

## 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

仲村武志<sup>B)</sup>, 大関和貴<sup>#A)</sup>, 福澤聖児<sup>B)</sup>, 濱仲誠<sup>B)</sup>, 石川盛<sup>B)</sup>, 小林清志<sup>B)</sup>, 小山亮<sup>B)</sup>, 西田稔<sup>B)</sup>,  
西村誠<sup>B)</sup>, 柴田順翔<sup>B)</sup>, 月居憲俊<sup>B)</sup>, 矢富一慎<sup>B)</sup>, 段塚知志<sup>A)</sup>, 藤巻正樹<sup>A)</sup>, 藤縄雅<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>, 金井保之<sup>A)</sup>, 木寺正憲<sup>A)</sup>,  
込山美咲<sup>A)</sup>, 熊谷桂子<sup>A)</sup>, 真家武士<sup>A)</sup>, 長友傑<sup>A)</sup>, 中川孝秀<sup>A)</sup>, 中村仁音<sup>A)</sup>, 大西純一<sup>A)</sup>, 奥野広樹<sup>A)</sup>,  
坂本成彦<sup>A)</sup>, 須田健嗣<sup>A)</sup>, 内山暁仁<sup>A)</sup>, 渡部秀<sup>A)</sup>, 渡邊環<sup>A)</sup>, 渡邊裕<sup>A)</sup>, 山田一成<sup>A)</sup>, 山澤秀行<sup>A)</sup>  
Takeshi Nakamura<sup>B)</sup>, Kazutaka Ozeki<sup>#A)</sup>, Seiji Fukuzawa<sup>B)</sup>, Makoto Hamanaka<sup>B)</sup>, Shigeru Ishikawa<sup>B)</sup>,  
Kiyoshi Kobayashi<sup>B)</sup>, Ryo Koyama<sup>B)</sup>, Minoru Nishida<sup>B)</sup>, Makoto Nishimura<sup>B)</sup>, Junsho Shibata<sup>B)</sup>, Noritoshi Tsukiori<sup>B)</sup>,  
Kazuyoshi Yadomi<sup>B)</sup>, Tomoyuki Dantsuka<sup>A)</sup>, Masaki Fujimaki<sup>A)</sup>, Tadashi Fujinawa<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>, Yasuyuki Kanai<sup>A)</sup>,  
Masanori Kidera<sup>A)</sup>, Misaki Komiyama<sup>A)</sup>, Keiko Kumagai<sup>A)</sup>, Takeshi Maie<sup>A)</sup>, Takashi Nagatomo<sup>A)</sup>,  
Takahide Nakagawa<sup>A)</sup>, Masato Nakamura<sup>A)</sup>, Jun-ichi Ohnishi<sup>A)</sup>, Hiroki Okuno<sup>A)</sup>, Naruhiko Sakamoto<sup>A)</sup>,  
Kenji Suda<sup>A)</sup>, Akito Uchiyama<sup>A)</sup>, Shu Watanabe<sup>A)</sup>, Tamaki Watanabe<sup>A)</sup>,  
Yutaka Watanabe<sup>A)</sup>, Kazunari Yamada<sup>A)</sup>, Hideyuki Yamasawa<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 2020 to July 2021. 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 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、2020 年 8 月から 2021 年 7 月までの 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、 $^{40}\text{Ar}$ 、 $^{48}\text{Ca}$ 、 $^{70}\text{Zn}$ 、 $^{86}\text{Kr}$  等を最高 400 MeV/u ( $^{40}\text{Ar}^{18+}$ ) 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、 $^{40}\text{Ar}$  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あり、生物照射実験にビームを供給している。Figure 1 に RI ビームファクトリーにおける加速器群および実験装置の構成を示す。

