

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

小山亮^{#,B)}, 須田健嗣^{A)}, 後藤彰^{A)}, 大西純一^{A)}, 大城幸光^{C)}, 渡邊環^{A)}, 福澤聖児^{B)}, 濱仲誠^{B)}, 石川盛^{B)},
小林清志^{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)}, 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)}, 渡邊裕^{A)}, 山田一成^{A)}, 小高康熙^{C)}

Ryo Koyama^{#,B)}, Kenji Suda^{A)}, Akira Goto^{A)}, Jun-ichi Ohnishi^{A)}, Yukimitsu Oshiro^{A)}, Tamaki Watanabe^{A)},
Seiji Fukuzawa^{B)}, Makoto Hamanaka^{B)}, Shigeru Ishikawa^{B)}, Kiyoshi Kobayashi^{B)}, Takeshi Nakamura^{B)},
Minoru Nishida^{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)}, 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)}, Yutaka Watanabe^{A)}, Kazunari Yamada^{A)}, Yasuteru Kotaka^{C)}

^{A)} RIKEN Nishina Center, ^{B)} SHI Accelerator Service Ltd., ^{C)} Center for Nuclear Study, the 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 2016-July 2017) aiming at increasing accelerating ability of the AVF cyclotron.

1. はじめに

理研仁科センターの 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 28 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 までで $E = 3.78 \sim 7$ MeV/u に加速し、RRC でさらに 65 ~ 135 MeV/u まで加速する。RRC で加速されたビームは 3 通りの供給先がある: 1)RI ビームファクトリー(RIBF[1])旧施設(RARF)の各実験コースへの供給, 2)RIBF の超伝導リングサイクロトロン(SRC)へ輸送して更に加速し RIBF 実験コースへの供給、および 3)RIBF の中間段リングサイクロトロン(IRC)へ輸送して更に加速した後、RARF に逆輸送して生物実験コースへの供給、である。Figure 1 に RIBF の全体図を示す。また、これらの加速モードについては文献[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 ⁸⁶Kr²⁰⁺($M/Q = 4.3$)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)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。

[#]rkoyama@riken.jp

本稿ではこの 1 年間(2016 年 8 月から 2017 年 7 月まで)の AVF の運転状況を報告する。具体的には 2 項で加速実績と運転統計を含む運転実績を、3 項でエネルギー等の測定データを、4 項でイオン源、エネルギーアップグレード計画を含む開発事項を、5 項ではこれに関連して実施した RF 系のメンテナンスを、報告し、6 項でまとめとする。

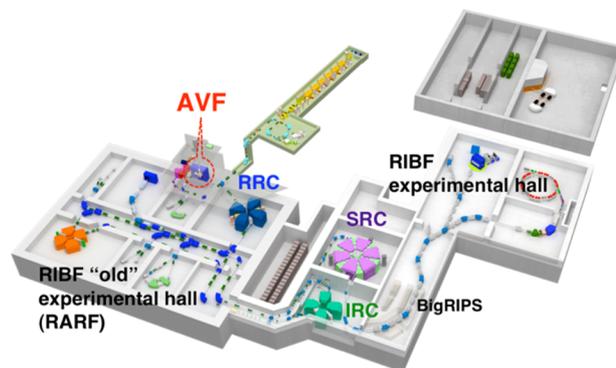


Figure 1: Schematic layout of RIBF at RIKEN Nishina Center.

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 Figure 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。この 1 年間で加速したビームについては RRC 入射モード(Supply

to RRC)、AVF 単独モード(AVF stand-alone)、およびそれぞれで初めて加速したビーム(1st beam)を区別してプロットすると共に下段にそのリストも示した。特筆すべき初加速ビームは AVF 単独モードにおける p 20 MeV と 30 MeV、および α 7.18 MeV/u であり、それぞれ 4-2 項エネルギーアップグレード、および 3-1 項実測エネルギーで述べる。

