

1 GeV 大強度陽子リニアックの設計の指針

941114 加藤隆夫

まとめ

- 1) H^- と H^+ の双方を加速できる。
- 2) ピーク電流 30 mA、平均電流 1mA を目標とする。
- 3) デューティ因子増加による平均電流の増大を見込める設計とする。
- 4) 最新の成果を取り込んだ beam dynamics デザインとする。
- 5) DTL と CCL の周波数比は 3 倍に選ぶ。
- 6) クライストロンの使える範囲で低めの周波数を選ぶ。
- 7) DTL には四極電磁石を使う。
- 8) DTL 入射エネルギーは 3 MeV とする。
- 9) RFQ は RF 的にユニットタンクとする。
- 10) 加速管の対称性を重視する。
- 11) 安定な運転を達成できる事を目標とする。
- 12) 加速管とビームラインの放射化に留意する。

1. はじめに

1987 年に 1 GeV ワーキンググループは、大強度陽子リニアックの提案を行ない、その実現の為に必要と予想される技術開発を行なってきた(参考文献 1)。ここでは、ピーク電流 20 mA、平均電流 400 μ A、基本周波数 432 MHz、繰り返し周波数 50Hz のパルスリニアックが想定されている。

このリニアック特に DTL の実現性は、幾つかの新しい重要な技術開発の予測の上に成り立っていた。第一に、スペックに見合う永久四極磁石が開発可能であるという判断があった。その後の開発は、その判断を実証した。その時点での第二の予測は、20 mA- 1π mm-mrad の H^- イオン源は遠からず実現するというものであった。この点に関しては、少し反省せざるを得ない。現時点では、20 mA ビームのエミッタンスは、より大きく設定する必要があると判断される。第三の予測は 3 MeV-RFQ は可能であるというものであり、これはその後の開発により、見事に実証された。周波数 432 MHz の選択は、3 MeV-RFQ の実現性の判断に依存しており、当時、その判断は四面楚歌に包囲された事を思えば、隔世の感がある。

周波数 432 MHz を選定出来たもっとも大きな理由のひとつは、ネオディウムボロン系とサマリウムコバルト系の永久四極磁石がドリフトチューブリニアック (DTL) に採用可能であると予想したからであった。その予想は正しかったが、最初の提案から長い年月を経て、世界において供給される永久磁石の種類と量に大きな変化が現われている。産出量が絶対的に少ない希土類元素 (サマリウム) を使う永久磁石は、年々その生産量が減少し、今後の供給見通しは悲観的な情勢となった。かつて、トランジスターの出現により、真空管の使用量が激減し、今や特種な用途以外には使われなくなっているという

歴史があり、その過程では、加速器に使われる大出力真空管にも、そうした全般的な流れが大きく影響した。諸事情を考慮すれば、サマリウムコバルト系の永久四極磁石は今後の大量且つ継続的な使用予定から、はずさざるをえない。ネオディウムボロン系の永久磁石は、その耐放射線特性に問題が残るので採用できない。従って、DTLの四極磁石として、電磁石を候補と考える。このような技術環境は、リニアックの設計に大きな影響を与える。一般にDTLに使用される四極電磁石が実現できる磁場勾配は、永久磁石方式が達成する値に比べてかなり低い。これは周波数の選定とDTLへの入射エネルギーの選択において主要な境界条件となる。

さて、筆者は、更に大強度化を目指す場合の方策を、かつて、提案した（参考文献2）。その要点は次の通りである。

1. あまり大きくないピークビーム電流を選び、
2. あまり高くない繰り返し周波数を選び、
3. 長いビームパルス長さを選択する。

上記結論の背景はここでは省略するが、このような平易な指針が、マシンの性格を殆ど決めてしまうといえる。

以上をふまえて、平均ビーム強度の増大を目指し、ピーク電流 30 mA、平均電流 1mA の 1 GeV 陽子リニアックを提案する。このリニアックは、運転のデューティ因子を増加させる事により平均電流の増加が期待出来るような構成として、究極の CW リニアック（デューティ因子 100%）の実現の為の開発研究が行なえる環境を用意する。

