

## 理研重イオンリニアックの現状報告

### PRESENT STATUS OF RILAC

遊佐陽<sup>B)</sup>, 日暮祥英<sup>#, A)</sup>, 山内啓資<sup>B)</sup>, 小山田和幸<sup>B)</sup>, 田村匡史<sup>B)</sup>, 金子健太<sup>B)</sup>, 鈴木惇也<sup>B)</sup>,  
大木智則<sup>B)</sup>, 今尾浩士<sup>A)</sup>, 内山暁仁<sup>A)</sup>, 大関和貴<sup>A)</sup>, 木寺正憲<sup>A)</sup>, 坂本成彦<sup>A)</sup>, 須田健嗣<sup>A)</sup>,  
長友傑<sup>A)</sup>, 中川孝秀<sup>A)</sup>, 西隆博<sup>A)</sup>, 藤巻正樹<sup>A)</sup>, 山田一成<sup>A)</sup>, 渡邊環<sup>A)</sup>, 渡邊裕<sup>A)</sup>, 上垣外修一<sup>A)</sup>  
Akira Yusa<sup>B)</sup>, Yoshihide Higurashi<sup>#, A)</sup>, Hiromoto Yamauchi<sup>B)</sup>, Kazuyuki Oyamada<sup>B)</sup>, Masashi Tamura<sup>B)</sup>,  
Kenta Kaneko<sup>B)</sup>, Junya Suzuki<sup>B)</sup>, Tomonori Ohki<sup>B)</sup>, Hiroshi Imao<sup>A)</sup>, Akito Uchiyama<sup>A)</sup>, Kazutaka Ozeki<sup>A)</sup>,  
Masanori Kidera<sup>A)</sup>, Naruhiko Sakamoto<sup>A)</sup>, Kenji Suda<sup>A)</sup>, Takashi Nagatomo<sup>A)</sup>, Takahide Nakagawa<sup>A)</sup>,  
Takahiro Nishi<sup>A)</sup>, Masaki Fujimaki<sup>A)</sup>, Kazunari Yamada<sup>A)</sup>, Tamaki Watanabe<sup>A)</sup>, Yutaka Watanabe<sup>A)</sup>,  
Osamu Kamigaito<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> RIKEN Nishina Center

<sup>B)</sup> SHI Accelerator Service, Ltd.

#### Abstract

This year marks 43 years since the RIKEN Heavy Ion Linac (RILAC) began supplying ion beams; RILAC has accelerated a variety of ion species at different energies according to experimental requirements. Following a shutdown from June 2017, RILAC was upgraded with a new Superconducting ECR Ion Source (SCECRIS) and Superconducting Linac Booster (SRILAC) to further continue the Superheavy Element (SHE) synthesis program beyond nihonium. Beam commissioning was carried out in January 2020 and the <sup>40</sup>Ar beam was successfully accelerated to 6.2 MeV/u for the first time. Beam acceleration of the SHE experiment using SCECRIS and SRILAC was then started in June 2020. In this year, the RF control system of the RILAC injector and the cooling water temperature control mechanism were upgraded to enable more stable accelerator operation and beam supply. The current operation status of the RILAC is reported.

#### 1. はじめに

理研仁科加速器科学研究センターの理研重イオンリニアック(RILAC)[1, 2]は、1981年に単独運転が開始され、今年で43年目を迎えた。現在のレイアウトをFig. 1に示す。1986年には後段の理研リングサイクロトロン(RRC)の入射器としての運転も開始し、2006年には理研

RI ビームファクトリー(RIBF)[3]複合加速器の入射器としての運転も開始した。2017年6月より新たなビーム強度を加速するための増強工事が行われ、超伝導 ECR イオン源(28 GHz SCECRIS)[4]及び超伝導リニアック(SRILAC)[5, 6]が2019年に導入された。

