

## 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

月居憲俊<sup>#,A)</sup>, 大関和貴<sup>B)</sup>, 福澤聖児<sup>A)</sup>, 濱仲誠<sup>A)</sup>, 石川盛<sup>A)</sup>, 小林清志<sup>A)</sup>, 小山亮<sup>A)</sup>, 仲村武志<sup>A)</sup>, 西田稔<sup>A)</sup>,  
西村誠<sup>A)</sup>, 柴田順翔<sup>A)</sup>, 矢富一慎<sup>A)</sup>, 段塚知志<sup>B)</sup>, 藤巻正樹<sup>B)</sup>, 藤縄雅<sup>B)</sup>, 福西暢尚<sup>B)</sup>, 長谷部裕雄<sup>B)</sup>,  
日暮祥英<sup>B)</sup>, 池沢英二<sup>B)</sup>, 今尾浩士<sup>B)</sup>, 上垣外修一<sup>B)</sup>, 金井保之<sup>B)</sup>, 加瀬昌之<sup>B)</sup>, 木寺正憲<sup>B)</sup>, 込山美咲<sup>B)</sup>,  
熊谷桂子<sup>B)</sup>, 真家武士<sup>B)</sup>, 長瀬誠<sup>B)</sup>, 長友傑<sup>B)</sup>, 中川孝秀<sup>B)</sup>, 中村仁音<sup>B)</sup>, 大西純一<sup>B)</sup>, 奥野広樹<sup>B)</sup>,  
坂本成彦<sup>B)</sup>, 須田健嗣<sup>B)</sup>, 内山暁仁<sup>B)</sup>, 渡部秀<sup>B)</sup>, 渡邊環<sup>B)</sup>, 渡邊裕<sup>B)</sup>, 山田一成<sup>B)</sup>, 山澤秀行<sup>B)</sup>  
Noritoshi Tsukiori<sup>#,A)</sup>, Kazutaka Ozeki<sup>B)</sup>, Seiji Fukuzawa<sup>A)</sup>, Makoto Hamanaka<sup>A)</sup>, Shigeru Ishikawa<sup>A)</sup>,  
Kiyoshi Kobayashi<sup>A)</sup>, Ryo Koyama<sup>A)</sup>, Takeshi Nakamura<sup>A)</sup>, Minoru Nishida<sup>A)</sup>, Makoto Nishimura<sup>A)</sup>, Junsho Shibata<sup>A)</sup>,  
Kazuyoshi Yadomi<sup>A)</sup>, Tomoyuki Dantsuka<sup>B)</sup>, Masaki Fujimaki<sup>B)</sup>, Tadashi Fujinawa<sup>B)</sup>, Nobuhisa Fukunishi<sup>B)</sup>,  
Hiroo Hasebe<sup>B)</sup>, Yoshihide Higurashi<sup>B)</sup>, Eiji Ikezawa<sup>B)</sup>, Hiroshi Imao<sup>B)</sup>, Osamu Kamigaito<sup>B)</sup>, Yasuyuki Kanai<sup>B)</sup>,  
Masayuki Kase<sup>B)</sup>, Masanori Kidera<sup>B)</sup>, Misaki Komiyama<sup>B)</sup>, Keiko Kumagai<sup>B)</sup>, Takeshi Maie<sup>B)</sup>, Makoto Nagase<sup>B)</sup>,  
Takashi Nagatomo<sup>B)</sup>, Takahide Nakagawa<sup>B)</sup>, Masato Nakamura<sup>B)</sup>, Jun-ichi Ohnishi<sup>B)</sup>, Hiroki Okuno<sup>B)</sup>,  
Naruhiko Sakamoto<sup>B)</sup>, Kenji Suda<sup>B)</sup>, Akito Uchiyama<sup>B)</sup>, Shu Watanabe<sup>B)</sup>, Tamaki Watanabe<sup>B)</sup>,  
Yutaka Watanabe<sup>B)</sup>, Kazunari Yamada<sup>B)</sup>, Hideyuki Yamasawa<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> SHI Accelerator Service Ltd.

