

## DEVELOPMENT OF OPTICAL-FIBER BEAM-LOSS MONITOR

Yoshiharu Yano<sup>#A)</sup>, Shinichiro Michizono<sup>A)</sup>, Shigeki Fukuda<sup>A)</sup>, Shinji Ushimoto<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup>High Energy Accelerator Research Organization

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801 Japan

<sup>B)</sup>Mitsubishi Electric System & Service Co. Ltd.

2-8-8 Umezono, Tsukuba, Ibaraki, 305-0045 Japan

### Abstract

We developed an arc sensor with high sensitivity from 2007. When we evaluated the arc sensor installed into the cavity coupler located in the beam tunnel, we found that an arc sensor reacted to beam loss sensitively. It is because Cherenkov light occurs in the optical fiber by the charged particle. This means that we can detect the state of the beam loss by observing the Cherenkov light. We set up large-diameter optical fiber on an acceleration pipe and a vacuum duct. We observed light from optical fiber by photomultiplier tube (PMT). When we observed light from the upstream, we can identify the point of the beam loss in position resolving power of 8.3 nsec/m. We observed beam loss at various points of the Linac.

## 光ファイバービームロスモニターの開発

### 1. はじめに

2007年から高感度のアークセンサーを開発してきたが、2010年にKEKBのARES空洞入力カプラーでアークセンサーの運用試験を行った時ビームロスによる荷電粒子に敏感に反応しアークセンサーとしての使用には対策が必要である事がわかった。この光は、ビームロスによって発生した荷電粒子が光ファイバーの中を通過する時に発生するチェレンコフ光である<sup>[1]</sup>。その後アークセンサーとして使用するための対策をLinacのビームを使って検証して来た。検証の結果、大口径の純粋石英光ファイバーと高電子増倍管(PMT)の組合せは非常に感度の高いビームロスモニターとして利用出来る事が分かった。さらに感度を上げれば加速管フィールドエミッションの発生状況を観測しフィールドエミッションの多い加速管の特定をする事が出来る。

### 2. チェレンコフ光

#### 2.1 チェレンコフ光

チェレンコフ光とは荷電粒子が媒質の光速を超える速度で媒質中を通過する際に発する光である。真空中の光速を $c$ 、光の波長を $\lambda$ 、媒質の屈折率を $n(\lambda)$ とすると媒質中の光速は $c_{\text{mid}}=c/n(\lambda)$ で表される。荷電粒子の速度 $\beta c$ がこの媒質中の光速を超える $\beta > 1/n(\lambda)$ の条件下でチェレンコフ光は発生する。このチェレンコフ光の輻射される角度は荷電粒子の進行方向からの角度を $\theta c$ とすると $\cos(\theta c)=1/(\beta n(\lambda))$ の条件を満たしている。純粋石英光ファイバーの屈折率 $n(\lambda)$ は約1.5であるから放射角 $\theta c$ は約 $50^\circ$ である。

#### 2.2 光ファイバー中のチェレンコフ光

ビームダクトに沿わせて設置した光ファイバーか

ら出てくる信号を考える。Linacのビームはほぼ光速でかつ十分短いバンチ長(2 ns以下)でダクトの中を移動している。ビームの一部がダクトにあたる様なビームロスが起きた場合その発生箇所は光速(3.3 nsec/m)で下流方向に移動して行く。またビームロスにより発生した荷電粒子はシャワーを作りダクトの外に出て光ファイバーを通過して行く。一方、光ファイバー中の光速は約5 nsec/mであるから1 m離れた箇所で発生した2つの光は上流から観測すると8.3 nsec、下流から観測すると前後の位置が入れ替わった2.7 nsecの間隔を置いて見える。ビームロスした粒子は下流方向に出て行くので下流から観測した場合の方が遥かに光の強度は高いがチェレンコフ光の放射角は $50^\circ$ と大きいので上流側に出る光もある。それを観測出来れば8.3 nsec/mの位置分解能でビームロスの発生箇所を特定することが出来る。

### 3. ビームロスモニター

#### 3.1 ビームロスモニター

PMT(H6780;浜松フォトニクス)4個をNIMモジュールに組込んだものとコア径600  $\mu\text{m}$ の純粋石英光ファイバーを組合せたものが光ファイバービームロスモニターである。

