

1 GeV リニアックのビームシミュレーション

KEK 加藤隆夫

1. はじめに

リニアックの性能は、いくつかの代表的なパラメーターの値で表す事が一般的である。ビームダイナミクスを扱う場合にも、リニアックとビームが作るシステムのある側面に光をあてて、そこで定義される量を基礎に議論する事がよく行われる。その場合には、物事が数式化できたり、又統計的に表現出来るので幾多の利点があるのだが、反面、一面を強調して定式化する時に、お互いの連関が失われてしまう恐れもある。そこで、本稿においては、予めある程度最適化したリニアックを設定したうえで、ビームトラッキングを通じて、システムを考察したいと思う。従って、本稿で扱った結果は、ある特定のリニアックについての結果である事に注意するが、こうした積み重ねにより最適リニアックを求めるのであるから、考察すべき材料を提示する役には立つと思われ、又周波数等が以下のモデルと大きく変わる場合にも、その場合の問題点は何かを考察する参考になると思う。

2. リニアックの構成

シミュレーションに使用するリニアックの構成を Fig.1 に示す。主要なパラメーターを Table 1 に示す。比較の為に single version(ref.1) と EHF(ref.2)をあわせて書いてある。

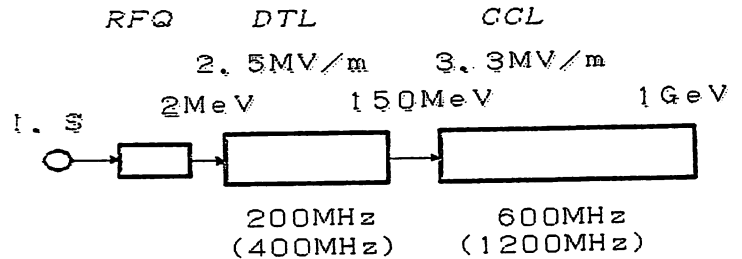


Fig.1 リニアックの構成。

加速電場の設定には幾つかの注意すべき点があるが (ref.3)、ここでは、リニアックの全長がほぼ 500 m という制約から、アルパレ型 (DTL) では 2.5 MV/m, CCL (coupled cavity linac) では 3.3 MV/m とした。

CCL のユニットタンクの長さは、望ましい横方向アクセプタンスが確保出来る事と、一本のクライストロンの安定な供給電力を 3 MW と仮定した時に、高周波電力給電システムが安定に運転出来る事等の二点を考慮して決めている。しかし、エネルギーの低い所ではユニットタンク長さを短くするなどの細かいが重要な配慮はまだ行っていない。CCL の具体的な structure に関しては、計算の上では特に制約は無いのであるが、使用したパラメーターは side coupled linac に依拠している。

DTL から CCL に変わるように、加速管構造が変わる部分を transition と呼んでいる。transition など無い方が建設の上でも運転保守の観点からみても良いに決っているが、それでもなお transition を入れるのは、加速器の加速効率を上げるためであり、それは全体としての cost saving につながるものである。Fig.2 にシャントインピーダンス (ZTI) のエネルギー依存性、Fig.3 に空洞励振電力の周波数依存性を示す。世界の他の場所で、400 MHz DTL + 1200 MHz CCL のシステム (EHF など) が考えられているのは、そのような選択により未決の問題はあるにしても、とにかく目に見える合理性 (rf システムまで含めて) を重視する姿勢と想像される。ビームダイナミクスから見ると、transition は重大な二つの問題をもたらす。横方向のビームマッチングと縦方向のビームマッチングである。完全なチューニングが有り得ないので、transition により確実にビームの性質は劣化する。故に transition の数は少ない方が良く、そこでは慎重なパラメーターの選択が要求される。DTL から CCL への transition energy を 150 MeV と高めた理由は、CCL のユニットタンク内のセルを同じ長さで作る場合には、rf 位相遅れによる加速効率の劣化が小さい事、従って長めのユニットタンクを選ぶ事、パンチ幅が狭くなっているのと、ドリフトスペースでのビームの縦方向の広がり方が (β が大きいので) 小さいので CCL におけるロスが少ない加速に有利な事、特に APS を想定する時には、100 MeV 以下の入射は structure の構造からの制約が大きい事である。

