

## J-PARC リニアックのビームロスモニタの機器構成と現状

### STATUS AND EQUIPMENT CONFIGURATION OF BEAM LOSS MONITORS AT J-PARC LINAC

中野 秀仁<sup>#, A)</sup>, 守屋 克洋<sup>A)</sup>, 宮尾 智章<sup>B)</sup>, 不破 康裕<sup>A)</sup>, 高橋 博樹<sup>A)</sup>, 神谷 潤一郎<sup>A)</sup>

Hideto Nakano<sup>#, A)</sup>, Katsuhiko Moriya<sup>A)</sup>, Tomoaki Miyao<sup>B)</sup>, Yasuhiro Fuwa<sup>A)</sup>, Hiroki Takahashi<sup>A)</sup>, Jun-ichiro Kamiya<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> Accelerator Division, J-PARC Center, Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

<sup>B)</sup> Accelerator Division, J-PARC Center, High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

#### Abstract

At J-PARC, beams accelerated by the linac and 3 GeV synchrotron are supplied to the Materials and Life Science Experimental Facility (MLF) and Main Ring (MR). Currently, a 950 kW beam is supplied to the MLF (design output 1 MW), and 800 kW has been achieved for the MR (upgraded design output 1.3 MW). In order to achieve operation beyond the design output, further stabilization and sophistication of the accelerator is essential. Beam loss not only causes equipment radioactivity, but in the worst case, makes equipment maintenance difficult. Therefore, beam monitors that diagnose beam loss are essential equipment for achieving high intensity. In this poster, we report on the equipment configuration and current status of the beam loss monitor (BLM) that detects beam loss at the J-PARC linac.

#### 1. リニアック BLM の概要

大強度陽子加速器施設(J-PARC) [1]ではリニアック [2]と 3 GeV シンクロトロン(RCS) [3]で加速されたビームを物質・生命科学実験施設(MLF)とメインリングシンクロトロン(MR)へ供給している。現在、MLF(設計出力 1 MW)へ 950 kW のビームを供給し、MR(増強設計出力 1.3 MW)では 800 kW を実現した。設計出力を超えた運転を実現するためには、複数の行先にビームを供給しているリニアックと RCS の更なる安定化や高度化は必須である。ビームロスが起きると機器を放射化だけでなく、最悪の場合、機器のメンテナンスができないほどの残留線量を残すことになる。そのため、どこでビームロスが生じたか、何故ビームロスが生じたのかを診断するビームモニタは大強度化実現に不可欠な機器である[4]。

J-PARC リニアックでは、ビームロスの検出の為にビームロスモニタ(BLM)をトンネル内に設置している。ビームバンチからロスした負水素イオンがビームパイプに衝突した際に核反応により 2 次粒子が放出される。2 次粒子としては主に中性子線とガンマ線が挙げられる。中性子線やガンマ線は放射線検出器を用いて検出する。

Figure 1 に J-PARC リニアックトンネルに設置されている BLM の概要を示した。各空洞セクションに設置されている台数と BLM の種類を示している。リニアックには比例計数管型 [5]とシンチレータ型 [6]の2種類の BLM が設置されている。Figure 1 に示されているように比例計数管型の検出器が主に使用されている。比例計数管型はガス型放射線検出器の 1 種であり、金属管の中心に金属線が張られており、不活性ガスが封入されている。金属管を陰極、金属線を陽極として高電圧が印加されている。放射線が入射した際に、放射線の電離作用によりガスから電子と陽イオンが生成される。これらを陰極と陽極の間にかけて電場で回収する。ガス型放射線検出器は印加する電圧の大きさにより増幅率が変化する。電

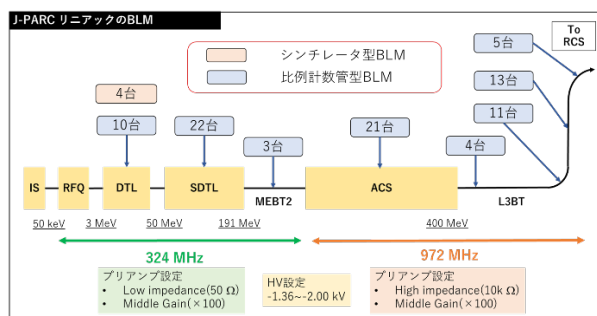


Figure 1: Overview of J-PARC Linac Beam Loss Monitor.

