

## 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

柴田順翔<sup>A)</sup>, 大関和貴<sup>#, B)</sup>, 福澤聖児<sup>A)</sup>, 濱仲誠<sup>A)</sup>, 石川盛<sup>A)</sup>, 小林清志<sup>A)</sup>, 小山亮<sup>A)</sup>, 茂木龍一<sup>A)</sup>, 仲村武志<sup>A)</sup>, 西田稔<sup>A)</sup>, 西村誠<sup>A)</sup>, 月居憲俊<sup>A)</sup>, 矢富一慎<sup>A)</sup>, 足立泰平<sup>B)</sup>, 藤巻正樹<sup>B)</sup>, 福西暢尚<sup>B)</sup>, 長谷部裕雄<sup>B)</sup>, 日暮祥英<sup>B)</sup>, 今尾浩士<sup>B)</sup>, 上垣外修一<sup>B)</sup>, 木寺正憲<sup>B)</sup>, 込山美咲<sup>B)</sup>, 熊谷桂子<sup>B)</sup>, 眞家武士<sup>B)</sup>, 三宅泰斗<sup>B)</sup>, 長友傑<sup>B)</sup>, 中川孝秀<sup>B)</sup>, 西隆博<sup>B)</sup>, 大西純一<sup>B)</sup>, 奥野広樹<sup>B)</sup>, 坂本成彦<sup>B)</sup>, サキラヤン グリンスメイ<sup>B)</sup>, 須田健嗣<sup>B)</sup>, 内山暁仁<sup>B)</sup>, 渡部秀<sup>B)</sup>, 渡邊環<sup>B)</sup>, 渡邊裕<sup>B)</sup>, 山田一成<sup>B)</sup>, 鎌倉恵太<sup>C)</sup>, 小高康熙<sup>C)</sup>  
Junsho Shibata<sup>A)</sup>, Kazutaka Ozeki<sup>#, B)</sup>, Seiji Fukuzawa<sup>A)</sup>, Makoto Hamanaka<sup>A)</sup>, Shigeru Ishikawa<sup>A)</sup>, Kiyoshi Kobayashi<sup>A)</sup>, Ryo Koyama<sup>A)</sup>, Ryuichi Moteki<sup>A)</sup>, Takeshi Nakamura<sup>A)</sup>, Minoru Nishida<sup>A)</sup>, Makoto Nishimura<sup>A)</sup>, Noritoshi Tsukiori<sup>A)</sup>, Kazuyoshi Yadomi<sup>A)</sup>, Taihei Adachi<sup>B)</sup>, Masaki Fujimaki<sup>B)</sup>, Nobuhisa Fukunishi<sup>B)</sup>, Hiroo Hasebe<sup>B)</sup>, Yoshihide Higurashi<sup>B)</sup>, Hiroshi Imao<sup>B)</sup>, Osamu Kamigaito<sup>B)</sup>, Masanori Kidera<sup>B)</sup>, Misaki Komiyama<sup>B)</sup>, Keiko Kumagai<sup>B)</sup>, Takeshi Maie<sup>B)</sup>, Yasuto Miyake<sup>B)</sup>, Takashi Nagatomo<sup>B)</sup>, Takahide Nakagawa<sup>B)</sup>, Takahiro Nishi<sup>B)</sup>, Jun-ichi Ohnishi<sup>B)</sup>, Hiroki Okuno<sup>B)</sup>, Naruhiko Sakamoto<sup>B)</sup>, Glynnis Mae Saquilayan<sup>B)</sup>, Kenji Suda<sup>B)</sup>, Akito Uchiyama<sup>B)</sup>, Shu Watanabe<sup>B)</sup>, Tamaki Watanabe<sup>B)</sup>, Yutaka Watanabe<sup>B)</sup>, Kazunari Yamada<sup>B)</sup>, Keita Kamakura<sup>C)</sup>, Yasuteru Kotaka<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> SHI Accelerator Service Ltd.

