

第 7 章 高 β 加速洞のビームダイナミクス

第7章 高 β 加速空洞のビームダイナミックス

- 1 $\pi/2$ モード加速管の為の計算コード
- 2 定速度型加速管と可変速度型加速管の比較
- 3 加速電場
- 4 収束系
- 5 入射部分の問題
- 6 高周波発散力
- 7 ビームシミュレーション
- 8 まとめ

1 $\pi/2$ モード加速管の為の計算コード

ドリフトチューブリニアック (DTL) で広く使われている加速管の計算コードである PARMILA は、 2π モード加速の為の計算コードであり、安定粒子の速度にあわせてセルの長さを決めるという意味で可変速度加速管を作り出す。この場合には、いわゆる安定粒子は、高周波周期でセルを通過する事になり、文字どおりの安定粒子が存在する。このタイプでは、セル毎にシャントインピーダンスを最適化出来る長所があるが、そのために、セル毎の長さが異なる。一方、作り方が簡単になるので、一つのタンクの中のセルの長さを一定に保つ設計法がありうる。これを定速度型加速管となす。この場合には、タンクの中で加速される粒子は、セルの長さに対応する周期とは異なる通過時間でセルを通過するので、加速位相がセル毎に異なる事になる。可変速度加速管でも、加速位相を変化させる設計法はある。この場合加速ゲインは

$$\Delta W = eE_0 T L \cos \phi$$

で与えられ、 ϕ と L が変化する。定速度型では、 ϕ が変化して、しかも L が一定のままであるので、特に低エネルギー領域で加速による速度の変化が大きいところで著しく加速効率を下げる事になる。その様子を図1に示す。電場が 3.6 MV/m, 入射エネルギーが 150 MeV と 400 MeV の場合について、可変速度型加速管との比で効率を定義している。これは、第5節で述べるようにショートタンクを入射部で使用する一つの理由となっている。ビームのどのエネルギーに対応するセルの長さを、基準セルとして採用するかは、選択の余地があるが、ここでは、ビームの入射エネルギーに相当する長さを基準に選ぶ。従って入射速度を $c\beta_{in}$ とすれば、 $\pi/2$ モードのカップルドキャビティリニアック (CCL) のセルの長さは

$$\beta_0 = (\beta_{in} + \beta_{out}) / 2$$

$$L = \beta_0 \lambda / 2, \quad c = f \lambda$$

添え字の out はセルの出口を表す。加速されて速度 $c\beta$ になった粒子は 1 セル進む間に $\pi(\beta_0 - \beta)/\beta$ の位相のずれを生じ、これは位相振動を除けば加速につれて加算的であるので加速効率をおとす原因となる。

次の問題は、長さ L のセルに、速度が $\Delta\beta$ 異なる粒子が入射した時の加速であるが、これは PARMILA のビームシミュレーション用のサブルーチンに使われている。加速ゲイン $\Delta W = eE_0 T L \cos\phi$ において、 T が次のように変わる。

$$T = T_0 + (dT/d\beta) \Delta\beta$$

$dT/d\beta$ は SUPERFISH により求められている。 $\Delta\beta$ が大きい場合に、この式で良いかチェックした所、入射部のタンクで 10^{-4} の精度で一致するので、PARMILA の方法を採用する。

以上縦方向の運動の概略について述べた。横方向の収束法は、第 4 節に述べる 3 種類をいれ、ビームシミュレーションに必要な加速電場のエラーと結果の表示機能を入れて、計算コードを新たに作った。

2 定速度型加速管と可変速度型加速管の比較

同じ入力パラメーターを使って、150 MeV から 1 GeV まで加速する時の定速度型加速管と可変速度型加速管の比較をしてみる。表 1 に結果を示し、図 2、3 に縦方向の位相振動の様子を示す。

表 1 定速度型加速管と可変速度型加速管の比較

	定速度型加速管	可変速度型加速管	
周波数	1200	1200	MHz
加速電場	4	4	MV/m
タンク長さ	310.2	297.4	m
タンク数	152	146	
セル数	3354	3206	
励振電力	86.0	82.2	MW
ϕ_{max}	-58.8	-30	degree

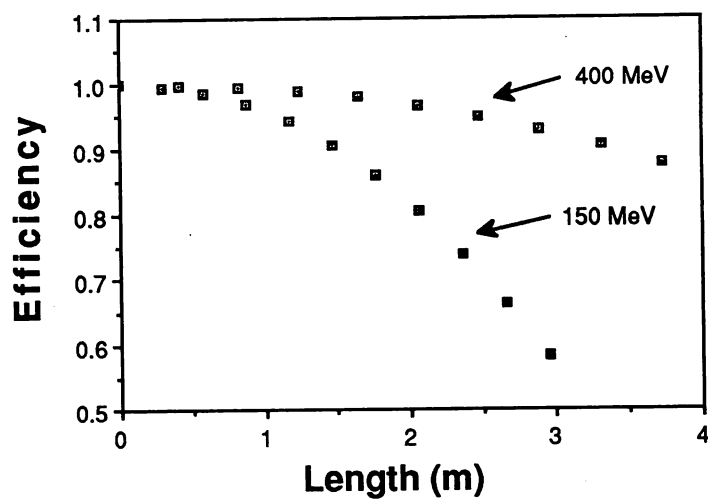


図 1 位相滑りによる加速効率の減少。

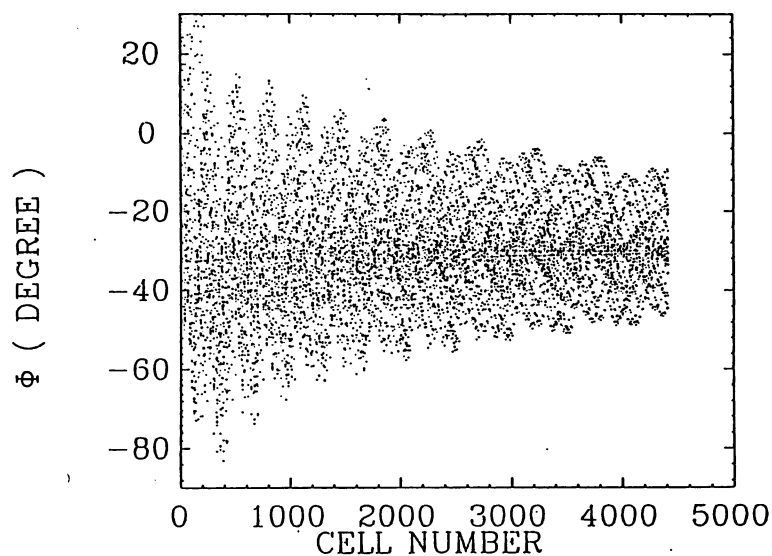


図 2 定速度加速管の縦方向位相振動。

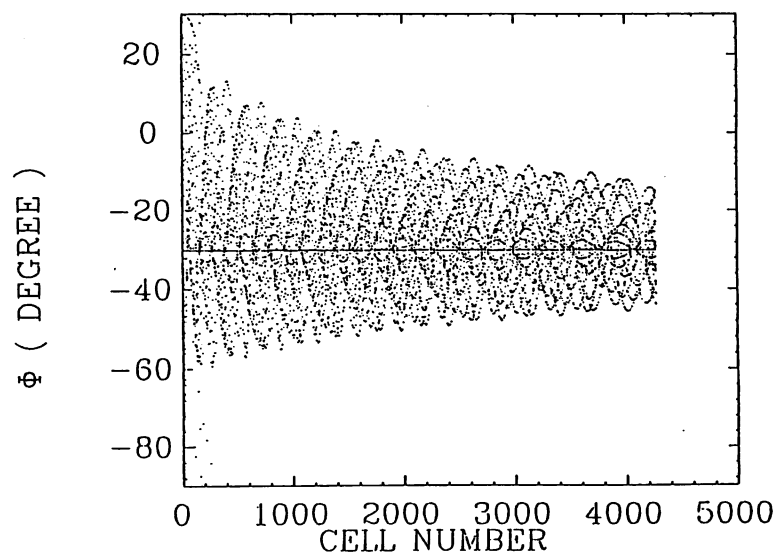


図 3 可変速度加速管の縦方向位相振動。

この比較では、定速度型加速管の入射位相は -30° にとつてあるので、位相の滑りによって、 ϕ はタンク内で -60° 近くまで変化する。この結果、縦方向のアクセプタンスは広がっている。入射位相の絶対値を小さくとれば、位相の滑りを小さい角度までにとどめる事も可能である。定速度型加速管は、つくり安さが圧倒的に簡単になるのに比べて、性能はそれほど落とさずに出来るので、このタイプを選択する。

