

理研 AVF サイクロトロン運転の現状報告

STATUS REPORT ON OPERATION OF RIKEN AVF CYCLOTRON

石川盛^{#,A)}, 小林清志^{A)}, 小山亮^{A)}, 柴田順翔^{A)}, 月居憲俊^{A)}, 仲村武志^{A)}, 西田稔^{A)}, 西村誠^{A)}, 濱仲誠^{A)}, 福沢聖児^{A)}, 矢富一慎^{A)}, 大関和貴^{B)}, 内山暁仁^{B)}, 大西純一^{B)}, 奥野広樹^{B)}, 加瀬昌之^{B)}, 上垣外修一^{B)}, 熊谷桂子^{B)}, 込山美咲^{B)}, 坂本成彦^{B)}, 須田健嗣^{B)}, 中川孝秀^{B)}, 長瀬誠^{B)}, 長友傑^{B)}, 福西暢尚^{B)}, 藤巻正樹^{B)}, 真家武士^{B)}, 山田一成^{B)}, 渡邊環^{B)}, 渡邊裕^{B)}, 大城幸光^{C)}, 小高康熙^{C)}, 山家捷一^{C)}
Shigeru Ishikawa^{#,A)}, Kiyoshi Kobayashi^{A)}, Ryo Koyama^{A)}, Junsho Shibata^{A)}, Noritoshi Tsukiori^{A)}, Takeshi Nakamura^{A)}, Minoru Nishida^{A)}, Makoto Nishimura^{A)}, Makoto Hamanaka^{A)}, Seiji Fukuzawa^{A)}, Kazuyoshi Yadomi^{A)}, Kazutaka Ozeki^{B)}, Akito Uchiyama^{B)}, Jun-ichi Ohnishi^{B)}, Hiroki Okuno^{B)}, Masayuki Kase^{B)}, Keiko Kumagai^{B)}, Osamu Kamigaito^{B)}, Misaki Komiyama^{B)}, Naruhiko Sakamoto^{B)}, Kenji Suda^{B)}, Takahide Nakagawa^{B)}, Makoto Nagase^{B)}, Takashi Nagatomo^{B)}, Nobuhisa Fukunishi^{B)}, Masaki Fujimaki^{B)}, Takeshi Maie^{B)}, Kazunari Yamada^{B)}, Tamaki Watanabe^{B)}, Yutaka Watanabe^{B)}, Yukimitsu Ohshiro^{C)}, Yasuteru Kotaka^{C)}, Shoichi Yamaka^{C)}
^{A)} SHI Accelerator Service Ltd.
^{B)} Nishina Center, RIKEN
^{C)} Center for Nuclear Study, the University of Tokyo

Abstract

The operation of the RIKEN AVF cyclotron was started in 1989. Since then, it has been operated not only as an injector for the RIKEN ring cyclotron but also as an independent supplier of various ion beams. In this report, we describe both the operational status and the improvement work for increasing accelerating ability of the AVF cyclotron performed in this past year (August 2015-July 2016).

1. はじめに

理研 AVF サイクロトロン(AVF)は、K 値が 70 MeV であり、理研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、27 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 ~ 7 MeV/u に加速し、RRC でさらに 65 ~ 135 MeV/u まで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[1][2])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)で加速している。AVF 単独モードでは、陽子(M/Q=1)から ⁸⁶Kr²⁰⁺(M/Q=4.3)までの多様な核種のイオンを 3.41 ~ 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、S.C-ECR、PIS)があるが、それぞれ金属イオン、ガス、偏極重陽子と、加速する粒子によって使い分けている。マシンタイムのスケジュールを、イオン源の開発や準備期間を考慮して組むことにより、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。ここでは 2015 年 8 月から 2016 年 7 月までの AVF 運転状況を報告する。

