

## 1. はじめに

筆者が1978年にこの研究所にくる前は、電子ビームを用いて原子核構造に関する実験を行っていたので、電子リニアックのユーザーの立場であった。ユーザーではあったが、マシンの立ち上げ後は、ビーム維持の役目をユーザー自身が負っていた。時としてビームが不安定になり、ターゲットへの入射電流が減ると(何等かの原因でビーム軌道が変わり途中での損失が多くなったものと思われる)、頼りにしたのがマシン調整のエキスパートと呼ばれる人であった。エキスパートが好まれたわけは、たんに調整が速いだけでなく、すぐには不安定にならないというようなことだったと思う。その調整の様子を見ていて、加速器についての知識不足もあったのだが、とても自分には出来ないと思って、自分から調整してみようなどとは頭から考えてもみなかったことを覚えている。

ところが、時が経ち事情があって、この研究所で電子リニアックの建設に携わるようになり、しかもビームトランスポートを担当することになった。この研究所の電子リニアックは長さ 500メートルあり SLAC (Stanford Linear Accelerator Center, 米国) の2マイル電子線形加速器について世界でも2番目の大きさである。筆者がユーザーだった頃のマシンは、この10分の1余りのものであった。その様なマシンにさえエキスパートが存在することを知っていた筆者は、1982年マシンが完成するにしたがって、自分の設計を信じつつも、正直のところかなりの重圧を感じていた。その後マシンは予定通りに完成し、リニアックのスタッフの努力によって順調に稼働しているが、筆者自身は、現在エキスパートと呼べるかどうかは別であるが、原子核実験をやっていた頃とは、全く逆の立場におかれることになっている。

どの様なモニターをどの様にどれほど整備すれば良いかという問題に対する答えは、加速器の大きさにもよるが、どれほど調整し易い加速器にするかに依存する。また、この「調整のしやすさ」と言うのは、加速器の種々のパラメータが白紙の状態からの調整を基準に考えるべきであろう。一度調整が済んでパラメータが決ってしまえばビームモニターは不用になると考えるのは短絡である。運転の経験を積むことによって、また装置に対する理解が深まることによって、ビームの状態が変化したとき、多くのモニターを見ずとも、どこをいじれば良いか分かるようになる。しかし、だからモニターは不用とする考え方は、結局特定のエキ

スパートしか生み出さないし、非能率的である。だれでも調整が出来る、自動的にビームを最適化するとすると、一つ一つのモニターを決まった手順に従って、系統的にチェックして行かなければならないからである。

電子リニアックは文字どおりまっすぐな加速器である。しかし長さが長くなるに従って、モニターなしでは運転が難しくなってくる。リニアックにも以下のような問題がある。

- (1) 加速器即ち加速管や集束電磁石は厳密にはまっすぐではなくアライメント誤差が生ずる。
- (2) エネルギーの低いところでは地磁気によるビーム偏向も無視できない。
- (3) 加速管のアパーチャー(内径)は20ミリ前後と小さい。
- (4) 加速管が主体な加速器であるため、通常は集束系の設計に制約を受ける。特に、陽電子ビームのようにエミッタンス(後述する)の大きなビームに対しても加速管のアパーチャーに対して、十分余裕を持ったビームサイズにしにくい。
- (5) 電子リニアックの途中でのエネルギーを正確に知ることは難しい、従って、集束系はエネルギーのずれに対して、ある程度の許容がある。
- (6) 偏向電磁石を持った円形加速器の位相安定性(phase stability)のようにエネルギーを安定化させる要素はない。(但し、エネルギー圧縮装置をつければ別であるが)
- (7) 円形加速器と同様に、線形加速器も長くなればビームと加速空洞の相互作用によるビーム発散現象(beam breakup)が生ずる、等々ビームトランスポートを困難にしたりビームを不安定にする独自の要因を持つ。

本所では、1983年から2.5GeV電子リニアックに引続き、陽電子リニアックの建設に着手した。ここでは、それまでの電子リニアックの経験を基にビームモニターを強化したため、陽電子の生成、加速という困難にもかかわらず、ビームの調整を容易にしている。そして、数アンペアの大電流1次電子や、数ミリアンペアの微小電流、大エミッタンス陽電子ビームの加速にとまなう困難に直面して、ビームモニターの重要性に対する認識が益々深まっている。

## 2. 電子リニアックのビームの特徴とモニター

### 2.1 電子ビームの性質を表すパラメーター、用語

図2-1を参照。

**エミッタンス(emittance)** 電子の中心軌道からの横方向(transverse)(中心軌道に垂直方向)変位 $r$ と進行方向 $\theta$ を変数とする位相空間に於てビーム(個々の電子の集合)の占める面積 $\epsilon$ のこと。普通はビームの90%が占める面積とすることが多い。ビームオプティクスで取扱いやすくするためビームの占める領域を楕円で近似する。文献1)等による記述では、横方向変位 $r$ (cm)、横方向の運動量成分 $p_r$ (MeV/c)を変数にとっている。この場合はエミッタンス $p\epsilon$ (MeV/c.cm)は進行方向の加速や集束によっては変化しない不変量であり、ビームの性質を表す重要なパラメーターである。また規格化エミッタンス(normalized emittance)という場合は $\gamma\beta\epsilon$ ( $\gamma=1/(1-\beta^2)^{1/2}$ ,  $\beta=v/c$ )で定義される量であり、 $\beta\sim 1$ の電子では、ほぼ $p\epsilon$ (MeV/c.cm)を $mc=0.5$ (MeV/c)で割った値になる。

**バンチ(bunch)** 電子を高周波(マイクロ波)の波に乗せて加速するには図のように固まりになっていなければならない。この塊のことをバンチという。バンチは波の頂(crest)に乗せて加速される。バンチの長さや位置は高周波の位相(度)を基準にして測られる。バンチの長さはビームのエネルギーの広がりに影響する。例えば10度のバンチはビームを高周波の頂にのせたとき0.4%のエネルギー幅を生ずる。

**その他** ビームの位置(beam position)と言うときは加速器(加速管)の中心軸(accelerator axis)から垂直方向の距離を言う。ビームのプロファイル(beam profile)とはこの軸と垂直な面上におけるビームの形、または分布を指す。

## 2.2 電子リニアックの概要とビームの特性

本所のリニアックについて簡単に説明する。加速周波数(2856MHz)や加速管の形式(ディスクロード型進行波管)、加速器の構成の仕方など基本的にSLACのものと同様である。図2-2-1に加速器の構成を示す。全体は大きく2.5GeV電子リニアックと陽電子発生用のリニアックに分かれている。

### 〈2.5GeV電子リニアック〉

**電子銃** 2.5GeVリニアックのもっとも上流(図の左側)に電子銃がある。この電子銃は東芝性板極管(E3078)のグリッド付カソードソケットを活性化して使用している。そのグリッドに印加するパルスによって放射光リング入射用の長パルス電子ビーム(1 $\mu$ s)とトリスタン入射用短パルス電子ビーム(2ns)を切り替えている。その特性を表2-2-1に示す。電子銃から発射されるビームはエネルギーが約100keVでパルス幅と繰り返し周波数、電流の異なる2種類のビームである。

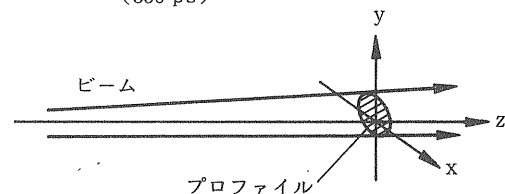
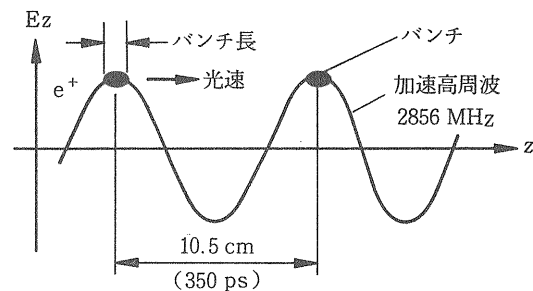
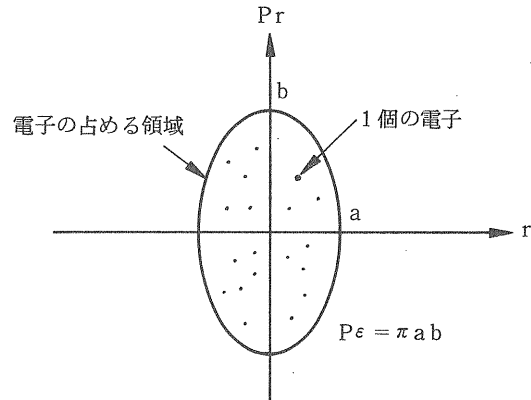
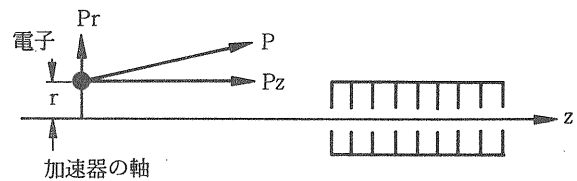


図2-1 電子ビームの性質を表す用語 (1)電子リニアックの座標軸 (2)エミッタンス (3)バンチ (4)ビームプロフィール

電子銃カソード/アノード間電圧	100 kV
〈長パルスビーム〉	
パルス幅	1 $\mu$ s
繰り返し	1 pps
ピーク電流	20-50 mA
〈短パルスビーム〉	
パルス幅	2 ns
繰り返し	50 pps
ピーク電流	40-100 mA

表2-2-1 電子ビーム

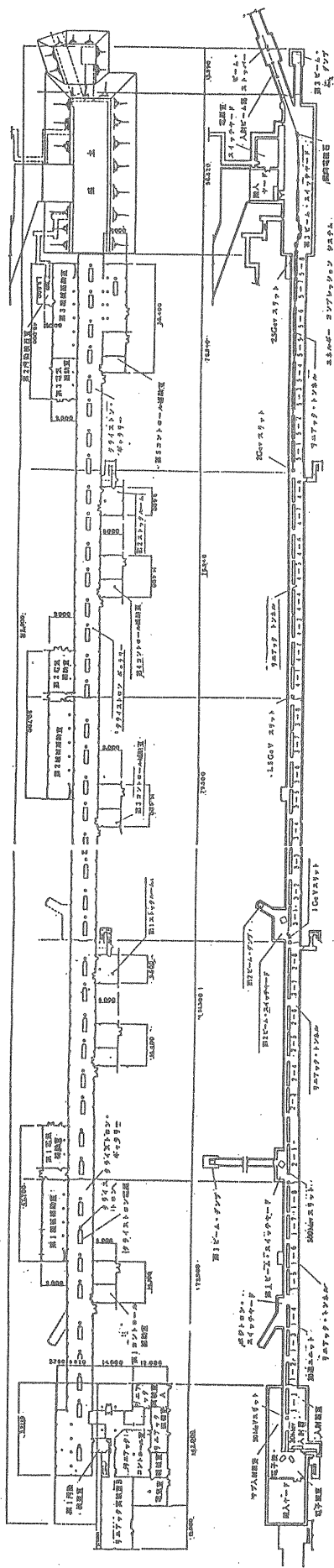


図2-2-1 KEX2. 5GeV電子リニアックの概要図

入射部 電子リニアックでは1台の高周波源(modulator)/クライストロン(klystron)及びそれからマイクロ波の供給を受ける2m加速管4本の組を1つの「ユニット」と呼んでいる。1番上流側のユニット(図2-2-2)はインジェクター(injector)または入射部と呼ばれていて、これは電子を2856MHzの高周波の加速位相に乗せるために、幅10ps前後に集群(バンチ bunch)させる部分である。

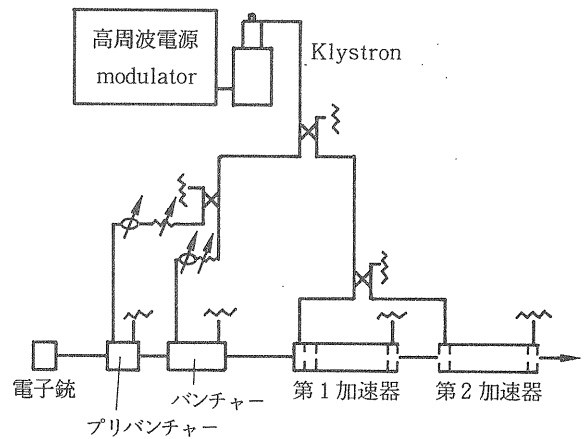
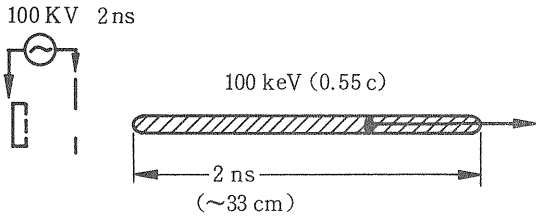


図2-2-2 2.5GeVリニアック入射部の構成

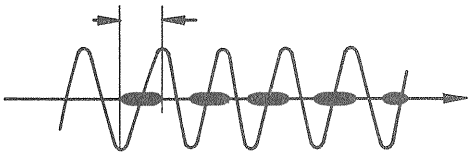
入射部を細かくみると、プリバンチャー(prebuncher)とバンチャー(buncher)、通常の加速部(accelerator section)に分かれる。バンチャーは電子をバンチすると同時にある程度(5MeV前後)加速し、そのバンチが崩れないようにする役目を果たす。電子銃を出たビームは100keVその速度は0.55c(c:光速)程度なので速度変調をかけやすいが、5MeVも加速するとその速度は0.996cにもなりバンチは安定したものになる。

(図2-2-3) プリバンチャーは加速せず、バンチャーがバンチ可能な位相範囲に電子を予め集めていれてやるもので、こうすることによってバンチャーの効率を良くすることが出来る。こうして、入射部を出るバンチされた電子ビームは電子銃からの電流の60%前後である。

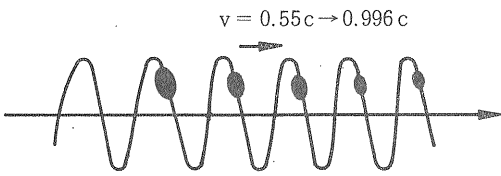
セクター部 入射部以降のユニット(図2-2-4)は8ユニットずつに分けられ、これを一つの「セクター」と呼んでいる。2.5GeVリニアックは5つのセクターからなっている。ここでは電子のバンチが加速位相の頂に乗せられて、ユニット当り60MeV余りずつ加速されていく。電子リニアックでは、そのビームの性質が電子銃及び入射部で殆ど決められる。従って入射部で、ビームをモニターすることが特に重要である。



(1) 電子銃からのビーム (短パルスの場合)



(2) プリバンチャー



(3) バンチャー

図2-2-3 入射部での電子のバンチの様子

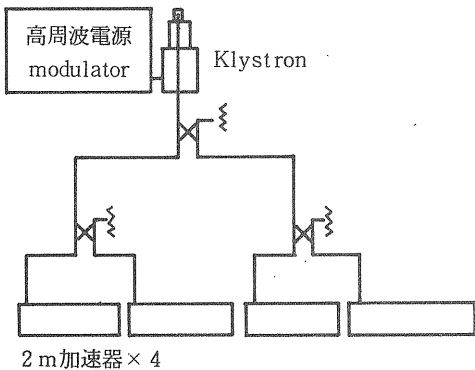
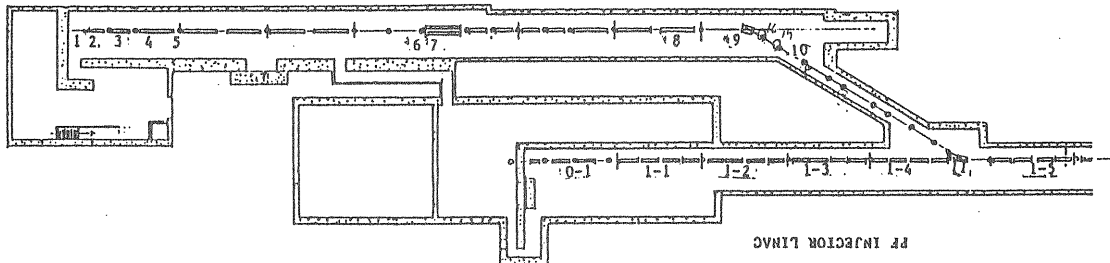


図2-2-4 2.5 GeV リニアックレギュラーユニットの構成



- |                                |                                 |                          |
|--------------------------------|---------------------------------|--------------------------|
| 1. ELECTRON GUN                | 5. FOCUS MAG. (TRIPLLET)        | 9. BENDING MAG. No.1     |
| 2. BUNCHER                     | 6. ELECTRON-POSITRON CONVERTER  | 10. FOCUS MAG. (SINGLET) |
| 3. 2M ACCELERATOR GUIDE (No.1) | 7. STRONG FOCUS COIL            | 11. BENDING MAG. (No.2)  |
| 4. 4M ACCELERATOR GUIDE (No.2) | 8. 4M ACCELERATOR GUIDE (No.14) |                          |

図2-2-6 陽電子発生装置の概要図

〈陽電子リニアック〉

陽電子ビームの生成 数輻射距離 (radiation length) の厚さを持った金属標的に1次電子ビームを当てるとき、電子対生成 (pair creation) によって生ずる陽電子を加速して得られる。(図2-2-5)

