

光ファイバビームロスモニタとワイヤスキャナ

OPTICAL FIBER BEAM LOSS MONITOR AND WIRE SCANNER

矢野喜治^{#(A),B)}, 福田茂樹^(A),B), 道園真一郎^(A),B)

Yoshiharu Yano^{#(A),B)}, Shigeki Fukuda^(A),B), Shinichiro Michizono^(A),B)

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

^{B)} Department of Accelerator Science, Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI)

Abstract

A wire scanner (WS) is usually used by a set of the wire drive part and the detection part. A tungsten wire of 50 μm -100 μm and a photomultiplier tube (PMT) are used. WS in Linac is using 100 μm of tungsten wire and PMT. Addition of WS is scheduled for SuperKEKB. A SuperKEKB Linac delivers an electron beam of 7 GeV to a SuperKEKB high-energy ring (HER) and a positron beam of 4 GeV to a SuperKEKB low-energy ring (LER). Furthermore, electron beams of 2.5 GeV and 4 GeV are supplied to the PF and the PF-AR, respectively. Therefore it's necessary to install a detector in a place which corresponds to beam energy. So the place where a signal goes out by a simulation including an installation site of existence was predicted. We installed an optical fiber beam loss monitor in the B sector where beam energy is about 1.5 GeV. We measured a signal of WS using the optical fiber beam loss monitor installed in a B sector. We confirmed that a signal of WS goes out to the place predicted by a simulation by a beam loss monitor.

1. はじめに

光ファイバビームロスモニタは大口径光ファイバと光電子増倍管 (PMT) 等の光検出器で構成される分布型の検出器である。加速器のビームダクト等に光ファイバを布設しファイバ端から出てくる光を観測することでダクト上のビームロスの分布を知ることが出来る [1][2][3][4]。これまでも光ファイバを使った様々なビームロスモニタの研究が進められてきた。 [5][6][7][8]。

ワイヤスキャナはビーム中に 100 μm 程度のタングステンワイヤを挿入し弾性散乱や制動放射による荷電粒子や γ 線を検出しビームサイズを計測する測定器である。ワイヤスキャナの検出器にはこれまで光電子増倍管 (PMT) が使われてきた。検出器を設置する場所は測定対象のビームのエネルギーによって異なっている。ここでは電子陽電子入射器の B セクタに設置されたワイヤスキャナと B セクタ後半に布設した光ファイバビームロスモニタでワイヤをビーム内に挿入した時ダクト外に出てくる荷電粒子の強度分布を観測しシミュレーション結果と比較した。

2. シミュレーション

Figure 1 に示すように半径 10 mm のステンレスのダクトに厚さ 100 μm のタングステンの板が付いた系を考える。タングステンの板に垂直にペンシルビームが入射し散乱と制動放射により出てくる荷電粒子と γ 線の分布をシミュレートする。入射ビームは 1.0 GeV、1.5 GeV、2.5 GeV、8.0 GeV の電子について行った。KEKB の電子のエネルギーに合わせて 8.0 GeV で計算した。

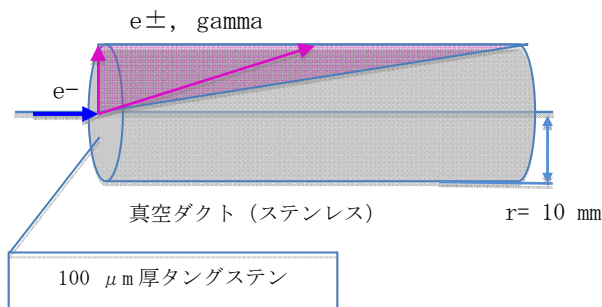


Figure 1: Model of a simulation.

