

理研 RIBF におけるリングサイクロトロン の 運 転 報 告

STATUS REPORT OF THE OPERATION OF RIBF RING CYCLOTRONS

小林清志^{B)}, 須田健嗣^{#, A)}, 福澤聖児^{B)}, 濱仲誠^{B)}, 石川盛^{B)}, 小山亮^{B)}, 茂木龍一^{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)}, 足立泰平^{A)}, 段塚知志^{A)}, 藤巻正樹^{A)}, 藤縄雅^{A)},
福西暢尚^{A)}, 長谷部裕雄^{A)}, 日暮祥英^{A)}, 池沢英二^{A)}, 今尾浩士^{A)}, 上垣外修一^{A)}, 金井保之^{A)}, 木寺正憲^{A)},
込山美咲^{A)}, 熊谷桂子^{A)}, 真家武士^{A)}, 三宅泰斗^{A)}, 長友傑^{A)}, 中川孝秀^{A)}, 中村仁音^{A)}, 大西純一^{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)}
Kiyoshi Kobayashi^{B)}, Kenji Suda^{#, A)}, Seiji Fukuzawa^{B)}, Makoto Hamanaka^{B)}, Shigeru Ishikawa^{B)},
Ryo Koyama^{B)}, Ryuichi Moteki^{B)}, Takeshi Nakamura^{B)}, Minoru Nishida^{B)}, Makoto Nishimura^{B)},
Junsho Shibata^{B)}, Noritoshi Tsukiori^{B)}, Kazuyoshi Yadomi^{B)}, Taihei Adachi^{A)},
Tomoyuki Dantsuka^{A)}, Masaki Fujimaki^{A)}, Tadashi Fujinawa^{A)}, Nobuhisa Fukunishi^{A)},
Hiroo Hasebe^{A)}, Yoshihide Higurashi^{A)}, Eiji Ikezawa^{A)}, Hiroshi Imao^{A)}, Osamu Kamigaito^{A)},
Yasuyuki Kanai^{A)}, Masanori Kidera^{A)}, Misaki Komiyama^{A)}, Keiko Kumagai^{A)}, Takeshi Maie^{A)},
Yasuto Miyake^{A)}, Takashi Nagatomo^{A)}, Takahide Nakagawa^{A)}, Masato Nakamura^{A)},
Jun-ichi Ohnishi^{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)}

^{A)} RIKEN Nishina Center

^{B)} SHI Accelerator Service Ltd.

Abstract

The operating status of the ring cyclotrons (RRC, fRC, IRC, SRC) of RIKEN RIBF is reported for the period from August 2021 to July 2022. We engage in corresponding improvement, tuning, and maintenance for beam enhancement and stable supply. In this contribution, practical accomplishment of accelerated beams so far, operating statistics and response to troubles occurred in this period are reported.

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 RI ビームファクトリー (RIBF)[1]における複合加速器システムは、3 台の入射器 (RILAC[2], RILAC2[3], AVF サイクロトロン[4]) 及び 4 台のリングサイクロトロン (RRC:理研リングサイクロトロン, $K = 540$ MeV[5], fRC:固定周波数リングサイクロトロン, $K = 700$ MeV[6, 7], IRC:中間段リングサイクロトロン, $K = 980$ MeV[8], SRC:超伝導リングサイクロトロン, $K = 2600$ MeV[9]) から構成される。これらの加速器を適宜組み合わせることで、重イオンは固体膜、あるいは気体を用いたチャージストリッパにより荷電変換される。これにより、水素 (H_2^+) からウランまでの全イオンを核子当たり 345 MeV/u ($A/Z \sim 2$ の場合は 400 MeV/u) まで加速することができる。

リングサイクロトロンからのビームは、大別して 2 つの実験施設に供給される。1 つは RIBF 実験棟の超伝導 RI ビーム生成分離装置 (BigRIPS) とその下流の実験装置群 (ZeroDegree, SAMURAI, SHARAQ, Rare RI Ring, PALIS) である。他方は RIBF 建設以前からある旧施設 (RARF) 内の実験室 (E2, E3, E5, E6) である。前者は SRC、後者は RRC または IRC の取り出しビームを使って実験が行われる[10]。

