

PLA / 95 / 1

95 / 4 / 20

1 GeV リニアック検討資料

1 GeV LINAC DESIGN NOTE

題目 (TITLE) 陽子リニアックの設計とスーパーコンピュータ

著者 (AUTHOR) 加藤隆夫

概要 (ABSTRACT)

陽子リニアックのビームシミュレーションにおいて、p-p 法による空間電荷効果を導入して、ビームの加速過程を逐次精確に計算して、興味ある結果が得られている。横方向と縦方向のカップリングが自然な形で達成されている事により、加速に伴う縦横のエミッタンス増加と収束力との関係が、鮮やかに結果に反映される事が示された。ビームのマクロ的な性質（エミッタンス）とミクロ的な性質（衝突）の双方の研究手段としての本コード（LINSAC）の活用が、今後期待される。このコードは空間電荷効果の計算に p-p 法を採用しているので、スーパーコンピュータへの依存度が大きく、並列化が急がれている。

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

陽子リニアックの設計とスーパーコンピュータ

高エネルギー物理学研究所 加速器研究系 加藤隆夫

1. はじめに

本稿で取り扱う大強度高エネルギー陽子リニアックの主な仕様は次の通りである。

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

この仕様を満たすような陽子リニアックの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 リニアック
- 4) 中間エネルギービーム輸送系-1 (MEBT)
- 5) ドリフトチューブリニアック (DTL)
- 6) 高エネルギービーム輸送系 (HEBT)
- 7) 高エネルギー部加速管 (ACS)

このリニアックの問題点は、加速自体にあるのではなく、如何にきれいに加速するかという点にある。加速過程におけるわずかのビーム損失 (10^{-4} 以下) は、加速管の放射化をもたらし、運転時間の制限を惹起してしまうからである。世界に唯一存在するロスアラモスの 800 MeV 陽子リニアックでは、高エネルギー加速部におけるビーム損失が見られ、これが、実質的なリニアックの性能を決めてしまっている。しかも、建設後 20 年を経て、このビーム損失の原因は解明されているとはいいがたい。従って、今後高エネルギー大強度陽子リニアック建設する場合には、第一にこの問題を解明しなければならない。仮に、このような問題点がないとすれば、リニアックの設計にスーパーコンピュータは必要ないであろうし、30 年前に開発されたマクロな性質をトレースするコードが充分役にたつ。

筆者はこのような考えから、新たなシミュレーションコードの開発を行なった。その指針は次のようなものである。

- 1) リニアック内部の加速電場は、その分布を正確に取り扱う。
- 2) 出来るかぎり近似を入れないで空間電荷効果を扱う。
- 3) 加速のユニットセルを多分割して計算を行なう。

これに対して従来の代表的な計算コードは、平均加速電場を使い、軸対称なディスクモデルにより空間電荷効果を取り扱い、ユニットセルを数個のマトリックスに分割して計算を行っていたのであるから、計算量は少ないが、それにより得られる情報には一定のマスクがかけられていたのである。一方、新たに開発したコード LINSAC (Linac Simulation Code with an Accurate Field Distribution、参考文献 1) は、その膨大な計算量の為に、

優れたスーパーコンピュータの存在によって、初めてその存在価値が実証されるコードであり、今回の KEKSC のグレードアップは非常に有り難いものとなった。

2. コード LINSAC の概要

ここでいう空間電荷効果とは、粒子の間に働くクーロン相互作用であり、その力は次式で表される。

$$F_i = -\frac{q^2}{4\pi\epsilon_0} \sum_{j \neq i}^N \frac{r_{ij}}{r_{ij}^3} \quad (1)$$

q は単位電荷、 ϵ_0 は真空中誘電率、 r_{ij} は粒子間の距離を表す。この式に従って直接計算する事は、粒子数 N が大きくなれば、一見して大変だとわかる。そこで遠距離力という力の性質を利用して、ポテンシャルで記述出来るような平均化された電場と、着目する粒子に極めて近づいた特定の粒子からの力を分けて記述する近似がよく使われ、

$$F_i = -\frac{\partial}{\partial r} q\phi_s(r,t) + \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0} \sum_j \frac{r_{ij}}{r_{ij}^3} \quad (2)$$