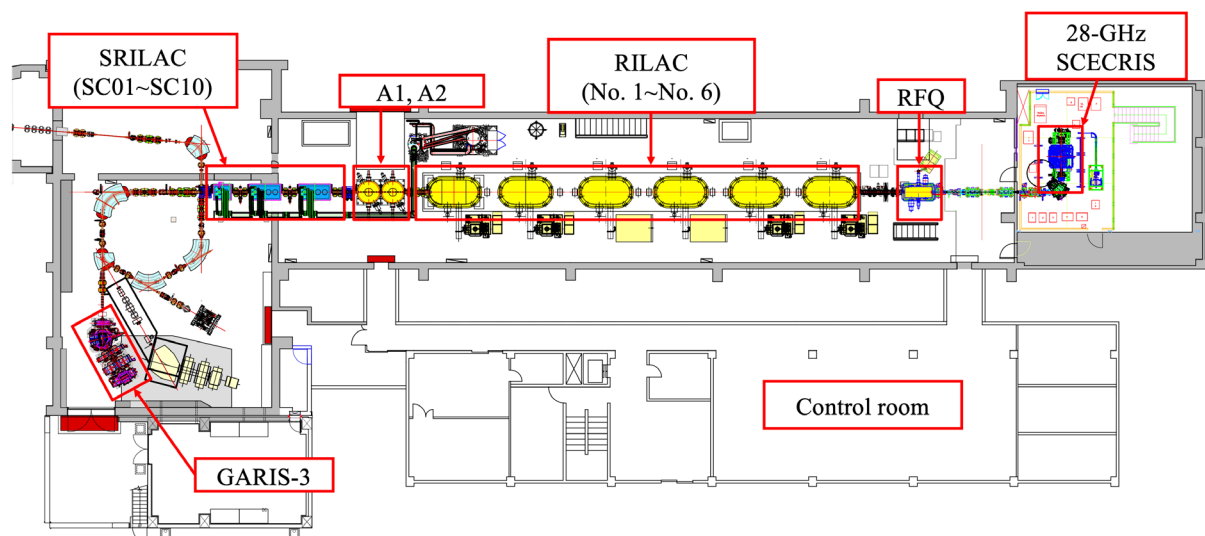


Figure 1: Layout of RILAC.

# higurasi@riken.jp

2019年から2020年3月にかけて総合加速試験運転[7-9]が行われ、同年6月から超重元素(SHE)探索実験へのビーム供給が開始された。

現在のビームラインはSHE探索実験のコースのみ整備が完了しているが、ラジオアイソトープ(RI)製造の為の新たな実験コースの工事も進められている。

本発表ではこの加速器の現状報告として、この10年間の運転状況、及びこの1年間における保守・改良作業などについて報告する。

## 2. 運転状況

Figure 2 に 2013 年～2022 年における各年の調整時間(Beam tuning time)、供給時間(Beam service time)、故障時間(Fault time)、28 GHz SCECRIS 単独運転時間(Stand Alone Operation time of Ion Source)、保守・改良作業等を行う停止時間(Planned down time)の内訳及び可用性(Availability)の推移を示す。

また、運転時間(Operation time)及び可用性は以下の関係で計算している。2018 年と2019 年は停止及び試験運転期間中のため、可用性は算出していない。

