

SuperKEKB の RF システムで使用するアークセンサ用光ファイバの性能評価 EVALUATION OF THE OPTICAL FIBER FOR ARC SENSOR FOR THE RF SYSTEM IN SUPERKEKB

中西功太^{*A,B)}、赤井和憲^{A,B)}、海老原 清一^{A)}、可部 農志^{A)}、小林 鉄也^{A,B)}、西脇 みちる^{A,B)}、
Kota Nakanishi^{*A,B)}, Kazunori Akai^{A,B)}, Kiyokazu Ebihara^{A)}, Atsushi Kabe^{A)}, Tetsuya Kobayashi^{A,B)}, Michiru Nishiwaki^{A,B)}

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

^{B)}The Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI)

Abstract

In SuperKEKB, new interlock systems for arc discharge will be adopted. In the system, instead of using the Si PIN photodiode in the the accelerator tunnel or in the klystron gallery, use the photomultiplier tube in the control room. To guide the light of the discharge to the photomultiplier, optical fiber is adopted. But the requirement of diameter of fiber core was not clear. In order to determine the specifications of the optical fiber, the performance was evaluated.

1. はじめに

アークセンサによるインターロックは、高周波の入力カプラやサーキュレータなどの放電を検出し、速やかに高周波の供給を停止する事で大電力の高周波機器を保護するために非常に重要なシステムである。KEKB では Si PIN フォトダイオードを使ったアークセンサを利用してきたが、SuperKEKB では、これに加えて光電子増倍管 (PMT) を利用したアークセンサによるインターロックシステムを導入する [1]。新しいアークセンサは特にデジタル LLRF システムを導入した RF ステーションに採用される予定で、約 10MHz のサンプリングレートでアークセンサの出力を監視することが出来る。PMT を利用したアークセンサは cERL など KEK の他の加速器プロジェクトでも採用され開発が進められている [2] [3] [4]。

新しいアークセンサは光ファイバを用いてアーク放電により発生した光を PMT に導く仕様になっており、フォトダイオードを高周波機器に直接取り付けいていた従来のアークセンサと比べると放射線や様々な電磁気的なノイズの影響を受けにくい。一方、受光部は光ファイバの切断面そのものであるため、使用する光ファイバのコアの面積がアークセンサの感度に比例する事になる。これまでアークセンサ用の光ファイバはコア径が 600 μm の大口径のものを利用してきたが、コア径が 50 μm または 62.5 μm の一般的なマルチモードの通信用光ファイバと比較して高価である事から、光ファイバのコア径とセンサの感度について調査を行った。また、従来型のアークセンサを使ったインターロックシステムと感度の比較を行った。

2. 測定素子の仕様

従来型のアークセンサの受光素子は浜松ホトニクス社製 Si PIN フォトダイオード S1722-02 である。試験に使用したアークセンサの受光素子は同じく浜松ホトニクス社製 PMT H6780(-00) である。それぞれの受光素子の感度特性を Figure. 1 および Figure. 2 に示す。PMT の感度波長範囲が 300~650nm に限られ、フォトダイオードがより広い感度波長範囲をもっていることが

分かる。なお、実際に LLRF に導入したアークセンサーでは H6780(-00) の後継機種である H10721-110 を使用しているが、特性に大きな違いは無い。

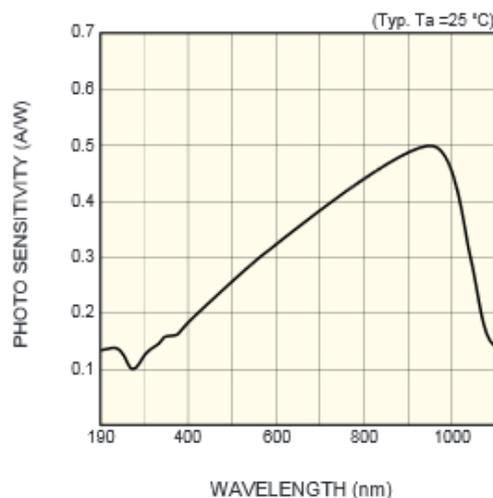


Figure 1: Photo sensitivity of the Si PIN photodiode. The horizontal axis represents wavelength and the vertical axis represents the photo sensitivity. (Curtsey of Hamamatsu Photonics K.K.)

