

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

西田稔^{#, B)}, 大関和貴^{A)}, 後藤彰^{A)}, 大西純一^{A)}, 大城幸光^{C)}, 福澤聖児^{B)}, 濱仲誠^{B)}, 石川盛^{B)}, 小林清志^{B)}, 小山亮^{B)}, 仲村武志^{B)}, 西村誠^{B)}, 柴田順翔^{B)}, 月居憲俊^{B)}, 矢富一慎^{B)}, 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)}, 加瀬昌之^{A)}, 木寺正憲^{A)}, 込山美咲^{A)}, 熊谷桂子^{A)}, 真家武士^{A)}, 長友傑^{A)}, 中川孝秀^{A)}, 奥野広樹^{A)}, 坂本成彦^{A)}, 須田健嗣^{A)}, 内山曉仁^{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)}

Minoru Nishida^{#, B)}, Kazutaka Ozeki^{A)}, Akira Goto^{A)}, Jun-ichi Ohnishi^{A)}, Yukimitsu Oshiro^{C)}, Seiji Fukuzawa^{B)}, Makoto Hamanaka^{B)}, Shigeru Ishikawa^{B)}, Kiyoshi Kobayashi^{B)}, Ryo Koyama^{B)}, Takeshi Nakamura^{B)}, Makoto Nishimura^{B)}, Junsho Shibata^{B)}, Noritoshi Tsukiori^{B)}, Kazuyoshi Yadomi^{B)}, Masaki Fujimaki^{A)}, Nobuhisa Fukunishi^{A)}, Hiroo Hasebe^{A)}, Yoshihide Higurashi^{A)}, Hiroshi Imao^{A)}, Osamu Kamigaito^{A)}, Masayuki Kase^{A)}, Masanori Kidera^{A)}, Misaki Komiyama^{A)}, Keiko Kumagai^{A)}, Takeshi Maie^{A)}, Takashi Nagatomo^{A)}, Takahide Nakagawa^{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 2019-July 2020) aiming at increasing accelerating ability of the AVF cyclotron.

1. はじめに

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)は稼働開始から今年で 31 年目を迎えた。K 値が 70 MeV であり単独で低エネルギービームを専用の実験コースに供給する「AVF 単独モード」と理研リングサイクロトロン(RRC)へ入射する「RRC 入射モード」で運用されている。RRC 入射モードでは RRC から旧施設(RARF)の各実験室へ供給する(AVF-RRC→RARF 実験)他、新施設の RI ビームファクトリー(RIBF[1, 2])へビームを輸送して超伝導リングサイクロトロン(SRC)で更に加速し RIBF の実験へ供給する(AVF-RRC-SRC→RIBF 実験)。また、中間段リングサイクロトロン(IRC)を使用し、RARF の生物実験コースへ送る(AVF-RRC-IRC→RARF 実験(生物))で使用されている。

本稿ではこの 1 年間(2019 年 8 月から 2020 年 7 月まで)の AVF の運転状況と、期間中に行われた 18 GHz ECR イオン源の導入、30 MeV 陽子加速の実用化について報告する。

2. 運転実績

2.1 加速実績

AVF でこれまでに加速された核種の質量荷電比と核子当たりのエネルギーの関係を Fig. 1 に示す。対象期間に加速したものは赤色(AVF 単独モード)と青色(RRC

[#] nishidam@riken.jp

入射モード)の○でプロットした。今回が初めての加速となった¹⁹F⁷⁺ 6.3 MeV/u (AVF 単独モード)は赤色の●でプロットしてある。また、それらの一覧を実験コース、ビーム量と共に Table 1 にまとめた。ビーム量は AVF の取り出し直後に設置されているファラデーカップ FC-C01 で実際に得られたビーム量の最大値を記した。

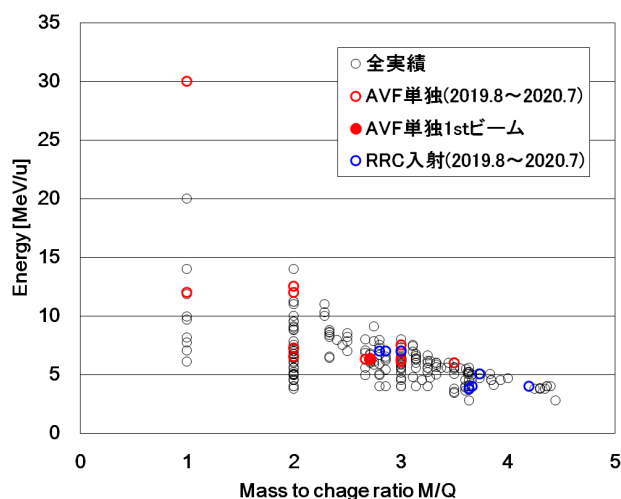


Figure 1: Energy-Mass to charge map of AVF.

