

理研 RIBF におけるリングサイクロトロン^{B)}の運転報告

STATUS REPORT OF THE OPERATION OF RIBF RING CYCLOTRONS

柴田順翔^{#, B)}, 須田健嗣^{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)},
西村誠^{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)},
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)}
Junsho Shibata^{#, B)}, Kenji Suda^{A)}, Seiji Fukuzawa^{B)}, Makoto Hamanaka^{B)}, Shigeru Ishikawa^{B)}, Kiyoshi Kobayashi^{B)},
Ryo Koyama^{B)}, Takeshi Nakamura^{B)}, Minoru Nishida^{B)}, Makoto Nishimura^{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)},
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 2017 to July 2018. 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 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、2017 年 7 月 15 日から 2018 年 7 月 23 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}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($^{40}\text{Ar}^{18+}$)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 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。

[#] shibata@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	466.7	36.0	23.2	92.4	
¹⁴ N	135		E3B (RI Production)	500	485.7	24.0	22.5	93.8	
²² Ne	70		E6 (RIPS)	> 200	420.0	122.0	123.3	100.9	
⁴⁰ Ar	95		E5B (Biology)	1	27.1	6.5	3.5	100.0	
⁵⁶ Fe	90		E5B (Biology)	1	1.3	14.0	12.0	100.0	
⁸⁴ Kr	70		E5A (Industry)	0.1	6.6	96.0	103.7	107.6	
⁸⁶ Kr	66		E3A (JAXA)	1	5.6	24.0	23.7	100.0	
⁵¹ V (1st)	6		RILAC2-RRC	E6 (GARIS2)	N/A	3461.5	324.0	209.8	64.3
⁵¹ V (2nd)	6			E6 (GARIS2)	N/A	7154.0	807.0	695.0	84.8
⁵¹ V (3rd)	6			E6 (GARIS2)	N/A	7307.7	840.0	824.9	87.1
¹³⁶ Xe	7.2	E2B (KEK/KISS)		250	1015.0	48.0	47.4	98.7	
¹³⁶ Xe	10.75	E2B (KEK/KISS)		250	185.0	96.0	96.2	99.3	
¹³⁶ Xe	10.75	E3A (JAXA) / E5A (MS)		1	92.0	39.0	37.8	116.0	
⁴⁰ Ar	160	AVF-RRC-IRC	E5B (Biology)	1	22.8	19.5	16.7	92.5	
RIBF									
¹⁸ O	230	AVF-RRC-SRC	BigRIPS/SAMURAI	> 700	600.0	540.0	543.0	100.6	
²³⁸ U	345	RILAC2-RRC-IRC-IRC-SRC	BigRIPS/ZDS/PALIS/SHARQA/Rare-RI Ring	> 50	71.0	960.0	919.9	95.8	
Total						3996.0	3702.6	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、実験室等で区分けし、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、ビーム可用性が 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、可用性 100% としている。

同一条件で複数回行われた実験をまとめて表しているが、⁵¹V-MT 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 2239.7 時間、停止時間は 114.4 時間、可用性は 95.5% であり、概ね従来通りの安定したビームを供給した。119 番元素合成実験が本格的に始まり、3 回 MT が行われた。計 1729.7 時間 ⁵¹V 6 MeV/u ビームを供給し、可用性は 82.4% であった。また、RRC 出口で最大 7300 pnA のビームを取り出した。

RIBF 側では、計 2 回の MT が行われた。計 1462.9 時間ビームを供給し、可用性は 98.2% であった。

²³⁸U 345 MeV/u ビーム加速では、最大で 71 pnA のビームを供給した。主として、RRC 後段に配置されているガストリッパーまでの通過効率改善により達成した。RRC の調整方法の変更、及びガ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る。入射器 RILAC2 と 4 台のリングサイクロトロン (RRC、fRC、IRC、SRC) を用いた RIBF で最も多くの装置が同時に稼働する加速モードであり、維持が容易ではなかったが、可用性 95.8% を達成した。

¹⁸O 230 MeV/u ビーム加速では、最大で 600 pnA、延べ 7 グループにビームを供給し、可用性は 100.6% であった。RRC において、第 1 高周波系 (RRC-RF#1) の中間段プレート電源過電流検出用メーターリレー故障と中間段フィラメント電源制御用 DC 24V 電源故障、真空制御系誤作動による真空悪化が発生したが、いずれも主に放射線の影響によるものと考えられる。