#### 3.2 入射器最下流の貫通孔からの観測

電子陽電子入射器のクライストロンギャラリと加速管室の間にはケーブル、導波管、真空引きのダクト等を通す貫通孔が数多くある。観測に使用した貫通孔は入射器の最下流にありビームを振り分けるパルス電磁石(BM\_58\_1)から5 mほど下流に位置する。図1に観測に使用した貫通孔の写真を示す。

貫通孔から光ファイバーのループを覗かせる方法と2本の光ファイバーを使う方法で観測した結果BM\_58\_1の方向に発生源(ビームロス)がある事が分かった。

<sup>#</sup> yoshiharu.yano@kek.jp

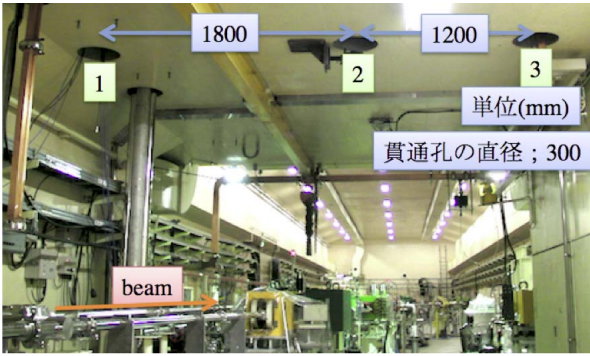


図 1: 観測用貫通孔

### 3.3 ダクトに設置した光ファイバーで観測

空間に複数本の光ファイバーを設置しそれらの信号の波形と時間差を計測する事でビームロスの発生源をある程度予測する事が出来た。しかし、2.2 で示したように真空ダクトや加速管に光ファイバーを張付けて上流側から観測するとビームが真空ダクトに当たっている場所の特定が可能である。

#### 3.3.1 AC\_C7~C8 ユニット間のビームロス

かつて C7 ユニットの加速管 AC\_C7 のかわりに電子銃 (CT-GUN) があり 2009 年に現在の形に改造され収束用ソレノイド磁石があった場所がストレートセクションになっている箇所がある。図 2 にその場所の写真を示す。そこは運転後の放射線サーベイで付近に比べ非常に残留放射能が高いホットスポットと言われる箇所がダクト上にある。原因不明であったが今回、AC\_C7~AC\_C8 間に光ファイバーを敷設しビームロスを確認した。図 3 にファイバーの設置図、加速管の配置図、光ファイバーの上流側から見たオシロスコープの波形を示す。光ファイバーはダクト、加速管の上、Q マグネットの中を通してある。Q マグネットとホットスポットで大きなビームロスがあることが分かる。

