

J-PARC S-DTL 空洞における NEG ポンプを用いた真空改善の検討

STUDY OF VACUUM IMPROVEMENT USING THE NEG PUMP AT J-PARC S-DTL CAVITY

小林史憲^{#, A)}, 平野耕一郎^{A)}
Fuminori Kobayashi^{#, A)}, Koichiro Hirano^{A)}
^{A)} J-PARC/JAEA

Abstract

In the J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) linac, the pressure in the Separate-type Drift Tube Linac (S-DTL) cavity is being investigated for improvement. The S-DTL cavity cannot be equipped with a large displacement ion pump due to space limitations. Therefore, the use of a large displacement NEG pump, which can be installed in a space-saving manner, was considered. NEG pumps are not suitable for long-term continuous pumping because their pumping capacity gradually deteriorates after activation, but SAES Getters' CapaciTorr HV 1600 pump can be used for long-term continuous pumping by activating it at 200°C. In this report, we examine a method of improving the pressure in a cavity using a NEG pump, and report on a test of long-term operation of a NEG pump while activating it at a low temperature and a test of exhaustion of residual gas in a cavity using a NEG pump.

1. はじめに

大強度陽子加速器施設 (J-PARC) リニアックはビーム損失が重要な大きな問題となる加速器施設である。J-PARC リニアックでは、H-ビームは Separated-type Drift Tube Linac (SDTL) によって 190.8 MeV まで加速され、その後 Annular-ring Coupled Structure (ACS) によって 400 MeV まで加速される。

J-PARC リニアックでは様々なメカニズムでビーム損失が起こっており、加速空洞内の残留ガスがビーム損失の原因の一つである。これは加速された負水素イオンと残留ガスが衝突し H₀ が発生するためである。一般に、ガス剥離断面はビームエネルギーが低いほど大きくなり、剥離率は残留ガス圧力に比例する。SDTL セクション (50 - 190.8 MeV) の真空値は 10⁻⁶~10⁻⁵ Pa 程度と ACS セクション (191 - 400 MeV) 以降に比べて一桁高いため、SDTL セクションでの残留ガス剥離はより顕著である[1]。

SDTL セクションについて、既設真空排気系に新たに真空ポンプを設置し真空値の改善を行うことはリニアック上流部のビーム損失を低減させるために有用である。そこで、既設真空排気系統に増設可能な真空ポンプに NEG ポンプを選定し、200 °C で活性化させながら長期運用することによって、真空値を改善させることを検討した。

2. SDTL セクションの圧力改善の検討

2.1 SDTL 空洞

SDTL セクションには 32 台の空洞があり、最下流に設置されている空洞を Fig. 1 に示す。空洞は底部にある 2 箇所の排気ポートからそれぞれ 400 l/s のイオンポンプ (アジレント社製 Vac Plus 500 Noble Diode) を用いて真空排気を行っている。1 台のイオンポンプの排気ポートを分岐し、ゲートバルブ (VAT 社製) を介して、粗排気系が接続されている。粗排気系は 300 l/s のターボ分子ポン

プ (島津製作所製 PT-300)、フォアラインポンプにはルーツポンプ (アルカテル社製 ACP28S) で構成される。加速器運転時はゲートバルブを閉じて、イオンポンプのみで排気を行っている。ゲートバルブのイオンポンプ側に電離真空計 (ULVAC 社製 GI-M2) の測定子 (ULVAC 社製 M-13) を設置し、空洞側の圧力を測定している。空洞下部の 2 台のイオンポンプの間には空洞冷却水用の配管が接続されており、非常に狭い構造になっている。

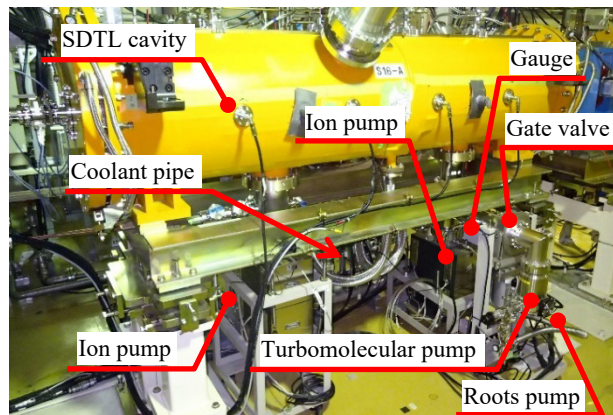


Figure 1: The photograph of the SDTL cavity.

