

J-PARC 3GeV シンクロトロン RCS の真空システムの現状 RECENT STATUS OF J-PARC RCS VACUUM SYSTEM

山田逸平 ^{*,A)}, 神谷潤一郎 ^{A)}, 仲野谷孝充 ^{A)}, 黒澤俊太 ^{B,A)}, 柳橋亨 ^{C,A)}, 志賀隆史 ^{D,A)}, 和田薫 ^{D,A)}, 割貝敬一 ^{E,A)}
Ippei Yamada ^{*,A)}, Junichiro Kamiya ^{A)}, Takamitsu Nakanoya ^{A)}, Syunta Kurosawa ^{B,A)}, Toru Yanagibashi ^{C,A)},
Takashi Shiga ^{D,A)}, Kaoru Wada ^{D,A)}, Keiichi Warigai ^{E,A)}

^{A)} J-PARC center, Japan Atomic Energy Agency

^{B)} mhr

^{C)} NAT Corporation

^{D)} TOKYO ELECTRONICS Co., LTD.

^{E)} ULVAC TECHNO, LTD.

Abstract

The J-PARC RCS vacuum system enables stable high power beam operation with large-aperture alumina beam ducts and turbo-molecular pumps (TMPs) as the main evacuation device. The beam line pressure is less than the first half of the order of 10^{-6} Pa. To realize a more stable vacuum system and reduce the vacuum pressure for the beam power increase and heavy ion acceleration, we have been improving the vacuum system, particularly by replacing the fore-line pumps of the TMPs and adding non-evaporable getter (NEG) pumps. The fore-line pumps are mainly dry scroll pumps, but these pumps need frequent maintenances such as once a year because of degradations of tip seals and grease. The Roots pumps replacing the dry scroll pumps have no sliding parts and achieved over-five-year operation with no maintenances. The additional NEG pumps having a high pumping speed for hydrogen, water, and carbon mono-oxide which were the main parts of the residual gas evacuated these gases as expected according to the mass spectroscopy analysis. The RCS beam line pressure reached 5×10^{-8} Pa which is the lower limit value of our pressure gauge.

1. 研究背景・目的

大強度陽子加速器施設 J-PARC は大電流かつ速い繰り返しにより、3GeV シンクロトロン (RCS) において 1 MW の大強度ビームを出力する。このような大強度ビームを実現するための真空システムに関わる J-PARC RCS の特徴として、ビームロスの局所化、および高周波磁場を用いたビーム軌道制御が挙げられる。大強度加速器を安定かつ安全に運転するためには、ビームラインの放射線量分布を制御する必要があり、J-PARC RCS では入射部に設置したコリメータセクションにビームロスを局在化している。そのため、コリメータ部はイオン衝撃脱離によるガス放出速度が高い。また、その他の区間ではビームロスを低減するために、ビームラインの口径を最大 400 mm 程度と大きくとっているため、ビームライン容積が大きい。さらに、速い繰り返し (25 Hz) でビームを加速するため、偏向電磁石や収束用電磁石では 25 Hz の磁場、荷電変換入射のためのバンパ電磁石では立ち上がり $1 \mu\text{s}$ 以下、つまり数 MHz 程度までの磁場でビーム軌道を制御する。そのため、電磁石中のビームダクトが金属の場合、渦電流によりダクトが数百度以上に加熱され、さらに誤差磁場が発生するため、絶縁物であるアルミナセラミック製の大口徑ビームダクト (長さ: 最大 3.5 m) を開発して使用している [1]。セラミックスダクトがビームライン全周の約半分を占めるため、熱膨張の観点からインストール後のベキングは困難である。また、出射用のキッカー電磁石は高電圧を印加するため、放電を防ぐ目的で真空中に電磁石を設置している。このキッ

カー電磁石はフェライトコアを利用しており、その表面積が大きいので、ガス放出速度が非常に高い。このような大容積かつガス放出速度が高い系をベキングなしに超高真空中に維持するために、J-PARC RCS では溜め込み式ポンプではなく輸送式ポンプであるターボ分子ポンプを主排気装置としている。

ターボ分子ポンプはその前段に粗引きポンプを必要とし、建設時は価格・性能の観点からドライスクロールポンプを採用した。しかし、消耗品部の劣化による非定期的メンテナンス頻度が高く、加速器の安定運転の観点から、フォアライン排気系の見直しを進めている。また現在、J-PARC ではビーム出力 1 MW 以上への更なる大強度化、及び重イオン加速の計画が進められている。これらを実現するためには極高真空中に近いビームラインを実現する必要があるため、現在真空排気系の増強を行っている。本論文では J-PARC RCS の真空システムのうち、上記二点の排気系に関する最近のアップグレードの現状について報告する。

