

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

西田稔^{B)}, 須田健嗣^{#, A)}, 福澤聖児^{B)}, 濱仲誠^{B)}, 石川盛^{B)}, 小林清志^{B)}, 小山亮^{B)}, 茂木龍一^{B)}, 仲村武志^{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)}, 木寺正憲^{A)}, 込山美咲^{A)}, 熊谷桂子^{A)}, 眞家武士^{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)} Minoru Nishida^{B)}, Kenji Suda^{#, A)}, Seiji Fukuzawa^{B)}, Makoto Hamanaka^{B)}, Shigeru Ishikawa^{B)}, Kiyoshi Kobayashi^{B)}, Ryo Koyama^{B)}, Ryuichi Moteki^{B)}, Takeshi Nakamura^{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)}, 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 2023 to July 2024. 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[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多段加速される途中で、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ー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のエネルギー 345 MeV/nucleon (質量電荷比 $M/q \sim 2$ の場合は 400 MeV/nucleon)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 (ZD spectrometer, 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、2023 年 8 月から 2024 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

Figure 1 に RIBF の加速器群および実験装置の構成を示す。入射器 RILAC と RILAC2 にはそれぞれ超伝導 ECR イオン源が、AVF についてはイオン種によって切り替えて使用する 3 台の常伝導イオン源が設置されている。RARF 実験と RIBF 実験のそれぞれにおける加速器の組み合わせ (加速モード[11])は、以下の通りである:

1) RARF 実験

AVF, RILAC2, または RILAC を入射器として RRC で水素からウランまでを加速する。AVF および RILAC が入射器の場合は RRC 上流で荷電変換を行う。 $M/q \sim 2$ の場合に核子当たりのエネルギーが最高の 135 MeV/nucleon となり、 $^{28}Si^{14+}$ までのイオンで実績がある。これとは別に、AVF を入射器として RRC と IRC で ^{40}Ar を 160 MeV/nucleon までカスケード加速した後、RARF 内の E5 実験室に戻して使用する戻しビームモードがある。AVF 及び RILAC は単独加速でもユーザーにビームを供給しており、別途報告する[12, 13]。

2) RIBF 実験: 固定周波数モード

RILAC2 または RILAC を入射器として、RRC, fRC, IRC, および SRC により多段加速を行う。fRC の前後において 1 回または 2 回の荷電変換を行い、 ^{238}U , ^{124}Xe , ^{70}Zn 等のイオンを 345 MeV/nucleon まで加速する。

3) RIBF 実験: 可変周波数モード

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/nucleon まで加速する。 $M/q \sim 2$ の場合に核子当たりのエネルギーが最高となり、 $^{40}Ar^{18+}$ で加

[#] ksuda@ribf.riken.jp

速実績がある。

4) RIBF 実験: 軽イオンモード

AVF を入射器として、RRC と SRC で多段加速を行い、 H_2^+ 、 2H 、 4He 、 ^{14}N 、 ^{16}O 等を最高で 400 MeV/nucleon まで加速する。

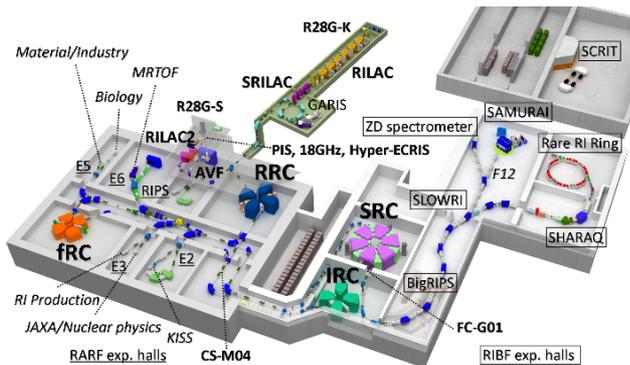


Figure 1: Schematic layout of RIBF facility at RIKEN Nishina Center for Accelerator-Based Science.

