

## SRILAC における NEG ポンプを用いた差動排気システム

### NON-EVAPORABLE GETTER-BASED DIFFERENTIAL PUMPING SYSTEM FOR SRILAC

今尾浩士<sup>#, A)</sup>, 山田一成<sup>A)</sup>, 坂本成彦<sup>B)</sup>, 渡邊環<sup>A)</sup>, 渡邊裕<sup>A)</sup>, 小山田和幸<sup>B)</sup>, 上垣外修一<sup>A)</sup>  
Hiroshi Imao<sup>#, A)</sup>, Kazunari Yamada<sup>A)</sup>, Naruhiko Sakamoto<sup>A)</sup>, Tamaki Watanabe<sup>A)</sup>, Yutaka Watanabe<sup>A)</sup>,  
Kazuyuki Oyamada<sup>B)</sup>, Osamu Oyamada<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> RIKEN Nishina Center for Accelerator-based Science

<sup>B)</sup> Sumitomo Heavy Industries Accelerator Science Ltd.

#### Abstract

Upgrades of the RIKEN heavy-ion linac (RILAC) involving a new superconducting linac (SRILAC) are undergoing to promote super-heavy element searches at the RIKEN Radioactive Isotope Beam Factory (RIBF). Stable ultra-high vacuum ( $<10^{-8}$  Pa) and particulate-free conditions are strictly necessary for keeping the performance of the superconductive radio frequency (SRF) cavities of the SRILAC. It is crucially important to develop neighboring warm sections to prevent contamination from the existing old RILAC and beamlines built almost four decades ago. In the present study, non-evaporable getter-based differential pumping systems were newly developed to achieve the pressure reduction from the existing beam-line vacuum ( $10^{-5}$ - $10^{-6}$  Pa) to the ultra-high vacuum within very limited length ( $<80$  cm) ensuring the large beam aperture of more than 40 mm. They are also equipped with compact electrostatic particle suppressors.

#### 1. はじめに

理研仁科加速器研究センターRI ビームファクトリー[1]では理研重イオンライナック(RILAC [2])をアップグレードし、超重元素研究(119 番以上の新元素の発見など[3])をより強力に推進すべく、超電導線形加速器(SRILAC [4-8])によってイオンビームを大強度化・高エネルギー化する計画を進めてきた。SRILACにおいては超電導加速空洞そのものの研究開発と共に、必要な真空の圧力やパーティクル環境が全く異なる既存の線形加速器(RILAC)とビーム輸送系内への設置とその運用方法が未知の挑戦課題となる。

我々は SRILAC の上下流の常温領域に配置し、環境の違いを緩和するための差動排気系の開発を行った。非蒸発型ゲッター(NEG)ポンプを主として用いた 3 段階の差動排気により直径 40 mm のビームアパーチャを確保しつつ、僅か 75 cm の領域で既存 BT 系の圧力( $10^{-5}$ - $10^{-6}$  Pa)から超電導空洞に必要な超高真空( $<10^{-8}$  Pa)への接続を実現する。パーティクルの飛散を抑えるための真空静電集塵機と不測の真空破壊から装置を保護する速断バルブを有している。

#### 2. SRILAC

SRILAC は既存の RILAC と HEBT の間に配置され、3つのクライオモジュール(CM1-CM3)からなる(Fig. 1)。CM1 と CM2 は 4 台、CM3 は 2 台の SRF を用いた 1/4 波長型加速空洞(QWR)を有し、その共鳴周波数は 73 MHz である。QWR は  $\beta=0.078$  に最適化されており、Q 値  $10^9$  で 6.8 MV/m の加速勾配を実現する。

SRF 運転温度は 4K で、隣接常温セクションにおいても  $10^{-8}$  Pa 以下の真空条件とパーティクルの少ない環境を要求する。既存 BT 系はビーム破壊型検出器(ファラ

<sup>#</sup> imao@riken.jp

デーカップ、ワイヤー型プロファイルモニター)、スリット、炭素膜ストリッパー等と共に 40 年近い運転を行っており、清浄な環境は失われている。また、ターボ分子ポンプとロータリーポンプによる排気のため、真空度は  $10^{-4}$ - $10^{-6}$  Pa である。

