

## 1 GeV リニアック検討資料

## 1 GeV LINAC DESIGN NOTE

題目 (TITLE) 陽子リニアック設計の為にコンピュターコード

著者 (AUTHOR) 加藤隆夫

## 概要 (ABSTRACT)

陽子リニアックを設計して、製作して、そして運転するという一連の流れの中で、その設計にコンピュターコードを利用する時の問題点を説明する。KEKにおける経験（40 MeV 陽子リニアックの設計と製作とチューニング及び1 GeV 陽子リニアックの設計等）をふまえて、今まで使用した計算コードについて、目的により三種類に分類して、その内容と相互の関係を概説する。次に、最近の幾つかの仕事から、特に、スーパーコンピュータと三次元計算に関連する以下の事例を紹介する。1) 三次元電磁場計算コード MAFIA のスーパーコンピュータ用のチューニングについて、2) 加速管の電磁場計算へのMAFIA の応用例、3) 空間電荷効果を取り込んだビーム輸送計算コードの開発。

## 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

# 陽子リニアック設計の為のコンピューターコード

加藤隆夫 (高エネルギー物理学研究所)

要旨：陽子リニアックを設計して、製作して、そして運転するという一連の流れの中で、その設計にコンピューターコードを利用する時の問題点を説明する。KEKにおける経験（40 MeV 陽子リニアックの設計と製作とチューニング及び1 GeV 陽子リニアックの設計等）をふまえて、今まで使用した計算コードについて、目的により三種類に分類して、その内容と相互の関係を概説する。次に、最近の幾つかの仕事から、特に、スーパーコンピューターと三次元計算に関連する以下の事例を紹介する。1) 三次元電磁場計算コード MAFIA のスーパーコンピューター用のチューニングについて、2) 加速管の電磁場計算へのMAFIAの応用例、3) 空間電荷効果を取り込んだビーム輸送計算コードの開発。

## Computer Codes for Designing Proton Linear Accelerators

Takao Kato

(National Laboratory for High Energy Physics)

Summary: Computer codes for designing proton linear accelerators are being discussed from the viewpoint of not only designing but also construction and operation of the linac. The codes are divided into three categories according to their purposes: 1) design code, 2) generation and simulation code, and 3) electric and magnetic fields calculation code. The role of each category is being discussed on the basis of experience at KEK (the design of the 40-MeV proton linac and its construction and operation, and the design of the 1-GeV proton linac). We introduce our recent work relevant to three-dimensional calculation and supercomputer calculation: 1) tuning of MAFIA (three-dimensional electric and magnetic fields calculation code) for supercomputer, 2) examples of three-dimensional calculation of accelerating structures by MAFIA, 3) development of a beam transport code including space-charge effects.

Keywords: Computer code, proton linear accelerator, design, three-dimensional calculation, supercomputer

第7回「原子力におけるソフトウェア開発」研究会にて発表  
(1991年10月 日本原子力研究所)

## 1. はじめに

世界には、陽子リニアック設計用の数多くの優れたコードが存在しているが、新しいコードも続々と生まれている。新しいタイプのリニアックが発明されると、新しい設計コードが開発される。古いタイプであっても、新しくリニアックを建設する場合には、より最適なコードが新たに開発されるか、又は大幅な修正が加えられる。そして、コンピューター性能の目覚ましい向上により、以前は計算出来なかった事が簡単に計算出来るようになった結果、多くの新しいコードが書かれている。これらのコードは殆ど手に入れる事が出来る。コンピューターの互換性の欠如に起因する作業を終えてしまえば、好きなようにリニアックが設計できる。パソコンで簡単に設計ができてしまう。全く夢のような時代になってきた。さて、夢のようだと感じる裏には、昔は厳しかったという思いがある。一昔前は、良かれ悪しかれ自分で、細かい所まで非能率的にやらざるを得なかったという事情があった。現在は恵まれ過ぎている点に、多少の怖さを感じる。シンクロスコープやネットワークアナライザーがデジタル化と同時に自動化され、訳がわからない内に正しいとされる答を出してしまった時に感じた怖さである。

将来、コンピューターの性能と使い勝手が飛躍的に高まると予想される。これは誠に歓迎すべき事であって、その性能を生かすような新しいコードが開発されると期待される。ここでは現状を見渡しつつ、陽子リニアックを設計して、製作して、そして運転すると言う一連の流れの中で、その設計にコンピューターコードを使う時のお話をしたいと考える。従って、今まで使用した計算コードについて、KEKにおける経験をふまえて概説する。これは、世の中に存在するコードについてのレビュー的なレポートではなく、小さい陽子リニアックの設計と製作とチューニング（40 MeV）と、大きい陽子リニアックの設計（1 GeV）の経験を率直に反省する内容になっており、いささか本研究会の主旨から逸脱している点をお詫びしておきたい。

## 2. 陽子リニアックの諸事情とコンピューターコード

### 2.1 陽子は中々速くならない

陽子はその質量が電子の約 1800 倍である。この事が、電子リニアックに比べて、陽子リニアックの構造を複雑にしている。

一般に加速構造（加速管）の単位長さ  $L$  は、加速に使用する高周波の一周期の間に粒子が通過する距離になる。

$$L = v t = \frac{v}{c} \frac{c}{f} = \beta \lambda$$

ここで、 $v$  は粒子速度、 $t$  は高周波周期、 $f$  は周波数、 $c$  は光速、 $\beta=v/c$ 、 $\lambda=c/f$  (波長) を表している。静止質量  $W_0$ 、全エネルギー  $W$  と  $\beta$  との関係は

$$W = \frac{W_0}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

静止質量は、 $W_0 = 938.28 \text{ MeV}$  (陽子)、 $W_0 = 0.511 \text{ MeV}$  (電子) であり、軽い電子のスピードは、少しの加速によりすぐに光速に近くなり、それ以後はエネルギーは増えてもそのスピードは殆ど一定といえる。従って、加速に使用する加速管の形を、加速効率等の理由により変える必要が無い。これに対して、実用上の陽子リニアックのエネルギー領域では、陽子のスピードは大きく変化して、一定にはならない。(3 MeV では  $\beta=0.08$ , 1 GeV で  $\beta=0.88$ ) この場合、あるエネルギー範囲で最適な加速管構造は、その他のエネルギー領域では、加速効率の減少とか、製造上の難しさの増大等の理由により、使用しにくくなる。従って、1 GeV 程度まで加速する陽子リニアックでは、2~3種類の異なった加速管を使うのが普通であり、このあたりに設計者の考え方が強く反映される余地がある。計画中の大型ハドロン用 1 GeV 陽子リニアック<sup>(1)</sup> は Fig.1 に示す構成になっている。