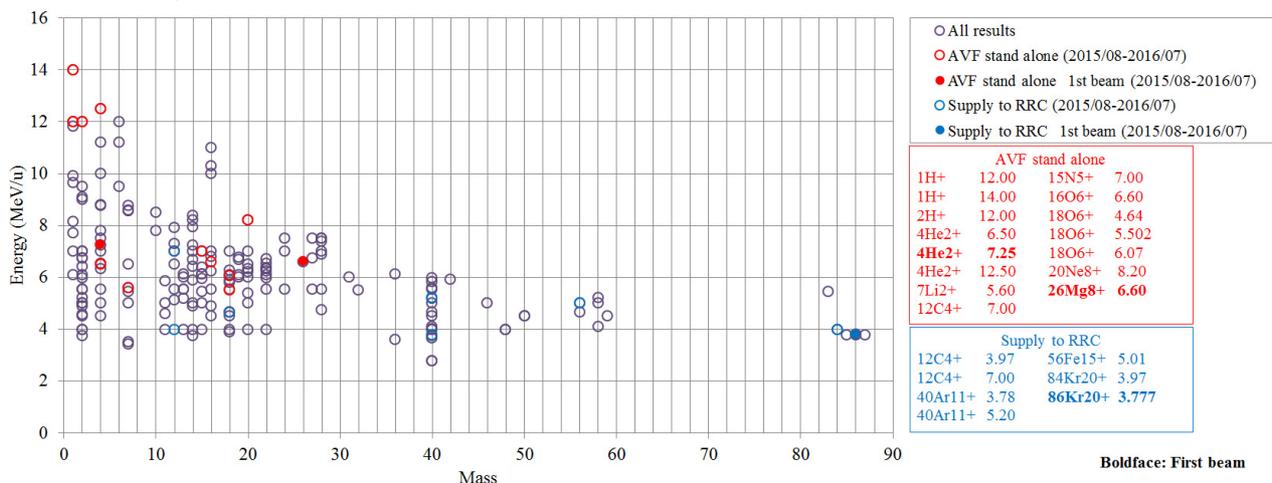


Figure 1: Energy-Mass map of AVF.

sishikawa@riken.jp

2. 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 Figure 1 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。

2015 年 8 月から 2016 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 7 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 3.97 から 7.00 MeV/u の範囲に分布している。初めて加速したビームは 1 種類で $^{86}\text{Kr}^{20+}$, 3.777 MeV/u であった。AVF 単独モードでは 15 種類のビームを加速し、それらは質量数が 1 から 26、核子当たりのエネルギーが 4.64 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 $^4\text{He}^{2+}$, 7.25 MeV/u と $^{26}\text{Mg}^{8+}$, 6.60 MeV/u であった。

3. 運転時間

AVF の運転時間を調整時間、供給時間、調整・供給中に発生した故障への対応時間に分け、供給時間に関しては実験コースごとに報告する。まずはそれぞれの加速モードとビームコースについて説明する。

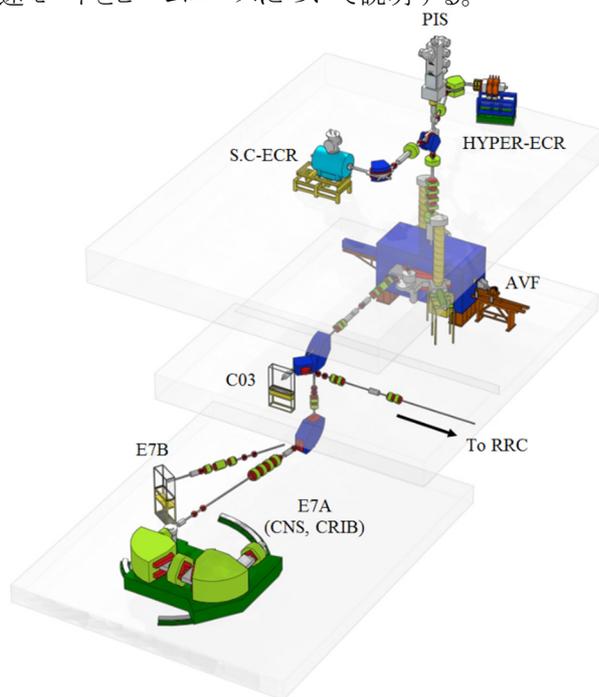


Figure 2: Overview of AVF cyclotron with ion sources and BT lines.