陽電子の発生量は、1次電子ビームのエネルギーと電流の積、即ちビーム電力に比例する。また、発生した陽電子のうちどれほど加速できるかどうかはビームトランスポート系の能力に依存する。KEKの陽電子リニアックでは約200MeVで数アンペアの1次電子を2 r. l. のタンタルの標的に当て、その1000分の1以上の陽電子を加速する設計になっている。

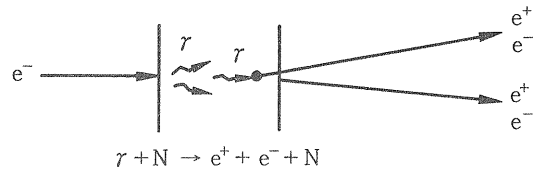


図2-2-5 電子対生成

KEKでは、図2-2-6 に示すように6ユニットからなる陽電子発生用のリニアックを2.5 GeV電子リニアックの西側に建設した。最初の3ユニットは大電流の1次電子を加速するもので、後半の3ユニットで陽電子を加速して2.5 GeV電子リニアックの途中 (第1セクター第5ユニット) に輸送する。表2-2-2 に陽電子ビームのパラメーターを示す。

電子加速部 前半の一次電子ビーム加速の部分は電子リニアックと原理的には同じであるが、短パルスの大電流を加速するために、プリバンチャーの前に更にサブハーモニックバンチャー (2856/24=119MHz) を置いて、電流の増加を図っている点が異なっている。(図2-2-7,8) また、大電流を加速するため、空間電荷の効果 (space charge effect) が問題になってくる。

**陽電子加速部** 後半の3ユニットで、ここの先頭には陽電子発生用の標的、陽電子捕獲用の強力なパルスコイルが設置されている。またこの直後の加速管にもソレノイドコイルを巻いている。

陽電子ビームは電流が小さく、ビームサイズも大きい、またその性質は2.5GeV電子リニアックの場合と異なり、入射部のビームの性質だけでなく、陽電子集束系の特性や2.5GeV電子リニアックへのビームトランスポートの影響もビームの性質を決める。即ち、陽電子ビームのエミッタンスは、一次電子のビームによるものではなく陽電子集束系のアクセプタンスによってきまる。また、バンチは、一次電子のバンチに、捕獲する陽電子の速度差や軌道差によるバンチの広がり加わる。更に、ビームトランスポートによる軌道差の影響もある。ビームエネルギーの分布はバンチの大きさによるもの以外に捕獲する陽電子のエネルギー範囲が加算される。(図2-2-9)

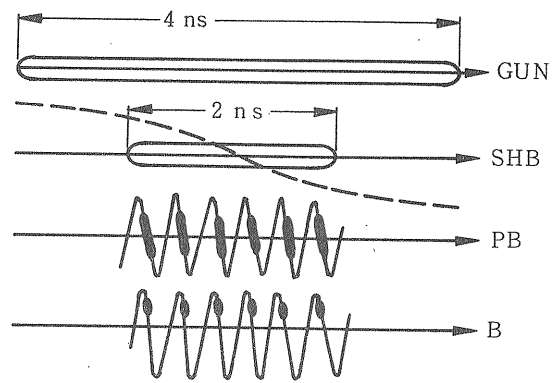
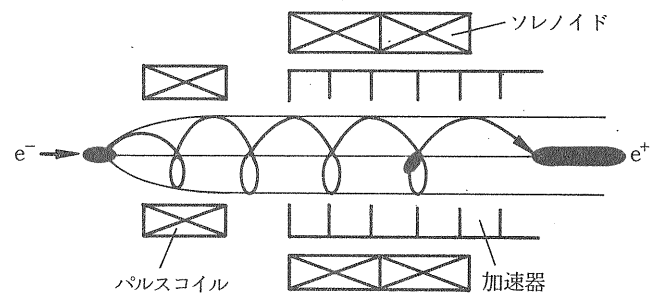


図2-2-8 陽電子発生装置用電子リニアック入射部での電子ビームのバンチの様子

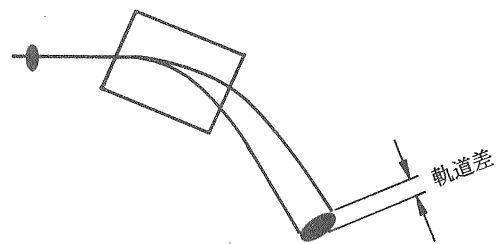
電子銃カソード/アノード間電圧	150 kV
電子銃電流パルス幅 (1)	4 ns
電子銃電流パルス幅 (2)*	10 ns
電子銃ピーク電流	10 A
1次電子ビームパルス幅	2 ns
1次電子ピーク電流	10 A
陽電子ピーク電流	≥10 mA
(at 2.5GeV, 0.5%dP/P)	
繰り返し周波数	50 pps
(*ビームトランスポート調整用)	



(1) 軌道差による陽電子ビームバンチの拡がり (陽電子捕獲用ソレノイド)



(2) 速度差によるバンチの拡がり



(3) 軌道差によるバンチの変化 (偏向電磁石系)

図2-2-9 陽電子バンチの変化の要因

表2-2-2 陽電子ビーム

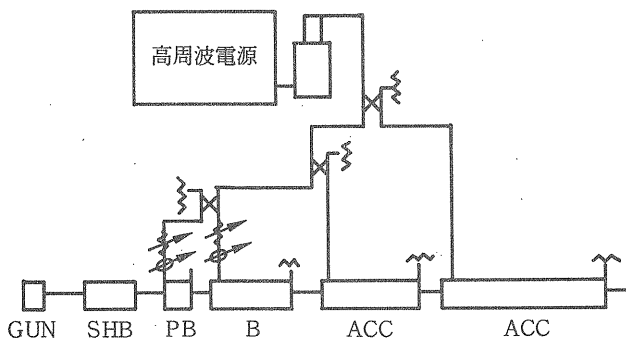


図2-2-7 陽電子発生装置用電子リニアックの入射部の構成

### 2.3 リニアックの調整とビームモニター

2.5GeV電子リニアック/陽電子リニアックのどちらの場合も、現在のところ自動的にビーム調整を行うよ

うにはなっていない。従って、高周波電源の調整や加速位相の変化などがあるごとにビームの調整をしている。2.5GeV電子リニアックの調整は、長パルスビームを用いて行い、単パルスビームの調整は最後のユニットによるエネルギーの調整と、スイッチヤード（トリスタンや放謝光リングへの入射路のある場所）での軌道調整だけを行っている。陽電子ビームはこれらとは別に調整される。調整が終了すると、加速高周波の位相や集束系のパラメーターが制御計算機に記憶され、またモニターしたビームの電流値等も記録される。ここではリニアックの全く最初からのたちあげを簡単に順を追って説明し、どの様なモニターが用いられているか紹介する。

#### 〈電子銃からの電流を調べる〉

個々の装置（例えば、高周波電源、集束系電源、制御用計算機など）の立ち上げが済んで、いよいよビームを出すとなると、最初にするのは電子銃から電流が出ているかどうかを調べることである。ここで電流モニターを使用する。長パルス電子ビームは、コアモニター（core monitor）を使用する。また単パルスビームには、壁電流モニター（wall current monitor）を用いる。これらのモニターは電流値だけでなく波形を見るものである。矩形のパルスであることがビーム負荷（beam loading）によるエネルギーのバラつきをなくすので好ましい。

#### 〈入射部の調整〉

次に、入射部の調整を始める。ここでは、バンチャーの調整が重要であり、最初はプリバンチャーの電力は切っておく。このとき先ずモニターしなければならないことが3つある。(1)プリバンチャー、バンチャー、通常加速管に必要な電力が供給されているか(2)ビームがロスせずにプリバンチャー、バンチャーに入っているか(3)電子銃からのビームパルスと加速高周波とのタイミングがあっているか、である。ここでは、RFモニター及び電流モニターを使用する。またビームの大きさ、位置を確認するスクリーンモニター（screen monitor）があれば調整が容易である。

電子銃からのビームがうまくバンチされているかどうかは最終的にはビームを偏向電磁石で曲げてエネルギースペクトルを測定するか、直接バンチを測定するストリークカメラ（streak camera）等のバンチモニター（bunch monitor）を使用する以外ない。

しかし、ストリークカメラのように直接バンチを測定するモニターがない場合は、バンチの最適化は後回しにして、伝統的に次のような方法が取られる。バンチャーの電力が設計値に近い値であれば、最初から程々にバンチされているはずである。従って、バンチャ

ーとその後の加速管の位相関係が一致すれば、電子は加速されて、この加速管の後ろでビーム電流が増える。繰り返してバンチャーの電力と位相を調整することによって、バンチが良くなって行けばエネルギーも揃ってきて電流も増加していく。こうして、ある程度の調整はバンチャーの少し後ろの電流モニターで出来る。

プリバンチャーの調整はバンチャーの調整が終了した後、電流が増えるように電力と位相を調整する。

#### 〈レギュラーユニットの調整〉

入射部の調整が終ると、通常の加速ユニットでの調整になるが、ここでも高周波電力、ビームの位置と電流、高周波とビームのタイミングの3点のモニターが前提である。後はビームバンチと高周波の位相を合わせる仕事である。位相あわせ（phasing）の方法として、次に述べるような方法が取られる。

第一の方法は、ビーム電流の小さいところでは困難で余り能率的な方法ではないが、KEKの電子リニアックでは数十ミリアンペアの長パルスや数アンペアの単パルスビームで可能な方法である。それは加速管出口のRFモニターを使ってビーム負荷を観測することである。通常、ビーム負荷（reactive beam loading）と言うのは、図2-3のように電子が加速管内に誘起する電波（beam induced wave）が加速高周波にベクトル的に重なりあって観測される現象のことで、加速状態では逆位相で加速高周波に重なり合うため、RF検波波形にへこみが観測される。位相の一致がよいほどこのへこみが大きくなるのでこれを観ながら位相の調整をする。

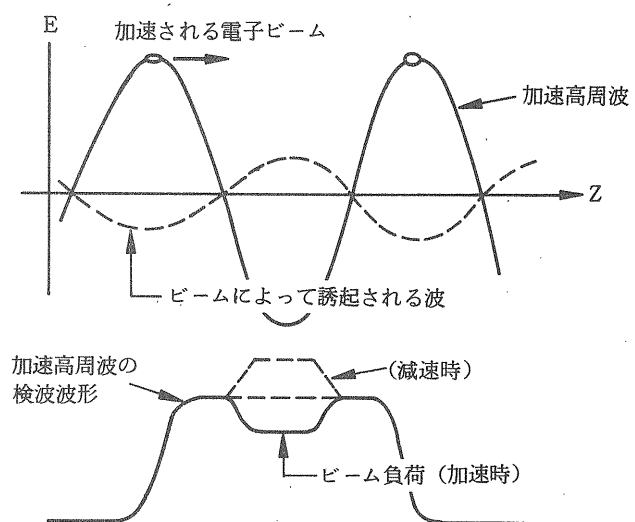


図2-3 reactiveなビーム負荷の概念図

第二の方法は、やはりRFモニターを使用するが、加速高周波とビームが誘起する高周波を同じモニターから交互に取り出し、各々の位相をマスターオシレーターの位相と比較することによって位相を合わせるものである。この方法は位相合わせの自動化の基本になっている。

#### 〈ビームトランスポートの調整〉

ビームトランスポートの調整はこれまでに述べた調整の各段階で行う。ソレノイドコイル、四極電磁石の集束電磁石は計算による電流を設定し、ビームと加速高周波の位相調整等が終るまでは動かさず、ステアリングだけで行う。ビームトランスポートの調整でモニターするのは、ビームのプロファイル、位置、電流である。短いリニアックでは電流だけを見て調整することも多いようだが、ビームの位置や形を見て調整すると非常に能率的で誰にでも容易に調整できる。本所の電子リニアックでは更にビームロスモニターすることによって調整やトラブルの診断を容易にするようにしている。

#### 2.4 ビームの特性を調べるためのモニター

ビームの中には加速器の特性を反映する情報が含まれている。

ここでBBUについて簡単に説明する。電子リニアックのBBUは  $HEM_{11}$  モードと云ってビームを横方向に振る働きを持つ電波(図2-4-1)をビーム自身が加速管内に誘起することによって、パルスの後ろの方にあるビームを損失する現象で、pulse shortenigとも呼ばれている。従って、これはパルス幅が、数マイクロ秒の長パルスビームに特有の現象である。

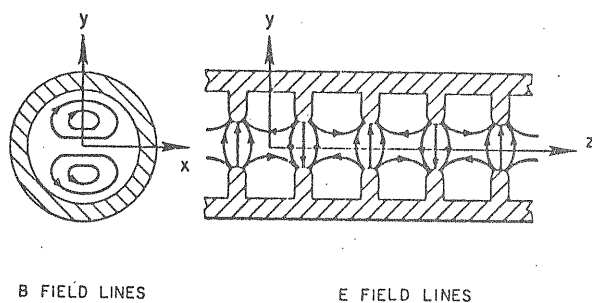


図2-4-1 ビームが誘起する  $HEM_{11}$  モードの電波 (文献2より転載)

リニアックで発生するビーム発散現象は (1)発振型のビーム発散 (regenerative beam breakup) と (2)蓄積型のビーム発散 (multisection or cumulative beam breakup) の二種類に分類されている。図2-4-2に各々の発生メカニズムを図解して示している。

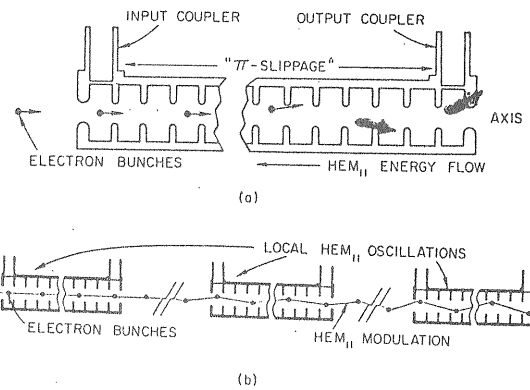


図2-4-2 (1)regenerative beam breakup (2)multisection or cumulative beam breakup の概念図 (文献2より転載)

(1)は大電流の短いリニアックで発生するもので、数百ミリアンペアないし数アンペアの電流から発散が始まる。これは、1本の加速管の中でビームによって誘起された  $HEM_{11}$  モードの電波 (backward wave) が加速管の入口方向に移動しビームにフィードバックをかけていき、ある電流値を越えたところで発振が始まるものである。

(2)でも発散を引き起こすのはビームによって誘起される  $HEM_{11}$  モードの電波であるが、(1)の場合と違い多数の加速管の中に、むしろローカルに蓄積されるこの電波によってビームの振動が始まるものである。

2.5GeVリニアックのように長い加速器で問題になるのはこちらの方のタイプである。

BBUの特徴はこのように電流が増えてあるしきい電流 (threshold current) を越えると急に発散が生じることである。BBUが生ずるとビームが横方向に振動を起こし、これがBBUの周波数となって観測される。この周波数を測定することによってBBUに関する加速管の特性を実験的に知ることが出来る。

#### 2.5 ビームモニターの配置をどうするべきか

電子リニアックのモニターとして最低限必要なのは電子銃と入射部の電流モニター、各ユニットに1台のRFモニターと電流モニターである。しかし、これだと電子リニアックが長くなるにつれエキスパートでなければ運転できないマシンになってしまう。誰にでも運転できるという条件をつけると、集束用の電磁石1組に対し1個のビームスクリーンと1個の電流モニターが必要である。モニターの位置は集束系の配置などに関連する。以下にいくつかの例を示す。

##### 〈入射路〉

ビームトランスポートから加速管への入射路、或は偏向電磁石への入射路ではスクリーンモニターとステ

アリング電磁石の配置は図2-5-1 のようになる。最初の2台のビームスクリーンとステアリングは偏向電磁石系や加速管への入射軸を決める。又このスクリーンによって後ろとのマッチングをモニターする。偏向電磁石系の2台のスリットと後ろのモニターはビームのエネルギースペクトルを測るとき用いるものである。偏向電磁石系は入射部と加速器の終端に必要である。

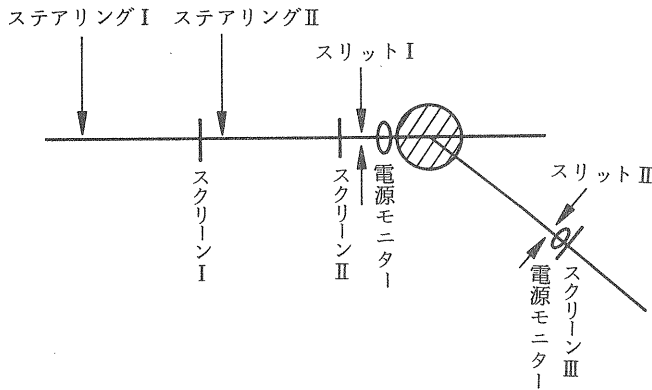


図2-5-1 入射路のモニターの配置例

〈通常の加速部〉

四極電磁石は加速管と加速管の間にはいる。この部分の配置は、陽電子リアックでは、図2-5-2 のようにしている。ビームトランスポートの調整では、ビームを四極電磁石の中心に通しておく必要がある。従って、四極電磁石とスクリーンモニター、ステアリングを1組にして用いる。電流モニターは加速管の直後に置いて放射線によるダメージが少なくなるようにしている。

