

理研超伝導重イオン線形加速器 (SRILAC) 性能と展望 PRESENT PERFORMANCE AND PERSPECTIVES OF THE RIKEN HEAVY-ION SUPERCONDUCTING LINAC (SRILAC)

坂本 成彦* 上垣外 修一、大関 和貴、須田 健嗣、山田 一成、内山 暁仁、長友 傑、日暮 祥英、西 隆博
Naruhiko Sakamoto*, Osamu Kamigaito, Kazutaka Ozeki, Kenji Suda, Kazunari Yamada,
Akito Uchiyama, Takashi Nagatomo, Yoshihide Higurashi, Takahiro Nishi
RIKEN Nishina Center, Wako, Japan

Abstract

The RIKEN Superconducting Heavy-Ion Linear accelerator (SRILAC) has been steadily supplying beams for superheavy element synthesis experiments since the commissioning in January 2020 by fixing relevant issues. The overall availability of the accelerator during beam supply periods, excluding regular maintenance and downtime due to major malfunctions, is approximately 90%, with availability exceeding 99% for the SRILAC alone. The decrease in available acceleration voltage due to the increase in X-rays, field emission (FE), from the superconducting cavities had been the main issue, but it has been found to be mitigated by processing with high-voltage pulse power (HPP). Currently, the on-set voltage at which X-rays begin to generate has been improved compared to that of the initial installation, resulting in the recovery of available acceleration voltage. This presentation will report on the current performance of SRILAC and prospects.

1. はじめに

理化学研究所仁科加速器科学研究センターのRI ビームファクトリー (Fig. 1) [1] では、ニホニウムに続く新元素合成実験を遂行するため理研重イオン線形加速器 (RILAC) のアップグレードを完成させた。2020年1月のファーストビーム加速 [2] に続いて GARIS-III スペクトロメーターのコミッショニングに成功 [3]。以来、新元素合成実験へのビーム供給を継続的に行っている。これまで実験に供給したビームの核種は ^{40}Ar , ^{51}V でエネルギーは 4.2 MeV/u から 6.3 MeV/u。また RI 医薬品製造のため近く α ビームを 7.25 MeV/u まで加速する予定である。加速したビームの最大強度は 2023 年に 5.2 pμA (デューティー 100%) を記録。新たに建設した超伝導 ECR イオン源 (SC-ECR) [4] により当初の目標のビーム強度 2.5 pμA (ニホニウム実験時の 5 倍) をはるかに凌ぐ量を達成している。以下に SRILAC の概要、運転状況、超伝導空洞で共通の問題となるフィールドエミッション (FE) への対応、また、初期の段階から抱えているカプラーの真空リーク問題の対処法について詳しく報告する。

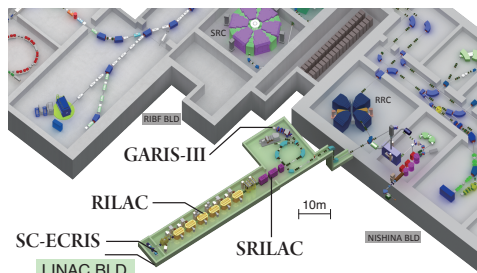


Figure 1: Birds-eye view of the RILAC.

2. 理研重イオン超伝導線形加速器概要

SRILAC は 3 台のクライオモジュール CM1, CM2, CM3 からなり、それぞれ 4 台、4 台、2 台の超伝導空洞を収納している (Fig. 2)。それぞれの空洞は上流から SC01-SC10 と呼ぶ。SRILAC の諸元を Table 1 に示す。運転温度は 4.5 K である。超伝導空洞は四分の一波長型の TEM 空洞 (SC-QWR) [5] で、高純度ニオブ板材から製作し表面処理により高い性能 (高加速勾配、低高周波損失) が実現されている。運転周波数は 73 MHz 固定であるが、電圧と位相を独立に設定できることと 2 ギャップの構造から空洞の数と電圧の調整によりエネルギーをある範囲でシームレスに変更することができる。ギャップ長は $\beta = 0.078$ に最適化されている。超伝導空洞は非常に繊細な装置で、長年の使用による性能劣化、おもに高周波面の汚れ等による FE の増加とそれに起因する Q 値の低下が運用における懸案事項である。対策のひとつとして外部から超伝導空洞内部へのパーティクル (FE の原因となる粒子) の流入を防ぐために SRILAC 上流と下流に静電集塵機能付きの差動排