2.2 NEG ポンプを用いた圧力改善の検討

空洞の排気ポートがある場所は狭く制限された場所であるため、小スペースで大排気量が望める NEG ポンプを用いて圧力を改善することを検討した。

NEG ポンプは、常温状態で水素及び一酸化炭素に対する排気速度が非常に大きく、簡単に超高真空を発生させることができる真空ポンプであり、加速器などのクリーンな真空が求められる装置に多く用いられている。

しかし、NEG ポンプは、不活性ガスに対し、排気能力を全く有せず、水素を吸収すると僅かながらメタンガスを放出するという欠点がある。また、活性化後の排気容量に限界がある為、長期間の運転時では排気能力が劣化していくという特性がある。排気能力が劣化した場合に

[#] kobayashi.fuminori@jaea.go.jp

は、550 °Cで活性化を行い、排気能力を復活させる必要がある。

そこで、上述した欠点を克服するため CapaciTorr® HV 1600 ポンプの温度(NEG 温度という)を 200 °Cで活性化状態を継続しながら使用することによって、高い排気能力を維持しながら長時間運用することを検討した。

CapaciTorr® HV 1600 ポンプは高多孔質焼結ディスクに ZAO ゲッター合金 (Ti-Zr-V-Al) を使用している。ゲッターカートリッジを適度な温度(約 200 °C)で作動させることにより、非常にコンパクトな設計で、H₂、N₂、H₂O、CO/CO₂、O₂ などのガスに対して高真空領域で高い排気性能を持つ特徴を有する[2, 3]。

2.3 Molflow+ コードを用いた圧力計算

NEG ポンプを 2 箇所あるイオンポンプ用配管にそれぞれ設置した場合、その有効性を確認するため、分子流領域のモンテカルロ シミュレーション コードである Molflow+ コード[4]を使用して計算を行った。SDTL 空洞の排気体系を Fig. 2 に示す。

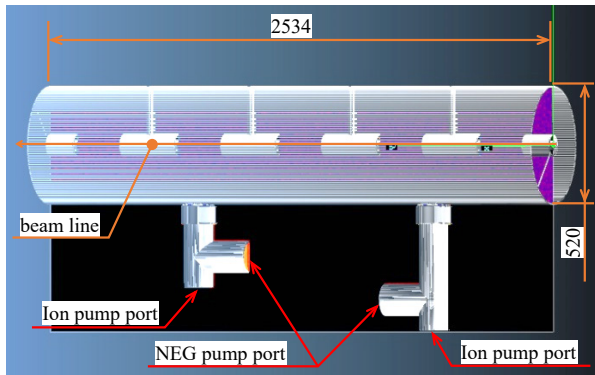


Figure 2: SDTLcavity exhaust configuration.

条件設定は、まず、NEG ポンプが設置されていない排気体系において、空洞のガス放出係数を求めた。イオンポンプの排気速度を 400 l/s に設定し、イオンポンプが接続されている排気ポートの真空値が利用運転中の電離真空計の値 3.5×10^{-6} Pa と同程度となるように、空洞のガス放出係数を 4.0×10^{-8} mbar**l*/s に設定した。このとき、ビームライン上の真空値は、シミュレーション結果から 5.5×10^{-6} Pa 程度であり、電離真空計での測定値の 1.6 倍程度であると推定される。

