

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

濱仲誠^{#,B)}, 須田健嗣^{A)}, 後藤彰^{A)}, 大西純一^{A)}, 大城幸光^{C)}, 福澤聖児^{B)}, 石川盛^{B)}, 小林清志^{B)}, 小山亮^{B)}, 仲村武志^{B)}, 西田稔^{B)}, 西村誠^{B)}, 柴田順翔^{B)}, 月居憲俊^{B)}, 矢富一慎^{B)}, 金子健太^{B)}, 小山田和幸^{B)}, 田村匡史^{B)}, 遊佐陽^{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)}, 加瀬昌之^{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)}, 長瀬誠^{A)}, 長友傑^{A)}, 中川孝秀^{A)}, 奥野広樹^{A)}, 大関和貴^{A)}, 坂本成彦^{A)}, 内山暁仁^{A)}, 渡部秀^{A)}, 渡邊環^{A)}, 渡邊裕^{A)}, 山田一成^{A)}, 小高康熙^{C)}
Makoto Hamanaka^{#,B)}, Kenji Suda^{A)}, Akira Goto^{A)}, Jun-ichi Ohnishi^{A)}, Yukimitsu Oshiro^{C)}, Seiji Fukuzawa^{B)}, Shigeru Ishikawa^{B)}, Ryo Koyama^{B)}, Takeshi Nakamura^{B)}, Minoru Nishida^{B)}, Makoto Nishimura^{B)}, Junsho Shibata^{B)}, Noritoshi Tsukiori^{B)}, Kazuyoshi Yadomi^{B)}, Kenta Kaneko^{B)}, Kazuyuki Oyamada^{B)}, Masashi Tamura^{B)}, Akira Yusa^{B)}, Masaki Fujimaki^{A)}, Nobuhisa Fukunishi^{A)}, Hiroo Hasebe^{A)}, Yoshihide Higurashi^{A)}, Hiroshi Imao^{A)}, Masayuki Kase^{A)}, Osamu Kamigaito^{A)}, Masanori Kidera^{A)}, Misaki Komiyama^{A)}, Keiko Kumagai^{A)}, Takeshi Maie^{A)}, Makoto Nagase^{A)}, Takashi Nagatomo^{A)}, Takahide Nakagawa^{A)}, Hiroki Okuno^{A)}, Kazutaka Ozeki^{A)}, Naruhiko Sakamoto^{A)}, Akito Uchiyama^{A)}, Shu Watanabe^{A)}, Tamaki Watanabe^{A)}, Yutaka Watanabe^{A)}, Kazunari Yamada^{A)}, 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 2018-July 2019) aiming at increasing performance 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、K 値が 70 MeV であり、リングサイクロトロン(RRC)の入射器として1989年に導入されて以来30年間稼働し続けている。1991年からは単独の加速器として低エネルギーの重イオンビームも直接実験に供給している。以下、前者を「RRC 入射モード」、後者を「AVF 単独モード」と呼ぶ。RRC 入射モードでは、AVF で水素(H₂)から Rb までを $E = 3.78 \sim 7$ MeV/u に加速し、RRC で更に 65 ~ 135 MeV/u まで高める。ビームの供給先は3通りあり、それぞれ 1) 旧施設(RARF)の各実験コースへ [AVF-RRC→RARF 実験]、2) 新施設の RI ビームファクトリー(RIBF[1])にビームを輸送し、超伝導リングサイクロトロン(SRC)で更に加速したビームを RIBF 実験コースへ [AVF-RRC-SRC→RIBF 実験]、3) 中間段リングサイクロトロン(IRC)へ輸送して更に加速後、RARF に逆輸送して生物実験コースへ [AVF-RRC-IRC→RARF 実験(生物)]、となっている。Figure 1 に RIBF の全体図を示す。また、これらの加速モードは文献[2]で詳細を報告している。

AVF 単独モードでは、陽子 ($M/Q = 1$) から $^{86}\text{Kr}^{20+}$ ($M/Q = 4.3$) までの多様な核種のイオンを 3.4 ~ 12.5 MeV/u (陽子は 14 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、

