

1 はじめに

加速器においてビーム位置モニターは最も重要なビーム診断装置である。実際、KEK 電子陽電子線形加速器 (KEK 入射器) の制御端末のディスプレイにはビーム軌道と電荷量を示すパネルが常に表示されており、ビームの調整と監視には欠かせない。線形加速器では四極電磁石や加速管はアライメントの誤差があり、ビームがこれらの中心がオフセットした位置を通るとエネルギー広がりやウェイク場によりエミッタンスが増大する。エミッタンス増大を抑制するためには軌道調整を行う必要があり、線形加速器全体にわたって高い分解能を持つビーム位置モニターが要求される。またビーム軌道は電磁石電源や RF の位相、振幅に対して敏感に応答するため高分解能の位置モニターは加速器の様々なコンポーネントの安定度の診断にも非常に役立つ。

ビーム位置モニターの原理に関しては過去の OHO 等で詳細に説明されているため、本テキストでは内容に直接関わる部分の簡単な説明のみとし、過去の OHO では言及はされているが、具体的な事例のないものや教科書ではあまり触れられない現実のモニターの意外な振る舞い (著者の常識、勉強不足が原因ではあるが) についても紹介する。

今年 (2020) OHO のテーマは「ビーム診断の基礎」で著者は電子線形加速器用ビーム位置モニターというタイトルとしたが、OHO は今回で 37 回目でビーム位置モニターだけでは内容の重複が多くなるため (深く掘り下げる実力もない)、KEK 入射器で使用しているワイヤースキャナーとスクリーンモニターの 2 種類のビームプロファイルモニターについても紹介する。

また今回の OHO は新型コロナウイルス感染症のためオンラインでの開催となり例年とは異なり先に講義があり、その後にテキストの発行となった。著者の怠慢で講義では説明の足りなかったこと、補足の内容等を後から追加した。ビーム診断のモニター製作経験がなくても実際にモニターを製作する上で多少なりとも役立てれば出来れば幸

2 ビーム位置モニター

ビーム位置モニター (Beam Position Monitor: BPM) は荷電粒子のビームの位置、電荷量をビーム非破壊で測定する。加速器で一般的に用いられる BPM はビームによって誘起される壁電流を測定する方法と空洞に誘起される電磁場 (ダイポールモード) を測定する方法がある。前者はストリップライン型 BPM とボタン電極型 BPM 等がある。線形加速器やビーム輸送路では 1 回のビーム通過でボタン電極に比べて大きな信号が得られるストリップライン型 BPM が良く用いられ、四極電磁石と共に設置されることが多い。ストリップライン型 BPM を蓄積リングに用いると非常に高出力になること、ビームダクトの間に電磁場がトラップされるなどの問題があり、これらが原因で BPM 本体や伝送ラインを損傷してしまう可能性がある。蓄積リングでは一般的にボタン電極型 BPM が用いられる。ストリップライン型 BPM は数ミクロンの位置分解能が得られるがサブミクロンの分解能が必要な場合は空洞型 BPM が用いられる。これらの BPM の原理や特性については OHO [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9] や他のレポート [10, 11] に詳しくまとめられている。

また近年、電気的な測定とは違うユニークなビーム診断の試みも研究され始めている。Kieffer らは 5.3 GeV の陽電子ビーム近傍に設置した熔融石英からの可視光領域のチェレンコフ放射 (荷電粒子が誘電体を直接通過しなくてもチェレンコフ放射が放射される。チェレンコフ回折放射とも呼ばれる) を測定し、非破壊のビーム診断に利用可能なことを実験的に示した [12]。チェレンコフ回折放射を用いた測定は電気的な制約を受けず、検出器も非常にコンパクトにすることが可能であることから、BPM への応用が期待される。実際、BPM に適用する試験 [13] も行われており、今後、実用的な利用が始まっていくかもしれない。

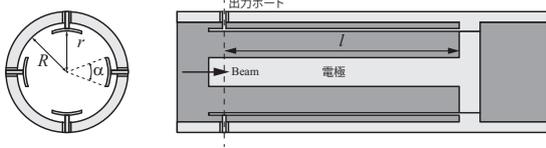


図 1: ストリップライン型 BPM

2.1 ストリップライン型ビーム位置モニター

はじめにストリップライン型 BPM の概要を説明する。以後、ビームの速度 v は光速 c とほぼ等しく十分相対論的 ($\beta = v/c \approx 1$) である仮定する。一般的なストリップライン型 BPM の構造は図 1 に示す様にビームダクト内に設置された互いに対向する 4 つの電極と電極に繋がる信号出力ポート部で構成される (以下本文ではストリップライン型 BPM を単に BPM と表記する)。ビームにより誘起された電流は特性インピーダンス 50Ω のフィードスルーと同軸ケーブルを通して測定系に伝送される。信号の反射を抑えるため、電極部の特性インピーダンスが 50Ω になる様に設計される (同軸部の中心導体と電極部の間隙部分を 50Ω にすることは難しい)。図 1 では下流側がビームダクトへ短絡されているが、下流側にも出力ポートを用意すると図 1 左側から進行するビームに対しては信号出力がなく、右側から進行するビームに対して信号出力のあるポートになる [3, 5, 11]。通常、線形加速器やビーム輸送路ではビームは一方方向であるため、短絡構造のほうが設計、製作が容易であり、安価となるため短絡構造の BPM が用いられる。図 2 に KEK 入射器で使用している標準的な BPM の写真を示す。

時間方向の分布 $I_{beam}(t)$ をもつビームがダクト半径 R 、電極内径 r 、特性インピーダンス Z の BPM の中心を通った場合に誘起される電圧は

$$V(t) = \frac{\alpha}{4\pi} Z (I_{beam}(t) - I_{beam}(t - 2l/c)) \quad (1)$$

で表せる。ここで l は電極の長さ、 α は中心から見た電極の開口角を表す。ビームのパンチ長 σ_t のガウス分布 $I(t) = I_0 \exp(-t^2/2\sigma_t^2)$ の場合、式 (10) は

$$V(t) = \frac{\alpha}{4\pi} Z \left(e^{-t^2/2\sigma_t^2} - e^{-(t-2l/c)^2/2\sigma_t^2} \right) \quad (2)$$

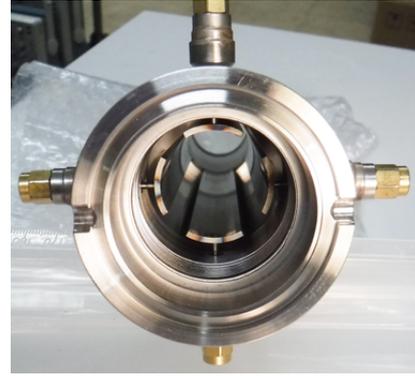


図 2: KEK 入射器で使用している通常の BPM

となる。異なるパンチ長のビームに対する信号の応答を図 3 に示す。 $t = 0$ はビームがポート部分を通じた時刻に相当し、電極に誘起された電流のポート側と電極側に $I_0/2$ ずつ流れ、 $t = l/c$ で短絡部で誘起された電流の半分は電極を流れてきた電流と相殺され $t = 2l/c$ で出力ポートに到達する。インピーダンス整合がとれた状態ですべての周波数領域で信号の減衰が無ければ信号の幅はパンチ長と同じになる。式 (2) をフーリエ変換し

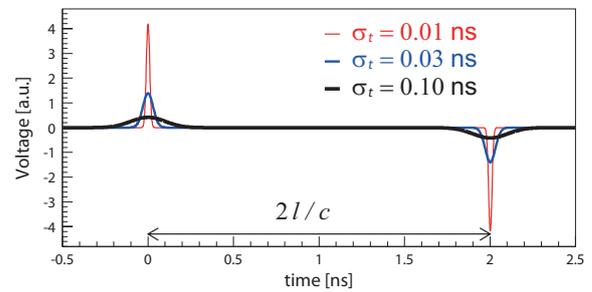


図 3: 電極長 30 mm の BPM に誘起される電圧の時間変化。信号の絶対値の高い側から順にパンチ長 10, 30, 100 ps に対応する。

て周波数領域で表すと

$$\begin{aligned} V(\omega) &= \frac{\alpha}{4\pi} e^{-\omega^2\sigma_t^2/2} \sin\left(\frac{\omega l}{c}\right) e^{i(\pi/2 - \omega l/c)} I_0 \\ &= Z_t(\omega) I_0 \end{aligned} \quad (4)$$

となる。BPM の周波数特性を表す伝達インピーダンス $Z_t(\omega)$ を図 4 に示す。信号は周波数が $(2n+1)c/4l$ ごとに極大値、 $nc/2l$ ($n = 0, 1, \dots$) ごとにゼロとなる。したがって、周波数領域で測定を行

う場合、測定する周波数と BPM の電極の長さの関係に注意する必要がある。包絡線はパンチ長に対応しており、パンチ長が短いほど高い周波数領域まで信号が伸びていることがわかる。時間領域で BPM の信号波形をより正確に測定するためには、スペクトル全体で減衰の少ない伝送路と広帯域のオシロスコープが必要になる。

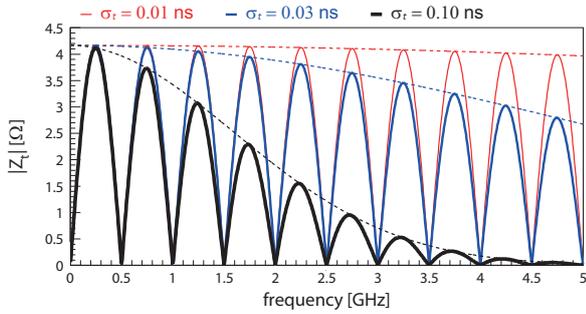


図 4: ストリップライン型 BPM の信号の周波数特性

一般的にビーム位置は上下、左右電極の出力をそれぞれ V_U, V_D, V_L, V_R としたとき規格化した上下、左右の電圧の差分（いわゆるデルタオーバースigma）

$$\Delta_H = V_R - V_L, \quad \Sigma_H = V_R + V_L \quad (5)$$

$$\Delta_V = V_U - V_D, \quad \Sigma_V = V_U + V_D \quad (6)$$

を用いて

$$x = x_0 + \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m a_{ij} \left(\frac{\Delta_H}{\Sigma_H} \right)^i \left(\frac{\Delta_V}{\Sigma_V} \right)^j \quad (7)$$

$$y = y_0 + \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m b_{ij} \left(\frac{\Delta_H}{\Sigma_H} \right)^i \left(\frac{\Delta_V}{\Sigma_V} \right)^j \quad (8)$$

で与えられる。ここで x_0, y_0 は BPM を設置した位置のオフセットを表す。ビーム位置が内径 R に対して十分小さければ x, y はそれぞれ $(i, j) = (1, 0), (0, 1)$ で近似出来る。ビームが中心から離れるほど非線形性が大きくなっていくため、多項式の次数 $i + j$ をどこまでとるかは要求される測定範囲に依存する。高次項まで含めると外側の位置の再現性は良くなるが、中心部では高次項の影響で位置の再現性が悪くなるため、一概に次数が

高ければ良いとも言えない¹。また、実際の運用では電圧に伝送路での減衰量を補正した補正係数がかかる。

2.2 実際の信号

BPM の信号は理想的にはパンチ長の幅を持ち、間隔が $2l/c$ のバイポーラー信号となるはずであるが、現実的な条件で測定するとどうなるだろうか？ 電極が短い場合、同軸ケーブルでの信号損失（高周波ほど減衰が大きい）が原因でバイポーラーの 2 つの信号の一部が重なりあってしまう。そこで分かりやすい例として電極が長い（長さ 457 mm、内径 28.6 mm）特殊な BPM の信号を例に実際の BPM の信号を紹介する。図 5 はこの BPM に 20 m の同軸ケーブルと 20 dB のアッテネータを介してオシロスコープ（帯域幅 4 GHz）に接続し、電子ビーム（電荷量 0.85 nC/bunch, パンチ長 ~ 10 ps）を観測した際の波形である。信号は教科書通り 2 つのバイポーラーになってお

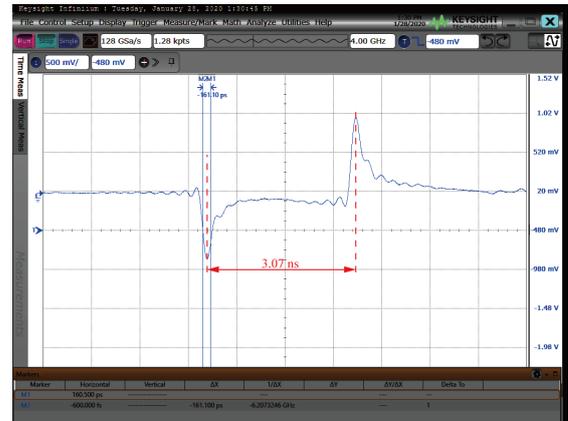


図 5: オシロスコープ（帯域幅 4 GHz）で測定した電子ビームに対するストリップライン型 BPM（電極長 457 mm）の信号波形。最初の信号の幅は FWHM で 160 ps となっている。

り、その間隔は約 3.07 ns で電極長から計算される値 3.05 ns と良く一致している。また、信号の強さは 20 m の 10D ケーブル（外部導体の直径 10 mm）と 20 dB（電圧 1/10）のアッテネータ

¹高次まで含めるとパラメータの管理や演算が煩雑になることもあり、KEK 入射器では 3 次までの演算としている。

を介しても約 800 mV あり、十分大きいことが分かる。BPM の信号は条件によっては 100 V を超えることもあるため、はじめてオシロスコープに接続する場合はアッテネータを接続して電圧を確認したほうが良い。信号の幅は FWHM で 160 ps (ガウス分布の幅で約 70 ps 相当) あり、実際のパンチ長 10 ps に比べて 7 倍程度広がっていることが分かる。主な原因として考えられるのはケーブルでの損失、測定器の限界 (オシロスコープの帯域) がある。電極が短い BPM の場合、伝送路

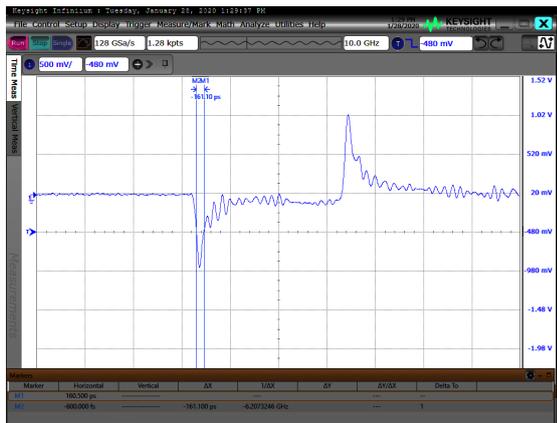


図 6: 帯域幅を 10 GHz にして測定した BPM の信号。条件は図 5 と同じである。

が原因で信号の幅が広がると互いに打ち消し合う領域が出てくるため、S/N は悪くなる。図 6 は同じ条件でオシロスコープの帯域幅を 10 GHz にして測定した波形であるが、信号の幅は変わっていない。信号の幅がパンチ長より広い原因は伝送路での減衰が主要因であると考えられる。またオシロスコープの帯域幅をこれ以上増やしても波形はほとんど変化しなかった。同軸ケーブル内の信号は TEM モードで伝搬していくが、周波数が高くなると高次のモードが混入してくる。最初の高次モードの TE_{11} モードのカットオフ周波数 $f_c^{TE_{11}}$ は

$$f_c^{TE_{11}} = \frac{2c}{\pi\sqrt{\epsilon_r}(D+d)} \quad (9)$$

で与えられる。ここで D と d はそれぞれ外導体の内径、中心導体の外形、 ϵ_r は比誘電率である。信号の減衰を小さくするためには太いケーブルが望ましいが、ケーブルを太くすると高次モードが混入してくるため、カットオフ周波数が測定に必要

な周波数領域の上限よりも高いケーブルを使う必要がある。また、コネクタやアッテネータ等も使用できる周波数範囲が決まっているので注意が必要である。今回使用したケーブルのカットオフ周波数は 10 GHz、アッテネータの周波数の上限は 12.5 GHz であった。10 GHz 以上の帯域幅で測定しても信号に大きな変化がなかったのは伝送路の限界であったと考えられる。また、図 6 には細かな振動が現れている。これは SMA のフィードスルーとストリップライン電極間のインピーダンス不整合が原因と考えられる (信号の立ち上がり時間を精度よく測定するために製作したもので、製作精度にあまりこだわらなかったのが一つの原因ですが)。この様に BPM の電気信号を時間領域で精度良く測定するのは難しいことが分かる²

