

理研 RIBF におけるリングサイクロトロン¹⁾の運転報告

STATUS REPORT OF THE OPERATION OF THE RIBF RING CYCLOTRONS

福澤 聖児^{#,B)}, 須田 健嗣^{A)}, 段塚 知志^{A)}, 藤巻 正樹^{A)}, 藤縄 雅^{A)}, 福西 暢尚^{A)}, 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)}, 熊谷 桂子^{A)}, 久保木 浩功^{A)}, 小林 清志^{B)}, 小高 康熙^{B)}, 込山 美咲^{A)}, 小山 亮^{B)}, 真家 武士^{A)}, 長瀬 誠^{A)}, 中川 孝秀^{A)}, 中村 仁音^{A)}, 仲村 武志^{B)}, 西田 稔^{B)}, 西村 誠^{B)}, 大西 純一^{A)}, 奥野 広樹^{A)}, 大関 和貴^{A)}, 坂本 成彦^{A)}, 柴田 順翔^{B)}, 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)}

Seiji Fukuzawa^{#,B)}, Kenji Suda^{A)}, Tomoyuki Dantsuka^{A)}, Masaki Fujimaki^{A)}, Nobuhisa Fukunishi^{A)}, Tadashi Fujinawa^{A)}, 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)}, Keiko Kumagai^{A)}, Hironori Kuboki^{A)}, Kiyoshi Kobayashi^{B)}, Yasuteru Kotaka^{B)}, Misaki Komiyama^{A)}, Ryo Koyama^{B)}, Takeshi Maie^{A)}, Makoto Nagase^{A)}, Takahide Nakagawa^{A)}, Masato Nakamura^{A)}, Takeshi Nakamura^{B)}, Minoru Nishida^{B)}, Makoto Nishimura^{B)}, Jun-ichi Ohnishi^{A)}, Hiroki Okuno^{A)}, Kazutaka Ozeki^{A)}, Naruhiko Sakamoto^{A)}, Junsho Shibata^{B)}, 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.

Abstract

The operating status of the ring cyclotrons (RRC, fRC, IRC, SRC) of RIKEN RI Beam Factory (RIBF) is reported for the period from August 2013 to July 2014. In the first eight months, accelerator operations using only RRC and its injectors were scheduled. During the period, several repair, maintenance and improvement works were performed to keep the cyclotrons reliable. Since March 2014, all the cyclotrons were operational, and beams such as uranium were provided to RIBF experiments. The beam quality and intensity requested by users were fulfilled for almost all the experiments. Total beam availability was 91.8 %, which is nearly as high as that in the last reported period. In this report, an overview of the facility is shown first, then, operating statistics and troubles are summarized.

1. 施設の概要

理化学研究所仁科加速器研究センターの RI ビームファクトリー(RIBF)^[1]の複合加速器システムは 3 台の入射器 (RILAC^{[2][3]}, RILAC2^[4], AVF^{[5][6]}) 及び 4 台のリングサイクロトロン (RRC^[7], fRC^[8], IRC^[9], SRC^[10])から構成される。重イオンはこれら加速器を適宜組み合わせることで多段階に加速されるが、その途中で個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⁺)からウランまでの全イオンを核子当たり 345 MeV/u (A/Z=2 の場合は 400 MeV/u)まで加速することができる。

実験施設は二つに大別される。一つは 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 スペクトロメータ)であり、他方は RIBF の建設以前から存在し、現在は旧施設と呼ばれている仁科記念棟の実験室 (E2, E3, E5, E6[RIPS]等)で

ある。後者は RRC の取り出しビームを使って実験が行われる^[11]。

本報告では 2013 年 8 月から 2014 年 7 月までの 1 年間における、これら 4 台のリングサイクロトロン¹⁾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) は RIBF における実験では以下に述べる 3 種類ある^[12]。

第 1 のモードは固定周波数モードと呼ばれ、RILAC2 (RILAC の場合もある) を入射器として、4 台の全リングサイクロトロンによりカスケード加速を行う。このモードでは fRC (固定周波数リングサイクロトロン) の前後において荷電変換を行い、²³⁸U、¹²⁴Xe 等の非常に重いイオンを核子あたり 345 MeV/u まで加速する。

