

理研 RIBF におけるリングサイクロトロンへの運転報告

OPERATION REPORT ON RING CYCLOTRONS IN THE RIBF ACCELERATOR COMPLEX

小山亮^{B)}, 大関和貴^{#, A)}, 福澤聖児^{B)}, 濱仲誠^{B)}, 石川盛^{B)}, 小林清志^{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)}, 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)}, 坂本成彦^{A)}, 須田健嗣^{A)}, 内山曉仁^{A)}, 渡部秀^{A)}, 渡邊環^{A)}, 渡邊裕^{A)}, 山田一成^{A)}
Ryo Koyama^{B)}, Kazutaka Ozeki^{#, A)}, Seiji Fukuzawa^{B)}, Makoto Hamanaka^{B)}, Shigeru Ishikawa^{B)}, Kiyoshi Kobayashi^{B)}, Ryuichi Moteki^{B)}, Takeshi Nakamura^{B)}, Minoru Nishida^{B)}, Makoto Nishimura^{B)}, Junsho Shibata^{B)}, Noritoshi Tsukiori^{B)}, Kazuyoshi Yado^{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)}, Naruhiko Sakamoto^{A)}, Kenji Suda^{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 2022 to July 2023. 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、2022 年 8 月から 2023 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。

[#] k_ozeki@riken.jp

2. 加速モード

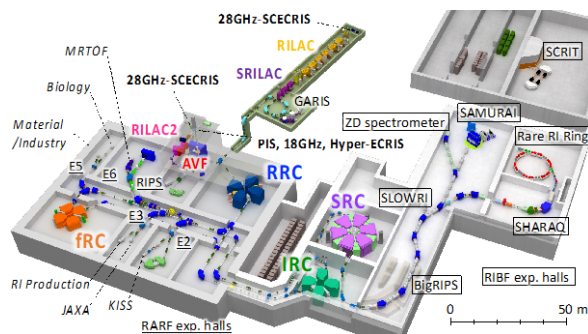


Figure 1: Schematic layout of RIBF facility at RIKEN Nishina center.

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 サイクロトロン、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、 $^{28}\text{Si}^{14+}$ までのイオンで実績がある。これとは別に、AVF サイクロトロンを入射器として

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 によりカスケード加速を行う。fRC の前後において 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、 $^{40}\text{Ar}^{18+}$ で加速実績がある。

4) RIBF 実験: 軽イオンモード

AVF サイクロトロンを入射器として、RRC と SRC でカスケード加速を行い、 H_2^+ 、 ^2H 、 ^4He 、 ^{14}N 、 ^{16}O 等を最高で 400 MeV/nucleon まで加速する。

3. 運転状況

3.1 運転統計

Table 1 にリングサイクロトロンの本期間のビーム強度・供給時間・可用性 (availability) を示す。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た。可用性とは、ビームユーザーがマシンタイム (MT)、あるいはマシンスタディ (MS) として要求した時間 (requested time) に対する実際に供給できた時間 (actual time) の比であり、加速器の安定運用の指標としている。加速器側の調整時間の短縮等で、要求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ビーム可用性が 100 % を超えることがある。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)。また、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、これも可用性 100 % としている。

統計データを要約すると RARF 側においては実照射時間が計 1,030 時間で昨年の 1,176 時間から若干の減少となった。実験は全て順調に行われ、可用性は 100 % を達成している。

RIBF 側については本期間最初のシリーズとなった 12 月の ^{70}Zn -345 MeV/nucleon MT が、ビームロスに伴うトラブルで 1 グループ目の実験中に途中終了となってしまった。重故障であったため以降の MT も全てキャンセルとなり、実照射時間は 149 時間で昨年の 1,377 時間から大幅減少となった。可用性に関してはこの 1 グループ目の要求/照射時間で計算し、77.4 % であった。途中終了となってしまったものの、取り出しビーム量は過去最大の 870 particle nA を達成した。上記トラブルについては次項で述べる。