となる。第1項はポアソン方程式を解く事に帰着し、第2項は衝突に対応する。

一般に流通しているリニアックのビームシミュレーションソフトは、空間電荷効果の軸対称性を仮定して、(2) 式の第1項を取り入れている。これは、空間電荷効果を大雑把に調べるには適用出来るが、大強度陽子リニアックのシミュレーションには力不足である。微小なビームロスが問題となっている今日では、第2項の衝突の項まで取り込んで、議論を行なう必要がある。衝突を含む計算でも、おそらく式(2)を使う場合が殆どである。その理由は、式(1)による計算は、あまりに膨大になりすぎて実用的ではないと信じられており、これは1980年代の書物に記されている(参考文献2)。表1に示したのは、(1)式を使って計算する場合 (particle-particle, PP法) の計算時間の評価である。この当時の計算機能力では、(1)式を使う計算法の採用には勇気が必要であったと思われる。新しいコード LINSAC は、(1)式の形で力を厳密に取り入れており、ベクトル化率 99.9% 以上を達成して、高速化をはかっている。

(1)式を用いる場合には、加速ギャップの電場及び収束磁場を三次元的に正確に記述して計算を行なわなければ、全く意味がない。平均した場をつかう計算と三次元の厳密な計算とは、計算過程における軌道や運動エネルギーがまったく異なる異質なものである。DTL の加速ギャップの電場は図1に示すような空間分布をしている。厄介な事にエネルギーが変わるに連れて、この分布の形も変わる。そこで、各エネルギーにおいて

表1 Timing estimates for PP calculations (from ref.2)

computer	Nominal time for 1 operation	CPU=10 N ² x 1operation-time		
		N=10 ²	N=10 ³	N=10 ⁵
Large scientific parallel/vector	1μs 0.1μs	0.1s 0.01s	10s 1s	1 day 1hr

9 次の多項式により軸上の電場を近似し、次式の関係により全電場の空間分布を決める。

$$E_z = \sum_{m=0}^{\infty} A_m I_0(k_m r) \cos \frac{2m\pi z}{L} \cos \omega t$$

$$E_r = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{A_m 2m\pi}{k_m L} I_1(k_m r) \sin \frac{2m\pi z}{L} \cos \omega t$$

$$k_m^2 = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 \left(\left(\frac{m\lambda}{L}\right)^2 - 1\right)$$

解くべき運動方程式は

$$\frac{d\mathbf{p}}{dt} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}), \quad \mathbf{p} = m_0 \gamma \mathbf{v}$$

I_0 は変形ベッセル関数、 L はユニットセル長さ、 λ は波長、 p は運動量、 v は速度、電場 E と磁場 B は空間電荷効果を含む全電磁場を表す。これを Runge-Kutta 法により数値計算する。

粒子数1600個、63000ステップの計算時間は1PE計算では約6時間である。本コードの並列化は今後の課題であり、計算精度と質の向上の為に早晚差し迫った問題となると予想している。

3. 計算結果

図2-3に、3 MeV から148 MeVまで計算した時の、出力波形を示す（ピーク電流30 mA）。図2には、いわゆるハロー（circle of light round the moon or sun）が出現しており、図3にも、同じ事ではあるが、ビーム集団から離れた粒子の存在が見られる。これらは、2個の粒子が特別に接近するいわゆるビーム内衝突の影響であり、式（1）で表されるクーロン電場を使用して逐次計算をした結果である。