SC-ECR、PIS) を使い、偏極重陽子、ガス、金属など、加速するイオンに応じて使い分けている。マシンタイムのスケジュールを組む際、イオン源の開発や準備を考慮しビーム切り替えを短時間で円滑に実施できるように運用している。

本稿ではこの1年間(2018年8月から2019年7月まで)の AVF の運転状況を報告する。2 項では運転実績、3 項ではイオン源の移設計画、4 項では RI 製造ラインにおけるビームエネルギーの測定、5 項では制御機器の移設と更新に関してそれぞれ述べ、6 項でまとめる。

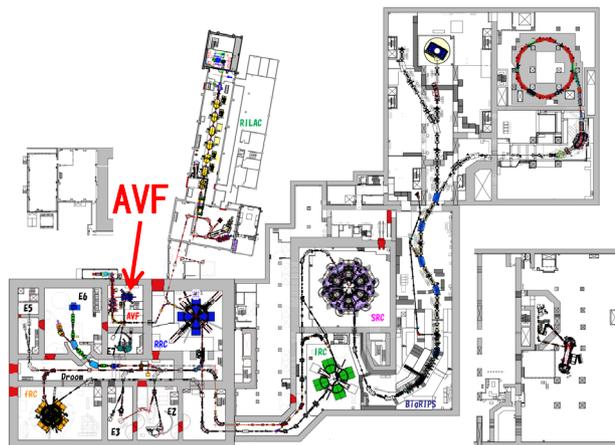


Figure 1: Schematic of RIBF at RIKEN Nishina Center.

[#]hamanaka@riken.jp

2. 運転実績

2.1 加速実績

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. 2 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。

2018 年 8 月から 2019 年 7 月までに加速したものは赤色と青色の○でプロットした。赤が AVF 単独モード、青が RRC 入射モードである。今回初めて加速した粒子は●でプロットし、粒子のリスト内に太字で表記した。対象期間中に RRC 入射モードでは 6 種類のビームを加速した。それらは質量数が 12 から 86、核子当たりのエネルギーが 3.75 から 5.7 MeV/u の範囲に分布している。AVF 単独モードでは 13 種類のビームを加速し、それらは質量数が 1 から 24、核子当たりのエネルギーが 5.0 から 12.5 MeV/u の範囲に分布している。初めて加速したビームは 2 種類で $^{10}\text{B}^{4+}$ (7.0 MeV/u) と $^{24}\text{Mg}^{8+}$ (8.0 MeV/u) であった。

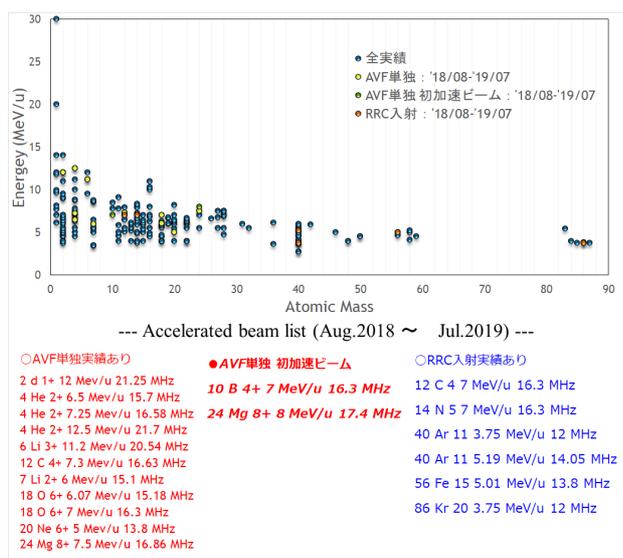


Figure 2: Energy-Mass map of AVF.