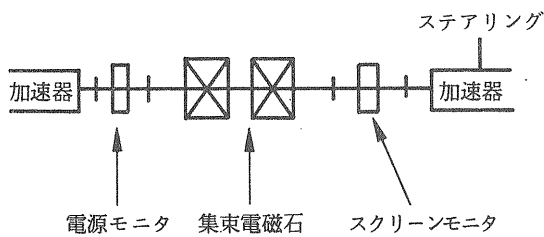
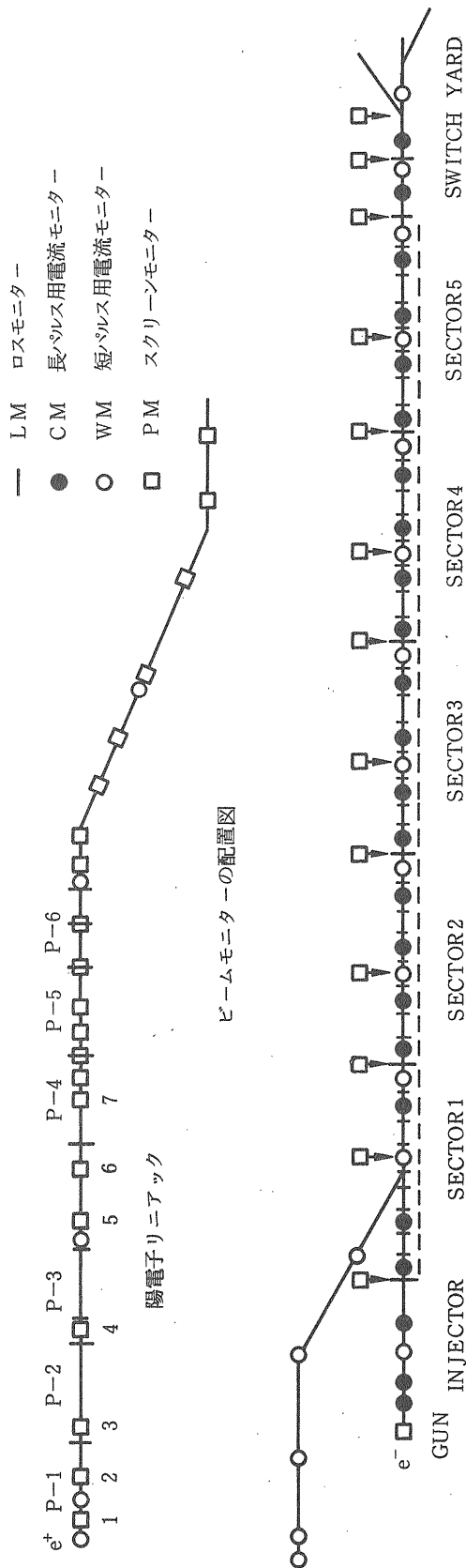


図2-5-2 通常加速部でのモニター配置例

3. KEKの電子リアックのモニター

3.1 ビームモニターの構成

これまでは電子リアックのビームの特性や調整法、ビームの分析などからビームモニターをどう用いるかを述べてきたが、つぎにKEKの電子リアックのモ



2.5 GeV 電子リアック

図3-1 2.5GeVリアック/陽電子発生装置用リアックのビームモニター配置図



モニターを紹介する。2章までで述べたことは、これまでの経験からの反省もふまえているので、特に最初に建設された2.5GeVリニアックでは必ずしも理想的なモニターの配置にはなっていない。図3-1に全体のビームモニターの配置を示す。

〈RFモニター〉

2.5GeVリニアックでは各ユニットに4本ある2メートル管のうち、2番目の加速管の出口側の無反射終端器(ダミーロード、dummy load)の前につけている。入射部のユニットではバンチャーと最初の2メートル加速管の出口側につけている。陽電子リニアックでは、バンチャーのほか各ユニット前半、後半の2箇所の割合で設置されている。

〈電流モニター〉

電子リニアックは最初PFリングに長パルス(1us)を供給するだけであったので、長パルス用の電流モニター(コアモニター)が整備された。続いてトリスタンの蓄積リング(AR)が完成し、単パルスビーム(2us)を出すようになって、単パルス用の電流モニターが開発された。更に、微弱な陽電子ビームが加速されるようになって、S/N比の良い壁電流モニターが整備されるようになったが、現在まだ整備は完了していない。

長パルス用の電流モニターは2.5GeV電子リニアックでのみ用いられていて、入射部では電子銃、プリバンチャー入口、第一2メートル加速管の後にあり、第1セクターから第5セクターでは奇数番目の各ユニットに設置されている。

単パルス用の電流モニターは、各セクターの偶数番目のユニットに設置する予定で、現在のところ第4、第8ユニットに設置されている。

〈ビームロスモニター〉

ビームロスモニターは長パルスビームの調整に有用で、2.5GeVリニアックで、入射部を除く全ユニット(40ユニット)に設置している。

〈スクリーンモニター〉

2.5GeV電子リニアックでは、入射部、各セクターの後ろ、スイッチヤードに設置されたが、陽電子ビームの加速にともない、各セクターの第4ユニットに増設した。(但し、第1セクターは第5ユニット)

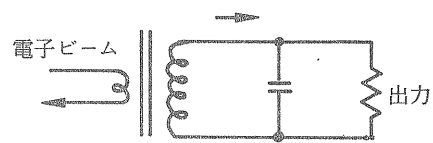
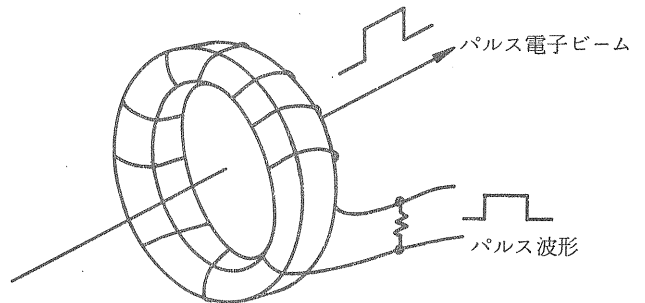
陽電子リニアックでは、原則として四極電磁石1組につき1台の割合でつけられている。

3.2 長パルス用電流モニター

長パルスの電流モニターによく用いられるモニターは、リング状のフェライトコアに導線を数十回巻いたもので、コアモニターあるいはカレントトランスフォー

マー(current transformer)等と呼ばれている。図3-2-1にその説明を図解した。

図にこのモニターの等価回路を示すが、加速ビームはトランスの一次側を流れる1ターンの電流と考えられる。2次側に流れる電流は、その自己インダクタン



$$V = V_0 (e^{-\lambda_2 t} - e^{-\lambda_1 t}) \quad (0 \leq t \leq 2)$$

サグの項 立ち上がりの項

$$\lambda_1 = \frac{1}{2RC} + \sqrt{\left(\frac{1}{2RC}\right)^2 - \frac{1}{LC}} \sim \frac{1}{RC}$$

$$\lambda_2 = \frac{1}{2RC} - \sqrt{\left(\frac{1}{2RC}\right)^2 - \frac{1}{LC}} \sim \frac{R}{L}$$

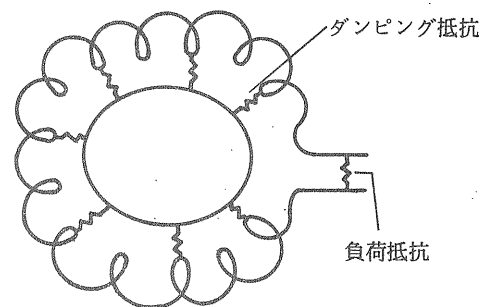
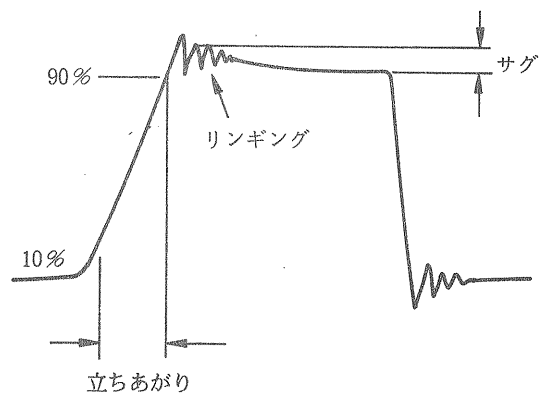


図3-2-1 コアモニターの説明図

スL、負荷抵抗R、容量Cの値によって1次側の電流波形を変換する場合と、電荷量に比例した振動出力を出す場合とに分けられる。即ち、

- A)  $4R^2C < L$  (パルス変換器)
- B)  $4R^2C > L$  (振動回路)

Bの場合は振動波形のどのピークを取っても電荷量に比例するので、十分に時間が経ってから測定することによって、ビーム加速に伴うノイズが避けられる利点もある。しかし、2.5GeVリニアックではパルス波形に関する情報が必要なのでAの条件で使用している。2次側に現れるパルスは、1次側パルスのピーク電流をI、2次側の巻数をNとすると、

- 1) 電流値  $I/N$
- 2) 立ち上がり RC
- 3) サグ R/L

となる。巻き数を多くすると、電流出力は小さくなるがLが大きくなりサグが小さくなる。また、RCを小さくすると、立ち上がりも速くなって広帯域型の電流モニターとなる。但し、モニターを広帯域型にするにつれ、立ち上がり、立ち下りのところで振動（リングング）があるので、ダンピング用の抵抗をいれる等の工夫が必要である。

図3-2-2, 3 のものは2.5GeVリニアックで用いられている電流モニターである。信号を得るには、コアモニターをビームダクトの中に入れるか、図のようにビームダクトの一部を絶縁して、ビームによる電磁場を外部に取り出すようにしなければならない。モニターを加速器の真空中に入れるのは出来るだけ避けたいので、2.5GeV電子リニアックでは、後者の方法をとっている。

〈ダクトの絶縁〉 アルミナセラミックの両端にコヴァール合金 (KOVAL ALLOY) の鈔を付けたものを用いている。コヴァールはアルミナと線膨張率が良くに於いて、アルミナを銅やステンレス等膨張率の異なる金属とろうづけをする場合、間に緩衝材として用いられる。但し、磁性体であるので使用場所に注意を要する。この絶縁ダクトはモニター用として便利であり、これまでのところ1個が不注意によって破損した以外はトラブルがない。モニターはこの絶縁ダクトの上から取り付ける。従って、コアやシールドのためのアルミニウムケース等を総て円筒形二つ割の構造にしている。

〈コアの巻線〉 細い線を全体に一樣に巻くことが望ましいが、組立の便利さを考えて、2つ割のコアの

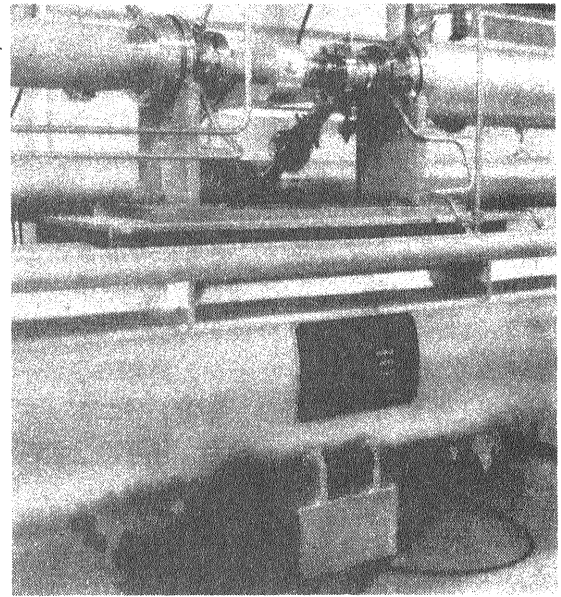


図3-2-2 2.5GeVリニアックに設置されているコアモニター。奇数番目のユニットの中央部（5λの空間）に設置されている。架台の下にアンプが置かれている。

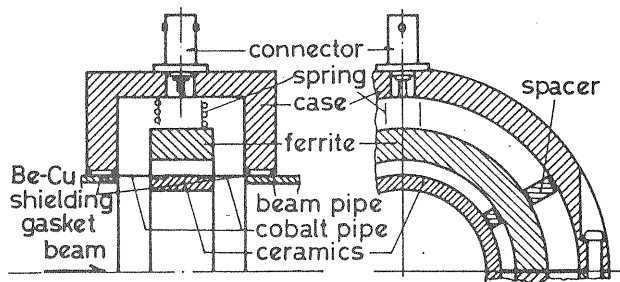


図3-2-2 コアモニターの断面図

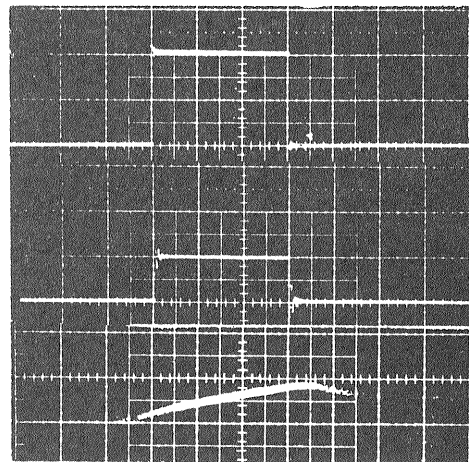


図3-2-3 コアモニターの性能。(上) 入力1ターン電流波形。0.5V, 1μs/div. (20mAの電流に相当) (中) 出力信号5mV, 1μs/div. (下) 同。5mV, 10ns/div.

片側に25回、0.1ミリのホルマール線（1PVF-φ0.1）を巻いている。

〈モニターの校正〉 もう片方のコアには1ターンの巻線に直列に50オームをいれて、モニターを校正するために利用している。即ちこの1ターンにパルサーからビーム電流の疑似パルスを入れ、その出力を制御室で測定することによって、このシステム全体の校正をすることができる。校正用の1ターン端子、信号出力端子には BNCLセアタクルをシールドケースから絶縁して使用している。

〈絶縁〉 コアと巻き線などの絶縁には対放射線を考慮して25ミクロンのポリイミドフィルムを使用している。

〈フェライトコア〉 Mn-Znのフェライトを半月状に2分割し切断面を研磨している。組立に際しては、スプリングで切断面に隙間が出来ないように押し付けている。

〈アルミニウムのシールドケース〉はセラミック絶縁ダクトとの間に約1ミリの隙間をあげシールドを組んだとき、機械的な圧力でセラミックを破壊しないようにしている。但し、シールドケースとビームダクトとは電氣的に接触が十分とれるように、コンタクター (contacter) をいれている。

図3-2-4 にこのモニターの性能を示す。

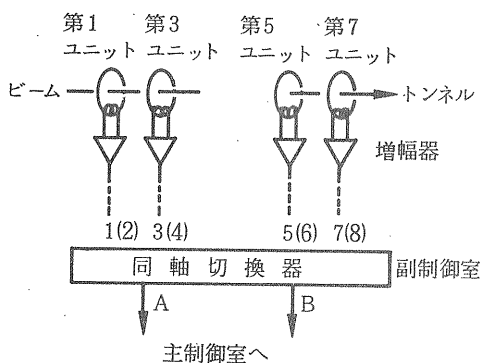


図3-2-4 コアモニターの信号系統図

モニターからの信号はすぐ近くに置いたアンプで増幅されて副制御室に送られる。コアモニターの二次側の負荷抵抗はアンプの入力抵抗になっている。アンプの出力は、この入力抵抗を二段に切り替えることによって変えている。オペアンプは帯域が DC-100MHzで、出力は50オーム負荷で8ボルト取り出せる。アンプは加速器の架台の下方に置きビームラインからの放射線を直接浴びないようにしている。

図3-2-5 に長パルス電流モニターの信号系統図を示す。コアモニターから出力され電力増幅された信号は3D2Tの三重シールドの可変性の50オーム同軸ケーブル

で各セクターの副制御室に送られる。ここで同軸スイッチによってA、Bの2系統にまとめられ、5D2Vの同軸ケーブルで主制御室に送られる。A、B 2系統にまとめたのは、主制御室に集まる同軸線の数を減らすと共に、軌道調整の際1つのセクター内で前半と後半の二か所を同時に観測できるように考慮したためである。主制御室に送られた信号は、波形デジタイザーで観測される。

### 3.3 短パルス用電流モニター

1ナノ秒前後の短パルス用の電流モニターとして一番手軽に用いられるのが、壁電流モニターである。

壁電流とはビームダクトの内面をビームと共に走る逆電荷の電流であると考えることが出来る。壁電流を観測するには、図のようにビームダクトを絶縁して、ここに抵抗を入れその両端の電圧を観測すれば良い。ビームの位置による影響を避けるため、ビームダクトの円周上に何本かの抵抗を並列にいれる。

〈等価回路〉 容量Cは浮遊容量である。このモニターの出力ピーク電圧は、ビーム電流をI、モニターのインピーダンスをZとすると、 $V = IZ$ である。図3-3-1のようにシールドケースをつけない簡単なものとZは殆ど直流抵抗Rそのものとなる。

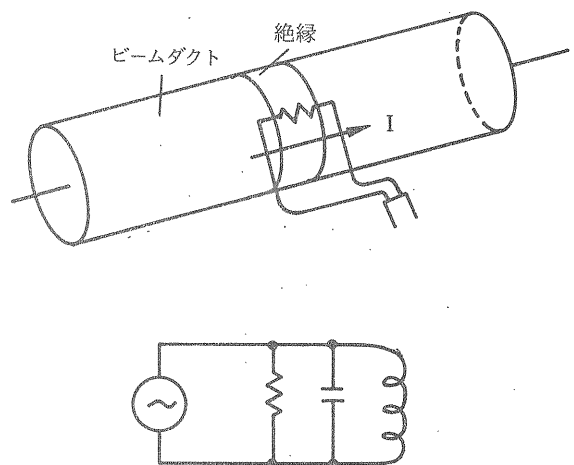


図3-3-1 壁電流モニターの概念図と等価回路

このモニターの立ち上がりはRCで決まる。従ってRを小さくすると出力は小さくなるが、立ち上がりは速くなる。図3-3-2 は抵抗値を変えていったときのパルス幅に対する応答を実験室で調べたものである。このモニターは絶縁されたビームダクトの上に同じ値の抵抗を10本つけただけのものである。

