

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

西村 誠^{A)}, 須田 健嗣^{#,B)}, 福澤 聖児^{A)}, 濱仲 誠^{A)}, 石川 盛^{A)}, 小林 清志^{A)}, 小山 亮^{A)},
茂木 龍一^{A)}, 仲村 武志^{A)}, 西田 稔^{A)}, 柴田 順翔^{A)}, 月居 憲俊^{A)}, 矢富 一慎^{A)}, 足立 泰平^{B)},
藤巻 正樹^{B)}, 福西 暢尚^{B)}, 長谷部 裕雄^{B)}, 日暮 祥英^{B)}, 今尾 浩士^{B)}, 上垣外 修一^{B)}, 木寺 正憲^{B)},
込山 美咲^{B)}, 熊谷 桂子^{B)}, 真家 武士^{B)}, 三宅 泰斗^{B)}, 長友 傑^{B)}, 中川 孝秀^{B)}, 西 隆博^{B)},
大西 純一^{B)}, 奥野 広樹^{B)}, 大関 和貴^{B)}, 坂本 成彦^{B)}, サキラヤン グリンスメイ^{B)}, 内山 暁仁^{B)},
渡部 秀^{B)}, 渡邊 環^{B)}, 渡邊 裕^{B)}, 山田 一成^{B)}, 鎌倉 恵太^{C)}, 小高 康熙^{C)}

Makoto Nishimura^{A)}, Kenji Suda^{#,B)}, Seiji Fukuzawa^{A)}, Makoto Hamanaka^{A)}, Shigeru Ishikawa^{A)},
Kiyoshi Kobayashi^{A)}, Ryo Koyama^{A)}, Ryuichi Moteki^{A)}, Takeshi Nakamura^{A)}, Minoru Nishida^{A)}, Junsho Shibata^{A)},
Noritoshi Tsukiori^{A)}, Kazuyoshi Yadomi^{A)}, Taihei Adachi^{B)}, Masaki Fujimaki^{B)}, Nobuhisa Fukunishi^{B)},
Hiroo Hasebe^{B)}, Yoshihide Higurashi^{B)}, Hiroshi Imao^{B)}, Osamu Kamigaito^{B)}, Masanori Kidera^{B)},
Misaki Komiyama^{B)}, Keiko Kumagai^{B)}, Takeshi Maie^{B)}, Yasuto Miyake^{B)}, Takashi Nagatomo^{B)},
Takahide Nakagawa^{B)}, Takahiro Nishi^{B)}, Jun-ichi Ohnishi^{B)}, Hiroki Okuno^{B)}, Kazutaka Ozeki^{B)},
Naruhiko Sakamoto^{B)}, Glynnis Mae Saquilayan^{B)}, Akito Uchiyama^{B)}, Shu Watanabe^{B)}, Tamaki Watanabe^{B)},
Yutaka Watanabe^{B)}, Kazunari Yamada^{B)}, Keita Kamakura^{C)}, Yasuteru Kotaka^{C)}

^{A)} SHI Accelerator Service Ltd.

^{B)} RIKEN Nishina Center

^{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 standalone operations. In this report, we describe both the operational status and improvement works performed in this year (August 2022-July 2023) 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 の基本スペックは、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。

仁科センターのサイクロトロン群は Fig. 1 のようになっている。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 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/u)まで加速する。RRC 入射モードでは、AVF で水素(H_2)から $^{87}\text{Rb}^{20+}$ までのイオンを 3.45 ~ 7 MeV/u に加速し、RRC で 65 ~ 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 の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(pol-d)、 ^{14}N 、 ^{18}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る。2015 年からは ^{40}Ar ビームを AVF から RRC、中間段リングサイクロトロン(IRC)[11]で 160 MeV/u まで加速して旧施設(RARF)側での生物実験に利用するようになった。

本稿では 2022 年 8 月から 2023 年 7 月までの AVF の運転状況、トラブルと改善を紹介する。

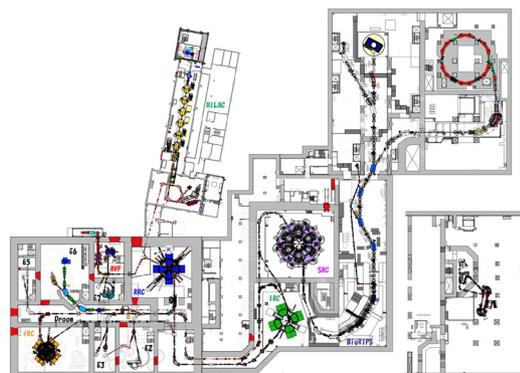


Figure 1: Schematic of RIBF at RIKEN Nishina Center.