要求仕様

- 1) 平均電流 1 mA
- 2) エネルギー 1 GeV
- 3) ピーク電流 30 mA

基本条件

- 1) H と H⁺ の両方を加速
- 2) クライストロン使用
- 3) 3 倍の周波数変換（DTL ----> CCL）

2. 全体構成

全体構成は次のようになる。

- 1) イオン源
- 2) 低エネルギービーム輸送系（LEBT）
- 3) RFQ
- 4) 中間エネルギービーム輸送系（MEBT）
- 5) DTL
- 6) SDTL

7) 高エネルギービーム輸送系 (HEBT)

8) ACS

ACSの周波数はDTLの3倍に選ぶ。ピーク電流は30 mAを想定する。さらに、試験的には40 - 50 mAも視界に入れる。デューティ因子は3.3%を想定するが、高周波源の増強により10%を視界に入れる。第5項のSDTL (separated type DTL)はこのエネルギー帯のシャントインピーダンスをあげる為に使用するが(参考文献3)、この導入により、縦方向と横方向の収束法の変化を、場所的に大きくずらす事が出来るという効果がある。これが、実際にどのように働くかは、今後のシミュレーションに待つとして、ここでは有力な候補としてあげておく。

3. 周波数の選定

周波数の選定において重要な諸因子を列挙すると、

- 1) 縦方向及び横方向のビームの運動に対して、空間電荷効果を考慮して適切な収束力が保持出来る事。
- 2) クライストロンが使用可能な事。
- 3) DTLの四極電磁石が可能である事。
- 4) ACSが可能である事。

それぞれの項目について簡単な検討を行なう。

3.1) 空間電荷効果を含む場合のビームダイナミクス

空間電荷効果自体の作用と、それを媒介としての作用の二通りの仕組みにより、空間電荷効果はビームのエミッタンスの増加をもたらす、加速性能を劣化させる。

エミッタンスの増加は基本的には次式であらわされる。

$$\frac{\epsilon_f}{\epsilon_i} = \left(1 + 2 \frac{k_0^2}{k_i^2} h \right)^{1/2} \quad (1)$$

ここで、 ϵ_i と ϵ_f は、始めと終りのエミッタンス、 k_0 はゼロ電流の収束力、 k_i は空間電荷を含む収束力、 h はエミッタンス増加をもたらす原因となるべきエネルギー源をあらわし、例えば、

- 1) 電荷の分布状態に依存する field energy、
- 2) 収束力に由来する振動エネルギー、
- 3) 収束力に由来する位置エネルギー、

などが考えられる。夫々のエネルギーは、空間の自由度3に対応する成分に分ける事が出来るが、この自由度に関しては、最終的に等しくエネルギーが分配されるという法則があり、これを equipartitioning と呼ぶ。従って、上記3項のエネルギーが終状態として

は、夫々の自由度の間にてバランスされなければならないという意味で、

4) equipartitioning、

および、終状態までの過程は、縦横の収束力に依存する意味から

5) ビームラインの収束パラメーターと、それ自体の非線形性、
が、意味をもつ事になる。

注) 第1項は、ビーム内の電荷分布の非一様性に基づく、いわゆる charge redistribution によるエミッタンス増加である。第2項と第3項とは、同一の振動の側面であるという意味で関連しており、第4項と第5項を媒介として、ある自由度におけるエミッタンスの増減を惹起する。第2項と第3項は場合によりはっきりと分けられる。例えば、入射ビームのエミッタンスの形がラインのアクセプタンスからずれていたり (mismatch)、または、ラインの中心からずれている (off-centering) ような場合は、第3項の位置エネルギーが、正常の場合に比べて高くなっていると考えられる。又、一つの自由度に関する収束力が強すぎる時は、第2項の大きな振動エネルギーを惹起すると考えられる。

電荷の非一様性に由来するエミッタンス増加を考える。この場合には (1) 式は

$$\frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_i} = \left(1 + \frac{1}{3} \left(\frac{k_0^2}{k_i^2} - 1 \right) \frac{U}{w_0} \right)^{1/2} \quad (2)$$

