

# J-PARC リニアック MEBT2 における真空系トラブル事例と対策

## VACUUM SYSTEM TROUBLES AND COUNTERMEASURES AT J-PARC LINAC MEBT2

諸橋裕子<sup>#,A)</sup>, 山田逸平<sup>A)</sup>, 小林史憲<sup>A)</sup>, 田村潤<sup>A)</sup>, 宮尾智章<sup>B)</sup>, 守屋克洋<sup>A)</sup>, 神谷潤一郎<sup>A)</sup>  
Yuko Morohashi<sup>#,A)</sup>, Ippei Yamada<sup>A)</sup>, Fuminori Kobayashi<sup>A)</sup>, Jun Tamura<sup>A)</sup>, Tomoaki Miyao<sup>B)</sup>,  
Katsuhiko Moriya<sup>A)</sup>, Junichiro Kamiya<sup>A)</sup>  
<sup>A)</sup> Japan Atomic Energy Agency  
<sup>B)</sup> High Energy Accelerator Research Organization

### Abstract

At the J-PARC Linac, beam acceleration is achieved using radio-frequency (RF) waves at 324 MHz and 972 MHz. In the Medium Energy Beam Transport line 2 (MEBT2), where the RF frequency changes from 324 MHz to 972 MHz, a Bunch Shape Monitor (BSM) was installed to measure the longitudinal beam profile. This BSM, developed and commissioned in 2012, experienced a vacuum system malfunction in November 2024, resulting in an emergency shutdown and damage to the turbo molecular pump. This report describes the details of the incident, including the cause of the failure, the immediate response actions, and the permanent countermeasures implemented to prevent recurrence.

### 1. はじめに

大強度陽子加速器施設 J-PARC のリニアックは、加速器システムの最初の段階として、負水素イオン(H<sup>-</sup>)ビームを約 400 MeV まで加速して、次段である 3 GeV シンクロトロン(RCS: Rapid Cycling Synchrotron)へビームを供給する役割を担っている。リニアックでは、ビームのエネルギーやエミッタンス、時間構造などを高精度に制御することで、後段の加速器及び各種実験施設の要求に応じた安定かつ高品質なビーム供給を実現している。

加速セクションには、高周波四重極型リニアック(RFQ)、ドリフトチューブリニアック(DTL)、機能分離型ドリフトチューブリニアック(SDTL)及び環状結合型リニアック(ACS)の加速空洞が用いられており、各段階でエネルギーを段階的に増加させながらビームを制御している。RFQ 下流から DTL 入口までの中間エネルギービーム輸送系(MEBT1: Medium Energy Beam Transport Line 1)及び SDTL 下流から ACS 入口までの 2 番目の中間エネルギービーム輸送系(MEBT2)で縦・横方向のビームマッチングが行われている。

各加速空洞の共振周波数は、RFQ から SDTL までが 324 MHz、ACS はその 3 倍にあたる 972 MHz である。周波数が切り替わる MEBT2 では、ACS 型のバンチャ空洞を 2 基設置しており、ACS セクションに整合するように縦方向ビームの調整に使用している[1]。

この MEBT2 における縦方向のビームプロファイルを測定するため、バンチャ・シェイプ・モニター (BSM: Bunch Shape Monitor) が開発され[2, 3]、2012 年に導入された。しかし 2024 年 11 月、当該 BSM において真空系のトラブルが発生し、ターボ分子ポンプの急停止と破損を伴う非常停止に至った。本稿では、このトラブルの詳細、発生時に実施した緊急措置、ならびに恒久的措置について報告する。

### 2. BSM 真空系の構成と増強経緯

BSM はロシア科学アカデミー核研究所(INR)によって開発された[4]のものであり、各国の大強度陽子リニアックで広く採用されている。J-PARC リニアックにおいても、2012 年に INR 製の BSM が 3 台導入され、ACS 加速空洞設置予定位置(当時は未設置)に先行して設置された[5]。しかし、設置当初からビーム運転中の真空悪化が確認され、2013 年には一旦ビームラインから取り外された。その後、オフライン環境下での真空ベーキング及びアウトガス分析が実施された[6]。

この問題を受けて、同年より INR 協力のもと、新型 BSM の開発・製作が開始された。現在 ACS セクション入口に設置されている 3 台の BSM は、J-PARC で開発された新型の BSM である[7]。

