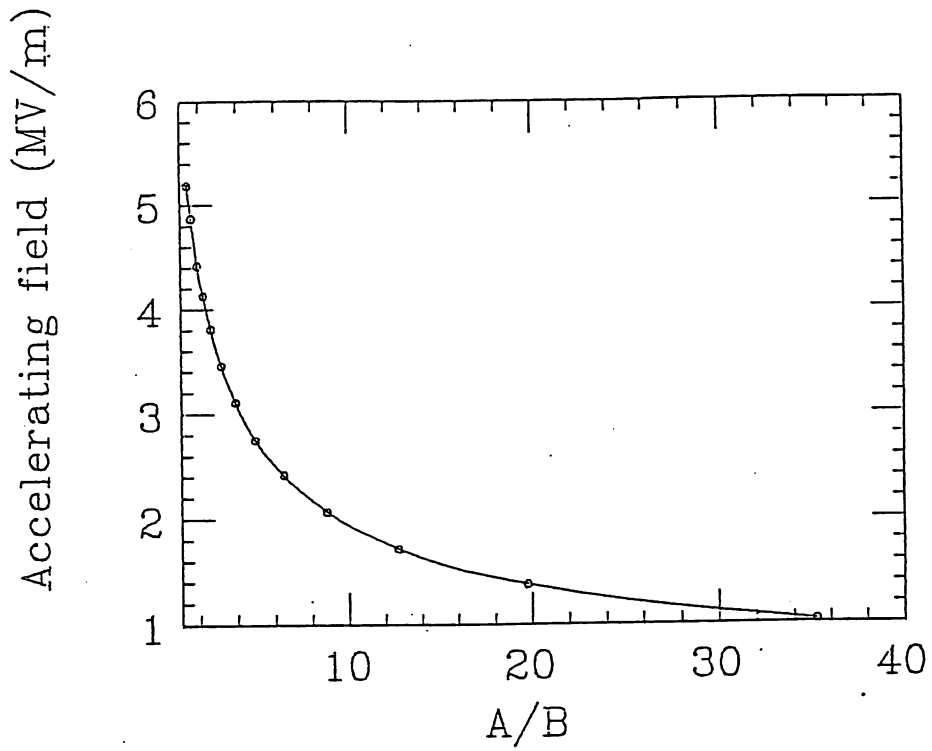


Fig.6 E_0 vs. A/B for the cost-optimized 600 MHz CCL linac. $\$ = 150$ 万.

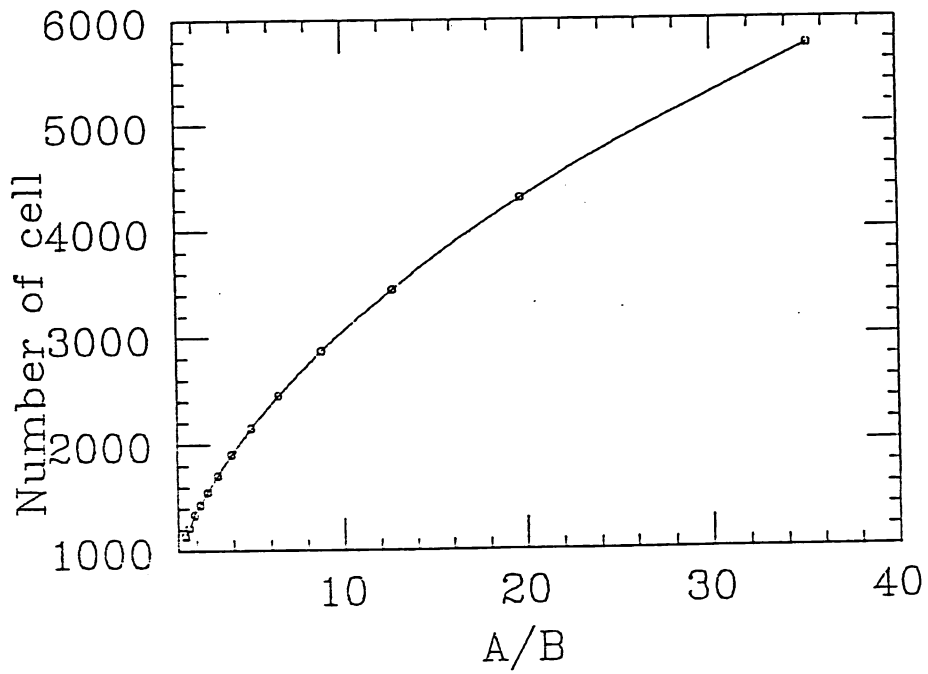


Fig.7 Number of cells vs. A/B for the cost-optimized 600 MHz CCL linac. $\$ = 150$ 万.

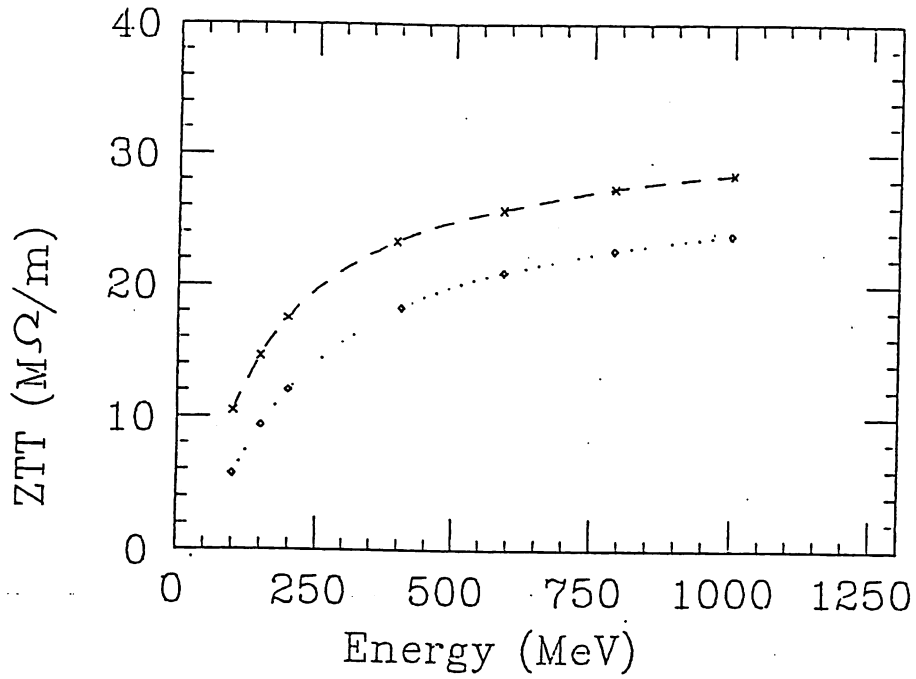


Fig. 8 ZTT of 500 MHz APS with beam hole radii of 5 cm (lower) and 2.54 cm (upper).

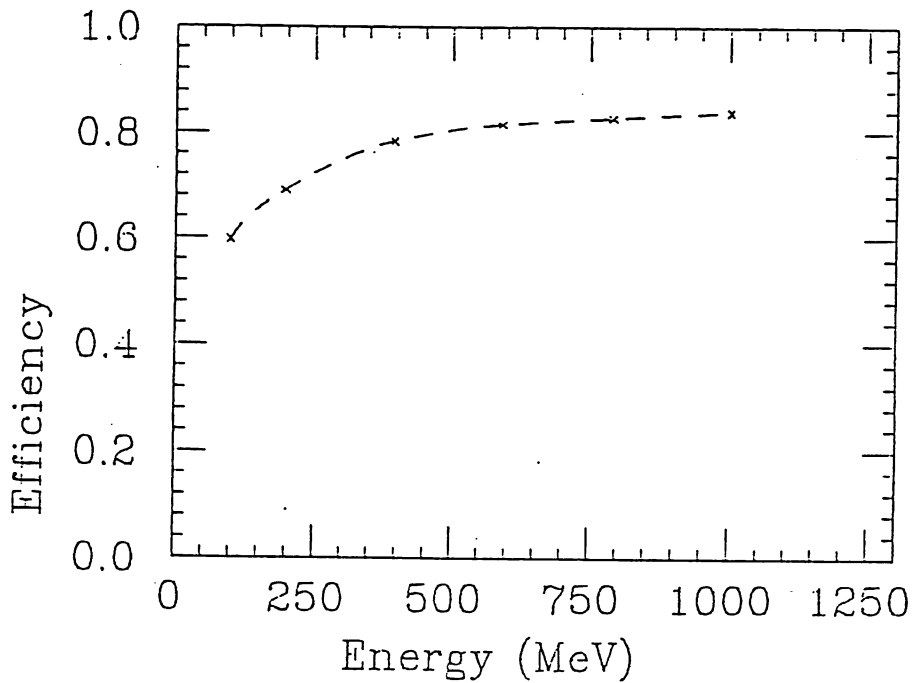


Fig. 9 Ratio of decrease of ZTT of 500 MHz APS due to difference of beam hole radius.

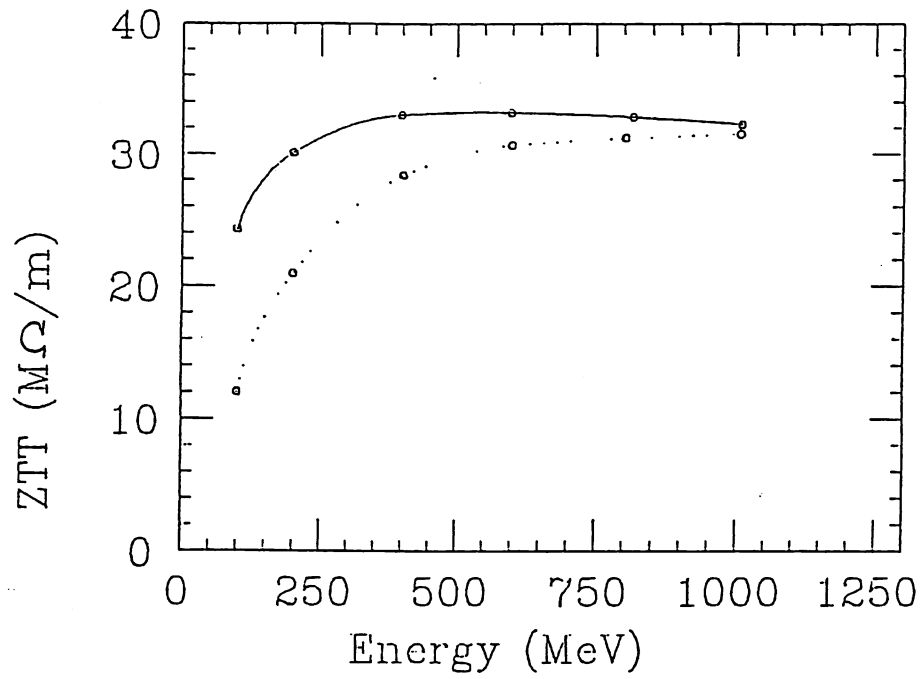


Fig. 10 ZTT of 500 MHz CCL cavity with free design (upper) and restricted design of a distance of 4.5 cm between adjacent walls.

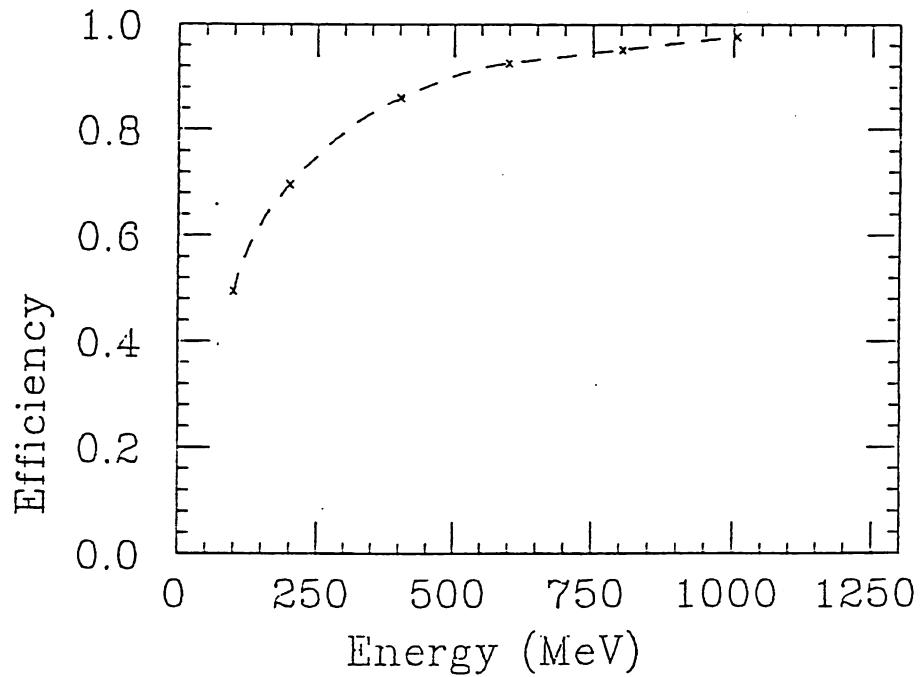


Fig. 11 Ratio of decrease of ZTT due to the increase of thickness of wall.

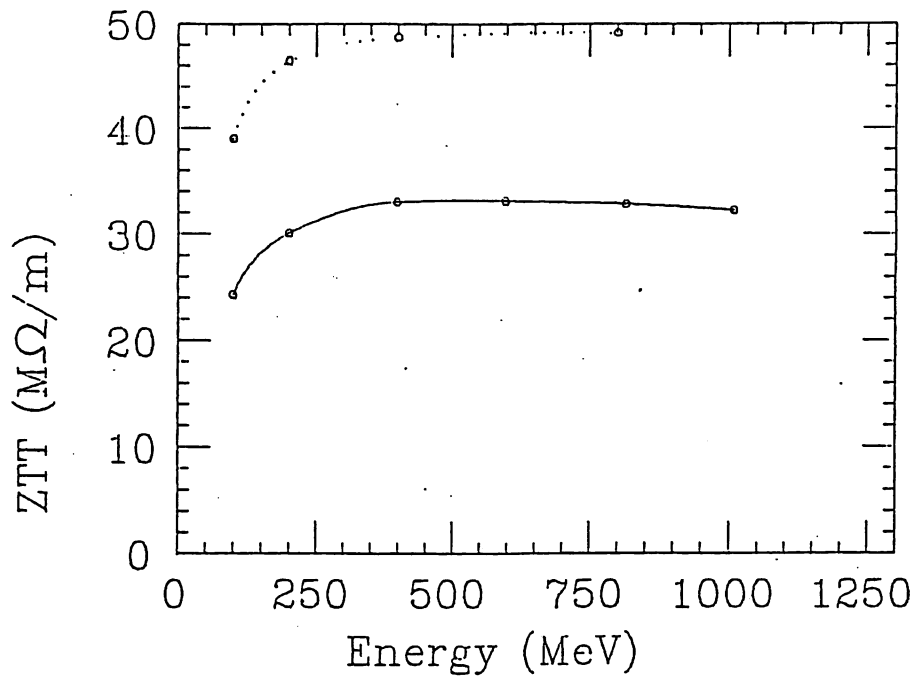


Fig. 12 Comparison between ZTT of 800 MHz and 500 MHz CCL cavity.