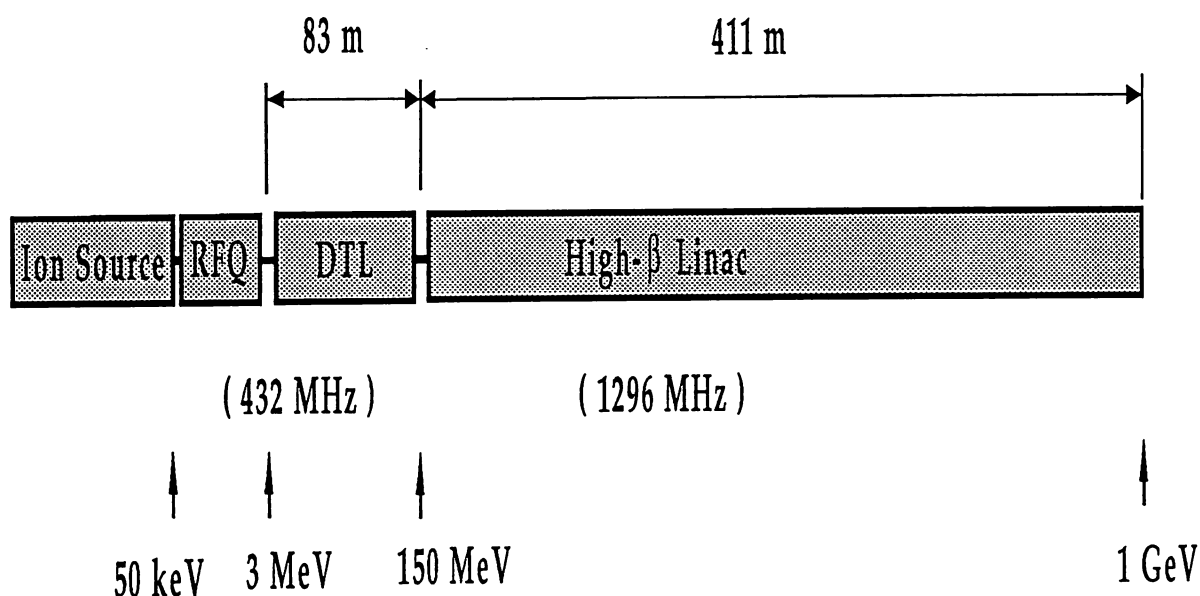


Fig. 1 The scheme of the 1-GeV proton linac.

イオン源に続いて、RFQ (radio frequency quadrupole)、DTL (drift tube linac)、そして CCL (coupled cavity linac) と全く性質の違う三種類の加速管で加速する方式である。

## 2.2 陽子リニアックの運転の難しさ

陽子リニアックの加速管では、加速に必要な電場の強さと位相が定められており、性質の良いビームを得る為の、それらの値の設定の許容範囲は以外と小さい。特に高エネルギーで大強度の陽子リニアックに対しては、高度の高周波技術により初めて対応可能な精度が要求される。一方、電子リニアックにおいては、極論を言えば、ある一部の加速管に電力を供給しなくても、ビームは全体的には加速されるのである。即ち、ある一部分の故障を別の部分で補う事が可能である。ところが、陽子リニアックは、それぞれの部分が特定のエネルギーに対応している為に、ある部分の故障を他の部分で補う事が出来ない。これは運転する上では実に厳しい条件であり、高周波源の重要性を強調する所以である。

次に、重要でありながら、電子リニアックと陽子リニアックの人の重なりが少ない事もある。以外と意識されないのは、加速途中の粒子の漏洩によるリニアックの放射化の問題である。特に、大強度高エネルギーの陽子リニアックでは、漏洩陽子による放射化のレベルが、実質的な運転時間を決める事が予想されている。高エネルギー領域においてビームロスが何故おこるのかは断定できないが、加速電場の強さと位相のエラーが関係している事が推定される。ビームロスは、エラーの複雑な加算的效果による為に、ある部分のチューニングが良いか悪いかの判定が難しくなってしまう。この部分の解明の為には、作られたリニアックの諸パラメーターが設計値に近く、運転の時のパラメーターがコンピューターシミュレーション用のパラメーターと良く一致しており、しかもシミュレーションにビームの振る舞いを正確に反映出来る事が要求される。

以上の理由により、陽子リニアックには精度の高いチューニングが必要であると言える。実際、設計と製作と運転方法とが三位一体となって、初めて実質的に精度の高いチューニングが達成されるのであるから、これらに使われるコンピューターコードの重要性は、非常に高い。

## 2.3 全体を考える

従って、陽子リニアックの設計では、高周波源とチューニングまで含めた全システムの設定が非常に重要となる。そのリニアックの目的と要求性能により、それに最適なりニアックが考えられる。我々は、一般に指標となる数値（電場、シャントインピーダンス等）だけを取り出して判断を下す傾向がある。便利で即座にできるから止むを得ない点もある。数字の裏に見え隠れする様々な事情（何を前提条件として、何を重点課題と考え、何をどの程度最適化しているか）は、夫々の場合により異なる事を踏まえて、個々のリニアックについて考察する事が重要と考えている。

例えば、電力が殆どコスト無しに供給されるとすれば、加速管設計におけるシャントインピーダンスの最適化の重要性は半減するであろう。同じく、ビームロ

ーディングが極めて大きいリニアックでも似た状況になるであろう。加速電流とエネルギーが小さいリニアックでは、シングルセルを並べて、夫々を固体高周波増幅器でドライブすれば魅力的なリニアックが出来るかもしれない。高エネルギー大強度のリニアックでビームロスによる放射化が問題となるとすれば、シャントインピーダンスを犠牲にしてもビーム穴を最大限大きくするだろう。しかし、低エネルギー小強度のリニアックでは、狙いをシャントインピーダンスの最適化に置くかもしれない。

全般の考察に際し重要なのは、使用できる技術レベルを的確に把握しておく事であろう。例えば、運転時のチューニングの難しさは、優れたモニターと優れた高周波コントロール系と全体チューニングの適正な理論があれば、ある程度解消される問題である。高周波関係の技術のレベルは、理論的境界と一般的な技術水準、そしてリニアックの大電力高周波装置の環境内での制約を踏まえて把握できる問題と言えよう。例えば、精度1%という数字は、静かな実験室とMWクラスの現場環境ではその意味する重みが違う。

注) \*シャントインピーダンスZは、加速管の加速効率を表す数値であり、平均加速電場をE、加速管の長さをL、励振高周波電力をPとすれば、

$$Z = \frac{E^2}{P/L}$$

と定義する。実効シャントインピーダンス $ZT^2$ をいう場合もある。

Tは transit time factor と呼ばれ、加速管の構造で決まる定数である。

\*加速管のユニットセルによる加速エネルギーは次式で与えられる。

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

$\phi$ は、陽子の加速高周波位相を表す。このエネルギー増加が陽子の速度を増加させ、この増加に見合うようにユニットセルの長さを増加させている。従って、あるユニットセルで得られるエネルギーの増加は予め

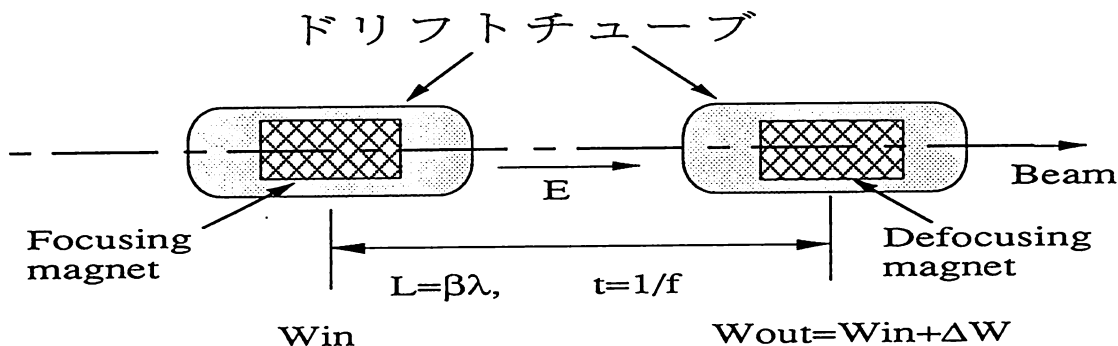


Fig. 2 Unit cell for a DTL accelerating structure.