本稿では、2021 年 8 月から 2022 年 7 月までの 1 年

間における 4 台のリングサイクロトロン の 運 転 状 況 について報告する。

2. 加速モード

加速器の組み合わせ (加速モード[11]) は、RIBF における実験では 3 種類ある。

1 つ目のモードは固定周波数モードであり、RILAC2、あるいは RILAC を入射器として、RRC, fRC, IRC, SRC によりカスケード加速を行う。fRC の前後において荷電変換を行い、 ^{238}U 、 ^{124}Xe 、 ^{70}Zn 等のイオンを 345 MeV/u まで加速する。

2 つ目のモードは可変周波数モードであり、RILAC を入射器として、RRC の前後において荷電変換を行い、IRC, SRC を使用して、 ^{40}Ar 、 ^{48}Ca 、 ^{70}Zn 、 ^{86}Kr 等を最高 400 MeV/u まで加速する。ここで、核子あたりのエネルギーが最高になるのはフルストリップ状態である $^{40}\text{Ar}^{18+}$ の場合であり、その他の核種では q/M に応じて低下する。

3 つ目のモードは軽イオンモードであり、AVF サイクロトロンを入射器として、RRC, SRC を使用して、 H_2^+ 、 ^2H 、 ^4He 、 ^{14}N 、 ^{16}O 等を最高 400 MeV/u まで加速する。これとは別に、AVF サイクロトロンを入射器として、RRC, IRC を使用し、 ^{40}Ar を 160 MeV/u まで加速した後、RARF 内の E5B に戻して使用する戻しビームモードもあり、生物照射実験にビームを供給している。Figure 1 に RI ビームファクトリーにおける加速器群および実験装置の構成を示す。

[#] ksuda@ribf.riken.jp

Corrected, see errata. 内容の訂正があります.

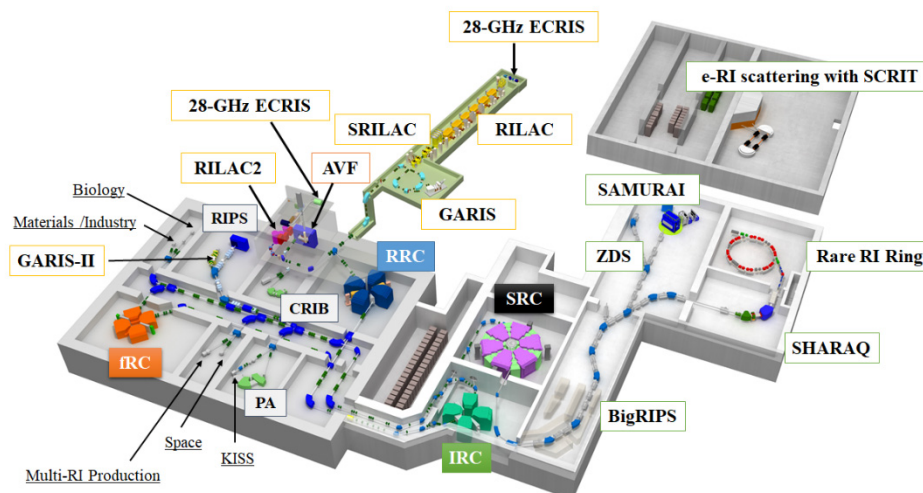


Figure 1: The layout of RIBF facility at RIKEN.