<sup>B)</sup> RIKEN Nishina Center

#### Abstract

The operating status of the ring cyclotrons (RRC, fRC, IRC, SRC) of RIKEN RIBF is reported for the period from July 2018 to July 2019. We engage in corresponding improvement, tuning, and maintenance for beam intensity upgrade and stable beam delivery. In this contribution, performance upgrades of the accelerated beams so far, operating statistics and the 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/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、2018 年 7 月 23 日から 2019 年 7 月 17 日までの 1 年における 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

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、 $^{238}\text{U}$ 、 $^{124}\text{Xe}$ 、 $^{70}\text{Zn}$  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、 $^{40}\text{Ar}$ 、 $^{48}\text{Ca}$ 、 $^{70}\text{Zn}$ 、 $^{86}\text{Kr}$  等のイオンを最高  $400$  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、 $^4\text{He}$ 、 $^{14}\text{N}$ 、 $^{16}\text{O}$  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、 $^{40}\text{Ar}$  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。

<sup>#</sup> tsukiori@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									
<sup>12</sup> C	135	AVF-RRC	E5B (Biology)	1	483.3	32.0	22.8	0.8	94.5
<sup>14</sup> N	135		E3B (RI Production)	500	600.0	124.0	130.4	0.1	105.2
<sup>40</sup> Ar	95		E5A (Industry)	1	8.8	36.0	35.0	0.6	97.1
<sup>56</sup> Fe	90		E5B (Biology)	1	1.7	6.0	5.9	0.0	100.0
<sup>84</sup> Kr	70		E3A (JAXA) / E5A (Industry)	1	4.4	58.0	71.1	0.2	122.6
<sup>86</sup> Kr	66	RILAC2-RRC	E3A (JAXA / Industry)	1	1.6	26.0	25.0	0.0	96.2
<sup>136</sup> Xe	10.75		E2B (KEK/KISS)	250	340.0	84.0	86.6	0.4	103.1
			E3A (JAXA) / E5A (MS)	1	330.0	18.0	17.8	0.0	98.6
<sup>238</sup> U	10.75		E5A(Material)	2	2.2	24.0	24.9	0.0	103.6
<sup>40</sup> Ar	160		AVF-RRC-IRC	E5B (Biology)	1	20.0	24.0	16.2	0.0
RIBF									
<sup>78</sup> Kr	345	RILAC2-RRC-IRC-IRC-SRC	BigRIPS/SAMURAI	> 300	272.2	672.0	649.0	58.7	96.6
<sup>124</sup> Xe			BigRIPS/ZDS	>80	173.0	516.0	372.6	143.4	72.2
<sup>238</sup> U			BigRIPS/ZDS/Rare-RI Ring/F12	> 60	72.1	1032.0	700.1	294.0	67.8
Total						2652.0	2157.3	498.1	81.3

### 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、実験室等で分類し、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いるので、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 435.6 時間、停止時間は 2.0 時間、可用度は 100.8%であり、従来通りの安定したビームを供給した。また、Table 1 の記載以外にも <sup>51</sup>V ビームによる 119 番元素合成実験が断続的に実施されたが、実験者との取り決めにより詳細の公表は差し控える。

RIBF 側では、計 3 回の MT が行われ、計 1721.7 時間ビームを供給し、可用度は 77.6%であった。

<sup>238</sup>U 345 MeV/u ビーム加速では、最大で 72 pnA のビームを供給した。これは、主として RRC 後段に配置されているガスストリッパーへの窒素ガスジェットシステムの導入とオリフィス大口径化[12]によるアクセプタンスの増加により通過効率が改善した事による。一方で、後述の通りトラブルが多発し、ビーム可用度は 67.8%に止まった。

<sup>124</sup>Xe 345 MeV/u ビーム加速では、前回 2016 年 4 月の MT 時の SRC からの抽出しビーム強度 102 pnA と比較すると実に 1.7 倍の 173 pnA を取り出している。これは主として後述の RRC 共振器改造による加速電圧向上の結果である。

