

理研 RIBF におけるリングサイクロトロン^{A)}の運転報告

STATUS REPORT OF THE OPERATION OF RIBF RING CYCLOTRONS

石川盛^{#,B)}, 須田健嗣^{A)}, 福澤聖児^{B)}, 濱仲誠^{B)}, 小林清志^{B)}, 小山亮^{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)}, 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)}, 加瀬昌之^{A)}, 木寺正憲^{A)}, 込山美咲^{A)}, 熊谷桂子^{A)}, 真家武士^{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)}, 山澤秀行^{A)}
Shigeru Ishikawa^{#,B)}, Kenji Suda^{A)}, Seiji Fukuzawa^{B)}, Makoto Hamanaka^{B)}, Kiyoshi Kobayashi^{B)}, Ryo Koyama^{B)}, Takeshi Nakamura^{B)}, Minoru Nishida^{B)}, Makoto Nishimura^{B)}, Junsho Shibata^{B)}, Noritoshi Tsukiori^{B)}, Kazuyoshi Yado^{B)}, 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)}, Masayuki Kase^{A)}, Masanori Kidera^{A)}, Misaki Komiyama^{A)}, Keiko Kumagai^{A)}, Takeshi Maie^{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)}, Hideyuki Yamasawa^{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 July 2019 to July 2020. 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と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 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、2019 年 7 月 18 日から 2020 年 7 月 18 日

までの 1 年間における 4 台のリングサイクロトロン^{A)}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($^{40}\text{Ar}^{18+}$ の場合)まで加速する。

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^+ 、D、 ^4He 、 ^{14}N 、 ^{16}O 等のイオンを最高 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 を使用して、 ^{40}Ar のイオンを 160 MeV/u まで加速した後、旧施設内 E5B に戻して使用する戻しビームモードも近年整備され、生物照射実験にビームを供給している。

[#] sishikawa@riken.jp

Table 1: Operating Status of RIBF

Beam particle	Energy (MeV/u)	Acceleration mode	Beam course	Beam intensity (particle nA)		Beam time (h)		Availability (%)
				Requested	Actual	Scheduled	Actual	
RARF								
¹² C	135	AVF-RRC	E5B (Biology)	1	450.0	35.5	29.1	94.5
¹⁴ N	135		E3B (RI Production)	500	571.3	49.6	49.6	99.9
²² Ne	70		E6 (RIPS)	250	3000.0	108.0	108.3	100.3
²⁰ Ne	135		E5B (Biology)	1	270.0	4.0	2.6	64.3
⁵⁶ Fe	90		E5B (Biology)	1	1.7	9.0	4.6	100.0
⁸⁴ Kr	70		E5A (Industry)	1	9.7	96.0	83.1	86.5
RILAC2-RRC								
¹³⁶ Xe	10.75	RILAC2-RRC	E2B (KEK/KISS)	250	325.0	387.0	372.4	96.2
			E3A (JAXA)	1	60.0	18.0	17.9	99.3
²³⁸ U	10.75		E5A (Material)	2	16.6	48.0	46.3	96.4
⁴⁰ Ar	160	AVF-RRC-IRC	E5B (Biology)	1	20.0	17.0	13.1	100.0
RIBF								
²³⁸ U		RILAC2-RRC-IRC-IRC-SRC	BigRIPS/ZDS/F12	> 60	94.2	388.9	433.2	111.4
Total						1161.0	1160.0	99.7

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) を要求時間 (scheduled time) で割ったものであり、加速器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、スケジュールされた時間以上にユーザーにビームを供給した場合などには、照射時間が要求時間を超過して、ビーム可用度が 100% を超えることがある。また、生物照射実験、材料照射実験に関して、ユーザー事由で早めに終了した場合は、可用度 100% としている。

RARF 側での実照射時間は、計 726.8 時間、停止時間は 45.3 時間、可用度は 93.7% であり、概ね従来通りの安定したビームを供給した。

RIBF 側では、1 回の MT が行われた。計 433 時間ビームを供給し、可用度は 111.4% であった。この ²³⁸U 345 MeV/u ビーム加速では、最大で 94.2 pnA のビームを供給した (前年の 72.1 pnA と比べて 31% 増加)。ビーム量が増加した理由は、主として、RRC の共振器において高出力励振試験を実施し加速電圧を上昇させたこと (4.1 項参照)、及び RRC の静電デフレクターにおける高圧電極とセプタムの間隔を 12 mm から 23 mm に広げたことによるものと考えられる。RIBF で最も多くの装置が同時に稼働する固定周波数モードでの加速であり、維持が容易ではなかったが、調整時間の前倒しにより可用度が 100% を超えた。

