

J-PARC リニアック製のバンチ・シェープ・モニタの開発 DEVELOPMENT OF BUNCH SHAPE MONITOR AT J-PARC LINAC

二ツ川 健太 *A), 川根 祐輔 *B), 田村 潤 *B), 根本 康雄 *B), 林 直樹 *B),
福岡 翔太 *C), 真山 実 *D), 三浦 昭彦 *B), 宮尾 智章 *A),
Kenta Futatsukawa *A), Yusuke Kawane *A), Jun Tamura *B), Yasuo Nemoto *B), Naoki Hayashi *B),
Shota Fukuoka *C), Minoru Mayama *D), Akihiko Miura *B), Tomoaki Miyao *A),

^{A)}High Energy Accelerator Research Organization

^{B)}Japan Atomic Energy Agency

^{C)}University of Tsukuba

^{D)}Mitsubishi Electric System & Service Co., Ltd

Abstract

In J-PARC Linac, the outgoing energy was upgraded from 181 MeV to 400 MeV in 2013 using Annular-ring Coupled Structure (ACS) cavities. The resonance frequencies of ACS cavities are 972MHz whereas those of existing cavities are 324MHz. Because the longitudinal matching of the injection beam to the ACS cavities is required, we have been developed the bunch shape monitors (BSM's) to measure the longitudinal beam profile. However, the vacuum property of the previous BSMs was not so good and those could not be installed. Therefore, we are developing the newly designed BSM. The pre-baking of 450 deg C was performed for the parts of BSM. The ultimate vacuum of BSM of 1.5×10^{-7} Pa was achieved and the purge examinations is in progress. We introduce the vacuum property of the new designed BSM.

1. はじめに

J-PARC リニアックでは、RF 駆動イオン源で生成された負電荷水素イオン (H^-) を 3-MeV 高周波四重極型リニアック (RFQ), 50-MeV ドリフトチューブリニアック (DTL), 191-MeV 機能分離型 DTL (SDTL), 400-MeV 環状結合型リニアック (ACS) により 400 MeV まで加速して、次段シンクロトロン加速器である 3-GeV RCS にビームを供給している。また、RFQ 出口から DTL セクション入口の間、SDTL セクション出口から ACS セクション入口の間にはビームの縦・横方向を調整するために、中間エネルギービーム輸送系 (MEBT1, MEBT2) が設置されている。ACS セクション下流から 3-GeV RCS 入射点までは、Linac to 3-GeV RCS ビーム輸送系 (L3BT) がある。各加速空洞の共振周波数は、RFQ 空洞から SDTL 空洞までが 324MHz、ACS 空洞は 3 倍の 972MHz となっている。共振周波数が変化する前後の MEBT2 には、ACS 型のバンチャ空洞が 2 台設置されている [1]。このバンチャ空洞を用いて、ACS 加速空洞へのビーム入射のために縦方向マッチングを実施している。一方で、ビームの縦方向の形状を測定するためのモニタとして、ロシア原子力研究所 (INR: Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences) と共同で、バンチ・シェープ・モニタ (BSM) を開発して設置した [2, 3]。

平成 21 年度より J-PARC 仕様で BSM の設計を開始して、平成 22 年度から平成 23 年度にかけて 3 台の BSM を製作した。平成 24 年度の夏季シャットダウン期間中に、ACS 設置予定場所¹ のビームラインに 3 台の BSM を据え付けた。その後、平成 24 年度から平成 25 年度にかけて基礎データを収集して、平成 25 年度の ACS 空洞のインストール後に実際に運用を開始する予定であった。しかし、現実には基礎データの収集の段階で、BSM の