2.1 厚さ 100 μm のタングステン板に入射した電子による荷電粒子と γ 線

厚さ 100 μm のタングステン板に 1.5 GeV の電子が 10,000 個入射した時に放出される荷電粒子と γ 線をカウントしエネルギーと放射角の関係を Table1 と Table2 にまとめた。

Table 1: Correlation Between the Energy and Scatter Angle (Charged particle)

相関係数 (Energy vs Angle)		粒子数	平均散乱角 (mrad)
0.004~0.1 GeV	-0.741	36	211.52
0.1~0.5 GeV	-0.294	90	8.32
0.5~1.0 GeV	-0.198	205	2.33
1.0~1.5 GeV	-0.007	9711	1.86

散乱粒子のエネルギーと散乱角の相関係数は低エ

yoshiharu.yano@kek.jp

エネルギーの粒子(0~500 MeV)は相関係数も比較的大きく粒子エネルギーと散乱角との間に相関が認められ散乱角も大きい。しかし全体の粒子に占める割合は 1%程度である。99%の粒子はエネルギーと散乱角の間に相関が無いことがわかる。それら粒子の平均散乱角は約 2 mm radian である。

Table 2: Correlation Between the Energy and Scatter Angle (gamma)

相関係数 (Energy vs Angle)		粒子数	平均散乱角 (mrad)
0.004~0.1 GeV	0.016	1199	1.30
0.1~0.2 GeV	0.012	267	1.23
0.2~0.5 GeV	0.002	298	1.31
0.5~1.0 GeV	-0.012	200	1.17
1.0~1.5 GeV	0.023	82	1.40

散乱粒子のエネルギーと散乱角の相関係数を見るとでてくる γ 線はエネルギーと散乱角の間に相関が無いことがわかる。低エネルギーの γ 線(0~200 MeV)は全体の 72%を占めている。全エネルギー領域で平均散乱角は約 1.3 mm radian である。

入射ビームのエネルギーが 1.0 GeV、1.5 GeV、2.5 GeV、8.0 GeV の場合に放出される荷電粒子と γ 線の数と平均散乱角を Table 3 に示す。

Table 3: Number of Particle and Average Scatter Angle

エネルギー	粒子数(荷電粒子)	平均散乱角(mrad)	粒子数(γ 線)	平均散乱角(mrad)
1.0 GeV	10032	2.8	1865	1.9
1.5 GeV	10042	1.9	2046	1.3
2.5 GeV	10052	1.1	2269	0.8
8.0 GeV	10077	0.34	2652	0.6

半径 10 mm のダクト中心にペンスルビームが入射し、厚さ 100 μ m のタングステン板で散乱を起こした場合を考える。散乱と制動放射で発生した荷電粒子と γ 線がダクトに当たる粒子の分布を Fig.2 ~Fig.5 に示す。

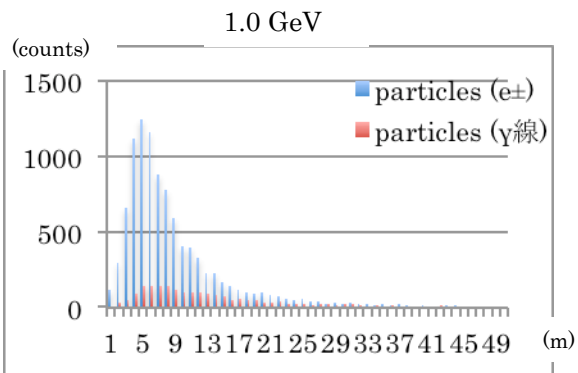


Figure 2: Histogram of the particle when the energy of the incident beam is 1 GeV.

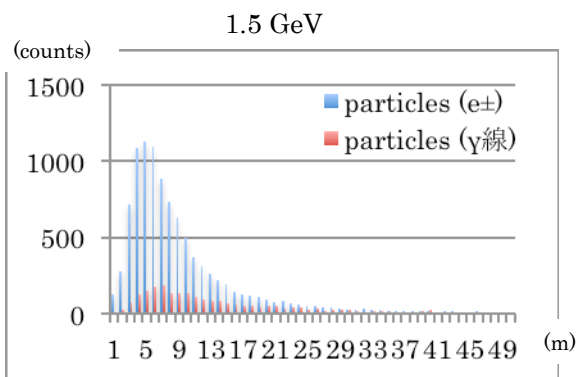


Figure 3: Histogram of the particle when the energy of the incident beam is 1.5 GeV.

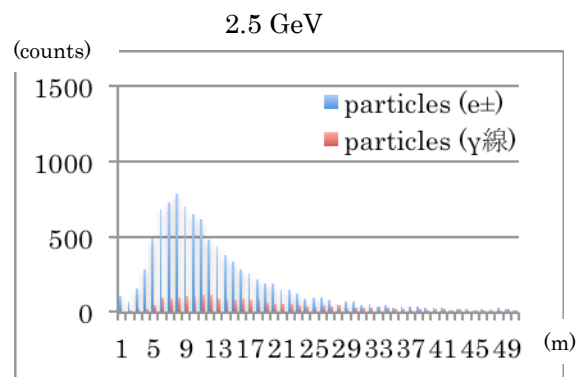


Figure 4: Histogram of the particle when the energy of the incident beam is 2.5 GeV.