決められた値でなくてはならない。TとLは構造的に予め決まる値なので、加速電場Eと加速位相 $\phi$ の正しい値がチューニングで要求される。

\*ビームローディングは、ビーム加速する時にエネルギーが消費される事を一般にいう。加速の反作用として、加速電場の強さと位相が変化してしまうので、対策が必要となる。

\*エミッタンスはビームの広がりと言える。縦方向のエミッタンスは、エネルギーの広がりとビームの進行方向の長さに関係する。

\*アクセプタンスは、その加速管が保持できる最大エミッタンスを言う。

## 2.4 便利だが怖いコンピュータコード

コンピュータコードを使う時、その便利さの故に、案外この辺の事情を看過してしまう事がある。例を二つあげよう。電磁場計算コードを使う時の目的は、高周波性能の良い加速空洞を設計する事にあるが、その目的が一人歩きを始めてしまう事がある。例えば、シャントインピーダンスが極めて優れている点が強調される加速空洞は、他の何らかの特性を犠牲にしている場合がある。アクセプタンスが小さくなっているとか、有り難くない他のモードが沢山あるといった具合である。実際に製作してみると、製作上の制約が極めて大きい場合もある。もう一つの例は、コードの入力データとして使うイオン源のエミッタンスの数値である。瞬間最大風速データと平均風速データの違い、そして、それ自体の値と加速器に応用する場合の違い（具体的には測定的位置、方法）など、加速器側では注意すべき点が多い。ここは、加速器の出発点なので特に重要である。

リニアック関係のコンピュータコードを使う時に注意すべき点をもう一点あげておこう。最近のコードの規模が大きい点を考えると止むを得ないと思うのだが、コードの中を具体的に知らずに計算する機会が多い事である。例えば、電磁場計算コードの内容を殆ど知らずに結果を利用している。勿論、そのコードを使い始める時は、予め解析的にわかっている問題を計算して、精度や適用範囲等のチェックを行なうが、そのコードが作られた時の目的から外れた事を計算しようとする、計算エラーが起きたり、結果が物理的に間違っていたりする。これは、注意していないと見逃す事がある点が怖い。加速器業界で流布しているコードは、その生い立ちから考えてみても、汎用的な書き方がされていない場合がある。汎用的な書き方をする程の時間がおそらく無かったのであろう。汎用的に書き下すかわりに、開発時の要請を満たすように簡略化して書くのである。

リニアックの寸法を決めるコードでも事情は同じである。そのコードの開発時のリニアックの構造を計算しやすいように書かれている。自分が計算しようとしている事をそのコードが正しく計算しているのかは、コードを読まない判断がつきにくい事が多い。それに、幾多の改良を経て使いやすくなってはいても、新しいリニアックを設計するには適用出来ない点や不便な箇所が出て来る。その場合には、

使いやすい形に修正するか、あるいは新しくコードを書かなければいけない事もある。又、空間電荷効果を考慮する時、そのクロスチェックの方法が無い場合など、結果の解釈が難しい場合がある。

これまでの議論の結論は、コンピューターコードは重要な要素技術であり、その目覚ましい発展は力強い限りであるが、これらを充分活用するには、リニアックの全体像（設計、製作、運転）まで含めた使用前後の諸検討が、益々重要になって来たという事である。

### 3. 陽子リニアック設計の為のコンピューターコード

陽子リニアック設計の為のコンピューターコードは、その目的により大きく三種類に分けられる。

第一は、ビームダイナミックスの基本的な関係を使って、ビームと加速管の最適なパラメーターを決める為のコードである（design code）。ここでは、リニアックにおけるビーム加速の諸性質を表す幾つかのパラメーターの最適な組み合わせが、要求仕様に従って考察される。

第二のコードは、第一の過程で決めたパラメーターを入力として使って、リニアック自体の基本的な寸法等のパラメーターを決める。上に述べた二種類のコードは、ビームシミュレーションを通じて、相互にチェックされて、全体の最適化が行なわれる。従って、第二のコードは、リニアックの基本寸法等を計算する部分（generation code）と、設定されたリニアックの中でのビームの振る舞いを計算する部分（simulation code）から構成されるのが、普通である。

第三は、リニアックを構成する機器（加速管や磁石）の設計を行なう為のコードである（電磁場計算コード）。ここでは、前項において設計された基本寸法を持つ加速空洞や磁石の諸特性を計算するが、一方では、ここで計算された高周波特性は、第二のコードの入力パラメーターとなっている場合があるので、第二と第三のコードの間でも何回かの反復計算が必要となる。この関係をFig. 3に示す。以下に、これら三種類のコードの特徴をまとめてみよう。

#### 3.1 第一種（design code）

リニアックの基本的なパラメーターは次の諸量と考えられる。

まずビームに関しては、エネルギー  $W$ 、加速電流  $I$ 、エミッタンス  $\epsilon$ 、バンチの半径  $a, b$ 、内部エネルギー  $U$ 。加速管に関しては、周波数  $f$ 、加速電場の強さ  $E$  と位相  $\phi$ 、収束系の位相進み  $\sigma$ 、アクセプタンス  $A$ 、最大加速電流  $I_{max}$ 、transit time factot  $T$ 、シャントインピーダンス  $Z$ 、最大表面電場  $E_p$ 、ビーム電力  $P_b$ 、励振電力  $P_c$ 。

