

J-PARC RCS 荷電変換装置におけるスロー排気・パーズシステムの改修 IMPROVEMENT OF SLOW PURGING AND SLOW PUMPING SYSTEM ON THE CHANGE EXCHANGE SYSTEM IN THE J-PARC RCS

飛田教光^{#,1)}, 吉本政弘¹⁾, 竹田修¹⁾, 佐伯理生二¹⁾, 山崎良雄¹⁾, 金正倫計¹⁾

武藤正義^{#2)}

Norimitsu Tobita^{#,1)}, Masahiro Yoshimoto¹⁾, Osamu Takeda¹⁾, Riuji Saeki¹⁾, Yoshio Yamazaki¹⁾, Michikazu Kinsho¹⁾,
Masayoshi Mutoh^{#2)}

¹⁾ Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC)/Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

²⁾ Nippon Advanced Technology Co.,Ltd

Abstract

In the 3 GeV Rapid Cycling Synchrotron (RCS) of the Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC), we adopted the multi-turn charge exchange injection scheme using stripper foils. The stripper foils are carbon based ultra-thin foil (about 1 μm thick), therefore it is difficult to handle the delicate thin foils. Moreover the stripper foils are activated after the beam irradiation. So breaking up and scattering the beam irradiated foil may increase the risk of internal exposure. Thus the vacuum chamber where the stripper foils are installed in needs the slow purging and slow pumping system. We added some bypass lines which have gas flow meters and some needles valves for the gas flow control. The slow purging and pumping system is effective in protecting the delicate foil, but it takes much time to purge and evacuate the vacuum chamber. The slow purging and pumping system previously were installed near the stripper foils to see the foil directly. However the high residual doses were detected around the stripper foil and then staff was exposed to radiation due to long hours of work. Therefore we improved the slow purging and pumping system in order to keep staff radiation exposure as low as possible. All bypass lines for the gas flow control were moved from acceleration tunnel to utility tunnel and additional remote observations system was added. The new system can decrease the staff radiation exposure considerably.

1. はじめに

Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC) の3つの加速器の内、3GeV シンクロトロン (Rapid Cycling Synchrotron; RCS) は 1MW の大強度陽子ビームを実現させるために、荷電変換フォイルを用いた負水素ビーム荷電変換多重入射方式を採用している^[1]。我々が使用する荷電変換フォイルは、厚さ約 1 μm の炭素製薄膜である。荷電変換フォイルは大強度ビームにさらされるため、荷電変換フォイル自身の放射化や劣化が寿命として問題となる^[2]。加速器の安定的な運転を維持するためには、荷電変換フォイルの定期的な交換が必須となるが、放射化し、壊れやすくなった荷電変換フォイルの取り扱いには様々な課題がある。その一つが、荷電変換フォイルを真空容器内に設置した後の真空排気やアルゴンパーズ時の取り扱いである。荷電変換フォイルは非常に薄いため、わずかな気流の流れでも破損するリスクがある。ましてや照射済みの放射化したフォイルが破損し、拡散すると作業員の体内被ばくのリスクが格段に高くなる。そこで、真空排気やアルゴンパーズを行う際、気流の影響を受ける圧力領域では、排気速度を極力制限しながら排気またはパーズできるシステムを構築した。このスロー排気系やスロー

tobita.norimitsu@jaea.go.jp

パーズ系によりフォイルを破損させることなく、真空容器内での取り扱いが可能となったが、フォイルを観測しながら、ゆっくり排気またはパーズを行うため、作業員が加速器トンネル内に長時間拘束される結果となった。一方で、LINAC でのエネルギー増強及びビーム電流増強を受けて、RCS での大強度運転が開始され、それに伴い入射部の残留線量も徐々に高くなってきた^[2,3]。入射部の残留線量は RCS の大強度運転にとって非常に重要な課題であり、ビームコミッショニングを通して低減に向けた成果が見え始めた^[4]。しかし、我々作業員側からも被ばく低減に向けた対策を必要と考え、スロー排気及びスローパーズ系の抜本的な見直しを行った。具体的には、これまで加速器本体のある主トンネル内でスロー排気及びスローパーズ系の操作を行っていたが、このシステムをそのままユーティリティ系のサブトンネルに移設することで、長時間の流量調整時の被ばくを抑制することを狙った。それに合わせて、直接目視にて監視していたフォイルとブルトン管による真空容器内圧力確認をサブトンネルでも実施できるように、ネットワークカメラを新たに設置し、サブトンネルでフォイルとブルトン管の画像を監視しながら作業を行えるシステムを構築した。以上の装置改修の結果、作業員の放射線被ばくは大幅に低減することが出来た。

