

## 3.6 ビームモニター

### 3.6.1 ビーム位置モニター

ERLの安定動作のための軌道補正、各種の軌道オプティクス・パラメーターの測定と補正、放射光実験のためのビーム位置制御及びエネルギー回収のための位相制御などのために、精確・精密で安定したビーム位置計測が重要となることから、一般のリング型加速器と同様ビーム位置モニター(BPM)は最も重要なビームモニタリング・システムである。 $\lambda=0.1$  nmのX線を回折限界で発生可能なように5GeV-ERLの目標を設定するものとする、エミッタンスの目標値は $\epsilon \leq \lambda/4\pi \approx 8$  pm-radとなり、オプティクス関数の値を $\beta = 5-10$  mとして予想されるビームサイズは6.3-8.9  $\mu\text{m}$ である。従ってBPMの測定精度は数 $\mu\text{m}$ 以下を目標とし、アンジュレーター部など更なる位置制御が必要となる箇所では1 $\mu\text{m}$ 程度の精度を目標とする。ただしその前提として、リニアックからアーク部へ入射してくるビームの位置が変動してこないことが重要である。

#### 信号検出ヘッド

信号検出電極としては、ボタン型電極とストリップライン電極が考えられる。ボタン型電極では、ERLの短いバンチ長を考えると電極構造およびフィードスルー構造において、高い周波数領域に極力共鳴が生じないような構造を事前に検討・開発しておく必要がある。このような共鳴はビームに対する共鳴的なカップリング・インピーダンスを生ずるので、インピーダンス特性の素直さからはストリップライン電極の方が望ましいであろう。ただし構造が複雑な分、ボタン電極型より精度の確保が難しく製造コストもかさむ。電極がビームを見込む方位角の広がりがある場合には、ボタン型電極およびストリップライン電極が出力する信号の電気量は等しいので、いずれを採用するかはビームチェンバーの構造および設置スペースの余裕を考慮して、リング要素の設計が具体化していく段階で決定すればよい。計測可能ビーム電流の範囲を10  $\mu\text{A}$ -100 mAとし、80 dB以上のダイナミックレンジを確保することを目指す。

#### オフセット校正

ビーム位置モニター個々のゲインとオフセットは、事前にベンチ上で校正した上で、設置後に個別にビームを使ってビームベスト・アライメントを実施し、デザイン軌道中心に対するオフセットを校正する。このためにはBPMを設置する全ての四極電磁石は、個々の収束力 $K$ を独立に $\pm 1\%$ 程度可変できることが必要であり、このためのトリムコイル及びトリムコイル用電源を装備していなければならない。これは高精度のビーム軌道制御を必要とするERLでは絶対必要条件である。四極電磁石のトリムコイルを使用するビームベスト・アライメントはアークのオプティクスモデルに依存しないので極めて信頼性の高いオフセット補正法である。実際KEKBではこの方法により、BPMオフセットを $\pm 10-30$   $\mu\text{m}$ 程度の精度で確定している。ERLでは更なる精度向上を目指す。

#### ベータートロン位相進みの測定

ビーム位置モニターは、ビーム位置計測及びその制御目的の他に、各種のビーム光学パラメーターの計測にとっても重要なものである。特にビームが1回しか通過しないERLのベータートロン振動の位相進み $\psi$ (リングで云うチューンに相当)の測定には、通常のリングにおける時間的振動を励起して測定するいわゆるチューンメータは役に立たず、BPMを用いて測定しなければならない。もしもステアリングの励磁で軌道の変位を作り、BPMで観測される振動的な軌道変位パターンから位相進みを $\Delta\psi/2\pi \sim 0.01$ の精度で計測しようとする場合には、 $N=200$ ヶ所ほどBPMが必要となるであろう。これはアーク部の四極電磁石の全数 $\sim 180$ 台に相当することから、BPMは

すべての四極電磁石に設置するのが望ましい。これが困難な場合でも各 TBA セル内で  $\beta$  が大きくなる 6 台 / セルの四極電磁石に BPM を設置することは最低限必要である。しかしながら、ビームが一回しか通過しない ERL ではリングのようなストップバンドは存在せず、ビーム安定性はベータートロン位相進みにはあまり依存しないであろう。横方向ウェークによるビームエミッタンスの増加の度合いが、 $\psi$  に対して如何程敏感であるかを考慮して必要な測定精度を評価すればよいと思われ、さほどの精度は要求されないのではないかと思われる。BPM の設計を確定するためにはビームダイナミクス検討グループにて、ベータートロン位相進みに対する必要測定精度及び測定アルゴリズムを十分に検討しておくことが必要である。現段階ではビームモニター検討グループとして BPM の必要設置台数を確定することはできない。

