

## J-PARC Linac におけるビーム窓保護ユニットの開発

### DEVELOPMENT OF BEAM WINDOW PROTECTION UNIT FOR J-PARC LINAC

高橋博樹<sup>#, A)</sup>, 宮尾智章<sup>B)</sup>, 畠山衆一郎<sup>A)</sup>, 石山達也<sup>C)</sup>  
Hiroki Takahashi<sup>#, A)</sup>, Takahiro Suzuki<sup>B)</sup>, Tatsuya Ishiyama<sup>B)</sup>, Yuichi Ito<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> Japan Atomic Energy Agency

<sup>B)</sup> High Energy Accelerator Research Organization

<sup>C)</sup> Mitsubishi Electric System & Service Co., Ltd.

#### Abstract

At J-PARC Linac, some beam dumps (BDs) are used for beam conditioning and study. A beam window is installed in the beamlines of each BD. A beam window protection system has been installed in the Linac 0-deg BD after a trouble with the beam window in 2018. However, the current system has not proved to be fully functional for future beam upgrade plan and etc. Then, we started to develop a beam window protection unit with a new function to measure the beam in real time and to inhibit the beam even in the middle of a beam pulse. In this paper, the details and performance of the developed beam window protection unit will be described.

#### 1. はじめに

J-PARC Linac では、複数のビームダンプ (BD) を用いてビーム調整・試験が行われている。これら BD の上流には、ビームラインに沿ってビーム窓が設置されている [1]。ビーム窓には、電流値 50 mA、長さ 100  $\mu$ s、Chopping 無し、繰り返し周期 2.5 Hz のビームが最大で入射可能である。つまり、ビーム窓および BD に、このパラメータを超えるビームが入射されることを避けることが求められる。しかしながら、入射されるビームのパラメータが適切であるかどうかは運転員が確認するのみであった。そして 2018 年のビーム試験において、人為的なミスにより 0 度 (0-deg) BD に通常とは異なるパラメータのビームが入射されるトラブルが発生した。そのため、直ぐに再度同じトラブルを発生させないための安全系を整備することとなり、既存機器を組み合わせることで 2 ヶ月という短期間でビーム窓保護システムを整備した。

しかしながら、整備したシステムは既存機器を組み合わせたものであったため、通常のビームコミッショニング等では問題ないが、ビーム窓保護に必要な機能を全て実装することはできなかった。そのため、確実に高い安全性を実現するために、要求機能を満足するビーム窓保護ユニットの開発を進めることとした。本ユニットにおいては、確実なビーム (粒子数) 計測とそれに基づいた監視を行うことが必須不可欠である。そこで、J-PARC 加速器において粒子数監視に使用されている粒子カウンター開発を参考にして開発を進めることとした。本件では、開発したビーム窓保護ユニットの詳細と性能について報告する。

#### 2. 既存ビーム窓保護システム

##### 2.1 ビーム窓におけるトラブル

ビーム窓は、ビームダンプ (BD) の上流側に設置されている例として Linac の 0 度 BD のビーム窓の位置を

Fig. 1 に示す。ビーム窓は、比較的熱伝導が良く、高温で機械強度がある Ni で作られている。また、圧力差による破損対策として鏡板状 (ドーム型) の形状である。また、発熱低減のため 0.38 mm の厚さとなっている。そして温度評価から、

(1) ビーム電流: 50 mA、ビーム幅: 100  $\mu$ s、Chopping: 無し、ビーム周期: 2.5 Hz

(2) ビーム電流: 50 mA、ビーム幅: 500  $\mu$ s、Chopping: 無し、ビーム周期: 無し (1 ショット)

のビーム入射は許容できることが分かっている。

これより、(1) をビームの許容値と考え、Linac の BD を利用したビーム調整・試験においては、これを超えるビームを使用しないこととしている。また (2) から、何らかの不具合により、通常の Linac で加速する最大ビーム幅 500  $\mu$ s のビームが入射された場においても、1 ビームパルスでビームを停止することでビーム窓は保護可能と考えられる。

