

## THE OBSERVATION OF THE COUPLER OF THE KEKB ARES CAVITY WITH THE PMT ARC SENSOR

Yoshiharu Yano #, Kiyokazu Ebihara, Kazuo Yoshino, Hiroshi Sakai, Tatsuya Kageyama, Shinichiro Michizono, Shigeki Fukuda  
High Energy Accelerator Research Organization  
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801 Japan

### Abstract

We developed the arc sensor using PMT and the optical fiber. We were able to catch the small emission of light that we were not able to look at so far. When KEKB is running, a Cherenkov light was observed at considerable strength. These light spoil the reliability of the arc sensor. We examined measures.

### PMT アークセンサによる KEKB ARES 空洞のカプラーの観測

#### 1. はじめに

クライストロンの RF 窓、空洞の RF 入出力カプラーなどの放電をいち早く検知し RF を停止する為にアークセンサが用いられるが、光をビューポート直後で電気信号に変換した場合、様々な電気ノイズによる誤動作で不必要にインターロックをかける事が多かった。しかし、ビューポートでとらえた光を光ファイバーで制御室まで導きそこで電気信号に変換すればノイズによる誤動作を減少することが出来る。これまで光ファイバーを使う事によるディメリットを補う為に光電子増倍管(PMT)を使った高感度アークセンサを開発してきた。<sup>1),2)</sup> ここでは KEKB ARES 空洞入力カプラーのセラミック窓からの発光を観測した結果を報告する。観測は ARES 空洞テストスタンドと KEKB 加速ステーション D8-D の 2 カ所で行った。テストスタンドでは通常の放電光の他に TV カメラでは見えない微弱光を観測した。D8-D では、KEKB 運転時、ビームロスにより光ファイバー中で強いチェレンコフ光が発生することが観測され、この光信号処理を現在検討中である。

#### 2. 光ファイバーとアークセンサ

光ファイバーは純粋石英、ステップインデックス構造、コア径 600  $\mu\text{m}$  で紫外~可視光(300~800nm)で透過率の高い物を使用した。両端には FC コネクタが付けられビューポートアダプタとアークセンサモジュール間を簡単に接続する事が出来る。テスト信号用の LED を付けたアダプタを示す。(写真 1)



写真 1 : ビューポートアダプタとキャップ

最新のアークセンサモジュール(Ver.5)は 4-ch の PMT を NIM 2 巾のモジュール内におさめそれぞれ独立に信号をモニターしながらゲインとインターロックレベルの設定をすることが出来る。PMT とアークセンサモジュールを示す。(写真 2)

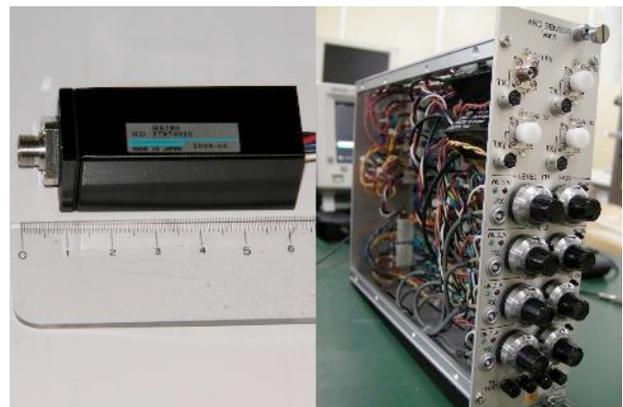


写真 2 : PMT とアークセンサモジュール

PMT(H6780)の感度波長範囲は 300nm~650nm でありシステム全体としては 300nm~650nm の光に対して感度を期待出来る。ただ、高感度領域を利用して微弱な光を観測しようとする PMT 個々の特性の違いが顕著になるため注意が必要である。ここでは表 1 に示すモジュールのチャンネル 1 のみを使用した。