一方、2013 年に取り外された INR 製 BSM のうち、1 台は MEBT2 へ移設された。この移設に際しては、真空

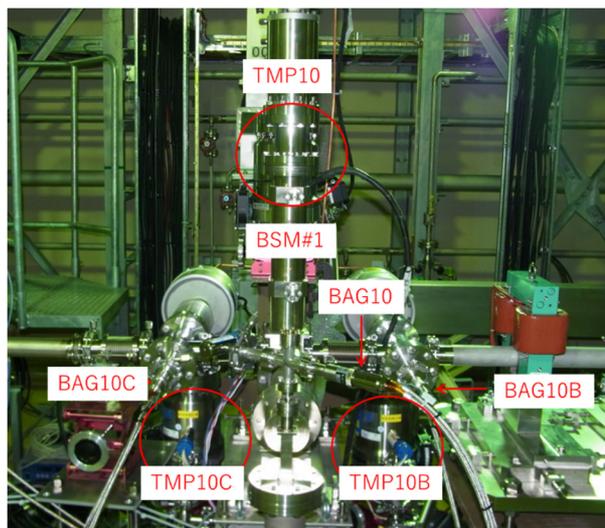


Figure 1: Layout of vacuum equipment at MEBT2.

<sup>#</sup> morohashi.yuko@jaea.go.jp

状態の改善を目的として、排気速度 300 L/Sec.のターボ分子ポンプ(TMP)3台を併設し、専用の真空系を構築した。これにより、ビーム運転時においても十分な真空が確保された。Figure 1にMEBT2 BSMの真空系構成を、Table 1にTMPの仕様及び導入以降の累積運転時間を示す。TMPは、BSM本体の頭頂部に設置されたTMP10、及びビームラインに沿ってBSMの上流側に設置されたTMP10B、下流側に設置されたTMP10Cの計3台で構成されている。それぞれの排気ラインに対して、B-Aゲージ及び熱伝導真空計(CNV)が設置されており、真空圧力の監視が可能となっている。

Table 1: Turbo Molecular Pump Specifications

メーカー、型式	SHIMADZU, PT-300(R1)
最大排気速度	300 L/s for N <sub>2</sub>
軸受方式	ピポット式軸受
コントローラー	PTI-300(RTS)-T9
導入時期	2013年10月
累積運転時間	頭頂部(TMP10): 77009.1 h(破損時) BSM上流(TMP10B): 76799.6 h BSM下流(TMP10C): 70817.7 h

## 2. トラブルの状況

本トラブルは、ビーム運転中の2024年11月22日に発生した。広範囲のB-Aゲージが同時に急激な圧力上昇を検知し、機器保護システム(MPS: Machine Protection System)警報が発報した。TMPのフォアラインに接続されていたドライスクロールポンプ(DSP)は運転

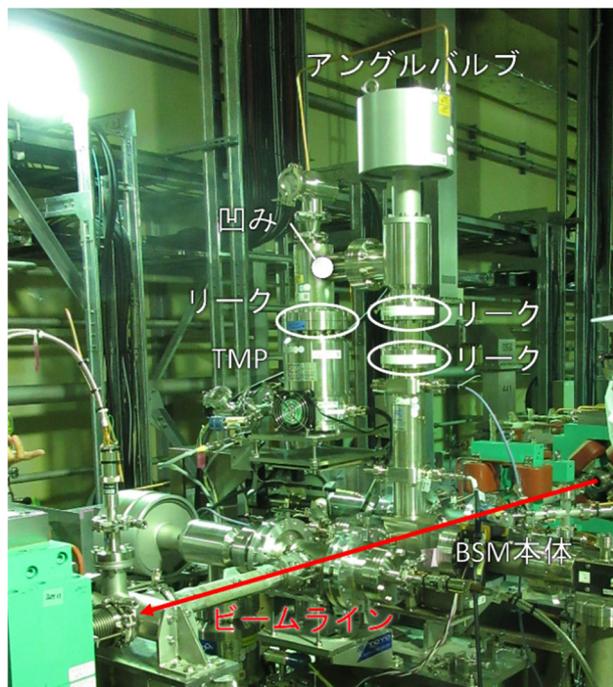


Figure 2: Observed flange leaks between the TMP and the BSM after atmospheric entry.

を継続していたものの圧力は大気圧に達していた(後述4.参照)。さらに、B-Aゲージのフィラメントが断線していたことから、大気突入が発生したと判断し、加速器トンネルへ入域した。

確認の結果、TMPのフォア側に設置されていたピラニゲージのケーブルが脱落しており、また、TMPとBSM本体の間に位置する3か所のフランジ接続部においてリークが確認された。Figure 2に故障したTMPとリークの確認されたフランジを示す。これらの接続部では、ICFフランジ及びNWフランジのネジが手で容易に動かせるほど緩んでいた。

さらに、Fig. 3に示すとおりTMP直上に設置されていたL字管には目視で確認できる変形(へこみ)が生じており、突発的な圧力変動、機械的衝撃が疑われた。また、TMPとビームラインの間に設置されていたアングルバルブにおいては真空封止できず、リークが発生していた。これらの状況を踏まえ、応急処置としてアングルバルブとTMPの切り離しを行い、BSM上部にブランクフランジを取り付けて真空封止を行った。

