

理研 RIBF のリングサイクロトロン運転報告

STATUS REPORT OF THE OPERATION OF THE RIBF RING CYCLOTRONS

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

^{A)} RIKEN Nishina Center for Accelerator-Based Science

^{B)} SHI Accelerator Service Ltd.

^{C)} CNS, the University of Tokyo

Abstract

The operating status of the ring cyclotrons (RRC, fRC, IRC, SRC) of RIKEN RIBF is reported for the period from August 2014 to July 2015. The supplied beam intensities are increasing year by year, and we engage in corresponding improvement and tuning, and maintenance for stable supply. In this contribution, operating statistics, and response to troubles which 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複合加速器システム RI ビームファクトリー(RIBF)^[1]は、1986年より稼働を続けている理研リングサイクロトロン(RRC)^[2]をはじめ、2006年に運用を開始した固定加速周波数型リングサイクロトロン(fRC)^[3]、中間段リングサイクロトロン(IRC)^[4]、そして超伝導リングサイクロトロン(SRC)^[5]の4つのリングサイクロトロンと、理研重イオン線型加速器(RILAC)^[6, 7]、RILAC2^[8]およびAVFサイクロトロン(以下AVFと表記)^[9, 10]の3台の入射器で構成されている。RIBFにおけるこれまでの加速実績を図1に示す。各加速器の多様な組み合わせ(加速モード)により水素(H₂⁺)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)まで加速する事が出来る。RIBFの主加速器であるSRCを用いる加速モードは入射器に応じて3種類あり、これ以外に、RRCから取り出したビームを旧施設の実験室で用いる事も出来る。また、今回

新たにAVF, RRC, IRCを組み合わせ高エネルギーまで加速した軽イオンを旧施設E5B生物照射室に戻

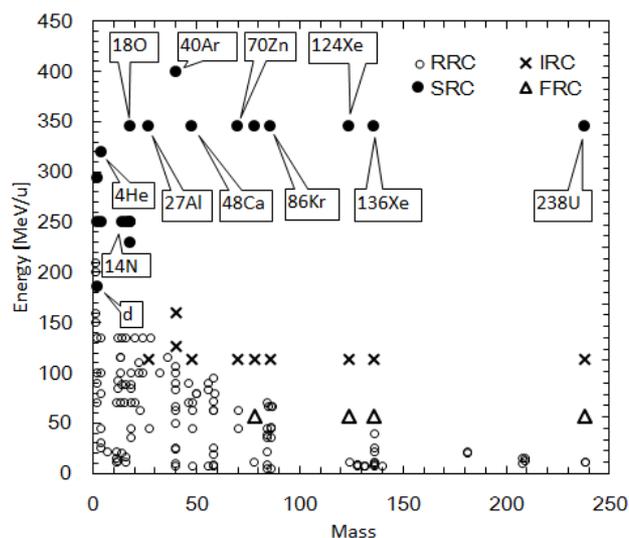


Figure 1: List of nuclei accelerated at RIBF until now.

[#] nishidam@riken.jp

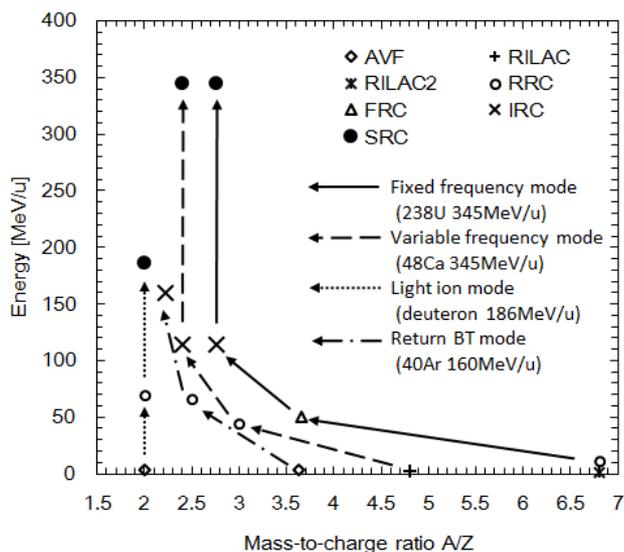


Figure 2: Transitions of energy and mass-to-charge ratio of accelerated nuclei in each acceleration mode in RIBF.