[#] ksuda@ribf.riken.jp

2. 運転状況

これまで AVF で加速された全ての核種の M/Q と核子当たりのエネルギーの関係性を Fig. 2 に示す。この1年間での AVF 単独モードの粒子は赤色の○、RRC 入射モードは青色の○、特に、今期初めて加速したイオンビーム(以下、1st ビーム)は●で表している。1st ビームは、 $^{129}\text{Xe}^{25+}$ 2.45 MeV/u と $^{136}\text{Xe}^{26+}$ 2.45 MeV/u であった。

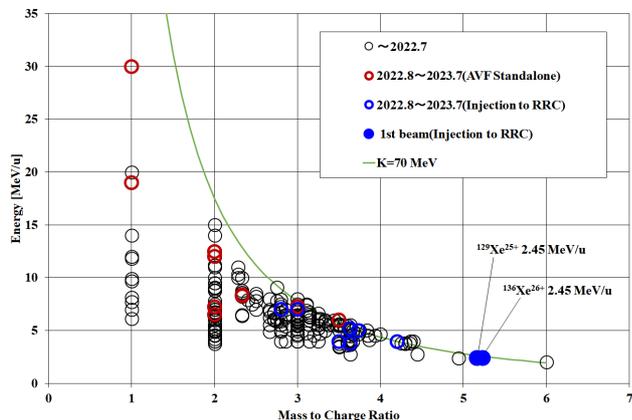


Figure 2: Energy-mass to charge map of AVF.

この1年間の加速粒子一覧を Table 1、AVF 近傍の図を Fig. 3 に示す。

Table 1: List of Accelerated Beams

AVF Standalone		
Ion	Energy (MeV/u)	Intensity (cuA)
P	19	15.6
P	30	11.9
D	12	13.3
α	6.5	3.9
α	7.25	62.4
α	12.5	15.8
$^7\text{Li}^{2+}$	6	5.6
$^7\text{Li}^{3+}$	8.3	22
$^7\text{Li}^{4+}$	10	2.7
$^{12}\text{C}^{4+}$	7.3	14.7
$^{14}\text{N}^{6+}$	8.4	5.2
$^{18}\text{O}^{6+}$	7	15.1
Injection to RRC		
$^{12}\text{C}^{4+}$	7	1.2
$^{14}\text{N}^{4+}$	4	2
$^{14}\text{N}^{5+}$	7	1.2
$^{40}\text{Ar}^{11+}$	3.8	3.2
$^{40}\text{Ar}^{11+}$	5.2	5.1
$^{56}\text{Fe}^{15+}$	5.01	1.1
$^{86}\text{Kr}^{20+}$	3.97	3.6
$^{129}\text{Xe}^{25+}$	2.45	1
$^{136}\text{Xe}^{26+}$	2.45	0.8

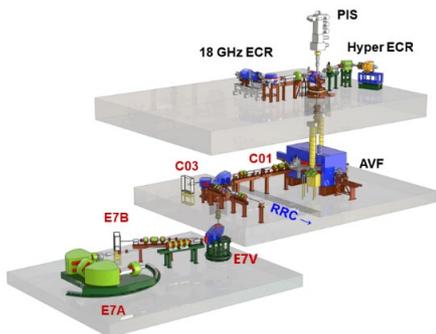


Figure 3: Overview of AVF cyclotron.

