

理研 AVF サイクロトロン運転の現状報告

STATUS REPORT ON THE OPERATION OF RIKEN AVF CYCLOTRON

石川盛^{A)}, 須田健嗣^{B)}, 福澤聖児^{A)}, 濱仲誠^{A)}, 小林清志^{A)}, 小松田恭平^{A)}, 小山亮^{A)}, 茂木龍一^{A)}, 仲村武志^{A)}, 西田稔^{A)}, 西村誠^{A)}, 柴田順翔^{A)}, 矢富一慎^{A)}, 足立泰平^{B)}, 藤巻正樹^{B)}, 福西暢尚^{B)}, 長谷部裕雄^{B)}, 日暮祥英^{B)}, 今尾浩士^{B)}, 上垣外修一^{B)}, 木寺正憲^{B)}, 込山美咲^{B)}, 熊谷桂子^{B)}, 眞家武士^{B)}, 三宅泰斗^{B)}, 森田泰之^{B)}, 長友傑^{B)}, 中川孝秀^{B)}, 西隆博^{B)}, 大西純一^{B)}, 奥野広樹^{B)}, 大関和貴^{#B)}, 坂本成彦^{B)}, サキラヤン グリニスメイ^{B)}, 内山暁仁^{B)}, 渡邊環^{B)}, 渡邊裕^{B)}, 山田一成^{B)}, 鎌倉恵太^{C)}, 小高康熙^{C)}

Shigeru Ishikawa^{A)}, Kenji Suda^{B)}, Seiji Fukuzawa^{A)}, Makoto Hamanaka^{A)}, Kiyoshi Kobayashi^{A)}, Kyohei Komatsuda^{A)}, Ryo Koyama^{A)}, Ryuichi Moteki^{A)}, Takeshi Nakamura^{A)}, Minoru Nishida^{A)}, Makoto Nishimura^{A)}, Junsho Shibata^{A)}, Kazuyoshi Yadomi^{A)}, Taihei Adachi^{B)}, Masaki Fujimaki^{B)}, Nobuhisa Fukunishi^{B)}, Hiroo Hasebe^{B)}, Yoshihide Higurashi^{B)}, Hiroshi Imao^{B)}, Osamu Kamigaito^{B)}, Masanori Kidera^{B)}, Misaki Komiyama^{B)}, Keiko Kumagai^{B)}, Takeshi Maie^{B)}, Yasuto Miyake^{B)}, Yasuyuki Morita^{B)}, Takashi Nagatomo^{B)}, Takahide Nakagawa^{B)}, Takahiro Nishi^{B)}, Jun-ichi Ohnishi^{B)}, Hiroki Okuno^{B)}, Kazutaka Ozeki^{#B)}, Naruhiko Sakamoto^{B)}, Glynnis Mae Saquilayan^{B)}, Akito Uchiyama^{B)}, Tamaki Watanabe^{B)}, Yutaka Watanabe^{B)}, Kazunari Yamada^{B)}, Keita Kamakura^{C)}, Yasuteru Kotaka^{C)}

^{A)} SHI Accelerator Service Ltd.

^{B)} RIKEN Nishina Center

^{C)} Center for Nuclear Study, University of Tokyo

Abstract

The RIKEN AVF cyclotron started its operation in 1989. Since then, it has been used not only as an injector of the RIKEN ring cyclotron but also as a supplier of various ion beams directly to users in its standalone operations. In this report, we describe both the operational status and improvement works performed in this year (August 2024-July 2025) aiming at increasing accelerating ability of the AVF cyclotron.