3. アークセンサ感度の比較

3.1 比較用光源

HRD 社製の白色 LED HWDH-A59A-33b を用いてアークセンサの感度比較用の光源を作成した。Figure. 3 に示すように、LED のスペクトルはほとんどが 300~650nm に収まっており、本 LED を用いてアークセンサの感度を比較しても大きな問題がないと考えられる。本稿では順電流と相対光度の関係を線形として取り扱う事とするが、Figure. 4 より、それが良い近似であることが分かる。アルミニウム製の治具の内部に用意された直径 100mm の円筒状の空間の底板の一方に LED、もう一方に光ファイバを固定するための FC 型レセプタクルを取り付けた Figure. 5。従来型のアークセンサを取り付ける際は RF レセプタクルの代わりに ICF34 の

* kota.nakanishi@kek.jp

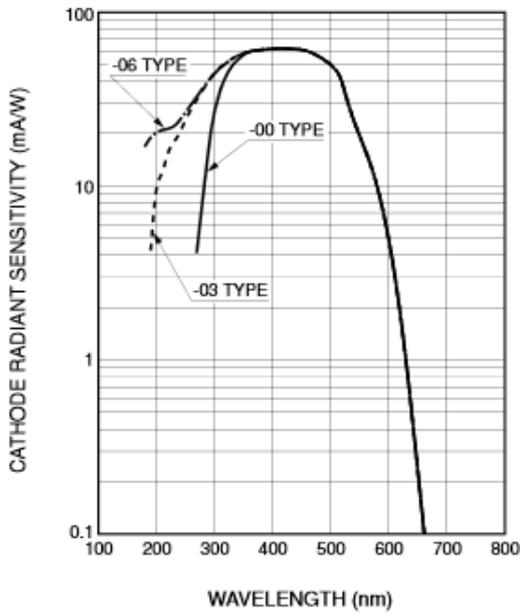


Figure 2: Photo sensitivity of the photomultiplier tube. The horizontal axis represents wavelength and the vertical axis represents the photo sensitivity. The solid black line should be referred. (Curtsey of Hamamatsu Photonics K.K.)

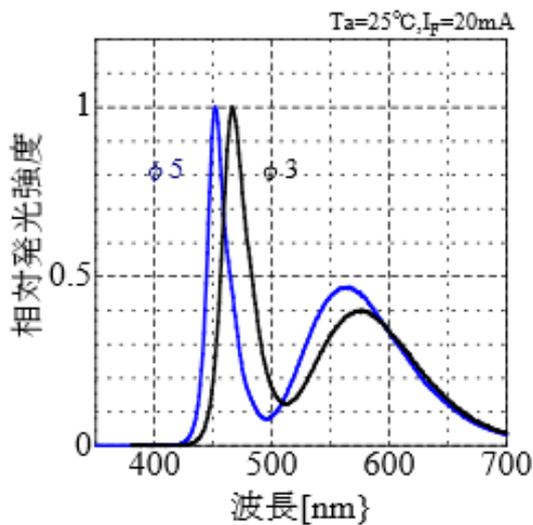


Figure 3: Spectrum of the LED. The horizontal axis represents wavelength and the vertical axis represent the relative luminance of the LED. The blue line should be referred. (Curtsey of HRD Co.,Ltd.)