Table 1: Operating Status of RIBF

Beam particle	Energy (MeV/u)	Acceleration mode	Beam course	Beam intensity (particle nA)		Beam service time (h)		Availability (%)
				Requested	Actual	Scheduled	Actual	
RARF								
¹² C	135	AVF-RRC	E5A (Industry)	2	500.0	5.0	4.7	100.0
			E5B (Biology)	2	550.0	20.5	8.1	100.0
²⁰ Ne	135		E5B (Biology)	2	120.0	3.0	1.9	100.0
²² Ne	70		E6 (RIPS)	500	530.0	120.0	119.3	99.4
⁴⁰ Ar	95		E5A (Industry)	1	85.3	156.0	110.5	100.0
⁵⁶ Fe	90		E5B (Biology)	2	7.1	9.0	4.5	100.0
⁸⁴ Kr	70	E3A (Industry)	1	7.4	36.0	36.0	99.9	
	70	E5A (Industry)	1	9.8	300.0	272.3	100.0	
⁴ He	7.25	RILAC2-RRC	E3B (RI Production)	10000	10000.0	12.0	12.0	100.0
⁵¹ V	6		E6 (GARIS2)	5000	3306.0	294.0	290.4	100.0
			E2B (KEK/KISS)	200	120.0	72.0	71.9	99.9
¹³⁶ Xe	10.75		E3A (JAXA)	100	136.5	144.0	123.2	100.0
²³⁸ U	10.75	E5A (Material)	1	100.0	18.0	17.3	100.0	
		E2B (KEK/KISS)	2	314.3	96.0	89.5	99.4	
⁴⁰ Ar	160	AVF-RRC-IRC	E5B (Biology)	2	29.4	20.5	14.6	100.0
Subtotal						1306.0	1176.0	94.0
RIBF								
⁷⁸ Kr	345	RILAC2-RRC-IRC-IRC-SRC	BigRIPS/ZDS/SHARAQ	700	690.0	384.0	395.4	103.0
²³⁸ U (1st)			BigRIPS/ZDS/Rare RI Ring/PALIS	80	73.3	304.5	301.2	98.9
²³⁸ U (2nd)			BigRIPS/ZDS/F12/SLOWRI/SHARAQ	120	82.6	696.0	680.4	97.8
Subtotal						1384.5	1377.1	99.5
Total						2690.5	2553.1	96.9

3. 運転状況

3.1 運転時間

期間中の運転時間統計を Table 1 に示す。核種、エネルギー、実験室等で分けし、ビーム可用度 (availability) を記している。ビーム可用度とは、ビーム利用者がマシンタイム (MT)、あるいはマシンスタディ (MS) 中に実際に照射できた時間 (actual time) を予定時間 (scheduled time) で割ったものであり、加速器の安定運用の指標である。ただし、MS は加速器自体の調整も含めて時間を割り当ててあるので、停止時間はないも

のとしている。加速器側の調整時間の短縮等で、予定された時間以上にユーザーにビームを供給した場合等には、照射時間が予定時間を超過して、ビーム可用度が 100% を超えることがある。また、ユーザー事由で早めに終了した場合は、可用度を 100% としている。特に、生物照射実験や材料照射実験に関してはその割合が大きい。本期間は、RARF 側での実照射時間は計 1176 時間、可用度は 94.0% で、昨年と比較して約 500 時間長かった。

RIBF 側での MT は 3 回行われたものの、内 1 回目の U-MT がユーザー事由により中断し、そのまま中止となった。この中止が影響し、昨年より 570 時間短い、計 1377.1

時間のビーム供給にとどまった。可用性は 99.5 %であった。以下、各 MT について述べる。

2021 年 11 月、1 回目の ^{238}U 345 MeV/u ビーム加速は 73.3 pnA からスタートしたものの、12 月初旬に BigRIPS のヘリウム圧縮機が故障したため、MT が中止になった。2022 年 3 月から 4 月にかけて行った 2 回目の U 加速では、最大 82.6 pnA のビームを 1 か月間供給した。

2022 年 5 月、 ^{78}Kr 345 MeV/u ビーム加速を行い、最大強度 690 pnA のビームを供給した。

ビーム強度は、(1) 200 pnA までの弱いビームに対して、SRC 出口に設置されているファラデーカップ FC-G01 で測定されるビーム強度と、フェイズプローブ PP-G01 から得られる信号の強度を比較し、両者がほぼ比例している事を確認した後、(2) 200 pnA 以上の大強度ビームに対して PP-G01 の信号強度からビーム量を推定した。

