

J-PARC 3GeV シンクロトロン の ビームロス モニタ システム

BEAM LOSS MONITOR SYSTEM OF THE RAPID CYCLING SYNCHROTRON OF JAPAN PROTON ACCELERATOR RESEARCH COMPLEX

山本風海[#], 林直樹, 畠山衆一郎, 佐伯理生二, 岩間悠平
Kazami Yamamoto[#], Naoki Hayashi, Shuichiro Hatakeyama, Ryuji Saeki and Yuhei Iwama
J - PARC Center, Japan Atomic Energy Agency

Abstract

The 3 GeV Rapid Cycling Synchrotron (RCS) of the Japan Proton Accelerator Complex (J-PARC) provides more than 300 kW beam to the Material and Life Science Facility (MLF) and the Main Ring (MR). In such high intensity hadron accelerator, the lost protons that are a fraction of the beam less than 0.1 % cause many problems. Those particles bring about a serious radioactivation and a malfunction of the accelerator components. Therefore, the beam loss monitor (BLM) is one of the most important equipment to observe the state of the beam during operation, and to keep a steady operation. Moreover, if we set operation parameters of BLM adequately, it can detect the beam loss that is 10^{-6} fraction of the beam. Thus it enables fine-tuning of the accelerator. In the J-PARC RCS, a proportional counter and a plastic scintillation counter are used for the beam commission and the stable operation as BLM. We report present status of the BLM system in J-PARC RCS.

1. はじめに

大強度陽子加速器施設 (J-PARC) 計画の 3GeV シンクロトロン (RCS) は 1MW という大強度出力を目標に設計、建設された。2007 年より運転を開始し、東日本大震災の影響で運転が一時中断されることもあったが、2013 年 5 月の段階では 300kW 超のビーム出力で物質生命科学実験施設 (MLF) および 50GeV シンクロトロン (MR) へビームを供給している^[1]。この様な大強度ビーム出力を達成する上で最も重要なことは、ビームロス可能な限り低く抑えることである。ビームロスが多くなると、それによって発生した即発放射線によって絶縁破壊、機械強度の低下が引き起こされ、加速器構成機器の故障頻度が上がる。また、それら機器やトンネルが放射化する事で、保守作業時の被ばく量が増大し、最悪の場合は残留放射線が近接作業が十分可能なレベルに低下するまで作業が開始できない、等の支障をきたすようになる。このような状況を避けるために、RCS では多数のビームロスモニタ (BLM) を用意し、ビーム調整時や供用運転時のビームロス量を測定、監視している。本論文では、RCS のビームロスモニタシステムの現状について報告する。

2. ビームロスモニタシステム

2.1 ヘッド

J-PARC RCS では、ビームロスの検出器として比例計数管およびプラスチックシンチレーションカウンタを使用している。

比例計数管は東芝電子管デバイス製の E-6876 を使用している^[2]。比例計数管は主として全周のビームロスの分布状況を把握するために使用しており、

全四極電磁石の架台にこのモニタを取り付けてある。また、それ以外にも入射部や出射部、コリメータ部などのロスの多いと思われる箇所に複数台設置しており、現時点で稼働している総数は 80 本である。図 1 に比例計数管の配置例を、図 2 に宇宙線による出力波形を示す。半値幅は 200nsec 程度である。

プラスチックシンチレーションカウンタとしては、プラスチック部は Bicron 社製の BC-400 番シリーズ^[3]を、また光電子増倍管には浜松ホトニクス社の H3164-10^[4]を使用している。プラスチックシンチレータは主にビーム調整試験時にロスの時間構造を見るために使用しており、そのため調整時に特に注意が必要な入射部や出射部、コリメータ部に集中して設置している。現時点で稼働している総数は 20 本である。図 3 にプラスチックシンチレーションカウンタの配置例を、図 4 に宇宙線による出力波形を示す。半値幅は 20nsec 程度である。