RRC 入射モードの場合、AVF から取り出されたビームは C21 コースに曲げられ RRC へ送られる。RRC で加速し取り出されたビームは各実験室へ供給もしくは SRC で加速され RIBF の実験に用いられる。

AVF 単独モードの場合は取り出されたビームは Figure 2 で示す通り、次の 3 つのコースに送られる。1 つめはビーム取り出しから直進したところにある、RI 製造

の為に増設された C03 コースである。供給するビームは、以前は 14 MeV の陽子が主であったが最近では 12 MeV/u の重陽子の供給が増えてきている。

2 つめは AVF から取り出された後、垂直方向に曲げられ再度水平方向に曲げられる E7A コースである。このコースは東京大学原子核科学研究センター (CNS) が管理し、CRIB[3]を用いて原子核実験が行われている。

3 つめは E7A と同じ水平面にある E7B コースでここは主に学生実験や産業連携に利用される。

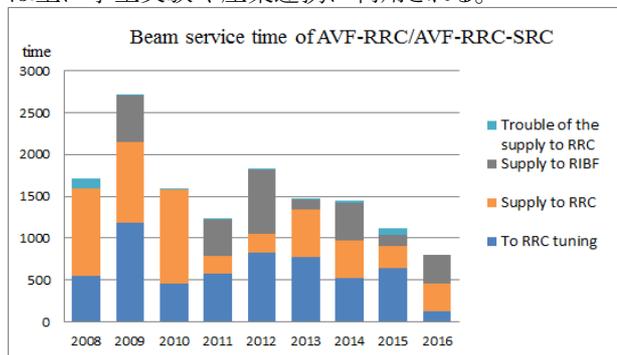


Figure 3: Beam service time of AVF-RRC/AVF-RRC-SRC.

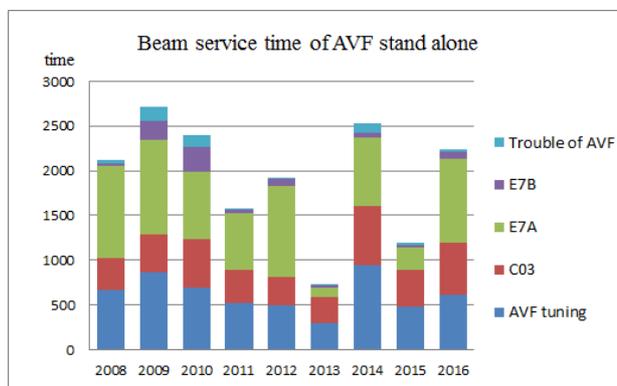


Figure 4: Beam service time of AVF stand alone.

Figure 3 に RRC 入射モードの運転時間、Figure 4 に AVF 単独モードの運転時間を示す。図中の調整時間は、加速器の準備開始時刻からターゲット上のスポットの調整完了時刻までの時間を積算したものである。また C03、E7A、E7B、RRC、RIBF は各コースのユーザーにビームを供給した時間でスポット調整完了時刻から実験終了時刻までの積算である。データ期間は 2008 年 8 月から 2016 年 7 月末までとし、1 年毎に示す。両図の横軸は、前年の 8 月からその年の 7 月までの期間を表している[4]。

2016 年の RRC 入射モードでの AVF 調整時間(青色)は 133 時間だった。尚、RRC 入射モード時、AVF の故障対応時間(水色)はなかった。各実験コースおよび RIBF への供給時間は各々 329 時間(オレンジ)、349 時間(灰色)であった。合計の運転時間は 811 時間で前年の 1036 時間から減少した。これは AVF 以外の加速器 (RILAC[5][6]、RILAC2[7])を入射器とした RRC 運転と RIBF への供給が増加した為である。

2016 年における AVF 単独モードでの AVF 調整時

間(青色)は 611 時間、故障対応時間(水色)は 27 時間で C03、E7A および E7B への供給時間は各々 585 時間(赤色)、943 時間(緑色)、67 時間(紫色)であった。3つのコースの中では E7A が最も利用時間が多かった。合計の運転時間は 2207 時間で前年の 1169 時間と比べ増加した。尚、故障により中止または延期となったユーザーサービスはなかったが、実験時間を延長するユーザーサービスを C03 コースで実施した。

4. 不具合・故障

不具合・故障は、調整あるいは供給中のいずれかに起こった事を対象とした。不具合・故障の割合は RRC 入射モードで 0%、AVF 単独モードで 0.98%、両者を合計した場合の割合は 0.76%であった。

2015 年 8 月 30 日に AVF 取り出し軌道を変える装置の静電デフレクターにおいて暗電流が 0.35 mA 流れる症状が発生した。電源の設定で 0.35 mA 以上電極側に流れると定電流モードになり電圧が設定値に印加できなくなる。0.50 mA で定電流モードになるよう電源の設定を変えて焼き出しを行うが 24 時間経過しても症状が変わらない為 2015 年 8 月 31 日に静電デフレクター電極を大気側に引き出し高圧電極とセプタム電極の清掃を実施した。