2. J-PARC RCS 真空システム排気系の概要

J-PARC RCS 全周にわたる 2019 年夏以前の真空ポンプの配置を Fig. 1 に示す。2019 年夏以前はターボ分子ポンプ 32 台のみであり、丸記号はターボ分子ポンプの位置を表している。ターボ分子ポンプのフォアライン排気系には基本的にドライスクロールポンプを利用していた。網掛け部は直線部に対応しており、入射部にはビームロスを局所化させるためのコリメータ、出射部にはキッカー電磁石が配置されている。冒頭で述べた通り、コリメータ部はビームロスにより、またキッカー部は真空容器内に設置された表面積の大きなフェライト

* ippei.yamada@j-parc.jp

コアの存在によりガス放出速度が高く、高い排気速度が必要なためターボ分子ポンプを密に配置している。この真空排気系の場合の典型的な全周にわたるガス圧分布を Fig. 2 に示す。また、一例として、第二アーク部の残留ガスの質量分析結果を Fig. 3 に示す。水素 ($m/z = 2$)、水 ($m/z = 18$)、一酸化炭素 ($m/z = 28$)、二酸化炭素 ($m/z = 44$) が残留ガスの主成分である。ビーム運転中も 1×10^{-6} Pa 程度以下であり、陽子ビームの 1 MW 運転を達成している [2]。

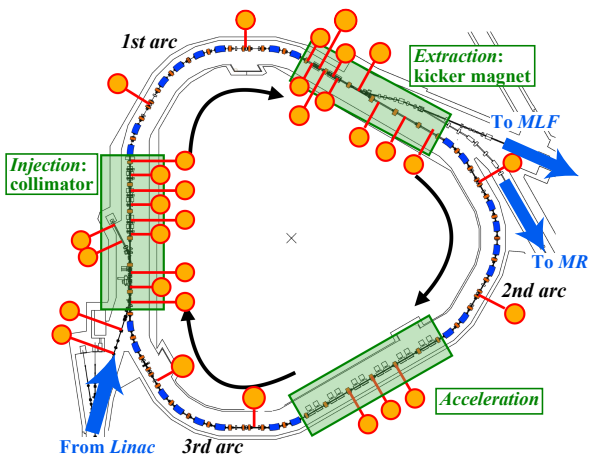


Figure 1: The J-PARC RCS vacuum system: arrangement of turbo-molecular pumps.

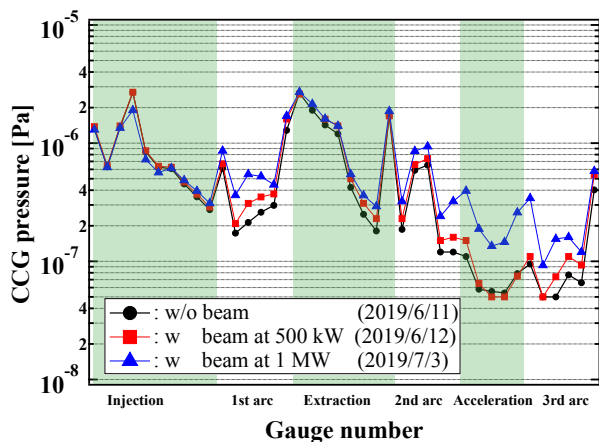


Figure 2: The typical vacuum pressure distribution along the J-PARC RCS ring in 2019.

3. フォアライン排気系の見直し

J-PARC RCS では主排気系であるターボ分子ポンプのフォアラインにドライスクロールポンプを建設時から長らく使用している。ドライスクロールポンプはビーム運転中は常に稼働しているため、ポンプ運転時間は年間約 6,000 時間である。Figure 4 に直近 8 年間のドライスクロールポンプのメンテナンス頻度の一覧を示す。点がメンテナンスを示し、黒の塗りつぶしはルーツポンプへ

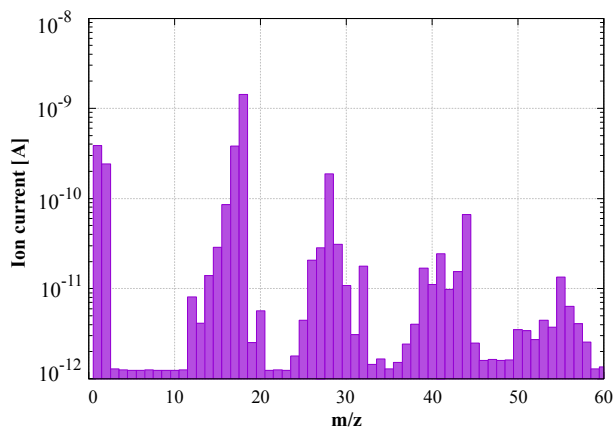


Figure 3: The mass spectra of the residual gas evacuated with turbo-molecular pumps. The applied voltage to the secondary electron multiplier was -1.3 kV.