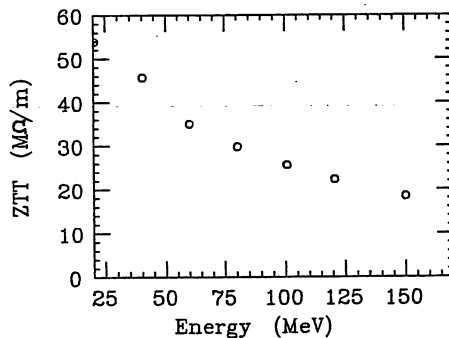


Fig.2 ZTI vs. energy (200 MHz DTL).

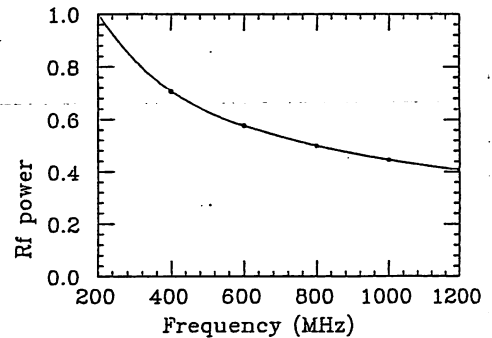


Fig.3 Relative power consumption vs. frequency.

Table 1 リニアックの主なパラメーターと他との比較

	CCL-1	CCL-2	CCL-3	single	EHF	
FREQUENCY	600	1200	600	500	1200	MHz
DTL FREQUENCY	200	400	200	200	400	MHz
RFQ FREQUENCY	200	200 OR 400	200	100	50 AND 400	MHz
Win	150	150	100	100	150	MeV
Wout	1000	1000	1000	1000	1200	MeV
E0	3.3	4.0	3.0	3.0	5.6	MV/m
Pc	95.4	90.3	89.7	100*	143	MW
TANK LENGTH	328	272	371	458**	232	m
STABLE PHASE	30	30	26	26	57-25	degree
AVERAGE ZTI	31	39	30	22	41	MΩ/m
TANK NUMBER	136	152	154	208		
CELL NUMBER	1784	2954	2082	1664		

* この数字は大きすぎる印象を受ける。仮に 80 MW とすれば ZTI=27 となる。
 ** 2.2 m × 208タンク
 注 1. 本稿の計算に使用したのは CCL-1 である。
 注 2. CCL-3 は single version との比較の為に入射と transition のエネルギーを同じにした。
 注 3. single は参考文献 1 による。
 注 4. EHF は参考文献 2 によるが、Hybrid structure と称する version の基礎となっている version について幾つかの仮定の基に計算した結果を示した。
 注 5. TANK LENGTH には Q-磁石用の空間は入っていない。CCL の Pc は理想値の 30% 増しを使っている。

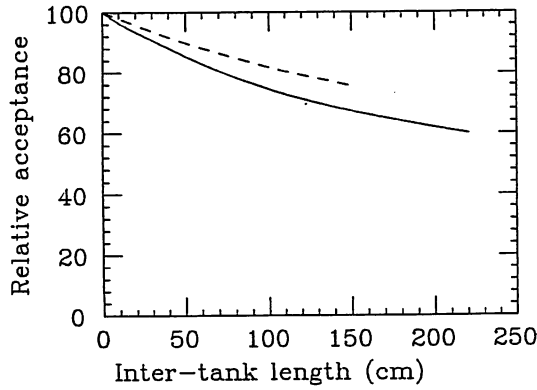


Fig. 4 Decrease of longitudinal acceptance (%) due to inter-tank spaces.

Solid line → E0=3.0 MV/m, 96 tanks, tank length=1.6 m.
Dashed line → E0=3.3 MV/m, 136 tanks, tank length=2.25 m.