ビューポートの形状を模擬した接続用の治具を取り付けられるようにした。その場合の光源とセンサーの距離は120mmとなる。

3.2 新旧アークセンサの感度とインターロック閾値

KEKB でアークセンサによるインターロックの閾値を最も厳しく設定していたのは超伝導空洞 (SCC) 用の入力カプラ部であり、それについて ARES 空洞用の入力カプラ部となっている。サーキュレータなどのイン

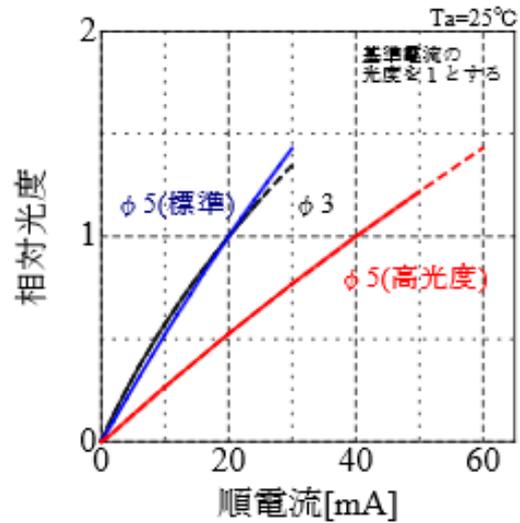


Figure 4: Luminance of the LED. The horizontal axis represents the current from power supply and the vertical axis represents the relative luminance of LED. The solid blue line should be referred. (Curtsey of HRD Co.,Ltd.)

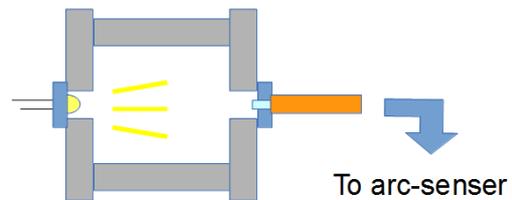


Figure 5: Layout of the light source for arc sensor calibration.

ターロックの閾値は10倍程度緩く設定されている。感度を落として運用する事は容易であるため、本稿では SCC 用および ARES 用入力カプラの閾値を比較対象とすることとする。試験用光源を用いてインターロックを発生させ実際の閾値を測定したところ、SCC、ARES それぞれの閾値は 6.2 lx、9.7 lx であった。6.2 lx の光を新しいアークセンサで観測した際の信号レベルを確認した。試験用光源とアークセンサを結ぶ光ファイバはコア径 62.5 μ m、600 μ m のものに加え、コア径 600 μ m から 50 μ m に変換するテーパ光ファイバを用いて光を集めた後に 62.5 μ m の光ファイバに接続してアークセンサに導く配置についても試験を行った。全てグレーデッド・インデックス型のマルチモード光ファイバを使用した。結果は Figure. 6 に示すようにコア径の大きな 600 μ m のファイバが最も感度が高く、テーパファイバを用いて光を集める事で感度が上がる事も確認できた。光ファイバのコアの断面積に比例した光量を取り込まれると考えられるので、アークセンサの感度は光ファイバのコア径の自乗に比例する事が期待できる。また、テーパファイバで光を収束する場合、両端のコア径の比と同じロスがあるため、アークセンサの感度はコア径に比例する事が期待できる。したがって、コア径 62.5 μ m のファイバを使用した場合を基準にすると、コア径 600 μ m のファイバを使用した場合の感度と 600 μ m から 50 μ m に変換す

るテーパ光ファイバを用いた場合の感度はそれぞれ7.7倍、92倍と期待される。実際の測定では、3.9倍と108倍であった。Figure. 6に示したように、テーパ光ファイバを使用しても KEKB と同等のアークセンサの感度を実現する事が可能と考えられるが、PMTのコントロール電圧は80%程度以上に設定する必要がある。

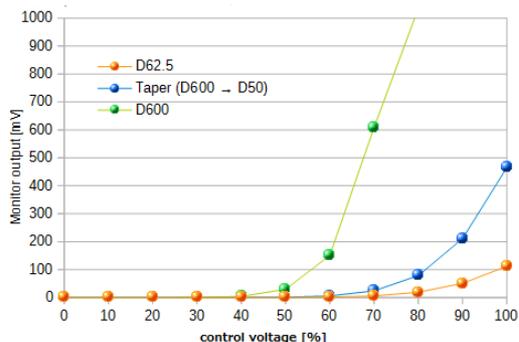


Figure 6: Signal level of the arc sensor at 6.2 lx. The horizontal axis represents the control voltage of PMT and the vertical axis represents the output voltage of arc sensor.