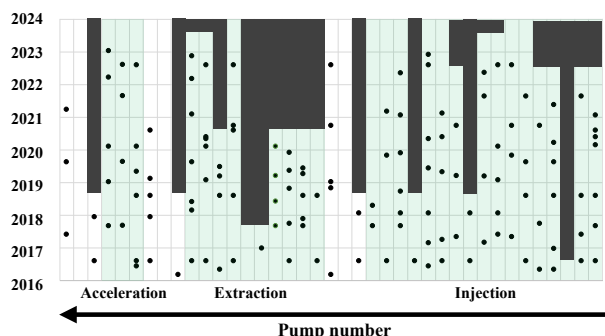


Figure 4: The maintenance frequency of the dry scroll pumps. The horizontal axis indicates the pump number along the J-PARC RCS ring. The black shaded means a Roots pump replaced the dry scroll pump.

の置き換えを示している。頻度が高いところでは年間 3 回、または数年間連続してのメンテナンスを実施していることがわかる。これらのメンテナンスが必要となった主な原因は、スクロール部が摺動するためチップシールが摩耗して圧縮比が落ちる、回転軸のグリス切れにより圧縮比が落ちる、というものである。正常時はドライスクロールポンプの吸入口圧力は 0.5 Pa 以下であり、2 Pa を超えたものについては直近のメンテナンス日 (1 回/週) に交換する、という体制をとっている。この圧力悪化は傾向がみられ始めてからおよそ 1 週間ですターボ分子ポンプのフォアライン圧力の上限を超えることがあるため、最悪の場合、ビーム運転を止めてメンテナンスをしなければなくなる可能性がある。また、メンテナンス自体は重作業ではないものの、管理区域内での作業時間の削減努力は放射線作業管理として必須である。より安定かつ安全な真空システムの実現を目的として、このような異常の頻度を下げるために、ドライスクロールポンプの主なメンテナンス要因となっている摺動部を持たない、ルーツポンプへの置き換えを進めている。本格的なルーツポンプへの置き換えは 2018 年に開始して、2023 年度 6 月の時点で粗引きポンプ全 39 台のうち 21 台がルーツポンプ化されており、2023 年度夏メンテナンス期

間にさらに4台置き換えを進める予定である。2018年に導入したルーツポンプについて2019年に一年間の運転に対する点検を実施したところ、ダイヤフラムがケーシングに固着する兆候が見られたため、2020年にケーシングにセラミック系コーティングを実施することでダイヤフラムの長寿命化を施した。その他、2023年1月に生じた以下に示す温度異常トラブル事象が1件生じたものの、その他のトラブルはなく、上記ダイヤフラムケーシングの長寿命化作業を除いてノーメンテナンスで5年以上、連続運転が可能である実績を得た。

J-PARC RCSで導入しているドライスクロールポンプ及びルーツポンプの仕様温度範囲の上限はどちらも周囲40度である。粗引きポンプを設置している地下三階は電磁石の電源ケーブルからの発熱により壁面温度が35度程度の高温な空間があり、そこに設置されたルーツポンプが温度異常にて停止する事象が生じた。空間自体の温度は40度を超過しておらず、ドライスクロールポンプの運転には支障がなかった(メンテナンス頻度も低い)ことから温度範囲について特段の注意はしていなかったが、ルーツポンプ表面温度を測定した結果、41度であり仕様範囲を超えていた。詳細な調査の結果、異常停止した個体の温度センサは仕様内の最大の系統誤差を持つものであり、実際の温度より高く検出してしまったため、他個体に比べて低温で異常停止することがわかった。実際、別の個体では表面温度が50度程度でも停止しない結果が得られた。