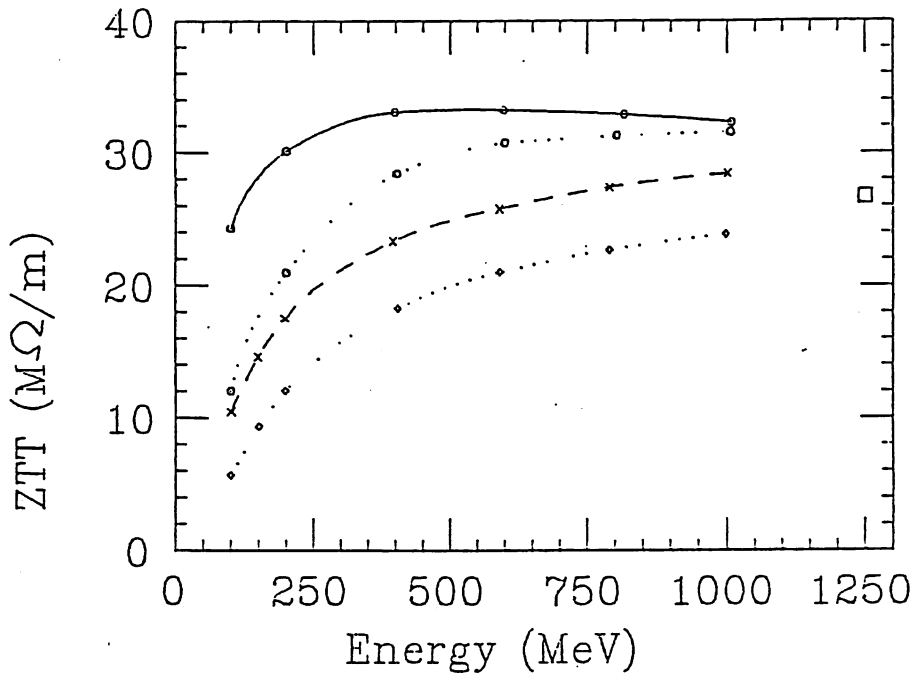


Fig. 13 Summary of ZTT study of 500 MHz cavities.
 Curved line ----- CCL free design.
 Circle and dotted. -- CCL restricted.
 Dashed line ----- APS 2.54 beam hole.
 lowest line ----- APS 5 cm beam hole.
 Box ----- TRISTAN APS.

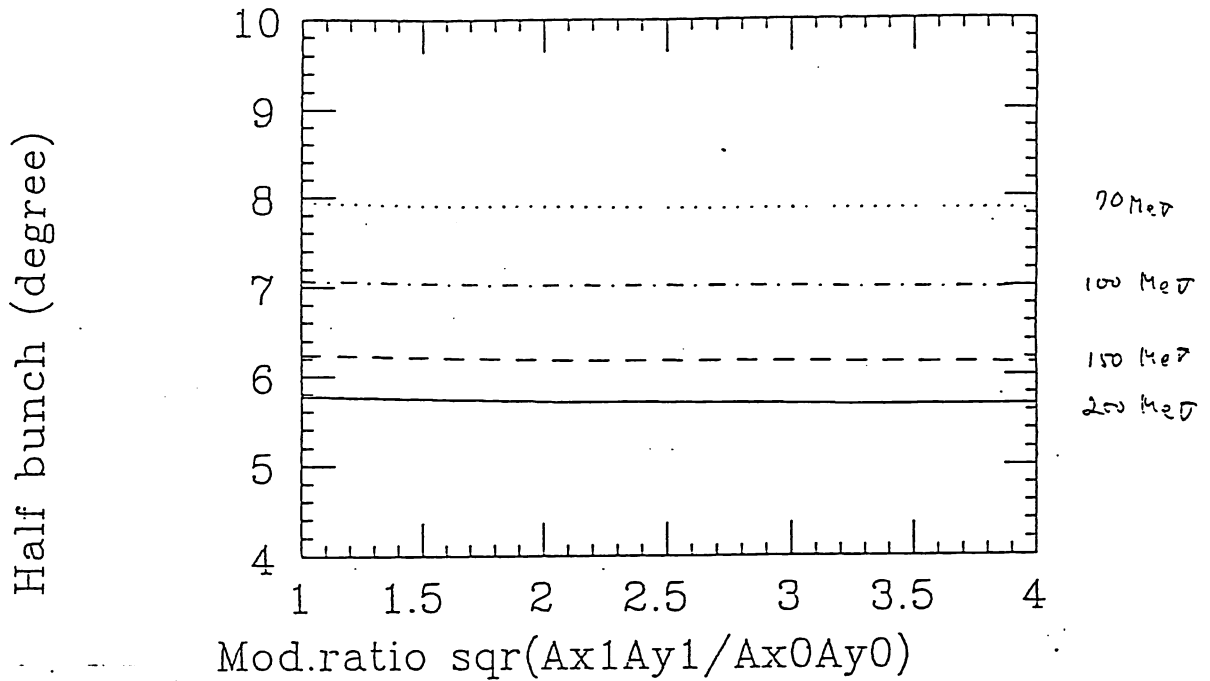


Fig.14 Half bunch length vs. beam-diameter ratio between at the exit and entrance and output energy from DTL linac. I=20mA. Stable phase=-30. Injection half beam spread is 30 degrees. From top, 70, 100, 150 and 200 MeV output energy.

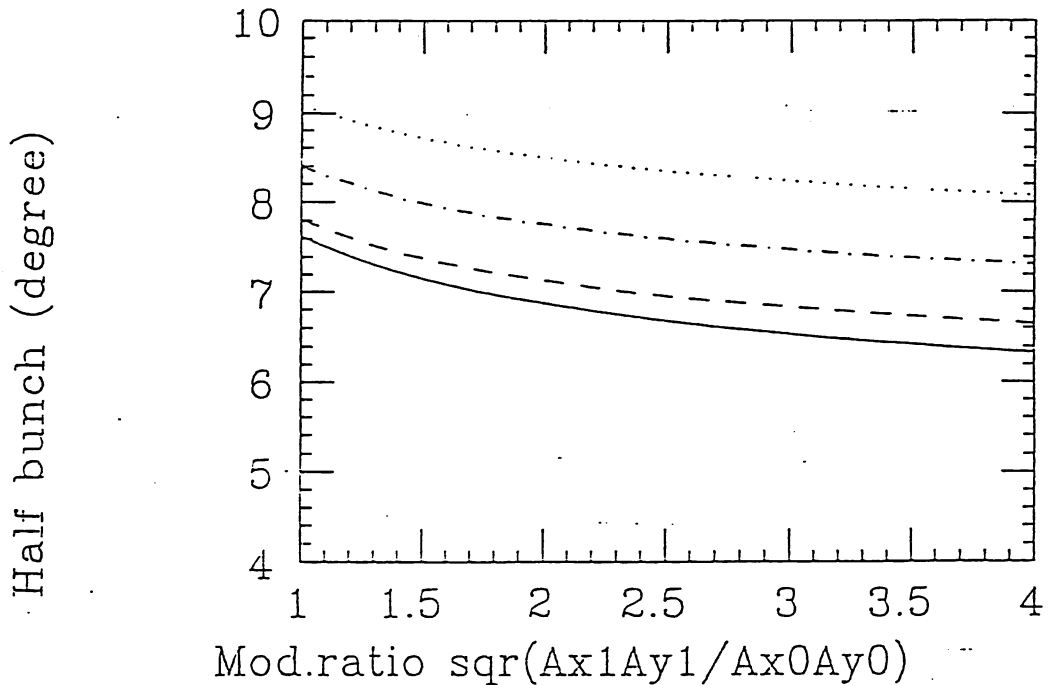


Fig.15 Half bunch length vs. beam-diameter ratio between at the exit and the entrance and output energy from DTL linac. I=200mA. Stable phase=-30. Injection half beam spread is 30 degrees. From top, 70, 100, 150 and 200 MeV output energy.

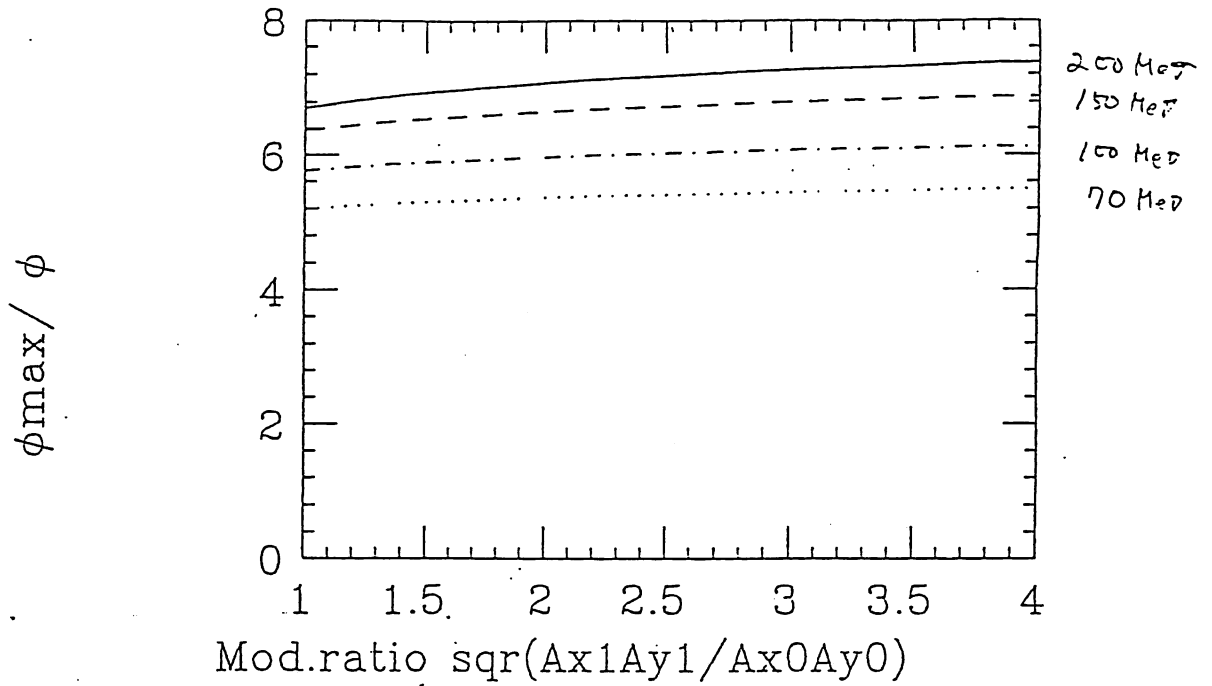


Fig.16 Phase-tolerance at the exit of DTL vs. beam-diameter ratio and output energy. $I=20$ mA. Stable phase = -30 . Injection half beam spread is 30 degrees.

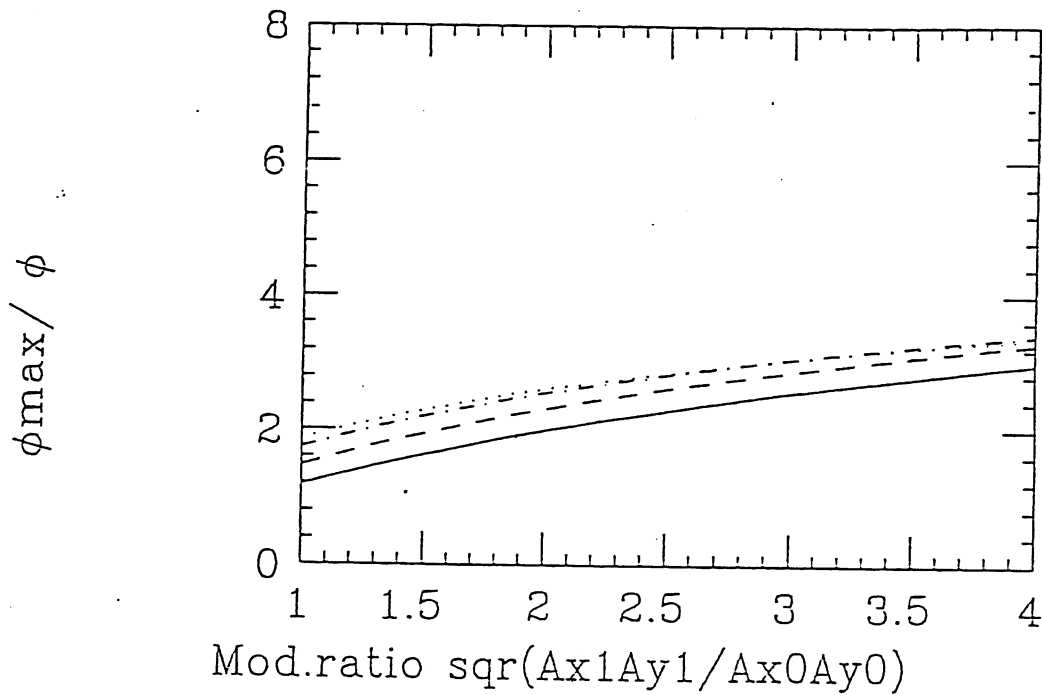


Fig.17 Phase-tolerance at the exit of DTL vs. beam-diameter ratio and output energy. $I=200$ mA. Stable phase = -30 . Injection half beam spread is 30 degrees.

