

## 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

濱仲誠<sup>B)</sup>, 大関和貴<sup>#A)</sup>, 福澤聖児<sup>B)</sup>, 石川盛<sup>B)</sup>, 小林清志<sup>B)</sup>, 小松田恭平<sup>B)</sup>, 小山亮<sup>B)</sup>, 茂木龍一<sup>B)</sup>,  
仲村武志<sup>B)</sup>, 西田稔<sup>B)</sup>, 西村誠<sup>B)</sup>, 柴田順翔<sup>B)</sup>, 矢富一慎<sup>B)</sup>, 足立泰平<sup>A)</sup>, 段塚知志<sup>A)</sup>, 藤巻正樹<sup>A)</sup>,  
福西暢尚<sup>A)</sup>, 長谷部裕雄<sup>A)</sup>, 日暮祥英<sup>A)</sup>, 池沢英二<sup>A)</sup>, 今尾浩士<sup>A)</sup>, 上垣外修一<sup>A)</sup>, 木寺正憲<sup>A)</sup>, 込山美咲<sup>A)</sup>,  
熊谷桂子<sup>A)</sup>, 眞家武士<sup>A)</sup>, 三宅泰斗<sup>A)</sup>, 長友傑<sup>A)</sup>, 中川孝秀<sup>A)</sup>, 中村仁音<sup>A)</sup>, 西隆博<sup>A)</sup>, 大西純一<sup>A)</sup>,  
奥野広樹<sup>A)</sup>, 坂本成彦<sup>A)</sup>, サキラヤン グリニスメイ<sup>A)</sup>, 須田健嗣<sup>A)</sup>, 内山暁仁<sup>A)</sup>, 渡邊環<sup>A)</sup>, 渡邊裕<sup>A)</sup>, 山田一成<sup>A)</sup>  
Makoto Hamanaka<sup>B)</sup>, Kazutaka Ozeki<sup>#A)</sup>, Seiji Fukuzawa<sup>B)</sup>, Shigeru Ishikawa<sup>B)</sup>, Kiyoshi Kobayashi<sup>B)</sup>,  
Kyohei Komatsuda<sup>B)</sup>, Ryo Koyama<sup>B)</sup>, Ryuichi Moteki<sup>B)</sup>, Takeshi Nakamura<sup>B)</sup>, Minoru Nishida<sup>B)</sup>, Makoto Nishimura<sup>B)</sup>,  
Junsho Shibata<sup>B)</sup>, Kazuyoshi Yadomi<sup>B)</sup>, Taihei Adachi<sup>A)</sup>, Tomoyuki Dantsuka<sup>A)</sup>, Masaki Fujimaki<sup>A)</sup>,  
Nobuhisa Fukunishi<sup>A)</sup>, Hiroo Hasebe<sup>A)</sup>, Yoshihide Higurashi<sup>A)</sup>, Eiji Ikezawa<sup>A)</sup>, Hiroshi Imao<sup>A)</sup>, Osamu Kamigaito<sup>A)</sup>,  
Masanori Kidera<sup>A)</sup>, Misaki Komiyama<sup>A)</sup>, Keiko Kumagai<sup>A)</sup>, Takeshi Maie<sup>A)</sup>, Yasuto Miyake<sup>A)</sup>,  
Takashi Nagatomo<sup>A)</sup>, Takahide Nakagawa<sup>A)</sup>, Masato Nakamura<sup>A)</sup>, Takahiro Nishi<sup>A)</sup>, Jun-ichi Ohnishi<sup>A)</sup>,  
Hiroki Okuno<sup>A)</sup>, Naruhiko Sakamoto<sup>A)</sup>, Glynnis Mae Saquilayan<sup>A)</sup>, Kenji Suda<sup>A)</sup>, Akito Uchiyama<sup>A)</sup>,  
Tamaki Watanabe<sup>A)</sup>, Yutaka Watanabe<sup>A)</sup>, Kazunari Yamada<sup>A)</sup>  
<sup>A)</sup> RIKEN Nishina Center, <sup>B)</sup> 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 2024 to July 2025. 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 responses to troubles occurred in this period are reported.