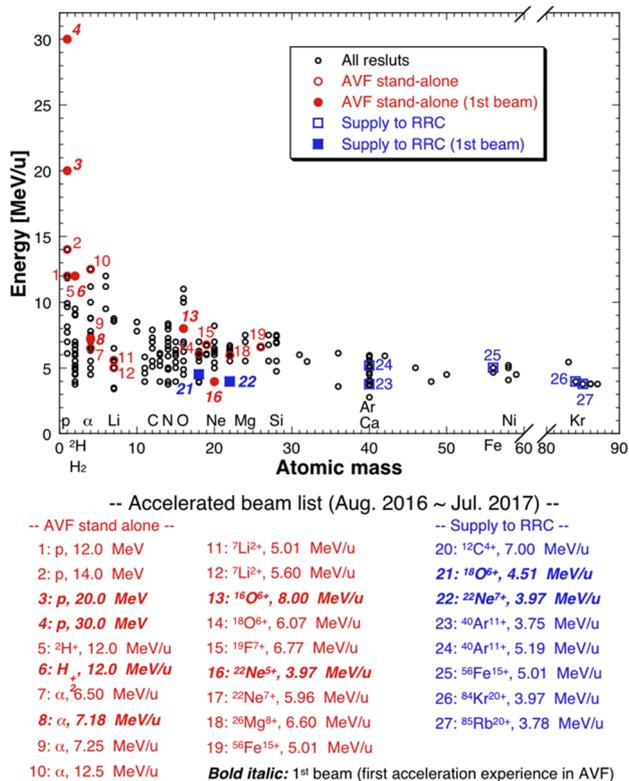


Figure 2: Energy-mass map of AVF.

2-2. 運転時間統計

AVF 運転時間を RRC 入射モードと AVF 単独モードに大別し、それぞれで AVF の調整時間、実験コース別供給時間、供給中の故障対応時間に分けて集計した。

1) RRC 入射モード

このモードでは Figure 3 に示した通り、AVF から取り出したビームを二極電磁石 DMC2 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 Figure 4 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。

例年よりも AVF を入射器とした RARF および RIBF 実験が多かったのが特徴である。なお、2016 年から AVF の調整時間が 1/3 以下に減っているが、これは 2015 年までは AVF と RRC 両者の調整が完了するまでの時間を調整時間として集計していたためである。

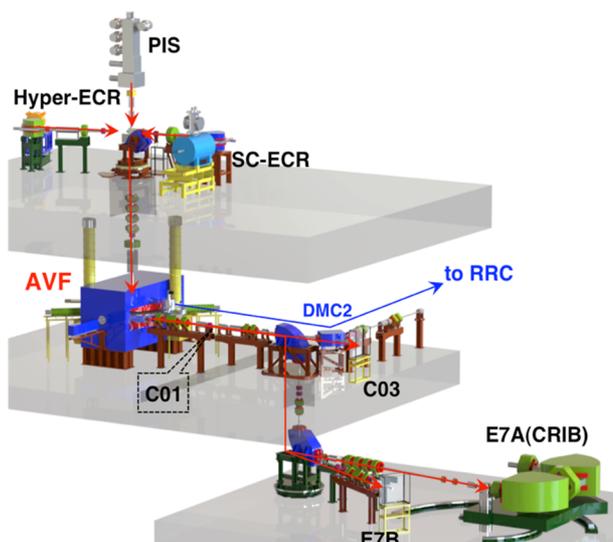


Figure 3: Overview of AVF cyclotron with 3 ion sources, 3 experimental courses, and beam transport line to RRC.

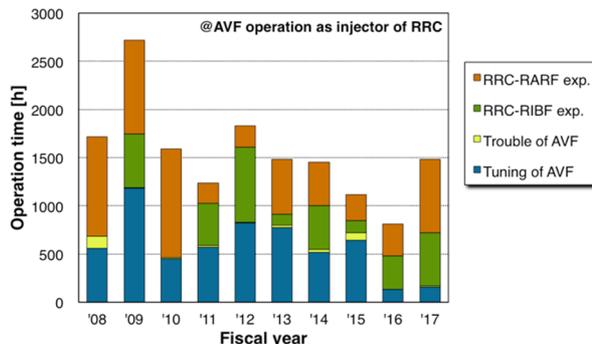


Figure 4: Beam service time of AVF operation as injector of RRC.