次に、Fig. 3 に示す体系で NEG ポンプ 2 台を設置した場合についてシミュレーションをした。2 台の NEG ポンプに、SAES Getters 社製 CapaciTorr® HV 1600、排気速度 300 l/s[3]を選定した場合、ビームライン上の真空値は 4.4×10^{-6} Pa となり、真空値は 20 % 程度の改善が見込める結果となった。また、2 台を大容量の NEG ポンプ、SAES Getters 社製 CapaciTorr® HV 2100、排気速度 625 l/s[5]を選定した場合、ビームライン上の真空値は 4.0×10^{-6} Pa となり、真空値は 28 % 程度の改善が見込める結果となった。

3. NEG ポンプを用いた排気試験

3.1 NEG ポンプ長期運用における真空値の推移

SDTL 空洞の既設イオンポンプの排気ポートに NEG ポンプを一台設置して、長期運用における圧力を測定し

た。測定体系を Fig. 3 に示す。まず、NEG ポンプを活性化化したのち、NEG ポンプ温度が常温である 27 °Cにて排気を行い、Fig. 4 に示すように真空値の推移を測定した。

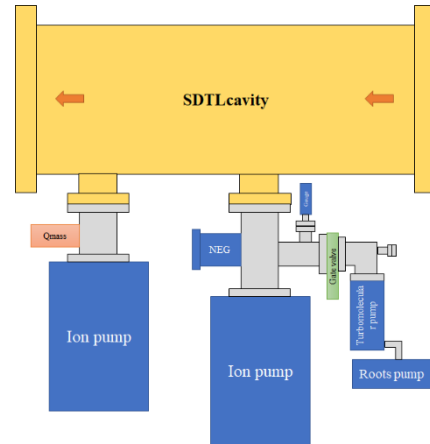


Figure 3: Measurement system.

次に、活性化後、定電流電源を用いて 1.5 A の電流を流し、NEG 温度を 200 °Cに保持しながら排気を行い同様に真空値の推移を測定した。

27 °Cの場合と 200 °Cの場合の排気性能を比較した結果、27 °Cで排気を行った場合は 160 日程度で、排気能力が劣化していき、200 日程度で完全に排気能力が無くなる。一方、200 °Cで保持しながら排気を行った場合は、測定期間の 290 日まで、排気能力を保ったままであった。200 °Cに保持することによって、NEG ポンプの排気能力を長期間維持できることが分かった。

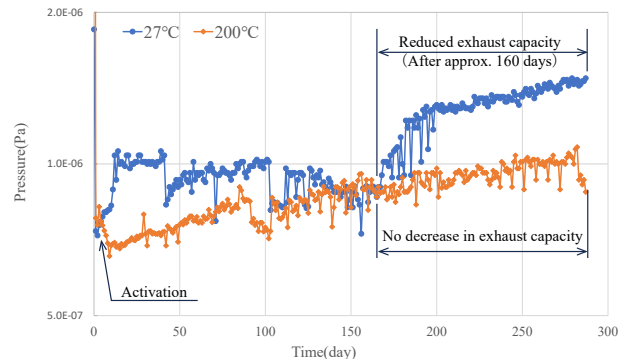


Figure 4: Vacuum value during long-term operation.

3.2 NEG 温度 27 °Cおよび 220 °Cでの排気速度比較

NEG 温度 27 °Cの排気速度に対して NEG 温度を 220°Cに増加させた場合、各種ガスの排気速度が通常の NEG 温度 27 °Cの場合に対してどのように変化するか調べた。

Figure 3 に示す測定体系において、四重極質量分析型残留ガス分析計 (PFEIFFER VACUUM 社製 QMG250 PrismaPro®, 以下 Qmass という) をイオンポンプ排気ポートに設置し、各ガスのイオン電流を 200 ms 毎に 7 s サイクルで測定した。

NEG ポンプを 550 °Cで 1 時間保持して活性化し、ターボ分子ポンプで粗排気後、電離真空計の値が 2×10^{-6} Pa 程度になるまでイオンポンプと NEG ポンプで排気した。

その後、NEG の温度が安定した状態でイオンポンプを停止させて NEG ポンプのみで排気し、電離真空計の値が 5×10^{-5} Pa 程度になるまで空洞内残留ガスのイオン電流を測定した。