表 1 : アークセンサモジュール

バージョン	Ver. 4	Ver. 5
TYPE	T2743-01	T3018-01
SER. NO.	10803-027-02	11004-007-01

#### 3. ARES テストスタンドでの試験

##### 3.1 ARES TEST 空洞

ここでは KEKB の ARES TEST 空洞で行ったコンディショニング時の発光現象と新品カプラーのエー

# yoshiharu.yano@kek.jp

ジング時の発光現象について述べる。TEST 空洞はMR-D1 電源棟に設置され新品カプラーのエージングやその他様々な試験を行っている。TEST 空洞出力カプラー側からの写真と入力カプラーに設置したアークセンサを示す。(写真3)

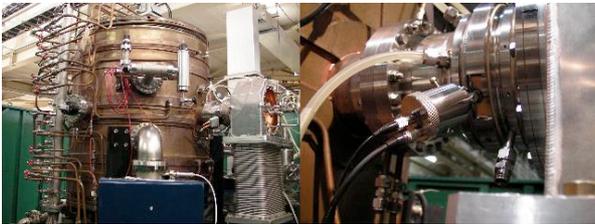


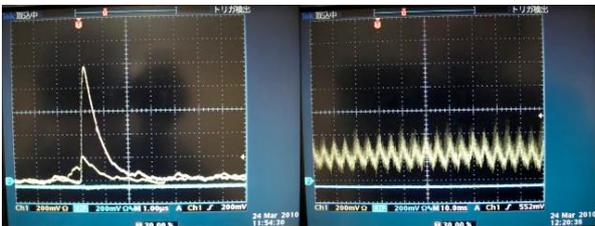
写真3 : TEST 空洞とアークセンサ

写真ではアダプタが見えているが試験では隙間からの光でノイズフロアが上がるのでアルミホイルで遮光している。

### 3.2 エージング済みのカプラー(Ver.4 で観測)

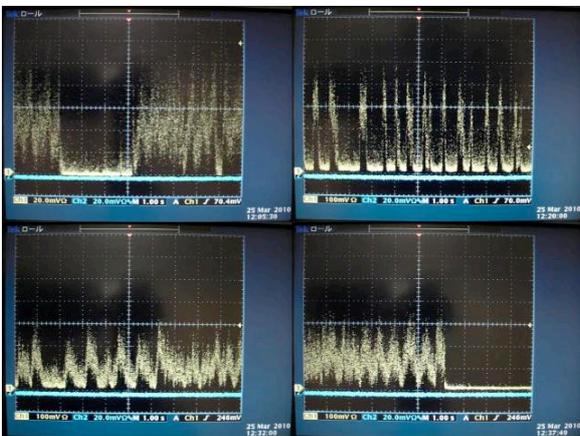
このカプラー(MBC042)は 800kW までエージングが済んだ物でセラミックの純度が高く 250kW 程度の RF パワーでセラミック自体の発光が始まる事が監視カメラで確認されている。

RF パワーが 150kW に達した頃から発光と思われる微弱信号が確認され始め、徐々にパルス高及び頻度が上昇し、250kW 付近で信号のベースが上がり始めた。この発光には 5msec の周期がある事が観測された。(写真4)



(左; 240kW, 右; 510kW)

写真4 : パルス波形(200mV/div, 1  $\mu$  sec/div) & 5msec 発光周期(200mV/div, 10msec/div)



(左上; 500kW, 右上; 520kW, 左下; 530kW, 右下; 530kW)

写真5 : 様々な発光パターン(100mV/div, 1sec/div) 左上の画像のみ(20mV/div, 1sec/div)

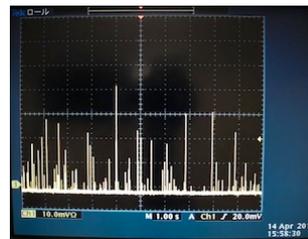
300kW~530kW は監視カメラでも見られていた間欠発光の様子が観察された。RF OFF 直後にも空洞に残ったパワーによると思われる弱い発光が観測された。写真5に様々な発光パターンを示す。