RARF 側、RIBF 側共に新型コロナウイルス感染症に係る緊急事態宣言により 2020 年 4 月から 5 月までの MT はすべてキャンセルになった。また、4.3 項で述べる RRC 共振器システム冷却システムの真空リークにより補修作業が必要になったため、6 月の MT は実施しなかった。

3.2 トラブル

この 1 年間で発生した主なトラブルを述べる。

- 2019 年 10 月 11 日、各実験室へ分配するビームトランスポートラインのファラデーカップ (FC-A11) が閉じて、以降の開閉操作を受け付けなくなった。原因がファラデーカップの制御を行っている N-DIM の故障と判明したため同機器を交換した。
- 2019 年 11 月 20 日、SRC の 4 台ある加速共振器のうち第 3 共振器 (SRC-RES3) のクライオポンプが停止した。各共振器にはクライオポンプが 3 台設置されており、そのうち 1 台が停止しインターロックで SRC 入射のファラデーカップ (FC-G50) が閉じてビーム供給が停止した。クライオポンプコンプレッサーのコントロールユニットが故障したことが判明し、同装置を交換した。
- 2019 年 11 月 22 日、IRC の第 1 高周波系 (IRC-RF-ES) 終段アンププレート冷却水流量異常が発生。フローメーターで流量の低下が見られたため、流量調整を行って異常をリセットした。その後、空洞を励振したが放電が多発した。原因は、共振器内部の RF シールドが溶融・蒸着して放電しやすい状況となっていたためであった (4.1 項参照)。2 時間程かけて徐々に励振電圧を 600 kV まで上昇させた。
- 2019 年 11 月 25 日、SRC の静電デフレクターセプタム冷却水用冷却ホースに亀裂が発生し、漏水が発生した。予め備え付けられていたホースに繋ぎ替えて対処した。
- 2019 年 11 月 28 日、RRC の第 2 共振器系で終段アンプのコントロールグリッド電源が過電流異常で停止。再立ち上げをするも、コントロールグリッドに通電すると直ちに過電流異常となった。真空管 (THALES RS2042SK) のフィラメントに通電するとカソード-コントロールグリッド間が短絡することが判明したため、真空管を交換した。故障した真空管は 2012 年 11 月から 7 年間使用したものだ。
- 2019 年 12 月 3 日、²³⁸U ビームの供給中にイオン源 (RIKEN 28GHz SCECRIS) のジャイロトロンが HV 異常により停止した。HV 異常は 11/19 から 12/3 まで 9 回発生しており、特に最後の 4 回は 10 分に 1

回発生するまでに状態が悪化していた。このため、イオン源の点検を行い、ジャイロトロン の 碍子 を 掃 除 した。イオン源停止からビーム生成完了まで 2 時間 40 分を要した。

4. 修理・改良

4.1 各サイクロトロン の RF down の推移

2017 年から 2019 年までの ^{238}U 345 MeV/u ビーム加速におけるビーム供給中の RF down の回数を集計し、グラフ化したものを Fig. 1 に示す。RF down は、空洞内での放電に伴う励振電圧低下と、電源の異常による励振停止状態を表す。

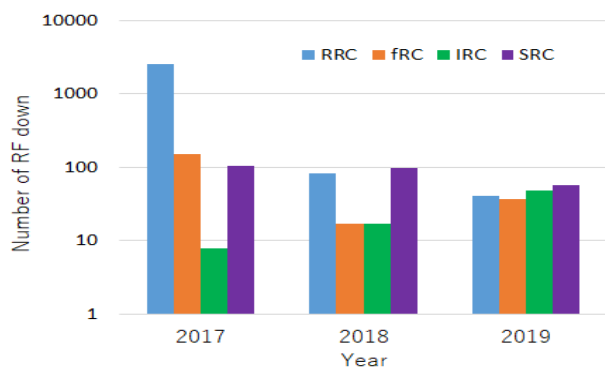


Figure 1: Number of RF down for RRC, fRC, IRC, and SRC.

2017 年までは RRC の共振器を設計範囲外の低い周波数で運転していた為、放電による RF down が多数を占めていた[12]。2018 年は RRC の共振器を改造したことにより、同一の運転周波数にも関わらず RF down の回数が著しく減り、SRC とほぼ同じになった。更に RRC では高出力励振試験を繰り返し行った結果、2019 年には第 1 共振器(RRC-RF#1)、第 2 共振器(RRC-RF#2)共に 130 kV を超える電圧で励振できるようになった。 ^{238}U