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

<sup>C)</sup> 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 2023-July 2024) 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 近傍図を 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( $\text{H}_2$ )から Xe までのイオンを

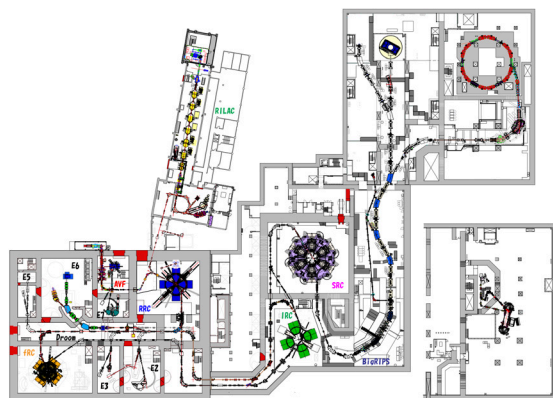


Figure 1: Schematic layout of RIBF at RIKEN Nishina Center.

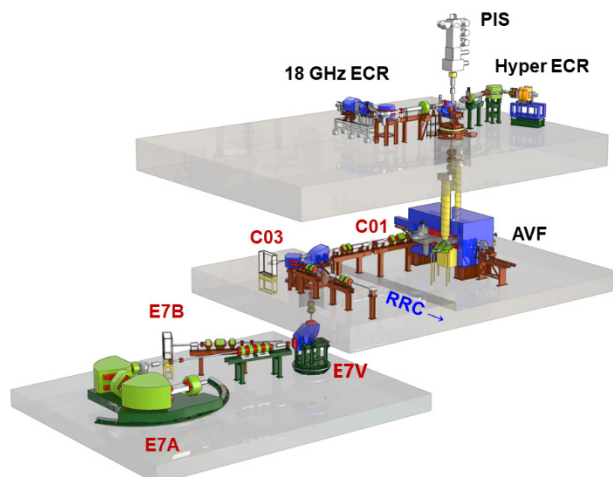


Figure 2: Overview of AVF cyclotron.

<sup>#</sup>k\_ozeki@riken.jp

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、 $^{14}\text{N}$ 、 $^{18}\text{O}$  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ます。2015 年からは  $^{40}\text{Ar}$  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  $^{129}\text{Xe}$  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 2023 年 8 月から 2024 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

この 1 年間の加速粒子一覧を Table 1 に示す。

これまで AVF で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. 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

Table 1: List of Accelerated Beams

	Ion	Energy (MeV/u)	Intensity (cμA)
AVF Standalone	$p$	14	14.4
1st beam	$p$	17	17.2
	$p$	30	12.6
	$d$	12	10.8
	$\alpha$	6.5	3.3
	$\alpha$	7.25	30.7
	$\alpha$	12.5	9.2
	$^7\text{Li}^{2+}$	6	2.3
	$^7\text{Li}^{3+}$	8.3	18.5
	$^7\text{Li}^{3+}$	10	2.3
	$^{12}\text{C}^{4+}$	7.3	3.8
	$^{13}\text{C}^{4+}$	6	2.4
	$^{15}\text{N}^{5+}$	7	11
	$^{18}\text{O}^{6+}$	7	3.8
Injection to RRC	$d$	7	2.1
	$^{12}\text{C}^{4+}$	7	3
	$^{18}\text{O}^{6+}$	4.9	7.3
	$^{40}\text{Ar}^{11+}$	3.78	3.4
	$^{40}\text{Ar}^{11+}$	5.2	3.2
	$^{56}\text{Fe}^{15+}$	5.02	1.1
	$^{84}\text{Kr}^{20+}$	3.97	3.1
	$^{86}\text{Kr}^{20+}$	3.8	3.8
	$^{129}\text{Xe}^{25+}$	2.45	1.1