RARF・RIBF 合わせての実照射時間は 1,178 時間、可用性が 96.5 % であった。

3.2 SRC-MDC3 真空リーク

2022 年 12 月 5 日よりおよそ 2 週間の予定で RILAC2-RRC-fRC-IRC-SRC を用いた ^{70}Zn -345 MeV/nucleon の MT が開始された。およそ 750 particle nA のビームを BigRIPS/SHARAQ コースに供給中の同年 12 月 11 日 21 時 16 分頃に SRC の南側バレー箱 (VLB2) を中心と

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	^{12}C	135	E5A (Industry)	5	191.7	11.9	11.9	100.0
	^{12}C	135	E5B (Biology)	5	191.7	13.2	13.2	100.0
	^{14}N	70	E3B (RI Production)	100	157.1	6.0	6.0	100.0
	^{14}N	135	RRC Machine study	150	164.3	30.8	30.8	100.0
	^{40}Ar	95	E5A (Industry)	1	61.8	131.0	131.0	100.0
	^{56}Fe	90	E5B (Biology)	2	6.3	7.1	7.1	100.0
	^{84}Kr	70	E3A (JAXA)	1	10.0	24.0	24.0	100.0
	^{84}Kr	70	E5A (Industry)	3	9.4	238.0	238.0	100.0
	^{129}Xe	35.58	E3A (JAXA)	1	1.1	11.9	11.9	100.0
	^{136}Xe	36	RRC Machine study	1	0.1	22.0	22.0	100.0
	^4He	7.25	E3B (RI Production)	25000	55000.0	45.7	45.7	100.0
	RILAC2-RRC	^{51}V	6	E6 (KEK/MRTOF)	3000	3038.5	192.0	192.4
^{129}Xe		36	RRC Machine study	1	0.7	25.8	25.8	100.0
^{136}Xe		7.20	E6 (KEK/MRTOF)	100	120.0	36.0	36.0	100.0
^{136}Xe		10.75	E2B (KEK/KISS)	250	315.0	104.0	104.0	100.0
^{136}Xe		10.75	E3A (JAXA)	1	250.0	30.5	30.6	100.5
^{136}Xe		10.75	E6 (KEK/MRTOF)	100	160.6	36.0	36.0	100.0
^{238}U		10.75	E5A (Material)	10	142.9	47.8	47.8	100.0
AVF-RRC-IRC	^{40}Ar	160	E5B (Biology)	2	22.2	15.7	15.7	100.0
				Subtotal		1029.3	1029.8	100.0
RIBF								
RILAC2-RRC-IRC-IRC-SRC	^{70}Zn	345	BigRIPS+SHARAQ	1000	869.9	192.0	148.5	77.4
				Subtotal		192.0	148.5	77.4
				Total		1221.3	1178.3	96.5

した急激な真空悪化に伴うインターロックが動作しビーム供給が停止した。即日の He リークハントにより、SRC の取り出しマグネティックチャンネル MDC3 周辺で大きなリークが検出されたため、重故障宣言を行い MT 中止が決定した。

その後より詳細な He リークハントやファイバースコープを用いた調査により、MDC3 出口側のビームダクトにリーク箇所を特定し、担当メーカーに修理依頼となった。リーク箇所修復のためには MDC3 を SRC のセクターマグネット内から外部に取り出す必要があったため、1) SRC の該当上部磁気シールドを撤去し、2) 隣接している第四共振器 (RES4) を後退してスペースを作り、3) MDC3 を引き出した (Fig. 2 参照)。リーク箇所については銅のなめ付け溶接によって修復された。修復前後の様子を Fig. 3 に示す。

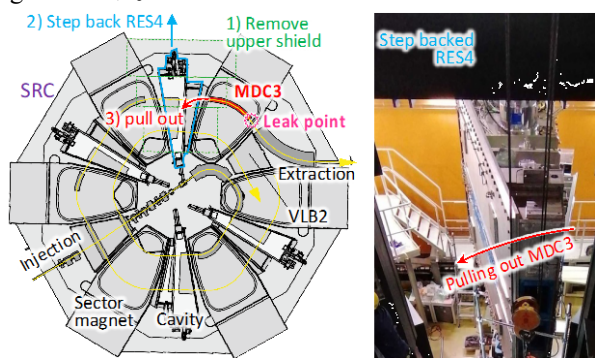


Figure 2: Pulling-out work of SRC-MDC3.