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。

- 9/11 21:20 加速器立ち上げ時、RRC-RF#2 の励振器における入力同軸管冷却配管から水漏れを発見した。補修パテによる応急修理では漏水は止まりきらず、しばらく漏水させたまま運転を継続していた。冬期メンテナンスで、漏水していた冷却銅配管を剥がし、新しい銅配管を巻き直して修理した。
- 9/13 9:30 ビーム供給直前、IRC の第 2 高周波系 (IRC-RF-NW) 用 6.6 kV 高圧受電盤の真空遮断器が故障した。真空遮断器の交換を行い、4 時間遅れでビーム供給を開始した。
- 10/15 13:00 28 GHz 超伝導 ECR イオン源のビーム生成不具合でビーム供給中断時、SRC の静電入射チャンネル (SRC-EIC) が放電し、電圧印可不可能となった。調査の結果、負荷側の問題と分かり、SRC を大気開放し、急遽 SRC-EIC のメンテナンスを行った。セプタム電極の冷却配管と高圧電極との間の放電が原因であった。SRC の真空引き、EIC のコンディショニング、およびビーム再調整を経て、約 5.5 日でビーム供給を再開した。
- 10/17 11:00 ビーム再調整中、fRC のトリムコイル (fRC_TSWN4) 電源が故障した。予備電源と交換を行った。
- 10/20 11:48 ビーム供給中、SRC の 4 台ある加速共振器のうち第 4 共振器 (SRC-RES4) が、終段プレート電源の高圧受電盤異常で励振できなくなった。同受電盤地絡リレーのソケット不良が原因であった。交換を行い、3 時間後にビーム供給を再開した。

- 10/29 5:36 ビーム供給中、SRC-RES4 励振器の中間段プレート冷却用ホースから水漏れを起こし、励振できなくなった。ホースを交換し、3 時間後にビーム供給を再開した。
- 11/3 8:06 ビーム供給中、IRC のトリムコイル (IRC_T20E) 電源が故障した。予備電源と交換を行い、2 時間後にビーム供給を再開した。
- 11/6 0:19 ビーム供給中、SRC 本体室で漏水を検知し、現場を点検した。SRC-EIC 冷却用ホースに亀裂が入り、水漏れしていた。経年劣化及び放射線ダメージによる硬化が原因と考えられる。亀裂の入った部分を切断、再接続を行った。3 時間後にビーム供給を再開した。
- 11/7 3:48 ビーム供給中、SRC 本体室で再び漏水を検知した。上記で対処した SRC-EIC の冷却用ホース継ぎ手部分から水漏れしていた。継ぎ手部の再取り付けで対処した。1 時間後にビーム供給を再開した。なお、今年度の夏期メンテナンスで、同敷設配管の一部を樹脂製ホースから金属配管へ盛り替える予定である。
- 1/11 0:20 ビーム供給中、RRC-RF#1 が終段プレート電源クローバ盤の空冷ファン異常で励振できなくなった。ファンを交換して、3 時間後にビーム供給を再開した。
- 5/21 21:18 RRC-RF#1 の中間段プレート電源過電流異常で励振できなくなった。調査の結果、同電源過電流検出用メーターリレー故障によるものと判明した。老朽化、もしくは大強度ビーム供給中であった為、放射線によるものと考えられる。予備品がなかった為、やむを得ずメーターリレーの接点を短絡して対処し、10 時間後にビーム供給を再開した。なお、夏期メンテナンスでの交換を予定している。
- 5/25 19:25 ビーム供給中、RRC の真空度が大気圧程度まで一気に悪化した。大気もしくは冷却水による真空リークを疑い、真空リークテストを行ったが、リークは検出されなかった。真空排気系の再起動で復旧し、RF と入射取り出し静電チャンネル (EIC、EDC) のコンディショニング、およびビーム再調整を行い、6 時間後にビーム供給を再開した。大強度ビーム供給中であった為、放射線の影響による真空制御系の誤作動と思われる。大気側と繋がっているバルブが開いたと思われるが、原因の特定はできていない。
- 5/31 22:29 ビーム供給中、RRC-RF#1 中間段フィラメント電源の制御用 DC 24V 電源が故障した。DC 24V 電源を交換し、1 時間後にビーム供給を再開した。これも放射線の影響と考えられる。
- 6/21 1:33 ビーム供給中、RILAC2 及び 28 GHz 超伝導 ECR イオン源用の冷却水ポンプが故障した。冷却水ポンプの修理の後、ビーム再調整を行い、1.5 日でビーム供給を再開した。
- 7/18 4:50 ビーム供給中、RILAC2 の RF と真空が異常停止した。RILAC2 の RF 制御用シーケンサー異常が原因であった。シーケンサーの制御ブレーカーを入れ直し、真空と RF を復帰した。ビーム照射が行われていた同じ実験室内に RILAC2 の