本 AVF は 18 GHz ECR イオン源[3](対象期間中に、これまでの SC ECR イオン源から置き換えられた。3 章参照)、Hyper ECR イオン源、PIS(偏極重陽子専用)の 3 つ

のイオン源を擁し、多様な核種の供給実績がある。取り出し半径 0.714 m で設計上の加速ハーモニック $H = 2$ 、RF 周波数は 12~24 MHz である為、得られるビームエネルギーの範囲は 3.78 MeV/u ($^{87}\text{Rb}^{20+}$) から 14 MeV (陽子) であるが、 $H = 3$ の 2.76 MeV/u ($^{40}\text{Ar}^{9+}$) や今回報告する $H = 1$ の 30 MeV (陽子) 等の実績もある。

Table 1: List of Accelerated Beams from August 2019 to July 2020

Beam particle	Energy [MeV/u]	Acceleration mode	Experimental Course	Beam current [pnA]
p	12	AVF stand-alone	C03(RI製造)	25000
p	30	AVF stand-alone	C01(加速器MS)/C03(RI製造)	10000
d	12	AVF stand-alone	C03(RI製造)	22000
$^4\text{He}^{2+}$	6.5	AVF stand-alone	E7B(学生実験)	7200
$^4\text{He}^{2+}$	7.25	AVF stand-alone	C03(RI製造)	25000
$^4\text{He}^{2+}$	12.5	AVF stand-alone	C03(RI製造)	3400
$^7\text{Li}^{2+}$	6	AVF stand-alone	C03(RI製造)	2370
$^{12}\text{C}^{6+}$	7	AVF-RRC	E5B(生物)	610
$^{14}\text{N}^{6+}$	7	AVF-RRC	E3B(RI製造)	900
$^{16}\text{O}^{6+}$	6.8	AVF stand-alone	E7A(CNS)	4160
$^{18}\text{O}^{6+}$	6.07	AVF stand-alone	C03(RI製造)	1260
$^{18}\text{O}^{6+}$	6.28	AVF stand-alone	C12(CNS)	4080
$^{18}\text{O}^{6+}$	7	AVF stand-alone	C12(CNS)	1580
$^{19}\text{F}^{7+}$	6.3	AVF stand-alone	C03(RI製造)	870
$^{20}\text{Ne}^{7+}$	7	AVF-RRC	E5B(生物)	800
$^{22}\text{Ne}^{6+}$	3.97	AVF-RRC	E6(RIPS)	1030
$^{24}\text{Mg}^{8+}$	7.5	AVF stand-alone	E7A(CNS)	400
$^{40}\text{Ar}^{11+}$	3.8	AVF-RRC-IRC	E5B(生物)	190
$^{56}\text{Fe}^{15+}$	5.01	AVF-RRC	E5B(生物)	90
$^{84}\text{Kr}^{20+}$	3.97	AVF-RRC	E5A(産業連携)	200

2.2 運転時間統計

AVF の過去 10 年間の運転時間を AVF 単独モードと RRC 入射モードに分け、各モードにおける AVF での調整時間、実験コース別供給時間、および供給中の故障対応時間について集計した。

1) AVF 単独モード

以下の定義に従って集計した結果を Fig. 2 に示す。

- AVF 調整時間(Tuning of AVF): AVF メインコイル励磁から AVF 取出し調整を経てビームスポット調整が完了するまでの時間。
- 供給時間: ビームスポット調整完了から実験終了までの時間。供給時間は 5 つの実験コース (Fig. 3 参照) に分けて集計した:
 - C01: AVF 取出し、マシンスタディ等使用。
 - C03 exp.: RI 製造用の実験コース。
 - E7A exp.: 東京大学原子核科学研究センター(CNS)。CRIB[4]で原子核、産業連携実験コース。
 - E7B exp.: RI 製造、産業連携実験コース。