第 2 のモードは可変周波数モードと呼ばれ、入射器を RILAC (可変周波数リニアック) とし、RRC の前後で荷電変換をした後、IRC、SRC を使用して ⁴⁰Ar、⁴⁸Ca、⁷⁰Zn、⁸⁶Kr といった核種を加速する。最高エネルギーは 400 MeV/u (⁴⁰Ar¹⁸⁺) の実績がある。

[#] fukuzawa@riken.jp

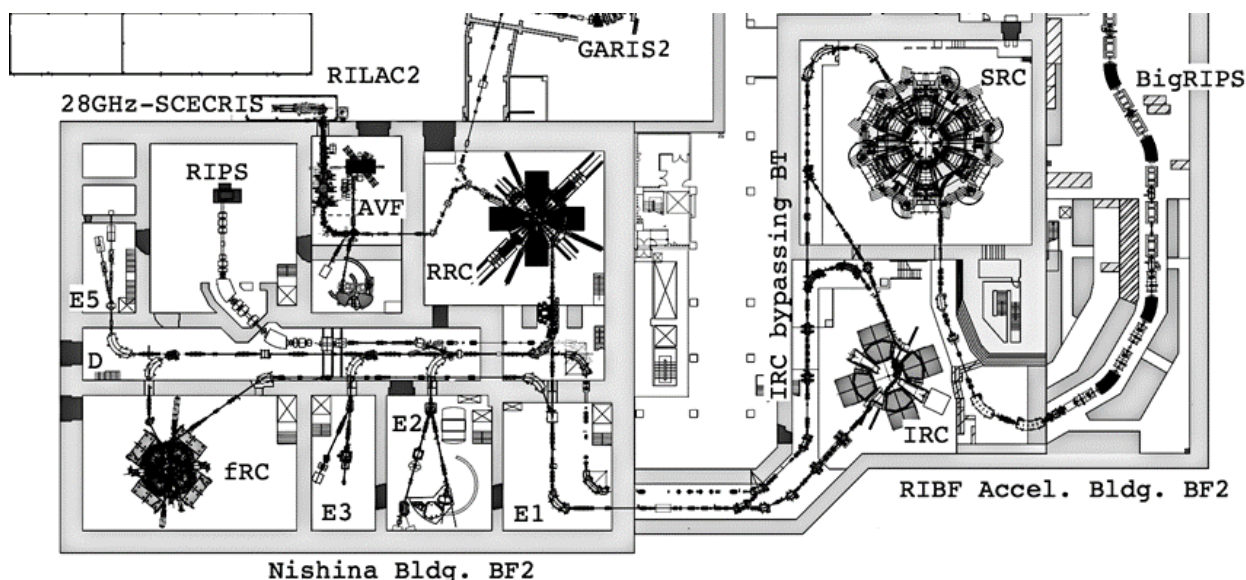


Figure 1: The layout of the accelerator facility in RIBF at RIKEN.

第3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 と SRC を使って H_2^+ 、deuteron、 4He 、 ^{14}N 、 ^{16}O 等の主に $A < 40$ の軽イオンを最高 400 MeV/u まで加速する。

3. 運転状況

3.1 運転内容および実績

2013年8月から2014年7月までの期間における運転時間を、ファラデーカップのステータスから自動で計測するシステム^[13]を利用して実験別にまとめた (Table 1)。尚、加速器の信頼性を示す指標としてビーム可用性 (availability) を、加速器に要求された予定ビーム供給時間に対する実ビーム供給時間の比として定義する。

但し、常時ビームを供給することを要求されないタイプの実験、例えば一定数のサンプルに重イオン

ビームを照射する生物照射実験やマシンスタディーなどに関しては、予定された実験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%として計上した。

2013年9月から2014年2月までは旧施設における実験のためにビームを供給した。E3A コースでの JAXA による半導体照射実験、E5B コースでの生物照射実験、E6 (RIPS)での RI ビームを用いた実験の他に、RILAC2 入射の Xe ビームを用いた KEK 短寿命核グループによる実験 (KEK/KISS)が E2B コースにて行われた。

2014年3月中旬より7月初旬までの間、SRC を用いた実験が再開された。まず、3月27日から4月15日まで5つの実験グループに対して ^{238}U ビームを供給し、イオン源試料交換及び施設の一般公開に伴う中断の後、4月23日から5月13日まで更に3つのグループに対して ^{238}U ビームの供給を行った。