### 3.3 新品カプラーのエージング(Ver.5 で観測)

このカプラー(MBC044)はマルチパクタリングの発生を抑えるため同軸ライン外胴体の内側に溝を加工した構造になっている。<sup>4)</sup> カプラー直前の方向性結合器でカプラーからの反射波をモニターに加えた。エージングプログラムはカプラーの真空が設定値以下の条件で RF パワーを上げて行くよう設定されている。

#### 1) 初期(RF ~150kW) :

2~4 分の間隔で約 1 秒間発光する状態がほぼ 2 時間続いた。発光と真空のハネは同期していた。後半は発光間隔が短く発光時間が長くなりほぼ連続して発光する状態になり真空のハネは見られなくなった。(写真7)

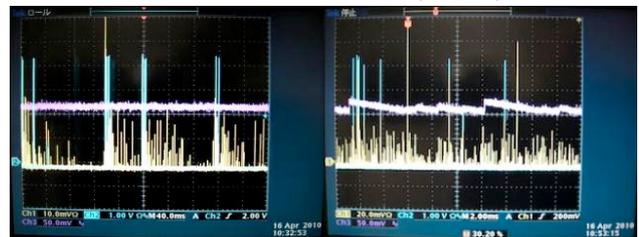


(150kW 時)

写真7 : 連続発光時(10mV/div, 1sec/div)

#### 2) 中期(RF 150~300kW) :

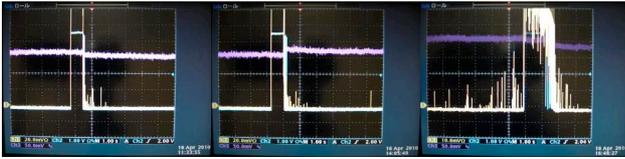
エージングが進んで行くにつれ 4~5 分の間隔で 5~10 秒間バースト的に発光するようになった。そのうち発光間隔が短くなり波のある発光がしばらく続き、そのうち 1 秒間に 10 回程度 10msec の短い発光が見られるようになった。RF 160kW 付近では反射波形は特に変化しなかったが、RF 180kW に達した頃から反射波にのこぎり状のパターンが見られる様になった。(写真8)



(左; 164kW, 右; 185kW)

写真8 : 反射波形 (20mV/div, 2msec/div)

しばらくすると連続発光が治まり 5~10 分おきに強い発光が起きる様になった。強い発光の終わりには反射波形が減少する時と増加する時が観測された。(写真9)



(左; 180kW, 中; 267kW, 右; 277kW)  
 写真 9 : ch-1(左, 中; 20mv/div, 右; 10mv/div)  
 ch-3(50mv/div), 1.0sec/div

ここで ch-1 は PMT のモニター信号、ch-2 はインターロック信号、ch-3 はカプラーの反射信号である。

### 3) 後期(RF 300~800kW) :

300kW 付近では強い発光が治まり弱い発光の頻度が上昇した。発光の状態に多少の変動はあるが特に強い発光も無く 800kW まで RF パワーは上昇した。後日再度 RF を投入したとき 750kW 付近で非常に強力な発光と反射波の減少及び真空のハネが観測された。(写真 10) ここでインターロックのしきい値は 1V に設定されている。この映像はカプラーのどこかでアーク放電が始まって約 13 秒後に光ファイバーの視野角内に放電が拡大し約 15 秒後に治まった現象を捉えたものと思われる。

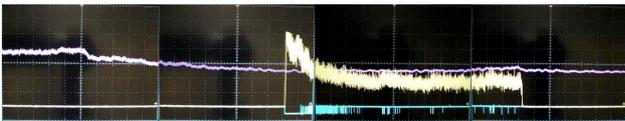


写真 10 : カプラーの反射(100mv/div, 1sec/div)と  
 アークセンサの信号(500mv/div, 1sec/div)