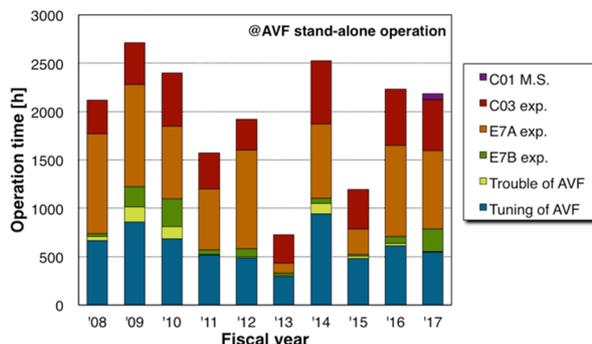


Figure 5: Beam service time of AVF stand-alone operation.

2) AVF 単独モード

このモードにおいて以下の定義に従って集計した結果を Figure 5 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 取出し調整を経てスポット調整が完了するまでの時間。

- 供給時間: スポット調整が完了してから実験が終了するまでの時間。但し以下 4 コースに分けて集計した:

- C01 M.S.: AVF 取出し直後のファラデーカップ。マシINSTAディ(M.S.)時に利用。

-C03 exp.:RI 製造用コース。

-E7A exp.: 東京大学原子核科学研究センター (CNS) が管理し、CRIB[3]を用いた原子核実験、および産業連携実験が行われているコース。

-E7B exp.:RI 製造、産業連携実験、および東京大学学生実験用コース。

・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。

このモードの全運転時間は昨年とほぼ同等であるが、AVF のエネルギーアップグレード計画に伴うマシンスタディが多かった(4-2 項参照)。また、RILAC2 を入射器とした RIBF 実験[2]との兼ね合いにより、本来は C03 で行いたい実験を E7B で代替実施したケースが数件あった。

RRC 入射モード、AVF 単独モード両者を合わせた合計運転時間は昨年の 3020 時間を上回り、3650 時間であった。トラブル等で供給を中断した時間は合計 16 時間で昨年の 28 時間と比べても更に好成績であった。

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のうち特筆すべきものをまとめる。

・2016年9月7日:7 MeV/u $^{12}\text{C}^{4+}$ の加速調整当初に、イオンを取り違えて誤って H_3^+ を加速した。AVF のメインコイルの値を実績値より 15A 高くしないとビームがうまく回らない、取出しビームを炭素膜で荷電変換しても荷電分布が見られない、ことなどから異常に気が付いた。その後イオン源のスペクトルでも異常が確認され、イオン源の高周波を 30 W と低め、かつイオン化ガス CH_4 を多めに入れると H_3^+ の生成が高まる様子が確認された。以降は最初に $^{12}\text{C}^{5+}$ のスペクトルピークを取るイオン源の調整を実施した後に目的の $^{12}\text{C}^{4+}$ に合わせることでイオンの取り違えの防止を行っている。

・2016年10月5日:14.5 MHz、27 kV で運転していた AVF-RF#1 の放電が多発したため、電圧を 1 kV 下げ #2 の電圧、および他パラメータでビームの状態を補償した。後日メンテナンスを実施した(詳細は 5 項参照)

・2017年6月21日:SC-ECR 出口のファラデーカップ I10 の駆動ベローズより真空リークが発生(引き抜くと真空悪化、挿入すると真空改善)。駆動の度にビームの状態が変わるので再調整が必要となっていた。真空リークシーラント(Vacseal)で応急処置した。

・2017年7月6日:AVF インフレクターに高圧がかからなくなった。碍子が汚れており、清掃にて復旧した。

3. 測定データ

3-1. 実測エネルギー

AVF の単独実験では、がん治療用核種 RI 製造のためにもビームを供給している。RI 製造においては最適なエネルギーが定められているので、静電ピックアップを用いたシステム[4]で実験毎に常時エネルギーを実測し、必ず要求エネルギーを満たすように AVF の加速運転を行っている。特に、 α ビームを用いた ^{211}At 製造においては、ビームエネルギーの増加に伴いその収量が増えるが、7.25 MeV/u を超えると人体にとって有害であり、かつ半減期の長い ^{210}Po の生成率が上昇する。従って、7.25 MeV/u $\pm 1\%$ の範囲で加速することが要求されてい