次に 10 ps 程度以下の短パンチビームが BPM の中心から大きく外れた位置を通過した場合の信号について紹介する。ビームが中心から大きく離れた場合、最も距離の離れた電極の信号は単にバイポーラーの振幅が小さくなった信号となるであろうか? 図 7 は同じ BPM で陽電子を測定した際の波形である。図 5 と同じ BPM を陽電子が通過した際の信号を 7 に示す。上段はビームが BPM 中心を通過しており、バイポーラー信号 (電子ビームと極性が反転) であるが、電極から大きく離れた位置をビームが通過した信号は崩れた形となっており、教科書的な振る舞いとは異なる。おそらくビームが BPM 内に誘起する電磁場を拾っていると考えられるが、中心から離れた場所を通過した際に何が起きているのか実験的に理解するのは難しい。そこで 3 次元の電磁場解析シミュレーションソフト CST STUDIO SUITE (CST) [14] を用いてビームが中心から大きくずれた場合に何が起きるか調べてみる。パンチ長 $\sigma_t = 10$ ps (3 mm) の光速の電子ビームが BPM (ダクト内径 48.2 mm, 電極の内径 36.0, 厚さ 1.5 mm, 開口角は 50°) の中心から $x=10$ mm (電極半径の半分程度) の位置を通過した際の zx 平面の電場の様子を図 8 に示す。電子ビームの周りはローレンツ

²実は、伝送路の S-Parameter をベクトルネットワークアナライザで測定し、そのデータを用いてフーリエ逆変換することで元の波形を精度良く再現することが出来る。高級な広帯域オシロスコープ (価格は \gtrsim ストリークカメラ) ではほぼリアルタイムで逆変換が行え、20 m のケーブルを通した数十ピコ秒の波形もきれいに戻すことが可能。

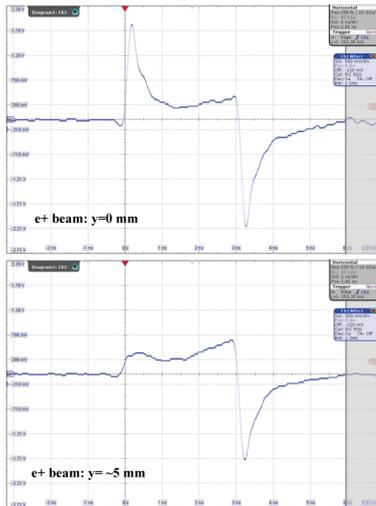


図 7: 上段は陽電子ビームが BPM 中心、下段は $y=+5$ mm の位置を通過した際の $-y$ 側の電極の信号。

収縮により電場が進行方向と垂直に分布していることが分かる。バンチ後方を見ると、ビームから離れた電極部に 3 つ大きな電場が生じている (破線の楕円で囲った部分)。同軸のポートに出力さ

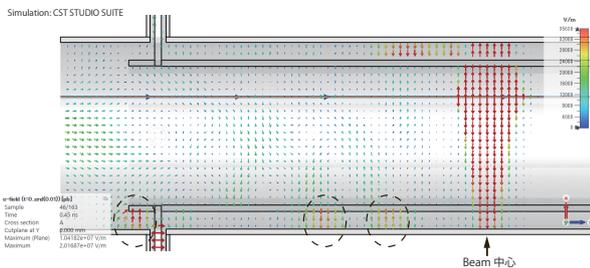


図 8: 電子ビーム ($\sigma_t=10$ ps) が $x=10$ mm の位置を通過した際に作られる zx 平面の電場の様子。左から右に向かって全体に引かれた線がビームが通過する軌道を表し、電場の向き、強度が矢印の向きと、大きさ、色で表現されている。電子ビーム後方に生じる電場を強調するため、電場の強さの表示は飽和させてある。

れる電流とその周波数特性を図 9 に示す。ビームに近い電極の信号はバイポーラーであるのに対して、離れた電極はビームによる壁電流の後方に大きさが同程度の複数の信号が続いている。周波数特性をみると、BPM の典型的な正弦波形状とは

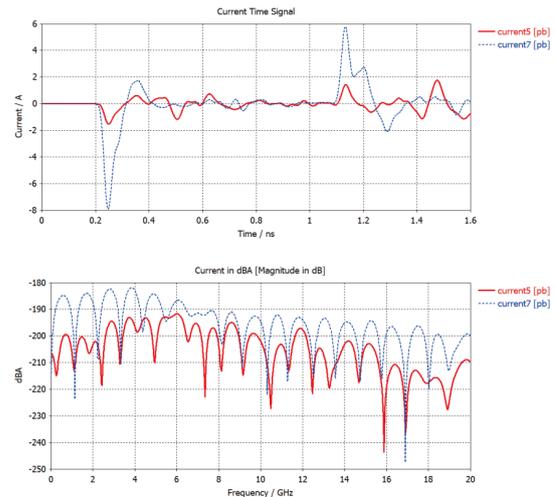


図 9: ポート (同軸部) に出力される電流の時間変化 (上段) とスペクトル (下段)。実線はビームから離れた電極、破線はビームに近い電極に対応する。

異なる応答となっており、ビームが BPM 内に誘起した電磁場 (ウェイク場) が混ざっていることが分かる。スペクトルの歪みは低い周波数側にも現れており、ビームが大きく中心から外れた場合は時間領域の測定だけでなく周波数領域での測定 (通常は ~ 300 Hz 以下) にも影響することが分かる。また、線形加速器では BPM 上流に加速管やベローズ、ビームダクトとの段差などがあり、ここで発生するウェイク場の一部はビームと一緒に BPM まで侵入してくる。その場合もビームが中心からずれるほど影響が大きくなる。通常、ビーム軌道を BPM の中心からずらして運転することは無いと思われるが、設計時に位置測定の信頼出来る範囲をシミュレーションである程度おさえておいたほうが良さそうである (現実でも大きな軌道が出た場合は鵜呑みにしないほうが良い)。より高精度の位置測定や非常に時間分解能の良い測定を行う場合は検出器周辺に可能なかぎり構造物を作らないことが重要になる。

2.3 BPM の設計

KEK 入射器での BPM の設計、製作手順を紹介する。通常、BPM の機械的な寸法が決まるのは四極電磁石や周辺のコンポーネントの設計が決

まった後になる。これに加えて、ビームの光学系の検討でビームロスを生じさせないための電極内径の下限が与えられる。要求された条件の下で特性インピーダンスが 50Ω になるように形状を決定する。以前は特性インピーダンスの評価に表面電化法を用いた二次元の計算 [15] を用いていたが、最近では CST を用いている。

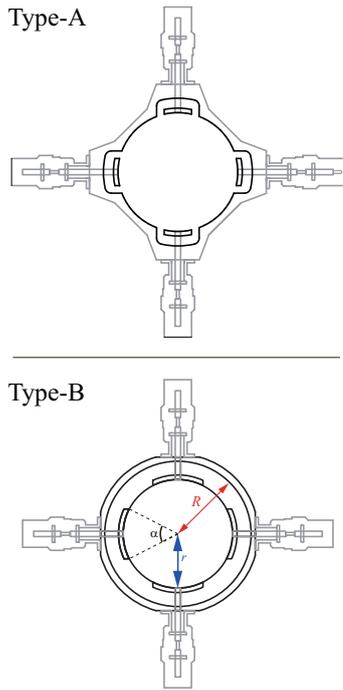


図 10: 代表的なストリップライン型 BPM の出力ポート部の断面形状。どちらもビーム出口側で短絡してある。

次に、陽電子捕獲用のソレノイド内に設置するストリップライン型 BPM を例に設計手順を説明する。BPM の形状は図 10 に示したように電極内と円筒ダクト内径を一致させ電極部外側に凹みを作る形状 (図 Type-A) と円筒ダクトの内側に電極を設置する形状 (図 Type-B) がある。前者のほうが、アパーチャーを大きくとりやすく、構造変化が小さくウェイク場の影響を低減出来るし、経験的にフィードスルー間でのインピーダンス不整合を小さくしやすいが、構造が複雑な分、製作コストが高くなる。後者 (Type-B) は構造が単純なため、設計、製作も容易で比較的安価に製作可能である。入射器のストリップライン型 BPM はほとんどがこのタイプである。ここでは入射器

陽電子捕獲部 [16] に設置した Type-B の形状設計を紹介する。BPM の設置箇所は陽電子捕獲部の DC ソレノイド内に設置された 2 台の加速管 (2 m 大口径 S-band 加速管) に挟まれた位置となる。ビームロスを生じさせないために電極内径 $r = 18 \text{ mm}$ が要求された。ビーム位置 x と電極の開口角 α の関係は $x \ll R$ のとき

$$\frac{\Delta_H}{\Sigma_H} = \frac{4 \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) x}{\alpha R} \quad (10)$$

と近似出来る [17]。 α を大きくとれば信号の強度は増すが、 Δ/Σ は小さくなり分解能は悪化する。この BPM では $\alpha = 50^\circ$ とした。ここまでパラメータが決まれば、特性インピーダンスを決定する残るパラメータは BPM の内径 R だけなので、 R と特性インピーダンスの関係をシミュレーションで求めて、 50Ω になる値に決めるだけである。伝送ラインの特性インピーダンスは入力信号に対する反射信号の大きさの時間変化から求めることが可能で、Time Domain Reflectometry (TDR) と呼ばれる。図 11 に CST で計算した BPM 内径ごとの特性インピーダンスを示す。 0.2 ns 付近の落ち込みは同軸から電極間に対応し、インピーダンス不整合が生じていることが分かる。それ以降の比較的フラットな部分が電極部の特性インピーダンスである。CST の場合、TDR 用の入力波形として一般的に実際の測定で用いられる矩形波とガウス分布を使う方法がある。矩形波の場合、エネルギーの減衰が無いことと信号の周波数帯域が制限されることからガウス分布を用いた方法が推奨されており、結果も若干異なる。この BPM の場合、矩形波を使った方法は特性インピーダンスが約 2Ω 高く評価された。またガウス分布の場合も信号の帯域が設定により異なるので実際の測定条件に近い範囲に設定したほうが良さそうである。また、電極の長さは周波数領域の測定を行う場合は利用するバンド幅で十分信号が得られる長さにする必要がある。

2.4 BPM の製作、評価

ストリップライン型 BPM は電極にたわみがあったり、設置位置、角度が異なると、特性インピーダンスにばらつきが生じる。その結果、位置の評

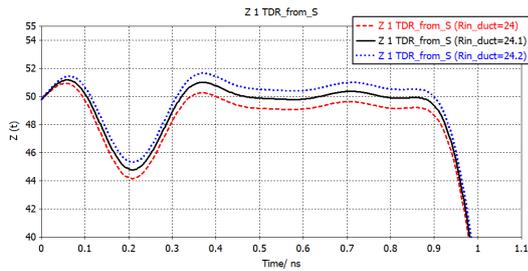


図 11: BPM の内径 R と特性インピーダンス

値を誤ってしまう（例えば、ビームが BPM 中心を通っても信号強度が異なる）。伝送路の信号減衰量や測定器のチャンネルごとの個性は実験的に評価出来るが、BPM 本体に起因する信号のばらつきを評価することは容易ではない。そこで、我々は電極部の製作、取り付けに最も注意している。4つの電極は出口部分で短絡され一体になることから電極部の加工は

1. 円筒から電極、円環形状の短絡部を一体もので切り出す
2. 電極を一本ずつ用意し溶接する

が考えられる。KEKB 増強時に製作された BPM は方法 1. で加工されており、はじめに丸棒を円筒形状に削り出し、その後、電極部をワイヤー放電加工で切り出す方法が採用された。しかし、この方法はワイヤー放電加工時の熱によるひずみが生じる問題（長さ 132.5 mm の電極両端を基準にして中央部で 0.2 の反り）があった。そこで、SuperKEKB のための入射器増強以降はあらかじめ熱処理したパイプ形状をワイヤー放電加工で切断して電極を切り出す方法へ変更した。電極部の仕様は長さ 132.5 mm（フィードスルー中心胴体溶接部-短絡部）に対して真直度で 0.1 mm 以下（5点測定）、目標値 0.05 mm 以下としている。詳細は参考文献 [18] にまとめられている。

BPM 完成後、特性インピーダンスの測定と異常の有無を調べるため、はじめに TDR 測定を行う。図 12 は §2.3 で紹介した BPM の TDR 測定の様子である。4つの各出力ポートに接続した測定結果を図 13 に示す。はじめに特性インピーダンスが約 50 Ω で安定した同軸ケーブル部分があり、その後 SMA フィードスルー部、フィードスルー

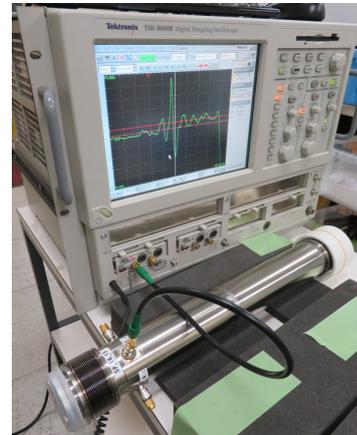


図 12: TDR 測定の様子。BPM が 1 m の同軸ケーブルで Tektronix TDS 8000B (Sampling module 80E04) に接続されている。

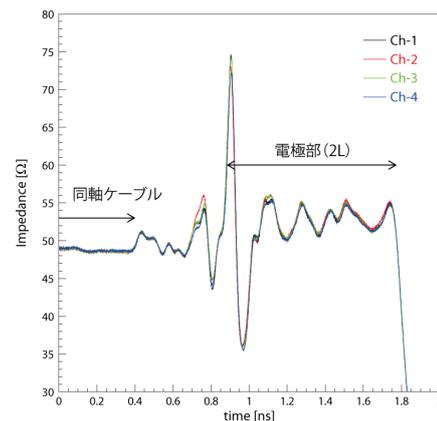


図 13: 4つの電極の特性インピーダンス測定結果。

中心導体-電極溶接部、電極部という構造が分かる。 $t = 1.8 \text{ ns}$ 付近の落ち込みが短絡部に対応する。電極のポート側端部の位置はフィードスルー中心導体と電極間の大きなインピーダンス不整合の影響で波形からは判断出来ないが、短絡部から $2L/c$ がポート側端部に相当する。電極部の特性インピーダンスもこの不整合の影響で正確に評価することは出来ないが、約 52Ω となっており、シミュレーションで評価した値とほぼ一致している。電極部製作時に測定した真直度は $0.02\text{--}0.03 \text{ mm}$ で目標値よりも十分小さい値であった。フィードスルー-電極間に大きな不整合はあるものの、この部分を含めて、4つ出力ポートの結果は非常に良く一致しており、加工、組み立てが精度良くできたことが分かる。

2.5 位置演算の係数の決定、ゲイン校正

ビーム位置を与える多項式 (7) の係数は実験的に求める方法とシミュレーションで求める方法がある。実験的に決定する場合は、はじめに BPM に通したワイヤーにパルス信号を流し、位置ごとに電圧を測定する。測定したマッピングデータを式 (7) に代入して実際の位置にフィットすれば係数が決定出来る [3]。シミュレーションで評価する場合は同様の事を仮想のビームを飛ばして行えば良い。それぞれ以下のようなメリット、デメリットが考えられる。

係数を実験的に求める方法 (ワイヤー)

- メリット
 - 製作精度で生じる歪みを含んだ応答が得られる (KEKB 増強時代に作られた BPM は 1 次の係数で最大で 4% の違いがあった。)
- デメリット
 - 複雑な測定装置が必要 (50Ω でインピーダンス整合をとるのが難しく、反射が発生)
 - ワイヤーと BPM 本体のアライメントの誤差が生じる

- ワイヤー中心とワイヤーの電荷中心の違いが誤差になる
- パルス信号は信号の帯域が制限され、測定するビームの帯域 (バンチ構造) と異なる。

係数をシミュレーションで求める方法

- メリット
 - 実際のビームに近い条件 (バンチ長) の応答が得られる
 - アライメントの誤差が無い
 - 任意の大きさ、形状の BPM でも評価出来る
- デメリット
 - BPM 製作精度によるばらつきは評価できない (ビームを使って各電極から検出器までのゲイン補正は可能であるが、BPM 本体の歪みを補正することは難しい)

それぞれメリット、デメリットがあるため BPM の製作精度や要求される条件等に合わせて検討すれば良い。ストリップライン型 BPM は製作精度に注意しないと電極ごとの個性が出やすいが、ボタン電極式の様な構造がよりシンプルな形状の場合はシミュレーションのほうに適していると思われる。KEK 入射器でも入射器-ダンピングリング間のビーム輸送路上流部に設置した大口径のストリップ型 BPM など特殊な形状の BPM は現在の測定システムでは計測が困難であることからシミュレーションを用いたマッピングデータを利用している。

BPM の各ポートから出力された信号は同軸ケーブルやコネクタを経由して測定器 (オシロスコープや専用のボード) に入力される。大型の加速器ではケーブルは通常は数十メートル以上はあり、長さが厳密に同じではないし、コネクタの締め具合も異なる。また測定器は内部にアッテネータやアンプがあり、チャンネルごとに減衰量やゲインに個性がある。そこで、各電極のゲイン

をそろえる必要がある。ゲイン校正はビームを用いて行うことが可能である [19, 20]。また、KEK 入射器では BPM の読み出し回路からパルス出力を BPM に送り、BPM 内で誘起された信号を読み返すことで対向電極同士のゲイン調整、監視を行っている（詳細は後述）。

2.6 BPM の信号測定

ビーム位置を計算するためには各電極のアナログ信号をデジタル信号に変換し、その大きさを評価する必要がある。測定方法は電圧の時間変化を直接測定する時間領域（Time Domain）測定と特定の周波数領域を切り出して測定する周波数領域（Frequency Domain）測定がある。