圧を上げるにつれ、電離飽和領域、比例領域、制限比例領域、ガイガーミュラー領域と変化する。その中でも、比例計数管は比例領域の電圧で使用される。放射線耐性が優れており、他の加速器施設でも使用されている。対象の放射線は、X 線、 $\gamma$ 線、中性子、高エネルギー荷電粒子と幅広く使用できる。ただし、金属管によりその大部分のエネルギーを失う低エネルギー $\beta$ 線などには適さない。一部上流側にはシンチレータ型検出器が設置されている。シンチレーション検出器の中でも時間応答が速いプラスチックシンチレータサンゴバン社製 BC-408[7]を使用している。プラスチックシンチレータは放射線の入射によりシンチレーション光を発生する。シンチレータに接続されている光電子増倍管で光を検出する。

BLM で放射線は電気信号に変換され、検出器近傍に設置されているプリアンプにより信号を増幅して地上部にあげられる(Fig. 2)。プリアンプのインピーダンスとゲインの設定は遠隔で操作可能であり、現在は 324 MHz 区間はインピーダンス 50  $\Omega$ 、972 MHz 区間はインピーダンス 10 k $\Omega$ とインピーダンスの設定が異なっている。ゲインの設定は Middle( $\times 100$ )で統一されている。

<sup>#</sup> hnakano@post.j-parc.jp

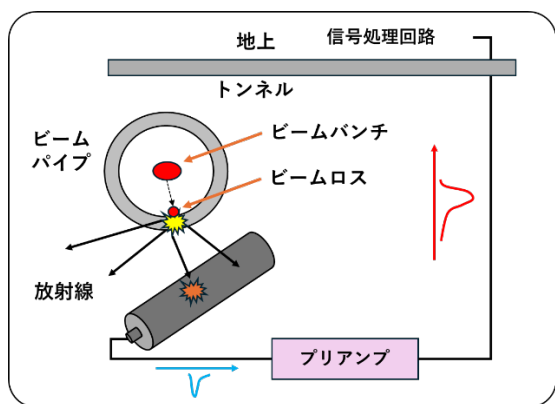


Figure 2: Detection flow of BLM.

## 2. BLM 構成機器

リニアック BLM は、Fig. 3 に示されるように主に各空洞間のビームラインの下部に設置されている。写真は SDTL 区間の加速空洞間の四極電磁石付近を撮影した。ビームの進行方向は右側が上流側で、左側が下流側となる。写真中央四極電磁石の中心を通るようにビームパイプが位置している。加速空洞の間、ビームパイプに対して鉛直下向き約 30 cm 下方に BLM ヘッド本体は設置されている。2 台の四極電磁石を設置している架台上に BLM ヘッドを固定するホルダーが備え付けられており、各空洞間に 1 台 BLM が設置されている。BLM ヘッドの両端には SHV 高電圧ケーブルと BNC 信号ケーブルが接続されている。バイアス電圧はローパスフィルタを通して地上に設置されている高圧電源により印加される。信号ケーブルはプリアンプに接続されており、プリアンプにより増幅された信号は、地上に設置されている信号処理回路に送られる。

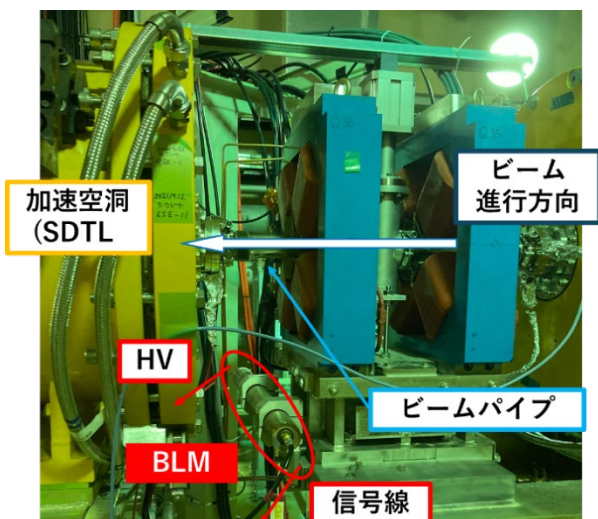


Figure 3: The status of the BLM installed at the site.