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 AVF サイクロトロン (以下、AVF)[1]は、理研リングサイクロトロン (RRC)[2]の入射器として 1989 年から運転されている。AVF の基本仕様は、K 値 70 MeV、ビーム取り出し半径 0.714 m、RF 周波数 12~24 MHz、最大励磁時の平均磁束密度 1.7 T となっており、外部入射イオン源 3 台

(Hyper-ECR[3]、18 GHz-ECR[4]、PIS[5]) のうち、1 台から生成したイオンビームを加速している。

仁科センターの加速器群の全体図を Fig. 1 に示す。RILAC[6]及び RILAC2[7]が比較的重いイオンを加速するのに対し、AVF は基本的に質量数 40 以下の比較的軽いイオンを加速して RRC へビームを送り込む。これを RRC 入射モードと呼ぶ。一方で、AVF から各実験コースへ直接ビームを供給する AVF 単独モードもある。AVF

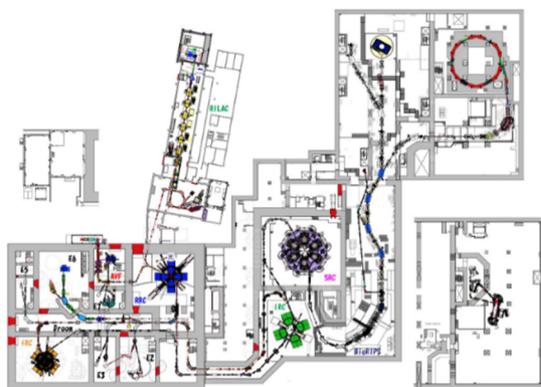


Figure 1: Schematic of RIBF at RIKEN Nishina Center.

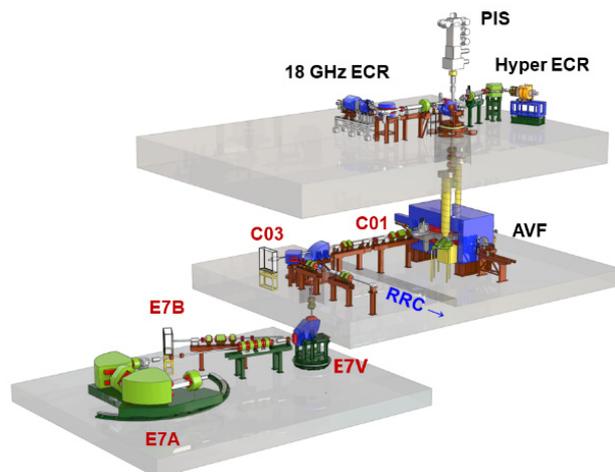


Figure 2: Overview of AVF cyclotron.

k_ozeki@riken.jp

近傍の図を Fig. 2 に示す。

AVF 単独モードでは、陽子から $^{84}\text{Kr}^{14+}$ までのイオンを 2 ~ 15 MeV/u (陽子は 30 MeV) まで加速する。RRC 入射モードでは、AVF で水素 (H_2) から Xe までのイオンを 2.45 ~ 7 MeV/u に加速し、RRC で 36 ~ 135 MeV/u まで多段加速する。2009 年から RI ビームファクトリー (RIBF[8, 9]) で軽イオン加速が開始されてからは、AVF は RIBF における入射器の役割も果たしている。AVF から取り出した偏極重陽子、 ^{14}N 、 ^{18}O などを RRC 及び超伝導リングサイクロトロン (SRC)[10] で 190 ~ 345 MeV/u まで加速して、BigRIPS と下流の実験室へ送り込んでいる。2015 年からは ^{40}Ar ビームを AVF から RRC、中間段リングサイクロトロン (IRC)[11] を用いて 160 MeV/u まで加速後、旧施設 (RARF) 側へ輸送し、生物実験に供給している。また、AVF から RRC で 36 MeV/u まで加速した ^{129}Xe ビームの産業利用実験への供給を 2023 年から開始している。

本稿では 2024 年 8 月から 2025 年 7 月までの AVF の運転状況、トラブル対応とメンテナンスについて報告する。

2. 運転状況

これまで AVF で加速された核種の質量電荷比と核子当たりのエネルギーの関係を Fig. 3 に示す。図中には加速実績のある全てのビームについてプロットしている。この 1 年間での AVF 単独モードの粒子は赤色の○、RRC 入射モードは青色の○、今期初めて加速したビーム (以下、1st ビーム) は赤色ないし青枠黄色の●で表している。1st ビームは $^{32}\text{S}^{11+}$ 8.3 MeV/u であった。