4. 極高真空実現に向けた真空ポンプの増強

J-PARC RCSはガス放出速度の高いコリメータセクションや真空中に設置されたキッカー電磁石を有しながらも、ターボ分子ポンプを主排気系にすることで一年間を通して安定的に全周に渡り 1×10^{-6} Pa程度以下を達成している。しかし、今後の更なる大強度化及び重イオン加速を見据えて、ビームライン圧力のさらなる低減が必要である。特に重イオンを加速する場合、ビームガス相互作用による電荷交換が生じるとビームのリジディティが変わるためビームロスに繋がる。例えば、現在は加速候補ではなくなったが、68個のウランイオンを61.8 MeV/uから735 MeV/uまで加速させる場合、現在の真空圧力分布であれば、残留ガスとの電荷交換により0.12%程度のロスが生じると見積もられる[3]。これは現在のJ-PARC RCSのプロトン加速の場合のビームロス0.05%程度[4]に対して有意な値であるため、ビームライン圧力を低減する必要がある。そこで、Fig. 3に示したようなターボ分子ポンプのみを利用した場合の残留ガス分析結果に基づき、水素、水および一酸化炭素の排気に適した非蒸発型ゲッター(non-evaporable getter: NEG)ポンプの増設を進めている。NEGポンプは使用前に、高真空中で吸着剤を加熱する活性化が必要とし、その際に多量のガスが放出されるため別の排気系が必要であるものの、RCS真空システムの主排気系はターボ分子ポンプであるため活性化時の排気系としても利用できる点が現状のシステムと相性が良い。また活性化時以外の電源及び制御系が不要なため増設のコストが小さい点も利点である。ただし我々は、建設時に設置したものの使用を停止していたイオンポンプ用ヒータの電源配線を

再利用することで、地上から遠隔にてNEGポンプの活性化ができるようなシステムを構築しており、放射線管理区域内への入域時間の短縮につながっている。

2019年度の夏の長期メンテナンス以降、ターボ分子ポンプ3台、NEGポンプ9台を3つのアーク部に増設し、各アーク部の真空排気系はターボ分子ポンプ2台であったのに対し、現在はターボ分子ポンプ3台、NEGポンプ3台となっている。この排気系にアップデートした後の2022年度夏メンテナンス前の圧力分布をFig. 5に示す。比較のため、Fig. 2のデータ(2019年度夏前の分布)もプロットしている。ポンプを増設したアーク部では、真空圧力が1/10程度に減少し、 10^{-8} Pa台を達成した。しかし、1台の極高真空対応のコールドカソードゲージを除いて、7台のゲージが圧力測定下限値 5×10^{-8} Paを指示しており、正確な圧力は測定できていない。そのため現在、極高真空対応のコールドカソードゲージの導入を進めている。

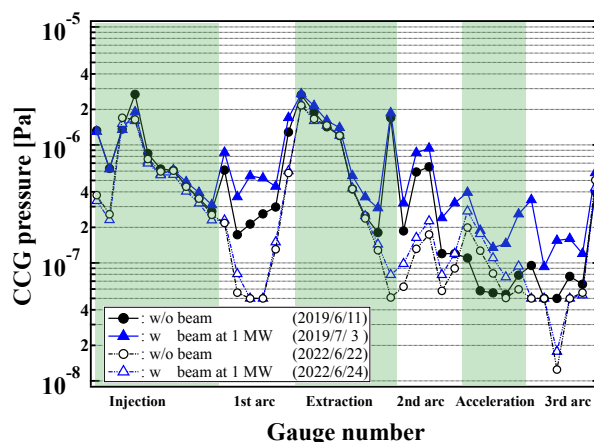


Figure 5: The typical vacuum pressure distribution along the J-PARC RCS ring at 2022.

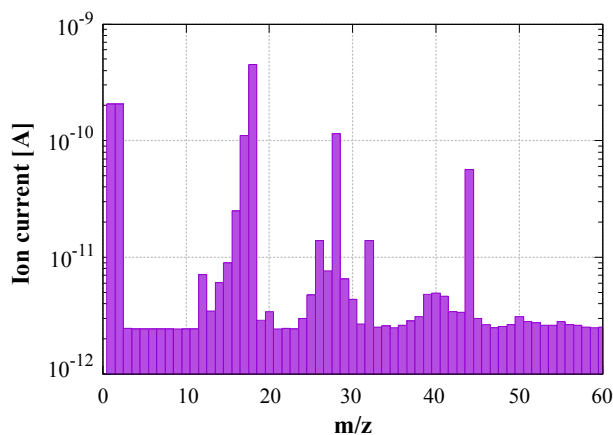


Figure 6: The mass spectra of the residual gas evacuated with turbo-molecular pumps and non-evaporable getter pumps. The applied voltage to the secondary electron multiplier was -1.5 kV.