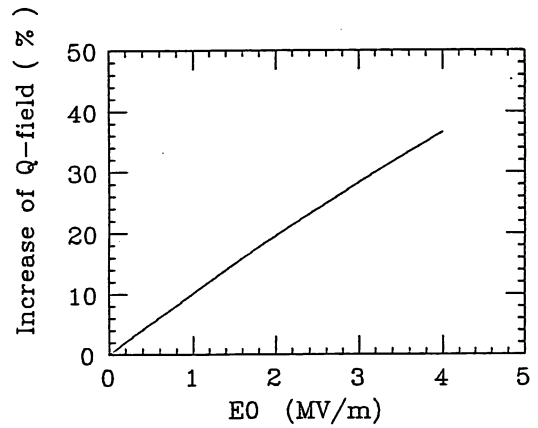


Fig. 5 Increase of Q-magnet strength due to rf defocusing.

CCL の横方向の収束は、singlet 方式により行い、四極磁石の間隔は 3 m とした。本稿では位相進みが 80° に選んであるが、今後の検討が大いに期待される分野である。なお、Q-磁石を置くドリフトスペースは、Fig. 4 に示すように縦方向のアクセプタンスの減少をもたらすので、注意が必要である。

DTL 中のビームシミュレーションは特に書くほどの事はまだ済ませていないが、CCL におけるビームロスが少ないという視点から行った幾つかの計算について簡単に述べる。第一は、DTL の入射エネルギーを、2 MeV から 3 MeV に上げた計算、これは、DTL の入射部の四極磁石の強さを緩和する事に関係する。第二は、DTL の 10 MeV までの加速に関して、縦方向のアクセプタンスが一定になるように、加速電場に傾きをつける事である。この方式は、KEK の陽子リニアックで部分的に行われている。限られた範囲のシミュレーションからみると、CCL のビームロスに重要なのは、CCL 入口のバンチの位相の広がりであり、DTL への入射エネルギーや、DTL の初段部分の加速方式にはよらないといえる。勿論、CCL 入口の位相の広がりが、DTL 入口の位相の広がりに関係することはいうまでもなく、DTL 加速においては、縦方向の位相平面における Liouville の定理はよく成り立っている事が確認された。

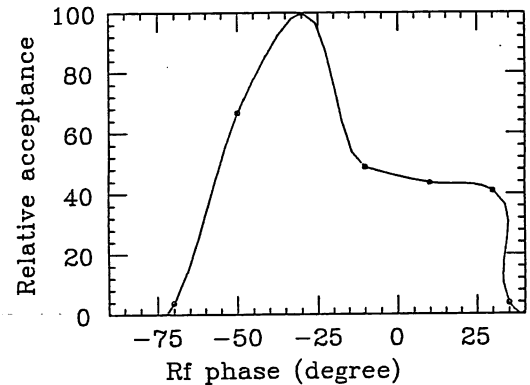


Fig. 6 Relative variation of CCL transverse acceptance vs. rf phase.

3. Rf defocusingについて

一般に rf defocusing が問題とされるのは、 $\beta(v/c)$ が小さい低エネルギー領域であるが、加速電場が高くなり、CCL のように Q-磁石の間に多数の defocusing 力を受ける構造になると、 β が大きい場合にも重要な因子となる。横方向の運動は、次式であらわされる。一般的な表記法だから省略して書くと、

$$\frac{1}{\beta\gamma} \frac{d}{dz} \left(\beta\gamma \frac{dx}{dz} \right) = k^2_{r,r} x - k^2_o x$$

$$k^2_{r,r} = -(q/mc^2) \pi EI \sin\phi / (\lambda \beta^3 \gamma^3)$$

$$k^2_o = (q/mc^2) cB' / (\beta\gamma)$$

本稿で設計した CCL のエネルギー 150 MeV において、両者の比をとると、 $k^2_{r,r}/k^2_o \sim 0.012$ 。実際、Q-磁石の強さを求めると、rf defocusing を考慮する場合としない場合とでは、同じ位相進みを実現するための Q-磁石の強さが Fig. 5 に示すように異なる。rf defocusing は $\sin\phi$ の位相依存性を持っており、ビームシミュレーションにより求めた横方向アクセプタンスは Fig. 6 に示すように変化する。一般的には、そのリニアックの安定位相におけるアクセプタンスをもって、アクセプタンスと称するので、このようにアクセプタンスの位相依存性が大きい場合には、相応の注意が必要となる。

