

The Operation of the RIBF Ring Cyclotrons

Masayuki Kase^{A)}, Takeshi Nakamura^{B)},
 Eiji Ikezawa^{A)}, Shigeru Ishikawa^{B)}, Yukimitsu Ohshiro^{C)}, Junichi Ohnishi^{A)}, Hiroki Okuno^{A)},
 Tadashi Kageyama^{A)}, Osamu Kamigaito^{A)}, Masanori Kidera^{A)}, Hironori Kuboki^{A)}, Keiko Kumagai^{A)},
 Yasuteru Kotaka^{B)}, Akira Goto^{A)}, Kiyoshi Kobayashi^{B)}, Misaki Komiyama^{A)}, Ryo Koyama^{B)},
 Naruhiko Sakamoto^{A)}, Kenji Suda^{A)}, Noritoshi Tsukiori^{B)}, Takahide Nakagawa^{A)}, Makoto Nagase^{A)},
 Minoru Nishida^{1,B)}, Hiroo Hasebe^{A)}, Makoto Hamanaka^{B)}, Yoshihide Higurashi^{A)}, Seiji Fukuzawa^{B)},
 Nobuhisa Fukunishi^{A)}, Masaki Fujimaki^{A)}, Takeshi Maie^{A)}, Kazuyoshi Yadomi^{B)}, Kazunari Yamada^{A)},
 Shigeru Yokouchi^{A)}, Tamaki Watanabe^{A)},

^{A)}RIKEN Nishina Center, ^{B)}SHI accelerator Service, ^{C)}CNS, Univ. of Tokyo

Abstract

We will report the operation status of the RIKEN Ring Cyclotrons (RRC, fRC, IRC, SRC) during this one year (July 2008 – June 2009). The total operating time of the RRC is 4473 hours. There are three kinds of the acceleration modes, the RRC always works as the first booster cyclotron in every mode. The operation of all Ring Cyclotrons (RILAC-RRC-fRC-IRC-SRC), providing a 345MeV/nucleon ²³⁸U beam, were carried out 715hr. The operation of RILAC-RRC-IRC-SRC, providing a 345MeV/nucleon ⁴⁸Ca beam, were carried out 593 hr. The operation of AVF-RRC-SRC, providing a 250MeV/nucleon ¹⁴N beam and polarized deuteron beam, were carried out for the first time in this spring for 797 hr. The operations of ordinary modes, AVF-RRC and RILAC-RRC, were performed 1451 hr, giving a variety of beams with energies around 100MeV/nucleon.

理研リングサイクロトロン (RRC, fRC, IRC, SRC) 運転の報告

1 : はじめに

理研リングサイクロトロン(RRC)は、1986年に完成したK値540MeVの分離セクター型サイクロトロンで、重イオンリアック¹⁾(RILAC)とAVFサイクロトロン²⁾(AVF)を入射器として、これまでに22年間にわたり多種の重イオンビームを供給しつづけてきた。AVF-RRCモードで比較的軽いイオンのビーム(70~135MeV/n)を、また一方、RILAC-RRCモードで比較的質量が重いイオンのビーム(6~63MeV/n)の供給に使用されてきた。これらのビームを用い、2次ビーム発生装置(RIPS)において多種のRIビームを生成し精力的に原子核実験が行われてきた。

より重い、かつより高エネルギーのビームを加速し、より広範な質量範囲の2次ビームを生成し実験に供給するRIビームファクトリー計画が1995年頃よりはじまり、2004~2006年にかけて、周波数可変型リングサイクロトロン(fRC, K値580MeV)、中間段リングサイクロトロン(IRC, K値980MeV)、そして超伝導リングサイクロトロン(SRC, K値2500MeV)があいついで建設され、あらたなRIビーム発生装置(BigRIPS)によるRIビームファクトリーが2007年よ

