

## THE OPERATION OF THE RIKEN RIBF RING CYCLOTRONS

Hiroshi Imao <sup>#,A)</sup>, Eiji Ikezawa <sup>A)</sup>, Shigeru Ishikawa <sup>B)</sup>, Yukimitsu Ohshiro <sup>C)</sup>, Jun-ichi Ohnishi <sup>A)</sup>, Hiroki Okuno <sup>A)</sup>, Tadashi Kageyama <sup>A)</sup>, Masayuki Kase <sup>A)</sup>, Osamu Kamigaito <sup>A)</sup>, Masanorii Kidera <sup>A)</sup>, Hironori Kuboki <sup>A)</sup>, Keiko Kumagai <sup>A)</sup>, Yasuteru Kotaka <sup>B)</sup>, Akira Goto <sup>A)</sup>, Kiyoshi Kobayashi <sup>B)</sup>, Misaki Komiyama <sup>A)</sup>, Ryo Koyama <sup>B)</sup>, Naruhiko Sakamoto <sup>A)</sup>, Junsho Shibata <sup>B)</sup>, Kenji Suda <sup>A)</sup>, Noritoshi Tsukiori <sup>B)</sup>, Takahide Nakagawa <sup>A)</sup>, Makoto Nagase <sup>A)</sup>, Takeshi Nakamura <sup>B)</sup>, Minoru Nishida <sup>B)</sup>, Makoto Nishimura <sup>B)</sup>, Hiroo Hasebe <sup>A)</sup>, Makoto Hamanaka <sup>B)</sup>, Yoshihide Higurashi <sup>A)</sup>, Seiji Fukuzawa <sup>B)</sup>, Nobuhisa Fukunishi <sup>A)</sup>, Masaki Fujimaki <sup>A)</sup>, Takeshi Maie <sup>A)</sup>, Kazuyoshi Yadomi <sup>B)</sup>, Kazunari Yamada <sup>A)</sup>, Shigeru Yokouchi <sup>A)</sup>, Tamaki Watanabe <sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> RIKEN Nishina Center, <sup>B)</sup> SHI Accelerator Service Ltd., <sup>C)</sup> CNS, the University of Tokyo  
2-1 Hirosawa, Wako-shi, Saitama, 351-0198

### Abstract

The yearly status report (July 2009-July 2010) of the ring-cyclotron complex (RRC, fRC, IRC, SRC) in RIKEN RI beam factory is provided.

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

### 1. はじめに

理研 RI ビームファクトリー(RIBF)で現在稼働中の4台のリングサイクロトロン群は1986年完成の理研リングサイクロトロン(RRC, K値 540 MeV)と、2004-2006年に相次いで完成した中間段リングサイクロトロン(IRC, K値 980 MeV)、周波数固定型リングサイクロトロン(fRC, K値 580 MeV)、そして最終段にある6基の超伝導セクター電磁石をもつ超伝導リングサイクロトロン(SRC, K値 2500 MeV)から構

成されている。重イオンリニアック(RILAC)とAVFサイクロトロン(AVF)を入射器として、従来の施設では軽い元素に限られていたRIビームをウランまでの全元素に渡って最大強度で発生させる事が可能になった。本稿では2009年7月から2010年7月まで約一年間の4台のリングサイクロトロンの運転状況を報告する。

### 2. 施設の配置と加速モード

図1にRIBF加速器群の配置図を示す。



図1：理研 RIBF ファクトリーにおける加速器群の配置図。

現在2つの入射器(RILAC, AVF)と4つのサイクロトロン(RRC, fRC, IRC, SRC)の計6つの加速器が配置されているが、それらの使用組み合わせは加速するイオンの質量電荷比と必要エネルギーによって使い分けられている。現在 RIBF で使用しているイオンの加速モードは以下のように分類される。

- 加速モード 1: AVF-RRC
- 加速モード 2: AVF-RRC-SRC
- 加速モード 3: RILAC-RRC
- 加速モード 4: RILAC-RRC-IRC-SRC
- 加速モード 5: RILAC-RRC-fRC-IRC-SRC