$$\text{運転時間} = \text{調整時間} + \text{供給時間} + \text{故障時間}$$

$$\text{可用性} = \text{供給時間} / \text{運転時間}$$

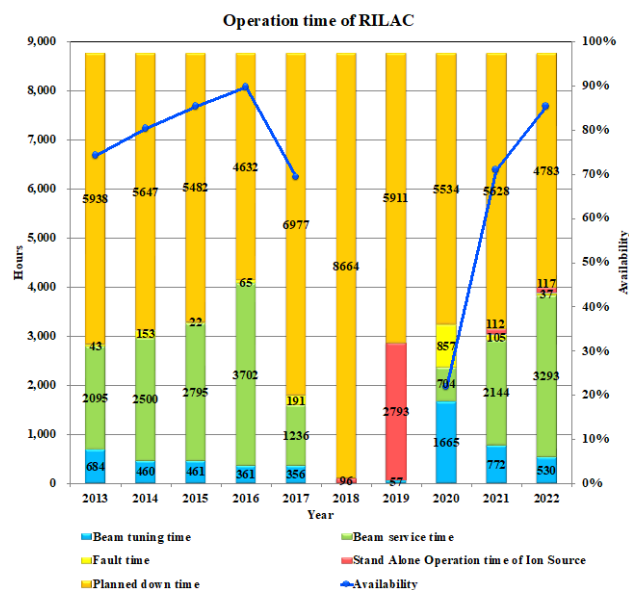


Figure 2: Operation time of RILAC.

2017 年 6 月より加速器は 28 GHz SCECRIS 及び SRILAC 導入のために長期停止期間に入り、2019 年 11 月より 28 GHz SCECRIS の入射コース(LEBT)でのビームテストを開始し、12 月には RILAC No. 6 での加速試験、2020 年 1 月には SRILAC での加速試験及び照射コース(HEBT)でのビーム調整を行い、同年 6 月下旬より SHE 探索実験へのビーム供給を開始した。

以降、大強度ビーム供給のため、調整の最適化と装

置の保守・改良を重ね、運転時間と可用性は停止以前の水準まで回復しつつある。

Figure 3 に 2013 年～2022 年の供給時間における各年の単独運転での SHE 探索実験時間(Experiments time related to the super-heavy element search)、その他実験時間(Other experiments time)、RRC 入射器運転での入射時間(Beam injection time)の内訳を示す。

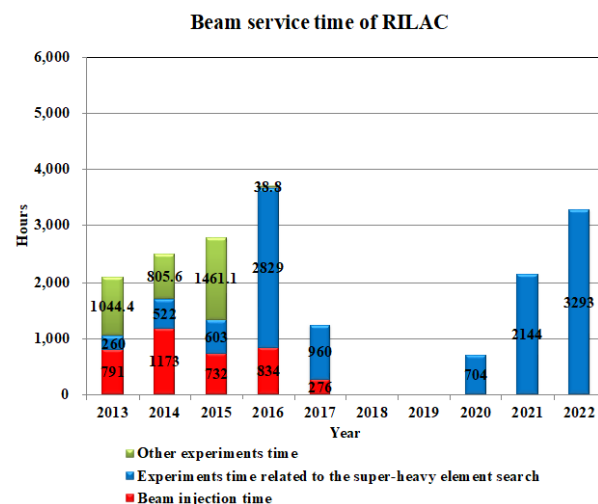


Figure 3: Beam service time of RILAC.

RRC 入射器運転としては、2017 年まで RIBF 実験及びその他の実験のため RRC へビームを入射した。単独運転としては、2017 年の長期停止までは SHE 探索実験 [10-12]及びその他実験を行っていた。2020 年の運転再開以降は SHE 探索実験のみが行われている。

## 3. 保守・改良作業状況

各装置を常に最良の状態に維持するため、我々は保守及び改良作業として、主に以下の作業を行った。

RF 系は励振器の駆動部及び高電圧部、共振器の駆動部及び内部電氣的接触部、励振器及び共振器の水冷部、高電圧直流電源、ローレベル信号制御機器などについて点検、清掃、及び部品交換などを行った。