高エネルギートランスポート系(HEBT)には医療用 RI 生成のためのビームラインと超重元素探索のための GARIS III が接続されている。薄膜や差動排気系で仕切られたガス室を有するため、潜在的に真空破壊のリスクを持っており、その対策も必要となる。

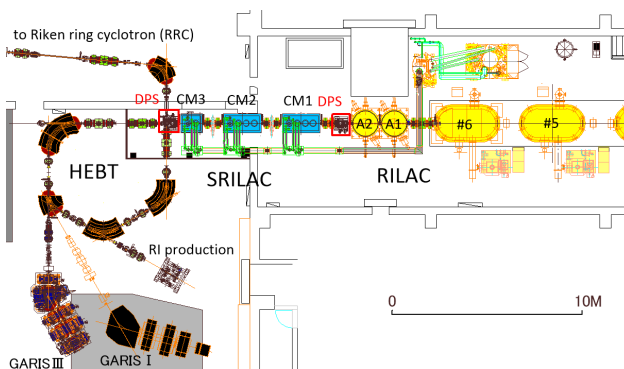


Figure 1: The CM1-3 are installed between the RILAC and the HEBT. The pair differential pumping systems (DPS) are placed upstream and downstream of the SRILAC. There are two active experimental lines connected to the HEBT, for GARIS III and RI production.

#### 3. 差動排気系の開発

既存加速器及びビームトランスポート(BT)系と SRILAC の真空条件、パーティクル条件の違いを緩和するために SRILAC の上下流に配置するための差動排気系の開発を行った。SRILAC 上下流において、ビームダ

イナミクスから必要なアパーチャは  $\phi 40$  mm であり、一方空間的制約から差動排気系に許されたフランジ間距離は 750 mm 程度であった。この条件で、既存 BT 系の圧力 ( $10^{-5}$ - $10^{-6}$  Pa) から超電導空洞に必要な真空 ( $<10^{-8}$  Pa) への接続を実現する必要がある。

我々は Fig. 2 に示す様な高密度にポンプを搭載した3段階の差動排気系をデザインした。使用したポンプの諸元を Fig. 2 下段に示す。

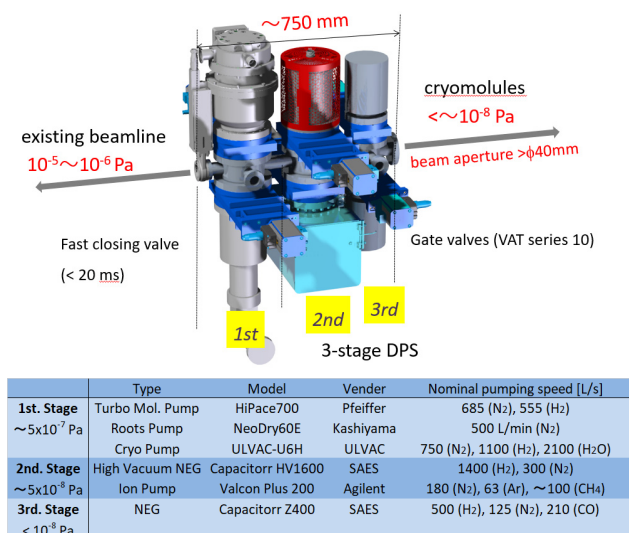


Figure 2: Design view of the three-stages DPS and basic properties of pumps we used.