ERL のような高精度マシンでは、軌道補正は常時オプティクスモデルと対応させながら行う必要があるので、上記のような多数の BPM を装備していなくても位相進みの測定は可能であると予想される。例えば BPM の感度をセンシティブにするためオプティクス関数  $\beta$  が最大となる四極電磁石に BPM を設置するものとする。ステアリングの励磁で作られる軌道の変位は観測する BPM の場所の  $\sqrt{\beta}$  に比例するので、BPM の測定値をラティスのオプティクスモデルから求めた  $\beta$  でフィットすることで、 $\beta$  の規格化を行う。BPM の測定値を  $x$ 、誤差を  $\Delta x$  とするとベータートロン位相進みの誤差は  $\Delta\psi/\psi \approx \Delta x/x$  程度であると評価できる。従って  $\psi/2\pi \approx 20$ 、 $\Delta x \approx 1 \mu\text{m}$ 、 $x \approx 100 \mu\text{m}$  とするとベータートロン位相進みは  $\Delta\psi/2\pi \approx 0.01$  程度の誤差で求めることが可能と考えられる。実際には位相ファクターも考慮しなければならないので、複数のステアリングとアーク部全体の BPM を用いてモデルをセルフコンシステントに計算する必要がある。実際に KEKB では測定値とモデルとをセルフコンシステントに計算することで、周長 3000 m のリング全周に渡ってベータートロン位相進みを  $\sim 1$  度程度の誤差で測定している。ただしビームが一回しか通過しない ERL においても、リングと同等の考え方が妥当であるか否かは検討を要する。

しかしながら BPM によるベータートロン位相進みの測定では軌道変位が必要なため、物理実験への ERL 放射光供給中にリアルタイムで測定することは不可能である。物理実験との両立アルゴリズムを検討しておかなければならない。以上のように解析の仕方でチューンの測定精度を向上させることが可能であると考えられるが、設置すべき BPM の台数はシミュレーションに基づいてオプティクス補正のアルゴリズムを十分検討した上で決定すべきである。また実際の設置数は、マシンの将来的な性能改善及び不測の事態に備えて余裕をみておくべきである。この余裕はシステムの完成度が十分とは云い難い最初のビームコミッシングでは重要な問題になり得ることを強調しておく。

### 設置及びビームチェンバー

ビーム位置モニターの現場への設置については、ビーム位置モニター検出部を真空チェンバーの固定点とし、その上下流部をベローズで切り離れた上で四極電磁石に直接固定するのが望ましい。固定が困難な BPM についてはその電極部の位置変動を放射線損傷に比較的強いキャパシタンス型変位計（分解能  $\sim 1 \mu\text{m}$ ）にてリアルタイムで測定し、ビーム位置制御の際の情報の一つとする。ただし現在市販されている変位計はケーブル長が短く指定されているのでそのまま使用することは出来ない。ロングケーブル対応の変位計を開発する必要がある。また光源点からビーム位置モニターを通過して、ビームライン上の光学機器をも見通せる形で、レーザービームを使ったアラインメントが行える機構を考慮しておくことも有用であろう。

検波は、RF 周波数 1.3 GHz の混入を避け、2 倍の 2.6 GHz で行なう。ただし最終的には真空ダクトのサイズ・形状も考慮して決定すべきであろう。ビームチェンバー内部にはビームが誘導する HOM が伝播しているため、BPM 電極はビーム信号と共に必ず HOM を検出しており、これが測定誤差の大きな要因となる。従って BPM の信号検出では HOM 成分が混入しないように、ビーム

パイプのサイズ及び形状によって決まる HOM の遮断周波数より低い周波数成分のみを検出するよう検波周波数を設定しなければならない。ビームチェンバーを半径  $r$  の円形断面とすると、導波管モードで伝播する HOM に対する最低遮断周波数は  $f_c = 1.84c/2\pi r$  であり (TE<sub>11</sub> モード)、 $f_c$  以下の周波数の HOM の電磁場振幅は  $\exp(-\alpha z)$  で減衰する ( $\alpha = (2\pi f/c)\sqrt{f_c^2/f^2 - 1}$ )。従って  $f_c > 2.6 \text{ GHz}$  とするには  $r < 33.8 \text{ mm}$  であることが必要である。 $r=15 \text{ mm}$  ( $f_c = 5.85 \text{ GHz}$ ) の場合には  $2.6 \text{ GHz}$  の HOM の振幅が  $10^{-6}$  以下に減衰する距離は  $12.6 \text{ cm}$  となり、BPM の前後  $13 \text{ cm}$  以内のビームパイプについては、HOM 発生の原因となるペローズや遮光マスク等のインピーダンス源となるような構造を持たないことが必要である。

### 信号処理

信号処理に関しては、各電極からのビーム信号をなるべく早い段階でデジタル化した上で、デジタルレシーバーでフィルタリング及びダウンコンバートを行なうことが望ましい。フロントエンドの回路方式については、ログアンプ IC 等を用いた高速応答型 (ブロードバンド型) とするか、 $1\text{-}100 \text{ msec}$  程度の応答速度ではあるが精度を確保しやすいヘテロダイン方式とするかは、今後の検討課題である。高速応答型は各ボタン信号に各々独立の回路を必要とするので、ドリフト等のため長期間の安定性を確保することが難しい。この場合は運転中の精度を保証するために、頻繁にビームベスト・アライメントが必要であろう。しかしながら同じ S/N 比を得るためには両者とも 1 電極信号当たり同一の計測時間が必要であるので、どちらが有利であるかは性能よりも使い勝手の面から考えるべきである。通常の CW 運転での平均的な軌道変位の計測や、間引き運転でのシングルショット計測など、様々な運転モードにも対応できるものとするのが、マシンのコミッシュニングの観点から重要であろう。またそうすることで、リニアック部、アーク部、アンジュレータ部のビーム位置モニターに対して、同一回路での対応が可能となる。