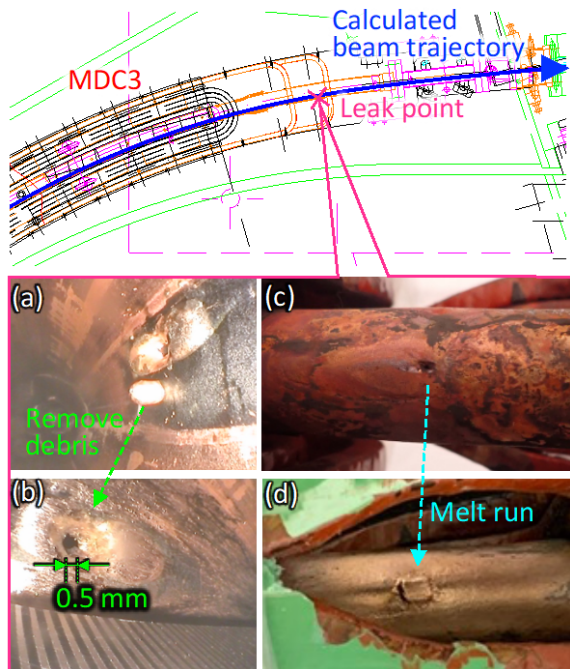


Figure 3: Photos of leak point of SRC-MDC3 (a-c) before and (d) after fixing work, which are taken from (a, b) inside and (c, d) outside of beam duct.

リーク発生時の様子を振り返ると、まず機器の誤作動など顕著な事象の記録は残っていない。一方でビーム

モニタリングシステム[14]のデータを見返すと Fig. 4 に示した様に真空リーク発生前の 20 秒ほど前から SRC の通過効率が 5 %悪化していたことがわかった。これはビームパワーにして 700 W 近くビームロスが増加していたことになり、これによってビームダクトに穴を開けたと考えている。ビームタイミングと通過効率の変化は fRC より下流から見えており、少なくとも fRC から上流に SRC におけるビームロスを増やす不安定要因があったと考えられるが原因は明確になっていない。いずれにしてもビームロスを検知するインターロックが不十分であったことは明らかであり、MDC にサーモカップルの取り付け、パッフルスリットの整備などの対策にて再発防止を図っている。

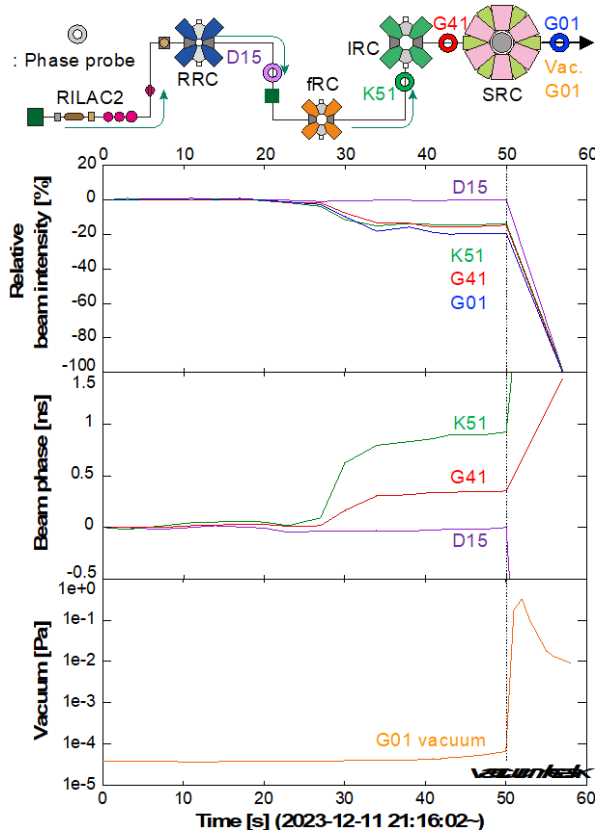


Figure 4: Beam intensity and beam phase around the time of vacuum leak at SRC-MDC3.