して使用する事も可能となった。SRC, IRC を用いる各モードに対して、多段加速の各段における到達エネルギーの例を図 2 に示す。実線は RILAC2 を入射器として全リングサイクロトロンを直列に接続する周波数固定モード、破線は RILAC を入射器として使用する周波数可変モード、点線は AVF を入射器とする軽イオンモードである^[11]。一点鎖線は今回新たに整備された IRC 戻しビームラインを活用するモードである。本稿では 2014 年 8 月から 2015 年 7 月までの RIBF のリングサイクロトロン系の状況について報告する。

2. 運転状況

2.1 運転時間

期間中の運転時間統計を表 1 にまとめる。表にはビーム種、エネルギー、実験コース、ビーム強度、運転時間と合わせてビーム可用性が示されている。可用性は予定されたビーム供給時間に対する実際の

ビーム供給時間の比で定義される。可用性 100% 以上はビーム調整時間の短縮等により実供給時間が予定時間を越えた事を意味する。また、材料照射実験等ユーザーが常時ビームを使用しない実験では、予定されたサンプル照射がスケジュールの遅延を伴わずに完了した場合、可用性 100% としている。表では同種ビームで行った複数回の実験をまとめて表示するが、SRC を用いた長期の実験に関しては個別に表示した。

SRC を用いた ^{238}U 加速は計 3 回行われた。計 1233 時間ビームを供給し、通算の可用性は 94% であった。また ^{238}U のビーム強度は回を追うごとに増加し(図 3 参照)、2015 年 5 月の運転では、イオン源におけるビーム強度増強、入射バンチャーのメッシュタイプから空洞タイプへの変更、回転型荷電変換装置への新奇炭素材料^[12]の導入、ビーム調整の熟練によるサイクロトロン通過効率向上などにより最大ビーム強度は 39.5 p nA に達した。一方、RRC の真空不良(後述)による通過効率悪化という問題を抱えている。

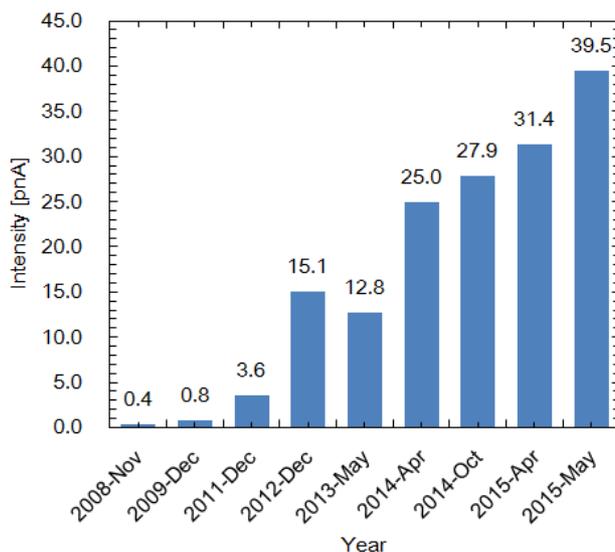


Figure 3: Beam intensity record obtained in each ^{238}U beam service.

Table 1: Operating Statistics of RIBF

Beam particle	Energy (MeV/u)	Acceleration mode	Beam course	Beam current (particle nA)		Beam time (h)		Down time (h)	Availability (%)
				Requested	Actual	Scheduled	Actual		
12C	70	AVF-RRC	E6(RIPS)	10.0	350.0	36.0	36.0	0.0	100.0
12C	135		E5B(Biology)	1.0	393.2	47.0	47.0	0.0	100.0
40Ar	95		E5B(Biology)	1.0	76.5	32.0	32.0	0.0	100.0
56Fe	90		E5B(Biology)	1.0	6.3	21.0	21.0	0.0	100.0
84Kr	70		E5A(Industry)	0.1	5.6	121.0	121.0	0.0	100.0
86Kr	36	RILAC-RRC	E3A(JAXA)	1.0	8.8	12.0	12.0	0.0	100.0
48Ca	63		E6(RIPS)	200.0	235.3	108.0	104.3	1.2	95.4
136Xe	10.75	RILAC2-RRC	E2B(KEK/KISS)	50.0	405.0	96.0	106.0	0.9	109.4
238U	10.75		A01(MS)/E5A(Material)	2.0	2500.0	48.0	48.0	0.0	100.0
40Ar	160	AVF-RRC-IRC	E5B(MS)	—	1.6	48.0	48.0	0.0	100.0
pol.d	190	AVF-RRC-SRC	BigD-pol	10.0	290.0	96.0	123.9	22.5	105.6
48Ca	345	RILAC-RRC-IRC-SRC	BigRIPS/SAMURAI	500.0	530.0	492.2	492.2	18.1	96.3
78Kr	345	RILAC2-RRC-IRC-IRC-SRC	BigRIPS/ZDS/EURICA/Rare-Ri Ring	300.0	486.1	732.0	732.0	72.2	90.1
238U(1st)	345		BigRIPS/ZDS	15.0	27.9	532.1	532.1	31.1	94.2
238U(2nd)	345		BigRIPS/ZDS	15.0	31.4	552.0	553.0	47.9	91.5
238U(3rd)	345		BigRIPS/ZDS	20.0	39.5	228.0	252.0	25.3	99.5