り始動した。³⁾

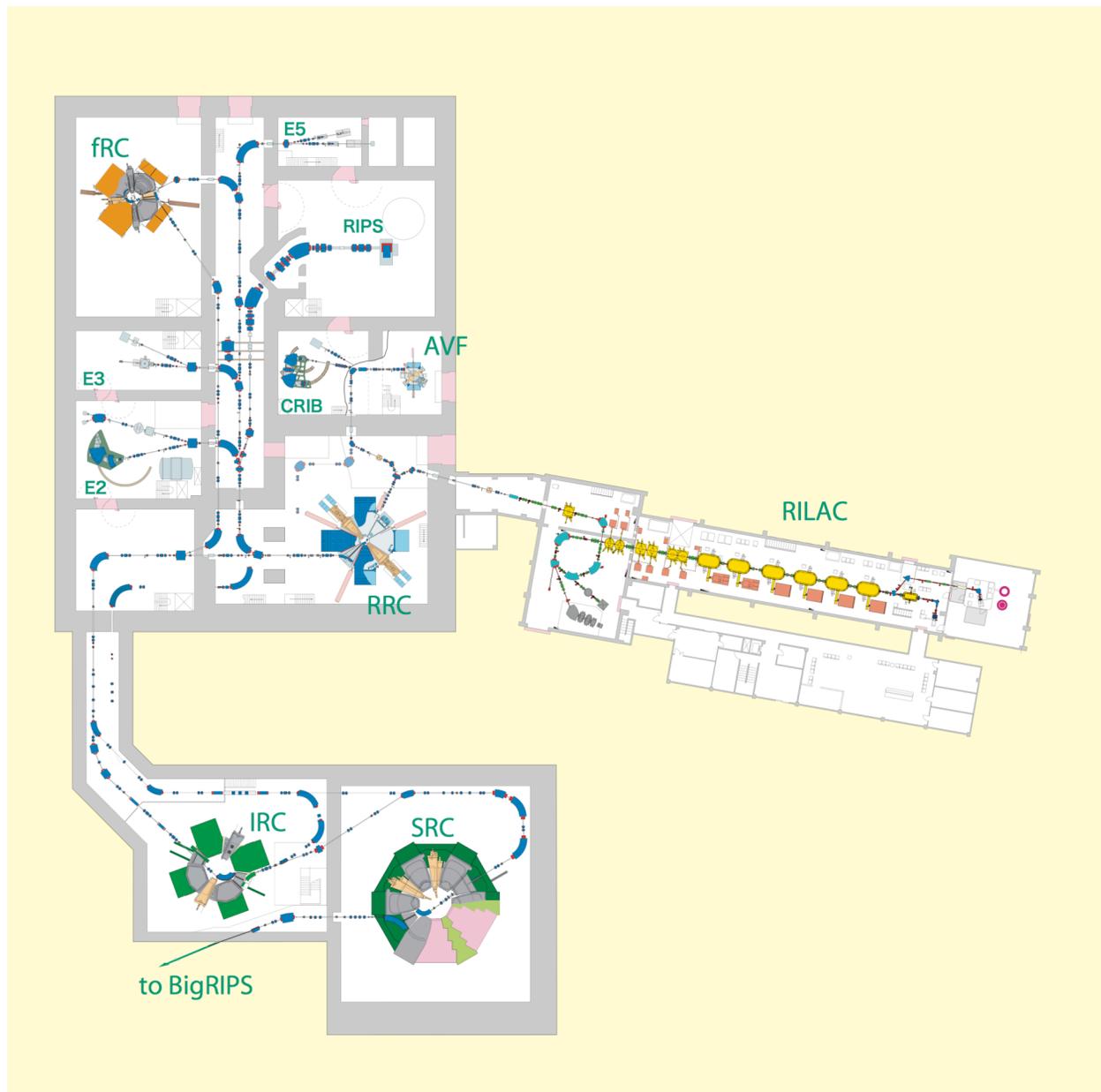
本論文では2008年7月から2009年6月までの一年間のこれらリングサイクロトロンの運転の状況を報告する。