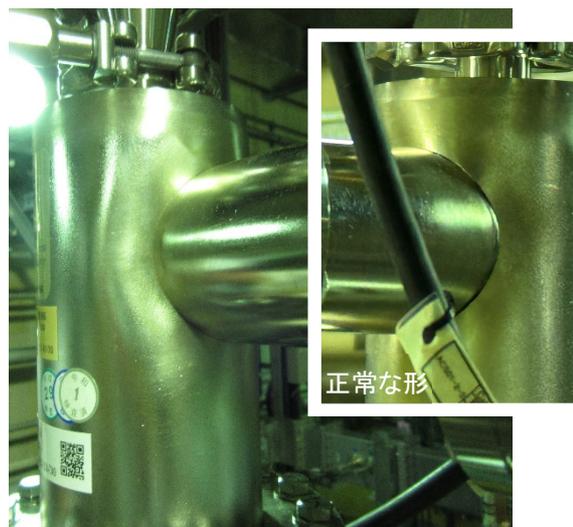


Figure 3: Dent found on the L-shaped vacuum pipe above the turbo molecular pump, suggesting mechanical shock during the vacuum failure.

## 3. ターボ分子ポンプの状況

TMPを回収後、内部調査を実施した。Figure 4-7に破損したTMP内部の様子を示す。ピポット軸部の潤滑オイルは基準量を維持しており、軸の固着による破損ではないことを確認した(Fig. 4)。また、ピポットベアリング及び軸上部ベアリングにも異常は見られなかった。一方、動翼及び静翼がハウジングに固着し(Fig. 5)、ローターステージが3つに割れている様子が確認された(Fig. 6)。これらの状況から、軸受部の破損が初期原因となり、動翼・静翼の破損が連鎖的に発生したものと推定された(Fig. 7)。当該ポンプの運転時間が長いことから、クリープ破断の可能性も否定できない。

本状況を受け、同一真空系に設置されていた他の2台のTMPについても長時間可動による信頼性低下が懸念されるため、継続使用を中止した。応急的な対応とし

PASJ2025 THP013

て、2025年1月に1台を撤去し、もう1台をイオンポンプ (Titan75s (Gamma Vacuum)、排気速度: 75 L/s for N<sub>2</sub>) に置き換えた。



Figure 4: Pivot section of the TMP. The residual lubricant was within the acceptable range, indicating no seizing damage.



Figure 5: Stator and rotor blades adhered to the housing.



Figure 6: Rotor stage fractured into three sections, indicating mechanical failure.



Figure 7: Initial bearing failure leading to blade adhesion and rotor breakage.

## 4. 真空圧力変化

### 4.1 トラブル発生時の状況

今回破損が確認された TMP 及び BSM の系統図を Fig. 8 に示す。また、トラブル発生時の B-A ゲージ及び熱伝導真空計 (CNV) の圧力推移を Fig. 9 に示す。故障した TMP と DSP の間に設置されている CNV が「CNVCT10A1」である。トラブル発生時、DSP は運転を継続していたが大気圧に達していたことが読み取れる。加えて、同系統に設置されていた4台の B-A ゲージは、いずれも断線していた。

### 4.2 TMP 故障前後の真空圧力推移

TMP 故障前後の 2024 年 10 月から 2025 年 6 月にかけての真空圧カトレンドを Fig. 10 に示す。データは、10 分間隔で処理したものである。

TMP 破損直後も、残る 2 台の TMP は運転を継続していたが、Table 1 に示すとおり、いずれも累積運転時間が 70,000 時間を超えていることから、保守上の観点から 12 月 4 日に両機を停止した。この停止以降、圧力の低下が緩やかになっていることが確認できるが、これは TMP 停止による排気速度の低下によるものである。

その後、約 1.5 か月が経過した 2025 年 1 月 6 日に TMP10B を撤去して、新たにイオンポンプを設置した。この対応により、TMP 破損前 (2024 年 10 月) と同等レベルの真空圧力を維持することが可能となった。なお、イオンポンプを設置した位置の B-A ゲージ (BAG10B) の圧力が、他の BAG と比較して高めであるのは、ビームライン側における実効排気速度の差異に起因するものと考えられる。

## 5. 恒久的処置

参考文献[8]に示されているとおり、ACS 最上流に設置された BSM (J-PARC 開発品) により、ビーム計測が可能であることが確認された。これを受けて、MEBT2 に設置されていた INR 製 BSM は完全に撤去され、現在その