但し、このビームロスはビームチューニングによってかなり変わってくるが、現在リニアックに設置しているビーム電流モニターではその違いが分か

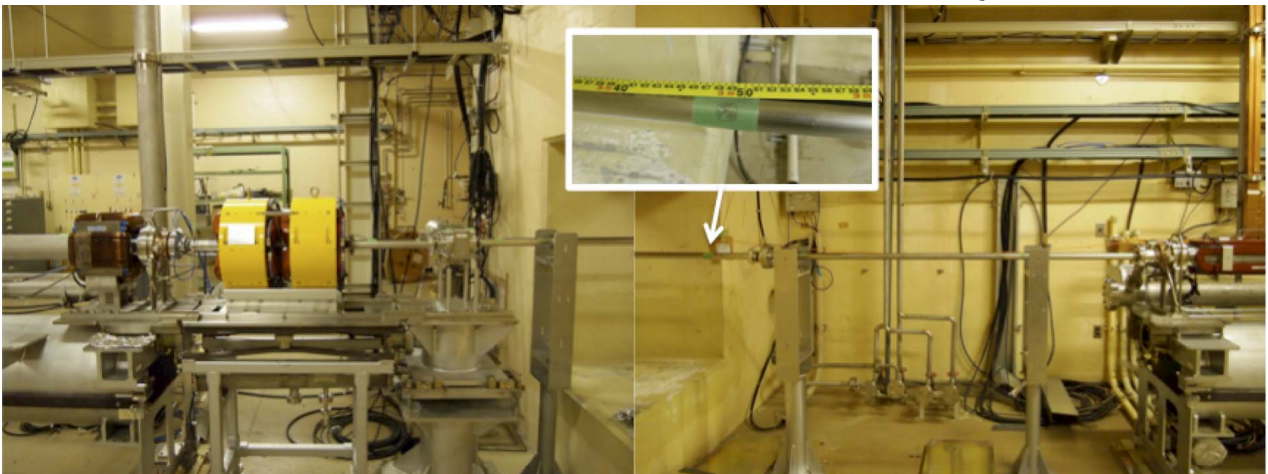


図 2: AC\_C7\_4~AC\_C8\_1 の写真

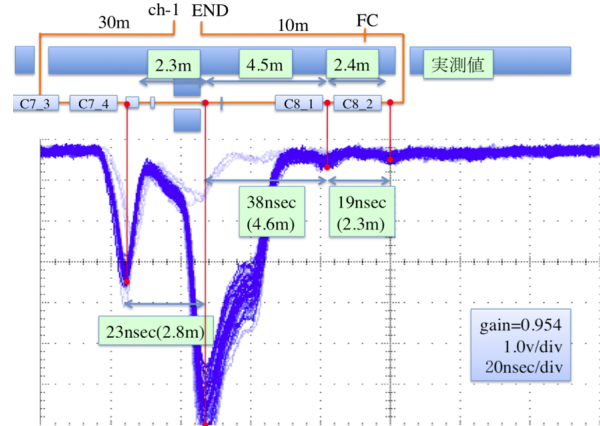


図 3: 光ファイバー上流側からのオシロ波形

らない。そのためビームロスが多い状態での運転が行われていると思われる。

#### 3.3.2 3T~AC\_32 ユニットの加速管のビームロス

3 セクターに配置した電子銃 (3T\_GUN) の下流、収束用ソレノイドの途中から光ファイバーをダクト、加速管の上、マグネットの中に設置してビームロスを観測した。

図 4 に加速管、ファイバーの設置図、光ファイバーの上流側から見たオシロスコープの波形を示す。全長 70 m の光ファイバーは加速管 AC\_28\_4 から下しシールドブロックを迂回しマグネットの中を通しダクト、加速管の上を加速管 AC\_33\_1 まで行きそこから貫通孔を通してギャラリーまで上がっている。もう 1 本はパンチャーの導波管貫通孔から下しソレノイド磁石の途中から中を通して加速管 AC\_33\_1 までのびている。終端は遮光してある。しかし、無反射端は作れないので下流方向に出た光がこの端面で反射して信号の解釈を困難にしている。

図 4 の上の 2 つは ch-1 から見た信号でロスが最も多いのは偏向電磁石 BM\_3T\_00 付近であることがわかる。直前にコリメーターがありそこで削られたビームが当たっていると思われる。Q マグネットの所でもロスが見られる。下の 2 つは 30 m の光ファイバーからの信号でやはり Q マグネットのところでもロ

スが確認出来る。最後の方の山は下流端面の反射の光が重なっているのが有効な情報ではない。1 番目と3番目の波形は3 nCの電子ビーム、2番目と4番目は1 nCの電子ビームでのビームロスの様子である。3 nCと1 nCのビームではロスのパターンが異なっているのが分かる。

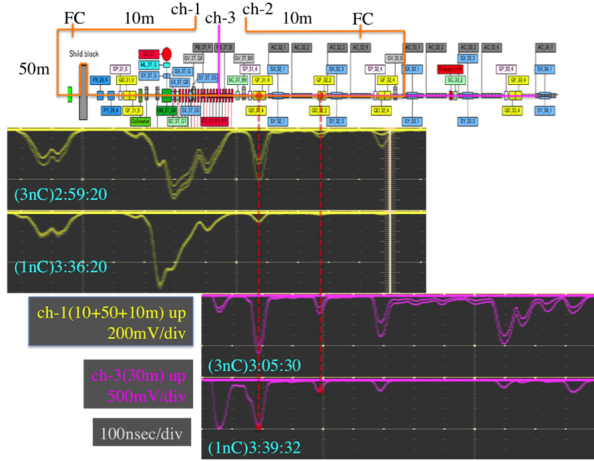


図 4: 3T~AC\_32 のビームロス波形

### 3.3.3 56 から 57 ユニット間のビームロス

加速管 AC\_56 から AC\_57 の間に光ファイバーを設置しビームロスを観測した。図 5 は加速管の配置図面に、上流側から見たオシロスコープの波形を重ね合わせたものである。