### 3.6.2 ビームサイズモニター

ビームサイズは  $6 \sim 9 \mu\text{m}$  オーダーと予想され、ワイヤー型のモニターで計測し、精度  $1 \mu\text{m}$  を目標とする。エミッタンス測定的首尾一貫性確保の為に、リニアック部出入口でのビームサイズ計測を同一手法で行なうものとし、加速・減速ビームそれぞれに対して、リニアックの出入口の合計 4 ケ所で計測する。低いエネルギーでの計測の信頼性の確保や、デコンボリューションなど信号処理の手法の精度獲得が検討課題である。またコミッシュニング開始直後のマシン調整には一般にデマルケスト等の蛍光板によるスクリーンモニターが有用であるが、ワイヤー型モニターおよびスクリーンモニター等のように直接ビームに挿入する破壊型モニターは、ERL が目標とする CW 運転では、例えばスクリーンをヒットする電荷量は  $100 \text{ nC}/\mu\text{sec}$  にも達するため瞬時にして過熱蒸発してしまうので使用できない。これらのモニターはシングルショットに近い運転条件でなければ使用できないので、これらのモニターの設置に関してはマシン調整に如何ほど有用であるか十分検討の上決定する必要がある。なお定常的な  $1.3 \text{ GHz}$  CW 運転でのビームサイズ計測には第 3.6.4 節で述べる放射光モニタを活用することになる。

### 3.6.3 ビーム強度モニター

#### 高速応答ビーム強度モニター

ビーム強度モニターとしては、絶対精度はあまりなくてもよいがある程度バンチ配列が識別できる高速応答のものと、ビームがワンターンする時間程度の時間分解能でよいが高精度で平均的ビーム電流が計測できるものの 2 種類必要である。高速応答のビーム電流モニターとしては BPM

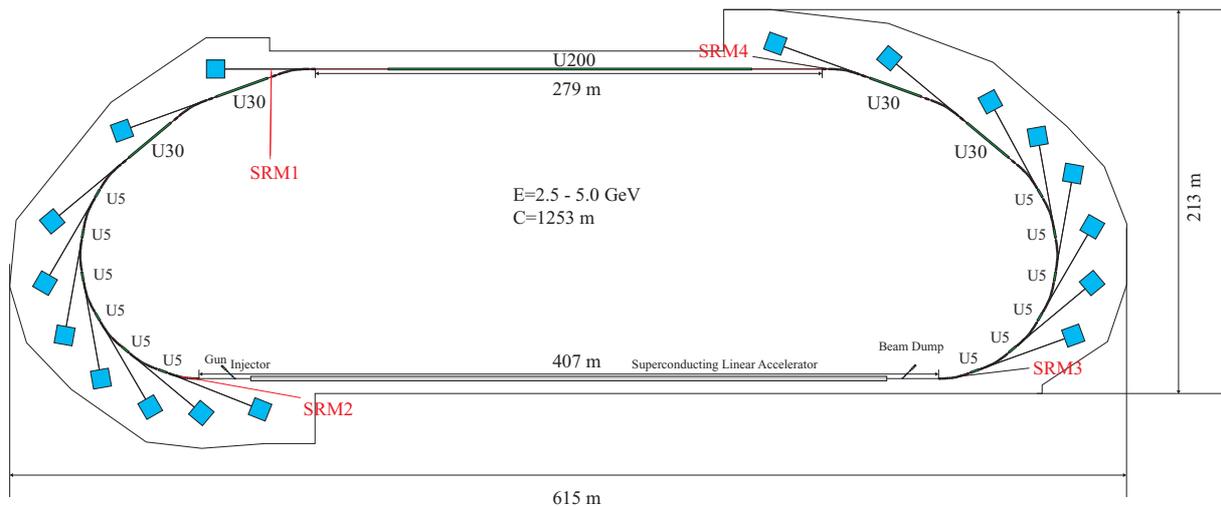
に用いられるボタン電極またはストリップライン電極の信号がそのまま使える。リニアック部、アーク部及び超長尺アンジュレータ部には BPM 用の電極だけではなく、ビーム電流モニター用の電極を配置しておくことが必要である。これらのビーム検出電極は、特にコミッシュニング開始時において最も重要な「最初のビームをワンターンさせる条件」を見つける時に不可欠のものである。どこでビームが失われるかを判定するためにはできるだけ多くの電極を配置するのが望ましいが、最初のコミッシュニング以外あまり出番はなく、またコストもかさむので、BPM 用の電極出力を rf 同軸スイッチにて切り替えて用いるのが経済的であろう。電極設置と同程度のコストがかかるが、必要個数を任意に変更できるのでコストミニマムを図り易い。あるいは BPM フロントエンドモジュールにこのような rf スwitch を組み込んでおけば、さほどコストアップをとまわずにできる可能性がある。検出ヘッドは 4 電極または 8 電極型としてこれらの電極出力を同時に観測できるようにし、高精度は必要ないがビームの位置を判定できるものにしておくことで、スクリーンモニターと同等の機能を持たせることができる。電極からの信号電圧  $V$  は、電極長またはボタン電極直径  $a$  よりバンチ長が十分短い場合には、 $a = 8 \text{ mm}$ 、電極部の実効静電容量を  $C \approx 10 \text{ pF}$ 、ビームバンチの電荷を  $Q_b = 10 \text{ pC}$ 、観測機器例えばオシロスコープの立ち上がり時間を  $\tau \approx 1 \text{ nsec}$ 、チェンバー半径を  $r = 15 \text{ mm}$  とすると、 $V \approx (a^2/2\pi r C \tau)(Q_b/C) \approx 2.3 \text{ mV}$  となり、 $10 \text{ pC}$  程度のバンチ電荷は検出可能であるので十分実用になるものと考えられる。ただし高速応答タイプのモニターでも  $1.3 \text{ GHz CW}$  のバンチを識別することは不可能であるので、ビーム電流の精密測定には高精度 DCCT が必要である。