3. 運転状況

3.1 運転時間

Table 1 に本期間の運転統計を示す。ビーム強度、供給時間、および可用性(availability)を、加速モード、イオン種、エネルギー、および実験コースで区分して記した。可用性とは、ビームユーザーがマシンタイム(MT)として要求した時間(requested time)に対する実際に供給した時間(actual time)の比であり、加速器の安定運用の指標

としている。ユーザー事由で予定より早く実験を終了した場合は、供給時間が要求時間を下回ることになるが、ユーザーが必要とするビームは過不足なく供給したものとして可用性を 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ケースが多い)。

RIBF 実験は、2022 年 12 月に発生した SRC の重故障[14]に伴う中止以来、1 年 4 ヶ月ぶりに再開された。2024 年 4 月から 6 月にかけて計 1391.4 時間行われ、可用性は 95.8%であった。実照射時間は 2022 年のそれと同程度であるが、2021 年と比べると約 560 時間短い[15]。SRC の故障箇所はビーム取り出し用磁気チャンネル(MDC3)にあり、出口側ビームダクトにビームの一部が衝突したことによりダクトが溶融して真空漏れを起こしていた。その原因は、加速調整の結果としてビーム軌道が MDC3 の内周側へ僅かに偏向していたところ、fRC に起因するビームの不安定性が重なったことにあると考えられる。加えて、SRC の超伝導電磁石を冷却するために使われているヘリウム配管に不具合が発生していることが判明したため[14]、それらの対処が 2024 年初頭まで行われた。MDC3 についてはメーカーによるダクト修理の後、再発防止策が施された(3.2 項)。運転の再開にあたり、 ^{18}O -250 MeV/nucleon、 ^{70}Zn -345 MeV/nucleon、および ^{124}Xe -345 MeV/nucleon の 3 種のイオンを加速する MT が予定され、実施された。以下、各 MT について述べる。

^{18}O -250 MeV/nucleon の MT では、18GHz-ECR イオン源から十分な量が得られる $^{18}O^{6+}$ ビームのエミッタンスをスリットで制限することで、前回 2013 年 4 月の同モードでの加速実績と比べて各加速器の通過効率が改善した。SRC から取り出したビームの最大値は 488 particle nA で、その際の通過効率は AVF:34.3%、RRC:84.7%、SRC:75.7%であった。また、この運転により SRC の修理

Table 1: Summary of Accelerated Beams in This Period

Acceleration mode	Beam particle	Energy [MeV/nucleon]	Beam course	Beam intensity [particle nA]		Beam service time [h]		Availability [%]
				Requested	Actual	Requested	Actual	
RARF								
AVF-RRC	2H	135	E3A (Nuclear physics)	30	85.0	45.7	45.7	100.0
	^{12}C	135	E5A (Industry)	1	298	9.1	9.1	100.0
	^{12}C	135	E5B (Biology)	5	298	25.6	18.0	70.3
	^{40}Ar	95	E5A (Industry)	1	69.4	174.4	174.4	100.0
	^{56}Fe	90	E5B (Biology)	2	7.3	5.6	5.6	100.0
	^{84}Kr	70	E3A (JAXA)	1	3.2	17.6	17.6	100.0
	^{84}Kr	70	E5A (Industry)	1	13.1	248.2	164.4	66.2
	^{86}Kr	66	E6 (RIPS)	1	9.1	45.7	45.7	100.0
	^{129}Xe	35.58	E3A (JAXA)	1	1.6	11.9	11.9	100.0
^{129}Xe	35.58	E5A (Industry)	1	1.6	82.8	82.8	100.0	
RILAC2-RRC	4He	7.25	E3B (RI Production)	25000	33000	12.0	12.0	100.0
	^{51}V	6	E6 (KEK/MRTOF)	2500	2692	239.4	239.4	100.0
	^{136}Xe	8.60	E6 (KEK/MRTOF)	50	270	23.4	23.4	100.0
	^{136}Xe	10.75	E2B (KEK/KISS)	500	700	240.0	240.0	100.0
AVF-RRC-IRC	^{40}Ar	160	E5B (Biology)	2	23.9	20.9	20.9	100.0
				Subtotal		1202.2	1110.8	92.4
RIBF								
RILAC2-RRC-fRC-IRC-SRC	^{70}Zn	345	BigRIPS/SHARAQ/ ZD spectrometer/F12	500	517	312.0	311.4	99.8
	^{124}Xe	345	BigRIPS/SHARAQ/SAMURAI/ ZD spectrometer/Rare RI Ring	140	138	720.0	676.3	93.9
RILAC2-RRC-SRC	^{18}O	250	BigRIPS/SAMURAI	500	488	420.0	403.7	96.1
				Subtotal		1452.0	1391.4	95.8
				Total		2654.2	2502.2	94.3