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)、ビーム供給中の加速器事由による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、C03:469.5 h、E7V:219.5 h、E7A:526.4 h、E7B:114.8 h であった。AVF 調整時間は 1428.4 h、不具合対応時間は 76.6 h、総運転時間は 2758.6 h であった。

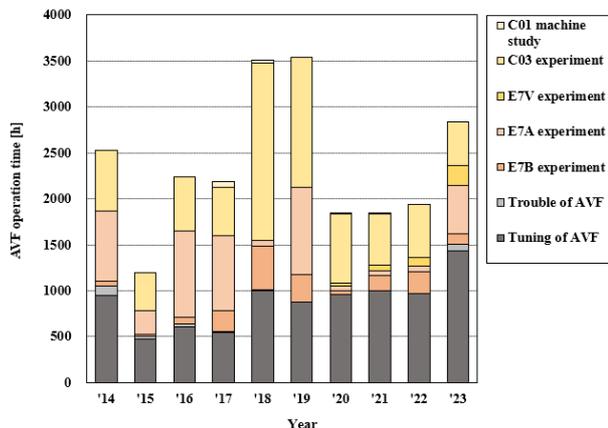


Figure 4: Beam service time of AVF standalone operation.

過去 10 年間の 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 SRC-MDC3(SRC からのビーム取り出しに用いる偏向電磁石)の故障のため、AVF を使用した RIBF へのビーム供給は行われなかった。調整時間は 278.2 h、

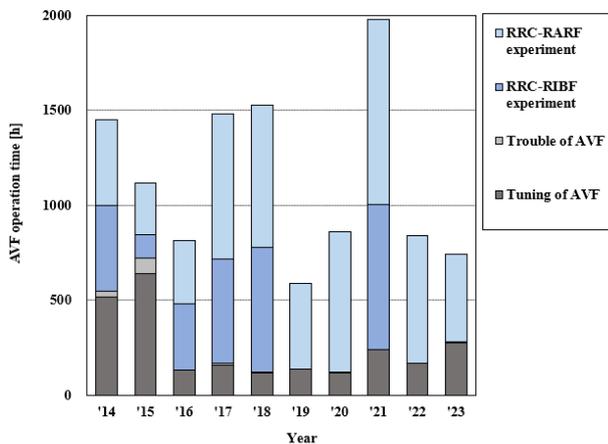


Figure 5: Beam service time of RRC injection operation.

照射時間は461 h、不具合対応時間は1.7 hであり、RRC 入射モードの総運転時間は739.2 hであった。

3. 運転時のトラブル

3.1 AVF サブチャンバー真空リーク

AVF トリムコイル(サーキュラーコイル)C8 の OUT 側フィードスルー部において、O リングの硬化によりサブチャンバーが真空リークを起こした。

2023年4月5日、AVF のコールドスタートからメインコイルを 1031 A に励磁したタイミングでサブチャンバーの真空度が悪化した。以前から度々起きていたトラブルであり[13]、この日はトリムコイル C8 の電流値を低めにして他のトリムコイルで磁場補正をしてマシンタイムをこなした。その後の調査により AVF メインチャンバー下側にあるトリムコイル C8 の OUT 側フィードスルー部において真空リークが確認された。

リーク箇所の修理作業はメインチャンバーを上ヨークと共に持ち上げる必要があったため、メインプローブをはじめメインチャンバーに差し込まれているすべての診断機器、Dec 電極および真空機器は約 2.5 日間で取り外された。リーク箇所である C8 OUT 側のフィードスルー部の O リング(AS568-110)は非常に硬く、曲げるとすぐに割れてしまうような状態だった(Fig. 6)。しかしながら、両隣の C7、C9 の O リングはまだ弾力性があったため、C8 の O リングは厳しい運転条件での熱負荷により極端に劣化したものと推察された。なお、作業時間の関係上、C9(IN/OUT)、C8(IN)、C7(IN/OUT)、ポールポンプ用ダクトのみ O リング交換を行い、その他の 19 系統はフィードスルー部の増し締めのみを実施した。機器の再取り付け後、4月13日に真空の復旧が完了し、 $^{14}\text{N}^{7+}$ のマシンスタディから AVF の運転を再開した。



Figure 6: Feedthrough pipes of trim coils and hardening of an O-ring at C8-OUT.