入射器に AVF を用いた周波数可変の加速モード 1, 2 では種々の軽イオン(A/q=2)を核子当り最大 440 MeV まで加速できる。また、加速モード 3, 4 (周波数可変) によってクリプトンまでの様々な重イオンビームを核子当り最大 400 MeV まで加速する事が可能である。更に重いイオン、すなわちウランやキセノン重イオンを加速する場合は周波数固定の加速モード 5 を使用し、核子当り 345 MeV の加速が可能となる。

### 3. 運転状況

それぞれのリングサイクロトロンがこの一年間の運転状況を円グラフにまとめた(図2)。中心から入射加速器、実験コース、fRC, IRC, SRC の使用有無、そして加速粒子が書かれている。円周方向が使用時間を表しており、1周長が RRC 使用時間、5238 時間に等しい。全ての加速モードで RRC を使

用しているのでこれは施設の使用時間を表している。例えば  $^{238}\text{U}$  の加速においては RILAC を入射加速器として使用し、RRC, fRC, IRC, SRC の全てを使用する加速モード 5 で運転を行い、加速器調整(Tune)に 801 時間を要し、BigRIPS を用いた物理実験には 287 時間供給された。

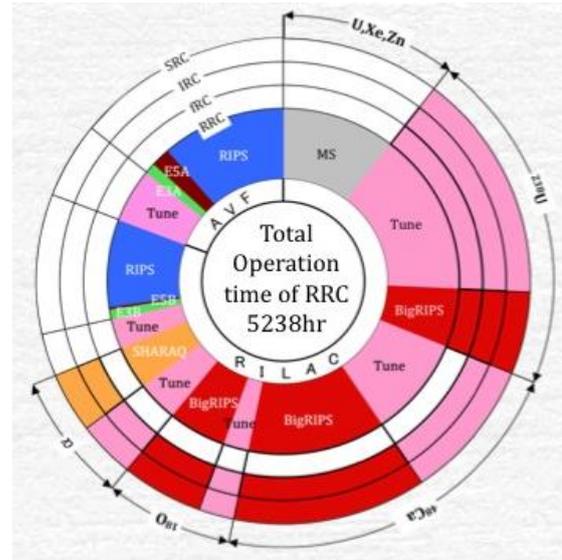


図2：リングサイクロトロンの2009年6月-2010年7月の運転状況。

加速モード	ビームコース	各コース実験数	加速粒子&エネルギー (MeV/u)	ビーム要求量 (pnA)	照射時間(h)	全体比率(%)
5)RILAC-RRC-fRC-IRC-SRC	BigRIPS	2	$^{238}\text{U}$ -345	10	287	10.7
	SHARQA	1	$\alpha$ -320	1000	280	10.5
4)RILAC-RRC-IRC-SRC	BigRIPS	2	$^{48}\text{Ca}$ -345	250	663	24.9
	BigRIPS	1	$^{18}\text{O}$ -345	500	210	7.9
3)RILAC-RRC	E6(RIPS)	7	$^{58}\text{Ni}$ -63	200	488	18.3
			$^{48}\text{Ca}$ -63	250		
			$^{40}\text{Ar}$ -63	800		
			$^{23}\text{Na}$ -63	1000		
	E5a		$^{238}\text{U}$ -10.75	2		
	E3a		$^{84}\text{Kr}$ -36.1	1		
1)AVF-RRC	E6(RIPS)	14	$^{40}\text{Ar}$ -95	80	740	27.7
			$^{13}\text{C}$ -115	470		
			$^{13}\text{C}$ -100	500		
			H2	0.1		
	E5b		$^{56}\text{Fe}$ -90	<10		
			$^{40}\text{Ar}$ -95	<10		
			$^{20}\text{Ne}$ -135	<10		
	E3b		$^{13}\text{C}$ -100	<10		
			$^{12}\text{C}$ -135	<10		
				$^{14}\text{N}$ -135		
<b>Total</b>					<b>2668h</b>	<b>100%</b>