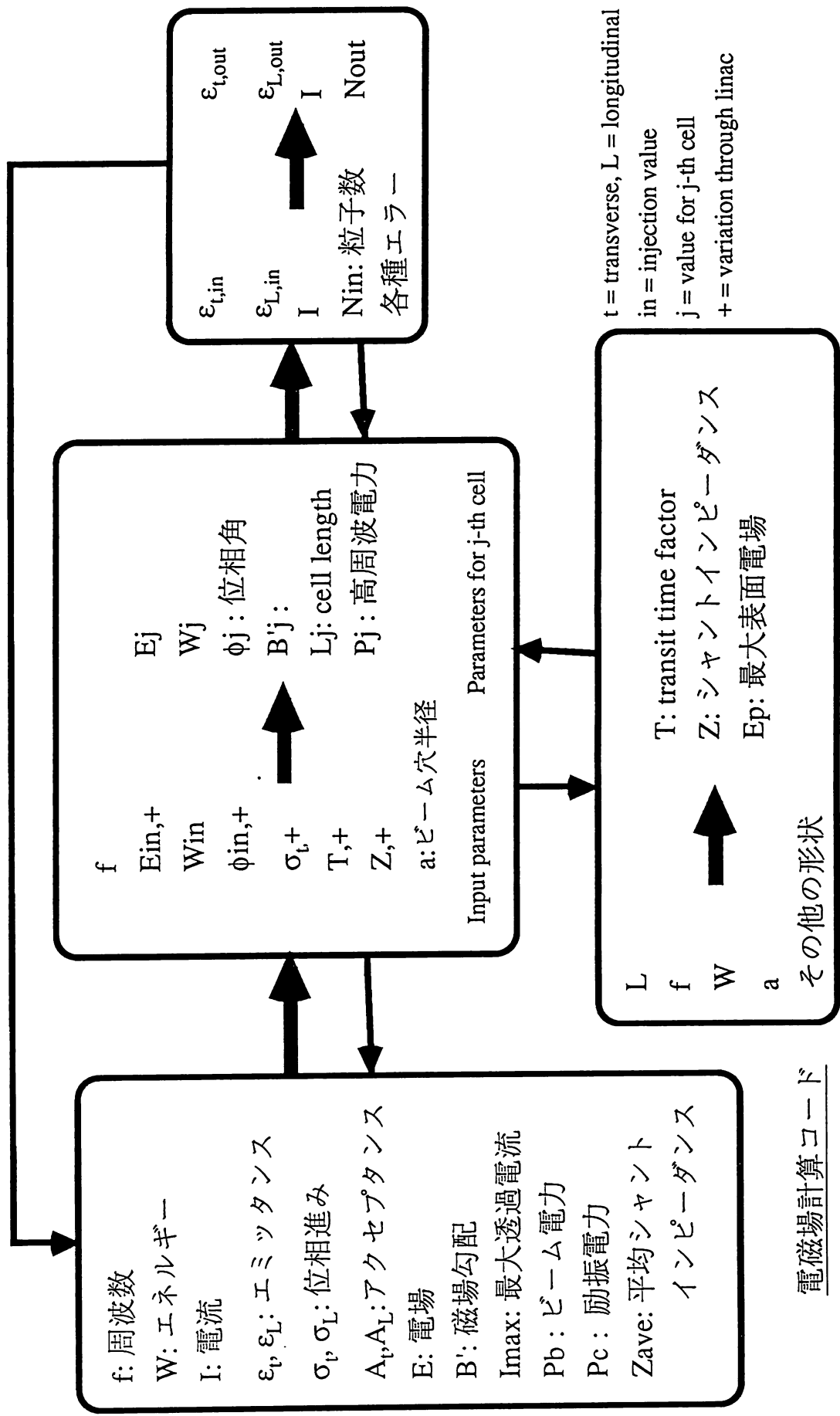
注) 上記の諸量は全てが独立変数では無い。また下線を引いてある諸



Simulation Code

Generation Code

Design Code



電磁場計算コード

Fig.3 Parameters of the codes for designing proton linac.

量は横方向 (transverse) と縦方向 (longitudinal) の二種類がある。  
現実のリニアックで最も重要なパラメーターの一つは、

$\text{duty factor} = \text{pulse length} \times \text{repetition rate}$  である。この表舞台に登場しない量が、Pb と Pc と共に、リニアック全体の性格を決めている。

ここに上げた諸量は、互いに幾つかの関係式で結ばれており、リニアックの中でどのように変化させるべきかをまず決めなければいけない。その時の経験的な注意がいくつかあるので紹介しよう。

#### A) あくまでビームだけで？

ビームの性質が重要としても、それをどこまで追及するかにより、設計が変わってくる。高周波源、冷却、放電限界、そしてコストなどと、どの程度まで妥協するか。例えば、コストを下げる為に、高周波源ユニットにあわせて電場を設定して、ユニットタンクの長さを決めて電力効率をあげる方法もある。更に、実験室のクリーンな条件のもとで見いだした放電限界に対するデータを、リニアックという悪条件下においてどこまで活用したらよいか、加速途中のビーム損失をどの程度考慮すべきかなど解決すべき問題が多い。

#### B) ビームの何が重要か？

ビームの諸性質の中で重要なのは、最大加速電流の大きさか、エネルギーの広がりか、横方向エミッタンスか。これらは、そのリニアックの要求仕様によりその優先順位が変わってくると同時に、全体の中での比重も変わる。

#### C) 提案されている関係式はどこまで適用すべきか？

例えば、エミッタンスの増加に関する関係式がある。一体、この関係をどのエネルギー領域まで持続させればいいのか。リニアック全体にある関係式を適用しようとするれば、必要な加速電場が非現実的な大きさになる事がある。又、この関係式は入射ビームパラメーターに対する依存性が大きい。はたして入射ビームをどの程度まで制御できると予測しておけばいいのか。そして、製作上の精度限界に由来するエミッタンスの増加の方がはるかに大きい場合の対策は等、ここにも問題が多い。

#### D) 細かな定義を？

例えば、単に"無酸素銅"という時に、数多くある無酸素銅の違いを全て捨て去ってしまい、問題点の所在を複雑にしてしまうような事例を指す。放電限界の何倍という時に、特に RFQ あたりではある時期、数値だけが世界を駆け巡っていた感があった。どの様な条件のもとでどの程度の内容を誰がどうしたか？の

三点を明確にする事が肝要であろう。

### E) 結論

以上の事から、リニアック全体を通して、明快に一つの理論から設計出来る現状では無いという結論に達する。一つの設計を簡単に実験検証出来ない事、いわゆるビームシミュレーションは進歩しているが、まだ完璧ではないと思われる事、そして最後に、リニアックは、ビームという判断基準により結果が試される事を考慮して、現実的な条件のもとに妥協しながら設計する事になる。その場合、大型の計画になればなるほど、コストの最小化が重要視される。

大強度陽子リニアックでは、大強度に由来する空間電荷効果を第一に処理しなければいけない。空間電荷効果は、低エネルギー領域でその効果が著しいから、RFQとDTLからなる入射部分を考える。入射部分の重要性は昔も今も変わらないが、以前は、縦方向の優れた入射用加速器が無かった。仕方無しに横方向のマッチングだけを考慮して、コッククロフトで750 keVまで加速して、DTLの捕獲効率を上げる為にバンチャーを通してからDTLへ入射させた。その場合のビームの縦方向のエミッタンスをFig. 4に示す。近年RFQなる新型加速器が発明されて、これをコッククロフトとバンチャーの変わりに使うと、エミッタンスはFig. 5のようになる。Fig. 4では縦方向のエミッタンスは、その定義と実体がかげ離れてしまう。従って、入射部において、縦方向と横方向のエミッタンスの大きさをある関係にしよう (Equipartitioning) という議論<sup>(2)</sup>がやりにくい。RFQの発明により、初めて、縦方向のマッチングもうまくできるようになった。

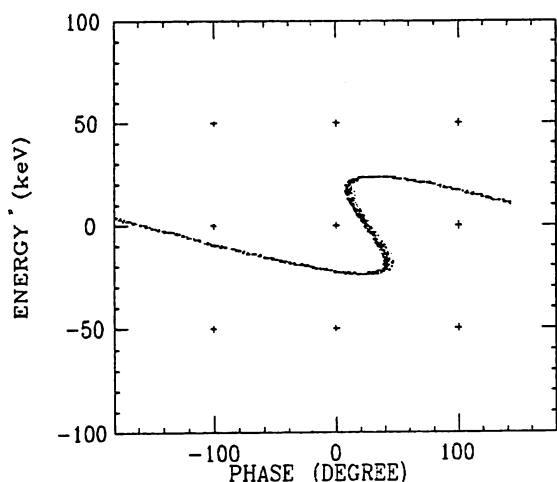


Fig. 4 Injected beam with a buncher.

