

J-PARC RCS ビームロスモニタの高圧依存性の測定 HIGH VOLTAGE DEPENDENCE MEASUREMENT OF BEAM LOSS MONITOR IN J-PARC RCS

畠山 衆一郎[#], 吉本 政弘, 山本 風海,
Shuichiro Hatakeyama [#], Masahiro Yoshimoto, Kazami Yamamoto
JAEA J-PARC

Abstract

The proportional counter is adopted for the beam loss monitor (PBLM) which is utilized for the machine protection system (MPS) in J-PARC 3GeV synchrotron (RCS) and 30GeV synchrotron (MR). The high voltage (HV) dependence of the gain of PBLM is measured in MR using beam loss at the collimator thus they have a result of the exponential fitting to the data. In RCS also measured the high voltage dependence using Na-22 source and beam loss. We have the same result as MR. Although we found there is saturation of the gain which is caused by the limit of the output voltage of the preamplifier and the integrator circuit. At present, we can't set the adequate HV values to all of PBLMs because the number of channels of HV is less than the number of PBLMs so some of PBLMs have the problem of saturation. Then we are planning to upgrade the HV power system using multi-channel HV modules.

1. はじめに

J-PARC 加速器では、ビームラインの放射線の低減を目的として、比例計数管型のビームロスモニタ(PBLM)が、機器保護システム(MPS)に組み込まれている。一般的な比例計数管は、不活性ガスが充填された円筒管内で放射線によって電離した電子を、円筒管と中心のワイヤの間にかけられた高電圧によって加速し、ガス分子と次々衝突電離(タウゼント雪崩)させて増幅する。J-PARC 3GeV シンクロトロン(RCS)と、30GeV シンクロトロン(MR)でも円筒管型(直径 50mm、長さ 600-1000mm)の比例計数管が用いられており、ガス成分は Ar 99% と放射線による劣化の少ないクエンチガス CO₂ 1%、ガス圧は 1.1 気圧、最大印加電圧は 2000V である。

2. 増幅率と印加電圧の関係

比例計数管のガス増幅率(ゲイン)は、印加電圧(HV)の高さによって、①電離電子の一部が陽極に届く前にイオンと再結合する再結合領域、②電離電子が全て陽極に届くが増幅は起こらない電離箱領域、③電離電子がタウゼント雪崩を起こし一次電子数に比例して増幅される比例計数領域、④残留イオンによる空間電荷効果で非線形効果が表れる境界領域、⑤空間電荷効果が支配的になり一次電子数に関係なくゲインがほぼ一定となる GM 領域に分かれる。増幅率と印加電圧の関係式は一般的に式(1)のような Diethorn の式 [1]に従う。

$$\ln M = \frac{V}{\ln(b/a)} \frac{\ln 2}{\Delta V_{\lambda}} \left[\ln \left(\frac{V}{pa \ln(b/a)} \right) - \ln K \right] \quad (1)$$

ここで、M はガス増幅率、V は印加電圧、a は陽極ワイヤの半径、b は陰極円筒管の半径、p はガス圧力、K はガス増幅が起こる閾値、 ΔV_{λ} は電離事象間の電位差(定数)である。比例計数領域では、ガス増幅率は近似的に

印加電圧の指数関数となる。Figure 1 に MR の PBLM の HV 依存性の結果を示す[2]。このデータは 3-50BT ビーム輸送ラインのコリメータにローカルバンプ軌道でビームロスさせて付近の PBLM で測定したもので、ゲイン(G)と印加電圧(V)のフィッティング関数は、

$$G = Q \exp (K V) \quad (2)$$

である。ここで $Q = Q_0'/Q_0$ で、 Q_0 は、電離箱領域での電荷量、 Q_0' と K は自由パラメータである。(以下、K は式(2)の K を示し、式(1)の K とは関係ない)

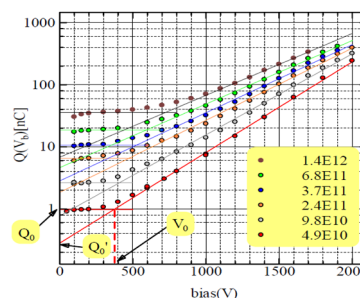


Figure 1: The gain curve of the PBLM as a function of the bias voltage. The Eq. (2) is adapted as a fitting function [2].