4. KEKB ダンピングリング用加速空洞の入力カプラによる試験結果

KEKB ダンピングリング用加速空洞の大電力試験時に新しいアークセンサを用いて入力カプラ部の発光状態を測定した。この実験では全てコア径 $600\mu\text{m}$ のファイバを用いた。大電力投入時に入力カプラのセラミック窓部分を高感度のビデオカメラ (KS-520K) で撮影すると、紫色に連続的に発光しているように見える (Figure. 7)。この発光状態では、従来のアークセンサはインターロ



Figure 7: The ceramic window of the RF input coupler is taken by the high-sensitivity video camera. It was seen as emits light continuously.

クを発生するにいたらず、通常のテレビカメラでは発光は認められない。手持ちの機材では光量不足のため発光のスペクトルを取得する事ができなかったが、高感度カメラの画像によると PMT の感度外である赤の発光が支配的であるようには見えない。このセラミック窓部分の連続発光を新しいアークセンサで測定した。測定結果

を Figure. 8 に示す。テレビカメラでは連続して発光しているように見えるが、実際には早い明滅を繰り返している事がわかった。図の信号はコア径 $600\mu\text{m}$ のファイバを用い、コントロール電圧は100%で測定した。平均の電圧は115mVであり、照度は0.046 lxである。コア径 $600\mu\text{m}$ の太いファイバを採用する事で、インターロックレベルと比べて低光量の発光現象の詳細を観測できる事が分かる。PMTを使用したアークセンサでスパ

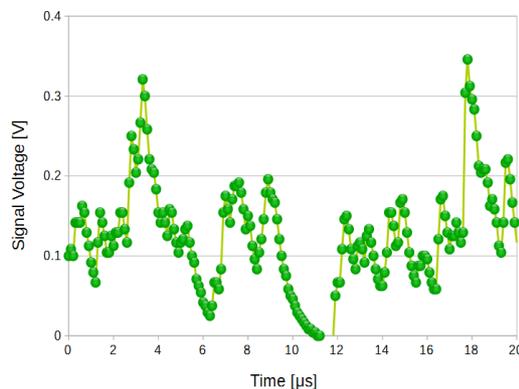


Figure 8: The light from arc discharge was observed by the arc sensor consist of PMT. The light was observed as continuous light by a video camera. The new arc sensor can observe the time structure of the light.

イク状のノイズが発生する事が報告されている [4]。これらは PMT やファイバへの放射線が原因と推定されている。本試験においても Figure. 9 に示すようなスパイク上のノイズが多数観測されている。このスパイクの幅は $1\sim 2\mu\text{s}$ 程度で単発であるため、適切なソフトウェア上によるフィルタ処理によってアーク放電と区別できると考えている。また、スパイク上の放電は宇宙線のよう

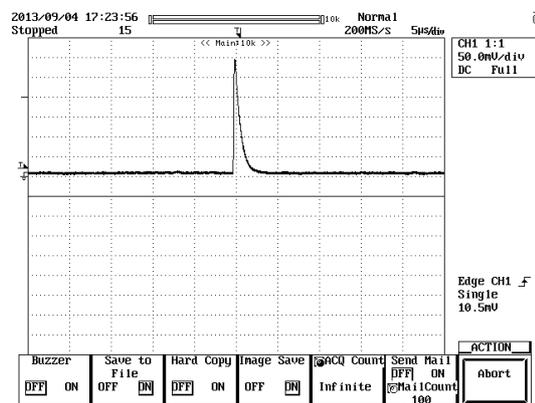


Figure 9: The new arc sensor consist of PMT caught the noise. It looks like a short spike. It was observed even when the RF was stopped.