## 4. KEKB ARES 空洞での試験

### 4.1 KEKB ARES 空洞

KEKB で運転中の ARES 空洞の入力カプラーに設置した本機で観測した光について述べる。1 箇所しか無いビューポートに既設のアークセンサ(フォトダイオードと発光ダイオードのセット)が設置してあり取り外す事が出来ないため、アダプターに既存のアークセンサの基板を組込んだ。D8-D の ARES 空洞とフォトダイオードと発光ダイオードを組込んだアークセンサヘッドを示す。(写真 11)



写真 11 : センサヘッド部と D8-D ARES 空洞

### 4.2 ビーム運転中のアークセンサの誤動作

既存のアークセンサはビーム入射時とアポート時に誤動作を起こすためこの期間はインターロックを動作させない様にしていた。それはビューポート直後で電気信号に変換し、地下→電源室→制御室まで

約 100m の距離を引き回しておりその過程でノイズが乗り誤動作していると思われる。

PMT アークセンサで観測したところ運転中でも弱い発光と宇宙線による低頻度の発光のみが見られた。

しかし、HER 入射に同期して強力な発光が確認された。(写真 12)

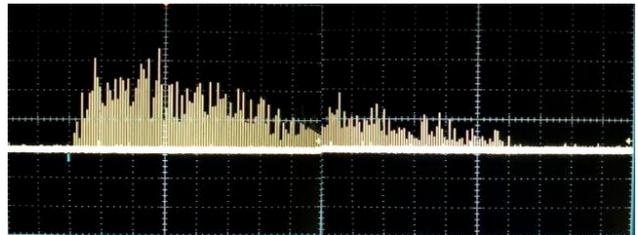
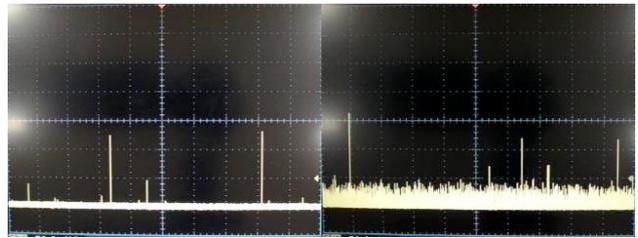


写真 12 : HER 入射時の信号(200mv/div, 1sec/div)

比較の為に RF 投入前と投入後の信号レベルの様子を示す。(写真 13)



(左; 0kW, 右; 260kW)  
 写真 13 : RF 投入前後(50mv/div, 1sec/div)

写真 13 で時々高い信号が見えるがこれは宇宙線が PMT の光電面に入射した時の信号である。写真 12 のような信号が見えるのは HER 入射時とビームアポート時だけで LER 入射時には観測されない。しかもアポート時に観測される信号レベルは 1.5~2.0v もあり感度を上げた場合インターロックの設定レベルを超えてしまう。PMT の感度を下げると今まで見てきた発光の細かな様子を観測する事は不可能になる。この光の原因は HER 入射時のビームロスで出来た荷電粒子が光ファイバーケーブルを通過する時に出るシンチレーション光かチェレンコフ光であると考えられる。既存のアークセンサもこの荷電粒子がフォトダイオードを通過して出る信号により誤動をしていたものと考えられる。PMT の信号を直接観測したところ、4nsec 程度で立ち上がっているためこの光はチェレンコフ光であると判断した。

### 4.3 チェレンコフ光のスペクトル

チェレンコフ光は物質中を進む荷電粒子がその物質中の光速を超えた場合に発生する。

- n ; 物質の屈折率
  - $\theta_c$  ; チェレンコフ光の放出角度
- とすると次の関係がある。

$$\beta > 1/n, \cos \theta c = 1/(n \beta)$$

単位長さあたり放出される光子数は(Frank-Tamm)  
 $\alpha$  ; 微細構造定数(= 1/137)  
 $\lambda$  ; チェレンコフ光の波長  
 とすると次の関係がある。

$$N_p = 2 \pi \alpha \phi (\sin^2 \theta c / \lambda^2) d \lambda$$

短波長の光が強く出ていることが分かる。ファイバーの透過特性と PMT の感度特性を考慮すると 400nm より短い波長の光を落とす必要がある事が推測される。

#### 4.4 チェレンコフ光とフィルター

問題の光のスペクトルを計測する事を試みたがビームによるチェレンコフ光は連続光ではないため通常の分光器では光量不足で測る事は出来なかった。そこで、光ファイバーの接続部分に赤フィルムを挟み込み信号の比較をおこなった。写真 14 にフィルムがある場合と無い場合の信号レベルを比較した。(左; フィルム無し, 右; 赤フィルム)