自由パラメータの Q_0' と K は相関しており、Fig. 2 に示す通り、 Q_0' の対数が K におよそ反比例する関係になる。

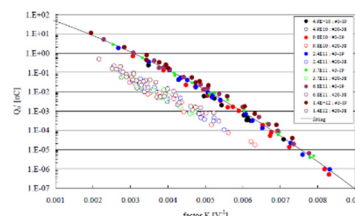


Figure 2: The correlation between Q_0' and K [2].

[#] hatake@post.j-parc.jp

3. RCS の PBLM の測定

RCS の PBLM の測定系は、地上の HV 電源からサブトンネルの LPF を通して主トンネルの PBLM にバイアス電圧が印加され、出力信号はサブトンネルのプリアンプ(入力インピーダンス 10kΩ、ゲイン 10 倍)を通して地上の積分回路につながる。積分回路は入射から出射までの時間(20ms)をカバーするゲートで波形を積分し、出力が MPS 回路につながる。積分回路からは PBLM の生波形も出力され、デジタイザ(16bit、250kHz、8000samples)によって入射から 32ms の波形が記録される。

3.1 Na-22 線源を用いた HV 依存性の測定

放射線計測器の校正用の Na-22 密封線源(~16kBq)を PBLM のゲイン測定に使用した。Na-22 は β +崩壊後の励起状態から 1.27MeV の γ 線、また対消滅から 0.51MeV の γ 線を放出する。測定では、ビームが停止したメンテナンス期間中に PBLM の円筒管の中央に線源を置き、デジタイザをランダムトリガにしてデータ取得した。Figure 3 は、デジタイザで取得した Na-22 の波形で、ピークの一つ一つが γ 線事象である。Figure 4 は、32ms 間に閾値(0.05V)を超えた γ 線の信号のピーク電圧値の和(Sum of peaks)をヒストグラムにしたもので、ランダムな事象の確率分布であるポアソン分布となる。

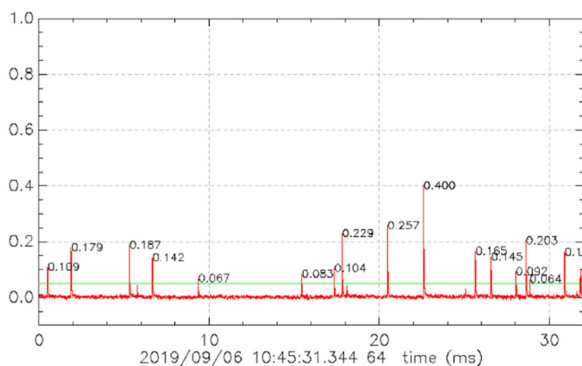


Figure 3: The Na-22 gamma-ray signal measured by the PBLM with 2000V bias voltage.

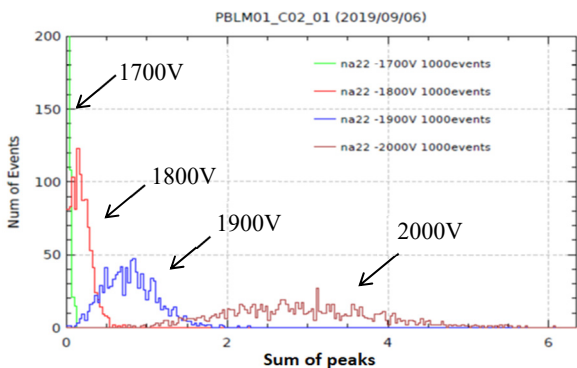


Figure 4: Histogram of the sum of peaks of the Na-22 gamma-ray signals measured by the PBLM with 1700, 1800, 1900, 2000V bias voltage. The histogram is interpreted as a poisson distribution.