とあらわされる。ここで、 U/w_0 はビーム内の電荷の非一様性に由来するエネルギーをあらわし、ガウス分布では 0.308 となる。上式を space-charge parameter μ_t を使って書き直すと、

$$\frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_i} = \left(1 + \frac{1}{3} \left(\frac{\mu_t}{1 - \mu_t} \right) \frac{U}{w_0} \right)^{1/2} \quad (3)$$

$$\mu_t = 1 - \frac{k_i^2}{k_0^2} = 1 - \frac{\sigma_i^2}{\sigma_0^2} \quad (4)$$

となる。ここで σ は横方向振動の位相進みをあらわす。space-charge parameter μ_t は、収束力とビームサイズの両方に依存するパラメーターであり、ここでは、ある加速電場を設定した上で、equipartitioning が成立するような入射時の値を求めてみた。その場合のビームパラメーターが、実際のビームに比べて近似の許容範囲ないかどうかは、別の検討対象となる。Table 1 にビーム電流 30 mA の場合の結果をまとめて示す。

Table 1 より、200 MHz と 300 MHz は空間電荷効果の働きにおいて大きな差 (約 2 倍) があるが、300 MHz と 350 MHz の差は約 30% である事がわかる。またビーム密度がガウス分布の時に予想されるエミッタンス増加 (EGF) は、5% 以内であり、この増加そのものは、問題視する程は大きくない事がわかる (但し、ビームパラメーターの選び方に依存する)。しかしながら、(1) 式からわかるように、エミッタンス増加に関連する項には space-charge parameter μ_t が関連しているので、より小さい値を選ぶ事は必要であろう。

Table 1 周波数による加速パラメーターの相違

Frequency	200	300	350	MHz
Emittance (90%)	0.15	0.15	0.15	$\pi\text{cm}\cdot\text{mrad}$
Eacc	2	2.2	2.4	MV/m
Beam radius	2.44	1.86	1.74	mm
$\Delta\phi$	6.6	8	8	degree
B'	42.9	96.5	129.6	kG/cm
σ_x^0	60	60	60	degree
σ_x	42.5	49.6	51.4	degree
σ_x/σ_x^0	0.71	0.83	0.86	
μ_t	0.50	0.32	0.27	
$\mu_t/(1-\mu_t)$	0.99	0.47	0.36	
EGF	5.0	2.4	1.8	%

EGF: emittance growth factor

3.2) クライストロンの使用

この条件からは、周波数 300 MHz 以上が望ましい。

3.3) DTL の四極磁石

これについては、次章で検討する。

3.4) ACS が可能である事。

シャントインピーダンスと大きさを考慮すれば、ある程度高い周波数が望ましい。

4. DTL の入射エネルギー

これはRFQ の出力エネルギーでもあり、リニアック全体の性格を決める重要なパラメーターである。3 MeV 選定の理由は、以前の参考文献をみていただく事にして、ここでは新たな周波数 300 - 350 MHz に対して、この入射エネルギーが持つ意味を考察する。