^{48}Ca 加速では、4 つの実験チームにビーム供給を行った。SRC のビーム取り出し装置 EDC で仕様上限に迫る 128 kV で運転を行い、ビームパワー 8 kW 超のビームを安定に供給した。190 MeV/u の偏極重陽子加速は SRC の設計が保証する下限エネルギー 250 MeV/u を下回る運転であり、加速試験の結果このエネルギーでもシングルターン取り出しが可能である事が示された。ターンの交じりを示す指標である SRC 取り出しビームにおけるメインバンチに対するハーフバンチの割合を 1% 以下に維持する為に、実験中にしばしば加速器の再調整を実施したが、加速器調整時間の短縮により前倒しでビーム供給を開始し、可用性は 100% を越えた。RIBF では Ca や Kr など中重核に対しては RILAC を入射器とする周波数可変モードで加速するのが基本であるが、今回の ^{78}Kr 加速では、周波数固定モードを採用した。この場合、大強度の 28 GHz 超伝導 ECR イオン源を利用出来る事、荷電変換が fRC 下流の 1 回で済むなどの利点がある一方で、fRC 取り出しエネルギーと IRC 入射エネルギーの違いから不必要に厚い荷電変換膜を使用せねばならず、ビームの質の劣化が想定される事から、これまで採用しなかったモードである。加速試験の結果、ビームの質は劣化するものの大強度運転は可能である事が示され、最大ビーム強度 310 p nA で 6 つの実験にビームを供給した。更に、実験終了後に SRC 下流の RI ビーム生成分離装置 BigRIPS のビームダンプを利用して大強度試験を行い、13.1 kW (486 p nA) のビームパワーを記録した。これは RIBF における最高記録である。

旧施設では、ESB コースを用いた生物実験、E5A コースを用いた産業利用、E6(RIPS)を用いた原子核実験、E2(KISS)を用いた実験が行われ、従来通りの安定したビーム供給を行った。

2.2 ハードウェアトラブル

加速調整中及びビーム供給中に大小様々なトラブルが発生した。ここでは主なトラブルについて報告する。

2014 年 9 月 4 日、RRC 加速調整中にビームが取り出し領域まで到達しない事象が発生した。調査の結果、入射用磁気チャンネル(MIC2)入り口に設置されたバップルスリットのビーム電流読み出し用ケーブルが ES バレー箱内ビーム軌道にはみ出している事が判明した。2014 年の夏季メンテナンス時に ES バレー箱を復旧する際、ケーブル敷設の最終確認が不十分であった事による。

10 月 29 日、SRC 用ヘリウム冷凍機で液化機のタービントリップが発生した。安全装置が働き超伝導マグネットは安全に低速放電を開始した。その後タービンに異常がない事から検出器等の誤作動によるものと判断し、タービンを再起動する事で復旧した。SRC においてはその他にコイルの温度検出異常でコイルの低速放電が 2 度発生した。

11 月 15 日、加速器調整中に旧施設の冷却水自動温度調節器が故障し、冷却塔のファンと散水ポンプが全数停止した。直ちに手動運転を行い、1 時間後にビーム調整を再開した。

2015 年 3 月 23 日、 ^{238}U 加速調整中に RRC 下流ビームラインに設置された偏向電磁石 DAA1 の電源 (C-D1) が過電流で度々落ちる現象が発生した。老朽化による電源の故障であるが、修理に時間を要するので同一筐体内の他の電源に切り替えて運転を再開した。この際、安全対策として故障電源の ON リレーを取り外し、通電出来ない様に処置した。