る[5]。しかしながら、従来のパラメータ設定では、7.3 ~ 7.4 MeV/u と高めのエネルギーになる傾向があった。要求される範囲内に収めるために、ビーム取り出し位置を内側にするなどイレギュラーな調整を行っていた。そこで、通常の調整でも要求されるエネルギーの範囲内に入るように、RF 周波数を規定の 16.58 MHz から 16.5 MHz に下げて運転を行い、実際に要求内に入っていることが確認された(計算値:7.18 MeV/u, 実測値:7.25 MeV/u)。2017年5月の実験以後は、この周波数を採用している。Figure 6 にこの1年間で RI 製造用に供給したビームのエネルギーの計算値と実測値を示す。

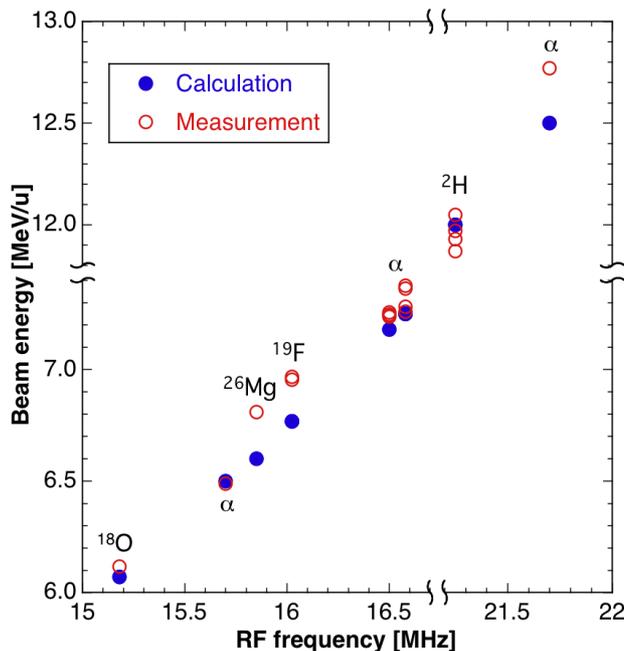


Figure 6: AVF energies by calculation and measurement.

3-2. オンラインビームモニタリング

ビーム供給中にはロックインアンプを中核としたオンラインビームモニタリングシステム[6]でビーム強度とタイミングを常時監視し、必要に応じて供給しながら微調整を行ってビームの安定供給に努めている。

^{18}O を AVF、RRC、および SRC を用いて 220 MeV/u まで加速し RIBF 実験に供給中のビーム挙動の例を Figure 7 に示す。AVF の冷却水は熱交換器の一次側三方弁の開度を PID 制御して熱交換後の温度を一定に保っている。同図はある条件で AVF 冷却水温が周期的に 0.3°C の振幅で変動した際のビームとの相関を示している。この冷却水温と同期して以下が観測された: 1) AVF のエネルギーが 0.7 keV/u 変動、2) RRC 入射(S71)のタイミングが 0.1 ns 、強度が 4% 変動、3) SRC 取出し(G01)、つまり RIBF ユーザーへ供給するビームのタイミングが 0.1 ns 、強度が 4% 変動。

このように何が原因で変動しているのかを把握することは長期的に安定したビームを供給する上で重要である。なお、温調の振幅 0.3°C は AVF の磁場安定度の観点からは不十分であるが、既存冷却システムにおいては妥当な値であり、PID 定数は問題ないと判断された。

