

## 光ファイバビームロスモニタとワイヤスキャナ-3

### OPTICAL FIBER BEAM LOSS MONITOR AND WIRE SCANNER-3

矢野喜治#, 福田茂樹, 道園真一郎, 明本光生

Yoshiharu Yano #, Shigeki Fukuda, Shinichiro Michizono, Mitsuo Akemoto

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

#### Abstract

We have observed a beam loss of various locations of Linac by an optical fiber beam loss monitor up to now. We installed an optical fiber beam loss monitor on a part of beam injector in Super KEKB and observed a beam loss. We relocated a wire scanner in A sector in Linac. We simulated and checked the signal by a beam loss monitor as it was relocated, to decide about the place where a sensor is installed. We investigated the wire scanner beam energy installed in the location beyond 1 GeV up to now. Beam energy in an installation site of a wire scanner in A sector is 45 MeV. We investigated an installation site of a sensor by a beam loss monitor, but the specification of most suitable place was difficult. But after a sensor was installed with a result of the simulation, we checked the signal of a wire scanner.

#### 1. はじめに[1-6]

2010年に光ファイバビームロスモニタの開発を始めて、主に電子陽電子入射器(Linac)でビームロスを観測してきた。Linacでビームロスが観測される主な場所は4極電磁石、偏向電磁石、ビームダクト等であり、加速管の中で発生したビームロスによる荷電粒子は加速管壁によってシールドされ観測は困難であることが分かった。2012年にPFリングのビーム入射時のビームロスを調査し、加速器室内の残留放射能が高い場所はリングのどの場所のビームロスが原因かを特定した。

2016年2月にSuper KEKB Phase-1がスタートし、

Linacからの電子、陽電子のビーム入射が始まった。最初のビーム入射時にビームが何処まで届いて何処でビームロスしているか調査するために(1)HER Ringの入射部と(3)LER Ringの入射部に光ファイバを布設し入射部近傍のビームロスを観測した。Ringの運転が進み入射部以外のビームロスを観測する必要があり、(2)HER Ring入射部の上流部と(4)LER Ringのコリメータ下流に光ファイバを布設しビームロスを調査した。

電子陽電子入射器では電子銃直後のAセクタのワイヤスキャナ(WS)の移設が必要になり検出器をそれまでの光電子増倍管(PMT)から(5)光ファイバとPMTの検出器に変更した。

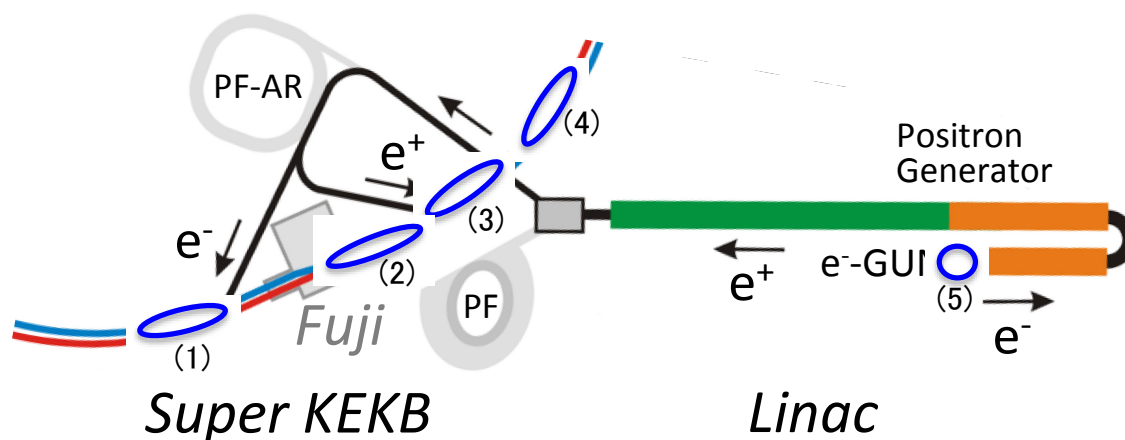


Figure 1: (1) a part of e- beam injector, (2) upstream of (1), (3) a part of e+ beam injector, (4) downstream of e+ beam collimator, (5) wire scanner for A-sector.