時間領域測定は広帯域で時間分解能の良い測定が可能で、市販のオシロスコープなどを使えば非常に簡単に測定出来る。電気的な測定でもアンテナを工夫し、広帯域（超高価格）のオシロスコープを使えばバンチ間隔が数百ピコ秒間隔のビームの分離も可能である³。しかし、サンプリング数や垂直分解能（通常のアナログオシロスコープは 8 bit 程度で有効ビット数はさらに低い）に限りがあることや広帯域にすることで逆にノイズも増えるなどの問題もあり高い位置分解能を得ることが難しい。信号強度はバイポーラ信号部の谷と山の差分（p-p）で与える方法と二乗和平方根をとる方法があり、サンプリング数の多い後者のほうが分解能が良い。以前、KEK 入射器で使用していた BPM 測定システム [21] はオシロスコープを利用して BPM の信号処理を行っていたが、位置分解能は最も良い条件で 25 μm 、通常は 50 μm 程度であった。また、このシステムは 50 Hz の測定が可能であったが、これは測定可能な限界に近く、実際オシロスコープのファームウェアを更新すると 50 Hz 測定が出来なくなる問題があった。また、オシロスコープを使う場合、波形測定以外の仕事

³KEK 入射器の陽電子捕獲部では 3.5 GeV の電子ビームをタングステン標的に照射し電磁シャワーで生成される電子、陽電子対をソレノイド磁場で捕獲しながら加速する。電子と陽電子は電荷が異なるため、加速管入り口で陽電子が減速位相に乗った場合は位相スリップをしながら電子バンチとの距離が広がっていき、RF 位相で 100 度以上離れた位置にバンチングする。予備的な実験結果ではあるが、実際に試験を行い 180 ps 離れた電子と陽電子の区別に成功している。

をさせるのが難しい。例えば、KEK 入射器ではイベントシステム [22] を利用して SuperKEKB HER/LER, PF, PF-AR など入射するリングに対応したトリガータイミングとビームモード情報やショット ID など付加的な情報が同時に光信号で様々な機器に配信されている。イベントシステムに対応した機器では測定データにこれらの付加的な情報を加えることが出来るがオシロスコープはこの光信号を直接受けられない。このためネットワーク経由でこれらの情報を取得し、ビーム測定データと紐付けなければいけないが、ネットワーク経由の情報は同期が保証出来ない。

周波数領域測定は BPM の信号の特定周波数領域を切り出して ADC でサンプリングする。ストリップライン型 BPM ではバンドパスフィルターで特定の周波数領域を切り出し、200 MHz 前後の高速、高分解能（16 bit）な ADC を用いたデジタル信号処理で高分解能を達成できる。ただし、ビームがマルチバンチの場合は、フィルターを通した信号を次のバンチが来る前に十分に減衰させるなどの工夫が必要となる。加速器に合わせて回路設計が必要になることもあるため、開発に時間を要することが難点である。この方法は多くの加速器施設でも独自に開発したシステムや商用のシステムで採用されている。

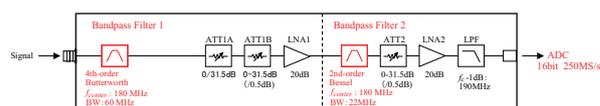


図 14: KEK 入射器の BPM 信号読み出し回路のフィルター部回路図

入射器の BPM 信号読み出し回路 [23, 24, 25] では中心周波数が 180 MHz の異なる 2 つのバンドパスフィルターを使用している。図 14 にフィルター部分の回路図を示す。バンドパスフィルターの詳細は後で説明する。バンドパスフィルター前後の信号波形を図 15 に示す。幅 2 ns のバイポーラ波形が 180 MHz で振動する幅約 60 ns の波形に変換されたことが分かる。この波形を ADC で離散的にサンプリングし、ベースラインを差し引いた値の二乗和平方根から信号強度が求まる。

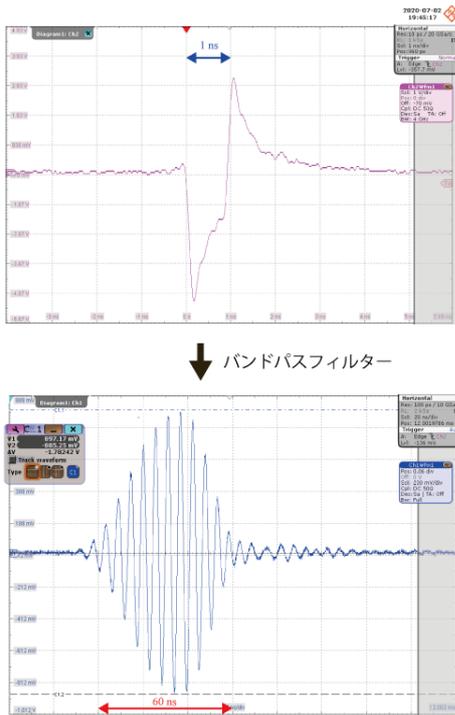


図 15: オシロスコープで観測した BPM の生信号とバンドパスフィルターを通した後の信号

2.7 信号読み出し回路のフィルター設計

入射器の BPM 信号読み出しシステム [23, 24, 25] は SLAC で LCLS-II 用に開発していた MicroTCA ベースの読み出しシステム [26] を元に開発した。入射器で開発した信号読み出し回路のバンドパスフィルター設計の概要を説明する。我々は以下の手順で開発を行った。

1. サンプリング周波数と分解能が高い ADC の候補を絞る
2. バンドパスフィルターを以下の条件で選定
 - BPM の周波数特性で十分感度の高い周波数帯
 - 中心周波数が高い
 - 折り返し雑音が無い周波数領域
 - 60 ns 程度で信号を十分減衰させる

ADC は分解能 16 bit、サンプリング周波数 250 MHz とした。サンプリング周波数が f_s のとき、中心周波数 f_c 、帯域幅 B のバンドパス

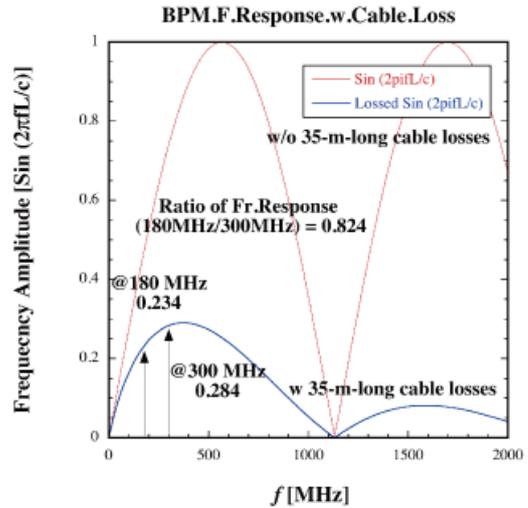


図 16: 電極長 132.5 mm の BPM の周波数特性。赤色はケーブルでの減衰なし、青色は 35 m の同軸ケーブルによる減衰を考慮した周波数特性である。

フィルターを通した信号で折り返し雑音を抑制するためには任意の整数 $m = 1, 2, \dots$ に対して以下の条件を満たす必要がある [27]。

$$\frac{2f_c + B}{m + 1} \leq f_s \leq \frac{2f_c - B}{m} \quad (11)$$

バンドパスフィルターはサンプリング周波数の f_s より低い側の 2 次ナイキストゾーン $[f_s - \frac{1}{2}f_s, f_s] = [125, 250]$ MHz と高い側の 3 次ナイキストゾーン $[f_s + \frac{1}{2}f_s, f_s] = [250, 375]$ MHz から選定することにした。KEK 入射器の BPM の電極長は特別な場所を除き 132.5 mm (ダンピングリングから下流 3 セクター以降はパルス四極電磁石に合わせて 57.5 mm) で統一しており、図 16 を見ると、この周波数領域は十分感度があることが分かる。バンドパスフィルターの決定までに実際に読み出し回路にフィルターを組み込み、ネットワークアナライザでナイキストゾーンの端で十分にゲインが落ちていること (40 dB) やアンプの線形性の試験など様々な試験が必要となる [23]⁴。KEK 入射器では

⁴電子回路の経験の無い者が片手間で開発するのは難しい。KEK 入射器の読み出しシステムは SLAC が LCLS-II 用に開発したボードのプロトタイプをベースに電子回路に比較的熟練した担当者が中心的に開発を進めたが、それでも泥臭い試験を繰り返し、完成まで約 3 年を要した。

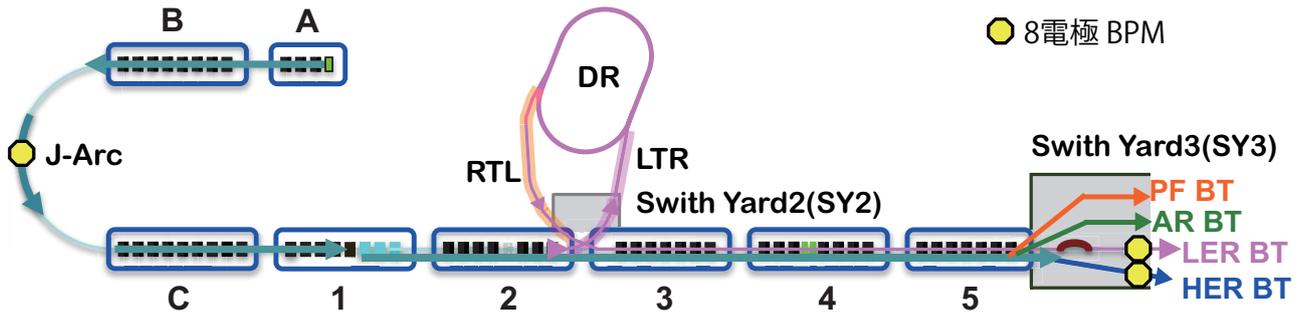


図 17: KEK 入射器の概略図。J-Arc 部と LER/HER BT にはエネルギー広がり監視用の 8 電極ストリップライン型 BPM が設置されている。

ビーム繰り返し 50 Hz の 1 パルスにバンチ間隔 96 ns の 2 バンチ運転入射運転を行うため、1 バンチ目の信号が 2 バンチ目の信号と重ならないように 60 ns で減衰させる必要がある。最終的に 1 段目に $f_c=180$ MHz、帯域幅 60 MHz の 4 次バターワースフィルタで中心周波数から緩やかに遮断し、はずれた裾部分を遮断し、2 段目の $f_c=180$ MHz、バンド幅 22 MHz のベッセルフィルタでパースト長を 60 ns にする構成とした (図 14)。

2.8 KEK 入射器の BPM

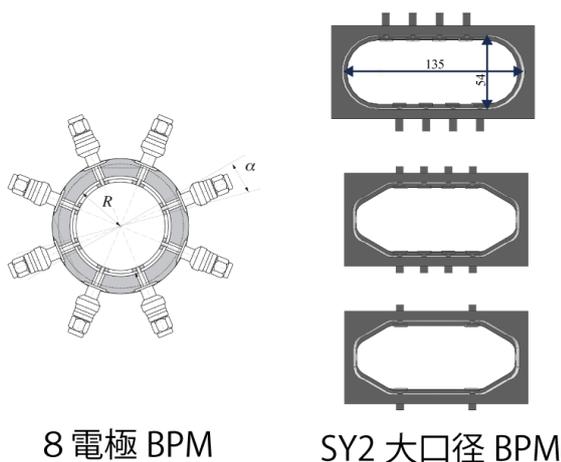
KEK 入射器のビーム位置モニターを紹介する。図 17 に示す様に、KEK 入射器は A から 5 セクターの全部で 8 つのセクターで構成される (KEK 入射器全体の詳しい説明は参考文献 [28] にまとめられている)。

A セクターには HER 入射用の低エミッタンスフォトカソード RF 電子銃と 1 バンチあたり 10 nC を超える陽電子生成用の大電荷の電子ビームと PF, PF-AR 入射用の 0.3 nC/bunch の低電荷量の電子ビームを生成する熱電子銃が設置されている。したがって、KEK 入射器では 1 バンチあたり 0.1 nC から 15 nC をカバーする非常にダイナミックレンジの大きな BPM 読み出し回路が要求される。ビーム繰り返しは 50 Hz で入射パターンは PF, PF-AR, HER, LER の要求に応じて変更している。HER, LER 入射の場合は 1 パルスにバンチ間隔が 96 ns の 2 バンチ運転を行っている。複雑な入射パターンやタイミング制御を

実現するため、タイミング制御は MRF イベントシステム [22, 29] を用いており、イベントジェネレータからタイミング情報と同時に入射先を区別するためのビームモードが送信される。信号は光信号で送信され、同時にショットごとに付与されるショット ID などビームに付随する情報も転送している。BPM の信号読出しシステムは信号強度に関して広いダイナミックレンジに対応するため、ビームモードに応じてアッテネータの値を切り替える必要があるため、イベントシステムに対応しなければならない。またショット ID をビーム情報に付加することで、異なる BPM 同士やパルス電磁石 [30] の電流値、RF の位相、振幅 [31] などと同期をとった比較が可能となる。これらの情報は EPICS [32] を通して共有される。

陽電子は 3.5 GeV の電子ビームを 1 セクター半ばに設置された陽電子捕獲セクションのタングステン標的に照射し、そこで発生した電磁シャワー中の陽電子を強力なソレノイド磁場で捕獲しながら加速して生成される [33]。生成された陽電子ビームはエミッタンスが大きくそのままでは LER へ入射出来ないため、ダンピングリングで低エミッタンス化する。生成された陽電子はエネルギー広がりが大きく、加速管やダクトのアーチャーいっぱい広がった大きなビームであるため、ダンピングリングへの入射路 (SY2-LTR) では大口径の BPM が必要である。

入射器には 2020 年 8 月現在、4 電極の BPM が 100 台、SY2 に大口径の特殊な BPM が 5 台 (うち 2 台は 8 電極)、エネルギー広がり監視用の 8 電極 BPM が 3 台設置されている。図 18 に 8 電



8 電極 BPM

SY2 大口径 BPM

図 18: 特殊な形状のストリップライン型 BPM

極タイプの BPM と大口径の BPM の断面図を示す。大口径タイプの BPM はパルス電流を用いた位置ごとの応答測定が出来なかったため、位置演算の係数は CST を用いて評価した。8 電極 BPM を用いたエネルギー広がり監視は後で詳細を説明する。

RF 電子銃で生成された低エミッタンス電子ビームとダンピングリング出射後の低エミッタンス陽電子ビームはそれぞれ HER, LER までエミッタンス増大を抑制しながら輸送する必要がある。電子ビームが加速管の中心から外れた軌道を通ると横方向のウェイク場によりエミッタンスが増大する。この問題を避けるためには電子ビームの軌道を精度良く制御する必要があり、BPM に高い位置分解能 ($10 \mu\text{m}$ 以下) が要求される。

入射器の BPM 信号読み出しシステムへの要求をまとめると

- 広いダイナミックレンジ ($0.1\text{--}15 \text{ nC/bunch}$)
- 2 バンチビーム対応 (バンチ間隔 96 ns)
- MRF イベントシステム対応
- EPICS 対応
- 分解能 $10 \mu\text{m}$ 以下

となる。我々は SLAC の LCLS-II 用の BPM 信号読み出し回路 [26] を元に開発した VME ベー



図 19: BPM 信号処理システム

スの信号読み出し回路とイベントシステムと統合し、BPM の信号処理システムを完成させた。

図 19 は BPM 信号処理システムの写真で VME クレータに左から順に RAS (Reliability Availability Serviceability) ボード、CPU ボード、EVR-230RF (イベントレシーバ)、BPM 信号読み出し回路が挿入されている。RAS ボードは VME クレータの電圧監視やファンの制御、異常時の警報発信、シリアルポートを介した他のボード (CPU 等) との接続が可能である。イベントレシーバはイベントジェネレータから送信された光信号を受信する機能と NIM/TTL 信号、CML 信号を出力することが可能である。BPM 読み出し回路へのトリガーは各ビームモードのタイミングに合わせてイベントレシーバで生成する。信号処理システムはクライストロンギャラリーの各セクターごとに平均 2 台程度設置されており、BPM 本体と信号読み出し回路は 35 m の同軸ケーブルで接続されている。電荷量、位置演算はこの信号読み出し回路 [23] で行っている。図 20 に信号読み出し回路の回路図を示す。BPM からの信号は RF ユニットの経路し、ADC に入力され、チャンネルごとに SUB FPGA で 16bit 1024W の ADC データの FIFO を行い、MAIN FPGA で位置演算を行っている。RF ユニットには §2.7 で紹介したバンドパスフィルターと可変のアッテネータが用意されている。アッテネータはビームモード (電荷量) に応じてパルスごとに設定値を変更している。また各 RF ユニットは 180 MHz の CW を切り出す