横方向の位相振動のある位相進みを与える為の磁場勾配は次式で与えられる。

$$B' = \frac{mc^2}{q} \frac{\beta\gamma}{c} \frac{\theta_0^2}{L^2}$$

$$B' \propto \frac{f^2}{\beta}$$

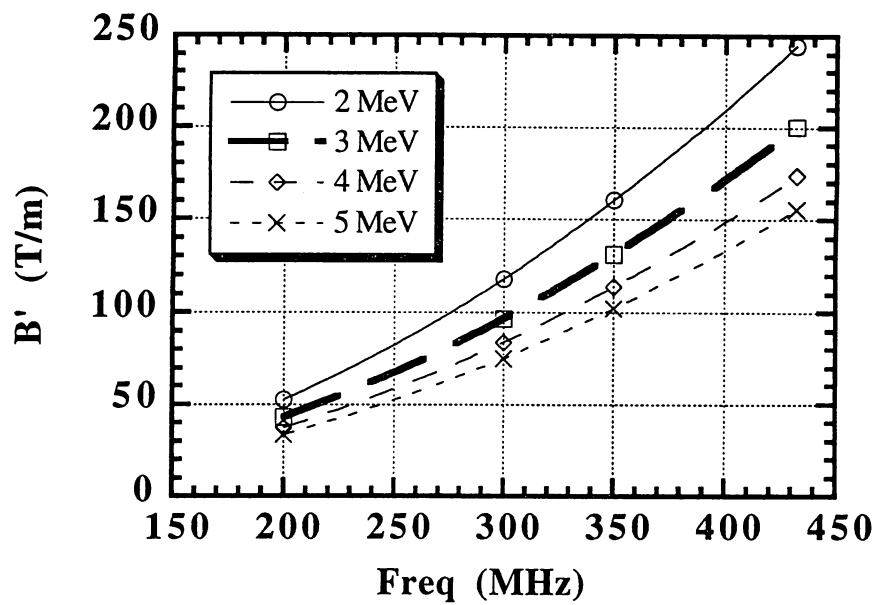


図1 必要となる磁場勾配

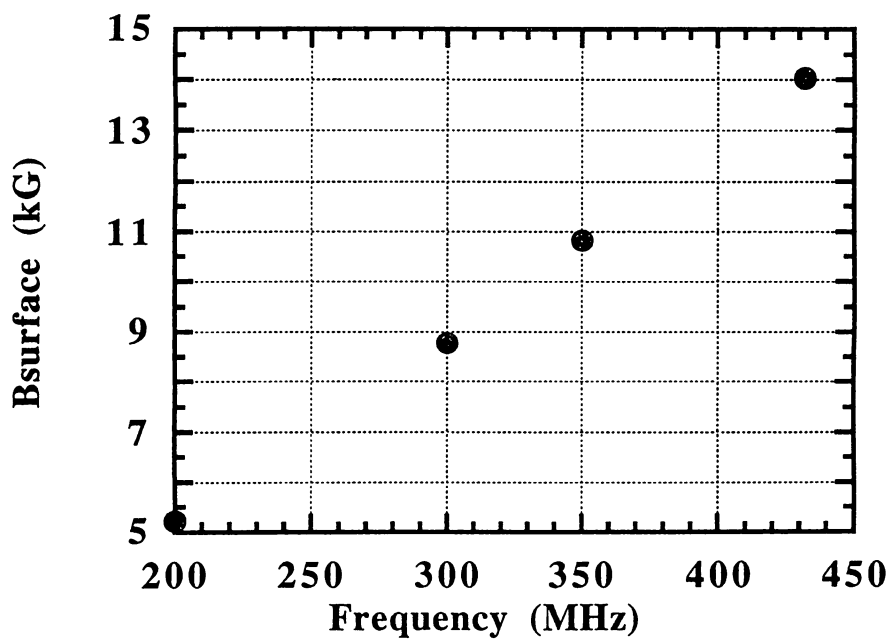


図2 四極磁石表面の磁場 (3 MeV 入射)

ここで、 $\theta/L=k$ であり、 k は位相振動の波数、 $L=\beta\lambda$ はセル長である。従って、必要な磁場勾配は周波数の平方に比例し、且つ入射速度（入射エネルギー）に反比例する。図1に位相進み 60° の場合を示す。図2に磁極表面磁場を示す。350 MHz の時には、3, 4, 5 MeV 入射に対応して、表面磁場は、10.8, 9.3, 8.4 kG となり、エネルギーを 5 MeV 近くまであげないと、300 MHz 3 MeV 入射と同等にならない。

RFQ と DTL の間のビームライン (MEBT) は、入射ビームのパラメーターをコントロールする意味で非常に重要な役割を持つ。その意味で以下の自由度を確保しておく必要がある。

1) ビームモニターの設置

2) ビームチョッパーの設置

リング入射を予定すれば、低エネルギー部において、速いチョッパーは必須である。そこでは、必然的に望ましくないビームロスが生じる。筆者の提案している RF チョッパー (参考文献4) は、電場により軌道を曲げるので、高いエネルギーになるほど困難さが増大する。