制御盤が設置されており、大強度ビームであった為、放射線が影響したものと考えられる。1 時間後にビーム供給を再開した。

- 7/20 0:08 RRC 用冷却水ポンプの 400 V ブレーカーが漏電トリップした。原因は不明であったが、異常がみられなかったことから、ブレーカーを再投入後、RRC の再立ち上げを行い、6 時間後にビーム供給を再開した。

4. 修理・改良

4.1 RRC 真空リーク修理と対処

RRC は 2013 年頃から真空度が悪化する傾向であった為、毎年のメンテナンス期間中に幾度となく調査を行い、可能な範囲で対策を行ってきた。調査の中で明らかとなった重大な真空リークは、以下の 2 箇所からである。

- 1) RF#2 共振器と S セクター磁極箱を繋ぐ 1 山ベローズの溶接部 (2014 年に特定)
- 2) N セクター磁極箱内の取り出し磁気チャンネル (MDC1) 入口付近でのビーム損傷によるメンブレン一部融解 (2017 年に特定)

RF#2 共振器ベローズ部からのリークは、2014 年頃から通常よりも一桁悪い 10^{-5} Pa を示していた為、度重なる調査を行ってきた。大まかなリーク箇所を特定できたものの、RRC 中心部側かつベローズの R 部下側であった為、直接観察できなかった。しかしながら、何らかの対策を施さなければならず、VACSEAL LIQUID を浸みこませた綿棒を棒状の治具に取り付け、手探りでリーク箇所と思われる場所に塗布して応急処置を施してきた。これにより、 2×10^{-6} Pa を維持して運転できていたが、メンテナンス時の大気開放や励磁、励振 ON/OFF の繰り返しなどにより、不定期に真空度が 10^{-5} Pa を示すことがあった。約 2 年に渡り、真空度が悪化する度、応急処置を施してきた。

2017 年夏に RRC の共振器改造準備で、ベローズが溶接されている共振器の側壁を外す作業があった為、ベローズのリーク箇所を真空側から調査した。その結果、リーク箇所を特定でき、TorrSeal の塗布で対処した。Figure 1 にベローズの写真を、Fig. 2 に溶接部クラックの写真を示す。これ以降、約 1 年真空度は安定している。

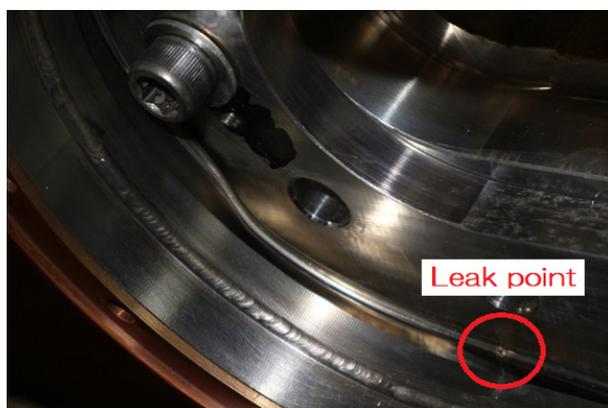


Figure 1: A leak point of the bellows for RRC #2.

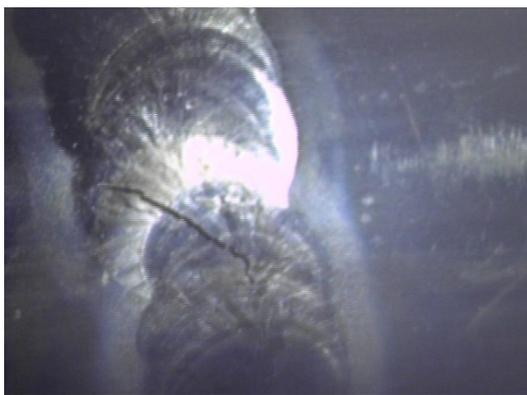


Figure 2: A crack on a welded part of the bellows.