分子量が 2(H₂), 16(CH₄), 18(H₂O), 26(C₂H₂), 28(CO/N₂/C₂H₄/C₂H₆), 29(C₃H₈), 31(CH₃OH/C₂H₅OH), 32(O₂), 40(Ar), 44(CO₂/N₂O)の各種ガスについて、NEG ポンプ温度が常温(27℃)の場合(以下、NEG 温度 27℃という)と NEG ポンプ温度を 215℃~229℃になるように設定した場合(以下、NEG 温度 220℃という)の NEG ポンプの排気速度を比較した。

容積 V の空洞を排気速度 S_1 のイオンポンプと排気速度 S_2 の NEG ポンプで排気する時、空洞から気体放出量 Q があつた場合、圧力 x について排気の式は(1) 式であらわされる。

$$V \frac{dx}{dt} = -(S_1 + S_2)x + Q \quad (1)$$

いま、イオンポンプを停止して排気速度 $S_1=0$ とすると(2)式となる。

$$V \frac{dx}{dt} = -S_2x + Q \quad (2)$$

定数:A、経過時間:t として、微分方程式を解くと、(3) 式となる。

$$x = \frac{Q}{S_2} + Ae^{-\frac{S_2}{V}t} \quad (3)$$

$t=0$ の時の値を B とすると、圧力と時間の関係は(4) 式となる。

$$x = \frac{Q}{S_2} + (B - \frac{Q}{S_2})e^{-\frac{S_2}{V}t} \quad (4)$$

時間に対する圧力変化を測定し、圧力上昇曲線をフィッティングすることによって、自然関数の指数部から排気速度 S_2 を求める。 Q_{mass} を用いて測定された各ガス種のイオン電流からガス組成を求めるには、あらかじめ高純度標準ガスを用いて圧力とイオン電流との比を求めておく必要がある。今回、圧力とイオン電流との比が不明なガス種があるため、イオン電流を(4) 式の x として、測定を行った。イオン電流上昇曲線をフィッティングすることによって、(4) 式の自然関数の指数部から排気速度 S_2 を求めた。各ガス種のイオン電流上昇曲線を Figs. 5 - 14 に示す。各種ガスのイオン電流上昇曲線をフィッティングして求めた排気速度 S_2 を Table 1 に示す。水素に関しては、フィッティングできなかったため、表から省いた。

Table 1 に示すように、質量数が 16, 18, 26, 31, 32, 40 のガスについては、NEG 温度 27℃と 220℃の場合の排気速度に差は見られなかった。質量数 28, 29, 44 のガスについては、NEG 温度 27℃での排気よりも、NEG 温度 220℃で活性化しながら排気した場合の方が、排気速度が 1.5~2 倍程度大きくなることが分かった。

水素に関しては、圧力上昇曲線をフィッティングすることが出来なかったが、Fig. 5 のグラフの傾きから判断する

と、27℃での排気速度が一番大きく、NEG の温度を上昇させると排気能力は悪くなっているのが分かる。

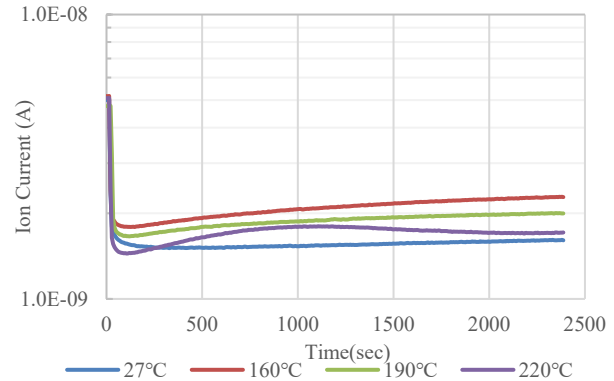


Figure 5: mass number: 2 (H₂).