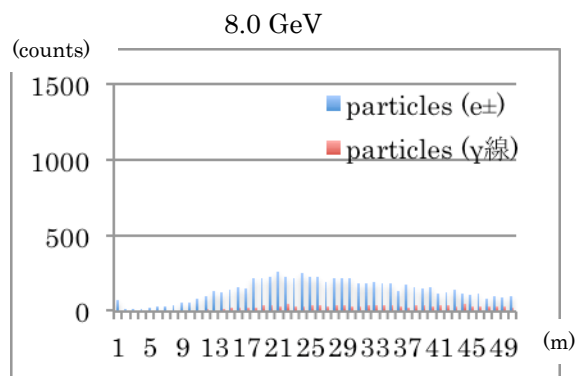


Figure 5: Histogram of the particle when the energy of the incident beam is 8.0 GeV.

2.2 ダクトに入射した荷電粒子と γ 線

厚さ 100 μ m のタングステン板で散乱を起こしダクトに入射する荷電粒子のエネルギーはほぼ入射ビームのエネルギーに等しく、制動放射で発生した

γ 線のエネルギーは 200 MeV 以下のものが大半を占める。Figure 1 に示すように厚さ $100\ \mu\text{m}$ のタングステンの板に 1.5 GeV 電子 10,000 個が入射した時に出た γ 線が半径 10 mm のダクトに当たる場所とエネルギーの分布を Figure 6 に示す。

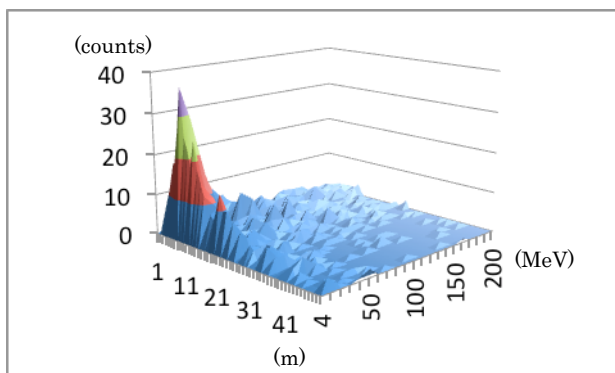


Figure 6: Histogram of the gamma when the energy of the incident beam is 1.5 GeV.

このグラフで γ 線のピークは散乱点から 7 m 下流、エネルギーは 4 MeV~10 MeV となっている。

2.3 光ファイバを通過する荷電粒子によるチェレンコフ光

Figure 7 に示すように光ファイバの中を荷電粒子が通過する場合を考える。ここでビームの入射角を ϕ 、光ファイバの臨界角を θ_{cr} 、チェレンコフ光の放出角を θ_{ch} とする。

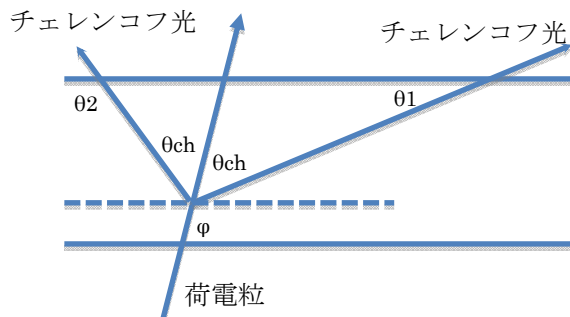


Figure 7: Cerenkov Light by the electric charge particle which passes an optical fiber.