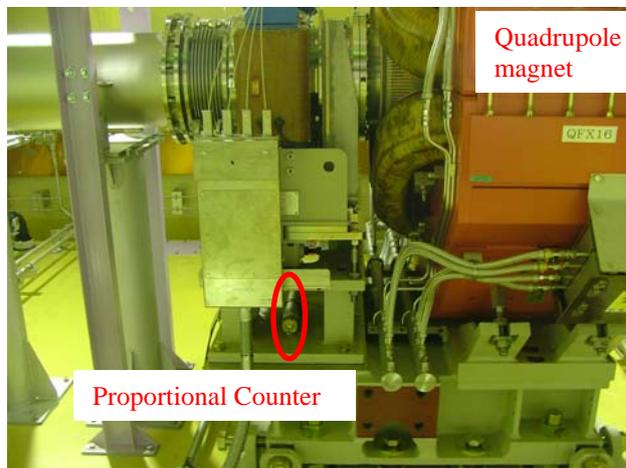


Figure 1: Setup of the proportional counter

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

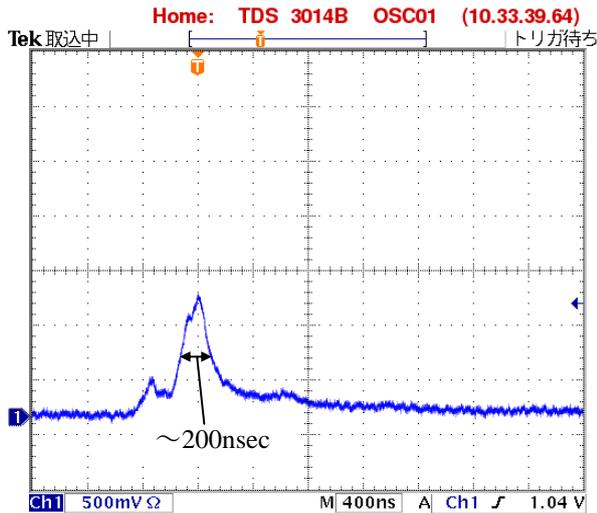


Figure 2: Cosmic ray signal of the proportional counter



Figure 3: Setup of the plastic scintillation counter

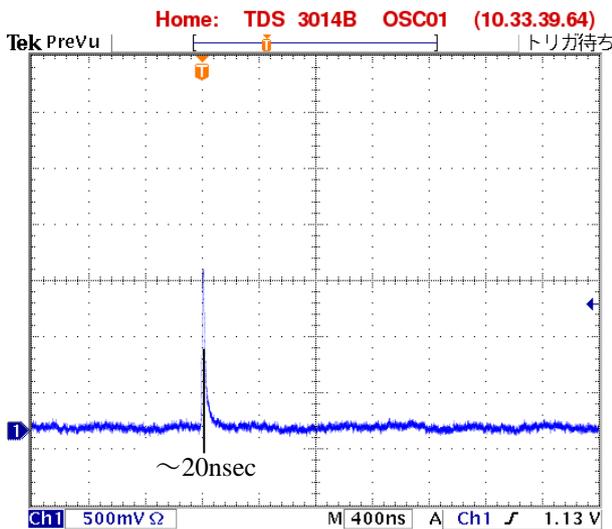


Figure 4: Cosmic ray signal of the plastic scintillation counter

2.2 信号伝送系

RCS は周長およそ 350m の 3 回対称のラティス構成で、24 台の偏向電磁石、60 台の四極電磁石によって構成されている。RCS ビームラインの中心には地上 1 階、地下 2 階建ての 3GeV シンクロトロン棟があり、各構成機器を動かすための電源やモニタの回路等はこの 3GeV シンクロトロン棟に集約されている。加速器が収められている主トンネルは地下 12 m にあり、さらにその下にケーブルや冷却水配管等を引き回すためのサブトンネルが設けられている。

ビームロスモニタの信号線と高圧線は、ヘッドを出るとまず近傍の貫通孔を通してサブトンネルに落とされる。サブトンネル内の貫通孔の下付近にはプリアンプが設置されており、入力した信号をオペアンプを用いた増幅回路で最大 1000 倍に増幅し出力する。増幅率は 10 倍、100 倍、1000 倍の 3 段階を選択可能で、地上から遠隔で切り替える事が出来る。また、増幅率以外にもプリアンプの入力抵抗も遠隔で 50 オームもしくは 10k オームの 2 通りに切り替えられる設計となっている。ビームロスの時間構造を詳細に見たい場合は出力に合わせて低入力抵抗で、またノイズの影響を低減しロスモニタシグナルの総量を見たい場合は高入力抵抗の設定で測定する。信号処理の機能以外にも、ヘッドに入力されている高圧出力を 1/100 に降圧してコンパレータで監視し、設定以下となった際に機器異常を発報するインターロック用回路も組み込まれている。モニタヘッドからサブトンネルのプリアンプまでの距離を数メートルに抑えることで、ヘッドを出た後速やかに信号を増幅し良好な S/N を確保するとともに、主トンネルから 1m 以上の床壁を隔てる事でアンプ素子への放射線の影響を最小限に抑える設計となっている。