2015 年 9 月 2 日に AVF 高周波加速空洞で真空リークが発生した。AVF 内の真空度が 1.2×10^{-5} Pa から 5.0×10^{-3} Pa まで悪化する。原因は RF#2 加速空洞の絶縁碍子とカップリングターミナルの間にある Oリングの劣化だった。RF カップリングターミナルの写真を Figure 5 に示す。

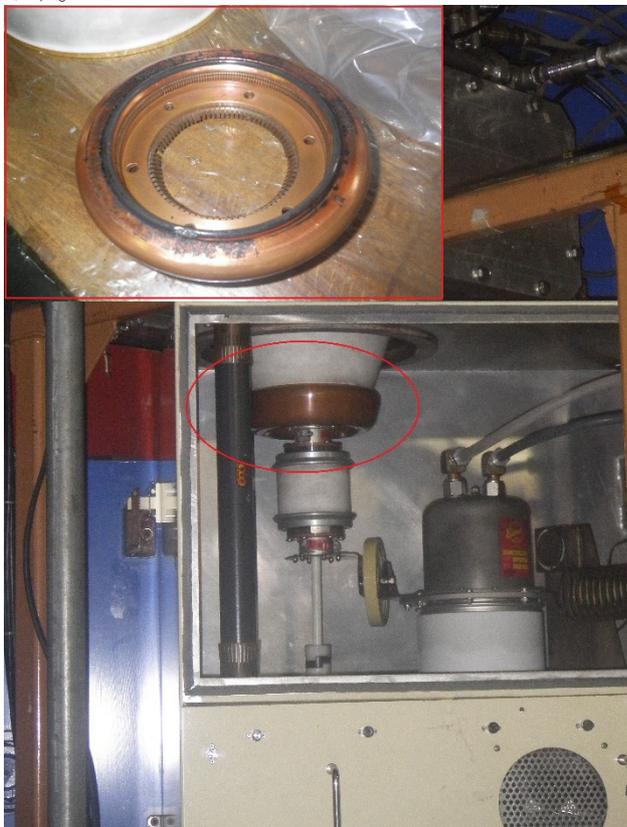


Figure 5: RF-Coupling terminal.

カップリングターミナルの清掃とOリングの交換を行い 4 時間 40 分後に真空引きが完了となる。しかし 30 分後に AVF 高周波増幅器プレート電源において異常停止が発生。原因は冷却用 FAN 劣化固着によるヒューズ切れだった。電源の冷却用 FAN の交換を実施しビーム再調整を行い、真空リーク発生から 8 時間 30 分後に照射を再開した。

5. 測定

2015 年度から C03 コースでの RI 製造のための照射において、シンチレーションモニターシステムおよび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]。

Figure 6 に AVF サイクロトロンとビームラインの概略を示す。SC はシンチレーションモニター (Scintillation monitor) を、PP は静電ピックアップ (Phase Probe) を表している。

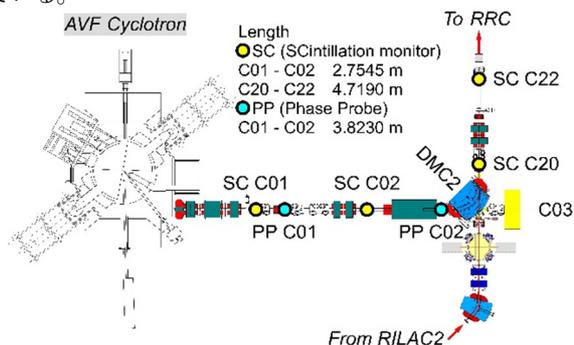


Figure 6: Schematic view of the AVF cyclotron and the beam transport line showing the positions of the scintillation monitors and the phase probe monitors.