4. 衝突の効果（ビーム内衝突）

新しい計算コード LINSAC の優れている点は、バンチ内衝突の効果を詳しく調べら

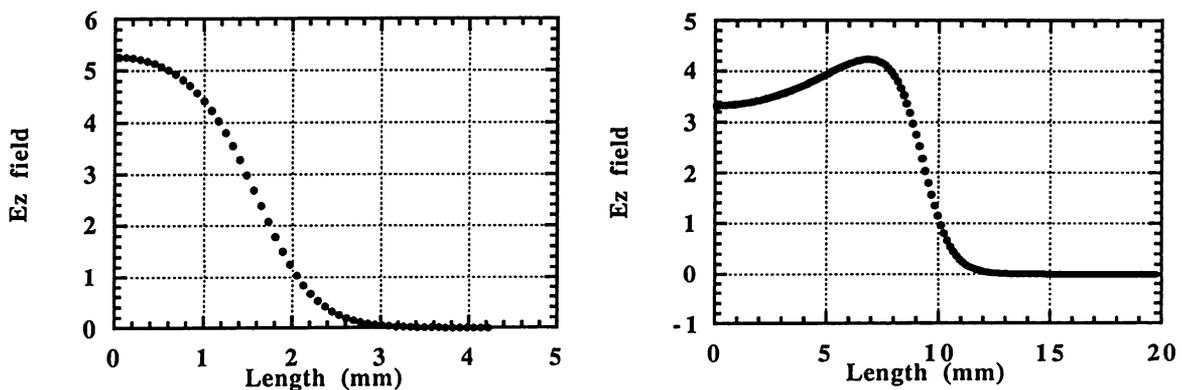


図1 加速ギャップの電場分布（対称なので半分を表示）。エネルギーが4 MeV 付近（左図）と100 MeV 付近（右図）。

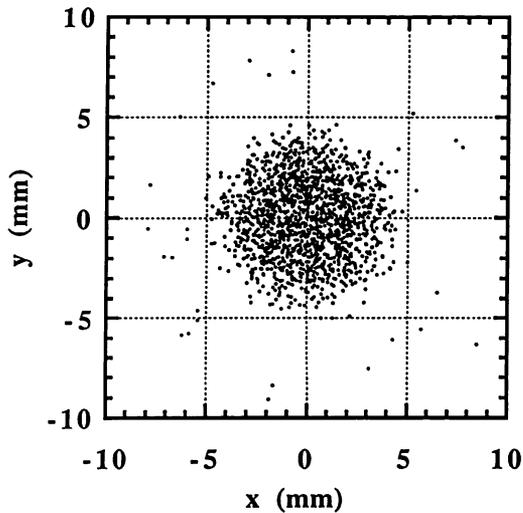


図2 出力ビームプロファイル。

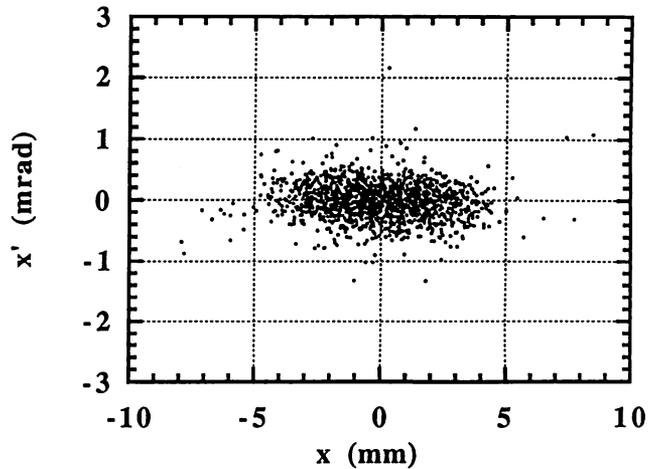


図3 出力ビームエミッタンス (x-x')。

れる点にある。ここでいう衝突は、2個の粒子が互いに近づく事により、受ける力がある一定の値以上になる現象を選別しており、例えば、2個の粒子間の距離は図4の形になる。この計算結果が、どの程度信頼できるかを調べる為に、クーロン力を(3)式のように修正する。

$$E = \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r^2 + \delta^2} \quad (3)$$

$$\delta = \alpha \frac{r_s}{2}$$

ここで、 Q は1個のマクロ粒子が持つ電荷数、 r_s はマクロ粒子間の平均距離、 α は自由パラメータを表す。簡単の為に $N_s = 1600$ 個の一様球形バンチの場合に(3)式がどのような形になるかを図5-6に示す。 $\alpha = 1$ の場合(図5)には、空間電荷力は(2)式の第1項で表される線形成分に近くなっている事がわかる。次に α を変えて、ビームを3 MeVから148 MeVまで加速した時の、ビームの横方向エミッタンスの増加を図7に示す。 α