第1ステージは後段で NEG ポンプを使用するための準備ステージとなっている。ターボ分子ポンプ (HiPace700; Pfeiffer vacuum GmBH) とクライオポンプ (CRYO-U6H; ULVAC, Inc.) を使用し、N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub> 等全ての種類のガスの圧力を十分に下げ、後段の NEG ポンプが性能を十分に発揮でき、再活性化間隔が短くなり過ぎない様にする。ターボ分子ポンプのバックポンプにはドライポンプ (NeoDry60E; Kashiyama Industries, Ltd.) を用いる。

第2ステージでは ZAO<sup>®</sup> 合金を使用した高真空 NEG ポンプ (Capacitorr HV1600; SAES Getters S.p.A.) とイオンポンプ (Valcon Plus 200 (VP200); Agilent Technologies) を用いる。HV1600 はシステムの中心となるポンプであり、 $10^{-7}$ - $10^{-8}$  Pa の圧力領域で水素に対して大きな排気量を持っている (1400 L/s)。VP200 は NEG が排気量を持たない希ガスや CH<sub>4</sub> の分圧を下げる。

最終第3ステージでは超高真空用 NEG ポンプ (Capacitorr Z400; SAES Getters S.p.A.) を使用し、SRF に最適な真空を作る[9]。

全てのポンプがそれぞれに適合した真空度領域で使用できる様に、システムの最適化は CERN で開発されたモンテカルロシミュレータ Molflow+ [10] を用いて行った。また、NEG ポンプの再活性化間隔は1年以上となる様にしている。

差動排気系は不測の真空破壊から SRILAC を守るための速断バルブ (Series 75.2; VAT Group AG) を持っている。SRILAC の上下流、及び HEFT に配置された真空ゲージの圧力上昇感知から 20 ms 以内にバルブを閉じ

ることが出来る。

差動排気系の全てのコンポーネント (真空チェンバー、ポンプ、真空バルブ、真空ゲージなど) は ISO1 規格を満たすクリーンルーム内で清掃、組上げを行った (Fig. 3)。真空チェンバーに関して、予備的な表面処理 (アルカリ脱脂、硝酸洗浄、ワイピングチェック、純水洗浄、温純水浸漬、クリーンドライエアブロー) は専門業者によって行われ、更に我々のクリーンルームにおいて、8-MPa の高圧超純水洗浄を行った後、120°C で 12 時間の真空ベーキングを行い、イオンガン (TG-3; Simco Company, Inc.) を用いたブローを行った。UHV ゲートバルブ (Series 10; VAT Group AG) については超純水洗浄を行った後、120°C で 12 時間の真空ベーキングを行い、2回の開閉を行いながらイオンガンを用いたブローを行った。その他、ポンプ、真空ゲージについては入念なイオンガンによるブローを行った。

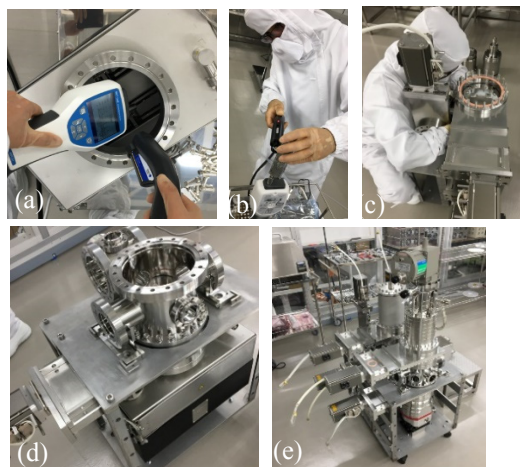


Figure 3: Cleaning and assembling of the DPS in the ISO-1 clean room; blowing of the VP200 with the ionizing gun (a), blowing of the Z400 (b), assembling the gate valve (c), vacuum chamber for the NEG pumps (d), assembled DPS for performance tests (e).

#### 4. SRILAC 差動排気系性能試験

クリーンルームでの組上げを行った後、差動排気システムの性能を見るための試験運転を行った (Fig. 4)。

まず初めに真空ベーキングを 120°C で約 5 日間行い、3 段階までの全ての部屋で  $10^{-9}$  Pa 台の真空度へと到達した。

その後、差動排気性能を見るため、窒素、水素、ヘリウムガスを 1 段階目の部屋へバリアブルリークバルブを用いてリークし、各部屋の真空度を測定した。結果を Fig. 4 の下段に示す。SRILAC 運転で重要な窒素、水素の差動排気性能に関して、測定された真空度分布は Molflow+ による計算の分布 (nominal な真空排気量を仮定) とよく一致しており、 $10^{-5}$  Pa 近い真空度から  $10^{-8}$  Pa 以下の真空度に差動排気できることが実証された。