な外的要因だけでなく、ファイバが設置される環境にも依存していると考えられる。Figure. 10 にスパイク状ノイズの発生頻度を示す。大電力 RF 試験の実施中に発生頻度が高く、週末や夜間の RF 停止期間中は発生頻度が下がっている。

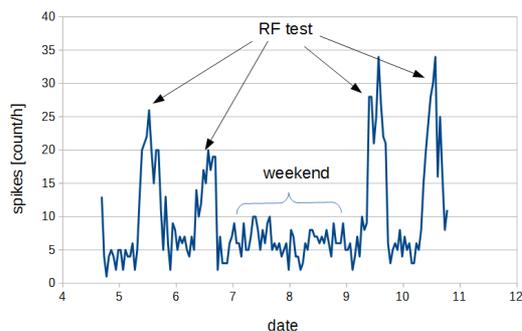


Figure 10: The count rate of spike-like noise is shown. It is affected by the level of ambient radiation.

5. まとめ

PMT を用いた新しいアークセンサで使用するための光ファイバの選定を行った。コア径 $62.5\mu\text{m}$ の通信用マルチモードファイバを用いても KEKB と同等のアークセンサのインターロックの閾値を検出する事は可能であるが、PMT のコントロール電圧を最大に上げて感度を確保した上で信号レベルが 100mV 程度であるため、ファイバや PMT の経年劣化などを考慮すると余裕が無いと判断できる。PMT のコントロール電圧に調整範囲を持たせた状態で使用するために、入力カプラ部等加速器トンネル内のアークセンサにはコア径 $600\mu\text{m}$ の大口径のファイバを使用することとした。クライストロンギャラリ内で使用するアークセンサはインターロックの閾値が 10 倍程度大きいので、コア径 $600\mu\text{m}$ から $62.5\mu\text{m}$ に絞ったテーパファイバをコア径 $62.5\mu\text{m}$ の通信用ファイバに接続して使用する事とした。

コア径 $600\mu\text{m}$ のファイバを使用してセラミックの放電を観測した結果、インターロック閾値の 1% 程度の照度の発光現象の時間構造を観測する事ができた。インターロックが発生する直前の前駆現象などを観測できる可能性がある。

アークセンサは放射線などの影響と考えられるスパイク状のノイズを観測する。ノイズの時定数は $1\sim 2\mu\text{s}$ 程度であるので、適切にフィルタ処理する事でアーク放電の信号と区別する事ができる。ノイズの検出頻度は周囲の放射線レベルに影響されるようである。

参考文献

- [1] T.Kobayashi, et al., “Development and Construction Status of New LLRF Control System for SuperKEKB”, Proceedings of the 5th International Particle Accelerator Conference, Dresden, Germany, Jun. 2014, WEPME071.
- [2] Takako Miura, et al., “LOW-LEVEL RF SYSTEM FOR cERL”, Proceedings of the 1st International Particle Accelerator Conference, Kyoto, Japan, Aug. 2010, TUPEA048.
- [3] Yoshiharu Yano, et al., “DEVELOPMENT OF ARC DETECTOR FOR cERL”, Proceedings of the 6th Particle Accelerator Society Meeting, Ibaraki, Japan, Aug. 2009, WPBDA14.
- [4] Yoshiharu Yano, et al., “THE OBSERVATION OF THE COUPLER OF THE KEKB ARES CAVITY WITH THE PMT ARC SENSOR”, Proceedings of the 7th Particle Accelerator Society Meeting, Hyogo, Japan, Aug. 2010, THPS086.