$$\begin{aligned} \cos\theta_{ch} &= 1/n\beta, \quad \beta = vp/c \sim 1 \\ \text{光ファイバのコアの屈折率; } n &= 1.5 \\ \theta_{ch} &= 48.2^\circ \\ \sin\theta_{cr} &= N_{clad}/N_{core} \\ n_{core} &= 1.5, \quad NA = 0.22 \\ \theta_c &= (90^\circ - \theta_{cr}) = 8.4^\circ \\ \theta_1 &= \phi - \theta_{ch}, \quad \theta_1 < \theta_c \\ \theta_2 &= \phi + \theta_{ch}, \quad 180 - \theta_2 < \theta_c \\ \text{これから} \\ \theta_{ch} - \theta_c &< \phi < \theta_{ch} + \theta_c \\ 39.8^\circ &< \phi < 56.6^\circ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 0.69 \text{ rad} &< \phi < 0.99 \text{ rad} \\ 180 - \theta_{ch} + \theta_c &> \phi > 180 - \theta_{ch} - \theta_c \\ 140.2^\circ &> \phi > 123.4^\circ \\ 2.45 \text{ rad} &> \phi > 2.15 \text{ rad} \end{aligned}$$

よって入射角 ϕ が上の条件を満たす荷電粒子のチェレンコフ光のみファイバ端に到達する。

つまり、ダクト内壁に荷電粒子或いは γ 線が入射しダクト内部でシャワーを起こし外部に出てきた荷電粒子のうち上記範囲にあるもののみが検出可能である。10 MeV の γ 線 10,000 個が 2 mm 厚の SUS に入射角 0.1 mrad~5 mrad で入射した時に出てくる荷電粒子の放出角 ϕ が $39.8^\circ < \phi < 56.6^\circ$ のものを前方、 $140.2^\circ > \phi > 123.4^\circ$ のものを後方とする。

Table 4: The number of charged particles which comes out when a gamma ray was incident on SUS of thickness 2 mm.

入射角 (mrad)	前方	後方	total	100*(f+b)/t	f/b
0.1	989	448	7153	20.09	2.21
0.5	1258	510	9005	19.63	2.47
1	1373	575	9985	19.51	2.39
1.5	1481	639	10799	19.63	2.32
2	1604	711	11408	20.29	2.26
2.5	1709	754	12062	20.42	2.27
3	1845	695	12646	20.09	2.65
3.5	1877	750	13113	20.03	2.50
4	1977	772	13698	20.07	2.56
4.5	2016	861	14198	20.26	2.34
5	2279	818	14726	21.03	2.79

2. ビームロスモニタ[9]

入射器のビームロスモニタはセンサとして大口径の純粋石英光ファイバ、検出器として PMT(H10721; 浜松ホトニクス) 2 個を NIM モジュールに組込んだものを使用している。光ファイバのコア径は用途に応じて $600\ \mu\text{m}$ 、 $800\ \mu\text{m}$ のものを使用している。

光ファイバをダクトに密着して布設すること、電磁石の中も通してチェンバーに密着させることでビームロスの場所の特定が容易になる。

3. ワイヤスキャナ(WS) [11][12]

3.1 Bセクタ WS とロスモニタの信号

入射器には現在 5 セットの WS システムが設置されており今後も増設予定である。これらは一部を除きワイヤ駆動部と PMT によるセンサ部で 1 セットになっている。1 つの WS システムは駆動部 4 台とセンサ部数台がビームオプティクスを考慮して配置されている。Figure 8 に B セクタの WS システムの

