

STATUS REPORT OF THE OPERATION OF THE RIBF RING CYCLOTRONS

理研 RIBF におけるリングサイクロトロン の 運 転 報 告

矢富一慎^{#,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)}, 柴田順翔^{B)}, 月居憲俊^{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)}, 加瀬昌之^{A)}, 上垣外修一^{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)} Kazuyoshi Yadomi^{#,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)}, Junsho Shibata^{B)}, Noritoshi Tsukiori^{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)}, Masayuki Kase^{A)}, Osamu Kamigaito^{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 August 2015 to July 2016. We engage in corresponding improvement, tuning, and maintenance for stable supply. In this contribution, 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RI ビームファクトリー (RIBF[1]) は現在、理研リングサイクロトロン (RRC[2]:K=540 MeV)、固定周波数リングサイクロトロン (fRC[3]:K=700 MeV)、中間段リングサイクロトロン (IRC[4]:K=980 MeV)、超伝導リングサイクロトロン (SRC[5]:K=2600 MeV) の 4 台のリングサイクロトロンを有し、これらを適宜多段的に組み合わせ水素からウランに至る全イオンを 345 MeV/u (A/Z~2 の場合は 400 MeV/u) まで加速し、各実験室に供給している。利用者の要求に応じて入射器 (RILAC[6]、RILAC2[7]、AVF[8])、および加速モード[9]を使い分けている。これまでの RIBF の加速実績を Figure 1 に示す。

実験室は大別して 2 種類あり、一方は RIBF 建造以前からある旧施設と呼ばれる仁科記念棟側の実験室で、主に RRC により加速されたビームを利用している。他方は RIBF 棟側実験室 (SAMURAI, SHARAQ, ZDS) で、SRC から取り出された後、超伝導 RI ビーム生成分離装置 (BigRIPS) を経たビームを利用している。旧施設側では E2B の KEK 短寿命核グループによる実験、E3A の JAXA グループによる半導体照射実験、E5A の産業利用実験、E5B の生物照射実験、E6 (RIPS) の RI ビームを用いた実験が行われている。施設概略図を Figure 2 に示す。旧施設側は床を白抜き、RIBF 側は床を色付きで示している。

本稿では 2015 年 8 月から 2016 年 7 月までの 1 年間のリングサイクロトロン の 運 転 時 間 と 調 整 時 間 の 統 計、ま

た発生した故障とその対処等について報告する。

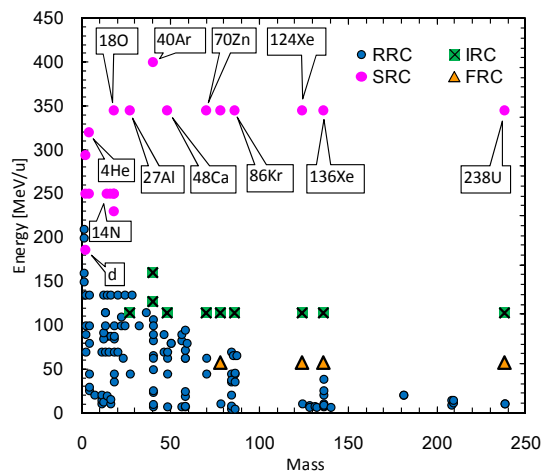


Figure 1: List of nuclei accelerated in RIBF.

2. 運 転 状 況

2.1 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) を要求時間 (scheduled time) で割ったものであり、加速器の安