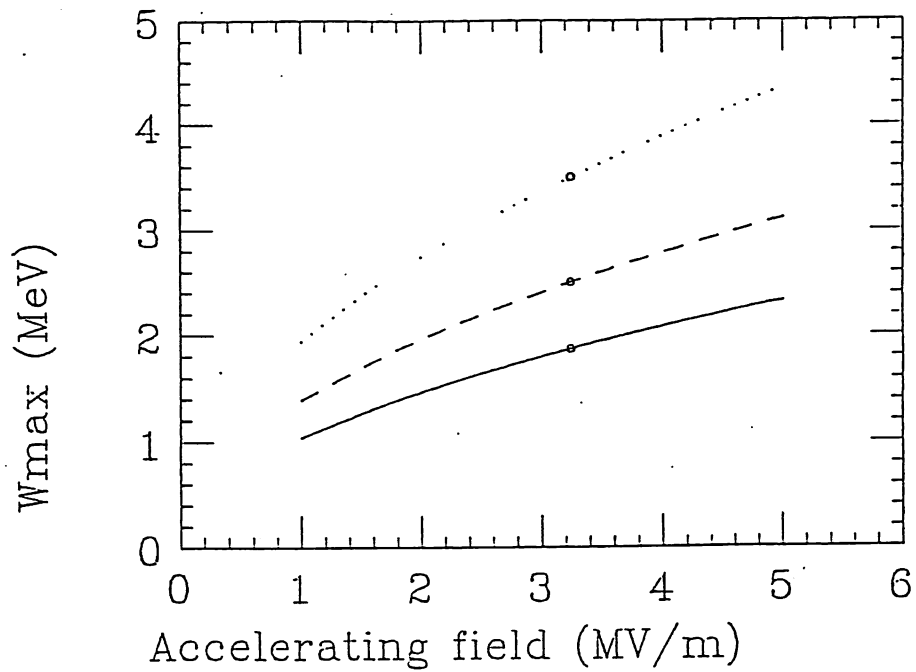


Fig.18 Energy acceptance in CCL vs. accelerating field. $f(\text{CCL})=400$ MHz. From top, 150,100 and 70 MeV injection.

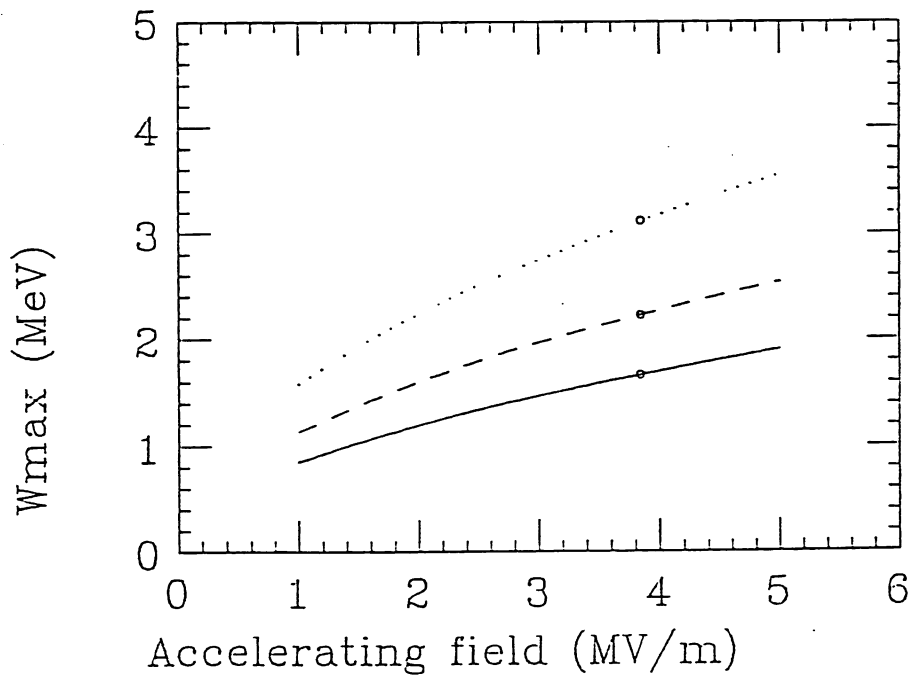


Fig.19 Energy acceptance in CCL vs. accelerating field. $f(\text{CCL})=600$ MHz. From top, 150,100 and 70 MeV injection.

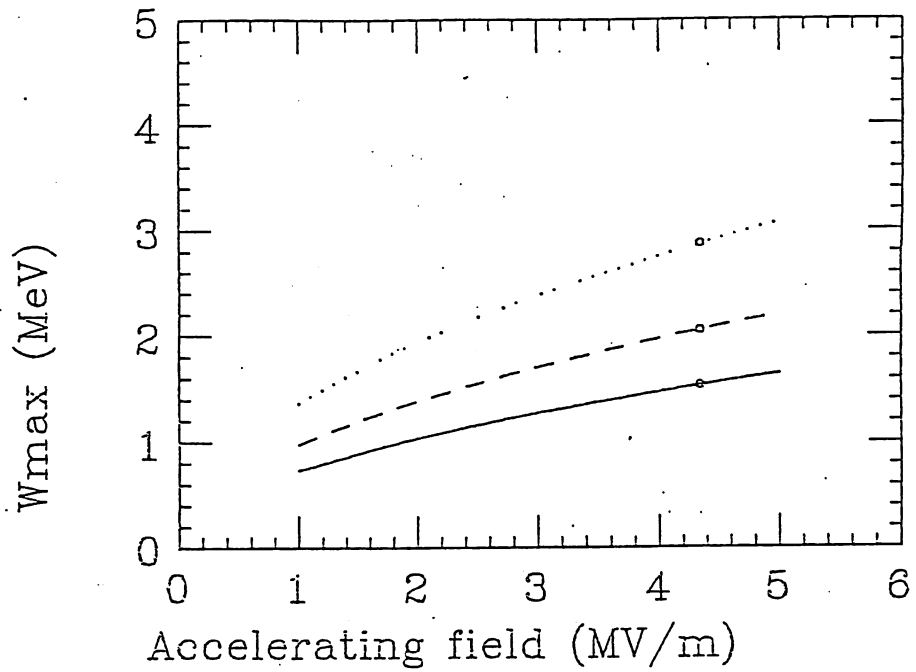


Fig.20 Energy acceptance in CCL vs. accelerating field. $f(\text{CCL})=800$ MHz. From top, 150,100 and 70 MeV injection.

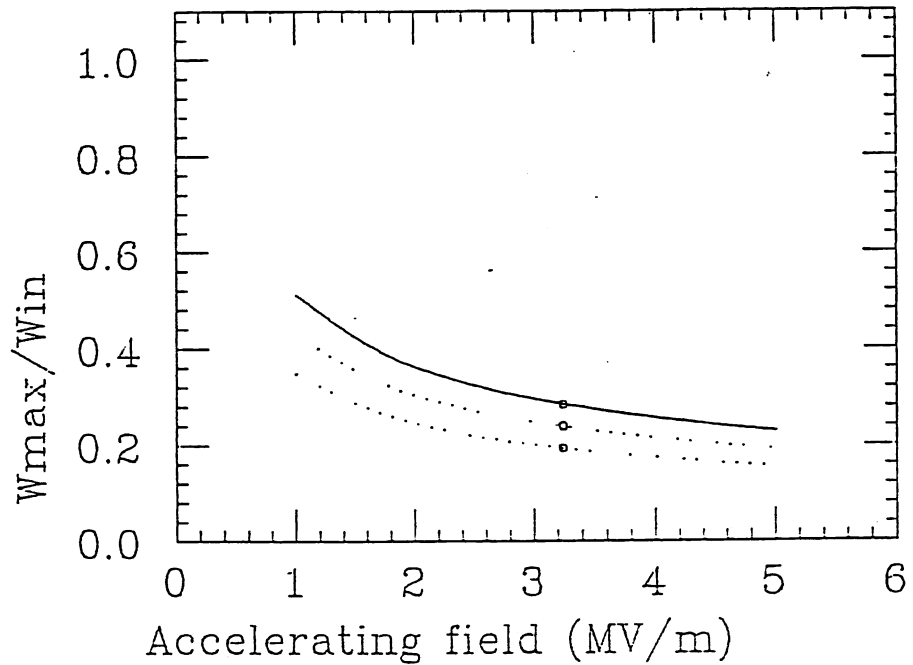


Fig.21 Ratio of W_{beam}/W_{max} in CCL vs. accelerating field. $f(\text{CCL})=400$ MHz. From top, 70,100 and 150 MeV injection.

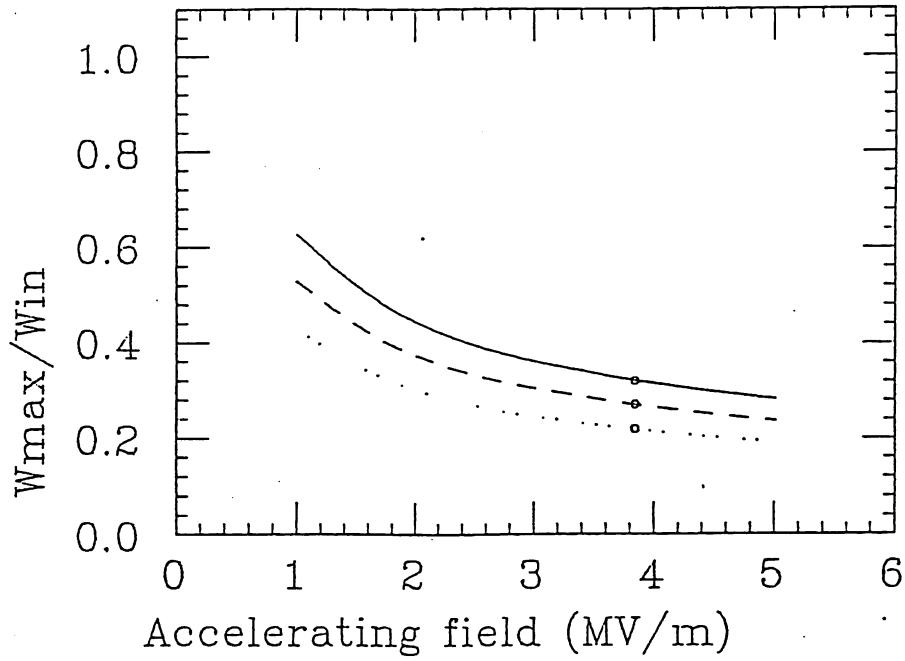


Fig.22 Ratio of W_{beam}/W_{max} in CCL vs. accelerating field. $f(CCL)=600$ MHz. From top, 70,100 and 150 MeV injection.

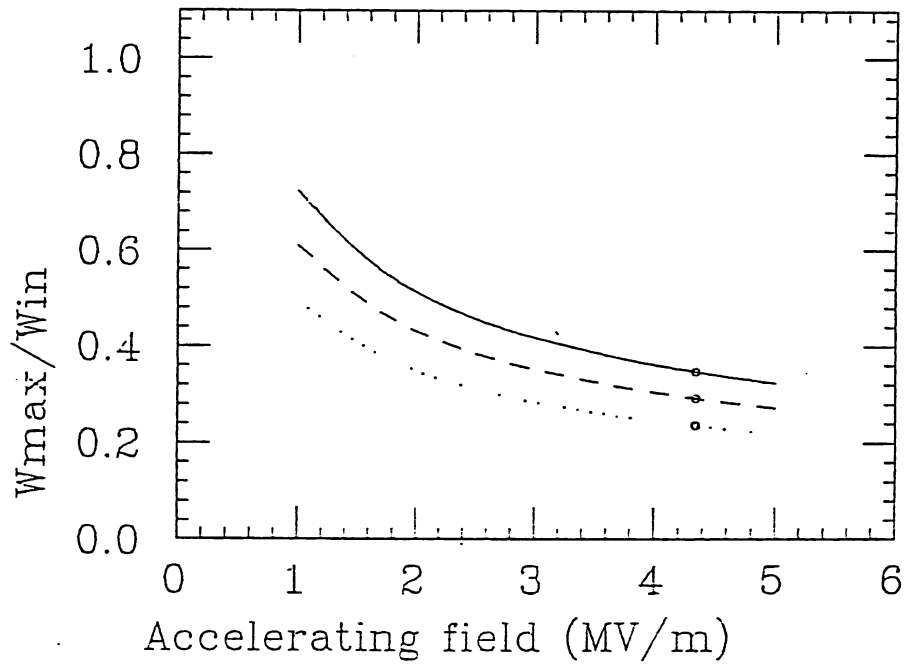


Fig.23 Ratio of W_{beam}/W_{max} in CCL vs. accelerating field. $f(CCL)=800$ MHz. From top, 70,100 and 150 MeV injection.

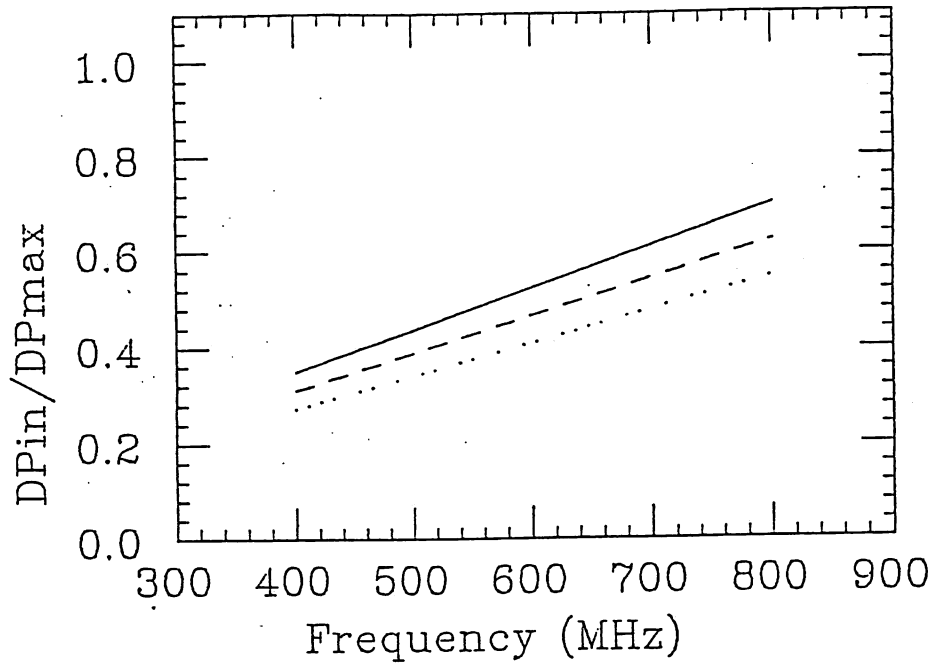


Fig.24 Ratio of Dphi-beam/Dphi in CCL vs. frequency. DTL frequency is 200 MHz. Stable phase is -30 degrees.