2.2 運転時間統計

AVF 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. 3 に示す。

- AVF 調整時間(Tuning of AVF): AVF のメインコイルを励磁してから 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。
- 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。
- 供給時間: ビームスポット調整完了～実験終了までの時間。

4 つの実験コース(Fig. 4 参照)に分け集計:

- 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[3]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。

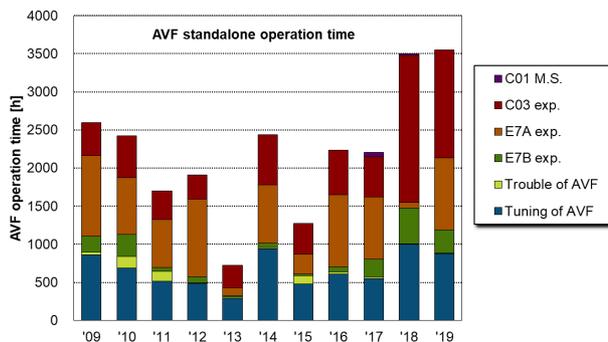


Figure 3: Beam service time of AVF standalone operation.

AVF 単独モードの運転時間は昨年とほぼ同じで、3500 時間を超えた。これは、昨年に引き続き、AVF を入射器として使用しない GARIS-II[4]の実験が行われたことで、AVF 単独実験が組みやすかった事が影響している。調整時間についても昨年と同様である。

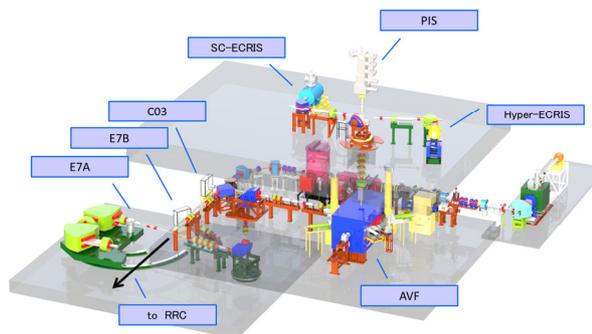


Figure 4: Overview of AVF cyclotron with 3 ion sources, 3 experimental courses, and beam transport line to RRC.

2) RRC 入射モード

この加速モードでは AVF から取り出したビームを二極電磁石 DMC2_3 により 90°偏向させ、RRC コースへ輸送する。以下の定義に従って集計した結果を Fig. 5 に示す。

- 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。
- 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。

2018年8月から2019年7月までの、RRC入射モードとAVF単独モードの両者を合計した運転時間は4130時間となった。昨年と比べてAVF単独モードの時間は増えたが、RRC入射モードの時間が減ったため、合計では昨年より800時間ほど下回った。故障時間の合計は7時間と短く、昨年と同様に好成績であった。その理由は、加速器の負担が少ない条件で一定期間連続運転したことであると考えられる。

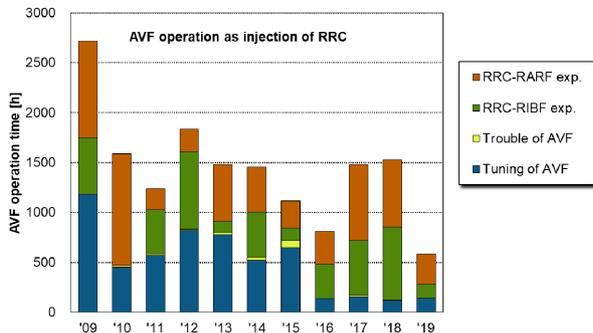


Figure 5: Beam service time of AVF operation as injection of RRC.

2.3 運転中のトラブル

2.2項で集計した運転中のトラブルを下記にまとめる。

- 2018年9月28日、C03のターボ分子ポンプの冷却ファンが故障したため、1時間停止。
- 2018年10月13日、チョッパー回路が故障し修理した為、約5時間停止。
- 2018年11月15日、ビームライン偏向電磁石電源(A-D1)が故障しトランジスタバンクヒューズを交換した為、30分間停止。
- 2018年12月29日、C01付近のロータリーポンプの機能低下による真空悪化により30分間停止。