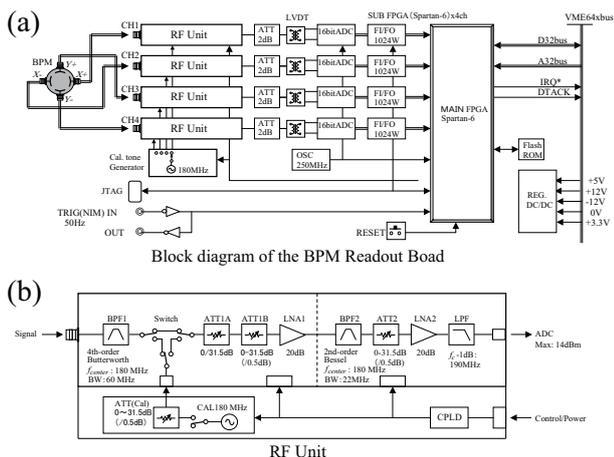


図 20: BPM 信号読み出し回路。図 (a) はメインボード、図 (b) は RF ユニットである。

ことで較正パルスを出力する機能を備えている⁵。較正パルスを用いて対向電極間のゲイン調整 [25] とゲイン変動の監視を行っている。較正パルスを用いた水平方向ゲイン測定の様子を図 21 に示す。はじめにチャンネル Y+ から較正パルスが出力され、Y+ 電極に信号が送られる。電極に信号が到達すると、隣接する電極に信号が誘起され、この信号が読み出し回路に戻る。X+, X- で測定した信号比がゲインの比となるため、この比で X- のゲインを補正して運用している (厳密には全ての電極のゲインを揃える必要があるが、通常の運転ではビーム位置は Δ/Σ の線形領域であり、1 次の補正としては十分と考えている)。また、この較正パルスはケーブルやコネクタ異常、接続ミスの発見に役だった。例えば、ケーブルが断線している場合、パルスを送り出したチャンネルには反射波が返ってくるが、他のチャンネルには全く信号が現れない。また、BPM 本体部で接続ミス (入れ違い) がある場合、パルスを送り出したチャンネルの隣接電極とは違うチャンネルに大きな出力が出る。較正パルスを用いれば、ビームが無い状態でも異常の有無を確認出来るし、運転中に異常が起きた場合も加速器を停止してトンネルに入域しなくても何が起きているのか確認出来るため

⁵ アンプが 2 段用意されているが、実際の運用ではパンチ電荷量が 0.3 nC の PF, PF-AR 入射用のビームでも十分な信号強度があり、アッテネータで 24 dB 減衰させている。分解能向上の観点からも必要無かった。

便利である。

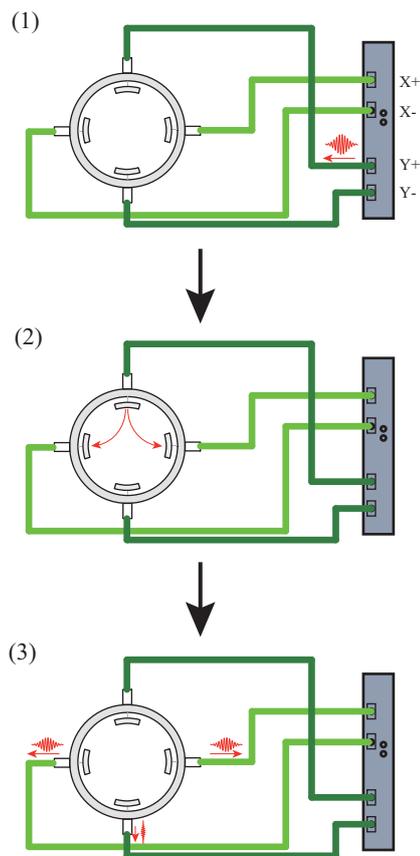


図 21: 較正パルスによるゲイン測定

最後に 3 台の BPM のうち、2 台の BPM から予測した位置と分解能を評価する 1 台の BPM の実測値を比較することで分解能を評価する 3BPM 法 [3] で測定した入射器の各 BPM の位置分解能を示す。測定は A セクター上流部のステアリング磁石の値を変化させて行った結果であるため、場所によって位置の変動範囲が異なるが (変化の大きな場所で ± 2.5 mm 程度)、要求された分解能を十分達成していることが分かる。J-Arc 部と 1 セクターの 1 点、3 セクターの 3 点で分解能の悪い場所があるが、これは分散関数が必要な場所 (1, 3 セクターはシケイン) でビームのエネルギー広がりの影響を受けているためである。また 3BPM 法は 3 台の BPM が同じ分解能であることを前提としているため、厳密にはこの方法で個々の BPM の分解能は評価できないが⁶ 全体的にほぼ一定の

⁶ 個々の BPM の分解能は主成分分析 (Principal component analysis (PCA)) と呼ばれる手法で評価できる。

分解能を示しており、高分解能を達成していることが分かる。

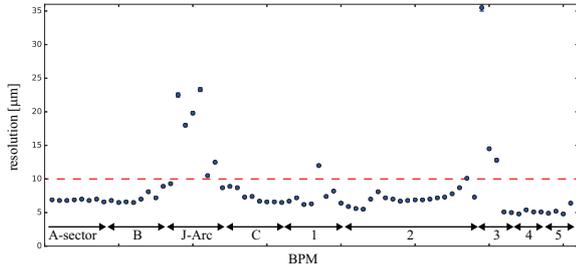


図 22: 3BPM 法で測定した各 BPM の位置分解能

3 多極 BPM を用いたビームの四重極モーメント測定

空間的な広がりをもつ電子ビームが誘起する壁電流を多重極展開したときの四重極モーメント J_q は

$$J_q = \frac{1}{R^2} (\langle x^2 \rangle - \langle y^2 \rangle + \langle x \rangle^2 - \langle y \rangle^2) \quad (12)$$

と表わせ、 N 電極の BPM に関して各電極に誘起される電圧を V_i とすると

$$J_q \approx \frac{\sum_{i=1}^N V_i \cos(2\theta)}{\sum_{i=1}^N V_i} \quad (13)$$

と表せる [34]。x, y 方向のビームサイズ σ_x , σ_y とすれば式 (12) の最初の 2 項は $\sigma_x^2 - \sigma_y^2$ に対応する。したがって、四重極モーメントを測定することで非破壊でビームサイズに関する量 (分散関数の大きな点ではエネルギー広がりにも対応) を測定することが可能である。実際に諏訪田らは KEK 入射器 J-Arc 中央部に 8 電極の BPM を設置してエネルギーフィードバックに利用出来ることを示した [35]。しかし、実際のビーム形状はガウス分布とは限らないし、どれだけビームの形状を反映しているんだ? という疑問が残る。そこで、実際に J-Arc に設置した 8 電極 BPM とその直後に設置されたスクリーンモニターを用いて四重極

モーメントとビーム形状の同期測定を行い、その有効性を確認した。

四重極モーメントは位置に依存した項があるため、はじめに BPM 上流のステアリングマグネットの強さを变化させ位置に関する 2 次の係数を実験的に求める。図 23 上段は測定したビーム位置と四重極モーメントの関係である。きれいな 2 次曲線を描いていることが分かる。この分布に 2 次式をフィットし、その分を引いて位置依存の項を消したプロットが図 23 の下の図である。ビームの位置変動による四重極モーメントの影響はキャンセルできるので純粋にビーム形状変化にともなう四重極モーメントの観察が可能になる。次に、J-ARC 上流のクライストロン (A セクター途中 ~ B セクター) の位相を变化させて電子ビームのエネルギー広がりを変えながら四重極モーメントとビーム形状の同時測定を行った。図 24 中央にスクリーンで測定したビームサイズと 8 電極 BPM で測定した位置依存補正後の四重極モーメントを示す。四重極モーメントがビームサイズの 2 次に比例して変化している様子が分かる。また、位相変化の符号が異なると同じビームサイズでも四重極モーメントの大きさが異なることが分かる。また中央の図の周囲にクライストロンの位相ごとの典型的な二次元のビームプロファイルを示してある。図 25 には水平方向のプロファイルを示した。位相を運転値よりも小さくする方向に変化させるとビームが 2 つのコアに分離していき、大きくすると左側 (低エネルギー側) に裾が広がる。四重極モーメントの大きさが同じでも位相変化の符号の違いでビームサイズが異なるため、四重極モーメントからビームサイズ (またはエネルギー広がり) を評価することは出来ないことが分かる。しかし、形状 (エネルギー広がり) の変化に応じて四重極モーメントも変化するため、常に四重極モーメントを監視していれば、理想的な位相からのずれを検出することやフィードバックに利用できることが分かる。

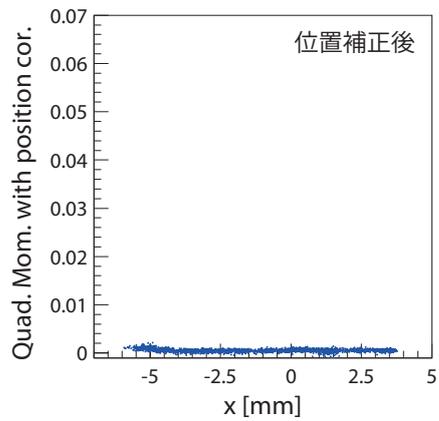
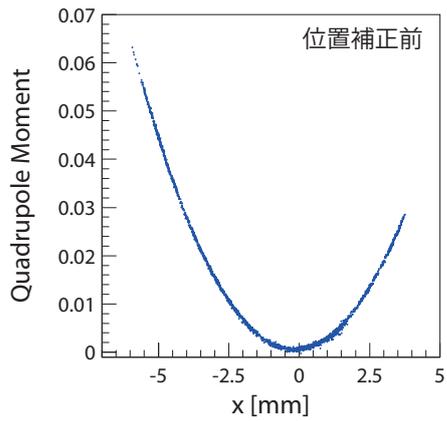


図 23: 8 電極 BPM で評価した位置に対する四重極モーメントの変化。上段は位置補正なし、下段は位置依存の補正を行っている。

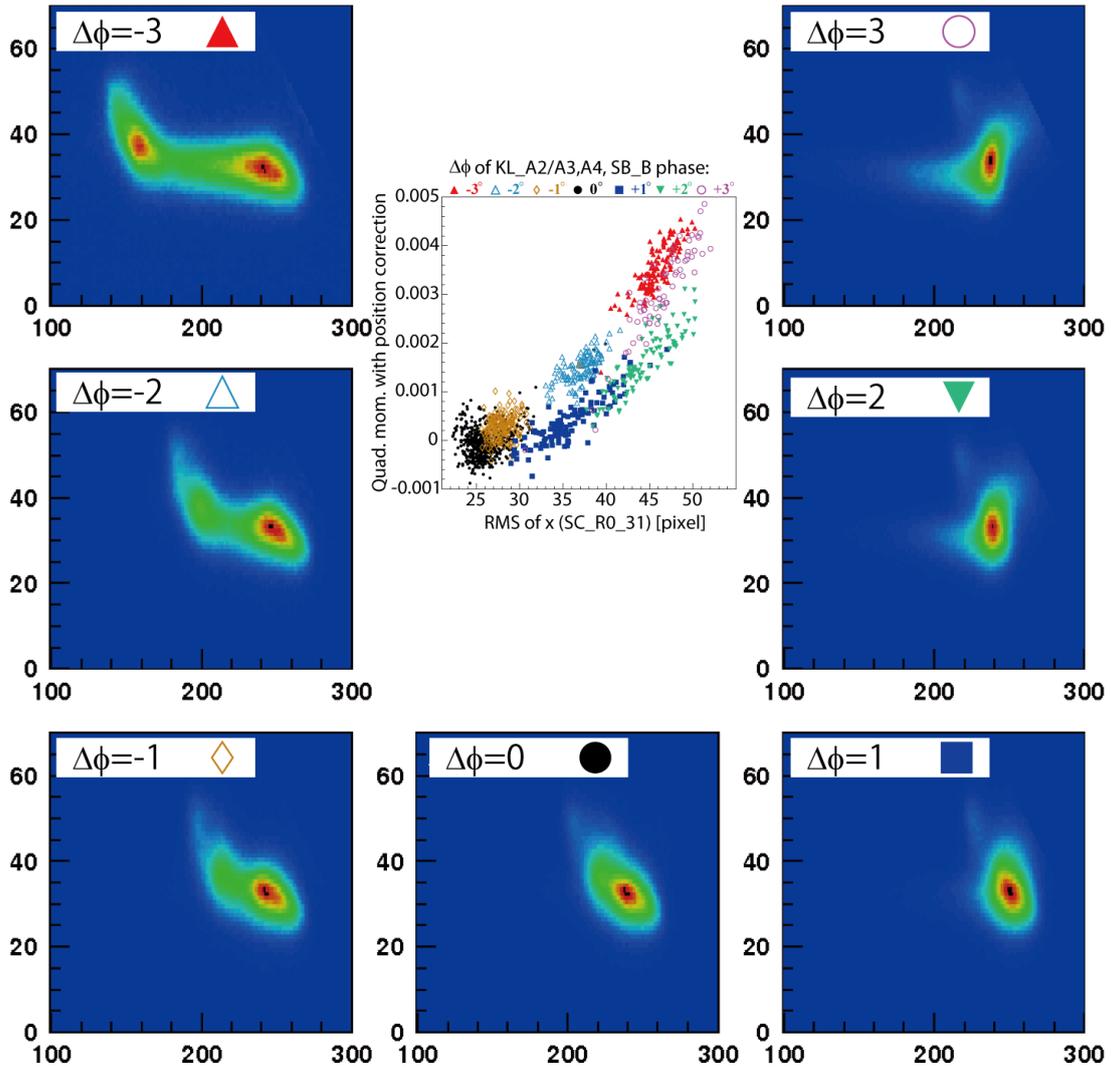


図 24: 中央の図はクライストロンの位相ごとにプロットした四重極モーメントとスクリーンモニターで測定したビームサイズ (RMS) [pixel]、プロファイルは二次元のビームプロファイル (1ショットのサンプル)。

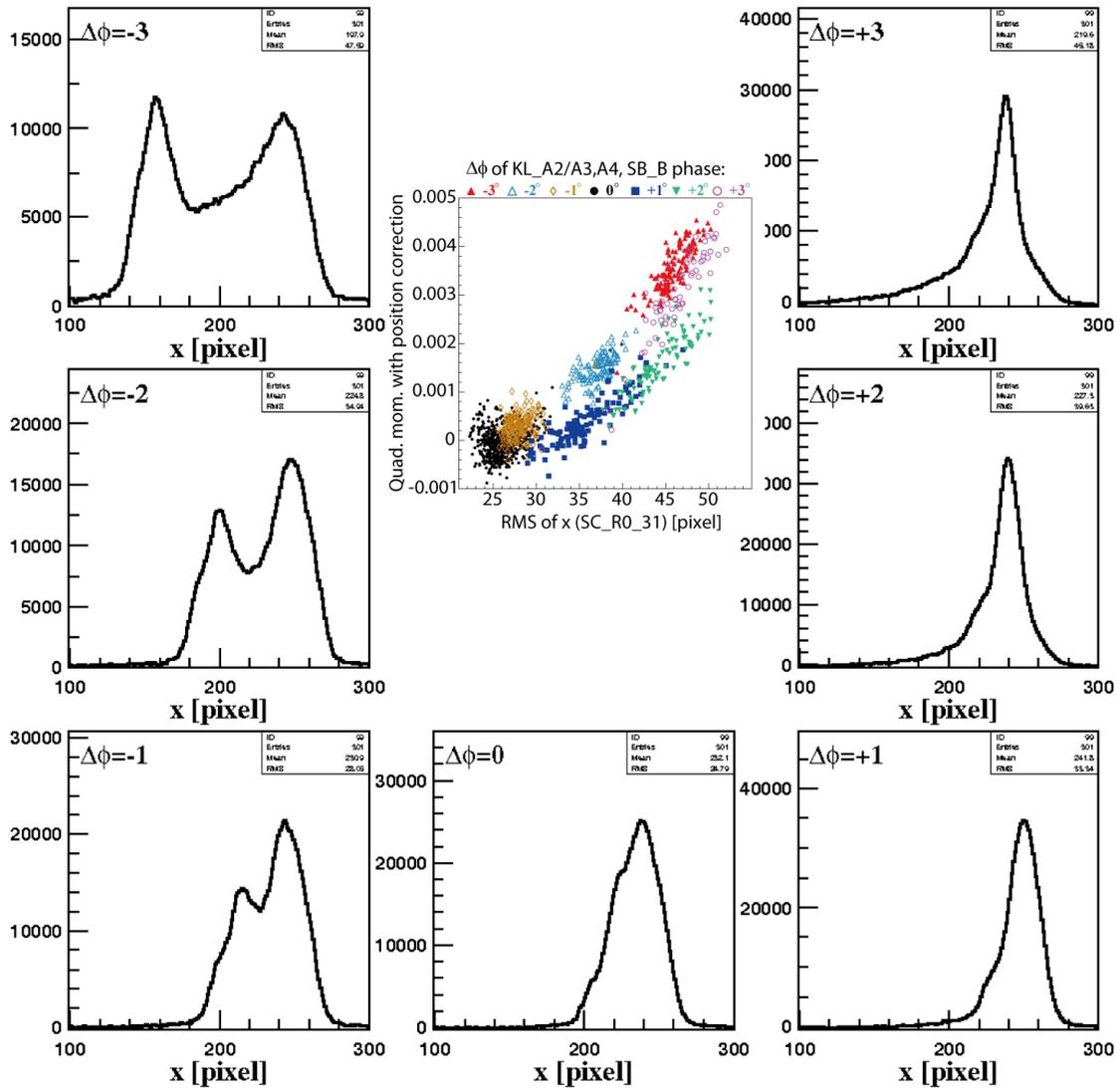


図 25: 中央の図はクライストロンの位相ごとにプロットした四重極モーメントとスクリーンモニターで測定したビームサイズ (RMS) [pixel]、プロファイルは水平方向のビームプロファイル (1 ショットのサンプル)。