3.3 その他トラブル

- 2022 年 11 月 28 日、SRC-RES4 共振器のアンプゲインが低下し 400 kV 程度しか加速電圧がかけられなくなった(平常時:600 kV)。調査・調整時の 2 次被害も発生し、プレート電源クローバ盤回路交換(保護ダイオード焼損)、トランジスタアンプ交換(アンバランス異常)、終段アンプ真空管交換(ゲイン低下疑い)、及び同真空管スクリーングリッド電源を交換したが解決しなかった。最終的に同真空管フィラメント電源が故障しており、制御系表示値が見かけ正常であるのに対して、実際の電流値は 200 A 程低下していることが判明し、交換により復旧した。
- 2022 年 11 月 30 日から、fRC の W 共振器の RF が度々アンプ異常で落ちると共に、プレート電源変電所にて漏電が検知される状態となった。同年 12 月

8 日にはプレート電源起動直後に漏電電流が 7 A 流れる状況となった。プレート電圧用昇圧トランス (400 V/4250 V) の故障が判明して待機品と交換して復旧した。

- 2023 年 4 月 19 日、RRC#1 共振器を 24 MHz にて励振中に出力が不安定になる症状を繰り返しているうちに中間段アンプのスクリーン過電流で直流電源が落ちた。様々調査の末、中間段アンプ内のバイパスコンデンサ焼損が判明し、交換により復旧した (Fig. 5)。このコンデンサはチョークコイルと分圧回路を形成し、出力同調回路で発生する高調波から直流電源を保護する役割を担っている。またこの異常発生の際に終段プレート電源の高圧真空遮断器 (VCB) にも異常が発生し、以後投入できなくなったが、VCB 内部のバネ機構の修理にて復旧した。

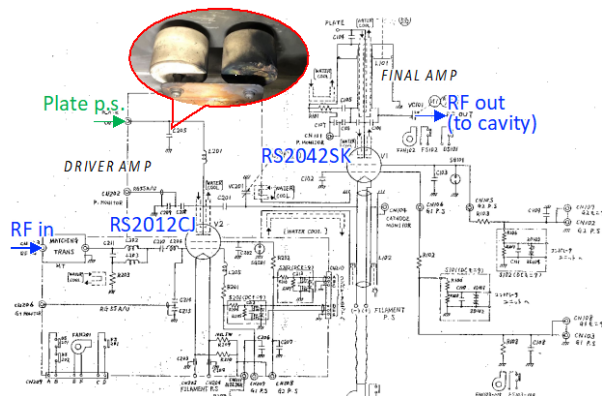


Figure 5: Burnt bypass-condenser in the driver amp of RRC-cavity#1.

4. 改良・開発項目

4.1 RRC トリムコイル・入射取出し系電磁石電源更新

4 セクターリングサイクロトロンである RRC は各セクターマグネットにそれぞれ 26 のトリムコイルを有する。これらへの通電には 1986 年の竣工以来、9 筐体 63 チャンネルのドロップ電源が使用されてきたが、老朽化対策として 2013 年度に 1 筐体 6 電源、昨年度 5 筐体 36 チャンネルがスイッチング電源に置きかえられた。昨年度置き換えた電源の内訳は 600 A/20 V が 17 台、600 A/50 V が 5 台、500 A/30 V が 2 台、400 A/10 V が 4 台、及び 50 A/12.5 V (バイパス) が 8 台である。更新にあたってはコストダウンと省スペース化のため、実績運転パラメータを基に各チャンネルの極性切換器の必要性が見直され、電源 8 台の極性切替器を撤廃し、1 台については追加された。36 年間使用されてきた旧電源は、異なる仕様の複数の電源が 1 筐体に収められていたが、新電源は 1 チャンネル 1 ユニットでコンパクトに規格化されており、故障時には手動リフターで待機品との交換が可能となった。電流安定度は $\pm 5 \times 10^{-6}$ で旧電源より 1 桁程良い。残る 3 筐体のトリムコイル電源は今後数年かけて更新の予定である。

一方、RRC の入射取出し系で使用されてきた出力電流の大きな電源 (ダイポール電磁石用 1600~2700 A、マグネティックチャンネル用 800~1500 A、総数 9 台) につ