後の健全性が確認された。

^{70}Zn -345 MeV/nucleon の MT では、上記の ^{18}O ビームの場合と同様、加速器の通過効率を重視した運転が行われ、BigRIPS に供給した最大ビーム量は 517 particle nA であった。ビームの供給中、加速器の主要箇所において通過効率が最も良かった時の値をビーム電流値と共に Table 2 に示す。通過効率はイオン源におけるビーム量で各所のビーム量を割った値である。5 台の加速器を直列運転し、途中チャージストリッパー (CS-M04) による荷電変換を 1 回行ったにも関わらず、全体の通過効率が 50 % を超えた。

^{124}Xe -345 MeV/nucleon の MT では、実験前の加速調整中に、fRC からの取り出しビーム量が僅かに減少すると、最終段の SRC からの取り出しビーム量が大幅に減少する(最大 1/3)という事象が頻発した。原因の調査を始めたところ、fRC の取り出し用静電チャンネル(EDC)の印可電圧を一旦下げてから戻すといった操作を行うことによってビームの状態がほぼ回復することが分かった (操作量は最大 30 kV)。EDC の不具合を疑い、高電圧電源、コントローラ、保護抵抗、大気側高電圧導入部と調査を

Table 2: Beam Transmission Efficiency for ^{70}Zn -345 MeV/nucleon

Faraday cup	Current [particle nA]	Transmission [%]
Ion source (U10)	979	100.0
RILAC2 extraction (S64)	800	81.7
RRC extraction (A01)	626	63.9
fRC extraction (F01bb)	626	63.9
CS-M04 extraction (M11)	557	56.9
IRC extraction (K01)	533	54.4
SRC extraction (G01)	503	51.4

進めたものの解決しなかった為、最終的に fRC を大気開放して EDC 本体の点検を行った。その結果、EDC 電極のリードロッド(給電ロッド)の付け根が若干変形していることと、給電ロッドの下部に取り付けられたコンタクトフィンガーを介して接触する、真空槽側の高圧導入部に放電痕が見られることが確認された。この接触部の不良が疑われた為、同部の清掃、リードロッドの付け直し、SRC で既に採用されている給電用ペンダント型電極(Fig. 2)の追加を行った。この処置によりビームの変動は収まり、その後約 1 か月に及ぶ長期の運転において 9 つのグループに安定したビームを供給することが出来た。

RARF 実験は概ね例年通りの計 1202.2 時間の照射を計画し、実照射時間は 1110.8 時間、可用度は 92.4 % であった。内訳は ^2H 、 ^{51}V 、 ^{86}Kr 、 ^{136}Xe を用いた原子核実験、 ^{12}C 、 ^{40}Ar 、 ^{84}Kr 、 ^{129}Xe を用いた産業利用の有償実験、 $^4\text{He}^+$ を用いた RI 製造、 ^{12}C 、 ^{40}Ar 、 ^{56}Fe を用いた生物実験であった。