高圧や RF を印加すると 10^{-3} Pa 台まで真空が悪化して機器保護装置 (MPS: Machine Protection System) を発報するなど、真空に関して問題点があることが明るみになった。最終的には、当時 BSM 近傍の排気を担っていたイオンポンプ (IP) を故障させるまで至った。上記の事態を考慮した結果、ACS 空洞の側には当該 BSM は設置することはリスクがあると判断し、平成 25 年度に ACS がインストールされた際に、BSM はその役目を果たせずにビームラインから取り除かれた。その後、BSM にターボ分子ポンプ (TMP) を接続してオフラインでベークを行ったが、劇的な真空の改善には繋がらなかった。その結果、翌年の平成 26 年度の夏季シャットダウン中には、BSM1 台に対して 300 L/sec の TMP3 台を接続させることで MEBT2 に BSM1 台のインストールをするに留まった [4]。このような状況では ACS セクション入口のラティスの同周期上に 3 台の BSM を設置して縦方向マッチングを行うという目的には到達できない。そこで、INR 製の BSM の真空改善の方向での検討を破棄して、新たに J-PARC リニアック製の BSM を開発することになった。

本稿では、J-PARC リニアック製の BSM の構造や真空試験の結果を紹介する。

2. BSM 測定原理

Figure 1 に BSM の測定原理を示す。バンチ化された負水素ビームが図の上から下へ通過するとき、アクチュエータによりビームライン中心に挿入されたタングステンワイヤー (Target) に衝突して二次電子を発生させる。ワイヤーには負の高圧が印加されており、二次電子はこのポテンシャル (U_{targ}) により加速される。加速された二次電子の一部はビームラインに対してアクチュエータの反対側に設置してあるコリメータ (Input Collimator) を通過して、電極 (RF Deflector+Lens+Steering) に到達する。この電極は、以下の 3 つの役割を果たしている。

* kenta.futatsukawa@kek.jp

¹平成 24 年度当時は第一期計画であり、ACS 空洞は据え付けられておらず、324MHz の加速空洞を使用して 181 MeV のビームを RCS へ供給していた。

1. $\lambda/2$ モードの共振器になっており、電極間の RF 電場 ($U_m/2 \sin(n\omega t + \phi)$) によりバンチの時間情報を位置変調させる。この RF は加速周波数の 324MHz と同期している。
2. 静電レンズ (U_{foc}) により二次電子の軌道を 2 つ目のコリメータ (Output Collimator) 位置に収束させる。
3. 2 つの電極間に電位差 (ΔV_{st}) を設けて、水平方向への収束点の微調整を行う。

二次電子の輸送系にはステアリング電磁石 (Steering Magnet) が設置されており、垂直方向に軌道の微調整を行うことができる構造になっている。2 つ目のコリメータを通過した二次電子は双極電磁石 (Bending Magnet) により 90 deg. 偏向されて最終段のコリメータ (Collimator) を通過できる運動量だけが弁別される。最終的に二次電子は、電子増倍管 (Secondary Electron Multiplier) を用いて、増幅されて信号として取り出される [5]。

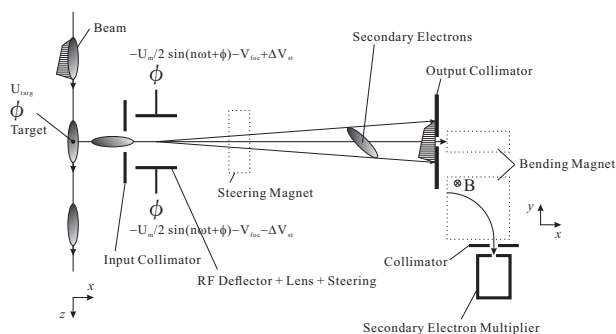


Figure 1: Principle of BSM.

3. INR 製 BSM の真空特性

平成 26 年度の夏季シャットダウン中に、真空特性が最も良かった INR 製 BSM に 300 L/sec の TMP3 台を接続させることで MEBT2 に設置した。この INR 製 BSM に関しては、上記の排気装置でオンライン・ベーキングを行うことでビームライン近傍で 10^{-7} Pa 台前半の真空度を達成している [4]。一方で、J-PARC 製の BSM の製作を行う前に、このときに真空特性が悪くインストールできなかった INR 製 BSM2 台の内 1 台に関して詳細な真空特性の調査を実施した。