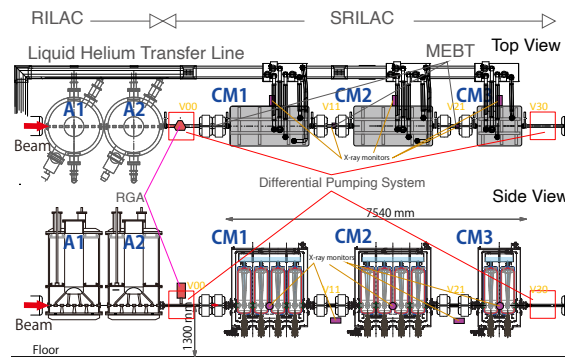


Figure 2: Layout of the SRILAC.

* nsakamot@ribf.riken.jp

Table 1: SRILAC Design Parameters

Parameters	
Frequency (MHz)	73.0 (CW)
E_{inj} (MeV/u)	3.6
E_{out} (MeV/u)	6.5
Maximum operation gap voltage (MV)	2.4
Synchronous phase ($^{\circ}$)	-25
Number of cavities	10
Cavity type	QWR (TEM)
β_{opt}	0.078
Gap	2
TTF	0.9
Aperture (mm)	40.0
R_{sh}/Q_0 (Ω)	579
G	22.4
E_{acc} (MV/m)	6.8
E_{peak}/E_{acc}	6.2
B_{peak}/E_{acc} (mT/(MV/m))	9.6
Operating temperature (K)	4.5
Helium pressure (MP)	0.1313
$\Delta f/\Delta P_{He}$ (Hz/hPa)	-2.0 [6]
Target Q_0	1×10^9
Q_{ext}	$1-4.5 \times 10^6$
Amplifier output (kW)	7.5
Beam current (μA)	~ 100

気システム [7] を導入している。空洞からの X 線はクライオモジュールの側壁に設置した X 線モニターで常時監視を行っている。SRILAC セクションでのビーム損失がパーティクル発生源となることがある。広く利用されているイオンチャンバーなどのビーム損失モニターでは SRILAC でのビームエネルギーが低いため感度が低くビーム損失の検出が難しい。SRILAC ではビームの損失が増えると常温部の真空度が悪化すると共に空洞監視用の X 線モニターの値の増加が観測される。そこで、ビームが横方向に一番広がる CM 間のビーム輸送系 (V11,V21) にも X 線モニターを新たに設置しロスモニターとして運用することにした。SRILAC は原則 X 線放射の無い状態で、つまり X 線放射が始まるギャップ電圧 V_{gap}^{onset} (ここでは $1 \mu Sv/h$ になる電圧とする) 以下の電圧で運転する。それは強い X 線放射が空洞の性能劣化の原因となる恐れがあること、ビーム損失が増えて X 線放射量に変化があっても瞬時に判別しづらいたことが理由である。しかしながら、長期のビーム供給を経て徐々に FE の増加が起きている。これに対しては後述のオンラインでの表面処理、高電力パルス処理 (HPP) [8] を必要に応じて実施している。

3. 冷却運転とビーム供給

これまでの SRILAC の運転状況を Fig. 3 に示す。水色で塗られている部分が空洞を冷却している期間、オレンジがビーム加速・供給を行っている期間。黄色の夏の約 2 ヶ月間はヘリウム冷凍機のメンテナンスを行っている期間である。紫色に塗られている期間は予期せ

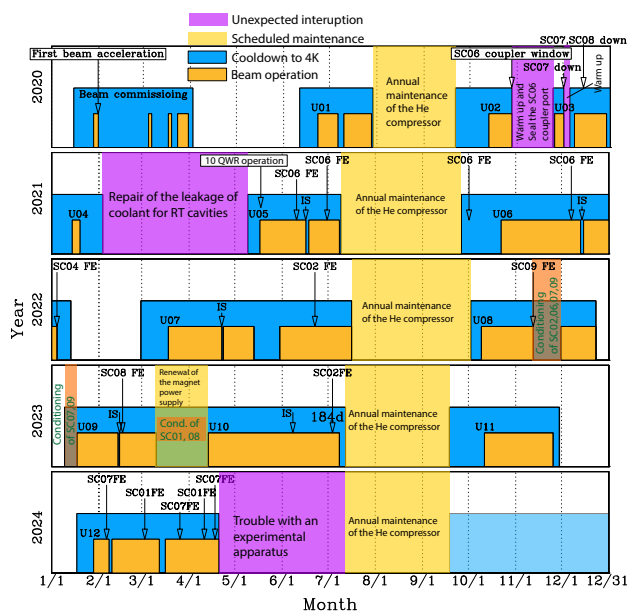


Figure 3: Operation history of the SRILAC.