4 ビームプロファイルモニター

入射器ではビームのプロファイル(形状)測定にワイヤースキャナーとスクリーンモニターを利用している。これらについても過去のOHOで詳しく解説 [36, 37, 8] されているため、簡単な説明と補足的な内容、実例を紹介する。

4.1 ワイヤースキャナー



図 26: ワイヤースキャナー本体

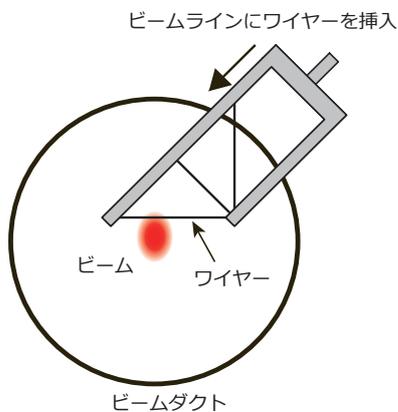


図 27: ワイヤーをビームに挿入する様子

ワイヤースキャナーは非常に細いワイヤー(100 μm 前後ではタングステン、10 μ 前後ではカーボンワイヤーなどが使われる)をビーム軌道に挿入し、ワイヤーの位置とビームとワイヤーの相互作用で生じる2粒子の量、あるいはワイヤーを流れる電流の量の測定値の相関から1次元の平均的なビーム形状を測定する装置である。図 27 に示す様に水平、垂直、斜めに張られたワイヤーが徐々に挿入されていき、全てのワイヤーがビー

ムを通過した後、元の位置に戻る。ビームがワイヤーを横切った瞬間の位置でのサイズしか測れないためマルチショットの測定となるが、ビームに対してワイヤー径が十分小さければほぼ非破壊で測定が可能である。特徴を簡単にまとめるとメリット:

- ほぼ非破壊で測定が可能(円形加速器では破壊的)
- 3台以上設置すれば四極電磁石の強さを変えずに Twiss Parameter, エミッタンス測定が可能
- 分解能がスクリーンモニターの様な光学上の制約を受けない
- メカニカルな装置であるため放射線による故障、劣化の心配が少ない
- マルチバンチ(バンチ間隔 数十 ns)でも測定が可能

デメリット:

- シングルショットの測定が出来ない
 - ショットごとのビームの揺らぎが測定に含まれる
 - 測定に時間を要する
- 2次元のプロファイルが測定出来ない(ビームが2玉に分かれていても、互いに重なりあっていると分からない。ただし、斜めのワイヤーがあると分離が分かることもある)
- 装置が大掛かりで高額

となる。

4.1.1 Twiss Parameter, エミッタンス測定とその条件

ワイヤースキャナーを用いた Twiss Parameter, エミッタンス測定の方法を説明する。図 28 に示す点 P_0 からワイヤースキャナーが設置された位置 W_1, W_2, W_3 までの転送行列を M, N, L とする。ビームラインは分かっているため、転送行列は既知である。簡単のため、1次元で考え、各位

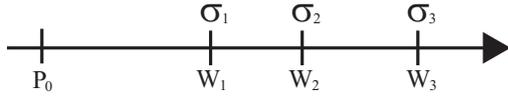


図 28: ワイヤスキャナーの並び W_i とその位置でのビームサイズ σ_i

置 W_i で測定したビームサイズを σ_i とする。転送行列を成分ごとに

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_1' \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} x_0 \\ x_0' \end{pmatrix} \quad (14)$$

$$= \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ x_0' \end{pmatrix} \quad (15)$$

$$N = \begin{pmatrix} n_{11} & n_{12} \\ n_{21} & n_{22} \end{pmatrix}, \quad L = \begin{pmatrix} l_{11} & l_{12} \\ l_{21} & l_{22} \end{pmatrix} \quad (16)$$

と表すと W_1 での Twiss Parameter ($\beta_1, \alpha_1, \gamma_1$) は P_0 での Twiss ($\beta_0, \alpha_0, \gamma_0$) を用いて、

$$\begin{pmatrix} \beta_1 \\ \alpha_1 \\ \gamma_1 \end{pmatrix} = \mathcal{M} \begin{pmatrix} \beta_0 \\ \alpha_0 \\ \gamma_0 \end{pmatrix} \quad (17)$$

$$\mathcal{M} = \begin{pmatrix} m_{11}^2 & -2m_{11}m_{12} & m_{12}^2 \\ -m_{11}m_{21} & m_{11}m_{22} + m_{12}m_{21} & -m_{12}m_{22} \\ m_{21}^2 & -2m_{21}m_{22} & m_{22}^2 \end{pmatrix} \quad (18)$$

で与えられる (W_2, W_3 についても同様)。ビームサイズ σ とエミッタンス ϵ の関係は $\sigma^2 = \epsilon\beta$ であるから、

$$\sigma_1^2 = \epsilon (m_{11}^2\beta_0 - 2m_{11}m_{12}\alpha_0 + m_{12}^2\gamma_0) \quad (19)$$

$$\sigma_2^2 = \epsilon (n_{11}^2\beta_0 - 2n_{11}n_{12}\alpha_0 + n_{12}^2\gamma_0) \quad (20)$$

$$\sigma_3^2 = \epsilon (l_{11}^2\beta_0 - 2l_{11}l_{12}\alpha_0 + l_{12}^2\gamma_0) \quad (21)$$

と表せる。エミッタンスが保存されていると仮定すれば未知数は $\epsilon, \alpha_0, \beta_0$ の 3 個 ($\gamma = (1 + \alpha^2)/\beta$) なので連立方程式を解けば (データにフィットすれば) Twiss Parameter とエミッタンスが得られる。

ワイヤスキャナーは連立方程式が互いに独立になる様に設計したビームラインの光学系で位相の進み (Phase advance) の異なる位置に設置しなければならない。図 29 は KEK 入射器 3 セクターに新たにワイヤスキャナーを設置する際に検討した Phase advance である。実際の運転では設計と変わることもあるため (KEK 入射器の

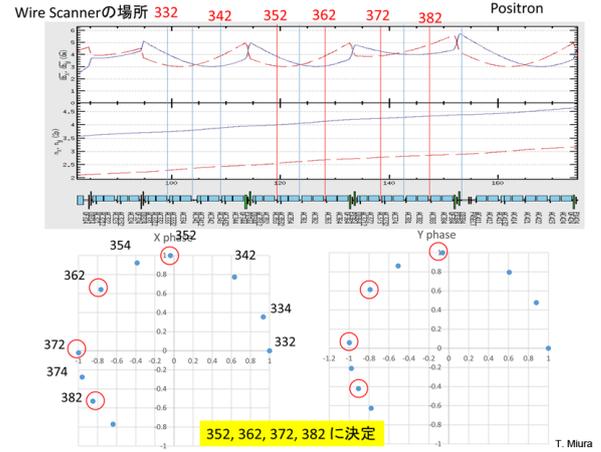


図 29: ワイヤスキャナー設置位置の検討

場合はビームモードごとにエネルギーが異なるため、光学系も変わる) ワイヤスキャナーは最低 4 台程度は用意したほうが良い。

4.1.2 二次粒子検出の原理、方法

ワイヤスキャナー測定ではワイヤを流れる電流を測る方法もあるが、ここでは二次粒子の検出について説明する。ワイヤに電子が当たると何が起きて、検出器では何を検出しているのだろうか? はじめに電子と光子の物質との相互作用をおさらいしておく。

電子と物質との相互作用のポンチ絵を図 30 に示す。制動放射は電子が原子核の電場で散乱する際に発生する放射である。制動放射によるエネルギー損失はエネルギー 10 MeV 付近から急激に増加していき、50 MeV 以上では制動放射によるエネルギー損失が支配的になる。多重クーロン散乱は電子が物質の原子核のクーロン場で何度も散乱を繰り返す散乱である。電子のエネルギー損失は無視できるが、運動の方向が変わる。GeV オーダーの電子ビームからみると大したことが無さそうに思えるが、100 ミクロン程度の物質を通過してもビームへの影響は無視できない。

光子と物質との相互作用はエネルギーが keV 領域では光電効果が支配的であるが、数十 MeV まではコンプトン散乱、それ以上では電子対生成が支配的になる。高エネルギーの加速器でも発生

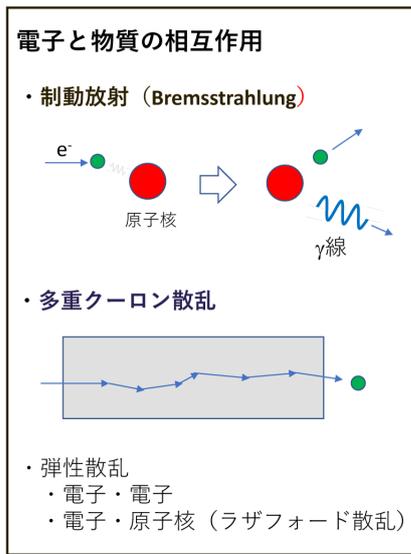


図 30: 電子と物質の相互作用

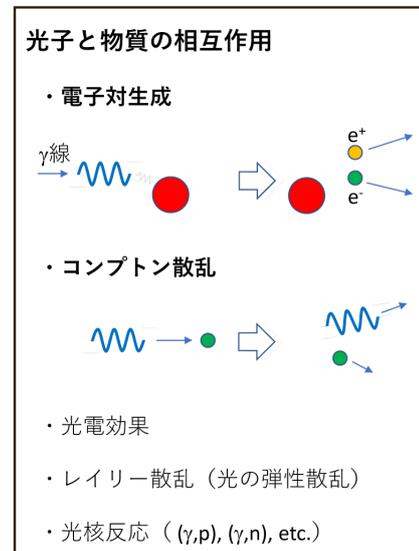


図 31: 光子と物質の相互作用

するガンマ線はほとんどが MeV 領域であるため、コンプトン散乱が主役になる。

実際に高エネルギーの電子ビームがワイヤーに入射すると何が起こるかを調べるために EGS5[38] でシミュレーションを行った。エネルギー 1 GeV の電子を厚さ 100 μm のタングステン標的に 10^6 個の電子を入射した際に生成される二次粒子を調べた。標的から出てきた粒子は電子は入射電子の 1.027 倍、ガンマ線が 0.36 倍、陽電子は 0.1% であった。標的が薄い場合電子対生成はほとんど起こらず、制動放射のガンマ線が電子の 3 割強生成されることが分かる。陽電子に対して電子が多いのはコンプトン散乱や電子-電子散乱で叩きだされる電子が増えるためだと思われる。次に放出される二次粒子のエネルギーと角度分布を確認する。図 32 は放出される電子のエネルギー、角度分布である。エネルギー分布 (右上図) を見ると、電子はあまりエネルギーを失わないことがわかる (950 MeV 以上の電子が全体の 90%)。一方、低エネルギー側にもピークが見える。10 MeV 以下の電子は全体の 2.5% で、大半がコンプトン散乱で生成されたものと考えられる。角度分布はほとんどが前方への微小角散乱であることが分かる。このことは大きな散乱角方向に検出器を置くことは非常に効率が悪いことを意味する。エネルギーと角度の相関分布で細い線状の分布が確認できるが、これは電子-電子の弾性散乱に対応する。同様に放出されたガンマ線の性質を図 33 に示す。エネルギーは電子と逆の分布、散乱角度は電子と同様に前方への散乱である。図 34 は角度分布の前方部分を拡大した図である。電子の散乱角はガンマ線に比べて広がっている。多重散乱の分布をガンス分布で近似したときの角度

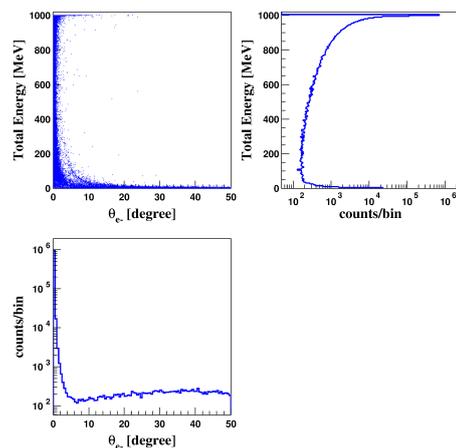


図 32: 1 GeV の電子が厚さ 100 μm のタングステンに入射した際に放出される電子のエネルギー、角度分布 (EGS5)。

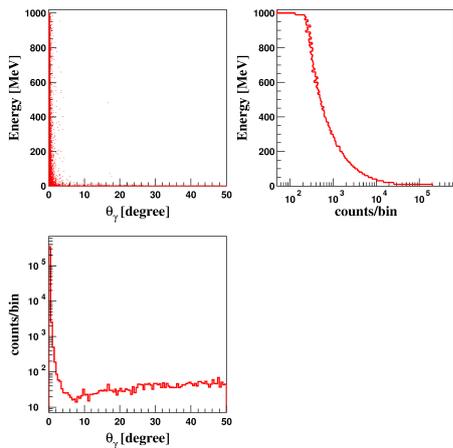


図 33: 1 GeV の電子が厚さ 100 μm のタングステンに入射した際に放出されるガンマ線のエネルギー、角度分布 (EGS5)。

広がり $\sqrt{\langle\theta^2\rangle}$ (RMS scattering angle) [rad²] は

$$\sqrt{\langle\theta^2\rangle} = 2 \frac{\chi_c^2}{1+F^2} \left[\frac{1+\nu}{\nu} \ln(1+\nu) - 1 \right] \quad (22)$$

で近似できる (経験式) [39]。ここで

$$\nu = 0.5 \frac{\Omega}{1-F} \quad (23)$$

$$\Omega = \chi_c^2 / \chi_a^2 \quad (24)$$

$$\chi_c^2 = 0.157z \left(\frac{Z(Z+1)}{A} \right) \frac{x}{p^2\beta^2} \quad (25)$$

$$\chi_a^2 = 2.007 \times 10^{-5} Z^{2/3} [1 + 3.34(Zz\alpha/\beta)^2] / p^2 \quad (26)$$

である。 p は入射粒子の運動量 [MeV/c²]、 x は経路長 [g/cm²]、 z , Z , A は標的原子の電荷、原子番号、質量数、 α は微細構造定数である。 F は Moliere 分布の補正係数で 0.90 ~ 0.995 の値をとる。ガウス分布の幅 σ_{mul} は $\sqrt{\langle\theta^2\rangle}/2$ で与えられる。 $F = 0.98$ として、タングステン標的の場合の分布の幅を計算すると 2.1 mrad となる。この幅を図 34 の破線で示した。角度分布にガウス分布をフィットして得た幅は 2.03 となり、経験式で評価した値と良く一致している。つまりワイヤーから出てくる電子の角度分布は多重クーロン散乱で決まることが分かる。制動放射の角度分布は $1/\gamma$

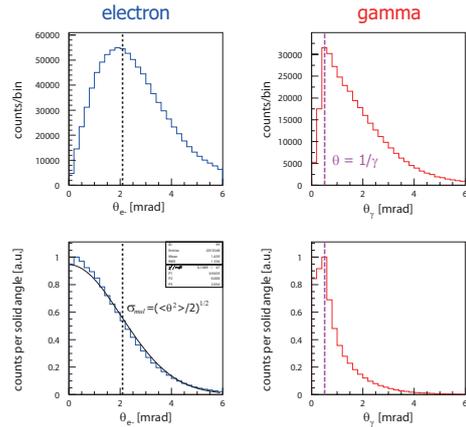


図 34: 電子 (左図) とガンマ線 (右図) の散乱角度。下段は単位立体角あたりの分布である (EGS5)。

で近似出来る (右図破線)。破線と分布のピークが良く一致していることが分かる。

以上から検出器を角度 $1/\gamma \sim \sigma_{mul}$ に設置すると効率よく二次粒子を検出出来ることが分かる。二次粒子の検出器としては

- シンチレータ + 光電子増倍管 (PMT)
- チェレンコフ媒質 (鉛ガラス等) + PMT
- PMT のみ (入射窓でのチェレンコフ放射)
- 光ファイバー + PMT (KEK 入射器)

などが考えられる。

4.2 ワイヤー径の補正

ワイヤーがビームに対して無視出来ない太さの場合、測定したビームサイズはワイヤーの影響を受ける。そこでワイヤー径による広がりを補正する必要がある。期待値 m の確率密度関数 $f(x)$ の分散は

$$\int (x-m)^2 f(x) dx \quad (27)$$

で与えられる。ワイヤーの半径を a 、ビームの幅を dx としたとき、二次粒子の量が電子がワイヤーを貫く長さ $dS = 2\sqrt{(a^2 - x^2)} dx$ に比例すると仮