INR 製 BSM に関して、平成 24 年度に INR 関係者が製作・調整を行い、その後 J-PARC 関係者が内部の状態を確認したことはなかった。そこで、最初に INR 製 BSM 真空槽内部の目視をすることにした。Figure 2 にそのときの内部の写真を示す。(a) 表面加工が粗いこと、(b) 目視できる汚れの付着や (c) 油性ペンで書かれた文字が確認できた。また、(d) ベンコットとエタノールで真空槽内部を拭いたところ、切削油と思われる黒い汚れがベンコットに移った²。以上のことから判断しても、INR 製 BSM が真空特性を十分に考慮して製作されているとは言い難いことが分かる。この後、到達真空度を確認する

²当該 INR-BSM はオイルポンプで排気したことがなく、この汚れの原因は製作時から付着していた切削油と推測できる。

のだが、その前にエタノールとベンコットを用いて人の手で拭いて洗浄を行っている。しかし、当該 INR 製 BSM は平成 24 年度にビームラインに設置された経歴があり、管体が軽度ではあるが放射化していることから、超音波洗浄などを実施することはできなかった。

ACS セクションに設置することを想定した現実的な真空装置のセットアップは、300 L/sec の TMP1 台と 250 L/min のスクロールポンプを用いて BSM 上部から排気することであった。そこで、INR 製 BSM を上記の真空装置のセットアップで約 200 °C で 48 時間のベーキング試験を計 2 回実施した。その結果、ビームライン近傍の到達真空度は 1×10^{-6} Pa であった。これは BSM 設置予定場所の ACS 空洞周辺の真空度より 1 桁近く悪い値となっている。真空槽の内部が真空汚染されていることから、ベーキングを実施したとしても汚れが焼き付いてしまい、真空度が期待したよりも向上しなかったと考えられる。

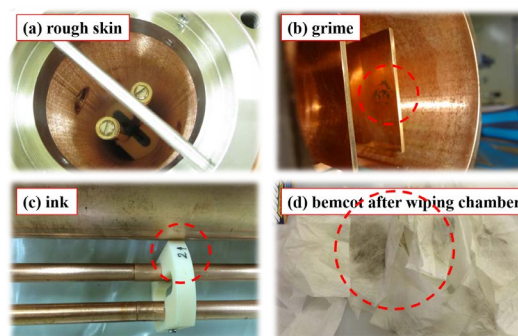


Figure 2: Photographs of the vacuum chamber in the INR-BSM. (a) Rough skin, (b) grime and (c) characters by a permanent marker were confirmed. (d) Bencots after wiping the vacuum chamber were blackened.

4. J-PARC リニアック製 BSM の製作

4.1 設置場所の再検討

当該 BSM を設置する予定の ACS 空洞の上流区間は、 10^{-7} Pa 台前半の真空度になるように設計されている。一方で、BSM は 300 L/sec の TMP を主排気ポンプと考えているが、ベーキングなしでは 10^{-7} Pa 台前半の真空度の到達は容易ではない。ベーキングを実施するためには BSM をゲートバルブ (GV) で挟みベーキングで脱離したガスが真空度の良い ACS 空洞の方向に向かうことを妨げる必要がある。しかし、デザインの BSM 設置予定場所と空洞間には電流モニタ (CT) があり、GV 設置して BSM を真空中に隔離することは空間的な問題で不可能であった。そこで、J-PARC 製 BSM を製作するに伴い、BSM の設置場所の再検討を行うこととした。

上記の目的で BSM を真空中に隔離させるためには、ラティスの同周期上に 3 台の BSM を設置するという制約から、J-PARC 製 BSM は ACS の 01~03 ブリッジ空洞上に設置するという一択しかなかった。Figure 3 に、(a) デザインの設置場所 [6] と (b) 再検討された設置場所を示す。再検討された設置場所の GV のための空間は 66 ~ 72 mm しかなかったが、既成品の 50 mm 幅の GV に