一方、サブトンネルから地上 1 階までは 3 回対称のアーチ部の各頂点にある垂直連絡口を経由する必要があるため、サブトンネルのプリアンプで増幅された信号は、これら垂直連絡口のうち最も近い場所を通して地上 1 階の 3 か所の部屋(タイミング装置室、モニタ装置室、高周波制御装置室)に上がってくる。最終的に、信号ケーブルはタイミング装置室、モニタ装置室、高周波制御室の各部屋に設置された信号処理回路に入力される。信号処理回路では入力波形をそのまま出力するバッファアンプと、ビーム加速周期間に信号を積分し出力する積分回路の機能が組み込まれている。これら波形信号、積分信号は必要に応じてオシロスコープ、VME 等を介してデジタルデータとして取り込み制御 LAN 上でアクセスできるようになっている。信号経路の概略を図 5 に示す。

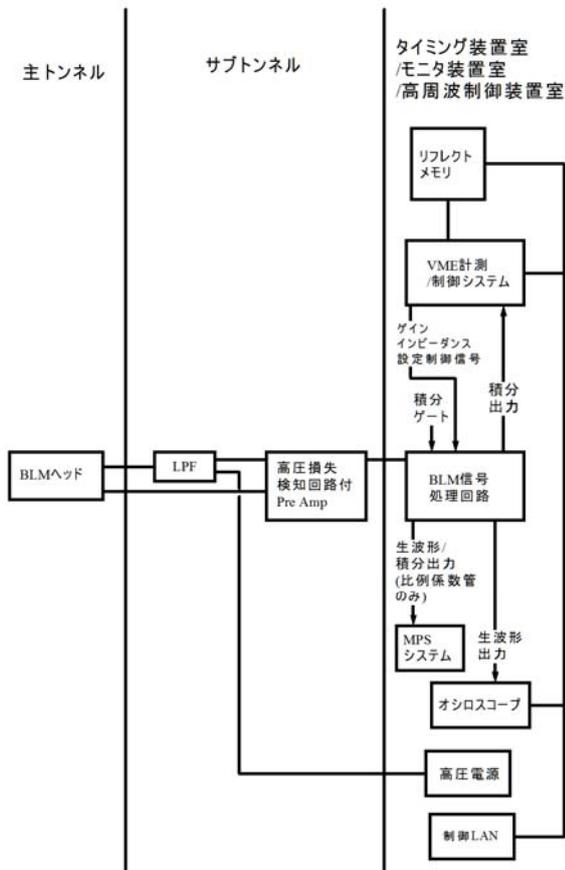


Figure 5: Block diagram of RCS BLM system

2.3 生波形

ロスモニタのうち、特に時間特性の良いプラスチックシンチレータの出力に関しては、信号処理回路のバッファ出力をデジタルオシロスコープに入力し、そのオシロスコープでデジタル化された波形情報を EPICS レコードにして OPI 上で表示、解析を行っている。ロスモニタを設置した場所によってロスが発生するタイミングが違う(入射部付近では入射中、取り出し付近では取り出し時、コリメータやアーク部では加速初期～終盤まで)ため、設置箇所によってオシロの時間レンジ、トリガディレイを切り替え、加速器の状態をより把握しやすい設定で測定を行っている。図 6、7 に波形データを用いたビーム測定試験の例として、1 中間バンチ毎の入射部付近でのロスの状況、および加速開始から 6 ミリ秒間のロスの時間構造を調べたデータを示す。

図 6 は、チョッパーを用いて入射する中間バンチを 1 つずつ切りだし、その切るタイミングをずらしながら入射部付近でのロスモニタの生波形を測定した結果である。図中、上に表示しているデータほどマクロバンチの先頭に近い箇所で切った時の結果で、切るタイミングが早ければ早いほど、すなわちマクロバンチの先頭に行けば行くほどロスが大きくなっている。これは、マクロバンチの構造を作る際にどうしても立ち上がりをきれいに切れず、数百 nsec

以上傾きが出来てしまいその箇所だけビーム光学調整がうまくできていないためと思われる。

図 7 は、縦および横方向のペインティング条件を変えた際のビームロスの発生する時間を実測(上図)とシミュレーション(下図)で比較した結果で、シミュレーションの結果と実測が良く一致していることが判る[5]。