3.2 ビームロスを用いた HV 依存性の測定

ビームロスを用いた測定は、ビーム運転中にデジタイザをビームに同期したトリガでデータ取得した。Figure 5 (a)は、MLF 600kW のビーム試験中にコリメータの遮蔽体の内側に設置されている PBLM の波形を HV を変えながら測定したもので、(b)は L3BT 輸送ラインにある 100 度ダンプにビームを打っている時の制動放射線を近傍にある PBLM で HV を変えながら測定したものである。

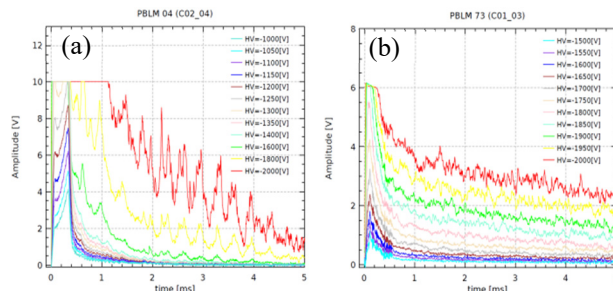


Figure 5: (a) The beam loss signal at the collimator measured by the PBLM with 1000 to 2000V bias voltage. (b) The signal by the bremsstrahlung radiation from 100deg dump beam loss measured by the PBLM at L3BT with 1500 to 2000V bias voltage.

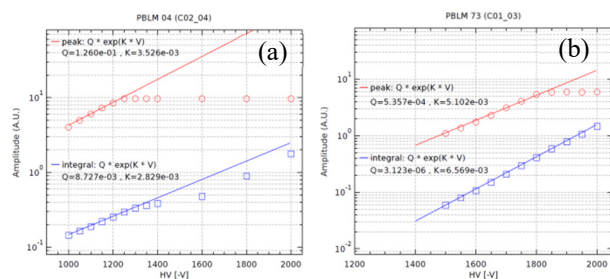


Figure 6: Exponential Fitting to the beam loss by the collimator (a) and the 100deg dump (b). The red circle points are peak value, the blue square points are integral value.

コリメータのビームロスでは HV の値が 1300V 以上で、100 度ダンプでは 1850V 以上で波形の上部が飽和している。Figure 6 (a) はコリメータのビームロスのデータのうち飽和していないものを式(2)でフィッティングしたもので、○はピーク値、□は積分値である。(b)は同様に 100 度ダンプのデータである。ピーク値はある HV 値を超えると飽和して平坦になるが、積分値は波形のテイル部分の寄与があるので平坦にはならない。これは、PBLM の出力が GM 領域に達しているわけではないことを示しており、波形が飽和しているのはプリアンプまたは積分回路の出力電圧の上限に達しているからと思われる。

3.3 Na-22 線源とビームロスの測定の比較

Na-22 線源のデータと 2 種類のビームロスのデータについて式(2)でフィッティングし、比較したものを Fig. 7 に示す。横軸は HV 値、縦軸(log scale)は、(a)、(b)のビームロスのデータでは波形の積分値、(c)の Na-22 線源のデータでは Sum of peaks のヒストグラムの平均値で、両者とも物理的な電荷量には換算していないが、電荷量の次元である。

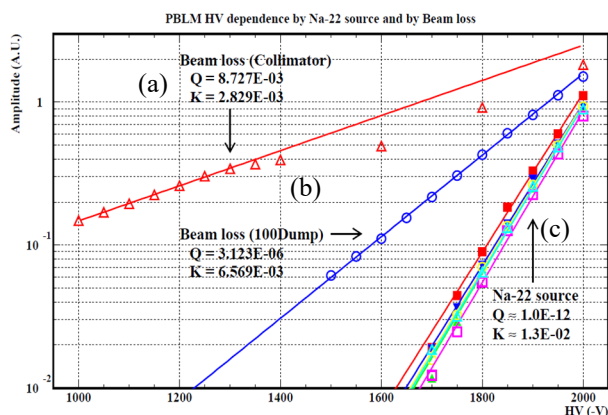


Figure 7: (a) The fitting by Eq. (2) for the beam loss data at the collimator. (b) for the beam loss data at 100deg dump (c) for the Na-22 source data. The unit of vertical axis is arbitral (not converted to the physical charge value).