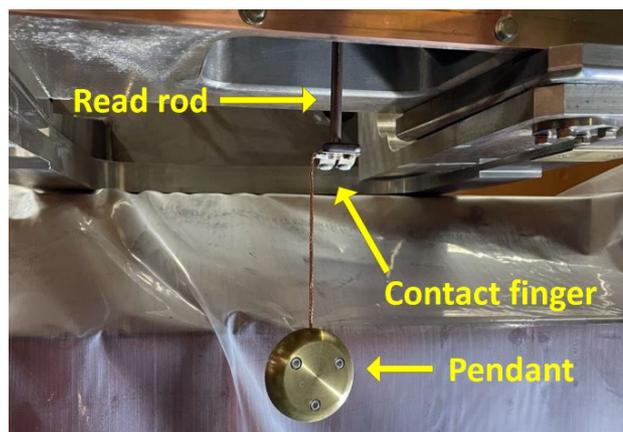


Figure 2: fRC EDC with a pendant-shaped electrode to supply high-voltage.

3.2 マシントラブル

実験スケジュールに影響したマシントラブルは 2 件あり、いずれも RRC において発生した。一件目は入射用静電チャンネル(EIC)の高電圧の印加不良であり、2 件目は、第一共振器(RF No.1)のムーバブルボックス冷却水の真空槽への漏れであった。それぞれが ^{12}C と ^{84}Kr 実験の可用度を低下させる原因となった。このトラブルに伴って中止された実験を補償するマシンタイムは、トラブルからの復帰後に順次開始されている。

3.2.1 RRC EIC 絶縁不良、あるいは高圧電源の不調

2024 年 12 月 18 日、加速調整を終えて実験開始の直前となった時、EIC に電圧が印加できなくなった。高圧ケーブルの絶縁不良と判明し、予め敷設してあった予備ケーブルと交換したものの、1 時間半後に再びケーブルの絶縁不良が起こった。同症状は 3 週間後にも再発した為、これまで交換に用いてきた予備ケーブルに比べ比較的新しい型のケーブルに交換した。又、EIC 本体の高圧導入部(ケーブルを差し込む部分)に絶縁ガスとして封入している窒素ガスが大気側へリークしていた為、ケーブル先端部の再加工を行った。その後 3 か月間は使用できていたが、4 月 2 日に 68 kV を印加中に再び印加不能となった。ケーブルの絶縁不良が疑われたものの、電源からケーブルを取り外して電源単体の動作試験を行ったところ、高電圧が出力されなかった為、電源を予備と交換して復旧した。これらの絶縁不良の元々の原因がケーブル、電源、および負荷のいずれにあるのかについては現状不明だが、以降これまで問題は再発していない。

3.2.2 RRC RF No. 1 ムーバブルボックス冷却水の真空槽側への漏れ

2024 年 1 月 19 日午前 6 時頃、加速調整中に共振器の真空度が悪化し始め、徐々に進行していった。加速調整が完了し、実験準備中につき待機していた 9 時 25 分に 1.4×10^{-4} Pa 台まで悪化した為、真空ポンプ等の点検をするが異常は見られなかった。その後 3.0×10^{-5} Pa に戻ったため実験へのビーム供給を開始したが、真空度は乱高下を繰り返し、悪化傾向が止まらなかった。RRC の励振システムには、機器を保護するためのインターロックが備わっている。真空度に関しては、 1.0×10^{-3} Pa よりも悪くなった場合に強制的に励振を落とし、再励振す

るためには 1.0×10^{-4} Pa まで回復するのを待たなければならぬ。このインターロックが、当日の 20 時 49 分からの 1 時間に 4 回働いた。その後は再励振しても数分で落ちてしまい、共振器の励振を維持することが困難になった。この為、運転継続は難しいと判断され、実験は中止となった。真空度の推移を Fig. 3 に示す。

RRC の共振器の内部には、周波数を可変とするためにムーバブルボックスが設置されている。後の調査により、ムーバブルボックスを支柱に固定している箇所(Fig. 4)から真空槽へ冷却水が漏れていたことが分かった。この固定部の O リングを交換することで問題は解決した。