2 : 加速器構成と加速モード

第1図に加速器のレイアウトをしめす。元より加速器施設がある仁科記念棟のE4実験室のスペクトロメータ(SMART)をどけてfRCが設置され、新しいRIBF加速器棟にIRCとSRCがあいついで建設された。またRRCとこれら新しいリングサイクロトロンは、それぞれBT系でつながれいろいろな加速モードでの運転が可能となっている。

重いイオン、ウランまたはキセノンなどの重ビームを加速する場合は、周波数固定モードを用い、すべてのリングサイクロトロンのカスケードモード(RILAC-RRC-fRC-IRC-SRC)により核子当たり345MeVの加速をする。また周波数可変モード(RILAC-RRC-IRC-SRC)によりクリプトンまでのビームを核子当たり最大400MeVまで加速可能である。また入射器にAVFを使用することも可能で、周波数可変モード(AVF-RRC-SRC)で、軽イオン(A/q=2)を核子当たり440MeVまで加速できる。

¹ E-mail: mkase@riken.jp



第 1 図 理研加速器の平面図。 RILAC: 1981年に完成した周波数可変型 (18-45MHz) 重イオンリニアックで6台の共振器からなり、1999年に上流に周波数可変型RFQが追加され、さらに2000年にCSMの6台の共振器が追加され核子当たり5MeVの加速器可能になった。RRC: 1986年に完成した理研リングサイクロトロンでK値540MeVのセクター分離型サイクロトロンである。AVF: 1989年にRRCの2番目の入射器として設置されたK値70MeVのサイクロトロンである。fRC: 主に大強度ウランビームのために設置された周波数固定型のリングサイクロトロンでK値580MeVである。IRC: 周波数可変型リングサイクロトロンでK値980MeVでfRC及びRRCからのビームを加速する。SRC: 超伝導リングサイクロトロンでK値2500MeVで6台のセクター電磁石、4台の加速器空洞、1台のFT共振器を持つ。

3 : 運転状況

それぞれのリングサイクロトロンこの一年間の運転時間を加速モード別に第2図の円グラフにまとめた。あらゆる運転モードは、RRCの運転がベースになっているのでRRCの運転時間4473時間を基にして示してある。また第1表に、この一年間に加速器したビームのリストを示す。

2008年11月に約18日間にわたり²³⁸U-345MeV/uビームをBigRIPSへ供給した。その実験期間前半は、ビームの供給は、やや不安定であったが、後半に向けて安定に供給できた。SRC出口のファラデーカップ (FC-G01) でのビーム量は、実験当初0.2pnA(20enA)だったのが日程が進むにつれ0.4pnA(32enA)まで増えた。前半ビームの調整を繰り返し行ったため、ターゲットの照射時間も有効時間の半分ぐらいであったが、後半数日は加速器の事情でブレイクすることなくビームを安定(90%以上)に供給できた。イオン源は、18GHz-ECRイオン源を用い金属ウランの試料をイオン源ECRプラズマにビーム軸後方より挿入しスパッター法で35+ビームを生成した。⁴⁾

2008年12月に約12日間⁴⁸Ca-345MeV/uビームをBigRIPSへ供給した。最大ビーム電流はSRC取出

しファラデーカップで170pnAであった。イオン源は、18GHz-ECRイオン源を用い90%以上エンリッチされた酸化カルシウムの焼結されたロッドを試料をイオン源ECRプラズマにビーム軸後方より挿入しスパッター法で11+価のカルシウムビームを生成した。⁴⁾