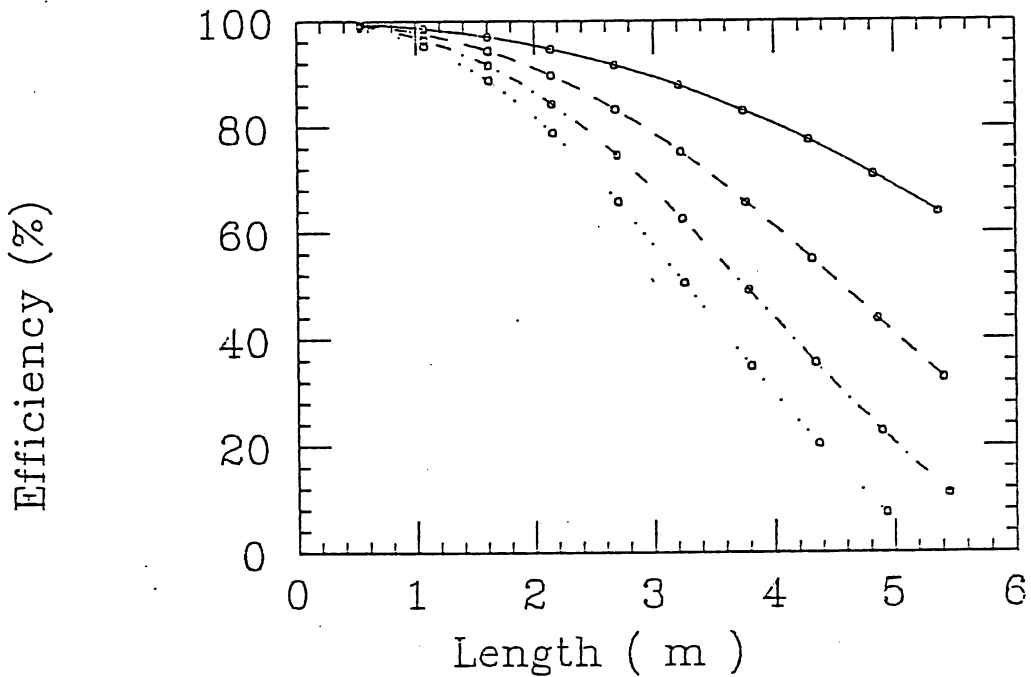


Fig.25 Accelerating efficiency of const-beta structure of 600 MHz-CCL vs. structure length. Circle means each five cells. Injection energy is 100 MeV. From top, accelerating field of 1,2,3 and 4 MV/m.

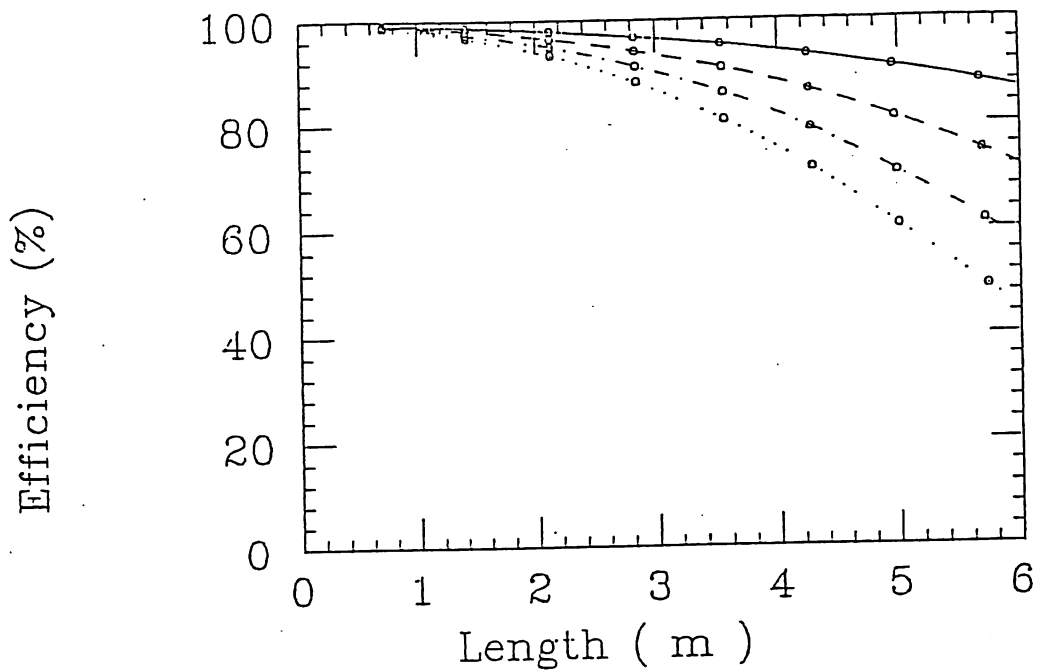


Fig.26 Accelerating efficiency of const-beta structure of 600 MHz-CCL vs. structure length. Circle means each five cells. Injection energy is 200 MeV. From top, accelerating field of 1,2,3 and 4 MV/m.

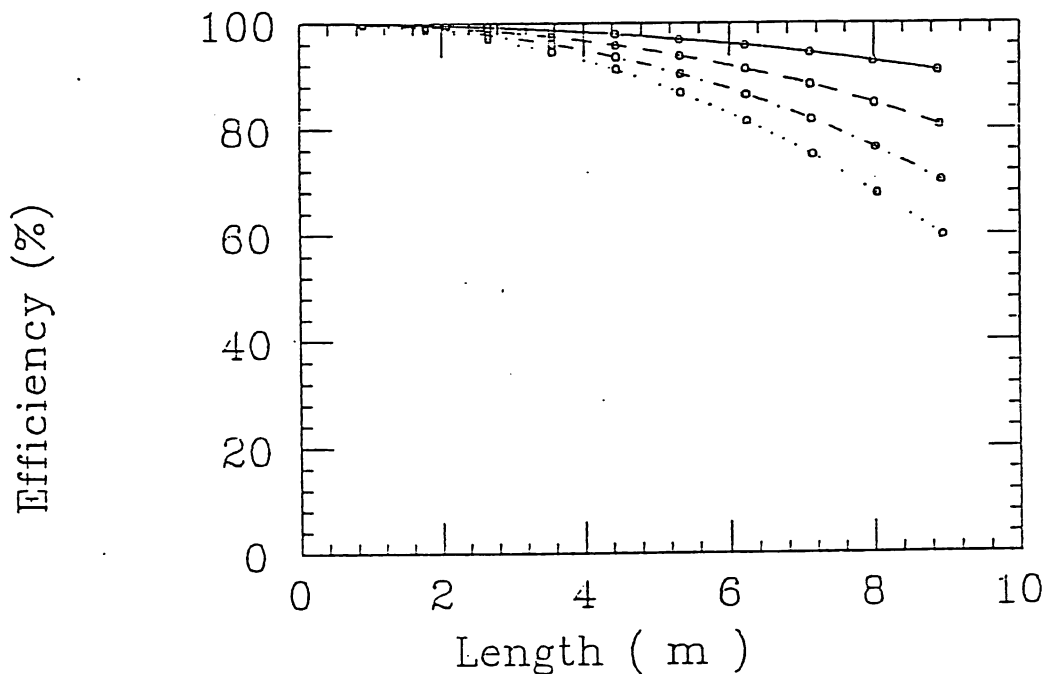


Fig.27 Accelerating efficiency of const-beta structure of 600 MHz-CCL vs. structure length. Circle means each five cells. Injection energy is 400 MeV. From top, accelerating field of 1,2,3 and 4 MV/m.

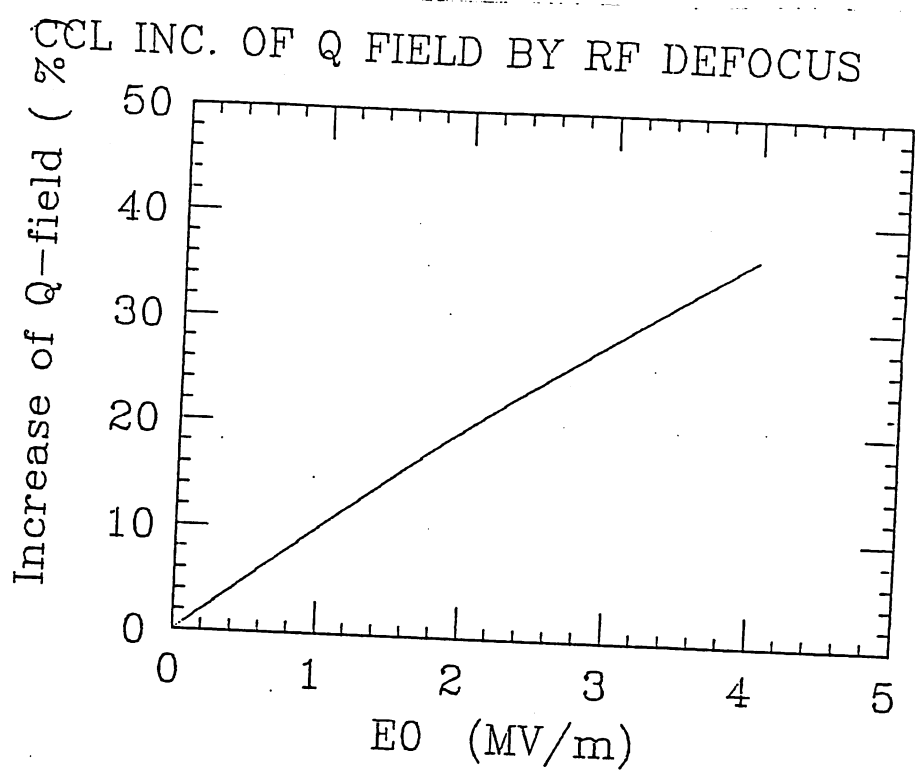


Fig.28 Increase of Q-magnet strength due to rf defocusing.

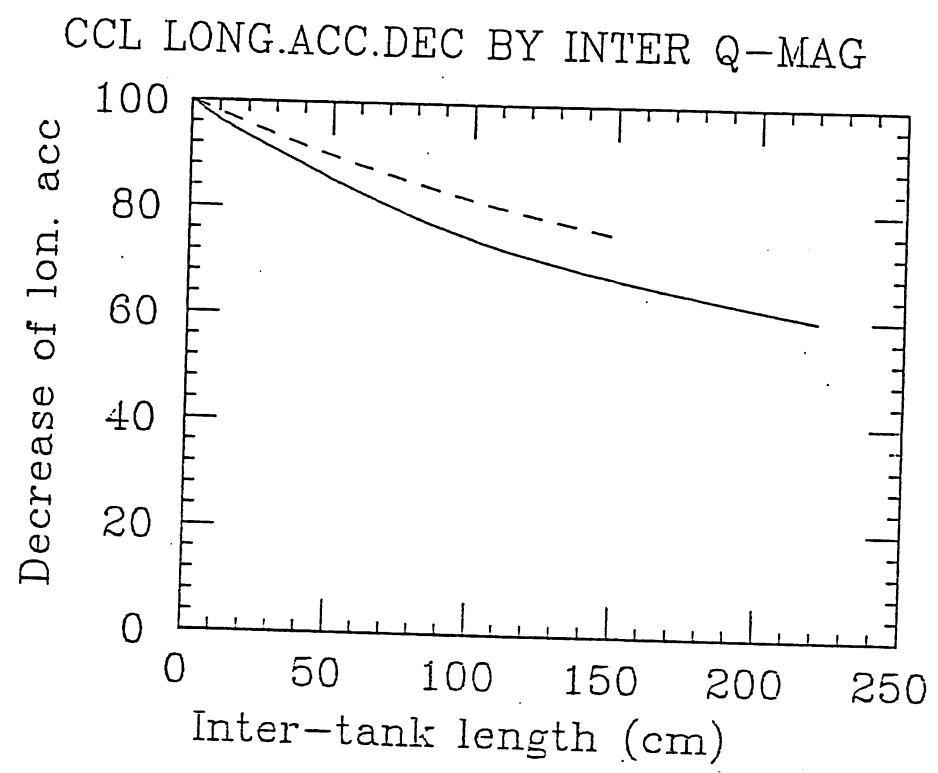


Fig.29 Decrease of longitudinal acceptance due to inter-tank spaces.
 Solid line ---> 3.0 MV/m, 938 cells, 96 tanks, tank length=1.6m.
 Dashed line --> 3.3 MV/m, 1784 cells, 136 tanks, tank length=2.25m.

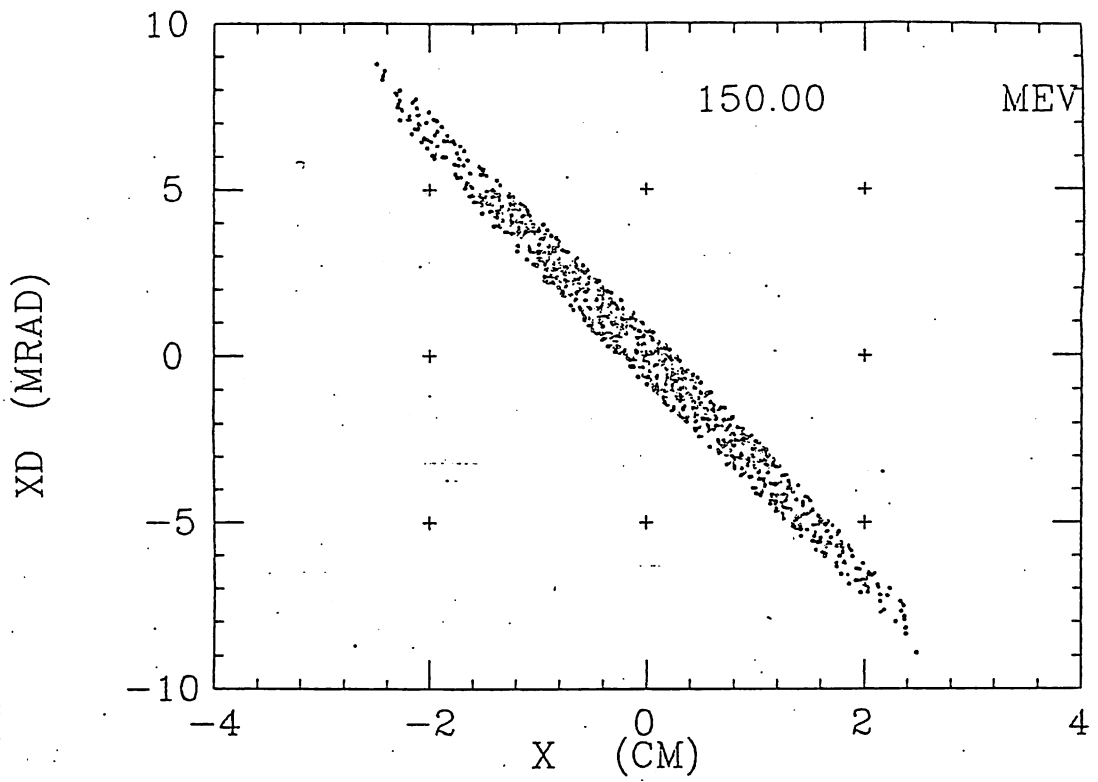


Fig.31 a) Transverse acceptance of CCL at the entrance.