3.3 SRC-MDC3 の改良された保護策

前述の通り、修理された SRC-MDC3 では、ビームロスに対する保護策を見直した。RIBF のサイクロトロンに装備されている全ての磁気チャンネルには、ビームから見て上下左右の方向に 4 枚のバップルスリットをビームの入射側に(場合によっては出射側にも)設置している。バップルスリットには主としてタンタル製の板が用いられ、ビームロスを電流として計測することで、ビームの軸出し調整の目安にしたり、インターロックの入力信号として利用

したりしている。

設置スペースが限られているため、従来は板厚 5 mm のバップルスリットが用いられてきた。しかし、ビームダクトを損傷させた Zn ビームに対しては厚さが不足していたため信号強度が低く、インターロックの閾値を超えなかったため破損を未然に防ぐことが出来なかった。そこで、厚さを 2 倍の 10 mm にすることで、ビームロスの検出感度を高めることとした。MDC3 の上流に設置されている MDC2 には、これまで厚さ 7 mm の板を設置していたが、併せて 10 mm に変更した。

更に、ダクトの温度を直接測定して常時監視出来るようにした。MDC3 の全体写真と補修箇所、および設置した温度計の位置を Fig. 5 に示す。全体写真(Fig. 5 (a))の丸で囲った部分のケーシング内部で損傷は起きていた。前年に報告した通り[14]、損傷部を銅のなめ付け溶接で塞いだ(Fig. 5 (b))。その後、溶接部の表面(Fig. 5 (c)①)、その下流の 2 箇所(同図②、③)、および①から見てダクトの反対側となる位置(同図④)の、合計 4 箇所に熱電対を設置した。

また、SRC の入射取り出し用静電チャンネル(EIC、EDC)を含めた温度監視システムを更新し、応答速度をこれまでの 100 ms から 1 ms へ高速化した。

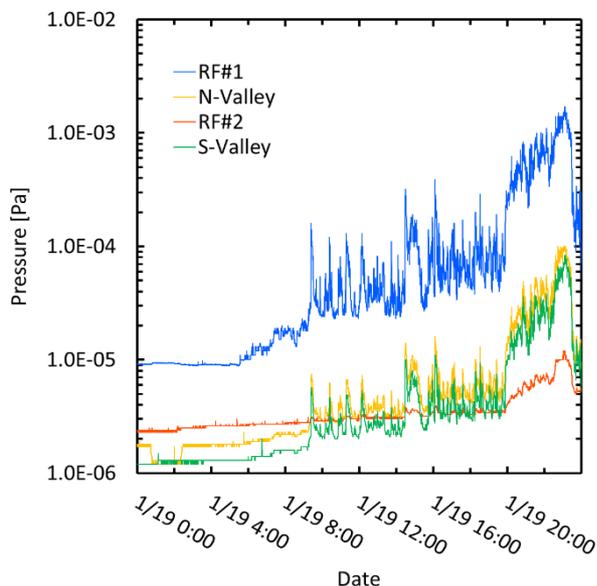


Figure 3: Fluctuation of vacuum for RRC.

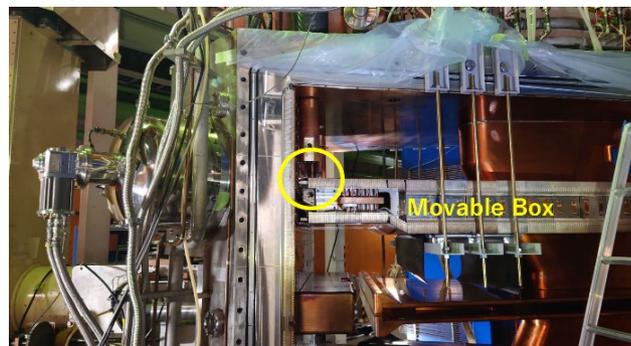


Figure 4: Leakage of cooling water from RRC No.1 resonator.