3. イオン源の移設計画

2000年頃に製造されたSC-ECRイオン源はミラーコイルが超伝導線で製作され(六極磁石は永久磁石)、20K用と4K用の2台のGM冷凍機を備えている。

SC-ECRイオン源は2008年からAVF用のイオン源として運用されてきた(Fig. 4参照)。しかし、その数年後にはGM冷凍機のメーカーによる保守サポートが終了したため、近年は保守が難しい状況になっている。冷凍機を代替機に交換する案が検討されたが、交換費用は高額で、仮に冷凍機を交換したとしても、冷却性能が保証されるためには年に1回のメンテナンスを行う必要があり、ランニングコストも多額となることから現実的ではなかった。2018年3月には冷凍機の冷却能力が低下する兆候が見られたため、同型の冷凍機から主要部品を取り外して交換するコールドメンテナンスを急遽実施している[5]。

こうした事情から別の案を模索していたところ、2016年度より理研リニアック(RILAC)の増強計画が始まった。同計画には28GHz超伝導ECRイオン源の新設が含まれていたため[6]、それまでRILACで使われていた18GHz ECRイオン源[7]の処遇が検討された。18GHz ECRイオン源は超重元素(ニホニウム)の探査にも使用

された古いイオン源であるが、 $^{40}\text{Ar}^{11+}$ を100 μA 生成するなど未だかなり優れた性能を有しており、また微調整が困難な超伝導磁石とは異なり、常伝導のミラーコイルは微調整が安易でオペレーターでもイオン源の急な変動に対応できる利点を備えている。そこで、18GHz ECRイオン源をAVFに導入することが決定された。SC-ECRイオン源の撤去、および18GHz ECRイオン源の移設作業は、今年の夏期メンテナンス期間に実施する予定である。Table 1に18GHz ECRイオン源の性能を、またFig. 6に同イオン源の全体像を示す。

Table 1: Main Parameters of RIKEN 18 GHz ECR Ion Source

Mirror coil Max. field strength	1.33 T
Mirror ratio	2.82
Hexapole magnet Inner diameter	80 mm
Hexapole magnet Outer diameter	186 mm
Hexapole magnet Length	230 mm
Hexapole magnet Material	Nd-B-Fe
Hexapole magnet Max. field strength	1.3 T
Microwave Frequency	18 GHz
Microwave Power	0.6 kW

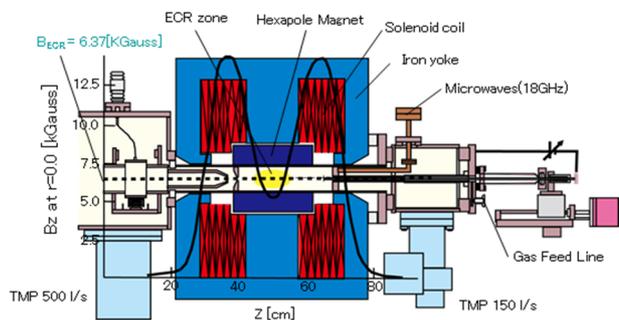


Figure 6: A cross-sectional view of the RIKEN 18 GHz ECR ion source.

4. ビームエネルギーの常時測定

AVFからC03コースへ供給するビームはRI製造に使われているが、RI製造では生成反応に依って最適なエネルギーが定められている。要求されたエネルギーを満たすビームを供給していることを常時確認するため、2015年度から静電ピックアップシステムによるエネルギー測定を実施している[8-10]。Figure 7にAVFサイクロトロンとビームラインの概略を示す。PPは静電ピックアップ(Phase pickup probe)を、SCはシンチレーションモニター(Scintillation monitor)をそれぞれ表している。静電ピックアップシステムは、ビームが静電ピックアップ内部を通過することによって誘起された信号波形を自動的

に処理し、2 台のモニターの時間差からビームの飛行時間 (TOF) を求め、予め計測したモニター間の距離 (Fig. 7 参照) を用いてビームのエネルギーを算出する。従来は、オペレーターがオシロスコープに表示された信号波形から TOF を読み取りエネルギーを計算してきたが [9]、現在はデータが自動処理され、2 秒毎に Web サーバーにアップロードされるようになっている。なお、当初は C03 コースにおいて PP と SC を併用していたが、PP のみでの運用に目途がついたため、現在は同コースの SC は取り外されており、RRC への入射ラインでのみ SC を使用している。