Figure 6 にビーム運転していない場合の第二アーク部

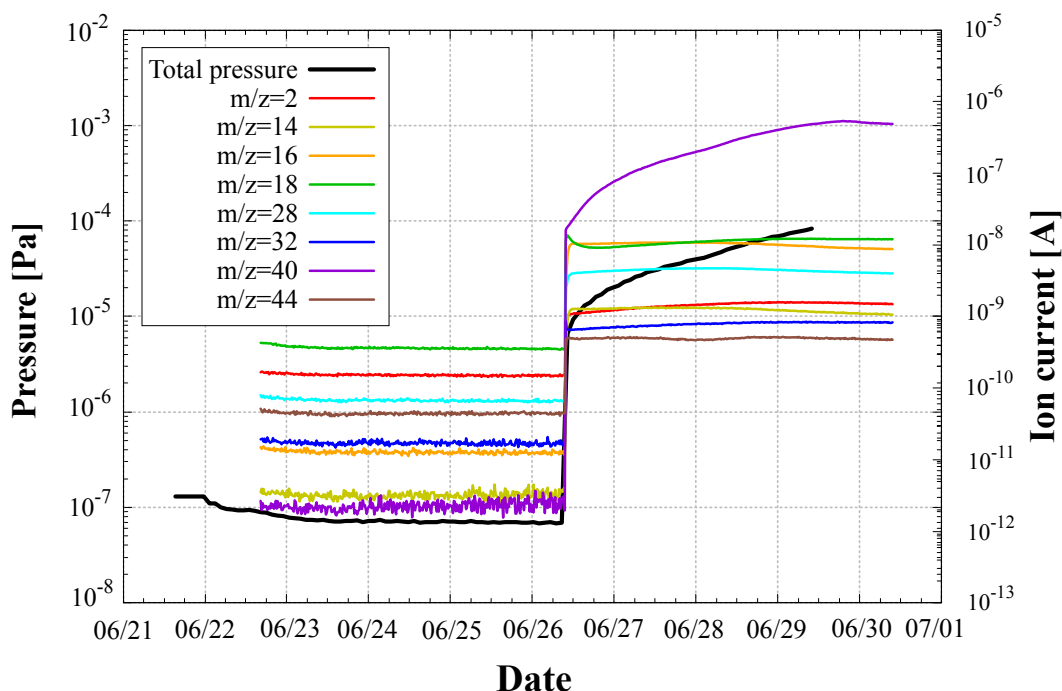


Figure 7: The time development of the total pressure measured with a cold cathode gauge and main mass spectrum intensities when the all turbo-molecular pumps were stopped at 9 AM on June 26. The unit of the mass spectrum intensity is ion current.

の残留ガスの質量分析結果を示す。NEGポンプを増設する前の質量分析結果 Fig. 3 は、二次電子増倍管の印加電圧が-1.3 kVであったのに対し、NEGポンプ設置後の解析結果 Fig. 6 は印加電圧が-1.5 kVであったため強度の直接的な比較はできないが、NEGポンプ設置後のスペクトルは全てのスペクトル強度がノイズレベルに近づいていることから、NEGポンプ設置の効果がわかる。また、第二アーク部において、ビーム運転終了時にターボ分子ポンプを全て停止した際のビームライン圧力ビルドアップ試験の結果を Fig. 7 に示す。急激に真空圧力が悪化している6月26日9時ごろに全てのターボ分子ポンプを停止し、NEGポンプのみの排気に切り替わっている。質量電荷比 $m/z = 40$ のアルゴンは大きく増加している一方で、 $m/z = 2$ の水素、 $m/z = 18$ の水、 $m/z = 28$ の一酸化炭素の増加割合は小さい。つまり、アルゴンの排気はNEGポンプではなくターボ分子ポンプが主体であり、水素や水の排気はNEGポンプが主体であることがわかる。また、全圧として質量分析機近傍に設置されているコールドカソードゲージの圧力もプロットしている。各スペクトルの増加割合を考慮すると、ターボ分子ポンプ停止に伴う圧力増加はアルゴンが排気できなくなることが主な原因であると考えられる。

5. まとめ

J-PARC RCS のさらなる安定化及び大強度化を目的として、真空システムの改良・増強を行っている。RCS 真空システムの主排気系であるターボ分子ポンプのフォアラインポンプには長らくドライスクロールポンプを利用していたが、摺動部の劣化によるメンテナンス頻度が最