[#] yadomi@riken.jp

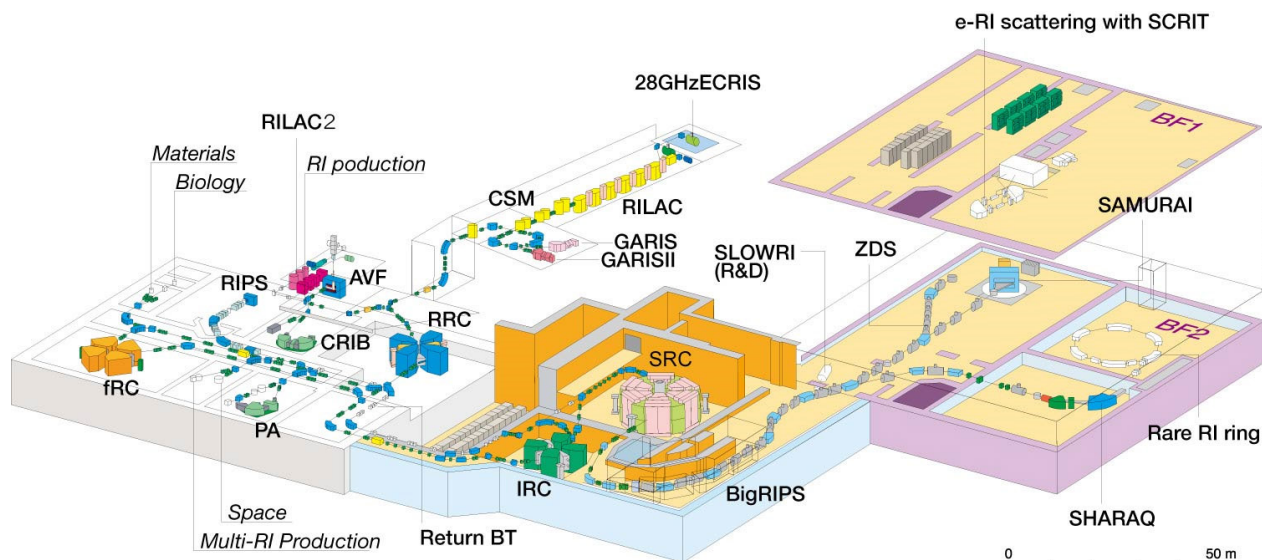


Figure 2: The layout of the accelerator facility in RIBF at RIKEN.

定度の指標である。但し、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。加速器側の調整が早く済んで実験開始が早まったり、停止時間の補償が認められたりした場合などには、照射時間が要求時間を超過するため、ビーム可用性が100%を超えることがある。旧施設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。

旧施設側での実照射時間は計 970.5 時間、停止時間は 7.4 時間、可用性は 104.2%であり、概ね従来通りの安定したビームを供給した。⁴⁰Ar 160 MeV/u の生物照射実験における可用性の低さは予定されたサンプルの照射が早く終わったものでトラブルによるものではない。

RIBF 側では、計 6 回の MT が組まれた。計 2263.7 時間ビームを供給し、可用性は 91.6%であった。以下に、それらの内訳を記す。

Beam particle	Energy (MeV/u)	Acceleration mode	Beam course	Beam time(h)		Availability (%)
				Scheduled	Actual	
¹² C	70	AVF-RRC	E6(RIPS)	72.0	79.7	110.7
¹² C	135		E5B(Biology)	36.0	38.0	105.6
⁴⁰ Ar	66		E5A(MS)	36.0	42.6	118.2
⁴⁰ Ar	95		E5A(Industry/MS)	38.5	40.2	104.4
⁴⁰ Ar	95		E5B(Biology)	30.0	29.9	99.7
⁵⁶ Fe	90		E5B(Biology)	24.5	27.9	113.7
⁸⁴ Kr	70		E5A(Industry)	36.0	38.0	105.6
⁸⁶ Kr	66		E3A(JAXA)	24.0	23.9	99.4
⁴⁸ Ca	63	RILAC-RRC	E6(RIPS)	336.0	338.5	100.7
⁸⁶ Kr	36		E3A(JAXA)	24.0	21.9	91.3
⁴ He	7.3	RILAC2-RRC	A02(MS)	48.0	66.6	138.8
¹³⁶ Xe	10.75		E2B(KEK/KISS)	144.0	140.0	97.2
²³⁸ U	10.75		A11(MS)/E2B(KEK/KISS)	72.0	78.4	108.9
⁴⁰ Ar	160	AVF-RRC-IRC	E5B(Biology)	10.0	5.3	53.2
¹⁸ O	230	AVF-RRC-SRC	SHARQA/SAMURAI	336.0	332.6	99.0
⁴⁸ Ca	345	RILAC-RRC-IRC-SRC	BigRIPS/SAMURAI/ZDS/Rare-RI Ring	396.0	376.5	95.1
¹²⁴ Xe	345	RILAC2-RRC-fRC-IRC-SRC	SAMURAI	168.0	176.5	105.1
²³⁸ U(1st)	345		SAMURAI/ZDS	588.0	519.2	88.3
²³⁸ U(2nd)	345		BigRIPS/ZDS	372.0	327.1	87.9
²³⁸ U(3rd)	345		BigRIPS/SAMURAI/ZDS	612.0	531.8	86.9
			Total		3403.0	3234.5