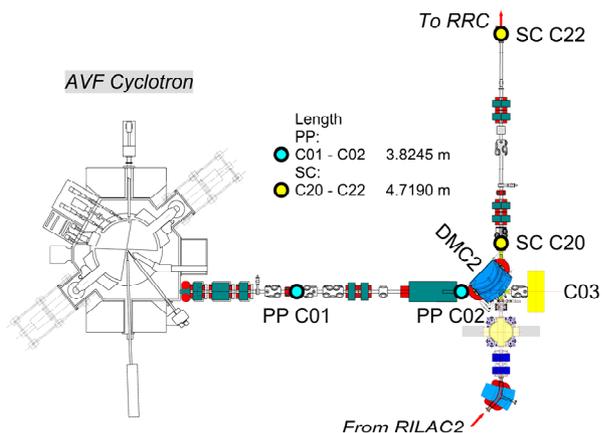


Figure 7: Schematic view of the AVF cyclotron and the beam transport line showing the locations of the phase probe monitors and the scintillation monitors.

この一年間に得られたエネルギーの測定結果を、AVF の設計値に基づいて計算したエネルギーと合わせて Fig. 8 に示した。特に、 ${}^7\text{Li}$ (6 MeV/u) と α (12.5 MeV/u) については、実測エネルギーが設計エネルギーよりそれぞれ 3%、と 2% 高かったが、概ね許容範囲内に収まったと言える。

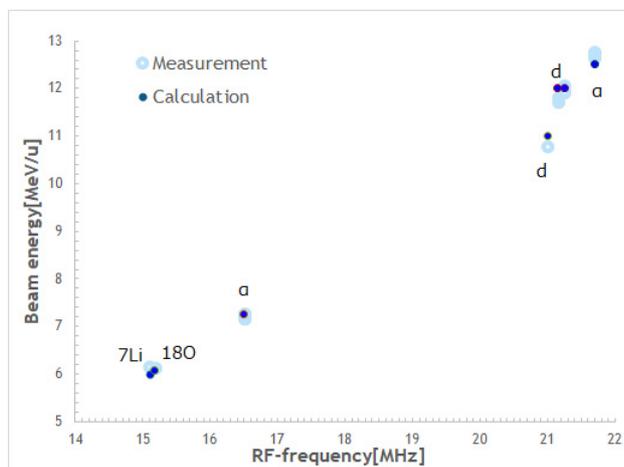


Figure 8: Beam energies obtained by TOF measurements compared with the design values of the AVF cyclotron.

5. 改善 (制御機器の放射線対策と更新)

AVF サイクロトロンによって加速されるビームの強度が増加するにつれて、制御装置が遠隔制御にตอบสนองしなくなるなどのトラブルが発生する頻度が高くなってきた [11]。最も頻度が高かったのは、C03 コースに 12 MeV/u の重陽子ビームを強度 4 μA で供給した場合であり、4 時間に 3 回発生した。重陽子の加速時に頻繁に発生することから、問題の原因は放射線であり、特にビームの供給中に AVF サイクロトロンとそのビーム輸送ラインから発生する中性子の影響であると推測された。そのため、TL バッジを使用して制御装置の設置場所周辺の中性子線量を測定した。測定結果を Fig. 9 に示す。

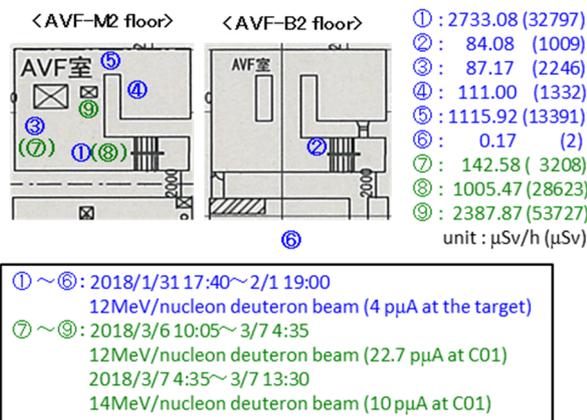


Figure 9: Neutron dose measurement. The AVF-B2 floor is one floor below the AVF-M2 floor. The data written on the right side shows the average dose (integrated dose).