3) 耐放射線作業の容易さ

更に、この地点のビームの安定性を確保するために、RFQ は RF 的にひとつのタンクである事が望ましい (筆者の経験より)。

以上より、DTL 入射エネルギーを 3 MeV より高める事は望ましくない。

4. 加速過程の検討

筆者は以前のレポートで、高エネルギー CCL 加速過程において、横方向の位相進みを一定に保つ方法と、次第に位相進みを遅くしていく方法の二つを計算して、結論としては、「現時点では、電磁石で双方ともを設定可能にしておけば充分である」と書いた (文献5)。これは、位相進み一定のシミュレーションが、ビームの暴れを惹起すると思われたので、その改善策を提案したのであった。DTL においても、結果的には似ている事が理論的な装いで提案されている (文献6)。それは、equipartitioning が成り立つように入射させて、縦と横の収束力を加速過程で一定に保つという方法である。具体的には、加速電場を加速管内で一定に保つ場合には、横方向の位相進みを漸次弱めていく事になり、反面、ビーム半径は次第に増加する。DTL の加速過程全域で equipartitioning が成り立つように位相進みを変えた時のビームサイズの変化の様子を図3に示す。位相進みの変化の様子を図4に示す。このように変化させる事は新たな問題を生む事も予想されるが、新しい魅力的な方法である事も事実である。この方法では、必然的にビームサイズが大きくなるので、ドリフトチューブのビーム孔半径とビーム半径の比が大きくとれる事が望ましい。エミッタンスが一定のビームの場合には、この比は波長の平方根に比例するので、低い周波数が有利となる。