3 加速電場

第5章1.3節の議論から、電場の強さは平均3.6 MV/m 以上なければいけない。最適な電場は、以下にあげる因子を考慮して決める。第1は DTL のビームを捕獲できるアクセプタンスを持つ事である。第2は空洞の冷却である。第3は利用出来るクライストロンの電力と高周波システムである。第4は第6節で述べる高周波発散力がビームに及ぼす影響である。第5は図1に示した入射部の加速効率の減少である。第6は加速器全体の経費の最適化である。DTL で問題となる放電限界は、周波数 1296 MHz では 32 MV/m なので問題とならないほど高い。この中で、第2項と第3項については、第6章で詳しい議論がなされている。ここではおよそ平均 4 MV/m とした。シャントインピーダンスの分布からわかるように、高いエネルギーになれば、ある加速電場を作るのに必要な高周波電力は減少する。今、横方向の収束の長さをほぼ一定とすれば、加速電場をじょじょに上げていく事によって、タンク毎の励振電力をほぼ一定に保つ事が出来る。これは、大電力クライストロンの出力をデバイダーにより分割して給電する形の高周波システムでは重要な問題となる。そこで入射部で 3.6 MV/m として、4.42 MV/m まで次第に上げるようにする。入射部のアクセプタンスの半幅は 2 MeV となり（第5章9式）、DTL の出力の最大エネルギー幅は、第5章の表1.1から 0.72 MeV となるので十分なアクセプタンスの大きさといえる。

4 収束系

CCL では、空洞の中に収束用の4極磁石を入れられないので、タンクとタンクの間にはドリフトスペースを作り、そこに磁石を置く。したがって、タンクの長さが収束の周期とほぼ同じ事になり、一つのタンクの高周波励振電力の大きさと、縦方向のビームダイナミックスと、横方向のビームダイナミックスがタンク間距離に依存する事になるので、この3者を最適化するように長さを選ばなければいけない。収束系に siglet を使うと、希望するアクセプタンスの大きさを得る為には、収束の周期を小さくしなければいけない。triplet を使うとその為に必要な

な長さが長くなりすぎて、ビームの縦方向のエミッタンスを悪化させる。従って、収束系には doublet を採用する。計算コードでは、以上3種類の収束系を自由に選べるようになっており、利用出来るクライストロン電力が 3 MW として、4つのタンクを同時に励振すると仮定して、ほぼ十分なアクセプタンスが得られる収束系を得た。代表的な長さを図4に示す。収束系の周期は約 2.6 m であり、ドリフトスペースはおよそ 0.7 m である。計算コードの中では、収束の周期長さと、横方向の位相進みと、磁石の配置を与えると、タンクの配置法を含めてすべての長さが決まる。2種類の収束の方法を行ってみた。第1は位相進みを一定にする方法、第2は磁場勾配を一定に保つ方法である。両者の比較を表2に示し、アクセプタンスとエミッタンスを図5に示す。図6に、磁場勾配一定の場合の y 方向のアクセプタンスと対応する加速後のエミッタンスを示す。最適な磁場勾配の変化の方法はまだ検討中であり、磁場勾配一定の方法をここでは選択した。

doublet の場合の一般的な収束の関係式を列挙しておこう。磁石の長さはいずれも同じで L_0 とする。磁石と磁石の間の距離を L_1, L_2 とする。これらは、端面から端面の距離として、 L_2 の中にタンクが入るとする。高周波発散力 ξ を第6節の形で取り入れると、

$$\begin{aligned} \cos \mu &= P \cos \theta \cosh \theta + k(Q + R)/2 * \cos \theta \sinh \theta \\ &\quad - k(Q - R)/2 * \cosh \theta \sin \theta \\ &\quad - k^2 \alpha L_1 L_2 / 2 * \sin \theta \sinh \theta \end{aligned}$$

$$P = 1 + L_2 \xi (L_1 + L_2) / (2Lc)$$

$$Q = L_1 + L_2 + L_2^2 \xi (L_1 + L_2/3) / (2Lc)$$

$$R = L_2 \xi / (k^2 Lc)$$

$$\alpha = 1 + L_2^2 \xi / (6Lc)$$

Lc はセルの長さを表す。

$$\begin{aligned} k \sin \mu \beta_{\max} &= P \cosh \theta \sin \theta + [kQ \cosh \theta + k^2 \alpha L_1 L_2 \sinh \theta] \cos^2(\theta/2) \\ &\quad + k(Q + R)/2 * \sinh \theta \sin \theta + kR \cosh \theta \sin^2(\theta/2) + (3\alpha - 2) * \sin \theta \end{aligned}$$

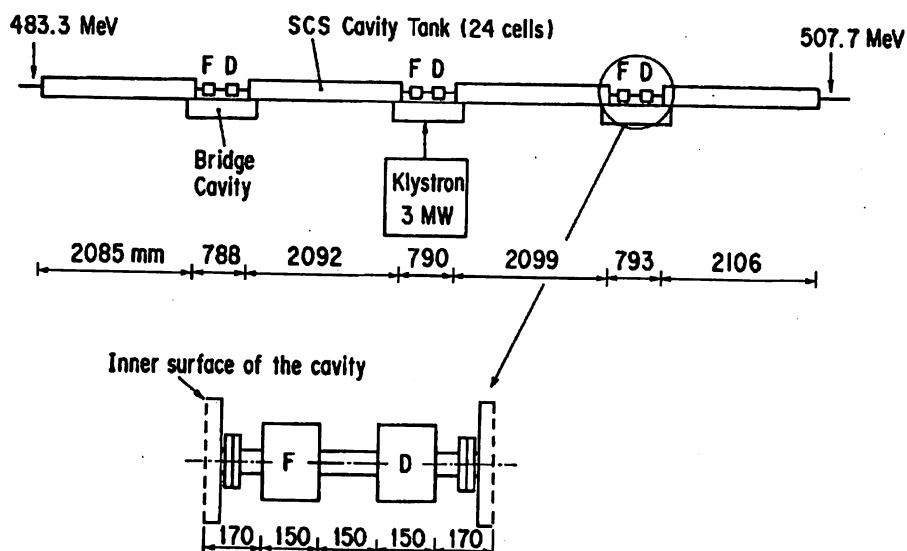
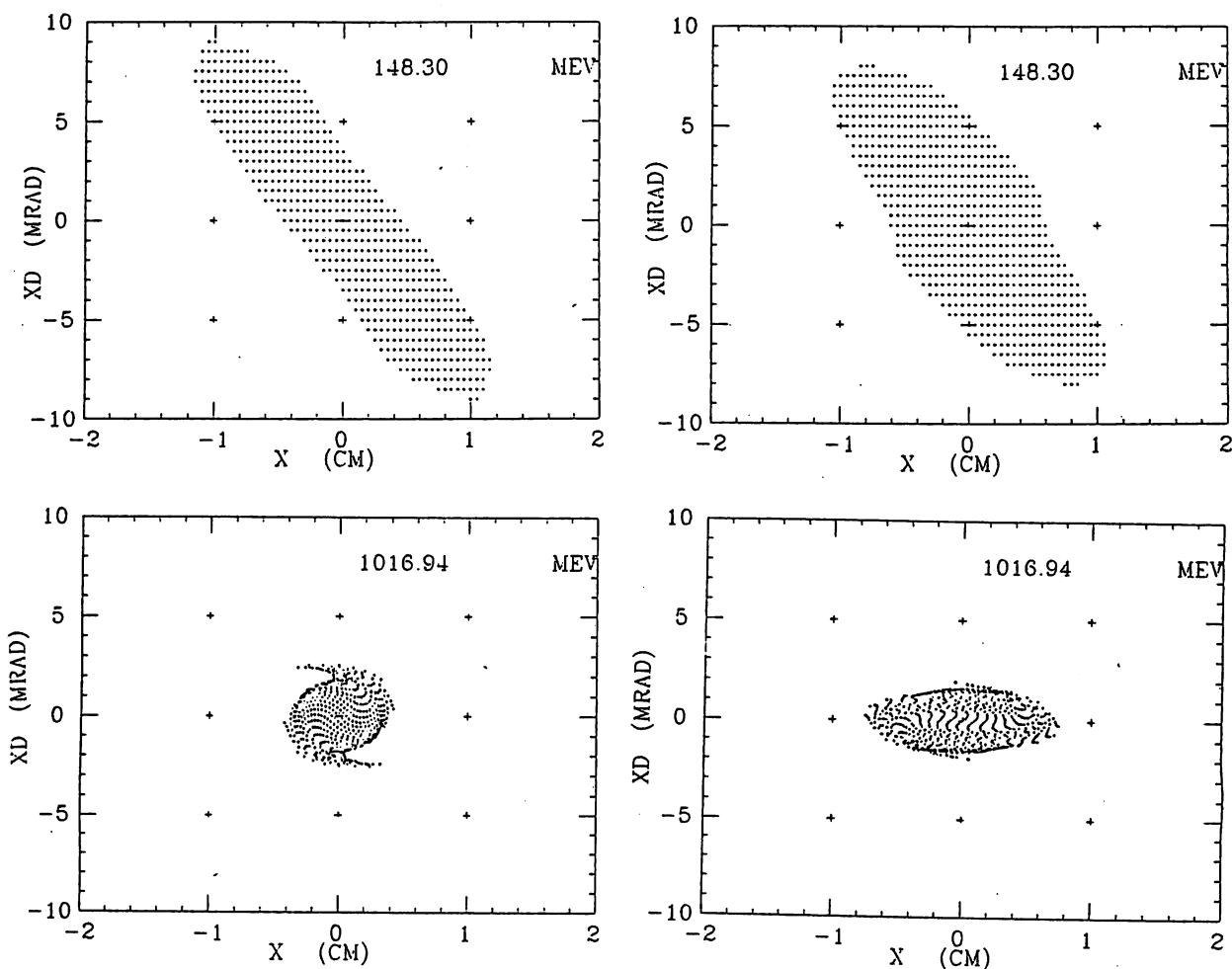