最大ビーム強度は、デフレクター (EDC) でのビームロス制限したものであってまだ増やせる状況ではあったが実験中いろいろなトラブルにみまわれあまり安定供給はできなかった。まず、SRCの共振器の一つ (RES3) が励振不能となり途中からRES3の使用をやめ3台の共振器でビーム供給を続けた。後で判明したことだが、共振器内部のコンタクトフィンガーの一部焼損がみられた。そのほか、SRC-RES1のプレート電源にインターロック回路の故障、SRC-FTのトランジスターアンプの方向性結合器の不具合が発生しそれぞれ数時間実験が中断した。またビームから速中性子線の影響と思われる冷却系流量センサーの故障が起きて冷却系が停止し、SRC取り出しのファラデーカップの熱による絶縁破壊が起きた。また実験装置BigRIPSのビームダンパー付近の放射化が深刻であることが判明し、次期

第1表 2008年7月より2009年6月までの一年間に加速したビーム

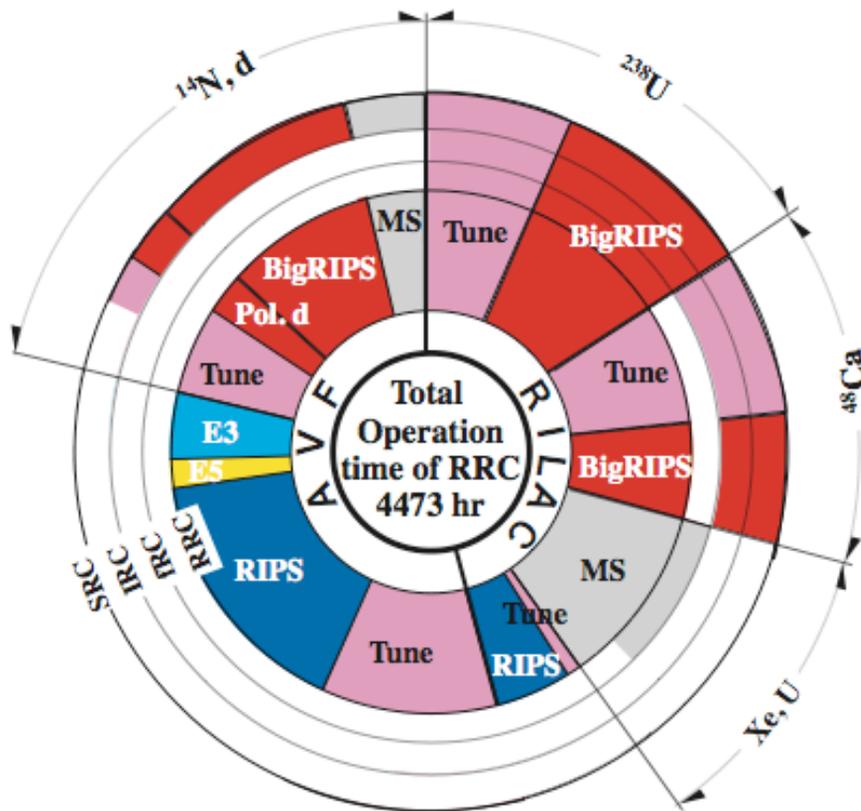
Acceleration mode	Beam course	No. of allocation	Beam & Energy (MeV/u)	Beam intensity (pnA)	Total hours (h)
RILAC-RRC-fRC-IRC-SRC	BigRIPS	2	²³⁸ U-345	0.1-0.4	409
RILAC-RRC-IRC-SRC		3	⁴⁸ Ca-345	100	276
AVF-RRC-SRC	Big-POL	1	pol.D-250	50	121
	SHARAQ	2	¹⁴ N-250	40	426
AVF-RRC	E6(RIPS)	12	²⁸ Si-135	3.5	931
			¹³ C-100	400	
			²⁴ Mg-100	65	
			⁵⁸ Ni-95	0.5	
			⁴⁰ Ar-95	50	
			²³ Na-63	340	
RILAC-RRC			⁵⁸ Fe-63	180	
			¹² C-135	<10	
AVF-RRC	E5b	12	¹⁴ N-135	<10	74
			⁴⁰ Ar-95	<10	
			⁵⁶ Fe-90	<10	
			⁸⁴ Kr-70	<1	
AVF-RRC	E3a,b	5	⁴⁰ Ar-95	<1	180
			¹⁴ N-135	500	
				Total	2417