また入射系 RF では、デジタルローレベル回路の導入と共振器、アンプ周りの駆動系モーターと制御システムの更新を行い、より安定した装置の運転を可能にした。

電磁石電源系は、空冷ファン、エアフィルター、水冷部について、点検、清掃、及び部品交換を行った。また、LEBT 電磁石電源と HEBT 電磁石電源の更新を行った。

冷却系は、冷却水ポンプ、冷却塔、熱交換器、空冷チラー、各種フィルターについて、点検、清掃、及び部品交換などを行った。また、Radio Frequency Quadrupole (RFQ)冷却系の温度調整機構については 1 次系、2 次系に温調計を設置し、2 次系の電動バイパスバルブと冷却塔送風機の ON/OFF を自動化した。これにより 2 次系の熱交換器への流量と温度を制御し、1 次系の温度を  $29.1 \pm 0.2$  °C で維持出来るようになった。RILAC ドリフトチューブ(RILAC DT)冷却系については、2 次系のバイパスと熱交換器にあるバルブを電動化し、RFQ と同様の

温度調整機構を整備することで、RILAC DT 冷却液の温度は  $27.5 \pm 0.2$  °C で維持出来るようになった。これにより RILAC の各冷却系統は、一定の温度で供給出来るようになり、より安定した装置の運転を可能にした。

圧空系は、コンプレッサー、除湿ドライヤー及び電磁弁の点検、及び部品交換を行った。

真空系は、ターボ分子ポンプ、クライオポンプ、ロータリーポンプ、ドライポンプ、真空バルブ、真空度測定装置について、点検、オイル交換、及び部品交換を行った。また、RILAC 共振器用ターボ分子ポンプとクライオポンプの各冷却水流量を確保する為、冷却水経路変更を行った。さらに RILAC 共振器用ターボ分子ポンプ 5000 L の代替ポンプテスト、RI 製造コースの真空排気を行った。

制御系は、サーバー、クライアント機器、UPS の点検、清掃、及び部品交換を行なった。また、新規電源の導入に伴う制御系の整備とデータアーカイブシステムの更新を行った。

診断系は、ファラデーカップ、プロフィールモニター、アッテネーター、ロックインアンプについて、点検、及び部品交換を行なった。

イオン源系は、装置内部品、高電圧部及び駆動部などについて、点検、清掃、及び部品交換を行なった。また、ジャイロトロンメインコイル電源の更新を行なった。

今回更新した入射系 RF 制御システムのローレベル盤と制御盤の写真を Fig. 4 に示す。さらに、入射系 RF のひとつである RFQ の電圧、位相と同冷却水温度の変動が、制御システム更新及び温度調整機構の整備前後で改善した様子を Fig. 5 に示す。

また、RILAC DT 冷却液の温度と HEBT におけるビーム強度の変動が、温度調整機構の整備前後で改善した様子を Fig. 6 に示す。



Figure 4: Low-level panel (right side of the photo) and control panel (left side of the photo) of the upgraded RF control system for RILAC injector.

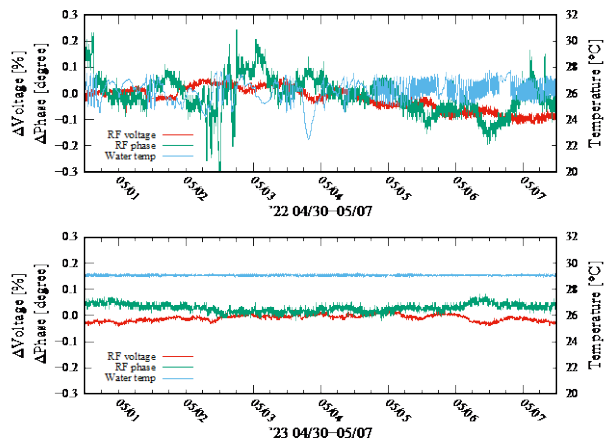


Figure 5: Fluctuations of RFQ voltage, phase and cooling water temperature before (top, '22 04/30-05/07) and after (bottom, '23 04/30-05/07) the RF control system upgrade and cooling water temperature adjustment mechanism installation. After the upgrade and installation, the fluctuations of the voltage, phase, and cooling water temperature are within  $\pm 0.1\%$ ,  $\pm 0.1$  degree, and  $\pm 0.2$  °C of the set values, respectively.