いては老朽化対策として更新改造を順次進め、部品の調達を含めると 6 年をかけて昨年度終了した。この更新改造においては電流フィードバックの検出器がシャント抵抗から DCCT へ置き換えられ、フィードバック制御回路も更新された。これにより必要な電流安定度が確保された。さらに主回路の電解コンデンサーと冷却水のフロースイッチの交換も行われた。

4.2 ビームインターロックシステムの更新

RIBF における加速器関連装置保護を目的としたビームインターロックシステム (BIS) には Melsec PLC を中核としたシステムが使用されている [15]。この BIS は 2006 年の RIBF 稼働に合わせて開発されたものであるが、現在では構成モジュール代替機入手が困難、接続信号数増加への対応が困難、そして応答速度の不足、などの問題を抱える様になった。そこで NI 社の CompactRIO を中核とした、Fig. 6 に示した新システムへの更新が進行中である [16]。新 BIS の応答速度は現行 BIS の約 15 ms より大幅に短縮され、およそ 250 μ s が達成できることが確かめられた。既に RIBF の一部の領域で現行 BIS と併用する形でテストを行なっているが大きな問題は発生していない。今後は領域の拡張、ハード・ソフトの整備を継続し来年度中の完全リプレイスを目指している。

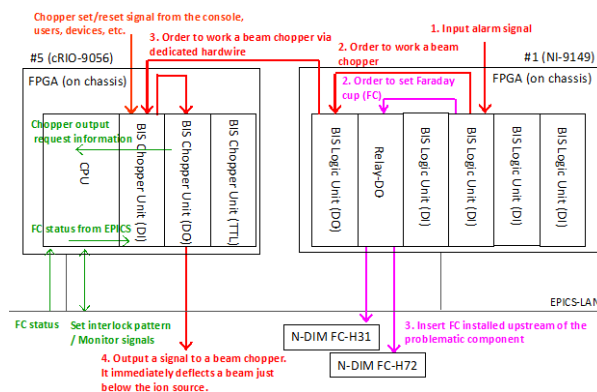


Figure 6: Hardware configuration and process flow in the new beam interlock system.

4.3 荷電変換リングを用いた高度化計画

ウランビームの強度を現状の約 20 倍 (~2000 particle nA) に増強するための高度化計画を進めている。現状のウランビームの加速スキームでは、2 回の荷電変換における効率はおよそ 5% である。言い換えると 95% のビームを捨てていることとなり、大強度化を阻む大きな問題となっている。この問題を解決するために、荷電変換の際に捨てられてきたビームをリサイクルする新しい装置「荷電変換リング (CSR)」 [17-19] を導入し、荷電変換効率を約 10 倍に大幅向上させるとするのが計画の核心である。

我々はこれまで CSR 実現のためのデザインワークと要素技術開発を進めてきた。特に実現の鍵となるコンパクトな四重極電磁石と取出し用電磁石について、プロトタイプ作成と磁場測定を完了し、必要な性能を達成している [20, 21]。更に詳細な磁場測定、及びステアリング機能を狙った四重極電磁石の駆動・ビームテストも計画されており、これら制御系の準備を行なっている。それぞれ

Fig. 7-a)及び b)にその構成を示す。

また、第1ストリッパーとなるCSR1について網羅的な技術デザインレポートの作成を完了し、外部専門家で構成された技術諮問委員会へ提出した。2023年6月15、16日に第1回委員会が開催され、計画推進のための有益な議論と提言が得られた。様々な技術的裏打ちが得られており、計画としての実行段階にあると言える。