改造に影響がでることから実験を途中でとりやめた。

2009年4月にAVF-RRC-SRCモードにより核子あたり250MeVの偏極重陽子ビームの加速に成功し、実験に供した。AVFに備え付けの偏極イオン源を用い、イオン源直後でウィーンフィルターによりスピン向きを選択しているためすべてのサイクロトロンでシングルターン取り出しを実現し、実験中それを維持しなければならない。実験中ビームは安定に供給され、実験は成功に終わった。また同じ加速モードで ^{14}N ビームを加速し、新しく東大CNSとの連携研究によ

り導入された実験装置スペクトロメータ (SHARAQ) のコッコミョニングに使用された。

第2図よりわかるとおり、全体の40%近くはRRCのビームは直接実験に使われている。14種類のビームを加速し、12のRIPS実験が行われた。RILAC-RRCモードで2種類の個体イオンビームを出している。E3、E5実験室において、生物照射実験とRI生成実験が行われている。この場合はほとんどがAVF-RRCモードで運転されている。



第2図 4台の理研リングサイクロトロンでの2008年7月より2009年6月までの一年間の運転モード別統計。この間のRRCの運転時間(4473時間)をベースに示している。Tune: ビーム調整時間、MS: 新しいビーム加速のためのマシンスタディー。

4 : 運転体制

全リングサイクロトン運転時には、RILACに運転員一名で独立したリニアック制御室でイオン源とリニアックの運転制御監視を行い、一方リングサイクロトンコントロール室に3名の運転員を配置して最大4台のリングサイクロトンの運転監視を行っている。約12時間間隔の2交代制で総勢17名の運転員より運転体制がとられている。RIビームファクトリー以外の運転時には、運転員は、加速器運転以外に照射実験等の実験サポートも実施している。

5 : 将来計画

ウランビームの強度を上げるために28GHz小電動ECRイオン源を開発中である。その第一弾のテストのためリニアックの入射高圧ドームに設置してテスト中である。RILACへ直接直流ビームを入射して現在の約10倍のビーム強度を目指している。またAVF本体室にRILACに変わる新入射器を建設中である。これが第3の入射器となる。2010年の夏にはこの新入射器の上流に28GHzイオン源を移動して現在の100倍の強度のウランビームを目指している。^{5]}

AVFは、中心領域の改造を行ってビーム強度の増強を目指している。次に加速器の運転時間を図2に示す。予定された時間に対し、実際に運転した時間をAVF単独（左側の2つのグラフ）、AVF-RRC（右側の2つのグラフ）に分けて比較した。さらにビーム供給時間における実験コースによっても分けて比較した。

またRRCについては、常に中心的な加速器であるためその運転効率を上げるために作業が進められている。

6 : まとめ

RIビームファクトリーが完成し初めての実験が2007年の行われて以来、本格実験が2008年秋より開始され、この一年間（2008年7～2009年6月）で3種類の運転モードによる加速が行われそれぞれ実験にビームを供した。これらの運転で理研リングサイクロトン(RRC)は、中心的加速器として働き、その総運転時間は4473時間であった。

参考文献

- 1] E. Ikezawa et al., “理研重イオンリニアックの現状報告”, in this proceedings.
- 2] S. Fukuzawa et al., “理研AVFサイクロトン運転の現状報告”, in this proceedings.
- 3] N. Fukunishi et al., “RI ビームファクトリー加速器系の現状”, in this proceedings.
- 4] T. Nakagawa et al., Nucl. Instrum. Meth. B226, 392(2004).
- 5] S. Kamigaito et al. “RIKEN RIBF のビーム増強計画”, in this proceedings.