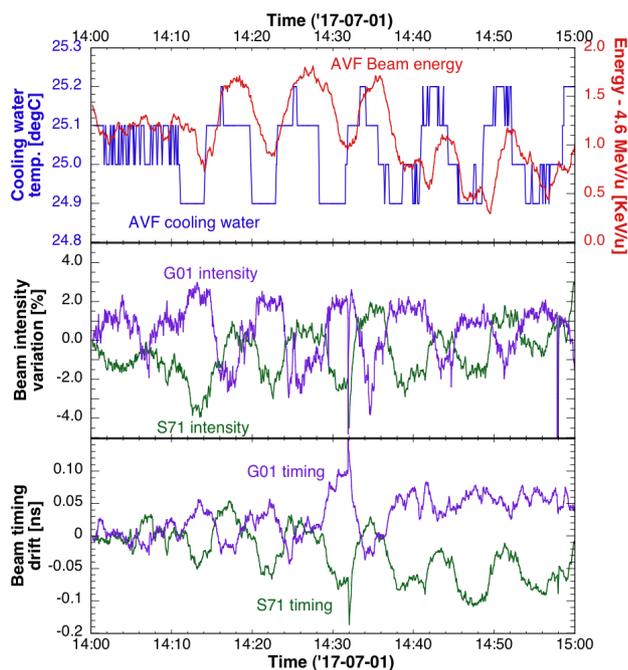


Figure 7: Correlation between beam stability and cooling water temperature of AVF. See text for more detail.

4. 開発項目

4-1. Hyper-ECR イオン源からのビームエミッタンス

Hyper-ECR イオン源で生成した軽イオンを AVF で加速した際の実績取出しビーム強度を Table 1 に示す。イオン源の引出し系の改良や AVF の綿密な調整により AVF 取出しビーム強度は従来の倍に増加しているが、入射効率に改善の余地がある。単にイオン源のビーム量を増強するだけではなく、AVF の入射効率が改善するようにその質が改善できれば取出しビーム量を増強できると考えている。入射効率の良し悪しの原因の判断材料とするため、イオン源のビーム出発点の近傍にエミッタンスモニターを取り付け、混在ビームの中から入射ビームのエミッタンスをマシンタイム毎に測定している[7]。試みとして、イオン源のプラズマ境界にビーム方向へ、凸、平行、凹型のメッシュを取り付け比較したところ、凹型メッシュ使用時にビームエミッタンスが改善されることを確認した。凹型のプラズマ境界は強収斂型引出し系によって形成される。強収斂引出し系の概略とビームエミッタンスの一例をそれぞれ Figure 8 と 9 に示した。Figure 8 中のビーム軌道は、エミッタンスモニターで測定したビームの位置と角度から描いた軌跡である。現在はビーム軌道に対する各電極の傾きやその形状を調整することにより、強収斂引出し系の最適化を進めている。

4-2. エネルギーアップグレード

AVF を用いた RI 製造において、製造可能核種を増やすと共に生成効率を上げることを目的として、ビームエネルギー増強のための研究を進めている。2009 年に中心領域の改造を実施して、 $M/Q = 2$ の粒子の最大エネルギーを核子あたり 9 MeV から 12 MeV に増加させた。更にハーモニクス $H = 1$ 加速により、陽子のエネルギーを現状の 14 MeV から 30 MeV に増強するための

Table 1: Beam Current of AVF for Light Mass Ion Produced from Hyper-ECR

Ion	Injection current [μA]	Injection efficiency [%]	Extraction current [μA]
P	278	36	22
^2H	310	29	24
α	430	36	30

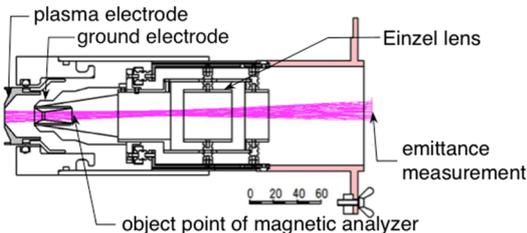


Figure 8: Trajectory of proton beam in the strong-focusing extraction system of Hyper-ECR.

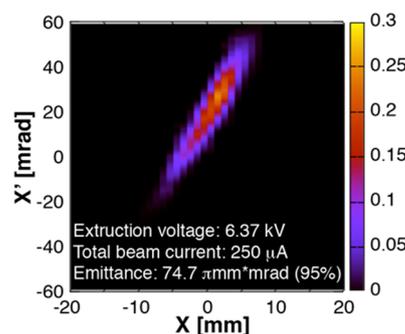


Figure 9: Emittance of proton beam from Hyper-ECR.