Table 1: Operating Statistics of RIBF

Beam particle	Energy (MeV/u)	Acceleration mode	Experimental course	Beam intensity (particle nA)		Beam time (h)		downtime (h)	Availability (%)
				Requested	Actual	Scheduled	Actual		
12C	70	AVF-RRC	E6(RIPS)	400	383.3	312.0	296.3	9.5	95.0
12C	135	AVF-RRC	E5B(Biology)	1	266.7	65.0	65.0	0.0	100.0
40Ar	95	AVF-RRC	E5B(Biology)	1	91.2	29.5	29.5	0.0	100.0
40Ca	50	RILAC-RRC	A02(Accelerator MS)	/	143.0	84.0	84.0	0.0	100.0
48Ca	63	RILAC-RRC	E6(RIPS)	200	294.0	156.0	128.1	28.5	82.1
56Fe	90	AVF-RRC	E2B(KEK/KISS)	1	3.1	48.0	48.0	0.0	100.0
56Fe	90	AVF-RRC	E5B(Biology)	1	2.8	21.0	21.0	0.0	100.0
86Kr	36	RILAC-RRC	E3A(JAXA)	1	38.0	12.0	12.5	0.2	104.4
124Xe	10.75	RILAC2-RRC	E2B(KEK/KISS)	10	772.0	48.0	47.0	0.2	97.9
124Xe	10.75	RILAC2-RRC	D-room(Accelerator MS)	/	1211.0	24.0	24.0	0.0	100.0
136Xe	10.75	RILAC2-RRC	E2B(KEK/KISS)	1000	485.0	48.0	44.6	1.9	93.0
238U	10.75	RILAC2-RRC	D-room(Accelerator MS)	/	1000.0	108.0	108.0	0.0	100.0
deuteron	250	AVF-RRC	BigRIPS	10	510.0	252.0	268.1	42.7	106.4
16O	250	-SRC	SHARQ(CNS)	10	41.8	108.0	125.4	18.6	116.1
70Zn(1st)	345	RILAC-RRC	SHARQ(CNS)	75	123.0	216.0	200.2	39.1	92.7
70Zn(2nd)	345	-IRC-SRC	SHARQ(CNS)	75	116.6	96.0	93.1	2.9	97.0
238U(1st)	345	RILAC2-RRC	BigRIPS,ZDS	10	22.1	540.0	384.4	159.6	71.2
238U(2nd)	345	-fRC-IRC-SRC	BigRIPS,ZDS	10	25.0	408.0	385.2	94.8	94.4
Total						2575.5	2364.5	398.1	91.8

前半の可用性が 71.2%と低いのは、マシントラブル (後述) のため実験開始が遅れた為である。一方、これまで 15.1 pnA が最高であったビーム量 (Figure 2) は、供給開始当初からユーザーの要求量を上回る 20.9 pnA が得られ、後半で最大 25 pnA に達した。

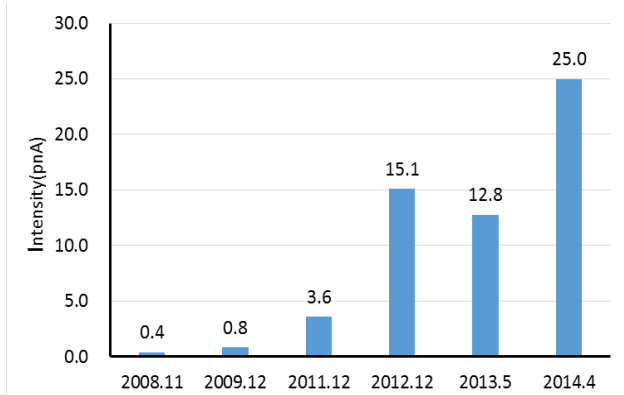


Figure 2: Beam intensity record obtained in each uranium-beam service.

その後、可変周波数モードの Zn 実験が 5 月 16 日から開始された。途中 SRC のヘリウム冷却システムのバックアップ電源として用いられるコージェネレーション設備 (CGS) の故障による 8 日間の停止を挟んで、6 月 7 日までこの実験は行なわれた。マシンタイム全体でビーム強度の平均値は 103 pnA で、前回 2012 年の最大強度 100 pnA とほぼ同じであった。今回の最大強度は 123 pnA である。

続いて、6 月 9 日から行われた deuterium 実験と 6 月 25 日より行われた ¹⁶O 実験では、他の軽イオンモードの実験と同様ユーザーより高品質なビームを要求された。deuterium ビームでは、ターンの混じりを示す指標であるメインバンチに対するハーフバンチの割合が SRC 出側において最も良い場合で 0.05%であった。加速器の安定性が十分でないため (後述)、時折ターンの混じりが 1%以上に悪化することがあったが、その都度加速器の調整を行い 0.2%以下に維持するべく努めた。