KEKB が運転していた 2010 年 7 月までは KEKB\_e-, KEKB\_e+, PF 用の 3 種類のビームをパルスごとに切替えて供給していた。この時のオプティクスを共通光学系と呼んでいる。今は KEKB が停止しているので PF 用にチューニングした PF 光学系で運転している。PF 光学系にセットした場合、Q マグネット QD,QF\_56\_4 の内部で少しビームロスが見える程度であるが、共通光学系の場合加速管のつなぎ目でもビームロスが観測される。この時期の光ファイバーは Q マグネットの外を通していたため Q マグネットの中心はビームロスが小さく見えている。共通光学系の場合は、さまざまな場所でビームロスが観測されるが、PF 光学系ではビームロスが少ないことが分かった。今後の運転では、今回のようなビームロスモニターを適用することにより、異なるエネルギーを通過させる場合にもビームロスを最小にするような光学系を構築できる可能性がある。

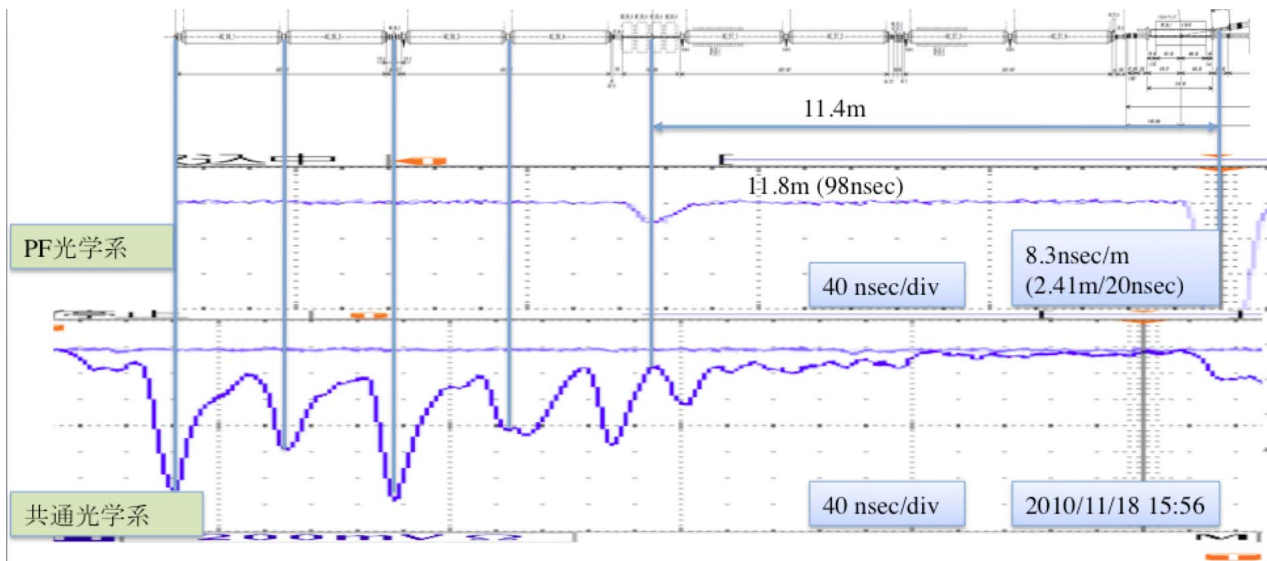


図 5: AC\_56~AC\_57 のビームロス波形

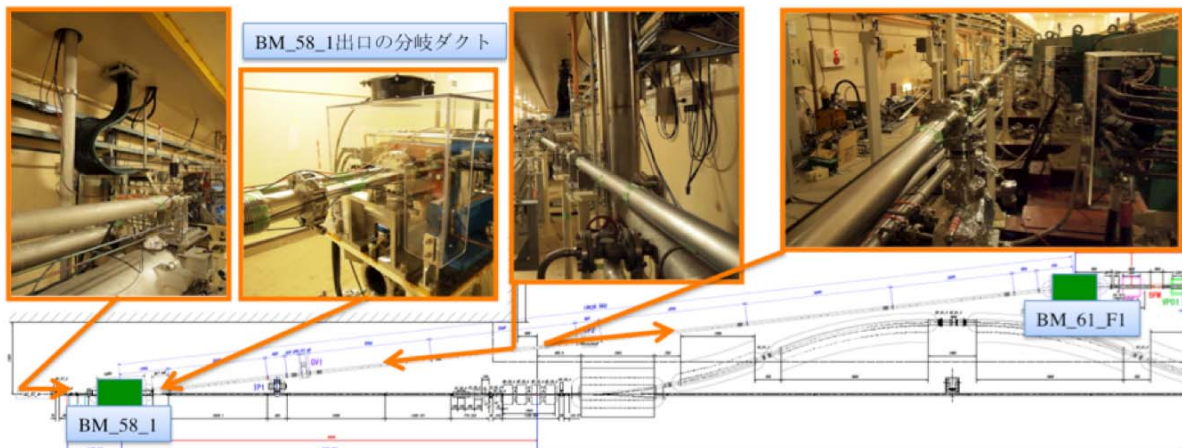


図 6: PF ビームラインの写真



### 3.3.4 PF ビームラインのビームロス

3.2 で見たように BM\_58\_1 付近でビームロスが発生している事が分かった。その場所の特定とビームロスの分布を調べるために BM\_58\_1 上流から曲げ戻しの BM\_61\_F1 までの間ダクトの上下左右に光ファイバーを敷設した。図 6 に配置図面とその付近の写真を示す。図 7 に通常運転時のビームロス波形を示す。

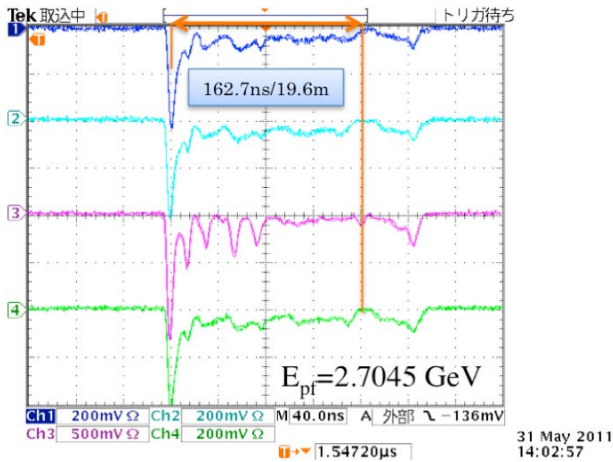


図 7: 通常運転時のビームロス波形

出来るだけダクトに密に接するように敷設したがゲートバルブ、フランジ、ダクト支持の金具等でダクトに接した部分とダクトから距離がある部分があるため信号の評価は慎重に行なう必要がある。