図4 代表的な収束系の長さ



$\mu = 60^\circ$

$B' = 23.2 \text{ T/m}$

図5 $\mu = 60^\circ$ (一定) と $B' = 23.2 \text{ T/m}$ (一定) で得られたアクセプタンスと対応する出口のエミッタンス。

$$\begin{aligned}\theta &= kL_0 \\ k^2 &= ecB' / m_0 c^2 \beta \gamma \\ n &= L_2 / Lc, \quad n \gg 1\end{aligned}$$

ここで n はセル数を表す。 $L_1 = 0$ の場合について、高周波発散力がある場合と無い場合の比を求めると、

$$\begin{aligned}\cos \mu' &= (1 + n^2 Lc \xi / 6) \cos \mu + (n^2 Lc \xi / 3) \cos \theta \cosh \theta \\ \beta'_{\max} &= (1 + n^2 Lc \xi / 6) (\sin \mu / \sin \mu') \beta_{\max} \\ &\quad + (n^2 Lc \xi / (3k \sin \mu')) \sin \theta (\cosh \theta + 1)\end{aligned}$$

ここで、添え字 ' は高周波発散力がある場合を表す。

表2 収束法の比較

	位相進み一定	磁場勾配一定	
規格化アクセプタンス	25.9	29.3	$\pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$
位相進み	60	67.9 - 25.2	degree
磁場勾配	23.2-50.3	23.2	

5 入射部分の問題

横方向のアクセプタンスは収束系の周期に大きく依存する。そこで入射部分のいくつかのタンクの長さを短くすれば（ショートタンクと呼ぶ）、横方向のアクセプタンスを大きくする事ができる。しかし、縦方向のアクセプタンスは、位相の滑りが小さくなっている為と、ドリフトスペースが増える為に、減少する。加速の効率は位相滑りが小さいだけ向上している。収束の周期長さを 1.65 m に選り、ショートタンクの個数を変えた時のアクセプタンスの変化の様子を図7に示す。高周波系の構造との関連からショートタンクを 16 に選ぶ。得られた規格化アクセプタンスは $A_x = 29\pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$, $A_y = 26\pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ である。この場合の縦方向アクセプタンスと対応する加速後のエミッタンスを図8に示す。

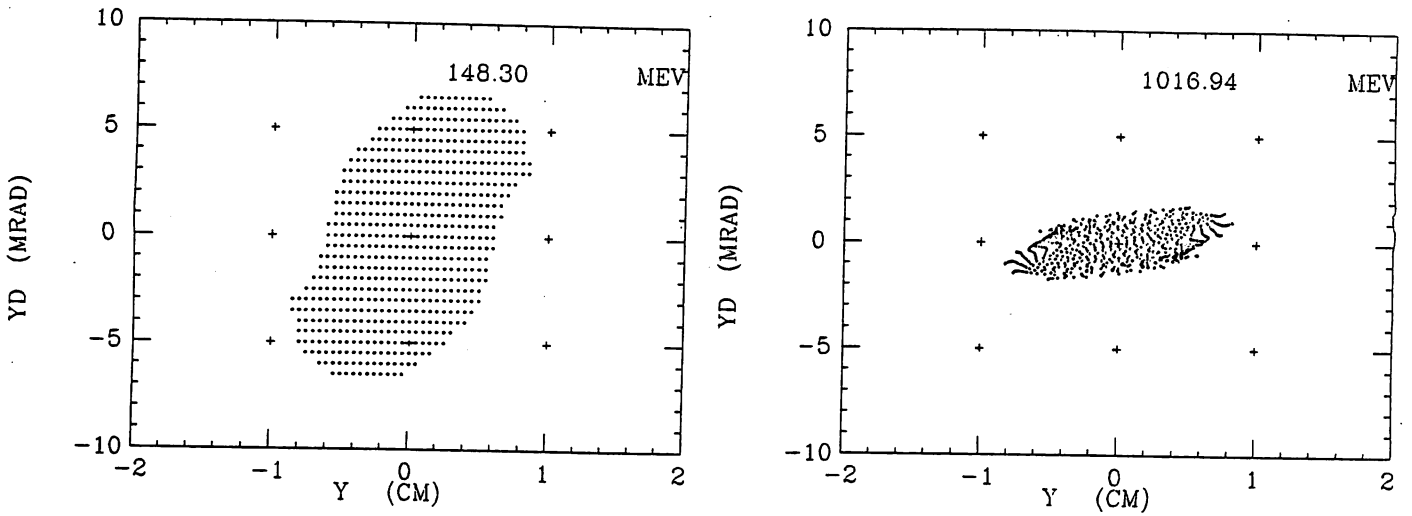


図6 $B' = 23.2 \text{ T/m}$ (一定) で得られた $y - y'$ アクセプタンスと対応する出口のエミッタンス。

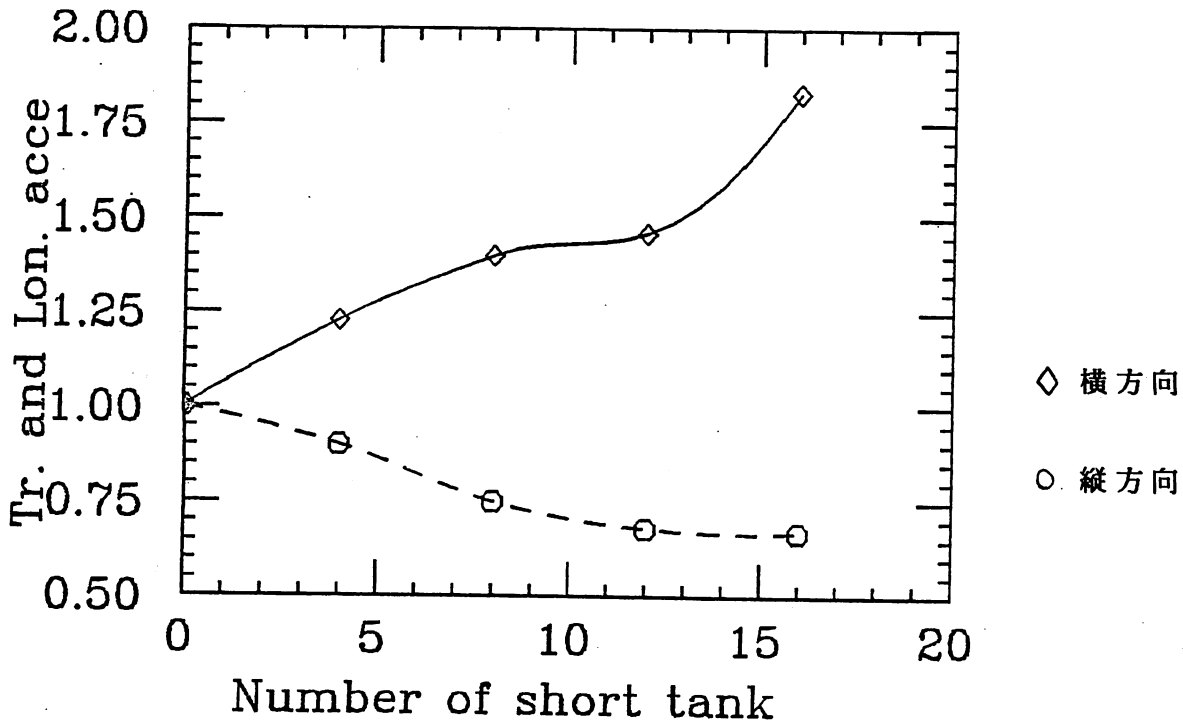


図7 ショートタンクの個数を変えた時のアクセプタンスの変化 (相対値)