#### 3.2 トラブル

この 1 年間に発生した主なトラブルを記載する。

- 10/19 SRC の静電デフレクター(EDC)で放電が多発しリーク電流が増大した為、SRC を大気開放し予備 EDC と交換して復旧した。交換時に同予備機のセプタム冷却配管フィードスルー部に真空リークが見つかり、真空シーラント(VACSEAL)塗布の応急処置を行った。
- 10/27 SRC の静電インフレクター(EIC)にリーク電流が流れ、印加電圧が 35 kV まで低下した。直近のビームプロファイル診断装置(PF-SEIC)を駆動した瞬間に発生したので、SRC を大気開放し内部点検した所、EIC の冷却配管と PF-SEIC が干渉した形跡があり、削れた金属片が高圧電極板に付着していた。付着物を取り除くと共に、PF-SEIC を OUT 側に固定する再発防止応急処置を施した。
- 11/15 RRC 入射ビームラインの二極電磁石電源(AVF-D1)がトリップした。トランジスタバンク内の警報ヒューズ交換で復旧した。
- 12/1 IRC メインコイル系純水冷却ポンプがインバーター異常で停止し、関係電磁石電源がトリップした。インバーター異常がリセットできない為、インバーター本体交換により復旧した。
- 12/12 IRC-EDC の電圧降下によりビームが取り出せなくなった。同電源直結のロガーでは電圧が 99→50 kV に降下しているのに対し、EPICS 制御システム上では変化していないので制御システムのトラブルと判断し、電源制御系のリセットを行なった所、復旧した。
- 12/21 RRC のトリムコイル電源(TA1245)本体で LOCAL/REMOTE の切り替えが出来なくなった。同切り替えスイッチを交換して復旧した。
- 1/29 SRC の取り出し磁気チャンネル(MDC2)の入射側バップル右側(内周側)に損傷が見つかった。アクセスのために第 3 共振器(RES3)を後退した上で修理作業を実施し復旧した。
- 2/10 ドリフトチューブライナック(DTL)の制御システムに通信異常が発生した為、調査した所、シーケンサーの各 I/O インターフェースユニットが受電されていなかった。24 V スwitchング電源の故障が判明し、交換により復旧した。
- 3/25 SRC 常伝導トリムコイル電源系統の純水ポンプが故障し関係電磁石電源がトリップした。当該ポ

ンプはベアリング交換で復旧した。

- 3/30 SRC のヘリウム冷凍機(T1)がトリップした影響で、関連超伝導電磁石電源がトリップ(低速放電)した。T1 トリップのトリガー信号は回転速度低下であったが、回転数のデータには異常がなかったため、回転速度を読み取る計測器が誤信号を発したと推定している。
- 4/10 SRC のフラットトップ(FT)用トランジスタアンプが度々トリップしたため、予備機に交換して復旧した。
- 4/20 RILAC2 コースの四極電磁石電源(QTB31a)がIGBT 過負荷、ダイオード加熱のインターロックでトリップした。予備電源に交換して復旧した。
- 5/24 fRC-EDC の印加電圧に対するビームの挙動が不安定な為、fRC を大気開放し内部点検した所、EDC の高圧導入部が曲がっていたので、修正し復旧した。
- 6/7 ビーム調整中に SRC-EDC の放電が頻発しリークカレントが流れた。電圧上げ下げ等による通常のコンディショニングでは状態が改善しない為、SRC を大気開放し点検した所、セプタム電極に穴が開いていたので、予備のセプタムと交換し復旧した。
- 6/17 IRC からのビーム量が顕著に変動した上に、IRC の共振器 NW で電圧低下が頻発した為、現場確認すると、トランジスタアンプ本体ファンより異音が発生し、フロントパネルの出力メーターの針の振れも確認された。予備機と交換して復旧した。

また、2018 年 10 月から 12 月に実施した  $^{238}\text{U}$  ビーム加速 MT では、fDC 下流に設置してある回転荷電変換膜がビーム調整中に異常停止した。この異常停止はビーム供給を開始した後も度々発生し、最終的に磁性流体シールを交換することによって安定して動作するようになった。

この他、RRC 共振器改造(4 章参照)後から、同システム(Fig. 1)の冷却系統からの漏水によって共振器の真空悪化が度々発生している(概ね $4\sim 3$  乗 Pa 台まで真空悪化)。真空悪化発生の際に冷却配管の系統別にリーク調査を実施した後、溶接修理実施で復旧している。調査を含め復旧作業には概ね 4 日を要している。Table 2 にその履歴をまとめる。

Table 2: Vacuum Deterioration of RRC Cavities Caused by Cooling Water Leak from its Stem

Date	RRC Cavity	Relevant cooling system
9/17	#2	Lower stem #51
11/16	#1	Lower stem #42, 43
1/17	#1	Upper stem #45