RF#1 共振器においても、2015 年頃から真空度が悪化し始め、 2×10^{-5} Pa より良くなることはなくなってしまった為、2016 年から本格的な調査を開始した。2017 年の調査で、N セクター磁極箱のサブチェンバーとメインチェンバーが常時繋がっていることが判明した。その為、前述した 2017 年夏の RRC 共振器改造準備時に小型カメラを使い、N セクター磁極箱内を調査した結果、メインとサブのチェンバーを隔てるメンブレンに、重イオンビームによる熔融穴が 2 箇所開いていることが確認できた (Figure 3)。磁極箱内のギャップが 50 mm であり、なおかつこれらの穴がダミーディーから約 2 m 離れた遠い位置にあること、修理には N セクターの上ヨークやトリムコイルを取り除く必要があり費用が掛かり過ぎること等の理由でメンブレンの修理は行っていない。

対策として、サブチェンバー真空排気用のターボ分子ポンプを 50 L/min から 200 L/min へ増強した。これにより、現在は 10^{-6} Pa 台を維持している。

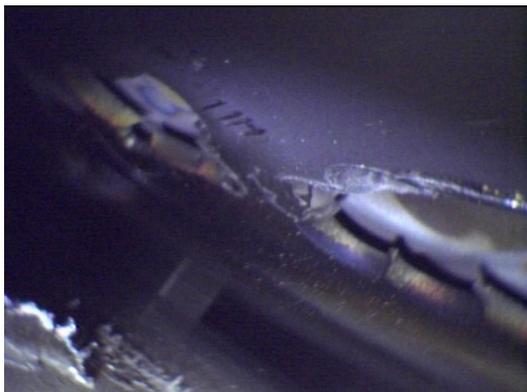


Figure 3: Two melted holes on the N-sector vacuum chamber, created by heavy ion beams.

4.2 RRC 共振器の改造

建設以来 30 年を過ぎた RRC の共振器は、老朽化による冷却水漏れ等を修理しつつ使用してきたが、RIBF の運転で最も重要な ^{238}U ビーム加速の際に加速電圧が不足しており、加速可能な ^{238}U ビーム電流がほぼ頭打ちとなっている問題があった。

^{238}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 で運転している。

この周波数で共振させる為、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る為、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、電圧を 80 kV 以上に上げられなかった。そこで、共振器の外箱とムーバブルボックスを残し、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、老朽化対策と 18.25 MHz 運転時の加速電圧向上をまとめて行うこととした。Figure 4 にオリジナル及び改造後の共振器内部の模式図を示す。

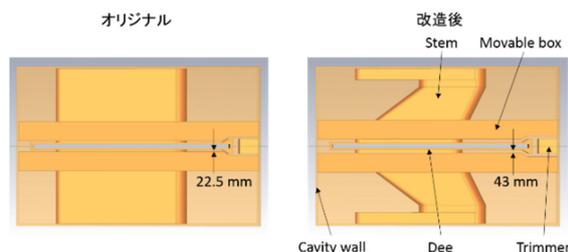


Figure 4: Side view of the resonator of RRC. The left panel shows the original design, and right shows the modified one.

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運転していないので、改造後の周波数範囲は 16~38 MHz となるようにした。

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、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分かった。Figure 5 に改造後の共振器内部の写真を示す。新しい共振器は 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 年前期 MT では ^{238}U ビーム加速がなかった為、18.25 MHz 運転時に高い電圧は不要であったが、試運転では 100 kV 超の電圧で運転できており、シャントインピーダンスが向上し、放電も減少したことが確認されている。同年後期には ^{238}U ビームの加速を予定している為、夏期メンテナンス中に電圧を上げてエージングを行い、120 kV 程度で安定運転することを目指している。

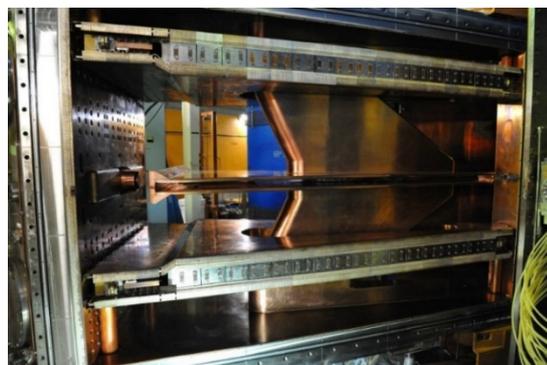


Figure 5: Modified resonator for RRC.