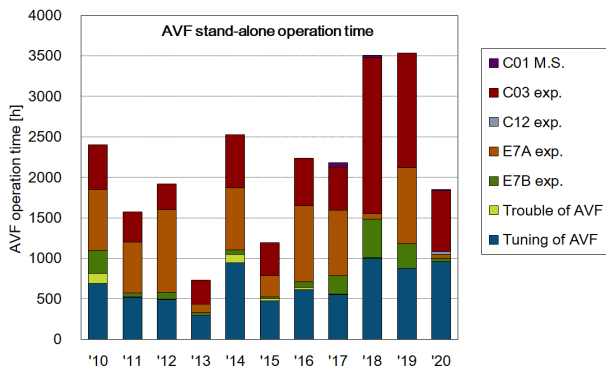


Figure 2: Beam service time of AVF stand-alone operation.

○C12 exp.: 東京大学原子核科学研究センター(CNS)。
 • 故障対応時間(Trouble of AVF): 供給時間中に発生した、AVF が原因の故障やトラブルによる中断時間。

AVF 単独モードの調整を含めた運転時間は 1848 時間であった。運転時間が昨年より大幅に減ったのは、新型コロナウイルスによる緊急事態宣言を受け 4 月、5 月の MT が全て中止となった事が大きい。

利用用途は C03 の RI 製造が多く、AVF 単独モードの照射時間の 85% を占めている。その中で $^4\text{He}^{2+}$ 7.25 MeV/u の照射が 44% を占め最長であった。

また、今回から AVF より垂直に曲げ下すビームラインの突き当り (Fig. 3 の C12) に CNS の実験グループがターゲットチャンバーを設け新たな実験が開始された。

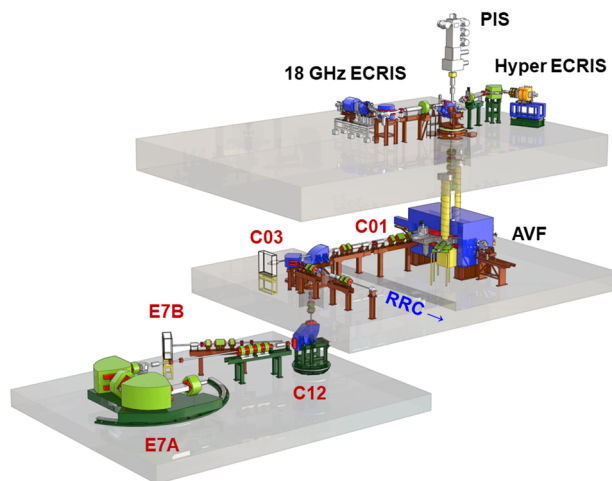


Figure 3: Overview of AVF cyclotron with 3 ion sources, 5 experimental courses, and beam transport line to RRC.

2) RRC 入射モード

AVF 単独モードと同様に過去 10 年間の RRC 入射モードの運転時間の内訳を Fig. 4 に示す。各時間の定義は以下の通りである。

- AVF 調整時間(Tuning of AVF): AVF メインコイル励磁から取出し調整が完了し、RRC へ輸送するまでの時間。
- 供給時間: RRC へ輸送してから実験が終了するまでの時間。ただし、RARF 実験(RRC-RARF exp.)と RIBF 実験(RRC-RIBF exp.)とで集計を分けた。

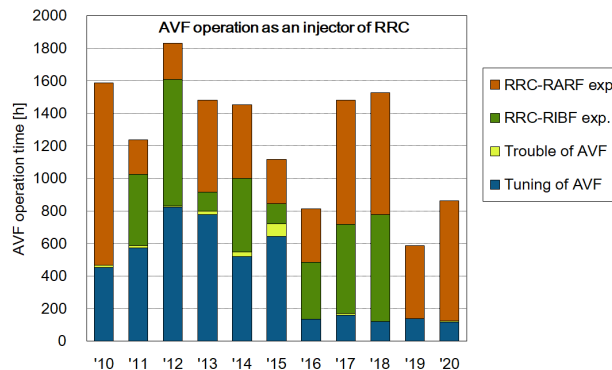


Figure 4: Beam service time of AVF operation as an injector of RRC.