6 高周波発散力

高周波発散力はエネルギーの高い場合は小さくなるが、タンクの中で 30 程度のギャップで発散力を受けると、全体としては、ビームダイナミクスに影響を及ぼす。一つのタンクの中の高周波発散力のトランスフォーマトリックスは

$$\begin{pmatrix} 1 & Lc \\ \xi & 1 \end{pmatrix} n$$

$$\xi = -e\pi E_0 T \sin \phi / (2m_0 c^2 \beta^2 \gamma^3)$$

とかける。 n は収束周期の中のセルの数、 Lc はセルの長さである。ドリフトチューブリニアックと違って、CCL では位相の広がりへのダンピングがあまり期待出来ない。即ち、第 5 章 1.4 節 (17) より、150 MeV から 1 GeV の加速では、 $\Delta \phi (1\text{GeV})/\Delta \phi (150\text{MeV}) = 0.43$ となる。DTL のビームの位相幅が 3 倍されて CCL へ入射されるので、縦方向アクセプタンスの端に入射したビームは大きな振幅の位相振動を行い、振幅の大きいところでは横方向の運動に摂動を受けやすくなる。入射位相を変えて横方向のアクセプタンスを計算した結果を図 9 に示す。図 10 に、高周波発散力がある時と無い時に得られるアクセプタンスの比を示す。ここでは、磁場勾配は一定とし、タンクの長さも一定 (1.2 m) としている。図 11 にタンクの長さを変える時のアクセプタンスの高周波発散力依存性を示す。各々のタンクの長さにおいて、高周波発散力の有無による横方向アクセプタンスの比を計算している。入射エネルギーは 150 MeV, 加速電場 3.6 MV/m, 入射位相 -30° としている。

なお、入射位相を変える時の捕獲効率と加速後のエネルギーの広がりを第 5 章 図 16 に示してある。その場合の入射ビームは、RFQ から得られるビームを仮定している。

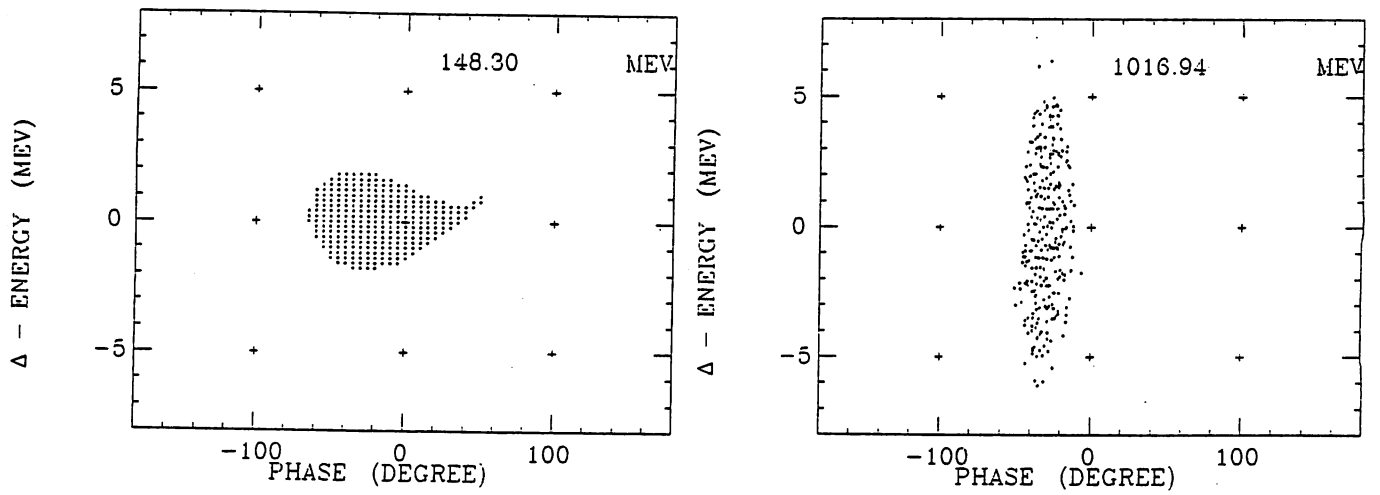


図 8 縦方向アクセプタンスと対応する加速後のエミッタンス

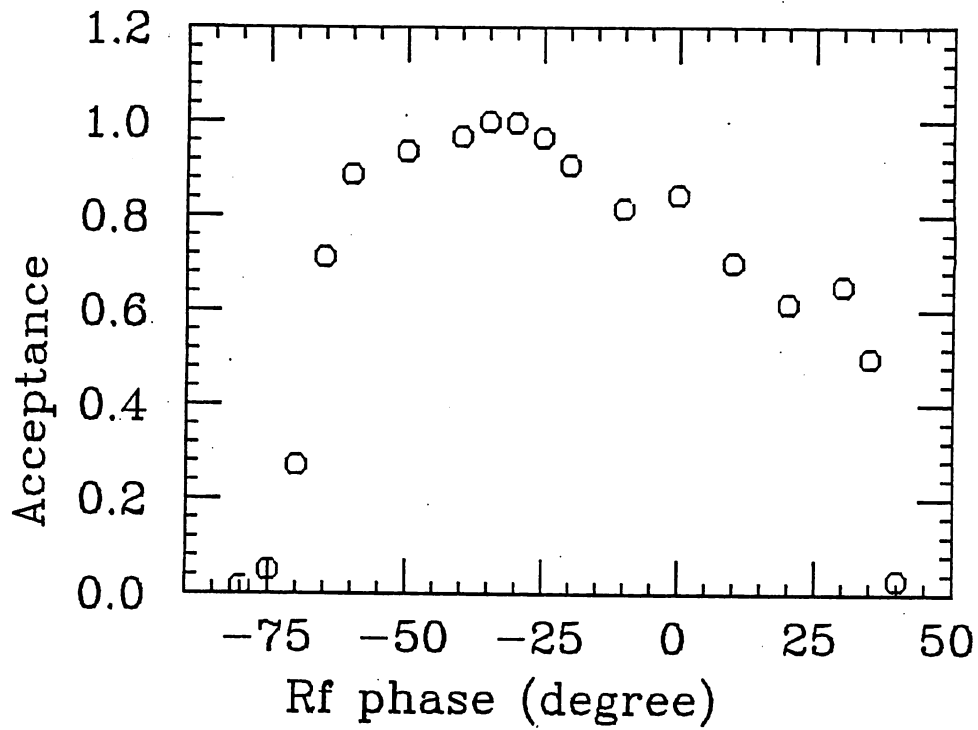


図 9 入射位相による横方向アクセプタンスの変化 (相対値)

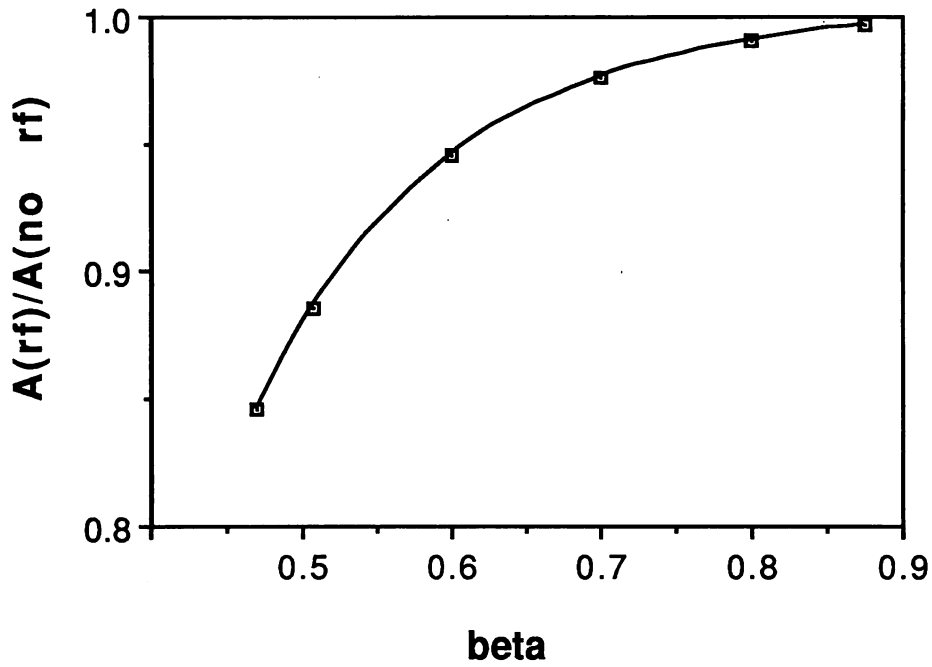


図 1 0 高周波発散力の有無によるアクセプタンスの違い。加速のパラメーターは 4 MV/m, $\phi_{in} = -30^\circ$, 1.2 m tank, $\mu = 60^\circ$ 。