ビームサイズを加速に従って大きくする事に賛成するもう一つの理由を図5に示す。

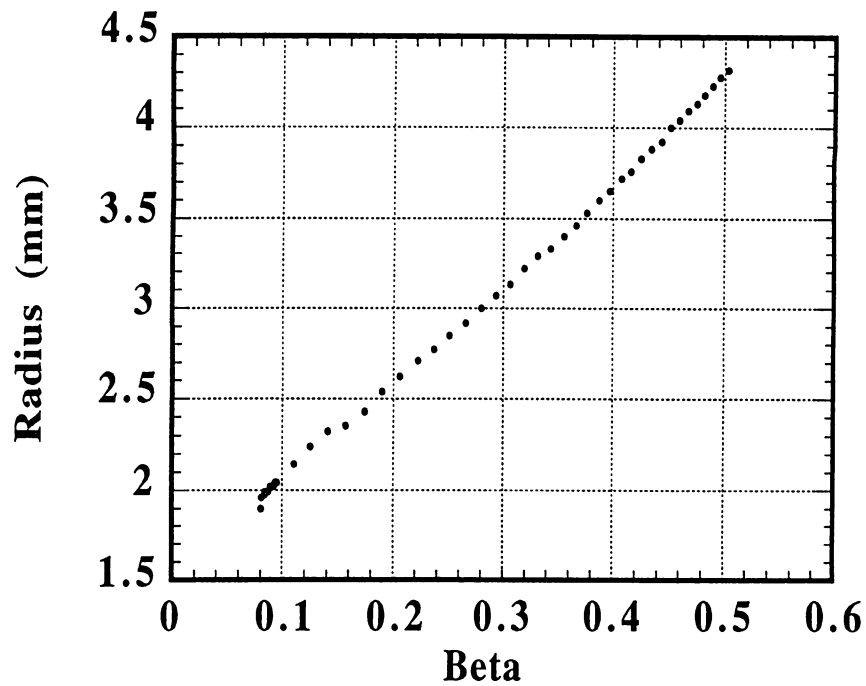


図3 equipartitioning が成り立つように位相進みを変えた時のビームサイズの変化。

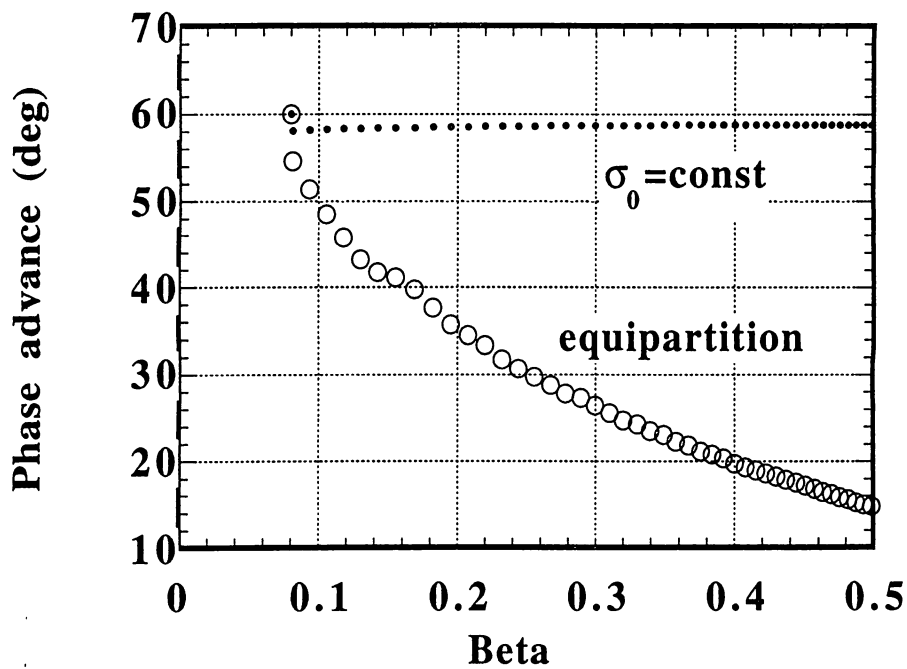


図4 DTL 内における 2 種類の横方向収束法。equipartitioning が成り立つように位相進みを変える収束法と位相進みがほぼ一定の収束法。

これは、筆者の開発した新しい計算コード（LINSAC、文献7）によるシミュレーションの結果であり、加速過程におけるビーム体積の変化とバンチ内衝突の頻度を表している。図からわかるように、バンチ体積が縮小したときに衝突頻度が増え、そして強い衝突も起こっている。この効果を回避する為には、バンチ体積を大きくするのがよく、すなわちビーム半径を大きくして加速する事が望ましい。又、同一エミッタンスの時には、マイクロパルスの電荷密度は周波数に比例するので、この意味からも低い周波数が望ましい。

5 . DTL の設計例

300 MHz と 350 MHz の DTL のデザインを Table 2 に示す。加速電場を以前より低く設定しているが、まだ高すぎる可能性も残る（duty をどこまで高めるかで決まる）。

6 . CCL について

対称性の問題からは ACS を候補にしたい。周波数が 600 MHz まで下がると、大きさの点から考えると巨大な感じがする。いずれにせよ、加速電場の設定が低くなるので、長さが長くなって大変だという以外には、これまで以上に心配する点はない。

Table 2 DTL デザインの比較

Frequency	300	350	MHz
Input energy	3	3	MeV
Output energy	147	147	MeV
Accel. field	2.2	2.4	MV/m
Length	116.2	110.9	m
Number of cells	359	401	
Number of tanks	13	14	
Pc (rf, +30%)	8.75	9.66	MW
Pbeam (30 mA)	4.33	4.32	MW
Total power	13.1	14.0	MW
Q-gradient	9.49	12.96	kG/cm
Acceptance	1.9	1.7	π cm·mrad

7. まとめ

- 1) そのマシンの要求仕様により、マシンの設計が異なる事を再確認する。
- 2) 無闇に仕様を拡張すれば、どこかに無理な設計となる。
- 3) その無理の性質を見極める必要があるが難しい場合がある。
頼りにする理論は、関連部分だけを抽象して作られ、しかも普通はおおくの仮定がなされており、応用時には見逃されやすい。
- 4) 従って、全体の合理性と整合性が必要と予測される。

参考文献

- 1) 大型ハドロン計画陽子リニアックワーキンググループ報告 I、JHP-10、KEK Internal 88-8.
- 2) I. Yamane et al., KEK Report 93-12, p.5 (1993) .
- 3) T. Kato, "Proposal of a Separated-Type Proton Drift Tube Linac for a Medium-Energy Structure," KEK Report 92-10 (1992) .
- 4) T. Kato, "New Design of an RF Beam Chopper," 7th Symp. on Accelerator Science and Technology, 228 (1989) .
- 5) 大型ハドロン計画陽子リニアックワーキンググループ報告 II、JHP-14、KEK Internal 90-16, p.211.
- 6) M. Reiser, "Design of Equipartitioned High-current RF Linsacs," LINAC 94.
- 7) T. Kato, "Beam Simulation Code Using Accurate Gap Field Distribution in a Drift Tube Linac," LINAC 94, KEK Preprint 94-84.