#### 高精度 DCCT

ビーム電流測定用 DCCT には KEKB 用に開発され実用化されている DCCT が使用可能である。本 DCCT は DC-20 kHz 以上の -3 dB 応答帯域幅を有しているにもかかわらず、これまで最も困難であったパラメトリック磁束変調用の磁性体コアの磁気特性バランスに無頓着であるように設計されているため国内メーカーで製造可能であり、緊急時の対応にも不安はない。200 mA フルスケール測定レンジにて、半年オーダーの長期ドリフトは  $20\text{-}50 \mu\text{A}$ 、分解能  $\sim 20 \mu\text{A}$ 、90%ライズタイム応答  $\sim 20 \mu\text{sec}$ 、絶対値誤差  $\pm 0.5\%$ F.S. である。小さな改造で -3 dB 帯域幅を DC-100 kHz (90%ライズタイム  $\sim 5 \mu\text{sec}$ )、ドリフト  $\sim 10 \mu\text{A}$ 、分解能  $\sim 10 \mu\text{A}$  に性能向上が可能と考えられるので、ERL には十分対応可能である。ERL では DCCT をリニアックと各アークとの接続部、及び長直線部と各アークの接続部に一台ずつ計 4 台を設置してビーム強度を高精度にて計測し、リニアック、アーク部及び長直線部におけるビーム損失を精密にモニタリングするものとする。安定なエネルギー回収のためにビーム回収率 99% 以上を確実に保証しなければならない ERL にとって、ビーム損失の定量的かつ精密測定は必要不可欠である。また、超電導リニアックへのビーム入射にともなうトランジェントローディング効果による位相及びエネルギーの変動を回避するために、ビーム電流のランピングに対して  $dI_b/dt < 100 \mu\text{A}/20 \text{ msec}$  なる制限が提唱されているが、これらを満たすためにはリニアック終端でのビーム電流を分解能  $\sim 10 \mu\text{A}$  程度にてリアルタイムで計測し、常時それを電子銃にフィードバックしなければならない。上記改造予定の DCCT はこの使用にも対応可能である。

#### 3.6.4 放射光モニター

KEK・ERL 計画ではエミッタンス  $\sim 8 \text{ pm-rad}$ 、バンチ長  $0.1\text{-}1 \text{ ps}$  というマイクロビームが計画されている。この様なビームを実現するには精度の高いビーム計測が必要である。ここでは放射光 (SR) を使用したビーム計測について述べる。SR ビームの光源にはアーク部の偏向電磁石を使用することを考えるが、必要に応じてモニター専用のウィグラーを設けることも考える。測定す



SRM1: SR monitor for U200.

SRM2: SR monitor at the last TBA cell of the right arc.

SRM3: SR monitor at the first TBA cell of the left arc.

SRM4: SR monitor at the last TBA cell of the left arc.

図 3.58: SR モニタービームライン

べきビームサイズは  $6\text{-}9\ \mu\text{m}$  程度、またパンチ長は  $30\text{-}300\ \mu\text{m}$  の範囲である。計測装置としては従来の可視光デバイスが中心となるが、ビームプロファイルの観測のために X 線の屈折光学系のシステムも設置することを考える。

#### 光源及び可視光 SR の取出し

SR モニターによるビーム計測を行いたい場所は図 1 に示すように、線形加速器の入口近く（戻ってきたビームを見る）、出口近く、および長尺アンジュレーターの入口および出口の 4 箇所であろう。このうち、リニアックの入口近く、出口近く、および長尺アンジュレーターの入口については主にビームサイズとパンチ長の計測が主な目的となり、また長尺アンジュレーターの出口では長尺アンジュレーター内のビームの計測、アンジュレーター光の光軸の計測が主な目的である。SR 観測に使用する波長域としては可視光用には  $300\text{-}850\ \text{nm}$  を考える。リニアックの入口近く、出口近く、および長尺アンジュレーターの入口については、TBA セルの中央の偏向電磁石からの放射光を光源にするのが良いと思われる。この場合光を取り出す際に出来るだけ上流でミラーによりはねて取り出すデザインが良いと思われるが、場合によってはビームラインと下流の Q マグネットとの整合性を取る必要があるかもしれない。また、最低一箇所には光軸方向にそのままビームを取り出してビームプロファイルを計測するために X 線の屈折光学系も設置する場所を設ける。X 線光学系は比較的長いので、ユーザーのビームラインとの場所のやりくりを考える必要がある。可視光の取り出しは従来通りベリリウムミラーを挿入して行う。また水平方向のビームサイズをフィールドデプスの影響を受けずに計測するには、可視光が出せる程度の弱い垂直ウィグラーを挿入することが望ましく、例えば Q-Q 間の  $60\ \text{cm}$  の短いフリースペースに挿入可能かどうか検討する必要がある。この場合には光は TBA セルの最下流の偏向電磁石から光を取り出すことになる。