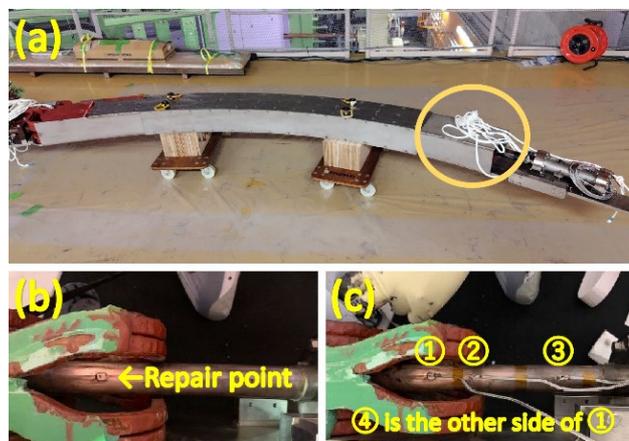


Figure 5: Photographs of SRC-MDC3, (a) overall, (b) leakage point of beam duct repaired by melt-run welding, (c) attached four thermocouples to beam duct.

4. 改良・更新

4.1 RRC-EIC,EDC 用高圧電源更新

RRC の入射と取り出しに使用されている静電チャンネル(EIC、EDC)の高圧電源は、予備の 1 台を含めて計 3 台ある。1986 年の稼働開始以来、修理を重ねて使用してきたが、老朽化が進んでいること、および専用高圧ケーブルの耐電圧性能に余裕がないことから電源の更新を進めている。更新にあたり、新電源で使われるケーブルが耐電圧 150 kV となり、径が太くなる事から電極側電圧導入部の端末も新たに設計した。またケーブルの曲げ半径も変わる事から敷設経路の変更を行い、今夏に電線管とケーブルの敷設、新電源用ラックの設置、および電圧印加テストを予定している。

4.2 FC-G01 の大強度対応型ファラデーカップ

RIBF のユーザーへ供給するビーム強度は、SRC 出口のビームラインに設置されているファラデーカップ (FC-G01) の計測値を基準としている。FC-G01 は RIBF における加速器全体の調整に使用されるため重要であるが、RIBF のビーム強度が低かった 2007 年に製作・設置された 3 kW 対応のものであり、近年のビーム強度の増加に対応できていなかった。元々、大強度ビームは RI ビーム分離生成装置 BigRIPS のビームダンプで停止させ、ビーム強度を計測する前提となっていたが、ユーザー側の準備ができるまでビームが通せないため運用上の問題がある。そこで、数十 kW のビーム強度に対応できる新型 FC-G01 の設計・製作を少しずつ進め、昨年度ようやく設置まで完了して本年度から運用を開始した。

新型 FC-G01 を実現するにあたって最大の難点は設置スペースの制限であった。旧来の FC-G01 は Fig. 6 の上段に示すように壁に開いた縦横 1.5 m、奥行き 1 m 弱の凹みに収めたチャンバーに取り付けられていた。大強度ビームに対応するためにはファラデーカップの冷却を強化しなければならない。そのために、可能な限り全長を長くする必要があった。四重極電磁石 (黄緑色) のビームライン下流から開口内壁面までの約 1.5 m に納まるように設計を行いつつ、必要な冷却能力を確保した。

新型 FC-G01 に更新した後の写真を Fig. 6 の下段に示す。新型 FC-G01 の本体は全長約 1.2 m の銅製で、

ビーム照射部分は 80 cm 程度のくさび形となっており、アルミ製角フランジから吊り下げる構造である。開口部には新型 FC-G01 を格納するアルミ製角チャンバーを設置した。クレーンの届く上流側 (同図右端) に角フランジを置き、遠隔で開口部内のチャンバーの真上までスライドさせた後、下降させて角チャンバーへ格納出来るような機構を設けた。四重極電磁石の上端面と開口部上壁面の間隔が小さいため、新型 FC-G01 をステッピングモーターによってビーム軸の左右方向に駆動させ、測定位置と待避位置との間を往復させる仕組みとなっている。