#### 1. はじめに

理化学研究所 核科学研究所 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ることで多段階加速される途中で、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, Rare RI Ring) 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、2024年8月から2025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。

<sup>#</sup> k\_ozeki@riken.jp

#### 2. 加速モード

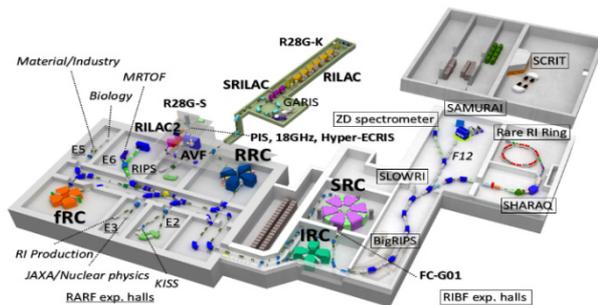


Figure 1: Schematic layout of RIBF facility at RIKEN Nishina Center for Accelerator-Based Science.

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、 $^{28}\text{Si}^{14+}$ 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  $^{40}\text{Ar}$  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、 $^{238}\text{U}$ 、 $^{124}\text{Xe}$ 、 $^{70}\text{Zn}$  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、 $^{40}\text{Ar}$ 、 $^{48}\text{Ca}$ 、 $^{70}\text{Zn}$ 、 $^{86}\text{Kr}$  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 を入射器として、RRC と SRC で多段加速を行い、 $\text{H}_2^+$ 、 $^2\text{H}$ 、 $^4\text{He}$ 、 $^{14}\text{N}$ 、 $^{16}\text{O}$  等を最高で 400 MeV/nucleon まで加速する。

### 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、2024 年 10 月から 12 月、2025 年 5 月から 7 月にかけて行われた。計 1401.3 時間行われ、可用性は 94.2%であった。実照射時間は 2023 年 8 月から 2024 年 7 月までのそれと同程度であった[13]。この1年間で、 $^{238}\text{U}$ -345 MeV/nucleon、 $^{70}\text{Zn}$ -345 MeV/nucleon、および  $^{136}\text{Xe}$ -345 MeV/nucleon の 3 種のイオンを加速する 4 つの MT が予定され、実施された。以下、各 MT について述べる。

$^{238}\text{U}$ -345 MeV/nucleon の MT は、2024 年 11 月、2025 年 5 月に行われた。BigRIPS に供給した最大ビーム量は 72.8 particle nA で、可用性は両 MT を通じて 91.9%であった。両 MT 中に fRC-RF プレート電源昇圧トランスの故障トラブルが発生した (3.2.1 項)。両トラブルともに発生日時が週末ということもあり、復旧まで 2-3 日を要したが、待機品への交換作業自体は半日程度で完了した。

$^{70}\text{Zn}$ -345 MeV/nucleon の MT では、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 650 particle nA であった。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昨年度同様、全体の通過効率が 50%を超えた[14]。

$^{136}\text{Xe}$ -345 MeV/nucleon の MT は、2024 年 11 月に行われ、最大ビーム量は 53.8 particle nA で可用性は 95.1%であった。10 月 5 日に SRC 超伝導メインコイル、トリムコイルが低速放電でトリップするトラブルが発生。これは He 冷凍機のインターロック系の信号にノイズが乗り誤信号を拾ってしまったためである。本実験は、要求量が 40 particle nA であったので、イオン源出口にあるスリット