4 月 25 日、SRC の RF(RES#2)終段プレート電源クローバ盤の天井ファンが故障した。故障したファンの予備品の手持ちがない為、止むを得ず RILAC の RF#5, #6 で使用中だった同型のファンを取り外して、SRC の RF に移設して運転を再開した。

5 月 18 日、重陽子運転終了後に SRC の RF(RES#1) の内部点検を実施したところ、スタブのコンタクトフィンガーが焼損していた。その他にも方向性結合器の故障、下粗同調パネルに漏水痕跡が発見された。

5 月 20 日、SRC の共振器に取り付けてあるクライオポンプ RES#3-CP03 がコンプレッサーの温度異常で度々落ちる様になった。流量計が目詰まりを起こし冷却が不十分になった事が原因であった為、問題の流量計を取り外して再度運転を行った。同様の事象が 6 月 2 日にバレー箱のクライオポンプ (VLB2-CP02) でも起こった。

5 月 28 日、SRC の RF(RES#4)が励振出来なくなった。調査の結果、約 25000 時間使用した終段アンプ真空管が寿命を迎えた為と判断し、真空管交換作業を行って約 10 時間後にビーム供給を再開した。

6 月 10 日、fRC の共振器に取り付けてあるクライオポンプ (RE-CP1) のコンプレッサーが故障した。fRC の共振器にはクライオポンプが 2 台取り付けてある為、故障したポンプの昇温を待って 1 台のみでも 5×10^{-5} Pa 台が維持される事を確認して加速器の運転を継続した。

RIBF 運転の全体を通して、IRC のクライオポンプがコンプレッサーの異常で頻りに停止した。IRC 室内に設置された 14 台のクライオポンプのうち、異常停止するのは IRC 室北側に設置された 2 台に限られ、南側に設置された残りのコンプレッサーは異常停止しない。また故障したコンプレッサーを予備機と交換しても同じ症状が再発する事から、北側コンプレッサーの設置場所において、運転時環境放射線量が許容レベルを超えている可能性が高いので、移設を検討している。

3. 修理・改良

3.1 RRC サブチェンバーの真空漏れ修理

RRC の E セクターマグネットにおいて、トリムコイルが格納されているサブチェンバーに真空漏れがある事が以前より分かっていたが、メインチェンバーに影響を及ぼさない漏れであった為、本格的な修理をせずに加速器の運転を行っていた。漏れ量は比較的安定していたが、悪化する前に修理を行う必要がある為、2014 年夏季メンテナンス期間中に修理を行う事が決定された。漏れ箇所はトリムコイルのフィードスルー部で、ES バレー箱を後退させて漏れ箇所の確認を行ったところ、O-ring が溶けていた。

O-ring を交換する事で漏れを止める事が出来た。

3.2 IRC, SRC 励振器冷却系の改良

2014年3月、今まで同一系統であったIRC, SRC 励振器冷却系を独立させ、IRC 励振器には、新たに供給水温の低い冷水(供給水温 20°C)をSRC 入射取出系電磁石用冷却設備より接続する工事を実施した。冷水を供給する事により、冷却能力に余裕が出来、アンプの出力を上げられる様になった。結果、IRC 励振器の性能が向上し、ビームの取出し効率向上やビームの大強度化にも貢献した。また、IRC, SRC 励振器系双方の冷却系を独立させた事により、SRC 励振器冷却系にも余裕が出来、以前に比べ励振し易くなった。但し、供給温度が低い為、負荷のない状態でいつまでも冷水を循環させていると、アンプ内を結露させてしまう為注意が必要である。本工事の特徴として、凍結工法を用いた事が挙げられる。理由としては、大幅な工期の短縮、配管敷設の際に大量の冷却水(純水)を廃棄する必要がない事である。

3.3 IRC EDC セプタム電極の改造

2013年に、RRCの静電取り出しチャンネル(EDC)においてセプタム電極のビーム入口側にV字の切れ込みを入れる事で、ビームロスによるセプタム電極の発熱を抑える事に成功した^[13]。今回これと同じ改造をIRCのEDCへ施した。他のサイクロトロンにおいても順次同じ改造を行う予定である。