Figure 2 に、 ^{78}Kr ビームの供給スケジュール、可用性並びに最大ビーム量を示す。

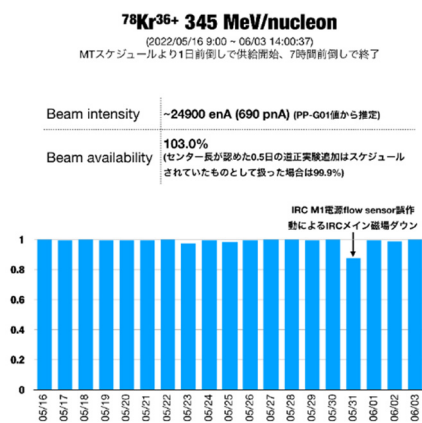


Figure 2: Schedule, availability, and maximum intensity for the acceleration of the $^{78}\text{Kr}^{36+}$ beam at 345 MeV/u.

3.2 トラブル

この 1 年間に発生した主なトラブルについて述べる。

- 9/14 IRC の立ち上げ時に、セクター磁石のメインコイルが地絡異常で落ちた。現場を確認した所、ホロコンやブスバーの周辺が大量に結露していた為、カバー類を撤去して扇風機等で乾燥させた。
- 9/15 IRC 戻しビームライン用偏向電磁石 DAKR の電源がトリップしている事に気づいた。遠隔でのリセットを試みたが出来なかったため、現場を確認したところ、冷却水異常で落ちていた。電源内部の流量バルブを調整して復旧させた。
- 9/19 RRC の中心領域に設置された入射系ビームラインの偏向電磁石 BM1_1 の冷却水系銅配管継手より少量の水漏れが発生した。MT が連続しており、十分な作業時間が確保出来なかったため、漏れ続ける冷却水をドレインに流して対処した。後日、銅配管を上部より取り外して継手を交換した。
- 10/30 RRC のトリムコイル電源 TD12 において電源異常が連発した。調査の結果、28N の系統に定格の約 400 A を流すと異常となったものの、電流を 200 A に下げたところ問題が起きなかった。そこで、同一電源内の 28N と 28E のケーブル、並びに電流設定を入れ替えることで対処した。
- 11/16 ^{238}U ビームの加速調整中に、SRC からの取り出しビーム量が激減する現象が頻発した。その際、固定周波数モードにおける第 2 ストリッパーのすぐ下流に設置された偏向電磁石 DMM1 以降のビーム軸が全てずれた。DMM1 の電源が不安定であった為、使用していた IDX 製電源から、予備の SHI 製電源に切り替えた。
- 11/19 fRC の W 共振器を励振中に、プレート電源クローバー異常が発生した。異常をリセットできなかったため、同電源の制御ブレーカを OFF/ON して復旧させた。その後も異常が頻発したため、同電源内部の制御基板 CI5 を交換した。
- 11/19 SRC の第一共振器 (RES1) において加速電圧が低下し、電圧レギュレーションが外れて不安定となった。励振器の一部である終段真空管アンプの各電源の状態を確認したところ、終段フィラメント電流が低下し、変動していた。本アンプに用いている終段フィラメント電源は直流型で、定電流モードで運用しているため、出力電流は常に一定でなければならない。終段フィラメント電源の故障と判断し、電源を交換した。
- 2022/1/5 RRC セクター磁石のメインコイルを励磁した際、第 2 共振器 (RRC-RF#2) の真空度が通常よりも一桁悪い、 $2.0\text{E}-5$ Pa になった。4 台あるセクター磁石の内、南側の S セクター磁石と同共振器との間を接続しているベローズの中心領域に近い箇所から真空リークを検出した。真空シール剤の VACSEAL をベローズ下面へ塗布したところ、共振器の真空度が $2.0\text{E}-6$ Pa まで改善した。
- 3/1 RRC-RF#2 の加速電圧が低下し、電圧レギュレーションが外れた。空洞の共振周波数を自動的に調整するために用いているトリマーが駆動範囲の限界まで動き、停止していた。空洞を再励振したところ、空洞へ高周波電力を供給するフィードラインにおいて反射電力が大きく、進行波と反射波のモニター信号から演算により求められる負荷インピーダンスの表示が、通常は 50Ω となるどころ、 60Ω 以上と異常値を示した。反射波をモニターしている方向性結合器のダミー抵抗を交換して復旧した。
- 3/27 fRC のバレー箱や共振器の真空度が $1.0\text{E}-2$ Pa 台まで悪化し、各バルブが閉まった。クライオポンプが全台停止していたため、再起動させた。
- 4/11 RILAC2 入射用の 28 GHz ECR イオン源においてマイクロ波発生源として使用しているジャイロトロンの高圧が過電流で落ちる現象が 6 回発生した。頻度は一時間に一回であった。第 2 イオン源室に入室して点検したところ、高圧部の碍子が汚れていたため磨いた (4.4 節参照)。
- 5/13 fRC の 2 台の共振器 (E, W) を励振中に、同時に何らかの異常が発生し、インターロックが働いてフィラメント電源 (LV) までオフになった。E 共振器は再励振することができたが、W 共振器はプレート電源クローバー異常をリセットすることができず、励振不可となった。調査の結果、終段真空管アンプ内に設置されたフィラメント電源用トランスの端子