〈モニターの試験、校正〉 図3-3-3 のような装置を使用する。テーパ型の同軸管はインピーダンスが50

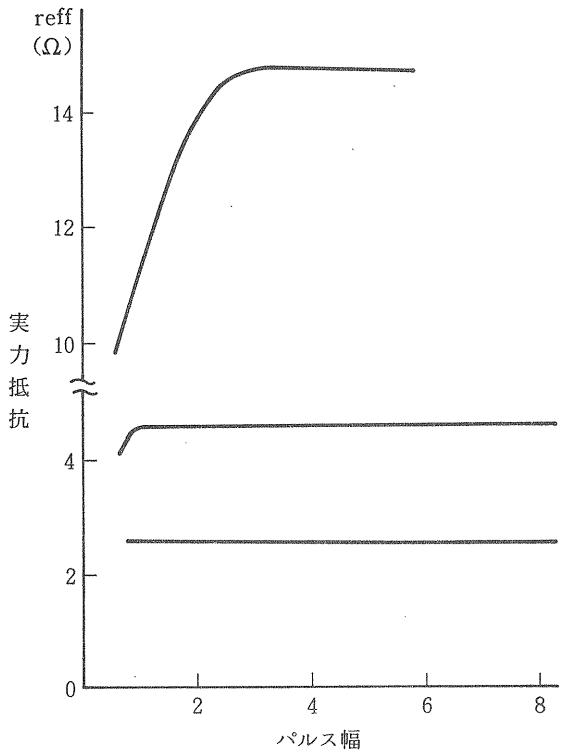


図3-3-2 壁電流モニター (シールドなし) のパルス応答性。抵抗値が(1)22Ω (2)6.8Ω (3)2.2Ωの3種類の場合に付いて、入力のパルス幅に対する実効抵抗 (出力電圧/入力電流) を示す。

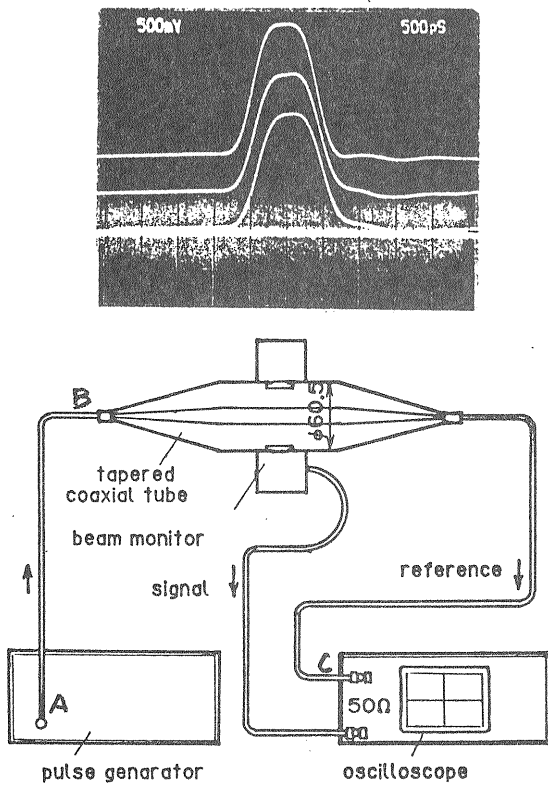


図3-3-3 壁電流モニターの試験/構成に使用する測定装置及び電流波形 (上から順にA、B、C点での観測波形)。

オームになるように製作され、速いパルスに対しても反射などによって、波形が崩れないようにしている。この同軸管の中心導体に流れる電流がビーム、また外部導体がビームダクトに対応する。中心導体を流れる電流とモニターからの出力をオシロスコープで測定することによってモニターの較正を行う。

陽電子リニアック、2.5GeV電子リニアックで実際に使用されている壁電流モニターは図3-3-4 のようなものである。ビームダクトの径によって2種類のものを使用している。外側のアルミニウム容器はシールドの役割を果たす。内部のフェライトはシールドの交流インピーダンス $L\omega$  を大きくして、壁電流がシールド側に流れる量を少なくする。信号を取り出すための抵抗器は円筒形のものを用いている。これはモニターを組み立てるとき能率的であり、また抵抗が同軸管の一部を成し、抵抗自身の自己インダクタンスをなくすことが出来る。構造は長パルス用電流モニターの場合と同じで、絶縁ダクトの上に二つ割のシールド容器、フェライトコア、円筒形抵抗器などを取り付けるようにな

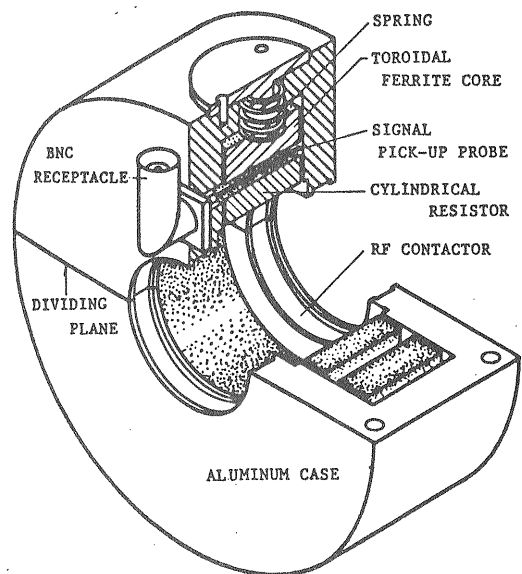
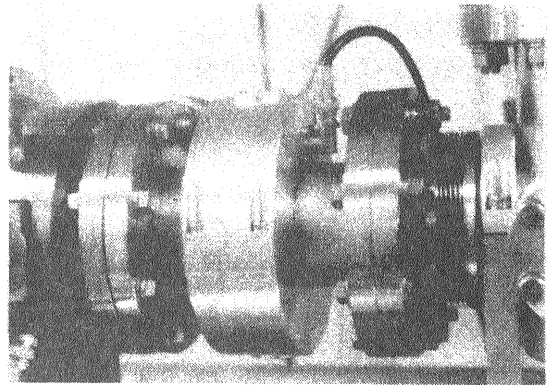


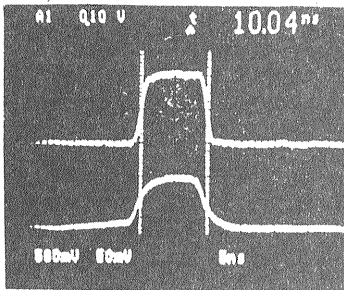
図3-3-4 2.5GeVリニアックで使用されている壁電流モニター

っている。壁電流モニターをシールド付にすることによって、陽電子ビームのように数ミリアンペア程度の小さな電流に対して S/N比が飛躍的に高くなり信号の観測を可能にする。図3-3-5 にこのモニターの性能を示す。

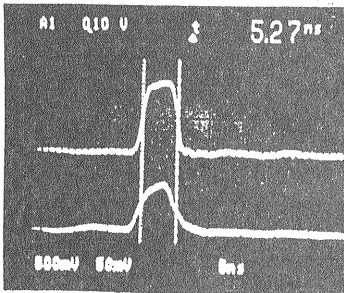
壁電流モニターの信号は、すぐ近く（2メートル位）で5倍に増幅して副制御室に送っている。アンプは帯域が DC-1.1GHzの IC を使用し、50オームのストリップ線路の基板に組み込んでいる。50オーム負荷で最大2ボルトの出力が取り出せる。図3-3-6 にこのアンプの性能を示す。

図3-3-7 に壁電流モニターの信号系統図を示す。アンプ出力は低損失の半可変式（semi-flexible）同軸

ケーブルで副制御室に送られている。これらはDC-10GHzの帯域を持つ同軸スイッチにより1系統にまとめられて主制御室に送られる。同軸ケーブルのサイズは陽電子リニアックでは13D、2.5GeVリニアックでは20Dのものが使用されている。

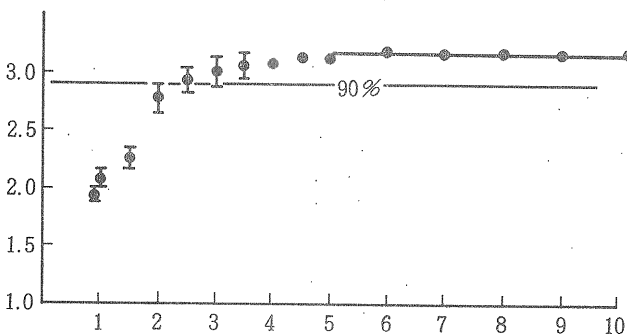


(a)パルス幅10ns  
(上) 500mV, 5ns/div.  
(下) 50mV, 5ns/div.



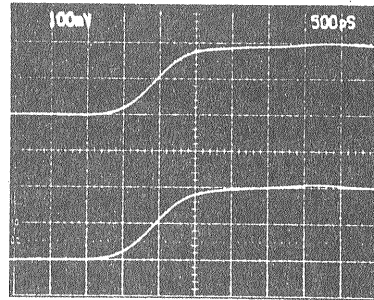
(b)パルス幅5ns  
(上) 500mV, 5ns/div.  
(下) 50mV, 5ns/div.

(1)入力パルスと出力パルスの電流波形の比較



(2)パルス応答性。入力パルス幅に対する実効抵抗値

図3-3-5 2.5GeVリニアックで使用されている壁電流モニター（φ60.5ダクト用）の性能。



(上) 入力  
20mV, 500ps/div.  
(下) 出力  
100mV, 500ps/div.

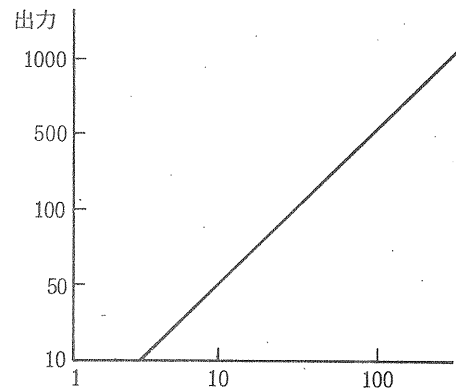


図3-3-6 広帯域アンプの性能。(1)立ち上がり(2)入力/出力直線性

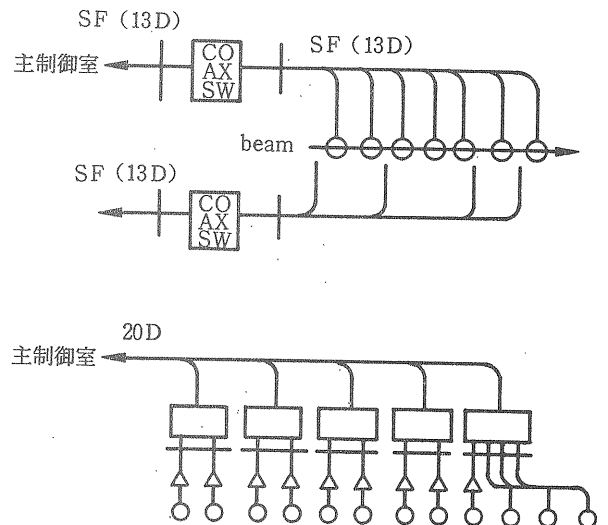


図3-3-7 壁電流モニターの信号系統図

### 3.4 ビームロスモニター

リニアックで用いられるビームロスモニターは、放射光光源系のスタッフによって開発されたものである。光源系のもと同様であるが、以下に簡単に説明する。

システムの図解を図3-4-2 に示す。センサーの部分は 20Dのシールド付の半可撓式の同軸ケーブルをリニアック1ユニット分の長さ(約8メートル)に切断し、高圧用と信号用の特別なコネクタを両端に付けたものである。同軸線の中心導体が信号線、外部導体が高圧線、一番外側のシールドが共通のグランドになっている。高圧は DC500ボルトを印加し、信号線とグランドとの絶縁抵抗は $10^{14}$ オーム程度に抑えている。

ビームロスモニターの出力は図3-4-3 に示す様にビームロスとビームエネルギーの積に比例している。

図3-4-4 に全体の系統図を示す。40のユニットからの信号は8ch×5台の積分器で積分された後マルチプ

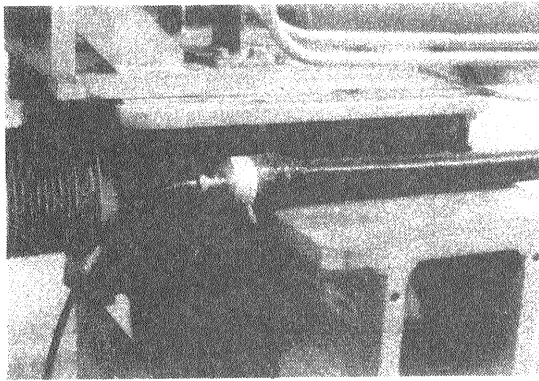


図3-4-1 加速管か大脳絵に取り付けられたビームロスモニターの写真。信号の取り出し部分。

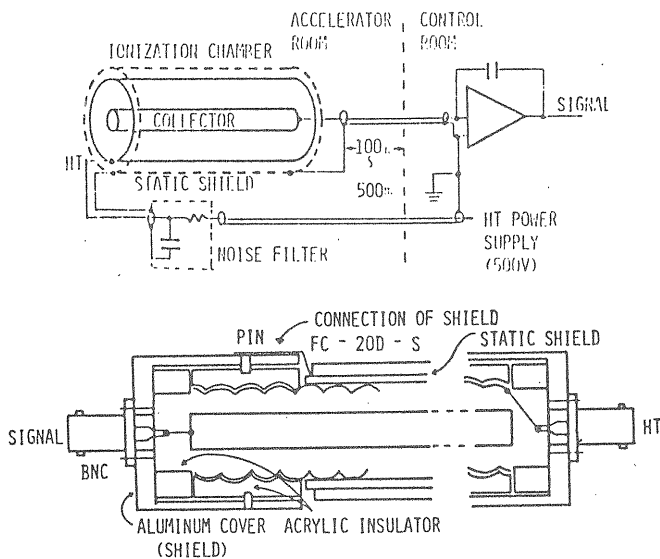


図3-4-2 ロスモニター断面図解

レクスされ、AD変換等の処理を受けた後、GPIBで制御用計算機MELCOM70/30に取り込まれる。このデータは主制御卓に棒グラフで表示されている。

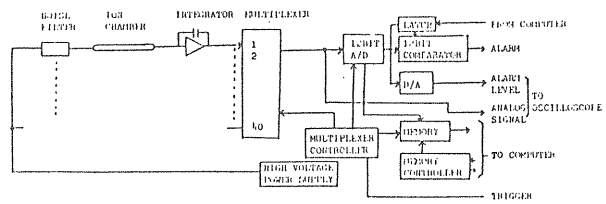


図3-4-3 ロスモニターの信号系統図及び信号処理回路のシステムブロック図

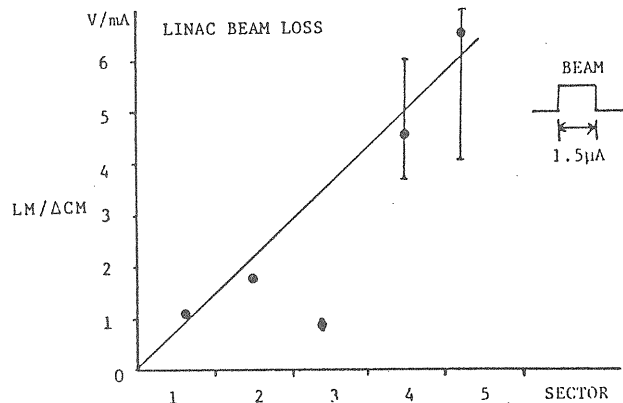


図3-4-4 ロスモニター出力電圧/ビームロス電流値をリニアックの長さの関数としてプロットしたものの。

### 3.5 スクリーンモニター

スクリーンをビームライン上に直接出し入れしてビームの位置や形を観る方法は加速器で広く用いられている。この方法は位置、形の二次元情報を目で確かめられるのでビーム診断がすぐ出来る。最近ではVISUAL機器の汎用化により、画像処理が容易になった。これにより、カメラからのビデオ信号を処理し、画像の信号強度をA/D変換して制御計算機に取り込むことによってビームの広がりや強度分布を表示することが出来る。

図3-5-1, 2 はビームラインに設置されているスクリーンモニターの真空容器とスクリーンの駆動装置の部分である。スクリーンの駆動はKEKでは何種類かの方法が実際に用いられているが、PF2.5GeVリニアック、陽電子リニアックではエアシリンダーによってスクリーンを駆動している。

エアシリンダーを用いる方法は圧縮空気の配管が余分に必要であるが、モーターの保守の必要がないこと、駆動速度が速く、多数のスクリーンを操作するときスムーズであること、制御系はエアシリンダーのバルブ