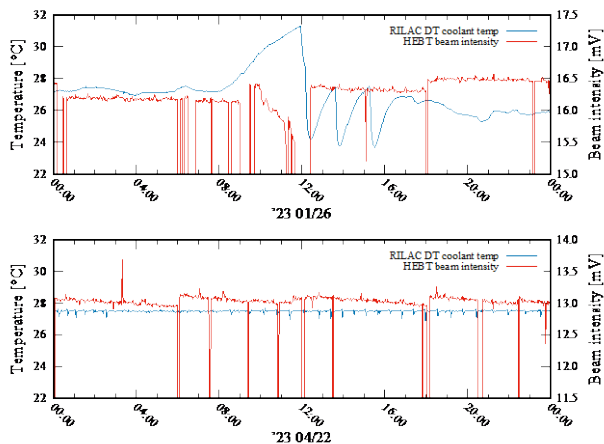


Figure 6: Fluctuations of RILAC DT coolant temperature and HEBT beam intensity at phase probe before (top, '23 01/26) and after (bottom, '23 04/22) the coolant temperature adjustment mechanism installation. Fluctuation of the beam intensity was improved by keeping the coolant temperature at  $27.5 \pm 0.2$  °C.

## 4. 故障状況

2017年7月から2023年6月までの6年間に発生した各装置別の故障に関して、故障発生件数及び割合をFig. 7に示す。故障の41%はRF系で、その他の装置は4%~16%であった。これはこの加速器の主要装置がRF系であり、部品点数が他の装置に比べ多いためであると考えられる。

2017年7月~2023年6月の修理実施件数と一時的な不具合件数に関する半年ごとの集計をFig. 8に示す。これらの故障としては、一時的な動作不良から重故障まで様々な故障があり、総計347件あった。

2022年7月から2023年6月までの1年間では総計56件の故障が発生しており、一時的な不具合8件を除く、48件について修理を実施した。この内、ビーム照射に大きな影響を与えたものを以下に挙げる。

2022年11月にSRILAC SC09のX線放出量が増加し、規定加速電圧での励振が困難になった。SRILAC運転開始以来、同事象の対処としてX線放出量が低減する電圧まで下げ、その分、他の空洞電圧を上げていた。今回の事象でその対処ではビーム加速が困難になったため、RFグループによる対処法の検討がなされ、空洞のパルスコンディショニングという手法が実施された。これによりSC09の状態は改善し、規定加速電圧での励振によるX線放出量は大幅に低減した[13]。

この手法をX線放出量が増加傾向にあった他の空洞にも実施し、問題なく規定加速電圧での励振が出来るようになった。

2023年5月にビームチョッパー動作不良が発生した。動作不良は断続的に発生したため、原因究明に時間を要したが、チョッパー回路の動作不良と判明。スイッチング回路と高圧電源を交換して復旧した。

この他は、装置内にあるリレーなどの故障や信号線の断線及び機器の通信不良など、軽微な故障であり、その都度部品交換や再起動などを実施して修理した。

以上は加速器運転中に発生した故障であり、数時間から数週間程度中断して修理した。

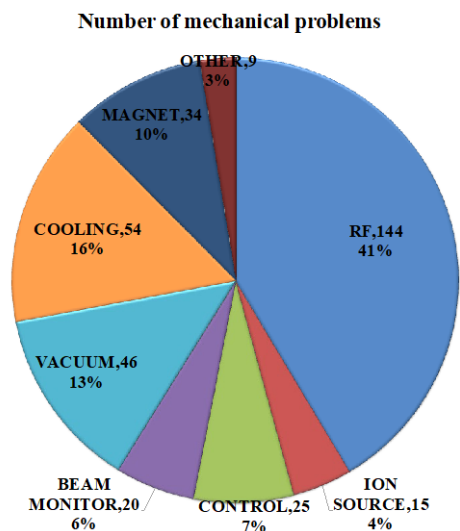


Figure 7: Number of mechanical problems from July 2017 to June 2023.