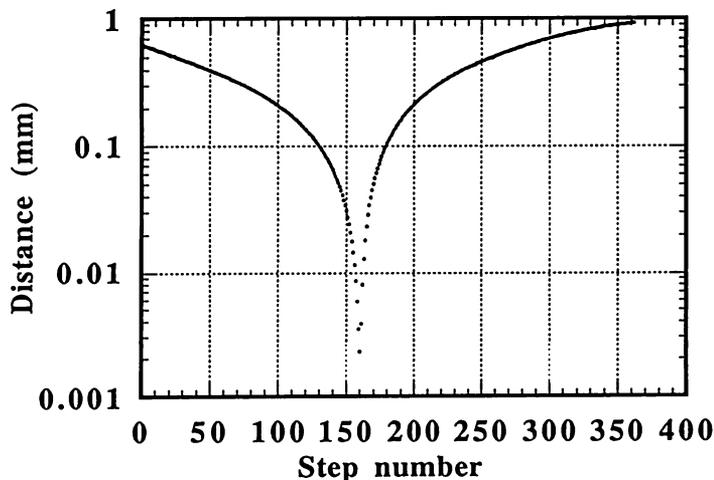


図4 2個の粒子の間の距離の衝突した付近での推移。

が小さくなるに従って、エミッタンス増加は大きくなるが、その変化の割合は10%程度であり、無視できる大きさと評価出来る。従って、コード LINSAC はクーロン力の補正をいれなくとも、ビームのマクロ的な性質に関しては、ほぼ正しい結果を示すといえよう。

ハローの生成に関しては大きな影響が出る事が予想される。式(3)からわかるように、2個の粒子が近づいてクーロン力が大きくなる場合に δ の影響は大きく効いてくる。 α を変えた時の、最終ビーム形状を図8-9示す(図2が $\alpha=0$ に相当する)。このシミュレーションでは、ビーム損失を考慮していないので、実際には壁に当たってロスすべき粒子が最後まで加速されている。従って、図8-9においてビームハローを形成する粒子は、加速過程の途中で徐々に振り落とされるビーム損失となる。ハロー生成の量は、シミュレーションで採用する α の大きさに依存する事がわかるので、ここでは、バ