長尺アンジュレーターの出口では、大角度に放射されるアンジュレーター放射光のスペクトルの低エネルギーの裾野部分を穴開き鏡を用いて取り出すことになる。この際、長尺アンジュレーターからの芯の光の部分はミラーに開けた穴から遮ることなく下流へ通す。またこのラインについては他の 3 つと異なり光軸変動の計測も行うので、取り出し鏡の熱変形による光軸の変動を差

引くためレーザーによる鏡の変動検出システムを組み入れる。また全てのラインの上流の適当な位置に（取り出し鏡のできるだけ直後に）鏡の熱変形によるフォーカス力をキャリブレーションするためのハルトマン・スクリーンのシステムを設置する。また計測すべきビームサイズは非常に小さいので取り出し鏡の土台の機械的振動、鏡の冷却水による振動の混入を極力避ける設計が必要である。

光を加速器の真空より取り出すにはガラスの光学窓が必要となるが、測定すべきバンチ長が短いことから低分散のガラスを選ぶ必要がある。アッベ数 ( $v_d$ ) が 60 以上であると通常低分散ガラスに分類されるが、手ごろに手に入るものとしては 90 程度の FCD10 (白クラウンガラス) のようなガラスもあるが、放射線に対する強さが不明であるので、調べる必要がある。

### ビーム転送ライン及び暗室

光モニターには計測システムを設置するために暗室が必要であり、測定器フロアーの装置類と干渉しないように設置する必要がある。そのため適当な場所まで光を導くビーム転送ラインが必要となるであろう。また計測するビームサイズが非常に小さいので、ビーム転送ラインおよび暗室の土台床振動は非常に本質的であり、細心の注意を払わなければならない。

暗室は各種の計測装置を設置するために 6 m×4 m 程度の広さが必要である。また塵芥による光の散乱によるバックグラウンドを抑えるために室内は無塵にする必要があるがクラス 1000 程度のクリーンルームで十分である。

### 計測機器

測定すべきビームサイズは 6-9  $\mu\text{m}$  程度であるから、縮小光学系を用いた PF で行った予備的な実験では、可視光を用いた放射光干渉計では 4  $\mu\text{m}$  の beam size を 1  $\mu\text{m}$  の分解能で測定できるのでビームが安定であれば十分に測定できる範囲である。測定に当たっては出来るだけ短い波長 (300-400 nm) を使う方が有利である。そのため屈折デバイスの使用は極力さけることにし、干渉計は反射式とする。また、ビームサイズが大きいため初期段階のためには従来の結像光学系を準備しておく必要があるであろう。

ビームサイズのみだけの計測ではなく、ビーム不安定性の観測などについてビームプロファイルの観測も重要となるため、この観測についても考えておかなければならない。ビームの光学像は観測するのに用いた光の波長での回折により空間分解能が決まるので、ミクロンオーダーのビームについては可視光で幾何光学像は観測できない。短い波長を使用するとしても VUV、SX の領域の光は取り扱いが面倒であるので硬 X 線を使用するのが比較的手軽である。この領域での結像素子としてはピンホール、フレネル・ゾーンプレート、屈折レンズなどがあるが、このうち、ピンホールはミクロンオーダーの分解能をだそうとするとホール径に対して厚さを薄くすることが難しく、ウェーブガイドになってしまう。フレネル・ゾーンプレートは良い条件下ではナノメートル領域の分解能が得られるが、モノクロメーターの波面エラー、ダイナミックレンジなど難しい問題も多い。X 線領域での屈折レンズはロシアのグループが手がけ開発がされているが、暗い（ピンホールよりは明るい）のが欠点である。直径 mm 程度、曲率半径 mm 程度のアリウム製のレンズをシリーズに 30-200 枚重ねることでそれぞれ 10-2 m 程度の実用的な焦点距離を得ることが出来る。焦点像は小角散乱装置の調整に使われているような技術を応用することで、例えば単結晶蛍光板に投影して顕微鏡で眺めるなどして観察することが出来る。このシステムでは硬 X 線領域での屈折率の分散はあまり大きくない（例えばアリウムで 0.999995/10 keV、0.9999985/20 keV、ただし長波長側では分散が急激に大きくなるので 10 keV より小さいエネルギー領域をカットした方がよい）のと理想的な近軸光学系であるので、単色化はバランス型の吸収フィルターで十分であろう。あとは微細加工技術でどこまで幾何学的収差を減らせるかが決め手となるであろう。い