4.3 fRC 共振器内部の RF コンタクト強化

fRC の共振器は上下 2 分割構造となっているが、この共振器内部のフランジ面に一部隙間が空いており、RF コンタクト部品である C リングを焼損させてしまう問題を抱えていた [12]。

そこで、共振器内部の上下を銅板で繋ぎ、RF コンタクトの強化を図る改造を 2018 年 2 月から 3 月にかけて行った。Figure 6 に改造後の共振器内部の写真を示す。

なお、2018 年前期 MT では fRC を使ったビーム加速がなかった為、同年後期から使用予定である。

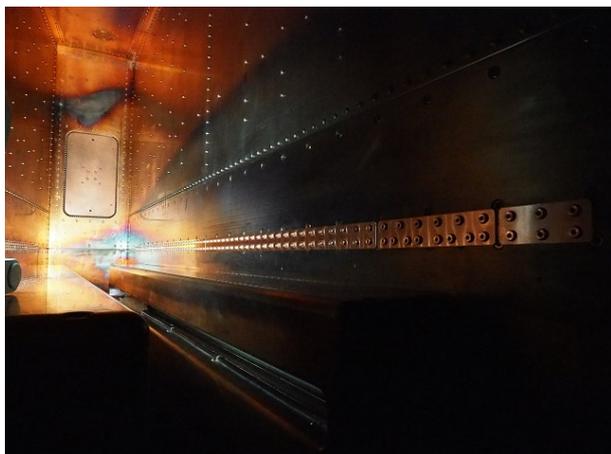


Figure 6: Improvement of RF contacts for the fRC resonators.

4.4 ビームエネルギー調整器の導入

3.1 に述べたように、RILAC2+RRC で加速したビームを使って、現在、新たな超重元素合成実験を行っている。超重元素の合成ではビームエネルギーを狙った値にピンポイントに調整し、標的へ照射し続ける必要があるが、サイクロトロンである RRC ではビームエネルギーを連続的に変更することは困難である。

そこで、RRC から標的までのビームラインに加速空洞を用いたエネルギー調整器を導入し、ビームエネルギーを $\pm 3\%$ 程度まで微調整できるようにした。エネルギー調整器の加速空洞、励振器及び制御盤は RILAC ブースターとして使用していた最終段の DTL タンク式[13]を流用した。この加速空洞は、6 ギャップの四分の一波長型共振器であり、セル長は厳密には合っていないが、エネルギーの微調整用としては使用可能であることが分かったため、ドリフトチューブは交換せずに移設した。ただし、オリジナルの共振周波数は 75.5 MHz であったので、RRC の運転周波数と適合する 73 MHz となるよう改造を行った。円筒同軸型空洞共振器の為、36 mm 厚の銅スペーサーリングを製作して外筒と内筒を延長し、共振周波数を下げた。Figure 7 に改造、移設後のビームエネルギー調整器の写真を示す。

改造後の低電力 RF 試験により、Q 値は 22500 のままオリジナルとほぼ変わらず、設計通りに 73 MHz に改造できたことが確認された。大電力試験も問題なく完了し、2017 年 12 月より MT で使用している。

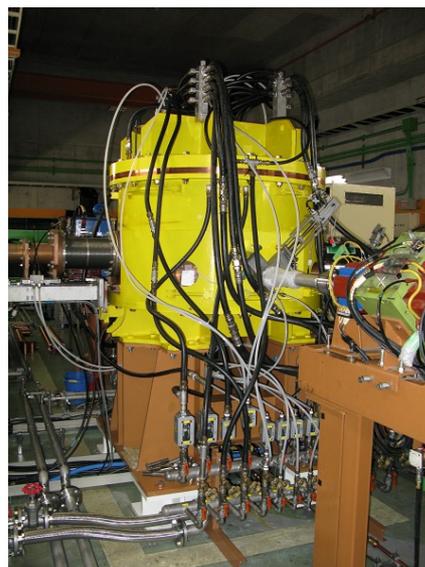


Figure 7: Beam Energy Adjuster (BEA) installed in the beamline after RRC.

5. まとめ

2017 年 7 月 15 日から 2018 年 7 月 23 日までの総運転時間は 3702.6 時間、可用性は 96.5%であった。 ^{238}U ビーム加速において、供給強度は最大 71 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] M. Nishimura *et al.*, Status report of the operation of RIBF ring cyclotrons, Proceedings of PASJ17, FSP028 (2017), pp.

1395-1399.

- [13] O. Kamigaito *et al.*, Construction of a booster linac for the RIKEN heavy-ion linac, *Rev. Sci. Instrum.* 76 (2005), pp. 013306-1-11.