4. CCL のビームシミュレーションの方法

シミュレーションに使用したビームは、DTL の入口において、6 次元の一様な分布を持つようにした 3000 個の粒子集団である。変化させるパラメーターとしては、ビームのエミッタンス (ϵ_x, ϵ_y)、エネルギーの広がり (ΔW)、位相の広がり ($\Delta\phi$) を考える。普通は、DTL のアクセプタンスに完全にマッチングさせて、安定位相を中心に入射する。DTL リニアックのパラメーターは変化させない。

DTL からのビームは、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 bunch length を大きくしたのち、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。

- 加速電場の各タンク毎の random 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 ±5% の範囲で加速電場の大きさを変える。
- 加速電場の各セル毎の random 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。

rf phase のエラーをいれていない理由は、第一にシミュレーションの量が増えるのを避けた、第二には、CCL ではセル毎のエラーは小さい事、第三には、シミュレーションの初期の結果からみて、重点を電場エラーに絞って良いと考えた事であるが、最終的には phase エラーも当然ながら考慮しなければいけないと思う。

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。

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

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

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、ロスの大きさと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 emittance growth は 90% normalized emittance の CCL 出口と入口での比で表す。縦方向の emittance growth は 90% emittance の比で表す。実際の加速は、計算に取り入れていないその他の多くの影響を受ける。その中でも比較的簡単に計算出来るようなのは、マッチングの乱れ、加速管と Q-磁石のアライメントの乱れ等で、今後の課題である。

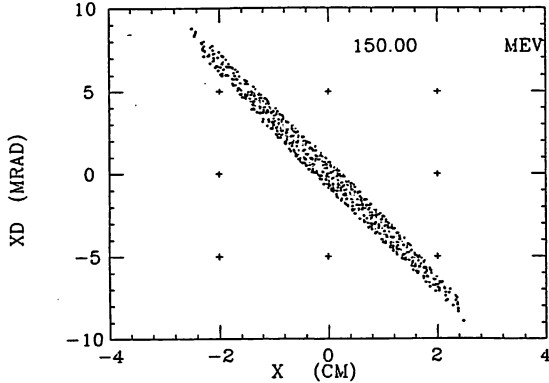


Fig.7 CCL transverse acceptance.

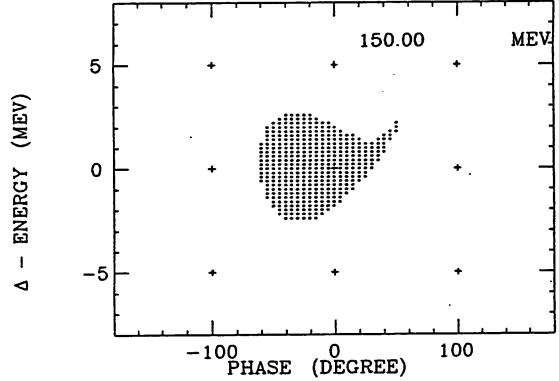


Fig.8 CCL longitudinal acceptance.

5. シミュレーションの結果

5.1 CCL のアクセプタンス

Fig.7 と Fig.8 に横方向と縦方向のアクセプタンスを示す。

横方向の normalized acceptance は、

$$\epsilon_x(90\%) = 1.11 \pi \text{ cm mrad} \quad \epsilon_x(100\%) = 2.25 \pi \text{ cm mrad}$$

$$\epsilon_y(90\%) = 1.42 \pi \text{ cm mrad} \quad \epsilon_y(100\%) = 3.46 \pi \text{ cm mrad}$$

5.2 DTL入射ビームのエミッタンスと CCL のビームロス

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。これは予想される RFQ のビームに相当している。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。本節のシミュレーションでは、DTL においてはビームのロスは無い。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。CCL の入口におけるエミッタンスとアクセプタンスの比を Table 2 に示す。Table 3 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 random エラーが $\pm 5\%$ であり、タンク毎の random エラーが $\pm 2\%$ である事を示す。