一方、Linac における 0 度 BD を用いた通常のビーム調整・試験においては、

・ビーム電流: 50 mA、ビーム幅: 50  $\mu$ s、chopping: 無し / 有、ビーム周期: 1 shot, 1 Hz ~ 2.5 Hz

・ビーム電流: 50 mA、ビーム幅: 100  $\mu$ s、chopping: 有、ビーム周期: 1 shot, 1 Hz ~ 2.5 Hz

というパラメータのビームが使用されている。ここで、

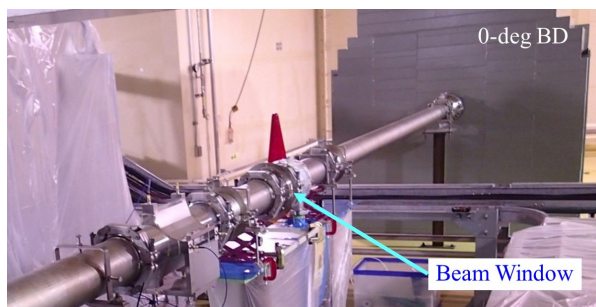


Figure 1: Beam window position of 0-deg BD.

<sup>#</sup> takahashi.hiroki@jaea.go.jp

chopping 有りの場合、chopping 無しの場合の約 54%に間引きされた(楕形)ビームとなる。つまり、ビーム幅: 100  $\mu$ s のビームを利用する場合においても、許容値(1)を超えたビームを BD に入射することはない。また、500  $\mu$ s を使用するビーム調整・試験は殆どない。このような状況から、ビーム調整・試験時に使用するビームが許容値以下であるかどうかは運転員が確認するだけとなっていた。さらに、J-PARC 稼働当初からこのような運用でトラブルが発生することはなかった。そのため、ハードウェアによるビーム窓保護の必要性はあまり考えられなかった。

2108 年 10 月から開始された Linac ビーム試験において、ヒューマンエラーが重なったことにより 50 mA、ビーム幅 500  $\mu$ s、chopping 有り、25 Hz のビームが約 1 秒間 0 度 BD に入射されてしまい、ビーム窓に大きな負荷を与えてしまった。これにより、0 度 BD を継続して使用することが出来なくなり、ビーム調整・試験を一時中断することとなった。しかしながら、検討によって Linac の 30 度 BD のみでビーム調整・試験を継続することを可能とし、なんとか Linac のビーム調整・試験を完了することができた。これにより、ビーム共用運転を予定通り開始することができた。しかしながら、このトラブルによりビーム窓保護のための安全機能実装が必要不可欠であることが明らかとなったことから、ビーム窓保護システムの検討、構築を開始することとなった。

## 2.2 既存ビーム窓保護システムの構成

ビーム窓の温度上昇はビーム窓に当たる粒子数によるものであることから、ビームの粒子数を計測することで、ビーム窓保護機能の実装が可能である。ビーム窓を保護するためには、2.1 の温度評価 (1)を超えたビームを入射させないことが必要不可欠である。一方で、通常 0 度 BD に入射されるビームはこれよりも少ない粒子数であることから、通常使用されるビームを基準とし、以下の機能の実装を目指したビーム窓を保護するシステムを構築することとした。

- (i) 1 ビームパルスの粒子数を計測し、閾値(50 mA、chopping 有り、ビーム幅 100  $\mu$ s 時の粒子数)を超えた時に MPS 信号を発報
- (ii) 1 秒間の積算粒子数を計測し、閾値(50 mA、chopping 有り、ビーム幅 100  $\mu$ s、2.5 Hz 時の積算粒子数)を超えた時に MPS 信号を発報

これらの機能実装においてはビームの計測ミス(計測抜け)の排除が不可欠であるため、J-PARC 加速器全体のビーム出力の監視に使用されている粒子数カウンターを採用し、これにビーム窓保護のロジックを追加して保護システムを構築した。既存ビーム窓保護システムの構成概略を Fig. 2 に示す。保護するビーム窓の前の電流モニタ(CT)からの信号は積分回路に入力される。積分回路は 1 ビームパルス毎に積算粒子数を求め、電圧値として粒子数カウンターに出力する。粒子数カウンターは、1 ビームパルス毎の積算粒子数から 1 秒間の積算粒子数(1 秒間移動積算粒子数)を算出する。そして、1 ビームパルスの積算粒子数、1 秒間移動積算粒子数とそれぞれの閾値を比較し、閾値を超えた時は MPS を発報しビームを停止させ、ビーム窓を保護する。

ここで、既存システムは 1 ビームパルス毎に積算粒子

数を求めるため、1 ビームパルスの途中で MPS 発報しビーム停止することが不可能である。しかしながら、2.1 の温度評価(2)よりビーム幅 500  $\mu$ s、1 ビームパルスの入射は許容できること、及び、通常の 0 度 BD を用いたビーム調整・試験でのビームパラメータを考慮すると、現状の運転に対応したビーム窓保護機能を実現したと言えよう。何よりも、短期間で安全機能を実装したことは、J-PARC