Corrected, see errata. 内容の訂正があります.

台が焼損していることが判明したためトランスを交換して復旧した。また、真空管については各電極間の耐電圧に問題がないことを確認したが、この機会に新品に交換した。

- 5/23 IRC の NE バレー箱に取り付けられたクライオポンプ (IRC-CP1-NEV) が停止した。放射線の影響によるものと考えられる。IRC 室に入りクライオコンプレッサー本体の電源を OFF/ON することで復旧させた。
- 5/31 IRC のメインコイル電源 (MAIN1) が冷却水流量不足 (Water Flow) で落ちた。遠隔でリセットして励磁することが出来たので調整を再開するも再発した。電源を確認すると、冷却水流量計の下限設定が 22 L/min であったのに対し、実際の流量は 24~29 L/min の間を変動していた。入出のバルブは共に全開で調整出来なかったため、流量計の下限設定を 10 L/min に変更して対処した。
- 6/21 1:00 RRC-RF#2 の真空度が徐々に悪化し始め、 $6.0E-6$ Pa であったものが 5 時間後に $7.0E-5$ Pa となった。冷却水を止めて水を抜くと $1.8E-5$ Pa まで回復した。調査を行ったところ、上システム 46 系統からのリークが原因と判明した。その後、通水して様子を見ると $6.0E-6$ Pa で留まっていたため、励振して暫く状況の推移を見ているうちにリークが止まった。
- 7/2 IRC の ES 共振器を励振中にフィラメント電源 (LV) まで落ちた。遠隔操作画面上での異常ステータスは、中間段 G1 過電流、及び同電源温度異常であった。遠隔にて異常のリセットを試みたが、同電源リモート異常がクリアできず、LV をオンにする条件が満たされなかった。現場操作盤では中間段 G1 過電流異常のみが点灯し、かつ電源本体の主電源 (MAINS) ランプが消灯する等、遠隔と現場のステータスが食い違っていた。電源本体を操作し、リモート→ローカル→リモートと切り替えることで MAINS ランプ点灯し、現場操作盤からの異常リセットが効くようになり復旧した。
- 7/14 RRC の第 1 共振器 (RRC-RF#1) において、真空度が $1.1E-5$ Pa から $2.2E-4$ Pa へと一桁以上悪化した。RF#2 の場合と同様に対処することで、一旦は $1.3E-4$ Pa まで改善したものの、励振試験を開始してから 30 分後の時点で $1.0E-3$ Pa 以上に悪化し、インターロックが働いて励振不能となった。翌 15 日、回復の見込みがない為、予定されていた 2 件の MT がキャンセルされた。調査の結果、下システム 47 系統からのリークと判明した。