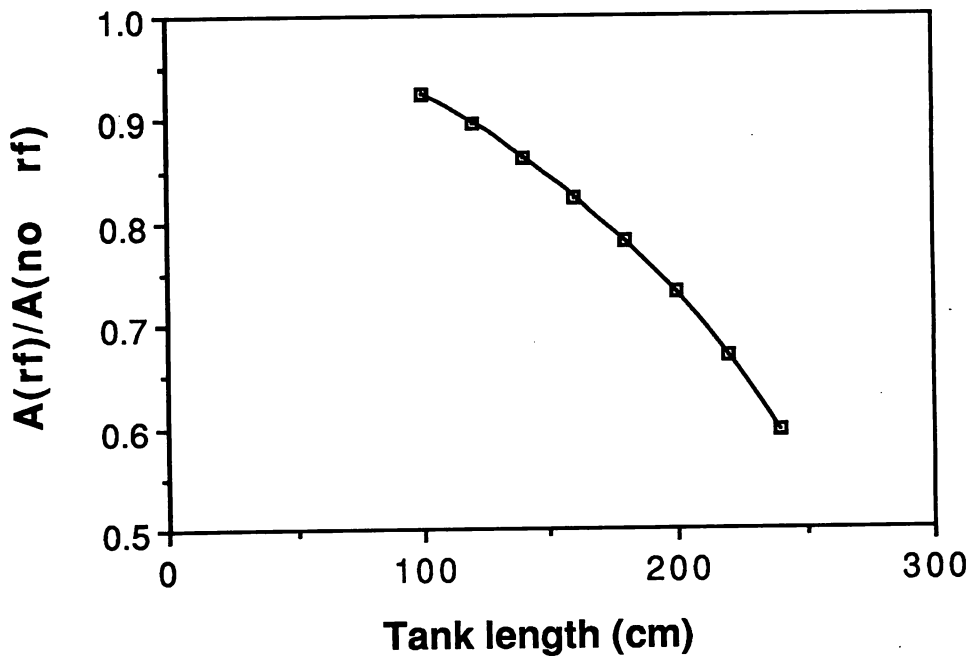


図 1 1 高周波発散力の有無によるアクセプタンスの違い。加速のパラメーターは 3.6 MV/m, $\phi_{in} = -30^\circ$, $\mu = 60^\circ$, 150 MeV。

7 ビームシミュレーション

横方向の場合について、DTL からのビームをマッチングさせて入射させた様子を図 1 2 に示す。予想されるエミッタンスとアクセプタンスの比は、DTL のエミッタンス増加が無いとすれば図に示したように 0.05 程度であるが、DTL の 4 極磁石のエラーを勘定にいれると、すぐに 0.2 - 0.6 になってしまう。そこで表 3 に示した 3 種類の粒子集団を DTL の入口につくって、加速電場のエラーに対してどのような振舞いをするかを調べてみる。

表 3 エミッタンスの異なる三種類のビーム

粒子集団名	PR187	PR188	PR189
ε_x/A_x	0.44	0.32	0.082
ε_y/A_y	0.30	0.21	0.055

A_x, A_y は CCL アクセプタンス。 $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ は CCL の入口における値。

粒子集団は 6 次元の広がりを持つ 3000 個からなり、エネルギーと位相の広がり、RFQ からの出力ビームを想定している (DTL 中のエミッタンスの増加を計算には取り込んでいないので、元の値が少し大きめになっている)。DTL で加速されたビームは、ドリフトスペースと Q-磁石により、横方向は完全にマッチングさせ、縦方向は、DTL と CCL の周波数の比に従ってバンチの長さを長くしたのち、CCL におけるビームロスが最小となるような位相へ入射させる。

CCL リニアックでは、次のように加速のパラメーターを変化させる。

- A. 加速電場の各タンク毎のランダムなバラツキ。例えば、5% のバラツキとは、設計値を中心として $\pm 5\%$ の範囲で加速電場の大きさを変える。
- B. 加速電場の各セル毎のランダムなバラツキ。
- C. 全タンクの平均加速電場の設計値からのズレ。

CCL におけるシミュレーションの結果は、以下の定義によりまとめる。

$$\text{loss ratio} = \text{透過粒子数} / \text{入射粒子数}$$

$$\text{loss factor} = \sum N_i W_i / \sum N_i W_0$$

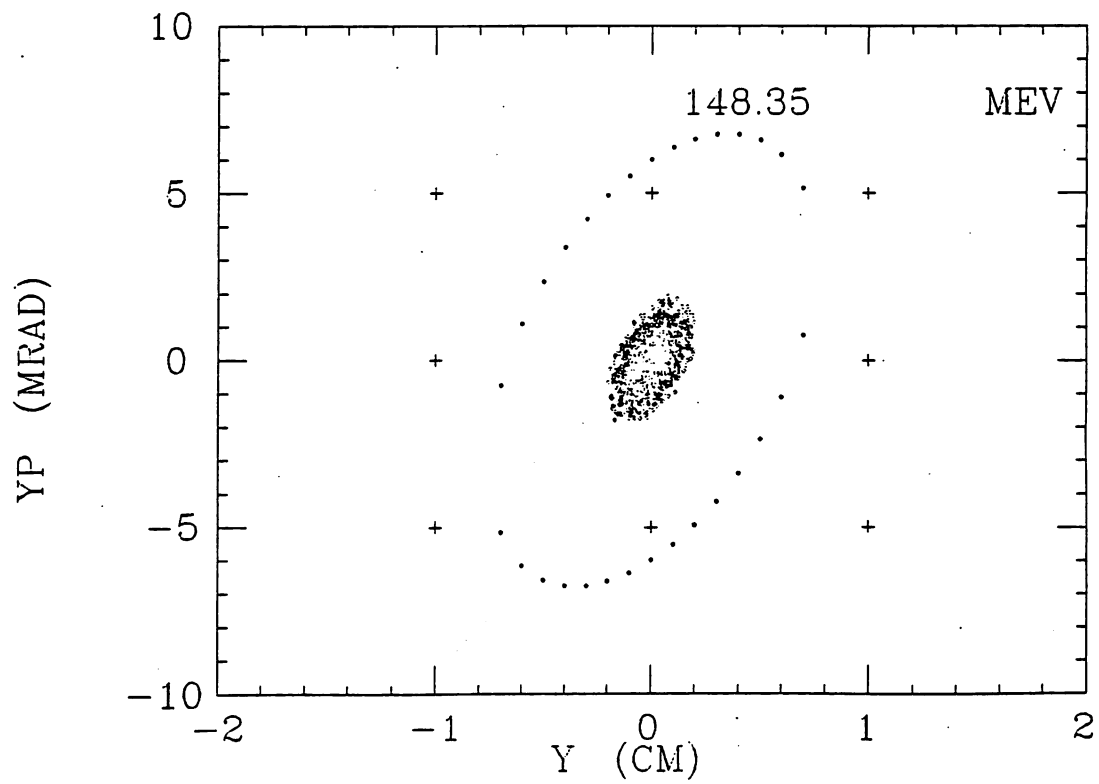
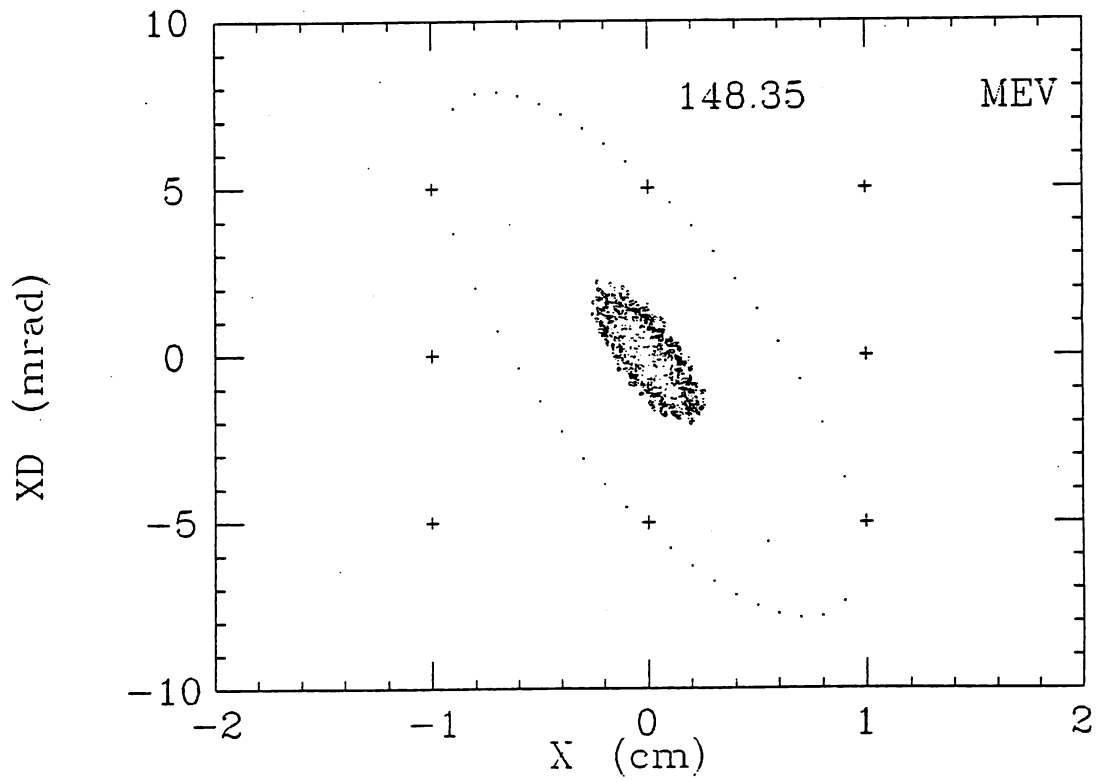