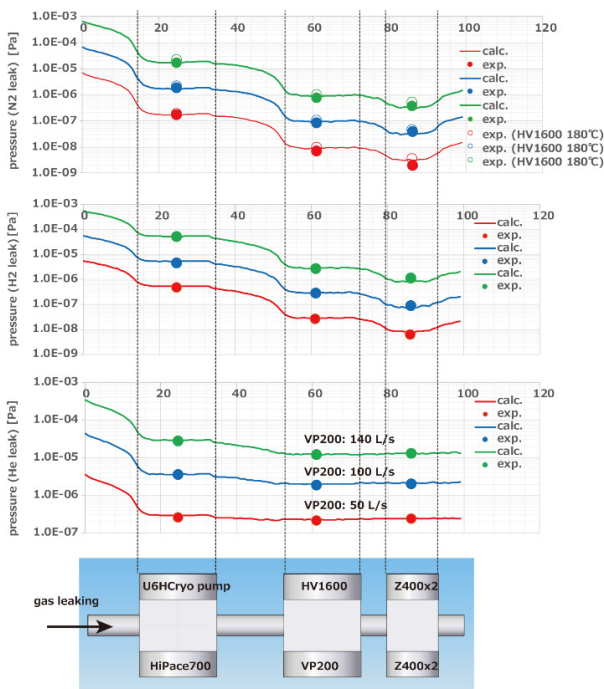
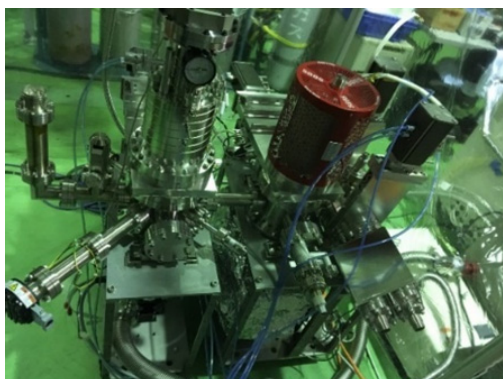


Figure 4: A picture of the DPS during the performance tests (upper) and the measured and calculated pressure distributions in the DPS for N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> and He leaking (bottom).

## 5. 真空静電集塵機

コンパクトな真空用静電集塵機を開発し、差動排気系の1段目に配置している (Fig. 5)。電極の形状はFEAソフトウェア Opera 3D (Dassault Systems GmbH)を用いて最適化を行った。±10 kV までの電圧を印加することができるが、ビームへの影響は軽微 (~0.5 mrad) でありBT上のステアラーで補正可能である。超高真空用パーティクルカウンター (Wexx co., Ltd)を用いて、真空内外でのパーティクル飛散抑制に関するテストを行い、良好な結果を得ている。

Figure 6 は真空リーク後、大気圧下において測定した 0.3 μm 以上のパーティクルカウント数の時間変化を表している。この際、真空チェンバーはクリーンルーム内に設置され、クリーンルーム外の大気を用いてリークを行っている。何もしなければパーティクルは真空チェンバー内において半減期1時間程度で漂い続けるが、集塵機に高圧をかける事でパーティクルの飛散・浮遊が抑制され

ている事が分かる。

Figure 7 は大気圧下で電極間にタングステン粉を人工的に落とした場合のパーティクルカウント数の違いである。鉛直上方向からタングステンワイヤーをグラインダーで削り、鉛直下方向におけるパーティクルカウンターでパーティクルのカウントを行った。電場を与えることで8割近いカウント数の減少が観測された。Figure 8 は同様の試験を真空下においてセラミックブロックを削ることで行ったものである。こちらも電場を与えることでカウント数が抑制されている。静電集塵機を機能させるためには、パーティクルが帯電している必要があるが、実際の使用環境はビームによる電離環境下であると考えられ、一定の効果が期待される。