Figure 8 は、式(2)の自由パラメータ K と Q の相関プロットで、それぞれ、(a)はコリメータのビームロス、(b)は 100 度ダンプのビームロス、(c)は Na-22 線源のデータを示す。MR の結果と同様に Q の対数は K に反比例していることが分かる。2つのビームロスのデータは、Na-22 線源のデータのフィッティングの外挿上にある。

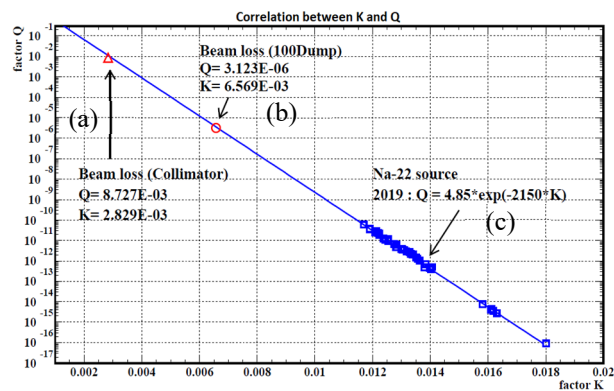


Figure 8: The correlation between the factor K and the factor Q of Eq. (2). (a) beam loss at collimator, (b) beam loss at 100deg dump, (c) Na-22 source data.

4. HV 電源システムのアップグレードの検討

RCS では、PBLM の積分出力は MPS 回路の入力電圧 (0~5V) の範囲内に調節しなければならないので、PBLM のゲインはビームロスの多い所では低めに、ビームロスの少ない所では高めに設定する必要がある。ところが HV 電源の数は 15 台しかなく 87 台の PBLM に供給するために、ひとつの HV 出力を分岐させて複数の PBLM に供給している。2020 年 6 月時点で MLF 600kW 利用運転時のビームロスで 5 箇所の PBLM のピーク値が飽和する場所が出ている。この問題を解決するために、PBLM 1 台に 1CH の HV が割り当てられるように HV のチャンネル数を増設する案が検討されている。ひとつは、(1) 現状の HV 電源と PLC の組み合わせを PBLM の台数分増設する案、もうひとつは、(2)モジュール

化された多チャンネルの HV 電源システムを導入する案である。(1)では設置スペース的に 19"ラックに 12 台が限界で、PLC の接続配線、ラダーの書き換えなどの作業量も多い。また HV の設定、読出を行う PLC の DA/AD モジュールの分解能が 12bit(4096)なので設定値とモニタ値のずれが 2~6V くらいある。一方、(2)の案では 19"ラックの 5U のスペースに最大 64CH 入り、作業量も HV モジュールを差して LAN ケーブルをつなぐだけで良い。また電圧の精度も設定値とモニタ値のずれが 0.1V 以内である。Figure 9 に、(2)の案である Wiener 社の HV 電源システム (Mpod-Mini-HV) のテスト機を示す。リモートコントロールのための EPICS 制御用ドライバーの開発は完了している。このテスト機は 2020 年 3 月から 7 月の 5 か月間、実際の PBLM に負荷をかけて試験運用し、安定して動作している。



Figure 9: A test bench of multi-channel HV system.

5. まとめ

J-PARC RCS の PBLM の HV 依存性を Na-22 線源と、ビームロスの 2 種類を用いて測定し、結果として印加電圧の指数関数のフィッティングによく一致した。フィッティングパラメーターの K と Q は MR の測定と同様に相関関係にあった。ビームロスの大きい場所での測定では波形のピーク値がある HV の値から飽和することがわかった。この問題を解決するため、HV の CH を増設する案として多チャンネルの HV 電源システムの導入を検討している。

参考文献

- [1] D. N. Poenaru *et al.*, "Experimental Techniques in Nuclear Physics", Chap. IV Proportional Counters, 1997.
- [2] K. Satou *et al.*, "APPLICATION OF A SINGLE-WIRE PROPORTIONAL COUNTER TO THE BEAM LOSS MONITORING AT J-PARC MR", Proceedings of IPAC10, 2010, Kyoto, Japan.