新型 FC-G01 専用の冷却水システムも設置した。熱負荷としては大きくないが、流速を上げるため 2.0 MPa で合計 660 L/min の冷却水を循環できるように設計した。流量計と圧力計の電子回路は放射線の影響により短時間で壊れるため、昔ながらの空気式伝送器と空電/空電変換器を使用している。

2024 年 4 月から新型 FC の運用を開始し、RIBF 実験において最大 12 kW のビームを止めて計測したが、設計上の余裕もあるため大きな問題は起こっていない。

5. まとめ

2023 年 8 月から 2024 年 7 月までの期間における全ビーム供給時間は 2502.2 時間、通期の可用性は 94.3 % であった。SRC の修理を終え、今後も更なるビームの大強度化と可用性の改善に向けた取り組みを行う。

参考文献

- [1] Y. Yano, "The RIKEN RI beam factory project: A status report", Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B 261, 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 Phys. Res. A 227, 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>

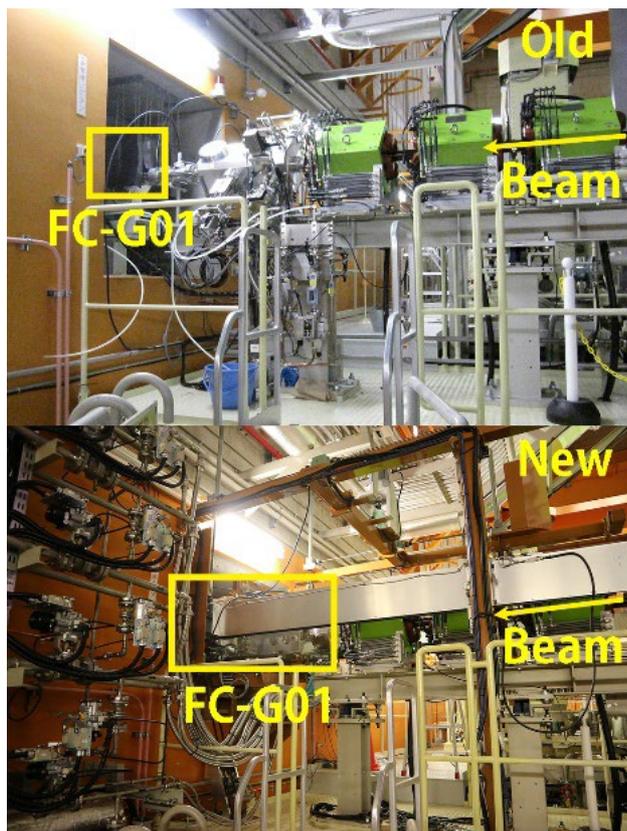


Figure 6: Faraday cup FC-G01 for extraction beam line of SRC used until FY2023 (upper panel), and new one designed for high power beam started to be used in FY2024 (lower panel).

PASJ2024 WTSP09

- [11] N. Sakamoto *et al.*, “High intensity heavy-ion-beam operation of RIKEN RIBF”, Proceedings of PASJ9, 2012, pp. 7-11.
- [12] J. Shibata *et al.*, “Status report on the operation of RIKEN AVF cyclotron”, Proceedings of PASJ2024, Yamagata, Aug. 2024, WTSP01, this meeting.
- [13] K. Kaneko *et al.*, “Present status of RILAC”, Proceedings of PASJ2024, Yamagata, Aug. 2024, WTSP07, this meeting.
- [14] R. Koyama *et al.*, “Operation report on ring cyclotrons in the RIBF accelerator complex”, Proceedings of PASJ2023, Funabashi, Aug.-Sep. 2023, TWSP01, pp. 1012-1016.
- [15] K. Kobayashi *et al.*, “Status report of the operation of RIBF ring cyclotrons”, Proceedings of PASJ2022, Online (Kyushu University), Oct. 2022, TWP003, pp. 1084-1088.