

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 OPERATIRON OF RIBF RING CYCLOTRONS

西村誠^{#, B)}, 大関和貴^{A)}, 福澤聖児^{B)}, 濱仲誠^{B)}, 石川盛^{B)}, 小林清志^{B)}, 小山亮^{B)}, 仲村武志^{B)}, 西田稔^{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)}, 長瀬誠^{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)}

Makoto Nishimura^{#, B)}, Kazutaka Ozeki^{A)}, Seiji Fukuzawa^{B)}, Makoto Hamanaka^{B)},

Shigeru Ishikawa^{B)}, Kiyoshi Kobayashi^{B)}, Ryo Koyama^{B)}, Takeshi Nakamura^{B)}, Minoru Nishida^{B)}, Junsho Shibata^{B)},

Noritoshi Tsukiori^{B)}, Kazuyoshi Yadomi^{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)},

Makoto Nagase^{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)}, 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 2016 to July 2017. 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研究センターの RI ビームファクトリー(RIBF)[1]の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], IRC:中間段リングサイクロトロン、K = 980 MeV[7], SRC:超伝導リングサイクロトロン、K = 2600 MeV[8])から構成される。

これら加速器を適宜組み合わせ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(H₂⁺)から U までの全イオンを核子当たり 345 MeV/u(4Z ~ 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ビームを用いた実験施設は 2 つに大別される。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)である。本年度、これら RIBF 実験装置群に新たに Rare RI-Ring[9]、PALIS[10]が加わった。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, IRC 取り出しビームを使って実験が行われる[11]。

本報告では、2016 年 7 月 1 日から 2017 年 7 月 14 日

までの 1 年における 4 台のリングサイクロトロン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[12])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、²³⁸U、¹²⁴Xe、⁷⁰Zn 等のイオンを 345 MeV/u 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、⁴⁰Ar、⁴⁸Ca、⁷⁰Zn、⁸⁶Kr 等を最高 400 MeV/u(⁴⁰Ar¹⁸⁺)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、H₂⁺、D、⁴He、¹⁴N、¹⁶O 等を最高 400 MeV/u 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、⁴⁰Ar 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た。

[#] mkt_nishimura@riken.jp

Table 1: Operating Status of RIBF

Beam particle	Energy (MeV/u)	Acceleration mode	Beam course	Beam intensity (particle nA)		Beam time (h)		Down time (h)	Availability (%)
				Requested	Actual	Scheduled	Actual		
RARF									
⁵⁶ Fe	90	AVF-RRC	E5B (Biology)	1	2	26	31.6	0.5	97.7
²² Ne	70		E6 (RIPS)	250	167	114	100.7	10.9	88.3
¹² C	135		E5B (Biology)	1	200	36	34.95	0	100.0
⁴⁰ Ar	95		E5B (Biology)	1	77.6	19.5	11.7	0	100.0
⁴⁰ Ar	95		E5A (Industry)	1	76.5	48	68.8	0.8	143.3
⁸⁵ Rb	66		E6 (RIPS)	1	0.7	48	55.7	0	116.0
⁸⁴ Kr	70		E5 (Industry)	0.1	7.5	144	150.3	0.3	104.4
⁵⁸ Ni	63		E6 (RIPS)	200	97.8	63	74.3	0	117.9
RILAC-RRC									
⁸⁶ Kr	36	E3A (JAXA)	1	5.1	20.4	21.6	0	105.9	
¹⁹⁷ Au	18.4	E5 (Industry)	0.1	2.1	3	2.2	0	73.3	
¹⁹⁷ Au	18.4	E3A (JAXA)	1	0.8	8	11.8	0	147.5	
¹³⁶ Xe	39	E3A (JAXA)	0.8	1.4	24	6.8	0	28.3	
¹³⁶ Xe	39	E5A (Industry)	0.1	0.8	3	3.8	0	126.7	
¹³⁶ Xe	10.75	E2B (KEK/KISS)	250	195	90	101.1	0	112.3	
RILAC2-RRC									
⁴ He	7.3	A02 (MS)	as much as possible	95	24	23.1	0	96.3	
⁵¹ V	6	D18/M11 (MS)	4000	3083	162	185.7	0.8	114.6	
²³⁸ U	10.75	E2B (KEK/KISS)	140	342.9	96	93	0.2	96.9	
²³⁸ U	10.75	E5A (Material)	2	34.3	24	25.3	0	105.4	
⁴⁰ Ar	160	AVF-RRC-IRC	E5B (Biology)	1	55.6	9	6.85	0	100.0
RIBF									
⁴⁸ Ca(1st)	345	RILAC-RRC-IRC-SRC	BigRIPS, ZDS, SAMURAI	400	738	492	474.7	29.4	96.5
⁴⁸ Ca(2nd)	345	RILAC-RRC-IRC-SRC	BigRIPS, ZDS	530	500	96	120.0	12.0	125.0
⁷⁰ Zn(1st)	345	RILAC2-RRC-fRC-IRC-SRC	BigRIPS, ZDS, SAMURAI	as much as possible	193	228	94.4	133.6	41.4
⁷⁰ Zn(2nd)	345	RILAC2-RRC-fRC-IRC-SRC	BigRIPS, SAMURAI	as much as possible	250	432	435.2	44.8	100.7
²³⁸ U(1st)	345	RILAC2-RRC-fRC-IRC-SRC	BigRIPS, ZDS, PALIS, Rare-RI Ring	50	40.7	600	511.2	88.8	85.2
²³⁸ U(2nd)	345	RILAC2-RRC-fRC-IRC-SRC	BigRIPS, ZDS, PALIS, SHARAQ	50	58	570.7	502.7	68.0	88.1
¹⁸ O	220	AVF-RRC-SRC	SAMURAI	500	550	492	474.6	17.5	96.5