検出器ヘッドはキャノン電子管デバイス製 Gas Proportional BLM, E6876-600 [8]を使用している(Fig. 4)。リニアックと RCS は同型の機器を使用している。従来型イオンチェンバの約 1,000 倍の感度とマイクロ秒の応答を実現し、インターロック保護として使用できる。化学洗

浄、検出器内部の高温真空加熱排気を実施し、不純ガスを除去している。また、2重管特殊構造により、耐ノイズ性を向上させ、パルスから連続モードまでの広い測定が可能である。E6876-600 の製品仕様を表 1 に示す。

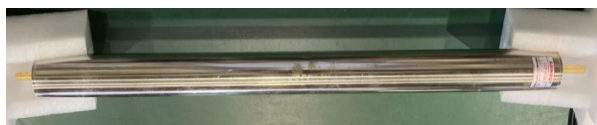


Figure 4: Canon Electron Tube Device Gas Proportional BLM, E6876-600.

Table 1: Spec of E6876-600

Length	600 mm
Diameter	50.8 mm
Effective Length	500 mm
Enclosed Gas	Ar+additive gas
Gas Pressure	approx. 1atm
Outer Shell	Stainless steel
Maximum Voltage	2,000 VDC
Connector	SHV, BNC

プリアンプはギガ製 G5106-T2を使用している(Fig. 5)。こちらも RCS と同型の機器を使用している。インピーダンス及びゲインの設定を遠隔で操作可能である。インピーダンスは High(10 kΩ)と Low(50 Ω)、ゲインは Low(×10)、Middle(×100)、High(×1000)から選択できる。裏面の D-sub 端子にケーブルを接続し遠隔操作を行う。

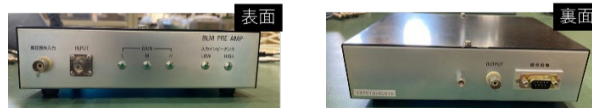


Figure 5: GIGA G5106-T2.

高圧電源は MATSUSADA 製 HJPM-2R3-01[9]を使用している。両極性タイプの最大±2 kV の電圧を印加できる。カタログ値では電流:3 mA、電力:6 W、リップル:5 mVp-p となっている。324 MHz 区間は基本的に-2 kW が印加されている。負水素イオンビームが加速されるにしたがってエネルギーも増加し、ビームロスによる放射線のエネルギーも増加する。比例計数管は放射線のエネルギーに比例した信号を出力するため、より大きな信号が出力される。プリアンプに入力される信号のゲインを調整するために 972 MHz 区間は基本的に-1.5 kW で運用している。一部 L3BT の第一アーク部などは特に放射線の強度が強いため-1.36 kW に調整している箇所もある。これらの設定は後述する BLM 接続機器を通じて J-PARC 中央制御室から BLMController というソフトで遠隔操作可能となっている。

## 3. BLM 接続機器

Figure 6 に BLM 接続機器の概要と、地上に設置されている信号処理回路(NIM モジュール)の写真を示した。BLM モニタヘッド、プリアンプ、ローパスフィルタ (LPF) がトンネル内に設置されており、高圧電源、信号処理回

路は地上のクライストロンギャラリー設置されている 19 インチラックに格納されている。信号処理回路でプリアンプから送られた信号を各所に分配すると共に、プリアンプの制御も行っている。背面に入力端子があり、前面に出力が3端子ある。生信号と高圧印加確認信号が Machine Protection System (MPS)モジュール、積分信号が VMEモジュールに送られ EPICS レコード化される。1 つの 19 インチラックに約 3 セット分の BLM 接続機器が格納されている。Figure 6 の左側の信号処理回路の図と右側の信号処理回路の写真は出力端子の位置関係が対応しており、出力 3 端子は BNC、プリアンプ制御、高圧喪失出力及び上位計算機との通信用の端子は多芯ケーブルが接続されている。

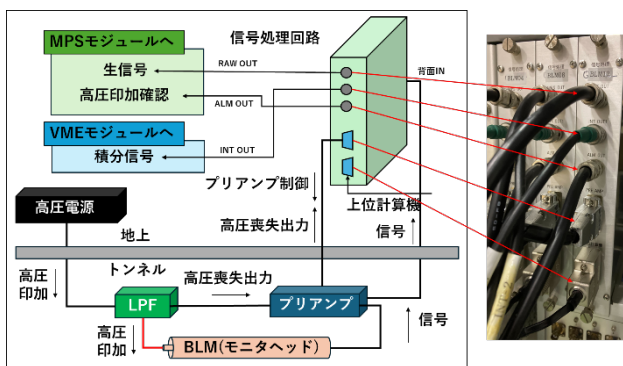


Figure 6: BLM connected equipment.