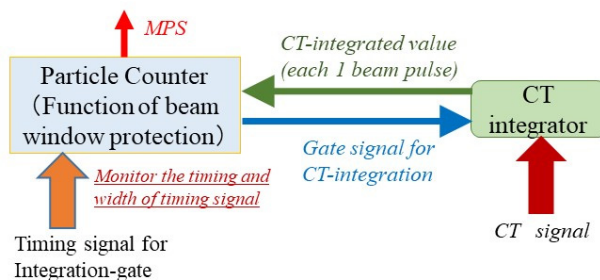


Figure 2: Configuration of current beam window protection system.

の運転に大きく貢献するものであった [2]。

## 2.3 既存ビーム窓保護システムの問題点

トラブル時には通常とは異なるビーム(例えば、ビーム幅 500  $\mu$ s、chopping 無し)が入射される可能性は排除できない。さらには、今後の J-PARC ビーム増強においては、ビーム幅 500  $\mu$ s を超えるビームの利用が考えられている。以上より、既存システムの 1 ビームパルス毎の積算粒子数ではなく、リアルタイムで“粒子数の計測”と“積算粒子数の算出”を行い、閾値を超えた場合は速やかに(1 ビームパルスの途中で)MPS を発報しビーム停止する、完全な保護機能の実現が必要不可欠である。また、既存システムは CT 信号の計測部分と異常監視部分(粒子数カウンター)が分離しているため、システムの動作シーケンスが複雑となっている。さらに、粒子数カウンターは電流値管理のために開発されたため、ビーム窓保護機能には不要な(過剰な)機能・性能が実装されていることもありコストが高めとなる。これは他の BD にも整備する際の問題となっていた。そこで、これらの課題を解決するビーム窓保護ユニットを開発することとした。

## 3. ビーム窓保護ユニット

### 3.1 ビーム窓保護ユニットの開発

既存システムにおいて採用した粒子数カウンターのビームの計測ミス(計測抜け)を排除する機能は、確実なビーム窓保護を実現するためには非常に有用である。そこで、「(1) CT 信号の計測部分と異常監視部分を一体化し、「(2) ビームの計測ミス(計測抜け)を排除する機能」を有し、「(3) ビームをリアルタイムで計測する」ことで、既存システムの問題点を解決し、より安全性の高い保護機能を有するビーム窓保護ユニットを開発することとした。

ここで、ビーム(粒子数)を計測する範囲(時間)は、タイミングシステムから入力される積分ゲートタイミング信号によって決定される。Linac がビームを加速可能な時間範囲は 25 Hz 周期(40 ms)の頭から 17,025  $\mu$ s を中心に

約 1 ms の範囲となることが分かっている。よって、「(2) ビームの計測ミスを除く機能」は、この範囲(頭から 17,025  $\mu$ s 前後)に積分ゲートタイミング信号が 25 Hz で常に入力されるかを監視することで実現している [3]。

この機能を組み込むため、ビーム窓保護ユニットには、Linac の加速可能な約 1 ms の時間範囲の CT 信号を計測し、計測データ保持することが要求される。そのため、ビーム計測周期(S/s)を速くすると、データ保持に必要なメモリ容量が非常に大きくなる。また、ビーム幅 500  $\mu$ s の 1 ビームパルスは入射可能であることに対して、閾値は通常使用されるビーム幅 100  $\mu$ s のビームを基準に設定されることから、閾値を超えた場合に数〜十数 $\mu$ s 以内にビーム停止することで、十分ビーム窓は保護できると考えられる。以上より、開発するビーム窓保護種ユニットの計測周期、つまりリアルタイム性は 1  $\mu$ s 周期とすることとした。

ビーム窓保護ユニットの 1  $\mu$ s 周期のリアルタイム性を実現するために、ビーム(CT 信号)を計測し、異常検出する機能は FPGA を用いて実装することとした。一方で、EPICS による上位制御系との情報授受については、J-PARC の安全系でも使用され実績のある PLC(横河電機製・FA-M3)を用いて実装することとした。開発したビーム窓保護ユニットの構成概略を Fig. 3 に、外観を Fig. 4 に示す。

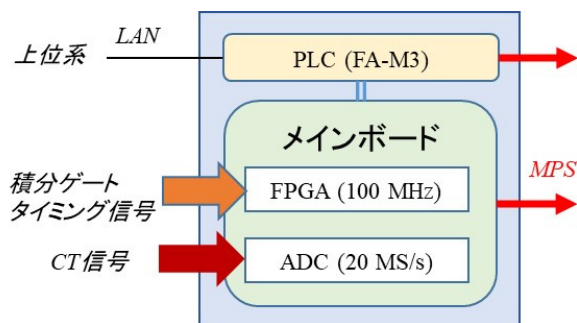


Figure 3: Outline of beam window protection unit.