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、ビーム可用性 (availability) を記している。ビーム可用性とは、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、加速器安定度の指標である。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性が 100% を超えることがある。RARF 側は同一ビームで複数回行われた実験をまとめて表し、RIBF 側では運転期間が長いことから個別に表した。

RARF 側での実照射時間は計 1009.3 時間、停止時間は 13.5 時間、可用性は 103.9% であり、概ね従来通りの安定したビームを供給した。⁵⁶Fe 90 MeV/u、¹²C 135 MeV/u、⁴⁰Ar 95 MeV/u、⁴⁰Ar 160 MeV/u の生物照射 MT に関しては、ユーザー事由で早めに終了した場合は当然ながら可用性 100% としている。¹³⁶Xe 39 MeV/u の可用性の低さは予定された実験時間より早く終了したことによる。²¹¹At 生成を目的とした ⁴He 7.3 MeV/u MS、119

番元素合成に必要な ⁵¹V 6 MeV/u MS も行われた。

RIBF 側では計 7 回の MT が行われた。計 2612.8 時間ビームを供給し、可用性は 90.5% であった。

²³⁸U(1st) 345 MeV/u ビーム加速は、最大ビーム強度が 40.7 pA であった。イオン源は高温オープン利用で約 1 ヶ月間ビームを供給した。ビーム量は昨年より最大 20% 増の 120~130 eμA。大きなトラブルが数件発生したため、可用性は 85.2% に留まった。

⁴⁸Ca(1st) 345 MeV/u ビーム加速は、最大ビーム強度が 738 pA であった。イオン源は過去最高の 50 eμA を供給した。停止時間の大半は必要不可欠な CS-e04 ストリッパ交換に由来するものであり、可用性は 96.5% と運転としてはほぼ理想的であった。

⁴⁸Ca(2nd) 345 MeV/u ビーム加速は、最大ビーム強度 500 pA。予定より 1.5 日早くビーム供給を開始して可用性は 125% であった。加速器事由の停止時間はストリッパ交換の 4.5 時間のみであった。

⁷⁰Zn(1st) 345 MeV/u ビーム加速は、最大ビーム強度 193 pA であった。約 1 日遅れでビーム供給を開始した。SRC 入射ビームラインのベローズ真空リークによる 3 日間の停止、イオン源プラズマチェンバー真空リークによる実験中断の影響で可用性は 41.4% であった。