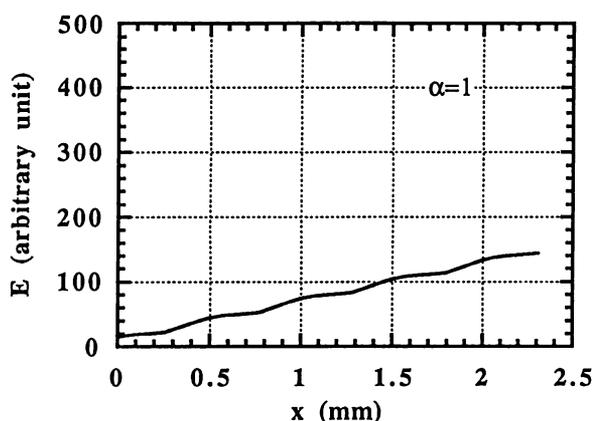


図5 横方向の空間電荷による電場分布 ($\alpha=1$)。

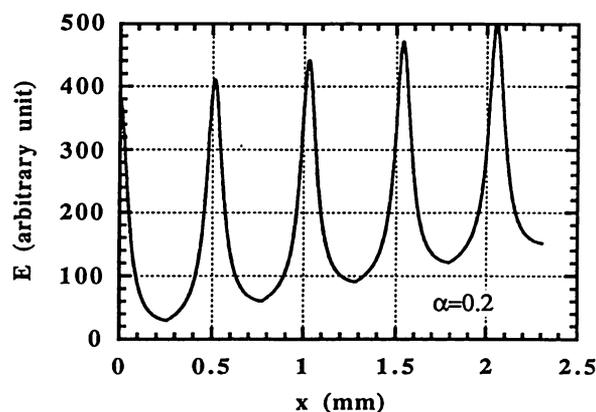


図6 横方向の空間電荷による電場分布 ($\alpha=0.2$)。

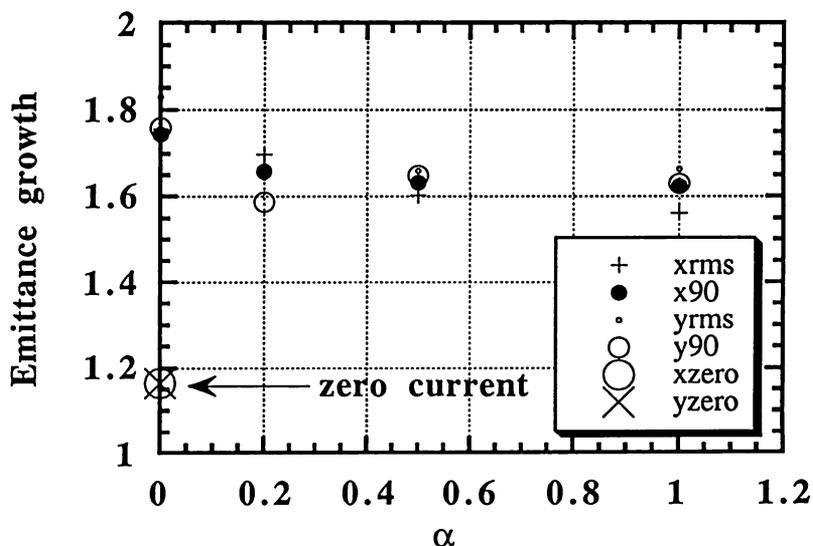


図7 横方向エミッタンス増加の α 依存性。rms は rms エミッタンス、90 は 90% エミッタンスを示す。

ンチ幅の横方向分布の標準偏差の6倍以上外側にある粒子をハロー粒子として勘定して、図10に示す。注目すべきは、殆ど線形な電場に近い $\alpha=1$ の場合にも、僅かながらハローの生成が見られる事であり、この事から、 $\alpha=0$ のシミュレーションはハロー生成の量を増大させている点に着目すれば、加速過程の性質を、より一層鮮やかに特徴づける巧妙なシミュレーションと理解されよう。

5. エミッタンス増加

種々の原因により、加速過程においてビームのエミッタンス増加が起こる。コードLINSACは、縦と横の運動のカップリングを自然な形で（特別な近似を入れないで）考慮しているので、縦と横の収束力と、縦横のエミッタンス増加との関係が、結果に反映