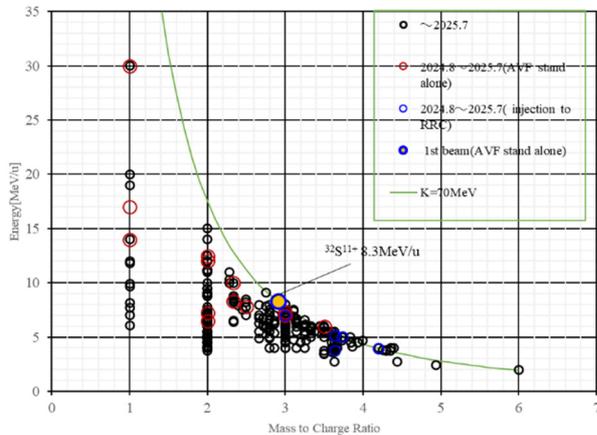


Figure 3: Energy-mass to charge map of AVF.

過去 10 年間の AVF 単独モードにおける運転時間の推移を Fig. 4 に示す。AVF の調整時間 (AVF のメインコイル通電開始から各実験コースのターゲット上でスポット調整が完了するまでの時間)、実験コースへのビーム供給時間 (スポット調整完了から実験終了までの時間)、ビーム供給中の AVF 事由によるトラブル等の供給中断時間を集計している。ビーム供給先は、C01 (加速器調整、マシンスタディ)、C03 (RI 製造)、E7V (東京大学原子核科学研究センター[以下、CNS]による実験、RI 製造)、E7A (CNS RI beam separator が使用される実験[12]、RI 製造)、E7B (学生実験、RI 製造) である。

Table 1: List of Accelerated Beams

	Ion	Energy (MeV/u)	Intensity (eμA)
AVF Standalone	p	14	26.5
	p	30	1.93
	d	7	0.345
	d	12	13.3
	d	14	1.53
	$^4\text{He}^{2+}$	6.5	3.88
	$^4\text{He}^{2+}$	7.25	39
	$^4\text{He}^{2+}$	12.5	9.2
	$^7\text{Li}^{2+}$	6	2.49
	$^7\text{Li}^{2+}$	10	2.7
	$^{10}\text{B}^{4+}$	7.8	4
	$^{12}\text{C}^{4+}$	7.3	6
	$^{18}\text{O}^{6+}$	7	3.4
	$^{20}\text{Ne}^{8+}$	8.2	1.55
$^{32}\text{S}^{11+}$ (1st beam)	8.3	1.15	
Injection to RRC	d	7	0.12
	$^{12}\text{C}^{4+}$	7	3.6
	$^{40}\text{Ar}^{11+}$	3.78	3.2
	$^{40}\text{Ar}^{11+}$	5.2	4.5
	$^{56}\text{Fe}^{15+}$	5.02	0.32
	$^{86}\text{Kr}^{20+}$	3.8	3.9
	$^{129}\text{Xe}^{25+}$	2.45	0.78

この 1 年間の加速粒子一覧を Table 1 に示す。

今期のビーム供給時間は、C01: 39.0 h、C03: 216.4 h、E7V: 154.7 h、E7A: 382.4 h、E7B: 418.8 h であった。AVF の調整時間は 845.95 h、AVF 事由によるビーム供給中断時間は 7.0 h、AVF 単独モードにおける総運転時間は 2057.3 h であった。

同様に RRC 入射モードにおける運転時間の推移を Fig. 5 に示す。調整時間は AVF のメインコイル通電開始から RRC へビームを受け渡すまでの時間とした。その後の供給先を RARF と RIBF に分け、IRC からの戻りラインは RARF に分類した。

RARF 実験コースへのビーム供給時間は 897.3 h、調整時間は 181.9 h、AVF 事由によるビーム供給中断時間は 9.9 h、RRC 入射モードでの総運転時間は 1079.2 h であった。

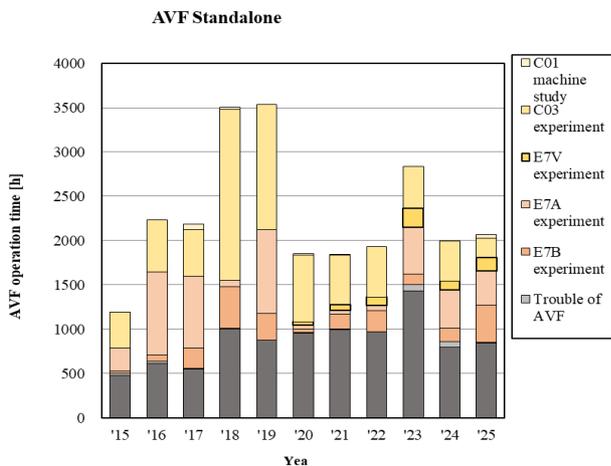


Figure 4: Beam service time of AVF standalone operation.

