

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

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

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

^{A)} RIKEN Nishina Center

^{B)} SHI Accelerator Service Ltd.

^{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 stand-alone operations. In this report, we describe both the operational status and improvement works performed in this year (August 2021-July 2022) aiming at increasing accelerating ability of the AVF cyclotron.

1. はじめに

理化学研究所(理研)仁科加速器科学研究センターの AVF サイクロトロン(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 年に稼働開始して以来今年 34 年目を迎えた。

AVF の基本スペックは、K 値 70 MeV、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 である。

Figure 1 に仁科センターサイクロトロン群の全体図、Fig. 2 に AVF サイクロトロン近傍図を示す。RRC の入射器としては他に RILAC[3]及び RILAC2[4]が存在し、これらが比較的重いイオンを加速するのにに対し、AVF は例外があるものの質量数 40 以下の比較的軽いイオンの加速を主に担っている。1991 年からは低エネルギービームを専用の実験コースに供給している。以下、これを「AVF 単独モード」と呼び、入射器として運転する場合は「RRC 入射モード」とする。

AVF 単独モードでは、陽子($M/Q=1$)から $^{84}\text{Kr}^{14+}$ ($M/Q=6$)までの多様な核種のイオンを 2 ~ 15 MeV/u(陽子は 30 MeV)まで加速し各実験コースへ供給している。また、3 台の外部入射イオン源(HYPER ECR[5]、18 GHz ECR[6]、PIS[7])があるが、イオン源の開発や準備期間を考慮して実験のスケジュールを組むことにより、ビーム切換えを短時間で円滑に実施できるように運営されている。

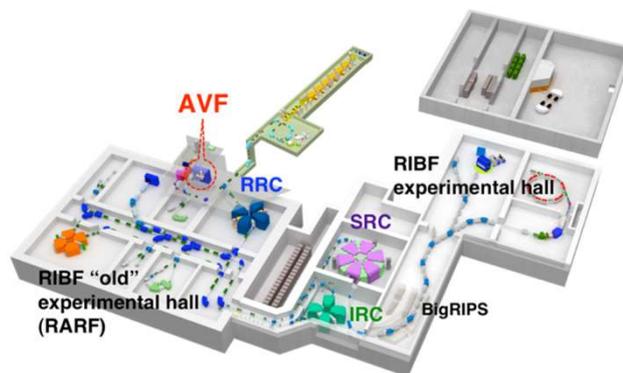


Figure 1: Schematic layout of RIBF at RIKEN Nishina Center.

RRC 入射モードでは、AVF で水素(H_2)から Rb までを 3.78 ~ 7 MeV/u に加速し、RRC でさらに加速し各実験コースへ供給している。2009 年から RI ビームファクトリー(RIBF[8, 9])での軽イオン加速が開始されたことにより、AVF は RIBF への入射器としての役割も果たしている。AVF から取り出した偏極重陽子、N、O 等の粒子を、RRC、および超伝導リングサイクロトロン(SRC)[10]で加速している。その他、AVF から RRC、中間段リングサイクロトロン(IRC)[11]を用いて加速されたビームを旧施設(RARF)側へ輸送し、生物実験に供給している(IRC 戻りライン)。本稿では 2021 年 8 月から 2022 年 7 月までの

[#] k_ozeki@riken.jp

AVF の運転状況、発生した不具合とその対応を報告する。

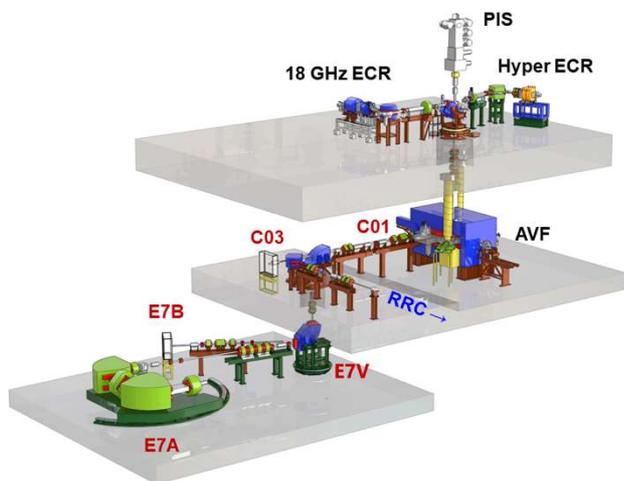


Figure 2: Overview of AVF cyclotron with three ion sources, three experimental courses, and beam transport line to RRC.