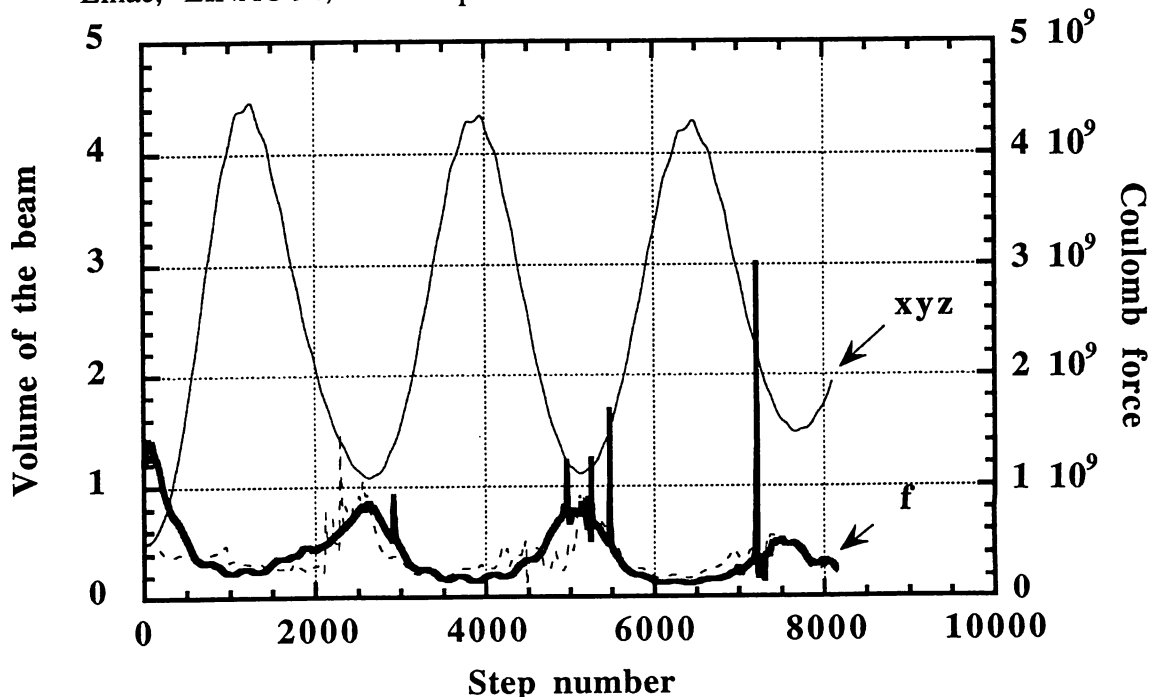


図5 DTL 加速中におけるビームの体積 (xyz) と粒子が受けるクーロン力 (f)、共に任意ユニット。横軸は逐次計算のステップ番号で1セル当たり180ステップ。図全体で45セルの加速を表している。

1 GeV 陽子リニアックについて

- * KEK は平均電流の増加を目指して新しいデザインを策定する。
- * その場合の周波数は 432 MHz より低くなる。
- * 細かいパラメーターは今後の検討に待つ。
- * 原研は 200 MHz のデザインを version up して、KEK の新しいデザイン策定に参加する。
- * 新しいデザインは、以下の基本仕様を満たすものとする。
 - 1) H⁻ と H⁺ の双方を加速できる。
 - 2) ピーク電流 30 mA、平均電流 1mA を目標とする。
 - 3) デューティ因子増加による平均電流の増大を見込める設計とする。
 - 4) 最新の成果を取り込んだ beam dynamics デザインとする。
 - 5) DTL と CCL の周波数比は 3 倍に選ぶ。
 - 6) クライストロンの使える範囲で低めの周波数を選ぶ。
 - 7) DTL には四極電磁石を使う。
 - 8) DTL 入射エネルギーは 3 MeV とする。
 - 9) RFQ は RF 的にユニットタンクとする。
 - 10) 加速管の対称性を重視する。
 - 11) 安定な運転を達成できる事を目標とする。
 - 12) 加速管とビームラインの放射化に留意する。
- * 試作機は、双方が仕様の策定を共同して行ない、新たに製作する。