ずれにしても装置としては簡便で半定量的なビームプロファイルの観察に適しているものと思われる。また蛍光寿命の短い蛍光板を用いれば光量にもよるが、高速ゲートカメラとの組み合わせにより、1.3 GHz の繰り返しには対応できないが（切り出せる最高速は 200 psec）、瞬間的なビームプロファイルの観測も可能であろう。

#### 縦方向ビームプロファイルの計測

縦方向ビームプロファイルの計測はパンチ長が 30-300  $\mu\text{m}$  の範囲であることを考えると、従来のようにストリークカメラで手軽に計測するのは不可能である。しかしながら、初期の段階でパンチ長が比較的長い時はやはりストリークカメラが有力な計測手段となるであろう。現在は最高に良い条件のもとで、ストリークカメラの時間分解能は 200 fs に達しているが、1 ps を切ると、ストリーク管内の電子ビームの初速度分布、空間電荷効果により急激に測定は難しくなり、従来のようにレンズで集光して手軽に測定できるようなものではなくなる。まず光学系の分散、すなわち光路長不一致の効果を減らすために全反射光学系の入力光学系が必要であるが、この点はすでに B ファクトリー用に開発したもの（光路長差 6 fsec 以下）があるので、それと同じものを用いれば十分であろう。また、光電子の初速度分布を狭くするために出来るだけ長波長域の入射光を使う必要がある。このために誘電体多層膜ミラーで反射波長域を選択する必要がある。また、光電面での光子密度を減らして、空間電荷効果を減らすために、時間構造をゆがめることなく、入射スリット上に 1 次元的にフォーカスする円柱反射光学系を設計する必要がある。最高に良い条件が達成された時に、フォトンカウンティング・モードに近い状態で 200 fs 程度の時間分解能が期待できる。ただしこのような計測状態での統計的なエラーは大きく、パンチプロファイルの定量的な計測はかなり難しいであろうことを認識しておかなければならない。しかしながら、このような超高時間分解下でのパンチプロファイルの半定量的な測定についてワンパスで計れる唯一のデバイスである。

いずれにしても、100 fs 程度のパルス長になったときは、パルス長を評価する標準的な方法は 2 光子相関計または干渉計を用いる方法である。ERL からの放射光では光子の増幅過程は期待できないから、2 光子相関計はあまり有望ではないであろう。そこで、2 光子干渉計（強度干渉計）を用いて測定することになるが、このシステムでは時間分解能は常に波束の長さ以下であるので時間分解能に不足はないが、PF で実験した経験によると、計測に時間がかかることが欠点である。統計的なエラーを考えて 1 点の計測に 30 秒ぐらいかけるとして、パルスの自己相関波形を計測するのに 10 点計ったとしても 5 分かかることになる。データアキュジションの方式を検討することで数分の 1 以下に短縮することは可能と思われるが、実際問題として秒単位の実時間測定は困難である。強度干渉計による測定では、光子多重度がある程度高い場合、波束相関のピークがパルス相関に重なって観測されるので、場合によってはパルスの自己相関を取るのではなく隣のパルスとの相互相関を取った方がよいかもしい。また、測定しようとするパルスの平均しか観測することが出来ないため、パルスの繰り返しにおいて再現性がないと測定は不正確になってしまう。また、時間軸をスキャンするので、各測定点で入射強度のばらつきがひどいと入射強度をモニターする必要がある。パルスのジッターには感度がないことなど、メリットにもデメリットにもなりうる問題もある。ただし現在のところ、強度干渉計は縦方向ビームプロファイルの計測に最も有力な手段と考えられるので、今後精力的に開発を進めていきたいと考えている。

#### 3.6.5 長尺アンジュレータ部ビームモニター

本 ERL 計画では長直線部に、単色超高輝度硬 X 線 ( $\lambda=0.1 \text{ nm}$ ) 発生のための超長尺アンジュレータ ( $\sim 200 \text{ m}$ ) を設置することが計画されている。アンジュレータは 50-60 cm の間隔を隔てて

設置される多数の5-10 m長のユニットから構成され、各ユニット間のスペースにはビーム収束用のダブルレットまたはトリプレット4極電磁石の組、軌道調整のためのステアリング電磁石またはシケイン、およびBPM、スクリーンモニター等のビームモニターが設置される。シケインは各アンジュレータ・ユニットにおける電子ビームのアンジュレーション位相を光の位相に同期させるために必要不可欠のものである。閉軌道が自動的に決まってしまうストレージリングの挿入光源と違い、ERLのようなワンパス型挿入光源では決まった安定軌道は存在しないため、アンジュレータ中をアンジュレータ光とオーバーラップさせて電子ビームを直進させることに多大な努力を払わなければならない。実際 DESY の TTF-FEL や ANL の APS-FEL 等 ERL と同様ワンパス型のリニアックベース FEL では、最適な条件で電子ビームをアンジュレータ中に通すことに大変な努力が払われている。このことから、~200 mにも及ぶアンジュレータにビームを通す場合には多くの困難が予想される。なお電子ビームプロファイル観測のためのシングルワイヤーモニターあるいはワイヤーグリッドモニターは、スクリーンモニターに比べて優位性が認められないこと及びビームによる加熱に弱いため 1.3 GHz CW 運転時のアクシデントを考慮して設置しないものとする。アンジュレータ中の精密な電子ビームサイズ計測及び光軸調整は、第3.6.4節で述べたように放射光モニター専用ラインに取り出されるアンジュレータ光の長波長成分の一部を用いて行う。