また、光ファイバーは BM\_61\_F1 の後で終端しているため波形の後半は上流で出た光が終端で反射したものとその場所が出た光が重ね合わさっているため注意が必要である。オシロスコープの各チャンネルは上流から見て ch1(右)、ch2(上)、ch3(左)、ch4(下)の順にセットしてある。BM\_58\_1 の中はコネクター付の光ファイバーを通す事が出来ないの

マグネットの外を通してている。信号が最大の箇所は BM\_58\_1 出口の分岐ダクトに接している部分である。BM\_58\_1~BM\_61\_F1 間が 19.6 m であるので分岐ダクトから 160 nsec の箇所は BM\_61\_F1 の出口付近である。それ以降の波形は上流で下流側に出た光が終端で反射したものである。

ダクトの左側に敷設した光ファイバーからの信号が突出して大きい。(注; ch3 のみ 500 mV/div で他は 200 mV/div) これは PF 用のビームがマルチバンチである事が起因していると思われる。マルチバンチビームはエネルギーが低いバンチも含んでいるためそれが BM\_58\_1 の磁場でより多く曲げられ出口の分岐ダクトに当たっていると思われる。

図 8 にビームエネルギーを変えた場合のビームロスの様子を示す。ビームエネルギーを上げて行くと約 40 MeV 上がった所で右のダクトにビームが当たり始めていのが分かる。さらに上げて行くとビームが当たり始めている箇所が上流に来る。この場合大量のビームがダクトに当たりシャワーで発生した大量の荷電粒子が他のファイバーも通過し全チャンネルで信号が出ていると思われる。

一方ビームエネルギーを下げて行くと約 20 MeV 下がった所で下流のロスに異常が見られる。4ch ほぼ同時にビームロスが見え始めている。さらに下げて行くとビームが当たっている箇所は上流に上がって来るがエネルギーを上げた場合と明らかにロスのパターンが異なっている。

ビームエネルギーを上げて行った場合エネルギー分布で高い側の裾がダクトの右側に当りビームが削られ始める様子がわかる。一方、エネルギーの低い側の裾は上流で既に削られているためエネルギーの裾の部分が曖昧で 1ch だけ信号が見える領域が無いと思われる。