図 1 2 マッチングさせて CCL のアクセプタンス (点線で示す) へ入射させた DTL で加速されたビーム

N_i と W_i は i 番目のセルでロスした粒子数とエネルギー、 W_0 は入射エネルギーを表す。loss factorは、ロスの大きさは無関係である事に注意する。エネルギーの幅は 90 % の全幅で表す。横方向のエミッタンスの増加は 90 % 規格化エミッタンスの CCL 出口と 入口での比で表す。縦方向のエミッタンスの増加は 90 % エミッタンスの比で表す。

DTL入口では、ビームの広がり $\Delta \phi = \pm 30^\circ$, エネルギーの広がり $\Delta W = \pm 60 \text{keV}$ をビームに与える。横方向のエミッタンスの twiss parameterは DTL アクセプタンスのそれと一致させる。エミッタンスの異なる三種類のビームについて、CCL の加速条件を変えてシミュレーションを行った。表 4 にシミュレーションの結果を示す。ここで加速電場のエラー(5, 2)の意味は、セル毎のランダムエラーが $\pm 5\%$ であり、タンク毎のランダムエラーが $\pm 2\%$ である事を示す。

粒子集団が PR187 の場合の loss ratio とタンク毎の加速電場エラーとの関係を 図 1 3 に示してある。1 % のロスビームが、現在の KEK のリニアックビームの半分程度に相当する。

セルエラー 5%、タンクエラー 2%の場合に、CCL リニアック全体の加速電場の強さと loss ratio, loss factor との関係を 図 1 4、図 1 5 に示す。ビーム損失の少ない加速電場の範囲が少しあるが、設計値よりも低い加速電場の場合には、次第にエネルギーの高い所でのビームロスが増える事が 図 1 5 からわかる。

このように、PR187 のエミッタンスでは、無視出来ないビームロスが予想されるので、PR188 のエミッタンス以下になるように、DTL におけるエミッタンスの増加を抑える必要がある。

以上述べたランダムなエラーは性質のよいエラーと言える。これに対して、例えば、タンクのセッティングを 0.2 mm 程度、位相幅になおして 0.6° 位、最初から 90 番目のタンクまでを一方向にずらすような、加算的なエラーを考えてみよう。この場合の縦方向のアクセプタンスと対応する加速後のエミッタンスを 図 1 6 に示す。縦方向のアクセプタンスは、その中心部で加速出来なくなるような変形を受け、その大きさは約 52 % 減少している。これから僅かな位相のエラーでも加算されると影響が大きい事がわかる。

この類のエラーは、加速管の製作法により全てのタンクの長さがわずかず短くなってしまったりとか、セッティング方法で系統的に誤差を生じるとか、あるいは、カップドキャビティリニアックの特性により、給電場所から電場の振幅と位相に勾配を生じるとか、高周波システムの系統的な誤差等を原因として考える事が出来る。いくつかのエラーの組合せに対するシミュレーションが現在進行中である。

表4 CCL のビームシミュレーションの結果

<u>PR187</u>	加速電場のエラー (セル, タンク) (%)				
	(0, 0)	(0, 2)	(0, 5)	(5, 2)	(5, 10)
ΔW (MeV)	2.22	2.40	2.22	2.10	18.9
loss ratio (%)	0.53	1.67	6.67	1.27	18.37
loss factor	1.33	1.25	1.21	1.27	1.25
$\varepsilon_{x, out} / \varepsilon_{x, in}$	1.23	1.26	1.36	1.24	4.84
$\varepsilon_{y, out} / \varepsilon_{y, in}$	1.05	1.06	1.14	1.05	3.95
$\varepsilon_{l, out} / \varepsilon_{l, in}$	5.46	4.86	8.57	5.19	/

<u>PR188</u>	加速電場のエラー (セル, タンク) (%)				
	(0, 0)	(0, 2)	(0, 5)	(5, 2)	(5, 10)
ΔW (MeV)	2.16	2.28	1.86	1.98	17.58
loss ratio (%)	0.07	0.07	0.5	0.07	6.83
loss factor	1.45	1.45	1.24	1.41	1.36
$\varepsilon_{x, out} / \varepsilon_{x, in}$	1.24	1.23	1.29	1.20	5.48
$\varepsilon_{y, out} / \varepsilon_{y, in}$	1.14	1.14	1.15	1.13	4.65
$\varepsilon_{l, out} / \varepsilon_{l, in}$	4.41	4.09	8.68	4.51	/

<u>PR189</u>	加速電場のエラー (セル, タンク) (%)				
	(0, 0)	(0, 2)	(0, 5)	(5, 2)	(5, 10)
ΔW (MeV)	2.58	2.64	1.38	2.34	17.22
loss ratio (%)	0	0	0	0	0
loss factor	/	/	/	/	/
$\varepsilon_{x, out} / \varepsilon_{x, in}$	1.53	1.44	1.24	1.45	6.40
$\varepsilon_{y, out} / \varepsilon_{y, in}$	1.44	1.35	1.26	1.38	6.82
$\varepsilon_{l, out} / \varepsilon_{l, in}$	2.52	2.73	8.12	3.18	/

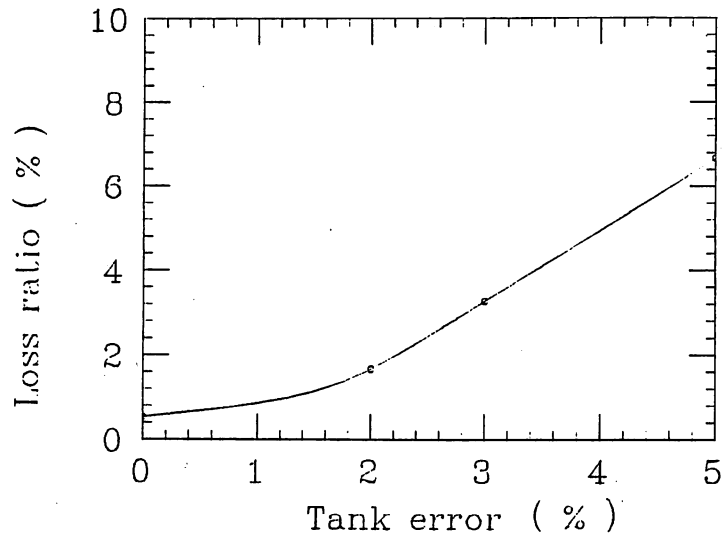


図 1 3 loss ratio と加速タンクのランダムエラーの関係 (粒子集団 PR187)