4. その他修理・改良

4.1 RRC 共振器システム冷却システム真空リーク修理

2018 年に、RIBF における ^{238}U ビームの電流を増大させるため、RRC 共振器 2 台のシステムとディー電極を一新する改造が行われた[12]。改造の結果、加速周波数 18.25 MHz において従来と比較して約 2 倍の高い加速電圧を発生させることができるようになったものの、製造上の問題に起因して、システム冷却システムからの微小な真空リークが起きるようになった[13]。これまでに数回のリーク調査と補修を繰り返しているが、未だに完全な解決に

は至っていない[14]。2022 年 2 月には、その後に予定されていた U 加速 (3 月)、および Kr 加速 (5 月) の RIBF-MT に向けて、RRC-RF#2 のシステム冷却配管のリーク調査を行い、発見した 16 箇所を全て補修した。

2022 年 6 月、RRC-RF#2 において新たにリークが見つかったものの、微少だったため運転は可能であった。しかし、7 月に RF#1 に大きなリークが生じて、運転に必要な真空度を維持できなくなり、MT の遂行に影響が出た (3.2 節参照)。そこで、夏メンテナンス期間中の 8 月上旬に空洞 2 台の補修作業を予定している。また、リークの調査を予防的に行い、早い段階でリーク箇所を補修することにより、より安定した運転を目指している。

4.2 RRC 共振器電圧変動と受電の関係

ビーム供給中に RRC-RF#1 と RF#2 の加速電圧が約 0.1 % 変動する現象[14]は引き続き発生している。 ^{238}U 345 MeV/u の加速では、RRC、fRC、IRC、および SRC によりカスケード加速を行う為、上段にある RRC の微弱な電圧変動でも最終段の SRC から取り出されるビームには大きく影響する。特に、RARF 施設の高圧受電電圧 (定格 6600 V) が 6400 V を下回る際に安定度が悪化する。高周波系のローレベル回路 (振幅調整器、位相調整器、及び前段増幅器として使用しているトランジスタアンプへの入力信号を増幅するためのプリアンプ) に安定化電源 (AVR) を導入したが、根本的な問題は解決していない。

4.3 RRC 入射取り出し機器用電源の DCCT 化

RRC の入射取り出しに用いられる電磁石、及び磁気チャネルの電源は、1986 年の RRC 建設当時より継続して使用しているため老朽化が顕著である。電源の安定度を高める為、シャント方式から DCCT 方式に改造する作業を毎年少しずつ行っており、2021 年 7 月までに全 9 台の内、5 台の改造が完了した[14]。2022 年 7 月現在、更に 2 台の改造が済んでおり、今年度中に残り 2 台を実施することで全数が完了する予定である。

4.4 28 GHz ECR イオン源系の故障とトラブル

RILAC2 入射用の 28 GHz ECR イオン源において大きなトラブルが 3 件発生した。一つ目は 2022 年 1 月 26 日に起きた真空排気装置のトラブルである。引き出しチャンバーのターボ分子ポンプ (TMP) が停止して、再起動も出来なくなった。TMP 直上のヘッドバルブを閉め、他の排気装置から真空復旧を試みたが、ヘッドバルブからの漏れがあったため失敗した。2 月 2 日に TMP の交換作業を行った際、TMP の羽根が飛び散りヘッドバルブに挟まっていることが分かった。清掃及び TMP 交換により復旧した。今回故障した TMP はメンテナンス周期が 3 万時間である所、核燃料物質に汚染された恐れがありメンテナンスを行えなかった為、9 万時間も使用していた物である。Figure 3 に破損した TMP の写真を示す。

二つ目は真空操作盤の上流に位置する分電盤内のノーフューズブレーカ (NFB) が漏電トリップした事である。2022 年 1 月 16 日の Xe-MT 中に突然イオン源が停止した。原因は上記の NFB の漏電トリップに伴い、イオン源の真空排気装置が停止したことによるものであった。その時はブレーカをリセットすることで復旧出来たので、



Figure 3: Damaged TMP used for the extraction chamber of the RIKEN 28 GHz ECR ion source.