# yoshiharu.yano@kek.jp

## 2. ビームロスモナタ

光電子増倍管 (PMT) と高圧電源回路を内蔵した浜松フォトニクス製の光センサモジュール (H10721-110) とブロック図及び本モジュール 2 個を組込んだビームロスモナタの NIM モジュールを Fig. 2 に示す。このビームロスモナタモジュールはネットワーク経由で PMT のゲイン制御が可能である。

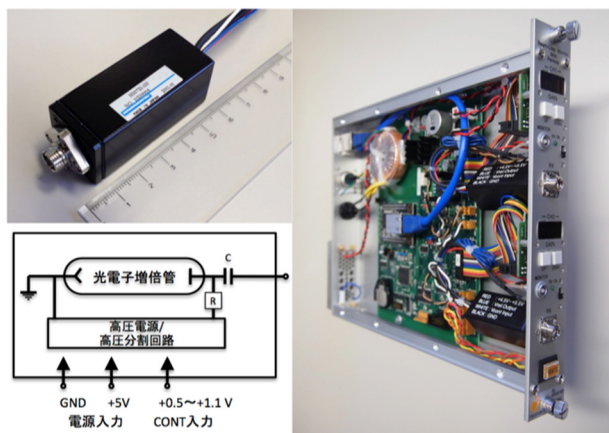


Figure 2: Beam Loss Monitor Module.

センサ部はフジクラの大口徑ファイバ (S.600/660) を使用している。コア材質は高 OH 純粋石英でコア径 600  $\mu$  m、クラッド材質はフッ素ドープ石英でクラッド径 660  $\mu$  m、心線外径は 1.4mm、伝送損失は 10 dB/km 以下 ( $\lambda=0.8$   $\mu$  m) である。

## 3. ビーム入射部近傍のビームロス

### 3.1 HER 入射部のビームロス

Figure 1 の (1) に示す場所に布設した光ファイバビームロスモナタの波形を Fig. 3 に示す。ビーム入射調整の初期は最適なビーム軌道が確定していないためリングに入射した電子が入射軌道から外れビームダクトに当たりビームロスを発生する。ビームロスによりダクトに当たった電子はそこでシャワーを発生しダクト外部に多量の荷電粒子を放出する。それらの荷電粒子はビームの下流側だけでなく上流側にも放出されダクトに布設した光ファイバを通過し内部でチェレンコフ光を発生する。但し、チェレンコフ光はファイバ内で頂角約 50 度のコーン状に発生するので光ファイバの軸に対して約  $50 \pm 8$  度の角度で入射した荷電粒子によるチェレンコフ光しか光ファイバ端まで届かない。ビームロスが発生した場所と光ファイバの間に距離があると上流側に出た光と下流側に出た光は同じ場所から出たものと見なせないが、光ファイバをビームダクトに密着して布設しておくことでビーム上流側に出た光も下流側に出た光も同じ場所から出たものと見なすことができる。

光ファイバはリングのビームダクトに密着して布設しているためビームの上流側に届いたチェレンコフ光を観測するとビームロスの発生箇所を推測することができる。またビームの下流側に発生したチェレンコフ光は光ファイバの下流端で反射し上流側に戻ってくる。最初に上流側に届いた光と下流端で反射して戻ってきた光の時間差から光ファイバの下流端からの距離が判明する。