### ビーム位置モニター

#### 〔ボタン型電極 BPM〕

基本的には、BPM は各アンジュレータ・ユニットの間のスペースに設置される。設置スペースに余裕のないことが予想されるため、ボタン型電極を採用することになる。設置台数は20~40である。理想的にはアンジュレータのギャップ部にも BPM を設置するのが望ましいが、ビームベースト・アライメントが不可能であるため BPM のオフセット校正が出来ず 0.5-1 mm 程度の中心精度しか期待できないため、精密な軌道調整にはあまり役に立たず、コミッショニング初期の軌道調整においておおまかな目安を得るためのものになるであろう。また円偏光アンジュレータの場合にはギャップ部に BPM を設置することは不可能である。電子ビーム軌道と光軸を一致させるためには極めて高精度の軌道制御が要求されるため、アンジュレータ・ユニットの間のスペースに設置される BPM は組となる4極電磁石のトリムコイルを用いてビームベースト・アライメントを実施し、オフセット誤差はビームサイズの数分の1以下、1  $\mu\text{m}$  程度を目指すことが必要であろう。例として KEKB リングの BPM をあげると、オフセット誤差 10-30  $\mu\text{m}$ 、分解能 2-3  $\mu\text{m}$  であることを考えると、かなり厳しい要求ではあるが実現不可能ではない。

#### 〔TM<sub>110</sub>キャビティー型 BPM〕

ボタン型電極の S/N 比(分解能)は信号伝送ケーブルの特性インピーダンスで制限され、単位帯域幅あたりの S/N 比はおおよそ  $S/N \propto \sqrt{Z_0}$  である。これに対してリニアコライダーの BPM の有力な候補として精力的に研究されている TM<sub>110</sub> キャビティーを用いた BPM は、実効的なインピーダンスを高くとれるために単位帯域幅あたりの S/N を大きくすることが可能であり、実際のビームテストにおいても 20-30 nm と云う極めて高い分解能が報告されている。キャビティー型 BPM は ERL にとって極めて魅力的な BPM であるが、経験が浅いため実用マシンに採用するためには、システムの単純化とコストの低減等、実用化に向けての R&D を精力的に推進しなければならない。さらにビームエミッタンスのブローアップを極限まで抑制しなければならない ERL においては横方向ウェークに関する詳細な検討が必要である。本 ERL 計画においては建設開始予定までの今後3年間、キャビティー型 BPM の実用化を目標とした開発を進めたい。このための予算処置を強く希望するものである。実用化の目途が立てばアンジュレータ部にはキャビティー型 BPM を採用するものとする。

### スクリーンモニター

#### 「蛍光スクリーンモニター」

蛍光スクリーンとしては、残光時間が長い（～msec）ので種々の運転モードに対応して個々のパンチを識別することは不可能であるが、広く用いられている Co イオンをドーブしたアルミナセラミック板（商品名：デマルケスト）が高感度で使いやすい。絶縁体であるためにチャージアップによる放電を防止するために、金属製のメッシュで表面を覆うことが必要である。各アンジュレータ・ユニットの間のスペースに、必要に応じてビーム軌道に出し入れするための駆動機構にマウントしたデマルケスト板を総計 20～40 台設置し、CCD カメラにてビームイメージのモニタリングを行う。高感度であるためビームヒットによる磁石列へのダメージを最小限に押さえて、長尺アンジュレータ部のビーム調整を行うには最適である。ただし 1.3 GHz CW 100 mA 運転では過熱破損してしまうので使用不可能であり、コミッショニング初期のマシン調整以外にはあまり出番はないかもしれない。

#### 「OTR スクリーンモニター」

光量は少ないが時間分解能のよい発光機構として OTR（optical transition radiation）を利用した OTR スクリーンモニターが広く用いられており、リニアックのパンチ長測定等に多用されている。ERL のアンジュレータ部における電子ビームプロファイル観測あるいは軌道の粗調整にも適しているものと考えられる。設置スペースを考慮して、同一の駆動機構に上記の蛍光スクリーンとセットにして長尺アンジュレータ部に設置するものとする。OTR スクリーンとしては～1 mm 厚程度の Al 板を用いる（KEKB リニアックではステンレス板が用いられているが、熱伝導が小さく放熱が困難なため ERL には適さないと思われる）。パンチ長およびビームサイズについては述べた放射光モニターにて常時観測するので、主に超長尺アンジュレータ部の電子ビーム軌道の粗調整に用いる。OTR の観測は蛍光板観測と同じ CCD カメラにて行う。高速ゲーテッドカメラを用いても 1.3 GHz CW 運転における個々のパンチを観測することは不可能であるので、特に必要とはしない。1 台のカメラを持ち回りで使用することでビーム損失の調査に役立つ可能性はあるであろう。OTR スクリーンも蛍光板と同様 1.3 GHz CW 100 mA 運転では過熱焼損するので使用不可である。どの程度のデューティーサイクルまで使用可能かを評価する必要がある。