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

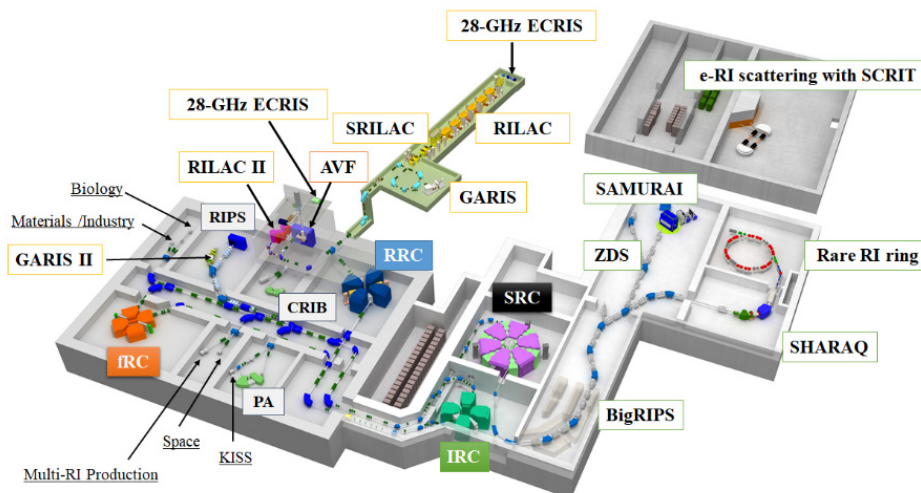


Figure 1: The layout of RIBF facility at RIKEN.

Table 1: Operating Status of RIBF

Beam particle	Energy (MeV/u)	Acceleration mode	Beam course	Beam intensity (particle nA)		Beam service time (h)		Down time (h)	Availability (%)
				Requested	Actual	Scheduled	Actual		
RARF									
<sup>12</sup> C	135	AVF-RRC	E5B (Biology)	2	541.7	39.0	13.6	0.0	100.0
			E5A (Industry)	2	91.7	5.0	5.1	0.0	101.7
<sup>14</sup> N	100		E3B (RI Production)	200	320.0	6.0	6.5	0.0	108.3
<sup>20</sup> Ne	135		E5B (Biology)	2	120.0	3.0	1.9	0.0	100.0
<sup>40</sup> Ar	95		E5A (Industry)	1	54.1	97.0	132.1	0.0	136.1
<sup>56</sup> Fe	90	RILAC2-RRC	E5B (Biology)	2	7.7	9.0	2.6	0.0	100.0
<sup>84</sup> Kr	70		E5A (Industry)	2	10.5	198.0	250.8	2.6	126.7
<sup>4</sup> He	7.25	RILAC2-RRC	RRC (MS)	18300	1100.0	24.0	33.6	0.0	139.9
<sup>51</sup> V	6		E6 (GARIS2)	2000	2230.8	12.0	0.0	0.0	100.0
<sup>86</sup> Kr	10.75		E2B (KEK/KISS)	500	555.6	48.0	47.4	1.3	98.8
<sup>136</sup> Xe	10.75		E2B (KEK/KISS)	100	136.5	144.0	123.2	1.3	100.0
			E3A (JAXA)	1	100.0	18.0	17.3	0.0	100.0
<sup>238</sup> U	10.75	AVT-RRC-IRC	E5A (Material)	2	214.3	48.0	37.4	0.0	100.0
<sup>40</sup> Ar	160		E5B (Biology)	2	29.4	30.0	8.5	0.0	100.0
				Subtotal		681.0	679.9	5.2	116.7
RIBF									
<sup>238</sup> U (1st)	345	RILAC2-RRC-IRC-SRC	BigRIPS/ZDS/Rare-RI Ring/PALIS	60	117.2	624.0	510.5	221.6	81.8
<sup>70</sup> Zn			BigRIPS/ZDS	600	782.0	216.0	244.2	7.8	113.0
<sup>238</sup> U (2nd)			BigRIPS/ZDS/Rare-RI Ring	70	89.5	648.0	610.6	59.5	94.2
<sup>12</sup> C	250	AVT-RRC-SRC	BigRIPS/ZDS	500	500.0	192.0	196.5	27.5	102.3
<sup>211</sup> Pb	250		BigRIPS	200	220.0	180.0	181.3	2.7	100.7
<sup>4</sup> He	200		BigRIPS/SHARAQ	> 500	1000.0	197.0	206.2	2.8	104.7
				Subtotal		2057.0	1949.2	322.0	94.8
Total						2738.0	2629.1	327.1	99.6