制御装置である N-DIM は、その一部が最も放射線量が高い場所である Fig. 9 の 1 番付近に配置されていたため、影響を強く受けていたことが判明した。トラブルの頻度を減らすには、放射線量が低い 3 番付近に N-DIM を移設する必要があった。

ところで、AVF とその実験コースの制御には、1989 年以來 DIM が使われてきた。2012 年には機能を向上させた N-DIM が利用可能となり、RILAC2 のビームラインの制御には用いられたが、AVF には導入が進んでいなかった。現在、AVF のビームインターロックシステム (AVF-BIS) の整備を進めているところであるが、AVF-BIS では入力される各種インターロック信号に基づいてチョッパーやファラデーカップを制御し、ビームを停止させる。このファラデーカップの制御には N-DIM が必須であるため、DIM からの置き換えが必要となっていた。

放射線によるトラブルの頻度を減らし、かつ AVF-BIS の整備を進めるため、2018 年の夏季メンテナンス中に AVF 本体室中二階において N-DIM の移設と設定作業を行った。具体的な内容は以下の通りである。

1. N-DIM を搭載した 19 インチラックの 1 台を、Fig. 9 の 1 番付近から 3 番付近に移動した。
2. 1 番付近の別のラックに取り付けられていた複数台の N-DIM を、3 番付近の既存のラックに移動させた。
3. 3 番付近の既存ラックに新しい N-DIM を取り付け、中二階の 3 番、ならびに AVF 本体が設置された上階に

あったDIMから信号および制御ケーブルを取り外して接続し、設定を行った。

これらの作業で移設、または設定された N-DIM は 28 台に上った。現在、それらは RILAC2 のビームライン上のビーム診断装置と、AVF 下流のビームライン上のビーム診断装置と真空システムを制御している。中二階以上にある N-DIM の更新は約 60 %まで進んだが、今後も更新を進めていく予定である。

N-DIM を移設した効果は、後のビーム加速において確認された。2018 年 12 月から 1 か月以上の間、C03 コースに 12 MeV/u の重陽子ビームを 1.5 μA の強度で供給したが、制御装置のトラブルは発生しなかった。移設により一定の効果があったものと考えられる。

6. まとめ

この 1 年間の AVF サイクロトロン の運転状況は順調であり、合計運転時間は 4130 時間であった。

参考文献

- [1] Y. Yano, NIM B261, 2007, pp. 1009-1013.
- [2] N. Tsukiori *et al.*, “Status report of the operation of RIBF ring cyclotrons”, Proceedings of the 16th PASJ Meeting, FSPH002, 2019.
- [3] Y. Yanagisawa *et al.*, NIM A539, 2005, pp. 74-83.
- [4] 加治大哉 *et al.*, “Gas-filled Recoil Ion Separator GARIS-II”, 放射化学, 第 34 号, 2016, pp. 12-23;
http://www.radiochem.org/pdf/rad_nw34.pdf
- [5] K. Kobayashi *et al.*, “Status report of the operation of the RIKEN AVF cyclotron”, Proceedings of the 15th PASJ Meeting, FSP008, 2018, pp. 1293-1297.
- [6] M. Tamura *et al.*, “Present status of RILAC”, Proceedings of the 16th PASJ Meeting, FSP1010, 2019.
- [7] T. Nakagawa *et al.*, Rev. Sci. Instrum., 73, 513, 2002.
- [8] T. Watanabe *et al.*, “Development of beam energy measurement system by using electrostatic pickups at the RIBF”, Proceedings of the 12th PASJ Meeting, THP079, 2015, pp. 1198-1201.
- [9] S. Ishikawa *et al.*, “Status report on operation of RIKEN AVF cyclotron”, Proceedings of the 13th PASJ Meeting, FSP009, 2016, pp. 1344-1347.
- [10] R. Koyama *et al.*, “Status report on operation of RIKEN AVF cyclotron”, Proceedings of the 14th PASJ Meeting, FSP027, 2017, pp 1390-1394.
- [11] M. Komiyama *et al.*, “Update of the control units around the AVF cyclotron”, RIKEN Accel. Prog. Rep. 2018, to be published.