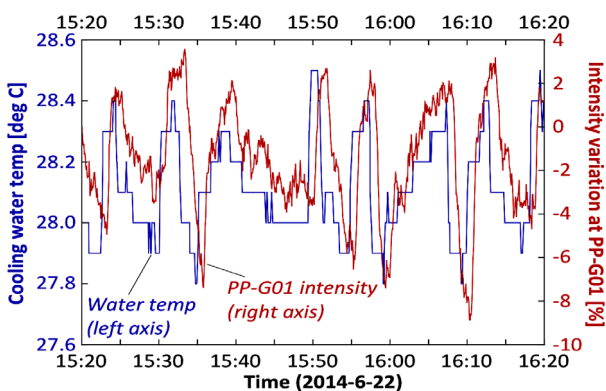


Figure 3: Correlation between the cooling water temperature of the AVF cyclotron and the beam intensity at the exit of SRC.

両実験中、AVF サイクロトロン冷却水の温度変動に同期したビーム量の変動が、SRC 出口側 (G01) の位相プローブとロックインアンプを組み合わせたモニター^[4]で観測された (Figure 3)。その際、RRC の RF を微調整し、この変動が軽減されるよう電圧と位相を決めるという対応をしたが、冷却水温度調整の PID 制御の再設定が必要であった可能性がある。

3.2 ハードウェアトラブル

この 1 年間に大小含めて多数のトラブル・不具合が発生した。以下、主なものについて述べる。

(1) 冷却水ポンプの漏電トリップ

2013 年 10 月 7 日、冷却水ポンプの 400 V ブレーカー (CP5) が漏電トリップし、RRC のメイン・トリムコイル、RF、入射取出し系、ビーム輸送系磁石がダウンした。実験再開に 5.2 時間要した。

(2) RRC のフィードスルーの真空リーク

2013 年 10 月 26 日、RRC 立ち上げ励磁中、E セクターのトリムコイルの真空チャンバーへの導入部 (フィードスルー) よりリークが発生し、RRC 真空チャンバーの真空度が 10 Pa まで悪化した (通常 10^{-6} ~ 10^{-5} Pa)。固定ボルトの増し締めを行った結果、12.7 時間で復旧した。

(3) fRC MDP の破損

fRC のラジアルプローブ (MDP) がゲートバルブに当たり損傷したため、急遽他のサイクロトロンで用いられるプローブを代用とした。しかし、2014 年 3 月 18 日の加速調整中にプローブを挿入した所、工作精度の問題で代用品がプローブのガイドと干渉し冷却水配管が破損した。冷却水がバレー箱に漏れて真空度が悪化したため、簡易的なプローブへの交換と、ドライスクロールポンプによるバレー箱内部の乾燥が行われた。このトラブルによるスケジュールの遅れは 4.5 日であった。

(4) BT の Q 磁石電源の誤動作

2014 年 4 月 13 日、SRC の入射側のビーム輸送系にある Q 磁石 QDG51b の電流値が、電源の誤動作により設定値である 90.1 A から 10 A 低下したため、SRC の MIC (磁気入射チャンネル) のバップルでビームロスを生じビームインターロック (BIS) が働く事象が起きた。当面の対応として予備電源への繋ぎ替えを行い、後日制御回路基板を交換した。

(5) D 室リバンチャートランジスタアンプ故障

2014 年 5 月 5 日、RRC と fRC の間にあるビーム分配室 (D 室) に設置されたリバンチャーの電圧が低下し上がらなくなった。高周波電力を供給していた 5 kW 出力のトランジスタアンプにおいて、4 系統あるパワーアンプのうち 1 系統において合成器のトランスが焼損して利得が低下し、さらにその下流の 4 合成器も焼損していた。SRC のフラットトップ加速用のトランジスタアンプを代用し、28.2 時間後に再開した。

(6) SRC EIC ケーブルの絶縁破壊

2014 年 5 月 17 日、SRC の EIC (静電入射チャンネル) に 118 kV を印加中に電圧がかからなくなった。使用していた耐圧 200 kV の高圧ケーブルが保護抵抗の導入部付近で絶縁破壊を起していたことが原因であった。予備品に交換し、8.6 時間で復旧した。