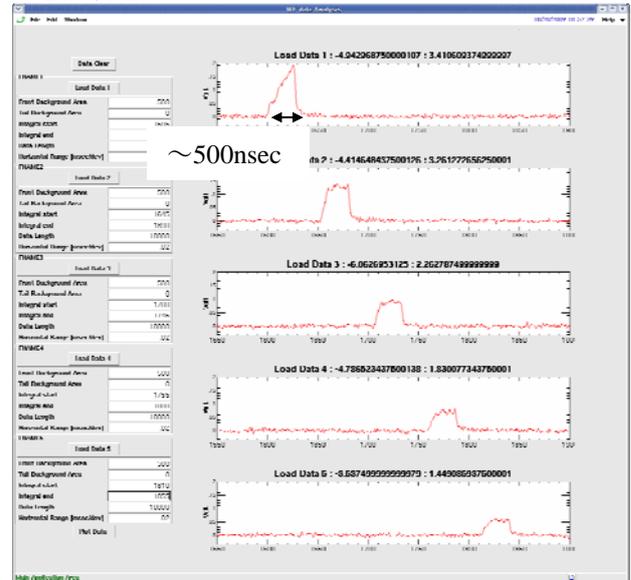


Figure 6: Beam loss signal dependence on the timing of the intermediate bunch

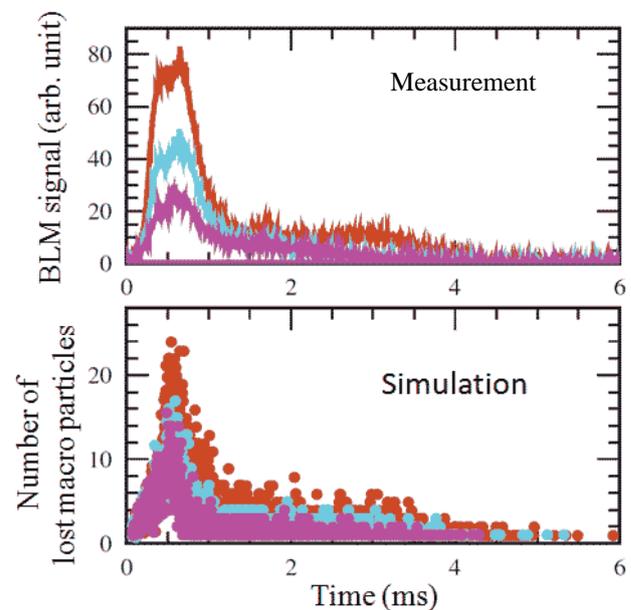


Figure 7: Comparison between the BLM signals and the simulation results

2.4 積分出力

積分出力は信号処理回路中のバッファアンプによって 2 系統に出力され、1 系統は後述する機器保護システム (Machine Protection System, MPS) へ、

もう一方は VME 計算機へ送られる。VME 計算機は積分出力のあるタイミングでの値を記録(現状は加速開始後 1msec、10msec、21msec の 3 点)し、複数のロスモニタの積分値をワークステーション上の共有メモリ上に送りそれらの羅列を 1 つのデータとして記録している。共有メモリ上では積分出力データ以外にヘッダー情報としてビームのタグや行き先、時間等の情報が付加される。このデータは EPICS (Experimental Physics and Industrial Control System^[6]) レコードとして読み出し可能で、加速器運転用の端末上で計測、制御される。

供用運転時は、MLF、MR 用のビーム条件を切り替えながら連続運転を行っているが、これらヘッダー情報を用いる事でそれら 2 箇所への同時連続供用運転時にも、それぞれの行き先別にロスモニタの出力を見る事ができる(ただし、上位系での処理/通信に時間がかかるため、3 秒に 1 発しか EPICS レコードとしては読み出せない。アーカイブデータは全てのショットについて保存してあり、後で参照可能である)。