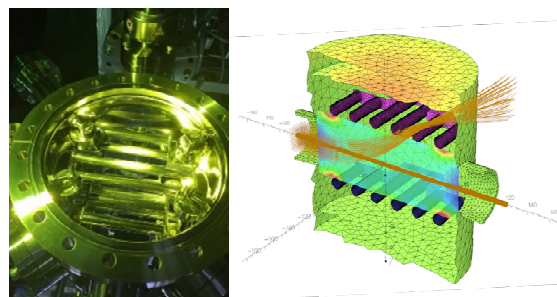


Figure 5: A picture of the electrostatic particle suppressor and calculated trajectory for the stainless steel particles (φ0.2 μm) with a single charge state and <sup>51</sup>V<sup>13+</sup> beams.

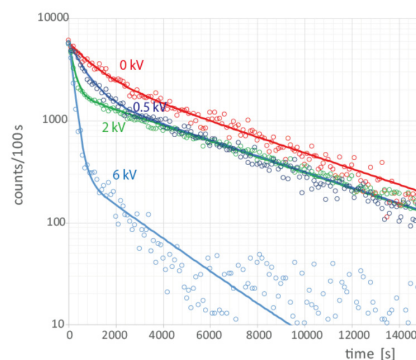


Figure 6: Dependence of particle counts (> 0.3 μm) after the fast venting on the applied voltage on the EPS. Solid lines indicate fitted lines using two exponentials.

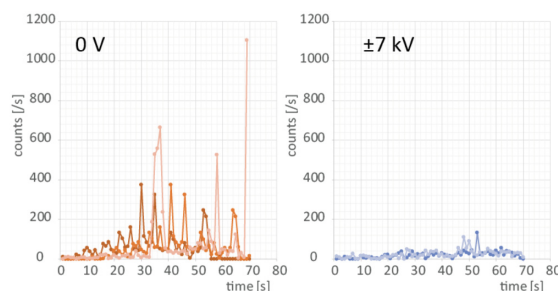


Figure 7: Particle counts (> 0.3 μm) when a tungsten wire was scraped by using a hand grinder with a ceramic drill bit with (right) and without (left) electric field. The collection efficiency of tungsten particles with the applied voltage of ±7 kV is about 77% in the present test.

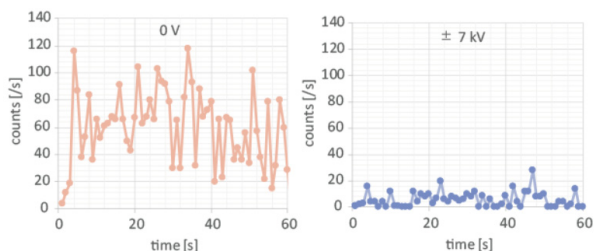


Figure 8: The particle counts ( $> 0.3 \mu\text{m}$ ) when the ceramic block was scraped above the EPS in vacuum with (right) and without (left) electric field.

## 6. HEBT の清浄化

上述のように既存の HEBT はビーム破壊型検出器、スリット、炭素膜ストリッパ等と共に 40 年近い運転を行っており、清浄な環境は失われている。そこで、HEBT の真空チャンバーや真空ダクトの清浄化作業を行った (Fig. 9)。専用の清掃具を用いた内面のアルコール拭取り、エアブロー、掃除機による吸引を行い、ファイバースコープでの目視検査と残留物除去を行った。形状が複雑な偏向電磁石の磁極箱 3 台については 1 台を新調し、2 台は超純水による高圧洗浄を行った。サンプルした残留物は EPMA により検査を行い、真鍮や SUS である事が分かっている (Fig. 10)。



Figure 9: Pictures of cleanings of ducts and chambers in the HEBT; alcohol wiping (a,b), air blowing (c), and vacuuming (d). Two bending magnet chambers were rinsed with pressurized ultra-pure water (e,f).