3.3 加速器マシンタディー

加速器マシンタディーとして、チャージストリッパーの試験、RRC メインコイルおよび電源交換後の試運転等が行われた。

また、固定周波数モードで Xe や U を加速する際、RRC のハーモニック数 h は 9 であるが、これを $h = 12$ あるいは 18 にしたモードの加速試験が行われた。 $h = 12$ の場合、RF 周波数 f は $h = 9$ の場合の 18.25 MHz から 24.34 MHz に上昇する。RRC の加速共振器^[15]は周波数が高い程シャントインピーダンスが高くなるため、空洞 1 ギャップ当たりの RF 電圧を従来の 70 kV から 150 kV まであげることができ、ターンセパレーションの良い Xe 加速に成功した。またこの際、RILAC2 の従来の入射バンチャーは 18 MHz 以下の運転が出来ないため、鋸歯状波用に製作したグリッド式バンチャーを 12.17 MHz にて運転した。

$h = 18$ の場合は $f = 36.51$ MHz であり、最大 RF 電圧は 260 kV と更に高くなる。しかし RRC の Dee 電極はダブルギャップ方式であり、ピーク位相を 90 度として、二つのギャップの双方について、RF 位相が最適位相から 75 度ずつずれるため実効電圧は低い。また、外周側になるにつれ電圧が高くなるが、周波数が高い程、外周と内周の電圧比が大きくなることから、 $h = 12$ の場合と比較して中心領域での電圧低下が激しい。現状では実用的ではないが試験的に行われた Xe 加速では、入射効率が良くないものの外周までの周回を確認した。

4. 修理・改良

この一年間の運転時間が例年と比べて短かった分、かわりに大掛かりな保守・改良作業が多く行われた。

4.1 RRC メインコイル電源の更新

1999 年 5 月と 2012 年 5 月に一回ずつ層間短絡を起こした RRC の W セクターメインコイル^[16]の交換が、前年の E セクター^[17]に続いて行われ、2013 年 9 月に完了した。さらに、過去 28 年間の使用に伴い老朽化し、サイリスターブロックの冷却板からの水漏れ等の問題が生じていたメインコイル電源も更新された。RRC の各メインコイルは 66 ターンより成るが 48 ターンの M1 コイルと 18 ターンの M2 コイルに分割されており、メインコイル電源も最大電流 1071.8 A の M1 電源と、最大電流 1071.3 A の M2 電源の二台に分かれていた。新電源は、M1 と M2 を

合わせた 66 ターンに最大電流 1080 A を給電する能力を有し、これに伴い負荷側の結線も変更された。磁場ドリフトに対して微調整を行う際は旧方式では M2 電源を最小刻み 0.01A~0.02A (フルスケール 16 ビットとして 1 ビットに対応)で調整し対応していた。これに対し新電源の電流値設定はそれぞれ 16 ビットからなる粗設定と細設定の 2 段階からなり、細設定ではフルスケール±33.75 A を 16 ビットとした制御によって 0.001 A の微調整が可能になった。このような 2 段階設定は、2012 年度に更新された fRC メインコイル電源^[18]に続いて導入された。

4.2 RRC EDC 改良

RRC の EDC (静電取り出しチャンネル) において、大電流ビームの損失が起きると、これに起因する発熱が生じる。2012 年 11 月にはセプタム電極が熔融し、ビームの取出し効率が 40%以下に低下するトラブルがあったことから^[19]、温度上昇を抑え電極の損傷を防止するための対策として、セプタム電極の入射側に V 字の切込みを入れる改造を行った。2 kW 以上のビームが周回するウラン加速では、従来温度上昇を抑えるため RRC 上流のスリット SL-U10, C21, C22 を用いてビームを制限して来たが、この制限が不要となり RRC に入射できるビーム量が増えた。

4.3 fRC の整備・修理

メンテナンス期間に fRC の EIC、位相プローブの点検と整備が行われた。またコミッションング時から時折突発的な真空悪化が発生してきた W 共振器の調査も行われた。共振器にセクター電磁石が隣接しているため真空漏れ箇所の外部からの特定が困難であったが、共振器を分解して調査したところ漏れ箇所を特定することができた。この共振器は上下 2 分割の構造となっており、接合面は金属板を C 型に折り曲げた C リングにより RF 接触を確保し、ゴムパッキンで真空をシールする構造となっている。上下を切り離した際、C リングとゴムパッキンが共に同じ場所で焦げているのが発見された (Figure 4)。