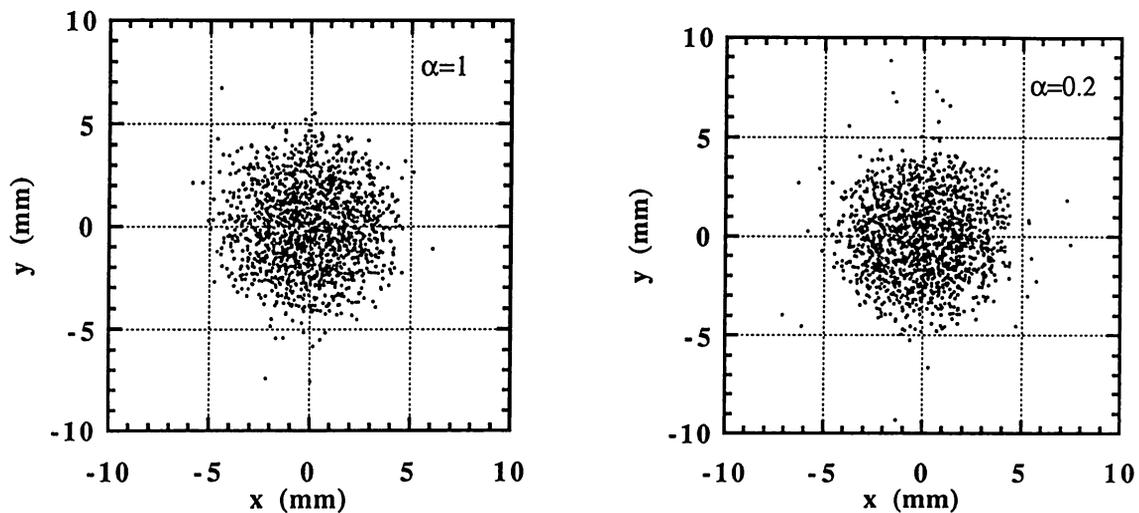


図8 加速後のビームプロファイル ($\alpha=1$)。図9 加速後のビームプロファイル ($\alpha=0.2$)。

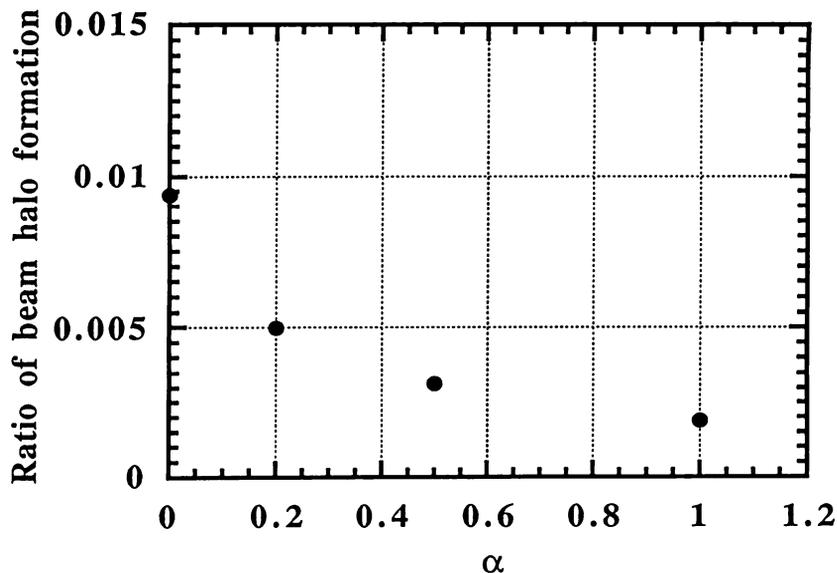


図10 ビームハロー生成の割合の α 依存性。

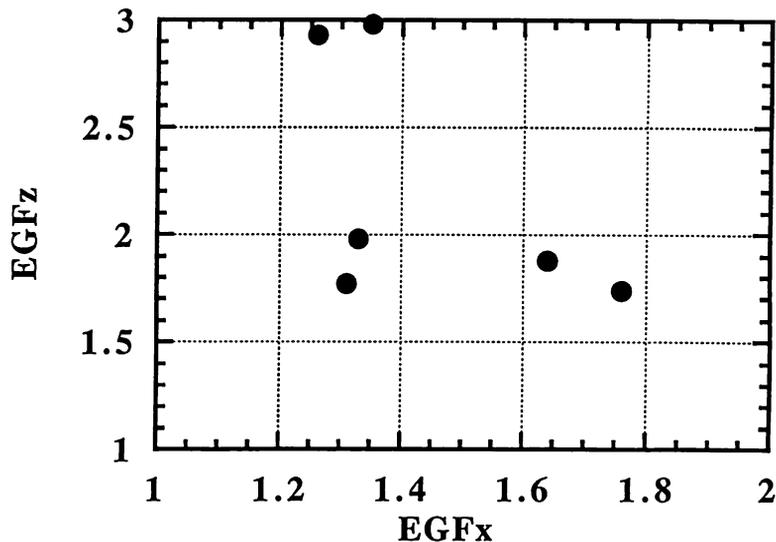


図1.1 加速パラメータを変えた時の縦方向のエミッタンス増加 (EGFz) と横方向エミッタンス増加 (EGFx) の分布。

される (Equipartitioning)。逆に言えば、このような精密な計算法を採用した為に、縦横のエミッタンス増加の制御が出来るようになったのである。図1.1に、加速パラメータを変えた時の、縦と横のエミッタンス増加を示した。これらの値の分布は、定性的な考察とは一致しており、加速パラメータの選択に重要な指針を与えるものとなる。

まとめ

陽子リニアックのビームシミュレーションにおいて、p-p法による空間電荷効果を導入して、ビームの加速過程を逐次精確に計算して、興味ある結果が得られている。横方向と縦方向のカップリングが自然な形で達成されている事により、加速に伴う縦横のエミッタンス増加と収束力との関係が、鮮やかに結果に反映される事が示された。ビームのマクロ的な性質 (エミッタンス) とミクロ的な性質 (衝突) の双方の研究手段としての本コード (LINSAC) の活用が、今後期待される。このコードは空間電荷効果の計算に p-p法を採用しているので、スーパーコンピュータへの依存度が大きく、並列化が急がれている。

謝辞

KEKの横谷氏、東京天文台の小笠原氏より衝突の扱いについて御示唆を戴きました事を感謝します。

参考文献

- 1) T. Kato, "Beam Simulation Code Using Accurate Gap Field Distribution in a Drift Tube Linac," Proc. 1994 International Linac Conf., p.523., KEK Preprint 94-84.
- 2) R W Hockney and J W Eastwood, "Computer Simulation Using Particles," Adam Hilger, Bristol and Philadelphia, 1988.