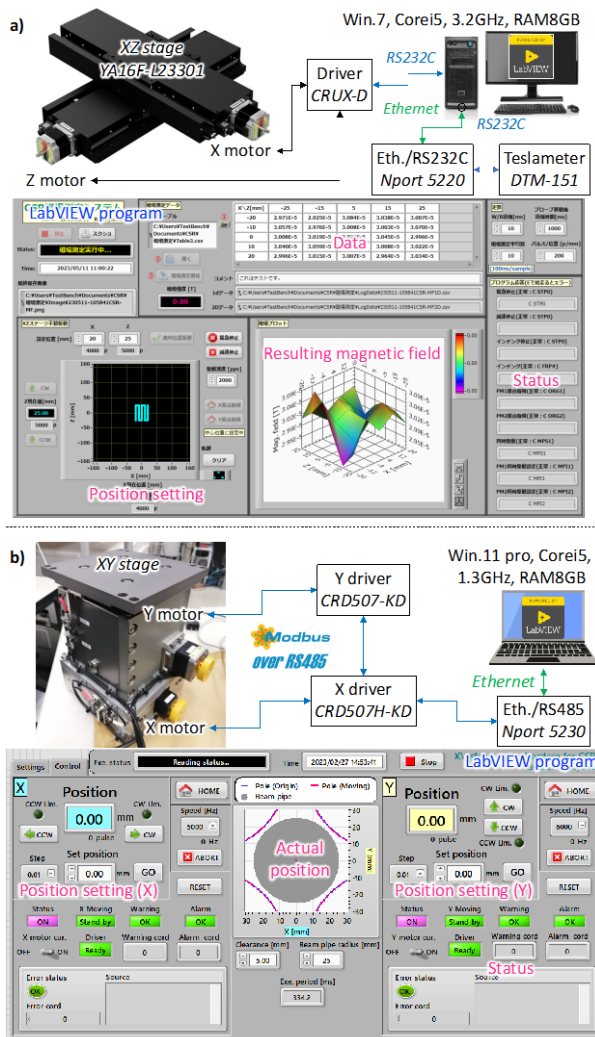


Figure 7: Outline of a) the magnetic field measurement system and b) the control system of XY stage for CSR.

5. まとめ

2022年8月から2023年7月までのリングサイクロトロンの実照射時間は1,178時間、可用性は96.5%であった。このうちRIBFのみで集計するとSRC-MDC3の重故障の影響で例年より大幅に短い149時間であった。現在、SRCはヘリウム冷却配管にリークが見つかり、交換部品製作中であるため、今年度中の運転再開の目処が立っていない状態にある。この間にビームインターロックの整備を含め、次の運転再開に向けて準備を進めているところである。

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>
- [11] N. Sakamoto *et al.*, "High intensity heavy-ion-beam operation of RIKEN RIBF", Proceedings of PASJ9, 2012, pp. 7-11.
- [12] M. Nishimura *et al.*, "Status report on the operation of RIKEN AVF cyclotron", Proceedings of PASJ2023, Funabashi, Aug. 2023, TWSP12.
- [13] A. Yusa *et al.*, "Present status of RILAC", Proceedings of PASJ2023, Funabashi, Aug. 2023, TWSP05.
- [14] R. Koyama *et al.*, "Online monitoring of beam phase and intensity using lock-in amplifiers", Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 729, 2013, pp. 788-799.
- [15] M. Kobayashi-Komiyama *et al.*, "Status of control and beam interlock system for RARF and RIBF", RIKEN Accel. Prog. Rep. 39, 2006, p.239.
- [16] M. Komiyama *et al.*, "Development and test operation of the prototype of the new beam interlock system for machine protection of RIBF", RIKEN Accel. Prog. Rep. 56, 2023, to be published.
- [17] H. Imao *et al.*, "Charge Stripper Ring for cyclotron cascade", in Proceedings of the 21st International Conference on Cyclotrons and their Applications (CYC2016), Zurich, Switzerland, Sep. 2016, pp. 155-159.
- [18] H. Imao, "Charge Stripper Ring Plan at RIKEN RIBF", J. Particle Accelerator Society of Japan, Vol. 17, No. 4, 2020, pp. 260-268.
- [19] H. Imao, "Charge Stripper Ring for RIKEN RI Beam Factory", JINST 15, 2020, P12036.
- [20] H. Imao, "The present status and future plan with charge stripper ring at RIKEN RIBF", in Proceedings of the 13th International Particle Accelerator Conference (IPAC2022), Bangkok, Thailand, May 2022, pp. 796-801.
- [21] H. Imao, "Status update of the Charge Stripper Rings project", JINST 18, 2023, P03028.