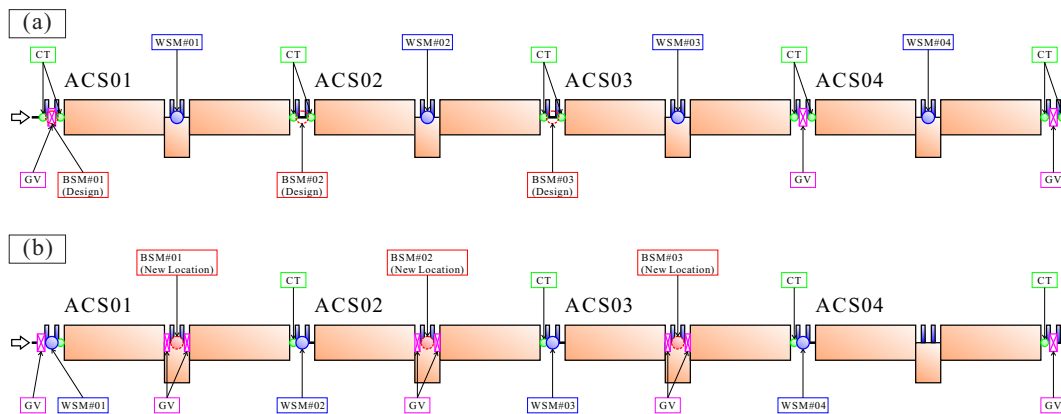


Figure 3: (a) Original and (b) reviewing installation locations of three BSMs.

ベローズを溶接することで、GV で BSM を真空的に隔離する目処は立った。

再検討された設置場所に BSM をインストールするため、平成 27 年度の夏季シャットダウン中に、WSM をブリッジ空洞上から空洞間への移動と薄型ベローズ付 GV6 台の据え付けを実施した。

4.2 新デザイン

J-PARC 製 BSM の最初の 1 台は、ボディ部、アクチュエータ部、偏向電磁石部の 3 つに分割して製作した。Figure 4 に J-PARC 製 BSM の外観図を示す。

ボディ部は、基本的には INR 製 BSM と同じ構造となっているが、空気溜りが出来ないように空気抜き穴を設けるなどの配慮をしている。SUS 材と無酸素銅は表面処理として複合電解研磨を実施している。INR 製 BSM の絶縁セラミックス材はマコールを使用していたが、真空での実績が高いアルミナで製作している。また、INR 製 BSM には一部青銅と思われる材質が使用されていたが、これらのパーツは無酸素銅で製作している。

J-PARC 製 BSM の設置場所を再検討した結果、アクチュエータ部を INR 製 BSM と同じ大きさで製作すると既設の IP と物理的に干渉するということが製作前に分かっていた。そこで、アクチュエータ部はパルスモータの動作方向にコンパクトで干渉を避けるように再設計を行った。INR 製 BSM がタングステンワイヤーに -10 kV の高圧を印加すると、数分毎の定期的に真空が悪化する挙動を示していたことから、放電が起きていたと推測された。そのため、ワイヤーの支持方法を変更して、放電が起き難いと思われる構造を検討した。SUS 材は表面処理として電解研磨を実施して、絶縁セラミックス材はアルミナを使用している。

偏向電磁石部は検討時間を多く確保できたこともあり、二次電子の軌道計算を行い、電磁石の形状や真空槽の内部構造の最適化を実施している。また、偏向電磁石部には 2 箇所にもコリメータがあるが、これがオリフィスの役目を果たしコンダクタンスを大きく悪化させていた。そこで、コンダクタンスを改善するために、J-PARC 製 BSM はコリメータがある面に対して問題ない範囲で空気穴を設けている。SUS 材は表面処理として電解研磨、無酸素銅は酸洗浄を実施している。

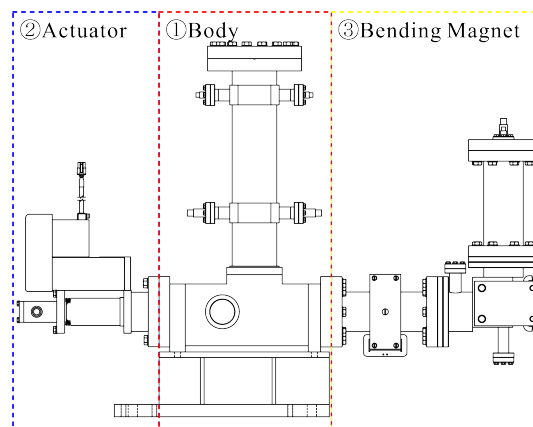


Figure 4: Overview image of newly designed BSM. It consists of three components, 1. body, 2. actuator, and 3. bending magnet.