### 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、実験室等で区分けし、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) を予定時間 (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、照射時間が予定時間を超過して、ビーム可用度が 100% を超えることがある。また、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。特に、生物照射実験、材料照射実験に関してはその割合が大きい。

RARF 側での実照射時間は、計 679.9 時間、停止時間は 5.2 時間、可用度は 116.7% 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、6 回の MT が行われた。計 1949.2 時間ビームを供給し、停止時間は 322 時間、可用度は 94.8% であった。

2020 年 10 月、1 回目の <sup>238</sup>U 345 MeV/u ビーム加速において過去最大強度である、117 pA のビームを SRC より取り出した。

RIBF 側で 3 年ぶりに AVF を入射器とした軽イオン

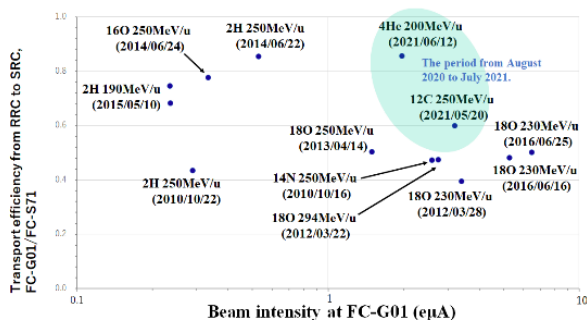


Figure 2: Improvement of transport efficiency using AVF injection mode acceleration.

モードでの加速が行われ <sup>12</sup>C, <sup>2</sup>H, <sup>4</sup>He の 3 種類のビームを供給した。Figure 2 に SRC 取出し後のファラデーカップ FC-G01 のビーム強度と RRC-SRC 間の通過効率の関係を示す。<sup>12</sup>C, <sup>4</sup>He などの比較的大強度の軽イオンビーム供給においても高い通過効率を実現した。しかしながら <sup>4</sup>He の実験終盤には放射線の影響によると思われる機器の不調が発生した。

### 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。

- 9/15 RRC 第 1 共振器 (RRC-RF#1) 立ち上げ励振中に終段アンプの入力コンデンサ (INCAP) の調整をした後にパルスが入らなくなる。INCAP を新品に交換しパルス及び、CW 励振ができる事を確認した。INCAP の駆動系は傘歯車が一部損傷しており、脱調しやすくなっていたので後日歯車を手配して交換を実施した。
- 10/20 SRC トリム電源 (SRC\_NT2\_2) が故障した。使用電流の少ない別のトリム電源 (SRC\_NT22\_2) と負荷側を繋ぎ替えて代用した。
- 10/21 SRC 第 2 共振器 (SRC-RES2) の方向性結合器が 70 Ω になっていたので交換した。
- 10/21 SRC 第 3 共振器 (SRC-RES3) の中間段の真空管が故障した為交換した。その他に中間段フィラメント電源の調整とサーマルスイッチを交換した。
- 10/22 SRC 第 1 共振器 (SRC-RES1) の終段フィラメント電源が CV モードと CC モードの切り替えを繰り返す異常が起きていたので交換した。
- 10/26 SRC-RES2 励振作業中パルスは見えるがパワーが入らず真空が  $1 \times 10^{-4}$  Pa まで悪化した。RF コンタクトフィンガーの損傷を疑い、SRC を大気開放して RF コンタクトフィンガー 5 枚を交換した。
- 10/31 SRC の静電デフレクター (SRC-EDC) にリークカレントが流れて電圧が 40 kV までしか印加できなくなる。焼き出しを行うが改善しない為、SRC-EDC を取出し点検を行った。セプト電極がビームにより熔解していた。予備機と入れ替える作業の為に SRC の超伝導電磁石の減磁、天井磁気シールドの取外し、SRC 本体の大気開放等の大掛かりな作業を行い、復旧するのに 6 日と 9 時間を要した。
- 11/8 SRC の静電インプレクター (SRC-EIC) が高電圧の印加ができなくなる事象が発生した (60 kV 程度で放電頻発)。現場を確認したところ、保護抵抗