配置図と A,B,C,D の各ワイヤをビーム中に挿入した時のロスモニタの信号を示す。

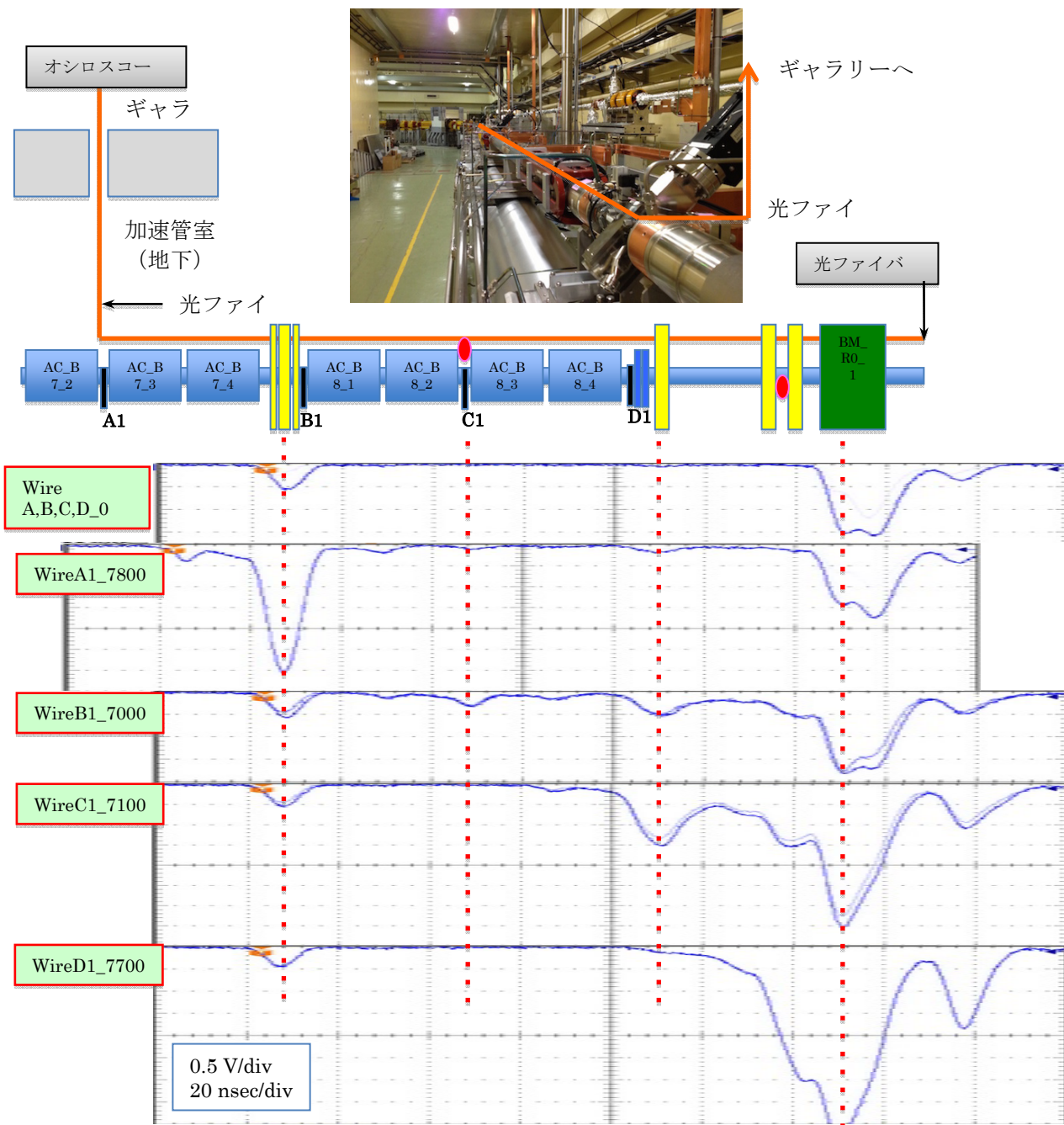


Figure 8: Layout and signals of wire scanner system at B sector.

3.2 シミュレーションとロスモニタ信号の比較

WS のワイヤを挿入した時にシミュレーションで予測されたダクトに当たる荷電粒子と γ 線の粒子数の予測をこれらのロスモニタの信号に重ね合わせたものを figure 9 に示す。

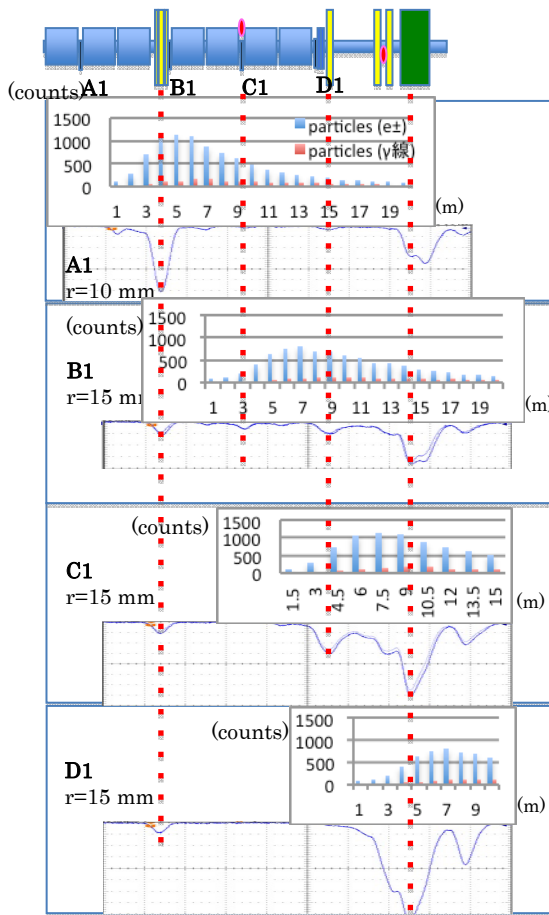


Figure 9: Signal prediction by a simulation and result of measurement of a beam loss monitor.