4.3 真空加熱炉での高温ベーキング

BSM 排気装置の目標である 10^{-7} Pa 台前半の超高真空度は、水の成分は枯れ、水素がその分圧比を占める領域であることは論文や教科書から学ぶことができる。一方で、 200 °C 前後のベーキングの主な目的は、真空槽の表面に吸着している水を脱離させることにあり、材質に溶解している水素を放出させる効果は期待できない。そこで、RCS の真空グループが所有するドライの真空加熱炉を借りて、J-PARC 製 BSM のボディ部とアクチュエータ部については 450 °C で 48 時間の条件でのベーキング処理をそれぞれ製作工程の途中に実施している。偏向電磁石部においては、同 450 °C で 24 時間の高温ベーキング処理を製造メーカに依頼してベーキング処理を実施している。Figure 5 にボディ部のベーキング中の全圧と温度のトレンドを示す。また、ベーキング中のガス成分を Fig. 6 に示す。後述する真空特性試験のベーキングと比較すると、ベーキングでの高温処理中に水素 (H_2) の分圧が低下している傾向が確認できる。昇温直後とベーキング終了直前の同温度条件 (450 °C) 下で水素の分圧を比較すると、ボディ部で $1/26$ 、アクチュエータ部で $1/20$ に改善している。本高温ベーキング処理で溶解水素の放出に成功していることが分かる。

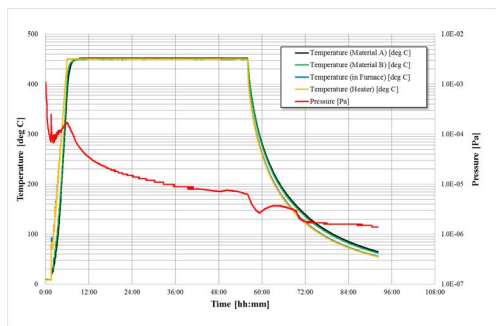


Figure 5: Trends of the total pressure and temperature in the period of pre-baking.

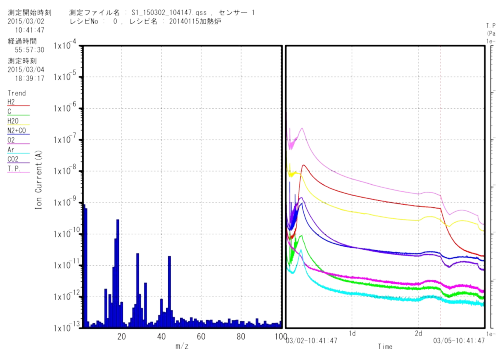


Figure 6: Trends of the partial pressure in the period of pre-baking.

5. 真空特性試験

5.1 到達真空度

平成26年度3月に納入されたBSMのボディ部とアクチュエータ部に関して、真空試験を実施した。最初、TMP単体、アクチュエータ部単体、ボディ部単体と各パーツの到達真空度を試験した (Table.1)。ボディ部単体試験は、最初は、ベーキングを実施しても真空度は目標である 10^{-7} Pa 台前半には到達できなかった。空気溜りや真空リークの存在を疑ったが、四重極形質量分析計 (QMS) でガス成分を調べたところ、空気の成分が原因でないことが分かった。そこで、ベーキングの温度を上げ、時間を伸ばして再ベーキングを実施したところ、 2.3×10^{-7} Pa の真空度に到達できた。ベーキング終了後、QMSで測定されたガス成分は水素 (質量数:2) が50%以上の分圧比を示し、水 (18) を十分に枯らせることができていたことが確認できた。これにより、BSMのアクチュエータ部とボディ部単体は、150~170℃のベーキングを実施することにより、 10^{-7} Pa 台前半の真空度に到達できることが示された。