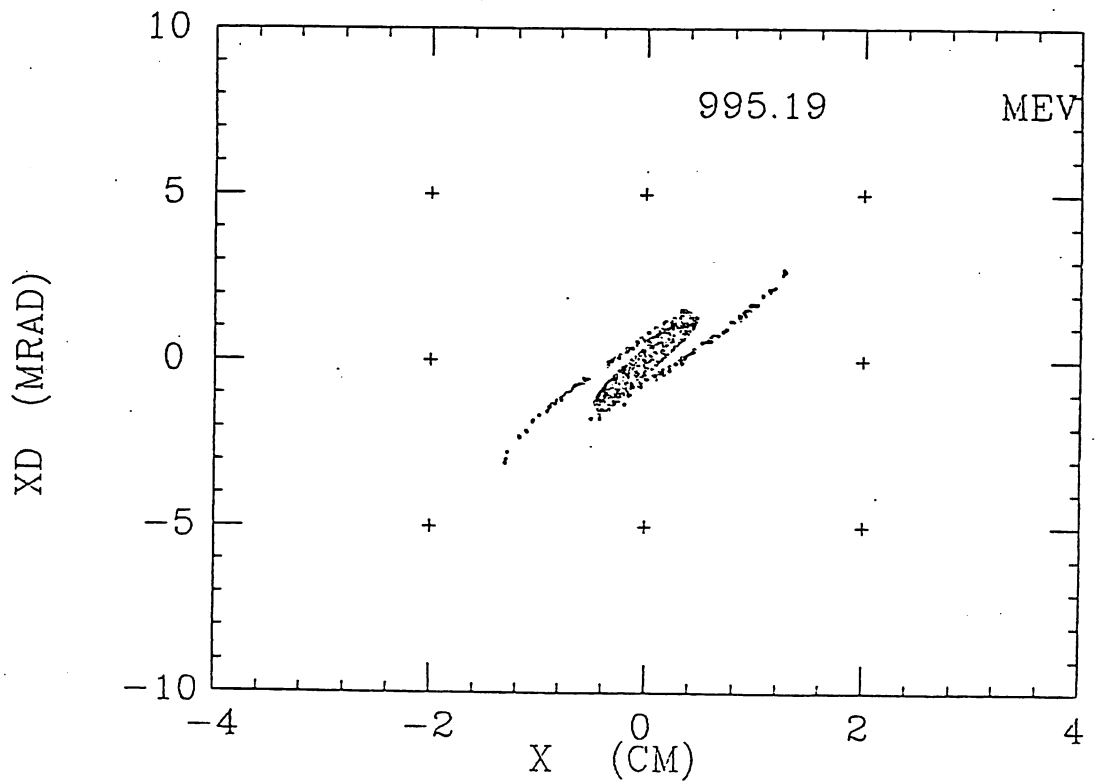


Fig.31 b) Transverse acceptance of CCL at the exit.

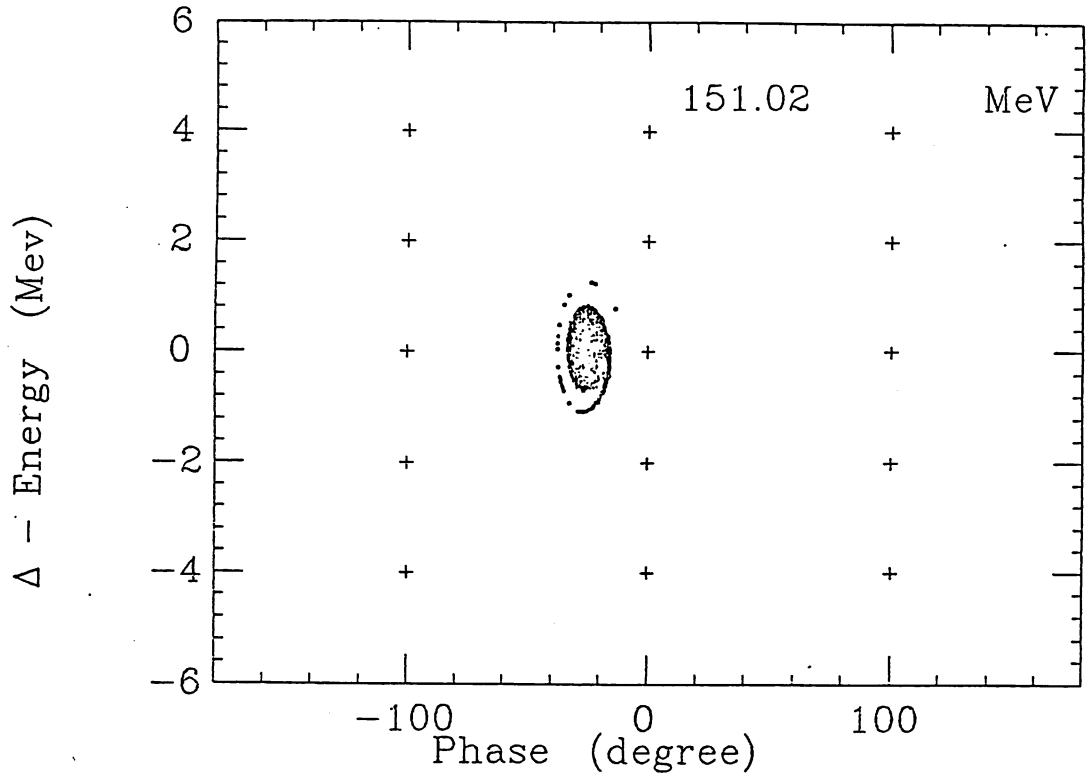


Fig.32 DTL output beam before transition.

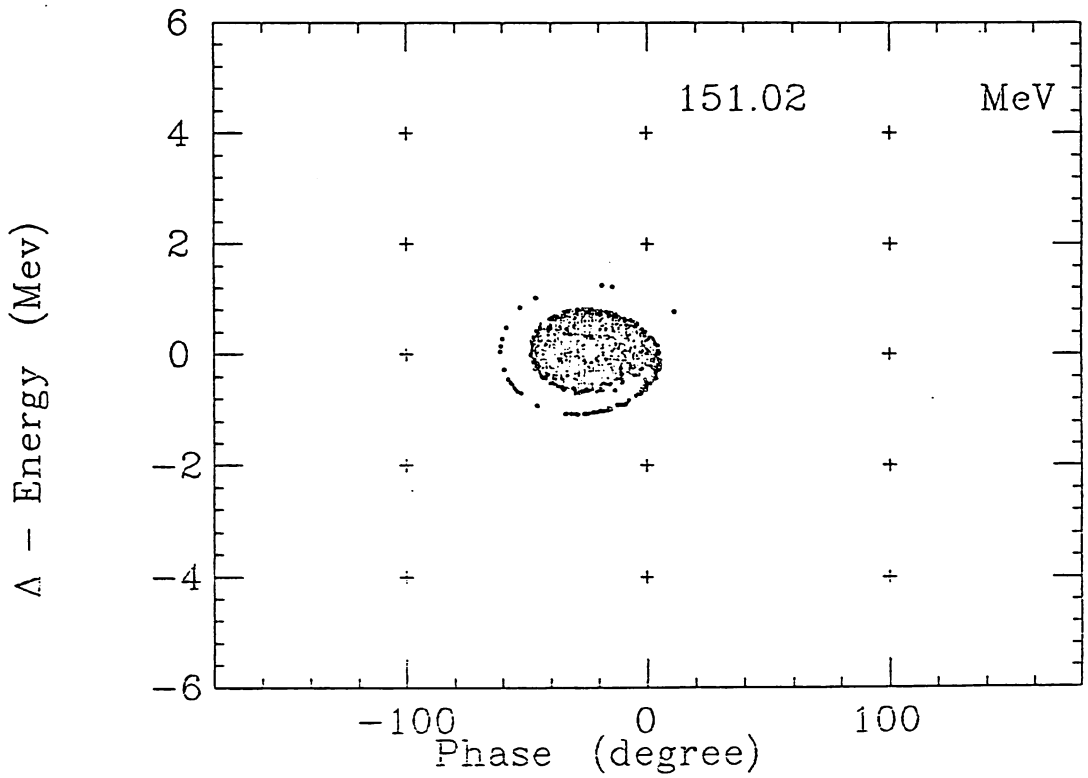


Fig.33 DTL output beam after transition.

Emittance of transverse motion cell# 195

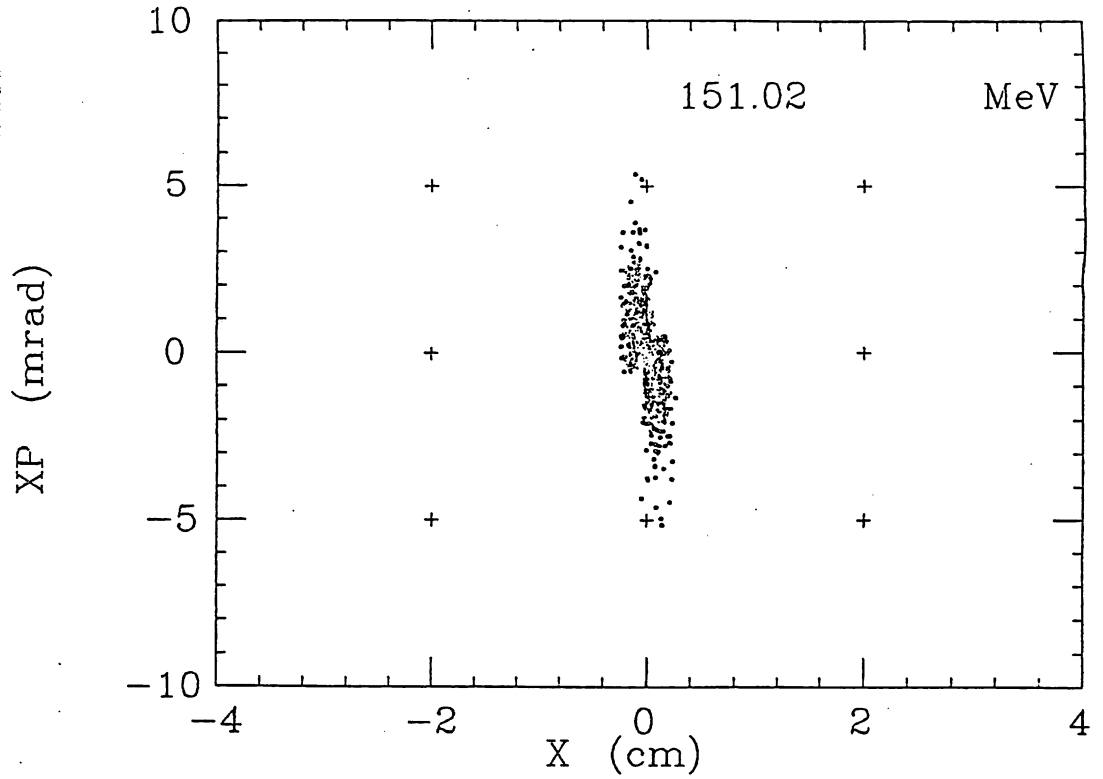


Fig.34 DTL output beam before transition.

Emittance of transverse motion cell# 195

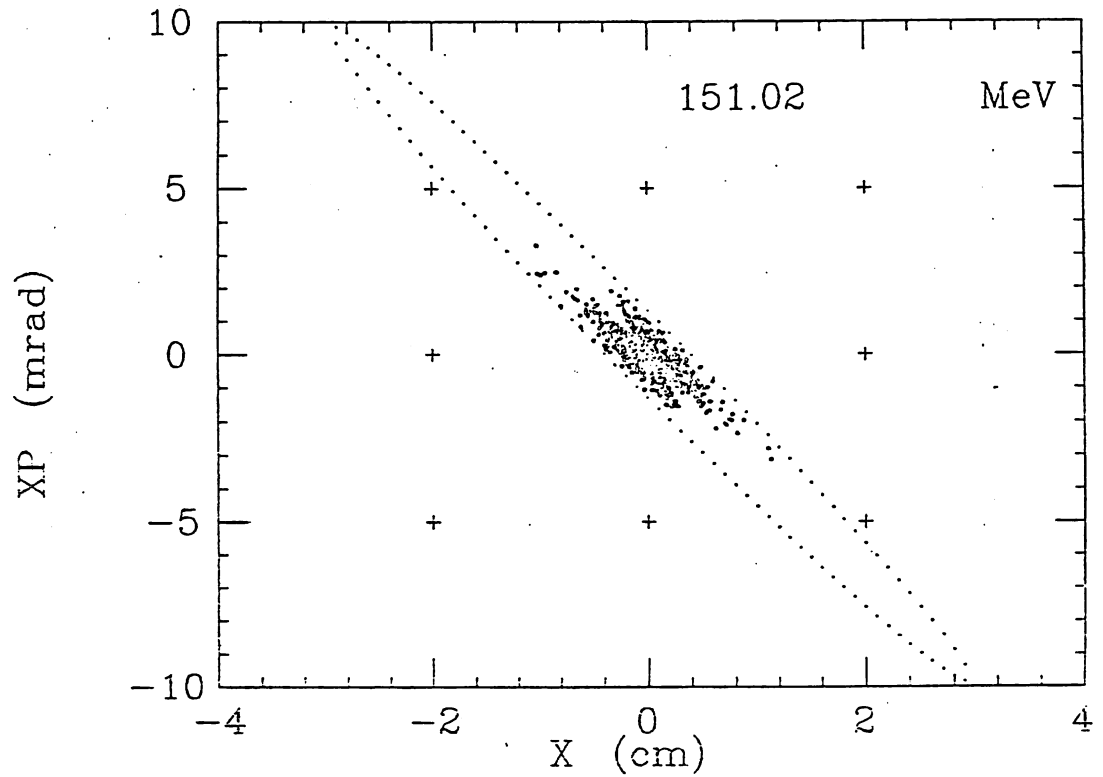


Fig.35 DTL output beam after transition. Dashed curve means CCL acceptance.