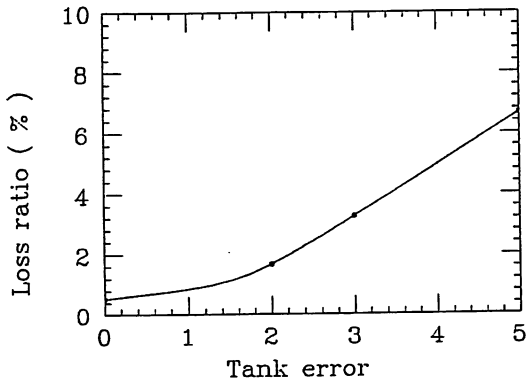


Fig.9 Loss ratio vs. tank error for PR187.

Table 2 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。

Table 3 CCL のビームシミュレーションの結果

PR187	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
$\epsilon_{x,out}/\epsilon_{x,in}$	1.23	1.26	1.36	1.24	4.84
$\epsilon_{y,out}/\epsilon_{y,in}$	1.05	1.06	1.14	1.05	3.95
$\epsilon_{l,out}/\epsilon_{l,in}$	5.46	4.86	8.57	5.19	/
PR188	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
$\epsilon_{x,out}/\epsilon_{x,in}$	1.24	1.23	1.29	1.20	5.48
$\epsilon_{y,out}/\epsilon_{y,in}$	1.14	1.14	1.15	1.13	4.65
$\epsilon_{l,out}/\epsilon_{l,in}$	4.41	4.09	8.68	4.51	/
PR189	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	/	/	/	/	/
$\epsilon_{x,out}/\epsilon_{x,in}$	1.53	1.44	1.24	1.45	6.40
$\epsilon_{y,out}/\epsilon_{y,in}$	1.44	1.35	1.26	1.38	6.82
$\epsilon_{l,out}/\epsilon_{l,in}$	2.52	2.73	8.12	3.18	/

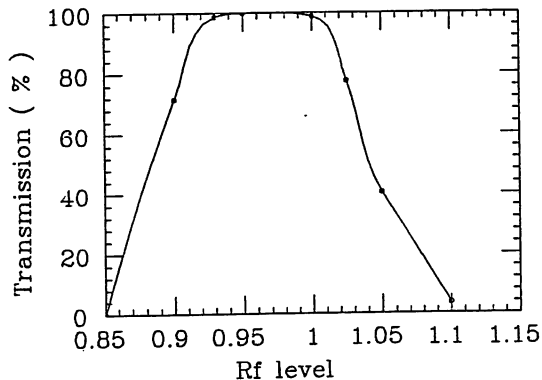


Fig.10 Transmission ratio vs. rf level for PR187. Tank error of 2% and cell error of 5% are assumed.

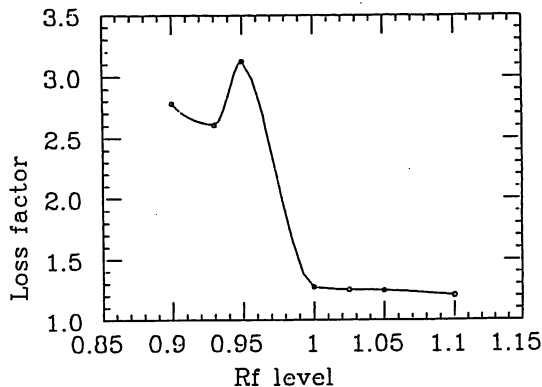


Fig.11 Loss factor vs. rf level for PR187. Tank error of 2% and cell error of 5% are assumed.