Table 1: Results of Ultimate Pressure Examinations for Each Part of BSM.

	w/o Bake-Out	w Bake-Out
TMP	2.9×10^{-7} Pa	5.5×10^{-8} Pa (100℃, 24h)
Actuator	-	8.1×10^{-8} Pa (150℃, 48h)
Body	-	2.3×10^{-7} Pa (170℃, 82h)

単体で目標の真空度を到達できることを確認した後、アクチュエータ部とボディ部を連結させて到達真空度を調査した。ベーキングは170℃で60時間、180℃で60時間の2回実施している。そのときの真空度と温度、分圧のトレンドを Fig. 7 に示す。最初のベーキングはビームライン近傍での到達真空度が 2×10^{-6} Pa に留まってしまった。これは、ベーキング温度と時間が不十分であったことだけでなく、ヒータの巻き方に斑があり、筐体の温度が上がらなかった箇所があったことにも一因であると考えている。このとき、ベーキング終了直前と冷却後と比較した各ガス成分の降下率は効果的なベーキングができた時に比べて、最大で1/8になっていた。そこで、ヒータを巻き直して180℃で60時間でベーキングを再度実施したところ、TMP近傍で 1.0×10^{-7} Pa、ビームライン近傍で 1.5×10^{-7} Pa の真空度を達成した。Figure. 7(b) から、質量数17 (OH)、18 (H₂O)、28 (N₂ or CO)、32 (O₂)、40 (Ar)、44 (CO₂) は昇温と共に分圧が急激に上昇し、その後、ゆっくりと低下していることが分かる。一方で、質量数2 (H₂) は、ベーキング開始後から徐々に分圧が上昇して、その後は一定値を保ち続けた。ベーキング終了後に、QMSで測定された分圧比は水素 (質量数:2) が70%以上を示して、水 (18) が枯れていることが確認できた (Fig. 8)。また、質量数が大きな成分はQMSの検出感度以下であり、真空槽内部が油などで汚染されていないことも確認できた。また、比較検証の実験をすることはできていないが、最終の到達圧力が水素で決まっていることから、プリベーキングを実施してSUS材に吸蔵された水素を放出させた効果はあったと考えられる。

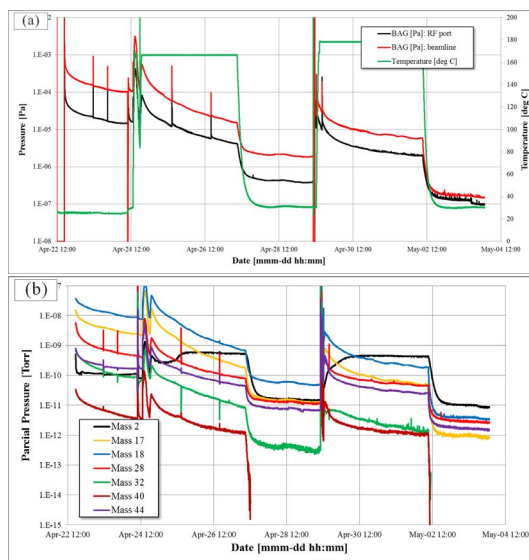


Figure 7: (a) Total pressure and (b) partial pressure of BSM during the period of the bake-out.

5.2 パージ試験

到達真空度が目標値に到達できることが確認できた後、実際のインストールを想定してパージ試験を実施した。今回行ったパージ試験の条件を Table 2 に示す。パージ前の真空度は、今回の目標の到達真空度である 10^{-7} Pa 台前半で同じ条件になるように努めた。

まず、基準とするため、室素を3分間だけ大気圧で封

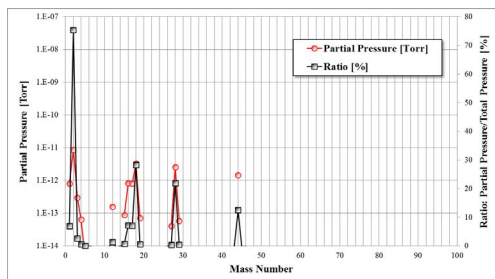


Figure 8: Partial pressure of BSM after the bake-out.