Loss ratio (%) Spread(90% full)

CCL CAPTURE & SPREAD BY PR155

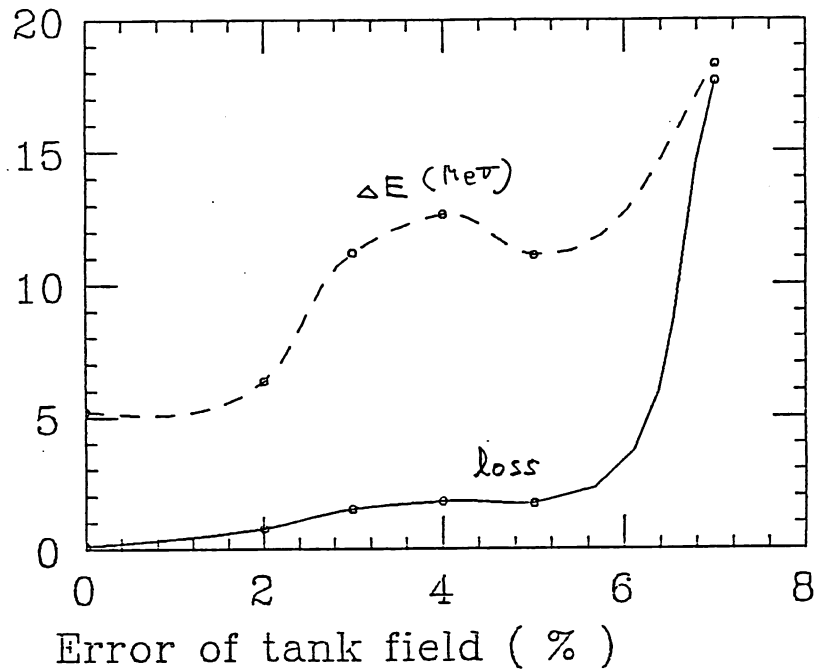


Fig.36 Loss ratio and energy spread vs. tank field error.

CCL SPREAD 2% BY PR155 AND CELL %

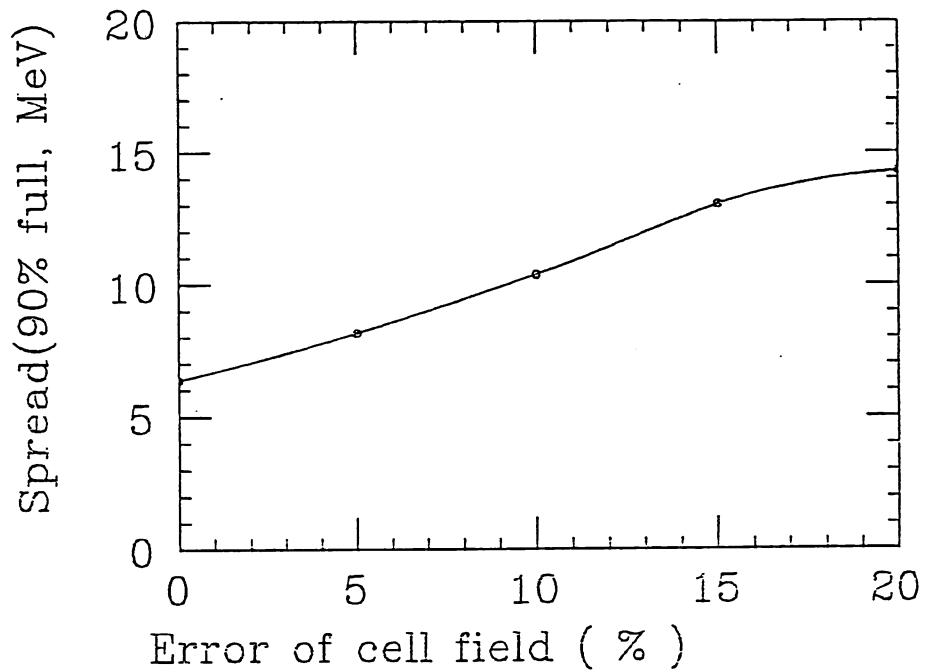
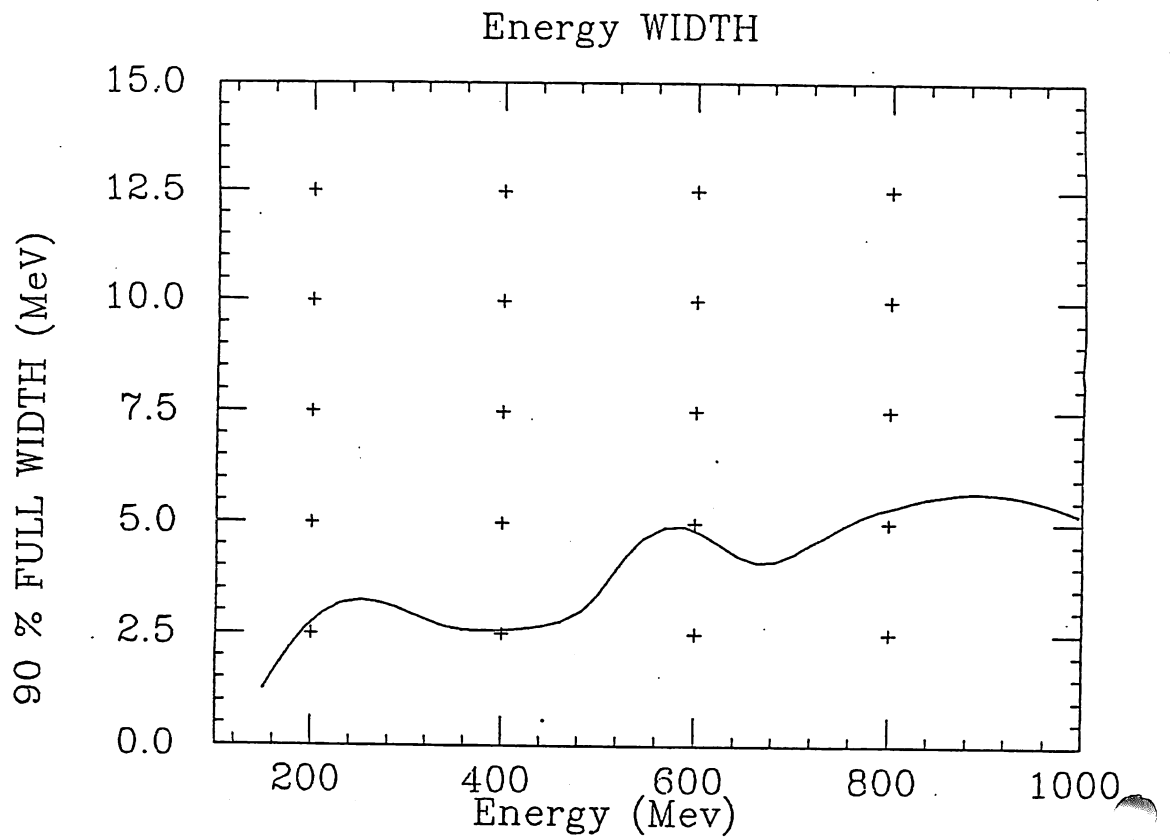


Fig.37 Energy spread vs. cell field error.

(A)



(B)

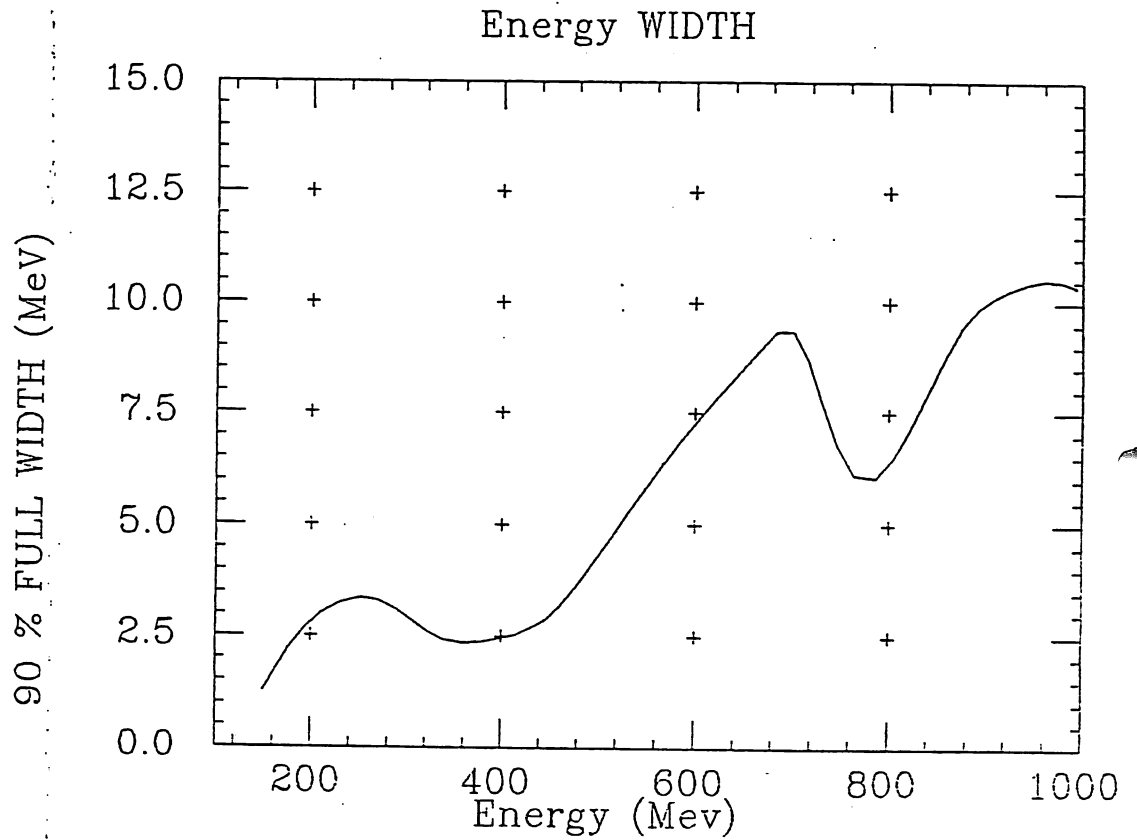
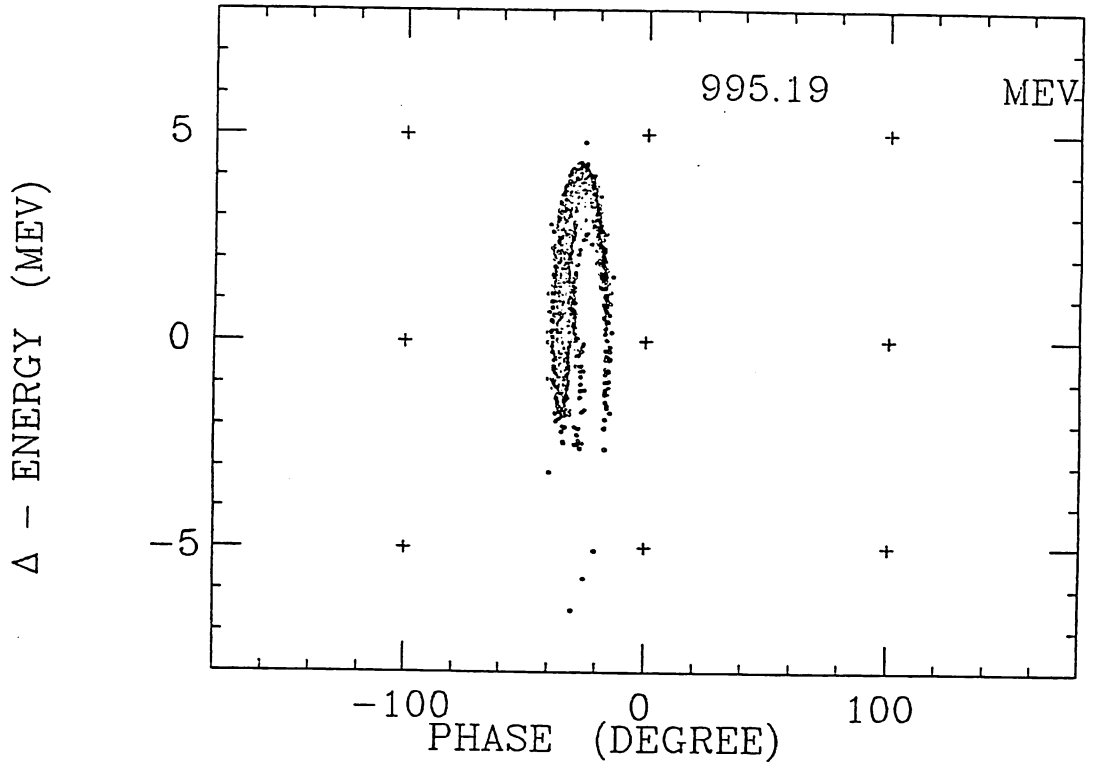


Fig.38 Variation of energy spread in CCL.