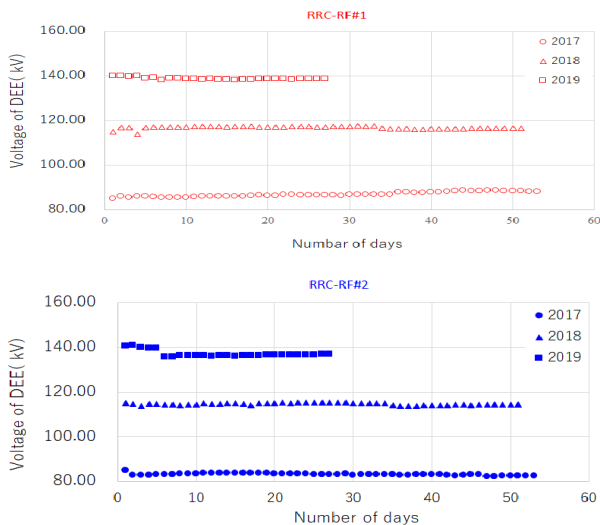


Figure 2: Comparison of acceleration voltages during operations from 2017 to 2019. Upper panel corresponds to RRC-RF#1, and lower panel RRC-RF#2.

345MeV/u ビーム加速における RRC の電圧の推移を Fig. 2 に示す。

fRC は 2017 年に実施した共振器内部の RF コンタクト強化によって放電回数が減った。

IRC の RF down の回数が年を追うごとに多くなっていくが、これは IRC 第 1 共振器(IRC-RF-ES)のガラス窓用の RF シールドが溶解し共振器表面に蒸着して放電しやすい状況になったためと考えられる。Figure 3 に溶解した RF シールド、Fig. 4 に共振器表面が蒸着された状況を示す。共振器側面下部にあった RF シールドから発生した蒸発物の一部は粗同調板により遮られたため、その影が空洞の上部に顕著に現れている。 ^{238}U 345 MeV/u ビーム加速における運転周波数である 36.5 MHz では、RF down の回数は増えたものの、MT 自体への影響はさほど大きくなかった。しかし、 ^{40}Ar 160 MeV/u ビーム加速での運転周波数である 24 MHz では顕著で、IRC-RF-ES では放電による電源 down を繰り返していた。このため、MT 中に影響がないように電圧を 440 kV から 320 kV まで下げて使用することとした。この問題の対策として、2019 年の夏期メンテナンス時に RF シールドを取り外して空洞内面を銅板で塞ぎ、ガラス窓をブランクフランジに変更した。蒸着した部分は研磨等で取り除く作業はしなかった。放電状況の増加傾向に注視しながら様子を見ることとした。



Figure 3: Damaged RF shield.

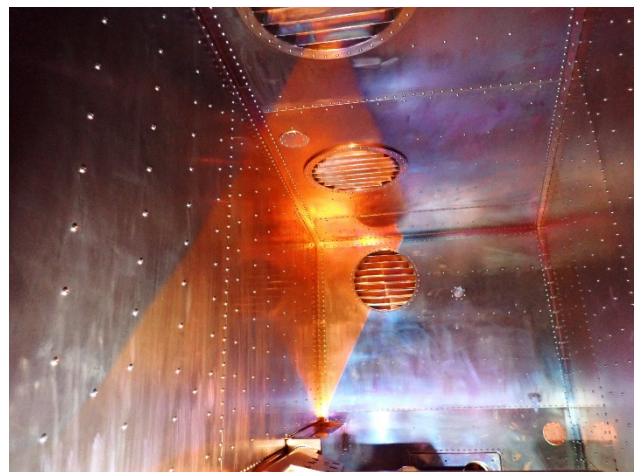


Figure 4: Inside of the resonator for IRC-RF-ES.

4.2 RRC-EBM1 不具合

2019年11月10日、 ^{238}U 10.75 MeV/u ビームをE5Aコースに供給中、ユーザーよりビーム消失の連絡を受けた。RRCからのビーム取り出し後にあるプロファイルモニター(PF-A01)でビーム軌道が10 mm程度水平方向にずれており、更に下流のビームトランスポートラインでビームが消失していることが判明した。RRCの取り出し偏向磁石の一つであるRRC-EBM1の電流を調整するとPF-A01で発生していた軌道ずれが戻り、ユーザーターゲットまでビームトランスポートが正常な状態になった。この問題は同年11月10日から11月12日までのMT間に9回発生した。

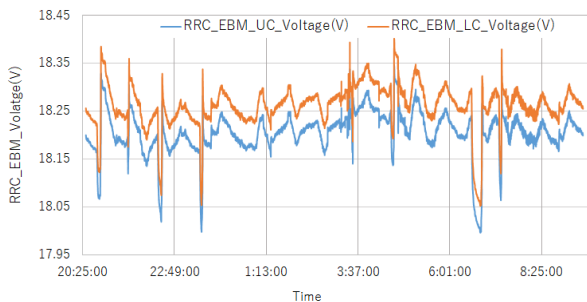


Figure 5: Voltage fluctuation of RRC-EBM1.