Figure 4: Picture of beam window protection unit.

開発したユニットの機能はメインボードに実装されており、CT 信号、積分ゲートタイミング信号など、リアルタイムの計測・監視が要求される信号が入力される。メインボードには保護ユニットのロジックを実装する FPGA (100 MHz)、CT 信号を計測するための ADC (16 bit、20 Msps) などが実装されており、1 ビームパルスの積算粒子数および 1 秒間移動積算粒子数の算出と、それぞれの閾値を超えたかどうかの判断を 1  $\mu$ s 周期で実施する。これにより、いずれかの積算粒子数が閾値を超えた時は、1 ビームパルスの途中においても速やかに MPS 信号を出力することを可能とした。このようにして、開発し

たビーム窓保護ユニットは、2.2 のビーム窓保護の要求機能(i)、(ii)を完全に(リアルタイムで)実現する。

### 3.2 ビーム窓保護ユニットの動作確認

ビーム窓保護の閾値については、CT 信号のノイズ等による変動を考慮して設定する必要がある。運転時の計測値から、経験的に CT 信号から求めた粒子数には数%の変動があることが分かっている。そこで既存ビーム窓保護システムでは、理想的な閾値に 10%のマージンを持たせた値を実際の閾値として設定している。例えば、要求機能(i)においては、50 mA、chopping 有り(以後「50 mA、chopping 有り」はビームの共通パラメータであるので省略する)、ビーム幅 110  $\mu$ s (ビーム幅 100  $\mu$ s の 10%増)のビームに対する粒子数を閾値としている。次に要求機能(ii)については、1 秒間移動積算粒子数の閾値を設定することとした。ここで、2.5 Hz の運転時における 1 秒間移動積算粒子数は、既存システムのロジックから最大でビーム幅 100  $\mu$ s、3 ビームパルス分となることが分かっている。そのため、ビーム幅 100  $\mu$ s の粒子数 $\times$ 3 ビームパルス+マージン(10%)が閾値として設定されている。今回、既存システムとの動作比較を考慮し、開発したビーム窓保護ユニットについても、既存システムと同じ閾値を設定することとした。

ビーム窓保護ユニットの動作確認は、既存システムと平行に接続して行うこととした (Fig. 5)。Figure 5 より、CT 信号、積分ゲートタイミング信号は、既存システムに接続されている信号を分岐してビーム窓保護ユニットに入力することとした。これにより、ビーム窓の安全性を十分確保した状態での動作確認が可能となる。

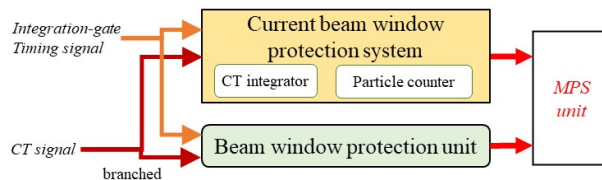


Figure 5: Configuration of performance test.

まず、要求機能(i)の 1 ビームパルスの積算粒子数が閾値を超えた場合の動作確認として以下を行った。

- ・ビーム幅 110  $\mu$ s のビーム入射時の動作確認
- ・ビームパルス途中でのビーム停止動作確認

次に、要求機能(ii)の「1 秒間移動積算粒子数が閾値を超えた場合の動作確認」を行った。これらの動作が仕様通りであることを確認できた上で、運用中において誤発報等の不具合の有無を確認する「長期動作確認」を行った。なお、既存システムおよびビーム窓保護ユニットにおいて、1 ビームパルスの積算粒子数、1 秒間移動積算粒子数が閾値を超えた場合の動作確認は、MPS ユニットにてそれぞれが出力する MPS 信号を検知することで確認した。