Table 1: Operating Statistics of RIBF

^{18}O 230 MeV/u ビーム加速では、超伝導イオン源 (SC-ECR[10]) の利用により最大ビーム強度が 6700 enA (838 pnA) になった。これは前回 (2012 年 3 月) 比で 2.0 倍である。15 時間の補償時間を含めて可用度は 99.0%であった。停止時間 18.37 時間のうち、12.0 時間が放射線の影響によるものであった。高放射線環境での運転により、RRC-EIC/EDC 及びメイン電源のトリップ、SRC-RES1 フィラメント電源故障などが発生した。

^{48}Ca 345 MeV/u ビーム加速では、最大ビーム強度は 689 pnA であった。前回 (2014 年) 比が 1.3 倍となり、ビームパワーとして 11.4 kW を達成した。可用度は 95.1%、停止時間は 19.5 時間であった。

^{124}Xe 345 MeV/u ビーム加速では、最大ビーム強度 102 pnA であった。通過効率の改善により、前回 (2013 年 6 月) 比が 2.7 倍に達した。加速器調整時間が短縮できたことから 12 時間多くビームを供給でき、かつ、停止時間が 3.5 時間と短かったため、可用度は 105%に達した。

^{238}U 345 MeV/u ビーム加速は 3 回行われ、延べ 15 グループに供給した。最大ビーム強度は 49 pnA であった。合計で 1378.1 時間ビームを供給し、可用度は 87.7%であった。停止時間が比較的長くなったのは、S6 リバンチャーフィーダー不調、および SRC の MIC1 の冷却水量低下の対応などに時間を要したこと、SRC における加速共振器のハイパワー運転により方向性結合器の故障が頻発したことに起因する。

2.2 トラブル

期間中に各リングサイクロンにおいて発生したトラブルについて、主なものを以下に挙げる。

2.2.1 RRC におけるトラブル

・ RF#1 フィーダー 碍子の破損

2015 年 10 月 9 日 RRC の RF#1 を励振維持中に、真空度が $1.3\text{e-}5$ Pa から $7.3\text{e-}3$ Pa に悪化した。調査の結果リーク箇所がフィーダー 碍子部と判明した。大気開放し交換作業を行い、10 月 13 日に復旧した。

・ MDC1 バッフル破損

2016 年 5 月 1 日 ^{124}Xe MT 時、RRC の真空度が悪化しているのを確認。MDC1 に取り付けられたバッフル



Figure 3: Picture of MDC1 for RRC. Bolt that secure the baffle plates was melted.

から読み出されるビーム電流に依存して真空度が増減していた。早急な対応が困難であったため、MT 中は加速器パラメータの微調にて対処し、MT 終了後にメンテナンスを行うこととした。2016 年 5 月 7 日に大気開放し、取り外して確認したところ、バッフルスリットを固定しているステンレスボルトが 1 つ溶融して落ち、バレー箱に付着していた。Figure 3 に、取り外した MDC1 の写真を示す。右上のボルトが欠落しているのがわかる。左側に伸びている配線を覆っている碍子のビーズにも溶融物の一部が付着している。MDC1 の予備機に交換して復旧した。

2.2.2 fRC におけるトラブル

・ FT 終段アンプ真空管ソケット焼損

2016 年 5 月 13 日 22:00、fRC FT の終段アンプにおいて、フィラメント電源をオンすると、直ちに「電源オン異常」となる事象が発生した。フィラメント抵抗値が 1.5 MOhm と、通常の 0.1 Ohm 未満と比べて異常に高くなっていたため真空管の異常を疑い、交換作業を開始した。真空管を外してみると、ソケットのコンタクトフィンガーが焼損して、真空管側に焼き付いていた。ソケット部は、類似のコンタクトフィンガーをハンダ付けして復旧した。真空管自体は絶縁等の問題はなかったが、ソケットと接触していた電極部の研磨が容易ではなかったため新品に交換した。14 日 21:30 に復旧した。

2.2.3 IRC におけるトラブル

・ビューポート破損

2015 年 10 月 5 日 13:17 IRC の真空度が悪化しているのでリーク調査を開始した。ビューポートが変色し亀裂が入っている事がわかり、SUS 製のブランクフランジに交換した。同日 19:30 に復旧した。



Figure 4: Cracked viewing port.