ぬ故障による停止時間で、これら昨年 7 月までの運転状況については昨年の加速器学会での報告 [8] を照会されたい。昨年の夏以降は 11 月末まで約 2 ヶ月半運転し (キャンペーン 11)、CM 制御系の UPS 電源の盛り替えのため一旦昇温。今年になって 1 月半ばから冷却を再開。7 月までの予定でビーム供給 (キャンペーン 12) を開始したが 4 月初旬に実験装置 GARIS-III に深刻なトラブルが発生したため中断することになった。

以下、ビーム供給中のビーム停止時間について述べる。高圧ガス機器の日常点検、ビーム電流の確認・微調整の他にインターロック作動による停止時間がある。ビーム電力が 1 kW を超えるため、磁石や RF、また真空などの加速器の機器のエラー・トラブルが起きた際はビームインターロックシステムによりイオン源出口の静電チョッパーで即時にビーム供給を停止することになっている。インターロック動作によるビーム停止時間は動作時刻、再開時刻と共に全て記録される [9]。記録データから加速器全体の可用性は通常約 90%。SRILAC 単体では LLRF の PID フィードバックパラメータの見直し、ヘリウム冷凍機の運転パラメータの最適化によ

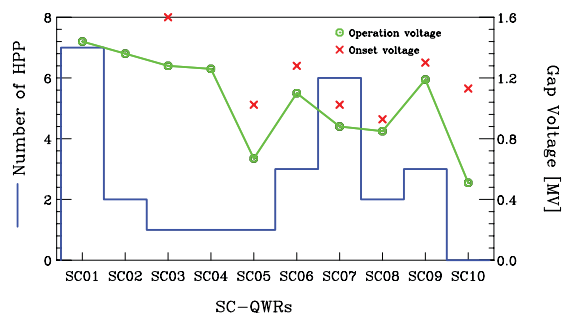


Figure 4: Number of HPP, Operation Voltages, X-ray onset voltages for each cavity.

るヘリウム圧力変動の最小化などにより 99% を超える
 可用性でビームを供給している。また、新たに導入した
 デジタル LLRF により、空洞の機械的振動に起因する
 と思われる位相の変動を最大振幅 $\pm 1^\circ$ 以内に収める
 ことができている。

ビーム加速時の空洞の加速ギャップ電圧を Fig. 4 に
 示す。図に示されているように FE が始まるオンセット
 電圧 ($V_{\text{gap}}^{\text{onset}}$) 以下で運転を行っている。FE の他に長期
 運用の懸念事項として真空リークを起こした CM2 の 2
 台の空洞の電力カプラーがある。これは同軸構造の外
 窓を追加することにより対応でき、現在も計 10 台での
 加速運転を継続している。ここでは $V_{\text{gap}}^{\text{onset}}$ として、測
 定 X 線レベルが $1 \mu\text{Sv/h}$ になる点をギャップ電圧に対
 する FE の測定値から内挿して求めた値を用いている。

4. フィールドエミッション (FE)

昨年
 の年会においてビーム供給中に FE が突然増加
 する現象について、またその対処法として HPP が有効
 であることを報告した [8]。これまで実施した HPP の回
 数は 26 回に及び、その経験から HPP の到達電圧が高い
 ほど $V_{\text{gap}}^{\text{onset}}$ が高くなる傾向があることがわかっている。

2024 年 1 月キャンペーン 12 開始前に測定したギャ
 ップ電圧に対する空洞の X 線量を Fig. 5 に示す。この時
 SC03,05,06 について HPP を実施している。HPP 到達電
 圧はそれぞれ 3.0 MV, 1.7 MV, 2.2 MV である。2024 年
 4 月時点のこれまでに実施した HPP の回数を $V_{\text{gap}}^{\text{onset}}$ と
 共に Fig. 4 に示す。昨年夏以降のキャンペーン 11 で
 は HPP 処置が必要な極端な増加は起きなかった。し
 かしながら、今年になってキャンペーン 12 の期間中、
 SC01,SC07 の X 線レベル上昇が顕著であった。SC01 が
 7 回、SC07 が 6 回と他の空洞に比べて HPP 実施回数
 が多いのはこれが理由で、この現象については秋以降に
 詳しく調べる予定である。FE の発生に伴ってギャ
 ップ電圧が数 kV の低いレベルから上がらない現象が発生
 することがある。これは HPP 中のパルス励振でも観測