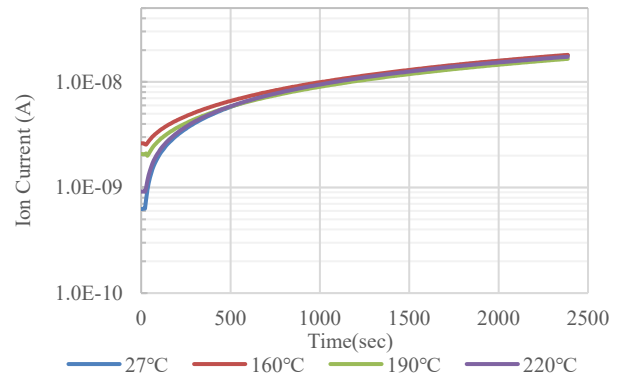


Figure 6: mass number: 16 (CH₄).

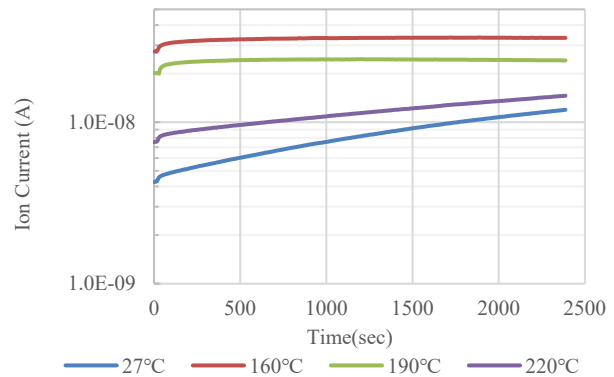


Figure 7: mass number: 18 (H₂O).

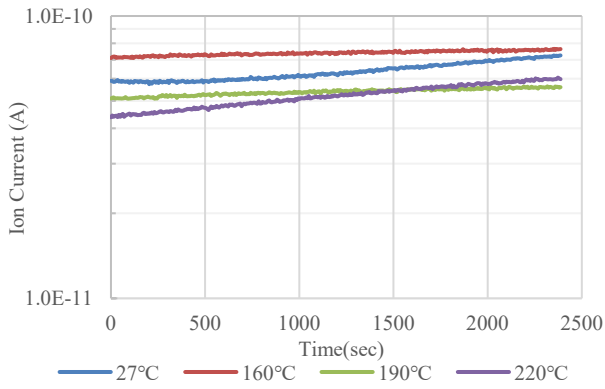


Figure 8: mass number: 26 (C_2H_2).

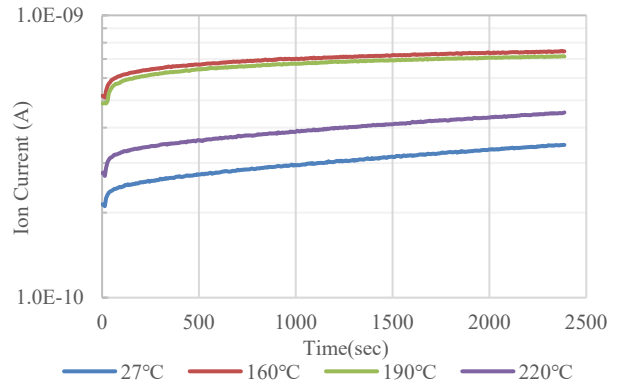


Figure 12: mass number: 32 (O_2).

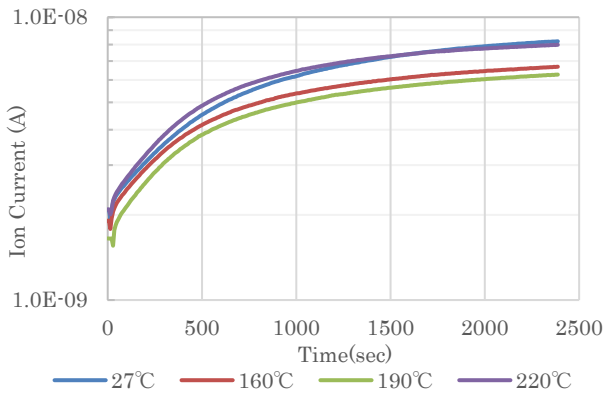


Figure 9: mass number: 28 ($CO/N_2/C_2H_4/C_2H_6$).