の 1 年間で 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)は赤色ないし青色の●で表している。1st ビームは陽子 17 MeV であった。RI 製造実験における実験者要望のエネルギー変更で、19 MeV から 17 MeV へ下げる調整を行い、ビームを供給した。

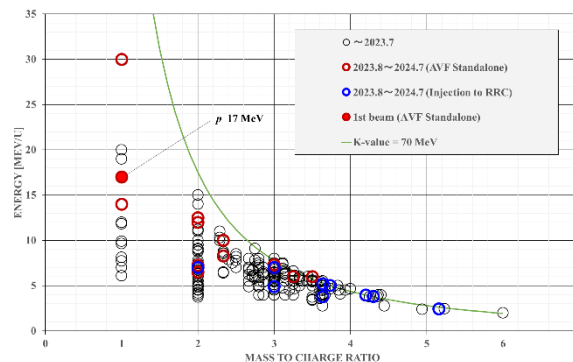


Figure 3: Energy-mass to charge map of AVF.

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。

今期のビーム供給時間は、C01:0 h、C03:450.1 h、E7V:97.3 h、E7A:436.4 h、E7B:147.6 h であった。AVF 調整時間は 792.8 h、AVF 事由によるビーム供給中断時間は 68.6 h、AVF 単独モードにおける総運転時間は 1924.2 h であった。

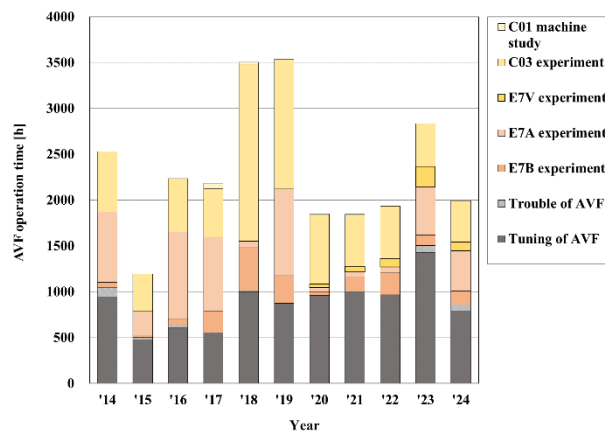


Figure 4: Beam service time of AVF standalone operation.

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。

今期は AVF を入射器とした RIBF 実験へのビーム供給が 3 年ぶりに行われ、ビーム供給時間は 418.2 h であった。RARF 実験コースへのビーム供給時間は 596.4 h、調整時間は 153 h、AVF 事由によるビーム供給中断時間は 2.2 h、RRC 入射モードでの総運転時間は 1167.6 h であった。

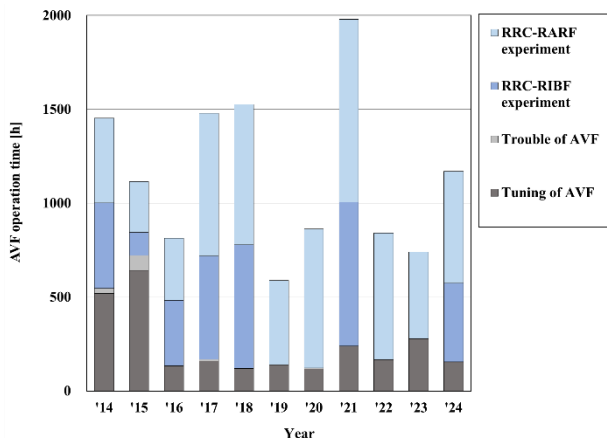


Figure 5: Beam service time of RRC injection operation.