2.2.4 SRC におけるトラブル

・ RF 方向性結合器、同軸管焼損

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、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。方向性結合器は、アンプから共振器へ電力を伝達する同軸線路の途中に取り付けられており、進行波・反

射波の位相と振幅をモニターするために用いられている。このモニター信号は、空洞の共振周波数を一定に保つための励振フィードバック回路へ入力されており、反射電力を最低限に抑えるために必須である。モニター信号に異常が発生（出力なし、あるいは低下）した際に現場を確認すると、RES1では検出部への過大入力により終端抵抗が焼損していた。焼損は合計 3 回起きたが、RF をオフした際に起き易かった。RES3 では、検出部の極板を固定していた半田が 4 回溶け、電極板そのものが外れて落ちた。原因は、主線路（同軸管 WX-152D）の内筒出口側の RF コンタクトが悪化して電力損失が増え、方向性結合器全体が加熱したことである。これらの故障に対しては、その都度検出部を予備品に交換して対応した。MT 終了後、方向性結合器を取り外して確認すると、内筒にも焼損がみられた(Figure 5)。内筒は真鍮



Figure 5: Damaged coaxial tube and teflon plates.

製で銀メッキが施されていたが、メッキが黒く焼け焦げて一部剥離し、サポートするテフロン板が熱により変形していた。方向性結合器以外の同軸部分も、内筒の一部が焼損、または変色し、テフロン板が損傷していた。10 月からの運転に向けて、現在修復作業を行っている。RF パワーの増強に対応するため、同軸管の冷却対策（空冷化）を同時に進めている。

・SRC クライオポンプ冷却バッフル水漏れ

SRC の各共振器に設置されているクライオポンプは、RF シールド (Figure 6) の開口部を通じて空洞内を排気している。励振時、空洞内に発生する熱がクライオポンプの温度を上昇させることで排気能力が低下してしまう



Figure 6: Cooling baffles coated with patina.

問題に対処するため、2011 年に冷却バッフルを後付けで組み込んだ。設置から 5 年以上が経過し、溶接部より水漏れが発生した。修復作業は 2016 年 3 月の MT 実施前に実施した。今後、他の箇所でも対処が必要になると考えられる。

3. 改良 メンテナンス

ビーム強度の増強、供給の安定化に向けた取り組みとして本期間中に行われた事を挙げていく。

3.1 RRC RF 制御系更新

2016 年 2 月から 3 月までの冬期メンテナンス期間中に、建造時より使われてきて補修も困難な状況であった RRC の RF 制御系を更新した。最大の懸案事項は、空洞内での放電への対応であった。周波数変更後に空洞のコンディショニングを行う際、空洞内で放電しない程度に電圧を設定して徐々に上げていくが、もし空洞内で放電が起こった場合には直ちに設定電圧を手動で下げなければならなかった。対応が間に合わないと放電が連続し、反射電力のためにアンプを損傷するだけでなく、前述の様にフィーダー碍子を破損することがあった。このため、放電時には自動で電圧を下げる仕組みが必要であったが、従来の制御系ではリレーロジックが用いられていたため、機能の追加・改修が困難であった。また、通常の励振中に放電が起きた場合、RF が落ちて再励振が必要となる確率が高かった。特に、ウラン加速における 18.25 MHz での運転では、周波数同調のためのトリマーを駆動する速度が遅く、再励振に約 30 分かかっていた。そこで、従来の制御系を廃止し、新規に製作した PLC を用いた制御システムに更新した。新たに書かれたラダープログラムを搭載した PLC 盤を、仁科記念棟の地下通路に設置した。駆動系のモーターとドライバーを更新し、ドライバーは PLC 盤に組み込んだ。リング本体室に従来から設置されている電源等の機器を制御、および監視するためのケーブルは新たに敷設した。また、ビーム強度の増強に伴う放射線量の上昇に対応するため、ローレベル回路を本体室から地下通路へ移設し、PLC 盤に組み込んだ。これに伴い、基準信号、およびローカルオシレータ信号分配用の方向性結合器ユニットを本体室から地下通路に移設し、同軸ケーブルの新規敷設、および再配置を行った。制御系の操作は、従来は 2 箇所の制御盤（本体室とコントロール室）から行っていたが、新しい制御系では PLC 盤のタッチパネル、あるいはコントロール室等から PC を用いて行えるようになった。これらの更新により、電圧がランプアップで制御されるようになったため、放電しても RF が落ちる確率が格段に低下した。まれに落ちた場合でも、再励振にかかる時間が約 5 分（従来の 1/6）と、大幅に短縮された。この様に、RF に起因する停止時間が短縮され、可用性の改善に大きく貢献した。