2. 運転状況

これまでに AVF で加速された核種の質量数と核子当たりのエネルギーとの関係を Fig. 3 に示す。図中にはこれまでに加速実績がある全てのビームをプロットした。この1年間で加速したビームについては AVF 単独モードの粒子は赤色の○、RRC 入射モードの粒子は青色の○、1st ビームを赤色の●で表している。1st ビームは ${}^7\text{Li}^{3+}$ 10 MeV/u、 ${}^{84}\text{Kr}^{14+}$ 2.0 MeV/u、 ${}^{84}\text{Kr}^{17+}$ 2.4 MeV/u であった。当該期間中の加速粒子を Table 1 に示す。

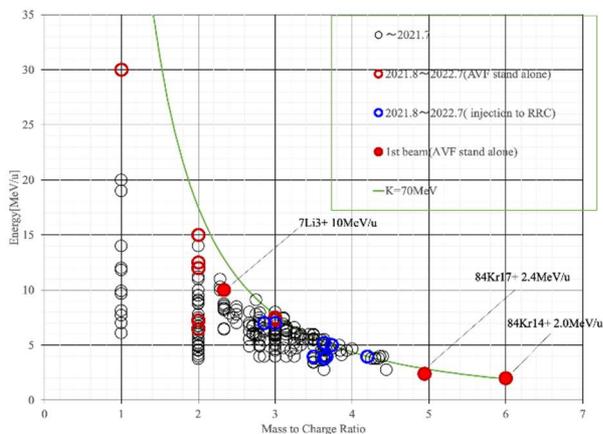


Figure 3: Energy-Mass to charge map of AVF.

Table 1: List of Accelerated Beams from August 2021 to July 2022

AVF stand-alone	p	30 MeV
	d	12 MeV/u
	d	15 MeV/u
	α	6.5 MeV/u
	α	7.25 MeV/u
	α	12.5 MeV/u
	${}^{12}\text{C}^{4+}$	7.3 MeV/u
AVF stand-alone 1st beam	${}^{18}\text{O}^{6+}$	7 MeV/u
	${}^{24}\text{Mg}^{8+}$	7.5 MeV/u
	${}^7\text{Li}^{3+}$	10 MeV/u
Injection to RRC	${}^{84}\text{Kr}^{14+}$	2.0 MeV/u
	${}^{84}\text{Kr}^{17+}$	2.4 MeV/u
	${}^{12}\text{C}^{4+}$	7 MeV/u
	${}^{14}\text{N}^{4+}$	3.97 MeV/u
	${}^{20}\text{Ne}^{7+}$	3.97 MeV/u
	${}^{22}\text{Ne}^{6+}$	7 MeV/u
	${}^{40}\text{Ar}^{11+}$	3.78 MeV/u
	${}^{40}\text{Ar}^{11+}$	5.19 MeV/u
	${}^{56}\text{Fe}^{15+}$	5.01 MeV/u
	${}^{84}\text{Kr}^{20+}$	3.97 MeV/u

Figure 4に、AVF単独モードでの運転時間の過去10年分の推移を示す。AVFサイクロトロン調整時間(AVFサイクロトロンのメインコイルへの通電開始から各実験コースのターゲット上でのスポット調整が完了するまでの時間)、それぞれの実験コースへのビーム供給時間(スポット調整完了から規定のMT時間終了までの時間)、ビーム供給スケジュール中の加速器事由による不具合対応による供給中断時間を集計した。

Figure 4にある様に、AVF単独モードでのビーム供給先はC01、C03、E7V、E7A、E7Bに分かれている。C01は加速器調整マシンスタディ用、C03はRI製造用、E7Vは東大原子核科学研究センター(CNS)実験用、E7AはCNS RI beam separator (CRIB) [12]実験用、E7Bは学生実験およびRI製造用のコースである。

ビーム供給時間は C01:31.8 h、C03:581.6 h、E7V:84.3 h、E7A:252.8 h、E7B:81.9 h であった。AVF 調整時間

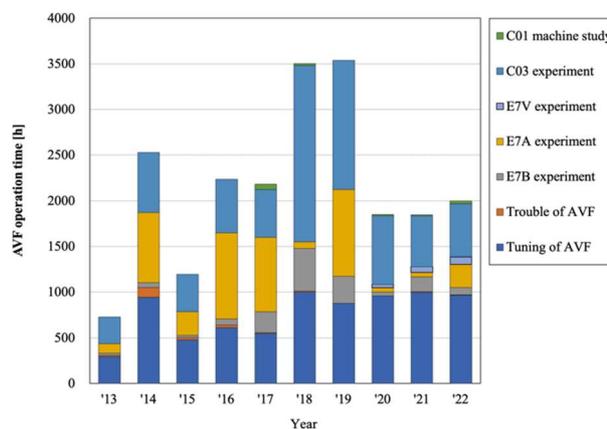


Figure 4: Beam service time of AVF stand-alone operation.

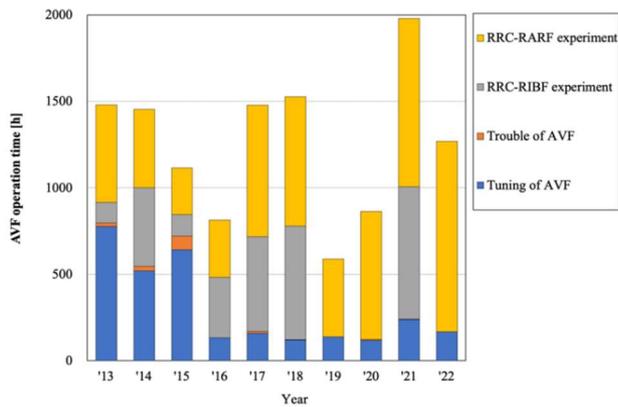


Figure 5: Beam service time of AVF operation as an injector of RRC.