- 故障対応時間(Trouble of AVF): 供給時間中に発生した、AVF が原因の故障やトラブルによる中断時間。

RRC 入射モードの調整を含めた運転時間は 858 時間であった。過去 10 年と比較して減少しているのは、RILAC2[5]を入射器とした重イオン実験が重点的に行われ、AVF を入射器とする RIBF の実験が行われなかった為である。

2.3 運転中のトラブル

対象期間に於いてマシンタイムは比較的スムーズに進行した。発生した主なトラブルを以下に挙げる。

- マグネティックチャンネルのトリップ

2019 年の後半(10 月 19 日)からマグネティックチャンネルが運転中に外部インターロックで頻繁にトリップするようになった。このコイルは 300 A から 600 A の範囲で使用しているが 2020 年 2 月 16 日に 385 A でトリップするようになり運転が困難になった為、マシンタイムの合間に調査を行った。当初ホローコンダクターに取り付けられたサーマルスイッチ(閾値 80°C)の誤動作を疑ったが、現場で通電しながらサーモカメラで観察した(Fig. 5 参照)ところ、本体下部のサーマルスイッチ取り付け部の温度が高い事がわかった。そこで当該部の冷却水流量を調べたがその系統のフラッシングは既に行っており、他の系統より流量が少ないということはない。

次にコイルの状態を調べたところ、コイルの口出し部でホローコンダクターを固定しているボルトの一部が若干緩んで口出し部が動くようになっていることがわかった。通電した状態でコイルの電圧を測定したところ、ホローコンダクターの位置に応じてコイル電圧が変化することが判明した。これらの調査より、本体内部で何らかの短絡が生じて発熱しているものと考えられたが、短絡箇所の特定は困難であった為、コイル両端の抵抗が最大となるような位置でホローコンダクターの固定ボルトを締め直した。これにより 500 A 以上通電してもトリップしなくなった為、その状態で現在も使用している。

- Hyper ECR イオン源の引き出し電極碍子交換

2020 年 1 月 6 日、¹⁴N のビーム調整中に Hyper ECR イオン源の引き出し電極のリーク電流が増え、ビーム調整が困難になった為、イオン源を大気開放し引き出し電極の碍子交換を行った。復旧に要した時間は約 5 時

間であった。

3. 18 GHz ECR イオン源の導入

2019 年 6 月まで AVF に接続されていた SC ECR イオン源は、超伝導ミラーコイルを冷却する GM 冷凍機の老朽化に伴い、かねてより冷凍機の交換が検討されていたが、交換費用や維持費用の観点から現実的ではなかった。代替案を模索していたところ、重イオン線形加速器(RILAC)の増強に伴い、28 GHz 超伝導 ECR イオン源を RILAC 用として新設することになった。これを受けて、それまで RILAC で使用していた 18 GHz ECR イオン源を、SC ECR イオン源と置き換える形で AVF に導入することにした。18 GHz ECR イオン源は過去にウランなどの核燃料物質を加速器へ供給していたことがあるので、汚染している可能性のあるチャンバー類は新しく製作した。真空排気装置は SC ECR イオン源のものを流用した。またその他にインフラの整備として主に次の 3 つに関し新設などの手当てを行った。

- ソレノイドコイル電源入力用高圧動力線
- ソレノイドコイル冷却用の加圧純水系
- 20°C 冷却水系

ミラー磁場を作るソレノイドコイル用の電源は 2 台あり、入力に 400 V/250 A の高圧動力線が必要であった為、別の建物である電源棟から偏極イオン源室へ 2 系統を敷設した。イオン源室にて漏電ブレーカーで受けたのち電源へ接続した。またソレノイドコイルには最大で 800 A を流す為、冷却としてコイルのホローコンダクターに 30°C、1.3 MPa の冷却水が必要である。イオン源室内の既設冷却純水系は 0.5~0.7 MPa の水圧であった為、この既設系統の一部から分岐して新たに加圧ポンプを増設した。これにより最大で 1.5 MPa、80 L/min 以上の加圧水系を確保しソレノイドコイルへ供給した。プラズマチャンバー、高周波真空窓や六極永久磁石冷却ジャケット、またソレノイドコイル電源のシャント抵抗の冷却用に対しては 20°C 冷却純水系が必要であり、ORION 社製の RKE2200 をイオン交換樹脂と共に屋内に設置して接続した。