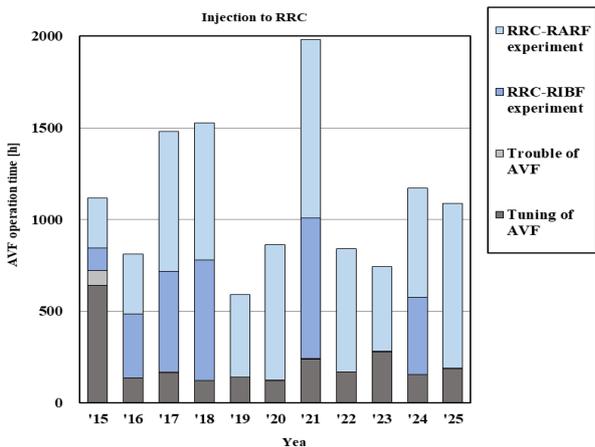


Figure 5: Beam service time of RRC injection operation.

3. 運転時のトラブル

3.1 インターロックシステム異常

2024年10月2日、イオン源引き出し直後のファラデーカップが、電磁石電源の電流値の変化を検知してビームを停止させるインターロックシステム (Beam Interlock System driven by change in current : Curs-BIS) の誤動作によって自動的に入った。原因は、使用していないはずの電源チャンネル Curs-BIS-33 No.5 (I_S2) がインターロックの対象に含まれており、それが発報と解除を繰り返していたことにあった。Curs-BIS の設定を変更して、当該チャンネルをインターロックの対象から外した。

3.2 18GHz ECR イオン源用チラー異常停止

2024年12月14日、18GHz ECR イオン源の電源(RF、ミラーコイル、および引き出し電極)が落ちた。現場を確認すると、当該イオン源用のチラーが冷却水不足に伴うインターロックの動作により停止していた。冷却水量が下限値(EMPTY)を下回っていたため、純水を補充してチラー

を再起動させた。冷却水の補給中に撮影したチラーの写真を図. 6 に示す。後日実施した調査では、チラーから冷却水を供給しているミラーコイル電源内、真空ウィンドウ、EH チューナー、六極磁石の冷却水ジャケット、プラズマチェンバーの外側のいずれにおいても漏水はみられなかった。今夏の定期点検時に詳細を調査する。



Figure 6: Chiller for R18G Ion source.

3.3 瞬時電圧低下による機器停止

2025年3月19日、瞬時電圧低下により、Hyper ECR イオン源の引き出し電極用電源と、その下流から AVF 入射までのビームラインにおける電磁石電源、更に AVF サイクロトロンインフレクター、デフレクター、および高周波空洞の励振 (RF) が落ちた。これに伴い各機器のステータスが異常となったものの、いずれも問題なくリセットすることができたので、再立ち上げと加速器の再調整を行った。

3.4 イオン源試料枯渇による補充と再調整

2025年6月7日、 $^{10}\text{B}^{4+}$ 7.8 MeV/u を E7A コースへ供給中に、ユーザー側の実験装置の直前に設置しているファラデーカップ (FC-7A1) におけるビームの電流値が 1.50 μA から 0.06 μA まで 4% に減少した。上流を確認すると、Hyper-ECR イオン源引き出し直後のファラデーカップ (FC-IH10) におけるビーム電流値が 10.00 μA から 0.74 μA へと 7.4% に低下していたことから、原因がイオン源にあったことが判明した。イオン源を点検したところ、MIVOC 法によってビームを生成するために使用していた試料(デカボラン)が枯渇していた。試料の再補充、およびイオン源と加速器の再調整を実施し、FC-IH10 では問題発生前と同一の 10 μA 、FC-7A1 では 1.6 μA まで復旧させた。実験装置の直前に設置しているビームプロファイルモニターを用いてビームの位置と形状に変化がないことを確認し、照射を再開した。なお、メンテナンス期間中に上記の作業を含めて試料の再補充を 3 回実施した。デカボランの再補充とイオン源および加速器の再調整に要した時間は合計 4.25 h だった。