定すると式 (27) からワイヤー径の分散 σ_{wire} は

$$\sigma_{wire} = \sqrt{\int_{-a}^a x^2 \frac{2\sqrt{a^2 - x^2}}{\pi a^2} dx} \quad (28)$$

$$= \frac{a}{2} \quad (29)$$

となる。したがって実際のビームサイズ σ_{beam} は測定したビームサイズ σ_{meas} と σ_{wire} を用いて

$$\sigma_{beam} = \sqrt{\sigma_{meas}^2 - \sigma_{wire}^2} \quad (30)$$

で与えられる。

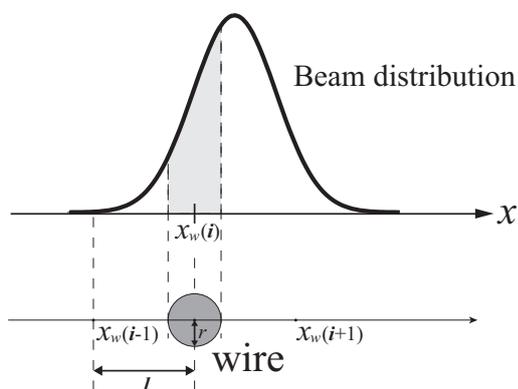


図 35: ワイヤスキャナー測定の 1 次元のモデル。ワイヤスキャナー測定の信号強度はワイヤーが覆うビームの断面とビームが横切るワイヤーの断面の長さの積になる。

これが本当に有効であるか確認するために 1 次元のモデルで計算してみる。図 35 に示す様に幅 σ のガウス分布のビームを半径 r のワイヤーが距離 l ステップごとに動くとして仮定する。ワイヤーが i 番目の測定位置 x_i にあるときの信号強度 $I(x_i)$ は

$$I(x_i) = \int_{x_i-r}^{x_i+r} \frac{c}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \sqrt{r^2 - (x - x_i)^2} dx \quad (31)$$

c は定数、 i ステップ目の位置は $x_i = il$ である。図 36 に直径 $100 \mu\text{m}$ のワイヤスキャナーで幅 100 と 50μ のビームサイズ測定を模擬した結果を示す。ビームの幅が狭くなるとワイヤー径の影響が大きくなり、ビームの幅が $50 \mu\text{m}$ の場合、 $6 \mu\text{m}$ ビームサイズを過大に評価してしまうことがわかる。フィットして得た測定値とワイヤー径の補正 (式 (30)) を行ったビームサイズの比較を

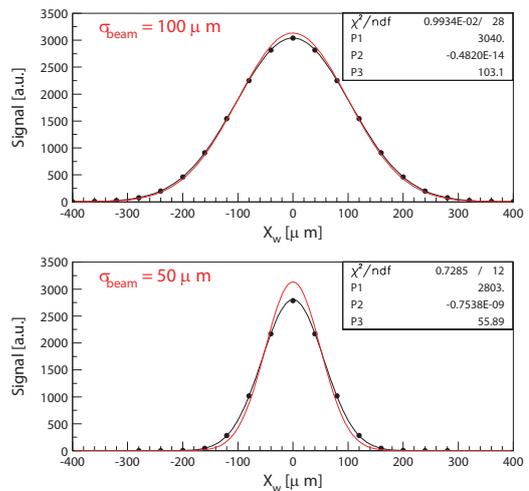


図 36: 20μ ステップごとに離散的に測定した信号強度 (モデル計算)。黒色は測定値、赤色は真の分布、青色はガウス分布をフィットした様子である。

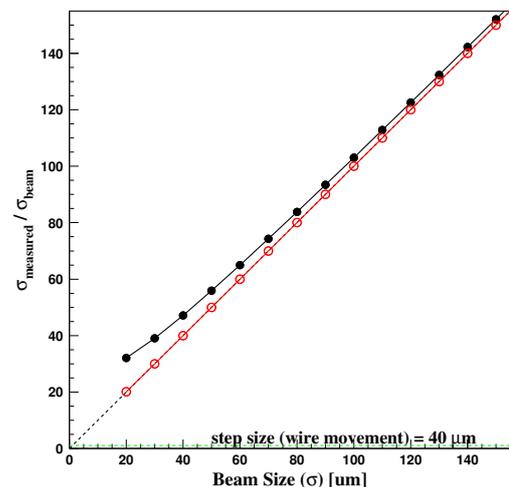


図 37: 測定したビームサイズ (黒色の丸印) とワイヤー径を補正した値の比較 (白抜きの丸印)。

図 37 に示す。ワイヤー径を補正した値は真の値を再現していることが分かる。

では、この補正すれば太いワイヤーを使っても大丈夫だろうか？この補正が通用するのは検出される信号がビームがワイヤーを貫く距離に比例し、かつビームがガウス分布に近い形状の場合のみである。例として図 38 に示す様に、ワイヤーが太く、ビームのほぼ全体覆う様な状況を考える。電子の散乱角は多重散乱で決まるので経路超が 2 倍になると、式 (22) より散乱角は $\sqrt{2}$ 倍となる（制動放射のガンマ線も多重散乱した電子から放出されるので影響は受けると考えられる）。したがって、ワイヤーの位置によって検出効率が変化してしまう。また、多くの測定点でワイヤーがビームの大半を覆ってしまうので、その点でも分解能が悪化する。少なくともワイヤーの半径をビームサイズと同程度以下にしたほうが良さそうである。

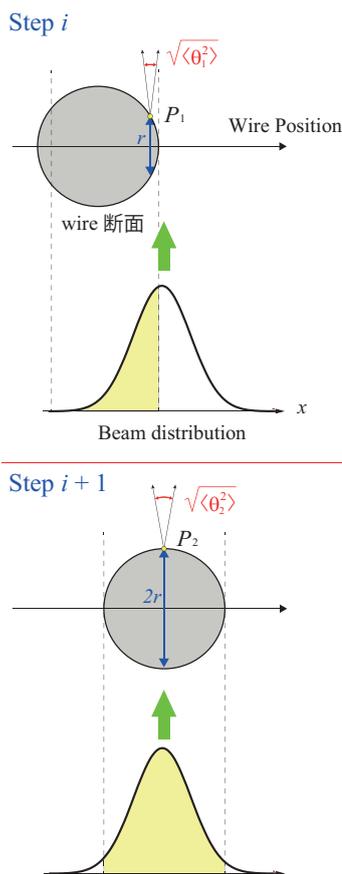


図 38: ビームの全幅と同程度のワイヤーをビームが通過した場合。

4.3 KEK 入射器のワイヤースキャナーシステム

KEK 入射器のワイヤースキャナーシステムと光ファイバーを用いた二次粒子検出について紹介する。

4.4 ワイヤースキャナー測定システム

KEK 入射器では二次粒子の検出にコア/クラッド径 600/660 μm の石英ファイバー（マルチモード）を利用している。二次粒子の信号を S/N 良く検出するため、光ファイバーはビーム軌道に近づけられる四極磁石を通るビームダクトまたは BPM に張られている（図 39）。光ファイバーで発生したチェレンコフ放射はクライストロンギャラリーに設置した光電子増倍管（PMT）が組み込まれた NIM モジュールに接続され、その出力を ADC で測定する。ビームモードによって電荷量もビームサイズも異なるため、ビームモードごとに適切な PMT ゲインを設定する必要があり、リモートからゲインを制御出来る。図 40 に示した写真はワイヤースキャナーの制御、信号読み出しシステムである。ワイヤーを駆動するステッピングモーターはパルスモーターコントローラーで制御し、ステッピングモータに送るパルスは同時にスケアラーに送信され、スケアラの計数からワイヤーの位置に換算する（4 $\mu\text{m}/\text{pulse}$ ）。ワイヤー制御とデータ収集は VME CPU 上の EPICS IOC で行っている。VME には BPM のシステムと同様にイベントレシーバが挿入されており、ビームモードの識別と ADC へのゲート信号の出力を行っている。

4.5 光ファイバーによる荷電粒子検出

光ファイバーはワイヤーで生成された電子またはガンマ線を効率良く検出出来るように四極電磁石（ダブレットまたはトリプレット全体を通す）中心のダクトに沿うように張られている。光ファイバーを使うメリットは

- ビーム軸近傍に敷設できる（大きな検出器は様々なコンポーネントが邪魔で良い位置に置けない）



図 39: 四極電磁石中心に張られた光ファイバー

- 信号強度が大きい(ビームダクトがコンバーター代わりになり、ビーム軸に近づけるため二次粒子も多く、ビーム軸から見た立体角も大きい)
- 放射線に強い
- 敷設、取り外しが容易

というメリットがある。石英ファイバーの荷電粒子検出への応用はその高い耐放射線性と高速な応答が注目され、もともとサンプリングカロリメータから始まった様である [40]。その後、加速器のロスモニターとして利用が広まり、KEK 入射器でも 2011 年ごろからロスモニターとして利用するための開発を始めた [41]。その後、ワイヤスキャナーの信号検出を非常に S/N 良く測定が出来ることが分かり [42]、それまでの PMT 単体で測定する方法から光ファイバーを利用した測定に変更した。

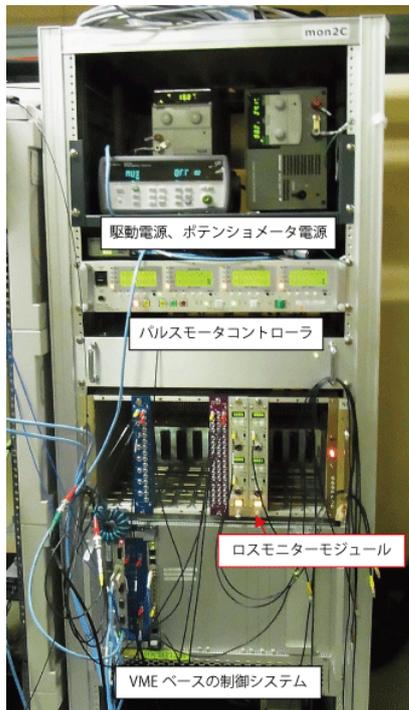


図 40: ワイヤスキャナー制御、データ読み出しシステム

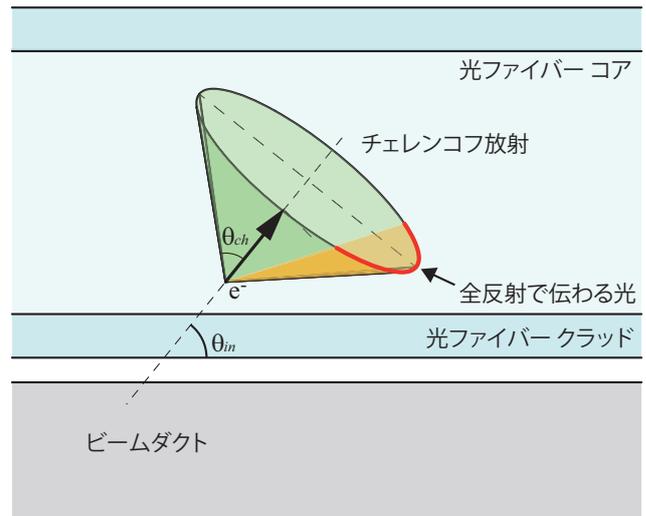


図 41: ファイバーに角度 θ_{in} で入射した電子がチェレンコフ放射を放射する様子

光ファイバーで荷電粒子を検出する条件を説明する。図 42 に示すようにビームダクトから電子が飛び出し、光ファイバーに入射した場合を考える。荷電粒子の速度が屈折率 n の媒質中(この場合は石英ファイバーのコア)の光の速度よりも早いときチェレンコフ放射が起こる。放射の角度 θ_{ch} は $\beta \approx 1$ のとき $\cos(\theta_{ch}) = 1/(\beta n)$ である。発生したチェレンコフ放射が PMT まで届くには

光ファイバーの中を全反射してこなければならぬ。簡単のため、図 42 に示す二次元の平面で単純化し、紙面右側に放出されたチェレンコフ放射が全反射する条件を考える。全反射の臨界角を θ_c とおくと、全反射の条件は $\alpha \geq \theta_c$ となる。上段 A、下段 B では α はそれぞれ $\alpha = \pi/2 - (\theta_{in} - \theta_{ch})$, $\alpha = \pi/2 - (\theta_{ch} - \theta_{in})$ となる。したがって、全反射となるための荷電粒子の入射角度 θ_{in} は

$$\theta_{ch} + \theta_c - \pi/2 \leq \theta_{in} \leq \theta_{ch} - \theta_c + \pi/2 \quad (32)$$

となる。光ファイバーのコアとクラッドの屈折率をそれぞれ 1.457, 1.440 とすると臨界角は 81° となり、全反射の条件は

$$38^\circ \lesssim \theta_{in} \lesssim 56^\circ \quad (33)$$

となる。この角度はワイヤーでの二次粒子の散乱角に比べて非常に大きい。したがって、ワイヤースキャナー測定で検出している信号はワイヤーで散乱された二次粒子がビームダクト等に当たり発生した二次粒子であると考えられる。

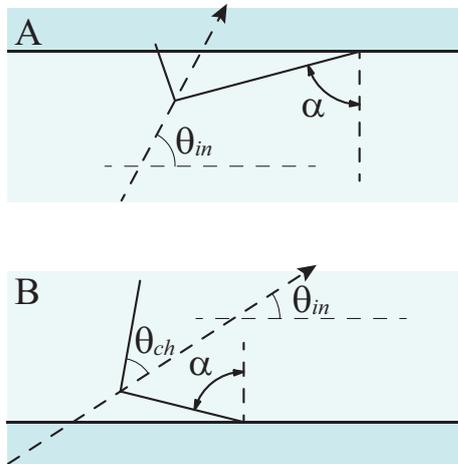


図 42: 平面で単純化した入射角度とチェレンコフ放射の角度

このことを EGS5 シミュレーションを用いて確認してみる。入射器 C セクターに設置されているワイヤースキャナーは 4.5 m 下流に光ファイバーが設置されている。はじめにエネルギー 1.7 GeV の電子ビーム (ワイヤーで多重散乱したと仮定)

が 4.5 m 下流で半径 9 mm、厚さ 2 mm の円環ビームダクト (鉄) に衝突するシミュレーションを行った。図 43 はダクトから放出された電子・陽電子の角度分布である。入射した 5000 イベントのうちチェレンコフ放射が光ファイバーを通じて観測されるのは角度 $38\text{--}56^\circ$ に放出された約 16000 個で、入射電子の約 3 倍の量の荷電粒子が観測出来ること分かる。次にダクトに当たったのがガンマ線の場合を考える。制動放射のガンマ線のエネルギーは 10 MeV 以下が大半を占めるので一例として 10 MeV のガンマ線がダクトに当たったシミュレーションを行った。図 44 に電子と陽電子の角度分布を示す。検出される荷電粒子の数は入射したガンマ線 (10 MeV) の約 4% で、多重散乱の電子に比べると 1/100 オーダーと非常に少ない。制動放射のガンマ線の平均的なエネルギーは散乱電子に比べずっと低いため、ダクトで生成される二次粒子が少ないことが分かる。ワイヤーと検出

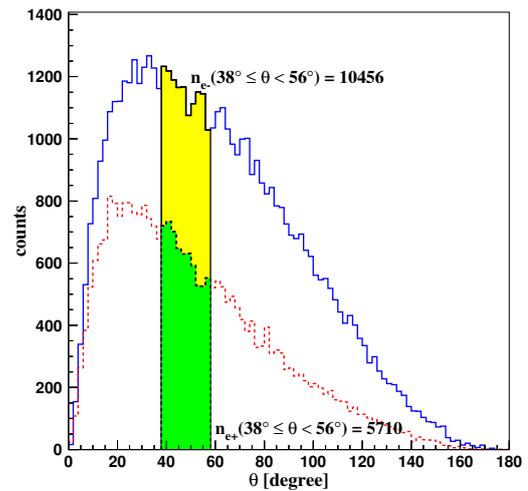


図 43: 1.7 GeV の電子 5000 個が厚さ 2 mm の鉄に対してほぼ平行 ($\theta = \tan^{-1}(9/4500)$) に入射した際にダクト表面から放出される電子 (実線)、陽電子 (破線) の角度分布

器の間に偏向電磁石がある場合は、散乱された電子も曲げられてしまうので、その場合はガンマ線がビームダクトやチャンパーに入射して生成された二次粒子を検出することになる。図 45 に 5 セ

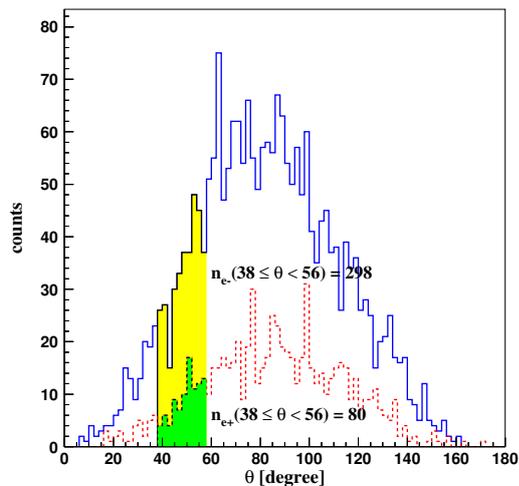


図 44: 10 MeV のガンマ線 5000 個が厚さ 2 mm の鉄に対してほぼ平行 ($\theta = \tan^{-1}(9/4500)$) に入射した際にダクト表面から放出される電子 (実線) 陽電子 (破線) の角度分布