#### (1) ビーム幅 110 $\mu$ s のビーム入射時の動作

まず、1 ビームパルスの積算粒子数の閾値設定後、ビーム幅 100  $\mu$ s のビーム入射時に既存システム、保護ユニットの両方で MPS が発報しないことを確認した。その後、ビーム幅 110  $\mu$ s のビームを入射して MPS 信号の検知を確認した結果、既存システムおよび保護ユニット

の両方が MPS 信号を出力したことを確認した。Figure 6 はこの時の CT 信号を計測したものである。これより、ビーム幅 110  $\mu\text{s}$  のビーム入射にて発報する適切な閾値が設定されており、それによって動作している (MPS 発報している) ことが分かる。

(2) ビームパルス途中でのビーム停止動作

(1)と同様に 1 ビームパルスの積算粒子数の閾値設定後、100  $\mu\text{s}$  のビーム入射時に既存システム、保護ユニットの両方で MPS が発報しないことを確認した。次に、ビーム窓保護ユニットの閾値を約 1/3 に変更し、再度、ビーム幅 100  $\mu\text{s}$  のビームを入射して動作確認を行った。この時、既存システムは MPS 信号を出力せず、開発した保護ユニットのみが MPS 信号を出力した。また、閾値を

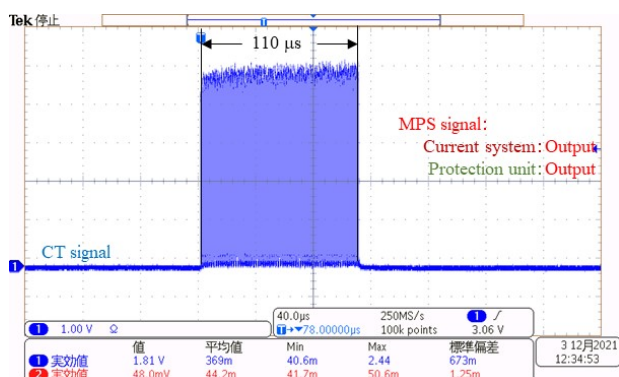


Figure 6: Performance test at 110  $\mu\text{s}$  beam injection.

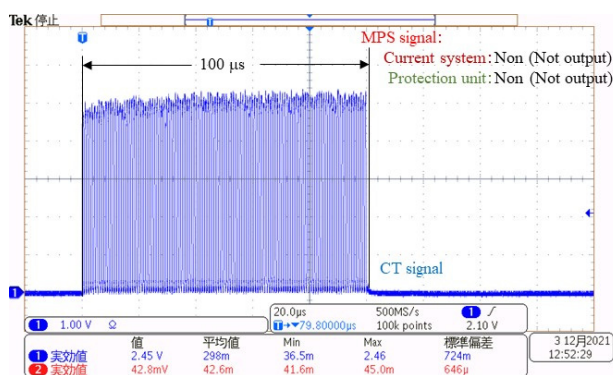


Figure 7: Performance test at 100  $\mu\text{s}$  beam injection under the normal threshold setting.

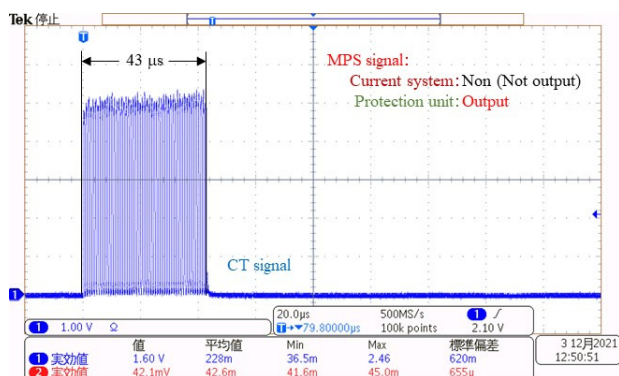


Figure 8: Performance test at 100  $\mu\text{s}$  beam injection under the 1/3 threshold setting.