MT終了後、レイヤーショートを疑い上下コイルの端子間電圧を測定した。RRC-EBM1は直後のRIBF MT(2019年11月13日から2019年12月6日までの ^{238}U ビーム加速)においても同一条件で使用するため、早急な原因究明が必要だった。結果をFig. 5に示す。上下コイルの電圧とも同時に著しい変動が見られたため電源本体の故障と判断した。

代替として、2014年に設置したIRC戻りビームラインの偏向電磁石(DAKR)の電源を使用することにした。電磁石の位置関係をFig. 6に示す。この電源は仁科記念棟地下通路に据え付けてあり、RRC入射取り出しに使用する偏向電磁石の電源としても利用可能となるよう、電源から電磁石のあるRRC室内までの負荷ケーブルの敷設工事は済んでいた。電源の切り替えはRRC室内で代替電源用の端子盤までサイズ200 SQの負荷ケーブル

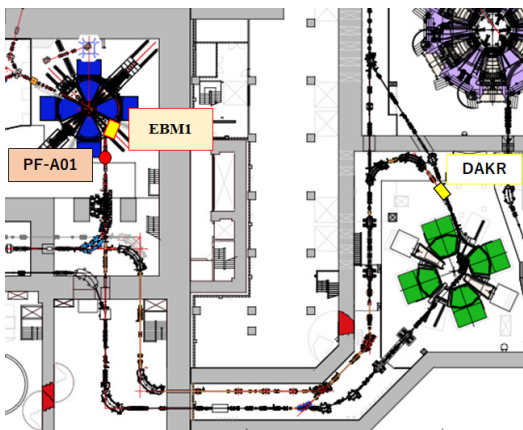


Figure 6: The layout of the accelerator facility in RIBF at RIKEN.

10本を6 mほど敷設した。尚、Table 2にRRC-EBMとDAKRを比較した諸元表を示す。電磁石の最大電流値が異なるため、電源側でモード1: 1500 A、モード2: 2800 Aと切り換えて使用できるようになっている。RRC-EBM1ではモード2で使用した。

RRC-EBM1の電源は桶型シャントが故障していた。2020年2月3日から2020年2月10日にかけてシャント方式からDCCT方式に変更したうえで使用できるようになり、EBM1電源から電磁石へのケーブルを戻し使用している。

Table 2: Magnet Parameters

item	EBM1	DAKR
Max magnetic field strength(T)	1.55	1.16
curvature radius(mm)	2295	4000
Deflection angle(°)	15	15
Magnetic field gap(mm)	42	60
Max current(A)	2270	1587
Nominal voltage(V)	37.7	24.1

4.3 RRC 共振器ステム冷却系統真空リーク

2019年8月から2019年9月にかけて、RRCの2台の共振器(RRC-RF#1、#2)のステム冷却系統のリーク補修を実施した。RF#1は33箇所、RF#2は48箇所のリークがあり全て補修した。2019年9月から2020年5月まではステム冷却系統に異常はなかったが、2020年5月15日に真空リークが再発した。

ステム冷却系統のリークは以下の状況で判明した。各セクターの真空度が励振器-共振器系統の冷却水ポンプを起動すると -6 乗Pa台から -2 乗Pa台まで悪化した。 -2 乗Pa台でも冷却水ポンプの起動で真空度に変化が生じた。各空洞のステム冷却系統からのリークが疑われたため、ステム冷却系統を水抜きし、ドライスクロールポンプで真空乾燥を実施すると -6 乗Pa台まで真空度が回復したことから、ステム冷却系統の真空リークと判断した。

補修作業は下記の手順で行った。(1)RRCから共振器を引き出し、(2)リークが判明した冷却配管を真空状態にしてリークディテクターで場所の特定を行う。(3)



Figure 7: Resonator for RRC repaired in June 2020.

特定したリーク箇所を溶接で補修する。(4)補修した配管を真空引きしリークディテクターで真空漏れがないか確認する。補修後の状態を Fig. 7 に示す。補修作業は新型コロナウイルス感染症に係る緊急事態宣言解除後の2020年6月6日から6月19日までに実施した。RF#1は9箇所、RF#2は61箇所のリークがあり、その全てを補修した。

5. まとめ

2019年7月18日から2020年7月18日までの総運転時間は1160.0時間、可用性は99.7%であった。²³⁸Uビーム加速において、供給強度は最大94.2 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 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, Cyclotrons'89, Berlin, Germany, 1989, pp. 51-54.
- [5] H. Kamitsubo, Progress in RIKEN Ring Cyclotron Project, Cyclotrons'86, Tokyo, Oct. 1986, pp. 17-23.
- [6] N. Inabe *et al.*, Fixed-frequency ring cyclotron (fRC) in RIBF, 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), 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, WEPL02 (2012), pp. 7-11.
- [12] N. Tsukiori *et al.*, Status report of the operation of RIBF ring cyclotrons, Proceedings of PASJ2019, FSPH002 (2019), pp. 1393-1397.