A. No error is considered.

B. Error of (tank=2,cell=10) is considered.

(A)



(B)

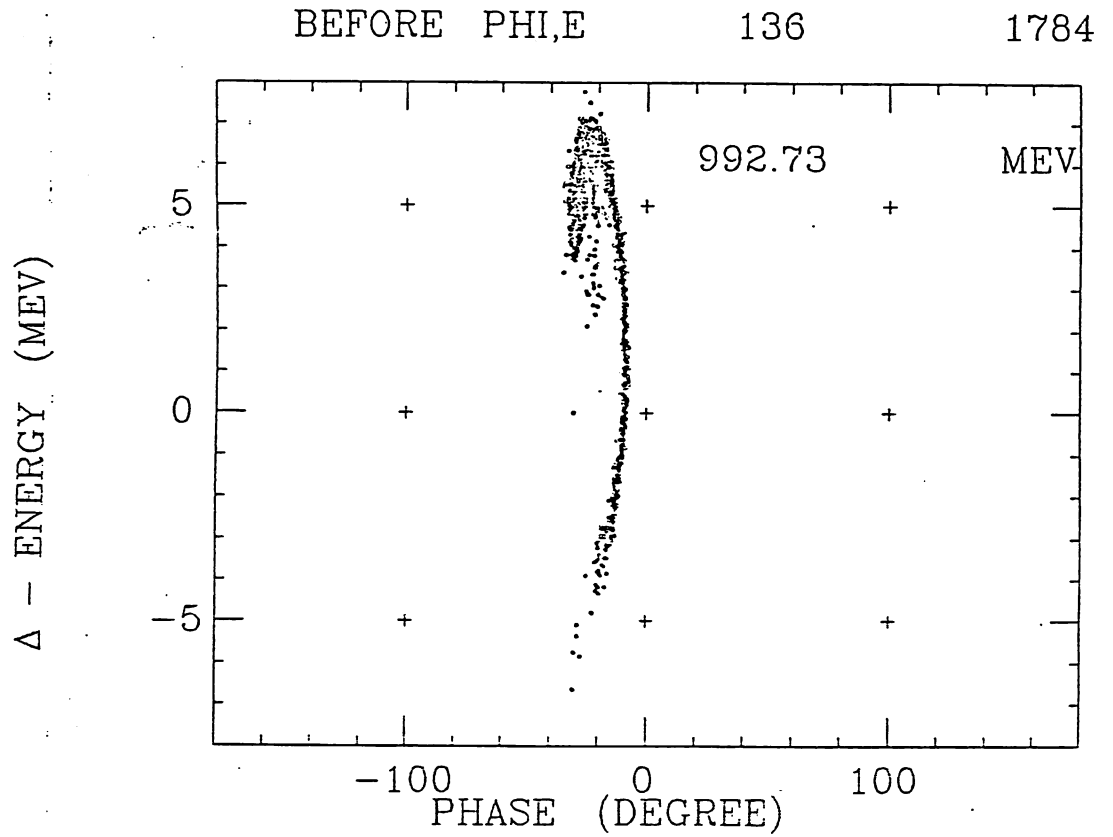
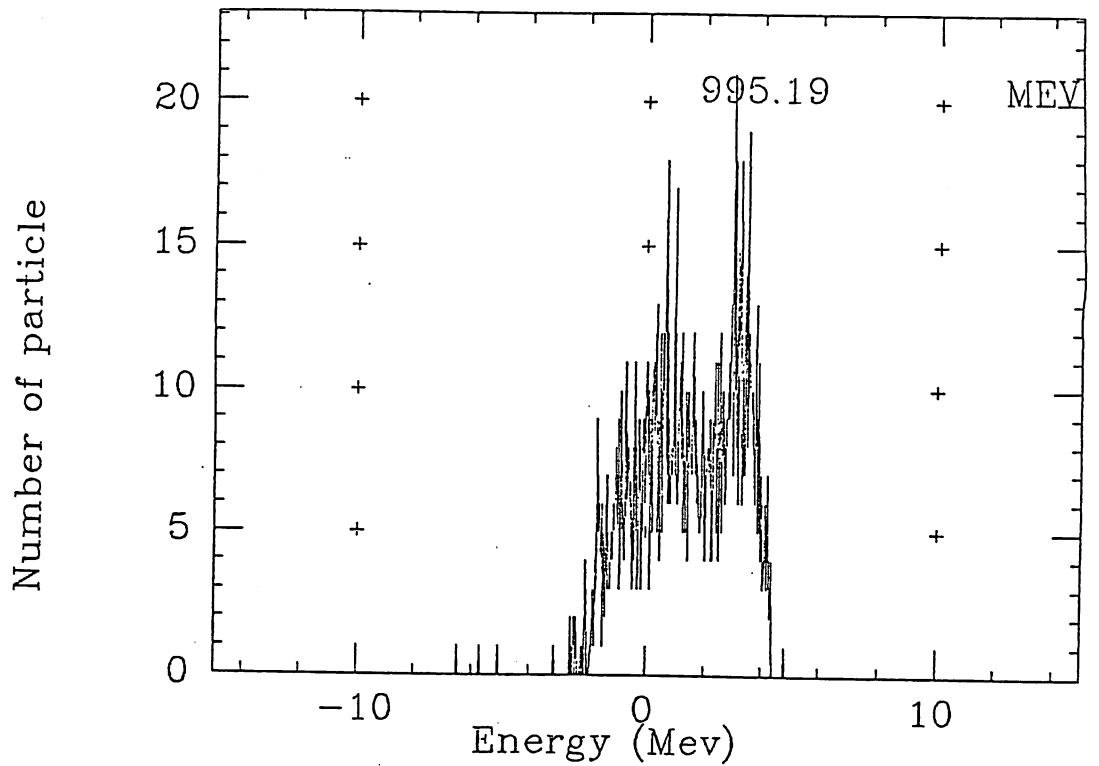


Fig.39 Longitudinal emittance at the CCL exit.

A. No error is considered.

B. Error of (tank=2,cell=10) is considered.

(A)



(B)

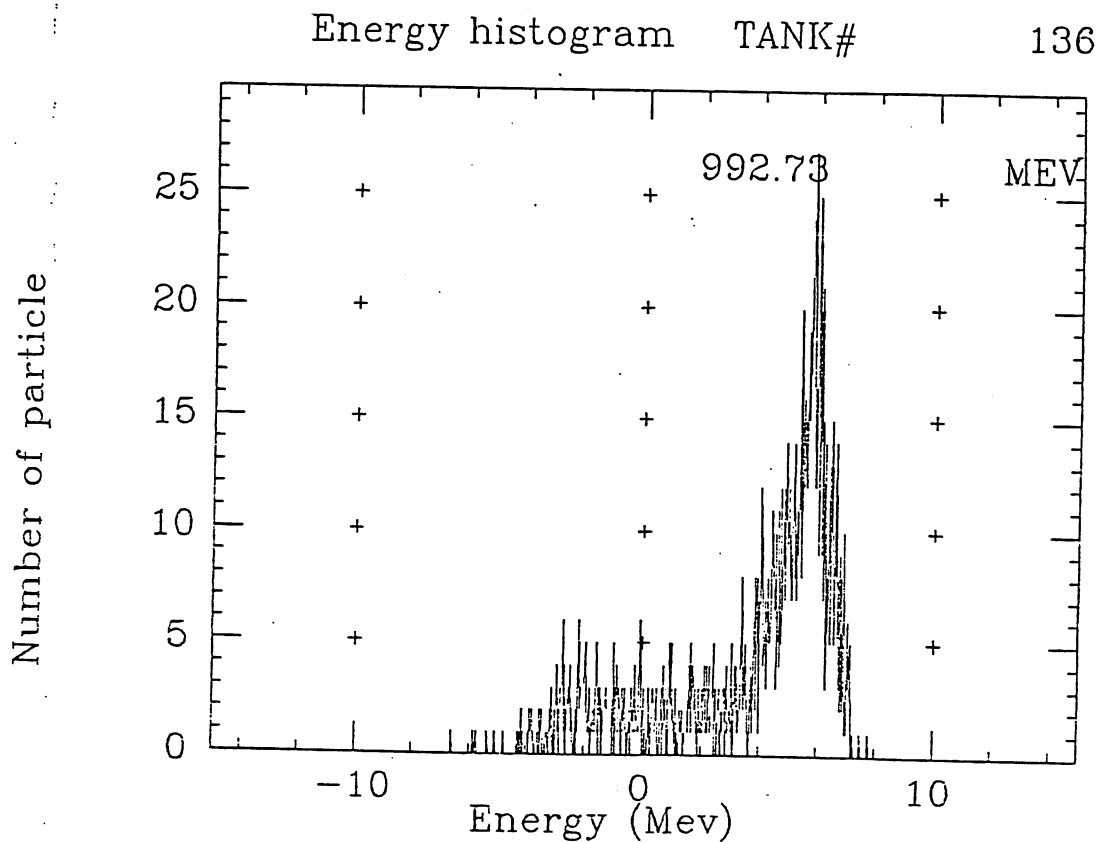
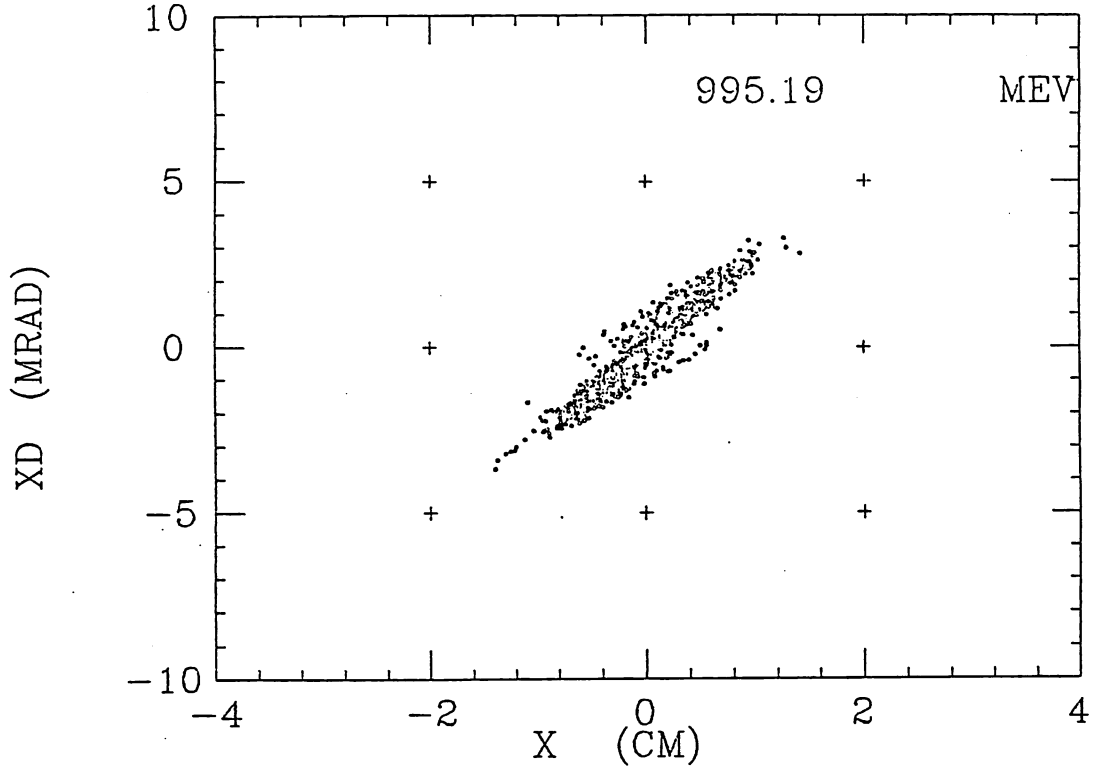


Fig.40 Energy spread at the CCL exit.

A. No error is considered.

B. Error of (tank=2,cell=10) is considered.

(A)



(B)

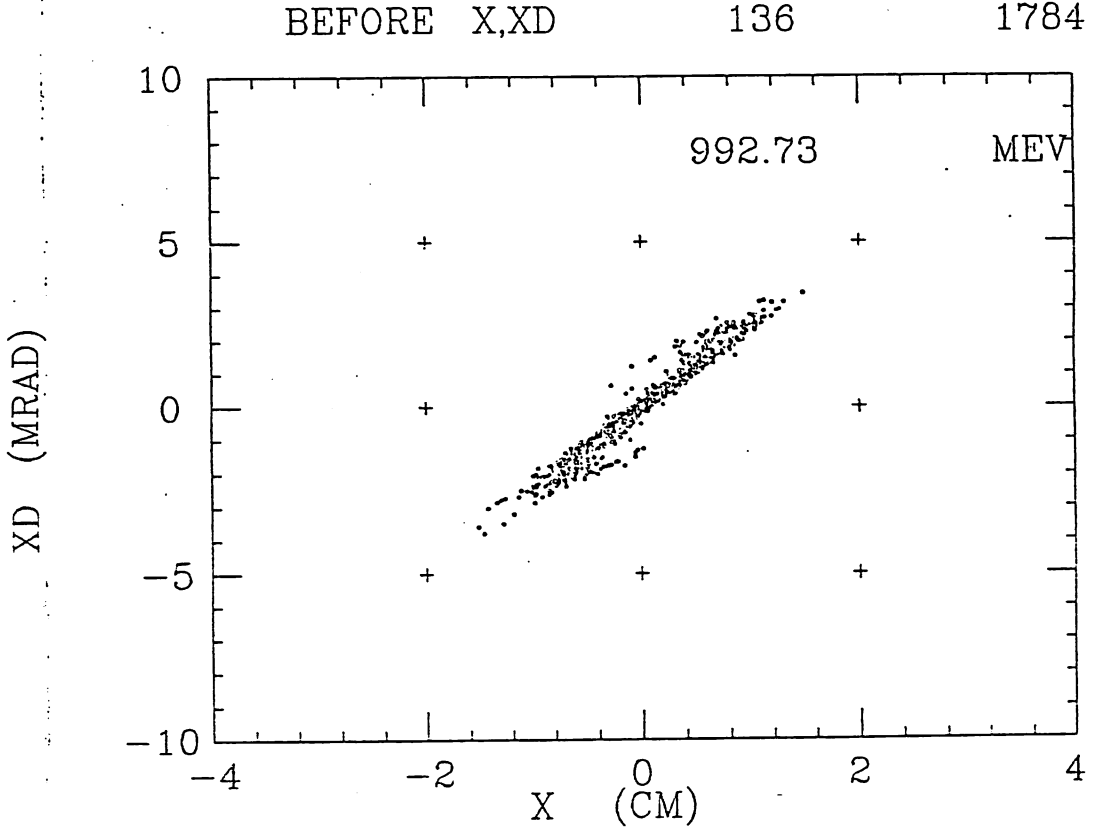


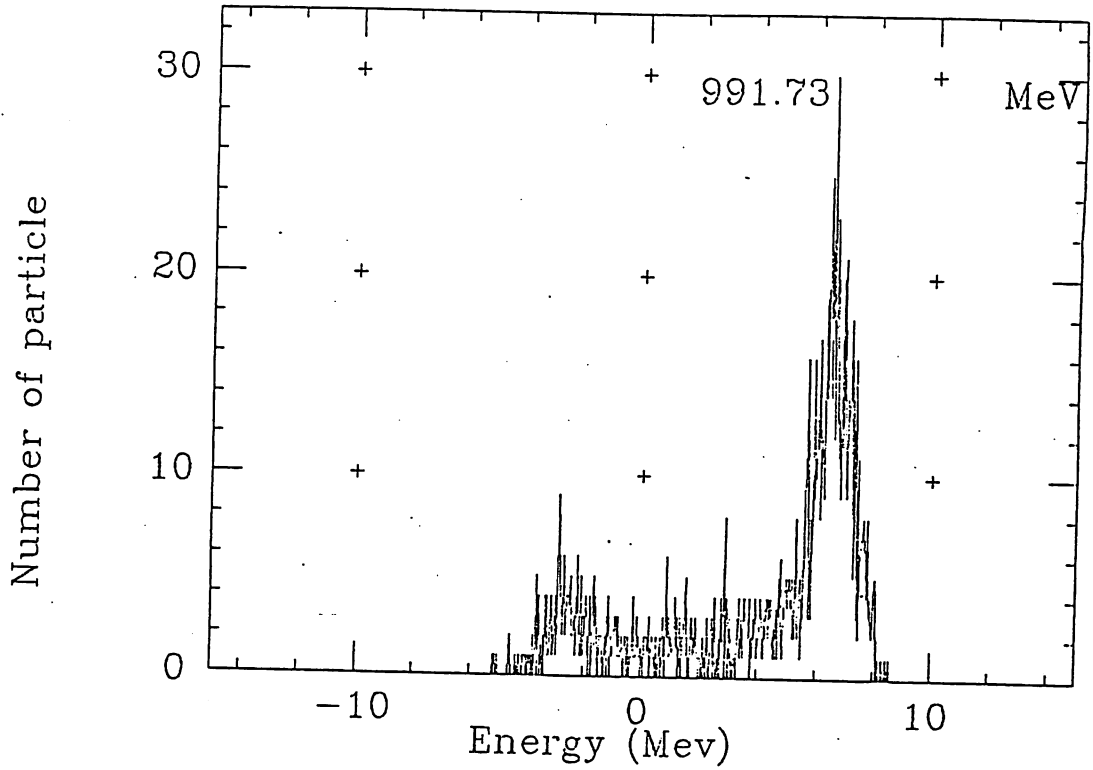
Fig.41 Transverse emittance at the CCL exit.