変更する前の CT 信号と閾値を約 1/3 とした時の CT 信号をそれぞれ計測したものを Fig. 7、Fig. 8 に示す。これらより、通常は 100  $\mu\text{s}$  となっている CT 信号の幅 (ビーム幅) が、閾値を 1/3 にした場合は 43  $\mu\text{s}$  となっており、保護ユニットの MPS 信号によりビームパルスの途中でビームが停止したことが分かる。以上より、開発したビーム窓保護ユニットが仕様通りの性能とリアルタイム性を有し、閾値を超えた場合に速やかに (ビームパルスの途中で) ビーム停止する機能を実現していることが分かる。

(3) 1 秒間移動積算粒子数が閾値を超えた場合の動作

閾値設定後、ビーム幅 100  $\mu\text{s}$ 、2.5 Hz にて既存システム、保護ユニットの両方で MPS が発報しないことを確認した。その後、ビーム幅 100  $\mu\text{s}$  のビームを 25 Hz で 5 ビームパルス入射しようとした時の CT 信号を Fig. 9 に示す。これより 5 ビームパルス目が MPS 信号の出力により計測 (入射) されていないことが分かる。これは 3 ビームパルスまで入射可能な閾値となっていることから、4 ビームパルスが計測 (入射) されて MPS が発報したことによるものであり、仕様通り動作となっている。なお、Fig. 9 では横軸のレンジ (20 ms) がビーム幅より大きいいため 4 ビームパルスが計測されているが、既存システムおよびビーム窓保護ユニットが計測した粒子数は 4 ビームパルス分より少ない値であることが確認できている。これより、開発した保護ユニットにより、4 ビームパルス目の途中でビームが停止されたことが分かる。以上より、開発したビーム窓保護ユニットが要求仕様(ii)に対してもリアルタイム性を有したビーム停止を実現していることが確認できた。

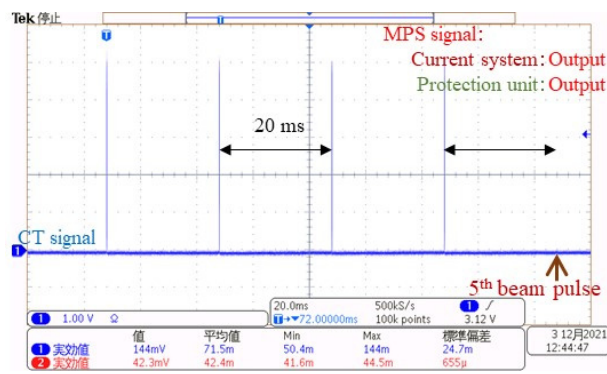


Figure 9: Performance test of integrated particle counts per second.

(4) 長期動作確認

2021 年 11 月から 2022 年 7 月まで長期動作確認試験を行った。その結果、期間中、ノイズの影響等による不具合はなく、開発したビーム窓保護ユニットが正確に動作することが確認できた。これにより、2022 年 11 月からの J-PARC Linac のビーム運転からは、開発したビーム窓保護ユニットのみの運用とする目処を得た。

なお、コスト面では開発したビーム窓保護ユニットは、粒子数カウンターの 1/2 程度とすることができた。さらに、既存システムにおいては VME や CT 積分器などシステム構築に必要な機器が他にもあるため、既存システムの整備コストと比較すると、ビーム窓保護ユニットは 1/3 程度での設置を可能とする。以上より、ビーム窓保護ユニットを用いることで、他のビームダンプ部分にビーム窓保護機能の実装を進める目処を得ることができた。

#### 4. まとめ

既存システムの課題(機能不足等)を解決し、より高い安全性を実現することを目的として、ビーム窓保護ユニットの開発を行った。そして開発した保護ユニットにより、閾値を超えた場合は 1 ビームパルスの中でも速やかにビーム停止することが可能となり、より高い安全性が実現できた。これは、J-PARC のビーム増強において有用な安全性の向上である。また、既存のビーム窓保護システムと平行して実装し、約 7 ヶ月間の長期動作試験を行い、開発したビーム窓保護ユニットが長期間においても正確に動作することが確認できた。

以上より、2022 年 11 月から開始される J-PARC ビーム調整・運転においては、開発したビーム窓保護ユニットのみの運用として問題がないことが明らかとなった。また、コスト的にも既存システムよりも安価にできることから、今後は他のビームダンプ(ビーム窓)部分に開発したビーム窓保護ユニットの設置を進める予定である。

#### 参考文献

- [1] K. Hasegawa *et al.*, “Commissioning of the J-PARC Linac”, in Proc. 22nd Particle Accelerator Conf. (PAC’07), New Mexico, USA, June 2007, pp. 2619-2623.
- [2] H. Takahashi *et al.*, “Development of a beam window protection system for the J-PARC linac”, Journal of Physics: Conference Series, 1350, 012142 (2019).
- [3] H. Takahashi *et al.*, “Monitoring System of Number of Particles in J-PARC Linac and RCS”, Proceedings of 3rd J-PARC Symposium (J-PARC2019), JPS Conf. Proc., 011014 (2021).