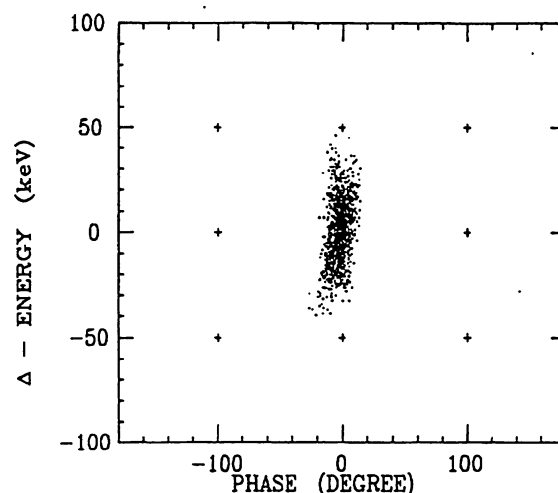


Fig. 5 Injected beam with an RFQ.

従って、design code に取り入れる主な関係は以下のような諸関係である（DTL の場合）。

\*入射点のequipartitioning を考慮する。

横方向と縦方向の位相振動のエネルギーを等分配にして、しかもリニアックの縦と横の収束系にマッチングさせる。equipartitioning の基本式を示すと

$$\varepsilon_t = \frac{\sigma_t a^2}{2\beta\lambda} \quad \varepsilon_L = \frac{\sigma_L b^2}{2\beta\lambda} \quad \frac{\varepsilon_L}{\varepsilon_t} = \frac{\sigma_t}{\sigma_L} = \frac{b}{a}$$

位相進み  $\sigma$  とバンチの長さは空間電荷効果を通して関係しているので、簡単な見かけ以上に複雑である。この式は、波風が立ちにくいように滑らかに入射して、しかも横と縦の微小振動のエネルギーのバランスをとる様子を表している。

\*equipartitioning を加速につれてどのように変化させるか決める。

縦横方向の位相進みを加速につれてどのように変化させるか決める。

ビームの内部エネルギーに由来するエミッタンスの増加を考慮する。

\*エミッタンスとアクセプタンスの比をある値に設定する。

\*電力の大きさを考慮する。

\*縦横の最大透過電流を考える。

RFQ は、収束と加速を電場で行なう為に、縦横の収束力の変化は一元的にできて便利とも言えるし、自由度が少なくて不便とも言える。特に、イオン源からの DC ビームをうまくバンチさせる事が最重要課題なので、バンチング部分の最適化の方法が何種類か考えられている。DTL 以後のリニアックは、加速と横方向の収束は独立しているので自由度は高い。

以上を真面目に考えると、リニアックへの入射時のパラメーターのセットと、それらの変化の仕方を導く事ができ、どの項目を優先させるかにより多種類のセットが考えられる。その中でどれが最善であるかは、第二種コードにより、リニアックを設定して、ビームシミュレーションを行なって、判断する。

### 3.2 第二種 (generation code, simulation code)

加速管の構造が異なる為に、陽子リニアックのすべてにわたって適用できるコードは存在しない。従って、加速管の構造毎に多くのコードが存在する。各研究所毎に異なったコードが存在する場合もあり、新しく加速器が建設される場合には、その加速器の特徴をより良く反映するコードが開発される状況である。しかしながら、世界的に流布している基本的なコードは存在しており、加速器用の

ソフトウェアの開発と整備に精力的なロスアラモス製 (LANL) のコードが多く、敬意を表せざるを得ない状況である。その中で代表的なコードは、RFQ用の PARMTEQ と DTL 用の PARMILA<sup>(3)</sup> である。

PARMTEQ と PARMILA とともにその GENERATION 部はすでいくつかの実機製作によりその精度は確かめられているといえよう。SIMULATION 部も良くできており、殆どのシミュレーションには十分といえる。ただ、古い版の空間電荷効果を取り扱う部分は、軸対称なディスクモデルにより加速ギャップの中心位置で効果を取り入れており、その精度チェックが必要と言えた。

CCL (coupled cavity linac) 用のコードは、世界共通のものではなく、各研究所で独自のコードを開発しながら将来計画に備えている。KEKで開発されたコード (PROEND) は次のような特色をもっている。

1.  $\pi/2$  モードの加速管を計算する。
2. 定速度型加速管と可変速度型加速管が比較できる。
3. 横方向の収束系を含んだ全系を自動的に計算する。
4. シミュレーション部は、実際のチューニングにおける測定可能量との対応を考慮している。

現実には、このコードをもとに製作されたリニアックは存在しないので、今後の検証が重要となる。

近年、エミッタンスの増大の機構の解明が進み、陽子リニアックの低エネルギー部の重要性が一段と認識されるに至っている。そこでは、異なった種類の加速管の間のマッチングとその間のビーム輸送が重要問題となる。イオン源とRFQの間、そしてRFQとDTLの間のビームの振る舞いを調べる為に、空間電荷効果を直接的に取り入れたビーム輸送用のコード (LEBT) を開発した。その特徴を以下に述べると、

1. 空間電荷効果を個々の粒子間で計算する。
2. ルンゲクッタ法により微分方程式を解く。
3. スーパーコンピュータ用にコード化する。

問題の設定の仕方に異論があるかもしれないが、実際に走らせた結果は得るものが多かった。具体例は次章に述べる。

### 3.3 第三種 (電磁場解析コード)

加速管の電磁場解析の重要性は益々増している。それは、最近、複雑な構造が増えてきた事と、要求される精度が増している為である。従来、加速管は軸対

称性を持つ構造のタイプが多かったので、軸対称な電磁場モードを計算するSUPERFISH<sup>(4)</sup>が多用された。計算精度等も実用上充分である。ところが、現実には非対称な構造を持つ製造物が沢山あって（高周波カップラー部、加速管の結合孔、DTLのポストカップラー、チューナーなど）、そこでは、trial and errorで製作を行っていた。3次元電磁場解析コードの登場がこの分野では非常に期待されていたのである。総合的な3次元電磁場解析コードMAFIA<sup>(5)</sup>が手軽に利用出来るようになって、この分野の省力化等の発展は非常なものである。しかしながら、現在のKEKにおける利用環境は、計算速度と利用出来る記憶容量の点が不充分であって、今後の環境整備が熱望されている。同時に、このような大型コードは、開発の始めから高速のコンピューター用に書かれるべきであって、その点、MAFIAには不満が残る。Table 1にKEKでよく使われるコードをまとめた。

Table 1 Examples of codes for designing proton linac.