#### 4. RRC 共振器の改造

RIBF 運転で最重要視される  $^{238}\text{U}$  ビーム加速において、ビーム電流が近年はほぼ頭打ちとなっていた。その

主たる原因は建設以来 30 年を過ぎた RRC にあり、不足気味であった RRC の加速電圧の向上こそがビーム強度増強の鍵であった。

2017 年まで  $^{238}\text{U}$  ビームは RILAC2 を入射器として使う固定周波数モードで加速しており、RRC の共振器は設計上の周波数下限(後述)を下回る 18.25 MHz で運転していた。この周波数で共振させる為に、周波数調整機構であるムーバブルボックスと、ディー電極間の距離を約 20 mm まで近づけて容量成分を稼いでいた為、シャントインピーダンスが極端に低く、なおかつ放電が頻発し、加速電圧を 85 kV 以上に上げられなかった。

その為、共振器の外箱とムーバブルボックスをそのまま残し、中身であるステムとディー電極を一新する改造を行うことにより、18.25 MHz 運転時の加速電圧向上を実現させることとした。Figure 1 に改造前後の共振器内部の模式図を示す。

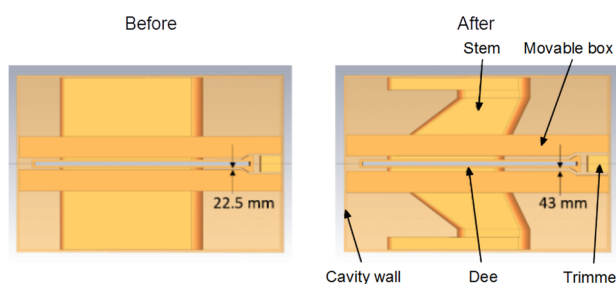


Figure 1: Side view of the resonator of RRC. The left and right panels show before and after modification.

RRC の共振器は半波長型ダブルギャップ式であるが、改造後は直線状のステムに切り欠きを入れることで、従来は 20~46 MHz であった周波数範囲を全体的に低周波数側へシフトさせた。近年、39 MHz 以上の高い周波数では加速していないので、改造後の周波数範囲を 16~38 MHz とするようになった。

改造工事は 2018 年 2 月から 3 月にかけて行われ、4 月に入ってから、ネットワークアナライザにより低電力 RF 試験を行った。その結果、ほぼ想定通りの周波数範囲と Q 値が得られたことが確認できた。Figure 2 に改造後の共振器内部の写真を示す。

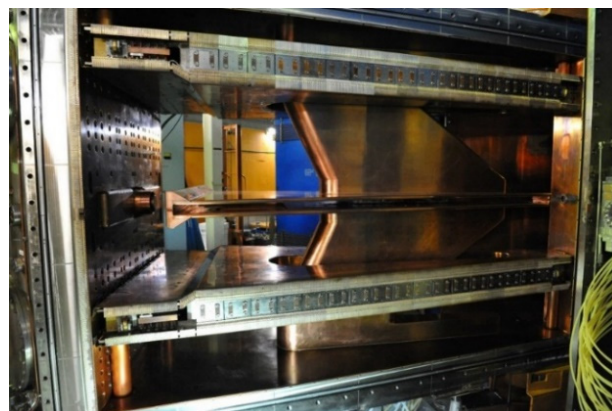


Figure 2: Modified resonator for RRC.



改造された共振器は昨年5月よりMTに使用され、現時点で18.25 MHzから32.6 MHzまで7種類の周波数で運転されている。2018年10月から12月までの $^{238}\text{U}$ ビーム加速MTでは18.25 MHz運転時に両共振器共に115 kV超の加速電圧で運転しており、シャントインピーダンスが向上し、放電による電圧低下や真空管の高圧電源トリップ(HV down)頻度も著しく低下した。この改造前後の2017年と2018年の同時期に実施した $^{238}\text{U}$ -MTにおける18.25 MHz運転について、加速電圧の比較をFig. 3に、電圧低下とHV Downの頻度の比較をそれぞれFig. 4とFig. 5に示す。