4. その他トラブル

4.1 グラディエントコレクター用ポテンショメーターの位置ずれに伴うビーム取り出し効率の悪化

$^4\text{He}^{2+}$ 6.5 MeV/u を E7B コースへ供給するため AVF を調整中に、AVF からのビームの取り出し効率が低下す

る問題が発生した。ビームの取り出し効率 ϵ を、メインラジアルプローブの位置が 645 mm の場合の電流値 I_A と、825 mm の場合の電流値 I_B との比率 ($=I_B/I_A$) により定義する。前回は、 $\epsilon = 1.0 \text{ e}\mu\text{A}/1.3 \text{ e}\mu\text{A} = 77\%$ だったのに対し、同一の加速パラメーターを使用した今回は $0.6/2.3 = 26\%$ へと悪化した。原因は、グラディエントコレクターの位置に対してポテンシオメーターの電圧読みがずれていたことにあり、前者が正しい位置から 18 mm も挿入方向にずれていた。この為、取り出し軌道が通常と異なるものとなり、 ϵ が大幅に低下したと考えられる。グラディエントコレクターの位置とポテンシオメーターの電圧の相関を測定し直してから再度取り出し調整を行ったところ、 $\epsilon = 1.1/1.8 = 61\%$ まで回復した。

4.2 AVF-RF#2 密同調板駆動部真空リーク

2025 年 6 月 28 日、第 2 高周波空洞の励振を停止した直後、真空度が $2.0\text{E-}5 \text{ Pa}$ から $7.2\text{E-}3 \text{ Pa}$ に悪化した。再度励振したところ $5.2\text{E-}4 \text{ Pa}$ まで戻ったため、2 日後に予定されていたマシンタイムにビームを供給した後、2025 年 7 月 1 日に詳細な調査を実施した。He リークディテクターを用いてリーク箇所の特定を試みたところ、まず共振周波数を変更するための外筒の直下にリークの反応があり、リーク量の表示値が $1.8\text{E-}9 \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ から $3.8\text{E-}8 \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ に変化した。この為、真空封じに使用している O リング (型式 MS28775-383) を交換した。真空排気の後に再度リーク試験を行ったところ、密同調板 (compensator) の駆動部においてリークが発見された。リーク量は多く、表示値が $8.2\text{E-}11 \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ からリークディテクターの検出許容値を超えるまで変化した。そこで、駆動部の真空封じに使用しているツイスターリング (型式 T-213) を交換した。取り外したツイスターリングに損傷が



Figure 7: Resonator cylinder hanged with the jig by a crane.

あったことを確認している。また、冷却水と駆動軸を止めている O リング (形式 P10) も同様に損傷していたことが確認されたため交換した。一連の作業を行うため、クレーンと専用の治具を使って内筒と外筒を吊り上げた (Fig. 7)。修理のために取り外された密同調駆動装置の写真を Fig. 8 に示す。



Figure 8: Compensator during the restoration.

4.3 AVF 位相スリット駆動軸継手の調査

ここ数年、位相スリット位置駆動継手及び位相スリット間隔駆動継手が破損する頻度が上がっていたため[13, 14]、原因を探るべく調査を行った。駆動時には、異音と共に駆動軸が上下方向に振動していることを目視により確認した。駆動軸の押さえを外し、駆動軸と真空を封じている O リング (型式 MS28775-114) を確認したところ、本来塗布されているはずのアピエズンが完全に乾いており、潤滑されていなかった (Fig. 9)。アピエズンを塗布すると異音が生じなくなった。現在は、継手が破損する症状は発生していない。但し、駆動軸が振動する事象はなくならなかったため駆動構造を見直す必要があり、今後の検討課題となった。



Figure 9: O-rings of the phase slit for AVF.