3.2 その他のトラブル

- 2022.10.16: AVF 位相スリットの width が駆動しなくなる。駆動軸がカップリングから外れていたのもでイモネジで固定。
- 2022.11.8: AVF メインコイル電源が ON できない。電磁接触器のタイマーリレーが故障していたので

交換。

- 2023.2.24: AVF 位相スリットの width のシャフトのカップリングが破損。ひとまず結束バンドでカップリングを補強。後日交換。
- 2023.4.17: 同月のトリムコイルフィードスルーC8 の O リング交換時、AVF ヨークアップ駆動系において大きな振動/騒音が複数回発生した。安全を考慮し、可能な範囲で業者によるギア部などのオーバーホールを夏季に実施した。使用には問題ないレベルであるが、1カ所でごく微小な振動/騒音が残っているため、今後の部品交換などの対策を検討する。
- 2023.5.27: AVF デフレクターの高電圧導入部から水漏れ。ひとまずバケツで受けておき、後日ホースを交換。
- 2023.6.2: AVF メインコイルがエラーなしで落ちた。400 V ラインの電磁開閉器を交換。
- 2023.6.5, 7.9, 7.13: 高周波系(以下、RF)のプレート電源が、その上流にあるキュービクルのブレーカがトリップしたためダウン。プレート電流を下げるようコントロールグリッド電圧を調整。ブレーカがトリップした原因は特定されず。夏季にブレーカ単体での遮断試験を実施した際は正常に動作したものの、念のため交換を検討中。
- 2023.7.17: ビーム供給中に AVF インフレクター負電極に電圧が印加できなくなりビームロスト。高電圧導入部のケーブルが絶縁不良となっていたため交換。数年前に水漏れを起こしたときから冷却水を止めていたので、この機会に冷却配管の修理を実施。
- 2023.7.19: ビーム供給中にクライオポンプのコンプレッサがダウンしたため AVF の真空度が悪化した。ポンプは再起動できたものの、真空度は改善しなかった。その原因として、当初は経年劣化によるコンプレッサの故障を疑ったが、最近数回起こった実験者側ターゲットガスの流入による影響の方が大きく、クライオポンプ内に凝縮/吸着されたガスが過剰となってポンプ内の温度上昇を引き起こしたと推察している。

4. 改善

4.1 Xe 加速試験、及び実験へのビーム供給

AVF-RRC モードで $^{129}\text{Xe}^{35+}$ ビームを加速し、E5 実験室へ供給した。

これまで Xe などの重いイオンは RILAC - RRC モードにより加速されていたが、2020年に SRILAC の運用が開始されて以来、超重元素合成実験を優先するため、RILAC は RRC への入射器として使用されていない。このため、Xe に関しては RILAC2 - RRC 加速モードでの 11 MeV/u がエネルギーの上限となっていたが、さらに高いエネルギーのビームによる産業応用実験の再開が強く希望されていた。そこで我々は既設ビームラインで実現できる AVF - RRC 加速モードで加速試験を行った。

AVF は取り出しビームエネルギーを下げつつ、RF が励振できる周波数にするため、ハーモニクス(以下、H)を 3 にして加速することを選択した。まず、 $^{136}\text{Xe}^{26+}$ と M/Q の近い $^{84}\text{Kr}^{17+}$ で H = 3 加速試験を行った。AVF は数年前、

p を 30 MeV/u まで加速することを優先した中心領域の改造を行っており、十分なビーム強度が取り出せるか懸念があった。通常の H = 2 加速と比べて AVF からの取り出し効率が低い結果になってしまったが、イオン源で $^{84}\text{Kr}^{17+}$ ビームを 18 eμA 生成、AVF に 23 eμA 入射し、1.2 eμA を取り出すことができた (AVF 通過効率: 5.2%)。イオン源のビーム量が AVF 入射時より少ないのはファラデーカップの径が小さく、ビームを受けきれていないためである。因みに中心領域改造前の 1997 年 11 月 17 日には、イオン源で $^{40}\text{Ar}^{11+}$ を 8.7 eμA 生成し、AVF へ 8.64 eμA 入射、190 enA 取り出ししている (AVF 通過効率: 2.2%)。