	第一種	第二種	第三種
RFQ	RFQUIK	PARMTEQ	MAFIA
	GENRFQ	<u>QKEK</u>	SUPERFISH
	<u>KEKRFQ</u>		
DTL	<u>EQUI</u>	PARMILA	SUPERFISH
	<u>DELIFO</u>		MAFIA
CCL		<u>PROEND</u>	SUPERFISH
			MAFIA
Beam line		TRANSPORT	
		<u>LEBT</u>	
Magnet			PANDIRA
			JMAG

(下線のひいてあるのは KEK 製)

#### 4. コード利用の具体例

KEKの中央計算機システムの中で行なってきた計算例を紹介する。まず、KEKの計算機環境をTable 2に示す。

計算速度は標準並としても、問題は使い勝手にある。スカラーコンピューター(M680H)は、利用出来る記憶容量が最大で75MB、計算時間が2時間である。スーパーコンピューター(S820)は、実用的に利用出来る記憶容量は128MB、

Table 2 Speed of the computers at KEK.

	MIPS	MFLOPS	
HITAC M680H	32	59	B-system
次期HITAC	150	100	
Super HITAC S820		3000	C-system

計算時間は30分である。スカラーコンピューターは利用者が多いから、実質経過時間は計算時間の十倍以上になってしまうことがある。大きな三次元計算をする場合には、これらは障害となっているが、次第に解消される事を期待している。

#### 4.1 MAFIA (old version) のチューニング

MAFIAは、Maxwell方程式を解く総合的なコードである。単に、電磁場解析をするだけでなく、電流（ビーム）を含む過渡状態まで計算出来るので、今後とも利用価値は高いと思われる。利用者が急増し、且つ計算時間のかかる大型のジョブが増えて来たので、それまでスカラーコンピューターにて走っていたMAFIAをスーパーコンピューターに乗せて走らせてみた。コードを書き換える前のベクトル化率は82.0%である。筆者にとって、スーパーコンピューターを使う初めての経験であり、歩みはのろかったが、主としてサブルーティンを展開するなどの作業の結果、最終的には、ベクトル化率93%以上を得た。これ以上速くする為には、全般的な書き換えを必要とするので、作業を中止した。この結果、スカラーコンピューター上で82分（155000メッシュ）かかった計算がスーパーコンピューター上では5分のできるようになった。この経緯をFig. 6とFig. 7に示す。

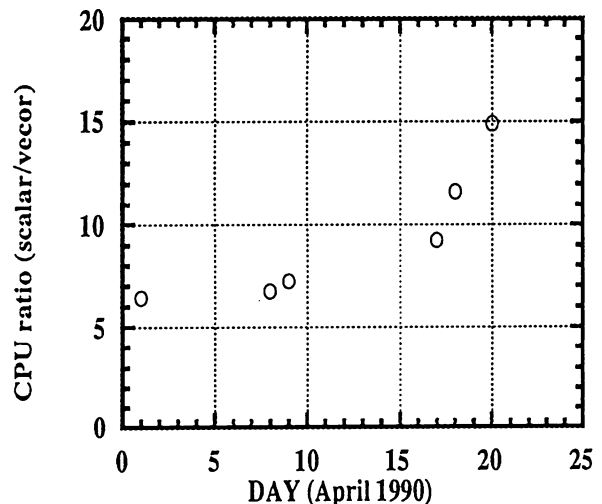
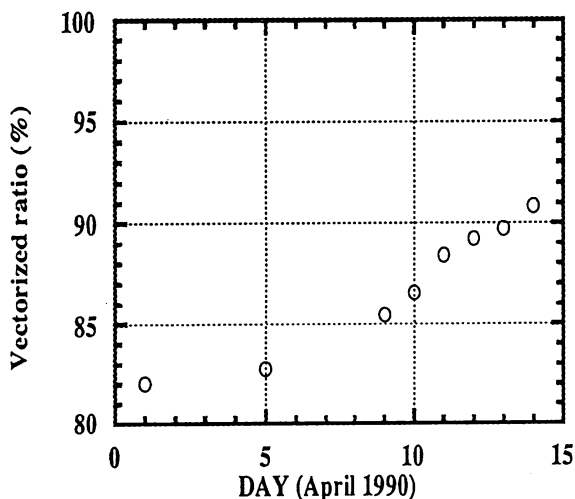


Fig. 6 Increase in the vectorized ratio by tuning. Fig. 7 Increase in the speed of calculation.

ここでの作業は良い経験となった。KEKのスーパーコンピューターは、ベクトル化率が99%以上のコードである事を一般的に要求しているようなので、たかだか93%では、問題外という事である。早く良い使用環境が実現される事を望むと同時に、スーパー用のコードは、最初からそれなりに開発すべきであるという感想を持った。

#### 4.2 RFQの電磁場分布

RFQ (Fig. 8) は、低エネルギー領域のバンチングと横方向の収束と加速とを同時に行なうリニアックとして、期待されている。基本モードは収束力を産み出すTE<sub>21</sub>であり、加速電極にうねりをつける事により加速電場成分を作っている。この加速成分をゆるやかに増大させる事により、イオン源から来るDCビームをうまくバンチさせる事が出来る。軸対称でないこのモードは、長い間使われてきた電磁場計算コード (LALA, SUPERFISH) では殆ど取り扱えない。非常に tricky な計算法 (長いアームをつけてドーナツ型の計算を行なう) を用いる事により、計算を行っていた。三次元電磁場計算コードの登場により、RFQは簡単に計算出来るようになった。しかしながら、必要なメッシュ数と計算時間を考えると、現在のKEKの大型計算機システムにおいて利用できるユーザー環境 (利用可能なメモリー、実効的な計算速度) が二桁近く改善される事が望まれる。Fig. 9 - 11 に示したのは、MAFIAによるRFQの中心電極部の計算結果である。この計算は165000メッシュにて行ない、計算時間約30分である (M680 H)。

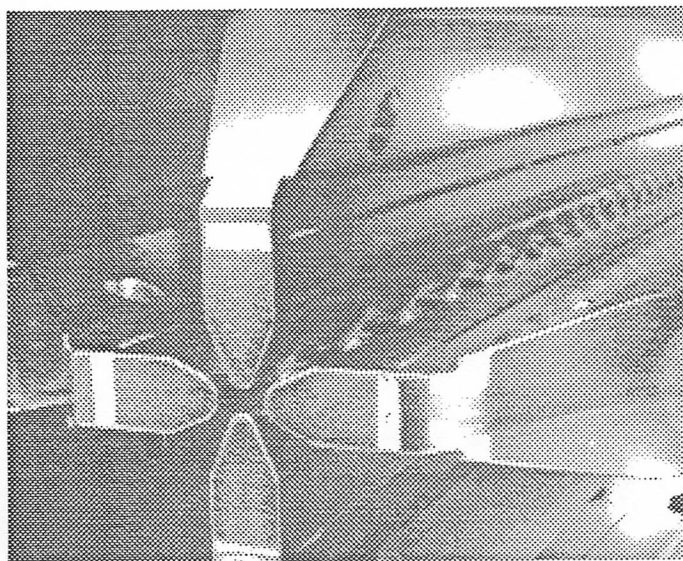


Fig. 8 Four vanes of an RFQ.