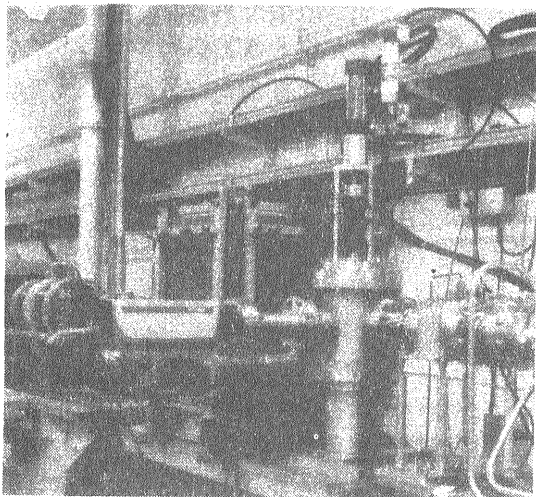


図3-5-1 2.5GeVリニアックの入射部及び各セクターエンドに取り付けられているスクリーンモニターの写真

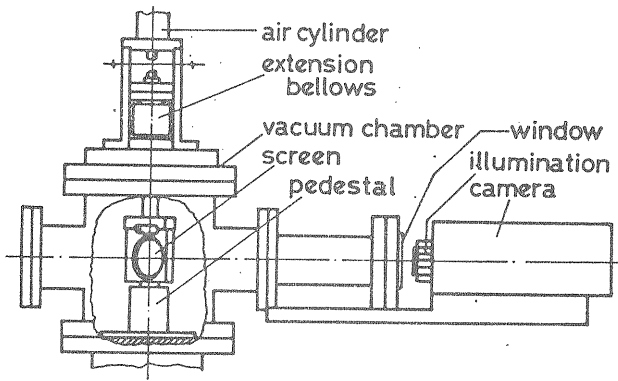


図3-5-2 スクリーンモニターの断面図

駆動用ソレノイドに加える交流の200または100ボルトのON/OFFだけなので比較的簡単に出来ること、スクリーンの位置はシリンダーのストローク、駆動装置の工作精度で決まり、モーターを用いた場合のようにリミットスイッチによるオーバーラン防止の必要もないので誤動作の心配もない。実際、これまで5年間使用したトラブルはエアシリンダーと駆動装置をつなぐユニバーサルジョイントの破損が1件あっただけである。

図3-5-3 の駆動装置の場合はタンデム型のエアシリンダー（図3-5-4）を用いて二段階に駆動して二種類のスクリーンをビームラインに挿入することが出来る。エアシリンダーに供給する圧縮空気は約5気圧であるが、スクリーンモニターの駆動には十分であり、また汎用の空気圧システムも耐圧10気圧程度である。シリンダーの内径は使用するベローズの有効径程度のものを選んでいる。

スクリーンは加速ビームの電荷量によって適当な明るさに光るものを選択する。また、放射線による影響

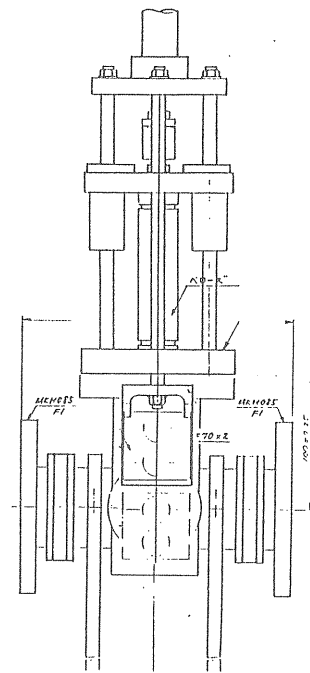


図3-5-3 二段式のスクリーンモニターの断面図

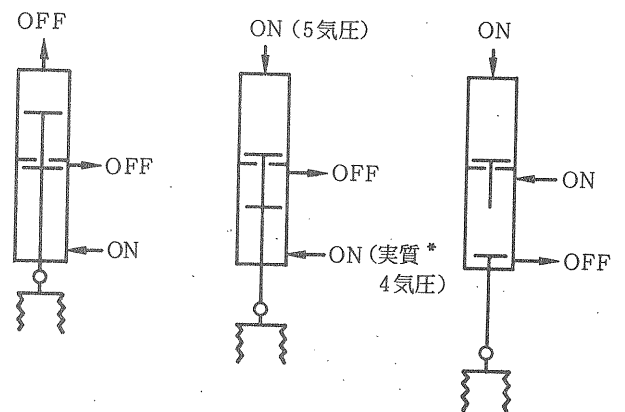


図3-5-4 タンデム型のエアシリンダーの動作

のないものが好ましい。一般的には、各種のセラミックスが用いられる。2.5GeVリニアックでは最初窒化ホウ素 (boron nitride) のセラミックスを用いていた。長パルスビームではこれでも十分であったが、短パルスビームを加速することになり、酸化クロムを含んだアルミナのセラミックス (99.5%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+CrO<sub>3</sub>) を使用している。これはヨーロッパ合同原子核研究所 (CERN) で試験されて用いられているもので、フランスの Desmarquest社から商品名AF995Rとして輸入している。これはルビーと同じ成分と発光構造をもち、少量の荷電粒子によって極めて明るい赤色光を発する。短パルスの微弱な陽電子ビームを観測するために、硫化亜鉛 (zinc sulfide) の蛍光スクリーンも使用しているが、これは放射線による変質やガス放出による加速管への

悪い影響の恐れもあるので最小限にしている。

モニターカメラは公称最低照度 3ルクスの汎用カメラを多用しているが、陽電子ビーム観測のために 0.3ルクスのものも使用している。2.5GeVリニアックの建設当初に設置したものはカメラをスクリーンのすぐ近く(約40cm)に置いたためしばしばダメージを受けた。その後設置したものは出来る限り加速器の架台の下方に置き鏡を使って直接ビームラインを観ないようになっている。鏡は必ず2枚を一組にして使用し上下左右が逆にならないようになっている。

図3-5-5 にスクリーンモニターの信号系統図、制御系のダイヤグラムを示す。カメラの信号は主制御室の同軸スイッチで切り替えられて2台のモニターテレビで観測されている。スクリーンモニターの制御は、各副制御室のリレーモジュールをリニアックの計算機制御システムを通じて制御し、エアシリンダー用の200V及びカメラの電力のON/OFFを行っている。

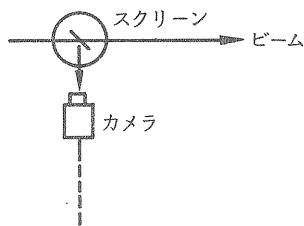


図3-5-5 スクリーンモニターの系統図

### 3.6 スクリーンモニターの画像処理システム

スクリーンの画像は、現在はモニターテレビを目で観ているだけである。この方法では、ビームの位置と形のおよそを知ることが出来るが、ビームの空間的(ビームラインに垂直な平面)な分布は不鮮明である。そこで、モニターカメラからの信号強度がビーム強度に比例していれば、これを処理して計算機に取り込み表示することによって、この空間分布を比較的簡単に知ることが出来る。高速に動作するスクリーンモニターとこの画像処理システムを組み合わせることによって、電子リニアックのビームプロファイルをリアルタイムで表示することも可能である。

現在は市販の画像処理システムで目的に合ったものが手にはいるが、最初の試験では代わりに、手製のビデオ信号同期回路とSONY/TEKTRONIXの波形デジタイザーを使用し、図3-6-1のようなシステムを組んだ。

電流分布を測定するには、ビーム電流の強度に比例した大きさのビデオ信号を取り出さなければならない。このためモニターカメラは (1)自動利得調整回路を外す、(2)水平、垂直同期信号をビームトリガーによ

て外部から与えることが必要である。図3-6-2 はカメラからのビデオ信号を処理するためのゲートのタイミングを示している。また、実験ではズーム、光量調整のためのアイリスを遠隔操作した。

図3-6-3 はビデオ信号とビーム電流強度の関係を、ビームトリガーからの遅延時間を変えながら測定したデータである。使用した電子ビームはエネルギー、パルス幅、繰り返しが各々、500MeV、1 $\mu$ s、1ppsで、電流は通常の運転で使用される 10mA-50mAに設定した。このデータによれば絞りをある適当な値に設定したとき、ビームから70msの遅延時間を取ればビデオ信号とビーム電流の強度の比例性が良くなることが分かる。

図3-6-4 にこのシステムを用いたビームプロファイルの2次元表示の例を示す。この例では左上の平面図にビームの分布をドットの色分けによって行い、また、X、Y軸に関する分布をY、Xに付いて積分した量で表示している。

画像処理システムで注目すべき点の一つは、ビデオ

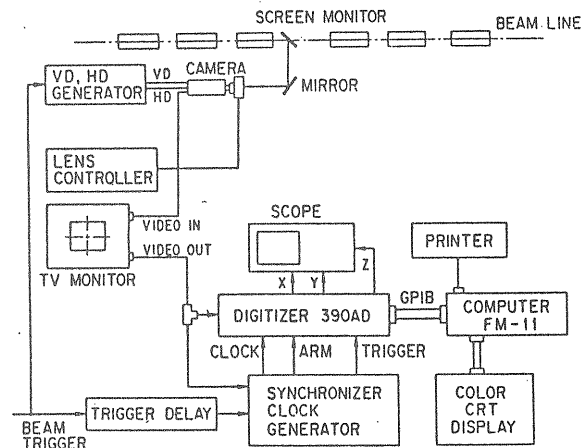


図3-6-1 スクリーンモニターの画像処理のための装置配置図

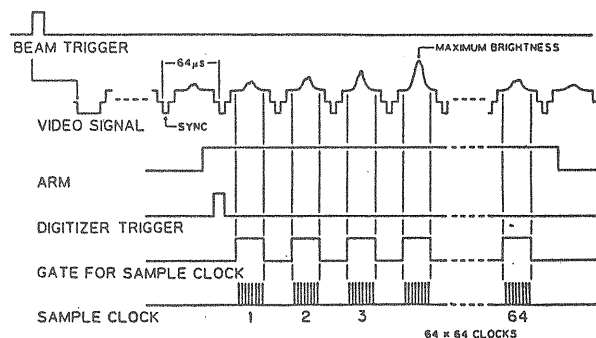


図3-6-2 TVカメラからのビデオ信号を処理するためのゲートのタイミング



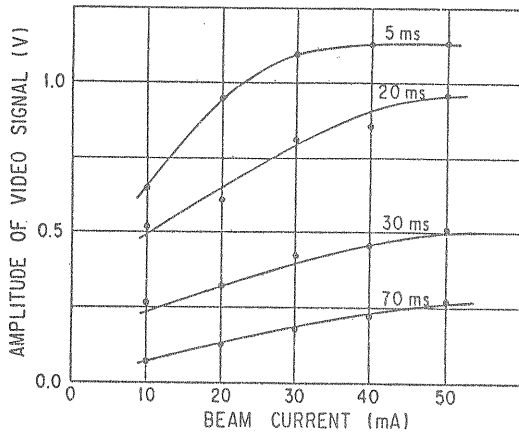


図3-6-3 5ms、20ms、30ms、70msのビームトリガーからの信号処理遅延時間に対する、ビーム電流とビデオ信号のピーク電圧値の関係

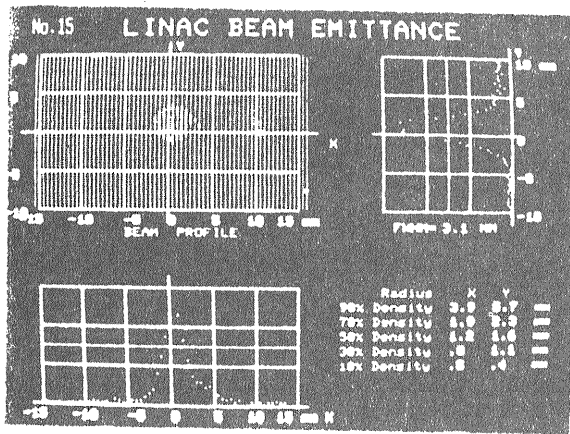


図3-6-4 ビームプロファイルの二次元表示の例

信号のサンプリングを多くして平均化するなどの処理を加えることによって、不鮮明な画像を鮮明にすることが出来る点である。今後このシステムが完成すればリニアックのビーム診断の有力な道具の一つとなるであろう。

### 3.7 RFモニター

RFモニターをビームモニターの一部として取り上げたのは、先にも述べたようにビームが加速管内に誘起した電波をモニターすることによってビームのバンチの位相を知ることが出来るからである。図3-7-1に示すのは自動的に加速高周波の位相とバンチの位相を合わせるシステムの原理図である。同じRFモニターから、ビームが誘起した電波と加速高周波を別々に取り出し、マスターオシレーターからの高周波と位相を比較し、一致させる。同じモニターと同じ経路を使用するので精度良く位相を比較することが出来る。ビー

ムの誘起電波を測定するときは、加速高周波のタイミングを加速状態から100 $\mu$ sずらし「スタンバイ」の状態にしておく。

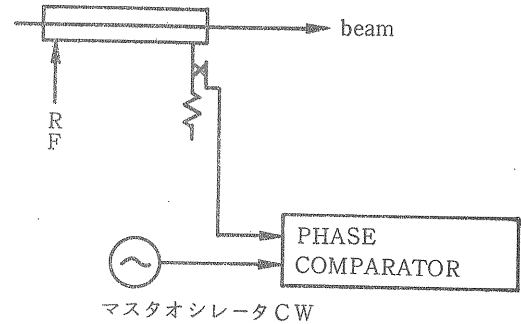


図3-7-1 自動位相合わせシステムの原理図

図3-7-2, 3 は2.5GeVリニアック/陽電子リニアックで用いられているRFモニターで、変形されたベータホール型方向性結合器(modified Bethe hole coupler)である。マイクロ波の教科書に良く載っているベータホール結合器は図3-7-4のようなもので、主同波管の電場によって結合して副同波管に流れる両方向性の電力と磁場によって結合する一方向性の電力の結合を適当に調整することによって、方向性結合器としたものである。主同波管の電波の向き(ポインティングベクトル)が逆になれば出力の方向も逆となる。出力の片側は無反射終端(ダミーロード dummy load)になっている。変形型のは主導波管にセラミックの窓を付けて真空と大気を遮断した上で電波を外部に取り出し、同軸型のカプラーで信号を出力している。

図3-7-5 はRFモニターの系統図である。加速ユニットからのRF信号は半可変性の位相安定化同軸ケーブルで副制御室に送られ、同軸スイッチでA、B 2系統にまとめられて検波、増幅され主制御室に送られる。



図3-7-2 2.5GeV電子線形加速器で使用されている変形ベータホール型方向性結合器の写真

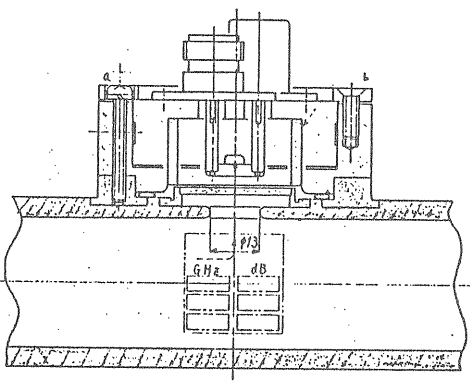
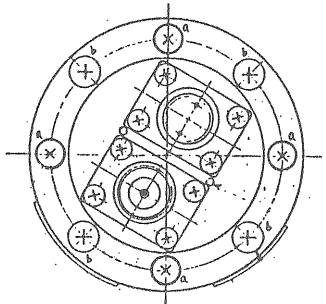


図3-7-3 2.5GeV電子線形加速器で使用されている変形ベータホール型方向性結合器の断面図

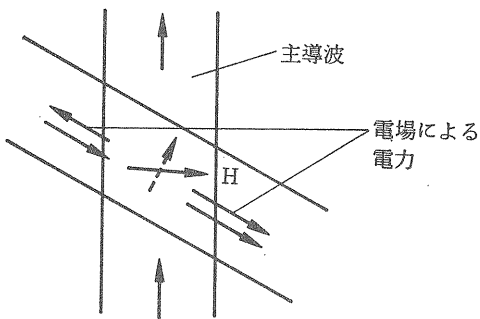


図3-7-4 ベータホール型方向性結合器の動作説明図

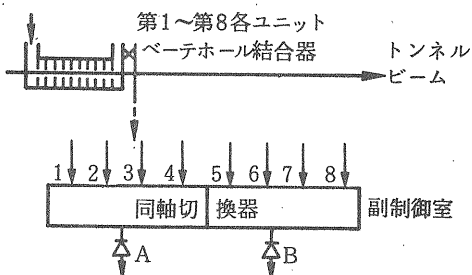


図3-7-5 RFモニターの系統図

### 3.8 その他のモニター

以下のモニターを「その他」としたのは余り重要でないという意味ではなく、常時使用されていなかったり、開発中であつたりするためである。

#### (1) 空洞共振器型ビーム位置モニター

これは  $TM_{110}$  モードの矩形、または円筒形空洞共振器を利用したモニターでSLACを初めいくつかの電子リニアックで使用されている。円筒型空洞を例にとって原理を説明する。このモードの電波は図3-8-1のような電磁界分布を持つ。