入射調整初期のビームロスの波形 (1) と調整が完了し

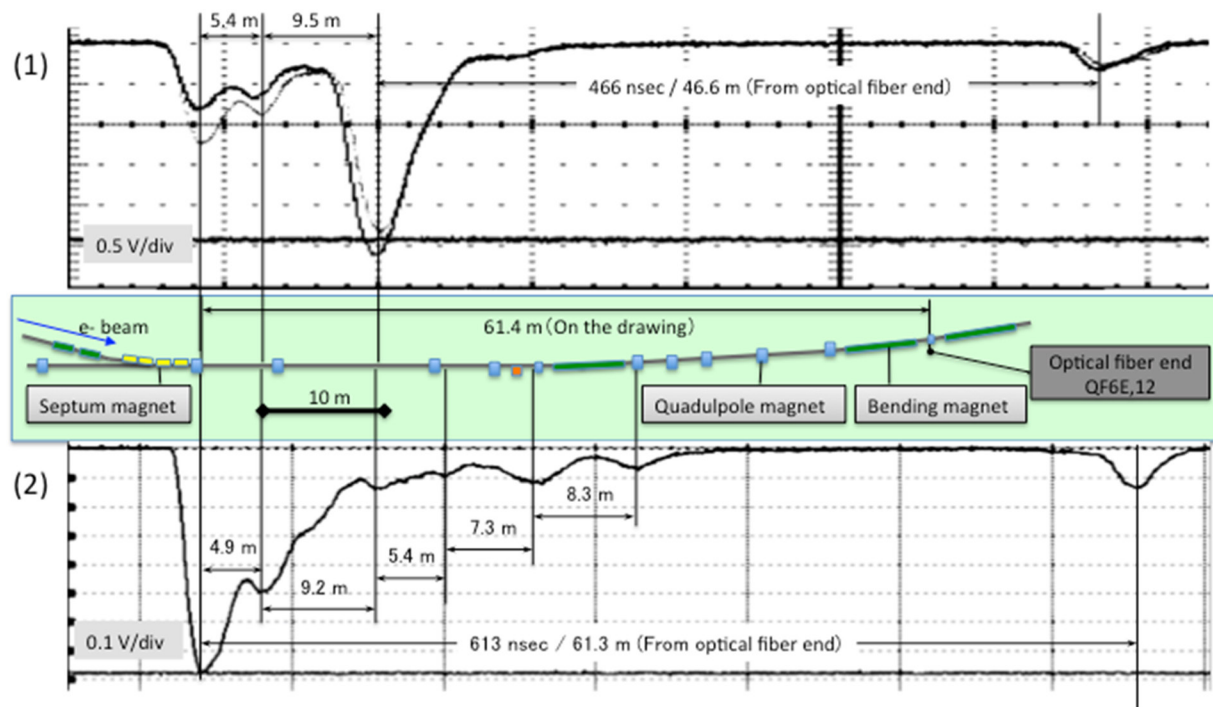


Figure 3: Schematic of a magnet on a part of beam injector and waveform of HER beam loss monitor. An upper waveform (1) indicates the state of the beam loss which is at a start of beam tuning. A lower waveform (2) indicates the state of the beam loss which is at an end of beam tuning.

安定にビーム入射が行われている時のビームロスの波形(2)を機器の配置図面に重ねたものが Fig. 3 である。調整初期の時ビームはまだリングを周回しておらずセプタムマグネットの下流約 15m 付近で大量にビームロスが発生しておりここでビームを失っていると思われる。調整完了後は入射セプタム下流の Q マグネット付近のビームロスが最も多く最初の B マグネット近傍までビームロスが続いているのがわかる。

### 3.2 LER 入射部のビームロス

Figure 1 の(3)に示す場所に布設した光ファイバビームロスモニタの波形を Fig. 4 に示す。ビームの入射調整が完了し安定的にビーム入射が行われている時のビームロスの様子である。オシロスコープの時間レンジを広げて約 20 ターン分を記録しビームロスが観測される場所を重ねたものが後ろの 7 個の波形である。

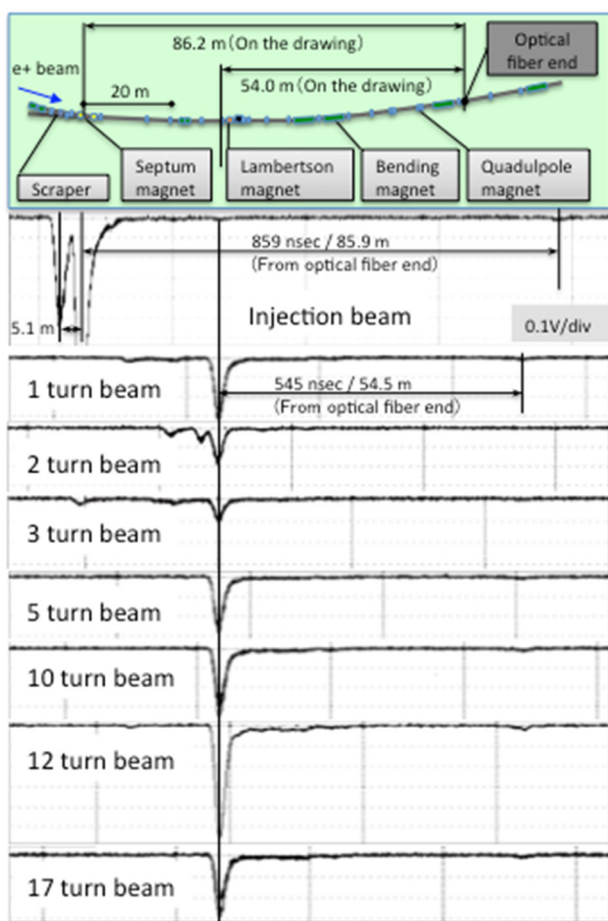


Figure 4: Schematic of a magnet on a part of LER beam injector and waveform of beam loss monitor.