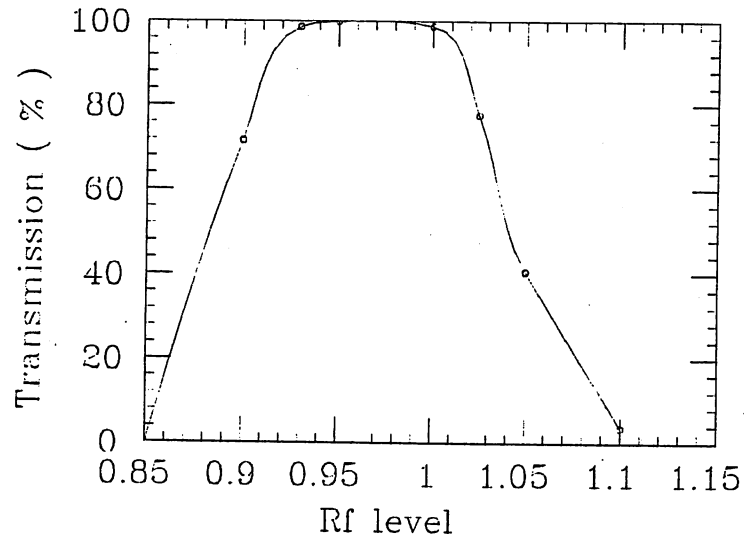


図 1 4 loss ratio とタンクレベルの関係 (粒子集団 PR187)

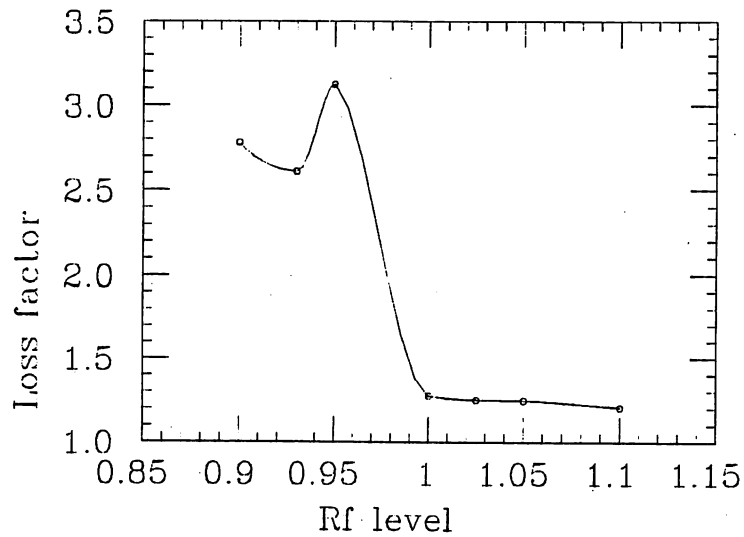


図 1 5 loss factor とタンクレベルの関係 (粒子集団 PR187)

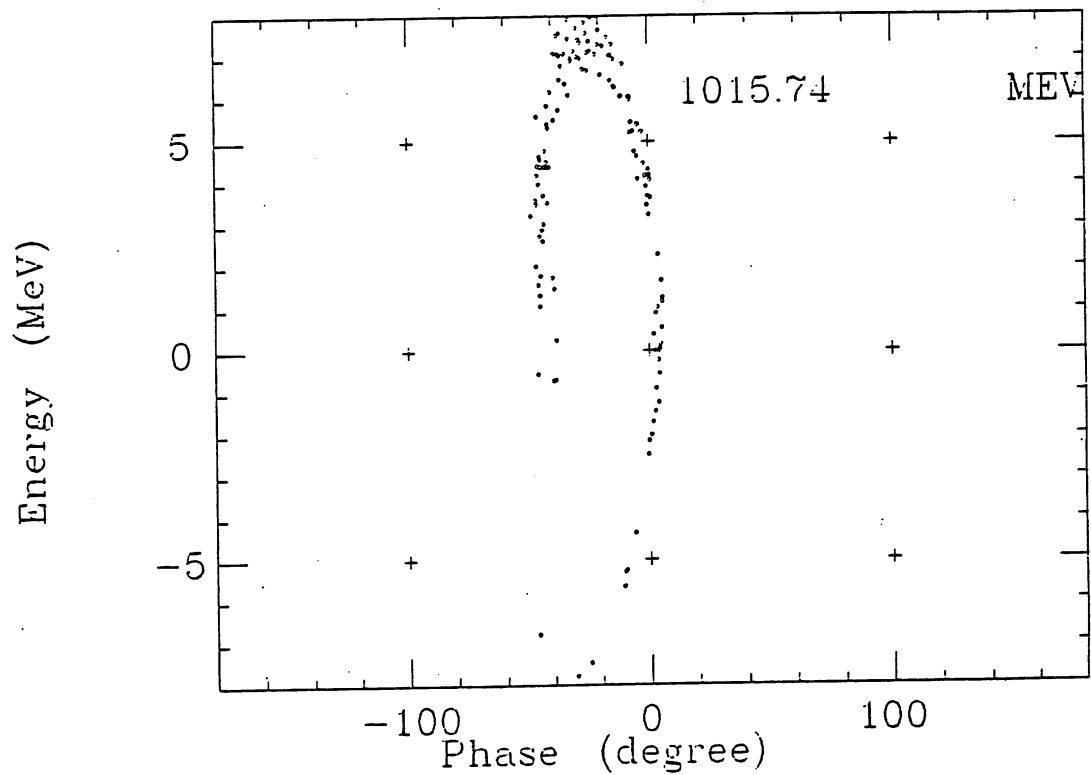
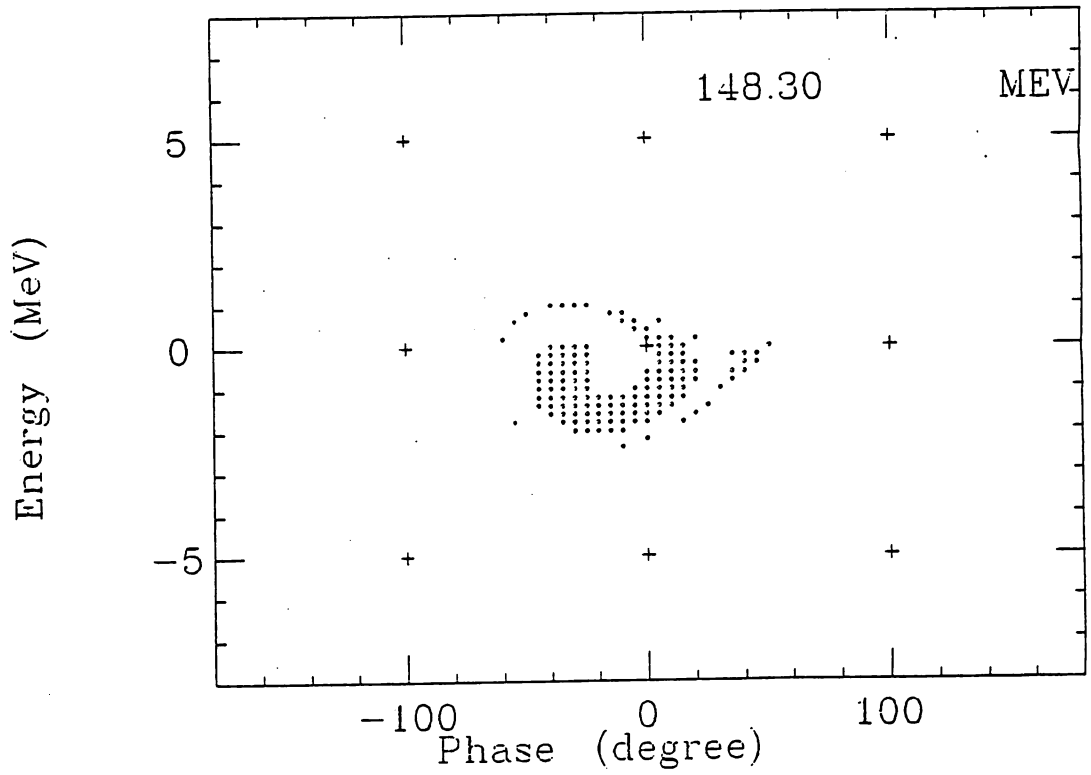