表1：この一年間に行われたマシンタイムで加速したイオンビームを加速モード毎にまとめた。ビーム調整、マシンスタディの時間は除外してある。

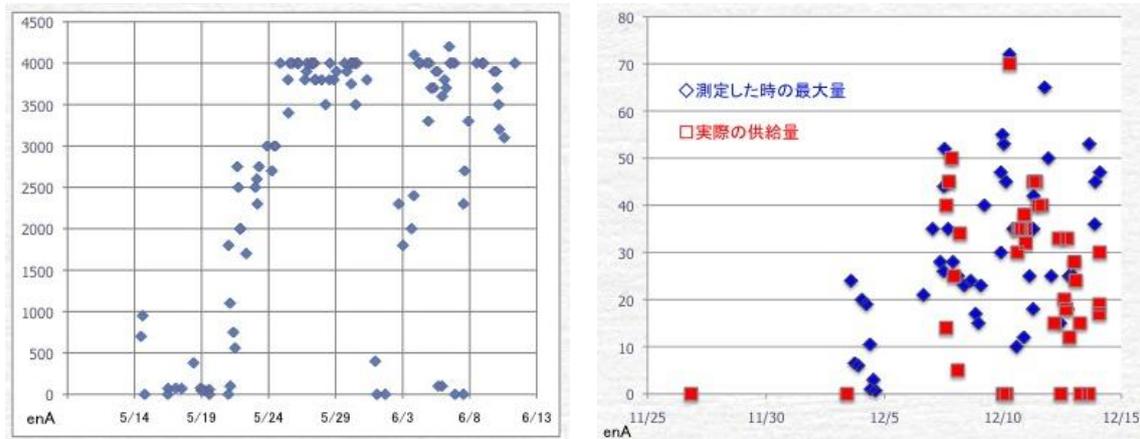


図 3 :  $^{48}\text{Ca}$  (左図) 及び  $^{238}\text{U}$  (右図) の BigRIPS へのビーム供給強度の時間推移。 $^{48}\text{Ca}$  のマシンタイムはビーム強度も増え、150-200 pnA を維持供給。途中で強度が減っているのはユーザー側の要求によるものである。 $^{238}\text{U}$  については最大 0.8 pnA の強度で取り出す事に成功しているがイオン源、RF の安定度に問題があった。

更に表 1 にはこの一年間に加速したイオンビームの一覧を示す。まず 2009 年 10/16-22 にかけて  $^{136}\text{Xe}$  ビームの加速テストを行い加速器グループで新規開発中のガス荷電ストリッパのテスト実験を行った。

2009 年 10/24-11/12 には 320 MeV/u の  $\alpha$  ビームを加速し、東大 CNS との連携研究により導入されているスペクトロメータ SHARAQ へと供給した。放射線の問題から適時ビームスリットとビーム減衰器を用いてビーム電流を抑えながらも、1000 pnA までのビーム供給に成功している。飛程の長い  $\alpha$  ビーム特有の問題としてファラデーカップでの電流測定が正確に行えず、カップに新規タンタル板を取り付ける等の措置が取られた。2009 年 11/16-12/24 は  $^{238}\text{U}$  の SRC からの取り出しを行い、BigRIPS へと供給した。各サイクロトロンにおけるビームパラメータの調整により SRC での取り出しウランビーム電流は従来の約 2 倍の 0.8 pnA まで増強されているがイオン源、RF の更なる安定化が課題として残っている。2009 年 12/14-28 そして 2010 5/1-6/22 には 345 MeV/u の  $^{48}\text{Ca}$  ビームの SRC 取り出し、BigRIPS への供給を行った。各サイクロトロンにおけるビームパラメータの調整により、 $^{48}\text{Ca}$  の SRC からの最大取り出しビーム電流は 230 pnA まで増強され、5 月からのマシンタイムでは約 1 ヶ月に渡り 200 pnA を安定に供給し、本格的実験利用が実現された[1]。 $^{48}\text{Ca}$  及び  $^{238}\text{U}$  の BigRIPS へのビーム供給強度の時間推移を図 3 に示す。2010 年 6/22-7/1 にかけて初の 345 MeV/u  $^{18}\text{O}$  ビームの供給を行い、約 500 pnA のビームが安定に供給されたが BigRIPS 標的近傍における真空リークにより予定より数日早い打ち切りとなった。