入射ビームは光ファイバの末端から 86 m の近傍で最大のビームロスが発生している。その上流 5 m に次に大きなビームロスが観測される。通常の解釈ではスクレーパーとセプタムマグネット付近でビームロスが発生することになる。しかし、これらの場所は入射ラインに該当しリングから約 1 m 離れている。つまり入射ラインで起きた

ビームロスを 1 m 離れた場所に布設したビームロスモニタで観測していることになる。そのためビームロスの位置を直接入射ラインの場所に当てはめることはできない。入射ビームのビームロスを正しく判定するためには入射ラインに直接布設する必要がある。

入射ビーム以降の波形は光ファイバの末端から 54 m 付近でビームロスが発生していることを示している。この場所はランバートソンマグネットの上流約 2m の位置にある Q マグネット入り口付近である。リングに入射したビームはベータートロン振動をしておりこの場所でビームロスを起こしやすい光学系になっていると思われる。

## 4. ビームアポート時のビームロス

### 4.1 HER ビームアポート時のビームロス

Figure 5 に HER ビームがアポートした時に入射部に布設した光ファイバロスモニタの波形を示す。

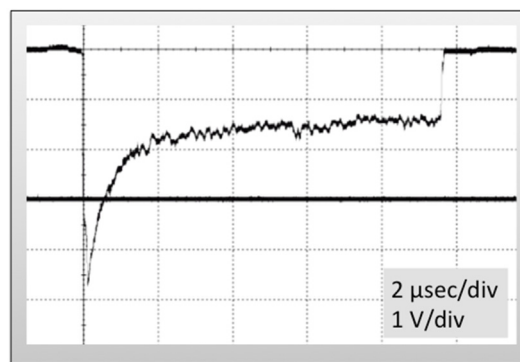


Figure 5: Waveform of the beam loss monitor when a HER beam has aborted.

ここで使用している PMT は Fig. 2 でわかるように非常に小型化されており高圧回路もこのモジュールに内蔵されている。そのため PMT に大量の光が入り大きな信号が連続して出ると内部回路への電源供給が間に合わないためこのような波形になる。つまり光ファイバの何処かで大量のビームロスが連続して発生したことを示す。

Figure 6 に同じアポート時の波形の最後の部分を示す。

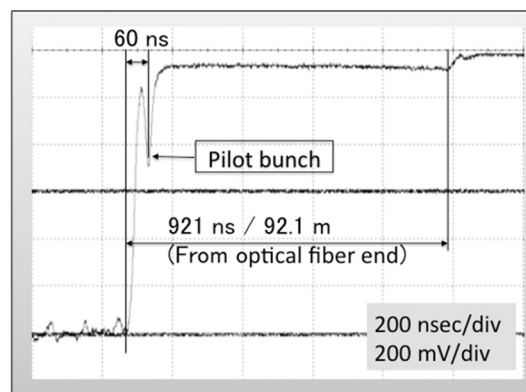


Figure 6: The last  $\sim 1 \mu\text{sec}$  of a beam loss monitor waveform when a HER beam has aborted.

これから光ファイバの終端から 92 m の近傍でビームロスが起きていることがわかる。それは HER のビームダンプがある場所に一致している。つまり正常にビームアポートが行われておりビームダンプの窓でのビームロスを観測していることがわかる。

#### 4.2 LER ビームアポート時のビームロス

Figure 1 の (4) に示す場所に布設した光ファイバビームロスモニタの波形を Fig. 7 に示す。この場所はコリメータ下流のビームロスを観測するためにビームダクトの左右に光ファイバを布設している。尚、この付近にビームダンプは無い。

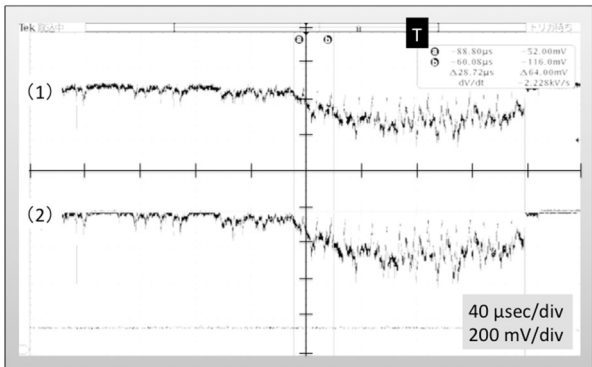


Figure 7: Waveform of the beam loss monitor when a LER beam has aborted.