図 1 6 タンクの位置が 0.2 mm ずれている時 (タンク番号 1 - 90) の縦方向アクセプタンスと加速後のエミッタンス。

8 まとめ

新しい計算コードにより計算した高 β 空洞の結果を表5に示す。表の中では、以下の諸量を表している。

NTK	タンク番号		
N1, N2	セルの通し番号		
NC	タンク内のセル数		
WIN	入射エネルギー		
CLENG	セル長さ	TANKLENG	タンク長さ
RF	励振電力	ZS	シャントインピーダンス
WGAIN	加速ゲイン		
PHI1	入射位相	PHI2	出口での位相
EZERO	加速電場		
PBEAM	ビーム電力	SUMPOWER	全電力

高 β 空洞の主要なパラメータを表6に示す。

表 5 CCL の主要なパラメーターの計算結果

+++++ BEAM CURRENT = 0.020 A IS ASSUMED

NTK	N1	N2	NC	WIN MeV	BETA IN	CLENG cm	TANKLENG cm	RF MMX1.20	ZS MOHM/m	WGAIN MeV	PHI1 deg	PHI2 deg	EZERO MV/m	PBEAM	SUMPPOWER
1	1	18	18	148.300	0.5043	5.8341	105.0138	0.312	52.371	2.6055	-30.00	-40.85	3.600	0.052	0.364
2	19	36	18	150.905	0.5078	5.8748	105.7466	0.311	52.810	2.6258	-30.00	-40.71	3.600	0.053	0.364
3	37	54	18	153.531	0.5113	5.9153	106.4747	0.311	53.247	2.6461	-30.00	-40.56	3.600	0.053	0.364
4	55	72	18	156.177	0.5148	5.9555	107.1982	0.311	53.680	2.6662	-30.00	-40.42	3.600	0.053	0.364
5	73	90	18	158.844	0.5183	5.9954	107.9171	0.310	54.111	2.6863	-30.00	-40.28	3.600	0.054	0.364
6	91	108	18	161.530	0.5217	6.0351	108.6314	0.310	54.540	2.7062	-30.00	-40.15	3.600	0.054	0.364
7	109	126	18	164.236	0.5251	6.0745	109.3409	0.309	54.965	2.7260	-30.00	-40.01	3.600	0.055	0.364
8	127	144	18	166.962	0.5285	6.1137	110.0459	0.309	55.388	2.7456	-30.00	-39.88	3.600	0.055	0.364
9	145	162	18	169.708	0.5319	6.1526	110.7462	0.309	55.807	2.7652	-30.00	-39.75	3.600	0.055	0.364
10	163	180	18	172.473	0.5352	6.1912	111.4418	0.308	56.224	2.7846	-30.00	-39.62	3.600	0.056	0.364
11	181	198	18	175.257	0.5385	6.2296	112.1328	0.308	56.638	2.8039	-30.00	-39.50	3.600	0.056	0.364
12	199	216	18	178.061	0.5418	6.2677	112.8191	0.308	57.050	2.8231	-30.00	-39.38	3.600	0.056	0.364
13	217	234	18	180.884	0.5451	6.3056	113.5007	0.307	57.459	2.8422	-30.00	-39.25	3.600	0.057	0.364
14	235	252	18	183.727	0.5483	6.3432	114.1777	0.307	57.864	2.8611	-30.00	-39.13	3.600	0.057	0.364
15	253	270	18	186.588	0.5516	6.3806	114.8501	0.307	58.247	2.8796	-30.00	-39.02	3.600	0.058	0.364
16	271	288	18	189.467	0.5548	6.4176	115.5177	0.307	58.608	2.8977	-30.00	-38.90	3.600	0.058	0.364
17	289	320	32	192.365	0.5580	6.4545	206.5435	0.558	58.967	4.7933	-30.00	-57.47	3.642	0.096	0.654
18	321	352	32	197.158	0.5631	6.5143	208.4586	0.557	59.549	4.8528	-30.00	-56.92	3.642	0.097	0.654
19	353	384	32	202.011	0.5683	6.5736	210.3555	0.557	60.127	4.9118	-30.00	-56.38	3.642	0.098	0.655
20	385	416	32	206.923	0.5733	6.6323	212.2341	0.557	60.698	4.9702	-30.00	-55.85	3.642	0.099	0.656
21	417	446	30	211.893	0.5784	6.6905	200.7137	0.542	61.264	4.8708	-30.00	-52.79	3.713	0.097	0.639
22	447	476	30	216.764	0.5832	6.7462	202.5864	0.542	61.807	4.9228	-30.00	-52.34	3.713	0.098	0.640
23	477	506	30	221.687	0.5880	6.8014	204.0419	0.541	62.344	4.9741	-30.00	-51.91	3.713	0.099	0.641
24	507	536	30	226.661	0.5927	6.8560	205.6802	0.541	62.876	5.0250	-30.00	-51.48	3.713	0.100	0.642
25	537	566	30	231.686	0.5974	6.9101	207.3016	0.560	63.402	5.1541	-30.00	-51.60	3.777	0.103	0.663
26	567	596	30	236.840	0.6021	6.9643	208.9297	0.560	63.913	5.2054	-30.00	-50.98	3.777	0.104	0.664
27	597	626	30	242.045	0.6067	7.0180	210.5400	0.560	64.397	5.2558	-30.00	-50.57	3.777	0.105	0.665
28	627	656	30	247.301	0.6113	7.0711	212.1522	0.560	64.876	5.3056	-30.00	-50.16	3.777	0.106	0.666
途中を省略															
141	3329	3348	20	942.245	0.8666	10.0238	200.4758	0.541	86.439	6.1800	-30.00	-31.86	4.410	0.124	0.665
142	3369	3368	20	948.425	0.8676	10.0346	200.6930	0.542	86.486	6.1871	-30.00	-31.84	4.410	0.124	0.665
143	3369	3368	20	954.612	0.8685	10.0454	200.9080	0.542	86.531	6.1941	-30.00	-31.82	4.410	0.124	0.666
144	3369	3408	20	960.807	0.8694	10.0560	201.1209	0.542	86.577	6.2011	-30.00	-31.80	4.410	0.124	0.666
145	3409	3428	20	967.008	0.8703	10.0666	201.3318	0.544	86.621	6.2145	-30.00	-31.78	4.415	0.124	0.668
146	3429	3448	20	973.222	0.8712	10.0770	201.5409	0.544	86.666	6.2213	-30.00	-31.76	4.415	0.124	0.668
147	3449	3468	20	979.443	0.8721	10.0874	201.7479	0.544	86.710	6.2281	-30.00	-31.74	4.415	0.125	0.669
148	3469	3488	20	985.672	0.8730	10.0976	201.9530	0.544	86.754	6.2348	-30.00	-31.73	4.415	0.125	0.669
149	3489	3508	20	991.906	0.8739	10.1078	202.1561	0.546	86.797	6.2477	-30.00	-31.71	4.419	0.125	0.671
150	3509	3528	20	998.154	0.8748	10.1179	202.3574	0.546	86.840	6.2543	-30.00	-31.69	4.419	0.125	0.672
151	3529	3548	20	1004.409	0.8756	10.1278	202.5568	0.546	86.879	6.2609	-30.00	-31.67	4.419	0.125	0.672
152	3549	3568	20	1010.669	0.8765	10.1377	202.7543	0.547	86.916	6.2673	-30.00	-31.66	4.419	0.125	0.672
				1016.937											

表 6 1 GeV CCL のパラメーター

周波数	1296	MHz
入射エネルギー	148	MeV
出力エネルギー	1017	MeV
加速電場	3.6 ~ 4.4	MV/m
安定位相	-30 ~ -57	degree
タンク長さ	303.0	m
全長	410.9	m
ビーム孔半径	1.5	cm
セル数	3568	
タンク数	152	
励振電力	81.7	MW
ビーム電力	17.4	MW
全電力	99.1	MW
クライストロン数	36	
クライストロン電力	3.0	MW
横方向位相進み	67.9 ~ 25.2	degree
規格化アクセプタンス (90 % x)	29	π mm · mrad
規格化アクセプタンス (100 % x)	36	π mm · mrad
規格化アクセプタンス (90 % y)	26	π mm · mrad
規格化アクセプタンス (100 % y)	34	π mm · mrad
最大入射エネルギー幅	1.5	MeV (90 % 半幅)
最大出力エネルギー幅	4.4	MeV (90 % 半幅)
最大入射位相幅	87	degree
最大出力位相幅	32	degree