### 3. 主なマシントラブルとその対応

#### 3.1 AVF 第 1 高周波系(RF#1)真空管の故障

2024 年 1 月 14 日、G1 電源投入後すぐに同過電流で異常停止するようになったが、真空管を交換して励振可能となった。2023 年 6 月を境に、RF#1 プレート過電流異常発生時、プレート電源一次側キュービクルの漏電遮断器(ELCB)がトリップする事象が稀に発生していた。当初は ELCB の誤作動を疑っていたが、真空管交換後は漏電トリップが起きることはなくなったため、主原因は真空管の故障であった可能性が高いと考えている。

交換作業は AVF 調整時間内に完了したため、実験へのビーム供給は予定通りの時刻で開始した。

ELCB については、誤作動を起こしていた可能性は低くなったものの、交換することを既に決断していたため、2024 年 3 月に予定通り交換作業を実施した。更に、予防保全としてプレート電源の配線用遮断器(MCCB)も交



Figure 6: Replaced devices for AVF. (a) Vacuum tube, (b) ELCB, (c) MCCB.

換済みである。交換した装置の写真を Fig. 6 に示す。

#### 3.2 AVF 室-E7 室間のゲート弁 GV-C10 故障

2024 年 6 月 8 日、E7A コース実験中に GV-C10 が故障して開けられなくなった。AVF 室と E7 室の間(Fig. 2 参照)に設置してあるゲート弁であり、作業に人手が必要なこと、土曜日に発生したことなどから、週明け月曜日からの修理対応となった。また、作業空間が限られていたため、ゲート弁そのものの交換ではなく、整備済み同型機の弁体を含む駆動部と入れ替えて修理した。作業場所と入れ替えた駆動部の写真を Fig. 7 に示す。

トラブル発生からビーム供給再開までは 53.7 h を要したものの、作業自体は 2 時間強で完了した。

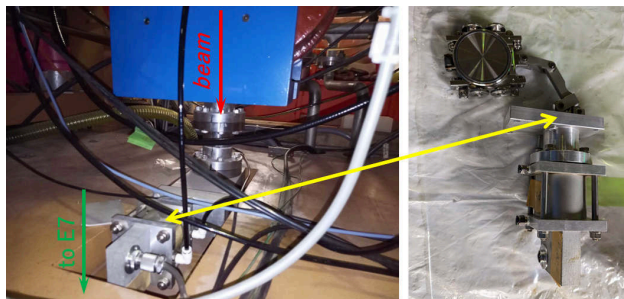


Figure 7: Work area of GV-C10 replacement and replaced part.

#### 3.3 AVF 位相スリット駆動軸継手の破損

以下の日時において、軸継手の破損が判明したため、交換を実施した。破損した軸継手の一例と交換後の写真を Fig. 8 に示す。

- 位相スリット位置駆動用軸継手: 2024 年 3 月 24 日
- 位相スリット間隔駆動用軸継手: 2024 年 1 月 4 日、2024 年 7 月 3 日

このトラブルについては既知のものであり、対処も比較的容易である。しかしながら、ここ数年破損の頻度が上がっているため、夏季メンテナンス期間中に原因を調査予定である。

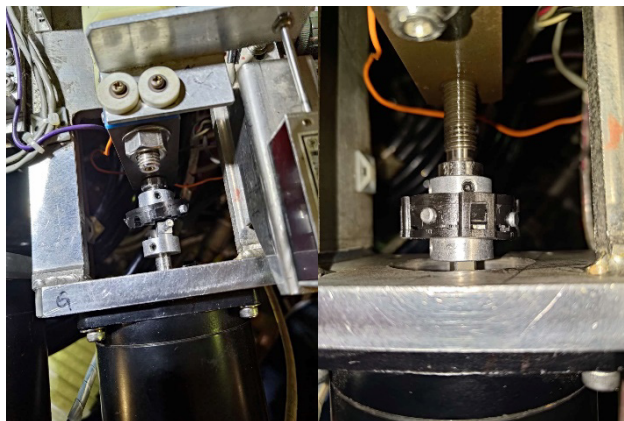


Figure 8: (left) Damaged shaft coupling, (right) shaft coupling after replacement.