このビームロスの波形は何らかの原因でビームの不安定が起きロスモニタアポートでビームが停止した時のものである。ビームアポートを出すロスモニタはイオンチェンバタイプとピンダイオードタイプで KEKB 運転当初から設置されているものでそれぞれ約 100 チャンネルある。

アポート信号でトリガがかかり、トリガ前 280  $\mu$  sec からトリガ後 120  $\mu$  sec までの光ファイバビームロスモニタの信号である。トリガ前 80  $\mu$  sec からビームロスが増加しトリガ後 80  $\mu$  sec でビームが無くなっているのがわかる。

### 5. Linac のワイヤスキャナ[7,8]

#### 5.1 A セクタのワイヤスキャナ(WS)

Figure 8 に A セクタのワイヤスキャナの写真を示す。

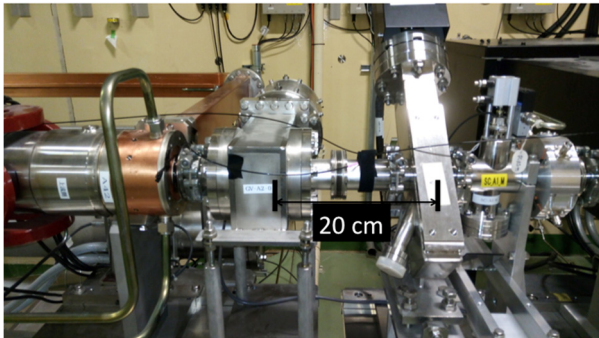


Figure 8: Photograph of wire scanner at A sector.

これは Fig. 1 の (5) に示すように Linac の上流部に設

置されている。この場所でのビームエネルギーは 45 MeV である。写真の右端に WS のワイヤ駆動部がある。以前はこの場所に検出器(PMT)が設置されワイヤ駆動部は約 1.5 m 上流側に設置されていた。ワイヤ駆動部を移設したことで従来の検出器を設置する場所が確保出来なくなり検出器を光ファイバに変更した。最適な検出器の設置場所を確認するためにシミュレーションを行い光ファイバビームロスモニタで確認した。

#### 5.2 シミュレーション[5]

ワイヤスキャナのワイヤは 100  $\mu$  m のタングステン、ダクトの半径は 15 mm、ビームエネルギーは 45 MeV の条件でシミュレーションを行う。半径 15 mm、厚さ 1 mm のステンレスのダクトの一端に厚さ 100  $\mu$  m のタングステンの板を置き、ダクトの中心に 10,000 個の電子が垂直に入射した場合を考える。散乱と制動放射により出てくる荷電粒子と  $\gamma$  線が半径 15 mm のダクトに当たる数を計算すると Fig. 9 のようになる。

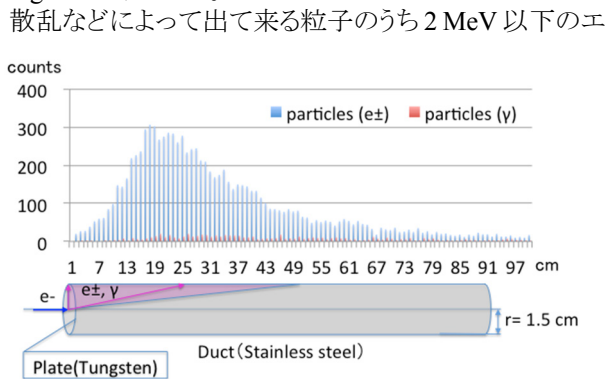


Figure 9: Histogram of the particle when the energy of the incident beam is 45 MeV.