本発表では、スロー排気及びスローパーズ系統の具体的な改修内容と、その効果について詳細に報告する。

2. 荷電変換装置真空容器内におけるスロー排気・スローパーズ系統の必要性

RCS で使用する荷電変換フォイルは炭素製薄膜を採用し膜厚約 1 μ m と非常に薄い。そのため取扱いには細心の注意を要する。特に真空容器内に設置後の真空排気またはアルゴンパーズ時の気流の流れは荷電変換フォイルに大きなダメージを与えかねない。そこで、特に粘性流領域での気体分子の乱流がフォイルの破損に大きく寄与すると考え、粘性流領域から分子流領域までの圧力範囲で乱流の発生を抑制するような系統の構築が必要になる。

一般に粘性流領域及び分子領域の区分の指標には次式で定義されるクヌーセン数がある^[5]。

$$K_n = \frac{\lambda}{D} \quad (1)$$

λ [m]は平均自由行程、 D [m]は管径を示す。このクヌーセン数が $K_n < 0.01$ の時に粘性流領域、 $K_n > 0.3$ の時に分子流領域とみなされている。ここで、気体温度を室温として $T = 300$ [K]と考え、気体分子を窒素として分子半径を $d = 0.37$ [nm]とすると、ボルツマン定数 $k = 1.38 \times 10^{-23}$ [J/K]から平均自由行程は圧力 P [Pa]を用いて次式の様に表される。

$$\lambda = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi d^2 P} = 6.8 \times 10^{-3} / P \quad (2)$$

そこで式(1)と式(2)を組み合わせると、分子流領域の条件は $PD < 2.2 \times 10^{-2}$ [Pa m]となる。ここから、管径が大きくなると、分子流領域に必要な到達圧力は反比例して小さくする必要があることが分かる。

一方で、粘性流領域での気流の流れに対しては、層流及び乱流の区分の指標に次式で定義するレイノルズ数が用いられる^[5,6]。

$$R_e = \frac{Dv\rho}{\eta} \quad (3)$$

v [m/s]は流速、 ρ [kg/m³]は密度、 η [Pa/s]は粘性係数を示す。このレイノルズ数が $R_e < 1200$ の時に層流、 $R_e > 2200$ の時に乱流とみなされている。ここで、式(3)にたいして、気体流量 $Q = dVP/dt = Pv\pi D^2/4$ [Pam³/s]と状態方程式から求めた密度 $\rho = PM/RT$ [kg/m³]を用いて変形させると次式の様になる。

$$R_e = \frac{4MQ}{\pi\eta DRT} = 0.82Q/D \quad (4)$$

つまり、管径が大きくなるほどかつ気体流量が小さくするほど、レイノルズ数は小さくなる。

以上の結果を実際の荷電変換装置に当てはめてみる。第1荷電変換フォイルが設置される真空容器の管径はおおよそ $D_1 = 0.56$ [m]、第2・第3荷電変換フォイルの真空容器は $D_{2,3} = 0.27$ [m]であるため、分子流領域までに必要な到達圧力はそれぞれ $P_1 = 3.9 \times 10^{-2}$ [Pa]及び $P_{2,3} = 8.1 \times 10^{-2}$ [Pa]となりかなり低くする必要があることが分かる。一方でレイノルズ数で評価する。荷電変換装置で採用しているターボ分子ポンプ(TMP)(排気速度 500[l/s])を起動させるためにドライスクロールポンプ(DSP)(排気速度 250[l/min])を用いた粗挽き系での必要な到達圧力がおおよそ 100[Pa]程度である。このTMP起動時のレイノルズ数は第1及び第2第3荷電変換装置でそれぞれ $R_{e1_TMPon} = 73.2$ 及び $R_{e1_TMPon} = 152$ となり乱流条件と比較しても十分に小さいことが分かる。実際に荷電変換フォイルが入った状態で到達圧力 100[Pa]になった時にTMPを起動してもフォイルには全く影響がないことが確認された。このことから、荷電変換フォイルに必要なスロー排気及びスローパーズの仕様は、大気圧(おおよそ 0.1[MPa])からTMP起動可能な 100[Pa]までの間で乱流を発生させないように流速を押さえることである。そのためフォアラインの途中で 1/4 インチのステンレス管を用いたバイパスラインを増設して排気系統を切り替えるようにし、流量計で流量を監視しながら、ニードルバルブで流量を調整できるようにした。これまでの経験上、バイパスラインの流量をおおよそ 4[l/min]程度に制限して運用してきたが、大気圧の時でもレイノルズ数はそれぞれ $R_{e1_air} = 9.76$ 及び $R_{e2,3_air} = 20.2$ となりフォイルに全く影響を与えずに排気できることが分かる。バイパスラインはコンダクタンスを極端に絞っているため、真空容器の到達圧力はせいぜい 10[kPa]程度である。この時、バイパスラインから本設のフォアラインへと切り替えるため排気速度は(本設ラインのコンダクタンスを無視しても) 250[l/min]である。この時のレイノルズ数を評価すると $R_{e1_DSP} = 6.1$ 及び $R_{e2,3_DSP} = 12.7$ となりフォイルに全く問題ないことが改めて確認できた。