2.5 MPS

2 つに分けられた積分出力のうち、MPS へ送られた信号に関しては、MPS 内部で個々のモニタ毎に設定されたしきい値に対してリアルタイムに比較が行われる。比較の結果、積分出力値がしきい値を超えるとその瞬間にビーム運転は停止される。各モニタのしきい値は、運転中の各ロスモニタの出力、CT による損失量の測定結果と運転終了後の残留線量の測定結果を比較して決定する。図 8 に、MLF に 300 k W 出力を 3 週間続けた後(現在の定常運転条件)の線量分布を示す。入射部を除き、加速器はほとんど放射化していない事が判る。このような線量測定は、通常連続供用運転終了毎に行われているが、ビーム調整試験として特殊な状況で運転を行った際や、ビーム強度を増強した際には試験途中でもビーム運転を一時停止し、一部または全周の線量の確認のための測定を行う事がある。また、より正確にロス量に対するモニタの応答と線量を調査するために、わざと数 W のロスを数時間以上発生させる試験も行われている。図 9 に、5~10W 程度のロスをアーク部数か所に発生させた時の積分出力を示す。この例では、BLM の HV、ゲインが適当な値に設定

してあり、そのおかげでロス量に対してほぼ比例した応答となっている。また、1W 以下のロスを検知するのに十分な S/N も得られている。

3. 結論

J-PARC RCS では、比例計数管とシンチレーションカウンタ合わせて 100 台程度を BLM として使用している。各 BLM は、運転状況に併せて適切な設定にすることで必要な情報が取得できるよう設計、改良が行われてきた。現状では、大強度化試験時の最も重要なモニタとして種々の運転パラメータを調整した際のビーム状態の確認に利用されている。また連続運転時は 1W/m を下回るリミットで MPS をかけることで、異常発生時にも即座にビームを停止する事で、加速器の汚染拡大を防いでいる。

一方で、現在の BLM の MPS システムは、ビームは安定で常に同じロスが発生する事を仮定して、1 ショット毎に閾値と比較を行っている。そのため、例えば 1W のロス量でリミットした場合、稀にほんの少しのビーム揺らぎが発生して 1 ショットだけ 1W 相当のビームが落ちただけでもビームを停止してしまう。このような場合、実際には 25Hz で 1 時間連続で 1W ロスが発生する訳ではないのだが、安全性を優先するために停止頻度が多くなってしまふ。このような不具合を解消するために、数秒間という長い間隔で積分を行い、その値でリミットをかけることで、上記のような事象の発生を防ぐ方針で検討を進めている。

参考文献

- [1] M.Kinsho, "Status and progress of the J-PARC 3GeV RCS", Proceedings of IPAC2013, THPWO037 (2013)
- [2] 東芝電子管デバイスカタログ, <http://www.toshiba-tetd.co.jp>
- [3] Saint-Gobain 社カタログ, <http://www.detectors.saint-gobain.com/Plastic-Scintillator.aspx>
- [4] 浜松ホトニクスカタログ, <http://jp.hamamatsu.com>
- [5] H.Hotchi et al., "Beam commissioning and operation of the Japan Proton Accelerator Research Complex 3-GeV rapid cycling synchrotron", Prog. Theor. Exp. Phys., 02B003 (2012)
- [6] <http://www.aps.anl.gov/epics/>