5. 18GHz ECR イオン源真空制御装置更新

18GHz ECR (R18G) イオン源のため、従来、真空制御装置が 3 箇所独立して存在し、それぞれが (1) プラズマチェンバー、(2) 引き出し電極、(3) 分析電磁石と診断箱の真空制御を担っていた。今回、診断箱用の独立した真空排気装置を設けるとともに、4 箇所の真空排

気装置を1台の真空制御操作盤から制御できるようにした。この操作盤からの操作は、従来の装置におけるボタン方式ではなく、タッチパネル方式により行うことができる。操作盤の PLC は EPICS ネットワークに接続されているため、リモートからの操作や、R18G とビームラインの真空度をサーバーに記録することが可能となった。更に真空度が $4.0E-3$ Pa に上昇した場合、R18G の引き出し電極に使用している高圧電源と、高周波発生装置として使用している TWTA を停止させるインターロックが追加された。制御系以外では、ロータリーポンプ直上のヘッドバルブが圧空駆動式からリーク弁連動の電動駆動式に変更された。更新前の真空排気装置を Fig. 10 に、更新後の真空制御操作盤の写真を Fig. 11 に示す。



Figure 10: Vacuum exhaust device before upgrade.



Figure 11: Vacuum exhaust device after upgrade.

6. まとめ

この 1 年間の AVF サイクロトロン総運転時間は 3136.5 h であった。老朽化は止められないものの、その都度修理と対策を練り、実施している。今後も引き続き安定なビーム供給を目指す。

参考文献

- [1] A. Goto *et al.*, “Injector AVF cyclotron at RIKEN”, Proceedings of Cyclotrons 1989, 1991, pp. 51-54.
- [2] H. Kamitsubo, “Progress in RIKEN Ring Cyclotron Project”, Proceedings of Cyclotrons 1986, 1987, pp. 17-23.
- [3] K. Kamakura *et al.*, “Current Status of 14 GHz ECR Ion Source at CNS, the University of Tokyo”, Proceedings of the 18th PASJ Meeting, 2021, pp. 598-599.
- [4] T. Nakagawa *et al.*, “Intense beam production from RIKEN 18 GHz ECRIS and liquid He free SC-ECRISs”, Rev. Sci. Instrum. 73, 2002, 513.
- [5] H. Okamura *et al.*, “Development of the RIKEN polarized ion source”, AIP Conference Proceedings 293, 1993, pp. 84-87.
- [6] M. Odera *et al.*, “Variable frequency heavy-ion linac, RILAC: I. Design, construction and operation of its accelerating structure”, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 227, 1984, pp. 187-195.
- [7] K. Yamada *et al.*, “Beam commissioning and operation of new linac injector for RIKEN RI beam factory”, Proceedings of IPAC 2012, 2012, pp. 1071-1073.
- [8] Y. Yano, “The RIKEN RI Beam Factory Project: A status report”, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B 261, 2007, pp. 1009-1013.
- [9] M. Nishida *et al.*, “Status report of the operation of RIBF ring cyclotrons”, Proceedings of the 21st PASJ Meeting, WTSP09, 2024.
- [10] H. Okuno *et al.*, “The Superconducting Ring Cyclotron in RIKEN”, IEEE Trans. Appl. Supercond. 17, 2007, pp. 1063-1068.
- [11] J. Ohnishi *et al.*, “Construction status of the RIKEN intermediate-stage ring cyclotron (IRC)”, Proceedings of Cyclotrons 2004, 2005, pp. 197-199.
- [12] Y. Yanagisawa *et al.*, “Low-energy radioisotope beam separator CRIB”, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res., Sect. A 539, 2005, pp. 74-83.
- [13] M. Nishimura *et al.*, “Status report on the operation of RIKEN AVF cyclotron”, Proceedings of the 20th PASJ Meeting, TWSP12, 2023, pp. 1049-1053.
- [14] J. Shibata *et al.*, “Status report on the operation of RIKEN AVF cyclotron”, Proceedings of the 21st PASJ Meeting, WTSP01, 2024, pp. 1112-1115.