荷電変換フォイルに必要なスロー排気系及びスローパーズ系の仕様をまとめると以下ようになる。

- フォアラインに 1/4 インチのステンレス管を用いてバイパスラインを増設し切り替えるよ

うにする。

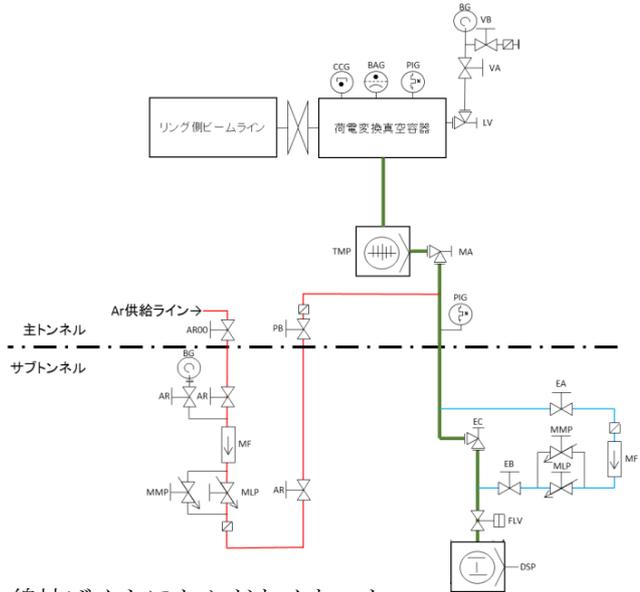
- バイパスラインに流量計及びニードルバルブを設置して、流量を調整しながら排気できるようにする。
- バイパスラインでの排気は大気圧から10[kPa]程度まで。その間の圧力監視はブルトン管を採用する。
- 原理的にはフォイルに影響を与えないと思われるが、念のためフォイルを監視しながら作業できるようにする。

これまで、スロー排気及びスローパーズシステムは・ブルトン管で計測する、・フォイルを監視する、の2つの仕様から、荷電変換装置真空容器直下にあるターボ分子ポンプのすぐ下流側のフォアライン配管にバイパスラインを設置した。直接監視をしながらの真空排気・パーズ作業は抑制しやすいといった利点が挙げられる。しかしスロー排気及びスローパーズ作業は時間がかかるにもかかわらず、残留線量の高い主トンネル内で手動操作にて行っているため、作業員の被ばく対策が重要な課題の一つとして挙げられていた。

3. スロー排気及びスローパーズシステムの改修工事

前節で挙げられた作業員の問題を解決するためには、1)操作を遠隔自動化させて作業員が地下で作業しないこと、2)操作場所を残留線量の低い場所に移設させること、の2つしかない。1)の場合、耐放射線仕様の遠隔自動化のための機器を取り付ける必要があり、かなり敷居が高い。そこで我々は、スロー排気及びスローパーズのためのバイパスラインを、残留線量がほとんどないサブトンネル側のフォアラインへ移設する方式を採用した。この場合、直接目視で計測していたブルトン管及びフォイルの監視が出来なくなる。そこで、作業時のみ複数台のネットワークカメラを設置して、サブトンネルから遠隔で監視できるシステムを新たに追加した。Fig.1に荷電変換装置の改修したスロー排気及びスローパーズの系統図をしめす。スロー排気のバイパスライン (Fig.1の青色ライン) をそのままサブトンネル側に移設した。またスローパーズライン (Fig.1の赤色ライン) については、アルゴンガス供給ラインが変更できなかったため、一度サブトンネル側に寄り道させ、そこに流量調節機能を集約させ、また主トンネル側に戻して各真空容器にアルゴンガスを供給させるようにした。改修工事完了後の様子として、Fig.2に新スローパーズ系統の外観写真、Fig.3に第1荷電変換装置真空容器から第2,3荷電変換装置真空容器までのスロー排気系統の外観写真を示す。今回のサブトンネルへの移設改修工事によって、従来

の作業時に数～十数[μSv]程度あった作業員の放射



線被ばくもほとんどなくなった。

Figure 1: Schematic diagram of new slow purging and slow pumping system for stripper foils.