エネルギーのものはダクト外に出てシャワーを作らないので除外した。この結果を Fig. 8 に当てはめるとワイヤの下流 20 cm にはゲートバルブが設置されている。A セクタに布設したビームロスモニタでワイヤスキャナの信号を調査したがノイズに埋もれて確認出来なかった。

ワイヤスキャナのセンサとして光ファイバを使う場合は

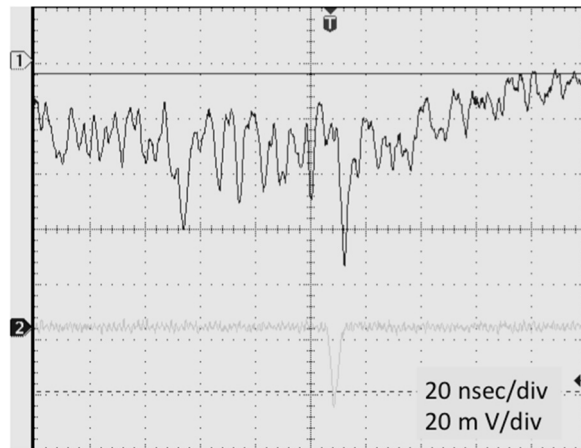


Figure 10: Waveform of wire scanner.

ビームの下流側に出た光を観測する。光ファイバはゲートバルブに沿わせて設置しビーム下流側から光信号を読み出す。尚、上流側のファイバ端は遮光している。

ビーム内にワイヤを挿入し散乱させた時の信号を Fig. 10 に示す。Ch-1 は左に見える加速管の下流に光ファイバを設置し観測した波形。Ch-2 はここで指摘した場所に設置し観測した波形である。Ch-2 は信号が非常にはっきりと見えている。一方 ch-1 はノイズに埋もれて信号がよく見えない。このノイズは加速管のフィールドエミッションによる電子がダクトでシャワーを引き起こしたものである。

## 6. まとめと今後の方針

SuperKEKB Phase-1 で HER/LER リングの入射部に光ファイバを布設してビーム入射時のビームロスを観測した。ビーム調整の初期段階で何処までビームが到達しているかを知ることは非常に有用であった。更に入射ビームのターンごとのビームロスの様子が詳細に分かるのもビームに何が起きているかを知る手がかりになる。今後は入射部以外にも光ファイバビームロスモニタを設置しビームロスの監視を行いたい。既存の PIN ダイオードタイプのロスモニタの情報を元に設置場所を決定しそのロスモニタの信号をトリガに光ファイバビームロスモニタのデータ収集を行いビーム監視に役立てたい。

今年の秋から始まるダンピングリングの運転に備えダンピングリングのビームロスを観測するための光ファイバをリング入射部と引出し部に布設する計画である。又、ダンピングリングの入射ラインに設置する WS の検出器として使用することになっている。

## 参考文献

- [1] Y. Yano, T. Obina, S. Michizono, “光ファイバビームロスモニター”, Proceedings of 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Osaka, August 8-11, 2012, pp.902-906.
- [2] T. Obina and Y. Yano, “OPTICAL FIBER BEAM LOSS MONITORS FOR THE KEK PHOTON FACTORY”, Proc. of IBIC2012, TUPA10.
- [3] Y. Yano, S. Michizono, S. Fukuda, T. Sanami, “BEAM LOSS INVESTIGATION NEAR THE PULSE BENDING MAGNET OF KEKB INJECTOR LINAC”, Proceedings of 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagoya, August 3-5, 2013, pp.403-405.
- [4] Y. Yano, N. Iida, T. Obina, S. Fukuda, S. Michizono, “光ファイバビームロスモニタの応用”, Proceedings of 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aomori, August 9-11, 2014, pp.443-447.
- [5] Y. Yano, S. Fukuda, S. Michizono, “光ファイバビームロスモニタとワイヤスキャナ”, Proceedings of 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Fukui, August 5-7, 2015, pp.915-919.
- [6] Y. Yano, S. Fukuda, S. Michizono, M. Akemoto, “光ファイバビームロスモニタとワイヤスキャナ-2”, Proceedings of 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Makuhari Messe, Chiba, Aug. 8-10, 2016, pp.1008-1011.
- [7] N. Iida, Y. Funakoshi, T. Kawamoto, M. Kikuchi, T. Mimashi, T. Suwada, M. Tanaka, M. Yamauchi, S. Yoshida, “RECENT PROGRESS OF WIRE SCANNER SYSTEMS FOR THE KEKB INJECTOR LINAC AND BEAM TRANSPORT LINES”, Proceedings of EPAC 2000, Vienna, Austria, 2000, pp.1738-1740.
- [8] Y. Yano, N. Iida, S. Michizono, “ワイヤ・スキャナ用センサーへの光ファイバの応用”, Proceedings of 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Osaka, August 8-11, 2012, pp.898-901.