移設作業は 2019 年の 7 月中旬から 12 月末まで行われ、その間の MT は全て Hyper ECR イオン源を用いて行われた。年明けて 1 月の MT から各種イオンの供給を開始した。ビーム強度は α 、Ar、Kr など SC ECR イオン源の時と比べ同等かそれ以上の量を達成し AVF へ供給している。

4. 30 MeV 陽子加速の実用化

理研 AVF サイクロトロン最大のエネルギーの実績値は核子あたり 14 MeV であったが、以前から高エネルギー化の検討が行われており[6]、2017 年夏に中心領域を新設計のものと交換して加速ハーモニック H=1 運転により 30 MeV 陽子の加速に成功した[7]。

Figure 6 に新旧中心領域の形状と、30 MeV 陽子の軌道および通常の H = 2 運転の中心軌道を示す。新中心領域ではインフレクターの形状(Re: 26 mm, gap: 8 mm)は旧領域と同じであるが、支持構造を変えることによって RF シールドを小さくした。30 MeV 陽子の加速アクセプタンスはトラッキング計算により位相幅 40°の範囲において 100 π mm \cdot mrad(入射エネルギー 15 keV において)以上



Figure 5: Thermo camera image of magnetic channel.

PASJ2020 THSP01

あることを確認した。今年度、30 MeV 陽子による RI 製造実験の実施が決定した為、2020 年 2 月に再度加速テストを行った。このテストにおいて入射直後にある位相スリットに 2 ターン目のビームの一部が当たることが分かった為、スリットの支柱を細くした。この結果、6 月の 30 MeV 陽子マシンタイムの調整時に放射線上の使用許可条件である $10 \mu\text{A}$ のビーム取り出しに成功した。このときの通過効率 (AVF 入射と取り出し電流値の比) は約 7% であった。

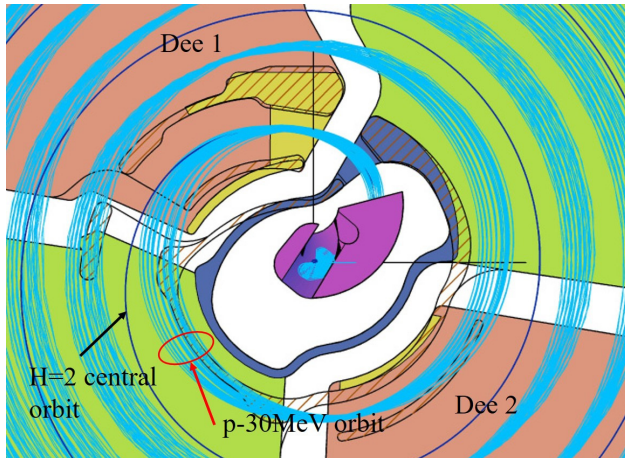


Figure 6: New and original central region of 715 AVF Cyclotron. The hatched area indicates the original one. Beam orbits for 30 MeV proton and H = 2 usual operation are also shown.

5. まとめ

この 1 年間の AVF サイクロトロン合計運転時間は 2705 時間であった。大きなトラブルは無く概ね順調であった。

参考文献

- [1] Y. Yano, NIM B261, 2007, pp. 1009-1013.
- [2] S. Ishikawa *et al.*, “Status report of the operation of RIBF ring cyclotrons”, Proceedings of the 17th PASJ Meeting, WESP03, 2020.
- [3] T. Nakagawa *et al.*, Rev. Sci. Instrum., 73, 513, 2002.
- [4] Y. Yanagisawa *et al.*, NIM A539, 2005, pp. 74-83.
- [5] K. Yamada *et al.*, “Beam commissioning and operation of new linac injector for RIKEN RI beam factory”, IPAC12, New Orleans, May 2012, TUOBA02, pp. 1071-1073.
- [6] S. B. Vorozhtsov *et al.*, “Modification of the central region in the RIKEN AVF cyclotron for acceleration at the H=1 RF harmonic”, Proceedings of Cyclotrons 2010, pp. 138-140.
- [7] J. Ohnishi *et al.*, “Beam test using new central region for energy upgrade at RIKEN AVF cyclotron”, Proceedings of Cyclotrons 2016, pp. 332-335.