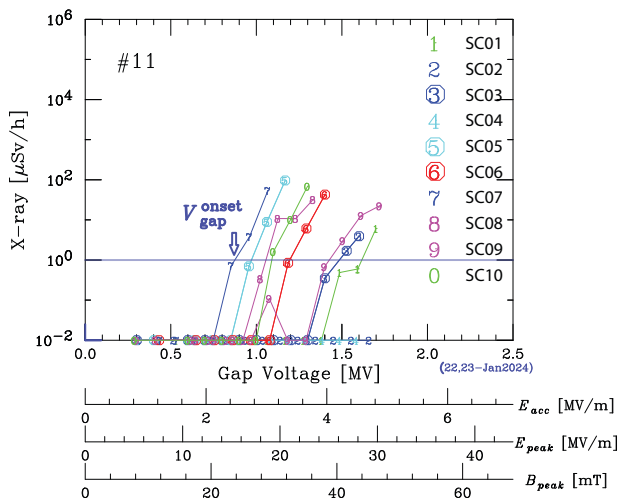


Figure 5: X-ray levels as a function of gap voltages. Each plotted number represents the ID of SC-QWRs. Circled plots were obtained after HPP.

され MP によるものと思われるが、この際アウトガス
 が発生し CM 間のビーム輸送系の真空度が変化するこ
 とがある。さらには MP に誘引されて X 線レベルが上
 がる事象も確認されておりこの 2 つの現象は独立した
 事象ではないことを示唆している。また、HPP により
 $V_{\text{gap}}^{\text{onset}}$ が改善するだけでなく MP も起こらなくなるため
 HPP は MP にも有効で、通常 MP を起こしている空洞
 に十分は RF 電力を送り込むためには外部 Q を下げる
 必要があるが SRILAC の外部 Q = 1×10^6 でも十分機能
 していると言える。

MP と FE それに伴うガス発生に関連性を調べるため
 輸送系 V00 に残留ガス分析装置 (RGA) を新たに設置
 した (Fig. 2)。

5. パワーカプラー

各空洞には最大電力 10 kW で設計されたパワーカ
 プラーが取り付けられている (Fig. 6 左)。アンテナ位置
 を調整できる同軸タイプの 1 枚窓 (常温) 構造である。し
 かしながらセラミック窓が断熱真空内に配置された影
 響で窓部の温度が零度以下になることが後になって判
 明した。初期の冷却試験中に SC05 のパワーカプラー

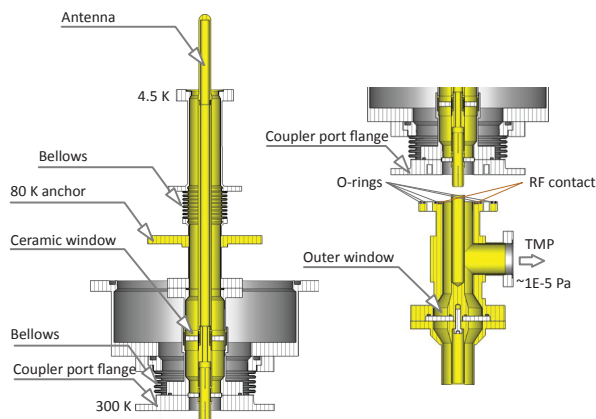


Figure 6: Schematic of the input coupler and outer window.

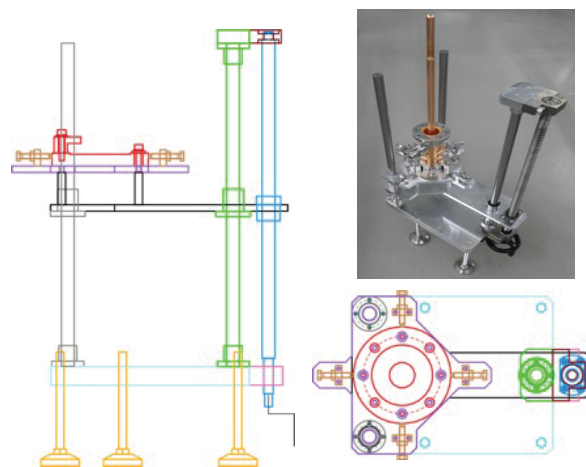


Figure 7: Schematic of the coupler installation apparatus.