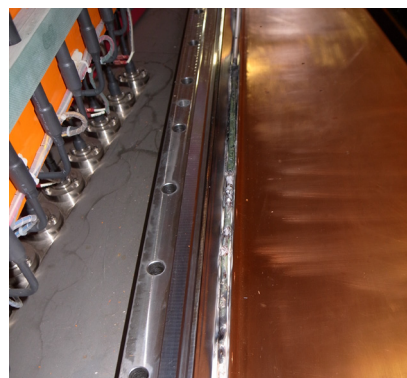


Figure 4: Burned-out C-ring in fRC-W resonator. 焦げた原因は接合面の締め付けが不十分であると考

えられる為、固定具の強化がなされた。以降これに起因した突発的な真空悪化は無くなった。

4.4 戻しビームライン

アルゴンなど比較的重いイオンをより高いエネルギーで生物照射実験に供すべく、IRC と既存 E5 施設を繋ぐ「高エネルギー（戻し）ビームライン」の整備が 2012 年より進められている。本事業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」の一環であり、2015 年度完成、2014 年度内仮運転開始の実現に向け、スケジュール通りに整備作業が進められている。本ビームラインにより、アルゴンなど比較的重いイオンに対しても十分な飛程が得られ、これまで以上の成果が出ることを期待されている。

5. まとめ

2013 年 8 月から 2014 年 7 月までの期間における実ビーム供給時間は 2364.5 時間となり、RIBF の実験に 62%、旧施設の実験に 38%が当てられた。2013 年 8 月から 2014 年 2 月までの期間は旧施設へのビーム供給を行いつつ、加速器の健全性を確保するための修理と改善を行い、2014 年 3 月からの RIBF 実験では量と質において概ねユーザーの要求を満たすビームを供給した。全体の可用度は昨年とほぼ同じ 91.8%であった。

参考文献

- [1] Y. Yano, The RIKEN RI beam factory project: A status report, Nucl. Instrum. & Methods B261 (2007) 1009-1013.
- [2] 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.
- [3] E. Ikezawa et al., Present Status of RILAC, in this proceedings.
- [4] 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.
- [5] A. Goto et al., Injector AVF cyclotron at RIKEN, Cyclotrons'89, Berlin, Germany, 1989, pp. 51-54.
- [6] Y. Kotaka, et al., Status report of the operation of the RIKEN AVF cyclotron, in this proceedings.
- [7] H. Kamitsubo, Progress in RIKEN Ring Cyclotron Project, Cyclotrons'86, Tokyo, Oct. 1986, pp. 17-23.
- [8] 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.
- [9] J. Ohnishi et al., Construction status of the RIKEN intermediate-stage ring cyclotron (IRC), Cyclotrons'04, Tokyo, Oct. 2004, 18P14, pp. 197-199.
- [10] H. Okuno et al., The Superconducting Ring Cyclotron in RIKEN, IEEE Trans. Appl. Supercond. 17 (2007) 1063-1068.
- [11] <http://www.nishina.riken.jp/RIBF/accelerator/overview.html>
- [12] N. Sakamoto et al., High intensity heavy-ion-beam

- operation of RIKEN RIBF, Proceedings of PASJ9, WEPL02 (2012) 7-11.
- [13] A. Uchiyama et al., Implementation of Visualization System for Beam Service Time in RIBF, in this proceedings.
- [14] R. Koyama et al., Nucl. Instrum. & Methods A 729 (2013) 788-799.
- [15] T. Fujisawa, RADIO FREQUENCY SYSTEM OF THE RIKEN RING CYCLOTRON, Proceedings of PASJ8, AWARD05 (2011) 150-154.
- [16] M. Hamanaka et al., THE OPERATION OF THE RIKEN RIBF RING CYCLOTRONS, Proceedings of PASJ9, WEPS004 (2012) 350-352.
- [17] Y. Watanabe et al., RIKEN Accel. Prog. Rep. 46 (2013) 130.
- [18] K. Kumagai et al., UPGRADE OF RIKEN FIXED-FREQUENCY RING CYCLOTRON, Proceedings of PASJ9, WEPS055 (2012) 517-521.
- [19] R. Koyama et al., STATUS REPORT OF THE OPERATION OF THE RIBF RING CYCLOTRONS, Proceedings of PASJ10, SAP013 (2013) 426-430.