これを受けて 2022 年 11 月 1 日、1 回目の $^{136}\text{Xe}^{26+}$ 加速試験を実施した。イオン源ではサポートガスを従来の O_2 にすると下流の偏向電磁石の磁場で $^{136}\text{Xe}^{26+}$ と $^{16}\text{O}^{3+}$ を分離できない問題があった。これはサポートガスを N_2 に変更することで解決し、18 eμA のビームを生成した。AVF から 950 enA の取り出しに成功。しかし下流のチャージストリッパー (0.5 mg/cm² の炭素膜) で荷電変換すると 21 enA までビーム強度が低下。RRC へ 5.6 enA しか入射できなかったため RRC 内の位相プローブでビームが測定できず、等時性磁場の調整ができない状況に陥った。それでも RRC から 2.7 enA のビームを取り出したものの、実験室への輸送中にビームを見失ってしまい、試験は終了した。

そこで我々は $^{136}\text{Xe}^{26+}$ を $^{129}\text{Xe}^{25+}$ に変更してチャージストリッパーでの荷電変換効率を 8% から 20% 程度に引き上げることで、RRC に入射するビーム強度を上げる作戦に出ることになった (Fig. 7)。

2023 年 1 月 19 日の 2 回目の加速試験では、核種変更に伴いイオン源のサポートガスを O_2 に戻すことができ、 $^{129}\text{Xe}^{25+}$ を 18 eμA 生成。AVF から 810 enA 取り出した。問題のチャージストリッパーでは $^{129}\text{Xe}^{35+}$ を 1 回目の加速試験の 3.5 倍相当の 72 enA 残すことに成功した。RRC へ 39 enA のビームを入射できたので、位相プローブを使って等時性磁場を無事作ることができた。RRC からは 20.5 enA のビームを取り出し、E5 実験室へ 15 enA のビームを輸送した。

2023 年 6 月 27 日に行われた本実験では、イオン源で $^{129}\text{Xe}^{25+}$ を 29 eμA 生成。AVF 取り出しで 850 enA。チャージストリッパー後に $^{129}\text{Xe}^{35+}$ が 72 enA。RRC に 44 enA 入射。RRC 取り出しが 40 enA。E5 実験室に 45 enA 供給している。

このビーム調整中に、E5 実験室へ 60 MeV/u 相当の Xe ビームを供給することを目指して、AVF - RRC - IRC モードでの加速が可能か否かを調べる試験を行った。

価数を下げるとともに RRC の入射エネルギーをさらに下げる必要があるため、チャージストリッパーの膜を 0.5 mg/cm² から 1.2 mg/cm² に厚くした。その結果、エネルギーは目標の 1.75 MeV/u に対して 1.61 MeV/u まで下げることができたが、膜の下流でビームバンチの運動量広がり度が ±1% 程度まで大きくなり、エミッタンスが増加してしまった。このため RRC までのビーム通過率が低下して 20 enA 程度しか RRC へ入射できないことが想定されたため、RRC はもちろん IRC におけるビーム調整も困難であるという結論に至った。これらのビーム加速におけ

るパラメータを Table 2 にまとめた。

今後は、次の手としてチャージストリッパーを 2 段にすることなどを検討しており、引き続き ^{129}Xe 60 MeV/u 加速を実現することを目指している。

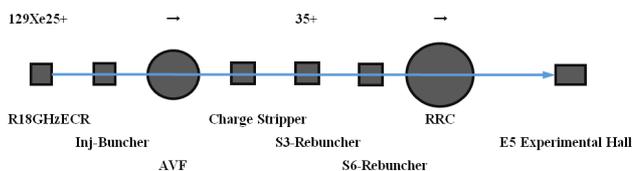


Figure 7: Acceleration of ^{129}Xe in AVF-RRC mode.