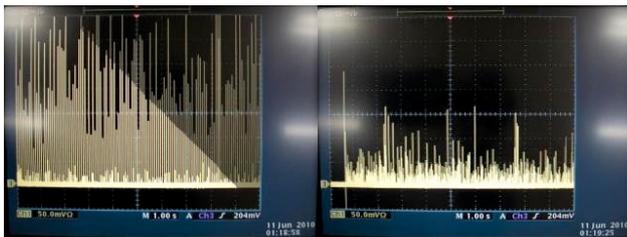


写真 14 : フィルムによる減衰比較  
 (50mv/div, 1sec/div)

赤フィルムを挿入したものは明らかに問題の信号レベルが下がっている。

#### 4.5 KEKB 運転時のカウンティンググレイト

半割の FC コネクタの間に青、緑、黄色、赤の 4 色のフィルムを挟んだ簡易フィルターを作り減衰の様子を比較した。測定ではモジュールのインターロックレベルとゲインを調整し、インターロックパルス数を計測し発光頻度の比較を行った。

RF 投入時の様子を測定する為にフィルター無しでアークセンサの感度を最大(10.00)、インターロックレベルを最小(0.00)に設定し毎秒のカウンティンググレイトを測定した。D8-D の RF 投入時から待機状態までの様子を示す。(図 1)

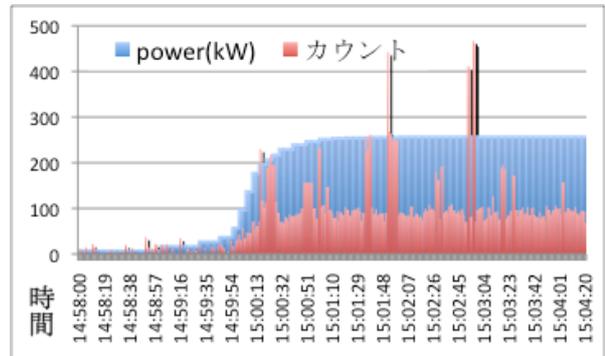
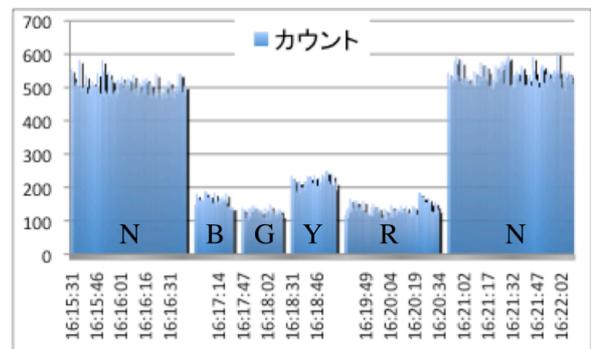


図 1 : RF 投入時の発光数/秒

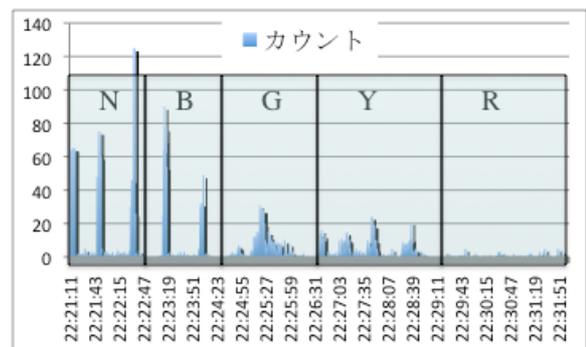
HER (0.0A), LER (1.6A), D8D (596kW), 感度(10.00), レベル(0.10)の条件でフィルターを変更した場合の 1 秒間のカウント数である。(図 2)