Figure 2: Photograph of the centralized gas flow control unit for the slow purging system.

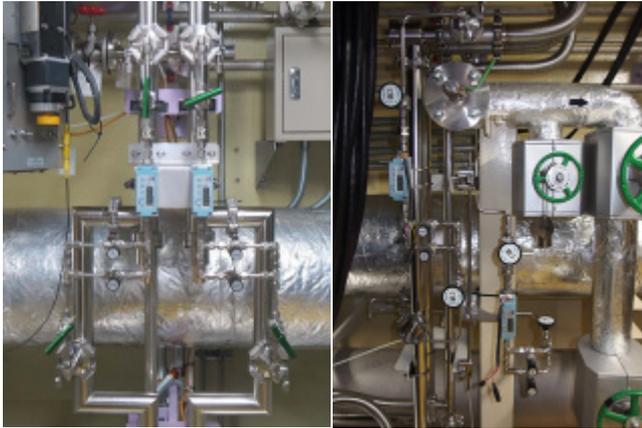


Figure 3: Photographs of the individual gas flow control units for the slow pumping system.

4. 新スロー排気及びスローパーズ系統を用いた荷電変換装置真空容器内の排気及びパーズ試験

本章では、新スロー排気及びスローパーズ系統の動作確認及び性能試験について報告する。

1) 主トンネルでの事前準備

今回改修した、新しいスロー排気及びスローパーズ系統のキーポイントは、直接目視で行っていたことを、ネットワークカメラを使った遠隔監視に切り替えたことである。そのため、作業のはじめに主トンネルにてネットワークカメラの設置作業が必要となる。遠隔監視の対象は真空容器内の荷電変換フォイルと容器内圧力を計測するブルトン管の2つである。フォイル監視用には、荷電変換真空容器のビューポートにカメラ固定治具をセットする。ビューポートのガラス面での反射による影響を抑制するためには、カメラをガラス面に張り付けるのが最も効果的である。そこで固定治具は、ビューポートのフランジに取り付けるリングにカメラを挟み込むリングが支持バーで連結しているだけの簡易な構造にし、カメラをビューポートのガラス面に押し当て固定することが出来る。また、真空容器内の照明もペンライトを挟み込めるクリップを固定治具にとり付けた。これにより、市販の高価な照明付のビューカメラを使うことなく真空容器内のフォイルを遠隔監視することが出来た。また、ブルトン管監視用カメラには特に注意点は無く、ブルトン管の前面に三脚を立て三脚上部にカメラを取り付け固定するだけで十分だった。2台のネットワークカメラを設置後、主トンネル内の荷電変換真空容器に設置したフォイル、ブルトン管監視用カメラの画像をサブトンネルで確認し、画像が鮮明に映し出されていることを確認した。ネットワークカメラを採用することで、複数台の監視画面を主トンネルとサブトンネル間に敷設している1本のLANケーブルに繋ぐだけで同時に確認することができた。(Fig.4)

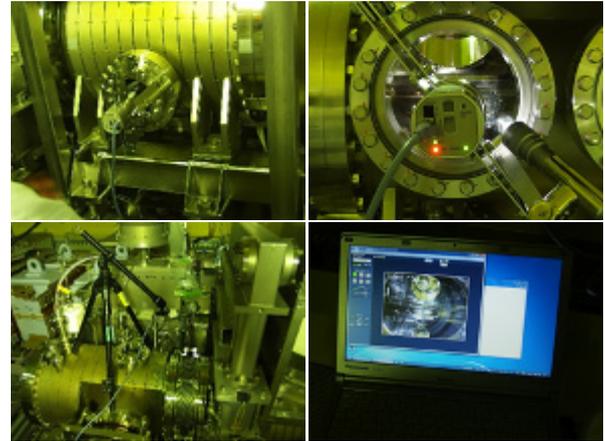


Figure 4: Confirmation of preparation and image of the monitoring camera.