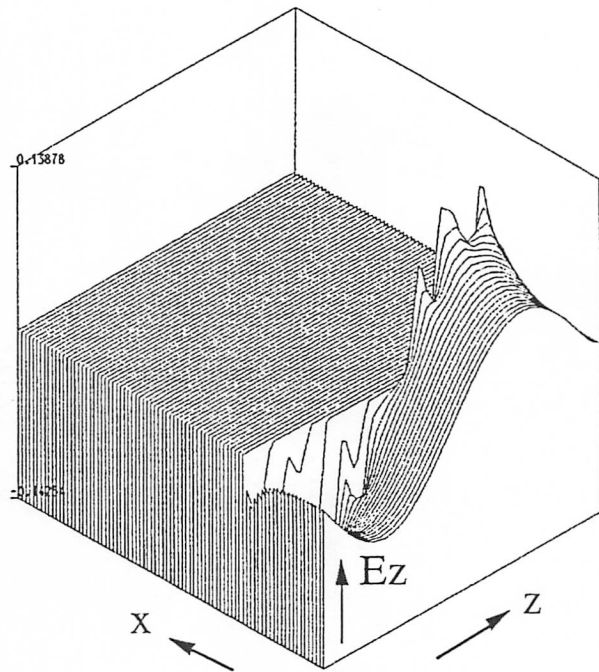
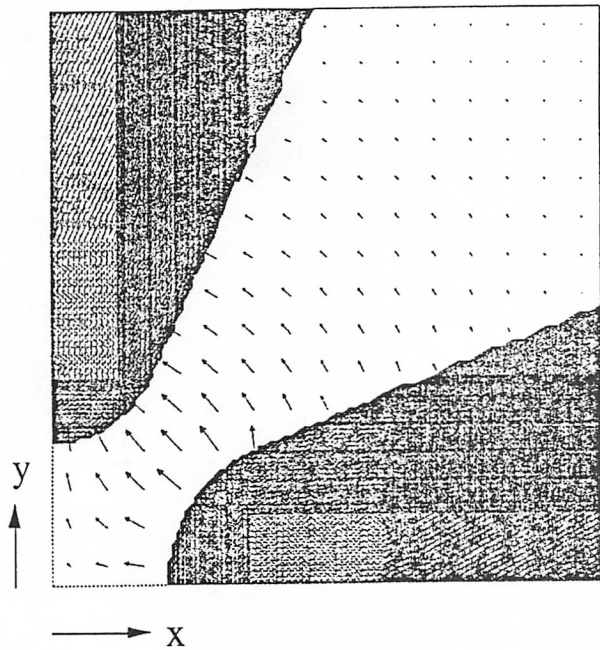


Fig.9 Electric field distribution between two vanes. Fig. 10 Accelerating field distribution.

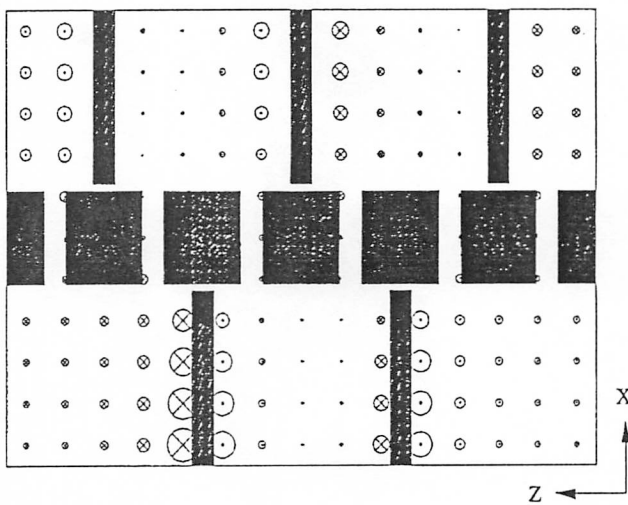
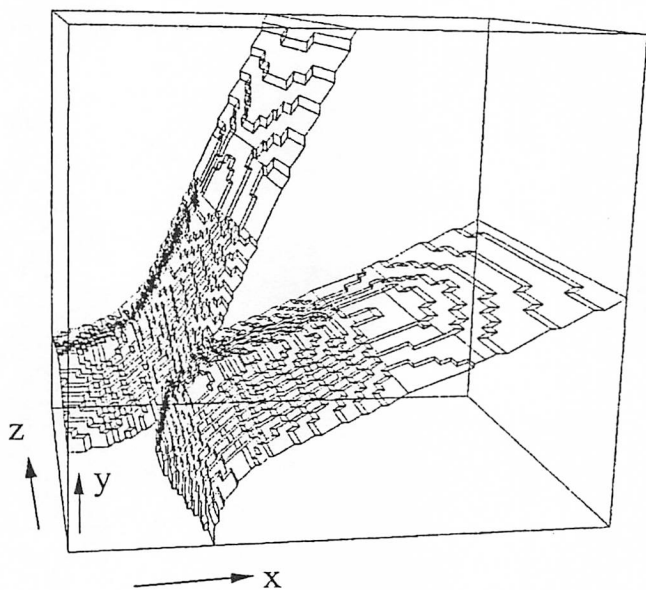


Fig.11 Geometry of the vanes used for calculation. Fig. 12 Magnetic field distribution for post mode.

#### 4.3 DTL の電磁場分布

DTL は、ドリフトチューブをぶら下げる為のステム以外は軸対称なので、SUPERFISHにより十分な計算が出来た。しかし、加速電場の安定化の為にポストカップラーを使うと、実に面倒な非対称系になる。加速管の直径が44cmと大きいのに対して、ポストカップラーの直径は1cmであり、チューニングの為に移動精度はmmの単位であるから、局所的なメッシュの大きさの選び方が難しくなる。精度を上げ