また、エネルギーを上げると分岐ダクトでのロスが少なくなっているのが分かる。おそらくビームは BM\_58\_1 の中を左寄りを通っていると思われる。

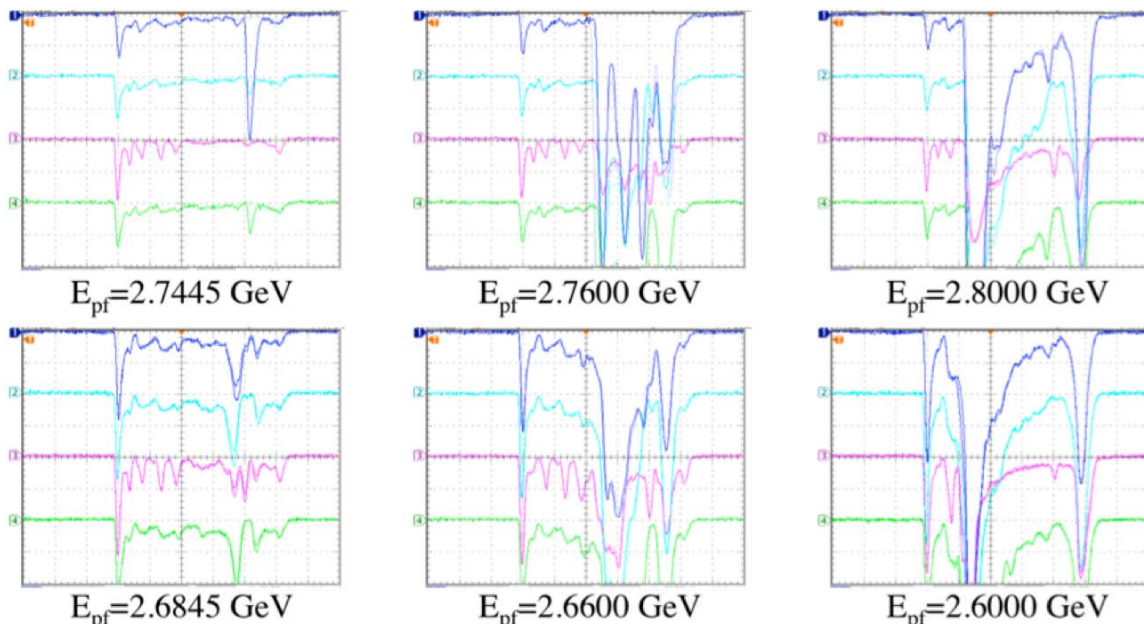


図 8: エネルギーを変えた場合のビームロス波形

今までの測定でビームロスが最も多く発生している所は分岐ダクトである事は分かったが、BM\_58\_1の内部のビームロスは確認出来ていない。内部のビームロスを確認するためにコネクタ付の光ファイバー30 mをカットし15 m×2本を上記の4本のファイバーと同じ経路でBM\_58\_1の中を通して信号を観測した。余計な信号を拾わないために分岐ダクトに接した後の光ファイバーはギャラリーに引き上げてある。

図9に観測波形を示す。オシロスコープの各チャンネルは上流から見てch1(右)、ch2(マグネット内部の右)、ch3(左)、ch4(マグネット内部の左)の順にセットしてある。

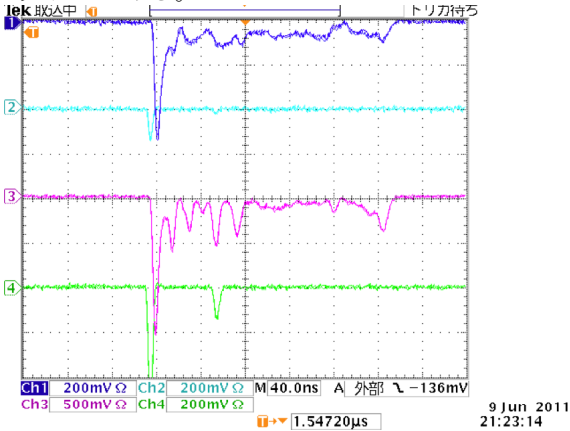


図9: BM\_58\_1内部のビームロス

オシロスコープから分岐ダクトまでの光ファイバーの長さがBM\_58\_1の内部を通した物と外を通した物で違っているためロスの位置が異なって見える。ch2, ch4の2つめのピークは分岐ダクトの所で下流方向に出た光がファイバーの端面で反射して検出された信号である。つまり、通常の運転状態ではBM\_58\_1の内部でほとんどビームロスは無く、分岐ダクトで大量にビームロスが発生している事が分かった。先に述べたように現在PF入射に使用している電子供給系はビーム中のエネルギー分布が大きい。今秋以降、SuperKEKBで使用する予定のRF電子銃を使ったスタディが始まるが、この新電子銃ではビームのエネルギーブレッドはかなり改善されることが期待され、エネルギーブレッドとビームロスの関係について、評価を進める予定である。