12th Feb., 2013
K. Yamamoto

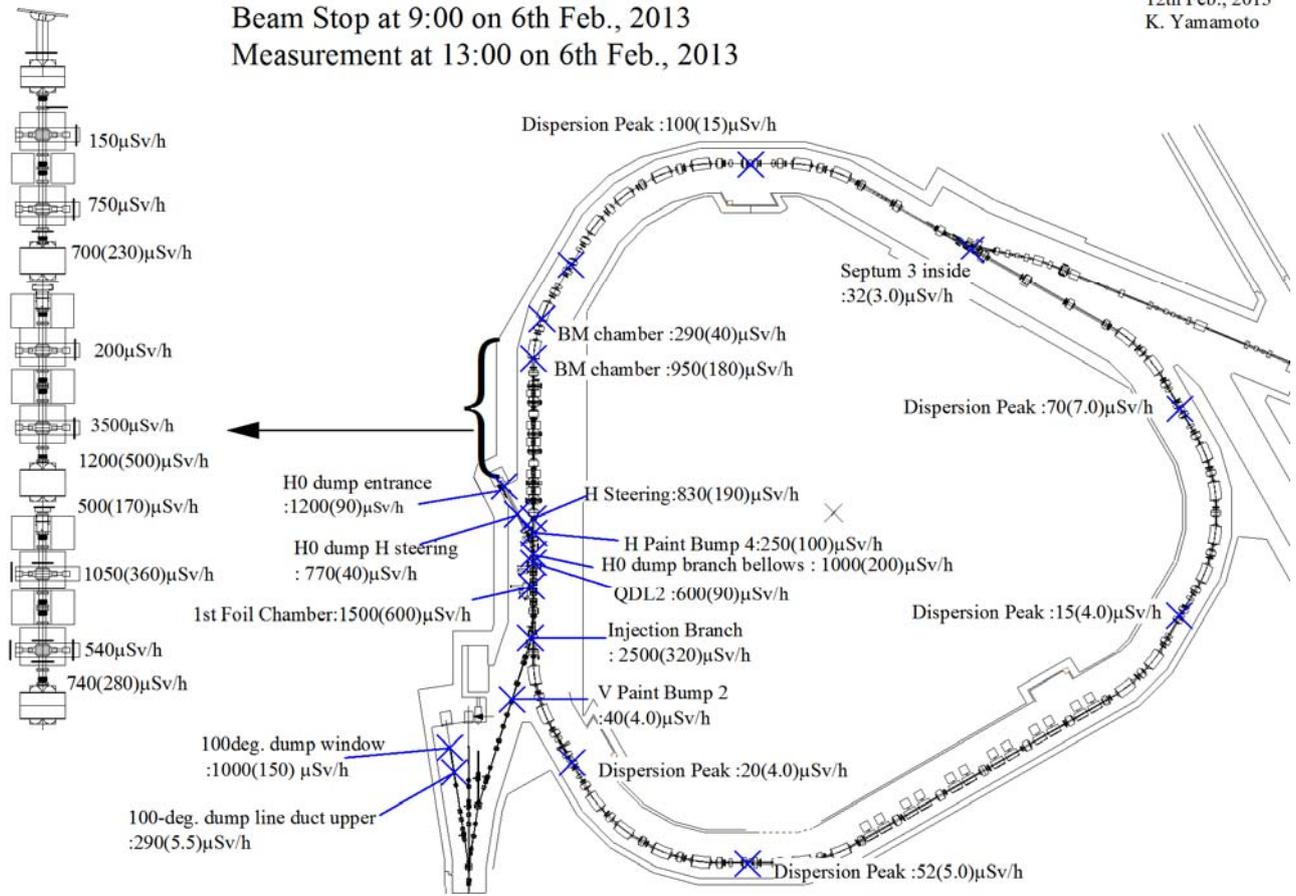


Figure 8: Residual dose distribution of J-PARC RCS after 300kW operation

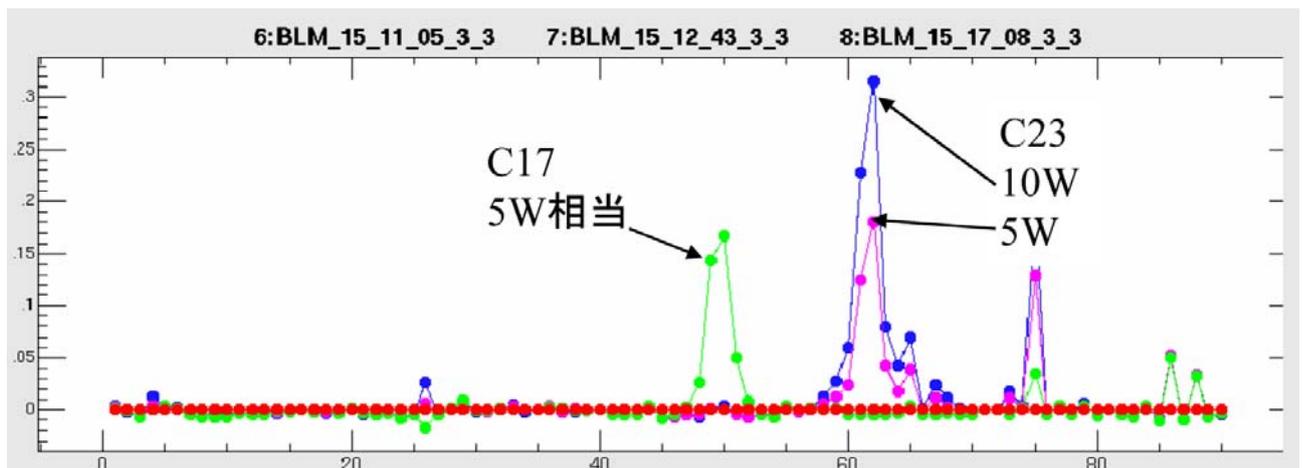


Fig. 9 BLM signal responses by the loss near the dispersion maximum points