中心領域についても設計が行われた[8]。Figure 10 に現状と新設計の中心領域を示す。昨年の夏には新設計の中心領域による加速試験を実施した[9]。試験は 30 MeV 陽子の加速だけではなく、従来の $H = 2$ 加速も行った。加速試験の結果を Table 2 に示す。 $H = 1$ 加速では 20 MeV 陽子は最大許可粒子数に相当する 10 μA が得られたが、30 MeV 陽子については 1.2 μA であった。これは共振器スタブ内の放電によるディー電圧の不足が疑われる。一方、同じく新設計の中心領域を用いた $H = 2$ 加速については、14 MeV 陽子、12 MeV/u H_2^+ ($^2\text{H}^+$ や α を模擬) など、イオン源ビーム量の多い粒子については問題なかったが、 $^{22}\text{Ne}^{7+}$ および $^{22}\text{Ne}^{5+}$ ($^{84}\text{Kr}^{20+}$ を模擬) については通過効率 (AVF の上流 I36 と下流 C01 フェラデーカップの値の比) が 17~18% であり、これは低電流粒子に対する従来の通過効率 20~40% に比べて若干低かった。また、 $^{55}\text{Fe}^{15+}$ の通過効率が 10% 程度と従来の半分以下であった。ただ、この場合は、Ne と加速条件に大差はないため、調整不足だった可能性がある。このように、新設計の中心領域は $H = 1$ と $H = 2$ 加速を両立させるため、従来の構造に比べて通過効率が少し劣っている可能性もあるが、ユーザーのビーム要求量はほぼ供給できそうということが分かった。しかし、新設計の採用によってその後のビーム調整時間の増加が予想されるが、その見積もり (デメリット) を検討する時間が十分なかったため、加速試験後、中心領域を従来の構造に戻し現在に至っている。

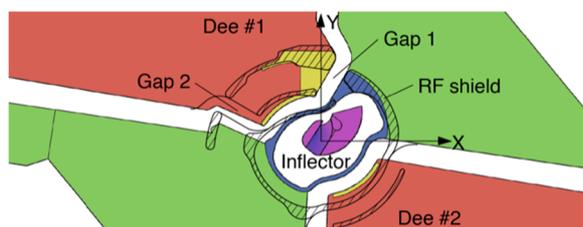


Figure 10: Existing and tested geometries of the central region. The shaded area indicates the existing geometry.

Table 2: Summary of Acceleration Test using Modified Central Region

Ion	Energy [MeV/u]	RF [MHz]	H	I36 [μ A]	C01 [μ A]	C01/I36 [%]
p	14	23	2	90	14.3	16
H ₂ ⁺	12	21.25	2	57	9.6	17
²² Ne ⁷⁺	6	15.05	2	42	7.5	18
²² Ne ⁵⁺	4	12.3	2	11.5	2	17
p	20	13.6	1	76	10	13
p	30	16.5	1	116	1.1	1
⁵⁶ Fe ¹⁵⁺	5	13.8	2	1.2	0.12	10

5. 高周波系メンテナンス

AVF のディー電圧は周波数に依存して#1:18 ~ 30 kV 程度、#2:33 ~ 46 kV 程度と大きな差がある状態で運転されている(制御系の表示電圧)。理由は#1 は#2 よりも放電が起こりやすいこと、真空管のグリッド電圧を下げ目にしないとパワーが取れないこと、が多いためである。加速効率の面でアンバランスにする場面もあるが、これらの理由が効いて実質的に電圧の上限が決まってしまう。また、エネルギー増強計画や RI 製造のためにより高い電圧・加速効率が求められている。以上を踏まえて約 1 ヶ月をかけて以下のメンテナンスを実施した。

1) #1 共振器: スタブ内での放電が確認されていたのでショート板を点検したところ、Figure 11 のとおりコンタクトフィンガーの焼損が確認され交換した。またフィンガーの接する内筒側放電痕も磨き清掃を実施した。さらに、現状問題とはなっていないが、分解作業の工程に合わせて碍子、および関係 O リングの交換も実施した。

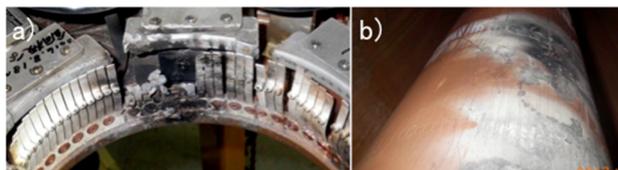


Figure 11: Discharge damage of a) contact fingers and b) the inner conductor in the resonator for #1 cavity of AVF.