シンチレーションモニターシステムはビームシグナルとRFクロックとのタイムラグを、Time-to-digital converter (TDC) によってデジタル化し、そのヒストグラムを取る事により、縦方向のビームプロファイルを得ている。

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シグナルを、オシロスコープに表示している。

両システムとも、2台のモニターを用いて、ビームの飛行時間 (TOF) を測定し、モニター間の距離 (Figure 6 参照) を元に、ビームのエネルギーを求めている。

SCでの測定は、アッテネーターとスリットでビームを絞り、LabVIEWで作成された測定プログラムでエネルギー値を取得している。PPでの測定はビームを照射中と同じ強度にし、オシロスコープに表示されたシグナルより読み取ったTOFを元にエネルギー値を計算している。エネルギーは、照射時間中にあらかじめスケジュールされた時間にオペレーターが測定し、ユーザーへ報告している。

6. 改良

各イオン源直後のファラデーカップの駆動とAVF取り出し直後のファラデーカップのビーム電流読み出しを従来のCIM/DIM制御からN-DIM[9]制御に更新した。DIMとはDevice Interface Moduleの略であり、約30年前

に理研が独自に開発したCAMACモジュールであるCommunication Interface Module (CIM)と光ケーブルで接続することにより各デバイスを制御するコントローラーである。また今回更新したN-DIMとはNetwork Device Interface Moduleの略であり、同じく理研が独自に開発したイーサネットに対応したモジュールである。

N-DIMは、従来のDIMと異なり、直接ネットワークに接続することによって主にビーム診断機器などを制御できる。ファラデーカップモニターからのビーム電流はイオン源単体で調整する場合は主にelectronic picoammeterをアナログメーターで計測し、AVFでの調整時はlog scale amplifierを通してデジタル表示で計測している。CIM/DIM制御からN-DIM制御に更新するにあたり新たに切り替え器を設けることになった。

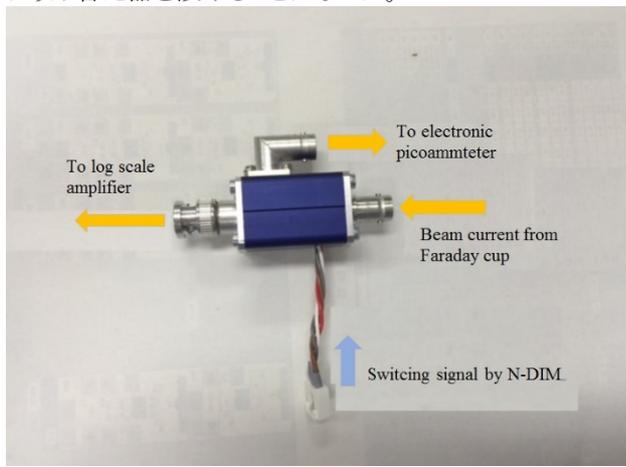


Figure 7: Beam current switcher.

切り替え器はN-DIMからの信号によりファラデーカップモニターからのビーム電流の表示をelectronic picoammeterかlog scale amplifierに切り換えることができる。Figure 7に切り替え器を示す。尚、HYPER-ECRイオン源のスペクトルを測定するときはアナログメーターの出力を使用している。

7. まとめ

2015年8月から2016年7月におけるAVFサイクロトロン
の運転状況はおおむね順調であり、調整時間を含めた
RRC入射モードとAVF単独モードの合計運転は3020時間
であった。単独利用、RRCへの入射、更にはRIBFへ
と精力的にビームを供給した。

参考文献

- [1] Y. Yano, The RIKEN RI beam factory project: A status report, Nucl. Instrum. & Methods B 261(2007)1009-1013.
- [2] K. Yadomi *et al.*, Status report of the operation of the RIBF ring cyclotrons, in this proceedings.
- [3] Y. Yanagisawa *et al.*, Nucl.Instrum.Meth. Phys. Res., Sect. A 539(2005)74-83.
- [4] Y. Kotaka *et al.*, Status report of the operation of the RIKEN AVF cyclotron, Proceedings of the 12th PASJ Meeting in Japan, FSP011 (2015).
- [5] M. Odera *et al.*, Variable frequency heavy-ion linac, RILAC: I. Design, construction and operation of its accelerating structure, Nucl. Instrum. & Methods 227 (1984) 187-195.

- [6] H. Yamauchi *et al.*, Present Status of RILAC, in this proceedings.
- [7] 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.
- [8] T. WATANABE *et al.* DEVELOPMENT OF BEAM ENERGY MEASUREMENT SYSTEM BY USING ELECTROSTATIC PICKUPS AT THE RIBF, Proceedings of the 12th PASJ Meeting in Japan, THP079 (2015).
- [9] M. Komiyama *et al.*, Control system for RIKEN RI-BEAM FACTORY. Proceedings of the 4th PASJ Meeting in Japan, WP72 (2007).