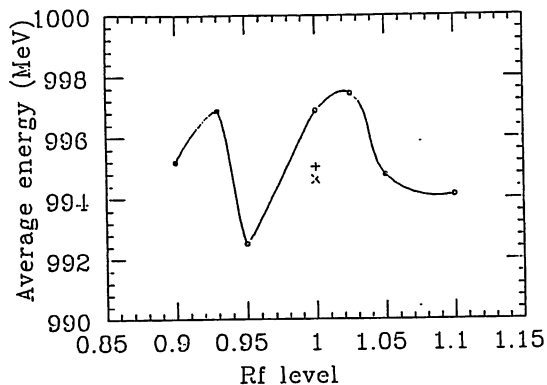


Fig.12 Average output energy vs. rf level for PR187. Tank error of 2% and cell error of 5% are assumed.

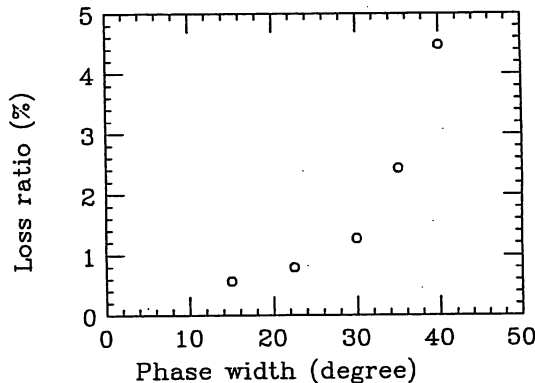


Fig.13 Loss ratio in CCL vs. bunch length at DTL entrance.

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 Fig.9 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 Fig.10, Fig.11 に示す。ロスの少ない加速電場の範囲はある程度はあるが、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わかる。この場合の平均エネルギーの変化を Fig.12 に示す。

5.3 DTL 入口の位相の広がり効果

DTL の入口で位相の広がりが二倍違うビーム集団 (PR187 と位相幅がこの半分の $\pm 15^\circ$ の PR186) をつくり、CCL による加速の様子を較べてみる。これは RFQ の設計と周波数の選択に関係する。結果を Table 4 に示す。又、loss ratio と DTL 入口の位相幅の関係を Fig.13 に示す。ここでは加速電場のエラー (5,2) を仮定している。

Table 4 DTL 入口の位相幅の効果

	PR187	PR186	
<u>at DTL entrance</u>			
$\Delta \phi$	± 30	± 15	degree
ΔW	± 60	± 60	keV
ϵx	0.56	0.56	π cm mrad
ϵy	0.55	0.55	π cm mrad
<u>at CCL entrance</u>			
$\Delta \phi$ (full)	34	18	degree
ΔW	0.6	0.15	MeV (90% full)
<u>at CCL exit</u>			
field error	(0,0) (5,2)	(0,0) (5,2)	
loss ratio	0.53 1.27	0.1 0.57%	
ΔW	2.2 2.1	1.9 1.8 MeV (90% full)	
ϵx	0.68 0.69	0.55 0.55	π cm mrad
ϵy	0.58 0.58	0.51 0.51	π cm mrad

6. 加速電場のズレについて

加速電場の大きさを知る為には、励振電力のモニターから類推する方法では不十分であり、良くチューニングされていると仮定出来るタンクによるビーム加速による判定が必要であると考えられる。その場合、 $\beta < 1$ なので位相振動が有ることを考慮しなければいけないが、一旦チューニングが出来てしまえば、モニターの値が役に立つ事はあきらかである。最も、ビームロスとエネルギーの広がりを考えなくて良いようなリニアックに出来れば、加速電場の値をきちんと押さえる必要はない。

多数の独立な高周波電源により励振されるリニアックの加速電場が、期待値と異なる理由を考えて、以下に挙げてみよう。

A. 励振電力が期待値と異なる。

多数の独立電源相互の電力比が期待値と異なる、そして一つの電源の電力を分割していく過程で分割比が違って来る等が考えられる。後者は分割の回数が多い程、バラツキは大きくなる。Los Alamos で採用している bridge coupler は、逆に自由な分割比を設定出来るようにしているが、利点欠点があるであろう。三通りの給電法を Fig.14 に示す。

B. ある励振電力を与えても、空洞の性質が変わっていて、加速電場の大きさが異なる場合がある。低電力測定によるシャントインピーダンスがバラツクうえに、決して少ないとは言えない発熱を伴う運転が、空洞のチューニングやカップリングに及ぼす影響などが考えられる。