2) サブトンネルでのスロー排気・パーズ作業

実際に作業時は、真空容器内にフォイルがある状態で流量を抑制しながら、カメラ画像を監視して荷電変換真空容器内のスロー排気及びスローパーズ作業を行った。スロー排気作業時にはドライスクロールポンプを起動して排気を行い、スローパーズ作業時にはArガスにてパーズを行う。スロー排気・スローパーズ時は常時、4[l/min]の数値を維持して作業を行っている。この数値は、今までの作業経験から設定した値である。

真空容器内のパーズ作業において、大気圧よりも過加圧状態にならないようにするために、ブルトン管の数値を確認する方法に加えて、エア抜き用のリークポートを用いる方法を採用している。スローリーク作業の返し前に、リークポートのNW40のクランプを外しておくことで、大気圧よりも加圧された段階でフランジが外れ、それ以上加圧されることを防ぐことが出来る。リークポートは、各荷電変換真空容器に取り付けられているため、我々はブルトン管とエア抜き用リークポートの二つを確認して作業完了としている。

3) スロー排気特性及びスローパーズ特性試験

新スローパーズ系統を用いた荷電変換真空容器内の作業時間と圧力変化をFig.5に示す。またFig.6に新スロー排気系統を用いた荷電変換真空容器内の作業時間と圧力変化を示す。これら新しいスロー排気及びスローパーズでの排気特性及びパーズ特性は、改修前とほとんど同じ結果となり、移設後もきちんと性能を維持できていることを確かめた。各装置において、排気とパーズ時間は全て流量を4[l/min]で一樣に調整しているため、ほぼ一緒なる。つまり装置毎のばらつきは、それぞれの真空容器の容積に比例している。

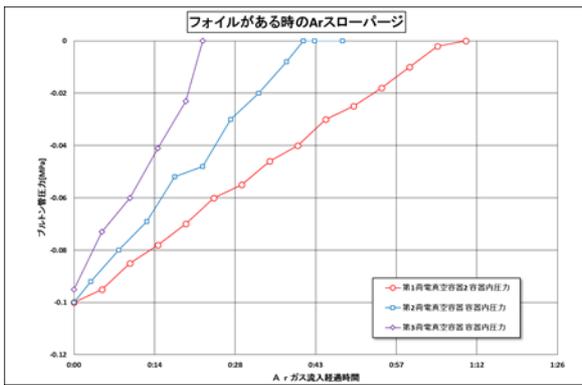


Figure 5: Slow pumping work time and pressure distribution.

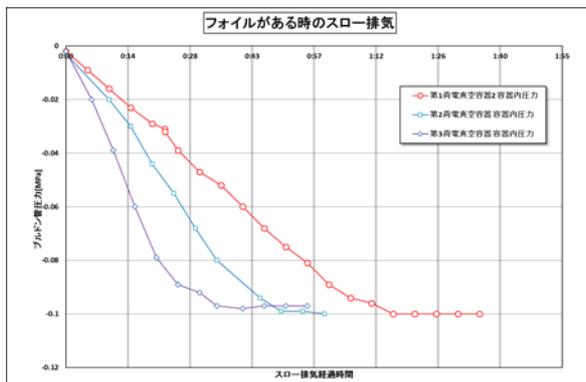


Figure 6: Trend plots of the vacuum pressure using slow purging system.

5. まとめ

真空容器内で荷電変換フォイルを取り扱うためには、スロー排気及びスローパーズ作業は必須である。しかし、これまでこの作業を残留線量の高い主トンネル内で実施していたため、作業員の放射線被ばくが大きな問題となっていた。今回、作業員の被ばく低減を目的として、既設のスロー排気及びスローパーズシステムを被ばくリスクが低いサブトンネルへ移設した。移設したことにより、スロー排気・スローパーズ作業時において、これまで数～十数 [μSv] ほどの線量被ばくがあったが、ほとんどなくなったことは大きな成果である。

今後も加速器を運転し続ける限り、加速器メンテナンスの一環として、使用済みフォイルと新規フォイルとの交換は必須であるため、移設した新スロー排気及びスローパーズシステムの有効性は非常に高い。しかしこれからも、さらなる問題点の抽出や作業効率の向上を目指して改良や見直しを行う。

参考文献

- [1] M. Yoshimoto et al., “HBC Foil Beam Study and Long-term Observation at the 3-GeV RCS in J-PARC”, J. Phys.: Conf. Ser. 417 (2013): 012073.
- [2] M. Yoshimoto et al., “Maintenance of radio-activated stripper foils in the 3 GeV RCS of J-PARC”, J. Radioanal. Nucl. Chem., DOI: 10.1007/s10967-015-4138-x.
- [3] M. Yoshimoto et al., “Residual dose measurement and activation of the injection area in the J-PARC RCS”, in this proceedings, THP011.
- [4] H. Hotchi, “Recent progress of J-PARC RCS beam commissioning”, in this proceedings, THOL06.
- [5] 千田裕彦, “粘性流領域における真空排気の理論計算とその応用”, 2010年1月・SEIテクニカルレビュー・第176号-(1)-.
- [6] <http://www.nucleng.kyoto-u.ac.jp/people/ikuji/edu/vac/app-A/conduct.html>