### 3.3.5 PF用ビームロスモニター

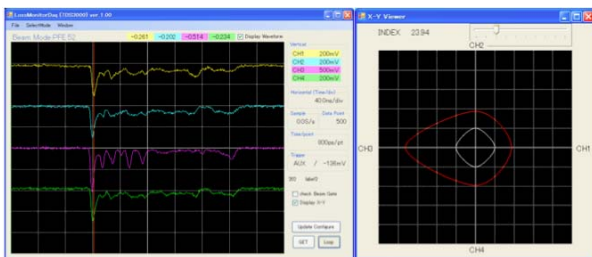


図10: 通常運転時の分岐ダクトのビームロス

3.3.4で4本の光ファイバーを使ってビームロスの分布が確認出来る事を示した。ここでは、運転時に有用なビューアーの画面を図10に示す。

左のオシロスコープ画面のカーソルで表示箇所を選択する事で下流方向を見た場合の右の画面でビームロスの分布を知ることが出来る。

### 3.3.6 5セクターのワイヤースキャナー(WS)

WSはビームを横切るワイヤーとPMTのセットで構成されている。ワイヤーに対しPMTをセットする場所によって測定の感度が左右されるため信号が強く出る場所を特定する事は非常に重要である。5セクターのWSを入れた場合どの場所で信号が検出されるか調査を行った。

今までの調査でWS\_56\_2, WS\_57\_2を入れた時BM\_58\_1の直前とQマグネット QD,QF\_58\_4の直前に信号が出る事を確認している。

ここでは、QD,QF\_58\_4の前後を調査しWSの信号が出る場所を特定した。信号の観測はアナライザーライン用の光ファイバーとWS用の光ファイバーで観測した。アナライザーライン用光ファイバーはBM\_58\_1の上流からアナライザーラインのダクト上に敷設した。WS用は光ファイバーを前出の貫通孔2からアナライザーラインのダクトまで下しダクト上をQD,QF\_58\_4の後まで敷設した。図11にWS用光ファイバーの敷設の様子を示す。図12に通常運転時の信号、図13にWS\_57\_1をON-LINEにした時の信号波形を示す。



図11: WS用光ファイバーのケーブル

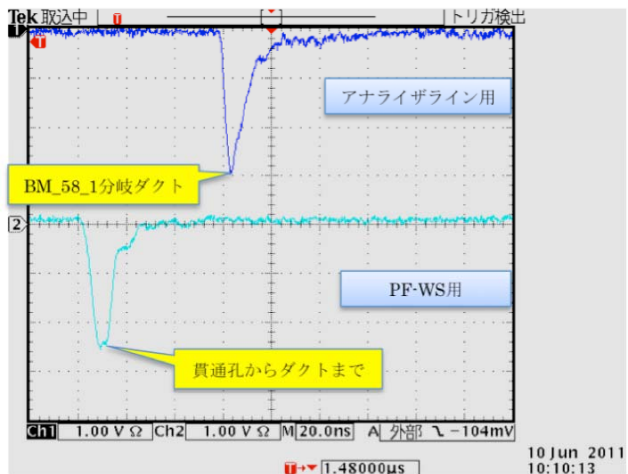


図12: 通常運転時のビームロス波形

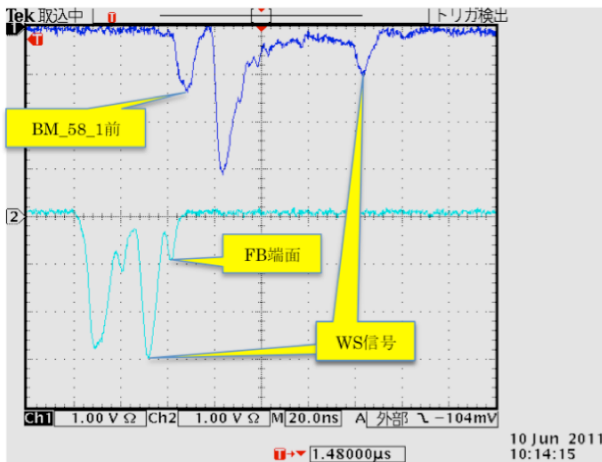


図 13: WS\_57\_2 ON-LINE 時のビームロス波形

PF-WS 用の信号を解析すると WS による信号は BM\_58\_1 の分岐ダクトから 7.2 m の所にある。最後に見える反射波形からは QD,QF\_58\_4 の後から 1.0m の所に有ると読み取れる。分岐ダクトから QD,QF\_58\_4 の先頭までは 7.0 m であるので Q マグネットの第 1 コアと第 2 コアの間にピークがある事が分かった。