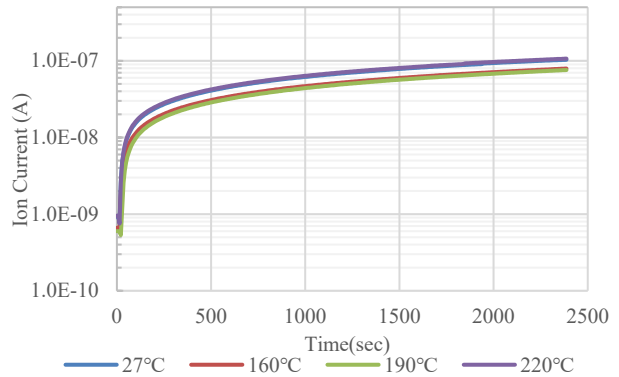


Figure 13: mass number: 40 (Ar).

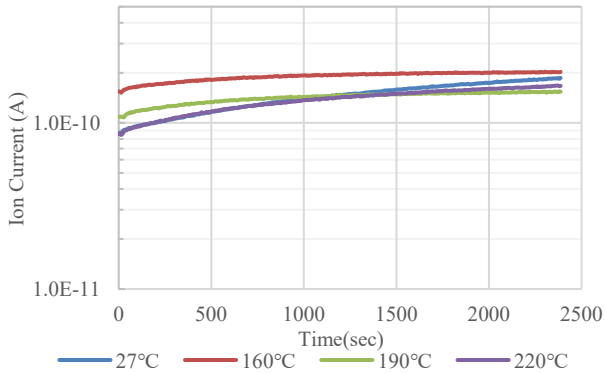


Figure 10: mass number: 29 (C_3H_8).

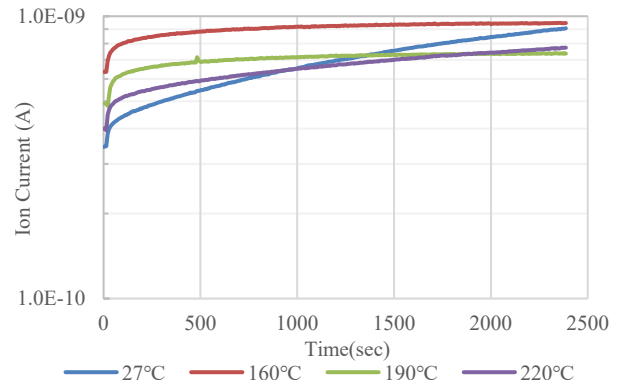


Figure 14: mass number: 44 (CO_2/N_2O).

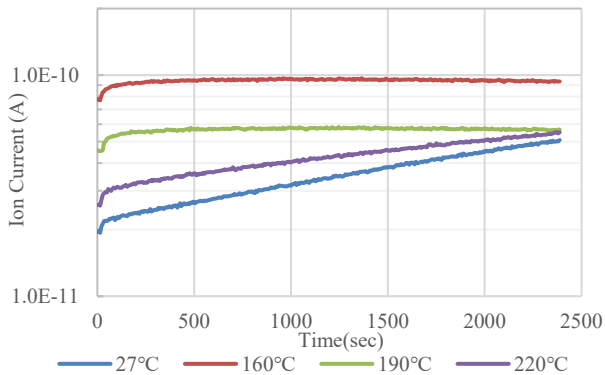


Figure 11: mass number: 31 (CH_3OH/C_2H_5OH).