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	
<b>RARF</b>								
AVF-RRC	$^2\text{H}$	135	D16	30	21.0	24.0	21.2	88.5
	$^{12}\text{C}$	135	E5A (Industry)	1	320.0	38.5	27.4	71.2
	$^{12}\text{C}$	135	E5B (Biology)	5	320.0	14.5	14.5	100.0
	$^{40}\text{Ar}$	95	E5A (Industry)	1	63.5	231.4	231.4	100.0
	$^{56}\text{Fe}$	90	E5B (Biology)	2	2.2	1.6	1.6	100.0
	$^{84}\text{Kr}$	70	E3A (JAXA)	1	4.5	18.0	16.7	93.0
	$^{84}\text{Kr}$	70	E5A (Industry)	1	12.2	470.7	468.1	99.4
	$^{84}\text{Kr}$	70	E6 (RIPS)	10	9.7	60.0	58.1	96.8
	$^{129}\text{Xe}$	35.58	E3A (JAXA)	1	2.7	18.0	18.0	100.0
	$^{129}\text{Xe}$	35.58	E5A (Industry)	1	2.7	44.8	44.8	100.0
RILAC2-RRC	$^4\text{He}$	7.25	E3B (RI Production)	50000	33000.0	22.2	22.1	99.6
	$^{136}\text{Xe}$	8.60	E6 (KEK/MRTOF)	250	300.0	12.0	11.0	91.8
	$^{136}\text{Xe}$	10.75	E2B (KEK/KISS)	250	700.0	206.9	205.7	99.4
AVF-RRC-IRC	$^{40}\text{Ar}$	160	E5B (Biology)	2	2384.6	15.1	15.1	100.0
<b>Subtotal</b>						1177.8	1155.8	98.1
<b>RIBF</b>								
RILAC2-RRC-IRC-IRC-SRC	$^{70}\text{Zn}$	345	BigRIPS-F12/ZD spectrometer	650	650.0	300.0	303.3	101.1
	$^{136}\text{Xe}$	345	BigRIPS-F12/SAMURAI	40	53.8	204.0	194.1	95.1
	$^{238}\text{U}$	345	BigRIPS-F12/ZD spectrometer	70	69.8	456.0	419.0	91.9
	$^{238}\text{U}$	345	BigRIPS-F12/ZD spectrometer	70	72.7	528.0	484.9	91.8
<b>Subtotal</b>						1488.0	1401.3	94.2
<b>Total</b>						2665.8	2557.0	95.9

(SL-U10)を使いビーム量を制限して行われた。

RARF 実験は概ね例年通りの計 1177.8 時間の照射を計画し、実照射時間は 1155.8 時間、可用度は 98.1%と非常に高い可用度を実現できた。内訳は  $^2\text{H}$ 、 $^{84}\text{Kr}$ 、 $^{136}\text{Xe}$  を用いた原子核実験、 $^{12}\text{C}$ 、 $^{40}\text{Ar}$ 、 $^{84}\text{Kr}$ 、 $^{129}\text{Xe}$  を用いた産業利用の有償実験、 $^4\text{He}$  を用いた RI 製造、 $^{12}\text{C}$ 、 $^{40}\text{Ar}$ 、 $^{56}\text{Fe}$  を用いた生物実験であった。2022 年 11 月より  $^{129}\text{Xe}$  を用いた加速が行われているが、RRC 取り出しビーム量も、年々通過効率が改善しビーム量が増えてきている。Figure 2 にこれまでの  $^{129}\text{Xe}$ -MT での AVF、RRC の通過効率及び RRC 取り出しビーム量の推移を示す。

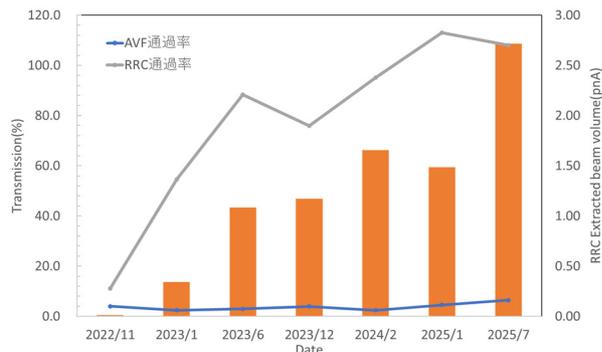


Figure 2: AVF and RRC transmission and extracted beam intensity for each  $^{129}\text{Xe}$ -MT.