### 4. スパイラルインフレクター整備

昨年の AVF 運転報告の通り、インフレクター下電極高

電圧導入接続部付近の高圧ケーブルが絶縁不良を起こした。その原因は、ケーブルの許容温度範囲を超えたためと考えている[13]。そのため、水漏れを起こして以来、使用していなかった冷却配管の修理を含め、メンテナンスを行うことにした。実施した作業内容について報告する。

#### 4.1 インフレクター電極部のメンテナンス

- 折損の激しいコンタクトフィンガー除去と電極取り付け台への新品コンタクトフィンガーのはんだ付け
  - ヘッドブロック根本付近にピンホールのある銅管の除去と新品銅管のはんだ付け
  - 冷却水ホース交換と繋ぎ込み
  - 電極ほか各部品の研磨と清掃
  - 新品高圧ケーブルに交換
- メンテナンス時の写真を Fig. 9 に示す。

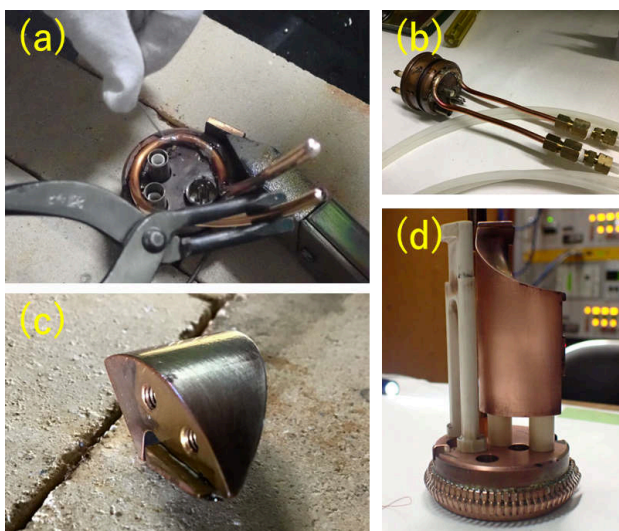


Figure 9: Maintenance of spiral inflector. (a) Soldering of copper pipe, (b) whole of head-block, (c) upper-electrode, (d) lower-electrode and stand for mounting electrode.

#### 4.2 温度モニターへの追加

AVF の静電デフレクターについては、ビーム損失によるセプタムの溶融を防ぐため、熱電対を取り付ける改造

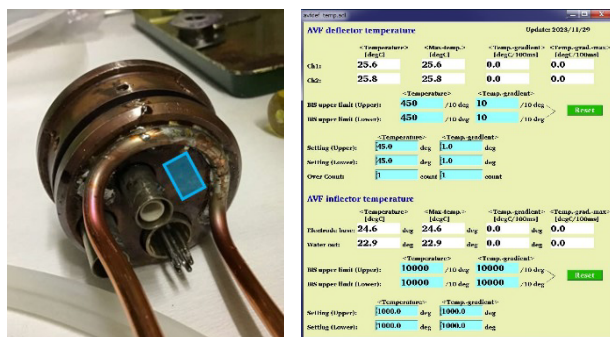


Figure 10: (left) Mounting position of thermocouple on head-block, (right) temperature monitoring screen.

を既に行っている[14]。そこで、インフレクターにも新たに熱電対を取り付けて温度監視を行うことにした。既に運用中のデフレクター用 PLC 温度モニターモジュールにインフレクター熱電対の繋ぎ込みと設定を行い、AVF 静電チャンネル一覧として常時温度モニターに追加した。Figure 10 に熱電対を取り付けた位置と温度モニター画面を示す。

## 5. まとめ

この 1 年間の AVF サイクロトロン総運転時間は 3092 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] S. Fukuzawa *et al.*, “Status report on the operation of RIKEN AVF cyclotron”, Proceedings of the 18th PASJ Meeting, WEP052, 2021, pp. 760-764.