Table 1: Comparison of Exhaust Velocities [m³/s] for NEG Temperatures of 27 °C, 160 °C, 190 °C and 220 °C

Mass number	NEG temperatures			
	27 °C	160 °C	190 °C	220 °C
16	1.1×10 ⁻⁴	1.1×10 ⁻⁴	1.1×10 ⁻⁴	1.1×10 ⁻⁴
18	7.7×10 ⁻⁵	5.4×10 ⁻³	5.4×10 ⁻³	7.7×10 ⁻⁵
26	7.7×10 ⁻⁵	1.8×10 ⁻⁴	1.8×10 ⁻⁴	7.7×10 ⁻⁵
28	4.5×10 ⁻⁴	6.2×10 ⁻⁴	6.4×10 ⁻⁴	6.4×10 ⁻⁴
29	1.8×10 ⁻⁴	9.0×10 ⁻⁴	9.0×10 ⁻⁴	3.6×10 ⁻⁴
31	7.7×10 ⁻⁵	5.4×10 ⁻³	5.4×10 ⁻³	7.7×10 ⁻⁵
32	1.8×10 ⁻⁴	1.8×10 ⁻⁴	1.8×10 ⁻⁴	1.8×10 ⁻⁴
40	2.2×10 ⁻⁴	2.2×10 ⁻⁴	2.1×10 ⁻⁴	2.2×10 ⁻⁴
44	1.4×10 ⁻⁴	1.1×10 ⁻³	1.1×10 ⁻³	2.2×10 ⁻⁴

3.3 NEG 温度 160 °Cと 190 °Cの排気速度

NEG 温度が 220 °C 以下の場合について、各種ガスの排気速度がどのように変化するか調べた。

3.2 項の測定後、電離真空計の値が 3.2 項の圧力値と同じ 2×10⁻⁶ Pa 程度になるまでイオンポンプと NEG ポンプで排気し、NEG 温度を 220 °C から 160 °C (160 °C ~ 164 °C で維持) に変化をさせた。NEG の温度が安定した状態になったら、イオンポンプを停止させて NEG ポンプのみで排気を行い、電離真空計の値が 5×10⁻⁵ Pa 程度になるまで空洞からの排出ガスのイオン電流を測定した。また、同様の手順で NEG 温度を 160 °C から 190 °C (190 °C ~ 193 °C で維持) に変化させた場合でも測定を行った。

測定した結果、NEG 温度 160 °C の場合と NEG 温度 190 °C の場合を比較すると、NEG 温度で排気速度の違いは見られなかった。

質量数 26, 29, 44 のガスについては、NEG 温度 160 °C 及び 190 °C の場合の排気速度は NEG 温度 220 °C の場合より、2 ~ 5 倍程度大きくなることが分かった。また、質量数 18, 31 のガスについては、排気速度が 70 倍も大きくなることが分かった。

それぞれの測定結果から、NEG を活性化しながら排気することにより、これまで NEG ポンプが得意としなかった質量数 26, 28, 29 等の炭化水素の排気速度の向上が見込めることが分かった。

4. まとめ

J-PARC LINAC の SDTL セクションの空洞内残留ガスがビーム損失の原因の一つとなっている為、空洞の真空値改善を検討し、既設スペースに設置可能な NEG ポンプを選定し、測定を行った。200 °C で活性化しながら運用すると、常温で使用した場合と比較して、排気能力が劣化せずに長期間運用できることが分かった。また、各残留ガス成分について、NEG 温度を変えて排気性能のデータを採取した結果、常温での運用時と比較して、220 °C では質量数 28, 29, 44 のガスに対し排気能力の向上が望めることがわかった。さらに、160 °C ~ 190 °C で

は、炭化水素系のガスについて、排気能力が向上することが分かった。

参考文献

- [1] J. Tamura, Measurement of H0 particles generated by residual gas stripping in the Japan Proton Accelerator Research Complex linac, Nucl. Instrum. Meth. A 1049 (2023), 168033.
- [2] <https://www.saesgetters.com>
- [3] <https://www.saesgetters.com/sites/default/files/Capacitorr%20Pumps%20datasheet%20HV1600.pdf>
- [4] R. Kersevan and J.-L. Pons, Introduction to Molflow+: New graphical processing unit-based Monte Carlo code for simulating molecular flows and for calculating angular coefficients in the compute unified device architecture environment, J. Vac. Sci. Technol. A 27, 1017 (2009).
- [5] https://www.saesgetters.com/sites/default/files/Capacitorr%20HV%20%2B%20datasheets_2017_web_3.pdf