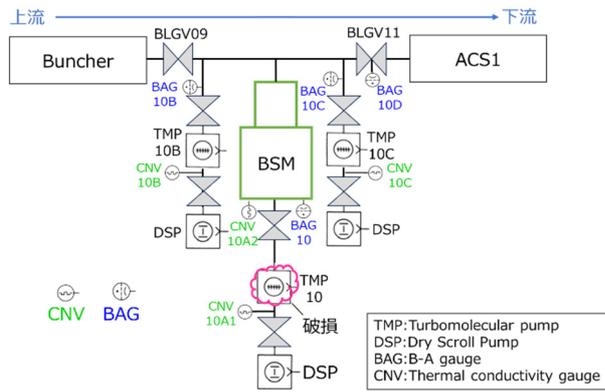
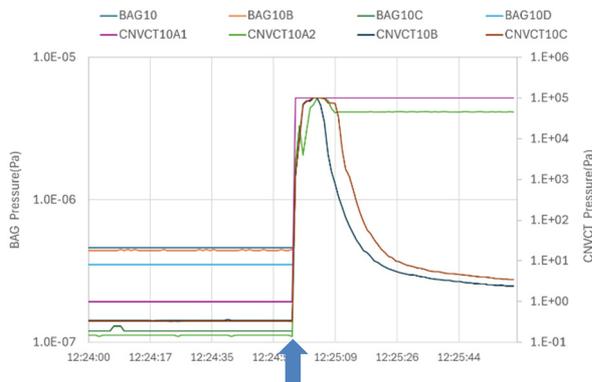


Figure 8: BSM equipment system diagram.



TMP破損

Figure 9: Pressure trend during turbo molecular pump failure.

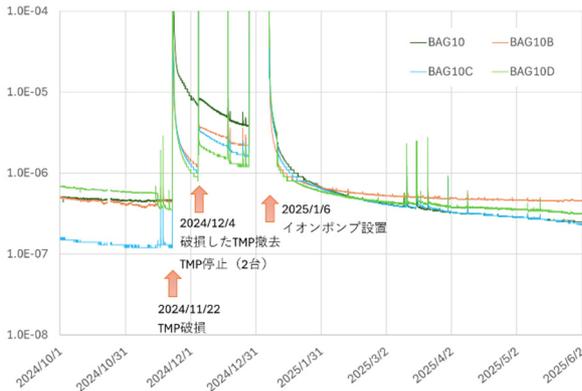


Figure 10: Trend of vacuum pressure before and after TMP failure. (October 2024 – June 2025)

設置跡には単管を設置する対応が進められている(対応期間:2025年7月~9月)。なお、ACS最上流に設置されている3台のBSM(いずれもJ-PARC開発品)についてもTMPを使用していることから、今後の運用や保守計画について検討を進める予定である。

## 6. まとめ

本稿では、J-PARC リニアック MEBT2 に設置された INR 製 BSM において発生した真空系トラブルと、その緊急対応および恒久的対策について述べた。

2024年11月、設置されていたTMPの急停止・破損により真空圧力が急上昇し、B-Aゲージ断線を含む事象であった。応急措置として、破損TMPの撤去とイオンポンプの設置を実施し、ビーム運転前の圧力レベルを回復した。さらに、ACS最上流に設置されたJ-PARC開発BSMにより計測が可能であることが確認されたため、MEBT2のINR製BSMは完全に撤去された。今後、残るJ-PARC製BSM3台の真空系についても運用の見直しを行い、より安定かつ安全な真空環境の維持に努めていく。

## 参考文献

- [1] Y. Yamazaki for J-PARC accelerator design team, "Technical design report of J-PARC", KEK Report 2003-13 and JAERI Tech 2003-44, <http://j-parc.jp>
- [2] A. Miura *et al.*, "Bunch Length Measurement of 181 MeV Beam in J-PARC Linac", Proc. of IPAC2013, Shanghai, China, May 12-17, 2013.
- [3] A. Miura *et al.*, "Bunch Shape Monitor for J-PARC Linac", Proc. of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagoya, Aug. 3-5, 2013.
- [4] A. V. Feschenko, "Technique and Instrumentation for Bunch Shape Measurements", Proc. of RuPAC2012, Saint-Petersburg, Russia, Sep. 24-28, 2012.
- [5] T. Miyao *et al.*, "Improvement of the Vacuum Pressure of the Bunch Shape Monitor at J-PARC Linac", Proc. of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsuruga, Aug. 5-7, 2015.
- [6] T. Miyao *et al.*, "Vacuum Improvement of Bunch Shape Monitor for J-PARC Linac", Proc. of IBIC2014, CA, USA, Sep. 15-18, 2014.
- [7] K. Futatsukawa *et al.*, "Development of Bunch Shape Monitor at J-PARC Linac", Proc. of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsuruga, Aug. 5-7, 2015.
- [8] T. Miyao *et al.*, "Trouble Cases Progress Report of Bunch Shape Monitor for Longitudinal Beam Matching in J-PARC Linac MEBT2", Proc. 22nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2025), Tokyo, Japan, Aug. 6-8, 2025.