4. RRCにおける真空の問題

4.1 共振器の真空漏れ

RRCには2器の加速共振器(RF#1, RF#2)があり、共に真空漏れが発生している。RF#1において通常 6×10^{-6} Paで、良い時は 1×10^{-6} Paの時もあった圧力が、2013年9月以降 1×10^{-5} Pa付近で落ち着いてしまった。2014年夏の調査で下側ステム外側の冷却配管に真空漏れを確認したが、構造上修理は困難であり、 1×10^{-5} Pa付近を維持出来ている事から修理を行わずに加速器の運転を継続していた。2015年に入ってから 2×10^{-5} Paより良くなる事はなく徐々に悪化し、5月の運転時は一時 1×10^{-4} Paに迫る乱高下を繰り返した後、 2×10^{-5} Pa付近で落ち着いた。RF#2は2014年2月の時点では 3×10^{-6} Paであった圧力が、それ以降徐々に悪化した。2014年夏の調査で共振器と磁極箱をつなぐベローズに真空漏れを確認したが、その時点では 6×10^{-6} Paを維持出来ていた事から修理は見送られた。2015年1月28日朝、冷却水ポンプを起動した時に真空が 2×10^{-4} Paまで悪化し、その後 10^{-5} Paまで回復する現象が起こった。同年3月に調査した結果、共振器上側ステム内側と上側Dee電極内側の冷却配管でリークを検出した。

4.2 真空中のビームロス

RRCの真空は2年程前から悪くなっていたが、より悪化したので ^{238}U ビームに対する影響を調べた。ラジアルプローブ(RP)を周回軌道の中心から半径2500 mmの位置に固定し、ビームチェンバー圧力を

変化させた時のビーム電流値を図4に示す。 1×10^{-4} Paまで圧力を上昇させたところ、 1×10^{-5} Paの時の約半分までビーム電流値が減少した。更に、 ^{78}Kr と ^{238}U の周回ビーム電流値の推移を図5に示す。この時のビームチェンバー平均圧力は共に 1.6×10^{-5} Paであった。 ^{78}Kr は入射して間もない800 mm付近で540 enAあったビームが3000 mm付近で490 enAと約9%減少したのに対し、 ^{238}U の場合、800 mm付近で950 enAあった電流値は周回を重ねるごとに低下し、3000 mm付近では約32%減の650 enA程度まで減少した。真空が悪化する以前の2012年の測定では5%程度の減少であったので ^{238}U のRRC通過効率を上げる為には、圧力を現状の 1×10^{-5} Paの数分の1に下げることがある。

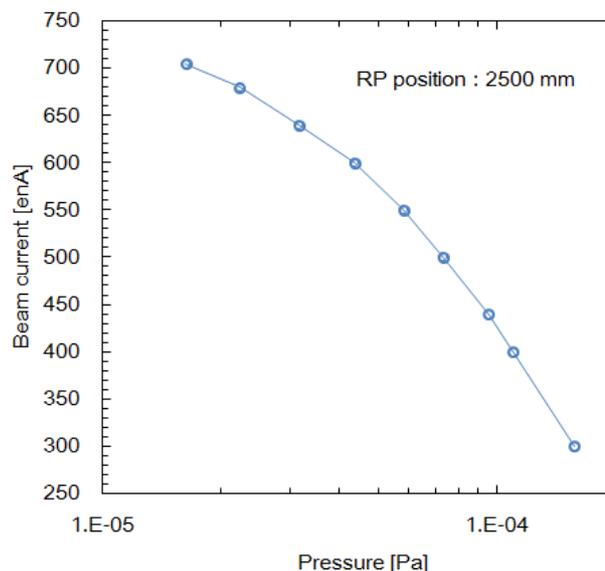


Figure 4: Dependence of beam current on the chamber pressure of RRC.

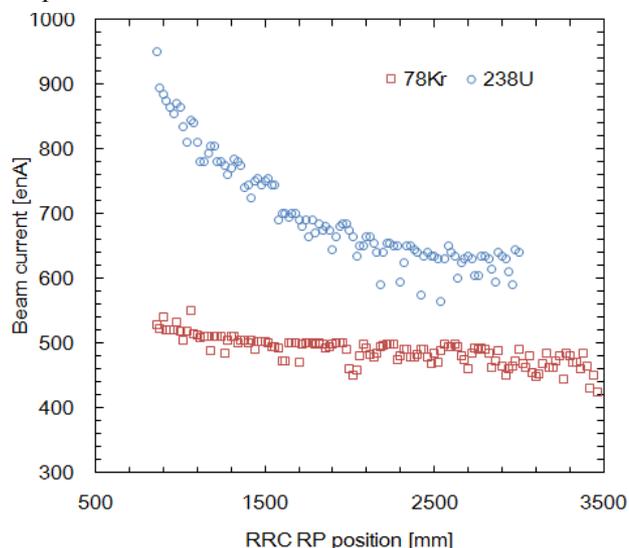


Figure 5: Shift in circulating beam currents of ^{78}Kr and ^{238}U in RRC.