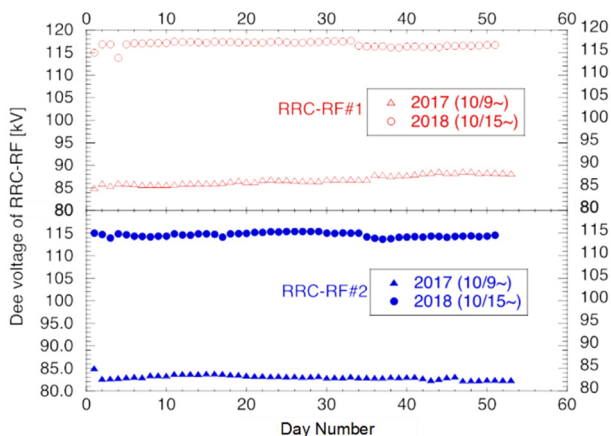


Figure 3: Comparison of acceleration voltage of DEE between operations in 2017 and 2018. (Upper panel) RRC-RF#1. (Lower panel) RRC-RF#2.

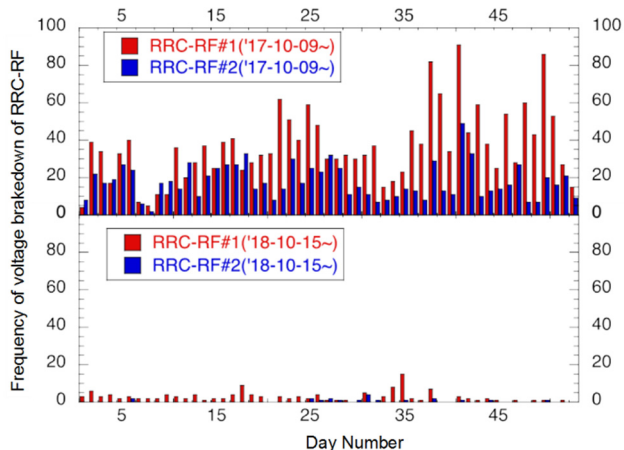


Figure 4: Comparison of frequency of voltage breakdown. (Upper panel) U-MT in 2017. (Lower panel) U-MT in 2018.

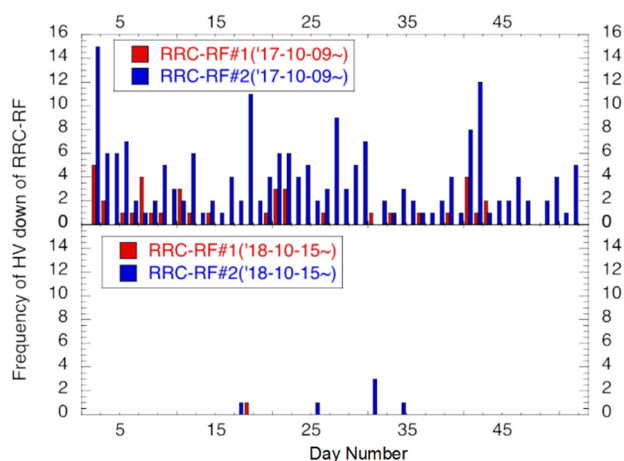


Figure 5: Comparison of frequency of HV down. (Upper panel) U-MT in 2017. (Lower panel) U-MT in 2018.

また、2019年前半の全MT終了後に励振試験を実施し、両共振器共に改造前の実に約2倍の160 kVの電圧を記録した。

この様に共振器改造によって大幅な性能向上が達成できたが、3項で述べた通りシステムの冷却システムからの漏水に伴う真空悪化が問題となっている。これは純銅製の大型部品を製作する際の溶接の難しさに起因している。今までは真空悪化が発生する度に、溶接修理等で凌いではきたが、今夏期メンテナンス時に本格的な点検、調査、修理を実施し、2019年後半の $^{238}\text{U}$ ビーム加速に向けて万全を期す。

## 5. まとめ

2018年7月23日から2019年7月17日までの総運転時間は2157時間、可用性は81.3%であった。

$^{238}\text{U}$ ビーム加速において、最大供給強度は72 pnA、また $^{124}\text{Xe}$ ビーム加速では、前回の1.7倍の最大供給強度173 pnAを記録した。加速器の機器装置の老朽化に対処しつつ、大強度化に向けた改造を行い、更なるビーム強度増強とトラブルレスなビーム加速を目指している。

## 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] M. Nishimura *et al.*, Status report of the operation of RIBF ring cyclotrons, Proceedings of PASJ17, FSP028 (2017), pp. 1395-1399.