この信号は光ファイバーの上流から見ているもので下流から見れば 5~6 倍の信号が見えるはずである。下流方向に出た信号を捉えるため QD,QF\_58\_4 の第 2 コアと第 3 コアの間から光ファイバーを入れ上流のステアリングマグネット SX\_58\_3 の上流まで光ファイバーを敷設した。図 14 に WS\_57\_2 を ON-LINE にした時のビームロスの波形を示す。

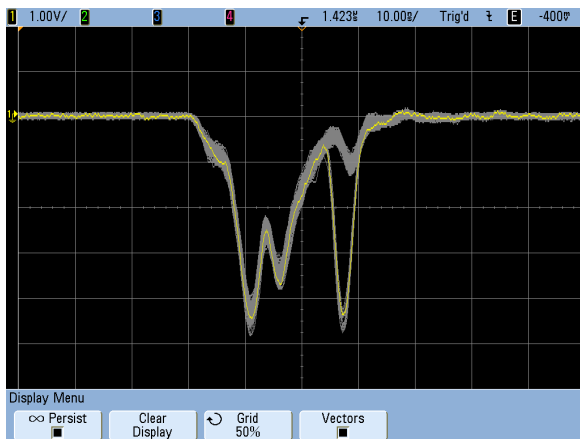


図 14: WS 用光ファイバーで観測した波形

前半の 2 山は光ファイバーの敷設経路で迂回が不十分だったため分岐ダクトのビームロスで発生した荷電粒子が見えている。最後のピークが WS によるものである。

現在の WS は 2010 年 12 月に光ファイバーの信号を見て KEKB 用に最適化し、PMT を QD,QF\_58\_4 の直前の場所から約 5 m 下流に移動している。その結果 KEKB ビームの測定ではノイズが少なくなり良好になったが PF ビームに対しては感度が悪くなった。

PMT を最適位置に設置するためにも、今回のこの

ビームロスモニターは大変有用であることが確かめられた。

### 3.3.7 加速管からのフィールドエミッション

この報告ではビームがある時のものだけであるが、この測定を行う場合 PMT のゲインをかなり下げている。RF-ON, BEAM-OFF の時に PMT のゲインを上げて行くと非常に興味深い物が見えて来る。

それは加速管のフィールドエミッションである。

加速管のフィールドエミッションを AC\_56~AC\_57~BM\_58\_1 に敷設した光ファイバーで観測した。

それぞれの加速管に投入する RF パワーを変えて調査した結果 AC\_32, AC\_55, AC\_56, AC\_57 でフィールドエミッションによる信号が見られた。さらに、当該加速管に関するステアリングマグネット、Q マグネット等の条件を変えて調査した結果、AC\_32\_2, AC\_57\_3 から出ている事を突き止めた。AC\_32 のレイアウト変更で AC\_32\_1, AC\_32\_2 が撤去されたのでそれぞれの入力カプラー部を観察した。それぞれの第 1 ディスクにはかなりの痘痕が出来ていたが AC\_32\_1 はビームが当たって出来たと思われる痕が無数に出来ていた。しかし AC\_32\_2 のものは明らかにそれとは異なっていた。

## 4. まとめ

通常はビームから遠ざけて設置すべき光ファイバーをセンサーとして使う事でビームロスモニターを開発した。但し、運転中は常に荷電粒子が光ファイバーを通過しているのでファイバーの劣化が心配される。2010 年 9 月から 1 年近く観測を続けたがファイバーの劣化等による信号の異常は見られていない。しかし今後光ファイバーの透過率の測定等を行なって劣化の評価をしなければならない。

大口径の光ファイバーと PMT を組み合わせる事で非常に強力なモニターが開発できた。今後はシミュレーション等を行なって解析を進めたい。

## 参考文献

- [1] Y. Yano, et al., "PMT アークセンサによる KEKB ARES 空洞のカプラーの観測" Proceedings 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Himeji, August 4-6, 2010