2) ピックアップ比測定: 実際に発生しているディー電圧を見積もるため、ピックアップ比の再測定を実施し、Figure 12-a を得た。#1 と #2 のピックアップ比の差はギャップ比で説明できるリーズナブルな結果となった。実際に励振した際のディー電圧について、現状の制御系で表示されている電圧を同図 b に示した。また、ピックアップ信号の振幅をオシロスコープで測定し、測定系の周波数依存性やケーブル損失等を考慮した上でピックアップ比から逆算すると同図 c を得た。両者の開きが改善したものの #1 は放電しやすくこれ以上電圧を上げられな

い傾向にあり、今後の課題である。

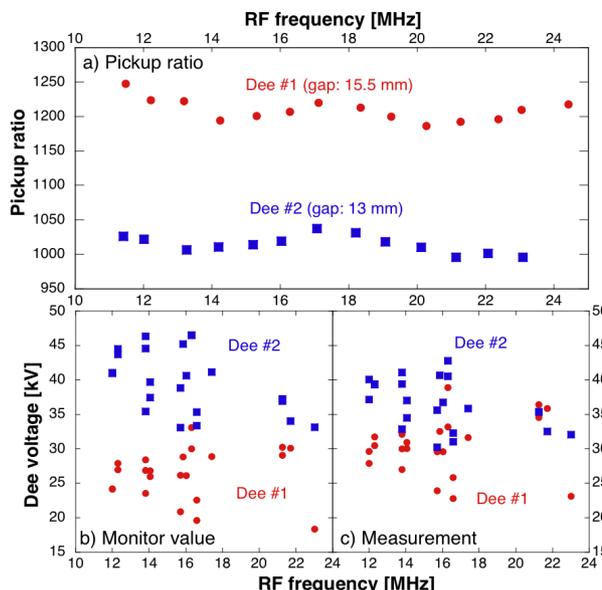


Figure 12: Calculation of dee voltage using measured pickup ratio. See text for more detail.

3) #1 ディー電極傾き修正: これまでにも何度か修正作業を実施しているが、外周側で支持しているディー電極が中心側に向かって垂れ下がる傾向にある。今回の測定で設計値よりも #1:4.5 mm、#2:1.5 mm 垂れ下がっていることが判明した。この傾きは加速周回中でのビームロスに繋がるので、#1 について修正作業を実施した(時間的制約もあり #2 は許容範囲とした)。Figure 13 に修正の様子と修正前後の値を示す。

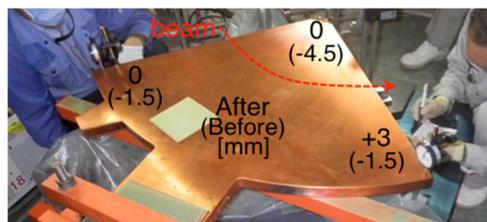


Figure 13: Fixing work of mounting dimension of dee electrode #1.

6. まとめ

この1年間のAVFサイクロトロン運転状況は順調であり合計運転時間は3650時間であった。今後もエネルギー増強計画を進めていく予定である。

参考文献

- [1] Y. Yano, NIM B261, (2007) pp. 1009-1013.
- [2] M. Nishimura *et al.*, FSP028, in this proceedings.
- [3] Y. Yanagisawa *et al.*, NIM A539, (2005) pp. 74-83.
- [4] T. Watanabe *et al.*, Proc. of PASJ 2015, pp.1198-1201.
- [5] S.M. Qaim *et al.* (eds.), IAEA Technical Report Series No. 473, IAEA, Vienna, Austria (2011).
- [6] R. Koyama *et al.*, NIM A729, (2013) pp. 788-799.
- [7] Y. Kotaka *et al.*, WEP092, in this proceedings.
- [8] S. B. Vorozhtsov *et al.*, Proc. of Cyclotrons 2010, pp. 138-140.
- [9] J. Ohnishi *et al.*, Proc. of Cyclotrons 2016, pp. 332-335.