### 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同様の内容で 2 件、その他、RF 関係のトラブルで目立つものがあった。

2024 年 11 月に fRC-RF-W 共振器、2025 年 5 月には fRC-RF-E 共振器の RF がプレート電源クローバ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た。プレート電源用昇圧トランスの故障と判明した。2022 年、2023 年にも同様のトラブルが発生していたため[15]、待機品への交換はいずれも半日程度で時間を要さず交換できた (Fig. 3)。

2025 年 7 月 9 日に IRC-RF-ES 共振器の RF 系の LV

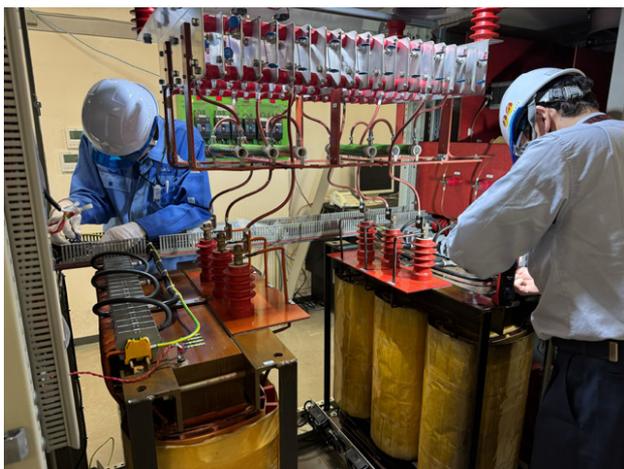


Figure 3: Transformer replacement work.

が ON できなくなるトラブルが発生した。フィラメント電源と出力ケーブルを切り離して調査したところ、中間段アンプ側に問題があることが分かりアンプ内を調査した結果、真空管のセラミック部分が破損していた(Fig. 4)。原因は現在のところ分かっていない。



Figure 4: Broken vacuum tube for intermediate stage amplifier of IRC-RF-ES resonator.

## 4. 改良・更新

### 4.1 新 Beam InterLock システム構築

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 2006 年より Melsec PLC を中核としたシステムが使用されており、RIBF 稼働に合わせて開発された[15]。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、そしてビーム強度増強による応答速度の不足、などの問題を抱える様になり、2021 年より National Instruments 社の CompactRIO を使い後継システムとして開発を進めている。新型 BIS はアラート信号を受信してビームを停止するために必要な信号を出力するのに要する時間が、デジタル入力信号で平均  $130 \mu\text{s}$  (Fig. 5)、アナログ入力信号で平均  $470 \mu\text{s}$  (Fig. 6)で、旧 BIS での応答速度が  $15 \text{ms}$  であることから、大幅な応答時間短縮がなされた。現在、旧 BIS と並列接続で運用しているが、2024 年 3 月には、ステーションが 7 つへ増設され、2024 年 5 月の新型 BIS の試験運用開始後、BigRIPS を用いた初の高強度ビーム実験では、エラー状況を報告せずにファラデーカップが挿入されるトラブルが多発した。1 か月以上の調査の結果、新しい BIS の信号リセットに関するロジックエラーがトラブルの原因であることが判明した。瞬間的なエラーを特定するために、新型 BIS のほとんどの入力信号は、オペレーターがエラー内容をチェックするまでエラー状態を保持するように設定されているが、ロジックミスにより

この設定が効かなくなっていた。また、イーサネット経由でエラー履歴を記録するシステムは、瞬発的に出るエラーイベントを取得できなかった。これらの問題はシステムのロジックを修正することで解決され、その後、新型 BIS は正常に動作した[16]。

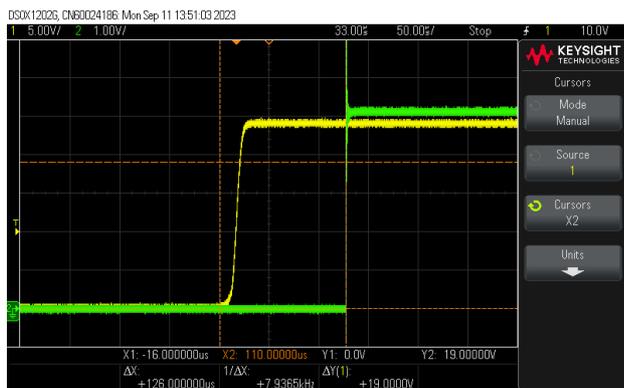


Figure 5: Signal output timing at RIBF-BIS2 DI Station (130  $\mu$ s in average). The yellow and green lines represent the input and output signals, respectively.