そのまま MT 終了までビームを供給した。後に、再び同事象が発生したため調査を行った所、同一の NFB に接続されていた空気圧縮機 (ベビーコンプレッサ) のオートドレンが故障している事が判明した為、これを交換した。

三つ目は 28 GHz マイクロ波発生源であるジャイロトロンに起こったトラブルである。2022 年 4 月 11 日、U-MT 中にジャイロトロンの電源が一時間に一回程度過電流により落ちるようになった為、イオン源を停止し調査を行った。目視による点検でジャイロトロンの碍子の汚れが目



Figure 4: Simple air purifier for Gyrotron.



Figure 5: Insulators before and after cleaning.

立っていたので、碍子を紙やすりなどで磨いた。その結果、再起動後は過電流で落ちる事は無く、MT を終える事が出来た。このような碍子の汚れは、以前より長期の MT を行った際に発生していた為、室内環境の一つである粉塵が原因である可能性を考え、簡易的な空気清浄機を取り付けて外気からの粉塵を取り除くことにした。Figure 4 に簡易空気清浄機の図を示す。

その後、V ビームの生成テストを、通常使用している RF のパワーよりもやや高めて 2 日間行った。たった 2 日間にも関わらず碍子の汚れが発生した為、原因は外気からの粉塵ではなく他にあるものと思われる。本件は更なる調査が必要である。Figure 5 に碍子の状態を示す。

5. まとめ

2021 年 8 月から 2022 年 7 月までの総運転時間は 2553.1 時間、可用度は 96.9 %であった。RIBF 運転の ^{78}Kr ビーム加速において、SRC より取り出したビーム強度は過去最大の 690 pnA を記録した。老朽化に対処しつつ、大強度化に向けた改造も行い、更なるビーム強度増大を目指している。

参考文献

- [1] Y. Yano, "The RIKEN RI beam factory project: A status report", Nucl. Instrum. & Methods B261, 2007, pp. 1009-1013.
- [2] M. Odera *et al.*, "Variable frequency heavy-ion linac, RILAC: I. Design, construction and operation of its accelerating structure", Nucl. Instrum. & Methods A227, 1984, pp. 187-195.
- [3] 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.
- [4] A. Goto *et al.*, "Injector AVF cyclotron at RIKEN", Proceedings of Cyclotrons'89, Berlin, Germany, 1989, pp. 51-54.
- [5] H. Kamitsubo, "Progress in RIKEN Ring Cyclotron Project", Proceedings of Cyclotrons'86, Tokyo, Oct. 1986, pp. 17-23.
- [6] N. Inabe *et al.*, "Fixed-frequency ring cyclotron (fRC) in RIBF", Proceedings of Cyclotrons'04, Tokyo, Oct., 2004, 18P15, pp. 200-202.
- [7] T. Mitsumoto *et al.*, "CONSTRUCTION OF THE FRC SECTOR MAGNET FOR RIKEN RI BEAM FACTORY", *ibid*, 20P12, pp. 384-386.
- [8] J. Ohnishi *et al.*, "Construction status of the RIKEN intermediate-stage ring cyclotron (IRC)", Proceedings of Cyclotrons'04, Tokyo, Oct., 2004, 18P14, pp. 197-199.
- [9] H. Okuno *et al.*, "The Superconducting Ring Cyclotron in RIKEN", IEEE Trans. Appl. Supercond. 17, 2007, pp. 1063-1068.
- [10] <http://www.nishina.riken.jp/RIBF/accelerator/overview.html>
- [11] N. Sakamoto *et al.*, "High intensity heavy-ion-beam operation of RIKEN RIBF", Proceedings of PASJ9, 2012, pp. 7-11.
- [12] N. Tsukiori *et al.*, "Status report of the operation of RIBF ring cyclotrons", Proceedings of PASJ2019, 2019, pp. 1393-1397.
- [13] S. Ishikawa *et al.*, "Status report of the operation of RIBF ring cyclotrons", Proceedings of PASJ2020, 2020, pp. 893-897.
- [14] T. Nakamura *et al.*, "Status report of the operation of RIBF ring cyclotrons", Proceedings of PASJ2021, 2021, pp. 575-579.