クター下流のワイヤースキャナー (4 台のうち下流側の 2 台) と光ファイバーの位置関係を示す。ワイヤースキャナーと光ファイバーの間にはパルス偏向電磁石が設置されており、PF 用のビームはここで曲げられるためワイヤースキャナーで散乱された電子は光ファイバーまで届かない。HER 入射と PF 入射の電子ビームのサイズをワイヤースキャナーで測定した様子を図 46 に示す。HER 入射の測定では信号はワイヤーで散乱した電子が多くを占めるが、PF 入射時の信号は制動放射のガンマ線が元となっている。

ワイヤーで散乱した二次粒子の角度はほぼ前方に集中しているため、ダクトは実効的に厚みのある物質となるので、ワイヤーで生成された二次粒子よりもそれらがダクトで生成した二次粒子が圧倒的に多い。ダクト内側の 1 点に電子またはガンマ線が入射したときダクトから放出された荷電粒子の位置の分布はどうなるだろうか? 荷電粒子が放出された位置の分布をそれぞれ図 47 (1.7 GeV の電子が入射した場合), 図 48 (10 MeV のガンマ線が入射した場合) に示す。どちらの場合も入射した位置 ($z = 0$) から 150 mm 程度後方まで

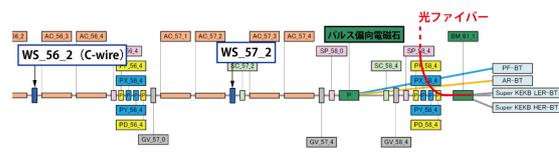


図 45: KEK 入射器 5 セクター下流のレイアウト。PF、PF-AR 入射ビームはパルス偏向電磁石で PF BT、AR BT へ導かれる。ワイヤースキャナーの 2 次粒子検出用の光ファイバーは HER、LER ビーム振り分けの偏向電磁石内のチャンバーに沿う様に張られている。

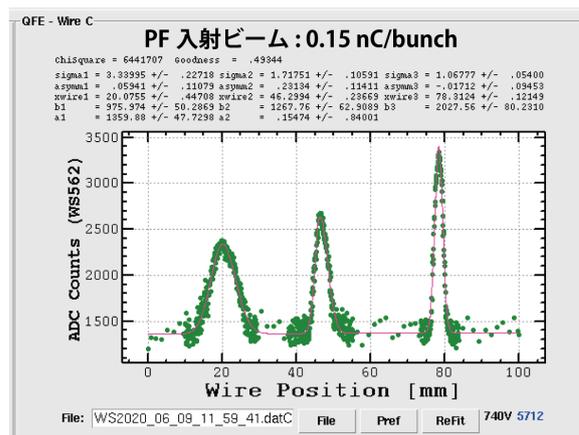
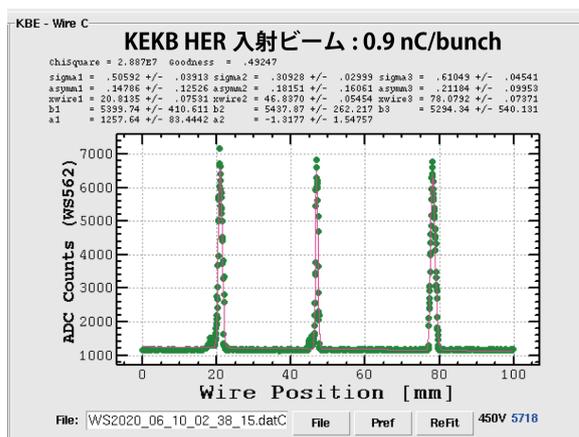


図 46: C-wire (WS.56.2) を用いたビームサイズ測。上段は HER 入射用の電子ビーム、下段は PF 入射用のビームサイズ測定の結果である。

の数が多く、その先もだらだと分布が伸びていることが分かる。光ファイバーは数十 cm 程度ダクトに沿うように張ると高い信号が得られる（ワイヤースキャナー位置でのビームのエネルギー、ダクトの厚みによる）。なお、このことは光ファイバーをロスモニターとして使用したときピンポイントでロスの場所を特定出来ないことを意味する。さらにビームロスの発生位置はその場所、あるいはそこから上流のどこか（ワイヤースキャナーの場合は光ファイバーより数メートル上流）ということになる。

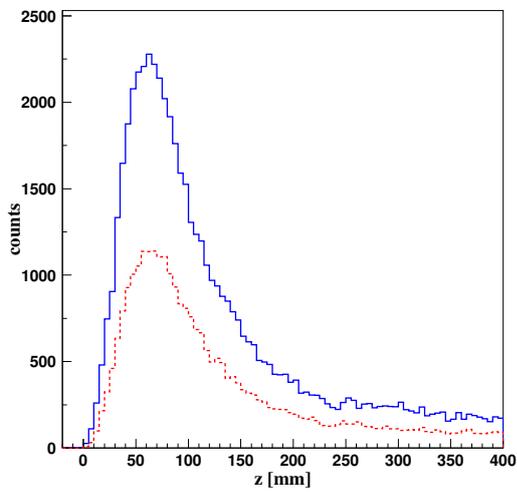


図 47: 1.7 GeV の電子が厚さ 2 mm のダクトの一点に入射した際の位置を $z = 0$ したとき、放出された二次粒子（電子・陽電子）の位置の分布。実線は電子、破線は陽電子の分布を表す。

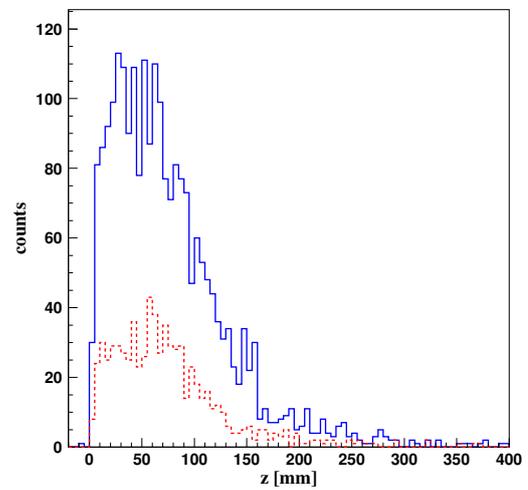


図 48: 10 GeV の電子が厚さ 2 mm のダクトの一点に入射した際の位置に放出された二次粒子（電子・陽電子）の位置の分布。実線は電子、破線は陽電子の分布を表す。

4.6 スクリーンモニター

入射器のスクリーンモニターは最近まで分厚いアルミナ蛍光板（デマルケストとも呼ばれる）と市販のCマウントレンズにエクステンダーレンズをつけたカメラでビーム非同期の測定をするというかなり時代遅れの仕様だった。2018年ごろから徐々にスクリーンの材質変更や光学系の改良を進めている。ここでは著者と同じ初心者がお手軽にそこそこ（数十マイクロン）の分解能をもつ光学系を構築する際に役立つ（かもしれない）内容を紹介する。スクリーンの光学系の構築に必要な基本的なことは過去のOHO[8]に良くまとめられている。さらに分解能が必要な場合や光学系についてちゃんと学びたい場合は論文や教科書を読んで下さい。また、加速器の環境で悩ましい放射線の問題についても紹介する。

4.6.1 入射器のスクリーンモニター

現在、KEK入射器のスクリーンモニターは

- ビームとの同期測定
- ビームサイズ $\sigma \approx 100 \mu\text{m}$ を十分測定可能な分解能（ダンピングリング下流の陽電子ビームは数十マイクロンであるがこれは別に検討）
- 光量に対する広いダイナミックレンジ（1/20 ~ 1倍）
- カメラをちゃんとシールドする、カメラのハングアップへの対応

という仕様を満たす様に設計している。スクリーンの材質は、デマルケスト、YAG:Ce結晶、遷移放射（optical transition radiation:OTR）測定用にアルミを蒸着したシリコンウェーハの3種類を使い分けている。

アルミナ蛍光板は酸化アルミニウム（ Al_2O_3 ）の粉末に酸化クロム（ Cr_2O_3 ）を添加して焼結して作られる。耐放射線性が高く、少ない電流でも良く光るので加速器施設ではスクリーンモニターの材料として良く用いられている。粉末を焼結しているため、ビームによる発光が内部で乱反射して分解能が悪化するため、高分解能の測定には向か

ない。厚さ $100 \mu\text{m}$ のアルミナ蛍光板と YAG:Ce や OTR を比較する実験を行ったが、ビームサイズが $200 \mu\text{m}$ 程度の場合はビームサイズの評価に影響は無かった（ただし2次元のプロファイルは YAG:Ce や OTR に比べてぼやけて見えた）[43]。ビーム通過から数ミリ秒以経過しても十分発光を確認できるほど発光が長く続くためカメラの露光時間で発光量に対するダイナミックレンジを調整できるので使い方によっては便利である。ただし、発光時間が長いためビーム繰り返しが高い場合に前のビームの残光が測定に影響を与えてしまう。また発光が安定しない[43]という問題もある。KEK入射器では古くからあるスクリーンモニターは全てアルミナ蛍光板である。高分解能の測定には向かないが、J-Arc 部中央（分散関数が 0.85 m ）のスクリーンはエネルギー広がりにより水平方向のビームサイズが RMS で 1.5 mm 以上になることや、調整のため各ビームモードで頻繁に挿入することから厚さ 0.1 mm のアルミナ蛍光板を意図的に使用している。また、放射線が多く大電荷量のビームを可能な限り収束した状態でビーム形状確認を行う陽電子標的直前のスクリーンモニターでもアルミナ蛍光板を採用した。発光波長は 694 nm に Cr^{3+} によるピークがあるが、その両側の $650 \sim 750$ の範囲にも発光がある。可視光用に設計されたアクロマティックレンズなどは 700 nm 以下で最適化されているため、 700 nm 以上の波長の光による色収差を避けたい場合はバンドパスフィルターを利用すると良い。

YAG:Ce 結晶は発光波長が 550 nm 、減衰時間が 70 ns で発光量が NaI 100 に対して 17 程度と明るいシンチレータである。耐放射線性も強いことから多くの加速器施設で良く使われている。KEK入射器では厚さ $100 \mu\text{m}$ の結晶を使用しており、電子銃下流から 1.5 GeV 程度のエネルギーの比較的低い領域に設置している。ピント調整とスケール較正のため、四隅に穴を開けている。超短バンチビームではコヒーレント遷移放射が問題となる[8]、がシンチレーション光はこの影響を受けない。シンチレータを通過したビームの発光を斜めから見ると、ビームが通過した各点から丁度観測者の方向へ屈折して来る光の分だけビームサイズが大きく観測される。ビームに対するスクリーンの角

度、観測方向を最適化して光学系を工夫(シャインブルーフの原理と呼ばれる手法を利用すると平面上の任意の点でピントが合った状態に出来る)すると非常に小さいビーム($\sigma = 16 \mu\text{m}$)でも OTR と遜色ない測定が出来ることが報告されている [44]。スクリーンにシンチレータを用いる場合は、発光の飽和に気をつける必要がある。YAG:Ce の場合、100 MeV の電子ビームではビームの密度が $0.004 \text{ pC}/\mu\text{m}^2$ 付近から飽和が始まることが報告されている [45]、我々の測定でも 1.5 GeV の電子ビームで $1 \text{ nC}/\text{mm}^2$ 付近でも飽和を確認した [43]。

OTR は cERL のスクリーンを参考にシリコンウェハー表面に 40 nm のアルミ膜を形成したものを使用している。レーザーマーキング処理でアルミ膜を剥離し、ピント調整とスケール較正用のケガキを入れている。OTR は結晶シンチレータの様な厚みの影響を受けず、光学系の分解能でビームサイズが測定出来るが、光量が低いことと、放射が $\sim 1/\gamma$ の角度広がりしか持たないため、光学系のアライメントがずれていると光量が小さくなったり、観測出来ないことがある。OTR の光はマイクロ波から X 線領域まで非常に広いスペクトルを持つ。通常の CCD や CMOS カメラ場合、波長 400 ~ 1000 nm 程度に感度を持つので可視光の光学系をそのまま使うと色収差で分解能が悪化してしまうため、バンドパスフィルターが必要である。KEK 入射器では現在 C, 3, 5 セクターに計 3 台が設置してある。

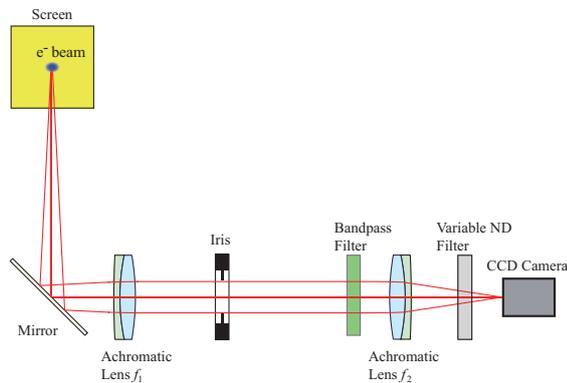


図 49: 入射器のスクリーンモニター概略図

入射器のスクリーンモニターの光学系の概略を

図 49 に示す。スクリーンはビームに対して 45° 傾いて設置されており、ビューポートの位置が下向きの場合一度ミラーで反射して測定している。光学系は焦点距離がそれぞれ f_1, f_2 の 2 枚のクロマティックレンズとバンドパスフィルター、ND フィルターで構成されている。光学系の倍率は f_2/f_1 となる。アクロマティックレンズ 2 枚の構成は間が平行光となるため距離を自由に変わらされるため、放射線の発生源から遠ざけることが出来、遮蔽の自由度も上がる。またレンズの間に光学フィルターを設置出来るメリットがある(同じメーカーの規格品ならフィルター類はレンズにホルダーごと付けられる)。KEK 入射器は PF, PF-AR 入射の $0.3 \text{ nC}/\text{bunch}$ から陽電子生成用の $15 \text{ nC}/\text{bunch}$ まで広いダイナミックレンジを確保する必要があることと、Q スキャンによるエミッタンス測定でビーム収束時にカメラの CCD が飽和しないように YAG:Ce, OTR スクリーンでは可変の ND フィルターを設置している。カメラは GigE 対応の外部トリガー入力で動作する CCD カメラ GC650 (セルサイズ $7.4 \mu\text{m}$, 分解能 659×493 , A/D 12 bit) と GC1020 (セルサイズ $4.65 \mu\text{m}$, 分解能 1024×768 , A/D 12 bit) の 2 種類を使用しており、必要な分解能に合わせて使い分けている。ビーム運転中は CCD カメラがハングアップすることがしばしば起こる(放射線によるメモリ素子のビット情報反転が原因と思われる)。そこでカメラの電源はリモート制御可能な 100 V の電源に接続し、操作できなくなった場合は電源の OFF/ON で復帰させている。図 50 に実際の光学系の一例を写真を示す。ここでは直径 25.4 mm、焦点距離 500 mm と 125 mm のアクロマティックレンズの構成で 1/4 倍の光学系となっている。各光学部品は光学レールに固定されており、容易に調整が可能である。リボルバー型の装置が複数の ND フィルターをおさめた可変の ND フィルターとなっている。

スクリーンでビームサイズ測定で使う場合、分解能を把握しておく必要がある。光学系の分解能は USAF1951 分解能テストターゲットと呼ばれるものを使うと簡易的に知ることが出来る。テストターゲットには縦、横 3 本線の組が引いてあり、この線が異なるサイズごとに用意されており、-2



図 50: 入射器のスクリーンモニター

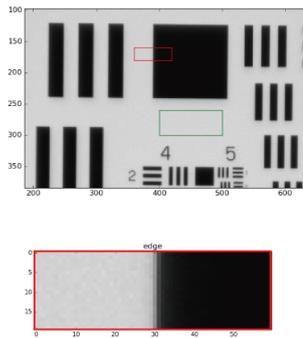


図 51: USAF1951 テストターゲットの一部を拡大した図

~7の10グループに1~6のエレメントの計100通りの3本線の組みがある。分解能の限界を超えるとこの3本の線が2本の線に見えたり、3本の線がひとつの太い線に見えたりする。分解能は3本の線が区別出来る最後のグループ、エレメントで与えられ、換算表が用意されている。図51にその一部を示す。ここでは印字された4の下の2の右側に見える6本の線の組がグループ4, エレメント2に対応し、分解能は1mmの間隔に引かれた17.95本のラインペアが区別出来る、つまり $1000 \text{ mm} / (17.95 * 2) = 27.86 \mu\text{m}$ が識別出来る分解能を意味する。レンズ直径25.4mm、焦点距離400, 125mm、CCDカメラのセルサイズが $4.65 \mu\text{m}$ の光学系では50に示したセットアップではグループ6, エレメント2まで識別可能でこれは約 $7 \mu\text{m}$ に対応する。この方法は簡易的に分解能を知るには便利ではあるが、目視による確認が必要であることなどからレンズ-スクリーン間の距離と分解能などを評価するには不便である(KEK入射の場合、スクリーンが 45° 傾いているので中心にピントを合わせても傾き方向は焦点から前後するので徐々に像がぼけていく)。そこで簡単な画像解析だけで簡単に解析する方法で分解能を評価している。図51の赤色の枠を拡大した部分を同図の下に示している。ここは分解能が十分高ければきれいなエッジが見えるはずであるが、グラデーションがかかった様にぼやけていることがわかる。この境界部分を用いて分解能を評価する。そこでこの部分をうまく評価できる関数を探す。本来、結像のぼやけ具合は点広がり関数と呼ばれる点光源に対する応答関数の重ね合わせで決まるようであるが、実際にこれを使うのは難しい。異なる場所からの光は互いに干渉しあう。干渉や共鳴などではよくコーシー(またはブライトウィグナー)分布が出てくるのでそれを試してみる。エッジ部分の像が一次元の線がコーシー分布で広がった像の重ね合わせと考えると、エッジ部分は

$$F(x) = a \int_{-\infty}^{\infty} f(t) dt + c \quad (34)$$

$$= \frac{a}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{x-u}{\Gamma} \right) + c \quad (35)$$