からリークが発生し、2020年11月ビーム供給中にはS06のパワーカプラーからリークが発生した。これは窓が過冷却されパワーカプラー同軸部の大気側に結露が起こり、その結果セラミック窓のメタライズした部分が脆弱になり真空リークが発生したと考えられる [10]。SC05、06、07、08の $V_{\text{gap}}^{\text{onset}}$ が低い (Fig. 4) のは清浄で無い大気がカプラーを通して空洞内部に入り込んだ影響であると考えられる。これらの空洞はCM2に設置されたもので作業環境が悪くすぐに対処することが難しいため、大気側に新たに真空窓を設けその間を真空に引くことで空洞内への大気の流れを最小限にして再開することとした (Fig. 6 右)。リークは確認されていなかったものの他の空洞のパワーカプラーも同じように傷んでいる可能性があるため、現在は10台全てのパワーカプラーポートを真空に引いて使用している。当初懸念されたセラミック窓のTiNコーティング未処置の外側でのMPの発生は今の所確認されていない。HPPの効果による高い勾配運転のためにはパワーカプラーの健全性を確保することが必要で、現在クライオモジュール設置状態でのパワーカプラー交換の手順と取り付け装置の設計・製作を進めている (Fig. 7)。

6. まとめと展望

SRILACは2020年以来超重元素探索実験へのビーム供給を継続的に行ってきた。ビーム強度は初期の目標を超えて最大強度 $5\text{ p}\mu\text{A}$ (デューティー100%)を達成。SRILAC自体の可用性は99%以上と高い安定度を実現している。FEとMPのコントロールにはHPPが有効であり、今後HPPの到達RF電力ピーク値を上げていくことによりさらに高加速勾配の運転が可能になることが期待される。パワーカプラーの健全性を保つため傷んだパワーカプラーの準備を進めていく。

参考文献

- [1] H. Okuno *et al.*, “Progress of RIBF Accelerators” Prog. Theor. Exp. Phys., pp. 03C002, 2012. doi:10.1093/ptep/pts046
- [2] K. Yamada *et al.*, “Successful Beam Commissioning of Heavy-Ion Superconducting Linac at RIKEN”, in *Proc. SRF’21*, East Lansing, MI, USA, Jun.-Jul. 2021, pp. 167. doi:10.18429/JACoW-SRF2021-M00FAV01
- [3] H. Sakai *et al.*, “Facility Upgrade for Superheavy-Element Research at RIKEN”, *Eur. Phys. J. A*, vol. 58, pp.238, 2022. doi:10.1140/epja/s10050-022-00888-3
- [4] T. Nagatomo *et al.*, “High intensity vanadium beam for synthesis of new superheavy elements with well-controlled emission by using ‘slit triplet’”, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 91, pp. 023318,2020. doi:10.1063/1.5130431
- [5] N. Sakamoto *et al.*, “Construction Status of the Superconducting Linac at the RIKEN Radioactive Isotope Factory”, in *Proc. LINAC’18*, Beijing, China, Sep. 2018, pp. 620–625. doi:10.18429/JACoW-LINAC2018-WE2A03
- [6] K. Suda *et al.*, “New Frequency-tuning System and Digital LLRF for Stable and Reliable Operation of SRILAC”, in *Proc. SRF’21*, East Lansing, MI, USA, Jun.-Jul. 2021, pp. 167. doi:10.18429/JACoW-SRF2021-WEPTV013
- [7] H. Imao *et al.*, “Non-Evaporative Getter-Based Differential Pumping System for SRILAC at RIBF”, in *Proc. SRF’19*, Dresden, Germany, Jun.-Jul. 2019, pp. 419–423. doi:10.18429/JACoW-SRF2019-TUP013
- [8] N. Sakamoto *et al.*, “理研重イオン超伝導線形加速器の超伝導空洞性能の劣化と回復”, in *Proc. PASJ’23*, Funabashi, Chiba, Japan, Aug.-Sep. 2023, pp. 884. https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2023/proceedings/PDF/FRP2/FRP21.pdf
- [9] A. Uchiyama *et al.*, “Data Archive System for Superconducting RIKEN Linear Accelerator at RIBF”, in *Proc. IPAC’21*, Campinas, SP, Brazil, May 2021, pp. 2178-2181. doi:10.18429/JACoW-IPAC2021-TUPAB297
- [10] K. Ozeki, O. Kamigaito, N. Sakamoto, K. Suda, and K. Yamada, “Present Status of RIKEN Power Couplers for SRILAC”, in *Proc. SRF’23*, Grand Rapids, MI, USA, Jun. 2023, paper WEPWB101, pp. 823–826.