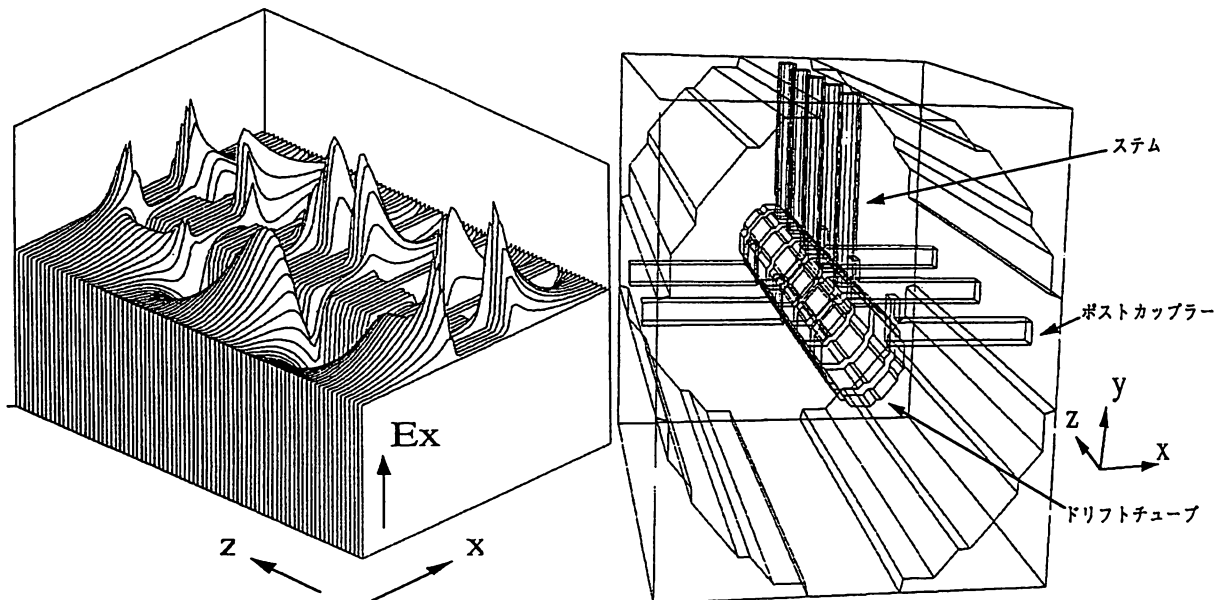


Fig. 13 Electric field distribution for post mode. Fig. 14 Geometry of DTL with post-couplers.

ようとするともッシュが足りなくなり、メッシュサイズの比を大きく変化させると計算誤差が大きくなってしまいます。従って全体のメッシュ数が100万程度では、精度の良い計算は出来ない悩みがある。Fig. 12-14に示したのは、ポストカップラー付きのDTLの計算結果である。精度は不十分ながらも、電磁場のモードがよくわかり、ポストモードの解析には非常に役にたつ。メッシュ数は405600、計算時間は113分である (M680H)。

#### 4.4 LEBT (Low Energy Beam Transport) の計算例

電磁場中の粒子の運動方程式は

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

$$\vec{E}_i = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \sum_{j \neq i} \frac{1}{r_{ij}}$$

とかける。ここでは一般によく使われている記述法に従う。空間電荷効果は個々の粒子の間のクーロン力を計算して取り込む事にする。

この方程式を四次のルンゲクッタ法により倍精度を使って解く。ゼロからの出発なので、最初からスーパーコンピューター用に注意してコード化する。加速器用のビームラインを想定して次の様な構成とした。

1. 単位長さを  $\beta\lambda$  とする。
2. 時間ステップは自由パラメーターとする。

3. 周期的又は自由な収束系を取り扱う。
4. 加速ギャップを取り入れる。
5. 空間電荷が無い時は、transfer matrix による厳密解と比較できる。
6. 多種類の入射粒子集団を用意し、外からの粒子も読み込めるようにする。
7. 連続ビームとバンチビームを取り扱う。
8. 単位長さ毎に全粒子のデータをファイルに書き出す。
9. 必要なビームの性質を計算して、グラフ表示する。この一部はスカラーに行なう。

Table 3 に、近年のコンピューターの速度の進歩を示した。

Table 3 Increase in speed of computers.

	1978	1990	YEAR
科学計算用	1	59	MFLOPS
ベクトル	10	3000	MFLOPS

1978年のコンピューターを使って、P-P (particle - particle) 計算を行なうと、例えば科学計算用では28時間かかり、ベクトルで行なうと3時間かかるから、P-P計算は無理であると判断されていた。ところが、現代のコンピューターでは夫々28分と33秒なのである。P-P計算を採用する価値はあると考えられる。Fig. 15に最小限必要なビームライン長さ約70cmを計算するのに必要な時間を示す。粒子数5000以上の値は推定値である。ベクトル化率は99.6%以上あり、スカラーの30倍の速度が得られた。

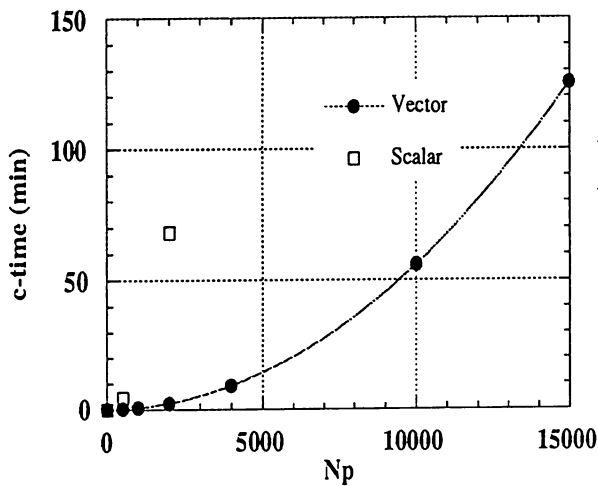


Fig. 15 Particle number dependence of CPU time for M680H and S820.

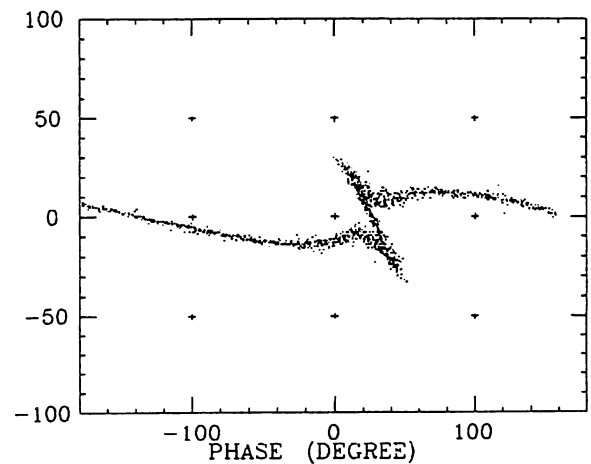


Fig. 16 A 100 mA injected beam with an RFQ.

このコードを使ってFig. 4に示した古い入射方式の空間電荷効果を計算してみる。エネルギー750 keVのビームはバンチャー空洞により急激にバンチングされるので、その時には大きな空間電荷効果がある。Fig. 16に電流が100 mAの時の縦方向エミッタンスを示す。Fig. 4と比べると空間電荷効果の作用がよくわかる。位相とエネルギーの広がりの増加、バンチャーの運転パラメーターの空間電荷効果による変化量などがこのシミュレーションから説明出来た。

おわりに

今後への期待を膨らませてまとめとしたい。第一は、計算スピードの飛躍による効果である。10倍スピードが速くなると新しい事が期待出来る。今回は述べられなかったが、ビームを含む過渡状態の解析などは恩恵が大きい。第二は、次世代の知能的なコンピューターの進歩により、経験的な知識の集約を組み込んで、リニアックの設計が出来るかもしれないという期待である。そのようなコンピューターコードは、リニアックの設計の中で、単なる要素技術としての役割以上の働きをする事ができよう。

本発表の機会を与えて下さいました関係者の皆様にお礼申し上げます。

#### 参考文献

- (1) Y. Yamazaki et. al., LA-11432-C,80(1987), Los Alamos, KEK Preprint 87-159.
- (2) R. A. Jameson, 1981 Linear Accelerator Conf., 125 (1981).
- (3) Parmila Users and Reference Manual, LANL (1990).
- (4) K. Halbach and R. F. Holsinger, Particle Accelerators, 7, 213 (1976).
- (5) T. Weiland, Particle Accelerators, 15, 245 (1984).