C. ビームローディングの影響

空洞の stored energy の約 10 倍のエネルギーをビームは必要とするので、ビームローディングの補償をきちんと行わないと、

400 μ secの長いビームパルスの中に、ビームが感じる電場が変化してしまう。簡単な計算によれば、single version では、一つのクライストロンからの給電を受ける多くのセルの中で、第一のセルについて時間的に完全な補償をすれば、最後のセルは必ず1%程度の加速電場の減少を起す事になる。進行波型のリニアックでは、加速電場の空間的な分布は、ある設計値の電流の値の時にだけ実現される。詳しい考察が必要な分野と思う。

7. まとめ

1. エミッタンスとアクセプタンスの比 (ϵ/A) をいくらに想定出来るかにより、ビームロスに関係する部分の設計と要求される rf チューニングの厳しさが大きく異なる。
2. Rf defocusing の効果が大きいので、ビームの位相幅には充分注意する必要がある。

ビームの性質を悪くせず、ビームロスを少なくする為に、縦横のエミッタンスの大きさに留意し、加速電場のチューニングに注意するという平凡な結論になった。最後に、本稿では space charge effect を考慮しないがそれは、ビーム電流 20 mA を想定しているからである。

謝辞

西川所長から、多くの貴重な御指摘と助言を戴きました。ここに深く感謝致します。

参考文献

1. "大型ハドロン計画の加速器", 61年12月10日.
2. A.Lombardi et al., "SCL Preliminary computations concerning the structure and beam dynamics", December 1986, A.Lombardi and M.Weiss, "Some general consideration of the injection scheme", October 1986.
3. 加藤隆夫, "1 GeV リニアックの試み", KEK ASN 259, October 1986.

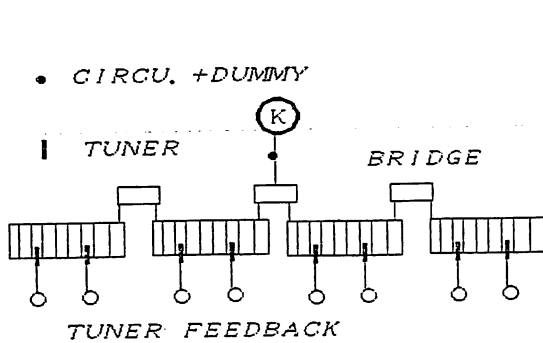


Fig.14 a) Rf system with bridge couplers for coupled cavity linac.

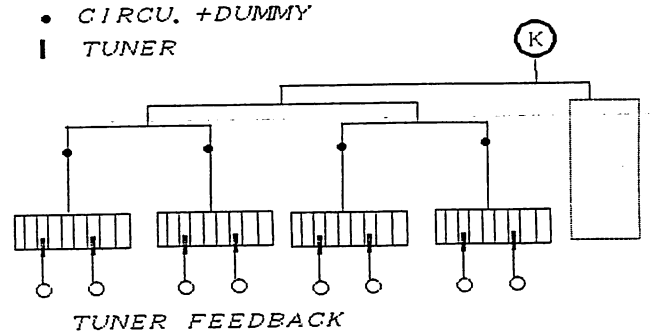


Fig.14 b) Rf system with dividers for coupled cavity linac.

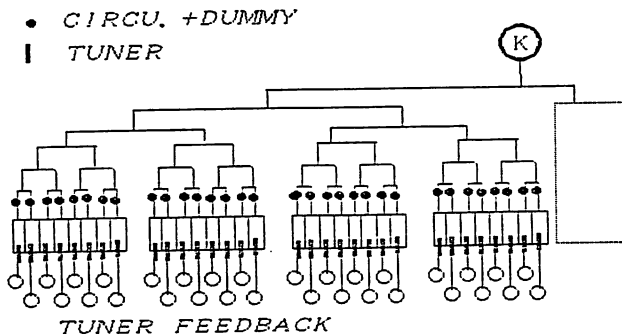


Fig.14 c) Rf system with dividers for single cavity linac.