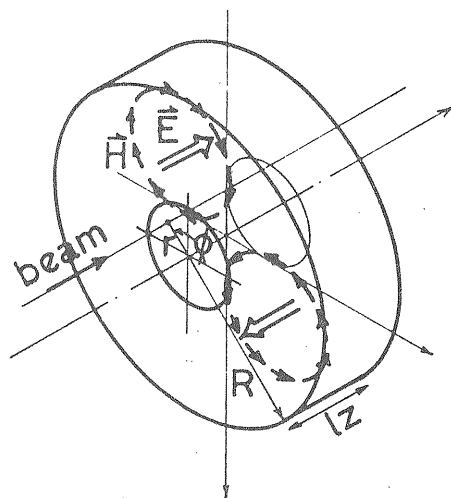


図3-8-1 円筒形空洞における  $TM_{110}$  モードの共振

ビームが中心軸を通るときにはビームはこの空洞に電波を出さない。しかし、中心軸からずれると、空洞に電波を放出してビームの方向に減速位相の電界分布を持つような  $TM_{110}$  モードの共振をおこす。信号出力はアンテナによって取り出す。ビームのずれる方向は信号の位相が 180度ずれるので分かる。出力の大きさはビーム電流と、変位の両方に比例するので、変位の絶対値を出すには必ずビーム電流で校正してやらねばならない。しかし、このモニターの利点は、ビームを加速器の中心軸に合わせるには精度も良く都合がよいことである。

SLAC等で使用されているものは、水平、垂直量方向のビーム位置を測る2個の  $TM_{110}$  矩形空洞及びビーム電流とビーム変位方向を知るための基準RFを得る  $TM_{010}$  円筒形空洞を一組にしてビーム位置モニターを構成している。2.5GeVリニアックでは2個の矩形空洞を図3-8-2のような1個の  $TM_{110}$  円筒形空洞に置き換えた。また、 $TM_{010}$  の円筒形空洞を省略してマスターオシレーターからの高周波を位相比較の基準としている。図に断面図を示す。所定の寸法公差で空洞を工作

した後最終的な共振周波数合わせは、アンテナの長さを微調して行った。

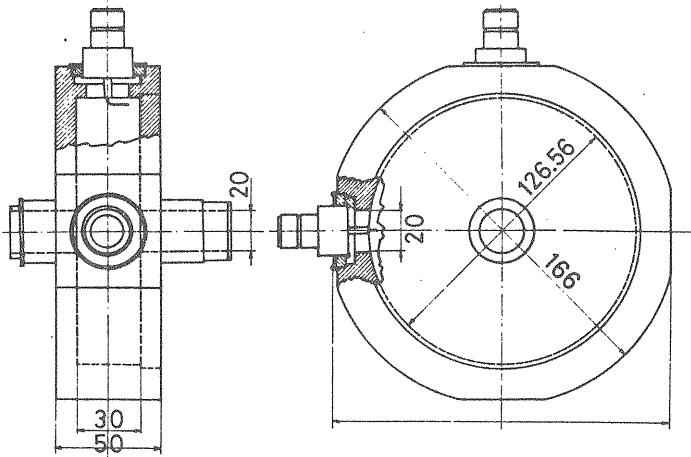


図3-8-2 TM110 円筒形空洞共振器を用いたビーム位置モニター

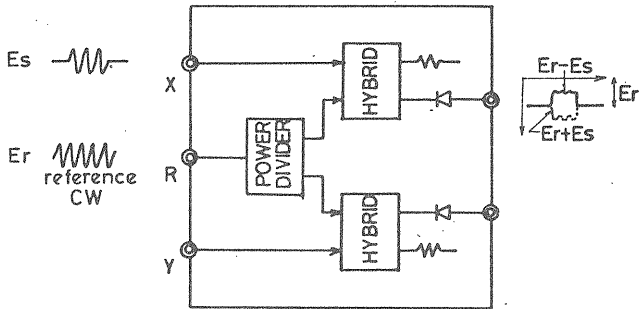


図3-8-3 空洞共振器からの信号処理回路

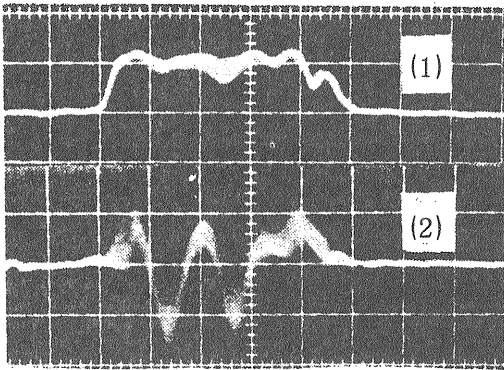


図3-8-4 電子ビームによるTM110 円筒形空洞共振器からの信号検波波形 ( $E_0=250\text{MeV}$ ,  $I_p=10\text{mA}$ ) (1) 垂直方向ビーム変位に対する出力 (2) 水平方向ビーム変位に対する出力 (5mV, 0.5us/div.)

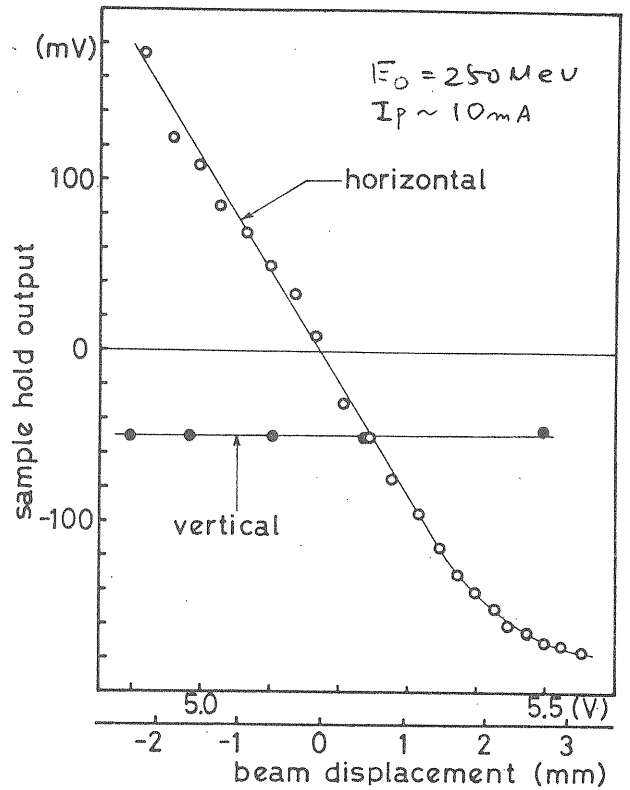


図3-8-5 電子ビームに対してモニターを水平方向に動かして測定したビーム位置検出精度

図3-8-3 の回路で空洞からの高周波信号 (パルス) とマスターオシレーターからの基準高周波 (CW) を重ね合わせて検波すると図3-8-4 のようにあるDCレベルを中心としてビーム方向によって正負の方向にパルスのビデオ信号が観測される。図3-8-5 はこの回路を用い、電子ビームに対してモニターの方を動かしてビーム変位を測定したデータ例である。

(2) BBU周波数を測定するためのモニター

図3-8-6 はビーム中に含まれているBBUの周波数成分を調べるためのモニターである。これはビームラインに垂直に同軸管を入れたものと考えてよい。同軸管の両端に向かって管径をテーパ型に絞りN型コネクタに変換している。片側を無反射終端とし、もう片方から信号を取り出す。同軸管のインピーダンスは50オームで広帯域の周波数モニターになっている。

(3) ストリップライン型のモニター

図3-8-7 はビームの微細な構造を観測することを目的とした速いモニターである。これは電子ビームに対して、ストリップラインの基板を垂直にいれて、信号を取り出すものである。ストリップラインは両面プリント基板の片側をグランドとし、もう片側に信号線とグランド間のインピーダンスが50オームとなるように

信号線路の幅を取っている。図のものは片側を無反射終端にし、もう片側から信号を取り出している。BBUモニターと同様であるが、ビーム進行方向に対して薄いため、ビームライン方向、即ち時間軸方向の分解能が高くなる。図3-8-8 に数ピコ秒のシングルバンチビームに対する観測信号の例を示す。

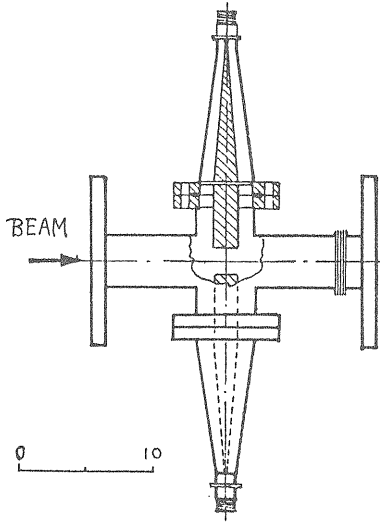


図3-8-6 BBU周波数を測定するためのモニター

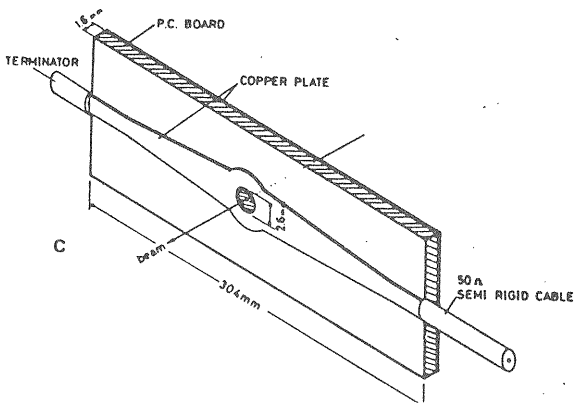


図3-8-7 ストリップライン型のモニター

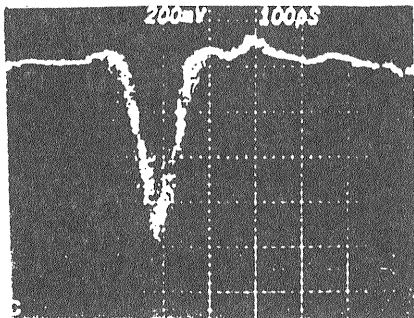


図3-8-8 ストリップライン型モニターによるシングルバンチビームの観測

(4) ストリークカメラ

ストリークカメラ(図3-8-9)は超高速光現象の波形測定装置である。現在2ピコ秒といった分解能のものが市販されている。日本の電子リニアックでもシングルバンチビームの加速を行っているところでは必須の測定装置となっている。

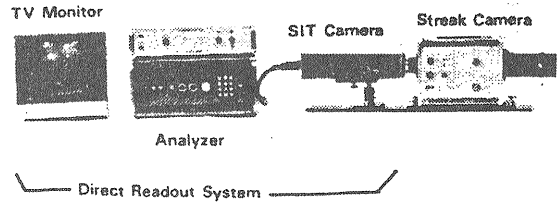


図3-8-9 ストリークカメラの写真(文献16より転載)

原理は、図3-8-10の様に先ず光をフォトカソードによって電子に変換し、次にこの電子ビームと垂直方向に電圧をかけてスイープすることによって、超高速現象の時間軸を横方向の位置に変換し、更にこれを増幅することによってTVモニターで観測できるようにしたものである。

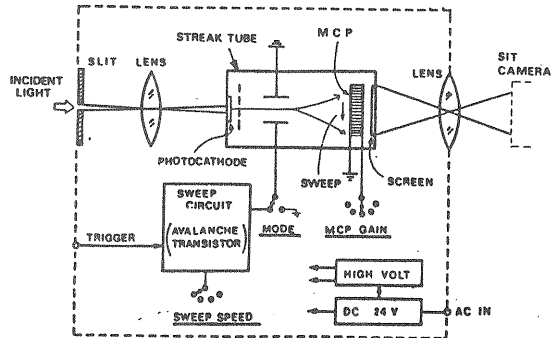


図3-8-10 ストリークカメラの概念図(文献16より転載)

3.9 ビームの観測と表示

2.5GeVリニアックでは常用のモニターは総て主制御室で観測することが出来る。また陽電子リニアックのモニターは総て陽電子副制御室で観測できる。まもなく陽電子リニアックの制御も総て主制御室で行うことが出来るようになる予定である。図3-9-1は主制御室コンソールの全体図である。

(1) 波形デジタイザー

波形デジタイザーは信号を一旦高速のアナログ処理回路とAD変換器でデジタルメモリに取入れ再度DA変換してスコープにアナログ表示したり、外部にデータを出したりする機能を持っている。2.5GeVリニアックの長パルス電子ビームは繰り返しが1ppsであり、通常

のアナログスコープでは非常に観測しづらい。このように繰り返しの少ない現象を扱うとき波形デジタイザは大きな力を発揮する。図のものは帯域DC-15MHz、サンプルレート30MHz×2(60MHz×1)、AD変換器は10ビットで2048語×2(4096語×1)の波形記憶長を持っている。

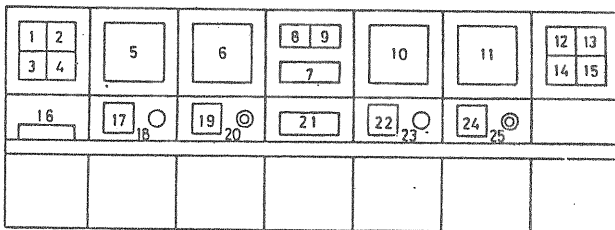
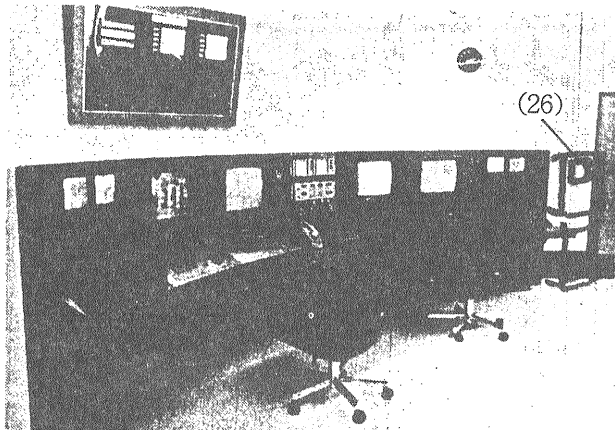


図3-9-1 主制御室コンソールにおけるモニターの表示、観測

- (7) 波形デジタイザー
- (26) DC-1GHz高感度スコープ
- (15) ビームロスモニターの表示
- (12) (13) スクリーンモニター用のTV
- (19) モニター操作用のタッチパネル

(2) DC-1GHz高感度リアルタイムスコープ

短パルスの電子/陽電子ビームの観測に使用する。短パルスビームはパルス幅が2ナノ秒と狭い上に繰り返しも少ない(現在は10pps)ので、信号の輝度は極めて暗い。そこでマイクロチャンネルプレート(2次電子増倍素子)で千倍程度明るくした高感度スコープが力を発揮している。

(3) ビームロスモニターの表示

電子リニアックの第一セクターから第五セクターまでの合計40の加速ユニットでのビームロスを棒グラフにして常時表示している。棒グラフの高さは、およそロスした電流とビームエネルギーの積、即ちロスパワーに比例した量になっている。

(4) ビームスクリーンのモニターテレビ

2台の9インチ白黒モニターテレビを使用している。

(5) モニター制御用のタッチパネル

現在行われているモニター関係の計算機制御は(1)電流モニター及びRFモニターの信号選択(2)スクリーンモニターの制御及び画像選択を図3-9-2のようなタッチパネルのパターンに従って行っている。

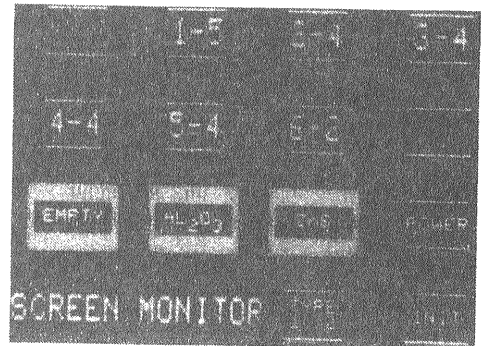
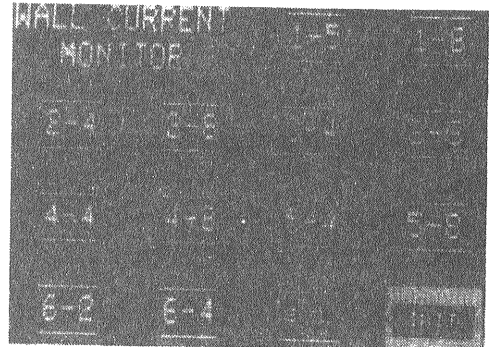


図3-9-2 モニターを制御するタッチパネルのパターン (a)電流モニターの選択 (b)スクリーンモニターの選択

4. ビームの観測

4.1 長パルスビームの調整とビームの観測

〈電流波形〉 図4-1-1 は2.5GeV電子リニアックの調整が終了した後で、電子銃とリニアック出口(スイッチヤード)のコアモニターで観測した、長パルスビームの電流波形を示す。ビーム波形は正常で、ロスによる波形の欠落は観測されない。スイッチヤードのモニターの波形は信号の輸送距離が長いために立ち上がりが鈍って見えているものである。

〈電流測定〉 図4-1-2 はリニアック全体でのビーム電流の分布の一例を示す。電子銃から入射部を出るまでに電流が60%程度に減るのはバンチャーの効率からやむを得ないもので不正常的なビームロスではない。

〈ビームロスの表示〉 図4-1-3 は第1セクター第1ユニットから第5セクター第8ユニットまでの40のユニットでのビームロスの一例を示す。通常のセクターに入った後ではビームロスはないが、放射線のシールドの設計基準では、2.5GeV、50mA、1us、50ppsのフ