その他マシンタイム外で起こった大きなトラブルとして、2009 年 7 月末に発生した SRC の EBM 冷却配管破損による SRC 内部での水漏れがあった。この水漏れでは各バレー部、3 台の共振器、フラットトップ共振器がほぼ水没、約 20 トンもの水に浸

された。復旧には実に 2 ヶ月弱の時間を要したが、バレー部、共振器、診断系、高圧部についての取り外し、洗浄、乾燥作業を行い順次問題の解決を行った。10 月初旬には 1 週間程度の共振器焼き出しを行い、10 月末のマシンタイムは問題なく行われた。

#### 4. 運転体制

全リングサイクロトロン運転時において、運転員 1 名が独立したリニアックのコントロール室でイオン源とリニアック運転制御系の監視を行っている。一方リングサイクロトロンのコントロール室には 3 名の運転員を配置して、最大 4 台のリングサイクロトロンの運転監視を行う。互いに連携しながら円滑な運転が行われている。運転シフトは約 12 時間間隔の 2 交代制でリニアック 6 名、リングサイクロロン 12 名の総勢 18 名の運転員によって運転されている。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. 大強度・高安定化に向けた取り組み

RILAC 入射用リバンチャーによるバンチ効率改善の為、二重リバンチャーシステムを採用し、新規リバンチャーの設計が行われた。この新規リバンチャーの敷設作業は 2010 年 2 月に行われ、今後のマシンタイムにおけるリバンチング効率の向上が期待されている。AVF では中心領域の改造で K 値、入射効率の増強を図っている[2]。RRC については常に中心的な加速器であり、その性能を上げるための調整作業が進められている。また、入射器系第 2 イオン源室が完成し、新しく 28GHz 超伝導 ECR イオン源が配備され、今秋の稼動を目指し試験実験が行われている[3]。並行して AVF 室への新入射器 RILAC2 の配備、各種試験、そして RILAC2 から既存 RIBF へのビーム輸送系の建設も行われている[4]。その他、

来るべき大強度ウランビームに耐え得る荷電ストリッパの研究開発等、更なる大強度ウランビーム加速への準備が進行している。

## 6. まとめ

RI ビームファクトリーではこの 1 年間(2009 年 7 月-2010 年 6 月)に 4 種類の加速モードによる運転が行われ、その総運転時間は 5238 時間であった。その中では SHARAO, BigRIPS を用いた 5 回のマシンタイムも行われ 4 台のサイクロトロンを駆使し、各種重イオンビームを加速供給する事が出来た。特に 2010 年 5、6 月には  $^{48}\text{Ca}$ -345MeV/u ビームを約 200 pnA を保ちながら約 1 ヶ月に渡り安定供給する事に成功し、この世界唯一の大強度ビームの本格的な原子核物理実験への利用が実現された。現在新入射器の設置、荷電ストリッパの開発など RIBF の更なる大強度化に向けた取り組みも進行している。

## 参考文献

- [1] M.Kase, et al., “理研 RIBF における  $^{48}\text{Ca}$  ビームの加速”, in this proceedings.
- [2] H.Imao, et al., “理研 AVF サイクロトロンの運転状況”, in this proceedings.
- [3] T.Higurashi, et al., “理研新超伝導 ECR イオン源の開発研究”, in this proceedings.
- [4] E.Ikezawa, et al., “理研重イオンリニアックの現状報告”, in this proceedings.