3.2 RRC 真空度改善作業

1986 年建造の RRC は各所に真空リーク箇所があり、今後も増えていく事が懸念されている。今期間中に行った対策は、RF#1 共振器内部の真空槽中にある冷却水

配管の継手の増し締めと、RF#2 共振器と S セクター磁極箱間のベローズからのリークに対してトルシールを塗布したことである。ベローズの修復には多大な時間と労力がかかるため応急の措置として行ったものであるが、RF#2 共振器の真空計で $7e-6$ Pa から $2e-6$ Pa に改善し思いのほか効果的であった。

3.3 IRC 真空系コンプレッサ放射線対策

RIBF 運転時、ビーム照射中に IRC のクライオポンプのコンプレッサが異常停止する問題が頻繁に発生していた。コンプレッサ自体の不良やメンテナンストラブルもあり、そちらにも対応しつつ改善を図った。今期の対策としては放射線の影響を考慮し、より線量が低いと思われる場所にコンプレッサを移設した。その結果、昨期 10 回以上起きていた異常停止が今期間中は 1 回と格段に少なくなった。

3.4 SRC RF パワー増強

前回の年会に於いて報告した冷却系の更新[11]により、SRC の RF パワーを増強する事ができた。しかし、今回の方向性結合器、および同軸管の焼損が発生した。これには同軸管を冷却する対策を施す予定である。

4. まとめ

今期の運転時間は 3234.5 時間、可用度は 95.0% であった。ビーム強度の向上、及び安定供給のため、RRC の RF 制御系更新、IRC クライオポンプコンプレッサ移設、RRC 真空改善作業、SRC RF パワーの増強などを実施した。トラブルとして、SRC の方向性結合器、および同軸管の焼損、RRC の MDC バッフル焼損などがあった。

参考文献

- [1] Y. Yano, The RIKEN RI beam factory project: A status report, Nucl. Instrum. & Methods B261 (2007) 1009-1013.
- [2] H. Kamitsubo, Progress in RIKEN Ring Cyclotron Project, Cyclotrons'86, Tokyo, Oct. 1986, pp. 17-23.
- [3] 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.
- [4] J. Ohnishi *et al.*, Construction status of the RIKEN intermediate-stage ring cyclotron (IRC), Cyclotrons'04, Tokyo, Oct. 2004, 18P14, pp. 197-199.
- [5] H. Okuno *et al.*, The Superconducting Ring Cyclotron in RIKEN, IEEE Trans. Appl. Supercond. 17 (2007) 1063-1068.
- [6] 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; H. Yamauchi *et al.*, Present status of RILAC, in this proceedings.
- [7] 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.
- [8] A. Goto *et al.*, Injector AVF cyclotron at RIKEN, Cyclotrons'89, Berlin, Germany, 1989, pp. 51-54; S. Ishikawa *et al.*, Status report of the operation of the RIKEN AVF cyclotron.
- [9] S. Fukuzawa *et al.*, Status of the operation of the RIBF ring

- cyclotrons, Proceedings of PASJ11, FSP024 (2014) 401-405.
[10] T. Nakagawa *et al.*, RSI. 75 (2004) 1394.
[11] M. Nishida *et al.*, Status of the operation of the RIBF ring cyclotrons, Proceedings of PASJ12, FSP003 (2015) 279-280.