#### 4. MPS の閾値設定

ビームに異常が起きた際に機器を守るために、リニアック BLM は MPS に組み込まれている。現状リニアック BLM の MPS のトリガは生信号の波高値で設定されている。利用運転中は BLM の信号を常に監視・記録しており、生信号の波高値が閾値以上の信号を記録した際は MPS を発報する。BLM に印加する高電圧も監視しており、指定した電圧が印加されていない場合も MPS を発報する。これらの BLM の MPS モジュール等は制御グループにより管理されている [10]。閾値の値は各モニターヘッドに個別に設定されており、通常運転時の波高から 3 割程大きい値に設定されている。

Figure 7 にオシロスコープ(DL1640 横河電機)で観察したロスモニタの通常運転時の波形を示した。MPS の閾値を設定するにはオシロスコープで通常時の波高値

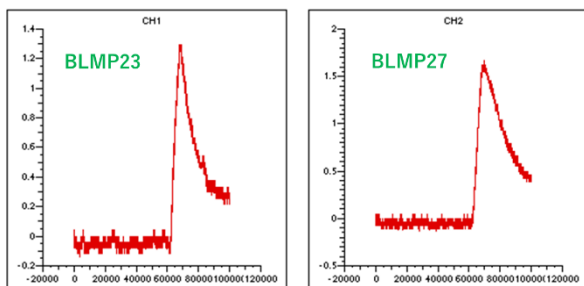


Figure 7: The waveform of the loss monitor during normal operation observed with an oscilloscope (DL1640, Yokogawa Electric).

を測定し、3 割程度大きい値を決定する。Figure 7 の左の ch1 は L3BT の BLMP23、右の ch2 は L3BT の BLMP27 の波形を示している。両者ともバイアス電圧は-1400 V が印加されている。閾値はそれぞれ通常運転時の波高から 3 割程大きい BLMP23:1.7 V、BLMP27:2.0 V に設定されている。MPS の閾値波高とバイアス電圧の設定は中央制御室で一元的にファイル管理されており、また行き先によって異なるパラメータが設定されている。J-PARC リニアックでは、L3BT を経由して RCS をビームの行先とした通常運転の他に、0° ダンプ、30° ダンプ、90° ダンプ、100° ダンプを行き先に設定したビームスタディが実施されている。それぞれダンプの大きさによって打ち込めるビームの出力が異なるため、ビーム幅や繰り返し周波数に制限がある。各ダンプの仕様に適したビームロス評価を行うために、個別に閾値やバイアス電圧の設定ファイルを整備している。

#### 5. まとめと今後の展望

J-PARC リニアックにおける BLM の機器構成とその現状についてまとめた。ビームロスが引き起こす放射化が保守作業等の妨げになる事象はこれまでの運転では起きてはいない。しかしながら、今後 J-PARC 加速器の 1 MW を超える出力増強、核変換研究のためのリニアック 50 Hz 運転等を検討する際に、ビームロスによる機器の放射化は重要な課題となる。その際は、現状の BLM システムでの運用が可能であるか十分に検討する必要がある。今後、より洗練された BLM システムを構築し、加速器の安全かつ安定的な運転を可能にするために、今回まとめた現状を踏まえて開発を進める。

#### 参考文献

- [1] Y. Yamazaki, Accelerator Technical Design Report for High-intensity Proton Accelerator Facility Project, in: J-PARC, JAERI-Tech 2003-044 (KEK Report 2002-13).
- [2] Hasegawa, Kazuo. "Progress and Operation Experiences of the J-PARC Linac", Proc. of LINAC. 2016.
- [3] H. Hotchi et al., "RECENT PROGRESS OF 1-MW BEAM TUNING IN THE J-PARC 3-GeV RCS", Proc. of IPAC'16, Busan, Korea, 2016, paper MOPOR004, p. 592.
- [4] K. Moriya et al., "Beam monitors in the J-PARC linac and its current activities", Proc. 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2023), Funabashi, Japan, Aug.-Sep. 2023, pp. 475-479.
- [5] Blum, Walter, Werner Riegler, and Luigi Rolandi. Particle detection with drift chambers. Springer Science & Business Media, 2008.
- [6] Blum, Walter, Werner Riegler, and Luigi Rolandi. Particle detection with drift chambers. Springer Science & Business Media, 2008.
- [7] <https://www.luxiumsolutions.com/radiation-detection-scintillators/plastic-scintillators/bc400-bc404-bc408-bc412-bc416>
- [8] <https://etd.canon/ja/product/category/proportional/beamloss.html>
- [9] <https://www.matsusada.co.jp/product/power-supplies/high-voltage-power-supplies/hjpm/>
- [10] H. Takahashi et al., "Update of MPS modules for J-PARC Linac and RCS", Proc. of PASJ2019, 2019.