入して直ぐに真空引きを開始して排気曲線を調べた。その結果、3日後にはビームライン近傍で 2.5×10^{-7} Pa になり、ほぼパージ前の真空度に到達できていることが確認できた。

窒素の封入時間を3分間から24時間に伸ばして、パージ試験を実施した。その結果、真空引き開始から3日後のビームライン近傍の真空度は 1.5×10^{-6} Pa であり、封入時間が与える影響の大きさが見て取れた。また、このときの主なガス成分は28 (N_2 or CO) となっていた。

次に、真空締結時やパージラインからの大気混入の影響を調べるために、24時間の封入中に2時間パージポートを開放して拡散により故意に大気を混入させて試験を行った。真空引き開始から3日後の真空度は 7.6×10^{-6} Pa であった。このときの残留ガスの主成分は18 (H_2O) であり、水が大気とともに真空槽内に流入して内部に吸着してしまう影響の大きさが確認できた。更に、パージ時のパージラインからの大気混入の影響を調べるために、パージラインのベーキングと真空引きを行い、可能な限りの大気混入を抑えた窒素パージを実施した。通常行っていたブローのみの場合と比較して、排気曲線はほとんど変化しておらず、窒素パージで24時間の封入という条件の場合はパージラインからの大気混入にそれほど神経質になる必要がないことが分かった。

最後に、パージガスをアルゴンに変えて、封入時間を24時間の条件でパージ試験を実施した。このときの主な残留ガス成分は40 (Ar) であり、窒素パージ時の28 (N_2 or CO) 成分の排気曲線とアルゴンパージ時の40 (Ar) 成分の排気曲線はほとんど一致していた。つまり、アルゴンでパージを実施したとしても、上記の条件の場合は大きなメリットはないことが分かった。

Table 2: Condition of Purge Examinations of BSM.

Gas	Filled Time	Purge Line	Remarks
N_2	3 min.	blow	
N_2	24 h	blow	
N_2	24 h	blow	air incorporation
N_2	24 h	baking & vacuuming	
Ar	24 h	baking & vacuuming	

6. まとめ

J-PARC リニアックでは、MEBT2 セクションで縦マッチングを実施するため、平成26年度の夏季シャットダウ

ン終了後から、J-PARC リニアック製 BSM 1 台の開発を開始している。現在、試験中ではあるが、ベーキングを実施することにより、到達真空度はビームライン近傍で 1.5×10^{-7} Pa を達成できた。また、インストールを想定したパージ試験も実施中であり、オンラインベーキングの必要性の有無を判断するための結果を取得中である。

当初の予定通りに BSM3 台を ACS セクション入口に設置するために、2 台目の BSM の製作も現在検討し始めた。

7. 謝辞

BSM ボディ部とアクチュエータ部の高温ベーキングにあたり、J-PARC RCS の真空グループの神谷潤一郎氏、能代谷彰二氏、引地祐輔氏には深く感謝致します。今回、唐突に真空加熱炉を貸して頂きたいという無茶な依頼に対して、快く協力して頂きました。また、真空を取り扱ってからの浅い私に対して色々のご指導頂きまして、誠に感謝致します。

参考文献

- [1] <http://www.j-parc.jp>; Y. Yamazaki for J-PARC accelerator design team, "Technical design report of J-PARC", KEK Report 2003-13 and JAERI-Tech 2003-44.
- [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] 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.
- [5] A. V. Feschenko, "Technique and Instrumentation for Bunch Shape Measurements", Proc. of RuPAC2012, Saint-Petersburg, Russia, Sep. 24-28, 2012.
- [6] A. Miura, et. al., "Beam Monitor Layout for Future ACS Section in J-PARC Linac", Proc. of IPAC2013, Shanghai, China, May 12-17, 2013.