器と負荷との間のケーブルがパンクしていたのでケーブルを交換した。

- 12/1 12:40 SRC 超伝導コイル (メインコイル、トリムコイル T1~T4) がコントロールデューア断熱真空悪化異常のインターロックで低速放電が起きた。ログを確認するが真空度の変化は見られないのでノイズだと思われる。
- 1/21 RILAC2 にあるファラデーカップ FC-B31 が引き出し方向へ駆動できなくなり現場を確認した。FC-B31 の対面にある真空用のゲートバルブ GV-B31 の駆動軸の歪みが原因でお互いに干渉して駆動できなくなっていた。GV-B31、FC-B31 共に取外し使用しない事にした。
- 3/22 RRC 第 2 共振器 (RRC-RF#2) の焼き出し中に反射過大で HV が落ち、その後クローバー盤の異常がリセットできない為調査した。クローバー電源内部の高圧断路器 (DS2) のリミットスイッチの不具合が判明し、リミットスイッチを調整して復旧した。
- 4/2 RF の焼きだし中に IRC 共振器 (IRC-ES) の放電が多発した為、IRC を大気開放して共振器内部の点検を実施した。RF コンタクトフィンガーが焼損していたので交換した。
- 4/3 ビーム調整中に SRC-RES3 の放電が多発したため SRC を大気開放して共振器内部の点検を実施した。トリマー駆動部の RF コンタクトフィンガーが焼損していたので交換し、以後 550 kV に下げて使用した。
- 4/4 SRC 常伝導トリムコイル用冷却ポンプ (SRC-P4) が異常により停止した為、SRC トリムコイルが落ちる。4/5 に業者による点検、調整により復旧した (定格電流付近で運転していたのが原因とのこと)。
- 4/12 SRC-RES2 の再立ち上げ時に 580 kV 付近で連続放電が多発した。600 kV から 550 kV に下げて SRC を再調整して運転継続した。
- 4/19 SRC-RES2 の再立ち上げ時に 450 kV 以上で放電が多発した。最終的に 4/20 日中に使用していた電圧の 551 kV から 451 kV まで下げて SRC を再調整して運転継続した。
- 4/30 fRC 出側にあるステアリング電磁石 (fRC-SH3、SV3) が負荷のサーマル異常で落ちた。ビームの軌道が変わり E1 室内ガスストリッパーの上流にあるベローズにビームが当たり、真空リークが発生した。ベローズを交換して復旧した。
- 5/23 15:29 ~ 5/24 17:00 SRC 冷凍機が異常フラグ (液溜めヒーター温度高) を発報して停止した。異常フラグをジャンプして運転を再開した。
- 5/31 1:24 ~ 5/31 7:30 旧施設冷却機械室キュービクル内の RRC 本体系冷却水ポンプが漏電トリップし、RRC-RF、メインコイル、トリムコイル、AVF-RRC 間 BT 系電磁石がダウンした。
- 7/7 IRC 共振器遠隔操作ソフト (Intouch) の画面が白抜きになり IRC-ES が落ちる。現場 PLC を確認すると、通信異常が点灯している。コントロールユニットを交換しラダープログラムをダウンロードして復旧した。

## 4. その他修理・改良

### 4.1 RRC 共振器システム冷却システム真空リーク修理

RRC 共振器は 2018 年に  $^{238}\text{U}$  345 MeV/u の加速周波数である 18.25 MHz の加速電圧向上を目的とした、ステムとディー電極を一新する改造を行った[12]。改造の結果、高い電圧で励振できるようになったが共振器システム冷却システムから微小な真空リークが起きるようになった[13]。

2020 年 9 月から 2020 年 10 月にかけて RRC-RF#1 のステム冷却システムのリーク調査と補修を実施し、その結果 4 箇所のリークが見つかり全て補修した。