A. No error is considered.

B. Error of (tank=2,cell=10) is considered.

Energy histogram cell#

1784



Emittance of longitudinal motion cell#

1784

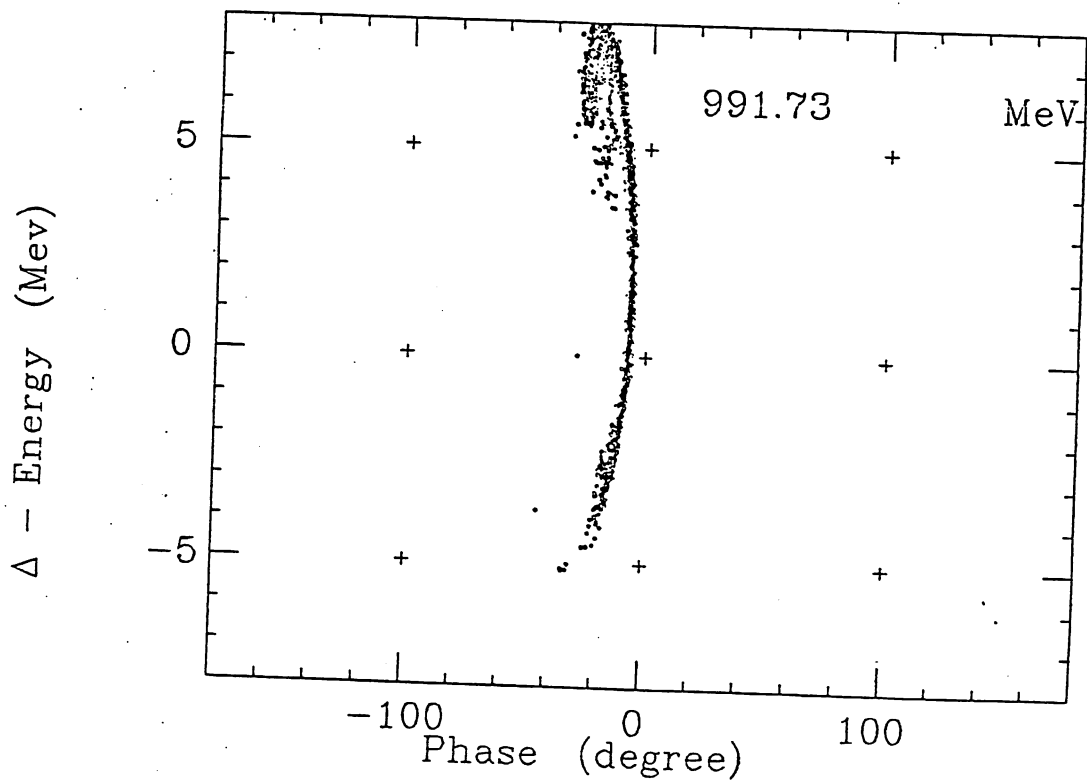


Fig.42 CCL output beam. Error of (tank=2%, cell=15%) is considered.

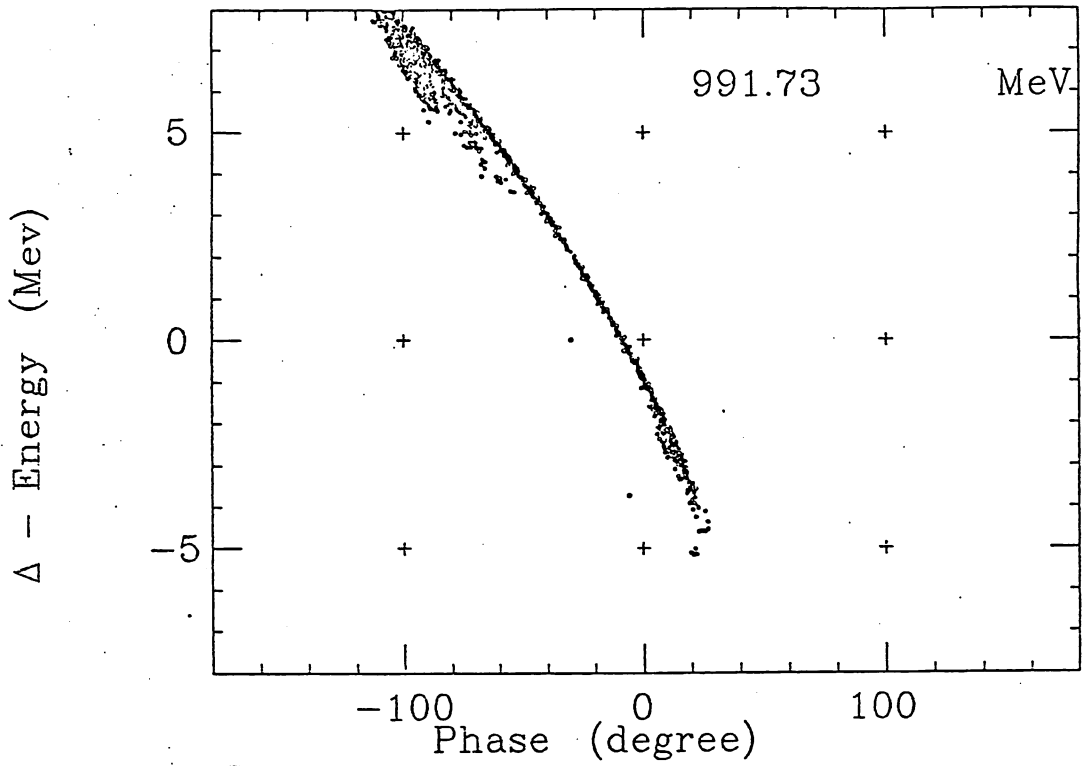


Fig.43 Lengthening of bunch length due to drift space of 80 m.

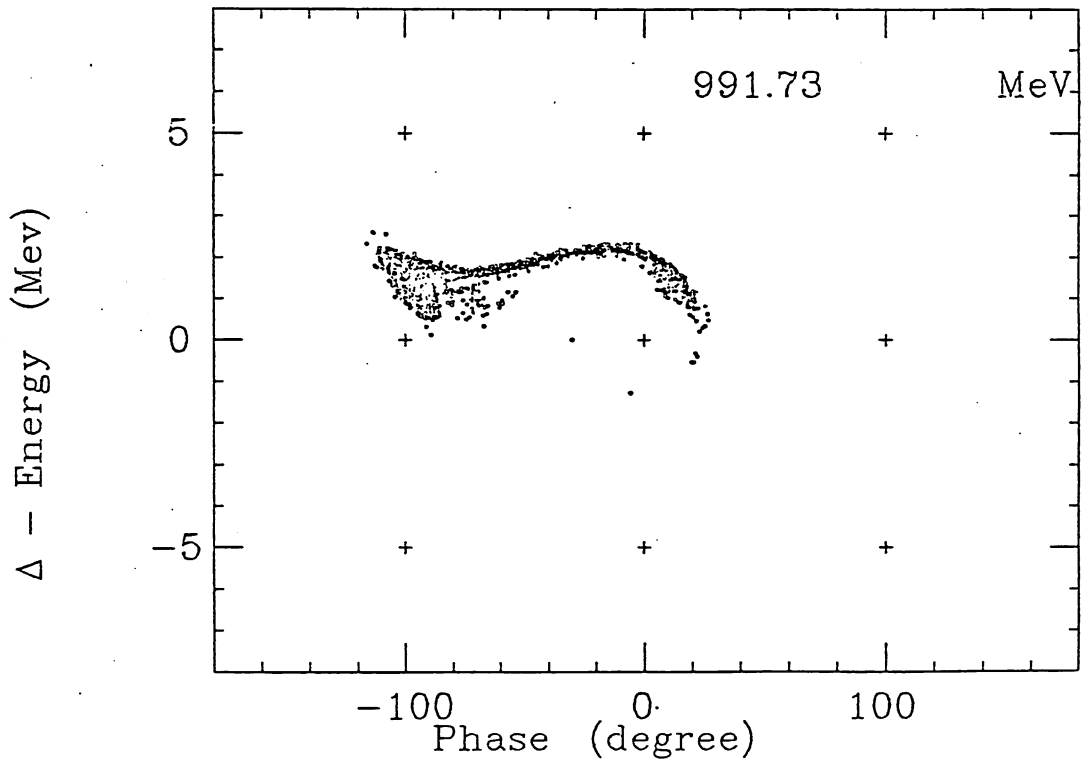


Fig.44 a) Longitudinal emittance after debuncher voltage of 6 MV.

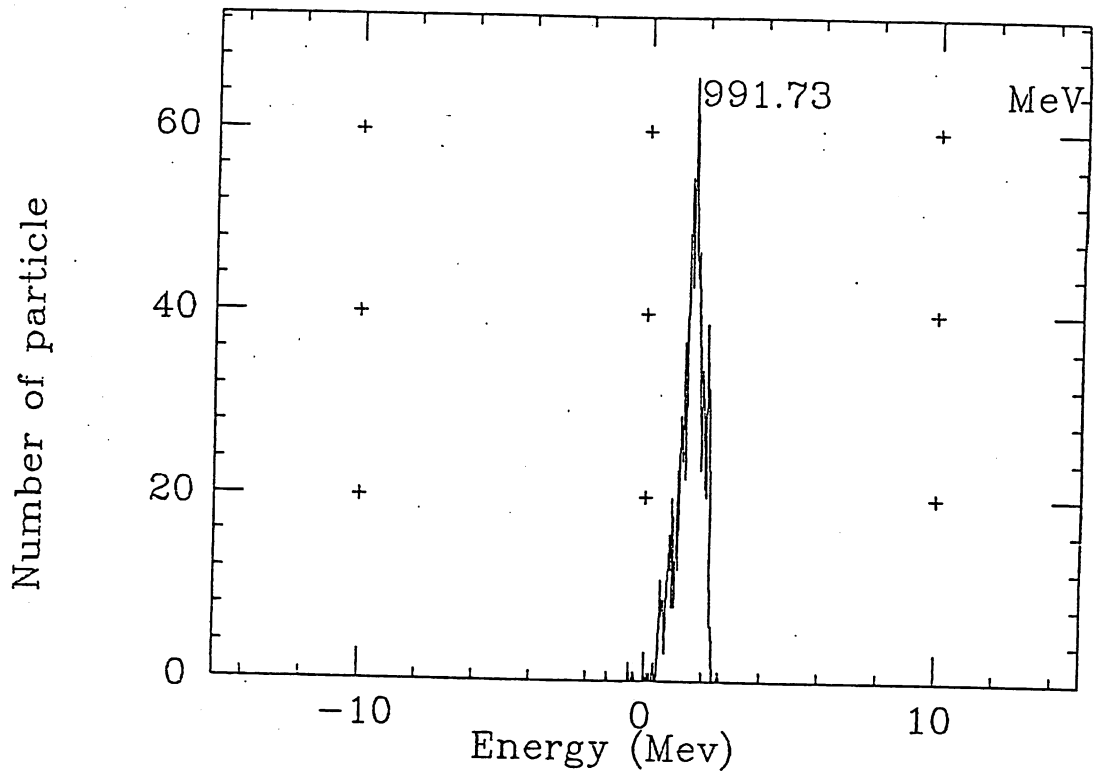


Fig.44 b) Reduced energy spread due to debuncher voltage of 6 MV.

CCL SPREAD BY DEBUNCHER 50, 80 M

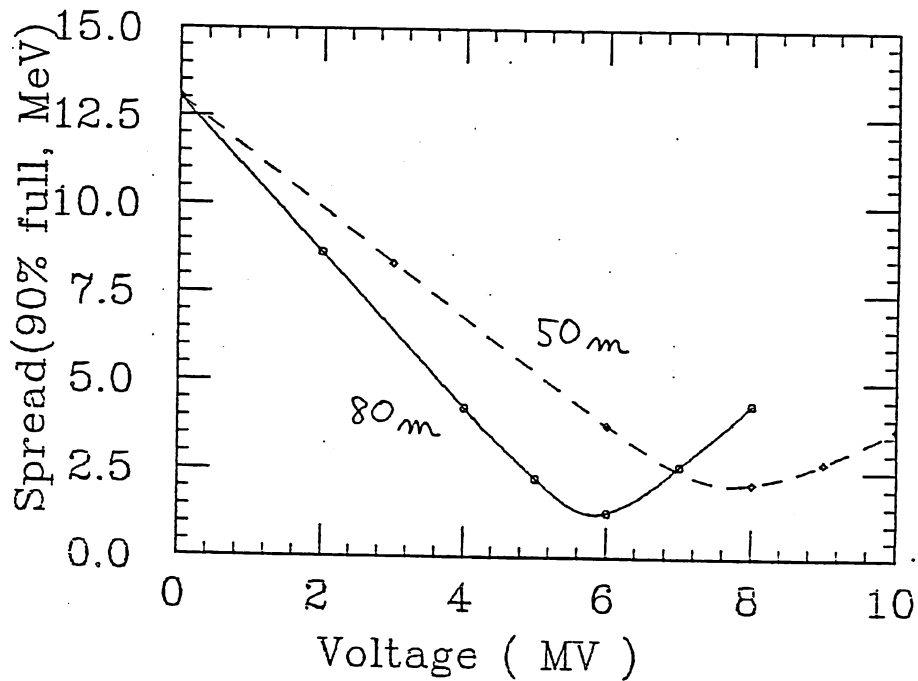


Fig.45 Reduced energy spread vs. debuncher voltage.
 Curved line ----> drift space of 80 m.
 Dashed line ----> drift space of 50 m.