は 967.4 h、不具合対応に費やした時間は 0.2 h、運転時間は 2000 h であった。

同じ様に、Fig. 5にRRC入射モードにおける時間集計を示す。調整時間はAVFサイクロトロンメインコイルへの通電からRRCへ受け渡すまでの時間とした。コースの区分はRARFとRIBFで分け、IRC戻りラインはRARFコースと分類した。

今期はAVFを使ったRIBFコースの使用はなくRARFコースのみであった。調整時間は166.9 h、照射時間は1102.3 h、不具合対応に費やした時間は0.6 h、RRC入射モードの運転時間は1269 hであった。

3. トラブル

大小様々トラブルは発生しているが、実験スケジュールへの影響は最小限に留めることができた。メンテナンス期間中に対応した事や、AVF調整時間内の短時間でトラブルが解決し、MTへの影響が出なかった事がその理由である。以下に主だったトラブルを列挙する。

- AVF-RF#2 密同調板駆動軸部より真空リーク
- 共振器下側碍子 Oリング部より真空リーク
- AVF 位相スリット駆動調査 (AVF ヨークアップ) 及びカップリング交換
- AVF 位相プローブチャンネル切り替えスイッチの故障
- 真空測定器表示トラブル。真空機器再起動
- AVF 真空排気装置の温度異常による停止
- 電磁石電源内部トランジスタバンクヒューズ断

上に挙げたトラブルは既出のものが多く対応策も既知であるため、比較的早い対応が可能であった。しかし、加速器自体の老朽化のため、発生頻度が上がる傾向にあり、部分的な改良も検討されてはいるが、トラブルの都度対応しているのが現状である。

例として、AVF-RF#2密同調板駆動軸部より真空リークが発生したトラブルについての経過を紹介する。

RF励振開始時にスパイク的に真空が悪化する症状が現れたが、定常励振時には発現しないこととリーク量が比較的微小なことから経過観察とし、ビーム供給を続け

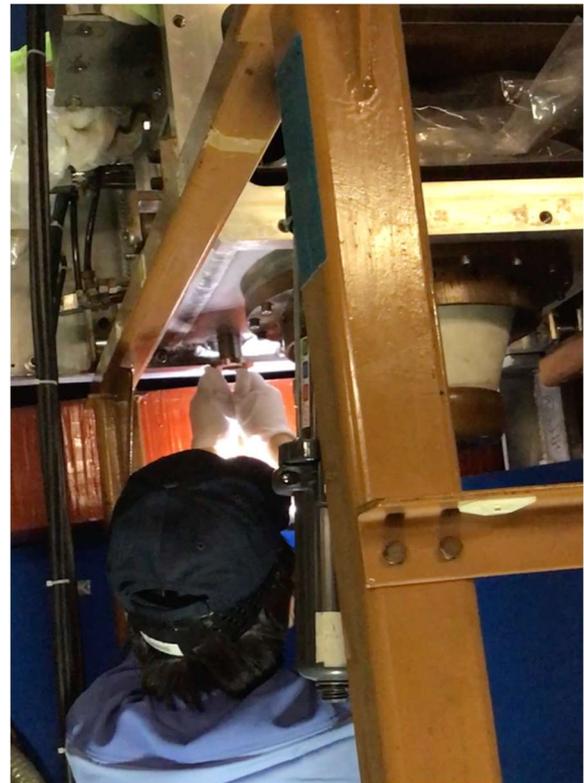


Figure 6: (top) Picture of work to restore compensator. (bottom) Photo of component to which X-ring is attached.

た。応急処置として密同調板をフルストロークで駆動させた事で、駆動軸部のXリングの変形によるものかグリスの具合によるものかは不明ではあるが、一時的に小康状態となっていた。

数ヶ月はこの状態で実験スケジュールをこなし、マシンタイムの合間に対応した。過去にも同様の事例があり、又リークテストの結果も同じ箇所の不具合があることを示していたので、軸部Xリングの交換を行なった。

復旧後の動作確認時のリークテストで共振器下側碍

子のリング部にリークが判明したので、更にこれを交換した。

Figure 6に作業風景と当該部品の写真を示す。

4. まとめ

2021年8月から2022年7月までのAVFの運転時間は3269時間であった。AVFを理由とした実験中断は1時間未満であり、ビームを安定に供給できた。

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] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] T. Nakagawa *et al.*, “Intense beam production from RIKEN 18 GHz ECRIS and liquid He free SC-ECRISs”, Rev. Sci. Instrum. 73, 2002, 513.
- [7] H. Okamura *et al.*, “Development of the RIKEN polarized ion source”, AIP Conference Proceedings 293, 1993, pp. 84-87.
- [8] Y. Yano, “The RIKEN RI Beam Factory Project: A status report”, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B 261, 2007, pp. 1009-1013.
- [9] K. Kobayashi *et al.*, “Status report of the operation of RIBF ring cyclotrons”, Proceedings of the 19th PASJ Meeting, MTPF003, 2022.
- [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.