⁷⁰Zn(2nd) 345 MeV/u ビーム加速は、最大ビーム強度が 250 pA であった。これまでの実績の約 2 倍に相当し、加速モードを可変周波数モードから RILAC2 を用いた固定周波数モードに変更したことで達成した。可用性は

100.7% であった。fRC の W 共振器(fRC RF-W)の不調により照射を中断してのビーム調整の必要が生じた。

^{238}U (2nd) 345 MeV/u ビーム加速は、最大ビーム強度は 58 pA、最盛期 1 週間のビーム強度平均値は 52 pA だった。fRC RF-W、fRC ビーム取り出し用静電チャンネル(fRC-EDC)故障修理のため、スケジュールを変更してビーム調整を開始し、当初のスケジュールより 0.5 日延長して終了した。実験期間中のビーム可用度は 88.1% であった。

^{18}O 220 MeV/u ビーム加速は、最大ビーム強度 550 pA、可用度は 96.5% であった。AVF スパイラルインフレクターにリークカレントが流れたため、碍子のメンテナンス作業を実施した。SRC バレー箱排気用クライオポンプ故障と RRC の No.2 共振器排気用クライオポンプ停止が発生したが、共に放射線の影響と思われる。

3.2 トラブル

この 1 年間に発生した主なトラブルを述べる。

- 10/17 7:00 ユーザーにビームを供給する直前に fRC の E 共振器排気用クライオポンプのモーターが停止した。再起動できないため、クライオパネルから 3 時間ガス出しを行った。fRC の真空度回復後、ビーム調整を行ない 4 時間遅れでビーム供給を開始した。
 - 10/23 8:20 ビーム供給中、fRC のフラットトップ共振器用トランジスタアンプが故障したので交換し、8 時間後にビーム供給を再開した。
 - 10/30 10:37 ビーム供給中、RRC の No.1 共振器(RRC RF#1)がダウンした。outcap capacitor(OUT CAP)容量が、通常 360 pF に対して 0 pF しかないので交換を実施した。16 時間でビーム供給を再開した。
 - 10/31 8:04 ビーム供給中、SRC 超伝導電磁石(超伝導メインコイル、超伝導トリムコイル、入射用超伝導(偏向電磁石)に対し誤信号によりインターロックが作動してダウンした。当該インターロックを無効にして、その代わりに冷凍機の He 液面の監視を行うこととし、各電磁石を再励磁した。12 時間でビーム供給を再開した。
 - 11/11 2:05 ビーム供給中、RRC RF#1 の OUT CAP 容量が 0 pF になる現象が再発したので交換作業を行った。
 - 12/3 9:36 ビーム供給中、SRC 超伝導トリムコイルが全てダウンした。第 1 セクター 3 番トリムコイルのクエンチ検出器が誤動作していた。予備の検出器がないため、クエンチ電圧、クエンチ継続時間の設定値を変更した。3 時間でビーム供給を再開した。
 - 4/8 20:51 ビーム供給中、SRC 入射ビームラインのステアラー(SRC_SH1)の戻り値が 75 A 跳び、SRC 入射ビームラインと VLB1 を接続するベローズに 1.6 kW の ^{70}Zn ビームが当たり、穴が開いた。ベローズにトルシールを塗布して SRC の真空は復旧した。この作業に合わせて不調だった IRC 静電取り出しチャンネル(IRC-EDC)のセプタム電極のメンテナン
- ス作業も行った。ビーム再調整を行い、3 日後にビーム供給を再開した。なお、ベローズは ^{70}Zn (2nd)-MT 終了後に予備品と交換した。
- 4/15 14:29 ビーム供給中、イオン源がプラズマチェンバーの真空悪化でダウンした。低温オープン導入ポートの高電圧絶縁プラスチック部品が融解して穴が開き真空リークしていた。ビーム生成に無関係なポートであったため、取り外して真空を復旧した。