2021 年 3 月に RRC-RF#1 と RRC-RF#2 のステム冷却システムのリーク調査と補修を再度実施し、その結果 RRC-RF#1 は 2 箇所、RRC-RF#2 は 12 箇所のリークが見つかり全て補修した。

リークの調査は予防的に行い早い段階でリーク箇所を補修し、より安定した運転を目指している。回を重ねるごとにリーク箇所は減ってきている。

### 4.2 RRC 共振器電圧変動と受電の関係

ビーム供給中に RRC-RF#1 と RRC-RF#2 の電圧が 0.1% 程度変動する現象が度々起きていた。 $^{238}\text{U}$  345 MeV/u の加速では RRC、fRC、IRC、SRC によりカスケード加速を行う為、上段にある RRC の微弱な電圧変動でも最終段の SRC から取り出されるビームには大きく影響する。電圧の変動は以前から起きていたが、最近になってこの変動が RARF 施設の高圧 6600 V 受電と相関がある事が判明した。改善策として RF 共振器システムの受電に AVR の導入等を検討している。Figure 3 に RRC-RF#1、#2 の電圧変動と高圧受電の関係を示す。

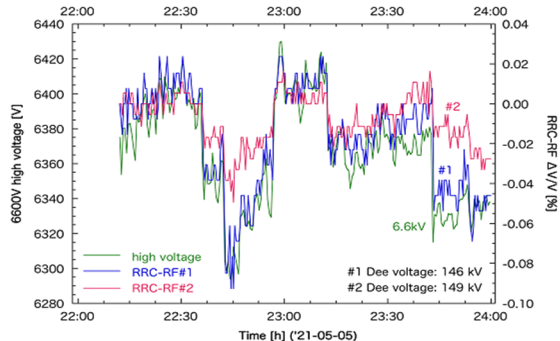


Figure 3: Correlation between voltage fluctuations of RRC acceleration cavities and those of commercial electricity.

### 4.3 RRC 入射取り出し機器用電源の DCCT 化

RRC の入射取り出しに用いられる電磁石、磁気チャネルの電源は 1986 年の RRC 建設当時より継続して使用しているため老朽化が顕著で、電源の安定度を高める為、シャント方式から DCCT 方式に改造する作業を毎年少しずつ行っている。2020 年 8 月から 2021 年 7 月までに入射側の電源 2 台 (RRC-BM2: 2700 A、RRC-BM12: 2700 A) と取出し側の電源 1 台 (RRC-EBM2: 1600 A) を改造した。全部で 9 台の電源の改造を予定しており現時

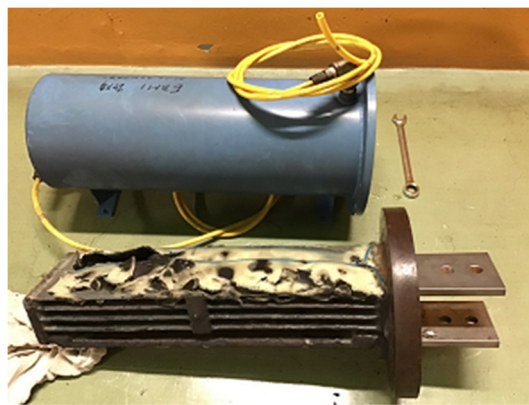


Figure 4: Aged shunt resistor used in the power supply of RRC-BM2.

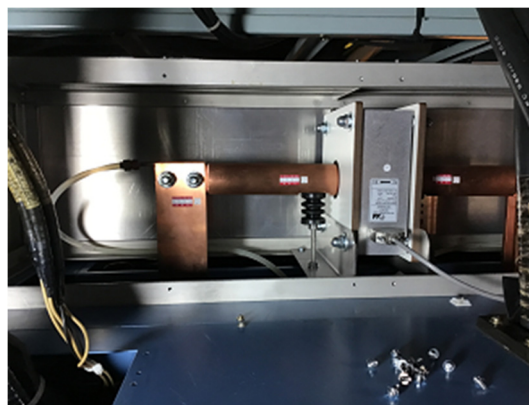


Figure 5: New DCCT for the power supply.