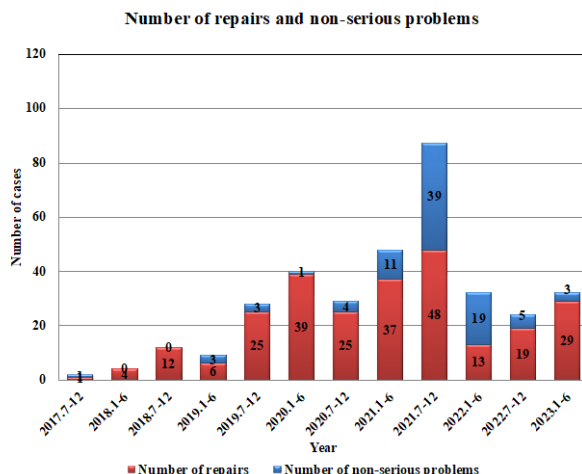


Figure 8: Number of repairs and non-serious problems from July 2017 to June 2023.

## 5. 老朽化対策と状況

RILAC No. 1~No. 6の励振器のうちNo. 3とNo. 4の2台は未だ更新されていない為、早期の更新が必要である。ドリフトチューブの冷却液漏れ[14]は、温度調整機構の整備で温度を18℃以上に維持出来るようになり、温度低下によるDT4-5冷却液の真空中への漏れ出しは防ぐことが出来た。しかし漏れ箇所の修理が完了したわけではないので、定期的な点検と観察が引き続き必要である。

冷却系では、使用しているポンプの型式が古く、整備に必要な部品調達が困難な状況になってきており、計画的なポンプの更新が必要である。

真空的な問題では2018年に修理を行ったRILAC No. 5同様に他の共振器も40年間使用し続けているため、リーク箇所をその都度補修している。

## 6. 今後の予定

RILACはSHE探索実験へのビーム供給を再開して以来、大強度ビームでの長期連続運転を行っている。今後更なる大強度ビームの加速には、より精度の高いビーム調整が要求されるため、RILAC No. 6の下流側に新たにビーム位置・エネルギー測定モニター(BEPM)[8]を増設予定である。

またRI製造コースは整備作業が現在進められており、今後はRRCへの入射コースの整備作業も行われる予定である。

最後に、RILAC RFの励振器および共振器等の老朽化には対策が必要であり、今後計画的に進めて行くことが重要な課題の一つである。

## 参考文献

- [1] M.Odera *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 227 (1984) 187.
- [2] E. Ikezawa *et al.*, Proc. PASJ2019, FSPI010 (2019) 1263.
- [3] H.Okuno *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys. 03C002 (2012).
- [4] T.Nagatomo *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 91, 023318 (2020).

**PASJ2023 TWSP05**

- [5] N.Sakamoto *et al.*, Proc. Linac2018, Beijing, WE2A03, 620-625 (2018).
- [6] K. Yamada *et al.*, Proc. SRF2019, Dresden, Germany, TUP037, 504-409(2019).
- [7] N. Sakamoto *et al.*, Proc. PASJ2020, FRPP05 (2020).
- [8] T. Watanabe *et al.*, Proc. PASJ2020, FRPP20 (2020).
- [9] T. Nishi *et al.*, Proc. PASJ2020, THOO08 (2020).
- [10] E. Ikezawa *et al.*, Proc. PASJ3-LAM31, WP02 (2006) 272.
- [11] M. Kase *et al.*, Proc. IPAC2012, THPPP040 (2012) 382.
- [12] E. Ikezawa *et al.*, Proc. HIAT2015, WEPB14 222-224 (2015).
- [13] N. Sakamoto *et al.*, Proc. PASJ2023, FRP21 (2023).
- [14] T. Ohki *et al.*, Proc. PASJ2021, THP059 (2021) 984-985.