5. IRC 戻しビームライン

生物実験で使用するビームエネルギーの増強を目的として、IRCと既存施設E5をつなぐ新ビームラインの整備が行われた。

これは文部科学省が推進する「東北マリンサイエンス拠点形成事業」^[14]の一環で、新たに整備されたラインは、IRC 取り出し後の偏向電磁石 (DAKR) で SRC 入射ラインから分岐し、RRC から IRC をバイパスして SRC に向かうバイパスラインの一部を經由して RRC 本体室内の偏向電磁石 DMA1 にて既存ビームラインに合流するものである(図 6 参照)。整備に用いた四重極電磁石の一部とステアリング電磁石は、リニアックの E21 実験室で使用されていた物及び RRC 旧施設の E2, E4 実験室で使われていた物を利用して、2015 年 1 月に各機器の設置が完了し、2 日間の試運転を実施した。IRC から高エネルギー (160 MeV/u) のビームを得る為、AVF, RRC, IRC を直列に用いる新たなモードで加速した。これまで運転実績がなかったが、⁴⁰Ar ビームを 160 MeV/u まで加速し、予定通り旧施設へビームを戻した。更に、E5B の生物実験装置でユーザーへのビーム供給テストを行った。

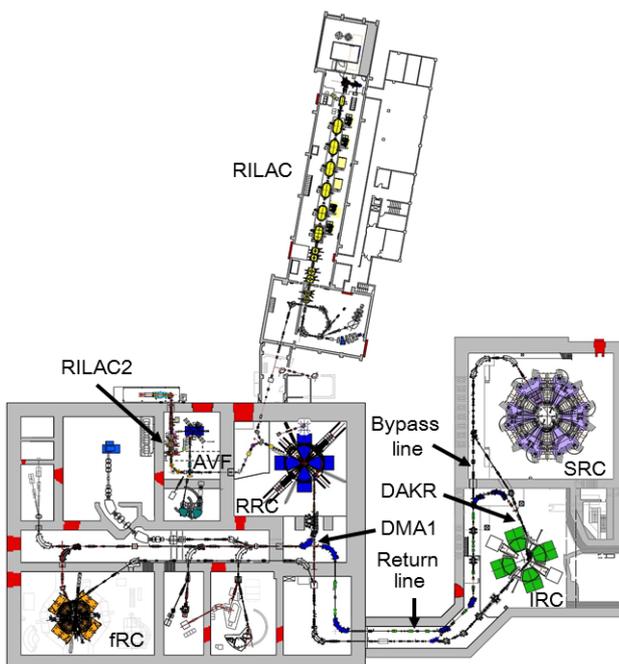


Figure 6: The layout of the accelerator facility in RIBF at RIKEN.

6. まとめ

2014 年 8 月から 2015 年 7 月までの期間における全ビーム供給時間は 3041 時間、このうち RRC 取り出しビームをユーザーが直接利用する実験は全体の 19% で、通期の可用性は 95% であった。RIBF における最大取り出し電流値は年を追うごとに上昇を続けている。今秋には Ca ビームを用いたビームパワー 13 kW の実用運転が予定されている。今後も更なる

ビーム強度の増強と可用性の改善へ向けた取り組みを行う。

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.
- [7] T. Ohki et al., Present status of RILAC, in this proceedings.
- [8] 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.
- [9] A. Goto et al., Injector AVF cyclotron at RIKEN, Cyclotrons'89, Berlin, Germany, 1989, pp. 51-54.
- [10] T. Nakamura, et al., Status report of the operation of the RIKEN AVF cyclotron, in this proceedings.
- [11] N. Sakamoto et al., High intensity heavy-ion-beam operation of RIKEN RIBF, Proceedings of PASJ9, WEPL02 (2012) 7-11.
- [12] H. Hasebe, private communication and it will be reported in HIAT2015 held at Yokohama, Japan, Sep. 2015.
- [13] S. Fukuzawa et al., Status report of the operation of the RIBF ring cyclotrons, Proceedings of PASJ11, FSP024 (2014) 401-405.
- [14] http://www.mext.go.jp/a_menu/kaihatu/kaiyou/gaiyou/1343277.htm