### 3.6.6 ビーム損失モニター

ERL ではビームパワーが極めて大きい（ $P_b=5 \text{ GeV} \times 100 \text{ mA}=500 \text{ MW}$ ）ので、エネルギー回収後のビームダンプ以外ではビーム損失は許されない。このため厳重なビーム損失モニターを装備して、わずかなビーム損失をも見逃さないようにしなければならない。このためにはリニアック、アーク、長直線部の全てに渡ってビーム損失モニターを配置する必要がある。特に、加速ビームと減速ビームを同時に収束輸送しなければならないリニアック部および各セクションのマッチング部は厳重に監視する必要があるであろう。

損失粒子による放射線を高感度で検出するには PIN フォトダイオードが適している。PIN フォトダイオードを用いたビーム損失モニターが製品として安価に入手できるが、カウンティング方式のため、マシンの完成度が向上して、極わずかな損失しかない状態になれば有効である。実際に KEK 放射光施設の PF リングで使用され、ビーム蓄積モードでの微少なビーム損失の観測に用いられた実績がある。しかしながら、コミッショニング初期のマシンの完成度の低い時期には、カウントレートの飽和を超えるような DC 的な大きなビーム損失が十分にあり得るので使用に耐えないと予想される。実際に KEKB リングでは蓄積中であっても時たまカウントレートの上限をはる

かに超えるビーム損失が観測されている。そこで KEKB リングのビーム損失モニターと同様、PIN フォトダイオード出力をアナログ的に処理する方式とすべきであろう。ダイオード出力を 100 m 以上のケーブルで計測室に伝送してからアナログ処理を行っても、20  $\mu\text{sec}$  程度の応答を実現できるので十分実用になるものと考えられる (KEKB では 400 m のケーブル長にて 80  $\mu\text{sec}$  の応答が得られている)。KEKB ではトランジェントなロスがメインであることから、トラックアンドホールド回路にて信号検出 / 処理を行っているが、ERL では DC 的なロスが予想されるので信号検出 / 処理方式は今後の検討課題である。

このような PIN フォトダイオード検出器を ERL 全周に沿って、10 m おきに計 130 個程度配置するのがよいであろう。個々の信号は全て独立したケーブルで計測室へ送り、個々独立の計 130 チャンネルのフロントエンド・アナログ処理回路にて信号処理を行う。フロントエンド回路はチャンネル数が多く、ERL 全周に渡るのでいくつかのステーションに分散配置することになる。

また第 3.6.3 節で述べたように 4 台の DCCT にて ERL 各部のビーム強度をモニタリングするので、ビーム電流の減少が 10  $\mu\text{A}$  を超えるような損失 ( $\Delta P_b = 5 \text{ GeV} \times 10 \mu\text{A} = 50 \text{ kW} = 10^{-4} P_b$  のビームパワー損失) は DCCT にても 5-10  $\mu\text{sec}$  程度の応答で検出可能である。

### 3.6.7 フィードバックシステム

電子ビームの軌道フィードバックは、ビーム位置モニターからの位置情報をもとに行なうグローバルフィードバックと、挿入光源ビームラインでの放射光光軸制御のローカルフィードバックの両者を含むシステムを目指す。両者を両立させるアルゴリズムの確立は今後の検討課題である。また、リニアックにおけるパルス毎の位置変動を電子銃部に直接フィードバックできるかどうかも今後の検討項目であるが、1.3 GHz CW と云う条件ではパルス毎のフィードバックは不可能であるので、ワンターン毎のフィードバックを目指すことになるであろう。

ERL の安定動作のためにはビームローディングによる加速 / 減速の位相変動に対して極めて厳しい制限が課せられている。従ってビームバンチ強度の安定化対策を十分に講じておく必要がある。この件に関しても 1.3 GHz CW と云う条件ではパルス毎の高精度安定化は不可能であるので、電子銃に対するワンターン毎のフィードバックを考えることになる。これにはビーム強度モニター用の DCCT が使用可能である。DCCT の応答は -3dB 帯域幅にして 100 kHz 程度を目指していることから、DCCT の応答速度として 90% 立ち上がりで 5  $\mu\text{sec}$  程度が期待できるものと考えられる。また精度に関しても 100 mA の電流に対して 10-30  $\mu\text{A}$  程度の精度で変動成分を検出することは可能であるので十分な能力を有しているものと思われる。実際に、KEKB 用に開発した DCCT は 20 kHz 帯域幅を有し、200 mA フルスケール時に  $\sim 20 \mu\text{A}$  の分解能を実現していることから、もう少し改良を施し ERL での使用に余裕をもって対応できるものにしたい。

エネルギー回収のための減速ビームの位相調整は、シケイン部での軌道長の調整で行なう。そのために、減速ビームの位相測定あるいはビーム位置モニターでの軌道長制御が必要となる。

平松成範 (KEK・加速器)

春日俊夫、三橋利行、山本樹、芳賀開一、本田融、帯名崇 (KEK・PF)