Table 2: Beam Parameters and Transmission

	2022/11/1	2023/1/19	2023/6/29	2023/6/29
R18GHZ ECR	$^{136}\text{Xe}^{26+}$	$^{129}\text{Xe}^{25+}$	$^{129}\text{Xe}^{25+}$	
AVF IN	21000	18000	29000	
	17000	12000	20000	
AVF				
Harmonics	3	3	3	3
Frequency	14.5 MHz	14.5 MHz	14.5 MHz	
RP 74 mm		4350	4400	
RP 645 mm		2770	2900	
RP 825 mm		630	850	
AVF OUT	950	810	800	710
Energy (cale)	2.45 MeV/u	2.45 MeV/u	2.45 MeV/u	2.45 MeV/u
Energy (TOF)	2.45 MeV/u	2.50 MeV/u	2.50 MeV/u	2.50 MeV/u
Charge Stripper				
C-Foil	0.5 mg/cm ²	0.5 mg/cm ²	0.5 mg/cm ²	1.2 mg/cm ²
Charge Stripper OUT	15	72	78	100
Energy (TOF)	2.20 MeV/u	2.19 MeV/u	2.20 MeV/u	1.61 MeV/u
RRC IN	5.6	39	45	20
RRC				
Energy (cale)	2.18 MeV/u	2.18 MeV/u	2.18 MeV/u	
RRC OUT	3.2	20.5	40	
Energy (cale)	35.66 MeV/u	35.66 MeV/u	35.66 MeV/u	
Energy (TOF)	35.66 MeV/u	35.64 MeV/u	35.64 MeV/u	
E5 Experimental Hall		26	48	

[enA]

4.2 AVF Phase Probe(PP)用スイッチ更新

AVF サイクロトロン内部には動径方向に 6 対の平行平板型静電ピックアップ (以下、PP) が配置されている。これらの信号は同軸スイッチにより切り替えられてオシロスコープ等で観測され、等時性磁場を形成するための調整に利用されている。1980 年代の運転開始以来運用されてきたスイッチは、ここ数年、一部のチャンネルへの切り替えに失敗するという本体の異常に加え、制御系が正しく動作しないといった事象が多々見られるようになってきた。老朽化と、年々増大するビーム強度に伴う放射線ダメージによるものと推察している。

そこで今回、Fig. 8 に示した様に、スイッチ本体・制御系を含めた更新作業を行った。操作性は、不具合が多発する前と同様に快適なものとなった。今のところトラブルは発生せず、順調に動作している。

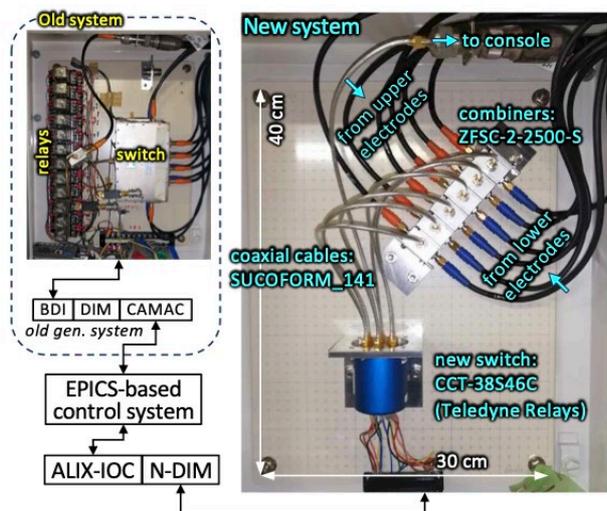


Figure 8: Coaxial switch and its control system for AVF phase probes.

5. まとめ

この1年間のAVFサイクロトロンは3497.8 hであった。長年の懸案事項だった真空リークの問題が解決し、各所老朽化に対してはその都度修理と対策を施してきている。ユーザーからの要求を満たす新規ビームの加速も成功させてきた。今後も引き続き安定なビーム供給を行っていく予定である。

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] K. Kobayashi *et al.*, “Status report of the operation of RIBF ring cyclotrons”, Proceedings of the 19th PASJ Meeting, MTPF003, 2022.
- [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 inter-

mediate-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] S. Fukuzawa *et al.*, “Status report of the operation of RIKEN AVF cyclotron”, Proceedings of the 18th PASJ Meeting, WEP052, 2021.