(N;無し、B;青、G;緑、Y;黄、R;赤フィルター)  
 図 2 : フィルターによるカウント数の違い

マルチパクタによる光は黄フィルムを通した場合がやや多くなっているが大きな差は見られない。

HER, LER 同時入射, 感度(10.00), レベル(0.20)の条件でフィルターを変更した場合の 1 秒間のカウント数である。(図 3)



(N;無し、B;青、G;緑、Y;黄、R;赤フィルター)  
 図 3 : HER, LER 同時入射

1 種類のフィルターで計測中にカウント数がくし状に増減している。HER 入射時にチェレンコフ光を感じてカウント数が増えている。その他の時はマルチパクタの光であるため数カウントしかない。この図から赤のフィルターでかなりのチェレンコフ光が

落ちているのが分かる。

ハロゲンランプを使って簡易フィルターの透過特性を計測した結果を示す。(図 4)

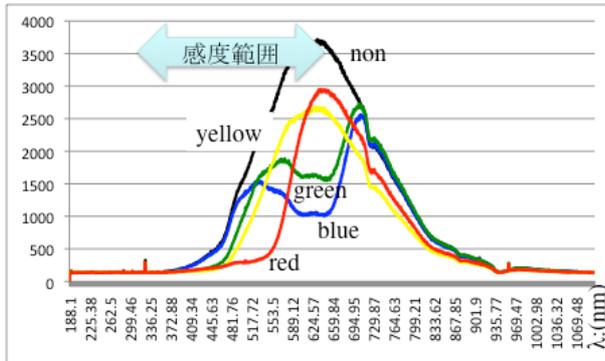


図 4 : 簡易フィルターの透過特性

以上からチェレンコフ光は~550nm より短波長の成分がほとんどであると推測出来る。

赤フィルターを通したアークの信号は未確認なので断定はまだ出来ないが、赤フィルターを使えばビームロスの多い所でも光ファイバーを使ったアークセンサの使用が可能であろう。ビームロスの比較的少ない D5-C での測定も行ったがこちらはチェレンコフ光をほとんど感じなかったので問題なく使えるであろう。

## 5. 最後に

KEKB の運転は 2010 年 6 月で終了するため測定機器を揃える時間的余裕が無く校正された測定器を使っての測定は出来なかった。そのためこれらは参考データにしかならないが、KEKB の運転が再開されるまでの間、テスト空洞と Linac で追測定を行い SuperKEKB で PMT アークセンサを採用出来るよう試験を続けたい。また放射線下での光ファイバーの耐久性については未調査であるので今後この件についても調査を進めて行く。

ところでアークセンサにとってチェレンコフ光は邪魔者であるが、ビームロスモニターのセンサーとして見た場合、光ファイバーは有効なセンサーとして使える。立ち上がりの早い PMT を使いファイバーの解放端にミラーを付け、ファイバー上で発生した光の直接光と反射光の時間差を測定すればファイバー上で荷電粒子が通過した場所を特定することが出来る。これをビームダクトに平行に複数本張ればビームロスの発生箇所を特定するデータになる可能性がある。今後は、これについても検討を進めて行きたい。

## 参考文献

- [1] 矢野喜治ほか “光電子増倍管を利用したアークディテクターの開発” 第 34 回リニアック技術研究会、和光、2007
- [2] 矢野喜治ほか “cERL 用アークディテクターの開発” 第 36 回リニアック技術研究会、東海村、2009
- [3] T. Kageyama et al. “The ARES Cavity for KEKB”, Proc. of e+e- Factories '99, Tsukuba, Sep.1999.
- [4] Tetsuo Abe et al. “Multipactoring suppression by fine grooving of conductor surfaces of coaxial-line input couplers for high beam current storage rings” KEK Preprint 2009-42 February 2010 A