4. まとめと今後

半径 10 mm の真空ダクト中心部で厚さ $100 \mu\text{m}$ のタンダステン板にビームが当たり散乱と制動放射によって発生した荷電粒子や γ 線がダクト壁でシャワーを引き起こした結果、ダクト外に布設した光ファイバを通過すると期待される荷電粒子の分布をシミュレートした。

B セクタ後半に設置済みのワイヤスキャナのワイヤ駆動部と当該箇所 に布設したコア径 $800 \mu\text{m}$ の光ファイバを使用してワイヤをビーム内に挿入した時に発生するビームロスの分布を測定した。

布設した箇所のダクトの構造、例えばダクトの直径と厚さ、ベローズ部の構造、フランジ部分でのダクトへの密着度などでビームロスモニタの信号の様子が異なる事を考慮するとシミュレーションの結果と光ファイバビームロスモニタの信号は良く一致している。

今後、既存のワイヤスキャナの検出器である PMT の代わりに光ファイバの検出器を使用するとともに新しく設置するワイヤスキャナの検出器として光ファイバを使用してゆく。

ビームロスモニタに関して、現在はある特定の場所に光ファイバを布設しオシロスコープの波形を解

析しビームロスの様子を観測している。陽電子ターゲットの前後の 1 セクタと 2 セクタに光ファイバを布設し制御グループが管理するモニタステーションに設置した高速の VME-ADC を使ってロス波形を取り込む予定である。

参考文献

- [1] P. Gorodetzky, D. Lazic, G. Anzivino, E. Chiavassa, A. Contin, G. Dellacasa, N. Demarco, R. De Salvo, M. Gallio, P. Guaita, K.F. Johnson, P. Juillot, M. Lundin, M. Marino, A. Musso, A. Piccotti, E. Scomparin, E. Vercellin "Quartz fiber calorimetry" Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 361, 1995, pp.161-179.
- [2] A. Intermite, M. Putignano, A. Wolski, "First calibration of a Cherenkov beam loss sensor at ALICE using SiPM", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 677, 2012, pp.80-88.
- [3] G. Mavromanolakis, "Quartz fiber calorimetry and calorimeters", HEP-Cavendish/04/34, UA-NPPS/06/2003.
- [4] S.H. Law, S.C. Fleming, N. Suchowerska, and D.R. McKenzie, "Optical fiber design and the trapping of Cherenkov radiation", APPLIED OPTICS, Vol.45, No.36, 20 December 2006, pp.9151-9159.
- [5] W. Goettmann, M. Körfer, F. Wulf, "BEAM PROFILE MEASUREMENT WITH OPTICAL FIBER SENSORS AT FLASH", Proceedings of DIPAC 2007, 2007, pp.123-125.
- [6] F. Wulf, M. Körfer, "BEAM LOSS AND BEAM PROFILE MONITORING WITH OPTICAL FIBERS", Proceedings of DIPAC09, 2009, pp.411-417.
- [7] X.-M. Maréchal, Y. Asano, T. Itoga, "Design, development, and operation of a fiber-based Cherenkov beam loss monitor at the SPring-8 Angstrom Compact Free Electron ", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A673, 2012, pp.32-45.
- [8] J.W. van Hoorne, "Cherenkov Fibers for Beam Loss Monitoring at the CLIC Two Beam Module, CERN-THESIS-20120112, 2012.
- [9] Y. Yano, T. Obina, S. Michizono, "光ファイバー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.
- [10] T. Obina and Y. Yano, "OPTICAL FIBER BEAM LOSS MONITORS FOR THE KEK PHOTON FACTORY", Proc. of IBIC2012, TUPA10.
- [11] 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.
- [12] 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ーの応用", Proceedings of 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Osaka, August 8-11, 2012, pp.898-901.
- [13] 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.
- [14] 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.