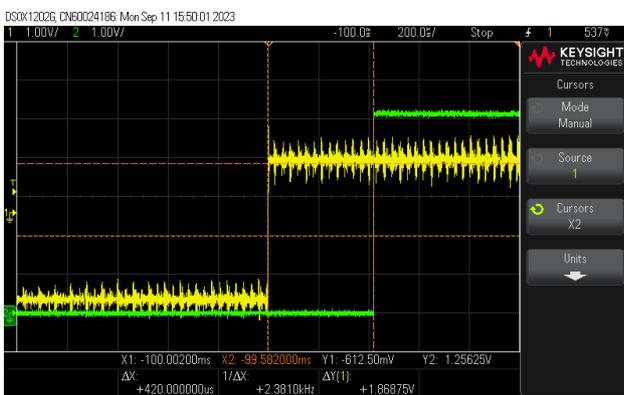


Figure 6: Signal output timing at RIBF-BIS2 AI Station (470  $\mu$ s in average). The yellow and green lines represent the input and output signals, respectively. Pulses are output from a function generator at a 10 kHz cycle.

#### 4.2 RRCトリムコイル電源更新

4 セクター型リングサイクロトロンである RRC には、各セクターマグネットに 26 本のトリムコイルが設置されている。1986 年の運転開始以降、これらのコイルには 60 台以上の専用電源が用いられてきたが、老朽化対策として、2013 年度から 2023 年にかけて全体の約 70% に相当する電源をスイッチング方式の電源に置き換えた[15]。さらに 2025 年 3 月には、トリムコイル用電源 3 台とバイパス回路用 8 台の更新を行なった。更新にあたっては、長年のビーム運転を通じて得られた知見をもとに、不要な機器を整理し、コストを抑えつつ機能の最適化を図った。たとえば、コイル 6 および 27 に対応する 8 台の電源では極性切替器が不要と判断され、これを廃止した。一方で、コイル 9 については  $^{238}\text{U}$  加速時に極性の反転が必要なため、新たに極性切替器を追加した。コイル 26 と 27 の配置は互いの距離が非常に近いため、1 つのコイルであ

ると見なし、コイル 26 のみに電源を設置し、電源台数を 4 台削減した。さらに、コイル 6 に用いられる 4 台の電源については、一部の粒子加速条件で磁場強度が不十分であると判明したため、出力電流を 400 A から 500 A に増強した。RRC のトリムコイル電源では、運転中に手動で電流値を頻繁に調整する必要がある。このため、更新後の電源は最大出力電流まで約 10 秒で到達可能な設計とした。この速度は、IRC および SRC で使用されている同様の電源と比較して、約 3 倍速い。電源の仕様は極力統一化し、電流と電圧の組み合わせを 4 種類に限定した。これにより一部の電源では、既存の負荷側配線の許容電流を上回る状態が生じたが、それらの電源については内部の電流制御ソフトウェアにより最大電流値を制限することで、安全性を確保している[17]。



Figure 7: Power supply array for RRC trim coils.

## 5. まとめ

2024 年 8 月から 2025 年 7 月までの期間における全ビーム供給時間は 2557.0 時間、通期の可用性は 94.2% であった。

## 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] S. Ishikawa *et al.*, “Status report on the operation of RIKEN AVF cyclotron”, Proceedings of PASJ2025, Tokyo, Aug. 2025, TFP007, this meeting.
- [13] M. Tamura *et al.*, “Present status of RILAC”, Proceedings of PASJ2025, Tokyo, Aug. 2025, TFP008, this meeting.
- [14] M. Nishida *et al.*, “Status report of the operation of RIBF ring cyclotrons”, Proceedings of PASJ2024, Jul.-Aug. 2024, Yamagata, WTSP09, pp. 1135-1140.
- [15] 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.
- [16] M. Komiyama *et al.*, “Development and Test Operation of the Prototype of the New Beam Interlock System for Machine Protection of the RIKEN RI Beam Factory”, *JACoW*, ICALEPCS2023, TUPDP050.
- [17] K. Kumagai *et al.*, “Replacement of power supplies for coil in RIKEN Ring Cyclotron”, RIKEN Accel Prog Rep 57(2024), pp. 92-93.