 - 5/6 9:00 ビーム供給中、fRC RF-W のトリマーが IN LIMIT まで行き着いて同調が取れなくなり電圧低下が発生した。W の電圧を 389.4 kV から 351.0 kV まで下げ、E 共振器の電圧で補償する調整を行った。2 時間でビーム供給を再開した。
 - 5/29 10:27 ビーム供給中、A02 ガスストリッパーの真空が悪化した。He ガス循環用の部品(D3 gas collector)が ^{238}U ビームで融解していたので取り外した。8.5 時間でビーム供給を再開した。
 - 5/30 12:32 ビーム供給中、fRC RF-W が反射過大でダウンしてしまい励振できなくなった。トリマーが IN LIMIT に行き着いているので、トリマーの機械的リミットを IN 側に移動させて駆動範囲を広げた。5 時間でビーム供給を再開した。
 - 6/8 9:00 SRC He 圧縮機に冷却水を供給している RIBF 冷却塔 4 系の No.2 散水ポンプが故障したため、冷却塔 2 系の No.2 散水ポンプと入れ換える作業を行った。4.5 時間でビーム供給を再開した。
 - 6/10 6:42 ビーム供給中、RRC 本体系純水ポンプの高圧受電盤 CP-5 が漏電トリップして、RRC メイン磁場、RF、入射、取り出し電磁石がダウンした。RRC 入射からビーム再調整を行い、6.5 時間でビーム供給を再開した。
 - 6/14 9:00 ビーム供給中に、故障していた第 2 イオン源室のエアコンの修理を行った。イオン源再立ち上げを行い、9 時間でビーム供給を再開した。
 - 6/18 14:18 ビーム供給中、A02 ガスストリッパーのロータリーポンプが異常停止を繰り返すため代替機に交換した。4 時間でビーム供給を再開した。
 - 6/26 8:53 ビーム供給中、RRC 入射ビームラインの偏向電磁石(RRC_BM2)の磁場が変わり下流のビーム通過率が低下した。設定値を 2095 A から 2105 A にするとビームが戻った。15 分でビーム供給を再開した。その後、ビームを維持するために RRC_BM2 の設定値を上げ続ける必要があった。原因は現在も調査中である。
 - 6/30 8:48 ビーム供給中、RRC にビームが入射しなくなった。RRC_BM2 の設定値を 2194 A から 2075 A にするとビームが戻った。20 分でビーム供給を再開した。
 - 7/6 23:40 ビーム供給中、AVF のスパイラルインフレクター(+)にリークカレントが 3.5 mA 流れて、設定値 2.24 kV に対して戻り値 1.10 kV しか印加できなくなった。インフレクター(+)電極を取り外し、碍子の清掃を行った。6.5 時間でビーム供給を再開した。
 - 7/13 3:46 2 時間前にダウンしていた SRC バレー箱排気用クライオポンプのクライオパネルから放出されたガスで、SRC の真空度が $1.3 \times 10^{-3}\text{-Pa}$ まで悪

4.4 SRC RF 同軸管冷却機構設置

SRC からの取り出しビーム量を増やすため、より高い加速電場 (ギャップあたり 700 kV 以上) での運転を行ったところ、2016 年 4 月から 6 月末までの MT 中に、4 台ある加速共振器のうち第 1 共振器(RES1)、第 3 共振器(RES3)の方向性結合器が度々焼損し、加速空洞の励振に支障をきたした(詳細は昨年報告[15]を参照)。そこで同軸管に穴を開け、ブロワーで同軸管内部を空冷する事で事態の改善を試みた。ブロワー(型番:U100B-H26、段数:2 段、最大風量:14 m³/min、最大静圧:4.00 kPa、モーター出力:1.5 kW)設置後の同軸管周辺の様子を Fig. 3 に示す。