ルパワー加速の状態、各セクターエンドのコリメーターの部分で各々5%、合計 25%のビームロスが許容されている。

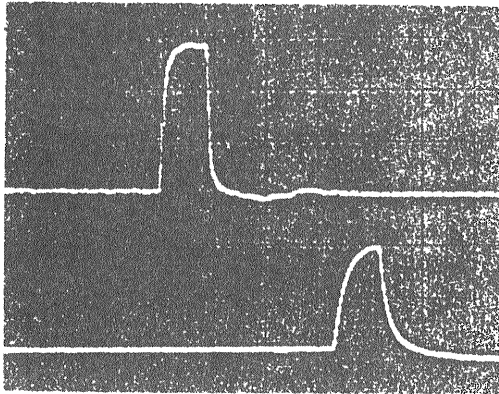


図4-1-1 波形デジタイザーで観測した長パルスビームの電流波形 (0.25V, 1 $\mu$ s/div.) (上) 電子銃 (CM0-1) (下) スイッチヤード (CM6-3)

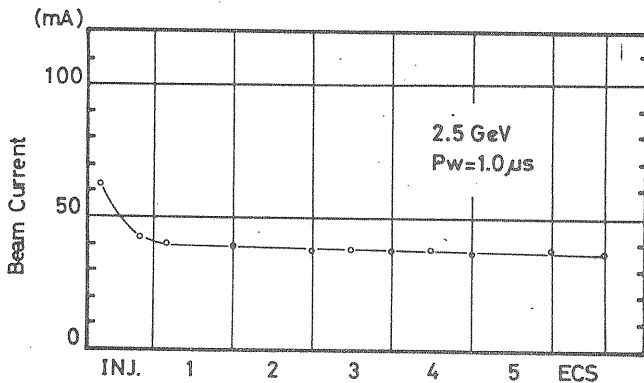


図4-1-2 長パルスビームの電流分布例

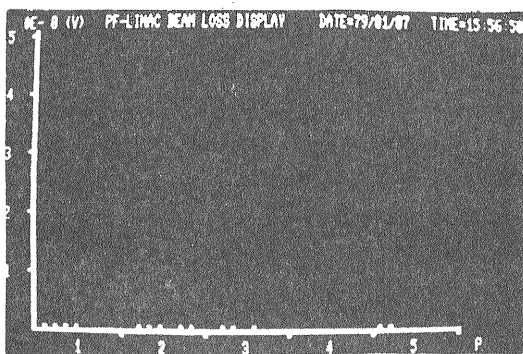


図4-1-3 長パルスビームのビームロス表示

〈ビームプロファイル〉 図4-1-4 は入射部と各セクターエンドでのスクリーンモニターで観測したビームプロファイルである。中心部の四角は縦が10mm、横が7mm の目盛りである。スクリーンの感度が良く、ハロー (halo) の部分まで明るく光っていて、コアの部

分はこれよりも小さい。リニアックのビームプロファイルはどの場所においても円形でなければならない。

図4-1-5 はビームトランスポートの計算例であるが、第2セクターの途中から四極電磁石の間隔が二倍になるの で、ビームサイズは第1セクターエンドで一旦小さくなった後、第2セクターで再び大きくなり、以下少しずつ小さくなっていく。スクリーンモニターによる観測は概ねこの傾向を示している。

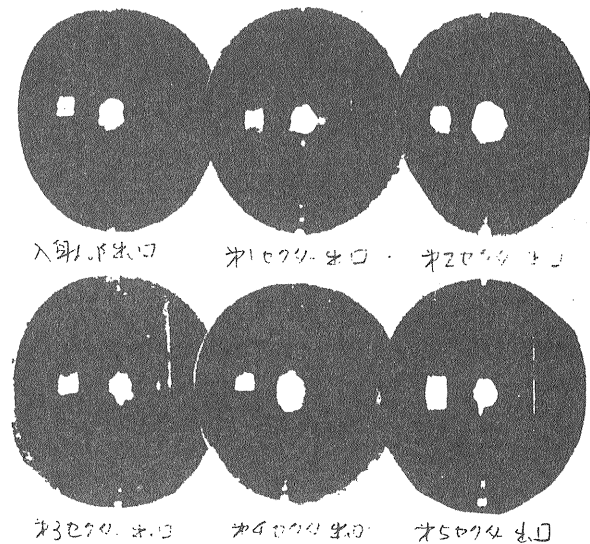


図4-1-4 ビームプロファイルの観測例

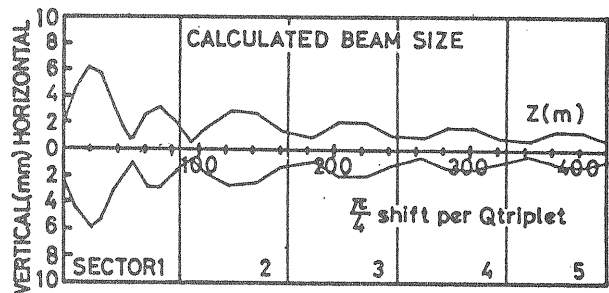


図4-1-5 ビームプロファイルの計算例

〈ビーム負荷波形〉 ビーム電流がある程度あると、図4-1-6 のようなビーム負荷波形が観測される。ビームのバンチと加速高周波の位相が合うほど、ビーム負荷による波形のへこみが大きくなる。また、高周波の波形に対するこのへこみの位置関係によって、互いのタイミングの関係を知ることが出来る。この加速高周波の立ち上がりの部分(1)は、高周波が加速管の中に満たされるまでの時間でフィリングタイム (filling time) と呼ばれている。加速ビームはこのフィリングタイムを過ぎた後で加速管に入らなければならない。次にビーム負荷波形を観ると、ここにも立ち上がりの

部分(2)があるが、これはビームが加速管に誘起する電波のフィリングタイムに当たる。実際のビームの位置は図に示した位置(3)である。ビームが感じる加速電界の強さは、加速管に供給される高周波とビームの誘導電界の加算されたものである。従ってこの誘導電界の立ち上がる部分(過渡状態)ではビームの加速エネルギーが徐々に低くなっていき、定常状態になるとビームエネルギーはビーム負荷に相当するだけ低くなる。ビーム電流が多くなるとこの過渡部分でのエネルギー差も大きくなりスペクトルが悪くなる。

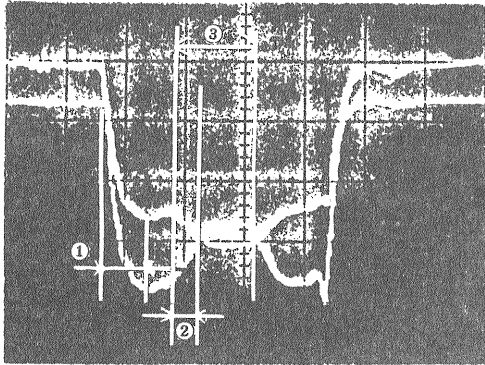


図4-1-6 ビーム負荷波形の例  
(上) RF1-6 (減速位相) (下) RF1-5 (加速位相)

〈エネルギーの測定〉 電子リニアックのエネルギー、或はエネルギースペクトルを測定するには偏向電磁石でビームを曲げなければならない。

図4-1-7 は第一セクターの後ろの偏向電磁石と電流モニターによって測定したエネルギー分布の例である。

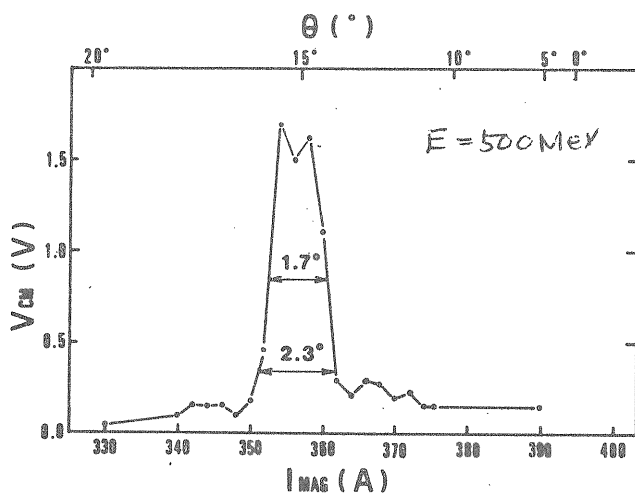


図4-1-7 エネルギースペクトル測定例(1) 第一セクターの後の偏向電磁石系により測定。横軸電磁石電流、縦軸電流モニター出力電圧

偏向電磁石で曲げた後のスクリーンモニターではビームは図4-1-8のような形に観測される。ビームの固まった部分(コアcore)は定常状態の部分で、その幅はビームのバンチの大きさと加速高周波の位相によって決められる部分である。そのコアよりエネルギーの高い部分は過渡状態の部分である。このエネルギー幅はビームの電流によって決まる。

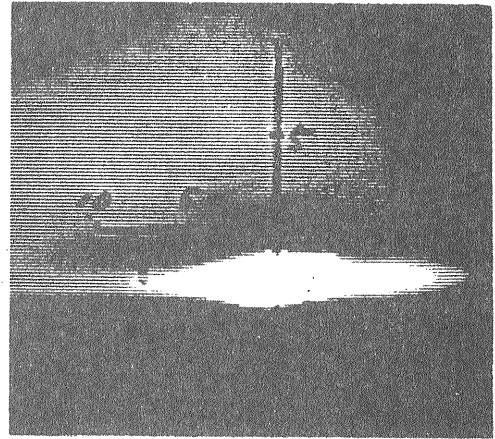


図4-1-8 偏向電磁石 (PF-RING BT-BM) で曲げた後のビームプロファイル。目盛りの数字はmm単位。0.85%/cmの運動量分散で、右側の方がエネルギーが高い。

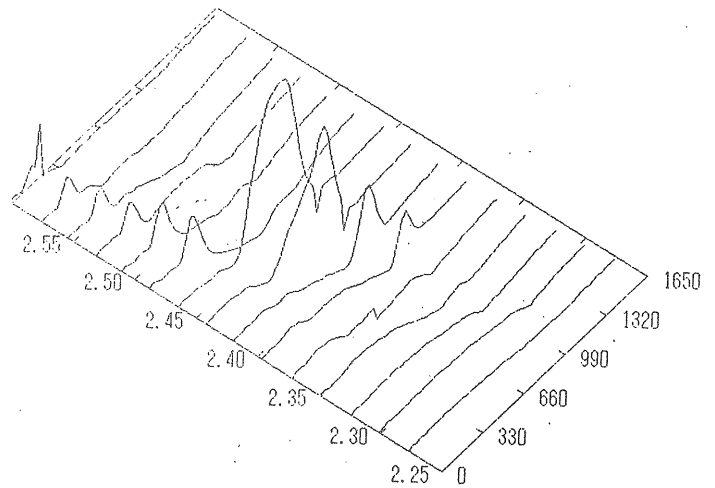


図4-1-9 エネルギースペクトル測定例(2) スイッチヤードの偏向電磁石 (PF-RING BT-BM) により測定。左横軸ビームエネルギー (GeV)、右横軸はパルスの時間軸 (ns)、縦軸はビーム電流を示す。

過渡状態によるエネルギー幅はリニアックに於て長パルスの大電流を加速するとき、次に述べるBBUの問題と共に重大な障害になる。これを改善しようとする試みも提案されている。先に説明したように、通常、ビームは加速高周波が加速管に充填してから入るよう

に合わせるが、いくつかの加速管では加速高周波とビームを同時に加速管に入れて過渡部分でのエネルギー幅を相殺するというアイデアである。2.5GeVリニアックでもこの方法を実験した。そのために、ビームのエネルギー分布をパルスの時間軸に付いても詳しく調べたものが図4-1-9である。この測定でビームパルスの先頭に当たる部分のエネルギーが高くなっている状態がはっきりみられる。この実験ではこのアイデアは成功しなかったが、加速ビームの状態についての重要な学習になった。

調整が悪い状態では電流波形が欠けたり、ビームロスモニターの表示にもロスが現れてくる。また、ビームプロファイルが良くない状態も観測される。

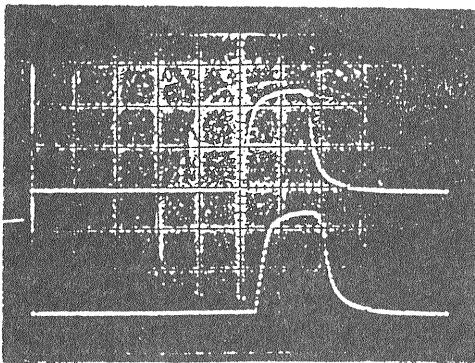
#### 4.2 電子リニアックに於けるビーム発散現象

SLACが最初に2マイル加速器の調整を初めて1週間たった1966年4月27日、その三分の二を加速したところでBBUが発生した。これはパニックと言うよりむしろ非常な驚きであったと報告されている。なぜなら、その時のしきい電流は10-20mAで、それまでに知られ

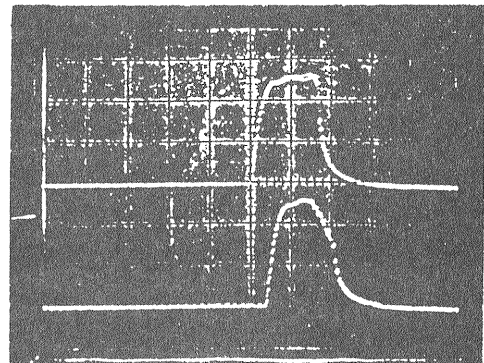
ていた短い加速器よりずっと低い電流であったし、2マイル加速器の仕様加速電流である50mAに近い値だったからである。こうして長い電子リニアックに於ける蓄積型のBBUが大きな問題になったのである。

同じSLACの報告によるとKEKの2.5GeVリニアックと同じ長さの付近でのしきい電流は30-40mAであったので、我々としてもこのBBU対策を最重点課題としたのである。その対策の一つは加速管の構造を5種類に分けバラバラに配置して、同じ周波数のHEM<sub>11</sub>Mモードが蓄積されないようにしたことである。もう一つは集束系の強度を強くすることによって振動を抑えるようにしたことである。

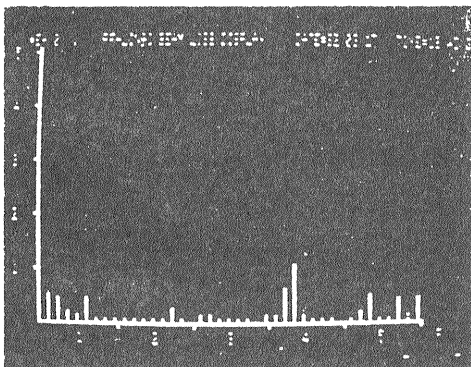
図4-2-1は2.5GeVリニアックで300mA、1.6μsの電流を加速したときに発生したBBUである。このときの加速器全体でのビームロスと第五セクターでの電流波形を示している。ビーム電流が少しさがって280mAのところではビーム波形、ロスともに正常であるが、300mAで急にビーム発散が発生している。ビーム波形の特徴はパルスの後ろの方が欠けるpulse shorteningの形をしており、ビームロスも前の方から徐々に起こるの



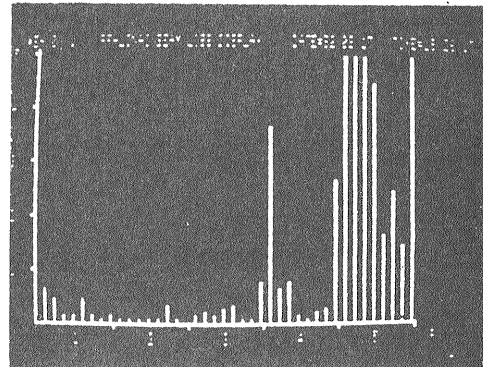
(a) 280mA, 1.6μs, 1.7GeVの電子ビーム  
(上) 第5セクター入口 (CM5-0)  
(下) 第5セクター出口 (CM6-1)



(c) 300mA, 1.6μs, 1.65GeVの電子ビーム  
(上) 第5セクター入口 (CM5-0)  
(下) 第5セクター出口 (CM6-1)



(b) 280mA加速時のロスパターン



(d) 300mA加速時のロスパターン

図4-2-1 BBUが発生する前後におけるビーム電流波形とビームロス表示



ではなく第5セクターで急に起こっている。これらの特徴は正に蓄積型の BBU に特有のものである。

BBU のしきい電流  $I_b$  は、加速管の構造が同じであればビームのパルス幅  $\tau$ 、加速器の長さ  $z$  に半比例し、加速管の電界強度  $(dV/dz)$  に比例する。即ち、

$$I_b \propto (dV/dz) / \tau z$$

またこれらの条件が同じであれば集束系の強度に比例する。これらのことは SLAC の実験でも確かめられている。図4-2-2 は集束系の強度と BBU のしきい電流をプロットしたデータである。図でベータトロン波長と言うのはビームが集束電磁石系によって集束されるとききのビームサイズの振動の波長のことである。このデータから KEK 2.5GeV リニアックの BBU は加速管の対策などの効果があつて起こりにくいことが解る。

BBU の周波数モニターによる測定も行われた。これは 3.8(2) で紹介したモニターを加速器の出口 (スイッチヤード) のビームラインに設置しこの信号を 13D 相当の半可撚式同軸ケーブルによって第5副制御室におくり、スペクトラムアナライザで分析した。スペクトラムアナライザで周波数分析をすると、観測される周波数  $f$  は、BBU の周波数  $f_b$  以外に、加速器の周波数である  $f_0$  (2856MHz)、アナライザの局部発振器の周波数  $f_i$ 、及びそれらのビート周波数が縋て観測される。