で表せるはずである。ここで $f(x)$ はFWHM Γ

のコーシー分布

$$f(x) = \frac{1}{\pi} \frac{\Gamma}{(x-u)^2 + \Gamma^2} \quad (36)$$

を表す。何も写っていない白色の領域の平均を ADC のペダスタル値として横軸に位置 (pixel)、縦軸に 1 ピクセルの短冊の ADC 値の平均をとったデータに式 (35) をフィットした様子を図 52 に示す。この関数は良くデータを再現できている事が分かる。フィットで得た FWHM は $6.9 \mu\text{m}$ であった。光学系の回折限界 s は波長 λ と開口数 N を用いると $s = \kappa \frac{\lambda}{NA}$ で与えられる。 κ は結像の条件に依存し、 $0.5-1$ の間の値をとる。通常使われる $\kappa = 0.61$, $\lambda = 0.5 \mu\text{m}$ で計算すると $s = 9.6 \mu\text{m}$ でフィットの値に近く、回折限界が分解能を決めていると考えられる (CCD カメラのセルサイズを 4.65 から $7.4 \mu\text{m}$ に変更すると分解能は $12 \mu\text{m}$ 程度まで悪化する)。次にターゲットを移動ステージに乗せ、移動したときにどれだけ分解能が悪化するか調べた。図 53 にレンズとテストターゲットまでの距離の変化と分解能の関係を示す。ピン트가あった状態から 4mm ずれた位置では分解能が $40 \mu\text{m}$ 程度まで悪化することが分かる。

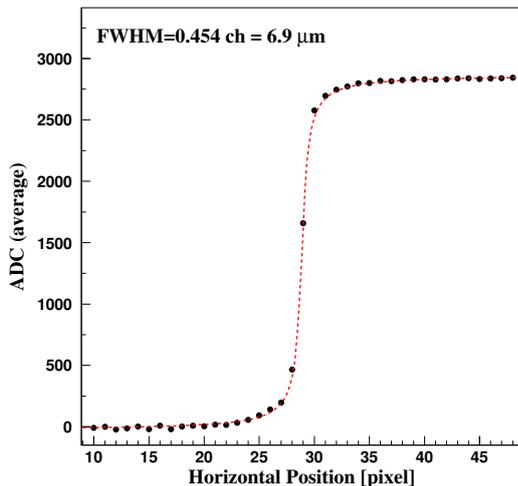


図 52: USAF 1951 ターゲットのエッジ付近の位置と ADC 値。赤色の破線は式 (35) をフィットした様子を表す。

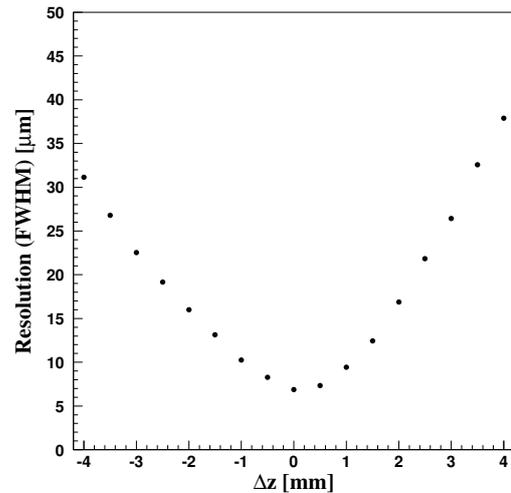


図 53: 焦点からのずれ Δz と分解能。焦点距離 f_1 の対物レンズまでの距離はピン트가あった位置を $z = 0$ とすると $f_1 + \Delta z$ である。

4.6.2 CCD カメラの放射線損傷と電子加速器内の放射線

スクリーンの挿入に伴う二次粒子または定常的なビームロス、加速管の暗電流起源の放射線、放射化した物質からの放射線など、加速器近傍に設置したカメラは放射線に晒される。放射線による損傷が蓄積すると CCD が損傷して白点が増えたり (一見、正常に見えても露光時間を増やすとダメージを受けているピクセルが見えてくる)、カメラの制御系の半導体が損傷して故障する。また加速器運転中にカメラがハングアップすることがあるが、これも放射線が原因と考えられる。

では半導体の中で何が起きているのだろうか? 放射線により半導体の Si 原子にエネルギーが付与されると Si 原子が弾き飛ばされ、格子欠陥 (空孔) が生じ (Displacement) 欠陥準位を形成して半導体の特性が劣化する。Si 原子 1 個をはじき飛ばすのに必要なエネルギーのしきい値は $\sim 25 \text{ eV}$ 程度のものである [46]。Displacement に必要なしきい値をみると、中性子の弾性散乱の場合は 185 eV 、中性子捕獲反応の場合は $^{28}\text{Si}(n,\gamma)^{29}\text{Si}$ 反応で 1 keV 以上の反跳原子が生成されるため、 25 eV

を有に超えている。電子の場合は ~ 260 keV 以上で displacement を起こす [47, 48, ?]。ガンマ線の場合はコンプトン散乱で 260 keV 以上の電子を生成すれば displacement を起こすことになる。ワイヤースキャナーの説明で紹介した例を見ても、電子加速器でさえ厳しい環境であることは想像がつく。参考文献 [49] によると放射線損傷が蓄積すると CCD カメラに白点が生じるが、そのしきい値は表 1 の様になる。影響は高速中性子、熱中性

表 1: CCD に白点を作るのに必要な放射線の照射量

放射線	1 個の白点を作るのに必要な照射量
高速中性子	7.7×10^3 [1/cm ²]
熱中性子	8.8×10^4 [1/cm ²]
ガンマ線	7 [mSv]

子、ガンマ線の順になる。KEK 入射器でも CCD カメラ周辺でバッジを用いた簡易的な測定を試みたことがあるが、2 週間の運転でガンマ線は 200 ~ 1500 mSv、中性子は飽和して測定出来ないという結果となった。CCD カメラの損傷を抑えるためにはガンマ線だけでなく中性子の遮蔽が重要であると思われる。

また、KEK 入射器では古い S-band 加速管の暗電流起源の放射線も多いことがわかってきている。KEKB 時代から使用していた 2m S-band 加速管数本と新品の加速管についてで入力電圧 35 MW (~ 30 MV/m 相当) 繰り返し 50 Hz、パルス幅 750 ns の試験を 30 分間行ったところ暗電流の多い加速管では数 Sv/h に達する場所があることが分かった [50]。加速管の位置ごとに測定した放射線量を図 54 に示す。加速管全体から放射線が放出され、出口付近では数 Sv/h に達することが分かる。新品の加速管では放射線がほとんど観測されなかったことから長期間の運転によるダメージで電界放出が頻発する様になったと考えられる。特に古い加速管がある場合は、CCD カメラや他の半導体機器の遮蔽は加速管からの放射線も考慮に入れたほうが良さそうである。

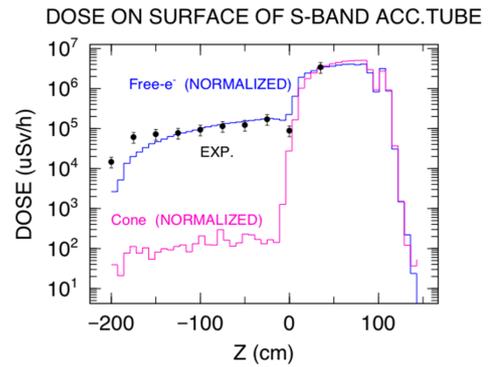


図 54: 加速管に線量計を貼りつけて測定した線量当量率。横軸は加速管出口を 0 としたときの位置を表す。青色のヒストグラム (Dark Current Simulation) は加速管のアイリスから電界放出があるモデル、紫色のヒストグラムは加速管の入り口からエネルギーに応じてコーン状に電子が放出されるモデルである。

5 まとめ

KEK 入射器で使用しているストリップライン型 BPM とワイヤースキャナー、スクリーンモニターを参考に各モニターの基礎的な性質をまとめた。ここに書かれた内容は確認が不十分な点が多々ある。間違いがあるという疑いをもち読んでいただいたほうが良いかと思う。それでもどなたかの役に立てれば幸いです。

謝辞

KEK 入射器の BPM 信号読み出し回路は SLAC の Steve Smith 氏、Andrew Young 氏からとても多くの情報とアドバイスを頂きました。二人の協力なしには完成することは出来ませんでした。また KEK の飛山氏にも多くの助言をいただきました。また回路の実装、試験に関しては山田恭介氏（元デジテックス研究所）VME IOC の実装は関東情報サービス 早乙女秀樹氏に多くの協力をいただきました。また回路の完成まで中心となって開発を行った一宮亮氏に深く感謝します。

スクリーンモニター開発では JASRI 柳田 謙一氏には右も左も分からない初心者に分かりやすく具体的なアドバイスを頂き、とても助かりました。KEK 高井 良太氏には cERL のスクリーンモニターや OTR スクリーン製作に関する具体的な情報を頂きました。他にもたくさんの方から多くのサポートをいただきました。本当にありがとうございました。

参考文献

- [1] 家入孝夫. ビーム計測. *OHO1991*, 1991.
- [2] 日出富士雄. 高分解能 BPM. *OHO1995*, 1995.
- [3] 諏訪田剛. ビーム計測 I. *OHO2002*, 2002.
- [4] 本田洋介. ナノビーム診断. *OHO2006*, 2006.
- [5] 飛山真理. 電子加速器のビームモニター概要 ~ 電氣的モニター ~. *OHO2008*, 2008.
- [6] 外山毅. ビームインストルメント. *OHO2009*, 2008.
- [7] 林直樹. ビームモニター 1: ビーム位置モニター. *OHO2010*, 2010.
- [8] 前坂比呂和. 高精度ビーム診断. *OHO2013*, 2013.
- [9] 久保木浩功. 陽子ビームモニター. *OHO2018*, 2018.
- [10] 平松成範. 加速器のビームモニター. *KEK Internal 2004-4*, 2004.
- [11] P. Forck, P. Kowina, and D. Liakin. Beam position monitors. 2009.
- [12] Kieffer, et al. Direct observation of incoherent Cherenkov diffraction radiation in the visible range. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 121, p. 054802, Aug 2018.
- [13] Lefèvre, et al. Cherenkov diffraction radiation as a tool for beam diagnostics. In *Proceedings of 8th International Beam Instrumentation Conference*, 2019.
- [14] CST Studio Suite. <http://www.globus.org/toolkit/>.
- [15] T. Suwada. Numerical design analysis of energy-spread monitor using multi-stripline electrodes. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol. 61, No. 2, pp. 808–816, 2014.
- [16] T. Kamitani. Injector status: Positron source upgrade. 2014.
- [17] Robert E. Shafer. Beam position monitoring. In *Proceedings of AIP Conference*, Vol. 249, pp. 601–636, 1992.
- [18] 諏訪田剛. ストリップライン型 bpm における電極加工法と特性インピーダンスの評価. In *Proceedings of the 11th Annual Meeting of PASJ*, 2014.
- [19] K. Satoh and M. Tejima. Recalibration of position monitors with beams. In *Proceedings of Particle Accelerator Conference*, pp. 2482–2484, 1995.
- [20] 手島昌己, 外山毅, 花村幸篤. J-PARC 3-50 BT のビーム位置モニタの測定精度の改善. In *Proceedings of the 10th Annual Meeting of PASJ*, 2013.
- [21] M. Satoh, et al. EPICS IOC of WindowsXP-based oscilloscope for fast

- BPM data acquisition system. In *Proceedings of ICALEPCS2009*, pp. 567–569, 2009.
- [22] Micro-Research Finland Oy. Timing system. <http://www.mrf.fi/index.php/timing-system>.
- [23] 一宮亮, 諏訪田剛, 佐藤政則, 宮原房史, 古川和朗. SuperKEKB に向けた高位置分解能 linac bpm 読み出しシステムの開発. In *Proceedings of PASJ2014*, pp. 427–431, 2014.
- [24] R. Ichimiya, et al. High position resolution and high dynamic range stripline beam position monitor (BPM) readout system for KEKB injector linac towards the SuperKEKB. In *Proceedings of IBIC2014*, pp. 637–641, 2014.
- [25] F. Miyahara, et al. High position resolution BPM readout system with calibration pulse generator for KEK e⁺/e⁻ Linac. In *Proceedings of IBIC2015*, pp. 369–372, 2015.
- [26] C. Xu, et al. Design of an ultra-compact stripline BPM receiver using MicroTCA for LCLS-II at SLAC. 2013.
- [27] Richard G. Lyons. *Understanding Digital Signal Processing*. Pearson, 1996.
- [28] 夏井拓也. 入射器の概略・全体 (1)(2). *OHO2019*, 2019.
- [29] 梶裕志ほか. Event timing system による superkekb 入射制御. In *Proceedings of the 10th Annual Meeting of PASJ*, 2013.
- [30] 榎本嘉範. パルスマグネット. *OHO2019*, 2019.
- [31] H. Katagiri, et al. RF monitoring system for SuperKEKB injector Linac. In *Proceedings of IPAC2018*, pp. 2128–2130, 2018.
- [32] EPICS. <https://epics.anl.gov/>.
- [33] 榎本嘉範. 陽電子源. *OHO2019*, 2019.
- [34] T. Suwada, M. Satoh, and K. Furukawa. Nondestructive beam energy-spread monitor using multi-strip-line electrodes. *Phys. Rev. ST Accel. Beams*, Vol. 6, p. 032801, Mar 2003.
- [35] T. Suwada, M. Satoh, and K. Furukawa. New energy-spread-feedback control system using nondestructive energy-spread monitors. *Phys. Rev. ST Accel. Beams*, Vol. 8, p. 112802, Nov 2005.
- [36] 諏訪田剛. ビーム計測 II. *OHO2002*, 2002.
- [37] 佐藤健一郎. ビームプロファイルモニタ. *OHO2010*, 2010.
- [38] EGS5. <http://rcwww.kek.jp/research/egs/egs5.html>.
- [39] Gerald R. Lynch and Orin I. Dahl. Approximations to multiple Coulomb scattering. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, Vol. 58, No. 1, pp. 6 – 10, 1991.
- [40] Ph. Gorodetzky, et al. Very hard radiation resistant and ultra-fast calorimetry. *Radiation Physics and Chemistry*, Vol. 41, No. 1, pp. 253 – 261, 1993.
- [41] 矢野喜治ほか. 光ファイバービームロスモニターの開発. In *Proceedings of the 8th Annual Meeting of PASJ*, 2011.
- [42] 矢野喜治, 福田茂樹, 道園真一郎. 光ファイバビームロスモニタとワイヤスキャナ. In *Proceedings of the 12th Annual Meeting of PASJ*, 2015.
- [43] F. Miyahara, et al. Experimental tests of screen materials for high-precision transverse beam size measurements at the SuperKEKB Injector Linac. In *Proceedings of IBIC2019*, 2019.

- [44] Rasmus , Eduard Prat, Vincent Thominet, and Cigdem Ozkan Loch. Transverse profile imager for ultrabright electron beams. *Phys. Rev. ST Accel. Beams*, Vol. 18, p. 082802, Aug 2015.
- [45] A. Murokh, et al. Limitations on the resolution of YAG:Ce beam profile monitor for high brightness electron beam. In *Proceedings of the 2nd ICFA Advanced Accelerator Workshop*, 1999.
- [46] M. Moll. Radiation damage in Silicon detectors - an introduction for non-specialist -. 2001.
- [47] F. H' Dlts measurements of radiation induced defects in epitaxial and mcz silicon detectors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 583, No. 1, pp. 104 – 108, 2007. Proceedings of the 6th International Conference on Radiation Effects on Semiconductor Materials, Detectors and Devices.
- [48] G. Lindstoem. Radiation damage in silicon detectors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 512, No. 1, pp. 30 – 43, 2003. Proceedings of the 9th European Symposium on Semiconductor Detectors: New Developments on Radiation Detectors.
- [49] R. Pugliesi, et al. Study of pixel damages in CCD cameras irradiated at the neutron tomography facility of IPEN-CNEN/SP. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 804, pp. 59 – 63, 2015.
- [50] 岩瀬広. private communication, August 2020.