大で3回/年となる場所が存在するため、ルーツポンプへの置き換えを進めている。その結果、5年以上にわたりノーメンテナンスで運転できる実績を得た。また、さらなる大強度化及び重イオン加速を実現するために、NEGポンプを増設して真空圧力の低減を図った。その結果、NEGポンプは期待通り、水素、水、一酸化炭素を排気し、全圧として1/10程度に低減でき、複数のコールドカソードゲージにおいて測定下限値である 5×10^{-8} Pa を達成した。以上から重イオン加速に対応しうる真空システムの構築の可能性を見出した。

最後に上記の取り組みを反映した、2023年夏メンテナンス前の真空システムの排気系の配置を Fig. 8 に示す。四角記号がNEGポンプ、バツ印つきの丸記号がフォアラインがルーツポンプのターボ分子ポンプを表している。今後も上記の取り組みを継続し、全ての粗引きポンプの置き換え、及び極高真空ビームライン実現に向けた真空システムの高度化を行う予定である。特に真空圧力の低減については、入射部と出射部が依然として 10^{-6} Pa を超えている。出射部は非常に高い速度のガス放出が原因であると考えており、排気系の増設により対策する予定である。一方入射部は、高周波磁場により近傍のダクトフランジ中に発生した渦電流によりフランジが熱膨張し、その非一様性による片締めが原因のリークであると考えており、大規模な対策が必要であると想定している。

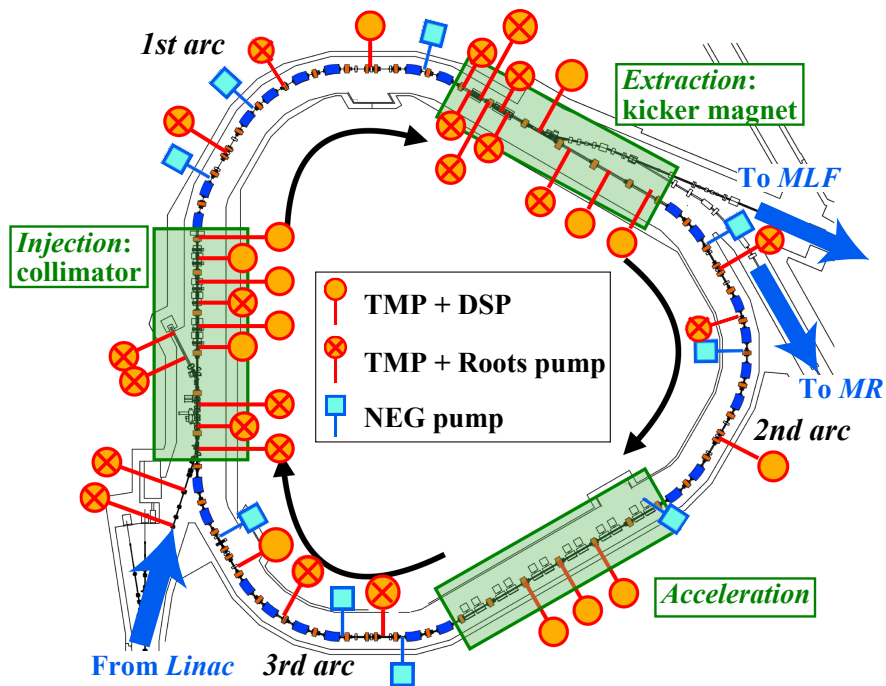


Figure 8: The J-PARC RCS vacuum system: arrangement of pumps in June 2023.

参考文献

- [1] J. Kamiya *et al.*, "Design Consideration of Beam Duct for Quadrupole Correctors in J-PARC RCS", *J. Vac. Soc. Jpn.*, vol. 57, No. 4(2014).
- [2] K. Yamamoto *et al.*, "Design and actual performance of J-PARC 3 GeV rapid cycling synchrotron for high-intensity operation", *J. Nucl. Sci. Technol.*, 1-32 (2022).
- [3] H. Harada *et al.*, "Simulation Study of Heavy Ion Acceleration in J-PARC", *Proc. 3rd J-PARC Symposium (J-PARC2019)*.
- [4] P. Saha *et al.*, "High intensity beam operation of J-PARC RCS with minimum beam loss", *Proc. 14th International Particle Accelerator Conference (IPAC23)*, Venezia, Italy, TUPM061.