点で 5 台の改造が完了している。

改造では水冷の銅ブスバーと、電流出力タイプの DCCT を使用し、その他に主回路コンデンサ、主・副フロースイッチ、電源フィードバック用の制御基板の交換も実施した。

Figure 4 に老朽化し抵抗部分の絶縁が剥がれてしまっている桶型シャント、Fig. 5 に改造後の DCCT の写真を示す。

### 4.4 電磁石電流変動監視システム Curs-BIS

RIBF 実験では約 600 台もの電源を使用して電磁石を励磁しビームを供給している、2017 年 4 月のビーム供給中に SRC 入射ビームラインにあるステアリング電磁石 (SRC-SH1) の電流値が操作を行っていないのに 75 A 変動する事象が発生した。その影響でビームの軌道が変わり、入射ビームラインと第 1 バレー箱 (VLB1) を接続するベローズにビームが当たり真空リークが発生した。

そこで 2019 年から電源の電流値を監視して、遠隔操作を行わない状態で電流値が変動した際にインターロックシステムに信号を送る、電磁石電流変動監視システム (Curs-BIS) を開発し導入している。電流の測定は、電源が様々な仕様で製作されている都合上それぞれに適切な異なるセンサーで行われている。精度の良い外付け DCCT によるもの、簡易的な外付け DCCT によるもの、

電源フィードバック DCCT の出力を分岐しているもの、電源シャントの出力を絶縁アンプを介して測定しているもの、これらのいずれかで測定されている。Curs-BIS ユニツトは 1 台あたり最大 48 台までの電源電流値を監視できる。2020 年 8 月から 2021 年 7 月までにユニツトを 5 台増設し 161 台の電源を追加し、計 549 台の監視を行なっている。現時点で RARF 側に 8 台、RIBF 側に 7 台のユニツトを設置してある。今後さらにユニツトを追加する予定である。Figure 6 に Curs-BIS のユニツトの写真を示す。

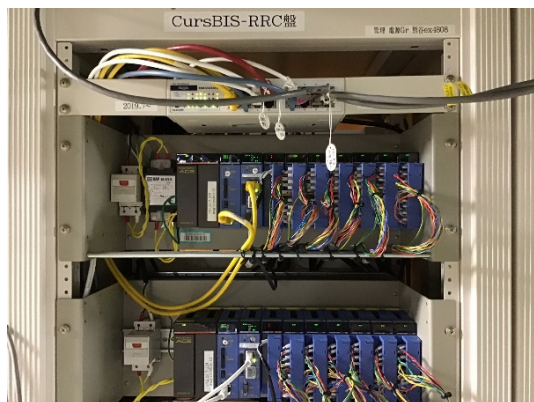


Figure 6: Curs-BIS measurement device.

Curs-BIS は加速器のビーム調整やビームトランスポート調整等で電源を操作する際はシステムがそれを感知し操作中は電流が変化してもインターロックに信号を送らず、操作完了後に電流の監視を再開する仕組みになっている。そのおかげでオペレーターが電流値を変える際に何も気にする必要が無い為、円滑なビーム調整ができる。また、ウェブブラウザ経由で簡単に電源毎に異常と判断すべき閾値の上限、下限、インターロック出力の有無、等の設定が行える。

## 5. まとめ

2020 年 8 月から 2021 年 7 月までの総運転時間は 2629.1 時間、可用度は 99.6%であった。<sup>238</sup>U ビーム加速において、SRC より取り出したビーム強度は過去最大の 117 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 A227, 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] N. Tsukiori *et al.*, “Status report of the operation of RIBF ring cyclotrons”, Proceedings of PASJ2019, 2019, pp. 1393-1397.
- [13] S. Ishikawa *et al.*, “Status report of the operation of RIBF ring cyclotrons”, Proceedings of PASJ2020, 2020, pp. 893-897.