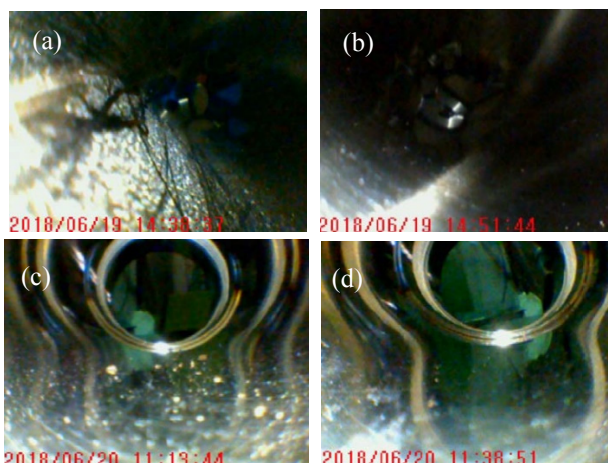


Figure 10: Silver particles (stainless steel) found in a bending magnet chamber. They were removed by wiping (b). Golden particles (brass) found in a diagnostic chamber (c). They are also removed by the wiping (d).

## 7. まとめ

SRILAC の上下流に設置するための NEG ポンプを用いた 3 段階差動排気系の開発と試験を行った。組上げは ISO1 クリーンルームで行われた。窒素と水素ガスについて  $\phi 40\text{mm}$  のビームアパーチャを確保し、80 cm の長さで、 $10^{-5} \text{ Pa}$  台から  $10^{-8} \text{ Pa}$  以下への減圧が実証されている。また、初段に設置するための真空静電集塵機の開発と試験を行い、既存 HEBT の清浄化作業も行った。現在最終的な機器清掃と組上げを行っており、2019 年 9 月中旬に実際のビームラインへ配置予定である。

## 謝辞

NEG ポンプの使用に関して、SAES 社の桜井英樹氏、Enrico Maccallini 氏に多くの助言をいただきました。また、真空パーティクルカウンターを用いたシステム導入に関して、KEK の阪井寛志氏にご助言いただきました。ここに感謝致します。

## 参考文献

- [1] Y. Yano, Nucl. Instr. Meth. B261, 1009 (2007).
- [2] M. Odera *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A227, 187 (1984).
- [3] K. Morita *et al.*, JPSJ, vol.73, p. 2593 (2004).
- [4] N. Sakamoto *et al.*, “Construction Status of the Superconducting Linac at the RIKEN Radioactive Isotope Factory” in Proc. LINAC’18, Beijing, China, Sep. 2017, WE2A03, p. 620.
- [5] N. Sakamoto *et al.*, “Development of Superconducting Quarter-Wave Resonator and Cryomodule for Low-Beta Ion Accelerators at RIKEN Radioactive Isotope Beam Factory”, presented at the 19th Int. Conf. RF Superconductivity (SRF’19), Dresden, Germany, Jun.-Jul. 2019, paper WETEB1, this conference.
- [6] K. Yamada *et al.*, “Construction of Superconducting Linac Booster for Heavy Ion Linac at RIKEN Nishina Center”, presented at the 19th Int. Conf. RF Superconductivity (SRF’19), Dresden, Germany, Jun.-Jul. 2019, paper TUP037, this conference.
- [7] K. Suda *et al.*, “Fabrication and Performance of Superconducting Quarter-Wavelength Resonators for

- SRILAC”, presented at the 19th Int. Conf. RF Superconductivity (SRF’19), Dresden, Germany, Jun.-Jul. 2019, paper MOP055, this conference.
- [8] O. Kamigaito *et al.*, “Measurement of Mechanical Vibration of SRILAC cavities”, presented at the 19th Int. Conf. RF Superconductivity (SRF’19), Dresden, Germany, Jun.-Jul. 2019, paper TUP042, this conference.
- [9] T. Porcelli, E. Maccalini, P. Manini, M. Mura, and M. F. Urbano, “Experimental methods for the assessment of NEG pumps working in dust-sensitive environments” in Proc. 9th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC’18), Vancouver, Canada, Apr.-May 2018, pp. 3828-3830. doi: 10.18429/JACoW-IPAC2018-THPAL076.
- [10] Molflow+; <http://molflow.web.cern.ch/>