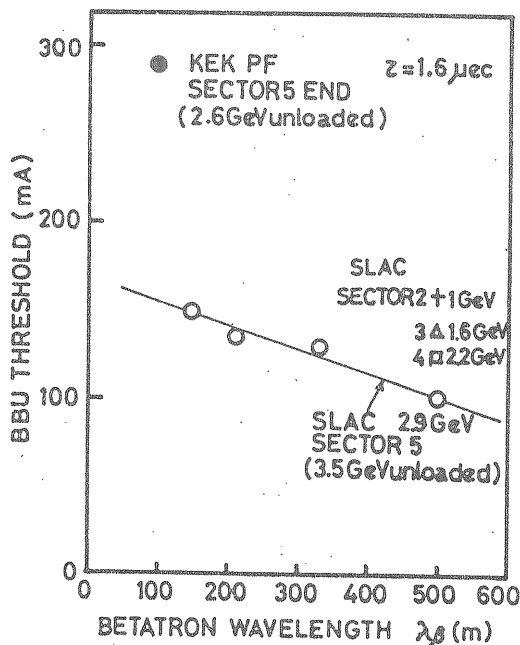


図4-2-2 集束系の強さと BBU のしきい電流 (BBU の発散が始まるビーム電流) の関係。横軸は集束系のベータトロン波長。波長が短いほど集束は強い。縦軸はしきい電流。

即ち、

$$f = 1f_0 + mf_b + nf_i \quad (1, m, n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$$

が観測される周波数である。従つて解析に対しては適当にフィルターを入れながら測定をする。図4-2-3 はスペクトラムアナライザの解析結果の一例である。図にみられる 4.20-4.25GHz のピークが加速管のベンチでの低電力試験の結果からも予想される BBU の周波数であり、加速管の構造を 5 種類としたために鋭いピークにはならず、分散されたものになり BBU を起こりにくくしていると報告されている。

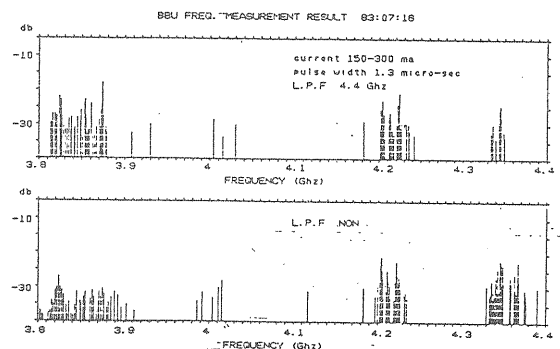


図4-2-3 BBU 周波数の測定。上段は 4.4MHz のローパスフィルターを入れて高い周波数成分の影響を除いたもの。4.2MHz 付近のものが加速管の低電力試験からも予想される BBU の周波数といわれている。

#### 4.3 エミッタンスの測定

図4-3-1 のように四極電磁石とその後のスクリーンモニターを用いてエミッタンスを測定することが出来る。いま四極電磁石とスクリーンの距離を  $L$ 、スクリーンの上でのビームサイズを  $R$  とすると、

$$R^2 - R_0^2 = L^2 (L_e / R_0)^2 (Q - Q_0)^2$$

がの関係が得られる。ここで  $Q$  は四極電磁石の強度を表す量で、

$$Q = (e/P) (dBy/dx)$$

である。(  $e$  は電気素量、 $P$  は電子の運動量、 $B$  は電磁石の磁束密度である。) また、 $e$  はエミッタンス、 $R_0$ 、 $Q_0$  はスクリーン上でビームサイズが最小となるとききのビーム半径と、四極電磁石の値である。この式は双曲線を表す式であるから、 $Q$  を替えながら  $R$  を測定することによって係数となっている  $e$  を求めることが出来る。

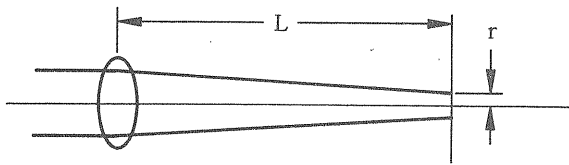


図4-3-1 エミッタンスの測定原理

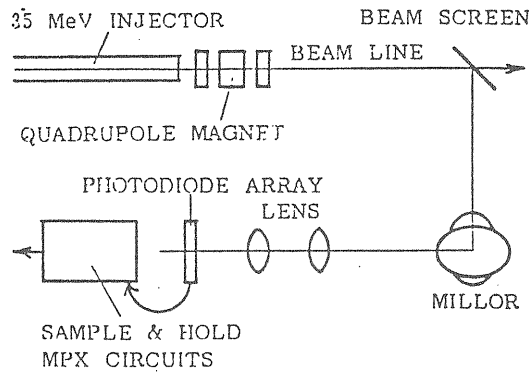


図4-3-2 実験に用いた装置の配置

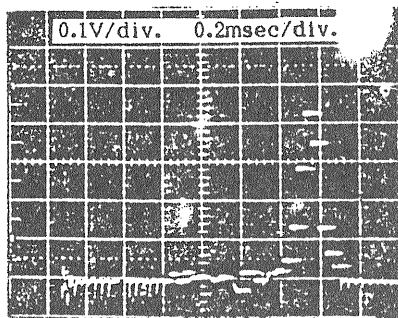


図4-3-3 フォトダイオードによるビームプロファイル観測例

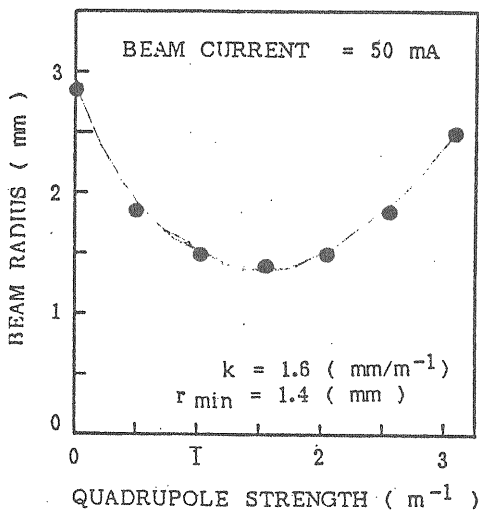


図4-3-4 Q-R曲線

この原理に基づいて、図4-3-2 の様な装置によって、エミッタンスの測定が入射部で行われた。ビームサイズはスクリーンの像を光学系をもちいてフォトダイオードアレイに導いて測定された。図4-3-3 はフォトダイオードアレイの信号をサンプルホールドし、マルチプレクスしてオシロスコープで観測したものである。こうして得られたQ-R曲線を図4-3-4 に示す。

#### 4.4 陽電子ビームの観測

KEK の陽電子発生装置は1985年 7月に初めて陽電子加速を開始した。先に説明したように KEKの場合は陽電子は1次電子の1000分の1のオーダーの量を集めることしか出来ない。最初の加速の際は、1次電子の電流は約1.7Aであり、陽電子捜しはかなりの困難が予想されていた。このときに行ったことは次のようなことであった。

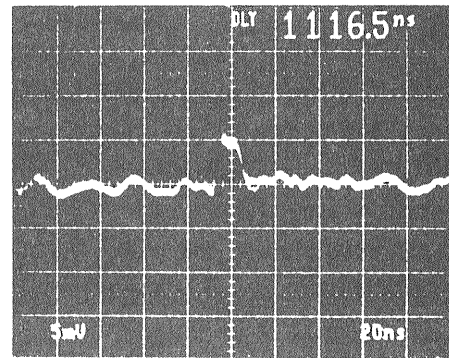


図4-4-1 陽電子リニアックに於て最初に観測された二次電子ビーム

- (1) 陽電子を加速する前に集束系及び高周波電源の位相などは、電子ビームを用いて決めた。
- (2) 陽電子捕獲用の集束コイルの後のスクリーンモニターでビームサーチ。しかしこれは、スクリーンに当たる電子/陽電子の数が

$$10\text{ns} \times 1\text{mA} \times 10\text{pps} / 1.6 \times 10^{-19} / 3\text{cm}^2 \sim 2 \times 10^7 (\text{e}^+/\text{cm}^2)$$

であり、実験データからも観測困難が予想されたが実際にも発見できなかった。

- (3) シールドなしの壁電流モニターを同じ場所に入れた。このモニターの出力電圧は抵抗値を50オームとすると、アンプの入力抵抗と併せて実効抵抗は25オーム程度で、1mA の電流でも25mVの出力があり、アンプで更に5倍に増幅されるので期待をした。しかし、これはノイズが大き過ぎて何も発見できなかった。

- (4) シールド付の壁電流モニターに取り替えた。この

モニターは実効抵抗がシールド無の場合の10分の1程度小さいのでやや悲観的であったが、ノイズが少ない、即ち S/N比が非常に良いことに期待した。スコープのディレイを（陽電子生成用標的を抜いて）一次電子を観たときの位置に合わせて観測すると、陽電子集束用コイルの後ろで先ず僅か 0.3mA 余りに相当する 5mV の二次電子ビームの痕跡を発見した。（図4-4-1）

次に高周波の位相を陽電子の加速位相に反転した。この場所では陽電子の電流がまだ二次電子や標的を通り抜けた電子にかき消されて観測されなかったが、もう1ユニット下流側でやはり0.3mA 余りの陽電子が初めて観測された。（図4-4-2）これが陽電子ビーム加速の始まりであった。この時はこの痕跡を増やして 2mA 余りの陽電子ビームを加速した。

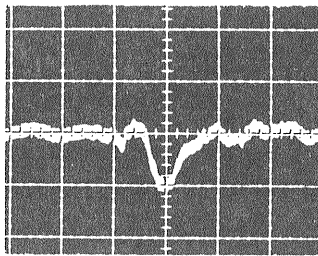


図4-4-2 最初に観測された陽電子ビーム

現在は陽電子ビームはトリスランリングに入射され電子/陽電子衝突実験も行われるようになった。図4-4-3 は2ns, 5mA, 10pps の陽電子をARに入射したときの加速電流の分布である。陽電子リニアックの最後では約10mA出ているが、最後まで加速されるのは約5mAである。この落ちこぼれのどれだけかは、陽電子のエミッタンスが電子に比べて大きくトランスポートがより難しいと言うことや、電流が少なくスクリーンで観測しづらいことも関係している。従ってモニターに付いても質、量ともに改善を進めていく予定である。

トリスランに入射するビームのパルス幅は2ns でなければならないが、陽電子ビームの調整は観測のしやすさから、10nsのビームが使用されている。図4-4-4 はその 10nsのビームを第5副制御室と主制御室で観測し比較したものである。ピークは60% 余りに減り、パルス幅も広がっている。

図4-4-5 はトリスランリングに入射されるパルス幅2ns の陽電子ビームをSHBを使用することによってパルス幅4ns のビームから得ることを示した観測波形である。SHBを使用することによってパルス幅が4nsか

ら 2nsに縮まると同時にピーク電流が増加していることが解る。

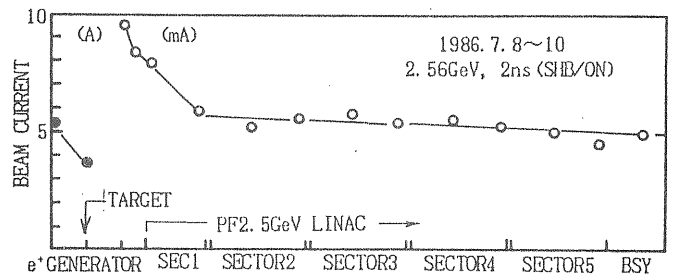


図4-4-3 陽電子ビームの電流分布図

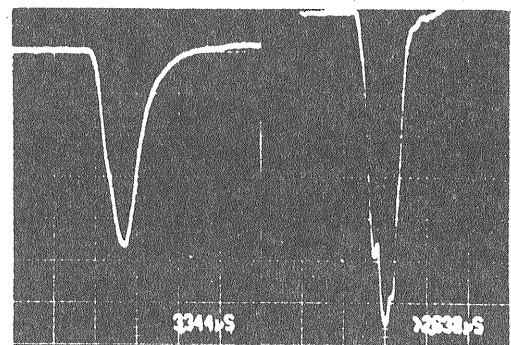


図4-4-4 陽電子ビームの観測波形。第5セクター第8ユニットの壁電流モニターWM5-8からの信号。第5副制御室（モニターから約80m）と主制御室（約480m）での観測波形の比較。

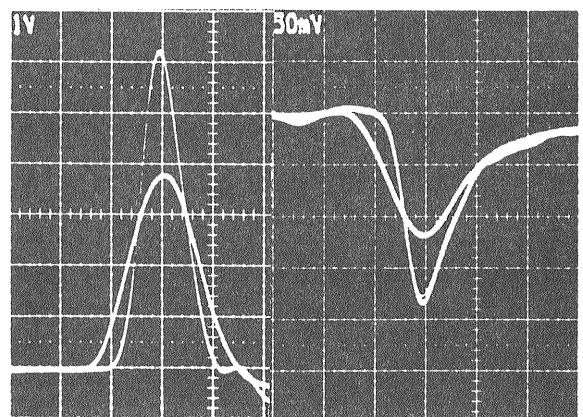


図4-4-5 陽電子発生装置におけるSHB (Sub-Harmonic Brancher) の働き。(左) 第1ユニットの壁電流モニターによる1次電子電流波形。1V, 2ns/div.、SHB/on=約6.5A (右) 第6ユニットの壁電流モニターによる陽電子ビーム電流波形。50mV, 2ns/div.、SHB/on=約20mA

#### 4.5 バンチの測定

図4-5-1 は最近陽電子リニアックの一次電子ビームのバンチをストリークカメラを用いて測った例である。これはリニアックのビームを空気中に約3メートル飛ばしその時ビーム進行方向に出るチェレンコフ光をストリークカメラに導いて観測したものである。バンチの間隔はリニアックの加速周波数 2856MHzより 350psである。この測定はリニアックにおいては初めてのものです。今後陽電子リニアックのビーム解析に使用していく予定である。

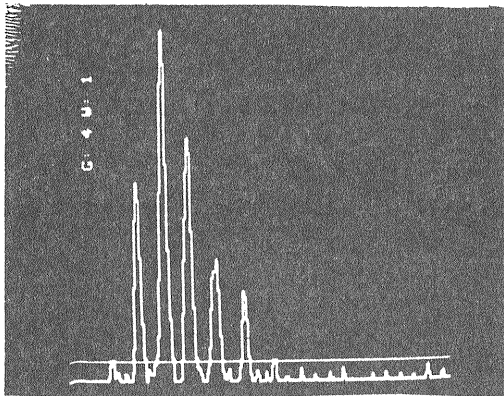
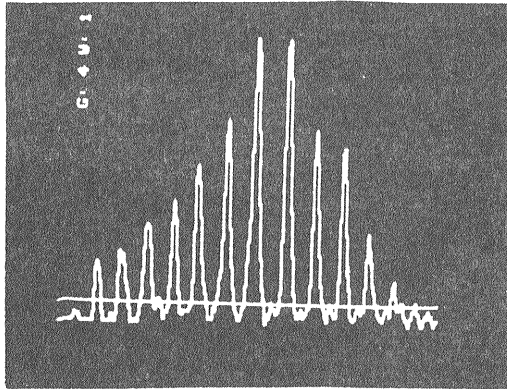


図4-5-1 ストリークカメラによる短パルスビームのバンチの観測 (a)4nsビーム (b)2nsビーム (SHB/on)

#### 5. あとがき

KEK-2.5GeV電子リニアックのモニターは、専門がないので、コントロールグループを中心としてリニアックのスタッフが協力しあって出来たものである。またPF光源系の援助もあった。この講義録もそれらの仕事をまとめた形にした。他の講義録との重複があることを承知のうえで、この機会を借りてまとめさせて戴いた。後から読み返すと説明不十分な箇所が多いが、何等かの参考になれば幸いである。最後に本稿を

まとめるに当たって、資料等の提供や親切なアドバイスをして戴いた方々に深く感謝する次第です。

#### 参考文献

##### 電子リニアックに付いての教科書

- 1) THE STANFORD TWO-MILE ACCELERATOR, R. B. NEAL, Editor, W. A. Benjamin, Newyork
- 2) LINEAR ACCELERATORS, P. M. LAPOSTOLLE, A. L. SEPTIER, Editor, NORTH-HOLAND P. C., Amsterdam

##### KEK2.5GeV電子線形加速器

- 3) J. Tanaka, Nucl. Instr. and Meth. 177(1980)101.
- 4) I. Sato, Nucl. Instr. and Meth. 117(1980)91.

##### コアモニター

- 5) J. M. Anderson, Rev. Sci. Instr. 42(1971)915

リニアックのビームロスモニターシステムは1982年当時PF光源系でモニターの仕事がされていた柴田進吉教授、中川秀利氏によって整備された。

- 6) H. Nakagawa et al., Proc. 7th Meeting on Linear Accelerators (1982)209

##### 壁電流モニター

- 7) H. Nakagawa et al., Proc. 3rd Meeting on Linear Accelerators (1978)35
- 8) PHOTON FACTORY ACTIVITY REPORT 1983/1984, KEK progress Report 84-3, III-4
- 9) J. Borer, R. Jung CERN/LEP-BI/84-14

##### スクリーンモニター

- 10) Radiation Resistant Fluorescent screens, CERN TECHNOLOGY NOTE
- 11) De-kang LIU et al., to be published in Proc. of 1986 Linac Conf. (KEK Preprint 86-22)

##### その他

- 12) M. Washio, S. Fukuda et al., KEK-79-24
- 13) H. Hanaki et al., to be published in Proc. of 1986 Linac Conf. (KEK Preprint 86-27)
- 14) A. Enomoto et al., Res. Rep. Lab. Nucl. Sci. Tohoku Univ. 13(1980)289
- 15) I. Sato et al., Proc. 9th Meeting on Linear Accelerators (1984)90
- 16) ピコ秒ストリークカメラとその応用 浜松ホトニクス株式会社