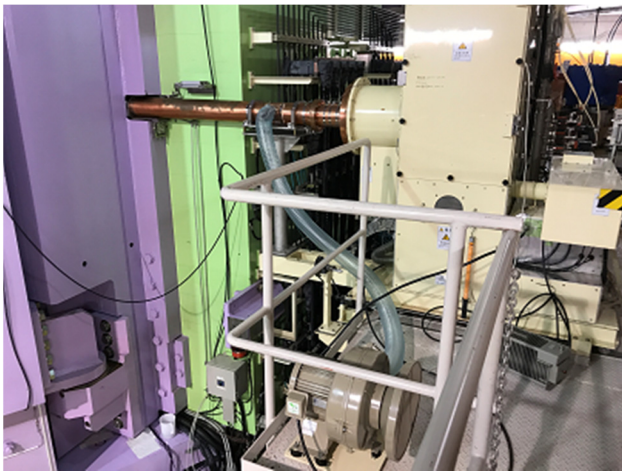


Figure 3: Blower cooling system for coaxial tube of SRC.

2016 年 10 月にまず SRC-RES1 と RES3 を、同年 11 月に RES2 と RES4 にブロワー及び温度測定の為の熱電対を設置した。Table 2 にそれぞれのディー電圧と方向性結合器付近の温度を示す。ブロワー設置後は電圧に因らず 35°C 程度に落ち着いており、以後、同様のトラブルは発生していない。

Table 2: Temperature of Directional Couplers in Coaxial Tube of SRC

2016/10/22			
	Dee voltage [kV]	DC temp [degC]	Blower cooling
RES1	626	35.2	on
RES2	610	45.7	off
RES3	652	35.4	on
RES4	635	63.3	off

2016/12/6			
	Dee voltage [kV]	DC temp [degC]	Blower cooling
RES1	642	35.5	on
RES2	612	34.4	on
RES3	647	34.9	on
RES4	649	35.3	on

Frequency: 36.5 MHz

5. まとめ

2016 年 7 月 1 日から 2017 年 7 月 14 日までの運転時間は 3622.1 時間、可用性は 93.7%であった。

fRC RF-W 共振器の C リング焼損、fRC EDC セプタム電極融解など、ビーム大強度化に伴うトラブルが発生した。一方でガスストリッパの大口径化、SRC RF 同軸管冷却機構設置による RF 安定化などの改良を行いリングサイクロトロン性能を引き出してきた。今後も引き続き、ビームの大強度化、高安定化に向けた運転、改良を推し進めていく。

参考文献

- [1] Y. Yano, The RIKEN RI beam factory project: A status report, Nucl. Instrum. & Methods B261 (2007) 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) 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; T. Mitsumoto *et al.*, CONSTRUCTION OF THE FRC SECTOR MAGNET FOR RIKEN RI BEAM FACTORY, *ibid*, 20P12, pp. 384-386.
- [7] J. Ohnishi *et al.*, Construction status of the RIKEN intermediate-stage ring cyclotron (IRC), Cyclotrons'04, Tokyo, Oct. 2004, 18P14, pp. 197-199.
- [8] H. Okuno *et al.*, The Superconducting Ring Cyclotron in RIKEN, IEEE Trans. Appl. Supercond. 17 (2007) 1063-1068.
- [9] Y. Yamaguchi *et al.*, "Construction of the rare-RI ring at RIKEN RI Beam" Journal of Particle Accelerator of Japan, Vol.12, No.3, 132-141 (2015).
- [10] T. Sonoda *et al.*, "Development of a resonant laser ionization gas cell for high-energy, short-lived nuclei" Nucl. Instrum. Meth. B295, 1-10 (2013).
- [11] <http://www.nishina.riken.jp/RIBF/accelerator/overview.html>
- [12] N. Sakamoto *et al.*, High intensity heavy-ion-beam operation of RIKEN RIBF, Proceedings of PASJ9, WEPL02 (2012) 7-11.
- [13] H. Imao *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams 15 (2012) 123501.
- [14] H. Imao *et al.*, IPAC13, Shanghai (2013) THPPA01 & THPW038.
- [15] K. Yadomi *et al.*, Status of the operation of the RIBF ring cyclotrons, Proceedings of PASJ13, FSP008 (2016) 1339-1343.